

제 1단계 최종보고서

주기적안전성평가 시행을 위한 원전설비 용접부 건전성평가 기술개발

A Study on the Evaluation of Welds Integrity
in Nuclear Power Plant for PSR

연 구 기 관

한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부 장관 귀하

본 보고서를 “주기적안전성평가 시행을 위한 원전설비 용접부 건전성평가 기술 개발
과제의 1 단계 보고서로 제출합니다.

2002. 6. 13

주관연구기관명 : 한국전력기술(주)
주관연구책임자 : 진 태 은
연 구 원 : 김종성, 김충태
 염학기, 정성규
 박홍배, 장윤석
 노희영, 황경모
 장현영, 홍석주
 박진석, 이승건
 오인택, 김현수
 서영하, 박준수
 장상균, 김종민
 최성표, 김형규
 정규석, 윤재로
 석 호, 김한선

보고서 초록

과제관리번호	2000-N-NL-01-C-282	해당단계 연구기간	2000. 6.14 - 2002. 6.13	단계구분	(현 1 단계)/(총 2 단계)
연구사업명	중사업명	특정연구개발사업			
	세부사업명	국가지정연구실 사업			
연구과제명	중과제명	-			
	세부(단위) 과제명	주기적안전성평가 시행을 위한 원전설비 용접부 건전성평가 기술 개발			
연구책임자	진태은 그룹장	해당단계 참여연구원수	총 : 25 명 내부 : 16 명 외부 : 9 명	해당단계 연구비	정부 : 358,404 천원 기업 : 427,565 천원 계 : 785,969 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국전력기술㈜ 재료기술연구그룹		참여기업명	-	
국제공동연구	1. PVRC/MPC JIP (상대국명: 미국 상대국 연구기관명 : PVRC/MPC) 2. Battelle Weld JIP (상대국명: 미국 상대국 연구기관명 : Battelle Memorial Institute)				
위탁연구	1. 연구기관명 : 선문대학교 연구책임자 : 박인규 교수 2. 연구기관명 : 서울산업대학교 연구책임자 : 장동영 교수 3. 연구기관명 : 아이윙㈜ 연구책임자 : 김정수 이사				
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500 자 이내)				보고서 연수	356
<p>○연구 목표</p> <p>실제 용접 현상을 고려한 용접부의 금속조직/성분 변화 예측 기술 및 잔류응력 해석 기술 개발</p> <p>○연구 내용 및 결과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 원전설비 용접부 건전성평가 상세 연구계획 수립 <ul style="list-style-type: none"> · 기술자료 수집/조사, 기존 연구동향 분석 및 문제점 도출 · Web 기반 원전설비 용접부 일반사항 DB/전문가시스템 초안 구축 - 금속조직 변화 예측기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 상변화, 다층용접, 후열처리 등 실제 용접 현상/과정을 고려한 금속조직 변화 예측기술 개발 · 실제 용접 현상/과정을 고려한 용접부 기계적 물성 예측기술 개발 · 용접부의 국부 취약부의 기계적 물성을 향상시키는 국부 Heat Sink 용접법 개발 · Web 기반 원전설비 용접부 금속조직 변화 예측 DB/전문가시스템 초안 구축 - 잔류응력 해석 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 대상기기 용접부 선정 및 일반 범주화용 기술 개발 · 원전설비 용접부 자동 유한요소 모델링 프로그램 및 이론적 온도해석 기법 개발 · 실제 용접 현상/과정 뿐만 아니라 금속조직/재료물성 변화 등을 고려한 잔류응력 해석기술 개발 · 후열처리 지속시간을 단축하고 두께/초기 잔류응력 등에 무관한 단순 후열처리 선도 개발 · 온도/농도/응력/전압 구배의 영향이 고려된 수소기인균열 해석 기술 개발 · 수소기인균열 발생을 효율적으로 완화시키는 전기전송 처리방안 및 시작품 개발 · Web 기반 원전설비 용접부 잔류응력/수소기인균열 해석 DB/전문가시스템 초안 구축 					
색인어 (각 5 개 이상)	한 글	주기적안전성평가, 원전설비, 용접부, 금속조직, 잔류응력, 수소기인균열			
	영 어	Periodic Safety Review, Nuclear Components, Welds, Microstructure, Residual Stress, Hydrogen Induced Cracking			

요 약 문

I. 제 목

주기적안전성평가 시행을 위한 원전설비 용접부 건전성평가 기술 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 당해단계 연구개발 목적

본 연구의 최종 목표인 원전설비의 안전 설계, 운영 및 보수에 활용될 수 있는 국내 미자립 용접부 건전성평가 핵심기술을 개발하기 위해 실제 용접 현상을 고려한 용접부의 금속조직/성분 변화를 예측하는 기술과 잔류응력을 해석하는 기술을 개발

2. 당해단계 연구의 필요성

가. 기술적 측면

- 향후 원자력 산업계는 가동 원전의 주기적안전성평가 및 수명연장과 신규 원전의 설계, 제작 단계부터의 안전성 향상이 최대의 관건이 될 것이므로 원전설비 용접부 건전성평가의 국내 미자립 핵심기술을 확보하는 것은 필수적으로 중요
- 이러한 용접부 건전성평가 핵심기술을 효율적이고 신뢰성 있게 개발하기 위해서는 최신 연구동향을 반영하고 기존 연구의 문제점을 고려한 상세계획 하에서 체계적인 연구가 필요
- 특히, 가동 중 원전의 수명연장, 설계개선 및 주기적안전성평가 수행 시 용접부 금속조직 및 잔류응력 평가는 가장 기본적인 고려사항의 하나이며 용이하고 경제적인 평가를 위해서는 실험적 접근방법 이외의 이론적/준경험적 접근방법에 근거한 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석 기술 개발이 필요함.
- 또한, 신규 원전의 경우에도 용접부에 대한 금속조직 및 잔류응력 측면에서의 기존 문제점을 보완하는 안전설계를 용이하고 경제적으로 수행하기 위해서 이론적/준경험적 접근 방법에 근거한 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석 기술 개발이 필요함.
- 이러한 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석은 잠열 방출 및 흡수, 다층 육성용접 및 후열처리와 같은 실제 용접 현상 및 과정을 고려할 경우 신뢰성이 증대됨.

나. 경제/산업적 측면

- 국내 경우 원전설비 용접부 건전성평가 관련 비용이 호기 당 10 억원 규모이상으로 추정되며 후속 호기를 감안할 때 용접부 건전성평가 기술의 국내자립은 중요
- 또한, 원전설비 용접 뿐만 아니라 화전/중화학 설비의 용접, 열처리, 주조 및 코팅 등 다양한 분야에서 본 개발기술을 적용하여 금속조직 변화를 예측하고 잔류응력을 해석할 수 있으므로 연구 개발결과의 파급 효과는 지대할 것으로 예상됨.

III. 연구개발의 내용 및 범위

구분	연구목표	연구내용	연구 범위
1차년도 (' 00)	[제1과제] 상세연구 계획수립	○기술자료 수집/조사 및 기존 연구 동향 분석/문제점 도출	○ASME 코드, AWS 기술논문, TWI DB 등을 통한 수집, 분석 ○개략화된 이론연구에 국한되고 열처리 효과 반영 미흡 등의 문제점 도출
		○원전설비 용접부 건전성평가 상세 연구계획 수립	○1, 2단계의 총 8개 세부과제중 연구기획을 제외한 7개 과제별로 수립
		○Web기반 원전설비 용접관련 일반 사항 DB/전문가시스템 초안 구축	○연구계획과 연계하여 용접부 건전성 평가를 위한 통합시스템 설계, 구축 ○홈페이지를 운영하여 용접부 건전성평가 사이버기술자문(QA) 수행기반 구축
	[제2과제] 금속조직/ 성분변화 예측기술 개발	○대상 기기 용접부 선정 (금속조직/ 성분변화 기술개발)	○원자로압력용기,배관용접부 등 원전설비 주요기기를 중심으로 특성분석/선정
		○대상 용접부 (SA508 Gr.3 Cl.1)에 대한 재료물성치 결정	○위탁실험과 문헌조사를 통한 평가용 열적/ 기계적 재료물성치 및 조직관찰
		○상변화 등 실제 용접 현상/과정을 고려한 온도해석 기술 개발	○입력변수 결정 및 해석을 위한 유한요소 모델링 (PATRAN) ○잠열 방출/흡수, 다층용접, 후열처리 등의 현상반영(PHOENICS/ABAQUS)
		○실제 용접 현상/과정을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발	○기존 실험식 및 온도해석 결과를 이용한 결정립 크기 결정 ○평형 상태도(Thermo-Cal.) 및 Reaction Kinetics 모델을 이용 TTT/CCT 결정 ○CCT에 온도해석 결과를 중첩 열영향부의 석출상 및 분율 예측, 탄화물 평가
		○실제 용접 현상/과정을 고려한 기계적 물성 예측기술 개발	○기계적 물성치인 경도, 항복강도 및 인장 강도를 예측
2차년도 (' 01)	[제2과제] 금속조직/ 성분변화	○금속조직/성분변화 예측기술 검증, 보완 및 완화방안 도출-	○기존자료와의 비교를 통한 검증 및 금속변화 및 물성치 저하 완화방안 도출
		○Web기반 원전설비 용접부 금속 조직 변화 예측 DB/전문가시스템 초안 구축	○연구계획과 연계하여 용접부 건전성 평가를 위한 통합시스템 설계, 구축 ○홈페이지를 운영하여 용접부 건전성평가 사이버기술자문(QA) 수행기반 구축
		○해외자료(TWI, Battelle)를 활용, 용접부 중성자 조사취화 특성 검토	○용접부 중성자 조사취화 특성 자료 정리

구분	연구목표	연구내용	연구 범위
2차년도 (' 01)	[제3과제] 잔류응력 해석기술 개발	○대상 기기 용접부 선정(잔류응력 해석) 및 일반 범주화용 용접부 선정기술 개발	○파단 확률, Risk 등을 이용하여 대상 기기를 분류하는 일반 범주화 기술
		○원전설비 용접부 전용 자동 유한 요소 모델링 프로그램 개발	○용접부 형상/패스 수에 따른 효율적인 유한 요소 모델링 프로그램 개발
		○대상 용접부(이종재 용접부 인코넬 82, SA508 Gr.1a, TP316) 재료물성치 결정	○위탁실험과 문헌조사를 통한 평가용 열적/기계적 재료물성치 및 조직관찰
		○이론적 온도해석 기법 개발	○중첩법 및 Fourier Series를 이용한 이론해석 기술개발/프로그램화 추진
		○잔류응력 해석기술 개발	○1차년도 개발기술 적용 온도해석 및 금속 조직 변화 예측 ○상변태 등을 고려한 User Subroutine(UMAT) 개발, 응력해석(ABAQUS)
		○잔류응력 해석기술 검증 보완 및 완화방안 도출	○이종재 용접부에 대한 중성자 회절법을 이용한 측정, 검증, 완화방안
		○수소기인균열(HIC) 해석기술 개발	○온도, 응력, 수소화산, 전기 해석을 고려한 HIC 평가 기술개발 및 발생완화 방안 검토
		○Web기반 원전설비 용접부 잔류응력 해석 DB/전문가시스템 초안 구축	○연구계획과 연계하여 용접부 건전성 평가를 위한 통합시스템 설계, 구축 ○홈페이지를 운영하여 용접부 건전성평가 사이버기술자문(QA) 수행기반 구축

IV. 연구개발 결과

[1차년도]

세부연구 개발목표	연구내용	연구결과
상세연구 계획 수립	○용접관련 기술기준, 문헌, 데이터 수집 분석	○KS/ASME/AWS/DIN/ISO 등 기술기준, NED/Welding Journal 등 논문, DOE/NRC/EPRI/TWI/WRC 보고서 등 200여건 수집 분석
	○최신 연구동향 파악 및 선진 연구기관과의 협력체계 구성	○미국 PVRC/MPC와의 공동연구 체계 구축 ○미국 Battelle과의 공동연구 체계 구축 ○영국 TWI 산업체 회원 가입 및 주기적 협의 체계 구축 ○네덜란드(EU)의 Joint Research Center인 IE와의 공동연구 체계 구축 ○일본 JPVRC와의 협력체계 구축 추진중
	○용접관련 기존 연구의 문제점 도출	○기술기준 경우 공통적으로 용접부 상태/손상 평가절차 미제시 ○기존 연구의 경우 실제 용접 현상 고려시 비경제성, 잔류응력 분포에 대한 일반 범주화 미흡, 신뢰성 있는 통계처리 기법 미개발 등 도출
	○기존 연구 문제점 및 최신 동향이 고려된 용접부 건전성평가 연구계획 수립	○2단계 7과제에 대해 수립 - 1단계(상태평가) 2과제(금속조직/잔류응력) - 2단계(손상평가) 5과제(피로/부식/피로균열성장/응력부식균열성장/복합손상)
	○Web 기반 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 구축	○일반 사항에 대해 용접부 특성, 손상사례, 용접절차서 작성/검토 4개 모듈 ○기타 손상평가 및 상태평가에 대해 각 모듈 별로 작성 추가
	○원자력분야 NRL중 최초로 홈페이지 (www.wins.re.kr) 운영	○과기부 주요 기술정책 및 원전 안전성/수명 연장 홍보 ○연구내용 게시 및 용접 관련 사이버 기술자문 40여회 수행
금속조직/ 성분변화 예측기술 개발	○주기기 8개, 용접부 40여개에 대해 중요 요소 검토 금속조직 예측기술 개발대상 용접부 선정	○원자로 압력 용기 용접부로 선정
	○SA508 Gr.3 Cl.1에 대한 위탁실험을 통해 재료물성치 및 취약부 결정	○SA508 Gr.3 Cl.1에 대한 상온부터 300℃까지의 열적/ 물리적 재료물성치 및 취약부
	○상 변태/변화를 고려한 용접과정 동안의 온도해석 기술 개발	○상 변태/변화에 따른 잠열 흡수 및 방출 같은 용접현상 고려 ○다층용접/후열처리 같은 실제 용접과정 고려 ○기존결과와 비교시 온도는 ± 5% 범위 내에서 일치 HAZ 구분도 일치
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 이론적/ 준경험적 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발	○온도이력에 따른 용접부위별 금속조직 변화 고려 ○상 분포, 결정립 크기, 석출물 종류/상분율, 탄화물 크기 등 예측 ○기존 연구 및 위탁실험 결과와 비교시 경향 동일 하며 정량적 예측값에 대해서도 신뢰도 90% 범위 내에서 일치
	○강도 등 용접부 재료물성 결정기술	○경향 일치하나 정량적 결정값에 대해서는 일부 차이 존재 ○국부 취약부 결정

[2차년도]

세부연구 개발목표	연구내용	연구결과
금속조직 변화	○금속조직 변화 및 기계적 물성 저하 완화 방안 도출	○국부 Heat Sink를 이용한 용접
예측기술 검증 및 보완	○금속조직 예측 DB/전문가시스템 초안 구축	○Web 기반 2개 모듈로 구축 - 금속조직 예측/기계적 물성 예측
잔류응력 해석기술 개발	○용접부 조사취화 특성 검토	○압력용기강/SS 용접부 조사취화 특성 검토결과
	○원전설비 용접부 대상기기 및 일반범주화 기법 개발	○잔류응력 해석대상 용접부로 이중재, SS배관, RPV 선정
	○용접부 전용 자동 유한요소모델링 프로그램 개발	○과손확률순으로 Ranking 설정후 대상 용접부를 선정하는 기법 개발
	○용접부 전용 자동 유한요소모델링 프로그램 개발	○용접부 형상/패스 수에 따른 유한요소 모델링 자동화 프로그램 개발
	○대상 용접부에 대한 재료물성치/금속조직 실험 및 결정	○이중재료 용접금속 인코넬 82, SA508 Gr.1a, TP316에 대한 열적/물리적/기계적 재료물성치 고온실험(위탁)
	○이중재료 용접부 인코넬 82의 금속조직 분석 (위탁)	○이중재료 용접부 인코넬 82의 금속조직 분석 (위탁)
	○이론적 온도해석 기법 개발	○스테인리스 강 배관 용접부에 대한 이론 및 프로그램 개발
	○1차년도 개발기술을 활용한 온도해석 및 금속조직 예측	○이중재/SS 배관/원자로압력용기 용접부 대상
	○사용자 정의 보조 프로그램 UMAT 개발	○상변태 변형률과 어닐링 변형률이 고려된 재료 거동 관련 UMAT 개발
	○잔류응력 해석	○이중재/SS 배관/원자로압력용기 용접부의 잔류 응력 분포 결정
		○가동중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석절차 개발
		○용접부 피로 설계를 위한 유한요소 응력해석 절차 개발
	○잔류응력 측정	○중성자 회절법 및 Hole Drilling 방법 이용(위탁), 이중 용접부 잔류응력 측정
	○잔류응력 완화방안 도출	○후열처리 온도별 잔류응력 완화정도 곡선 도출
	○수소기인균열 해석절차 개발	○수소화산에 대한 온도/농도/응력/전압 구배의 영향이 고려된 절차개발
		○임계 수소농도와 임계 작용응력이 고려된 절차 개발
	○수소기인균열 해석	○C-Mn 강 용접부에 대해 온도, 금속조직, 잔류 응력 및 수소화산 해석 결과 복합평가
	○수소기인균열 완화방안 도출	○수소기인균열 발생 완화 및 관련 코드 요건 면제를 위한 경제적이고
		○효율적인 전기 전송처리 방안 및 시작품 개발
	○잔류응력/수소기인균열 해석 DB/전문가 시스템 초안 구축중	○Web 기반 2개 모듈로 구축 - 잔류응력 해석/수소기인균열 해석

V. 연구개발 결과의 활용계획

[1 차년도]

세부과제	연구 개발 결과	활용 계획
상세 연구 계획 수립	○상세 연구계획	○금속조직 변화 예측, 잔류응력 해석 및 손상 평가 등 용접부 건전성평가 기술 개발에 활용
	○원전설비 용접관련 일반 사항 DB/전문가시스템 초안	○홈페이지와 연계를 통해 원전설비 용접관련 일반사항 사이버 기술자문 ○향후 개발될 금속조직 변화 예측, 잔류응력 해석 및 손상평가 DB/전문가시스템 초안과 연계
	○홈페이지 (www.wins.re.kr)	○연구내용 게시, 원전 안전성/수명연장 홍보 및 용접관련 사항 사이버 기술자문 ○용접 관련 일반사항 DB/전문가시스템 초안과 연계
금속조직/ 성분변화 예측기술 개발	○열적/물리적/기계적 재료 물성치	○온도해석, 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석 시 입력 자료로 활용
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 온도해석 기술	○금속조직 변화 예측, 잔류응력 해석 및 손상평가 시 온도 분포 결정에 활용
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측기술	○잔류응력 해석/손상 평가 시 금속 조직/성분 변화 예측에 활용 ○가동중 원전의 수명연장, 설계개선 및 주기적안전성평가 수행 시 건전성평가 측면에서 용접부 금속조직 평가 시 용이하고 경제적으로 활용 ○신규 원전 설계 시에도 용접부에 대한 금속조직 측면에서의 기존 문제점을 보완하는 안전설계에 용이하고 경제적으로 활용 ○원전설비 용접 뿐만 아니라 화력 발전소/중화학 설비의 용접, 열처리, 주조 및 코팅 등 다양한 분야에 적용하여 금속조직 변화를 예측
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 용접부 금속 기계적 물성 결정기술	○용이하고 경제적인 용접부 취약부 결정에 활용

[2 차년도]

세부과제	연구 개발 결과	활용 계획
금속조직 변화 예측기술 검증 및 보완	○금속조직 변화 및 기계적 물성 완화방안	○별도의 공정어 필요 없이 용접하면서 금속조직 변화 및 기계적 물성 저하를 예방하는 용접에 활용
	○금속조직 예측 DB/전문가 시스템 초안	○홈페이지와 연계를 통해 원전설비 용접부 금속조직 예측 관련 사이버 기술자문 ○향후 개발될 잔류응력 해석 및 손상평가 DB/전문가시스템 초안과 연계
	○용접부 조사취화 특성	○가압열충격, 저인성 파괴해석 등에 활용
잔류응력 해석기술 개발	○원전설비 용접부 일반 범주화 기법 개발	○잔류응력 해석 및 손상평가 대상 용접부 선정시에 활용 ○Risk-Informed Inspection 에 활용
	○용접부 전용 자동 유한요소 모델링 프로그램	○용접부 온도해석, 금속조직 변화 예측, 잔류응력 해석 및 손상평가지 유한요소 모델링시에 활용
	○열적/물리적/기계적 재료 물성치	○온도해석, 금속조직 예측 및 잔류응력 해석시 입력자료로 활용
	○이론적 온도해석 기법	○3 차원 대형용접 구조물의 온도해석에 활용
	○사용자 정의 보조 프로그램 UMAT	○잔류응력에 미치는 상변태/어닐링의 영향 고찰에 활용
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 잔류응력 해석 기술	○가동중 원전의 수명연장, 설계개선 및 주기적안전성평가 수행시 손상평가 측면에서 입력자료인 잔류응력 평가지 용이하고 경제적으로 활용 ○신규 원전 설계 시에도 용접부에 대한 잔류응력 측면에서의 기존 문제점을 보완하는 안전설계에 용이하고 경제적으로 활용 ○원전설비 용접 뿐만 아니라 화력 발전소/중화학 설비의 용접, 열처리, 주조 및 코팅 등 다양한 분야에 적용하여 잔류응력 해석에 활용
	○잔류응력 완화방안	○기존 후열처리 방식과 비교시 최고온도 지속시간이 단축되고 두께/초기 잔류응력 크기/ramp up 시간 등에 무관하게 적용, 일관되고 효율적인 완화방안 도출로 경제성이 향상된 후열처리 지침 개발에 활용
	○수소기인균열(HIC) 해석 기술	○수소화산에 미치는 모든 영향(온도/조직/응력/전압 구배)을 고려한 해석기술을 개발함으로써 수소기인균열 발생위치 및 시간 예측에 활용
	○HIC 완화방안	○기존 HIC 제거 열처리를 대체하는데 활용 ○템퍼비드 보수 용접부의 비파괴검사 대기시간 단축 또는 제거에 활용
	○잔류응력/HIC 해석 DB/전문가 스템 초안	○홈페이지와 연계를 통해 원전설비 용접부 잔류응력/HIC 해석 관련 사이버 기술자문 ○향후 개발될 손상평가 DB/전문가시스템 초안과 연계

SUMMARY

I. TITLE

A Study on the Evaluation Technologies for Nuclear Power Plant Components Welding Integrity

II. OBJETIVE

Welded parts are still subject to various degradations in spite of long study in nuclear industry. As the number of operating nuclear power plants increases, the integrity of welded parts needs to be maintained on the basis of advanced technologies. The final goal of this study is to develop the core technologies applicable to the design, management and maintenance of welds in nuclear structures. The objective of the phase I study is to prepare a detailed plan for integrity evaluation and to develop the technologies for predicting microstructure changes and residual stress for welded parts of nuclear power plant components by using appropriate software, metallurgical theory and analytical methods.

III. CONTENTS & SCOPE

The phase I is composed of following studies

- To make a detailed plan for welding integrity evaluation
 - Collection of technical documents and analyze the latest study trends
 - Establishment of detail plan for integrity evaluation on nuclear plant welded parts
 - Construction of web based database and expert system related to welding in nuclear structure
- To develop the technologies for predicting metallurgical microstructure of welds
 - Selection of significant welded parts for evaluation
 - Determination of material properties on the designated welds(SA-508 Gr. 3)
 - Development of thermal analysis technology considering actual welding phenomena and process such as phase transformations
 - Development of prediction methodology on the microstructure changes considering actual welding phenomena and process
 - Development of prediction methodology on the mechanical properties considering actual welding phenomena and process
- To develop the technologies for predicting residual stress of welds
 - Selection of significant welds and development of its method
 - Development of finite element modeling program for exclusive use of nuclear welds
 - Determination of material properties on the designated welds(Inconel 82 & SA-508 Gr.1a)
 - Development of temperature analysis technique on the basis of theoretical approach

- Development of residual stress analysis
- Verification of the technology in use of residual stress analysis
- Identification of methodology for the residual stress mitigation
- Development of analysis technology for hydrogen induced cracking
- Development of web based database and expert system related to welding in nuclear structure

IV. RESULTS

- Detailed planning for integrity evaluation on welds
 - Approximately, 200 documents are obtained regarding welds integrity
 - Collaborative research system has been constructed to cope with current trends and issues along with premier organizations such as PVRC/MPC, Battelle, TWI, and EU JRC.
 - None of codes and standards present explicit procedure for integrity evaluation
 - Integrity evaluation considering the current issues and trends are i) condition assessment reflecting microstructure and residual stress, ii) degradation evaluation including fatigue, corrosion, fatigue crack growth, and stress corrosion cracking
 - Web based database and expert system are composed of 4 module
 - NRL home page(www.wins.re.kr) has been successfully operated through cyber consultant and played a role as a messenger of nuclear safety
- Development of technologies for predicting metallurgical microstructure on welds
 - Reactor pressure vessel has been chosen for integrity evaluation
 - Material properties of SA-508 up to 300 ° C from room temperature have been verified by experimental methods
 - Substantial welding phenomena such as adoption and release of latent heat due to the phase transformation have been considered
 - Actual welding process such as multi-pass welds and post weld heat treatment have been considered
 - The analysis result was consistent with that of previous one within the 5% error range
 - Grain size, precipitation, carbide, and phase distribution of the welds have been predicted by using Thermo-Calc, DICTRA, and MAP
 - The trends of material properties such as strength, hardness are in good agreement with previous results but some quantitative value are not same each other
- Development of technique for predicting residual stresses on welds
 - Dissimilar weld, stainless steel piping weld and reactor vessel weld are selected for residual stress analysis
 - Welds selection has been conducted in accordance with ranking of failure probability
 - Theoretical temperature analysis technique is developed and applied to stainless steel piping.

- UMAT has been developed to consider phase transformation and annealing effects
- Residual stress distributions are determined by using UMAT and ABAQUS.
- The effect of temperature, concentration, stress, and electrical potential gradient on the hydrogen diffusion have been investigated
- HIC analysis method based on critical hydrogen concentration and critical stress level has been developed
- HIC evaluation for C-Mn steel has been conducted by using temperature, residual stress, and hydrogen diffusion analysis results
- Electro-transport treatment which can replace post-weld heat treatment has been developed to efficiently mitigate the sensitivity of hydrogen embrittlement

V. APPLICATION PLAN

- Utilization for reliable and efficient implementation of welding integrity evaluation
- Utilization of baseline data and references for welding integrity evaluation
- Incorporation with DB/Expert system into integrity evaluation
- Application of prediction technique of microstructure changes and residual stress
 - Provide input data for aging evaluation of nuclear structures
 - Provide input data for integrity evaluation of nuclear structures
 - Determine the vulnerable parts on nuclear power plant components
 - Provide mitigation method of HIC economically and efficiently

CONTENTS

Chapter 1. Introduction.....	1
1. Objective	1
2. Scope.....	3
Chapter 2. Status of Technical Development.....	5
1. A trend of the foreign study.....	5
1) Investigation of previous studies.....	5
2) Recent study trends.....	8
2. A trend of the domestic study.....	10
3. Current status of the technique.....	11
Chapter 3. Contents and Results.....	12
1. Development of a detailed plan for welding integrity evaluation.....	12
1) Identification of the problems in previous studies.....	12
2) Establishment of a detailed plan for weld integrity evaluation.....	32
3) Construction of database and expert system for welding specifications.....	46
2. Development of prediction technique of microstructure changes.....	51
1) Selection of subject welds.....	51
2) Determination of material properties.....	56
3) Development of temperature analysis technique.....	61
4) Development of prediction technique of microstructure changes.....	66
5) Development of prediction technique of mechanical material properties.....	79
3. Validation and modification of prediction technique of microstructure changes and derivation of microstructure change mitigation.....	82
1) Validation and modification of prediction technique of microstructure changes and derivation of microstructure change mitigation activity.....	82
2) Construction of database and expert system for microstructure change prediction.....	103
3) Investigation of prediction technique of irradiation embrittlement.....	107
4. Development of residual stress analysis technique.....	132
1) Selection of subject welds and development of selection/classification method for subject welds	132
2) Development of automatic finite element modeling program.....	146
3) Determination of material properties.....	151
4) Development of theoretical temperature analysis technique.....	156

5) Development of residual stress analysis technique.....	167
6) Validation/modification of residual stress analysis technique and derivation of residual stress mitigation activity.....	202
7) Development of hydrogen induced cracking analysis technique.....	241
8) Construction of database and expert system for residual stress analysis.....	277
5. Results.....	281
Chapter 4. Achievement and Contribution.....	283
1. Achievement.....	283
2. Contribution.....	285
Chapter 5. Application Plan of Study Results.....	286
Chapter 6. List of Collected Documents	288
Chapter 7. References.....	313
Appendix 1. Welding Phenomena and Basic Theory.....	318
Appendix 2. International Cooperation Researches.....	346

목 차

제 1 장 서론.....	1
제 1 절 연구 목적 및 필요성.....	1
제 2 절 연구 범위.....	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황.....	5
제 1 절 국외 연구동향.....	5
1. 기존 연구 검토.....	5
2. 국가별 최신 연구동향.....	8
제 2 절 국내 연구동향.....	10
제 3 절 개발 기술의 현위치.....	11
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과.....	12
제 1 절 상세연구계획 수립.....	12
1. 기존 연구동향 및 문제점 도출.....	12
2. 상세 연구계획 수립.....	32
3. 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가 시스템 초안 구축.....	46
제 2 절 금속 조직/성분 변화 예측 기술 개발.....	51
1. 대상기기 용접부 선정.....	51
2. 재료물성치 결정.....	56
3. 온도해석 기술개발.....	61
4. 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발.....	66
5. 기계적 물성예측 기술개발.....	79
제 3 절 금속조직 예측기술 검증/보완 및 완화방안 도출.....	82
1. 금속조직 예측기술 검증/보완 및 완화방안 도출.....	82
2. 금속조직 변화 예측 DB/전문가시스템 구축.....	103
3. 조사취화 예측기술 검토.....	107
제 4 절 잔류응력 해석 기술 개발.....	132
1. 대상기기 용접부 선정 및 대상기기 용접부 선정/분류법 개발.....	132
2. 자동 유한요소 모델링 프로그램 개발.....	146
3. 재료물성치 결정.....	151
4. 이론적 온도해석 기술 개발.....	156
5. 잔류응력 해석 기술 개발.....	167
6. 잔류응력 해석기술 검증 보완 및 완화방안 도출.....	202
7. 수소기인균열 해석기술 개발.....	241

8. 잔류응력 해석 DB/전문가시스템 구축.....	277
제 5 절 연구 개발 결과.....	281
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도.....	283
제 1 절 연구개발 목표의 달성도.....	283
제 2 절 기술발전예의 기여도.....	285
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획.....	286
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보.....	288
제 7 장 참고문헌.....	313
부록 1 용접 현상 및 기초이론.....	318
부록 2 국제 공동 연구.....	346

그림 목차

그림 1 용접 열원으로부터의 열 유속 분포.....	6
그림 2 ORNL의 용접부 금속조직/성분 예측 종합 모델.....	7
그림 3 국가별 최신연구동향.....	8
그림 4 상세 연구계획 수립 방법.....	30
그림 5 용접공정에 따른 적용 규격.....	31
그림 6 연구 단계 및 과제별 개념적 상관관계.....	41
그림 7 1단계 두 과제 내 세부 항목들 간 상관관계.....	41
그림 8 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발 흐름도.....	42
그림 9 잔류응력 해석기술 개발 흐름도.....	43
그림 10 1단계 및 2단계 중과제들 간 상관관계.....	44
그림 11 피로 및 부식 평가 기술개발 흐름도.....	44
그림 12 피로균열성장 및 응력부식균열 평가 기술개발 흐름도.....	45
그림 13 복합 손상평가 기술개발 흐름도.....	45
그림 14 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 Logic 구성.....	49
그림 15 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 초안 Web 기반 구축화면.....	50
그림 16 몇몇 아크 용접들의 산소와 질소 함량 수준.....	55
그림 17 SA508 Gr.3 Cl.1 원자로 압력용기 용접부의 형상.....	55
그림 18 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1의 밀도 변화.....	57
그림 19 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1의 비열 변화.....	57
그림 20 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1의 열전도도 변화.....	58
그림 21 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1의 탄성계수 변화.....	58
그림 22 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1의 항복응력 변화.....	59
그림 23 만능 시험 장치를 이용한 인장실험.....	59
그림 24 파단된 인장시편.....	60
그림 25 유한요소 모델.....	63
그림 26 시간에 따른 Layer5와 Layer6 사이의 온도 분포 변화.....	64
그림 27 시간에 따른 Layer 1 중심에서의 온도 변화.....	64
그림 28 용융선으로부터 거리에 따른 Peak 온도의 시간 변화.....	65
그림 29 용융선으로부터 거리별 Peak 온도의 비교.....	65
그림 30 Peak 온도 및 시간에 따른 Prior 오스테나이트 결정립 성장.....	72
그림 31 온도에 대한 SA 508 Gr.3 Cl.1의 개별적 상들의 평형 상 분율.....	72
그림 32 SA 508 Gr.3 Cl.1의 TTT 선도 (예측결과).....	73
그림 33 SA 508 Gr.3 Cl.1의 CCT 선도 (예측결과).....	73
그림 34 SA 508 Gr.3 Cl.1의 CCT 선도 (실험결과).....	74

그림 35 Peak 온도에 따른 단위 열영향부 결정.....	74
그림 36 용융선으로부터 0.8mm 떨어진 SA 508 Gr.3 Cl.1 열 영향부의 미세조직 예측.....	75
그림 37 용융선으로부터 2.8mm 떨어진 SA 508 Gr.3 Cl.1 열 영향부의 미세조직 예측.....	75
그림 38 결정립 크기에 따른 상 분율의 평가.....	76
그림 39 후열 처리 적용 후 SA 508 Gr.3 Cl.1 모재의 미세조직.....	77
그림 40 후열 처리 적용 후 SA 508 Gr.3 Cl.1 열 영향부의 미세조직.....	77
그림 41 후열 처리 적용 후 SA 508 Gr.3 Cl.1 용착부의 미세조직.....	77
그림 42 후열처리에 의한 탄화물 조대화.....	78
그림 43 SA 508 Gr.3 Cl.1 용접부의 비커스 경도 변화 예측.....	81
그림 44 모사된 용접 열 이력.....	91
그림 45 열영향부내 단위 영역들.....	91
그림 46 수정전 결정립 크기 예측값.....	92
그림 47 수정후 결정립 크기 예측값.....	92
그림 48 SA508 Gr.3 Cl.1의 평형 상태도.....	93
그림 49 HAZ부내 단위 영역에 따른 마르텐사이트 분율 비교.....	94
그림 50 HAZ부내 단위 영역에 따른 베이나이트/페라이트 분율 비교.....	94
그림 51 As-welded 경도 비교.....	95
그림 52 후열처리 이후의 경도 비교.....	95
그림 53 As-welded 인장강도 비교.....	96
그림 54 후열처리후 인장강도 비교.....	96
그림 55 용융선으로부터 거리에 따른 prior 오스테나이트 결정립 크기 분포.....	97
그림 56 용융선으로부터 거리에 따른 석출 상 분율 분포.....	97
그림 57 용융선으로부터 거리에 따른 경도 변화.....	98
그림 58 용융선으로부터 거리에 따른 인장강도 변화.....	98
그림 59 용접 열영향부의 냉각률 변화.....	99
그림 60 용접 열영향부의 prior 오스테나이트 결정립 크기 변화.....	99
그림 61 용접 열영향부의 비이커스 경도 변화.....	100
그림 62 용접 열영향부의 인장강도 변화.....	100
그림 63 베이나이트 및 마르텐사이트의 파괴인성 비교.....	101
그림 64 미세조직별 확산에 의한 탄소농도 변화.....	101
그림 65 온도에 따른 오스테나이트 상분율 계산 결과.....	102
그림 66 Intercritical 열처리 온도에 따른 충격에너지값 변화.....	102
그림 67 금속조직 예측 입력모듈.....	105
그림 68 금속조직 예측 출력모듈.....	105
그림 69 기계적 물성치 예측 입력모듈.....	106
그림 70 기계적 물성치 예측 출력모듈.....	106
그림 71 중성자 조사취화로 인한 샤프 충격에너지의 변화.....	125

그림 72	원자로 압력용기 조사취화에 따른 건전성 평가절차.....	126
그림 73	($T-RT_{NDT}$)에 따른 기준 무연성 천이온도의 변화.....	127
그림 74	막응력 수정계수.....	127
그림 75	벽두께에 따른 열응력 수정계수의 변화.....	128
그림 76	벽면 내부에서의 온도구배.....	128
그림 77	플루언스와 구리함량의 변화에 따른 USE의 변화.....	129
그림 78	인장시험으로부터 얻어진 항복강도의 증분량과 중성자 플럭스 사이의 관계.....	130
그림 79	항복응력의 계산결과와 측정치와의 비교.....	131
그림 80	일반 범주화용 대상기기 용접부 선정/분류 기법.....	142
그림 81	배관 용접부의 초기결함 밀도.....	142
그림 82	배관 용접부 파손 평가논리.....	143
그림 83	RCS-1 배관 용접부.....	143
그림 84	40년 운전동안 누설확률.....	144
그림 85	40년 운전동안 파단확률.....	144
그림 86	40년 동안 임의 계통별 완전파단확률.....	145
그림 87	자동 유한요소 모델링 프로그램 초기화면.....	148
그림 88	Layer 정보 입력화면.....	149
그림 89	Mesh 정보 입력화면.....	149
그림 90	3-Pass 용접부 자동 유한요소 모델링 결과.....	150
그림 91	온도변화에 따른 SS316의 열전도도 및 비열변화.....	153
그림 92	Inconel 82의 온도에 따른 밀도 및 비열 변화.....	154
그림 93	Inconel 82의 온도에 따른 열전도도 변화.....	154
그림 94	Inconel 82의 온도에 따른 탄성계수 및 항복강도 변화.....	154
그림 95	만능 인장시험기와 고온 챔버.....	155
그림 96	Inconel 82 인장 시편.....	155
그림 97	얇은 마일드 강판에 대한 일반적인 아크 용접.....	162
그림 98	주열원과 가상 이미지 열원이 제시된 열전달 모델.....	162
그림 99	공간과 시간 변수들 사이의 관계를 제시하는 동적 링 열원.....	163
그림 100	Gaussian 분포를 가진 동적 원형 디스크 열원.....	164
그림 101	해석모델.....	165
그림 102	유한요소 모델.....	165
그림 103	V 그루브 바닥선을 따른 온도 상승 분포.....	166
그림 104	용접 심선에 따른 판 바닥면 상 열영향부 경계선(727°C) 변화.....	166
그림 105	용접 잔류응력에 대한 상세 해석 절차.....	180
그림 106	열탄소성 1차원 문제에 대한 도식적 해.....	181
그림 107	변태 소성 변형률의 개념.....	182
그림 108	어닐링 변형률 고려 사용자 정의 보조 프로그램 타당성 검증 모델.....	182

그림 109 중심선 변위 분포에 대한 기존 연구결과와의 비교.....	183
그림 110 상변태 변형률 고려 사용자 정의 보조 프로그램 타당성 검증 모델.....	183
그림 111 횡방향 잔류응력 분포에 대한 기존 연구결과와의 비교.....	184
그림 112 이중재 용접부.....	185
그림 113 스테인리스 강 원주방향 용접부.....	186
그림 114 이중 용접부에 대한 유한요소 모델.....	187
그림 115 안전단-TP316 용접부의 용접 패스 11 용착후 시간에 따른 온도분포.....	188
그림 116 시간에 따른 열영향부 F 지점에서의 온도 변화.....	189
그림 117 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 유한요소 모델.....	190
그림 118 A 해석의 온도분포.....	191
그림 119 시간에 따른 절점 1728에서의 온도 변화.....	192
그림 120 용융선으로부터 거리에 따른 SA508 Gr.1a 열영향부의 prior 오스테나이트 결정립 크기.....	192
그림 121 SA508 Gr.1a의 평형 상태도.....	193
그림 122 SA508 Gr.1a의 CCT 선도.....	193
그림 123 용융선으로부터 거리에 따른 SA508 Gr.1a 열영향부의 석출 상 분율.....	194
그림 124 용융선으로부터 거리에 따른 SA508 Gr.1a 열영향부의 경도.....	194
그림 125 용융선으로부터 거리에 따른 SA508 Gr.1a 열영향부의 인장강도.....	194
그림 126 SS315의 평형 상태도.....	195
그림 127 Inconel 82의 평형 상태도.....	195
그림 128 SS304의 평형 상태도.....	195
그림 129 이중재 용접부의 잔류응력 분포.....	196
그림 130 용접 toe line들을 따른 횡방향 잔류응력 분포.....	197
그림 131 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부의 잔류응력 분포.....	197
그림 132 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 A 해석의 잔류응력 분포.....	198
그림 133 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 B 해석의 잔류응력 분포.....	199
그림 134 원자로 압력용기 원주방향 용접부의 잔류응력 분포.....	200
그림 135 용접 중심선으로부터의 거리에 따른 원자로 내외면의 원환 잔류응력 분포.....	201
그림 136 중성자 회절 잔류응력 측정장치의 개략도.....	213
그림 137 실험 장치.....	214
그림 138 Non-Welded Sample 측정.....	214
그림 139 측정 시편 형상 및 측정 위치.....	215
그림 140 Channel-20의 조정.....	216
그림 141 Channel-20 조정 및 측정 실험.....	216
그림 142 Normal 방향 channel 측정 위치 및 방법.....	217
그림 143 Normal 방향 channel 측정 결과.....	218
그림 144 Transverse 방향 channel 측정 위치 및 방법.....	219

그림 145 Transverse 방향 channel 측정 결과.....	220
그림 146 Axial 방향 channel 측정 위치 및 방법.....	221
그림 147 Axial 방향 channel 측정 결과.....	221
그림 148 2mm 깊이에서의 normal 방향 응력 분포.....	222
그림 149 2mm 깊이에서의 transverse 방향 응력 분포.....	222
그림 150 2mm 깊이에서의 axial 방향 응력 분포.....	223
그림 151 5mm깊이에서의 normal 및 transverse 방향 응력 분포.....	223
그림 152 Hole drilling 기술 개요.....	224
그림 153 Hole drilling 실험.....	225
그림 154 Hole drilling 기술을 이용한 시편내 측정 위치.....	226
그림 155 Hole drilling 기술을 이용한 각 측정위치별 transverse 및 axial 잔류응력 분포.....	229
그림 156 이중재 용접부의 횡방향 잔류응력에 대한 해석 및 측정 결과의 비교.....	229
그림 157 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 잔류응력 해석치 비교.....	231
그림 158 SA508 Gr.1a 배관 원주방향 용접부.....	232
그림 159 후열처리 과정.....	232
그림 160 크리프 거동 미고려 경우의 Equivalent 응력 변화.....	233
그림 161 크리프 거동 고려 경우의 Equivalent 응력 변화.....	234
그림 162 후열처리 온도 및 시간에 따른 크리프 변형률 변화.....	234
그림 163 잔류응력 완화에 대한 후열처리시 최고온도 지속시간의 효과.....	235
그림 164 두께에 따른 잔류응력 완화 효과.....	236
그림 165 다양한 초기 잔류응력 크기에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계.....	236
그림 166 다양한 후열처리 지속 온도에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계.....	237
그림 167 다양한 후열처리 ramp up 시간에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계.....	237
그림 168 온도에 따른 항복강도 변화.....	238
그림 169 다양한 초기 잔류응력에 따른 후열처리 지속 온도와 잔류응력 완화정도의 관계.....	238
그림 170 다양한 두께에 따른 후열처리 지속 온도와 잔류응력 완화정도의 관계.....	239
그림 171 무차원화된 후열처리 온도와 잔류응력 완화사이의 관계.....	240
그림 172 수소기인균열의 발생위치.....	259
그림 173 민감한 미세조직을 갖고 있는 HAZ를 따라 발생한 수소기인균열.....	259
그림 174 온도에 따른 수소의 확산속도.....	260
그림 175 수소기인균열 해석 절차.....	260
그림 176 해석 대상.....	261
그림 177 온도 변화에 따른 C-Mn 강의 비열 및 열전도도.....	261
그림 178 온도 변화에 따른 C-Mn 강의 탄성계수 및 항복강도.....	262
그림 179 온도 변화에 따른 C-Mn 강의 diffusivity.....	262
그림 180 온도 변화에 따른 C-Mn 강의 solubility.....	263
그림 181 열유속 profile 함수.....	263

그림 182	유한요소 모델.....	264
그림 183	용접 패스 5 용착이후 온도분포 변화.....	265
그림 184	A점의 시간에 따른 온도 변화 비교.....	266
그림 185	잔류응력 분포.....	267
그림 186	시간에 따른 용착시 수소 flux.....	268
그림 187	온도구배 확산해석을 통한 20시간 경과후 X-X 선상의 normalized된 수소농도.....	268
그림 188	Solubility의 온도 종속성 고려 여부에 따른 수소 농도 분포 변화.....	269
그림 189	응력구배 고려 여부에 따른 수소 농도 분포 변화.....	270
그림 190	전기장 고려 수소 확산 해석절차.....	271
그림 191	전극 설치 위치.....	271
그림 192	유효 전압 구배 분포.....	272
그림 193	경우 2 전기장하에서의 C-Mn 다층 용접부의 온도분포(1시간 경과).....	273
그림 194	시작품 개략 구성도.....	273
그림 195	검증 실험 흐름도.....	274
그림 196	전기전송 처리 검증 실험용 시편의 형상.....	274
그림 197	전기전송 처리.....	275
그림 198	가스 크로마토그래프 장치 개략도.....	275
그림 199	가스 크로마토그래프를 이용한 수소함량 측정.....	276
그림 200	수소함량 측정결과.....	276
그림 201	잔류응력 해석 입력모듈.....	279
그림 202	잔류응력 해석 출력모듈.....	279
그림 203	수소기인균열 완화 입력모듈.....	280
그림 204	수소기인균열 완화 출력모듈.....	280
그림 A-1	OAW 과정 개요.....	335
그림 A-2	SMAW 과정 개요.....	335
그림 A-3	GTAW 과정 개요.....	335
그림 A-4	PAW와 GTAW 과정 비교.....	336
그림 A-5	GMAW 과정 개요.....	336
그림 A-6	SAW 과정 개요.....	337
그림 A-7	ESW 과정 개요.....	337
그림 A-8	EBW 과정 개요.....	338
그림 A-9	Gibbs 자유에너지의 도식적인 변화.....	338
그림 A-10	확산동안의 자유에너지와 CHEMICAL POTENTIAL 변화.....	339
그림 A-11	농도 구배가 있는 경우 RANDOM JUMP에 의한 침입형 확산.....	340
그림 A-12	FICK의 제 2법칙 유도.....	341
그림 A-13	균질 핵 생성.....	341
그림 A-14	반경 R의 구형 입자의 균질 생성과 관련된 자유에너지 변화.....	342

그림 A-15 평평한 MOLD 벽상의 구형 캡의 비균질한 생성.....	342
그림 A-16 균질 생성과 비균질 생성에 대한 고체 CLUSTER들의 잉여 자유에너지.....	343
그림 A-17 초기 평면 응고면의 분열과정.....	343
그림 A-18 TTT Diagram과 시간에 따른 FRACTION 변태 사이의 관계.....	344
그림 A-19 AISI 1040의 CCT Diagram.....	344
그림 A-20 다양한 용접법에 따른 HAZ의 열 이력 비교.....	345
그림 A-21 용접 용융부와 HAZ의 미세조직 개요.....	345

표 목차

표 1 연도별 기술개발목표.....	2
표 2 1 단계 연구개발 내용 및 범위.....	3
표 3 Battelle 전문가와의 면담.....	14
표 4 TWI 전문가와의 면담.....	14
표 5 세계 용접관련 단체와 용접관련 분야별 규격 제정현황.....	16
표 6 용접공정에 따른 AWS 규격 구성	19
표 7 p-nUMBER.....	23
표 8 용접법의 종류 및 구분.....	23
표 9 안전 1 등급 기기 검사부위.....	23
표 10 안전 2 등급 기기 검사부위.....	24
표 11 KS, AWS, ASME B&PV 및 ISO 규격별 차이점.....	24
표 12 국내외 연구개발 종합표.....	25
표 13 KS, AWS 및 ASME B&PV 규격 용접관련 사항의 문제점.....	27
표 14 국내외 기존 연구 문제점.....	28
표 15 국내외 기존 연구 문제점 해결을 위한 대안.....	29
표 16 1 단계 상세 연구방안 총괄표.....	33
표 17 2 단계 상세 연구방안 총괄표.....	36
표 18 모재의 화학조성.....	54
표 19 용접부의 화학조성.....	54
표 20 예열 및 후열 처리에 대한 변수 범위.....	54
표 21 용접 변수 범위.....	54
표 22 각 용접 Layer 별 용접시간.....	61
표 23 개별적 상들에 대한 부격자 모델.....	68
표 24 A ₁ 과 A ₃ 의 변태점 온도.....	68
표 25 항복강도 및 인장강도 비교.....	80
표 26 용접 열영향부 단위지역의 모사 열이력.....	83
표 27 SA508 Gr.3 Cl.1 의 화학조성.....	83
표 28 오스테나이트로부터 페라이트의 상변태 온도.....	84
표 29 항복강도 및 인장강도 비교.....	80
표 30 원자로 압력용기의 건전성 관련 규제요건.....	107
표 31 용접재에 대한 화학인자[CF], °F.....	117
표 32 모재에 대한 화학인자[CF], °F	118
표 33 단순 배관입력 모델 및 기존결과 데이터와 특정원전 RCS-1 배관 입력데이터.....	139
표 34 RCS-1 배관 용접부 신뢰성 모델의 변수 및 적용 값.....	139

표 35 RCS-1 용접부의 누설 및 파단확률.....	140
표 36 재료별 화학조성.....	151
표 37 S304 의 화학조성.....	152
표 38 SS304 의 열적/물리적 재료물성치.....	152
표 39 SS304 의 기계적 재료물성치.....	152
표 40 아크 용접 변수들.....	160
표 41 이중재 용접부의 용접변수 특성.....	173
표 42 스테인리스 강 배관 내면 원주방향 용접부의 MMA 내경 용접변수.....	173
표 43 스테인리스 강 배관 외면 원주방향 용접부의 SAW 외경 용접변수.....	173
표 44 후열처리 대상 재료 및 두께에 따른 후열처리 지속온도 및 시간.....	208
표 45 C-Mn 강의 화학조성.....	246
표 46 다층 용접 모델에 대한 용접변수 특성.....	246
표 47 침입형 원자의 전기 이동 방향.....	253
표 48 경우에 따른 방향별 평균 전압구배의 절대치 및 유효 평균 전압구배.....	255
표 49 온도에 따른 전기 해석 관련 재료물성치.....	255
표 50 개략 해석절차를 통한 확산 시간.....	256
표 51 전기전송 처리 조건.....	258
표 52 검증실험 시편의 수소함량 측정조건.....	258
표 53 1 단계 연구개발 결과.....	281
표 54 연구목표의 달성 내용.....	283
표 55 연구개발 결과의 활용계획.....	286
표 A-1 다양한 재료 및 두께에 따른 용접법 적용 개요.....	328
표 A-2 각 용접법 별 특성, 장단점 및 적용성 요약.....	329

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 목적 및 필요성

두개 또는 그 이상의 설비/구조물 구성 요소들을 서로 기계적으로 접합하는 방법에는 리벳팅, 용접, 볼팅, 접착 등과 같이 다양한 방법들이 있다. 이러한 다양한 방법들 나름대로 각각의 장점들을 가지고 있으나 원전설비와 같은 대형 강 설비/구조물은 특성상 구성 요소들간 수많은 접합 부위가 존재하며 이러한 설비/구조물이 운전 시 필수적으로 유지하여야 할 신뢰성, 안전성 및 기밀성 등에 기인하여 용접 방법이 가장 폭 넓게 수행되어지고 있다. 일례로 1,000MW 급 규모의 원자력 발전소의 건설에는 원자로 압력용기를 비롯한 설비/구조물의 제작에 평균 26,500 여 곳의 용접을 필요로 한다[1]. 또한, 사람이 운동할 때 뼈대 보다는 관절이 다치기 쉬운 것처럼 설비/구조물의 관절 역할을 수행하는 용접부도 모재 부위에 비하여 취약한 금속적/기계적 성질을 가지고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 신기술 개발과 그간의 오랜 연구들이 수행되어졌음에도 불구하고 손상발생 가능성 및 손상사례 발생 측면에서 아직도 취약부위는 여전히 용접부라 할 수 있다.

원전에서는 ASME B&PV Code Sec. II, III, XI [2~4] 및 AWS Code[5] 등에 따라 용접부가 설계 검사되며 재질선택, 용접평가, 후열처리, 품질관리 및 가동중 검사 등이 설계, 건설, 운전 및 보수 단계에서 수행되어지나 아직도 용접부의 건전성 평가기술을 완전히 확보하였다고 할 수 없으며 실제로 끊임없이 문제가 야기되고 있다. 특히, 국내의 경우 기존의 연구가 각 전공분야 별로 수행되어 실제 용접 현상 및 과정을 고려한 금속 조직/성분 변화, 잔류응력 등 용접부 상태평가 분야와 실제 용접상태를 고려한 피로, 부식, 피로균열성장, 응력부식균열 등 손상평가 분야에서의 금속학적인 연구와 기계학적인 연구가 유기적으로 이루어지지 않아 대표적인 국내 미자립 핵심기술로 존재하며 산업체에서 적용할 수 있는 연구가 부족한 상태이다. 아울러, 향후 원자력 산업계는 가동 원전의 주기적안전성평가 및 수명연장과 신규 원전의 설계, 제작 단계부터의 안전성 향상이 최대의 관건이 될 것이며 원전설비 용접부 건전성평가 관련 비용이 호기 당 10 억원 규모 이상으로 추정되므로 원전설비 용접부 건전성평가의 국내 미자립 핵심기술을 확보하는 것은 필수적이다

따라서 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹에서는 국가지정연구실 사업의 일환으로써 원전 설비의 안전 설계, 운영 및 보수에 활용될 수 있는 국내 미자립 용접부 건전성평가 핵심기술을 연구한 후, 용접부에 대한 복합 건전성평가 기술을 개발하고 이를 시스템화하는 기술을 개발하는데 본 연구의 최종목표를 두고 있다.

이러한 원전설비 용접부 건전성평가 핵심기술을 효율적이고 신뢰성 있게 개발하기 위해서는 우선적으로 최신 연구동향 및 기존 연구의 문제점이 고려된 상세 연구계획이 수립되어야 한다. 또한, 가동중 원전의 수명연장, 설계개선 및 주기적안전성평가 수행시 가장 기본적으로 평가되어야 하는 용접부 금속조직 및 잔류응력을 용이하고 경제적으로 평가하기 위해서는 실험적 접근 방법 이외의 이론적/준경험적 접근방법에 근거한 금속조직 변화 예측기술 및

잔류응력 해석 기술 개발이 필요하다.

신규 원전의 경우에도 용접부에 대한 금속조직 및 잔류응력 측면에서의 기존의 문제점을 보완하는 안전 설계를 용이하고 경제적으로 수행하기 위해서 이론적/준경험적 접근방법에 근거한 금속 조직 변화 예측기술 및 잔류응력 해석기술 개발이 필요하다. 아울러, 이러한 이론적/준경험적 접근방법에 근거한 예측/해석 기술의 신뢰성 확보를 위해서는 용접과정 동안의 잠열 방출/흡수, 다층 육성용접 및 후열 처리와 같은 실제 용접 현상/과정과 금속조직/기계적 물성 변화를 고려하여야만 한다. 이러한 금속조직 변화 예측기술과 잔류응력 해석기술이 개발되어진다면 원전설비 용접 뿐만 아니라 화전/중화학 설비의 용접, 열처리, 주조 및 코팅 등 다양한 분야에 적용하여 금속조직 변화를 예측하고 잔류응력을 해석할 수 있으므로 연구 개발결과의 파급효과는 지대할 것으로 예상된다.

따라서 표 1에서 제시되고 있는 바와 같이 본 1단계에서는 원전설비 용접부 건전성평가 기술 개발을 위한 상세 연구계획 수립과 실제 용접 현상/과정을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측기술 및 잔류응력 해석기술 개발에 그 목표를 두고 있다.

표 1. 연도별 기술개발목표

구분 차년도	기술 개발 목표
1단계 1차년도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 상세 연구계획 수립 ○ 실제 용접 과정/현상을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발
1단계 2차년도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발 및 검증, 보완 ○ 실제 용접 과정/현상을 고려한 잔류응력 해석기술 개발
2단계 1차년도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실제 용접부 상태를 고려한 피로평가 기술 개발 ○ 실제 용접부 상태를 고려한 부식평가 기술 개발
2단계 2차년도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실제 용접부 상태를 고려한 피로균열성장 평가기술 개발 ○ 실제 용접부 상태를 고려한 응력부식균열 평가기술 개발
2단계 3차년도	<ul style="list-style-type: none"> ○ 복합 손상평가 기술 개발 ○ 통합 건전성평가 전문가시스템 구축기술 개발

제 2 절 연구 범위

당해년도의 세부 연구목표를 달성하기 위해서 표 2에서 제시되고 있는 내용 및 범위를 수행하였다.

표 2. 1단계 연구개발 내용 및 범위

[1차년도]

세부 연구 목표	연구개발 내용 및 범위
[제1과제] 상세 연구계획 수립	<ul style="list-style-type: none"> ○국내외 최신 연구동향 파악 <ul style="list-style-type: none"> - TWI(영), Battelle(미) 등 국외 선진 연구기관 방문 및 전문가 면담 - 국내 관련 학회 참석 및 전문가 면담 ○용접관련 기술기준, 문헌 및 데이터 수집 분석 <ul style="list-style-type: none"> - KS[6], ASME, AWS, ISO[7] 등 기술기준 - NED 등 각종 Journal/Proceeding, DOE, NRC, EPRI, TWI, Battelle, ORNL 등의 보고서 ○용접관련 기존 연구의 문제점 도출 <ul style="list-style-type: none"> - 해석 접근법(실험 또는 이론)에 따른 경제성 - 해석결과의 신뢰성 <li style="text-align: right;">- 해석기술의 적용성 ○용접부 건전성평가 상세 연구계획 수립 (2단계 7과제) <ul style="list-style-type: none"> - 1단계 2과제 (용접부 상태평가): 금속 조직/성분 변화 예측★, 잔류응력 해석★ - 2단계 5과제 (용접부 손상평가): 피로, 부식, 피로균열성장, 응력부식균열, 복합손상 ○원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 초안 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 상세 연구계획을 토대로 Web 기반으로 구축 - 대상기기 특성, 용접부 특성, 용접절차서 작성 및 검토의 4개 모듈 ○홈페이지 (www.wins.re.kr) 구축 운영 <ul style="list-style-type: none"> - 연구실/연구내용/연구진 소개, Q&A, 공지사항 등의 모듈로 구성 - 연구내용 게시, 원전 안전성/수명연장 홍보, 사이버 기술자문
[제2과제] 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○대상 기기 용접부 선정 <ul style="list-style-type: none"> - 1차측 주기기 8개, 용접부 40여 개에 대해 6개 중요요소 검토 - 원자로압력용기 원주방향 용접부로 선정 ○열적/물리적/기계적 재료물성치 결정 <ul style="list-style-type: none"> - 위탁실험 : 금속조직 관찰, 밀도/비열/탄성계수/항복·인장강도/응력·변형률 선도 측정 - 기존 연구결과 활용 : 열팽창계수/프와송 비/열전도도/점성계수 결정 ○유한요소(FE : Finite Element) 모델링 <ul style="list-style-type: none"> - FE 모델링 전문 프로그램인 PATRAN[8]을 이용한 최적 형상 및 크기 분포 모델링 - 용접 Layer별 Grouping한 축대칭 4절점 유한요소 모델 ○실제 용접 현상/과정을 고려한 온도해석 기술 개발★ <ul style="list-style-type: none"> - ABAQUS[9] 및 열전도 근거[10,11] Lumped 모델[12] 이용 - 잠열 방출/흡수, 다층 육성용접 및 후열처리 같은 실제 용접 현상/과정 고려 ○실제 용접 현상/과정을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발★ <ul style="list-style-type: none"> - 기존 결정립 성장 실험식 및 온도해석 결과를 이용한 결정립 크기 결정 - ThermoCalc[13]를 이용한 평형 상변태점/분율 및 석출물 종류 결정 - Reaction Kinetics 모델[14]을 이용한 TTT 선도 결정 - Scheil-Avrami Additivity 법칙[15,16]을 이용하여 TTT 선도를 CCT 선도로 변환 - CCT 선도 상에 온도해석 결과를 중첩하여 열 영향부의 상 분포 예측 - DICTRA[17]를 이용한 석출물 성장 평가 ○실제 용접 현상/과정을 고려한 용접부 기계적 물성 결정기술 개발★ <ul style="list-style-type: none"> - 기존 실험 결과식 및 온도해석/금속조직 예측 결과를 이용한 경도, 항복강도 및 인장강도 결정

[주] ★: 핵심 미자립 기술 (타 항목도 부분적 기술 미자립 상태)

[2차년도]

세부 연구 목표	연구 개발 내용 및 범위
<p>[제 2 과제] 금속조직/ 성분 변화 예측기술 검증 및 보완</p>	<p>○검증 실험과 비교를 통해 예측기술 보완 - 금속조직/성분 측정 결과와 비교 검토</p> <p>○금속 조직/성분 변화 및 특성 저하 완화방안 도출★ - 최적 민감도 분석 조건 도출 - 용접변수에 따른 금속 조직/성분 변화 민감도 분석 - 국부 Heat Sink 효능 및 적용성 검토</p> <p>○금속조직 예측 DB/전문가시스템 초안 구축 - 통합 건전성평가 전문가시스템과의 연계를 고려한 개별 Logic 설계 - 최적의 개발 Tool 을 선정하여 금속 조직/성분 변화 예측 모듈 개발 - Web 기반으로 구축, 홈페이지와 연계 추진</p>
<p>[제 3 과제] 잔류응력 해석기술개발, 검증 및 보완</p>	<p>○용접부 상태/손상 일반 범주화를 위한 대상기기 용접부 선정/분류 기법 개발 - WinPraise[18], Susceptibility Ranking 및 확률기법 등 이용 - 파손확률, Risk 등 검토</p> <p>○원전설비 용접부 전용 자동 유한요소 모델링 프로그램 개발 - 잔류응력 유한요소 해석의 효율화를 위해 PATRAN 과 연계 추진</p> <p>○대상 용접부에 대한 재료물성치/금속조직 실험 및 결정 - 이종재 용접금속 인코넬 82 에 대한 열적/물리적/기계적 재료물성치 고온(900 ℃까지) 실험 - 이종재료 용접부에 대한 금속 조직/성분 변화 분석 실험 - 기존 연구 결과 또는 SPSS[19]의 통계 모듈로부터 결정</p> <p>○이론적 온도해석 기법 개발★ - 가상 이미지 열원 중첩법[20] 및 Fourier Series 등 이용</p> <p>○온도해석 및 금속조직/성분 변화 예측 - 1 차년도 개발 기술 적용</p> <p>○사용자 정의 보조 프로그램 UMAT[9] 개발★ - 어닐링/상변태 변형률 고려</p> <p>○잔류응력 해석 - ABAQUS 를 이용한 용접부 잔류응력 해석 - 해석치에 덜 영향을 주는 유한요소 모델링 기법 개발</p> <p>○잔류응력 측정 - 잔류응력 해석결과의 타당성 검증 및 해석 기술의 보완 목적 - 중성자 회절법 및 홀 드릴링법을 이용한 이종재 용접부 잔류응력 측정</p> <p>○수소기인균열 해석모델 개발 - 잔류응력 및 수소 확산 등 수소기인균열 발생에 영향을 주는 인자 도출 및 개념적 해석모델링</p> <p>○수소기인균열 해석★ - 온도/잔류응력 해석결과 및 ABAQUS 이용 수소확산 해석</p> <p>○잔류응력/수소기인균열 완화방안 도출★ - 최적 민감도 분석 조건 도출 - ABAQUS 를 이용하여 용접변수에 대한 잔류응력/수소기인균열 민감도 분석 - 후열처리 온도 지속시간, 두께, 초기 잔류응력 크기 등의 효능 및 적용성 검토</p> <p>○잔류응력/수소기인균열 해석 DB/전문가 시스템 초안 구축 - 통합 건전성평가 시스템과의 연계방안을 고려한 개별 Logic 설계 - 최적의 개발 Tool 을 선정하여 잔류응력/수소기인균열 해석 모듈 개발 - Web 기반으로 구축, 홈페이지와 연계 추진</p>

[주] ★: 핵심 미자립 기술 (타 항목도 부분적 기술 미자립 상태)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

본 1 단계 연구는 원전설비 용접부 건전성평가 기술의 효율적 개발을 위한 상세 연구계획 수립과 실제 용접 현상/과정을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측기술 및 잔류응력 해석기술 개발의 두 세부연구과제로 나눌 수 있다. 이러한 세부연구과제들 중 하나인 상세 연구계획 수립을 위해 원전설비 용접부 건전성평가 기술 전체에 대한 국내외 기술개발 현황을 고찰하였으며 이에 대한 고찰 내용은 제 3 장에서 제시되어질 것이다. 따라서 본 장에서는 당해단계의 다른 세부연구과제인 실제 용접 현상/과정을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발과 잔류응력 해석 기술과 관련된 국내외 기술개발 현황을 국내외로 분류하여 고찰 제시하고자 한다.

제 1 절 국외 연구동향

1. 기존 연구 검토

실제 용접 현상/과정을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측 및 잔류응력 해석 기술과 직간접적으로 관련이 되는 기존 연구들을 온도 및 유체유동 해석, 금속 조직/성분 변화 예측 및 잔류응력 해석으로 분류하여 검토한 결과는 다음 아래와 같다.

가. 온도 및 유체유동 해석

용접부의 온도 및 유체유동 해석의 특징과 기존 연구의 현황은 다음과 같다.

○ 특징

- 아크의 열 효과는 용접 Pool의 유체역학과 결합되어진 Boltzmann 방정식들을 계산하는 것에 의해 모델화
- 용융 Pool 내의 유동 양식은 중력, 부력, 표면장력, 전자기력, Droplet 모멘트와 가스 유동에 의한 Drag Force와 같은 인자들에 의해 영향을 받음.
- 또한 이러한 인자들은 아크 전압, 전류, Shielding과 화학조성에 의해 영향을 받을 수 있음.
- 아크와 용접 Pool 사이의 결합 정도는 강함.

○ 연구현황

- Rosenthal[10,11]: 열전도에 근거하여 2,3 차원 열 유동 이론적 해석식 개발
- Christensen 등[21]: 용융부 (FZ: Fusion Zone) 깊이 및 용접조건을 무차원화 시키고 이러한 무차원 변수들 사이의 관계식을 도출
- Chandel 등[22], Shinoda와 Masumoto[23], Pardo와 Weckman[24], Tekriwal 등[25]: 경험적, 준경험적으로 FZ 형상을 결정하거나 열적 해석을 통해 유체 유동의 예측 없이 FZ 형상 결정
- Kou 등[26], Matsunawa 등[27]: 유체 유동 및 FZ 형상 예측
- Gu 등[28]: 복잡한 Pool 형상에 대해 Eulerian Reference Frame이 보다 효과적임.
- Goldak 등[29]: 정상적인 아크용접에서는 그림 1(b)와 같은 Double Ellipsoidal 열유속이 유용

하다고 결정하였음.

- Barlow[30] : Prescribed 온도 열원 모델로 두개의 용접 Pool 이 발생하는 SMAW 을 모델링
- Dong 등[12] : 여러 개의 용접 Pass 가 하나의 용접 Layer 로 Grouping 되어 용접 되어진다고 가정하는 Lumped 모델의 유용성 제시

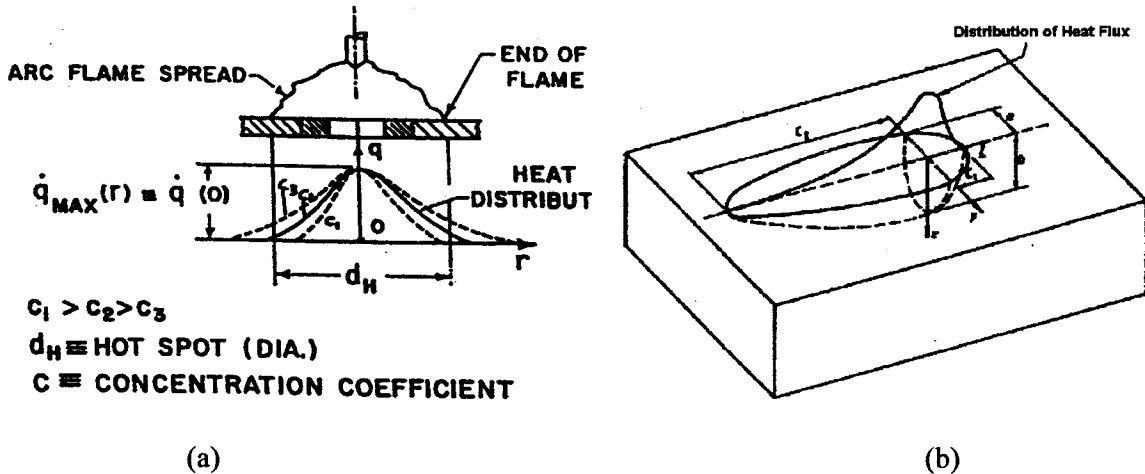


그림 1. 용접 열원으로부터의 열 유속 분포

(a) Normal Gaussian 분포 모델

(b) Double Ellipsoidal 모델

나. 금속 조직/성분 변화 예측

용접부의 금속 조직/성분 변화 예측의 특징과 기존 연구의 현황은 다음과 같다.

○ 특징

- 용접 구조물로 이용되는 강의 경우, 가열률이 높다고 해도 과열정도가 개략적으로 (일반적으로) 80°C 이므로 상변태가 평형상태에서 발생한다는 것은 타당함.
- 냉각 시는 비등온 상 변태 확산이론의 예측이 필요

○ 연구현황

- Goldak 등[31] : Kirkaldy 등[32]의 연구에 근거하여 오스테나이트 결정립 성장률을 결정립 크기, 과냉도, 확산도, 현 상분율 등이 포함된 상미분 방정식들로 표현함.
- Buchmeyer 와 Cerjak[33] : 개별적 상들의 경도와 상분율로부터 경도를 평가함.
- Oddy 와 Chandel[34] : 연속적인 템퍼링(Tempering)과 연화(Softening)가 발생하는 다층 육성 용접부의 경도 평가
- Bhadeshia 등[35~37] : 평형 상태도, 상분율, TTT(Time Temperature Transformation) 선도, CCT (Continuous Cooling Transformation) 선도 결정 등 강의 상변태 거동과 관련된 이론적/준경험적 연구인 MAP(Material Algorithm Project) 수행

- David 와 Babu[38~40] : 그림 2 에서 보이는 바와 같은 용접부의 금속 조직/성분 예측을 위한 분석적, 실험적 및 수치 해석적인 종합 예측 모델을 개발하였음.

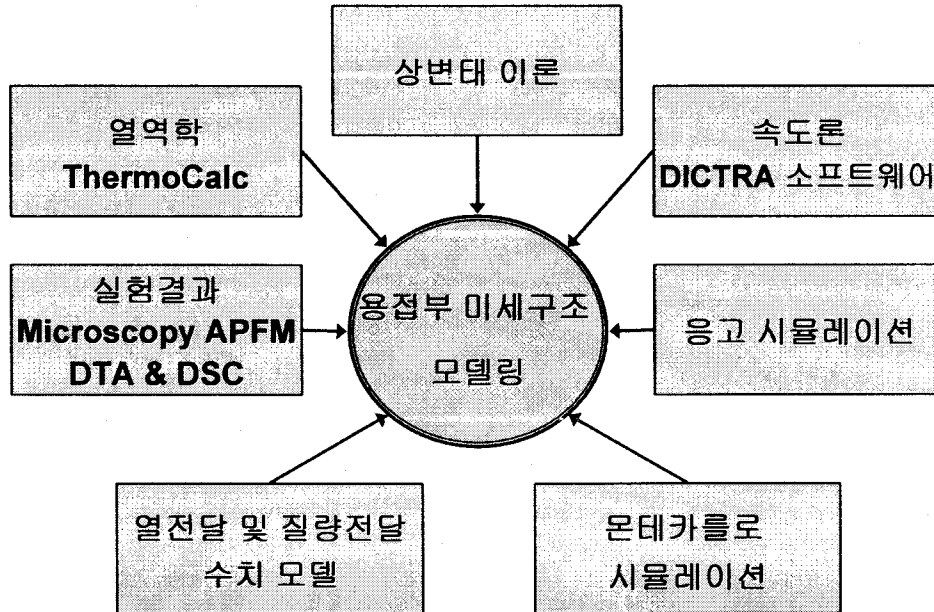


그림 2. ORNL 의 용접부 금속 조직/성분 예측 종합 모델

다. 잔류응력 해석

용접부의 잔류응력 해석의 특징과 기존 연구의 현황은 다음과 같다.

○ 특징

- 용접 잔류응력은 체적변태, 소성변태, 재용융시 어닐링 효과, 기계적 물성 변화 등 금속 조직 변화에도 영향을 받으나 구조물의 구속조건에 가장 큰 영향을 받음.
- 최근에는 상용 유한요소 패키지를 보다 효율적으로 활용하는데 초점을 맞추고 있음.

○ 연구현황

- Goldak 등[31] : 체적변태, 소성변태를 고려한 잔류응력 해석을 위한 탄소성 구성 거동 방정식 제시
- Leblond 등[41] : A508 강의 금속조직 변화 예측과 연계된 소성변태를 고려한 잔류응력 해석 프로그램 개발
- Bouchard 와 Bradford[42] : 단일 비드 보수 용접부의 잔류응력 해석을 위한 다양한 3 차원 유한요소 모델 개발
- Dong 등[43] : 체적변태, 소성변태 및 어닐링을 고려한 사용자 정의 보조 프로그램 및 3 차원 유한요소 잔류응력해석의 원활한 수행을 위한 복합재 셀 요소 개발

2. 국가별 최신 연구동향

국외 선진 연구기관에서는 최근 들어 단지 금속조직을 예측하고 잔류응력을 해석하는 것에 그치지 않고 그림 3 에서 보이는 바와 같이 최근 컴퓨터 시뮬레이션 응용 및 DB 구축을 통한 용접부 금속 조직/성분 예측기술 및 잔류응력 해석기술 개발이 적극 추진되고 있으며 용접과 관련된 다양한 상용 코드(Sysweld[44], WeldTran[45], WeldaSpec[46], WeldaCoord[46] 등)가 개발되어 판매되고 있다.

각 국가별로 좀더 자세히 검토하면 다음과 같다.

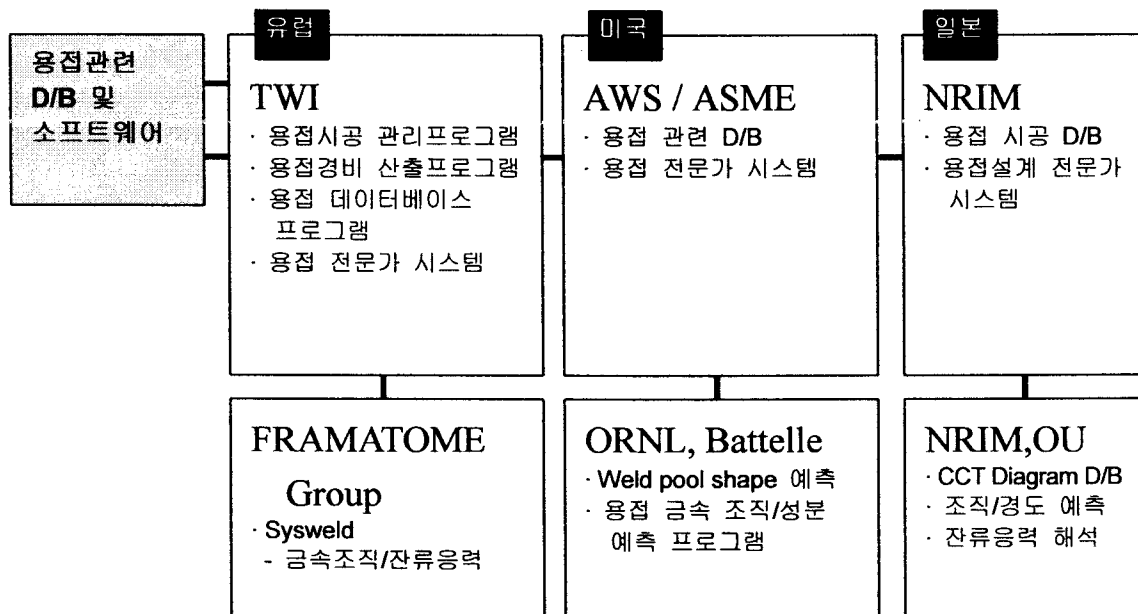


그림 3. 국가별 최신 연구동향

가. 미국

ORNL[38]와 Battelle[45]의 주도로 용접시 금속 조직/성분 변화와 잔류응력에 대한 연구를 수행하고 있다. 두 기관에서 수행되고 있는 최신 연구는 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

○ ORNL

- 현재까지 가장 상세하고 진전된 연구 수행
- 미시적인 관점에서 금속 조직/성분 변화를 연구
- 강의 조성, 오스테나이트 온도, 최대/최소 냉각속도를 입력함으로써 재료의 연속 냉각 변태 곡선, 등온 변태 곡선과 미세 조직 및 경도를 제공하는 인터넷 사이트 운영
- 해석결과를 원전설비의 용접법과 용접부에 적용하기에는 제한성 존재

○ Battelle

- 거시적인 관점에서 잔류응력 해석시 금속조직 변화의 영향을 고찰하기 위해 연구 수행

- 용접 잔류응력 해석과 관련된 연구 활발
- 강의 조성, 오스테나이트 변태 온도, 최대/최소 냉각속도를 입력함으로써 재료의 TTT/CCT 선도와 미세조직 및 경도를 결정할 수 있는 WeldTran 개발(미세조직 예측시 제한성 있음.)
- WeldTran 을 ABAQUS 사용자 정의 보조 프로그램인 UMAT 와 결합하여 금속조직 변화를 고려한 잔류응력 해석을 대형 용접 구조물에 수행하고 있음.

나. 기타 나라

일본에서는 NRIM (National Research Institute for Metals)[47]과 OU (Osaka University)[48], 유럽에서는 프랑스의 Framatome[44]와 영국의 TWI[46]가 주도적으로 용접부의 금속 조직/성분 변화 및 잔류응력에 대한 연구를 수행하고 있다. 이들 기관에서 수행되고 있는 최신 연구는 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

○ NRIM

- 최근에는 연구내용을 인터넷 상에 제공
- 이론적 접근 없이 실험에 의해 CCT 선도를 DB 화하고 내삽하여 임의의 냉각속도에 대한 미세조직의 정량적 계산 수행
- 실험 조직과 용접 조건에 대해서는 매우 정확한 예측이 가능하지만 임의의 용접 조건에 대해서는 단지 정성적인 예측만 가능

○ OU

- 최근에는 금속조직 변화를 고려한 잔류응력 해석 연구를 활발히 수행
- 시편 또는 소형 용접구조물 수준의 잔류응력 해석으로 아직 대형 용접 구조물에는 적용하기에는 부적합

○ Framatome

- 세계에서 현재 유일한 상 변태 고려 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석 상용 FEM 코드인 Sysweld 를 개발하였음.
- 원자로 열 영향부의 잔류 응력을 해석하기위해 70년대 말부터 제작
- FEM 에 의한 열분포 해석과 야금학적 모델에 의한 상분율 해석의 상호 작용 고려 가능
- 다양한 형태의 구조에 적용이 가능할 뿐만 아니라 GUI(Graphics User Interface)를 채용하여 사용자의 편의를 강조하고 있음.
- 프로그램 구조의 복잡성으로 인해 사용 방법 습득에 많은 시간이 필요할 뿐만 아니라 또한 상 변태 현상을 고려하기 위해 실험에 의한 CCT 선도 DB 를 필요로 하고 있음.

○ TWI

- 이론적 접근 없이 실험에 의해 CCT 선도를 결정하여 실험한 조직과 용접 조건에 대해서는 매우 정확한 예측이 가능하지만 임의의 용접 조건에 대해서는 단지 정성적인 예측만 가능
- 금속조직 변화 예측용 상용프로그램은 아직 개발되어있지 않으며 용접절차 전문가시스템인 WeldaSpec/WeldaCoord 에서 용접법에 따른 금속조직 변화 제한치 등 일부 내용만이 제시
- ABAQUS 를 사용, 각종 원전설비 용접부의 잔류응력을 해석하고 있음.

제 2 절 국내 연구동향

용접부 금속 조직/성분 변화 예측 및 잔류응력 해석과 관련된 국내 연구들은 대부분 실험 연구들로서 이론적/준경험적 해석연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한, KAERI, POSCO, KAIST 등 몇몇 기관에서 용접부 금속조직 변화에 대한 DB 구축과 잔류응력 해석 프로그램 개발을 추진 중에 있으나, 실험을 통해 금속조직 변화 DB를 구축하기 때문에 금속조직 변화 예측시 시간적/경제적인 비효율성이 존재하며, 대형 용접 구조물의 잔류응력 해석시 계산 알고리즘이 복잡하기 때문에 시간적 제한성이 존재한다. 특히, 새로운 용접법 및 재료에 대한 금속조직 변화를 개발될 DB로 예측시 단지 정성적인 평가만이 가능할 것이다. 각 기관별로 수행한 연구에 대한 개략적 내용은 다음과 같다.

○ KAERI

- 원자력 압력용기 강인 SA508 Class 1 의 열 영향부(HAZ : Heat Affected Zone) 금속조직과 재료물성치 사이의 상호관계에 대한 실험적 연구[49,50] 수행
- KRISS 와 공동으로 SA508 Class 1 의 열처리에 대한 금속 열역학을 이용한 이론적 연구[51] 수행
- 최근에는 실험을 통해 원전설비 용접부의 금속조직 및 물성에 대한 DB 를 구축하고자 함.

○ POSCO[52]

- Fe-Cr-Ni 강 용접부 미세편석에 대한 FDM 해석 연구 수행
- 이러한 미세편석은 응고 시 비평형 응고에 의해 발생되어지므로 응고이론 적용
- 기존의 1 차원 모델을 발전시킨 2 차원 모델 개발
- Al-4.9wt.% Cu 합금의 일방향 응고 실험과 2024 Al 합금의 용접실험을 통해 타당성 검증
- 고체에서의 확산 변태에 대한 연구가 아니기 때문에 열 영향부의 금속조직 예측은 불가능

○ KAIST

- Sysweld 를 대체할 수 있는 용접 잔류응력 해석 프로그램을 개발[53] 수행
- 금속조직 변화를 고려한 잔류응력 해석 가능하나 대형 용접 구조물 적용에는 제한성 존재
- 최근에는 이러한 제한을 극복하기 위해 병렬 처리 방안 추진

제 3 절 개발기술의 현 위치

본 절에서는 당해단계 연구를 통해 개발될 용접부 금속 조직/성분 변화 예측기술과 잔류응력 해석기술이 국내외 기술개발 현황에서 차지하는 위치를 앞에서 검토 제시한 국내외 기술개발 현황을 토대로 분석하고자 한다.

국외 경우 상술한 바와 같이 본 연구실에서 개발하고자 하는 기술의 기초 부분을 이미 개발하여 적용하고 있으나 대형 용접구조물인 원전설비 용접부를 대상으로 하여 피로, 부식 등 손상평가와 연계시키기 위한 금속 조직/성분 변화 예측기술 및 잔류응력 해석기술은 아직 개발되어 있지 못한 실정이다. 따라서 본 연구를 통해 기술을 개발하고 이를 현장에 적용시 원전설비 용접부의 금속 조직/성분 변화 예측분야 및 잔류응력 해석분야를 선도할 수 있을 것으로 예상된다.

또한, 국내 경우 상술한 바와 같이 이론적/준경험적 해석 연구는 거의 전무한 실정으로 본 연구를 통해 이론적/준경험적 접근법을 이용한 금속 조직/성분 변화 예측기술 및 잔류응력 해석기술을 개발시 국내외 관련분야 기술력을 한단계 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 상세 연구계획 수립

본 연구과제의 성공적인 수행을 위해서는 원전설비 용접부 건전성평가와 관련된 최신 연구 동향 및 기존 기술기준/연구의 문제점을 고려한 상세 연구 계획 수립이 요구된다. 이러한 상세 연구 계획은 그림 4에 제시한 바와 같이 국내외 최신 연구동향 파악, 관련 자료 수집 및 분석, 기존 연구의 문제점 도출을 통해 수립되어지며 수립된 상세 연구계획을 토대로 연구기반이 되는 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 초안과 대외 협력/기술력 홍보 등을 위한 홈페이지가 구축 운영되어진다.

1. 기존 연구 동향 및 문제점 도출

본 항에서는 이미 국내외 기술개발 현황에 대해서 상술하였기 때문에 최신 연구동향 파악, 기술기준, 문헌 및 데이터 수집 분석과 기존 연구의 문제점 도출 순으로 서술하고자 한다.

가. 국내외 최신연구동향 파악

관련 학회 참석, 전문가 초청 세미나 개최, 선진 연구기관 방문 및 전문가 면담 등을 통해 최신 국내외 연구동향을 파악하였다. 본 항에서는 선진 연구기관 방문 및 전문가 면담을 중심으로 파악한 최신 국내외 연구동향을 국내외로 분류하여 제시하고자 한다.

1) 국외 최신 연구동향 파악

용접부 건전성평가 관련 연구의 선도적 위치에 있는 미국의 Battelle Memorial Institute 와 영국의 TWI 를 방문, 관련 분야 전문가들과 면담 토론하여 국외 최신 연구동향을 파악하였다.

○ Battelle Memorial Institute

- 기관 설명

71 년 전 Mr. Battelle 의 기부로 “Putting Technology to Work”라는 모토아래 미국 오하이오주 콜롬버스에 설립된 비영리 연구소로서 미국 내 국립연구소들(PNNL, BNL, ORNL 등)을 관리할 정도로 미국 내 연구분야에서 선도적 위치를 점하고 있다. 특히, 용접부 잔류응력 해석 분야에서 세계적으로 가장 앞선 기술을 보유하고 있는 연구 집단인 Center for Welded Structures Research 가 소속되어 있다.

- 전문가 면담 토론 내용

표 3 과 같이 잔류응력 분포를 결정하기 위한 온도해석/금속조직 예측기술과 고온 균열(Hot Cracking) 완화방안에 대해 토론하였다.

◆ 최신 연구동향

면담 토론을 통해 다음 아래와 같은 최신 연구동향을 파악하였다.

- ▶ 다양한 용접부에 대한 잔류응력 분포의 일반 범주화 및 국부적 후열처리 적용에 대한 국제공동연구 예정
- ▶ 유한요소 Mesh 크기 및 분포에 둔감한 잔류응력 및 구조적 응력 해석기법 개발 중
- ▶ 계산시간 절약을 위해 이론적 온도해석 기법을 개발하였고 대형 실구조물에 적용 중
- ▶ 잔류응력 해석의 경제성을 향상시키기 위해 열전도 근거 모델 및 Lumped 모델 이용 추세
- ▶ 온도, 금속조직 및 잔류응력 사이의 상호작용을 모사하고 실제 구조물 해석에 적용

○ TWI

- 기관 설명

영국 캠브리지 소재의 TWI는 용접 및 접합과 관련된 폭 넓고 깊이 있는 연구를 1923 년 이래 수행하였으며 용접 관련 자료에 대한 DB인 Weldasearch[46] 운영 및 자문을 Industrial Member 형태로 전세계 산업체를 대상으로 운영하고 있다. 특히, 마찰/레이저 용접법 등 신개념의 용접법 개발/용접부 건전성평가 분야에서 세계적으로 가장 앞선 기술을 보유하고 있다.

- 전문가 면담 토론 내용

표 4 와 같이 RII(Risk Informed Inspection), 유한 요소법을 이용한 잔류응력 해석, 금속조직 예측 및 비파괴 검사의 신뢰성 확보방안에 대해 토론하였다.

- 최신 연구동향

면담 토론을 통해 다음 아래와 같은 최신 연구동향을 파악하였다.

- ◆ 유럽에서의 최신 RII 적용 연구
- ◆ EC(European Commission) 주관하에 “해석방법에 따른 노화된 기기 용접부의 잔류응력 분포 변이”를 주제로 수행 중인 VORSAC Project 내용 파악
- ◆ 이종재 용접부의 후열처리 미적용 및 잔류응력 분포의 문제점 해결을 위한 연구 추진 중
- ◆ 용접 후 수소기인균열이 발생할 때까지 비파괴 검사를 대기하는 시간을 단축하려는 연구
- ◆ 캠브리지 대학에서 대외적으로 개방하는 MAP 자료 활용성 인지

2) 국내 최신 연구동향 파악

용접부 건전성평가 관련 분야 학회 참석, 국내 전문가 초청 세미나 개최 및 전문가 면담 토론을 통하여 다음 아래와 같이 국내 최신 연구동향을 파악하였다.

- 원자로 압력용기 용접부의 금속조직 변화를 실험적 접근법을 사용하여 평가 (KAERI)
- 어닐링/상변태 변형률을 고려치 못한 상태의 잔류응력 유한요소 해석 (성균관대)
- 용접부 HAZ 부의 파괴인성치 변화에 대한 연구 활발히 진행 중 (중앙대, 경희대)
- 응력부식균열 개시시간에 대한 무차원화 기법 개발 (서울대)
- 이종재 용접부의 응력부식균열 평가의 필요성 인지

표 3. Battelle 전문가와의 면담

성명	소속/직위	면담 토론 내용
Dr. Dong	Center for Welded Structures Research/ Technical Director	<ul style="list-style-type: none"> - PVRC/MPC JIP (Joint Industry Project) - 잔류응력 분포 및 국부적 후열처리 적용 - Battelle Weld JIP - Mesh 크기 및 분포에 둔감한 FEM 기법 개발 - S-N 선도를 이용한 피로수명 평가
Dr. Cao	Center for Welded Structures Research/ Research Scientist	<ul style="list-style-type: none"> - 이론적 용접부 온도해석 기술 - Fourier Series 와 중첩이론 이용 - 거대한 구조물 적용 시 효율적 (계산시간 절약)
Dr. Hong	Center for Welded Structures Research/ Research Scientist	<ul style="list-style-type: none"> - ABAQUS 를 이용한 용접부 온도해석 및 잔류 응력 해석기술 - 용접 Pool 내 열대류 효과는 열전도 근거 모델이용 - 여러 개의 용접 Pass 를 하나의 Layer 로 가정하여 해석하는 Lumped 모델이용 - 고주파 저항용접 해석 어려움 - 용접금속 용착시의 열 경계조건 - 이차원 모델과 삼차원 모델의 차이점 - 열 탄소성 거동 구성방정식
Dr. Yang	Center for Welded Structures Research/ Research Scientist	<ul style="list-style-type: none"> - 고온 균열 완화방안 - 롤링 및 급속냉각법 적용 - 압축응력 작용
Dr. Lu	Center for Welded Structures Research/ Research Scientist	<ul style="list-style-type: none"> - 미세 금속조직 예측기술 - WeldTran (자체 개발 코드) 소개 - TTT 선도 구한 후 CCT 선도 계산 - CCT 선도에 냉각곡선 중첩하여 석출 상 분포 결정

표 4. TWI 전문가와의 면담

성명	소속/직위	면담 토론 내용
Dr. Cane	Power & Process Sector/ Sector Manager	<ul style="list-style-type: none"> - RII 기법 - TWI 개발 프로그램 RiskWise 소개 및 토론 - 적용 시 이득 및 적용사례 소개 - 가중치 결정법
Dr. Leggatt	Finite Element Section/ Section Manager	<ul style="list-style-type: none"> - 유한요소법을 이용한 잔류응력 해석 기술 - ABAQUS 이용 - 노즐부 해석사례 소개 - VORSAC (Variation Of Residual Stress in Aged Component) Project 소개 - 이종재 용접부의 잔류응력 측면에서의 문제점
Dr. Khalid	Inspection Section/ Section Manager	<ul style="list-style-type: none"> - 지하매설 배관의 비파괴 검사 기법 - 초음파 이용 - 신뢰성 확보를 위한 기구 개발
Dr. Woollin	Corrosion, Stainless Steel and Nonferrous Metals/ Section Manager	<ul style="list-style-type: none"> - 부식 평가 기법 - 수소기인균열 발생 대기시간 단축방안 - 금속조직 변화 예측기술 - MAP (Material Algorithm Project) 소개, ThermoCalc 의 장단점 토론

나. 용접관련 기술기준, 문헌 및 데이터 수집 분석

본 항에서는 원전설비 용접과 관련된 기존의 기술기준 및 연구의 문제점을 도출하기 위해 기술기준 및 기존 연구의 문헌/자료 등을 검토한 결과를 제시하고자 한다.

1) 기술기준 검토

기술기준이란 표준화 및 품질보증의 목적을 달성하기 위해 전문화되고 단순화되어진 규격 및 표준 등을 의미하며 기술기준은 현재 연구되어 개발 중인 내용으로 구성되는 것이 아니라 공적인 검증을 이미 거친 실제 현장에서 현재 적용되어야 할 내용으로 구성되어진다. 따라서 현재 원전설비 용접에 실제 적용되어지는 기술기준, 즉 규격을 검토함으로써 용접 현장의 현황 및 문제점을 파악할 수 있다. 용접과 관련된 규격은 표 5 에서 제시되고 있는 것 같이 나라별, 단체별로 다양하나 본 항에서는 국내 원전설비 용접과의 관련성을 고려하여 한국공업규격(KS), AWS 규격 및 ASME B&PV 규격을 개별적으로 검토 제시한 후 각 규격간 공통점 및 차이점을 비교 제시하고자 한다.

가) 한국공업규격

한국공업규격은 용접기구나 용접재료와 같은 제품 규격으로 되어 있기도 하며 또한 용접에 의해 만들어지는 제품 또는 부품의 품질 확보나 경제성을 지향하는 규격으로 이루어졌다. 용접과 관련된 한국공업규격들을 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

- B0106 : 용접사 기량검증
- B0428 : 절단가공 및 홈가공
- B0845, B0844 : 시험검사
- B0876, B0878, B0884, C9605, P8142 : 가접, 예열, 용접 및 후열 처리
- B0885, B0886 : 용접 시공요령 및 용접시공법 확인을 통한 시공계획 수립
- B6211, B8152 : 용접 설계내역 검토 및 설계 명세
- D3515, D3560, D3550, D3612 : 용접 모재 및 재료에 대한 조달 및 확인
- 용접 시공법 확인
 - B0106 : 용접 용어
 - B0885 : 용접기술 검토에 있어서의 시험 방법 및 판정기준
- 절단가공 및 홈가공
 - B0428 : 가스절단 가공장판 보통 허용차
- 시험검사
 - B0844 : T형 필릿 용접 이음의 굽힘 시험 방법
 - B0845 : 강용접 이음부의 방사선 투과 시험 방법
- 가열/예열/용접 후열
 - B0876 : 아크손 용접 작업 표준 (박강판)
 - B0878 : 서브머지 아크 용접 작업 표준 (박강판)
 - B0884 : 용접부의 국부가열 응력 제거 방법
 - C9605 : 정류기식 직류아크 용접기
 - P8142 : 용접봉 보호면
- 용접 모재 및 재료

- D3515 : 용접구조용 압연강재
- D3560 : 보일러 및 압력용기용 탄소강 및 몰리브덴강 강판
- D3550 : 피복아크 용접봉심선
- D3612 : 스테인리스 강 아크용접 플럭스코어선

표 5. 세계 용접관련 단체와 용접관련 분야별 규격 제정현황

분야 \ 단체	KS*	JIS*	JWE**	AWS**	DIN*	DVS**	ISO**
적용대상/설계	5	23	0	32	34	28	8
용접법승인	4	11	8	27	10	47	3
용접재료	46	64	5	35	35	18	17
용접기	26	30	7	22	44	16	34
안전/위생	2	28	5	11	23	4	21
용접모재	60	69	9	0	28	0	28
비파괴시험	11	34	3	16	34	22	35
플라스틱	0	2	0	0	9	11	3
용어/기호	5	9	0	4	11	1	9
기계적 시험	34	44	7	0	8	8	10
용접작업표준	9	10	7	40	18	66	3
계	202	324	51	187	254	221	171

주) JWE : 일본용접학회, DVS : 독일용접학회, * : 국가규격, ** : 단체규격, *** : 국제규격

나) AWS 규격

AWS (American Welding Society)에서는 매우 많은 용접관련 규격 문서를 발간하고 있으며 이들 문서에는 Code, Specifications, Recommended Practices, Classifications, Methods 및 Guides 가 포함된다.

- 정의 및 기호 (Definition and Symbols)
- 용접봉 (Filler Metals)
- 인증 및 시험 (Qualification and Testing)
- 용접절차 (Welding Process)
- 용접응용 (Welding Application)
- 안전성 (Safety)

각각의 위 주제들에 대해 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

- 정의 및 기호
 - AWS A2.4 (Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination)
 - 이 문서에서는 도면에 표시되어야 할 용접, 납땜(Brazing) 및 비파괴시험 요건에 대한 기호들을 서술
 - AWS A3.0 (Standard Welding Terms and Definitions)

- 이 문서에서는 용접관련 작업 시 사용되는 표준용어 정의가 수록되어 있음

○ 용접봉 재료

- AWS 용접봉 규격(Specification)은 용접 및 납땜 시 사용되는 대다수 형태의 Consumable 을 취급함
- 규격에는 의무 및 비의무 조항에 관련된 내용이 수록되어 있음
 - 의무조항 : 화학적 성질, 기계적 성질, 제작, 시험, Packaging
 - 비의무조항 : 사용자에게 용접봉의 분류, 설명, 사용 용도에 대한 정보를 제공
- 대부분의 AWS 용접봉 규격은 ANSI 에 의해 승인을 받았고 ASME 에 의해 채택되었음.
- ASME 가 AWS 용접봉 규격을 그대로 받아들이거나 변경하여 받아들일 때 AWS 번호 앞에 SF 문자를 첨가함(예 : AWS A5.4, SFA 5.4).
- AWS 는 사용자가 용접봉을 구매할 때 도움을 주기위해 다음의 문서를 발행함.
 - AWS A5.01 Filler Metal Procurement Guidelines : 용접봉 성분 확인, 용접봉 분류, 용접봉 시험 항목에 대한 방법 제시
 - Filler Metal Composition Charts : 용접봉 회사 상품명으로부터 AWS 규격 등을 결정할 수 있도록 도와주는 도표

○ 인증 및 시험

- AWS B1.10, Guide for the Nondestructive Inspection of Welds
 - 이 규정에서는 용접부를 검사하기 위한 일반적인 비파괴 방법에 대해 설명하고 있음
 - 해당 검사로는 육안검사, 침투탐상시험, 자분탐상시험, 방사선투과시험, 초음파탐상시험, 와전류탐상시험이 있음
- AWS B2.1, Standard for Welding Procedure and Performance Qualification
 - 이 규정은 용접 절차, 용접사(Welders), 용접기사(Welding Operators)에게 요구되는 조항에 대해 설명하고 있음
 - 탄소강, 합금강, 주강 등의 모재에 적용
- AWS B2.2, Standard for Brazing Procedure and Performance Qualification
 - 이 규정은 Brazing 절차, Brazers, Brazing Operators 에게 요구되는 조항에 대해 설명
 - 이 규정으로 적용할 수 있는 모재로는 탄소강, 합금강, 주강 등이 있음.
- AWS B4.0, Standard Methods for Mechanical Testing of Welds
 - 이 규정은 Welded Joints, 용접성 및 고온 균열의 평가를 위해 사용되는 기본적인 기계적 시험에 대해 설명하고 있음
 - Butt Joint : 인장시험, 샤프충격시험, 하중낙하시험, Dynamic Tear 시험, Bend Type 시험
 - Fillet Weld : 파괴시험, 전단시험
- AWS C2.16, Guide for Thermal Spray Operator and Equipment Qualification
 - Thermal Spray 코팅을 적용하기 위해 필요한 작업자/기기의 인증에 관하여 서술하고 있음
- AWS C3.2, Standard Method for Evaluating the Strength of Brazed Joints in Shear
 - 이 규정은 Brazed Joint 에서 신뢰성 높은 전단강도를 얻기 위해 사용되는 시험 방법을

설명

- AWS D10.9, Specification for Qualification of Welding Procedures and Welders for Piping and Tubing

- 이 규정은 특히 배관 제품의 인증 시 적용됨
- Circumferential Groove 및 Fillet 용접 시 적용(Longitudinal Seams 은 제외)

○ 용접절차

- Resistance Welding

- AWS C1.1, Recommended Practices for Resistance Welding
- AWS C1.3, Recommended Practices for Resistance Welding Coated Low Carbon Steels

- Thermal Spray

- AWS C2.1, Thermal Spraying : Practice, Theory and Application
- AWS C2.2, Recommended Practices for Metallizing with Aluminum and zinc for Protection of Iron and Steel

- Brazing

- AWS C3.3, Recommended Practices for Design, Manufacture, and Inspection of Critical Brazed Components

- 아크 및 가스 용접/절단

- AWS C4.2, Operator's Manual for Oxyfuel Gas Cutting
- AWS C5.1, Recommended Practices for Plasma Arc Welding
- AWS C5.2, Recommended Practices for Plasma Arc Cutting
- AWS C5.3, Recommended Practices for Air Carbon-Arc Gouging and Cutting
- AWS C5.4, Recommended Practices for Stud Welding
- AWS C5.5, Recommended Practices for Gas Tungsten Arc Welding
- AWS C5.6, Recommended Practices for Gas Metal Arc Welding
- AWS C5.7, Recommended Practices for Electro gas Welding

○ 용접응용

- Structural

· AWS D1.1, Structural Welding Code-Steel

이 규정은 탄소강 및 저합금강 용접구조물에 적용할 수 있음

박판을 주요 구조물에 용접 시킬 경우 여기에 제시된 조항을 따름

D1.1 은 3mm 이하 두께의 압력용기, 압력배관 또는 모재에 적용 할 수 있도록 만들어진 규정이 아님

· AWS D1.2, Structural Welding Code-Aluminum

이 규정에는 Al 합금 구조물에 대한 용접 요건을 다루고 있음

· AWS D1.3, Structural Welding Code-Sheet Steel

이 규정은 Sheet 및 Strip Steel (5mm 이하의 두께)의 아크용접에 적용할 수 있음

· AWS D1.4, Structural Welding Code-Reinforcing Steel

▶ 이 규정은 Splices, Steel Connection Devices, Inserts, Anchors, Anchorage 용 Concrete Reinforcing Steel 용접에 적용할 수 있음

- Marine : AWS D3.5, Guide for Steel Hull Welding 등
- Automotive : AWS D8.4, Recommended Practices for Automotive Welding Design 등
- Sheet Metal : AWS D9.1, Specification for Welding of Sheet Metal
- Piping 및 Tubing
 - AWS D10.4, Recommended Practices for Welding of Aus. Chromium Nickel SS Piping & Tubing
 - AWS D10.7, Recommended Practices for Gas Shielded Arc Welding of Al and Al-Alloy Pipe
 - AWS D10.8, Recommended Practices for Welding of Cr-Mo Steel Piping and Tubing
 - AWS D10.10, Local Heat Treatment of Welds in Piping and Tubing
 - AWS D10.11, Recommended Practices and Procedures for Root Pass Welding and Gas Purging
 - AWS D10.12, Recommended Practices and Procedures for Welding of Plain Carbon Steel Pipe
 - AWS D10.13, Practices for Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Piping and Tubing
- Machinery 및 Equipment
 - AWS D14.1, Spec. for Welding Industrial and Mill Crane and Other Material Handling Equipment 등

○ 안전성

- AWS C2.1, Recommended Safe Practices for Thermal Spraying
- AWS F1.1, Method for Sampling Airborne Particulates Generated by Welding and Allied Processes
- AWS F1.2, Laboratory Method for Measuring Fume Generation Rates and Total Fume Emission for Welding and Allied Processes
- AWS F1.3, A Sampling Strategy Guide Evaluating Contaminants in the Welding Environments
- AWS F2.1, Recommended Safe Practices for Electron Beam Welding and Cutting
- AWS F4.1, Recommended Safe Practices for Preparation for Welding and Cutting Containers and Piping that have Held Hazardous Substances

표 6 은 용접공정에 따른 AWS 규격 구성을 제시하고 있다.

표 6. 용접공정에 따른 AWS 규격 구성

용접 공정	해당AWS 규격	제 목
1. 설계	AWS D 1.1	Structural Welding Code – Steel
2. 용접시공요령/용접 시공법 확인	AWS A 3.0	Standard Welding Terms and Definitions Including Terms for Brazing, Soldering, Thermal Spraying and Thermal Cutting
	AWS B 2.1	Specification for Welding Procedure and Performance Qualification
3. 용접모재 및 용접재료	AWS A 5.1	Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding
4. 가접/예열/용접/후열	AWS F 3.1	Guide for Welding Fume Control
5. 교정 및 결함보수	AWS B 1.11	Guide for the Visual Examination of Welds
	AWS B 1.10	Guide for the Nondestructive Inspection of Welds Supersedes AWS B1.0-77
6. 시험검사	AWS B 1.10	Guide for the Nondestructive Inspection of Welds Supersedes AWS B1.0-77
	AWS B 4.0	Qualification Standard Methods for Mechanical Testing of Welds

다) ASME B&PV 규격

ASME B&PV Committee 에서 제정 발간한 ASME B&PV 규격 내용 중 용접과 관련된 Section 은 II, III, IX, XI 으로 구분할 수 있으며 개략적인 내용은 다음과 같다.

- Section II Part C 는 용접재료에 대한 규격으로서 각종 용접법에 사용되는 전극, SFA 규격 요건 등이 명시되어 있음
- Section III 에는 안전관련 품목의 설계, 제작, 시험, 검사, 설치 시 적용되는 용접재료, 용접인정, 용접검사 요건이 Subsection NX-2400, 4300, 5200 에 명시되어 있음
- Section IX 에는 용접절차인정, 용접사 자격인정에 대한 사항이 명시되어 있으며 ASME Code 전체 Section 중에서 용접과 관련하여 가장 자세하게 언급하고 있음
- Section XI 에는 가동중검사 용접부 검사부위가 명시되어 있음

각 Section 별로 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

○ ASME Code Section II Part C

- 범위

- ASME Code Section II 는 자재사양으로서 Part A, B, C, D 로 구분되어 있음. 이중 Part C 가 용접재료에 대한 규격으로 다음 아래의 내용을 포함함.
 - ▶ 전극(Electrode) Specification, 전극 이용 용접법
 - ▶ 권고되는 저장요건
 - ▶ 권고되는 Polarity 및 전류
 - ▶ SFA 규격을 만족시키기 위한 정보

○ ASME Code Section III

- 범위

- ASME Code Section III 는 총 8 개의 Subsection 으로 구성되어 있으며 압력용기, 저장조, 배관, 밸브, 펌프, 지지물에 대한 설계, 제작, 시험, 검사, 설치 등에 대한 규정을 제공하고 있음

- 용접관련 사항

- NX-2400 : Welding Material
 - ▶ NX-2410 : 일반요건
 - ▶ NX-2420 : 요구되는 시험
 - ▶ NX-2430 : 기계적 성질, 화학분석 및 델타 페라이트 결정 등 용접금속 시험
 - ▶ NX-2440 : 용접재료의 저장 및 취급
- NX-4300 : Welding Qualifications, Records, and Identifying Stamps
 - ▶ NX-4310 : 일반요건
 - ▶ NX-4320 : 용접인정, 기록, 스탬프 확인
 - ▶ NX-4330 : 용접절차인정 시험의 일반요건

- ▶ NX-4350 : 튜브-튜브시트 용접 인정요건
- ▶ NX-4360 : 용접밀봉 인정요건
- NX-4600 : 후열처리 요건
- NX-5200 : 용접 검사
 - ▶ NX-5210 : 배관, 밸브, 펌프에서 축방향 용접부 이음 및 용기 용접 이음
 - ▶ NX-5220 : 배관, 밸브, 펌프에서 원주방향 용접부 이음 및 용기 용접 이음
 - ▶ NX-5230 : 범주 C
 - ▶ NX-5240 : 범주 D
 - ▶ NX-5250 : 기타

○ ASME Code Section IX

- 목적
 - ASME Code Section IX 용접인정(Welding Qualification)은 기기의 공급, 설치와 관련된 용접에 적용하여 기기의 용접에 있어 중요한 요소인 용접절차시방서(Welding Procedure Specification : WPS)의 인정 및 용접작업자의 자격인정에 대한 요건을 규정하고 있음.
- 일반요건
 - QA/QC 프로그램 요건의 문서화
 - ▶ Section I - A-300
 - ▶ Section IV - Appendix F
 - ▶ Section VIII, Div. 1 - Appendix 10
 - ▶ Section VIII, Div. 2 - Appendix 18
 - 용접제어
 - ▶ 도면에 명시된 대로 인정된 용접절차시방서를 따를 것, 자격 인정된 용접사, 용접 절차 시방서에 명시된 용접재료 사용, 스탬프 날인 혹은 용접사 식별기록 유지, 용접결함 검사, 비파괴검사 수행
- 절차인정
 - 용접절차시방서는 특정 용접을 실시하는데 있어 요구되는 상세한 용접조건을 명시한 문서로서 용접작업자가 용접을 실시하는데 필요한 지침을 제공함.
 - 절차인정기록서(Procedure Qualification Record : PQR)는 용접절차시방서를 인정하기 위한 시험용접부를 만드는데 사용한 실제 용접조건과 인정 실험 결과를 기록한 문서임.
 - ▶ 일반요건
 - : 용접절차시방서 내용
 - 용접절차시방서에 사용한 각 용접법에 대한 모든 필수변수, 비필수변수 및 추가 필수변수를 기술하고 용접절차시방서는 이를 입증하는 절차인정 기록서를 명시하여야 함.
 - : 절차인정기록서 작성방법
 - 절차인정기록서는 시험자의 용접에 사용한 용접데이터를 기록한 문서이며 시험자의 용접 중 기록한 용접변수에 대한 기록서임, 절차인정기록서는 시험

편에 대한 시험결과를 포함하고 있으며 기록한 변수는 일반적으로 용접에 사용하는 실제 용접변수의 범위 내에 있음.

: 용접절차시방서 인정시험

→ 용접절차시방서의 인정시험은 용접절차시방서에 따라 용접한 용접구조물이 요구되는 성질을 가지고 있는지를 확인하기 위하여 실시

✓ 인장, 굽힘, 필렛 용접, 충격, 스티드 용접 등의 기계시험,

✓ 방사선투과, 침투탐상 및 육안검사 등의 비파괴검사

▶ 모재 및 용접재료의 구분

: 용접절차시방서의 인정횟수를 줄이기 위하여 화학성분, 용접성, 기계적 성질 등에 따라 모재에 P-Number 를 지정하고 강, 합금강에 대해서는 P-Number 에 추가하여 그룹번호를 지정하고 있음.

: 모재의 종류별로 지정된 P-Number 는 표 7 과 같다.

▶ 용접절차시방서의 용접변수

: 용접절차시방서의 용접변수는 각 용접법에 대하여 필수, 추가필수, 비필수변수로 구분됨.

: 필수변수

→ 용접부의 기계적 성질에 영향을 미치는 용접조건으로 P-Number, 용접법, 용가재, 예열 및 후열처리 조건임.

: 추가필수변수

→ 용접 조건의 변경이 용접부의 파괴인성에 영향을 미치는 것

→ 필수 변수에 추가 되는 것으로 용접법, 수직상진 용접, 수직하진 용접, 입열, 예열, 후열처리 등임.

: 비필수변수

→ 용접조건의 변경으로 기계적 성질에 영향을 미치지 않는 것

→ 이음현상, 뒷면 가우징 방법 및 청소 방법 등임.

용접시공

용접법

▶ 용접법의 종류 및 구분은 표 8 과 같음.

용접 검사

재료가 코드 및 설계기준 및 규격을 만족하는지 검사, 문제예방을 위한 루트패스 검사, 용접부 내외측 육안검사, NDE, 적절한 문서화

용접작업자의 자격인정기록서

용접작업자가 용접절차시방서를 사용할 수 있는 능력이 있음을 보이기 위해 공급자에 의해 인정된 용접작업자를 기록하는데 사용되는 문서로서 다음 아래의 내용이 포함되어야 함.

▶ 실제 필수변수 및 시험결과, 용접작업자 인정범위 및 기타 정보

○ ASME Code Section XI

- 범위
 - ASME Code Section XI 은 원전 기기의 가동중검사 요건을 명시하고 있음.
- 구성
 - ASME Code Section XI 은 3 개의 Division 으로 구성되어 있음.
 - 이 중 Div 1 이 가압경수로에 적용되며 부분으로서 Subsection IWA, IWB, IWC, IWD, IWE IWF, IWP, IWV 로 구성됨.
- 용접 관련사항
 - ASME Code Section XI 에서는 검사가 요구되는 가동중 원전 기기의 용접부 명시
 - 표 9 와 10 은 각각 안전 1 등급과 2 등급 기기의 검사부위로서 대부분이 용접부임

표 7. P-Number

소재의 종류	구 분
강 및 합금강	P-1 ~ P-11, P-5A, 5B, 5C
알루미늄 및 알루미늄합금	P-21 ~ P-25
동 및 동합금	P-31 ~ P-35
니켈 및 니켈합금	P-41 ~ P-47
티타늄 및 티타늄합금	P-51 ~ P-53
지르코늄 및 지르코늄합금	P-61 ~ P-62

표 8. 용접법의 종류 및 구분

용접법	기호(구분)	비고
피복아크용접	SMAW	
가스메탈아크용접	GMAW	FCAM 포함
가스텅스텐아크용접	GTAW	
서브머지드아크용접	SAW	
일렉트로슬래그용접	ESW	
일렉트로가스용접	EGW	
플라즈마아크용접	PAW	
산소가스용접	OFW	
스터드용접	SW	
저항용접	RW	

표 9. 안전 1등급 기기 검사부위

검사 범주	검사 부위
B-A, B-B	압력용기의 압력유지 용접부
B-D	용기의 압력유지 노즐 용접부
B-E	용기의 부분 관통부 용접부
B-G-1	직경 2 인치 미만의 볼트
B-H, B-K-1	용기, 배관, 펌프, 밸브의 일체형 접합부
B-L-1, B-M-1	펌프, 밸브 용접부
B-L-2, B-M-2	펌프 케이싱 및 밸브 바디
B-N-1, B-N-2, B-N-3	원자로 용기의 내부표면 및 내부기기
B-O	제어봉구동하우징 용접부
B-P	압력유지 경계
B-Q	증기발생기 튜브

표 10. 안전 2 등급 기기 검사부위

검사 범주	검사 부위
C-A	압력용기의 압력유지 용접부
C-B	용기의 압력유지 노즐 용접부
C-C	용기, 배관, 펌프, 밸브의 일체형 접합부
C-D	직경 2 인치 이상의 압력유지 볼트부
C-F-1	오스테나이트 스테인레스강 및 고합금강 배관의 압력유지 용접부
C-F-2	탄소강 및 저합금강 배관의 압력유지 용접부
C-H	모든 압력유지 기기

라) 비교 검토

앞에서 제시한 기술기준 검토결과를 토대로 각 용접공정별로 KS, AWS, ASME B&PV 및 ISO 규격을 비교 제시하면 그림 5 와 같다. 그림에서 보이는 바와 같이 상당 부분 일치되거나 일부 차이점이 존재한다. 각 규격별 차이점을 정리하면 표 11 과 같다.

표 11. KS, AWS, ASME B&PV 및 ISO 규격별 차이점

규격	차이점
KS	○ 용접 교정, 결함보수 및 가동중검사에 대한 내용 미제시
AWS	○ 용접기술자, 절단/흠 가공 및 가동중검사에 대한 내용 미제시
ASME B&PV	○ 원전/화전/중화학 설비의 압력용기 및 배관 등 구조물의 용접에만 국한
	○ 용접기술자, 및 절단/흠 가공에 대한 내용 미제시
	○ 용접설계와 용접절차 자체에 대한 구체적 내용 미제시
ISO	○ 규격 특성상 가동중검사에 대한 내용 포함되어 있음
	○ 용접기술자에 대한 내용 제정 준비중임
	○ 가동중검사에 대한 내용 미제시

2) 기존 연구의 문헌 및 자료 검토

최신 연구를 포함하는 기존의 연구들을 검토함으로써 용접관련 기존 연구의 문제점을 파악할 수 있다. 용접 관련 기존 연구들을 크게 상태평가 기술개발과 손상평가 기술개발의 2 단계 7 과제로 구분하여 TWI DB 와 인터넷을 활용하여 200 여건 이상의 연구 논문, 보고서, 문헌 및 자료 등을 수집 검토한 결과를 표 12 에 요약 제시하고 있다.

표 12. 국내의 연구개발 종합표

구 분		국 외		국 내	
		국가(기관)	연구내용	기관	연구내용
용접부 상태 평가 기술 개발	금속 조직/성분 변화	미국(ORNL, Battelle 등) 캐나다(CU) 일본(NRIM 등) 영국(Cambridge, TWI) 프랑스(EdF, Framatome) 체코(VIAM) 슬로베니아(WRI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Thermocalc 을 이용한 용접부 미세조직 예측 ○ WeldTran 을 이용한 용접부의 거시적 금속조직 예측 ○ 강의 상변태 거동에 대한 열역학/확산이론/응고이론 등을 이용한 금속조직 예측 ○ 기초 실험데이터와 열역학/확산이론/응고이론 등을 이용한 용접부 금속조직 예측 ○ SYSWELD 를 이용하여 HAZ 부 금속조직 예측 ○ 용접부의 거시적 금속조직뿐만 아니라 미세조직 예측 및 실험 기술 개발 상태 	KAERI KRISS KEPRI 서울대 한양대 POSCO	<ul style="list-style-type: none"> ○ RPV 강 HAZ 부 금속조직과 물성 사이의 상호관계에 대한 실험연구 ○ RPV 강 열처리에 대한 이론적 연구 ○ 원전배관 저합금강재의 HAZ 금속 조직과 물성사이의 상호관계에 대한 실험 연구 ○ FeCr-Ni 강 용접부 미세편석에 대한 FDM 해석 ○ 용접부 미세조직 예측에 대한 체계적 이론적/준경험적 해석 기술 미개발 상태
	잔류응력	미국(Bechtel, GE, EWI, Battelle 등) 캐나다(CU) 일본(Hitachi, Osaka 대, JAPEIC 등) 영국(TWI) 프랑스(EdF, IdS) 독일(Siemens) 체코(VIAM) 슬로베니아(WRI)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배관 맞대기 용접 시 수축에 대한 단순화된 해석기법 개발 ○ 용접 잔류응력 분포에 대한 불확실성 해석 ○ 보다 실제적인 용접현상 및 과정과 재료상태를 고려한 ABAQUS 를 이용한 용접부 잔류응력 해석 ○ 단순화된 변형률을 이용한 압력용기 내 용접 배관 연결부의 잔류응력 해석 ○ 후판 용접부에 대한 단순화된 잔류응력 완화방안 평가법 개발 ○ 국부적 PWHT 의 최적 가열 조건 결정을 위한 FEM 해석 ○ CRDM 노즐 용접부의 잔류응력 FEM 해석 ○ 맞대기 용접부 잔류응력에 대한 재료물성치 효과 평가를 위한 FEM 해석 ○ ABAQUS 를 이용한 용접부 잔류응력 및 수축에 대한 3D 해석 ○ SYSWELD 를 이용하여 HAZ 잔류응력 해석 ○ 보다 실제적인 용접부 잔류응력 해석기술 개발 및 현장 적용 단계 	KOPEC 서울대 부산대 조선대 대우중 삼성항공 현대중 성균관 대	<ul style="list-style-type: none"> ○ 점용접시 잔류응력 해석 ○ 개략화된 재료물성치를 이용한 잔류응력 해석 ○ 용접부 잔류응력에 대한 실험 ○ 용접부 잔류응력에 미치는 예열효과와 FEM 해석 ○ 실험을 통한 최적 PWHT 또는 MSR 결정 ○ 상세한 상변태 및 어닐링 효과를 고려치 못한 해석 기법 적용 및 실험실 수준의 해석 연구 단계

구분	국 외		국 내		
	국가(기관)	연구내용	기관	연구내용	
용접부 손상 평가 기술 개발	피로	미국(ANL, Battelle 등) 일본(NRIM 등) 영국(TWI) 프랑스(EdF 등) 독일, 러시아	○ 환경영향을 고려한 방대한 피로 시험 수행, 결과분석, DB 구축 ○ 용접부 상태평가 기술을 토대로 한 피로해석 ○ 피로손상에 미치는 잔류 응력의 영향에 대한 해석적 연구 및 광범위한 실험 ○ 실제 용접부 상태를 고려한 피로 해석기법 개발, DB 구축 및 현장 적용 단계	KOPEC 홍익대 현대차 성균관 대	○ 피로수명 예측 프로그램개발 ○ 용접부 피로거동 중 잔류 응력 재분포에 대한 실험 ○ 점용접 인장시편의 피로거동 실험 ○ 점용접 박판의 부식피로강도 실험 ○ 실험실 수준의 연구로 산업 현장 미적용 단계
	부식	미국(EPRI 등) 일본(동경대 등) 영국(맨체스터대) 기타유럽국가	○ 실험결과, 보수이력, 해석 모델링 기법 및 통계 처리 기법을 이용한 부식 DB 구축 ○ 원전 2 차측 배관에 대한 부식 및 침부식 평가 연구 ○ 해석기법/통계처리 기법 개발, DB 구축 및 현장 적용 단계	KOPEC KAIST 한양대 KEPRI	○ 틸부식/공식 등 국부부식 개시단계 모델링 연구 ○ CASS 용착금속의 응고 모드가 공식 생성 및 성장에 미치는 영향에 대한 실험 ○ 일부 해석적기법을 개발했지만 실제 용접부 상태 미고려한 단계
	피로 균열 성장	미국(ORNL, Battelle 등) 일본 (동경대 등) 독일(GRS) 프랑스(EdF) 캐나다 (AECL) 영국(CEGB)	○ 배관, RPV, CANDU 압력관, 폐기물 보관탱크에 대한 결정론적 평가 수행 및 프로그램 개발 ○ 가압열충격시 RPV에 대한 확률론적 건전성 평가 프로그램 개발 ○ 용접부의 잔류응력이 가압열 충격시 원자로 압력 용기의 파손확률에 미치는 영향 연구 ○ 용접부의 파괴인성치와 금속조직 사이의 관계식 도출 해석 및 실험 ○ 실제 용접부 상태를 고려한 평가 프로그램 구축 및 현장 적용 단계	KOPEC KEPRI KAERI KAIST	○ 열유체 해석 결과를 토대로 VISA-II 코드를 이용한 확률론적 건전성평가 ○ RPV 강 용접부의 파괴인성치와 금속조직 사이의 관계식 도출 실험 ○ 환경영향을 고려한 피로균열성장모델 개발 및 실험 ○ 평가 프로그램 미개발 및 실제 용접부 상태 미고려 단계
	응력 부식 균열	미국 (EPRI, W 등) 프랑스(EdF) 일본(동북대) 기타 유럽국가	○ Alloy 600의 응력부식균열 발생 및 성장에 대한 통계적 평가 기법 개발 ○ 증기발생기 전열관에 대한 응력부식 균열 평가 ○ CRDM 노즐 용접부에 대한 응력부식 균열 평가 ○ 피막 특성과 기계적 변수(응력)사이의 관계 도출 ○ 실제 용접부 상태를 고려한 평가 DB 구축, 통계적 평가 기법 개발 및 현장 적용단계	KOPEC KEPRI KAERI 서울대 KAIST	○ Alloy 600의 응력부식균열 성장률 평가 프로그램개발 ○ 증기발생기 전열관에 대한 응력부식균열 기초 평가 ○ Alloy 600의 응력부식균열 발생 실험연구 ○ 용접부 응력부식균열 평가를 위한 새로운 실험 기법 개발 ○ 실험실 수준의 연구로 산업 현장 미적용 단계
	복합 손상	미국 (EPRI, W 등) 프랑스(EdF) 일본 기타 유럽국가	○ 크리프 및 피로의 복합 손상에 대한 광범위한 실험과 손상역학 적용 연구 ○ 조사취화 및 응력부식균열의 복합 손상에 대한 실험 연구 ○ 몇몇 경우의 복합 손상에 대해서만 파악 기술 개발 및 현장 적용	KOPEC KAERI KAIST	○ 크리프 및 피로의 복합 손상에 대한 광범위한 실험과 손상역학 적용 연구 ○ 조사취화 및 응력부식균열의 복합 손상에 대한 국외 연구결과 현장 적용 ○ 실험실 수준의 연구로 산업 현장 미적용 단계

다. 기존 결과에 대한 문제점 도출

앞 항에서 제시한 기존의 기술기준 및 연구 검토 결과를 토대로 문제점을 도출 제시하고자 한다. 도출된 문제점을 극복 또는 제거할 수 있는 상세 연구계획을 수립하는데 활용하고자 한다.

1) 기술기준의 문제점

앞 항에서 검토한 KS, AWS 및 ASME B&PV 규격에 대해 각각의 문제점을 표 13 과 같이 도출하였다. 원전설비 용접부 상태 및 손상평가 관점에서 살펴보면 표 13 처럼 KS 및 AWS 규격들은 단지 용접부 잔류응력, 후열처리(PWHT : Post Weld Heat Treatment) 및 보수용접 등이 필요 시 평가되어야 한다고 언급하고 있을 뿐 본 연구과제 수행 시 필수적인 상태 및 손상 평가 절차/기법 등이 제시되지 않고 있다. 또한, ASME B&PV Sec.XI 에 따른 가동중 검사 범위가 때에 따라서는 원전설비의 경제성 및 안전성을 저하시킬 수 있다고 최근 연구들에서 보고되고 있다.

따라서 본 과제 측면에서 기술기준 문제점을 해결하기 위한 대안은 다음 아래와 같으며 상세연구계획 수립에 반영되어질 것이다.

- 신뢰성 있고 경제적인 용접부 상태 및 손상평가 절차 개발
- 실제 용접 현상/과정 및 상태를 고려한 상태 및 손상 평가 절차 개발
- 경제성 및 안전성 향상을 위해 대상 용접부위 선정 시 확률론적 기법 적용

표 13. KS, AWS 및 ASME B&PV 규격 용접관련 사항의 문제점

규격 용접공정	KS	AWS	ASME B&PV
일반 사항	<ul style="list-style-type: none"> ○ 포괄적으로 작성되어 기술 발전에 맞춰 규격을 보수 운영하기 어려움 ○ 상태 및 손상에 대한 평가법 미제시 ○ 상태 및 손상에 대한 구체적인 평가법 미제시 ○ 상태 및 손상에 대한 보다 세밀한 평가법 미제시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 상태 및 손상에 대한 구체적인 평가법 미제시 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 상태 및 손상에 대한 보다 세밀한 평가법 미제시
용접 설계	-	-	○ 구체적인 내용 미제시
용접 기술자	-	○ 미제시	○ 미제시
용접모재 및 재료	○ 신 소재 개발 시 이를 포괄할 수 있는 체계 필요	-	-
절단/홈 가공	○ 용접 전단계 준비로 규격 제정 필요하나 미제시	○ 미제시	○ 미제시
용접 시공	○ 동적 특성 평가에 관한 내용 미제시	-	○ 구체적인 내용 미제시
교정/결함 보수	○ 보수대상의 판별기준이 불명확	-	-
가동중 검사	○ 미제시	○ 미제시	<ul style="list-style-type: none"> ○ 구체적인 해석절차 미제시 ○ 검사부위 선정시 때에 따라 경제성 및 안전성을 저하시킬 수 있다고 보고

2) 기존 연구의 문제점

앞 항에서 검토한 기존 연구들 각각의 문제점을 수행단계별로 살펴보면 표 14와 같다. 따라서 이와 같은 기존 연구 문제점을 해결하기 위한 대안을 표 15에 제시하고 있으며 이 또한 상세연구계획 수립에 반영되어질 것이다. 표 15에서 제시된 것처럼 해석 모델 개발이 우선적으로 필요할 것이며 해석결과의 신뢰성 확보를 위해 실험 및 이론적 검증절차 개발 및 적용 또한 모든 단계에서 필요할 것이다.

표 14. 국내외 기존 연구 문제점

구분		국 외	국 내
용접부 상태 평가 기술 개발	금속 조직/성분 변화	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실제 용접현상을 고려하지 않기때문에 정확한 결과 예측을 위해서는 광범위한 비경제적인 실험 연구 필요 ○ 입력자료 자체의 불확실성 큼. ○ 기존 해석프로그램(예 : ThermoCalc)은 평형상태를 기반으로 개발되었으나 용접 중 냉각동안을 평형 상태로 가정하여 이를 이용하는 것은 해석결과의 정확도에 문제 발생 가능 ○ 열전도 근거 열 유동 모델 이용 시 정확한 용융 Zone 크기 및 형상 예측 어려움 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실험 연구 위주로 해석 연구 미흡 ○ 용접부 미세조직 예측에 대한 체계적 해석기술 미개발 상태 ○ 실험실 수준의 연구
	잔류응력	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해석모델이 모든 실제 용접현상을 고려하지 않기때문에 정확한 결과 예측을 위해서는 광범위한 비경제적인 실험 연구 필요 ○ 다양한 용접부의 잔류응력 분포에 대한 일반 범주화 미흡 ○ 수소기인균열 발생 대기시간 단축방안 미흡 ○ 잔류응력 형태의 정량적인 정의에 대한 지식 기초 구축 미흡 ○ 대부분의 연구가 용접 전 소재의 가공 손상이 미고려된 잔류응력 해석 ○ 유한요소 패키지 및 해석수행자에 따라 해석 결과값의 편이가 큼 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실험 연구 위주로 해석 연구 미흡 ○ 상 변태 및 어닐링 효과를 고려치 못한 개략화된 재료 물성치를 이용하여 신뢰성이 떨어짐 ○ 실험실 수준의 연구
용접부 손상 평가 기술 개발	피로	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신뢰성과 효율성을 겸비한 통계처리 기법 미개발 ○ 피로 손상 시 잔류응력 저하에 대한 해석적 연구 미흡 ○ 전체 잔류응력 분포를 고려한 피로평가 미흡 ○ 용접 전 가공 및 용접동안의 손상을 고려한 피로평가 없음 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실험 연구 위주로 해석 연구 미흡 ○ 실제 용접부 금속조직 및 잔류응력 등 상태를 고려한 연구 미흡 ○ 실험실 수준의 연구
	부식	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신뢰성과 효율성을 겸비한 해석 모델 미개발 ○ 해석 모델 적용 시 부정확성 및 제한성 존재 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실제 용접부 금속조직 변화를 고려한 연구 미흡 하며 대부분은 실험 연구 ○ 해석적 기법에 대한 연구는 기초 수준 ○ 실험실 수준의 연구
	피로 균열 성장	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신뢰성과 효율성을 겸비한 통계처리 기법 미개발 ○ 균열성장 시 잔류응력 재분배에 대한 해석적 연구 미흡 ○ 전체 잔류응력 분포를 고려한 균열, LBB 및 확률론적 건전성 평가 미흡 ○ 용접 전 가공 및 용접동안의 손상을 고려한 FCG 평가 미흡 ○ 균열 성장 시 잔류응력의 재분배 고려 연구 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실험 연구 위주로 해석 연구 미흡 ○ 실제 용접부 금속조직 및 잔류응력 등 상태를 고려한 연구 미흡 ○ 실험실 수준의 연구
	응력부식균열	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신뢰성과 효율성을 겸비한 통계처리 기법 미개발 ○ 균열성장 시 잔류응력 재분배에 대한 해석적 연구 미흡 ○ 전체 잔류응력 분포를 고려한 균열 및 확률론적 건전성 평가 미흡 ○ 용접 전 가공 및 용접동안의 손상을 고려한 응력부식균열 발생 및 성장 평가 미흡 ○ 균열개시 해석 모델 적용 시 부정확성 및 제한성 존재 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 실험 연구 위주로 해석 연구 미흡 ○ 실제 용접부 금속조직 및 잔류응력 등 상태를 고려한 연구 미흡 ○ 실험실 수준의 연구
	복합손상	<ul style="list-style-type: none"> ○ 피로-크리프, 조사취화-응력부식균열을 제외한 복합 손상에 대한 해석적 모델 개발 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 피로-크리프를 제외한 복합 손상 연구 미흡 ○ 실제 용접부 금속조직 및 잔류응력 등 상태를 고려한 연구 미흡 ○ 실험실 수준의 연구

표 15. 국내외 기존 연구 문제점 해결을 위한 대안

구분		문제점 해결 대안
용접부 상태 평가 기술 개발	금속 조직/성분 변화	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해석의 경제성을 위해 열전도 근거 Lumped 모델 기법을 이용한 온도해석 ○ 금속 열역학, 확산이론 등 이론적 접근법 뿐만 아니라 기존 실험/해석 연구 결과를 이용한 이론적/준경험적 해석 모델 개발 ○ 불확실성 극복을 위한 민감도 해석 수행 ○ 용접 Pool 내 열 유동 현상을 반영한 열전도 근거 열 유동 모델 개발 ○ 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 실험 및 이론적 검증 절차 개발 및 적용
	잔류응력	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해석의 경제성을 위해 열전도 근거 Lumped 모델 기법을 이용한 온도해석 ○ 잔류응력 분포 일반 범주화를 위한 대상기기 용접부 선정 및 분류기법 개발 ○ 잔류응력 및 수소화산 등 영향인자를 고려한 수소기인균열 해석 모델 개발 ○ 어닐링 /상변태 변형률이 고려된 재료거동 구성방정식 개발 ○ 용접 전 보재의 가공 손상을 고려한 해석 수행 ○ 유한요소패키지 및 유한요소 특성에 따른 민감도 해석 ○ 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 실험 및 이론적 검증 절차 개발 및 적용
용접부 손상 평가 기술 개발	피로	<ul style="list-style-type: none"> ○ 손상역학과 결합된 통계처리 기법 개발 ○ 피로 손상 시 잔류응력 저하를 고려한 해석 모델 개발 ○ 전체 잔류응력 분포를 고려한 피로평가 수행 ○ 용접 전 가공 및 용접동안의 손상을 고려한 피로평가 수행 ○ 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 실험 및 이론적 검증 절차 개발 및 적용
	부식	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전류/이온 농도 등 영향인자를 고려한 이론적 해석 모델 개발 ○ 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 실험 및 이론적 검증 절차 개발 및 적용
	피로균열성장	<ul style="list-style-type: none"> ○ 손상역학과 결합된 통계처리 기법 개발 ○ 균열 성장에 따른 잔류응력 재분포를 고려한 해석 모델 개발 ○ 전체 잔류응력 분포를 고려한 피로균열성장 평가 수행 ○ 용접 전 가공 및 용접동안의 손상을 고려한 피로균열성장 평가 수행 ○ 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 실험 및 이론적 검증 절차 개발 및 적용
	응력부식균열	<ul style="list-style-type: none"> ○ 손상역학 및 Slip Dissolution 기법과 결합된 통계처리 기법 개발 ○ 균열 성장에 따른 잔류응력 재분포를 고려한 해석 모델 개발 ○ 전체 잔류응력 분포를 고려한 응력부식균열 평가 수행 ○ 용접 전 가공 및 용접동안의 손상을 고려한 응력부식균열 평가 수행 ○ 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 실험 및 이론적 검증 절차 개발 및 적용
복합손상	<ul style="list-style-type: none"> ○ 손상역학과 결합된 통계처리 기법 개발 ○ 손상들간 역학 관계 평가 모델 개발 ○ 해석 결과의 신뢰성 확보를 위해 실험 및 이론적 검증 절차 개발 및 적용 	

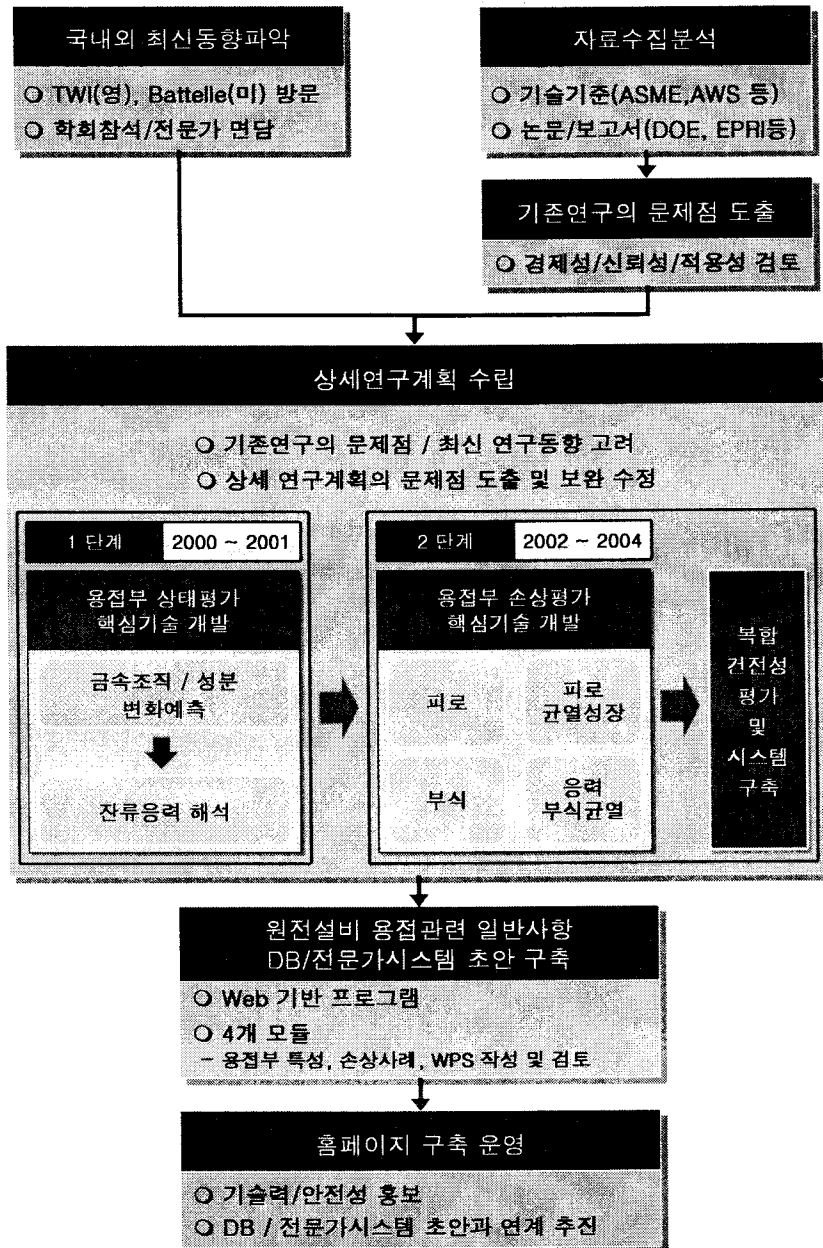


그림 4. 상세연구계획 수립방법

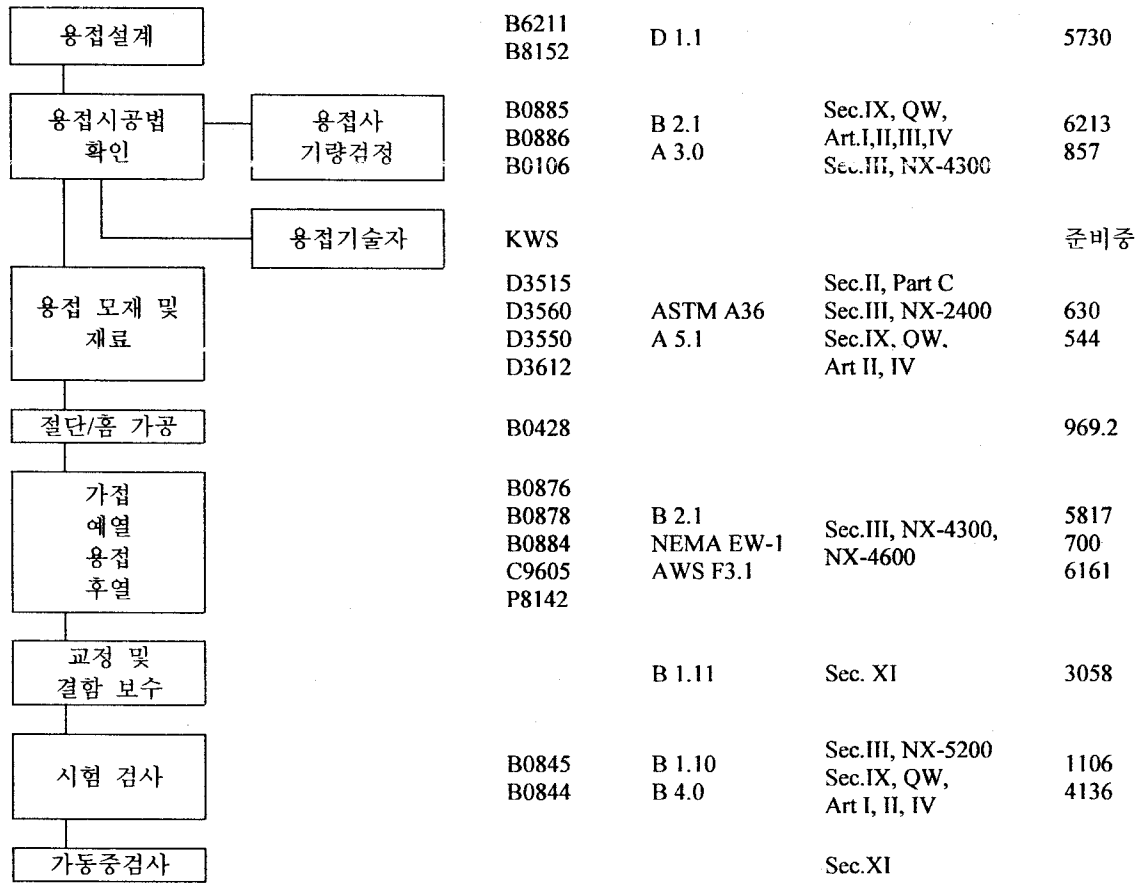


그림 5. 용접공정에 따른 적용 규격

2. 상세 연구계획 수립

용접 관련 기술기준 및 기존 연구들에 대한 검토 결과와 도출된 문제점과 최신 연구동향을 고려하여 효율적이면서 신뢰성있는 연구 수행을 위한 상세 연구계획을 각 연구 단계별로 수립 제시하고자 한다. 그림 6에서는 각 연구 단계 및 과제별 개념적인 상관 관계를 나타내고 있다. 그림 6에서 나타낸 바와 같이 2단계 7과제로 분류되어 상세 연구 계획이 수립되어진다.

