

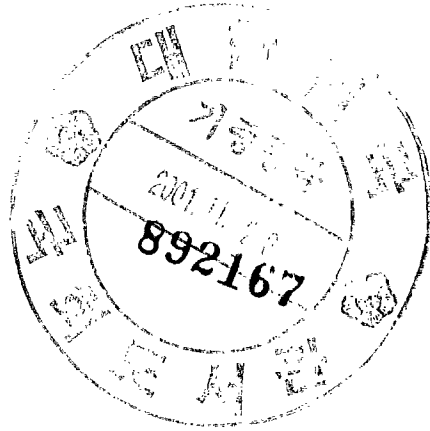
최종보고서

**Pb-Bi 냉각 액체금속로의
자연순환 능력 연구**

**Natural Circulation Characteristics
of a Pb-Bi Liquid Metal Cooled Reactor**

주관연구기관
서울대학교

과 학 기 술 부



제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀하

본 보고서를 “Pb-Bi 냉각 액체금속로의 자연순환 능력 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2001. 8. 31.

연 구 기 관 명 : 서울대학교

연 구 책 임 자 : 서 균 렬

연 구 원 : 주 호 성

“ : 이 승 동

요 약 문

I. 제 목

Pb-Bi 냉각 액체금속로의 자연순환 능력 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구는 미래 원자력 기술에서 핵심적 냉각재로 전망되는 Pb-Bi계 비활성 액체금속에 대한 기술 기반을 확립함으로써, 액체금속로 및 소멸처리로 등 첨단 원자력 설비의 개발을 체계적으로 지원하는데 그 목적이 있다.

지구 온난화 문제가 가시화되고 있는 실정에서 원자력의 역할이 점차적으로 중시되고 있다. 원자력의 취약점인 사용후 연료처분과 우라늄자원의 유한성을 극복할 수 있는 기술적 방안으로 액체금속로, 핵융합로, 미임계 소멸처리로 등이 제시되고 있다. 이러한 미래형 원자력 설비에서 액체금속 냉각재 기술은 장치의 성능 및 안전성 확보를 위해 핵심적 요소가 된다. 최근까지 주 액체금속으로 개발되어 왔던 Na은 화재 위험성이 지속적으로 문제시되어 사용 중단 위기를 맞고 있다. 반면, 러시아가 비밀리에 개발하여 해군 잠수함 추진에 성공한 Pb-Bi계 비활성 액체금속이 신기술로서 대두되고 있다. 미래형 원자력 설비의 개발을 위한 기반을 확립하기 위해서는 액체금속의 열수력학적인 특성을 연구할 필요가 있다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

비활성 액체금속 냉각재의 물성 자료를 수집하여 체계화하고 자연순환을 실험하기 위한 실험장치를 구성한다. 실험을 통하여 얻은 온도분포와 압력강하 수치들을 수계산 및 CFX 4.2 코드를 통한 해석결과와 비교하여 자연순환시 열제거 능력을 분석한다.

IV. 연구개발결과

예비해석을 통하여, 원형관의 직경이 클수록 난류 영역에 쉽게 도달하게 되고 좀 더 안전하게 실험을 할 수 있음을 확인하였다. CFX 4.2 코드를 이용하여 수계산으로 해석한 Pb-Bi의 자연순환 특성을 비교하였다. CFX 4.2에서 계산한 유속은 유로 형상에 따른 엘보우 효과를 고려한 수계산과 비슷하였다.

실험을 통해서 고온관과 저온관의 평균 온도 차이를 구할 수 있었고, 이를 이용하여 유속과 압력강하를 구하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통하여 수행하고자 하는 비인화성 액체금속을 이용한 고유 안전성과 경제성을 갖춘 차세대 액체금속로 개념 개발은 향후 국내에서 액체금속 실증로를 개발하고자 할 때 중요한 자료를 제공할 것이다. 또한 본 연구가 비활성 액체금속이 Na에 비하여 전반적으로 우수한 성능임이 판단될 경우, 현재의 액체금속로 연구에도 반영할 수 있을 것이다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Project Title

Natural Circulation Characteristics of a Pb-Bi Liquid Metal Cooled Reactor

II. Objective and Importance of the Project

The objectives of this project are to study the natural circulation characteristics of Pb-Bi based nonreactive liquid metal systems.

Nowadays, the nuclear energy has gained more attention as a clean energy having the least aggravating impact on the environment. On the other hand the waste management and the limitation on the uranium resources are among its shortcomings that ought to be resolved by adoption of a liquid metal reactor, a fusion reactor or an accelerator driven transmutation reactor for instance. The liquid Na, the principal coolant for the conventional fast reactors, is seen to be handicapped due to its vulnerability to fire. In these evolutionary nuclear energy systems, the Pb-Bi base inert liquid metal coolant technology has been regarded as an essential element to the functional efficiency and the safety. This study is concerned with thermo- and hydrodynamics of promising Pb-Bi eutectic liquid metal systems to pave the way to developing future nuclear energy systems.

III. Scope and Contents of the Project

The thermophysical properties of the liquid metal systems were compiled as databases and a test facility was constructed to study natural circulation

characteristics. The results from the experimental tests, such as temperature differences and pressure drop, were compared with analytical solutions from the first-principle calculation and CFX 4.2.

IV. Results

Results of the pre-analysis indicated that the natural circulation experiment can be performed over a wide range in the large pipe diameter. A three-dimensional computational fluid dynamics code, CFX 4.2, was applied to check on the result of the first-principle calculation. The velocity profiles determined by CFX 4.2 was found to be similar to those of the first-principle calculation method including the screwed elbow effect.

From the experiment, the average temperature difference between the hot leg and the cold leg could be measured. By utilizing this value, the flow velocity and pressure drop were calculated.

V. Proposal for Application

On the basis of this research, it is suggested to design the liquid metal coolant system which can be used in the future nuclear energy system.

The natural circulation capability of Pb-Bi investigated in this work suggests the feasibility of promising design for the Pb-Bi liquid metal cooled reactor.

CONTENTS

(영 문 목 차)

Summary (Korean)	i
Summary (English)	iii
Contents (English)	v
Contents (Korean)	vii
List of Tables	ix
List of Figures	x
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Current Status of Technology Development	3
Section 1 State of the art	3
Section 2 Advanced research	5
1. Intrinsic safety of LMR	5
2. Inert liquid metal coolant	5
3. Natural circulation of liquid metal	7
Section 3 Domestic research	8
Section 4 Future prospect	9
Chapter 3. Contents of R&D and Results	10
Section 1. Thermophysical database of liquid metal coolant	11
1. Thermophysical database of liquid metal coolant	11
a. Properties of liquid metal	11
b. Characteristics of Pb-Bi	11
(1) Pb-Bi corrosion	11
(a) Ferrous metal	11
(b) Non-ferrous metal	22
(c) Nonmetal	22

(2) Thermohydraulic properties of Pb-Bi	23
Section 2. Pre-analysis	25
1. Modeling and scaling	25
2. Pre-analysis	25
a. First-principle calculation	25
(1) Methodology	26
(2) Results and conditions considering elbow effect	33
(3) Results not considering elbow effect	40
b. Numerical analysis by CFX 4.2	44
(1) Methodology	44
(2) Results	47
Section 3. Experimental Setup	50
1. Apparatus	50
2. Experimental Method	51
Section 4. Results	61
Section 5. Scaling	68
Chapter 4. Achievements and Contributions	71
Chapter 5. Proposal for Application	72
Chapter 6. References	73

목 차

요 약 문	i
Summary (영문 요약문)	iii
Contents (영문 목차)	v
목차	vii
표 목 차	ix
그 립 목 차	x
제1장 서 론	1
제2장 국내·외 기술개발 현황	3
제1절 지금까지의 연구개발	3
제2절 외국의 경우	5
1. 고유 안전 액체금속로의 연구	5
2. 비활성 액체금속 냉각재의 연구	5
3. 액체금속의 자연순환 연구	7
제3절 국내의 경우	8
제4절 앞으로의 전망	9
제3장 연구개발수행 내용 및 결과	10
제1절 액체금속 냉각재의 물성자료 수집	11
1. 액체금속 물성 자료 수집	11
가. 활성/ 비활성 액체금속 물성치	11
나. Pb-Bi(납-비스무스)의 특성	11
(1) Pb-Bi에 의한 철금속, 비철금속, 비금속물질의 부식현상	11
(가) 철금속	11
(나) 비철금속	22
(다) 비금속	22
(2) Pb-Bi 냉각재의 열전달 특성	23

제2절	실험 예비 해석	25
1.	냉각 계통의 모델링 및 척도해석	25
2.	예비 해석	25
가.	수계산을 통한 예비 해석 수행	25
(1)	예비 계산 방법론	26
(2)	예비 수계산 결과 및 실험 조건 [엘보우 효과 고려]	33
(3)	예비 수계산 결과 [엘보우 효과 비교려]	40
나.	CFX 4.2 코드를 통한 예비 해석 수행	44
(1)	예비 계산 방법론	44
(2)	예비 해석 결과	47
제3절	실험 내용	50
1.	실험 장치 구성	50
2.	실험 방법	51
제4절	실험 결과	61
1.	온도 분포	61
제5절	척도해석	68
제4장	연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도	71
제5장	연구개발결과의 활용 계획	72
제6장	참고문헌	73

표 목 차

표 3.1 Na, K, Li 의 물성치 비교	13
표 3.2 Pb, Bi, Sn의 물성치 비교	14
표 3.3 냉각재의 자연순환 능력 비교	24
표 3.4 Pb-Bi와 저온용융합금물의 주요 물성치	32
표 3.5 실험결과와 예비 계산의 무차원수 비교	70

그림 목차

그림 3.1 온도에 따른 Na, K, NaK의 비열의 변화	15
그림 3.2 온도에 따른 Na, K, NaK의 열전도도의 변화	16
그림 3.3 온도에 따른 Na, K, NaK의 점성도의 변화	17
그림 3.4 온도에 따른 Pb, Bi, Pb-Bi, Hg의 비열의 변화	18
그림 3.5 온도에 따른 Pb, Bi, Pb-Bi, Hg의 열전도도의 변화	19
그림 3.6 온도에 따른 Pb, Bi, Pb-Bi, Hg의 점성도의 변화	20
그림 3.7 예비계산 개략도	27
그림 3.8 원형관 직경별 유속에 따른 Re	35
그림 3.9 원형관 직경별 유속에 따른 밀도차	36
그림 3.10 원형관 직경별 유속에 따른 온도차	37
그림 3.11 원형관 직경별 유속에 따른 가열부분 평균열속	38
그림 3.12 원형관 직경별 유속에 따른 가열부위 열용량	39
그림 3.13 엘보우 효과를 제외한 계통 내의 온도 분포	41
그림 3.14 엘보우 효과를 제외한 계통 내의 압력 분포	42
그림 3.15 엘보우 효과를 제외한 계통 내의 유속 분포	43
그림 3.16 CFX 4.2 코드를 이용한 실험장치 모델	46
그림 3.17 CFX 4.2에 의한 계통 내 등속도면	48
그림 3.18 CFX 4.2에 의한 계통 외벽면 온도분포(K)와 내부 벡터 분포	49
그림 3.19 실험 루프의 기하학적 크기	52
그림 3.20 히터의 개략도	53
그림 3.21 열 교환기	54
그림 3.22 냉각수 공급기	55
그림 3.23 온도 측정 위치	56
그림 3.24 실험 장치	57
그림 3.25 시간에 따른 냉각수 온도변화	58

그림 3.26 자료 분석기	59
그림 3.27 실험장치 구성도	60
그림 3.28 고온관과 저온관의 평균온도 변화	63
그림 3.29 좌측상단부와 우측하단부 엘보우에서의 평균온도	64
그림 3.30 온도차이에 따른 유속	65
그림 3.31 온도 차이에 따른 히터 용량	66
그림 3.32 온도 차이에 따른 압력강하	67

제1장 서론

액체금속로는 양호한 중성자 경제성으로 인하여, 잉여 중성자를 이용한 플루토늄 자체 증식 또는 장수명 방사성 폐기물인 액티나이드를 핵연료로 재활용이 가능하도록 설계할 수 있다. 액체금속로는 이러한 재활용 핵연료주기 기술을 통하여 우라늄 자원의 이용률을 기존의 경수로에 비하여 약 60-70배나 높일 수 있다. 따라서 경수로의 사용후 핵연료 처분 문제를 해결함과 동시에 에너지 자원의 획기적인 증대 방안이 되는 액체금속로가 당면한 몇 가지의 기술적 약점을 극복할 경우, 지구 온난화의 대책으로서 차세대 원자력의 주력으로 부상할 것으로 기대된다.

프랑스의 피닉스, 수퍼피닉스 및 일본의 몬주 등의 기존 액체금속로는 안전성, 핵폐기물, 및 경제성에 있어서 충분히 만족할 만한 답을 주지 못하고 있으며 이것은 가시적인 기일 내에 극복할 가능성을 제시하지 못하고 있다. 현재의 대부분 액체금속로는 Na의 낮은 용융점, 우수한 열전달 특성, 높은 비등점, 그리고 구조재와의 양립성을 장점으로 액체 Na를 냉각재로 선택한다. 그러나, Na은 물 또는 공기와 극렬히 반응하는 인화성 물질이며, 중성자에 의하여 방사화 된다. 중성자에 의한 방사화는 1차측 냉각재의 방사능 준위를 높여 중간 열교환 계통이 필요하게 된다. 또한 Na의 인화성은 Na 화재 사고를 유발할 수 있으며, Na 누설 및 화재를 방지하기 위한 복잡한 안전 계통 설비를 요구한다. 특히, 증기발생기는 Na 누설 감지 계통, 사고시 압력 방출 계통을 구비하여야 한다. 또한, Na은 플루토늄을 핵연료로 사용하는 대형 고속로에서 기포 반응도 계수가 양으로 만일의 사고시 Na이 비등할 경우 노심 용융과 같은 대형 사고로 발전할 가능성이 있다. 그리고 무엇보다도 액체금속로는 고가의 안전설비 및 재처리 비용으로 인하여 타 전력원에 대비한 경제적 열세를 극복하기 어려운 실정이다.

그럼에도 불구하고 지구온난화에 장기적 대책이며 차세대 에너지원으로 발전될 잠재력과 당면 문제들의 기술적 해결 가능성을 고려하여 액체금속의 연구 개발의 중요성이 강조된다. 아직까지 체계적으로 이루어지지 못한 방안으로 Na 화재 같은 사고를 원천적으로 배제할 수 있고, 중간 열교환 계통을 없애고 1차 냉각계통이 증

기 발생기를 통하여 직접 물/ 증기의 2차 냉각계통으로 연결할 수 있는 비활성 액체금속에 관한 연구가 유망하다.

액체금속 냉각을 통한 고속로의 개발은 이미 외국에서 많은 시도와 연구 개발이 있는 분야이고, 앞서 언급한 고속로들이 현재 운전을 하고 있다. 한편 원자력 장기 수급 전략에 의하여 2020년경 고속로의 도입이 계획된 시점에서 선행 연구결과, 경험 및 축적된 기술을 종합 분석하고 창의적인 개선을 거쳐서 신개념의 액체금속로의 개념을 도출하고 그 가능성을 확립하는 것이 중요하다. 이것은 에너지원을 자립할 수 있는 기반이 되며, 고유 기술 확보를 통한 선진국과의 공동 연구개발이 가능하며, 원자력 산업기반을 구축할 수 있다.

근자에 들어 경수로에서 빈번히 발생하는 사고가 국민들의 원자력발전소의 필요성에 대한 공감대를 약화시키고 있다. 따라서, Pb-Bi(납-비스무스)와 같이 비인화성, 비방사화성 특징을 갖고 음의 반응도 기포 계수가 가능한 물질을 냉각재로 사용하여 안전성을 향상시키고 계통의 단순화를 통해 경제성을 향상시키기 위한 개념 연구를 수행할 필요가 있다. 조만간 일반대중의 원자력발전에 대한 신뢰를 회복하기 위해서는 새로운 개념의 원자력발전소가 제시되어야 할 것이며, 근본적인 안전성 문제와 경제성 문제를 해결 할 수 있는 비전의 제시가 필요하다.

제2장 국내·외 기술개발 현황

제1절 지금까지의 연구개발

국내·외에서는, 초기 액체금속로 개발 단계에서부터 여러 가지 액체금속이 냉각재로 고려되었다. 1960년대 이후에는 우수한 열전달 특성, 높은 비등점, 구조재와의 양립성 등의 장점을 취하여 주로 액체 Na이 냉각재로 사용되어 오고 있다. 그러나, 액체 납 또는 Pb-Bi(납-비스무스) 같은 비인화성 금속을 냉각재로 하는 액체금속로 개념에 관한 연구도 구 소련, 미국 그리고 일본 등지에서 활발히 수행된 바 있다. 이러한 서구의 노력도 개념 설계 이상으로 발전하지 못하였는데, 이는 구조재의 부식 문제를 해결하지 못한 데 있다. 이와 관련하여 미국의 BNL에서 마그네슘과 지르코늄 같은 첨가물을 이용하여 무산소 환경을 개발하였으나 열전달시 성공적이지 못하였다. 반면, 최근 정보에 의하면 구 소련은 납 냉각재에 의한 구조재 부식 방지 기술을 개발하여 핵추진 잠수함용 납합금 냉각 액체금속로를 건조하여 성공적으로 운전해온 것으로 알려졌다. 1952년부터 Pb-Bi 냉각재를 용존 산소량 조절을 통한 부식 방지기술을 개발하여 이를 핵추진 잠수함용 원자로에 응용하여 지금까지 운전 경력이 70 RY나 된다는 것이다.

국내에서는 한국원자력연구소에서 액체금속로 개념 설계 연구를 수행하여 왔으나 연구 인력의 제한 등으로 Na 냉각 액체금속로에 대한 연구만 수행하였으며, 비인화성 냉각재를 사용한 액체금속로에 대한 연구는 전무한 실정이다. 또한 가속기 구동 설계에 있어서 액체금속 냉각재의 특성을 분석하는 연구가 있으나 동력로에 이용하는 경우는 최근 서울대에서 PEACER의 개념설계가 비활성 액체금속을 이용한 동력로 개념 설계의 시작되어 연구중인 상태이다[1].

국외에서도 프랑스의 피닉스나 일본의 몬쥬 등 Na 냉각 액체금속로는 이미 배관 누설 경험이 많으며, 이로 인한 사고로부터 복구되는데 상당한 시일이 걸림을 보여주었다. 이는 노후화에 의한 것이 아닐뿐더러, 상당한 수준의 기술진들에 의해서 가동된 것임에도 불구하고 공통적 문제를 발생시키는 것을 볼 때, 다수의 대형 상

업로로서 발전하는데 한계성을 보이고 있다. 또한 현재 한국원자력연구소에서의 KALIMER는 이제까지 Na 냉각 액체금속로 연구에만 중점을 두어왔다. 따라서, 대체 냉각제를 사용한 원자로 개념에 대한 연구가 상당한 관심을 끌고 있다.

제2절 외국의 경우

1. 고유 안전 액체금속로의 연구

사고시 운전자의 인위적인 조작이나 공학적인 기구의 활용 없이 자연적인 물리 법칙에 의하여 노심이 정지되어 정상 상태로 복귀하는 특성을 고유 안전성이라 한다. 이는 원자력 발전소의 안전성 향상의 궁극적인 목표로 할 수 있으며, 이를 기술적으로 실현하기 위한 노력이 활발하게 진행 중이다. 이에 대한 대표적인 연구는 금속 핵연료 및 고온전해 재처리 기술에 기초한 미국 ANL의 IFR(Integral Fast Reactor) 연구를 들 수 있다. IFR의 경우, 스크램(scram) 실패를 동반하는 유량상실사고(ULOF), 반응도삽입사고(UTOP) 및 열원상실사고(ULOHS) 등에서, 금속 연료의 우수한 핵·열적 특성에 따라 노심의 온도 상승 및 이에 따른 노심 팽창 등에 의한 반응도 제한 효과만으로 원자로가 정지되어 사고가 종식됨을 보였다. 또한, 1986년 EBR-II를 이용한 실험을 통하여 유량상실사고 및 열원상실사고시 금속 핵연료 노심이 반응도 제한 효과만으로 안전하게 정지됨을 입증하였다. 이 IFR의 고유 안전성 개념은 미국의 PRISM과 SAFR 및 일본의 MDP 원자로 등의 개념에 적용되고 있다.

