

KAERI/RR-2203/2001

최종보고서

**액체금속로 설계기술개발**  
**Liquid Metal Reactor**  
**Design Technology Development**

**소듐기술개발**  
Development of Sodium Technology

주관연구기관  
한국원자력연구소

과 학 기 술 부

# 제 출 문

과 학 기 술 부 장 관 귀 하

본 보고서를 "액체금속로 설계기술개발" 과제 (세부과제 "소듐기술개발")의 최종 보고서로 제출합니다.

2002. 4. 30.

연구기관명: 한국원자력연구소

연구책임자: 최 종 현

연 구 원:	황성태	남호윤
	최운동	김태준
	최석기	정경채
	박진호(A)	김병호
	정지영	김종만
	최병해	김희령
	박진호(B)	최일곤
	이길용	김봉수

# 요 약 문

## I. 제 목

소듐기술개발

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

액체금속로가 상업화되기 위해서는 안전성과 경제성을 동시에 갖추는 것이 필수적이다. 액체금속로는 물 대신에 액체 소듐을 냉각재로 사용하기 때문에 열효율을 극대화 할 수 있는 장점이 있는 반면에, 소듐이 갖는 높은 화학 반응성으로 인하여 취급에 각별한 주의가 필요하다. 특히 액체금속로에서 고온의 용융 소듐이 대량으로 누설되면 액체금속로의 안정성에 심각한 위협을 초래할 수 있다. 또한 액체금속로의 경제성을 향상시키기 위해서는 소듐의 단점을 최소화시키고 장점을 최대화시킬 수 있는 소듐 특성 기술을 개발하여 액체금속로를 체계화 및 단순화시키는 것이 필요하다. 따라서 소듐기술개발은 액체금속로의 안정성과 경제성 확보에 관련하여 필수적으로 확보해야 할 중요한 기술중의 하나로 평가되고 있다.

그러므로 본 연구는 전산모델검증실험에 필요한 실험시설을 설계, 제작하여 액체금속로의 설계에 필요한 실험자료를 생산하고, 앞으로 액체금속로에 채용될 중요 측정 및 요소기기들을 개발과 함께 성능 확인 시험을 통하여 이들 기기들의 개발에 필요한 기술을 축적하기 위하여 소듐기반실험을 수행함과 아울러 소듐안전특성실험을 병행하여 소듐의 안전 취급기술의 확립을 그 목적으로 한다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

### 1. PSDRS 실험

가. PSDRS 실험장치 설계 및 제작

나. 실험시편 방사율 측정실험

### 2. 중간열교환기 실험

- 가. 중간열교환기 물모의 유동실험
  - (1) 기존연구의 재검토
  - (2) 실험
    - (가) 실험조건 및 실험범위
    - (나) 실험장치
  - (3) 실험자료 평가
- 나. 중간열교환기 열전달 특성 및 압력강하 실험장치 설계
  - (1) 시험부의 개념 설계
  - (2) 소듐루프의 개념 설계
- 3. 전자펌프 관성보완장치 성능특성실험
  - 가. 실험
  - 나. 실험자료의 분석
- 4. 핵연료집합체 압력강하 및 핵연료 핀다발 수중 동특성
  - 가. 핵연료집합체 압력강하 실험
    - (1) 압력강하 상관식
    - (2) 실험
  - 나. 핵연료핀다발 진동 특성 실험
    - (1) 유한요소 해석
    - (2) 검증 실험
- 5. 상부플레넘 액면요동 물모의 실험
  - 가. 임계조건을 분석
  - 나. 수위계의 자체 개발, 설계, 제작
- 6. 소듐 열유체 특성실험
  - 가. MHD 자장내에서의 유동특성 실험 개요
  - 나. 소듐용 차압계의 국산 기술 개발
  - 다. 자장하에서 소듐 압력강하 실험
    - (1) 변환 자장발생장치 설계 및 제작
    - (2) 압력강하 실험
- 7. 측정/분석 및 요소기기 기초기술 개발
  - 가. 소듐 열유속 측정 실험

- (1) 열유속 보정장치 모델링
- (2) 열유동 해석
- (3) 열유속센서 보정장치
- (4) 간이 열유속 측정시험
- 나. 국소 유속 센서 측정 실험
  - (1) 국부 유속 센서의 원리
  - (2) 국소 유속 측정 센서의 설계
- 다 중간열교환기용 중규모 전자펌프 설계
  - (1) 등가회로 해석
  - (2) 80 l/sec 중규모 환단면 선형 유도전자펌프의 설계
- 8. 소뿔화재 감지/소화실험
  - 가. 소뿔화재 감지실험
    - (1) 실험장치 설계 및 제작
    - (2) 감지실험
  - 나. 소뿔화재 소화실험
    - (1) 실험장치 구성
    - (2) 소화실험
- 9. 소규모 물 누출에 의한 표적 손상해석
  - 가. 물 누출에 대한 각 국의 현황
  - 나 소규모 물 누출 실험 및 표적 손상 해석
    - (1) 실험 장치의 제작
    - (2) 1차 실험
    - (3) Jet simulation 실험
    - (4) 실험 장치 개선 및 물 누출 예비 실험
    - (5) 반응 jet에 의한 표적에서의 온도 profile 및 손상현상 해석
- 10. 대규모 물모의 실험
  - 가. 대규모 물 누출 분석
  - 나. Spike 코드 1차 검증을 위한 대규모 물 모의 실험
- 11. 실시간 물 누출 음향신호 분석 실험
  - 가. 누출 소음 특성 및 누출 시간 예측

나. Prototype의 설계

## 12. 대체 냉각재 특성연구

가. 기술개발 현황

나. 냉각재 특성

## IV. 연구개발결과 및 활용계획

### 1. PSDRS 실험

PSDRS의 잔열제거 특성을 분석할 수 있는 정상 및 과도상태에 대한 실험결과들이 얻어졌다. 실험시편 방사율 측정실험에서는 표면온도가 증가함에 따라 스테인레스 스틸 316L과 304의 방사율이 증가하는 비율은 두 재질이 거의 같고 증가율은  $1.31 \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$  정도이었다. 표면조도(10점 평균조도)가 11.29~22.61 $\mu\text{m}$ 인 316L의 방사율은 이 온도범위에서 대략 0.44에서 0.51이며 304의 방사율은 대략 0.32에서 0.38 이었다. 이 실험치들을 표면온도의 함수로 근사식을 기술하였다. 400 $^\circ\text{C}$  정도에서 시편을 가열하면서 가열시간에 따라 304의 방사율을 측정된 결과 방사율은 표면상태에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이다가 600시간부터는 평형상태를 보였고 초기 상태보다 15% 정도 증가하였다.

### 2. 중간열교환기 실험

정삼각 및 회전 정삼각 배열의 경사각도가 다른 5개(30 $^\circ$ , 45 $^\circ$ , 60 $^\circ$ , 75 $^\circ$  및 90 $^\circ$ )의 관다발 실험부를 제작하였으며, 경사각도와 유량에 따른 유입부, 중심부 및 유출부에서의 총 2,568개(정삼각배열 1680개, 회전정삼각배열 888개)의 압력강하 실험자료를 생산하였다. 이 실험자료를 기존의 실험식들과 비교, 분석하였으며 이를 바탕으로 기존상관식을 수정하였다. ESDU 상관식은 삼각형 배열일 경우 실험치와 비교적 잘 일치하였으며, 회전삼각배열일 경우 약간의 수정이 필요하였다. Idel'chik 상관식은 삼각형 배열일 경우 90 $^\circ$  경사각도를 제외하고는 수정이 필요하였으며, 회전삼각형 배열일 경우에는 30 $^\circ$  경사각도인 경우에만 수정이 필요하였다.

### 3. 전자펌프 관성보완장치 성능특성실험

전자펌프 제어기를 사용하지 않고 직접 모터발전기에서 발전되는 전기를 전자펌프에 입력하여 각 월마다 3번의 실험을 반복하여 수행하였고, 실험의 반복성은 양호하였다. 각 특성이 감소하는 율은 관성 모멘트에 역비례하였고, 초기 전류에 비례하였다. 실험범위에서 모든 특성의 변화를 잘 기술하는 무차원 시간을 제안하여 실험자료를 정리하였고, 실험관계식을 도출하였다. 월이 달라도 회전진동수에 따라 실험인자는 유사하게 감소하는 경향을 보였다.

### 4. 핵연료집합체 압력강하 및 핵연료 핀다발 수중 동특성

핵연료집합체를 지나는 유동에서의 입구 오리피스, 핵연료다발 입구, 핵연료다발, 핵연료다발 출구 및 핵연료집합체 상부 등 5곳에서 총 825개의 압력강하 실험자료를 생산하였다. 입구 오리피스와 핵연료다발에서의 압력강하의 측정값이 다른 부위에서의 압력강하 측정치보다 현저하게 컸으며, 측정된 실험자료를 사용하여 기존의 핵연료다발 압력강하 상관식을 평가한 결과, Cheng과 Todreas의 상관식이 실험데이터와 가장 잘 일치하였다.

모의 핵연료봉의 수중 진동 특성을 실험과 3차원 유한요소 해석을 통해 규명하였다. 수중에서 모의 핵연료봉의 진동 특성은 유체 간격에 따른 부가질량 효과로 인해 공기중 고유진동수보다 수중 고유진동수값이 더 작게 나타나는 것을 확인하였다. 즉 부가질량효과는 유체 간격이 증가할 수록 증가한다. 또한 모의 핵연료봉의 각 진동 모드에 상응한 무차원고유진동(수중 고유진동수/공기중 고유진동수)해석에서 간극선재의 질량과 인장력은 모의 핵연료봉의 진동특성에 아무런 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다.

### 5. 상부플레넘 액면요동 물모의 실험

자유액면에서의 가스혼입은 vane의 위치가 높을수록 더 잘 일어나는 것을 볼 수 있다. 가스혼입이 일어나는 판단조건을 3가지 경우로 나누어 측정하였는데 모든 경우에 가스혼입이 일어나는 임계조건에서 수위(H)와 유출유

량(Q)과의 관계를 나타내면  $H = b \ln(Q - a)$ 로 나타났고, 상수인  $a$ ,  $b$ 의 값은 달랐다. 유입되는 최대유속이 17cm/sec 범위에서 vane의 위치에 따라 자유액면의 구배가 최대 5mm 정도 다르게 나타났으나 센서의 오차범위가  $\pm 0.8\text{mm}$ 이므로 특수한 분석방법이 요구되어 차후에 분석할 예정이다.

## 6. 소음 열유체 특성실험

자장발생장치의 자장은 전류 90A에 5030 gauss를 나타내었고, 변환전력공급장치의 전류와 전압은 cosine wave를 잘 출력하였으며, 전자석에 일정한 전압을 걸었을 때 진동수가 증가하면 전자석의 Inductance로 인하여 전류의 파형이 감소하고, 전압과 전류의 위상차가 더 증가하는 경향을 보였다.

## 7. 측정/분석 및 요소기기 기초기술 개발

고온, 고열유속 조건에서 사용할 수 있는 상용 열유속센서로 일본의 KEM 제품과 미국 Vatell사 제품을 분석하였으며 최종적으로 Vatell사의 열유속센서를 선정하였다. 그리고 고온, 고열유속 조건과 같은 열전달현상 분석에 필요한 전도방식의 열유속센서 보정장치를 자체 제작하였다. 이는 미국의 NIST에서도 기본적인 아이디어만 제안된 상태이며 구체적인 실험 장치를 만든 것은 본 연구가 처음이다. FLUENT를 이용한 해석결과는 두 가지로 구별된다. 첫 번째 해석결과는 주시험부를 전체적으로 분석한 경우이다. 이는 구리블록 상단의 온도를 계산하였으며, 주시험부의 아래면으로 누설되는 열유속 결과를 이용하여 보조히터의 용량 결정에 사용할 수 있다. 두 번째 해석결과는 sheathed heater ½개 부분에 해당하는 부분만을 해석하는 것으로 첫 번째 해석결과에서 주시험부 중심부분의 온도편차와 열유속 편차가 거의 나타나지 않는 점을 이용하여 보다 세밀하게 결과를 분석한 것이다. 전도방식의 열유속센서 보정장치로 3,500 W의 열량을 주 시험부 밖으로 뽑아내기 위해 냉각수를 구리tube 내에 흘리는 열교환 방식을 채택하여 steady state 상태를 유지할 수 있다.

상용주파수 및 최적주파수에서 동작하는 80 l/sec 중규모 환단면 선형 유도전자펌프를 개념설계하였다. 설계된 펌프는 최적주파수의 경우가



상용주파수 입력의 경우보다 73% 적은 입력전력과 1.5 배 높은 효율로 동작할 것으로 예상된다.

#### 8. 소듐화재 감지/소화실험

5kg의 소듐이 290℃에서 60, 120psi.의 누출 압력으로 누출되었을 경우 누출부위와 감지기간의 거리가 150cm 이내에서는 비교적 짧은 시간안에 소듐 누출이 감지되었으나, 누출부위와 감지기간의 거리가 150cm이상일 때에는 소듐 누출 감지시간이 점차 길어지는 것으로 나타났다. 60psi.의 누출압력에서보다 100psi.의 누출압력에서 소듐누출을 감지하는 시간이 빠르게 나타났으며 누출부위와 감지기간 거리가 길어질수록 두 압력에서의 감지시간 차이는 크게 나타났다. 또한 누출시간에 따른 누출감지부위에서의 온도 변화는 소듐 누출을 감지되기 직전에 급격하게 상승하였다.

시각적 관찰결과 sodium bicarbonate는 소듐과의 반응성이 적을뿐더러 소듐풀의 연소면을 효과적으로 덮는 것으로 관찰되었다. 소화재 살포초기에 연소되는 소듐양이 작았을 때의 온도 감소율이 소듐의 양이 클 때의 온도 감소율보다 크게 나타났지만 시간이 지남에 따라 비슷한 온도감소율을 보여주는 것으로 나타났다. 따라서 소듐에 대한 소화재의 중량비를 1:1.3으로 하여 중규모 이상의 소듐화재를 위하여 소화재를 살포하는 것이 적당한 것으로 나타났다. 소화재 입자크기에 대한 영향은 20, 30, 40 $\mu$ m사이에서 크게 나타났고 40 $\mu$ m과 50 $\mu$ m의 크기를 가진 소화재의 소화효율은 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 소화재 선정 및 준비시 소화재의 입자크기를 40 $\mu$ m 미만으로 하는 것이 중요하고 가급적 작은 입자크기를 갖는 소화재가 소듐화재 소화에 유리한 것으로 나타났다.

#### 9. 소규모 물 누출에 의한 표적 손상해석

본 연구에서는 전열관에서 물이 누출되어 발생하는 일반적인 현상과 전열관 재질로 예상되는 ferrite steel중 2.25Cr-1Mo steel을 사용해서 액체 소듐분위기에서 물 누출 실험을 수행함으로써 시편 및 표적에서 발생하는 소듐-물 반응에 의한 부식현상 및 누출 표면에서의 온도변화 등에 대한 영향을 관찰하였다. 실험 결과 재질의 부식은 소듐부위에서부터 진행

되며, 소량의 물 누출이 진행됨에도 불구하고 표적 표면에 재질의 damage가 발생되었으며, 소듐화합물이 침적되는 현상이 관찰되었다. 또한 누출 크기가 0.15mm인 직경을 통해 15ml의 물이 누출되는 경우 표적 표면에서 소듐-물 반응에 의한 온도 상승은 약 70-80°C정도를 나타내었다.

#### 10. Spike 코드 1차 검증을 위한 대규모 물 모의 실험

초기 압력 spike의 전파현상 및 2차계통에 미치는 영향을 평가하기 위한 SPIKE코드는 반응부분의 현상해석을 위한 파라미터 연구, 경계조건의 평가, 문헌자료와의 비교 등에 기초하여 개발되었다. 그리고 rupture disk 채용품을 선정하기 위한 파열실험이 수행되었다. 중간 열교환기 상부인입관계서 시간이 약 14초후에 압력이 초기 압력보다 감소하는 것은 압력파가 전달되어 중간열교환기의 하부 플레넘으로 전달되고 이곳에서 면적의 확대로 인하여 압력이 감소하기 때문이다.

#### 11. 실시간 물 누출 음향신호 분석 실험

실시간 물 누출 음향신호 분석 실험하여 micro leak 검출 기술을 확보하였으며, prototype 장치 기술 개발의 기반이 되었다.

#### 12. 대체냉각재 특성연구

세계적인 개발현황, 기초물성, 안전보장 기법 및 향후연구방향 등에 대한 폭넓은 조사를 수행하였다.

# SUMMARY

## I. Project Title

Development of Sodium Technology

## II. Objective and Importance

It is essential that the liquid metal reactor(LMR) is simultaneously equipped for the economical efficiency and the safety for its commercialization. LMR has the advantage of maximizing the heat efficiency and operating with low pressure by using liquid sodium instead water as a coolant. A large amount of hot sodium leakage may pose a potential threat to the safe operation of the plant. In order to improve the economical efficiency of the LMR, it is necessary to simplify the system of LMR by developing the sodium technology, which results in the maximum utilization of the sodium characteristics. Accordingly the knowledge of sodium technology is evaluated to be one of the important and indispensable technology for the establishment of the economical efficiency and the safety in LMR.

The objective of this study is to produce the experimental data required for design of LMR by installing the experimental facilities for the computer code verification experiments, and develop the elemental components which can be used in sodium facilities or in the LMR, accumulate the basic technology for the developments of these components through the experiment based on sodium. And this study aims to assure the technology for the safety and the handling of sodium through the sodium safety experiment.

## III. Contents and Scope of the Study

### 1. PSDRS experiment

A. Design and manufacture of PSDRS's experimental device

- B. Measuring thermal emissivity of the PSDRS facility
- 2. Intermediate heat exchanger experiment
  - A. Intermediate heat exchanger water experiment
    - (1) Discussions of previous studies
    - (2) Experiment
      - (A) Requirements and scopes of experiment
      - (B) Experimental apparatus
    - (3) Analysis of experimental results
  - B. Design of the IHX test facility for heat transfer and pressure drop
    - (1) Conceptual design of the test section
    - (2) Conceptual design of the sodium loop
- 3. Experiment on the electromagnetic pump inertial compensation system
  - A. Experiment
  - B. Analysis of experimental data
- 4. Measurement of pressure drop in a fuel assembly and Vibration characteristics experiment of a fuel pins
  - A. Measurement of pressure drop in a fuel assembly
    - (1) Pressure drop correlations
    - (2) Experiment
  - B. Vibration characteristics experiment of a fuel pins
    - (1) FEM analysis
    - (2) Verification experiment
- 5. Experiment on the surface fluctuation
  - A. Critical condition for the inception of gas entrainment
  - B. Development, design, and fabrication of level meter
- 6. Experiment on sodium thermal hydraulics
  - A. Concept of MHD experiment
  - B. Development of the sodium pressure sensor
  - C. Sodium pressure drop in the magnetic field
    - (1) Design and fabrication of oscillatory power supply system

- (2) Experiment on the pressure drop
- 7. Sodium measuring technology and development of key components
  - A. Development of sodium heat flux measurement
    - (1) Modeling of heat transfer in calibration facility
    - (2) Heat transfer analysis
    - (3) Heat flux calibration facility
    - (4) Preliminary test of heat flux measurement
  - B. Experiments for Local velocity sensor
    - (1) Principle of local velocity sensor
    - (2) Design of local velocity measurement sensor
  - C. Design of EM pump for IHX experiment
    - (1) Analysis of basic concept
    - (2) Design of annular induction EM pump
- 8. Detection/extinguishment of sodium fire
  - A. Experiment for the detection of sodium fire
    - (1) Design and installation of experimental device
    - (2) Experiment
  - B. Experiment for extinguishing sodium fire
    - (1) Design and installation of experimental device
    - (2) Experiment
- 9. Target surface damage analysis by small water leakage
  - A. State of art
  - B. Experiments and analysis of the target surface damage
    - (1) Apparatus preparation
    - (2) First experiment
    - (3) Jet simulation experiment
    - (4) Apparatus improvement and water leak experiment
    - (5) Analysis of the temperature profile and damage at surface of target material by reaction jet
- 10. Large leak water mock-up test

- A. Analysis of large scale water leak event
  - B. Large leak water mock-up test for the verification of SPIKE code
11. Experiments of acoustic signal analysis based on DSP
- A. Leak noise characteristics and estimation of leak
  - B. Design of prototype
12. Study on the characteristics of alternative coolants
- A. Technical review for heavy liquid metal technology development
  - B. Properties

#### **IV. Results and Proposal for Application**

##### **1. PSDRS experiment**

Through the experiment for the passive safety decay heat removal system, lots of data were obtained for the steady states and transient states tests. The data obtained from this experiment may be used for verification of computer codes for analysis of the thermal-flow behavior of PSDRS. The increase rate of the thermal emissivity of the stainless steel 316L and 304 according to the surface temperature was nearly the same and was approximately . The thermal emissivity of stainless steel 316L whose surface roughness is  $11.29\sim 22.61\mu\text{m}$  is between 0.44 and 0.51, and that of stainless steel 304 is between 0.32 and 0.38. The thermal emissivity of stainless steel 304 is measured according to the heating period by heating the test section at  $400^{\circ}\text{C}$  and the thermal emissivity increases gradually and reaches equilibrium state after 600 hours. The thermal emissivity at the equilibrium state is 15% higher than that in the initial state.

##### **2. Intermediate heat exchanger experiment**

Measurement of pressure drop in inclined tube arrays of triangular and rotated triangular arrangements is performed. Ten test sections

which have five different inclined angles ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  and  $90^\circ$ ) are fabricated. Measurements are made for inlet, center and exit regions of test sections changing water temperature and flow rate, and total 2,568 pressure drop data are produced. The previous pressure correlations are evaluated and modified using the measured data. The ESDU correlation fits well with measured data for triangular tube arrays, but needs some modifications for rotated triangular tube arrays. The Idel'chik correlation needs modifications for triangular tube arrays except for 90 degree inclined angle. For rotated tube arrangement, the Idel'chik correlation needs modification only for 30 degree inclined angle. The measured data will be used for the development and verification of thermal hydraulic computer code for intermediate heat exchanger design.

### 3. Experiment on the electromagnetic pump inertial compensation system

The experiments are repeated three times for each wheel in the EM pump inertia supplementation experiment, and the reproducibility was excellent. The decay rate of each characteristics was inversely proportional to the inertial moment and proportional to the initial current. The dimensionless time which describes best the all of decay characteristics was proposed and the experimental data are described using it.

### 4. Measurement of pressure drop in a fuel assembly and vibration characteristics experiment of a fuel pins

Measurement of pressure drops in a fuel assembly for five different sections in a fuel assembly; inlet orifice, fuel assembly inlet, wire-wrapped fuel assembly, fuel assembly outlet and fuel assembly upper region. Total 825 pressure drop data are produced and the pressure drops in the inlet orifice and wire-wrapped fuel assembly are

much larger than those in other regions. The previous pressure drop correlations for wire-wrapped fuel assembly are evaluated using the measured data and it is shown that the correlation by Cheng and Todreas fits best with measured data. The measured data will be used for development and verification of thermal hydraulic computer code for design of reactor core.

In-water vibration characteristics of a fuel rod have been estimated through experiment and 3-dimensional finite element analysis. It has been confirmed that in-water natural frequencies of the fuel rod are lower than in-air ones due to the added mass effect of the fluid, namely the added mass effect increases as the gap increases. It has been also shown that the wire wrap mass and its pre-tension do not affect the non-dimensional natural frequency (in-water natural frequency / in-air one) corresponding to each vibration mode.

##### 5. Experiment on the surface fluctuation

It is observed that the gas entrainment in the free surface occurs easily when the vane level becomes higher. The measurements have been carried out according to three cases of inception condition. In all of the cases, the relations between the mean level ( $H$ ) and the flow rate ( $Q$ ) are represented as  $H = b \ln(Q - a)$ , but the constants are different for each case. When the inflow velocity is less than 17 cm/sec, the variation of the gradient of free surface is maximum 5 mm, but since the error range of sensor is  $\pm 0.8$  mm, a special analysis method is required and will be analyzed later.

##### 6. Experiment on sodium thermal hydraulics

The magnetic field generated by the power supply was 5030 gauss when the electric current is 90 A. The electric supply system produces well the cosine wave type current and voltage. When the frequency



was increased with constant voltage, the current wave was decreased due to the inductance of electromagnet and the phase difference between voltage and current was increased.

#### 7. Sodium measuring technology and development of key components

A Vatec heat flux sensor(HFM-6D/H) is chosen to measure a heat flux in high heat flux condition. The results getting from DAS-TC of Keithley shows also little deviation in heat flux measurement. In the analysis by using the FLUENT, two kinds of results were shown. In the whole domain analysis, the heat loss in side direction is calculated and it shown to be neglected. Second, the partial analysis which has 22.5 mm width in copper block, showed temperature profile in detail and the heat flux is proposed. Through the system analysis using the FLUENT, much time can be saved in progressing the fabrication process. Also it gives us an optimum value in design. The calibration facility developed for a heat flux sensor shows good results with  $\pm 5\%$  standard deviation and it gives us a wide range of application to nuclear power plant and any other industrial fields. And the numerical simulation by using FLUENT can also act as a guidance analyzing the system especially in small sized systems or severe experimental conditions.

The magnetic field generated by the power supply was 5030 gauss when the electric current is 90A. The electric supply system produces well the cosine wave type current and voltage. When the frequency was increased with constant voltage, the current wave was decreased due to the inductance of electromagnet and the phase difference between voltage and current was increased.

#### 8. Detection/extinguishment of sodium fire

In case that sodium of 5kg at 290°C and 60, 120psi is leaked,

sodium leak is detected quickly below 150cm distance between leak position and detector. Beyond 150cm distance between leak position and detector, it takes long time to detect the leak of sodium. Sodium leak is detected more rapidly at 100psi than 60psi. The farther distance between leak position and detector become off, the greater difference of leak detection time between two pressures become.

Sodium bicarbonate, commercially available dry chemical powder was tested for the extinguishment of sodium fire. Sodium fire tests were performed on various scale to observe the powder extinguishant, sodium bicarbonate. It was found that sodium bicarbonate was more effective than any other extinguishants. As a result of experimental observation, the powder floated on top of sodium pool and covered effectively the surface of burning pool. None of substantial reaction was observed at the interface. And only small quantity of powder was required. Effect of particle size on extinguishment was found very great. The particle size range was very effective range up to approximately  $40\ \mu\text{m}$  and relatively ineffective range above  $50\ \mu\text{m}$  for the extinguishment of sodium fire.

#### 9. Target surface damage analysis by small water leakage

In this study, the corrosion phenomena on the target tube surface appeared by small water leakage was analyzed, and the temperature increasing profile phenomena formed by sodium-water reaction through the leak nozzle under water medium was observed. As results, the corrosion of the tube material was started at sodium side. In spite of the small leakage of water, the target surface appeared damage phenomenon and sodium compounds deposited. Also, in case of water leakage through 0.15mm diameter nozzle size, temperature at target surface from the heat by sodium-water reaction increased about 70-80°C.

#### 10. Large leak water mock-up test

SPIKE code for the estimation of propagation phenomena of initial spike pressure and effects to the secondary system was developed on the basis of the parameter study for analysis of phenomena in reaction zone, the estimation of boundary condition, and comparison with document. And the tests for selection of substituting material of the rupture disk were performed. The pressure on the upper inlet tube of IHX became lower in 14 sec. This was due to the reduction of pressure caused by the enlargement of area in the lower plenum, which resulted from the transfer of the pressure wave to the lower plenum.

#### 11. Experiments of acoustic signal analysis based on DSP

It was constructed with instrumentation and sensor design to measure the poor signal from local velocity, and applied with verification experiments to develop the sensor measuring the local velocity in core bundle of KALIMER system.

#### 12. A study on the characteristics of alternative coolants

An intensive research was performed into the global development status, basic properties, safety assurance methods, and direction of research in the futures and so on.

# 여 백

# CONTENTS

Chapter 1	Introduction	1
Chapter 2	State-of-art in the Related Technology	9
Chapter 3	Contents of the Research Development	23
Section 1	PSDRS experiment	23
1.	PSDRS experiment	23
A.	Introduction	23
B.	Experiment	23
C.	Experimental results	34
2.	Measuring thermal emissivity of the PSDRS facility	45
A.	Introduction	45
B.	Experiment	47
C.	Experimental result	55
D.	Conclusion	63
Section 2	Intermediate heat exchanger experiment	67
1.	Intermediate heat exchanger water experiment	67
A.	Introduction	67
B.	Experiment	73
C.	Experimental results	87
D.	Conclusion	121
2.	Design of the IHX test facility for heat transfer and pressure drop	122
A.	Introduction	122
B.	Conceptual design of the test section	122
C.	Conceptual design of the sodium loop	123
Section 3	Experiment on the electromagnetic pump inertial compensation system	128
1.	Introduction	128

2. Experiment	128
A. Experimental apparatus	128
B. Experimental method	140
C. Experimental data	144
3. Experimental result	145
A. Error analysis	145
B. Experimental data	146
C. Analysis of experimental data	162
4. Conclusion	175
Section 4 Measurement of pressure drop in a fuel assembly and vibration characteristics experiment of a fuel pins	176
1. Measurement of pressure drop in a fuel assembly	176
A. Introduction	176
B. Pressure drop correlations	179
C. Experimental apparatus and method	183
D. Results and discussion	187
E. Conclusion	196
2. Vibration characteristics experiment of a fuel pins	197
A. Introduction	197
B. FEM analysis	197
C. Verification experiment	207
D. Experimental results	208
E. Conclusion	215
Section 5 Experiment on the surface fluctuation	217
1. Introduction	217
2. Experiment	217
A. Experimental apparatus	218
B. Level sensor	218
C. Experimental method	223

3. Data analysis	229
A. Error analysis	229
B. Critical condition for gas entrainment	229
C. Gradient of free surface	235
4. Result	238
Section 6 Experiment on sodium thermal hydraulics	245
1. Concept of MHD experiment	245
2. Development of the sodium pressure sensor	248
3. Sodium pressure drop in the magnetic field	251
A. Design and fabrication of oscillatory power supply system	251
B. Experiment on the pressure drop	255
4. Conclusion	255
Section 7 Sodium measuring technology and development of key components	256
1. Development of sodium heat flux measurement	256
A. Introduction	256
B. Status of research home and abroad	257
C. Contents of research and results	272
2. Experiments for local velocity sensor	307
A. Introduction of sensor design	307
B. Principle of local velocity sensor	307
C. Design of local velocity measurement sensor	313
D. Conclusion	318
3. Design of EM pump for IHX experiment	319
A. Analysis of basic concept	319
B. Design of annular induction EM pump	321
C. Conclusion	321
Section 8 Detection/extinguishment of sodium fire	325
1. Experiment for the detection of sodium	325

A. Objective of the study	325
B. Design and installation of experimental device	325
C. Experimental method	331
D. Results	331
2. Experiment for extinguishing sodium fire	332
A. Objective of the study	332
B. Experiment	337
C. Results	337
3. Conclusion	340
Section 9 Target surface damage analysis by small water leakage	344
1. Introduction	344
2. Trend on the small leak analysis	345
3. Jet phenomena	348
4. Experiments and analysis of the target surface damage	353
A. Apparatus preparation	353
B. Experimental method	354
C. Analysis	355
5. Results and discussion	355
A. First experiment	355
B. Jet simulation experiment	360
C. Apparatus improvement and water leak experiment	364
D. Analysis of the temperature profile and damage at surface of target material by reaction jet	365
6. Conclusion	380
Section 10 Large leak water mock-up test	382
1. Objective of the study	382
2. Introduction	382



3. Experimental apparatus	383
A. Summary	383
B. Simulation of the KALIMER secondary system	383
C. Composition of loop	389
4. Experiment of rupture disk(RD)	391
5. Water mock-up test	393
Section 11 Experiments of acoustic signal analysis based on DSP	395
1. Introduction	395
2. Experimental equipment	396
3. Leak noise characteristics and estimation of leak	398
A. Leak phenomena in KALIMER steam generator	398
B. Characteristics of acoustic propagation	402
C. Noise generation mechanism during injection of argon into water	409
D. Acoustic properties with pressures and flow rates	410
4. Design of prototype	419
5. Conclusion	422
Section 12 A study on the characteristics of alternative coolants	423
1. Introduction	423
2. Technical review for heavy liquid metal technology development	424
3. Properties	426
4. Conclusions	433
Chapter 4 Accomplishment of the Research Development Objectives and Contribution to Other Areas	435
Chapter 5 Application Plan of the Research Development Results	439

Chapter 6 References.....411

# 목 차

요약문.....	i
Summary.....	ix
Contents.....	xix
목차.....	xxv
표목차.....	xxx
그림목차.....	xxxii
제1장 서론.....	1
제2장 국내·외 기술개발 현황.....	9
제1절 국외 기술 개발 현황 분석.....	9
제2절 국내 기술 개발 현황 분석.....	14
제3장 연구개발 수행내용 및 결과.....	23
제1절 PSDRS 실험.....	23
1. PSDRS 실험.....	23
가. 서론.....	23
나. 실험.....	23
다. 실험 결과.....	34
2. 실험시편 방사율 측정실험.....	45
가. 서언.....	45
나. 실험.....	47
다. 실험결과.....	55
라. 결 론.....	63
제2절 중간열교환기 실험.....	67
1. 중간열교환기 물모의 유동실험.....	67
가. 서론.....	67
나. 실험.....	73
다. 실험결과.....	87
라. 결론.....	121
2. 중간열교환기 열전달 특성 및 압력강하 실험장치 설계.....	122

가. 개요	122
나. 실험부의 개념설계	122
다. 소듐 루프 개념설계	123
제3절 전자펌프 관성보완장치 성능 특성 실험	128
1. 개요	128
2. 실험	128
가. 실험장치	128
나. 실험방법	140
다. 실험자료 생산	144
3. 실험결과	145
가. 오차분석	145
나. 실험결과 정리	146
다. 실험자료 분석	162
4. 결론	175
제4절 핵연료집합체 압력강하 및 핵연료 핀다발 수중 동특성	176
1. 핵연료집합체 압력강하 실험	176
가. 개요	176
나. 압력강하 상관식	179
다. 실험장치 및 실험방법	183
라. 실험결과 및 토의	187
마. 결론	196
2. 핵연료 핀다발 진동 특성 실험	197
가. 개요	197
나. 모의 핵연료봉의 수중동특성 해석	197
다. 검증 실험	207
라. 동특성 실험	208
마. 결론	215
제5절 상부플레넘 액면요동 물모의 실험	217
1. 실험의 개요	217
2. 실험	217

가. 실험장치	218
나. 수위계	218
다. 실험방법 및 범위	223
3. 실험자료 정리	229
가. 측정오차	229
나. 가스혼입 임계조건	229
다. 자유액면 구배	235
4. 결론	238
제6절 소뚝 열유체 특성실험	245
1. MHD 자장내에서의 유동특성 실험 개요	245
2. 소뚝용 차압계의 국산 기술 개발	248
3. 자장하에서 소뚝 압력강하 실험	251
가. 변환자장발생장치 설계 및 제작	251
나. 압력강하 실험	255
4. 결론	255
제7절 측정/분석 및 요소기기 기초기술 개발	256
1. 소뚝 열유속 측정실험	256
가. 서론	256
나. 국내·외 기술개발 현황	257
다. 연구개발 수행내용 및 결과	272
2. 국소 유속 센서(local velocity sensor) 측정 실험	307
가. 센서 설계의 개요	307
나. 센서의 원리	307
다. 국소 유속 측정 센서의 설계	313
라. 결론	318
3. 중간열교환기용 중규모 전자펌프 설계	319
가. 등가회로 해석	319
나. 80 l/sec 중규모 환단면 선형 유도전자펌프의 설계	321
다. 결론	321
제8절 소뚝화재 감지/소화실험	325

1. 소뿔화재 감지실험.....	325
가. 실험목적.....	325
나. 실험장치 제작 및 설치.....	325
다. 실험방법.....	331
라. 실험결과.....	331
2. 소뿔화재 소화실험.....	332
가. 소화실험 개요 및 목적.....	332
나. 소화실험.....	337
다. 실험결과.....	337
3. 결론.....	340
제9절 소규모 물 누출에 의한 표적 손상해석.....	344
1. 개요.....	344
2. 물 누출에 대한 각국의 현황.....	345
3. 누출 jet 현상.....	348
4. 소규모 물 누출 실험 및 표적 손상 해석.....	353
가. 실험 장치의 제작.....	353
나. 실험 방법.....	354
다. 분석.....	355
5. 결과 및 고찰.....	355
가. 1차 실험.....	355
나. Jet simulation 실험.....	360
다. 실험장치 개선 및 물 누출 실험.....	364
라. 반응 jet에 의한 표적에서의 온도 profile 및 손상현상.....	366
6. 결론.....	380
제10절 대규모 물 모의 실험.....	382
1. 목적.....	382
2. 서언.....	382
3. 물 모의 실험장치.....	385
가. 개요.....	385
나. KALIMER 2차 계통의 모사 계산.....	388

다. 루프 구성.....	389
4. Rupture disk(RD) 파열실험.....	391
5. 물 모의 실험.....	393
제11절 실시간 물 누출 음향 신호 분석 실험.....	395
1. 서론.....	395
2. 실험장치.....	396
3. 누출 소음 특성 및 누출시간 예측.....	398
가. 증기발생기에서 물/스팀 누출 현상.....	398
나. 음향 전파 특성.....	402
다. 물 속에 아르곤 가스의 injection동안 소음 발생 메카니즘..	409
라. 압력, 유량 변화의 배경에 따른 음향 특성 변화.....	410
4. Prototype의 설계.....	419
가. 신경망 적용.....	419
나. 다층 신경망.....	420
5. 결론.....	422
제12절 대체냉각재 특성 연구.....	423
1. 서론.....	423
2. 기술개발현황.....	424
3. 냉각재 특성.....	426
4. 결론.....	433
제4장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도.....	435
제5장 연구개발 결과의 활용계획.....	439
제6장 참고문헌.....	441

# 표 목 차

표 1.2.1	다양한 표면에 따른 총 방사율.....	46
표 1.2.2	실험시편의 규격 및 표면조도.....	50
표 2.1.1	측정에 사용된 유량계 보정곡선.....	86
표 2.1.2	측정에 사용된 차압계 보정곡선.....	86
표 2.1.3	DP 측정지점 및 측정거리(정삼각배열).....	86
표 2.1.4	DP 측정지점 및 측정거리(회전 정삼각배열).....	87
표 2.1.5	실험에 사용된 계측기 오차.....	93
표 2.1.6	시험부 제작 오차(정삼각배열).....	93
표 2.1.7	시험부 제작 오차(회전 정삼각배열).....	94
표 2.1.8	불확실성 평가(정삼각배열).....	94
표 2.1.9	불확실성 평가(회전 정삼각배열).....	94
표 2.1.10	보정인자(정삼각배열), $\psi$ .....	97
표 2.1.11	보정인자(회전 정삼각배열), $\psi$ .....	97
표 2.2.1	중간열교환기 특성실험에 사용할 실험장치 Case 별 비교.....	125
표 3.2.1	Novatome Electromagnetic Pump IA124의 기하학적 및 전기적 설계변수.....	131
표 3.2.2	Novatome Pump의 효율 추정값(200℃).....	134
표 3.2.3	측정변수의 특성 및 오차.....	141
표 3.3.1	전자펌프 관성보완장치 측정 초기값.....	147
표 4.1.1	실험에 사용된 차압계 보정곡선.....	139
표 4.2.1	공기중 모의 핵연료봉의 고유진동수 비교 (a) 간극선재의 인장력이 존재하는 경우 (b) 간극선재의 인장력이 존재하지 않는 경우.....	202
표 4.2.2	유체 간격에 따른 고유진동수 비교.....	204
표 4.2.3	유체 간격에 따른 무차원 고유진동수 비교.....	205
표 4.2.4	실험에 사용된 실험장비.....	209
표 4.2.5	공기중 모의 핵연료봉의 실험치/해석치 고유진동수 비교.....	212



표 4.2.5	수중 모의 핵연료봉의 실험치/해석치 고유진동수 비교.....	213
표 5.2.1	Level sensor의 안쪽벽면에서부터의 거리(mm).....	224
표 5.3.1	실험장치의 제작오차 및 측정오차.....	230
표 5.3.2	Case-1인 경우 가스혼입이 발생한 유량, 수위, Vane의 위치.....	231
표 5.3.3	Case-2인 경우 가스혼입이 발생한 유량, 수위, Vane의 위치.....	232
표 5.3.4	Case-3인 경우 가스혼입이 발생한 유량, 수위, Vane의 위치.....	233
표 5.3.5	액면의 구배 측정실험에서의 초기 설정조건.....	237
표 6.2.1	Ar 가스에 의한 소듐 DP-meter 압력 측정결과.....	250
표 7.1.1	Heat Flux Calculation of Radiation Source.....	304
표 7.3.1	80 l/sec급 중규모 환단면 선형 유도전자펌프의 설계 제원...	322
표 8.2.1	소듐감지 실험조건.....	331
표 8.2.1	Sodium bicarbonate의 특성.....	336
표 8.2.2	소화 실험조건.....	338
표 9.1.1	증기발생기 운전시 발생된 사고원인 및 빈도.....	345
표 9.2.1	각국에서 수행된 소듐-물 반응특성 연구에 대한 요약.....	348
표 9.5.1	2.25Cr-1Mo 시편을 사용한 물 누출 실험 후 원소분석 결과.....	359
표 9.5.2	Wastage 시험 조건.....	369
표 12.3.1	액체금속의 물리적 성질.....	427
표 12.3.2	핵연료피복관 재료의 화학적 조성.....	428

## 그 립 목 차

그림 1.1.1	실험장치의 배관 및 계장도.....	26
그림 1.1.2	실험장치 설치도.....	27
그림 1.1.3	Test reactor 내부 단면도.....	28
그림 1.1.4	실험장치의 덕트도.....	29
그림 1.1.5	히터 배열도.....	30
그림 1.1.6	열전대 설치도.....	31
그림 1.1.7	유동발달상태 측정위치.....	32
그림 1.1.8	Hot film 015036 검정곡선.....	32
그림 1.1.9	Hot film 015042 검정곡선.....	33
그림 1.1.10	소듐 이송장치.....	33
그림 1.1.11	정상상태에서의 온도변화.....	36
그림 1.1.12	정상상태에서의 공기 입, 출구 온도.....	36
그림 1.1.13	모사된 원자로 반경방향 벽면온도(정상상태).....	37
그림 1.1.14	정상상태에서의 공기분리기 외벽(찬공기쪽)온도.....	37
그림 1.1.15	히터 출력변화에 따른 풀 내부 최고온도.....	38
그림 1.1.16	50kW에서의 온도변화.....	38
그림 1.1.17	55kW에서의 온도변화.....	39
그림 1.1.18	모사된 원자로 반경방향 벽면온도(41kW).....	39
그림 1.1.19	모사된 원자로 반경방향 벽면온도(50kW).....	40
그림 1.1.20	모사된 원자로 반경방향 벽면온도(55kW).....	40
그림 1.1.21	공기냉각 유로에서의 온도분포(정상상태).....	41
그림 1.1.22	공기냉각 유로에서의 온도분포(41kW).....	41
그림 1.1.23	공기냉각 유로에서의 온도분포(50kW).....	42
그림 1.1.24	공기냉각 유로에서의 온도분포(55kW).....	42
그림 1.1.25	공기냉각 유로에서의 속도분포(정상상태).....	43
그림 1.1.26	공기냉각 유로에서의 속도분포(41kW).....	43
그림 1.1.27	공기냉각 유로에서의 온도분포(50kW).....	44

그림 1.1.28	공기냉각 유로에서의 온도분포(55kW).....	44
그림 1.2.1	방사율 측정용 실험장치.....	49
그림 1.2.2	일정한 온도에서 적외선 온도계의 민감도 및 방사율 측정방법(시편: RV2 SUS316L).....	53
그림 1.2.3	스테인레스 스틸 316L의 표면온도에 따른 방사율 (시편 RV1, RV2)과 참고문헌(표.1)에서의 SUS 316의 방사율.....	59
그림 1.2.4	스테인레스 스틸 304(시편 CV1, CV2, AV1)의 표면 온도에 따른 방사율과 참고문헌(표.1.2.1)에서의 방사율과 비교.....	60
그림 1.2.5	스테인레스 스틸 304 시편(CV1)의 표면온도 400℃ 에서의 시간에 따른 방사율 변화.....	62
그림 1.2.6	400℃에서 24시간 후부터 일주일까지 스테인레스 스틸 304의 방사율 증가율.....	65
그림 1.2.7	400℃에서 150시간부터 425시간까지 스테인레스 스틸 304의 방사율 증가율.....	66
그림 2.1.1	정삼각 배열.....	69
그림 2.1.2	회전 정삼각 배열.....	70
그림 2.1.3	경사 관다발 시험부.....	76
그림 2.1.4	실험장치①물공급탱크②펌프③댐퍼④매니폴드⑤시험부.....	78
그림 2.1.5	터빈유량계 보정곡선(1 in.).....	80
그림 2.1.6	터빈유량계 보정곡선(2.5 in.).....	80
그림 2.1.7	터빈유량계 보정곡선(3 in.).....	81
그림 2.1.8	DP-meter 6-O-2(Re)의 보정곡선.....	81
그림 2.1.9	DP-meter 6-O-1의 보정곡선.....	82
그림 2.1.10	DP-meter 10-R-1(Re)의 보정곡선.....	82
그림 2.1.11	DP-meter 30-O-1의 보정곡선.....	83
그림 2.1.12	DP-meter 30-O-2의 보정곡선.....	83
그림 2.1.13	DP-meter 100-R-1의 보정곡선.....	84
그림 2.1.14	DP-meter 150-R-1의 보정곡선.....	84

그림 2.1.15 DP-meter 250-R-1의 보정곡선.....	85
그림 2.1.16 DP-meter 250-R-2의 보정곡선.....	85
그림 2.1.17 30도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(정삼각).....	98
그림 2.1.18 30도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(정삼각).....	98
그림 2.1.19 30도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(정삼각).....	99
그림 2.1.20 45도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(정삼각).....	99
그림 2.1.21 45도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(정삼각).....	100
그림 2.1.22 45도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(정삼각).....	100
그림 2.1.23 60도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(정삼각).....	101
그림 2.1.24 60도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(정삼각).....	101
그림 2.1.25 60도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(정삼각).....	102
그림 2.1.26 75도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(정삼각).....	102
그림 2.1.27 75도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(정삼각).....	103
그림 2.1.28 75도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(정삼각).....	103
그림 2.1.29 90도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(정삼각).....	104
그림 2.1.30 90도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(정삼각).....	104
그림 2.1.31 90도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(정삼각).....	105
그림 2.1.32 30도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(회전정삼각).....	105
그림 2.1.33 30도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(회전정삼각).....	106
그림 2.1.34 30도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(회전정삼각).....	106
그림 2.1.35 45도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(회전정삼각).....	107
그림 2.1.36 45도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(회전정삼각).....	107
그림 2.1.37 45도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(회전정삼각).....	108
그림 2.1.38 60도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(회전정삼각).....	108
그림 2.1.39 60도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(회전정삼각).....	109
그림 2.1.40 60도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(회전정삼각).....	109
그림 2.1.41 75도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(회전정삼각).....	110
그림 2.1.42 75도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(회전정삼각).....	110
그림 2.1.43 75도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(회전정삼각).....	111
그림 2.1.44 90도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하(회전정삼각).....	111

그림 2.1.45	90도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하(회전정삼각).....	112
그림 2.1.46	90도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하(회전정삼각).....	112
그림 2.1.47	Idel'chik 상관식과의 비교(정삼각).....	113
그림 2.1.48	Idel'chik 상관식과의 비교(회전정삼각).....	113
그림 2.1.49	ESDU 상관식과의 비교(정삼각).....	114
그림 2.1.50	ESDU 상관식과의 비교(회전정삼각).....	114
그림 2.1.51	ESDU 상관식과의 비교(정삼각, 회전정삼각).....	115
그림 2.1.52	측정데이터와 기존 상관식과의 비교(30도, 정삼각).....	117
그림 2.1.53	측정데이터와 기존 상관식과의 비교(45도, 정삼각).....	117
그림 2.1.54	측정데이터와 기존 상관식과의 비교(60도, 정삼각).....	118
그림 2.1.55	측정데이터와 기존 상관식과의 비교(90도, 정삼각).....	118
그림 2.1.56	측정데이터와 기존 상관식과의 비교(30도, 회전정삼각)....	119
그림 2.1.57	측정데이터와 기존 상관식과의 비교(45도, 회전정삼각)....	119
그림 2.1.58	측정데이터와 기존 상관식과의 비교(60도, 회전정삼각)....	120
그림 2.1.59	측정데이터와 기존 상관식과의 비교(90도, 회전정삼각)....	120
그림 2.2.1	중간열교환기 실험부의 형상, 규격 및 가열봉 설치 위치..	126
그림 2.2.2	경우에 따른 중간열교환기 열유체 실험장치.....	127
그림 3.2.1	MHD 소뚝 압력강하 실험장치의 구조도.....	130
그림 3.2.2	200℃일 때 Pump IA 124의 유량율-압력차 특성.....	133
그림 3.2.3	소뚝 차압기 주위의 배관의 치수 및 운전조건.....	135
그림 3.2.4	휠의 규격 (a) small wheel (b) large wheel.....	136
그림 3.2.5	관성보완장치의 구성.....	138
그림 3.2.6	모터발전기 내부 구성.....	139
그림 3.3.1	측정한 시스템의 유량-펌프 헤드 특성.....	149
그림 3.3.2	측정한 값들의 시간에 따른 변화율 (small wheel).....	150
그림 3.3.3	측정한 값들의 시간에 따른 변화율 (large wheel).....	151
그림 3.3.4	시간에 따른 휠의 회전진동수 감쇠특성.....	153
그림 3.3.5	시간에 따른 전압 감쇠특성.....	154
그림 3.3.6	시간에 따른 전류 감쇠특성.....	155
그림 3.3.7	휠의 회전진동수에 대한 출력전압의 변화.....	156

그림 3.3.8	휠의 회전진동수에 대한 출력전류 변화	157
그림 3.3.9	휠의 회전진동수에 따른 발전효율	158
그림 3.3.10	휠의 회전진동수에 따른 역률의 변화	159
그림 3.3.11	휠의 회전진동수에 따른 유효전력	160
그림 3.3.12	휠의 회전진동수에 따른 유량의 변화	161
그림 3.3.13	휠의 회전진동수에 따른 펌프헤드 특성	163
그림 3.3.14	휠의 회전진동수에 따른 펌프효율	164
그림 3.3.15	무차원 시간에 대한 휠의 무차원 회전진동수 특성	166
그림 3.3.16	무차원 시간에 대한 무차원 출력전압 특성	168
그림 3.3.17	무차원 시간에 대한 무차원 출력전류 특성	169
그림 3.3.18	무차원 시간에 대한 무차원 유효전력 특성	170
그림 3.3.19	무차원 시간에 대한 무차원 유량 특성	171
그림 3.3.20	휠의 무차원 회전진동수에 대한 무차원 출력전압	172
그림 3.3.21	휠의 무차원 회전진동수에 대한 무차원 전류	173
그림 3.3.22	휠의 무차원 회전진동수에 대한 무차원 유효전력	174
그림 4.1.1	핵연료집합체	185
그림 4.1.2	핵연료집합체 단면 및 연료봉 Wire Spacer	185
그림 4.1.3	차압계 DP-100PSI-O-1의 보정곡선	188
그림 4.1.4	차압계 DP-100-R-1의 보정곡선	188
그림 4.1.5	입구 오리피스에서의 압력강하 (DP1)	191
그림 4.1.6	핵연료다발 입구에서의 압력강하 (DP2)	191
그림 4.1.7	핵연료다발에서의 압력강하 (DP3)	192
그림 4.1.8	핵연료다발 출구에서의 압력상승 (-DP4)	192
그림 4.1.9	핵연료집합체 상부에서의 압력강하 (DP5)	193
그림 4.1.10	핵연료집합체 각 부위별 압력강하 상대적 크기	193
그림 4.1.11	Novendstern 상관식과 실험데이터와의 비교	194
그림 4.1.12	Rehme 상관식과 실험데이터와의 비교	194
그림 4.1.13	Engel, Markley와 Bishop 상관식과 실험데이터와의 비교	195
그림 4.1.14	Cheng과 Todreas 상관식과 실험데이터와의 비교	195

그림 4.2.1	모의 핵연료봉의 경계조건.....	198
그림 4.2.2	모의 핵연료봉과 유체의 유한요소 모델링.....	199
그림 4.2.3	Hinged-free 경우에 대한 모드 형상.....	200
그림 4.2.4	Guided-free 경우에 대한 모드 형상.....	201
그림 4.2.5	공기중 모의 핵연료봉의 고유진동수 비교 그래프 (a) Hinged-free (b) Guided-free.....	203
그림 4.2.6	Hinged-free 경우의 2차 모드에 대한 무차원 고유진동수 그래프 (a) 간극선재의 인장력이 존재하는 경우 (b) 간극선재의 인장력이 존재하지 않는 경우.....	207
그림 4.2.7	모의 핵연료봉 수중 실험장치.....	208
그림 4.2.8	모의 핵연료봉의 수중 동특성 실험장치 개략도.....	210
그림 4.2.9	실험장치.....	210
그림 4.2.10	공기중 모의 핵연료봉의 실험치/해석치 고유진동수 비교 그래프.....	212
그림 4.2.11	수중 모의 핵연료봉의 실험치/해석치 고유진동수 비교 그래프 (a) Hinged-free (b) Guided-free.....	213
그림 4.2.12	공기중 주파수 응답 함수.....	214
그림 4.2.13	수중 주파수 응답 함수.....	215
그림 5.2.1	가스혼입 실험부의 단면.....	219
그림 5.2.2	실험장치의 구성.....	220
그림 5.2.3	가스혼입 실험부의 규격.....	221
그림 5.2.4	실험부의 출구노즐 규격.....	222
그림 5.2.5	Level sensor의 형상 및 설치위치(45° 인 경우).....	225
그림 5.2.6	평균수위계의 보정과 보정식.....	226
그림 5.2.7	국소수위계 #02의 보정실험자료와 보정식.....	227
그림 5.3.1	각 가스혼입이 일어나는 기준에 따른 유량과 평균 수위의 임계조건.....	234
그림 5.3.2	가스혼입이 일어나는 임계조건과 관계식 비교.....	236
그림 5.3.3	낮은 유량인 5 l/sec에서 자유액면 구배.....	239

그림 5.3.4	높은 유량인 35 ℓ/sec에서 자유액면 구배.....	240
그림 5.3.5	Vane의 위치 0 mm일 때 자유액면 구배.....	241
그림 5.3.6	Vane의 위치 200 mm일 때 자유액면 구배.....	242
그림 5.3.7	Vane의 위치 400 mm일 때 자유액면 구배.....	243
그림 5.3.8	Vane의 위치 600 mm일 때 자유액면 구배.....	244
그림 6.1.1	MHD 소뚝 압력강하 실험장치의 구조도.....	246
그림 6.1.2	MHD 압력강하 실험장치.....	247
그림 6.2.1	소뚝용 차압계의 schematic diagram.....	249
그림 6.3.1	변환자장발생장치의 출력 형태.....	252
그림 6.3.2	변환자장발생장치의 사진.....	254
그림 7.1.1	Heat flux 센서의 원리.....	259
그림 7.1.2	Vatell heat flux 센서(HFM-6C/H).....	259
그림 7.1.3	Heat flux amplifier(AMP-6).....	259
그림 7.1.4	High heat flux의 전도 검정시설의 block diagram.....	261
그림 7.1.5	High flux 전도장치의 단면도.....	261
그림 7.1.6	전도장치의 체계도(NIST).....	261
그림 7.1.7	전도장치의 도식도(Kyoto Electronics).....	263
그림 7.1.8	Kyoto electronics - heat flux meter.....	263
그림 7.1.9	KEM heat flux meter의 측정 범위.....	265
그림 7.1.10	Constant temperature room (Kyoto Electronics).....	265
그림 7.1.11	HFS 검정시설(Kyoto 그림 7.1.1 Electronics).....	265
그림 7.1.12	열누출 HFS (Kyoto Electronics).....	263
그림 7.1.13	고온조건에서의 전도 검정.....	263
그림 7.1.14	HFS 검정장치의 단면.....	263
그림 7.1.15	보호가열기를 가진 heat flux generator.....	271
그림 7.1.16	Heat flux 센서를 보상하기위한 시설 배열도.....	271
그림 7.1.17	Conduction type HFS calibration facility의 도식도.....	274
그림 7.1.18	열분석에서의 grid generation(FLUENT).....	277
그림 7.1.19	시험부에서의 온도 분포.....	277
그림 7.1.20	시험부에서의 온도 분포.....	277



그림 7.1.21	주시험부에서의 copper block의 온도 분포	278
그림 7.1.22	상부판에서의 heat flux 분포	278
그림 7.1.23	하부판에서의 heat flux 분포	278
그림 7.1.24	HFS열전도에 있어서 grid 생성	281
그림 7.1.25	시험부에서의 온도 분포	281
그림 7.1.26	주시험부에서의 copper block의 온도 분포	282
그림 7.1.27	주시험부에서의 aluminum의 온도 분포	282
그림 7.1.28	Copper block 상부의 온도 분포	282
그림 7.1.29	주시험부에서의 helium layer의 온도 분포	284
그림 7.1.30	Aluminum block 상부벽에서 heat flux 분포	284
그림 7.1.31	하부판에서의 heat flux 분포	284
그림 7.1.32	실험장치의 도식도	285
그림 7.1.33	주시험부의 도식도	285
그림 7.1.34	주시험부의 부품	287
그림 7.1.35	Plate type heat flux sensor	288
그림 7.1.36	Plate type sub-heater	288
그림 7.1.37	Slidacs and relay	288
그림 7.1.38	Heater controller	288
그림 7.1.39	Insulation board	288
그림 7.1.40	주시험부의 connectors	290
그림 7.1.41	주시험부의 connectors	290
그림 7.1.42	주시험부의 base	291
그림 7.1.43	주시험부의 1 mm gap	294
그림 7.1.44	전도성 heat flux 센서의 검정시설	295
그림 7.1.45	Data logging system	297
그림 7.1.46	Constant temperature room and air-temperature controller	299
그림 7.1.47	Vatell HFM6-C/H와 AMP-6H을 사용한 heat flux의 측정	300
그림 7.1.48	Heat flux의 측정 도식도	300

그림 7.1.49 Heat flux의 측정 sheet	301
그림 7.1.50 Heat flux 측정	305
그림 7.2.1 주물형 alnico 자석의 자기 특성	308
그림 7.2.2 핵연료 번들이나 중간열교환기의 튜브에 사용되는 센서	308
그림 7.2.3 축방향의 자기 분포도	309
그림 7.2.4 원주 각도에 따른 횡축 자기장이 미치는 soft iron 원통형 주위의 압력	310
그림 7.2.5 원주 각도에 따른 원통형 영구자석 주위의 압력	311
그림 7.2.6 Annular 용기 속을 흐르는 유체의 흐름과 생성 전압과의 관계	312
그림 7.2.7 속도 크기 방향의 결정	313
그림 7.2.8 횡축 흐름을 측정하기 위한 국소 유속 센서의 자석 배치(사례)	314
그림 7.2.9 횡축 흐름을 측정하기 위한 측정 센서	315
그림 7.2.10 종축 흐름을 측정하기 위한 측정 센서	315
그림 7.2.11 신호계측장치	316
그림 7.2.12 횡축 흐름을 측정하기 위한 국소 유속 센서의 세부 제작 단면도(사례)	316
그림 7.2.13 튜브 주변의 유속을 측정할 수 있는 이동형 국소유속센서의 상세 제작 단면도	317
그림 7.2.14 튜브 속을 이동하면서 횡축 흐름을 측정할 수 있는 국소 유속 센서의 세부 제작 단면도(사례)	318
그림 7.3.1 3상용 선형 유도전자펌프의 상당 등가회로의 일례	320
그림 7.3.2 80 l/sec급 중규모 환단면 전자펌프의 개념설계 단면도 [(a) 상용주파수 사용시, (b) 최적주파수]	323
그림 7.3.3 80 l/sec급 중규모 환단면 전자펌프 구동압력-유량 특성예상곡선 (a) 상용주파수 및 (b) 설계주파수	324
그림 8.1.1 소듐공급계통	326
그림 8.1.2 나선형 소듐 누출 감지기	327

그림 8.1.3	소듐 누출 감지부.....	328
그림 8.1.4	수평배열파이프에서 소듐누출부.....	329
그림 8.1.5	수평배열파이프에서 소듐 누출 온도 측정 부위.....	330
그림 8.1.6	누출압력에 대한 누출 감지시간.....	333
그림 8.1.7	누출감지기 설치 위치에 따른 소듐 누출 감지.....	334
그림 8.2.1	소듐 중량에 따른 온도 변화.....	339
그림 8.2.2	입자크기분포에 따른 온도변화(소듐중량 : 4.8kg).....	342
그림 8.2.3	입자크기분포에 따른 온도변화(소듐중량 : 9.6kg).....	343
그림 9.3.1	가정된 반응 flame 모양.....	349
그림 9.3.2	소듐 부위에서 steam jet에 의한 영향.....	350
그림 9.3.3	튜브 배열에 따른 flame의 영향 범위.....	351
그림 9.3.4	반응 flame 모델.....	352
그림 9.4.1	물 누출 시편 및 단일 표적.....	354
그림 9.5.1	물 누출 jet 및 거리별 영향.....	356
그림 9.5.2	미량 물 누출 실험장치 및 P&ID.....	357
그림 9.5.3	소듐 brick의 모습(약 1.8Kg).....	358
그림 9.5.4	소규모 물 누출 실험에서 관찰된 자체시편과 표적의 표면.....	359
그림 9.5.5	시편 부식 부위 표면의 SEM 사진.....	360
그림 9.5.6	질소가스를 이용한 누출 hole에서 발생하는 jet 모습.....	361
그림 9.5.7	질소가스를 이용한 slice 및 circle형태의 누출기에서 누출되는 모습.....	363
그림 9.5.8	Jet core 부위의 길이.....	363
그림 9.5.9	표적 후면의 열전대 접속을 위한 hole.....	365
그림 9.5.10	물 누출 실험장치.....	366
그림 9.5.11	실험장치 계통도.....	368
그림 9.5.12	소듐-물 반응 시험부.....	369
그림 9.5.13	Wastage 분포의 실험 예와 반응 경계면의 계산치.....	370
그림 9.5.14	반응부의 온도분포와 소듐온도.....	371
그림 9.5.15	Jet형태와 표적에서의 손상부위.....	372

그림 9.5.16 표적 표면에서의 온도 상승 곡선.....	373
그림 9.5.17 자체 시편의 물 누출 실험 전, 후의 모습.....	375
그림 9.5.18 표적 표면에서의 손상 모습.....	376
그림 9.5.19 손상 부위를 확대한 모습.....	377
그림 9.5.20 부식부위 EPMA분석 profile.....	378
그림 9.5.21 표적 표면에 deposit된 소듐원소 분석 결과.....	379
그림 10.3.1 칼리머 2차 계통의 단순구조도.....	383
그림 10.3.2 칼리머 2차 계통의 결 가지 및 분기점 모델.....	385
그림 10.3.3 본 모델에 의해 계산된 대규모 물 누출시의 2차 계통의 여러 지점에서의 과도압력에 대한 일반적 경향.....	386
그림 10.3.4 누출부위에서의 압력이 최대일 때 IHX 및 반응영역 에서의 압력영향.....	387
그림 10.3.5 IHX에서의 압력이 최대일 때 IHX와 증기발생기간의 이격거리에 따른 압력영향.....	388
그림 10.3.6 반응영역에서의 압력이 최대일 때의 누출속도 및 장치규모의 영향.....	388
그림 10.3.7 물 모의 실험장치의 등축도.....	389
그림 10.3.8 물 모의 실험시설의 사진도.....	390
그림 10.3.9 단순배관 압력전파 실험장치.....	390
그림 10.4.1 알루미늄 박판의 겹수에 따른 박판의 파열압력 (1매의 두께 : 0.07mm).....	392
그림 10.4.2 알루미늄 박판의 겹수에 따른 박판의 파열압력 (1매의 두께 : 0.1mm).....	392
그림 10.5.1 중간열교환기 상부 인입관에서의 압력변화.....	394
그림 10.5.2 중간열교환기 하부 플레넘에서의 압력변화.....	394
그림 11.2.1 실험장치.....	398
그림 11.3.1 시간 변화에 따른 물 누출량의 변화.....	399
그림 11.3.2 물 누출 시작에서부터 갑작스런 물 누출량 증가가 일어나는 시간(sodium temp. 450°C, wall thickness 2.5mm)①2.25Cr 1Mo, ②X18H9 steel(18Cr 9Ni).....	400

그림 11.3.3	물 누출량과 시간 의존성.....	400
그림 11.3.4	갑작스런 물 누출 증가가 일어나는데까지 걸리는 시간과 초기누출속도와의 관계(•;data of IPPE using KALIMER 증기발생기 structure mat'l, 2.25Cr 1Mo).....	401
그림 11.3.5	시간에 따른 물 누출량의 의존성(2.25Cr 1Mo를 가지고 IPPE에서 실험한 결과).....	401
그림 11.3.6	소듐-물 반응 종결 및 검출 과정.....	402
그림 11.3.7	소듐에서 수소 기포 소음의 thermal, viscosity, radiation attenuation 효과.....	406
그림 11.3.8	소듐에서 누출 소음의 스펙트라 (sodium temp. 350℃, distance, 1650mm).....	407
그림 11.3.9	소듐에서 누출 소음의 스펙트라(sodium temp. 500℃, distance, 1650mm).....	407
그림 11.3.10	여러 가지 소듐온도에서 누출 소음 스펙트라 (distance, 1650mm).....	408
그림 11.3.11	여러 가지 누출량에서 음향신호패턴과 이의 FFT 결과 [(A); raw signals, (B); FFT of raw signals].....	411
그림 11.3.12	여러 가지 압력 하에서 Ar 가스 주입에 따른 음향 신호를 200kHz cut-off filtering하여 얻어진 raw 신호...	413
그림 11.3.13	여러 가지 압력 하에서 Ar 가스 주입에 따른 음향 신호를 50kHz cut-off filtering한 결과.....	414
그림 11.3.14	여러 가지 유량 변화에서 peak frequency와 peak 값의 관계.....	417
그림 11.3.15	몇 가지 배경 소음에 대한 peak frequency와 peak 값과의 관계.....	418
그림 12.2.1	액체중금속 냉각 원자로 설계개념.....	433

## 제 1 장 서 론

우리나라는 주요 에너지원이 되고 있는 석탄, 석유, 천연가스 등을 해외에 의존하고 있고, 이들 화석 연료마저 점차 고갈되어가고 있다. 특히, 화석연료의 무분별한 사용은 대기 오염 및 지구 온난화의 주요한 원인이 되고 있어 선진국을 중심으로 화석연료의 사용을 억제하는 한편 원전 위주의 에너지 정책을 유지해 나갈 추세에 있다. 우리나라의 전체 전기사용량중 약 40%가 원자력에 의하여 공급될 정도로 원자력 에너지에 대한 비중은 날로 커지고 있지만 원자로의 보유기종이 경수로와 중수로에 제한되어 있다. 경수로와 중수로의 연료가 되는 우라늄은 극히 제한된 양만 이용되기 때문에 기존원자로보다 열효율이 높고 우라늄자원의 60배 이상을 활용할 수 있는 액체금속로가 차세대 원자로로서 부각되고 있다.

액체금속로는 기존원자로와 같이 열중성자를 사용하지 않고 고속중성자를 사용하기 때문에 냉각재로서 열효율이 좋고 중성자 흡수 능력이 좋은 소듐을 사용하고 있지만 소듐은 화학적으로 활성이 매우 크기 때문에 원자로를 경제적으로 설계하는데 많은 제약조건이 따른다. 따라서 앞으로 액체금속의 개발방향은 경제성과 안전성을 갖추는 것으로 이를 위하여 모든 노력을 기울이고 있다. 이러한 이유 때문에 액체금속로의 설계에 필요한 소듐 실험자료의 생산, 소듐기반기술 및 소듐 안전기술 등은 경제성과 안전성을 향상시키는 중요 기술로 취급되고 있다.

본 과제의 목적은 액체금속로 설계용 전산코드를 개발, 검증하는데 필요한 기초실험자료를 생산하고, 실험에 관련된 측정기술의 확립과 아울러 소듐기반기술과 소듐 안전 기술을 개발하는데 있다. 1단계(1997~1999)에서는 소듐 기초기술 습득을 목적으로 기본 열유체 특성실험, 안전취급 특성실험, 요소기기 개발 등을 주로 수행하여 각종 설계용 전산코드 검증에 필요한 기본기술은 갖추었다고 판단됨에 따라 2단계(2000-2001)에서는 설계분야에서 도출한 실험을 수행하는데 필요한 선행 기술 개발 및 전산코드 검증용 실험자료를 생산하는데 목적을 두고 있다. 본 연구에 의하여 생산된 기초실험자료는 액체금속로 개발과제의 내부연계에 따라 설계분야에 제공되어 전산코드 개발 및 검증에 필요한 기초자료로 활용되고 측정기술, 기반실험 및 소듐 안전실험자료는 앞으로 수행될 실험장치 설계 및 액체금속로의 소듐 관련장치에 적용할 기초기술로 축적될 예정이다.

전산코드 검증실험은 PSDRS실험, 중간열교환기 실험, 핵연료집합체 압력강하 및 핵연료 핀다발 수중동특성 실험, 상부플레넘 액면요동 물도의 실험을 통하여 전산코드 검증에 활용될 수 있는 실험자료를 생산하였다. PSDRS 실험에서는 PSDRS의 열흐름 거동을 분석하기 위해 개발된 컴퓨터 코드(PARS)의 검증을 위한 실험자료를 생산하였다. 원자로가 어떤 이유로 인해 그 작동이 정지되어 노심에서 발생하는 열을 적당한 방법으로 제거하지 못할 경우엔 원자로가 정지된 이후에도 내부 온도가 계속해서 상승하게 되어 노심을 구성하는 핵연료가 손상될 수 있으며, 원자로 내부의 소듐이 비등되어 보다 심각한 사고를 불러올 수 있으므로 이를 미연에 방지하기 위해서는 원자로가 정지된 이후에도 상당기간 동안 이 붕괴열을 제거하는 방법이 마련되어 있어야 한다. 현재 우리나라에서 연구개발 중인 액체금속로 KALIMER의 경우 잔열제거는 증기발생기-응축기, SGACS 그리고 PSDRS의 모두 3가지 방법으로 이루어지도록 설계되어 있다. 이들 가운데 PSDRS만이 유일한 안전등급 잔열제거계통으로 모든 열제거원의 고장 시에 최종적인 잔열제거 수단이 된다. 이러한 PSDRS의 열흐름 거동을 분석하기 위해 개발된 컴퓨터 코드(PARS)의 검증을 위한 실험자료를 생산할 목적으로 원자로 모형을 그대로 축소 모사한 실험장치에 실제 소듐을 충전해서 실험을 수행하였다. 또한 PSDRS의 특성을 측정하는 실험에서는 복사열전달이 중요한 열전달 메카니즘이기 때문에 각 재질에 대한 방사율(thermal emissivity)은 액체금속로의 잔열제거계통 해석에 필요한 복사에 의한 열전달을 계산하는데 주요한 실험자료이다. 본 실험은 액체금속로인 KALIMER의 1차측 잔열제거계통인 PSDRS를 모의하는 실험장치에 사용되는 재료들인 스테인레스 스틸(SUS) 316L과 304의 방사율(thermal emissivity :  $\epsilon$ )을 측정하였다. 방사율을 측정하는 방법으로는 여러 가지 방법이 있으나 정밀히(오차 3% 미만) 측정하기 위해서는 고가의 장치와 측정조건을 엄격하게 유지하기 위한 부속장비들로 구성되므로 적은 실험비로 간편하게 시편을 교체하면서 측정하기에는 어려움이 있다. 여기에서는 실험오차는 3~10% 정도로 비교적 높으나 실험비가 가장 적게 소요되는 방법인 적외선 온도계를 이용하여 간접적으로 방사율을 측정하는 방법으로 실험을 수행하였다.

중간열교환기 실험은 중간열교환기 물모의 유동실험과 중간열교환기 열전달 특성 및 압력강하 실험장치 설계로 구분하여 수행하였다. 중간열교환기 물모의 유동실험은 KALIMER 중간열교환기 열유동 해석을 위한 코드 개발 및 검증에 필요한 중간열교환기 관다발에서의 경사각도에 따른 압력강하 실험자료를 생산하기 위한 것이다. 액체금속로 중간열교환기 설계에 필요한 셀측에서의 튜브의 배열과 경사각도에 따른 압력강하 특성을 분석하기 위하여 실험을 수행하였다. 정삼각형 및 회전정삼각형 배열의 튜브 번들에 대하여 30, 45, 60, 70도 및 90도 경사각도에 대하여 유입부, 중심부 및 유출부에서의 압력강하 측정 실험을 수행하였다. 측정된 압력강하 실험자료들을 사용하여 기존의 압력강하 상관식들을 평가하고, 수정하였다. 그리고 중간열교환기 열전달 특성 및 압력강하 실험장치 설계는 설계분야에서 작성한 실험요건서를 기초로 1단계 1차년도(1998년)에서 실험장치를 설계하여 제작시방서를 작성하였고, 이를 연구보고서에 요약하여 기술하였다. 이 실험장치에는 설계부서에서 요구한 4개의 실험 즉, IHX 전열관 다발실험, 상부플레넘 열유체 실험, ratcheting 실험 및 tee에서의 난류열혼합 실험 등을 한 개의 소듐 루프에서 수행할 수 있도록 소듐 공용장치를 구축하고 이에 4개의 실험부를 설치하는 형식이다. 이 공용장치는 저온 루프와 고온 루프 두 개로 구성되고 각각의 루프에서의 소듐 유량은 40 l/sec 이고, 열량은 300kw 이다. 이와 같은 유량은 액체금속로의 정상 운전시에 핵연료집합체 한 개에 들어갈 수 있는 용량으로 고가의 실험비가 필요하였으므로 예산상의 문제점으로 인하여 착수가 불가능하였다. 그러므로 여기에서는 유량을 1/2로 줄인 중간열교환기 열수력 실험장치의 실험부를 제안하였고, 이 실험을 수행한 후에 이 루프를 활용하여 차후 실험부를 교체하여 다른 실험을 수행할 수 있는 활용방안을 고려하여 수정된 루프를 개념 설계하였다.

액체금속로에서 전자펌프를 1차측 냉각재인 소듐 구동펌프로 채용할 경우에 전자펌프는 관성력이 없어 외부전원 상실시 관성력에 의해 노심의 잔열을 제거하는데 문제점이 있다. 이를 보완하기 위한 유력한 방법의 하나로 휠이 달린 모터발전기(motor-generator)를 사용하여 외부전원 상실시에 휠의 관성력으로 전력을 생산하여 전자펌프를 작동시키는 개념이 있



다. 이 개념을 채용하기 위해서는 검증과 기초자료 생산이 필수적이다. 이 연구는 유체설계분야의 전자펌프 관성보완장치 성능실험 요건서에 따라 수행하였다. 실험에서는 정상시에는 모터의 역할을 하나 외부전원 차단시에는 발전기의 역할을 하는 소규모 관성보완장치를 설계, 제작하였다. 기존의 MHD 소듐 실험장치에 설치된 소형 전자펌프에 외부전력 차단시에는 관성보완장치에서 발생된 전력을 공급하는 구조로 실험장치를 구성하여 이 장치의 특성을 실험하였다. 전자펌프에 60Hz, 최대 15kW의 전력을 정상적으로 공급하다가 외부전원 상실시에 시간에 따른 관성보완장치의 회전수, 전압, 전류, 역을 및 소듐 계통에서의 유량, 압력강하 등의 변화를 측정하여 관성보완장치의 성능을 평가하였다. 휠의 특성을 조사하기 위하여 규격이 다른 두 종류의 휠을 사용하여 실험하였다.

핵연료집합체 압력강하실험은 설계분야에서 필요한 기초실험 중의 하나이고 핵연료집합체 온도분포를 정확히 예측하고, 집합체 내에서의 주요한 열수력 현상을 이해하는 것이 필수적이기 때문에 노심설계에 필요한 핵연료집합체 각 부위별, 즉, 입구 오리피스(orifice), 핵연료집합체 입구, 와이어가 나선형 형태로 감겨진 핵연료집합체, 핵연료집합체 출구 및 핵연료집합체 상부 부분에서의 압력강하 측정 실험을 수행하였다. 실제 KALIMER 노심 핵연료집합체를 모사한 271개의 연료봉으로 구성된 집합체를 실험부로 사용하여 물 실험을 수행하였으며 기존 압력강하 상관식들의 타당성을 비교, 분석하였다. 또한 액체금속 원자로의 경우 정상적인 운전조건 하에서 유체유발진동에 의한 핵연료봉의 동적 구조건전성을 평가하기 위해서는 핵연료봉의 유체 내 동특성에 대한 정확한 해석이 수행되어야 한다. 원자로심 내부에서 핵연료봉의 진동거동은 내부유체의 유속에 의하여 크게 영향을 받는다. 따라서 유체 유동에 의한 핵연료봉의 진동 응답을 예측하기 위해서는 먼저 유체의 영향을 고려한 핵연료봉의 동특성 해석이 필요하다. 수중에서의 모의 핵연료봉의 동특성은 주로 유체의 부가 질량 효과에 의하여 지배되므로, 모의 핵연료봉 및 외부실린더사이의 간격의 크기를 변화시킴으로써 유체간격의 크기에 따른 동특성 변화를 진동모우드별로 상세히 관찰하였다. 또한 액체금속로의 핵연료봉에 사용된 간극 선재가 핵연료봉의 진동모우드에 미치는 영향을 살펴보았다.

상부플레넘 액면 요동 물모의 실험은 유체설계분야와의 연계연구로 유체설계분야에서 작성한 KALIMER 내부분서인 실험요건서 LMR/FS200-XR-01/2001의 6개 실험부 중에서 case-4인 구조로 장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 액체금속로 노심의 상부에는 냉각재인 소듐의 자유액면이 존재하는데 소듐과 커버가스의 온도차는 대표적으로 130℃ 정도이다. 자유액면의 요동으로 인해 인접한 재질에 열피로를 유발시키고, 커버가스가 소듐속으로 혼입되면 중간열교환기의 성능저하와 노심의 핵반응도에 문제점을 야기시키므로 자유액면에서의 요동 현상을 분석하는 것은 액체금속로 개발에 중요하다. 이 실험에서는 상온의 물을 사용하여 가스혼입이 일어날 수 있는 임계조건 즉, 가스혼입이 발생하는 시점의 자유액면의 높이와 유출유량을 측정하여 가스혼입이 일어나는 조건을 분석하였다. 또한 유입유량과 자유액면의 높이에 따른 자유액면의 구배를 측정하였다. 실험장치의 규모는 KALIMER의 길이스케일로 1/4 정도이며, 상부 플레넘의 1/4 section을 모의하였다. 이 실험에서는 부차적으로 안쪽 벽면에 Vane을 설치하여 UIS에 부착된 구조물이 자유액면의 유동에 어떤 영향을 미치는지를 조사하고자 하였다.

한편 소듐기반기술은 액체금속로에 사용되어지는 많은 부품과 기기들 중에서 노형 개발에 직접 영향을 미치거나 경제성을 획기적으로 높일 수 있는 기기를 개발하기에 앞서 축적하여야 할 필수적인 기술이다. 따라서 본 연구에서는 소듐 열유체 특성실험, 소듐 열유속 측정실험, 국소유속 센서 측정실험, 중간열교환기 중규모 전자펌프 설계 연구가 수행되었다.

소듐 열유체 특성실험은 자장이 소듐 유동의 압력강하에 미치는 영향을 정량화하기 위한 실험이며, 실험은 기설치한 MHD 압력강하 실험장치에서 수행되었다. 이 실험에서는 전년도에 수행한 자장내에서의 MHD 압력강하의 이론적 계산결과를 실험과 비교하기 위한 자료를 생산하는 것이다. 주요 실험절차는 소듐 유동이 흐르는 상태에서 자장을 변화시켜 전자유량계의 유량변화와 소듐용 차압계의 압력강하를 측정하는 것이다. 이 실험에서 압력강하 실험자료 생산은 예비실험 단계에 있으며, 소듐 차압측정 기술을 개발하고 측정시험을 수행하는데 대부분의 시간을 소비하였다. 수행한 측정시험으로는 차압측정기의 보정시험, 오일과 소듐의 반응시험, 중

력이 미치는 영향 보존시험, 러시아형 차압계의 문제점 분석, 오일관의 형태변화 시험, 실리콘 오일의 압축성 시험 및 아르곤 가스에 의한 소듐 차압계의 특성을 분석 등을 수행하였다.

액체금속로에는 고온의 소듐을 냉각재로 사용하기 때문에 소듐 특성을 측정할 수 있는 센서들은 경수로의 냉각재인 물에서 사용하는 센서들과 많이 다르다. 측정기술은 액체금속로에서의 활용성 뿐만 아니라 소듐 관련 실험에서 실험의 효율과 정확도를 매우 높일 수 있으므로 개발하여야 할 필수적인 측정기술이다. 따라서 고온, 고열유속 조건과 같은 열전달 현상 분석에 필요한 전도방식의 열유속센서 보정장치를 자체 제작하고, 이 조건에 해당되는 열전달현상을 FLUENT를 이용하여 해석함으로써 열유속센서의 민감도(sensitivity) 측정에 대한 데이터를 획득하고 실제 열전달 조건에서는 검출된 출력전압으로부터 열유속을 계산하고자 하였다. 또한 국소 유속 센서(local velocity sensor)는 KALIMER core 번들 주변을 흐르는 유체의 유속을 측정하거나 중간열교환기(IHX)의 튜브 주변을 흐르는 유체의 유속을 측정하기 위한 것으로서 측정 결과는 유체 관련 장치를 설계하는데 필요한 전산코드 검증에 활용되기 때문에 KALIMER core의 종축과 횡축 흐름을 측정할 수 있는 국소 유속 측정 센서를 설계하였다.

한편 전자 유체인 소듐 유동은 자장에 매우 민감하다. 전자펌프, 전자유량계 등 자장발생장치가 많이 사용되는 액체금속로의 개발에서는 자장이 소듐 유동에 미치는 영향을 정량적으로 파악하여야 하며, 소듐 시설의 실험비용을 감소시키기 위하여 고가인 전자펌프를 자체 설계, 제작할 필요가 있다. 추후 실험 loop를 구성하여 펌프를 설계, 제작하여 중간열교환기 열유체 실험장치에 활용할 계획이다.

소듐 화재 특성 실험 및 소듐-물반응 특성실험과 같은 안전 특성 실험은 KALIMER 고유의 특성에 맞춰 실험이 수행됨으로써, 자료생산 및 설계에 반영하는 시스템으로 연계되어, 계통의 안전성 확보와 더불어 평가기술을 확립함으로써 원자로의 안전 설계 최적화 자료로 활용될 수 있다. 원자로에서 소듐화재를 억제하기 위한 가장 좋은 방법은 화재방호대책을 완벽하게 고려한 액금로를 설계하여 건조하는 것이다. 하지만 이러한 방호대책이 고려되더라도 소듐이 전혀 누출되지 않는다고 볼 수 없다. 소듐이 대기중이나 기타 원자로 건물에 누출되는 사고가 방출되는 경우에 화재

확대 방지를 위하여 초기에 소듐 누출을 감지하여 신속하게 소듐화재를 소화하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 소듐화재 발생시에 조업자가 신속하게 조치를 취할 수 있도록 초기에 소듐 누출을 감지할 수 있는 기술을 개발하고 액금로의 소듐화재를 효과적으로 소화할 수 있는 소화재를 시험하고자 하였다.

한편 증기발생기에서는 매우 적은 소량의 물이 누출되더라도 소듐과의 격렬한 반응에 따른 열 및 압력의 영향과 강한 부식성 때문에 자체의 누출 지점은 물론 주위의 파이프까지 절단시키는 사고로까지 연장되어 대량의 물을 누출시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 설계시 누출의 검출방법 및 누출 검출시의 대책설비가 반드시 고려되어야 하며, 또 증기발생기 등 원자로의 각 component에 대한 사고 후 건전성을 반드시 평가하여야 한다. 이를 위하여 우선 소듐-물 반응의 특성에 대한 해석이 반드시 수행되어야 하며, 누출 단계별 감시대책, 누출 특성의 평가 및 반응생성물(열포함)의 거동, 누출의 과정 및 반응기내에서의 압력변화 등이 연구되어야 한다. 또한 증기발생기 및 2차계통의 건전성을 평가하기 위해서는 미량 누출에 대한 충분한 자료 확보 및 대규모 누출시의 압력전과 해석코드를 개발하여 검증하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 전열관을 사이에 두고 전열관 벽에서 어떤 결함이 발생되어 고압의 물이 소듐 부위로 미량 또는 소량 누출되는 경우를 가정해서, 물 누출시 발생하는 소듐-물 반응에 의한 전열관 재질의 부식현상, 침식현상 및 표적에서의 반응특성으로 wastage 현상 및 온도상승에 대한 반응 특성을 해석하고, 물 누출이 진전되는 전과 메커니즘을 규명함으로써 추후 증기발생기의 안전성 해석을 위한 코드 개발시 사용될 수 있는 기초자료를 얻고자 하였다. 또한 micro leak에서부터 큰 규모로 누출이 증가하는 과정의 transition 현상에서의 bubbling을 파악하여 micro leak를 검출하는 Prototype의 장치를 개발하고, KALIMER 증기발생기의 건전성을 유지하기 위한 기초자료를 생산하고자 하였다.