가. 용접부 상태 평가 기술개발

1 단계 연구는 우선적으로 상세 연구계획을 수립한 후 실제 용접부의 금속 조직/성분 변화 및 잔류응력 등 상태 평가 기술 개발을 목표로 하며 2 단계 연구의 기반이 된다. 본 항에서는 실제적으로 연구가 수행되어지는 용접부의 금속 조직/성분 변화 및 잔류 응력 해석 기술개발의 두 과제에 대한 상세 연구계획을 제시하고자 한다. 두 과제 내 세부 항목별 상관관계를 나타내 그림 7에서 보는 바와 같이 온도해석은 금속 조직/성분 변화 및 잔류 응력에 영향을 미치므로 우선적으로 수행되어야 한다. 즉, 온도해석 결과는 금속 조직/성분 변화 예측 뿐만 아니라 잔류응력 해석 시 입력자료로써 사용되어진다. 또한, 금속 조직/성분 변화도 잔류응력 분포에 영향을 미치므로 잔류응력 해석 보다 먼저 금속 조직/성분 변화 예측기술이 개발되어야 한다. 최종적으로는 이러한 해석절차를 통해 양산된 결과들은 DB와 전문가시스템 초안 구축을 위한 기반 자료로써 활용되어진다. 이러한 상세 해석절차를 실제 원전설비 용접부의 상태 평가에 적용함으로써 실험적 접근법에 비하여 보다 효율적이고 경제적인 평가가 가능할 것으로 예상된다. 금속 조직/성분 변화 예측 기술과 잔류응력 해석 기술은 각각 그림 8와 9에 제시된 순서에 따라 개발되어질 것이다. 보다 상세한 수행방안은 표 16에서 제시되고 있다.

나. 용접부 손상 평가 기술개발

1 단계 연구가 실제 용접부의 금속 조직/성분 변화 및 잔류응력 등 상태를 평가하는 기술을 개발하는 것이라면 2 단계 연구는 이를 토대로 피로, 부식, 피로균열성장 및 응력부식 균열 등의 손상을 평가하는 기술을 개발하는 것이다. 또한, 2 단계 연구에서는 단일 손상평가 기술을 통합 평가하거나 복합 손상을 평가할 수 있는 기술을 개발하고 최종적으로 통합 평가 DB/전문가시스템 초안을 구축하는 것이다. 따라서 본 항에서는 각각의 단일 손상평가 기술개발과 복합 손상평가 기술개발의 과제 분야에 대한 상세연구방안을 제시하고자 한다. 그림 10은 1 단계에서의 개발할 용접부 상태 평가기술 및 2 단계에서 개발할 각각의 손상 평가기술 사이의 상관관계를 나타내고 있다. 각 단일 손상평가 기술들과 복합 손상평가 기술은 각각 그림 11, 12, 13에 제시된 순서에 따라 개발되어질 것이다. 아래의 그림들에서 보이는 바와 같이 개발 업무의 효율화를 동일 차년도에 수행되어지는 대상 손상들끼리(피로-부식, 피로균열성장-응력부식균열) 연관시켜 기술 개발 흐름도를 작성하였다. 보다 상세한 수행방안은 표 17에서 제시되고 있다.

표 16.1 단계 상세 연구방안 총괄표

차년도	연구개발 목표	기술구분	기술항목	개발, 운영 및 수립방안	연구실적물	비고
1 차 년도	[제 2 과제] 금속조직/ 성분변화 예측기술 개발	• 금속조직/ 성분 변화 예측 기술 개발	• 대상기기 용접부 선정	<ul style="list-style-type: none"> • 선정법 - 안전성, 손상사례, 용접특성, 경제성 - 가동중 검사 대상 여부, 보수/검사 용이성 	• 대상기기 용접부 자료	<ul style="list-style-type: none"> • 위탁실험 - 신문대 - '00.7.15~ '01.3.14 • 용접부 건전성 평가 연구회 개최 - '01.03 - 국제공동연구 - PVRC/MPC JIP - '00.12~'01.11(12 개월)
			• 열적/ 물리적/ 기계적 재료 물성치 결정	<ul style="list-style-type: none"> • 외부기관(신문대) 위탁 실험 및 결정 - 저합금강(압력용기강 SA508)으로 제한 - 광학 현미경/SEM 을 이용한 용접부위 금속 조직 관찰 - 밀도 측정기와 DSC 를 이용한 300°C 까지의 밀도/비열 측정 - 인장실험을 통한 300°C 까지의 탄성계수/ 항복 강도/인장강도/연신률/응력- 변형률 선도 측정 - 열팽창계수/프와송 비/열전도도/점성계수 결정 • TWIDB 를 활용, 자료 수집 분석하여 기계적/ 열적/물리적 재료물성치 결정 	<ul style="list-style-type: none"> • 위탁연구 보고서 • RPV 강 재료 물성치 자료 	
			• 유한요소 모델링	<ul style="list-style-type: none"> • 유한요소 모델링 전문 프로그램 PATRAN 이용 • 해석해의 신뢰성 확보를 위해 유한요소의 최적 형상 및 크기 분포 모델링 	<ul style="list-style-type: none"> • 축대칭 4 절점 유한 요소 모델 	
			• 실제 용접 현상/ 과정을 고려한 온도해석 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> • Battelle 에 연구원을 단기간 파견시키고 PVRC/MPC JIP 주관 국제공동연구에 참여하여 최신 온도해석 기술 습득 및 공동개발 - PVRC/MPC : Pressure Vessel Research Council/Material Properties Council - PVRC/MPC JIP 주제 : 잔류응력 분포 및 국부적 후열처리 적용유한요소 해석 전문 프로그램인 ABAQUS 이용 • 기본 해석모델 결정 - 기술기준 및 용접절차서 (WPS)를 참조하여 용접변수 결정 - 용접 시 경계조건 결정 - 용접변수 및 경계조건 결정시 품질보증 분야의 평가 필요 • 효율화 및 열 유체 유동효과 고려를 위한 열전도 근거 해석 이용 - 용접 Pool 내의 열유체 유동을 고려하기 위해 재료의 열전도도에 곱해지는 보정계수 결정 • 잠열 Option 을 이용하여 상변태/변화에 따른 잠열 흡수/방출과 같은 실제 용접현상 고려 • Model Change 기능을 이용하여 다층 육성 용접 및 후열처리와 같은 실제 용접과정 고려 • 기존 연구결과와 비교 후 수정 보완 		

차년도	연구개발 목표	기술구분	기술항목	개발, 운영 및 수립방안	연구실적물	비고
1 차 년도	[제 2 과제] 금속조직/ 성분변화 예측기술 개발	• 금속조직/ 성분 변화 예측 기술 개발	• 실제 용접 현상/ 과정을 고려한 온도해석 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> • Battelle 에 연구원을 단기간 파견시키고 PVRC / MPC JIP 주관 국제공동연구에 참여하여 최신 온도해석 기술 습득 및 공동 개발 • 기존 결정립 성장 실험식에 온도해석 결과를 대입하여 결정립 크기 결정 • 금속 열역학 계산 프로그램인 ThermoCalc 를 이용하여 평형상태에서의 상 변태점/분율 및 석출물 종류 결정 • 금속 확산 계산 프로그램인 DICTRA 와 Reaction Kinetics 모델을 이용하여 TTT 선도 결정 • Scheil-Avrami Additive 법칙에 의해 TTT 선도를 CCT 로 변환 • CCT 선도에 냉각과정 동안의 온도해석 결과를 중첩하여 HAZ 부의 상분포 예측 • DICTRA 를 이용하여 후열처리 시 탄화물 성장 평가 • 논문 발표/토론을 통해 각 상세기술의 타당성 재검토 	<ul style="list-style-type: none"> • 국외 교육 파견 보고서 • 국제공동 연구 보고서 • 용접부 금속조직 변화 예측기술/ 수행결과 • 자문보고서 	<ul style="list-style-type: none"> • 용접부 건전성평가 연구회 개최 - '01.4 월 • 국내외 자문 - 국내자문 • KIST 1 인 ('01.2-4) • 산업대 1 인 ('01.2) • 국제공동연구 - PVRC/MPC JIP • '00.12~'01.11 (12 개월)
			• 실제용접 현상/과정을 고려한 용접부 기계적 물성 결정기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 기존 실험 결과식 및 온도해석/금속조직 예측 결과를 이용한 경도, 항복강도 및 인장강도 결정 	<ul style="list-style-type: none"> • 용접부 기계적 물성 결정기술/ 수행결과 	
2 차 년도			• 예측기술 검증 보완 및 완화 방안 도출	<ul style="list-style-type: none"> • 위탁 검증실험 및 기존 연구결과 비교를 통한 검증 보완 - 용접과정 동안의 온도분포 - 용접부의 금속조직 관찰 - 기존결과와의 비교 및 내외부 토론을 통해 기술 보완 • Parametric 연구를 통한 용접변수에 따른 금속 조직/성분 변화 추이 분석 - 최적 민감도 분석 및 Parametric 연구 조건 도출 - 금속조직/성분 변화에 지배적인 용접변수/용접재 성분 도출 - 지배 용접변수에 따른 금속 조직/성분 변화 민감도 분석 - 예/후열처리 효능 및 적용성 검토 - 기존결과와의 비교, 전문가 자문 및 내외부 토론을 통해 보완 - 금속 조직/성분 변화 완화방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 용접부 금속조직/ 성분 변화 예측 기술 검증 및 Parametric 연구 결과 	
			• 금속 조직/성분 변화 예측 관련 DB/전문가 시스템 초안구축	<ul style="list-style-type: none"> • 주로 Parametric 연구결과를 활용하고 기존 연구결과도 이용 • 통합 건전성평가 전문가시스템과의 연계를 고려한 Logic 설계 • 최적의 개발 Tool 을 선정하여 금속 조직/성분 변화 예측 모듈 개발 • Web 기반으로 구축 홈페이지와 연계 추진 • DB/전문가 시스템 초안에 대해 품질보증 소분야의 평가 필요 	<ul style="list-style-type: none"> • 용접부 금속 조직/성분 변화 관련 DB/전문가 시스템 초안 	

차년도	연구개발 목표	기술구분	기술항목	개발, 운영 및 수립방안	연구실적물	비고
2 차 년도	[제 3 과제] 잔류 응력 해석 기술 개발	• 잔류 응력 해석 기술 개발	• 상태/손상 일반 범주화를 위한 대상기기 용접부 선정/분류 기법개발	• 민감도 순위 및 확률 기법 적용 • 파손확률, Risk 검토	• 선정/분류기법 및 적용 결과	• 위탁 재료물성 실험 - 선문대 - '01.7~'02.5 • 위탁 잔류응력 측정실험 - 산업대 - '01. 12 • 건전성평가 연구회 개최 - '01.9 • 국제공동 연구 - PVRC/MPC JIP - Battelle Weld JIP • Mesh 크기/ 분포에 둔감한 FEM 기법 개발 • 국내외 자문 - 국내자문 5 인 - 국외자문 • Battelle / TWI
			• 원전 전용 자동유한요소 모델링 프로그램 개발	• 잔류응력 유한요소 해석의 효율화를 위해 PATRAN 과 연계 추진	• 자동유한요소 모델링 프로그램	
			• 재료물성치/금속 조직 실험 및 결정	• 이종재료 용접금속 인코넬 82 에 대한 열적/물리적/기계적 재료물성치 고온(900°C 까지) 실험(위탁) • 이종재료 용접부에 대한 금속 조직/성분 변화 분석(위탁) • 기존 결과 또는 SPSS 내 신경회로망/통계 모듈로부터 결정	• 위탁연구보고서 • 인코넬 82 재료 물성치 및 금속 조직 분석 자료	
			• 이론적 온도해석 기법 개발	• 중첩법 및 Fourier Series 이용 • Heat Source 및 Heat Sink 개념 이용	• 이론적온도해석 기법/ 프로그램	
			• 온도해석 및 금속 조직/성분 변화 예측	• 1 차년도 개발 기술 적용	• 온도해석/금속 조직 예측 결과	
			• 사용자 정의 보조 프로그램 개발	• 어닐링/상변태 변형을 고려한 재료거동 구성방정식 개발 및 이용 • Battelle 에 연구원을 단기간 파견시켜 관련기술 습득	• 사용자정의보조프로그 램 • 국외교육 보고서	
			• 잔류응력 해석	• ABAQUS 이용 • Battelle Weld JIP(국제공동연구)에 참여하여 해석치에 덜 영향을 주는 유한요소 모델링 기법 공동 개발	• 잔류응력 해석 결과 • 국제공동연구 보고서	
			• 잔류응력 측정	• 잔류응력 해석결과와 타당성 검증 및 해석기술 보완 목적 • 중성자 회절법을 이용한 이종재 용접부 잔류응력 측정(위탁)	• 위탁기관 보고서 • 잔류응력측정자료	
			• 수소기인균열 해석모델 개발	• 잔류응력 및 수소 확산 등 수소기인균열 발생에 영향을 주는 인자 도출 및 개념적 해석 모델링	• 수소기인균열 해석 모델	
			• 수소기인균열 해석	• 잔류응력 해석결과와 FlexPDE 이용	• 수소기인균열해석결 과	
			• 잔류응력/수소기인균열 완화방안 도출	• 최적의 민감도 분석/Parametric 연구조건 도출 • ABAQUS/Design 을 이용하여 용접변수에 따른 민감도 분석 • PVRC/MPC JIP 에 참여하여 국부적 후열처리 적용성 검토 • 예/후열처리 효능 및 적용성 검토 • 기존결과와 비교, 전문가 자문 및 내외부 토론을 통해 보완 • 금속 조직/성분 변화 완화방안 도출	• 잔류응력/수소 기인균열 발생 완화방안 • 국제공동연구 보고서	
			• DB/ 전문가 시스템 구축	• 잔류응력/수소기인 균열 해석 관련 DB/ 전문가 시스템 초안 구축	• 통합 건전성평가 전문가시스템과의 연계를 고려한 Logic 설계 • 최적의 개발 Tool 을 선정하여 금속 조직/성분 변화 예측 모듈 개발 • Web 기반으로 구축, 홈페이지와 연계 추진	

표 17.2 단계 상세 연구방안 총괄표

차년도	연구개발 목표	기술구분	기술항목	개발, 운영 및 수립방안	연구실적물	비고
3 차 년도	[제 4 과제] 피로평가 기술개발	• 피로평가 기술개발	• 대상기기 용접부 선정	• 1 단계 선정법 참조	• 대상 용접부 자료	• 위탁실험 • 건전성평가 연구회 개최 - '02.9, '03.3 • 국제 Workshop - '02.10 • 국내외 자문 • 국외 교육 - Battelle Weld JIP
			• 대상 용접부에 대한 재료 물성치 및 피로특성 결정	• 위탁 실험 및 결정 - 1 단계 연구에서의 대상 용접부와 불일치시 기계적/열적/ 물리적 재료 물성치 실험 및 결정 - 대상 용접부 재료에 대한 S-N 선도 개발 - 용접부위 금속 조직 및 성분 분석 - 용접부위 잔류응력 측정 • 자체적으로도 수집 분석 결정	• 위탁연구 보고서 • 재료물성치 및 피로특성 자료	
			• 온도해석, 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석	• 1 단계에서 개발한 기술 이용	• 온도해석/금속조직 예측결과 • 잔류응력 해석결과	
			• 운전 중의 온도, 열 응력 및 기계적 응력 해석	• ABAQUS 이용 • 운전 중의 경계조건 결정	• 운전 중의 온도 및 응력 해석결과	
			• 피로평가기술 개발	• 비균질재에 대한 손상역학과 결합된 통계처리 기법(MT, MLM)개발 • 국외교육 파견을 통해 국외 선진연구기관에서 수행되어지는 기법 습득 • Battelle Weld JIP 에 참가하여 용접부 S-N 선도 적용기법 공동 개발 • 피로 손상 시 잔류응력 저하 모델 개발 • 전체 잔류응력 분포 및 용접 전 모재 손상 고려	• 피로 평가 기술/ 수행 결과 • 국외교육 보고서 • 국제공동연구보고서 • 자문보고서	
			• 평가기술 검증 보완 및 완화방안 도출	• 위탁 검증실험 결과 비교를 통한 검증 • 기존결과와의 비교 및 내외부 토론을 통해 기술 보완 • 민감도 분석 및 Parametric 연구를 통한 용접변수에 따른 피로손상 변화 추이 분석 - 피로손상에 지배적인 용접변수/용접재 성분 도출 - 기존결과와의 비교, 전문가 자문 및 내외부 토론을 통해 보완 - 피로손상 완화방안 도출	• 용접부 피로평가 기술 검증 및 Parametric 연구 결과	
	• 피로 DB/ 전문가 시스템구축	• 피로평가 DB/전문가시스 템 초안구축	• 주로 민감도 분석 및 Parametric 연구결과를 활용하고 기존 연구결과도 이용 • 통합 건전성평가 DB/전문가시스템 및 홈페이지와의 연계추진	• 용접부피로 평가 DB/전문가 시스템 초안		

차년도	연구개발 목표	기술구분	기술항목	개발, 운영 및 수립방안	연구실적물	비고
3 차 년도	[제 5 과제] 부식평가 기술개발	• 부식평가 기술개발	• 대상기기 용접부 선정	• 1 단계 선정법 참조	• 대상 용접부 자료	• 위탁실험 건전성평가연 구회 개최 - '02.9, '03.3 • 국제 Workshop - '02.10 • 국내외 자문 • 국외 교육
			• 재료물성치 및 부식특성 결정	• 위탁 실험 및 결정 - 1 단계 연구에서의 대상 용접부와 불일치 시 기계적/열적/물리적 재료물성치 실험 및 결정 - 대상 용접부 재료에 대한 부식특성 실험 - 용접부위 금속 조직 및 성분 분석 - 자체적으로도 수집 분석 결정	• 위탁연구 보고서 • 재료물성치 및 부식특성 자료	
			• 온도해석, 금속조직/성분 변화 예측	• 1 단계에서 개발한 기술 이용	• 온도해석/금 속조직 예측 결과	
			• 운전 중의 온도해석	• ABAQUS 이용 • 운전 중의 경계조건 결정	• 운전 중의 온도 해석 결과	
			• 부식 평가기술 개발	• 비균질재에 대한 전류/이온 농도 변화 등 영향인자를 고려한 이론적 해석모델(FDM, FVM, BEM 이용) 개발 • 국외교육 파견을 통해 국외 선진연구기관의 기법 습득	• 부식평가 기술/수행 결과 • 국외교육 파견 보고서	
		• 평가기술 검증보완 및 완화방안 도출	• 위탁 검증실험 결과 비교를 통한 검증 • 기존결과와의 비교 및 내외부 토론을 통해 기술 보완 • 민감도 분석 및 Parametric 연구를 통한 용접변수에 따른 부식손상 변화 추이 분석 - 부식손상에 지배적인 용접변수/용접재 성분 도출 - 기존결과와의 비교, 전문가 자문 및 내외부 토론을 통해 보완 - 부식손상 완화방안 도출	• 용접부 부식평가 기술 검증 및 Parametric 연구 결과		
• 부식 DB/전문가 시스템 초안 구축	• 부식평가 DB/전문가 시스템 초안 구축	• 주로 민감도 분석 및 Parametric 연구결과를 활용하고 기존 연구결과도 이용 • 통합 건전성평가 DB/전문가시스템 및 홈페이지와의 연계 추진	• 용접부 부식평가 DB/전문가 시스템 초안			

차년도	연구개발 목표	기술구분	기술항목	개발, 운영 및 수립방안	연구실적물	비고
4 차 년도	[제 6 과제] 피로균열 성장평가 기술개발	<ul style="list-style-type: none"> • 피로균열 성장평가 기술개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 대상 용접부 선정 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 단계 선정법 참조 	<ul style="list-style-type: none"> • 대상 용접부 자료 	<ul style="list-style-type: none"> • 위탁실험 • 건전성 평가 연구회 개최 - '03.9, '04.3 • 국제 Workshop - '03.10 • 국내외 자문 • 국외 교육 • 국제공동 연구
			<ul style="list-style-type: none"> • 재료물성치 및 피로균열 성장 특성/ 파괴 인성치 결정 	<ul style="list-style-type: none"> • 위탁 실험 및 결정 - 1 단계 연구에서의 대상 용접부와 불일치 시 재료물성치 실험 및 결정 - 금속조직별 온도변화에 따른 피로균열성장 선도 결정실험 - 금속조직별 온도변화에 따른 파괴인성치 결정실험 - 응력부식균열 평가기술 개발과도 연계 필요 • 기존 연구결과와의 비교, 자체적으로도 수집 분석 결정 	<ul style="list-style-type: none"> • 위탁연구 보고서 • 재료물성치/피로 균열 성장 특성/ 파괴인성치 자료 	
			<ul style="list-style-type: none"> • 온도해석, 금속조직 예측 잔류응력 해석 	<ul style="list-style-type: none"> • 1 단계에서 개발한 기술 이용 온도해석, 금속 조직/성분 변화 예측 및 잔류응력 해석 	<ul style="list-style-type: none"> • 온도해석/금속 조직 예측결과 • 잔류응력 해석결과 	
			<ul style="list-style-type: none"> • 운전 중의 온도/응력해석 	<ul style="list-style-type: none"> • 운전 중의 경계조건 결정하고 ABAQUS 이용 	<ul style="list-style-type: none"> • 운전 중의 온도/ 응력 해석 결과 	
			<ul style="list-style-type: none"> • 균열해석 	<ul style="list-style-type: none"> • FEAM 또는 가중함수법을 이용한 파괴역학 매개변수 결정 • 비균질재내 균열선단의 응력분포를 대표할 수 있는 파괴역학 매개변수 개발 • 금속 조직과 파괴인성치와의 상관관계 도출 • 개발 기술의 검증을 위해 ABAQUS 이용 계산 • 비균질재에 대한 신 개념의 FAD(Failure Assessment Diagram) 개발 • 국외교육 파견/국제공동연구를 통한 국외 선진기관의 기법 습득 및 공동 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 용접부 균열 해석 기술/수행 결과 • 국외교육 보고서 • 국제 공동 연구 보고서 • 자문 보고서 	
			<ul style="list-style-type: none"> • 피로균열성장 평가 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 손상역학과 결합된 통계처리 기법 개발 • 국외교육 파견/국제공동연구를 통한 국외 선진 기관의 기법 습득 및 공동 개발 • 균열성장 시 잔류응력 재분포를 고려한 해석모델 개발 • 전체 잔류응력 분포 및 용접 전 손상 고려 	<ul style="list-style-type: none"> • 피로 균열 성장 평가 기술/수행 결과 • 국외교육 보고서 • 국제 공동연구 보고서 	
			<ul style="list-style-type: none"> • 평가기술 검증보완 및 완화방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 위탁 검증실험 결과 비교를 통한 검증 - 용접부의 금속조직 관찰, 성분분석 및 잔류응력 측정 실험 - 용접부의 피로균열성장 및 취성파괴 실험 • 기존결과와의 비교 및 내외부 토론을 통해 기술 보완 • 민감도 분석 및 Parametric 연구를 통한 용접변수에 따른 피로균열성장 및 취성파괴 손상 변화 추이 분석 - 피로균열성장/취성파괴 손상에 지배적인 용접변수/용접재 성분 도출 - 기존결과와의 비교, 전문가 자문 및 내외부 토론을 통해 보완 - 피로균열성장 및 취성파괴 손상 완화방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 피로균열성장 평가기술 검증 및 Parametric 연구 결과 	
<ul style="list-style-type: none"> • FCG DB/전문가 시스템 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 피로균열성장 평가 DB/전문가 시스템 초안 구축 	<ul style="list-style-type: none"> • 주로 민감도 분석 및 Parametric 연구결과를 활용하고 기존 연구결과도 이용 • 통합 건전성평가 DB/전문가시스템 및 홈페이지와의 연계 추진 	<ul style="list-style-type: none"> • 용접부 피로균열 성장 평가 DB/전문가 시스템 초안 			

차년도	연구개발 목표	기술구분	기술항목	개발, 운영 및 수립방안	연구실적물	비고
4 차 년도	[제 7 과제] 응력부식 균열평가 기술개발	• 응력부식 균열 평가 기술 개발	• 대상용접부 선정	• 1 단계 선정법 참조	• 대상 용접부 자료	• 위탁실험 • 건전성 평가 연구회 개최 - '03.9, '04.3 • 국제 Workshop - '03.10 • 국내외 자문 • 국외 교육 • 국제공동 연구
			• 재료물성치 및 응력부식 균열 특성/ 파괴인성치 결정	• 위탁 실험 및 결정 - 1 단계 연구에서의 대상 용접부와 불일치 시 재료물성치 실험 및 결정 - 금속조직별 온도변화에 따른 응력부식균열 개시 및 성장 선도 결정실험 - 금속조직별 온도변화에 따른 파괴인성치 결정실험 - 응력부식균열 평가기술 개발과도 연계 필요 • 기존 연구결과와의 비교, 자체적으로도 수집 분석 결정	• 위탁연구 보고서 • 재료물성치/응력 부식균열 특성/ 파괴인성치 자료	
			• 온도해석, 금속조직 예측 잔류응력 해석	• 1 단계에서 개발한 기술 이용 온도해석, 금속 조직/성분 변화 예측 및 잔류응력 해석	• 온도해석/금속 조직 예측결과 • 잔류응력해석결과	
			• 운전 중의 온도/응력해석	• 운전 중의 경계조건 결정하고 ABAQUS 이용	• 운전 중의 온도/ 응력해석 결과	
			• 균열해석	• FEAM 또는 가중함수법을 이용한 파괴역학 매개변수 결정 • 비균질재내 균열선단의 응력분포를 대표할 수 있는 파괴역학 매개변수 개발 • 금속 조직과 파괴인성치와의 상관관계 도출 • 개발 기술의 검증을 위해 ABAQUS 이용 계산 • 비균질재에 대한 신 개념의 FAD(Failure Assessment Diagram) 개발 • 국외교육 파견/국제공동연구를 통한 국외 선진기관의 기법 습득 및 공동 개발	• 용접부 균열해석 기술/수행 결과 • 국외교육 보고서 • 국제공동연구 보고서 • 자문 보고서	
		• 응력부식균열 평가 기술개발	• 손상역학 및 Slip Dissolution 기법과 결합된 통계처리 기법 개발 • 국외교육 파견/국제공동연구를 통한 국외 선진기관의 기법 습득 및 공동 개발 • 균열성장 시 잔류응력 재분포를 고려한 해석모델 개발 • 전체 잔류응력 분포 및 용접 전 손상 고려	• 응력부식균열평가 기술/수행 결과 • 국외교육보고서 • 국제공동연구보고서		
• 평가기술 검증보완 및 완화방안 도출	• 위탁 검증실험 결과 비교를 통한 검증 - 용접부의 금속조직 관찰, 성분분석 및 잔류응력 측정 실험 - 용접부의 응력부식균열 개시 및 성장 실험 • 기존결과와의 비교 및 내외부 토론을 통해 기술 보완 • 민감도 분석 및 Parametric 연구를 통한 용접변수에 따른 응력부식균열 개시 및 성장 변화 추이 분석 - 응력부식균열 개시 및 성장에 지배적인 용접변수/용접재 성분 도출 - 기존결과와의 비교, 전문가 자문 및 내외부 토론을 통해 보완 - 응력부식균열 개시 및 성장 완화방안 도출	• 응력부식균열 평가기술 검증 및 Parametric 연구 결과				
	• SCC DB/전문가 시스템구축	• 응력부식균열 평가 DB/전문가 시스템 초안구축	• 주로 민감도 분석 및 Parametric 연구결과를 활용하고 기존 연구결과도 이용 • 통합 건전성평가 DB/전문가시스템 및 홈페이지와의 연계 추진	• 용접부 응력부식 균열 평가 DB/ 전문가시스템 초안		

차년도	연구개발 목표	기술구분	기술항목	개발, 운영 및 수립방안	연구실적물	비고	
5 차 년도	[제 8 과제] 복합 건전성 평가 기술 및 시스템 구축기술 개발	• 복합 손상 평가 기술 개발	• 대상 용접부 선정	• 1 단계 선정법 참조	• 대상요접부 자료	• 위탁 실험 • 건전성 평가 연구회 개최 - '04.9, '05.3 • 국제 Worksho p - '04.10 • 국내외 자문 • 국외 교육 • 국제 공동 연구	
			• 재료물성치 및 복합손상 특성 결정	• 위탁 실험 및 결정 - 금속조직별 온도변화에 따른 복합손상(피로-부식)(FCG-SCC 성장) 특성 실험 • 기존 연구결과와의 비교, 자체적으로도 수집 분석 결정	• 위탁연구 보고서 • 재료물성치/복합 손상 특성 자료		
			• 온도해석, 금속조직 예측 잔류응력 해석	• 1 단계에서 개발한 기술 이용	• 온도해석/금속 조직 예측결과 • 잔류응력해석결과		
			• 운전 중의 온도/응력해석	• 운전 중의 경계조건 결정하고 ABAQUS 이용	• 운전 중의 온도/ 응력해석 결과		
			• 단일 손상평가	• 개발한 단일 손상평가 기술 이용 각 단일 손상 평가	• 단일 손상평가 결과		
			• 복합손상 평가기술 개발	• 단일손상 평가 결과를 기초로 비균질재에 대한 손상역학과 결합된 통계처리 기법 개발 • 손상들간 역학관계 평가 모델 개발 • 국외교육 파견 및 국제공동연구 참여를 통해 국외선진연구기관에서 수행되어지는 기법 습득 및 공동 개발	• 복합손상 평가 기술/수행 결과 • 국외교육 보고서 • 국제공동연구보고서		
			• 평가기술 검증보완 및 완화방안 도출	• 위탁 검증실험 결과 비교를 통한 검증 - 용접부의 금속조직 관찰, 성분분석 및 잔류응력 측정 실험, 용접부의 복합 손상 실험 • 기존결과와의 비교 및 내외부 토론을 통해 기술 보완 • 민감도 분석 및 Parametric 연구를 통한 용접변수에 따른 복합 손상 정도 변화 추이분석 - 복합 손상에 지배적인 용접변수/용접재 성분 도출, 기존결과와의 비교, 전문가 자문 및 내외부 토론을 통해 보완, 복합 손상 완화방안 도출	• 복합손상 평가 기술검증 및 Parametric 연구 결과		
			• 복합 DB/ 전문가 시스템구축	• 복합손상 평가 DB/전문가 시스템 초안 구축	• 주로 민감도 분석 및 Parametric 연구결과를 활용하고 기존 연구결과도 이용 • 통합 건전성평가 DB/전문가시스템 및 홈페이지와의 연계 추진		• 용접부 복합손상 평가 DB/전문가 시스템 초안
			• 통합 건전성 평가 DB/ 전문가 시스템 초안 구축	• 기존 통합 DB/ 전문가 시스템 분석 검토	• 국내외 통합 건전성평가 DB/전문가 시스템 분석 후 문제점 도출		• 기존 DB/전문가 시스템 분석자료
				• Logic 구성 및 Structure 설계	• Client 와 Server 사이의 통신 프로토콜은 Internet 환경하에서 사용하는 TCP/IP 활용 • LAN 망 이용 컴퓨터간 데이터 공유기능 부여 • 운영체제는 Win NT 또는 2000 이용		• Logic 구성 및 Structure 설계 방안
	• 통합 건전성평가 시스템 구축 요소 기술 개발 및 구축	• 각 손상별 모듈을 통합한 단일 시스템 형태 • ODBC 기법을 이용한 지능형 DBMS 구축 • 객체 지향 프로그램 기법 사용 • 사용자의 편의성을 고려하여 GUI 환경 채택	• 통합 건전성평가 시스템				
	• 원전적용방안	• 원전설비 용접부 자료 수집 분석, 실질 적용이 가능한 적용방안 수립	• 원전설비 적용 방안				

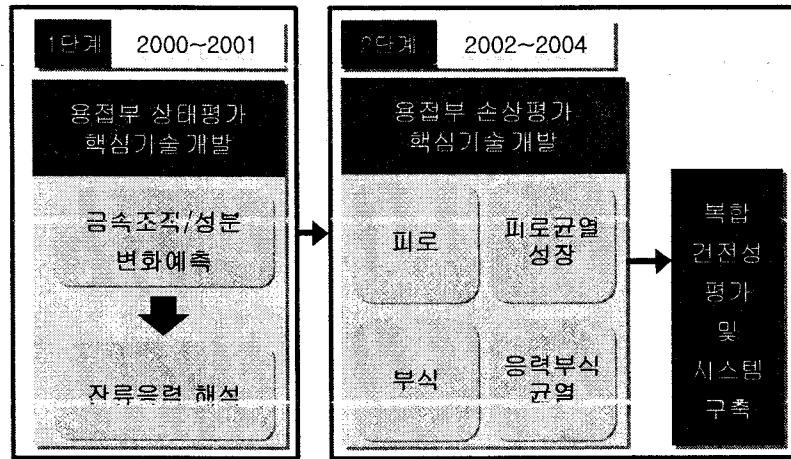


그림 6. 연구 단계 및 과제별 개념적 상관관계

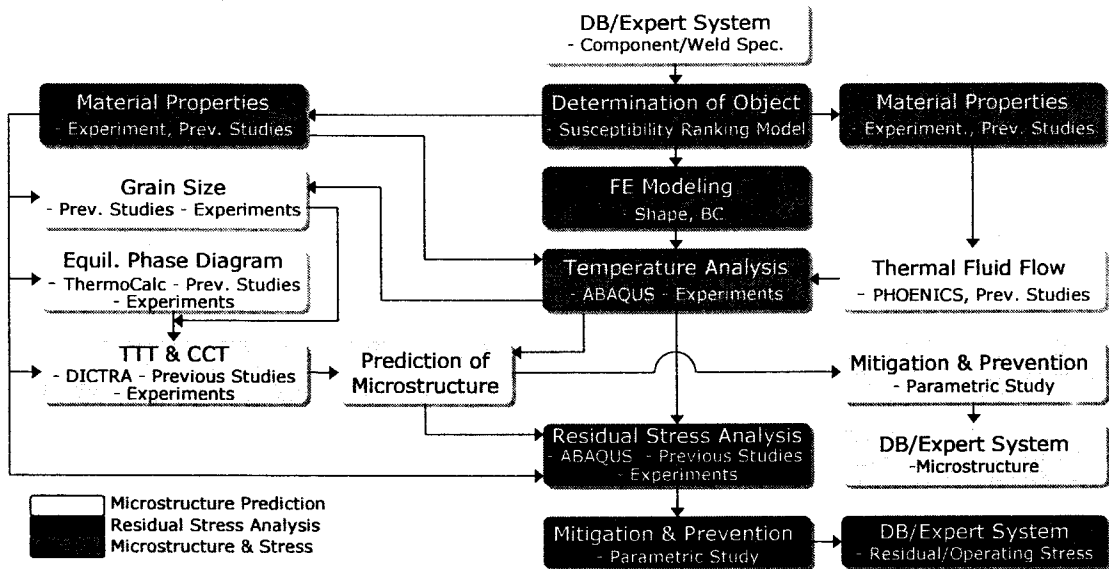


그림 7.1 단계 두 과제 내 세부 항목들 간 상관관계

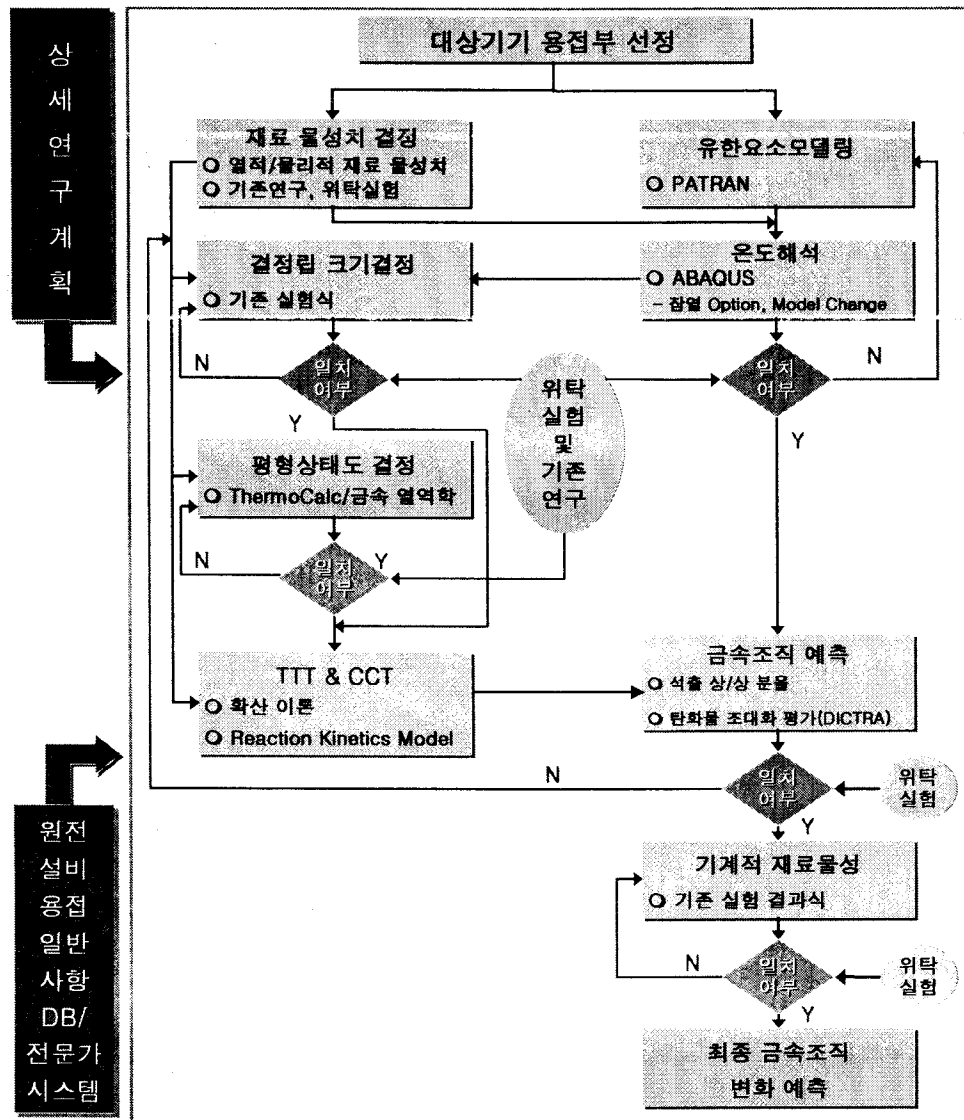


그림 8. 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발 흐름도

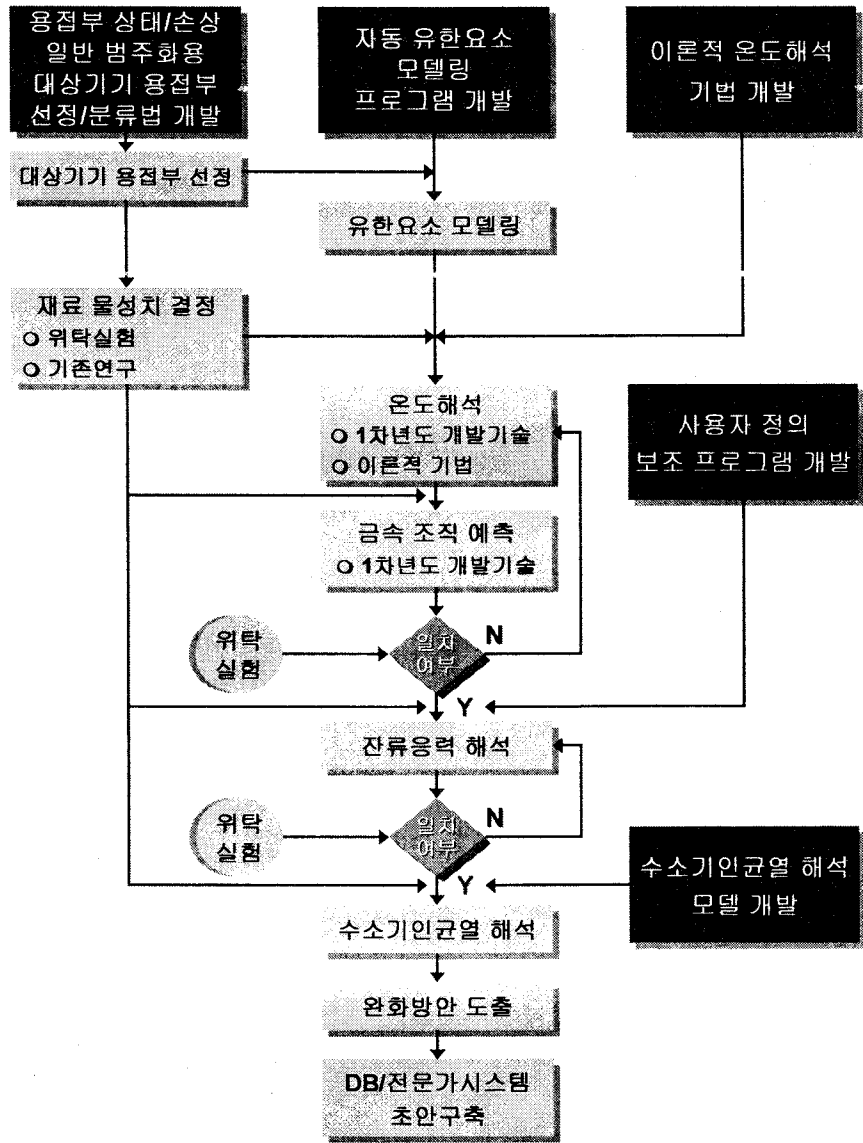


그림 9. 잔류응력 해석기술 개발 흐름도

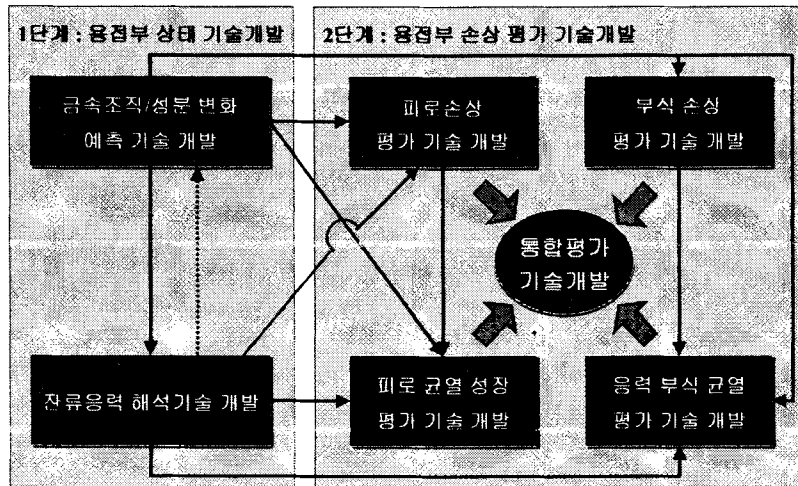


그림 10.1 단계 및 2 단계 중과제들 간 상관관계

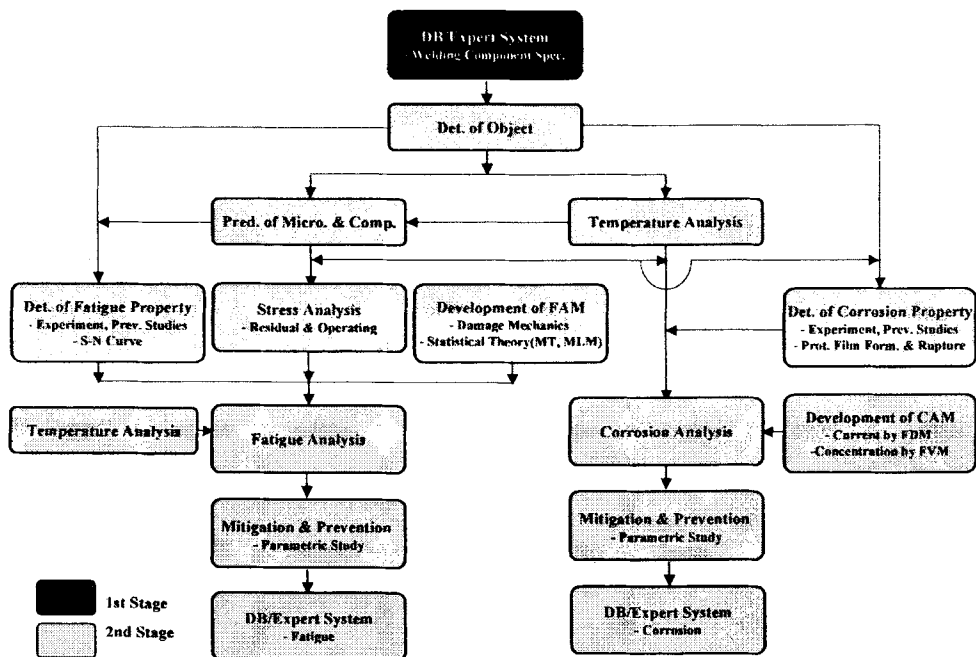


그림 11. 피로 및 부식 평가 기술개발 흐름도

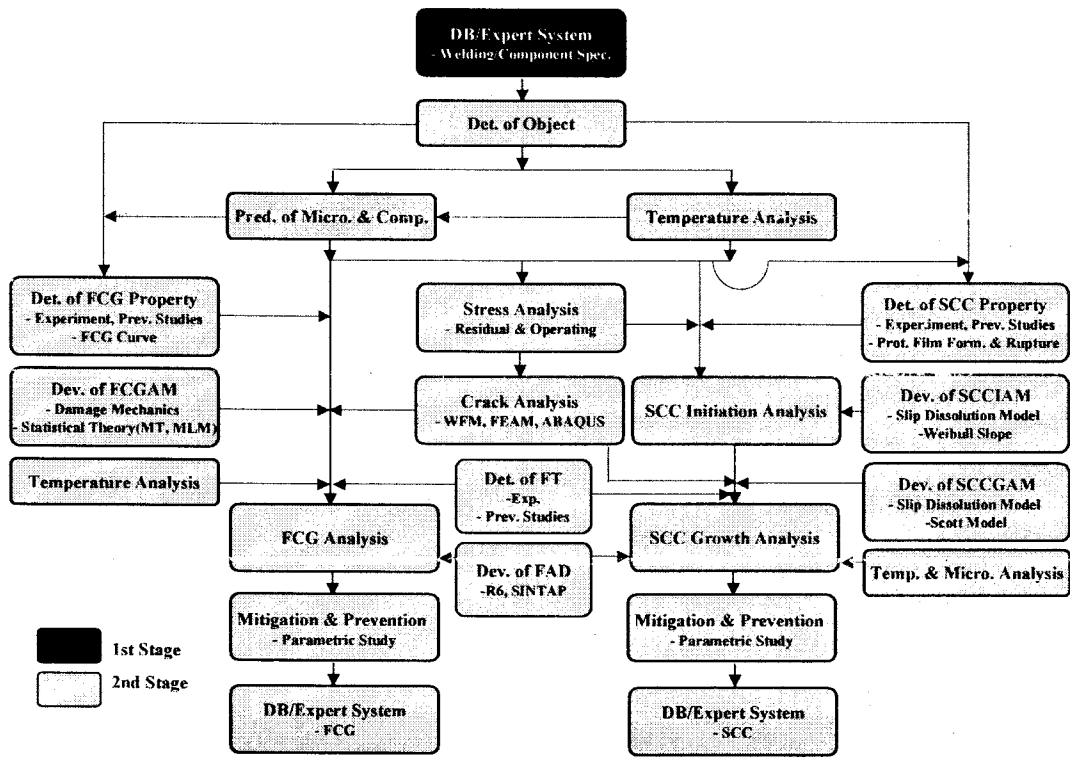


그림 12. 피로균열 성장 및 응력부식균열 평가 기술개발 흐름도

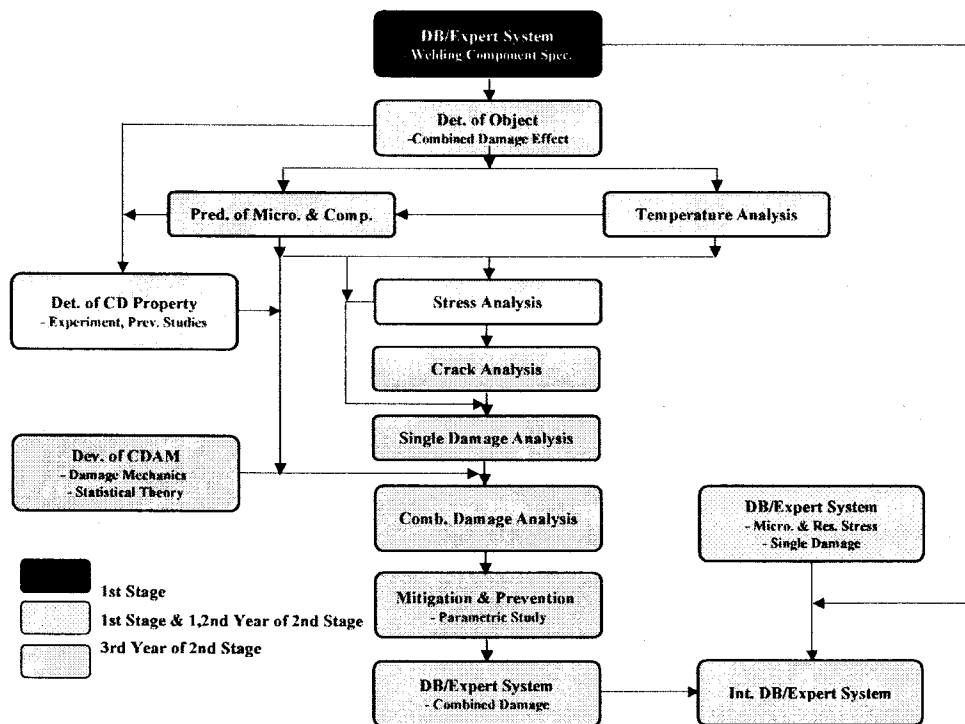


그림 13. 복합 손상평가 기술개발 흐름도

3. 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가 시스템 초안 구축

원전설비 용접부 건전성평가 상세 연구계획을 토대로 향후 원전설비 용접부 건전성평가 기술 개발 시 필요한 입력 자료들을 사전 도출하고 이들 자료의 용이한 확보 관리를 위해 원전설비 용접관련 일반 사항 DB/전문가 시스템 초안을 자체적으로 구축한 후 국내 전문가 기술 자문을 통해 수정 보완하였다. 본 항에서는 기초작업으로 우선적으로 수행한 기존 DB/전문가 시스템들의 분석 검토 내용과 Logic 구성/Structure 설계를 위한 개념정리를 정리 제시하고자 하고 이를 토대로 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가 시스템을 Web 기반으로 구축한 내용을 최종적으로 제시하고자 한다.

가. 기존 용접관련 일반사항 DB/전문가 시스템 분석 검토

미국의 SNL(Sandia National Laboratory)과 영국의 TWI 의 DB/전문가 시스템들에 대한 분석 검토 결과를 제시하고자 한다.

○ SNL

- 목표

- 용접 구조물의 제작을 용이하기 위한 계산 프로그램 SmartWeld 의 한 부분으로서, 용접 일정을 관리하기 위한 DB (WSDB)가 개발 되어졌음.
- SmartWeld 구축 목표는 기기 설계자에게 용접과정에 대한 선택 지침을 제공하여 설계/제작 시간을 단축하고 올바른 설계 제작이 용이하도록 하는 것임.

- 내용

- 기존의 DB 들은 용접일정에 대한 50 여개의 변수들이 저장됨.
- 이러한 DB 들은 변수의 영향을 과소평가한 것으로 WSDB 는 500 여개 변수들을 저장하고 있음.

- 사용 기법

- 정보 모델링 기법에 의해 구축되어졌음.
- 정보 모델링은 용접에 대한 자료 및 관계식들에 대한 모델화 작업임.
- NIAM(Natural Language Information Analysis Methodology) 기법이 이용되어짐.
 - ▶ 기본적인 요소 포함, 확장성
 - ▶ 매번 이용 시마다 동일한 답변/결과

○ TWI

- 목표

- WPS, PQR 및 PQR-WS 의 용접 절차, 용접기술자의 Qualification 및 NDT 결과의 체계적 관리

- 내용

- WeldaSpec : WPS, PQR, PQR-WD 등 용접 절차 관리

- Welderqual : 용접 기술자의 Qualification 을 확인
- NDTspec : NDT 결과를 관리
- WeldaCoordinator : 위에서 제시한 세가지 DB 의 통합
- 사용 기법
 - 정보 모델링 기법에 의해 구축되어졌음.

나. 개념적인 Logic 구성 및 Structure 설계

기존의 DB/전문가시스템들은 용접 제작을 보다 용이하게 하기 위해 개발되어 본 연구과제의 목적에 정확히 부합되지는 않으나, 원전설비 용접부 건전성평가 기술개발에 적합하게 수정 보완하는 것은 크게 어렵지 않을 것이다. 따라서 본 항에서는 기존 DB/전문가시스템들의 검토 결과를 토대로 개념적인 Logic 구성 및 Structure 를 설계 할 것이다.

○ 목적

- 실제 용접부 상태 및 손상을 평가하는데 보다 용이하게 수행하도록 하는 안내 지침을 구축
- 즉, 상태 및 손상 평가 시 보다 용이하게 입력 및 타당성 검증 자료를 도출하는데 있음.

○ 내용

- 대상기기 특성, 용접부 특성, 용접절차서(WPS) 작성 및 용접절차서 검토의 4 개 모듈로 분류되는 Structure 로 설계되어짐.
- 각 부분에 포함되는 내용은 다음과 같음.
 - 대상기기 특성 : 용접부가 위치한 기기의 이력, 형상, 기능, 설계특징, 재질, 재료 물성치, 운전조건 등이 제시됨.
 - 용접부 특성 : 용접부 형상, 용접절차, 용접변수, 예열/후열처리, 모재/용접봉 재질, 재료물성치, 손상사례, 가동 전/중 검사이력 및 적용코드 등이 제시됨.
 - 용접절차서 작성 : 용접절차서를 대상기기 용접부의 적용코드에 적합하게 작성하기 위한 모듈
 - 용접절차서 검토 : 작성된 용접절차서가 적용코드에 적합하게 작성되었는지 용이하게 검토할 수 있는 모듈

○ 적용성

- 용접부 상태/손상 평가 측면에서의 적용성은 다음과 같음.
 - 대상기기 특성
 - ▶ 대상기기 용접부 선정 시 이용 가능
 - ▶ 용접부 상태 및 손상 평가 시 입력자료 도출에 이용 가능
 - 용접부 특성
 - ▶ 대상 기기 용접부 선정 시 이용 가능
 - ▶ 용접부 상태 및 손상 평가 시 입력자료 도출에 이용 가능

- ▶ 평가 대상 손상 결정시 이용 가능
- ▶ 평가 결과의 타당성 검증자료로 이용 가능
- ▶ 용접부 상태 및 손상 평가 시 완화방안 도출에 이용 가능
- 용접절차서 작성
 - ▶ 대상기기 및 용접부의 특성 검토를 통해 용접절차서 작성에 활용
- 용접절차서 검토
 - ▶ 작성된 용접절차서 검토에 이용

원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 초안의 각 모듈들간 상호관계 및 용접부 상태/손상 평가와의 관련성 등 Logic 을 그림 14 에서 제시하고 있다.

다. Web 기반 구축 내용

앞에서 제시한 바와 같이 설계한 Logic 구성 및 Structure 를 토대로 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템을 Web 기반으로 구축한 화면을 그림 15 에서 각 모듈별로 제시하고 있다.

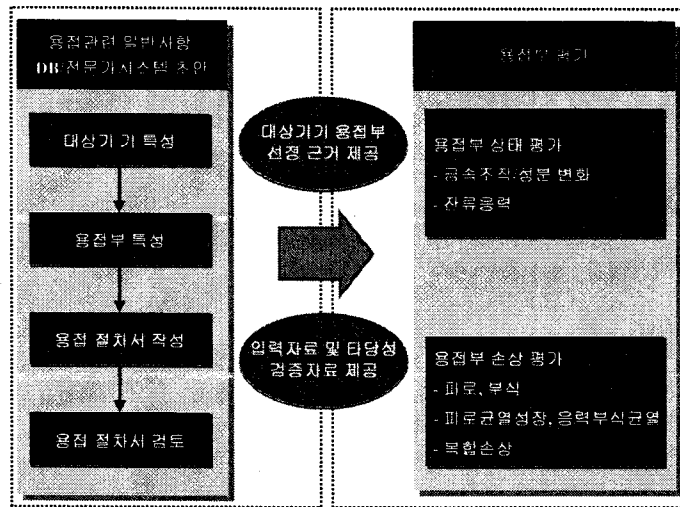
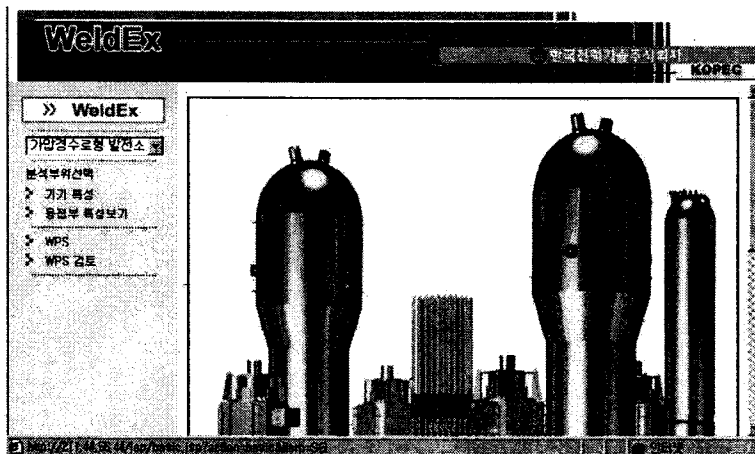


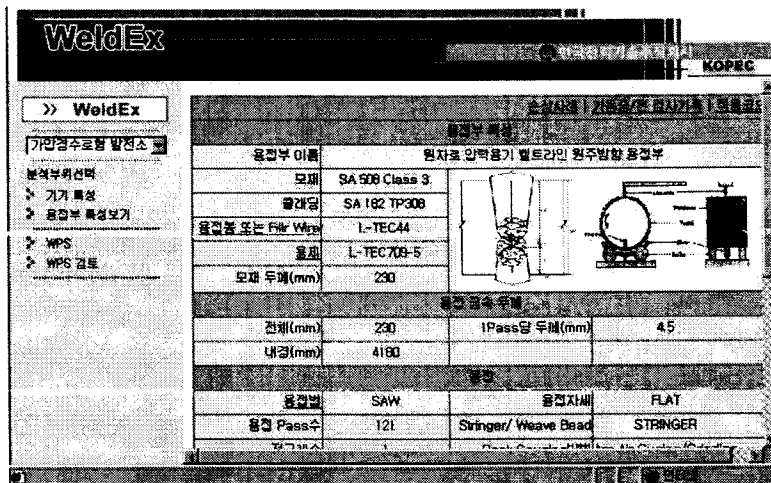
그림 14. 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 Logic 구성



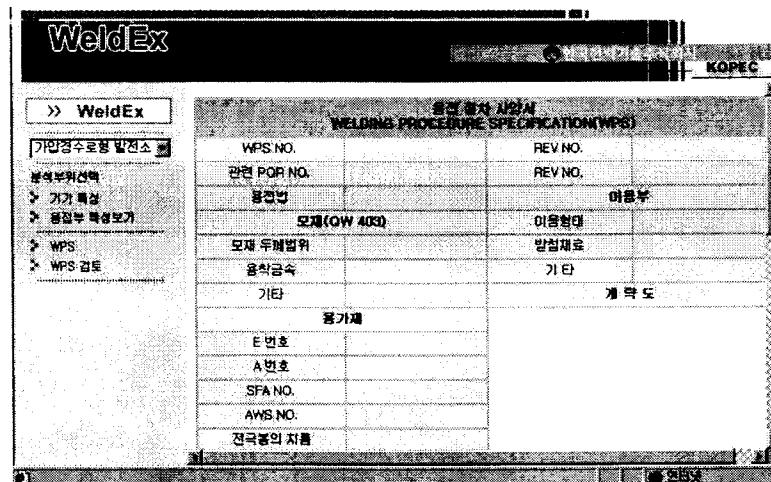
(a) 초기화면

개략도	발전소	가압경수로형	
	기기명	REACTOR VESSEL	
	소재	SA 508 Class 3	
	규격명	SA (B2 TP 308	
	설비력(MW)	2825	
	설계압력(psig)	2300	설계온도(F)
	운전압력(psig)	2250	운전온도(F)
	시험압력(psig)	3125	가열/냉각률(F/hr)
	PH	9.0~10.4	용존산소(ppb)
	하이드라진(ppm)	20~50	알루미늄(ppm)
	리튬(ppm)	0.2~2.2	용존수소(cc/kgH ₂ O)
	염소이온(ppm)	15	황소이온(ppm)
	철(ppm)	4400	황산이온(ppm)

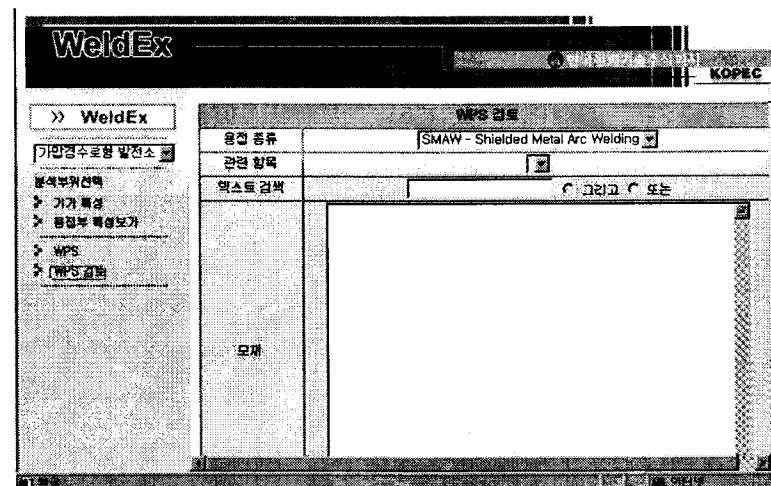
(b) 대상기기 특성



(c) 용접부 특성



(d) 용접절차서 작성



(e) 용접절차서 검토

그림 15. 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가 시스템 초안 Web 기반 구축화면

제 2절 금속 조직/성분 변화 예측 기술 개발

1차년도의 또 다른 연구 목표인 실제 용접 현상/과정을 고려한 용접부 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발은 앞에서 제시한 상세 연구계획 및 그림 8의 기술개발 흐름도에 따라 수행 되어진다. 본 절에서는 용접부 건전성평가의 일환으로 온도해석, 금속조직 변화 및 이에 따른 기계적성질의 변화를 예측하고 검증실험을 통해 타당성을 확인하였다. 이들 결과는 향후 수행하게 될 용접부의 잔류응력평가 및 건전성 손상시 중요 입력자료로 활용될 예정이다.

1. 대상기기 용접부 선정

본 항에서는 원전설비 용접부의 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발이라는 연구목표를 충족시키고 대표성을 가질 수 있는 대상기기 용접부를 선정하기 위한 절차를 제시한 후 이 절차를 적용해 대상기기 용접부를 선정하고자 한다.

가. 대상기기 용접부 선정절차

대상 기기 용접부 선정 시 다음 아래의 요소들을 검토하여야 한다.

○ 안전성

- 용접부의 파손 시 원전 안전성에 미치는 영향을 평가하여 다음 아래 등급으로 분류할 수 있음. (보다 나중에 제시된 등급일수록 가중치 감소)
 - 원자로 냉각재 압력 경계로 파손 시 심각한 방사능 누출을 야기시킬 수 있는 기기
 - ▶ 예 : RPV, RCS 배관/노즐/밸브, RCP, SG, 가압기 등
 - 원자로 냉각재 압력 경계는 아니나 파손 시 방사능 누출 또는 사고 완화/안전 정지 기능에 문제를 야기시킬 수 있는 기기
 - ▶ 예 : RHRS/SIS/CVCS/CCWS/CCSWS/AFWS 등의 배관/노즐/밸브/펌프/열교환기/압력용기 등
 - 파손 시 바로 위에서 제시한 기기들의 기능 수행에 영향을 미칠 수 있는 기기
 - 파손되어도 안전성에 미치는 영향이 미약한 기기

○ 손상사례

- 손상사례 특성 및 빈도에 따라 다음 아래와 같은 등급으로 분류할 수 있음. (나중에 제시된 등급일수록 가중치 감소)
 - 금속 조직/성분과 관련된 손상사례가 있는 경우
 - 금속 조직/성분과 관련하여 손상사례는 없으나 기타 손상사례가 있는 경우
 - 어떠한 손상사례도 없는 경우

○ 용접특성

- 모재/용착 금속 재질, 용접법 및 열처리 등 용접특성을 손상기구 발생측면에서 검토하여 다음 아래의 등급으로 분류할 수 있음.(나중에 제시된 등급일수록 가중치 감소)
 - 손상에 취약한 금속 조직/성분 변화가 발생할 수 있고 예측이 어려운 경우
 - 손상에 취약한 금속 조직/성분 변화가 발생할 수 있으나 예측이 쉬운 경우
 - 손상에 취약한 금속 조직/성분 변화가 발생하지 않는 경우

○ 경제성

- 보수비용 및 운전 정지에 따른 손실비용을 고려하여 다음 아래와 같이 분류할 수 있음.(나중에 제시된 등급일수록 가중치 감소)
 - 보수 비용 소요가 막대하거나 장기간의 원전 정지가 필요한 기기
 - 보수 비용 소요가 막대하지는 않으나 장기간의 원전 정지가 필요한 기기
 - 보수 비용 소요가 막대하지 않으며 장기간의 원전 정지도 필요치 않은 기기

○ 가동중 검사 대상 및 보수/검사 용이성

- 가동중 검사 대상 여부와 보수/검사 용이성 여부를 검토하여 다음 아래와 같이 분류할 수 있음.(나중에 제시된 등급일수록 가중치 감소)
 - 가동중 검사 대상이거나 보수/검사를 위한 접근이 불가능한 기기
 - 가동중 검사 대상이 아니나 접근이 용이하지 못한 기기
 - 가동중 검사 대상이 아니며 접근도 용이한 기기

위에서 서술한 요소들 i(안전성, 손상사례, 용접 특성, 경제성, 가동중 검사 대상 및 보수/검사 용이성)에 따른 가중치 W_i 와 각 요소 i내 분류 등급 j에 따른 가중치 W_j 를 결정 하여 다양한 기기 용접부들에 대해 다음 아래와 같이 선정여부 정도 C를 정량화 할 수 있다.

$$C = \sum_i \sum_j W_i W_j \quad (1)$$

C가 다양한 기기 용접부에 대해 결정되면 C 값의 크기 순으로 나열한 후 수행할 연구 목적, 일정 및 내용 등에 따라 적절히 결정된 평가 용접부 수를 기준으로 C 값이 큰 순서로 대상 기기 용접부가 최종적으로 결정되어질 것이다. 물론 W_i 및 W_j 의 값뿐만 아니라 위에서 서술한 요소 및 등급의 타당성에 대해서도 원전 설계, 제작, 운영 및 보수정비 전문가 등이 모여서 결정하여야만 한다. 그러나 이러한 정량화는 광범위한 자료 수집 분석 및 깊이 있는 논의가 필요할 것이다. 따라서 본 연구 수행 시에는 위에서 제시한 방법론을 정성적인 측면에서 적용하여 대상기기 용접부를 결정하고 대상기기 용접부의 형상, 재질 및 용접부 특성을 제시하고자 한다.

나. 대상기기 용접부

대상기기 용접부 선정절차 내 요소들을 1차측 8개 주기기(원자로 압력용기, 가압기, 원자로 냉각재 펌프, 증기발생기, 고온관, 저온관, Cross Over Leg, 밀림관) 40여 개 용접부(원주방향 용접부, 노즐-배관 용접부, 배관-배관 용접부, 관통 용접부 등)에 대해 다음 아래와 같이 정성적으로 검토하여 원자로 압력용기의 원주방향 용접부를 대상기기 용접부로 선정하였다.

○ 안전성

- 원자로 압력용기의 경우 원전의 안전과 직결되는 대표적인 주기기로서 파손 시 가장 심각한 노심 손상 및 방사능 누출을 야기시킬 수 있음.

○ 손상사례

- 가압기 관통 노즐/가열기 용접부와 원자로 압력용기 출구 노즐/관통 노즐 용접부에 응력부식균열 발생 사례 있음.
- 저온관과 분기관(Branch Line) 사이의 용접부와 밀림관 용접부에 고주기 피로에 의한 손상사례 있음.
- 원자로 압력용기 원주방향 용접부는 손상사례는 없으나 용접부의 금속 성분(Cu) 증가시 조사취화 정도가 증가하며[54] 이로 인하여 저인성 파괴해석[55] 및 PTS (Pressurized Thermal Shock) 해석[56]을 수행한 사례 있음.
- 또한, 원자로 압력용기 강인 SA508의 경우 고강도 및 고인성을 갖는 베이나이트 (Bainite) 조직이나 용접 및 후열처리에 의해 조직변화, 탄화물 석출 및 성장이 발생되어 열 영향부의 기계적 물성 저하를 야기시킬 수 있음.

○ 용접특성

- 원자로 압력용기 원주방향 용접부는 SAW 용접부로서 그림 16에서 제시한 바와 같이 용접부내 산소 함량이 다른 용접법 보다 많을 수 있어 강도, 인성 및 점성의 저하를 가져올 수 있을 뿐만 아니라 SAW 특성인 상대적으로 높은 입열량과 큰 용융 Pool에 기인하여 조대한 Columnar Grain이 용융 Zone에서 형성되어 저인성 및 고온 균열이 발생할 수 있음[57].
- 원자로 압력용기 강 용접부는 변태 기구가 명확하게 규명되지 않은 베이나이트 조직에 여러가지 상이 혼합되어 석출되므로 금속조직 변화 예측이 어려움.

○ 경제성

- 원자로 압력용기 보수 시 장기간의 원전 정지가 필요하며 보수 시 비용 소요가 막대함.

○ 가동중 검사 대상 및 보수/검사 용이성

- 8개 주기기의 모든 용접부는 가동중 검사 대상 부위임.

본 연구에서 금속 조직/성분 변화 예측 기술개발을 수행할 대상기기 용접부의 형상은 그림 17에서 보이는 바와 같이 외면과 내면 쪽으로 각각 81 Pass 및 39 Pass의 SAW 용접법이

수행되어진다. 외면 쪽이 먼저 용접 된 후 그림 17에서 보이는 바와 같이 점선까지 그라인드 한 후 내면 쪽이 용접 되어진다.

모재와 용접봉의 재질은 각각 SA508 Gr.3 Cl.1과 L-TEC44:Wire/L-TEC709-5:Flux이며 각각의 화학조성은 표 18과 19에서 제시되고 있다[2,58]. 예열 및 후열 처리는 가스 가열법이며 열처리 변수들은 표 20에서 제시되고 있다. 또한 용접동안의 용접 변수들은 표 21에서 제시되고 있다.

표 18. 모재의 화학조성

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
wt%	0.19	0.08	1.35	0.006	0.002	0.82	0.17	0.51	0.009

표 19. 용접봉의 화학조성

Element		C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	V
L-TEC44: Wire	Spec.	0.10/0.18	<0.20	1.65/2.15	<0.012	<0.035	<0.08	0.45/0.65	<0.05
	Data	0.12	0.01	1.80	0.008	0.006	0.02	0.52	0.002
L-REC709-5: Weld metal	Spec.	<0.15	<0.80	<2.10	<0.012	<0.030	<0.08	0.40/0.65	<0.05
	Data	0.09	0.24	1.64	0.011	0.005	0.02	0.52	0.006

표 20. 예열 및 후열 처리에 대한 변수 범위

Pre-Heat			Post-Heat		
Min.	Interpass Max.	Maintenance	Min.	Max.	Maintenance
121°C	200°C	221~298 °C/4hr	615°C	635°C	40.5hr

표 21. 용접 변수 범위

Electrode Type	Electrode Dia.	Current	Volt	Polarity	Speed
Pass 1-4					
L-TEC44	4.0mm	500A	28-29V	DCRP	40cm/min
Pass 5-82					
L-TEC709-5	4.0mm	650A	31-32A	DCRP	36cm/min
Pass 83-121					
L-TEC709-5	4.0mm	700-720A	33-35V	DCRP	33cm/min

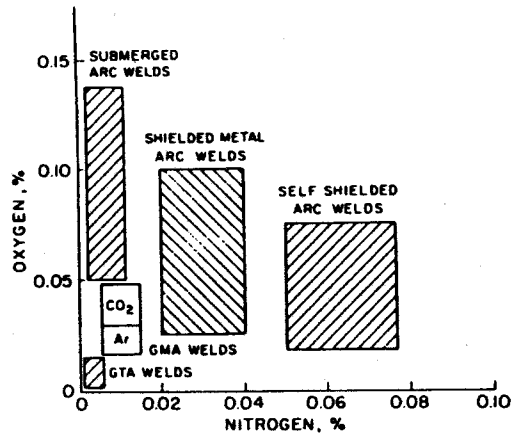


그림 16. 몇몇 아크 용접들의 산소와 질소 함량 수준

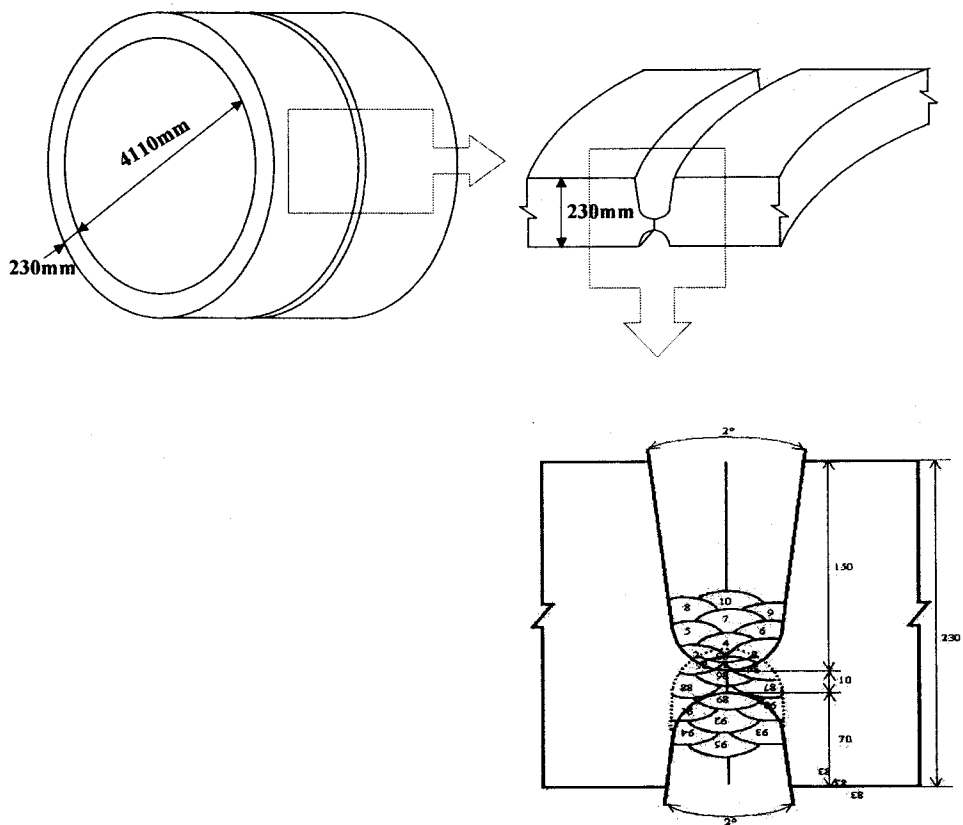


그림 17. SA508 Gr.3 Cl.1 원자로 압력용기 용접부의 형상

2. 재료물성치 결정

본 항에서는 선정된 대상기기 용접부의 재료물성치를 위탁실험, TWI DB, 기존의 연구 결과들을 활용하여 결정하고자 한다.

가. 열적/물리적 재료물성치

모재와 용착금속 사이의 밀도, 열전도도 및 비열 등 열적/물리적 재료물성치는 차이가 없다고 가정되어진다. 향후 이에 대한 보다 심도 있는 검토가 수행되어야 할 것이다. 표 18의 조성을 Howe[59]와 Kubachewski[60]의 액상선/고상선 식에 대입하면 모재인 SA508 Gr.3 Cl.1의 액상선 및 고상선 온도는 각각 1501.04°C 와 1461.09°C 이다. Jablonka 등[61]의 관계식과 위탁실험 결과로부터 그림 18과 같이 온도에 따른 밀도 변화를 결정할 수 있다. ASME B&PV 규격[2], Thomas 등[62] 및 위탁실험 결과를 이용하여 비열 및 열전도도를 각각 그림 19, 20과 같이 결정할 수 있다. 그림 19의 비열은 잠열이 고려된 것이며 그림 20의 열전도도는 용융시 열대류 효과를 고려하기 위해 액상선 이상에서는 측정치의 5배를 곱한 값이다.

나. 기계적 재료 물성치

모재와 용착 금속 사이의 탄성계수, 항복응력 및 프와송 비 등 기계적 재료물성치도 차이가 없다고 가정되어진다. 향후 이에 대한 보다 심도 있는 검토가 수행되어야 할 것이다. ASME B&PV 규격[2]과 Mizukami 등[63]의 관계식으로부터 그림 21과 같이 온도에 따른 탄성계수 변화가 결정되어진다. 온도에 따른 항복응력 변화는 ASME B&PV 규격[2]과 Grill 등[64]의 연구결과로부터 그림 22와 같이 결정되어진다. 프와송 비는 온도에 따라 변화 없이 0.29[64]로 일정하다고 가정 되어진다. 만능 인장 시험기를 이용한 인장실험이 그림 23과 같이 수행되어졌으며 그림 24에 제시된 시편은 인장 실험시 파단된 시편이다.

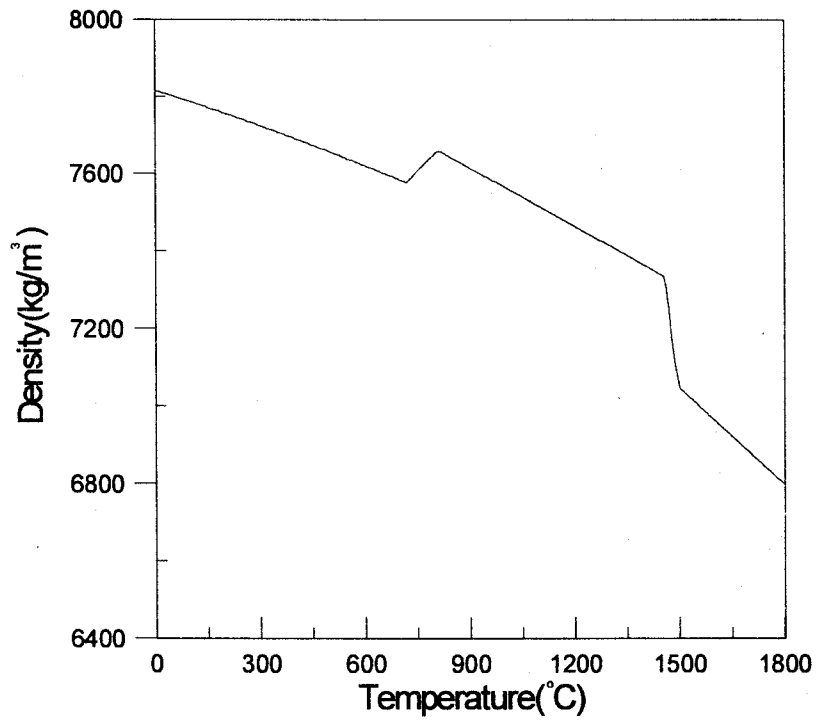


그림 18. 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1 의 밀도 변화

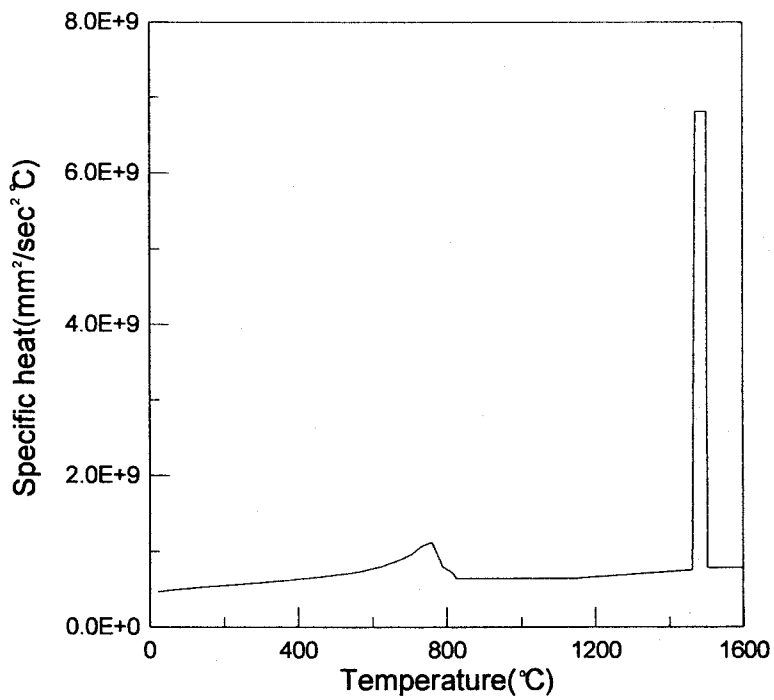


그림 19. 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1 의 비열 변화

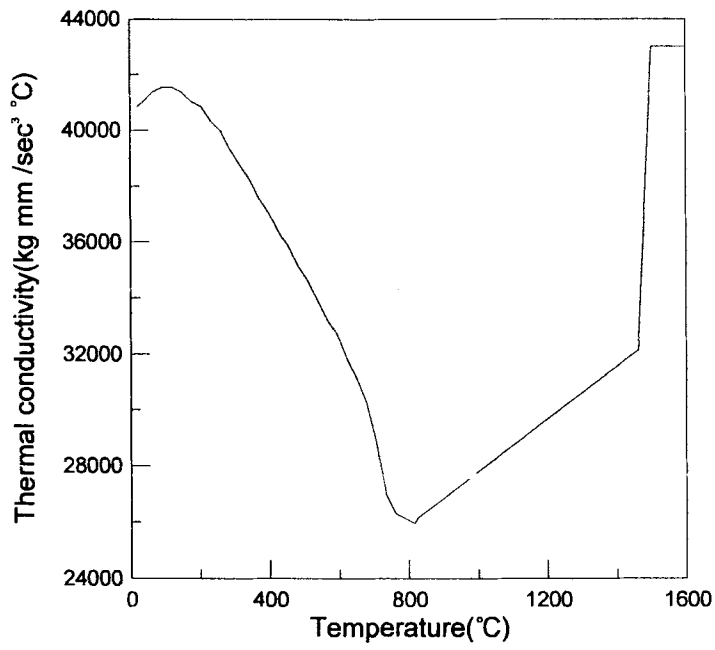


그림 20. 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1 의 열전도도 변화

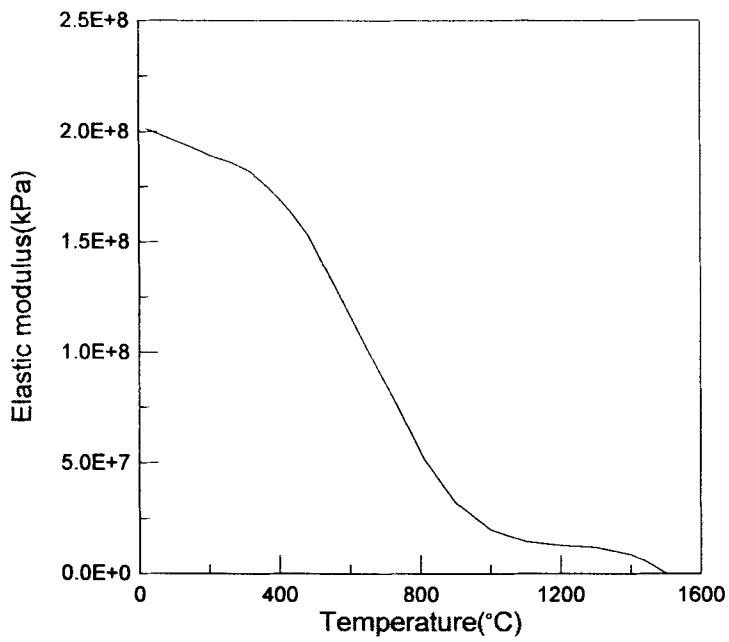


그림 21. 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1 의 탄성계수 변화

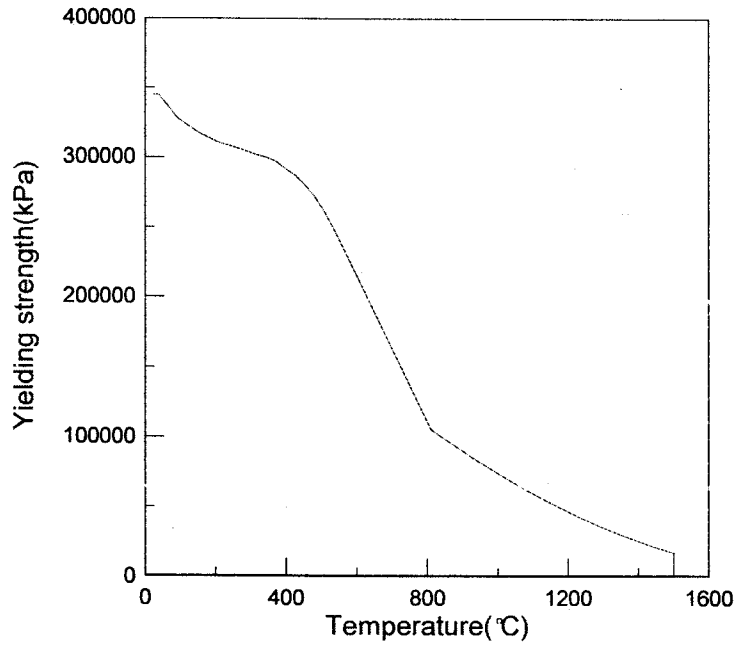


그림 22. 온도에 따른 SA 508 Gr.3 Cl.1 의 항복응력 변화

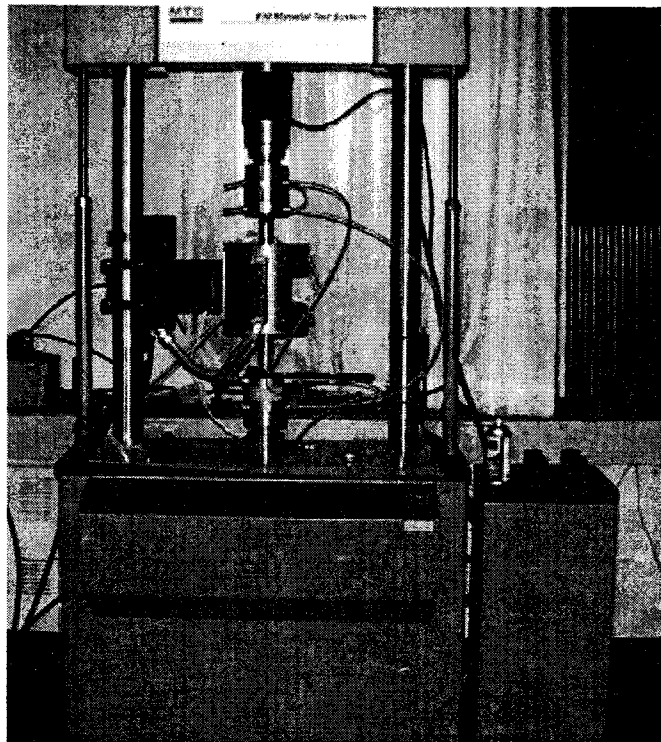


그림 23. 만능 시험 장치를 이용한 인장 실험

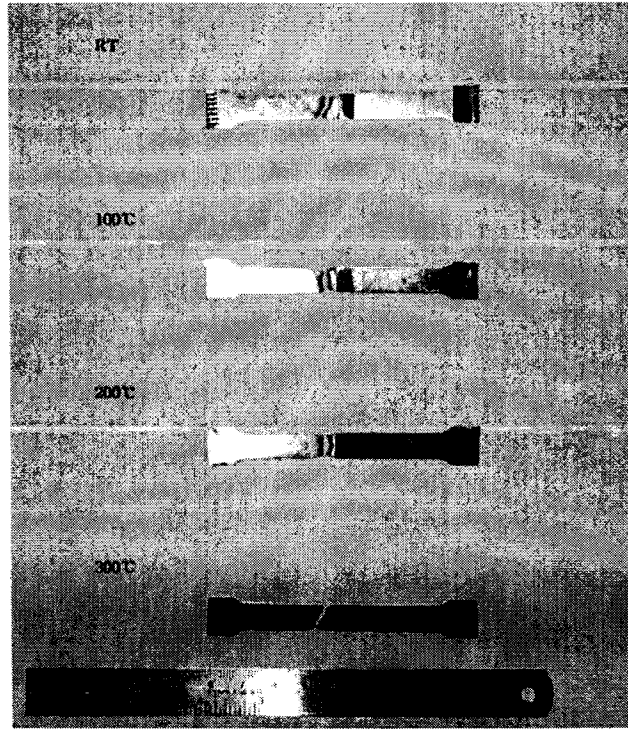


그림 24. 파단된 인장 시편

3. 온도해석 기술개발

가. 경계조건 결정

본 항에서는 해외 교육훈련 기간 동안 습득한 내용을 중심으로 온도해석을 위한 열적 경계 조건을 결정 제시하고자 한다. 온도해석을 위해서는 다음 아래의 열적 경계 조건들이 결정 되어져야 한다. 또한, 경제적인 온도해석을 위해 외면은 8Layer, 내면은 5Layer로 모델링한 Lumped 모델[12](외면의 1Layer와 내면의 1Layer는 중첩됨) 이용을 고려하여 다음 아래 사항들에 대해 검토 결정하였다.

- 입열량
- Layer 별 용접시간
- 초기온도
- 시간에 따른 열 유속
- 대기와의 열대류계수
- 용접 Layer 별 시간 간격
- 예열 및 후열 처리 시 온도 및 지속시간
- 냉각 시 용착금속부 열 유동

각 항목들에 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다.

- 입열량
 - 입열량은 용접봉을 액상선 온도 이상으로 용융 시키는데 모두 소비되었다고 가정하였음.
- Layer 별 용접시간
 - 축대칭 온도해석을 수행할 것이기 때문에 각 Layer 별 용접시간은 용접봉 속도의 역수로 표 22와 같이 결정됨. (mm 및 sec 단위로 유한요소 모델링 되어질 것이므로 속도를 mm/sec의 단위로 환원 후 계산)

표 22. 각 용접 Layer 별 용접시간

Layer	1	2-8	9-13
용접시간 (sec)	0.15	0.167	0.1818

- 초기온도
 - 용착금속이 용착될 때 초기온도는 액상선 온도 보다 10℃ 높은 1511.04℃라고 가정함.
 - 모재의 초기온도는 25℃에서 예열을 통해 121℃로 유지된다고 가정함.
- 시간에 따른 열 유속
 - 효율을 고려하여 계산된 입열량은 용착금속을 용융시키고 용착금속과 모재를 가열하는데 모두 소비어진다고 가정하였음.

- 따라서 열 유속은 고려하지 않았음.
- 대기와의 열대류계수
 - 열대류계수는 예열 및 후열 시에는 강제 대류이기 때문에 $100\text{W/m}^2\text{°C}$ 라고 가정되어지며 후열처리이후 공냉 동안은 자연대류이기 때문에 $10\text{W/m}^2\text{°C}$ 라고 가정되어짐.
- 용접 Layer 별 시간 간격
 - Layer 간 냉각시간은 1시간으로 가정하였음.
- 예열 및 후열처리시 온도 및 지속시간
 - 예열처리시의 주위 온도는 표 20을 참조하여 298°C 로 가정함.
 - 예열처리하는 용접 Layer 사이에도 계속되어짐.
 - 후열처리시의 주위 온도와 지속시간은 표 20을 참조하여 635°C 로 40.5시간으로 가정함.
- 냉각 시 용착금속부 열 유동
 - 용제 도포를 통해 용접동안과 용접이후 대기로부터 차단 보호되므로 단열조건으로 가정함.

나. 유한요소 모델링

그림 25는 PATRAN을 이용해 모델링한 온도해석을 위한 유한요소 모델을 나타내고 있다. 그림 25에서 보이는 바와 같이 요소 수와 절점 수는 각각 830과 940이며 요소 특성은 4절점 축대칭 요소이다. 각 Layer 내 요소들은 각 Layer의 용접순서에 따라 제거와 재탄생 (Rebirth)의 과정을 모사하는 ABAQUS의 Model Change 기능[9]을 이용하여 각 용접 Layer 별로 부가 또는 삭제되어진다.

다. 온도해석

본 연구에서는 비열 설정시 상 변태/변화에 의한 급격한 변화를 고려하여 용접 동안의 잠열 방출/흡수와 같은 실제 용접 현상을 고려하였으며 ABAQUS Model Change 기능을 이용하여 다층 육성용접과 같은 실제 용접과정을 고려하였다. 또한, Lumped 모델을 이용한 열전도 근거 해석을 통해 효율적인 온도해석을 수행하였다. 본 온도해석 기술은 해외 교육과 국제공동연구(PVRC/MPC JIP)를 통해 공동 개발한 기술로서 금속조직 예측 및 잔류 응력 해석의 기초가 된다.

그림 26은 용접 Layer 5가 용착되어 Layer 6 용착 이전까지의 시간에 따른 온도변화를 보여 주고 있다. 그림 26에서 보이는 바와 같이 시간 경과에 따라 용접부의 국부적인 고열이 확산 되어 온도가 감소함을 알 수 있다. 그림 27은 외면 용접 Layer 1의 중심부에 위치한 절점 275에서의 시간에 따른 온도변화 값을 제시하고 있다. 그림 27에서 보이는 바와 같이 각 용접 Layer가 용착되는 것에 따라 온도가 증가하다가 감소하는 것을 반복함을 보여주고 있다. 그림 28은 외면 용접 Layer 5에서 용융선(FL : Fusion Line)으로부터 떨어진 거리에 따른 온도의 시간 변화를 보여주고 있다. 그림 28에서 보이는 바와

같이 용융선으로부터 멀어 질수록 용접 Layer가 용착시 발생하는 Peak 온도가 감소함을 알 수 있다. 그림 29는 용융선으로부터의 거리별 Peak 온도치를 기존 연구결과[65]와 비교 제시하고 있는데 $\pm 5\%$ 범위 내에서 잘 일치하고 있다. 따라서 본 연구를 통해 개발된 온도해석 기술은 잠열 방출/흡수, 다층 육성용접 및 후열처리 같은 실제 용접 현상/과정을 고려함으로써 해석 해의 신뢰성이 확보된 효율적인 기술임을 알 수 있다.

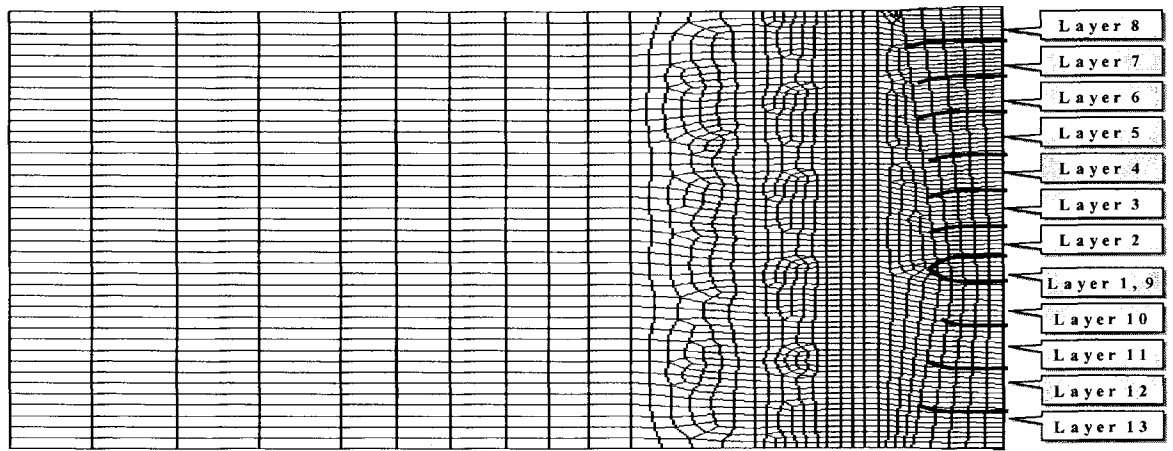
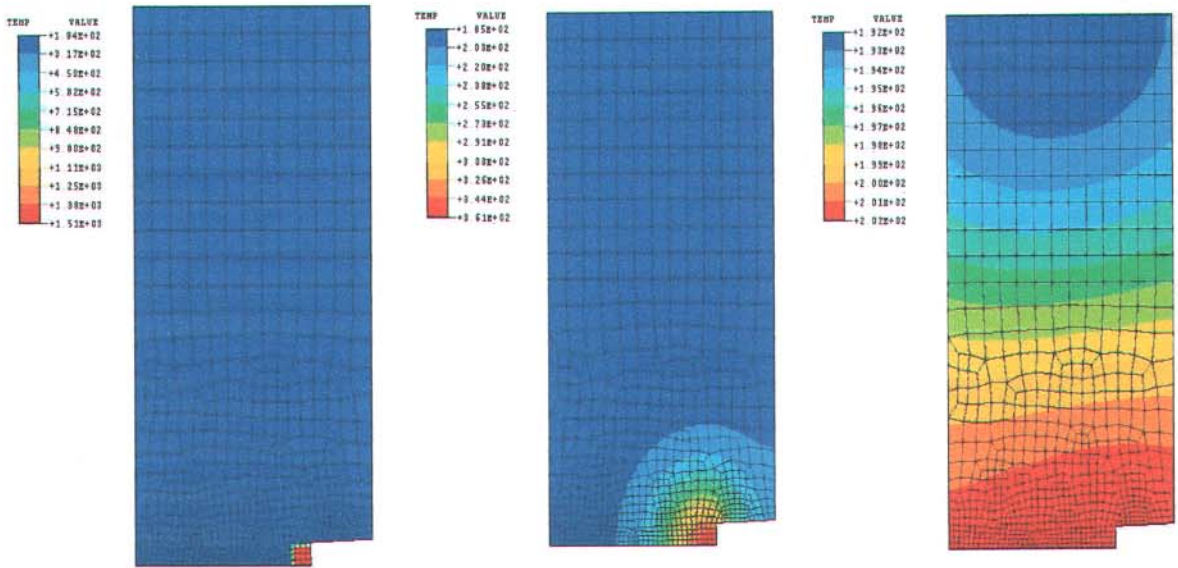


그림 25. 유한요소 모델



(a) Layer 5 이후 바로

(b) Layer 5 이후 105 초 경과

(c) Layer 6 바로전

그림 26. 시간에 따른 Layer 5 와 Layer 6 사이의 온도 분포 변화

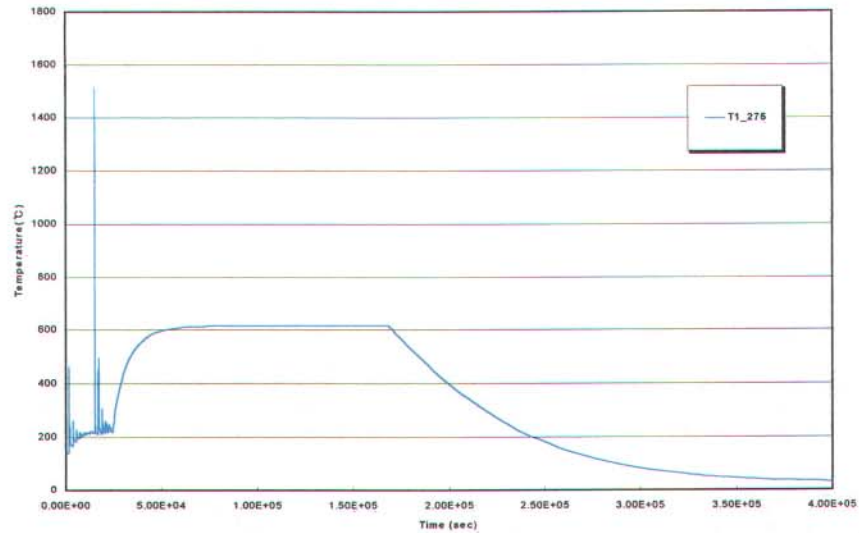
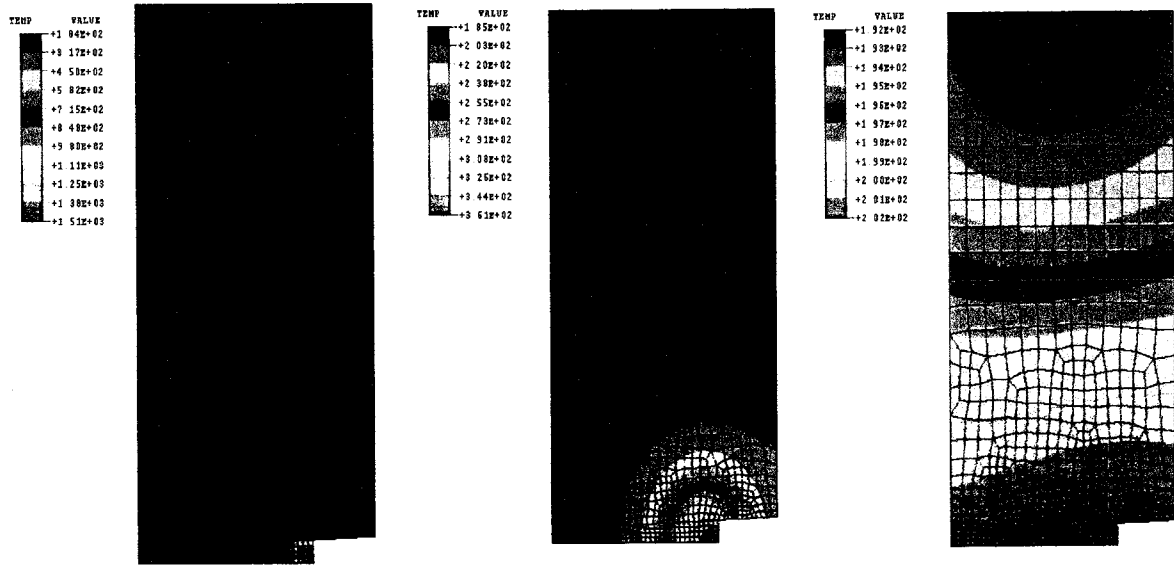


그림 27. 시간에 따른 Layer 1 중심에서의 온도 변화



(a) Layer 5 이후 바로 (b) Layer 5 이후 105 초 경과 (c) Layer 6 바로전

그림 26. 시간에 따른 Layer 5 와 Layer 6 사이의 온도 분포 변화

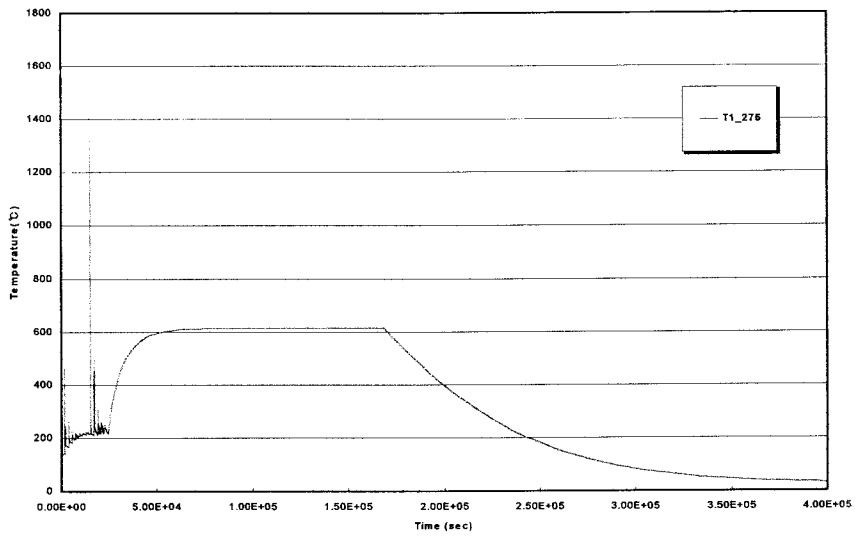


그림 27. 시간에 따른 Layer 1 중심에서의 온도 변화

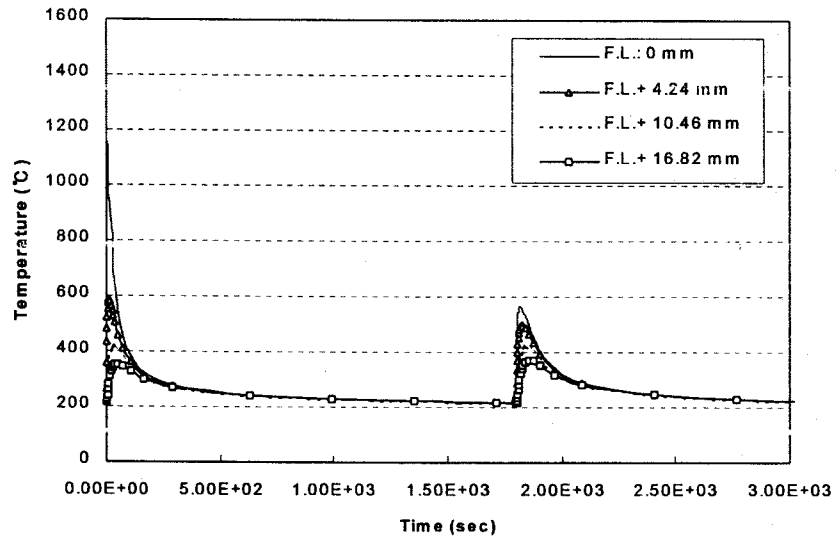


그림 28. 용융선으로부터 거리에 따른 Peak 온도의 시간 변화

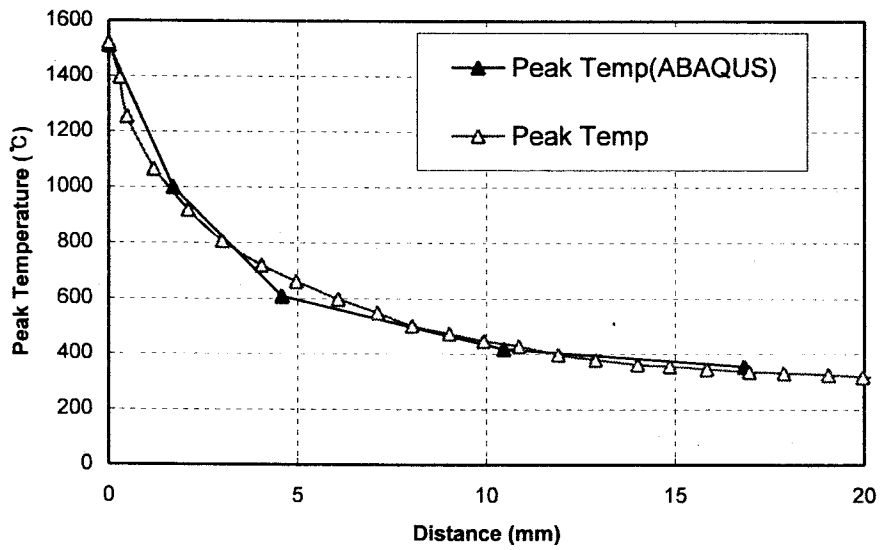


그림 29. 용융선으로부터 거리별 Peak 온도의 비교

4. 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발

원자로 압력용기 강인 SA 508 Gr.3 Cl.1뿐만 아니라 대부분의 원전설비 구조용 강의 용착부는 모재에 비하여 기계적 물성이 우수하고 열 영향부의 기계적 물성은 용접 또는 후열처리 이후 모재나 용착부에 비하여 저하된다고 보고되고 있다[66]. 따라서 본 연구에서는 용접부내 취약부인 열영향부를 해석대상 부위로 선정하여 용접과정 동안의 열이력에 따른 결정립 크기, 석출 상 종류/분포/분율, 탄화물 종류 및 조대화 등 금속 조직/성분 변화를 실제 용접 현상/과정(실제 용접 현상/과정을 고려하여 계산한 열영향부의 열 이력)을 고려하여 예측하는 기술을 개발하고자 한다. 본 금속조직 예측기술 중 일부는 해외교육과 국제공동연구(PVRC/MPC JIP)를 통해 공동 개발한 기술이며 원활한 기술개발을 위해 국내 전문가 기술자문을 수행하였다.

가. 결정립 크기 예측

결정립 크기는 핵 생성 및 확산정도에 큰 영향을 미치므로 TTT 선도 결정 이전에 먼저 결정하여야 한다. 용접 열싸이클에 의해 미세조직의 결정립 크기는 변화하며 크게 재결정에 의한 결정립 미세화 현상과 고온에서의 결정립 성장으로 구분할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 용접의 냉각과정시 발생하는 결정립 성장만을 고려하였다. 고온에서의 결정립 성장은 식(2)~(4)[67]와 같은 관계가 있음이 확인되었다.

$$d_r^{n_1} = d_0^{n_1} + K_0 \alpha \tau \exp\left(-\frac{Q}{RT_p}\right) \quad (2)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{\pi RT_p}{Q}} \quad (3)$$

$$\tau = \left(\frac{q'}{vd}\right)^2 [4\pi\lambda\rho(T_p - T_0)^2] \quad (4)$$

여기서, d_r : 시간에 따른 결정립 크기, d_0 : 초기 결정립 크기, n_1 은 지수(강인 경우 0.1~0.3), Q 는 활성화 에너지, T_p 는 Peak 온도, q' 는 입열량, v 는 용접속도, λ 는 열전도도, ρ 는 밀도, d 는 두께이다.

그림 30은 초기 결정립 크기를 22 μ m로 가정하여 상기 식에 따라 계산된 결정립 성장 결과이다. Peak 온도가 1350 $^{\circ}$ C에서 시간이 경과함에 따라 결정립 성장이 두드러지게 나타나지만 Peak 온도가 900 $^{\circ}$ C에서는 거의 변화가 없었다. 이는 1000 $^{\circ}$ C 미만에서는 결정립 성장 구동력이 매우 낮기 때문인 것으로 판단된다. Supercritical 지역의 경우 1000 $^{\circ}$ C까지의 냉각시간이 약20~30초 정도 소요되므로 최종 Prior 오스테나이트 결정립 크기는 약 30~38 μ m가 된다.

이러한 값은 위탁실험 결과(모재 : 24 μ m, 용접부 : 41 μ m)와 신뢰도 구간 90% 이내에서 잘 일치한다. 따라서 기존 실험 결과식[67]과 온도해석 결과를 이용한 본 결정립 성장 결정기술은 타당하다고 할 수 있다.

나. 평형상태도 및 상 변태점 결정

금속 열역학 계산 프로그램인 Thermo Calc를 이용하여 금속 상변태 거동 해석시 가장 기초가 되는 입력 및 참조 자료들인 평형 상태도 및 변태점이 결정되어진다.

1) 평형 상태도 작성

금속의 미세조직 안정성을 확인하는 것은 재질의 건전성을 평가하기 위한 첫 단계이며, 이것은 평형 상태도를 작성함으로써 확인된다. 평형상태도는 Hillert와 Staffasson[68]에 의해 제안된 부격자 (Sublattice) 모델을 이용하여 작성할 수 있다. 부격자 모델이란, 예를 들어 bcc 고용체 강의 경우 금속 원소가 차지하는 격자자리와 침입형 원자(C, N)와 원자 공공(Vacancies)으로 이루어진 격자간 자리를 각기 독립적인 부격자로 가정하여 bcc 격자가 두개의 부격자로 이루어졌다고 보는 것이다. 이 모델은 fcc/hcp 고용체 상에 대해서도 같은 방법으로 적용되며, 합금계에서 세 가지 상의 분자식 (Formula Unit)을 Fe-Cr-Mn-C-N의 5원 합금계에 대해 예를 들어 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Formula Unit} : (\text{Fe, Cr, Mn})_a(\text{Va, C, N})_c$$

여기서 첨자 a와 c는 두 부격자 상에서의 자리 비율을 나타내는 정수로서 격자 자리와 8면체 공공의 자리 비율에 따라 bcc 격자의 경우 a=1, c=3, fcc 격자의 경우에는 a=1, c=1의 값이 이용되고 있으며, hcp 격자의 경우에는 격자 구조상 fcc 격자에서와 같은 값이 이용되어야 하나 상대적으로 격자간 거리가 작은 C 축 방향으로서는 매 격자간 자리마다 침입형 원자가 들어서지는 못한다고 가정하여 a=1, c=0.5의 값이 이용되고 있다.

이러한 fcc와 hcp 고용체에 대한 열역학 모델은 각기 같은 격자구조를 갖는 M(C,N) 및 M₂(C,N) 형태의 탄질화물에 대해서도 똑같이 적용된다. 위의 분자식으로 표현되는 상의 분자식 1mole 당 Gibbs 에너지 식을 Fe-Cr-Mn-C-N 5원 합금계에 대해 예를 들어 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G_m = & y_{\text{Fe}}y_{\text{Va}}^0 + y_{\text{Cr}}y_{\text{Va}}^0 G_{\text{CrVa}} + y_{\text{Mn}}y_{\text{Va}}^0 G_{\text{MnVa}} + y_{\text{Fe}}y_{\text{C}}^0 G_{\text{FeC}} + y_{\text{Cr}}y_{\text{C}}^0 G_{\text{CrC}} + y_{\text{Mn}}y_{\text{C}}^0 G_{\text{MnC}} \\ & + y_{\text{Fe}}y_{\text{N}}^0 + y_{\text{Cr}}y_{\text{N}}^0 G_{\text{CrN}} + y_{\text{Mn}}y_{\text{N}}^0 G_{\text{MnN}} + aRT(y_{\text{Fe}} \ln y_{\text{Cr}} + y_{\text{Mn}} \ln y_{\text{Mn}}) \\ & + cRT(y_{\text{Va}} \ln y_{\text{Va}} + y_{\text{C}} \ln y_{\text{C}} + y_{\text{N}} \ln y_{\text{N}}) + \Delta G^{m0} + \Delta G^{xs} \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 y는 각 원소의 해당 부격자 내에서의 자리분율을 나타내며 ${}^0G_{\text{MVA}}$ 는 순수 원소 M의 비자성 상태에서의 Gibbs 자유에너지를 나타낸다. 또한 ${}^0G_{\text{MC}}$, ${}^0G_{\text{MN}}$ 는 격자간 자리가 모두 C 또는 N으로 채워진 가상의 M-C 또는 M-N 화합물의 Gibbs 에너지를 나타낸다. aRT 및 cRT로 시작되는 항은 각각의 부격자 내에서 원자 배열 엔트로피로 인한 Gibbs 에너지 항이며, ΔG^{m0} 는 자기변태에 의한 Gibbs 에너지의 변화를 나타내는 항으로 Inden[69], Hillert와 Jarl[70]에 의해 제안된 모델식이 사용된다. 식(5)로부터 알 수 있듯이 각 상에 대해 적용될 열역학 모델(분자식)이 정해지면 Gibbs 에너지의 표현식은 자동적으로 결정이 된다. 표 23에 주요 상에 적용되는 부격자 모델을 제시하였다.

표 23. 개별적 상들에 대한 부격자 모델

개별적 상	부격자 모델
Liquid	(C, Cr, Fe, Mn, Mo, N, Ni, Si)
BCC_A2	(Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Si) ₄ (C, N, Va) ₃
FCC_A1	(Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Si) ₄ l(C, N, Va) ₄
HCP_A3	(Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Si) ₄ l(C, N, Va) _{0.5}
SIGMA	(Fe, Mn, Ni, Si) ₈ (Cr, Mo) ₄ (Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Si) ₄₈
CHI_A12	(Cr, Fe)24(Cr, Mo) ₄₀ (Cr, Fe, Mo) ₂₄
LAVES_PHASE	(Cr, Fe, Mn) ₂ (Mo) ₄
MU_PHASE	(Cr, Fe, Mn, Ni) ₇ (Mo) ₂ (Cr, Fe, Mo, Ni) ₄
P_PHASE	(Cr, Fe, Ni) ₂₄ (Cr, Fe, Mo, Ni) ₂₀ (Mo) ₁₂
R_PHASE	(Cr, Fe, Ni) ₂₇ (Mo) ₁₄ (Cr, Fe, Mn, Mo, Ni) ₁₂
M6C	(Fe, Ni) ₂ (Mo) ₂ (Cr, Fe, Mo, Ni) ₂ (C) ₄
M23C6	(Cr, Fe, Mn, Ni) ₂₀ (Cr, Fe, Mn, Mo, Ni) ₃ (C) ₆
CEMENTITE	(Cr, Fe, Mn, Mo, Ni) ₃ (C, N) ₄
KSI CARBIDE	(Cr, Fe, Mo) ₃ (C) ₄
M7C3	(Cr, Fe, Mn, Mo, Ni) ₇ (C) ₃
PI	(Cr) _{12.8} (Fe, Ni) _{7.2} (N) ₄
FE4N	(Cr, Fe, Mn, Ni) ₄ (C, N) ₄
FECN_CHI	(Fe) _{2.2} (C, N) ₄

그림 31은 기 설명한 부격자 모델을 이용한 상용 패키지인 Thermo-Calc를 사용하여 SA508 Gr.3 Cl.1에 대하여 온도에 따른 안정상(Stable Phase)을 계산한 결과이다. 그림 31에서 보듯이 SA508 Gr.3 Cl.1에서 열역학적으로 안정한 탄화물로는 MC, M₂C, M₇C₃, ξ - Carbide, Cementite (M₃C)가 있으나 실제 용접시 발생하는 온도를 고려할 때 MC 형태의 탄화물은 생성되기 어려운 것으로 판단된다. 이 결과는 M₃C 와 M₂C 형태의 탄화물이 관찰된 실제 TEM 분석 결과[66]와도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Thermo Calc를 이용한 상 변태도 결정기술은 타당함을 알 수 있다.

2) 변태점 계산

그림 31을 통해 오스테나이트에서 페라이트로 변태되는 평형 변태점인 A_{c1} 및 A_{c3} 온도를 결정할 수 있으며 이 값을 경험식 및 실험에 의해 도출된 결과와 함께 표 24에 제시하였다. 각 방법에 따라 차이가 나는 주요 원인은 경험식[71] 및 실험 결과[72]는 가열과정시의 변태점이고 Thermo-Calc로 계산한 값은 평형상태 값이기 때문이다.

표 24. A₁과 A₃의 변태점 온도

구분	A ₁ (°C)	A ₃ (°C)	비고
Thermo Calc	646	790	A _{c1} /A _{1c3} 해당
김주하 등	680	830	A _{c1} /A _{c3} 해당
한국중공업 실험	701	786	A _{c1} /A _{c3} 해당

다. TTT 및 CCT 선도 예측

등온 하에서 변태가 시간 경과에 따라 석출되는 상을 나타낸 것이 TTT 선도이며 CCT 선도는 연속냉각 시 시간 경과에 따라 석출되는 상을 나타낸 선도로써 시간에 따른 온도해석 결과와 중첩되어 상의 석출 여부를 결정하는데 이용되어진다.

1) TTT 선도 예측

TTT 곡선은 Zener[73] 및 Hillert[74]가 제시한 다음의 식(6)에 의해 작성된다.

$$\tau(X, T) = \frac{F(C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, G)}{\Delta T^n \exp(-Q/RT)} S(X) \quad (6)$$

여기서, F는 금속의 화학조성(wt.%)의 함수, G는 Prior 오스테나이트 결정립 크기 (ASTM Number), ΔT 는 과냉도, Q는 확산반응에 대한 활성화 에너지, n은 확산과 관련된 경험 상수 (n=2는 체적을 통한 확산, n=3은 Boundary를 통한 확산)이다. S(X)는 반응속도 함수로서 식(7)과 같이 작성된다.

$$S(X) = \int_0^X \frac{dX}{X^{0.4(1-X)}(1-X)^{0.4X}} \quad (7)$$

식(6)과 (7)을 사용하여 냉각 시 생성되는 상에 대한 분율을 계산할 수 있다. 따라서 냉각시 생성되는 페라이트 상의 분율은 식(8)와 (9)과 같다[14].

$$\tau_F = \frac{FC}{2^{0.41G} (Ae_3 - T)^3 \exp(-27500/RT)} S(X) \quad (8)$$

$$FC = \exp(-4.25 + 4.12C + 4.36Mn + 0.44Si + 1.71Ni + 3.33Cr + 5.19\sqrt{Mo}) \quad (9)$$

펄라이트 상의 분율은 식(10)와 (11)과 같이 표현된다[14].

$$\tau_P = \frac{PC}{2^{0.32G} (Ae_1 - T)^3 \exp(-27500/RT)} S(X) \quad (10)$$

$$PC = \exp(1.00 + 6.31C + 1.78Mn + 0.31Si + 1.12Ni + 2.70Cr + 4.06Mo) \quad (11)$$

베이나이트 상의 분율은 식(12)와 (13)과 같이 표현된다[14].

$$\tau_B = \frac{BC}{2^{0.29G} (B_s - T)^2 \exp(-27500/RT)} S(X) \quad (12)$$

$$BC = \exp(-10.23 + 10.18C + 0.85Mn + 0.55Ni + 0.90Cr + 0.36Mo) \quad (13)$$

이때, B_s 는 베이나이트 상의 시작 온도로 식(14)와 같이 표현된다[14].

$$B_s = 637 - 58C - 35Mn - 15Ni - 34Cr - 41Mo \quad (14)$$

한편 마르텐사이트 상의 시작온도는 Kung과 Raymond[75]에 의해 제안된 식(15)와 같다.

$$M_s = 539 - 423C - 30.4Mn - 17.7Ni - 12.1Cr - 7.5Mo + 10Co - 7.5Si$$

(15)

제시된 식(8)~(15)를 이용하여 SA 508 Gr.3 Cl.1 재질에 대한 TTT 선도 예측 결과를 그림 32에 나타내었다. 이때 결정립 크기는 $G=8$ 로 모재의 결정립 크기에 해당되며 시작 분율은 1% 및 10%로 설정하였다.

2) CCT 곡선 예측

앞 항에서 작성된 TTT 선도에 대해 Scheil-Avrami Additive 법칙[15,16]을 적용하여 CCT 선도로 변환하였다. 그림 33은 SA508 Gr.3 Cl.1에 대한 CCT 예측결과를 나타낸 것이고 그림 34는 SA508 Gr.3 Cl.1에 대한 실험한 결과[72]를 나타낸 것으로 예측결과와 실험결과가 유사한 경향을 보이고 있으나 예측결과가 실험결과보다 각 상들이 더 빨리 생성되고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 실험장비의 분해능이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 통해 개발한 TTT/CCT 선도 결정기술은 석출 상의 생성 양상 측면에서 타당함을 알 수 있다.

라. 석출상 및 상분율 예측

1) 단위 열영향부 결정

그림 35는 그림 29와 31을 통해서 도출된 Peak 온도와 변태온도를 결합시켜 나타낸 것으로 이를 통해 용접 경계에서 3.26mm까지는 Supercritical 영역, 3.26~4.35mm 사이는 Intercritical 영역, 그 이상은 Subcritical 영역으로 구분하였다. 그림 35에서 보이는 바와 같이 기존 연구결과[65]의 경우(5.24mm)와 비교시 Peak 온도에 따른 영역 구분이 잘 일치함을 보인다. 따라서 본 연구를 통해 개발한 개략적인 단위 열영향부 결정기술 만으로도 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있다.

2) 미세조직 예측

상기 작성한 CCT 선도와 온도해석시 도출된 냉각곡선을 활용하여 전반적인 미세 조직의 종류를 예측하고자 하였다. CCT 선도는 결정립 크기에 영향을 받으며 결정립 크기가 커질수록 장시간 축으로 곡선이 이동한다. 용접시 용융 경계부로부터 멀어질수록 Peak 온도가 낮아지며 이로 인해 결정립 크기가 변화한다. 이런 현상을 고려하여 결정립 크기별 CCT 선도를 작성한 후 용접시 위치별 냉각곡선을 이용하여 미세조직을 예측하였다. 그림 36 및 37은 온도해석을 통해 도출된 냉각곡선과 CCT 선도를 중첩 시킨 것으로 냉각곡선이 베이나이트의 시작점을 통과하고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 용접부 전반의 조직은 베이나이트로 구성되며 일부 미변태 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태할 것으로 예측된다. 따라서 최종 조직은 베이나이트와 마르텐 사이트의 혼합조직이며 용접 경계로부터 멀어질수록 냉각속도 및 결정립 크기의 변화로 인해 최종적으로는 베이나이트와 마르텐사이트의 분율이 변화될 것이라 예측할 수 있다.

이를 확인하기 위해 Ion 등[76]이 제안한 방법에 따라 결정립 크기에 따른 상분율을 계산하였고 그 결과를 그림 38에 제시하였다. 결정립 크기가 작아질수록 즉, 용융 경계부로부터 멀어질수록 마르텐사이트의 분율이 감소함을 정성적으로 확인할 수 있었다. 그림 39~41은 예측결과를 검증하기 위해 수행한 위탁실험 결과로 열영향부를 구성하는 대부분의 조직은 모재와 유사한 베이나이트 조직임을 확인할 수 있었다. 그러나 확보한 시편이 후열처리를 수행한 시편이었기 때문에 마르텐사이트 조직은 확인할 수 없었다. 따라서 미세조직 예측과 관련된 기술의 정량적 비교를 통한 타당성 검증을 수행할 수는 없었으나 열영향부에서 베이나이트 조직이 석출된다는 위탁실험 결과와의 비교를 통해 정성적인 타당성을 검증하였다.

마. 후열처리에 따른 탄화물 크기 예측

RPV의 두께는 약 250mm 정도로 두껍기 때문에 용접 후 615℃에서 40시간 정도의 후열 처리를 수행한다. 후열처리를 통해 용접 경계에서 발생한 마르텐사이트 조직은 연성이 회복되어 기계적 성질은 향상되나 대부분의 HAZ 조직인 베이나이트 조직에서는 탄화물의 조대화 현상이 발생되어 경도 및 연성이 동시에 저하된다[65]. 탄화물 성장은 식(16) 또는 열역학 이론과 원자의 확산계수를 이용한 상용 패키지인 DICTRA를 이용하여 계산할 수 있다.

$$r^3 - r_0^3 = k \left(\frac{\alpha \tau}{T_p} \right) \exp\left(-\frac{Q}{RT_p}\right) \quad (16)$$

여기서, r_0 와 k 는 실험 상수이다.

본 연구에서는 DICTRA를 통해 후열처리 조건에서의 M_2C Carbide(MO_2C) 성장을 계산하였고 이때 초기 탄화물의 직경은 김주학 등[66]의 연구에 제시된 바와 같이 0.2 μ m로 가정하였다. 그림 42는 DICTRA를 통해 계산된 M_2C Carbide 성장 결과이며 여기에서 제시한 탄화물 크기는 부피이다. 계산결과 615℃에서 40시간 경과 후 탄화물의 크기는 초기 크기에 비해 약30% 정도 증가되었음을 확인할 수 있었다. 이 결과는 후열처리 시 발생하는 Subcritical 지역에서의 연화현상을 설명하는데 활용될 수 있다.