2. 비활성 액체금속 냉각재의 연구

고속로의 냉각재는 중성자 감속을 최소화하고, 중성자 흡수를 최소화하며, 경수로보다 약 4배 가량 높은 노심의 고출력 밀도 계통으로부터 열을 효과적으로 제거하여야 한다. 이에 따라, 고속로 개발 초기부터 Na, NaK, Hg, Pb, Pb-Bi, Pb-Li 등의 액체금속들과 He, CO₂ 등의 가스가 냉각재 후보로 고려되었다. 그러나, 가스 냉각 고속로는 개념 설계 단계 이상으로 발전하지 못하였으며, 이제까지 건설된 모든 고속로는 액체금속을 냉각재로 사용하고 있다.

1946년 Los Alamos에 건설된 최초의 고속로 Clementine은 수은을 냉각재로 사용하였으며, 이어 건설된 EBR-I 및 Fermi-1은 Na-K를 냉각재로 사용하였다. 이

들 금속은 낮은 용융점을 갖는 장점이 있으나, 수은은 밀도가 높아 높은 펌프 부하를 요하며, 독성이 강하여 문제가 되고, Na-K는 K가 상당히 강한 중성자 흡수체라는 단점이 있다. 이에 따라, 1960년대 이후에 개발된 서구의 고속로는 대부분 Na를 냉각제로 사용하고 있다. 이는 Na의 낮은 용융점, 우수한 열전달 특성, 높은 비등점, 구조재와의 양립성 등의 장점을 취한 결과이다.

그러나, Na는 물 또는 공기와 화학적으로 격렬히 반응하여, 중성자에 의해 방사화되어 강한 감마선을 방출한다. 또한, Na는 플루토늄을 핵연료로 사용하는 대형 고속로에서 양의 반응도 기포 계수를 갖는 단점이 있다. Na의 인화성은 Na 화재와 같은 사고를 유발할 수 있으며, Na 누설 및 화재를 방지하기 위한 복잡한 계통 설비를 요구한다. 특히, 증기발생기에서는 Na 누설 감지 계통, 사고시 압력 방출 계통 등을 구비하여야 한다. 중성자에 의한 방사화는 1차측 냉각제의 방사능 준위를 높여 중간 열교환 계통이 필요하다. 또한, Na의 양의 반응도 기포 계수는 만일의 사고시 Na이 비등할 경우 노심 용융과 같은 대형 사고로 발전할 가능성이 있다.

따라서 밀도가 높아 높은 펌프 부하를 요하고 구조재의 부식 문제가 있어 배제되었던 Pb나 Pb-Bi가 대체 냉각제로 관심을 끌게 되었다. Pb-Bi를 냉각제로 사용할 경우 반응도 기포 계수를 거의 영 또는 음으로 만들 수 있다. 또한, Pb-Bi는 비인화성으로 Na 화재 및 폭발과 같은 사고 가능성이 원천적으로 배제된다. 또한 큰 밀도로 인하여 펌프 정지시 자연 대류를 촉진하는 장점이 있다.

Pb 및 Pb-Bi를 냉각제로 사용하는 고속로 개념에 대한 연구가 고속로 개발 초기부터 다양하게 수행되었으나 서구에서는 개념 설계 이상으로 발전하지 못하였다. 주된 이유는 Pb 냉각제에 의한 구조재의 부식 문제를 해결하지 못한 데 있으며, 이와 관련하여 미국의 BNL에서 마그네슘과 지르코늄 같은 첨가물을 이용하여 무산소 환경을 개발하였으나 열전달 특성이 성공적이지 못하였다. 반면, 러시아는 1952년부터 Pb-Bi 냉각제에 대한 연구를 수행하여, 용존 산소량을 조절하여 부식을 방지하는 기술을 개발하였다. 러시아는 이 기술을 핵추진 잠수함용 원자로에 응용하여, Pb-Bi 냉각 액체고속로를 건조하여 성공적으로 운전해 오고 있다.

3. 액체금속의 자연순환 연구

미국의 ANL에서는 소형의 납냉각 액체금속로의 자연순환 현상을 연구하고 있다. 이 소형 동력로는 개발도상국에 판매를 목적으로 공장에서 직접 제작하여 수송하며, 핵연료에 대한 접근을 막는 방법으로 15년 동안 핵연료를 재장전 하지 않고 운전할 수 있도록 설계하고 있다. MIT에서는 납냉각재의 자연순환 효과를 극대화하여 냉각재 펌프를 사용하지 않고, 정상운전 상태에서도 자연순환으로 냉각이 가능한 원자로의 개념 설계를 하고 있다. 일본도 도쿄공과대학에서 납냉각재를 이용한 소형의 동력로를 연구 중인데, 30년 동안 핵연료의 교체 없이 운전이 가능한 노심 설계에 납냉각재를 이용하여 자연순환을 통한 열제거를 실현하려 하고 있다. 한편 가속기 구동 미입계로에서의 자연순환 특성을 Westinghouse에서 연구하고 있으며 실증 원자로 계통에 관한 핵연료와 피복재, 그리고 냉각재에 관한 연구가 진행중이다.

제3절 국내의 경우

한국원자력연구소에서 액체금속로 개념 설계 연구를 수행하여 왔으나, 연구 인력의 제한 등으로 Na 냉각 액체금속로에 대한 연구만 수행하였으며, 비활성 냉각재를 사용한 액체금속로에 대한 연구는 전무한 실정이다. 최근 서울대에서 핵확산저항성 청정안전로(PEACER)의 개념설계를 완성하였다. Pb-Bi 냉각재와 1년 주기의 금속 연료를 토대로 한 1,560 MWth의 기준 노형을 개념설계하였으며 일차적 모형을 이용한 열수력 계산 결과, 원자로의 냉각수 계통 사고시 자연순환에 의한 잔열제거가 가능함을 보였다. 또한 건식처리 개념을 이용한 핵확산저항형 연료순환공정계의 설계 개념을 확립하여 연료 순환 자급과 천층처분이 가능한 방사성폐기물로 전환할 수 있는 개념의 기술적, 경제적 실용화 가능성을 보였다.

제4절 앞으로의 전망

본 연구를 통하여 수행하고자 하는 비인화성 액체금속을 이용한 고유 안전성과 경제성을 갖춘 차세대 액체금속로 개념 개발은 향후 국내에서 액체금속 실증로를 개발하고자 할 때 중요한 자료를 제공할 것으로 기대된다. 또한 본 연구가 비활성 액체금속이 Na에 비하여 전반적으로 우수한 성능임이 판단될 경우, 현재의 액체금속로 연구에도 반영할 수 있을 것이며, 가속기를 이용한 액티나이드 연소로 설계에도 중요한 판단 자료를 제공할 것이다. 또한, 멀지 않은 장래에 선진국에서 이러한 기술을 이용한 원자로를 개발할 경우, 기술권이 치밀하게 장악될 것이다. 따라서 본 연구와 같은 창의적 개발 노력을 지속할 경우, 우리의 기술권을 확보할 수 있고, 국제 협력과 공동 연구를 통한 선진 기술 습득과 기술 자립을 이룰 것으로 기대된다.

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

본 연구는 다음과 같이 수행되었다. 첫째로 냉각재로 사용되는 액체금속의 물성을 활성/ 비활성 액체금속으로 구분하여 자료를 수집하였다. 또한 Pb-Bi에 의한 물질의 부식현상을 철금속, 비철금속, 비금속의 세가지 종류에 따라 구분 정리하였고, Pb-Bi 냉각재의 열전달 특성을 알아보았다. 둘째로 기초실험 장치의 모델링과 Pb-Bi 냉각재를 대신한 상사물질의 자연냉각 능력을 알아보기 위한 예비 해석을 수행하였다. 세 번째로 자연순환 현상의 실험적 연구를 위하여 실험장치를 제작하고 실험을 수행하였으며 실제 실험과 동일한 상황에서의 조건을 1차원 flow-loop 모델과 CFX 4.2 코드에 부여하여 실험결과와 해석결과를 비교하였다.

제1절 액체금속 냉각재의 물성자료 수집

1. 액체금속 물성 자료 수집

가. 활성/ 비활성 액체금속 물성치

지금까지 주로 연구된 액체금속은 Na, K, Li 등으로 열적 특성은 우수하나 화학적 활성이 높아 액체금속로 적용 경험에 비추어 불 때 화재에 의한 안전성 문제가 취약점으로 대두되었다. 이에 반해 Pb, Bi, Sn 등 화학적으로 안정한 비활성 액체금속은 화재를 일으키지 않고 물과 반응하여도 수소방출이 없어 원자력 안전에 매우 바람직한 고성능 냉각재이다. 본 연구에서는 비활성 액체금속 중 원자로 냉각재로 사용 가능한 Pb-Bi계 액체금속에 대하여 자료 조사를 통하여 자연순환 실험에 사용 가능한 냉각재를 선택하였다. 표 3.1은 기존 액체금속로에 사용 가능한 액체금속의 물성치이며, 표 3.2는 비활성 액체금속 계열의 물성치이다.

나. Pb-Bi(납-비스무스)의 특성

Pb-Bi는 Na와는 달리 비활성으로 공기 또는 물과의 반응 엔탈피가 높아서 화재와 수소 발생의 가능성이 적어 냉각재 누출시 야기되는 화학적 사고 위험이 낮고, 핵적 특성도 냉각재로서 좋은 장점을 가지고 있다. 그러나, Pb-Bi계 액체금속이 가지는 부식성은 구조재의 건전성 저하 가능성이 있으며, 액체금속의 높은 밀도로 인해 펌프 부하가 상승하고, Pb에 비해 Bi가 10배 정도 값이 비싸며, 높은 에너지의 즉발 감마선을 발생 시킨다는 단점이 있다[2].

(1) Pb-Bi에 의한 철금속, 비철금속, 비금속물질의 부식현상[3]

(가) 철금속

① 스테인레스스틸

430형은 540°C(1000°F)에서 Pb-Bi(납-비스무스)에 대한 저항성이 대단히 우수하다.

446형은 480°C ~ 1215°C(900°F ~ 2200°F)의 온도 범위에서 100시간 동안 다

른 철금속에 비해 상대적으로 부식에 대한 저항성이 강함이 알려져 있다.
310(25Cr, 20Ni)형은 540℃(1000°F)에서 Pb-Bi(납-비스무스) 합금에 대한
부식 저항성이 우수하나 그보다 더 높은 온도에서는 부식을 일으킨다.

표 3.1 Na, K, Li 의 물성치 비교표[4~8]

	t (°C)	ρ (kg/m ³)	λ (Cal/m·hr·°C)	c_p (Cal/kg·°C)	$a \times 10^2$ (m ² /hr)	$\nu \times 10^2$ (m ² /sec)	Pr $\times 10^3$
Sodium (Na)	100	928	74.0	0.331	24.1	77.0	1.15
	200	903	70.2	0.317	24.5	50.6	0.74
	300	878	64.9	0.306	24.2	39.4	0.59
	400	854	59.1	0.304	22.8	33.0	0.52
	500	829	54.9	0.304	21.8	28.9	0.48
	600	805	52.1	0.305	21.2	25.7	0.44
	700	780	50.8	0.305	21.3	23.2	0.39
Potassium (K)	100	818	40.0	0.195	25.1	56.1	0.80
	200	795	39.5	0.189	26.3	42.8	0.59
	300	773	37.3	0.185	26.1	35.2	0.49
	400	750	34.0	0.183	24.8	29.8	0.43
	500	727	30.0	0.183	22.6	25.7	0.41
	600	704	26.6	0.184	20.5	22.1	0.39
	700	681	24.3	0.185	19.3	20.5	0.38
Lithium (Li)	200	515	39.6	0.990	7.77	111.0	5.14
	250	510	39.8	1.001	7.80	100.4	4.63
	300	505	40.1	1.012	7.85	92.7	4.25
	400	495	40.5	1.034	7.91	81.7	3.72
	500	484	40.9	1.056	8.00	73.4	3.30
	600	474	41.3	1.078	8.08	66.8	2.98
	700	465	41.7	1.100	8.15	61.7	2.73

표 3.2 Pb, Bi, Sn의 물성치 비교표[4~8]

	t (°C)	ρ (kg/m ³)	λ (Cal/m·hr·°C)	c_p (Cal/kg·°C)	$a \times 10^2$ (m ² /hr)	$\nu \times 10^2$ (m ² /sec)	Pr $\times 10^3$
Lead (Pb)	400	10592	13.0	0.0352	3.49	21.0	2.17
	450	10536	13.2	0.0352	3.56	19.1	1.93
	500	10476	13.3	0.0352	3.61	17.5	1.75
	550	10419	13.4	0.0352	3.65	16.3	1.61
	600	10360	13.7	0.0352	3.76	15.3	1.47
	700	10242	15.2	0.0352	4.22	13.7	1.17
	800	10125	17.0	0.0352	4.77	12.5	0.94
Bismuth (Bi)	280	10050	12.5	0.036	3.45	18.0	1.88
	300	10030	12.6	0.036	3.50	17.1	1.76
	350	9970	13.0	0.036	3.63	15.4	1.53
	400	9910	13.4	0.036	3.76	14.2	1.36
	500	9785	14.2	0.036	4.03	12.2	1.09
	600	9660	14.9	0.036	4.31	10.8	0.91
	700	9530	15.7	0.036	4.59	9.8	0.77
Lead- Bismuth Alloy (Pb-Bi)	130	10570	9.4	0.035	2.54	31.4	4.45
	200	10486	10.1	0.035	2.75	24.3	3.18
	300	10364	10.9	0.035	3.00	18.7	2.24
	400	10242	11.8	0.035	3.29	15.7	1.72
	500	10120	12.6	0.035	3.56	13.6	1.37
	600	10000	13.6	0.035	3.88	12.4	1.15
	700	9876	14.4	0.035	4.16	11.4	0.99

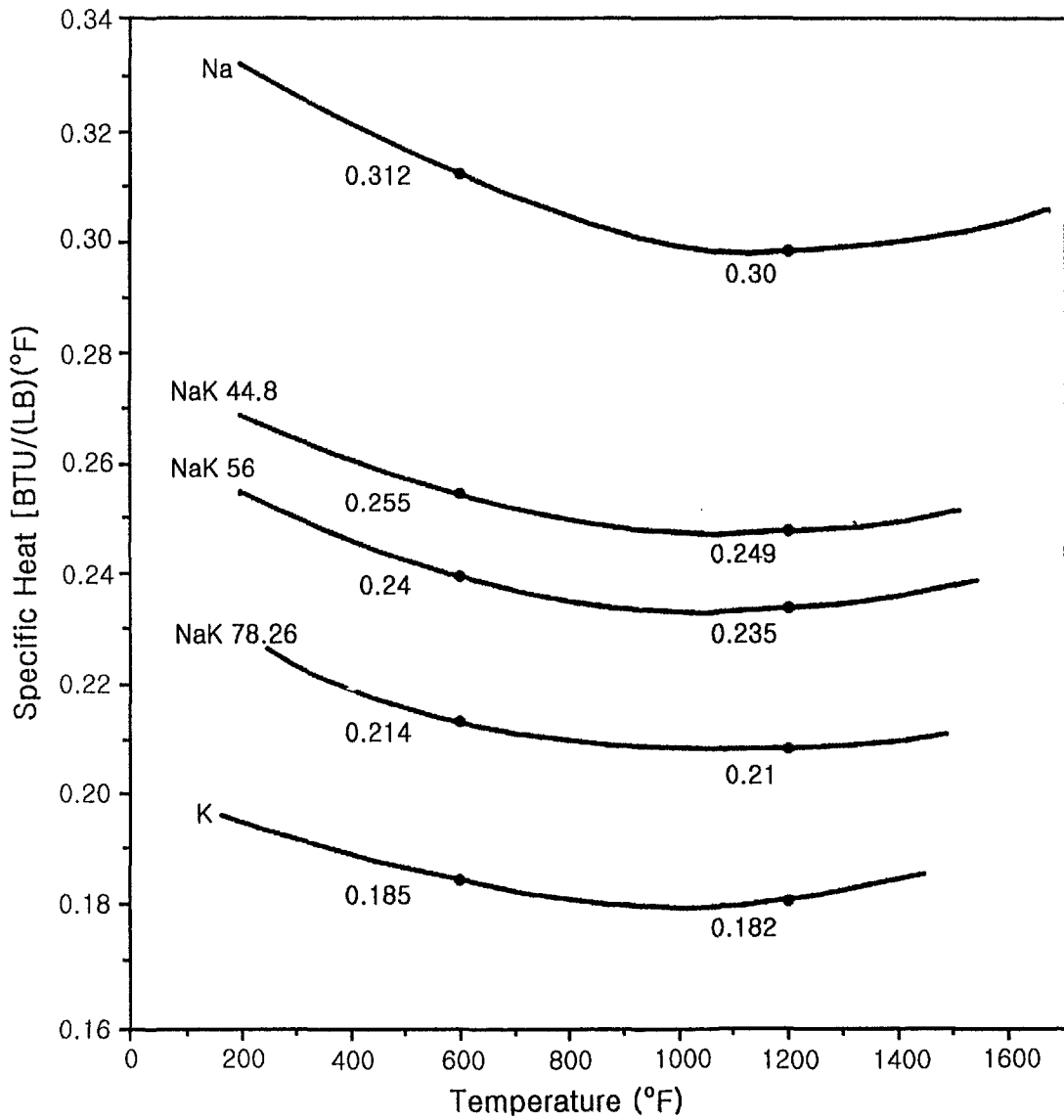


그림 3.1 온도에 따른 Na, K, NaK의 비열의 변화[9]

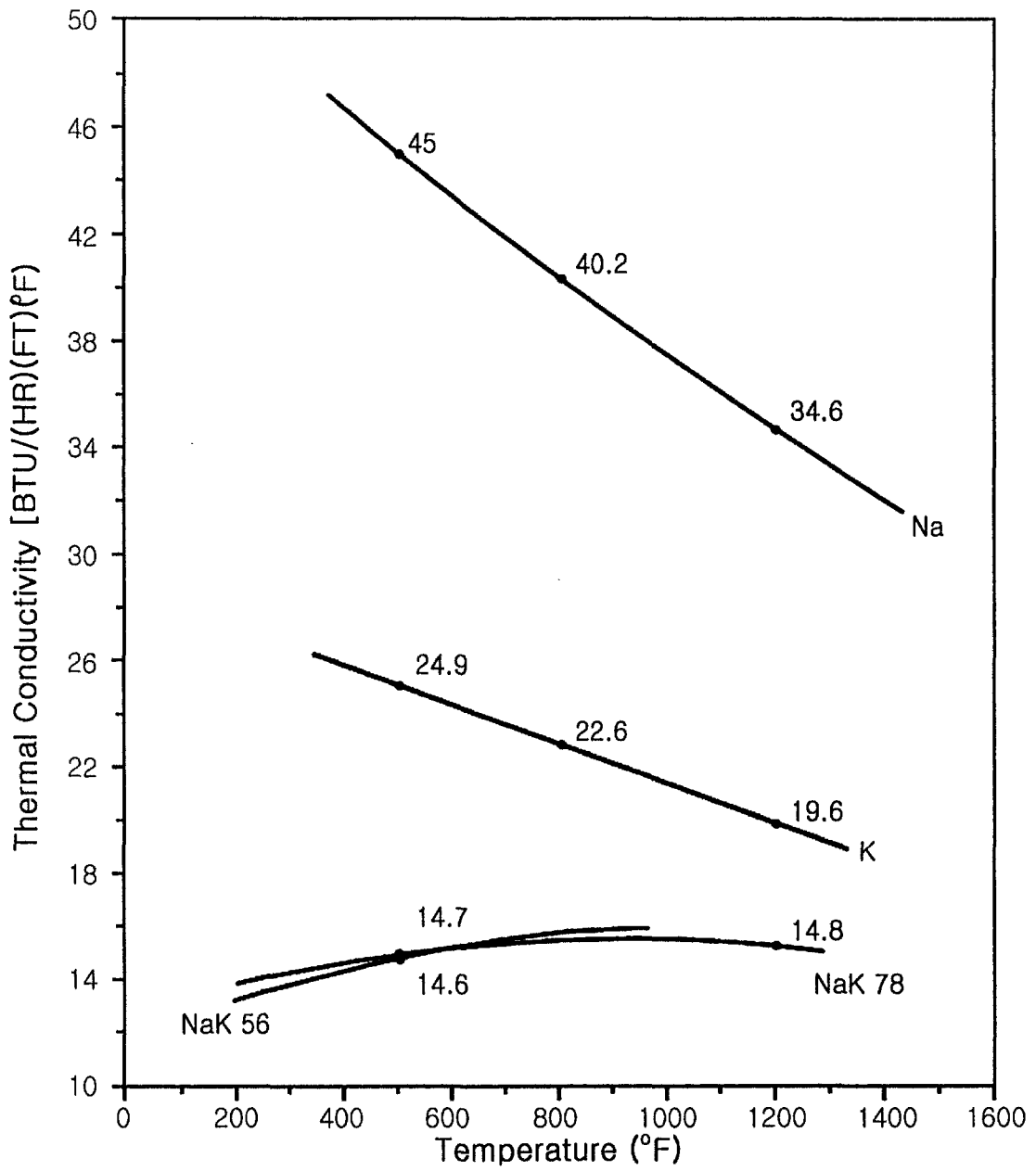


그림 3.2 온도에 따른 Na, K, NaK의 열전도도의 변화[9]