여 백

## 제 2 장 국내·외 기술개발 현황

### 제 1 절 국외 기술개발 현황 분석

외국의 경우 오랜 고속증식로 개발과정에서 많은 연구가 보고되고 있으나 열수력 설계용 실험자료는 노형에 밀접한 관련이 있으므로 노형 특성에 맞는 실험자료가 필요하며, 또한 현재에는 노형의 조밀화에 필요한 실험자료를 생산하고 있으나 구입할 수 없는 실정이다. 요소기기는 KALIMER 노형에 필요한 특수기기이므로 국내연구개발이 필요하다.

소듐 누출 감지 기술은 소듐 시스템에서 사고의 확대 방지와 기기 및 인명 보호에 필수 불가결한 기술이다. 소듐 누출 감지기는 소듐 누출 형태에 따라 세 가지 유형으로 구분될 수 있는데 첫 번째는 열 절연체가 없는 파이프나 용기로부터 소듐이 누출되는 기체환경으로의 누출과 두 번째로 소듐이 파이프나 용기표면에 열 절연체 혹은 다른 물질이 접촉하고 있을 때 기체-고체환경으로의 소듐 누출, 그리고 세 번째로 열교환기의 경우 액체환경으로의 소듐 누출로 나눌 수 있다. 이러한 소듐 누출 형태에 따라 미국을 비롯한 서방 선진국에서는 다양한 누출 감지기를 개발하여 오고 있다. 소듐이 파이프나 용기로부터 기체환경으로 누출될 경우 소듐의 누출 형태는 누출되는 위치, 누출량, 압력차, 누출온도 등에 따라 달라진다. 이러한 경우에 누출감지기로는 매연감지기가 적합하며 다만 소듐 누출율이 낮고 소듐 표면을 따라 흐르거나 방울져 떨어지는 경우에는 접촉감지거나 수위 감지기를 이용하여 소듐 누출을 감지할 수 있다. 소듐 시스템에는 일반적으로 열손실을 막기 위하여 열절연체가 사용되는데 이러한 절연체가 소듐 누출을 감지하는데 방해 요소가 된다. 이러한 경우에는 직접 관찰에 의하여 소듐 누출을 발견할 수 없기 때문에 소듐의 누출 경로를 바꾸어 증기나 매연을 포집하여 누출을 감지하는 기술이 개발되고 있다. 열교환기나 액체로 둘러싸인 소듐에서는 액체환경으로의 소듐 누출이 가능하다. 소듐 환경으로 소듐이 누출되는 경우는 기체환경으로 누출되는 경우와 같은 방법을 사용할 수 없으며 그 방법 역시 적용하기 어렵다. 물로의 누출에는

기체환경으로 누출되는 방법을 사용할 수 없으며 증기계통에서는 소듐에 반응하는 분석기의 이용이 가능하다.

액체 소듐은 우수한 열 전달 능력과 높은 비열, 고온에서 구조물과의 양호한 양립성 등을 나타내기 때문에 액금로의 냉각재로 많이 사용된다. 그러나 원자로 2차 계통에서는 저압의 액체 소듐과 전열관 사이에 고압의 물(스팀)이 공존하게 되는데, 전열관에서 어떤 defect(용접불량, pin-hole, vibration의 반복적 발생)가 발생하게 되면 고압의 물이 소듐 부위로 누출되면서 소듐-물의 폭발적인 화학반응과 함께 다량의 반응열, 수소가스 등이 발생되어 원자로 운전의 정지와 같은 중대한 사고가 발생할 수 있다. 따라서 원자로 건설 전 설계단계부터 물 누출에 대한 고유의 안전성을 확보하기 위한 부단한 연구가 계속되고 있는데, 이러한 물 누출은 초기에는 미세한 누출로 출발하여 미량→소량→중규모→대규모 누출로 진전되는 것으로 알려져 있기 때문에, 누출을 초기에 검출할 수 있는 검출기의 개발과 함께 물 누출이 진전되는 현상의 해석을 통해 설계에 반영할 수 있는 실험 자료의 획득이 필요하다.

외국에서 진행되었거나 진행중인 소듐-물 반응 특성 연구는 프랑스, 영국을 중심으로 한 유럽국가들과 미국 및 일본, 러시아 등에서 활발히 연구가 진행된 것으로 알려져 있는데 러시아의 경우 보고된 자료들을 수집할 수 없는 단점이 있다.

유럽의 경우 프랑스와 영국 등에 의해 액체금로 개발이 주도되면서 소듐-물 반응에 대한 연구가 진행되었으며, 영국의 경우 SuperNoah에서 소규모, 중규모의 물 누출 실험을 수행하여 그들이 정한 설계기준 누출율에 대한 정당성을 입증하기도 하였으나, PFR에서 누출사고를 경험한 후 물 누출에 대한 중요성이 한층 제고되어 활발한 연구가 수행되었다. 프랑스에서는 미량 누출실험이 Chatou에 있는 Micromegas 시설에서 수행된 것을 비롯해서, Novatom에서의 누출전파 실험, Cadarache에 있는 Castor loop에서의 대규모 소듐-물 반응실험들이 수행되었다. 소량 누출의 경우 자국에서 사용 예정이었던 시편에 crack을 인공적으로 제작해서, fatigue crack이 발생하는 현상을 관찰하거나, 미량 물 누출에 의한 인근 튜브의 wastage현상 해석을 위한 실험이 주류를 이루고 있다.

미국의 경우 액체금속로 개발 초기에는 대규모 물 누출을 중심으로 시스템의 안전성 여부가 중점적으로 연구되었으나, ESADA 시설의 증기발생기에서 미량 누출이 발생된 후 소량 물 누출의 중요성이 대두되면서 APDA에서 물 누출 연구가 체계적으로 수행되었다. 누출계통의 평가 및 개발, 수소감지기 개발, wastage rate 측정 등의 실험이 수행되었으며, 원통형 orifice를 누출 hole로 사용하여 표적을 전방에 배치한 후 물 누출 실험을 수행하였는데, wastage rate는 물의 누출속도가 커질수록 증가하지만 어느 점에서 최대 값을 나타내고 다시 감소한다는 중요한 결과를 도출하였다.

일본의 경우 액금로의 경제성이 부각되면서 2중 탱크형의 새로운 개념이 도입되면서 소듐-물 반응 특성에 대한 해석이 더욱 중요하게 대두되었다. 소듐-물 반응 특성 해석을 위해 SWAT 시설을 5기 건설하여 재질 특성실험, 누출전파 해석용 코드개발, 수소검출기 개발, 누출을 저감을 위한 연구 등이 차례로 수행되었다. 그 외에도 소규모 누출과 관련하여 독일의 Interatom에서 전열관 재질로 사용되는 12Cr 강에 대한 실험과 수소검출기 개발, 이탈리아의 SPX-1을 위한 대규모 누출 실험 및 Incoloy 800을 사용한 누출 전파실험 및 열 전달 실험이 수행되었으며, 인도의 경우 소량 누출 연구를 위한 시설들이 건설예정에 있으며, 수소 검출기의 성능 검증을 위한 소듐 loop가 건설되어 운전되고 있는 것으로 알려져 있다.

이상에서 살펴본 것과 같이 여러 나라에서 다양한 종류의 소듐-물 반응시설들이 건설되어 자국의 특성에 맞는 실험이 수행되었음을 알 수 있으며, 이들로부터 소듐-물 반응특성 연구가 진행된 상황을 보면, 대개 물 누출을 소규모 와 대규모 누출로 구분하여 연구가 진행되었음을 알 수 있다. 먼저 소규모 누출에서, 미량 누출의 원인으로 전열관의 용접불량이 모든 누출사고의 대부분을 차지하고 있으며, tube bundle의 vibration이나 튜브자체의 결함 등에 의해 발생된 경우도 있다. 주요 현상은 self-enlargement와 self-plugging 현상으로, 각국에서는 이와 관련하여 초기 물 누출율과 소듐 온도를 변수로 실험한 결과, 누출이 발생되었을 시 소듐-물 반응생성물에 의한 corrosion현상이 강하게 작용되는 것으로 밝혀졌으며, 곧 누출의 확대는 시간이 지남에 따라 소듐 측에서 스팀 측으로 부식



이 진행되어, 누출 구멍의 단면이 edge상으로 발전되고 중국에는 누출율이 급격히 확대되는 것으로 해석하고 있다. 이 때 발생하는 leak hole의 크기는 소듐 온도, 튜브 재질, 초기 누출율 등에 의해 영향을 받는 것으로 해석하고 있다.

미량보다 좀 더 누출 규모가 확대된 소량 누출의 경우에 수행된 각국의 실험은 주로 소듐내에 물 누출 노즐을 설치하고 이 노즐로부터 jet를 발생시켜 전면에 장착된 표적에서 손상 정도를 해석하는 것이 주종을 이루고 있으나, 실제 소듐 속에서 노즐을 통해 표적을 손상시키는 실험은 거의 중규모 정도의 물이 누출되기 때문에 세계적으로 실험이 그렇게 많이 수행되지는 않은 것으로 판단된다. 실험시 변수로는 소듐 온도, 노즐-표적과의 거리, 누출율 변화 등으로 실험을 수행하였으며, 전열관 벽이 관통되기까지 걸린 시간으로 단위시간당 마모 깊이를 나타내는 wastage rate를 측정하여 방정식을 구한 것이 대부분이다.

중규모와 대규모 물 누출 실험은 대부분 해석코드를 개발하여 이론적인 해석을 수행한 경우가 대부분이고, 일부 국가에서만 몇 번의 실제 실험이 수행되었으며, 물 누출에 의해 파열된 튜브의 개수, overheating, 입력 상승 등을 해석하였다. 이처럼 물 누출에 대한 중요성은 액체금속로 초기 개발과정부터 고려된 필수 사항으로, 안전성을 고려하여 증기발생기 개발 초기에는 전열관을 이중으로 하는 방식을 사용하기도 하였으나, 근래에 경제적인 측면이 고려되어 단일 전열관 개념으로 발전되면서, 물 누출에 대한 안전성 측면이 더욱 강조되고 있다.

유럽의 경우 영국, 프랑스 등에 의해 주도되어 오면서 주로 Super Phenix를 연구대상으로 하였다.

- Test of spontaneous development of crack: 증기발생기 괴포 화영역인 490 및 350°C에서 초기 V형, 0.4mm 깊이의 초기 fault에 의한 fatigue crack 현상 관찰 및 소듐-물 접촉에 의한 결함의 발전 과정을 연구하였다.
- 많은 컴퓨터 프로그램을 개발하였으며, 이를 검증하기 위한 실험시설로서 THERTA 및 NOAH 등을 설치하여 소듐-물 반응에 의한 온도와 열 flux를 평가하였다.

미국의 경우는 ANL에서 소듐-물 반응에 의해 발생하는 수소의 초기 확산현상을 측정하기 위하여 수소농도 측정기 개발을 시작으로 하여 대규모 누출을 평가하기 위한 프로그램 개발 및 평가기술을 개발하였다. 그리고 대규모 누출시 발생하는 높은 압력을 안전하고 신뢰성 있게 배출시킬 수 있는 시스템을 개발하여 증기발생기 및 2차 계통에 미치는 충격을 방지할 수 있도록 하였다. 증기발생기의 건전성 평가는 다양한 코드를 개발하여 대규모 누출시의 증기발생기에 대한 건전성을 해석하였고 전산코드는 다음과 같다.

- APDA의 BUG 코드
- GE의 SWEAR 코드
- AI의 TRANSWRAP 코드

이를 검증하기 위한 실험시설로서 AI의 Fermi Steam Generator 시스템이 있으며, 실제 대규모 누출속도가 50 lb/sec로 예상되었으나 이 실험을 통해서도 누출속도가 20 lb/sec로 나타났으며, NOAH test에서는 10 lb/sec로 나타나 더 큰 규모의 누출시점 및 누출되는 물의 양에 대해서도 더 많은 실험을 수행하여 상세히 규명되어야 한다고 판단하고 있다.

중국에서는 1단계~3단계로 구분하여 소듐-물 반응에 대한 활발한 연구가 수행되고 있다. 1단계인 1968~1987년까지의 약 20년간은 약 12개의 sodium loop 및 test facilities를 설치하여 neutronics, thermohydraulics, materials 및 sodium technology에 대한 기반기술을 확보하였으며, 2단계인 1987~1993년까지는 약 20개의 sodium loop 및 test facilities를 확보하여 sodium technology, materials & fuels safety 및 fast reactor에 대한 기술 확보 목적으로 기본 연구방향을 설정하였으며, 2004년까지 65 MWt experimental fast reactor 건조를 예정으로 하고 있고, 3단계인 1995년 이후는 Chinese Experimental Fast Reactor(CEFR)를 개념설계한 후 design test demonstration을 목적으로 연구를 진행하고 있으며, 다수의 요소기기도 자체 개발하고 있다.

일본의 경우는 실험로 JOYO 및 원형로 MONJU를 운전하면서 소듐-물 반응 특성에 대해 많은 연구를 수행해 왔으나 최근의 사고 등으로 많이 위축되어 있는 상태다. 그러나 그 동안에도 기술 축적을 위한 연구는

활발히 진행되어 왔으며, CRIEPI의 경우는 처음에는 Double Pool형 원자로를 대상으로 연구를 수행해 오다가 최근에는 innovative steam generator 개념을 도입하여 ARES(Advanced Reactor Eliminating Secondary) 시스템을 갖춘 3660 MWt 원자로에 대한 연구를 수행하고 있다.

미국, 일본, 러시아, 인도, 유럽 등 선진국에서는 소듐-물 반응에 의한 물 누출 검출 기술을 확보하고 있으나, passive 음향 검출 비교 실험 결과에 의하면, 러시아의 음향 검출은 1 g/sec 까지 검출이 가능한 알고리즘으로서 검출 특성이 가장 우수하고 중국의 음향 검출 기술의 수준에 대해서는 아직 정보가 전무한 상태이다. Active 음향 검출 기술은 일본이 가장 우수한 편이나 실제 SG 시스템에 적용하기에는 아직 적절치 못하는 기술이다. 현재는 micro leak 에 대한 poor noise 하에서의 leak noise를 확보하기 위한 분석기술에 관심을 가지고 있다.

## 제 2 절 국내 기술개발 현황 분석

고온과 저온의 소듐이 난류열혼합하는 현상을 온도차, 유속, 노즐에서의 높이 등을 실험인자로 온도장과 온도요동에 관련된 400개의 Data Set을 측정하여 현재까지 70%에 해당되는 자료를 분석하였다. 일정 온도차에서 저온 소듐의 유속이 증가할수록 평균온도 분포는 점점 더 작아지고, 최대와 최소 온도의 폭은 좁아짐을 볼 수 있었다. 또한 축방향의 변화에 따라 최대 및 최소 온도 값이 좌·우 양쪽으로 이동함을 볼 수 있었다. 고·저온 소듐의 유속이 동일한 경우에 온도요동의 모양이 III 모양으로 나타나며, 비등속인 경우에도 이와 같은 모양의 온도요동이 형성되었다. 온도차이의 증가, 높이의 감소, 유속의 증가, 고·저온 소듐의 유속차의 증가 등에 따라 온도요동의 크기는 증가하게 되며, 축방향의 변화에 따라 유속변화의 민감도와 온도차이에 의한 민감도는 유사하게 감소하였다.

공기에 의한 원자로 벽면냉각으로 잔열을 제거시키는 안전계통이 기술적인 면에서 타당한지를 분석하기 위하여 1/10 규ah의 소듐을 사용하는 자연순환 실험장치를 설계, 제작, 설치하였고, 이 실험에서 자연대류와 열

전도에 의한 특성을 분리하여 해석코자 알루미늄을 사용하는 같은 규격의 실험장치를 설계, 설치하였다.

1차계통 펌프가 정지될 때 발생하여 노심내부로 흐르는 유동의 재분배를 분석하였고, 이를 해석할 수 있는 간단한 프로그램을 개발하였다. 이 유동재분배에는 연료집합체의 하부에 설치된 오리피스가 가장 중요한 역할을 하였으며, 기존 원자로들에서 그 모양은 서로 상이하였다. 오리피스에 의한 압력강하를 계산하는데 필수적인 유동마찰계수를 측정할 수 있는 물 실험장치를 설치하였다. 소듐의 차압측정용으로는 NaK을 압력매개체로 사용하는 압력센서가 주로 사용되고 있다.

액체금속로에서 가장 중요시되는 사고인 소듐의 비등을 분석하기 위한 기초연구를 수행하였다. 소듐의 기포율을 측정하는 방법, 보이드의 전파를 해석할 수 있는 방법을 분석하였고 이에 필요한 Data Base을 만들었다. 기포율 측정 센서로는 Chen-type 프로브가 가장 좋으며, 보이드 해석용 코드로는 THERMIT-6S를 보완하여 사용하는 것이 가장 타당하다고 평가되었다.

소듐 시설의 표준 제어 시스템을 개발하기 위하여 실시간 문답이 가능한 소듐 루프 운전지원 시스템을 개발하고 있다. 당해년도에는 지식베이스의 형태를 설계하여, 운전절차에 대한 지식을 전산화하는 토대를 마련하였고, 이러한 지식베이스를 추론하는 시스템을 개발하였다. 전체 시스템을 세계의 프로세스로 설계하고, 각 프로세스 간의 통신방법을 확립하였다. 또한 제어패널 프로그램의 기초 정보 모듈을 개발하였으며, 전체 정보 시스템의 하위 구조를 확립하였다.

고온의 소듐 탱크내부를 투시하여 영상화하는 데는 초음파를 사용하는 방법이 가장 타당하였다. 소듐에 탐촉자를 담가 측정하는 방법이 가장 좋으나 현재까지 개발되어 있는 기술로는 저온의 물에만 적용할 수 있다. 측정, 분석기술을 축적하고, 고온 소듐용 센서를 개발하기 위한 방법을 강구하였다.

전자유량계 개발에서는 6개의 코일 그룹을 갖는 검출부와 검출되는 신호를 분석하는 신호처리부를 설계하였고, 국소형 와류식 전자유량계를 설계하는데 필요한 제반 문제점을 분석하였다. 국소형 유량계 설계에서는 센

서의 직경을 5mm 이내로 작게 만들어야 하는 문제점이 남아 있다.

소뿔의 열혼합 실험을 모의하기 위하여 소뿔 실험부와 규격이 같은 물 실험을 수행하였다. LDV로 전 유동영역의 평균유속과 속도요동을 측정하여 유동장의 유동특성을 분석할 수 있는 지도를 작성하였다. 이와 병행하여 PIV 계측기로 실험부 내의 입자의 유동을 추적하여 유동장을 가시화시키는 기술을 개발하였다. 온도와 유동장의 특성 분석기술로는 VXI 시스템을 도입하였으며 시운전 단계에 있다.

경계적용, 비엇물림 격자계를 사용하는 열수력 해석용 전산코드를 개발하고 있는데 이차모멘트 난류모델과 다공질 매질법을 도입하였다. 이차모멘트 난류모델을 효율적으로 도입하는 방법을 제시하였고 시험문제어의 적용을 통하여 타당성을 검증하였다. 시험문제로는 난류모델 검증용으로 널리 이용되고 있는 후향계단 유동을 택하였다. 본 연구에서 채택된 Gibson과 Launder의 이차모멘트 난류모델은 유동의 박리를 포함하는 재순환영역에서 속도분포를 비교적 정확히 예측하나, 재순환영역을 지나 새로운 경계층이 형성되는 지역에서는 속도를 낮게 예측하였다. 이 모델은 또한 재순환영역에서 난류에너지와 난류전단응력을 실험치보다 높게 예측하였다. 이러한 결과들은 비록 이차모멘트 난류모델이  $k-\epsilon$  모델보다 여러 형태의 유동해석에서 전반적으로 우수한 결과를 산출하나 이 모델도 앞으로 개선의 여지가 많은 것으로 생각된다.

액체금속로의 노심상부에 형성되는 자유액면을 해석하기 위하여 이론을 정립하고 프로그램을 코딩화하였다. 자유액면 운동의 계산에는 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 그 중에서, 자유액면을 기술하는 방정식이 비선형 경계조건을 가지는 선형 방정식이라는 점에 착안한 모드 분석 방법과 MAC 방법, 유한차분법 등을 비교, 분석하였다. 먼저 모드 분석법에 기반을 두고, 원통형 용기에 유체가 담겨져 있을 때의 파동 현상을 주요 모드로 나누고, 그 시간에 대한 변화를 비선형 분석방법을 사용하여 연구하였다. 그리고, 일반적으로 적용할 수 있는 수치해석 방법을 개발, 보완 중이다. 이 방법은, 그 계산방법과 결과분석이 간단하나, 전산코드의 안정성 문제가 아직 미해결된 과제로 남아 있어 전산코드를 안정화하기 위해서 여러 가지 방법을 강구하였다. MAC 방법과 유한차분법들의 특성분석과

응용에 대한 자료수집 및 비교분석을 마무리하였고 전산코드 작성을 시작하였다.

지금까지의 연구결과를 분석한 바에 의하면 자유액면의 요동에 영향을 미치는 가장 주요한 무차원수는 Froude수이며, 그 다음으로 Reynolds수와 Weber수이다. 가스혼입에서 가장 중요한 무차원수는 물의 수위와 탱크의 직경의 비인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이와 같은 특성을 자세히 분석하여 액체금속로의 설계에 반영코자 높이와 폭의 비를 임의로 변화시킬 수 있는  $\varnothing 500 \times H1200$  mm 규격의 실험장치를 설계하였다.

전자기의 등가회로 해석법과 후보재료의 전기적/자기적 고온특성 실험 자료 생산 및 재료의 방사선 조사에 관한 자료조사 등을 통하여 소듐용  $600^{\circ}\text{C}$ ,  $60 \text{ l/min}$  규격인 침지식 전자펌프를 설계하였다. 철심재료로는 규소 강판, 코일재료로는 알루미늄 분산강화동이 가장 우수하다. 전기절연 재료인 마이카, 알루미늄 등이 중성자 조사하에서도 사용 가능하나 가장 취약한 부분이다.

큐리점 전자석을 이용하는 피동형 노정지기구(SASS)의 기술 성립성을 확인하기 위하여 SASS 설계요건을 정리하고, 지진에 의해 제어봉 안내관이 변형되더라도 제어봉이 문제없이 노심에 삽입될 수 있는 다관절형 노정지봉과 SASS 실험장치를 설계/제작하여 상온에서 원리확인시험을 수행하였다. 재료의 큐리점( $600^{\circ}\text{C}$ )을 이용하는 전자석을 구성하여 냉각재의 온도가 큐리점 이상으로 상승하면 제어봉이 자중에 의해 자유낙하하는 것을 확인하였다.

액체금속로에 사용 가능한 증기발생기의 기술을 분석하였고 칼리머용 증기발생기에 대한 사양을 정리하였다. 증기 사이클로는 과열증기 사이클이 보다 우수하였으며, 헬리칼 코일형이 가장 유력한 증기발생기 형태이었다. 또한 칼리머용 증기발생기의 매개변수를 계산하였는데, 전열관의 직경은  $31.75\text{mm}$ 이고, 전열관의 수는 630개가 적합하였다.

316L 및 316LN 스텐레스 강으로  $600^{\circ}\text{C}$ 에서 인장 및 피로시험에서 인장시험결과 최대인장강도는 온도가 증가하면 감소하지만 질소를 첨가하면 그 값은 증가하였고, 연신율은 온도에 따라서 약간 감소하다가 증가하는 경향을 나타내었고 질소를 첨가하면 약간 증가하였다. 항복강도는 질소를

첨가한 경우가 더 낮게 나타났고 온도가 증가하면 감소하였다. 변형속도에 따른 항복강도, 인장강도, 연신율의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 인장시험결과 동적변형시효가 발생하는 임계변형량은 온도가 증가하면 감소하고 변형속도가 증가하면 증가하는 경향을 보였고, Nabarro 이론에 따라 활성화에너지를 구하면 24kcal 이다. 이것은 공공과 탄소의 확산을 위한 활성화에너지의 평균값과 유사하므로 동적변형시효는 공공과 탄소가 전위의 상호작용에 의해서 발생한다는 것을 알 수 있다.

피로시험에서 고온에서의 초기의 급격한 경화는 동적변형시효에 의한 것으로 생각되며, 피로수명의 감소는 동적변형시효와 산화의 영향 때문으로 생각된다. 600°C에서 질소를 첨가하지 않은 것과 첨가한 것은 둘다 초기에 급격한 경화를 일으키는 것으로 보아 동적변형시효가 일어나는 것을 알 수 있고, TEM의 관찰결과 질소를 첨가하면 전위의 슬립형태가 평면적으로 변하고 dipole이 관찰되었으므로, 600°C에서의 질소에 의한 피로수명 개선은 동적변형시효라기보다는 Cr과 질소와의 단범위규칙도가 고온에서도 유지되어 평면슬립을 조장하기 때문으로 생각된다. 피로시험후의 표면의 관찰결과 피로균열 전파속도는 고변형범위에서는 질소의 영향이 없고, 저변형범위에서는 질소를 첨가하면 피로균열의 전파속도가 감소하는 것으로 나타났다. 질소의 유무와 상관없이 600°C에서 피로시험한 경우 변형범위가 1%인 경우는 석출물이 관찰되지 않았지만 0.6%인 경우 석출물이 관찰되었다.

반복피로 하중에 의해 진전되는 균열의 길이를 측정하는 시스템을 COD법 및 DCPD법을 이용하여 개발하였고, 측정된 피로균열 길이를 2차 다항식으로 회귀분석하는 프로그램을 Quattro Pro S/W를 이용하여 개발하였다. 개발한 자료처리 및 분석 시스템은 균열진전속도를 정량적으로 시험, 평가할 수 있어서 구조물의 건전성평가의 주요한 기술로 응용될 수 있다. 액체금속로의 후보재료인 316, 316L 스테인레스 강의 피로균열 진전속도를 하중비(R)의 변화에 따라 측정하였다. R의 증가에 따른 재료의 피로균열 진전속도의 증가를 확인하였고, 316L의 경우가 316 스테인레스 강보다 상대적으로 피로균열진전에 대한 저항성이 컸다. R이 0.2이고 응력주기가 10Hz인 스테인레스 강의 경우 피로균열 진전속도는  $(da/dN)=(9.1 \times$

10-9)( $\Delta K$ )2.91과 같다.

고온용 코일재료인 알루미늄 분산 강화동의 내부산화층의 두께는 내부산화시간의 제곱근에 비례하여 증가하며, 그 관계는 Rhines의 식을 잘 만족하였다. 또 내부산화층의 경도는 표면으로부터의 거리가 증가할수록 감소하였다. 이는 입자 크기가 증가하면서 입자간 간격이 커지는 현상으로부터 확인할 수 있었다. 내부산화된 판재는 단면감소율이 증가함에 따라 인장강도가 증가하며, 그 증가정도는 단면감소율이 증가하면서 감소하였다. 또 어닐링된 후에도 강도의 현저한 감소현상은 보이지 않았다. 초기두께가 증가할수록 강도는 감소하였다. 전기전도도는 목표치를 만족하였다. 그러나 목표로 하는 500MPa의 인장강도를 얻기 위해서는 초기두께가 0.25mm 이하인 판재를 내부산화하여 90%이상의 압하율로 압연하여야 함을 알 수 있었다.

액체금속로 중간열교환기 설계에 필요한 튜브 배열과 경사각도에 따른 압력강하 상관식은 경사각도가 90도인 경우에는 많은 연구가 수행되어 왔으나, 경사각도가 90도 이하인 경우에는 문헌상에 보고된 압력강하 상관식은 Idel'chik과 ESDU 상관식 등이다. 이들 상관식들은 광범위한 실험데이터를 사용하여 검증되지 않고, 어떤 특정한 실험데이터를 사용하여 만들어졌기 때문에 실제 설계에 사용되기 위해서는 검증이 필요하다. 국내에서 튜브 배열과 경사각도에 따른 압력강하 상관식의 개발에 관한 연구는 아직 수행되지 않았다. 본 연구에서는 KALIMER 설계에 필요한 중간열교환기 셀측의 압력강하 실험자료를 생산하여 기존의 상관식을 평가하고, 새로운 압력강하 상관식을 개발하는데 필요한 Database를 제공하고자 한다.

액체금속로 노심 핵연료집합체에서의 압력강하에 대한 연구는 wire spacer가 나선형으로 감겨진 핵연료집합체에서의 압력강하 상관식에 대해 비교적 많이 수행되어 왔으나, 입구 오리피스(orifice), 핵연료집합체 입구, 핵연료집합체 출구 및 핵연료집합체 상부 부분에서의 압력강하에 대한 연구는 기존의 문헌에 잘 보고되어 있지 않다. Wire spacer가 나선형으로 감겨진 핵연료집합체에서의 압력강하 상관식에 대한 연구는 본 과제와 공동연구로 서경원과 전문현이 연구를 수행한 바 있다. 그러나 이들의 연구는 연료봉의 개수와 크기가 적은 실험부를 사용하여 실험을 수행하였기



때문에 KALIMER 설계에 필요한 실험자료를 제공하지 못하고 있다. 본 연구에서는 KALIMER 설계에 필요한 핵연료집합체 각 부위별 압력강하 실험자료를 생산하여 기존의 상관식을 평가하고, 새로운 압력강하 상관식을 개발하는데 필요한 Database를 제공하고자 한다.

지금까지 국외에서는 소듐 감지기에 대한 연구가 다양한 용도에 맞게 수행되어 오고 있으나 국내에서는 이에 대한 연구가 아주 미진한 상태이다. 1989년도에 고속증식로 안전연구를 수행하는 과정에서 photo flame 감지기를 설계, 제작하여 소듐 에어로졸 발생장치를 이용하여 이들 감지기의 작동여부 및 민감도 등을 시험하여 실제 소듐 누출감지기로서의 성능을 평가하였다.

국내에서 액체금속로 개발은 1990년대 초에 시작되었으며, 그 전까지는 단편적인 연구로 원자로 노심에 대한 연구가 주로 수행되어 왔다. 특히, 액체금속로의 냉각재로 사용되는 소듐에 대한 연구는 주로 액체 소듐의 안전한 취급과 관련된 연구를 수행하였으며, 90년대 중반 원자력 중장기 개발의 시작과 함께 점차 활성화되기 시작하였고, 이와 더불어 소듐-물 반응에 대한 연구가 시작되었다. 소듐-물 반응과 관련된 초기 연구개발은 주로 액체 소듐의 물리, 화학적인 특성 해석과 전열관에서 미량의 물이 누출되었을 경우 발생하는 소듐-물 반응의 화학적인 특성을 기초로 해서, 전열관의 용접불량이나 defect에 의해 미량의 물이 누출되었을 경우 누출경로의 self-plugging과 reopening과 같은 self-wastage 현상의 해석이 수행되었으며, 미량의 수소검출장치의 제작 및 성능평가, 대규모 누출시 발생하는 압력증가 등에 대한 기술현황분석 및 물 모의 실험 등이 수행되었다.

그 후 연구가 좀 더 활성화되어 중장기 1단계 과정에서는, 미량 누출에 의한 누출 경로의 reopen time 측정, 시편의 reopen shape 및 size 측정 등에 대한 실험이 성공적으로 수행되었으며, 그 동안 액체금속로 선진국에서 수행되었던 각종 소량 물 누출 실험 자료를 수집 분석하여, 소량 물 누출에서 중요하게 취급되는 wastage 방정식, wastage에 영향을 주는 주요 인자의 해석, 재질의 부식 특성 등에 대한 일부 자료를 확보하였다. 그러나 기 수집된 자료들을 보면 각국의 사정에 따라 실험 조건이나 해석

방법 등이 서로 일치하지 않고 있는데, 이는 각국에서 개발되고 있는 액체 금속로가 자기 나라 고유의 특성을 살리고 있고, 이에 상응되는 실험들이 각국마다 독특하게 수행된 결과로 해석되고 있다.

따라서 우리 액체금속로 역시 우리 특성에 맞는 실험으로부터 기초자료를 확보하여, 외국의 실험자료와 비교 분석한 후, 설계에 반영하는 시스템으로 발전되어야 할 것으로 생각되며, 소듐-물 반응의 초기 연구 단계인 점을 감안하여 물 누출에 대한 기초자료의 획득과, 증기발생기를 비롯한 소듐-물 반응현상 해석, 특히 물 누출에 대한 안전성 평가 기술의 개발로 점차 연구의 중심이 잡혀야 할 것으로 생각된다.

국내의 경우는 앞에서 언급한 바와 같이 본 프로젝트를 시작하기 전에는 sodium technology에 대한 연구가 전무한 상태였으며, 액체금속로기술 개발 프로젝트를 시작하면서 비로서 대규모 누출사고에 대한 기술현황을 분석하여 물 누출 사고를 해석하는 방법론적 개념을 정립하였고, 아울러 각국의 해석 코드 현황을 분석하여 대규모 물 누출시 초기 스파이크 압력을 해석하기 위한 우리 자체의 프로그램(SPIKE)을 개발하였으며, 또한 이 프로그램들을 검증하기 위하여 현재 1차적 검증 실험장치인 물 모의 실험시설을 확보하여 2차 계통에 미치는 압력영향에 대한 실험을 수행하고 있다.

물 누출 검출 기술에는 수소 검출과 음향 검출 기술이 있으며, 수소 검출 기술은 검출기 제작 기술 및 검출 실험을 하였고, 음향 검출은 물 mock-up 실험장치에서 음향 센서를 설치하고 기초적인 센서의 설치에 따른 특성 실험 및 장치를 셋업하고 있으며, 0.1 g/sec 에서의 검출기술개발을 목표로 하고 있다.

# 여 백

## 제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

### 제 1 절 PSDRS 실험

#### 1. PSDRS 실험장치 설계 및 제작

##### 가. 서론

원자로가 어떤 이유로 인해 그 작동이 정지되게 되어도 노심에서는 계속해서 상당한 양의 열이 발생하게 된다. 이 열은 지발 중성자에 의한 핵분열과 핵분열 과정에서 생성된 핵분열 생성물로부터 방출되는 베타입자와 감마선의 에너지에 기인하는 것으로 이를 붕괴열이라 부른다. 이렇게 발생하는 열을 적당한 방법으로 제거하지 못할 경우엔 원자로가 정지된 이후에도 내부 온도가 계속해서 상승하게 되어 노심을 구성하는 핵연료가 손상될 수 있으며, 특히 열전달 매체로서 소듐을 사용하는 액체금속로의 경우 원자로 내부의 소듐이 비등되어 보다 심각한 사고를 불러올 수 있으므로 이를 미연에 방지하기 위해서는 원자로가 정지된 이후에도 상당기간 동안 이 붕괴열을 제거하는 방법이 마련되어 있어야 한다. 현재 우리나라에서 연구개발 중인 액체금속로 KALIMER의 경우 잔열제거는 증기발생기-응축기, SGACS 그리고 PSDRS의 모두 3가지 방법으로 이루어지도록 설계되어 있다. 이들 가운데 PSDRS만이 유일한 안전등급 잔열제거계통으로 모든 열제거원의 고장 시에 최종적인 잔열제거 수단이 된다. 본 실험은 이러한 PSDRS의 열흐름 거동을 분석하기 위해 개발된 컴퓨터 코드(PARS)의 검증에 위한 실험자료를 생산할 목적으로 원자로 모형을 그대로 축소 모사한 실험장치에 실제 소듐을 충전해서 실험을 수행하였다.

##### 나. 실험

##### (1) 실험장치

실험장치는 유체 및 계측제어 계통 설계기술개발 분야에서 작성한 실험요건서 및 수정내용을 기초로 설계, 제작되었다. 장치 구성은 그림 1.1.1~1.1.3에서 볼 수 있는바와 같이 test reactor, 소듐 저장조, 콜드트랩, 열

열공급계통, 측정 및 제어계통, 배관 및 덕트계통 등으로 되어 있으며, test reactor는 그림 1.1.4에서 볼 수 있는 바와 같이 다시 reactor vessel (RV), containment vessel(CV), air separator, casing으로 구성되고, 원자로 노심을 모사하기 위하여 그 하단부에 총 144개의 rod heater를 삽입, 장착하였다(그림 1.1.5). 내부에서 생성된 열원을 냉각시키기 위하여 외부의 동심원관 형태의 유로를 통해 외부공기를 유입토록 설계되었는데, 유입된 차가운 외기는 동심원관을 따라 자연대류 또는 강제대류 열전달 과정과 동시에 복사열전달이 이루어지는 혼합열전달을 거쳐 내부 동심원관을 따라 배출된다. 장치에 사용된 주 재질은 SUS 316과 304이며 장치규모는 실 규모를 약 1/10 정도로 축소 모사시킨 크기이다.

## (2) 측정

Test reactor 내부에 충전된 소듐과 test reactor를 구성하고 있는 여러 벽면에서의 온도를 실시간에 측정할 수 있도록 그림 1.1.6과 같이 장치 내부 및 벽면에 총 45개의 열전대(K-type)를 설치하였으며, reactor vessel 내부의 소듐 충전량과 유동상태를 확인하기 위하여 3개의 액체 수위계를 장착하여 사용하였다.

또한 air chimney 및 hot air channel을 통한 공기의 흐름속도를 측정하기 위해 pitot tube(고속 측정용)과 hot wire(저속 측정용)을, 장치의 차압 특성을 확인하기 위하여 공기 입, 출구부에 차압계( $\sim 30\text{inH}_2\text{O}$ )를 각각 검정, 설치하여 실험 중 공기속도 및 차압을 측정하였다. 특히 hot air channel에서의 유동 발달상태를 확인하기 위하여 이 부분의 공기통로를 그림 1.1.7과 같이 총 7개 지점으로 세분하여 통과하는 공기의 온도와 속도를 측정하였다. 그림 1.1.8-9는 공기속도 측정에 사용된 hot wire의 검정 결과를 나타낸 것이다. 보정 범위는  $0\sim 30\text{m/s}$  였고, TSI의 calibrator를 사용하여 IFA300에서 압축공기의 온도와 hot-film의 voltage 값을 읽어서 각각의 센서에 대한 보정을 통해 보정식을 얻은 후 이에 대한 보정곡선을 얻었다.

## (2) 실험

### (가) 공탑시험

본 실험은 고온( $\sim 650^{\circ}\text{C}$ )의 소듐을 다량으로 사용하기 때문에 장치의 기계적인 변형이나 결합에 따른 누출로 인해 발생될 수도 있는 심각한 사고를 사전에 예방하기 위하여 승온, 공탑시험을 수행한 결과 test reactor 내부 pool baffle용 isolator의 구조가 변형되어 가스가 누출됨을 확인하여 이를 보완 제작하여 다시 설치한 후 재시험한 결과 이상없음이 확인되었다.

### (나) 소듐충전

소듐의 이송 및 충전 전 장치 내부에 남아있을지 모르는 수분과 기름 때 제거를 위해 먼저 장치를 가열한 상태에서 Ar gas를 이용해 내부에 대한 flushing을 충분히 행하였으며, 그림 1.1.10과 같은 이송장치를 이용하여 총 6드럼(약 1100 l)의 소듐을 약  $120\sim 130^{\circ}\text{C}$ 로 용융시켜 Ar gas 압으로 장치 하부에 위치한 저장조에 이상없이 충전시켰다.

### (다) 실험

실험은 정상상태와 과도상태 두 가지로 나뉘어 수행되었다. 정상상태 실험은 일정범위의 고정된 열원을 가지고 수행되었으며, 공기 냉각에 의한 열손실이 모사된 노심으로부터 생성된 열과 동일해지고 계가 평형에 도달해 요건서 상의 특정부위 온도들과 공기유속이 일정한 시간동안 변함없이 유지될 때 정상상태에 이른 것으로 간주하고 air channel 상의 공기흐름 상태를 일정한 간격에 따라 측정하였다.

과도상태란 원자로 정지시 발생하게 되는 상황을 모사한 것으로 먼저 원자로 내부 노심 출구부의 소듐 평균 온도가  $525^{\circ}\text{C}$ 에 달하고 이 때 pool baffle 내 소듐이 baffle을 넘지 않는 상태로 유지될 때 이를 정상상태에 도달한 것으로 간주하고 이 때부터 노심의 히터 용량을 일정한 크기로 증가시키면서 계가 도달하게 되는 pool 내부 최고온도와 그 때의 경계조건을 측정하였다. 과도상태 실험은 air fan을 이용하여 풍량을 일정하게( $1\text{m}^3/\text{sec}$ ) 공급하며 실험을 수행하였다. 공기냉각 유로에서의 온도와 속도 값의 경우 Thermo Pro Software에서 hot-film의 bridge voltage 값을 얻고, 자체 제작한 소프트웨어에서 온도 보정값과 보정식 그리고 얻어진 voltage 값을 이용해서 최종 속도값을 얻었다.

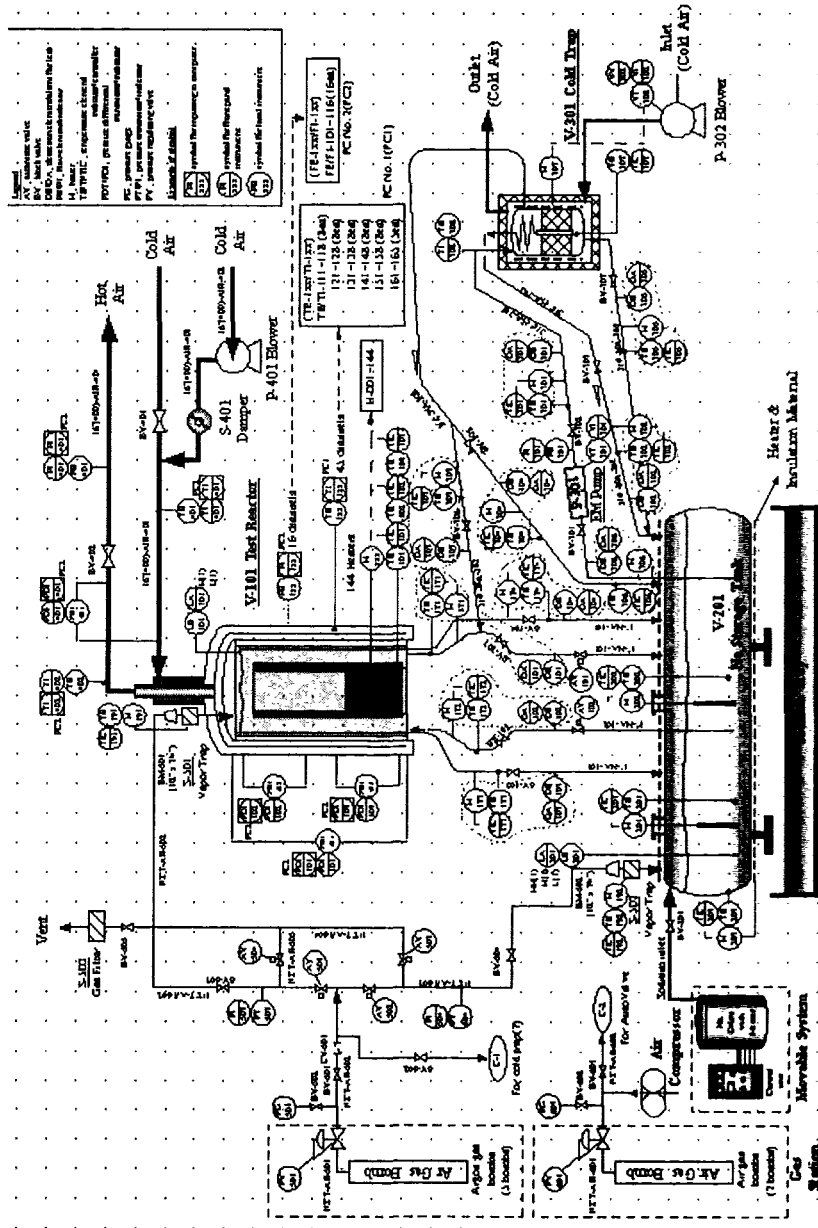


그림 1.1.1 실험장치의 배관 및 계장도

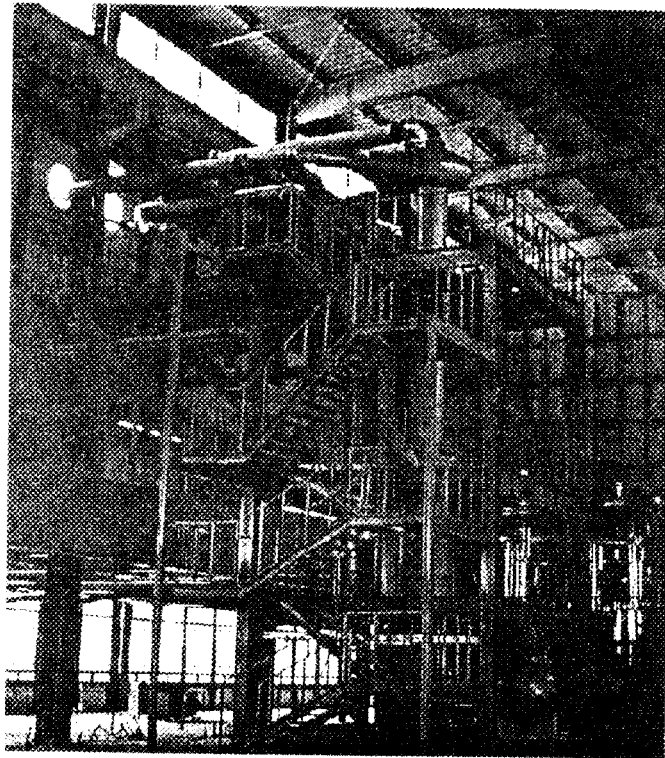


그림 1.1.2 실험장치 설치도



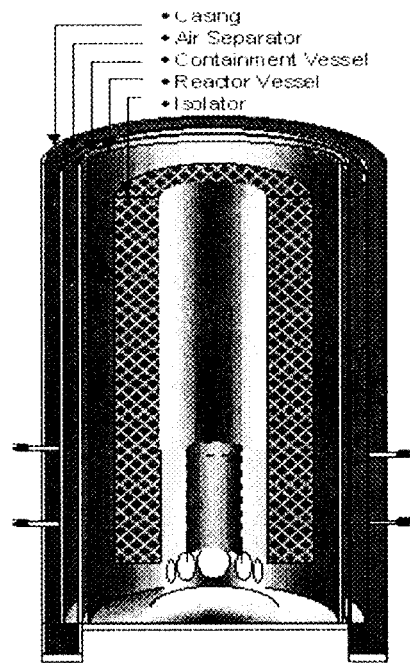


그림 1.1.3 Test reactor  
내부 단면도

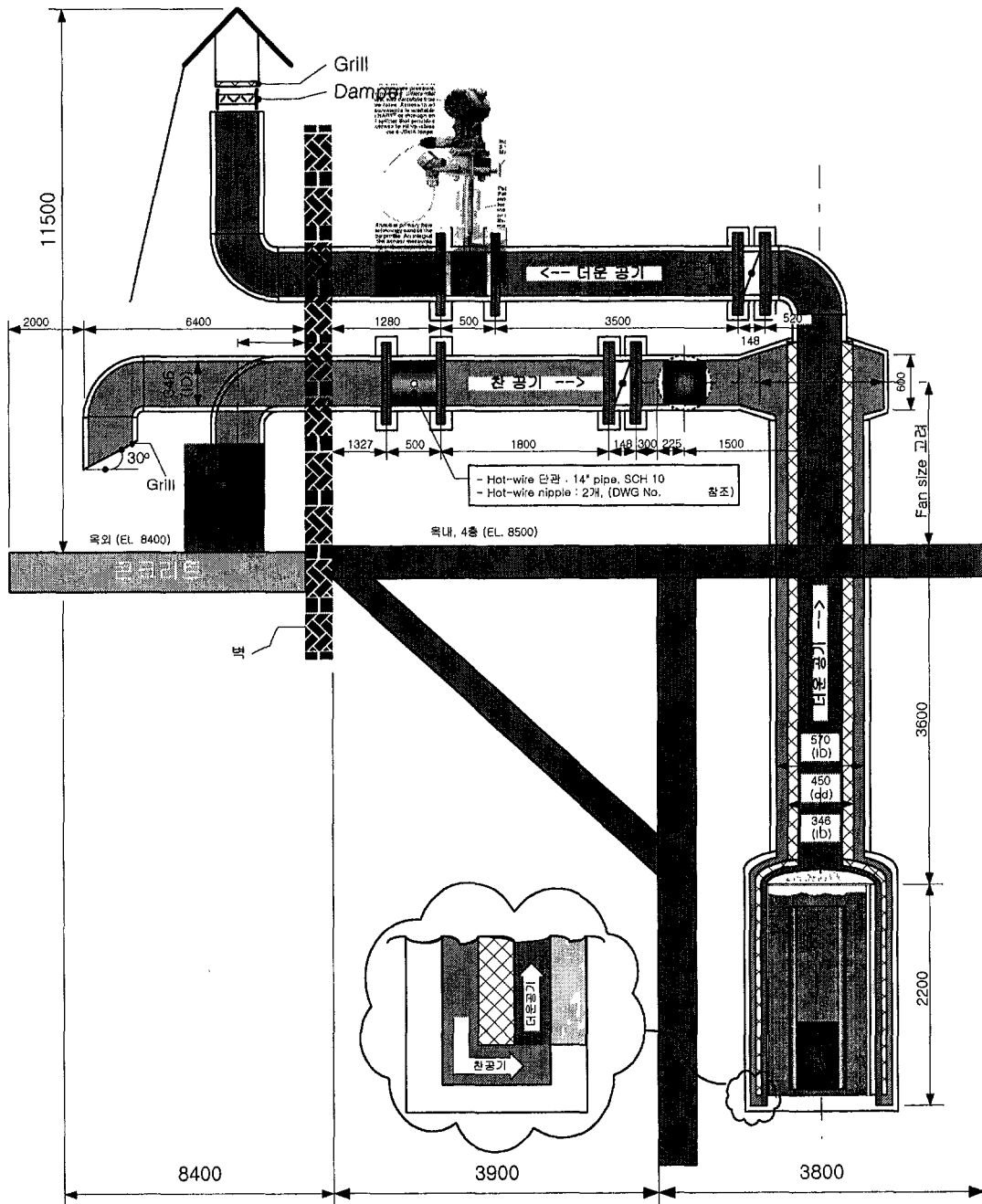


그림 1.1.4 실험장치의 덕트도

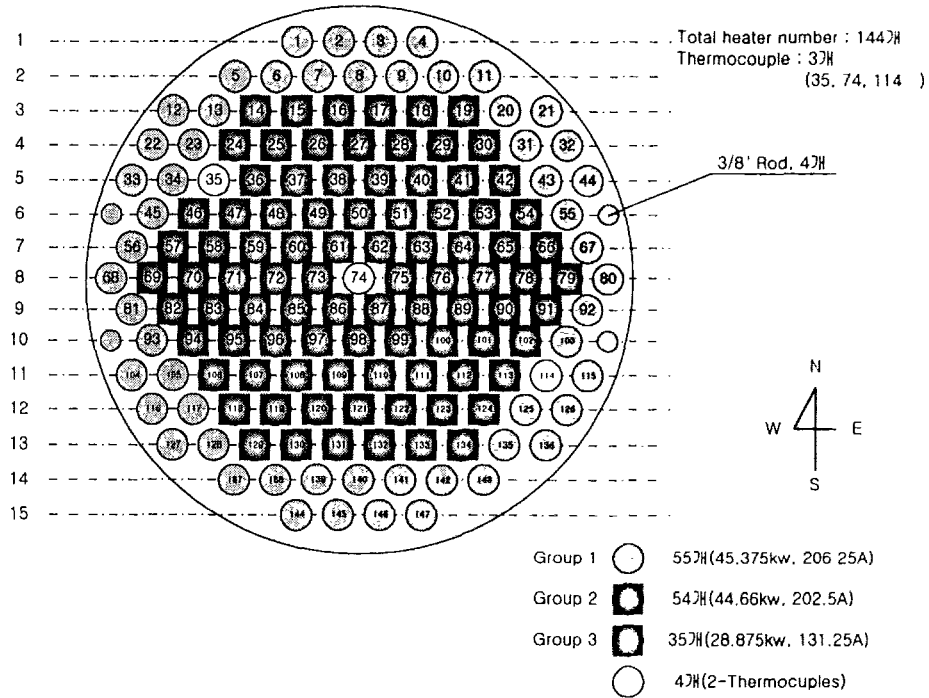


그림 1.15 히터 배열도

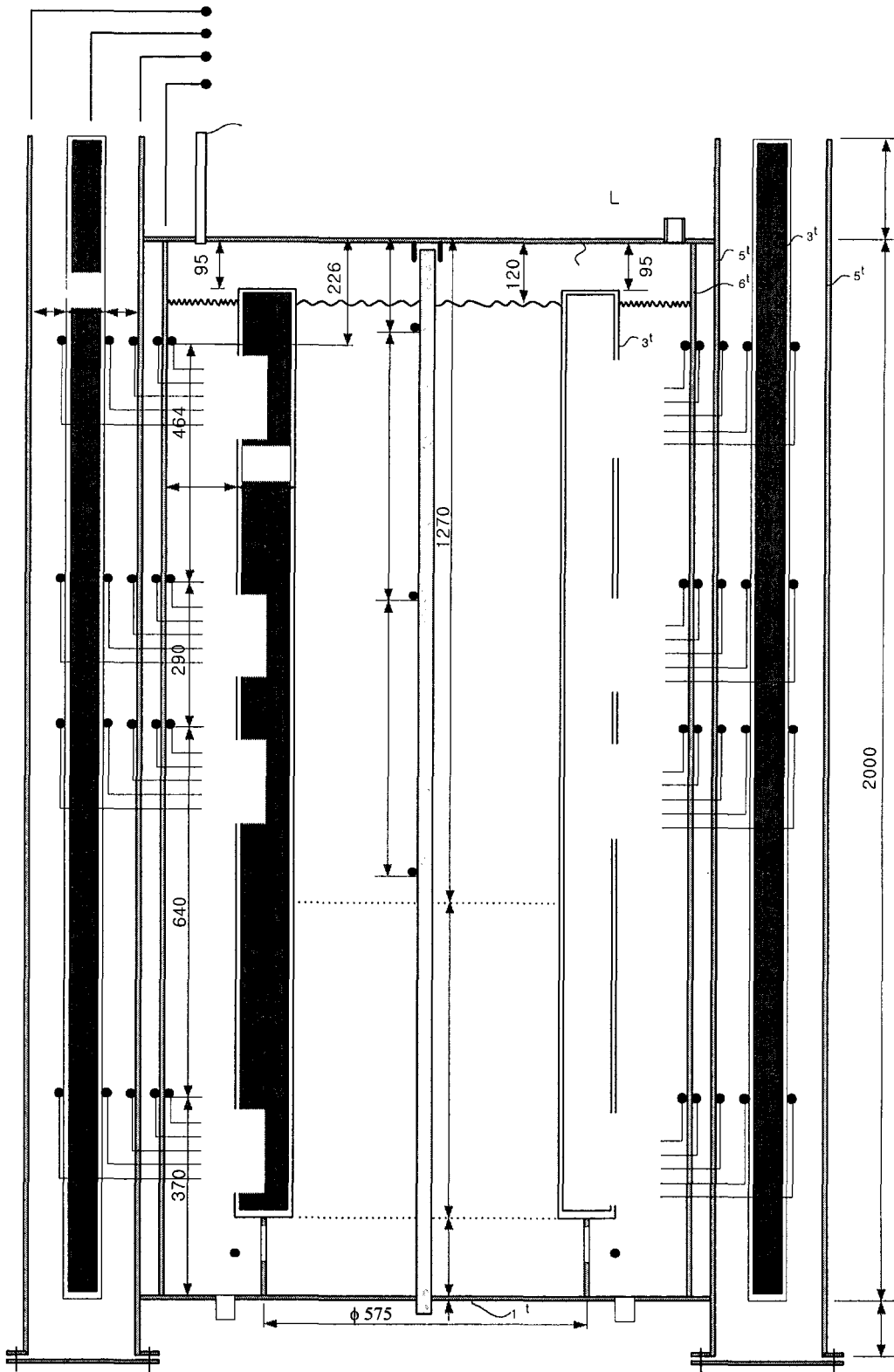


그림 1.1.6 열전대 설치도

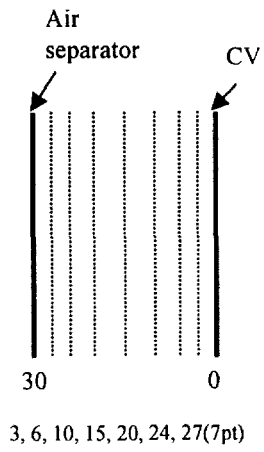


그림 1.1.7 유동 발달상태 측정위치

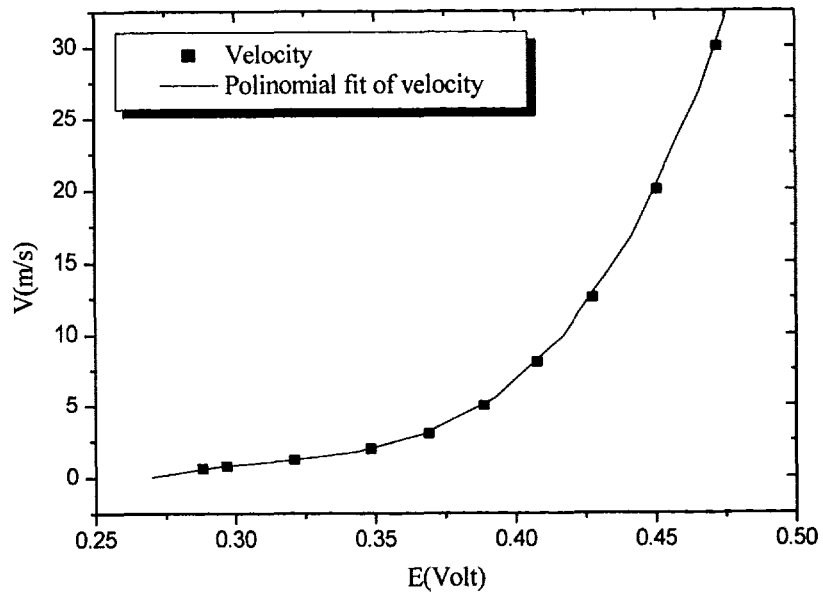


그림 1.1.8 Hot-film 015036 검정곡선

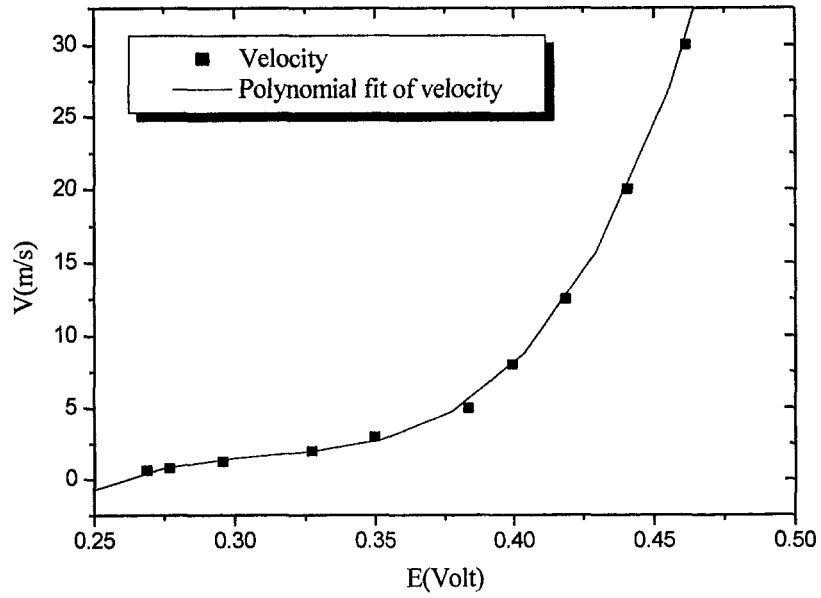


그림 1.1.9 Hot-film 015042 검정곡선

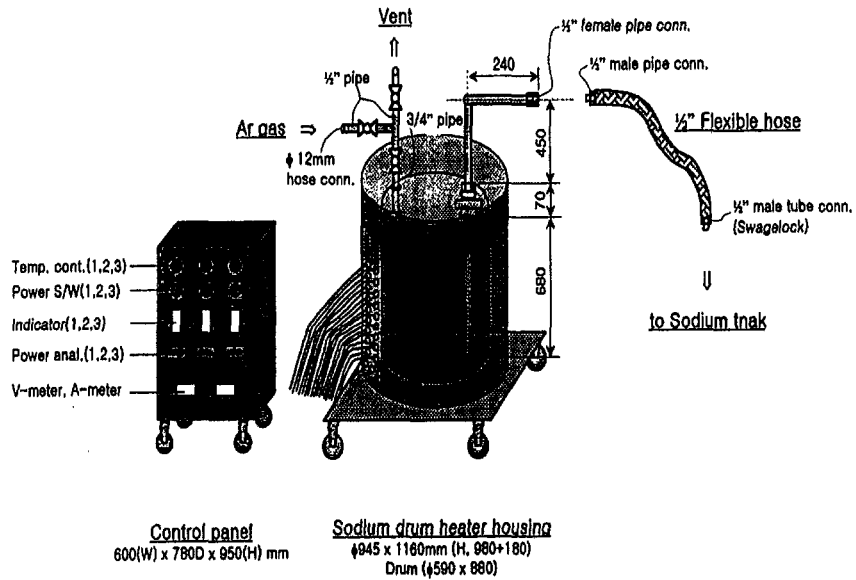


그림 1.1.10 소듐 이송 장치

## 다. 실험결과

### (1) 정상상태

24kW의 고정된 열원을 가지고 수행한 정상상태 실험결과를 그림 1.1.11과 1.1.12에 보였다. 소뚝은 장치 하부에 설치되어있는 저장조로부터 약 170℃로 예열된 후 가스 압으로 약 650 l 정도가 공급되었으며, 반응기 내부에서 소뚝의 충전 수위가 항상 일정한 수위를 유지하도록 소뚝을 가열하는 동안 반응기 내부에 장착된 수위 조절관을 열어두어 온도 상승에 따른 밀도차로 부피팽창된 과잉의 소뚝이 반응기를 빠져나가도록 하였다.

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 계는 가열 후 약 11시간만에 노심 및 소뚝통로 입, 출구 온도(TC-041, 106, 007, 001)와 공기통로 출구에서의 공기 온도가 30분 이상 일정하게 유지되어 평형에 도달하였음을 확인할 수 있었다. 이 때 pool 내부 소뚝의 최고온도는 517℃이었다.

그림 1.1.13은 정상상태에서 장치의 수직방향 높이에 따른 반경방향 기벽들의 온도변화를, 그리고 1.1.14는 공기분리 외벽(cold air 유입통로)에서의 온도변화를 보인 것으로 두 번째 수직 높이 기벽(TC-037, 그림 1.1.6 참조) 부근의 온도가 다른 측정지점들에 비해 현저히 높음을 알 수 있다. 이는 air channel을 통해 유입되는 찬 공기가 이 지점에서 정상적으로 순환되지 못함을 보인 것으로 사료되어 향후 이 부분에 대한 보다 세밀한 조사와 분석이 필요하다 하겠다.

### (2) 과도상태

계가 정상상태에 도달한 후 power controller를 이용해 히터 출력을 점증적으로 상승시켜 baffle 내부 소뚝이 baffle 바깥쪽으로 넘쳐 흐르도록 한 후 장치에 설치된 air fan을 가동시켜 풍량을 일정하게(1m<sup>3</sup>/sec) 공급하면서 잔열제거실험을 수행하였다.

그림 1.1.15는 히터 출력변화에 따른 pool 내부 소뚝의 최고 도달 온도를 나타낸 것으로, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 히터출력 41, 50, 55kW에서의 pool 내부 소뚝 최고온도는 각각 537, 563 및 597℃ 였다.

그림 1.1.16과 1.1.17은 히터출력 50 및 55kW에서의 소뚝통로 입·출구, 노심 입·출구 및 공기출구에서의 온도변화 과정을 보인 것이며, 그림 1.1.18

부터 1.1.20까지는 각각의 히터 출력에 따른 pool 내부 소둑의 최고온도 도  
달시 장치 수직방향 높이에 따른 반경방향 기벽들의 온도변화를 나타낸 것  
이다.

### (3) 공기유동 발달상태

그림 1.1.21-28은 정상 및 과도상태에서 계가 평형을 이룬 후 공기 냉  
각유로(hot air channel)에서의 공기유동 발달상태를 확인하기 위하여 공  
기냉각 유로 수직방향으로 열전대가 설치된 높이와 동일한 4곳(FE1; 하  
단, FE4; 최상단)에서의 공기온도 및 속도를 그림 1.1.7과 같이 반경방향에  
따라 일정한 간격으로 측정된 결과를 보인 것이다. 정상상태의 경우 내벽  
온도범위는 200~330℃이며, 외부로부터 유입되는 공기온도는 약 2~4℃  
이다. 최대온도는 가열되는 내벽에 연결된 측면 벽쪽에서 생긴다. 모든 경  
우에 있어서 동일하게 측정지점이 내벽으로부터 멀어질수록 온도가 급격  
하게 떨어짐을 알 수 있다. 열복사에 의해 유로 내에서의 온도는 외벽에  
가까이 갈수록 상승한다. 유사한 결과가 속도분포에서도 나타났다.

과도상태의 경우엔 강제대류를 수반하고 있고, 모든 경우에 있어서 공  
통적으로 정상상태 경우에서보다 내벽 온도가 낮다. 이것은 강제대류에 의  
한 냉각효과가 자연대류시보다 상대적으로 크기 때문에 나타나는 현상으  
로 생각할 수 있다.



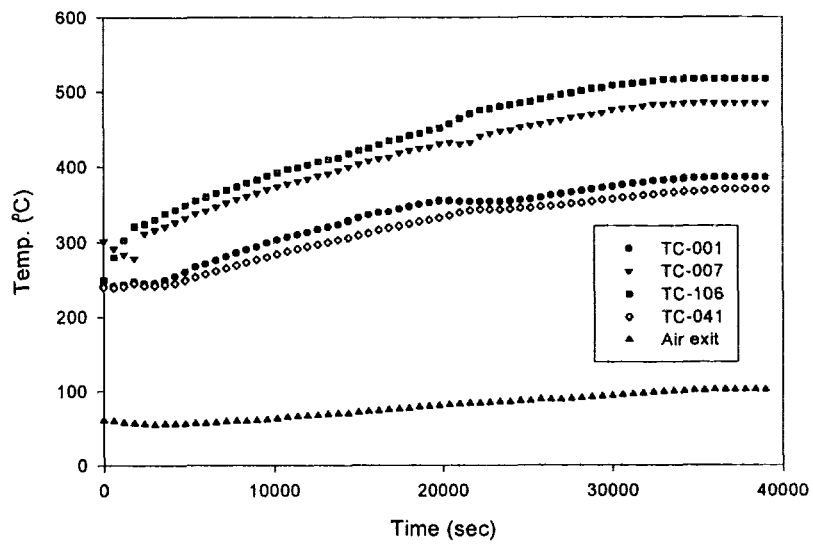


그림 1.1.11 정상상태에서의 온도변화

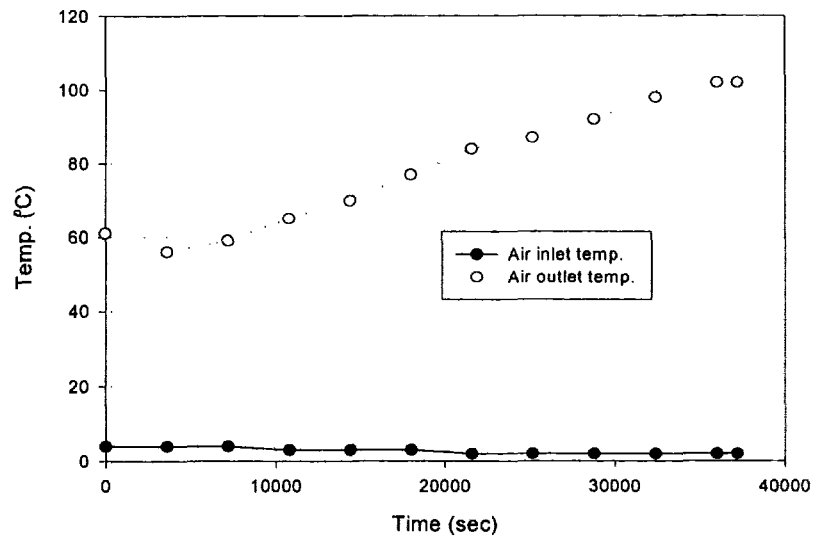


그림 1.1.12 정상상태에서의 공기 입, 출구 온도

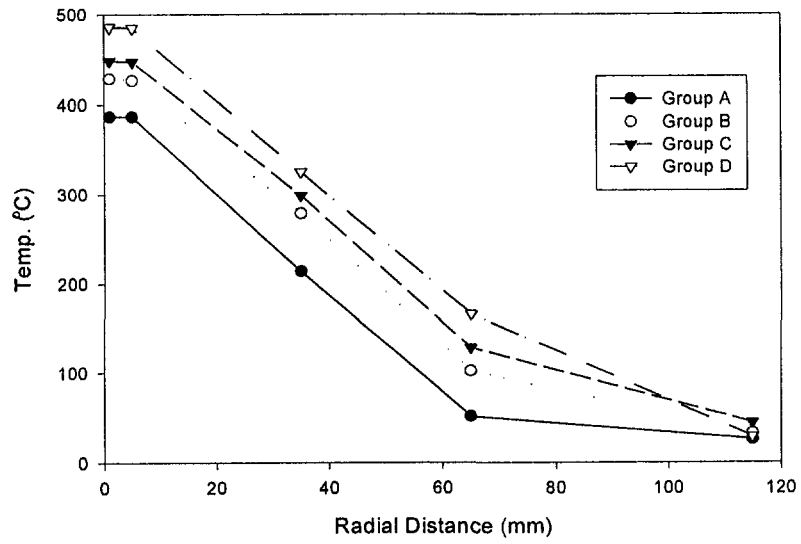


그림 1.1.13 모사된 원자로 반경방향 벽면온도(정상상태)

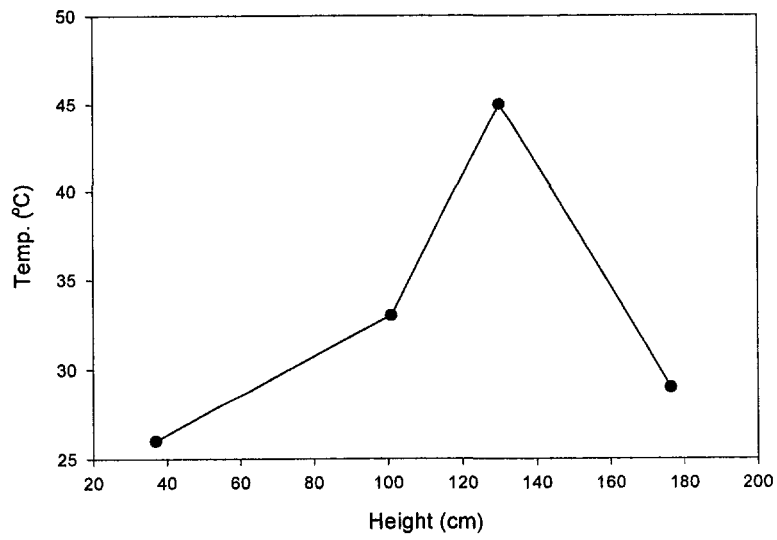


그림 1.1.14 정상상태에서의 공기분리기 외벽(찬공기쪽) 온도

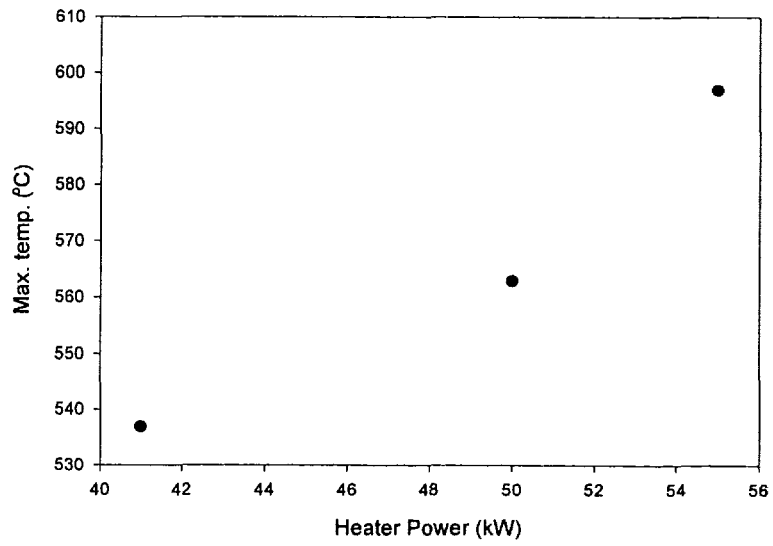


그림 1.15 히터출력 변화에 따른 풀 내부 최고온도

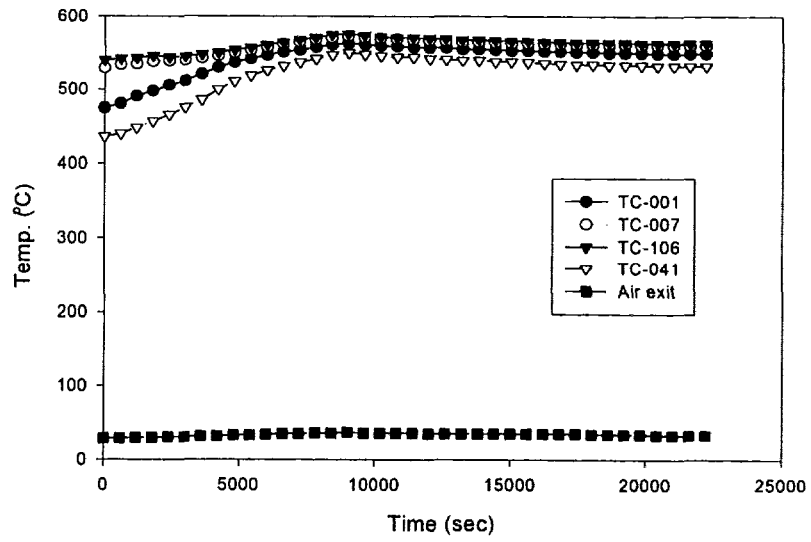


그림 1.16 50kW에서의 온도변화

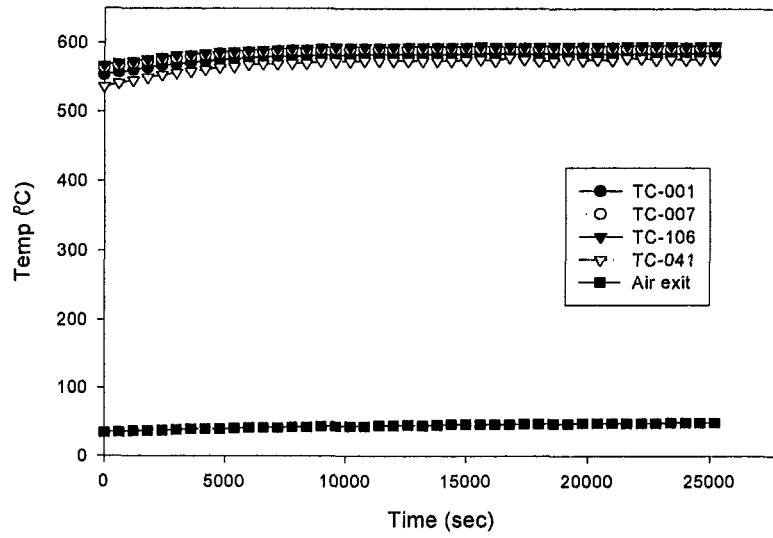


그림 1.1.17 55kW에서의 온도변화

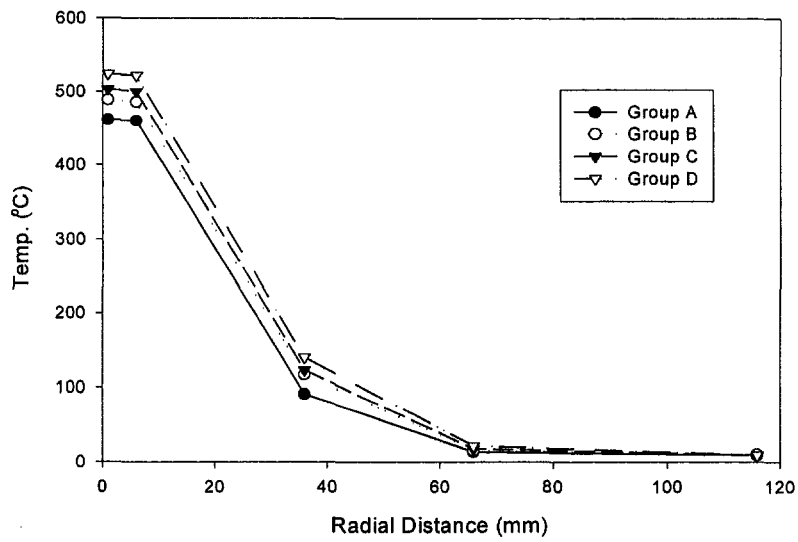


그림 1.1.18 모사된 원자로 반경방향 벽면온도(41kW)

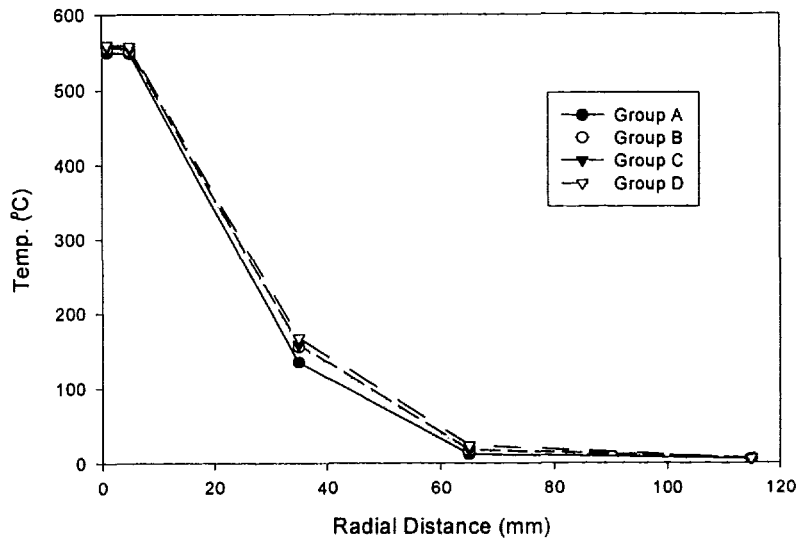


그림 1.1.19 모사된 원자로 반경방향 벽면온도(50kW)

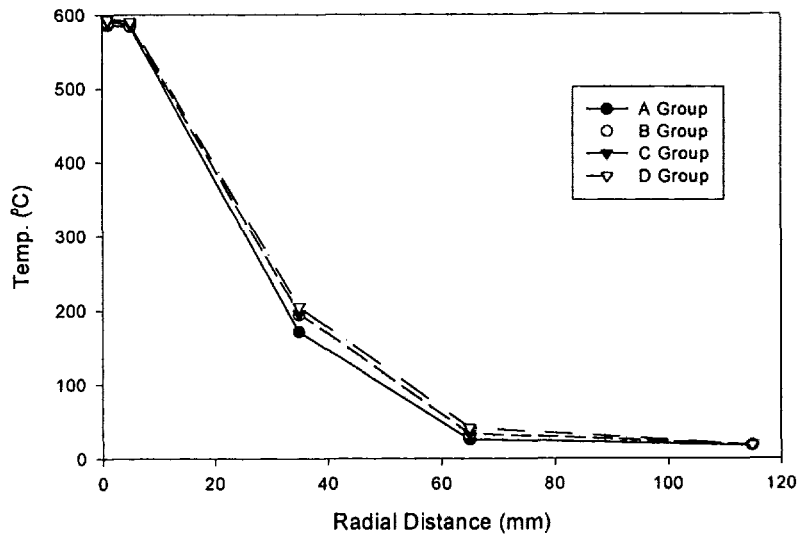


그림 1.1.20 모사된 원자로 반경방향 벽면온도(55kW)

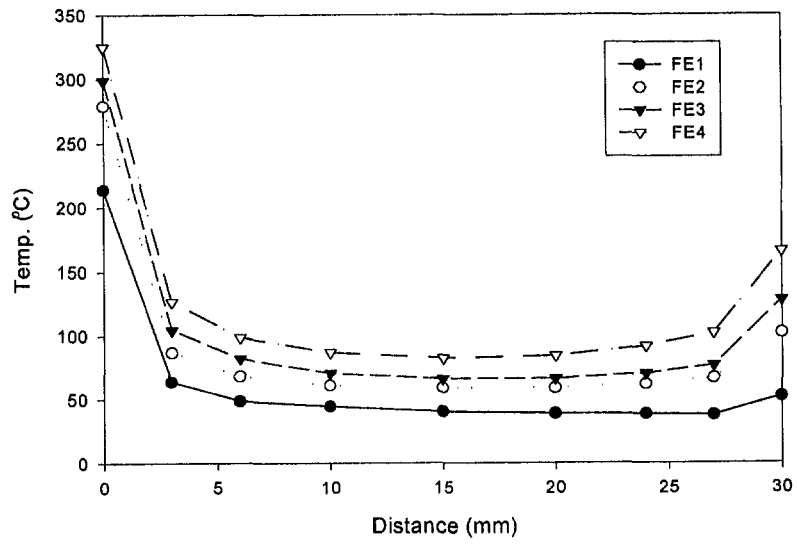


그림 1.1.21 공기냉각 유로에서의 온도분포 (정상상태)

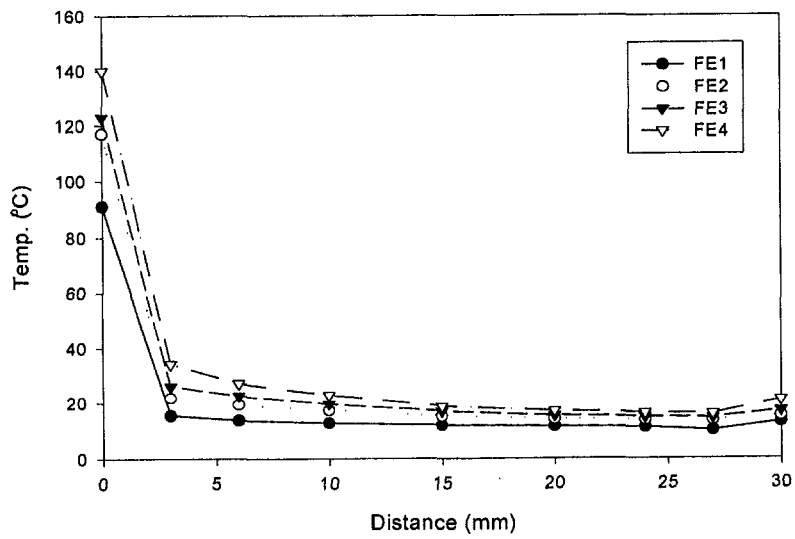


그림 1.1.22 공기냉각 유로에서의 온도분포 (41kW)

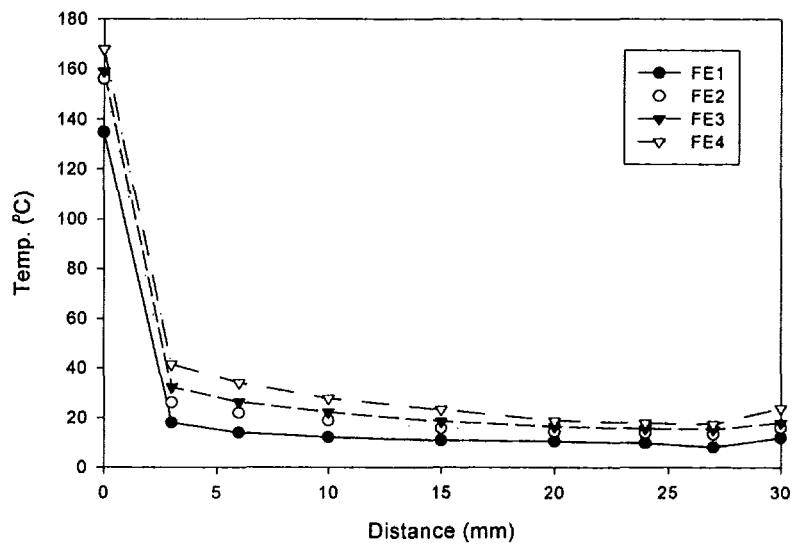


그림 1.1.23 공기냉각 유로에서의 온도분포 (50kW)

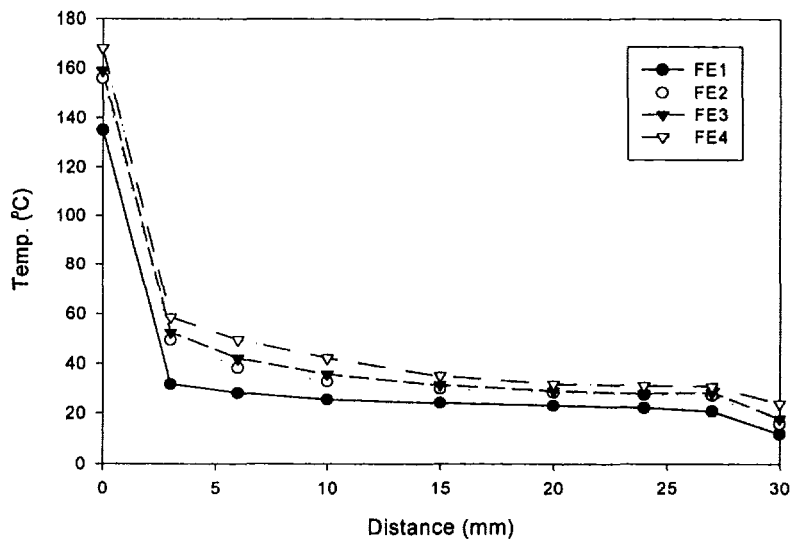


그림 1.1.24 공기냉각 유로에서의 온도분포 (55kW)

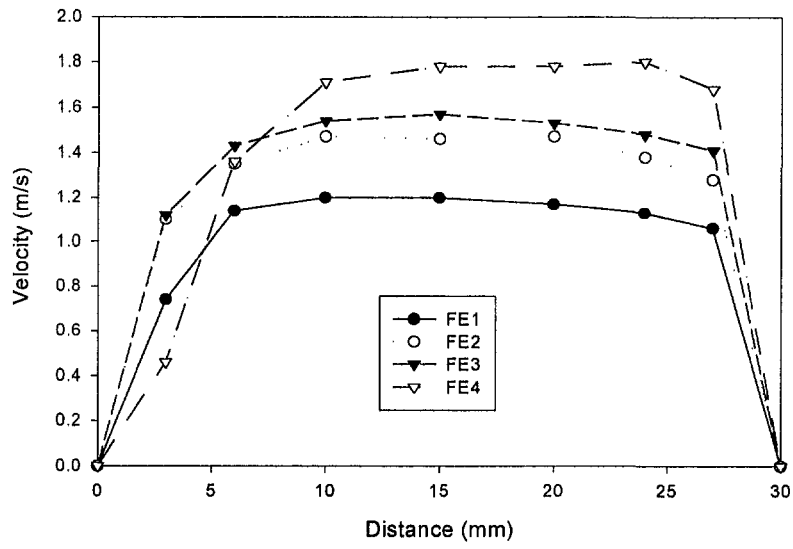


그림 1.1.25 공기냉각 유로에서의 속도분포 (정상상태)

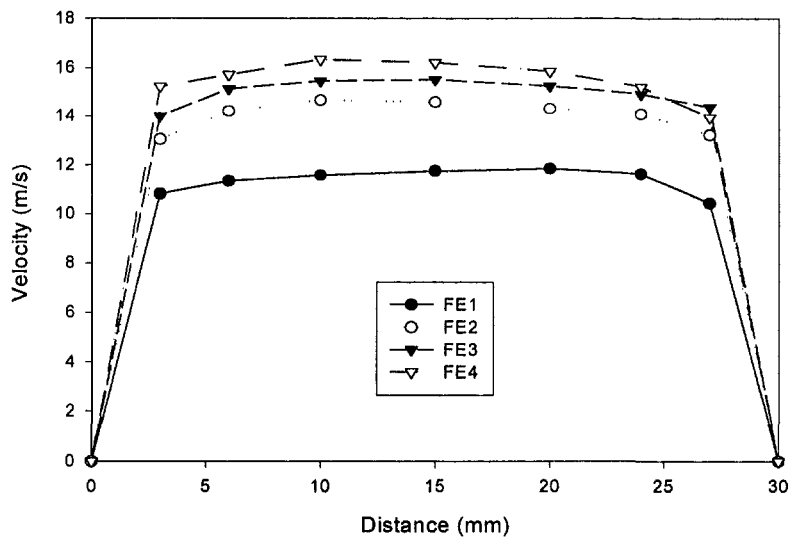


그림 1.1.26 공기냉각 유로에서의 속도분포 (41kW)



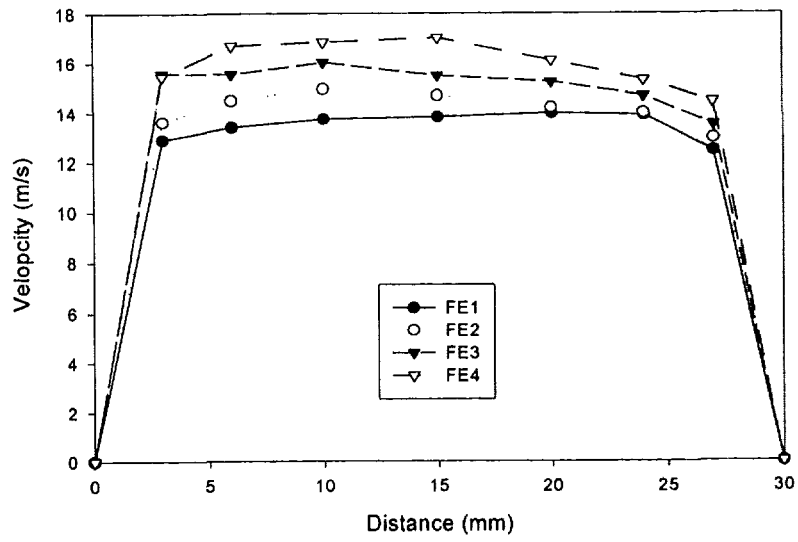


그림 1.1.27 공기냉각 유로에서의 속도분포 (50kW)

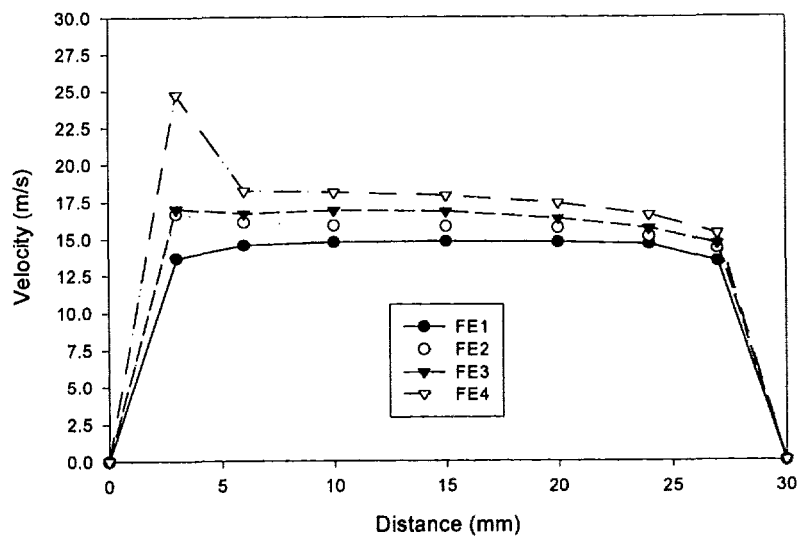


그림 1.1.28 공기냉각 유로에서의 속도분포 (55kW)

## 2. 실험시편 방사율 측정실험

### 가. 서언

본 실험은 액체금속로인 KALIMER의 1차측 잔열제거계통인 PSDRS를 모의하는 실험장치에 사용되는 재료들인 스테인레스 스틸(SUS) 316L과 304의 방사율(thermal emissivity :  $\varepsilon$ )을 측정하는 실험이다. 방사율은 PSDRS 실험자료 해석에 사용되는 기본자료이며, 또한 액체금속로의 잔열제거계통의 해석에서 복사에 의한 열전달을 계산하는데도 필수적인 실험자료이다. 방사율은 흑체에 대한 시료의 열복사에너지의 비로써 다음 식으로 나타난다.

$$\varepsilon = E(T)/E_b(T) \quad (1.2.1)$$

방사율은 재료의 기본적인 물리적 성질이며, 복사열전달 해석에 필수적인 계수이므로 Hand Book 및 여러 문헌에 기술되어 있을 것으로 예상하였으나 극히 제한된 자료들만을 조사할 수 있었다. PSDRS 실험장치에는 SUS 316L과 304를 사용하고 있다. SUS 316과 304의 방사율을 정리한 표 1.2.1에서 보는 바와 같이 방사율은 재료의 특성뿐만 아니라, 표면상태(표면조도, 산화정도, 온도)에 따라 넓은 범위에 걸쳐 나타나 있으므로 실제 적용하는데는 많은 어려움이 따른다. SUS 316L에 관한 실험자료들을 수집할 수 없었으나 SUS 316L과 SUS 316은 특성 및 성분이 매우 비슷하므로 방사율도 거의 같을 것으로 예상된다.