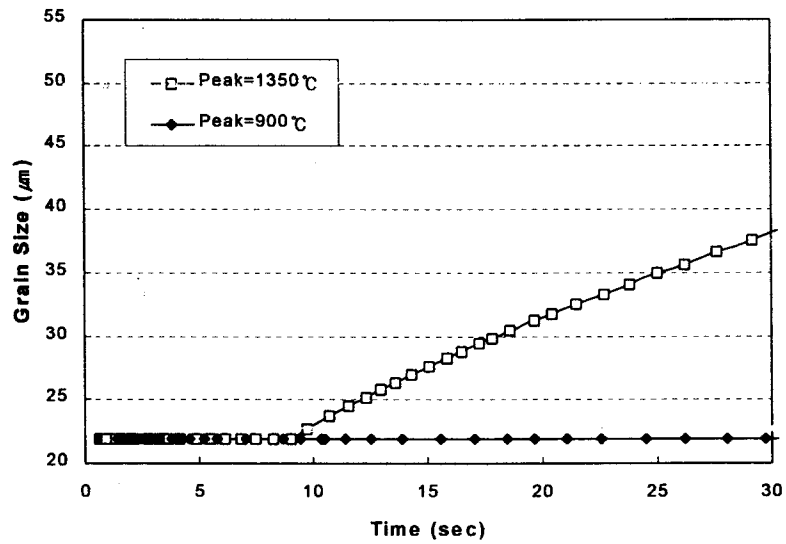


그림 30. Peak 온도 및 시간에 따른 Prior 오스테나이트 결정립 성장

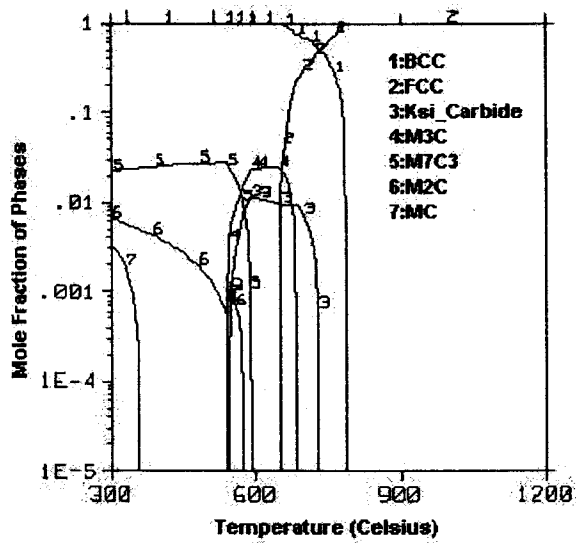


그림 31. 온도에 대한 SA 508 Gr.3 Cl.1 의 개별적 상들의 평형 상 분율

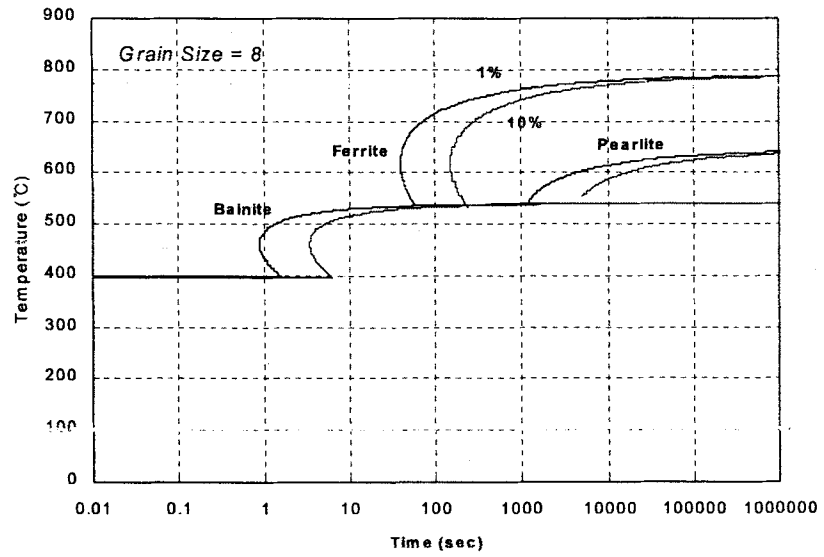


그림 32. SA 508 Gr.3 Cl.1 의 TTT 선도 (예측 결과)

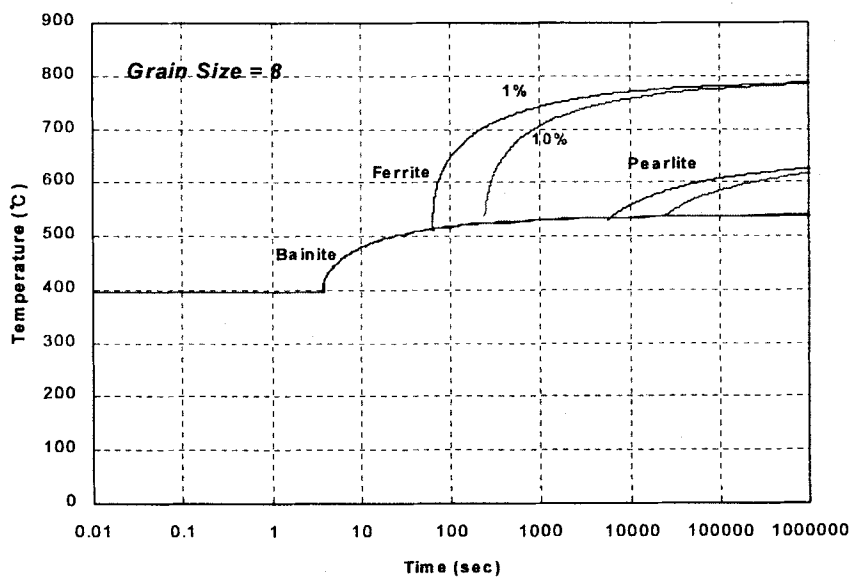


그림 33. SA 508 Gr.3 Cl.1 의 CCT 선도 (예측결과)

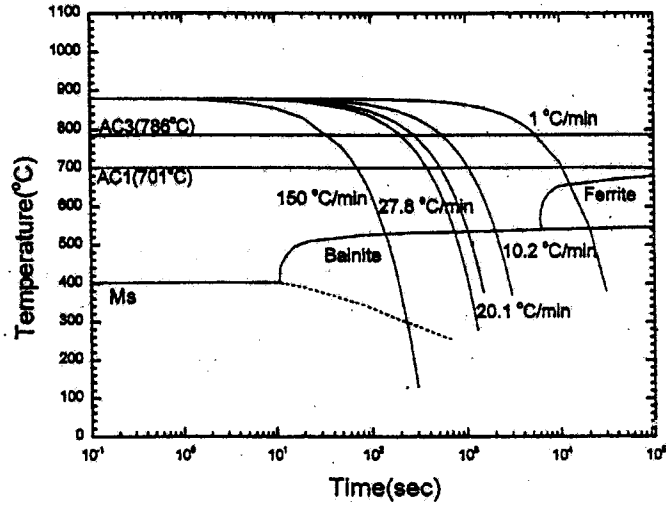


그림 34. SA 508 Gr.3 Cl.1 의 CCT 선도 (실험결과)

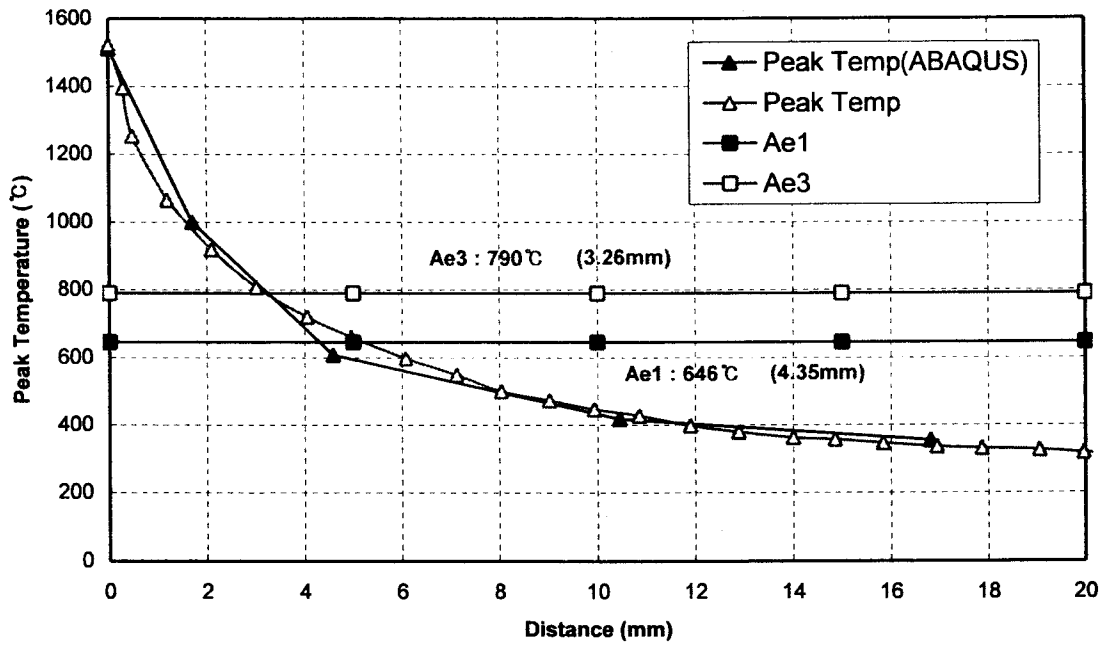


그림 35. Peak 온도에 따른 단위 열영향부 결정

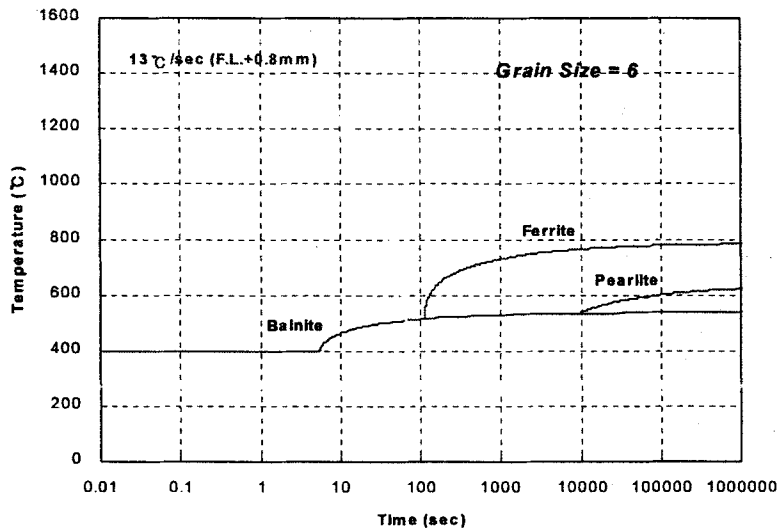


그림 36. 용융선으로부터 0.8mm 떨어진 SA 508 Gr.3 Cl.1 열 영향부의 미세조직 예측

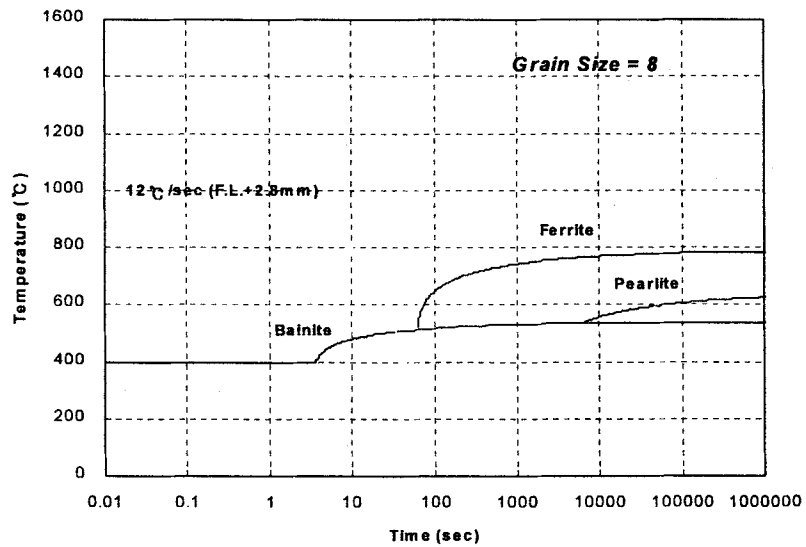


그림 37. 용융선으로부터 2.8mm 떨어진 SA 508 Gr.3 Cl.1 열 영향부의 미세조직 예측

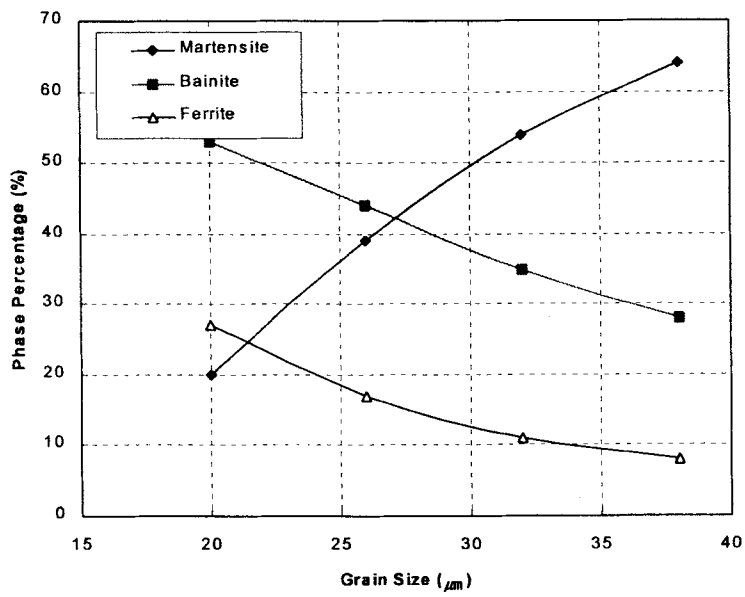


그림 38. 결정립 크기에 따른 상 분율의 평가

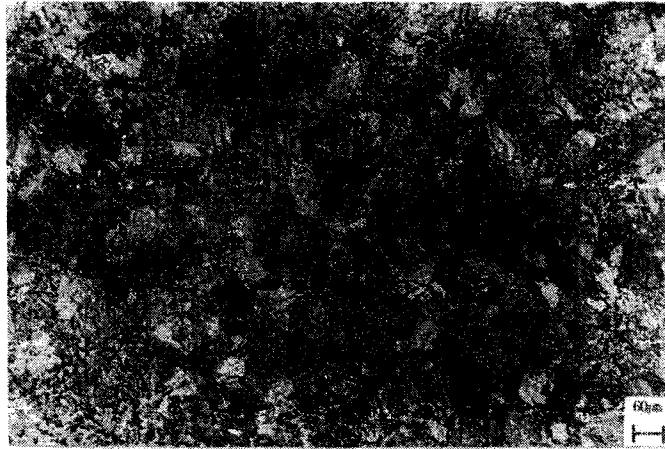


그림 39. 후열처리 적용 후 SA 508 Gr.3 Cl.1 모재의 미세조직

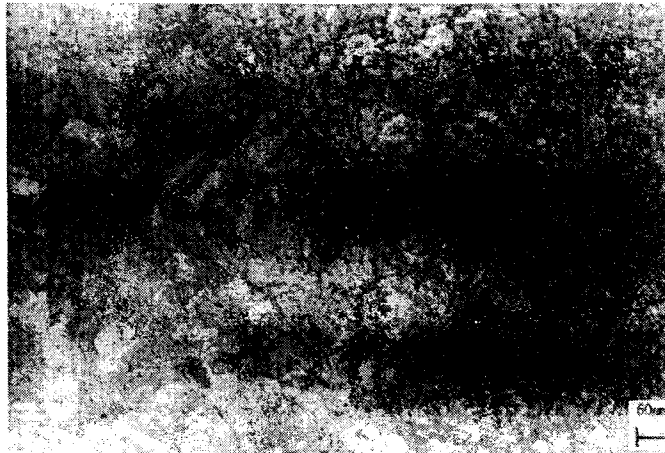


그림 40. 후열처리 적용 후 SA 508 Gr.3 Cl.1 열 영향부의 미세조직

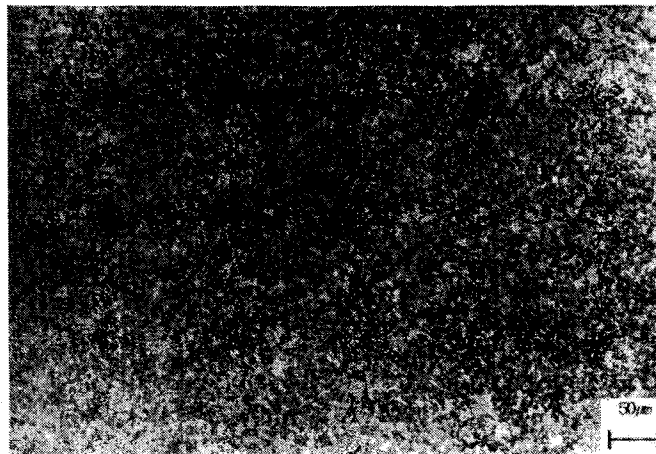


그림 41. 후열처리 적용 후 SA 508 Gr.3 Cl.1 의 용착부의 미세조직

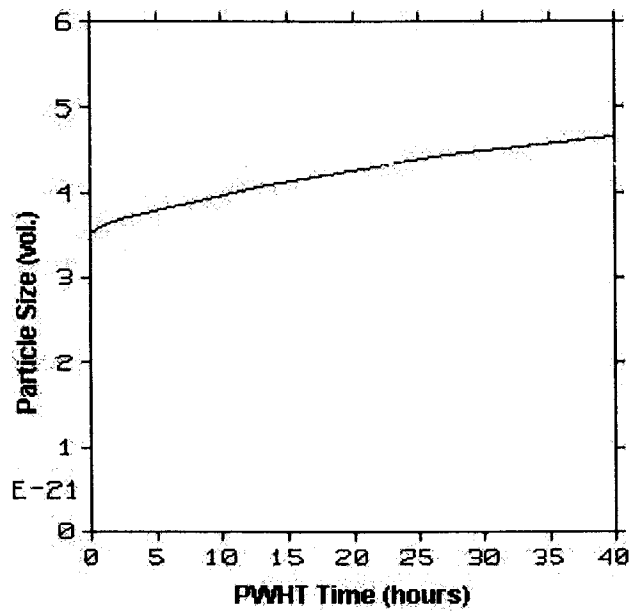


그림 42. 후열처리에 의한 탄화물 조대화

5. 기계적 물성 예측 기술개발

원자로 압력용기 강인 SA 508 Gr.3 Cl.1의 경우 용접 및 후열처리에 의해 발생하는 조직변화, 탄화물 석출 및 성장에 의해 기계적 특성이 저하될 수 있어 원전의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 보다 실제적인 원자로 압력용기의 건전성평가를 위해서는 용접 및 후열 처리에 의해 발생하는 금속조직 변화에 따른 기계적 물성의 변화를 고려한 평가가 필요하다.

가. 비커스 경도(H_v) 예측

기계적 성질은 미세조직의 종류 및 분율에 따라 변화하므로 Victor Li[14]가 제시한 식(17)~(20)로 용접부의 경도를 예측할 수 있다. 이러한 결과는 후열처리 전 상태를 의미한다.

$$H_v = X_M H_{VM} + X_B H_{VB} + (X_F + X_P) H_{VF+P} \quad (17)$$

$$H_{VM} = 127 + 949C + 27Si + 11Mn + 8Ni + 16Cr + 21 \log V_r \quad (18)$$

$$H_{VB} = -323 + 185C + 330Si + 153Mn + 65Ni + 144Cr + 191Mo + (89 + 53C - 55Si - 22Mn - 10Ni - 20Cr - 33Mo) \log V_r \quad (19)$$

$$H_{VF+P} = 42 + 232C + 53Si + 30Mn + 12.6Ni + 7Cr + 19Mo + (10 - 19Si + 4Ni + 8Cr + 130V) \log V_r \quad (20)$$

여기서 H_{VM} 는 마르텐사이트 경도, H_{VB} 는 베이나이트 경도, H_{VF+P} 는 페라이트와 펄라이트 혼합 조직의 경도, X 는 상의 부피분율이고 V_r 는 냉각속도이다.

상기 식들을 이용하여 용접 경계로부터의 거리에 따른 경도값을 예측하여 그림 43에 제시하였다. 또한 예측 결과를 검증하기 위하여 위탁 실험결과 및 국내 연구결과[77]와 비교하였다.

용접경계 근처와 후열처리 이전에서는 차이가 거의 없으나 모재에서는 예측 값이 실험값보다 더 크게 나타났다. 따라서 본 연구를 통해 개발한 경도 예측기술은 후열처리 이전에 대해서 유사한 경향을 얻을 수 있으나 정량적인 값에는 차이가 존재한다. 이러한 차이와 후열처리 이후의 경도값은 향후 템퍼링 효과(Tempering Effect)를 고려한 보완 수정을 통해 계산되어질 수 있다.

나. 인장강도 및 항복강도 예측

Akselsen[78]은 경도 예측결과를 활용하여 후열처리 전의 Supercritical 지역(결정립 조대화 지역)의 인장강도 및 항복강도를 예측하였고 경도값과 인장강도 및 항복강도와의 관계는 식(21)~(23)과 같다.

$$\sigma_y = 3.1H_v(0.1)^n - 80 \quad (21)$$

$$n = 0.065(\Delta t_{8/5})^{0.17} \quad (22)$$

$$\sigma_u = 3.5H_v(1-n)\left[\frac{12.4}{(1-n)}\right]^n - 92 \quad (23)$$

여기서, σ_s 는 항복강도, σ_u 는 인장강도, ΔH_v 는 Vickers 경도, $\Delta t_{8/5}$ 는 800℃에서 500℃까지의 냉각 시간이다.

상기 식들에 따른 예측결과를 표 25에 제시하였고 예측값이 실험값보다 큰 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 개발한 항복강도/인장강도 예측기술은 향후 보완 수정이 필요하다.

표 25. 항복강도 및 인장강도 비교

구분	H_v	$\Delta t_{8/5}$	예측결과 (MPa)		실험결과 (MPa)
			σ_y	σ_u	σ_u
F.L. + 0.8mm	417.6	23	923.1	1648.2	1286
F.L. + 2.8mm	325	25	697.8	1265.8	1039

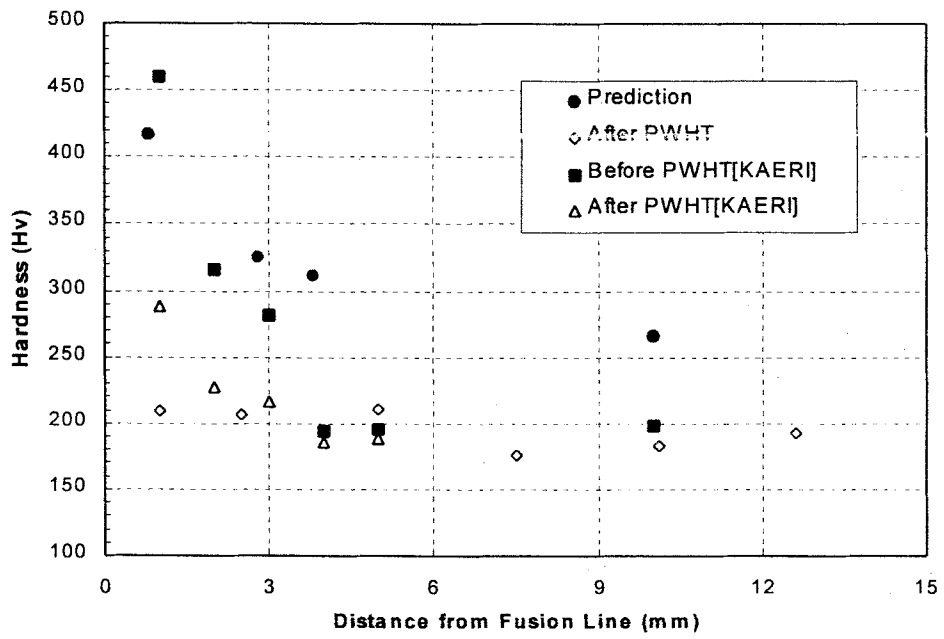


그림 43. SA 508 Gr.3 Cl.1 용접부의 비커스 경도 변화 예측

제 3절 금속조직 예측기술 검증/보완 및 완화방안 도출

1. 금속조직 예측기술 검증/보완 및 완화방안 도출

다층 용접시 발생하는 반복적인 열이력에 의해 용접 열영향부(HAZ : heat affected zone)의 미세조직은 국부적으로 변화하며 이에 따라 재료의 기계적 물성도 변하게 된다. 또한 용접후 잔류응력의 제거를 목적으로 수행되는 후열처리(PWHT : post weld heat treatment)에 의해 탄화물의 조대화 현상이 발생하여 원래 조직과는 상이한 기계적 물성을 보이게 된다. 특히 원전설비에 사용되는 강의 경우 고강도 및 고인성을 갖는 금속조직이나 용접 및 PWHT에 의해 발생하는 조직변화, 탄화물 석출 및 성장에 의해 기계적 물성이 저하될 수 있어 건전성에 나쁜 영향을 미칠 수 있을 뿐만 아니라 잔류응력 해석시 부정확한 결과를 도출할 수 있다. 따라서 HAZ부에 기계적 및 금속학적 특성을 보다 상세히 예측하려는 관련 연구들이 수행된바 있으나, 이들 중 대부분의 연구들은 다양한 용접 조건에 대해 미세조직/기계적 물성 평가시 경제적/시간적 제약이 따르는 실험적인 방법을 이용하였으며 이론적 접근법을 사용한 기타 연구들도 석출상 별로 결정립 성장/상변태 관련 재료상수 값들을 사전에 실험을 통해 결정하여야 할 뿐만 아니라 기계적 재료물성을 예측할 수 없다. 이러한 기존 연구들의 문제점을 극복하고자 1차년도 연구에서 용접 열영향부의 금속조직과 기계적 재료물성을 이론적/준경험적으로 예측하는 기술을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 1차년도 연구에서 개발한 금속조직 및 기계적 물성 변화 예측기술을 기존 연구 및 실험 결과와 비교 검토하여 최종적으로 수정 보완하고 이러한 기술을 토대로 용접 열영향부의 금속조직 변화 및 기계적 재료물성 저하를 완화할 수 있는 방안을 도출하고자 한다.

가. 금속조직 변화/기계적 물성 저하 예측기술 검증 보완

우선적으로 개발 절차의 타당성을 검토하기 위해 모재가 SA508 Gr.3 Cl.1인 원자로 압력용기(RPV : reactor pressure vessel) 원주방향 용접 HAZ부에 대한 기존의 글리블 모사(Gleeble simulation) 실험결과[65,77]와 비교하고 개발된 상세절차를 수정 보완한다. 최종적으로 수정 보완된 개발 상세절차를 RPV 원주방향 용접 HAZ부에 적용하여 용이하게 신뢰성 있는 금속조직과 기계적 물성을 결정하고 이러한 결과들을 토대로 용접 HAZ부내 국부 취약부를 도출하고자 한다. 또한, 잔류응력 해석시 본 예측절차의 활용 가능성도 검토하고자 한다.

1) 타당성 검증 및 절차수정

가) 해석모델

예측절차의 타당성을 확인하고 수정 보완하기 위해 모재가 SA508 Gr.3 Cl.1인 RPV 원주방향 용접 HAZ부에 대한 글리블 모사 실험의 해석모델을 사용하였다. 용접 및 PWHT 조건은 그림 44와 같이 Ramp up 형태로 모사[77]하였고 이러한 열이력에 따라 그림 45와 표

26과 같이 HAZ부를 단위 지역으로 구분하였다[77]. 표 27은 SA508 Gr.3 Cl.1의 화학조성을 제시하고 있다.

표 26. 용접 열영향부 단위지역의 모사 열이력

단위 지역	1 st Cycle		Interpass Temp. (°C)	2 nd Cycle		PWHT Temp.(°C)/ Time(hrs)
	Peak Temp.(°C)	Heating/Cooling Rate(°C/sec)		Peak Temp. (°C)	Heating/Cooling Rate(°C/sec)	
S1	1350	256/13	200	1350	256/13	610/30
S2	1350	256/13	200	900	100/12	
S3	1350	256/13	200	750	57/10	
S4	900	100/12	200	900	100/12	
S5	900	100/12	200	750	57/10	
S6	750	57/10	200	750	57/10	
S7	680	56/8	200	680	56/8	

표 27. SA508 Gr.3 Cl.1의 화학조성

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
wt.%	0.19	0.08	1.35	0.006	0.002	0.82	0.17	0.51

나) 결정립크기 예측

Leblond 등[41]이 제시한 식(1)에 타당성 검증 해석모델의 열이력과 Alberry 연구[79]에서 SA508 Gr.3 Cl.1 재료에 대해 제시된 재료상수 값들 ($a=1.3$, $C=2.1 \times 10^{12} \text{ mm}^{1.3}/\text{sec}$, $Q=460\text{kJ/mol}$)을 대입하여 계산한 HAZ부의 prior 오스테나이트 결정립 크기를 그림 46에서 나타내고 있다.

$$\frac{d\bar{D}^a}{dt} = Ce^{-Q/RT} - \frac{\dot{z}}{z} \bar{D}^a \quad (\dot{z} \geq 0)$$

$$= Ce^{-Q/RT} \quad (\dot{z} < 0) \quad (1)$$

그림 46에서 보이는 바와 같이 기존의 실험 결과와 큰 차이를 보이므로 Alberry[79]가 제시한 재료 상수들을 다음 아래와 같이 보정하였다.

$$a = 0.83 \quad (X_M \leq 0.18), \quad 1.9 \quad (X_M > 0.18) \quad (2)$$

$$C = 2.1 \times 10^{12} \text{ mm}^{1.3} / \text{sec} \quad (3)$$

$$Q = 444\text{kJ/mol} \quad (X_M \leq 0.18), \quad 429\text{kJ/mol} \quad (X_M > 0.18) \quad (4)$$

그림 47은 상수들을 보정시킨 후의 결과로서 기존 실험과 비교시 잘 일치함을 알 수 있다.

다) 평형상태도 결정

그림 48은 Thermo-Calc를 사용하여 모재인 SA508 Gr.3 Cl.1에 대하여 온도에 따른 안정상(stable phase)을 계산한 결과이다. 그림 48에서 보듯이 이 SA508 Gr.3 Cl.1에서 열역학적으로 안정한 탄화물로는 MC, M₂C, M₇C₃, ξ -탄화물, 시멘타이트(cementite) M₃C가 있으나 실제 용접시 발생하는 온도를 고려할 때 MC 형태의 탄화물은 생성되기 어려운 것으로 판단된다.

이 결과는 M₃C와 M₂C 형태의 탄화물이 관찰된 실제 투과전자현미경 (TEM) 분석결과 [66]와도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 48로부터 오스테나이트에서 페라이트로 변태되는 평형 변태점인 Ae₁ 및 Ae₃를 결정할 수 있으며 이 값을 경험식 및 실험에 의해 도출된 결과와 함께 표 28에 제시하였다. 각 방법에 따라 차이가 나는 주요 원인은 경험식[65]/실험결과[41]는 비평형 상태에서의 변태점이고 본 연구 계산값은 평형상태하의 값이기 때문이다.

표 28. 오스테나이트로부터 페라이트로의 상변태 온도

Tool	Temperature	A1(°C)	A3(°C)
Thermo-Calc		646	790
Kim & Yoon		680	830
Leblond & Devaux		615*	800*

*: 냉각율 10 °C/hr에서의 실험값

라) 상분율 예측

그림 49와 50은 1차년도 연구에서 개발한 예측절차를 이용하여 타당성 검증 해석 모델에 대하여 계산한 각 석출 상의 분율을 나타낸 것이다. 본 예측결과는 기존의 실험 결과[77]와 잘 일치함을 알 수 있다.

마) 경도 예측

다층 용접과 PWHT시 뜨임 효과(tempering effect)에 기인하는 경도 저감은 식(5)~(7) [80]에 마르텐사이트 상분율과 온도이력을 대입하여 계산한다.

$$\Delta H_v = \{844C + 177 - 197CE_{II} + 16.5(H - 21.5)\}X_M + \{18(H - 18)^2 - 138\}V^{0.5} + \{20(H - 18)^2 - 268\}Nb^{0.5} + \{25(H - 17.3)^2 - 55\}Mo^{0.5} - CE_{II} + 26 \quad (5)$$

$$CE_{II} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{5} + \frac{Cu}{10} + \frac{Ni}{18} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{2.5} + \frac{V}{5} + \frac{Nb}{3} \quad (6)$$

$$H = 0.001T(20 + \log_{10} t) \quad (7)$$

여기서 t는 다층 용접시 최고온도 지속시간 또는 PWHT 지속시간(hour)이다.

최종적으로 용접후 경도값에 뜨임 효과에 의한 경도 저감을 고려하여 경도값을 결정한다. 그림 51과 52는 타당성 검증용 예측결과로서 기존 실험 결과[77]와 비교시 잘 일치하고 있다.

바) 기계적 강도 예측

인장강도의 경우 식(8),(9)를 이용하여 예측시 기존 결과[77]와 차이가 존재하여 식(8)의 계수 3.5를 2.45로 보정한 후 PWHT 이전/이후의 인장강도 예측결과를 그림 53과 54에 각각 제시하고 있다. 그림 53과 54에서 보이는 바와 같이 기존 실험 결과[77]와 비교시 잘 일치함을 알 수 있다.

$$\sigma_u = 3.5H_v(1-n)\left(\frac{12.4}{1-n}\right)^n - 92 \tag{8}$$

$$n = 0.065\Delta t_{800/500}^{0.17} \tag{9}$$

2) 원자로 압력용기 용접부 적용

본 해석대상은 1차년도 연구에서 수행한 대상과 동일하기 때문에 해석모델, 유한요소 모델 및 온도해석에 대한 내용은 제시하지 않고 수정 보완된 금속조직/기계적 물성 변화 예측에 대한 내용만 제시하고자 한다.

가) 결정립 크기

온도해석 결과를 식(1)에 대입하고 식(2)~(4)를 이용하여 HAZ부의 prior 오스테나이트 결정립 크기를 결정한다. 그림 55는 외면 용접 Layer 8에 인접한 용접 Layer 7내 위치한 A-A 선상의 HAZ부 prior 오스테나이트 결정립 크기를 용융선으로부터의 거리에 따라 제시하였다. 그림 55로부터 용융선으로부터 멀어질수록 대체로 결정립 크기가 조밀해지고 이로 인하여 오스테나이트가 분해되는 시간이 단축되어진다고 예측할 수 있다.

나) 평형상태도

타당성 검증용 해석모델의 재료와 동일한 조성이므로 그림 48과 표 28의 결과와 같다.

다) 상분율

수정 보완한 상세 해석절차와 예측된 평형 변태점/prior 오스테나이트 결정립 크기를 이용하여 CCT 선도를 결정하고 이러한 CCT 선도에 온도해석 결과로부터 계산한 냉각선도를 도시하여 석출되는 금속 상의 종류를 예측하고 상 분율을 결정한다.

그림 56은 외면 용접 Layer 8에 인접한 용접 Layer 7내 위치한 A-A 선상의 석출 상 분율을 용융선으로부터의 거리에 따라 제시하였다. 그림 56으로부터 HAZ부는 대부분 베이나이트와 마르텐사이트로 구성되며 용융선에서 멀어질수록 마르텐사이트 분율이 감소함을 알 수 있다.

라) 기계적 물성

○ 경도

- PWHT 수행 이전과 이후의 비이커스 경도는 상세 해석절차, 석출 상분율 및 온도해석 결과를 이용하여 결정한다.
- 그림 57은 외면 용접 Layer 8에 인접한 용접 Layer 7내 위치한 A-A 선상의 후열처리 이전/이후 경도를 용융선으로부터의 거리에 따라 제시하였다. 그림 57로부터 HAZ부에서 경도는 용융선으로부터 멀어질수록 감소하는 경향이 있으며, 후열처리 이후 결정립 조대화 HAZ부(CGHAZ : coarse grain heat affected zone)의 경도는 후열처리 이전과 비교시 감소폭이 큼을 알 수 있다. 또한, 글리블 모사 실험결과[77] 및 실제 RPV 원주방향 용접부에 대한 위탁 실험결과와 비교시 잘 일치함을 알 수 있다.

○ 기계적 강도

- PWHT 수행 이전과 이후의 항복강도/인장강도는 상세 해석절차, 경도 및 온도해석 결과를 이용하여 결정한다.
- 그림 58은 외면 용접 Layer 8에 인접한 용접 Layer 7내 위치한 A-A 선상의 후열처리 이전/이후 항복강도/인장강도를 용융선으로부터의 거리에 따라 제시하였다. 그림 58로부터 HAZ부 기계적 강도는 용융선으로부터 멀어질수록 감소하는 경향이 있으며, 후열처리 이후 CGHAZ부 기계적 강도는 후열처리 이전과 비교시 감소폭이 큼을 알 수 있다. 또한, PWHT 이후 기계적 강도값은 용융선으로부터 5mm 정도 떨어진 부위, 즉 CGHAZ부가 아닌 Subcritical HAZ부(SCHAZ)에서 가장 저하되어 인장하중에 가장 취약한 국부 취약부임을 알 수 있다. 또한, 글리블 모사 실험결과[77]와 비교시 잘 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 예측절차를 활용하면 압력용기 강 용접부내 국부 취약부를 실험을 수행하지 않고도 효율적으로 찾아낼 수 있다고 판단된다.
- 또한, 압력용기 용접부에 대한 세밀한 잔류응력 해석시 중요한 입력변수들인 HAZ부 마르텐사이트의 상 분율/석출속도 및 국부적 기계적 물성 변화에 대해 정확한 평가가 가능하므로 향후 세밀한 잔류응력 해석시 용이하게 상기 변수들을 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

3) 요약

본 검증 보완 연구에서는 압력용기강 용접 HAZ부에 대한 금속조직 및 기계적 재료물성 평가의 효율화 및 경제성 향상을 위해 개발된 이론적/준경험적 금속조직 및 기계적 물성 예측절차를 수정 보완하고 RPV 용접부에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 압력용기 강 HAZ부에 대해 효율적/경제적일 뿐만 아니라 신뢰성있는 금속조직/기계적 물성 평가 수단을 확보하였다.
- RPV 원주방향 용접 HAZ부 전반에 걸쳐 베이나이트와 마르텐사이트가 석출되었으며

마르텐사이트 상 분율은 용융선으로부터 멀어질수록 감소함을 용이하게 예측하였다.

- RPV 원주방향 용접 HAZ부의 PWHT 이후 기계적 강도값은 모재에 가까운 **Subcritical HAZ**에서 가장 저하되어 인장하중에 가장 취약한 국부 취약부임을 용이하게 예측하였다.
- 향후 금속조직/재료물성 변화를 고려한 압력용기 용접부의 잔류응력 해석시 신뢰성있는 금속조직/ 재료물성 관련 입력자료를 효율적/경제적으로 도출할 수 있을 것으로 예상된다.

나. 금속조직 변화/기계적 물성 저하 완화방안 도출

본 연구를 통해 개발된 금속조직/기계적 물성 변화 예측기술을 활용하여 용접 열영향부의 금속조직 변화/기계적 물성 저하를 완화시킬 수 있는 방안을 도출하고자 한다. 기존 용접공정내 용접과정 조정과 신규 공정 추가의 두가지 측면에서 접근되어진다.

1) 기존 용접공정내 용접과정 조정

기존 용접공정의 틀을 바꾸지 않는 한도내에서 세부적 용접과정을 변화시켜 금속조직 변화/기계적 물성 저하 완화방안을 도출하고자 한다. 인장강도 및 파괴인성치 모두 모재/용접금속에 비하여 가장 낮은 국부 취약부가 발생하는 원자로 압력용기 원주방향 용접 미변태 열영향부(subcritical HAZ)를 주요 대상으로 한다. 용접 열영향부의 금속조직/기계적 물성 변화에 가장 영향을 주는 요소는 각 용접 사이클 후 냉각률이다. 또한, 원자로 압력용기 강 원주방향 용접부에 대한 금속조직 예측시 국부 취약부는 용융선으로부터 5mm 떨어진 미변태 열영향부이다. 즉, 상 변태는 일어나지 않고 단지 다층 용접 입열에 의한 반복적인 템퍼링 효과에 의해 기계적 강도가 저하된 것이다. 따라서 국부 취약부를 급격히 냉각시켜 국부 취약부의 템퍼링 효과를 방지하는 국부 heat sink 용접법을 개발 제시하고 상 변태 열영향부의 기계적 물성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

가) 열영향부의 냉각률 변화

- 용접 열영향부에 최고 온도 발생이후 바로 냉각시키므로 최고 온도는 동일하다고 가정한다. 이러한 가정을 통해 변태 열영향부의 범위는 기존 원자로 압력용기 원주방향 용접부와 동일하다.
- 또한, 후열처리 이후의 기계적 물성이 좋은 변태 열영향부의 특성 변화를 최소로 하기 위해 용융선 쪽으로 갈수록 냉각률이 점차 감소되어지도록 제어한다고 가정한다.
- 그림 59는 기존의 원자로 압력용기 원주방향 용접 열영향부에 발생하는 용융선으로부터의 거리에 따른 냉각률 변화와 본 연구에서 새롭게 제시한 냉각률 변화를 각 용접 사이클에 따라 제시하고 있다.
- 그림 60은 그림 59에서 새롭게 제시된 냉각률 변화를 기준으로 prior 오스테나이트 결정립 크기를 평가한 결과로서 기존 결정립 크기 예측결과와 비교시 변태 열영향부의 결정립 크기는 약간 줄어들었음을 알 수 있다. 따라서 새로운 냉각률 변화를 적용시

결정립 크기 감소에 의한 CCT 선도 이동(석출 속도를 빠르게 하는 방향) 효과를 냉각률 증가로 상쇄시켜 기존 상 분율 예측결과와 비교시 변태 열영향부내 석출 상 분율의 변화 정도는 작을 것으로 생각되어진다.

- 그림 61과 62는 그림 59에서 새롭게 제시된 냉각률과 기존 냉각률에 대해 예측한 경도 및 인장강도 결과를 나타내고 있다. 그림 61과 62로부터 새로운 냉각률 변화를 적용시 기존의 국부 취약부에서의 경도와 인장강도가 증가하고 변태 열영향부에서도 전체적으로 약간 증가하였음을 알 수 있다.

나) 국부 Heat Sink 용접법

- 열영향부의 냉각률 변화에 따른 기계적 물성 예측결과로부터 특정시간 이후 국부적으로 냉각 시키는 국부 **heat sink** 용접법은 효율적인 금속조직 변화/기계적 물성 저하 완화방안의 하나로서 고려되어질 수 있다.
- 특히, Heat sink 용접은 고온 균열 저하를 위해 최근 개발 적용되어지고 있으므로 국부 취약부와 최고 온도 도달시간을 정확하게 결정할 수 있다면 원자로 압력용기 원주방향 용접부의 기계적 물성 저하를 방지하는데도 용이하게 사용될 수 있다.
- 또한, 국부 취약부와 최고 온도 도달시간은 1차년도 연구에서 개발한 금속조직 예측기술을 이용하여 용이하게 결정할 수 있다.
- 이러한 국부 heat sink 용접은 경도, 인장강도와 같은 기계적 강도 측면에서 접근한 완화방안 으로서 파괴인성치와 같은 파괴강도 측면에서도 접근이 필요하다고 판단되어진다.
- 향후 국부 heat sink 용접시 용접부에 발생하는 열응력과 잔류응력에 대한 연구도 수행할 예정이다.

2) 신규 공정 추가

국부 heat sink 용접법과 같이 기계적 강도 측면에서 접근하는 것이 아니라 용접전 신규 공정을 추가하여 파괴강도 측면에서 파괴인성치 향상을 가져다 주는 **intercritical** 열처리의 타당성을 계산역학적으로 검토하고자 한다.

가) 취약부위 발생 원인 검토

- 용접 열영향부의 미세조직은 재료의 화학성분, 용접조건, 최고 가열온도 등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다. 반복적인 용접 열이력을 경험하는 열영향부 조직은 용접 경계로부터 떨어진 거리(입계의 크기 변화), 냉각속도 및 화학조성(입내의 석출물 변화)에 따라 다양하게 변화한다.
- 이와 같이 다양한 조직을 갖는 열영향부중 가장 취화가 심하게 나타나는 곳은 일반적으로 용접경계 근처의 결정립이 조대화된 영역이며, 이를 흔히 국부취화영역(LBZ :

local brittle zone)이라 언급되고 있다.

- LBZ가 쉽게 생성되는 조건에서는 LBZ가 용접부 충격인성에 치명적인 영향을 미치게 되므로 이 부위에 대한 관리는 구조물의 건전성 측면에서 매우 중요하다.
- LBZ 원인을 규명하기 위한 많은 연구가 있었으며 그 결과 다음과 같은 현상에 의해 취화가 발생한다고 알려져 있다.
 - 고탄소 마르텐사이트 생성
 - 상부 베이나이트(upper bainite) 생성
 - 석출물 생성
 - 결정립 조대화 등
- 그림 63에서 보듯이 마르텐사이트 상은 파괴인성 값이 다른 상들에 비해 현저히 낮으므로 취화 영역으로 작용하여 기기의 구조적 건전성을 저하시키며 동일 마르텐사이트 상에서 상대적 취성 여부는 상내에 함유되어 있는 탄소함량에 좌우되며 탄소함량이 많아질수록 인성이 저하되어 취성이 높아지게 된다.
- 특히 용접의 반복적인 열이력에 의해 발생하는 상변태 과정시 석출된 페라이트상과 인접해 있는 마르텐사이트의 경우 탄소의 함량이 매우 높아질 수 있다.
- 페라이트상과 인접해 있는 마르텐사이트에 탄소의 함량이 높은 이유를 그림 64를 통해 설명할 수 있다. 참고로 그림 64는 확산계산 전용 프로그램인 DICTRA를 통해 탄소의 상별 확산 정도를 계산한 결과이다.
- 탄소는 오스테나이트 형성 원소이므로 페라이트에서의 고용도는 매우 낮고 용접과정시 오스테나이트 단상 조직이었던 부분이 냉각 과정시 일부분이 페라이트로 변태된다면 페라이트 경계로 탄소를 방출할 것이며 이들 탄소가 오스테나이트 경계에 축적될 것이다.
- 이러한 오스테나이트 조직이 후속 용접 사이클에 의해 다시 고온에 노출되게 된다면 경화능이 증가되었기 때문에 냉각시 조직은 더 쉽게 마르텐사이트로 변태될 것이며, 생성된 마르텐사이트는 탄소함량이 높게 된다.

나) Intercritical 열처리

- 원자로 압력용기강 재질인 SA508의 미세조직은 베이나이트에 제작시 수반되는 용접 등의 공정에 의해 발생된 페라이트, 마르텐사이트, 잔류 오스테나이트 및 탄화물들이 혼재된 조직이므로 미세상에 따른 구조물의 인성 저하가 발생될 수 있다.
- 따라서 용접 후열처리가 수행되어지는데 원자로 압력용기 제작시 파괴인성 향상을 목적으로 A_{c1} 아래 610°C 에서 후열처리를 수행하고 있다.(그림 63에서 보듯이 후열처리를 통해 마르텐사이트 및 베이나이트상의 파괴인성은 약 2배 정도 향상)
- 이와 같이 용접부의 파괴인성을 향상시키기 위해 수행되는 일반적인 후열처리 방법 이외에도 앞에서 검토한 바와 같이 고탄소 마르텐사이트의 변태를 억제하는 방법(마르텐사이트 상이 생성되더라도 상내 탄소함량을 최소화시키는 방법)을 고려할 수 있다.
- 탄소함량 최소화 방법은 용접전 A_{c1} 과 A_{c3} 사이의 온도구간(Intercritical)에서 열처리를

수행하여 오스테나이트 영역을 확장시켜 단위체적당 포함되는 탄소함량을 희석시키는 방법이 있다.

- 이 방법을 사용하여 조직을 변화시킨후 후열처리를 수행하면 구형의 탄화물이 마르텐사이트 래스(lath) 및 아경계(subgrain)에서 균일하게 석출하여 파괴인성을 향상시키는 역할을 하게 된다.
- 이 방법은 최근에 제안된 방법으로 현재 현장에서 모재 및 용접부에 대하여 적용성 연구를 수행 중에 있으며 연구결과에 의하면 용접전 조직 내의 오스테나이트 상분율이 약 40%인 경우 용접후열처리를 수행하였을 때 구형의 석출물 생성으로 인해 충격인성이 높게 나타난다고 보고되고 있다. 따라서 용접부의 파괴인성을 향상시키기 위해 용접전 오스테나이트의 상분율을 40%로 유지할 수 있는 열처리를 수행하도록 권고되고 있다.
- 그림 65는 금속 열역학 계산프로그램인 Thermo-Calc를 활용하여 작성한 SA508 Gr.3 Cl.1의 평형상태도로 오스테나이트의 상분율에 따른 온도를 확인할 수 있으며 그림 65로부터 오스테나이트 상분율이 40%에 해당되는 온도는 약 720℃이므로 intercritical 열처리 온도를 720℃로 결정할 수 있다.
- 그림 66은 intercritical 열처리 온도에 따른 충격에너지 값의 변화를 나타낸 실험결과로 온도가 720℃일때 충격에너지 값이 가장 높음을 확인할 수 있다. 즉, Thermo-Calc를 이용하여 결정한 intercritical 열처리 온도가 타당함을 알 수 있다.
- 계산역학 적용을 통해 SA508 Gr.3 Cl.1에 대한 기존 intercritical 열처리 조건과 동일한 조건을 용이하게 도출하였으며 기타 강에 대한 intercritical 열처리 조건이 필요할 때도 실험적 접근에 비하여 경제적으로 최적 조건을 도출할 수 있다.

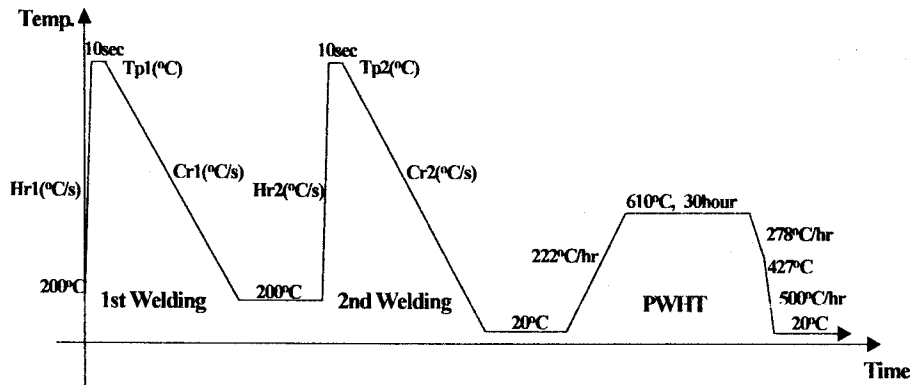


그림 44. 모사된 용접 열 이력

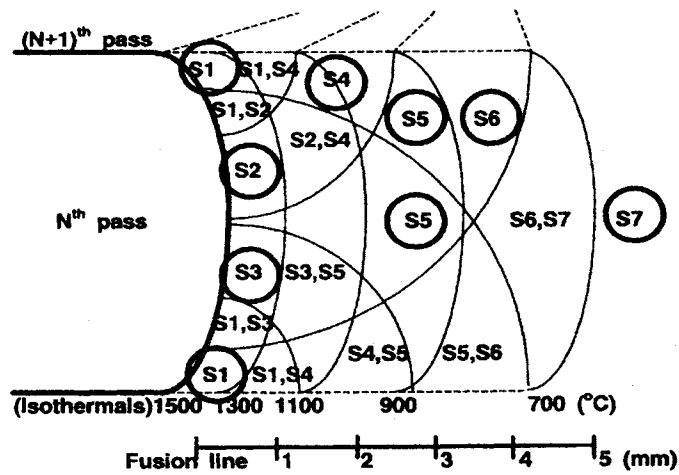


그림 45. 열영향부내 단위 영역들

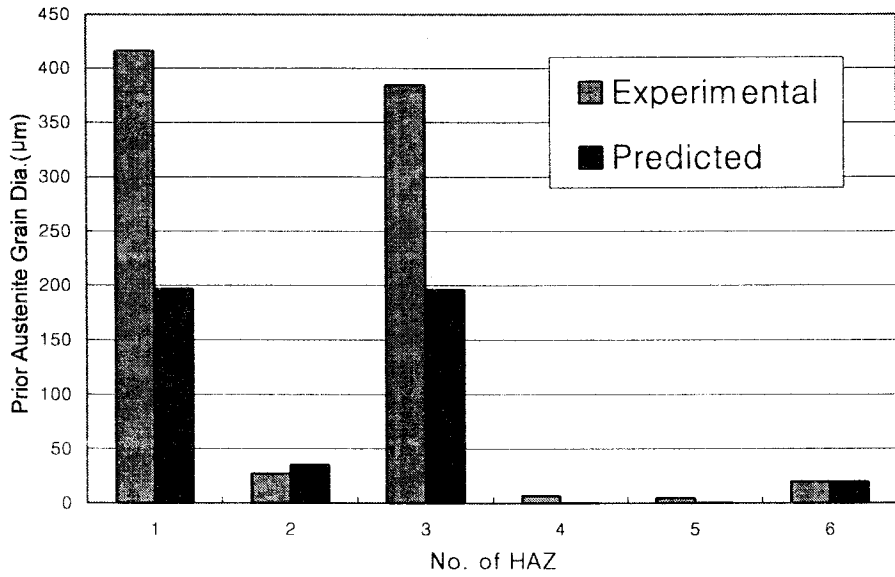


그림 46. 수정전 결정립 크기 예측값

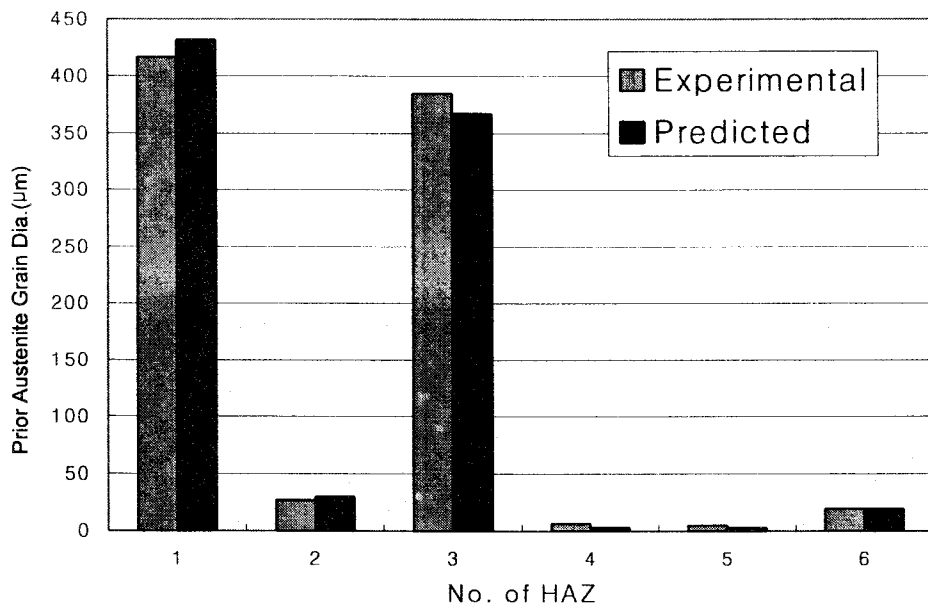


그림 47. 수정후 결정립 크기 예측값

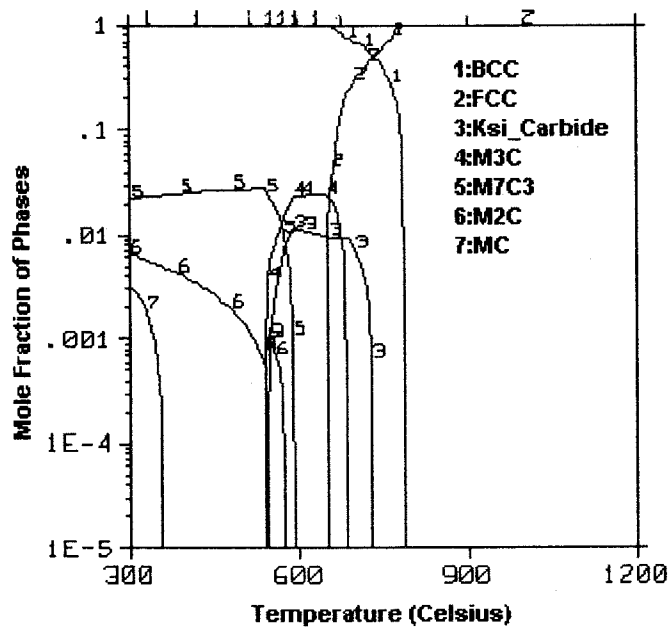


그림 48. SA508 Gr.3 Cl.1의 평형 상태도

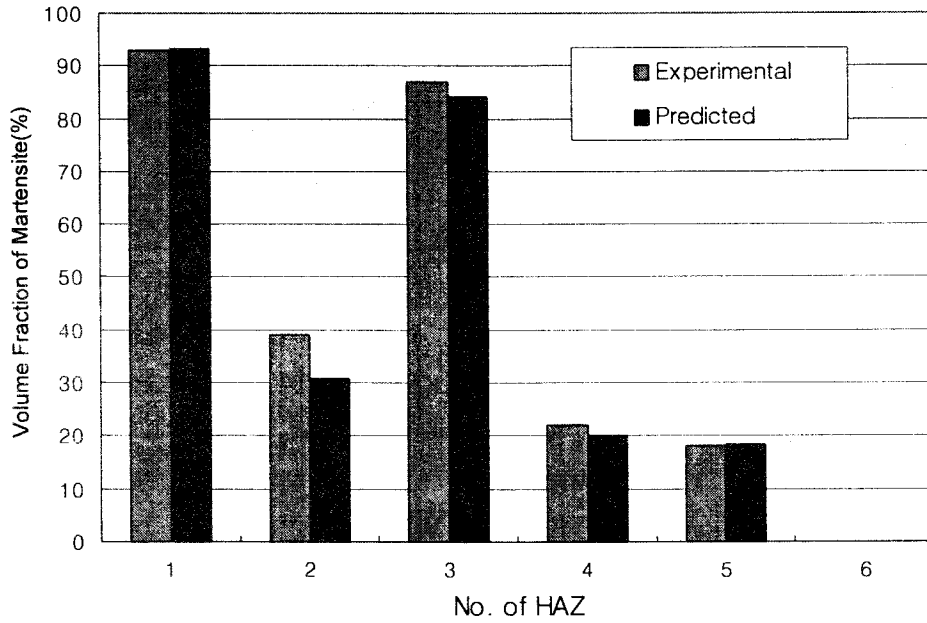


그림 49. HAZ부내 단위 영역에 따른 마르텐사이트 분율 비교

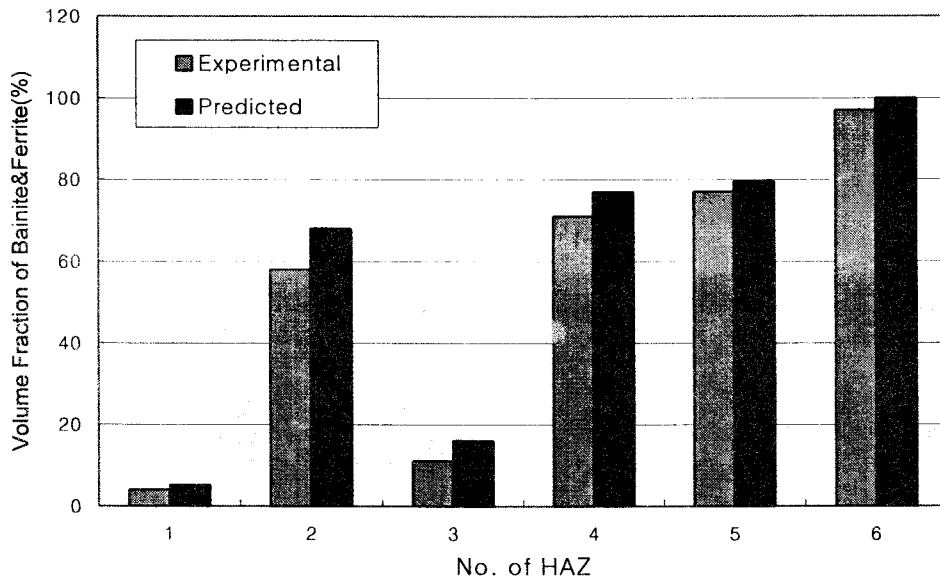


그림 50. HAZ부내 단위 영역에 따른 베이나이트/페라이트 분율 비교

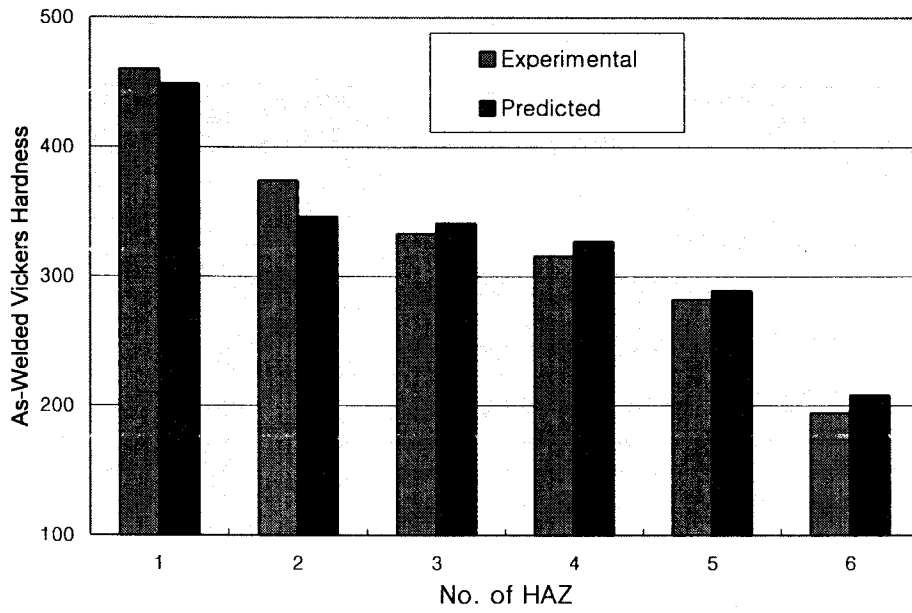


그림 51. As-welded 경도 비교

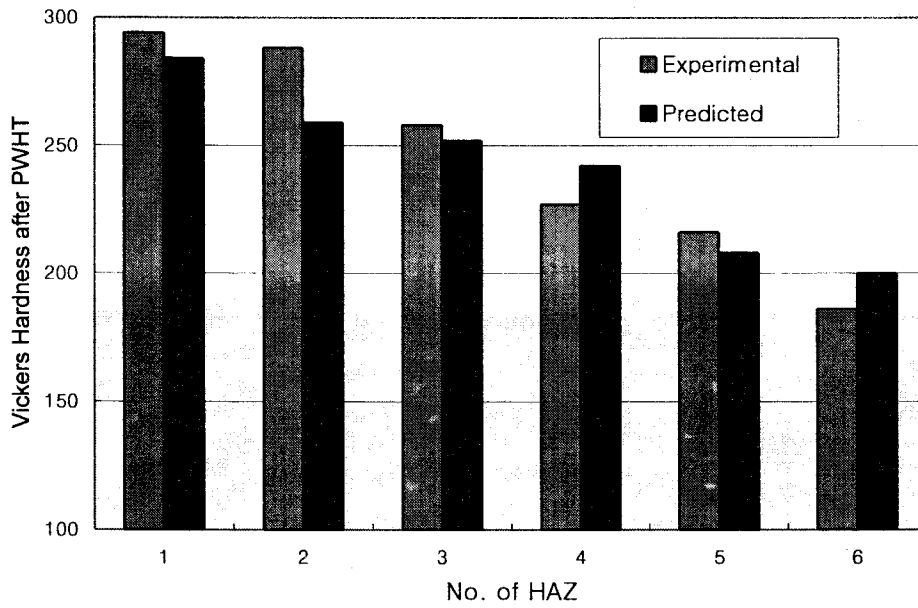


그림 52. 후열처리 이후 경도 비교

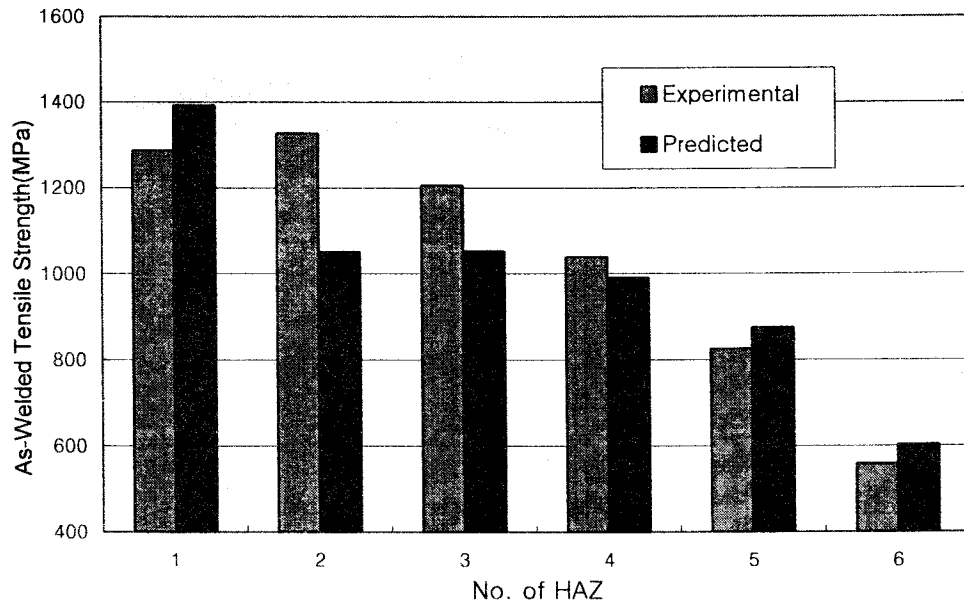


그림 53. As-welded 인장강도 비교

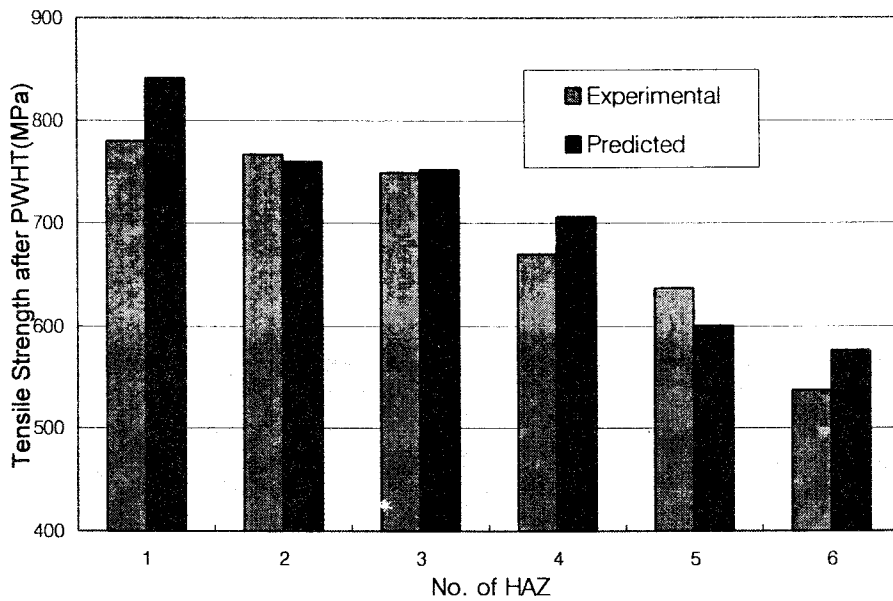


그림 54. 후열처리후 인장강도 비교

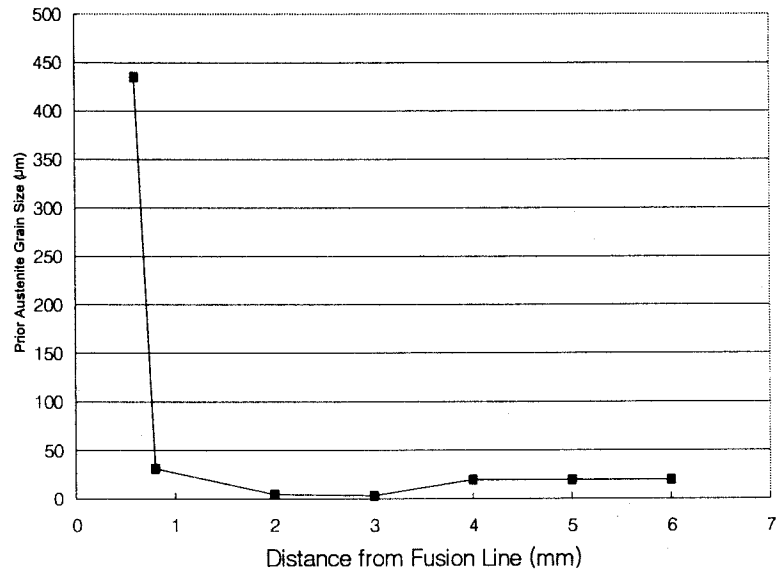


그림 55. 용융선으로부터의 거리에 따른 prior 오스테나이트 결정립 크기 분포

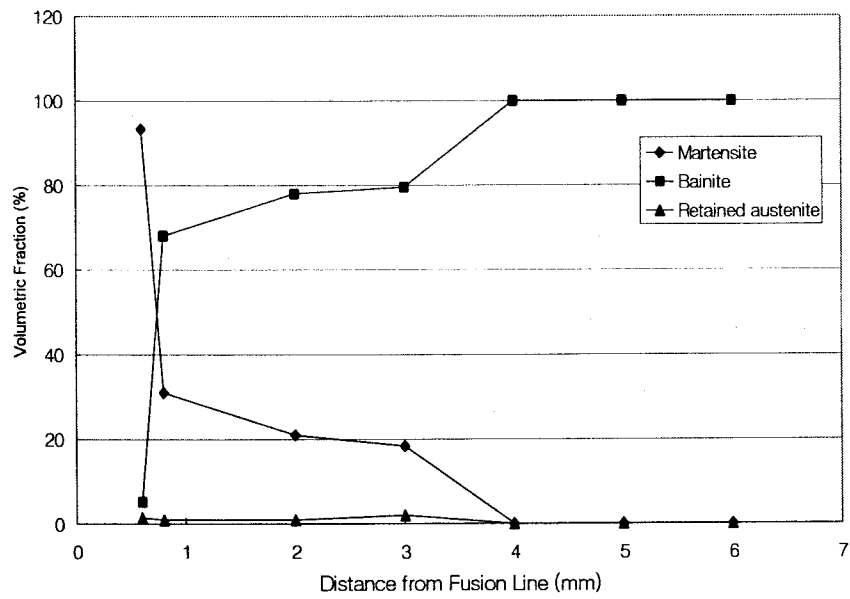


그림 56. 용융선으로부터의 거리에 따른 석출 상 분율 분포

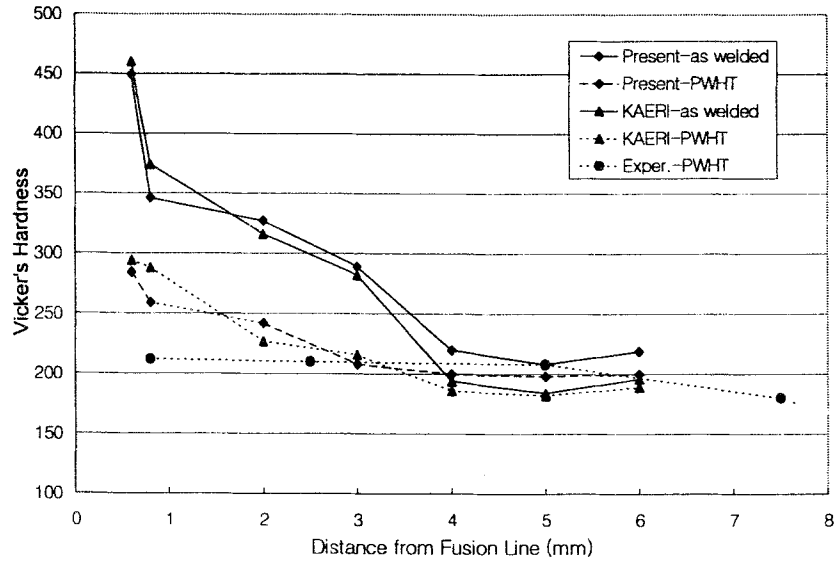


그림 57. 용융선으로부터의 거리에 따른 경도 변화

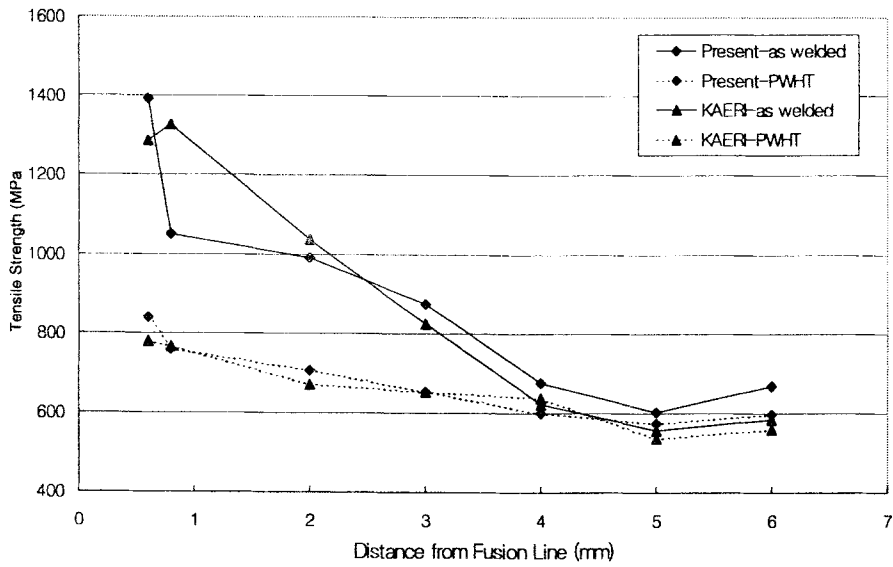


그림 58. 용융선으로부터의 거리에 따른 인장강도 변화

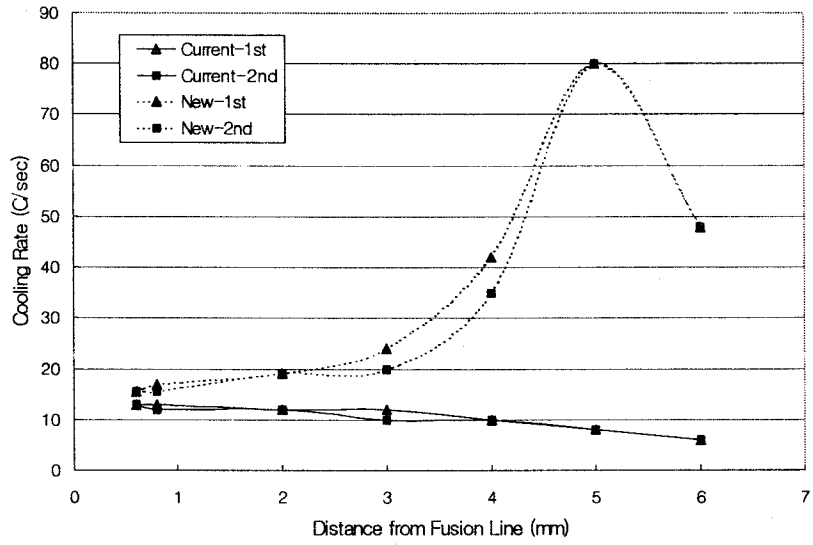


그림 59. 용접 열영향부의 냉각률 변화

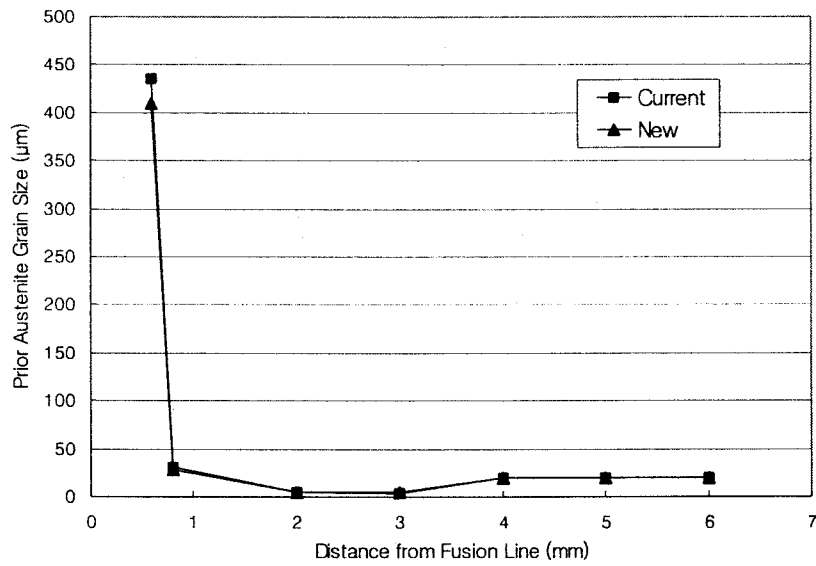


그림 60. 용접 열영향부의 prior 오스테나이트 결정립 크기 변화

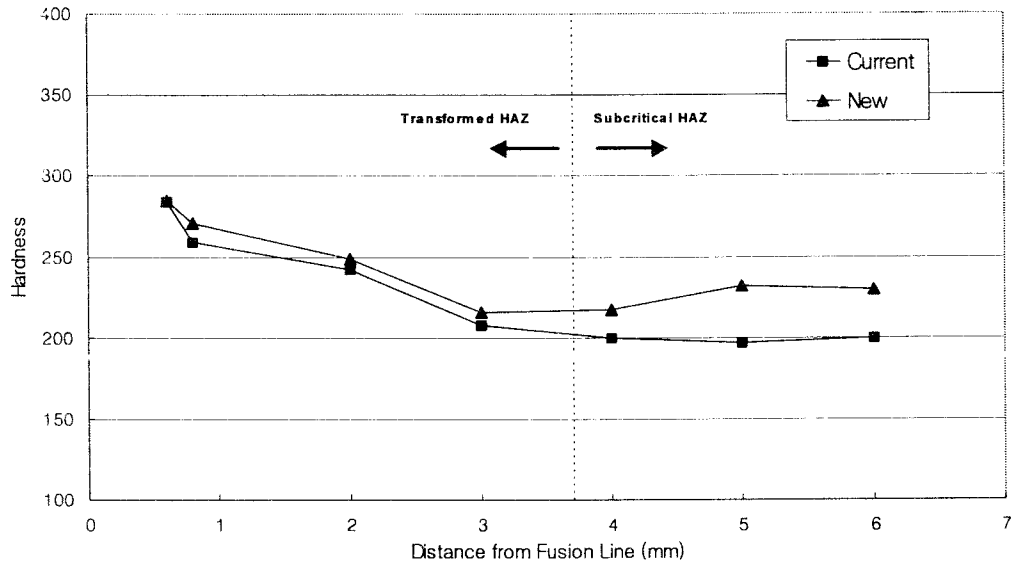


그림 61. 용접 열영향부의 비이커스 경도 변화

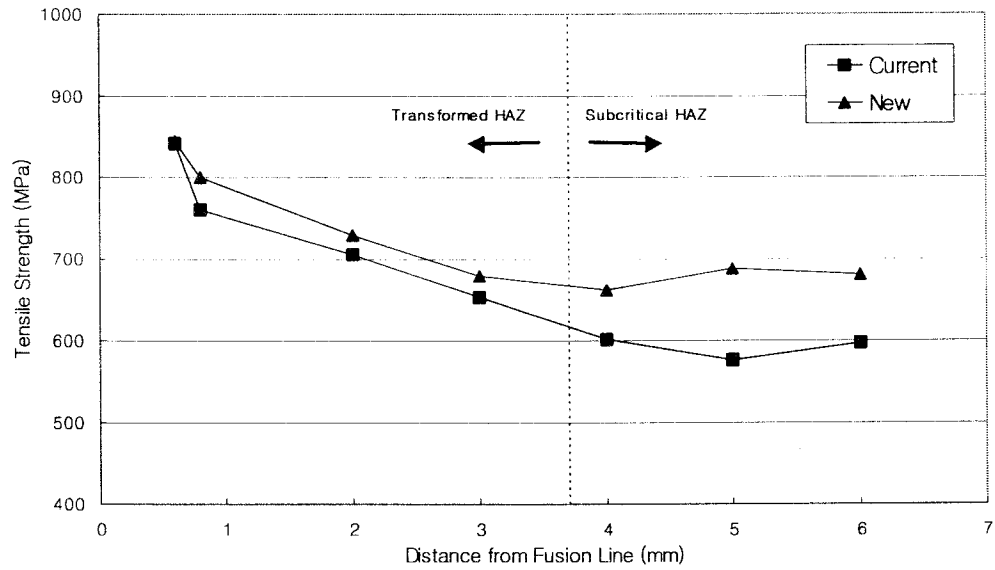


그림 62. 용접 열영향부의 인장강도 변화

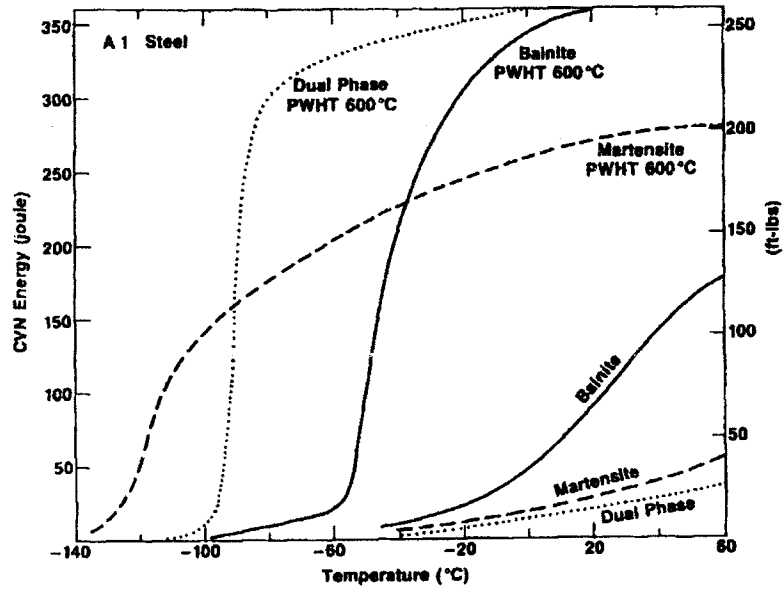


그림 63. 베이나이트 및 마르텐사이트의 파괴인성 비교

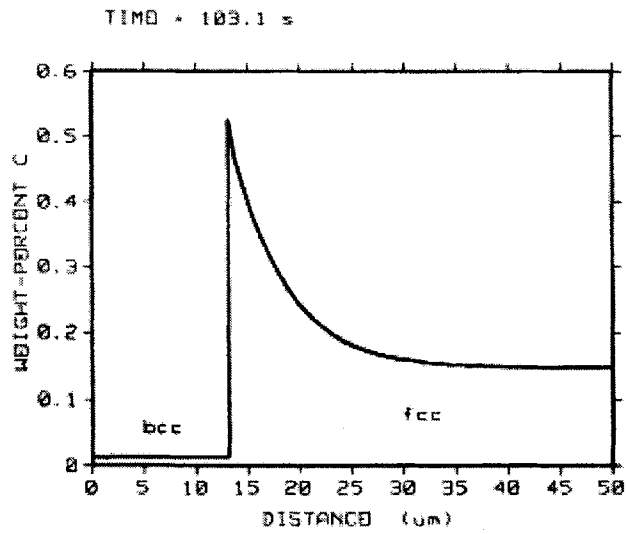


그림 64. 미세조직별 확산에 의한 탄소농도 변화

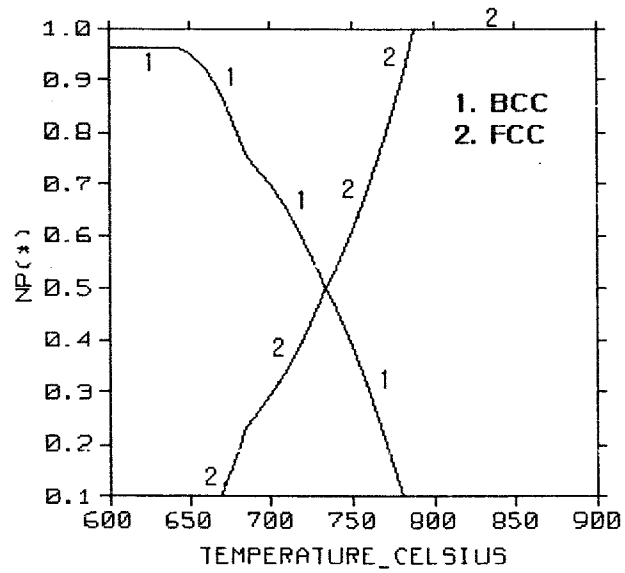


그림 65. 온도에 따른 오스테나이트 상분율 계산결과

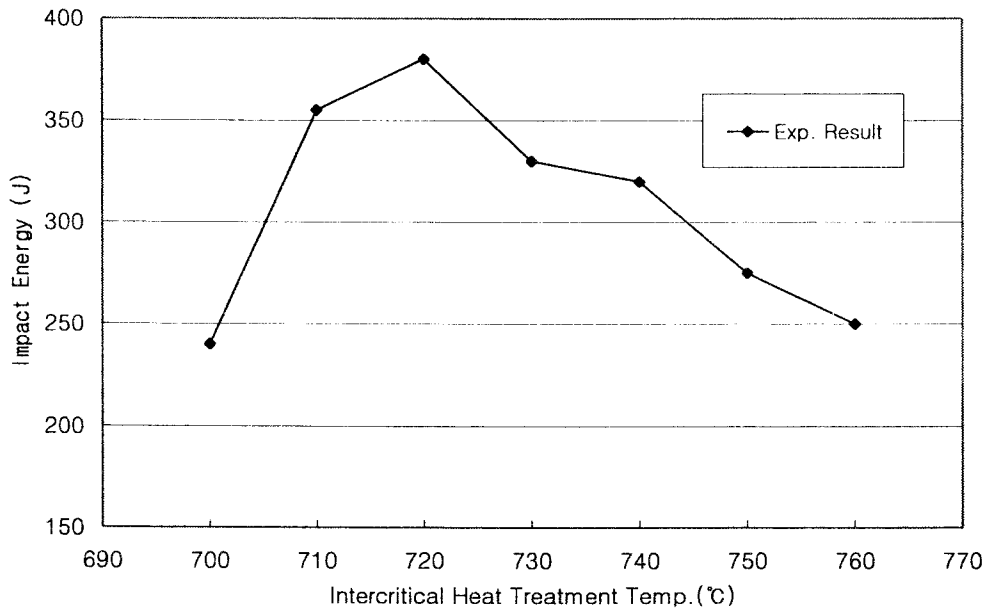


그림 66. Intercritical 열처리 온도에 따른 충격에너지값 변화

2. 금속조직 변화 예측 DB/전문가 시스템 구축

본 연구실은 2002년 3월 1일부터 3개월간 금속조직 예측 DB 및 전문가 시스템구축을 위탁(아이웍㈜)하여 개발하였다. DB 및 전문가 시스템의 구성 및 상세내용은 다음과 같다.

금속조직 예측 DB/전문가 시스템은 크게 금속조직 예측부와 기계적 물성 예측부 부분으로 구성된다. 금속조직 예측부는 용접으로 인해 발생하는 열영향부의 상변태 및 석출상 형성, 결정립 크기 변화 등을 예측하는 부분이고 기계적 성질 예측부는 새롭게 변화된 조직에 따른 기계적 물성치를 예측하는 부분으로 사용자가 손쉽게 결과를 확인할 수 있도록 Web 기반으로 작성하였다.

가. 금속조직 예측부

금속조직 예측부는 입력모듈, 계산모듈, 출력모듈의 3개 서브모듈로 구성된다. 입력 모듈은 재료의 화학조성과 초기 조건 및 냉각속도 등을 입력하는 모듈이며 계산모듈은 입력된 자료를 활용하여 결과 값을 계산하는 모듈이다. 출력모듈은 계산된 결과를 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 표와 그림 형식으로 제시하는 서브모듈이다. 각 부분의 특징을 다음에 제시하였다.

1) 입력모듈 (그림 67 참조)

- 재료 대분류 (탄소강, 합금강, 스테인리스강)
- 화학조성
- 초기 오스테나이트 결정립 크기
- 냉각속도
- 800℃부터 500℃에 도달하는 시간

2) 계산모듈

- Web용 언어를 사용하여 계산 모듈 작성
- 지정된 Server를 통해 계산
- 국내외 연구결과, 연구실에서 개발한 계산식 및 열역학 계산 프로그램인 Thermo-Calc사의 TQ-I 활용

2) 출력모듈 (그림 68 참조)

- 계산결과
 - 용접으로 인해 발생하는 석출물 종류(탄화물 종류) 및 생성 온도
 - 변태온도
 - 등온냉각곡선(TTT) 및 연속냉각곡선(CCT)

- 상종류
- 상분율
- 용접으로 인해 성장된 결정립 크기
 - 계산결과는 인터넷 브라우저 상에서 표 및 그림 형식으로 표시
 - 냉각곡선과 등온냉각곡선 및 연속냉각곡선이 중첩되어 표시 (가로축 : 시간, 세로축 : 온도)
 - 결과를 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 냉각곡선이 지나가는 위치에 생성되는 상의 이름과 상분율 표시

나. 기계적 물성 예측부

기계적 물성 예측부도 금속조직 예측부와 동일하게 입력, 계산 및 출력의 3개 서브모듈로 구성된다. 최종적으로 후열처리 전후의 경도, 항복강도 및 인장강도를 예측하게 된다. 각 부분의 특징을 다음에 설명하였다.

1) 입력모듈 (그림 69 참조)

- 재료 대분류(탄소강, 저합금강, 스테인리스강)
- 화학조성
- 냉각속도
- 800℃부터 500℃에 도달하는 시간
- 후열처리 온도 및 시간

2) 계산모듈

- Web용 언어를 사용하여 계산 모듈 작성
- 지정된 Server를 통해 계산
- 국내외 연구결과 및 연구실에서 개발한 계산식 활용하여 물성치 예측

3) 출력모듈 (그림 70 참조)

- 계산결과
 - 경도
 - 항복강도
 - 인장강도
 - 계산결과를 인터넷 브라우저 상에서 표형식으로 표시

한국과학기술원 - 국제산업연구실(WINS) - Microsoft Internet Explorer
 http://www.wins.re.kr/k

Microstructure Prediction

Material Selection CS LAS SS

Carbon wt. %: (0.1) Silicon wt. %: (0.2) Manganese wt. %: (1.00)
 Nickel wt. %: (0.5) Molybdenum wt. %: (0.5) Chromium wt. %: (0.5)
 Vanadium wt. %: (0.1) Cobalt wt. %: (0.1) Phosphorous wt. %: (0.015)
 Sulfur wt. %: (0.005) Nitrogen wt. %: (0.01) Boron wt. %: (0.001)
 Copper wt. %: (0.01)

Austenite Grain Size (m): (50e-6)
 Cooling Rate K/s: (0.3)
 time (sec, 800 C -> 500 C) (1)

그림 67. 금속조직 예측 입력모듈

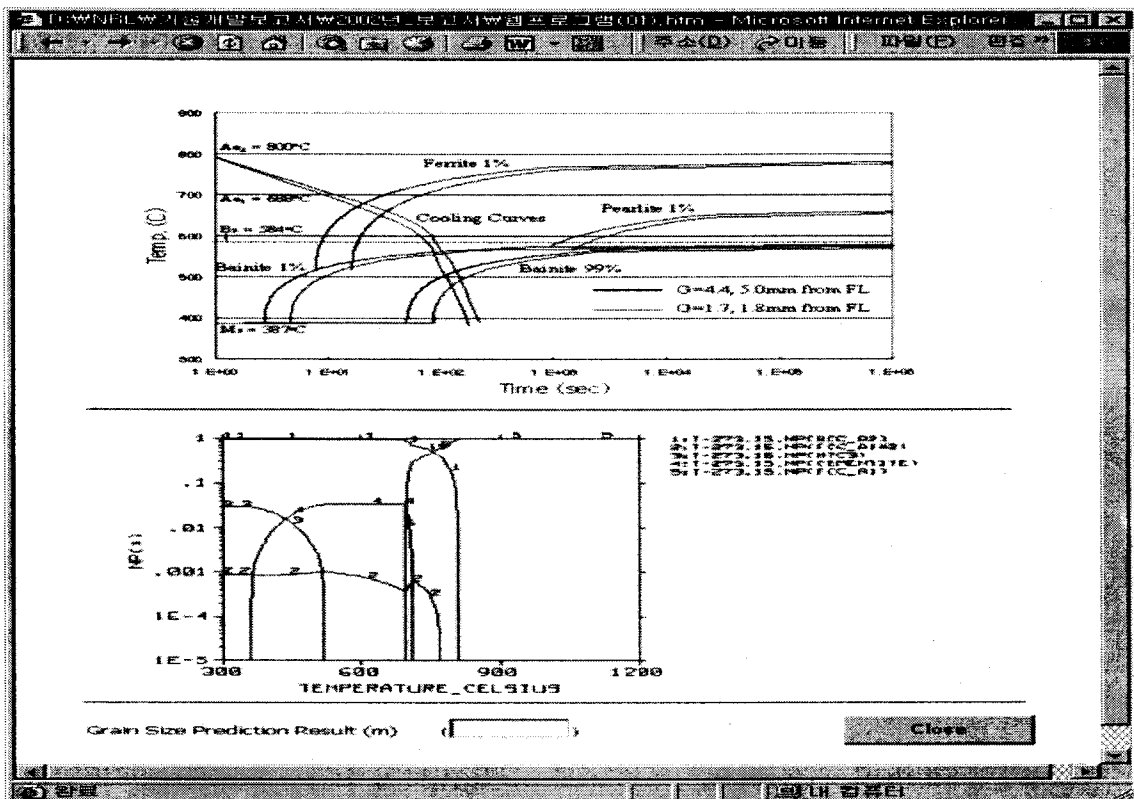


그림 68. 금속조직 예측 출력모듈

한국전력기술 - 국가지정연구실(WINS) - Microsoft Internet Explorer

주소 http://www.wins.re.kr/k

Mechanical Properties Prediction

Material Selection CS LAS SS

Carbon wt.%(0.1) Silicon wt.%(0.2) Manganese wt.%(1.00)

Nickel wt.%(0.5) Molybdenum wt.%(0.5) Chromium wt.%(0.5)

Vanadium wt.%(0.1) Cobalt wt.%(0.1) Phosphorous wt.%(0.015)

Sulfur wt.%(0.005) Nitrogen wt.%(0.01) Boron wt.%(0.001)

Copper wt.%(0.01)

Austenite Grain Size (m): (50e-6)

Cooling Rate K/s: (0.3)

time (sec, 800 C -> 500 C) (1)

Calculation

인터넷

그림 69. 기계적 물성치 예측 입력모듈

Microsoft Internet Explorer

주소

Mechanical Properties Prediction Result

	Prediction Result
Hardness (Hv)	305
Yield Strength(MPa)	602
Tensile Strength(MPa)	1210

내 컴퓨터

그림 70. 기계적 물성치 예측 출력모듈

3. 조사취화 예측 기술 검토

핵분열 과정에서 발생하는 중성자 환경에 노출된 재료는 결정구조, 기계적 성질, 전기 및 물리적 성질 등이 변화되며, 이들은 중성자 속, 에너지 스펙트럼, 조사시간과 조사온도 등에 비례하여 영향을 받는다. 원자로 압력용기의 경우 중성자 조사로 인해 기계적 특성이 변화하여 그림 71과 같이, 기준 무연성 천이온도(Reference Nil-Ductility Transition Temperature : RT_{NDT})는 증가하고, 상단 에너지는 저하한다. 중성자 조사취화는 원자로 압력용기 벨트라인 부위에 가장 큰 영향을 미치며, 이로 인해, 원자로 냉각재 계통의 압력경계를 구성하고 있는 원자로 압력용기 자체의 안전성에 지대한 영향을 끼친다. 원자로 압력용기 이외에도 원자로 내부구조물 등 스테인리스강으로 제작된 기기에서도 중성자에 의한 조사취화 문제가 나타나고 있다.

본 항에서는 원자로 압력용기의 중성자 조사와 관련한 규제요건과 지침을 기초로 연장운전을 포함한 운전단계에서 조사데이터와 감시데이터를 이용하여 건전성 유지를 위한 관련 평가절차와 방법을 제시하였다. 또한 스테인리스강 Type 304의 중성자 조사로 인한 기계적 특성의 변화에 대해 기존의 연구자료를 토대로 검토하였다.

가. 원자로 압력용기의 중성자 조사취화관련 규제요건 및 지침

원전의 구조적 건전성과 관련하여 10CFR50, App. A, “원자로 냉각재 압력경계의 파손방지” 요건에서는 운전, 보수, 시험 및 가상사고 발생시 원자로 냉각재 압력경계 기기가 비취성(Non-brittle) 형태로 거동하고 충분한 파괴방지여유를 유지하도록 요구하고 있다[81]. 이에 따라, 원자로 압력용기의 건전성 유지를 위해 부수적으로 관련 규제요건과 지침을 규정하고 있으며, 이들은 크게 압력-온도 허용한도(P-T Limits), 가압열충격 및 상단 에너지 측면에서 다루고 있다. 표 29는 제작단계, 설계단계, 운전단계 그리고 연장운전 단계에서 적용되고 있는 규제요건과 지침들을 보여준다. 이를 기초로 다음 절에서는 압력-온도 운전한도, 가압열충격 및 상단 에너지와 관련하여 운전단계와 수명연장 단계에서 적용할 수 있는 건전성 유지를 위한 평가절차와 방법에 대해 다루었다

표 29. 원자로 압력용기의 건전성관련 규제요건

규 제 요 건	제 작	설 계	운 전	주 요 내 용
10CFR50 App. A GDC	○	○	○	General Design Criteria
10CFR50.55a	○	○	○	Application Code & Standards
10CFR50.61			○	Pressurized Thermal Shock
10CFR50.66			○	Thermal Annealing
10CFR50 App. G	○	○	○	P-T Limits
10CFR50 App. H			○	Surveillance Program
10CFR50 App. A GDC	○	○	○	General Design Criteria
10CFR50.55a	○	○	○	Application Code & Standards
10CFR50.61			○	Pressurized Thermal Shock
10CFR50.66			○	Thermal Annealing
10CFR50 App. G	○	○	○	P-T Limits
10CFR50 App. H			○	Surveillance Program

나. 원자로 압력용기의 중성자 조사취화 평가방법 및 절차

중성자 조사취화에 따른 원자로 압력용기의 건전성을 유지하기 위한 규제관련 사항과 절차를 종합하면 그림 72와 같다. 이를 기초로 원전의 운전 및 수명연장 단계에서 중성자 조사취화에 따른 원자로 압력용기의 구조적 건전성 측면에서 고려되고 있는 압력-온도 운전한도, 가압열충격 및 상단 에너지와 관련하여 규제요건과 지침에 따른 평가방법을 설명하면 다음과 같다.

1) 압력-온도 운전한도

압력-온도 운전한도는 10CFR50, App. G[82]에 따른 원자로 압력용기의 취성과파괴 방지를 위해서 ASME Code의 Section III 또는 Section XI, Appendix G, "Protection Against Nonductile Failure"[83]를 적용하여 작성한다.

가) 중성자 플루언스

- 감시시편이 받은 중성자 조사량은 원자로 압력용기 내부에 설치된 선량계(Dosimeter)를 이용하여 측정한다. 압력용기 재료가 받은 내면의 중성자 플루언스는 감시캡슐 내부의 시편이 받은 중성자 플루언스($E \geq 1.0\text{MeV}$)를 선향계수(Lead Factor)로 나누어 간접적으로 산출이 가능하다.
- 이러한 방법으로 평가된 용기 내면의 플루언스로부터 벽면내부의 플루언스를 산출할 수 있으며, 이는 Reg. Guide 1.99, Rev. 2[84]에서 제시하고 있는 식 (10)을 적용하여 추정한다.

$$f = f_{\text{Surface}} \cdot e^{-0.24x} \quad (10)$$

여기서, f_{surface} 는 내벽면에서의 플루언스로서 단위는 n/cm^2 이며, x 는 내벽면으로부터 떨어진 거리(inch)를 나타낸다.

나) 기준 무연성 천이온도(RT_{NDT})

- 무연성 천이온도(Adjusted RT_{NDT} : ART)는 Reg. Guide 1.99, Rev 2에 제시된 평가방법에 따라 평가하며, 식 (11)을 적용한다. 식 (12)는 조사전의 Initial RT_{NDT} , 조사로 인한 RT_{NDT} 의 변화량, 앞의 두 항에 대한 불확실성을 고려한 Margin을 포함하여 3개의 항으로 구성된다.

$$\text{ART} = \text{Initial } RT_{\text{NDT}} + \Delta RT_{\text{NDT}} + \text{Margin} \quad (11)$$

$$\Delta RT_{\text{NDT}} = [\text{CF}] \cdot f^{(0.28 - 0.11 \log f)} \quad (12)$$

여기서, f 는 플루언스($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$)를 나타낸다. CF는 화학인자(Chemistry Factor)로서 감시데이터의 유무에 따라 다르게 평가하며, 감시데이터가 없는 경우에는 구리함량(wt%)과 니켈함량(wt%)으로부터 결정할 수 있으며, 반대로 2개 이상의 감시데이터를 활용할 수 있을 경우에는 구리와 니켈함량과 무관하게 식 (13)에 따라 산출할 수 있다.

$$[\text{CF}] = \frac{\sum \Delta \text{RT}_{\text{NDT}} \cdot f^{(0.28-0.11\log f)}}{\sum f^{(0.28-0.11\log f)}} \quad (13)$$

한편, Margin은 식 (14)에 따라 정해진다.

$$\text{Margin} = 2\sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_\Delta^2} \quad (14)$$

여기서, σ_I 는 Initial RT_{NDT} 에 대한 표준편차로서, 평균값을 얻는데 사용된 데이터로부터 얻어진다. 측정값이 사용될 경우에는 시험결과로부터 평가되며, 측정값이 사용되지 않을 경우에는 재료에 대한 일반적인 평균값이 사용된다. σ_Δ 는 $\Delta \text{RT}_{\text{NDT}}$ 에 대한 표준편차로 σ_Δ 가 $\Delta \text{RT}_{\text{NDT}}$ 의 평균값의 0.5배를 초과하는 경우를 제외하고는 용접부에 대해서는 28°F이고, 모재에 대해서는 17°F이다.

다) 기준 임계 응력확대계수(Reference Critical Stress Intensity Factor), K_{IR}

- 그림 73은 ASME Code, NB 2331에서 결정된 기준 무연성 천이온도 RT_{NDT} 로 나타낸 온도와 기준 임계 응력확대계수 K_{IR} (ksi $\sqrt{\text{in}}$) 사이의 보수적인 관계를 보여주는 곡선이다. 이 곡선은 ASME SA-533 Grade B Cl. 1, SA-508-2 및 SA-508-3 강으로 제작된 시험편에서 온도의 함수로서 정적, 동적 및 균열정지 시험에서 얻은 모든 결과 데이터가 이 곡선의 상부에 위치한다. 이 곡선의 해석적 근사식은 식(15)와 같다.

$$K_{\text{IR}} = 26.78 + 1.233\text{Exp}[0.014(T - \text{RT}_{\text{NDT}} - 160)] \quad (15)$$

- 특정 재료와 환경에 적용할 수 있는 더 큰 K_{IR} 이 없다면, NB 2331의 요건을 만족하고 상온에서의 규정 최소 항복강도가 50.0ksi 이하인 페라이트강에 대해 그림 73을 사용할 수 있다.
- 상온에서 규정 최소 항복강도가 50.0ksi보다 높고, 90.0ksi를 초과하지 않는 재료의 경우에 그림 73을 사용하기 위해서는 용접금속과 열영향부를 포함하여 관심온도의 범위에서 각기 다른 온도로 가열된 최소한 세 종류의 충분한 수의 시편으로부터 파괴역학 데이터를 확보하여야 하며, 이들 데이터는 그림 73의 곡선 상부에 위치하여야 한다.

- 이상과 같이 규정 최소 항복강도가 50.0ksi보다 높고, 90.0ksi를 초과하지 않는 고강도 재료는 재료특성 변화에 영향을 줄 수 있는 방사선 환경에서 사용할 경우에 K_{IR} 곡선에 대한 방사선의 영향을 평가하여야 하며, 이 정보는 설계시방서에 포함되어야 한다.

라) 최대 가상 결함

- 무연성 파괴방지를 위한 평가에서 사용하는 결함은 예리하고 최대 응력방향에 수직인 표면결함이다. 단면 두께가 4인치에서 12인치까지의 경우, 결함깊이는 단면두께의 1/4이고, 길이는 단면두께의 3/2이다.
- 단면두께가 12인치를 넘는 경우는 12인치 단면에서의 가상결함을 사용하며, 단면두께가 4인치보다 작은 경우에는 결함깊이를 1인치로서 보수적으로 가정한다.
- 이러한 가상적인 단면두께의 영향은 그림 73의 곡선을 작성하는데 사용하였다.
- 최대 가상결함의 크기가 더 작음을 보증할 수 있는 경우에는 경우에 따라 보다 작은 결함크기를 사용할 수 있다.
- 결함의 크기가 본 최대 가상결함의 2배가 되는 경우에도 평가에서 반영하는 안전계수로 인하여 무연성 파괴방지를 보증할 수 있다.

마) Level A & B Service Limits

- 불연속 부위로부터 멀리 떨어진 셸 및 헤드
 - 응력확대계수
 - 막응력에 의한 응력확대계수 (최대 가상결함 기준)

$$K_{lm} = M_m \times \text{막응력} \quad (M_m \text{은 그림 74 적용}) \quad (16)$$

- 굽힘응력에 의한 응력확대계수 (최대 가상결함 기준)

$$K_{lb} = M_b \times \text{최대 굽힘응력} \quad (M_b \text{는 그림 74 } M_m \text{의 } 2/3) \quad (17)$$

- 반지름 방향 온도구배에 의한 열응력 (최대 가상결함 기준)

$$K_{lt} = M_t \times \text{벽면 내외부사이의 온도차, } F \quad (M_t \text{는 그림 75 적용}) \quad (18)$$

- 그림 75의 M_t 는 아래의 경우에만 적용할 수 있고, 예상 온도구배는 그림 76과 유사하다.
- 온도변화는 정적조건에서 시작하며, 기동 및 정지단계를 포함하여 100°F/hr 이하의 변화율을 갖는다. 이때 더 빠른 온도변화율에 대해서 적용할 경우는

보수적인 결과로 나타난다.

- 위의 조건을 만족시킬 수 없는 경우는 다른 방법을 이용하여 열응력에 의한 K_{Ic} 을 계산하여야 한다. 예를 들어, 반지름 방향 온도구배에 의하여 발생하는 모멘트를 계산하고, 식 (14)의 기준을 적용, 등가 선형응력(NB 3213.13(1)(c))을 고려하여 K_{Ic} 을 계산할 수 있다.
- 재료의 항복강도를 초과하는 응력 : 재료의 항복강도를 초과하는 것으로 계산된 응력을 탄성적으로 고려하기 위한 절차를 WRCB 175에서 제시하고 있으며, 이 방법이 재료의 항복강도를 초과하는 복합응력의 경우에는 그림 74, 75 및 76을 대신하여 사용할 수 있다.

- 허용압력

- 이 항에 주어진 식은 Level A/B 운전한도가 규정된 운전조건 동안 가상결합 깊이에서 모든 온도에 대한 허용압력을 결정하기 위한 기준으로 사용한다. 이 가정의 보수성에 추가로 1차응력으로부터 계산한 K_{Ic} 에 승수 2를 적용하도록 권고하고 있다. 불연속 부위에서 멀리 떨어져 있는 셸과 헤드부위의 주요 하중은 아래와 같다.

- ▶ 압력에 의한 일반 1차 막응력
- ▶ 기동 및 정지단계에서 벽면의 온도구배에 의하여 발생하는 열응력

그러므로, 어떠한 가상의 온도 변화율에 대해서도 허용압력을 유지하기 위해서는 다음의 요건을 만족시켜야 한다.

$$2K_{Im} + K_{It} < K_{IR} \quad (19)$$

이 요건은 기기의 전 수명기간에서 각 온도에 대해 적용한다. 여기서, K_{Im} , K_{It} , K_{IR} 은 각각 식 (16), 식 (18) 및 그림 73에 따른다.

- 저압 과압방호계통을 갖는 원전에 대해서는 원자로 기동 및 정지시의 저온 과압사고(운전한도 A&B로 구분되는)에 따른 파손방지를 위해 다음의 하중과 온도 조건을 적용할 수 있다. 저온 과압방호계통의 냉각수 온도는 아래의 두 값 중 큰 값보다 작아야 유효하다.

- ▶ 냉각수 온도 200°F
- ▶ $RT_{NDT} + 50^\circ\text{F}$ 미만인 원자로 압력용기 금속온도에 해당하는 냉각수 온도

- 저온 과압 방호계통은 원자로 용기의 최대 압력을 식 (19)에서 구한 값의 110%로 제한하여야 한다.

○ 기하학적 불연속부에 가까운 노즐, 플랜지 및 동체의 부위

불연속 부위로부터 멀리 떨어진 셸 및 헤드에 적용하는 동일한 일반절차가 복잡한 응력분포를 갖는 부위에 사용할 수 있다. 단, 다음에 명시된 특수조건에 대해서는 허용 작용하중을 결정하기 위해 절차를 다소 수정하여야 한다.

- 막응력과 굽힘응력의 고려

- 플랜지 또는 노즐에 가까운 부위에서의 K_{Ic} 을 계산할 때 중요한 요소가 될 수

있는 굽힘응력을 고려하기 위해서는 식 (18)을 수정하여야 한다. 다음 값들의 합이 정상 운전조건과 이상 운전조건에서 K_{IR} 보다 작아야 한다. 즉, 식 (20)을 만족하여야 한다.

- ▶ 1차 막응력 : $2 K_{Im}$
- ▶ 1차 굽힘응력 : $2 K_{Ib}$
- ▶ 2차 막응력 : K_{Ims}
- ▶ 2차 굽힘응력 : K_{Ibs}

$$2K_{Im} + 2K_{Ib} + K_{Ims} + K_{Ibs} < K_{IR} \quad (20)$$

여기서, 볼트의 사전하중으로 인한 응력은 1차 응력으로 간주한다.

- 플랜지와 인접하고 있는 쉘부위가 볼트의 목표 사전하중과 가동전 계통 수압시험 압력의 20%를 초과하지 않는 입력에 의하여 응력을 받을 경우 응력부위의 금속온도는 최소한 응력부위 금속의 최초 RT_{NDT} 이어야 하며, 여기에 추가로 중성자 조사로 인한 영향을 고려하여야 한다.
- ASME Sec. III, NB 3213.13(2)의 경우를 제외하고는 열응력을 2차 응력으로 간주해야 한다. 더욱 복잡한 응력분포를 갖는 경우는 그림 75와 같은 단순 접근방식으로는 적절히 표현할 수 없기 때문에 그림 75의 K_t 을 열응력 확대계수 평가 목적으로 사용하기에는 적절하지 않다.
- 노즐의 인성요건
 - 노즐의 파괴인성 요건의 정량적 평가는 현시점에서는 타당성이 없다. 그러나, 이제까지 얻은 자료에 의하면 내부 압력, 외부 하중 및 열응력을 복합적으로 고려한 노즐의 설계 결함크기가 용기 동체에서 가상되는 결함에 비해 작은 것으로 나타나 있다. 비파괴검사 방법은 이러한 작은 결함을 검출할 수 있도록 충분한 정확도와 신뢰도를 지녀야 한다.
 - WRCB 175의 본문 5(C)(2)는 내부 압력응력에 의한 탄성응력에 대한 노즐 실린더 동체의 내부 코너 해석에 필요한 근사적 방법을 제시하고 있다.
 - 최저 운전온도가 RT_{NDT} 에 $60^\circ F$ 를 더한 값이고, 2.5인치 이하의 두께를 갖는 노즐과 부속물의 경우는 무연성 파괴로부터 보호됨을 입증하기 위한 파괴인성 해석을 필요로 하지 않는다.

바) Level C/D Service Limits

- C급 및 D급 운전한계 동안에 발생하는 하중, 결함크기 및 재료물성치의 조합은 일정한 규정을 적용하기에는 너무 다양하므로 각 경우에 따라 개별적으로 해석을 수행한다.
- 가상하중, 결함크기, 재료인성을 각 사안에 따라 타당함을 입증할 경우 ASME Code Section III 또는 XI의 Appendix에 기술한 방법론을 적용할 수도 있다.

사) 수압시험 온도

- 원자로 압력용기에 핵연료 장전에 앞서 수행하는 계통 및 기기 수압시험은 RT_{NDT} 에 $60^{\circ}F$ 를 더한 값 이상의 온도에서 실시할 것을 권고한다. $60^{\circ}F$ 의 여유는 시험 압력에서의 무연성 파괴를 방지하기 위함이다.
- 원자로 압력용기에 핵연료를 장전한 후 수행하는 계통 및 기기 수압시험은 최저 시험온도는 K_1 을 평가하여 결정한다. K_1 은 다음 4개항의 값을 합한 값이다. 즉, 식 (21)을 만족하여야 한다.
 - ▶ 1차 막응력 : $1.5K_{1m}$
 - ▶ 1차 굽힘응력 : $1.5K_{1b}$
 - ▶ 2차 막응력 : K_{1ms}
 - ▶ 2차 굽힘응력 : K_{1bs}

$$1.5K_{1m} + 1.5K_{1b} + K_{1ms} + K_{1bs} < K_{1R} \quad (21)$$

- 위의 두 항을 만족하는 계통 수압시험은 계통의 기기에 요구되는 최고 온도 이상의 온도에서 수행해야 한다.

2) 가압열충격

가압열충격은 압력이 상당히 높은 상태에 있거나 재가압되는 상태에서 압력용기의 벽면온도가 기준 무연성 천이온도보다 저하됨에 따른 재료 파괴인성의 급격한 감소와 벽면의 급냉으로 인한 높은 열응력이 더해지는 현상으로서 10CFR50.61[85]에서는 이에 따른 압력용기의 보호를 위한 파괴인성 요건을 규정하고 있다. 본 항에서는 이를 기초로 평가절차와 방법을 제시하였다.

가) 규제요건

- ㉔ : 가압경수로의 경우에 발전사업자는 EOL 플루언스에 대해 각 원자로 압력용기 벨트라인 재료에 대해서 NRC가 채택한 방법에 따라 RT_{PTS} 를 예측하여야 한다. 이때 각 벨트라인 재료에 대해 계산에 사용된 구리와 니켈함량과 플루언스를 기술하고, 노심배치형태에 대한 가정을 포함하여 각 압력용기 벨트라인 재료에 대한 RT_{PTS} 의 예측치를 기술하여야 한다. 한편, RT_{PTS} 예상값의 현저한 변화가 예상되거나 원전설비에 대한 만료일의 변경을 요청할 경우에는 이 평가결과를 갱신하여야 한다. RT_{PTS} 에 대한 변화가 과거의 값이나 현재의 값, 또는 두 값이 갱신기간을 포함한 운영허가의 만료일에 앞서 심사기준을 초과할 경우, 중요하게 다루어져야 한다.
- ㉕ : 가압열충격 심사기준으로 판재, 단조재 및 축방향 용접재에 대해서 $270^{\circ}F$, 원주 방향 용접재에 대해서는 $300^{\circ}F$ 를 적용하며, 이 기준과의 비교를 위해 원자로 압력용기 벨트라인의 각 용접재와 판재 또는 단조재에 대한 RT_{PTS} 를 (나)의 절차에

따라 평가하여야 한다. 해당재료에 대한 RT_{PTS} 는 EOL 플루언스로부터 결정되어야 한다.

- ㉔ : 가압경수로의 경우, EOL 플루언스에 따른 벨트라인 재료에 대한 RT_{PTS} 가 PTS 심사기준을 초과하는 것으로 예측될 경우, 발전사업자는 ㉔에 따른 PTS 심사기준의 초과를 방지하기 위한 플럭스 감소 프로그램을 이행하여야 한다. 플럭스 감소방안의 이행을 위한 일정에는 규제기관에게 발전소 변경, 신규 정보나 해석기술에 기인하는 심사한도보다 높은 RT_{PTS} 를 갖는 경우에 대한 허용 위험도를 증명하는 상세해석의 제출과 예상되는 승인가간을 고려하여야 한다.
- ㉕ : 가압경수로의 경우, ㉔에 따른 해석결과 EOL 플루언스를 사용한 RT_{PTS} 가 PTS 심사기준의 초과를 방지할 수 없는 경우에 심사기준을 초과한 지속적인 운전을 허용받고자 한다면, 발전사업자는 가상의 PTS 사고로부터 원자로 압력용기의 가상파괴를 방지하는데 요구되는 기기, 계통 및 운전이 무엇인지를 결정하기 위한 안전성 해석결과를 제출하여야 한다. 이 해석에서 발전사업자는 이용가능한 정보, 연구결과 그리고 발전소 감시데이터를 기초로 원자로 압력용기의 특성을 결정할 수 있으며, 확률론적 파괴역학 기술을 사용할 수 있다. 이 해석은 적어도 RT_{PTS} 가 심사기준에 도달할 것으로 예측되는 시점의 3년전에 제출되어야 한다.
- ㉖ : 규제기관은 제안된 수정조치의 효과를 포함하여 ㉔와 ㉕에 따라 제출된 발전사업자의 해석을 검토하여 PTS 심사기준을 초과하는 RT_{PTS} 를 갖는 설비의 운전을 개별적으로 승인할 수 있다. 이때 규제기관은 결론으로 도출된 원자로 압력용기의 파손에 대한 가능성에 영향을 끼치는 주요 인자들을 고려한다.
- ㉗ : 만약, ㉖의 요구에 응하여 규제기관이 PTS의 심사기준을 초과하는 RT_{PTS} 를 갖는 설비의 운전을 ㉔와 ㉕에 따라 제출된 발전사업자의 해석결과를 승인할 수 없는 것으로 결론이 도출된다면, 발전사업자는 기준을 초과한 운전에 앞서 규제기관에게 승인을 요청하고 허락을 받아야 한다. 이 요청은 PTS 사고에 기인하는 원자로 압력용기의 파손가능성이 감소될 것임을 사전에 제출한 해석에서 제안된 내용에 추가로 설비의 기기, 계통 및 운전에 대한 변경이나 신규 정보 또는 향상된 방법론에 기초한 추가해석을 수행하여야 한다.
- ㉘ : 발전소의 RT_{PTS} 의 한도가 ㉔의 심사기준을 초과할 것으로 예상되거나 ㉔에서 ㉖의 기준을 충족할 수 없다면, 10CFR50.66의 요건에 따라 원자로 압력용기 벨트라인은 재료의 파괴인성을 회복시키기 위하여 열풀림 처리를 수행할 수 있다. 이 원자로 압력용기는 벨트라인 재료의 예상 파괴인성이 열풀림과 부차적인 영향을 설명하는 RT_{PTS} 와 함께 ㉔에서 ㉖의 요건을 충족하는 가동기간에 대해서만 운전을 계속할 수 있다.
- ㉙ : PTS 심사기준은 발전소가 정당성 관련 입증을 하지 않고는 운전을 계속할 수 없는 압력 용기 벨트라인 재료에 대한 RT_{PTS} 를 의미한다.

나) RT_{PTS} 의 계산

RT_{PTS} 는 재료에 대한 EOL 플루언스 f 를 사용하여 각 압력용기 벨트라인 재료에 대해 평가되어야 하며, RT_{NDT} 를 계산하는데 사용된 동일한 절차를 사용하여

평가하여야 한다.

- 압력용기 벨트라인의 각 용접부와 판재 또는 단조재에 대한 RT_{NDT} 계산은 식 (22)를 사용하여 평가한다.

$$RT_{PTS} = RT_{NDT(U)} + M + \Delta RT_{NDT} \quad (22)$$

- $RT_{NDT(U)}$ 의 측정치를 이용할 수 없는 경우는 재료에 대한 평균값과 표준편차를 얻는데 충분한 시험결과가 있다면, 일반 평균값이 사용될 수도 있다.
- 용접금속에 대해서는 다음의 일반 평균값이 다른 정당성을 제공하지 않는 한 사용하여야 한다. 즉, Linde 80 flux로 제작된 용접부에 대해서는 $0^{\circ}F$, Linde 0091, 1092 및 124 그리고 ARCOS B-5 Weld flux로 제작된 용접부에 대해서는 $-56^{\circ}F$ 를 사용한다.
- M은 $RT_{NDT(U)}$, 구리와 니켈함량, 플루언스와 계산상의 절차에 대한 불확실성을 고려한 값으로, 식 (23)을 이용하여 계산한다.

$$M = 2\sqrt{(\sigma_U)^2 + (\sigma_{\Delta})^2} \quad (23)$$

- σ_U 는 $RT_{NDT(U)}$ 에 대한 표준편차이다. $RT_{NDT(U)}$ 가 측정치라면, σ_U 는 시험방법의 정확성으로부터 결정된다. $RT_{NDT(U)}$ 의 측정치를 이용할 수 없어 해당 재료의 일반값을 사용하는 경우는 σ_U 는 평균값을 산출하는데 사용된 데이터로부터 얻어진 표준편차가 된다. 용접부에 대한 일반 평균값이 사용된다면, σ_U 는 $17^{\circ}F$ 가 된다.
- σ_{Δ} 는 ΔRT_{NDT} 에 대한 표준편차로서 용접부에 대해서는 $28^{\circ}F$, 모재금속에 대해서는 $17^{\circ}F$ 를 사용한다. 이때 σ_{Δ} 는 ΔRT_{NDT} 의 0.5배를 초과할 필요는 없다.
- ΔRT_{NDT} 는 천이온도 이동량의 평균값 또는 RT_{NDT} 의 변화량이며, 식 (24)를 사용하여 계산한다.

$$\Delta RT_{PTS} = [CF]f^{(0.28-0.11\log f)} \quad (24)$$

- CF는 구리와 니켈함량의 함수인 화학인자(Chemistry Factor)로서, 용접재료에 대해서는 표 30, 모재금속(판재 및 단조재)에 대해서는 표 31을 적용한다. 이때 선형보간법의 적용이 가능하다. 표 30과 31에서 “wt-% Copper”과 “wt-% Nickel”은 재료에 대한 판재 또는 단조재와 임계 압력용기 용접부에 해당하는 Weld Wire Heat Number로 만들어진 용접샘플에 대한 측정치의 평균값(Best Estimate Values)이다.
- 만약, 이들 값의 확보가 어려운 경우에는 재료시방서에 제시된 상부한도(Upper Limiting Value)를 사용할 수 있다. 이 또한 이용할 수 없다면, 타당성을 근거로 일반 데이터에 기초한 보수적인 평가결과 (Mean + σ)를 사용할 수 있다. 이들

중에 어떠한 값도 사용할 수 없다면, 35%의 구리함량과 10%의 니켈함량으로 가정하여야 한다.

- f 는 문제의 재료에 대해 운전기간 동안 가장 높은 플루언스를 받는 압력용기 내부표면층의 클래드-모재 경계면에서의 플루언스이며, 단위는 $10^{19}n/cm^2$ 이다. 앞에서 언급한 바와 같이, 압력용기 벨트라인 재료에 대한 EOL 플루언스가 RT_{PTS} 를 계산하는데 사용한다.
- 각 압력용기 벨트라인 재료에 대한 RT_{NDT} 가 해당 원자로 압력용기와 관련된 값이라는 사실을 증명하기 위해서 발전사업자는 취화정도에 영향을 줄 수 있는 발전소의 특성 정보를 고려하여야 한다. 이 정보는 원자로 압력용기 운전온도와 무관하며, 감시프로그램 결과와의 연관성이 포함되어야 한다.
- 해당 발전소의 감시프로그램 결과가 아래에 제시한 기준으로부터 결정되었을 경우에는 RT_{NDT} 평가에 반영되어야 한다.
 - 감시캡슐에 있는 재료들은 조사취화에 대한 관리대상 재료이어야 한다
 - 조사 및 비조사 상태에 대해 온도에 따른 샤프 에너지에서의 데이터 분포는 정확히 30ft-lb 온도를 결정할 수 있을 만큼 충분히 작아야 한다.
 - 하나의 원자로에 대한 감시데이터가 2개 이상인 경우, ΔRT_{NDT} 의 산란 데이터는 용접부에 대해서는 $28^\circ F$, 모재금속에 대해서는 $17^\circ F$ 보다 작아야 한다. 캡슐 플루언스의 범위가 클지라도, 그 산란 데이터(Scatter)는 이들 값의 2배를 초과할 필요는 없다.
 - 캡슐 샤프 시편의 조사온도는 클래딩/모재금속 경계면에서 압력용기 벽면온도 $\pm 25^\circ F$ 범위에서 같아야 한다.
 - 캡슐에 있는 상관 감시재료(Correlation Monitor Material)에 대한 감시데이터는 재료 데이터베이스의 산란범위에 있어야 한다.
 - 앞에서 기술한 기준에 따른 신뢰할 수 있는 감시데이터는 식 (24)의 해당 재료의 CF를 결정하는데 사용되어야 한다. 재료의 해당 CF는 식 (25)를 이용하여 계산한다.

$$CF = \frac{\sum_{i=1}^n [A_i \times f_i^{(0.28 - 0.10 \log f_i)}]}{\sum_{i=1}^n [f_i^{(0.56 - 0.20 \log f_i)}]} \quad (25)$$

- 식 (26)은 ΔRT_{PTS} 를 결정하기 위한 EOL 플루언스와 함께 식 (24)를 사용하여 RT_{PTS} 를 결정하는데 사용한다.

$$RT_{PTS} = RT_{NDT(U)} + M + \Delta RT_{PTS} \quad (26)$$

표 31. 용접재에 대한 화학인자[CF], °F

Copper wt%	Nickel, wt%						
	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
0	20	20	20	20	20	20	20
0.01	20	20	20	20	20	20	20
0.02	21	26	27	27	27	27	27
0.03	22	35	41	41	41	41	41
0.04	24	43	54	54	54	54	54
0.05	26	49	67	68	68	68	68
0.06	29	52	77	82	82	82	82
0.07	32	55	85	95	95	95	95
0.08	36	58	90	106	108	108	108
0.09	40	61	94	115	122	122	122
0.10	44	65	97	122	133	135	135
0.11	49	68	101	130	144	148	148
0.12	52	72	103	135	153	161	161
0.13	58	76	106	139	162	172	176
0.14	61	79	109	142	168	182	188
0.15	66	84	112	146	175	191	200
0.16	70	88	115	149	178	199	211
0.17	75	92	119	151	184	207	221
0.18	79	95	122	154	187	214	230
0.19	83	100	126	157	191	220	238
0.20	88	104	129	160	194	223	245
0.21	92	108	133	164	197	229	252
0.22	97	112	137	167	200	232	257
0.23	101	117	140	169	203	236	263
0.24	105	121	144	173	206	239	268
0.25	110	126	148	176	209	243	272
0.26	113	130	151	180	212	246	276
0.27	119	134	155	184	216	249	280
0.28	122	138	160	187	218	251	284
0.29	128	142	164	191	222	254	287
0.30	131	146	167	194	225	257	290
0.31	136	151	172	198	228	260	293
0.32	140	155	175	202	231	263	296
0.33	144	160	180	205	234	266	299
0.34	149	164	184	209	238	269	302
0.35	153	168	187	212	241	272	305
0.36	158	172	191	216	245	275	308
0.37	162	177	196	220	248	278	311
0.38	166	182	200	223	250	281	314
0.39	171	185	203	227	254	285	317
0.40	175	189	207	231	257	288	320

표 32. 모재에 대한 화학인자[CF], °F

Copper, wt%	Nickel, wt%						
	0	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20
0	20	20	20	20	20	20	20
0.01	20	20	20	20	20	20	20
0.02	20	20	20	20	20	20	20
0.03	20	20	20	20	20	20	20
0.04	22	26	26	26	26	26	26
0.05	25	31	31	31	31	31	31
0.06	28	37	37	37	37	37	37
0.07	31	43	44	44	44	44	44
0.08	34	48	51	51	51	51	51
0.09	37	53	58	58	58	58	58
0.10	41	58	65	65	67	67	67
0.11	45	62	72	74	77	77	77
0.12	49	67	79	83	86	86	86
0.13	53	71	85	91	96	96	96
0.14	57	75	91	100	105	106	106
0.15	61	80	99	110	115	117	117
0.16	65	84	104	118	123	125	125
0.17	69	88	110	127	132	135	135
0.18	73	92	115	134	141	144	144
0.19	78	97	120	142	150	154	154
0.20	82	102	125	149	159	164	165
0.21	86	107	129	155	167	172	174
0.22	91	112	134	161	176	181	184
0.23	95	117	138	167	184	190	194
0.24	100	121	143	172	191	199	204
0.25	104	126	148	176	199	208	214
0.26	109	130	151	180	205	216	221
0.27	114	134	155	184	211	225	230
0.28	119	138	160	187	216	233	239
0.29	124	142	164	191	221	241	248
0.30	129	146	167	194	225	249	257
0.31	134	151	172	198	228	255	266
0.32	139	155	175	202	231	260	274
0.33	144	160	180	205	234	264	282
0.34	149	164	184	209	238	268	290
0.35	153	168	187	212	241	272	298
0.36	158	173	191	216	245	275	303
0.37	162	177	196	220	248	278	308
0.38	166	182	200	223	250	281	313
0.39	171	185	203	227	254	285	317
0.40	175	189	207	231	257	288	320

- 식 (25)에서 n 은 감시데이터의 수이다. A_i 는 ΔRT_{NDT} 의 측정치이고, f_i 은 각 감시데이터에 대한 플루언스이다. 감시 용접부의 구리와 니켈함량이 압력용기 용접데이터와 명확히 다르다면, 즉, 압력용기 용접재와 감시재료의 Weld Wire Heat Number에 대한 평균값이 다를 경우에는 ΔRT_{NDT} 의 측정치가 압력용기에 대한 화학인자와 감시 용접재에 대한 화학인자의 비를 곱하여 구리와 니켈함량의 차이에 대해 조정되어야 한다.
- 신뢰할 수 있는 해당 발전소 감시프로그램의 결과가 사용되는 경우에 σ_{Δ} 는 용접부에 대해 14°F, 모재금속에 대해 8.5°F이며, 이때 σ_{Δ} 는 ΔRT_{NDT} 의 0.5배를 초과할 필요는 없다.
- 해당 발전소에 대한 감시프로그램으로부터 얻어진 결과의 사용은 앞에서 산출한 결과보다 크거나 작은 RT_{NDT} 로 나타날 수 있다.
- 현저하게 RT_{PTS} 의 정확성을 향상시킬 수 있는 것으로 예상되는 정보에 대해서는 규제기관에 보고하여야 한다. 앞에서 기술한 방법에 따라 수정된 RT_{PTS} 를 사용한 경우에는 규제기관장의 승인을 받아야 한다.

3) 상단 에너지

- 중성자 조사로 인한 상단 에너지와 관련하여 10CFR50, App. G에서는 초기 USE가 75ft-lb이상이어야 하며, 가동중에는 50ft-lb(68J) 이상을 유지하도록 규정하고 있다.
- 이때 상단 에너지가 50ft-lb 이하로 낮아질 경우에는 ASME Code, Sec. XI, App. K에 따른 노심재료에 대한 파괴인성의 재검토와 안전성 해석을 통하여 낮은 USE로도 ASME Sec. XI App. G에서 요구하는 것과 동등한 안전여유도를 유지하여야 한다.
- 재료 상단 에너지의 감소량은 Reg. Guide 1.99, Rev. 2에 따라 예측할 수 있으며, 실제 감시데이터의 사용여부에 따라 다른 방법을 사용한다. 감시데이터가 없는 경우에는 재료의 화학조성과 플루언스의 함수로서 그림 77이나 식 (27)을 사용하여 중성자 플루언스의 함수로서 산술적으로 평가한다.

$$D = (100Cu + 9) \cdot f^{0.2368} \quad (27)$$

$$D = (100Cu + 14) \cdot f^{0.2368} \quad (28)$$

$$D = 42.39 \cdot f^{0.1502} \quad (29)$$

여기서, D : 재료의 상단 에너지 감소량(%), Cu : 구리함량(wt%), f : 1/4 T에서의 고속 ($E > 1.0\text{MeV}$) 중성자 플루언스($\times 10^{19} \text{ n/cm}^2$)이다.

- 또한, 신뢰할 수 있는 2개 이상의 감시데이터를 이용할 수 있는 경우에는 그림 77을 사용하여 다음에 제시된 절차에 따라 감시재료의 상단 에너지를 결정할 수 있다.
- 그림 77 상에 발전소 감시데이터를 표시한다.
- 기존의 선과 평행하게 모든 데이터의 상한선(Upper Bound)을 도시하여 중성자 조사에 기인하는 상단 에너지 감소량을 예측한다. 이때 이 선은 다른 선들에 우선하여 사용되어야 한다.

다. 원자로 압력용기 열풀림 (Thermal Annealing) 영향 평가

원자로 압력용기에 있어서 중성자 조사취화로 인해서 실제 압력-온도 운전한도가 좁아졌거나, 가압열충격 또는 최대흡수에너지의 기준을 초과하고, 열풀림을 통한 지속적인 운전을 고려할 경우, 이에 따른 타당성을 예측, 평가하여야 한다. 즉, 감시 데이터 및 조사데이터로부터 얻어지는 재료물성치 데이터, 열풀림 온도 및 열풀림 시간과 같은 열풀림 조건, 그리고 열풀림 수행시점을 고려하여 재료물성치 회복량과 열풀림 후의 중성자 조사에 따른 재취화를 평가하여야 한다. 다음은 열풀림에 대한 각 인자들에 대한 예측기술을 제시한다.

1) 회복량 평가

- 열풀림에 따른 파괴인성 회복량(Percent Recovery) 평가의 목적은 열풀림후의 RT_{NDT} 와 USE를 결정하는데 있다. 이 열풀림 회복량은 열풀림후 원자로 압력용기 가동기간 동안의 재취화로 인한 안전여유도 평가와 수명결정을 위해서 매우 중요한 변수이며, 이의 평가방법에는 크게 감시시편을 이용하는 방법 (Surveillance Program Method), 압력용기 벨트라인으로부터 채취한 샘플재료를 이용하는 방법 (Irradiated Vessel Material Method) 및 수식을 이용한 계산방법 (Computational Method)이 있다.
- 이들 방법 중 감시프로그램과 압력용기 조사시편을 이용하는 방법은 정밀평가가 가능하나 초창기 건설된 가동원전의 경우는 시편확보가 극히 제한적일 수 있다는 단점이 있다. 한편, 수식을 이용한 방법은 조사시편의 확보가 어려운 경우에 고려할 수 있으며, 기존의 열풀림 연구결과를 바탕으로 수립된 계산식을 기초로 회복량을 평가하는 방법이다. Reg. Guide 1.162에서는 수식을 이용한 최대흡수에너지의 회복량 평가식으로 식 (30)을 제시하고 있다.

$$R_{USE} = \{ [1 - 0.586 \exp(-t_a / 15.9)] \times [0.570 \Delta USE_i + (0.120 T_a - 104) Cu + 0.0389 T_a - 17.6] \} \times \{ 100 / \Delta USE_i \} \quad (30)$$

여기서, R_{USE} 는 풀림에 의한 USE 회복량(%)이며, ΔUSE_i 는 조사전후의 USE의 차이를 나타낸다. t_a 와 T_a 는 각각 풀림시간과 풀림온도를 나타내며, Cu는 구리함량이다. 한편, 무연성 천이온도 회복량 평가식으로 식 (31)을 제시하고 있다.

$$R_i = [0.5 - 0.5 \tanh\{(a_1 T_a - a_2) / 95.7\}] \quad (31)$$

이때, R_i 는 열풀림에 따른 천이온도 회복량(%)이며, a_1 과 a_2 는 각각 다음과 같다.

$$a_1 = 1 + 0.015 \ln(t_a) - 0.424 Cu^{(3.28 - 0.00306 T_a)}$$

$$a_2 = 0.584(T_i + 637) \quad (T_a > 800^\circ F)$$

$$0.584T_i - 15.5 \ln(\Phi) + 833 \quad (T_a < 750^\circ\text{F}) \quad (32)$$

여기서, Φ 는 중성자 플럭스($n/cm^2\cdot s$)이며, T_i 는 조사온도를 나타낸다. 이때, $750^\circ\text{F} \sim 800^\circ\text{F}$ 의 풀림온도에서는 식 (31)에 따른 천이온도 회복량(R_i) 산출에 제한을 받는다. 그러나, 플럭스 항(Flux Term)을 포함하고 있는 a_2 를 775°F 까지 적용하고, 이 값을 적용하여 평가한 결과와 플럭스항을 포함하고 있지 않은 800°F 에서의 평가결과를 선형적으로 내삽하여 보수적으로 회복량을 산출할 수 있다.

2) 열풀림 후의 초기 물성치 정량화

열풀림 회복에 따른 압력용기의 초기 재료 물성치의 정량화는 회복량(%) 계산에 사용된 평가방법에 따라 다른 식이 적용된다. 앞서 수행한 계산방법에 따라 RT_{NDT} 와 USE 회복량이 계산되면, 식 (28)과 식 (32)를 이용하여 열풀림 후의 초기 물성치, $C_vUSE_{(A)}$ 와 $RT_{NDT(A)}$ 를 결정할 수 있다.

○ 압력용기 감시프로그램을 이용하는 방법

- 감시시편으로부터 열풀림 회복량, R_i 와 R_{USE} 를 결정할 수 있을 경우에는 RT_{NDT} 와 USE는 식 (33)과 식 (34)를 이용하여 계산한다.

$$RT_{NDT(A)} = RT_{NDT(U)} + \Delta RT_{NDT} \times (100 - R_i) / 100 \quad (33)$$

$$C_vUSE_{(A)} = C_vUSE(U) \cdot [1 - D \times (100 - R_{USE}) / 10000] \quad (34)$$

- $RT_{NDT(A)}$ = 열풀림후의 RT_{NDT}
- $RT_{NDT(U)}$ = 비조사재의 RT_{NDT}
- ΔRT_{NDT} = 조사로 인한 RT_{NDT} 변화량
- R_i = 열풀림에 따른 ΔRT_{NDT} 회복량(%)
- $C_vUSE_{(A)}$ = 열풀림 후 재료의 USE
- $C_vUSE_{(U)}$ = 열풀림후 조사전 재료의 USE
- D = 열풀림전 USE 감소량(%)
- R_{USE} = 열풀림에 따른 USE 회복량(%)

- 식 (33)과 식 (34)로부터 계산된 $RT_{NDT(A)}$ 와 $C_vUSE_{(A)}$ 는 추후 발전소 재가동시의 기준 RT_{NDT} 및 USE로 이용된다.