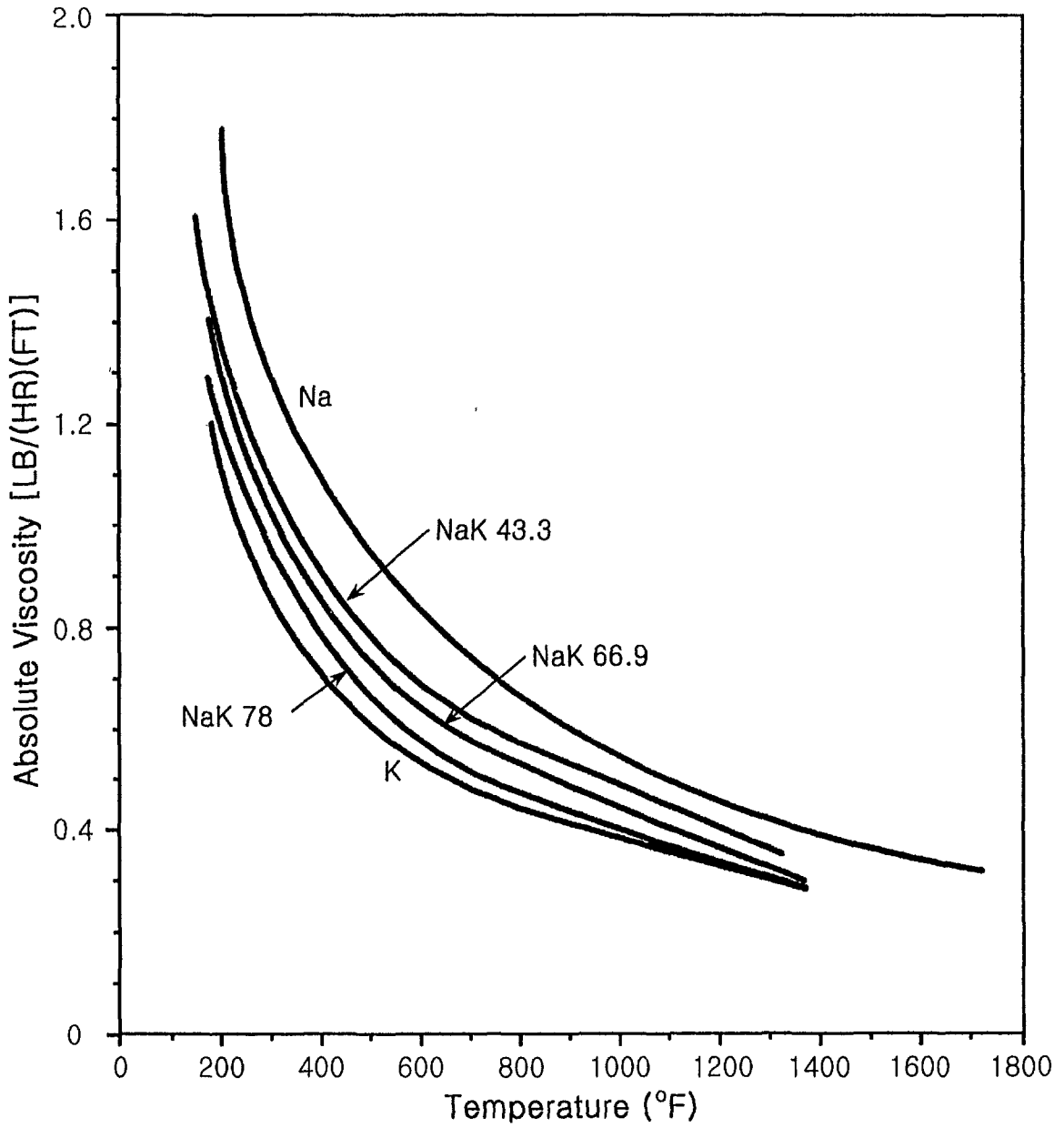


그림 3.3 온도에 따른 Na, K, NaK의 점성도의 변화[9]

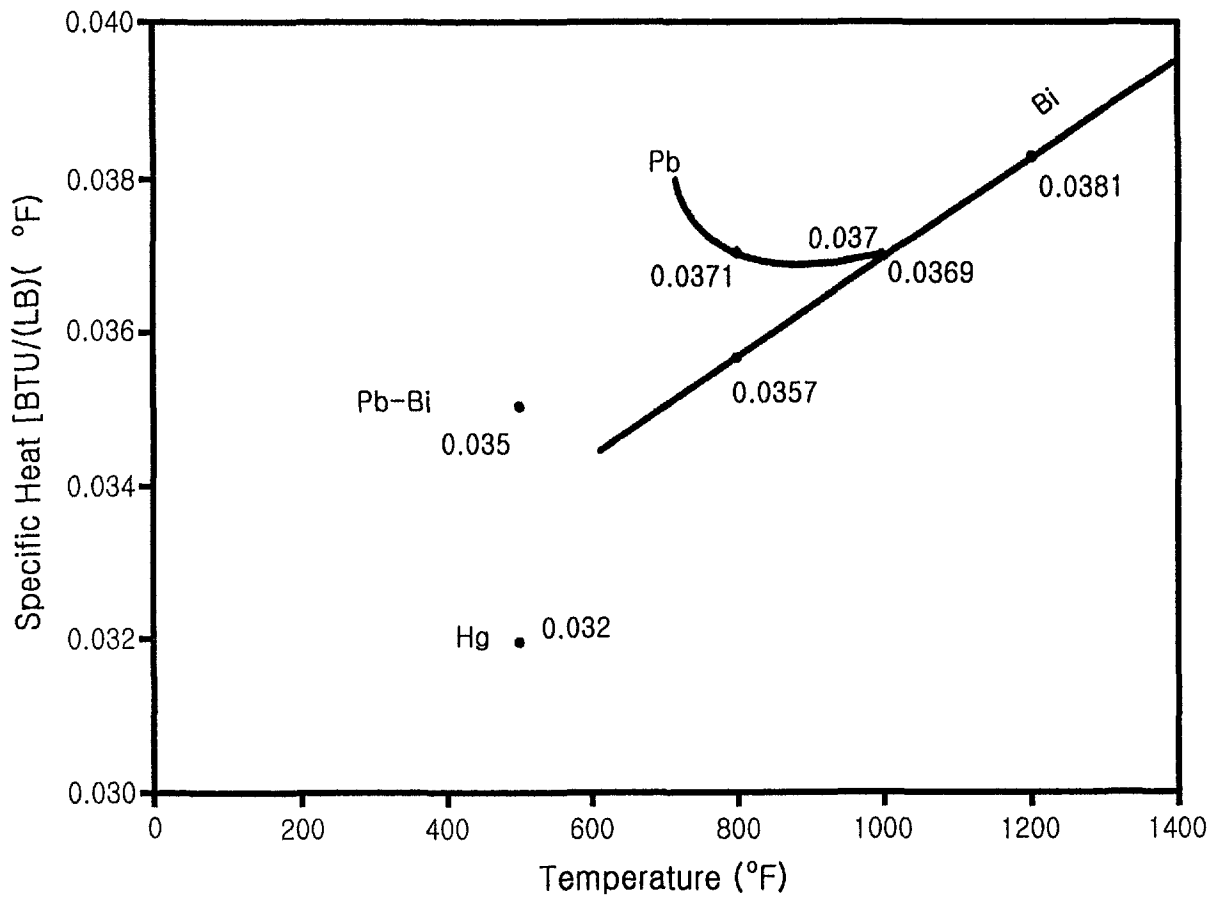


그림 3.4 온도에 따른 Pb, Bi, Pb-Bi, Hg의 비열의 변화[9]

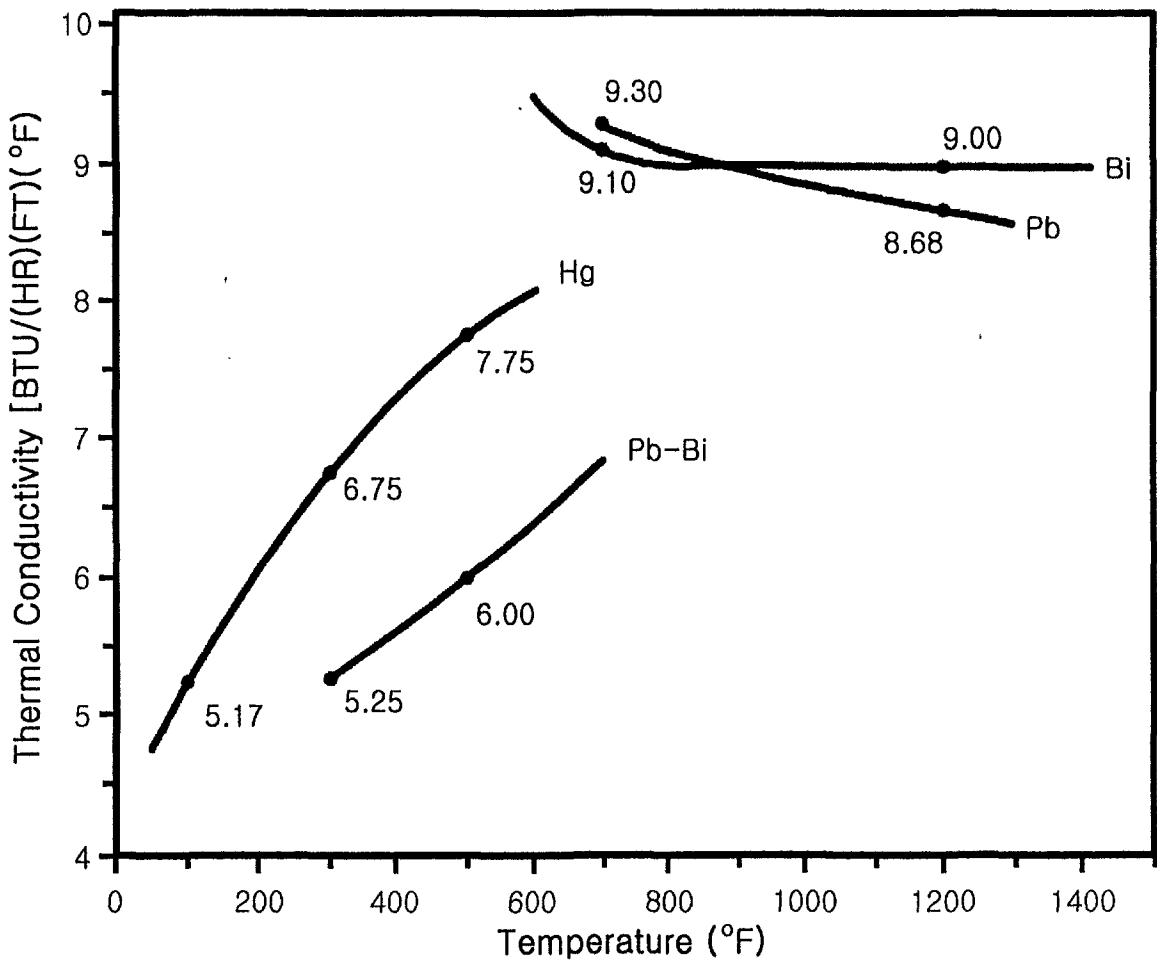


그림 3.5 온도에 따른 Pb, Bi, Pb-Bi, Hg의 열전도도의 변화[9]

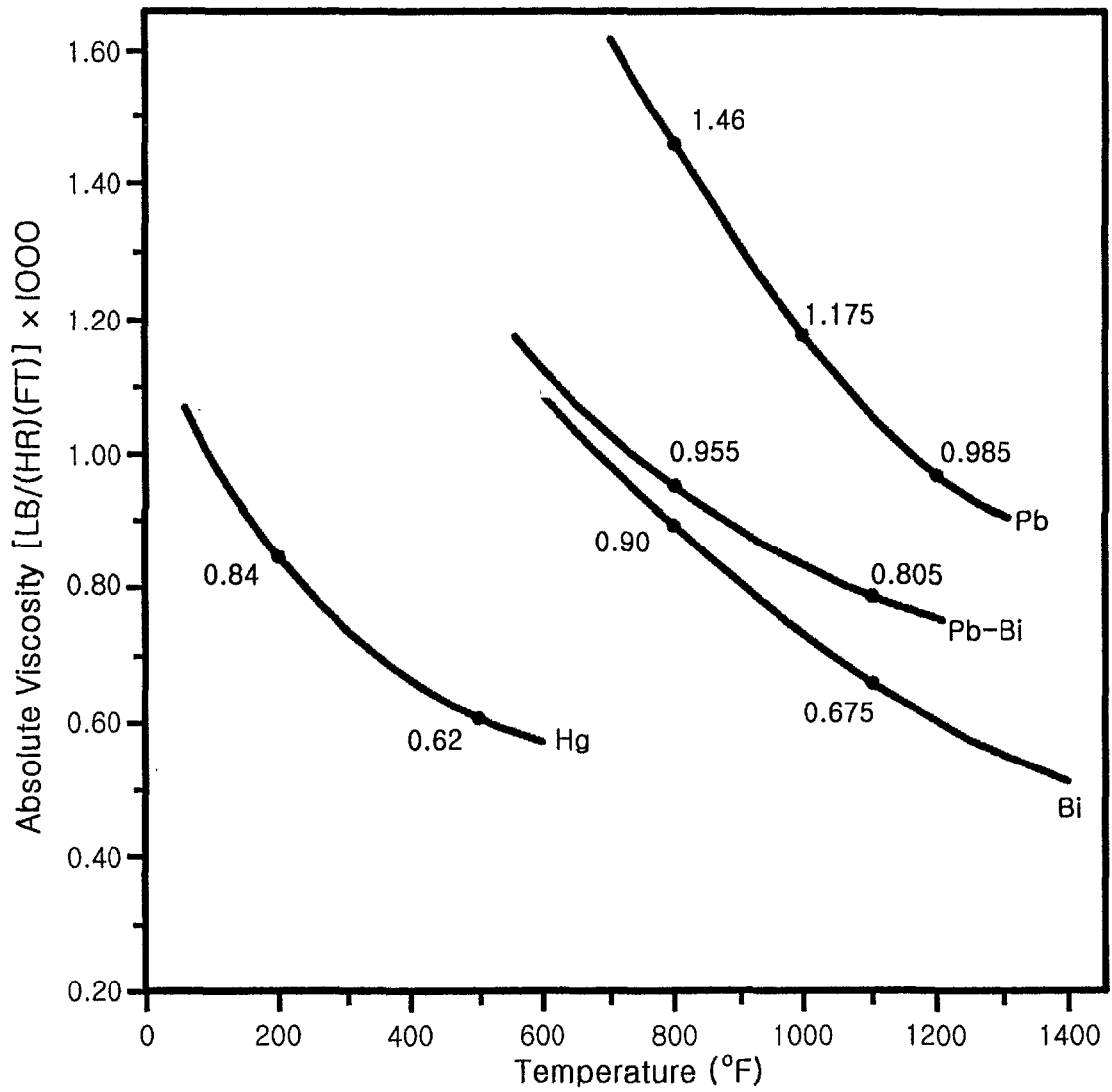


그림 3.6 온도에 따른 Pb, Bi, Pb-Bi, Hg의 점성도의 변화[9]

347(18~8Cb)형은 650°C(1200°F)에서 깨끗하게 정련된 표면이 노출될 경우 Pb-Bi(납-비스무스) 합금에 대한 부식 저항성에 한계가 있다. 그러나 불꽃 산화된 표면이 노출된다면 540°C(1000°F)에서 부식 저항성이 강해진다.

316(16Cr, 13Ni, 3Mo)형은 540°C(1000°F)에서 Pb-Bi(납-비스무스) 합금에 대한 부식 저항성에 한계가 있으나 230°C(450°F)에서는 부식에 잘 견딘다.

302(18Cr, 8Ni)형과 오스테나이드 스테인레스스틸은 230°C(450°F)에서 부식에 대한 저항성이 강하고 570°C(1060°F)에서는 한계가 있고 1000°C(1830°F)에서는 부식에 대한 저항성이 크게 떨어지게 된다.

330(15Cr, 35Ni)형은 540°C(1000°F)에서 Pb-Bi(납-비스무스) 합금에 대한 저항성이 크게 떨어진다.

309형은 1200°C(2200°F)에서 500시간 동안 이 합금에 담겨져 있을 경우 부식이 일어난다.

② 저탄소강

연철은 비산화조건에서 최소한 500°C(930°F)까지는 부식 저항성이 강하고 변환 온도인 700°C(1290°F)까지는 만약 탄화물 구조가 타원형을 띠고 있다면 저항성이 강하다. 페라이트는 납과 납합금에 의하여 거의 영향을 받지 않고 시멘타이트는 영향을 받는다. 따라서, 0.12 wt%의 최고 탄소함유도를 가지는 Locomotive Firebox Steel(ASTM SA30)이 부식에 대한 저항성이 강한 물질로 선정되어진다.

③ 크롬-몰리브덴 스틸

크롬-몰리브덴 스틸은 540°C(1000°F)에서 Pb-Bi 합금에 대한 저항성이 강하다.

④ 주철

용융납과 Pb-Bi쓰이는 주철솥은 대체로 1년이 지나면 금이 가서 사용을 할 수 없게 된다. 따라서 주철은 이들 물질을 담은 용기로 만족스럽지 못하다.

(나) 비철금속

① 베릴륨

베릴륨은 700°C(1292°F)에서 Pb-Bi 합금에 대한 저항성이 강하다. 그리고, 1000°C(1830°F)에서는 부식 저항성에 한계가 있다.

② 알루미늄

상업적으로 널리 사용되는 알루미늄2S는 300°C(570°F)에서 Pb-Bi 합금에 대한 저항성이 강하나 500°C(930°F)에서는 한계가 있다.

③ 니켈, 구리와 그들의 합금

하스텔로이C, 모넬금속, 인코넬은 Pb-Bi 합금에 의해 심각하게 영향을 받는다. 이와 같은 사실은 540°C(1000°F)에서 가열되고 비응력상태에서 실험한 시편을 통해 알게 되었다. 니켈 또한 비응력 조건하에서 Pb-Bi 합금에 의해 심각하게 영향을 받는다. 구리와 청동은 심각하게 부식이 일어나고 황동은 구멍이 뚫릴 정도이다. 그러나 하스텔로이 A, B, C와 알루미늄-청동은 230°C(450°F)에서 1300시간 동안 노출되었을 때라도 크게 영향을 받지 않는다. U형으로 납땜이 된 하스텔로이 B는 납땜이 된 부근에서 틈이 생겨 갈라진다.

④ 티타늄 합금

Pb-Bi 합금 속에서 650°C(1200°F)의 온도하, 500시간동안 있었을 때 티타늄-4wt%크롬 합금은 부식에 대한 저항성이 매우 강하다. 티타늄-1wt%실리콘 합금은 부식 저항성이 다소 떨어지고 티타늄-5wt%구리 합금은 납에 대한 저항성이 크게 떨어진다.

⑤ 기타 합금

순수 망간은 비응력 조건하에서도 Pb-Bi 합금에 크게 영향을 받는다. Pb-Bi 유동 계측기의 전극으로 쓰이는 텅스텐은 용융 금속으로부터 추출되므로 지지분한 산화막이 끼게된다.

(다) 비금속

유리튜브는 220℃~240℃(425°F~465°F)온도범위와 유동 조건하에서 Pb-Bi 합금의 부식에 잘 견딘다. 그러나, 순환 유체의 흐름으로 기계적인 강도는 크게 떨어진다.

(2) Pb-Bi 냉각재의 열전달 특성

액체금속의 열전달 특성은 다음의 몇 가지로 나눌 수 있다. 경수로의 냉각재인 물에 비하여 큰 열전달 계수 값을 가지고 있다. 그리고 비등점이 상당히 높기 때문에 냉각계통이 낮은 압력에서도 운전이 가능하다.