본 실험에서는 PSDRS실험장치에 사용되는 재질인 SUS 316L과 304 강판의 일부를 채취하여 만든 시편 3종류를 사용하여 온도에 따른 방사율의 변화와 표면의 산화정도(가열시간)에 따른 방사율의 변화를 측정하였다. 이 강판들은 시중에서 상용화되고 있는 일반적인 제품이다. 표면의 산화정도는 실험 도중에 측정할 수 없었기 때문에 가열시간에 따라 표면 색깔의 변화를 관찰하면서 방사율을 측정하였다. 표면온도에 따른 방사율의 변화를 측정하는 실험에서의 온도범위는 실험장치의 제약으로 인하여 45°C에서 540°C이었다. 산화정도에 따라 방사율을 측정하는 실험에서는

표 1.2.1 다양한 표면에 따른 총 방사율 [William, 1954]

재질	Surface	deg (°C)	Emissivity	Ref.
Sus316	1. Cleaned with toluene, then methanol	24	0.28	1-1
	2. Cleaned with soap and water, toluene, and methanol in succession		0.28	
	3. Polished on buffing wheel to mirror surface, cleaned with soap and water, toluene, and methanol		0.17	
Sus316	Cleaned with toluene, then methanol results after repeated heating and cooling	232-871	0.57-0.66	1-2
Sus316	Cleaned with soap and water, toluene, and methanol in succession results after repeated heating and cooling	232-1049	0.52-0.50	1-3
Sus316	Polished on buffing wheel to mirror surface, cleaned with soap and water, toluene, and methanol	232-1049	0.26-0.31	1-4
Sus316	Polished	204-1038	0.24-0.31	2-1
Sus304	Light silvery, rough, brown, after heating results after repeated heating and cooling	215-490	0.44-0.36	1-5
Sus304	After 42 hr heating at 513°C	215-526	0.62-0.73	1-6

시편을 400℃ 정도로 유지하면서 장기간(679시간) 동안 가열시간의 함수로 방사율을 측정하였다.

방사율을 측정하는 방법으로는 본문에서 기술하는 것과 같이 여러 가지 방법이 있으나, 정밀히(오차 3% 미만) 측정하기 위해서는 고가의 장치와 측정조건을 엄격하게 유지하기 위한 부속장비들로 구성되므로 적은 실험비로 간편하게 시편을 교체하면서 측정하기에는 어려움이 있다. 여기에서는 실험오차는 3~10% 정도로 비교적 높으나 실험비가 가장 적게 소요되는 방법인 적외선 온도계를 이용하여 간접적으로 방사율을 측정하는 방법으로 실험을 수행하였다.

## 나. 실험

### (1) 방사율 측정방법

방사측정법(Radiometric Emissivity Method)은 시편자체가 방사하는 열복사를 방사검출기에 의하여 검출하고, 그것을 같은 온도의 흑체 방사와 비교하는 방법이다. 측정원리는 반구면경의 곡률중심에 시편을 설치하여 흑체에 가까운 방사율을 측정할 수 있고, 반구면경의 초점을 시편 외부로 편향시키기 위하여 반구면경의 회전 중심을 축으로 하여 좌우로 일정 각도를 편향시켜 시편 자체의 radiation flux를 얻어 측정할 수 있다. 이 방법에 사용되는 실험장치로는 시편과 무한 반사를 발생시키는 반구면경, 반구면경을 왕복회전운동시키는 조향장치, 측정조건을 일정하게 유지시키는 수냉식 진공조, 시편표면의 radiation flux의 변화를 측정하고 흡수율 및 방사율을 측정하기 위한 적외선 방사 측정시스템 등으로 구성된다.

반사측정법(Reflectivity Method)은 다른 방사원으로부터의 열복사를 시편표면에 입사시켜, 시편에 의하여 반사된 radiation flux를 방사검출기로 검출하고 시편의 반사율로부터 방사율을 구하는 방식이고, 열량측정법(Calorimetric Method)은 시편표면으로부터 주위로 손실된 열량을 계측한 후 관계식을 이용하여 방사율을 구하는 방식이 있다.

근사적으로 방사율 결정방법으로는 첫째, 비교적 낮은 온도(260℃)를 가지는 물체에 대하여 적외선 온도계의 측정면적을 충분히 포함하도록 물체 위에 적기 혹은 마스크링테이프를 붙이고, 0.95로 셋팅된 방사율값을 사

용하여 테잎의 온도를 측정한다. 다음으로 물체에 인접한 지역의 온도를 측정하고 같은 온도에 도달할 때까지 방사율값을 조절하여 얻는다. 둘째로는 물체표면의 일부분에 코팅이 가능하다면, 방사율값 0.98을 갖는 무단 검은색 페인트를 도포하여 방사율값 0.98로 셋팅된 적외선 온도계로 온도를 측정한다. 다음으로 물체의 근접지역을 측정하여 같은 온도에 도달할 때까지 방사율값을 조절하여 얻는다. 셋째 방법으로는 열전대로 물체의 실제 온도를 결정하고, 적외선 온도계를 이용하여 물체의 온도를 측정한 다음 열전대에서 측정한 온도와 같아지도록 적외선 온도계의 방사율 값을 조절하여 얻는다. 본 방식은 간접적인 방사율 측정방식으로 이동이 용이하고, 장시간측정이 가능하며, 시편의 온도가 적외선온도계의 범위까지 측정이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 오차가 높은 단점이 있다.

## (2) 실험장치

위에서 언급한 정밀 방사율을 측정방법으로 방사율을 측정하려면 고가의 장비가 필요하고, 고온에서 장시간 측정할 수 없는 단점이 있어 본 실험에서는 시편의 온도범위가 고온(45~540℃)이고, 시편의 표면에 도포를 하여선 안되므로 적외선 온도계를 사용하여 간접적으로 방사율을 측정하는 3번째 방법인 근사적 방사율 측정방법 중 적외선 온도계를 사용하는 방법으로 방사율을 측정하였다.

시편은 PSDRS 실험장치에 실제 사용되는 3종류의 스테인레스 스틸의 일부를 채취하여 사용하였다. 실험장치는 그림 1.2.1과 같이 구성되며, 형상은 시편 지지대에 강판, 석면 가열기, 동판 시편 순으로 부착이 되어있고, 시편의 온도분포가 균일하도록 가열기와 시편 사이에 동판을 두었다. 열전대(OMEGA, k-type)를 동판에 부착하여 시편의 표면온도를 조절하였고, 이 열전대의 오차는  $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$  이다. 시편은 표 1.2.2와 같이 PSDRS 실험장치에 사용한 재질로 크기는 100×100mm 이고, 적외선 온도계의 시편 요구치수보다 크게 제작하였다. 주요 변수인 표면의 조도는 본 실험에 앞서 원전연료주식회사에 있는 측정기를 이용하여 각각의 시편에 대해서 측정하였다.

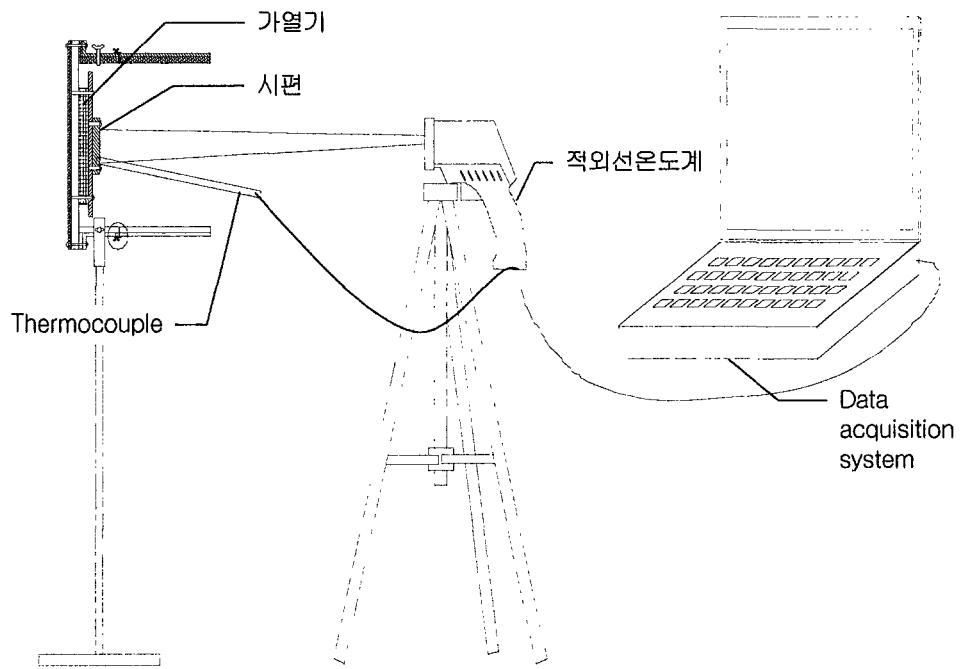


그림 1.2.1 방사율 측정용 실험장치

표 1.2.2 실험시편의 규격 및 표면조도

조도 측정 조건					비 고
총계측길이(LT) : 5.600mm 실계측길이(LM) : 4.000mm VB : 25.00 $\mu$ m 구간길이(LC) : 0.800mm					
시편명	재질	규격(mm)	중심선평균조도 (Ra, unit : $\mu$ m)	10점평균조도 (Rz, unit : $\mu$ m)	
RV1	SUS316L	100×100×6	4.044	18.64	온도에 따른 방사율
RV2	SUS316L	100×100×6	4.228	22.61	온도에 따른 방사율
CV1	SUS304	100×100×5	2.811	14.36	표면산화도에 따른 방사율
CV2	SUS304	100×100×5	1.996	11.29	온도에 따른 방사율
AC1	SUS304	100×100×3	3.925	18.82	온도에 따른 방사율
AC2	SUS304	100×100×3	3.629	19.07	온도에 따른 방사율

### (3) 실험방법

#### (가) 계측장비

비접촉식인 적외선 온도계는 Raytek사의 모델명 MX4+U로 이동이 용이하고 정확도가  $\pm 1\%$ , 분해능은 0.01이다. 이 적외선 온도계에는 내장되어 있는 레이저에 의해 측정위치를 감식할 수 있는 기능이 있다. 적외선 온도계를 시편과 수직이 되도록 설치하였고, 시편과의 거리는 0.3m에서 수 m까지 가능하나 실험에서는 750mm 정도를 유지하였다. 이 적외선 온도계는 적외선에 의한 온도측정 뿐만 아니라 열전대에 의한 온도도 동시에 측정할 수 있다. 측정기 자체에서 측정조건의 설정, RS232 포트로 PC에서 원격조정 및 측정할 수 있는 기능이 있다.

측정에서 가장 민감한 인자는 열전대에 의한 표면온도를 측정하는 방법이다. 본 측정에서는 표면측정용인 OMEGA사 제품(model: 88013-K)을 사용하였다. 이 열전대는  $\varnothing 5\text{mm}$ 인 원형 집열판이 있고, 센서 자체오차는 0.75%이다. 이와 같은 모델(button junction type)을 사용하면 표면에서 자연대류에 의한 열전달이 일어날 경우에 편향오차가 2~3% 정도이므로 본 연구의 오차분석에서는 열전대의 편향오차를 2.5%로 계산하였다. 또한 측정오차를 최소화하기 위하여 열전대를 스프링으로 약간의 힘을 가해 시편의 표면과 열전대의 측정면을 완전히 접촉시켜 측정하였다.

적외선 온도계에서 측정한 data는 serial port로 전송되어 PC용 소프트웨어에 의해 제어, 측정 및 분석이 가능하다. 그러나 본 실험에서는 주위 환경의 변화에 따라 표면온도가 변하므로 짧은 시간에 측정하기 위하여 소프트웨어에서 방사율을 변화시키면서 적외선 온도계와 열전대에 의해 나타나는 소프트웨어 상의 온도를 기록하는 방법을 채택하였다.

#### (나) 시편 및 측정변수

본 실험에서는 PSDRS 실험장치의 복사열전달이 일어나는 reactor vessel(재료: SUS 316L, 시편명: RV1 및 RV2), containment vessel(재료: SUS 304, 시편명: CV1 및 CV2) 그리고 air separator wall(재료: SUS 304, 시편명: AV1 및 AV2)에 사용된 재질로 각각 2개씩 3종류의 시편을 만들어 방사율을 측정하였다. 이 시편들의 규격, 특성 및 용도는 표 1.2.2



에 기술하였다. 이 표에는 방사율 측정실험에 앞서 표면조도를 측정한 자료가 기술되어 있다. 표면조도는 측정방법에 따라 10점 평균조도, 중심선 평균조도 및 최대높이 조도 등 3가지로 분류되나 이 연구에서는 10점 평균조도와 중심선 평균조도를 측정하였고, 이 보고서에서는 표면조도로 비교적 널리 사용되는 10점 평균조도를 사용하여 분석하였다. SUS 304를 사용한 두 곳의 재질의 표면조도를 측정한 결과 두 재질의 표면조도에 약간의 차이가 있었고 또한 SUS 304인 AC1과 SUS 316L인 RV1의 중심선 표면조도가 유사하기 때문에 둘 다 측정대상으로 실험하였다.

본 시편은 시중에 일반적으로 사용되는 스테인레스 스틸의 표면세척제의 한 종류인 CHEMTEC 사의 SUS Cleaner (모델: SUS725)로 세척한 후에 물로 다시 세척하였다. 실험에서 적외선 온도계의 측정거리 대 시편 유효면적 비율(distance to spot size ratio)이 50:1이므로 750mm:15mm, 즉 측정면에서의 측정직경은  $\varnothing 15\text{mm}$ 이다. 시편표면의 중심 부근에서 외견상이상이 없는 부분에서 방사율을 측정하였다.

3종류의 시편으로 다음과 같이 2종류의 실험을 수행하였다.

- ① 시편의 온도에 따른 방사율 (SUS 316L 및 SUS 304)
- ② 표면 산화도(酸化度)에 따른 방사율 (SUS 304)

#### (다) 측정방법

시편을 2kW 용량의 가열기에 고정시킨 후 출력전력과 온도를 선택적으로 제어할 수 있는 제어기로 표면온도를 제어하였다. 본 실험에서는 표면온도의 요동을 감소시키기 위하여 온도제어 대신 출력전력을 일정하게 유지시키면서 표면온도를 제어하였다. 표면온도가 일정하게 유지되면 열전대로 표면온도를 측정한 후, 열전대를 제거하고 같은 위치에서 적외선 온도계로 온도를 측정한다. 이 때 적외선 온도계의 방사율을 조절하여 열전대에서 측정한 온도(기준온도)와 같아지게 만든다. 이 때의 방사율이 시편의 방사율로 간주한다. 그림 1.2.2는 스테인레스 스틸 316L인 시편 RV-2를 사용하여 열전대로 측정한 3종류의 기준온도(47.3°C, 282.2°C, 476.1°C)에 대해 각각 방사율을 0.2에서 1.0까지 변화시키면서 적외선 온도계에 나타난 온도를 표시한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 기준온도(열전대로

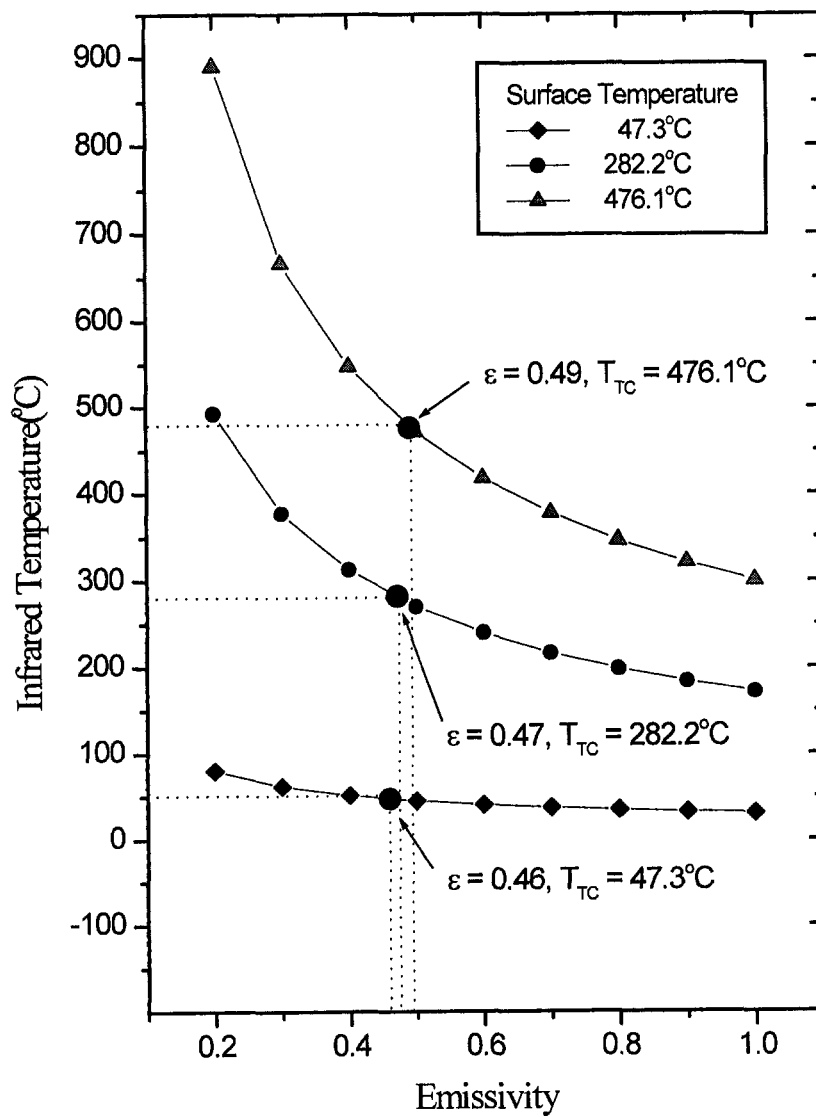


그림 1.2.2 일정한 온도에서 적외선 온도계의 민감도 및 방사율 측정방법 (시편: RV2 SUS316L)

측정한 surface temperature)가 282.2°C인 경우 적외선 온도계의 방사율이 달라지면 적외선 온도계에서 나타나는 온도의 값이 상당히 변화 ( $de/dT = -0.00236$ )하므로 적외선 온도계에서 4°C 이하의 온도 분해능을 가지면 0.01 보다 좋은 분해능을 갖고 방사율을 측정할 수 있다.

예로 기준온도 282.2°C에서 방사율과 적외선 온도계가 나타내는 그래프에서 y-좌표 282.2°C가 그래프와 만나는 점의 x-좌표인 방사율이 282.2°C에서의 시편의 방사율이고 이 값은 0.47 정도이다. 이 그림에서는 경향을 보이기 위하여 방사율을 0.1 씩 증가시키면서 측정하였으나 실제 측정에서는 표면온도 282.2°C에서의 방사율을 기준으로 상하로 0.01 씩 방사율을 증가 또는 감소시키면서 측정하였다.

그림 1.2.2에서와 같이 시편의 표면온도가 낮아질수록 적외선 온도계의  $de/dT$ 의 절대값이 증가한다. 즉, 낮은 온도에서는 적은 표면온도의 변화에도 방사율이 많이 변하므로 낮은 온도에서 이 방법으로 방사율을 측정하면 본 실험에서 가장 오차가 많은 열전대에 의한 표면온도 측정오차가 방사율의 측정오차에 전파되어 실험오차가 증가한다. 그러므로 50°C 이하에서는 본 실험에서 사용한 방법으로 방사율을 측정하는 것은 적합하지 않다.

시편의 온도변화에 따른 방사율을 측정하는 실험에 사용한 시편은 1주일 이상 시편을 상온에서 500°C 정도까지 수 차례 걸쳐 가열과 냉각을 거듭한 후 측정에 사용하였다.

표면 산화도에 따른 방사율 측정실험에서는 시편의 초기상태에서부터 가열을 시작한 2시간 후부터 전력제어에 의해 시편의 표면온도를 400°C 정도로 유지하면서 시간에 따라 방사율을 측정하였다. 실험에서 시간은 가열에 착수한 이후부터의 시간을 나타낸다. 시간에 따라 같은 표면온도를 유지하면서 방사율을 측정하여야 하지만 실내온도 및 외부전력의 조건에 따라 표면온도가 변화하므로 대표 표면온도에서의 방사율 값을 비교하기 위하여 실제 온도에서 방사율을 측정한 후에 이 실험의 전단계에서 측정된 온도변화에 따른 방사율 값의 변화율을 사용하여 보정하였다. 대표 표면온도는 각 실험에서의 표면온도를 평균한 값을 사용하였다.

(라) 실험절차

- ① 시편의 온도를 설정온도로 유지시킨다.
- ② 열전대를 측정하고자 하는 표면에 부착한 후 온도(표준온도)를 측정한다.
- ③ 열전대를 제거하고 같은 위치에 적외선 온도계를 맞춘다.
- ④ 적외선 온도계가 열전대 온도계와 유사한 온도를 나타내도록 적외선 온도계의 기준이 되는 방사율을 조절한다.
- ⑤ 적외선 온도계의 방사율과 온도를 측정, 기록한다.
- ⑥ 기준이 되는 방사율을 중심으로 방사율을 0.01 만큼 증가 또는 감소시켜 가면서 각각 5번씩 방사율을 조절하고, 이때의 방사율과 온도를 측정한다.
- ⑦ ②에서 ⑥까지의 절차를 5번 반복한다.

다. 실험결과

(1) 오차분석

본 연구에서는 실험결과에 대한 불확실성 해석을 ASME 규격에 따라 수행하였다. 불확실성 해석에 의하여 최종적으로 얻어지는 것은 계측에 있어서의 우연오차(precision error)와 편향오차(bias error)의 상한값 및 양자의 결합에 기인하는 불확실성의 상한값에 대한 수치적 추정값이 된다. 우연오차란 측정의 반복과정에서 관측되는 것으로 수많은 오차요인 때문에 반복된 측정값이 일치하리라 기대할 수 없다. 랜덤오차(random error)라고도 하고 정밀도(S)와 관계된다. 편향오차는 시험기간동안 변화가 없는 시스템 오차이다. 어떠한 주어진 시료는 동일한 기법과 환경조건 아래에서 동일한 편향오차를 포함하게 되는데 이는 정확도(B)와 관계된다. 오차가 정규분포할 경우에는 모평균을  $\mu$ 라 할 때 구간  $\mu \pm 2\sigma$ 는 측정값의 전체 산포(scatter)의 95 %를 포함하게 된다. 평균과 표준편차를 추정하기 위한 정밀도 지표(precision index) S는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (1.2.2)$$

여기에서  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k$ 는 측정값  $x_k$ 의 평균값이고, 본 실험에서는 측정회수  $N$ 이 5이다. 여기에서 불확실성 해석의 대상은 emissivity( $\varepsilon$ )이며, 본 실험에서는 선형보간법을 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$\varepsilon = \varepsilon_2 - \frac{\bar{T}_{\varepsilon_2} - \bar{T}_{TC}}{\bar{T}_{\varepsilon_2} - \bar{T}_{\varepsilon_1}} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (1.2.3)$$

여기에서  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 는 적외선 온도계 설정 방사율값이고,  $\bar{T}_{\varepsilon_1}, \bar{T}_{\varepsilon_2}$ 는 그때의 적외선 온도계에서 측정한 온도이며,  $\bar{T}_{TC}$ 는 열전대로 측정한 시료의 표면온도이다.

이 불확실 해석에서는 계측기의 오차, 시험체의 형상오차, 그리고 데이터 수집오차만을 고려한다. 각 파라미터들이 측정치에 전파하여 미치는 영향을 살펴보기 위하여 다음과 같이 상대정밀도와 상대정확도를 구한다. 결과  $r$ 이 다음과 같은 독립 parameter의 함수라 할 때

$$r = f(\bar{P}_1, \bar{P}_2, \dots, \bar{P}) \quad (1.2.4)$$

상대정확도와 상대정밀도는 각각 다음과 같다.

$$\frac{B_r}{r} = \left[ \sum_{i=1}^I \left( \theta'_i \frac{B_{\bar{P}_i}}{\bar{P}_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.2.5)$$

$$\frac{S_r}{r} = \left[ \sum_{i=1}^I \left( \theta'_i \frac{S_{\bar{P}_i}}{\bar{P}_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.2.6)$$

여기서 상대감도계수(relative sensitivity coefficient)  $\theta'_i$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta'_i = \frac{\partial r / r}{\partial \bar{P}_i / \bar{P}_i} \quad (1.2.7)$$

이상의 절차와 같이 공학에서 가장 많이 사용되는  $U_{RSS}$  모델(root-sum-square model)이 사용되었고, 신뢰도 95%의 포괄도를 가지고 있으며,  $t$ 는 대칭인 스튜던트  $t$  분포(two-tailed Student  $t$  distribution)를 따르는 95%에 해당하는 값으로, 자유도가 4인 경우 약 2.776의 값을 갖는다.

$$\frac{U_{RSS}}{\epsilon} = \left[ \left( \frac{B_{\epsilon}}{\epsilon} \right)^2 + \left( t \frac{S_{\epsilon}}{\epsilon} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.2.8)$$

본 실험에서 가장 많은 오차를 발생시키는 것은 열전대에 의한 표면온도를 측정하는데 있었다. 열전대에 의한 표면온도 측정에서 편향오차를 2.5%로 설정하였으나 측정한 결과에서 보면 400℃에서 5번 측정할 때 실험중에서 가장 높은 최대온도와 최소온도의 차이가 10℃ 정도이므로 이 값보다는 편향오차가 낮을 것으로 생각된다. 열전대를 시편에서 제거한 후 적외선 온도계로 온도를 측정할 경우 이 온도가 미세하게 증가하는 경향을 보였다. 즉, 열전대가 핀 역할을 하여 실제온도보다 낮은 표면온도를 측정하고 있는 것으로 간주된다. 그러므로 측정한 방사율은 실제값보다 미세하게 더 낮을 것으로 예상된다. 이 평가방법으로 분석한 오차는 첨부한 data sheet에서 각 실험치에 대한 오차를 기술하였다. 대략 3.5%~10% 정도의 측정오차를 보였다.

## (2) 실험결과 분석

### (가) 온도에 따른 방사율 측정 실험결과

온도에 따른 방사율 측정실험은 표 1.2.2에서와 같이 시편 RV1 (SUS316L), RV2 (SUS316L), CV2(SUS304) 및 AC1(SUS304)을 사용하여 실험하였다. 참조문헌에서 조사한 기존의 방사율값은 넓은 온도범위에서 양단 두 값으로 주어지고, 또한 표면조건이 유사하지만 참고문헌에 따라 SUS 316인 경우 거울표면과 같이 연마한 표면(polished on buffing wheel to mirror surface)에서는 방사율이 0.17에서 0.33 정도이고, 표면의 조도상태는 나타나 있지 않으나 표면을 연마하지 않고 단순히 표면을 세척한 경우에는 0.23에서 0.66로 방사율이 넓은 범위에 분포하여 있다.

그림 1.2.3은 SUS 316L인 시편 RV1과 RV2에서의 온도에 따른 방사율을 측정된 것이다. 또한 이 그림에서는 다른 참고문헌에서 조사한 SUS 316의 방사율값과 비교하였다. SUS 316L에 대한 방사율을 기술하는 문헌은 극히 제한되어 주로 SUS 316의 방사율 자료와 비교하였고, 참고한 자료의 표면상태는 표 1.2.1에 자세히 기술하였다. 이 그림에서는 RV1과 RV2의 방사율이 미세한 차이로 RV2가 높게 보이나 오차범위 내에 있으며, 이 경향에 대해서는 서로 다른 두 시편의 평균조도 즉, RV1이  $18.64\ \mu\text{m}$ , RV2가  $22.61\ \mu\text{m}$  이므로 RV2의 방사율이 미세하게 높은 것으로 설명할 수 있으나 표면조도가 거의 같고, 또한 두 시편의 방사율 차이가 실험의 오차범위에 비해 매우 적어 표면조도의 차이에 의한 방사율의 차이라고는 설명할 수 없다. 그러므로 본 실험의 측정조건에서는 SUS 316L의 방사율은 시편이 달라도 유사한 것으로 간주된다.

SUS 316L 시편을 사용한 실험에서 시편표면의 온도가 증가하면 방사율은 직선적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그 증가율은 매우 완만하여  $44^\circ\text{C}$ 에서  $540^\circ\text{C}$ 까지 온도가 증가하는 동안 방사율은 대략 0.44에서 0.51 정도로 증가하였다. 측정된 SUS 316L 시편의 방사율을 온도에 대해 1차 식으로 최적 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$\epsilon = 0.437 + 1.313 \times 10^{-4} T \quad (1.2.9)$$

여기에서  $\epsilon$ 은 시편의 방사율을,  $T$ 는 온도( $^\circ\text{C}$ )를 나타낸다.

실험에서 측정된 표면조도가  $11.29 \sim 18.82\ \mu\text{m}$ 인 SUS 304의 방사율과 참고문헌에 기술된 방사율을 그림 1.2.4에 동시에 도시하였다. 본 실험치를 세밀히 분석하면  $100^\circ\text{C}$  미만에서는 온도에 따라 방사율이 증가하는 율이 높다가  $100^\circ\text{C}$  이상이 되면 증가율이 적어지면서 SUS 316L의 방사율과 거의 같은 기울기를 보이면서 증가한다. 그러나 전체적인 관점에서 볼 때에는 온도에 따라 거의 1차 식으로 변하고 있으며,  $100^\circ\text{C}$ 에서  $537^\circ\text{C}$ 까지 증가하는 동안 방사율이 대략 0.32에서 0.40까지 증가하였다.

이 그림에서  $100^\circ\text{C}$ 보다 낮은 적은 방사율 값의 3개의 실험치를 제외한 SUS304 시편의 방사율을 온도에 대해 1차 식으로 기술하면 다음과 같다.

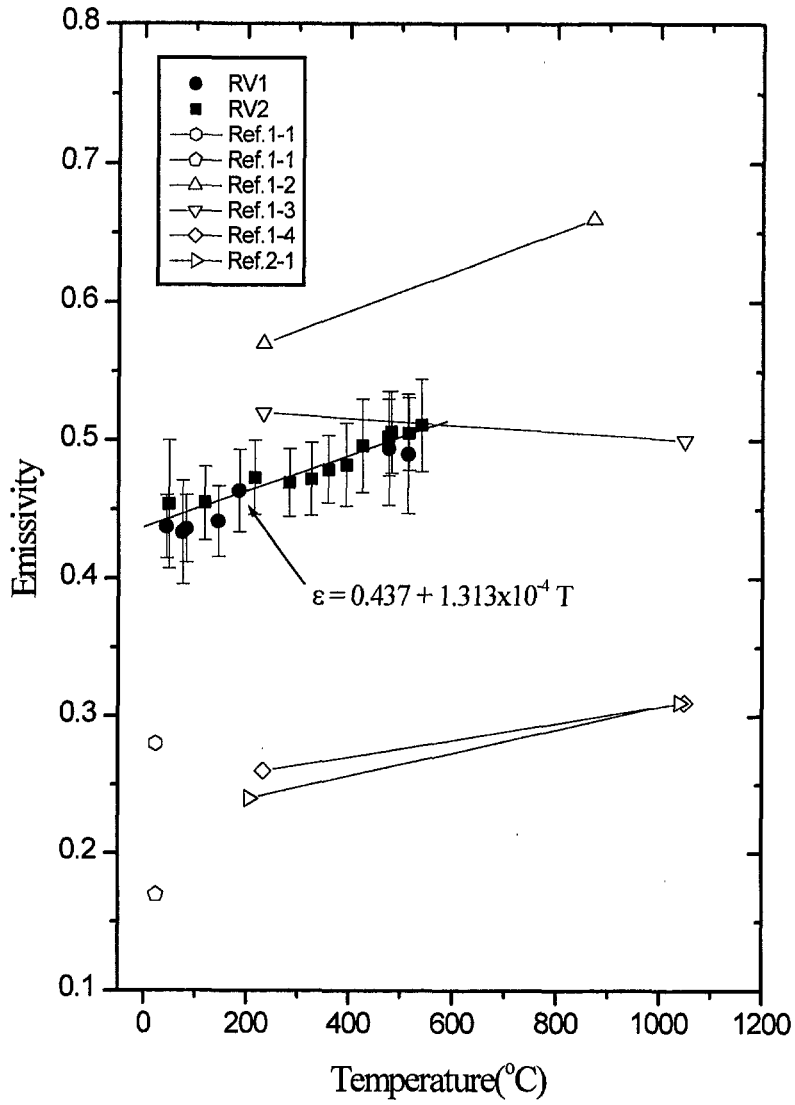


그림 1.2.3 스테인레스 스틸 316L의 표면온도에 따른 방사율 (시편 RV1, RV2)과 참고문헌(표.1.2.1)에서의 SUS 316의 방사율



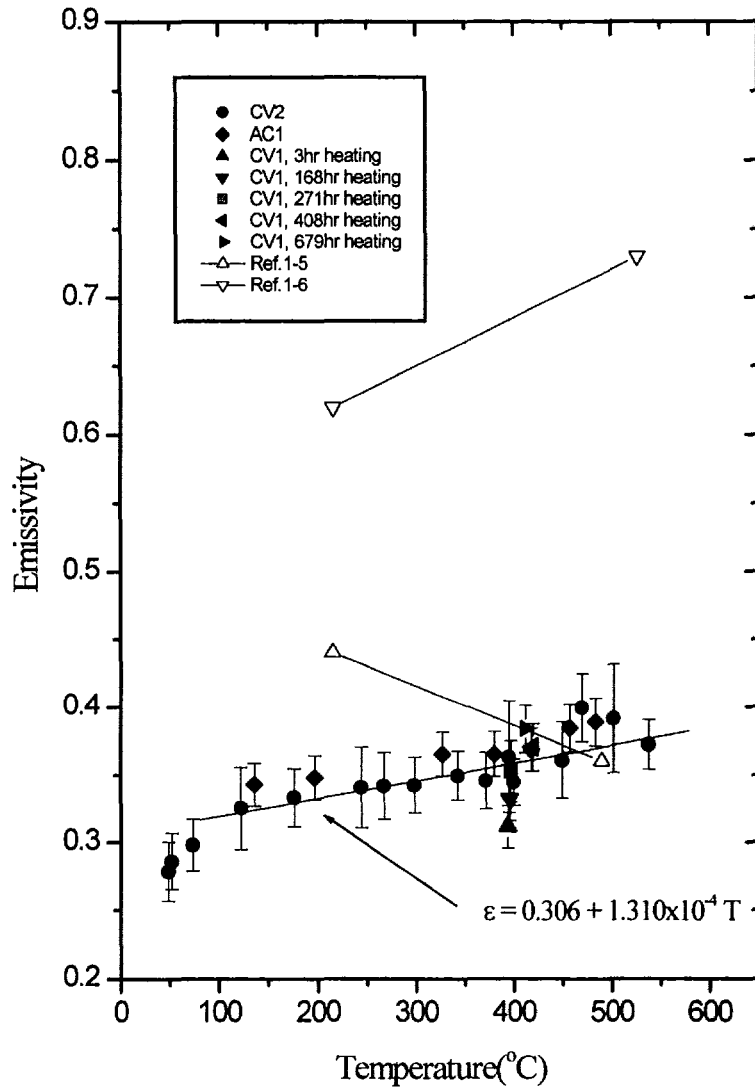


그림 1.2.4 스테인레스 스틸 304(시편 CV1, CV2, AV1)의  
표면온도에 따른 방사율과 참고문헌(표.1.2.1)에서  
의 방사율과 비교

$$\varepsilon = 0.306 + 1.310 \times 10^{-4} T \quad (1.2.10)$$

이 실험의 범위에서 표면조도가 방사율에 미치는 영향을 보기 위하여 SUS 316L 실험치(그림1.2.3)와 SUS 304의 실험치(그림 1.2.4)를 비교하여 보면 SUS 304의 방사율이 SUS 316L의 방사율보다 같은 온도에서 대략 0.13 정도 즉, 약 30% 정도 낮다. 표 1.2.2에서 SUS 304(CV2)의 표면조도가  $11.29\mu\text{m}$  이고, SUS 316L(RV2)의 표면조도가  $22.61\mu\text{m}$  이므로 RV2의 표면조도가 CV2 표면조도의 2배 정도이다. 그러나 SUS 304의 방사율을 비교한 그림 1.2.4에서 AC1 시편의 표면조도가  $18.82\mu\text{m}$ 로 CV2의 약 2배 정도이나 방사율은 6% 정도 높다. 그러므로 SUS 304의 방사율이 낮은 이유는 표면조도의 영향도 어느 정도 있지만 대부분 재질 자체의 특성에 더 기인한다고 볼 수 있다.

#### (나) 표면 산화정도에 따른 방사율 측정 실험결과

표면산화정도에 따른 방사율 측정실험은 SUS 304인 시편 CV1을 사용하여 수행하였다. 실험은 대기중에서 시편의 표면온도를  $400^{\circ}\text{C}$  정도로 장시간 연속적으로 유지하면서 시간에 따라 방사율을 측정하였다. 본 실험에서는 가열시간에 따른 표면산화정도의 변화는 측정할 수 없었기 때문에 가열한 시간을 기준으로 하여 방사율을 측정하였다. 기준시간은 시편을 가열하기 시작한 시간으로 하였고, 2시간 후에  $400^{\circ}\text{C}$  근방으로 온도를 상승시켰다.

한달 정도 연속적으로 측정하는 동안 주위의 대기온도와 전력의 변동 등이 발생하였다. 그 기간동안 각각의 시간대에서 측정한 기준온도의 평균값 즉, 평균온도는  $402^{\circ}\text{C}$  이고 변동편차는  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  정도이었다. 이 기준온도의 요동에 따라 방사율값의 미세한 변동이 발생한다. 같은 기준온도에서의 시간에 따른 방사율을 보이기 위하여 SUS 304의 방사율과 온도와의 관계식 식(1.2.10)에서 온도에 대한 방사율의 변화량을 고려하여 보간하였다. 이 값을 사용하여 시간에 따른 방사율값을 나타낸 것이 그림 1.2.5와 같다.

679시간 동안 장기간 가열한 시편의 표면 색깔은 얼룩덜룩하게 부위에

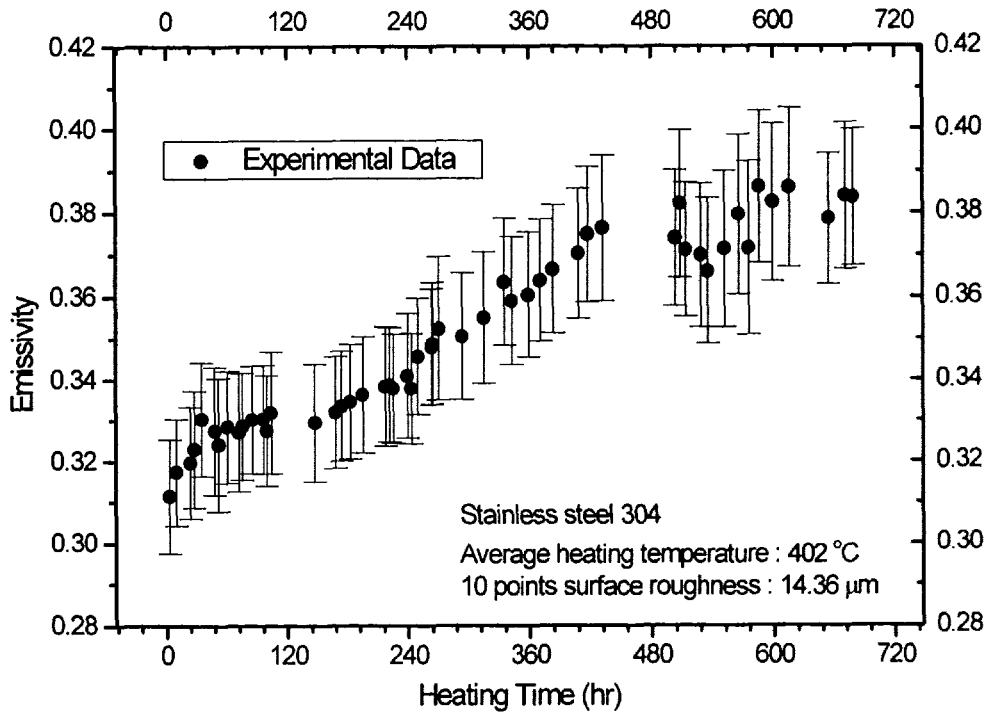


그림 1.2.5 스테인레스 스틸 304 시편(CV1)의 표면온도 400°C에서의 시간에 따른 방사율 변화

따라 달랐다. 즉, 조금 변한 금속색깔인 은백색(silver gray)이 나는 부위, 주황색(orange) 부위, 자주색(violet) 부위 및 주황색과 자주색이 겹친 짙은 자주색 부위 등으로 뒤섞여 나타났다. 측정된 부위에서 시간에 따라 표면의 색깔을 관찰한 바에 의하면, 초기에는 시편표면의 색깔은 광택이 나는 은백색이지만 400℃에서 가열하면 점차적으로 주황색으로 변하다가 시간이 지날수록 자주색이 나타나 두 색깔의 혼합으로 짙은 자주색으로 변하였다. 이 후 시간이 더 지나면 자주색이 옅어지면서 부위에 따라서는 은백색이 다시 나타났다. 이 실험 후에 검사를 한 결과, 시편에서의 측정부위는 가장 표면 색깔의 변화가 많은 곳 중의 한 부위인 주황색과 자주색이 혼합된 부분이었다.

이 실험의 최종단계(679시간 실험 후)에 시편에 나타나는 표면색깔의 대표적인 부분을 선택하여 부분별로 방사율을 측정하였으나 색깔에 따른 방사율의 차이는 실험의 오차범위 내에 있으며 분명한 차이를 보이지 않고 있었다.

그러나 가열시간에 따라 방사율의 변화를 살펴보면, 그림 1.2.5에서 초기의 24시간 동안에 방사율의 증가율이 높은 것은 초기의 은백색에서 주황색으로 변할 때였다. 이 때 방사율이 0.012 정도 즉, 4% 정도 증가하였다. 시간이 지남에 따라 표면의 주황색 색깔이 짙어짐에 따라 방사율이 일주일 정도 서서히 증가( $3.964 \times 10^{-5}/\text{hr}$ )한 것으로 보인다(그림 1.2.6). 그 후 425시간까지 표면의 색깔이 주황색으로부터 부분적으로 짙은 자주색으로 바뀌면서 방사율의 증가율(그림 1.2.7)이  $1.66 \times 10^{-4}/\text{hr}$  정도로 높아졌다. 500시간 이후 3일 정도에도 측정시간과 측정위치가 미세하게 변하여도 방사율이 0.01 정도 달라져 측정치의 변화가 많았지만 600시간 이 후에는 시간이 증가하여도 방사율이 0.38 근방에서 어느 정도 평형상태를 유지하였다.

## 라. 결론

열전대로 시편 표면온도를 측정된 기준온도와 적외선 온도계의 방사율을 조절하여 시편표면의 온도를 비교하면서 방사율을 측정하는 방법으로

SUS 316L과 304의 방사율을 측정하였다. 실험오차는 3.5~10% 범위였고, 대부분의 오차가 열전대로 표면온도를 측정하는데서 발생하였다. 실험의 온도범위는 50~540℃ 정도이며, 표면온도가 증가함에 따라 SUS 316L과 SUS 304 재질의 방사율이 증가하는 비율은 두 재질이 거의 같고 증가율은  $1.31 \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$  정도이다. 표면조도가 18.64~22.61 $\mu\text{m}$  정도인 PSDRS 실험장치용 재질인 SUS 316L의 방사율은 50~540℃ 표면온도 범위에서 대략 0.44에서 0.51로 온도(℃)에 따라 증가하였고 실험식은 다음과 같다.

$$\epsilon = 0.437 + 1.313 \times 10^{-4} T$$

표면조도가 11.29~18.82 $\mu\text{m}$ 인 PSDRS 실험장치용 재질인 SUS 304의 방사율은 100~540℃ 표면온도 범위에서 대략 0.32에서 0.38로 온도(℃)에 따라 증가하였고 그 실험식은 다음과 같다.

$$\epsilon = 0.306 + 1.310 \times 10^{-4} T$$

표면조도가 18.82 $\mu\text{m}$ 인 SUS 304의 방사율은 표면조도가 11.29 $\mu\text{m}$ 인 SUS 304보다 전 온도구간에 걸쳐 6% 정도 높으나 측정오차 범위 내에 있다. 시편으로 사용한 SUS 304의 방사율은 SUS 316L의 방사율보다 같은 온도에서 대략 0.13 즉, 30% 정도 낮다. 이 차이는 표면조도의 영향도 어느 정도 있으나 대부분의 영향이 재질의 특성에 기인한다.

400℃ 정도에서 평균조도가 14.36 $\mu\text{m}$ 인 SUS 304 시편을 679시간 가열하면서 가열시간에 따라 방사율을 측정한 결과 방사율은 표면상태에 따라 서서히 증가하는 경향을 보이다가 600시간부터는 평형상태를 보였고, 이때의 방사율은 0.38 정도로 초기상태보다 15% 정도 증가하였다. 시편 표면의 색깔 변화 상태에 따라 방사율의 값이 조금 다르게 나타나고 있으나, 많은 차이가 없고 측정오차 범위 내에 있다.

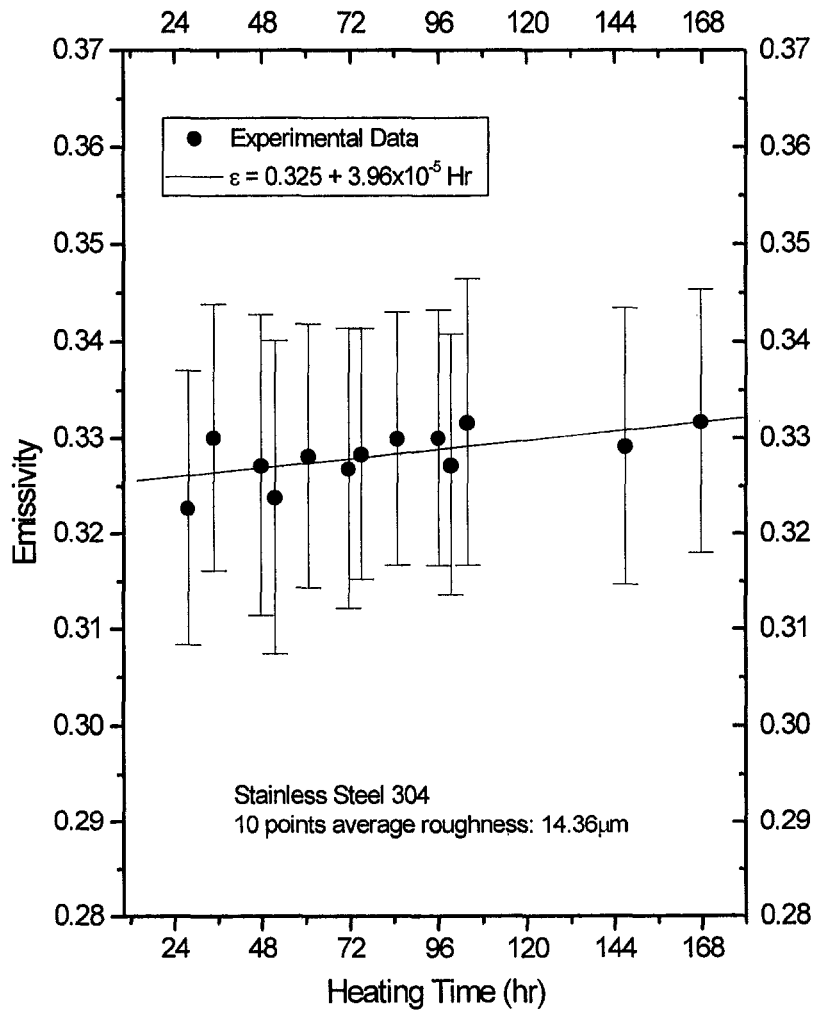


그림 1.2.6 400°C에서 24시간 후부터 일주일까지 스테인레스 스틸 304의 방사율 증가율

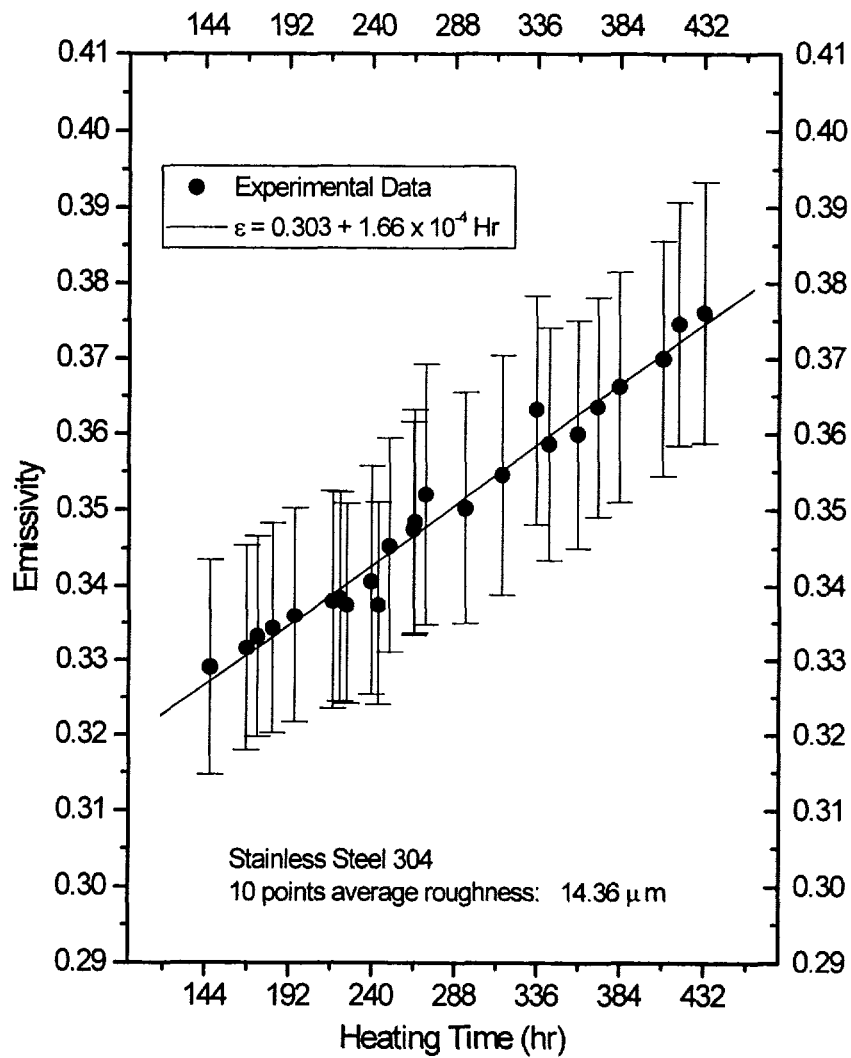


그림 1.2.7 400°C에서 150시간부터 425시간까지 스테인레스 스틸 304의 방사율 증가율

## 제 2 절 중간열교환기 실험

### 1. 중간열교환기 물모의 실험

#### 가. 서론

##### (1) 연구개발의 필요성

본 실험의 주목적은 KALIMER 중간열교환기의 열-유동 해석을 위한 코드 개발 및 검증에 필요한 중간열교환기 관다발에서의 경사각도에 따른 압력강하 실험자료를 생산하기 위한 것이다. 액체금속로 중간열교환기 (IHX: intermediate heat exchanger)는 많은 관다발(tube bundle)로 이루어져 있고, 셸(shell)측에서의 1차측 유동은 매우 복잡한 형태이다. 이 셸측에서 유동의 방향과 관다발이 이루는 경사각과 관다발의 배열이 압력강하 특성에 미치는 영향을 정량화하기 위한 실험을 수행하였으며, 이 실험은 중간열교환기 설계용 전산코드의 개발 및 설계검증에 활용한다. 또한 이 실험결과를 활용하여 기존의 관련 상관관계식들의 정확성과 실험범위의 적정성을 평가하고, 정확성이 높고 적용범위가 넓은 실험식을 도출하는데 있다. 셸측의 유동형태에서 가장 간단한 경우는 유동이 관다발의 축방향으로 흐르는 경우인 순수 축방향 유동(purely axial flow)이다. 이 경우에는 관 내부에서의 유동마찰계수를 활용하면 쉽게 활용할 수 있다. 또 다른 특수한 경우인, 유동이 관의 축에 대하여 수직방향을 이루는 열교환기에서 생기는 순수 횡유동(purely cross flow)은 좀 더 복잡한 2차원 유동이지만 실험적으로 많이 알려져 있다. 그러나 유동이 관의 축에 대하여 임의의 각으로 경사져 있다면 일반적인 3차원 유동이 된다. 이러한 유동 즉, 관다발과 유동이 이루는 임의의 경사각에 따른 셸측에서의 압력강하에 관해서는 실험자료 분석에서 참고하여 논의하는 소수의 문헌들에서 나타나 있으나 그 중 어떤 상관관계식들은 그 가용한 범위를 넘어선 외삽된(extrapolated) 자료로부터 만들어진 것들도 있기 때문에 중대한 오차를 가지고 있을 수 있다. 따라서 신뢰성 있는 정확한 설계를 위한 상관관계식을 사용하기 전에 먼저 적당한 상관관계식을 선정하거나 더욱 정교한 상관관계식을 개발하는 것이 선행되어야 할 것이다. 따라서 이 문헌들에서 나타나는 실험상관관계식들을 정밀한 실험자료를 이용하여 분석하고,



사용범위를 평가하는 것은 설계에 있어서 중요한 일이다.

## (2) 연구범위

실험은 유체계통설계 과제에서 요구한 실험요구문서 [2.1.29]에 기초하여 실험장치를 설계하여 실험을 수행하였다. 유체계통설계 과제에서 요구한 실험은 두 부분으로 구성되어 있다. 즉, 실험-I의 범위는 작동유체로서 물을 사용하는 셀측 유동 특성 측정과 작동유체로서 소듐을 사용하는 중간열교환기 관 배열에 대한 기본적인 대류열전달 및 압력강하특성 측정이다. 예산의 제한으로 인해 설계부서와 협의하여 이들 실험 중의 하나인 작동유체로서 물을 사용한 중간열교환기 관 배열에 따른 압력강하 측정을 중심으로 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 관배열은 정삼각배열과 회전 정삼각배열의 두 가지이다. [그림 2.1.1, 그림 2.1.2] 본 연구에서 사용한 시험부는 사각단면을 가진 5개의 덕트 형상으로 정삼각 배열의 경우 가로와 세로가 각각 122mm와 203.2mm이고, 회전 정삼각배열의 경우 140.7 mm과 203.2 mm이며, 내부에 각각  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  및  $90^\circ$ 의 경사각을 가진 관다발이 설치되어 있다. 그림 2.1.3은 본 연구에서 사용된 경사관다발 시험부를 도식적으로 나타낸 것이다. 여기에서 우리는 경사각에 따른 셀측 압력강하 실험자료를 생산하였고, 기존 실험식들의 정확성을 평가하였다. 차후 범용적으로 사용될 수 있는 경사각에 따른 실험식을 개발할 예정이다. 관다발 배열의 피치비(P/d)는 1.6이고, 레이놀즈 수의 범위는 관직경을 기준으로 700-27000이다. 차압 측정위치는 관다발의 유입부, 중심부 그리고 유출부 등 3곳이다.

## (3) 관다발유동의 유동특성

관다발 유동을 이해하기 위해서는 먼저 그 유동의 특성을 이해하는 것이 중요하다. 이 유동의 기하학적 형상과 조건을 결정하는데 필요한 변수들은 관배열의 종류, 관의 간격 그리고 유입유량, 유입방향 및 유동형태 등이다. 가장 일반적으로 사용되는 관의 배열형태는 크게 나누어 정렬사각배열(in-line square array), 회전사각배열(rotated square array),

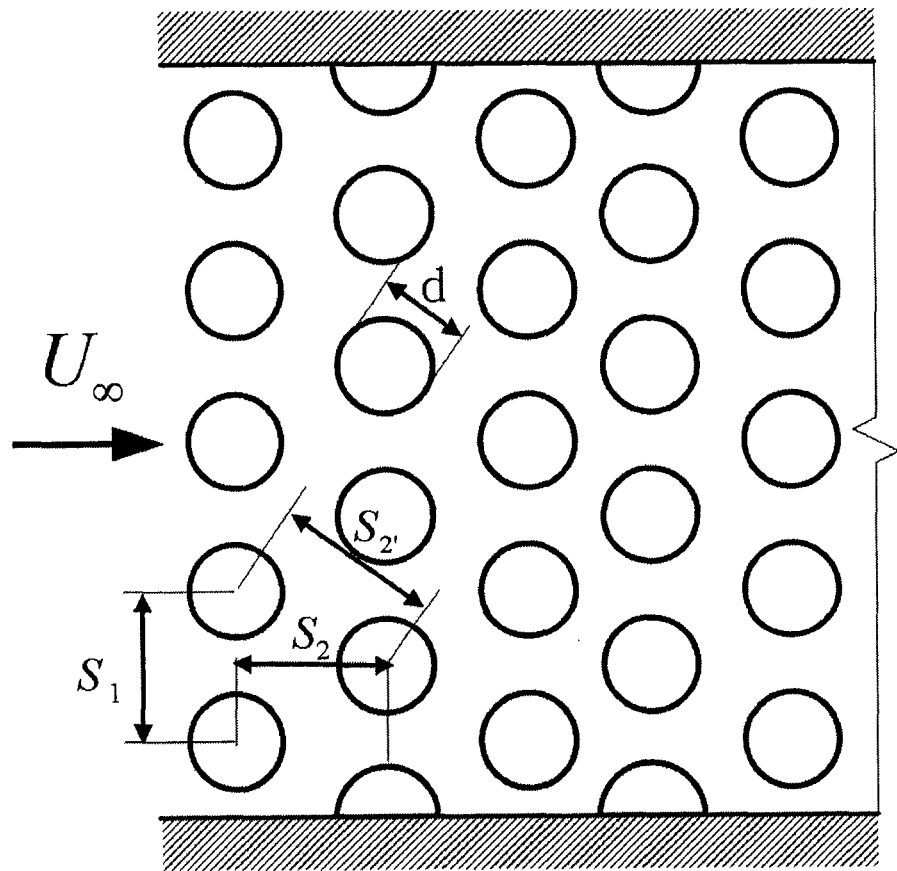


그림 2.1.1 정삼각 배열.

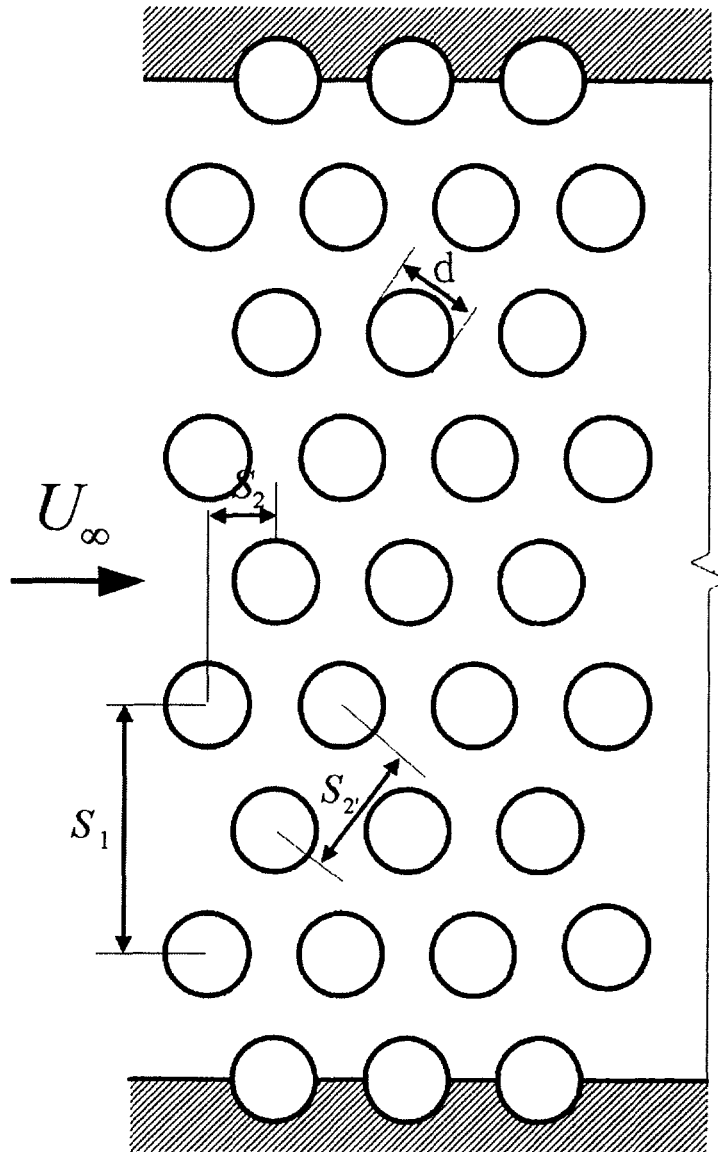


그림 2.1.2 회전정삼각 배열.

정렬삼각배열(정삼각배열, in-line triangular array), 회전삼각배열(확장삼각배열, rotated triangular array) 등이 있는데 통상 횡방향(transverse) 및 종방향(longitudinal) 피치로 정의된다. 그림 2.1.1과 그림 2.1.2는 본 연구에서 사용된 정삼각배열과 회전삼각배열에 대한 도해를 나타내고 있다. 삼각배열에서의 유동은 주기적으로 수축 팽창(converging and diverging)하는 단면을 가진 곡관(curved duct) 유동과 유사하기 때문에 각기 다른 열에 있는 관 주위에서의 유동장이 서로 유사한 양상을 가지게 된다. 정렬사각배열(in-line square array)에서의 유동은 때로는 직선 채널(straight channel)에서의 유동에 대응된다. 관열 내부의 최소 단면에서의 유동은 주로 피치비(pitch ratio)에 따라서 결정된다.

낮은 레이놀즈 수에서 관다발내 유동형태는 순환영역(recirculation region) 내에서 대척도 와류(large scale vortices)를 갖는 층류이며 또한 경계층도 층류이다. 따라서  $Re < 3000$ 에서의 유동형태는 지배적 층류(predominantly laminar)로 묘사할 수 있다. 레이놀즈 수를 증가시키면 관사이의 유동은 고도의 난류를 갖는 와류(vortical flow)가 되며 여전히 층류 경계층을 유지하게 된다. 이 때의 유동 형태는 혼합유동(mixed flow)으로 묘사한다. 초기의 큰 와류(vortex)의 크기는 속도 증가에 따라서 감소하게 되는데  $10^3 < Re < 10^4$ 의 범위에서는 지배적 층류와 혼합류(mixed flow)간의 중간유동형태(intermediate flow pattern)가 존재하기도 한다. 혼합류 영역은 광범위한 레이놀즈 수의 범위를 망라하고 있으며  $Re < 2 \times 10^5$ 까지 그 특성을 유지하게 되는데 이 때 관다발 내의 유동은 고도의 난류(highly turbulent)가 된다. 임계유동영역(critical flow regime)에서는 관다발의 총항력(total drag)이 단일관인 경우와 유사하게 변한다. 그러므로 레이놀즈 수에 따라서 유동을 3 가지 유동영역으로 구분할 수 있다.

#### (4) 기존연구의 재검토

관다발에 대한 대부분의 초기 연구들은 순수 횡유동(purely cross flow)에 중점을 준 실험자료에 관한 것이다[2.1.1~2.1.13]. 이들은 층류에서 임계유동영역에 이르는 광범위한 범위에서 다양한 관의 배열에 대한 압력강하 및 열전달계수를 측정하였다. 단일봉 및 유동방향에 수직인 관다

발에 대한 이와 같은 연구들에 대한 분석과 종합적인 정리는 문헌에 체계적으로 이루어져 있다[2.1.14, 2.1.19, 2.1.20]. 본 연구는 경사 관다발에 대한 횡유동에 관한 것이므로 여기에서는 경사각을 갖는 관다발에 관한 연구만을 살펴보았다.

Kazakevich[2.1.15]는 30, 45, 60 그리고 90도의 경사각을 갖는 1개에서 7개까지의 경사진 봉을 지나는 공기 유동에서의 압력강하를 측정하였다. 그는 6가지의 사각배열 및 8가지의 삼각배열에서 횡유동에서의 주유동 속도(cross-flow main stream velocity)에 기반을 둔 자유유동 레이놀즈 수(free stream Reynolds numbers)에 대해 7,000에서 100,000까지의 범위를 측정하였다. Groehn[2.1.16]은 보다 넓은 경사각 범위인 15, 30, 45, 60, 75, 90도 경사각에서 1개에서 10개의 봉 열을 지나는 압력강하를 측정하였다. Mueller[2.1.17]는 경사각을 가진 삼각배열 관다발을 지나는 유동에서 평행방향 및 수직방향 배열의 압력강하를 측정하였으며, 관 배열에 관계없는 2차원 유동저항 상관관계식을 개발하였으나 실험장치의 제한 때문에 레이놀즈 수 1,100 범위까지 결과를 얻었다. Boettgenbach[2.1.18]는  $P/d=1.2$ 인 사각배열에서 30, 45, 60 및 90도의 경사각을 가진 1개에서 10개까지의 열을 지나는 유동에서 저항성분(resistance components)을 측정하였다. 그의 결과는 수력직경에 기반한 레이놀즈 수가 5,500에서 550,000의 범위를 망라하고 있으나 결과는 상당히 이산되어 있다. 1984년에 Derek[2.1.22]은  $P/d=1.5$ 와 0, 30, 45, 60 및 90도의 경사각을 갖는 관배열에서 단상(single phase) 및 다상(multi-phase) 유동에 대한 심도있는 연구를 수행하였다. 그는 두 가지 저항성분을 모두 측정하여 열수력 코드를 위한 관계식을 만들었으며 특히, 이 관계식은 관배열 종류에 관계없이 사용할 수 있다. 또한 Idel'chik [2.1.21]에 의하여 경사각의 영향을 고려한 사각 및 삼각 배열에 대한 압력강하 관계식이 제시되었으며, 지금까지의 주요 연구 결과들을 참고로 하여 가장 최근에 개발된 상관관계식은 The Engineering Sciences Data Unit[ESDU, 2.1.19, 2.1.20]에 의하여 제시된 것이다. 전년도에 우리는 정삼각형 배열을 가지는 경사 관다발을 지나는 횡유동에서의 압력강하실험을 수행하였다.[2.1.32] 그 결과 ESDU의 상관식을 강력하게 추천하였으며, 또한 I'delchik의 상관식을 본 실험 결과를 바탕으로 수정하기도 하였다.

이상의 실험적 연구와 함께 컴퓨터와 고등수치해법의 눈부신 발전으로 난류와 층류 유동영역에서 FDM, FVM, FEM 등 다양한 방법을 사용한 이론적 연구들도 이루어졌다[2.1.23~2.1.26]. 그리고 Antonopoulous[2.1.27, 2.1.28]는 최초로 층류 및 난류유동에서 경사각을 갖는 관다발에 대해 수치해석을 하였다. 지금까지의 수치해석적 연구들은 자신의 수치해법을 검증하고 설계를 위한 더욱 신뢰성 있는 결과를 예측하기 위한 것이었다.

## 가. 실험

### (1) 실험조건 및 실험범위

유량은 약 1.8~60 l/sec의 범위에서 28개의 구간을 log-scale로 나누어 실험을 수행하였다. 이 유량은 관 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수로 환산하면 각각 약  $10^3$ 에서  $10^4$ 의 오더를 갖는다. 측정유량의 범위에 따라 각각 3개의 유량계를 바꾸어가면서 사용하였으며, 이 때 각 구간이 중첩되도록 하였다. 각 실험부에 설치된 3개 구간 즉, 관다발의 유입부, 중심부 및 유출부의 압력차를 3군데의 압력차를 측정범위에 맞게 압력계를 교체하면서 실험을 수행하였다. 동일한 실험을 각 데이터 세트에 대하여 2회씩 실시하였다. 작동 유체의 온도는 덕트 입구 및 출구에 위치한 열전대로부터 읽어들이어 평균을 취해서 얻었다.

실험요건서는 소듐을 사용한 중간열교환기 관다발 셀측에서의 열전달 계수 및 유동마찰 계수를 측정하는 것이 주된 목적인데 여기에서는 설계 분야와 협의하여 물을 사용하여 압력강하 실험 즉, 유동마찰계수를 측정하는 실험을 수행하였다. 이 압력강하 실험은 정삼각 배열과 회전정삼각 배열의 두 가지 배열을 포함하고 있다.

측정 유량범위는 다음과 같은 방법으로 결정하였다. 실험요건서[2.1.29]가 나타내는 유량범위는 다음과 같으며, 다음의 예는 회전정삼각배열에 사용된 기하학적 변수에 기준하여 나타낸 것이다.

작동유체 : 소듐  
온도 : 450°C

밀도 : 843.8Kg/m<sup>3</sup>  
 점도 :  $\mu = 0.0002551\text{Kg/m}\cdot\text{sec}$   
 덕트 높이 : 0.2032m  
 덕트 폭 : 0.1408m  
 유량 : 0.01~0.03m<sup>3</sup>/sec

본 실험은 물을 작동유체로 사용하고, 상온에서 실험을 수행하므로 실험조건은 다음과 같다.

작동유체 : 물  
 온도 : 21℃  
 밀도 : 997.4Kg/m<sup>3</sup>  
 점도 :  $\mu = 0.00098\text{Kg/m}\cdot\text{sec}$   
 덕트 높이 : 0.203m  
 덕트 폭 : 0.140m  
 유량 : 0.002~0.06m<sup>3</sup>/sec

위의 두 유동에 레이놀즈 상사를 적용시키면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\rho_s U_s d_s}{\mu_s} = \frac{\rho_w U_w d_w}{\mu_w} \quad (2.1.1)$$

그러므로

$$U_w = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right) \left(\frac{\mu_w}{\mu_s}\right) \left(\frac{d_s}{d_w}\right) U_s \quad (2.1.2)$$

이고, 물실험시 요구되는 유량은

$$Q_w = U_w A_w = U_w A_s \left(\frac{A_w}{A_s}\right) = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right) \left(\frac{\mu_w}{\mu_s}\right) \left(\frac{d_s}{d_w}\right) U_s A_s \left(\frac{A_w}{A_s}\right) \quad (2.1.3)$$

$$Q_w = \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right) \left(\frac{\mu_w}{\mu_s}\right) \left(\frac{d_s}{d_w}\right) \left(\frac{A_w}{A_s}\right) Q_s \quad (2.1.4)$$

으로 계산된다. 위 식을 사용하여 실험요구서의 조건에 맞는 물실험시 유량을 계산하면 0.0325~0.0975m<sup>3</sup>/sec 이다. 그러므로 본 실험의 유량범위는

실험요구서의 총 유량범위를 충분히 만족하지 못하나, 제안된 특정 유량 [suggested value : 0.0111m<sup>3</sup>/sec (소디움) → 0.036m<sup>3</sup>/sec (물)]의 조건은 만족한다.

## (2) 실험장치

실험장치는 횡방향 유동(cross flow) 내 관다발의 경사각에 따른 압력강하 특성을 측정하기 위한 것이다. 이 실험장치는 물공급탱크, 펌프, 댐퍼, 매니폴드 그리고 시험부로 이루어져 있으며 그림 2.1.4에 나타내었다.

### (가) 물공급탱크

물공급탱크에는 대략 5톤 정도의 물이 채워진다. 내경이 1500mm, 높이는 상하 경판을 합하여 4000mm 이다. 높이 200mm인 강판을 상부와 하부에 부착하고 보수와 검사가 용이하게 상부에는 플랜지를 연결하였다. 채워진 물과 탱크로 주입되는 유속 등으로 인하여 변형이 일어나지 않게 두께 5mm의 SUS304 강판으로 설계, 제작하였다. 하부강판이 용접되는 선을 기준으로 높이 300mm에 펌프로 연결되는 8"×6" 레듀서(reducer)를 설치하였다. 또한 2000mm 높이에 바이패스 관을 연결하였으며, 2600mm 높이에 시험부로부터 연결되는 3개의 관이 있다. 상부에는 상부 플랜지에서 200mm 하단에서부터 400mm 간격으로, 수위계를 설치하기 위한 홀더를 2개 부착하였다. 이 때 수위계는 OMEGA 모델 LV-102 float type으로 하였다.

### (나) 펌프 (Pump)

펌프의 흡입구는 6", 20기압용 플랜지로 되어 있고 유출구는 5", 30기압용 플랜지로 연결되어 있다. 이 펌프는 3단으로 3m<sup>3</sup>/min에 120m의 수두를 갖는다. 펌프의 하부는 4개의 anchor로 바닥에 고정된다. 이 펌프로부터 나온 유체의 유량은 인버터와 바이패스 관을 통하여 제어된다.



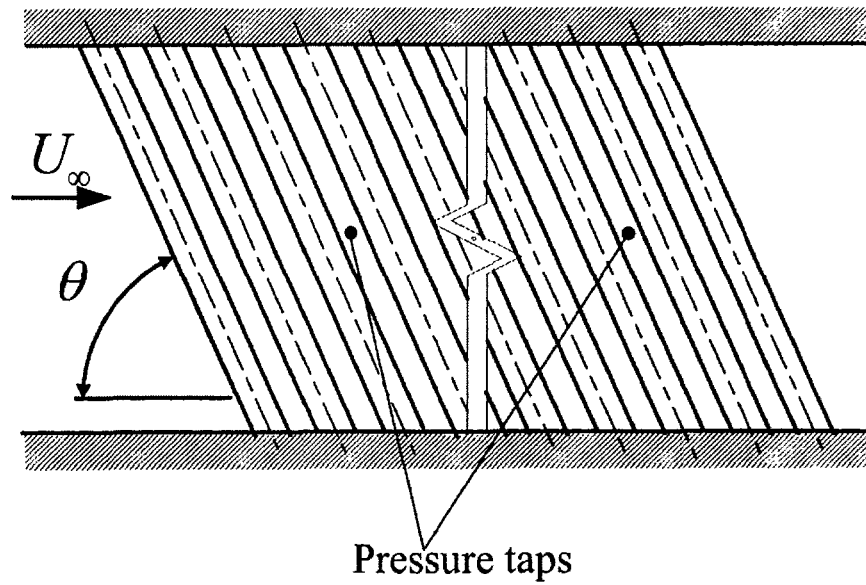


그림 2.1.3 경사관다발 시험부.

(다) 댐퍼 (Damper)

댐퍼는 펌프에 의해 발생하는 유동의 요동을 최소한(유량의 0.5% 이하)으로 줄이기 위한 것으로 외경 216.3mm, 내경 200mm, 높이 2200mm인 탱크로 되어 있다. 내부에는 댐퍼 내의 수위의 요동을 줄이기 위하여 스크린으로 고정된 wire mesh가 채워져 있다. 커버가스(질소)의 압력으로 일정한 수위를 유지한다.

(라) 매니폴드 (Manifold)

매니폴드는 유량계 상류 및 하류에 각각 1개씩 설치하였다. 유량을 측정하기 위하여 오차 0.5%이내인 터빈(turbine) 유량계를 설치하였다. 이 장치에 설치된 유량계는 OMEGA 모델로 구경이 3", 2.5", 1" 등 3가지 종류이다. 매니폴드는 6" 티들을 용접으로 연결한 형태이다.

(마) 시험부

관다발 실험부의 기본적 도해는 그림.2.1.2에 나타내었다. 이 시험부는 횡방향 유동(cross flow) 내 관다발의 경사각에 따른 압력강하 특성을 측정하

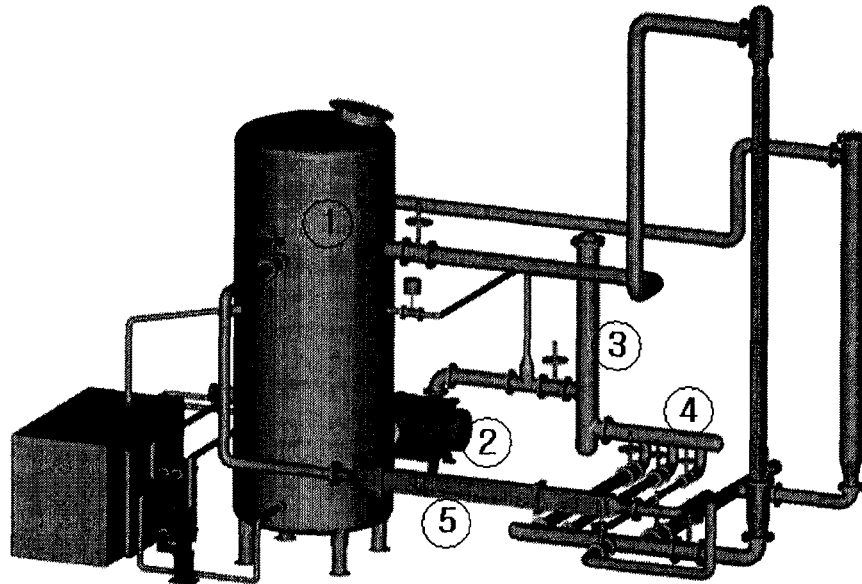


그림 2.1.4 실험장치, ①물공급탱크, ②펌프, ③멤퍼, ④메니폴드, ⑤시험부.