○ 압력용기 조사재를 이용하는 방법

- 압력용기 표면부근의 판재, 용접재 및 단조재의 샘플을 이용하는 본 방법에 의해 평가된 샤피데이터는 표면의 물성치를 나타내므로 직접적으로 Reg. Guide 1.99에서 요구하고 있는 $1/4T$ 지점의 물성치로는 활용할 수 없다. 그러나, 압력용기 벨트라인 으로부터 인출된 샘플에 대한 풀림전/후의 물성치 평가결과는 판재, $1/4T$ 단조재, 용접부 재료에 대한 회복량(%)을 평가하기 위한 데이터로 충분히 활용할 수 있다. 이때 원자로 압력용기 조사재가 최고 플럭스 부위에서 인출되었을 경우 물성치

회복량은 다음 식을 이용하여 평가할 수 있다.

$$RT_{NDT(A)} = RT_{NDT(U)} + RT_{NDT} \times [1 - (TT_{SI} - TT_{SA}) \cdot (R_s / \Delta T_s)] \quad (35)$$

$$C_V USE_{(A)} = C_V USE_{(U)} (1 - D/100) (C_{VSA} / C_{VSI}) \quad (36)$$

- RT_{NDT(A)} = 열풀림후의 RT_{NDT}
- RT_{NDT(U)} = 비조사재의 RT_{NDT}
- Δ RT_{NDT} = 조사로 인한 RT_{NDT} 변화량
- TT_{SI} = 측정표면의 풀림전 30ft-lb 에너지 준위의 천이온도
- TT_{SA} = 측정표면의 풀림후 30ft-lb 에너지 준위의 천이온도
- R_s = 판재, 단조재, 용접재 표면에 대한 1/4T 부위의 R_{USE} 비
- Δ T_s = 판재, 단조재, 용접재의 표면에 대한 1/4T 부위의 R_t 비
- C_VUSE_(A) = 판재, 단조재, 용접재 1/4T 위치의 풀림후 재료의 USE
- C_VUSE_(U) = 판재, 단조재, 용접재 1/4T 위치의 조사전 재료의 USE
- D = 판재, 단조재, 용접재 1/4T 위치의 USE 감소량(%)
- C_{VSI} = 측정표면의 풀림전 USE
- C_{VSA} = 측정표면의 풀림후 USE

○ 계산식을 이용한 방법

- 계산식을 이용한 열풀림 후 벨트라인에 대한 초기 RT_{NDT}와 USE는 식 (33)과 식 (34)로부터 식 (30)과 식 (31)에 의해 계산된 R_{USE} 및 R_t를 이용하여 정량화할 수 있다.

3) 재취화 평가

열풀림 규정 10CFR50.66(b)(3)(ii)(B)에 명시된 바와 같이 운전종료 시점의 취화 정도를 예측하기 위해 RT_{NDT}와 USE의 재취화 경향을 평가하여야 한다. 또한, 예측 결과를 확인하기 위해서는 열풀림후 원자로 가동기간에 걸쳐 감시프로그램에 따른 감시가 수행되어야 한다. 이때, 재취화 평가방법으로는 수평이동법(Lateral Shift Method)이 이용 되고 있으며, 이는 RT_{NDT}와 USE를 플루언스 축을 따라 초기 조사취화 곡선에서 평행하게 이동시키는 방법이다.

○ RT_{NDT}의 재취화 평가

- RT_{NDT}의 재취화 평가를 위한 수평이동법은 앞에서 설명한 바와 같이 열풀림전과 동일한 취화경향을 갖는다는 가정에 따라 열풀림 이전의 예측식인 식 (37)을 이용하여 열풀림 이후의 RT_{NDT}를 계산할 수 있다.

$$RT_{NDT} = RT_{NDT(U)} + \Delta RT_{NDT} + M \quad (37)$$

- RT_{NDT} = 풀림후 조사로 인한 재료의 기준 무연성 천이온도
- RT_{NDT(U)} = 풀림직후의 기준 무연성 천이온도
- Δ RT_{NDT} = 풀림후 조사에 따른 천이온도의 변화량
- M = 불확실성을 고려한 여유도

$$\Delta RT_{NDT} = CF \times f^{0.28-0.11 \log f}$$

$$M = 2 \sqrt{(\sigma_i^2 + \sigma_A^2)}$$

- 실질적인 재취화 평가는 식 (38)을 만족하는 플루언스를 계산하여 천이회복 플루언스 (Transition Recovery : f_t)를 결정함으로써 이루어진다.

$$RT_{NDT(A)} - RT_{NDT(U)} = [CF] f_t^{0.28-0.11 \log f_t} \quad (38)$$

여기서, $RT_{NDT(A)}$ 는 풀림후 재료의 기준 무연성 천이온도(RT_{NDT})이다. 따라서, 재취화에 따른 기준 무연성 천이온도, RT_{NDT} 의 평가는 식 (37)과 식 (38)을 함께 고려한 식 (39)를 이용한다.

$$RT_{NDT} = RT_{NDT(U)} + \Delta RT_{NDT} + M \quad (39)$$

$$\Delta RT_{NDT} = [CF] (f + f_t)^{0.28-0.11 \log (f + f_t)} \quad (40)$$

CF = 화학인자
 F = 평가된 중성자 플루언스의 증분
 f_t = 식 (38)로부터 평가된 천이회복 플루언스

○ USE의 재취화 평가

- USE의 재취화 평가도 수평이동법에 따라 풀림전의 취화경향과 동일하다는 가정을 이용하여 평가된다. 열풀림전의 가동기간에 대해 Reg. Guide 1.99, Rev. 2에서는 그래프 또는 이론식으로 표현한 식 (41)을 이용하여 USE 감소량을 평가하고 있다. Reg. Guide 1.99, Rev. 2에 제시된 식을 이용하면 다음과 같다.

$$C_v USE = C_v USE_{(U)} \times [1 - \frac{D}{100}] \quad (41)$$

$C_v USE$ = 조사에 따른 재료의 USE(ft-lb)
 $C_v USE_{(U)}$ = 풀림후 조사전 재료의 USE
 D = 조사로 인한 USE 감소량(%)
 Cu = 구리함량(wt%)
 F = 중성자 플루언스($\times 10^{19}$ n/cm²)

여기서, D는 다음 식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\text{모재금속} : D = (100Cu + 9) \cdot f^{0.2368}$$

$$\text{용접금속} : D = (100Cu + 14) \cdot f^{0.2368}$$

$$\text{상한선} : D = 42.39 \cdot f^{0.1502}$$

- 한편, 상단회복 플루언스(Shelf Recovery Fluence : f_s)의 수평이동량은 식 (42)를 이용하여 재료별로 평가할 수 있다.

$$\text{모 재} : f_s = \left[\frac{1 - (C_v \text{USE}_{(A)} / C_v \text{USE}_{(U)})}{100\text{Cu} + 9} \right]^{4.223} \quad (42a)$$

$$\text{용 접 재} : f_s = \left[\frac{1 - (C_v \text{USE}_{(A)} / C_v \text{USE}_{(U)})}{100\text{Cu} + 14} \right]^{4.223} \quad (42b)$$

$$\text{Upper Bound} : f_s = \left[\frac{1 - (C_v \text{USE}_{(A)} / C_v \text{USE}_{(U)})}{42.39} \right]^{6.658} \quad (42c)$$

- 이로부터 열풀림후 원자로 재가동에 따른 USE의 변화는 식 (43)을 이용하여 산출이 가능하다.

$$C_v \text{USE} = C_v \text{USE}_{(U)} \times [1 - D/100] \quad (43)$$

$$\text{모 재} : D = (100\text{Cu} + 9) \cdot (f + f_s)^{0.2368} \quad (44a)$$

$$\text{용접부} : D = (100\text{Cu} + 14) \cdot (f + f_s)^{0.2368} \quad (44b)$$

$$\text{Upper Bound} : D = 42.39 \cdot (f + f_s)^{0.1502} \quad (44c)$$

라. Type 304 SS의 중성자 플럭스에 의한 영향

항복응력의 증분과 중성자 플루언스 또는 플럭스와의 관계를 규명하는 연구를 일본의 Nippon Nuclear Fuel Development Co에서 수행하였다. 연구는 동일한 플루언스를 갖는 조사재료에 대해 플럭스의 변화와 인장시험 데이터와의 관계를 확인하는 것에 초점을 두었다. 연구결과에 따르면 조사된 Type 304 SS의 항복강도 증분량은 Radiation Hardening이 전위루프의 밀도에만 의존할 경우에 다음과 같은 관계식이 성립함을 제시하고 있다.

$$\Delta\sigma_y = A \times [\Phi^{0.5} \times (1 - \exp(-B \times \Phi t))]^{0.5} \quad (45)$$

여기서 ϕ 는 중성자 플럭스, ϕt 는 중성자 플루언스이며, A, B는 각각 상수를 의미한다.

또한 조사된 Type 304SS의 인장시험 결과로부터 그림 78과 같이 항복강도의 증분이 중성자 플럭스의 4제곱근에 의존함을 제시하고 있다. 이에 대한 검증을 위해 항복응력의 계산결과와 측정치사이의 관계는 그림 79와 같이 잘 일치하는 것으로 확인되었다.

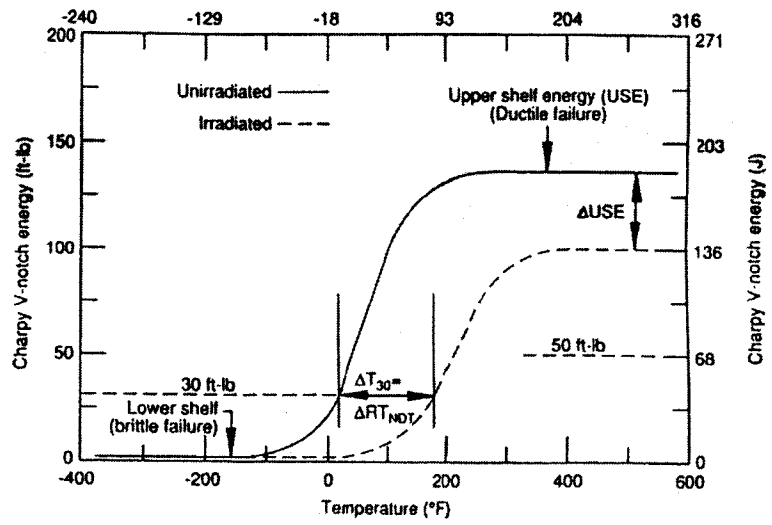


그림 71. 중성자 조사취화로 인한 샤피 충격에너지의 변화

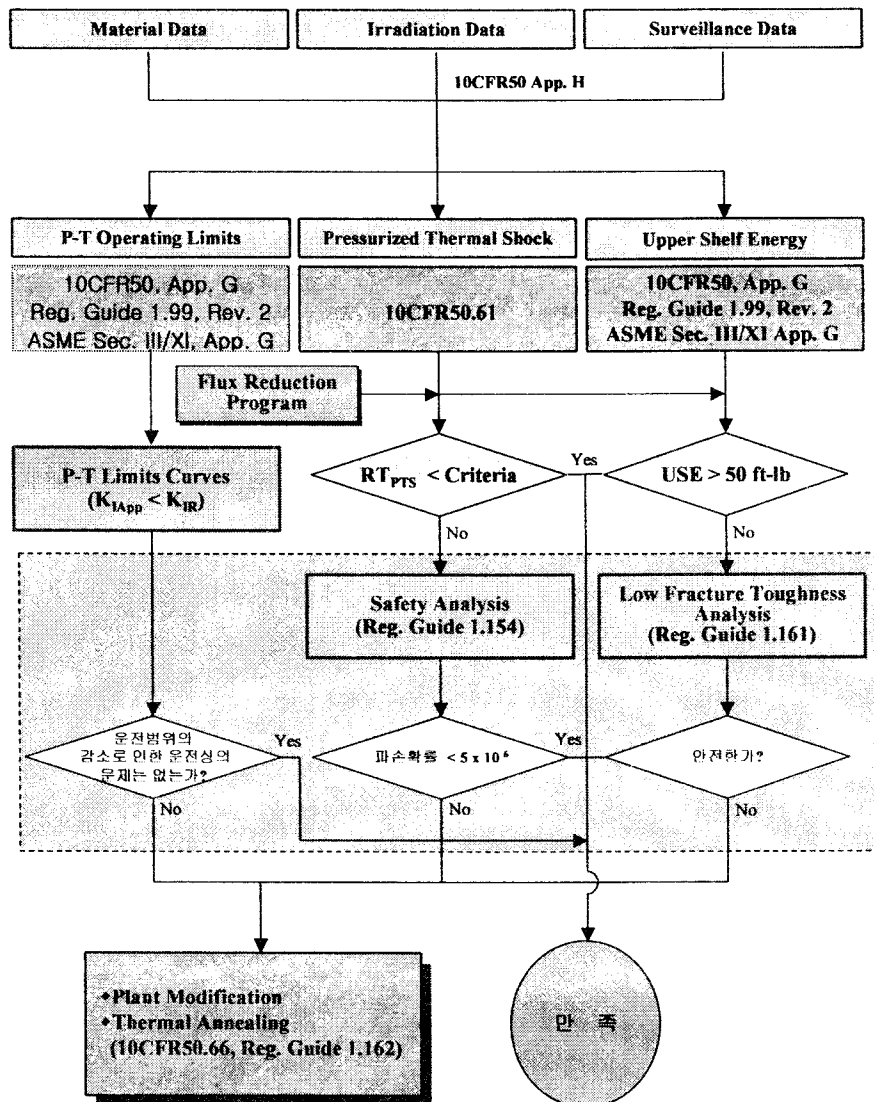


그림 72. 원자로 압력용기 조사취화에 따른 건전성 평가절차

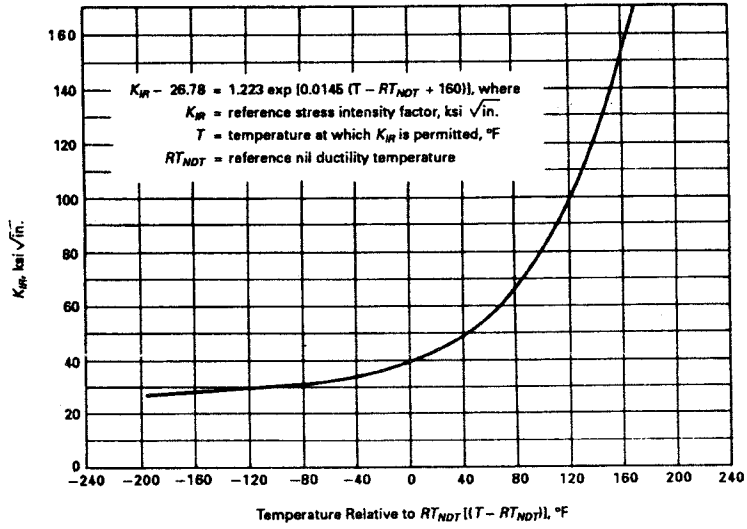


그림 73. $(T - RT_{NDT})$ 에 따른 기준 무연성 천이온도의 변화

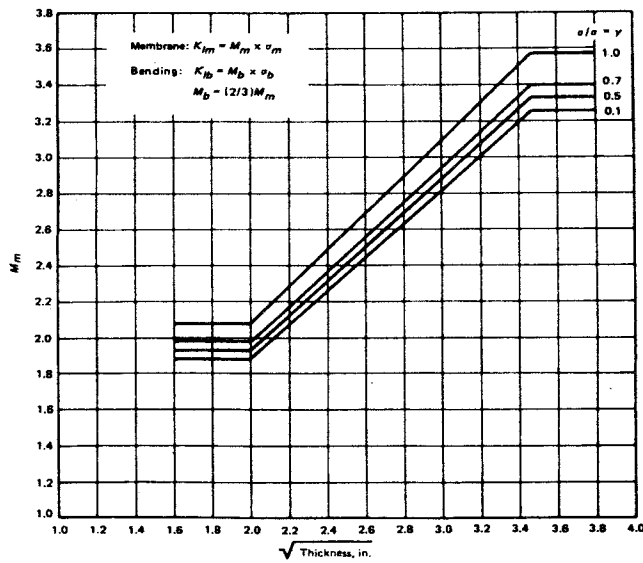


그림 74. 막응력 수정계수

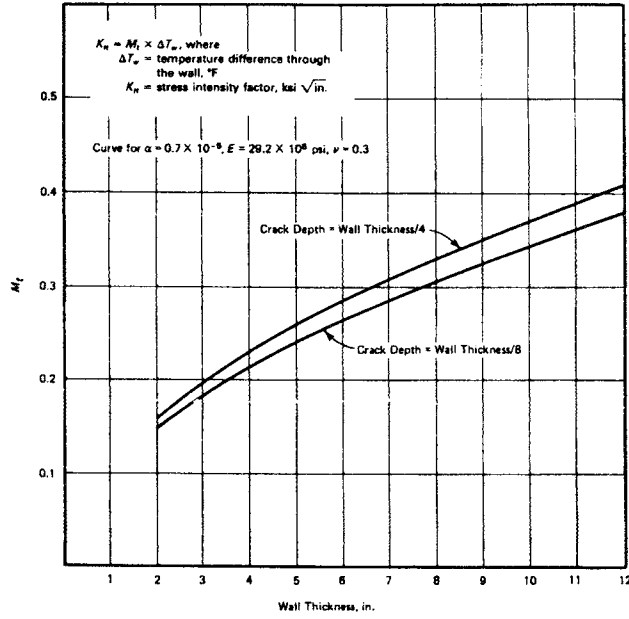


그림 75. 벽두께에 따른 열응력 수정계수의 변화

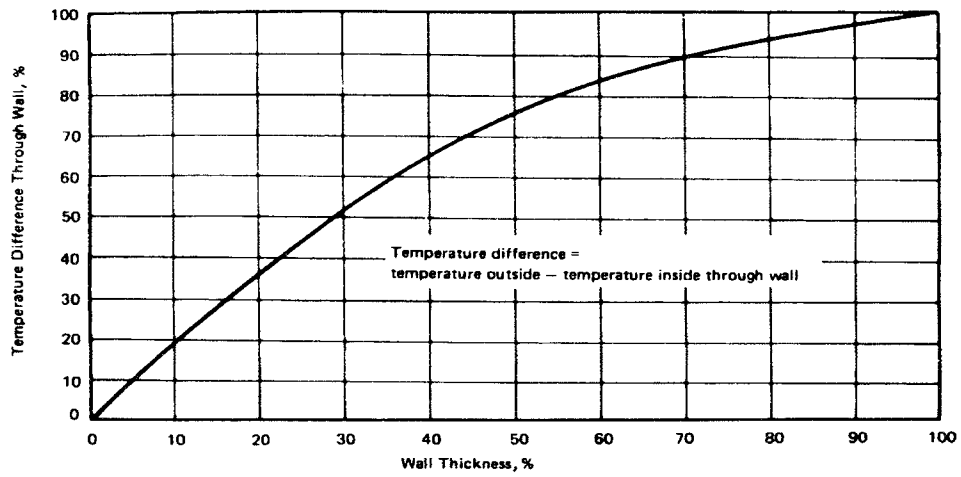


그림 76. 벽면내부에서의 온도구배

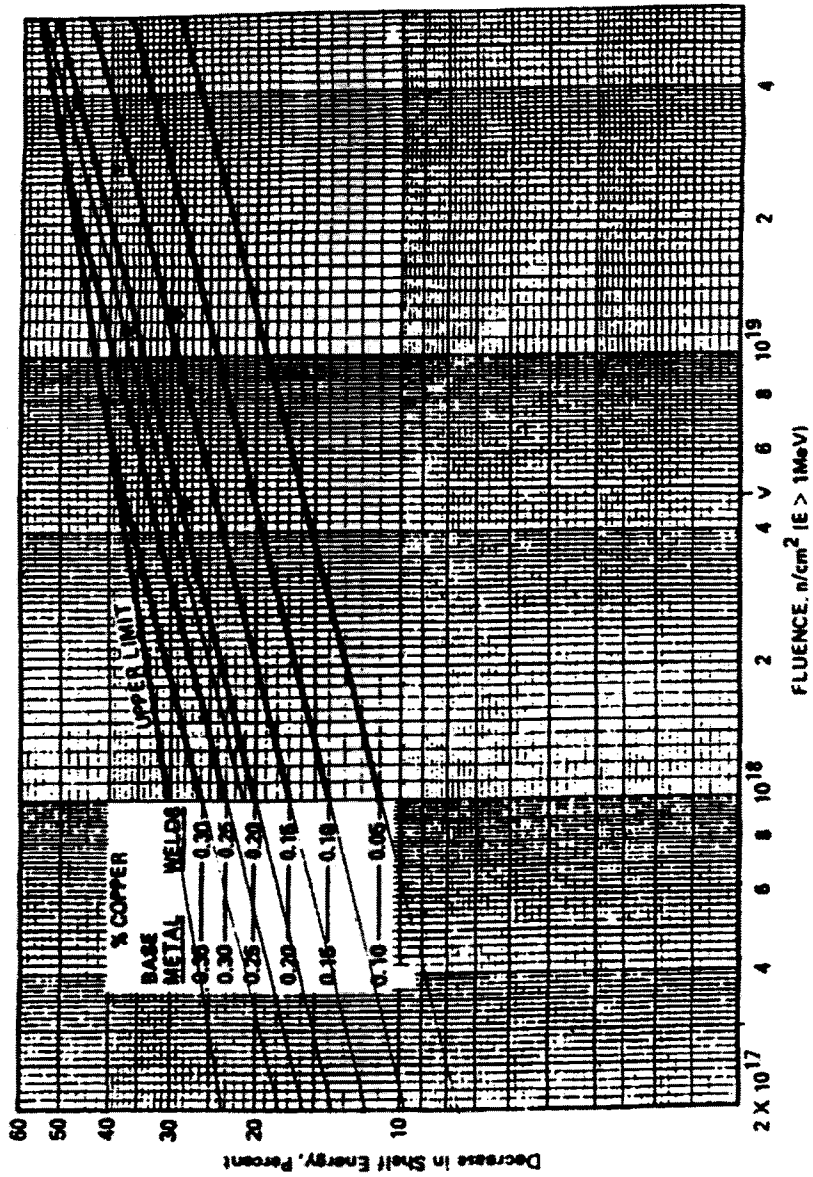


그림 77. 플루언스와 구리함량의 변화에 따른 USE의 변화

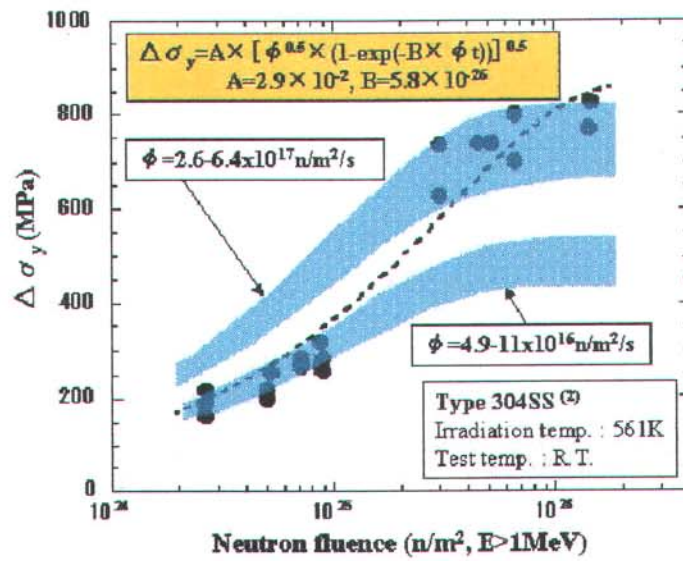


그림 78. 인장시험으로부터 얻어진 항복강도의 증분량과 중성자 플럭스 사이의 관계

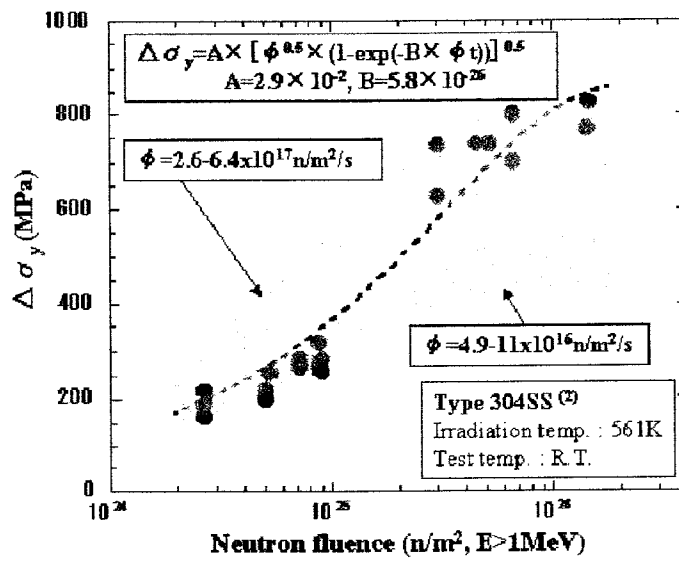


그림 78. 인장시험으로부터 얻어진 항복강도의 증분량과 중성자 플럭스 사이의 관계

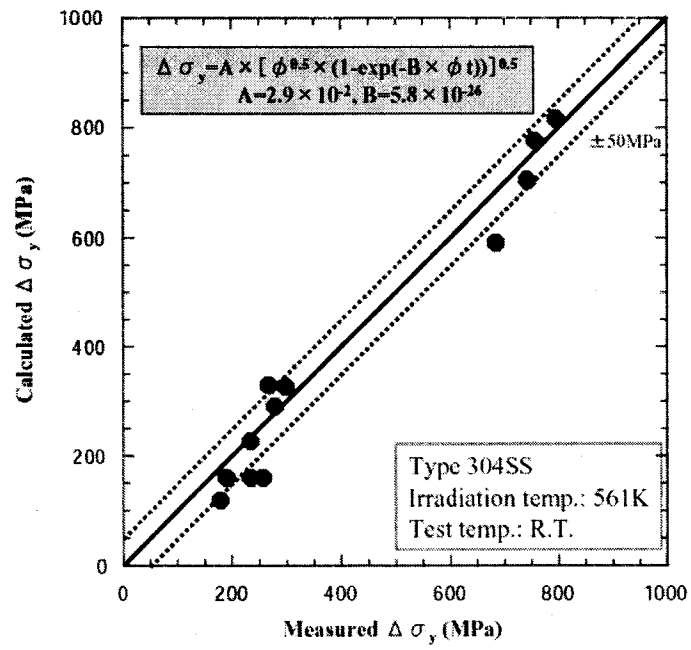


그림 79. 항복응력의 계산결과와 측정치와의 비교

제 4절 잔류응력 해석 기술 개발

1. 대상기기 용접부 선정 및 대상기기 용접부 선정/분류법 개발

가. 대상기기 용접부 선정

잔류응력 해석 대상기기 용접부를 선정하기 위해 1차년도에서 개발한 대상기기 용접부 선정절차를 적용한 결과, 다음 아래와 같이 이중재 용접부, 스테인리스 강 배관 거스 용접부 및 원자로 압력용기 원주방향 용접부를 선정하였다. 각 대상기기 용접부에 대한 보다 세밀한 형상, 재질 구성, 치수 및 용접 특성 등은 4절 3항과 5항의 해석대상에서 제시되어질 것이다.

1) 이중재 용접부

이중재 용접부는 안전성, 손상사례, 용접특성, 경제성 및 가동중 검사 대상 및 보수/검사 용이성 측면에서 다음 아래와 검토하여 대상기기 용접부로 선정되었다. 이중재 용접부에 대한 보다 상세한 내용은 본 보고서의 4절 3항과 5항 부분에서 제시되어질 것이다.

○안전성

- 이중재 용접부인 CRDM 노즐 관통부/RPV Instrument 노즐 관통부, 원자로 입출구 노즐 및 RCS 배관 노즐 등 원자로 냉각재 압력경계를 이루므로 파손시 심각한 방사능을 누출할 수 있음.

○손상사례

- CRDM 노즐 관통부에서 프랑스/벨기에/미국내 몇몇 원전에서 잔류응력에 기인하는 PWSCC(primary water stress corrosion cracking)를 경험하였으며 최근 들어 V.C. Summer 원전의 RPV 출구 노즐에서 잘못된 보수용접에 의한 잔류응력 과다로 PWSCC가 발생하였음.

○용접특성

- 이중재 용접부 용접 특성상 인코넬 600 계열의 버터링과 용접이 수행되어지나 이러한 인코넬 600 계열 중 몇몇 재질은 PWSCC에 민감한 결과를 나타내고 있을 뿐만 아니라 PWSCC에 둔감한 재질도 용접 입열과 후열처리에 의해 예민화 현상이 발생할 수 있음.

○경제성

- 원자로 냉각재 압력경계를 이루므로 보수시 운전정지에 따른 손실이 막대함.

○가동중 검사 대상 및 보수/검사 용이성

- 원자로 냉각재 압력경계를 이루므로 가동중 검사 대상임.

2) 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부

스테인리스 강 배관 원주방향 용접부는 안전성, 손상사례, 용접특성, 경제성 및 가동중 검사 대상 및 보수/검사 용이성 측면에서 다음 아래와 검토하여 대상기기 용접부로 선정되었다. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 보다 상세한 내용은 본 보고서의 4절 3항과 5항

부분에서 제시되어질 것이다.

○안전성

- RCS 배관, SIS 배관, CVCS 배관, RHRS 배관 등 대부분의 원전 1차측 배관은 스테인리스강으로 제작되어있으며 RCS 배관 용접부 경우 원자로 냉각재 압력경계를 이루어 파손시 심각한 방사능을 누출할 수 있을 뿐만 아니라 RCS 배관을 제외한 나머지 배관들도 원자로 안전정지에 필수적인 배관들로 파손시 원자로 안전운전/정지에 심각한 문제를 야기시킬 수 있음.

○손상사례

- 스테인리스 강 배관 용접부의 경우 후열처리시 예민화 현상때문에 후열처리 미수행으로 잔류응력 크기가 매우 크므로 SCC 및 피로 등 손상 발생 가능성이 높으며 실제 PWSCC 등 손상사례 있음.

○용접특성

- 스테인리스 강 배관 용접부의 경우 후열처리시 예민화 현상때문에 후열처리 미수행으로 잔류응력 크기가 매우 큼.

○경제성

- 원자로 냉각재 압력경계를 이루거나 원자로 안전정지와 밀접한 관계가 있으므로 보수시 운전정지에 따른 손실이 막대하며 원전 1차측의 대부분을 차지함.

○가동중 검사 대상 및 보수/검사 용이성

- 원자로 냉각재 압력경계를 이루거나 원자로 안전정지와 밀접한 관계가 있으므로 가동중 검사 대상임.

3) 원자로 압력용기 원주방향 용접부

원자로 압력용기 원주방향 용접부는 1차년도 연구에서 안전성, 손상사례, 용접특성, 경제성 및 가동중 검사 대상 및 보수/검사 용이성을 검토하여 금속조직 변화 예측기술 개발 대상기기 용접부로 선정되었으며 가압열충격 해석시 잔류응력 크기/분포에 따라 파손 확률이 큰 차이를 보이므로 잔류응력 해석도 수행되어져야 한다.

나. 일반 범주화용 대상기기 용접부 선정/분류법 개발

1,000MW급 규모의 원자력 발전소 경우, 평균 26,500여 곳의 수많은 용접부가 있으므로 모든 용접부들에 대해 건전성 평가 및 가동중 점검을 수행하는 것은 물리적으로 불가능하다. 그러나, 이러한 수많은 용접부들 중 운전환경, 기하학적 형상, 구속조건 등과 같은 응력 및 손상에 영향을 주는 인자들이 동일하거나 유사한 용접부들이 상존하고 있으며 용접부 파손시 원전의 안전성에 미치는 위험도도 큰 차이를 보인다. 따라서 손상 가능성 및 파손시 위험도에 따라 모든 용접부들에 대해 순위를 설정하고 이를 기초로 건전성 평가/가동중 점검 대상 용접부를 선정한 후 선정된 용접부의 손상 형태에 따라 분류하여 범주화 시킨다면 원전의

안전성 저하를 야기시키지 않으면서 보다 효율적/경제적인 용접부 관리가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 ASME Sec. XI 가동중 점검(ISI : in service inspection)의 보완 방안으로 최근 국외에서 활발히 적용되어지는 위험도 정보 검사(RII : risk informed inspection) 기법을 활용하여 잔류응력 해석을 포함한 건전성 평가 대상기기 용접부를 선정/분류하고 일반 범주화하는 기법을 제시하고자 한다. 그림 80은 본 연구에서 이용한 일반 범주화용 대상기기 용접부 선정/분류 절차로서, 그림 80에서 제시된 상세 절차들 중 확률론적 안전성평가(PSA : probabilistic safety assessment)는 국외 뿐만 아니라 국내에서도 이미 확립된 기술이나 용접부 파손확률 평가기술은 국내 미자립 기술이다.

따라서 본 연구의 주된 목적은 원자로 냉각재 계통 배관(RCS piping) 용접부들을 대상으로 적용하여 용접부 파손확률 평가기술을 개발하는 것이고 이를 통해 본 연구의 시범 대상 용접부를 선정하는 것이다.

1) 위험도 정보 검사 기법

원전 안전성관련 배관 용접부(Class 1,2,3)에 대해 ASME Sec.XI 규정에 따라 주기적인 ISI를 수행하여 건전성을 평가하고 있다. 그러나, 지난 20여년간 수행된 국외 원전의 ISI 기록을 검토한 결과, ASME Sec.XI 검사범위에 포함된 배관 용접부에서 발생된 손상들은 코드 제정시 예측했던 피로나 응력집중보다는 코드 제정시 고려하지 못했던 응력부식균열이나 열성층에 의한 손상이 주류를 이루며, 배관 용접부 손상 탐지여부도 육안검사나 배관누설에 의해 발견된 사례가 대부분이었다. 이러한 결과로부터, 현재의 ASME Sec.XI 규정에 의한 가동중 점검은 검사대상범위, 검사주기 및 검사방법의 측면에서 불리하므로, 보다 유용하고, 신뢰성 있는 새로운 방안을 검토할 필요성이 제기되었다.

따라서, 최근 미국 등에서는 ASME Sec.XI의 보완 방안으로 배관 용접부 손상확률과 손상으로 인한 원전의 위험도를 평가하여, 위험도에 따라 검사 대상부위, 검사주기 및 방법을 달리하는 RII 기법을 개발하여, ISI에 도입하는 연구를 수행하여 왔다[86].

또한 이를 일부 원전에 시범 적용한 결과, 위험도 순위에 따라 적절한 ISI 주기 및 검사방법을 결정함으로써 원전의 안전성을 향상시키고, 또한 위험도가 극히 낮은 부위는 검사대상에서 제외 함으로써 ISI 비용을 크게 감소시킬 수 있음이 입증되었다. 이러한 기법은 현재 미국 내에서는 활발히 연구 및 적용 중에 있으나 국내에서는 이와 관련된 연구결과나 평가 코드가 개발되지 않은 상태에서 울진 3, 4호기에 대해 시범적으로 전력 연구원에서 수행 중에 있다.

2) 파손확률 평가

RCS 배관 용접부중 위험도 우선 순위 기준이 되는 파손확률 평가를 수행하였다. 또한, 입력변수들의 변화에 따른 결과 파손확률의 변화를 평가하기 위한 민감도 분석을 수행하여, 입력변수의 중요도와, ISI 주기 연장으로 인해 증가된 파손확률 감소방안 분석 그리고, 추후 국내에 실제 적용시 기본 자료로 활용할 수 있도록 적용법 개발에 중점을 두었다.

가) 배관 용접부의 주요 손상형태 및 요인

배관 용접부의 위치, 재질, 운전조건 및 경험에 근거하여 발생 가능한 손상유형을 찾아 내어 파손확률 계산시 이를 반영하여야 한다. 일반적으로 배관에서 발생하는 손상은 크게 두 가지로 구분할 수 있다.

첫번째는 피팅(fitting), 균열성장, 벽두께 감소, 연성 감소 등으로 인해 배관 재질이 노화되는 것이며, 두번째는 수격현상, 압력변동, 지진 등과 같은 과도 현상에 의해 열화된 배관이 건전성을 상실하여 누수(leak) 또는 파단(break)과 같은 손상이 발생하는 것이다. 현재까지 알려진 원전 배관 용접부의 대표적인 손상 형태는 다음과 같다.

- 소성변형
- 취성파괴
- 크립 변형
- 소성 불안정성(plastic instability) 등

한편, 배관 용접부 손상을 유발하는 원인은 여러 가지가 있기 때문에, 특정 배관 용접부에 어떠한 손상 요인이 있는지를 평가하여 건전성 평가/가동중 점검 계획 수립시 이를 반영하여야 한다. 특히, 진동은 배관 용접부의 열화와 건전성 상실을 동시에 유발하는 중요한 손상요인 일 뿐 아니라 정상 운전 중에 진동이 발생할 경우 일반적인 가동중 점검 방법으로는 이로 인한 열화 진행추이를 감지하기 어려우므로 설계변경 등을 통하여 진동요인을 제거해야 한다.

이외에 배관 용접부의 건전성에 큰 영향을 주는 것으로 알려진 손상기구로는 침식, 부식, 마모, 응력부식균열, 열성층, 피로, 취화 등 매우 다양하며, 이들이 주로 배관 용접부 건전성 평가시 고려되고 있다.

나) 배관 파손 확률 평가모델

일반적으로 배관 용접부는 각종 손상기구로 인하여 운전년수가 증가함에 따라 파손확률이 증가된다. 확률론적 파괴역학 해석기법을 이용한 배관용접부의 파손확률 계산을 위해 NRC에서는 WinPraise 코드[18]를 개발한 바 있으며, 웨스팅하우스에서는 이를 기본 모델로 하여 배관 파손평가를 간편하게 수행할 수 있는 단순 확률론적 모델을 이용한 코드를 개발한 바 있다. 본 절에서는 이러한 코드의 특성, 코드에서 요구하는 입력변수모델, 입력변수의 불확실성 분포 및 평균값에 대한 편차 그리고 파손확률 모델에 대해 기술하였다.

(1) 확률론적 파괴해석 코드

- 본 연구에서 이용된 배관 파손확률해석 코드 WinPraise 코드는 특정 용접부만 평가하는 기존의 방식에서 벗어나 임의 계통 일부분을 통합하여 평가하는 것으로, 코드 내에서

배관재료 및 설계데이터, 파손형태, 운전조건, 가동중 점검 데이터, 손상기구, 초기결함 등에 대한 정보를 사전에 제공하여 사용자가 평가하고자 하는 배관계통에 가장 적절한 데이터를 선정하여 평가할 수 있도록 단순화시킨 프로그램이다.

- 이는 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 개발된 것으로서 TP304 및 TP316 스테인리스 강 배관은 피로 및 SCC에 의한 누설 및 파단확률, 그리고 탄소강 배관의 경우는 피로균열 및 침식/부식/마모로 인한 누설 및 파단확률을 계산할 수 있는 것으로, 과거의 손상 데이터나 전문가 판단을 이용하여 계산하는 방법보다 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있다.

(2) 입력변수 모델

- 본 연구에서 이용된 WinPraise는 배관의 용접 부위별 파손확률 계산 시 배관재료 및 파손형태 외 다수의 변수를 사용하며, 이 변수들에 대한 주어진 입력 값의 범위는 탄소강 및 TP304, TP316 스테인리스 강에 대한 기존 연구 결과를 인용한 것이다.
- 만약, 평가 대상 배관부위의 데이터가 없는 경우에는 사용자가 경험에 의하여 표 IV-1에서 제시한 기존 평가결과의 입력 값들의 범위 중에서 선정할 수 있으며, 평가부위에 대한 정확한 정보를 가지고 있는 경우에는 사용자가 해당 입력변수를 수정하여 입력할 수 있다.
- 이러한 다양한 입력변수들 중 파손확률 평가시 민감도가 클 것으로 예상된 일부변수에 대한 선정기준은 아래와 같으며, 배관 용접부 파손여부의 결정기준이 되는 유동응력(flow stress)은 설계 응력한계(design stress limit)와 관련되어 있으므로, 응력비 입력 값 선정의 기준으로 사용되며, 기타 데이터는 배관 설계 응력해석의 경험을 적용할 수 있다.
- 배관 용접부 초기결함 상태
 - 본 코드에서 사용된 결함수 분포는 PRODIGAL 코드[87]에 의해 계산된 것으로, 방사선 검사를 통하여 배관의 원주방향 용접부의 내부표면으로부터 벽두께별 가장 큰 결함크기와 결함수를 선택하여 인치당 결함수를 구축한 것으로 그림 81과 같다. 한편, X-Ray 검사를 하지 않은 용접부의 결함수는 PRODIGAL에 의해 계산된 일반 배관용접부의 결함수보다 12.8배까지 증가되어 파손확률이 커지게 된다. 또한 초기 결함크기 측면에서 X-Ray 검사를 하지 않은 용접부 체적의 함수로 Log-Normal 분포를 갖는 스테인리스 강과 페라이트강의 초기결함크기(Median 값)와 형상계수, β 는 다음과 같다.
 - 스테인리스 강

$$a(50) = 0.1025 - 0.009526t - 0.003793t^2 \quad (1)$$

$$\beta = 0.5057 + 0.2374 \ln(t) \quad (2)$$

- 페라이트 강

$$a(50) = 0.05297/t^{0.4532} \quad (3)$$

$$\beta = 0.08318 + 0.3623t - 0.07834 t^2 \quad (4)$$

여기서, t는 배관 벽두께이며 단위는 인치이다.

○ 피로응력범위

- 고주기 응력확대계수 범위가 피로균열성장 한계값(FCG Threshold)을 초과하면 파손이 일어나며, 이 값은 응력비($R = S_{Min}/S_{Max}$) 0.9를 기준으로 한 것이고, 여기서 응력은 진동, 열주기 등과 같은 고주기 피로응력을 의미한다.
- 코드에서 사용된 저주기 피로균열 성장률에 대한 응력비는 페라이트 강의 경우는 0.25미만이고 스테인리스 강의 경우는 0으로 기준 하였다. 이러한 응력비, R이 크게 달라진다면 입력되는 피로응력범위 값은 스테인리스 강의 경우 다음 식을 이용하여 수정 되어야 한다.

$$\Delta S_{Mod} = \Delta S / \sqrt{1-R} \quad (5)$$

○ 재료 소모비율(Wastage Rate)

- 균열성장깊이와 무관하게 배관 용접부 벽두께가 감소하는 비율을 직접 고려하여 입력하는 것으로, 배관 전체 환경에 벽두께 감소비율을 보수적으로 가정하여 적용한다면, 탄소강의 경우는 대형누설이나 파단이 발생할 확률은 매우 높아지게 되므로 정확한 데이터의 선정이 요구된다.

(3) 배관 용접부 파손 확률 모델

- 배관 용접부 신뢰성 모델에서는 균열깊이가 정상 운전 중 누설이 발생하는 한계 균열깊이를 초과하거나, 일부 설계제한(Design-Limiting) 과도상태 동안 균열면적을 제외한 잔여 단면의 응력이 유동응력을 초과하는 경우 파손으로 간주한다.
- 이러한 배관 용접부의 파손형태는 크게 소량 누설과 양단 파단으로 구분할 수 있으며, 이의 주원인은 열적 과도상태 또는 유동으로 인한 진동 등과 같은 고주기 하중으로 인해 발생된 작은 미탐지 균열이 입계 응력부식균열 또는 피로 때문에 성장하거나 침식, 부식, 마모로 인해 배관 용접부 벽이 얇아지기 때문이다.
- 본 고에서 이용한 코드는 이러한 소량누설 또는 파단과 같은 배관 용접부의 파손여부 및 확률을 평가하기 위해 몬테카를로 기법을 사용하며, 배관 용접부 파손 평가논리는 그림 82와 같다.
- 그림 82에서 보는 바와 같이 파손확률 평가모델은 초기균열이 시간에 따라 피로,

침식/부식, 응력부식 등에 의해 성장하여 대형누설 또는 파단이 발생하는지의 여부를 판단한다.

- 대형누설, 파단이 발생하는 경우 파손횟수가 추가되고, 그렇지 않은 경우 누설탐지 여부에 따라 모의 종료 또는 다음 시간단계 수행여부를 판단한다.
- 이러한 절차에 의해 계산된 파손확률은 파손횟수를 전체 시행횟수로 나눈 값으로 가동전 및 가동중 점검시의 미탐지 확률을 반영하여 재평가할 수 있다.
- 이처럼 미탐지 확률을 고려한 파손확률은 식 (6)에 의해 조정될 수 있으며, ISI 미탐지 확률을 고려할 경우 실제 파손확률 값은 식 (6)을 고려함으로써 작아지게 된다.

$$P_{rr} = \sum_{n=1}^N P_{md}(n)F(n) / N \quad (6)$$

여기서, P_{rr} 는 파손확률 조정값, $P_{md}(n)$ 는 n 회 시행에 대한 ISI 미탐지 확률, $F(n)$ 은 n 회 시행에 대한 파손 가중치(파손이 발생하면 1, 아니면 0), 그리고 N 은 총 시행횟수를 나타낸다.

- 미탐지 확률은 시간의 함수이며, ISI가 수행될 당시의 균열크기에 의존한다. 즉, 균열의 크기가 커질수록 미탐지 확률은 낮아지며 따라서 파손확률은 커지게 된다. 시간의 함수로 i 번째 ISI에 대해 다음 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$P_{md}(n) = \text{Product}[P_{md}(n, t_i)] \quad (7)$$

여기서, $P_{md}(n, t_i)$ 은 시간 t_i 에서 용접부 n 의 ISI 미탐지 확률을 의미한다.

다) 배관 파손확률평가

원자로 국내 특정 원전의 RCS 배관 용접부들 중 특정 현장 용접부를 선정하여 배관 용접부 파손확률을 시험적으로 계산하였다. 여기서는 그림 83의 RCS 계통 중 임의 용접부 요소(RCS-1)를 선정하여 배관 용접부 파손확률을 계산하였다.

(1) 입력변수 선정

- 배관 용접부 파손확률을 계산하기 위해서는 해당 배관에 대한 설계자료와 운전, 정비 및 ISI 경험이 반영되어야 하며, 자료가 미흡할 경우 엔지니어의 객관적 판단이 필요하다.
- 표 33은 코드의 입력변수 종류와 입력범위를 나타냈으며, 본 고에서 계산한 RCS-1 용접부 요소에 대한 입력자료를 수록하였다. 평가를 위한 입력자료는 해외의 연구결과와 국내의 연구결과를 참조하여 작성하였다.
- 배관 용접부 파손확률 계산시 고려되는 입력변수별 분포형태와 데이터의 표준편차는 표 34와 같다.

표 33. 단순 배관입력 모델 및 기존결과 데이터와 특정 원전 RCS-1 배관 입력데이터

번호	단순화한 입력변수	기존 결과 데이터	선정값
1	배관 재료	탄소강, TP316,304	TP316
2	배관 용접부 파손 모드	소량 누설 양단 파단	소량 누설 양단 파단
3	검사기간 간격	4.00 - 16.0	10
4	결합검사의 정확성	0.12 - 0.36	0.24
5	배관 용접부의 온도, °F	50- 650	600
6	배관의 외경 (inch)	1.00 - 20.0	10
7	배관직경에 대한 두께비	0.02 - 0.26	0.1
8	운전 압력 (ksi)	0.10 - 2.50	2.5
9	잔류응력 수준	0.00 - 20	0.2
10	초기결함 상태	0.02 - 0.20	0.05
11	정상상태 응력비	0.02 - 0.20	0.14
12	응력부식균열 가능성	0.00 - 1.00	0.0
13	침식-부식-마모 가능성	0.00 - 1.00	0.0
14	고주기 피로하중	0.00 - 3	0.08
15	피로 천이하중	0.1 - 0.34	0.25
16	피로사이클/1년	5.00 - 35.0	5
17	설계 한계응력비	0.1 - 0.42	0.22
18	계통운전불능 누설률,gpm	0 - 600	600
19	탐지가능 최소누설률,gpm	0 - 10	1
20	용접부 유동응력 (ksi)	49.3-80.9	53.42

표 34. RCS-1 배관 용접부 신뢰성 모델의 변수 및 적용 값

변수 설명	분포형태	Median	표준편차/Factor
배관 외경 (inch)	N	1.00E+01	5.0E-02
배관 직경에 대한 벽두께비	N	9.00E-02	2.7E-03
초기균열깊이 (벽두께의 %)	L-N	5.00E+00	1.41E+00
초기균열깊이에 대한 길이비	L-N	6.00E+00	1.41E+00
인치당 결함수	C	7.70E-03	그림 IV-2
최초 ISI에 대한 사이클 수	C	5.00E+00	
다음 ISI까지의 주기,사이클	C	1.00E+01	
최소 ISI 미검출 확률 (PND)	C	1.00E-03	
50% 미검출확률에 대한 깊이	C	2.40E-01	
균열깊이에 대한 PND 지수 기울기	C	1.60E+00	
운전 연수당 유효 시간	L-N	7.45E+03	1.05E+00
정상운전압력(ksi)	N	2.70E+00	1.50E-02
정상상태 운전응력(ksi)(.02*fs-.2fs)	L-N	7.70E+00	1.26E+00
응력-부식 지수 (in/hr)	L-N	3.23E-12	2.37E+00
응력강도에 대한 SCC 지수	C	2.16E+00	
침식-부식 마모율 (in/hr)	L-N	1.27E-12	2.37E+00
고주기 진동응력 범위(ksi)	L-N	1.67E-04	1.35E+00
운전연수당 사이클수	C	1.00E+01	
주기적인 피로응력범위(ksi)	L-N	4.10E+01	1.41E+00
피로균열 계수 (in/cycle)	L-N	9.14E-12	2.85E+00
피로균열성장 지수	C	4.00E+00	
피로균열성장 임계값 (in)	C	4.60E+00	
소형누설에 대한 한계균열 깊이, in(0.97×Wall)	C	9.99E-01	
용접부 유동응력 (ksi)	N	5.34E+01	3.20E+00
설계 한계 축방향 응력비 (0.02*fs-0.5fs)	L-N	0.0E+00	1.41E+00

(2) 평가결과

- 배관 용접부 파손확률은 ISI 수행 여부에 따라 그림 84 및 85와 같이 소량 누설확률과 완전 파단확률로 나타난다.
- ISI를 수행하지 않을 경우의 완전 파단확률은 배관 용접부 파손으로 인한 노심손상확률 계산시 이용되며, 소량 누설확률은 민감도 분석시 이용된다.
- 배관 용접부의 완전 파단확률이 1×10^{-8} 이상일 경우에는 계산된 값을 사용하고, 그 이하의 값이 산출되는 경우에는 1×10^{-8} 을 위험도 평가에 사용한다.
- 본 결과로부터, 40년 운전시점에서 ISI 미수행경우 RCS-1 용접부의 완전 파단확률은 4.4866×10^{-9} 이므로, 배관파손에 의한 노심손상확률(CDF) 산출시 1×10^{-8} 의 값을 PSA에서 도출된 조건부 노심손상 확률과 조합하여 사용한다.
- 한편, ISI 수행여부가 배관 용접부 파손확률에 미치는 영향은 표 35에서와 같이, 누설확률 및 파단확률을 기준으로 40년 동안 운전시 ISI를 수행하지 않는 경우가 ISI 수행 경우보다 약 1.2~1.4 배 정도 크게 나타났다.
- 운전년수가 경과할수록 그 차이는 약간 증가하는 것으로 나타났는데 이는 운전년수에 따른 배관의 노화 및 열화로 인해 배관의 손상 가능성이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

표 35. RCS-1 용접부의 누설 및 파단확률

운전년수	누설(Leak) 확률		완전파단(Break) 확률	
	ISI 미수행	ISI 수행	ISI 미수행	ISI 수행
10	6.5371E-07	6.1661E-07	1.6446E-09	1.2671E-09
20	9.7949E-07	9.1612E-07	2.1970E-09	1.7696E-09
30	1.3964E-06	9.9790E-07	4.1486E-09	3.4412E-09
40	1.8512E-06	1.2973E-06	4.1486E-09	3.4412E-09

라) 대상 용접부 선정

본 연구에서 상세해석을 위한 대상 배관 용접부를 선정하기 위해 앞에서 제시한 배관파손확률 평가모델을 이용하여 특정 원전의 3개 계통(RCS, ECCS, FWS)에 대해 시범적으로 파손확률 평가를 수행하였다.

가동중 점검 범위를 판단하기 위해서는 배관 파손확률과 배관 손상으로 인한 노심 손상확률로부터 도출되는 위험도에 따라 우선순위가 선정되지만 본 연구에서는 배관 파손확률만을 기준으로 대상 용접부를 평가하였다. 상기 계통의 배관파손확률 평가를 위해 표 33에서와 같은 형태의 입력데이터를 각 계통별로 분석하여 평가한 결과는 그림 86과 같다.

그림 86에 의하면 임의의 RCS Segment가 임의의 ECCS나 FWS Segment의 파손확률보다 월등히 높은 것으로 도출되었기 때문에 본 연구에서 RCS 배관 요소를 평가대상 범위로 선정하였다.

다. 요약

본 연구에서는 대상기기 용접부 선정/분류법을 개발하기 위한 단계의 일환으로 아직 국내 미자립 기술인 배관 용접부 파손확률 기술개발에 중점을 두어 국내 특정원전의 RCS-1 배관 용접부에 대해 파손확률을 계산하였다. 계산된 배관 용접부 파손확률은 PSA에서 구해진 CDF와 조합되어 배관 용접부의 전체 위험도를 평가하는데 이용되어지며, 위험도에 따라 배관 용접부의 ISI 검사부위, 검사주기 및 방법이 결정되게 된다. 배관 용접부 파손확률 계산결과, 40년 운전시 ISI를 수행하지 않은 경우가 수행한 경우보다 배관 용접부 파손확률이 큰 것으로 나타났으며, 운전년수가 경과할수록 그 차이는 증가하는 경향을 보였다. 본 연구에서 시범적으로 평가 대상범위를 선정하기 위해 임의 계통 Segment에 대한 배관파손확률을 산출한 결과 RCS의 배관파손확률이 높게 산출되어 RCS 배관 요소를 상세 해석대상으로 선정하였다.

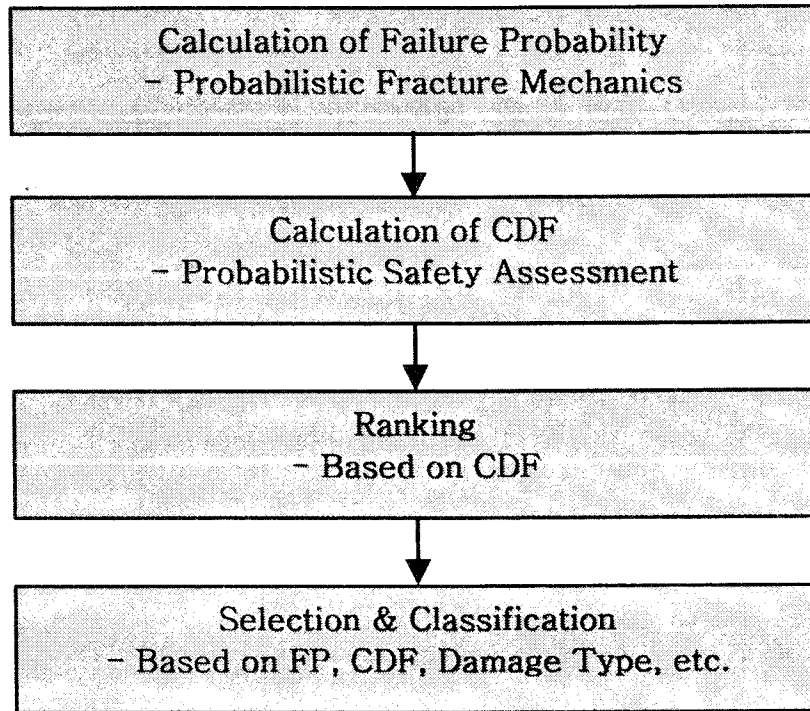


그림 80. 일반 범주화용 대상기기 용접부 선정/분류 기법

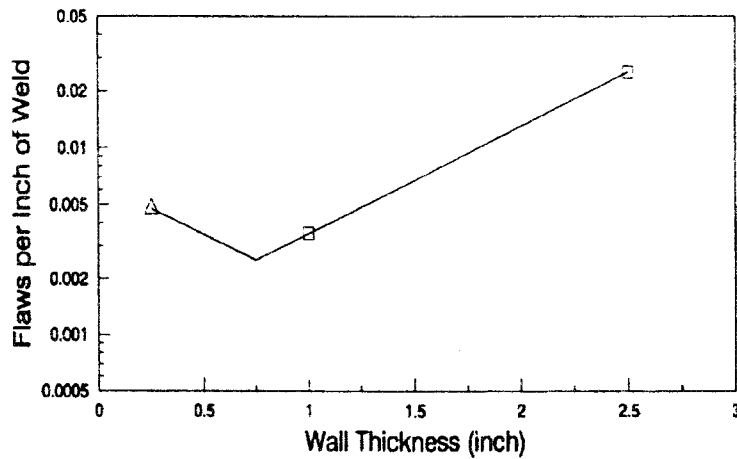


그림 81. 배관 용접부의 초기결함 밀도

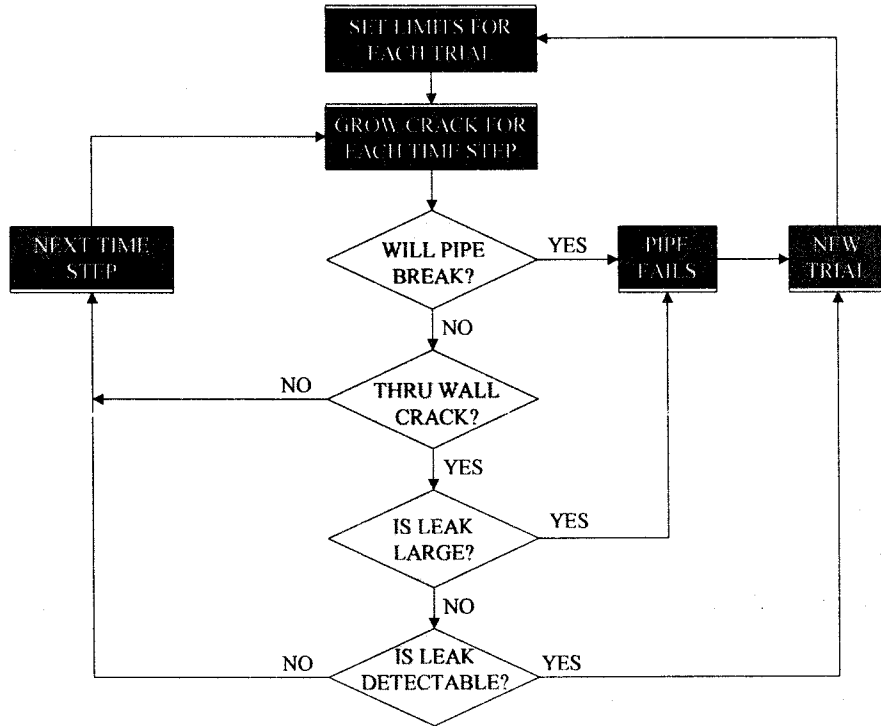


그림 82. 배관 용접부 파손 평가논리

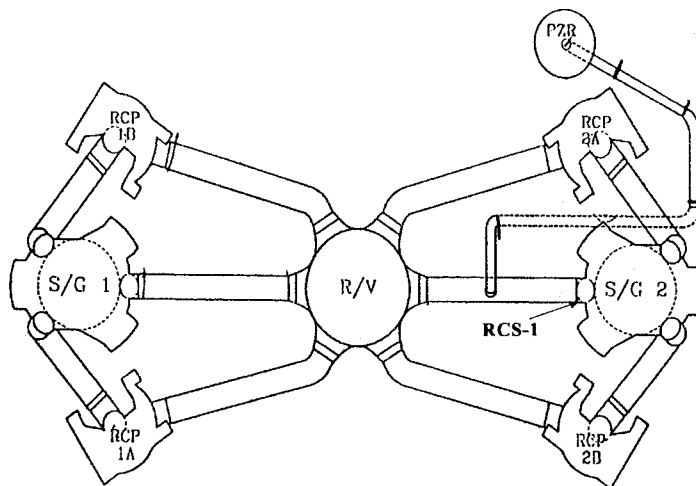


그림 83. RCS-1 배관 용접부

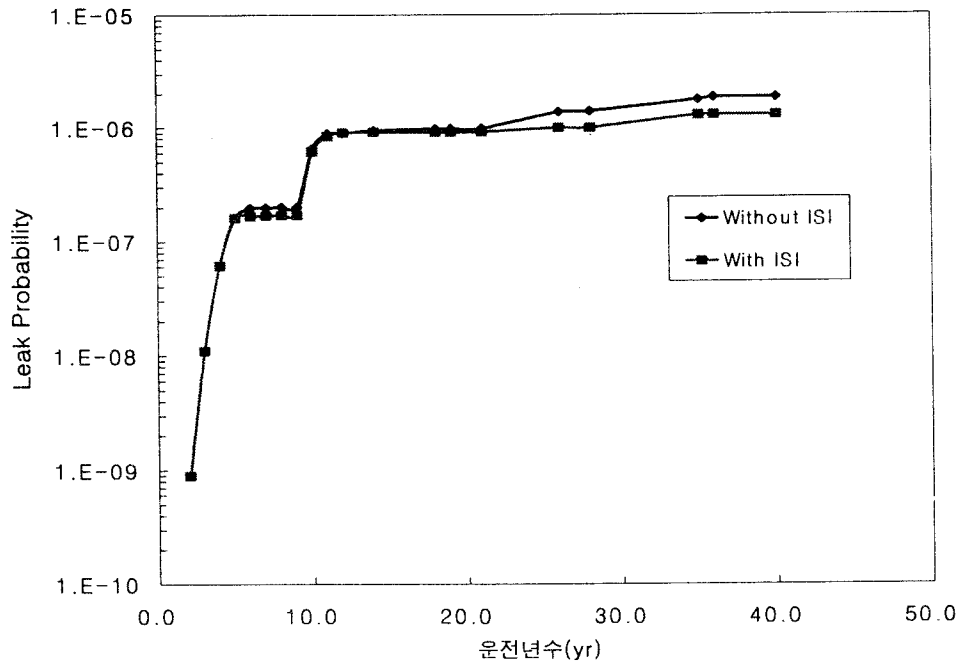


그림 84. 40년 운전동안 누설확률

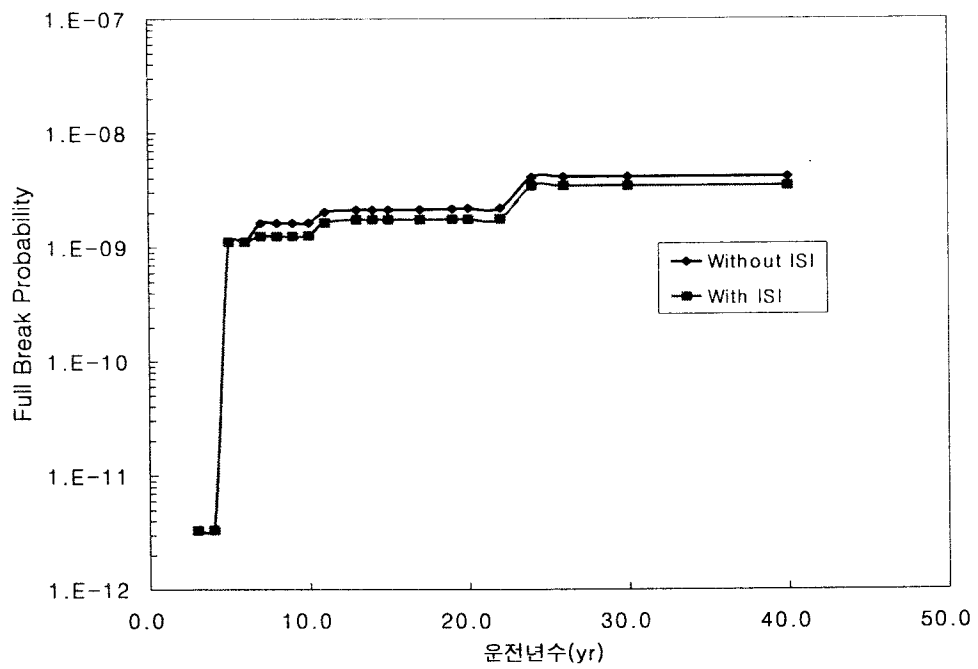


그림 85. 40년 동안 파단확률

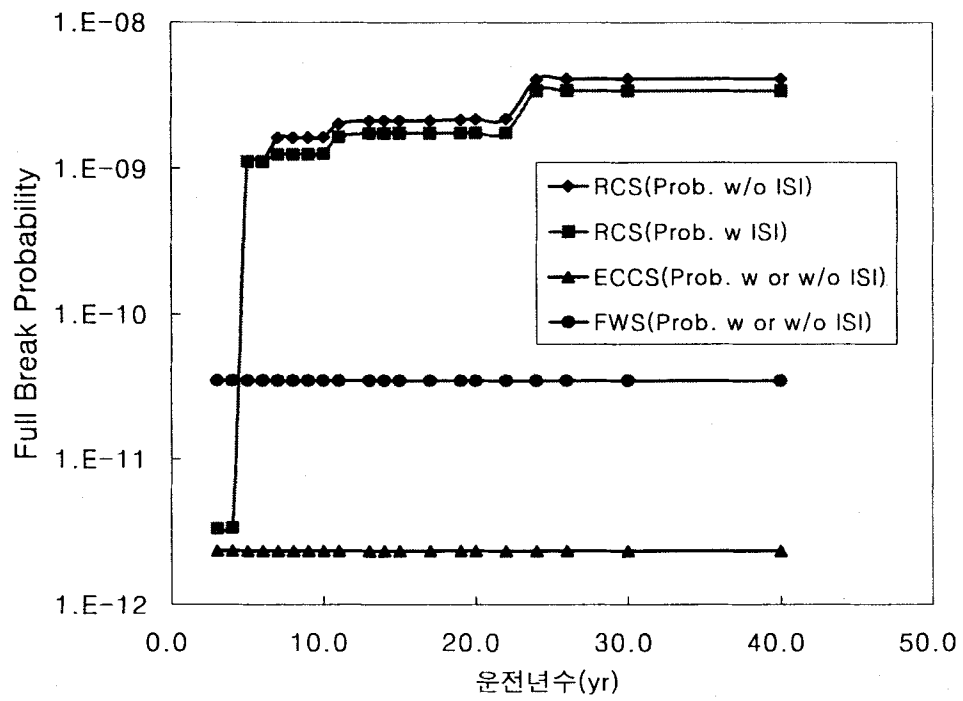


그림 86. 40년 동안 임의 계통별 완전파단확률

2. 자동 유한요소 모델링 프로그램 개발

가. 필요성

유한요소 모델링을 수행할 때 유사 형상일 경우 동일하고 반복적인 요소생성 작업을 수행하는 경우가 빈번하다. 특히 원전의 용접부의 경우 기본적인 기기 형상(배관, 압력용기 등)이 정해진다면 기기 용접부 형상은 개선 각도 및 치수의 차이만이 있을 뿐 거의 동일하다. 따라서 기기의 각 형상에 따른 기본적인 요소 생성 절차를 미리 프로그램한 후 치수에 따라 요소수를 변화시키는 방법을 개발한다면 보다 효율적인 유한요소 모델링 작업을 수행할 수 있을 것이다.

나. 자동 유한요소 모델링 프로그램

1) 자동 유한요소 모델링 프로그램 개발

사용자의 작업량 및 작업시간을 크게 줄이기 위해 용접부의 자동 유한요소 모델링 프로그램을 개발하였다. 기본적으로 기기 형상에 따라 반복적으로 수행되는 작업을 분리하여 코딩한 후 케이스별 상세 정보를 입력하여 최종 모델링 결과를 도출할 수 있도록 프로그램을 작성하였다.

그림 87~89는 현재 개발된 배관 용접부에 대한 자동 유한요소 모델링 프로그램의 입력 및 실행 윈도우를 나타낸 것으로 사용자의 편리성을 고려하여 Microsoft사에서 개발한 Visual Basic 6.0을 사용하여 작성하였다. 본 프로그램의 기본이 되는 코딩작업은 MSC사에서 개발한 PCL 언어를 사용하였고 최종적인 메쉬(Mesh) 생성작업은 개발된 프로그램을 MSC사의 PATRAN 프로그램과 연계되어 수행되도록 개발하였다.

먼저 그림 87과 같이 배관의 길이, 두께, 직경을 입력한 후 용접 단면의 상세 치수와 원하는 용접층수(layer)를 입력한다. 이때 용접시 생성되는 열영향부를 고려할 수 있게 입력부를 작성하였다. 그 후 하단의 Next 단추를 누르면 용접층수당 패스수를 입력할 수 있는 그림 88의 창이 나타난다. 용접층당 패스수를 입력한 후 Next 단추를 누르면 메쉬 작업을 수행할 수 있는 그림 89의 창이 나타난다. 그림 89에서 메쉬 유형과 메쉬 길이를 입력하고 용접단면 각 부위별로 생성하고자 하는 요소수에 해당되는 값을 입력한다. 그림 89의 하단의 Main 단추를 눌러 그림 87로 복귀한 후, 그림 87 하단의 Mesh 단추를 누르면 자동으로 입력용 파일(*.db)이 생성된다. 생성된 입력용 파일은 상용 모델링 프로그램인 PATRAN의 Input 파일로 사용되며 이를 이용하여 바로 유한요소 모델을 생성시킬 수 있다.

2) 자동 유한요소 모델 작성 결과

개발된 프로그램을 활용하여 직경이 700mm 배관에 대한 유한요소 모델을 시범적으로 작성하였다. 배관의 용접형상은 Y형 Groove이며 총 10 pass, 5 layer인 용접부를 모델링하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 그림 87의 입력창에 용접 단면부의 상세 치수 정보를 입력하고, 그림 88과 그림 89의 입력창에 pass 및 mesh개수를 입력하여 입력용

파일(weld01.db)을 생성하였다. 생성된 weld01.db 파일을 PATRAN 프로그램에서 실행하여 배관 용접부 자동유한요소 모델을 작성하였고 그 결과를 그림 90에 제시하였다.

다. 활용성 및 기대효과

개발된 프로그램은 사용자가 보다 쉽고 신속하게 용접형상을 모델링할 수 있어 해석에 소요되는 작업시간을 감소시킬 수 있다. 또한 현장 용접부에서 시급을 요하는 문제가 발생하였을 때 보다 빠른 해석결과를 도출할 수 있는 장점을 갖고 있다.

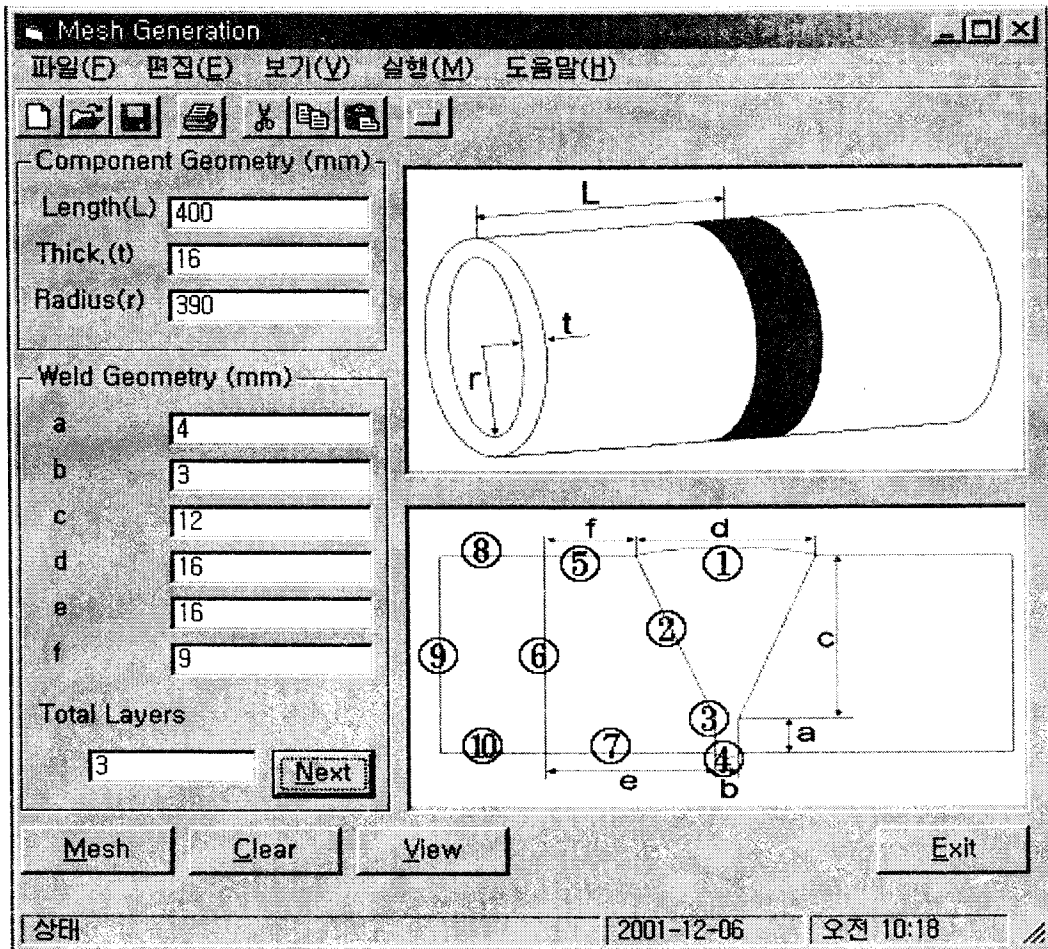


그림 87. 자동 유한요소 모델링 프로그램 초기화면

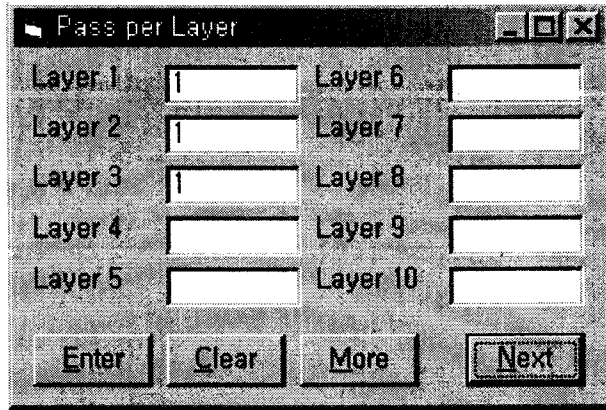


그림 88. Layer 정보 입력화면

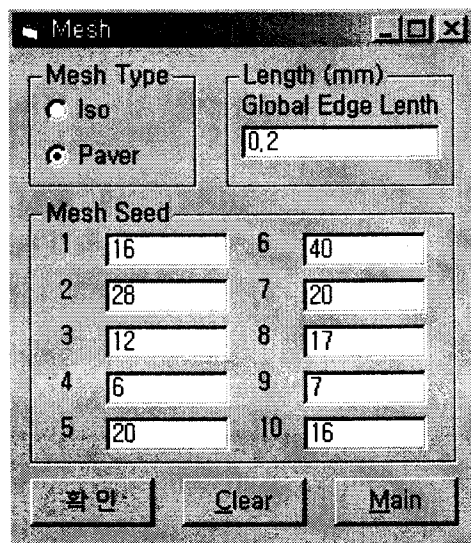


그림 89. Mesh 정보 입력화면

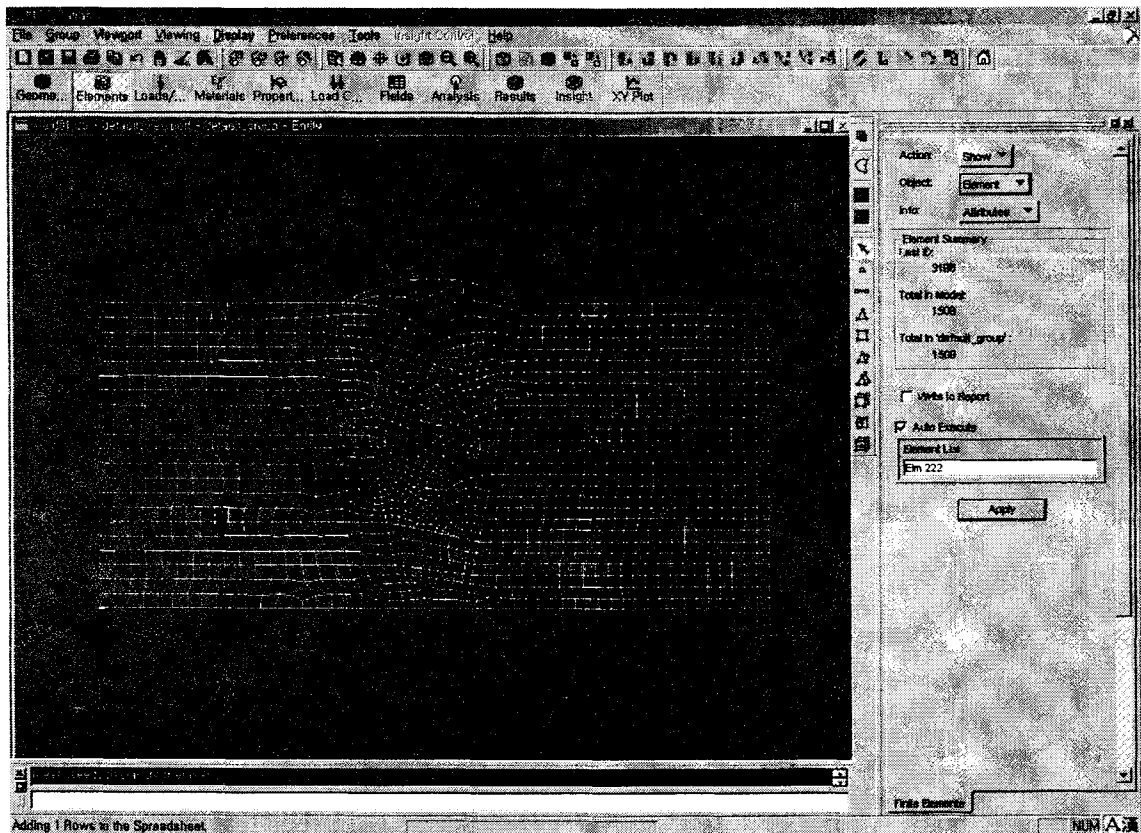


그림 90.3 Pass 용접부 자동 유한요소 모델링 결과

3. 재료물성치 결정

각 해석모델에 대해 온도해석, 금속조직 예측 및 잔류응력 해석시 필요한 재료물성치들은 위탁실험과 기존 연구결과로부터 다음과 같이 결정되어졌다.

가. 이중재 용접부

- 이중재 용접부는 원자로 냉각재 배관 재료인 SA508 Gr.1a, 안전단 재료인 TP316, 분기 배관 재료인 F316, 안전단/분기 배관사이의 용접금속인 ER316L, 버터링 및 원자로 냉각재 배관/ 안전단 사이의 용접금속인 Inconel 82로 구성된다.
- 표 36은 각 재료별 화학조성을 나타내고 있다.
- SA508 Gr.1a의 열적/물리적/기계적 재료물성치는 SA508 Gr.3 Cl.1의 경우와 동일하다고 가정하였다.(1차년도 연구결과 참조)
- SS316의 열적/물리적 재료물성치는 그림 91과 같으며 기계적 재료물성치는 SS304의 경우와 동일하다고 가정하였다.(표 39 참조)
- Inconel 82의 경우 위탁실험과 기존 연구결과를 종합하여 그림92~94와 같이 결정하였다.
- 그림 95는 만능 인장시험기와 고온 챔버를 이용한 고온 인장실험을 보여주고 있으며 그림 96은 시험전 시편과 인장시험 후 파단된 시편을 보여주고 있다.

표 36. 재료별 화학조성

(unit : weight %)

Comp. Mat.	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Ti	Nb	Co	Fe
SA508 Gr.1a	0.3 max	0.7-1.35	0.025 max	0.025 max	0.15-0.4	0.4 max	0.25 max	0.1 max	0.05 max	-	-	-	-	Base
TP316,F316	0.08	2.0	0.045 max	0.03 max	1.0 max	11.0-14.0	16.0-18.0	2.00-3.00	-	-	-	-	-	Base
ER316L	0.04	0.5-2.5	0.04 max	0.03 max	0.9	11.0-14.0	17.0-20.0	2.0-3.0	-	0.75	-	-	-	Base
Inconel 82	0.1 max	2.5-3.5	0.03 max	0.015 max	0.50 max	67.0 min	18.0-22.0	-	-	0.5 max	0.75 max	2.0-3.0	0.75 max	3.0 max

나. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부

- 재질은 SS 304이며 표 37은 계산에 사용된 304 스테인리스강의 화학조성을 나타낸 것이다.
- 표 38과 39는 SS 304의 열적/물리적/기계적 재료물성치를 온도 변화에 따라 제시하고 있다

표 37. SS 304 화학조성 (wt.%)

구분	Cr	Ni	C	Mn	P	S	Si
304	18-20	8-11	0.08(max)	2.0	0.04	0.03	0.75

표 38. SS 304의 열적/물리적 재료물성치

온도 (°C)	열전도도 (Wm/°C)	비열 (kJ/kg°C)	밀도 (kg/m³)
20	13.31	0.470	7966
100	14.68	0.487	7937
200	16.33	0.508	7898
300	17.93	0.529	7857
400	19.47	0.550	7814
500	20.96	0.571	7769
600	22.38	0.592	7724
700	23.76	0.613	7677
800	25.07	0.634	7630
900	26.33	0.655	7583
1000	27.53	0.676	7535
1100	28.67	0.698	7486
1200	29.76	0.719	7436
1420	31.95	0.765	7320
1460	320	0.765	7320
3000	320	0.765	7320

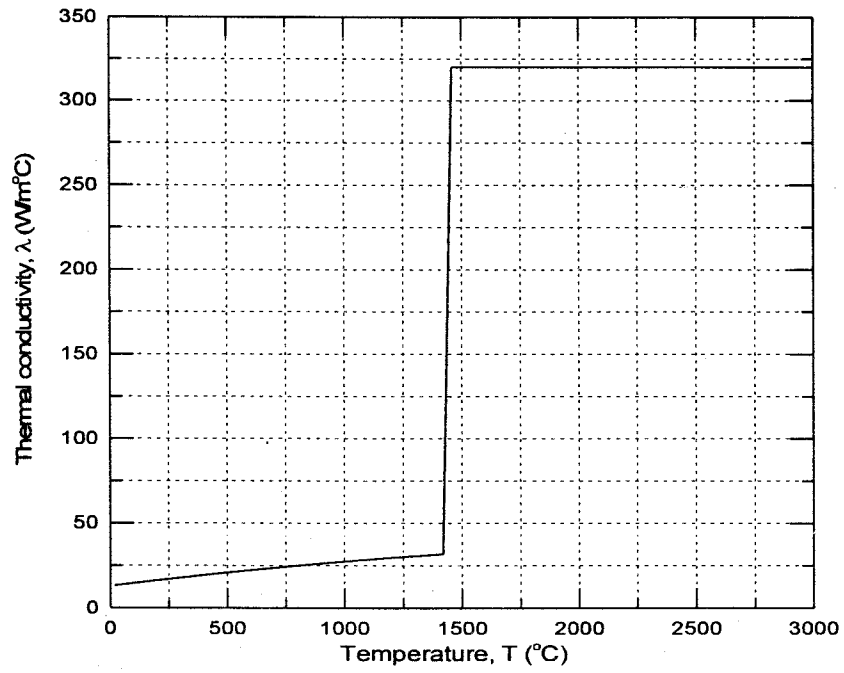
[주] Solidus Temp : 1420°C, Liquidus Temp : 1460°C, Latent Heat : 300KJ/kg

표 39. SS 304의 기계적 재료물성치

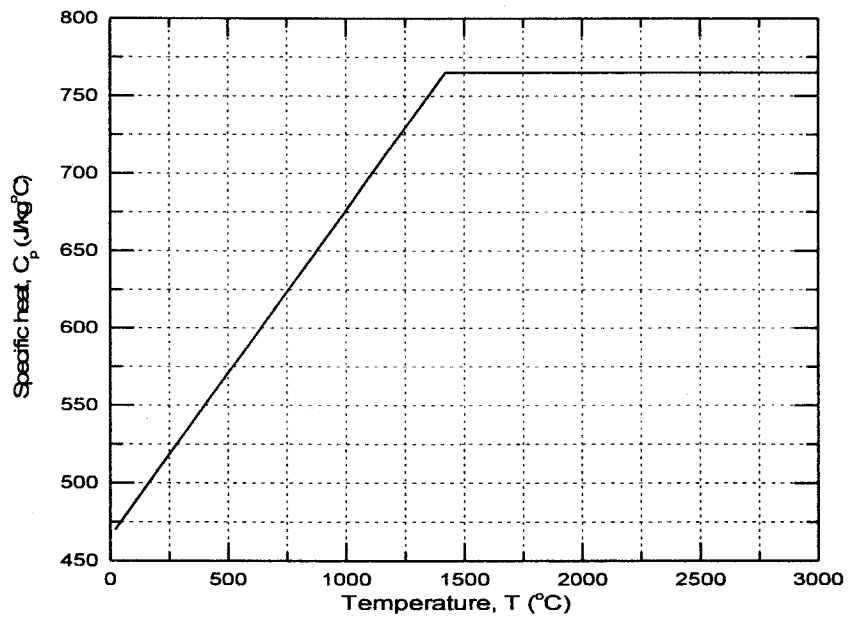
온도 (°C)	탄성계수 (GPa)	프와송비	0.2%항복강도 (Mpa)	항복강도 (MPa)	열팽창계수 (mm/mm/°C×10 ⁶)
20	195.1	0.267	278	325	15.24
100	191.2	0.273	233	272	15.80
200	185.7	0.290	193	226	16.43
300	179.6	0.310	168	196	16.97
400	172.6	0.322	154	180	17.44
500	164.5	0.313	146	171	17.85
600	155.0	0.296	141	165	18.21
700	144.1	0.282	133	156	18.54
800	131.4	0.262	-	-	18.83
816	-	-	128	150	-
900	116.8	0.240	-	-	19.11
1000	100.1	0.229	-	-	19.38
1038	-	-	31	36	-
1100	81.1	0.223	-	-	19.66
1149	-	-	15	18	-
1200	59.5	0.223	-	-	19.95
1260	-	-	9	11	-
1420	2	0.223	3	3.3	20.70
1460	2	0.223	3	3.3	20.70
3000	2	0.223	3	3.3	20.70

다. 원자로 압력용기 원주방향 용접부

- SA508 Gr.3 Cl.1에 대한 재료물성치는 위탁실험과 기존 연구결과로부터 결정되어졌으며 그 내용은 1차년도 연구의 재료물성치 결정 분야에서 제시되어 있다.



(a)



(b)

그림 91. 온도 변화에 따른 SS316의 열전도도 및 비열 변화

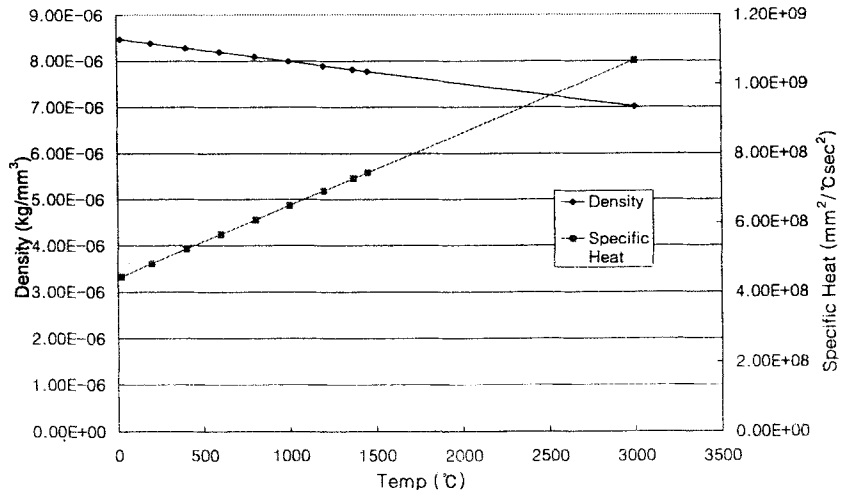


그림 92. Inconel 82의 온도에 따른 밀도 및 비열 변화

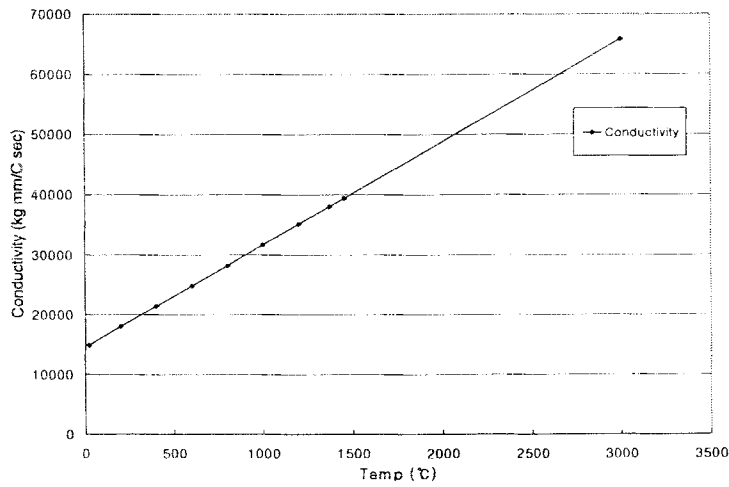


그림 93. Inconel 82의 온도에 따른 열전도도 변화

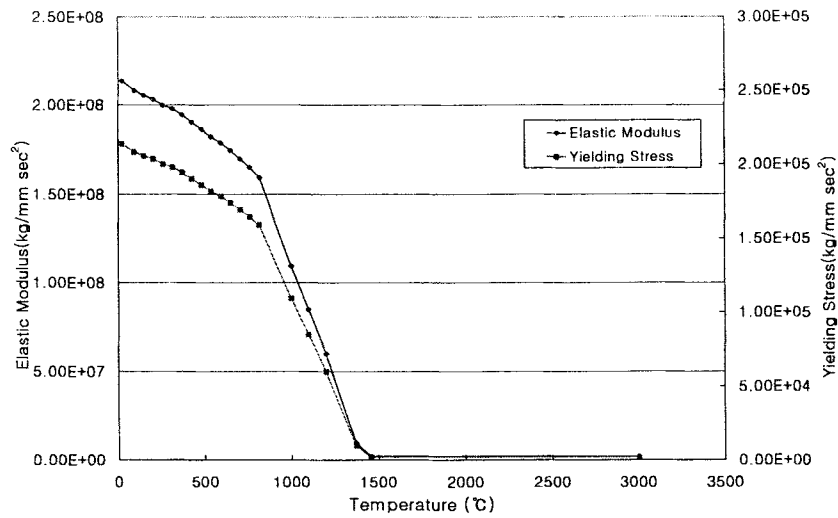


그림 94. Inconel 82의 온도에 따른 탄성계수 및 항복강도 변화

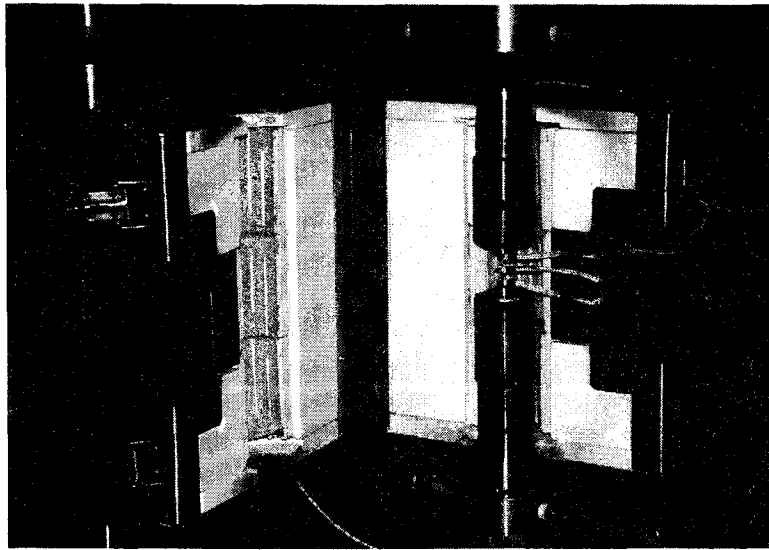


그림 95. 만능 인장시험기와 고온 챔버

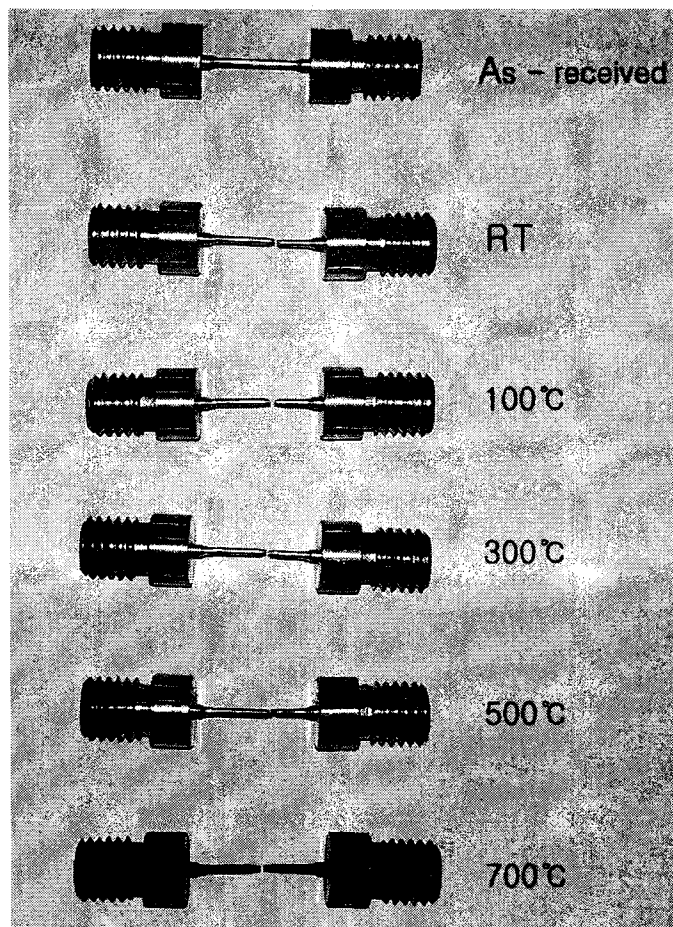


그림 96. Inconel 82 인장 시편

4. 이론적 온도해석 기술 개발

원전 설비 구조물과 같은 복잡한 구조의 대형 용접구조물에 대한 수치적 온도해석의 필요성이 점점 증대되어지고 있다. 그러나, 유한요소 해석과 같은 수치해석을 이용하는데 있어서 주요한 장애의 하나는 대형 용접구조물에 대해 전체적인 계산속도가 느리거나 때때로 수렴이 안된다는 것이다. 많은 연구자들이 이러한 장애를 극복하면서 해석 해의 정확성을 유지하기 위해 이론 해석적인 열적 해 모델링을 수행하였으나 곡선의 용접선 및 다양한 결합 형태를 가지는 용접부를 다루는데 여전히 문제점을 가지고 있었다.

따라서, 본 연구에서는 기존의 이론적 온도해석 연구 동향을 검토하고 곡선 용접 및 다양한 결합 형태의 용접 결합부에 적용될 수 있는 이론적 온도해석 기초기술을 개발 제시하고 곡선의 용접선을 가지고 있는 대표적인 원전설비 용접부인 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 개발 기술을 적용한 후 유한요소 해석 결과와 비교하여 타당성을 검토하고자 한다.

가. 기존 연구동향

아크 용접은 원전설비와 같은 대형 구조물 및 그 요소들을 접합하는 검증된 접합방법 중 하나이다. 이러한 용접시 발생하는 고열로 인한 기계 및 재료적 거동의 변화를 연구하기 위해서는 용접부 주변에 대한 열 해석이 반드시 수반되어야 한다. Rosenthal[10]에 의해 용접부 열 해석이 최초로 수행되었으며, 약 70여 년이 지난 현재도 Rosenthal이 제시한 식을 사용하여 용접부 온도 분포를 예측하고 있다. Rosenthal은 용접 열영향부(HAZ)와 모재 내 온도상승을 고려하기 위하여 등속으로 이동하는 점 열원(point heat source)을 이용하여 다음과 같은 중요한 결론을 얻고 있다.

즉, 열원 전방에서의 온도 상승이 열원 후방에서의 온도 하강보다 훨씬 가파르며, 용접시 용접 열영향부와 모재는 용접 후 냉각보다 더 빨리 가열된다. 또한, 용접 전압을 증가시키면 등온선 모양의 큰 변화 없이 HAZ 폭을 증대시킨다. 그리고, 용접 속도는 등온선 모양의 변화와 관련이 있으며, 더 빠른 용접 속도는 등온선 모양의 신장 효과를 가져온다. 마지막으로 더 큰 열확산계수를 갖는 용접 모재의 경우 등온선 모양이 좀 더 원형에 가까워진다.

하지만, 이러한 Rosenthal의 결과는 용접 열원으로부터 멀리 떨어진 곳에서는 잘못지만 용접 열원 지점 또는 근방에서는 Rosenthal 식이 적용되지 않는 단점을 안고 있다. 이를 극복하기 위하여 몇몇 이론적 연구가 수행되었다. 이 중 Wells[88]는 Rosenthal의 점 열원 대신 직사각형 열원 모델을 사용하였고, Barry 등[89]은 띠 열원을 수정한 열 해석 모델을 제시하였다. 또, Eager와 Tsai[90]는 2차원 Gauss 분포 열원을 사용하여 Rosenthal 식을 수정, 제시하였다. 그러나, 근래 들어 이러한 이론적 접근에 관한 연구를 찾아보기 드문 데 이는 1970년대 이후 컴퓨터의 급격한 발전으로 인해 이론적 접근보다는 유한요소 해석을 이용한 접근방법이 선호되기 때문인 것으로 생각된다. 그렇지만, 최근 FE 해석과 이론적 방법을 통한 해석사이의 결과 획득시간에 관한 비교 연구가 수행되면서 1980년대 들어 도외시 되던 이론적 접근 방법의 장점이 부각되고 있다.

나. 해석기술 및 엄밀해

두께 H , 폭 W , 작업길이 L 로 이루어고 V 그루브를 갖는 전형적인 아크 용접판재를 그림 97과 같이 고려한다.

용접 모재내 온도 분포를 구하기 위해 가상 이미지(image) 열원 방법[20]과 중첩(superposition) 방법[20]을 사용한 그림 98의 열전달 모델이 사용된다. 즉, 용접부는 주열원(primary heat source) HS0으로 표현되며, 용접 모재의 유한경계(하부면 및 양측면)를 단열(adiabatic) 상태로 가정하여 이의 조건을 만족시키기 위하여 주열원과 같은 크기, 같은 이동속도를 갖는 가상 이미지 열원들(IHS1~IHS5)을 고려한다. 열원은 유사 Gauss 분포 열유속을 갖는 디스크형 열원으로 가정하였다.

1) 균일 열유속을 갖는 디스크형 열원

먼저, 유사 Gauss 분포 열원의 해석에 앞서 반무한체 용접 모재를 대상으로 용접부를 균일 열유속(uniform heat flux)을 갖는 등속 이동 디스크형 열원(moving ring heat source)으로 해석한 모델에 대해 기술한다. 본 연구에서는 열원의 이동속도는 일정하다는 가정을 사용하였다. 그림 99에서 (x,y,z) 는 고정좌표계를 (X,y,z) 는 이동좌표계를 나타내며 Galilean 변환에 의해 $X=x-vt$ 의 관계를 갖는다. 디스크형 열원으로 인한 반무한체 내 임의의 점 $M(x,y,z)$ 에서의 온도 분포식은 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_M = 2Q_{rg}/\rho c(4\pi\alpha\tau)^{1.5} \exp\{-(r_0^2+x^2+y^2+z^2)/4\alpha\tau\} I_0(r_0(x^2+y^2)^{0.5}/2\alpha\tau) \quad (8)$$

여기서 $I_0(\)$ 는 제 1종 수정 0차 Bessel 함수이며 r_0 는 고려된 열원의 반경이다. 그림 99에서 보듯이 τ_i 순간에서 미소시간 증분 $\tau_i+d\tau_i$ 로의 미소 온도 증분량은 식 (8)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\theta_M = 2q_{rg}d\tau_i/\rho c(4\pi\alpha\tau)^{1.5} \exp\{-(r_0^2+x^2+y^2+z^2)/4\alpha\tau\} I_0(r_0\{(x-v\tau_i)^2+y^2\}^{0.5}/2\alpha\tau) \quad (9)$$

이를 $\tau_i=0$ 에서 $\tau_i=t$ 구간에 대해 적분하고 $X=x-v\tau_i$, $\tau_i=t-\tau$ 로 치환하면 균일분포 열유속 디스크형 열원에 대한 해를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\theta_M = q_{rg} v_i / 8\lambda\alpha\pi^{1.5} \exp(-XV) \int_0^{t^2\tau/4\alpha} f(r_0, w)dw \quad (10)$$

여기서

$$f(r_0, \omega) = 1/\omega^{1.5} \exp(-\omega-u^2/4\omega) I_0(r_0V^2\{(X+2\omega/V)^2+y^2\}^{0.5}/2\omega) \quad (11)$$

$$\omega = v^2\tau/4\alpha \quad (12a)$$

$$u = R_h V \quad (12b)$$

$$R_h^2 = r_0^2 + X^2 + y^2 + z^2 \quad (12c)$$

$$V = v/2\alpha \quad (12d)$$

2) 유사 Gauss 분포 디스크형 열원

열원내의 열유속이 유사 Gauss 분포를 하고 있는 경우에 대해 반무한체내 임의의 점 $M(x,y,z)$ 에서의 온도 분포식 결정에 대해 기술한다. 그림 10과 같이 고려된 유사 Gauss 분포 열 방출 강도(heat liberation intensity)는 다음과 같다.

$$q_0 = C \exp\{-3(r/r_0)^2\} \quad (13)$$

윗 식의 계수 C 는 링형 분포를 전 열원내에서 적분함으로써 결정할 수 있다. 즉,

$$q_{pi} = \int_0^{\infty} q_0 2\pi r_i dr_i = \pi r_0^2 C / 3(-e^{-3} + 1) \approx 0.3167\pi r_0^2 C \quad (14)$$

$$C = q_{pi} / 0.3167\pi r_0^2 \quad (15)$$

따라서 식 (13)의 열 방출 강도 분포식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$q_0 = q_{pi} / 0.3167\pi r_0^2 \exp\{-3(r_i^2 / r_0^2)\} \quad (16)$$

또한, 링형 요소에서의 열유속은 다음과 같다.

$$q_{rg} = q_{pi} / 0.3167\pi r_0^2 \exp\{-3(r_i^2 / r_0^2)\} 2\pi r_i dr_i \quad (17)$$

이를 식 (9)에 대입하고 전 열원 분포내에서 적분하면 유사 Gauss 분포 열원으로 인한 반무한체 내의 온도분포 결정식을 다음과 얻을 수 있다.

$$\theta_M = 3.1576q_{pi} v / 4\lambda\alpha\pi^{1.5} r_0^2 e^{-XV} \int_0^{\infty} \exp\{-3(r_i^2 / r_0^2)\} r_i g(r_i) dr_i \quad (18)$$

여기서

$$g(r_i) = \int_0^{v^2\tau/4\alpha} f(r_i, \omega) d\omega \quad (19)$$

$$f(r_i, \omega) = 1/\omega^{1.5} \exp(-\omega - u_i^2/4\omega) I_0(r_i V^2 \{(X+2\omega/V)^2 + y^2\}^{0.5}/2\omega) \quad (20)$$

$$u_i = V (r_i^2 + X^2 + y^2 + z^2)^{0.5} \quad (21)$$

준 정적 상태(quasi-steady state)의 온도분포식을 식 (18)로부터 얻기 위해서는 식 (19)의 함수 $g(r_i)$ 의 특성에 대해 고찰할 필요가 있다. 식 (19)내의 함수 $f(r_i, \omega)$, 즉 식 (20)을 도시해보면 $f(r_i, \omega \geq 5) = \text{const.}$ 임을 알 수 있다. 즉, 식 (19)의 적분 상한 값을 $\omega = v^2\tau/4\alpha = 5$ 로 취함으로써 준 정적 상태의 온도분포 해를 얻을 수 있다. 따라서, 준 정적 상태 도달 시간 t_{qs} 는 다음 식에 의해 결정할 수 있다.

$$t_{qs} = 20\alpha/v^2 \quad (22)$$

용접 속도가 크거나 모재의 열확산계수가 작으면 준 정적 상태 도달 시간이 짧아짐을 알 수 있다.

3) 용접 모재의 기하학적 경계를 고려한 온도 분포 결정

실제 용접 모재내(그림 97)의 온도 분포를 알기 위해서 그림 98의 열전달 모델을 고려한다. 즉, 용접시 용접 모재내 임의 점 M에서의 온도 상승은 주열원 및 가상 이미지 열원들의 효과를 합한 결과로 반영이 된다. 이들 각각의 열원들은 M(x,y,z)로부터 R₀~R₅ 거리에 위치하고 있다.

$$R_0 = (X^2+y^2+z^2)^{0.5} \quad (23)$$

$$R_1 = \{X^2+y^2+(2H-z)^2\}^{0.5} \quad (24)$$

$$R_2 = \{(X+2vt)^2+y^2+z^2\}^{0.5} \quad (25)$$

$$R_3 = \{(X+2vt)^2+y^2+(2H-z)^2\}^{0.5} \quad (26)$$

$$R_4 = [\{2(L-vt)-X\}^2+y^2+z^2]^{0.5} \quad (27)$$

$$R_5 = [\{2(L-vt)-X\}^2+y^2+(2H-z)^2]^{0.5} \quad (28)$$

이들 값의 X축으로의 투영 값은 다음과 같다.

$$X_0 = X_1 = X \quad (29)$$

$$X_2 = X_3 = -(X+2vt) \quad (30)$$

$$X_4 = X_5 = 2(L-vt)-X \quad (31)$$

그리고 이들 위치에서의 u는 다음과 같다.

$$u_n = V(r_i^2+R_n^2)^{0.5}, \quad (n=0,1,2,3,4,5) \quad (32)$$

따라서, 임의 점 M에서의 온도 상승은 다음 식에 의해 결정될 수 있다.

$$\theta_M = 3.1576q_{pl}v/4\lambda\alpha\pi^{1.5}r_0^2 \sum_5^{n=0} e^{-Xnv} \int_0^{\infty} \exp\{-3(r_i^2/r_0^2)\} r_i g_n(r_i) dr_i \quad (33)$$

여기서

$$g_n(r_i) = \int (\text{from } 0 \text{ to } v^2\tau/4\alpha) f_n(r_i, \omega) d\omega \quad (34)$$

$$f_n(r_i, \omega) = 1/\omega^{1.5} \exp(-\omega - u_n^2/4\omega) I_0(r_i V^2 \{(X_n + 2\omega/V)^2 + y^2\}^{0.5}/2\omega) \quad (35)$$

다. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부 적용

SS316 스테인리스 배관 잠호 아크(submerged arc) 용접을 대상으로 하여 식 (33)에 의한 이론적 해석을 수행한다. 고려된 용접모델은 그림 101과 같다. 해석 대상으로 삼은 SS316 강의 온도에 따른 열전도계수와 비열의 변화는 그림 91에 제시되어있다.

본 연구의 최종 결과 식 (33)은 재료의 열적 물성치를 상수 값으로 가정을 하여 유도된 것이므로 그림 91의 온도에 따른 재료물성치 변화를 고려할 수 없다는 단점이 있다. 하지만, 기존 이론적 해석 결과 역시 이러한 데이터들의 평균값으로 그 값을 취하고 실험적 결과들과 비교했을 때 큰 오차 없이 수용될 수 있음을 보여주고 있다. 따라서 그림 91의 평균 데이터들을 그 물성치로 채택하였다. 채택된 열전도계수는 $150 \text{ J/m} \cdot \text{s}^\circ\text{C}$ 이며 비열은 $0.6 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ 이다.

또, 용접 조건 및 재료에 대한 데이터는 표 40에서 찾을 수 있다.

표 40. 아크 용접 변수들

Welding Parameters	Value
Welding Voltage, V	30 V
Welding Current, I	421 A
Arc Efficiency, η	0.97
Welding Arc Speed, v	5.93 mm/sec
Arc Beam Radius, r_0	8.0 mm
Filler Wire, d	1.6 mm
Wire Feed Velocity, v_{feed}	20 cm/sec
Filler Droplet Temp.	2023 $^\circ\text{C}$
Ambient Temp.	25 $^\circ\text{C}$
Melting Pool Temp.	1460 $^\circ\text{C}$
HAZ Temp.	727 $^\circ\text{C}$
Thickness of Plate, H	15.9 mm

유효 열유속 q_{pl} 은 표 40으로부터 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$q_{\text{pl}} = P - Lh_{\text{total}} = 9268.4 \text{ J/sec} \quad (36)$$

여기서 $P = \eta VI$, $Lh_{\text{total}} = \pi d^2/4 v_{\text{feed}} \rho \Delta H$ 이다. 또, 주어진 모델의 준 정적 상태 도달시간은 $t_{\text{qs}} \approx 22 \text{ sec}$ 임을 알 수 있다.

그림 102는 본 연구를 통해 개발된 이론적 해석기술의 타당성을 검증하기 위해 수행되는 유한요소 해석의 유한요소 모델이다. 요소 특성은 4절점 축대칭 요소이며

재료물성치와 경계조건은 이론적 해석기술 적용의 경우와 동일하게 설정하였다.

그림 103은 이론적 해석과 유한요소 해석에 의한 $y=10\text{mm}$, $z=0\text{mm}$ (bottom surface)에서의 시간에 따른 온도상승 분포들을 절대 좌표계 축상에서 보여주고 있다. 그림 103으로부터 이론적 해석결과를 유한요소 해석결과와 비교시 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 104는 이론적 해석과 유한요소 해석에 의한 $z=0\text{mm}$ (bottom surface)에서의 시간에 따른 열영향부 분포들을 상대 좌표계 축상에서 보여주고 있다. 그림 104로부터 이론적 해석결과를 유한요소 해석결과와 비교시 잘 일치함을 알 수 있다. 현 모델의 경우 모델이 단순하여 이론적 해석과 유한요소 해석 사이의 계산시간 차이는 산술적으로 큰 차이를 보이지는 않으나 이론적 해석시 계산시간이 유한요소 해석의 경우와 비교시 1/10 이하이다. 또한, 유한요소 해석을 위해 유한요소 모델링을 수행하는 시간을 포함하면 유한요소 해석시간에 대한 이론적 해석시간의 비는 더욱 감소한다. 특히 대형 용접 구조물의 용접부 온도분포를 이론적 해석을 통해 계산하는 경우, 계산시간과 해석시간(유한요소 모델링 시간 포함)의 단축에 따른 이득으로 본 연구를 통해 개발된 이론적 온도해석의 유용성이 보다 증대될 것으로 판단된다.

그림 103과 104로부터 본 연구를 통해 개발된 이론적 해석기술은 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부와 같은 곡선의 용접선을 가지고 있는 용접부에 대해서도 해석을 할 수 있을 뿐만 아니라 유한요소 해석에 비하여 신뢰성이 저하되지 않는 결과를 매우 짧은 시간내에서 계산할 수 있는 유용한 기술임을 알 수 있다.

라. 결 론

가상 이미지 열원 방법과 중첩법을 이용한 용접부에 대한 이론적 온도해석 기법을 본 연구를 통해 개발한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부의 온도분포 이론식을 구하였으며 이론식 적용 결과는 유한요소 해석 결과와 비교시 잘 일치하였다.
- 개발된 온도분포 결정식은 천이 상태 및 준 정적 상태 모두에 적용되는 일반 식이며, 특히 용접 풀(pool)내의 온도상승 형태를 정확히 예측할 수 있었다.
- 본 연구를 통해 개발된 이론적 온도해석 기술은 대형 용접 구조물에 적용시 유용성이 보다 증대될 것이다.

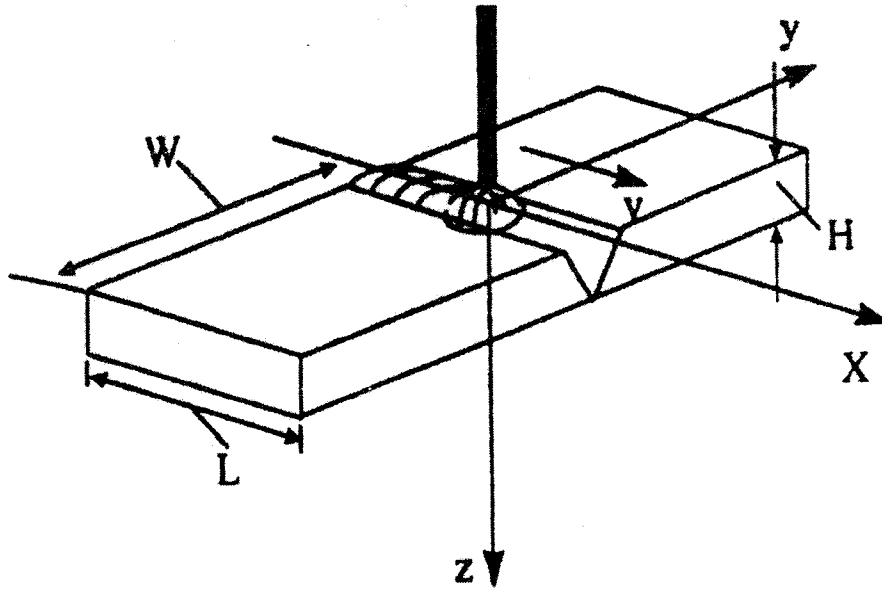


그림 97. 얇은 마일드 강판에 대한 일반적인 아크 용접

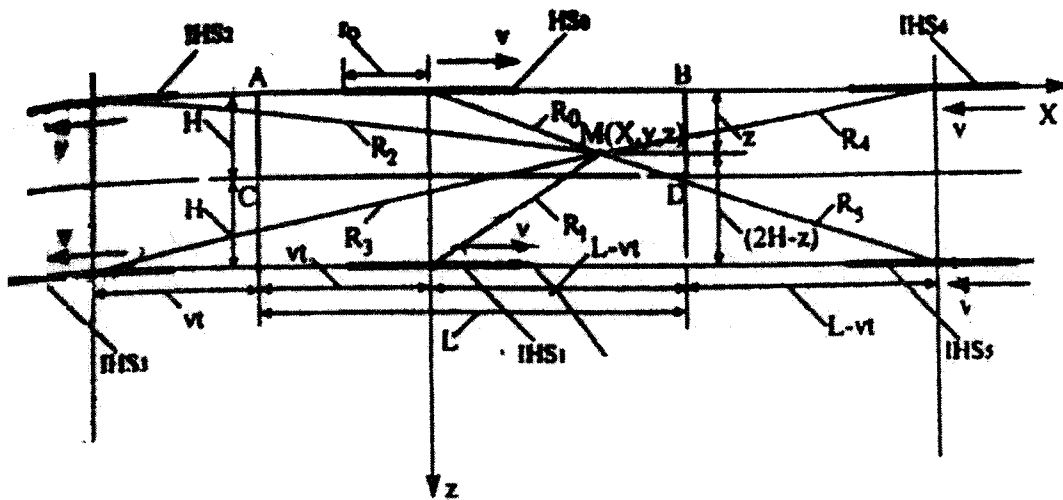


그림 98. 주열원과 가상 이미지 열원이 제시된 열전달 모델

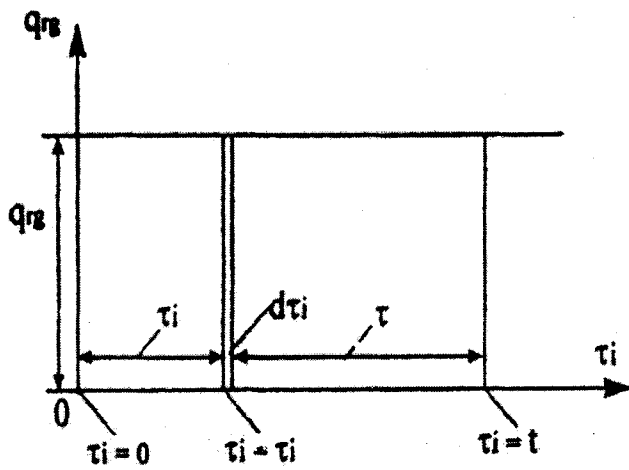
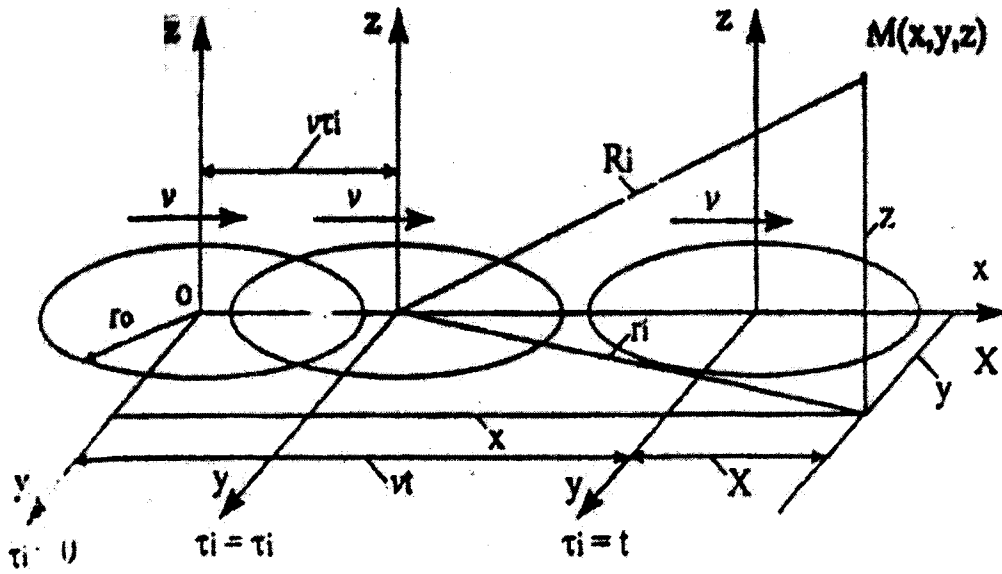


그림 99. 공간과 시간 변수들 사이의 관계를 제시하는 동적 링 열원

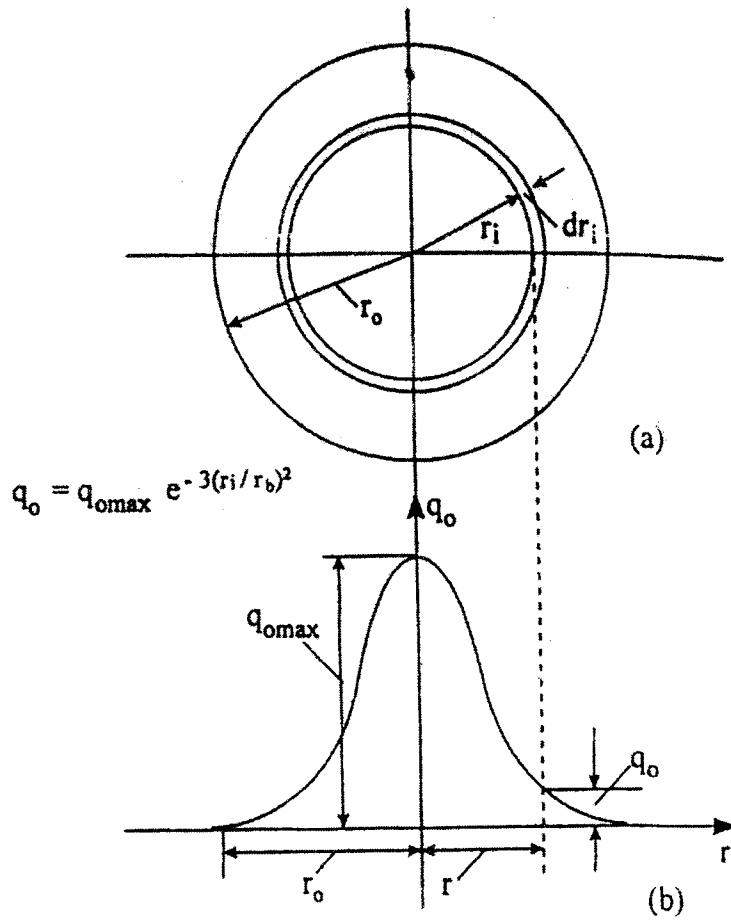


그림 100. Gaussian 분포를 가진 동적 원형 디스크 열원

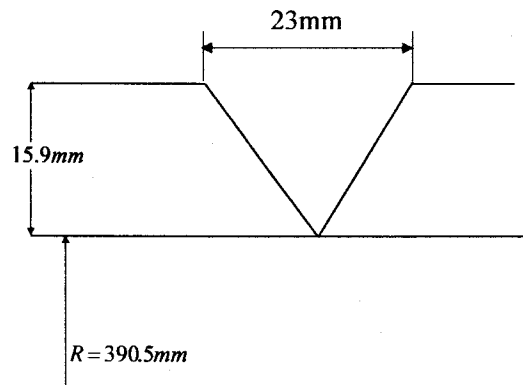
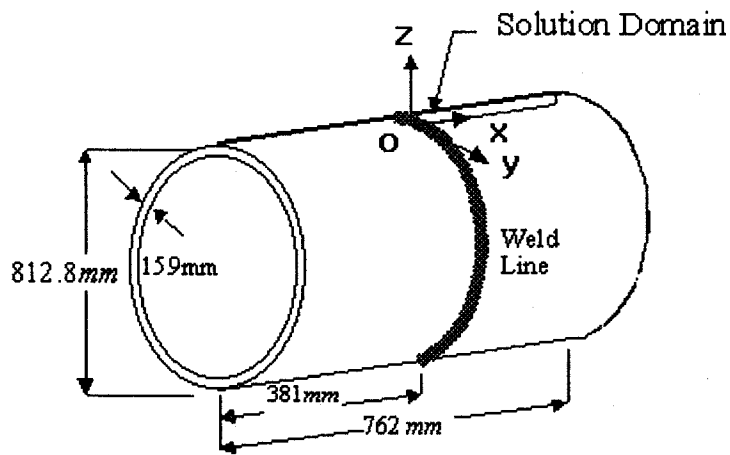


그림 101. 해석모델

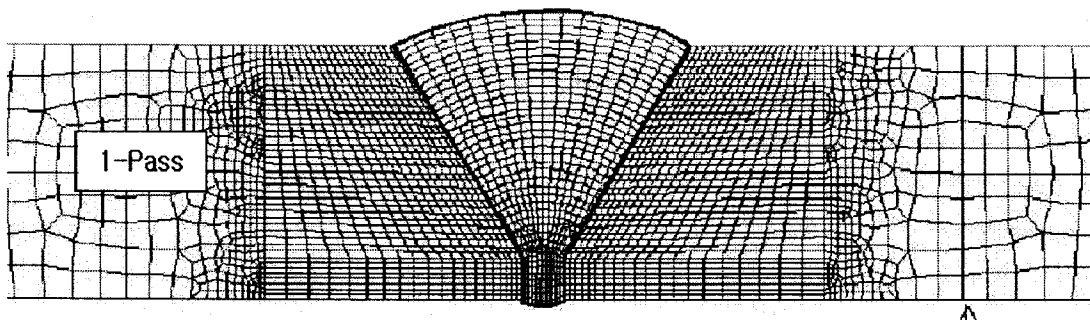


그림 102. 유한요소 모델.

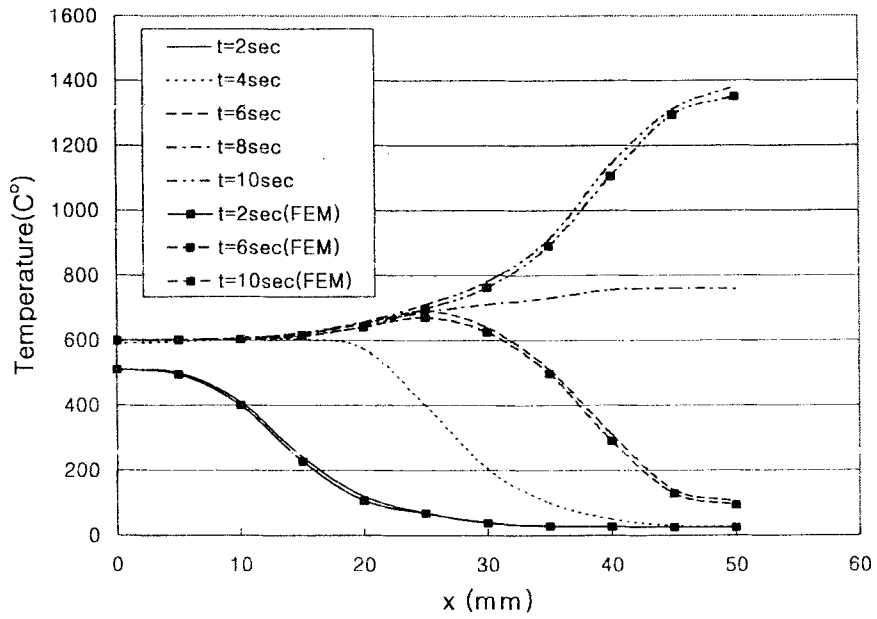


그림 103. V 그루브 바닥선을 따른 온도 상승 분포

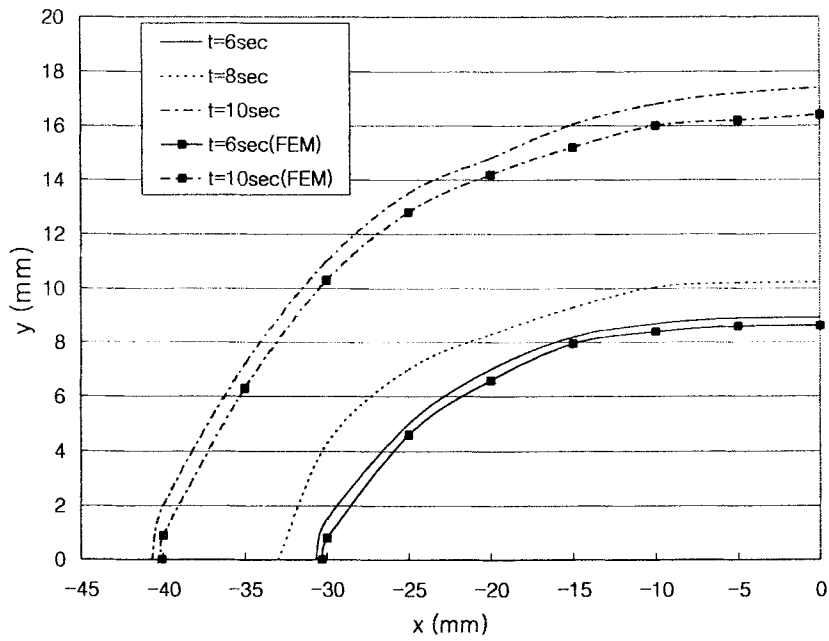


그림 104. 용접 심선에 따른 판 바닥면 상 열영향부 경계선(727°C) 변화

5. 잔류응력 해석 기술 개발

원전설비와 같은 대형 강 구조물은 특성상 구조물 구성 요소들간 수많은 용접부가 존재하며 용접부 특성(비균질성, 기하학적 불균일성, 잔류응력 및 구조적인 Rigidity 등)상 손상 발생 잠재성을 내포하고 있다. 이러한 잠재성을 해결하기 위해 신기술 개발과 활발한 연구들이 수행되어졌음에도 불구하고 손상 발생 가능성 및 손상사례 측면에서 취약부위는 여전히 용접부라 할 수 있다. 이러한 용접부 손상 발생 인자들 중 응력부식균열과 피로파괴 발생의 주요인자인 잔류응력을 평가할 때 용접 현상/과정의 복잡성 때문에 잔류응력을 계산하는 것이 용이하지 않아서 주로 실험적 접근 방법이 사용되어왔으나 과도한 비용/시간 투입에 따른 비경제성 및 컴퓨터 하드웨어/소프트웨어의 눈부신 발달로 인하여 최근 계산역학 적용이 활발히 수행되어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 계산역학 적용에 초점을 맞추어 그림 105에서 제시되고 있는 용접 잔류응력 해석절차에 따라 잔류응력 해석이 수행되어진다. 그림 105에서 제시된 바와 같이 온도해석 결과는 금속조직 변화 예측의 입력 값으로 제공되며 온도해석/금속조직 예측 결과는 잔류응력 해석의 입력 값으로 제공된다. 또한, 이러한 해석 절차를 통해 양산된 결과들은 DB와 전문가 시스템 구축을 위한 기반 자료로서 활용되어진다. 이론적/준경험적 접근방법을 이용한 이러한 상세 해석절차를 실제 원전설비 용접부의 잔류응력 해석에 적용함으로써 실험적 접근법에 비하여 보다 효율적이고 경제적인 평가가 가능할 것으로 예상된다. 그림 105의 해석절차를 적용하는데 필수적인 용접부 재료거동 모사 사용자 정의 보조프로그램을 우선적으로 개발한 후 최종적으로 이종재 용접부, 스테인리스 강 배관 및 원자로 압력용기 원주방향 용접부에 대해 해석절차에 따라 잔류응력 해석을 수행하고자 한다.

가. 사용자 정의 보조 프로그램 개발 및 검증

용접부 손상 평가시 특히, 응력부식균열 발생 및 성장 평가시 평가결과의 Scattering Band 폭이 큰 이유 중의 하나는 잔류응력 해석치의 불확실성에 있다. 이러한 불확실성을 감소시키기 위해서는 용접 입열에 따른 열영향부의 금속조직 및 재료물성치 변화를 고려한 보다 정밀한 잔류응력 해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 열영향부 금속조직 및 재료물성치 변화가 고려된 사용자 정의 보조 프로그램 (UMAT)을 개발하고 기존의 연구결과와 비교 검토하여 개발 프로그램의 타당성을 검토하고자 한다.

1) 사용자 정의 보조 프로그램 개발

용접 동안에는 용접시간이 짧기 때문에 크리프 변형률은 일반적으로 무시 가능하나 열탄소성 변형률과 금속조직 및 상 변화에 따른 변형률은 무시할 수 없다. 즉, 정확한 해석 해를 구하기 위해서는 상변태에 따른 상변태 변형률과 온도 증가에 따라서 어닐링 온도 이상부터 변형률이 감소하여 액상에서는 변형률이 영이 되도록 하는 어닐링 변형률을 고려하여야만 한다. 그러나 상용 유한요소법 패키지의 일반적인 명령 구조내에서는 이러한

상변태 및 어닐링 변형률을 고려할 수 없고 상용 유한요소법 패키지에서 특별하게 제공하는 사용자 정의 보조 프로그램 기능을 이용하여 고려하여야만 한다.

우선적으로 용접부 잔류응력 해석용 사용자 정의 보조 프로그램 개발시 기본이 되는 용접부 재료거동 구성 방정식을 검토하고 ABAQUS 사용자 정의 보조 프로그램의 특성을 고찰하고 용접대로 거동에 대한 사용자 정의 보조 프로그램을 개발하고자 한다.

가) 용접부 재료거동 구성방정식

- 용접 시간이 짧기 때문에 크리프의 영향은 무시 가능
- 열, 탄성, 소성, 어닐링 및 상 변태 변형률 고려[91]

$$\partial \epsilon^{Tot}/\partial t = \partial \epsilon^{\theta}/\partial t + \partial \epsilon^e/\partial t + \partial \epsilon^p/\partial t + \partial \epsilon^A/\partial t + \partial \epsilon^{Tr}/\partial t \quad (37)$$

여기서 $\epsilon^{Tot}, \epsilon^{\theta}, \epsilon^e, \epsilon^p, \epsilon^A$ 및 ϵ^{Tr} 은 각각 전체, 열, 탄성, 소성, 어닐링 및 상 변태 변형률임.

- 상용 유한요소법 패키지에선 어닐링 및 상 변태 변형률이 일반적으로 고려되지 않으므로 사용자 정의 보조 프로그램 개발 필요
- 어닐링 변형률[91]
 - 용융동안 재료는 어떠한 탄성 소성 변형률도 없는 Virgin 상태가 됨.
 - 어닐링 변형률 미고려시 용융부와 열영향부에 큰 변형을 야기시키며 비실제적인 변위값을 제시하며 계산시 느린 수렴성을 보임.

$$\partial \epsilon^A/\partial t = \partial \epsilon^{Ac}/\partial t + \partial \epsilon^{Ap}/\partial t \quad (38)$$

여기서

$$\partial \epsilon^{Ac}/\partial t = 0 (\theta < \theta_A), \quad = \{(\partial \theta/\partial t)/(\theta_m - \theta)\}^q \epsilon^{Ac} \quad (\theta_A < \theta < \theta_m) \quad (39)$$

$$\partial \epsilon^{Ap}/\partial t = 0 (\theta < \theta_A), \quad = \{(\partial \theta/\partial t)/(\theta_m - \theta)\}^q \epsilon^{Ap} \quad (\theta_A < \theta < \theta_m) \quad (40)$$

여기서 ϵ^{Ac} 는 어닐링 탄성변형률, ϵ^{Ap} 는 어닐링 소성변형률, θ_A 는 어닐링이 발생하는 시작온도, θ_m 는 용융 온도임.

- 그림 106에서 보이는 바와 같이 탄성-완전 소성 및 선형 열팽창 거동을 하는 1차원 모델에 대해 고찰시 어닐링 변형률을 고려하지 않으면 온도가 원상 복귀되어도 실제와는 다른 최종 변형률 값을 나타냄.
- 상 변태 변형률[41, 53, 91]
 - 냉각과정 동안 발생하는 마르텐사이트 변태시 팽창에 기인하여 발생

- 그림 107에서 보이는 바와 같이 상변태 발생시 항복강도보다 훨씬 작은 응력 작용 하에서도 소성 변형률을 발생시킬 수 있음.
- 체적 수축에 기인하는 체적 상변태 변형률 ϵ^{TV} 과 소성 상변태 변형률 ϵ^{TP} 로 분리 할 수 있음.

$$\partial \epsilon^{Tr} / \partial t = \partial \epsilon^{TV} / \partial t + \partial \epsilon^{TP} / \partial t \quad (41)$$

$$\partial \epsilon^{TP} / \partial t = 3/2 KS (2-2z-2\partial z / \partial t) \partial z / \partial t \quad (42)$$

여기서 K는 재료상수, S는 Deviatoric 응력, z는 변태된 상의 분율로서 마르텐사이트 분율로서 1차년도에서 개발한 금속조직 예측기술을 이용하여 예측되어짐.

- ϵ^{TP} 를 고려하면 매우 국부적인 위치에서 압축 잔류응력을 발생시킴.
- ϵ^{TP} 를 고려하지 않고 잔류응력을 계산하고 건전성평가에 이용하는 것은 보수적일 수 있음

○ Yielding Surface 처리[53]

- 탄성 한계내에서의 응력-변형률 관계는 다음과 같음.

$$\sigma = E : (\epsilon^{Tot} - \epsilon^p - \epsilon^0 - \epsilon^{Ap} - \epsilon^{TP}) \quad (43)$$

여기서 E는 온도종속적인 탄성 Stiffness Tensor임.

- Von-Mises Yield Criterion를 Kinematic 및 Isotropic 경화 법칙의 결합 체계내에서 가정함.
- Yield Function 을 아래와 같이 가정함.

$$F = (1.5 T:T)^{0.5} - Y(\theta, \epsilon^p) \quad (44)$$

$$T = (\sigma - \alpha) - \{1/3 (\sigma - \alpha) : \delta\} \delta \quad (45)$$

$$\epsilon^p = \epsilon^p \partial F / \partial \sigma = \epsilon^p T \quad (46)$$

여기서 ϵ^p 는 Standard Equivalent 소성변형률임.

- Yield Surface 중심의 Evolution (열소성에 대한 Rice의 수정을 따른 Ziegler 법칙)

$$\alpha = \psi \{ \mu (\sigma - \alpha) + h \alpha \theta \}, \mu = H/Y \epsilon^p, h = 1/H \partial H / \partial \theta \quad (47)$$

여기서 H는 단일 축방향 응력-변형률 선도의 기울기, ψ 는 0부터 1까지(0은 Isotropic, 1은 Kinematic 경화)의 값으로서 재료종속 Isotropic/Kinematic 경화비임.

- Yield Surface Expansion

$$Y = \psi \sigma_y(\theta) + (1 - \psi) \sigma(\epsilon^p, \theta) \quad (48)$$

○ 열영향부내 재료물성치 변화 처리

- 용접 열영향부에 과도한 입열로 금속조직 및 기계적 재료물성이 변화하게 되므로 잔류응력 분포에도 영향을 미칠 수 있다.
- 따라서 1차년도에서 개발한 금속조직/재료물성 변화 예측기술을 토대로 열영향부의 기계적 재료물성치인 항복강도 및 인장강도 변화를 고려하여야 한다.
- 이러한 고려를 통해서만 다층용접 및 후열처리시 템퍼링(tempering) 효과를 모사할 수 있다.