과거의 여러 가지 액체금속이 고속로의 냉각재로 실험과 연구가 수행되었으며 대체로 Na이 채택되어 현재의 발전용 및 연구용 원자로의 냉각재로 사용되고 있다. 특히 용융점이 낮고 비등점이 높으며 큰 열전달 계수를 갖고 부식성이 낮은 특성으로 인하여 좋은 냉각재로 간주되었다. 그러나 현재까지의 고속로 운영의 경험을 되돌아보면 Na 냉각재가 갖는 아직 해결되지 못한 문제점이 있으며 이것은 계통 누설 위치에서의 물 또는 공기와의 반응이다. 특히 일본 몬주에서 Na이 누출되는 사고시에 공기와 공기 중의 수분과의 반응을 일으켜 화재가 발생하는 안전성 문제를 드러내었다.

Pb-Bi 냉각재는 이러한 Na이 갖는 화학적 활성을 갖지 않고, 큰 밀도를 이용한 자연 냉각효과를 이용한다면 충분한 열적 여유도를 갖는 고속로의 냉각재가 될 수 있다.

표 3.3은 액체금속로의 냉각재에 따른 특성들을 요약한 것인데, Pb-Bi 냉각재가 상대적으로 우수한 물성을 가지고 있음을 볼 수 있다.

표 3.3 냉각재의 자연순환 능력 비교[10]

냉각재	원자로	입구/출구 온도 [℃]	자연순환 수두 [$\Delta \rho$]		열용량 [ρC_p]		열적 여유도 [$T_{\text{boil}} - T_{\text{out}}$]	
			g/m^3	정규화	J/m^3K 10^6	정규화	℃	정규화
Pb-Bi	ATW	340/510	0.205	1	1.53	1	1160	1
Pb	Brest	420/540	0.146	0.71	1.50	0.98	1185	1.02
Na	CRBRP	399/535	0.036	0.18	1.08	0.71	350	0.30
H ₂ O	4-Loop PWR	283/325	0.073	0.36	2.93	1.91	18	0.02

제2절 실험 예비 해석

1. 냉각 계통의 모델링 및 척도해석

액체금속로의 계통 거동을 이해하기 위해서는 실험장치를 설계하고 실험하고자 할 때 여러 가지 부품의 크기와 실험조건을 적절하게 모의하는 것이 중요하다. 특히 액체금속을 냉각재로 사용하는 경우 사고시 자연순환에 의한 노심의 열을 제거하는 정도가 원자로의 안전성과 중요한 연관성을 가지고 있으므로 척도해석의 영향은 더 중요하다. 일반적인 자연순환에 대한 척도해석법은 질량, 운동량, 에너지의 1차원 미분방정식을 세우고 운동량 방정식에 대한 압력항을 제거하기 위해 계통 전체에 대한 적분을 하고 그 결과식들을 무차원화시켜 무차원수들을 찾는다. 그러나 이러한 실험장치의 제작에서 모든 무차원수를 완전히 맞추는 것은 실제로 불가능하며, 자연순환의 열원, 열침 그리고 마찰손실과 관련한 무차원수만을 고려한다. 일반적으로 자연순환에서 액체금속을 움직이게 하는 힘은 부력이다. 이는 운동량 방정식에서의 Richardson 수와 Froude 수에서 나타나며, 마찰에 의한 압력 손실은 Friction 수(N_f), Orifice 수(N_0)에서 표현된다. 본 실험장치를 제작하는 데에는 이외에도 크기와 관련하여 길이 (L), 면적 (A) 등을 고려하였다.

앞서 언급된 무차원수와 조건을 정리한 관계식을 이용하여 실험장치를 설계하였다. 설계과정은 실험장치의 모델을 먼저 선정하고 실험장치의 길이와 넓이의 비를 정하여 전체 체적의 비를 결정한다. 그리고 실험장치의 압력을 정하면 출력과 나머지 변수들이 결정된다. 이때 마찰 손실은 다른 변수와 무관하게 정의될 수 있다. 그러나 Friction 수(N_f), Orifice 수(N_0)는 전체 체적이 줄어든 실험장치에서 각 부분을 정확하게 일치시키기가 물리적으로 불가능하다. 따라서 계통 전체에 걸친 압력 손실이 같아지도록 형태를 조절하여야 한다.

2. 예비 해석

가. 수계산을 통한 예비 해석 수행

(1) 예비 계산 방법론

본 연구과제 실험에 관한 예비 계산으로 파이프 직경별로 Pb-Bi 냉각재를 대체할 만한 저온용융합금물(Low-temperature melting metal alloy)의 유속과 가열부분의 열량을 평가하였다. 이 예비 계산에서 정상상태 1차원 단상 유동 조건이고 파이프 직경별로 저온용융합금물의 유속에 따른 Re, 표면의 열속, 가열부분 전체의 열용량, 뜨거운 영역과 차가운 영역의 온도차와 밀도차가 결과로 도출되었다[11,12]. 예비 계산을 위한 현상도는 그림 3.7과 같다.

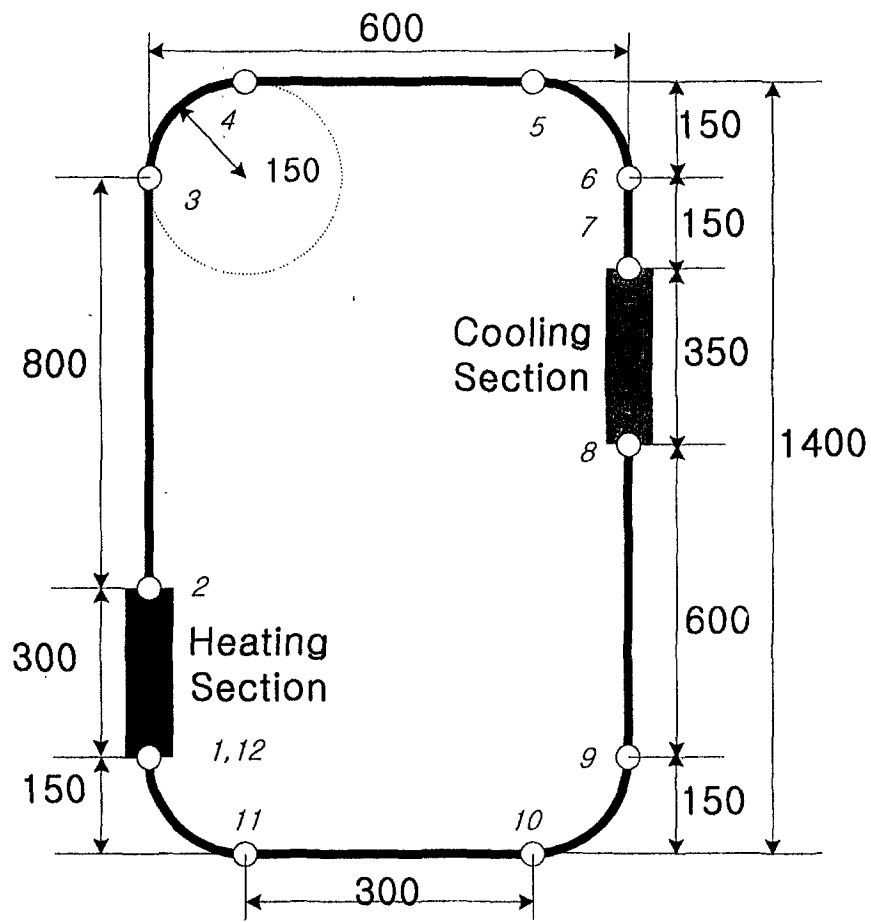


그림 3.7 예비계산 개략도 (단위 mm)

각 노드는 압력 강하를 구할 때 중요부위인 가열부분과 냉각부분의 입출구, 4개의 엘보우, 각 파이프의 입/ 출구까지 총 12개로 나뉘어 있다.

계산 과정은 다음과 같다. 각 노드 사이의 압력 강하는 벽면과의 마찰에 의한 압력강하, 중력에 의한 압력 변화, 가속에 의한 압력변화, 유로형상에 따른 압력변화로 이루어져있다. 즉,

$$\Delta p_{ij} = \Delta p_f + \Delta p_g + \Delta p_a + \Delta p_{form} \quad (3.1)$$

여기서,

$$\Delta p_{ij} = j\text{번 노드와 } i\text{번 노드 사이의 압력강하 [Pa]}$$

$$\Delta p_f = \text{마찰에 의한 압력강하}$$

$$\Delta p_g = \text{중력에 의한 압력강하}$$

$$\Delta p_a = \text{가속도에 의한 압력강하}$$

$$\Delta p_{form} = \text{유로형상에 따른 압력강하}$$

각 노드 사이의 압력 차이에 대한 식을 쓰면 다음과 같다.

$$p_1 = p_2 + f \frac{|h_2 - h_1|}{D} \frac{G^2}{\rho_1 + \rho_2} + \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} g(h_2 - h_1) + \frac{G^2}{2} \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (3.2)$$

$$p_2 = p_3 + f \frac{|h_3 - h_2|}{D} \frac{G^2}{\rho_3 + \rho_2} + \frac{\rho_2 + \rho_3}{2} g(h_3 - h_2) + \frac{G^2}{2} \left(\frac{1}{\rho_3} - \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (3.3)$$

$$p_3 = p_4 + f \frac{|h_4 - h_3|}{D} \frac{G^2}{\rho_4 + \rho_3} + \frac{\rho_3 + \rho_4}{2} g(h_4 - h_3) + K_{elbow} \frac{G^2}{\rho_4 + \rho_3} \quad (3.4)$$

$$p_4 = p_5 + f \frac{L}{D} \frac{G^2}{\rho_4 + \rho_5} + \frac{G^2}{2} \left(\frac{1}{\rho_5} - \frac{1}{\rho_4} \right) \quad (3.5)$$

$$p_5 = p_6 + f \frac{|h_6 - h_5|}{D} \frac{G^2}{\rho_6 + \rho_5} + \frac{\rho_5 + \rho_6}{2} g(h_6 - h_5) + K_{elbow} \frac{G^2}{\rho_6 + \rho_5} \quad (3.6)$$

$$p_6 = p_7 + f \frac{|h_7 - h_6|}{D} \frac{G^2}{\rho_7 + \rho_6} + \frac{\rho_7 + \rho_6}{2} g(h_7 - h_6) + \frac{G^2}{2} \left(\frac{1}{\rho_7} - \frac{1}{\rho_6} \right) \quad (3.7)$$

$$p_7 = p_8 + f \frac{|h_8 - h_7|}{D} \frac{G^2}{\rho_8 + \rho_7} + \frac{\rho_8 + \rho_7}{2} g(h_8 - h_7) + \frac{G^2}{2} \left(\frac{1}{\rho_8} - \frac{1}{\rho_7} \right) \quad (3.8)$$

$$p_8 = p_9 + f \frac{|h_9 - h_8|}{D} \frac{G^2}{\rho_9 + \rho_8} + \frac{\rho_9 + \rho_8}{2} g(h_9 - h_8) + \frac{G^2}{2} \left(\frac{1}{\rho_9} - \frac{1}{\rho_8} \right) \quad (3.9)$$

$$p_9 = p_{10} + f \frac{|h_{10} - h_9|}{D} \frac{G^2}{\rho_{10} + \rho_9} + \frac{\rho_{10} + \rho_9}{2} g(h_{10} - h_9) + K_{elbow} \frac{G^2}{\rho_{10} + \rho_9} \quad (3.10)$$

$$p_{10} = p_{11} + f \frac{L}{D} \frac{G^2}{\rho_{11} + \rho_{10}} + \frac{G^2}{2} \left(\frac{1}{\rho_{11}} - \frac{1}{\rho_{10}} \right) \quad (3.11)$$

$$p_{11} = p_{12} + f \frac{|h_{12} - h_{11}|}{D} \frac{G^2}{\rho_{12} + \rho_{11}} + \frac{\rho_{12} + \rho_{11}}{2} g(h_{12} - h_{11}) + K_{elbow} \frac{G^2}{\rho_{12} + \rho_{11}} \quad (3.12)$$

$$p_{12} = p_1 + f \frac{|h_1 - h_{12}|}{D} \frac{G^2}{\rho_1 + \rho_{12}} + \frac{\rho_1 + \rho_{12}}{2} g(h_1 - h_{12}) + K_{elbow} \frac{G^2}{\rho_1 + \rho_{12}} \quad (3.13)$$

여기서,

$p_i = i$ 번 노드에서의 압력 [Pa]

$f =$ 마찰 계수

$h_i = i$ 번 노드까지의 높이 [m]

$D =$ 파이프 직경 [m]

$G =$ 질량 유속 [$kg/m^2 sec$]

$\rho =$ 유체 밀도 [kg/m^3]

$g =$ 중력 가속도 [m/sec^2]

$K_{elbow} = 0.3$ (loss coefficient for 90° flanged elbow)(참고문헌)

또한, 매끈한 원형관에 대해서 마찰계수는 다음과 같이 주어진다.(참고)

$$f = \frac{64}{Re_D} \quad \text{층류} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned}
 f &= 0.316Re_D^{-0.25}, & Re_D < 30,000 & \quad \text{난류} & \quad (3.15) \\
 f &= 0.184Re_D^{-0.2}, & 30,000 < Re_D < 1,000,000 &
 \end{aligned}$$

각 노드의 밀도는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_i = \rho_c \quad (i=1,8,9,10,11,12) \quad (3.16-1)$$

$$\rho_i = \rho_h \quad (i=2,3,4,5,6,7) \quad (3.16-2)$$

여기서,

ρ_c = 저온관에서의 유체밀도

ρ_h = 고온관에서의 유체밀도

식 (3.16)의 밀도를 각 노드의 밀도에 대입하여 식 (3.2)에서 식 (3.13)까지를 모두 합하면 다음과 같은 하나의 식이 도출된다.

$$\begin{aligned}
 & f \frac{L}{D} \frac{G^2}{2\rho_c} + f \frac{L}{D} \frac{G^2}{2\rho_h} + f \frac{|h_3 - h_2|}{D} \frac{G^2}{2\rho_h} + f \frac{|h_6 - h_7|}{D} \frac{G^2}{2\rho_h} + f \frac{|h_8 - h_7|}{D} \frac{G^2}{\rho_h + \rho_c} \\
 & + f \frac{|h_8 - h_9|}{D} \frac{G^2}{2\rho_c} + f \frac{|h_1 - h_{12}|}{D} \frac{G^2}{\rho_c} + 2K_{elbow} \left(\frac{G^2}{2\rho_c} + \frac{G^2}{\rho_h} \right) + f \frac{|h_2 - h_1|}{D} \frac{G^2}{\rho_c + \rho_h} \\
 & = (\rho_c - \rho_h)g \frac{(h_7 + h_8 - h_1 - h_2)}{2}
 \end{aligned} \quad (3.17)$$

위의 자연순환에 관한 식 (3.17)에서 가속에 의한 압력변화항이 제거되었고, 마찰력과 유로 형상에 의한 압력강하와 부력에 의해 생기는 압력이 평형을 이루면서 자연순환에 의한 유동량이 결정된다. 액체금속이므로 차가운 영역과 뜨거운 영역의 밀도차가 두 밀도의 차를 제외한 항에서는 0이라는 가정은 식 (3.17)를 보다 더 단순한 형태로 다음과 같이 변환시킨다.

$$2f \frac{L}{D} \frac{G^2}{2\rho_c} + 2f \frac{|h_3 - h_1|}{D} \frac{G^2}{2\rho_c} + 4K_{elbow} \frac{G^2}{\rho_c} = (\rho_c - \rho_h)g \frac{h_7 + h_8 - h_2 - h_1}{2} \quad (3.18)$$

차가운 영역과 뜨거운 영역의 저온용융합금물의 밀도차는 부력에 관련된 밀도 변화를 제외하고는 유체를 비압축성으로 가정하는 Boussinesq 가정에 의해 열팽창계수 β 와 온도차 ΔT 로 나타낼 수 있다.

$$\rho_c - \rho_h = \rho_c \beta \Delta T \quad (3.19)$$

두 영역의 온도차는 질량유속과 원형관 직경, 가열부위의 열용량, 열속으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G \frac{\pi D^2}{4} c_p \Delta T = Q = q \pi D (h_2 - h_1) \quad (3.20)$$

Pb-Bi와 본 연구 해석에 이용할 액체금속로의 작동유체 상사물로 용점이 낮아 다루기 쉬운 저온용융합금의 주요 물성치는 표 3.4에 정리되어 있다.

표 3.4 Pb-Bi와 저온용융합금물의 주요 물성치[13]

물성치	Pb-Bi	저온용융합금물
구성성분	44.5% Pb, 55.5% Bi	26.93% Pb, 49.92% Bi 13.28% Sn, 9.85% Cd
녹는점 (T_{melt})	125°C	70°C
밀도 (ρ)	10240 kg/m ³	9383.2 kg/m ³
부피 열팽창계수 (β)	$2.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$	$2.2 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
열전도도 (k)	11.9 W/m · K	18.9 W/m · K
비열 (c_p)	146.4 J/Kg · K	167.5 J/Kg · K
동점성계수 (ν)	$1.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$	$2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$
Pr	0.019	0.013

(2) 예비 수계산 결과 및 실험 조건 [엘보우 효과 고려]

그림 3.8에서 3.12는 표 3.4의 물성치와 식 (3.18), (3.19), (3.20)을 이용하여 구한 원형관 직경별 저온용융합금물의 유속에 따른 Re 수, 밀도차, 온도차, 가열 히터의 열속, 열용량을 나타내는 그래프를 보여주고 있다.

그림 3.8에 따르면 파이프 직경이 커질수록 낮은 속도영역에서도 난류유동임을 볼 수 있다. 본 실험의 결과를 액체금속로에 적용시키려면 그 유동이 난류가 되어야 하므로 실험 루프의 파이프 직경은 되도록 큰 것이 좋을 것을 알 수 있다. 그림 3.9는 파이프 직경별 유속에 따른 밀도차를 보여주고 있다. 밀도차는 최대 0.0025 kg/m^3 이고 저온용융합금물의 밀도는 9383.2 kg/m^3 이다. 따라서 위의 계산에서 두 밀도의 차를 제외한 나머지 항에서 온도 상승에 따른 밀도변화를 고려하지 않는 것이 타당함을 보여주고 있다. 그리고 파이프 직경이 작을수록 차가운 영역과 뜨거운 영역의 밀도차가 같은 유속에서 점점 커짐을 알 수 있다. 그림 3.10은 파이프 직경별 유속에 따른 뜨거운 영역과 차가운 영역의 온도차를 보여주고 있다. 파이프 직경이 작을수록 온도차가 커짐을 볼 수 있는데, 이는 그림 3.9의 밀도차에서도 같은 결과를 볼 수 있다. 이는 파이프 직경이 작으면 같은 유속이지만 질량유량이 작아지기 때문에 그만큼 차가운 영역과 뜨거운 영역의 온도차이가 커짐을 알 수 있다. 본 실험에 쓰이는 저온용융합금물은 150°C 이상이 되면 타버리기 때문에 실험 루프의 파이프 직경은 클수록 보다 넓은 영역에서의 실험 수행이 가능하다.

그림 3.11은 파이프 직경별 유속에 따른 가열부분 평균열속을 알 수 있다. 파이프 직경이 커질수록 평균열속은 커짐을 볼 수 있다. 따라서 직경이 큰 파이프를 사용했을 때, 히터 표면 온도가 높아져서 저온용융합금물의 한계온도인 150°C 이상이 될 수도 있다. 그러나 그림 3.10의 온도차에서 직경이 작을 때 온도차가 훨씬 커지므로 저온용융합금물 전체가 150°C 이상이 되기 쉽기 때문에 큰 열속에도 불구하고 직경이 큰 파이프를 실험루프에 사용하는 것이 좋다.

그림 3.11의 열속을 통해 계산한 파이프 직경에 따른 유속에 따른 가열부분 히터의 열용량을 그림 3.12에서 볼 수 있다. 그림 3.12에서 보면 그림 3.11과 마찬가지로 히터의 열용량 또한 파이프 직경이 커질수록 커진다. 이는 같은 조건에서 자

연순환에 의한 열제거는 파이프 직경이 커질수록 더 원활하게 이루어짐을 알 수 있다.