### (3) 측정 및 실험 방법

모든 측정신호는 Data Acquisition Unit(HP 3852A)로 읽어 들여 컴퓨터의 GPIB 보드를 통하여 최종 HP-Vee 프로그램으로 Pentium-III PC에서 가시적으로 관찰하고, 데이터를 저장할 수 있도록 하였다. 모든 신호들은 200개씩 읽어 들여 PC에 저장하였다. KALIMER 중간열교환기에서의 관다발의 경사각도 및 유량에 따른 압력강하 특성을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 장치에 대한 상세한 설명은 기존의 문서 [2.1.30]에 잘 설명되어 있다. 압력강하는 차압계를 사용하여 측정하였으며, 온라인화된 PC로 데이터를 수집하였다. 작동유체(working fluid)는 물을 사용하였다. 관다발 축과 유동방향이 이루는 각 30, 45, 60, 75, 90도에 대한 실험을 각각 수행하였다. 유량은 3개의 유량계를 사용하여 측정하였으며, 유체의 온도는 실험부 입구와 출구에서 열전대를 사용하여 측정하였

기 위한 것이다. 유입되는 유동에 대하여 각각 90, 75, 60, 45 그리고 30도의 경사각을 가진 관다발로 채워진 5개의 직사각 덕트이며 유동단면은 정삼각배열의 경우  $0.122\text{ m} \times 0.203\text{ m} (W \times H)$  그리고 회전 삼각배열의 경우  $0.140\text{ m} \times 0.203\text{ m} (W \times H)$ 의 면적을 가지고 있다. 이 직사각 덕트는 각 경사각에 따라서 교체가능하게 되어 있으며, 누수를 방지하기 위하여 실리콘 고무를 덧대어 볼트로 체결하도록 설계되어있다. 시험부는 KALIMER IFX의 주요 유동과 관다발형상을 모의하고 있다. 기본적인 시험부 형상은 KALIMER 설계 형상과 동일하며 관다발은 그림 2.1.3에서 보여주는 것과 같다. 이 시험부는 크게 3부분으로 되어있다. 즉, 확대관을 통과해 스크린을 지나는 1 m의 유입부와 1.6 m 길이의 관다발부 및 축소관을 지나는 길이 0.5 m인 유출부로 이루어져 있다. 유입부는 원형 단면으로부터 사각 덕트로 연결되는 디퓨저와 1 cm 간격의 5개의 스크린으로 되어 있다. 유사한 형태의 유출부는 길이가 0.5 m 이다. 디퓨저를 통과한 유체는 스크린을 지나 균일화되어 관다발 입구로 유입된다. 유입부와 유출부에는 유체의 온도를 측정하기 위한 열전대를 설치하였다. 정사각배열의 경우 원형 단면의 관다발부는 벽면효과를 최소화하기 위하여 반원 단면의 봉을 벽면에 부착하였다[그림 2.1.1]. 원봉의 총수는 115개이고 반원봉은 22개이다. 회전정삼각배열의 경우는 홀수 열에 해당하는 봉의 반단면 부분은 벽면에 묻혀있다[그림 2.1.2]. 이것도 역시 원형 단면을 가진 관다발은 폭방향으로의 무한 길이를 모사하는 것이다. 동일한 단면을 갖는 원봉의 총수는 185개이며, 이 중 벽면에 묻힌 봉(embedded rod)의 개수는 양측 벽에 21개씩 42개이다. 유입유동에 대한 경사각만 다른 5개의 관다발은 모두 동일한 배열 형태를 가진다. 양 측벽은 내부 유동 상태를 관찰할 수 있도록 아크릴 소재를 사용하였으며, 오른쪽 측면에는 압력강하 측정을 위하여 유동방향으로 정 중앙선 상을 따라 4개의 압력탭을 설치하였다. 압력탭의 직경은 정삼각배열의 경우 3.2mm이며, 회전 정삼각배열의 경우는 1 mm이다.

다. 압력강하는 유입구, 중심부 및 유출부의 3부분으로 구분된 위치에서 측정하였다. 유량의 범위는 실험요구문서에서 요구한 범위를 역학적 상사(dynamic similitude) 법칙에 따라서 정하였다.

측정 데이터는 수평 및 수직 관다발 실험부 입구 및 출구에 위치하고 있는 2개의 열전대에서 나오는 온도신호, 관다발 시험부에 위치한 3개의 차압계에서 나오는 전류신호 및 3개의 유량계에서 나오는 전압신호 등이다. 유량계는 병렬로 설치된 3개의 유량계를 범위에 맞게 선정하여 측정하였고, 41 l/sec가 초과한 유량범위에서는 두 개의 유량계를 동시에 사용하였다. 2~3.6 l/sec 범위에서는 OMEGA사의 Turbine meter FTB-106-CE (최대유량: 4.55 l/sec)를, 3~24 l/sec 에서는 OMEGA사의 Turbine meter FTB110-CE (최대유량: 30.3 l/sec)를, 21~39 l/sec 범위에서는 OMEGA사의 Turbine meter FTB111-CE (최대유량: 49.3 l/sec)를 사용하였고, 39 l/sec가 초과한 유량범위에서는 두 개의 유량계를 동시에 사용하였다. 유량계를 바꿀 때에는 측정지점이 중첩되도록 하였다. 덕트의 입구 및 출구에 장치되는 열전대는 OMEGA사의 J형 열전대이다. 유량계의 보정으로는, 유량계 구입시 Calibration Data Sheet (유량-진동수)에 따라 Function Generator로 Calibration Data Sheet에 있는 진동수를 발생시켜 이에 대응하는 유량에 대한 전압(0~5V)으로 전압-유량 직선을 얻어 보정식을 만들어 사용하였다. 보정식은 표 2.1.1에 있으며 보정곡선은 그림 2.1.5-2.1.7에 있다. 차압측정기의 보정은 기지의 압력을 입력하여 최종 Data Acquisition Unit에서 받은 전압(2~10V)으로 전압-압력 직선을 얻어 보정식으로 사용하였다. 차압계는 측정범위에 따라 OMEGA 및 ROSEMOUNT사의 6, 10, 30, 100, 150, 250 inH<sub>2</sub>O의 측정범위를 가지는 6가지 종류를 선정하여 사용하였다. 본 실험에 사용된 차압측정기의 보정곡선은 그림 2.1.8-2.1.16에 있으며, 보정식은 표 2.1.2에 있다. 차압계의 측정위치 및 측정거리는 표 2.1.3-2.1.4에 나타내었다.

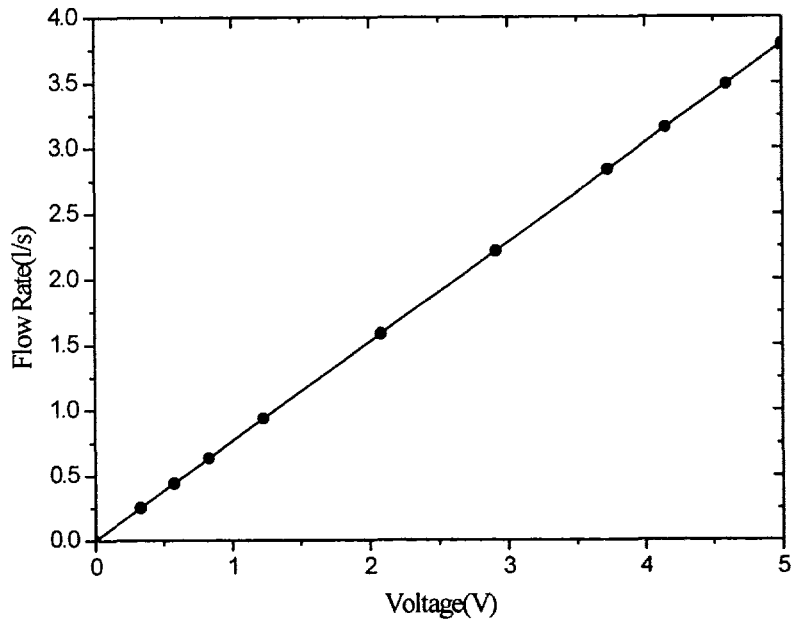


그림 2.1.5 터빈유량계 보정곡선(1 in.).

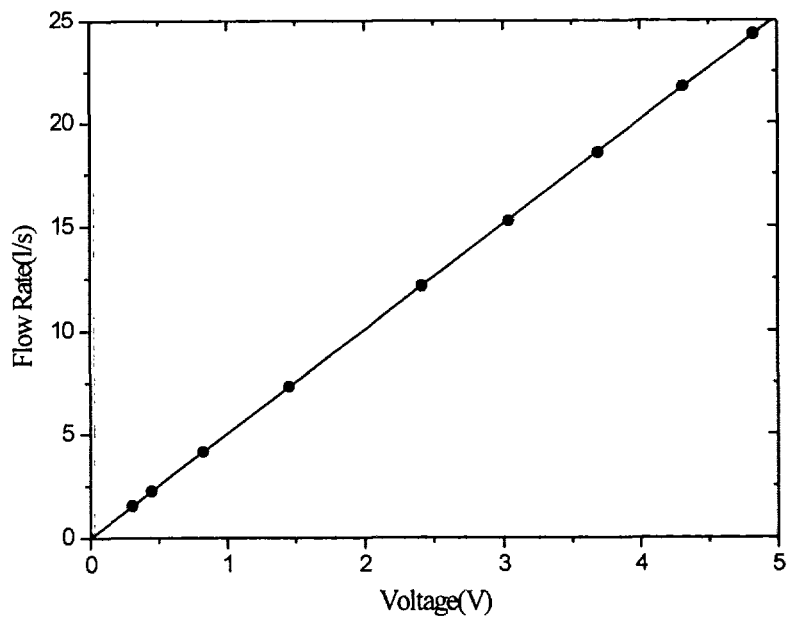


그림 2.1.6 터빈유량계 보정곡선(2.5 in.).

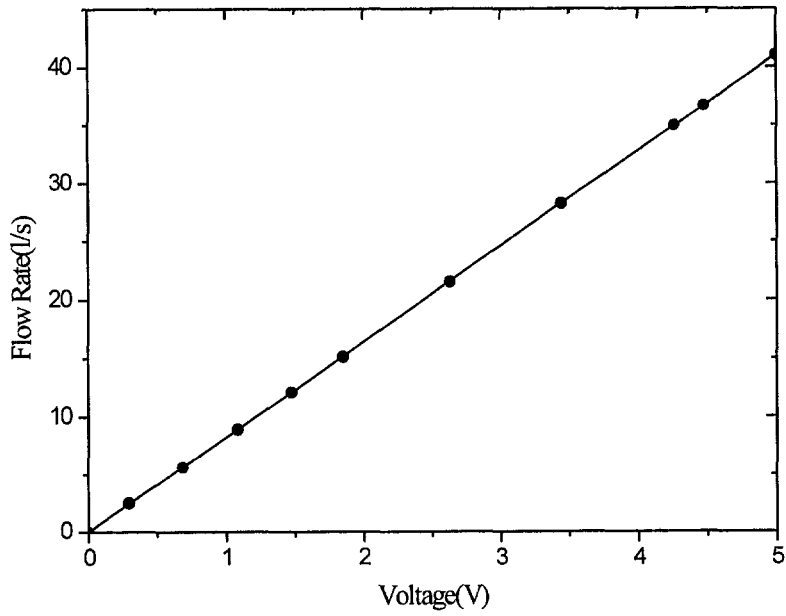


그림 2.1.7 터빈유량계 보정 곡선(3 in.).

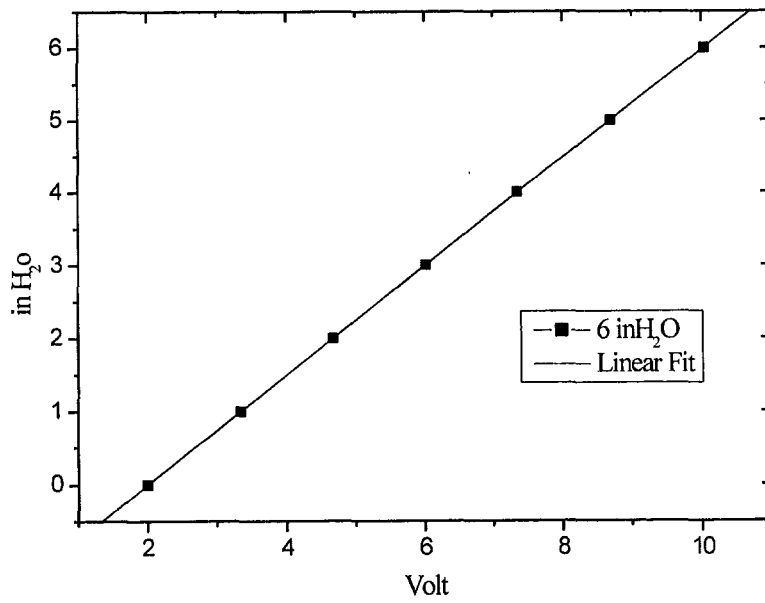


그림 2.1.8 DP-meter 6-O-2(Re)의 보정곡선.

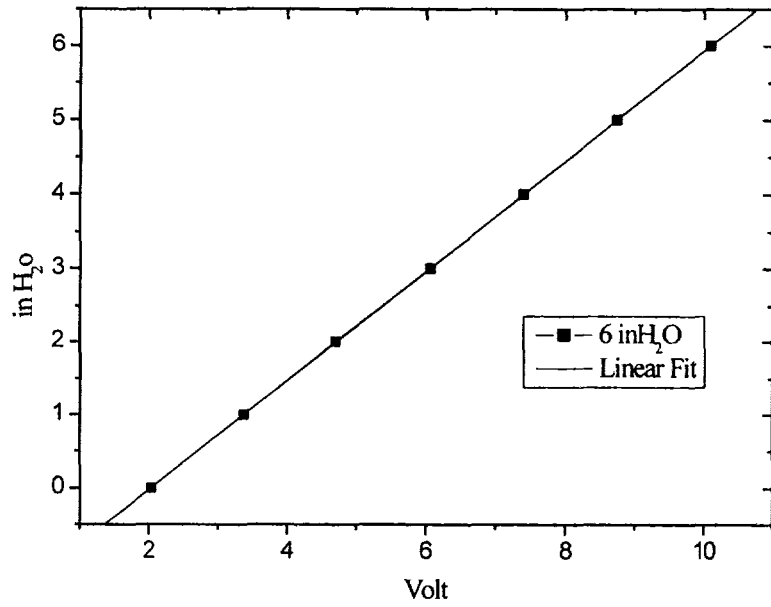


그림 2.1.9 DP-meter 6-O-1의 보정곡선.

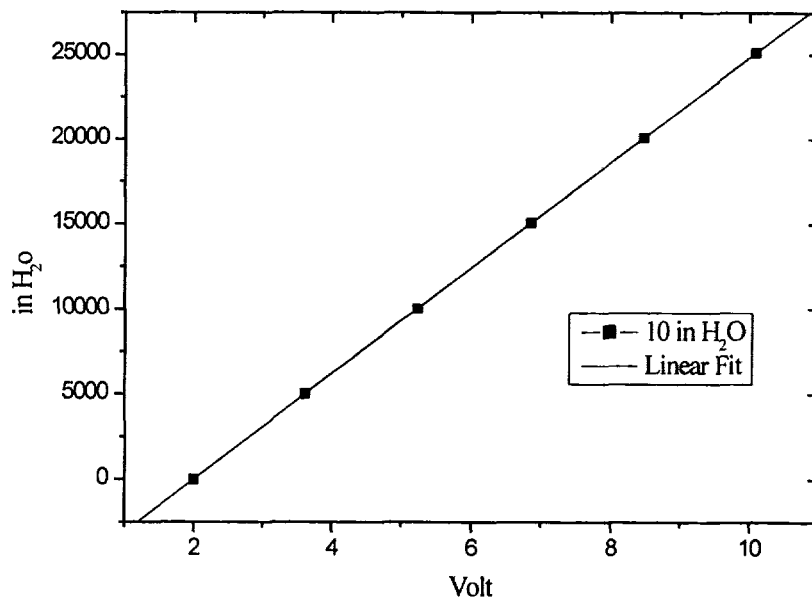


그림 2.1.10 DP-meter 10-R-1(Re)의 보정곡선.

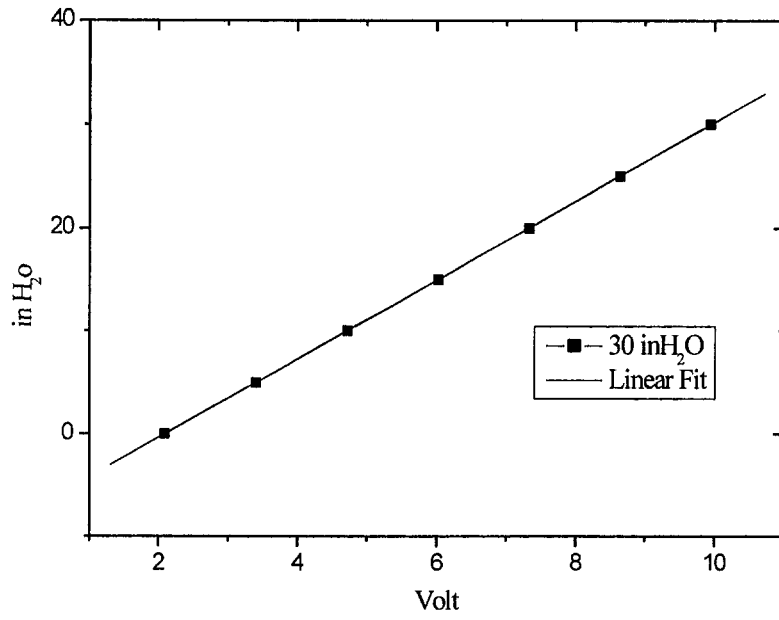


그림 2.1.11 DP-meter 30-O-1의 보정곡선.

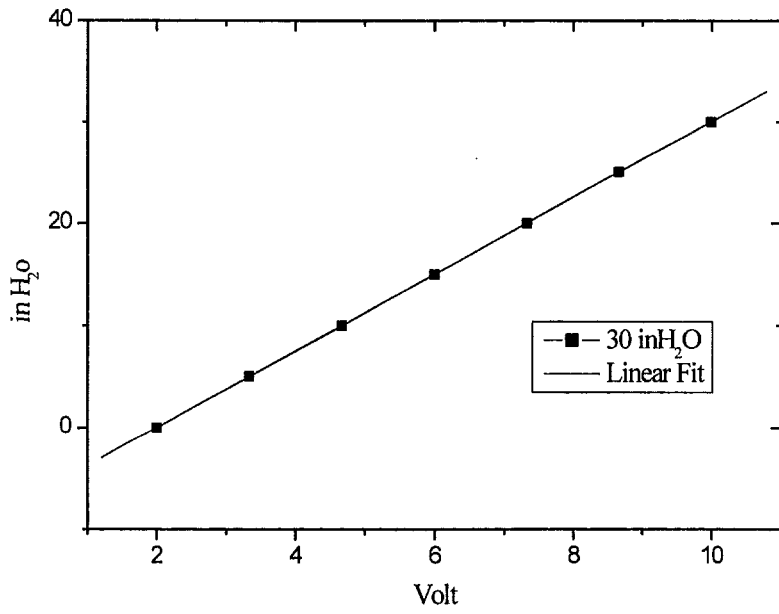


그림 2.1.12 DP-meter 30-O-2의 보정곡선.



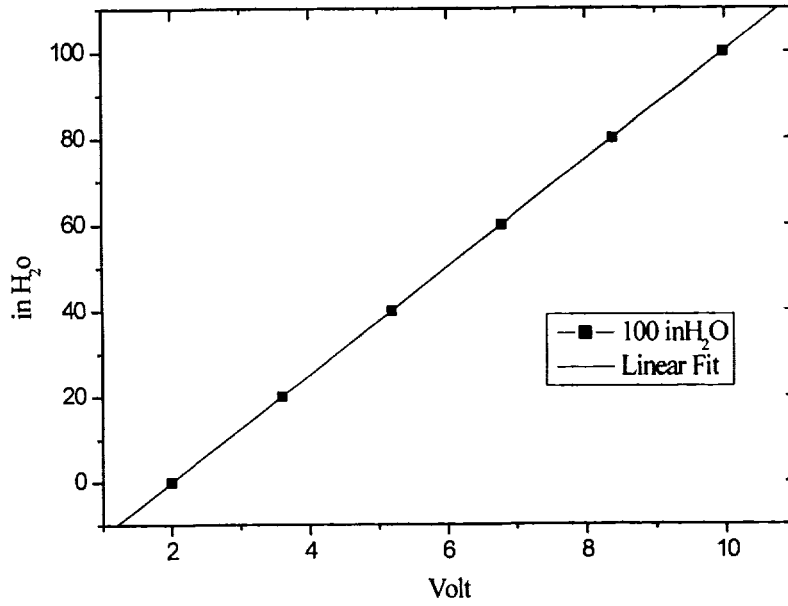


그림 2.1.13 DP-meter 100-R-1의 보정곡선.

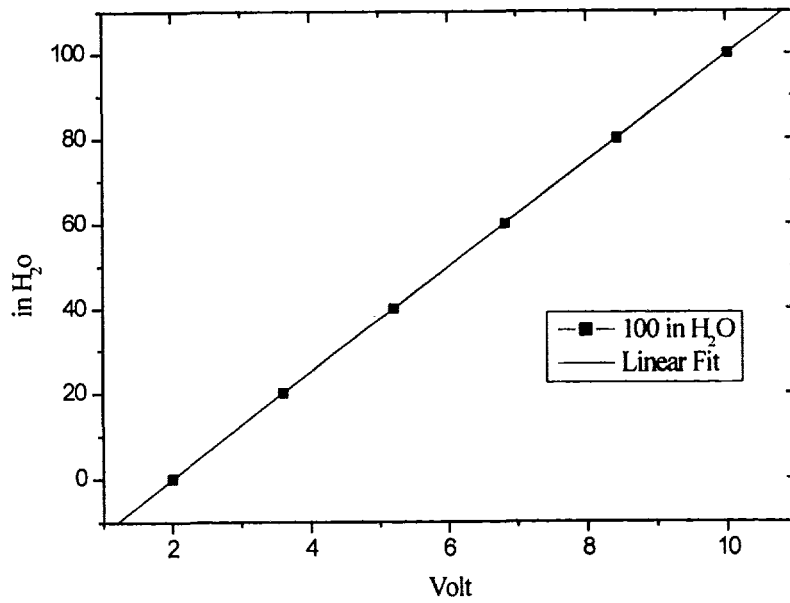


그림 2.1.14 DP-meter 150-R-1의 보정곡선.

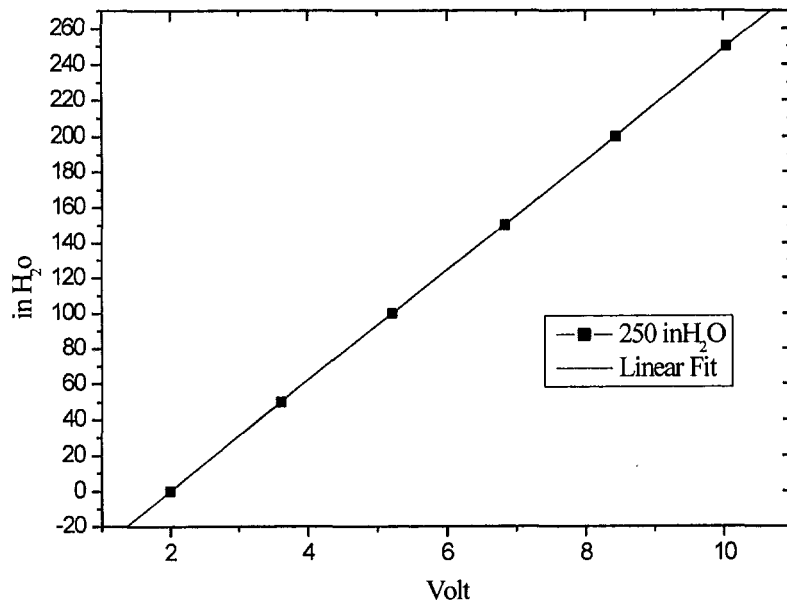


그림 2.1.15 DP-meter 250-R-1의 보정곡선.

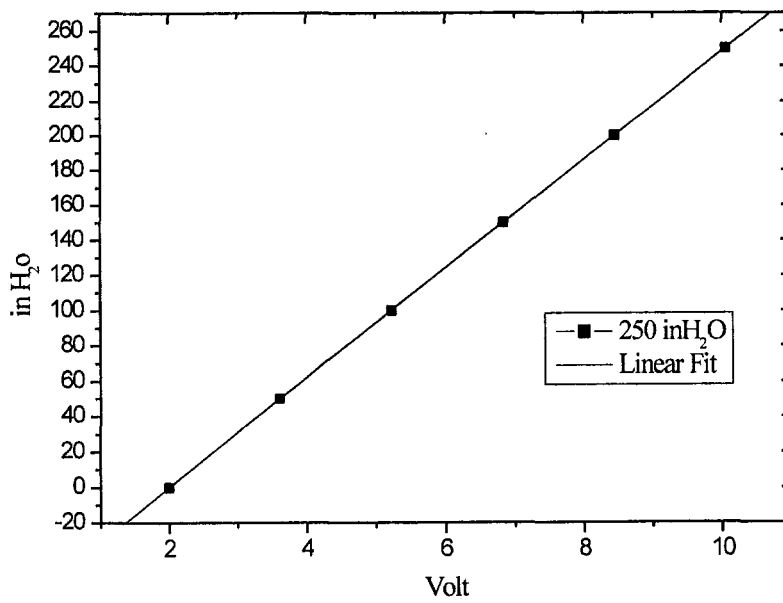


그림 2.1.16 DP-meter 250-R-2의 보정곡선.

표 2.1.1 측정에 사용된 유량계 보정곡선.

Flow Meter	Calibration Curve
F1(3 in)	$Q = 0.00303 + 0.75865*E$
F2(2.5 in)	$Q = -0.01135 + 5.03767*E$
F3(1 in)	$Q = 0.0217 + 8.19017*E$

표 2.1.2 측정에 사용된 차압계 보정곡선.

DP-Meter	Calibration Curve
6-O-2(RE)	$P = -1.49386 + 0.74683*E$
6-O-1	$P = -1.51089 + 0.74444*E$
10-R-1(RE)	$P = -2.46796 + 1.2354*E$
30-O-1	$P = -7.99963 + 3.81918E$
30-O-2	$P = -7.5327 + 3.75536*E$
100-R-1	$P = -25.0765 + 12.52841*E$
150-O-1	$P = -24.93018 + 12.44998*E$
250-R-1	$P = -61.99326 + 31.0388*E$
250-R-2	$P = -61.98992 + 31.00308*E$

표 2.1.3 DP 측정지점 및 측정거리(정삼각배열)

시험부	DP 측정지점	유입부	중심부	유출부
30°	Tube No.	1-8	8-19	19-23
	측정거리	246.4mm	387.2mm	105.6mm
45°	Tube No.	1-8	8-19	19-23
	측정거리	174.23mm	273.79mm	74.67mm
60°	Tube No.	1-8	8-19	19-23
	측정거리	142.26mm	223.55mm	60.97mm
75°	Tube No.	1-8	8-19	19-23
	측정거리	127.55mm	200.43mm	54.66mm
90°	Tube No.	1-8	8-19	19-23
	측정거리	123.2mm	193.6mm	52.80mm

표 2.1.4 DP 측정지점 및 측정거리(회전정삼각배열)

시험부	DP 측정지점	유입부	중심부	유출부
30°	Tube No.	1-14	14-34	34-42
	측정거리	284.2mm	406.9mm	161.5mm
45°	Tube No.	1-14	14-34	34-42
	측정거리	201.0mm	287.1mm	113.8mm
60°	Tube No.	1-14	14-34	34-42
	측정거리.	164.1mm	235.0mm	93.2mm
75°	Tube No.	1-14	14-34	34-42
	측정거리	147.1mm	210.2mm	84.1mm
90°	Tube No.	1-16	16-32	32-42
	측정거리	162.4mm	162.4mm	101.5mm

#### 다. 실험 결과

##### (1) 불확실성 해석(Uncertainty Analysis)

##### (가) 불확실성 해석의 목적 및 범위

불확실성 해석의 목적은 각각의 측정에 대한 불확실성을 예측하는 것 뿐만 아니라 측정의 불확실성이 최종결과에 미치는 영향에 관한 타당한 평가를 통하여 각 오차 요인에 따른 불확실성을 감소시키기 위한 것이다. 여기에서는 본 실험에 대한 불확실성 해석을 수행함으로써  $Re$ 와  $C$ 값의 불확실성을 예측하여 측정의 불확실성이 최종 결과에 미치는 영향을 평가하고 각 오차요인에 따른 불확실성을 감소시키고자 한다.

실험결과에 대한 불확실성 해석은 ASME 코드 PTC-19.1[2.1.31]에 따라 수행하였다. 이 규격은 각각의 측정에서 불규칙적으로 생기는 오차와 항상 일정한 값으로 생기는 오차(fixed error)의 양자로부터 기인하는 불확실성과 이들 오차의 최종 결과의 불확실성으로의 전파를 평가하는 절차에 대하여 기술하고 있다. 계측의 불확실성 해석에 의하여 최종적으로 얻어지는 것은 계측에 있어서의 우연오차(precision error)와 편향오차(bias error)의 상한값 및 양자의 결합에 기인하는 불확실성의 상한값에 대한 수

치적인 추정값이다.

(나) 측정오차

모든 측정에는 오차가 동반되며 이들 오차는 측정값(measured value)과 참값(true value)과의 차로 정의된다. 어떠한 측정에서도 편향오차(bias error)  $\beta$ 와 우연오차(random precision error)  $\epsilon_k$ 가 발생할 가능성이 있게 되며 따라서 전오차(total error)  $\delta_k$ 는 이 양자의 합으로 나타난다.

$$\delta_k = \beta + \epsilon_k \quad (2.1.5)$$

(다) 우연오차(precision error, random error)

일반적으로 존재하는 수많은 오차요인 때문에 반복적으로 측정한 값이 서로 일치하리라 기대할 수 없다. 우연오차는(precision error) 바로 이 반복 측정시 관측되는 오차로 랜덤오차(random error)로도 부른다. 예를 들어서 표준편차  $\sigma$ 는 우연오차  $\epsilon_k$ 의 확률분포에서 하나의 지표가 된다. 오차가 정규분포(normal distribution)인 경우 모평균(population average)을  $\mu$ 라 할 때 구간  $\mu \pm 2\sigma$ 는 측정값 전체 산포(scatter)의 약 95%를 포함하게 된다. 여기에서의 불확실성의 우연오차에 기초한 성분의 상한 추정값을 바로 이 95%의 신뢰도에 대한 상한값으로 사용한다. 이 95% 신뢰도는 일반적이고 전통적으로 채택되는 다양한 기준에 채용되어 온 것이다. 이 표준편차가 크다는 것은 측정값의 이산화는 크다는 것을 의미한다. 표준편차를 추정하기 위해서 사용하는 통계량 S를 정밀도(precision index)라 부르며 다음과 같이 정의한다.

$$S = \left[ \sum_{k=1}^N \frac{(X_k - \bar{X})^2}{N-1} \right]^{1/2} = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N X_k^2 - \left( \sum_{k=1}^N X_k \right)^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (2.1.6)$$

여기에서 N은 측정회수,  $\bar{X}$ 는 측정값  $X_k$ 의 평균값(시료평균)으로서 다음과 같다.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k \quad (2.1.7)$$

이 우연오차를 감소시키려면 측정 대상이 되는 각 물리량에 대한 개별적인 측정값을 사용하는 대신에 여러 측정값들의 평균값을 사용하는 것이 바람직한데 이 경우 평균값  $\bar{X}$ 의 정밀도는 다음과 같다.

$$S_{\bar{X}} = \frac{S}{\sqrt{N}} \quad (2.1.8)$$

랜덤오차(random error)라고도 하고 정밀도 S와 관계된다. 편향오차는 시험기간동안 변화가 없는 시스템 오차이다. 어떠한 주어진 시료는 동일한 기법과 환경조건 아래에서 동일한 편향오차를 포함하게 되는데 이는 정확도 B와 관계된다. 오차가 정규분포를 하는 경우에 모평균을  $\mu$ 라 할 때 구간  $\mu \pm 2\sigma$ 는 측정값의 전체 산포(scatter)의 95%를 포함하게 된다. 평균과 표준편차를 추정하기 위한 정밀도 지표(precision index) S는 다음과 같이 정의된다.

$$S = \left[ \frac{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (2.1.9)$$

여기에서  $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k$ 는 측정값  $X_k$ 의 평균값이고, 본 실험에서는 측정회수 N은 200개를 사용하였다. 여기에서 불확실성 해석의 대상은 레이놀즈수,  $Re$ 와 압력손실계수(pressure-loss coefficients) C이며 다음과 같이 정의된다.

$$Re = \frac{\rho DU}{\mu} = \frac{\rho DQ}{\mu HW} \quad (2.1.10)$$

$$C = \frac{2\Delta P D H^2 W^2}{\rho N Q^2 S_L} \sin \theta \quad (2.1.11)$$

여기에서  $U$ 는 관이 점유하고 있는 면적을 무시하고 계산한 유동면적에 기초한 속도를 나타내며 다음과 같이 나타낸다.

$$U = f(H, W, Q) = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{HW} \quad (2.1.12)$$

이 불확실성해석에서는 계측기의 오차, 시험체의 형상오차, 그리고 데이터 수집오차만을 고려한다.(표 2.1.5, 표 2.1.6, 표 2.1.7.)

표 2.1.5는 계측기의 각 모델에 따른 편향오차를 나타낸 것이다. 각 파라미터들이 레이놀즈 수와 유동마찰계수에 전파하여 미치는 영향을 살펴보기 위하여 다음과 같이 상대정밀도와 상대정확도를 구한다. 결과  $r$ 이 다음과 같은 독립 parameter의 함수라 할 때

$$r = f(\bar{P}_1, \bar{P}_2, \dots, \bar{P}_j) \quad (2.1.13)$$

상대정확도와 상대정밀도는 각각 다음과 같다.

$$\frac{B_r}{r} = \left[ \sum_{i=1}^j \left( \theta_i' \frac{B_{\bar{P}_i}}{\bar{P}_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1.14)$$

$$\frac{S_r}{r} = \left[ \sum_{i=1}^j \left( \theta_i' \frac{S_{\bar{P}_i}}{\bar{P}_i} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1.15)$$

여기서 상대감도계수(relative sensitivity coefficient)  $\theta_i'$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\theta_i' = \frac{\partial r / r}{\partial \bar{P}_i / \bar{P}_i} \quad (2.1.16)$$

이상과 같은 정의에 의하여 레이놀즈 수와 유동손실계수에 따른 상대정확도와 상대정밀도는 다음의 절차에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{B_{Re}}{Re} = & \left[ \left( \frac{\partial Re}{\partial \rho} \frac{\rho}{Re} \frac{B_\rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial \mu} \frac{\mu}{Re} \frac{B_\mu}{\mu} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial Q} \frac{Q}{Re} \frac{B_Q}{Q} \right)^2 + \right. \\ & \left. \left( \frac{\partial Re}{\partial D} \frac{D}{Re} \frac{B_D}{D} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial W} \frac{W}{Re} \frac{B_W}{W} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial H} \frac{H}{Re} \frac{B_H}{H} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1.17) \end{aligned}$$

$$\frac{S_{Re}}{Re} = \left[ \left( \frac{\partial Re}{\partial \rho} \frac{\rho}{Re} \frac{S_{\bar{\rho}}}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial \mu} \frac{\mu}{Re} \frac{S_{\bar{\mu}}}{\mu} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial Q} \frac{Q}{Re} \frac{S_{\bar{Q}}}{Q} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{\partial Re}{\partial D} \frac{D}{Re} \frac{S_{\bar{D}}}{D} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial W} \frac{W}{Re} \frac{S_{\bar{W}}}{W} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial H} \frac{H}{Re} \frac{S_{\bar{H}}}{H} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.18)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \rho} = \frac{Re}{\rho}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \mu} = -\frac{Re}{\mu}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial Q} = \frac{Re}{Q}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial D} = \frac{Re}{D} \quad (2.1.19)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial W} = -\frac{Re}{W}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial H} = -\frac{Re}{H}$$

$$\frac{B_C}{C} = \left[ \left( \frac{\partial C}{\partial \Delta P} \frac{\Delta P}{C} \frac{B_{\bar{\Delta P}}}{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \rho} \frac{\rho}{C} \frac{B_{\bar{\rho}}}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial Q} \frac{Q}{C} \frac{B_{\bar{Q}}}{Q} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{\partial C}{\partial D} \frac{D}{C} \frac{B_{\bar{D}}}{D} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial W} \frac{W}{C} \frac{B_{\bar{W}}}{W} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial H} \frac{H}{C} \frac{B_{\bar{H}}}{H} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{\partial C}{\partial S_L} \frac{S_L}{C} \frac{B_{\bar{S}_L}}{S_L} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \theta} \frac{\theta}{C} \frac{B_{\bar{\theta}}}{\theta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.20)$$

$$\frac{S_C}{C} = \left[ \left( \frac{\partial C}{\partial \Delta P} \frac{\Delta P}{C} \frac{S_{\bar{\Delta P}}}{\Delta P} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \rho} \frac{\rho}{C} \frac{S_{\bar{\rho}}}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial Q} \frac{Q}{C} \frac{S_{\bar{Q}}}{Q} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{\partial C}{\partial D} \frac{D}{C} \frac{S_{\bar{D}}}{D} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial W} \frac{W}{C} \frac{S_{\bar{W}}}{W} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial H} \frac{H}{C} \frac{S_{\bar{H}}}{H} \right)^2 + \right. \\ \left. \left( \frac{\partial C}{\partial S_L} \frac{S_L}{C} \frac{S_{\bar{S}_L}}{S_L} \right)^2 + \left( \frac{\partial C}{\partial \theta} \frac{\theta}{C} \frac{S_{\bar{\theta}}}{\theta} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1.21)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \Delta P} = \frac{C}{\Delta P}$$

$$\frac{\partial C}{\partial \rho} = -\frac{C}{\rho}$$



$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial Q} &= -2 \frac{C}{Q} \\ \frac{\partial C}{\partial D} &= \frac{C}{D} \\ \frac{\partial C}{\partial W} &= 2 \frac{C}{W} \\ \frac{\partial C}{\partial H} &= 2 \frac{C}{H} \\ \frac{\partial C}{\partial S_L} &= -\frac{C}{S_L} \\ \frac{\partial C}{\partial \theta} &= C \frac{\cos \theta}{\sin \theta} \end{aligned} \quad (2.1.22)$$

## (2) 실험자료 평가

이상에서 구한 결과를 이용하여 레이놀즈 수와 유동마찰계수의 불확실성을 평가하기 위하여 공학에서 가장 많이 사용되는  $U_{RSS}$  모델 (root-sum-square model)이 사용되었고, 신뢰도 95%의 포괄도를 가지고,  $t$ 는 대칭인 스튜던트  $t$  분포(two-tailed student  $t$  distribution)를 따르며 95%에 해당하는 값으로, 자유도( $\nu$ )가  $\nu \geq 30$  이면 2로 근사한다.

$$Re : \quad \frac{U_{RSS}}{Re} = \left[ \left( \frac{B}{Re} \right)^2 + \left( t \frac{S}{Re} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1.23)$$

$$C : \quad \frac{U_{RSS}}{C} = \left[ \left( \frac{B}{C} \right)^2 + \left( t \frac{S}{C} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.1.24)$$

표 2.1.8과 표 2.1.9는 레이놀즈 수와 유동마찰계수의 불확실성 평가결과를 나타낸 것이다.

표 2.1.5 실험에 사용된 계측기 오차

	모델명	편향오차
DP-Meter	6 inH <sub>2</sub> O OMEGA	2 %
	6 inH <sub>2</sub> O OMEGA	2 %
	10 inH <sub>2</sub> O ROSEMOUNT	2 %
	30 inH <sub>2</sub> O OMEGA	2 %
	30 inH <sub>2</sub> O OMEGA	2 %
	100 inH <sub>2</sub> O ROSEMOUNT	2 %
	150 inH <sub>2</sub> O OMEGA	2 %
	250 inH <sub>2</sub> O ROSEMOUNT	2 %
	250 inH <sub>2</sub> O ROSEMOUNT	2 %
Flow Meter	FTB-111+FLSC-28	0.5 %
	FTB-110+FLSC-28	0.5 %
	FTB-106+FLSC-28	0.5 %
Thermocouple	JQSS-18G-12(J type)	max(2.2°C, 0.75%)

표 2.1.6 시험부 제작 오차(정삼각배열)

시험부 구성요소	Dimension	오차
Duct 높이(H)	203.2mm	0.01mm
Duct 폭 (W)	122.0mm	0.01mm
Duct 길이	1600mm	0.01mm
Tube 직경 (d)	12.7mm	0.01mm

표 2.1.7 시험부 제작 오차(회전 정삼각배열)

시험부 구성요소	Dimension	오차
Duct 높이(H)	203.2mm	0.01mm
Duct 폭 (W)	140.7mm	0.01mm
Duct 길이	1600mm	0.01mm
Tube 직경 (d)	12.7mm	0.01mm

표 2.1.8 불확실성 평가(정삼각배열)

	B	$S_{\bar{x}}$	$U_{RSS}$
Re	0.50	0.15	$\pm 0.58 \%$
C	2.23	0.29	$\pm 2.31 \%$

표 2.1.9 불확실성 평가(회전 정삼각배열)

	B	$S_{\bar{x}}$	$U_{RSS}$
Re	0.01833	0.412864	$\pm 6.3420125$
C	1.007923	1.51651	$\pm 3.238079$

### (3) 실험결과 분석

수력학적 저항은 열교환기에서 가장 중요한 특성 중 하나이며 관다발을 지나는 유동에서 총 압력강하에 의하여 특성 지워진다. 알려진 대로 관다발을 지나는 총 압력강하는 유동속도와 관다발 배열 그리고 유체의 물리적 특성의 함수이다. 일정한 밀도와 점성을 갖는 유체에서 관다발의

저항은 다음과 같은 함수관계식으로 표현된다.

$$\Delta p = f(u, S_1, S_2, D, N, \mu, \rho) \quad (2.1.25)$$

이 관계식의 무차원 형태는 다음과 같이 표현된다.

$$Eu = \phi(Re, s_1/D, s_2/D, N) \quad (2.1.26)$$

혹은 지수 형태로

$$Eu = kRe^r N \quad (2.1.27)$$

여기에서  $u$ 는 특성 속도로서 자유유동속도 또는 최소 유로 단면적에서의 최대속도가 되며,  $S_1, S_2, D$ 는 각각 횡방향 및 종방향에서의 피치와 특성길이인데 관의 직경이나 수력직경으로 나타나는 길이 척도(length scale)이다. 무차원수  $Eu$ 는 Euler 수로서 보통 마찰계수 또는 유동손실계수의 항으로 나타난다. 이상에서 알 수 있듯이 열전달이 없는 동온유동(isothermal flow)에서의 압력강하(pressure drop) 또는 압력손실(pressure loss)은 레이놀즈 수  $Re$ 와 기하학적 변수만의 함수가 된다. 따라서 관다발을 지나는 유동에서 압력강하에 대한 상관관계식은 주로 식(2.1.27)의 변형된 형태로 나타나게 된다.

그림 2.1.17-2.1.31은 정삼각배열에서의 각 경사각에 대하여 유입부, 중심부 그리고 유출부에서의 압력강하를 레이놀즈 수에 대하여 도시한 것이며, 그림 2.1.32-2.1.46은 회전정삼각배열에서의 결과를 나타낸 것이다. 두 경우 모두 유출구에서의 경우를 제외하면 레이놀즈수와 압력강하가 선형적인 관계에 있다는 것을 알 수가 있다. 전자는 레이놀즈 수의 범위를 확장시키기 위하여 작동유체의 온도를 상승시켰기 때문에 두 곡선은 마치 평행이동한 것처럼 일정한 변이를 보여주고 있다. 그러나 후자 즉 회전정삼각배열의 경우는 두 가지 실험결과가 모두 겹치는 것을 볼 수 있는데

이는 두 실험에 사용한 작동유체의 온도가 거의 일정하기 때문이다. 따라서 압력강하를 무차원 변수인 압력손실계수나 마찰계수 등으로 나타낸다면 식 2.1.27에서 예상한 바와 같이 동일한 곡선으로 나타낼 수 있을 것으로 생각된다. 두 경우 공통적으로 유출구에서는 레이놀즈 수가 증가함에 따라 곡선이 선형을 유지하지 못하는 것을 볼 수 있는데 이는 출구의 배압에 의한 효과로 생각되며, 이를 규명하기 위해서는 유동속도의 측정이나 유동가시화에 의한 상세 유동장을 관찰해보는 것이 필요하다고 생각된다. 본 측정 결과를 판다발 내에서의 유동에 대한 기존의 많은 상관식 중 Idel'chik[2.1.21]과 ESDU79034[2.1.20]의 상관식과 비교하였다. 그림 2.1.47은 다음과 같은 Idel'chik의 상관식과의 비교를 나타낸 것이다.

$$f = \Psi \left[ 3.2 + 0.66 \left( 1.7 - \frac{(S_1 - d_h)}{(S_2 - d_h)} \right) \right] Re_m^{-0.27} (N+1)/N \quad (2.1.28)$$

여기에서  $Re_m = \frac{\rho U_m d_h}{\mu}$ ,  $S_1, S_2$  및  $S_1'$ 는 각각 횡방향 피치(transverse pitch), 종방향 피치(longitudinal pitch) 그리고 대각방향의 피치(diagonal pitch)를 나타낸다. 그리고  $N$ 은 관 열의 수를 나타낸다.  $\Psi$ 는 경사각에 대한 보정값으로 90, 60, 45, 30도에 대하여 각각 1, 0.8, 0.57 그리고 0.34이다. 이 상관식은 경사각 90도에서의 마찰계수를 기준으로 하여 각에 따른 보정을 해주고 있는데 각도에 따른 상수인 보정값은 레이놀즈 수에 따른 변화를 반영해 주고 있지 못하다는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구결과와 비교했을 때 90도를 제외한 곳에서 상당한 값의 차이를 보여주고 있다. 따라서 이 상관식의 각도에 따른 보정값을 수정해 주어야 함을 알 수 있다. Idel'chik 상관식은 경사각의 영향을 고려한 일반적이고도 단순한 식이다. 이 식을 본 연구의 결과와 비교하면 경사각이 감소할수록 큰 차이를 보여준다. 앞에서 언급했듯이 순수 횡유동의 경우 본 실험결과와 매우 잘 일치하였다. 따라서 경사각에 대한 보정값을 수정한다면 그 식은 더욱 정확해지고 유용해질 것이다. 본 실험결과를 사용하여 수정한 보정인자는 표 2.1.10과 같다. 수정된 상관관계식은 모든 경사각에 대하여 10%이내로 더욱

표 2.1.10 보정인자(정삼각배열),  $\psi$

경사각	기존	수정
90	1	1
60	0.8	0.87
45	0.57	0.7
30	0.34	0.4

표 2.1.11 보정인자(회전 정삼각배열),  $\psi$

경사각	기존	수정
90	1	1
60	0.8	0.87
45	0.57	0.7
30	0.34	0.4

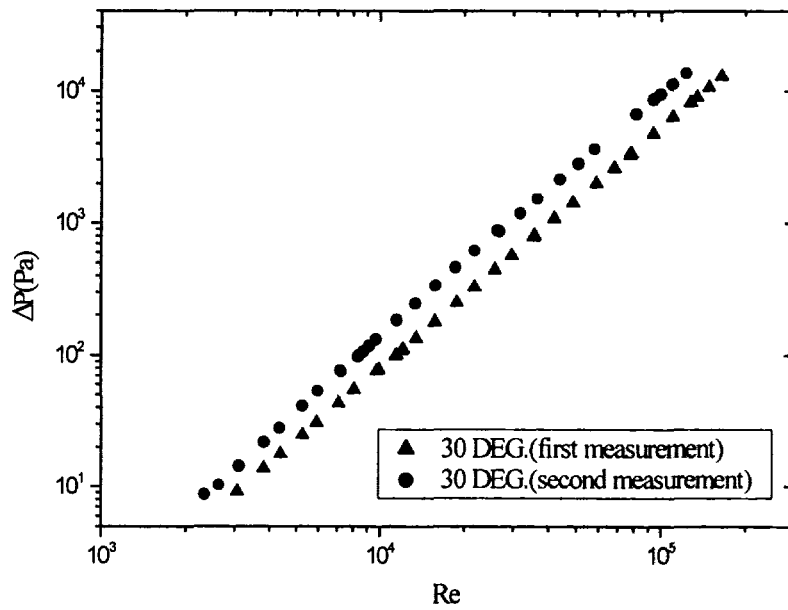


그림 2.1.17 30도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (정삼각).

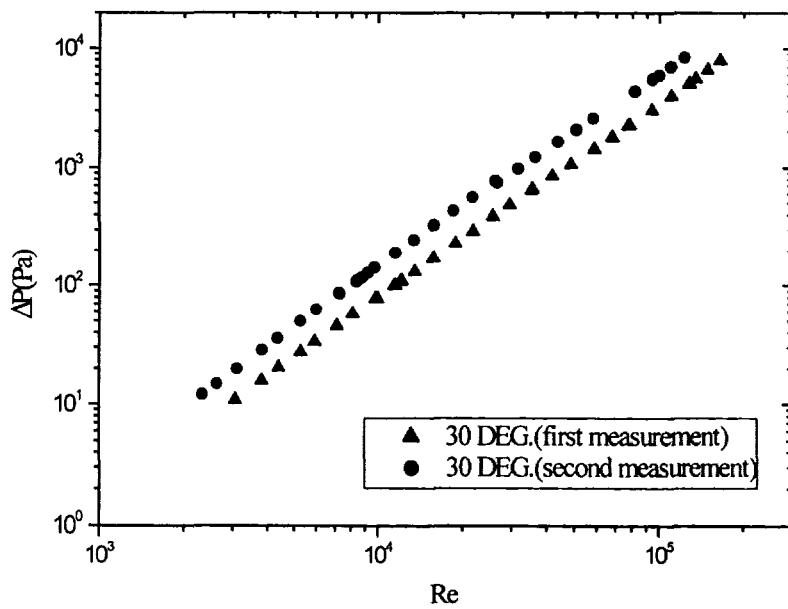


그림 2.1.18 30도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (정삼각).

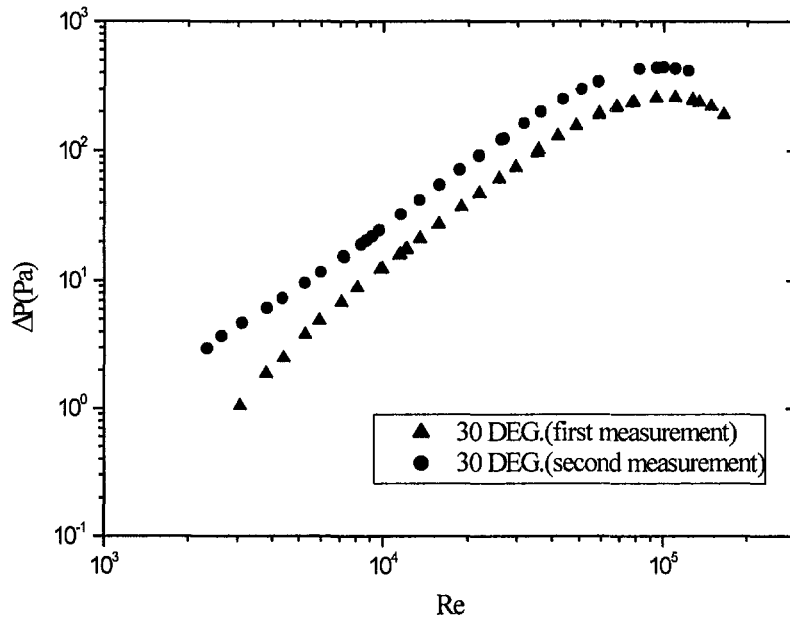


그림 2.1.19 30도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (정삼각).

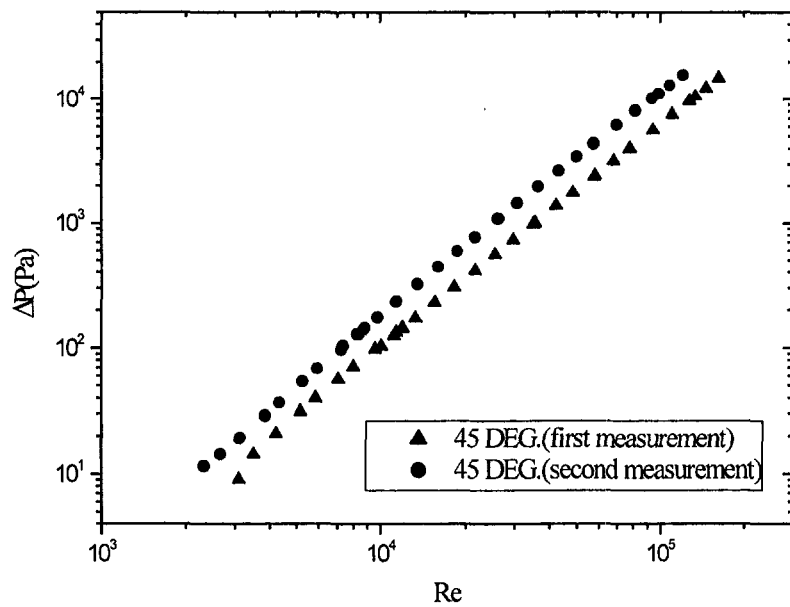


그림 2.1.20 45도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (정삼각).



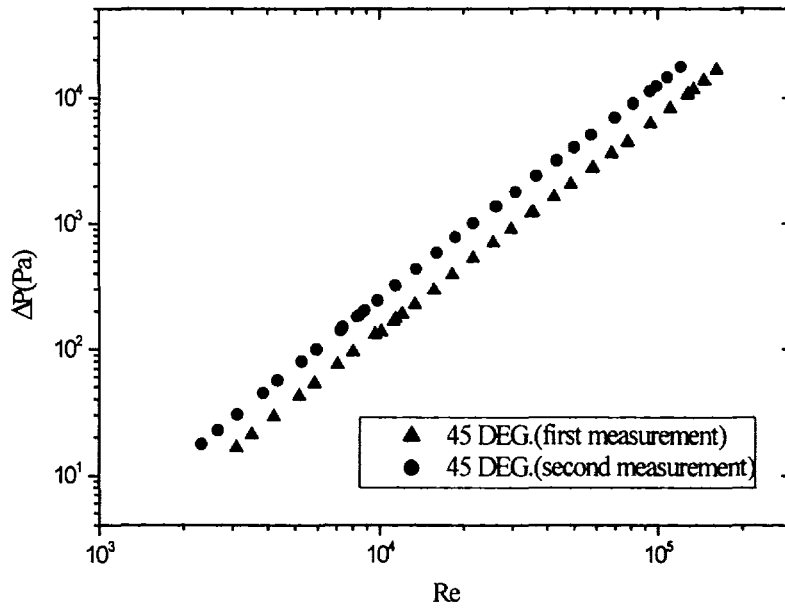


그림 2.1.21 45도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (정삼각).

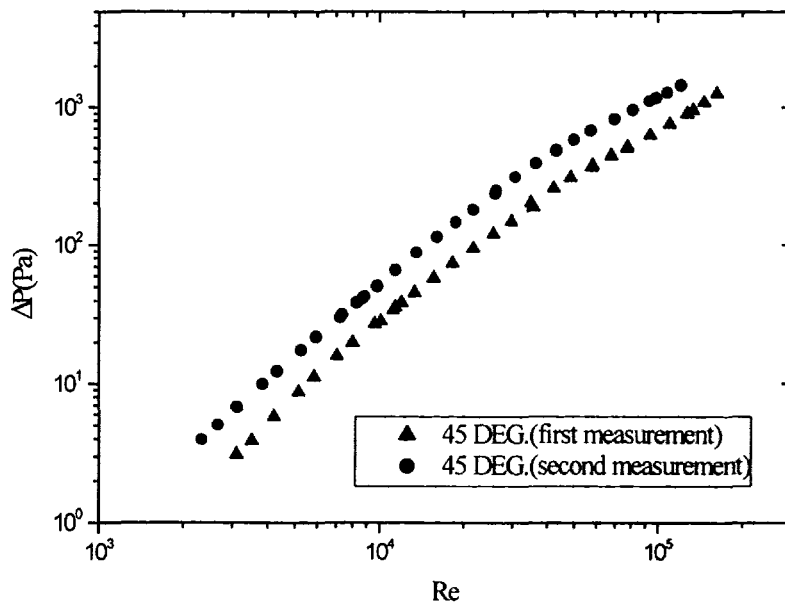


그림 2.1.22 45도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (정삼각).

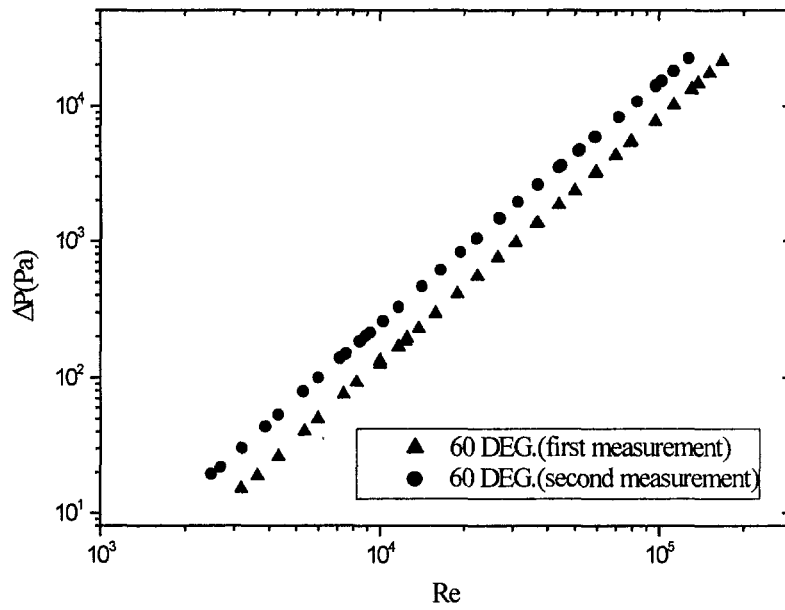


그림 2.1.23 60도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (정삼각)

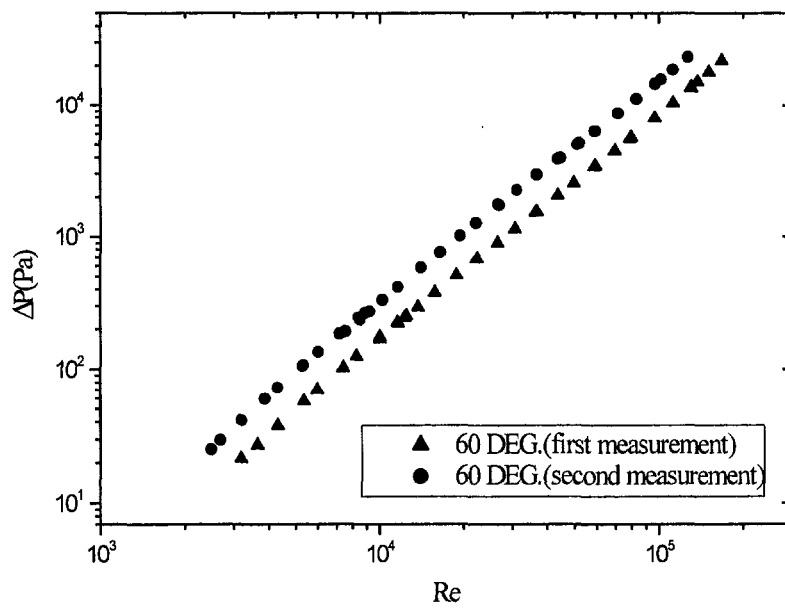


그림 2.1.24 60도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (정삼각).

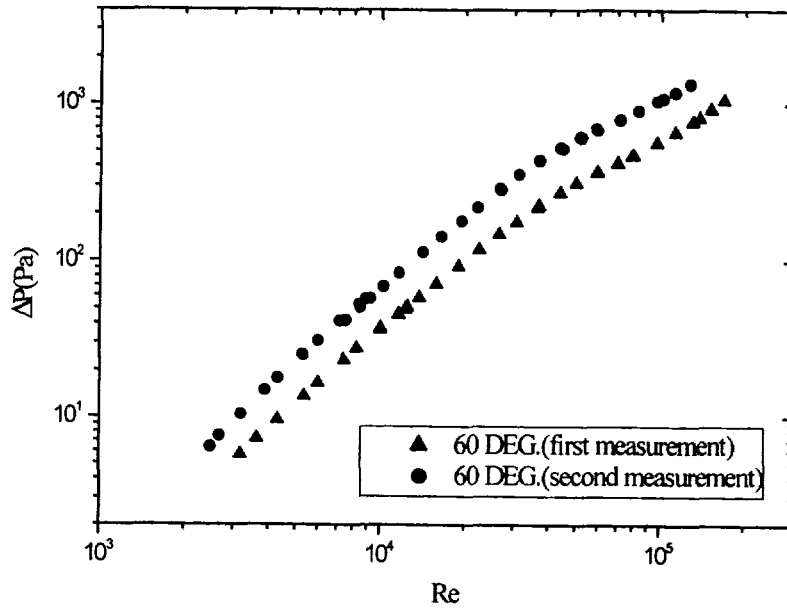


그림 2.1.25 60도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (정삼각).

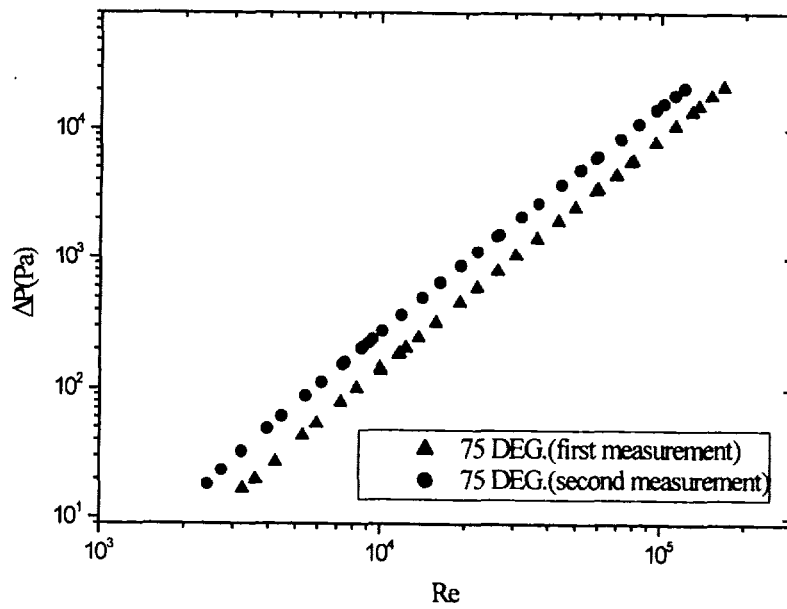


그림 2.1.26 75도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (정삼각).

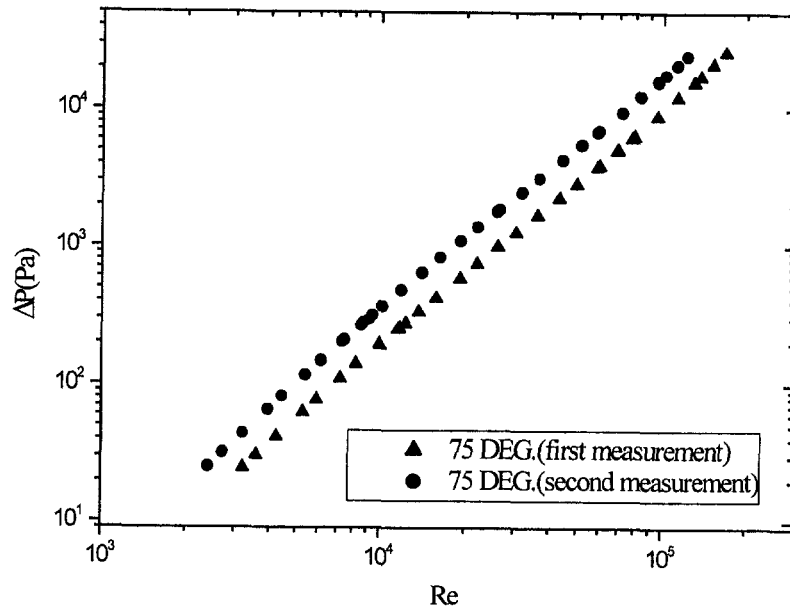


그림 2.1.27 75도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (정삼각).

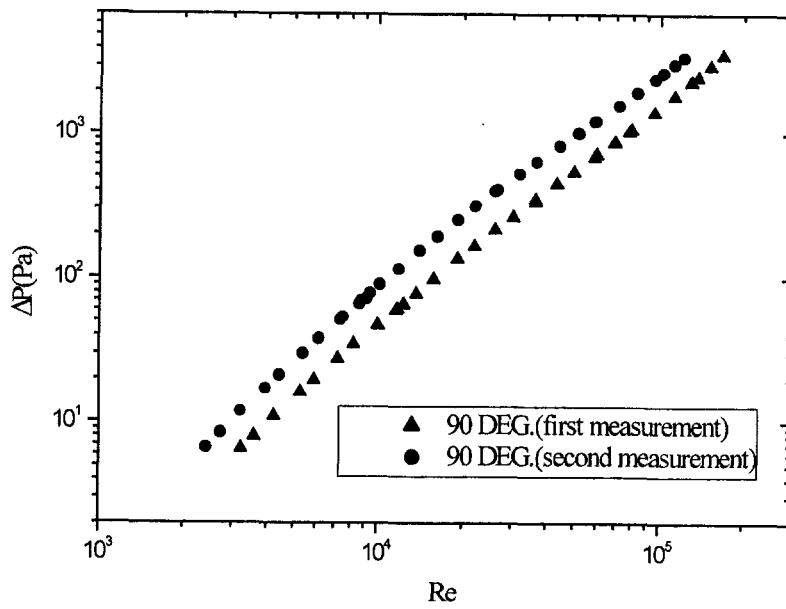


그림 2.1.28 75도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (정삼각).

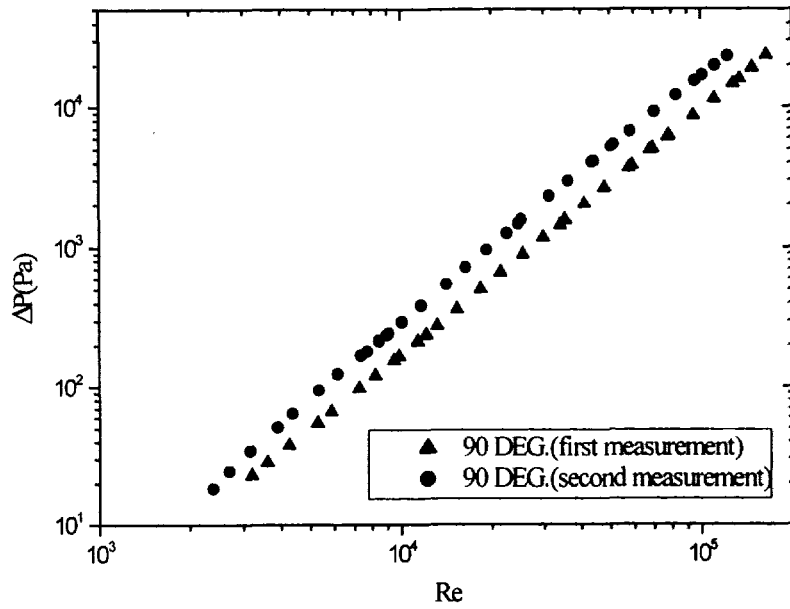


그림 2.1.29 90도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (정삼각).

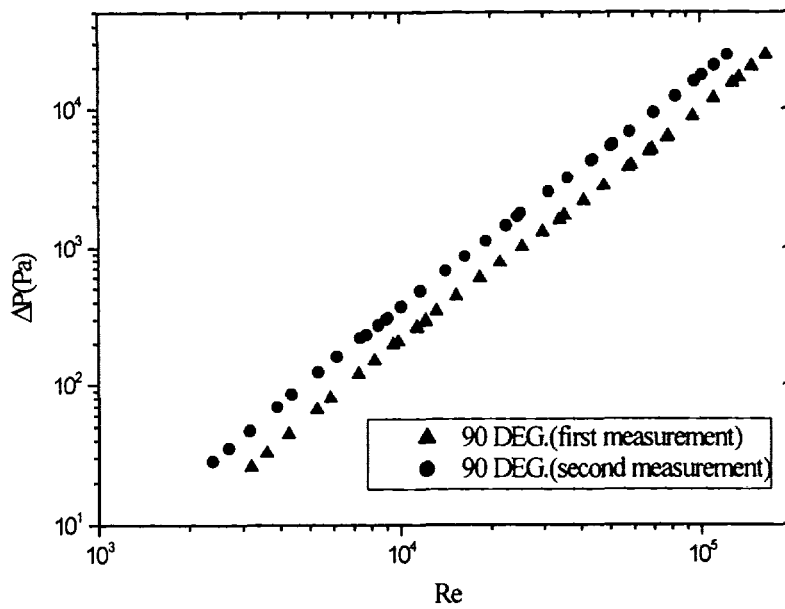


그림 2.1.30 90도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (정삼각).

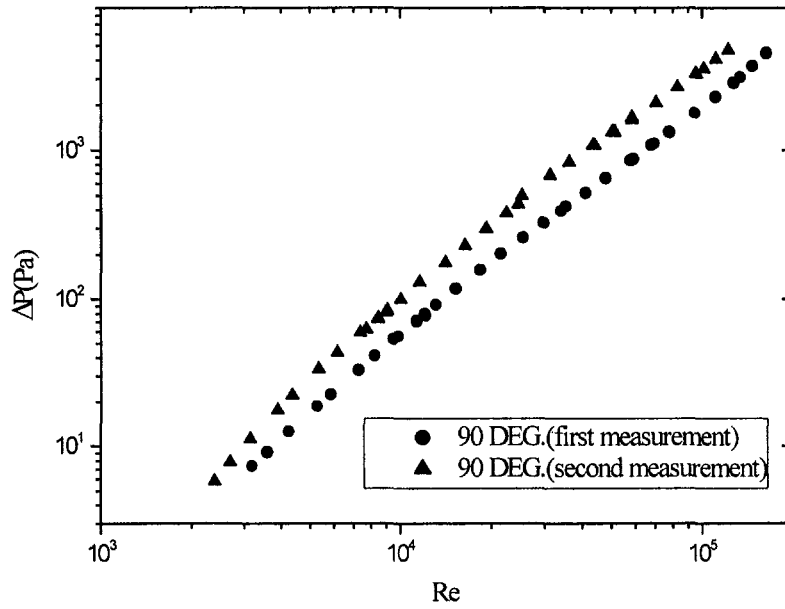


그림 2.1.31 90도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (정삼각).

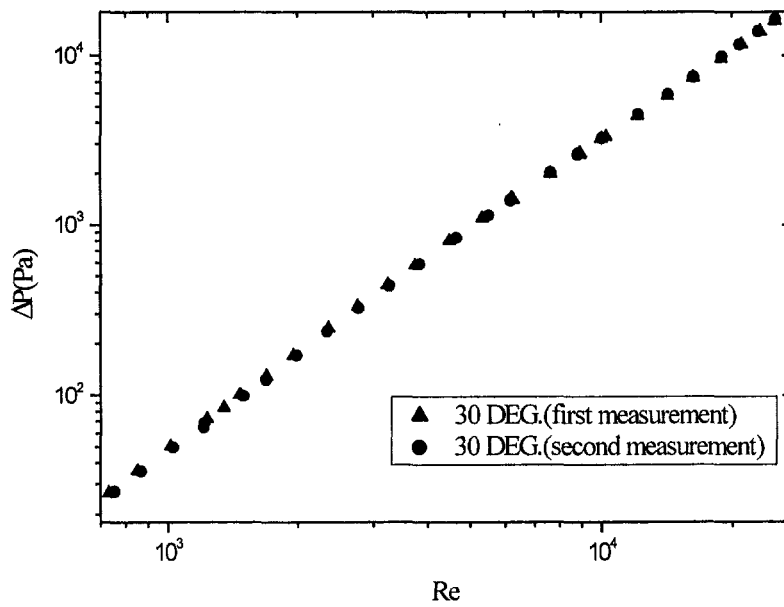


그림 2.1.32 30도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (회전정삼각).

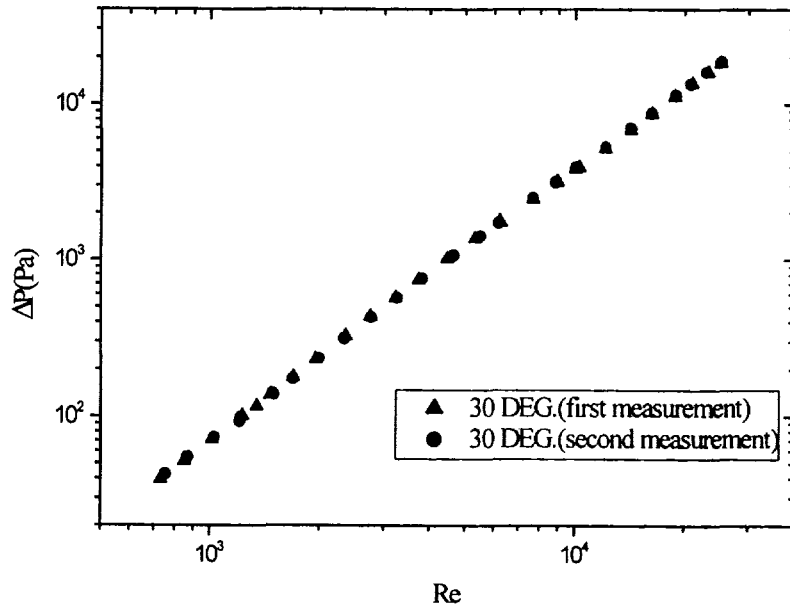


그림 2.1.33 30도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (회전정삼각).

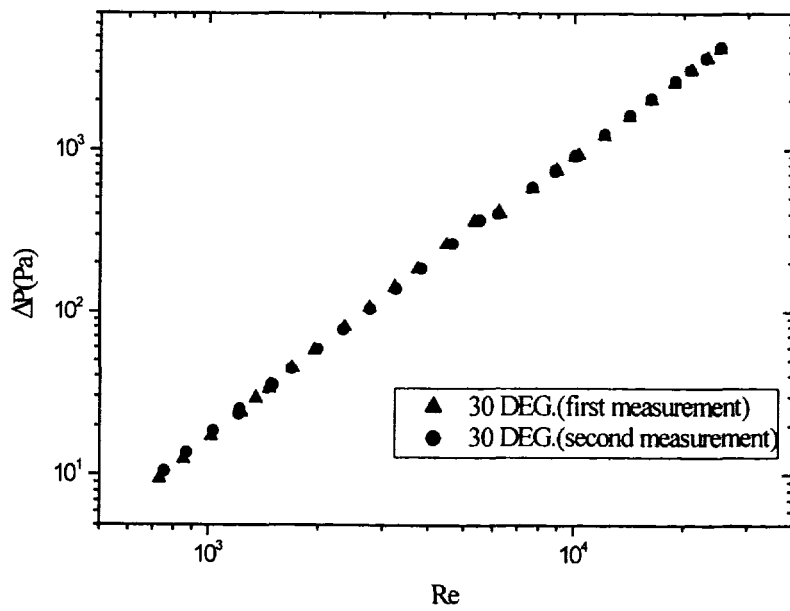


그림 2.1.34 30도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (회전정삼각).

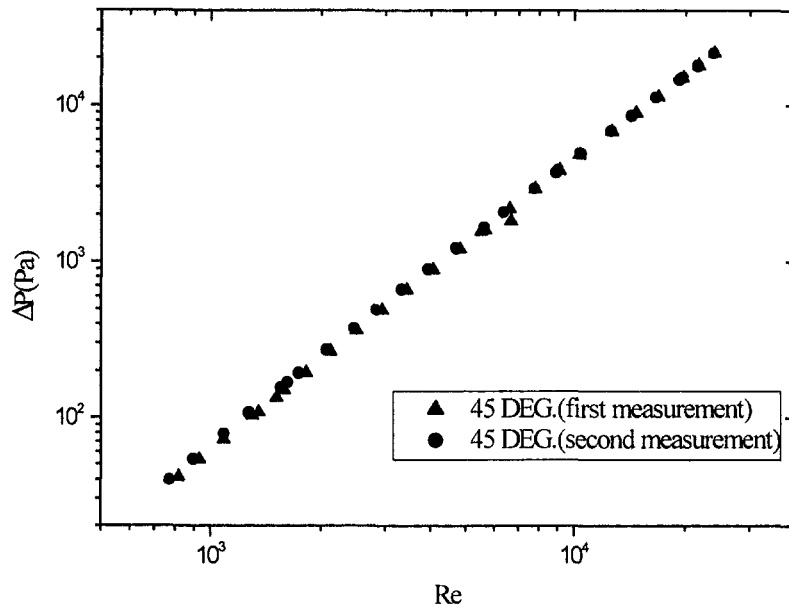


그림 2.1.35 45도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (회전정삼각).

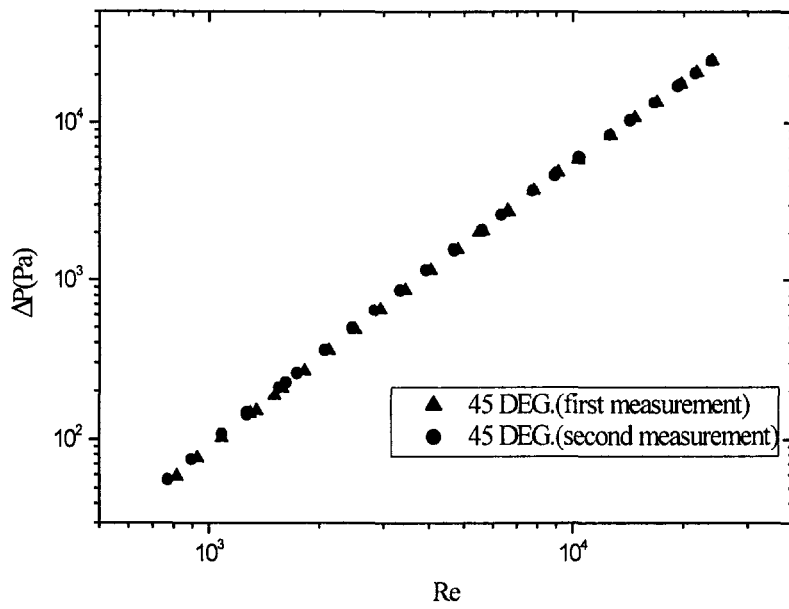


그림 2.1.36 45도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (회전정삼각).



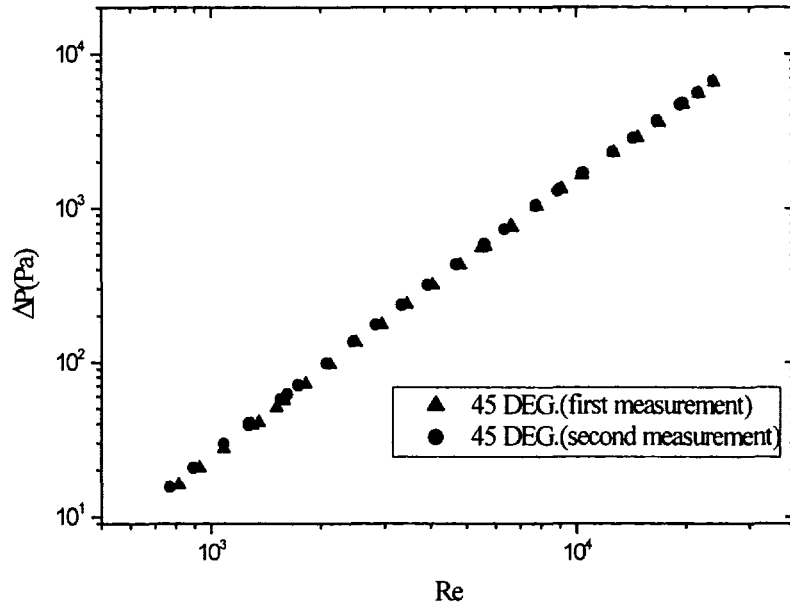


그림 2.1.37 45도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (회전정삼각).

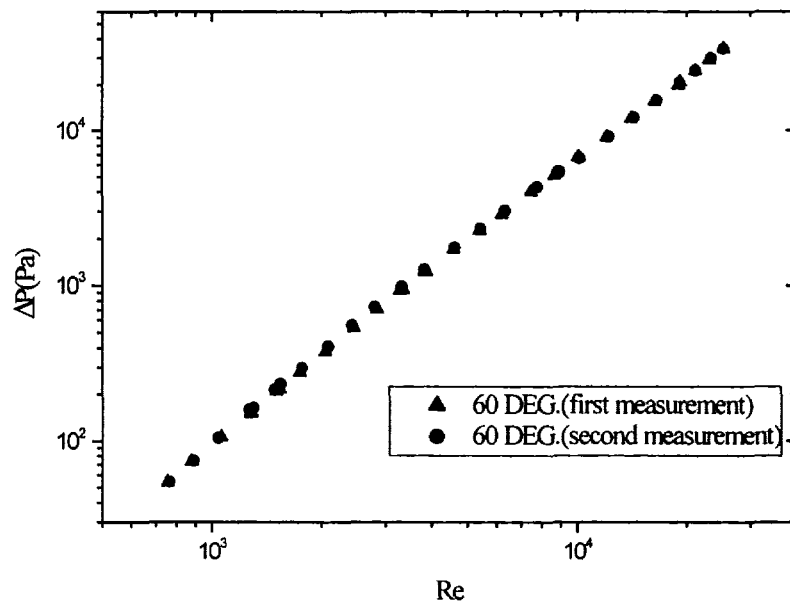


그림 2.1.38 60도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (회전정삼각).

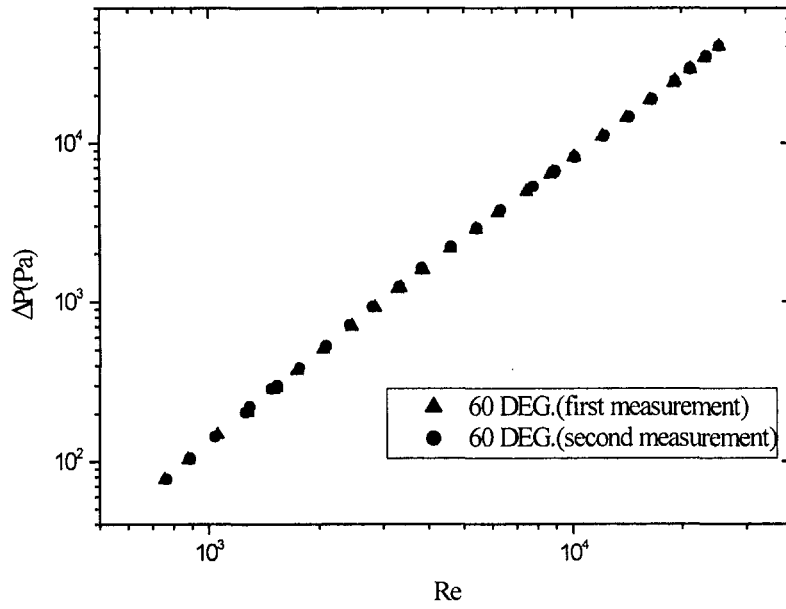


그림 2.1.39 60도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (회전정삼각).

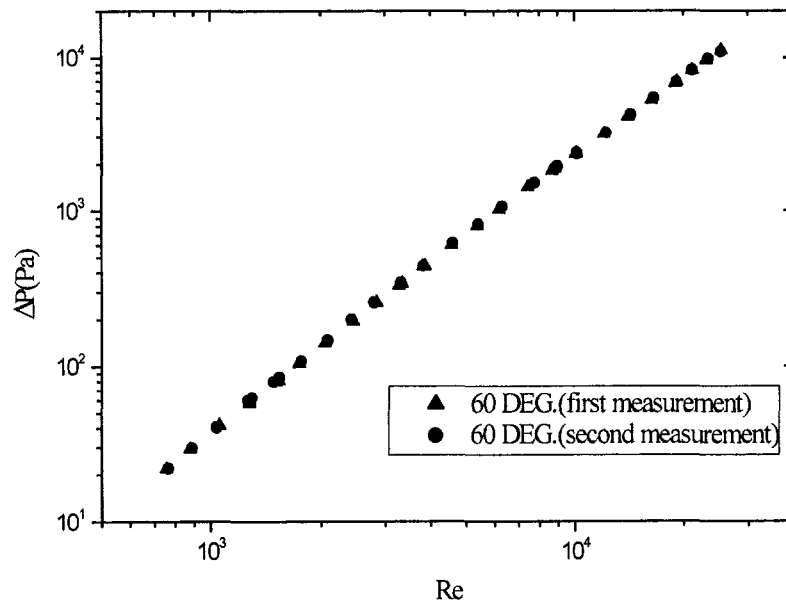


그림 2.1.40 60도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (회전정삼각).