나) ABAQUS내 UMAT 특성 검토

○ 특성

- 재료의 기계적 거동을 사용자가 정의하는 보조 프로그램임.
- Fortran 언어로 작성하게 되어있음.
- 해석 해에 종속적인 상태 변수들을 이용할 수 있음.
- 응력과 해석 해에 종속적인 상태 변수들을 각 Increment의 마지막에 수정되어야 함.
- 기계적 재료거동 모델에 대한 재료 Jacobian Matrix $\partial\Delta\sigma/\partial\Delta\varepsilon$ 가 제공되어야만 함.
- 임의의 상태 변수들을 정의하기 위해 또다른 사용자 정의 보조 프로그램인 USDFLD를 이용할 수 있음.

○ 변수들

- 정의되어지는 변수들
 - DDSDE(NTENS,NTENS) : Jacobian Matrix
 - STRESS(NTENS) : Increment 시작에서의 Stress Tensor
 - STATEV(NSTATV) : 해석해에 종속적인 상태 변수들을 포함하는 Array
 - SSE : 특정 탄성 변형률 에너지
 - SPD : 특정 소성 변형률 에너지
 - SCD : 특정 크리프 변형률 에너지
 - 수정되어질 수 있는 변수들
 - PNEWDT : 사용되어지는 시간 증분에 대한 새로운 시간 증분의 비
- 정보를 위해 제공되는 변수들
 - STRAN(NTENS) : Increment 시작에서의 총 변형률을 포함하는 Array
 - DSTRAN(NTENS) : 변형률 Increment의 Array
 - TIME(1) : 현 Increment 시작에서의 시간
 - TIME(2) : 현 Increment 시작에서의 총 시간
 - DTIME : 시간 증분
 - TEMP : Increment 시작에서의 온도
 - DTEMP : 온도 증분
 - PREDEF : Increment의 시작에서의 이미 정의된 상태 변수들의 내삽된 값의 Array

- DPRED : 이미 정의된 상태 변수 증분들의 Array
- CMNAME : *Material Option에서 주어진 이름
- NDI : Direct 응력 성분의 개수
- NSHR : 공학적 전단응력 성분의 개수
- NTENS : 응력 또는 변형률 성분 Array의 크기
- NSTATV : 해석 해에 종속적인 상태 변수들의 개수
- PROPS(NPROPS) : *User Material Option에서 정의된 재료상수의 Array
- NPROS : 재료 상수의 개수
- COORDS : 좌표축 Array
- DROT(3,3) : Rotation Increment Matrix
- CELENT : Characteristic Element Length
- DFGRD0(3,3) : Increment 시작에서 주어지는 변형 구배를 포함하는 Array
- DFGRD1(3,3) : Increment 종료에서 주어지는 변형 구배를 포함하는 Array
- NOEL : Element 번호
- NPT : Integration Point 번호
- LAYER : Composite Shell과 Layered Solid의 Layer 번호
- KSPT : 현 Layer내 Section Point 번호
- KSTEP : Step 번호
- KINC : Increment 번호
- 정의되어져야 하는 변수 결정
 - 본 연구에서 잔류응력 해석시 크리프 변형률을 고려하지 않고 Solution-Dependent State 변수들의 사용 및 에너지 출력이 필요치 않으므로 정의되어지는 변수들 중 Jacobian Matrix $\partial\Delta\sigma/\partial\Delta\varepsilon$ 와 Stress Tensor만이 결정되어지면 된다.

다) UMAT내 공식화

- 정보를 위해 제공되어지는 변수들 중 온도 변수 TEMP, 온도 Increment DTEMP, 열팽창계수로부터 열 변형률 계산
- 식(38)~(40)에 따라 현 Increment에서의 어닐링 탄성/소성 변형률 계산
- 온도변화에 따른 금속조직/기계적 재료물성 예측결과를 이용하여 식(41)~(42)에 따라 현 Increment에서의 상변태 체적/소성 변형률 계산
- 식(44)~(48)을 이용하여 항복 Surface 팽창 고려
- 현 Increment에서의 열변형률, 어닐링 변형률과 상변태 변형률을 이전 Increment에서의 값과 비교하여 각각의 변형률 증분을 각 방향에 대해 계산
- 정보를 위해 제공되어지는 변수인 현 Increment에서의 Total 변형률, 각각의 변형률 값과 식(43)을 이용하여 응력 Tensor 및 증분 계산
- 계산된 응력 증분과 변형률 증분을 이용하여 현 Increment에서의 Jacobian Matrix 도출

2) 타당성 검증

본 연구에서 개발된 사용자 정의 보조 프로그램의 타당성을 검증하는데 있어서 어닐링 변형률과 상변태 변형률로 분리하여 각각에 대해 기존의 연구결과와 비교 검토하여 타당성을 검증하고자 한다.

가) 어닐링 변형률에 대한 타당성 검토

- 어닐링 변형률에 대한 사용자 정의 보조프로그램의 타당성을 검토하기 위해 그림 108에서 보이는 바와 같이 알루미늄 합금으로 제작된 양단 단순 지지 보의 상단면에 클래딩 용접되는 경우에 대한 기존 연구 결과들[92]과 비교 검토하고자 한다.
- 그림 109는 개발된 사용자 정의 보조 프로그램을 이용하여 계산된 중심부 변위를 실험 결과 및 어닐링을 고려한 기존 연구결과와 비교 제시한 것으로 잘 일치함을 알 수 있다.
- 그림 109로부터 어닐링 변형률을 고려한 유한요소 해석시 실제 현상과는 다르게 과도한 변형이 발생하는 것을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

나) 상변태 변형률에 대한 타당성 검토

- 상변태 변형률에 대한 사용자 정의 보조프로그램의 타당성을 검토하기 위해 그림 110에서 보이는 바와 같이 마일드 강 상단면에 니켈 클래딩 용접되는 경우에 대한 기존 연구결과[93]와 비교 검토하고자 한다.
- 그림 111은 개발된 사용자 정의 보조 프로그램을 이용하여 계산된 횡방향 잔류응력 분포를 기존의 연구결과와 비교하여 제시한 것으로 기존 연구결과와 잘 일치함을 알 수 있다.
- 또한, 상변태 변형률을 고려하지 않은 경우와 비교시 전반적인 분포양상은 동일하나 열영향부내 국부적인 영역에서 압축응력이 발생함을 알 수 있으며, 상변태 변형률 고려 경우 압축응력 발생 영역이 없기 때문에 미고려 경우에 비해 보수적인 평가 결과를 가져다 줄 수 있다.

나. 해석 대상

본 연구에서는 이중재 용접부, 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부와 원자로 압력용기 원주방향 용접부를 잔류응력 해석 대상으로 선정하였다.

1) 이중재 용접부

- 이중재 용접부인 원자로 냉각재 배관 노즐부(분기 배관으로 분기되는 부위)의 Mock up 시편으로서 그림 112에 제시하고 있다.

- 그림 112에서 보이는 바와 같이 해석모델은 원자로 냉각재 배관 재료인 SA508 Gr.1a, 안전단 재료인 TP316, 분기 배관 재료인 F316, 안전단/분기 배관사이의 용접금속인 ER316L, 버터링 및 원자로 냉각재 배관/안전단 사이의 용접금속인 Inconel 82로 구성되어지며 용접은 양쪽 모두 24 패스로 수행되어진다.

표 41은 본 해석모델에 적용된 용접변수 특성을 제시하고 있다.

표 41. 이중재 용접부의 용접변수 특성

Part \ Par.	Welding Method	Voltage (V)	Current (A)	Speed (cm/min)	Preheat Temp. (°C)	Interpass Temp. (°C)	PWHT (°C/hr)
Buttering	GTAW	13~15	160~190	9~14	15 min	175 max	615± 20/3 min ~30 max
Buttering-Safe End	SMAW	24~26	140~155	12~18	15 min	175 max	210~300/2
Safe End-TP316	GTAW	13~15	160~190	9~14	15 min	175 max	

2) 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부

- 그림 113은 잔류응력 해석치와 실험치가 존재하는 용접부인 스테인리스 강 배관 원주 방향 용접부에 대해 제시하고 있다.
- 내면과 외면은 각각 MMA와 SAW 용접법을 적용하였으며 용접변수들은 표 42와 43과 같다.

표 42. 스테인리스 강 배관 내면 원주방향 용접부의 MMA 내경 용접변수

Pass	Voltage (V)	Current (A)	Average Advance Rate (mm/sec)	Estimate Weld Bead Section Area (mm ²)
1	22.5	85	3.25	9.3
2	23	121	2.63	17.1
3	22.4	156	2.52	21.9

[주] pass 1 : layer 1, pass 2 와 pass 3 : layer 2

표 43. 스테인리스 강 배관 외면 원주방향 용접부의 SAW 외경 용접변수

Pass	Voltage (V)	Current (A)	Advance Rate (mm/sec)	Estimate Weld Bead Section Area (mm ²)
1	28	300	6.35	29.3
2	30	421	5.93	47
3	30	421	5.93	47
4	30	440	5.93	49.2

3) 원자로 압력용기 원주방향 용접부

1차년도 및 2차년도 연구에서 수행한 금속조직 변화/기계적 물성 저하 예측기술 개발 및 검증보완 분야의 대상 모델과 동일하다.

다. 온도 해석

이종재 용접부, 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부 및 원자로 압력용기 원주방향 용접부에 대해 1차년도 연구에서 개발된 온도해석 기술을 활용하여 다음 아래와 같이 수행되어졌다.

1) 이종재 용접부

○ 경계조건

- 초기온도는 25°C로 가정하였다.
- 용접동안에는 150°C의 대기와 강제 열대류(열대류계수 : 100W/m²C) 되어진다고 가정하였다.
- 열 경계조건 설정 시 입열량이 용접금속을 용융시키는데 일부만 소비되고 나머지는 체적 열 유속의 형태로 용접부에 열을 가한다고 가정하였다.
- 체적 열 유속이 가해지는 시간은 용접속도의 역수로 가정하였다.
- 용접 패스간 시간 간격은 용접 패스후 완전히 주위 온도로 냉각되어질 때까지의 시간으로 설정하였다.

○ 유한요소 모델링

- 그림 114에서 보이는 바와 같이 3134개 절점과 2984개 요소의 4절점 평면 변형률 요소로 모델링하였다.

○ 온도해석

- Lumped 모델 기법을 사용하지 않고 실제 용접 패스 수대로 해석하였다.
- 그림 115는 안전단과 TP316 사이의 용접부에 용접 패스 11이 용접된 후 시간 경과에 따른 온도분포를 나타내고 있다. 그림 115로부터 시간 경과에 따라 점차적으로 열이 확산되어짐을 알 수 있다.
- 그림 116은 그림 114 상의 F 지점에서의 용접과정 동안의 온도 변화를 나타내고 있다. 그림 116으로부터 다층 용접동안의 반복되는 가열과 냉각에 기인하여 다층 용접시 전형적인 온도 싸이클 형태인 톱날 형태의 온도 싸이클이 나타남을 알 수 있다.

2) 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부

유한요소 모델, 온도해석 및 잔류응력 해석의 신뢰성 확보를 위해 Benchmark 해석의 일환으로 두가지 해석의 경우로 나누어 수행하였다.

○ 경계조건

- 초기온도는 25°C로 가정하였다.
- 용접동안에는 25°C의 대기와 자연 열대류(열대류계수 : 10W/m²C)되어진다고 가정하였다.
- 열 경계조건 설정시 A 해석은 입열량이 모두 용착금속을 용융시키는데 모두 소비된다고

가정했지만 B 해석은 일부만 소비되고 나머지 일부는 열 유속의 형태로 용접부에 열을 가한다고 가정하였다.

- 체적 열유속이 가해지는 시간은 용접속도의 역수로 가정하였다.
- 용접 패스간 시간 간격은 배관 용접부 원주 길이를 용접속도로 나눈 값으로 설정하였다.

○ 유한요소 모델링

- 유한요소 모델링은 두 해석 모두 축대칭 Lumped 모델로 모델링하였다. 그러나 A 해석은 그림 117(a)에서 보이는 바와 같이 909개 절점과 289개 요소의 축대칭 8절점 요소로 모델링하였고 B 해석은 그림 117(b)에서와 같이 723개 절점과 651개 요소의 축대칭 4절점 요소로 모델링하였다.

○ 온도해석

- 두 해석 모두 ABAQUS의 Model Change 기능을 이용하여 용접 Layer의 용착을 모사하였으며 열전도 근거 해석모델을 사용하였다.
- 그림 118은 A 해석에서 수행한 온도해석 결과이다.
- 그림 119는 그림 12(a) 상의 절점 1728에서의 용접과정 동안의 온도 변화를 나타내고 있다.
- 그림 119로부터 다층 용접동안의 반복되는 가열과 냉각에 기인하여 다층 용접시 전형적인 온도 사이클 형태인 톱날 형태의 온도 사이클이 나타남을 알 수 있다

3) 원자로 압력용기 원주방향 용접부

유한요소 모델링과 온도해석은 1차년도 연구의 일환으로 수행되어졌으며 그 내용은 1차년도 온도해석 분야에 제시되어 있다.

라. 금속조직/기계적 물성 예측

이종재 용접부, 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부 및 원자로 압력용기 원주방향 용접부에 대해 1차년도 연구에서 개발되고 2차년도 연구에서 검증 보완된 금속조직 예측 기술을 활용하여 다음 아래와 같이 수행되어졌다.

1) 이종재 용접부

○ SA508 Gr.1a

- 결정립 크기
 - 그림 120은 용융선으로부터의 거리에 따른 prior 오스테나이트 결정립 크기를 나타내고 있다.
 - 그림 120으로부터 용융선에서 멀어질수록 prior 오스테나이트 결정립이 작아짐을 알 수 있다.

- 평형 상태도

- 그림 121은 Thermo-Calc를 이용하여 결정한 SA508 Gr.1a의 평형 상태도를 나타내고 있다.
- SA508 Gr.3 Cl.1와 같이 그림 IV-42로부터 열역학적으로 안정한 탄화물은 MC, M₂C, M₇C₃, ξ-carbide와 시멘타이트(M₃C)임을 알 수 있다.
- 그림 121로부터 Ae₁과 Ae₃는 각각 694°C와 810°C이다.

- CCT 선도 예측

- 그림 122는 SA508 Gr.1a의 CCT 선도를 나타내고 있다.
- 그림 122로부터 결정립 크기가 작아질수록 동일 냉각률에서 석출시간이 단축됨을 알 수 있다.

- 석출 상 및 상 분율 예측

- 그림 123은 용융선으로부터의 거리에 따른 각 석출상의 분율을 나타내고 있다.
- 그림 123에서 보이는 바와 같이 HAZ부 전 영역에 걸쳐서 페라이트와 베이나이트가 석출되어지며 FGHAZ부와 CGHAZ부에 대해 각각 페라이트와 베이나이트가 대부분을 차지함을 알 수 있다

- 경도 및 기계적 강도 예측

- 그림 124는 용융선으로부터의 거리에 따른 비이커스 경도를 나타내고 있다.
- 그림 125는 용융선으로부터의 거리에 따른 인장강도를 나타내고 있다.
- 그림 124, 125에서 보이는 바와 같이 FGHAZ부에서 비이커스 경도와 인장강도가 가장 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 인장강도 측면에서 가장 취약한 부위는 용융선으로부터 2~3mm 떨어진 부위임을 알 수 있다.

○ SS316

- SS316은 오스테나이트 단상 조직이므로 마르텐사이트 변태에 의한 변태 소성이 발생하지 않기 때문에 잔류응력 해석시 상변태 변형률을 고려할 필요가 없다.
- 따라서 본 연구에서는 석출 탄화물 및 상의 분율을 상세하게 예측하지 않고 Thermo-Calc를 이용하여 평형상태 하에서 석출되는 탄화물 및 상의 종류를 온도 범위에 따라 확인하고자 한다.

- 평형 상태도

- 그림 126은 SS316에 대한 평형 상태도를 나타내고 있다.
- 그림 126을 살펴보면 전 온도구간에 걸쳐서 오스테나이트 단상조직이며 약 980°C 근방에서부터 M₂₃C₆의 탄화물이 석출되기 시작한다.
- 또한, 약 800°C 부근에서 시그마 상이 석출되어 상온으로 갈수록 석출되는 양이 더욱 커지고 있다.
- 이러한 탄화물과 시그마 상은 Cr이 농축된 상이므로 석출상 주변의 Cr원자를 고갈시켜 부식 특성을 크게 저하시키므로 용접부 부식 및 응력부식균열 평가시 상세한 금속조직 변화 예측이 필요하다.

○ Inconel 82

- Inconel 82는 오스테나이트 단상조직이므로 마르텐사이트 변태에 의한 변태 소성이 발생하지 않기 때문에 잔류응력 해석시 상변태 변형률을 고려할 필요가 없다.
- 따라서 본 연구에서는 석출 탄화물 및 상의 분율을 상세하게 예측하지 않고 Thermo-Calc를 이용하여 평형상태하에서 석출되는 탄화물 및 상의 종류를 온도 범위에 따라 확인하고자 한다.
- 평형 상태도a
 - 그림 127은 Inconel 82에 대한 평형 상태도를 나타내고 있다.
 - 그림 127을 살펴보면 전 온도구간에 걸쳐 오스테나이트와 극히 소량의 석출물로 이루어져 있다.
 - 대표적인 생성가능한 석출물로는 M_2C 탄화물과 시그마 상이 있으며, M_2C 형태의 탄화물은 약 900℃ 근방에서, 시그마 상은 약 380℃부근에서 석출되기 시작한다.
 - 이런 유형의 석출물은 부식특성을 크게 저하시키나, 앞에서 살펴본 오스테나이트계 스테인리스강의 경우 보다 석출될 수 있는 양이 극히 적다

2) 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부

- SS304는 SS316과 동일하게 용접과정 동안 지속적으로 오스테나이트 상을 유지하기 때문에 탄화물 석출을 확인하기 위해 Thermo-Calc를 이용 평형 상태도를 결정하였다.
- 그림 128은 SS304에 대하여 온도에 따른 평형 상의 분율 변화를 나타낸 것이다.
- 냉각이 진행될수록 1000℃ 근방에서 $M_{23}C_6$ 형태의 탄화물이 석출되기 시작하며 약 800℃부터 Sigma 상이 석출되기 시작한다.

3) 원자로 압력용기 원주방향 용접부

2차년도에서 수행한 금속조직 변화/기계적 물성 저하 예측기술 검증 보완 분야에서 제시한 내용과 동일하다.

마. 잔류응력 해석

이종재 용접부, 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부 및 원자로 압력용기 원주방향 용접부에 대한 온도분포/금속조직 예측결과, UMAT 및 ABAQUS를 이용하여 잔류응력 해석이 다음과 같이 수행되어졌다.

1) 이종재 용접부

○ 경계조건

- 용접동안에는 양단이 양방향 모두 고정되어있다고 설정하였다.
- 상온으로 냉각되어지고 후열처리되어질 때 양단 free한 상태로 설정하였다.

○ 잔류응력 해석결과

- 재료거동 구성방정식은 어닐링/상변태 변형률을 고려한 열탄소성 거동 방정식을 이용하였다.
- 그림 129는 횡방향 및 축방향 잔류응력 분포를 보여주고 있다.
- 그림 129로부터 횡방향 및 축방향 잔류응력 분포 모두 bending 형태이며 횡방향 잔류응력의 경우 위쪽면 버터링과 SA508 Gr.1a 열영향부에서 최대 인장응력이 작용함을 알 수 있다.
- 또한, 축방향 잔류응력의 경우 Inconel 82 용착금속부는 양쪽(안전단, SA508 Gr.1a) 보다 작은 응력이 작용하며 SA508 Gr.1a 열영향부에서 최대 응력이 작용됨을 알 수 있다.
- 그림 130은 그림 IV-35상의 용접 toe line들 A-A', B-B', C-C', D-D'와 E-E'에 따른 횡방향(x축 방향) 잔류응력 분포를 제시하고 있다.
- 그림 130에서 보는 바와 같이 C-C' 선을 제외하고 전반적으로 용접 toe line에서의 횡방향 잔류응력은 bending 형태[93]임을 알 수 있다.
- 또한, SA508 Gr.1a와 버터링 사이의 용접 toe line인 E-E' 선의 위쪽 면에 최대 횡방향 잔류응력이 발생됨을 알 수 있다. 즉, SA508 Gr.1a와 버터링 사이의 용접 toe line에서 균열 발생 잠재성이 가장 높다고 판단되어진다.

2) 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부

○ 경계조건

- 축대칭이므로 중심 용접선을 따라 롤러(중심용접선에 수직 방향) 구속조건을 설정

○ 잔류응력 해석결과

- 잔류응력 해석을 위해 사용한 재료거동 구성 방정식은 두 해석 모두 열탄소성 거동 방정식을 사용하였다.(상변태 변형률은 고려 불필요)
- 그림 131은 A 해석 경우의 축방향 및 원환 잔류응력 분포를 보여주고 있다.
- 그림 131로부터 축방향 및 원환 잔류응력 모두 bending 형태[93]이며 원환 잔류응력이

축방향 잔류응력보다 크게 작용됨을 알 수 있다.

- 특히, 원환 잔류응력의 경우 항복강도(278MPa)를 초과한다. 따라서 이러한 스테인리스 강 배관의 수환경이 적절히 관리되지 못한다면 응력부식균열이 발생할 수 있음을 보여준다.
- 그림 132와 133은 A 해석과 B 해석에서 수행한 결과를 나타내고 있다. 이들 결과를 비교하여 보면 분포 양상은 동일하나 그 정량적 값의 크기에 있어서는 차이가 존재한다.
- 정량적 값에서 차이가 발생한 이유는 열적 경계조건 결정시 용접 열유속 고려 차이에 기인한다고 생각되어진다.

3) 원자로 압력용기 원주방향 용접부

- 그림 134는 축 방향과 원환 방향 잔류응력 분포이며 그림 134로부터 잔류응력 분포는 bending 형태가 아닌 self-equilibrating 형태[93]임을 알 수 있다.
- 그림 135는 용접 중심선으로부터의 거리에 따른 원자로 내외면의 원환 잔류응력 분포를 나타낸 것으로 열영향부의 매우 좁은 영역내에서 매우 급격한 변화가 발생하며 작은 크기의 최대 응력이 모재에 가까운 열영향부에서 발생함을 알 수 있다.

바. 결론

상변태 변형률과 어닐링 변형률을 고려하기 위한 용접 재료거동 사용자 정의 보조 프로그램 개발 및 스테인리스 강 배관/원자로 압력용기/이종재 용접부 잔류응력 해석을 통해 다음 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- 기존 연구결과와 잘 일치하는 어닐링/상변태 변형률 고려 사용자 정의 보조 프로그램을 개발하였다.
- 어닐링 변형률을 고려함으로써 유한요소 해석시 실제 현상과는 다르게 과도한 변형이 발생되는 것을 방지할 수 있었다.
- 상변태 변형률을 고려함으로써 마르텐사이트 변태에 의한 열영향부내 국부적 영역에서 압축응력이 작용하는 것을 모사할 수 있었으며 상변태 변형률 미고려 경우보다 덜 보수적인 건전성평가 결과를 얻었다.
- 개발된 잔류응력 해석기술을 적용하여 이종재 용접부, 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부 및 원자로 압력용기 원주방향 용접부에 대한 잔류응력 분포를 결정하였으며 측정 및 기존 연구결과와의 비교를 통해 개발기술의 타당성을 검증할 것이다.

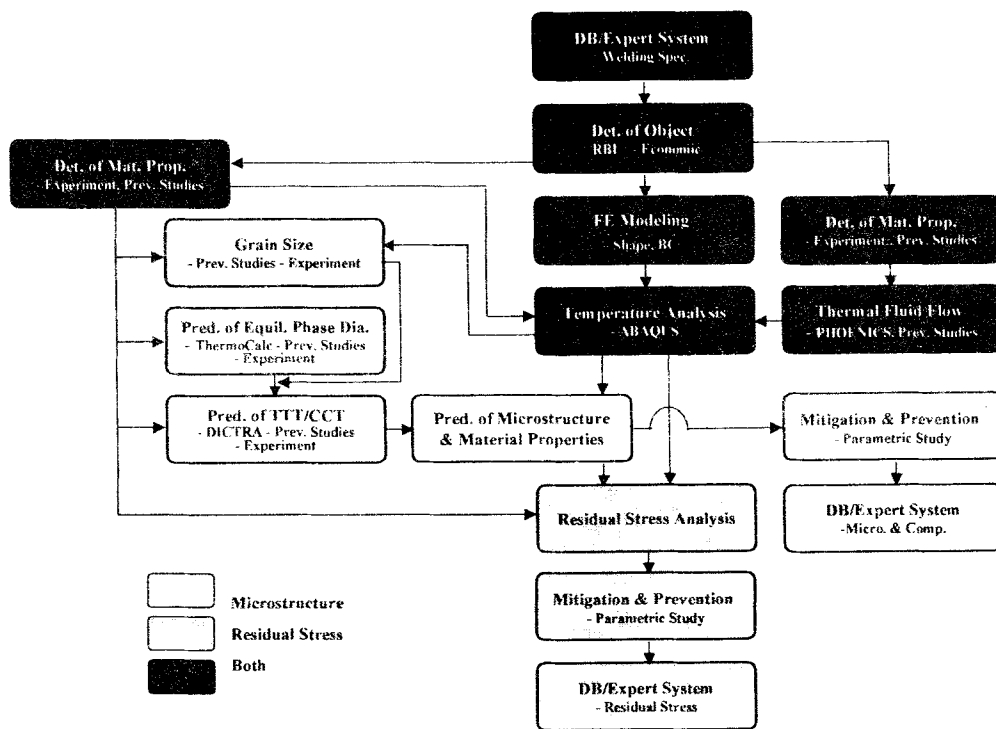


그림 105. 용접 잔류응력에 대한 상세 해석 절차

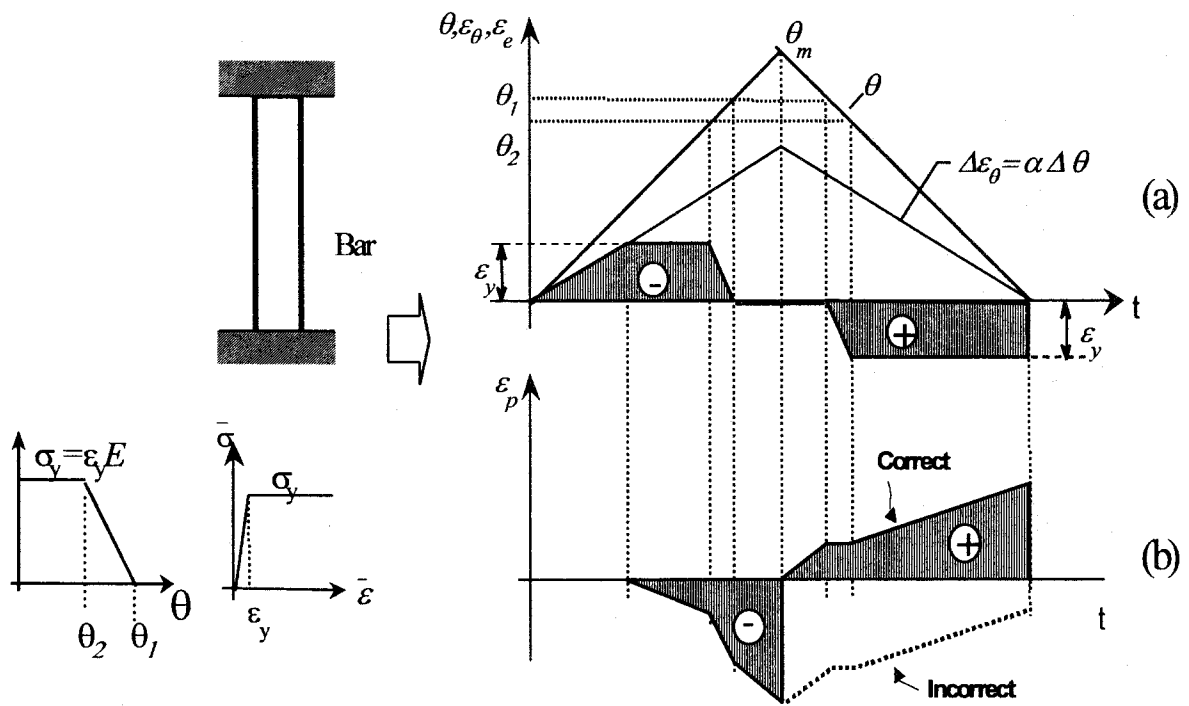


그림 106. 열탄소성 1차원 문제에 대한 도식적 해

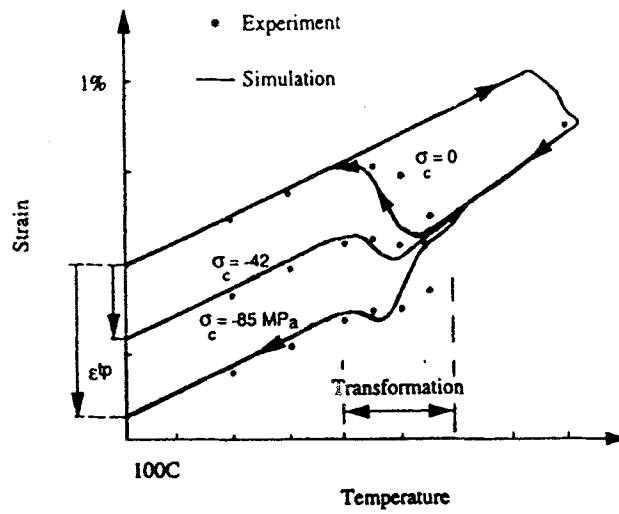


그림 107. 변태 소성 변형률의 개념

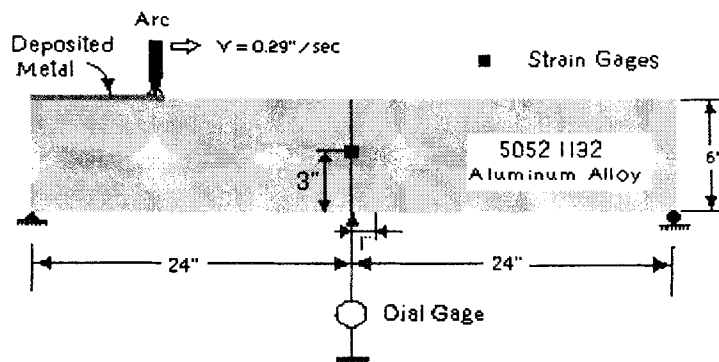


그림 108. 어닐링 변형률 고려 사용자 정의 보조 프로그램 타당성 검증 모델

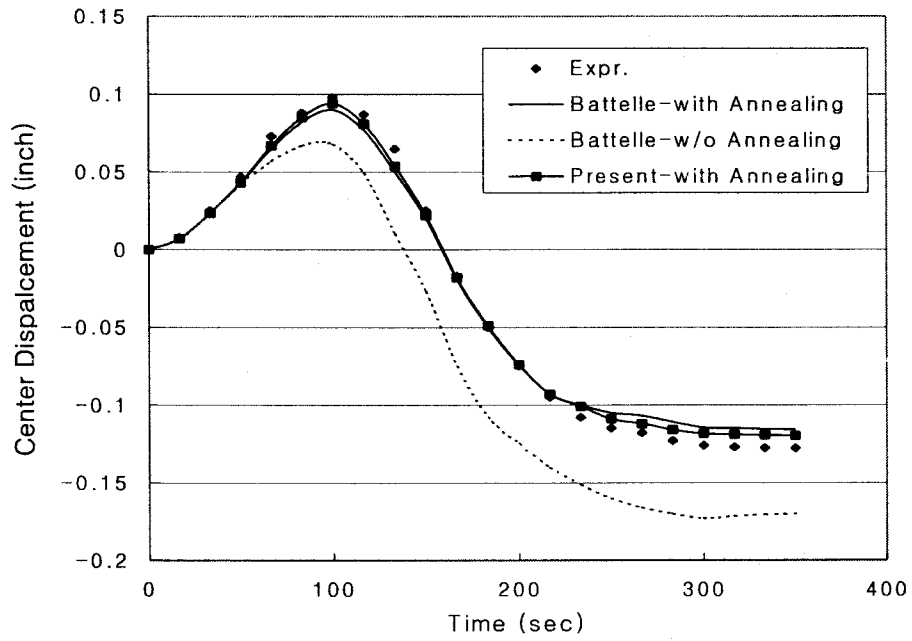


그림 109. 중심부 변위 분포에 대한 기존 연구결과와의 비교

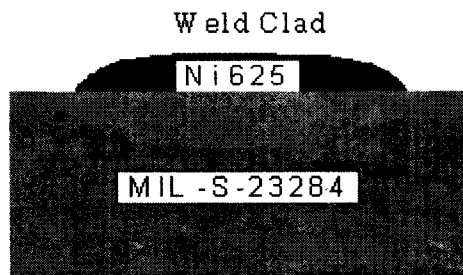


그림 110. 상변태 변형을 고려 사용자 정의 보조 프로그램 타당성 검증 모델

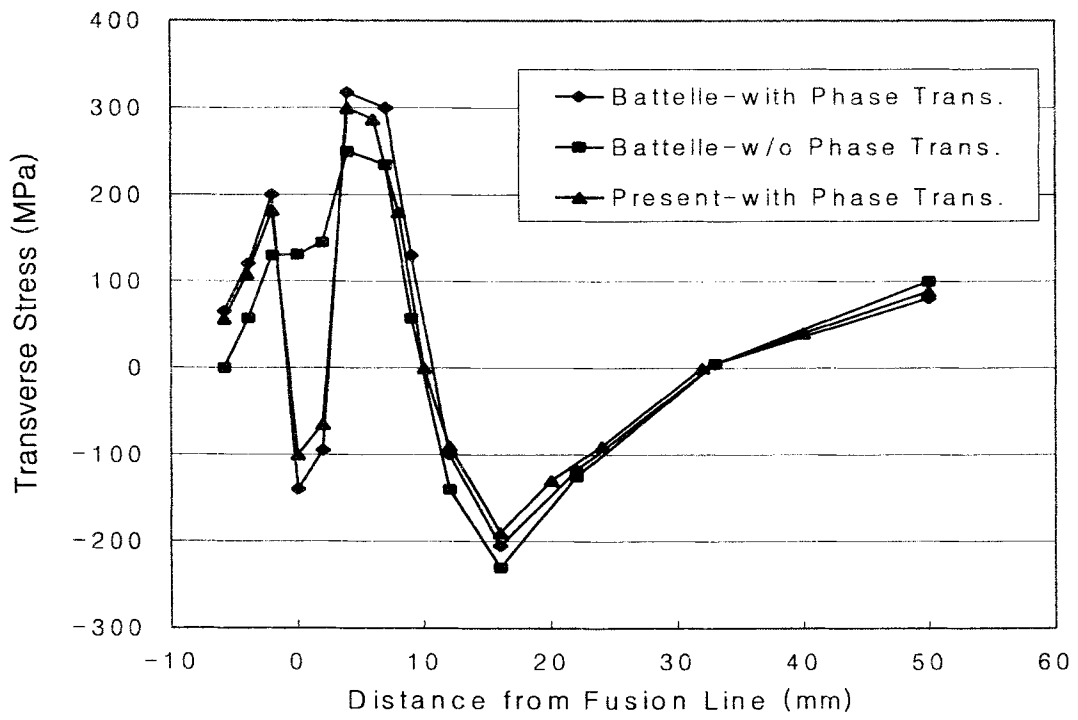


그림 111. 횡방향 잔류응력 분포에 대한 기존 연구결과와의 비교

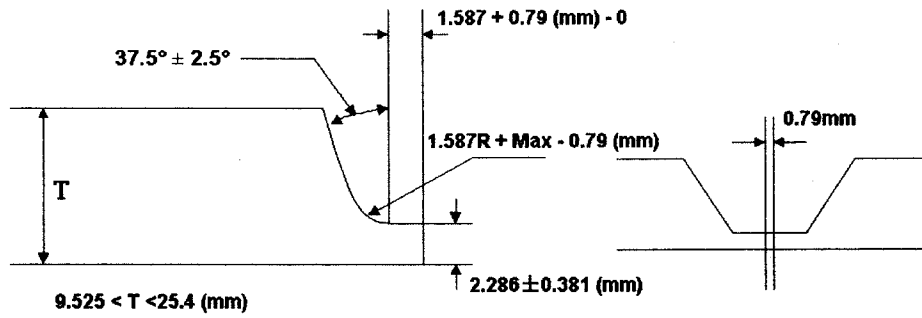
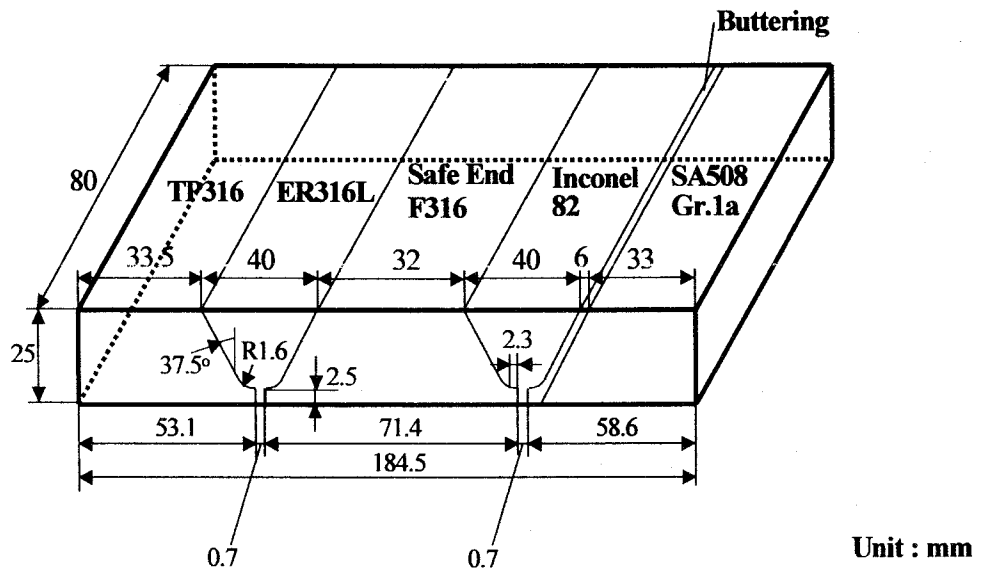
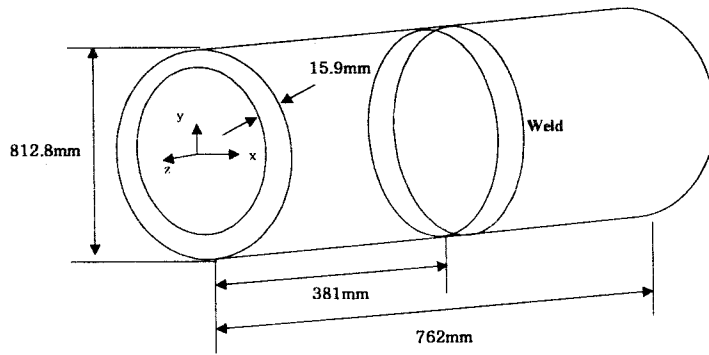
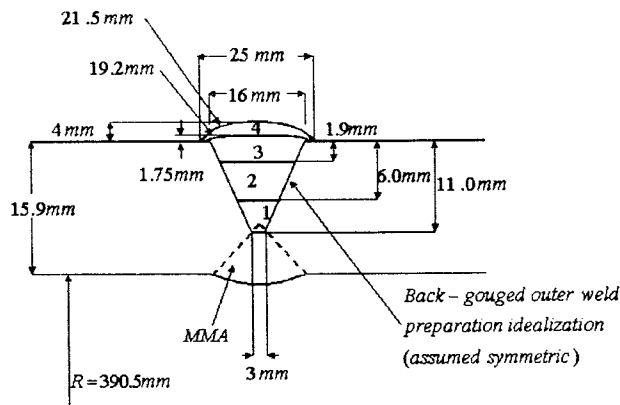


그림 112. 이중재 용접부

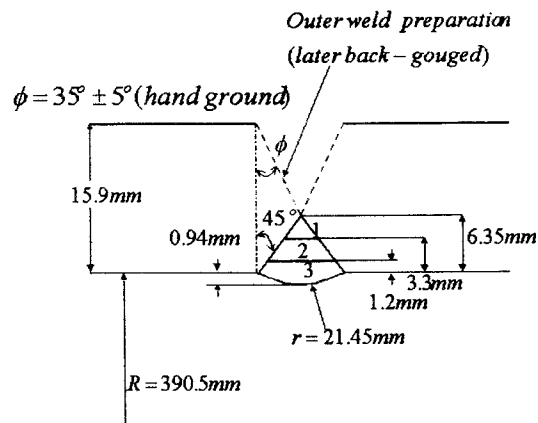


(a) 스테인리스 강 배관



Outer SAW : 4 Passes

(b) 외경 용접부



MMA Inner Weld : 3 Passes

(c) 내경 용접부

그림 113. 스테인리스 강 원주방향 용접부

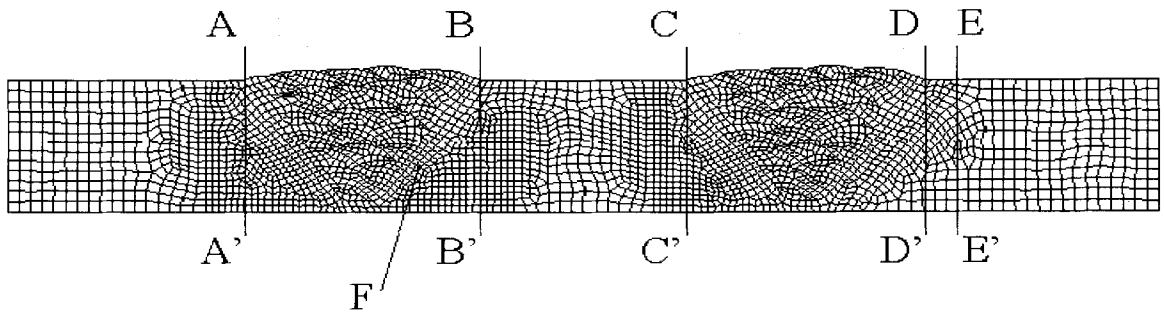
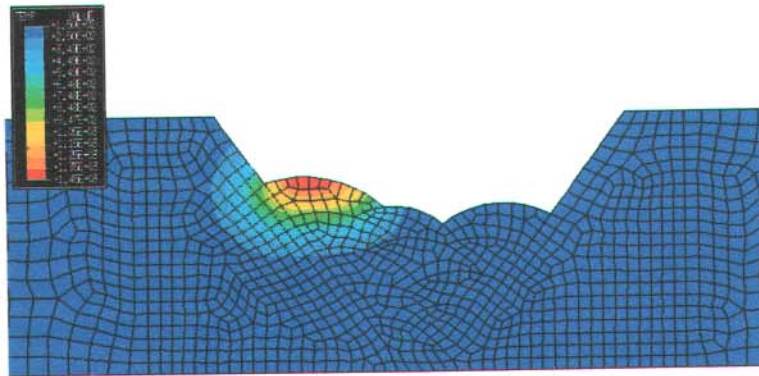
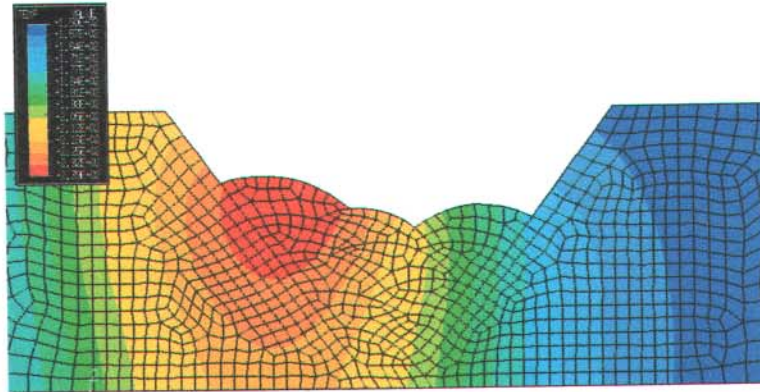


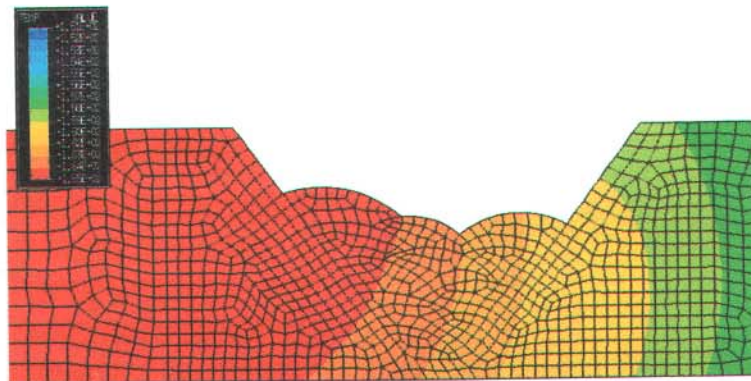
그림 114. 이중 용접부에 대한 유한요소 모델



(a) 0.844초 경과

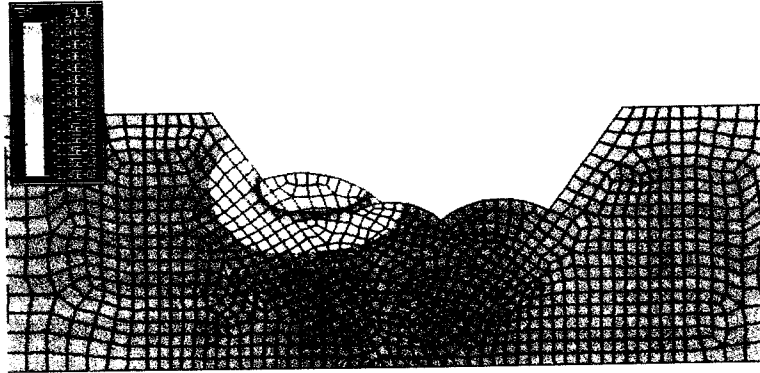


(b) 37초 경과

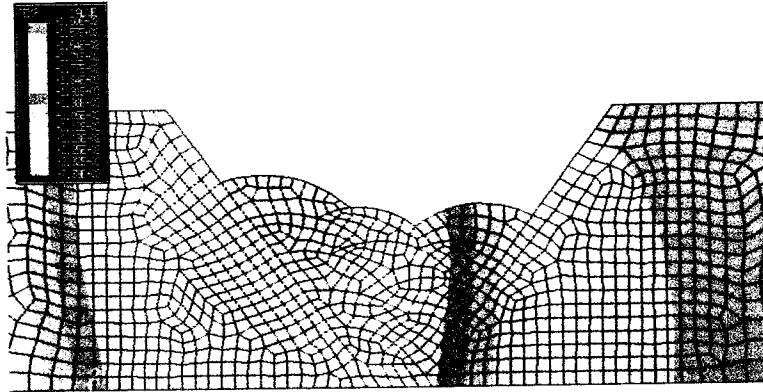


(c) 397초 경과

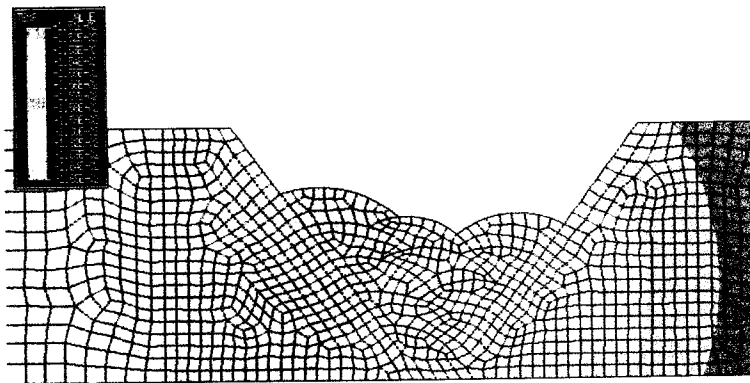
그림 115. 안전단-TP 316 용접부의 용접 패스 11 용착후 시간에 따른 온도분포



(a) 0.844초 경과



(b) 37초 경과



(c) 397초 경과

그림 115. 안전단-TP 316 용접부의 용접 패스 11 용착후 시간에 따른 온도분포

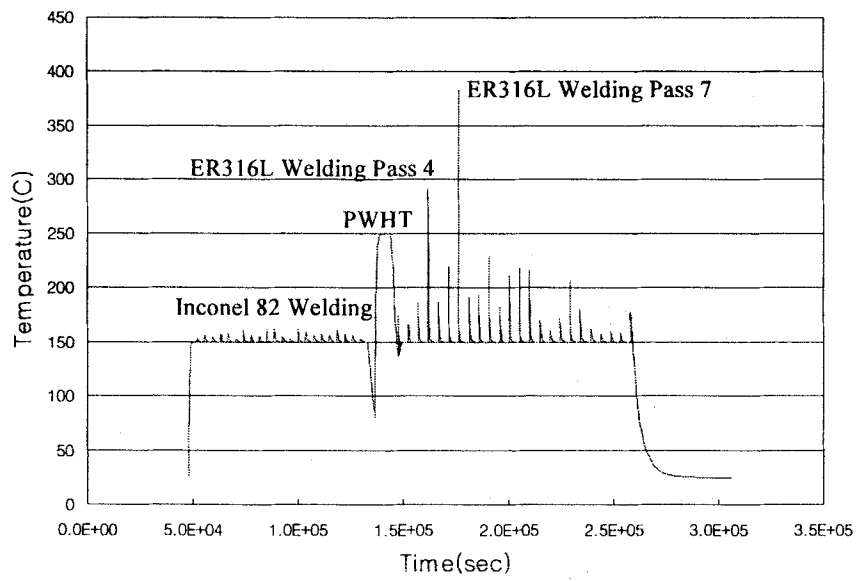
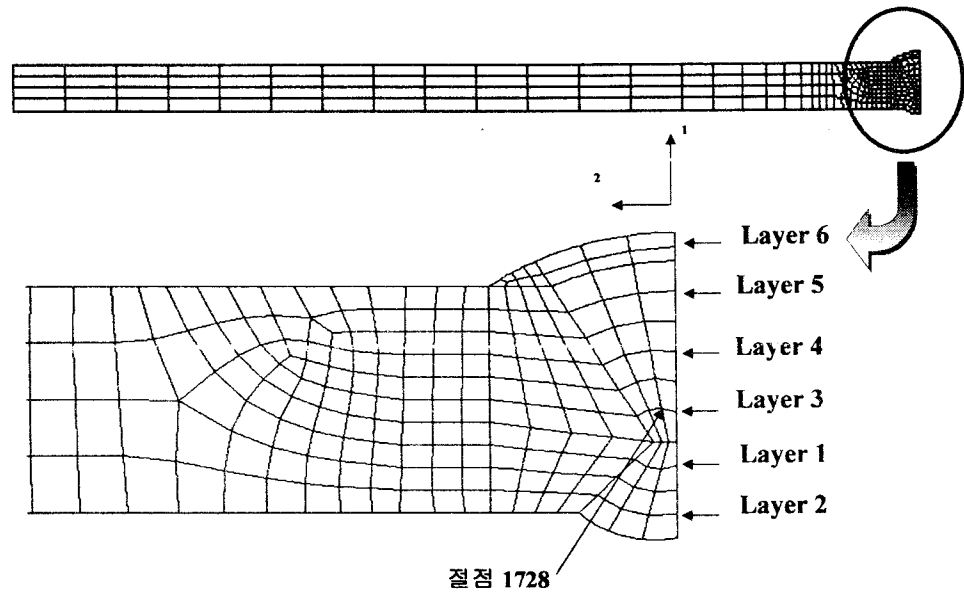
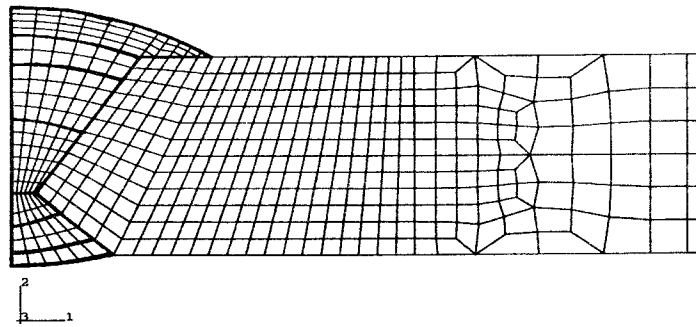


그림 116. 시간에 따른 열영향부 F지점에서의 온도 변화

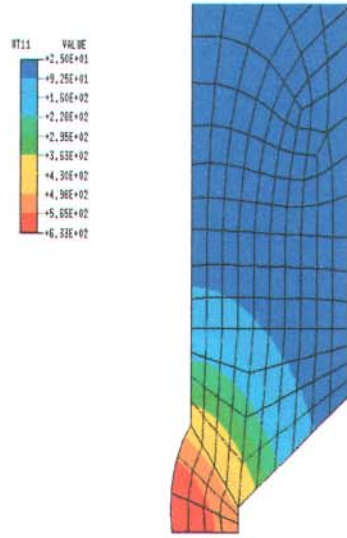


(a) A 해석 (축대칭 8절점 요소)

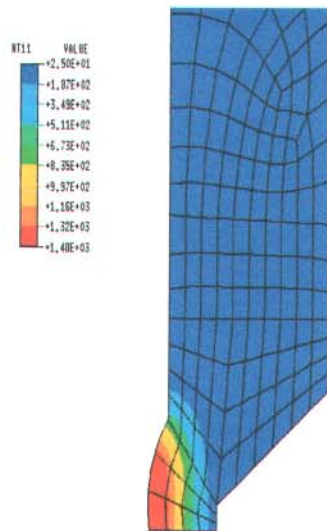


(b) B 해석 (축대칭 4절점 요소)

그림 117. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 유한요소 모델

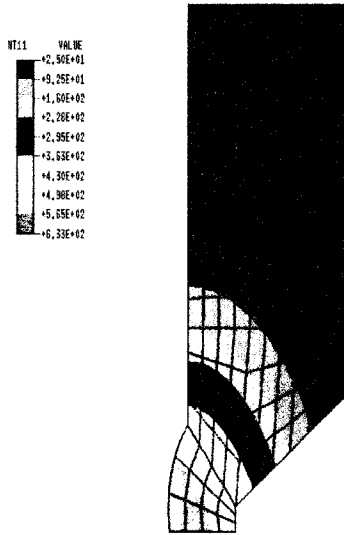


(a) Layer 2 용착 후 0.388초 경과

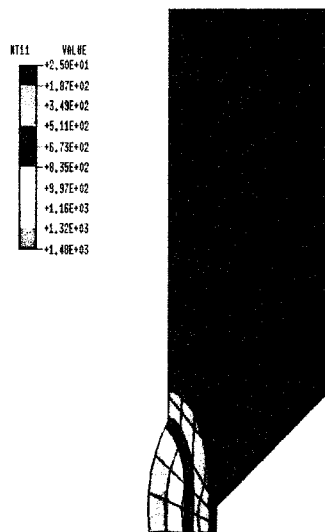


(b) Layer 2 용착 후 4.45초 경과

그림 118. A 해석의 온도분포



(a) Layer 2 용착 후 0.388초 경과



(b) Layer 2 용착 후 4.45초 경과

그림 118. A 해석의 온도분포

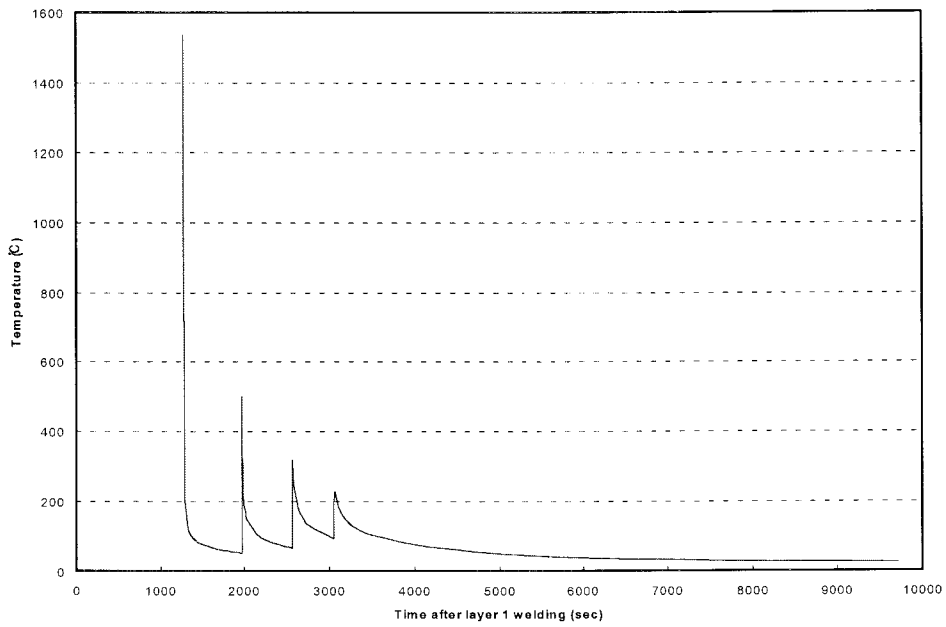


그림 119. 시간에 따른 결점 1728에서의 온도 변화

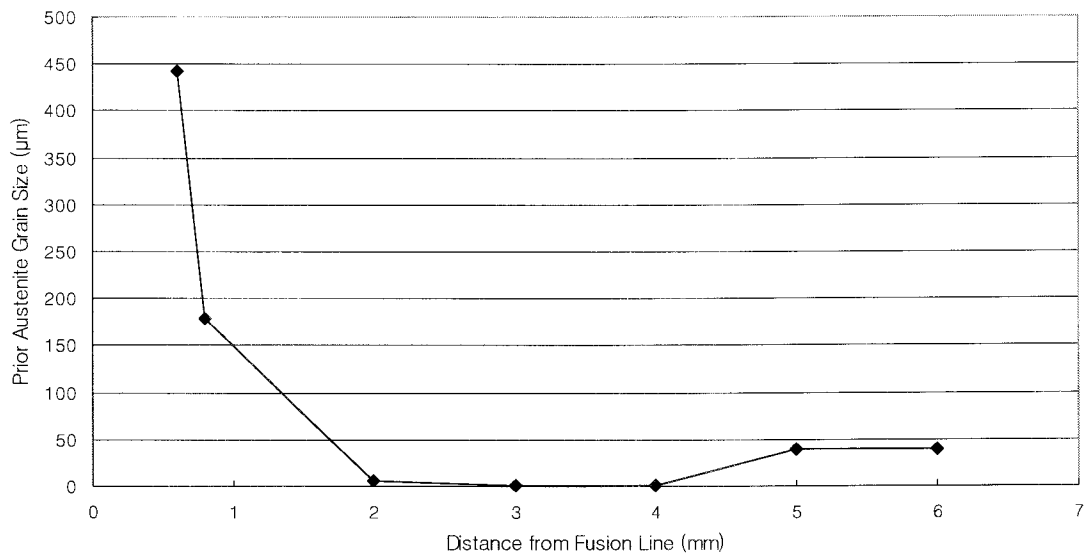


그림 120. 용융선으로부터의 거리에 따른 SA508 Gr.1a 열영향부의 prior 오스테나이트 결정립 크기

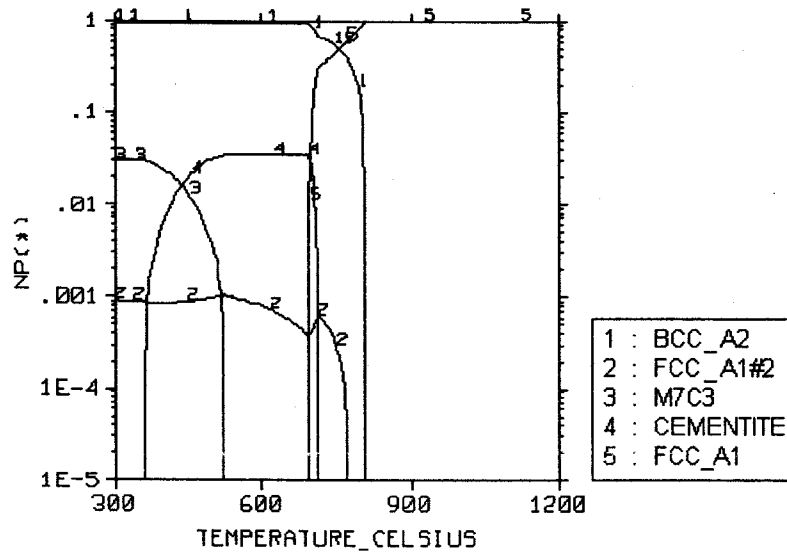


그림 121. SA508 Gr.1a의 평형 상태도

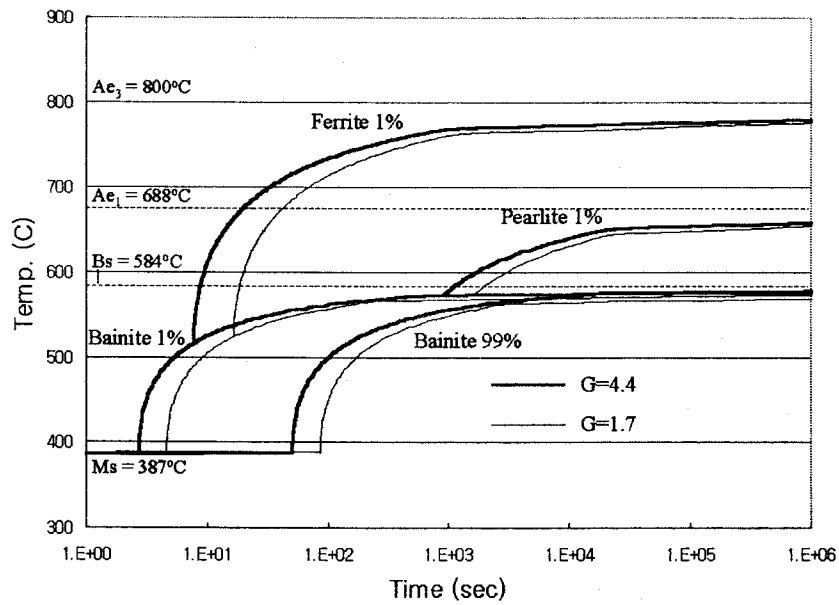


그림 122. SA508 Gr.1a의 CCT 선도

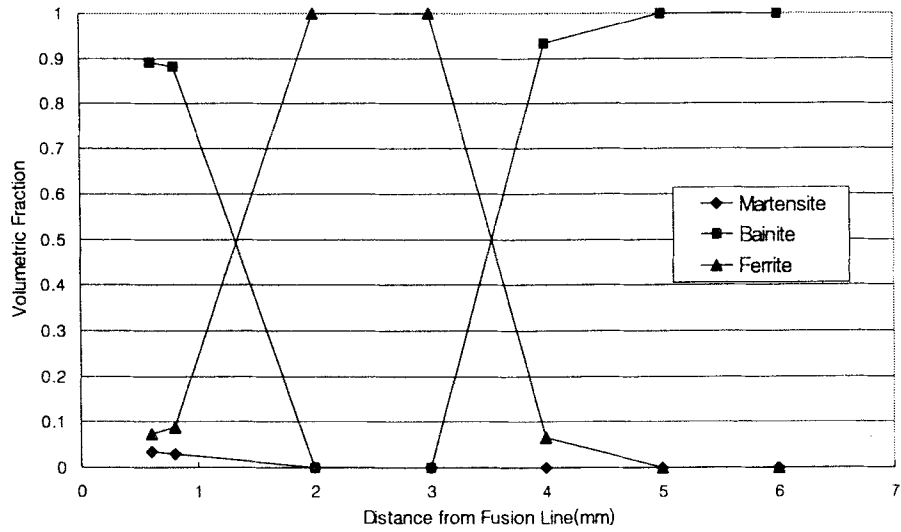


그림 123. 용융선으로부터의 거리에 따른 SA508 Gr.1a 열영향부의 석출 상 분율

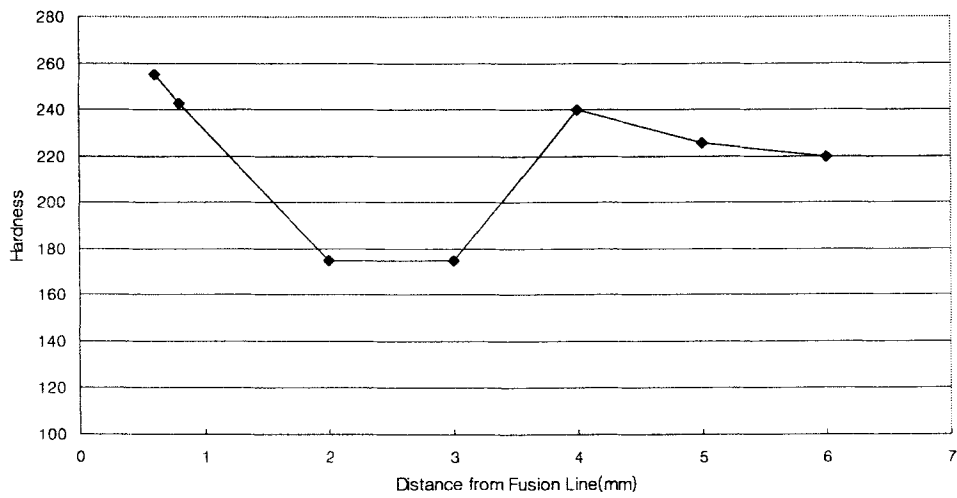


그림 124. 용융선으로부터의 거리에 따른 SA508 Gr.1a 열영향부의 경도

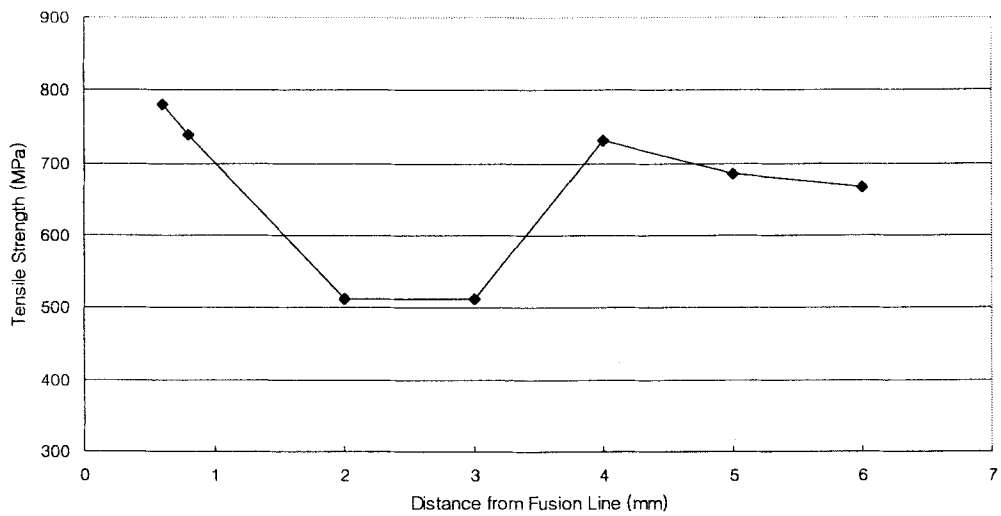


그림 125. 용융선으로부터의 거리에 따른 SA508 Gr.1a 열영향부의 인장강도

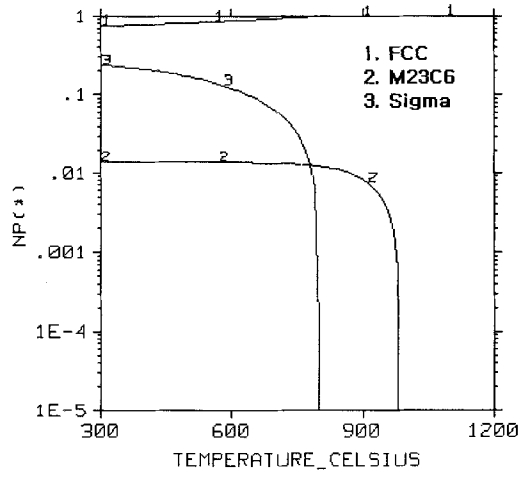


그림 126. SS316의 평형 상태도

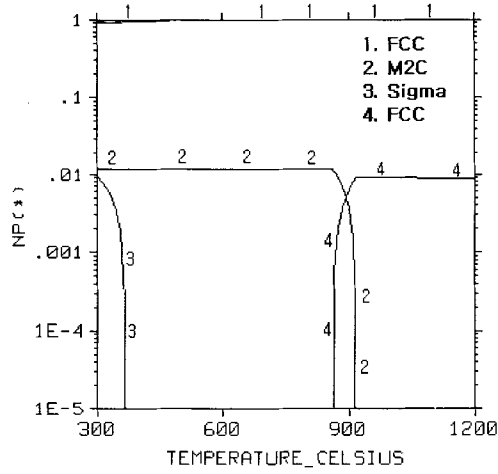


그림 127. Inconel 82의 평형 상태도

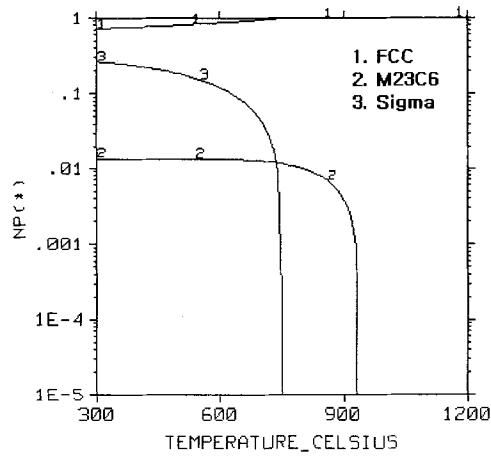
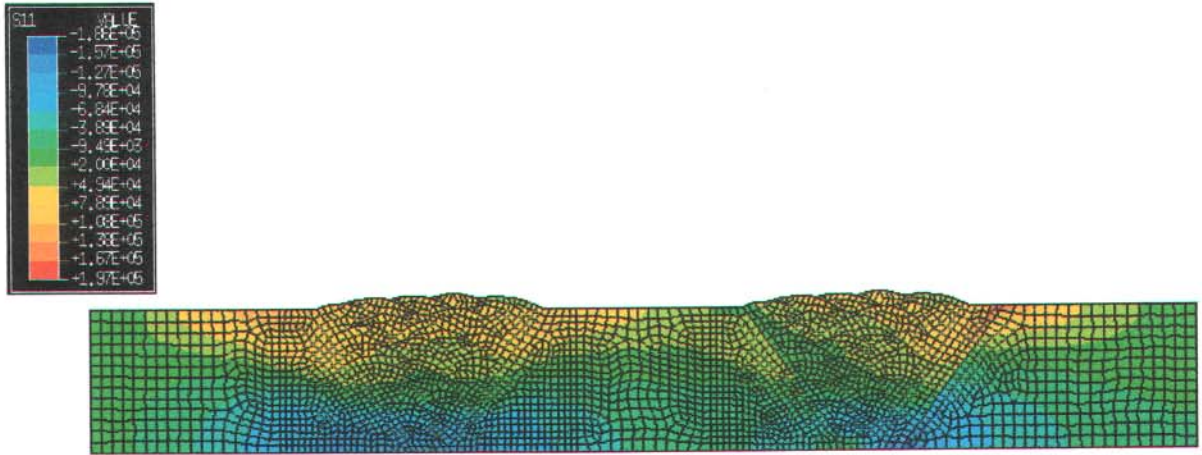
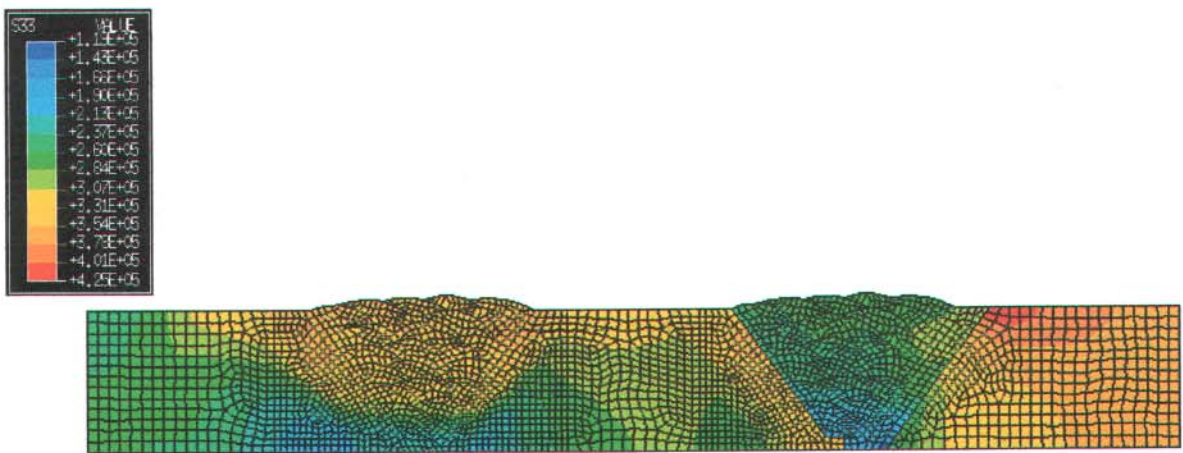


그림 128. SS 304의 평형상태도

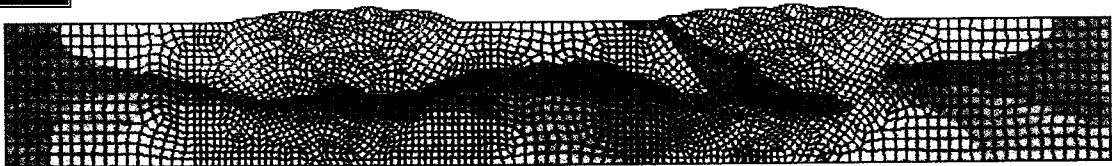
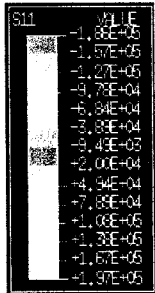


(a) 횡방향 잔류응력

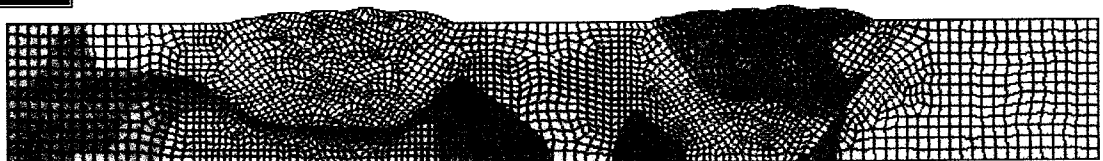
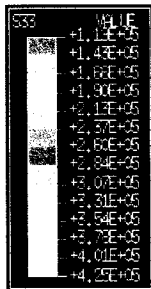


(b) 축방향 잔류응력

그림 129. 이중재 용접부의 잔류응력 분포



(a) 횡방향 잔류응력



(b) 축방향 잔류응력

그림 129. 이중재 용접부의 잔류응력 분포

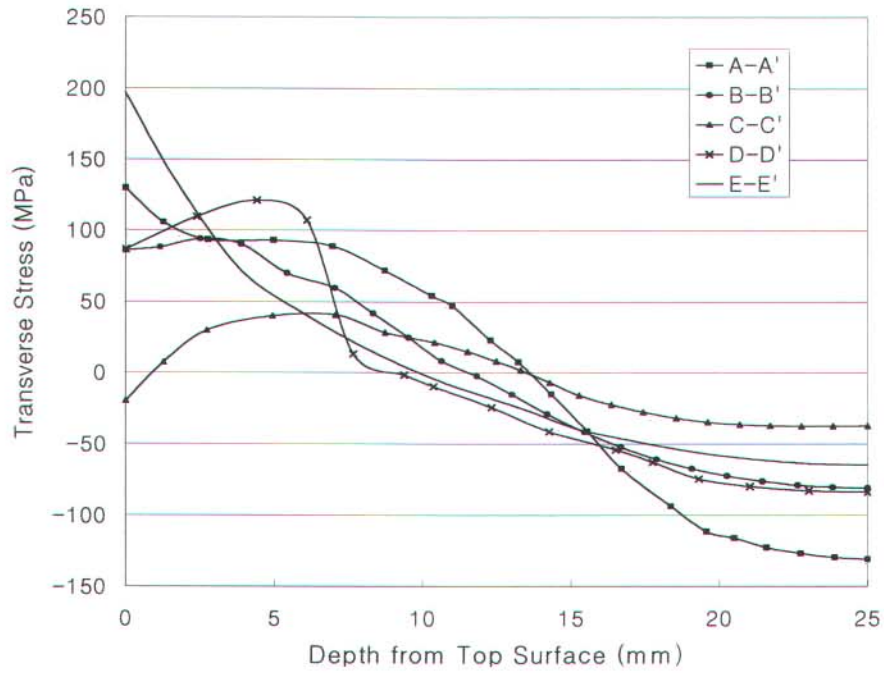


그림 130. 용접 toe line들을 따른 횡방향 잔류응력 분포

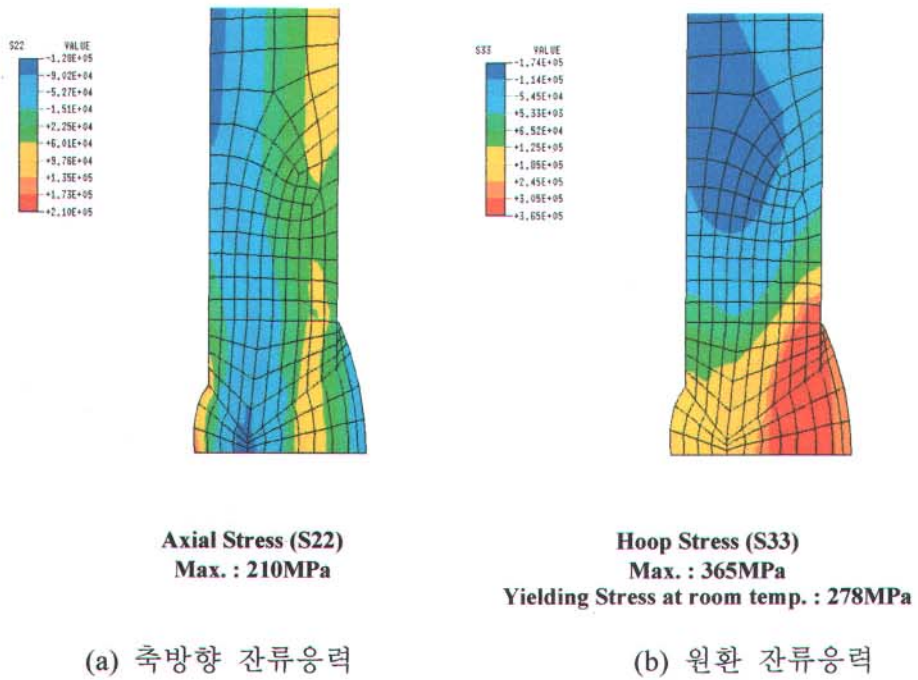


그림 131. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부의 잔류응력 분포

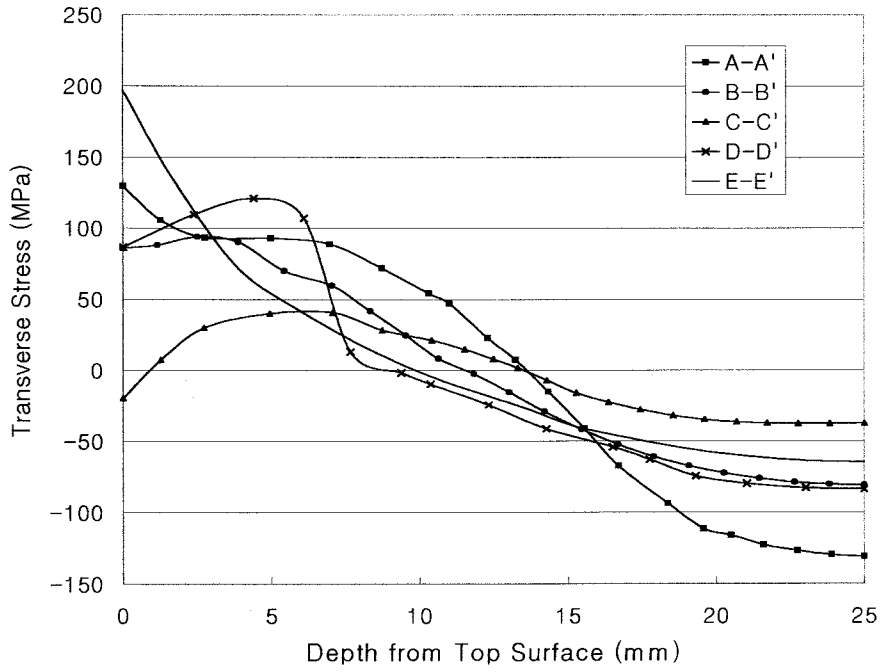


그림 130. 용접 toe line들을 따른 횡방향 잔류응력 분포

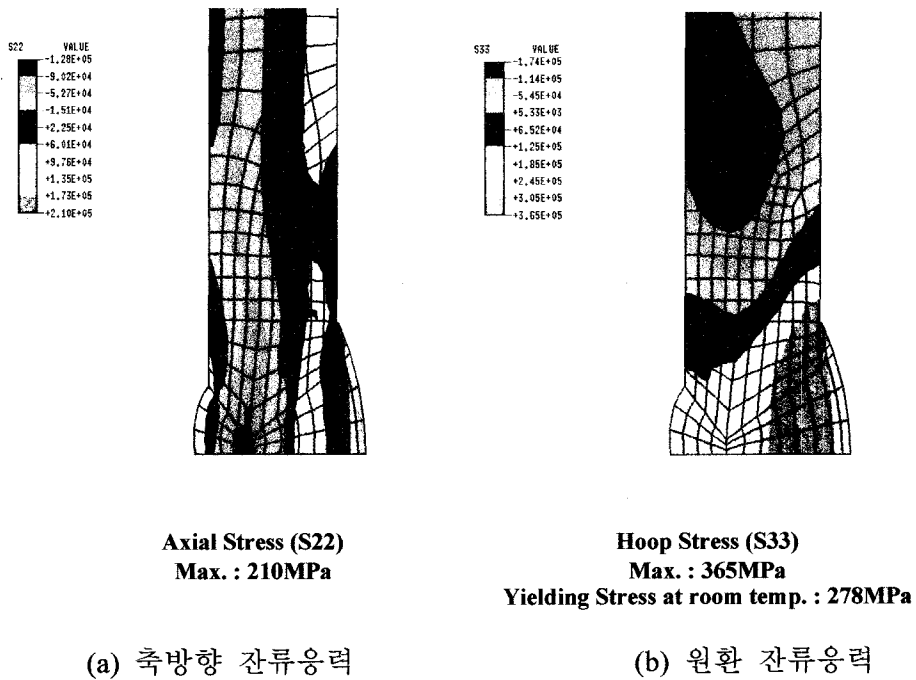
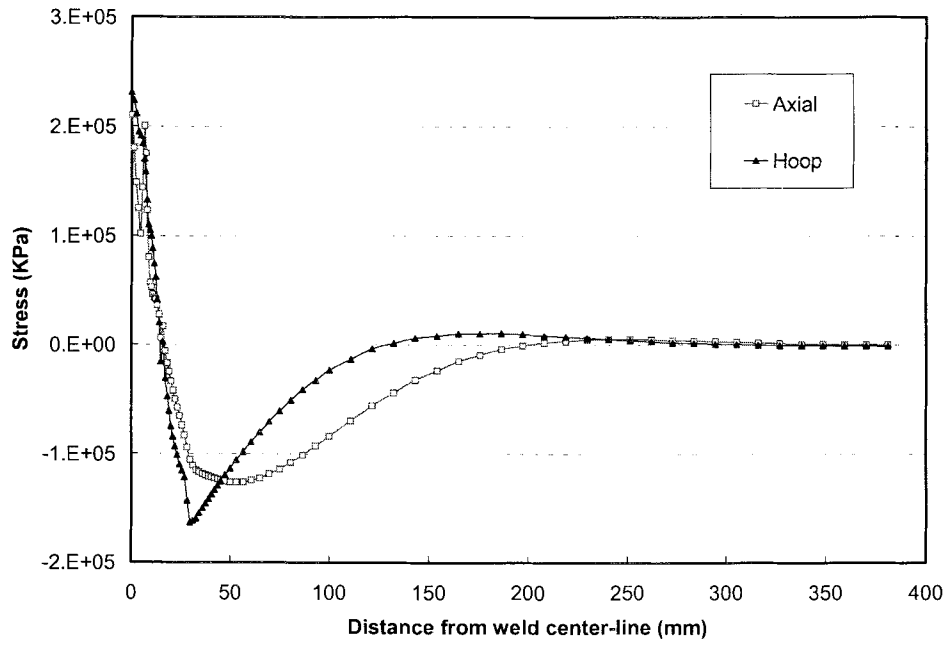
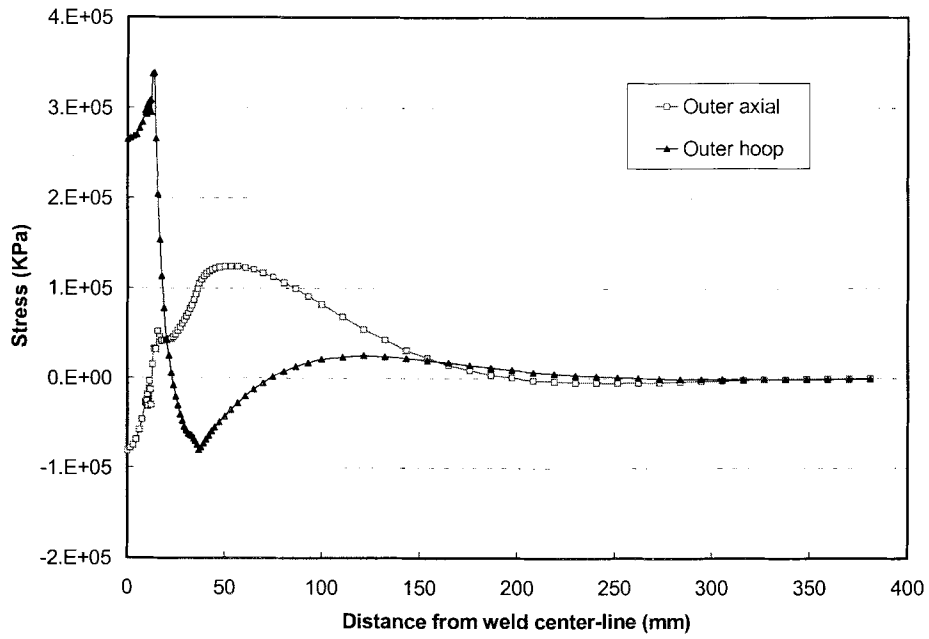


그림 131. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부의 잔류응력 분포

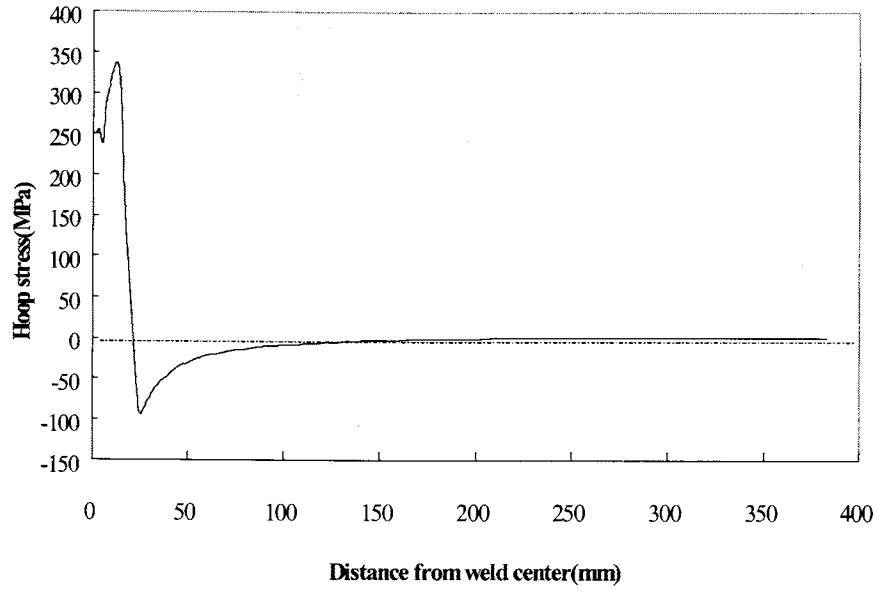


(a) 내면 축방향 및 원환 응력

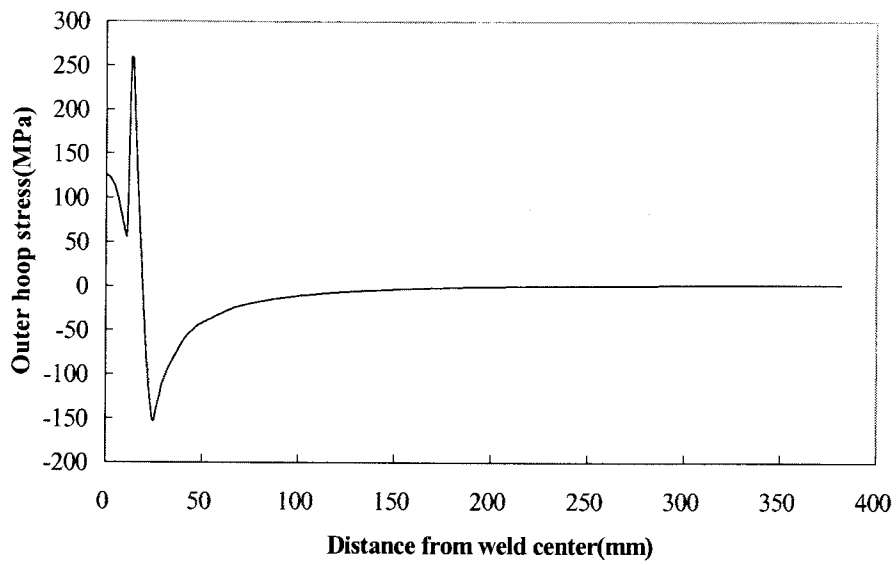


(b) 외면 축방향 및 원환 응력

그림 132. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 A 해석의 잔류응력 분포

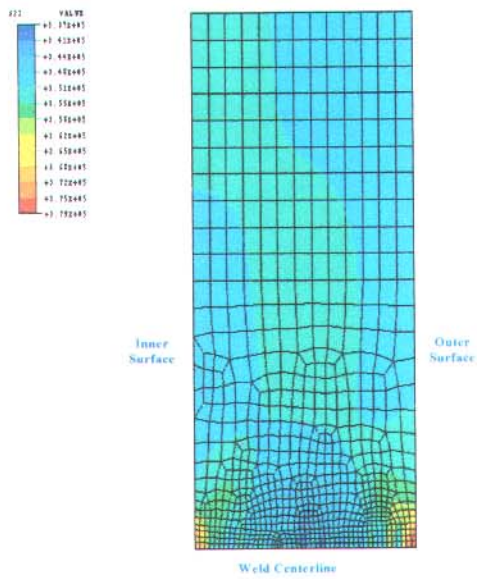


(a) 내면 원환 응력

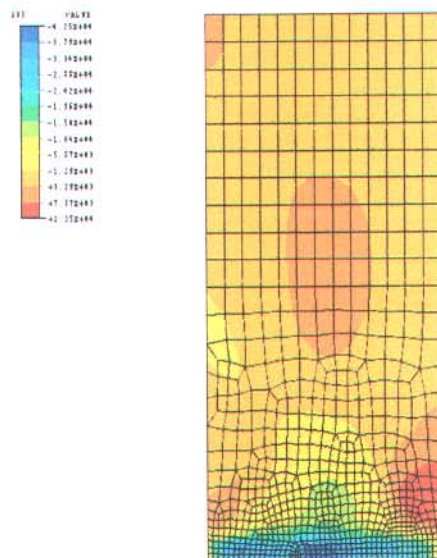


(b) 외면 원환 응력

그림 133. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 B 해석의 잔류응력 분포

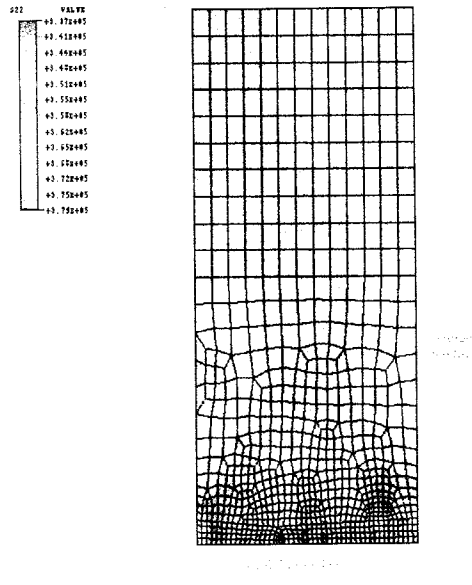


(a) 축 방향

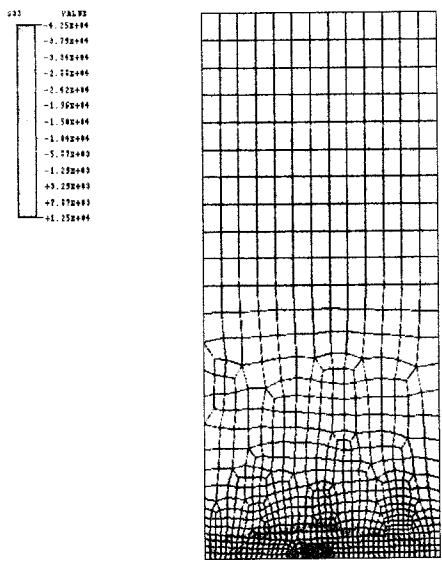


(b) 원환 방향

그림 134. 원자로 압력용기 원주방향 용접부의 잔류응력 분포



(a) 축 방향



(b) 원환 방향

그림 134. 원자로 압력용기 원주방향 용접부의 잔류응력 분포

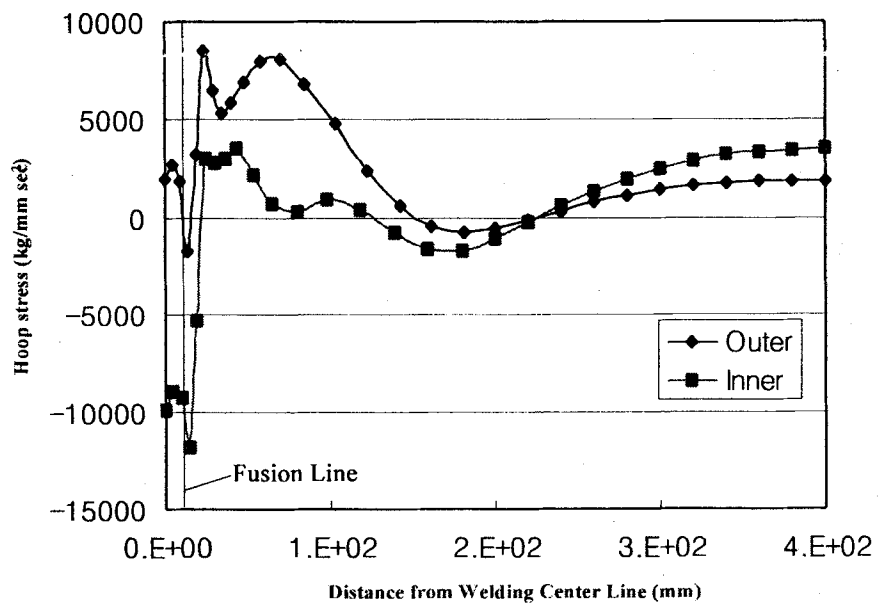


그림 135. 용접 중심선으로부터의 거리에 따른 원자로 내외면의 원환 잔류응력 분포

6. 잔류응력 해석기술 검증 보완 및 완화방안 도출

가. 잔류응력 검증 보완

본 연구에서는 개발된 잔류응력 해석기술에 대한 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행하고 기존 연구결과들과 비교 검토하고자 한다.

1) 잔류응력 측정 실험

이종재 용접부에 대한 잔류응력 분포를 위탁실험을 통해 중성자 회절법과 hole drilling 방법으로 측정하고자 한다.

가) 중성자 회절을 이용한 잔류응력 측정

중성자 회절을 이용한 잔류응력 측정 원리, 장점, 변형률/응력 계산식 및 측정 절차를 제시하고 이종 용접부에 대한 측정결과를 제시하고자 한다.

(1) 측정 원리

- 그림 136과 같은 중성자 빔의 높은 투과력을 이용해서 다결정조직을 갖는 물체 내부에 분포하는 잔류응력을 측정
- 다결정의 금속재료가 균일한 변형을 갖도록 탄성적으로 변형이 일어나면 결정립을 이루고 있는 격자면의 면간거리는 응력이 없는 상태의 값에서 이에 상당하는 새로운 값을 갖는다.
- 이 새로운 면간거리는 본질적으로 응력에 대해 동일한 방향을 갖는 각 면들에 대해서 일정한 값을 갖는다. 따라서 중성자 회절을 이용한 잔류응력의 측정은 이 결정들의 면간거리를 측정함으로써 가능하게 된다.
- 균일 변형률을 갖는 회절선에서 회절선의 이동으로 변형률이 계산되며 변형률을 알면 기계적으로 측정된 재료의 탄성계수를 이용한 계산이나 보정작업을 통하여 응력을 결정할 수 있다.

(2) 장점

- 중성자는 전기적으로 중성을 나타내고 있기 때문에 물질과의 반응이 약해서 침투력이 X선에 비해 강하다.
- 중성자의 회절 단면이 회절각의 증가에 따라 감소하지 않는 성질 때문에 분해능이 좋은 큰 회절각을 선택할 수 있다.
- X선과 달리 중성자의 회절 강도가 원자번호에 대해 불규칙하기 변하기 때문에 중금속과 경금속이 존재하는 재료에 대해서 X선의 경우 원소의 Peak를 얻기가 매우 어려운 반면

중성자의 경우에는 두 가지 Peak를 모두 얻을 수 있다

(3) 변형률 및 응력 계산식

- 정상상태 중성자의 경우 Peak의 모양은 확실한 Gaussian의 형태를 갖는다.

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (49)$$

여기서 λ 는 X-ray 빔 파장, θ 는 회절각, d 는 결정면간 거리, n 은 상수이다.

- 중성자 회절을 이용한 측정방법에서 변형률은 아래 그림과 같이 입사빔과 회절빔이 교차하는 영역에서 산란벡터의 방향에 의해서 결정되어지며 Bragg's Law 식을 만족시키기 위해서 결정의 면간거리 d 는 변형율을 구하기 위한 결정의 면간거리의 차인 아래식으로 정리된다.

$$\Delta d = d - d_0 \quad (50)$$

여기서 d 는 부과된 응력에 대한 격자 면간거리이며 d_0 는 응력을 받지 않는 상태의 격자 면간거리이다.

- 중성자 빔과 파장 λ 는 회절각 θ 과 결정의 면간거리 d 의 변화를 가져오고 변형률 값이 구해진다. 탄성계수와 포와송의 값을 이용하여 각 방향에 대한 응력값을 계산할 수 있다.

$$\sigma_{Nor} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\epsilon_{Nor} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{Nor} + \epsilon_{Tran} + \epsilon_{Axi}) \right] \quad (51)$$

$$\sigma_{Axi} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\epsilon_{Axi} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{Nor} + \epsilon_{Tran} + \epsilon_{Axi}) \right] \quad (52)$$

$$\sigma_{Tran} = \frac{E}{(1+\nu)} \left[\epsilon_{Tran} + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_{Nor} + \epsilon_{Tran} + \epsilon_{Axi}) \right] \quad (53)$$

(4) 측정절차

- 측정절차는 크게 Calibration 과정, 응력을 받지 않은 시험편의 측정 그리고 용접시험편의 측정으로 구성된다.
- 계측장비 배열 및 조정 (그림 137 참조)
 - Diffractometer 중심축
 - Linear translate 배열
 - Slit 배열
 - Channel 조정 및 중성자 wavelength 결정

○ Stress Free Sample 측정 :

- 용접부의 잔류응력을 측정하기 위해서는 측정 대상물과 같은 재질의 시험편에 대한 응력을 받지 않은 상태에서의 값이 기준 정보로 사용된다.
- 중성자에 의한 sample's edge 결정
- Non-welded sample 측정 (그림 138 참조)

○ Welding Sample 측정

- 응력을 받은 측정 대상물의 격자거리 d 에 대해서 측정 대상물과 같은 재료의 응력을 받지 않은 상태의 격자거리 d_0 가 측정되면 격자변형은 다음식과 같다.

$$\varepsilon = (d - d_0) / d_0 \quad (54)$$

- 상기 식에 Bragg's Law의 식을 대입해서 정리하면 용접된 시편과 응력을 받지 않은 시편의 격자거리는 다음 식과 같다.

$$d = \lambda / 2\sin \theta \text{ (welding sample)} \quad (55)$$

$$d_0 = \lambda / 2\sin \theta_0 \text{ (unwelding sample)} \quad (56)$$

- 상기 식을 이용하여 시편의 변형율은 다음과 같이 격자면간거리의 값과 회절각의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = (d - d_0) / d_0 = (\sin \theta_0 / \sin \theta) - 1 \quad (57)$$

- 위에서 구해진 변형률과 측정시편의 회절탄성계수값과 프와송비를 후크의 법칙에 적용하면 각 지점에 분포하는 응력을 측정할 수 있다.

(5) 측정 결과

○ 측정정보

- 시편 : 이중재 용접재 (길이 180mm × 폭 80mm × 두께 25mm)(그림 139 참조)
- 모재의 구분
 - 스테인리스강(TP316)
 - 스테인리스강(ER316L)
 - 스테인리스강(F316)
 - Inconel 82 ERNiCr-3
 - SA508 Gr.1a

○ 실험의 구성

- Collimator 및 Slit

- First collimator : 20(soller type)
- Second collimator : 6mm × 60mm (one-silt type)
- Beam slit
 - Incident beam slit : 2 mm(t) × 20mm (h) [Normal, Transverse direction]
 - 2 mm(t) × 20mm (h) [Axial direction]
 - Scattered beam slit : 2 mm(2) × 40mm (h)
 - Diffractometer 중심으로부터 incident slit의 거리 : 30mm
 - Diffractometer 중심으로부터 scattered beam slit의 거리 : 30mm
- Detector
 - Operating voltage : 4,600 Volts
 - TDC configuration file : 1d100010.cfg
 - External delay(for stop pulse) : 180 nsec
 - Background count : 0.22 cts/sec
- 사전 측정결과
 - Center position of beam slits의 중심 위치
 - Incident beam slit 위치 : 6.25mm
 - Scattered beam slit 위치 : 14.1mm
 - Channel-2θ 조정 (그림 140, 141 참조)
 - Sample : SUS pin 220 reflection
 - 1 channel = $0.016^\circ + 0.00020(2\theta)$
- Channel 측정 결과
 - Normal 방향 측정 (그림 142, 143 참조)
 - Transverse 방향 측정 (그림 144, 145 참조)
 - Axial 방향 측정 (그림 146, 147 참조)

(6) 응력 환산 결과

- Normal 방향 응력 (2mm)
 - 그림 148로부터 인코넬 82 용접부 표면에서 압축 normal 응력이 작용하고 SA508 Gr.1a와 SS316의 열영향부 표면에서 가장 큰 인장 normal 방향 응력이 작용됨을 알 수 있다.
- Transverse 방향 응력 (2mm)
 - 그림 149로부터 axial 방향 응력과 마찬가지로 인코넬 82 용접부 표면에서 압축 transverse 응력이 작용하고 SA508 Gr.1a와 SS316의 열영향부 표면에서 가장 큰 인장 normal 방향 응력이 작용됨을 알 수 있다
- Axial 방향 응력 (2mm)
 - 그림 150으로부터 인코넬 82 용접부 표면에서 인장과 압축 axial 응력이 급격히 변동하면서 작용하고 SA508 Gr.1a의 열영향부 표면에서 가장 큰 인장 axial 방향 응력이 작용됨을 알 수

있다.

○ Normal, transverse 방향 응력 (5mm)

- 그림 151로부터 내부의 잔류응력 분포도 표면쪽의 잔류응력 분포 양상과 유사하나 스테인리스 강 용접부와 인코넬 용접부의 잔류응력 크기에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

(7) 결 론

- 한국원자력연구소의 high resolution power diffractometer에서 중성자 회절을 이용한 잔류응력 측정을 수행하였다.
- 중성자 회절을 이용하여 스테인레스강 용접부에서의 세 주응력 방향 normal, axial, transverse 의 잔류응력 변화를 측정하였다.
- 잔류응력 용융금속의 열수축, 각 용접 패스, 그리고 용접부 냉각시의 열구배에 의한 것으로 설명할 수 있다.
- 중성자 회절은 용접시 발생한 잔류응력장을 해석할 수 있는 한 방법을 제공하였다.
- 그러나 중성자 d_0 값의 오차로 인해 잔류응력 측정값과 해석값이 서로 잘 일치하지 않았으며 향후 이에 대한 보완 차원에서 재측정을 수행할 예정이다.

나) Hole drilling 기술

중성자 회절법의 대안으로서 중성자 회절법의 타당성 검증 목적으로 그림 152에서 나타낸 hole drilling 기술을 이용하여 이중재 용접부의 몇몇 지점들에 대해 잔류응력을 측정하였다.

(1) Hole drilling 기술 특성

- 잔류응력의 정량적 평가기법 중 신뢰성이 비교적 높은 방법이다.
- 잔류응력이 존재하는 부재에 구멍을 천공하면서 주변의 변형구속이 해제된다는 사실에 근거하여 응력형태의 변화값이 잔류응력의 측정치가 된다.
- Hole Drilling 법에 의해 잔류응력을 이완시킬 때 원형구멍 주위에서의 변형률 변화량을 계측하는 것이기 때문에 다른 요인에 의한 변형률의 변화를 최소화하여야 한다.
- 그러나 이 변형률의 변화량은 약 40μ 정도의 겉보기 변형률 변화가 생긴다는 단점을 내제하고 있다.

(2) 측정 절차 (그림 153)

- 스트레인 게이지를 선정 측정부에 부착
- 스트레인 게이지에 리드선을 납땜으로 고정하고 변형률 측정장치에 연결
- 변형률 측정장치 내의 휘트스톤 브릿지 회로를 보정

- 드릴링 전의 변형률을 측정하고 스트레인 게이지 중심에서부터 적당히 떨어진 곳에 드릴링
- 드릴링 후 충분히 이완되는 시간을 주기 위해 적당한 시간을 두고 변형률 값을 측정
- 변형률은 식(58)을 이용하여 응력으로 변환되어진다

$$\sigma_{\max} \sigma_{\min} = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1}{4A} \pm \frac{\sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2}}{4B}$$

Where $\bar{A} = -\bar{a}(1+\nu)/2E$ and $\bar{B} = -\bar{b}/2E$ (58)

여기서, a, b는 시편의 성질과 무관한 무차원화된 조정 계수들이다.

(2) 가정조건

- Isotropic, 선형탄성재료(linear elastic material)
- 응력은 깊이에 따라 크게 변화하지 않는다.
- 잔류응력은 항복응력의 0.5배를 초과하지 않는다.
- Hole 범위내에서의 응력변화는 작다.

(3) Hole drilling을 이용한 잔류응력 측정 실험결과

- Transverse 및 axial 방향 응력
 - 측정위치는 그림 154에서 제시되고 있다.
 - 그림 155는 각 위치에서의 transverse 및 axial 잔류응력 측정결과를 나타내고 있다.
 - 그림 155에서 보이는 바와 같이 중성자 회절법의 측정결과보다 한 order 높게 측정되어졌다.
 - 따라서 중성자 회절법의 stress free 상태하에서의 d_0 를 재측정후 hole drilling 방법과의 비교가 필요하며 보다 많은 측정위치에서의 hole drilling 기술 적용이 필요하다고 판단된다.

2) 잔류응력 해석 결과와의 비교

위탁실험 및 기존 연구결과와 비교하여 잔류응력 해석기술의 타당성을 검증하고자 한다.

가) 이중재 용접부

그림 156에 제시된 바와 같이 잔류응력 해석결과를 중성자 회절법과 hole drilling 방법에 의한 잔류응력 측정결과와 비교시 중성자 회절법의 경우 큰 차이(order 차이)를 보인다. 중성자 회절법을 이용한 잔류응력 측정 실험에서 서술한 바와 같이 잔류응력 환산의 기준이

되는 stress free 상태의 d_0 의 신뢰성이 확보되지 못한 상태이다. 따라서 stress free 상태의 d_0 를 다시 측정하고 이를 이용 잔류응력을 재산정한 후 잔류응력 해석결과와 비교하여야만 한다. 또한 hole drilling 방법 경우 해석결과와 유사한 잔류응력 분포를 나타내고 있으나 정량적인 값에서 차이가 난다. Hole drilling 방법의 특성상 실험자의 숙련도에 큰 영향을 받으므로 보다 많은 부위에서 반복 측정이 필요할 것으로 보인다. 추후 빠른 시일내로 d_0 측정을 수행하고 hole drilling 방법으로 추가적인 측정을 할 예정이므로 1단계 연구 종료시까지 이중재 용접부에 대한 잔류응력 해석기술의 타당성을 검증할 수 있을 것으로 판단된다.

나) 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부

그림 157은 Battelle의 연구결과[94], A 해석 및 B 해석의 결과를 비교 제시한 것으로서 전체적인 잔류응력 분포는 유사하나 정량적인 값에 차이가 존재한다. 이러한 차이가 발생한 이유는 열적 경계조건 설정시 용접 열유속 결정 방법의 차이 때문이라고 여겨진다.

나. 잔류응력 완화방안 도출

2차년도 연구를 통해 개발된 잔류응력 해석기술을 이용하여 잔류응력 크기를 효율적으로 저감시킬 수 있는 방안을 개발하고자 한다. 본 연구에서 잔류응력에 대한 후열처리 변수들의 영향을 고찰하기 위한 parametric study를 수행하여 잔류응력 완화방안을 도출하였다.

용접 잔류응력을 완화방안으로는 용접 후열처리가 널리 보편적으로 사용되어지고 있다. 보편적으로 적용되어지는 용접 후열처리는 표 44에 제시된 바와 같이 대상 기기의 두께가 두꺼워질수록 장시간의 후열처리 지속시간을 요구하고 있다. 이와 같이 보편적 후열처리를 적용시 지속시간의 장시간화로 비경제적이 될뿐만 아니라 후열처리 지속시간의 장시간화는 석출 탄화물 성장에 따른 파괴인성치 저하를 가져다 줄 수 있다는 연구결과가 최근 들어 발표되고 있다.

따라서 본 연구에서는 후열처리시 잔류응력 완화기구 및 크리프 발생기구에 대한 고찰, 후열처리 변수들에 따른 잔류응력 완화 영향 고찰 등을 통해 잔류응력 완화 측면에서 보다 일관되고 효율적인 후열처리 지침을 도출하는데 있다.

표 44. 후열처리 대상 재료 및 두께에 따른 후열처리 지속 온도 및 시간

P-No.	지속온도 °C	최소 지속시간			
		0.5인치 이하	0.5-2인치	2-5인치	5인치 이상
1, 3	593-677	30min	1hr/in	2hr+15min/in	2hr+15min/in
4	593-677	30min	1hr/in	1hr/in	5hr+15min/in
5, 6	677-760	30min	1hr/in	1hr/in	5hr+15min/in
6 Gr.4	566-621				
7	704-760	30min	1hr/in	1hr/in	5hr+15min/in
8		불필요			

1) 후열처리시 잔류응력 완화기구 고찰

Stout[95]는 용접 후열처리시 잔류응력은 고온에서의 항복강도 저하에 따른 소성 거동에 의해 지배적으로 완화되어지며 크리프 거동에 의해서는 부가적으로 완화되어진다고 주장하였다. 그러나 후열처리시 크리프 거동이 지배적인 잔류응력 완화기구라는 몇몇 연구들이 발표되어졌다. 따라서 본 연구에서는 후열처리시 크리프 거동이 잔류응력 완화에 미치는 영향을 고찰하기 위한 크리프 미고려/고려 잔류응력 완화 해석을 수행하여 후열처리시 크리프 거동의 중요성과 시간에 따른 크리프 변형률 발생 거동을 고찰하고자 한다.

가) 해석모델

- 그림 158과 같은 SA508 Gr.1a 배관 원주방향 용접부에 그림 159와 같은 후열처리가 수행되어지는 경우를 해석모델로 선정한다.

나) 잔류응력 완화 해석

- 우선 크리프 거동의 중요성을 확인하기 위해 크리프 거동을 고려치 않은 경우와 고려한 경우에 대해 잔류응력 완화정도를 평가한다.
- 크리프 재료거동은 다음 아래와 같은 Omega Creep Law[96]를 사용한다.

$$\partial \epsilon_c / \partial t = \partial \epsilon_{co} / \partial t \exp(\Omega_m \epsilon_c) \quad (59)$$

여기서

$$\log_{10} \partial \epsilon_{co} / \partial t = -\{C_0 + \Delta_{\Omega}^{sr} + (C_1 + C_2 S_1 + C_3 S_1^2 + C_4 S_1^3) / (460 + T^n)\} \quad (60)$$

$$\Omega_m = \Omega_n^{\delta_{\Omega} + 1} + \alpha_{\Omega} n_{BN} \quad (61)$$

$$\Omega_n = \max\{(\Omega - n_{BN}), 3.0\} \quad (62)$$

$$\log_{10} \Omega = C_0 + \Delta_{\Omega}^{cd} + (C_1 + C_2 S_1 + C_3 S_1^2 + C_4 S_1^3) / (460 + T^n) \quad (63)$$

$$\delta_{\Omega} = \beta_{\Omega} \{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_e - 1.0\} \quad (64)$$

$$n_{BN} = -\{C_0 + \Delta_{\Omega}^{sr} + (C_2 + 2C_3 S_1 + 3C_4 S_1^2) / (460 + T^n)\} \quad (65)$$

$$S_1 = \log_{10} \sigma_e^n \quad (66)$$

- 그림 160은 후열처리시 크리프 거동을 고려하지 않은 경우의 시간에 따른 Equivalent 응력 변화를 제시하고 있다. 그림 160으로부터 크리프 거동을 고려하지 않으면 최초의 잔류응력 크기(항복응력의 1.5배)에 비하여 20% 정도밖에 감소되지 않음을 알 수 있다.
- 그림 161은 후열처리시 크리프 거동을 고려한 경우의 시간에 따른 Equivalent 응력 변화를

제시하고 있다. 그림 161로부터 크리프 거동을 고려하면 최초 잔류응력 크기의 1/6 수준까지 감소됨을 알 수 있다.

- 그림 160, 161로부터 Stout의 주장과는 달리 후열처리시 잔류응력 완화에 미치는 지배적인 기구는 고온 소성기구가 아니라 크리프 거동임을 알 수 있다.
- 그림 162는 후열처리시 크리프 거동을 고려한 경우의 시간에 따른 크리프 변형률 변화를 제시하고 있다. 그림 162로부터 후열처리시 크리프는 후열처리 최고 온도 지속기간에서 Stout의 주장처럼 주로 발생하는 것이 아니라 지속 온도로의 상승기간, 즉 후열처리 초기기간에서 대부분 발생함을 알 수 있다.
- 그림 163은 잔류응력 완화에 대한 후열처리시 최고온도 지속시간의 효과를 제시한 것으로서 지속시간에 따라 크리프 변형률이나 잔류응력 완화정도가 거의 동일함을 알 수 있다.
- 그림 162와 163의 결과에서 보이는 바와 같이 크리프 거동에 의한 잔류응력 완화는 후열처리 초기기간 내에서 대부분 발생하기 때문에 잔류응력 완화 측면에서 고찰해보면 보편적 후열처리 과정의 지속시간은 과다하므로 지속시간을 단축할 수 있다.

2) 일관되고 효율적인 후열처리 지침 개발

잔류응력 완화해석을 통해 초기 잔류응력, 후열처리 지속 온도 및 ramp up 시간과 같은 후열처리 변수들과 두께가 잔류응력 완화에 미치는 효과를 고찰한다. 이러한 고찰 결과를 토대로 후열처리 변수들과 두께에 무관하게 unique한 후열처리 지침 선도를 개발하고자 한다.

가) 후열처리 변수의 영향

- 그림 164는 두께에 따른 잔류응력 완화정도를 제시하고 있다. 일반적으로 두께가 두꺼울수록 초기 잔류응력이 크고 후열처리로(Furnace) 설정온도를 느리게 따라가기 때문에 그림 164와 같이 동일 후열처리 지속시간에서 두께가 두꺼울수록 잔류응력 완화 정도는 증가하며 최종 완화시간은 약간 증가함을 알 수 있다. 또한, 후열처리 지속시간이 증가하여도 잔류응력 완화에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다.
- 그림 165는 다양한 초기 잔류응력 크기에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계를 제시하고 있다. 그림 165로부터 초기 잔류응력이 클수록 잔류응력 완화정도가 커짐을 알 수 있다.
- 그림 166은 다양한 후열처리 지속 온도에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계를 제시하고 있다. 그림 166으로부터 지속 온도가 증가할수록 잔류응력 완화정도가 커짐을 알 수 있다.
- 그림 167은 다양한 후열처리 ramp up 시간에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계를 제시하고 있다. 그림 167로부터 ramp up 시간이 잔류응력 완화에 미치는 영향은 미미함을 알 수 있다.

나) Unique한 후열처리 지침

- 후열처리 변수와 두께에 다른 Parametric study를 통해 ramp up 시간과 후열처리 지속시간은 잔류응력 완화정도에 미치는 영향이 미미한 반면, 초기 잔류응력 크기와 후열처리 지속온도는 완화정도에 미치는 영향이 큼을 알 수 있었다. 두께가 두꺼워질수록 초기 잔류응력 크기가 커지므로 초기 잔류응력 크기를 이용하여 두께 변화에 다른 영향을 고찰할 수 있다.
- 따라서 초기 잔류응력 크기와 후열처리 지속온도를 기준으로 하는 unique한 후열처리 지침을 개발하고자 한다.
- 그림 168은 온도에 따른 항복강도 변화 선도로부터 크리프 발생 온도 T_0 에서의 크리프 activation 응력을 도출하는 과정을 제시한 것이다.
- 그림 169(a)는 후열처리 지속 온도에 대한 잔류응력 완화정도 변화를 다양한 초기 잔류응력에 따라 나타낸 것이고 그림 169(b)는 후열처리 지속 온도에 대한 크리프 activation 응력으로 무차원화한 잔류응력 완화정도 변화를 다양한 초기 잔류응력에 따라 나타낸 것이다. 그림 169로부터 크리프 activation 응력으로 무차원화시키므로써 초기 잔류응력 크기에 무관하게 단일 선도화되어짐을 알 수 있다.
- 그림 170(a)은 후열처리 지속 온도에 대한 잔류응력 완화정도 변화를 다양한 두께에 따라 나타낸 것이고 그림 170(b)은 후열처리 지속 온도에 대한 크리프 activation 응력으로 무차원화한 잔류응력 완화정도 변화를 다양한 두께에 따라 나타낸 것이다. 그림 170로부터 크리프 activation 응력으로 무차원화시키므로써 두께에 무관하게 단일 선도화되어짐을 알 수 있다.
- 그림 169, 170과 같이 후열처리 변수 및 두께에 무관하게 후열처리 지속 온도와 크리프 activation 응력으로 무차원화한 잔류응력 완화 사이의 관계를 단일 선도로 나타낼 수 있다.
- 또한, 크리프 발생 온도를 이용하여 후열처리 지속 온도를 무차원한 후 무차원화된 잔류응력 완화와의 관계를 나타내면 그림 171과 같다.
- 그림 171로부터 기존의 보편적인 후열처리 지침보다는 매우 단순화된, 즉, 후열처리 변수 및 두께에 무관하게 단일 후열처리 지침 선도를 이용할 수 있음을 알 수 있다.

3) 결 론

용접 후열처리를 크리프 거동에 기인하는 잔류응력 완화기구를 고찰하고 잔류응력 완화해석을 수행한 결과 다음 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 후열처리를 지배적인 잔류응력 완화기구는 고온 소성기구가 아니라 크리프 거동이다.
- 후열처리를 잔류응력 완화는 후열처리 초기기간 내에서 대부분 발생하기 때문에 잔류응력 완화 측면에서 고찰해보면 보편적 후열처리 과정의 지속시간은 과다하므로 지속시간을 단축할 수 있다. (후열처리의 경제성 향상 가능)

- 후열처리 변수들 중 후열처리 최고온도 지속시간 및 ramp up 시간의 변화에 따라 잔류응력 완화정도의 변화는 무시할 수 있다.
- 잔류응력 완화를 크리프 activation 응력으로 무차원화시키면 무차원화된 잔류응력 완화와 후열처리 온도 사이의 관계는 두께 및 초기 잔류응력 크기에 따라 변화없이 단일 선도로서 나타낼 수 있다.
- 기존의 보편적인 후열처리 지침보다는 매우 단순화된 단일 후열처리 지침 선도를 개발하였다.