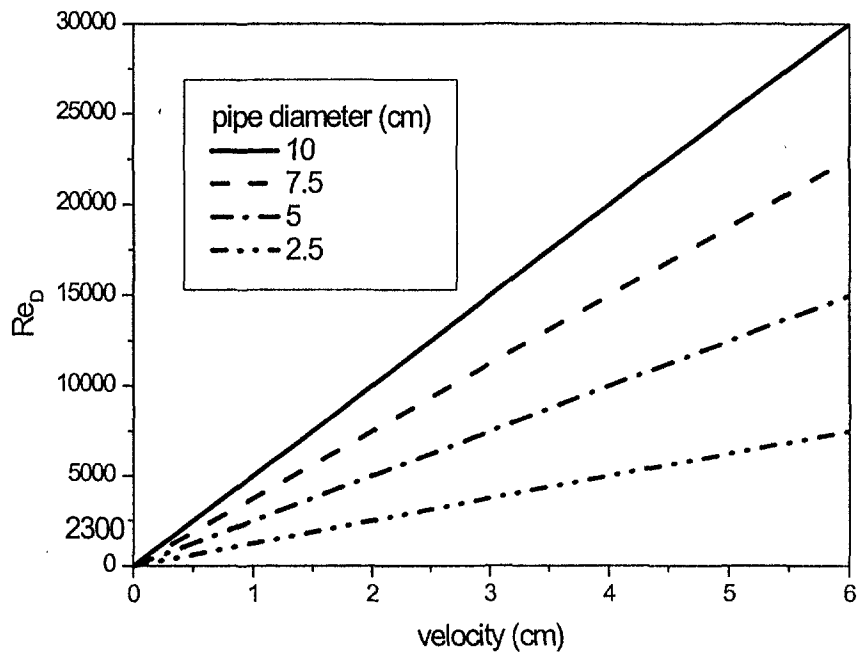


그림 3.8 원형관 직경별 유속에 따른 Re

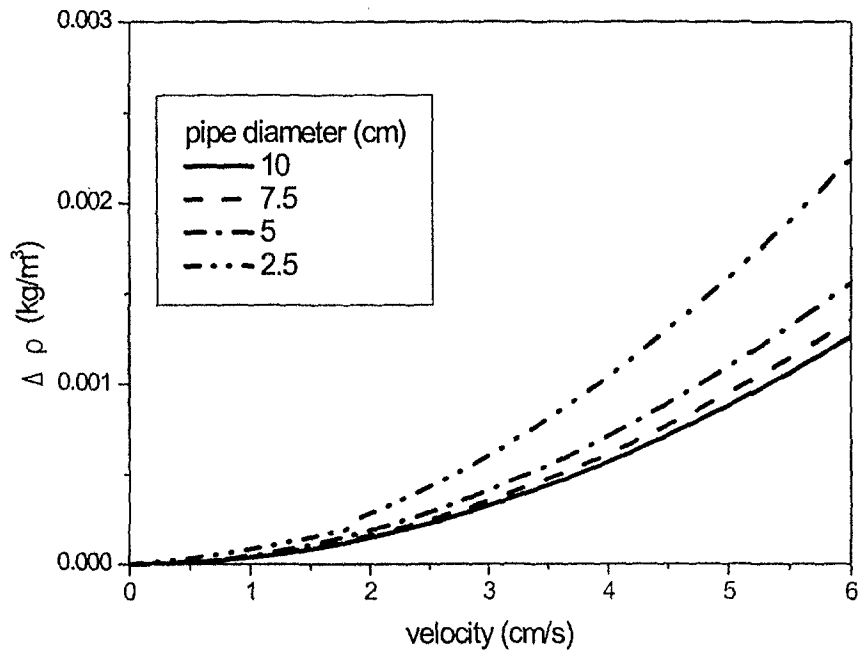


그림 3.9 원형관 직경별 유속에 따른 밀도차

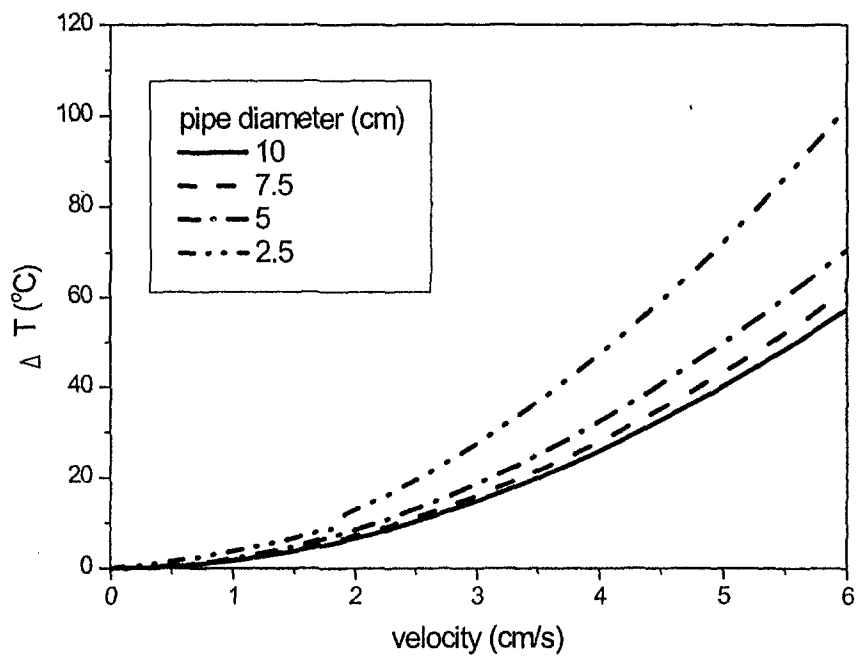


그림 3.10 원형관 직경별 유속에 따른 온도차

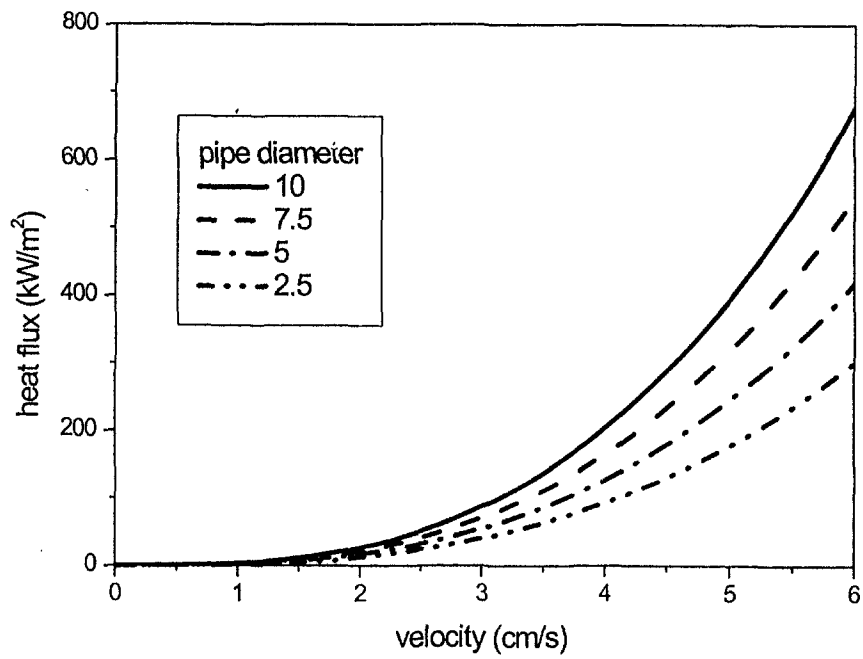


그림 3.11 원형관 직경별 유속에 따른 가열부분 평균열속

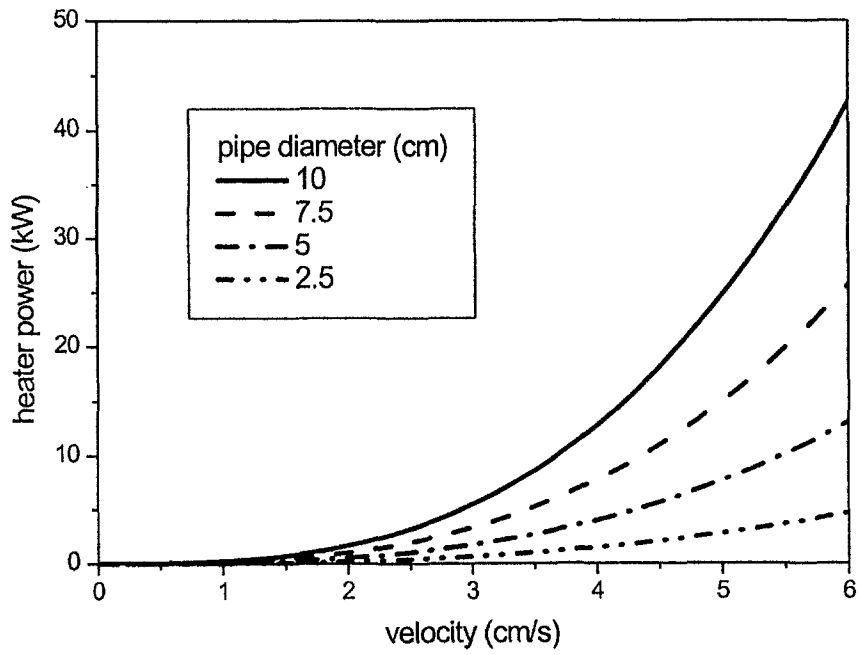


그림 3.12 원형관 직경별 유속에 따른 가열부위 열용량

(3) 예비 수계산 결과 [엘보우 효과 비교]

엘보우 효과를 고려하지 않았을 때의 예비 수계산 결과는 Visual Basic과 C++[14]을 통해 다음의 그림들과 같이 쉽게 알아볼 수 있게 출력하였다. 계산 조건은 히터의 파워가 89.38 W가 주어졌을 때의 자연순환에 의해 생기는 실험 루프내의 온도분포, 압력 분포와 속도 분포를 그래프로 그림 3.13, 3.14, 3.15에서 나타내었다. 그림 3.13에 따르면 히터의 파워가 89.38 W 시, 차가운 영역과 뜨거운 영역의 온도차이가 0.61 K이다. 그러나 엘보우 효과를 고려했을 경우 온도차이는 0.97 K가 된다. 이는 엘보우에 의한 유로 형상에 따른 압력강하 때문에 생기는 두 결과의 차이이다.

그림 3.14의 경우 루프 밑부분이 대략 1기압 정도이고 윗부분이 0.001 기압 정도로 나왔지만, 실제 압력은 윗부분이 1기압 정도가 될 것이고 밑부분은 실험 결과의 똑같은 압력 차이를 보이며 2기압 정도가 될 것이다. 이는 밀도가 10000 kg/m^3 에 가까운 유체가 1 m 이상의 높이를 가지고 있다면 수두로 바꾸었을 때 10m 정도가 되기 때문이다. 그림 3.15의 자연순환 유속과 같은 조건에서 엘보우를 고려했을 때의 유속은 각각 1.24 cm/s, 0.75 cm/s로 엘보우 고려시의 유속은 엘보우 비교려시의 유속의 60%에 해당한다. 이는 엘보우 같은 형상에 의한 압력강하가 벽면과의 마찰에 의한 압력강하 못지 않게 자연순환 유속에 영향을 미침을 볼 수 있고, 이는 그림 3.13에서 나타나는 온도차이와 엘보우 고려 시의 결과 비교와 같은 경향을 가진다.

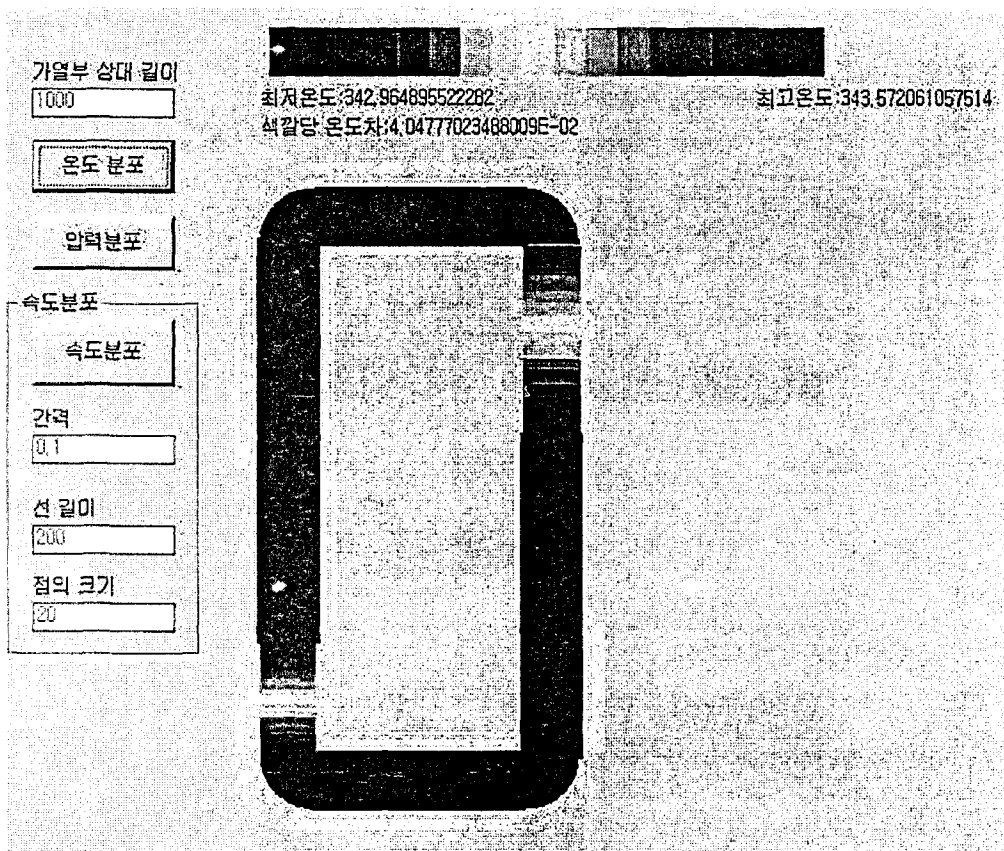


그림 3.13 엘보우 효과를 제외한 계통 내의 온도 분포

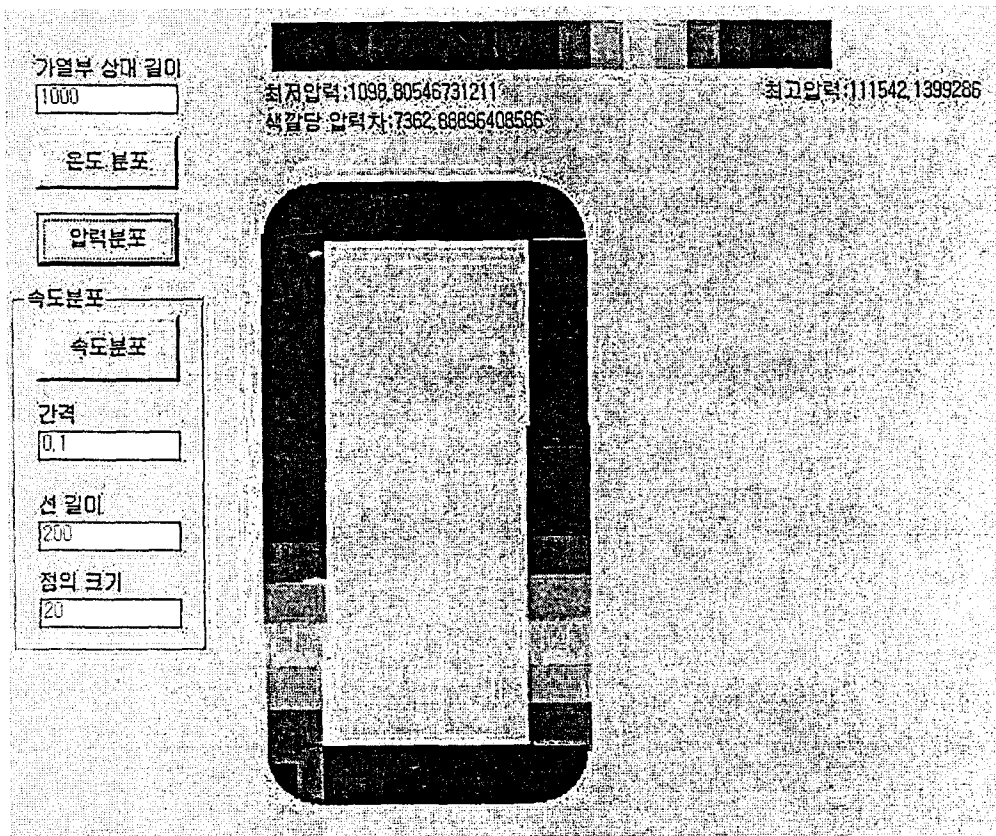


그림 3.14 엘보우 효과를 제외한 계통 내의 압력 분포

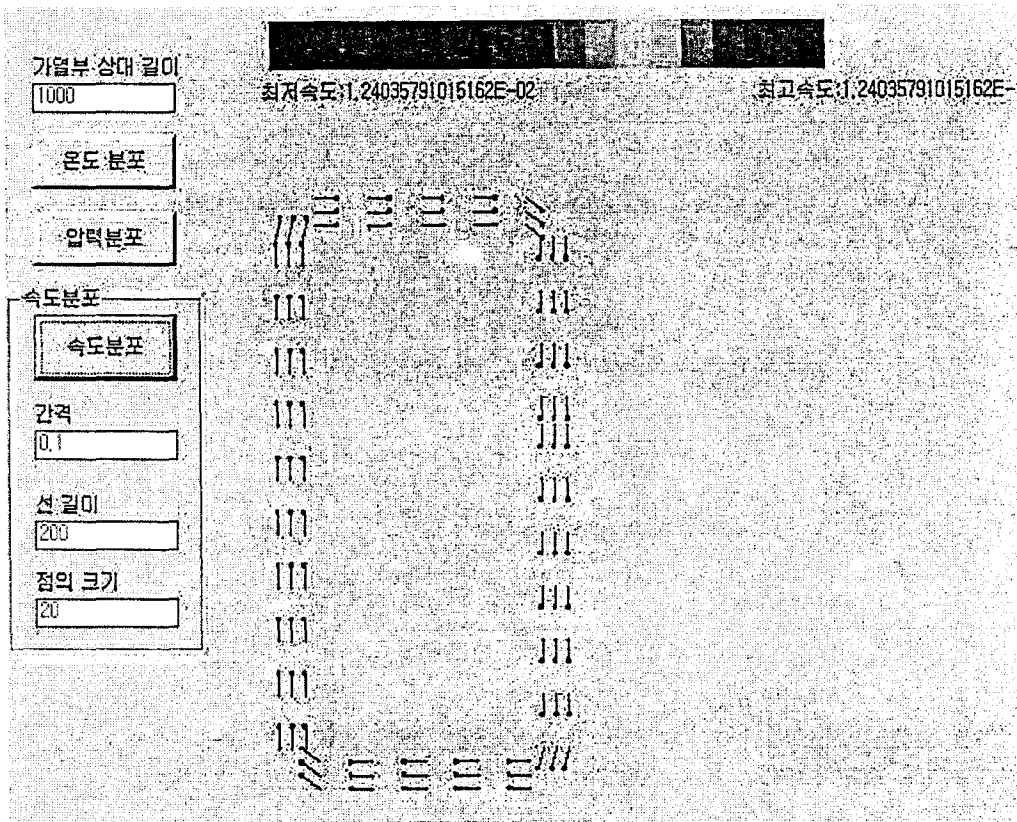


그림 3.15 엘보우 효과를 제외한 계통 내의 유속 분포

나. CFX 4.2 코드를 통한 예비 해석 수행

(1) 예비 계산 방법론

CFX 4.2[15,16,17] 코드는 다양한 범위의 열유체 유동과 열전달 과정을 모사하기 위해 사용되는 일반적인 전산유체역학 프로그램이다. 코드에 내장된 방정식들은 보수적인 형태로 계산되는 유한체적법(Finite Volume Method)에 기초를 두고 복잡한 3차원의 기하학적인 모양을 물질적인 해석모형에 적용하기 위해 경계밀착좌표계(Body Fitted Coordinates)를 도입하였다. CFX에서 속도, 압력, 온도를 계산하는 절차는 유동장에서 압력을 가정하여 운동량 방정식을 풀 다음 계산된 속도를 질량보존 방정식에 대입하여 만족여부를 확인하고, 만족하지 않으면 압력보정을 이용하여 새로운 속도와 압력값을 생성하여 에너지 방정식과 난류 방정식 등에 대입하여 계산한다. 계산된 속도, 온도, k , ϵ 등의 오차를 점검하여 수렴되지 않으면 다시 반복 계산을 수행하고, 수렴되었으면 계산을 종료한다.