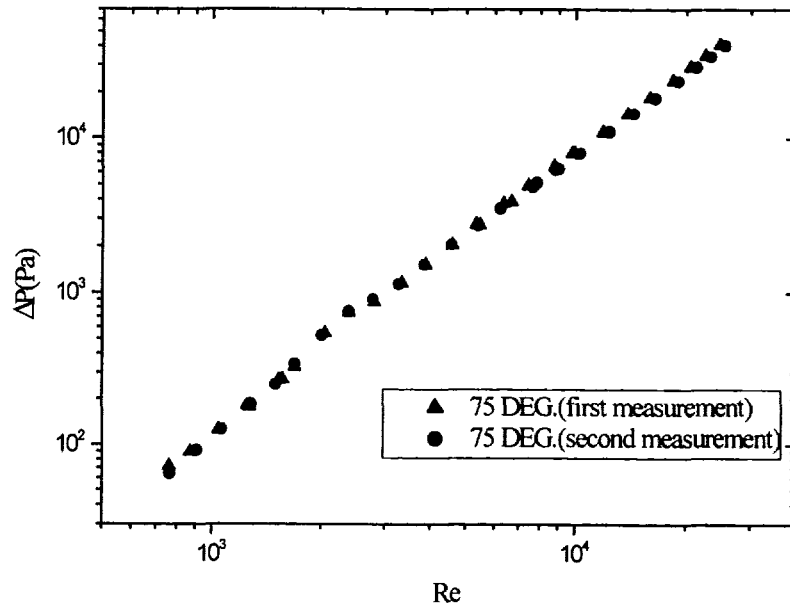


그림 2.1.41 75도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (회전정삼각).

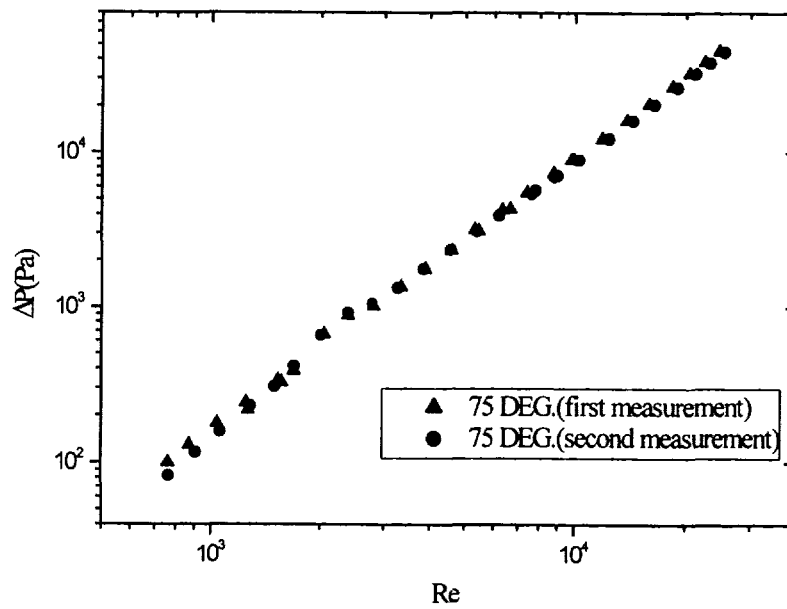


그림 2.1.42 75도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (회전정삼각).

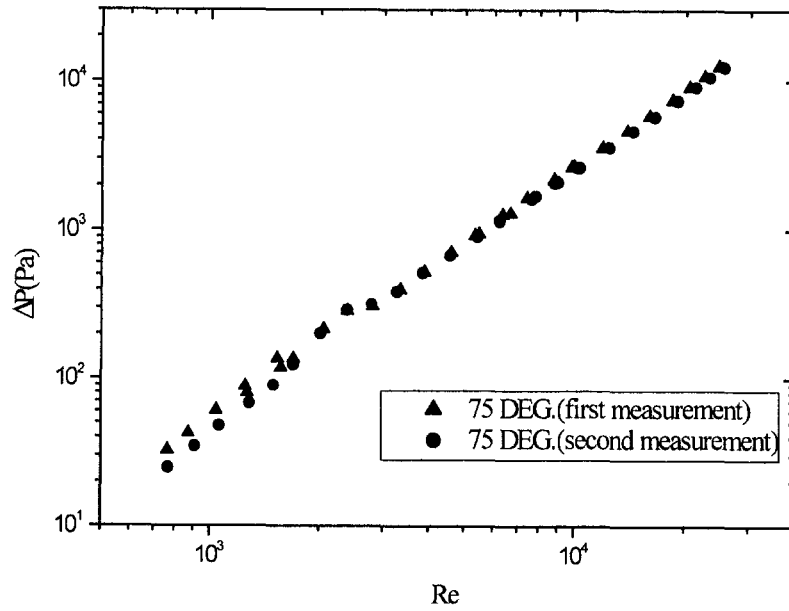


그림 2.1.43 75도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (회전정삼각).

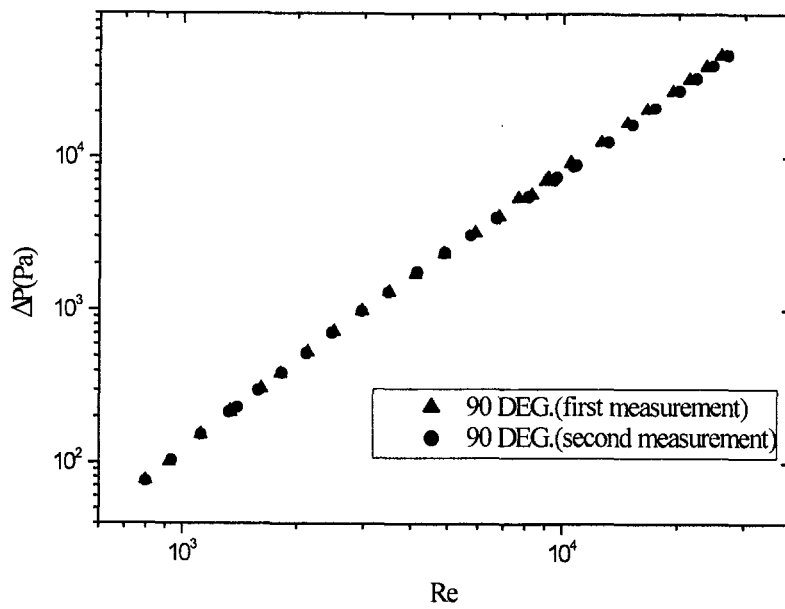


그림 2.1.44 90도 경사각도 시험부의 유입부 압력강하 (회전정삼각).

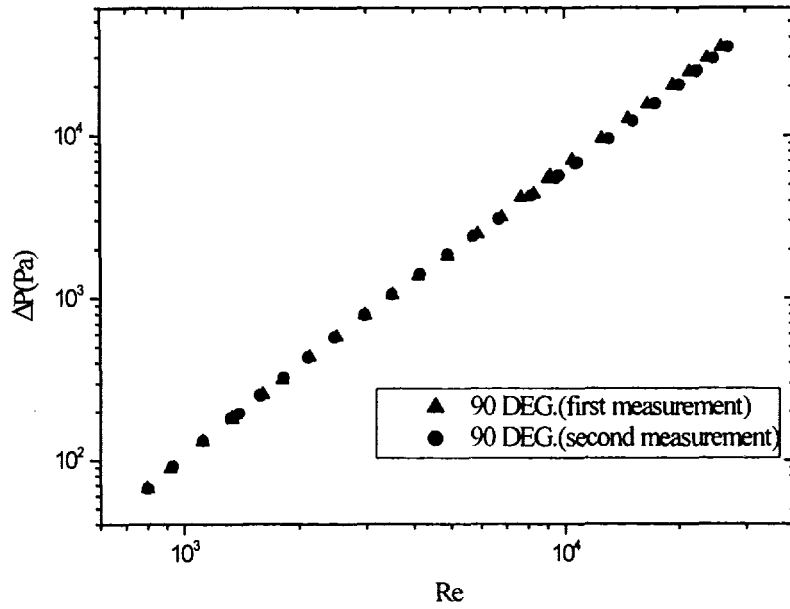


그림 2.1.45 90도 경사각도 시험부의 중심부 압력강하 (회전정삼각).

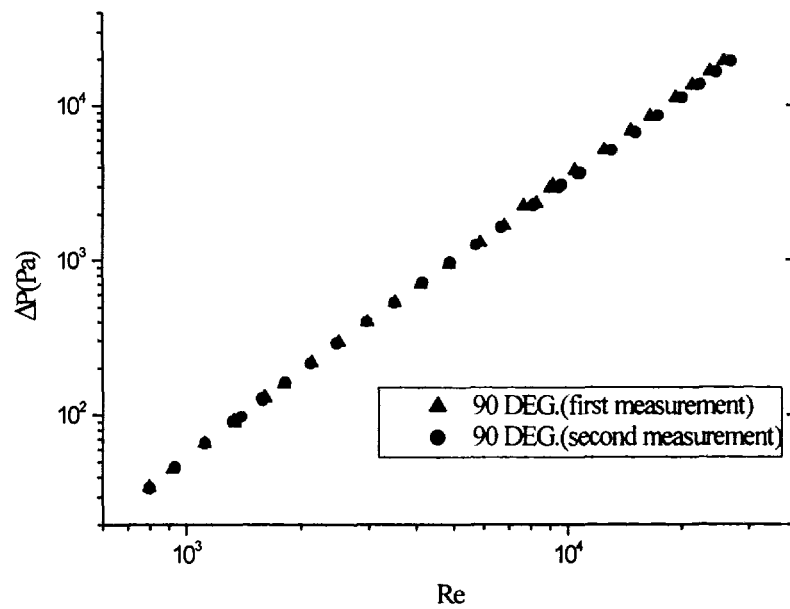


그림 2.1.46 90도 경사각도 시험부의 유출부 압력강하 (회전정삼각).

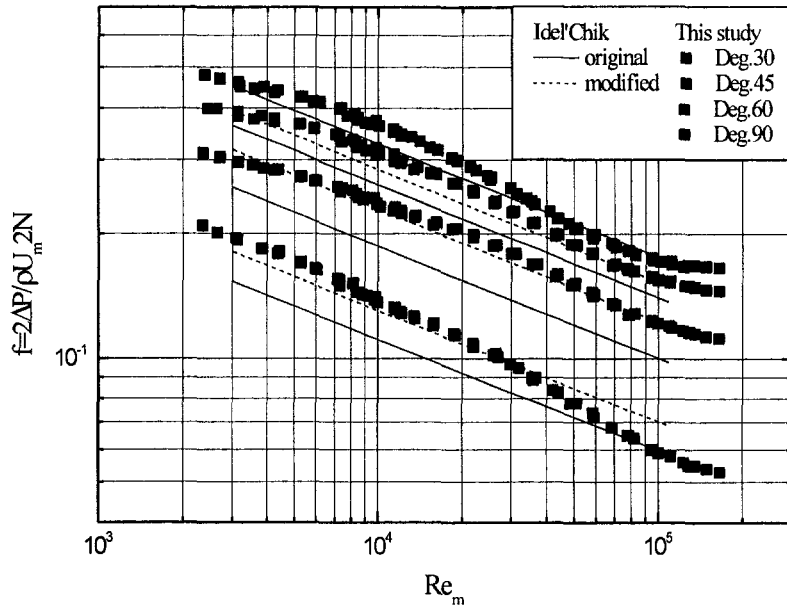


그림 2.1.47 Idel'chik 상관식과의 비교(정삼각)

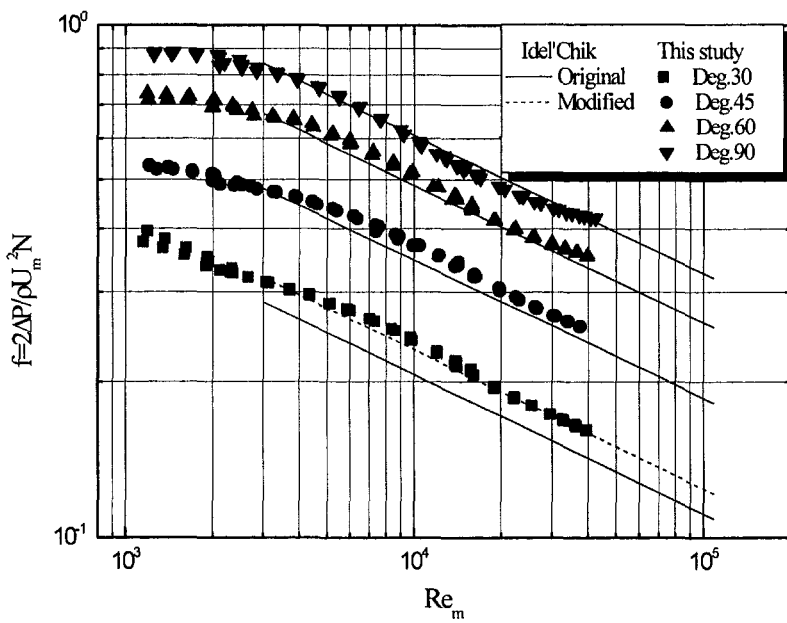


그림 2.1.48 Idel'chik 상관식과의 비교(회전정삼각)

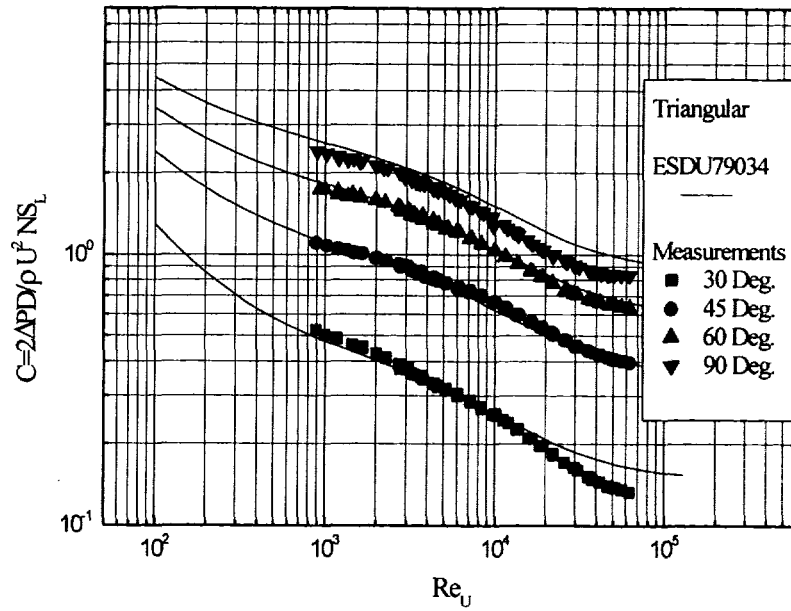


그림 2.1.49 ESDU 상관식과의 비교(정삼각).

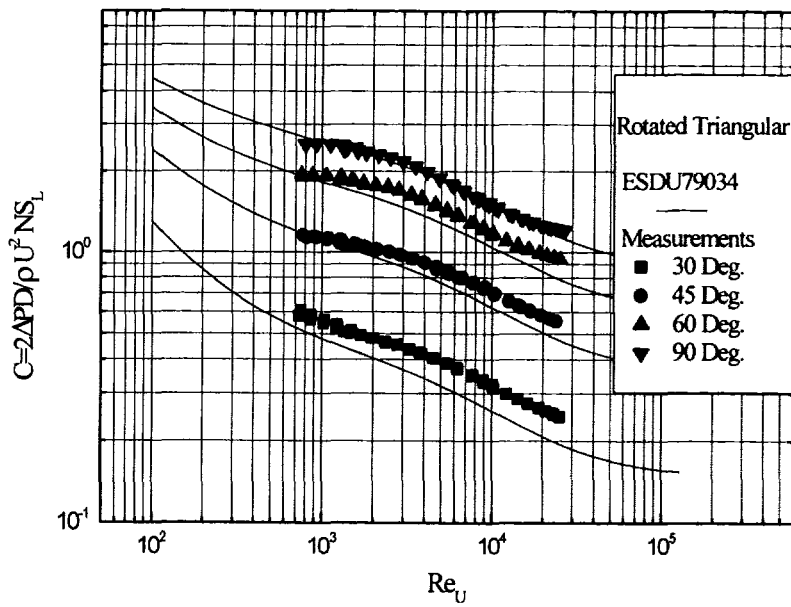


그림 2.1.50 ESDU 상관식과의 비교(회전정삼각)

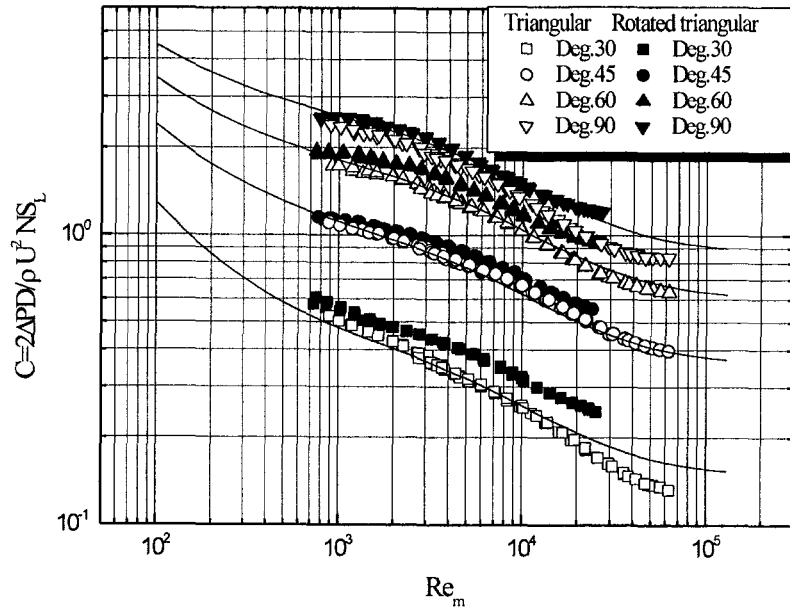


그림 2.1.51 ESDU 상관식과의 비교(정삼각, 회전정삼각).

잘 일치하는 것을 보여주고 있다. 그림 2.1.48은 회전정삼각배열의 경우의 결과를 역시 Idel'chik의 상관식과 비교한 것이다. 이 경우는 30도의 경사각인 경우를 제외하면 전체적으로 우수한 예측을 보여주고 있다. 30도인 경우의 각도에 대한 보정인자를 0.38로 수정한다면 본 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 2.1.49, 2.1.50, 2.1.51은 경사각을 가진 관다발내의 많은 가용한 압력강하 상관관계식 중에서 가장 최근의 식인 ESDU Item No.79034 [2.1.20] 상관관계식과 본 연구의 결과를 비교한 것이다. 이 식은 층류에서부터 난류까지 하나의 식으로 전 유동영역을 포함하기 때문에 실험결과에 의하여 평가된다면 가장 유용할 것으로 생각된다. 이 식에서는 식(2.1.28)과 같이 정의되는 압력손실계수(pressure loss coefficient)를 통하여 나타내고있다. ESDU의 상관관계식은 다음과 같다.

$$C = \frac{2\Delta p D}{\rho U^2 N S_L} \quad (2.1.29)$$



$$C = C \phi_2,$$

$$C = Y \left( \frac{D_v}{D} \right) \frac{1}{(X-1)^3}$$

여기에서

$$D_v = \frac{2\sqrt{3}X^2}{\pi} - \frac{Re}{Re+10}$$

$$Y = \left[ \frac{3.61}{Re^{0.7}} \left( \frac{1+5}{Re^{0.8}} \right)^2 + 0.0625(1-a)^2 + 0.01 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$a = \frac{Re}{(Re+10^4)}$$

$$\phi_2 = (\sin \theta)^{a_1}$$

$$a_1 = 1 + 1.55 \left[ \frac{Re}{Re+40} \right]^2$$

$$Re_U = \frac{\rho U D}{\mu}$$

$$U = \beta U_m$$

$$\beta = \frac{X-1}{X}$$

$$X = \frac{S}{D}$$

여기에서  $U$ 는 덕트 단면적을 기준으로한 평균유동속도이며,  $U_m$ 은 최소단면적을 지나는 최대유동속도이다. 이 상관식은 앞의 Idel'chik의 상관식과는 달리 경사각에 따른 보정인자는 레이놀즈 수의 함수로 되어있으며, 레이놀즈 수의 영향을 반영해주고 있다. 이 상관관계식은 본 연구의 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. 약간의 영역만 제외한다면 측정 데이터와 상관관계식과의 편차는  $\pm 5\%$ 내에 있다. 그러나 회전정삼각배열의 경우는 작은 유동경사각의 경우 최대오차가 20%에 이르는 것을 알 수 있다. 또한 전체적으로 난류로의 천이영역에서 30도와 90도 경사각에 있어서는 약간의 편차를 보여주고 있어서 이를 감소시킬 수 있도록 어느 정도의 수정이 필요함을 알 수 있다. 그림 2.152-2.159는 측정결과와 ESDU상관식 그리고 수정된 Idel'chik 상관식과의 비교를 보여주고 있다. 이 결과들은 30도 경사각을 가진 회전삼각배열에 대한 ESDU상관식을 제외한

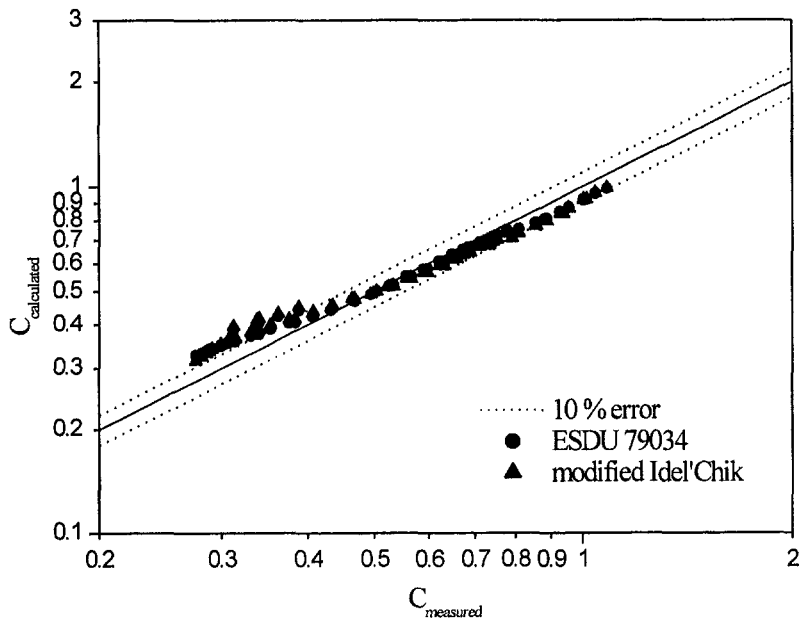


그림 2.152 측정데이터와 기존 상관식과의 비교(30도, 정삼각)

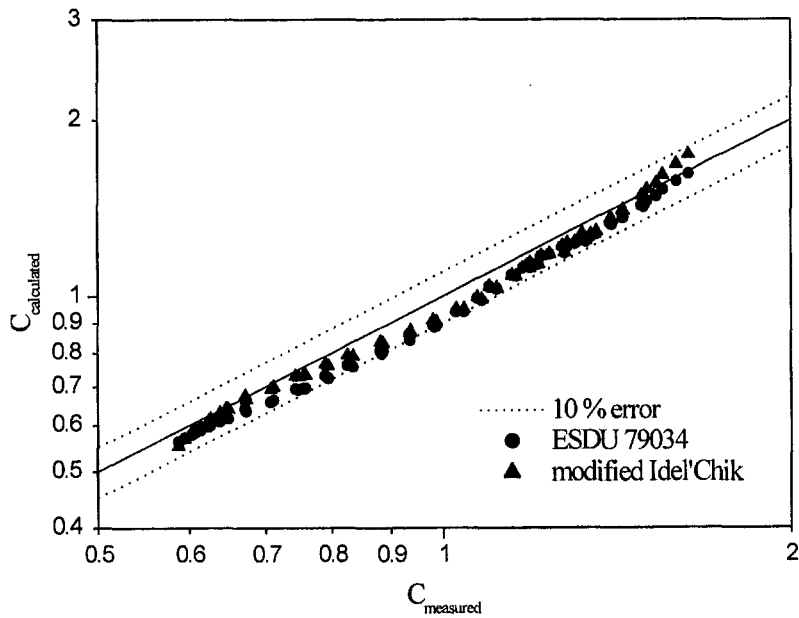


그림 2.153 측정데이터와 기존 상관식과의 비교(45도, 정삼각)

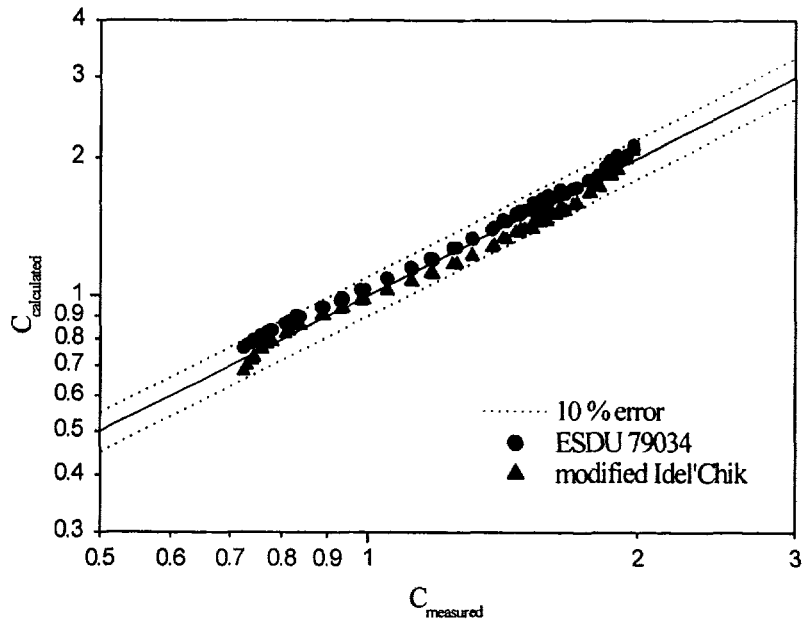


그림 2.154 측정데이터와 기존 상관식과의 비교(60도, 정삼각)

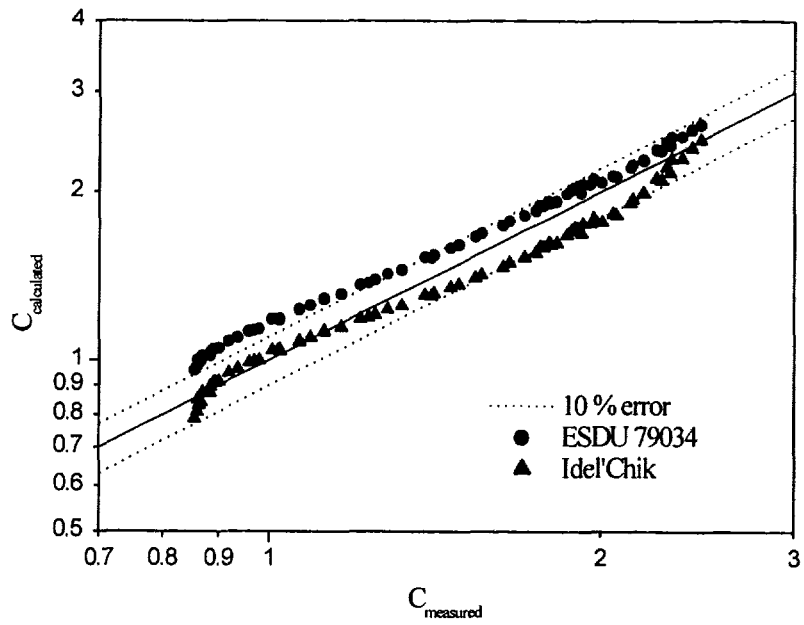


그림 2.155 측정데이터와 기존 상관식과의 비교(90도, 정삼각)

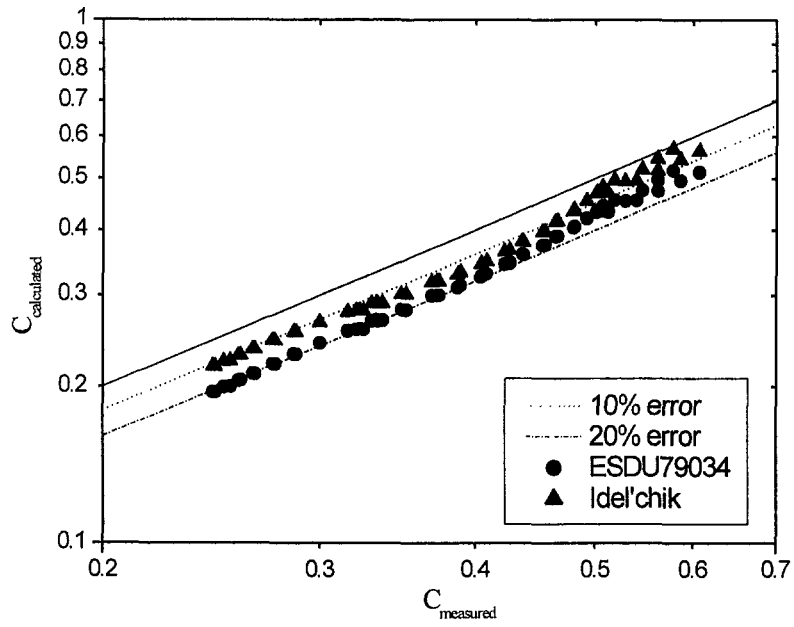


그림 2.156 측정데이터와 기존 상관식과의 비교(30도, 회전정삼각)

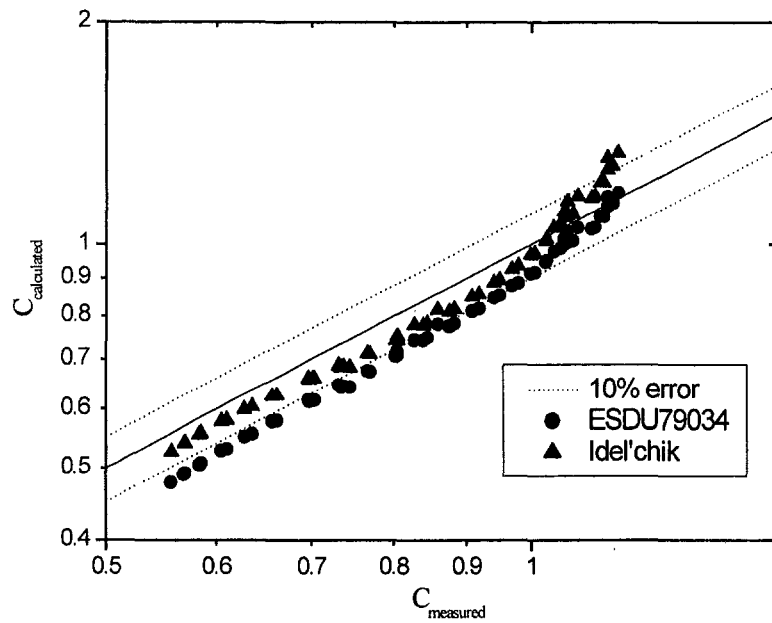


그림 2.157 측정데이터와 기존 상관식과의 비교(45도, 회전정삼각)

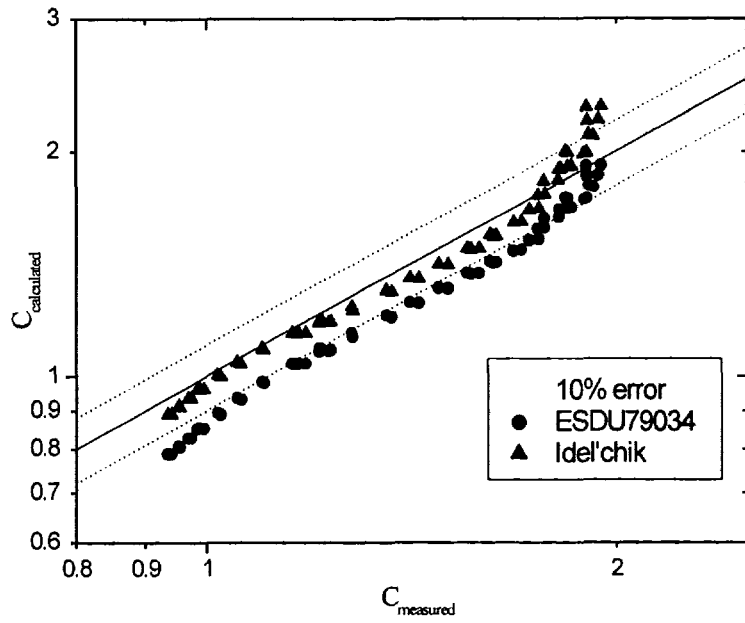


그림 2.1.58 측정데이터와 기존 상관식과의 비교(60도 회전정삼각)

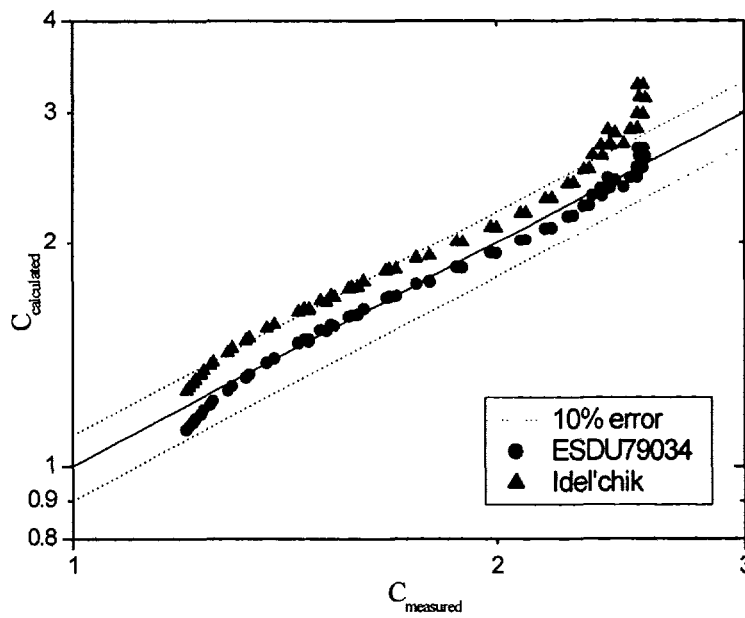


그림 2.1.59 측정데이터와 기존 상관식과의 비교(90도 회전정삼각)

다면  $\pm 10\%$  내로 잘 일치하고 있는 것을 보여준다.

#### 라. 결론

정사각 단면을 가지는 덕트 내에 경사각을 가진 정삼각 및 회전정삼각배열을 가진 관다발을 지나는 유동에서의 압력강하특성 측정실험을 수행하였다. 레이놀즈 수는 약  $800 \sim 6.3 \times 10^4$ 의 범위를 가지며 각각 30, 45, 60, 75 그리고 90도의 경사각을 가지고  $P/d=1.6$ 인 관 배열을 지나는 유동에서 압력강하를 측정하였으며, 기존의 두 가지 상관식과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 관다발에 대한 횡방향 유동에서 경사각에 따른 압력강하를 측정할 수 있는 실험장치를 설계 및 제작하였으며, 이로부터 실험데이터를 생산하였다.

둘째, 본 연구에서 비교한 기존의 상관관계식 중에서 ESDU는 측정된 데이터의 경향과 매우 잘 일치하고 있으며, 30도와 90도의 경우 난류로의 천이영역에서 약간의 편차를 보여준다고 하더라도 삼각형배열을 지나는 유동문제를 포함하는 공학적인 문제에서 사용하기에 충분히 정확하다는 것을 알 수 있다. 그러나 ESDU관계식은 회전정삼각배열의 경우에 경사각이 45도보다 작아질 경우에는 수정이 필요하다.

셋째, 수정된 Idel'chik의 관계식은 경사각 90도에서는 매우 잘 일치하고 있으나 경사각이 이보다 작을 경우에는 수정이 요구된다. 그러나 회전정삼각배열의 경우에는 30도 경사각의 경우를 제외하면 전 영역에서 잘 일치하고 있다. 또한 수정된 관계식은 측정 데이터와 잘 일치하고 있다.

## 2. 중간열교환기 열전달 특성 및 압력강하 실험장치 설계

### 가. 개요

이 실험은 열유체 설계분야에서 1단계 초기에 실험을 의뢰한 것이다. 설계분야에서 작성한 실험요건서를 기초로 1단계 1차년도(1998년)에서 실험장치를 설계하여 제작시방서를 작성하였고, 이를 연구보고서에 요약하여 기술하였다. 이 실험장치에는 설계부서에서 요구한 4개의 실험 즉, IHX 전열관 다발실험, 상부플래넘 열유체 실험, Ratcheting 실험 및 Tee에서의 난류열혼합 실험 등을 한 거의 소듐 루프(sodium Loop)에서 수행할 수 있도록 소듐 공용장치를 구축하고 이에 4개의 실험부(test section)를 설치하는 형식이다. 이 공용장치는 저온 루프와 고온 루프 두 개로 구성되고, 각각의 루프에서의 소듐 유량은  $40 \text{ l/sec}$  이며, 일량은  $300\text{kW}$  이다.

이와 같은 유량은 액체금속로의 정상운전시에 핵연료집합체 한 개에 들어갈 수 있는 용량으로 고가의 실험비가 필요하였으므로 예산상의 문제점으로 인하여 착수가 불가능하였다. 이 실험장치는 표 2.2.1의 Case-0의 경우에 해당한다. 실험의 필요성은 최우선적으로 요구되나 기설계한 장치로는 착수가 불가능하므로 당해년도에서는 제작비를 줄이면서 실험의 목적에 부합되는 실험장치를 재설계하도록 계획되어 있다. 그러므로 여기에서는 유량을 1/2로 줄인 중간열교환기 열수력 실험장치의 실험부를 제안하였고, 이 실험을 수행한 후에 이 루프를 활용하여 차후 실험부를 교체하여 다른 실험을 수행할 수 있는 활용방안을 고려하여 표 2.2.1에서와 같이 3개의 루프(case-1, case-2, case-3)를 개념설계하였다. 이를 토대로 설계분야와의 협의를 거쳐 확정된 루프를 상세설계할 예정이다.

### 나. 실험부의 개념설계

이 실험에서는 중간열교환기 전열관 다발, 셀 측의 열전달 특성과 압력강하 특성을 측정하기 위한 것으로 주요 실험인자는 전열관과 유체의 흐름이 이루는 경사각과 전열관의 배열이다. 액체금속로의 중간열교환기에서는 1차측 소듐은 전열관 내부로, 2차측 소듐은 셀 측을 흐르는 형상이나 이 실험에서는 측정오차를 줄이고 실험을 간단하게 하기 위하여 전열관을 봉 또는 가열봉(rod heater)으로 모사하였다. 그림 2.2.1에서 실험부의 형상을 보이고 있다. 실험인자로서의 경사

각은 0, 45, 75, 90도 등 4종류이고, 전열관의 배열은 두 종류(삼각배열과 확장 삼각배열)를 선정하였다. 경사각이 0도인 경우는 두 종류 배열에서 공통되므로 실험부는 총 7 개이다. 7개의 실험부를 동시에 실험장치에 설치하면 밸브의 개수와 지지용 구조물 등이 증가하여 실험규모가 커지므로 실험부와 루프는 플렌지와 플렌지를 서로 용접하는 형태로 부착하고, 실험부 교환시에는 용접부위를 절단하여 다시 다른 실험부를 용접하는 개념을 채용하였다.

실험부 설계에서 보완한 주요 변화는 첫째, 유로의 높이는 그대로 두고 폭을 반으로 감소시켜 소듐 유량을 처음 30 l/sec에서 15 l/sec로 낮추었고, 각 실험부에 설치되는 전열관을 모의하는 가열봉을 13개에서 4개로 축소하였다. 가열봉은 이중벽으로 만들고, 가열봉의 상, 중, 하 세 부분에 각각 열전대 4개씩을 가열봉의 내부벽과 외부벽 사이에 심어 가열봉의 표면온도를 측정하고자 설계하였다. 표면온도 측정부위와 대응하여 소듐온도를 측정할 수 있게 열전대를 소듐 유로에 설치한다. 그러나 측정코자 하는 번들 내에서 발달된 난류를 만들기 위하여 유로 방향으로 삼각배열에서는 열수를 13개에서 23개로, 회전 삼각배열에서는 열수를 17개에서 23개로 증가시켰다. 압력강하를 측정하기 위하여 유입류(7개 열), 정상류(11개 열) 및 유출류(5개 열)에서의 차압을 측정한다.

#### 다. 소듐 루프 개념설계

실험부(test section)를 제외한 부분을 소듐 루프(sodium loop)라 정의한다. 중간열교환기 열유체 특성실험에 활용될 수 있을 뿐만 아니라 차후에 다른 실험에의 활용가능성을 고려하여 3종류의 소듐 루프의 개념을 제시하였다(그림 2.2.2). Case-0은 전단계에서 설계한 것으로 설계분야에서 요구한 4개 실험항목의 실험부들을 1개의 공용루프에 동시에 설치하는 개념으로 실험들을 만족시키는 최대 실험요건에 따라 설계하였다. 유량적 측면에서는 중간열교환기 열유체 특성 실험이 가장 높고, 열적 측면에서는 Tee 난류열혼합 실험이 가장 높았다. 40 l/sec 유량이면 핵연료집합체 1개에 유입되는 유량으로 차후에 실험 핵연료집합체 열유체 실험에서도 활용될 수 있는 규모이다. 장기적으로 보면 소듐 비등을 전제로한 안전성 실험들을 제외한 여러 종류의 소듐 열유체 실험들의 특성을 충족하게 설계되어 있어 실험비용이 절감되는 면이 있다.

유량을 1/2 정도로 줄였을 경우, case-1은 중간열교환기 열유체 특성실험에



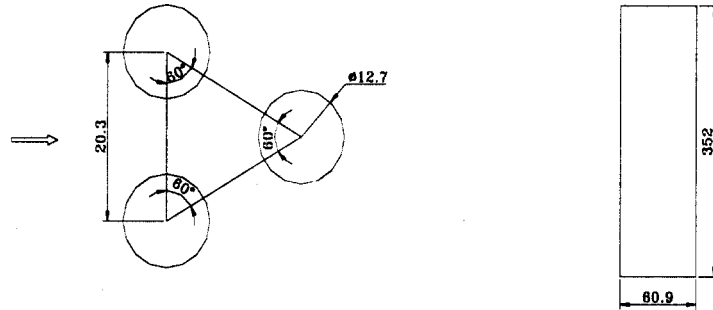
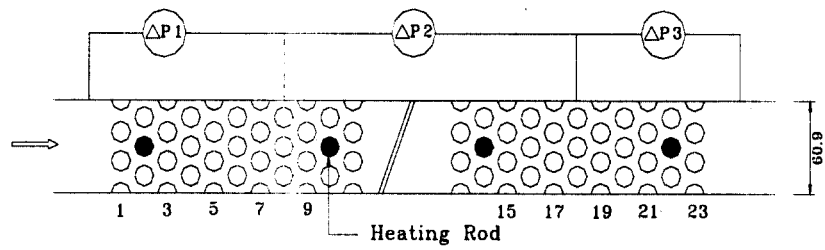
가장 적합한 형태로 구성되어 있다. 유량이 15 l/sec 정도인 한 개의 배관으로 형성되고, 냉각기는 30kW 용량인 소규모이므로 불순물 제어계통인 정화기(cold trap) 계통과 직렬로 설치하여 정화 또는 냉각용으로 사용한다. 30kW 용량인 가열기는 소듐 공급탱크 내부에 상부로부터 주입하여 설치한다. 이와 같은 설치 형태는 커버그스 부위에서 플렌지로 부착할 수 있으므로 소듐과 접촉하지 않아 저가로 제작이 가능하다. 차후 이 장치로는 소규모 발열 및 냉각이 소요되는 실험 즉, 소듐 유동특성실험에 사용될 수 있다. 설계에 필요한 소듐의 열유체 실험에서 유체적 특성실험은 어느 범위 내에서는 물론써 모의가 가능하지만 열적 특성실험은 소듐의 높은 열전도도로 인하여 다른 유체로 모의할 수 없다. 대부분의 소듐 실험은 열적 특성실험이므로 이 장치는 차후 활용성이 낮다.

Case-2는 유량은 같지만 case-1과는 달리 대용량 발열실험의 예로, 1/3 규모 정도의 핵연료집합체 실험 등을 차후에 수행할 수 있게 150kW 냉각기를 설치하였고, 또한 필요에 따라서는 대용량(유량 15 l/sec, 열량 150kW) 고온배관을 설치할 수 있게 설계하였다. 가열기는 플렌지로 공급탱크 상부에 설치할 수 있는 최대 용량인 80kW를 설치하여 열용량을 높여 고온의 소듐을 사용하는 실험을 수행할 수 있게 설계하였다. 이 실험장치는 실험부에 고용량의 발열체를 설치하는 실험 즉, 차후 수행예정인 핵연료집합체 실험 등에 활용될 수 있다.

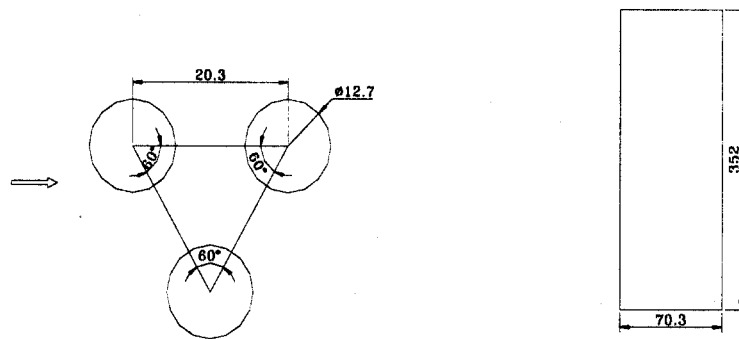
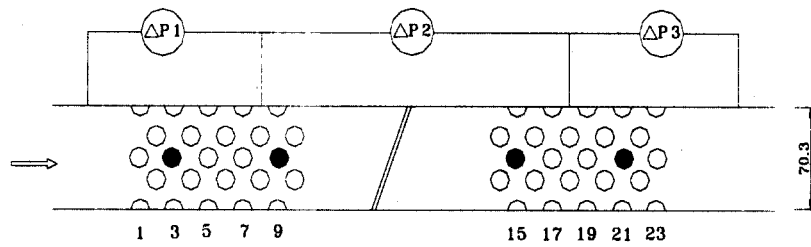
Case-3은 열혼합실험, 열교환기 특성실험 등과 같이 저온 소듐(150kw방출)과 고온 소듐(150kw가열)이 동시에 필요한 실험을 수행할 수 있게 고온 배관과 저온 배관 즉, 두 개의 배관을 갖는 루프로 소듐 비등과 같은 안전성 실험들을 제외한 액체금속로에서 요구되는 유량이 15 l/sec 미만이 요구되는 대부분의 실험을 수행할 수 있다. 유체적 실험 측면에서는 두 개의 루프를 합쳐 유량을 30 l/sec까지 가능하므로 전단계에서 설계분야에서 작성한 공간 열교환기 특성실험요건에 대해 실험부를 보완하지 않고서도 수행할 수 있는 장점이 있다. Case-2에 차후에 Case-3과 같이 고온 루프를 설치할 때에는 공급탱크 내부에 들어있는 가열기와 제어계통이 쓸모가 없어지며, 설치비가 추가로 더 소요된다.

표 2.2.1 중간열교환기 특성실험에 사용할 실험장치 Case 별 비교

Loop	특 성	용 량	추정예산 (억원)	활용가능한 실험
Case-0	<ul style="list-style-type: none"> <li>· '98년도에 장치의 상세설계</li> <li>· 고온과 저온 루프 각각의 유량이 40 ℓ/sec, 가열기와 냉각기의 열용량이 300kW</li> <li>· 핵연료집합체 1개의 유량 규모로 안전성을 제외한 대부분 열수력 실험 수행할 수 있는 대규모 실험 시설</li> <li>· 4개의 실험장치를 동시에 설치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가열기: 300kW</li> <li>· 냉각기: 300kW</li> <li>· 최대유량: 40 ℓ/sec</li> <li>· 소듐량: 7.0 ton</li> </ul>	27.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 설계 분야에서 요구한 4개 실험을 실험요건서에 따라 수행 가능</li> </ul>
Case-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>· IHX 실험 수행에 적합하게 설계</li> <li>· cold trap loop에 소용량 냉각기 설치</li> <li>· 공급탱크 내부에 가열기 설치</li> <li>· 소듐 유동 특성 실험에 적합</li> <li>· 30kW 미만 발열 또는 냉각 실험에 활용가능</li> <li>· 15 ℓ/sec 유량시 0.9°C/sec 냉각/가열</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가열기: 30kW</li> <li>· 냉각기: 30kW</li> <li>· 최대유량: 15 ℓ/sec</li> <li>· 소듐량: 1.5 ton</li> </ul>	9.9	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ratcheting 실험</li> <li>· 자유액면요동실험</li> </ul>
Case-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 차후 15 ℓ/sec, 150kW 가열기를 갖는 heating loop 설치가 가능하게 설계</li> <li>· 공급탱크 내부에 가열기 설치</li> <li>· 150kW 미만 발열체 특성실험 가능</li> <li>· 15 ℓ/sec 유량시 4.5°C/sec 냉각</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가열기: 80kW</li> <li>· 냉각기: 150kW</li> <li>· 최대유량: 15 ℓ/sec</li> <li>· 소듐량: 3.0 ton</li> </ul>	11.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ratcheting 실험</li> <li>· 자유액면요동실험</li> <li>· 핵연료집합체실험</li> </ul>
Case-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 15 ℓ/sec 유량, 150kW 용량 고온 및 저온 loop로 구성</li> <li>· 발열, 냉각 동시 또는 각각 사용 가능</li> <li>· 안전성 실험을 제외한 대부분의 열유체 실험 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가열기: 150kW</li> <li>· 냉각기: 150kW</li> <li>· 최대유량: 15 ℓ/sec</li> <li>· 소듐량: 3.0 ton</li> </ul>	15.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Ratcheting 실험</li> <li>· 자유액면요동실험</li> <li>· 핵연료집합체실험</li> <li>· 냉온 열혼합실험</li> <li>· 열교환기 특성실험</li> </ul>

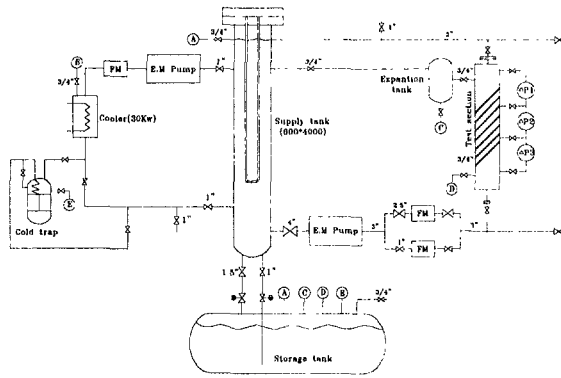


(a) Triangle Test Section (Inclination: 45°, 70°, 90°)

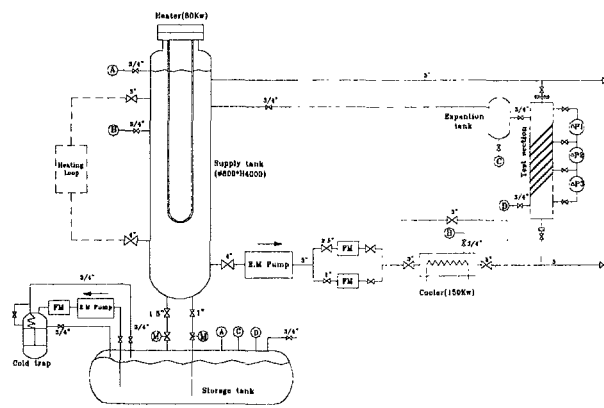


(b) Extended Triangle Test Section (Inclination: 45°, 70°, 90°)

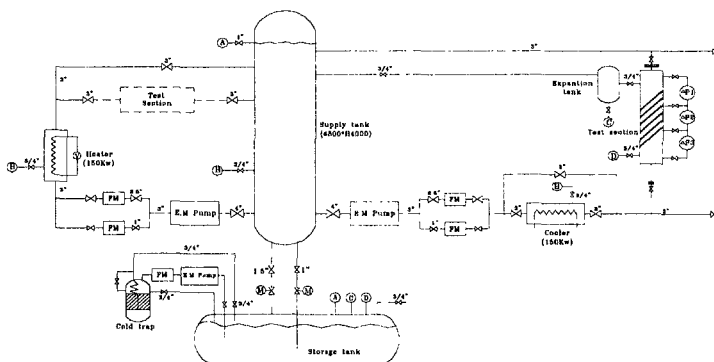
그림 2.2.1 중간열교환기 실험부의 형상, 규격 및 가열봉 설치 위치



(a) 소듐 루프 Case-1



(b) 소듐 루프 Case-2



(c) 소듐 루프 Case-3

그림 2.2.2 경우에 따른 중간열교환기 열유체 실험장치

## 제 3 절 전자펌프 관성보완장치 성능 특성 실험

### 1. 개요

액체금속로인 KALIMER에서는 1차측 냉각재인 소듐 구동펌프로 전자펌프를 채용하였다. 전자펌프는 여러 장점에도 불구하고 휠이 있는 기계식 펌프와는 달리 펌프의 관성력이 없어 외부전원 상실시 관성력에 의해 노심의 잔열을 제거하는데 문제점이 있다. 관성력에 의한 노심 냉각능력은 안전성 면에서 주요한 역할을 하므로 이 단점을 보완하고자 전자펌프를 1차측의 구동펌프로 채용하는 액체금속로에서는 별도로 관성보완장치를 설치할 필요성이 있다. KALIMER에서는 모터발전기(motor-generator)를 사용하여 정상가동시에는 무부하 운전하는 휠의 관성력으로 외부전원 상실시에 전력을 생산하여 전자펌프를 구동하기 위한 장치를 채용하고자 하므로 이 개념의 검증과 분석용 기초자료 생산이 필요하다. 이 연구는 유체설계분야의 전자펌프 관성보완장치 성능실험 요건서에 따라 수행하였다.

실험에서는 정상시에는 모터의 역할을 하나 외부전원 차단시에는 발전기의 역할을 하는 소규모 관성보완장치를 설계, 제작하였다. 기존의 MHD 소듐 실험장치에 설치된 소형 전자펌프에 외부전력 차단시에는 관성보완장치에서 발생된 전력을 공급하는 구조로 실험장치를 구성하여 이 장치의 특성을 실험하였다. 전자펌프에 60Hz, 최대 15kW의 전력을 정상적으로 공급하다가 외부전원 상실시에 시간에 따른 관성보완장치의 회전수, 전압, 전류, 역률 및 소듐 계통에서의 유량, 압력강하 등의 변화를 측정하여 관성보완장치의 성능을 평가하였다. 휠의 특성을 조사하기 위하여 규격이 다른 두 종류의 휠을 사용하여 실험하였다.

### 2. 실험

#### 가. 실험장치

##### (1) 관성보완 실험장치의 구성

이 실험은 정상적으로 운전되고 있는 소듐 루프에서 외부전원이 상실될 때 관성보완장치에서 발생하는 전력을 소듐 루프의 구동용 펌프로 사

용되고 있는 전자펌프에 공급하도록 구성되어 있다. 이 실험에서는 관성보완장치의 전기적 특성과 소듐 루프에서의 열수력적 특성을 측정하여 관성보완장치의 성능을 분석하는 것이다. 실험장치는 훔의 관성력으로 전기를 발전시키는 관성보완장치와 소듐 루프로 구성되어 있다. 정상적으로 작동되고 있는 전자펌프에서 외부전력(한전전력)을 차단하면, 한전 전력에 의해 훔을 1800rpm으로 구동시키며 모터 역할을 하고 있던 모터발전기(motor-generator)가 발전기로서의 기능을 하며 무접점으로 전자펌프에 전력을 공급하게 된다. 이 절환 시점에서는 발전기에서 생성되는 전력은 한전의 전력과 전압, 주파수 및 위상이 동기화 되어 있다. 이 실험에 사용된 전자펌프는 Novatome 사의 제품으로 MHD 실험장치에 설치하여 5년 이상 실험에 사용하던 것이다.

외부전력 차단 후, 관성보완장치는 시간이 지남에 따라 전자펌프에 공급되는 부하에 의해 관성력을 소실하게 되므로 이 실험에서 측정하는 모든 인자는 천이상태(transient state)로 감쇄하게 된다. 실험에서 측정하는 전기적 실험인자로는 주파수, 전압, 전류, 역률 등이고 열수력학적 실험인자로는 유량과 펌프 양단의 압력차 이다.

## (2) 소듐 루프의 구성

이 실험에 사용된 소듐 실험장치는 MHD 압력강하 실험장치로 그림 3.2.1과 같이 구성되어 있다. 최대유량은 3.3 l/sec이고, 최대 운전온도는 550°C, 설계압력은 10기압이다. 이 실험장치는 본 연구에서 개발, 설계, 제작한 3대의 소형 전자펌프의 특성을 측정하는 실험을 수행하였고, 현재에는 자장이 소듐 유동의 압력강하에 미치는 영향을 정량화하기 위한 실험을 수행하고 있는 실험장치이다. 이 실험장치는 다목적 기초실험을 수행하기 위한 장치이므로 여러 개의 루프로 구성되어 있다. 이 실험에서는 소듐 공급탱크, 전자펌프, 자장-압력강하 실험부, 전자유량계로 구성되는 루프를 사용하였다.

이 실험장치에 설치된 Novatome사 model IA124 전자펌프의 설계변수는 표 3.2.1에 기술하였다. 정격운전조건은 600°C 소듐에서 유량은 3.3 l/sec, 수두는 3기압이다. 이 전자펌프는 입력전압을 0V에서 최고 380V까지 변화시킬 수 있는 전자펌프 제어기가 설치되어 있으나, 이 실험에서는 전자펌프 제어

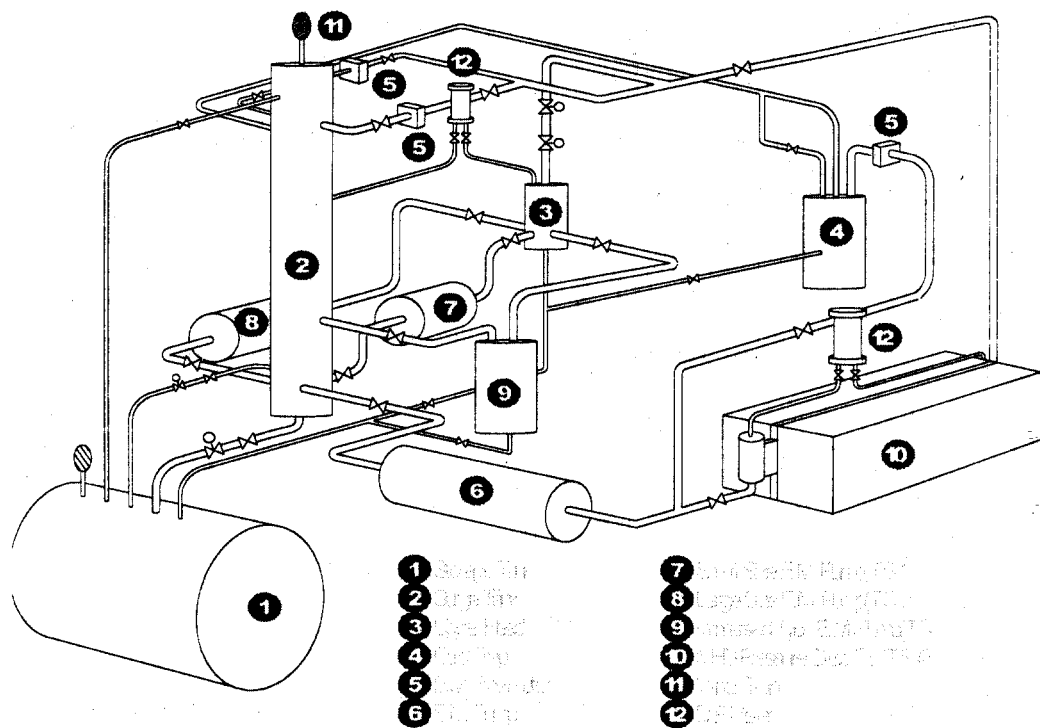


그림 3.2.1 MHD 소듐 압력강하 실험장치의 구조도

표 3.2.1 Novatome Electromagnetic Pump IA124의 기하학적 및 전기적 설계변수

특 성	알려진 값	추정값
열수력학적	Flowrate(l/sec): 3.33 Pressure difference(Bar): 3 Temperature(°C): 600	-
기하학적	Pump length: 756mm Pump diameter: 190mm Outer duct diameter: 33.4mm Outer duct thickness: 2.77mm	Inter core gap: 9mm Inner core diameter: 15.4mm Inner duct thickness: 1mm Slot depth: 90mm Slot width: 33.7mm
전기적	Frequency: 60Hz Phase: 3 Input power(W): 8,000 Input current(A): 12 Input voltage(V): 380	Pole pairs: 2 Slot/phase/pole pair: 1 Pole pitch: 184mm



기를 제거하고 실험을 수행하였다. 그림 3.2.2는 전자펌프 구입시 제공된 소듐 온도 200℃에서의 특성곡선이다. 이 그림에서 220V 이하의 값들은 과제에서 개발한 소형전자펌프 설계용 전산코드인 EMPAD로 추정된 것이다. 표 3.2.1과 그림 3.2.2를 이용하여 EMPAD로 추정된 이 전자펌프의 효율을 표 3.2.2에 기술하였다.

전자펌프 양단의 차압은 전자펌프 입구와 출구 사이의 차압을 측정하여야 하지만 그림 3.2.1에서 보는 바와 같이 이 루프의 특성이 전자펌프 출구에 설치된 자장-압력강하 실험부 양단의 압력차를 측정하기에 적합하게 차압계를 설치한 것이다. 이를 그림 3.2.3과 같이 개조하여 전자펌프의 유출구에 있는 자장-압력강하 실험부의 입구와 소듐 공급탱크 상부의 커버가스의 압력차를 측정하였으므로 전자펌프 양단의 압력차와는 다소 다르다. 그러므로 정밀한 전자펌프 양단의 압력차를 구하기 위해서는 그림 3.2.3의 배관설계 도면의 치수와 소듐의 온도조건을 이용하여 이론적으로 보상하는 것이 필요하다. 배관에 설치된 소듐밸브는 게이트 밸브들이고, 전자펌프 유출배관(outlet line)에 설치된 3개의 엘보와 유입배관(inlet line)에 있는 2개의 엘보는 90° 엘보이다. 차압계 상부탱크와 소듐 공급탱크의 커버가스인 아르곤 가스는 서로 통해 있고 두 탱크에서의 소듐 수위(level)는 소듐 충전시에 같은 높이로 채웠다.

### (3) 관성보완장치

관성보완장치는 휠(wheel)의 관성력으로 전기를 발생하는 장치이다. 정상 운전시에는 적은 부하로 모터로서 휠을 회전시키다가 비상시에 전기를 발전시키는 모터발전기(motor-generator : M-G)로서의 역할을 한다. 휠의 규격은 그림 3.2.4에 제시하였다. 휠은 모터발전기의 축에 연결되어 있고, 휠을 교체할 수 있게 설계되어 있다. 이 실험에서는 2개의 휠을 비중이 7.801인 철판으로 만들었다. 소형 휠의 규격은  $\phi 649.8 \times t50.82$  이고, 대형 휠의 규격은  $\phi 720 \times t100\text{mm}$  이다. 모터발전기에 들어 있는 회전자는 코일로 이루어졌으며 외부전원이 상실되면 이 회전자도 관성력을 갖는다. 회전자는 질량이 52 kg 이고, 직경이 320mm 이다. 이 회전자는 코일로 구성되어 있어 질량이 균일하지는 않지만 질량분포가 균일한 것으로

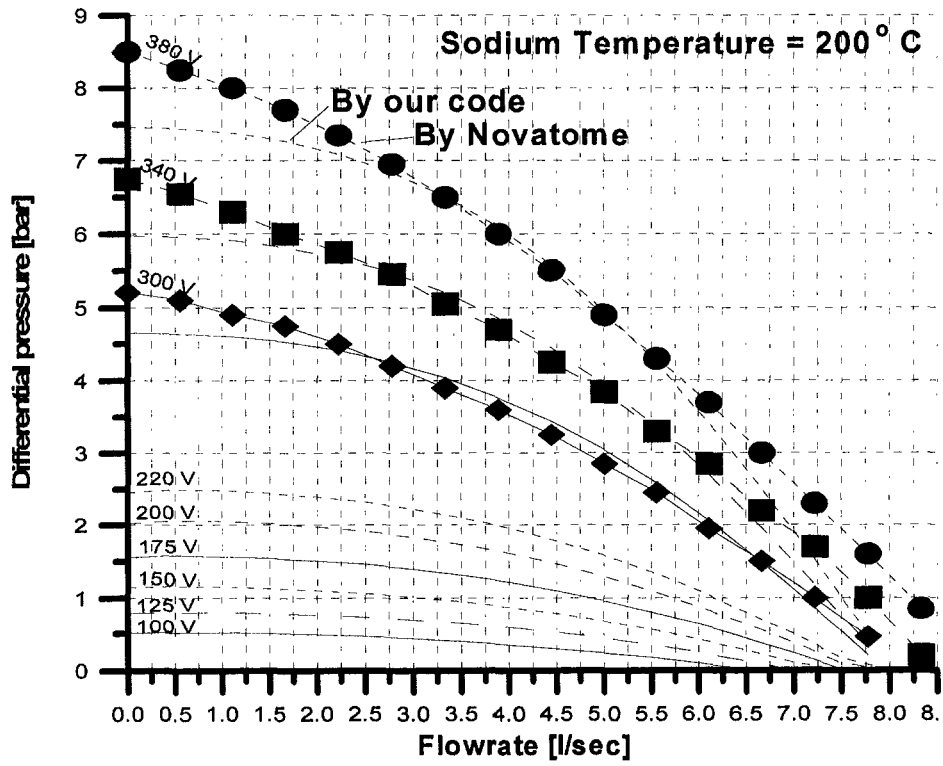


그림 3.2.2 200°C일 때 pump IA 124의 유량-압력차 특성

표 3.2.2 Novatome Pump의 효율 추정값(200℃)

유량 (l/sec)	효율(%)								
	100V	125V	150V	175V	200V	220V	300V	340V	380V
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
1.0	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7
1.5	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6
2.0	7.4	7.5	7.5	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.7
2.5	9.3	9.4	9.5	9.6	9.6	9.6	9.7	9.7	9.7
3.0	10.9	11.2	11.4	11.5	11.6	11.6	11.7	11.8	11.8
3.5	12.2	12.8	13.2	13.4	13.5	13.6	13.7	13.8	13.8
4.0	12.9	14.1	14.7	15.0	15.3	15.4	15.6	15.7	15.7
4.5	13.3	14.9	15.8	16.3	16.7	16.8	17.3	17.4	17.4
5.0	12.6	15.1	16.3	17.2	17.7	17.9	18.5	18.7	18.8
5.5	11.1	14.2	16	17.1	17.8	18.2	19.1	19.4	19.5
6.0	7.0	12.0	14.2	16.0	16.9	17.5	18.8	19.1	19.3
6.5	0.9	7.1	11.0	12.9	14.5	15.2	17.0	17.4	17.8
7.0	0.0	0.0	4.8	8.1	9.9	10.9	13.3	13.9	14.3
7.5	0.0	0.0	0.0	0.4	2.8	4.1	7.2	8.1	8.6
8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7

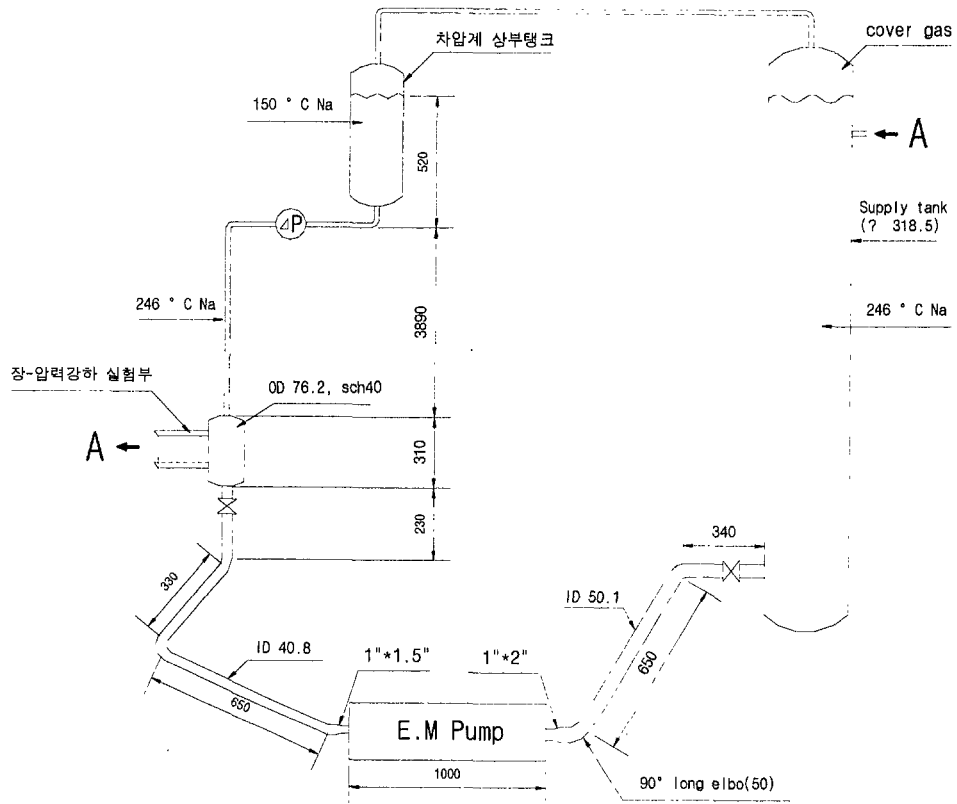


그림 3.2.3 소듐 차압기 주위의 배관의 치수 및 운전조건

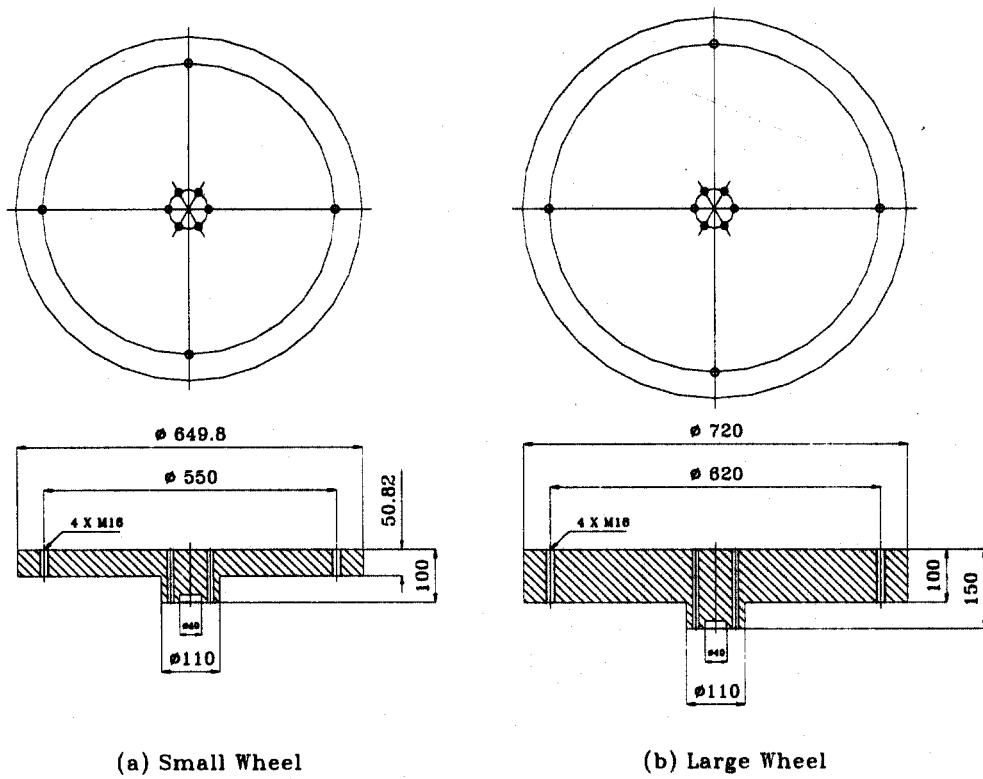


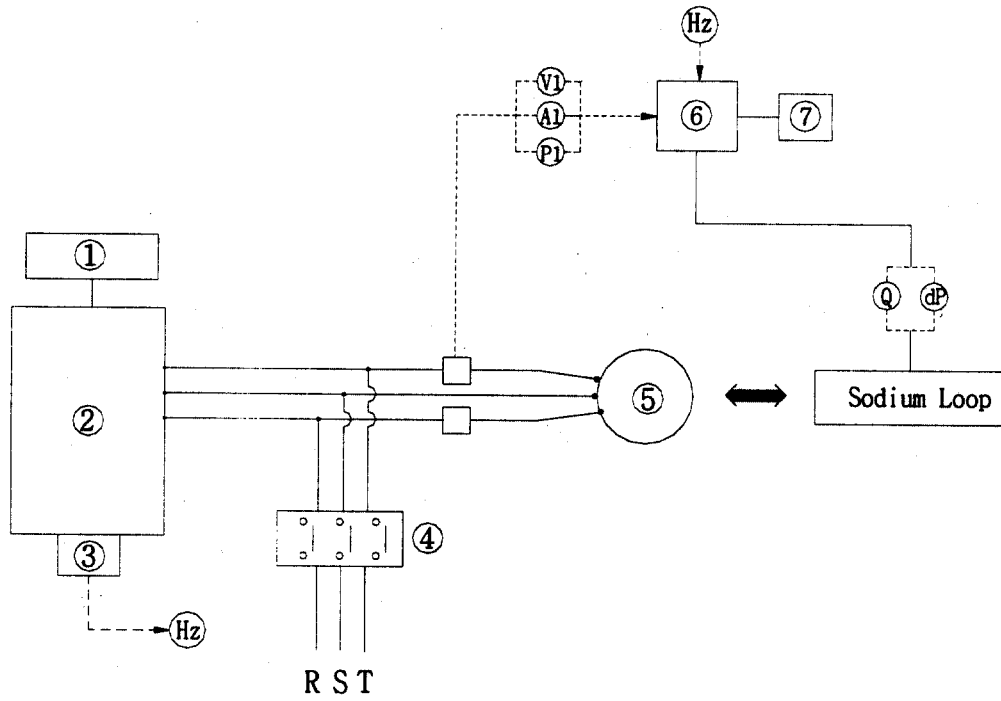
그림 3.2.4 휠의 규격 (a) small wheel (b) large wheel

가정하여 관성력을 계산하였고, 관성력은 소형 휠의 1/10 정도이었다.

관성보완장치의 구성은 그림 3.2.5와 같다. 이 그림에서 관성보완장치의 작동순서를 보면 다음과 같다. 최초의 한전측 전원인 R.S.T. 입력전원의 출력에 의하여 부하(전자펌프)에 전원이 투입되어 가동되면 입력전원 센서에 의하여 M-G controller가 동작하여 모터발전기 측에 연결되어 있는 소형 시동용 동기전동기는 서서히 가속한다. 이 때 발전기의 무접점 절환회로는 off 상태이며, 동기전동기는 설정시간 후 동기속도의 약 102-103% 부근에서 속도센서(③)의 신호를 받아서 한전의 위상과 같아지면 M-G 절환회로에 의해 M-G controller와 분리되고, 동시에 무접점 절환회로에 의하여 한전전력에 의한 운전이 시작된다. 이 때 동기전동기의 무부하 전기손실은 수십 Watt 이내이며, 동기전동기의 회전각은 한전 위상에 자동 동기화 되어 운전되다가 정전시에는 그대로 발전기로 동작함으로써 한전의 위상각이 그대로 유지되는 발전기로 동작한다.

실험용 입력차단 스위치(④)의 보턴을 눌러 분리시키면 전자펌프에 공급되는 한전전력이 차단되고 모터발전기가 전력원이 되어 차단하기 전의 한전전원과 동일한 위상과 전압으로 전자펌프에 전력이 공급된다. 전자펌프(⑤)는 최종적인 부하이다. 신호변환기(⑥)는 계측기(⑦)의 입력신호가 -16~16 DVC 범위이므로 다양한 종류의 신호를 한 대의 계측기에서 동시에 측정하기 위하여 0~10 DVC로 바꾸는 장치이다.

모터발전기의 내부구성은 그림 3.2.6과 같다. 이 그림에서 보면 상부에는 휠(①)이 부착되고, 하부에는 기동용 동기전동기(⑦)가 설치되며, 중심에는 가장 주요한 부분인 모터와 발전기를 겸용으로 사용하는 발전기가 설치되어 있다. 정지되어 있는 최초에는 휠의 무게 때문에 발전기 고정자 코일(④)에 한전전원을 투입시켜도 운전이 불가능하므로, 발전기 고정자 코일(④)에 전원을 인가하지 않는 상태에서 기동용 동기전동기(⑦)를 운전하여 무부하 상태에서 60Hz인 1800rpm 보다 약 2~3% 높은 회전수로 가속시킨 다음 하부의 코일(⑥)을 여자시키면 ⑤의 코일에 전압이 유기된다. 여기에서 유기된 전압은 회전자 코일(③)에 다시 연결되어 발전기의 특성을 갖는 동기전동기가 된다. 이 때 ④번의 출력 라인에 역으로 한전전원을 투입하면 발전기 전체가 동기전동기화 되어 한전전원의 주파수에 동기화



- ① Wheel
- ② Motor-Generator
- ③ 속도검출계
- ④ 실험용 입력차단 S/W
- ⑤ 전자펌프
- ⑥ 신호변환기(0-10VDC)
- ⑦ 계측장비

그림 3.2.5 관성보완장치의 구성

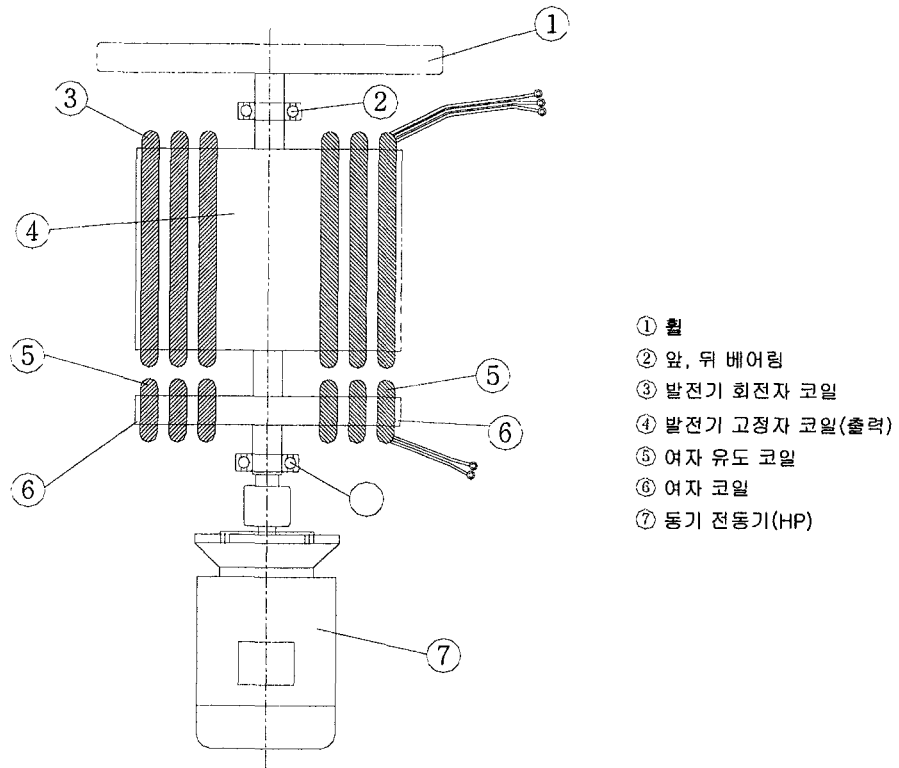


그림 3.2.6 모터발전기 내부 구성



되어 운전되고 기동용 동기전동기는 전원이 차단되어 완전히 전기적으로 분리된다. 이 상태에서 한전전원을 정전시키면 ④번 코일은 출력코일이 되어 발전 전압이 출력된다.

## 나. 실험방법

### (1) 계측장비

소듐 유량계는 Novatome사 모델인 전자유량계로 소형 유량계와 대형 유량계를 병렬로 설치하여 유량에 따라 선택적으로 측정에 사용할 수 있게 설계되어 있으나, 이 실험에서는 대형 유량계만 사용하였다. 이 유량계의 최대 유량은  $3.3 \text{ l/sec}$  이다. 이 유량계들은  $0\sim 20\text{mV}$  출력을 발생하므로 외부의 노이즈에 매우 민감하다. 이 유량계는 최대  $\pm 5\%$ 의 오차를 갖고 있다.

러시아에서 구입한 소듐 차압계를 사용하였다. 이 차압계는 소듐보다 무겁고 또한 소듐과  $150^\circ\text{C}$  이하에서 반응하지 않는 오일을 차압계에 채워 오일과 소듐이 직접 접촉하여 압력을 transducer에 전달하는 방법을 사용하고 있다. 이 실험에 사용된 유량계의 최대 차압은  $630 \text{ kPa}$  이다. 차압계로 연결되는 소듐 배관이 길어(4m 정도) 정상상태(steady state)에서의 압력전달에는 별 문제가 없으나 천이상태에서는 어느 정도 감응시간이 늦어져 오차가 증가할 것으로 예상된다. 전자펌프 제어기를 사용하지 않고 전자펌프에 순간적으로  $220\text{V}$  정도의 전원을 공급하였기 때문에 차압계가 불안정한 상태를 보였으며, 소형 휠을 사용하는 실험에서는 작동불능 상태가 되었다. 수차례 천이상태에서 차압을 측정한 결과를 분석한 바에 의하면 최대  $\pm 10\%$  정도의 오차와  $1\text{kPa}$  정도의 고정오차를 갖는 것으로 예측된다.

주요변수의 특성 및 측정오차, 기호 및 단위는 표 3.2.3에 기술하였다. 측정한 값들은 계측기 뿐만 아니라 판넬상에서 디지털 지시계에 의해 표시되므로 계측시에 두 값을 서로 비교함으로써 측정값의 정확도를 관찰하였다. 측정한 변수들의 측정방법과 다른 실험치로부터 도출한 인자들을 아래에 기술하였다.

### (2) 주요 변수의 정의

모터의 극수( $N_p$ )가 4극인 모터전동기이므로  $60\text{Hz}$  전원주파수( $f$ )를 갖

표 3.2.3 측정변수의 특성 및 오차

Parameter	Symbol	Unit	Steady state Error	Method	Remark
시간	t	sec	0.01 sec	측정	t=0 외부전력 차단
발전기 주파수	f	Hz	0.5 %	측정	"
발전기 전압	V <sub>1</sub>	volt	1%±0.1	측정	"
발전기 전류	A <sub>1</sub>	ampere	1%±0.01	측정	"
발전기 역율	F <sub>1</sub>	%	1%	측정	"
발전기 전력	P <sub>1</sub>	kW	1.73%±0.1	계산	$\sqrt{3} V_1 \cdot A_1 \cdot F_1$
발전기 효율	E <sub>w</sub>	%		계산	$\frac{100 \times \sqrt{3} V_1 A_1}{4\pi^2 I f \frac{df}{dt}}$
소뚝 유량	Q	m <sup>3</sup> /s	5%±10 <sup>-3</sup>	측정	
펌프 헤더	dP	kPa	10%±1	측정	
전자펌프 효율	E <sub>p</sub>	%	12%	계산	$\frac{100 \times Q \cdot dP}{P_1}$
소형 wheel	S	-	±1mm	-	∅649.8×t50.82mm
중형 wheel	L	-	±0.5mm	-	∅720.0×t100 mm
코일 회전자	-	-	±5%		52kg, ∅320mm

는 전력을 발전하기 위해서는 회전수( $N_s$ )는 다음과 같다.

$$N_s = \frac{120 f}{N_p} \quad (3.2.1)$$

그러므로 전동기는 초기에 1800rpm으로 운전되며, 회전속도센서에 의해 측정되는 회전수를 이용하여 주파수를 측정한다. 발전기 전압( $V_1$ ) 측정위치는 입력전환 스위치 바로 전단에서 측정하였다. 실험부에 공급되는 전력은 한전전력이 전압조절기를 거쳐 실험장치에 공급된다. 실험부에 공급되는 한전전력의 전압은 215~220V 정도였고, R.S.T. 위상에 따라 220V 일 때 0~2V 정도의 오차를 보였다. 이 실험에서는 모든 센서를 R 위상에 고정시키고 실험을 수행하였다. 발전기의 전류( $A_1$ )도 위상에 따라  $\pm 1\%$  정도의 차이를 보였다.