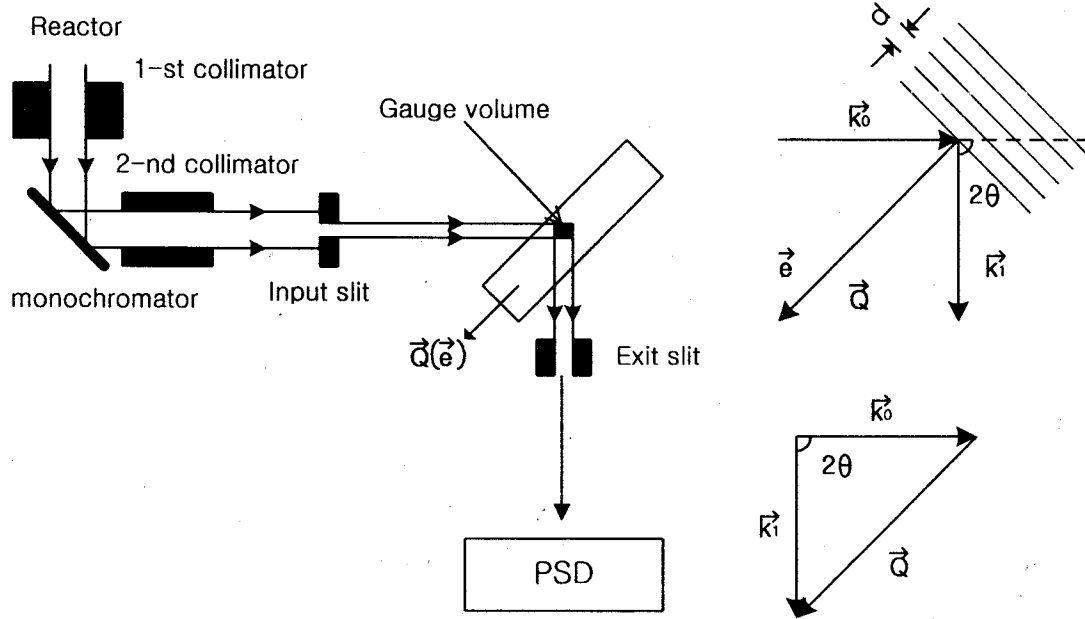


그림 136. 중성자 회절 잔류응력 측정장치의 개략도

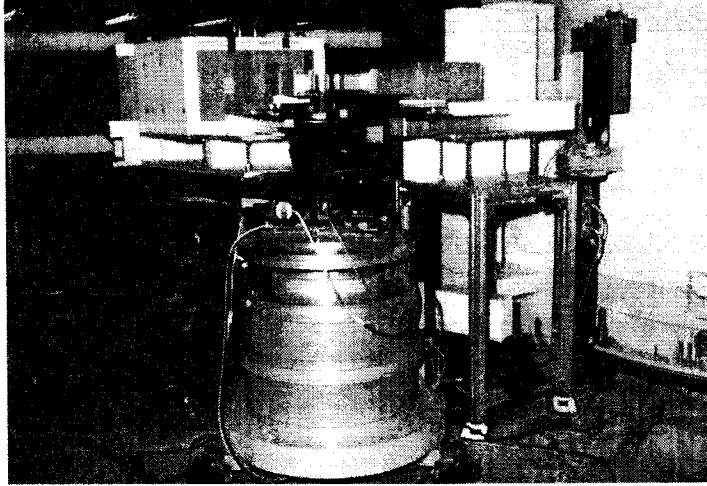


그림 137. 실험 장치

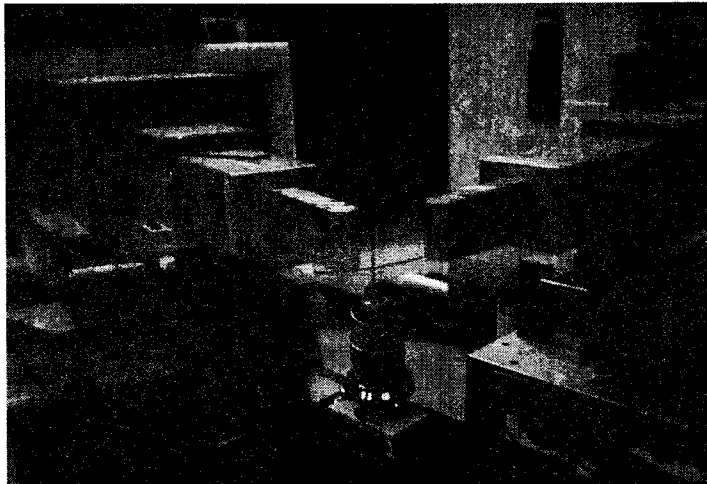


그림 138. Non-Welded Sample 측정

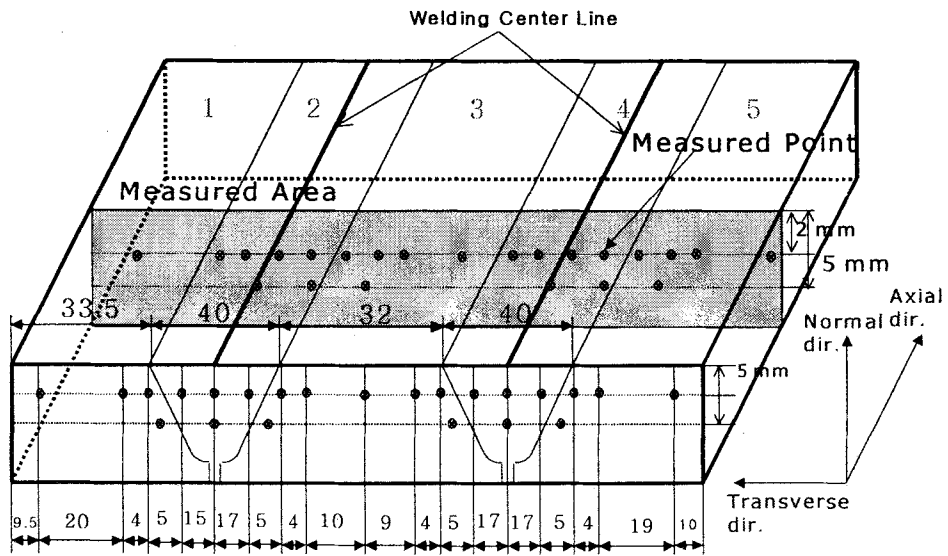


그림 139. 측정 시편 형상 및 측정 위치

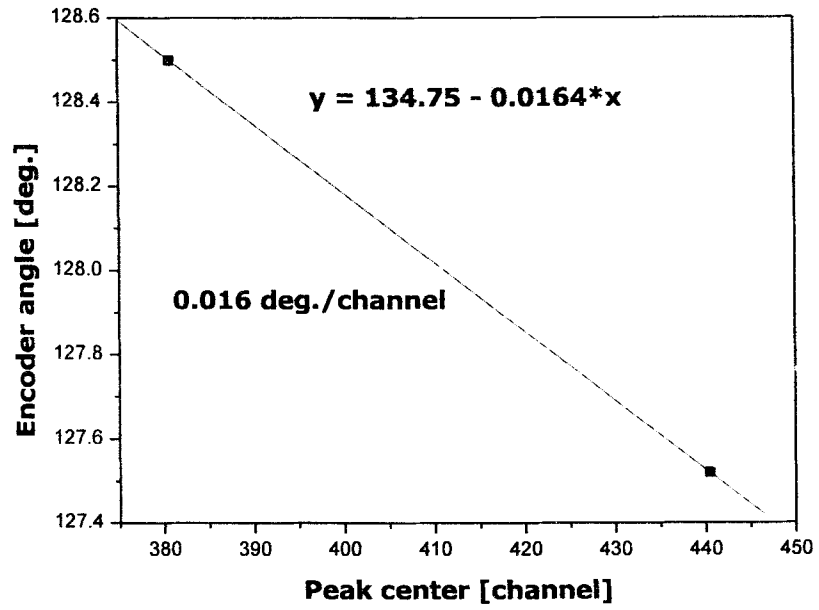


그림 140. Channel-20의 조정

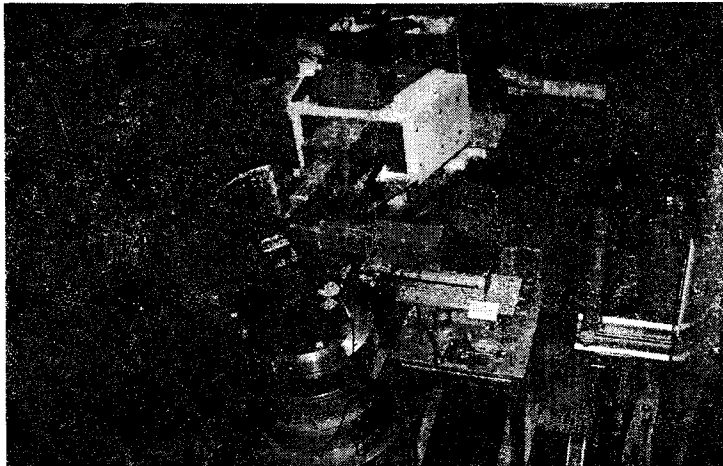
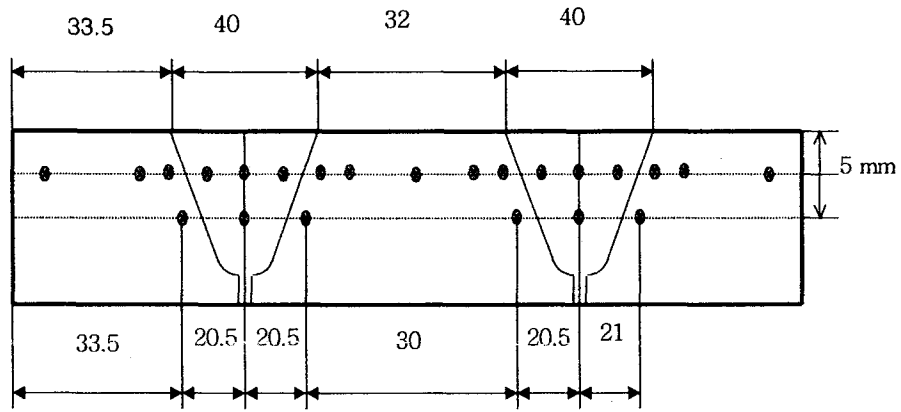
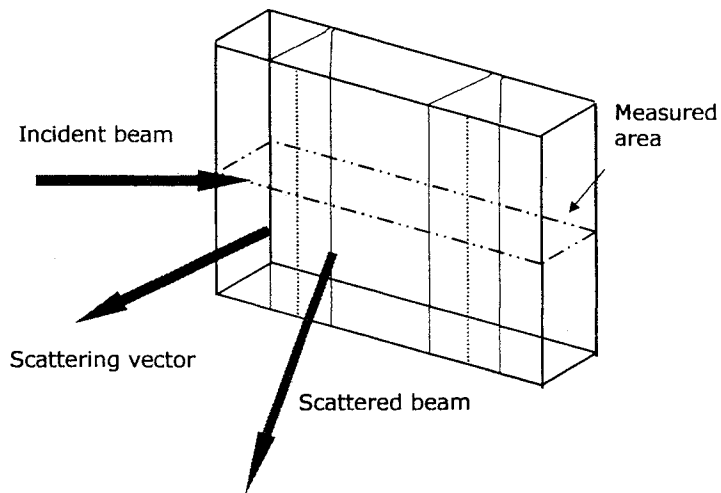


그림 141. Channel-20 조정 및 측정 실험



(a) 측정 위치



(b) 중성자 빔 입사 및 회절

그림 142. Normal 방향 channel 측정 위치 및 방법

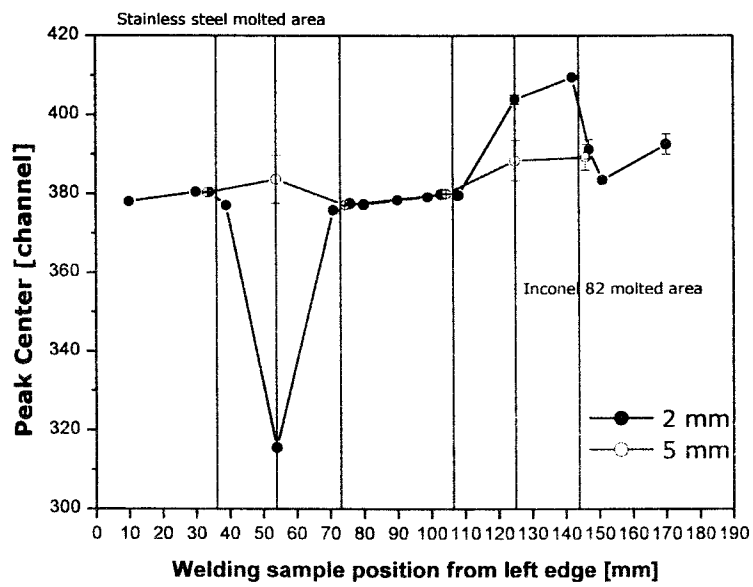
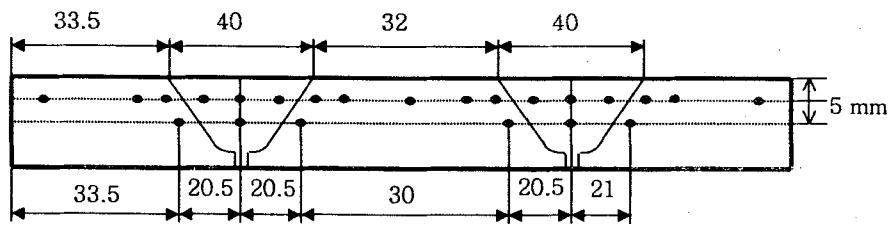
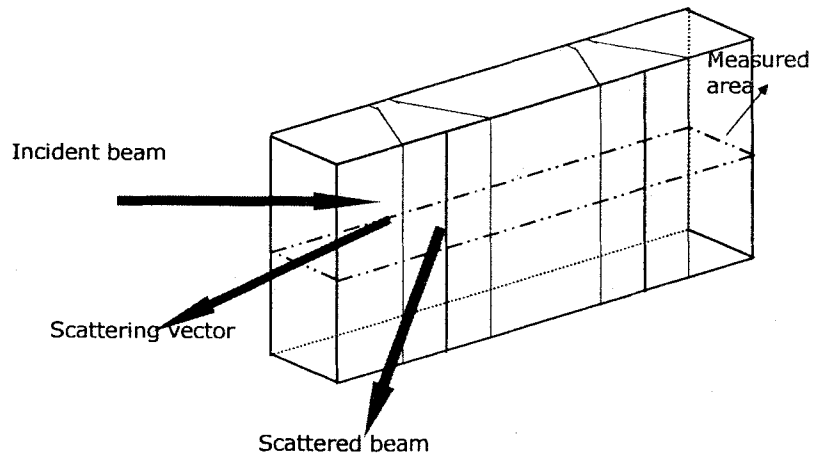


그림 143. Normal 방향 channel 측정 결과



(a) 측정 위치



(b) 중성자 빔 입사 및 회절

그림 144. Transverse 방향 channel 측정 위치 및 방법

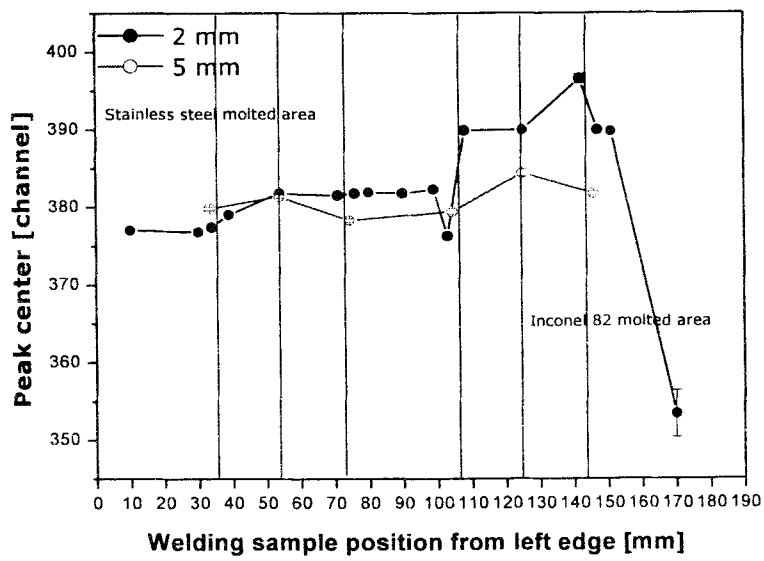


그림 145. Transverse 방향 channel 측정 결과

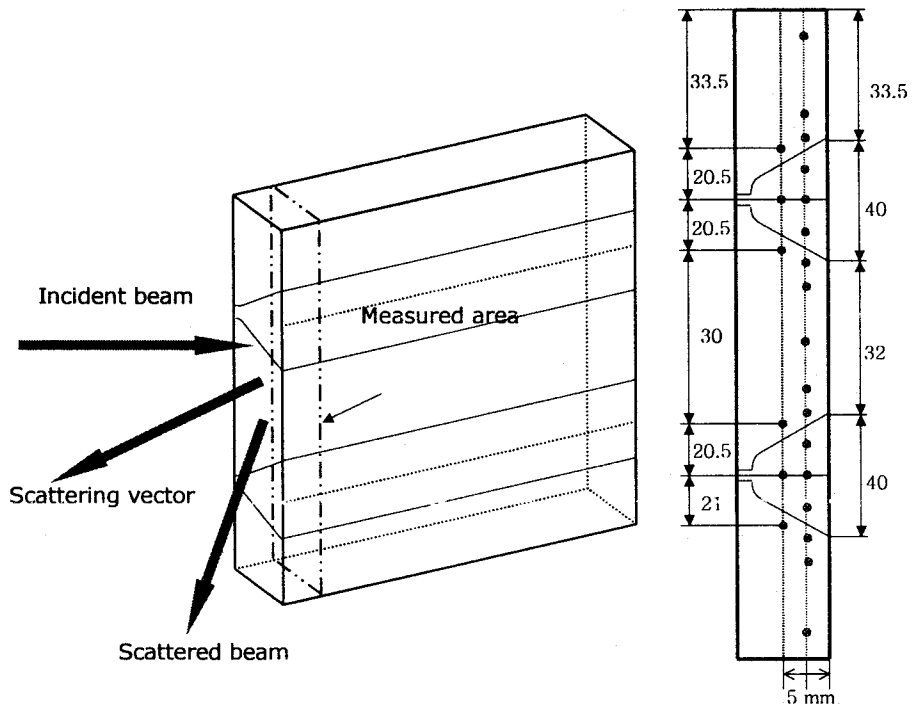


그림 146. Axial 방향 channel 측정 위치 및 방법

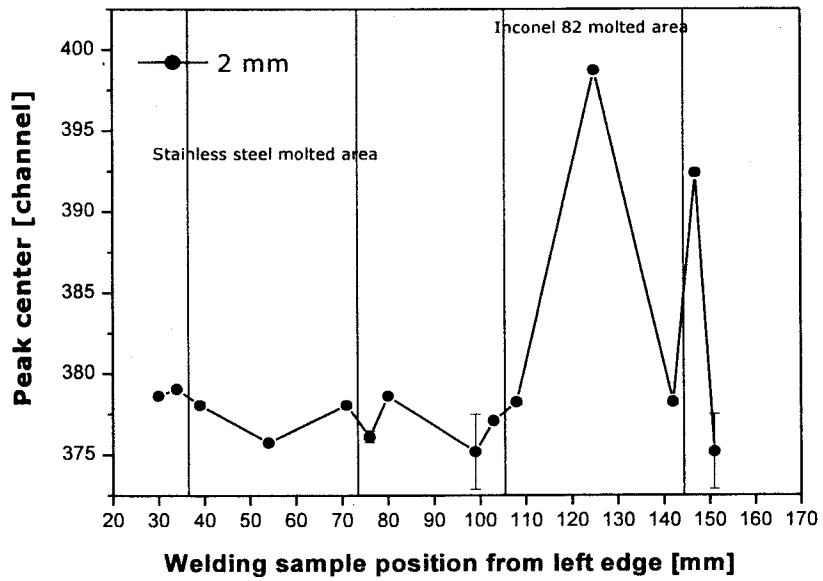


그림 147. Axial 방향 channel 측정 결과

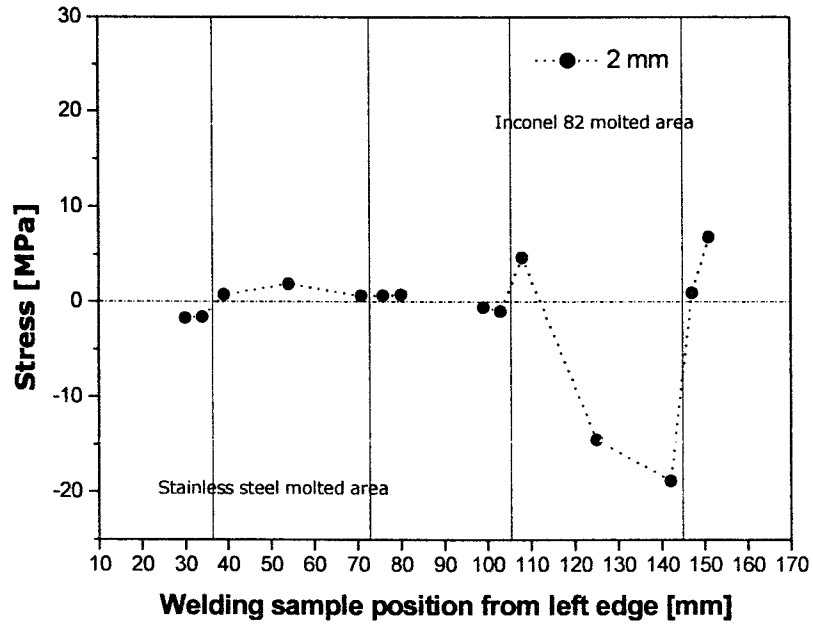


그림 148. 2mm 깊이에서의 normal 방향 응력 분포

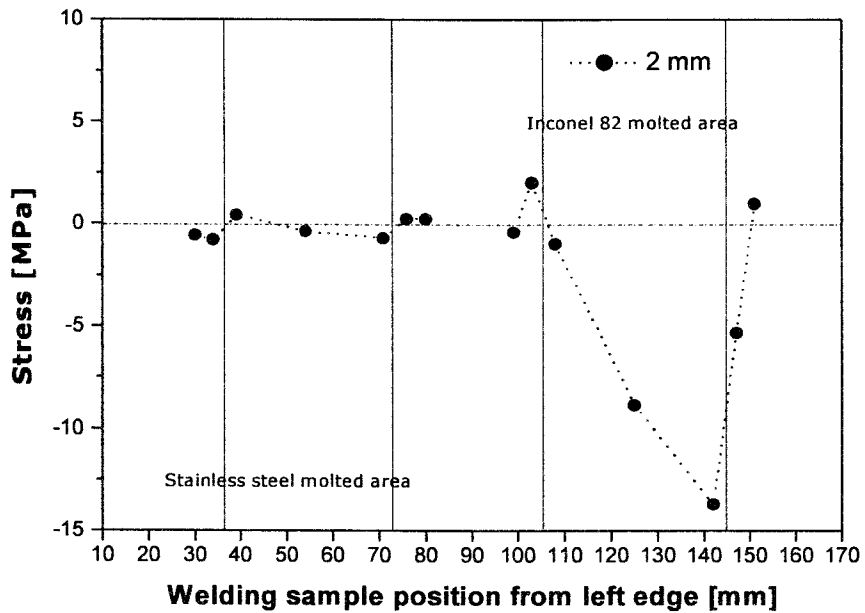


그림 149. 2mm 깊이에서의 transverse 방향 응력 분포

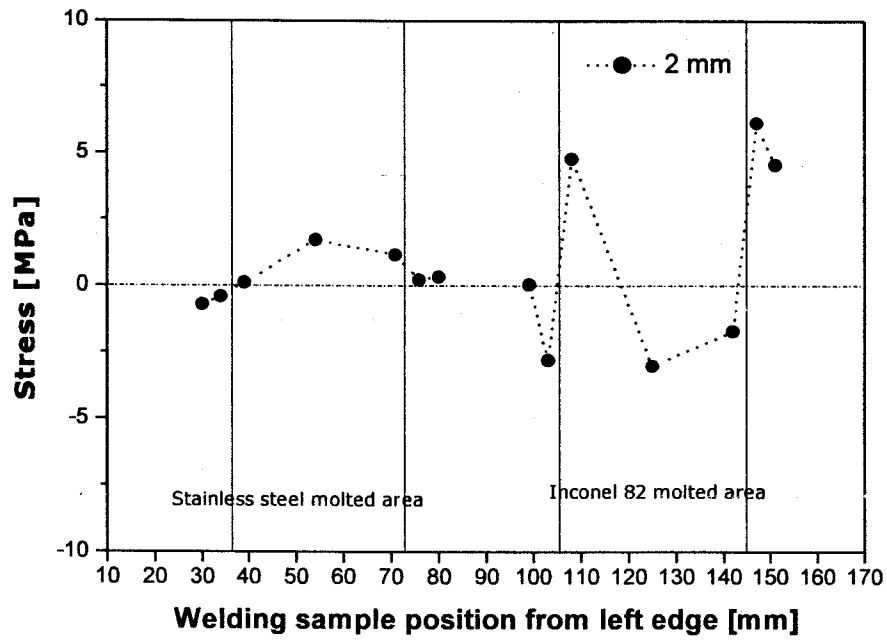


그림 150. 2mm 깊이에서의 axial 방향 응력 분포

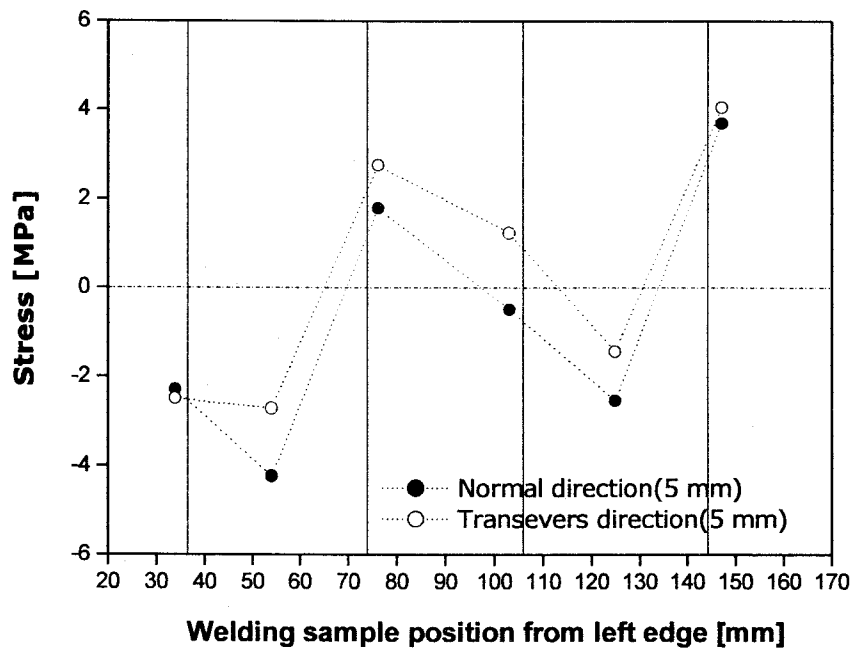


그림 151. 5mm 깊이에서의 normal 및 transverse 방향 응력 분포

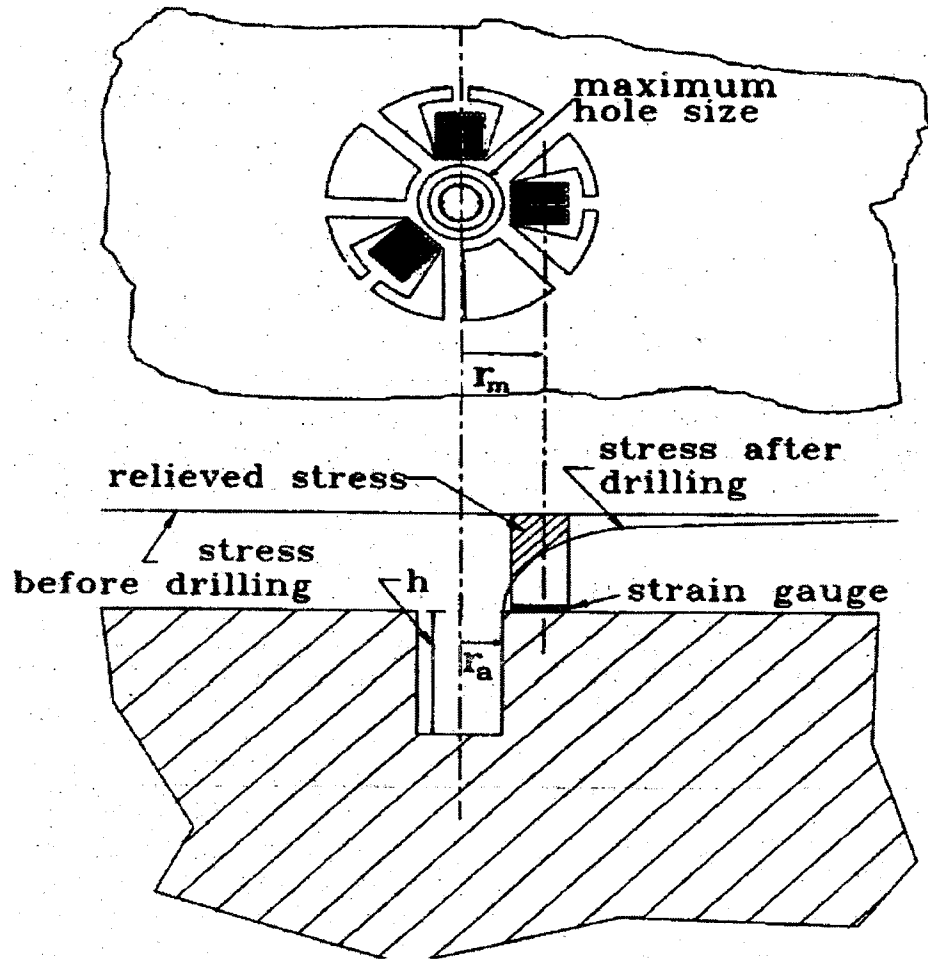
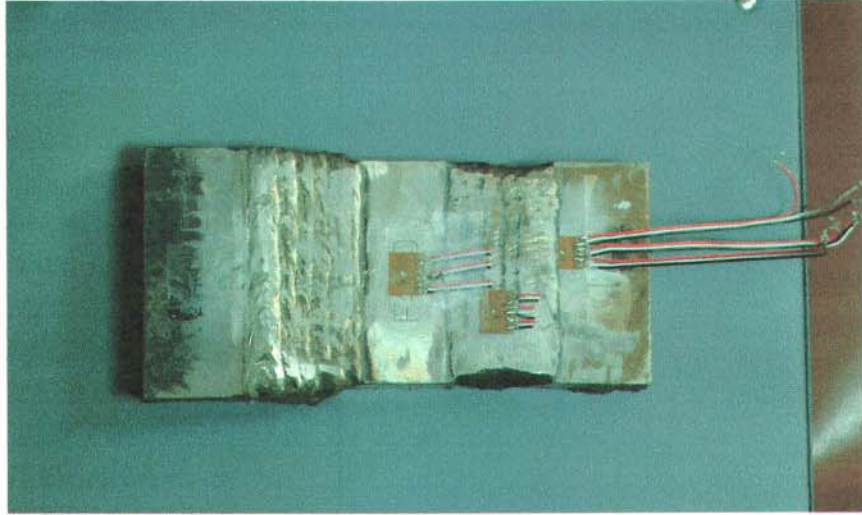
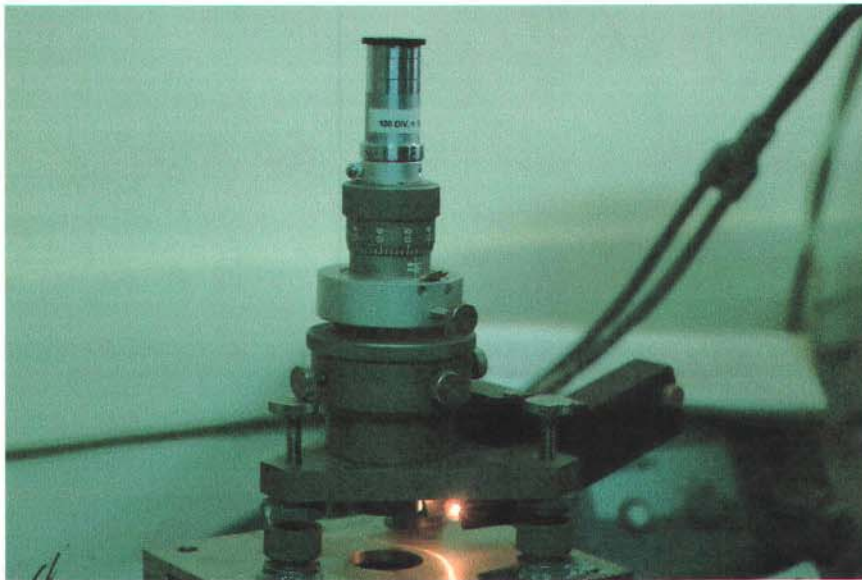


그림 152. Hole drilling 기술 개요

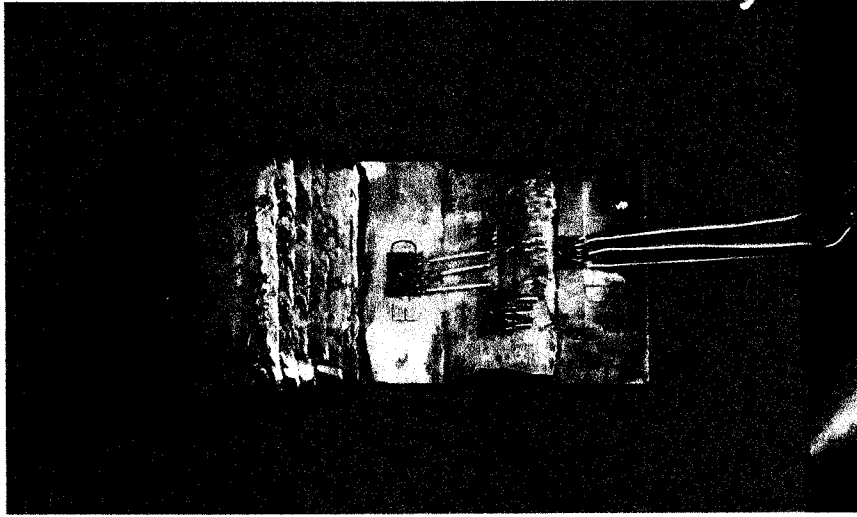


(a) 스트레인 게이지 부착 모습



(b) Hole drilling 모습

그림 153. Hole drilling 실험



(a) 스트레인 게이지 부착 모습



(b) Hole drilling 모습

그림 153. Hole drilling 실험

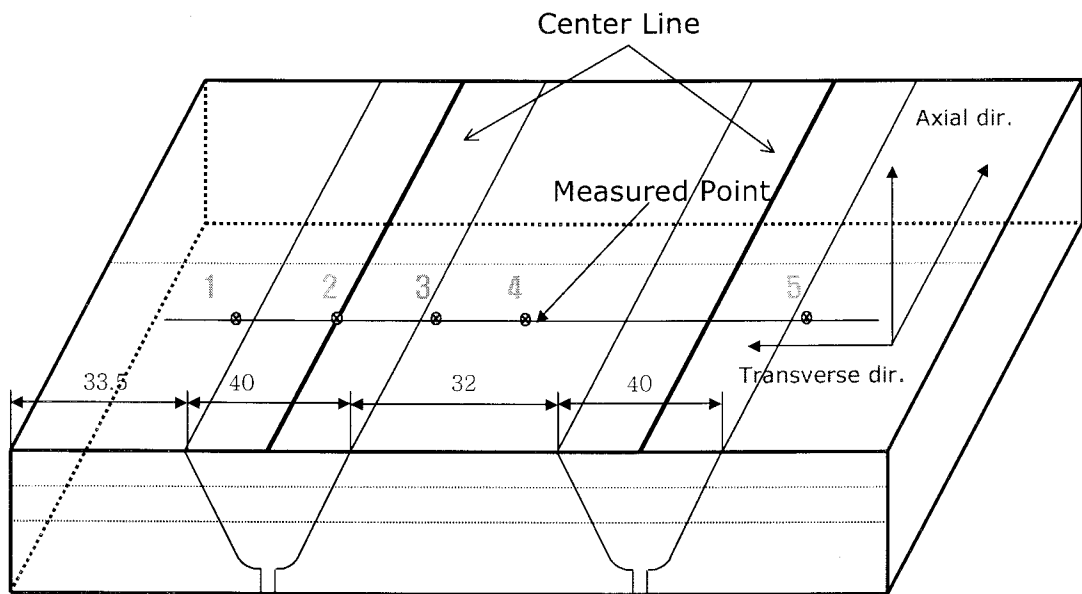
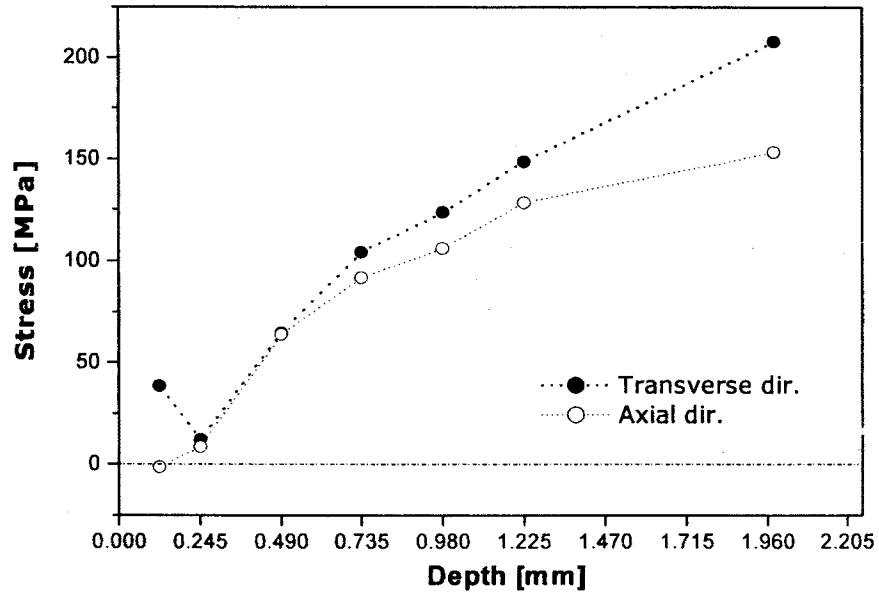
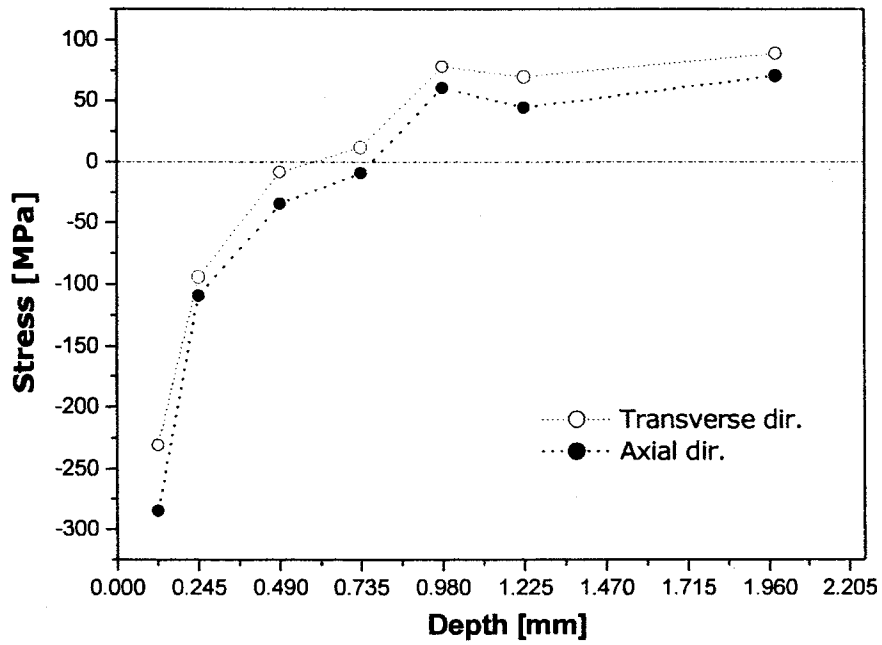


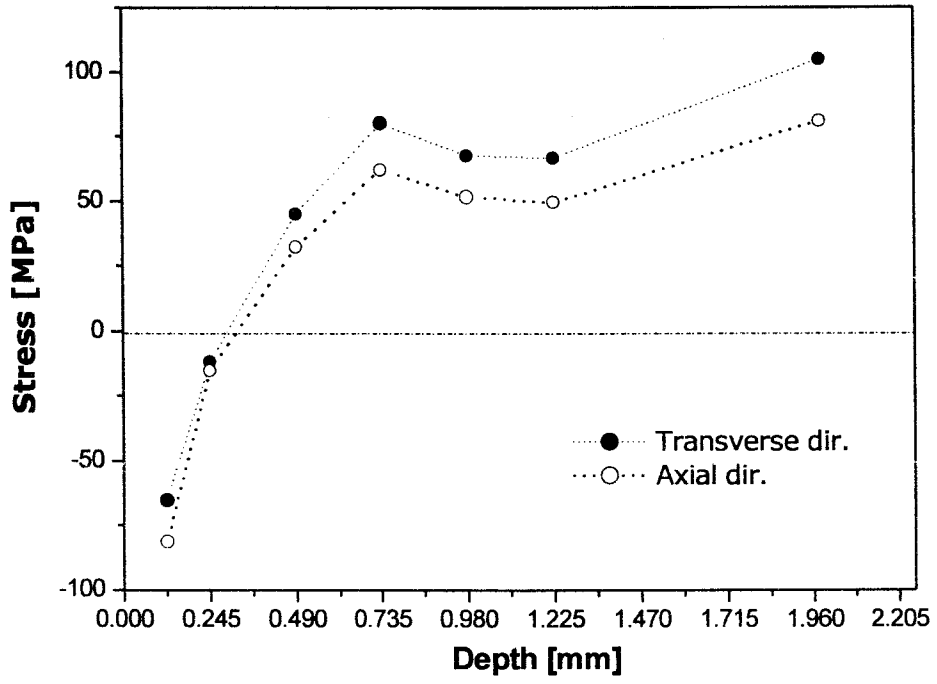
그림 154. Hole drilling 기술을 이용한 시편내 측정 위치



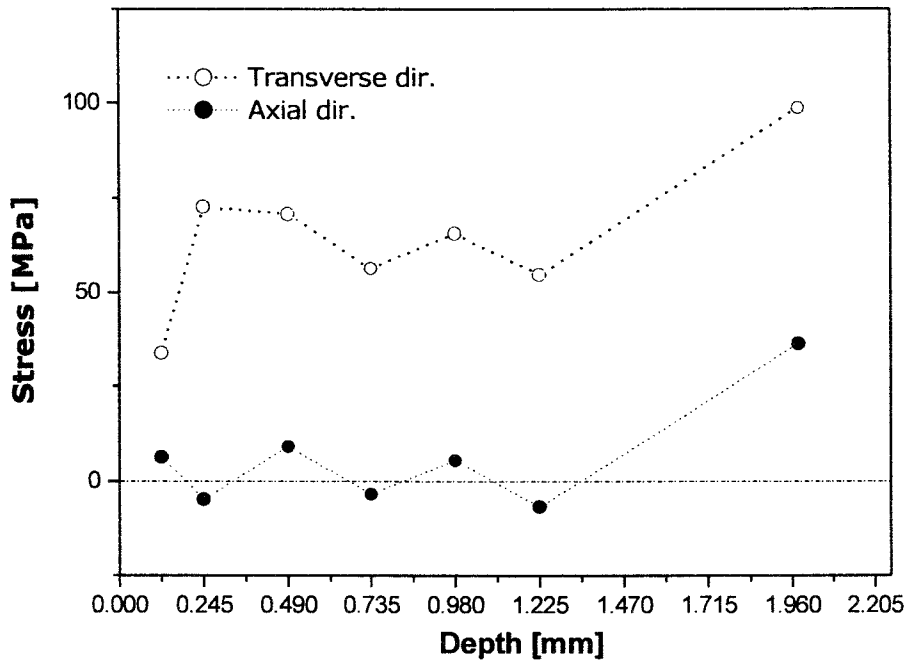
(a) Point 1



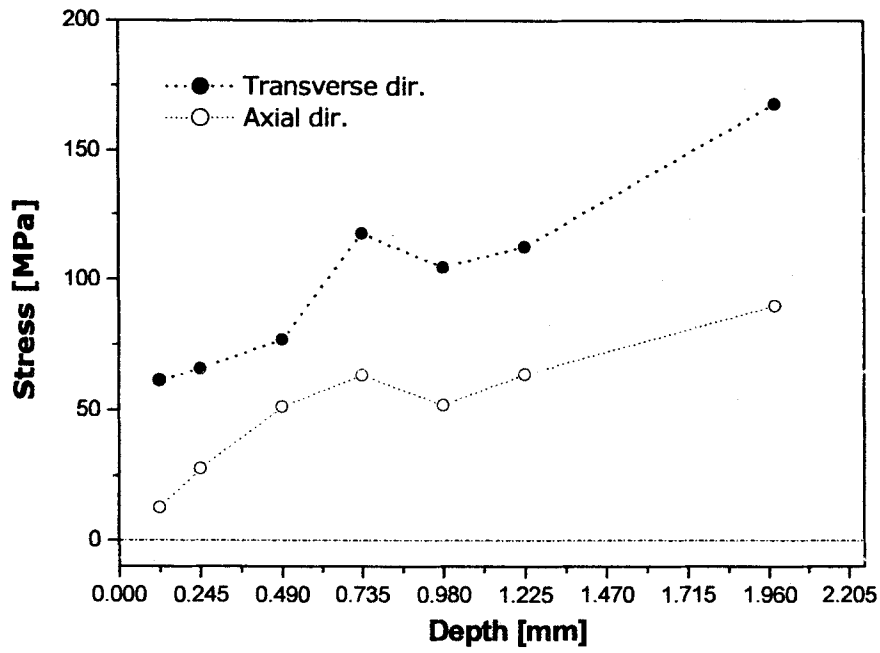
(b) Point 2



(c) Point 3



(d) Point 4



(e) Point 5

그림 155. Hole drilling 기술을 이용한 각 측정위치별 transverse 및 axial 잔류응력 분포

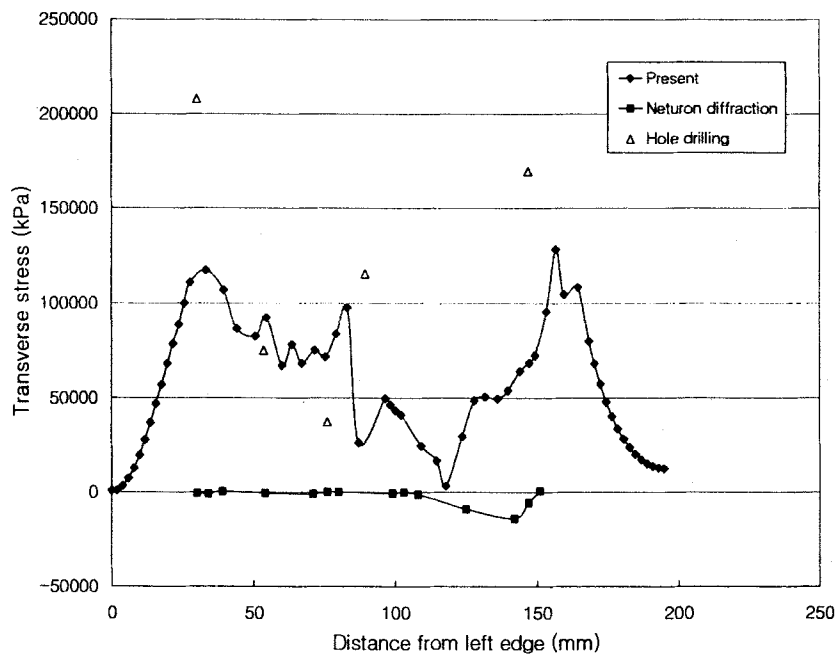
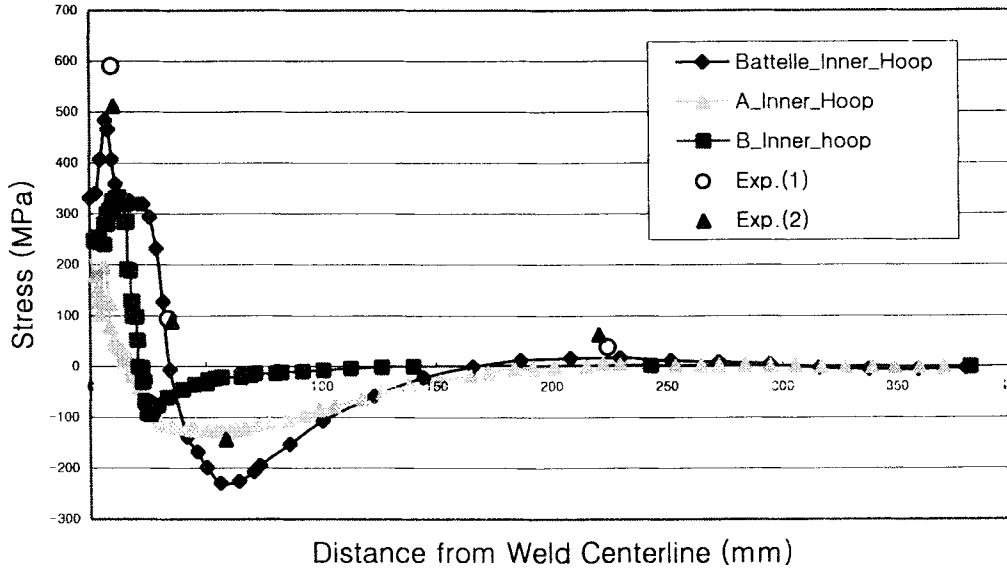
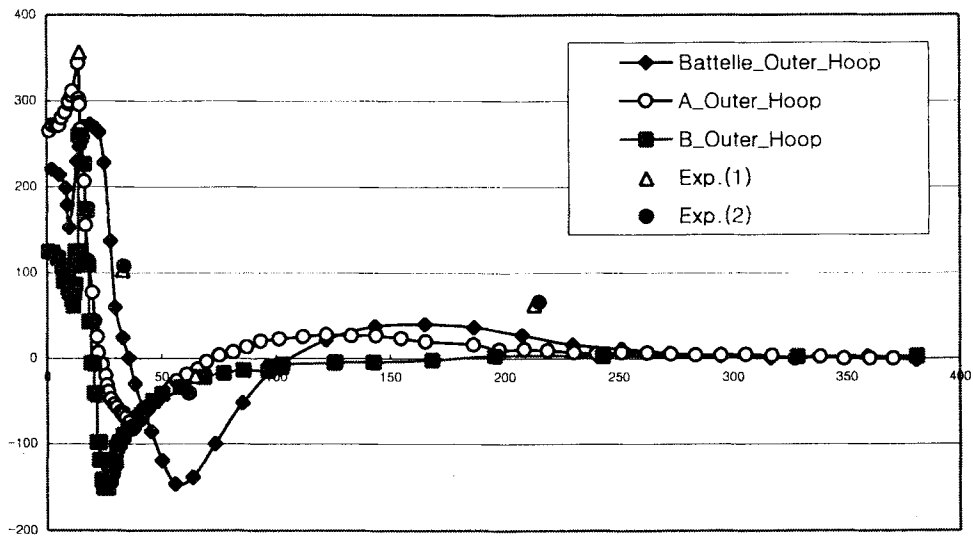


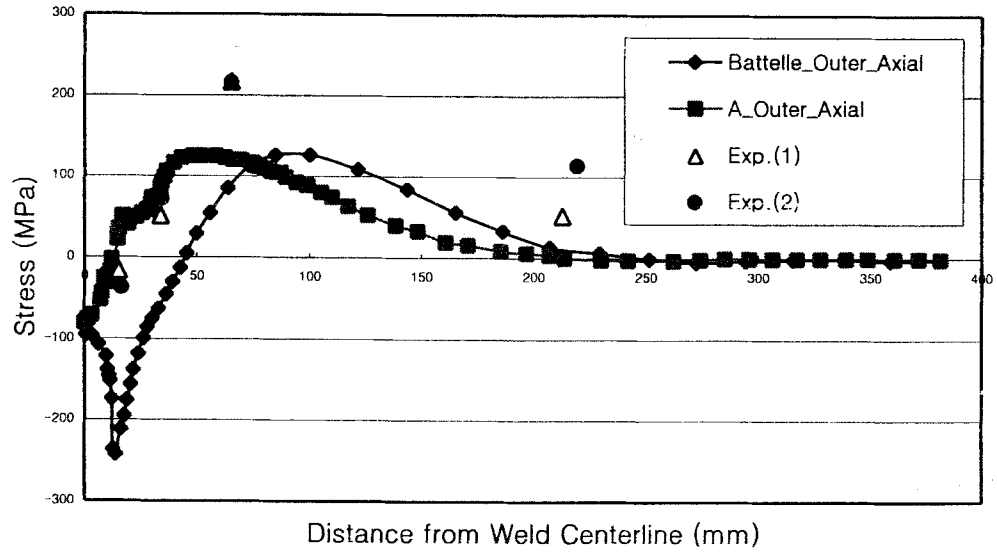
그림 156. 이종재 용접부의 횡방향 잔류응력에 대한 해석 및 측정 결과의 비교



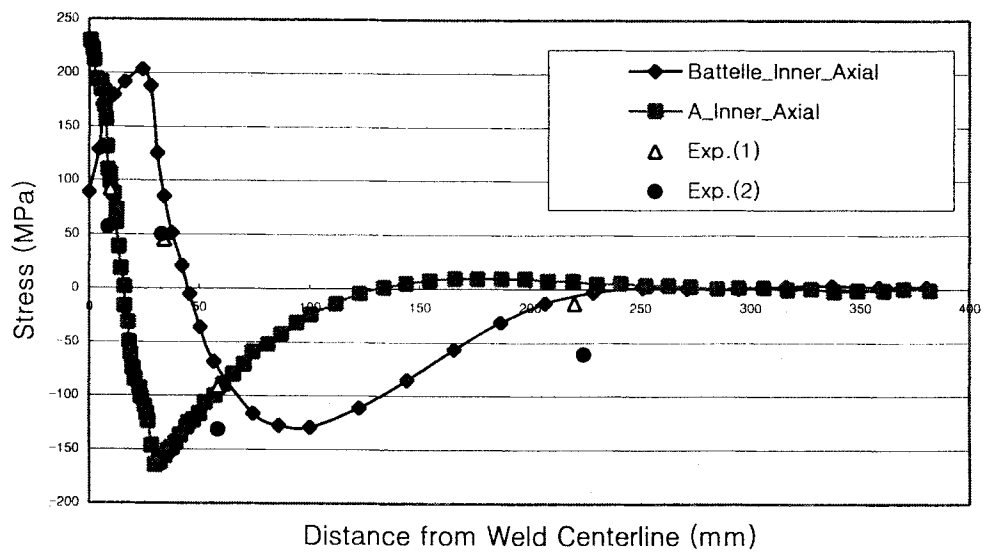
(a) 내면 원환응력



(b) 외면 원환응력



(c) 내면 축방향 응력



(d) 외면 축방향 응력

그림 157. 스테인리스 강 배관 원주방향 용접부에 대한 잔류응력 해석치 비교

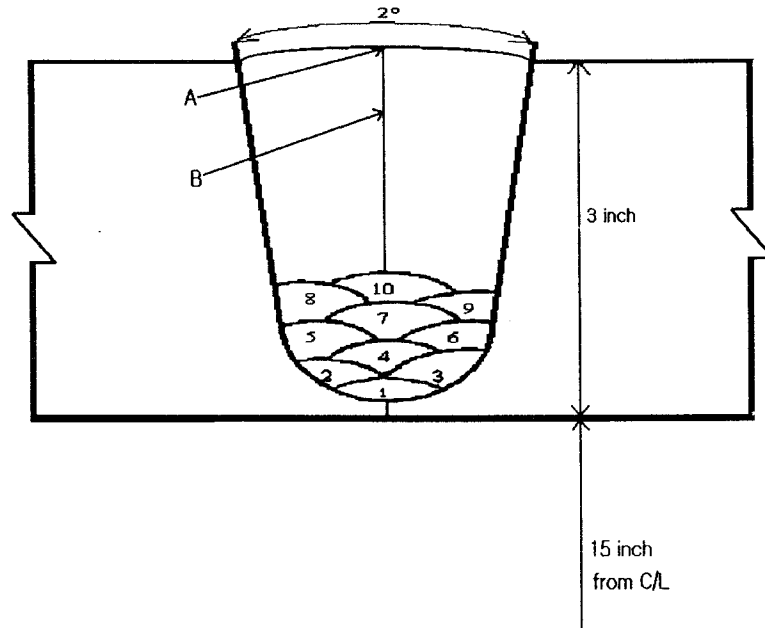


그림 158. SA508 Gr.1a 배관 원주방향 용접부

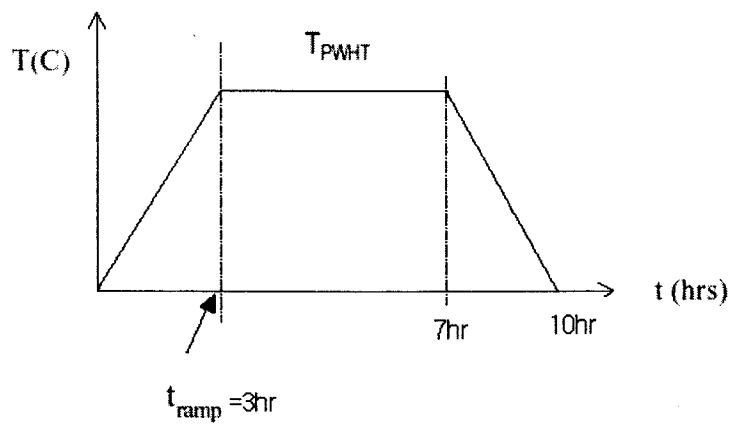


그림 159. 후열처리 과정

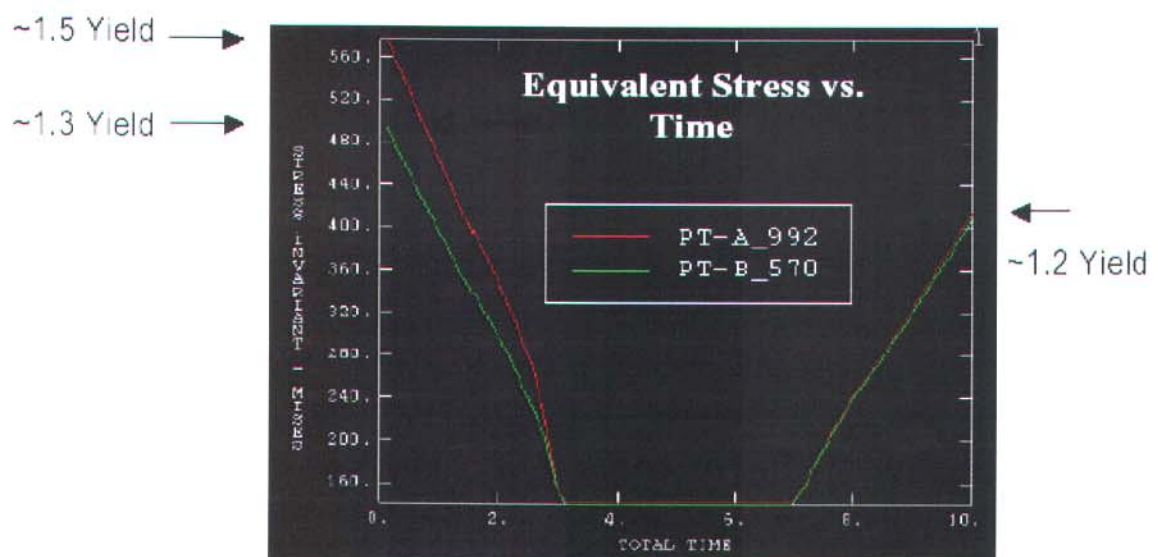


그림 160. 크리프 거동 미고려 경우의 Equivalent 응력 변화

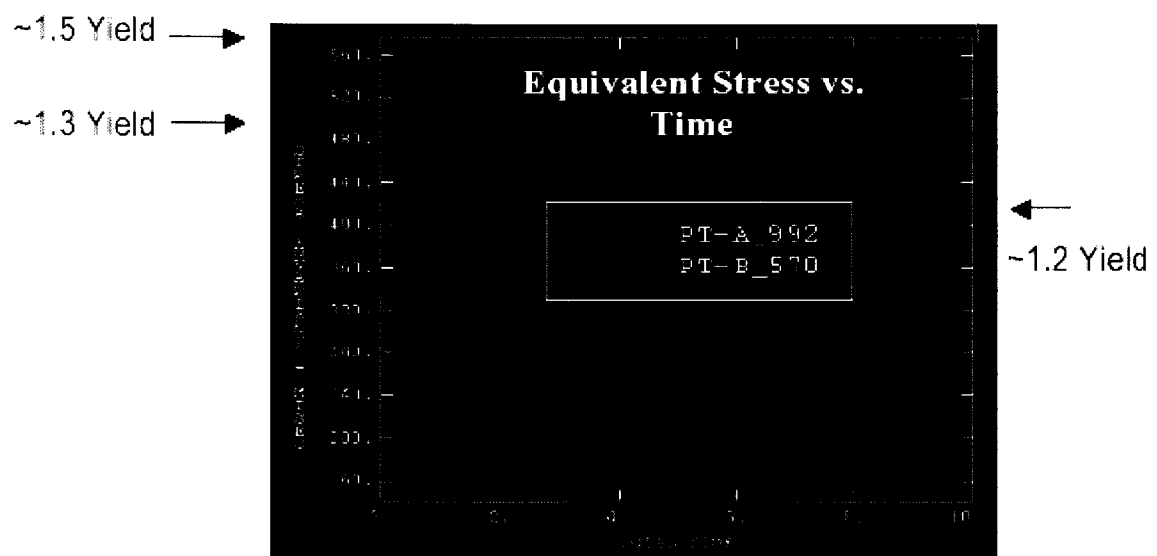


그림 160. 크리프 거동 미고려 경우의 Equivalent 응력 변화

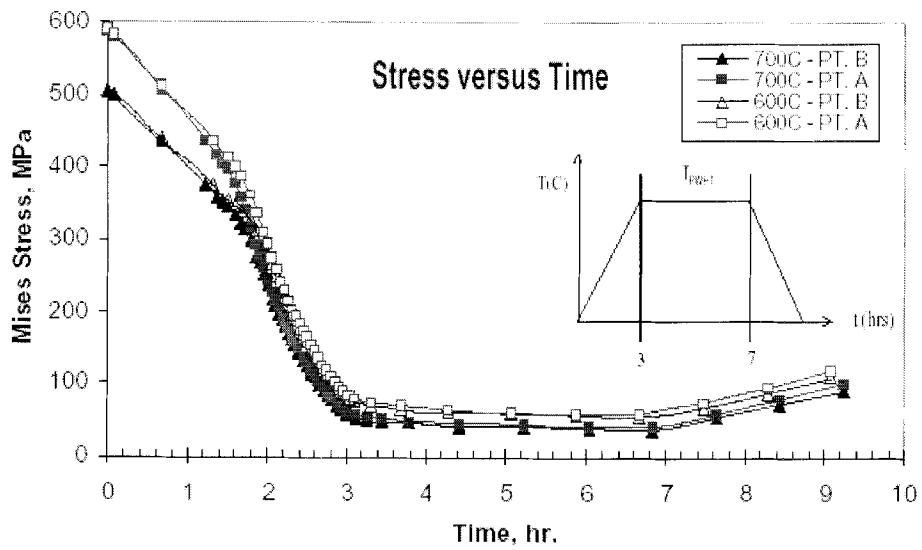


그림 161. 크리프 거동 고려 경우의 Equivalent 응력 변화

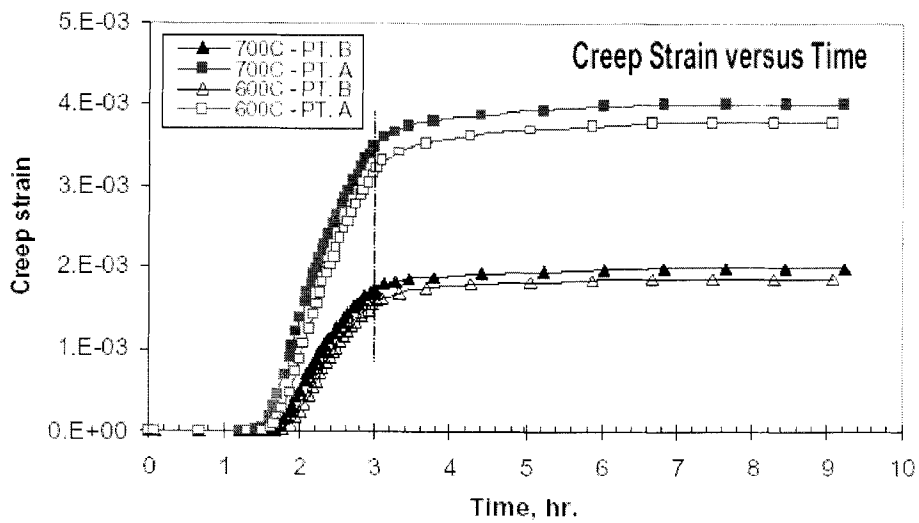
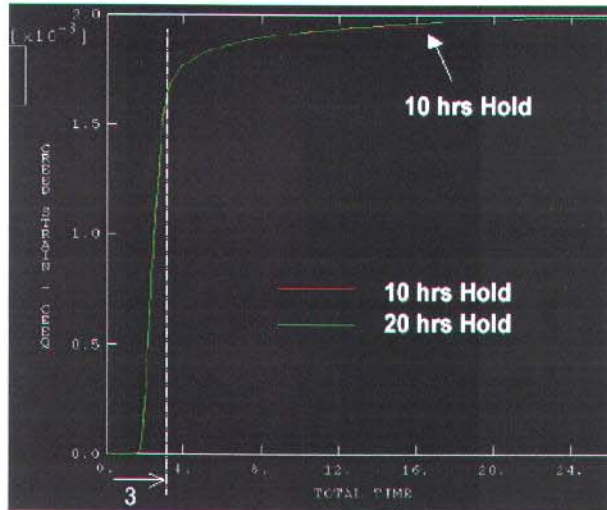
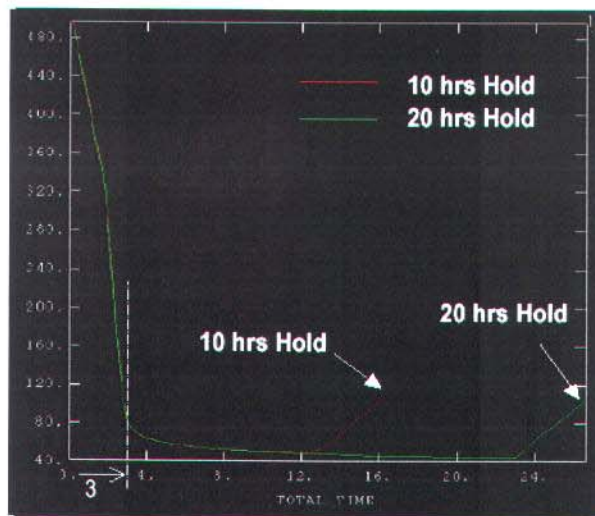


그림 162. 후열처리 온도 및 시간에 따른 크리프 변형률 변화

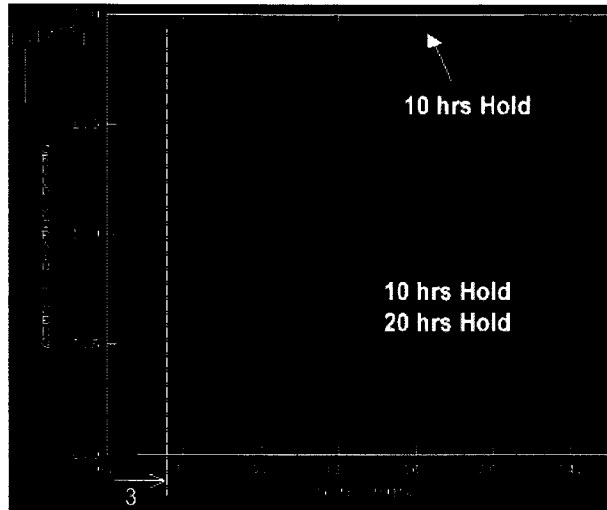


(a) 크리프 변형률

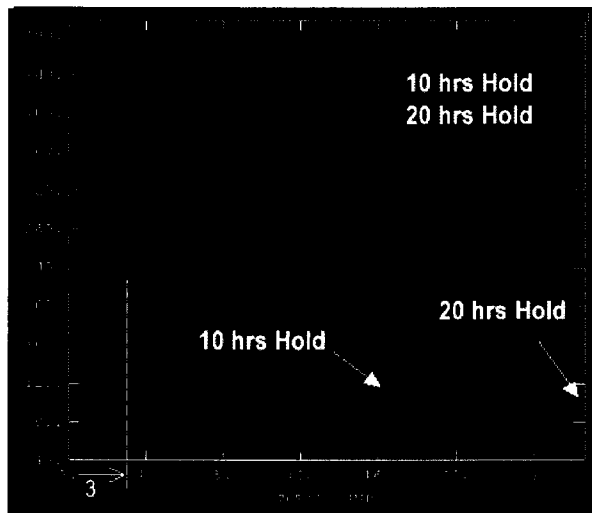


(b) 잔류응력

그림 163. 잔류응력 완화에 대한 후열처리시 최고온도 지속시간의 효과



(a) 크리프 변형률



(b) 잔류응력

그림 163. 잔류응력 완화에 대한 후열처리시 최고온도 지속시간의 효과

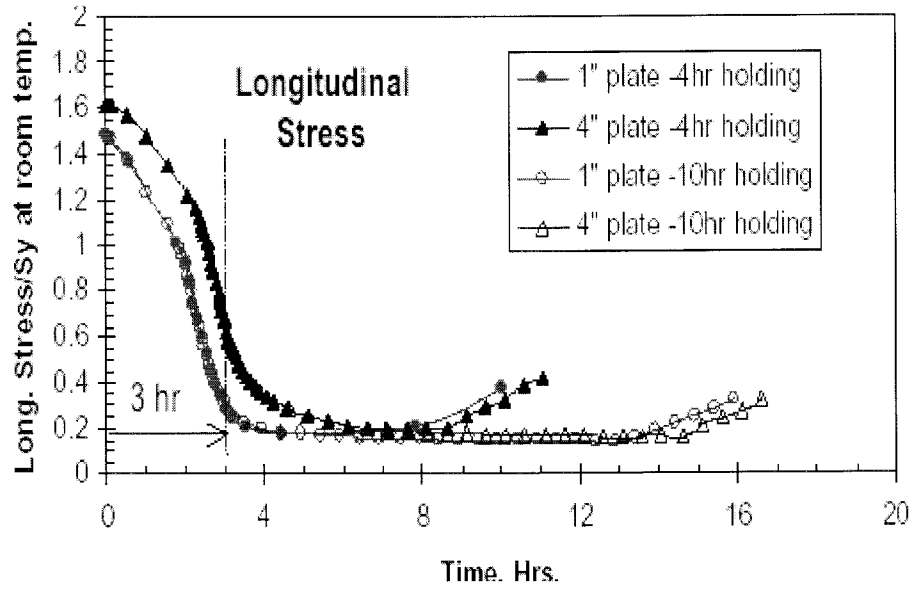


그림 164. 두께에 따른 잔류응력 완화 효과

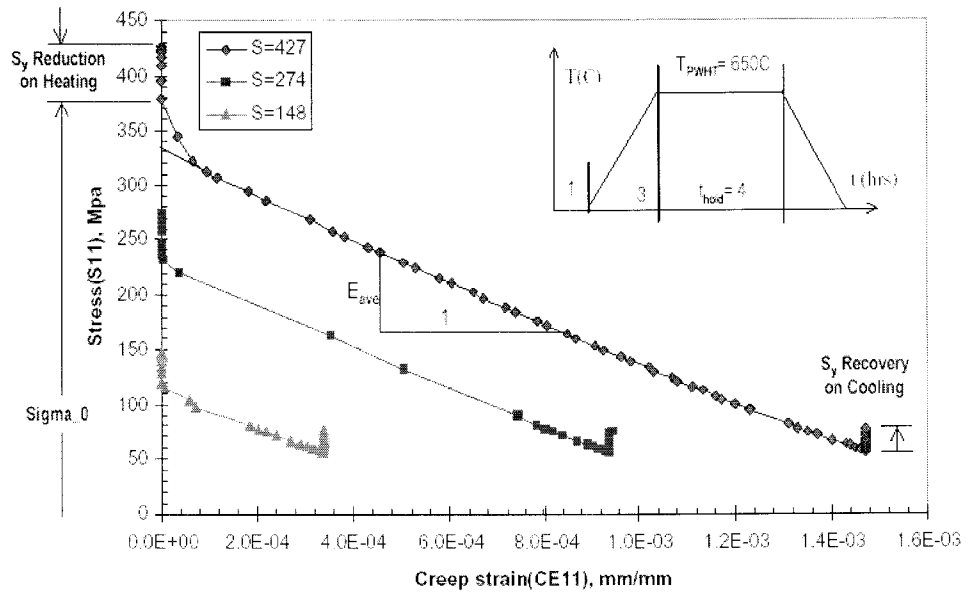


그림 165. 다양한 초기 잔류응력 크기에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계

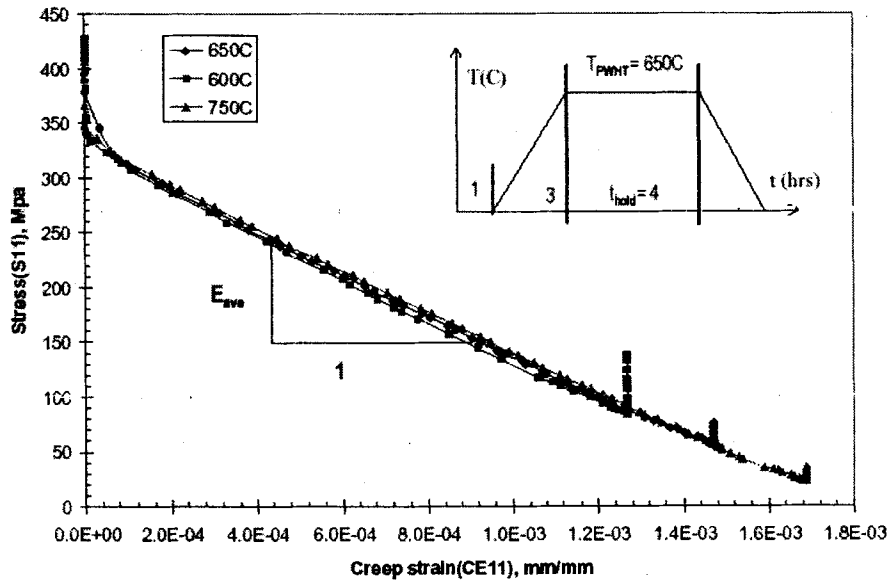


그림 166. 다양한 후열처리 지속 온도에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계

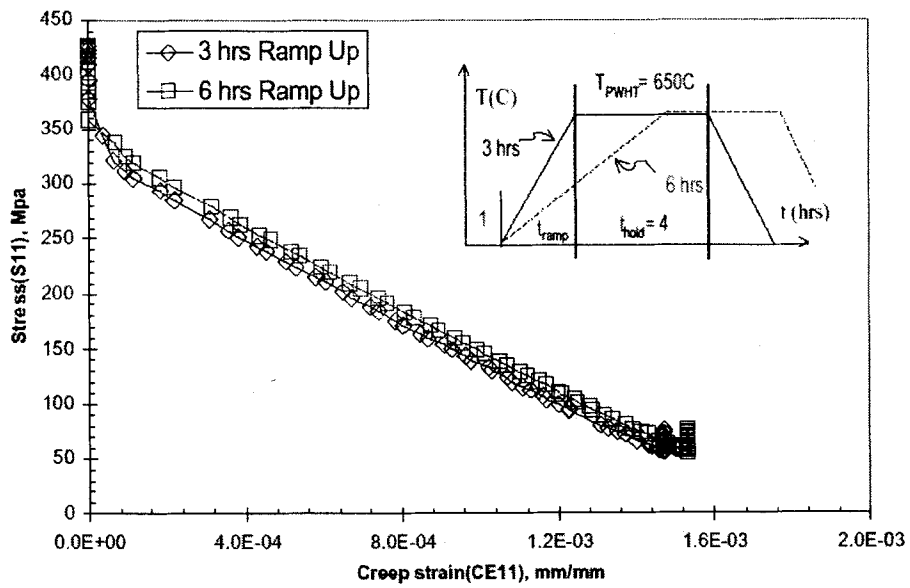


그림 167. 다양한 후열처리 ramp up 시간에 따른 크리프 변형률과 잔류응력의 관계

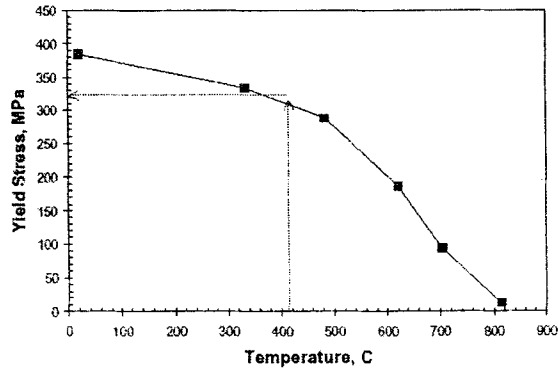
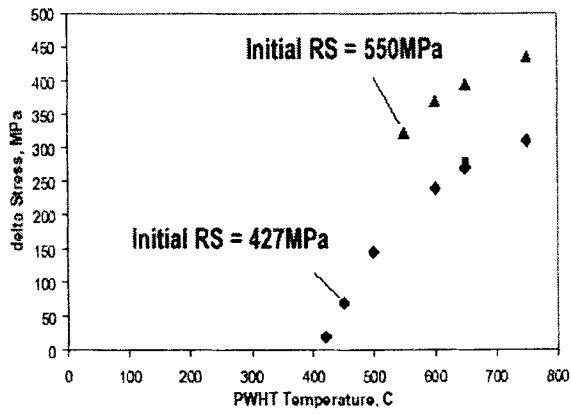
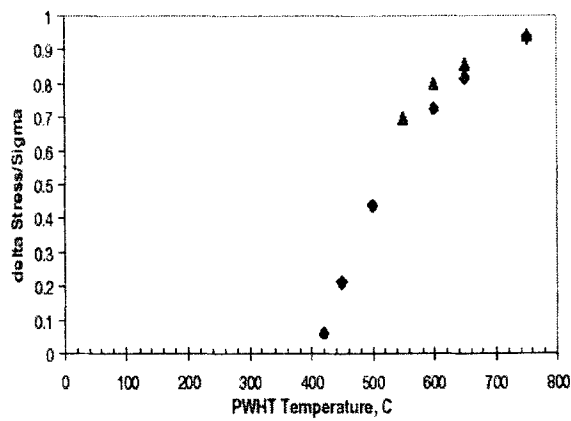


그림 168. 온도에 따른 항복강도 변화

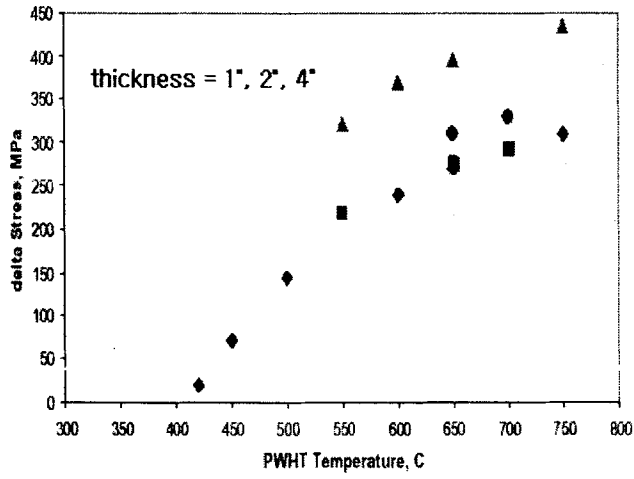


(a) Non-normalized

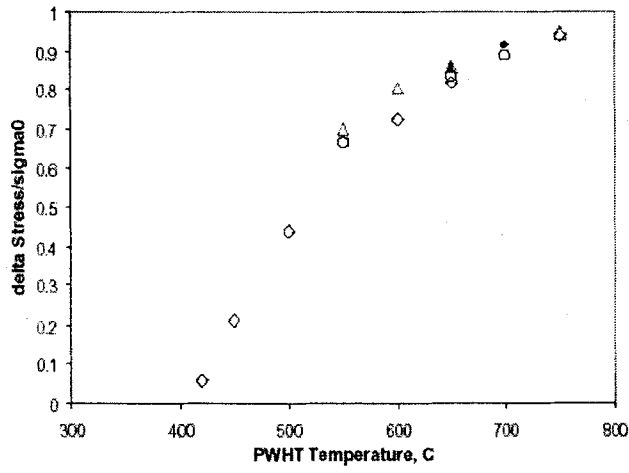


(b) Normalized

그림 169. 다양한 초기잔류응력에 따른 후열처리 지속 온도와 잔류응력 완화정도의 관계



(a) Non-normalized



(b) Normalized

그림 170. 다양한 두께에 따른 후열처리 지속 온도와 잔류응력 완화정도의 관계

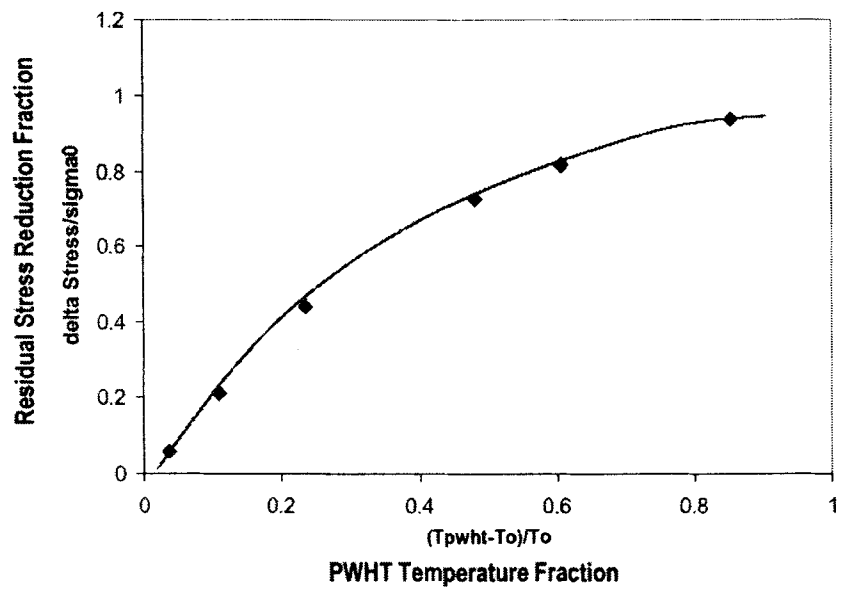


그림 171. 무차원화된 후열처리 온도와 잔류응력 완화 사이의 관계

7. 수소기인균열 해석기술 개발

원전설비 용접부의 수소기인균열은 원전 기기 제작/건설시 공정관리에 심각한 문제점을 야기시킬 수 있을 뿐만 아니라 가동중 원전의 이용률 및 안전성을 저하시키는 문제를 제기할 수 있다. 특히 용접부에서 주로 발생하는 수소기인균열은 용접 후 바로 발생하지 않고 일정한 시간이 흐른 후 발생하는 경향이 있어 ASME 코드에서는 이를 반영하여 수소제거 또는 잔류응력 제거를 위한 후열처리를 용접작업 완료 후 바로 수행하지 않는 용접 경우 최소한 48시간이 지난 후에 균열발생 여부를 검사하는 비파괴 검사를 수행토록 요구하고 있다. 문제는 이러한 요건을 만족시키기 위해 작업공기가 길어지고 전체적으로는 제작/건설 공기 지연과 발전소의 이용률 저하를 초래할 수 있다는 점이다.

본 연구에서는 수소기인균열 발생 가능성 및 시간을 단축하는 완화방안을 도출하기 위한 사전 단계로서 수소기인균열 해석기술을 개발하고자 한다. 우선적으로 수소기인균열의 발생기구, 특징, 발생이론 등을 검토하여 수소기인균열 발생 위치 및 시간을 예측할 수 있는 수소기인균열 해석절차를 개발한 후 이러한 해석절차를 기초로 하여 상용 유한요소 해석 패키지인 ABAQUS를 이용, 용접부 온도/응력 분포에 따른 수소 확산 해석을 수행하고자 한다.

가. 수소기인균열 해석절차 개발

1) 수소기인균열 발생기구

고장력강 용접시 용접부나 열영향부에 침투한 활성수소(diffusible hydrogen)에 의해 일어나는 수소취화 현상은 수소기인균열(HIC : hydrogen induced cracking), 수소유발균열 (hydrogen assisted cracking), 저온균열(cold cracking), 혹은 지연균열 (delayed cracking)을 유발시킬 수 있다.

이러한 유형의 균열은 용접부 보수를 위한 상당한 비용이 소요되므로 산업계에서 주요 문제로 제기되고 있다. 대부분의 수소기인균열은 균열을 발견하기가 매우 어려운데 이는 균열이 용접작업 후 바로 발생하지 않고 일정시간 혹은 몇일 후에 발생하기 때문이다. 수소기인균열은 그림 172에서 보는 바와 같이 열영향부 혹은 용접금속에서 발생한다.

수소기인균열이 발생하기 위해서는 일반적으로 다음과 같은 네 가지 조건이 필요하다.

- 수소의 공급
 - 피복재, 플럭스, 차폐가스내의 수소
- 인장응력
 - 응고 및 냉각에 따른 용접금속 및 모재의 수축
- 열영향부 미세조직의 경화
 - 용접 열사이클에 의한 조직의 경화(그림 173)
- 낮은 주위 온도
 - 저온으로 냉각시 수소원자가 수소분자 형성

용접봉에는 수소가 존재하며 플럭스에 습분이 있을 경우 수소가 용접부에 유입된다. 대기중의 습분이 아크용접시 플럭스에 유입될 수 있다. 수소는 H₂O의 분자형태로 존재하거나 플럭스 제작시 혹은 코팅에 사용되는 성분에 존재할 수 있다. 용접 아크는 수소분자가 이온화하여 각각의 수소원자로 분리되기에 충분한 고온의 열이 존재한다.



수소원자는 원자의 크기가 상대적으로 작기 때문에 아크의 고온에 노출될 경우 용접 풀 및 모재로 쉽게 확산해 갈 수 있다. 그림 174에서 보는 바와 같이 수소의 확산속도는 온도가 증가함에 따라 증가한다.

수소가 인균열이 발생하기까지 수소의 확산경로를 정리하면 다음과 같다.

- 수소의 공급
 - 피복재, 플럭스의 수분
 - 차폐가스의 수분, 녹, 기름 등
- 용접시 용접열에 의해 수분에서 분해된 수소원자가 용착금속에 침투
 - $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$
 - $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}$
 - $\text{H} \rightarrow \text{H}^+ + \text{e}^-$
 - $\Sigma \text{H}^+ \rightarrow$ 활성 수소
- 수소분자 형성
 - 고온과 저온에서 현격한 고용도 차이로 과포화된 수소가 존재
 - 응고시 수소원자는 Gibbs 자유에너지를 낮추기 위해 다른 수소원자와 재결합하여 수소분자 (H₂) 형성
- 수소분자가 재료내의 기공으로 이동하여 고압의 수소가스 형성

수소취성의 기구를 설명하는 이론은 수소가 어떻게 균열의 성장을 돕는가 즉, 어떤 작용을 하여 균열의 성장에 필요한 파괴에너지를 감소시키느냐를 설명할 수 있어야 하는 동시에 수소취화 현상시에만 일어나는 특이한 현상을 설명할 수 있어야 한다. 이러한 특이한 현상이란 재료내에 용해되어 있는 수소원자가 재료에 내부응력이나 외부응력이 주어지는 경우 응력이 높은 곳, 균열근처의 삼축 응력장으로 확산하여 삼축 응력장내의 수소농도가 커진다는 것이며 또 한가지는 수소취성이 일어나는 경우 균열이 불연속적으로 성장한다는 것이다. 압력선은 균열내에 있는 수소가 흡착선은 균열표면에 있는 수소가 격자선은 격자내에 있는 수소가 취성의 원인이 된다는 것이다.

○ 압력설(hydrogen pressure theory) [97]

- 금속격자내로 확산한 원자상태의 수소(H)가 공공(vacancy)이나 기공(void) 등에서 수소분자(H₂)를 형성하고 이들이 축적되어 가스가 된 다음 가스압력이 높아져서 그 힘에 의해 균열이 전파된다는 이론이다.
- 제한성 : 균열내의 수소압이 균열성장에 필요한 힘보다 커야 한다. 열역학적인 이유로 인해 재료의 균열내에 형성할 수 있는 수소압은 1기압을 넘을 수 없음.

○ 표면흡착 이론(surface adsorption theory) [97]

- 수소가 균열 선단에 흡착되어 균열성장에 필요한 표면에너지를 감소시켜 균열성장을 쉽게 일어나게 한다는 이론이다.
- 제한성 : 균열성장에 필요한 파괴에너지는 수소흡착에너지에 비해 약 10⁵배가 크므로 수소가 균열의 표면에 흡착할 때 발생하는 에너지는 균열의 성장에 도움을 주지 못함.

○ 격자설 [97]

- Trojano 등[98]이 주창한 이론으로서 격자내 특히 균열근처의 삼축응력장내에 용해되어 있는 수소원자가 취성의 원인이 된다는 이론이다. 응력이 주어졌을 때 격자내에 용해되어 있는 수소원자가 응력이 낮은 격자내의 타지역에서 응력이 높은 균열근처의 삼축응력장으로 확산하여 이 지역에서 수소농도가 증가하고 이 지역내의 응력과 수소농도가 임계수준에 도달하면 균열이 성장한다는 것이다.
- 제한성 : 이 이론은 격자내에 용해되어 있는 수소원자가 어떤 작용을 하고 어떤 경로를 밟아 균열의 성장을 돕느냐에 대해서 설명을 하지 않고 있음

한편, Trojano's model[98]에서는 먼저 재료 내부에 이미 존재하는 균열첨단에 하중에 가해지면 첨단 앞부분의 소성역에 탄성적으로 팽창되는 격자구조가 발생하고 그 주변에 고용화되어 있던 활성 수소들이 팽창된 격자구조 내부로 확산 침입한다. 침입한 활성 수소들이 안정상인 수소분자가 되어 수소가스 기공을 형성하며 기공과 균열 첨단 사이의 좁은 구역이 하중을 이겨내지 못하고 깨어져 나가며 계속해서 동일 현상을 반복하여 균열이 진전된다는 것이다.

고력장 용접시 용접부나 열영향부에 침투한 활성수소에 의해 일어나는 수소기인균열은 수소의 확산이 균열에 가장 큰 영향을 미친다. 다음은 수소기인균열의 특징을 요약하여 제시한 것이다.

- 수소에 의한 균열은 잠복기간(incubation time)을 거쳐 발생한다.
- 용접부가 고강도일수록 그리고 구속응력이 클수록 단시간에 균열이 발생한다.
- 잠복기간은 응력이 높아질수록 짧아진다.
- 인장강도 및 경도가 높아질수록 잠복시간과 수소균열을 유발하는 최소응력이 낮아진다.
- FCC 구조를 갖는 금속에서는 금속의 전성이 높고 수소의 확산이 느리기 때문에 수소기인 균열에 대한 저항성이 높다.

한편, 수소기인균열은 활성 수소량이 어느정도 충분할 때 용융선 가까이에서 일어나는

macro crack (under bead crack)과 약간 적을 때 일어나는 micro crack으로 구분할 수 있다.

○ Macro crack

- Macro crack은 용융선 바로 아래의 under edge에서 확산수소 및 마르텐사이트 조직에 의해 쉽게 균열 발생하며 용접 후 일정 시간이 지난 다음 비파괴시험을 통해 쉽게 발견 가능하다.

○ Micro crack

- Micro crack은 활성 수소량이 적절하게 적을 때 용접 열영향부에 확산한 활성수소가 Trojano's model에 따라 용접열응력에 의해 HAZ에 미세한 microcrack을 형성한다.

2) 수소기인균열 해석절차

그림 175는 수소기인균열의 해석 절차를 제시하고 있다. 그림 175와 같이 우선적으로 용접부 온도 및 잔류응력 해석을 수행하고 이러한 해석치 들을 토대로 수소확산 해석을 수행하여 관심있는 부위의 수소 집중 농도와 작용 주응력을 계산한다. 계산된 수소 집중 농도와 작용 주응력을 그림 175 상에 제시된 임계 수소 집중 농도-임계 주응력 선도와 비교하여 균열 발생 여부를 판단한다. 본 절에서는 해석절차의 핵심 기본 이론인 온도/응력 구배에 종속적인 mass 확산 이론과 균열 발생 임계기준에 대해 고찰 제시하고자 한다.

가) Mass 확산 이론[99]

○ 지배 방정식

- Fick's law의 확장 및 질량 보존 방정식과의 결합
- 모재내 확산 원소의 불균일한 solubility
- 온도와 압력 구배에 의한 mass 확산
- 기초 Solution 변수 $\phi = c/s$ (s는 모재의 solubility, c는 normalized한 모재의 질량 농도)
- 질량 보존 방정식

$$\int V dc/dt dV + \int S n \cdot J dS = 0 \tag{68}$$

여기서 V는 체적, S는 면적, n은 S에 바깥쪽으로 수직인 벡터, J는 확산 flux, n· J는 S를 떠나는 확산 flux임.

- General한 확산 flux 방정식

$$J = -sD[\partial \phi / \partial x + k_s \partial \ln(\theta - \theta Z) / \partial x + k_p \partial p / \partial x] \tag{69}$$

여기서 D는 diffusivity, ϕ 는 normalized 농도(=c/s)로서 activity이고, k_s 는 온도구배에 의한 확산을 나타내는 Soret effect factor, θ_z 는 절대 영 온도, k_p 는 equivalent pressure stress p의

구배에 의한 확산을 나타내는 pressure stress factor임.

- Fick's law

$$J = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = -D \cdot (s \frac{\partial \phi}{\partial x} + \phi \frac{\partial s}{\partial x}) \quad (70)$$

대부분의 경우 s는 온도의 함수이므로

$$J = -sD \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} - D \cdot (c/s) (\frac{\partial s}{\partial \theta}) (\frac{\partial \theta}{\partial x}) \quad (71)$$

여기서 첫 번째 term은 normalized된 농도 관련 term이며 두 번째 term은 온도구배에 의한 확산 관련 term임.

- General한 확산 flux 방정식과 Fick's law내 온도구배 관련 term을 비교하면

$$k_s = c(\theta - \theta_z) / s^2 \frac{\partial s}{\partial \theta} \quad (72)$$

여기서 ABAQUS내에서 Fick's law를 이용시 자동적으로 k_s 계산이 수행되어짐.

- k_p 를 특정화하는 것에 의해 Fick's law의 확장 형태가 다음과 같이 유도됨.

$$J = -D \cdot (\frac{\partial c}{\partial x} + sk_p \frac{\partial p}{\partial x}) \quad (73)$$

여기서 k_s 계산은 자동적으로 수행되어짐.

- 질량 보존 법칙에 Fick's 1st law를 대입하면 Fick's 2nd law와 동일해짐.

$$\int V dc/dt dV + \int V \frac{\partial J}{\partial x} dV = \int V dc/dt - \frac{\partial}{\partial x} D \cdot \frac{\partial c}{\partial x} dV = 0 \quad (74)$$

나) 균열 발생 임계기준[100]

○ 임계 응력/농도

- Satoh 등

$$\sigma_{imp,cr} = -73 \log(H_{R,cr}) + 83 \quad (75)$$

$$H_{R,cr} = H_0 \exp(\beta \tau_{cr}) \quad (76)$$

$$\beta \tau_{cr} = 3.75(CE-0.40) + \log H_0 \quad (77)$$

여기서 $H_{R,cr}$ 은 잔류 수소의 임계 농도, H_0 는 초기 용접부 수소농도이며 1.7kJ/mm²의 아크

에너지가 가해진 HT780 Steel 용접부로부터 유도된 식임.

○ 임계 응력세기(stress intensity)

- Karppi 등

$$\Sigma I < \Sigma c = 785 - 1.2Hv - 250 \log H_{R100} \quad (78)$$

$$\Sigma I = FI \cdot m \cdot RF \quad (79)$$

여기서 ΣI 는 응력세기계수의 일종, FI는 비드 형상에 종속적인 응력 severity parameter, M은 0.03과 0.06 사이의 값, RF는 restraint intensity(N/mm/mm), H_{R100} 은 TR=100°C에서의 잔류농도, Hv는 Vickers 경도임.

나. 수소기인균열 해석

수소기인균열 발생 지점과 시간을 예측하기 위해 수소기인균열 해석절차를 이용하여 온도, 응력 해석후 수소 확산 해석을 수행하였다. 수소기인균열 발생시의 임계 수소 농도/주응력을 도출하기 위해서는 광범위한 실험이 요구되므로 따라서 본 연구에서는 임계 수소 농도/주응력과 비교를 통한 정확한 수소기인균열 발생 지점과 시간을 예측하기 보다는 온도, 잔류응력 및 수소 확산 해석 결과를 토대로 개략적인 균열 발생 지점과 시간을 예측하고자 한다.

1) 해석대상

- 본 해석모델의 타당성을 검증하기 위해 TWI[101]에서 해석한 바 있는 C-Mn 강 다층 용접부를 해석 대상으로 선정하였다.(그림 176 참조)
- 표 45는 C-Mn 강의 화학조성을 나타내고 있다.
- 표 46은 용접 변수들을 제시하고 있다.

표 45. C-Mn 강의 화학조성

Composition	C	Mn	Si	Nb
C-Mn Steel	0.18	1.50	0.1-0.5	0.003-0.1

표 46. 다층 용접 모델에 대한 용접변수 특성

No. of Pass	Current	Voltage	Speed	Preheat Temp.	Interpass Temp.	Time between Passes
14	680A	31V	400mm/min	100°C	100°C	20min

2) 재료물성치

○ 열적/물리적 재료물성치[101]

- 그림 177은 온도해석시 입력된 온도 변화에 따른 비열 및 열전도도를 나타내고 있다.
- 밀도는 7800kg/m^3 로 설정하였다.

○ 기계적 재료물성치

- 그림 178은 잔류응력 해석시 입력된 온도변화에 따른 탄성계수, 열팽창계수 및 항복강도를 나타내고 있다.
- 프와송비는 0.27로 설정하였다.

○ 확산 재료물성치[101]

- 그림 179는 수소 확산 해석시 입력된 온도변화에 따른 diffusivity를 나타내고 있다.
- 그림 180은 수소 확산 해석시 입력된 온도변화에 따른 solubility를 나타내고 있다.

3) 온도해석

○ 경계조건[101]

- 초기 온도는 예열에 의해 100°C 로 가정되어진다.
- 그림 181과 같이 시간에 따른 열유속 profile 함수 $f(t)$ 가 정의되어진다.
- 용접시 용접금속에 가해지는 열유속은 다음과 같이 정의되어진다.

$$q = dQ/dt = 2v \frac{\eta Q' - \rho c (T_p - T_a) A_n}{L} f(t) \quad (80)$$

여기서 v 는 용접속도, Q' 는 전압×전류인 입열량, η 는 효율, ρ 는 밀도, c 는 비열, T_p 는 preheat 또는 interpass 온도, T_a 는 주위온도로서 20°C , A_n 은 용착금속 면적, L 은 용접 풀 길이이다.

- 해석 대상의 외면은 자연대류 상태라고 가정하였다. (열대류계수 $h=10\text{W/m}^2\text{C}$)

○ 유한요소 모델링

- 그림 182는 온도, 잔류응력 및 확산 해석시 사용된 유한요소 모델을 보여주고 있다.
- 유한요소 특성은 4절점 요소이며 8836개의 절점과 2564개의 요소로 구성되어있다.

○ 온도해석

- 1차년도 연구에서 개발한 온도해석 기술에 따라 ABAQUS의 model change 기능과 열전도 근거 해석을 이용하여 용접부의 온도분포를 계산하였다.
- 그림 183은 5번째 용접 패스 이후 시간 경과에 따른 용접부 온도분포 변화를 나타내고 있다. 그림 183에서 보이는 바와 같이 용접금속 용착후 용접금속에서 매우 높은 온도를 나타내나 시간 경과에 따라 점차 열의 확산되어 냉각되는 현상을 관찰할 수 있다.
- 그림 184는 본 온도해석의 타당성을 검증하기 위해 그림 182에서 제시된 A점의 시간에 따른 온도 변화를 TWI의 연구결과와 비교 제시한 것이다. 그림 184에서 보이는 바와

같이 TWI 결과[101]와 잘 일치하며 따라서 본 연구의 온도해석 결과는 타당하다고 판단되어진다.

4) 잔류응력 해석

○ 경계조건

- 잔류응력이 크게 걸리도록 C-Mn 강 용접부 양단을 고정시키는 기계적 경계조건을 부가하였다.

○ 응력 해석

- 온도이력을 입력자료로 활용하여 열탄소성 평면 변형률 응력 해석을 수행하였다.
- 그림 185는 상온으로 냉각되었을때의 각 방향의 최종 잔류응력 분포를 나타내고 있다.
- 그림 185(a)은 횡방향(용접방향에 수직인 시편 폭 방향) 잔류응력 분포를 나타내고 있다. 그림 185(a)로부터 횡방향 잔류응력 분포는 bending 형태로서 상부에 인장이, 하부에 압축이 작용함을 알 수 있다. 특히 위쪽면 열영향부와 모재쪽에 용접금속부 보다 큰 인장응력이 작용되어지고 있다.
- 특히 수소기인균열은 용접방향에 평행하게 발생하므로 횡방향 잔류응력 분포는 매우 중요하다. 따라서 잔류응력 측면에서만 살펴보면 용접방향에 평행한 수소기인균열 발생 가능성은 용접금속부와 하부 보다는 상부 열영향부와 모재쪽이 높다고 예측할 수 있다.
- 그림 185(b)은 잔류 hydrostatic 압력 분포를 나타내고 있다. Hydrostatic 압력의 부호는 응력과 반대(-부호는 인장의 개념)임을 명심하여야 한다. 즉, hydrostatic 압력의 경우 - 부호의 위치는 팽창 상태하에 있음을 의미하며 기공 형성에 따른 수소 집중 site가 되어 수소기인균열 발생 위치가 될 수 있다. 그림 185(b)로부터 오른쪽 상부의 용접금속부와 열영향부 계면 근처에서의 가장 작은 hydrostatic 압력이 작용하므로 응력구배에 의한 수소 집중이 발생할 것으로 예상된다.
- 그림 185(c)으로부터 잔류 von-Mises 유효응력이 항복강도보다 더 크게 작용함을 알 수 있다. 그림 185(c)으로부터 용접금속부와 상부 열영향부/모재부에서 소성변형이 발생할 것으로 예상된다.

5) 수소 확산 해석

○ 경계조건

- 초기 수소농도는 0ppm으로 가정되어진다.
- 용착되는 금속의 수소 flux는 그림 186과 같은 시간에 따른 변화를 가진다.
- 용접부 외면으로 모여진 수소는 대기중으로 전부 확산된다는 가정으로부터 용접부 외면의 수소 농도는 0ppm으로 설정한다.

○ 확산 해석

- 타당성 검증

- 그림 187은 온도 구배만을 고려한 확산 해석 결과로서 용접 완료후 20시간 경과후 X-X 선상의 normalized된 수소농도를 나타내고 있다.
- 그림 187에서 제시된 바와 같이 TWI 결과[101]와 비교시 매우 잘 일치하므로 본 연구 결과가 타당함을 알 수 있다.

해석상 온도 종속적인 solubility 의 중요도

- Solubility의 온도 종속성을 고려한 경우와 미고려 경우에 대해 온도 구배 고려 확산해석을 수행한 후 두 경우를 비교한 결과를 그림 188에서 제시하고 있다.
- 그림 188에서 보이는 바와 같이 solubility를 온도에 무관하게 설정하여도 해석 결과는 거의 동일함을 알 수 있으며 계산시간은 20배이상 단축됨을 알 수 있다.
- 따라서 적절한 온도에서의 solubility를 대표값으로 가정하여 해석하여도 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

응력 구배의 중요도

- 응력구배를 고려하지 않은 확산 해석과 응력 구배를 고려한 확산해석을 수행한 후 두 경우에 대해 결과를 비교 평가하였다
- 물론, 두 경우 모두 온도 및 농도 구배에 의한 확산은 해석시 기본적으로 고려되어진다.
- 그림 189(a)는 응력 구배를 미고려한 확산 해석결과이며 그림 189(b)는 응력 구배를 고려한 확산해석 결과이다.
- 그림 189로부터 응력 구배를 미고려한 경우와 응력 구배까지 고려한 경우 수소가 집중되는 위치가 다르므로 정확한 수소 집중 부위를 찾기 위해서는 응력 구배까지 고려된 해석을 수행하여야만 한다.
- 또한 그림 189(b)의 수소 집중 위치는 잔류응력 해석에서 미리 예측한 수소 집중 위치, 즉 최소 hydrostatic 압력 발생 위치와 동일함을 알 수 있다.
- 그림 189(a)는 수소가 특정 부위에 집중된 용접 완료후 20시간 경과시의 결과이며 그림 189(b)는 수소가 다른 특정 부위에 집중된 용접 완료후 60시간 경과시의 결과로서 두 경우 모두 전체 수소 농도 분포가 시간에 대해 변화하지 않는 정적인 상태하에 있다.
- 따라서 수소 농도 측면에서 고찰할 때 수소기인균열이 발생한다면 응력 구배 미고려 해석 경우에는 수소가 집중되어 안정화되는 20시간 이후에 균열이 발생할 것이라는 결과를 도출할 수 있으며 응력 구배 고려 해석의 경우에는 60시간 이후에 균열이 발생할 것이라는 결과를 도출할 수 있다.
- 그림 189(a)과 (b)에 나타난 바와 같이 특정부위에 집중되는 normalized된 수소 농도는 각각 2.93×10^5 과 4.46×10^5 으로 응력 구배를 고려한 경우가 보다 높은 수소 집중도를 보이며 그림 185(a)에서 보이는 바와 같이 응력 구배 고려 경우의 수소 집중 위치에서 횡방향 잔류응력 값이 응력 구배 미고려 경우보다 크다. 따라서 균열 발생 가능성은 보다 높은 수소 집중도와 횡방향 잔류응력을 나타내는 응력 구배 고려 경우가 높다.
- 또한, 20시간 경과 이후 온도구배는 영이 되므로 응력구배에 의한 수소 확산이 지배적으로 발생됨을 알 수 있다.

다. 수소기인균열 완화방안 도출

현재 제작, 건설 및 보수 용접 현장에서는 수소기인균열 발생을 방지하기 위한 수소 발생원 차단(예 : 용접봉 건조 등) 및 용접후 열처리(수소 제거만을 목적으로 하는 후열처리가 제작 현장에서 수행되어지고 있음)를 수행하고 있으며 재질 특성 또는 후열처리 장치 설치상 문제점 등에 기인하여 용접후 바로 열처리를 할 수 없는 경우(ASME 코드 상에서는 템퍼 비드 용접 수행)에만 비파괴 시험 대기시간을 48시간으로 규정하고 있다. 그러나, 이러한 비파괴검사 대기시간에 기인하여 제작/건설/보수 공정이 장시간화 되어져 경제적 비용이 크며 후열처리 적용 경우에도 열원 에너지 비용 및 제작/건설/보수 공정 장시간화에 따른 경제적 비용 또한 크다. 따라서 수소기인균열 완화 목적 후열처리를 적용하는 제작/현장/보수 용접의 경우, 후열처리를 대체할 수 있을 뿐만 아니라 후열처리 미수행 용접 경우에도 48시간의 대기시간 코드 요건을 면제(실제적으로는 대기시간 단축) 받을 수 있게 하는 보다 경제적인 완화방안을 도출하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 기 개발된 수소기인균열 해석절차와 전기 전송(electrotransport) 이론을 적용하여 수소기인균열 발생 가능성과 시간을 감소시키는 완화방안을 도출하고자 한다. 우선적으로 수소기인균열 전기 전송 이론에 대해 고찰한 후 기존 수소 확산 이론에 전기 전송 이론을 결합시킨 전기장 고려 수소 확산 해석절차를 개발 제시하고 적용하였다. 최종적으로는 전기장 고려 수소 확산 해석절차 내의 전기 전송 이론의 타당성을 검증할 뿐만 아니라 수소기인균열 완화방안의 하나로서 개발하고자 하는 실험 및 전기 전송 시작품 구성을 개략적으로 제시하였다.

1) 전기 전송 이론 고찰

전기 전송처리는 금속 내에 침입형/치환형 용질(solute)을 전기적으로 정제하는 방법이다.

가) 전기 전송 이론

- 금속이 전기장 하에 있으면 질량이동현상(mass transport phenomenon)이 일어난다. 이러한 전기적 전도성과 확산이 결합하여 전기, 진동 그리고 결합의 spatial aspect에 의존하여 전기 전송 현상을 만들어낸다.
- 고체 내에서 원자이동은 식(81)에서 나타낸 것처럼 다양한 구동력의 결과이다.

$$J = -cM(\delta\mu/\delta x + \delta T/\delta x + e\delta V/\delta x) \quad (81)$$

여기서 J 는 단위면적을 단위시간에 이동을 의미하는 유속이고, c 는 단위 체적당 원자들내 확산되는 화학종의 농도, M 은 단위 driving force당 전송 속도(mobility), $\delta\mu/\delta x$ 는 화학 포텐셜 구배, $\delta T/\delta x$ 는 열구배, $\delta V/\delta x$ 는 전압 구배, e 는 전자의 기본 전하량이다.

- 전류밀도로 인한 전기 전송은 두 가지 힘으로 나타낼 수 있는데 첫번째는 valence Z_i (수소 경우 1), 전자의 기본 전하량 e 와 전기장 구배 E 의 곱인 $Z_i e E$ 로 정의할 수 있는 electrostatic force F_{es} 이다. 이 힘은 양극 이온은 음극을 향하게 하고 음극 이온은 양극으로 향하게 한다.
- 두 번째 힘은 friction-wind force F_{wd} 로 전류밀도와 직접적으로 관련이 있다. Friction wind force는 한 개의 결합에 대하여 전자에 의한 초당 net momentum lost로 $nmV_D/t_D N_D$ 로 주어진다. 여기서, n 과 N_D 는 전자와 결합밀도이고, m 은 전자 질량, V_D 는 electron drift velocity, 그리고 t_D 는 electron scattering에 대한 충돌시간(collision time)이다.
- Resulting Force, F_i 는 아래와 같이 주어진다.

$$F_i = F_{es} - F_{wd} = Z_i e E - F_{wd} \quad (82)$$

여기서 Friction-wind force, F_{wd} 는 $\delta_i E$ 로 주어지며 δ_i 는 i 에 대한 마찰계수이다. 그러므로 식(82)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i = eE(Z_i - \delta_i/e) = eEZ^* \quad (83)$$

여기서 Z^* 는 effective valence이고 $Z^* = Z_i - \delta_i/e$ 로 주어진다.

- 용질의 이동속도 v_i 는 전기력 F_i 에 비례하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i = B_i \cdot F_i \quad (84)$$

여기서 비례상수 B_i 는 절대이동도(absolute mobility)로 알려진 비례상수이다.

- 절대이동도(absolute mobility)와 확산 이동은 Nernst-Einstein관계가 있다.

$$D_i = B_i kT(1 + d \ln \gamma / d \ln c) \quad (85)$$

여기서 k 는 볼츠만 상수이고, T 는 절대온도, γ 는 활동도 계수, c 는 용질농도이다. 이상용액에서, 활동도 계수는 상수이고 농도에 무관하다. 위 식은 다음과 같이 나타낼 수가 있다.

$$Z^* = \frac{U_i \cdot k \cdot T}{D_i \cdot e} \quad (86)$$

여기서 U_i 는 단위 전기장 당 이동속도로 나타나는 electronic mobility이다. 식(86)은 주어진 온도, T , applied electric field, E , 그리고 수소확산계수, D_H 가 주어질 경우 수소의 이동속도,

\bar{v}_H 를 결정하는데 사용되어질 수 있다.

나) 수소의 전기 전송

- 위에서 나타낸 식을 사용하여 수소의 절대이동도(absolute mobility), B_H 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$B_H = v_H / F_i = D_H / f k T \quad (87)$$

여기서 f 는 격자 관련 상수이다. 따라서 속도는 식(88)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_H = (D_H / f k T) e E Z^* \quad (88)$$

- 식(86)을 다시 정리함으로써, 수소의 전기 전송을 의미하는 수소에 대한 electric mobility, U_H (단위 전기장 당 이동속도)는 아래와 같이 된다.

$$U_H = \frac{\partial v_H}{\partial E} = \frac{D_H}{f \cdot k \cdot T} \cdot e \cdot Z^* \quad (89)$$

- 수소 flux는 주어진 작용 전기장 E 에 대하여 용접부에 대한 electric mobility와 concentration profile을 알 수 있을 경우 아래의 식으로 결정할 수 있다.

$$J_H = N_H U_H E - D_H (\delta N_H / \delta x) \quad (90)$$

여기서 N_H 는 atoms/cm³에서 수소 농도이다.

- 강에서 용접부의 수소가 보다 낮은 농도자리로 이동할 경우에, 확산 flux와 전기 flux가 식(90)으로 나타낼 수 있다.
- 많은 금속과 합금은 많은 양의 수소를 함유할 수 있고, 수소는 고용체(solid solution)내에서 매우 잘 움직인다.
- 표 47은 다양한 용질을 함유하는 금속과 합금의 종류, 전기 전송의 방향성을 나타내고 있다.

표 47. 침입형 원자의 전기 이동 방향

Solvent metal	Anode-directed solutes	Cathode-directed solutes
α -Fe	-	H,D,C,N
γ -Fe	N	H,C,B
Ni	-	H,D,C
Co	-	C
V	-	C,N,O
β -Ti	O	C
W	-	C
Ta	-	C,H
Mo	-	H

2) 전기장 고려 수소 확산 해석절차

전기장을 고려한 수소 확산 해석절차는 그림 190과 같이 개략 해석과 상세 해석으로 나누어 진다. 그림 190에서 보이는 바와 같이 개략 해석과 상세 해석 경우 모두 온도, 잔류 응력, 전기장 및 전기장 미고려 확산 해석까지는 동일하나 확산 해석 단계에서 분리되어진다.

가) 개략 해석

- 전기장 미고려 확산 해석으로부터 수소 확산 flux (식(81)의 첫번째/두번째 항의 합) J_D 결정
- 전기장 해석으로부터 전극간 평균 전압구배 계산
- 전압 구배에 의한 확산 flux(식(81)의 세번째 항) J_E 계산

$$J_E = N_H U_H E \tag{91}$$

- 식(1)에 따라 총 확산 flux J_T 계산
- 이동 대상 체적 V_{st} 결정
- 대상 체적 내 수소 원자수 결정

$$\#_H = N_H \times N_O \times V_{st} \times \frac{\rho_{st}}{A t_{st}} \tag{92}$$

여기서 N_O 는 아보가드로 수, A 는 단면적, t_{st} 는 이동 거리, ρ_{st} 는 밀도임.

- 확산 시간 t 계산

$$t = \frac{\#_H}{A J_T} \tag{93}$$

나) 상세 해석

- 전기장 미고려 확산 해석으로부터 수소 확산 flux (식(81)의 첫번째/두번째 항의 합) J_D 결정
- Diffusivity D 와 J_D 로부터 식 (93)에 의해 A_1 계산

$$A_1 = J_D / D \quad (94)$$

- 유효 Diffusivity D_{eff} 도출

$$D_{\text{eff}} = D - \frac{N_H U_H}{A_1} \frac{\partial V}{\partial x} \quad (95)$$

- $N_H U_H / A_1 \partial V / \partial x$ 를 state variable D_v 로 정의한 후 diffusivity가 온도와 D_v 에 종속적이라고 정의
- 수소 확산 해석 수행
- 농도 및 시간 결정

3) 전기장 고려 수소 확산 해석

전기장 고려 수소 확산 해석절차 중 개략 해석절차에 따라 수소기인균열 해석대상이었던 C-Mn 강 다층 용접부에 대해 수소 확산 해석을 수행하였다.

가) 전기장 해석

- 재료물성치
 - 해석에 사용된 저항율(resistivity)은 $10^{-5} \Omega \text{ cm}$ 이다.
- 경계조건
 - 그림 191은 전기적 경계조건을 나타낸 것으로 양극과 음극의 위치는 응력 구배 미고려/고려 수소 확산 해석결과를 토대로 결정하였다.
 - 그림 191(a)는 응력 구배 미고려 수소 확산 해석시의 수소 집중 부위로부터 응력구배 고려 수소 확산 해석시의 수소 집중 부위를 향해 전류가 흘러 최종적으로 음극 표면에 수소가 모여 방출되도록 전극을 설치한 것이며 그림 191(b)는 응력 구배 미고려 수소 확산 해석시 수소집중부위로부터 바로 상면쪽으로 수소가 확산 방출되도록 전극을 설정하였다.
 - 전류는 각 양극에서 면적 1 cm^2 에 10000 A 가 흐르도록 하였다.
 - 외면에서는 자연 열대류(대기온도 25°C , 열대류계수 $10 \text{ W/m}^2 \text{C}$) 상태이다.

○ 전기장 해석결과

- 그림 192(a)와 (b)는 그림 191에서 제시된 경우1과 2에 대한 각각의 유효 전압 구배 분포를 나타내고 있다.
- 표 48은 각 경우의 방향별 평균 전압 구배를 나타내고 있다.

표 48. 경우에 따른 방향별 평균 전압구배의 절대치 및 유효 평균 전압구배

(단위 : V/cm)

Case	x-direction	y-direction	Effective
1	0.052	0.147	0.156
2	0.132	0.166	0.212

나) 수소 확산 해석

○ 재료물성치

- 표 49는 해석에 사용된 유효 effective valence, diffusivity, mobility를 나타내고 있다.

표 49. 온도에 따른 전기 해석 관련 재료물성치

Temp.(°C)	Effective valence	Diffusivity (cm ² /sec)	Mobility (cm ² /sec V)
25	0.27	1.3×10 ⁻⁶	1.37×10 ⁻⁵
100	0.35	8.6×10 ⁻⁶	9.38×10 ⁻⁵

○ 이동 대상 체적 결정

- 응력구배 미고려 수소 확산 해석결과로부터 수소가 상면 1/5 지점에 집중되므로 이동 대상 면적은 0.5cm²으로 결정하였으며 이동 거리는 0.2cm로 결정하였다.
- 즉, 이동 대상 체적은 0.1cm³이다.

○ 확산 시간 계산

- 응력구배 미고려 수소 확산 해석결과(용접 완료후 1시간 경과시점)로부터 수소 집중 부위의 평균 수소 농도 N_H를 결정한 결과 7.8ml H₂/100g fused metal(=4.9963 ×10¹⁸ atoms/cm³)이다.
- 표 50은 개략 해석절차에 따라 계산된 확산시간을 온도 변화에 따라 나타내고 있다.
- 표 50 상의 J₀는 응력 구배 미고려 수소 확산 해석 결과로부터 결정되어진 값이다.
- 표 50으로부터 25°C에서 경우 1과 2에 대해 각각 3.9시간과 3.5시간 만에, 100°C 에서는 경우 1과 2에 대해 각각 1.4시간과 1.1시간만에 수소를 확산 방출시킬 수 있음을 알 수 있다.
- 또한, 경우 2가 경우 1보다 빨리 수소를 확산시키므로 경우 2의 경우가 보다 적절한 전극 배치임을 알 수 있다.
- 표 50으로부터 온도 증가시 확산 시간이 단축됨을 알 수 있다.
- 그림 193은 coupled 온도-전기장 해석을 수행하였을 때의 1시간 경과후의 온도 분포(경우 1, 초기온도 25°C)를 보여주고 있다. 그림 193으로부터 온도가 거의 상승하지 않음을 알

수 있다. 그러나 저항이 보다 큰 재질의 경우에는 무시못할 만큼 상승되어질 수 있으며 이에 따라 확산이 보다 활성화되어지기 때문에 확산시간은 단축되어질 것이다. (표 50은 온도가 일정하게 유지된다는 가정하에서 계산되어진 것임)

- 용접후 상온으로 냉각되기전에 전기 전송 처리를 수행한다면 후열처리에 비하여 짧은 시간내에 경제적으로 용이하게 수소를 확산 제거시킬 수 있음을 본 해석을 통해 입증하였다.
- 10000A의 고전류가 필요하나 이러한 전류는 아크 용접기의 전원 공급장치를 이용하면 용이하게 얻을 수 있다.
- 개략 해석절차를 이용하지 않고 상세 해석절차를 사용한다면 보다 세밀하고 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상되며 현재 전압 구배를 state variable로 변환시키는 사용자 정의 보조 프로그램을 구축하는 단계로서 1단계 연구 종료 이전에 상세 해석절차 적용 결과도 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

표 50. 개략 해석절차를 통한 확산 시간

Temp.(°C)	v_H ($\times 10^{-5} \text{cm/sec}$)		J_E ($\times 10^{13} \text{atoms/cm}^2 \text{sec}$)		$J_D(\times 10^{13} \text{atoms/cm}^2 \text{sec})$		$J_T(\times 10^{13} \text{atoms/cm}^2 \text{sec})$		t (hr)	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
25	0.214	0.290	1.069	1.449	2.473	2.473	3.542	3.922	3.9	3.5
100	1.463	1.989	7.310	9.938	2.473	2.473	9.783	12.41	1.4	1.1

주) J_D 는 응력구배 미고려 수소 확산 해석으로부터 구한 유효 mass flux 임.

4) 검증 실험 및 시작품 제작

전기장을 고려한 수소 확산 해석을 통해 전기 전송 장치의 타당성을 입증하였으나 바로 실제 적용하는데는 무리가 따른다. 따라서 현장 적용을 위한 준비 단계로서 시작품을 개발하고 실험을 통한 전기 전송 처리 시작품의 타당성을 검증하고자 한다.

가) 전기 전송 처리 시작품

○ 구성

- 그림 194는 전기 전송 장치 시작품의 개략적 구성도를 보여주고 있다.
- 그림 194와 같이 고전류의 직류 전원을 공급하여 주는 전원 공급장치, 전류/전압을 제어하는 제어부, 전원을 전달해 주는 케이블, 용접부와 전기 접촉을 하는 전극부로 구성 되어진다.
- 용접 열영향부에 전류가 흐를 수 있도록 크램프를 이용하여 전극을 연결한 후 전원 공급장치에서 직류전류를 공급하면 수소는 음극방향으로 이동하게 되므로 국부부위의 수소를 감소시킬 수 있고 이로 인해 수소기인균열 감수성 완화효과를 기대할 수 있다.
- 이러한 전기전송처리 방식을 이용하면 제작시 두께 2인치 이상의 모든 강재에 적용되는

수소화산 열처리(300°C에서 4시간 유지)를 대신할 수 있으므로 비용절감에 기여할 수 있으며 운전 중에는 보수용접 후 후열처리로 대신하여 발전소 임계시간을 현격하게 단축시킬 수 있음

○ 핵심 기술사항

- 용접 열영향부에 고전류를 인가하기 위한 전원공급장치 주문제작 : 최대 직류 500A
- 전극 접촉시의 저항을 최소로 낮추기 위해 전기전도도가 우수한 구리를 이용하여 별도의 전극 연결부를 제작하였으며 이때 용접부와의 접촉면적을 최소로 하기 위해 절삭 가공함
- 현장 적용성을 향상시키기 위해서는 대형 구조물에 고전류를 인가할 수 있는 전극 접촉부의 개발이 요구됨

나) 시작품 검증 실험

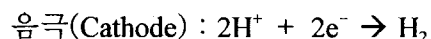
전기전송처리의 효율성을 확인하고 현장적용 가능여부를 판단하기 위한 검증실험 수행하였다. 그림 195는 전기장 고려 확산 해석 및 시작품 검증을 위한 실험의 흐름도를 보여주고 있다

○ 시편 및 전극접촉부 제작

- 전기 전송처리를 시편을 그림 196에 나타낸 바와 같이 40mm×22mm×15mm의 크기로 모두 3개를 제작하였다
- 시편의 양쪽 중앙에는 전극을 연결할 수 있도록 슷나사가 들어갈 5mm의 홈을 제작하였다.
- 시편재질 : 탄소강(SM45C)

○ 수소 장입

- 시편을 600mesh로 연마한 후 시편에 수소를 장입시키기 위해 3% H₂SO₄용액에 침적시켜 탄소 전극봉과 연결하여 3mA/cm의 전류밀도로 48시간 동안 흘려주었다.



- 양극의 탄소봉에서는 금속의 용해가 일어나며 음극의 탄소강 시편표면에서는 수소가 발생한다.
- 수소는 원자상태 혹은 이온상태로 금속의 격자사이로 확산해 들어가므로 분자상의 수소반응을 억제시키는 As₂O₄을 첨가하여 시편표면으로 수소가 확산하여 장입될 수 있도록 하였다.

○ 전기 전송처리

- 수소장입이 완료된 시편을 헬에서 꺼내어 메탄올로 시편표면의 황산을 제거하였다. 시편 양단의 5mm의 홈에 나사와 전극 접촉부를 연결하여 (+)와 (-) 전극을 체결하였다.
- 시편에 전극을 체결한 후 표 51에 나타낸 조건으로 직류전원공급기를 이용하여 전류를 인가하였다
- 시작품 검증 시편의 전기 전송처리 : 그림 197

표 51. 전기 전송처리 조건

인가전류(Amp)	전압(Volts)	인가시간(min)	비고
450	0.3	60	

○ 수소함량 측정

- 수소장입된 시편에 대한 전자기수송 처리 후, 가스 크로마토그래피의 챔버에 시편을 넣고 아르곤가스를 퍼지하여 진공상태로 만든 다음 45℃에서 72시간 유지시킨 후 수소함량을 측정하였다(그림 198, 199)
- 표 52는 검증실험 시편의 수소함량 측정조건을 제시한 것이다. 전기 전송 처리 유무에 따른 시편의 수소함량을 비교하여 수소기인균열 감수성 완화 효과를 확인하였다.

표 52. 검증실험 시편의 수소함량 측정조건

구분	전기 전송처리 유무	비고
시편 #1	Yes	-
시편 #2	No	60분 동안 대기중 방치
시편 #3	No	-

- 그림 200은 시편 #1, #2, #3에 대한 수소함량 측정결과를 나타낸 것이다. 그림 201은 전기 전송처리 동안 시편 표면의 온도를 측정한 결과이다.

다) 검증실험 결과

그림 200의 측정결과에서 알 수 있듯이 시편 #1의 수소함량은 3.70(ml)로 시편 #2의 13.12(ml), 시편 #3의 12.06(ml)와 비교하여 수소함량이 3배 이상 낮게 측정되어 전자기수송 처리를 효과를 확인할 수 있었다.

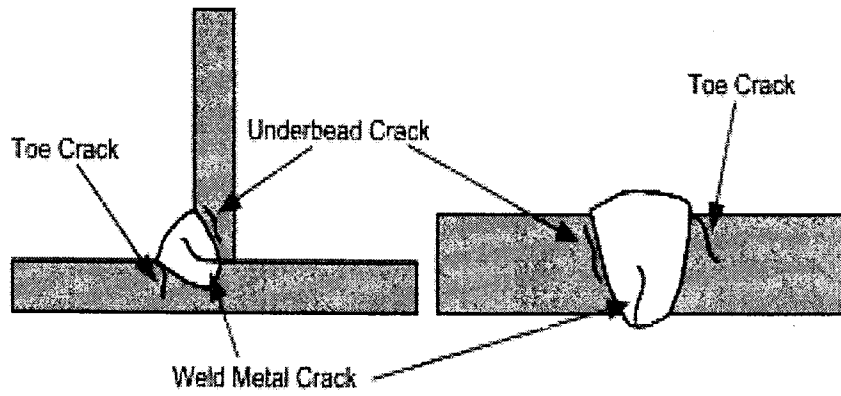


그림 172. 수소기인균열의 발생위치

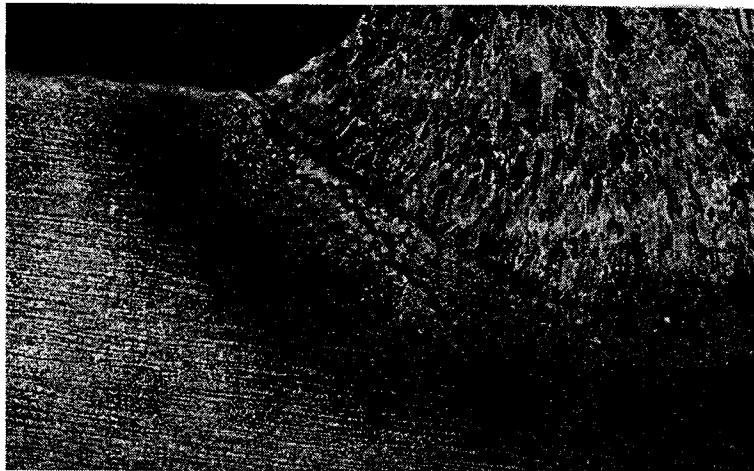


그림 173. 민감한 미세조직을 갖고 있는 HAZ를 따라 발생한 수소기인균열

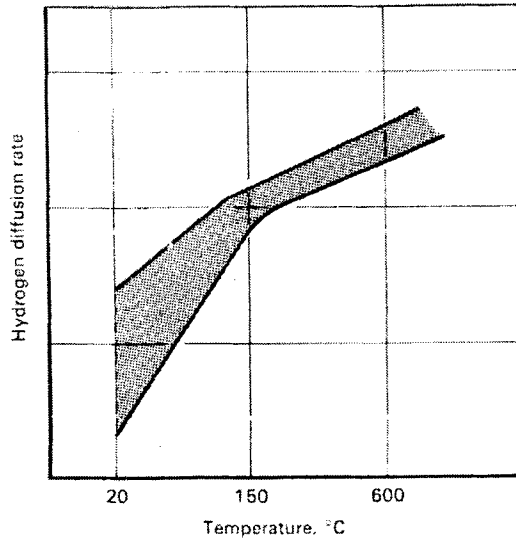


그림 174. 온도에 따른 수소의 확산속도

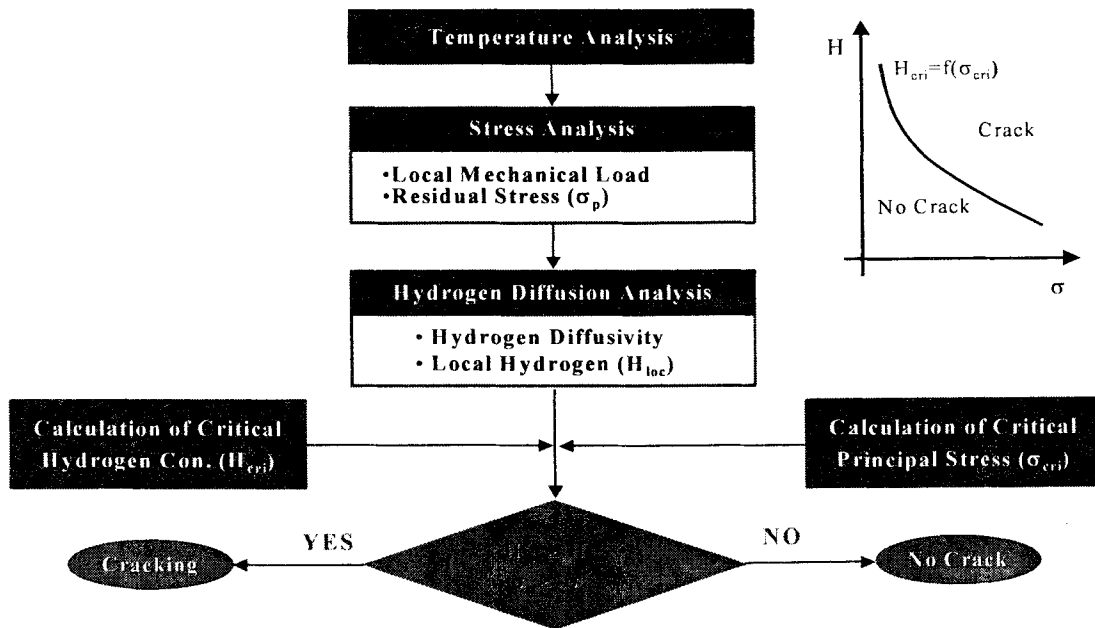
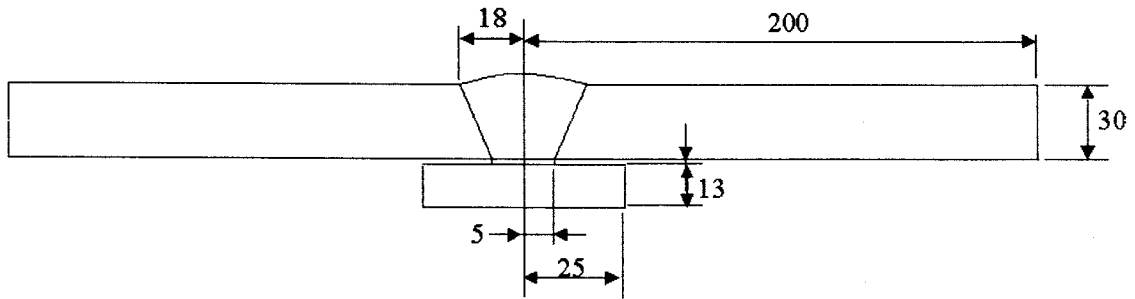


그림 175. 수소기인균열 해석 절차



Unit : mm

그림 176. 해석 대상

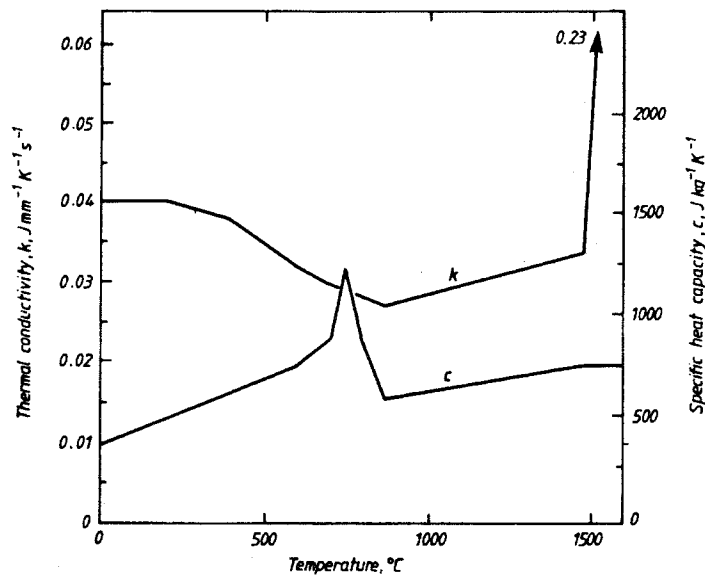


그림 177. 온도 변화에 따른 C-Mn 강의 비열 및 열전도도

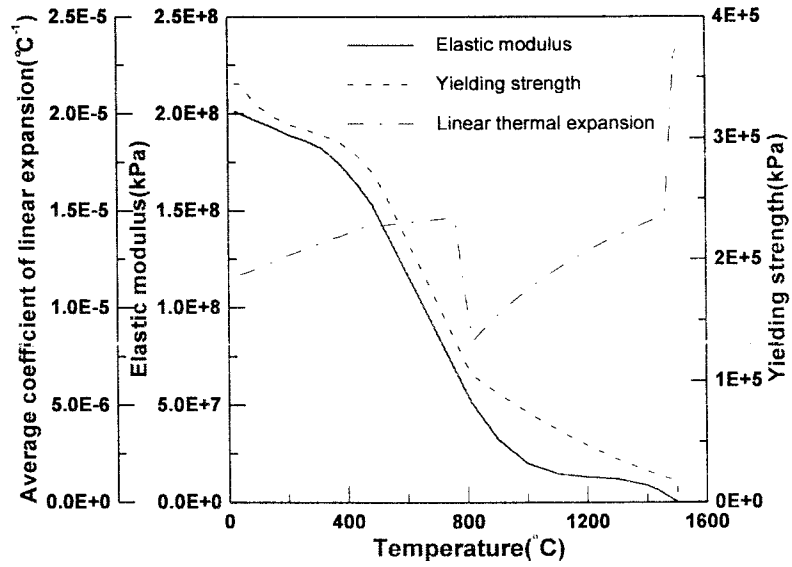


그림 178. 온도 변화에 따른 C-Mn 강의 탄성계수 및 항복강도

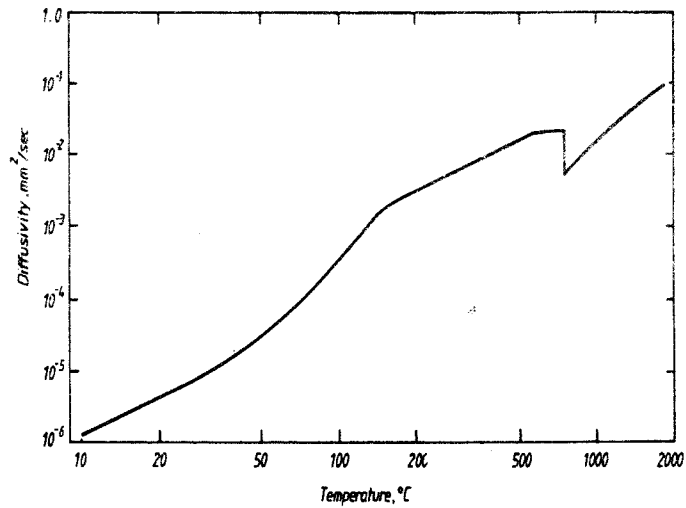


그림 179. 온도 변화에 따른 C-Mn 강의 diffusivity

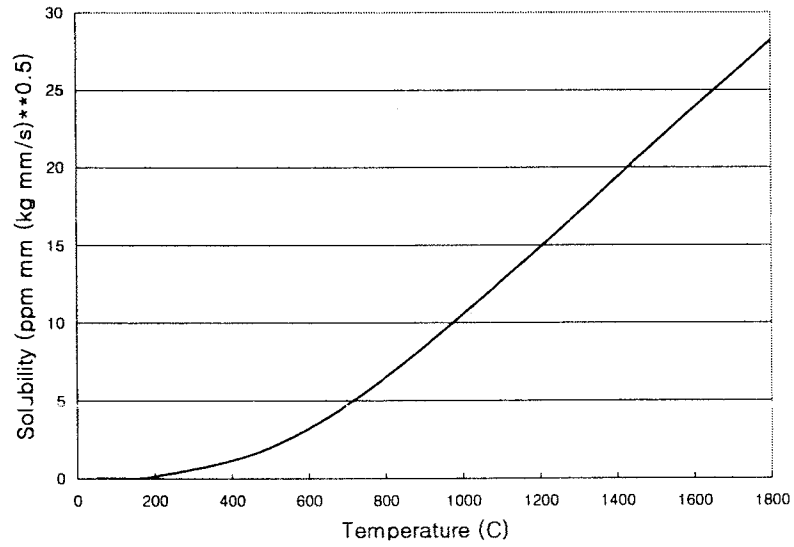


그림 180. 온도 변화에 따른 C-Mn 강의 solubility

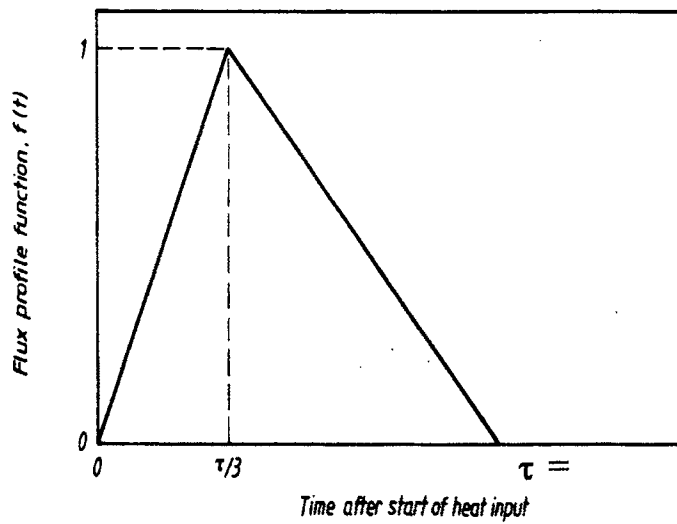
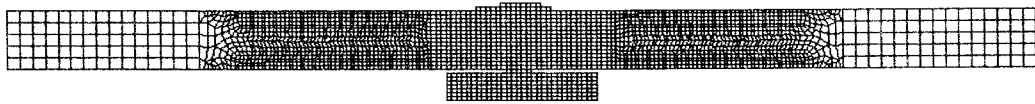
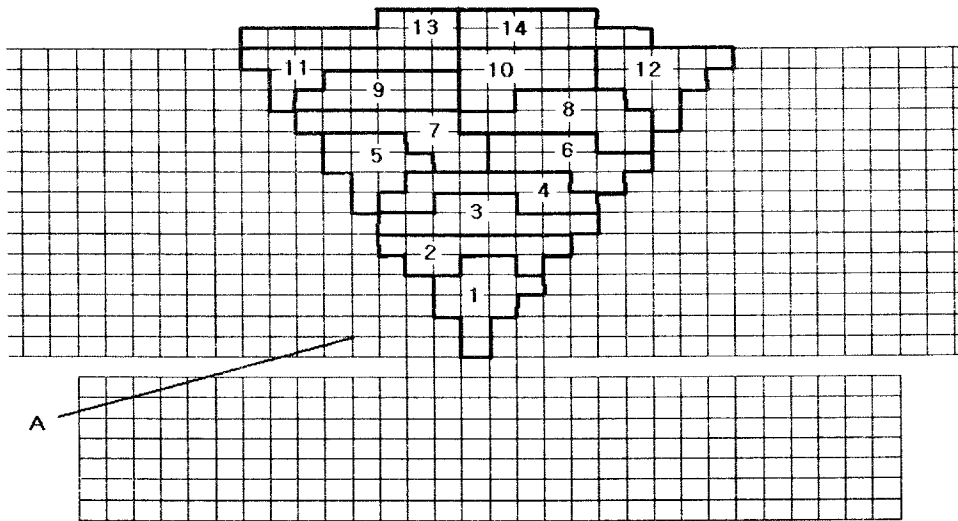


그림 181. 열유속 profile 함수

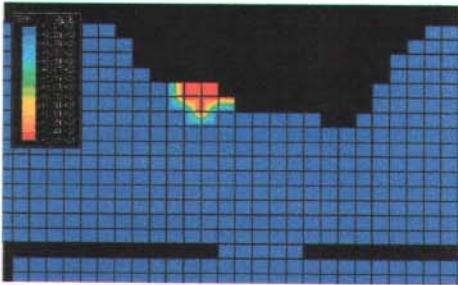


(a) 전체 모델

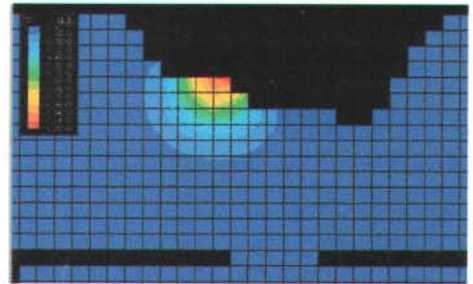


(b) 확대된 중심부

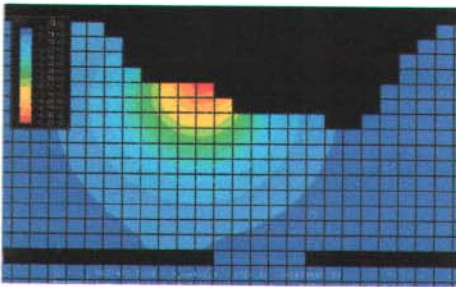
그림 182. 유한요소 모델



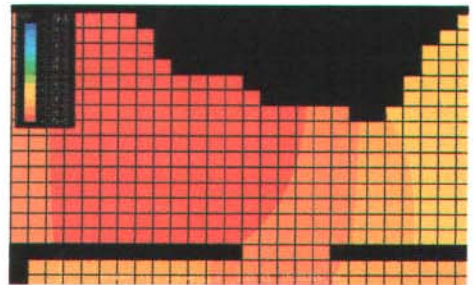
(a) 14초 경과



(b) 17초 경과



(c) 24.6초 경과

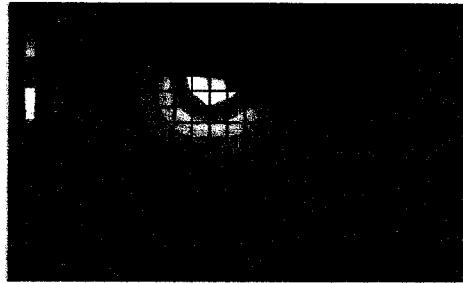


(d) 282초 경과

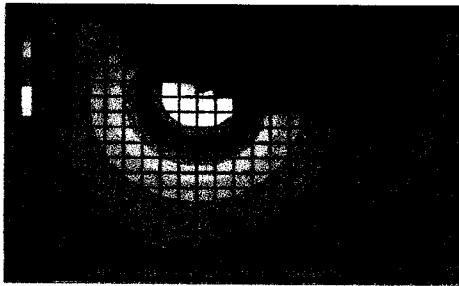
그림 183. 용접 패스 5 용착이후 온도분포 변화



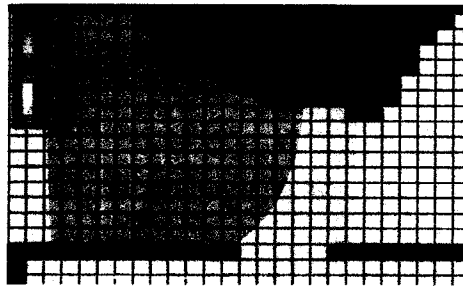
(a) 14초 경과



(b) 17초 경과

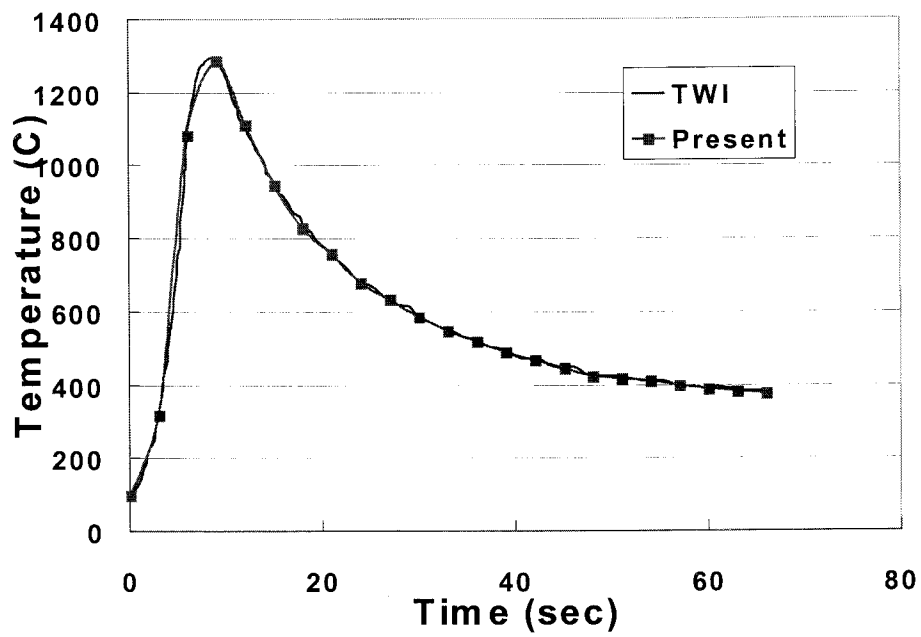


(c) 24.6초 경과



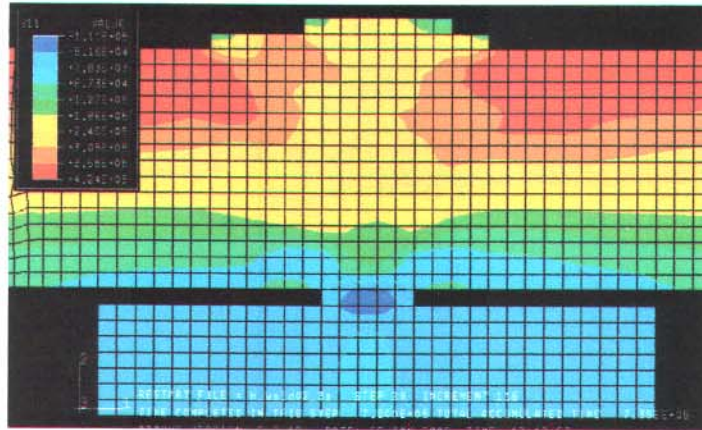
(d) 282초 경과

그림 183. 용접 패스 5 용작이후 온도분포 변화

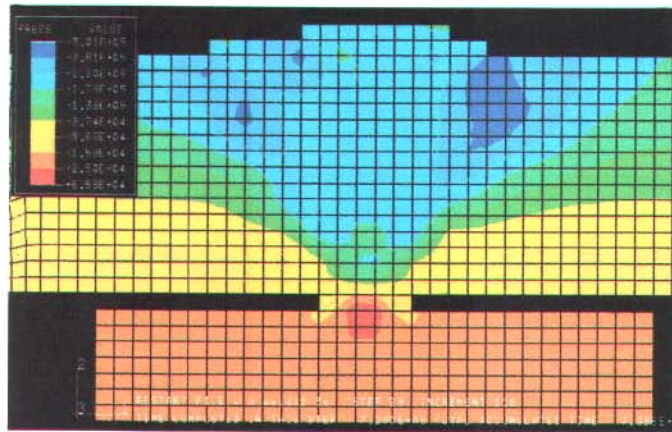


Temperature change on HAZ after deposition of layer 5

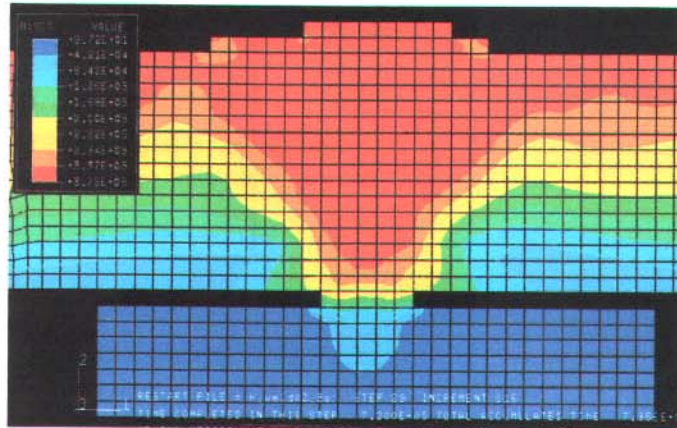
그림 184. A점의 시간에 따른 온도 변화 비교



(a) 횡방향 잔류응력



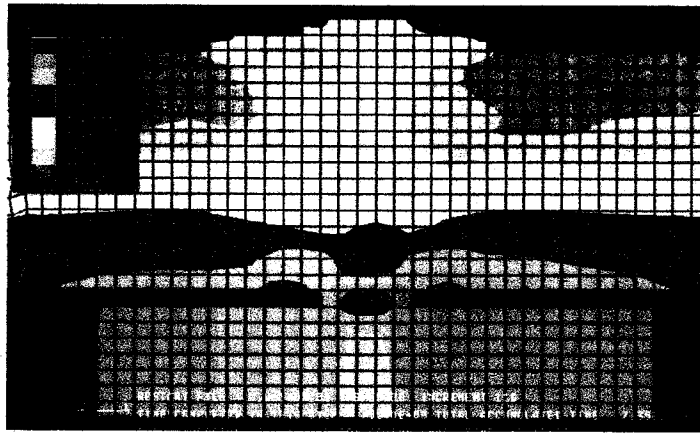
(b) 잔류 hydrostatic 압력



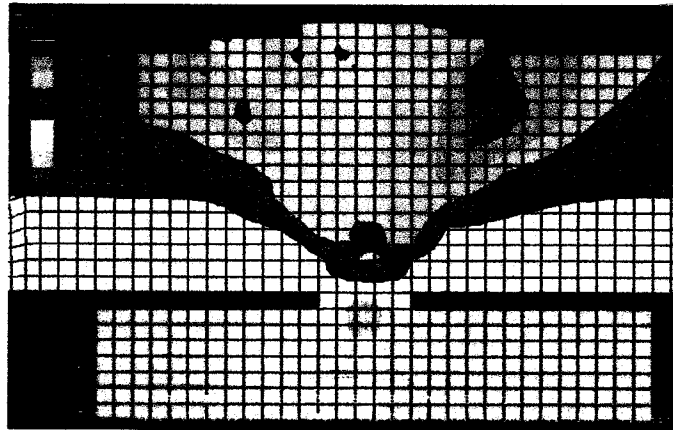
(최대 응력 : 379MPa, 항복강도 : 320MPa)