CFX 코드는 pre-processing을 통하여 시작한다. 원하는 기하학 모형을 만들고 grid를 나누고 필요한 경계조건을 지정하는 작업을 한다. 우선 build를 이용하여 원하는 모형을 코드가 이해할 수 있는 형태로 그린다. 3차원 해석 코드이므로 CAD와 같은 형태이다. 모형이 그려지면 patch를 붙여서 원하는 지점에 입구, 출구, 벽 등의 조건을 지정한다. 이 작업은 command file을 만들 때 경계조건으로 지정하는 위치이므로 반드시 필요하다. Patch가 이루어지면 mesh 작업을 하는데 표면을 따라서 grid를 나누는 일을 한다. 이 grid 작업이 끝난 후 각 node들이 제대로 만들어 졌는지를 확인하는 analysis과정을 거치게 된다. Pre-processing을 통하여 만들어진 geometry 관련 파일을 solver에서 불러들여서 각 grid에 대한 정확한 결과값들과 수렴성을 파악하는 과정을 거친다. 수렴도가 확인되면 결과값에 대한 모든 정보가 dump 파일로 만들어지고 이것을 이용하여 post-processing을 거치게 된다. Post-processing은 각 grid의 결과값을 가시화하는 과정이 대표적인데 결과값을 분석·처리하는 과정이다.

본 연구에서는 앞서 수행한 수계산을 통한 해석 결과를 확인하는 과정과

Pb-Bi 냉각재를 대신할 저온용융합금이 자연순환을 모사하는데 타당한 재료인가에 대한 평가 자료를 제시하는데 사용된다. 그림 3.16과 같이 사각형 원형관 계통을 3차원적으로 모델링하여 유체 흐름에 따른 온도 분포, 압력 분포, 속도 분포를 각각 구하였다. 저온용융합금은 70℃에서 녹는 액체금속이며, 원형관을 따라 온도차에 의한 압력차로 자연순환을 하게 된다.

기본 구조는 그림 3.7 개략도와 동일하며 높이가 다른 열원과 열침을 가지고 있다. 열원의 열유속은 28 kW/m²로 설정하였다.

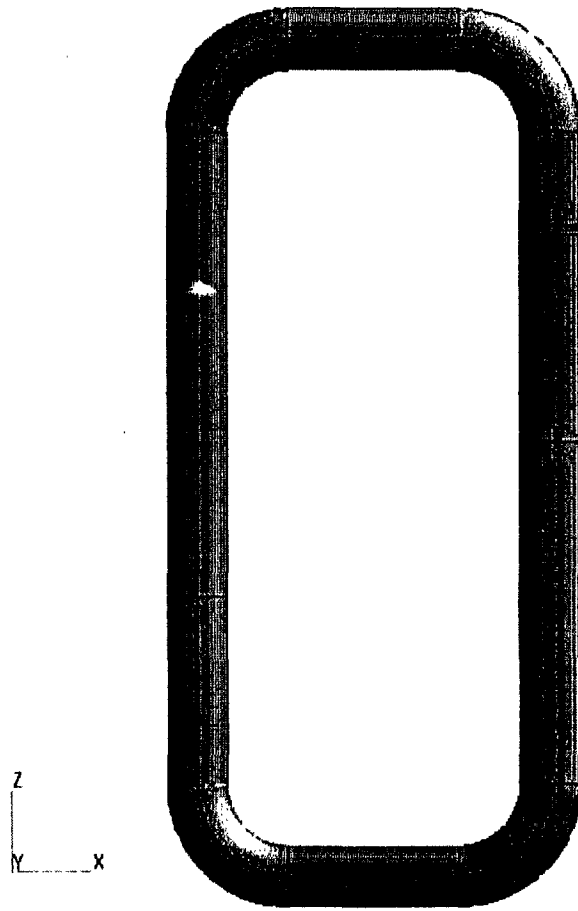
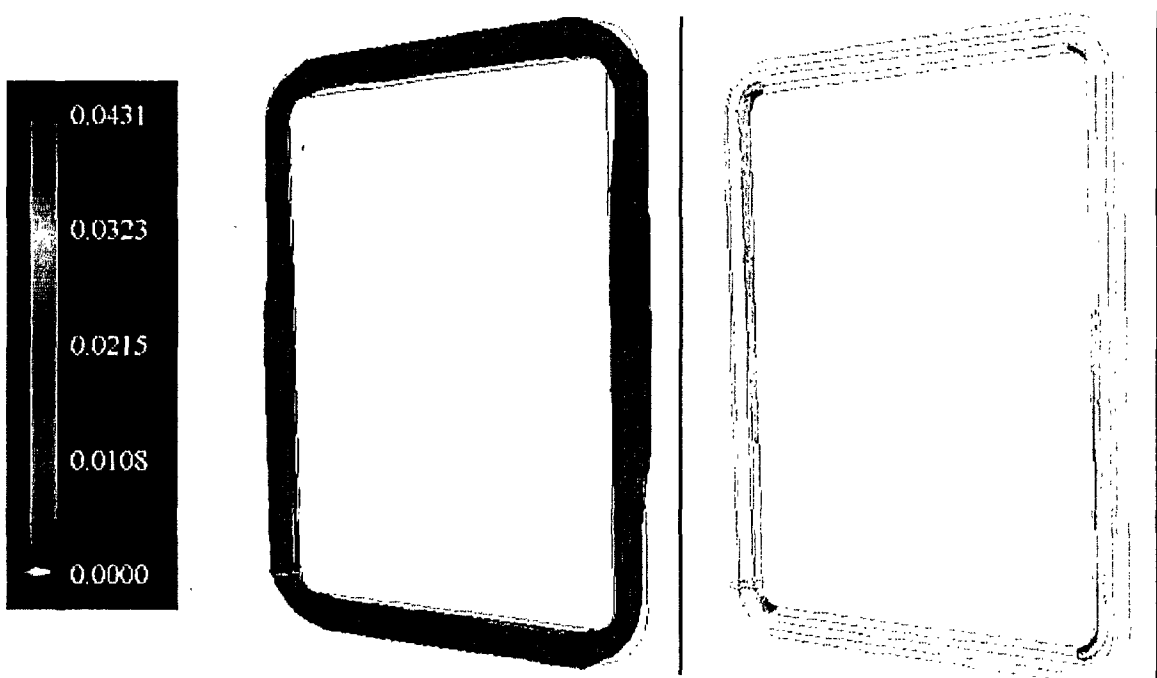


그림 3.16 CFX 4.2 코드를 이용한 실험장치 모델

(2) 예비 해석 결과

CFX 4.2 코드를 이용하여 본 연구과제에서 수행될 실험조건과 같은 기하학적 모형에서 예비 계산을 수행하였다. 특별히 가열부분의 히터의 평균열속은 28 kW/m^2 으로 가정하였다. CFX 4.2 해석에 쓰인 주요모델은 다음과 같다. k- ϵ 모델을 이용한 난류 해석과 Boussinesq 가정을 이용한 부력효과를 고려하였다. 그림 3.17은 CFX 4.2를 통하여 수행한 예비 계산 결과들 중 등속도면을 나타내고 있다. 그림 3.17(a)에 속도 2.2 cm/s 는 대략적으로 평균속도에 근접한 속도로 엘보우 효과를 고려한 예비 수계산 결과의 2.1 cm/s 와 매우 유사한 결과가 나타났다. 그리고 엘보우 효과의 경우 엘보우 안쪽면의 속도가 평균속도에 비해 빠른 것을 그림 3.17(b)의 등속도면을 통해 알 수 있다.

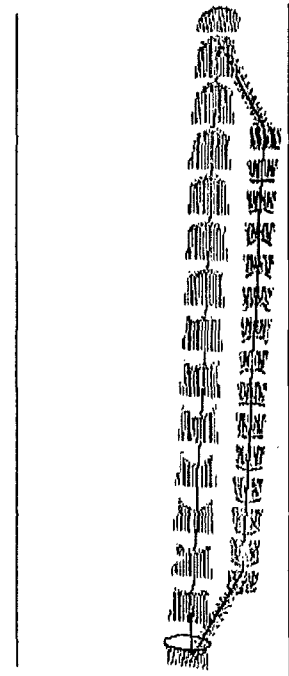
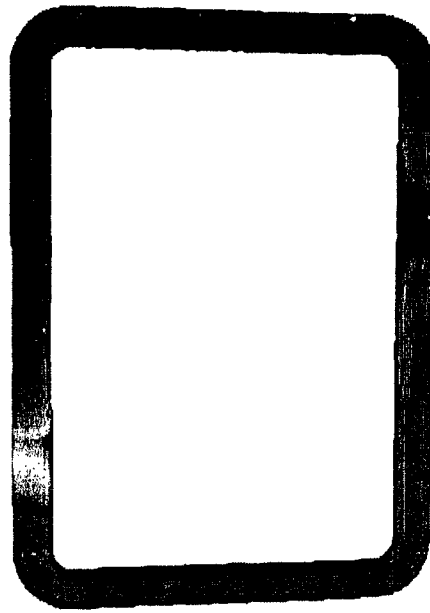
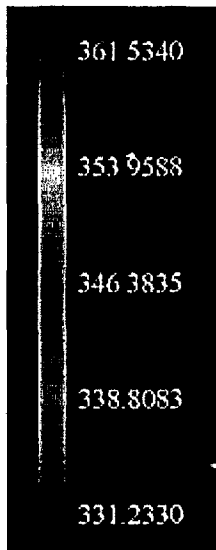
그림 3.18(a)는 외벽면의 온도분포를 보여주고 있다. 전체 루프 좌측 밑의 히터 부분에 부분적으로 온도가 매우 높음을 알 수 있다. 위의 온도분포는 절대적인 값이기보다는 상대적인 값으로 뜨거운 영역과 차가운 영역의 온도차이는 대략 7.4K 정도 나타난다. 이 결과 역시 엘보우 효과를 고려한 예비 수계산 해석 결과인 7.0K 와 매우 유사하다. 그리고 엘보우에 의한 안쪽면의 속도증가로 인한 영향으로 벽면 쪽의 온도가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 그림 3.18(b)에서는 실험루프 내부의 속도분포를 볼 수 있다. 그림 3.18(b)의 앞쪽 부분 밑의 가열 영역에서는 표면 근처의 유체 온도가 더 높기 때문에 표면 근처의 속도가 더 높은 분포를 가진다. 이 분포가 단열처리된 파이프 내에 흐르면서 그 속도분포가 점점 난류에서의 완전발달영역에서의 속도분포와 유사한 분포를 가지게 된다. 그리고 뒤쪽의 냉각 영역에서는 표면 근처의 온도가 감소하면서 표면근처의 속도가 커지면서 가열 영역과 반대의 양상을 띄게 된다.



(a) 0.02m/s

(b) 0.031m/s

그림 3.17 CFX 4.2에 의한 계통 내 등속도면



(a) 외벽면 온도분포(K)

(b) 내부 벡터 분포

그림 3.18 CFX 4.2에 의한 계통 외벽면 온도분포(K)와 내부 벡터 분포

제3절 실험 내용

1. 실험 장치 구성

자연순환 거동을 실험적으로 연구하기 위한 실험장치를 제작하였다. 이 실험장치의 주요 구성요소는 열원의 기능을 하는 히터와 열침의 기능을 하는 열 교환기, 그리고 부수적으로 자연순환의 특성을 연구하기 위한 유체를 미리 저장해놓기 위해 루프 상단부에 저장 탱크를 설치하였다.

실험장치의 재질은 시중의 상업용 규격의 스테인레스 파이프로 만들었고, 루프의 내경은 105mm이고 두께는 4mm 이다. 파이프의 중심선을 기준으로 루프의 높이는 1400mm, 너비는 60mm 이다(그림 3.19).

열원으로 쓰일 히터는 루프의 정면에서 좌측 하단부 중심선에서 150mm로부터 떨어진 부분에 설치하고 길이는 300mm이다. 이를 위해 반 원 형태의 길이 150mm, 내부직경은 파이프 외부직경과 같은 113mm의 히터 4개를 제작하여 전체적인 열원을 구성하였다. 각각의 히터 요소는 알루미늄 주물로 제작하였고, 최대출력이 2kW이다. 알루미늄 주물로 만든 히터는 400°C 이상 가열되면 형태의 변형이 야기되므로 온도를 측정할 수 있는 열전대를 설치하도록 직경 3mm의 홀을 만들었다(그림 3.20).

열 교환기는 루프의 우측 상단부에 설치하여 열침으로서의 역할을 하게된다. 이는 외부 직경 216.3mm, 길이 350mm의 상업용 규격의 스테인레스 파이프로 사용하여 제작하였다(그림 3.21). 열 교환기의 냉각수는 공업규격의 상업용 냉각기를 통하여 공급되고, 일정한 유량의 냉각수를 주입하기 위해 별도로 유량계 조절 장치를 설치하였다(그림 3.22). 모든 부품들은 두께 25mm의 유리섬유로 단열하여 실험과정 중 대기로의 열손실을 감소시켰다.

자연순환시 루프 내부 각 부위별로 온도를 측정하기 위해 그림 3.7과 같이 각 노드마다 열전대(K-type)를 설치하였다. 히터 내부표면 온도와 외부표면에도 K-type의 열전대를 설치하여 입력한 출력이 외부로 발산하는 양을 계산하였다(그

림 3.23).

2. 실험 방법

그림 3.24의 실험 루프에 물을 채워 넣고 파워 조절을 통해 전압과 전류를 설정하여 전열기 용량을 1.5kW로 유지하게 만들었다. 승온되는 동안 디지털 온도계로 온도를 측정하여 루프 내부의 전체적인 상태를 추정하였다. 냉각수 공급기에서 냉각수의 온도를 설정하여 평형이 되기를 기다렸다가 전체적인 자연순환 실험을 시작하였다. 본 실험에서 설정한 냉각수 온도는 10℃이고 그림 3.25와 같이 3000초 이후부터 평형상태가 이루어짐을 볼 수 있었다. 실험의 각 부위에 설치되어 있는 열전대는 온도에 따라 기전력을 발생시키고 이는 자료 분석기(그림 3.26)를 통하여 온도로 변환되어 PC에서 디스플레이 되면서 동시에 저장하도록 되어 있다. 본 실험의 전체적인 구성도는 그림 3.27과 같다.