역율이란 전압과 전류의 위상차 즉, 전압과 전류의 파형 차이의 크기를 나타내는 계수이다. 역율은 다르게 표현하면 유효전력을 전체전력으로 나눈 값으로 나타나며, 일반적으로 부하의 용량이 클수록 역율은 좋고, 같은 용량이면 극수가 증가할수록 무부하 전류도 증가하여 역율이 나빠지게 되는 것이 보통이다. 발전기 계통의 역율( $F_1$ )은

$$F_1 = \frac{\text{유효전력}}{\text{전체전력}} \quad (3.2.2)$$

편의상 전체전력은 대개 kVA 단위로 읽으며, 유효전력은 kW 단위로 나타낸다. 발전기 전력( $P_1$ )은 실험에서 전력을 직접 측정하였으나 정의에 따라 전압과 전류 및 역율로 계산한 값과 미세한 차이를 보여 계산하였다. 3상 전류에서 전체전력( $W_t$ )은 다음과 같이 표시된다.

$$W_t = \sqrt{3} V \cdot A \quad (3.2.3)$$

여기에서  $W_t$ 는 watt, V는 volt 단위이고, A는 ampere 단위이다. 발

전기의 유효전력  $P_1$ 은 식(3.2.3)에 역을 곱한 형태로 이를 watt 단위로 표시하면 다음과 같다.

$$P_1 = \sqrt{3} V_1 \cdot A_1 \cdot F_1 \quad (3.2.4)$$

일반적으로 발전기의 효율은 생산되는 전체전력을 발전기의 출력으로 나눈 것이지만, 이 실험에서는 천이상태에서 발전기의 출력이 분명하게 정의되지 않으므로 발전기(휠) 효율( $E_w$ )은 발전기에서 생산되는 전체전력을 관성체의 운동에너지가 시간에 따라 변하는 변화율로 나눈 것으로 정의하였다. 이를 백분율로 나타내면 다음과 같다.

$$E_w = 100 \cdot \frac{\sqrt{3} V_1 \cdot A_1}{4\pi^2 I f \frac{df}{dt}} \quad (3.2.5)$$

여기에서 시간에 따른 주파수의 변화율은 주파수를 시간의 함수로 fitting하여 구하였다.  $I$ 는 관성모멘트이고, 실험에서 사용한 휠의 관성모멘트는 휠의 무게  $M$ 과 휠의 반경  $r$ 로 다음과 같이 주어진다.

$$I = \frac{M \cdot r^2}{2} \quad (3.2.6)$$

그러므로 한전전력으로 운전될 때에는 발전기 효율은 정의되지 않으므로 편의상 영(0)으로 기술하였다. 관성모멘트는 휠의 관성력 뿐만 아니라 내부에 있는 코일 회전자의 관성율도 동시에 고려하여야 한다.

전자펌프의 효율( $E_p$ )은 전자펌프가 외부에 하는 일량을 입력되는 일량으로 나눈 값으로 백분율로 표시하면 다음과 같다.

$$E_p = 100 \cdot \frac{Q \cdot \delta P}{P_1} \quad (3.2.7)$$

여기에서  $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 는 유량을 나타내며,  $\delta P(\text{Pa})$ 는 펌프 양단의 압력차를 나타낸다.

#### 다. 실험자료 생산

##### (1) 측정변수 및 실험자료

이 실험에서 측정한 값들은 관성보완장치의 회전수, 전압, 전류, 익울과 소뚝 루프에서는 전자펌프 유입구 및 유출구에서의 소뚝 온도, 유량 및 전자펌프 유출구와 소뚝 공급탱크 사이의 차압을 측정하였다. 이 측정치를 이용하여 유효전력, 발전기의 효율 및 전자펌프의 효율을 계산하였다.

제어패널에는 소뚝 루프를 제어, 계측하기 위한 장비 이외의 관성보완장치용 제어기 및 표시기(display indicator)가 설치되어 있다. 이와 아울러 센서의 계측신호를 0~10 DVC로 변환시키는 신호변환기도 내부에 설치되어 있다. 신호변환기와 측정 센서는 수 차례 보정하였다. 보정시에 발생하는 오차는 센서 자체 오차의 10% 이하이었고, 이 오차도 전체오차에 포함되어 있다. 이 보고서에는 보정한 관계식과 그래프들은 기술하지 않았다.

##### (2) 측정방법

모터발전기가 한전전력과 동기화되어 있는 상태에서 소뚝 루프가 정상상태(steady state)로 운전될 때 측정을 시작하였고, 외부전원(한전전력)을 차단하여 휠이 정지할 때까지 데이터를 수집하였다. 두 종류 휠 각 $^2$ 에 대해 3번씩 측정하였다. 제어패널에서 변환된 신호와 소뚝 루프에 설치된 유량계, 차압계 및 열전대에 의한 온도신호를 Workstation으로 제어되는 HP745B 계측기를 사용하여 수집하였다. 측정에 사용한 소프트웨어는 HPVee 이다. 측정에는 0 DVC에서 10 DVC로 변환되는 신호값과 변환한 실제값이 기록되며, 측정시에는 모든 값들이 그래프로 화면에 나타난다. 이와 동시에 실험분석에 보조적으로 사용하기 위하여 패널에 외부전원을 차단하기 전의 상태인 초기상태(steady state)에서 지시되는 표시기의 데이터를 별도로 기록하였다.

### (3) 실험절차

- ① 수동입력전환 스위치를 관성보완장치를 통과하지 않는 외부 한전전력으로 전환시켜 소듐 루프를 평형상태로 운전한다. (6시간 이상 소요)
- ② 관성보완장치에 전력을 공급한다. (관성보완장치에 전력을 공급하여도 모터발전기에 한전전력이 공급되지 않은 상태임)
- ③ 모터발전기에 한전전력이 차단된 상태에서 기동용 동기모터를 작동하여 휠의 회전수가 1800rpm 이상 되게 가속시킨다.
- ④ 한전전력과 모터발전기의 전력 위상이 동기화 되면 자동으로 한전전력이 모터발전기에 전력을 공급하게 되고 ,기동용 동기모터의 작동이 정지된다.
- ⑤ 수동입력전환 스위치를 조작하여 전자펌프에 공급되는 외부 한전전력을 관성보완장치로 연결되는 전원으로 바꾼다.
- ⑥ 다시 소듐 루프가 평형상태를 유지하게 장시간 운전한다. (이 때에는 관성보완장치에 공급되는 한전전력으로 펌프가 운전됨)
- ⑦ 소듐 루프가 평형상태가 되면 계측기를 테스트 모드에서 측정모드로 바꾸고 데이터를 저장하기 시작한다.
- ⑧ 패널상의 표시기에 나타나는 값들을 기록한다.
- ⑨ 외부전원 차단 스위치를 눌러 한전전력을 차단한다.
- ⑩ 휠이 정지될 때까지 기다렸다가 계측기의 측정모드를 정지시킨다.

### 3. 실험결과

#### 가. 오차분석

본 연구에서는 실험결과에 대한 오차해석을 ASME 규격에 따라 수행하였다. 본 실험은 계측기의 측정범위가 최대값 근방에서 영으로까지 감쇄하는 천이상태에서의 실험이다. 센서의 오차는 대개 reading error에 고정된 error인 어떤 값  $\alpha$ 의 합으로 주어지거나 또는 full scaling error로 주어진다. 그러므로 일반적으로 센서를 사용할 때에는 센서가 계측할 수 있는 최대값(full scale)의 100%에서 10% 정도 범위까지 측정에 사용한다. 즉, 측정할 수 있는 최대값의 낮은 범위에 갈수록 오차가 높아지고, 아주

낮은 범위에서는 측정값이 오차범위 내에 포함되는 현상이 발생한다.

본 실험에서는 관성력이 적어질수록 역을 제외한 모든 측정값들이 기하급수적으로 감소하다 최대값의 10% 미만에서 장시간 계측되는 형태이다. 정상상태 실험에서는 노이즈로 들어오는 미세한 값들이 별 의미가 없지만 이 실험의 낮은 범위에서는 센서 자체의 오차와 외부에서 들어오는 노이즈의 미세한 변화가 상대적으로 큰 값의 변화로 나타난다. 그러므로 이 실험에서는 낮은 범위에서의 계측기의 보정이 정밀히 요구되어 정상상태에서 사용하는 1차식 보정방법 대신 다차원 함수로 보정하여 전 구간에서 최대한 잘 맞게 보정하였고, 휠이 정지한 후에 미세한 zero point의 변화를 다시 보정하였다. 그러나 계측기의 자체 특성으로 인하여 낮은 범위에서는 오차가 높을 뿐만 아니라 천이상태이므로 오차를 정확히 예측할 수 있는 방법이 없다. 이 실험분석에서는 외부전력을 차단하기 전의 상태 즉, 정상상태에서의 오차는 표 3.2.3에 기술되어 있다. 계측기의 낮은 범위에서 오차를 줄이는데 중점을 두어 상대적으로 정상상태의 오차가 높아지는 현상을 보였다.

#### 나. 실험결과 정리

실험의 초기 값 즉, 외부전력을 차단하기 전의 값을 표 3.3.1에 정리하였다. 이 자료에는 정상상태에서부터 시간의 변화에 따라 1초 내지 2초 간격으로 진동수가 2 Hz 될 때까지의 주파수, 전압, 전류, 발전기 효율, 역을, 유효전력, 유량, 펌프 헤드(펌프 양단 압력차) 및 펌프효율이 기술되어 있다. 그러나 소형 휠 실험에서는 소뎀 차압계의 고장으로 펌프헤드는 측정하지 못하였다.

모터발전기를 사용하지 않는 경우, 즉 휠에 의한 관성력이 없는 경우에 대해서도 전자펌프에 공급되는 전원을 차단하는 실험을 6차례 수행하였으나 이 보고서에는 실험자료를 기술하지 않았다. 이 실험에서 살펴보면 관성력이 없으면 전자펌프는 2초 이내에 유동이 10% 이하로 줄고 8초 정도에서 유동을 거의 상실함을 알 수 있었다.

실험을 시작하기 전에 유량과 전자펌프 양단의 압력강하를 측정값의 타당성을 분석하기 위하여 전자펌프 특성곡선이 주어진 300V 입력전

표 3.3.1 전자펌프 관성보완장치 측정 초기값

Test No.	발전기 전압(V)	발전기 전류(A)	발전기 전체전력(kW)	발전기 유효전력(kW)	발전기계통 역율(%)	유량 (l/sec)	펌프Head (Kpa)	비 고
	$V_1$	$A_1$	$P_{1,T}$	$P_{1,e}$	$F_1$	$Q$	dP	
test-25	219.13	10.50	3.984	3.924	98.49	2.543	-	small wheel
test-26	217.40	10.50	3.953	3.933	99.50	2.536	-	"
test-27	213.38	10.43	3.854	3.831	99.40	2.509	-	"
test-28	219.38	10.56	4.012	3.961	98.74	2.504	162.7	large wheel
test-29	216.63	10.42	3.910	3.808	97.39	2.524	162.3	"
test-30	215.52	10.58	3.949	3.929	99.50	2.530	160.7	"



압에서 유량과 압력강하를 측정하였다. 이 때 유량 3.3 l/sec에서 350kPa의 압력강하를 보였다. 소음 온도 250°C에서 이와 같은 유량이면 펌프 특성곡선에서는 전자펌프의 헤더가 355kPa 정도이므로 큰 오차는 없음을 확인하였다. 그림 3.2.3에서 측정하지 못한 전자펌프 입구와 출구에서의 압력강하를 계산하여 측정한 값에 보정하는 방법으로 전자펌프 양단 압력차를 구하였다. 보정한 관계식은 다음과 같다.

$$dP = 1.811 Q^2 \quad (3.3.1)$$

여기에서 dP는 kPa 단위이며, Q는 l/sec 단위이다. 3.3 l/sec에서 20kPa 정도이다. 이 값을 보정한 전자펌프 양단의 압력차는 그림 3.3.1과 같다.

#### (1) 시간에 따른 실험인자들의 변화

실험에서 측정한 각 인자들의 변화를 그래프들로 표시하였다. 다음에 기술되는 그래프들에서 휠을 구분하는 기호 중, S는 소형 휠에 대한 실험을 의미하며 L은 대형 휠을 의미한다. 그래프들에 나타나는 Load는 식 (3.2.3)으로 기술되는 전체전력을 나타낸다.

그림 3.3.2은 소형 휠을 사용하여 측정한 3개의 실험자료 중에 대표적으로 시간에 따른 각 인자들의 변화를 보인 것이고, 그림 3.3.3는 대형 휠을 사용하여 측정한 인자들의 변화를 보인 것이다. 이 두 그림에서 보면 역율과 효율을 제외한 실험인자들의 값은 지수함수로 감쇠(decay)하는 형태를 보이고 있으며, 이들 중에서 주파수를 제외한 다른 인자들은 외부전원 차단시(time=0)에 짧은 시간내에 급격히 떨어졌다가 서서히 지수함수로 감쇄함을 볼 수 있다. 전자펌프 제어기를 사용한 다른 실험에서 보면 측정치를 초기값으로 무차원하였을 때, 초기에 떨어지는 비율은 펌프에 공급되는 초기의 부하가 높을수록 떨어지는 비율이 높았다.

역율은 계단형태로 감소하다가 증가하는 양상을 보였다. 이 이유는 전자펌프에 공급되는 전력공급배선에 전자펌프 구입시 Novatome에서 제공한 역율보상장치를 설치하였기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 똑같이 역

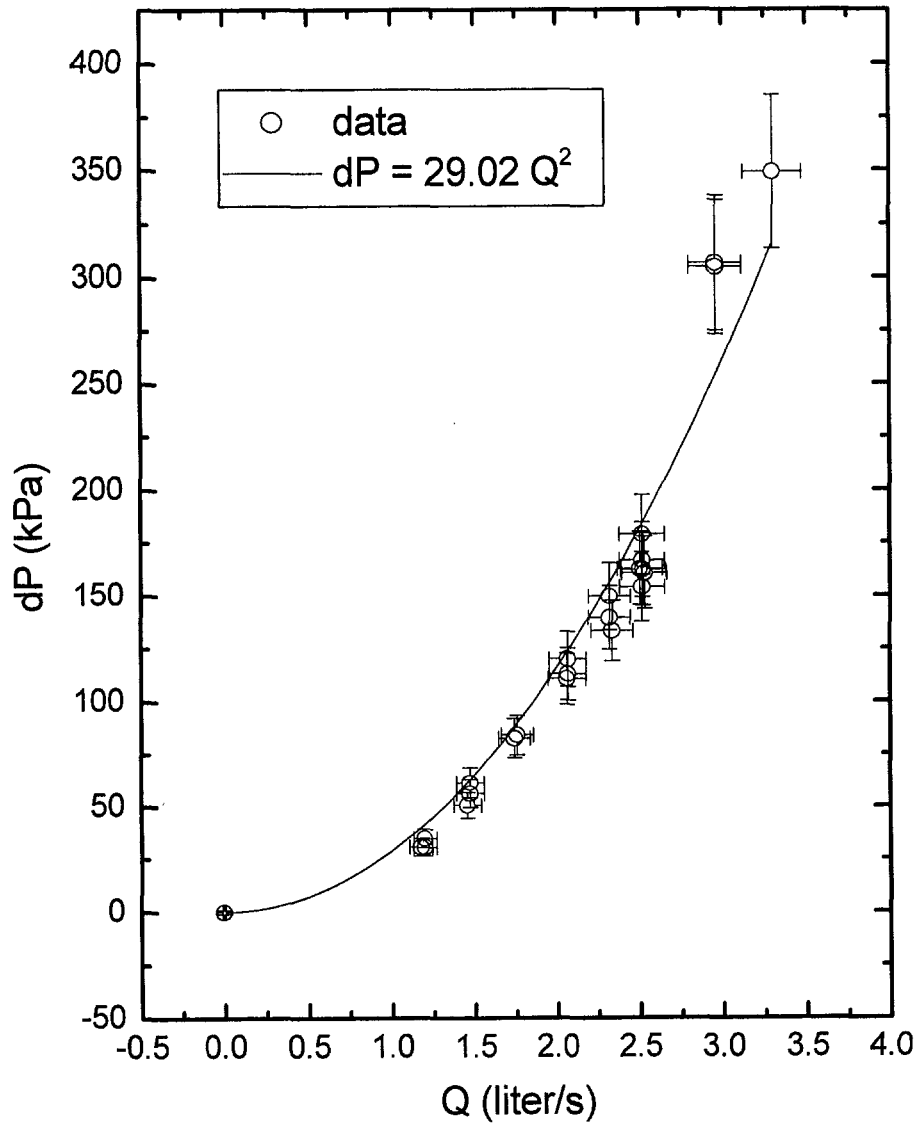


그림 3.3.1 측정된 시스템의 유량-펌프 헤드 특성

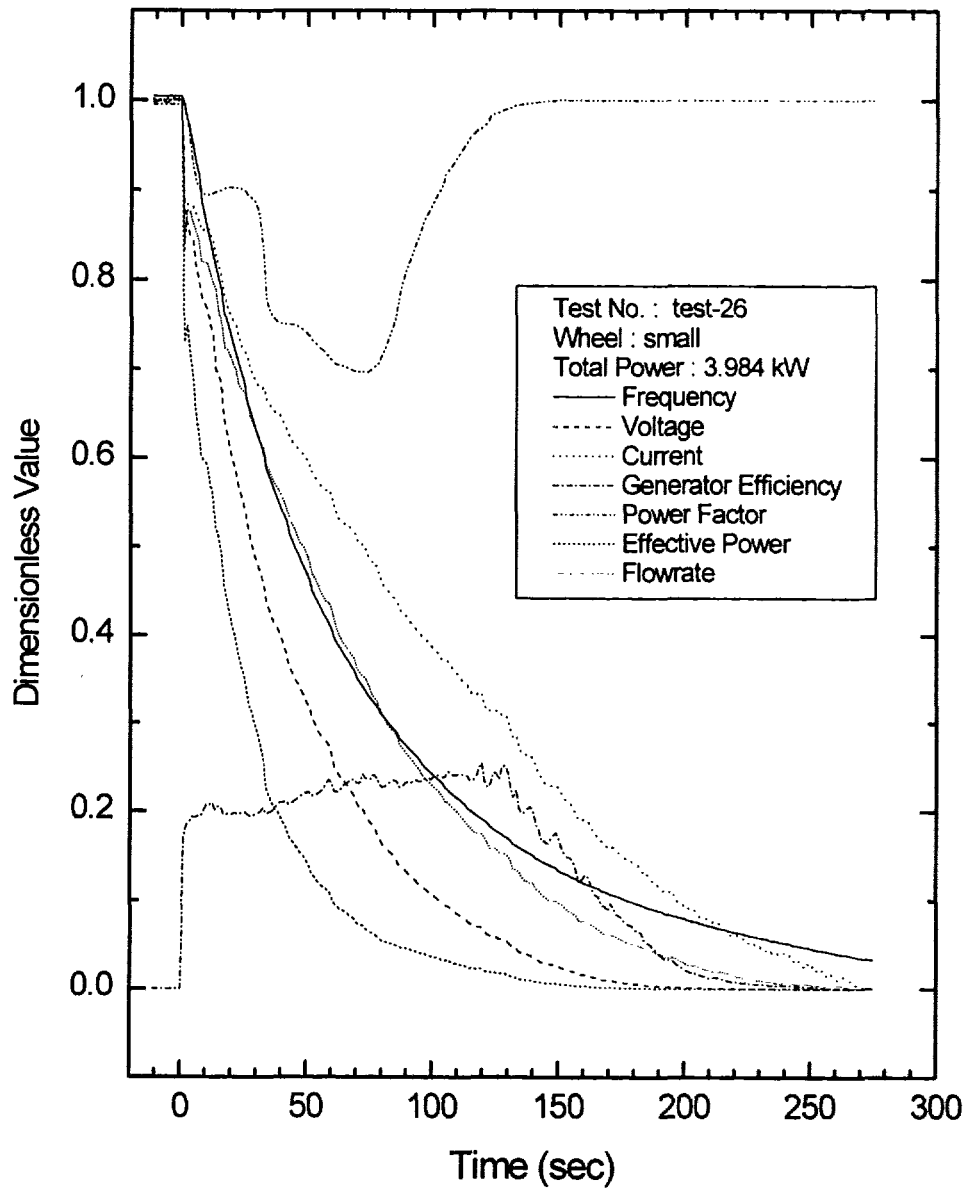


그림 3.3.2 측정된 값들의 시간에 따른 변화율 (small wheel)

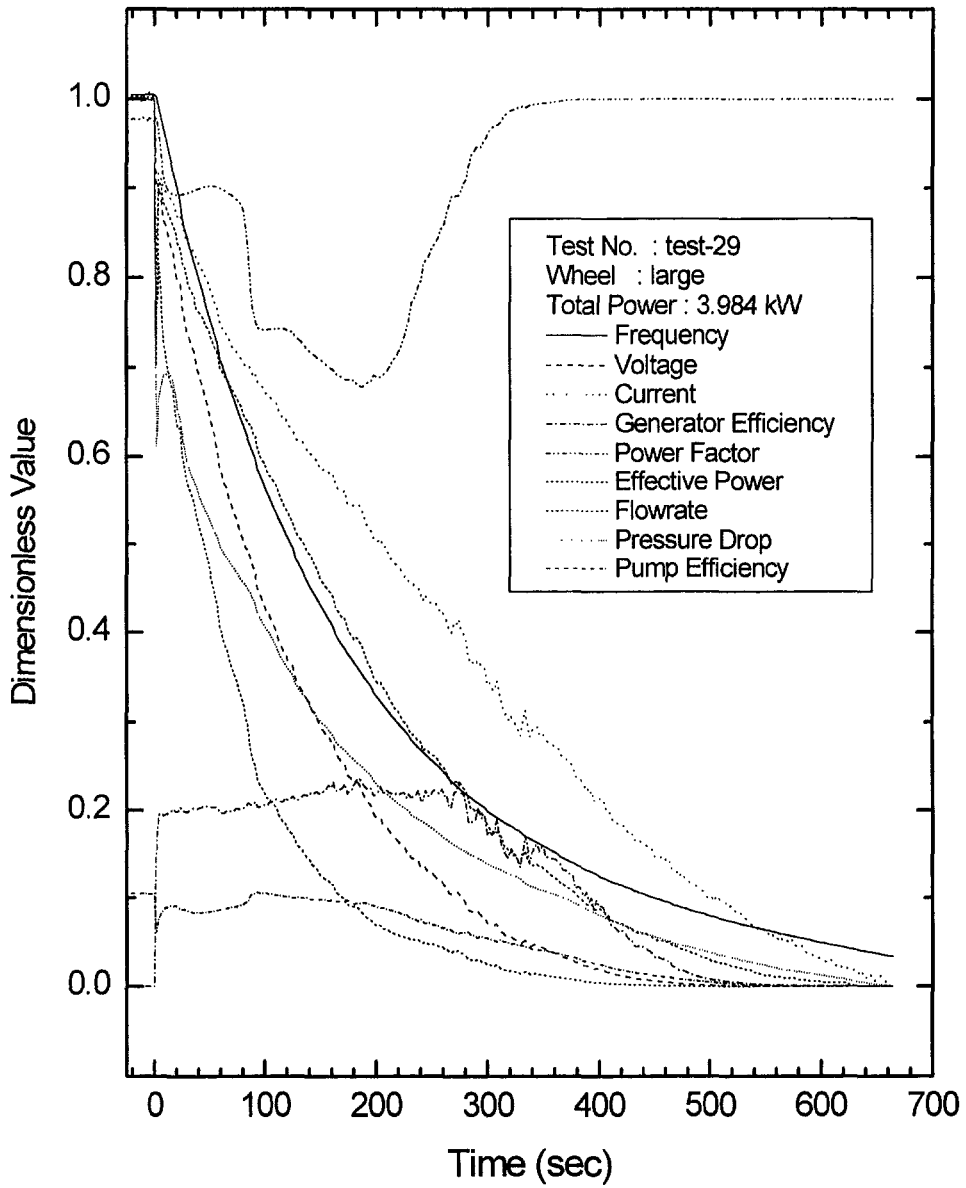


그림 3.3.3 측정된 값들의 시간에 따른 변화율 (large wheel)

역율보상장치를 사용하였지만 전자펌프 제어를 사용할 때에는 역율이 서서히 감소하였다 다시 증가하는 양상을 보였다.

그림 3.3.4는 시간에 따른 각 실험들에서의 주파수 변화를 나타낸다. 6개의 실험에서의 전체전력이 유사하다고 볼 때, 휠의 크기가 같으면 시간에 따라 감소하는 양이 같으며, 휠이 커지면 같은 주파수로 감소하는데 필요한 시간이 길어진다.

그림 3.3.5와 그림 3.3.6dsm 각각 전압과 전류의 시간에 따른 감쇠현상을 보이고 있다. 여기에서도 휠의 회전주파수에서와 같은 현상을 보이고 있고, 이들 외에 다른 실험 인자들도 같은 현상을 보였다.

## (2) 휠의 회전진동수에 따른 실험인자들의 변화

그림 3.3.7은 휠의 회전진동수에 따른 전압의 변화를 보이고 있다. 초기의 전력이 유사할 때, 휠의 크기에 관계없이 진동수가 같으면 전압이 같음을 볼 수 있다. 다른 실험인자들도 이와 같은 현상을 보였다. 전압은 5 Hz까지 1차함수(직선적)로 휠의 회전진동수에 비례함을 볼 수 있다. 그림 3.3.8dsm 휠의 회전진동수에 따른 전류의 변화를 보여주고 있고, 그림 3.3.9는 모터발전기의 효율을 보이고 있다. 이 효율은 식(3.2.5)와 같이 정의되었으며, 4kW 정도의 초기부하에서 이 모터발전기의 효율은 대략 20% 정도이다. 다른 실험에서 효율은 초기부하가 높을수록 증가하는 경향을 보였고, 전자펌프 제어를 사용할 경우에는 같은 초기부하일지라도 다른 값을 보였다.

그림 3.3.10은 전자펌프의 역율을 나타낸다. 역율은 시스템에 공급되는 전압과 전류의 위상차에 따라 달라지기 때문에 초기 공급되는 전력의 질 및 공급받는 부하의 전기적 특성에 따라 변하므로 시스템의 고유 특성이 다. 또한 많은 전기용량이 필요한 기기의 배선에 일반적으로 설치하는 역율보상장치에도 관계되므로 역율은 전자펌프에 실제적으로 공급되는 유효 전력에 많은 영향을 미치지만 객관화하기는 어렵다.

그림 3.3.11은 휠의 회전진동수에 따른 전자펌프에 공급되는 유효전력을, 그림 3.3.12는 소듐 루프에서의 유량의 변화를 보여주고 있다. 이 유량을 나타내는 그래프에서 보면 사용한 전자유량계는 5% 정도의 오차를 갖

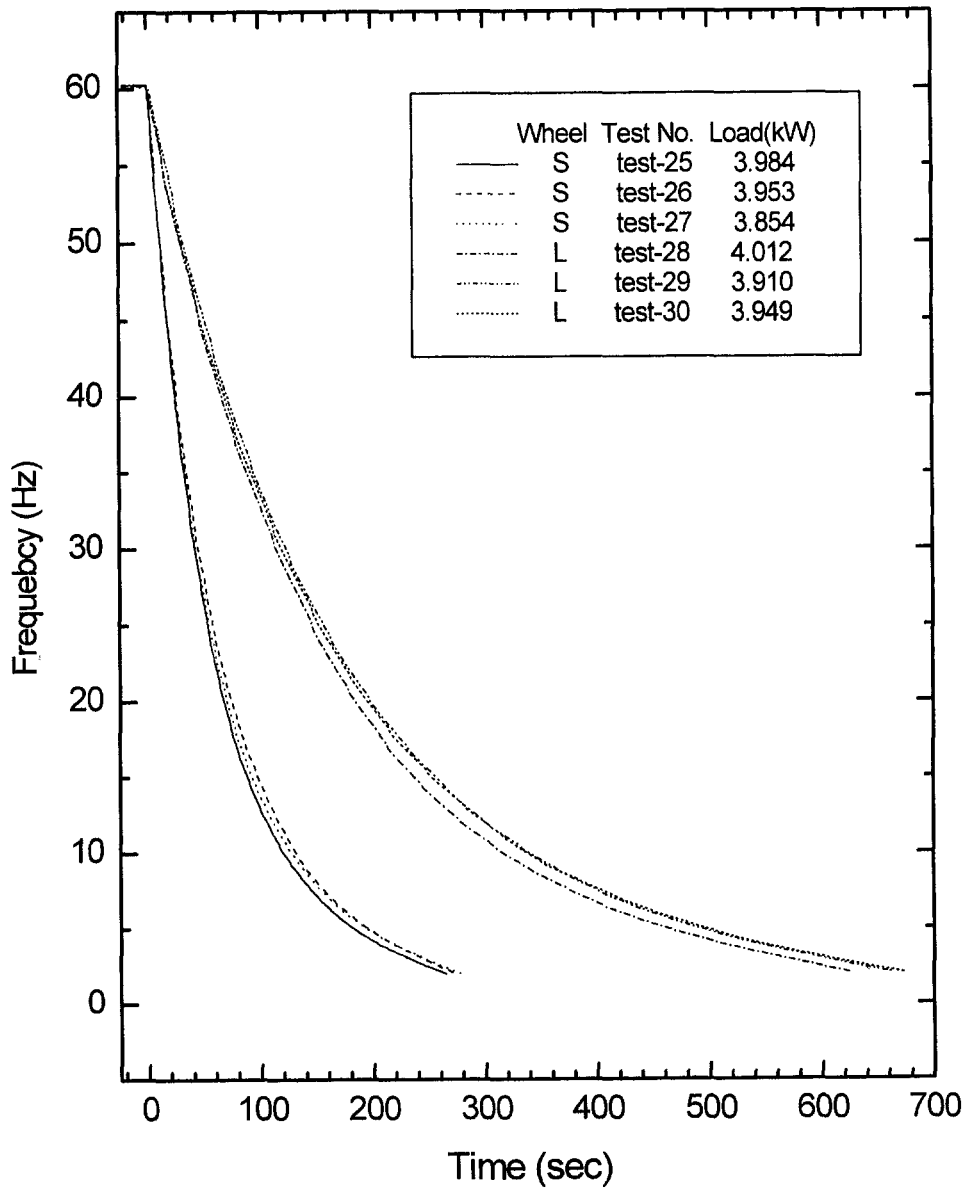


그림 3.3.4 시간에 따른 휠의 회전진동수 감쇠특성

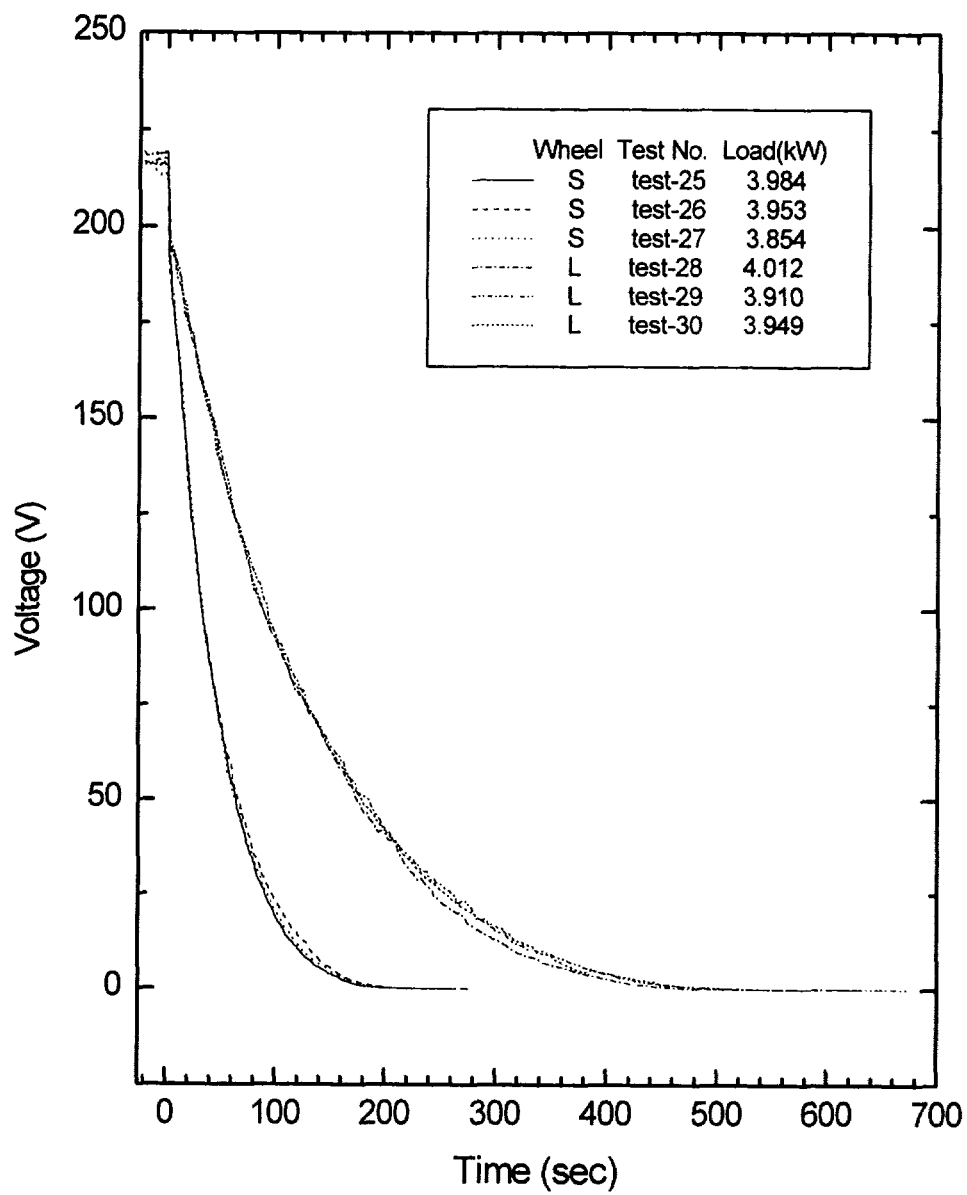


그림 3.3.5 시간에 따른 전압 감쇠특성

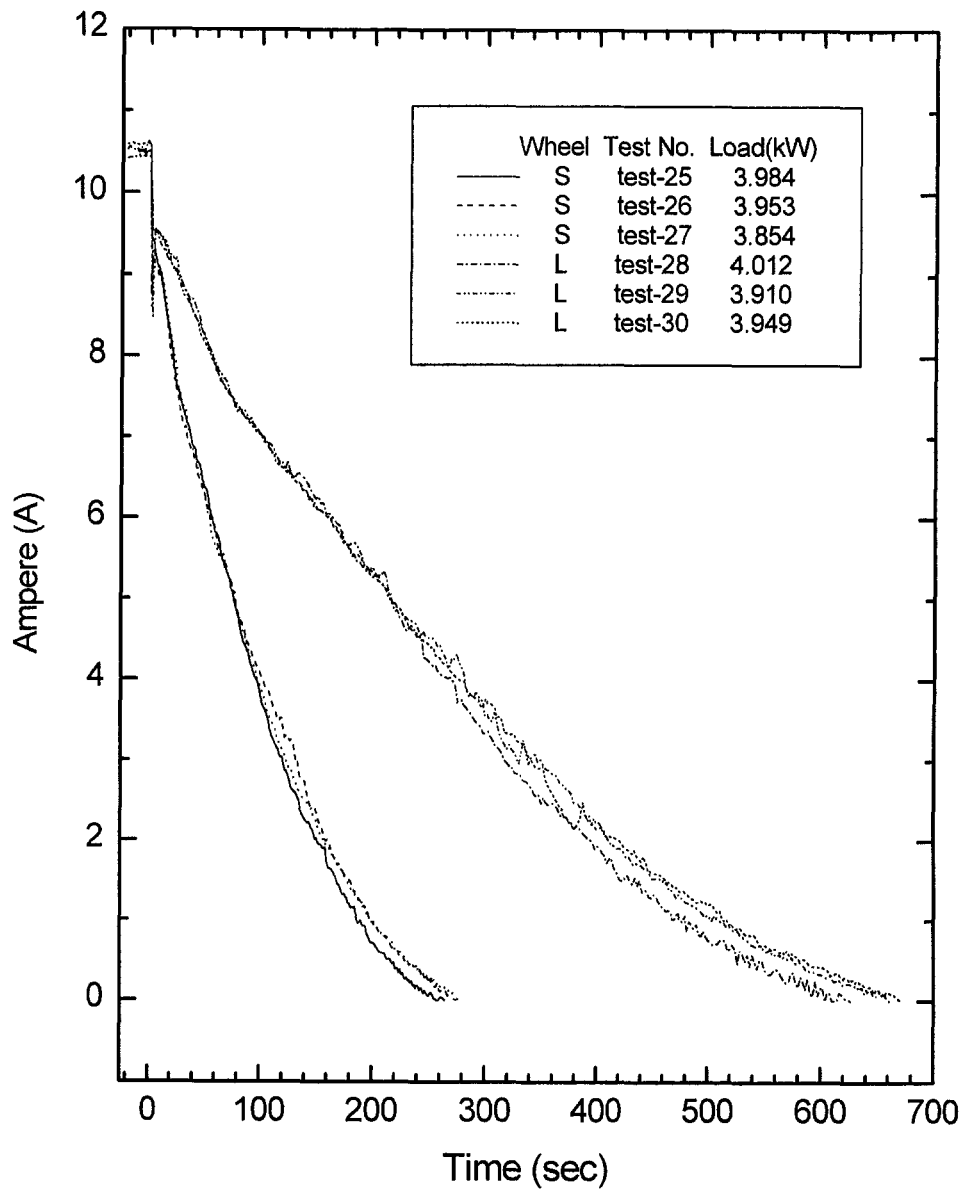


그림 3.3.6 시간에 따른 전류 감쇠특성



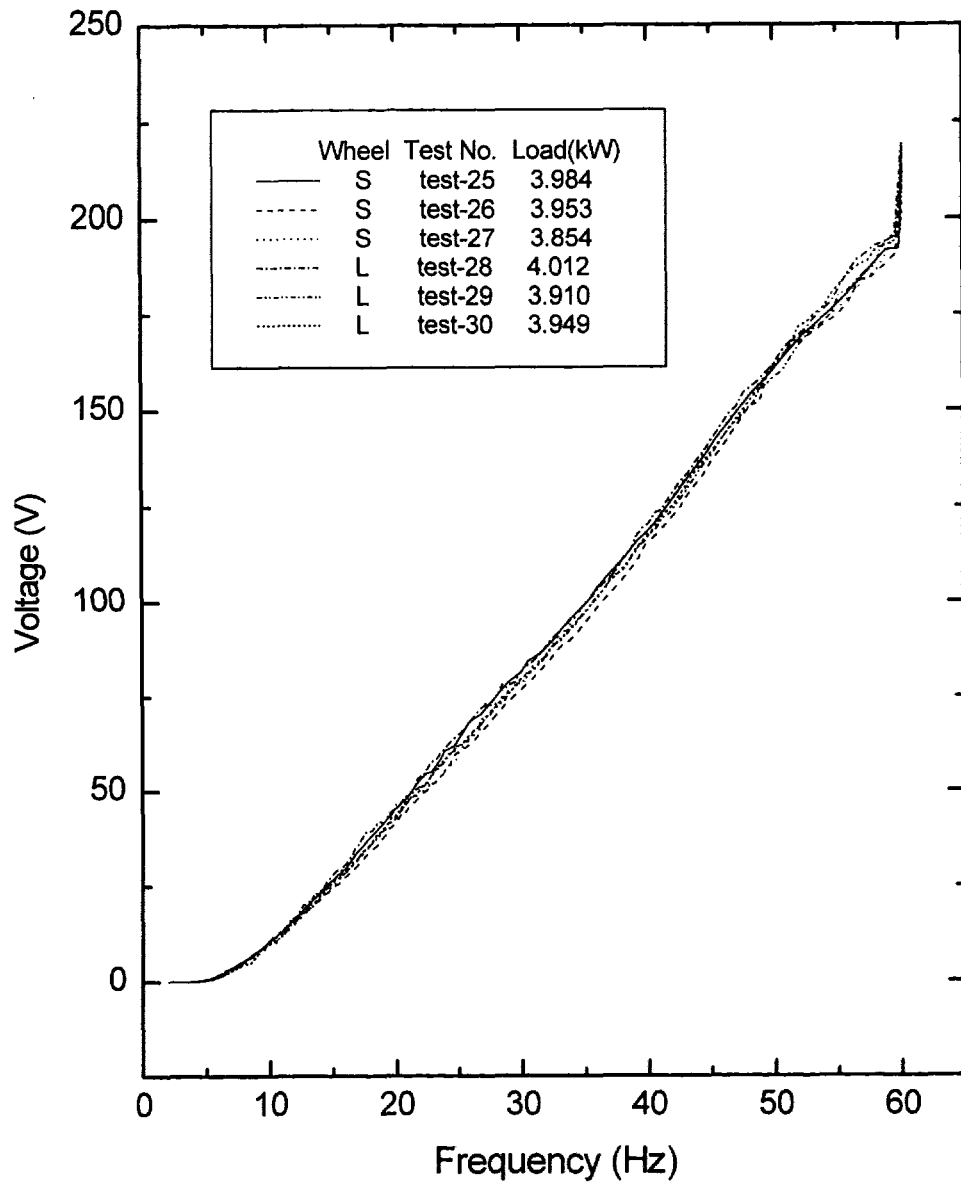


그림 3.3.7 휠의 회전진동수에 대한 출력전압의 변화

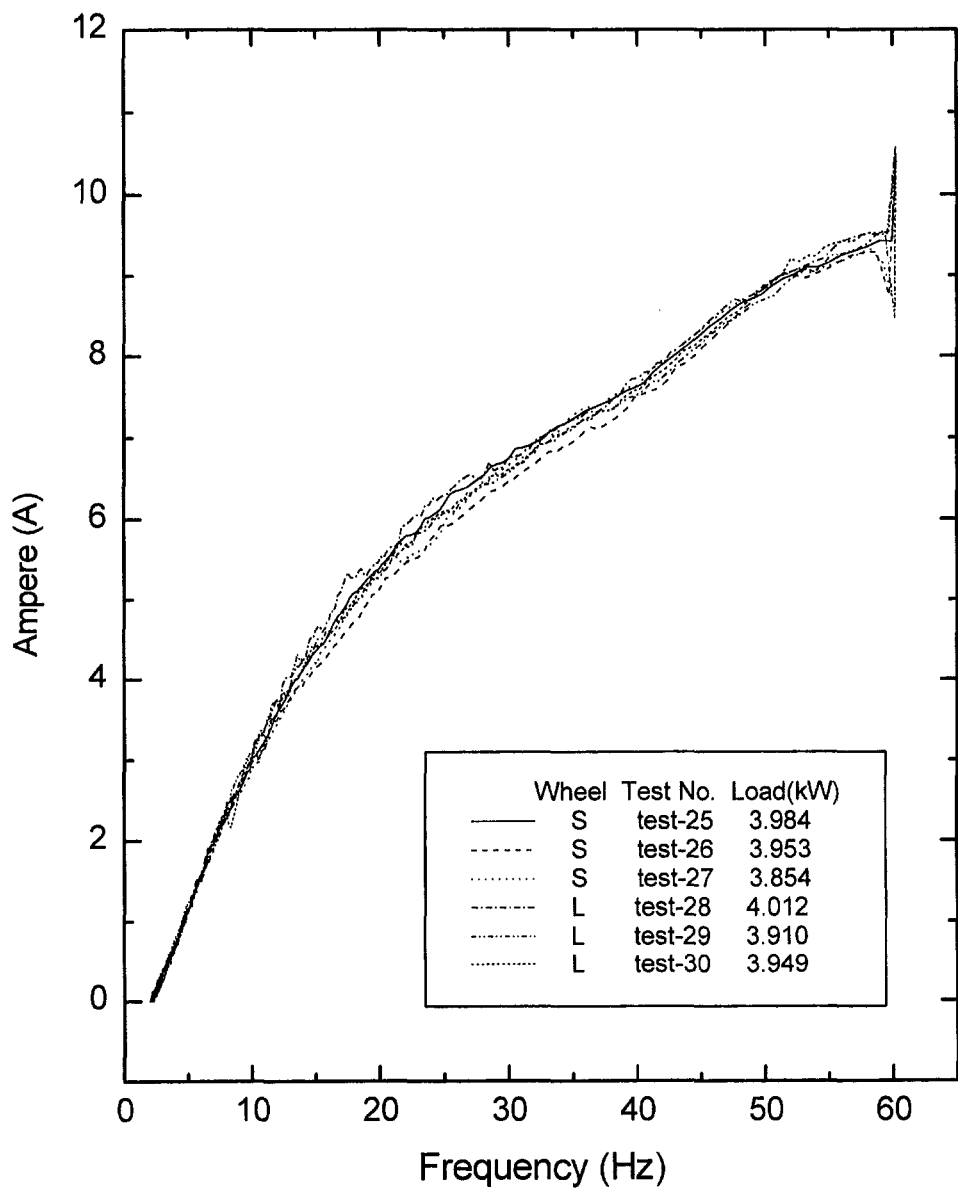


그림 3.3.8 휠의 회전진동수에 대한 출력전류 변화

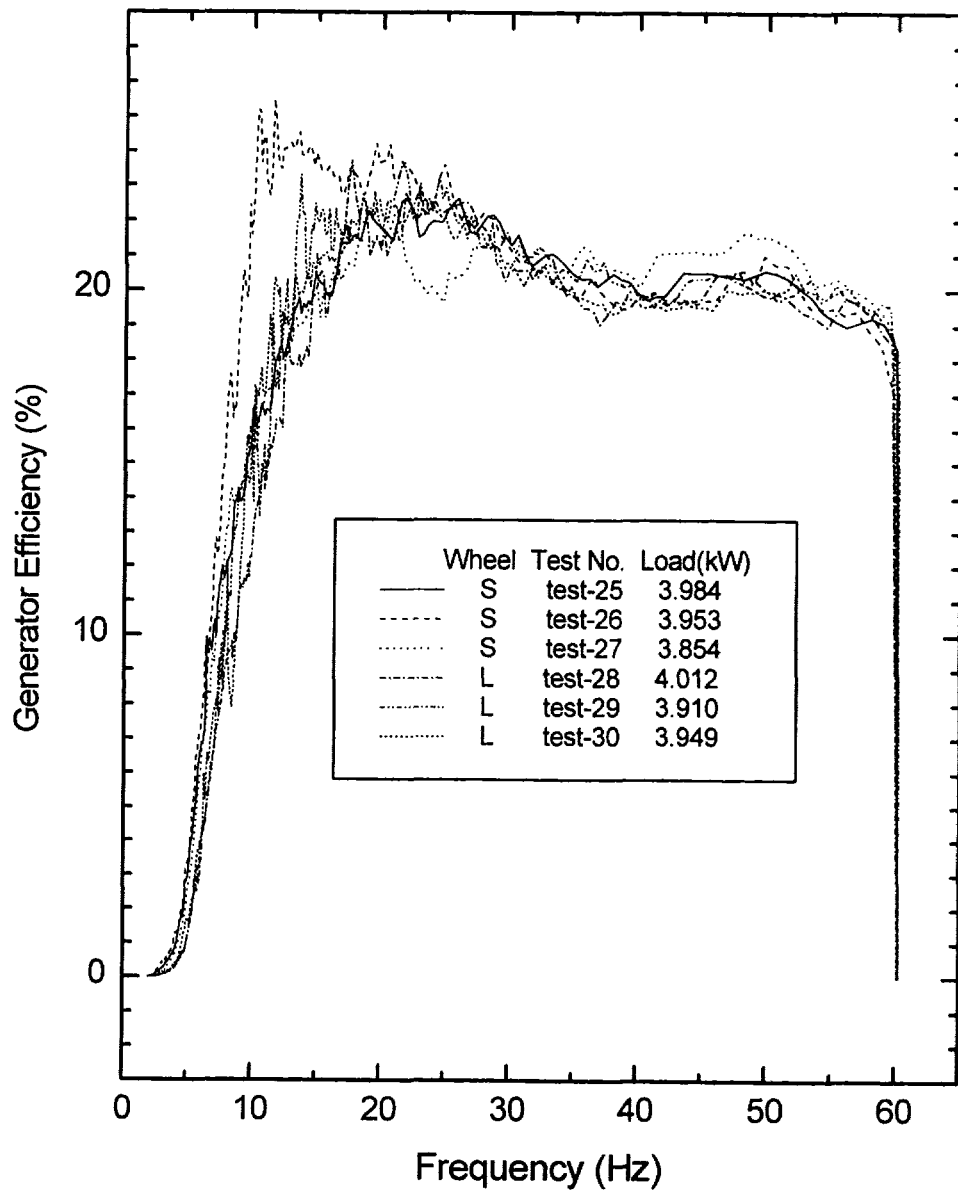


그림 3.3.9 휠의 회전진동수에 따른 발전효율

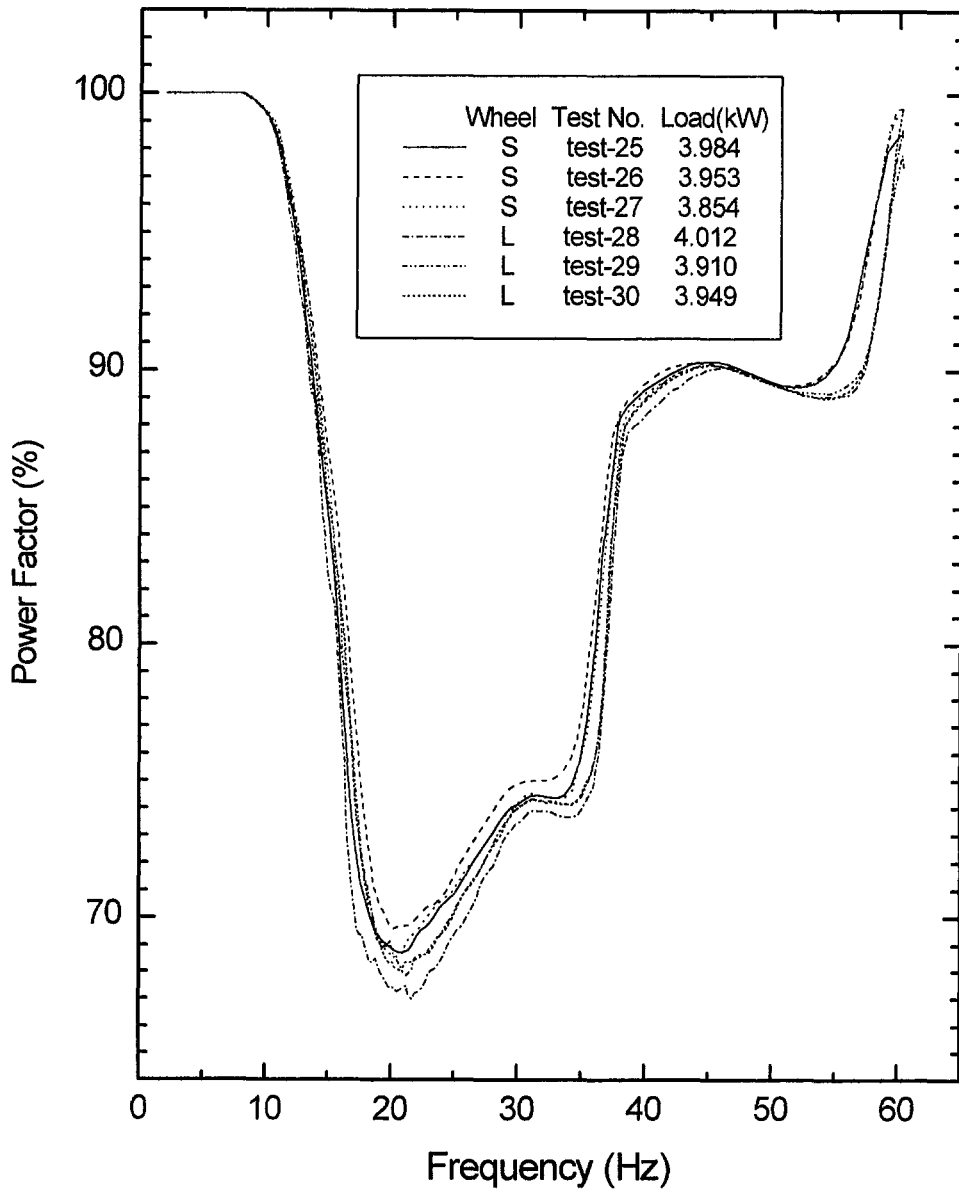


그림 3.3.10 휠의 회전진동수에 따른 역률의 변화

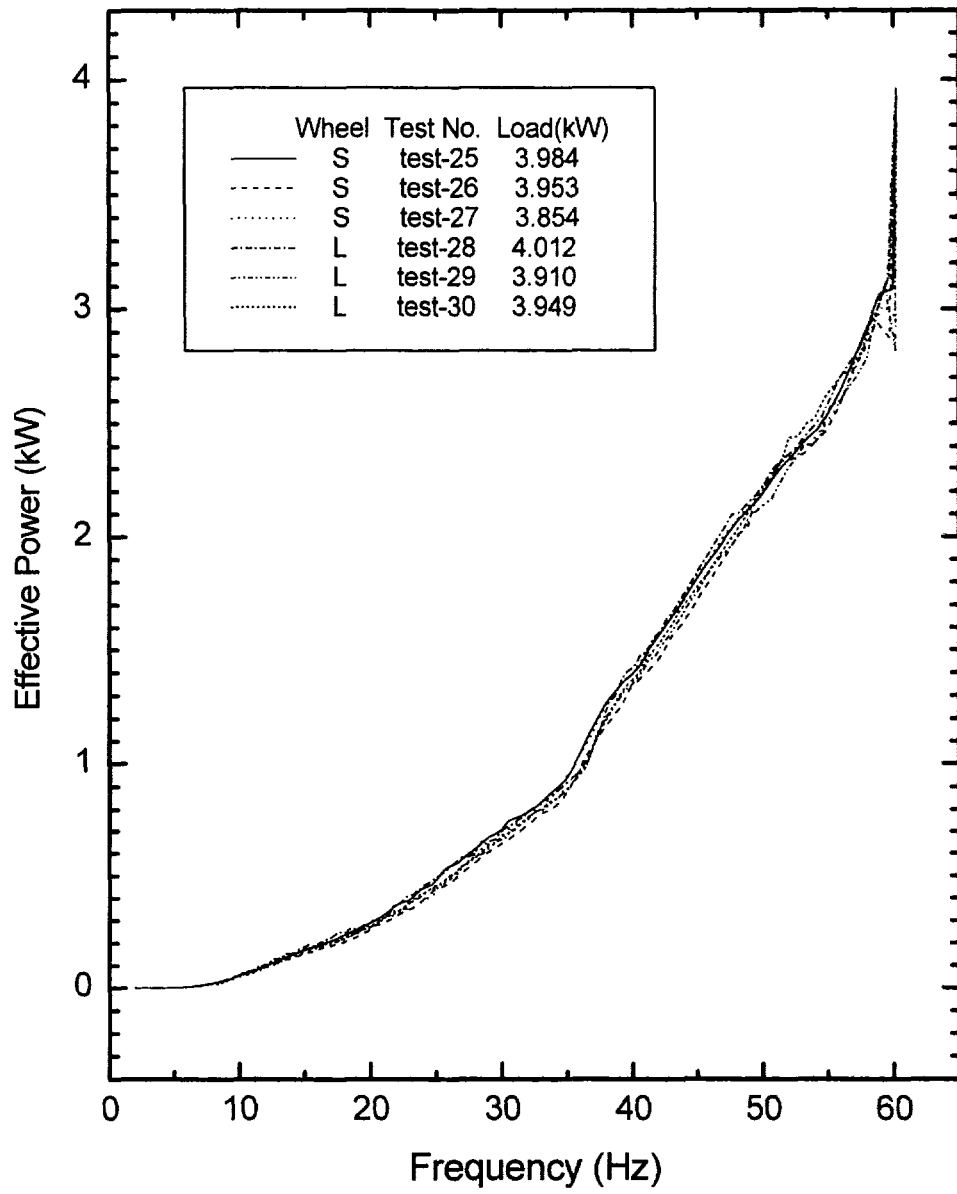


그림 3.3.11 휠의 회전진동수에 따른 유효전력

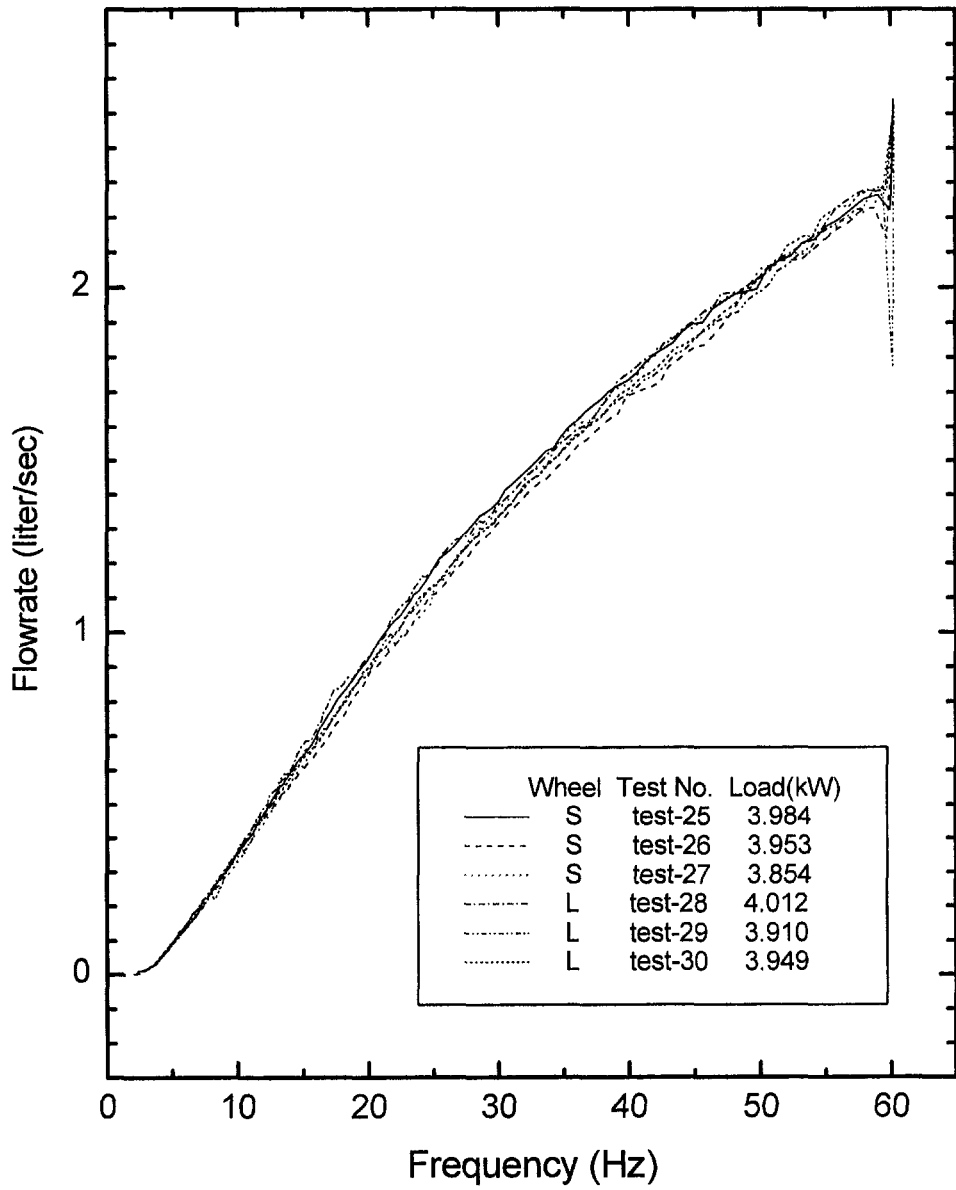


그림 3.3.12 휠의 회전진동수에 따른 유량의 변화

지만 다른 전기적 계기와 거의 동등한 측정의 반복성을 보여주고 있다. 그림 3.3.13는 펌프의 헤드를 나타낸다. 펌프의 헤드는 측정된 인자들 중에서 가장 낮은 반복성을 보여주고 있으며, 오차분석에서도 가장 높은 오차를 보였다. 이 실험에서 사용한 오일과 소뿔이 직접 접촉하는 형태의 차압계는 정상상태(steady state) 측정에서는 오일과 소뿔의 접촉면에서 큰 충격 없이 양호하게 유지할 수 있으므로 신뢰성이 있으나, 본 실험과 같이 2기압 정도로 급격히 변하는 운전조건에서는 신뢰성이 높지 않다.

그림 3.3.14은 전자펌프의 효율을 나타낸다. 전자펌프의 효율을 측정된 값과 전자펌프 특성곡선을 이용하여 계산한 표 3.2.2를 비교하였다. 실험에서 보면, 소뿔 온도 246°C에서 195V를 공급하여 2.52 l/sec의 유량일 때 그림 3.3.14에서 대략 10% 정도의 효율을 보인다. 표 3.2.2에서는 20°C 온도에서 220V의 전압을 공급하여 2.5 l/sec 유량이면 9.6% 효율을 보인다. 측정된 유량-압력강하 특성과 전자펌프 특성곡선은 어느 정도 일치함을 알 수 있다.

#### 다. 실험자료 분석

##### (1) 시간의 무차원화

앞에서 기술한 바와 같이 휠의 크기에 따라 특정 실험인자가 같은 값에 도달하는 시간이 달라짐을 볼 수 있었다. 이를 분석한 결과, 초기부하가 같으면 특정 실험인자가 같은 값에 도달하는 시간이 관성체 초기의 운동에너지에 비례함을 알 수 있었다. 즉,

$$t_e \sim \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (3.3.2)$$

여기에서  $t_e$ 는 특정 인자가 감쇄시에 같은 값에 도달하는 시간이고,  $\omega$ 는 각속도이다.  $I$ 는 관성체의 관성 모멘트이며 휠에서는 식(3.2.6)과 같이 주어진다.

전자펌프 제어기를 사용한 다른 실험에서  $t_e$ 는 전자펌프에 공급되는 초기전류( $A_p$ )에 대략적으로 반비례함을 알 수 있었다. 즉,

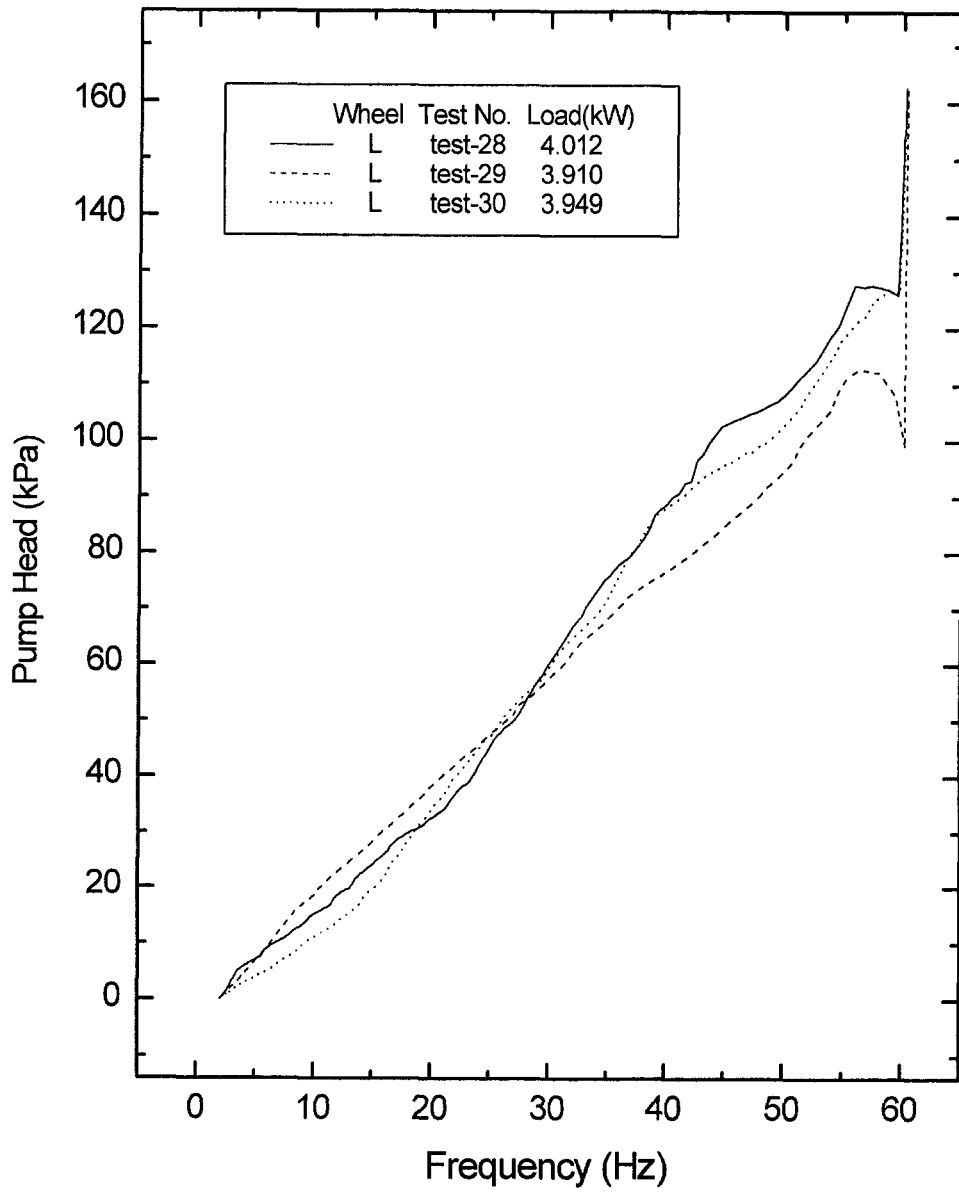


그림 3.3.13 휠의 회전진동수에 따른 펌프헤드특성



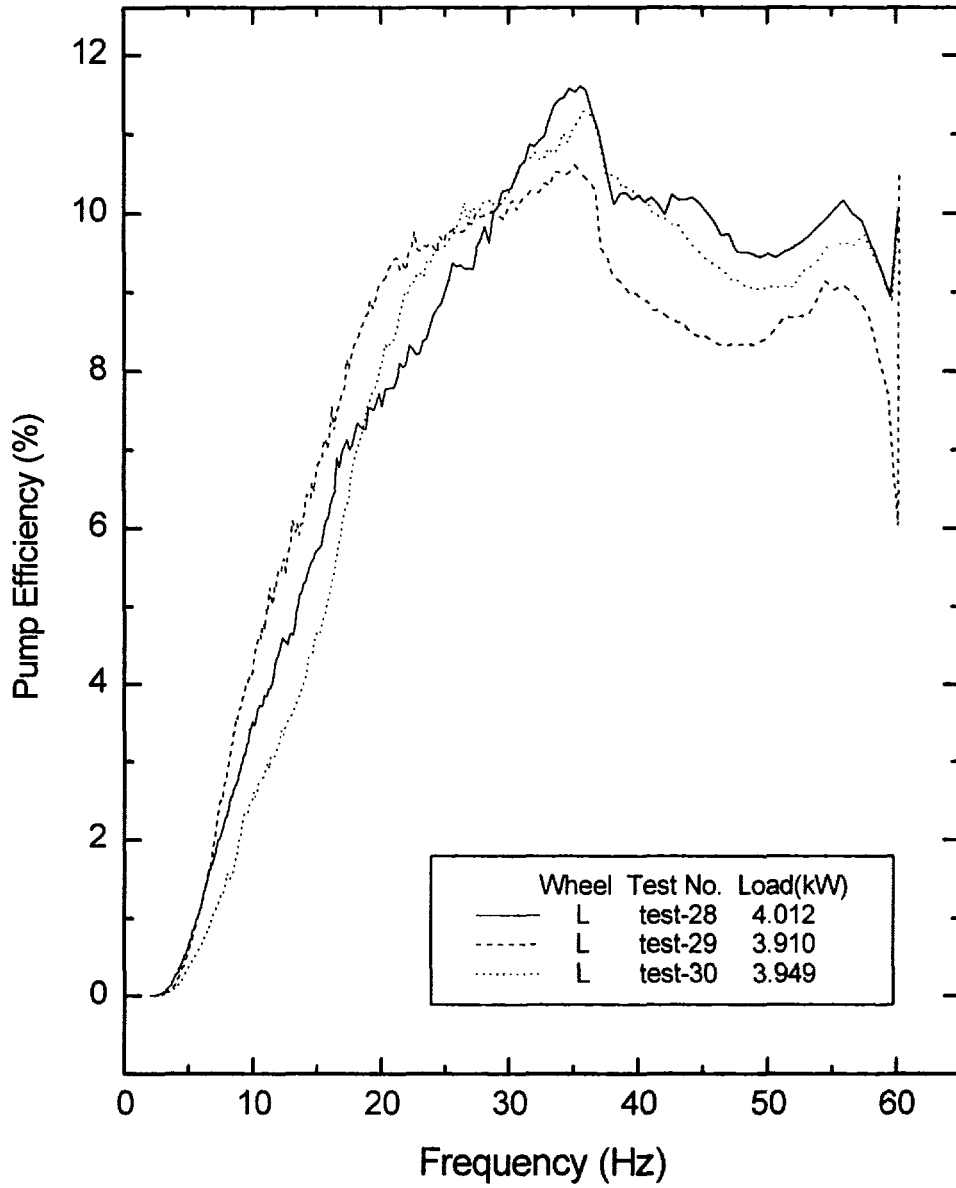


그림 3.3.14 휠의 회전진동수에 따른 펌프효율

$$t_e \sim \frac{1}{A_p} \sim \frac{1}{P_T} \cdot V_p \quad (3.3.3)$$

여기에서  $P_T$ 는 전자펌프에 공급되는 초기의 전체전력을 나타내고,  $V_p$ 는 전자펌프에 공급되는 초기전압을 나타낸다. 식(3.3.2)와 식(3.3.3)에서 관계식을 구하고, 전압의 단위를 갖는 어떤 값  $V_g$ 를 나누면 다음과 같다.

$$t_e \sim \frac{\frac{1}{2}I\omega^2}{P_T} \cdot \frac{V_p}{V_g} \quad (3.3.4)$$

이 식에서 앞 부분은 energy를 power로 나누어서 시간의 단위이므로 뒤 부분  $V_p$ 를 무차원화하면  $t_e$ 는 시간의 단위가 된다.  $V_p$ 를 무차원으로 만들기 위해서 본 실험에서는 변하지 않는 전압 즉, 모터발전기에서 나오는 초기전압( $V_g$ )으로 나누었다. 그러므로 무차원 시간  $t^*$ 는 다음과 같이 정의되었다.

$$t^* = \frac{t}{t_e} = \frac{P_T t}{\frac{1}{2}I\omega^2} \cdot \frac{V_g}{V_p} \quad (3.3.5)$$

다시 정리하면, 여기에서  $t$ 는 실제시간이고,  $P_T$ 는 전자펌프에 공급되는 초기의 전체전력이며,  $\frac{1}{2}I\omega^2$ 는 휠의 초기운동에너지이다.  $V_g$ 는 모터발전기에서 발생하는 초기전압이고,  $V_p$ 는 전자펌프에 공급되는 초기전압이므로 전자펌프 제어기를 사용하지 않을 경우에는  $V_g$ 와  $V_p$ 가 같고 또한 앞에서 정의한  $V_1$ 의 초기값과 동일하다.

## (2) 실험결과 무차원분석

측정한 다른 실험인자는 초기의 값 즉, 외부전력을 상실하기 직전의 값으로 나누어 무차원 수로 나타내었다. 그림 3.3.15은 무차원화한 시간으로 회전진동수를 나타낸 것이다. 무차원 회전진동수가 0.2(12Hz)까지 감소하면 소듐 루프에서의 유동이 거의 정지되는데 이 때까지는 실험치들이 잘

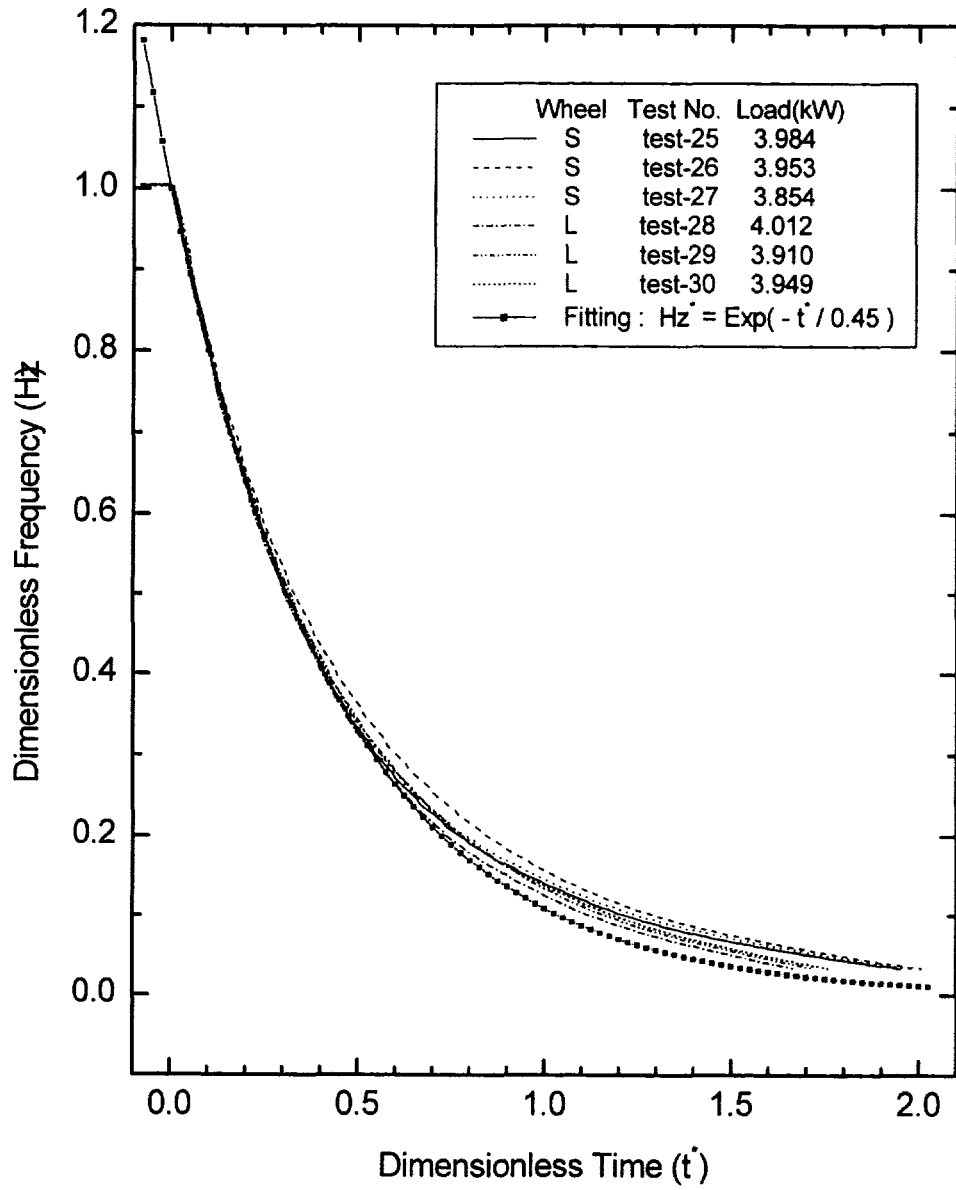


그림 3.3.15 무차원 시간에 대한 휠의 무차원 회전진동수 특성

모이고 있는 형상이다. 이 그림에서 무차원 회전진동수( $Hz^*$ )를 무차원 시간( $t^*$ )으로 나타내면 다음과 같다.

$$Hz^* = \text{Exp}\left(-\frac{t^*}{0.45}\right) \quad (3.3.6)$$

그림 3.3.16와 그림 3.3.17은 각각 무차원 시간으로 무차원 전압( $V^*$ )과 무차원 전류( $A^*$ )를 나타낸 것으로 실험치들이 비교적 잘 모이고 있다. 이들을 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V^* = 0.956 \text{Exp}\left(-\frac{t^*}{0.319}\right) \quad (3.3.7)$$

$$A^* = -0.2283 + 1.1455 \text{Exp}\left(-\frac{t^*}{1.1}\right) \quad (3.3.8)$$

다른 실험인자들도 무차원 시간으로 표현이 가능하나 특정 시스템에 관계되는 역율을 관계식으로 나타낼 수가 없으므로 무의미하다. 그림 3.3.18은 유효전력을, 그림 3.3.19는 유량을 무차원 시간으로 나타내었다.

그림 3.3.20은 무차원 회전진동수로 전압을 나타낸 것이고, 그림 3.3.21은 전류를 도시한 것이다. 무차원 전압( $V^*$ )과 무차원 전류( $A^*$ )는 다음과 같이 나타낸다.

$$V^* = 0.1293 + 1.019 Hz^* \quad (3.3.9)$$

$$A^* = -0.580 + 1.492 Hz^{*0.3} \quad (3.3.10)$$

그림 3.3.22는 유효전력을 회전수로 나타낸 것이다. 무차원 시간으로 회전진동수의 변화를 예측하는 것이 가장 중요하며, 다른 변수들은 무차원 시간이나 무차원 회전진동수로 구할 수 있다.