(c) 잔류 von-Mises 유효 응력

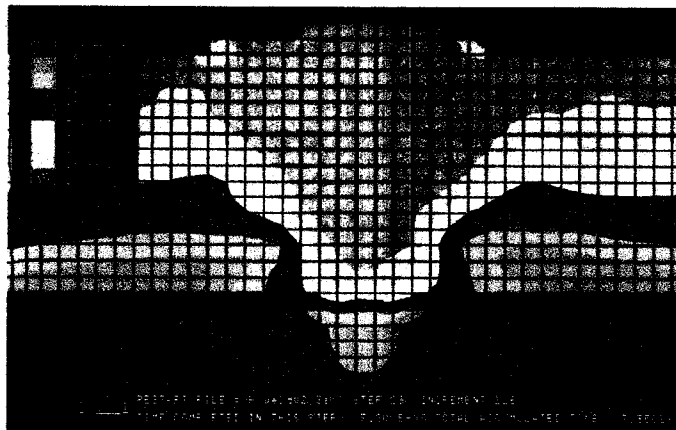
그림 185. 잔류응력 분포



(a) 횡방향 잔류응력



(b) 잔류 hydrostatic 압력



(최대 응력 : 379MPa, 항복강도 : 320MPa)

(c) 잔류 von-Mises 유효 응력

그림 185. 잔류응력 분포

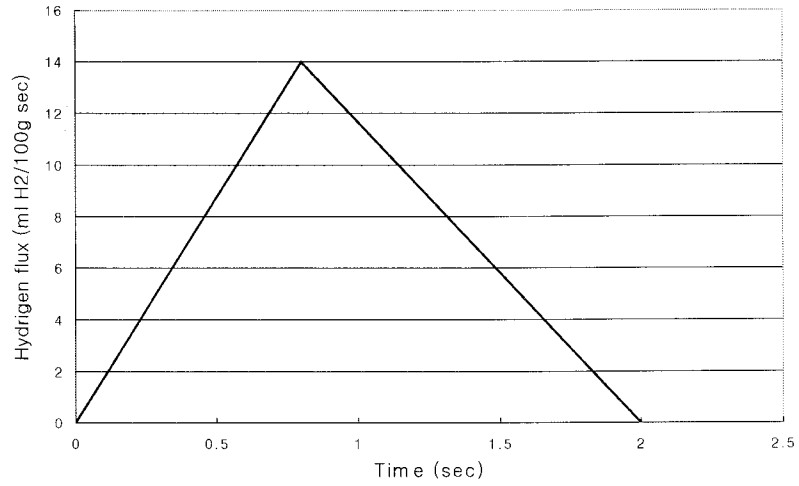


그림 186. 시간에 따른 용착시 수소 flux

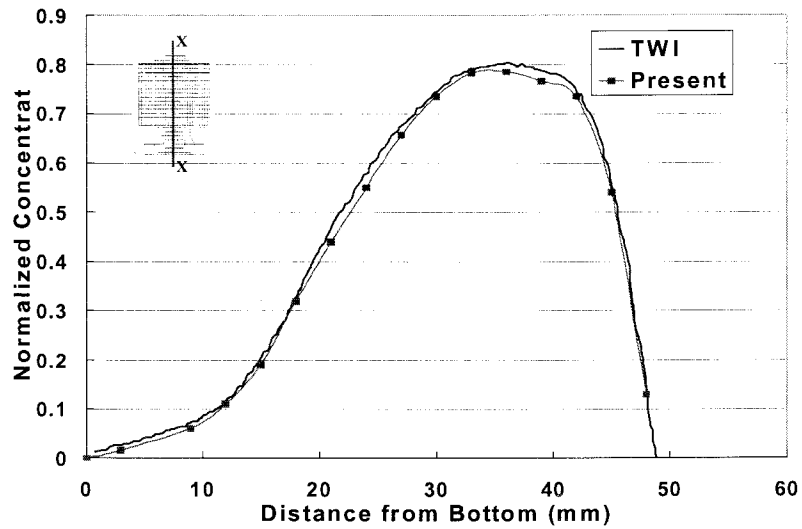
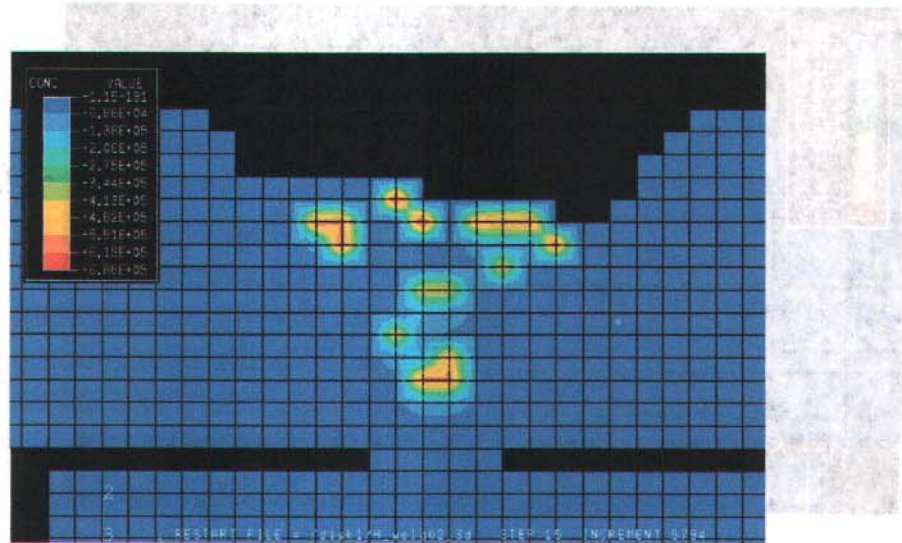
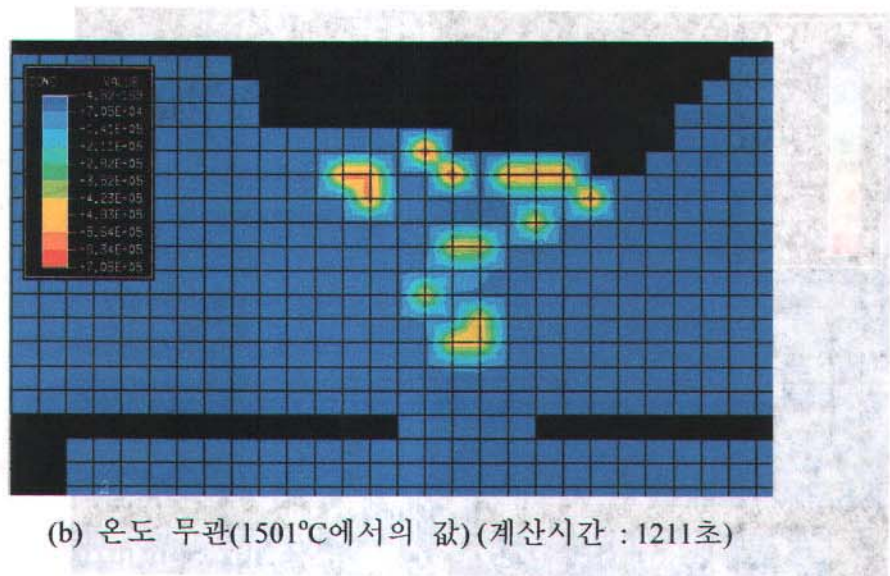


그림 187. 온도구배 확산해석을 통한 20시간 경과후 X-X선상의 normalized된 수소농도

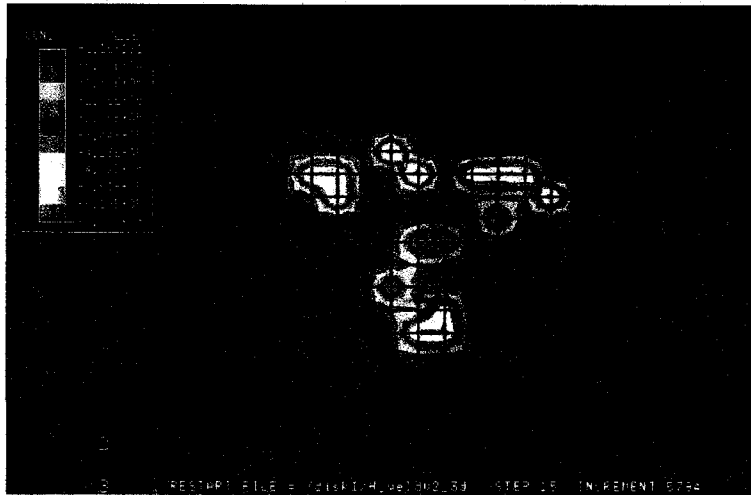


(a) 온도 종속 (계산 시간 : 24257초)

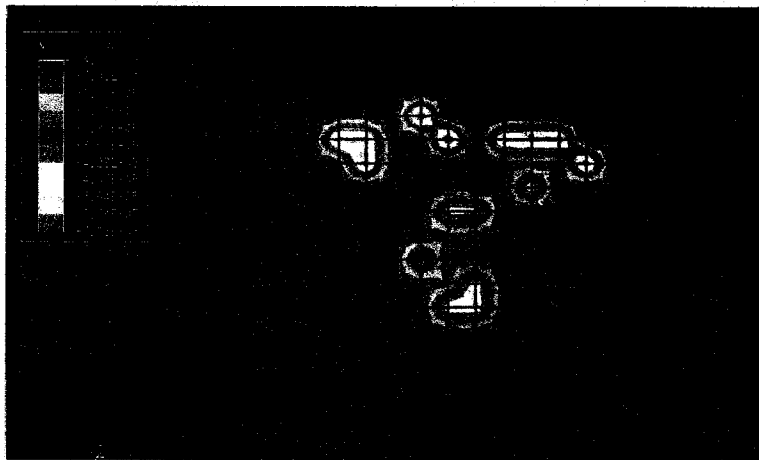


(b) 온도 무관(1501°C에서의 값) (계산시간 : 1211초)

그림 188. Solubility의 온도 종속성 고려 여부에 따른 수소 농도 분포 변화
(용접 패스 7 용작후 20분 경과, Digital 600 au workstation 512 Mbyte)

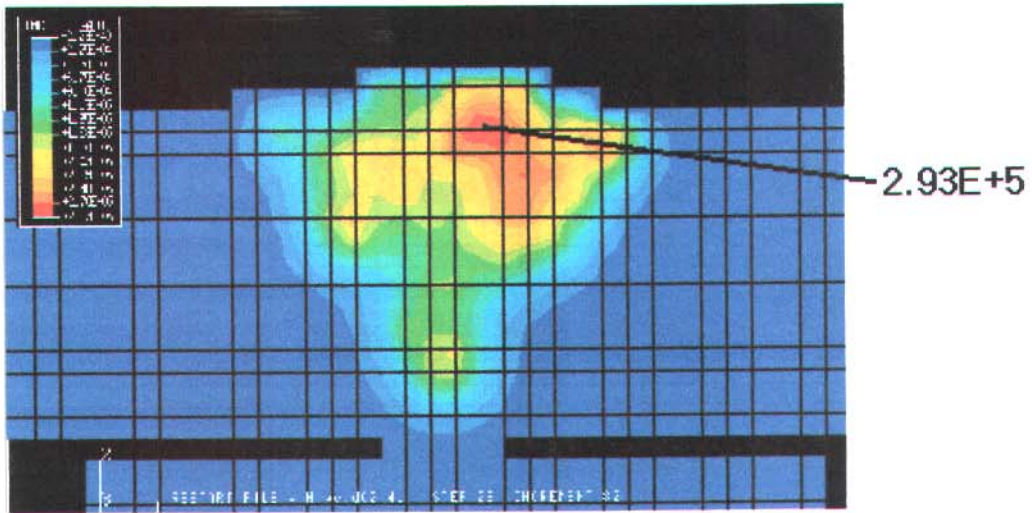


(a) 온도 종속 (계산 시간 : 24257초)

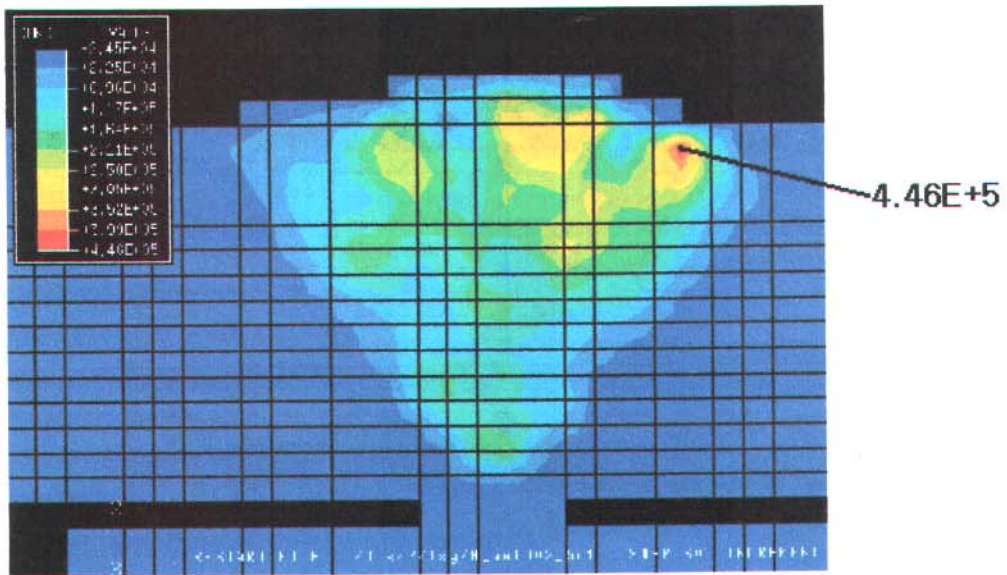


(b) 온도 무관(1501°C에서의 값)(계산시간 : 1211초)

그림 188. Solubility의 온도 종속성 고려 여부에 따른 수소 농도 분포 변화
(용접 패스 7 용착후 20분 경과, Digital 600 au workstation 512 Mbyte)



(a) 응력 구배 미고려 (용접 완료후 20시간)

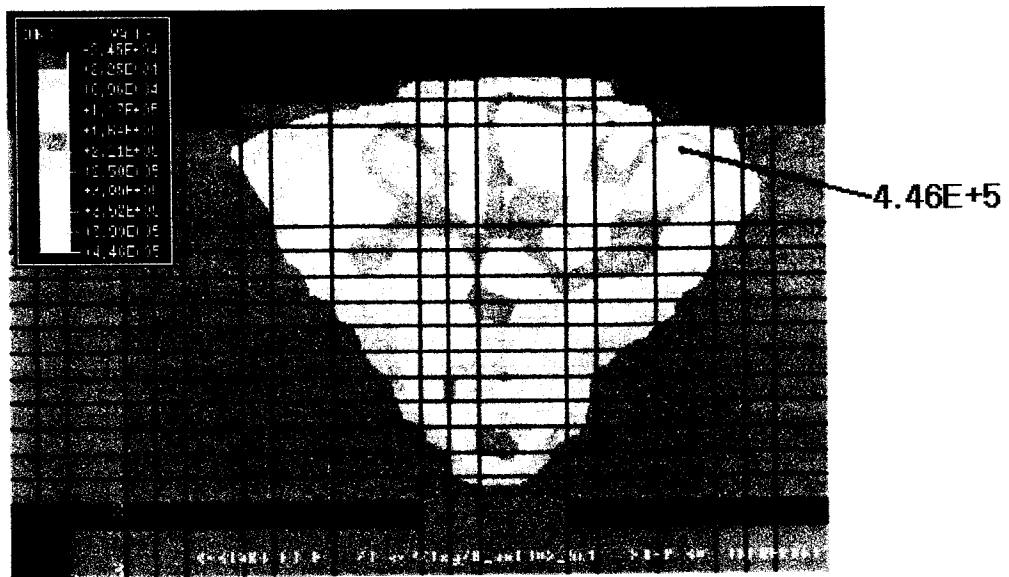


(b) 응력 구배 고려 (용접 완료후 60시간)

그림 189. 응력 구배 고려 여부에 따른 수소 농도 분포 변화



(a) 응력 구배 미고려 (용접 완료후 20시간)



(b) 응력 구배 고려 (용접 완료후 60시간)

그림 189. 응력 구배 고려 여부에 따른 수소 농도 분포 변화

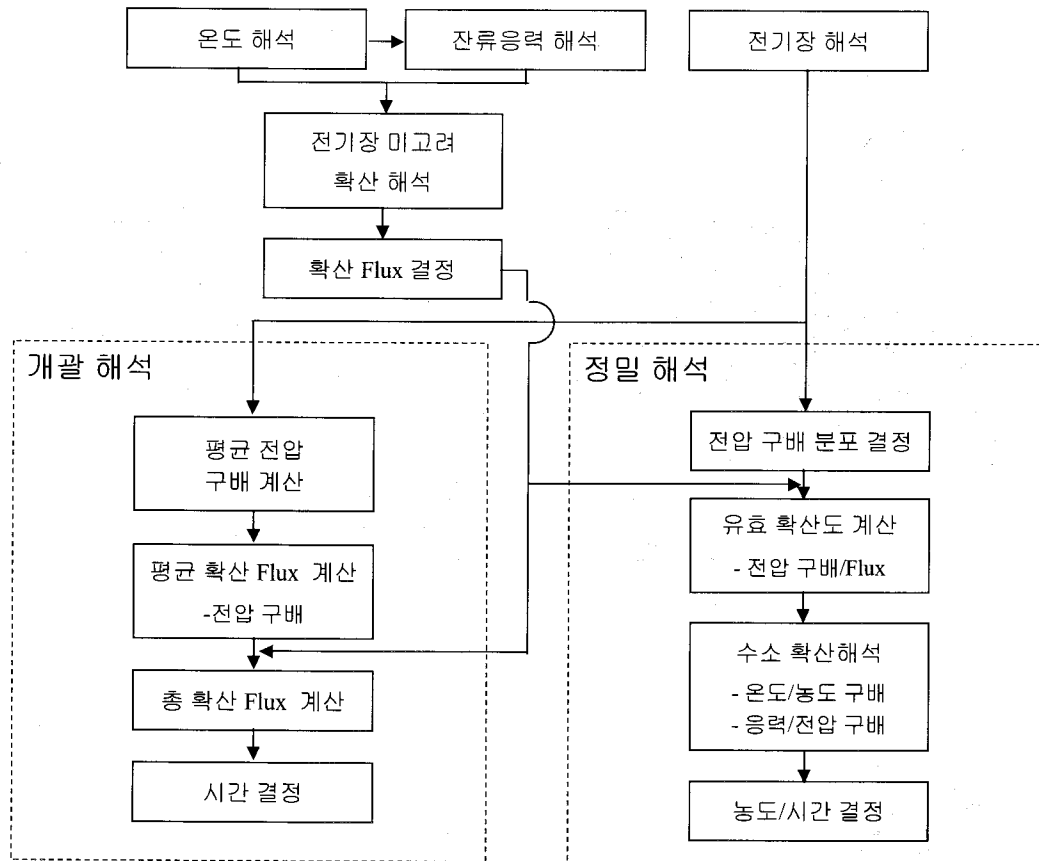


그림 190. 전기장 고려 수소 확산 해석절차

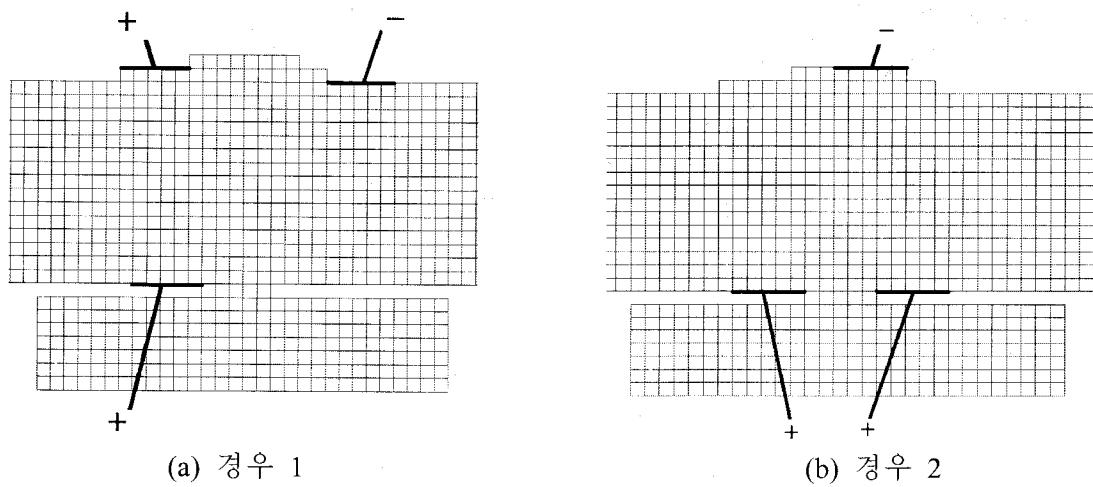
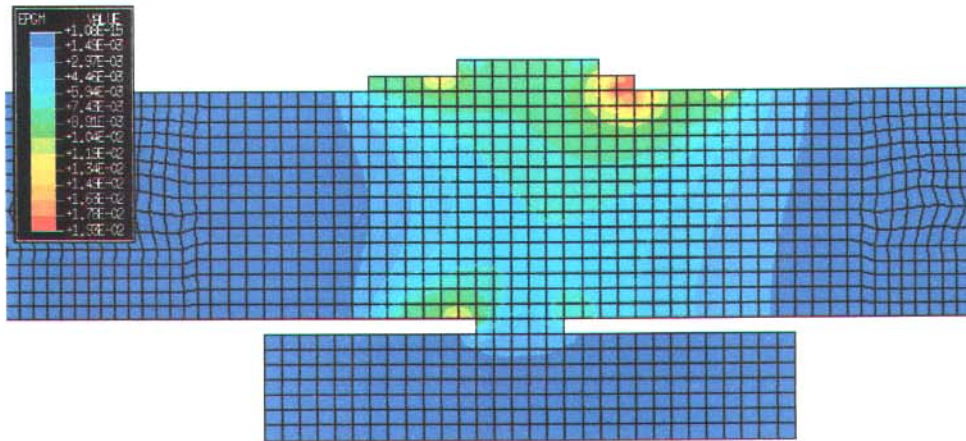
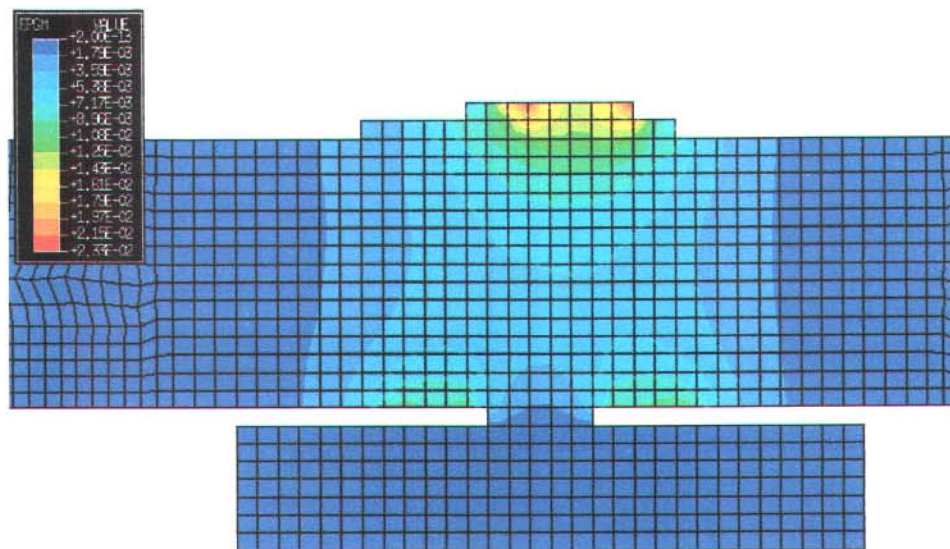


그림 191. 전극 설치 위치

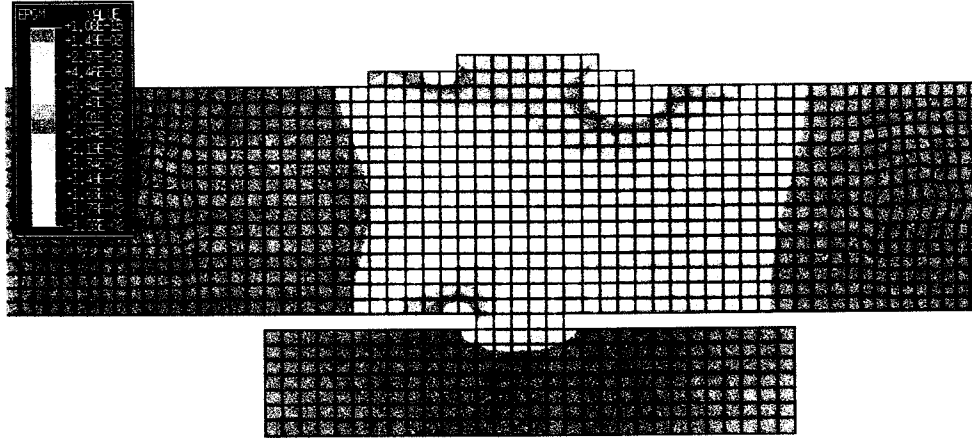


(a) 경우 1

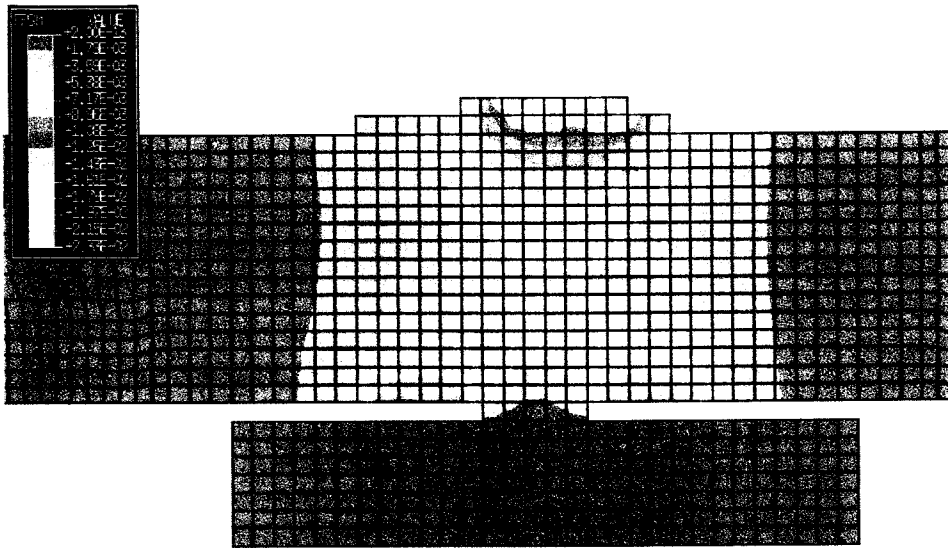


(b) 경우 2

그림 192. 유효 전압 구매 분포



(a) 경우 1



(b) 경우 2

그림 192. 유효 전압 구매 분포

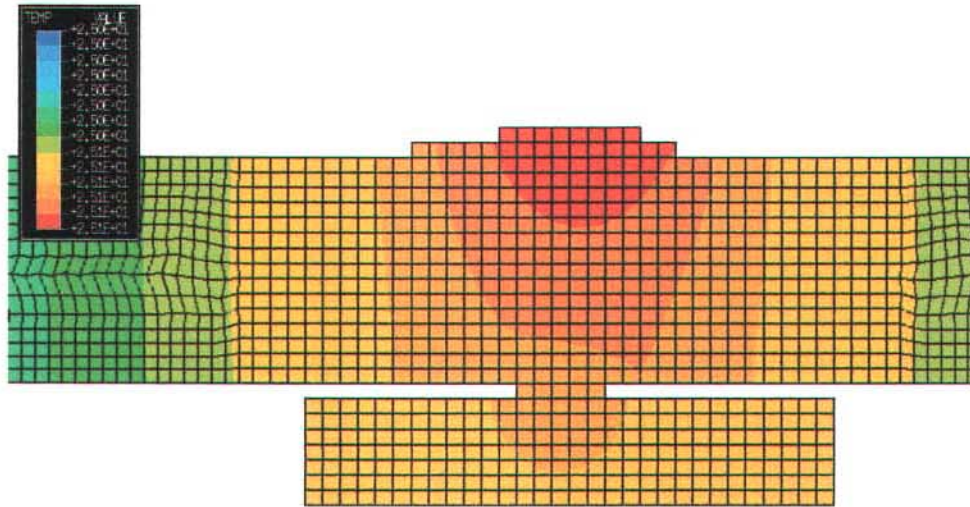


그림 193. 경우 2 전기장하에서의 C-Mn 다층 용접부의 온도 분포(1시간 경과)

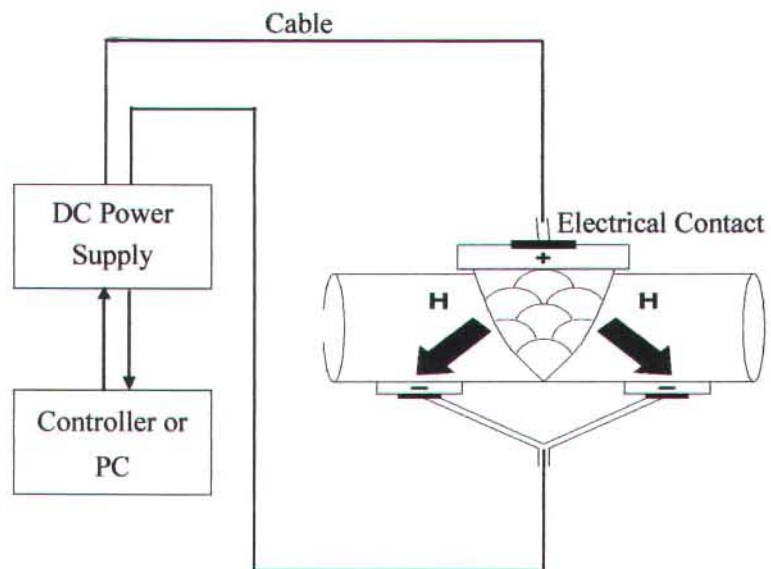


그림 194. 시작품 개략 구성도

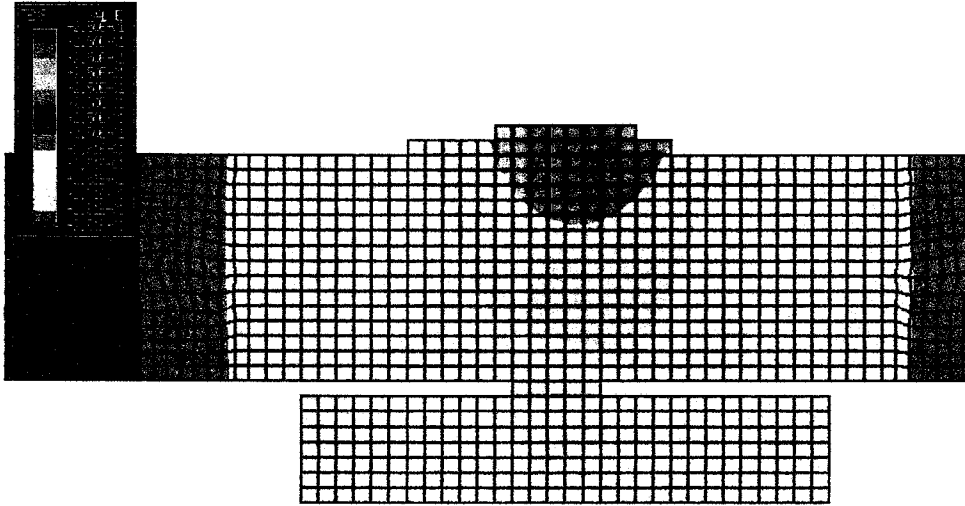


그림 193. 경우 2 전기장하에서의 C-Mn 다층 용접부의 온도 분포(1시간 경과)

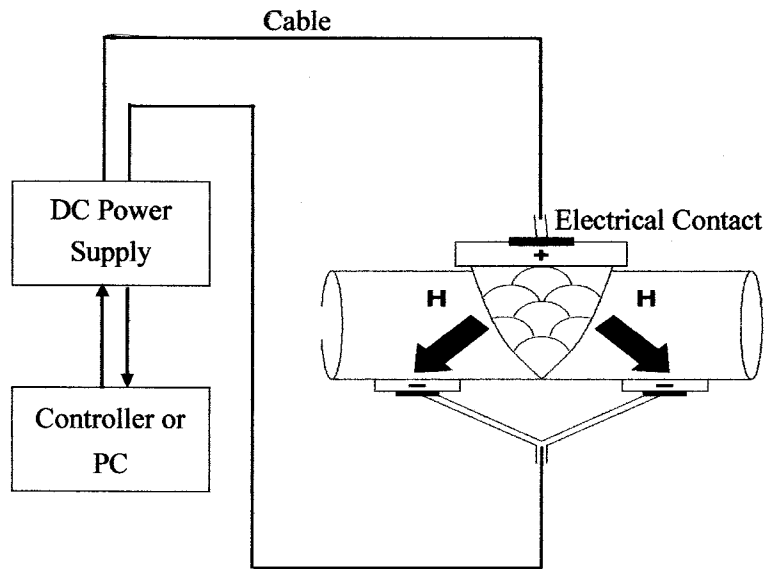


그림 194. 시작품 개략 구성도

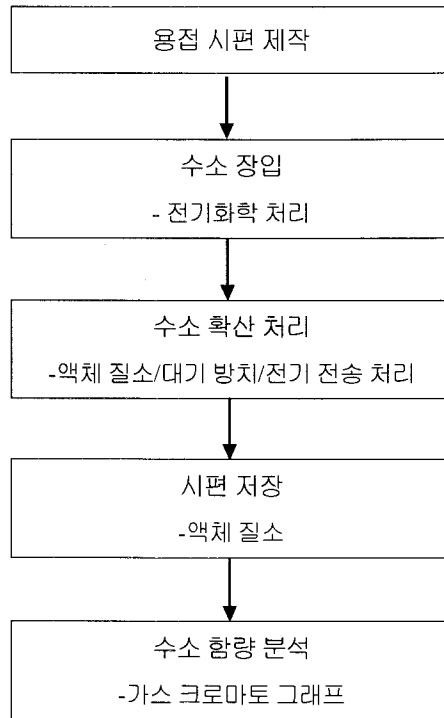


그림 195. 검증 실험 흐름도

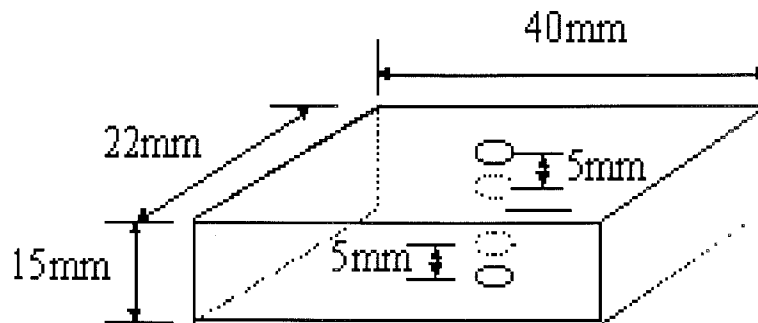


그림 196. 전기 전송처리 검증 실험용 시편의 형상



그림 197. 전기 전송 처리

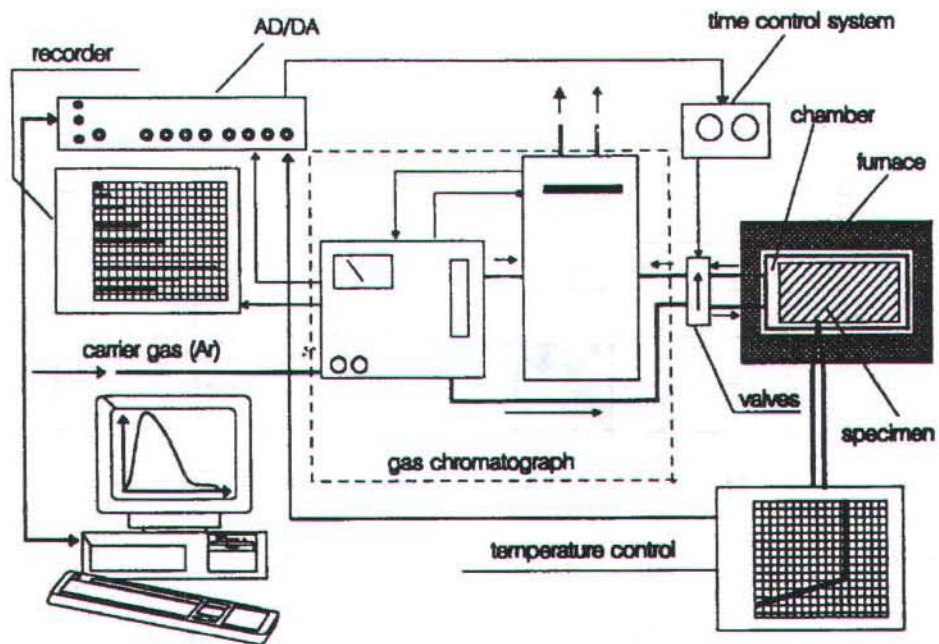


그림 198. 가스 크로마토그래프 장치 개략도

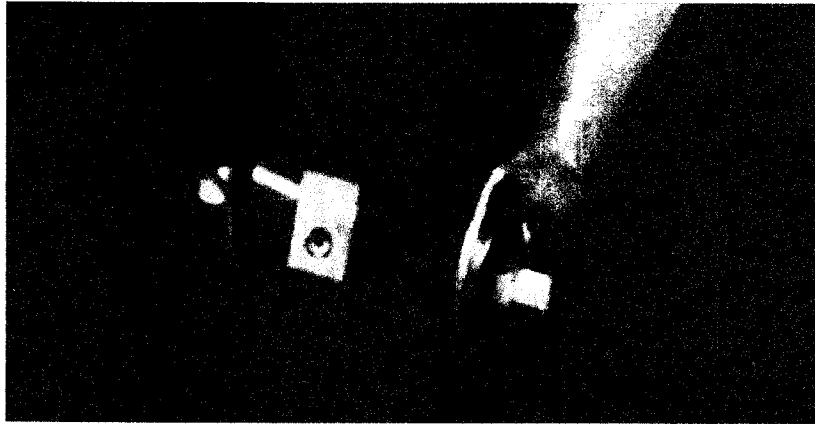


그림 197. 전기 전송 처리

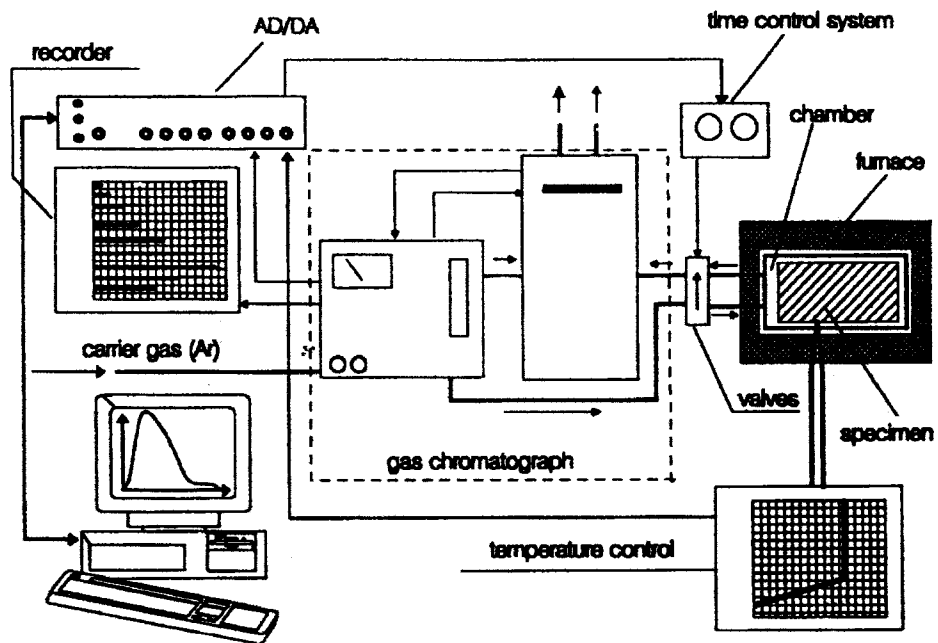


그림 198. 가스 크로마토그래프 장치 개략도



그림 199. 가스 크로마토그래프를 이용한 수소함량 측정

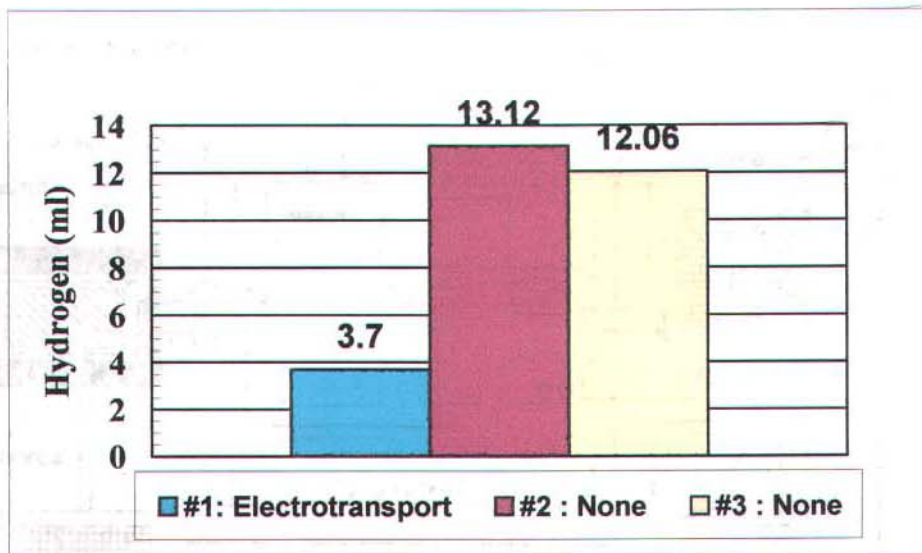


그림 200. 수소함량 측정결과

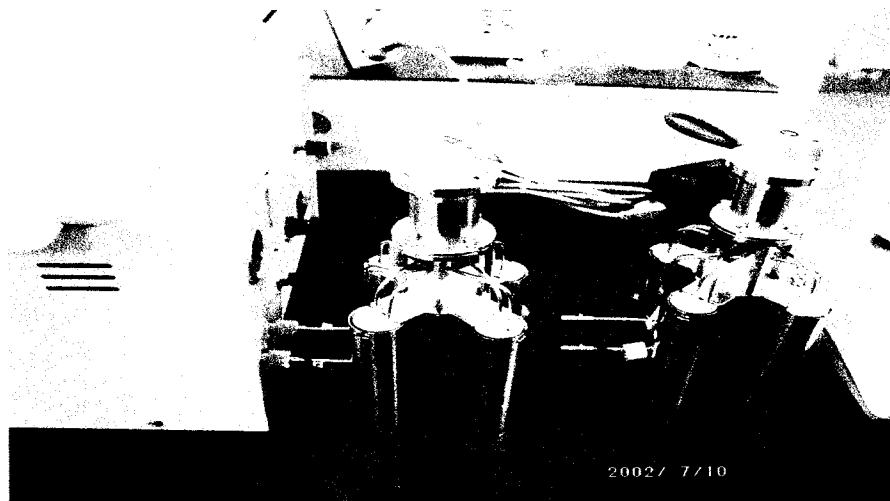


그림 199. 가스 크로마토그래프를 이용한 수소함량 측정

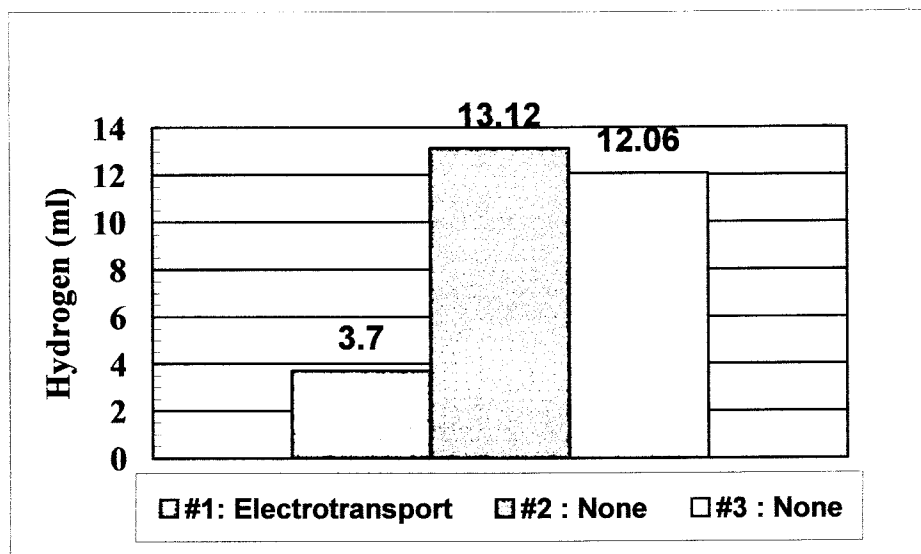


그림 200. 수소함량 측정결과

8. 잔류응력 해석 DB/전문가 시스템 구축

본 연구실은 2002년 3월 1일부터 3개월간 금속조직 관련 전문가 시스템 개발과 더불어 잔류응력해석 DB/전문가 시스템을 위탁(아이윙㈜)하여 개발하였다. DB 및 전문가 시스템의 구성 및 상세내용은 다음과 같다.

잔류응력해석 DB/전문가 시스템은 크게 2개 모듈로 구성된다.

- 용접부의 잔류응력 해석 DB/전문가시스템 모듈
- 용접부의 수소기인균열 완화 DB/전문가시스템 모듈

잔류응력 해석부는 용접으로 인해 발생하는 열영향부의 잔류응력을 금속조직 변화 및 어닐링 변형률 등을 고려하여 잔류응력을 간편하게 계산하는 부분이며, 수소기인균열 완화부는 용접시 금속내부로 침입한 수소에 의해 발생하는 균열을 방지하기 위해 침입된 수소를 금속내부의 취약부위로부터 전기적인 방법을 통해 확산시키는 방법을 제시하는 부분이다. 본 DB 및 전문가 시스템은 사용자가 손쉽게 활용할 수 있도록 Web 기반으로 작성하였다.

가. 용접부 잔류응력 해석부 구성 및 특징

잔류응력 해석부는 입력모듈, 계산모듈, 출력모듈의 3개 서브모듈로 구성된다. 입력모듈은 재료의 종류, 재료 물성치, 용접형상 및 용접조건 등을 입력할 수 있도록 구성된다. 이때 사용자 편의를 위해 각 재질별 물성치 등의 기본적인 물성치를 DB로 구축할 예정이다. 계산모듈은 입력된 자료를 활용하여 결과 값을 계산하는 서브모듈이며 출력모듈은 계산된 결과를 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 표와 그림 형식으로 제시하는 서브모듈이다. 각 부분의 특징을 다음에 제시하였다.

1) 입력모듈 (그림 201)

- 재료 대분류 (탄소강, 합금강, 스테인리스강)
- 재료 물성치 (기계적 물성치 및 열적 물성치)
- 용접형상 (각 부위별 치수)
- 용접조건 (용접전압, 전류, 시간 등)

2) 계산모듈

- Web용 언어를 사용하여 계산 모듈 작성
- 지정된 Server를 통해 계산
- 국내외 연구결과, 연구실에서 개발한 계산식 활용

3) 출력모듈 (그림 202)

- 계산결과
 - 온도해석 결과 및 온도분포
 - 잔류응력 분포
- 계산결과는 인터넷 브라우저 상에서 표 및 그림 형식으로 표시

나. 용접부 수소기인균열 완화부 구성 및 특징

수소기인균열 완화부는 잔류응력 해석부와 동일하게 입력모듈, 계산모듈, 출력모듈의 3개 서브모듈로 구성된다. 입력모듈에서는 용접봉 종류 및 용접조건 등을 입력하여 초기 용접시 침입한 수소량을 결정한다. 계산모듈은 결정된 수소량을 이동시키기 위해 필요한 전류, 전압 및 시간을 해외 실험식 등을 이용하여 결정하는 단계이며, 계산 모듈에서 결정된 최적 조건을 최종적으로 출력모듈에서 제시하게 된다. 아래에 각 부분의 특징을 설명하였다.

1) 입력모듈 (그림 203)

- 모재 종류 입력(탄소강, 저합금강, 스테인리스강)
- 용접봉 종류 입력
- 용접조건 입력
- 필요시 초기 수소량 직접 입력가능

2) 계산모듈

- Web용 언어를 사용하여 계산 모듈 작성
- 지정된 Server를 통해 계산
- 국내외 연구결과 및 연구실에서 개발한 계산식을 활용하여 수소 확산을 위한 최적 조건 도출(전압, 전류, 통전시간)

3) 출력모듈 (그림 204)

- 계산결과
 - 전압
 - 전류
 - 통전시간
 - 수소 감소량
- 계산결과를 인터넷 브라우저 상에서 표형식으로 표시

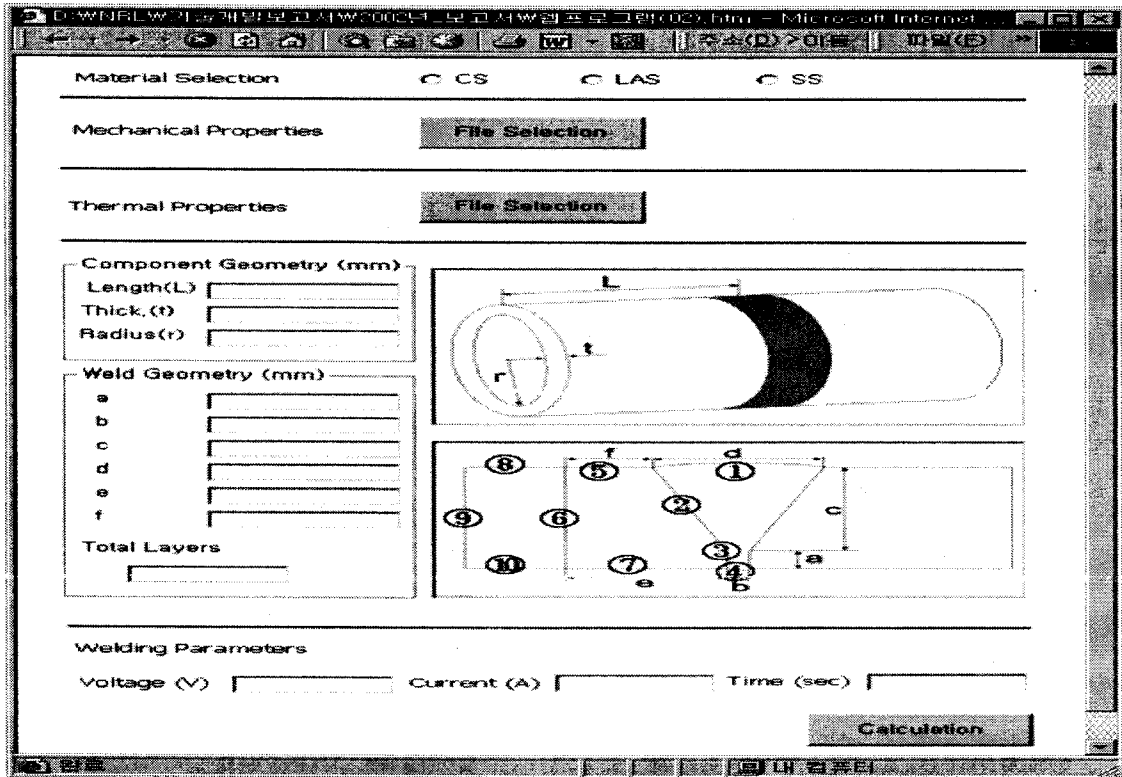


그림 201. 잔류응력 해석 입력모듈

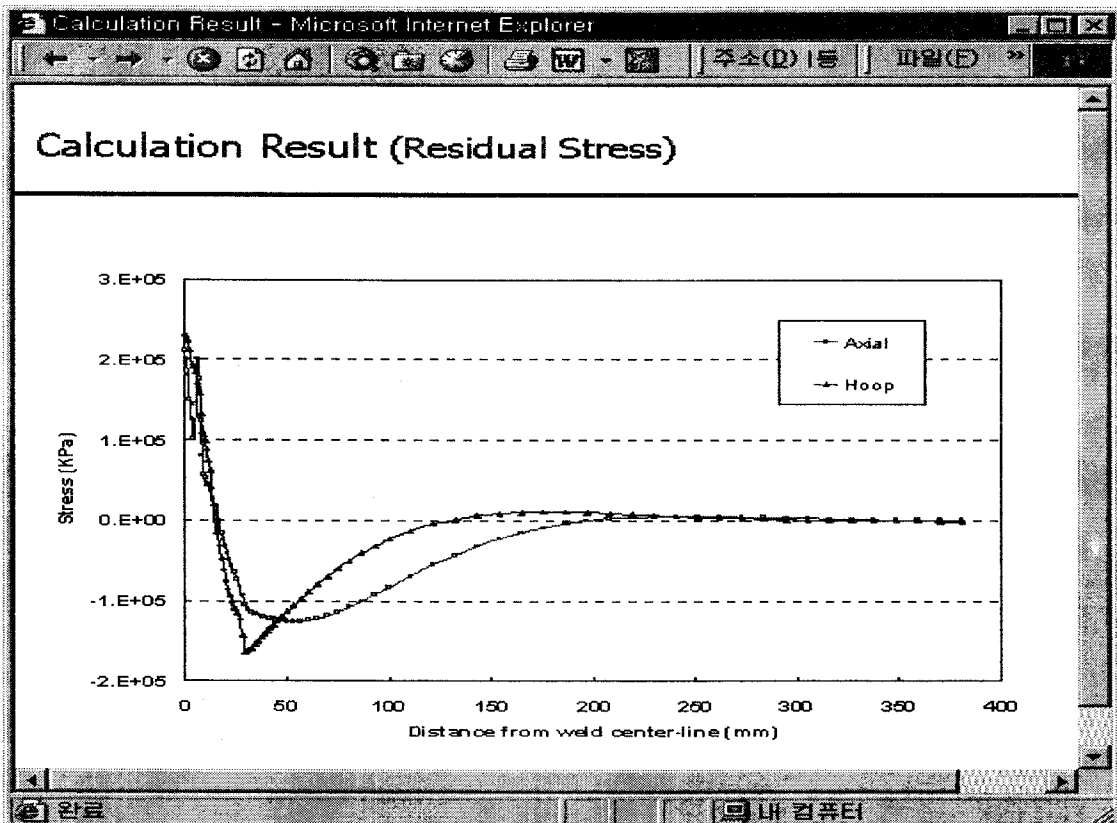


그림 202. 잔류응력 해석 출력모듈

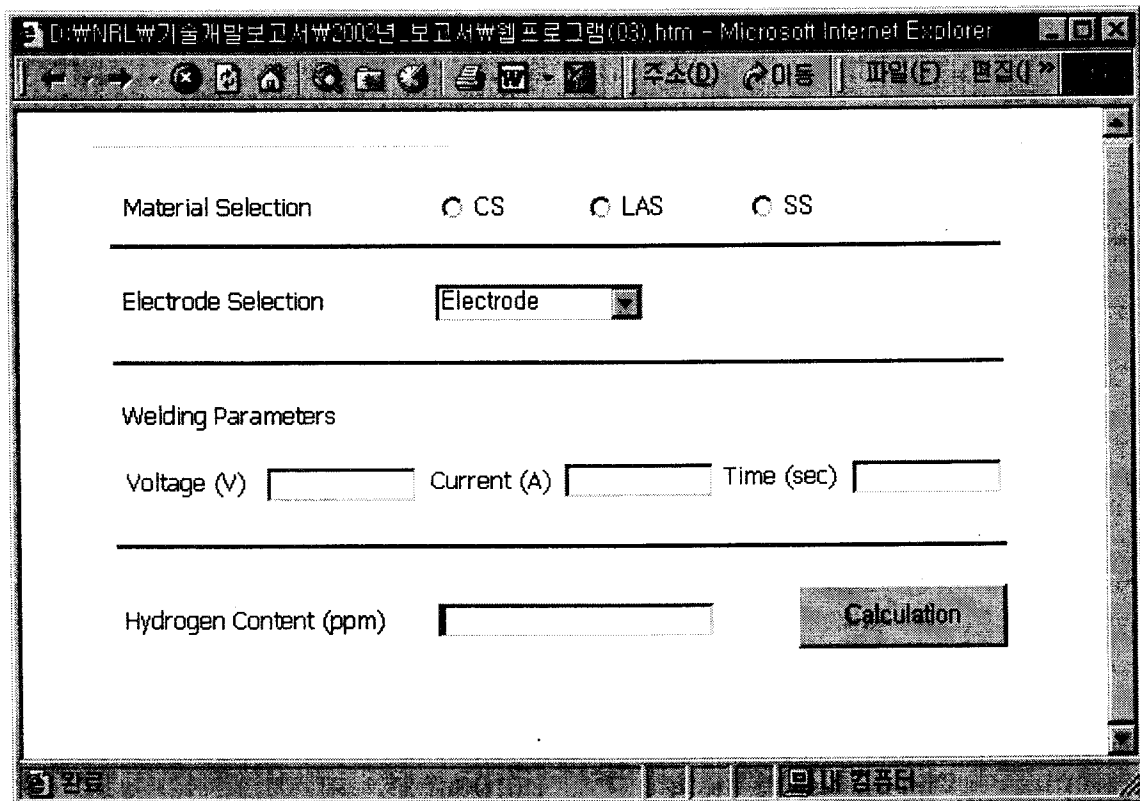


그림 203. 수소기인균열 완화 입력모듈

표 2-15 개략 해석결과를 통한 확산 시간 - Microsoft Internet Explorer

Calculation Result (Diffusion Time)

Temp. (°C)	v_H ($\times 10^{-5} \text{ cm/sec}$)		J_E ($\times 10^{13} \text{ atoms/cm}^2 \text{ sec}$)		J_D ($\times 10^{13} \text{ atoms/cm}^2 \text{ sec}$)		J_T ($\times 10^{13} \text{ atoms/cm}^2 \text{ sec}$)		t (hr)	
	Case1	Case2	Case1	Case2	Case1	Case2	Case1	Case2	Case1	Case2
25	0.214	0.290	1.069	1.449	2.473	2.473	3.542	3.922	3.9	3.5
100	1.463	1.989	7.310	9.938	2.473	2.473	9.783	12.41	1.4	1.1

그림 204. 수소기인균열 완화 출력모듈

제 5 절 연구개발 결과

당해단계 연구 목표인 상세 연구계획 수립, 실제 용접 현상/과정을 고려한 용접부 금속 조직/성분 변화 예측기술과 잔류응력 해석기술 개발을 수행한 결과 표 53 과 같은 최종적인 결론을 얻었다.

표 53.1 단계 연구개발 결과

[1차년도]

세부연구 개발목표	연구내용	연구결과
상세연구 계획 수립	○용접관련 기술기준, 문헌, 데이터 수집 분석	○OKS/ASME/AWS 등 기술기준, NED 등 논문, DOE/NRC/EPRI 보고서 등 200여건 수집 분석
	○최신 연구동향 파악 및 선진 연구기관과의 협력체계 구성	○미국 PVRC/MPC와의 공동연구 체계 구축 ○미국 Battelle과의 공동연구 체계 구축 ○영국 TWI 산업체 회원 가입 및 협의체계 구축 ○네덜란드(EU)의 Joint Research Center인 IE와의 공동연구 체계 구축 ○일본 JPVRC와의 협력체계 구축 추진중
	○용접관련 기존 연구의 문제점 도출	○기술기준 경우 용접부 상태/손상 평가절차 미제시 ○기존 연구의 경우 실제 용접 현상 고려시 비경제성, 잔류응력 분포에 대한 일반 범주화 미흡, 신뢰성 있는 통계기법 미개발 등 도출
	○기존 연구 문제점 및 최신 동향이 고려된 용접부 건전성평가 연구계획 수립	○2단계 7과제에 대해 수립 - 1단계(상태평가) 2과제(금속조직/잔류응력) - 2단계(손상평가) 5과제(피로/부식/피로균열성장/응력부식균열성장/복합손상)
	○Web 기반 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 구축	○일반 사항에 대해 용접부 특성, 손상사례, 용접절차서 작성/검토 4개 모듈 ○기타 손상평가 및 상태평가에 대해 각 모듈 별로 작성 추가
	○원자력분야 NRL중 최초로 홈페이지 (www.wins.re.kr) 운영	○과기부 주요정책 및 원전 안전성/수명연장 홍보 ○연구내용 게시 및 용접 관련 사이버 기술자문 40여회 수행
금속조직/ 성분변화 예측기술 개발	○주기기 8개, 용접부 40여개에 대해 중요 요소 검토 금속조직 예측기술 개발대상 용접부 선정	○원자로 압력용기 용접부로 선정
	○SA508 Gr.3 Cl.1에 대한 위탁실험을 통해 재료물성치 및 취약부 결정	○SA508 Gr.3 Cl.1에 대한 상온부터 300℃까지의 열적/ 물리적 재료물성치 및 취약부
	○상 변태/변화를 고려한 용접과정 동안의 온도해석 기술 개발	○상 변태/변화에 따른 잠열 흡수 및 방출 같은 용접현상 고려 ○다층용접/후열처리 같은 실제 용접과정 고려 ○기존결과와 비교시 온도는 ± 5% 범위 내에서 일치 HAZ 구분도 일치
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 이론적/ 준경험적 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발	○온도이력에 따른 부위별 금속조직 변화 고려 ○상 분포, 결정립 크기, 석출물 종류/상분율, 탄화물 크기 등 예측 ○기존 연구 및 위탁실험 결과와 비교시 경향 동일 하며 정량적 예측값에 대해서도 신뢰도 90% 범위 내에서 일치
	○강도 등 용접부 재료물성 결정기술	○경향 일치하나 일부 정량적 차이 존재 ○국부 취약부 결정

[2차년도]

세부연구 개발목표	연구내용	연구결과
금속조직 변화	○금속조직 변화 및 기계적 물성 저하 완화 방안 도출	○국부 Heat Sink를 이용한 용접
예측기술 검증 및 보완	○금속조직 예측 DB/전문가시스템 초안 구축 ○용접부 조사취화 특성 검토	○Web 기반 2개 모듈로 구축 - 금속조직 예측/기계적 물성 예측 ○압력용기강/SS 용접부 조사취화 특성 검토결과
잔류응력 해석기술 개발	○원전설비 용접부 대상기기 및 일반범주화 기법 개발	○잔류응력 해석대상 용접부로 이중재, SS배관, RPV 선정 ○파손화률순으로 Ranking 설정후 대상 용접부를 선정하는 기법 개발
	○용접부 전용 자동 유한요소모델링 프로그램 개발	○용접부 형상/패스 수에 따른 유한요소 모델링 자동화 프로그램 개발
	○대상 용접부에 대한 재료물성치/금속조직 실험 및 결정	○이중재료 용접금속 인코넬 82, SA508 Gr.1a, TP316에 대한 열적/물리적/기계적 재료물성치 고온실험(위탁) ○이중재료 용접부 인코넬 82의 금속조직 분석 (위탁)
	○이론적 온도해석 기법 개발	○스테인리스 강 배관 용접부에 대한 이론 및 프로그램 개발
	○1차년도 개발기술을 활용한 온도해석 및 금속조직 예측	○이중재/SS 배관/원자로압력용기 용접부 대상
	○사용자 정의 보조 프로그램 UMAT 개발	○상변태 변형률과 어닐링 변형률이 고려된 재료 거동 관련 UMAT 개발
	○잔류응력 해석	○이중재/SS 배관/원자로압력용기 용접부의 잔류 응력 분포 결정 ○가동중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석절차 개발 ○용접부 피로 설계를 위한 유한요소 응력해석 절차 개발
	○잔류응력 측정	○중성자 회절법 및 Hole Drilling 방법 이용(위탁), 이중 용접부 잔류응력 측정
	○잔류응력 완화방안 도출	○후열처리 온도별 잔류응력 완화정도 곡선 도출
	○수소기인균열 해석절차 개발	○수소화산에 대한 온도/농도/응력/전압 구배의 영향이 고려된 절차개발 ○임계 수소농도와 임계 작용응력이 고려된 절차 개발
	○수소기인균열 해석	○C-Mn 강 용접부에 대해 온도, 금속조직, 잔류 응력 및 수소화산 해석 결과 복합평가
	○수소기인균열 완화방안 도출	○수소기인균열 발생 완화 및 관련 코드 요건 면제를 위한 경제적이고 ○효율적인 전기 전송처리 방안 및 시작품 개발
	○잔류응력/수소기인균열 해석 DB/전문가 시스템 초안 구축중	○Web 기반 2개 모듈로 구축 - 잔류응력 해석/수소기인균열 해석

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발 목표의 달성도

당해단계 연구 목표인 상세 연구계획 수립, 실제 용접 현상/과정을 고려한 용접부 금속조직/성분 변화 예측기술 및 잔류응력 해석기술 개발을 달성하기 위해 수행한 내용은 표 54에 제시된 바와 같으며 연구목표를 100% 달성하였다.

표 54. 연구목표의 달성내용

[1 차년도]

세부연구개발목표	달성내용	달성도 (%)
상세 연구계획 수립	<ul style="list-style-type: none"> ○ 용접관련 기술기준, 문헌, 데이터 200여건 수집 분석 ○ 최신 연구동향 파악 및 선진 연구기관과의 협력체계 구성 <ul style="list-style-type: none"> - 미국 PVRC/MPC 와의 공동연구 체계 구축 - 미국 Battelle Weld JIP 와의 공동연구 체계 구축 - 영국 TWI 산업체 회원 가입 및 주기적 협의 체계 구축 - 네덜란드(EU) 의 Joint Research Ctr. 인 IE 와의 공동연구 체계 구축 - 일본 JPVRC 와의 협력체계 구축 추진중 ○ 용접관련 기존 연구의 문제점 도출 <ul style="list-style-type: none"> - 기술기준 경우 공통적으로 용접부 상태/손상 평가절차 미제시 - 기존연구의 경우 실제 용접현상 고려시 비경제성, 잔류응력 분포에 대한 일반 범주화 미흡, 신뢰성 있는 통계처리 기법 미개발 등 도출 ○ 기존 연구 문제점 및 최신 동향이 고려된 용접부 건전성평가 연구계획을 2단계 7과제에 대해 수립 <ul style="list-style-type: none"> ○ Web 기반 원전설비 용접관련 일반사항 DB/전문가시스템 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 일반사항에 대해 용접부 특성, 손상사례, 용접절차서 작성/검토 4개 모듈 - 기타 손상평가 및 상태평가에 대해 각 모듈별로 작성 추가 ○ 원자력분야 NRL 중 최초로 홈페이지(www.wins.re.kr) 운영 <ul style="list-style-type: none"> - 파기부 주요 기술정책 및 원전 안전성/수명연장 홍보 - 연구내용 게시 및 용접관련 사항 사이버 기술자문 40여회 수행 	100
금속조직/성분변화 예측기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주기기 8개, 용접부 40여개에 대해 중요요소 검토 결과 원자로 압력 용기 용접부를 금속조직 예측기술 개발대상 용접부 선정 ○ SA508 Gr.3 Cl.1 에 대한 위탁실험을 통해 상온부터 300℃까지의 열적/ 물리적 재료물성치 및 취약부 결정 ○ 상 변태/변화를 고려한 용접과정 동안의 온도해석 기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 상 변태/변화에 따른 잠열 흡수 및 방출 같은 용접현상 고려 - 다층용접 및 후열처리 같은 실제 용접과정 고려 - 기존결과와 비교시 온도는 ± 5% 범위 내에서 일치 HAZ 구분도 일치 ○ 실제 용접 현상/과정을 고려한 이론적/준경험적 금속 조직/성분 변화 예측기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 온도이력에 따른 용접부위별 금속조직 변화 고려 - 상 분포, 결정립 크기, 석출물 종류/상분율, 탄화물 크기 등 예측 - 기존 연구 및 위탁실험 결과와 비교시 경향 동일하며 정량적 예측값에 대해서도 신뢰도 90% 범위 내에서 일치 ○ 강도 등 용접부 재료물성 결정기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 경향 일치하나 정량적 결정값에 대해서는 일부 차이 존재 - 국부 취약부 결정 	100

[2 차년도]

세부연구개발목표	달성내용	달성도 (%)
금속조직변화 예측기술 검증 및 보완	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 금속조직 변화 및 기계적 물성 저하 완화방안 도출] <ul style="list-style-type: none"> - Heat Sink 를 이용한 용접 ◦ 금속조직 예측 DB/전문가시스템 초안 구축 ◦ 용접부 조사취화 특성 검토결과 	100
잔류응력 해석기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 원전설비 용접부 대상기기 및 일반범주화 기법 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 잔류응력 해석대상 용접부로 이종재, SS 배관, RPV 선정 - 파손확률 순으로 Ranking 설정후 대상 용접부 선정 기법 개발 ◦ 용접부 전용 자동 유한요소모델링 프로그램 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 용접부 형상/패스 수에 따른 유한요소 모델링 자동화 프로그램 개발 ◦ 대상 용접부에 대한 재료물성치/금속조직 실험 및 결정 <ul style="list-style-type: none"> - 이종재료 용접금속 인코넬 82, SA508 Gr.1a, TP316 에 대한 열적/물리적/기계적 재료물성치 고온실험(위탁) - 이종재료 용접부 인코넬 82 의 금속조직 분석 (위탁) ◦ 이론적 온도해석 기법 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 스테인리스 강 배관 용접부에 대한 이론 및 프로그램 개발 ◦ 1차년도 개발기술을 활용한 온도해석 및 금속조직 예측 <ul style="list-style-type: none"> - 이종재/SS 배관/원자로압력용기 용접부 ◦ 사용자 정의 보조 프로그램 UMAT 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 상변태 변형률과 어닐링 변형률이 고려된 재료거동 관련 UMAT 개발 ◦ 잔류응력 해석 <ul style="list-style-type: none"> - 이종재/SS 배관/원자로압력용기 용접부의 잔류응력 분포 결정 - 가동중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석절차 개발 - 용접부 피로설계를 위한 유한요소 응력해석 절차 개발 ◦ 잔류응력 측정 <ul style="list-style-type: none"> - 중성자 회절법 및 Hole Drilling 방법 이용(위탁), 이종재 용접부 잔류응력 측정 ◦ 잔류응력 완화방안 도출 <ul style="list-style-type: none"> - 후열처리 온도별 잔류응력 완화정도 곡선 도출 ◦ 수소기인균열 해석절차 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 수소확산에 대한 농도/온도/응력/전압구배의 영향이 고려된 절차개발 - 임계 수소농도와 임계 작용응력이 고려된 절차 개발 ◦ 수소기인균열 해석 <ul style="list-style-type: none"> - C-Mn 강 용접부에 대해 온도, 금속조직, 잔류응력 및 수소확산 해석 결과 복합평가 ◦ 수소기인균열 완화방안 도출 <ul style="list-style-type: none"> - 수소기인균열 발생 완화 및 관련 코드 요건 면제를 위한 경제적이고 효율적인 전기 전송처리 방안 및 시작품 개발 ◦ 잔류응력/수소기인균열 해석 DB/전문가시스템 초안 구축 	100 (100)

제 2 절 기술발전의 기여도

당해단계 연구 수행을 통해 체계적으로 수립된 상세 연구계획에 따라 용접부 건전성평가가 수행되어진다면 향후 원자력 발전소의 안전성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 신뢰성 있고 효율적인 건전성평가를 수행할 수 있다.

또 다른 연구 목표 대상인 실제 용접 현상/과정을 고려한 용접부 금속 조직/성분 변화 예측기술과 잔류응력 해석기술은 실제 용접 현상/과정을 고려하였다는 점에서 보다 실제적이고 신뢰성있는 평가가 가능하다는 것을 의미하며 아울러 실험적 접근법이 아닌 이론적/준경험적 접근법을 사용하였기 때문에 실험적 접근법에 비하여 경제적이고 효율적인 평가가 또한 가능하다.

본 개발기술 적용을 통해 얻어진 원전설비 용접부의 금속 조직/성분 변화 예측결과와 잔류응력 해석결과는 각종 손상평가시의 입력자료로써 사용되므로 금속조직 예측/잔류응력 해석 뿐만 아니라 원전설비 건전성평가 전반에 걸쳐서 신뢰성 있고 효율적인 평가를 가능하게 해준다. 또한, 본 개발기술은 원전설비 용접부 뿐만 아니라 화전/중화학 설비의 용접, 코팅, 주조, 열처리 등 분야의 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석에 적용될 수 있다.

따라서 원전설비 용접부 금속 조직/성분 변화 예측기술 및 잔류응력 해석기술을 개발함으로써 상술한 관련분야 기술을 신뢰성/효율성 측면 뿐만 아니라 적용성 측면에서도 한단계 향상시켰다고 판단 되어진다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

당해단계 연구와 관련하여 전반적인 추가 연구의 필요성은 없다고 판단되나 타당성 검증을 통한 일부 수정 보완이 필요하다고 판단되며 향후 대상기기 용접부를 변경하여 개발기술을 적용할 계획이다.

표 55는 본 연구수행을 통해 얻어진 개발 결과에 대한 관련 또는 타 연구에의 응용방안 및 기업화 추진방안 등 활용계획을 제시하고 있다.

표 55. 연구개발결과의 활용계획

[1 차년도]

세부과제	연구 개발 결과	활 용 계 획
상세 연구 계획 수립	○상세 연구계획	○금속조직 변화 예측, 잔류응력 해석 및 손상 평가 등 용접부 건전성평가 기술 개발에 활용
	○원전설비 용접관련 일반 사항 DB/전문가시스템 초안	○홈페이지와 연계를 통해 원전설비 용접관련 일반사항 사이버 기술자문 ○향후 개발될 금속조직 변화 예측, 잔류응력 해석 및 손상평가 DB/전문가시스템 초안과 연계
	○홈페이지 (www.wins.re.kr)	○연구내용 게시, 원전 안전성/수명연장 홍보 및 용접관련 사항 사이버 기술자문 ○용접 관련 일반사항 DB/전문가시스템 초안과 연계
금속조직/ 성분변화 예측기술 개발	○열적/물리적/기계적 재료 물성치	○온도해석, 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석 시 입력 자료로 활용
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 온도해석 기술	○금속조직 변화 예측, 잔류응력 해석 및 손상평가 시 온도 분포 결정에 활용
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 금속 조직/성분 변화 예측기술	○잔류응력 해석/손상 평가 시 금속 조직/성분 변화 예측에 활용 ○가동중 원전의 수명연장, 설계개선 및 주기적안전성평가 수행 시 건전성평가 측면에서 용접부 금속조직 평가 시 용이하고 경제적으로 활용 ○신규 원전 설계 시에도 용접부에 대한 금속조직 측면에서의 기존 문제점을 보완하는 안전설계에 용이하고 경제적으로 활용 ○원전설비 용접 뿐만 아니라 화력 발전소/중화학 설비의 용접, 열처리, 주조 및 코팅 등 다양한 분야에 적용하여 금속조직 변화를 예측
	○실제 용접 현상/과정을 고려한 용접부 금속 기계적 물성 결정기술	○용이하고 경제적인 용접부 취약부 결정에 활용

[2 차년도]

세부과제	연구 개발 결과	활 용 계 획
금속조직 변화 예측기술 검증 및 보완	○금속조직 변화 및 기계적 물성 완화방안	○별도의 공정이 필요 없이 용접하면서 금속조직 변화 및 기계적 물성 저하를 예방하는 용접에 활용
	○금속조직 예측 DB/전문가 시스템 초안	○홈페이지와 연계를 통해 원전설비 용접부 금속조직 예측 관련 사이버 기술자문 ○향후 개발될 잔류응력 해석 및 손상평가 DB/전문가시스템 초안과 연계
	○용접부 조사취화 특성	○가압열충격, 저인성 파괴해석 등에 활용
잔류응력 해석기술 개발	○원전설비 용접부 일반 범주화 기법 개발	○잔류응력 해석 및 손상평가 대상 용접부 선정시에 활용 ○Risk-Informed Inspection 에 활용
	○용접부 전용 자동 유한요소 모델링 프로그램	○용접부 온도해석, 금속조직 변화 예측, 잔류응력 해석 및 손상평가지시 유한요소 모델링시에 활용
	○열적/물리적/기계적 재료 물성치	○온도해석, 금속조직 예측 및 잔류응력 해석시 입력자료로 활용
	○이론적 온도해석 기법	○3 차원 대형용접 구조물의 온도해석에 활용
	○사용자 정의 보조 프로그램 UMAT	○잔류응력에 미치는 상변태/어닐링의 영향 고찰에 활용
	○실제 용접 현상.과정을 고려한 잔류응력 해석 기술	○가동중 원전의 수명연장, 설계개선 및 주기적안전성평가 수행시 손상평가 측면에서 입력자료인 잔류응력 평가시 용이하고 경제적으로 활용 ○신규 원전 설계 시에도 용접부에 대한 잔류응력 측면에서의 기존 문제점을 보완하는 안전설계에 용이하고 경제적으로 활용 ○원전설비 용접 뿐만 아니라 화력 발전소/중화학 설비의 용접, 열처리, 주조 및 코팅 등 다양한 분야에 적용하여 잔류응력 해석에 활용
	○잔류응력 완화방안	○기존 후열처리 방식과 비교시 최고온도 지속시간이 단축되고 두께/초기 잔류응력 크기/ramp up 시간 등에 무관하게 적용, 일관되고 효율적인 완화방안 도출로 경제성이 향상된 후열처리 지침 개발에 활용
	○수소기인균열(HIC) 해석 기술	○수소화산에 미치는 모든 영향(온도/조직/응력/전압 구배)을 고려한 해석기술을 개발함으로써 수소기인균열 발생위치 및 시간 예측에 활용
	○HIC 완화방안	○기존 HIC 제거 열처리를 대체하는데 활용 ○템퍼비드 보수 용접부의 비파괴검사 대기시간 단축 또는 제거에 활용
	○잔류응력/HIC 해석 DB/전문가 스템 초안	○홈페이지와 연계를 통해 원전설비 용접부 잔류응력/HIC 해석 관련 사이버 기술자문 ○향후 개발될 손상평가 DB/전문가시스템 초안과 연계

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

(엑셀 파일 양식)

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	2000-03-Vol.38-No.3	Mn-Mo-Ni 저합금강의 인성과 강도에 미치는 2상영역 열처리와 템퍼링 조건의 영향	대한금속재료학회지	안연상, 오용준, 김홍덕, 김길무, 홍준화
Paper	2000-05-Vol.38-No.5	Mn-Mo-Ni 저합금강의 천이온도영역에서 취성파괴특성에 대한 국부파괴응력 및 탄화물의 영향	대한금속재료학회지	양원준, 허무영, 노성주
Paper	2000-05-Vol.38-No.5	Mn-Mo-Ni 저합금강의 취성균열 전파에 미치는 입계 결정방위차의 영향	대한금속재료학회지	김민철, 오용준, 홍준화
Paper	2000-06-Vol.38-No.6	원자로 압력용기용 SA 508강의 기계적 성질 향상을 위한 합금설계 연구	대한금속재료학회지	김상호, 임영록, 이성학, 이후철, 오용준, 홍준화
Paper	1998-06-Vol.36-No.6	질소첨가 Type 316L스테인리스강의 입계석출 및 예민화특성에 미치는 냉간가공의 영향	대한금속학회	서무홍, 오용진, 류우성, 천병선
Paper	1998-08-Vol.36-No.8	SA 508 Cl.3 원자로압력용기강 단위열영향부의 노치인성과 미세조직 변화	대한금속학회	김주학, 윤의박
Paper	1997-08-Vol.35-No.8	Type 316L 스테인리스강의 입계 석출 및 예민화에 미치는 질소의 영향	대한금속학회지	오용준, 류우석, 홍준화
Paper	1998-03-Vol.36-No.3	질소를 첨가한 Type 316L 스테인리스 강의 동적변형시효 거동	대한금속학회지	김대완, 류우석, 홍준화, 국일현, 최시경
Paper	1999-08-Vol.37-No.8	용접열 사이클 최고온도가 원자로 압력용기강 IRHAZ의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향	대한금속학회지	김주학, 이창희
Paper	1999-10-Vol.37-No.10	원자로 압력용기강 용접열영향부의 천이영역 파괴인성과 미세조직 변화	대한금속학회지	신학수, 김주학
Paper	2000-Vol.24-No.2	소형시험편의 Master Curve 방법을 이용한 원자로 압력용기강의 파괴인성 천이특성평가	대한기계학회논문집 A권	이봉상, 양원준, 허무영, 김주학, 홍준화
Paper	1991-09-Vol.9-No.3	컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 저항요점에 관한 연구	대한용접학회지	함원국
Paper	1992-12-Vol.10-No.4	용접규격의 현황과 발전방향	대한용접학회지	최병길
Paper	1994-12-Vol.12-No.4	미소시험편에 의한 강 용접부의 응력부식 균열 평가에 관한 연구	대한용접학회지	유효선, 임재규, 정세희
Paper	1994-12-Vol.12-No.4	방사선 투과검사의 방법과 산업적용	대한용접학회지	이용

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1994-12-Vol.12-No.4	비파괴검사개론	대한용접학회지	정용무
Paper	1994-12-Vol.12-No.4	초음파탐상시험에 의한 강용접부 결함평가	대한용접학회지	이의종
Paper	1994-12-Vol.12-No.4	초음파탐상시험의 최신응용	대한용접학회지	조정삼
Paper	1995-03-Vol.13-No.1	강구조물 관련 용접규격과 안전성 확보	대한용접학회지	이병훈, 황선호
Paper	1995-03-Vol.13-No.1	용접규격과 품질시스템	대한용접학회지	최병길
Paper	1995-03-Vol.13-No.1	인공해수의 pH에 따른 강 용접부의 응력 부식균열거동에 관한 연구	대한용접학회지	유효선, 나의균, 정세희
Paper	1995-03-Vol.13-No.1	전력산업에서 용접기술 규격의 개발현황	대한용접학회지	나진수
Paper	1995-03-Vol.13-No.1	ASME CODE 적용과 품질보증	대한용접학회지	이상연
Paper	1995-06-Vol.13-No.2	고온기기의 재질 경년열화와 수명예측	대한용접학회지	정세희
Paper	1995-06-Vol.13-No.2	초기 과하중이 점용접 인장전단 시험편의 피로거동에 미치는 영향	대한용접학회지	강성수, 정원욱
Paper	1996-02-Vol.15-No.2	SP-SSRT법에 의한 TMCP강 용접부의 응력부식균열 평가에 관한 연구	대한용접학회지	유효선, 정희돈, 유대영, 정세희
Paper	1996-02-Vol.15-No.2	SYSWELD를 이용한 용접 프로세스 제어 기술	대한용접학회지	이재경, 이기훈
Paper	1996-04-Vol.14-No.2	표면처리 박강판 spot용접 이음재의 응력분포와 부식피로강도 평가	대한용접학회지	배동호, 임동진
Paper	1996-04-Vol.14-No.2	표면처리 박강판 spot용접 이음재의 응력분포와 부식피로강도 평가	대한용접학회지	배동호, 임동진
Paper	1996-04-Vol.14-No.2	Ti산화물가의 HAZ인성 및 미세조직에 미치는 용접열 cycle의 영향	대한용접학회지	정홍철, 한재광, 방국수

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1997-02-Vol.15-No.1	용접부에 작용하는 구속응력의 해석	대한용접학회지	신상범, 윤중근
Paper	1997-02-Vol.15-No.1	유한산소법을 이용한 용접부의 잔류응력, 변형 및 파괴해석	대한용접학회지	심용래
Paper	1997-04-Vol.15-No.2	용접이음부 형태변화에 따른 후열처리시의 역학적 특성에 관한 연구	대한용접학회지	방한서, 강성원, 김기성, 김종명, 노찬승
Paper	1997-04-Vol.15-No.2	원통관의 원주용접시 발생하는 잔류응력에 관한 실험적 연구	대한용접학회지	엄동석, 유기열
Paper	1997-06-Vol.15-No.3	용접잔류응력이 용접부 피로강도에 미치는 영향의 정량적 평가방법	대한용접학회지	김용준
Paper	1997-06-Vol.15-No.3	용접재의 잔류응력 재분포와 피로거동	대한용접학회지	이용복, 정진성
Paper	1997-06-Vol.15-No.3	MSR을 이용한 용접잔류응력의 제거와 적용성 검토	대한용접학회지	박지선, 한명수, 한종만
Paper	1997-10-Vol.15-No.5	열탄소성 해석에 의한 원주용접 원통관의 잔류응력 예측과 그 영향에 대한 연구	대한용접학회지	유기열, 엄동석
Paper	1997-10-Vol.15-No.5	Ni-Cr-Fe 및 Ni-Fe-Cr-Mo계 합금의 용접부 균열특성에 관한 연구	대한용접학회지	김희봉, 이창희
Paper	1998-10-Vol.16-No.5	304 스테인리스강 용접부 잔류응력에 미치는 예열 효과의 유한요소 해석	대한용접학회지	장경복, 김하근, 강성수
Paper	1998-10-Vol.16-No.5	Fe-Cr-Ni강 용접금속부의 미세편석에 관한 해석	대한용접학회지	박준민, 박종민, 안상곤, 이창희, 윤의박
Paper	1998-12-Vol.16-No.6	오스테나이트계 스테인리스강 용착금속의 응고모드가 공식 생성 및 성장에 미치는 영향	대한용접학회지	최한신, 김규영, 이창희
Paper	1998-12-Vol.16-No.6	용접용 강의 분류와 예열	대한용접학회지	이보영
Paper	1999-06-Vol.17-No.3	SA 508-cl.3강의 ICCG HAZ의 인성에 미치는 M-A constituents의 영향	대한용접학회지	권기선, 김주학, 홍준화, 이창희
Paper	1972-12-Vol.9-No.2	알루미늄합금의 저항용접에 따른 열응력 및 잔류응력의 해석	대한조선학회지	김재근, 김효철

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1999-05	원전배관 저합금 강재의 용접열영향부에 대한 물성연구	제6회 원전기기건전성 Workshop	오영진, 김지현, 황일순
Paper	2000-Vol.10-No.4	샤피 V- 노치 충격 하중-변위 곡선의 균열정지하중을 이용한 원자로입력용기강의 파괴인성 예측	한국재료학회지	박정용, 김주학, 이윤규, 홍준화
Paper	1998	Numerical modeling of root formation and effects in the shrinkage zone during the welding process	ABAQUS User's Conference	S. Fricke, E. Keim, J. Schmidt
Paper	1999-Vol.179	Uncertainty analysis of welding residual stress fields	Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering	Khaled Abdel-Tawab, Ahmed K. Noor
Paper	1999-09-Vol.35-No.5	Irradiation effects on magnetic properties in neutron and proton irradiated reactor pressure vessel steel	IEEE Transactions on Magnetics	Duck-Gun Park, Jun-Hwa Hong
Paper	1999-Vol.76	Effects of loading rate and temperature on J-R fracture resistance of an SA516-Gr.70 steel for nuclear piping	International Journal of Pressure Vessels and Piping	J.H. Yoon, B.S. Lee
Paper	1993-Vol.33-No.4	Elastic moduli and internal friction of low carbon and stainless steels as a function of temperature	ISIJ International	Mikio FUKUHARA, Asao SANPEI
Paper	1999-04-Vol.85-No.8-Part.2	Changes in magnetic parameters of neutron irradiated SA 508 Cl.3 reactor pressure vessel forging and weld surveillance specimens	Journal of Applied Physics	Se-Hwan Chi, Kee-Ok Chang, Jun-Hwa Hong
Paper	2000-05-Vol.87-No.9	The effect of microstructural changes on magnetic Barkhausen noise and magnetomechanical acoustic emission in Mn-Mo-Ni pressure vessel steel	Journal of Applied Physics	Y.Y. Song, D.G. Park, J.H. Hong
Paper	1999-Vol.196-197	Effect of microstructure on magnetic Barkhausen noise level in the weld HAZ of an RPV steel	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	Joo-Hag Kim, Duck-Gun Park
Paper	1999-Vol.196-197	Nondestructive evaluation of irradiation effects in RPV steel using Barkhausen noise and magnetoacoustic	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	D.G. Park, J.H. Hong
Paper	2000-Vol.215-216	Microstructural dependence of Barkhausen noise and magnetic relaxation in the weld HAZ of an RPV steel	Journal of Magnetism and Magnetic Materials	Duck-Gun Park, Cheol-Gi Kim, Jun-Hwa Hong
Paper	1999-02-Vol.14-No.2	Grain boundary filmlike Fe-Mo-Cr phase in nitrogen-added type 316L stainless steels	Journal of Materials Research Society	Yong-Jun Oh, Woo-Seog Ryu
Paper	1997-12-Vol.32-No.23	Evaluation of thermal recovery of neutron-irradiated SA508-3 steel using magnetic property measurements	Journal of Materials Science	Duck-Gun Park, Jun-Hwa Hong
Paper	1999-Vol.34	An iteration method for directly determining J-resistance curves of nuclear structural steels	Journal of Materials Science	Thak-Sang Byun, Bong-Sang Lee, Ji-Hyun Yoon, Jun-Hwa

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1999--Vol.34	Ductile fracture mechanisms in shielded metal-arc and gas tungsten-arc welds of 347 stainless steels	Journal of Materials Science	Yong-Jun Oh, Bong-Sang Lee
Paper	1994-Vol.209	Damage depth profile and recovery characteristics of 16 MeV proton irradiated 12Cr-1MoV steel	Journal of Nuclear Materials	Se-Hwan Chi, Jun-Hwa Hong
Paper	1998-06-Vol.257	Notch position in the HAZ specimen of reactor pressure vessel steel	Journal of Nuclear Materials	J.H. Kim, E.P. Yoon
Paper	1998-Vol.252	A theoretical model for determination of fracture toughness of reactor pressure vessel steels in the transition region from automated ball indentation test	Journal of Nuclear Materials	Thak-Sang Byun, Jin-Weon Kim, Jun-Hwa Hong
Paper	2000-Vol.277	Estimation of fracture toughness transition curves of RPV steels from ball indentation and tensile test data	Journal of Nuclear Materials	Thak-Sang Byun, Seok-Hun Kim
Paper	2000-Vol.278	Nitrogen effect on precipitation and sensitization in cold-worked Type 316L(N) stainless steels	Journal of Nuclear Materials	Yong-Jun Oh, Jun-Hwa Hong
Paper	1999-02-Vol.121	A simple estimating method for reduction of welding residual stresses in thick welded joint from stress-relief annealing-part II: The characteristics of reduction of welding residual stresses in very thick joints during SR treatment	Journal of Pressure Vessel Technology	K. Nakacho, Y. Ueda
Paper	1999-11-Vol.121	Residual stress analysis by simplified inherent strain at welded pipe junctures in a pressure vessel	Journal of Pressure Vessel Technology	M. Mochizuki, M. Hayashi, T. Hattori
Paper	2000-03	Residual stresses in welded moment frames and implications for structural performance	Journal of Structural Engineering	jinmiao Zhang, Pingsha Dong
Paper	1999-05-Vol.34-No.5	The changes of the structural, magnetic and mechanical properties in a reactor pressure vessel steel neutron-irradiated at 70°C	Journal of the Korean Physical Society	D.G. Park, J.H. Hong
Paper	1999-05-Vol.34-No.5	The effect of microstructural changes on magnetic Barkhausen noise in Mn-Mo-Ni pressure vessel steel	Journal of the Korean Physical Society	H.T. Jeong, D.G. Park
Paper	1999-11	원자로압력용기강 용접열영향부위(HAZ)에서의 기계적특성 분포 및 노치위치 문제점	KINS Workshop	김주학, 문종걸, 신학수, 이봉상
Paper	1998-05-Vol.29A	Calculation of α/γ equilibria in SA508 grade 3 steels for intercritical heat treatment	Metallurgical and Materials Transactions A	Byeong-Joo Lee, Hong-Deok Kim
Paper	2000-04-Vol.31A	Correlation of the microstructure and fracture toughness of the heat-affected zones of an SA 508 steel	Metallurgical and Materials Transactions A	Sang-Ho Kim, Suk-Young Kang
Paper	1999-Vol.194	Application of intercritical heat treatment to improve toughness of SA508 Cl.3 reactor pressure vessel steel	Nuclear Engineering and Design	Yeon-Sang Ahn, Hong-Deok Kim

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	2000-Vol.195	Modeling of weld residual stresses in core shroud structures	Nuclear Engineering and Design	jinmiao Zhang, Pingsha Dong
Paper	2000-Vol.197	Simplified analysis of shrinkage in pipe to pipe butt welds	Nuclear Engineering and Design	Chakrapani Basavaraju
Paper	2000-Vol.199	J-R fracture Properties of SA508-1a ferritic steels and SA312-TP347 austenitic steels for pressurized water reactor's primary coolant piping	Nuclear Engineering and Design	B.S. Lee, Y.J. Oh, J.H. Yoon
Paper	2000-Vol.5-No.3	Microstructure and toughness of intercritically reheated heat affected zone in reactor pressure vessel steel weld	Science and Technology of Welding and Joining	K.S. Kweon, J.H. Hong, J.H. Kim,
Paper	1996-Vol.35-No.3	A phenomenological model for transient creep behaviors based on the steady state creep properties	Scripta Materialia	Bong-Sang Lee, Soo- Woo Nam, Jun-Hwa Hong
Paper	1999-Vol.40-No.2	Mossbauer analysis of heat affected zones of an SA 508 steel weld	Scripta Materialia	Soon-Ju Kwon, Joo- Hag Kim
Paper	1994-Vol.30- No.12	Evaluation of irradiation effects of 16 MeV proton-irradiated 12Cr-1MoV steel by small punch tests	Scripta Metallurgica et Materialia	Se-Hwan Chi, Jun- Hwa Hong
Paper	2000-03-Vol.43- No.3	Characterization of boundaries and determination of effective grain size in Mn-Mo-Ni low alloy steel from the view of misorientation	Scripta Materialia	Min-Chul Kim, Yong- Jun Oh, Jun-Hwa Hong
Paper	1998-01	Calculating the lowest failure pressure for electric resistance welded pipe	Welding Journal	Bruce D. Craig
Paper	1998-07-Vol.308- s	Stainless steel cladding of structural steel plate using the pulsed current GMAW process	Welding Research Supplement	P.K. GHDSH, P.C. GUPTA, V.K. GOYAL
Paper	2000-02	Approximate stress intensity factor and notch stress for spot welds	Welding Research Supplement	S. ZHANG
Paper	2000-09	Modeling of projection welding processes using coupled finite element analyses	Welding Research Supplement	X. SUN
Paper	1996-Vol.5	Estimating residual life of ally 600 RPV penetrations		E. Stephen Hunt, Glenn A. White
Paper	1997-Vol.347	Residual stresses and stress corrosion cracking of PWR CRDM nozzles		F.Ternon, C. Faidy
Paper	1998-Vol.373	Computational modeling of weld residual stresses and distortions—an integrated framework and industrial applications		P. Dong, J. Zhang, M.V. Li

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1998-Vol.373	Residual stress analysis of a multi-pass girth weld		P. Dong, N. Ghadiali F.W. Brust
Paper	1998-Vol.373	Residual stress effects on crack driving force in multipass welds		Yong-Yi Wang, Zhili Feng, Wentao Cheng
Paper	1998-Vol.373	Residual stresses in strength-mismatched welds and implications on fracture behavior		jinmiao Zhang, Pingsha Dong
Paper	1998-Vol.380	Reheat cracking sensitivity and hydrogen effect on mechanical properties of type 347 stainless steel weld metal		Hiroshi Yamamoto
Paper	1999-Vol.393	Classical and emerging fracture mechanics parameters for history dependent fracture with application to weld fracture		Frederick W. Brust
Paper	1999-Vol.393	Determination of critical heated band width during local PWHT by creep analysis		Hidekazu Murakawa, Jianhua Wang
Paper	1999-Vol.393	Influence of heating conditions on temperature distribution during local PWHT		Yukihiko Horii, Jinkichi Tanaka
Paper	1999-Vol.393	On the validation the models related to the prevision of the HAZ behaviour		Y. VINCENT, JF. JULLIEN
Paper	1999-Vol.393	Residual stress simulation incorporating weld HAZ microstructure		LUBOMIR JUNEK
Paper	1999-Vol.393	Study of the material properties of thin pipe butt welds on the welding residual stress distribution by using numerical simulation		J.J. JANOSCH, D. LAWRJANITEC
Paper	1999-Vol.393	Welding residual stresses with magnitudes lower than the material yield strength		Kyle Koppenhoefer
Paper	2000-03-Vol.56- No.3	Carbon and nitrogen effects on sensitization resistance of type 347 stainless steels		Y.J. Oh, J.H. Yoon
Paper	1986-09-Vol.17B	Computer modeling of heat flow in welds	Metallurgical Transactions B	J. Goldak
Paper	1991-06	Coupling heat transfer, microstructure evolution and thermal stress analysis in weld mechanics	IUTAM Symposium	J. Goldak, Alan Oddy
Paper	1986-05	Computational heat transfer for weld mechanics	Advanced in Welding Science Technology	J. Goldak, M. McDill

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1985-06	Effects of SO ₂ shielding gas additions on GTA weld shape	Welding Research Supplement	C. R. Heiple
Paper	1999-11	Marangony effect in deep penetration laser welding of steel	18th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics	T. Fuhrich
Paper	1991-09	The effect of gas shear stress on marangoni flows in arc welding	Welding Research Supplement	R.T.C. Choo
Paper	1989-05	fluid flow and its effect on penetration shape in stationary arc welds	2nd Int. Conference on Trends in Welding Research	Akira Matsunawa
Paper	2000-08-Vol.122	Welding residual stresses and effects on fracture in pressure vessel and piping components : A millennium review and beyond	Journal of Pressure Vessel Technology	P. Dong, F.W. Brust
Paper	1996	Computer Simulation of Manufacturing Processes : Casting and Welding	Computer Modeling and Simulation in Engineering 1	U. Chandra
Paper	1998-06-Vol.29B	A computational model for the prediction of steel hardenability	Metallurgical and Materials Transactions B	M. Victor Li
Paper	1993-Vol.14-No.2	Computed Multicomponent Phase Diagrams for Hardenability and HSLA steels with application to the prediction of microstructure and mechanical properties	Journal of Phase Equilibria	A. Kroupa, J.S. Kirkaldy
Paper	1995-06	Modeling the formation of oxide inclusion in low-alloy steel welds	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	S.S. Babu
Paper	1993-Vol.45-No.3	Mixed-mode stress intensity factors for interacting semi-elliptical surface cracks in a plate	Engineering Fracture Mechanics	R.B. Stonesifer
Paper		Comparison of Various Codes/Standards/Recommendations	Battelle	
Paper	1981-03-Vol.48	An embedded elliptical crack, in an infinite solid, subject to arbitrary crack-face tractions	Journal of Applied Mechanics	K. Vijayakumar
Paper	1983-Vol.17-No.3	Analysis solution for embedded elliptical cracks, and finite element alternating method for elliptical surface cracks, subjected to arbitrary loadings		
Paper	1995-06	Computational weld mechanics : A progress report on ten grand challenges	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	J. Goldak
Paper	1995-06	Modern solidification theory applied to welding	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	W. Kurz

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1985-10	A camparison of the point source and finite element schemes for computing weld cooling	JDC University Research Symposium	J.E. Moore
Paper	1985-06	Computational weld mechanics		John Goldak
Paper	1993-12	Modeling of brittle zones in the HAZ of steel welds	Int. Conf. Proceedings on Modeling and Control of joining Processes	S. Suzuki
Paper	1993-12	Analytical modeling of normal grain growth in welds	Int. Conf. Proceedings on Modeling and Control of joining Processes	Isak Andersen
Paper	1986	Weld microsegregation characterization and modeling	Advances in Welding Science and Technology	J.A. Brooks
Paper	1986	The mechanism of acicular ferrite formation in steel weld deposits	Advances in Welding Science and Technology	M. Strangwood
Paper	1995-06	Weld solidification and microstructural development	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	J.A. Brooks
Paper	1995-06	Microstructure evaluation in low alloy steel weld metal from convective heat transfer calculations in three dimensions	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	K. Mundra
Paper	1995-06	Modeling the ferrite-to-austenite transformation in the heat-affected zone of stainless steel multi-pass welds	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	J.M. Vitek
Paper	1995-06	Simulation of the weld heat affected zone microstructure of a 0.5 Cr-Mo-V steel	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	B. Radhakrishnan
Paper	1995-06	An internal state variable approach to the modeling of solid state transformations in welds	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	O. Grong
Paper	1988-06	A methodology for computing heat affected zone hardness, microstructure and preheat temperature	2nd Int. Conference on Cambridge Computer Technology in Welding	M.J. Bibby
Paper	1988-06	Computer prediction of weld bead shapes	2nd Int. Conference on Cambridge Computer Technology in Welding	R.S. Chandel
Paper	1996-06	Simulation of weld pool formation during vertical arc welding with emphasis on the influence of groove preparation	6th Int. Conference on Computer Technology in Welding	D Weiss
Paper	1996-06	The mathematical model for optimization of weld shape formation in different positions of arc welding	6th Int. Conference on Computer Technology in Welding	B M Berezovsky

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1996-06	The modeling of butt welds using neural networks in robotic GMAW	6th Int. Conference on Computer Technology in Welding	L-O Larsson
Paper	1993-12	On the prediction of HAZ grain size using monte carlo simulation	Int. Conf. Proceedings on Modeling and Control of joining Processes	B. Radhakrishnan
Paper	1993-12	Cellular automata modeling of weld solidification structure	Int. Conf. Proceedings on Modeling and Control of joining Processes	W.B. Dress
Paper	1995-06	Effect of oxide inclusions on the solid state transformation in low-alloy steel fusion welds	4th Int. Conference on Trends in Welding Research	S.S. Babu
Paper	1993-Vol.6-Ch.11	Corrosion of weldments	ASM Handbook (Weld integrity and performance)	A. Wahid
Paper	1993-Vol.6-Ch.11	Properties of Nickel-alloy welds	ASM Handbook (Weld integrity and performance)	T.J. Kelly
Paper	1997	Thermal analysis of welds	ASM Int. the Materials Information Society (Modeling in welding, hot powder forming)	J.A. Goldak
Paper	1995-02	Temperature prediction for welding using a personal computer	The American Society of Mechanical Engineers	L.A. Van Gulick
Paper	1984-06-Vol.15B	A new finite element model for welding heat sources	Metallurgical Transactions B	John goldak
Paper	1976-12-Vol.55	An investigation of the thermal response of stationary gas tungsten arc welds	Welding Research Supplement	E. Friedman
Paper	1987	An efficient method for estimation of reduction of welding residual stresses from stress relief annealing		Yukio Ueda
Paper	1991	Finite element modeling and residual stress calculation for multi-pass single welded joint between a plate and the penetrating pipe	The Minerals, Metals & Materials Society	Yukio Ueda
Paper	1996-04	Improvement in numerical accuracy and stability of 3-D FEM analysis in welding	Welding Research Supplement	J. Wang, Y. Ueda
Paper	1992-06	Prediction of welding residual stresses in T and I joints using inherent strains. 3rd report : method for prediction of welding residual stress using residual stress generation source	Welding International 1992. 6	Yukio Ueda
Paper	1993-07	Experimental verification of a method for prediction of welding residual stresses in T joints using inherent strains 4th report : method for prediction using source of residual stress	Welding International 1993. 7	Yukio Ueda

WINS 보유 자료 목록

종류	No	제목	출판	저자
Paper	1972	Thermal nonlinear behavior of structures		Yukio Ueda
Paper	1989	ABAQUS welding analysis	ABAQUS User's Conference	Leonard A. Van Gulick
Paper	1988	Finite element welding computations using general purpose nonlinear analysis codes	ASME PVP Conference	L.A. Van Gulick
Paper	1988	Thermomechanical modeling to support analysis based weld joint design	Materials in Manufacturing Processes	L.A. Van Gulick
Paper	1993-09-Vol.72	Error due to two dimensional approximation in heat transfer analysis of welds	Welding Research Supplement	V. Kamala
Paper	1996-06	Software for structural integrity assessment	6th Int. Conference on Computer Technology in Welding	R Phaal
Paper	1998	Reheat cracking and strategies to assure integrity type 316 welded components	Int. Conf. On Integrity of High Temp. Welds	M C Coleman
Paper	1999-02-Vol.121	A simple estimating method of reduction of welding residual stresses in thick welded joint from stress-relief annealing -- Part II : The characteristics of reduction of welding residual stresses in very thick joints during SR treatment	Journal of Pressure Vessel Technology	K. Nakacho
Paper	1999-09-Vol.121	Residual stress analysis by simplified inherent strain at welded pipe junctures in a pressure vessel	Journal of Pressure Vessel Technology	M. Mochizuki
Paper	1999-Vol.393	Determination of critical heated band width during local PWHT by creep analysis	ASME	Hidekazu Murakawa
Paper	1999-Vol.393	Residual stress simulation incorporating weld HAZ microstructure	ASME	Lubomir Junek
Paper	1999-Vol.393	Study of the material properties of thin pipe butt welds (in C-Mn and stainless steel) on the welding residual stress distribution by using numerical simulation	ASME	J.J. Janosch
Paper	1999-Vol.393	Welding residual stresses with magnitudes lower than the material yield strength	ASME	Kyle Koppenhoefer
Paper	1999-Vol.393	On the validation of the models related to the prevision of the HAZ behaviour	ASME	Y. Vincent
Paper	2000-Vol.197	Simplified analysis of shrinkage in pipe to pipe butt welds	Nuclear Engineering and Design	Chakrapani Basavaraju

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper		Some consistency requirements on hardening - Recovery evolution equation for welding	Sandia National Lab	Lee A. Bertram
Paper	1986	On large strain elasto-plastic and creep analysis	Finite Element Methods for Nonlinear Problems Europe-US Symposium	K.J. Bathe
Paper	1983	Numerical implementation of constitutive models : rate-independent deviatoric plasticity	Workshop on the Theoretical foundation for Large-Scale Computations of Nonlinear	Thomas J.R. Hughes
Paper	1986	A comparison of an implicit and explicit implementation of the hughes-liu shell		J.O. Hallquist
Paper	1986	Implementation of a modified hughes-liu shell into fully vectorized explicit finite element code	Finite Element Methods for Nonlinear Problems Europe-US Symposium	J.O. Hallquist
Paper	1990-08-Vol.112	Consistent strain fields in 3D finite element analysis of welds	Journal of pressure Vessel Technology	A.S. Oddy
Paper	1989	Transformation effects in the 3D finite element analysis of welds	2nd Int. Conf. On Trends in Welding Research	A.S. Oddy
Paper	1986-05	Progress in computing residual stress and strain in welds	Advances in Welding Science and Technology	J. Goldak
Paper	1990	Keynote address modeling thermal stresses and distortions in welds	Recent Trends in Welding Science and Technology	John Goldak
Paper	1992-02-Vol.114	Transformation plasticity and residual stresses in single-pass repair welds	Journal of Pressure Vessel Technology	A.S. Oddy
Paper	1998-Vol.373	Residual stresses in strength-mismatched welds and implications on fracture behavior	ASME	P. Dong
Paper	1998-Vol.373	Residual stress effects on crack driving force in multipass welds	ASME	Yong-Yi Wang
Paper	2000-03	Residual stresses in welded moment frames and implications for structural performance	Journal of Structural Engineering	J. Zhang
Paper		Thermal stresses in welding	Thermal Stresses 1	Lennart Karlsson
Paper	1997	Analysis of repair weld residual stresses in vessel-type structures	The Institute of Metals	P. Dong

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper		Measurement and modeling of residual stresses in thick section type 316 stainless steel welds		SK Bate
Paper	1998-11	Analysis of residual stresses in Al-Li repair welds and mitigation techniques	Welding Research Supplement	P. Dong
Paper	1999-Vol.393	Influence of heating conditions on temperature distribution during local PWHT	ASME	Yukihiko Horii
Paper	2000	A comprehensive thermal solution procedure for different weld	PVP Conference 2000	Z. Cao
Paper	2000-Vol.410-1	Analytical and experimental study of residual stresses in a multi-pass repair weld	ASME	J. Zhang
Paper	2000-Vol.410-1	Effects of repair weld length on residual stress distribution	ASME	J. Zhang
Paper	1998-05-Vol.120	Effects of repair weld residual stresses on wide-panel specimens loaded in tension	Journal of Pressure Vessel Technology	P. Dong
Paper	1998-09	Assessment of numerical procedures for residual stress analysis of multipass welds	Welding Research Supplement	J.K. Hong
Paper	1993	Finite element modeling of a single pass GMA weldment	Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes VI	S. Das
Paper	1960	Stress-strain relations in plasticity and thermoplasticity	2nd Symposium on Naval Structural Mechanics	P.M. Naghdi
Paper	1985	Deformations and stresses in butt-welding of large plates	Numerical Methods in Heat Transfer Vol.III	Mikael Jonsson
Paper	1986-06-Vol.6	Finite element analysis of temperature and stresses in a single-pass butt-welded pipe-influence of mesh density and material modeling	Engineering Computations	C.T. Karlsson
Paper	1994	Finite element simulation and measurement of welding residual stresses	Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering	Lars Wikander
Paper	1985-10	Simulation of tack welding procedures in butt joint welding of plates	Welding Research Supplement	M. Jonsson
Paper	1991	Coupling between heat flow, metallurgy and stress-strain computations in steels : the approach developed in the computer code sysweld for welding or quenching	The Minerals, Metals & Materials Society	J.M. Bergheau

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1991	Combined and stress-strain calculations	The Minerals, Metals & Materials Society	Lennart Karlsson
Paper	1991	3-D simulation of a laser surface treatment through steady state computation in the heat source's	IUTAM Symposium	J.M. Bergheau
Paper		Influence of material properties at high temperatures on the modelling of welding residual stress and deformation state		D. Bru, J. Devaux
Paper		Thermomechanical behaviour of carbon manganese steel under martensitic transformation		Cavallo N.
Paper	1994	Metallurgical and mechanical consequences of phase transformations in numerical simulations of welding processes	ASM International	J.B. Leblond
Paper	1998-06	3-D residual stress characteristics in pipe repair welds	ASM International	J. Zhang
Paper	1996-06	Integration of weld residual stresses into the local mechanical approach for optimising the fatigue strength of fillet welded assemblies		J.J. Janosch
Paper		Residual stress analysis fracture assessment of welded joints in moment resistant frames	Modeling and Simulation Based Engineering	J. Zhang
Paper	1996-Vol.37-No.2	Local approach for defining an aid for the design department for optimizing the geometry of fatigue loaded fillet welds		J.J. Janosch
Paper	1998	Investigation and repair of a leak at a high temperature stainless butt weld	Int. Conf. On Integrity of High Temperature welds	J.W. Dunn
Paper	1998	Direct measurement of residual stresses at a repair weld in an austenitic steel tube	Int. Conf. On Integrity of High Temperature welds	L. Edwards
Paper	1988	Surface deformations resulting from laser spot welding	ASME	D.J. Segalman
Paper	1988	Developments in constitutive modeling : application of the ABAQUS UMAT routine	ABAQUS User's Conference	D.M. Parks
Paper	1991	Automated thermomechanical modeling of welds using interface elements for 3D metal deposition	ABAQUS User's Conference	Lee A. Bertram
Paper	1998-Vol.373	Residual stress analysis of a multi-pass girth weld	ASME	P. Dong

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	2000-Vol.410-1	Characteristic residual stress distribution in pressure vessels and piping components	ASME	P. Dong
Paper	1998-Vol.373	Computational modeling of weld residual stresses and distortions - an integrated framework and industrial applications	ASME	P. Dong
Paper	1997-08	A 3-D composition shell element model for residual stress analysis of multi-pass welds	14th Int. Conf. On Structural Mechanics	J. Zhang
Paper	1992-Vol.71-No.9	Determination of residual stresses in thick-section weldments	Welding Research Supplement	Y. Shim
Paper	1975-08	Thermochemical analysis of the welding process using the finite element method	Journal of Pressure Vessel Technology	E. Friedman
Paper	2000-02	Heat transfer and fluid flow in a partially or fully penetrated weld pool in gas tungsten arc welding	Int. Journal of Heat and Mass Transfer	H.G. Fan
Paper	1998-11	Modeling, optimization and classification of weld quality in tungsten inert gas welding	Int. Journal of Machine Tools & Manufacture	Y.S. Tarnq
Paper	1999-08-Vo.11-No.4	Prediction of microstructures in laser welding of stainless steel AISI 304	Journal of Laser Applications	W. Guo
Paper	1999	Role of delta-ferrite in the dissolution of passive films on the austenitic stainless-steel weld metals	Journal of Materials Science Letters	M.G. Pujar
Paper	2000-06-Vol.31B	3-D Monte Carlo simulation of grain growth in the heat-affected zone of a 2.25Cr-1Mo steel weld	Metallurgical and Materials Transactions B	S. Sista
Paper	2000-05-Vol.122	Metallurgical assessment of the softened HAZ region during multipass welding	Journal of Manufacturing Science and Engineering	D. Wojnowski
Paper	1998-Vol.38-No.10	Physical metallurgy of pulsed current submerged arc welding of steels	ISIJ International	Ivan Hrivnak
Paper	2000-08	3-D Monte Carlo simulation of grain growth during GTA welding of titanium	Acta Materialia	Z. Yang
Paper	1999-Vol.41-No.2	Validity of concept of phase evolution diagrams to weldments of 9Cr-1Mo steel	Scripta Materialia	M. Vijayalakshmi
Paper	2000-08	On the formation of a centerline grain boundary during fusion welding	Acta Materialia	O. Hunziker

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1988	Computational thermal analysis of welds : current status and future directions	The Minerals, Metals & Materials Society	J. Goldak
Paper	2000-07	Modeling of weld residual stresses and distortions : computational procedures and applications	6th Int. Conf. On Residual Stresses	Pingsha Dong
Paper	1991	Computational weld mechanics as a coupled problem	The Minerals, Metals & Materials Society	J. Goldak
Paper		Prediction of multicomponent equilibrium and transformation diagrams for low alloy steels		J.S. Kirkaldy
Paper	1978-04-Vol.9A	Thermodynamic prediction of the Ae3 temperature of steels with additions of Mn, Si, Ni, Cr, Mo, Cu	Metallurgical Transactions A	J.S. Kirkaldy
Paper	1989-10-Vol.5	Thermodynamic estimation of liquidus, solidus, Ae3 temperatures, and compositions for low alloy multicomponent steels	Materials Science and Technology	A.B. Sugden
Paper	1982-02	An examination of the validity of existing empirical formulae for the calculation of Ms Temperature	Metallurgical Transactions A	C.Y. Kung
Paper		A critical review of data sources for isothermal transformation and continuous cooling transformation diagrams		George T. Eldis
Paper		The role of interfacial energy during solid state phase		Mats Hillert
Paper	1970-Vol.24	The regular solution model for stoichiometric phases and ionic melts	Acta Chemica Scandinavica	M. Hillert
Paper		A compendium of ternary iron-base phase diagrams		Bjorn Uhrenius
Paper	1945-10	Kinetics of the decomposition of austenite	New York Meeting	Clarence Zener
Paper	1993	Heat and fluid flow in welding	Mathematical Modeling of Weld Phenomena	T. Zacharia
Paper	1993	Analysis of weld metal solidification and microstructures	Mathematical Modeling of Weld Phenomena	S.A. David
Paper	1993	Physical metallurgical concerns in the modeling of weld metal transformations	Mathematical Modeling of Weld Phenomena	D.L. Olson

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1993	Modeling the evolution of microstructure in steel weld	Mathematical Modeling of Weld Phenomena	H.K.D.H. Bhadeshia
Paper	1993	Modeling the weld thermal cycle and transformation behaviour in the heat affected zone	Mathematical Modeling of Weld Phenomena	K.E. Easterling
Paper	1993	Ternary diffusion in dissimilar steel welds	Mathematical Modeling of Weld Phenomena	B. Buchmayr
Paper	1993	Prediction of mechanical properties of weld metal based on some metallurgical assumptions	Mathematical Modeling of Weld Phenomena	PH. Bourges
Paper	1997	A constitutive model for welding process simulation using finite element methods	Int. Conf. Computational Engineering Science	Frederick W. Brust
Paper	1988-01	Coupled transient heat transfer microstructure weld computations	Acta Materialia	C. Henwood
Paper	1989-05	Keynote address transport phenomena in welds with emphasis on free surface phenomena	2nd Int. Conf. On Recent Trends in Welding Science and Technology	Julian Szekely
Paper	1996-09	Residual stress mitigation techniques for control-rod drive penetration (CRDP) welds of nuclear pressure vessel heads	Battelle	
Code & Standard	E1269-99	Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry	American Society for Testing and Materials	
Code & Standard	E1952-98	Standard test method for thermal conductivity and thermal diffusivity by modulated temperature differential scanning calorimetry	American Society for Testing and Materials	
Code & Standard	E228-95	Standard test method for linear thermal expansion of solid materials with a vitreous silica dilatometer	American Society for Testing and Materials	
Code & Standard	E831-93	Standard test method for linear thermal expansion of solid materials by thermomechanical analysis	American Society for Testing and Materials	
Code & Standard	ANSI/AWS A9.2-92	Standard guide for recording arc weld material property and nondestructive examination data in computerized databases	American Welding Society	
Code & Standard	ANSI/AWS B4.0-98	Standard methods for mechanical testing of welds	American Welding Society	
Code & Standard		ASME section IX welding & brazing qualifications	Korea Power Engineering Co.	

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	지자
Report	KINS/HR-180	국내 원전의 압력용기 및 배관에서 발견된 결함에 대한 조사분석	서울산업대학교 건설구조연구소	
Report	B-T-3264	Fracture toughness of alloy 600 and EN82H weld in air and water	Bechtel Bettis, Inc.	
Report	B-T-3265	Fracture toughness of alloy 690 and EN52 weld in air and water	Bechtel Bettis, Inc.	
Report		Stress relief of welds and weldments	EPRI	
Report	UCRL-ID-120392	Localized weld metal corrosion in stainless steel water tanks	Lawrence Livermore National Lab.	
Report	LA-13283-MS	Residual stress measurement by successive extension of a slot	Los Alamos National Lab.	
Report	LA-UR-98-904	Several methods applied to measuring residual stress in a known specimen	Los Alamos National Lab.	
Report	C/ORNL-92-0117	Development of a comprehensive weld process model	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-931234--12	Celluar automata modeling of weld solidification structure	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-941144-- 181	Residual stress patterns in steel welds	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-950682--14	Microstructure evaluation in low alloy steel weld metal from connective heat transfer calculation in three dimensions	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-950682--14	Role of phase transformations in residual stress development multipass ferritic steel welds and gleeble test bars	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-950682--6	Analysis of weld solidification cracking in cast nickel Al alloys	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-950682--8	Simulation of the weld heat affected zone of a 0.5Cr-Mo-V steel	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-9509118--6	An integrated model for optimizing weld quality	Oak Ridge National Lab.	

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Report	CONF-9606178--1	Fracture assessment of weld material from a full-thickness clad RPV shell segment	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-960706--7	A finite element model for residual stress in repair welds	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-9611106--1	Trends in microstructure modeling in weld metals	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-961138--1	Modeling microstructure development in weld metals	Oak Ridge National Lab.	
Report	CONF-970726--3	Residual stresses in weld overlay tubes : A finite element study	Oak Ridge National Lab.	
Report	ORNL/CP-96684	The inclusion of weld residual stress in fracture margin assessments of embrittled nuclear reactor pressure vessels	Oak Ridge National Lab.	
Report	ORNL/TM-13091	Assessment of the fracture behavior of weld material in full-thickness clad beams	Oak Ridge National Lab.	
Report		Microstructure modeling in weld metal	Oak Ridge National Lab.	
Report	SAND97-1610C	An information model based weld schedule database	Sandia National Lab.	
Report	SAND-97-8256 UC-406	Predicting weld solidification cracking using damage mechanics-LDRD summary report	Sandia National Lab.	
Report	SAND--97-8555C	Finite element modeling of weld solidification cracking in 6061-T6 Al -applicability of strain- based failure criteria	Sandia National Lab.	
Report	SAND-97-8582C	Thermal-mechanical modeling and experimental validation of weld solidification cracking in 6061-T6 Al	Sandia National Lab.	
Report	WAPD-T-3092	Accuracy evaluation of stress measurements	Westinghouse Electric Co.	
Report	WAPD-T-3181	Residual stresses in weld deposited clad pressure vessels and nozzles	Westinghouse Electric Co.	
Report	WSRC-MS-94-0604	Resistance weld qualification analysis for radioactive waste canisters (U)	Westinghouse Electric Co.	

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1997-590	The effect of TiN particles on the HAZ properties of microalloyed steels	TWI	G Ferguson
Paper	1997-592	A review of micromechanical failure models for cleavage and ductile fracture	TWI	C S Wiesner and R M Andrews
Paper	1997-594	Intermetallic formation in superduplex stainless steel simulated heat affected zones	TWI	R N Gunn
Paper	1997-599	The effects of multiple preloads on subsequent low temperature fracture of a pressure vessel steel	TWI	K Bell
Paper	1997-601	Detection of penetrator flaws in high frequency induction welded (ERW) tube	TWI	A B Day
Paper	1997-607	Wear and corrosion resistant coatings by resistance surfacing	TWI	K Wiemer
Paper	1997-618	Comparison of deterministic and probabilistic flaw assessment methods for a welded joint	TWI	H G Pisarski
Paper	1997-621	Ultrasonic inspection of external stress corrosion cracking in ferritic steel line pipe	TWI	B W Kenzie and M R Kirby
Paper	1997-622	TIG welding high nitrogen superaustenitic stainless steels with filler addition	TWI	P Woollin
Paper	1997-623	Compositional factors controlling solidification cracking in C-Mn steel laser welds	TWI	G I Rees
Paper	1997-624	Effect of HAZ intermetallic precipitates on the toughness of superduplex stainless steel	TWI	R N Gunn and C S Wiesner
Paper	1997-625	Review of factors influencing porosity in aluminium arc welds	TWI	A B D Gingell and T G Gooch
Paper	1997-627	Modelling of microstructure in C-Mn and low-alloy steel weld deposits	TWI	G I Rees
Paper	1997-628	The effect of manganese and nitrogen on microstructure and toughness of modified 9%Cr 1%Mo weld metals	TWI	A M Barnes
Paper	1998-632	Catastrophic failures of steel structures in industry: case histories	TWI	B Hayes and R Phaal

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1998-633	The physical and welding metallurgy of titanium aluminides: A review	TWI	L S Smith and P L Threadgill
Paper	1998-636	A theoretical assessment of the fatigue strength of transverse fillet welded joints in thin plate	TWI	T R Gurney
Paper	1998-637	Methods of fatigue life improvement for welded joints in medium and high strength steels	TWI	S Manteghi
Paper	1998-638	A review of structural assessment techniques for yield strength mismatch and welding residual stresses	TWI	S D Smith
Paper	1998-639	Application of the 'local approach' to cleavage fracture to HAZ failure predictions	TWI	N Cardinal, M R Goldthorpe, C S Wiesner and A L
Paper	1998-641	Predictive formulae for weld distortion - a critical review	TWI	G Verhaeghe
Paper	1998-642	Prior overload effects in structural integrity assessments	TWI	A Muhammed
Paper	1998-648	SSC of welded 0.5%Cr steel: Effect of pH and H ₂ S partial pressure	TWI	D C Buxton
Paper	1998-649	Preliminary investigation into the preparation of aluminide coatings using the high velocity oxyfuel spraying process	TWI	A J Sturgeon
Paper	1998-650	Pitting corrosion of weldments in a high chromium/nitrogen austenitic alloy	TWI	P Woollin
Paper	1998-653	Effect of intermetallic content on pitting resistance of ferritic/austenitic stainless steels	TWI	B J Ginn and T G Gooch
Paper	1998-654	Estimation of exposure to arc welding fume	TWI	G J Carter
Paper	1998-655	Weld metal hydrogen cracking during welding 450 N/mm ² yield strength steel using tubular cored electrodes	TWI	A J Kinsey
Paper	1998-656	Fatigue performance of tungsten inert gas (TIG) and plasma welds in thin steel sections	TWI	S J Maddox (TWI) and C A Moura Branco (Portugal)
Paper	1998-657	Effect of composition on creep properties of 9%Cr1%Mo weld metals for grade 91 steel	TWI	A M Barnes

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1998-658	A review of weld metal porosity and hydride cracking in titanium and its alloys	TWI	L S Smith and M F Gittos
Paper	1998-660	High productivity pipe welding of Ti-6Al-4V alloys	TWI	L S Smith and M F Gittos
Paper	1998-663	A review of micromachining technologies for microstructures	TWI	C P J Foster, J Cole and C C Otter
Paper	1998-664	Friction stir welding of a ferritic stainless steel - a feasibility study	TWI	W M Thomas, P Woolin and K I Johnson
Paper	1999-665	Effect of Weibull parameters on 'local approach' to cleavage fracture predictions	TWI	A D Karstensen, M R Goldthorpe and C S Wiesner
Paper	1999-666	Welding and cutting trials using a 3kW fast axial flow carbon monoxide laser	TWI	I A Jones and P A Hilton
Paper	1999-667	Thermal welding of polymers	TWI	R J Wise
Paper	1999-670	A review of methods and recommended procedures to evaluate the static strength of corroded nozzles in steel pressure vessels	TWI	A T Smith
Paper	1999-673	Thermal spraying of amorphous and nanocrystalline metallic coatings - a review	TWI	T J Mursell and A J Sturgeon
Paper	1999-674	Procedures for reducing solidification cracking in CO ₂ laser welds in structural steel	TWI	I A Jones
Paper	1999-677	A fracture mechanics approach to adhesively bonded joints. Phase 1: Fatigue performance and joint characterisation	TWI	E J Kellar, C Vlattas and S M Tavakoli
Paper	1999-678	Friction stir welding - the state of the art	TWI	P L Threadgill
Paper	1999-679	Using fracture mechanics to claim exemption from PWHT - four case studies	TWI	R H Leggatt, A Muhammed, A T Smith and M J Cheaitani
Paper	1999-680	Fatigue properties of clinched, self piercing riveted and spot welded joints in steel and aluminium alloy sheet	TWI	G R Razmjoo and S A Westgate
Paper	1999-681	Effects of composition and welding speed on solidification cracking in C-Mn steel laser welds	TWI	S M i Birch

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	1999-682	Ferritic-austenitic stainless steel TIG welding using high nitrogen shielding gas	TWI	B J Ginn and T G Gooch
Paper	1999-683	Structure and corrosion resistance of friction stir welds in aluminium alloys 2014A and 7075	TWI	A J Leonard
Paper	1999-684	Friction stir welding aluminium alloy 5083 - increased welding speed	TWI	C J Dawes, E J R Spurgin and D G Staines
Paper	1999-686	An assessment of weld heterogeneities in PMMA using birefringence	TWI	R J Wise and S D Smith
Paper	1999-687	Fatigue test results for laser welds in steel - A review	TWI	P J Tubby, E J Olden and G S Booth
Paper	1999-688	Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures	TWI	S J Maddox
Paper	1999-689	The prediction of maximum HAZ hardness in C-Mn and low alloy steel weldments	TWI	D J Abson and A J Kinsey
Paper	1999-690	Solidification cracking of modified 9Cr1Mo submerged arc weld metals: the influence of Mn and Nb	TWI	A Barnes
Paper	1999-691	Static and fatigue performance of mechanically fastened and hybrid joints in sheet metals	TWI	S A Westgate and G R Razmjoo
Paper	1999-692	Development of friction stir tools for the welding of thick (25mm) aluminium alloys	TWI	W M Thomas and M F Gittos
Paper	1999-693	Macro and microstructural features of friction stir welds in various materials	TWI	P L Threadgill and A J Leonard
Paper	1999-694	Tool developments for friction stir welding of 6mm thick aluminium alloys	TWI	C J Dawes, D G Staines and E J R Spurgin
Paper	2000-696	Preliminary examination of forces generated during the friction stir welding process	TWI	R Johnson and N L Horrex
Paper	2000-700	Assessment of the mechanised flux cored arc welding process for underwater wet welding	TWI	A C Woloszyn
Paper	2000-702	Rotating arc welding of thin section tubulars - machine development	TWI	S W Kallee

WINS 보유 자료 목록

종류	No.	제목	출판	저자
Paper	2000-703	Assessment of the TWI top face control system for TIG welding	TWI	G B Melton and R L Jones
Paper	2000-707	A critical review and comparison of various methods to evaluate the static strength of corroded pressurized components	TWI	A T Smith
Paper	2000-711	Probabilistic modeling of HAZ fabrication hydrogen cracking in C-Mn steels	TWI	R J Pargeter, A Muhammed and J M Nicholas
Paper	2000-712	Effect of nitrogen addition to nickel alloy TIG weld metals on corrosion resistance	TWI	P Woollin and B J Ginn
Paper	2000-713	A Coupled model for predicting cleavage and ductile fracture in steel : Improvements to the model and some applications	TWI	A D Karstensen and M R Goldthorpe
Paper	2000-714	The significance of root flaws in friction stir welds in aluminium alloys	TWI	T L Dickerson and J Przydatek
Paper	2000-715	The prediction of maximum HAZ hardness in multiple pass C-Mn and low alloy steel weldments	TWI	D J Abson and J M Nicholas
Paper	2000-716	Forces in friction stir welding of aluminium alloys further studies	TWI	R Johnson

제 7 장 참고문헌

- [1] 이병훈, 황선효, “강구조물 관련 용접규격과 안전성 확보”, Journal of KWS, Vol.13, No.1, March, 1995.
- [2] ASME B&PV Committee, ASME B&PV Code, Sec.II, 1998.
- [3] ASME B&PV Committee, ASME B&PV Code, Sec.III, 1998.
- [4] ASME B&PV Committee, ASME B&PV Code, Sec.XI, 1998.
- [5] AWS, AWS Code, 1999.
- [6] KS 총람, 한국공업표준협회, 1990.
- [7] 국제품질보증시스템 인증제도-ISO 9000 시리즈 안내, 공업진흥청/한국표준협회, 1992.
- [8] MSC, PATRAN User’s Manual, Ver.2000, 2000.
- [9] HKS, ABAQUS User’s Manuals, Ver. 5.8, 1998.
- [10] D. Rosenthal, Welding Journal, Vol.20, pp.220s, 1941.
- [11] D. Rosenthal, Transaction of ASME, Vol.68, pp.849, 1946.
- [12] P. Dong, et al., “Residual stress analysis of a multi-pass girth weld,” ASME PVP, Vol.373, Fatigue, Fracture and Residual Stresses, pp.421-431, 1998.
- [13] ThermoCalc AB, ThermoCalc User’s Manuals, Ver.N, 2000.
- [14] M. Victor Li, et al., A computational model for the prediction for steel hardenability, Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 29B, June, pp 661-672, 1998.
- [15] E. Scheil, “Anlaufzeit der austenitumwandlung,” Arch. Eisenhüttenwes, Vol.8, pp.565, 1935.
- [16] M. Avrami, “Kinetics of phase change I,” J. Chem. Phys., Vol.7, pp.1103, 1939.
- [17] ThermoCalc AB, DICTRA User’s Manuals, 2000.
- [18] D.O. Harris and D.Dedhia, WinPRASIE 98 – Praise Code in Windows, Technical Report TR-98-4-1(Ver. 4.3.1), 1998.
- [19] SPSS Inc., Homepage : www.spss.com.
- [20] O. Grong, Metallurgical Modelling of Welding, 2nd Ed., The Institute of Materials, London, United Kingdom, 1997.
- [21] N. Christensen, et al., Br. Welding Journal, Vol.12, pp.54, 1965.
- [22] R.S. Chandel, et al., “Computer prediction of weld bead shapes,” 2nd Int. Conf. Comp. Tech. in Welding, Abington, June, 1988.
- [23] T. Shinoda and I. Masumoto, “Prediction of weld geometries for CO₂ butt-welded joints,” Mat. Sci. & Tech., Vol.5, pp.293-298, 1989.
- [24] E. Pardo and D.C. Weckman, “Prediction of weld pool and reinforcement dimensions of GMA welds using a finite element model,” Met. Trans. B, Vol.20B, pp.937-946, 1989.
- [25] P. Tekriwal, et al., “Finite element modelling of heat transfer for gas tungsten arc welding,” Metal Construction, pp.599R-606R, Oct., 1987

- [26] S. Kou and Y.H. Wang, "Computer simulation of convection in moving arc weld pools," *Met. Trans. A*, Vol.17A, pp.2271-2277, 1986.
- [27] A. Matsunawa, et al., "Convection in weld pool and its effect on penetration shape in stationary arc welds," *Trans. of JWRI*, Vol.16, No.2, pp.1-8, 1987.
- [28] M. Gu, et al., "Steady state thermal analysis of welds with filler metal addition," 1991.
- [29] J.A. Goldak, et al., "A New Finite Element Model for Welding Heat Sources," *Trans. AIME*, Vol.15B, pp.299-305, June, 1984.
- [30] J.A. Barlow, "One weld or two The formation of a submerged arc weld pool," *The Welding Institute Research Bulletin*, pp.177-180, June, 1982.
- [31] J. Goldak, A. Oddy, M. Gu, "Coupling heat transfer, microstructure evolution and thermal stress analysis in weld mechanics," *The Proceeding of IUTAM(Int. Union of Theoretical and Applied Mechanics) Symposium*, Lulea, Sweden. June 10-14, 1991.
- [32] J.S. Kirdaldy and E.A. Baganis, *Metall. Trans. A*, Vol. 9A, pp 595-501, 1978
- [33] B. Buchmeyer and H. Cerjak, "Mathematical description of HAZ behavior of low-alloyed structural steels," *Proc. International Conf. Improved Weldment Control with Special Reference to Computer Technology*, Vienna, Austria, pp.43-50, July 4-5, 1988.
- [34] A.S. Oddy and R.S. Chandel, "Hardness prediction for the repair welding of 2.25Cr-1.0Mo pressure vessels, AWS Annual Meeting, Detroit, 1991.
- [35] H.K.D.H. Bhadeshia and L.E. Svensson, "Quantitative model for boron effects in steel welds, modelling and control of joining processes," *Proc. Of American Welding Society*, Orlando. USA. 1993
- [36] H.K.D.H. Bhadeshia, L.E. Svensson and B. Grefot, "The austenite grain structure of low alloy steel weld deposits," *Journal of Materials Science*, Vol.21, No.11, 1986.
- [37] H.K.D.H. Bhadeshia, L.E. Svensson and B. Grefot, *Theory for allotriomorphic ferrite formation in steel weld deposits*, Welding and the Performance of Pipelines, Welding Institute London, UK 1987
- [38] S.S. Babu. and H.K.D.H. Bhadeshia, "The transition from bainite to acicular ferrite in reheated Fe—Cr—C weld deposits," *Materials Science and Technology*, Vol.6, No.10, pp.1005-1020, 1990.
- [39] S.A. David, S.S. Babu and J.M. Vitek, "Weldability and microstructure development in nickel-base superalloys," *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, Vol.4, Edited by H. Cerjak, IOM Communications, 1998.
- [40] S.A. David and S.S Babu, *Microsturcture Modeling in Weld Metal*, DOE Report, ORNL, 1998
- [41] J.B. Leblond and J. Devaux, "A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size," *Acta Metall.*, Vol.32, No.1, pp.137-146, 1984.
- [42] P.J. Bouchard and R.A.W. Bradford, "Validated axial residual stress profiles for fracture assessments of austenitic stainless steel pipe girth welds," *Proceedings of ASME PVP*, Vol.423, pp.93-99, 2001.
- [43] P. Dong and F.W. Brust, "Welding residual stresses and effects on fracture in pressure vessel and piping components: a millenium review and beyond," *Trans. of the ASME, J. of Pressure Vessel Technology*, Vol.122, No.3, pp.329-338, 2000.