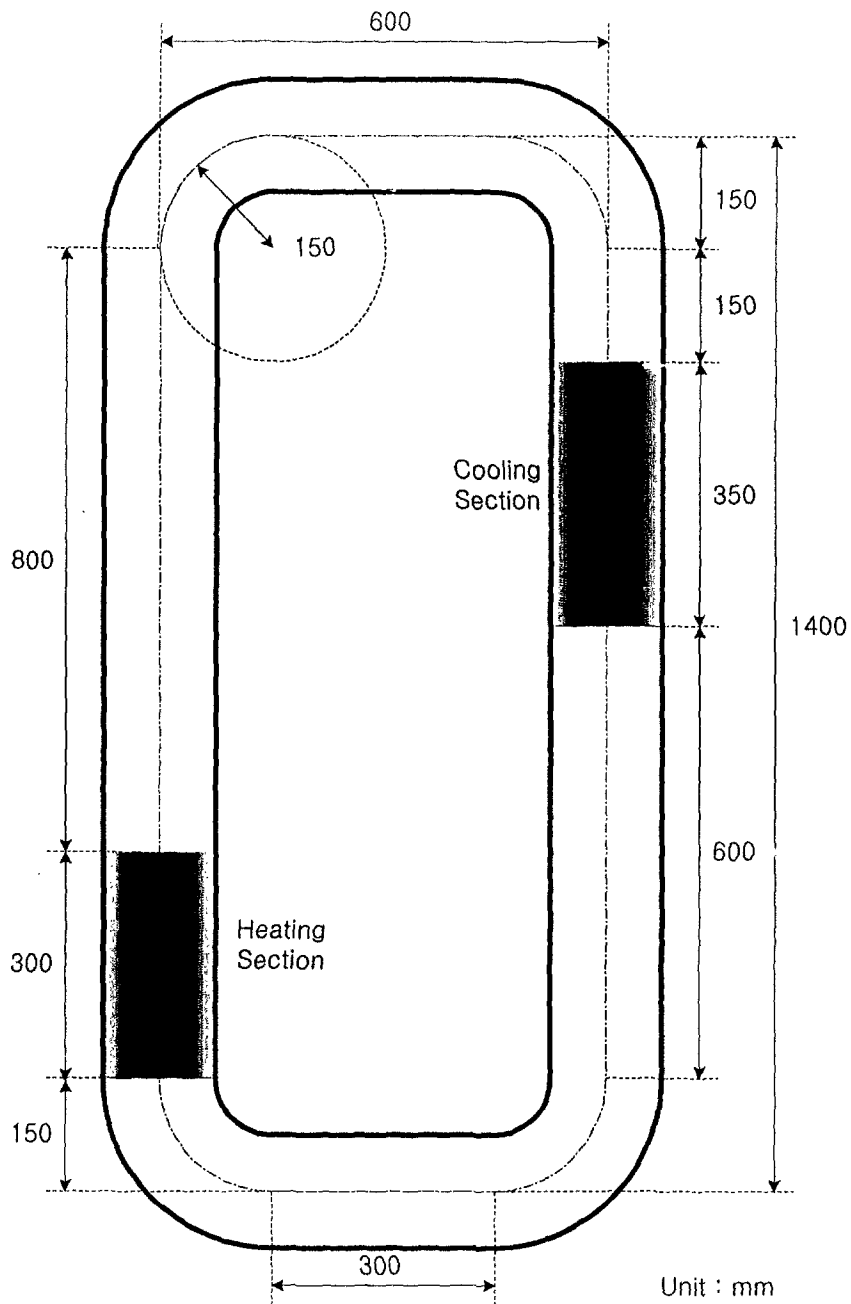


그림 3.19 실험 루프의 기하학적 크기

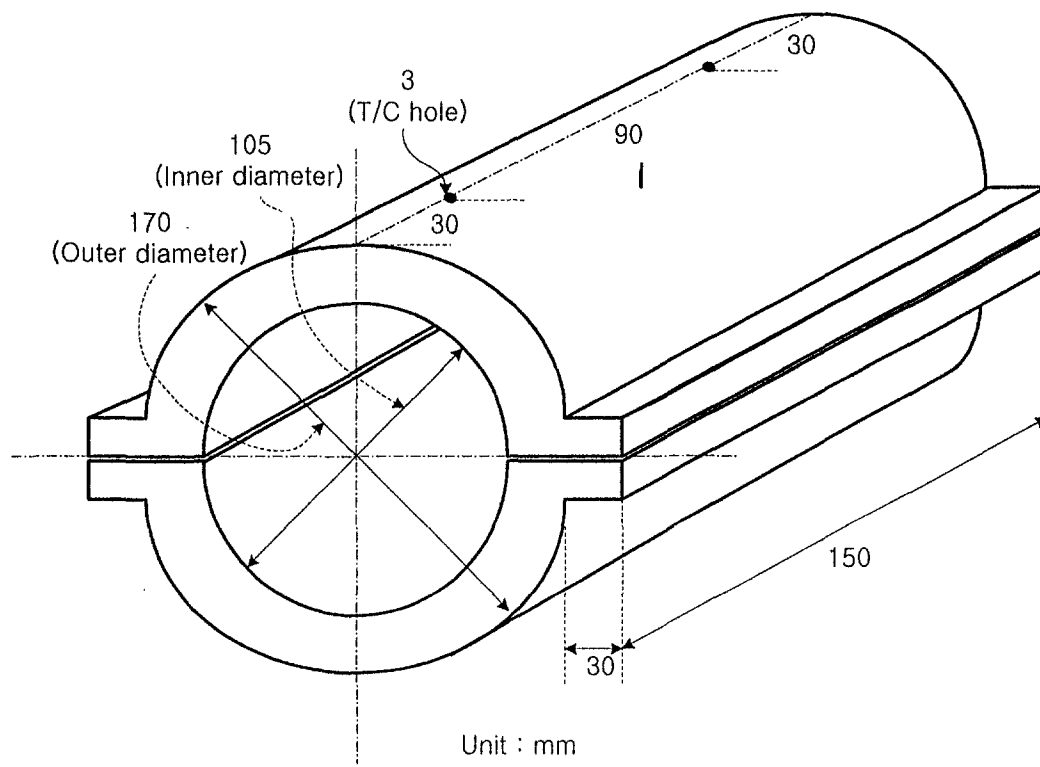


그림 3.20 히터의 개략도

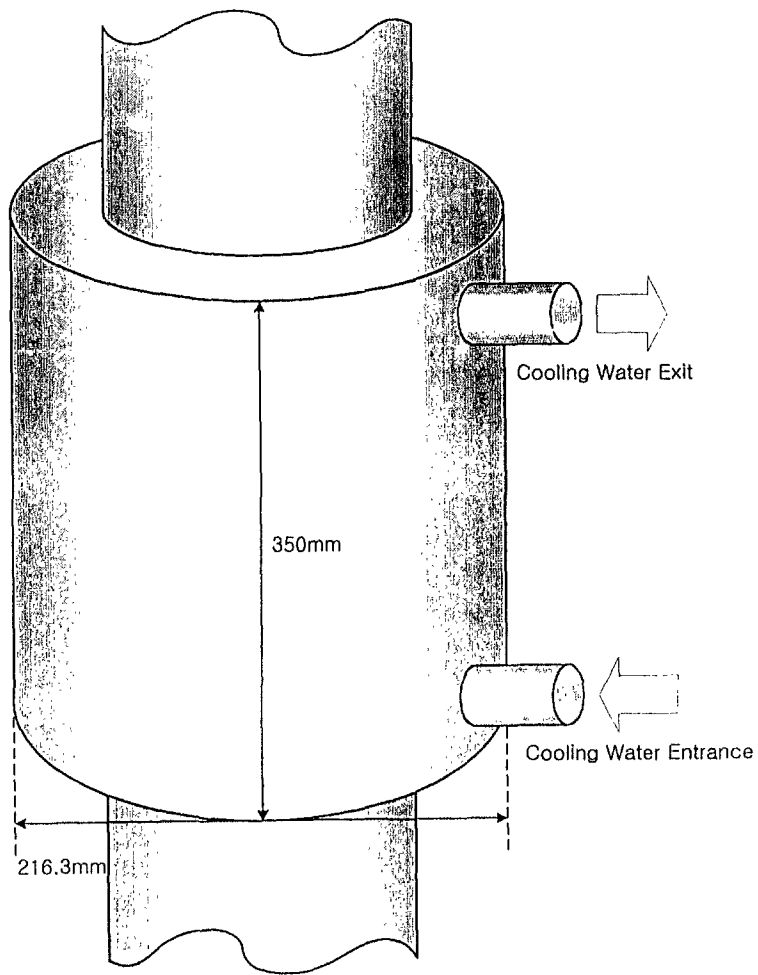
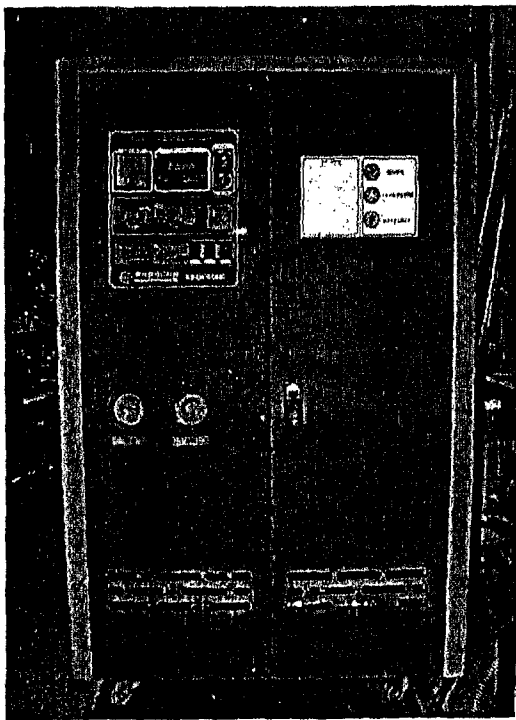
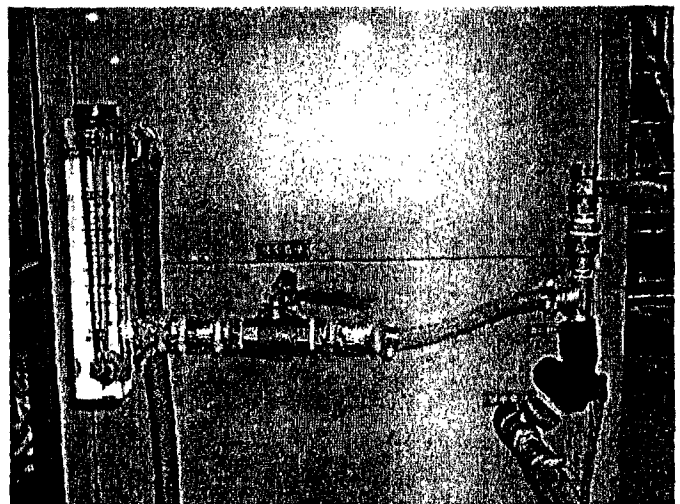


그림 3.21 열 교환기



(a) 정면부



(b) 후면부

그림 3.22 냉각수 공급기

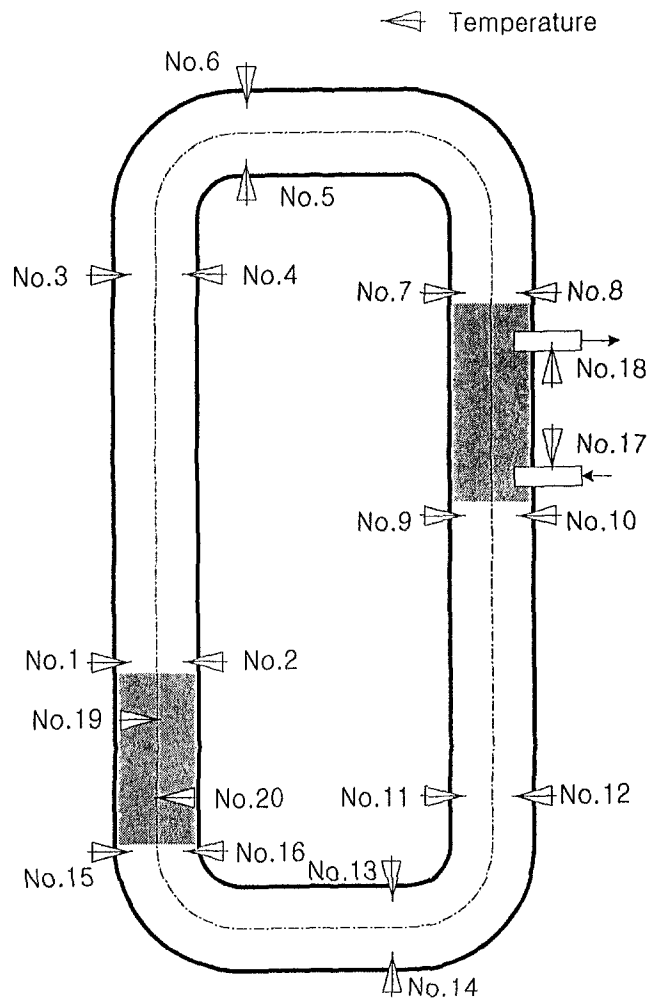


그림 3.23 온도 측정 위치

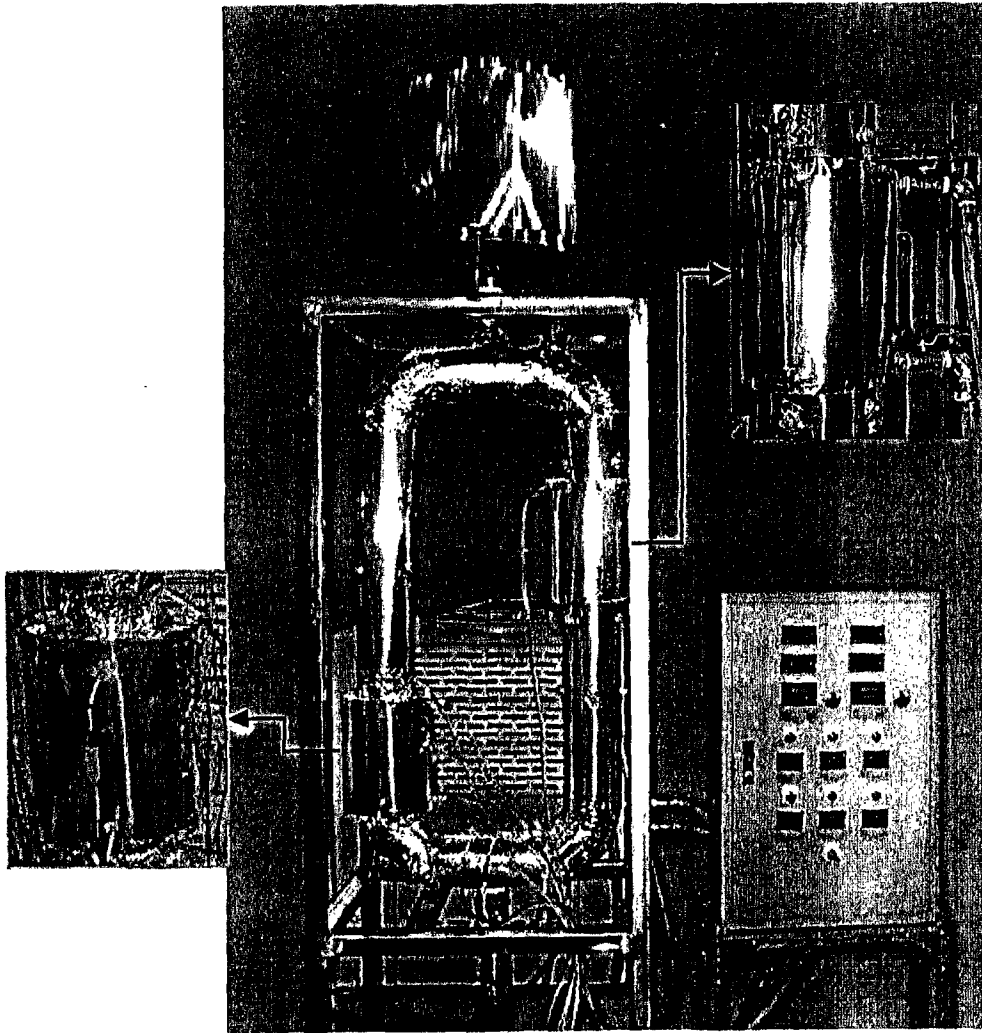


그림 3.24 실험 장치

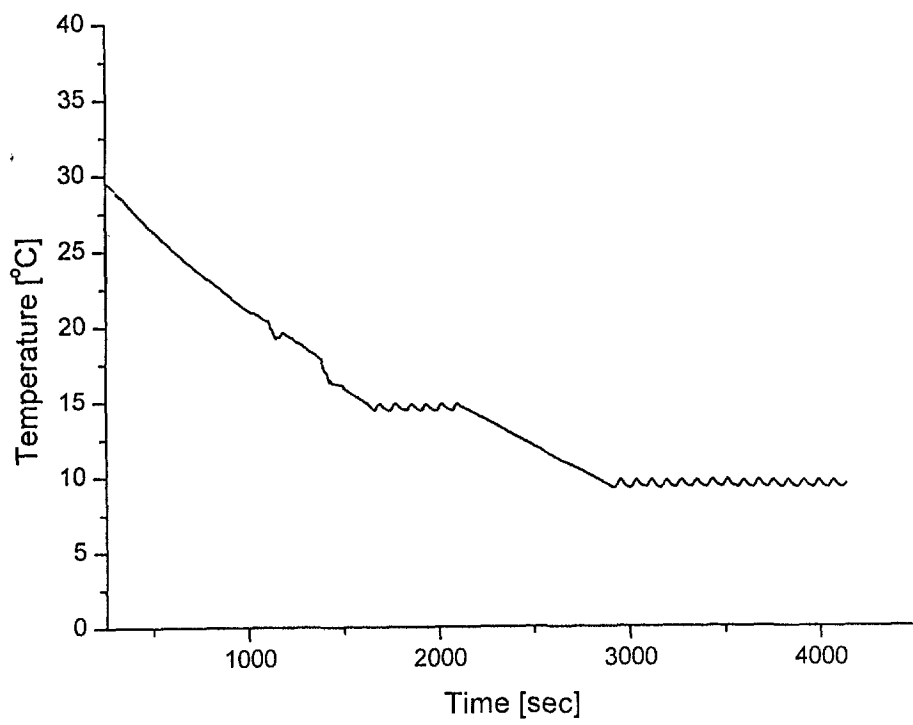
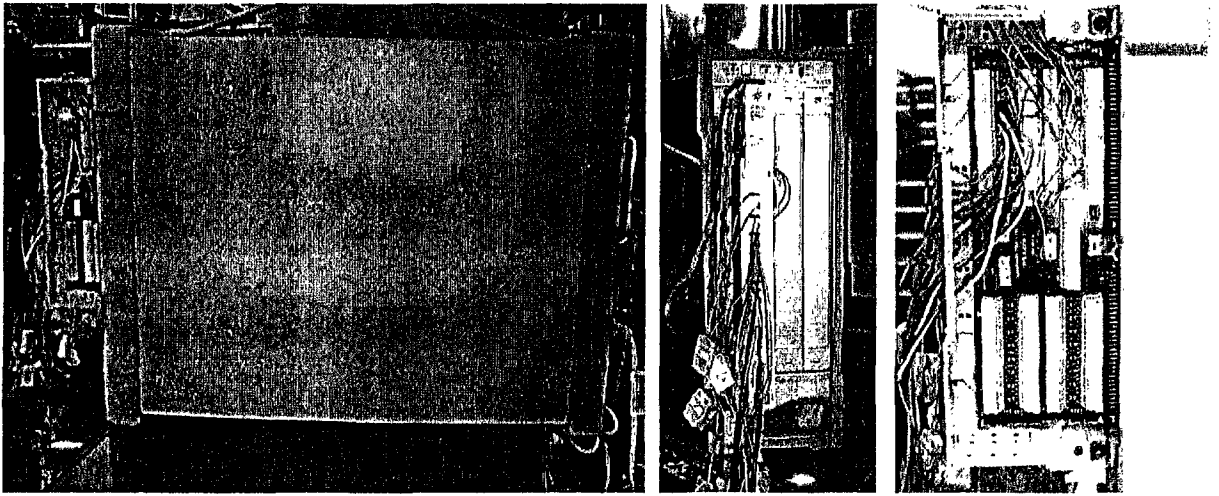


그림 3.25 시간에 따른 냉각수 온도변화



(a) 측면부

(b) 정면부

(c) 슬롯 카드

그림 3.26 자료 분석기

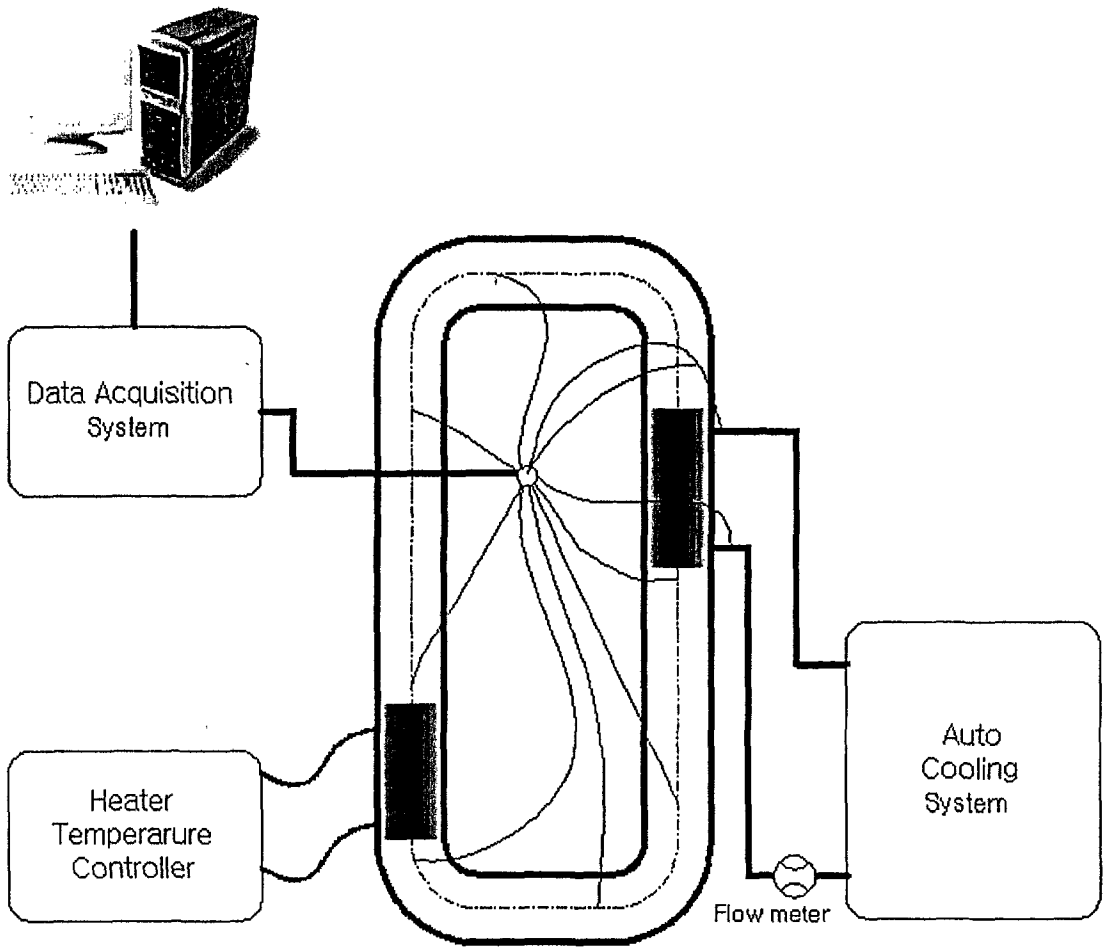


그림 3.27 실험장치 구성도

제4절 실험 결과

1. 온도 분포

고온관 부분과 저온관 부분의 평균적인 온도는 그림 3.28과 같이 나타났다. 냉각수 온도가 점차 내려감에 따라 고온관과 저온관의 평균온도도 같이 내려가고, 3000초 후의 냉각수 온도가 일정해짐에 따라 과도 상태를 나타내던 고온관과 저온관의 온도도 정상상태를 유지하면서 온도 차이를 보였다.

정상상태 이후부터의 고온관 및 저온관의 평균온도는 각각 62.35℃와 61.8℃로서 루프내부에서 비등현상이 발생하지 않고, 단상 자연순환 조건을 만족시키고 있다. 또한, 각 노드에서의 평균온도를 측정·비교한 결과, 일정한 온도차이가 발생하였으므로 온도변화에 따른 밀도차로 인한 유동이 형성되고 있음을 증명한다(그림 3.29).

실험에서 구한 고온관과 저온관의 온도차를 이용하여 내부 유체의 유속을 구하였다. 먼저, 1차원 모델을 사용하여 물 유속에 따른 온도차(그림 3.30), 히터 용량(그림 3.31) 그리고, 압력 강하(그림 3.31)를 구하여 실험에서 측정된 온도차에서도출한 유속과 1차원 모델에서의 이론적인 수치를 비교하였다. 또한 3차원 효과가 고려된 CFX 4.2 결과와도 비교하였다.

주어진 온도를 이용하여 다음 식으로 유속을 구할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{Q}{m \times c_p} \quad (3.21)$$

일정한 열 유속을 공급하는 히터는 그 자체가 완전한 단열이 되지 않기 때문에 외부로 빠져나가는 열속을 계산해야 했다. 히터 외부 표면에 장착한 접촉 열전대로 온도를 파악하고, 면적비등을 고려하여 순수하게 루프 내부로 공급되는 열 유속은 전체 열 유속의 35%로 계산되었다. 따라서, 1.5kW의 출력을 가진 히터에서는

0.525kW에 해당하는 열 유속만이 루프 내부의 열원으로 쓰인다는 것을 짐작 할 수 있었다. 이 같은 열 유속 보정 결과와 식 (3.21)을 통해 약 3.23 cm/sec의 루프 내부의 유속을 도출하였다. 그림 3.30을 통하여 실험에서 구한 온도차이에 대응하는 유속이 실제 도출한 값보다 크다는 것을 알 수 있다. 이는 실험 루프의 예기치 않았던 열 손실이 있음을 말해 주고 있는데, 예를 들어 루프 표면을 통한 열전달, 열전대를 장착하기 위한 소켓과 루프 상단과 하단에 연결되어 있는 방출 밸브, 그리고 루프와 루프 프레임을 고정시켜 주는 연결부 등을 통한 열전달이 그 주요 원인이 되겠다. 이와 같은 외부 열전달의 현상은 온도차에 따른 히터 용량(그림 3.22)에서도 설명된다. 실험에서 도출한 유속에 대한 히터 용량은 실제 실험에서 공급한 보정 용량보다 적음을 확인할 수 있다. 이 또한 외부로의 열손실이 가져다 주는 결과라고 볼 수 있다.

실험에서 도출한 유속을 가지고 그에 따른 압력 강하(그림 3.23)를 예측해 보면 5.0×10^{-6} atm으로 아주 미세하게 압력 강하가 일어남을 볼 수 있다. 실제 압력 강하를 측정하기 위해서는 정밀한 차압계를 요구한다.