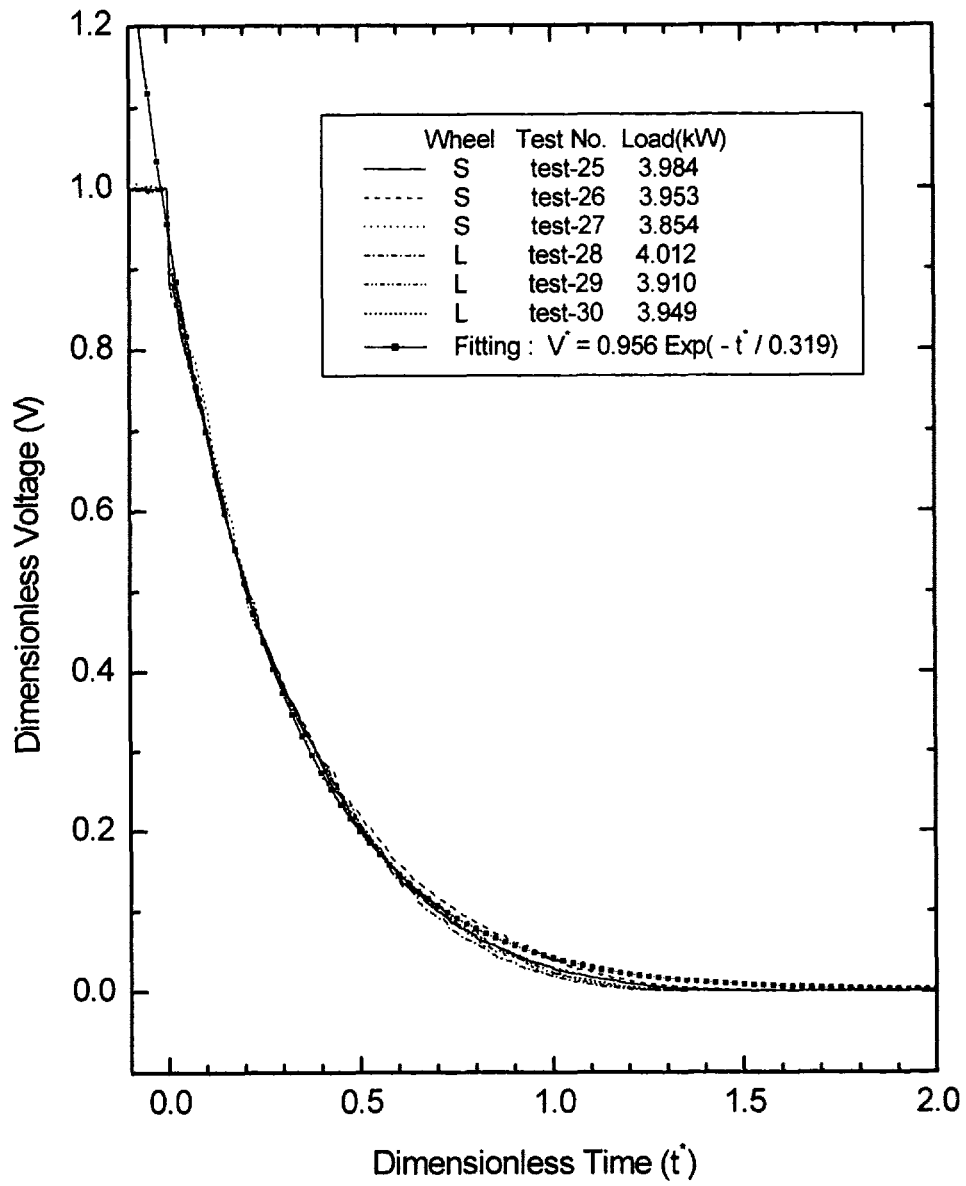


그림 3.3.16 무차원 시간에 대한 무차원 출력전압 특성

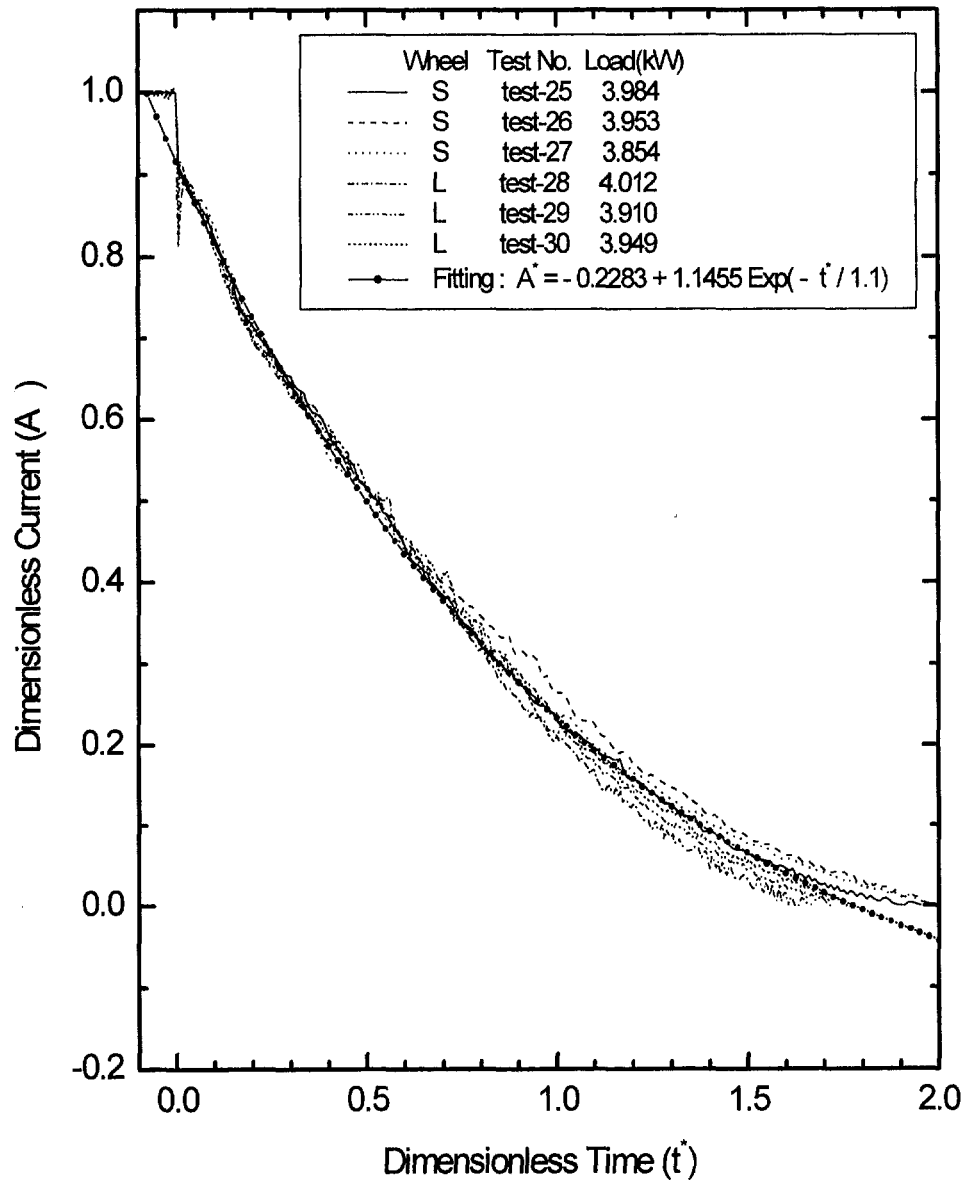


그림 3.3.17 무차원 시간에 대한 무차원 출력전류 특성

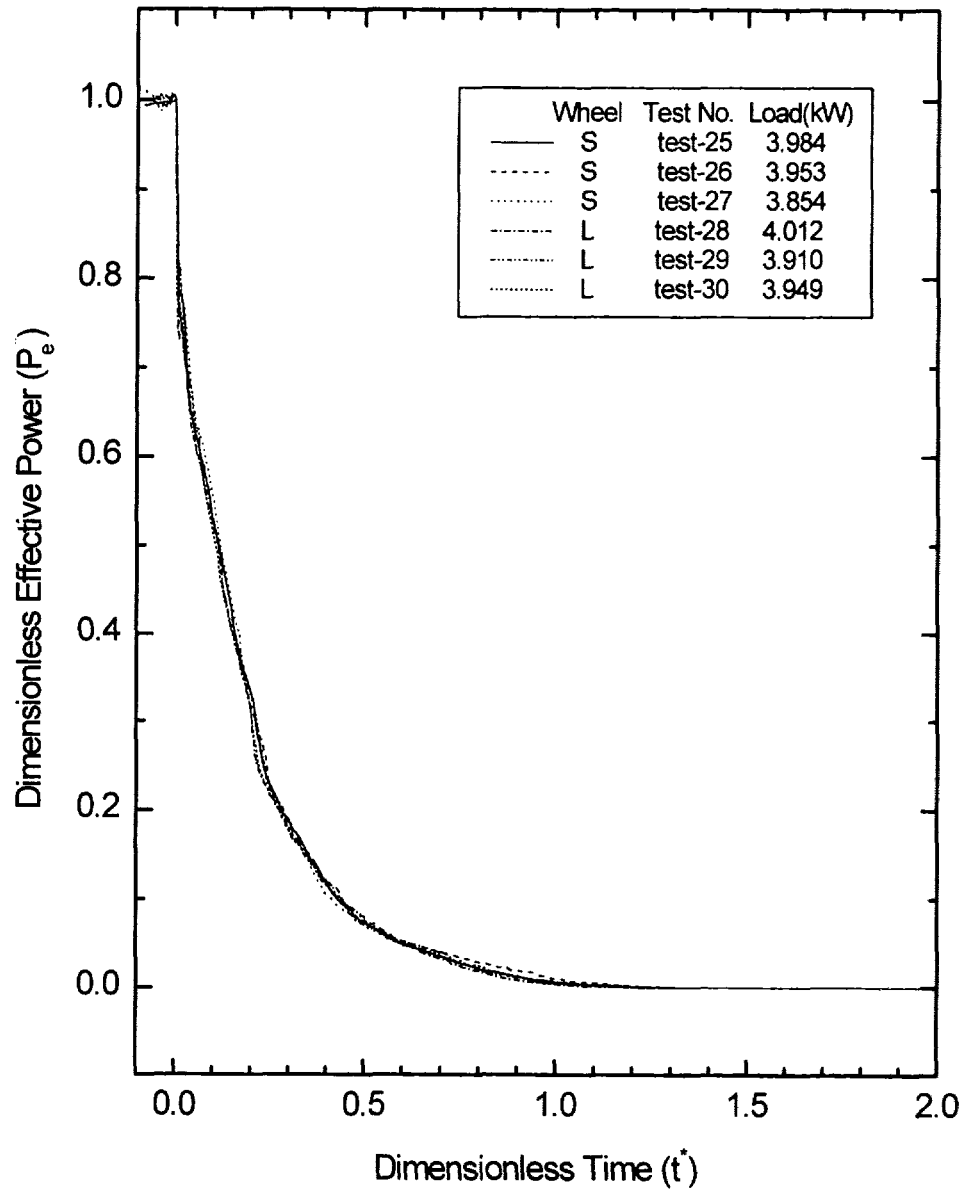


그림 3.3.18 무차원 시간에 대한 무차원 유효전력 특성

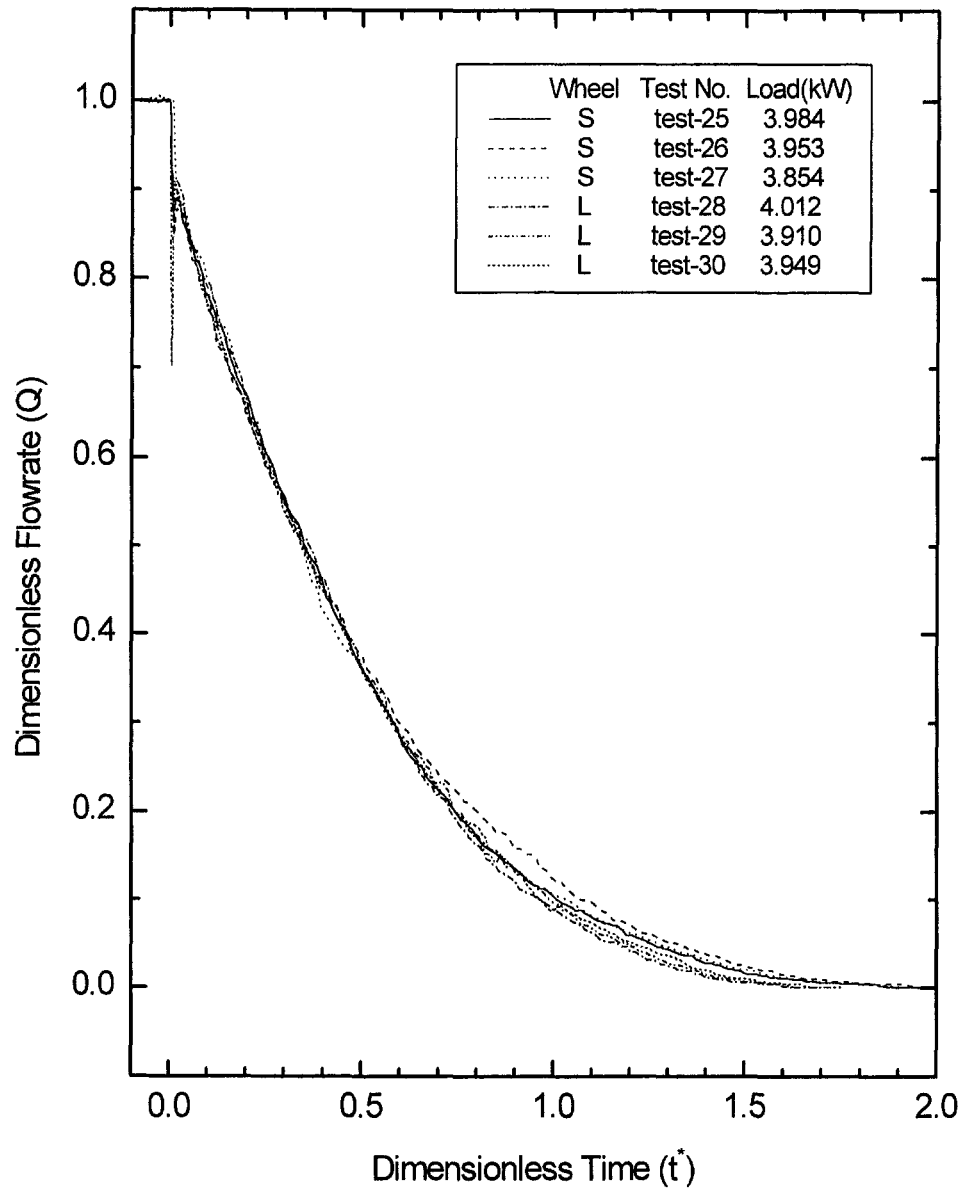


그림 3.3.19 무차원 시간에 대한 무차원 유량 특성



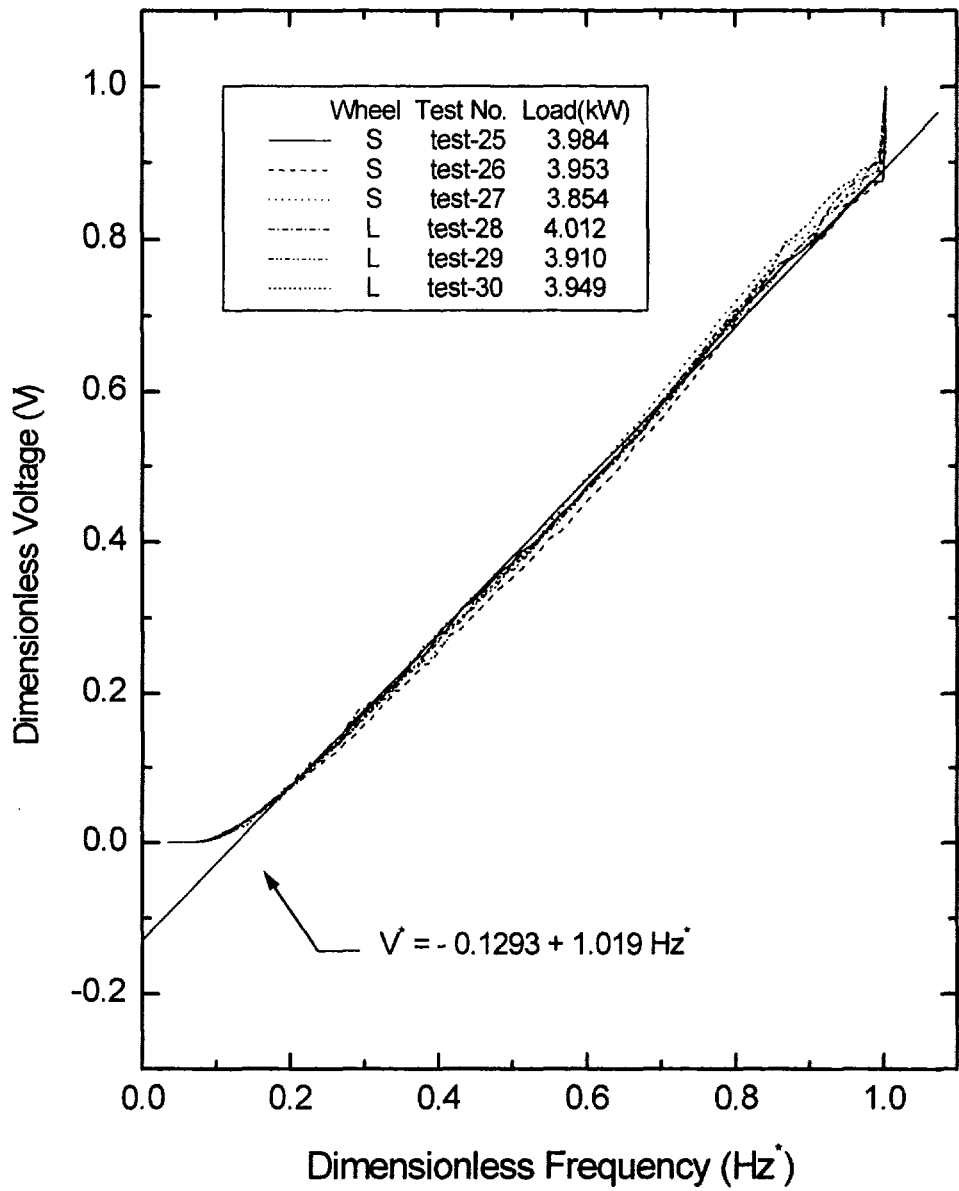


그림 3.3.20 휠의 무차원 회전진동수에 대한 무차원 출력전압

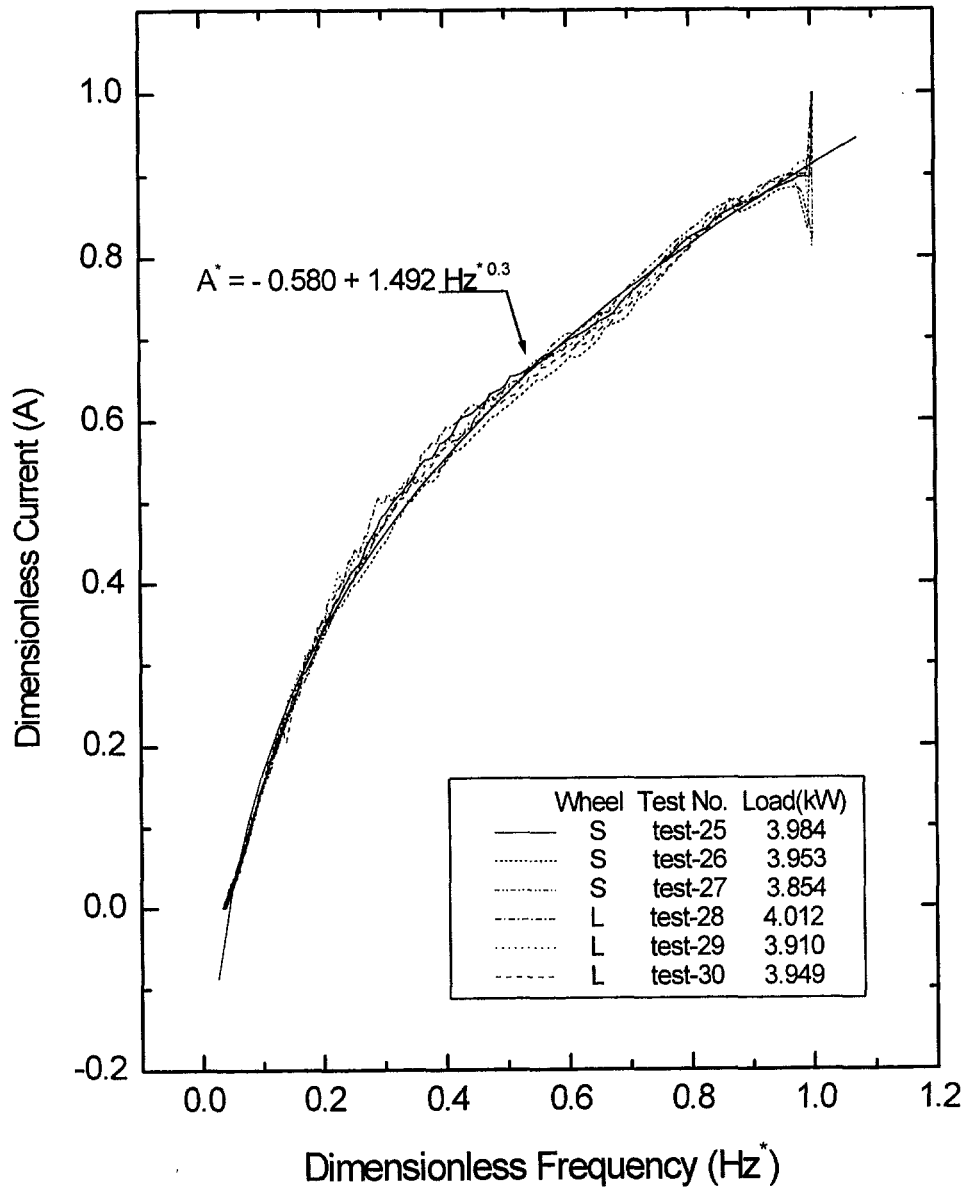


그림 3.3.21 휠의 무차원 회전진동수에 대한 무차원 전류

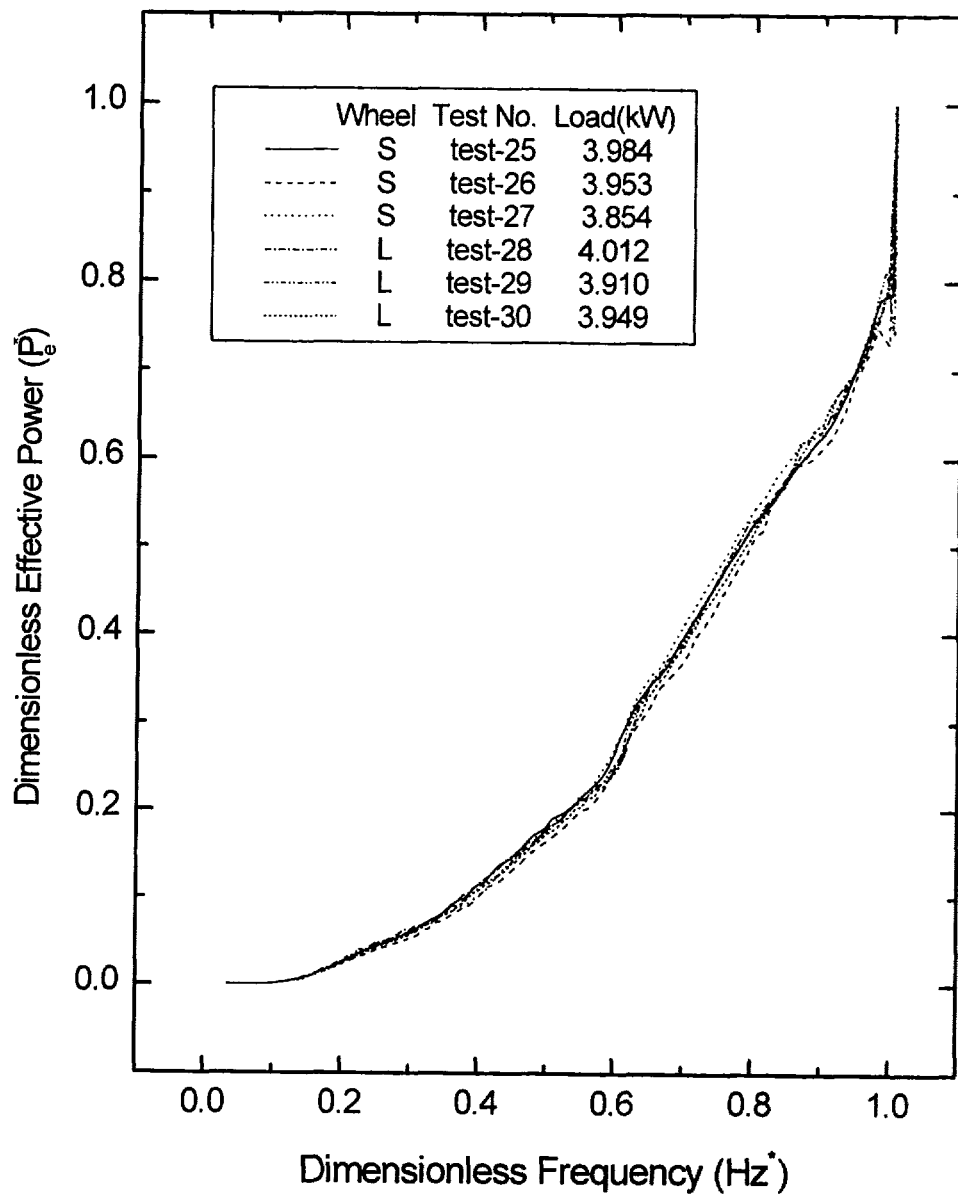


그림 3.3.22 휠의 무차원 회전진동수에 대한 무차원 유효전력

#### 4. 결론

15kW 용량의 관성보완장치를 설계, 제작, 실험하였으며, 휠은 비중이 7.801인 첼로  $\varnothing 649.8 \times t 50.82\text{mm}$ 인 소형휠과  $\varnothing 720.0 \times t 100\text{mm}$ 인 대형 휠 두 가지를 사용하여 실험하였다. 전자펌프 제어기를 사용하지 않고 직접 모터발전기에서 발전되는 전기를 전자펌프에 입력하여 각 휠 마다 3번의 실험을 반복하여 수행하였고, 실험의 반복성은 양호하였다. 각 특성이 감소하는 율은 관성 모멘트에 역비례하였고, 초기 전류에 비례하였다. 실험 범위에서 모든 특성의 변화를 잘 기술하는 무차원 시간을 제안하여 실험 자료를 정리하였고, 실험관계식을 도출하였다. 휠이 달라도 회전진동수에 따라 실험인자는 유사하게 감소하는 경향을 보였다.

## 제 4 절 핵연료집합체 압력강하 및 핵연료 핀다발 수중 동특성

### 1. 핵연료집합체 압력강하 실험

#### 가. 개요

액체금속로의 노심은 정육각형 형태의 스테인레스강 덕트에 싸여진 여러개의 핵연료집합체로 구성되어 있다. 핵연료집합체에서 생성되는 열을 효과적으로 추출하기 위해서는 핵연료집합체간의 유량을 적절히 분배하고, 온도분포를 적절히 유지시키는 것이 매우 중요하다. 각 집합체간의 유량은 각 집합체의 수명기간 중 최대 발열시에 필요한 유량에 따라 여러 그룹으로 구분되어 그룹별로 일정한 유량이 분배되도록 설계된다. 유량의 분배는 정상운전시의 집합체의 압력강하 크기를 다르게 함으로서 적절한 유량을 집합체에 공급한다. 노심내 최대 압력강하는 일차펌프의 수두에 의해 결정되며, 펌프의 수두는 일차계통 유량의 함수로 주어진다. 따라서 핵연료집합체 온도분포를 정확히 예측하고, 집합체 내에서의 주요한 열수력 현상을 이해하는 것은 액체금속로의 노심 설계에 필수적이다. 특히 액체금속로 핵연료집합체의 핵연료봉다발은 다른 집합체에 비해서 핵연료봉 피치와 직경비(P/D)가 작고, 노심구조물 중 가장 큰 압력강하가 발생하며 열수력 특성이 다른 구조물과는 상이하다. 핵연료봉들 사이의 적절한 간격을 유지하고 냉각재의 혼합을 증가시키기 위해서 다양한 형태의 스페이서들이 제안되어왔다. 다양한 형태의 스페이서들 중에서 나선형 와이어 스페이서가 가장 널리 사용되어왔다. KALIMER 설계에서도 와이어 스페이서를 사용하고 있다. 핵연료봉 사이에 와이어 스페이서가 존재하면 수력학적 마찰을 증가시킨다. 즉 필요로하는 유량을 공급하기위하여 좀 더 큰 용량의 펌프가 필요하다. 그러므로, 와이어 스페이서를 사용한 핵연료 집합체 핵연료봉다발의 유동마찰계수를 정확히 예측하고 압력강하 특성을 파악하는 것은 액체금속로 노심 설계 및 안전성 해석에서 큰 부분을 차지한다. 기존의 와이어 스페이서 관련 실험들은 핵연료봉 피치와 직경비(P/D)와 와이어가 한번 회전할 때 의 축방향 길이와 직경비(H/D)만을 주요실험인자로 했기 때문에 갭(gap) 크기 등과 같은 각 실험부에 대한 상세한 정보들이 부족

보들이 부족하고, 따라서 각 실험자료들 간의 직접적인 비교가 어려우며 기존의 상관식들의 적용대상이 한정되는 경우가 많았다. 따라서 KALIMER의 핵연료집합체와 똑같은 형상의 집합체를 사용하여 물 실험을 해야 할 필요성이 있으며, 여기서 생산된 자료를 활용하여 유동마찰계수를 평가하고, 개발할 필요성이 있다.

각 핵연료집합체는 입구 오리피스(orifice), 핵연료집합체 입구, 와이어가 나선형 형태로 감겨진 핵연료집합체, 핵연료집합체 출구 및 핵연료집합체 상부 부분으로 구성되어 있다. 본 연구의 주 목적은 KALIMER 노심설계에 사용될 수 있도록 이들 영역에서 압력강하 값들을 측정하는 것이다. 측정된 압력강하 값들을 사용하여 이들 영역에서 상대적 크기를 비교하였다. 나중에 보여지는 바와 같이 입구 오리피스와 와이어가 나선형 형태로 감겨진 핵연료집합체에서의 압력강하 값이 다른 영역에서의 압력강하 값들보다 상대적으로 크다. 그리고 KALIMER 설계에서 입구 오리피스의 설계가 아직 확정되지 않았고, 본 연구에 사용된 입구 오리피스의 형태는 하나의 선택 가능한 형태이므로, 본 연구에서 압력강하 상관식의 평가는 와이어가 나선형 형태로 감겨진 핵연료집합체에서의 압력강하에 국한하고자 한다.

연료봉 사이의 간격을 적절히 유지하고, 냉각재의 혼합을 증진시키기 위하여 여러 가지 형태의 스페이스(spacer)가 제안되었다. 여러 가지 형태의 스페이스들 중 액체금속로에는 나선형 형태의 스페이스가 널리 사용되고 있고, KALIMER 설계에서도 적용되고 있다. 연료봉 사이에 스페이스가 존재하면 수력학적 마찰을 증대시킨다. 즉, 필요한 유량을 유지하기 위하여 좀 더 큰 용량의 펌프가 필요한 것이다. 그러므로 와이어가 나선형 형태로 감겨진 핵연료집합체에서의 압력강하를 정확하게 예측하는 것은 액체금속로 설계에 매우 중요하다.

와이어 스페이스가 존재하는 액체금속로 핵연료집합체 내의 유동 및 열전달을 분석하는데는 부수로해석법(subchannel analysis method)이 공통적으로 사용되어져 왔다. KALIMER 설계에서는 COBRA-IV-I 코드 [4.1.1]와 MATRA 코드[4.1.2]를 기본으로 개발된 MATRA-LMR 코드 [4.1.3]가 사용되고 있다. 이러한 코드를 사용하여 열수력학적 보전방정식

을 해석하기 위해서는 부수로 마찰계수(subchannel friction factor)에 관한 상관식이 필요하다. 그러므로 액체금속로 핵연료집합체 내의 열유동 현상을 정확하게 해석하기 위해서는 정확성이 검증된 부수로마찰계수 상관식의 개발이 매우 중요하다. 와이어가 핵연료봉 사이에 존재하게 되면 매우 복잡한 기하학적 형상과 유동현상을 유발하게 되고, 일반적으로 사용되어지고 있는 등가직경방법(equivalent diameter method)의 사용은 적절하지 못하다. 지금까지 많은 사람들이 와이어 스페이서가 존재하는 액체금속로 핵연료집합체 내의 유동마찰계수를 개발하기 위하여 많은 연구를 수행하여 왔다. 이러한 연구들은 다음과 같은 크게 두 가지의 경우로 구분할 수 있다. (1)와이어 스페이서가 없는 핵연료봉에서의 마찰계수 상관식을 개발하고, 와이어 스페이서가 존재하는 영향을 고려하여 상관식을 보정(correction)하는 방법, (2)처음부터 와이어 스페이서가 존재함으로써 생기는 복잡한 유동현상을 고려하여 상관식을 개발하는 방법 등이다. Novendstern[4.1.4], Rehme[4.1.5] 및 Engel et al.[4.1.6]의 방법들은 첫 번째 경우에 속하고, Cheng과 Todreas[4.1.7]의 방법은 두 번째 경우에 속한다.

Novendstern[4.1,4]은 와이어 스페이서가 존재하는 육각형 배열의 연료봉에서의 압력강하를 예측할 수 있는 상관식을 개발하였다. 이 상관식은 와이어 스페이서가 존재하는 연료봉에서의 압력강하 상관식은 평활한(smooth) 파이프에서의 압력강하 상관식에 와이어 스페이서가 존재하는 영향을 고려한 경험식(empirical correlation)을 곱하여 구할 수 있다는 개념으로 개발되었다. 이 모델은 난류유동인 경우 적용될 수 있고, 여러 가지 종류의 기하학적 형상에서  $\pm 14\%$  정도의 정확도를 갖는 것으로 보고되어 있다. Rehme[4.1.5]도 와이어 스페이서가 존재하는 연료봉의 봉다발(bundle) 마찰계수를 계산할 수 있는 간단한 상관식을 개발하였다. 와이어 스페이서가 존재함으로써 발생하는 연료봉 주위의 선회속도(swirl velocity)를 고려한 유효속도(effective velocity) 개념을 도입하여, 마찰계수를 유효속도와 등가직경을 기반으로 한 수정된 레이놀즈수를 사용하여 개발하였다. 이 상관식은 천이 및 난류유동영역에 적용될 수 있다. Engel et al.[4.1.6]은 층류, 천이 및 난류유동 전체에 적용할 수 있는 매우 간단한

상관식을 개발하였다. 이 상관식은 매우 제한된 실험자료를 사용하여 개발되었고, 연료봉과 와이어 스페이스의 기하학적 변수들(P/D, H/D)을 고려하지 않았기 때문에 적용가능 기하학적 형상이 제한될 것이라 생각된다. Cheng과 Todreas[4.1.7]은 광범위한 실험데이터를 사용하여 마찰계수에 대한 상관식을 개발하였다. 이들은 봉다발(bundle) 마찰계수뿐만 아니라 내부(interior), 가장자리(edge) 및 모서리(corner) 영역의 부수로 마찰계수(subchannel friction factor)도 개발하였고, 이들 상관식들은 층류, 천이 및 난류유동 전체에 적용할 수 있다. 이들 상관식들은 비교적 복잡하므로 간단한 형태의 상관식도 제안하였다. 다음 장에 위에서 언급한 네 가지 모델에 대한 수학적 설명을 제시하고자 한다.

본 연구의 목적은 KALIMER 설계를 위해 핵연료집합체 각 부위별 압력강하 값들을 측정하는데 있다. 핵연료집합체는 입구 오리피스(orifice), 핵연료집합체 입구, 와이어가 나선형 형태로 감겨진 핵연료집합체, 핵연료집합체 출구 및 핵연료집합체 상부 부분에서의 압력강하 값들을 측정하였다. 271-편 봉다발에서 유량과 유체의 온도를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 측정된 압력강하 실험자료들을 사용하여 핵연료집합체 각 부위별 압력강하 값들의 상대적 크기를 조사하였으며, 기존의 와이어 스페이스가 있는 핵연료봉다발에서의 압력강하 상관식들을 평가하였다.

## 나. 압력강하 상관식

### (1) Novendstern 모델

Novendstern[4.1.4]의 상관식에서 압력강하는 다음의 식들로 결정된다.

$$\Delta P = f \frac{L}{D_e} \frac{\rho V^2}{2} \quad (4.1.1)$$

여기에서

$$f = f_1 X_1^2 \frac{D_e}{D_{e1}} \quad (4.1.2)$$



$$f_1 = f_s M \quad (4.1.3)$$

$$f_s = \frac{0.316}{\text{Re}_1^{0.25}} \quad (4.1.4)$$

$$M = \left\{ \frac{1.034}{(P/D)^{0.124}} + \frac{29.7(P/D)^{6.94} \text{Re}_1^{0.086}}{(H/D)^{2.239}} \right\}^{0.885} \quad (4.1.5)$$

$$\text{Re}_1 = \frac{\rho V_1 D_{e1}}{\mu} = \text{Re} X_1 \frac{D_{e1}}{D_e} \quad (4.1.6)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V D_e}{\mu} \quad (4.1.7)$$

$$V_1 = X_1 V \quad (4.1.8)$$

$$X_1 = \frac{A}{N_1 A_1 + N_2 A_2 \left( \frac{D_{e2}}{D_{e1}} \right)^{0.714} + N_3 A_3 \left( \frac{D_{e3}}{D_{e1}} \right)^{0.714}} \quad (4.1.9)$$

$$A = N_1 A_1 + N_2 A_2 + N_3 A_3 \quad (4.1.10)$$

이고, 이 식들에서  $N_i$  와  $A_i$  는  $i$ -번째 부수로의 개수와 면적,  $A$ 는 총 유동 면적,  $V$ 는 번들 평균속도,  $D_e$ 는 번들 등가직경을 나타낸다. 하첨자 1,2,3은 각각 중앙부수로, 가장자리부수로 및 코너부수로 나타낸다.

## (2) Rehme 모델

Rehme[4.1.5]모델에서 식(1)의 마찰계수는 다음의 식들로 결정된다.

$$f = \left( \frac{64}{\text{Re}} F^{0.5} + \frac{0.0816}{\text{Re}^{0.133}} F^{0.9335} \right) \frac{S_b}{S_f} \quad (4.1.11)$$

여기에서

$$F = \left(\frac{P}{D}\right)^{0.5} + \left[7.6 \frac{(D+D_w)}{H} \left(\frac{P}{D}\right)^2\right]^{2.16} \quad (4.1.12)$$

이고, 이들 식에서  $D_w$ 는 와이어의 직경,  $H$ 는 와이어 래프(wire wrap)의 리드(lead),  $S_b$ 는 연료봉의 유체접촉길이(wetted perimeter), 그리고  $S_t$ 는 총 유체접촉길이(total wetted perimeter)를 나타낸다. 그리고 이 상관식은  $2 \times 10^3 \leq Re \leq 3 \times 10^5$ ,  $.1 \leq P/D \leq 1.42$ ,  $8 \leq H/D \leq 50$ , 그리고  $7 \leq N_r \leq 217$ 의 범위에서 적용가능하다.

### (3) Engel, Markley 과 Bishop 모델

Engel, Markley 와 Bishop[4.1.6] 모델에서 식(4.1.1)의 마찰계수는 다음의 식들로 계산된다.

$$f = \frac{110}{Re} \quad \text{for} \quad Re \leq 400 \quad (4.1.13)$$

$$f = \frac{110}{Re} (1-\psi)^{0.5} + \frac{0.55}{Re^{0.25}} \psi^{0.5} \quad \text{for} \quad 400 \leq Re \leq 5000 \quad (4.1.14)$$

$$f = \frac{0.55}{Re^{0.25}} \quad \text{for} \quad 5000 \leq Re \quad (4.1.15)$$

여기에서

$$= \frac{(Re-400)}{4600} \quad (4.1.16)$$

이다. 이 상관식은 층류, 천이유동 그리고 난류유동 모두에 적용될 수 있다.

(4) Cheng과 Todreas 모델

Cheng과 Todreas[4.1.7] 모델에서 식(4.1.1)의 마찰계수는 다음의 식들로 계산된다.

$$f = \frac{C_{\mu}}{\text{Re}} \quad \text{for} \quad \text{Re} \leq \text{Re}_L \quad (4.1.17)$$

$$f = \frac{C_{\pi}}{\text{Re}^{0.18}} \quad \text{for} \quad \text{Re} \geq \text{Re}_T \quad (4.1.18)$$

$$f = \frac{C_{\mu}}{\text{Re}}(1-\psi)^{\frac{1}{3}} + \frac{C_{\pi}}{\text{Re}^{0.18}}\psi^{\frac{1}{3}} \quad \text{for} \quad \text{Re}_L \leq \text{Re} \leq \text{Re}_T \quad (4.1.19)$$

여기에서

$$= \log\left(\frac{\text{Re}}{\text{Re}_L}\right) / \log\left(\frac{\text{Re}_L}{\text{Re}_T}\right) \quad (4.1.20)$$

$$\log\left(\frac{\text{Re}_L}{300}\right) = 1.7\left(\frac{P}{D} - 1.0\right) \quad (4.1.21)$$

$$\log\left(\frac{\text{Re}_T}{10000}\right) = 0.7\left(\frac{P}{D} - 1.0\right) \quad (4.1.22)$$

$$= \left( \log(\text{Re}) - \left( 1.7\frac{P}{D} + 0.78 \right) \right) / \left( 2.52 - \frac{P}{D} \right) \quad (4.1.23)$$

$$C_{\mu} = \left( -974.6 + 1612.0\left(\frac{P}{D}\right) - 598.5\left(\frac{P}{D}\right)^2 \right) \left(\frac{H}{D}\right)^{0.06-0.085(P/D)} \quad (4.1.24)$$

$$C_{\pi} = \left( 0.8063 - 0.9022\log\left(\frac{H}{D}\right) + 0.3526\left(\log\left(\frac{H}{D}\right)\right)^2 \right) \left(\frac{P}{D}\right)^{9.7} \left(\frac{H}{D}\right)^{1.78-2(P/D)} \quad (4.1.25)$$

## 다. 실험장치 및 실험방법

### (1) 실험장치

실험장치는 3개의 실험부(test section)와 공용 루프로 구성되어 있다. 본 연구의 핵연료집합체 압력강하 측정 실험부, 수평방향 유동에서의 관다발 압력강하 측정 실험을 위한 실험부 및 축방향 유동에서의 관다발 압력강하 측정 실험을 위한 실험부로 구성되어 있으며, 한 개의 실험부에서 실험이 이루어질 때 다른 실험부들은 양단에 설치된 밸브들로 격리되게 하여 각 실험부는 독립적으로 운영될 수 있도록 되어있다. 공용루프는 물 공급탱크(supply tank), 주 펌프, 댐퍼 및 2개의 매니폴드로 구성되어 있다. 이 공용루프는 중간열교환기 물모의 실험장치와 동일하다. 본 연구의 핵연료집합체 압력강하 측정 실험장치의 각 부분을 설명하면 다음과 같다.

#### (가) 물 공급탱크

물 공급탱크에는 대략 5톤 정도의 물이 채워진다. 내경이 1500mm, 높이는 상하 경판을 합하여 4000mm 이다. 높이 200mm인 강판을 상부와 하부에 부착하고 보수와 검사가 용이하게 상부에는 플랜지를 연결하였다. 채워진 물과 탱크로 주입되는 유속 등으로 인하여 변형이 일어나지 않게 두께 5mm의 SUS304 강판으로 설계, 제작하였다. 하부강판이 용접되는 선을 기준점으로 높이 300mm에 펌프로 연결되는 8"×6" 레듀서(reducer)를 설치하였다. 또한 2000mm 높이에는 바이패스 관을 연결하였으며, 2600mm 높이에 실험부로부터 연결되는 3개의 관이 있다. 상부에는 상부 플랜지에서 200mm 하단에서부터 400mm 간격으로, 수위계를 설치하기 위한 홀더를 2개 부착하였다. 이 때 수위계는 OMEGA 모델 LV-102 float type으로 하였다.

#### (나) 펌프(Pump)

펌프의 흡입구는 6", 20기압용 플랜지로 되어 있고 유출구는 5", 30기압용 플랜지로 연결되어 있다. 이 펌프는 3단으로 3m<sup>3</sup>/min에 120m의 수두를 갖는다. 펌프의 하부는 4개의 anchor로 바닥에 고정된다. 이 펌프로부터 나온 유체의 유량은 인버터와 바이패스 관을 통하여 제어된다.

#### (다) 댐퍼(Damper)

댐퍼는 펌프에 의해 발생하는 유동의 요동을 최소한(유량의 0.5% 이하)으로 줄이기 위한 것으로 외경 216.3mm, 내경 200mm, 높이 2200mm인 탱크로 되어 있다. 내부에는 댐퍼 내의 수위의 요동을 줄이기 위하여 스크린으로 고정된 wire mesh가 채워져 있다. 커버가스(질소)의 압력으로 일정한 수위를 유지한다.

#### (라) 매니폴드 (Manifold)

매니폴드는 유량계 상류 및 하류에 각각 1개씩 설치하였다. 유량을 측정하기 위하여 오차범위가 0.5% 이내인 터빈(turbine) 유량계를 설치하였다. 이 장치에 설치된 유량계는 OMEGA 모델로 구경이 3", 2.5", 1" 등 3가지 종류이다. 매니폴드는 6" 티들을 용접으로 연결한 형태이다.

#### (마) 실험부

관다발 실험부의 기본적 도해는 그림 4.1.1과 그림 4.2.2에 나타내었다. 실험부는 KALIMER 핵연료집합체의 주요 형상을 모의하고 있다. 핵연료봉다발은 271개의 연료봉으로 구성되어 있으며, 연료봉의 직경은 7.4mm이다. 연료봉 사이의 피치는 8.9mm이고 연료봉 직경과 피치의 비(P/D)는 1.2이다. 핵연료봉다발은 wire-spacer로 나선식으로 감겨져 있는데 wire의 직경은 1.4mm이고 한번 감겨져 본래의 위치로 돌아오는 Lead의 길이는 183.3mm이다. 그러므로 연료봉 직경과 Lead의 비(H/D)는 24.84이다. 연료봉들은 정6각형 형태의 Duct에 장착되어 있는데 Duct의 한 변의 길이는 149.34mm이다. 연료봉집합체의 수력학적 반경은 4.2mm이다. 연료봉집합체의 하부는 물이 유입되는 오리피스로 구성되어 있고, 상부는 물이 유출되는 6각형 형태의 Duct로 구성되어 있다. 핵연료집합체 하부에 lower plenum이 있는데 이것은 연료봉집합체를 고정하는 장치로 상부는 8" 플렌지로 연료봉집합체를 고정, 밀폐시키는 역할을 하며, 하부의 6" 플렌지는 주 배관에 연결되어 있다. 12개의 직경 30mm 구멍은 아래에서 유입된 물이 통과하여 측면 오리피스로 유입되도록 설치하였다. 이 구멍은 압력손실을 최대한 줄일 수 있도록 설계되었다. 온도와 차압을 측정하기

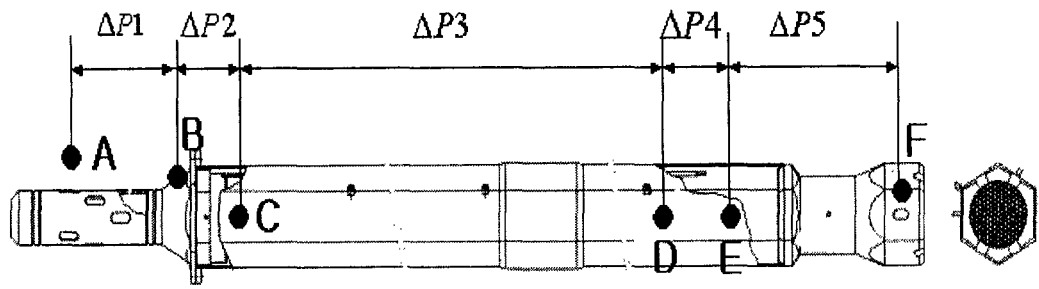


그림 4.1.1 핵연료집합체

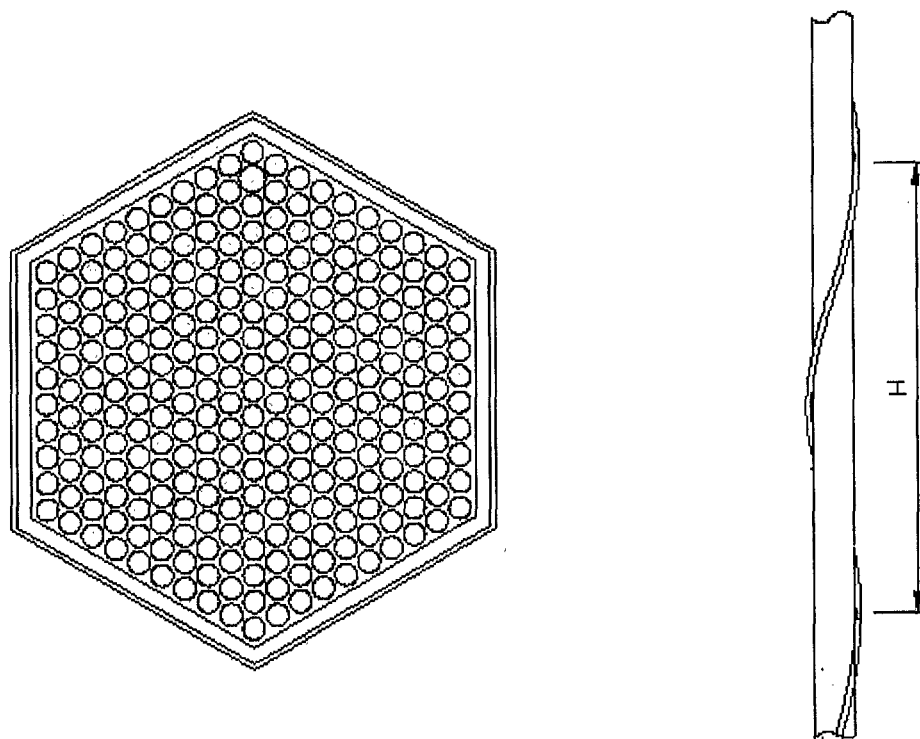


그림 4.1.2 핵연료집합체 단면 및 연료봉 Wire Spacer

위한 1/8" 탭이 2개 설치되며, 이 탭들은 외경이 30mm, 길이는 60mm이다. 60° 로 경사진 면은 연료봉집합체의 하부에 있는 경사면과 일치하며 이 사이에 패킹을 넣고 집합체에 부착된 플랜지 상단에 끼워지는 두께 24mm인 플랜지와 서로 조여 집합체와 Plenum을 연결, 밀폐시켰다. 연료봉집합체의 상단에는 Upper Plenum이 있는데 이것은 집합체와 분리가 가능하게 설계되었다. 이것은 집합체의 상단을 고정, 밀폐시키는 역할을 하며 8" 티와 캡 및 하부에 O-Ring으로 고정시키는 플랜지로 구성된다. 유출구인 6" 배관은 공급탱크에 연결된다. 상부와 측면에는 공기방출용, 열전대용 및 차압측정용 3개의 1/8" 탭과 3가닥의 진동선사용 Leading Wire를 외부로 끌어 내는 1/4" 탭 1개가 설치되어 있다. O-Ring용 플랜지들은 Plenum에 용접으로 부착되는 두께 20mm 플랜지와 분리되는 두께 10mm의 플랜지로 구성된다. 상하 2개의 플랜지가 만드는 홈 사이에 직경 10mm인 O-Ring을 넣고 12개의 직경 15mm 육각 볼트로 고정하였다.

## (2) 계측기

측정 데이터는 핵연료집합체 입구 및 출구에 위치하고 있는 2개의 열전대에서 나오는 온도신호, 핵연료집합체 내부에 위치한 5개의 차압계에서 나오는 전류신호 및 3개의 유량계에서 나오는 전압신호 등이다. 유량계는 병렬로 설치된 3개의 유량계를 범위에 맞게 선정하여 측정하였고, 41 l/sec가 초과한 유량범위에서는 두 개의 유량계를 동시에 사용하였다. 2-3.6 l/sec 범위에서는 OMEGA사의 Turbine meter FTB-106-CE (최대유량: 4.55 l/sec)를, 3~24 l/sec에서는 OMEGA사의 Turbine meter FTB-110-CE (최대유량: 30.3 l/sec)를, 21~39 l/sec 범위에서는 OMEGA사의 Turbine meter FTB-111-CE (최대유량: 49.3 l/sec)를 사용하였고, 39 l/sec가 초과한 유량범위에서는 두 개의 유량계를 동시에 사용하였다. 유량계를 바꿀 때에는 측정지점이 중첩되도록 하였다. 차압계는 OMEGA 및 ROSEMOUNT사의 6, 10, 30, 100, 150, 250inH<sub>2</sub>O 와 100Psi의 7가지 종류를 측정범위에 맞게 선정하여 사용하였다. 덕트의 입구 및 출구에 열전대는 OMEGA사의 J형 열전대이다. 유량계의 보정으로는 유량계 구입시 Calibration Data Sheet (유량-진동수)에 따라 Function Generator로 Calibration Data Sheet에 있는 진

동수를 발생시켜 이에 대응하는 유량에 대한 전압(0~5V)으로 전압-유량 직선을 얻어 보정식을 만들어 사용하였다. 차압측정기의 보정은 기지의 압력을 입력하여 최종 Data Acquisition Unit에서 받은 전압(2~10V)으로 전압-압력 직선을 얻어 보정식으로 사용하였다. 본 실험에 사용된 차압측정기의 보정선의 예들이 그림 4.1.3과 그림 4.1.4에 있으며, 보정식은 표 4.1.1에 있다

### (3) Data Acquisition System

모든 측정신호는 Data Acquisition Unit(HP 3852A)로 읽어 들여 컴퓨터의 GPIB 보드를 통하여 최종 HP-Vee 프로그램으로 Pentium-III PC에서 가시적으로 관찰하고, 데이터를 저장할 수 있도록 하였다. 모든 신호들은 200개씩 읽어 들여 PC에 저장하였다.

### (4) 실험방법

유량은 약 2.2~60 l/sec의 범위에서 26개의 구간을 log-scale로 나누어 실험을 수행하였다. 이 유량은 집합체의 수력학적 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수로 환산하면 각각 약  $10^3$ 에서  $10^4$ 의 오더를 갖는다. 측정유량의 범위에 따라 각각 3개의 유량계를 바꾸어 가면서 사용하였으며, 이 때 각 구간이 중첩되도록 하였다. 각 실험부에 설치된 5개 구간 즉, 입구 오리피스, 핵연료다발 입구, 핵연료다발, 핵연료다발 출구 및 핵연료집합체 상부 등 5군데의 압력차를 측정범위에 맞게 차압계를 교체하면서 실험을 수행하였다. 온도는 20°C에서 70°C까지 변화하며 5회 실시하였다. 유체의 온도는 덕트 입구 및 출구에 위치한 열전대로부터 읽어 들여 평균을 취해서 얻었다.

### 라. 실험결과 및 토의

그림 4.1.5에서 그림 4.1.9는 각각 입구 오리피스, 핵연료다발 입구, 핵연료다발, 핵연료다발 출구 및 핵연료집합체 상부 등 5곳 위치에서 유량에 대한 압력강하 측정치를 보여주고 있다. 대부분의 경우 Log-Log Plot에서



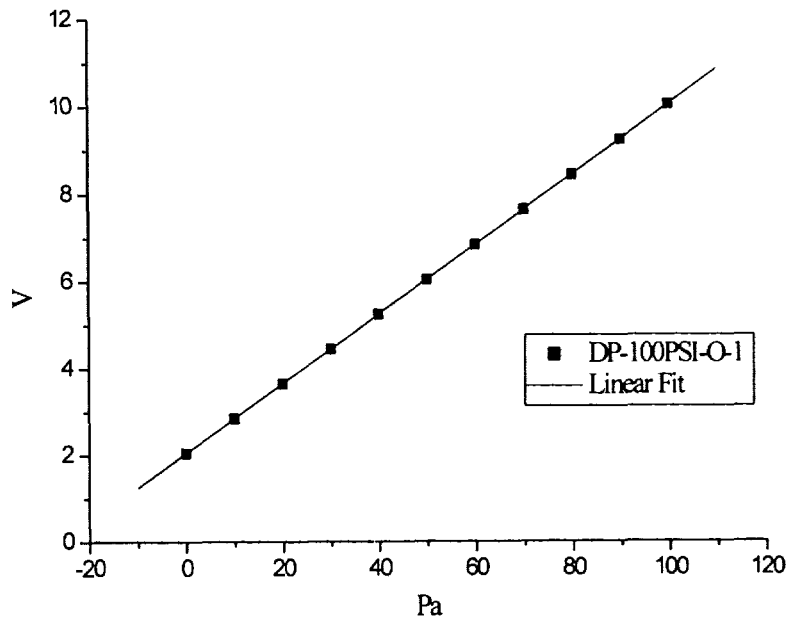


그림 4.1.3 차압계 DP-100PSI-O-1의 보정곡선

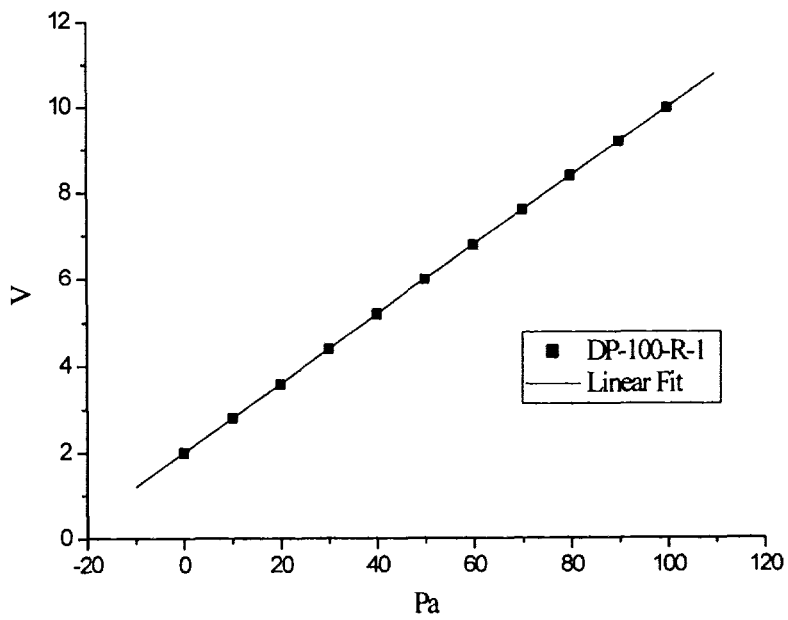


그림 4.1.4 차압계 DP-100-R-1의 보정곡선

표 4.1.1 실험에 사용된 차압계 보정곡선

DP Meter	Calibration Curve
DP-100PSI-O-1	$P = 2.0515*V + 0.07978$
DP-100-R-1	$P = 1.99805*V + 0.07958$
DP-10-R-1	$P = 1.93059*V + 0.81139$
DP-150-O-1	$P = 1.99795*V + 0.08052$
DP-250-R-1	$P = 1.98777*V + 0.03196$
DP-250-R-2	$P = 1.99668*V + 0.03226$
DP-30-O-1	$P = 2.04704*V + 0.26275$
DP-30-O-2	$P = 1.93175*V + 0.26212$
DP-6-O-1	$P = 2.00746*V + 1.34575$
DP-6-O-2	$P = 2.00693*V + 1.3415$
DP-750-R-1	$P = 1.98663*V + 0.01065$

압력강하의 값은 유량에 선형적으로 변함을 관찰할 수 있다. 핵연료집합체 출구에서 유량이 적을 경우 비선형적으로 변화하는 것은 유동의 박리현상 때문이다. 동일 유량에서 각 실험(EXP.A : 19-25°C, EXP.B : 30-34°C, EXP.C : 25-29°C, EXP.D : 31-36°C, EXP.E : 63-65°C)마다 다른 것은 각 실험마다 유체의 온도가 다르기 때문이다. 그림 4.1.8의 핵연료집합체 출구의 경우 압력강하 값이 아니고, 압력상승 값이다. 그것은 핵연료집합체 출구를 통과하면서 유동의 면적이 갑자기 증가하여 유속이 감소하기 때문이다. 그러나 그림에는 도식화하지 않았지만 이 영역에서도 유량이 적을 경우에는 압력강하 현상이 관찰되었다. 그림 4.1.10은 핵연료집합체 5곳에서 측정된 압력강하의 상대적 크기를 보여주고 있다. 핵연료다발에서의 압력강하 값이 제일 크고, 그 다음으로 입구 오리피스에서의 압력강하 값이 크을 관찰할 수 있다. 다른 영역에서의 압력강하 값은 핵연료다발에서의 압력강하 값보다 약 2-order 작은 것으로 관찰된다. 핵연료다발에서의 압력강하 상관식의 오차가 약 10% 정도 되는 것을 감안하면, 이들 영역에서의 압력강하 값들은 무시할 정도로 작다.

그림 4.1.11에서 그림 4.1.14는 본 실험의 측정결과와 기존의 압력강하 상관식들과의 비교를 보여주고 있다. 그림 4.1.11은 Novendstern[4.1.4]의 상관식과의 비교를 보여준다. Novendstern[4.1.4]의 상관식은 난류영역에만 적용되는 상관식이므로 난류영역의 경우 비교적 실험치와 잘 일치하나 천이영역에서는 실험치와 일치하지 않고 실험데이터와 최대 21%의 오차를 보임을 알 수 있다. Novendstern 상관식은 Blasius의 식에  $P/D$  및  $H/D$ 의 효과를 고려한 인자  $M$ 을 곱하는 형태를 가진다. Novendstern 상관식에서는 유동마찰계수가  $Re^{-0.25}$ 에 비례하는데 본 실험의 경우에는  $Re^{-0.21}$ 에 비례한다. 그림 4.1.12는 Rehme[4.1.5]의 상관식과 본 실험데이터와 비교한 것을 보여준다. 이 상관식의 전반적인 경향은 실험치와 일치하나 최대 12%의 오차를 가지고 전체적으로 유동마찰계수를 하향 예측함을 관찰할 수 있다. 그림 4.1.13은 Engel et al.[4.1.6]의 상관식과 실험치와의 비교를 보여주고 있다. 이 상관식은 모든 유동영역에서 실험치와 최대오차 42.8%로 매우 불일치하며, 그 경향이 일관되지 않음을 관찰할 수 있다. 이 상관식은 레이놀즈 수에만 의존하고  $P/D$  및  $H/D$ 의 영향을 고려하지

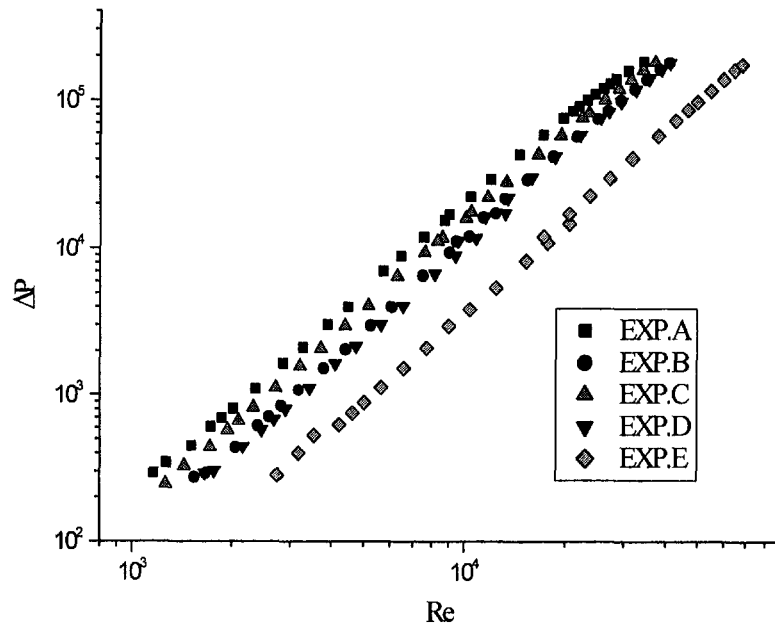


그림 4.1.5 입구 오리피스에서의 압력강하 (DP1)

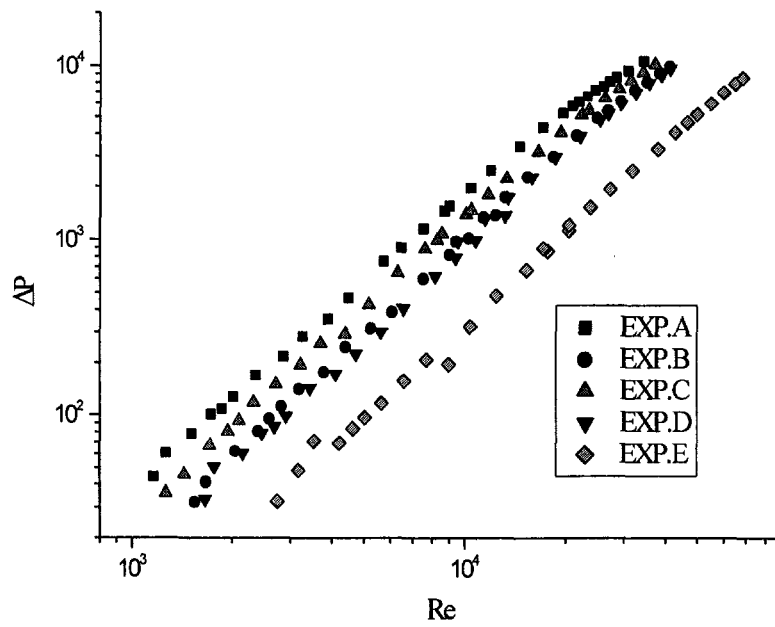


그림 4.1.6 핵연료다발 입구에서의 압력강하 (DP2)

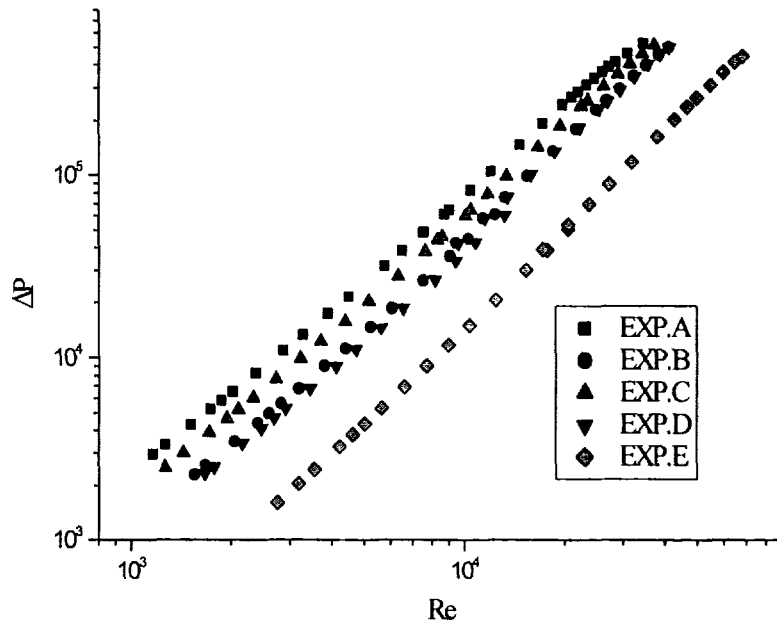


그림 4.1.7 핵연료다발에서의 압력강하 (DP3)

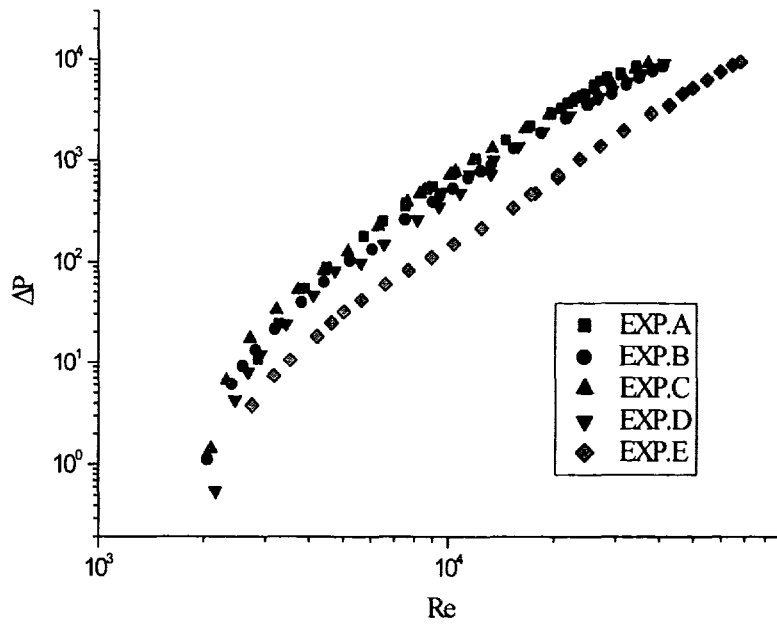


그림4.1.8 핵연료다발 출구에서의 압력상승 (-DP4)

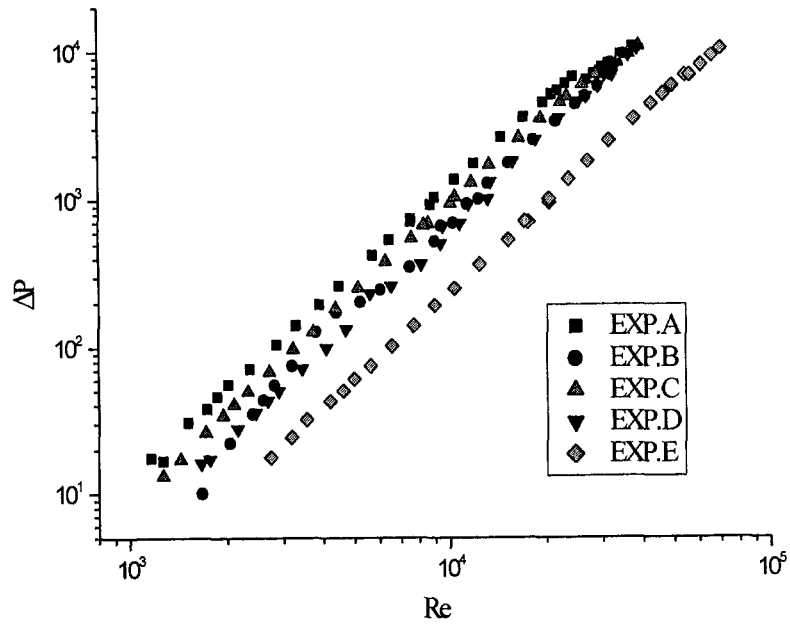


그림 4.1.9 핵연료집합체 상부에서의 압력강하 (DP5)

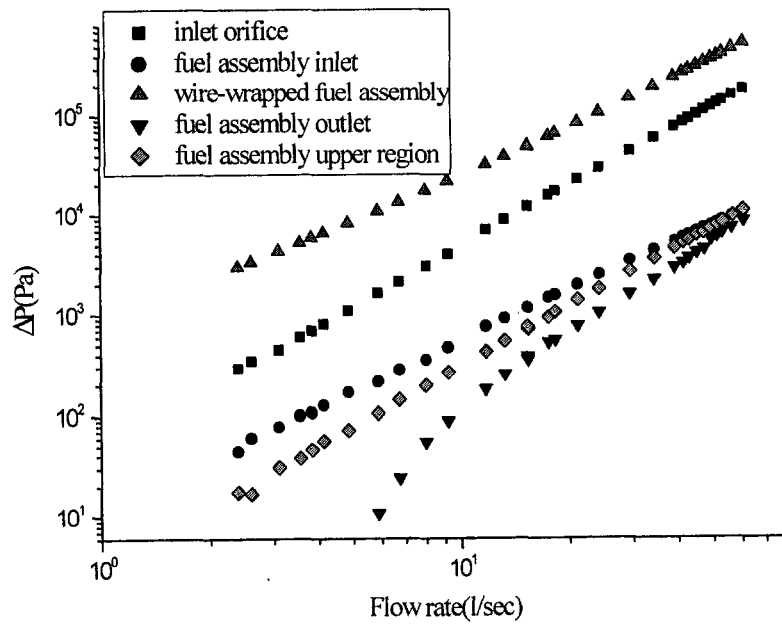


그림 4.1.10 핵연료집합체 각 부위별 압력강하 상대적 크기

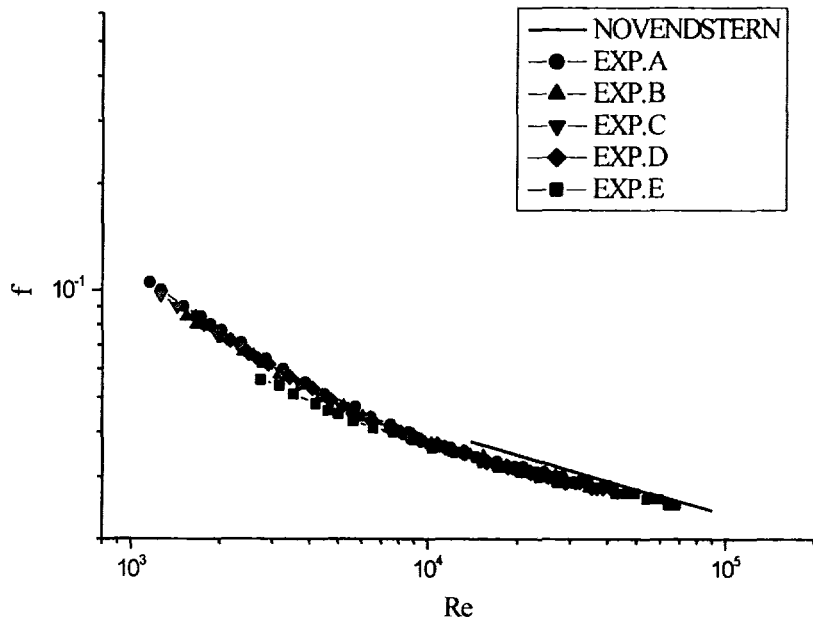


그림 4.1.11 Novendstern 상관식과 실험데이터와의 비교

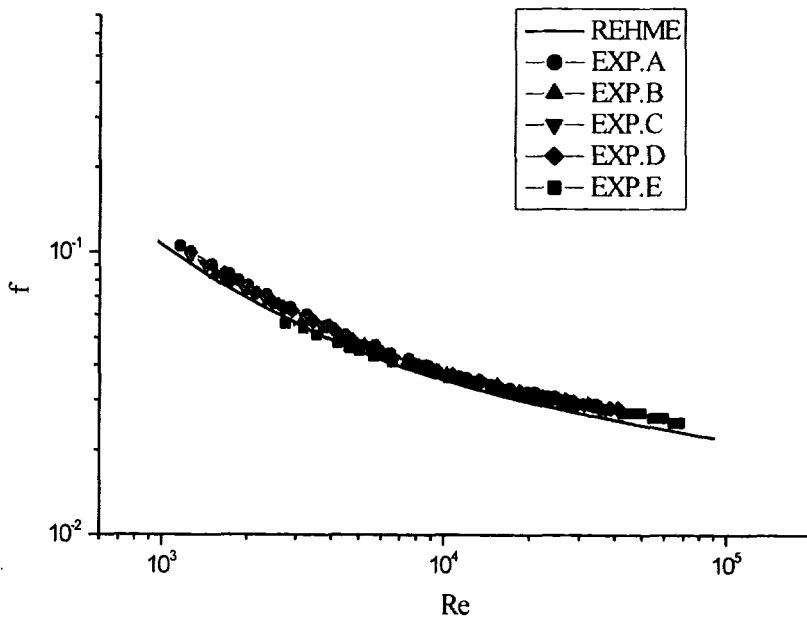


그림 4.1.12 Rehme 상관식과 실험데이터와의 비교

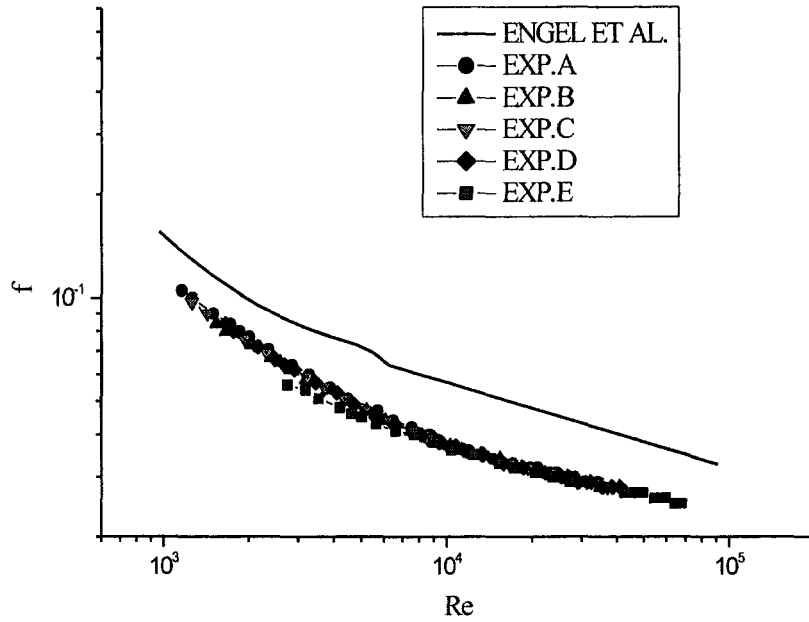


그림 4.1.13 Engel, Markley와 Bishop 상관식과 실험데이터와의 비교

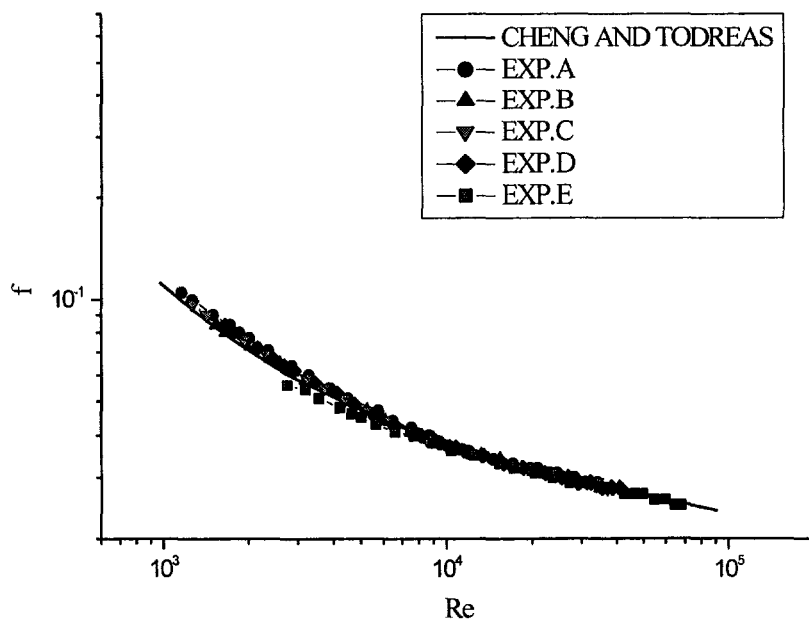


그림 4.1.14 Cheng과 Todreas 상관식과 실험데이터와의 비교



않았다. 연료봉 사이에 Wire-Spacer가 존재하면 유동에 큰 영향을 미친다. 그러므로 Wire-Spacer가 존재할 경우 P/D 및 H/D의 영향을 고려하지 않으면 좋은 결과를 얻지 못함을 알 수 있다. 그림 4.1.14는 Cheng과 Todreas[4.1.7]의 단순화된 상관식과 본 실험결과와의 비교를 보여주고 있는 것이다. 대부분의 데이터들이 최대  $\pm 10\%$  이내의 정밀도로 잘 맞고 있으며 모든 유동영역에서 잘 맞고 있다. 그러나 천이영역에서는 약간 하향 예측하고 있다. 본 연구에서 수행한 제한된 실험데이터를 가지고 명확한 결론을 내리기에는 무리가 있으나 Cheng과 Todreas의 단순화된 상관식이 사용하기 쉽고, 고려된 4가지 상관식들 중 가장 정확하게 마찰계수를 예측하였다. 또한 이 상관식은 층류영역, 천이영역 및 난류영역에 모두 사용할 수 있으므로 이 상관식의 사용을 추천한다.

#### 마. 결론

액체금속로에 설치되는 핵연료집합체를 지나는 유동에서의 입구 오리피스, 핵연료다발 입구, 핵연료다발, 핵연료다발 출구 및 핵연료집합체 상부 등 5곳에 차압계를 설치하여 유량을 변화하면서 압력강하를 측정하였다. 핵연료집합체는 직경이 7.4mm인 271개의 연료봉으로 구성되어 있으며, 봉직경과 피치비(P/D)는 1.2이고 봉직경과 Wire-Spacer Lead비(H/D)는 24.84이다. 유량범위는 2.2~60 l/sec이며, 온도를 변화하면서 5회 실험을 수행하였다. 이 유량에 대응하는 봉다발의 수력학적 직경을 기준으로 한 레이놀즈 수의 범위는 약 1100~78,000이다. 본 실험에서 총 825개의 입구 오리피스, 핵연료다발 입구, 핵연료다발, 핵연료다발 출구 및 핵연료집합체 상부 등 5곳의 압력강하 실험자료를 생산하였다. 이 실험자료들은 KALIMER 핵연료집합체 내부 유동해석 코드를 개발하고 검증하는데 사용될 것이다. 또한 측정된 실험결과를 이용하여 핵연료집합체에서의 유동 마찰계수에 대한 기존의 상관식들을 평가하였는데 Cheng과 Todreas의 단순화된 상관식이 유동의 마찰계수를 가장 정확하게 예측하였다.

## 2. 핵연료핀다발 진동 특성 실험

### 가. 개요

액체금속 원자로의 경우 정상적인 운전조건 하에서 유체유발진동에 의한 핵연료봉의 동적 구조건전성을 평가하기 위해서는 핵연료봉의 유체 내 동특성에 대한 정확한 해석이 수행되어야 한다. 원자로심 내부에서 핵연료봉의 진동거동은 내부유체의 유속에 의하여 크게 영향을 받는다. 따라서 유체 유동에 의한 핵연료봉의 진동응답을 예측하기 위해서는 먼저 유체의 영향을 고려한 핵연료봉의 동특성 해석이 필요하다[4.2.1-2].

수중에서의 모의 핵연료봉의 동특성은 주로 유체의 부가질량 효과에 의하여 지배되어지므로, 모의 핵연료봉 및 외부실린더 사이의 간격의 크기를 변화시킴으로써 유체간격의 크기에 따른 동특성 변화를 진동모우드별로 상세히 관찰하였다. 또한 액체금속로의 핵연료봉에 사용된 간극선재가 핵연료봉의 진동모우드에 미치는 영향을 살펴보았다.

### 나. 모의 핵연료봉의 수중동특성 해석

모의 핵연료봉 모델의 공기중 및 수중에서의 진동특성 변화 및 유체가 구조물의 고유진동 주파수에 미치는 영향을 평가하기 위한 자유진동 해석을 수행하고 이에 대한 검증실험을 실시하였다.

자유진동해석은 상용코드인 [ANSYS]를 사용하여 유한요소법으로 해석하였으며, 모델은 간극선재가 없는 연료봉의 경우와 연료봉에 감겨 있는 간극선재의 질량 효과를 고려한 경우, 그리고 간극선재에 작용하는 인장에 따른 기하중을 포함한 경우에 대하여 공기중 및 수중에서의 동특성 해석을 수행하였다. 이 때 유체와 구조물의 상호관계를 정확하게 모사하기 위해서 유체부분에 대해서는 ANSYS의 3차원 유체요소를 적용하였다.

모의 핵연료봉의 공기중 및 수중에서의 동특성 해석모델의 검증을 위하여 실규모 모델에 대한 모우드 시험을 수행하였다. 이 때 구조물에 대한 진동입력은 충격가진을 사용하였으며, 진동응답은 가속도를 측정하였다.

(1) 모의 핵연료봉과 유체의 모델링

모의 핵연료봉은 네개의 부분으로 나누어져 있는 지지 레일에 조립될 keyway부분과 모의 핵연료(납), 모의 핵연료를 감싸고 있는 피복관 그리고 피복관 덮개부분으로 구성되어 있다. Keyway부분과 피복관 덮개부분은 간극선재의 시작과 끝나는 지점이기도 하다.

모의 핵연료봉의 피복관은 4절점 shell요소(SHELL63)로, 나머지는 8절점 요소(SOLID45)로 모델링 하였다. 모의 연료봉 주위에 있는 유체 부분은 전단계수가 0이고 적절한 체적탄성계수에 근거하여 3차원 고체 요소(3-D structure solid element)로부터 개발된 요소(FLUID80)를 사용하였으며, 압축성, 점성, 중력의 영향을 고려할 수 있는 요소이다. 그림 4.2.1은 모의 핵연료봉 모델의 경계조건을 보여주며, 그림 4.2.2는 유체를 포함한 전체 유한요소 모델의 예이다. 모의 핵연료봉 모델의 윗부분은 레일에 의해 지지되어 있으며 아래부분은 자유단을 가진다.

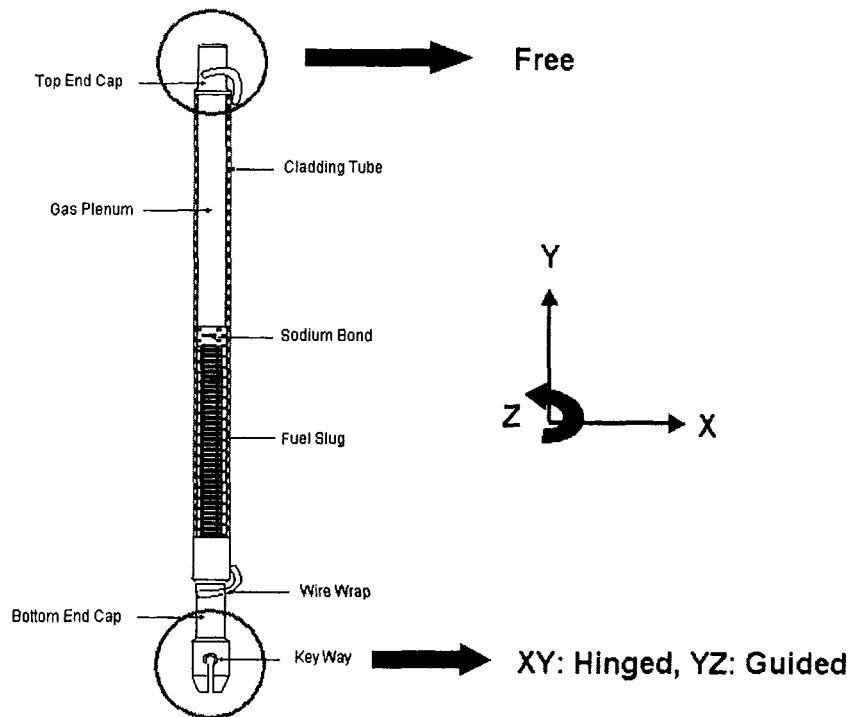


그림 4.2.1 모의 핵연료봉의 경계조건

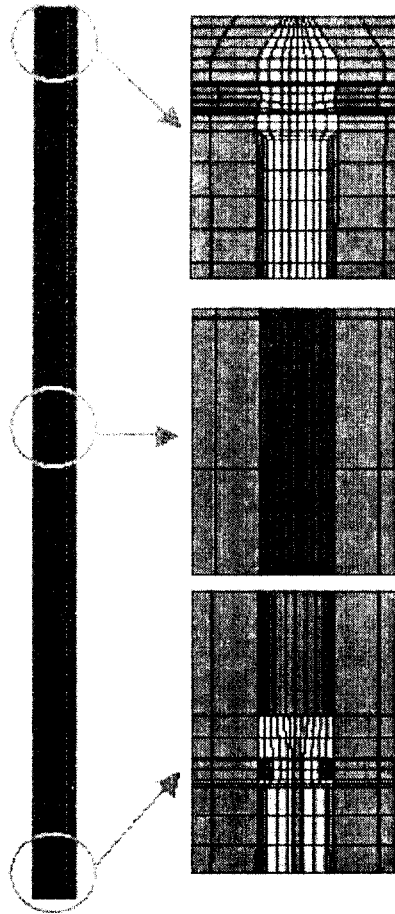


그림 4.2.2 모의 핵연료봉과 유체의 유한요소 모델링

(2) 공기중에서의 진동 모드해석

공기중에서 모의 연료봉 모델의 고유진동수와 진동모우드 형상을 구하기 위한 자유진동해석을 수행하였다. 재질은 SUS 304이며 사용된 물성치는 다음과 같다.

- 탄성계수 (Young's modulus) :  $E = 1.95 \times 10^{11}$  Pa
- 프아송비 (Poisson's ratio) :  $\nu = 0.3$
- 밀도 :  $\rho = 7.9 \times 10^4$  N/m<sup>3</sup>

여기서는 간극선재 없이 단지 모의 연료봉에 대한 것과 간극선재는 감겨있지만 인장력이 존재하지 않는 경우, 그리고 간극선재에 인장력이 작용하는 세가지 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 서로 다른 경계조건에

대한 진동모우드 형상 결과가 그림 4.2.3 및 그림 4.2.4에 나와 있으며, 모우드 형상별 고유진동수는 표 4.2.1에 요약되어 있다.

간극선재에 인장력이 없는 경우의 고유진동수는 인장력이 가해진 경우에 비하여 동일 모우드 형상에서 약간 높게 나타나며, 간극선재의 질량은 고유진동수 결과에 거의 영향이 없음을 볼 수 있다. 간극선재에 인장이 작용하면 연료봉에는 압축력이 작용하므로 구조물의 강성을 약화시켜 고유진동수가 낮아진 것으로 판단된다. 그리고 간극선재 자체의 유, 무 보다는 간극선재에 대한 인장력의 유, 무가 연료봉의 고유진동수에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수가 있다. 그림 4.2.5는 간극선재의 유 무 및 인장력의 유, 무에 따른 고유진동수 변화를 진동 모우드 별로 요약한 결과를 보여준다.