- [44] Sysweld Software, Homepage : www.systus.com
- [45] P. Dong, Attachment Powerpoint File for WeldTran on E-mail, 2000
- [46] TWI Homepage www.twi.co.uk
- [47] NRIM, Homepage : www.nr im.go.jp
- [48] M. Mochizuki, et al., "Welding residual stresses at the intersection of a small diameter pipe penetrating a thick plate," Nuclear Engineering and Design, Vol.144, No.3, pp.439-447, 1993.
- [49] S.H. Kim, et al., "Correlation of the microstructure and fracture toughness of the heat-affected zones of an SA508 steel," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.31A, pp.1107-1119, April, 2000.
- [50] 김주학, 이봉상, 홍준화, "원자로 압력용기강 용접열영향부에 대한 물성연구", 6th KINS Workshop, 1999.
- [51] B.J. Lee, H.D. Kim and J.H. Hong, "Calculation of / equilibria in SA508 Grade 3 steels for intercritical heat treatment," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.29A, pp.1441-1447, 1998.
- [52] 박준민, 안상곤, 윤의박, "Fe-Cr-Ni 강용접 금속부의 미세편석에 관한 해석," Journal of KWS, Vol.16, No.5, Oct., 1998.
- [53] J.W. Kim and S. Im, "Numerical analysis of phase transformation in steel," The First Int. Conf. On Advances in Structural Engineering and Mechanics, Seoul, Aug.23-25, 1999: ASEM, Vol. 1, pp.227-232.
- [54] R. Pelli, Irradiation Embrittlement Mitigation, AMES Report No. 1, 1994.
- [55] KAERI, 고리 1호기 원자로 압력용기 저인성 파괴해석 연구, 1994.
- [56] KEPRI, 고리 1호기 원자로 압력용기 가압열충격 해석연구, 1998.
- [57] Sindo Kou, Welding Metallurgy, John Wiley & Sons, Inc., 1987.
- [58] 한국중공업 용접절차검정서, QA-A-0303-019, 한국중공업, 1992.
- [59] A.A. Howe, "Estimation of liquidus temperatures for steels," Ironmaking and Steelmaking, Vol.15, No.3, pp.134-142, 1988.
- [60] O. Kubachewski, Iron Binary Phase Diagrams, Berlin Springer Verlag, 1982.
- [61] A. Jablonka, et al., "Thermomechanical properties of iron and iron-carbon alloys: density and thermal contraction," Steel Research, Vol.62, No.1, pp.24-33, 1991.
- [62] B.G. Thomas, et al., "Mathematical model of the thermal processing of steel ingots: part 1. heat flow model," Metallurgical Transaction B, Vol.18B, pp.119-130, 1987.
- [63] H. Mizukami, et al., Tetsu-to-Hagane, Vol.63, No.146, S-652, 1977.
- [64] A. Grill, et al., "Mathematical analysis of stresses in continuous casting of steel," Ironmaking and Steelmaking, No.1, 38-47, 1976.
- [65] 김주학, 윤의박, "SA 508 Cl. 3 원자로압력용기 단위열영향부의 노치인성과 미세조직 변화," 대한금속학회지, Vol. 36, No.8, pp.1329-1337, 1998.
- [66] 김주학, 홍준화, "Microstructures and Mechanical/Fracture Properties in the Weld HAZ of SA 508-3 RPV Steel," 제 2회 용접부 건전성평가 연구회, 한전기술(주), 2001.
- [67] Lars-Erik Svensson, "Control of Microstructures and Properties in Steel Arc Welds, CRC Press, 1993.

- [68] M. Hillert and L.I. Staffasson, *Acta Chem. Scand.*, Vol 24, pp. 3618-26, 1970.
- [69] G. Inden, *Bullentin of Alloy Phase Diagrams*, Vol.2, pp.412, 1981,
- [70] M. Hillert and M. Jarl, *Calphad*, Vol.2, pp.412, 1981.
- [71] M. Atkins, *Atlas of Continuous Cooling Transformation Diagrams for Engineering Steels*, ASM, 1980.
- [72] 부산대학교, SA508 Cl. 3의 재료특성 결정, 한국중공업 용역 보고서.
- [73] C. Zener, *Trans. AIME*, Vol.167, pp.550-583, 1946.
- [74] M. Hillert, *Jernkont. Ann.*, Vol.141, pp.557-585, 1957.
- [75] C.Y. Kung and J.J. Raymond, *Metall. Trans. A*, Vol.13A, pp.328-331, 1982.
- [76] J.C. Ion, et al., *Acta Metall.*, Vol.32, No.11, pp.1949-1962, 1984.
- [77] 강석영, 김상호, 김주학, 홍준화, SA508 강 용접 열영향부의 미세조직과 충격인성의 상관관계, *대한금속학회지*, Vol.37, No.4, 1999.
- [78] Akselsen, et al., "Tensile properties of heat affected zone of medium strength low carbon, C-Mn and 2.25 Cr-1Mo steels," *Material Science and Technology*, Vol.383, 1990.
- [79] P.J. Alberry, "Computer model for multipass repair welds in SA508 Class2 alloy," *Welding Research Supplement*, October, pp.410-s-417-s. 1989.
- [80] M. Okumura, et al., "Prediction of HAZ hardness after PWHT," *Proceedings of Stress Relieving Heat Treatments of Welded Steel Constructions Conference*, Sofia, Bulgaria, 6-7, July, 1987, pp.61-68.
- [81] 10CFR50, Appendix A, General Design Criteria for Nuclear Power Plants, 1996.
- [82] 10CFR50, Appendix G, Fracture Toughness Requirements, 1996.
- [83] ASME B&PV Code, Sec.III, Appendix G, Fracture Toughness Criteria for Protection Against Fracture, 1996.
- [84] Reg. Guide 1.99, Rev.2, Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials, 1988.
- [85] 10CFR50.61, Fracture Toughness requirements for Protection against Pressurized Thermal Shock Events, 1996.
- [86] K.R. Balkey, B.A. Bishop, Application of Risk-Based Methods to Piping Inservice Inspection Topical Report, WCAP-14572, 1996.
- [87] O. J. V. Champman, "Simulation of Defects in Weld Construction, "Reliability and Risk in Pressure Vessel and Piping, ASME PVP-Vol.251, 1993.
- [88] A.A. Wells, "Heat flow in welding," *Welding Journal*, Vol.31, pp.263s-267s, 1952.
- [89] J.M. Barry, et al., "Heat conduction from moving arcs in welding," *Welding Journal*, Vol.42, pp.97s-104s, 1963.
- [90] T.W. Eager and N.S. Tsai, "Temperature fields produced by traveling distributed heat sources," *Welding Journal*, Vol.62, pp.346s-355s, 1983.
- [91] F.W. Brust, et al., "A constitutive model for welding process simulation using finite element methods," *Advances in Computational Engineering Science*, S.N. Atluri and G. Yagawa, Eds., pp.51-56, 1997.
- [92] P. Dong, et al., "Computational modeling of weld residual stresses and distortions – an integrated framework ad industrial applications," *Proceedings of ASME PVP*, Vol.373, pp.311-335, 1998.

- [93] P. Dong and J.K. Hong, Critical Assessment, Validation, and Recommendations on Residual Stress Estimates for Fitness for Service Assessment, PVRC/MPC JIP Report, Draft 2, 2001.
- [94] P. Dong, et al., Battelle Report No.N001334, Battelle Memorial Institute.
- [95] R.D. Stout, Postweld Heat Treatment of Pressure Vessels, WRC 302, 1985.
- [96] M. Prager, et al., "Omega method - an engineering approach to life assessment," Trans. of ASME, J. of Pressure Vessel technology, Vol.122, 2000.
- [97] D.A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, Second Edition, pp.279-281, 1995.
- [98] A.R. Troiano, The Role of Hydrogen and Other Interstitials in the Mechanical Behavior of Metals, Trans. ASM, Vol.52, pp.54-80, 1960.
- [99] HKS, ABAQUS Theory Manuals, Ver. 5.8, 1998.
- [100] N. Yurioka, IIW Doc.IX-1938-99.
- [101] S.D. Smith and F.J. Blunt, An Application of a Simple Numerical Model for Hydrogen Diffusion in Multipass Submerged Arc Weld in C-Mn Steels, TWI Research Report, 1993.

부록 1. 용접 현상 및 기초 이론

본 부록에서는 당해단계 세부 연구과제에 대한 수행 내용 및 결과를 제시 하기 이전에 이들 두 과제를 수행하기 위해 필수적으로 사전에 파악하고 있어야만 하는 용접 현상 및 기초 이론을 제시하고자 한다.

1. 용접 현상 검토

본 연구과제의 연구 대상인 원전설비 용접부의 안전성과 중요성 때문에 원전설비에 폭넓게 적용되는 용접(Fusion Welding)을 용접방법으로 국한하여 본 과제를 수행하고자 한다. 따라서 본 항에서는 용접에 대한 전반적인 개요 및 용접별 특성에 대해 제시하고자 한다.

가. 용접 개요

용접은 용융에 의해 금속의 결합이 수행되어지는 접합 과정으로 고온의 고상 상태에서 압력에 의해 금속의 결합이 수반되는 압접과 용착 금속(Filler Metal)만 용융되는 Soldering 또는 Brazing과는 달리 모재(Base Metal)와 용착 금속 모두 용융된다.

본 항에서 고려할 주요한 용접 과정은 열원에 따라 다음 아래와 같이 분류할 수 있다.

- 가스 용접 : 산소연료 가스 용접(OFW : Oxyfuel Gas Welding)
- 아크 용접 : 쉴디드 금속 아크 용접(SMAW : Shielded Metal Arc Welding)
 - 가스 텅스텐 아크 용접(GTAW : Gas Tungsten Arc Welding)
 - 플라즈마 아크 용접(PAW : Plasma Arc Welding)
 - 가스 금속 아크 용접(GMAW : Gas Metal Arc Welding)
 - 서브머지드 아크 용접(SAW : Submerged Arc Welding)
 - 일렉트로슬래그 용접(ESW : Electroslag Welding)
 - 플럭스 코어 아크 용접(FCAW : Flux Cored Arc Welding)
- 고 에너지 빔 용접 : 일렉트론 빔 용접(EBW : Electron Beam Welding)
 - 레이저 빔 용접(LBW : Laser Beam Welding)

용접 대상 재료 및 두께에 따른 적용 가능한 다양한 용접법들에 대해 표 A-1에서 제시하고 있다. 또한, 각 용접법의 특성, 장단점 및 적용성에 대해 표 A-2에서 요약 정리하여 제시하고 있다. 또한 그림 A-1~8은 각 용접법에 대한 개략적인 그림들이다.

2. 용접관련 기초이론 검토

용접부의 금속 조직/성분 변화를 예측하기 위해 필수적으로 숙지하여야 할 금속 열역학 및 확산 이론, 결정립 성장이론, 응고이론 및 확산변태 등 기초이론을 검토하고자 한다.

가. 열역학 및 상태도

금속 미세조직에 열역학을 적용함으로써 합금이 평형상태에 있는지 예측할 수 있다. 본항에서는 상태도에 대한 열역학 적용이론을 제시하고자 한다.

○ 평형상태

- Gibbs 자유에너지

· 일정 온도 및 압력에서 발생하는 상변태에 대한 계(System)의 상대적인 안정성을 결정하는데 이용되는 자유 에너지는 아래 식으로 나타내어진다.

$$G = H - TS = U + PV - TS = KE + PE + PV - TS \tag{1}$$

여기서 G는 Gibbs 자유에너지, H는 엔탈피(Enthalpy), U는 내부에너지, KE는 운동에너지, PE는 위치에너지, P는 압력, V는 체적, T는 온도이며 S는 엔트로피(Entropy)로 고체와 액체 같은 밀집된 상 들을 다룰 때, PV 항은 보통 U와 비교시 매우 작아서 $H \approx U$ 로 가정할 수 있다.

- 평형상태

· 일정 온도와 압력하에서 폐쇄계(Closed System)가 가장 낮은 Gibbs 자유 에너지를 가진다면 안정화된 평형 상태이다. 즉 다음 아래 식을 만족할 때 안정화된 평형 상태이다.

$$dG = 0 \tag{2}$$

- 준평형(Metastable) 상태

· 식(2)를 만족하나 G의 값이 가장 낮은 값이 아닌 국부적 최소값인 경우의 평형상태로 안정화된 평형상태와 구별되어진다. 즉, 그림 A-9에서 상태 A의 경우가 안정화된 평형 상태이며 상태 B의 경우가 준평형 상태이다.

- 상변태

· Gibbs 자유에너지가 감소되는 어떠한 상변태도 가능하다.

$$G = G_2 - G_1 < 0 \tag{3}$$

여기서 G_1 와 G_2 는 각각 초기와 최종 상태들에서의 자유에너지이다. 그림 A-9는 자유 에너지의 도식적인 변화를 나타내고 있다.

○ 상태도

- 상태도에는 특정 합금계의 미세조직과 상의 구조를 조절하는 것에 대한 정보가 함축되어 있다.

- 미세조직은 상변태를 통해 나타나며 상(Phase)은 물리적, 화학적 특성이 균일한 계의

균질한 부분이다.

- 이원 상태도

· A와 B가 액체 및 고체 상태 모두에서 완전하게 혼합하는 간단한 경우를 고려하면 액체 및 고체에서의 자유에너지 선도는 이원 상태도를 도출할 수 있다.

- Gibbs Phase Rule

· C개의 성분과 P개의 상을 포함하는 계가 평형상태 하에 있다면 자유도 F는 다음과 같다.

$$P + F = C + 2 \quad (4)$$

- Gibbs 자유에너지와의 관계

· 어떠한 상의 Gibbs 자유에너지도 Gibbs 삼각형안의 점들로부터 수직 거리에 의해 나타낼 수 있다.

나. 확산

확산은 상 변태 속도를 제어하는 가장 기본적인 과정들의 하나로서 항상 Gibbs 자유에너지를 감소하는 방향으로 발생한다. 확산은 그림 A-10과 같이 농도가 서로 균일해지는 방향으로 확산이 일어나는 일반적인 Down-Hill 확산과 농도가 각각 증가하여 점점 서로 차이가 나는 방향으로 확산이 발생하는 Up-Hill 확산으로 분류할 수 있다. 두 가지 경우 모두 Chemical Potential이 높은 영역에서 낮은 영역으로 확산이 발생함을 알 수 있다.

○ 침입형(Interstitial) 확산

- Fick 의 제 1법칙

· 평균적으로 침입형 원자는 1초에 GB번 Jump 하고 Plane 1과 2 사이의 거리가 a인 Dilute Interstitial 고체 Solution의 단순화 모델(그림 A-11 참조)을 이용하면 다음과 같은 Fick의 제1법칙이 유도되어진다.

$$J_B = - D_B \partial C_B / \partial x \quad (\text{atoms/m}^2 \text{ sec}) \quad (5)$$

$$D_B = 1/6 \Gamma_B a^2 \quad (6)$$

여기서 D_B 는 B의 확산도(Diffusivity) 또는 확산계수라고 불리며 m^2/sec 의 단위를 가진다.

· 식(6)은 단순한 Cubic Lattice 내의 침입형 확산에 대해 유도되었지만, Jump 거리 a에 대한 올바른 대입이 행해진다면 임의의 Cubic Lattice내에서 Random하게 확산하는 임의의 원자에도 동일하게 적용되어질 수 있다. 또한, Non-Cubic Lattice 경우 다른 정방향으로의 Jump 확률은 다르며 D는 방향에 따라 변화되어진다.

· 원자 Jump가 완전히 Random하게 발생하고 Concentration에 독립적이라는 조건은 보통 실제 합금에서는 이루어질 수 없음에도 불구하고 실험으로부터 Fick의 법칙이 여전히 적용 가능함을 보인다.

- Non-steady State 확산 및 Fick의 제 2 법칙

- 대부분 경우 실제적인 Steady State 조건은 이루어지지 않는다.
- 즉, Concentration은 시간과 공간에 따라 변화하기 때문에 Fick 제 1 법칙은 더 이상 이용되어질 수 없다.
- 농도분포가 x방향으로만 존재하고 확산 유속이 D_B 와 $\partial C_B / \partial x$ 에 종속적인 예로부터 (그림A-12 참조) 다음과 같은 Fick의 제 2 법칙이 유도되어짐.

$$\partial C_B / \partial t = \partial (D_B \partial C_B / \partial x) / \partial x \quad (7)$$

- Concentration에 따른 D_B 의 변이가 무시되어질 수 있다면

$$\partial C_B / \partial t = D_B \partial^2 C_B / \partial x^2 \quad (8)$$

- 식(8)은 시간에 따른 조성 변화율과 Concentration Profile $C_B(x)$ 사이의 관계식임.

다. 결정립 성장

성분의 확산에 영향을 주어 결과적으로 상 변태에 영향을 미치는 결정립 크기의 성장기구와 성장 모델에 대해 살펴보면 다음과 같다.

○ 성장기구

- 용접부에서의 결정립 성장은 용접 열 사이클에 따라서 영향을 받게 되는데, 온도가 상승하여 A_1 온도 이상으로 상승하게 되면 오스테나이트로 상변태 시작
- A_3 온도에 이르러 완전히 오스테나이트로의 변태가 종료되어 초기 모재의 결정립 보다 작은 오스테나이트 결정립들이 분포하게 됨.
- 온도가 계속 상승하면, 고온 영역을 거치면서 오스테나이트 결정립이 매우 조대화 된다.
- 그러나 결정립의 조대화 정도는 최고온도, 고온 영역에서의 유지시간 등에 매우 큰 영향을 받게 되어 다양한 결정립 크기를 나타낼 수 있으며, 이러한 이유로 용접 열영향부에서 여러 미세조직을 나타내는 영역 발생

○ 결정립 성장 모델

- 상변태가 종료되어 고온으로 온도가 상승하면, 상변태로 인해 미세화 되어진 오스테나이트 결정립들은 성장하게 된다. 식(9)는 많은 학자들에 의해 제시된 등은 결정립 성장에 대한 일반적인 식으로서 결정립 성장 거동 예측을 예측한다.

$$G = kt^n \quad (9)$$

- 용접부에서의 결정립 성장은 온도가 연속적으로 변하면서 발생하기 때문에 등은 결정립 성장 방정식인 식(9)를 그대로 적용하는 것은 불가

- 따라서 식(9)에서 양쪽 항을 1차 미분하게 되면 식(10)과 같이 표현되며, 식(10)의 관계를 통하여, 다시 식(11) 유도

$$\frac{dG}{dt} = nkt^{n-1}, t = \left(\frac{G}{k}\right)^{1/n} \quad (10)$$

$$\Delta G = nk^{1/n} \left(\frac{1}{G}\right)^{\frac{1}{n}-1} \Delta t \quad (11)$$

- 식(11)은 등온시에 일정 시간 동안의 결정립 크기 변화를 나타내는 식으로서 각 온도에서의 상수 n, k 값을 알고, 각 온도에서 rt 동안의 미소시간동안 순간적인 등온 성장을 한다고 고려하면 전체적인 열 사이클 동안 반복적인 계산을 통하여 결정립 성장을 고려 할 수 있게 됨.
- 상수 n, k값은 온도가 변함에 따라 값이 변하기 때문에 실제 계산과정에서 사용하기 위하여 각 온도에서의 상수 n, k 값은 기존의 제시된 다음과 같은 방법으로 그 값을 구할수 있음.
- 식(9)에서 양쪽 항에 자연로그를 취하면 식(12)로 표현됨.

$$\ln G = n \ln t + \ln k \quad (12)$$

- 식(12)에서 보면, $\ln t$ 와 $\ln G$ 의 관계로부터 기울기는 n, 절편은 $\ln k$ 임.
- 즉, 어느 특정 온도에서의 등온 결정립 실험 결과의 직선적인 관계를 회귀분석을 통해 구하게 되면, 상수 n, k 값을 결정할 수 있게 되며 수치해석적인 방법을 이용하여 각 온도의 중간 값에서도 상수 n, k 값을 결정할 수 있다.

라. 응고이론

응고는 금속 또는 합금의 결정 상태와 비결정 상태 사이의 변태로서 용접부 FZ 상태 평가를 위한 온도해석 및 금속 조직/성분 예측 시 응고 현상에 대한 이해는 필수적이다.

○ 순수 금속에서의 생성

- 액체가 평형 용융온도 T_m 밑으로 냉각되어진다면, 응고를 발생시키는 구동력은 $G_L - G_S$ 이며 액상은 순간적으로 응고될 것으로 예측되어진다. 그러나 항상 순간적으로 응고되지는 않으며 평형 용융온도 밑에서도 액체로 존재하는 과냉되는 경우가 발생한다. 이러한 이유는 변태가 매우 작은 고체 입자들 또는 Nuclei에서 생성되어지기 때문이다.
- 균질한 생성
 - 그림 A-13에서 보이는 바와 같이 균질한 액체에 반경 r 의 구형 고체 입자가 더해지는 경우를 고려하면 Gibbs 자유에너지의 변화는 다음과 같이 도출되어진다.

$$\Delta G_r = -4/3 \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \quad (13)$$

$$\Delta G_v = G_v^L - G_v^S \quad (14)$$

여기서 γ_{SL} 은 고체와 액체 사이의 계면의 자유에너지이다.

· 식(14)로부터 반경 r 의 증가에 따른 Gibbs 자유에너지 변화를 그림 A-14와 같이 도시해 보면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

$$r^* = (2\gamma_{SL}T_m / L_v) 1/\Delta T \quad (15)$$

$$\Delta G^* = (16\pi\gamma_{SL}^3T_m / 3L_v^2) 1/(\Delta T)^2 \quad (16)$$

· 식(15)와 (16)으로부터 과냉도 ΔT 가 증가 시 임계 핵 크기와 최대 잉여 자유에너지 증분이 감소함을 알 수 있다.

균질 핵 생성 속도

· 액체가 단위 체적 당 C_0 개의 원자들을 포함한다면, 임계 크기에 도달하는 Cluster의 수 C^* 는 다음과 같음.

$$C^* = C_0 \exp(-\Delta G_{hom}^* / kT) \quad \text{clusters/m}^3 \quad (17)$$

· 이러한 Cluster 각각에 하나 이상의 원자의 첨가는 Cluster들을 안정화된 Nuclei로 변환시키며 이러한 변환이 주파수 f_0 에 따라 발생한다고 가정하고 식(16)을 대입하면 균질 생성속도는 다음과 같음.

$$N_{hom} = f_0 C_0 \exp\{-A/(\Delta T)^2\} \quad (18)$$

$$A = 16\pi\gamma_{SL}^3T_m^2 / 3L_v kT \quad (19)$$

· 식(19)로부터 균질 생성속도는 영의 값에서 매우 폭이 좁은 온도 범위에 걸쳐서 매우 큰 값으로 변화됨을 알 수 있음.

비균질한 생성

· Nucleus가 주형(Mold) 벽과 접촉하여 형성한다면 작은 과냉도에서 보다 쉽게 생성이 발생할 수 있다.

· 그림 A-15와 같이 평평한 벽 상의 구형 캡의 비균질 생성을 고려하면 Gibbs 자유에너지 변화는 다음과 같이 도출되어짐.

$$\Delta G_{het} = \{-4/3 \pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma_{SL}\} S(\theta) \quad (20)$$

$$S(\theta) = (2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2 / 4 \quad (21)$$

여기서 γ_{SL} 은 고체와 액체 사이의 계면의 자유에너지 임.

- 식(20)으로부터 반경 r 의 증가에 따른 Gibbs 자유에너지 변화를 그림 A-16과 같이 도시해보면 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

$$r^* = 2\gamma_{SL} / \Delta G_v \quad (22)$$

$$\Delta G^* = 16\pi\gamma_{SL}^3 / 3(\Delta G_v)^2 S(\theta) = S(\theta)\Delta G^*_{hom} \quad (23)$$

θ 값이 크지 않으므로 식(23)으로부터 비균질 생성의 경우가 균질 생성의 경우보다 훨씬 적은 에너지 장애물을 가진다는 것을 알 수 있다.

- 비균질한 핵 생성 속도
- 비균질 생성속도는 다음과 같은 형태로 주어짐.

$$N_{het} = f_1 C_1 \exp(-\Delta G^*_{het} / kT) \quad (24)$$

여기서 f_1 은 f_0 와 비슷한 주파수 Factor 이며 C_1 은 액체의 단위 체적당 비균질 생성 Site 들과 접촉하는 원자들의 수임.

○ 용접부 응고

- 용접부 응고 특징
 - 용접 용융금속과 모재 사이의 접촉은 모재의 용융과 용착금속의 Dilution을 초기에 야기시킬 수 있음.
 - 용융금속의 온도는 매우 높고 모재는 효과적인 열 Sink이기 때문에 초기에 액체 내에 가파른 온도구배가 발생하며 결과적으로 Constitutional 과냉도가 낮아짐.
- 용접속도의 영향
 - 용접 속도 증가 시 그림 A-17에서 보는 바와 같이 용접 Pool 형상이 타원 형상에서 보다 폭이 좋은 배 모양의 형상이 됨.
 - 그림 A-17에서 제시된 바와 같이 배 형상의 용접 Pool은 용접부 중심선까지 꽤 일정한 온도 구배를 유지하기 때문에 느린 용접 속도 경우와는 달리 성장 방향을 변화시키지 않으며 적절한 방향의 결정구조가 안정화되어짐.
- 결정 성장의 기하학적 특징
 - 응고는 초기에 모재의 용융 결정립에서 Equi-axial하게 발생함.
 - 결정 성장이 상대적으로 느리다면, 처음에는 Planar 구조를 그 다음에는 세밀한 Cellular 구조를 형성함.
 - 중간 단계의 결정 성장은 Cubic 결정 경우 Coarse한 Columnar 결정이 <100> 방향으로 성장하는 현상을 일으키는 Cellular-Dendrite 임. 용접 중심선에서의 최종 응고는 빠른 결정 성장 및 Segregation과 관련이 있으며 용접 조건에 따라 최종 Dendrite 구조는 Equi-axed 되어질 수 있음.

마. 고체에서의 확산 변태

고체에서 일어나는 대부분의 상변태는 열적으로 활성화된 원자 이동에 의해 발생한다. 이러한 상변태는 개략적으로 석출 변태, 공석변태, Massive 변태, Ordering 변태 및 Polymorphic 변태로 분류할 수 있다.

○ 등온 변태도 - TTT 선도

- TTT 선도 특성

- 등온변태는 시간과 온도의 함수로서 그림 A-18(a)와 같이 변태분율(f)을 나타냄으로써 표현할 수 있음.
- $f(t, T)$ 를 결정하는 변수들은 생성속도, 성장속도, 생성 Site의 밀도 및 분포, 인접 변태 체적으로부터 확산의 증첩과 인접 변태된 체적임.
- 그림 A-18(a)의 C-형상의 TTT 선도로부터 과냉도 증가에 따른 생성속도 및 성장속도의 변화를 설명할 수 있음.

○ 오스테나이트로부터 페라이트의 석출

- 과냉도 정도에 따른 페라이트 석출 양상

- 작은 과냉도의 경우, 오스테나이트 결정립계에서 페라이트가 생성되며 결정립계를 형성하기 위해 Blocky 방법으로 성장함.
 - 보다 큰 과냉도의 경우, 결정립계로부터 페라이트가 Widmanstätten Side Plate 형태로 성장하려는 경향이 증가하며 과냉도가 증가 시 보다 세밀하게 됨.
 - 보다 빠른 냉각의 결과인 미세조직은 결정립 크기와 냉각속도에 의존함.
 - 냉각속도가 적당히 빠르다면, 보다 높은 과포화 정도가 도달되기 전까지는 핵이 형성되지 않으며 높은 과포화 도달 후 생성속도는 빨라지고 결정립계의 넓은 범위에 걸쳐 Nuclei가 채워짐.
 - 온도가 TW (Grain 경계 Allotriomorphs와 Widmanstätten Side-Plate 발생을 구분하는 온도)보다 낮아진다면 페라이트는 온도가 감소할수록 보다 세밀한 Widmanstätten Side-Plate 형태로 오스테나이트 안에서 성장함.
 - 많은 Grain Corner와 Edge가 존재하는 미세한 결정립 크기의 시편인 경우, 많은 핵이 TW 온도 위에서 형성되어질 수 있으며 결정립계로 성장함.
 - 조대한 결정의 시편인 경우, 상대적으로 적은 핵이 높은 온도에서 형성되어질 것이며 TW 온도 아래까지 이러한 입자들로부터 멀리 위치한 오스테나이트는 과포화된 상태로 있을 것이며 이때 페라이트는 결정립계에서 생성되어질 수 있으며 Widmanstätten Side-Plate로 성장될 수 있음.
- 0.8% C 이상을 함유하는 오스테나이트는 유사한 양상으로 시멘타이트로 석출되어짐.

○ Cellular 석출

- Cellular 석출의 기본적인 특징은 석출물 선단부가 성장함에 따라 경계도 이동한다는 것임.
- Cellular 석출의 성장은 전진하는 결정립계와 접촉하는 석출물 선단부에서 용질의 분기 (Partitioning)를 필요로 하는데 이러한 분기는 다음 아래의 두 가지 방법에 의해 발생될 수 있음.

· 전진하는 셀면 바로 앞의 격자를 통한 확산

· 움직이는 결정립내에서의 확산

- 셀면이 지나갈 때 기지의 조성이 불연속적으로 변화하기 때문에 Cellular 석출은 불연속 석출로 알려져 있음.

· 필요성

- ▶ TTT 선도는 주어진 온도에서 퀴칭하고 시간의 함수로서 다양한 성분들의 체적 분율을 측정하는 것에 의해 얻어짐.
- ▶ 그러나 실제적인 열처리는 연속적인 냉각동안 발생하는 변태와 관련되어 있음.
- ▶ TTT 선도는 다양한 변태의 시간과 온도에 걸쳐서 사용되어질 수 없음.
- ▶ 따라서 CCT 선도 사용이 필요함.

· 특징(그림 A-19 참조)

- ▶ CCT 선도는 TTT 선도를 보다 낮은 온도와 보다 긴 시간까지 확장 시킨 것임.
- ▶ TTT 선도에서 설명될 수 없는 다음 사항을 설명할 수 있음.
 - : 느린 냉각속도에서의 M_s 온도(마르텐사이트 변태 온도)의 저하
 - : M_s 부터 200°C 까지의 냉각 시 발생하는 마르텐사이트의 Tempering
 - : 보다 다양한 미세조직

· CCT 선도 작성법

- ▶ 가장 빠른 퀴칭 속도를 제외한 모든 냉각 속도에 대해 프로그램된 선형 냉각 속도를 이용하여 고속 Dilatometer로 측정하여 작성되어짐.

○ Massive 변태

- 최초의 상이 동일한 조성을 가지나 다른 결정 구조를 가지는 하나 또는 그 이상의 새로운 상으로 변화되는 현상임($\beta \rightarrow \alpha$).
- 일반적으로 β 상에 대한 α 상의 방향이 Random하므로 성장은 α/β 계면을 가로지르는 열적 Activated Jumping 과정이 수반됨.
- 따라서 Massive 변태는 무확산 변태 (Diffusionless civilian transformation)라고 정의될 수 있음.

○ 규칙 변태

- 조성 변화 또는 Long Range 확산 없이 불규칙상(Disordered Phase)인 α 상으로부터 규칙상(Ordered Phase)인 α' 상으로의 변화되는 현상임($\alpha \rightarrow \alpha'$).
- Disorder 된 용액으로부터 Order된 초격자를 생성하는 두 가지 가능한 발생기구
 - 국부적인 재배치에 의한 Short-Range Order의 연속적인 증가
 - Order된 영역형성에 대한 에너지장벽이 있는 경우 변태는 생성과 성장의 과정에 의해 발생되어야 함.

○ Polymorphic 변태

- 다른 온도 범위에 걸쳐 다른 결정구조들이 안정화되어질 때 단일 성분계에서 발생하는 상 변태임.
- 가장 잘 알려진 예는 fcc-Fe와 bcc-Fe 사이의 상 변태임.

○ 용접 시 고체 내 확산 변태

- 용접부의 열 이력 및 재료물성치

· 강판은 효과적인 열 Sink가 될 수 있으므로 그림 A-20에서 보이는 바와 같이 냉각속도는 다양한 용접법에 대해 매우 높음.

· 이러한 열 이력은 상 변화 및 열적/기계적 응력의 결합에 기인하여 HAZ내 모재의 재료물성치를 변화시킴.

- C-Mn 강의 전형적인 미세조직 변화(그림 A-21참조)

· HAZ 내에서 재결정, 결정립 성장 및 심지어 Aging도 발생함.

· 결정립 성장은 강도와 인성을 저하시키기 때문에 가장 큰 문제임.

▶ 고온에서의 결정립 성장을 피하기 위해서는 결정립 성장을 억제하는 TiN을 세밀하게 분산시키면 됨.

· 고강도 강에서는 마르텐사이트의 형성과 관련된 수소기인균열(Hydrogen-Induced Cracking)이 문제가 될 수 있음.

▶ 주위 대기, 용제 또는 전극 재료의 수소 원자가 용융 금속에 흡수되고 HAZ에 빠르게 확산되면 마르텐사이트에서 수소의 용해도는 페라이트에서 보다 낮기 때문에 수소는 마르텐사이트 바깥으로 배출되어져서 마르텐사이트-페라이트 상 경계 또는 개재물 경계에 집중되어질 것임.

▶ 용접부 잔류응력의 효과와 결합되어져서 수소는 철 격자를 약하게 할 것이며 균열을 발생시킬 것임.

▶ 잔류 수소의 함량을 줄이는 방법과 고 잔류응력이 존재하는 경우에 마르텐사이트 발생을 피하는 방법으로 저온균열은 억제될 수 있음

표 A-1. 다양한 재료 및 두께에 따른 용접법 적용 개요

재료	두께 ¹⁾	용접법									
		OFW	SMAW	GTAW	PAW	GMAW	SAW	ESW	FCAW	EBW	LBW
탄소강	S	O ²⁾	O	O		O	O			O	O
	I	O	O	O		O	O		O	O	O
	M	O	O			O	O		O	O	O
	T	O	O			O	O	O	O	O	
저합금강	S	O	O	O		O	O			O	O
	I		O	O		O	O		O	O	O
	M		O			O	O		O	O	O
	T		O			O	O	O	O	O	
스테인리스강	S	O	O	O	O	O	O			O	O
	I		O	O	O	O	O		O	O	O
	M		O		O	O	O		O	O	O
	T		O			O	O	O	O	O	
주철	I	O	O								
	M	O	O			O	O		O		
	T	O	O			O	O		O		
니켈 및 니켈 합금	S	O	O	O	O	O				O	O
	I		O	O	O	O	O			O	O
	M		O		O	O	O			O	O
	T		O			O		O		O	
알루미늄 및 알루미늄 합금	S	O		O	O	O				O	O
	I			O		O				O	O
	M			O		O				O	
	T					O				O	
티타늄 및 티타늄 합금	S			O	O	O				O	O
	I			O	O	O				O	O
	M			O	O	O				O	O
	T					O				O	
구리 및 구리 합금	S			O	O	O				O	
	I				O	O				O	
	M					O				O	
	T					O				O	
마그네슘 및 마그네슘 합금	S			O		O				O	O
	I			O		O				O	O
	M					O				O	O
	T					O				O	
Refractory 합금	S			O	O	O				O	
	I				O	O				O	
	M										
	T										

주 : 1) S(두께 3mm까지의 Sheet), I(두께 3-6mm 사이의 Sheet), M(두께 6-19mm 사이의 Sheet),

T(두께 19mm 이상의 Sheet)

2) O(추천의 의미)

표 A-2. 각 용접법 별 특성, 장단점 및 적용성 요약

용접법	특성	장단점	적용성	참조 그림	
가스 용접	OFW	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가열 매개체로서 산소와 결합된 연료 가스 이용 ○ 고온의 화염 때문에 가장 일반적으로 이용되어지는 가스 용접법 ○ 용제(Flux)는 용접부의 보호 정도에 따라서 필요할 수도 필요하지 않을 수도 있음. ○ C₂H₂와 O₂의 비에 따라 환원염, 중성염 및 산화염으로 구분 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 장비 단순 - 운반 용이 - 저가 - 보수/정비 적용성 양호 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 느린 용접 속도 - 높은 단위 용접 길이 당 총 입열량 - 넓은 부위의 열 영향부(HAZ) - 심각한 변형 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 환원염 <ul style="list-style-type: none"> - Al 합금 및 고탄소강 ○ 산화염 <ul style="list-style-type: none"> - 황동 ○ 중성염 <ul style="list-style-type: none"> - 대부분의 금속 ○ 반응성 금속 <ul style="list-style-type: none"> - Ti 및 Zr 같은 반응되기 쉬운 금속의 용접에 대해서는 적합하지 않음. 	그림 A-1
아크 용접	SMAW	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모재 표면과 Covered된 Electrode Tip 사이의 전기적 아크를 열원으로 사용 ○ 주위 공기로부터 용융 금속을 보호하기 위한 Shielded 가스가 Electrode Cover로부터 발생 <ul style="list-style-type: none"> - Cellulose Electrode 경우 H₂, CO, H₂O, CO₂ 발생 - Limestone Electrode 경우 CO₂, CaO 슬래그 발생 ○ 용접 금속을 환원시키고 청결하게 하기 위해 Electrode Cover로부터 환원제와 용제 공급 ○ Electrode Cover로부터 아크 안정을 위한 안정제 공급 ○ 용접부 화학조성을 제어 하기 위해 Electrode Cover로부터 합금 원소/ 금속 파우더 공급 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 (다른 아크 용접법과 비교시) <ul style="list-style-type: none"> - 장비 단순 - 운반 용이 - 저가 - 보수/정비 적용성 양호 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 과도한 고용접진류 적용 시 Electrode Cover의 과열 및 저하 발생 - Deposition Rate 제한 - 용접동안 Electrode 교체 필요성에 기인하는 전체 생산능률 저하 - 용접 기술자의 건강에 해로움 - 용접 기술자의 기술에 용접 품질이 좌우 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Limestone Electrode <ul style="list-style-type: none"> - 수소 취화에 민감한 용접 금속에 적용 ○ 반응성 금속에는 적합하지 않음. 	그림 A-2
	GTAW	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모재 표면과 소비되지 않는 텅스텐 Electrode 사이의 전기적 아크를 열원으로 사용 ○ 아르곤 또는 헬륨 등 불활성 가스로 주위 공기로부터 용융 금속을 보호 ○ DCSP (Direct Current Straight Polarity) 경우 <ul style="list-style-type: none"> - 강한 가열효과로 폭이 좁고 깊은 용접 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 깨끗한 용접 - 안정된 아크 발생 - 반응성 금속에도 사용가능 - Refractory 산화물을 형성하는 Al 및 Mg같은 금속에도 사용가능 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 느린 Deposition Rate - 전기소모 과다 - 비경제적 	<ul style="list-style-type: none"> ○ DCRP 경우 <ul style="list-style-type: none"> - Al 및 Mg 같은 강한 산화막 형성 금속 ○ 펄스 직류 이용 경우 <ul style="list-style-type: none"> - Out-of-Position 용접에 적용 	그림 A-3

용접법	특성	장단점	적용성	참조 그림	
아크 용접	GTAW	<ul style="list-style-type: none"> ○ DCRP (Direct Current Reverse Polarity) 경우 <ul style="list-style-type: none"> - 가열 효과가 텅스텐 Electrode에 집중되어 큰 직경의 수냉각 Electrode 사용 필요 - 강한 산화막 청소작용 - 얇은 용접 ○ 교류를 이용한 경우 <ul style="list-style-type: none"> - 상대적으로 좋은 용착 금속침투와 산화막 청소작용 - 텅스텐 Electrode에서 온도가 높으므로 전류가 불안정되기 쉬움. ○ 펄스화된 직류를 이용한 경우 <ul style="list-style-type: none"> - 변형 및 Bridging Gap의 어려움을 감소시킴. ○ 1% 또는 2%의 Thoria를 함유하는 텅스텐 경우가 순수 텅스텐 보다 높은 전자 방사도와 좋은 전류 운반 능력을 가지고 있으므로 아크 발생이 용이하며 보다 안정됨. ○ 불활성 가스 이용에 따른 특성 <ul style="list-style-type: none"> - 아르곤이 헬륨 보다 이온화 되기 보다 용이하므로 아크 발생이 용이하며 전압 저하가 낮음. - 아르곤이 보다 무거우므로 용접 금속을 보호하기에 보다 적합함. - 아르곤이 헬륨보다 저가 - 아르곤이 헬륨보다 좋은 산화막 청소작용 - 헬륨 이용 시 고 전력 입열량 및 아크길이의 고 민감도 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 깨끗한 용접 - 안정된 아크 발생 - 반응성 금속에도 사용가능 - Refractory 산화물을 형성하는 Al 및 Mg같은 금속에도 사용가능 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 느린 Deposition Rate - 전기 소모 많고 고가의 불활성 가스 사용으로 비경제적 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 헬륨 이용 시 <ul style="list-style-type: none"> - 보다 두꺼운 용접 대상과 보다 빠른 용접 속도에 적용 ○ 아르곤 이용 시 <ul style="list-style-type: none"> - 아크 길이의 보다 좋은 제어 가능 ○ 제한된 입열량 때문에 얇은 용접 대상의 용접에 적합 	그림 A-4

용접법	특성	장단점	적용성	참조 그림	
아크 용접	PAW	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모재 표면과 Electrode 사이의 폭이 좁은 아크를 열원으로 사용 ○ 텅스텐 Electrode를 사용하기 때문에 GTAW와 유사 ○ 오리피스 가스 노즐의 수렴작용때문에 GTAW 보다 폭이 좁은 아크발생 ○ 결과적으로 GTAW 보다 좁고 깊은 용접부 발생 ○ PAW의 보다 긴 아크 길이 때문에 수동 용접동안 아크 길이 변이에 대해 덜 민감하므로 GTAW 보다 덜 숙련된 기술자가 용접하여도 됨. ○ Electrode가 오리피스 가스 노즐 안에 있기 때문에 Electrode Tip이 용접 Pool과 접촉할 가능성 적으며 아크 발생이 GTAW 보다 어려움. 결과적으로 아크 발생을 위한 Pilot 아크 시동 회로 필요 ○ 특정 두께 범위(2.5-6.4 mm)에 대해 PAW 적용 시 Key Hole이 이용되어질 수 있음. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점(GTAW와 비교시) <ul style="list-style-type: none"> - 덜 숙련된 기술자가 용접하여도 됨. - Key Hole 이용 시 완전한 용접관통을 확연하게 확인할 수 있으며 GTWA보다 빠른 용접 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 용접 토치가 복잡 - 플라즈마 아크 용접 토치는 때때로 커지며 코너에 가까운 부위의 용접은 어려워짐. - 전력원이 GTAW 보다 고가임. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ GTAW 용접 경우와 유사 ○ 수동용접에 적합 ○ 두께 13mm까지의 금속에 대한 단일 Pass 용접 	그림 A-4
	GMAW	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모재 표면과 연속적인 용착 금속 Electrode 사이의 전기적 아크를 열원으로 사용 ○ 주위 공기로부터 용융 금속을 보호하기 위해 불활성 가스 또는 CO₂ 가스 사용 ○ DCRP는 가장 널리 이용되어짐. <ul style="list-style-type: none"> - 안정된 아크, 부드러운 금속 전달 및 좋은 용접 침투 ○ DCSP 및 교류 경우는 좀처럼 적용되지 않음. <ul style="list-style-type: none"> - 금속 전달이 부드럽지 못함. ○ 금속 전달의 기초적인 세가지 형태 <ul style="list-style-type: none"> - Short Circuiting 경우 서로 접촉 시 용착 금속은 Electrode로부터 용접 Pool로 전달되어짐. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 빠른 용접 속도 - 자동화 - 안정된 아크, 부드러운 금속전달 및 좋은 용접 침투로 용접 품질 양호 - 높은 생산성 및 에너지 효율 우수 - CO₂ 사용 시 경제적 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 장비 고가 - 불활성 가스 사용이나 피복재/용재 사용 시 보다 CO₂ 사용 시 품질이 떨어짐. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ CO₂ 사용은 원자력 분야에서 사용 회피 	그림 A-5

용접법		특성	장단점	적용성	참조 그림
아크 용접	GMAW	<ul style="list-style-type: none"> - Globular 또는 Spray 형태 전달은 제각기 중력 또는 전자기력 하에서 Discrete한 금속 Drop들이 아크 Gap을 가로질러 전달되어짐. ○ 금속 전달 양식을 결정하는 중요 인자들 <ul style="list-style-type: none"> - 용접 전류 - Electrode 크기 - 쉴드드 가스의 조성 ○ FCAW는 Flux-Cored된 Electrode를 사용하는 GMAW의 일종임. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 빠른 용접 속도 - 자동화 - 안정된 아크, 부드러운 금속전달 및 좋은 용접 침투로 용접 품질 양호 - CO₂ 사용 시 경제적 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 장비 고가 - 불활성 가스 사용이나 피복재/용재 사용 시 보다 CO₂ 사용 시 품질이 떨어짐. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ CO₂ 사용은 원자력 분야에서 사용 회피 	그림 A-5
	SAW	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모재 표면과 노출된 용착 금속 Electrode 사이의 전기적 아크를 사용 ○ 용접 영역 전체에 걸쳐 Granular하고 용융 가능한 재료 장막으로 아크 보호 ○ 슬래그의 보호 및 세정 작용 때문에 매우 깨끗한 용접을 얻을 수 있음. ○ 용융 슬래그와 Granular 용재 안에서 아크가 발생되므로 안정된 고전류가 적용되어지며 주위로의 열손실이 매우 적음. ○ Granular 용재에 합금 원소들과 금속 파우더 첨가 <ul style="list-style-type: none"> - 합금원소는 용접 금속의 조성을 조정함. - 금속 파우더는 Deposition Rate를 증가시킴. ○ DCRP는 가장 자주 이용되어짐. ○ 고 용접 전류에서 아크 Blow를 최소화하기 위해 교류가 사용되기도 함. ○ 용융 슬래그 및 용접 Pool이 상대적으로 크기 때문에 Flat Position 용접과 원주 용접 경우에만 적용되어짐. ○ 상대적으로 높은 입열량 및 큰 용접 Pool 때문에 FZ에 Coarse한 Columnar Grain이 종종 발생하고 낮은 파괴인성치와 Hot Cracking 발생 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 빠른 용접 속도 - 자동화 - 깨끗한 용접 가능 - 안정된 아크 - 고품질의 용접부 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 장비 고가 - 용융 금속의 이행상태 육안확인 불가능 - 용접 Position 제한 - 낮은 파괴인성치와 Hot Cracking 발생 가능 - 현장 사용 불가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ GTAW 및 GMAW 보다 두꺼운 단면의 용접에 적합 ○ Flat Position 및 원주 용접에만 적용되어짐. 	그림 A-6

용접법	특성	장단점	적용성	참조 그림	
아크 용접	ESW	<ul style="list-style-type: none"> ○ 용융 슬래그와 더불어 모재 표면과 용착 금속을 용융시켜 금속을 접합함. ○ 용접 Pool은 용접부의 전체 횡단면을 따라 이동하는 용융 슬래그에 의해 보호되어짐. ○ 아크는 용접과정의 시작 시에만 발생함. ○ 두꺼운 단면을 용접 시 균일 열분포를 얻기 위해 Electrode를 진동 시킴. ○ 매우 큰 입열량에 기인하여 금속 조직상 손상을 받음.(예: 큰 HAZ, FZ내에 Coarse한 Grain 발생) ○ 수직 용접 Position에만 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 빠른 Deposition Rate - 두꺼운 단면의 용접에도 단일 Pass로 용접 가능하므로 용접 변형 제거 가능 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 낮은 파괴인성치 발생 - 용접 Position 제한 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 보다 두꺼운 단면의 용접에 적합 ○ 수직 용접 Position에만 적용되어짐. 	그림 A-7
고 에너지 빔 용접	EBW	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고 에너지의 전자 빔을 열원으로 사용 ○ 매우 높은 침투력을 가지며 Key Hole 형성 ○ 아크 용접 보다 훨씬 깊고 폭이 좁은 용접 가능 ○ 매우 빠른 용접 뿐만 아니라 일반적으로 Multi-Pass가 요구되는 경우에 단일 Pass로 용접 가능 ○ 단위 용접길이 당 총 입열량은 아크 용접보다 훨씬 낮음. ○ 아크 용접에 비해 훨씬 폭이 좁은 FZ 및 HAZ이 발생하고 변형 적음. ○ 낮은 입열량 및 매우 빠른 냉각률로 Coarse하고 Brittle한 Intermetallic Compound들의 석출을 방해 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 두꺼운 단면의 용접에도 단일 Pass로 용접 가능하므로 용접 변형 제거 가능 - 좁은 FZ 및 HAZ 발생 - 용접부의 기계적 물성치 양호 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 장비 매우 고가 - 잔류 및 이종 금속의 자기장은 빔의 굴절을 야기시킴. - 용접 이전 정확한 용접부 배치 및 형상 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 반응성 및 Refractory 금속에 용접 적용 가능 ○ Al 및 스테인리스 강 같은 이종 재료의 용접에도 적용됨. ○ 불완전하게 탈가스 처리된 Rimmed 강의 경우 적합하지 않음. ○ Mg 합금 및 납을 함유하는 낮은 비등점 성분들을 함유하는 합금들 경우 적합하지 않음. 	그림 A-8

용접법	특성	장단점	적용성	참조 그림
고 에너 지 빔 용접	<p>LBW</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 고 에너지의 레이저 빔을 열원으로 사용 ○ 연속 Wave, 고 전력 레이저 빔 경우 전기 빔 용접경우와 유사 <ul style="list-style-type: none"> - 매우 높은 전력밀도 - 아크 용접 보다 훨씬 깊고 폭이 좁은 용접 가능 - 매우 빠른 용접 뿐만 아니라 단일 Pass로 용접 가능 - 단위 용접길이 당 총 입열량은 아크 용접보다 훨씬 낮음. - 아크 용접에 비해 훨씬 폭이 좁은 FZ 및 HAZ이 발생하고 변형 적음. ○ 빔의 산란 및 반사 특성은 다름. <ul style="list-style-type: none"> - 레이저 빔은 전자 빔 경우와는 달리 진공장치 및 X-Ray 불필요 - Graphite 또는 Phosphate 같은 에너지 흡수 재료들이 용접 대상 표면에 코팅되지 않는다면 특히, Al 및 구리 합금경우 총 에너지의 상당 부분이 손실되어짐. ○ 고상 레이저와 가스 레이저로 분류 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장점 <ul style="list-style-type: none"> - 두꺼운 단면의 용접에도 단일 Pass로 용접 가능하므로 용접 변형 제거 가능 - 좁은 FZ 및 HAZ 발생 - 용접부의 기계적 물성치 양호 ○ 단점 <ul style="list-style-type: none"> - 장비 매우 고가 - 용접 이전 정확한 용접부 배치 및 형상 필요 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 이종 재료의 용접에도 적용됨. 	-

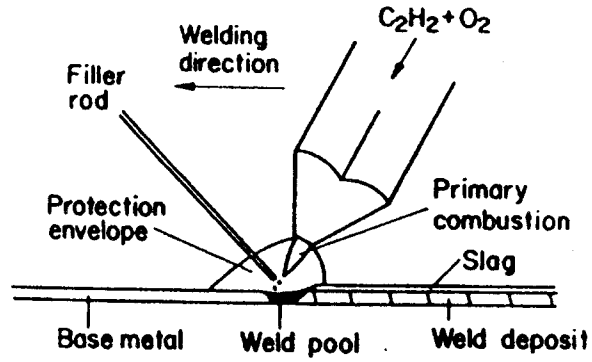


그림 A-1. OFW 과정 개요

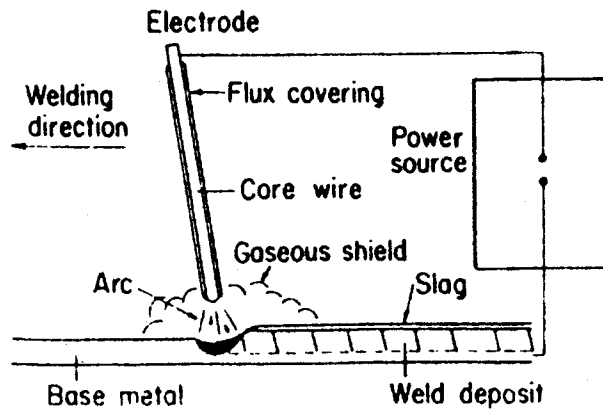


그림 A-2. SMAW 과정 개요

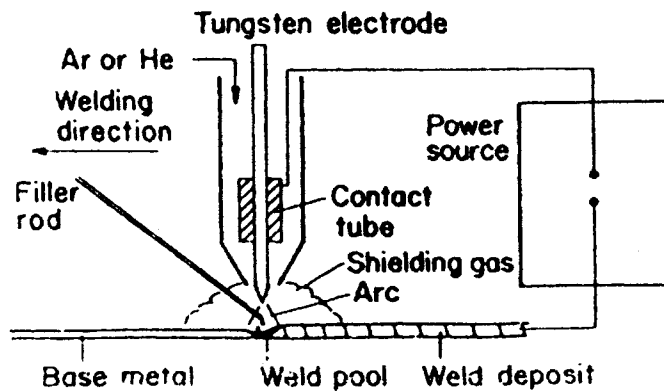


그림 A-3. GTAW 과정 개요

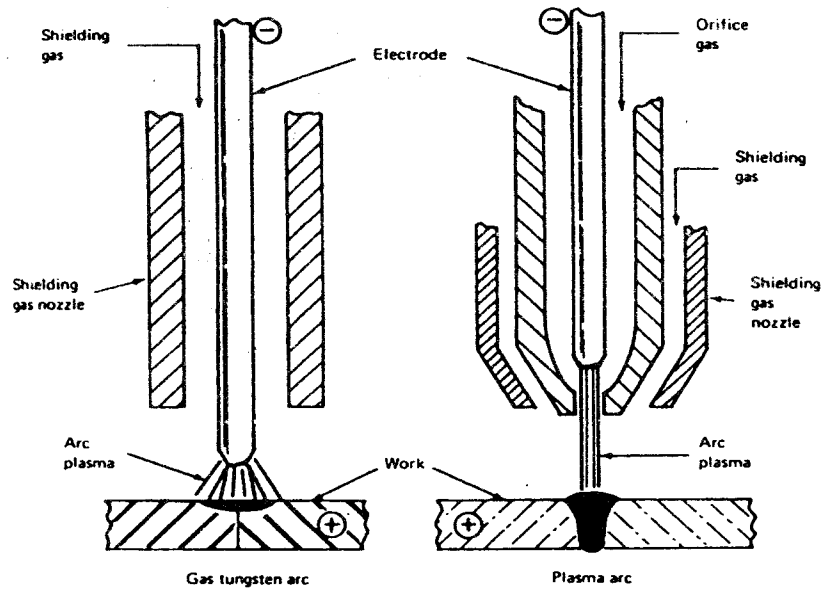


그림 A-4. GTAW와 PAW 과정 비교

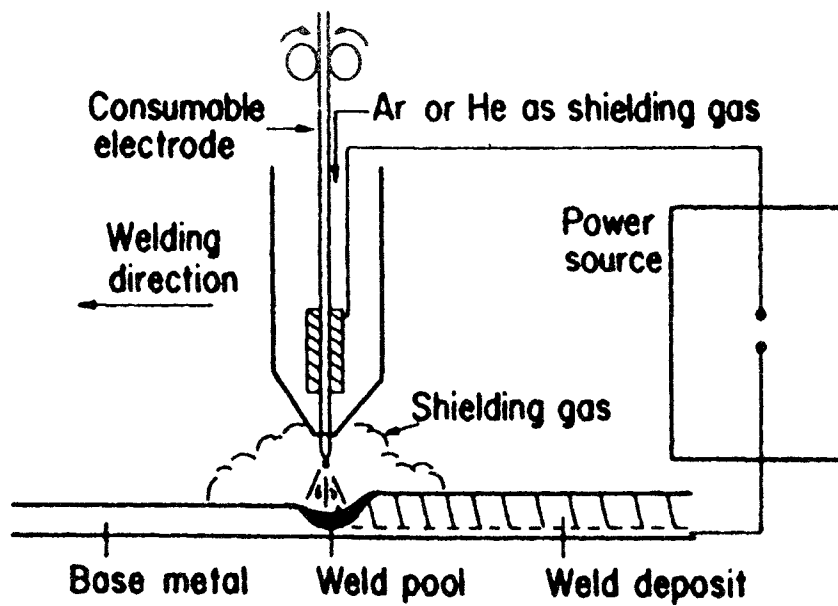


그림 A-5. GMAW 과정 개요

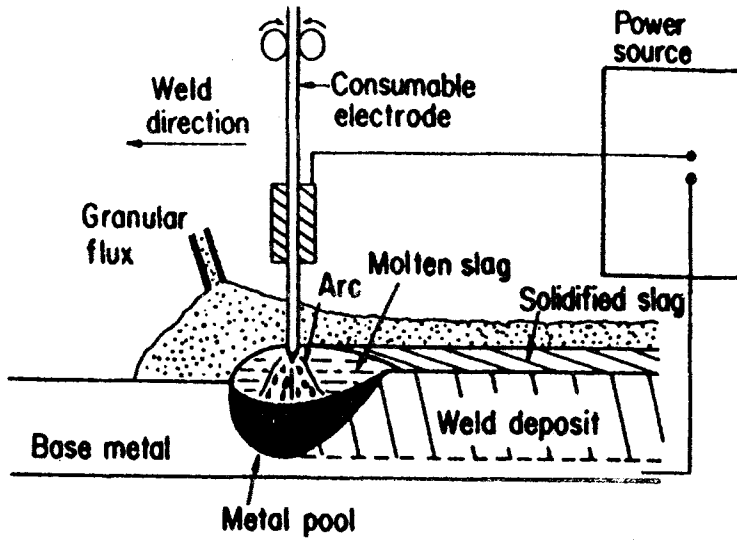


그림 A-6. SAW 과정 개요

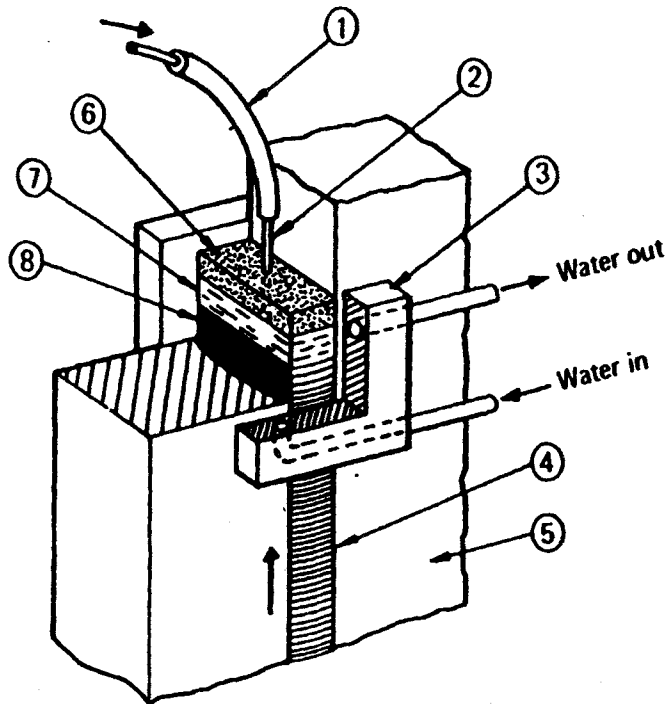


그림 A-7. ESW 과정 개요

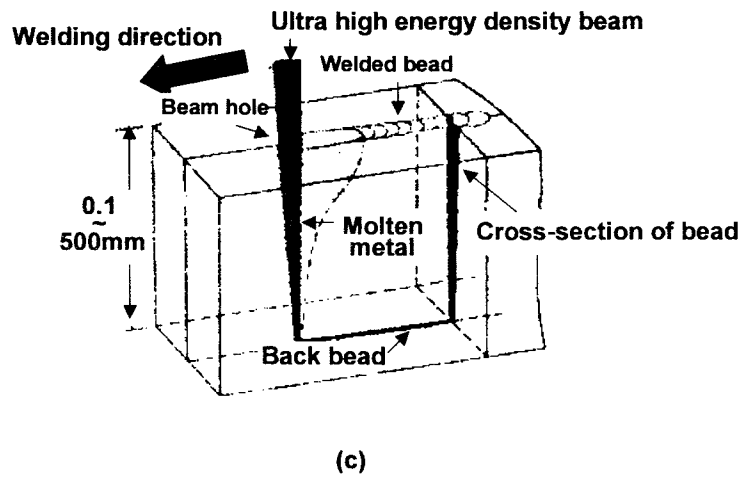
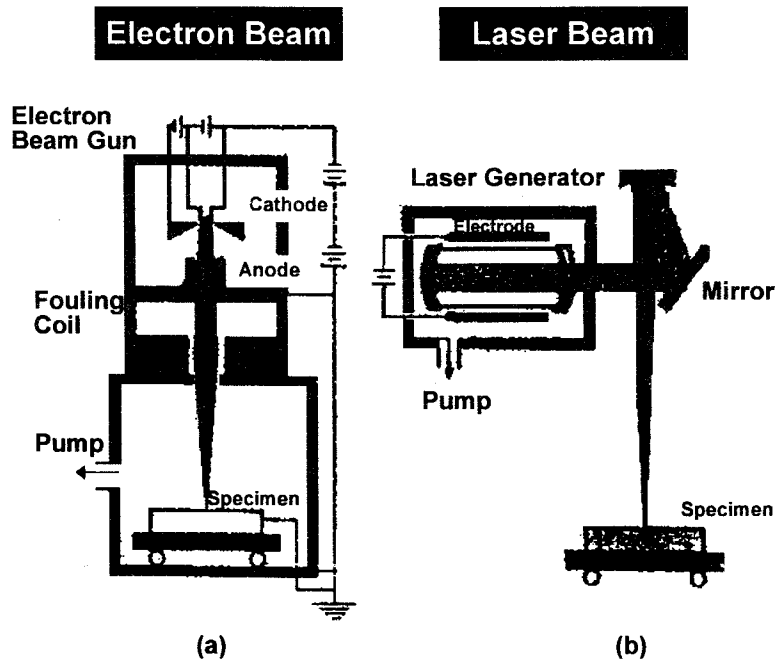


그림 A-8. EBW 과정 개요

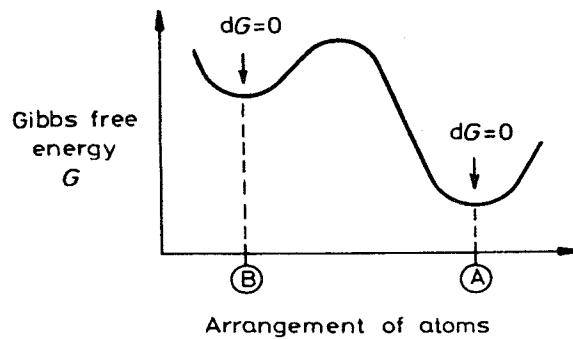


그림 A-9. GIBBS 자유에너지의 도식적인 변화

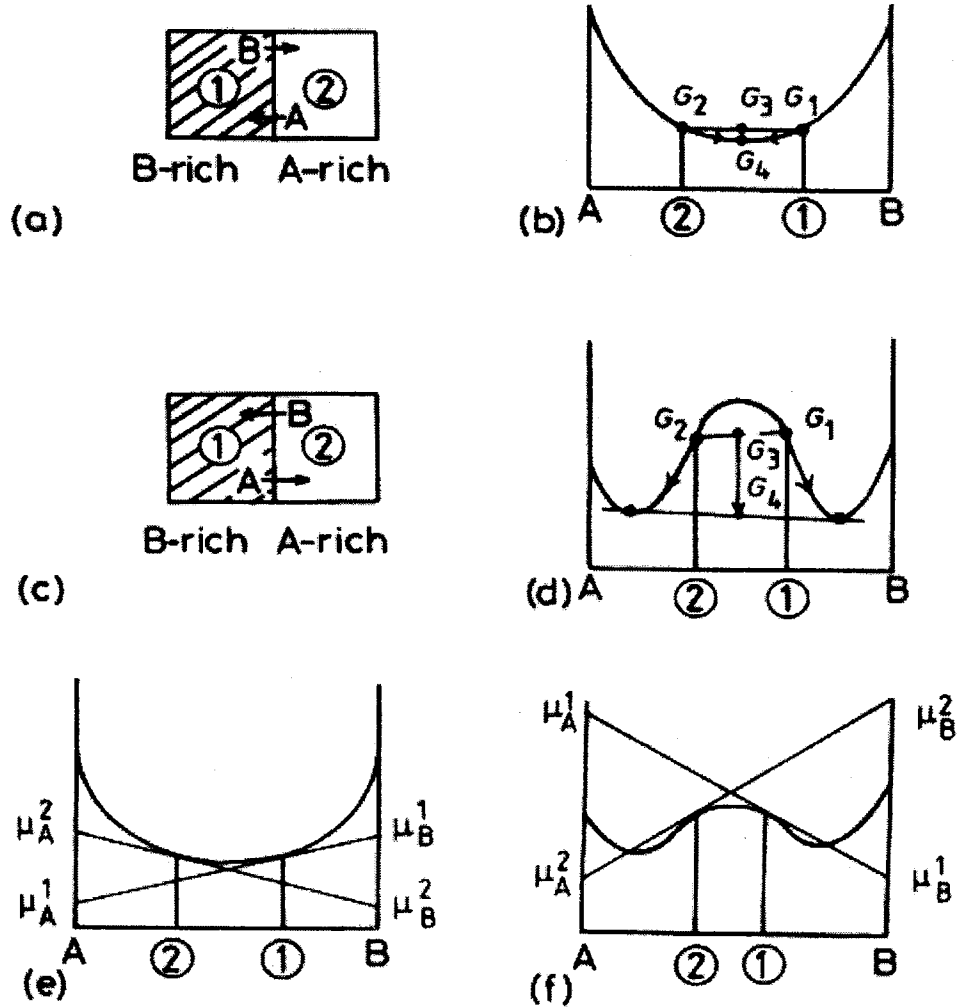


그림 A-10. 확산 동안의 자유에너지와 Chemical Potential 변화
 (a), (b), (e) : Down-Hill 확산, (c), (d), (f) : Up-Hill 확산

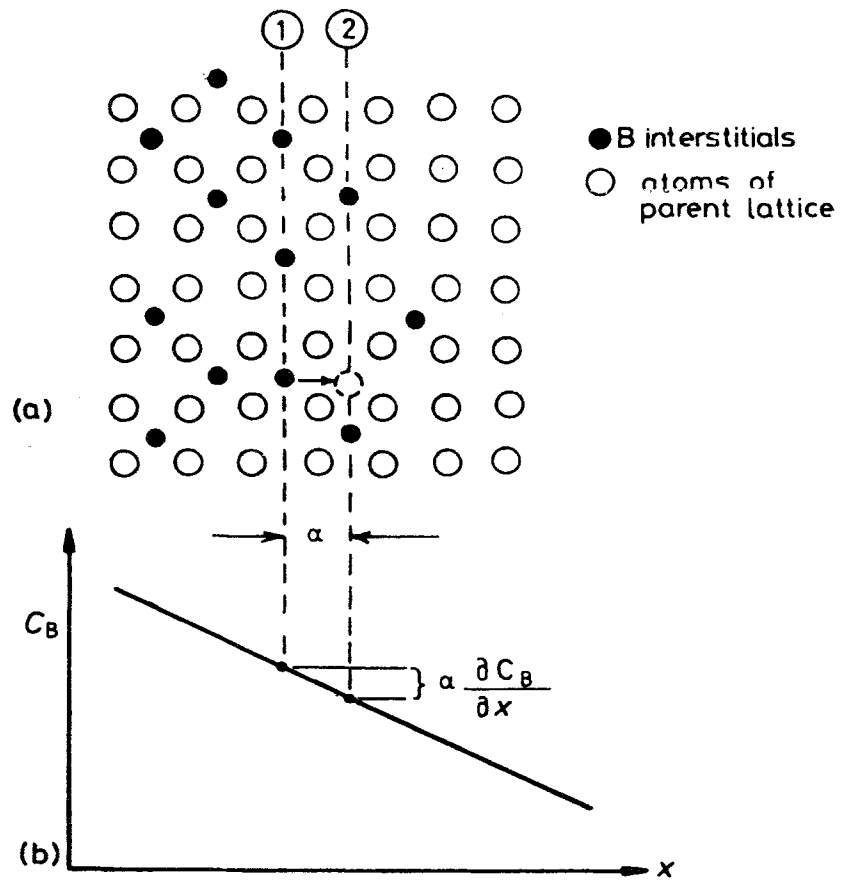


그림 A-11. 농도 구배가 있는 경우 RANDOM JUMP에 의한 침입형 확산

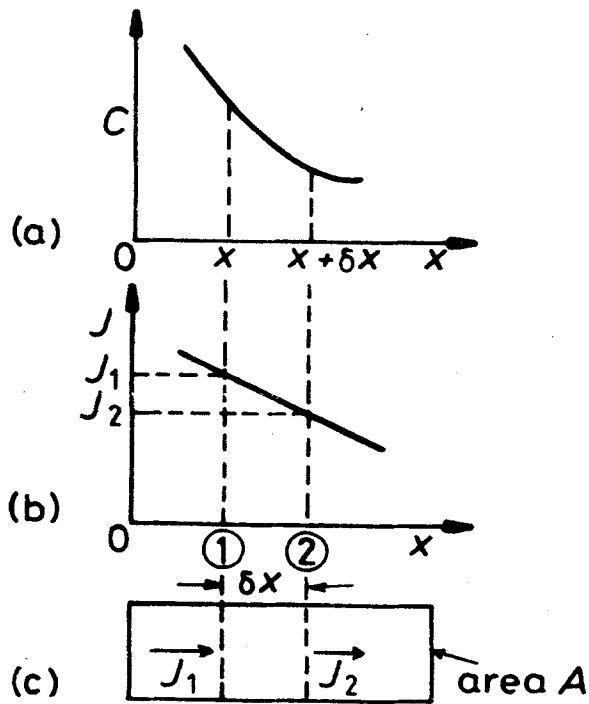


그림 A-12. FICK의 제 2 법칙 유도

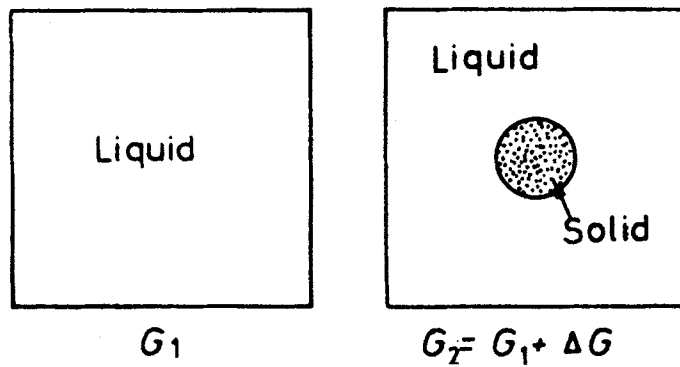


그림 A-13. 균질 핵 생성

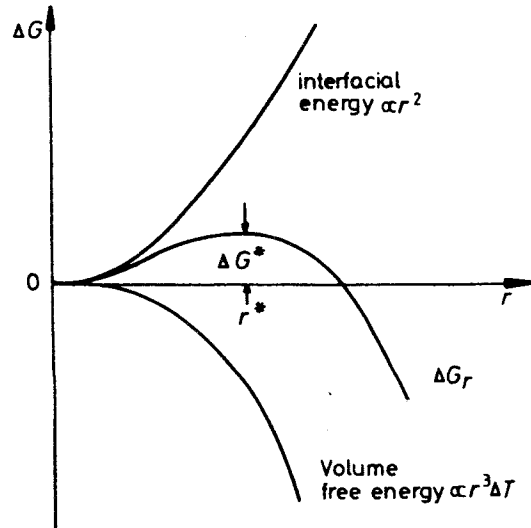


그림 A-14. 반경 r 의 구형 입자의 균질 생성과 관련된 자유에너지 변화

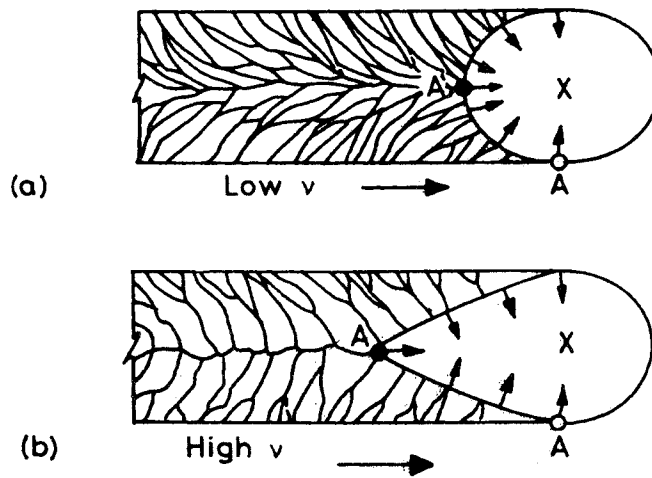


그림 A-15. 용접 속도 증가에 따른 용접 Pool 형상 및 결정성장 변화
(a) 느린 속도, (b) 빠른 속도

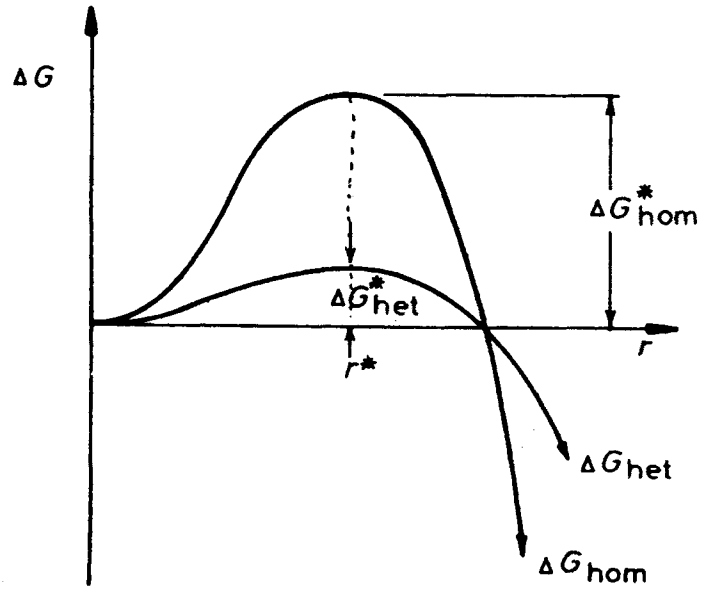


그림 A-16. 균질한 생성과 비균질한 생성에 대한 고체 CLUSTER들의 EXCESS 자유에너지

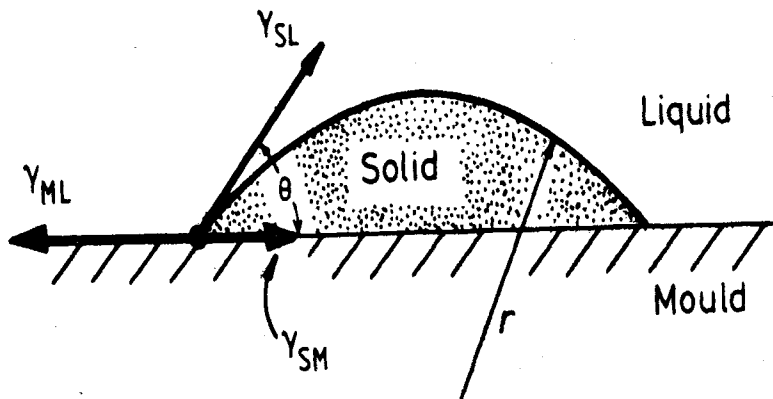


그림 A-17. 평평한 Mold 벽상의 구형 캡의 비균질한 생성

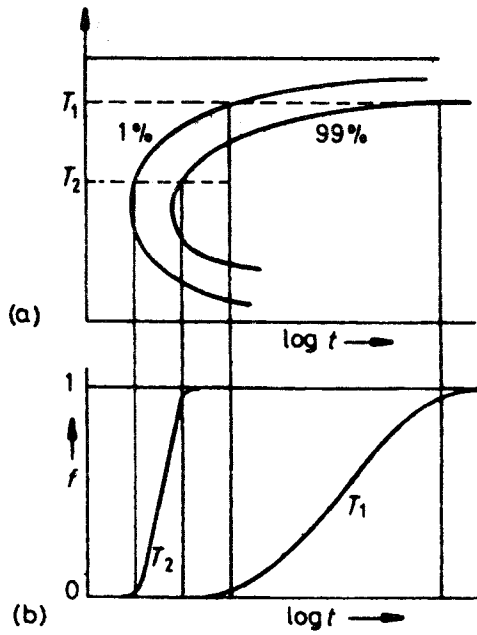


그림 A-18. TTT 선도와 시간에 따른 Fraction 변태 사이의 관계

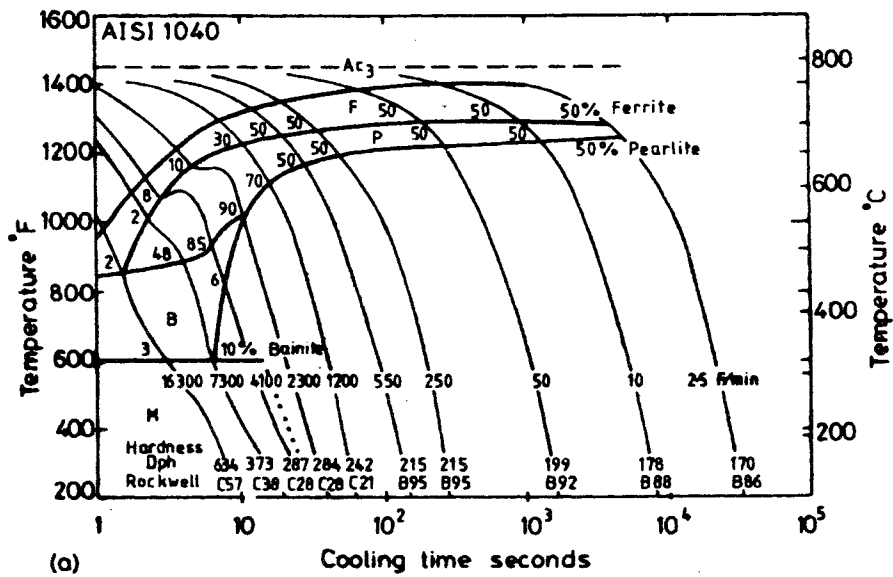


그림 A-19. AISI 1040의 CCT 선도

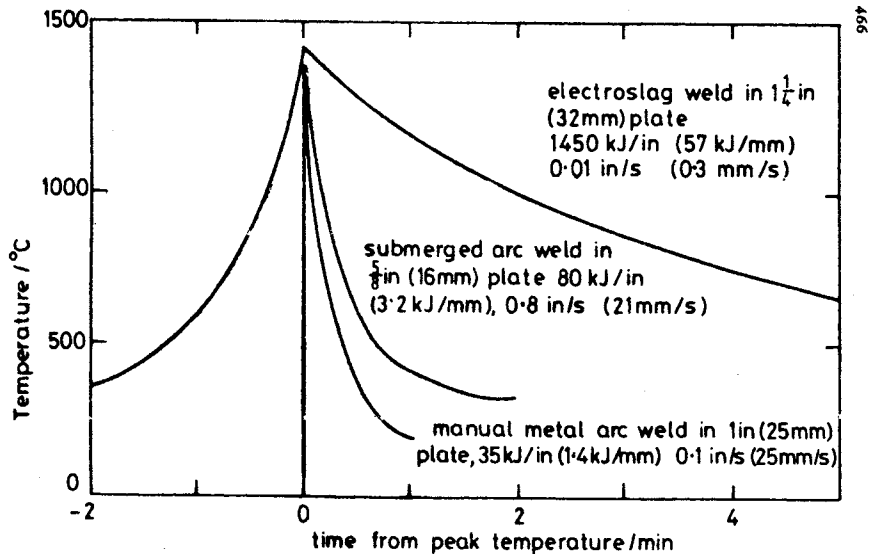


그림 A-20. 다양한 용접법에 따른 HAZ의 열 이력 비교

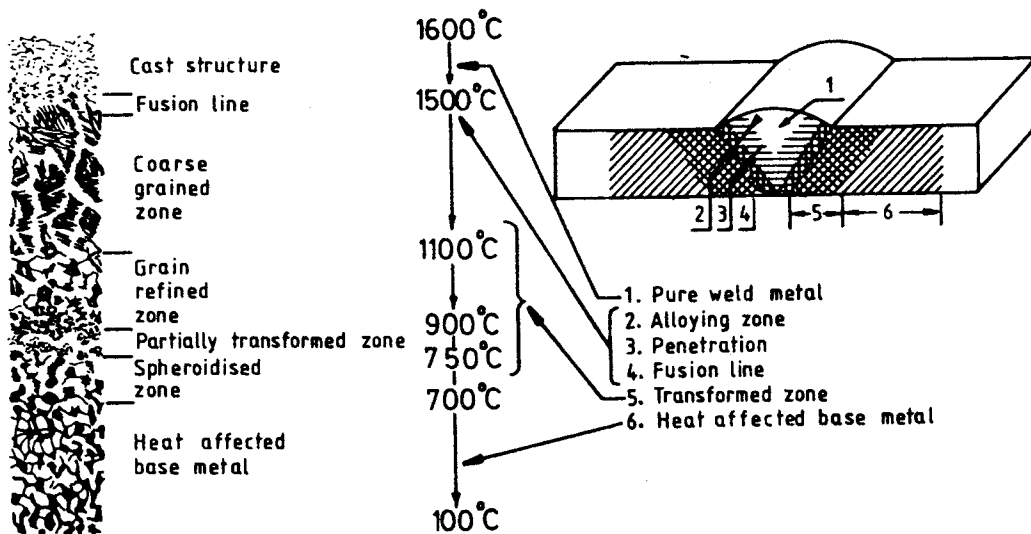


그림 A-21. 용접 용융부와 HAZ의 미세조직 개요

부록 2. 국제 공동 연구

본 부록에서는 당해단계 연구동안 수행한 국제 공동 연구의 요약 보고서를 제시하고자 한다.

1. PVRC/MPC JIP

구조물의 용접시 용접변수, 재료의 고온거동 및 구속조건 등의 상호작용에 의해 발생하는 변형 및 잔류응력은 구조물의 건전성을 저하시킨다는 것은 잘 알려져 있는 사실이다. 용접시 발생하는 잔류응력과 관련된 국내외 많은 연구가 오랫동안 수행되어 왔으나 용접시 발생하는 과정의 복잡성으로 인해 연구자들에 의해 제안된 대부분의 방법들은 실제 측정값과 큰 차이를 보이고 있다. 가장 큰 원인으로서는 용접시 열전달 과정 및 고온에서의 재료거동의 묘사가 비현실적이기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 잔류응력해석과 관련된 대표적인 선행 연구결과들을 검토하여 최적의 해석방법을 제안하였다. 또한 제안된 방법을 통해 실제 구조물의 잔류응력을 평가하였고 실험결과와의 비교를 통해 해석절차의 타당성을 확인하였고 최종적으로 사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석 절차를 도출하였다.

가. 해석기술 및 용접현상 검토

잔류응력 해석기술은 용접현상과 관련지어서 (1) 열유동 모델링 (2) 고온 용접금속 거동의 두가지 분야로 분리하여 검토하고자 한다.

재료에 상관없이 용접 잔류응력의 모델링은 (1) 열 유동 (2) 용융으로부터 상온까지 변화하는 재료거동 (3) 주어진 이음부 구속조건하에서의 천이상태의 열소성의 세가지 관련 현상으로 설명되어진다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이, 용융 풀 근처와 안에서 다양한 열적-물리적 현상이 사용중 적합성 평가 목적을 위해 잔류응력을 해석할 수 있기 위해 열전도 해석 기술에 근거한 열전도내 열유동에 대한 벌크(bulk) 효과를 고려함으로써 매우 단순화시킬 수 있다. 이러한 단순화시킨 등가 열유동 모사 절차들은 용접 잔류응력을 결정하는데 폭넓게 이용되어지고 있다.

1) 용접 열유동 모델링

Fig. 1에서 예를 들었던 것처럼 모재는 용접하는 도중에 국부적으로 높은 온도 분포를 가진 용융풀 내에 용융 이상의 과열 온도를 나타낸다. 그 결과 발생하는 용융 특징들은 아크 특성과 용융 풀 동역학들과 직접적 연관이 있다. 실험과 최근의 연구결과들은 잔류응력과 변형 예측시 열 해석절차의 정확도 척도가 되는 양으로서의 용융 형상을 고려함으로써 해석절차를 단순화시킬 수 있다.

사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석시 유효하게 적용될 수 있는 열유동 해석 모델링은 다음과 같다.

- 용융부 형상과 크기는 등가 열전도 효과에 대한 복잡한 열유동 기구의 입열량 효과에 대한 입력 변수로써 사용되어질 수 있다.

- 이차원 유한요소 모델을 사용해서 열유동 해석을 수행하는 경우, 미리 예측된 온도 영역들은 의도된 용융부 형상의 초기 조건에 대해 주의깊게 평가되어야 한다.

2) 고온 용접금속 거동

용융 풀내 용접금속은 급격한 가열, 상변화, 용융, 고화현상과 급격한 냉각을 경험한다. 예측된 잔류응력에 대한 마르텐사이트 변태 효과를 고려함으로써 경화된 탄소강 용접에 대한 몇가지 자세한 연구들이 기존 문헌들에서 제시되고 있다. 예측한 잔류응력에서의 차이점들은 매우 국부적이고 오늘날의 잔류응력 측정기술이 매우 어렵다는 결과를 보여주고 있다.

Fig. 2는 상변태 효과를 고려한 일레트로 슬래그 용접 클래딩의 용접 경우로 이차원 모델이 이용되어졌다. 미세조직 분석에서 클래드 용접부에서 페라이트, 퍼얼라이트 그리고 마르텐사이트의 체적 분열이 추정되었고 단순한 혼합법칙과 측정에 근거하여 경도분포를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 또한, 냉각하는 과정에 마르텐사이트 변태와 관련된 자세한 물성치 분포와 체적 변화들을 고려한, 최종 잔류응력 분포를 Fig. 2(c)에 제시하고 있다. Fig. 2(c)로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 마르텐사이트 변태효과는 국부적인 상변태 영역에 국한되어지며 체적 팽창 효과 때문에 국부적으로 압축을 나타낸다.
- 전체 분포들은 상변태 효과의 고려 여부에 무관하게 유사하다. 실제적인 응용 관점에서 그러한 국부적인 잔류응력 분포들은 아주 자세한 해석을 필요로 하기 때문에 실험적으로 정량화하는 것이 힘들 뿐만 아니라 구조적 건전성 평가에서 잔류응력의 상한치들을 단순화하거나 파괴 구동력의 보수적인 평가를 제공한다.

나. 사용중 적합성 평가용 잔류응력 해석절차

사용중 적합성 평가 목적을 위한 잔류응력 해석절차를 제시하고자 한다. 이런 절차는 사용중 적합성 평가를 위한 다양한 기기 용접부의 잔류응력 분포를 결정하는데 적합한 기초를 제공할 것이다.

잔류응력 발생기구는 매우 복잡하며, 재료거동, 용접변수, 이음부 형상 및 부속물의 구성 등 여러 변수들에 영향을 받는다. 최근의 발달된 컴퓨터들을 이용하여도 복잡한 용접 현상의 일부분은 여전히 이해되지 않은 채로 남아 있다. 따라서, 신뢰성을 확보하면서도 경제적인 해석절차가 산업적인 이용을 위해 개발되어야 한다. 사용중 적합성 평가를 위해 계산되어지는 응력확대계수에 미치는 잔류응력 분포의 영향을 다음 아래와 같이 고찰함으로써 사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 분포 해석시 상세한 용접 과정동안의 동역학 및 국부적 미세조직 효과 등을 고려할 필요가 없음을 도출하였다.

1) 잔류응력에 의한 응력확대계수 계산

두께에 따른 잔류응력 분포는 표면으로부터 깊이 의 함수로서의 형태로 표시 되었고, 균열크기 에 대한 응력확대계수를 얻기 위한 적분시 가중함수법이 이용되어

진다.

$$K(a) = \int_0^a \sigma^r(x) w(a, x) dx \quad (1)$$

여기서 $w(a, x)$ 는 가중함수로서 다양한 배관과 압력용기의 용접 형상들에 대하여 개발되어져 있다.

상세한 유한요소 잔류응력 해석으로부터 얻어진 잔류응력 분포 $\sigma^r(x)$ 는 Fig. 3에 제시된 바와 같이 막 응력성분 σ_m^r , 굽힘 응력성분 σ_b^r 과 응력확대계수의 용이한 계산을 위한 자기 평형 성분(self-equilibrating component) $\sigma_{s.e}^r$ 로 분해할 수 있다. 세가지 응력성분들은 다음 아래와 같이 수식들로 표현되어진다.

$$\begin{aligned} \sigma_m^r &= \frac{1}{t} \int_0^t \sigma^r(x) dx \\ \sigma_b^r &= \frac{6}{t} \int_0^t \sigma^r(x) \left(\frac{t}{2} - x\right) dx \\ \sigma_{s.e}^r &= \sigma^r(x) - \sigma_m^r - \sigma_b^r \left(1 - \frac{2x}{t}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

식(1)의 응력확대계수는 식(2)를 통해 얻어진 잔류응력 성분들과 단순 판에 대한 가중함수 $w_p(x)$ 를 이용하여 다음 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$K(a) = \int_0^a \left\{ \sigma_m^r + \sigma_b^r \left(1 - \frac{2x}{t}\right) + \sigma_{s.e}^r(x) \right\} \cdot w_p(a, x) dx \quad (3)$$

또는

$$K(a) = K_m(a/t) + K_b(a/t) + K_{s.e}(a/t) \quad (4)$$

식(2)에 제시된 잔류응력의 세가지 성분들이 주어진 용접형상에 대한 용접 잔류응력의 기하학적 영향을 완전히 포함하고 있으며 응력확대계수가 단순 판에 대한 동일한 가중함수를 사용하여 계산되어질 수 있다는 점에서 식(3)은 매우 중요한 의미를 갖는다.

대부분 적용에 있어서,은 용접 동안에 심한 구속조건이 없다면 무시될 수 있다. 굽힘 형태 분포는에 의해서 지배될 것이고 반면에 자기 평형 형태 분포는 식(2)와 같이 잔류응력을 각 성분들로 분해시 에 의해 지배된다.

응력확대계수 계산시 잔류응력이 미치는 영향을 고찰해 보기 위해 Fig. 4와 같이 간단한 순수 굽힘 형태($\sigma_b^r=206.84\text{MPa}$)의 잔류응력 작용 경우에 대해 세가지 방법들을 이용하여 응력확대계수를 계산하고 비교하고자 한다. 단일 균열 시편에 대한 가중함수 또는 동일 시편에 대한 핸드북상의 응력확대계수 계산식을 이용한다면, 응력확대계수의 계산치는 0,2보다 큰 a/t 에 대해 급격히 증가하는 하중제어 양상을 나타낸다. 이러한 방법들에서는 응력상태가 균열 크기에 대해 일정한 것으로 가정된다. 그러나 굽힘 형태의 잔류응력 분포는 Fig. 4와 같이 삼차원 유한요소 교호법(FEAM : finite element alternating method)을

이용하여 균열의 진전에 따른 잔류응력의 재분배를 모사할 수 있으며 응력확대계수는 $a/t=0.02$ 근처에서 최대값을 나타내다가 감소한다. 변위제어조건에 근거하는 가중함수의 사용은 유한요소 교호법의 경우와 거의 동일한 결과를 도출해 낸다.

굽힘 형태와 자기 평형 형태의 잔류응력 분포가 응력확대계수에 미치는 영향은 Fig. 5에서 제시하고 있다. 두가지 형태의 최대 잔류응력 값은 30ksi로 동일하나, 예상한 바와 같이 굽힘 요소가 자기 평형 요소보다 응력확대계수에 대해 더 큰 영향을 미친다. 또한, 그림 3에서 보이는 바와 같이 자기 평형 형태에 대한 응력확대계수는 약 0.3보다 작은 a/t 내에서만 양의 값을 나타내므로 균열 진전 거동에 대한 자기 평형 형태의 영향은 약 0.3보다 작은 a/t 내에서만 의미를 가진다는 것을 알 수 있다.

2) 응력확대계수에 대한 잔류응력의 영향

Fig. 6과 같은 실제적인 잔류응력 분포를 고려한다면, 응력확대계수에 대한 상세한 잔류응력 분포의 영향이 정량화될 수 있으며, 잔류응력 평가시 요구조건들이 응력확대계수와 관련하여 도출되어질 수 있다.

응력확대계수를 계산하기 위해 우선 굽힘 형태의 축방향 잔류응력이 작용하는 원주방향(girth) 용접부가 고려되어진다. 식(2)에 표현된 잔류응력 성분 분해절차를 통해 A-A 선상의 잔류응력 분포는 막 응력, 굽힘 응력 및 자기 평형 응력 성분들로 Fig. 7(a)와 같이 분리될 수 있다. 막 응력 성분은 무시할 만한 크기이므로 그림 4(b)에 나타내지 않았다. 모재의 항복강도 37ksi 보다 큰 최대응력을 가지는 굽힘 응력 성분이 지배적인 성분이며 내부표면에서 최대값이 발생한다. 또한 자기평형 성분은 5ksi보다 작은 최대응력을 가진다. 굽힘과 자기 평형 응력 성분들에 기인하는 응력확대계수는 식(3)을 이용하여 Fig. 7(b)와 같이 a/t 의 함수로서 도출되어진다. Fig. 7(b)에서 보이는 바와 같이, 응력확대계수에 대한 자기 평형 성분의 영향은 미약하며 응력확대계수에 대한 굽힘 응력 성분의 영향이 지배적임을 알 수 있다. 운전하중과 잔류응력 사이의 상호작용을 증명하기 위해, 10ksi의 균등한 막 응력이 배관 축방향을 따라 작용한다고 가정되어진다. Fig. 7(b)에 10ksi의 운전 막 응력이 작용하는 경우의 응력확대계수를 제시하고 있다. 전체 응력확대계수(운전하중과 잔류응력에 의한 응력확대계수의 합)와 운전하중에 의한 응력확대계수의 비교를 통해 대부분의 균열 길이 범위에 걸쳐서 전체 응력확대계수에 미치는 잔류응력의 영향이 중요함을 알 수 있다.

자기 평형 성분이 응력확대계수에 미치는 영향이 미약하다는 사실과 자기 평형 성분은 많은 용접 패스와 국부적인 미세조직 변화에 기인한다는 사실로부터 사용중 적합성 평가를 위한 단순화된 잔류응력 해석절차 개발이 가능하다는 것을 예상할 수 있다. 보일러 압력용기 보수용접은 이러한 예상을 구체화하기 위해 이용되어진다. 유한요소 모델로 예측되고 실험으로 검증된 보일러 압력용기 보수용접에 대한 두께 방향으로의 잔류응력 분포가 Fig. 8(a)에 제시되고 있다. Fig. 8(a)로부터 잔류응력 분포는 복잡한 높은 차수의 국부적 변이(high order local variation)를 가지는 굽힘이 지배적인 굽힘 형태임을 알 수 있다. Fig. 8(a)에서 보이는 바와 같이, 식(2)를 이용하여 각각의 성분들로 분해된 잔류응력 성분들 중 막 응력 성분은 무시될 만큼 작은 크기이며 굽힘응력 성분이 지배적임을 알 수 있다. 또한, 자기평형 성분은 많은 용접패스를 필요로 하는 보수용접의

특성에 기인하여 많은 싸이클 변화를 보여준다. 이러한 잔류응력 분포에 상응하는 응력확대계수 계산치가 Fig. 8(b)에 제시되고 있다. Fig. 8(b)로부터 자기 평형 성분은 국부적인 차원에서 응력확대계수에 영향을 미칠 뿐임을 알 수 있다.

3) 잔류응력 해석 요구조건

용접 잔류응력은 매우 복잡한 열적, 재료적, 결합된 열-기계 역학적 과정이며 잔류응력의 이용 목적이 구체화된 후 잔류응력 해석절차의 정확성 및 정밀성에 대한 요구조건이 결정되어질 수 있다.

잔류응력에 대한 깊이있는 이해를 위해, 상세한 용융 형상, 미세조직과 변태 소성(transformation plasticity) 및 템퍼링 효과(tempering effect) 등에 대한 평가가 필요하나, 사용중 적합성 평가를 위해서는 응력확대계수에 미약한 영향을 미치는 자기 평형 형태의 잔류응력을 야기시키는 이러한 상세 잔류응력 평가를 굳이 수행할 필요는 없다. 따라서 사용중 적합성 평가용 잔류응력 해석절차는 매우 간소화되어질 수 있으며 복잡한 용접형상의 해석을 가능케 해준다.

사용자 적합성 평가를 위해서는 다음 아래와 같은 잔류응력 해석시 요구조건들이 압력 용기/배관의 재질과 형상에 대해 적절하게 적용되어야 한다.

- 잔류응력 해석절차는 Fig. 3에서 보여진 자기 평형 성분의 1차 함수꼴을 만족시킬 수 있어야 한다. 해석절차가 정밀해 질수록 상세한 패스간 상호작용, 즉, 국부적 물성치 변화와 미세조직 효과 등은 작은 크기를 가지는 자기 평형 성분에 대해 보다 높은 차수 변이를 야기시킬 뿐이다. Fig. 7과 8로부터 자기 평형 성분의 추가적인 높은 차수 변이들은 응력확대계수에 큰 영향을 미치지 않음을 명확하게 보여준다.
- 실제적인 문제로서, Fig. 8(a) 상의 자기 평형 잔류응력 성분은 6차 이하의 다항식으로 표현할 수 없으며 대부분의 응력확대계수 계산식에서 고려되어질 수 있는 최대 차수는 4차까지이다. 실제적으로 응력확대계수는 낮은 차수의 평형 등가 분포로 개략화되어질 수 있다. Fig. 8(a)에 나타난 자기 평형 성분에 대해 자기 평형 조건을 부가함으로써 낮은 차수의 표현들을 Fig. 9(a)와 같이 나타낼 수 있다. 결과적인 응력확대계수 계산치를 나타낸 Fig. 9(b)로부터 2차 까지만 고려하여도 a/t 의 함수로써 응력확대계수를 충분히 표현할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 개략화 계산과 정밀한 유한요소 해석 사이의 차이는 용접부 파괴거동에 어떤 주목할 만한 영향도 줄 수 없는 매우 국부적 단계에서만 발생한다. 따라서 자기 평형 조건이 적절히 부가된다면 2차(사인 곡선) 함수로의 가정을 통한 계산이 응력확대계수 계산에 적합할 것이다.
- 자기평형이 지배적인 잔류응력 분포의 경우에도 식(2)에 의해 막응력 성분과 굽힘 응력 성분이 적절히 분리되어지기만 한다면 2차 함수로의 가정은 타당하다. 이러한 가정의 타당성을 증명하기 위해 원주방향 용접부의 잔류응력 분포(2)가 Fig. 10과 같이 이용되어진다. Fig. 10으로부터 막 응력 성분과 굽힘 응력 성분은 무시할 수 있음을 보여준다. Fig. 10(b)에서 보이는 바와 같이 응력확대계수는 2차 다항식을 가지는 자기 평형 성분에 의해 충분히 얻어질 수 있다.

다. 결 론

사용중 적합성 평가의 목적으로 잔류응력 해석절차가 검토 개발되어졌다. 용접 잔류응력 발생기구의 복잡성에 기인하여 수치해석 절차는 잔류응력 정보를 실제적으로 이용하는 방법에 종속적으로 변화되어진다. 본 연구는 파괴역학 요구조건들로부터 잔류응력 해석시 요구되는 정밀도와잔류응력의 유효한 처리까지의 일관된 체계를 제공한다. 주요한 관찰과 결론을 얻기 위해 상세한 몇몇 예들이 제시되어졌으며 최종적으로 사용중 적합성 평가를 위한 잔류응력 해석절차가 제시되어졌다.

2. Battelle Weld JIP

압력용기 및 배관 등 용접 구조물에서 피로파괴는 주로 응력이 집중되는 용접 연결부에서 발생된다고 보고되고 있고 있다. 그러나 ASME B&PV Code, Section III 및 Section VIII에서는 피로설계시 용접 연결부를 직접적으로 고려하지 않고 있으며, 용접부가 포함되지 않은 모재 시편에 대한 30여년 이전의 피로실험을 통해 개발된 S-N 설계선도를 사용하고 있다. 용접 연결부의 특성을 간접적으로 고려하기 위해 Class 1 압력기기 경우 모재 시편으로 구해진 S-N 설계선도와 비교를 통해 적절히 결정된 피로강도 감소 계수(FSRF : fatigue strength reduction factor)를 도입하여 용접 연결부의 감소된 피로강도가 고려되어진다. 또한 Class 1 배관에 대해서는, Jaske, Hechmer와 Kuhn에 의해 논의된 바와 같이 피로설계를 위한 응력세기(stress intensities)를 계산할 때 용접부의 응력집중 효과를 설명하기 위해 응력지수(stress indices)를 이용한다. 그러나 용접 연결부의 기하학적 구속조건 때문에 구조응력(structural stress)을 계산하기 위한 유한요소 해석시 유한요소 형상이나 분포에 민감한 결과를 초래하며 용접부에 대한 피로실험 결과 매우 큰 산포도를 보인다. 이러한 이유로 용접 구조물에 대한 피로평가 절차를 개선하고자 하는 관심이 높아지고 있다.

따라서 본 연구에서는 압력용기 및 배관 용접부 피로평가지 기술적으로 개선되어야 할 절차를 제시하고 개선된 절차에 따라 이용하여 평가하였다. 평가결과를 토대로 용접부 피로수명을 신뢰성 있게 결정할 수 있는 통합 피로선도 작성 근거를 제공하였다.

가. 유한요소 망 크기에 둔감한 해석 절차개발

최근들어 유한요소 망(mesh) 크기에 영향을 받지 않는 구조적 응력 해석절차를 개발하는 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되고 있다. Barsom 및 Jaske에 따르면 용접 토우부(toe)에서는 고유 응력 특이성으로 인해 기존 유한요소 해석방법으로는 응력집중계수(SCF: stress concentration factor)를 직접적으로 계산할 수 없다고 제시하고 있다. 그 대신, 국제 용접 기구(IIW)에서 권장하고 있는 핫 스팟 응력(hot-spot stress) 또는 구조응력 외삽(extrapolation) 절차가 수년 동안 사용되고 있다. 이러한 외삽 절차는 유럽 압력용기 코드에서도 채택되어 압력용기 및 배관의 용접부 설계시 사용되고 있다. 그러나 최근의 Dong등의 연구에 따르면, 핫 스팟 응력 외삽절차를 사용해 결정된 응력값은 유한요소 망 크기에 따라 매우 민감하게 변화하는 문제가 발생한다. 따라서 구조응력 계산치가 유한요소 망 크기에 민감하지 않도록 새로운 구조응력 개념을 도입한 범용적인 구조응력 해석절차를 아래와 같이 개발 이용하였다.

1) 솔리드(solid) 모델

Fig.1과 같이, T형 필렛 용접 토우에서의 응력분포는 용접 토우부 끝단에서 최대이며 두께 방향으로 단순 감소하는 분포를 보인다.

기존 유한요소 방법에 의하면, 용접 토우부에서 일정거리 내에서의 응력분포는 유한요소 망 크기에 따라 급격히 변화될 수 있다. Fig.2는 기존 방법에 따른 구조응력의 정적 평형 분포를 나타낸 것으로 식 (1)과 같이 막응력(membrane stress) σ_m 과 굽힘응력(bending stress) σ_b 로 구분된다.

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b \quad (1)$$

여기서 수직 구조응력 성분 σ_s 는 Fig.1의 단면 A-A와 같이 관심 지역에서의 응력을 의미한다. 이때 횡전단응력(transverse shear stress) τ_m 을 고려하지 않았으며, 원격 하중에 의해 매우 큰 횡전단응력이 용접 토우에 발생된다면 횡전단응력은 균열선과 경도를 결정하는데 매우 중요한 역할을 수행할 것이다.

Fig.1의 단면 B-B는 두번째 참조평면(second reference plane)으로 단면 B-B에서의 국부적 수직/ 전단응력은 유한요소해석을 통해 직접 계산할 수 있다. 거리 δ 는 단면 A-A와 B-B간의 이격거리를 의미한다. 편의상 행 방향으로 동일 길이 δ 를 갖는 유한요소 모델을 사용하였다. 단면 A-A와 B-B 사이에 평형조건을 부여하면 구조응력인 σ_m 및 σ_b 는 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_x(y) dy \quad (2)$$

$$\sigma_m \frac{t}{2} + \sigma_b \frac{t^2}{6} = \int_0^t \sigma_x(y) y dy + \delta \int_0^t \tau_{xy}(y) dy \quad (3)$$

여기서 식 (2)는 x 방향으로의 힘 평형을 의미하며 식 (3)은 모멘트 평형을 의미한다. 식 (3)의 우측 항은 구조응력의 정의상 가장 중요한 항목인 횡전단력을 의미한다.

만약 유한요소 망 크기가 매우 작다면 식 (3)의 횡전단력 항목이 무시될 수 있어서 식 (2)와 (3)에서의 σ_m 및 σ_b 는 Fig.1의 단면 A-A에서 직접 평가될 수 있다. 또한, 이격거리 δ 의 이용으로 인해 유한요소 망 크기가 두께 방향으로 한 개의 요소만을 가질 정도로 커져도 수식 상으로는 이격거리가 작은 경우와 동일하게 구조적 응력을 결정할 수 있다. 그러나 유한요소 망 크기가 커지면 전단 구속(shear locking)이 발생하므로 유한요소 해석시 감소 적분법(reduced integration method)을 사용하여 계산하여야 한다.

2) 겹침 이음부(lap fillet joint) 해석

상술한 구조응력 해석절차를 사용하여 Fig.3과 같은 겹침 이음부에 대하여 6가지 유형의 모델에 대해 상용 유한요소 패키지인 ABAQUS를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. Fig.4는 본 형상에 대하여 유한요소 망 크기에 따른 SCF를 비교하기 위해 작성된 8 절점 유한요소모델들 중 2가지를 나타낸 것이다.

또한, 용접 토우에서의 유한요소 망 크기에 따라 수행한 해석결과를 Fig.5에 제시하였다. Fig.5에서 보듯이 요소 크기 a/b 는 $0.16t/0.1t(\delta = 0.16t)$ 에서 $2t/1t(\delta = 2t)$ 까지 변화하여도 용접 토우에서의 SCF는 거의 동일하다. Fig.5로부터 유한요소 망 크기에 구조응력 값이 민감하지 않음을 알 수 있으며, 이를 토대로 본 절차를 통해 계산된 구조응력은 주어진 형상 및 경계조건에 대해 고유 응력 매개변수로 사용되어질 수 있다. 또한, 형상이 유사한 조인트에 대한 셸(shell)/판(plate) 유한요소 모델에 대해서도 유사한 구조응력이 예상된다.

3) 셸/판 유한요소 모델

솔리드 모델에서와 동일한 방법으로 Fig.6의 단면 B-B에서의 힘과 모멘트가 단면 A-A에서의 구조응력을 계산하기 위해 사용되었다.

각 절점에서는 6개의 자유도를 갖는 식 (4)와 같은 구조응력 계산식을 이용하였다.

$$\sigma_s = \sigma_m + \sigma_b = \frac{f_{x'}}{t} + \frac{6(m_{y'} + \delta f_{z'})}{t^2} \quad (4)$$

여기서 글로벌(global) 좌표계(x, y, z)를 사용한다면, 응력은 구조응력을 계산하기 위해 식 (4)를 사용하기 전 국부 좌표계(x', y', z')로 변환되어야 한다.

Fig.7은 셸 및 솔리드 모델에 따른 SCF의 차이, 2차원 및 3차원 모델에 따른 SCF 차이를 계산한 결과이다. Fig.7에서 보듯이 각 방법에 무관하게 거의 일정한 값을 보이고 있다. 2차원 모델의 경우 자유단 효과(free edge effect)가 고려되지 않기 때문에 다른 방법에 의한 것보다 약간 작은 경향을 보인다.

나. 통합 S-N 선도 접근

서로 다른 하중 조건하에서 다양한 연결부 형상, 용접 형상, 두께에 따라 다수의 S-N 데이터가 존재한다. 이러한 S-N 데이터의 산포도를 줄이고 통합시키기 위해 2.1절에서 제시한 구조응력 해석절차를 이용하고자 한다. 이의 일환으로서 기존 연구들로부터 취합한 다양한 용접부에 대한 S-N 선도 데이터를 각각 공칭응력(nominal stress) 진폭과 구조응력 진폭을 이용하여 Fig.8(a)와 (b)에 각각 제시하였다. Fig.8로부터 공칭응력의 경우에 비하여 구조응력의 경우가 산포도가 훨씬 줄어들으나 아직 통합 S-N 선도로서 사용하기에는 충분치 못함을 알 수 있다.

이러한 기존의 S-N 선도 데이터는 균열 발생이 아니라 최종 파단 또는 누설을 파손기준으로 설정하여 도출되었을 뿐만 아니라 두께 및 하중조건(순수전단 및 순수굽힘)에 따라 균열 성장 거동에 큰 차이를 보이므로 유한요소 망에 둔감한 구조응력 해석절차를 사용하여도 응력 근거 매개변수(stress based parameter)인 구조응력은 용접부 피로거동을 효과적으로 설명할 수 없다.

따라서 균열 성장 거동을 효과적으로 묘사할 수 있는 응력확대계수(SIF: stress intensity factor)진폭인 ΔK 를 유한요소 망에 둔감한 구조응력을 사용하여 계산한다면 S-N 데이터를 효과적으로 통합시킬 수 있을 것이다.

이러한 균열 성장에 대해 수정된 Paris law는 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C(M_{kn})^n (\Delta K)^m \quad (5)$$

$$M_{kn} = \frac{K_{notch}(\text{with local notch effects})}{K_n(\text{based on } \sigma_m \text{ and } \sigma_b)} \quad (6)$$

$$\Delta K = \Delta\sigma_m f_m\left(\frac{a}{t}\right) + \Delta\sigma_b f_b\left(\frac{a}{t}\right) \quad (7)$$

여기서 m 은 Paris law의 지수, n 은 짧은 균열($a/t < 0.1$)의 성장 거동을 특징짓는 지수, a 는 균열길이, M_{kn} 은 a/t 의 무차원 함수로 노치(notch) 효과를 나타내며 a/t 가 0.1에 도달하면 급격히 사라진다. $f_m(a/t)$ 와 $f_b(a/t)$ 는 응력확대계수 진폭에 미치는 각각 막응력 진폭 $\Delta\sigma_m$ 과 굽힘응력 진폭 $\Delta\sigma_b$ 에 의한 응력확대계수의 무차원 함수들이다.

과파기구에 근거하여 최종 파단에 도달하는 수명의 예측은 식 (8)에 의해 표시된다.

$$N = \int_0^{a_f} \frac{da}{C(M_{kn})^n (\Delta K)^m} \quad (8)$$

식 (8)은 적분시에 민감하지 않으므로 식 (9)와 같이 재작성될 수 있다.

$$N = \frac{1}{C} t^{1-m/2} (\Delta\sigma_s)^{-m} I(r) \quad (9)$$

여기서 r 은 구조응력 진폭에 대한 굽힘응력 진폭의 비이고 $I(r)$ 은 r 에 대한 무차원 함수이며 식 (10)과 같이 표현된다.

$$I(r) = \int_0^1 \frac{d(a/t)}{[f_m(a/t) - r\{f_m(a/t) - f_b(a/t)\}]^m} \quad (10)$$

Fig.9는 함수 분포를 나타낸 것으로 하중 제어 조건(load controlled condition)과 변위 제어 조건(displacement controlled conditions)에 따라 각기 다른 분포 양상을 보인다.

식 (9)의 $I(r)$ 을 알고있다면 $\Delta\sigma_s$ 에 대해 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\sigma_s = C^{-1/m} t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m} N^{-1/m} \quad (11)$$

또한 식 (11)을 등가 구조응력(equivalent structural stress)으로 식 (12)와 같이 전환하여 S-N 선도의 형태를 취할 수 있다.

$$\Delta S_s = \frac{\Delta\sigma_s}{t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m}} = C^{-1/m} N^{-1/m} \quad (12)$$

Fig.10은 Fig.8의 S-N 데이터를 식 (12)를 통해 나타낸 것으로 구조응력 진폭을 이용한

Fig.8(b)의 경우보다 산포도가 대폭 줄어들었음을 알 수 있다. 여기서 $m=3.6$ 은 용접부 없는 노치 시편들에 대한 균열 성장 데이터로부터 결정되어진 것이다. Fig.10으로부터 유한요소 망에 둔감한 구조응력 해석 절차와 응력확대계수 진폭을 이용한다면 두께, 용접부 형상 및 하중조건 등에 무관한 통합 S-N 선도를 도출할 수 있음을 알 수 있다

식 (12)의 등가 구조응력 진폭을 공칭응력 진폭 $\Delta\sigma_n$ 과 SCF를 이용 변환하면 식(13)과 같이 표현된다.

$$\Delta S_s = \frac{SCF_{ss}\Delta\sigma_n}{t^{(2-m)/2m}I(r)^{1/m}} \quad (13)$$

여기서 SCF_{ss} 는 구조응력에 근거한 SCF이다.

다. 통합 S-N 선도 도출/ASME Code와의 비교

통합 S-N 선도를 도출하는데 있어서 유한요소 망에 둔감한 유한요소 해석절차와 통합 S-N 선도 접근 절차를 이용한다면, ASME B&PV Code의 FSRF 규칙과 관련된 용접부 S-N 데이터를 다음 아래와 같이 재평가할 수 있다.

공칭응력 진폭을 이용한 배관 용접부의 S-N 데이터가 Fig.11(a)에 제시되고 있다. Fig.11에는 Fig.8과 10에 제시된 판 용접부에 대한 몇몇 S-N 선도 데이터가 포함되어지고 있다. 속 빈 기호들은 다양한 용접부 연결부와 하중조건들에서의 판 용접부 데이터를 나타내는 반면, 속 찬 기호들은 ASME 피로설계규칙과 직접적으로 관련되는 배관용접부 데이터를 의미한다. 예측했던 바와 같이 폭 넓은 산포도를 보임을 알 수 있다. 또한, Fig.11(b)는 Fig.11(a)와 동일한 데이터에 대해 구조응력 진폭을 이용하여 제시한 것으로서 10^2-10^7 사이클 사이에서 폭 좁은 산포도를 보인다.

Fig.12는 등가 구조응력 진폭과 $m=3.6$ 을 이용하여 변위 제어 조건과 하중 제어 조건에 대해 S-N 데이터를 정리 제시한 것이다. Fig.11(b)와 Fig.12 사이의 차이가 Fig.8(b)와 Fig.10 사이의 차이만큼 크지는 않지만, S-N 데이터의 향상된 통합화를 보여준다. Fig.12에서 제시된 폭 좁은 산포도를 나타내는 S-N 데이터로부터 응력 집중 효과를 내재시킨 등가 구조응력은 데이터를 잘 통합시켜 통합 S-N 선도를 도출할 수 있음을 알 수 있다.

일관된 어떠한 기계역학 근거 하에서도 ASME B&PV Code에 제시된 FSRF와 참조 평균 피로선도(reference mean fatigue curve)를 이용하여 용접부 피로선도를 도출할 수 없으므로 ASME B&PV Code에 제시된 FSRF는 경험적인 매개변수이다. ASME B&PV Code 상의 피로설계선도는 오랜 기간에 걸쳐 신뢰성있는 피로설계를 제공하였지만, 이러한 신뢰성 확보는 매우 높은 FSRF 값에 기인하는 과도한 보수성때문이다. 예로서, Jaske가 논의한 바와 같이, 노즐 필렛(fillet) 용접부는 ASME B&PV Code 상에서 약 4의 값을 갖는다. 전체 응력 집중 효과(global stress concentration effect)를 직접적으로 고려한다면, 선형 탄성내에서도 4.0보다 작은 전체 응력집중계수를 얻으며 식 (13)에서 제시한 SCF_{ss} 는 대체로 몇몇 용접부를 제외하고 2.0에 접근하고 있다. 즉, ASME B&PV Code에 제시된 FSRF는 과도한 보수성을 가지고 있다.

ASME B&PV Code에 제시된 보수성이 과도한 경험적 접근법에 비하여 본 논문에서 제시한 접근법은 ASME B&PV Code에서 제시된 FSRF를 고려할 필요가 없는 보수성이 완화된 효율적인 방법이다. 즉, Fig.12로부터 등가 구조응력 매개변수를 안다면 경험적인 응력증대계수(stress intensification factor) 또는 FSRF는 더 이상 피로평가지 필요하지 않음을 알 수 있다.

만약 FSRF를 정량화하고자 한다면, 특정 연결부 형태 및 하중 조건에 대해 FSRF 또는 응력증대계수를 보편적이고 일관된 체계 하에서 정의할 수 있다는 생각으로부터 식 (13)을 이용하여 FSRF는 식 (14)와 같이 표현되어진다.

$$FSRF_{ss} = \frac{SCF_{ss}}{t^{(2-m)/2m} I(r)^{1/m}} \quad (14)$$

여기서 $FSRF_{ss}$ 는 구조응력 정의에 근거한 피로강도 감소계수이다.

라. 결론

본 연구에서는 유한요소 망 크기에 둔감하고 파괴역학에 근거한 구조응력 매개변수를 이용한 통합 S-N 선도 접근절차를 제시하였고 다양한 용접부에 대해 적용하였다. 도출된 결론은 다음과 같다.

- 유한요소 망 크기에 둔감한 구조응력 해석절차는 용접 연결부의 피로거동에 미치는 응력집중 효과를 효과적으로 고려할 수 있다.
- 파괴역학에 근거한 구조응력 매개변수를 이용함으로써 다양한 용접부들에 대해 통합 S-N 선도를 도출할 수 있다.
- 통합 S-N 선도를 도출함으로써 과도한 보수성을 가지는 ASME B&PV Code 상의 경험적 FSRF를 이용할 필요가 없어지며 본 접근절차를 통해 보다 보편적이고 일관되게 FSRF를 정의할 수 있다.

특정연구개발사업 연구결과 활용계획서

사업명	중사업명	특정연구개발사업		
	세부사업명	국가지정연구실 사업		
과제명	주기적안전성평가 시행을 위한 원전설비 용접부 건전성평가 기술 개발			
연구기관	한국전력기술(주)	연구책임자	진태은	
총연구기간	2000년 6월 14일 ~ 2005년 6월 13일 (60개월)			
총 연구비 (단위 : 천원)	정부출연금	민간부담금	합계	
	358,404	427,565	785,969	
기술분야	원자력			
참여기업	-			
공동연구기관	-			
위탁연구기관	1. 선문대학교 2. 서울산업대 3. 아이원(주)			
연구결과활용 (해당항목에(v)표시)	1.기업화()	2.기술이전(v)	3.후속연구추진 (v)	4.타사업에 활용(v)
	5.선행 및 기초 연구()	6.기타목적활용 (교육,연구)(v)	7.활용중단 (미활용)()	8.기타()

특정연구개발사업 처리규정 제 31조(연구개발결과의 보고) 제 2항에 의거 연구결과 활용계획서를 제출합니다.

첨부 : 1. 연구결과 활용계획서 1부
2. 기술요약서 1부

2002년 6월 13일

연구책임자 : 진 태 은 (인)

연구기관장 : 박 용 택 (직인)

과학기술부장관 귀하

연구결과 활용계획서

1. 연구목표 및 내용

본 연구의 최종 목표인 원전설비의 안전 설계, 운영 및 보수에 활용될 수 있는 국내 미자립 용접부 건전성평가 핵심기술을 개발하기 위해 우선적으로 원전설비 용접부 건전성 평가용 상세 연구계획을 수립하고 이를 토대로 실제 용접 현상을 고려한 용접부의 금속 조직/성분 변화를 예측하는 기술과 잔류응력을 해석하는 기술을 개발

2. 연구수행결과 현황

가. 특허(실용신안) 등 자료목록

해당사항 없음.

나. 프로그램 등록목록

해당사항 없음.

다. 노하우 내역

- 용접 과정 동안 용접부의 금속 조직/성분 변화 메커니즘을 파악하여 원전설비 용접부의 열영향부에 발생하는 국부 취약부 위치를 예측하고 국부 취약부의 기계적 물성 저하를 억제할 수 있는 노하우를 확보하였음.
- 용접 과정 동안 발생하는 상변태 변형률과 어닐링 변형률을 고려하는 재료거동 관련 사용자 정의 보조프로그램을 개발함으로써 보다 정확한 잔류응력 분포를 계산할 수 있는 노하우를 확보하였음.
- 후열처리 최고온도, 두께 등 후열처리 변수들에 따른 잔류응력 이완기구를 고찰함으로써 후열처리 최고온도 지속시간을 단축시키고 두께/초기 잔류응력 크기/ramp up 시간에 무관하게 적용될 수 있는 일관되고 효율적인 잔류응력 완화방안을 도출할 수 있는 노하우를 확보하였음.
- 온도/농도/응력/전압 구배에 종속적인 수소 확산 메커니즘을 파악하여 수소확산에 미치는 모든 영향을 고려한 수소기인균열 해석 노하우와 기존 수소제거 목적 후열처리를 대체하고 탬퍼 비드 보수 용접부의 비파괴 검사 대기시간을 단축/삭제할 수 있는 노하우를 확보하였음.

라. 발생품 및 시작품 내역

- 단순 시편에 수소기인균열 완화방안으로 적용할 수 있는 기초적인 전기전송 처리를 위한 고전류(최고 500A)를 시편에 접촉 공급하는 시작품을 개발하였음.
- 이러한 시작품을 단순 형상의 시편에 적용시 수소 제거 성능을 검증하였음.

마. 논문게재 및 발표실적

○ 논문게재 실적

학술지 명칭	제 목	년도	호	발행기관	국명	SCI 여부
Key Engineering Materials	A study on the integrity evaluation for PWR vessel by pressurized thermal shock	2000	Vol. 183-187	Trans Tech Publications	Switzerland	0
Key Engineering Materials	A parametric study on the fracture mechanics analysis of elbow with surface crack	2000	Vol. 183-187	Trans Tech Publications	Switzerland	0
Metals and Materials	A study on the modeling of parameters affecting the IR drop mechanism in the initiation stage of crevice corrosion	2000	Vol. 6	대한금속학회	한국	SCIE
대한기계학회 논문집	균열이 존재하는 배관의 하중 지지능력 평가	2001	25 권 9 호	대한기계학회	한국	

○ 학술회의 발표 실적

학술회의명	제 목	년도	호	장 소	국명
The 3rd Int. Workshop on the Integrity of Nuclear Components	Calculation of residual stress during ERW by finite element analysis	2000	-	타이페이	대만
The 198th Int. Meeting of the Electrochemical Society	Effect of a sub-crack inside crevice on the crevice corrosion in the initiation stage	2000	-	피닉스	미국
1st Int. Workshop on Welding Integrity	Calculation of residual stress during ERW by finite element analysis	2000	-	용인	한국
Int. Conf. on Fatigue of Reactor Component	Mechanism of fatigue crack initiation in light water reactor coolant environments	2000	-	샌프란시스코	미국
ICG-EAC 2001	Development of integrated assessment methodology for PWSCC on welded parts of alloy 600 penetrations	2001	-	경주	한국
한국 원자력학회 춘계학술대회	주기적 안전성평가에서의 경년열화평가 방법론	2002	-	광주	한국
대한기계학회 춘계학술대회	가압열충격에 대한 원자로용기의 확률론적 파괴역학 해석 - 잔류 응력 및 파괴인성 곡선의 영향	2002	-	용평	한국
제 9 회 원전기기 건전성 W/S	안전 1, 2 등급 배관의 결함 평가	2002	-	제주	한국
제 2 회 파손방지 기술 산학연 연합회 Workshop	용접부 건전성 평가에 관한 검토	2002	-	서울대	한국

학술회의명	제 목	년도	호	장 소	국명
제 2 회 파손방지 기술 산학연 연합회 Workshop	저합금강 열영향부의 미세조직과 재료물성치에 대한 예측 프로그램 개발	2002	-	서울대	한국
제 2 회 파손방지 기술 산학연 연합회 Workshop	용접부 상의 수소기인균열에 대한 해석 모델 개발	2002	-	서울대	한국
제 7 회 원자력 안전기술 정보 회의	원전설비 용접부 잔류응력 해석 기술	2001	-	대전	한국
제 2 회 EAC-K Workshop	EAC 평가를 위한 용접부 잔류응력 해석 고찰	2001	-	부산	한국
제 3 회 용접부 건전성평가 연구회	원전설비 용접부 금속조직 예측 및 잔류응력해석	2001	-	용인	한국
제 3 회 용접부 건전성평가 연구회	1 차년도 연구결과 및 2 차년도 연구계획	2001	-	용인	한국
2001 년 원자력학회 추계학술대회	Estimation of Microstructures and Material Properties of HAZ in SA508 Reactor Pressure Vessel	2001	-	수원	한국
스테인리스강의 내식성과 향상기술 W/S	Effect of a sub-crack inside crevice on the crevice corrosion in the initiation stage	2001	-	연세대	한국
2001 년 대한기계학회 춘계학술대회	원자로 압력용기 원주방향 용접부의 잔류응력 해석	2001	-	제주	한국
2001 년 대한기계학회 춘계학술대회	원자로 압력용기 용접 열영향부의 미세조직 및 재료물성치 예측	2001	-	제주	한국
제 2 회 용접부 건전성평가 연구회	스테인리스강 배관 용접부의 잔류 응력해석 II (실계개발단 Bench-mark 결과)	2001	-	용인	한국
제 2 회 용접부 건전성평가 연구회	스테인리스강 배관 용접부의 잔류 응력해석 I (재료기술연구그룹 Benchmark 결과)	2001	-	용인	한국
제 2 회 용접부 건전성평가 연구회	SA508 Class3 용접부의 금속조직 예측 연구	2001	-	용인	한국
제 1 회 파손방지 기술 산학연 연합회 Workshop	용접부의 아임계 균열거동 및 구조적 건전성평가에 관한 기술 검토	2001	-	서울대	한국
제 1 회 파손방지 기술 산학연 연합회 Workshop	주기적안전성평가 시행을 위한 원전설비 용접부 건전성평가	2001	-	서울대	한국
제 1 회 파손방지 기술 산학연 연합회 Workshop	계산역학 적용을 통한 원전설비 용접부 상태 평가	2001	-	서울대	한국
제 1 회 용접부 건전성평가 연구회	국가지정연구실 연구현황 설명	2000	-	용인	한국

3. 연구성과 (기술이전 또는 기업화 완료)

년월	업체명	기술명	주요 내용
2002. 2	루마니아 체르노보다 원전	잔류응력 해석기술	○용접부 잔류응력 해석방법/절차 ○잔류응력 해석에 사용되는 각종 Code 기본 사용법

4. 기술이전 및 연구결과 활용계획

가. 당해단계 활용계획

- 상세 연구계획은 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석기술 개발에 활용
- 원전설비 용접부의 취약부위 결정에 금속조직 변화 예측/잔류응력 해석 기술 활용
- 대상기기 용접부 선정에 원전설비 용접부 일반 범주화 기법을 활용
- 이론적 온도해석 기법은 3차원 대형 용접 구조물의 온도해석에 활용
- 사용자 정의 보조 프로그램은 잔류응력에 미치는 상변태/어닐링 영향 고찰에 활용
- 금속조직 변화 예측/잔류응력 해석 기술은 완화방안 도출에 활용
- 수소기인균열 해석기술은 기존 수소제거 후열처리와 템퍼 비드 보수 용접부 비파괴 검사 대기시간 단축/삭제할 수 있는 전기전송 처리 방안 도출에 활용

나. 활용방법

- 그간 축적된 평가기술과 미자립 핵심분야 기술 개발을 통해 종합적인 용접부 건전성 평가 기술을 갖춘 산업체 연구그룹으로 발전
- 축적된 기술을 바탕으로 국내 원전설비의 건전성 및 수명연장 관련 각종 손상에 대한 과학적이고 체계적인 평가에 활용
- 국내 수행경험을 바탕으로 해외 원전의 건전성 및 수명 평가 사업을 적극적으로 추진
- 국내 기타 산업계에 대한 건전성 및 수명 평가 기술에 활용

다. 차년도 이후 활용계획

- 원전설비 용접부 손상평가 기술 개발의 입력자료로 활용
- 용접부 손상에 미치는 용접부의 금속조직 변화와 잔류응력의 영향 고찰에 활용
- 금속조직 변화/잔류응력 완화방안 적용을 통한 용접부 손상 완화방안 도출에 활용
- 판재 또는 배관 용접부에 적용 가능한 전기전송 처리 방안 도출에 활용

5. 기대효과

가. 기술적 측면

- 기기 안전성평가를 위한 체계적인 기술자립에 기여
 - 기확보하고 있는 용접부 상태 및 손상에 대한 개략화 평가 기술의 금속조직 변화 예측 및 잔류응력 해석 기술 개발 자립
 - 손상 평가기술을 실제 적용할 수 있는 산업체 전문 연구기관이 보유하는 체계 구축
- 세계적인 첨단 기술 확보를 통해 관련 분야 기술 선도에 기여
 - 해외 원전 선진국에서도 최근 활발한 연구가 수행중인 단계
- 실제 용접현상 재현을 통한 상태평가 및 실제 용접부 상태를 고려한 손상평가 기술 개발을 통하여 국내 금속, 기계 및 원자력 분야 기술향상 선도

나. 경제/산업적 측면

- 국내 기술개발시 현재 원전 한 호기당 40억원 규모의 평가비용에서 해외 자문비로 지출되는 10~15억원 규모의 외화절감이 예상되고 후속호기 고려시 추가 외화절감
- 안전성평가 기술 확보로 세계적 추세인 원전의 안전성 확보 설계/보수 및 건전성평가 용역 기술 수출의 경쟁력 확보
- 원자력, 수화력 및 일반 산업설비 등 타 분야 확대적용을 통한 건전성 확보에 기여
- 원전설비의 적절한 보수 및 안전성 관리를 통한 효율적 운영으로 원전의 경제성 향상에 기여

6. 문제점 및 건의사항

해당사항 없음.

기술요약서

■ 기술의 명칭

기술적 노화우, 신기술 등

■ 기술을 도출한 과제현황

과제관리번호	2000-N-NL-01-C-282			
과제명	주기적안전성평가 시행을 위한 원전설비 용접부 건전성평가 기술 개발			
사업명	특정연구개발사업			
세부사업명	국가지정연구실 사업			
연구기관	한국전력기술(주)	기관유형	산(대기업)	
참여기관(기업)	-			
총연구기간	2000. 6.14 - 2005. 6.13 (총 5년)			
총연구비	정부(358,404)천원 민간(427,565)천원 합계(785,969)천원			
연구책임자	성명	진 태 은	주민번호	
	근무기관 부서	재료기술연구그룹	E-mail	Jinte@kopec.co.kr
	직위/직급	그룹장	전화번호	031-289-4282
실무연락책임자	성명	김종성	소속/부서	재료기술연구그룹
	직위/직급	책임연구원	E-mail	kimjs@kopec.co.kr
	전화번호	031-289-4278	FAX	031-289-3189
	주소	(449-713) 경기 용인시 구성읍 마북리 360-9		

■ 기술의 주요내용

<p>[기술의 개요] 원전설비의 안전 설계, 운영 및 보수에 활용될 수 있는 국내 미자립 핵심기술인 실제 용접 현상을 고려한 원전설비 용접부의 금속 조직/성분 변화를 예측하고 잔류응력을 해석하는 기술</p> <p><기술적 특징> (1) 적용이 용이하고 경제적인 이론적/준경험적 접근 방법 이용 (2) 잠열 흡수, 다층 용접, 후열처리, 금속조직 변화 등 실제 용접 현상/과정을 고려한 선진성 (3) 개발기술의 적용결과가 손상평가 기술 개발, 설계 및 수명연장의 입력자료로써 활용되는 기반 기술성 (4) 원자력 분야 뿐만 아니라 화전/중화학 설비의 용접부 등 타 산업에도 적용 가능한 파급성</p> <p>[용도·이용분야] (1) 가동원전의 주기적안전성평가, 수명평가, 안전성 관리 및 효율적 운영 (2) 신규원전의 장수명화 설계 및 안전설계 (3) 수화력/일반 산업 설비 등의 안전설계, 수명평가, 안전성 관리 및 효율적 운영</p>

■ 기술의 분류

[기술코드] 519

[기술분야]

- 정보산업 기계설비 소재 정밀화학/공정 생명과학
 원자력 자원 에너지 항공/우주 해양
 교통 보건/의료 환경 기초/원천 기타

[기술의 활용유형]

- 신제품 개발 신공정 개발 기존제품 개선 기존공정 개선
 기타 (상기 내용 수행을 위한 수단 개발)

[기술의 용도]

- 기계설비 부품소자 원료재료 소프트웨어
 가공처리 기술 자동화기술 불량률 감소 등 현장애로기술
 제품설계기술 공정설계기술 기타()

■ 산업재산권 보유현황
해당사항 없음.

■ 기술이전 조건

이전형태	<input checked="" type="checkbox"/> 유상 <input type="checkbox"/> 무상	최저기술료	10,000 천원
이전방식	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input checked="" type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전 소요기간	1년 0개월	실용화예상시기	2005 년도
기술이전시 선행요건	○소프트웨어/하드웨어 등 전산 툴 사전 확보 필요 ○금속 열역학, 확산이론, 연속체 역학, 계산역학 등 기초지식 확보인력 필요		

■ 기술의 개발단계 및 수준

[기술의 완성도]

	① 기초, 탐색연구단계 : 특정용도를 위해 필요한 신 지식을 얻거나 기술적 가능성을 탐색하는 단계
✓	② 응용연구단계 : 기술적 가능성의 실증, 잠재적 실용화 가능성의 입증 등 실험실적 확인 단계
	③ 개발연구단계 : Prototype의 제작, Pilot Plant Test 등을 행하는 단계
	④ 기업화 준비단계 : 기업화에 필요한 양산화 기술 및 주변 기술까지도 확보하는 단계
	⑤ 상품화 완료단계

[기술의 수명주기]

	① 기술개념 정립기 : 기술의 잠재적 가능성만 있는 단계
	② 기술실험기 : 기술개발에 성공했으나 아직 실용성, 경제성 등이 확실치 않은 단계
	③ 기술적용 시작기 : 최초의 기술개발국에서만 활용되고 있는 단계
✓	④ 기술적용 성장기 : 기술개발국 및 일부 선진국에서 활용되고 있는 단계
	⑤ 기술적용 성숙기 : 선진국사이에서 활발한 기술이전이 일어나며, 기술의 표준화가 되어가는 단계
	⑥ 기술적용 쇠퇴기 : 선진국에서 개도국으로 기술이전이 활발하게 일어나고 선진국에서는 기술의 가치가 저하되나, 개도국에서는 아직 시장의 가치가 높은 기술

[기술발전 과정상의 기술수준]

	① 외국기술의 모방단계 : 이미 외국에서 개발된 기술의 복제, reverse Eng.
✓	② 외국기술의 소화·흡수단계 : 국내시장구조나 특성에 적합하게 적용시킴
	③ 외국기술의 개선·개량단계 : 성능이나 기능을 개선시킴
	④ 신기술의 혁신·발명단계 : 국내 최초로 개발

- 본 기술과 관련하여 추가로 확보되었거나 개발중인 기술 해당사항 없음.