CFX 4.2를 통해 실험조건과 같은 경계조건 하에서 분석한 결과, 온도차이는 실험값보다 작은 0.48 °C, 평균 유속은 실험값보다 큰 0.0338 m/s이다. 모든 그래프에서 CFX 4.2의 결과는 실험결과보다 1차원 분석 결과에 근접한 값을 가지고 있다. 이는 1차원 분석에서 전 영역이 완전발달 영역으로 가정되었기 때문에 생기는 차이이다. 실험 결과는 CFX 4.2 와 같은 발달영역에 따른 영향뿐만 아니라 열적 손실 및 여러 다른 인자들 때문에 1차원 분석 결과와 CFX 분석 결과보다 자연순환 속도가 작게 측정된다.

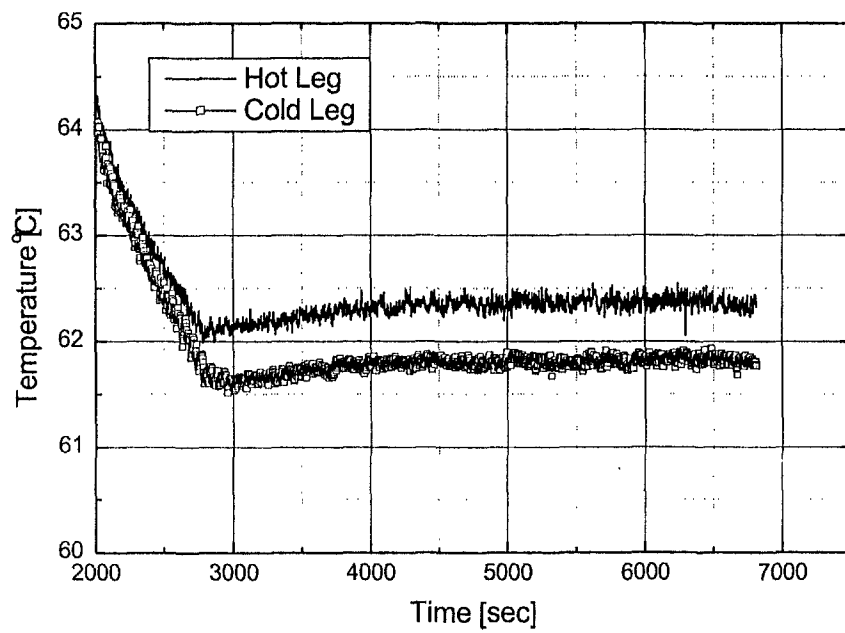


그림 3.28 고온관과 저온관의 평균온도 변화

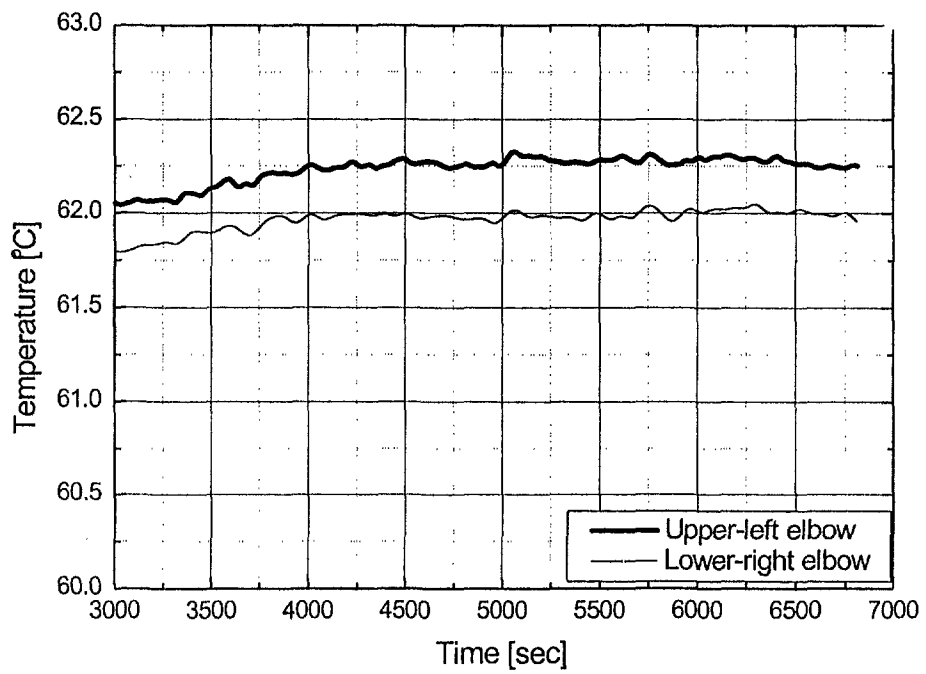


그림 3.29 좌측상단부와 우측하단부 엘보우에서의 평균온도

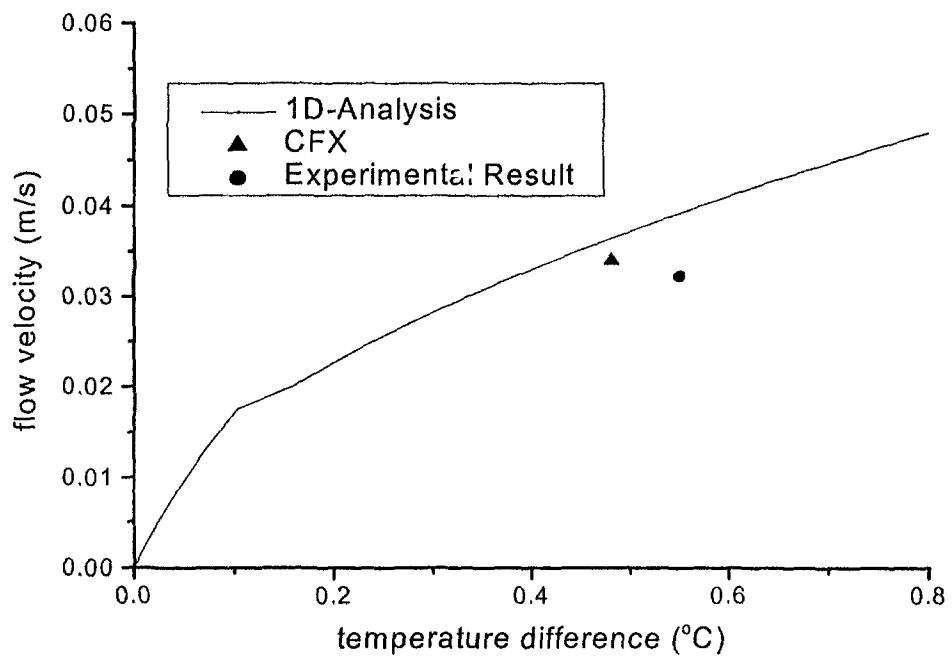


그림 3.30 온도차이에 따른 유속

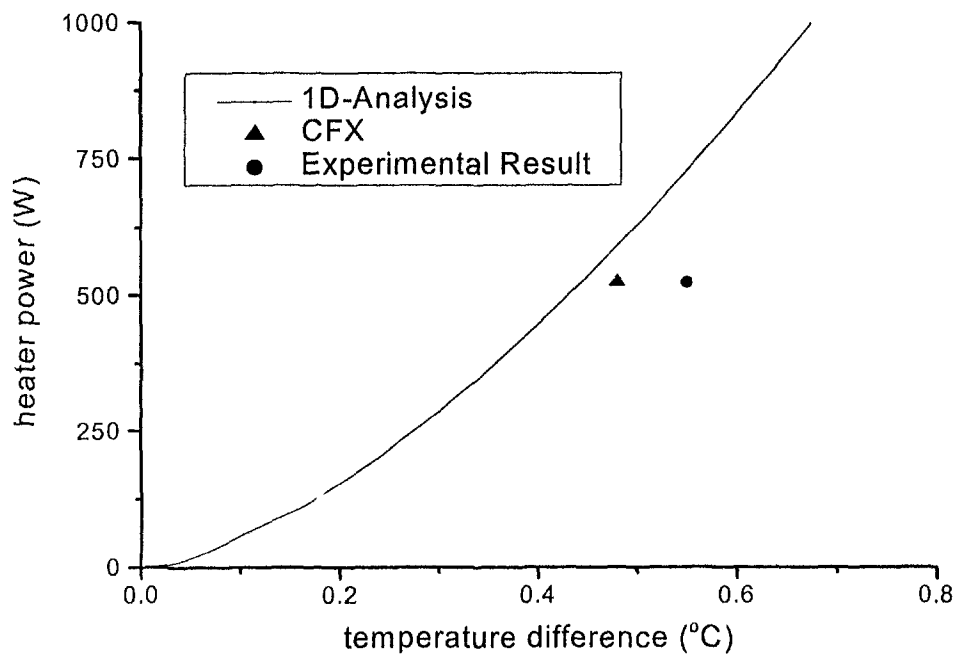


그림 3.31 온도 차이에 따른 히터 용량

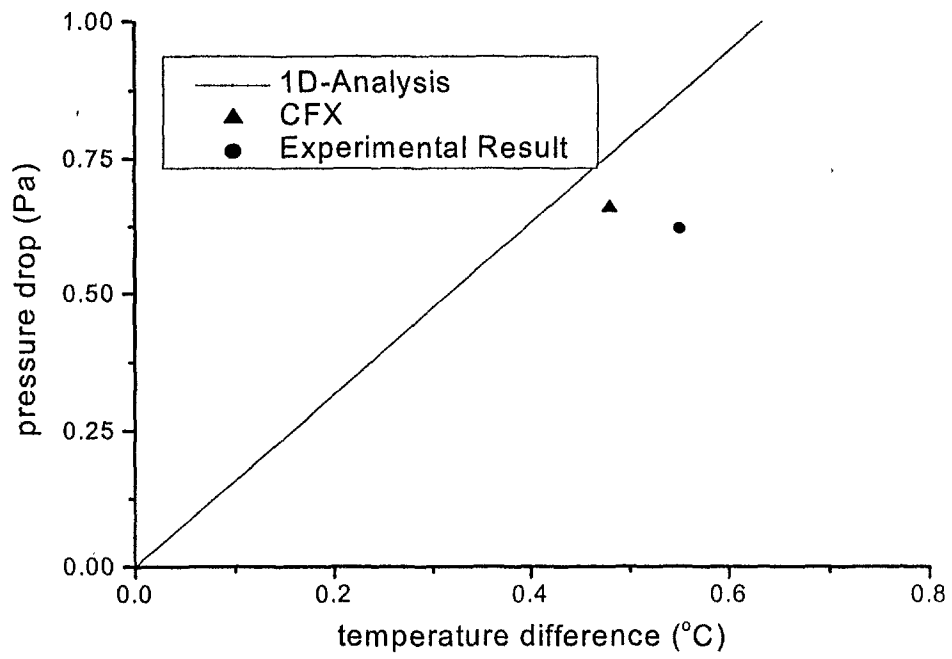


그림 3.32 온도 차이에 따른 압력강하

제5절 척도해석

크기가 다른 실험장치나 물성치가 다른 유체를 실험에 사용했을 때는 상사성(Similarity)을 유지해주기 위해 스케일링이 매우 중요하다. 이 스케일링에는 여러 가지 방법이 있다. TMI-2 사고 이후 소형과단 냉각재 상실 사고에 대한 연구가 활발해 짐에 따라 Ishii와 Kataoka 는 밀폐된 루프 안에서 자연순환에 관한 상사성 기준(Similarity Criterion)을 유도하게 되었다. 이들의 모델은 이론적인 면에서 매우 정확한 것으로 평가받았으며 미국에서는 이 모델을 IST(Integral System Test)의 설계와 자료 처리에 광범위하게 적용하였다.

일반적으로 자연순환에 대하여 적절하게 질량, 운동량 그리고 에너지의 1차원 미분방정식을 세운다. 그 중 운동량 방정식에 대하여 압력에 관한 항을 제거하기 위하여 루프 둘레에 대하여 적분을 한 후, 그 결과식을 무차원화시켜 상사성 기준을 나타내는 무차원 변수들을 찾아낸다. Ishii의 스케일링방법에 의해 얻어진 모든 무차원수들은 원칙적으로 실제 원자료와 모델에서 같은 값을 가져야 한다. 그러나 실험장치 제작에서 이러한 무차원수들을 모두 완전히 맞추는 것이 실제로 불가능하다. 본 연구에서는 Ishii와 Kataoka가 유도한 무차원 변수들 중에서 자연순환의 물리적 현상에 미치는 영향의 중요성을 고려하여 주요한 변수들만을 골라 그들을 충족시키는 상사성 관계식을 정리하여 사용하였다. [18]

그림 3-7과 같은 실험 루프에서 1차원 유체의 흐름 및 완전단열 가정 그리고 Boussinesq 가정에 의하면 단상 자연순환에 대한 지배방정식은 다음과 같게 된다.

연속방정식

$$\rho_c u = G = \text{constant} \quad (3-22)$$

적분 운동량 방정식

$$f \frac{L_{loop}}{D} \frac{G^2}{2\rho_c} + 4K_{elbow} \frac{G^2}{\rho_c} = \rho_c \beta \Delta T g \Delta h \quad (3-23)$$

위의 지배방정식에 질량유속을 무차원하여 대입한다.

$$G^* = \frac{G}{G_i} \quad (3-24)$$

그 결과 무차원 지배방정식은 아래와 같이 전개된다.

$$G^* = constant \quad (3-25)$$

$$\left(f \frac{L_{loop}}{D} + 4K_{elbow}\right) G^{*2} = \frac{\rho_c^2 \beta \Delta T g \Delta h}{G_i^2} \quad (3-26)$$

무차원 지배 방정식으로부터 다음과 같은 무차원 수들을 얻을 수 있다.

Richardson 수 (부력 / 관성력)

$$R = \frac{\beta \Delta T g \Delta h}{u_i^2} \quad (3-27)$$

Friction 수

$$F = f \frac{L_{loop}}{D} + 4K_{elbow} \quad (3-28)$$

표 3-4는 물을 이용한 실험 결과에 따른 Richardson 수와 Friction 수를 실험결과와 같이 보이고 있다. 그리고 위의 무차원수들 중 Richardson 수와 Friction 수가 같아질 때의 Pb-Bi의 자연순환 조건을 보이고 있다

이 밖에 수정된 Stanton 수, Fourier 수, Biot 수 등의 무차원수들이 에너지 방정식과 유체 고체간의 경계조건에 포함되어 있으나, 이들 수는 자연 순환 속도 결정에 영향이 없다고 볼 수 있다. 파이프 내에서 방사방향의 온도분포가 속도분포에 영향을 주어 마찰계수를 변화시키기는 하지만 큰 영향은 없다고 볼 수 있다.

표 3-5 실험결과와 예비계산의 무차원수 비교

	물 (실험)	물 (예비계산)	Pb-Bi (예비계산)	Woods Metal (예비계산)
Richardson 수	0.891	0.622	0.483	0.546
Friction 수	1.27	1.27	1.27	1.27
자연순환속도 (cm/s)	0.0323	0.0323	0.0323	0.0323
온도차 (K)	0.55	0.384	3.74	4.23

제4장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

비활성 액체금속 냉각재의 물성 자료의 수집, 냉각 계통의 모델링 및 척도해석, 자연순환 능력을 실증적으로 검증하기 위한 실험 장치를 설계하고 수계산과 CFX 4.2코드를 통한 해석등 비활성 액체금속 냉각재의 자연순환 능력 예측을 통하여 자연순환 실험에서의 압력 강하와 온도분포를 파악하였다.

이는 비활성 액체금속의 특성에 대한 기초 연구와 냉각재로서의 액체금속을 이용한 자연순환 시, 기본 현상에 대한 일체적 통찰력과 종합적 이해를 제공해준다. 이러한 연구결과는 지구 온난화에 대비하여 현재 전세계적으로 다시 활발히 연구 중인 비활성 액체금속로의 사고시 1차측의 냉각계통의 성능평가와 안전성, 경제성 평가 등 향후 국내에서 액체금속 실증로를 개발하고자 할 때 중요한 자료를 제공할 것이다. 또한, 본 연구가 비활성 액체금속이 Na에 비하여 전반적으로 우수한 성능임이 판단될 경우, 현재의 액체금속로 연구에도 반영할 수 있을 것이며, 가속기를 이용한 액티나이드 연소로 설계에도 중요한 판단 자료를 제공할 것이다. 또한, 멀지 않은 장래에 선진국에서 이러한 기술을 이용한 원자로를 개발할 경우, 기술권이 치밀하게 장악될 것이다. 따라서 본 연구와 같은 창의적 개발 노력을 지속할 경우, 우리의 기술권을 확보할 수 있고, 국제 협력과 공동 연구를 통한 선진 기술 습득과 기술 자립을 이룰 것으로 기대된다.

제5장 연구개발결과의 활용 계획

미국과 러시아는 Pb-Bi계 비활성 액체금속 냉각재 기술을 이용한 미래형 원자력 개발에 관련된 주요 기술에 대한 보호장벽을 강화하고 이에 대한 막대한 기술 이전 대가를 원할 것으로 예상된다. 이러한 추세속에서 앞으로 고속로 및 소멸처리로의 개발에 비활성 액체금속이 중요성이 부각될 전망이다. 액체금속 설계 기반 기술의 수입을 지양하고 차세대 액체금속로 개념 설계안 확보로 해외 도입 비용 부담을 경감하기 위한 자체 연구를 통한 기술의 조기 확보가 시급하다.

본 연구에서 터득한 액체금속 냉각재 특성과 고유 안전 액체금속로, 비활성 액체금속 냉각재 등 신기술에 대한 지식을 바탕으로 첨단 비활성 액체금속 냉각재의 적용 타당성을 분석하고, 신개념 액체금속로 설계 기술 방안을 도출하고자 한다.

제6장 참고문헌

- [1] 황일순 외, "핵확산 저항형 소멸처리로 개념설계 연구(Conceptual Design Study of Proliferation-Resistance Transmutation Reactor)," 과학기술부, 1998.
- [2] J. R. Weeks, "Lead, Bismuth, Tin and Their Alloys as Nuclear Coolants," Nuclear Engineering and Design, Vol. 15, pp 363-372, 1971.
- [3] 정창현 외, "소멸처리로의 냉각재 열수력학적 특성 연구(A Study on Thermal-hydraulic Characteristics of the Coolant Materials for the Transmutation Reactor)," 한국원자력연구소, 1997.
- [4] S. S. Kutateladze et al., "Liquid-Metal Heat Transfer Media," Atomic Press, Moscow, 1958.
- [5] H. A. Johnson et al., "Pipe Friction Factors for the Turbulent Flow of Lead-Bismuth Eutectic," United States Atomic Energy Commission, AECU-2852, Feb. 1954.
- [6] R. Cygan, "Lead-Bismuth Eutectic Thermal Convection Loop," United States Atomic Energy Commission, NAA-SR-1060, Oct. 1954.
- [7] R. Prasad et al., "Thermodynamic Study on Lead-Bismuth System," Bhabha Atomic Research Center, Bombay India, B.A.R.C-880, 1976.
- [8] R. C. Grassi, D. W. Bainbridge, J. W. Harman, "Final Report on Metallurgical Investigation of Materials Subjected to Liquid Lead-Bismuth Alloy Environment," United States Atomic Energy Commission, AECU-2201, July 1952.
- [9] P. L. Geiringer, "Handbook of Heat Transfer Media," Reinhold Publishing Corporation, New York, 1962.
- [10] M. D. Carelli, L. Green and D. V. Paramonov, "The Natural Circulation Potential of Lead and Lead-Bismuth Cooled Subcritical Reactors," Heavy

- Liquid-Metal Coolants in Nuclear Technologies (HLMC'98) Conference,
Obninsk, Russia, October 5-9, 1998.
- [11] N. E. Todreas and M. S. Kazimi, "Nuclear Systems I&II," Hemisphere
Publishing Co., New York, NY, USA, 1990.
- [12] F. M. White, "Fluid Mechanics," McGraw-Hill Book Co., New York, NY,
USA, 1986.
- [13] R. J. Park et al., "Natural Convection Heat Transfer with Crust
Formation in the Molten Metal Pool," Nuclear Technology, Vol. 127
Issue 1, pp. 66-83, 1999.
- [14] Microsoft Corp.
- [15] U. K. AEA Technology, CFX 4.2 : Pre-processing, Oxfordshire, UK.,
1997.
- [16] U. K. AEA Technology, CFX 4.2 : Solver, Oxfordshire, UK., 1997.
- [17] U. K. AEA Technology, CFX 4.2 : Post-processing, Oxfordshire, UK.,
1997.
- [18] 박군철 외, "과도현상 열수력학적 특성 분석," 한국원자력연구소, 1993.