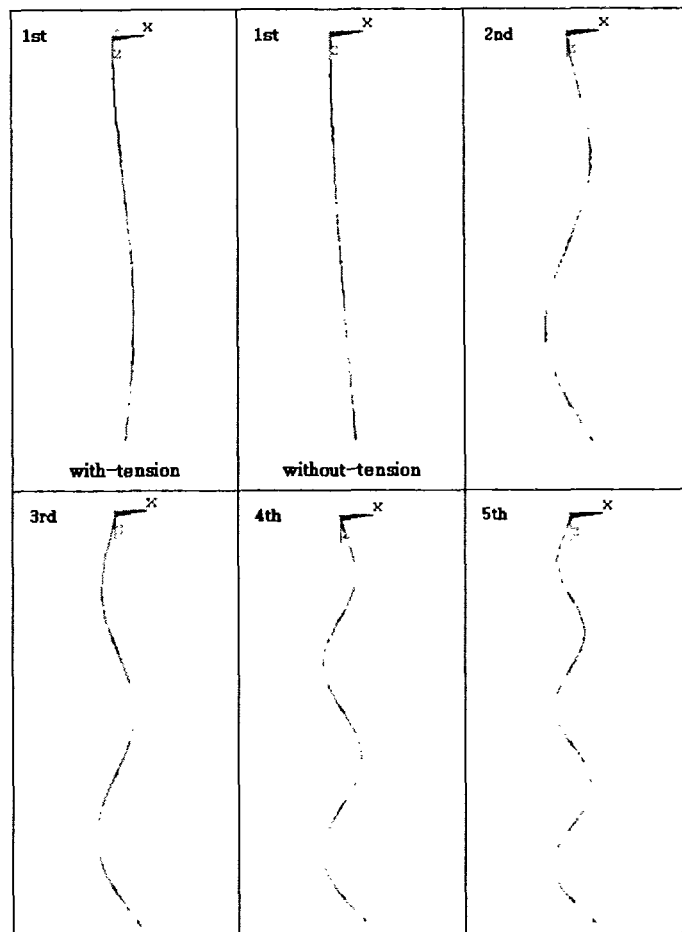


그림 4.2.3 Hinged-free 경우에 대한 모우드 형상

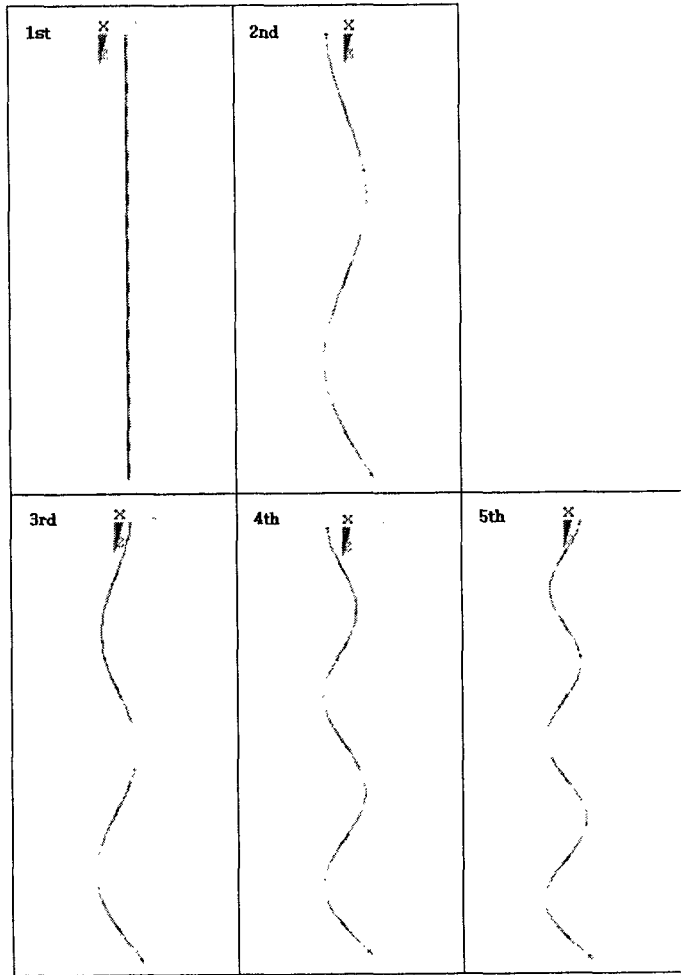
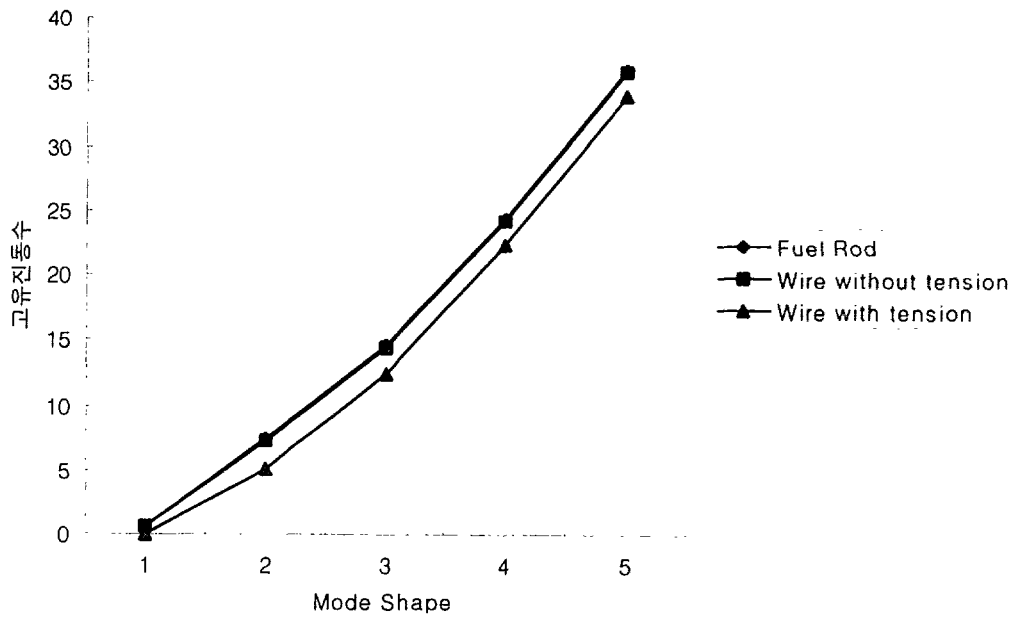


그림 4.2.4 Guided-free 경우에 대한 모우드 형상

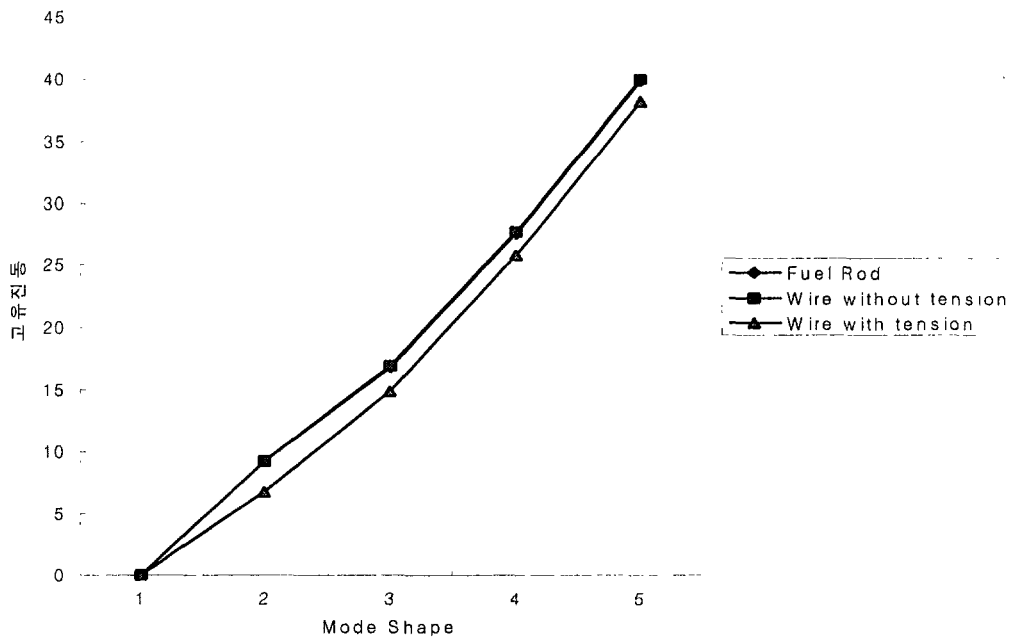
표 4.2.1 공기중 모의 핵연료봉의 고유 진동수 비교

[단위 : Hz]

Mode Number	without wire		with wire (without tension)		with wire (with tension)	
	Hinged-Free	Guided-Free	Hinged-Free	Guided-Free	Hinged-Free	Guided-Free
1st	0.56	-	0.56	-	-	-
2nd	7.40	9.15	7.35	9.17	5.10	6.83
3rd	14.56	16.78	14.47	16.84	12.47	14.86
4th	24.33	27.65	24.18	27.69	22.38	25.81
5th	35.95	39.87	35.74	40.00	34.00	38.26



(a) Hinged-Free



(b) Guided-Free

그림 4.2.5 공기중 모의 핵연료봉의 고유진동수 비교 그래프

### (3) 수중에서의 진동 모드해석

수중의 경우에 대한 진동특성 해석을 위하여 구조물과 유체의 탄성효과를 고려할 수 있도록 3차원 유체요소(FLUID80)를 추가적으로 사용하였다. 이 때 유체요소에 사용한 물성치는 다음과 같다.

- 유체(물) 체적탄성계수 :  $22 \times 10^8$  Pa
- 밀도 :  $1000 \text{ kg/m}^3$
- 점성계수 :  $1.005 \times 10^{-3} \text{ Ns/m}^2$

3차원 유체요소로 유체를 모형화 할 때 사각기둥(brick shaped) 형상으로 mesh를 나누어야 하는데 ANSYS로 3차원 요소를 생성시키기에는 너무 많은 시간을 요구하기 때문에 TRUE GRID(mesh generator) software를 사용하였다. 그리고 구조물이 복잡하고 유체와 구조물을 동시에 해석하는 과정에서 구조물과 유체에 대한 요소 수가 너무 많기 때문에 피복관은 center line을 중심으로 한 4절점 elastic shell 요소를 사용하였다.



본 연구에서는 유체 간격 변화에 따른 모의 연료봉의 진동특성 변화를 고찰하기 위하여, 유체간격을 연료봉 반경의 1/2~20 배까지 10단계로 나누어서 해석을 수행하였다. 해석 결과는 표 4.2.2에 나와 있으며, 표 4.2.3은 모우드 형상별 고유진동수를 공기중의 경우에 대하여 무차원화 한 결과이다. 그림 4.2.6은 제 2차 진동 모우드에 대한 무차원 고유진동수(수중 고유진동수/공기중 고유진동수)의 변화를 다항식 회귀곡선으로 curve fitting한 결과를 보여준다.

공기중보다 유체 내에서의 모의 핵 연료봉의 고유진동수가 작아지며, 유체의 간격이 클수록 고유진동수가 더 작아지는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 유체가 구조물에 부가적인 질량으로 작용하며 간격이 증가할수록 부가질량 효과가 더욱 증가하기 때문이다. 그리고 모의 핵연료봉의 무차원 고유진동수는 간극선재의 인장력 유,무와는 무관함을 알 수 있다.

표 4.2.2 유체 간격에 따른 고유진동수비교

(a) 간극선재의 인장력 존재하는 경우

H-F = Hinged-Free, G-F = Guided-Free

단위 = Hz

Mode Shape	B.C	Fluid gap(G) / Fuel rod radius(r)							
		0.5	0.8	1	2	3	4	5	20
2nd	H-F	3.74	3.95	3.90	3.78	3.59	3.01	3.00	1.37
	G-F	4.01	4.05	4.03	3.94	3.74	3.64	3.49	1.57
3rd	H-F	9.00	9.18	9.54	9.47	8.33	8.98	8.67	3.80
	G-F	9.34	9.54	9.57	9.65	9.35	9.11	8.74	4.14
4th	H-F	16.20	16.80	16.59	16.94	11.18	15.37	15.40	6.66
	G-F	16.42	16.92	17.06	17.13	16.68	16.21	15.60	7.27
5th	H-F	25.38	26.23	25.58	26.58	22.30	24.81	23.99	10.42
	G-F	25.49	26.43	26.71	26.72	26.09	25.18	24.13	11.08

(b) 간극선재 인장력인 존재하지 않는 경우

Mode Shape	B.C	Fluid gap(G) / Fuel rod radius(r)							
		0.5	0.8	1	2	3	4	5	20
2nd	H-F	5.87	6.01	6.02	5.70	5.02	5.52	4.53	2.34
	G-F	6.90	7.16	7.19	7.15	6.49	6.67	5.96	2.51
3rd	H-F	9.11	10.24	11.07	10.90	10.48	10.01	8.74	4.84
	G-F	12.06	12.67	12.64	12.80	12.08	11.31	11.39	5.13
4th	H-F	17.26	17.77	17.55	17.93	17.57	17.01	16.01	7.87
	G-F	19.42	20.12	20.80	20.93	20.35	18.75	18.23	7.93
5th	H-F	24.14	27.07	27.42	27.58	27.07	25.75	24.27	11.67
	G-F	28.32	28.40	29.78	30.05	29.19	28.09	27.01	12.00

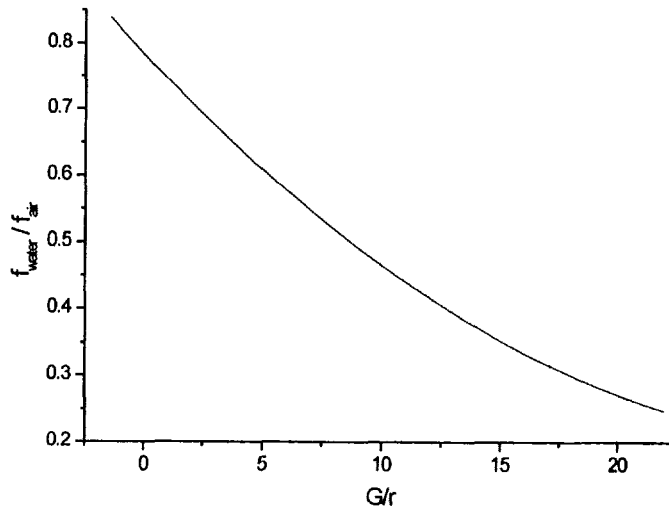
표 4.2.3 유체 간격에 따른 무차원 고유진동수 비교

(a) 간극선재의 인장력인 존재하는 경우

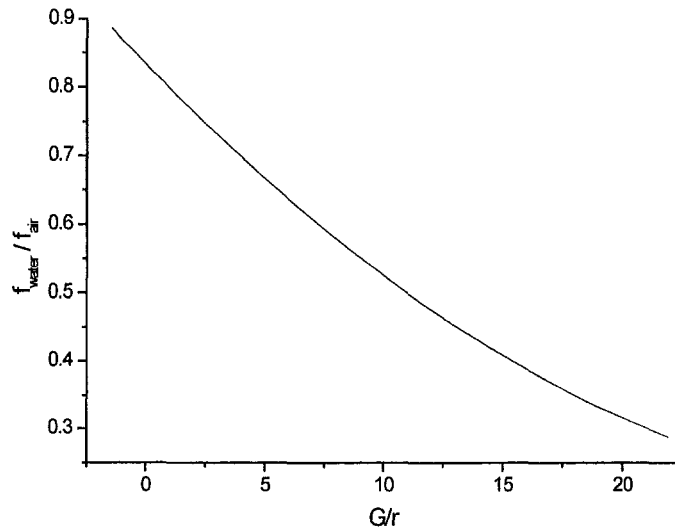
Mode Shape	B.C	Fluid gap(G) / Fuel rod radius(r)							
		0.5	0.8	1	2	3	4	5	20
2nd	H-F	0.73	0.77	0.76	0.74	0.70	0.59	0.59	0.27
	G-F	0.59	0.59	0.59	0.58	0.55	0.53	0.51	0.23
3rd	H-F	0.72	0.74	0.77	0.76	0.67	0.72	0.70	0.30
	G-F	0.63	0.64	0.64	0.65	0.63	0.61	0.59	0.28
4th	H-F	0.72	0.75	0.74	0.76	0.50	0.69	0.69	0.30
	G-F	0.64	0.66	0.66	0.66	0.65	0.63	0.60	0.28
5th	H-F	0.75	0.77	0.75	0.78	0.66	0.73	0.71	0.31
	G-F	0.67	0.69	0.70	0.70	0.68	0.66	0.63	0.29

(b) 간극선재의 인장력인 존재하지 않는 경우

Mode Shape	B.C	Fluid gap(G) / Fuel rod radius(r)							
		0.5	0.8	1	2	3	4	5	20
2nd	H-F	0.80	0.82	0.82	0.78	0.68	0.75	0.62	0.32
	G-F	0.75	0.78	0.78	0.78	0.71	0.73	0.65	0.27
3rd	H-F	0.63	0.71	0.77	0.75	0.72	0.69	0.60	0.33
	G-F	0.72	0.75	0.75	0.76	0.72	0.67	0.68	0.30
4th	H-F	0.71	0.73	0.73	0.74	0.73	0.70	0.66	0.33
	G-F	0.70	0.73	0.75	0.76	0.73	0.68	0.66	0.29
5th	H-F	0.68	0.76	0.77	0.77	0.76	0.72	0.68	0.33
	G-F	0.71	0.71	0.74	0.75	0.73	0.70	0.68	0.30



(a) 간극선재의 인장력인 존재하는 경우



(b) 간극선재의 인장력이 존재하지 않는 경우

그림 4.2.6 Hinged-free 경우에 대한 2차 모드에 대한 무차원 고유진동수 그래프

#### 다. 검증실험

##### (1) 실험목적

모의 핵연료봉의 공기중과 수중에서의 고유진동수를 측정하여 동특성 해석모델의 검증 및 실제 핵연료봉의 동특성 변화를 정확히 측정하여 유체진동 현상으로 인한 노심의 건전성 평가 및 설계연계자료로 활용코자 한다.

##### (2) 실험장치 개요

모의 연료봉을 지지하고 유체를 포함하는 외부 원통은 2개의 아크릴 반 기둥으로 제작하였으며, 각각은 다시 원주방향으로 4등분의 반 기둥으로 구성되어 있다. 상, 하부 두 기둥의 상부는 가속도 센서가 부착된 모의 핵연료봉의 keyway 부분을 지지하도록 되어 있다. 또한 하부에 지지대를 설치하여 시험모델을 조건에 따라 분해 및 조립이 용이하도록 하였다. 실험부의 3차원 조립도가 그림 4.2.7에 나와있다.

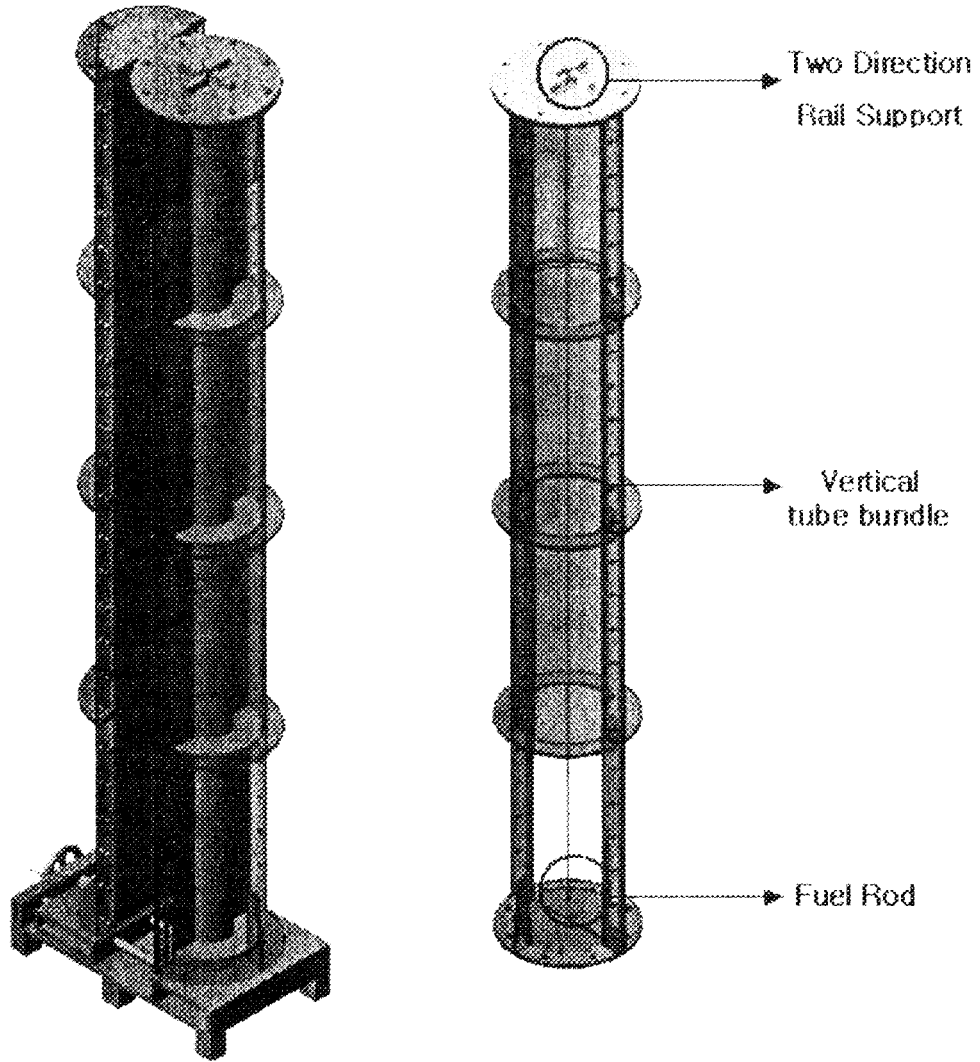


그림 4.2.7 모의 핵연료봉 수중 실험용 장치

라. 동특성 실험

(1) 실험장치

모의 핵연료봉의 공기중 및 수중에서의 동특성 추출을 위한 실험장치 개략도가 그림 4.2.8에 나와 있으며, 그림 4.2.9는 그 실제의 모습이다. 모의 핵연료봉을 지지하고 있는 가이드 레일은 절연하여 고정시켰다. 그리고 실험에 사용된 장비들은 아래와 같다.

표 4.2.4 실험에 사용된 실험 장비

Equipments	Specifications
Accelerometer	PCB Piezotronics VW 352B10
Impact hammer	B&K 8200
Signal conditioner	Charge amp. B&K 2635 PCB 482A16
Signal analyzer	IDEAS TDAS 8m3
Data acquisition	VXI 1432 (Agilent)

### (2) 실험방법

본 실험의 주목적은 모의 핵연료봉의 공기중 및 수중에서의 동특성 상관관계를 구하고, 해석적 모델의 검증에 위한 것이다. 따라서 본 실험은 공기중 실험과 수중 실험의 두 가지의 경우로 나누어 수행되었으며, 충격가진 방법을 사용하였다.

공기중 실험의 경우에는 모의 핵연료봉의 keyway부분을 가이드레인에 지지시켰고, 임팩트 햄머(impact hammer)를 이용하여 충격가진 방법을 사용하였다. 모의 핵연료봉의 XZ(hinged-free)방향과 YZ(guided-free)에 대한 모드 형상을 구하기 위한 절점들의 위치는 길이방향으로 1개의 지지점과 가속도계가 부착된 9개로 구성되어 있다. 수중 실험의 경우에는 길이방향으로 11개의 절점으로, 1개의 지지점과 10개의 가속도계 지점으로 구성되어 있다.

### (3) 동특성 파라미터 추출

충격가진 및 electro-mechanical 가진을 통하여 측정된 가진 및 응답신호는 I-DEAS TDAS 8m3 소프트웨어를 사용하여 Agilent VXI

시스템의 front end input 모듈(VXI 1432)로 입력된다. 입력된 신호들은 FFT 변환 및 평균화되어 주파수응답함수로 계산되어진다.

공기중 및 수중에서 충격가진을 통한 평균 횟수는 5회로 하였다. 그리고 공기중 및 수중 실험 모두의 경우에 대해 측정주파수 범위는 100Hz로 하였으며 샘플링 시간간격은 1/4096초로 하였다. 이때 주파수응답함수를 구하기 위하여 필요한 FFT의 데이터 개수는 8192개로 하였다. 동특성 매개변수(고유진동수, 감쇠율, 진동모우드 형상) 추출 역시 I-DEAS TDAS 8m3소프트웨어를 사용하여 구하였다.

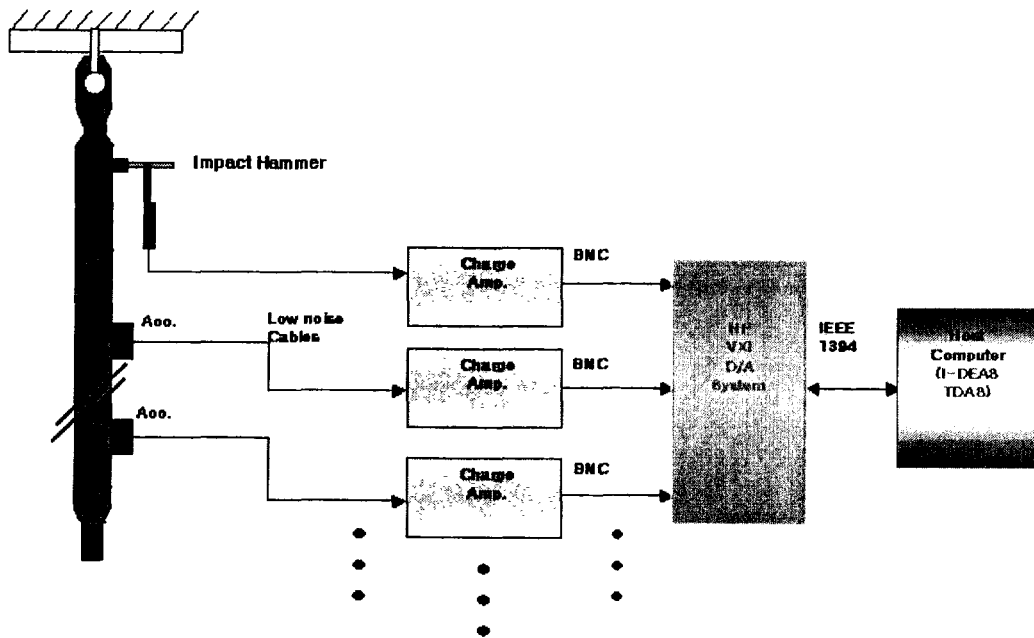


그림 4.2.8 모의 핵연료봉의 수중 동특성 실험 장치개략도

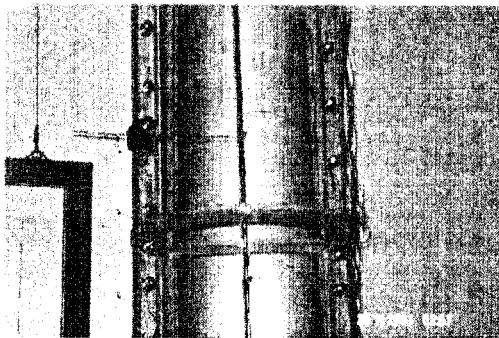


그림 4.2.9 실험장치

#### (4) 실험결과

공기중 및 수중에서 구한 모의 핵연료봉의 각 모드별 고유진동수와 유한요소 해석결과를 표 4.2.4 그림 4.2.10에서 비교하였다. 공기중에서 유한요소 해석결과와 실험값 비교에서 10% 정도 유한요소 해석값이 크게 나타났으며, 이러한 오차를 볼 때 유한요소해석이 정확하다고 볼 수 있다. 그리고 실험적으로 구하지 못한 고차 모드의 경우에는 유한요소로 예측할 수 있다고 생각한다.

수중에서는 유한요소 해석값에 비해 15-20%정도 실험값이 크게 나오는 것을 볼 수 있었고, 결과는 표 4.2.5와 그림 4.2.11에서 나타내었다. 수중에서의 결과가 공기중에 비해 다소 차이는 나지만 본 연구에서 제시한 유한요소 모델이 유용하다고 판단된다. 수중 실험에서 이와 같이 차이가 나는 것은 가진 방법에서 모의 핵연료봉에 직접 충격가진을 하지 못했기 때문에 가진 지지대를 이용하여 간접적 가진했기 때문이라 사료된다. 그러나 공기중의 경우와 마찬가지로 수중에서도 유한요소 해석결과를 이용하여 실험적으로 구하지 못한 진동모드를 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것이다. 그리고 실험 및 유한 요소 해석의 경향이 서로 잘 일치함을 볼 수 있었다. 그림 4.2.12와 그림 4.2.13은 공기중 및 수중에서 충격가진을 구한 모의 핵연료봉에 대한 주파수 응답함수를 각각 보여준다. 가진입력과 가속도 응답사이의 선형성이 매우 좋으며, 고유진동수 위치가 고주파수 영역까지 뚜렷하게 분리되어 나타나고 있음을 보여준다.

본 연구를 통해 모의 핵연료봉의 유체 진동에 대한 유한요소 모델을 개발하였고, 실험을 통해 모의 핵연료봉에 대한 유체의 부가질량 효과를 재검증할 수 있었다.



표 4.2.4 공기중 모의 핵연료봉의 실험치/해석치 고유진동수 비교

[단위 : Hz]

Mode number	Hinged-free		Guided-free	
	FEM 해석	실험	FEM 해석	실험
2	5.1	6	6.83	6.5
3	12.47	12	14.86	12.75
4	22.38	19.25	25.81	20
5	34	30.5	38.26	31.75
6	50.4	43	55.2	44
7	67.46	55.25	73.52	57

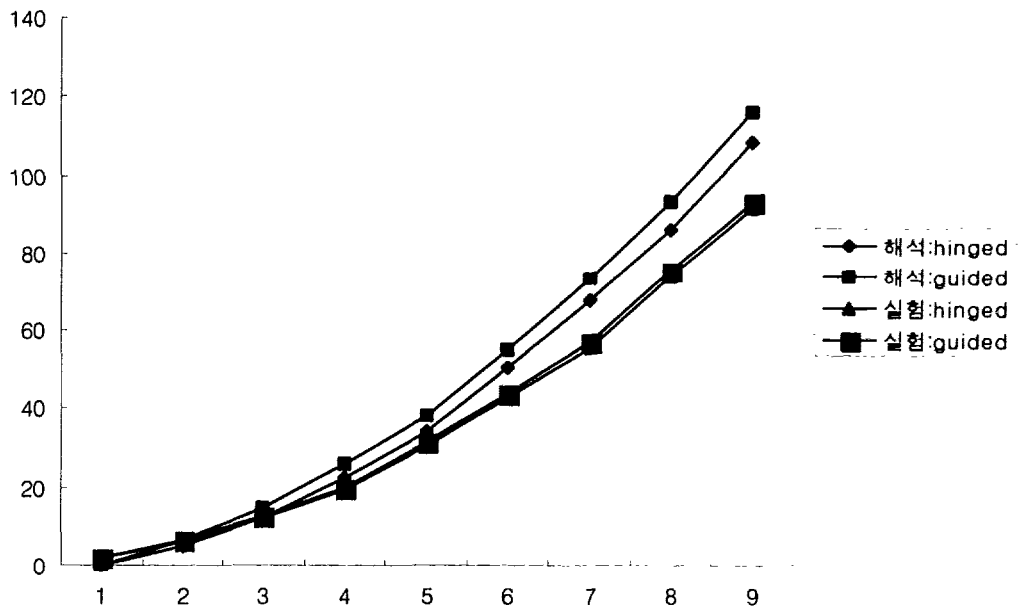


그림 4.2.10 공기중 모의 핵연료봉의 실험치/해석치 고유진동수 비교 그래프

표 4.2.5 수중 모의 핵연료봉의 실험치/해석치 고유진동수 비교

[단위 : Hz]

Mode number	FEM 해석	실험
2	1.865	2.375
3	4.36	5.25
4	6.87	7.75
5	9.05	10.5
6	18.25	20.5
7	32.72	36.36

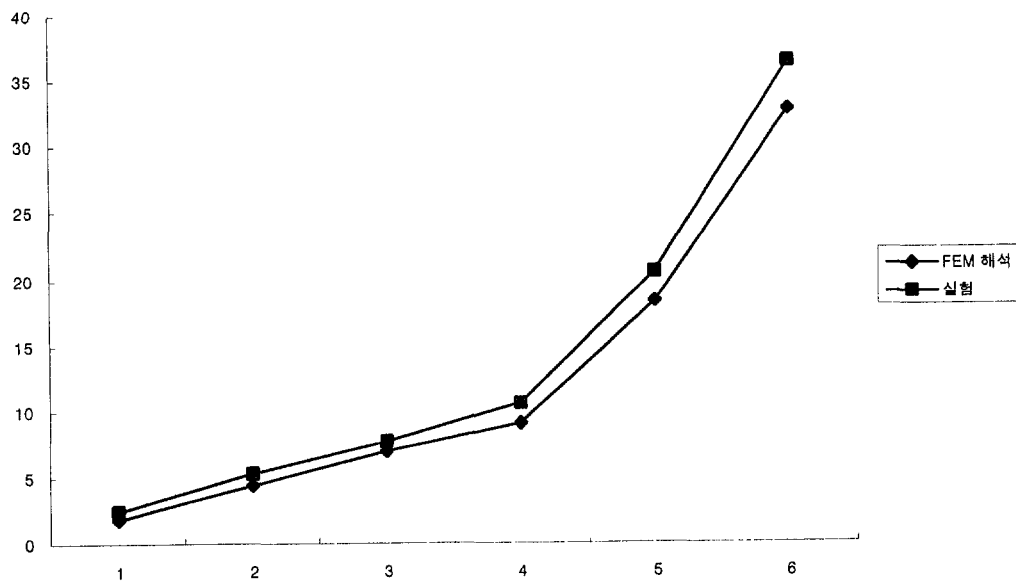
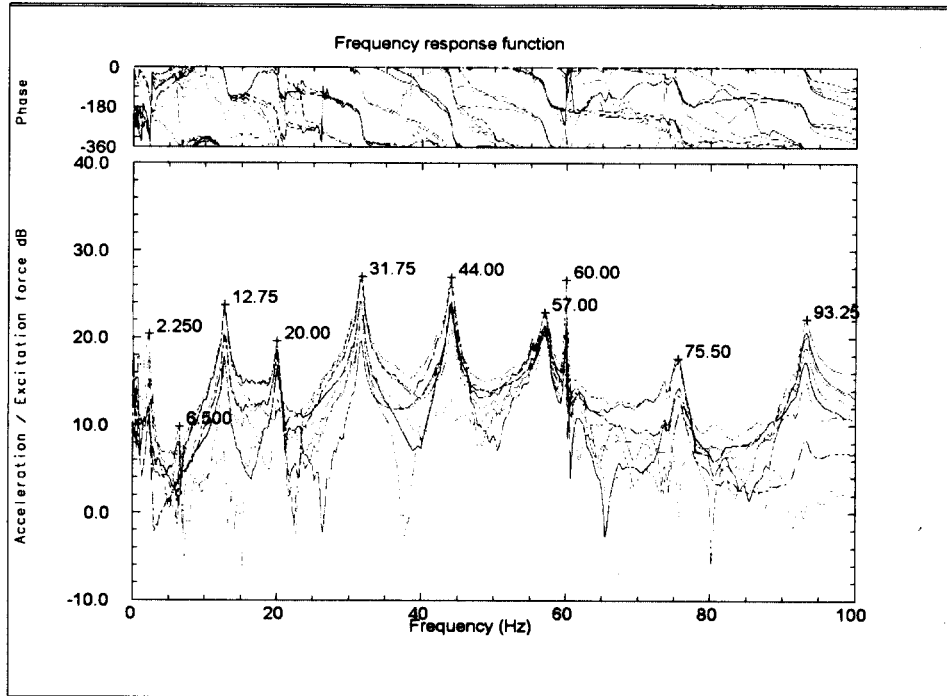
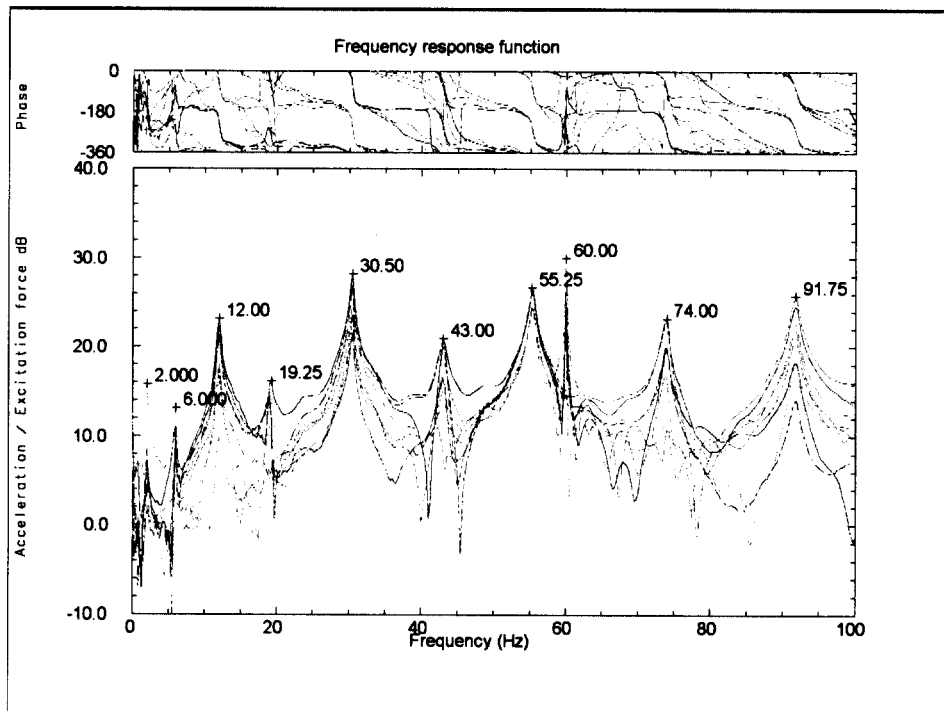


그림 4.2.11 수중 모의 핵연료봉의 실험치/해석치 고유진동수 비교 그래프



(a) Hinged-free



(b) Guided-free

그림 4.2.12 공기중 주파수 응답 함수

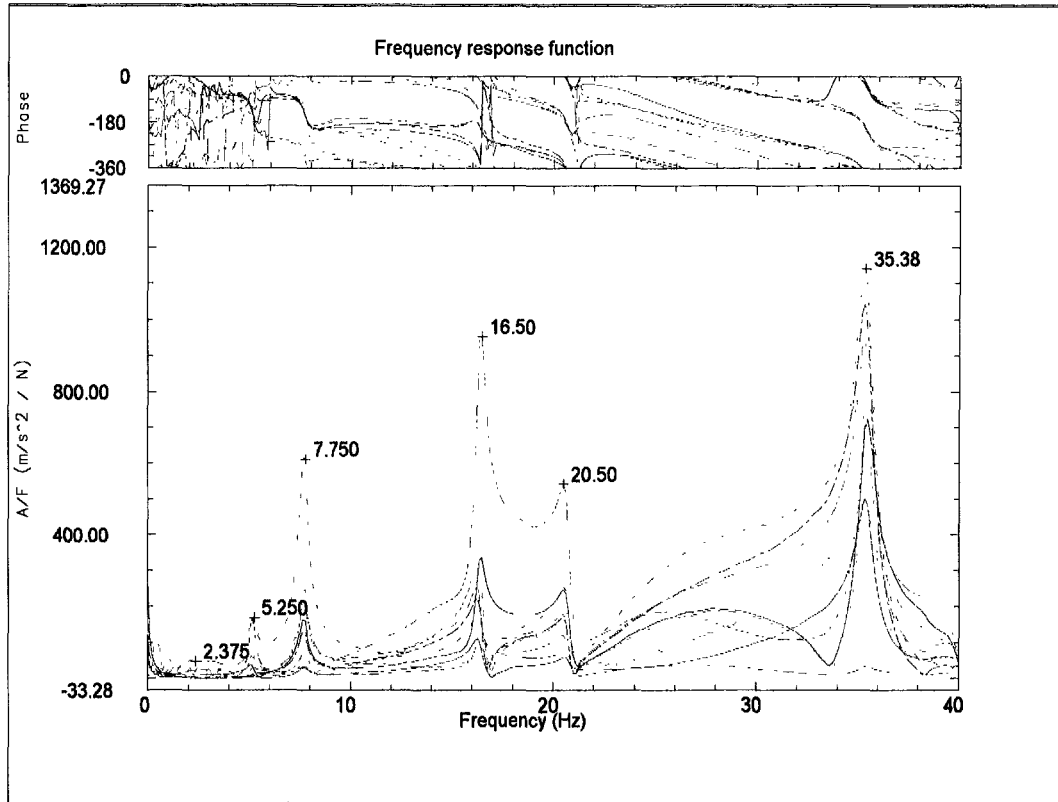


그림 4.2.13 수중 주파수 응답 함수

마. 결 론

- (1) 간극선재에 인장력을 가하지 않고 질량효과만 고려한다면 실제 집합체 내에서 유동이 발생시 붕과 붕사이에 발생하는 마찰력이나 충격완화 등에는 도움을 줄 수 있으나 고유진동수에는 영향을 미치지 못하고 거의 변화가 없다.
- (2) 공기중의 경우 핵 연료봉의 기본 고유진동 주파수는 6Hz이며, 수중의 경우에는 2.4 Hz로서 부가질량효과로 인하여 고유진동수가 현저히 감소 하였다.
  - 진동모우드에 따라 최대 54%에서 최소 9%로 감소함

(3) 유체의 간격이 증가함에 따라 모의 핵 연료봉의 고유진동수가 감소하였다.

- 유체의 부가질량 효과가 간격이 증가함에 따라 더욱 증가함을 정량적으로 확인함
- 부가질량효과는 진동모우드별로 달라짐
- 형상비(유체간격/구조물의 반경)에 따라 최대 20%와 최소 0.5%의 감소 비율을 확인함

(4) 핵 연료봉의 무차원 고유진동수(수중 고유 진동수/공기중 고유 진동수)는 간극선재의 인장력(3 kgf)의 영향을 받지 않는다.

## 제 5 절 상부플레넘 액면요동 물모의 실험

### 1. 실험의 개요

이 실험은 유체설계분야와의 연계연구로 유체설계분야에서 작성한 KALIMER 내부분서인 실험요건서 LMR/FS200-XR-01/2001의 6개 실험부 중에서 case-4인 구조로 장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 액체금속로 노심의 상부에는 냉각재인 소듐의 자유액면이 존재한다. 노심에서 분출된 소듐은 대략 0.5 m/sec 정도로 자유액면에 도달하고, 다시 자유액면보다 낮은 위치에 있는 중간열교환기로 흡입된다. 이 때 소듐은 530°C 정도의 온도를 갖고 있으며, 이에 반해 커버가스는 300°C 정도의 온도로 유지된다. 이런 경우에 열유체적으로는 두 가지 관점에서 문제가 제기된다. 첫째는 자유액면의 요동으로 인해 인접한 재질에 열피로 현상을 유발시키고, 둘째로는 중간열교환기로 소듐이 흡입될 때 자유액면에서 소용돌이가 발생하여 커버가스가 중간열교환기로 혼입(gas entrainment)될 수도 있다. 커버가스가 중간열교환기로 혼입되면 열교환기의 성능이 저하되고, 또한 노심으로 커버가스가 들어가서 핵반응도에 문제점을 야기시킨다.

이 실험에서는 상온의 물을 사용하여 가스혼입이 일어날 수 있는 임계조건 즉, 가스혼입이 발생하는 시점의 자유액면의 높이와 유출유량을 측정하여 가스혼입이 일어나는 조건을 분석하였다. 또한 유입유량과 자유액면의 높이에 따른 자유액면의 구배를 측정하였다. 실험장치의 규모는 KALIMER의 길이 스케일로 1/4 정도이며, 상부플레넘의 1/4 section을 모의하였다. 실험장치는 부채꼴 모양이며, 안쪽 원통은 반응도 제어장치가 설치되는 UIS를 모의하였고, 바깥 원통은 원자로 벽면을 모의하였다. 이 실험에서는 부차적으로 안쪽 벽면에 Vane을 설치하여 UIS에 부착된 구조물이 자유액면의 유동에 어떤 영향을 미치는지를 조사코자 하였다. 주입유량과 자유액면의 평균수위를 변화시키면서 자유액면의 구배에 관련된 실험자료 36set를 생산하였고, 가스혼입이 일어나는 임계조건을 측정하는 실험에서는 28개의 실험자료를 획득하였다.

### 2. 실험

#### 가. 실험장치

실험부(그림 5.2.1)를 설계, 제작하여 기존의 번들압력강하 실험장치(그림 5.2.2)에 부착하여 실험을 수행하였다. 실험장치에 관해서는 칼리머팀의 내부 문서인 상부플레넘 액면요동 실험장치의 제작시방서에 상세히 기술되어 있다. 그림 5.2.3은 실험부의 상세한 규격이다. 실험부의 하부 즉, 유입부와 유출부는 스테인레스 스틸로 만들었고, 자유액면이 있는 부위는 투명한 아크릴로 만들었다. 이 보고서에서의 수위는 스테인레스 스틸과 아크릴이 플렌지로 접하는 지점을 기준점으로 정하였다. 유입부에는 실험부로 균일하게 물이 유입되도록 하기 위하여 2종류로 만든 5개의 스크린을 설치하였다. 하부의 두 개는 노즐에서 들어오는 유체를 분산시키는 역할을 하며, 상부의 세 개는 균일한 속도를 갖도록 설계하였다.

유입구에서 유입된 물은 자유액면을 형성한 후 출구노즐로 자유낙하하여 빠져나간다. 출구노즐(그림 5.2.4)은 내경이 250mm인 원형이나 측면에 높이 100mm, 폭 14.54mm, 피치 24.54mm인 32개의 홀을 통해 유출구로 물이 들어가고, 이 상부에는 높이 100mm인 아크릴 돔으로 막혀진 형태이다. 자유액면의 평균수위는 출구노즐의 하류에 설치된 1개의 5" 수동밸브와 1개의 2" 전동밸브로 제어한다. 유입유량은 기존의 실험장치에 설치된 원심펌프의 회전수와 바이패스 관으로 조절한다. 이 펌프는 인버터로 회전수를 제어한다. 유량은 OMEGA 사의 Model 2.5" 및 3" 터바인 유량계를 사용하여 유량범위에 맞게 교체하면서 측정하였다.

#### 나. 수위계(level sensor)

이 실험에서 평균수위는 정확도는 떨어지나 넓은 범위(1200mm)를 측정할 수 있는 방법인 차압계를 이용하는 방법으로 측정하였고, 국소수위는 측정범위는 좁으나 높은 정확도와 빠른 감응도를 갖는 방법을 사용하여 측정하였다. 국소수위(local level)를 측정하는 18개의 level sensor로는 저항형 센서를 자체 설계, 제작하여 사용하였다. 이 국소수위 센서의 기본개념은  $\emptyset$  0.1mm STS wire를 물 속에 잠입한 후, 물의 수위에 따른 저항의 변화를 측정하는 방법이다. 이 센서에 1kHz AC 전력을 공급하는 전력공급장치를 자체 설계, 제작하여 사용하였다. 실험부의 중앙인 45° 각도에 설치한 9개의 센서

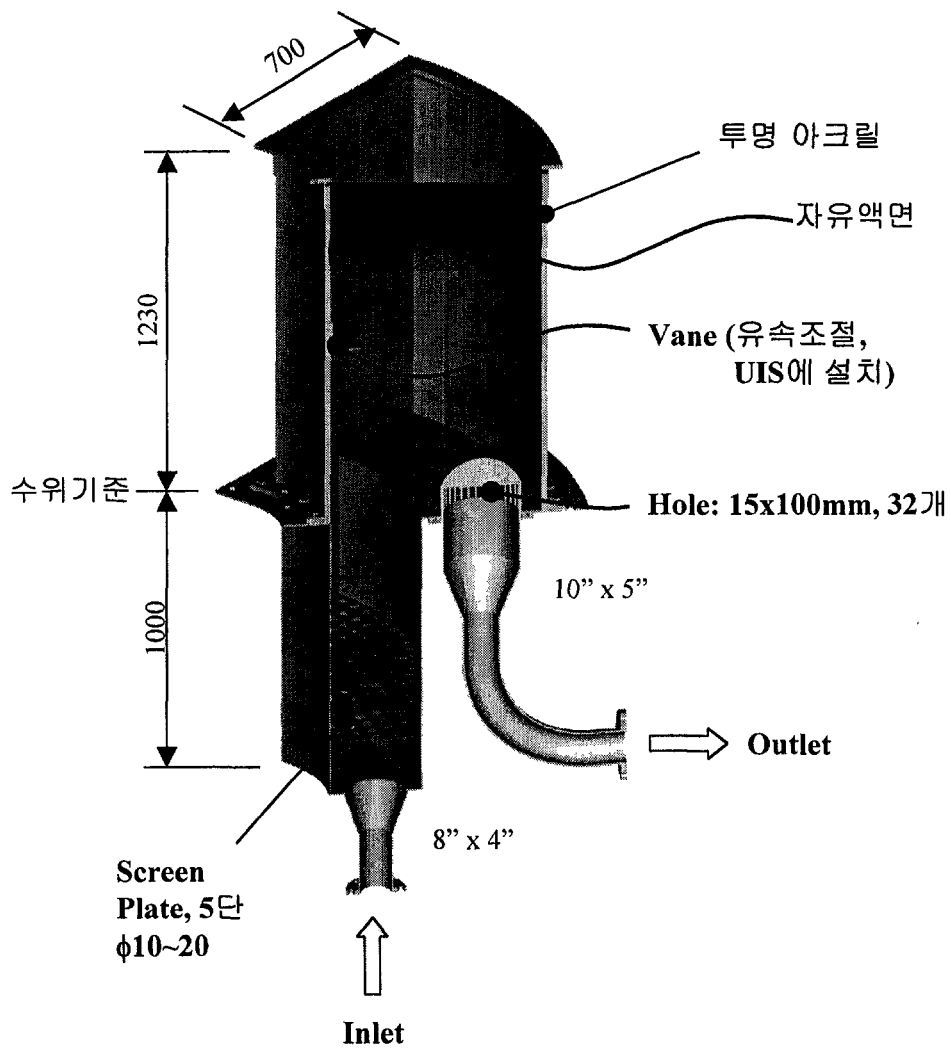


그림 5.2.1 가스혼입 실험부의 단면



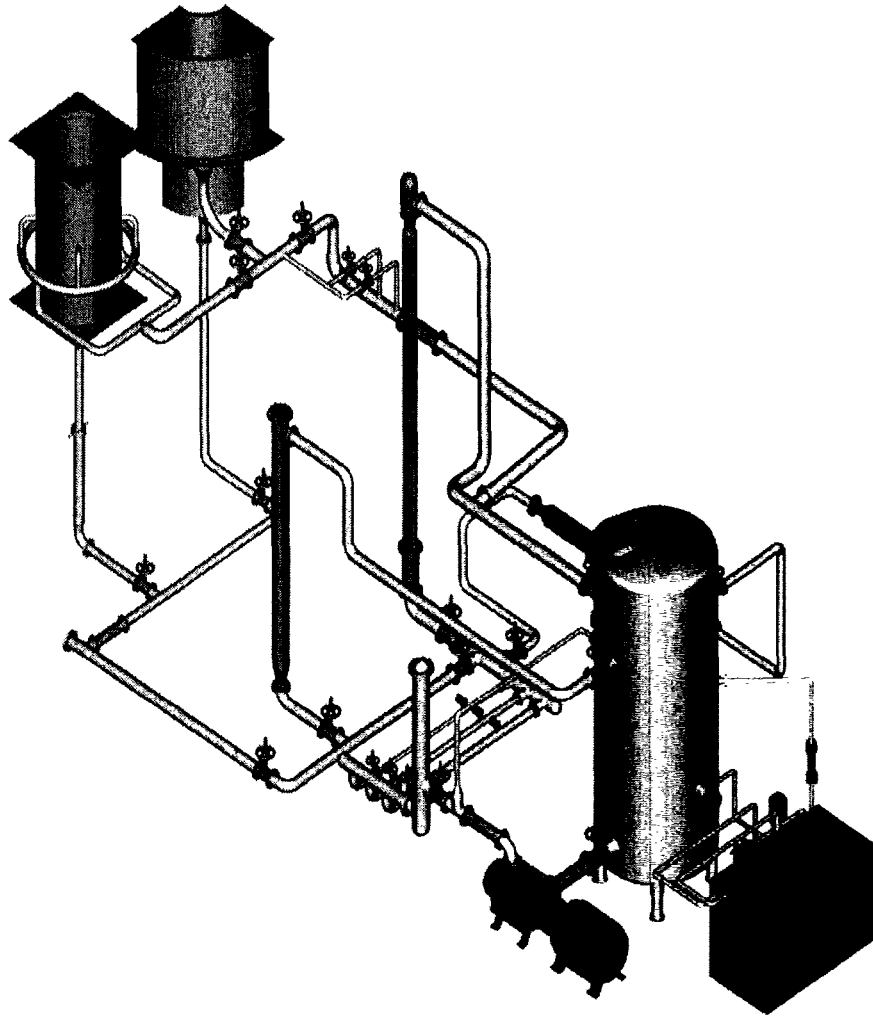


그림 5.2.2 실험장치의 구성

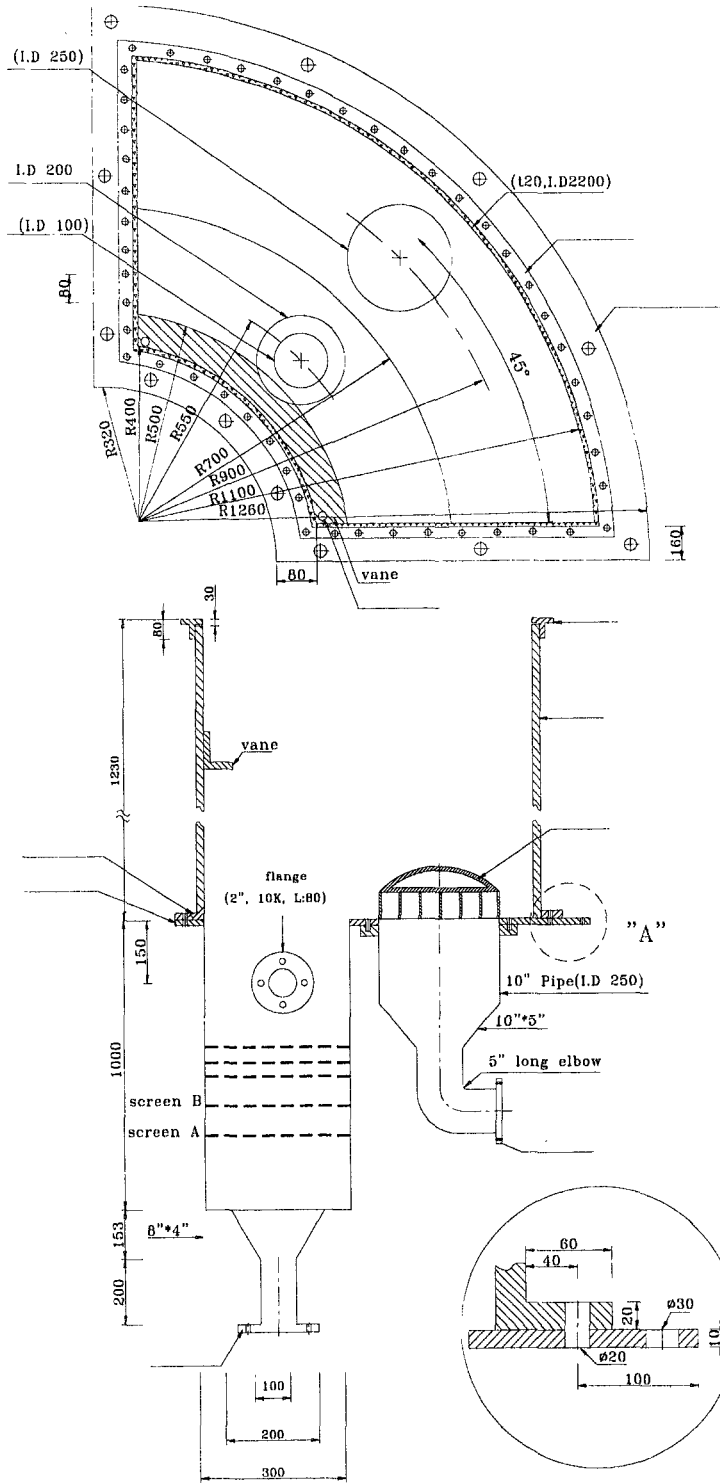


그림 5.2.3 가스혼입 실험부의 규격

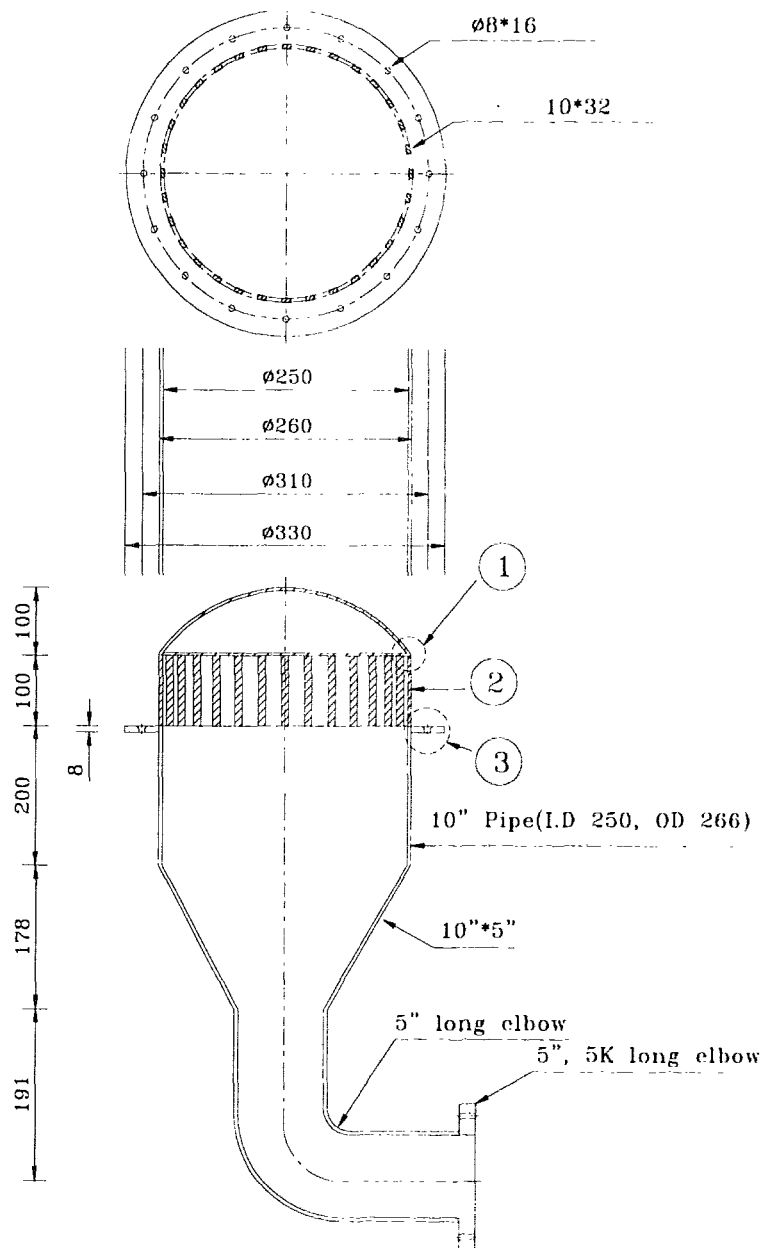


그림 5.2.4 실험부의 출구노즐 규격

는 STS316으로 만들었으며, 22.5° 각도에 설치한 9개의 센서는 STS304로 만들었다. 센서의 위치는 표 5.2.1에 기술되어 있다. 그림 5.2.5에서는 실험부의 45° 각도에 설치한 국소수위계의 형상을 보이고 있다.

평균수위를 측정하는 차압계는 장치에 설치한 후 보정하였다(그림 5.2.6). 국소센서의 전체 길이는 750mm 정도이나 실험에서는 분해력을 높이기 위하여 측정코자 하는 평균수위의 아래로 40mm, 위쪽으로 50mm 즉, 총 90mm를 보정하여 사용하였다. 18개의 센서 각각에 대해 3 위치의 설정수위에서 보정하였으므로 총 54개의 보정식을 작성하여 각각 국소수위 측정에 적용하였다. 그림 5.2.7은 대표적으로 설정수위 400mm에서 sensor #02를 보정한 그래프를 나타내고 있다. 이 센서들의 보정식은  $H = a + b \exp(cV)$  형태로 나타났다. 여기에서 H는 수위(mm), V는 출력신호(volt)이고, a, b, c는 보정상수 이다. 이 센서의 경우 400mm 근방에서 1mV의 출력전압 변화에 따라 0.0238mm 분해력을 보인다.

#### 다. 실험방법 및 범위

이 실험에는 두 종류의 실험을 수행하였다. 첫째로는 가스(공기)가 혼입되는 임계조건을 찾는 실험이며, 둘째로는 임의의 유량과 평균수위에서 vane의 위치를 바꾸어가면서 자유액면의 구배를 측정하는 실험이다.

##### (1) 가스혼입 임계조건 측정실험

가스혼입이 일어나는 임계조건 즉, 가스혼입이 일어날 때의 수위와 유출되는 물의 양을 측정하는 실험이다. 실험방법은 임의의 유입유량에서 평균수위를 800mm로 유지하다가 출구에 있는 밸브를 더 개방하여 수위가 출구노즐까지 감소하는 동안 유입유량과 평균수위를 계측기로 기록하면서 물표면의 상태를 관찰하여 공기혼입이 일어나는 시각에 계측기에 신호를 보내어 기록하였다.

공기가 혼입되는 때를 결정하는 것은 매우 어렵다. 유출배관에서 기포울을 정밀하게 측정하여야 하나 이에 합당한 기포울 측정기를 설치할 수가 없어서, 자유액면에서의 상태를 육안으로 보면서 결정하였다. 실험에서 자유액면의 변화상태를 세 가지 경우로 구분하여 각각의 기준을 정하였다.

표 5.2.1 Level sensor의 안쪽벽면에서부터의 거리 (mm)

$\theta$ \ channel	01	02	03	04	05	06	07	08	09
	11	12	13	14	15	16	17	18	19
45.0°	156	229	305.5	357.5	406	456.5	505	577	644
22.5°	154	228	304	354	403.5	458	505.5	576	640.5

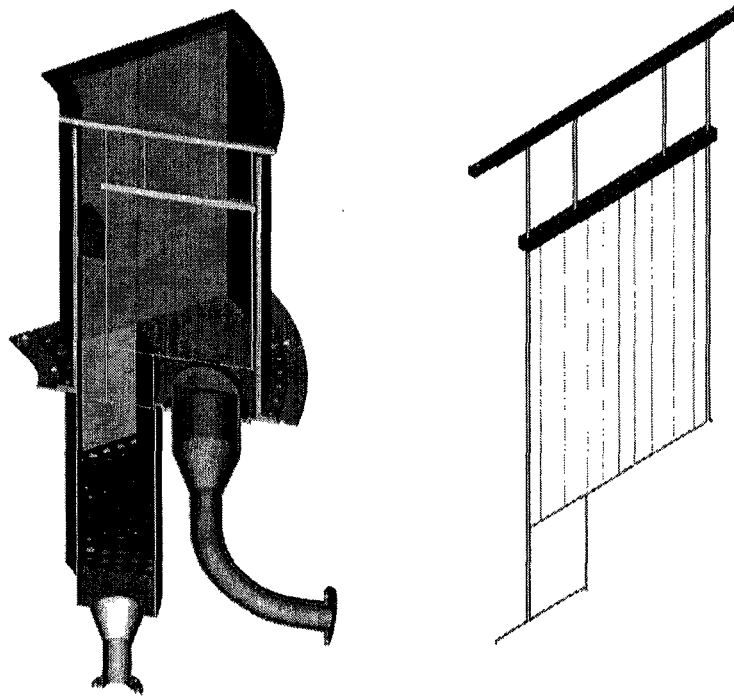


그림 5.2.5 Level sensor의 형상 및 설치위치(45° 인 경우)

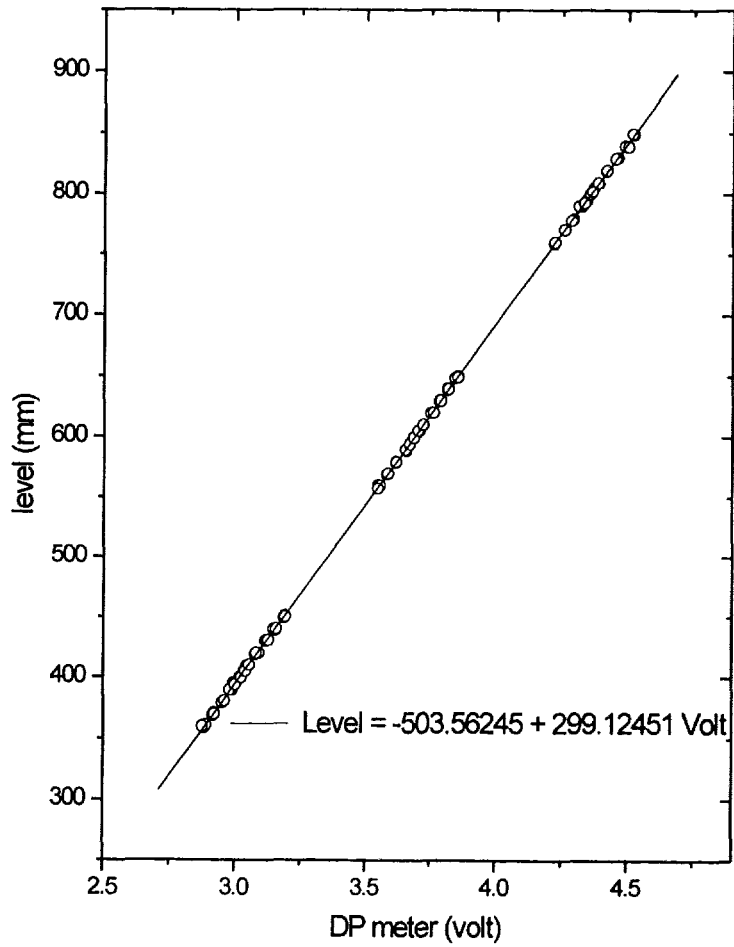


그림 5.2.6 평균수위계의 보정과 보정식

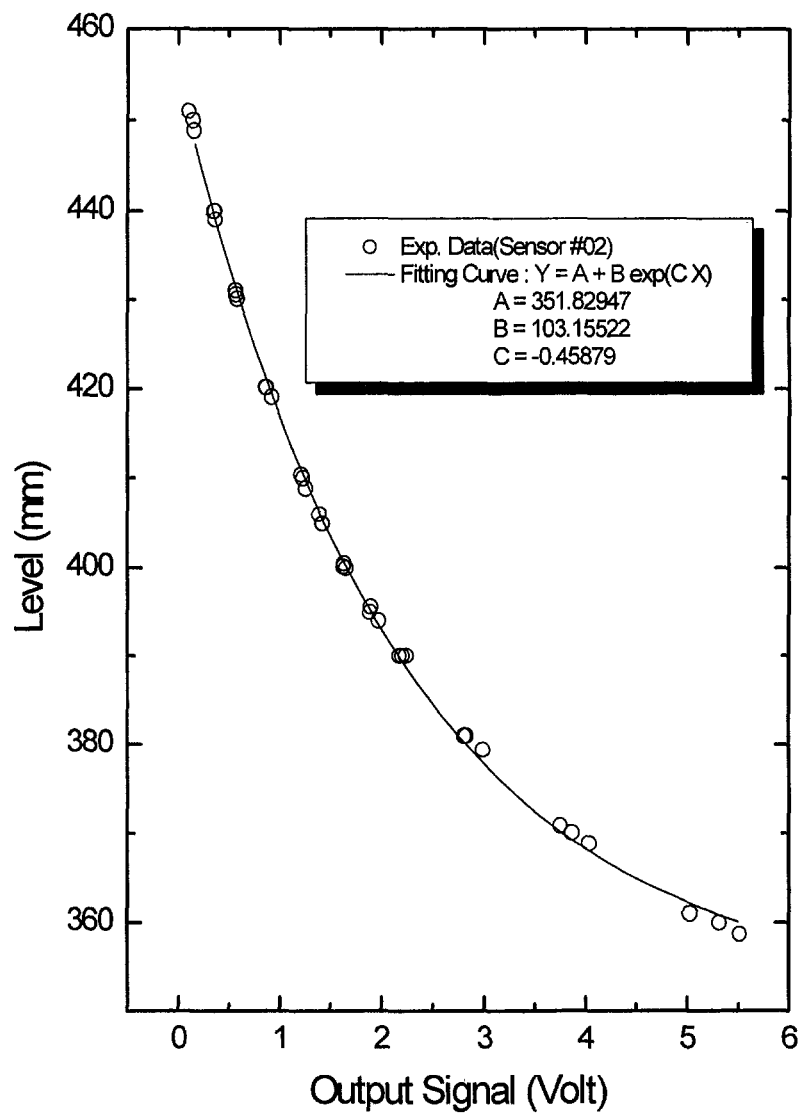


그림 5.2.7 국소수위계 #02의 보정실험자료와 보정식



**Case 1:** 물의 자유액면에 소용돌이(vortex)가 최초로 나타나서 vortex 중심이 수면에서 조금이라도 파인 모습이 육안으로 감지가 될 때로 즉, 자유액면에 소용돌이가 생성되는 시각을 기준으로 정했다. 이 때의 vortex는 전지역에서 나타났다.

**Case 2:** Vortex가 더 성장하여 접시 모양이 되는 시각을 기준으로 설정하였고, 이 때의 vortex는 생성과 사멸과정을 반복하여 일어나고, Case 3 보다는 생성 지역이 넓게 일어났다.

**Case 3:** Vortex가 더욱더 성장하여 접시모양의 하단부가 파단되면서 공기가 유입되기 직전일 때를 기준으로 설정하였다. 이 때의 공기 유입과정은 매우 불규칙하게 일어나고, 모두  $0^\circ$  와  $90^\circ$  부근 바깥쪽 모서리에서 먼저 발생한다. 또한 유량이 증가하면 공기가 유입되어 유출구로 빠져나가는 현상을 관찰할 수 있었다.

유입유량은  $5\sim 35\text{ l/sec}$  범위에서  $5\text{ l/sec}$  간격으로 7 종류의 유량에 대해 실험하였고, 각각의 유량에 대해서 vane의 위치를 0, 200, 400, 600mm 네 가지 경우로 바꾸면서 측정하였다. 그러므로 이 실험에서는 총 28set의 실험 자료를 생산하였다. 유출유량은 기준시각에서 평균수위의 감소율과 유입유량으로 계산하였다.

평균수위는 차압계를 이용하여 측정하였고, 평균수위의 감소율은 밸브의 주입유량 및 밸브의 열린 상태에 따라 달라지므로 일정하게 유지할 수 없었으나 각 실험에서 대략  $2\sim 3\text{ mm/sec}$ 로 감소하였다. 측정간격은 0.8sec 정도였다.

## (2) 자유액면 구배 측정실험

이 실험은 주입유량, 평균수위, vane의 위치를 임의의 값으로 설정하여 두고 표면이 평형상태에 도달하면 실험부의  $45.0^\circ$ ,  $22.5^\circ$  각도에 각각 9개씩 설치된 level sensor로 수위를 5ms 측정간격을 두고 10분 동안 data를 측정하였다. 주입유량의 설정치는 5, 20,  $35\text{ l/sec}$  3가지 경우이며, 평균수위의 설정치는 400, 600, 800mm 범위에서 유지하였고, vane의 위치는 0, 200, 400, 600mm 네 가지 경우로 바꾸면서 측정하였다. 그러므로 이 실험에서는 총 36set의 실험자료를 생산하였다. 각 실험에서 실험조건은 표 5.2.4에 기술하였

다.

### (3) VIDEO 촬영

가스혼입 임계조건 측정실험에서는 전 실험과정을 통해 촬영하였고, 자유액면 구배 측정실험에서는 vane의 위치가 0mm, 600mm 두 개의 경우에 대해서 촬영을 하였다. 그러므로 총 길이는 450분 정도의 분량이다.

## 3. 실험자료 정리

### 가. 측정오차

초당 4000개의 Data를 계측할 경우 계측장비(센서, 전력공급장치, 계측기)의 random한 background noise가  $\pm 20\text{mV}$  정도로  $\pm 0.5\text{mm}$  정도에 해당하나, 평균수위를 계산할 때는 이 노이즈는 없어진다. 측정오차는 ASME 규정에 의해 계산하였다. 제작오차 및 측정오차는 표 5.3.1에 기술되어 있다. 측정에서 센서의 오차는 편향오차로 사용되므로 국소수위센서의 오차도 편향오차로 사용하기 위하여 보정시에 수위를 측정할 오차( $\pm 0.1\text{mm}$ )를 고려하여 실험데이터가 99% 신뢰도를 갖도록 결정하였다. 센서의 길이로 90mm를 사용하였을 때에 센서와 보정용 실험자료에 따라 다르지만 대략  $\pm(0.5\sim 0.8)\text{mm}$ 의 오차를 가졌다.

### 나. 가스혼입 임계조건

가스혼입 임계조건은 3개의 가스혼입 판단기준에 대해서 각각 표 5.3.2에서 표 5.3.4에 기록하였다. 여기에서 가스혼입이 일어나지 않는 경우의 유입유량과 유출유량은 평균수위가 400mm일 때의 값이다. 이 실험자료들을 나타내는 그림 5.3.1은 각각의 가스혼입이 일어난다는 판단기준에 따라 유출유량과 평균수위의 임계조건을 보이고 있다. 가스혼입이 일어나는 상태를 육안으로 관찰하여 결정한 것이기 때문에 어느 정도의 오차는 인정하더라도 실험자료는 어떤 경향을 보이고 있다. 이 그림에서 level이 0인 경우는 임계조건은 아니지만 그 유량에서는 가스혼입이 일어나지 않는다는 것을 나타내고 있다. 각각의 기준에서 보면 미세하지만 vane의 위치가 높을수록 높은 수위에서 가스혼입이 일어나는 것을 볼 수 있다. 즉, vane의 위치가 높을

표 5.3.1 실험장치의 제작오차 및 측정오차

인 자	범 위	오 차
내면반경(mm)	400	$\pm 1.0\text{mm}$
외면반경(mm)	1100	$\pm 5.0\text{mm}$
국소수위계간의 거리(mm)	5~8	$\pm 0.25\text{mm}$
국소수위계 위치(mm)	-	$\pm 1.1\text{mm}$
평균 수위계 (mm)	200~1200	$\pm 0.5\%$
국소유속 센서(mm)	90	$\pm (0.5\sim 0.8)\text{mm}$
주입유량(ℓ/s)	5~35	$\pm 0.5\%$
유출유량(ℓ/s)	5~40	$\pm 1.2\%$
Vortex 발생기준 (sec)	-	$\pm 1 \text{ sec}$ ( $\pm 3 \text{ mm}$ )
Vortex 발생시 수위(mm)	-	$\pm (0.5\%+3\text{mm})$

표 5.3.2 Case-1인 경우 가스혼입이 발생한 유량, 수위, Vane의 위치

유입유량 (m <sup>3</sup> /s x 10 <sup>3</sup> )	유출유량 (m <sup>3</sup> /s x 10 <sup>3</sup> )	발생한 수위 (mm)	Vane 위치 (mm)	물 온도 (°C)
5.225	9.402	-	0.	19.1
5.193	7.864	-	200.	19.1
5.224	7.730	-	400.	19.1
5.198	7.127	-	600.	19.1
10.36	11.43	349.4	0.	19.2
10.34	12.34	388.9	200.	19.2
10.27	12.34	440.3	400.	19.2
10.28	12.91	469.1	600.	19.2
15.42	18.81	537.2	0.	19.2
15.38	17.28	510.4	200.	19.3
15.37	17.90	571.8	400.	19.3
15.29	18.07	641.3	600.	19.3
20.26	22.64	639.8	0.	19.3
20.39	22.92	544.1	200.	19.3
20.24	22.12	603.0	400.	19.3
20.27	24.24	639.8	600.	19.3
25.15	27.16	668.6	0.	19.3
25.15	28.34	605.9	200.	19.3
25.15	29.52	671.8	400.	19.3
25.11	28.93	713.9	600.	19.4
30.13	32.31	728.7	0.	19.4
30.20	34.88	605.3	200.	19.4
29.88	34.12	679.0	400.	19.4
29.91	33.84	694.5	600.	19.4
35.13	37.71	739.3	0.	19.5
35.17	37.54	701.7	200.	19.6
35.05	37.83	777.5	400.	19.6
35.01	36.90	793.7	600.	19.6

표 5.3.3 Case-2인 경우 가스혼입이 발생한 유량, 수위, Vane의 위치

유입유량 ( $\text{m}^3/\text{s} \times 10^3$ )	유출유량 ( $\text{m}^3/\text{s} \times 10^3$ )	발생한 수위 (mm)	Vane 위치 (mm)	물 온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )
5.225	9.402	-	0.	19.1
5.193	7.864	-	200.	19.1
5.224	7.730	-	400.	19.1
5.198	7.127	-	600.	19.1
10.31	11.99	-	0.	19.2
10.48	12.21	199.4	200.	19.2
10.43	12.16	207.7	400.	19.2
10.47	12.46	206.0	600.	19.2
15.61	18.27	392.7	0.	19.2
15.61	17.80	357.1	200.	19.3
15.43	17.60	481.4	400.	19.3
15.42	17.66	495.1	600.	19.3
20.53	23.34	433.6	0.	19.3
20.56	22.83	407.0	200.	19.3
20.41	22.88	532.1	400.	19.3
20.26	22.90	606.5	600.	19.3
25.35	27.47	505.1	0.	19.3
25.27	28.13	504.1	200.	19.3
25.31	28.96	558.9	400.	19.3
25.25	29.15	608.0	600.	19.4
30.30	32.21	525.8	0.	19.4
30.49	32.58	452.7	200.	19.4
30.05	34.18	578.5	400.	19.4
29.88	33.76	658.2	600.	19.4
35.16	37.13	648.0	0.	19.5
35.29	37.31	569.7	200.	19.6
35.25	38.68	575.4	400.	19.6
35.17	39.55	710.9	600.	19.6

표 5.3.4 Case-3인 경우 가스혼입이 발생한 유량, 수위, Vane의 위치

유입유량 (m <sup>3</sup> /s x 10 <sup>3</sup> )	유출유량 (m <sup>3</sup> /s x 10 <sup>3</sup> )	발생한 수위 (mm)	Vane 위치 (mm)	물 온도 (℃)
5.225	9.402	-	0.	19.1
5.193	7.864	-	200.	19.1
5.224	7.730	-	400.	19.1
5.198	7.127	-	600.	19.1
10.31	11.99	-	0.	19.2
10.33	12.11	-	200.	19.2
10.25	11.90	-	400.	19.2
10.33	12.64	-	600.	19.2
15.67	18.92	208.1	0.	19.2
15.77	18.00	205.6	200.	19.3
15.81	18.32	213.2	400.	19.3
15.75	18.16	207.1	600.	19.3
20.69	22.96	333.7	0.	19.3
20.61	22.39	370.7	200.	19.3
20.50	23.02	454.7	400.	19.3
20.55	24.73	413.8	600.	19.3
25.41	26.39	440.5	0.	19.3
25.48	27.63	434.3	200.	19.3
25.38	28.30	479.7	400.	19.3
25.39	29.33	484.8	600.	19.4
30.42	31.68	390.6	0.	19.4
30.51	32.90	416.6	200.	19.4
30.10	34.10	490.8	400.	19.4
30.12	35.33	492.2	600.	19.4
35.38	37.47	464.2	0.	19.5
35.42	38.28	456.5	200.	19.6
35.25	38.68	519.8	400.	19.6
35.21	38.57	604.5	600.	19.6

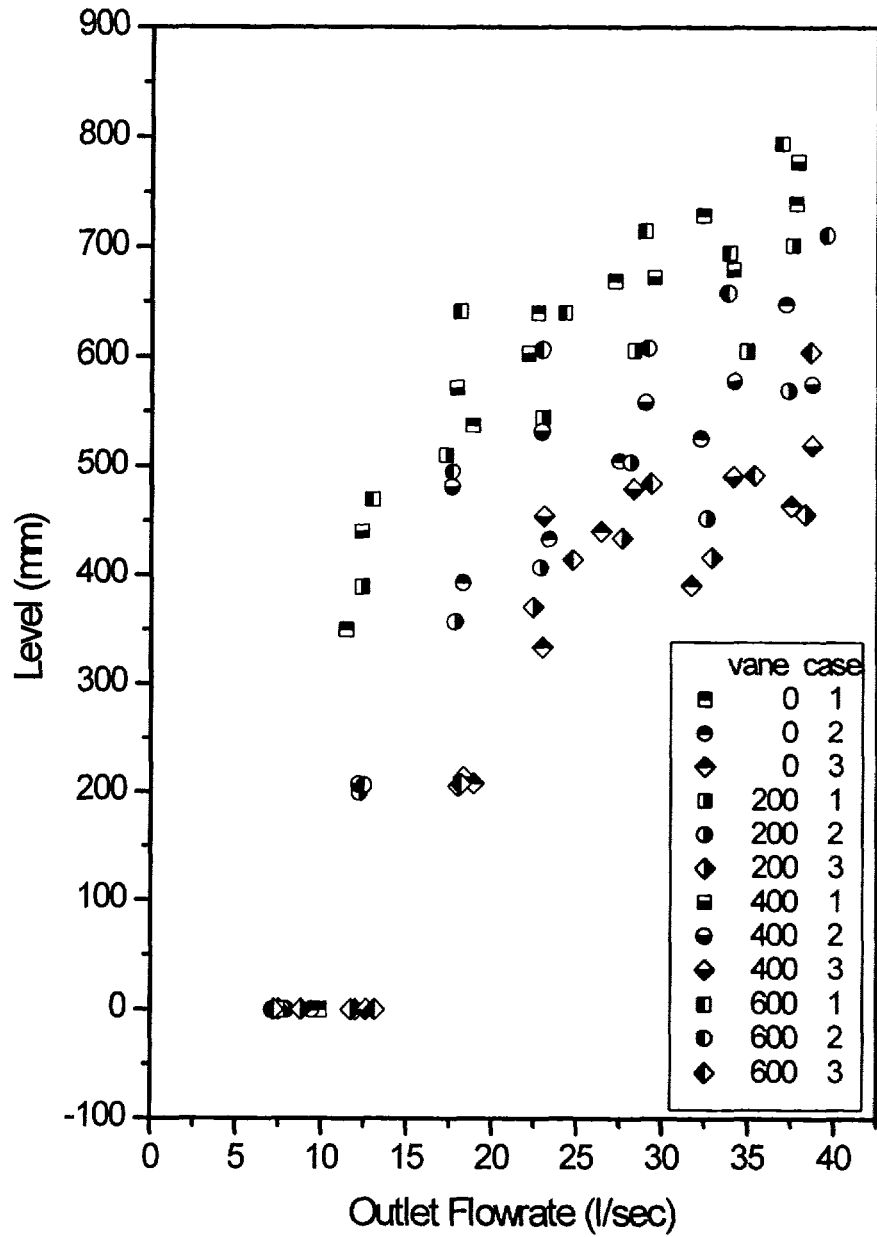


그림 5.3.1 각 가스혼입이 일어나는 기준에 따른 유량과 평균수위의 임계조건

수록 가스혼입이 잘 일어남을 볼 수 있다.

가스혼입이 일어나는 임계조건에서 수위(H)와 유출유량(Q)과의 관계를 나타내면  $H = b \ln(Q - a)$ 로 나타나고, 이 관계식을 실험자료와 비교한 것이 그림 5.3.2와 같다. 3가지 기준에서 임계조건을 관계식으로 나타내면 다음과 같다. 여기에서 H는 평균수위로 단위는 mm이며, Q는 유출유량으로 단위는 l/sec이다.

$$\text{case-1: } H = 214 \ln(Q - 5.27) \quad (5.3.1)$$

$$\text{case-2 : } H = 185 \ln(Q - 9.11) \quad (5.3.2)$$

$$\text{case-3 : } H = 160 \ln(Q - 14.4) \quad (5.3.3)$$

#### 다. 자유액면 구배

자유액면 구배를 측정하는 실험은 설정한 유입유량과 평균수위에서 자유액면이 평형상태를 유지하면, 18개의 국소수위계로 수위를 측정하였다. 각 센서의 위치는 표 5.2.1에, 실험의 초기조건은 표 5.3.5에 기술되어 있다. 자유액면의 요동과 구배는 유속에 많은 영향을 받으므로 실험에서의 유속은 매우 중요하다. 실험부에 유입구에서의 유입속도는 유입유량이 35 l/sec인 경우 135 mm/sec 정도이다. 원자로에서 대표적으로 470 mm/sec 정도이므로 실험에서 가장 많은 유량일 경우에도 원자로의 1/3 정도의 유속이다. 실험장치에서 공급할 수 있는 펌프와 배관이 한정되어 있으므로 실험부의 규모를 1/12 section 정도로 축소하여 실험하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

측정범위내의 전체 실험을 통하여 각 실험에서 18개의 센서들의 최대수위 차이가 5mm 이내이고, 또한 센서의 오차가  $\pm(0.5 \sim 0.8)$ mm인 것을 고려한다면 vane의 영향, 유량의 영향, 평균수위의 영향을 정확히 분석하기는 어려울 것 같으므로 분석방법을 도출하여 분석은 차후에 수행할 예정이다. 여기에서는 대표적으로 실험자료의 경향을 그림 5.3.3에서 그림 5.3.8까지 나타내었다.

그림 5.3.1에서 보면 자유액면의 구배를 측정한 실험은 유입유량 5 l/sec



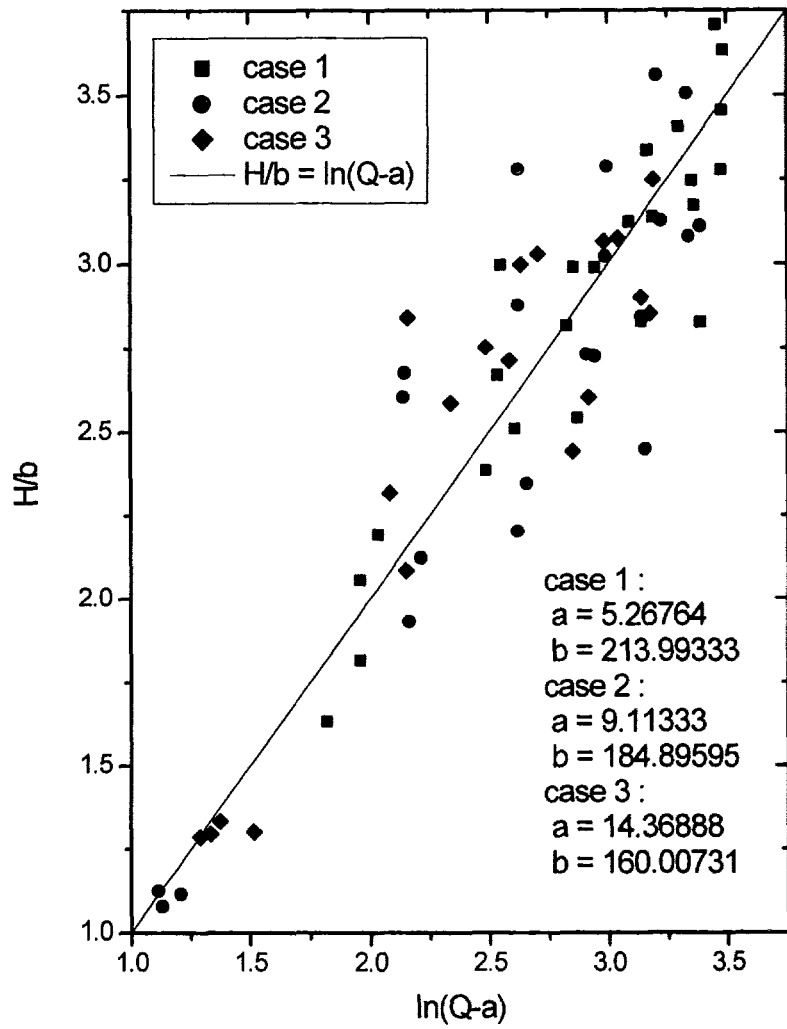


그림 5.3.2 가스혼입이 일어나는 임계조건과 관계식 비교

표 5.3.5 액면의 구배 측정실험에서의 초기 설정조건

Test No.	유입유량 (l/s)	평균수위 (mm)	Vane 위치 (mm)	물온도 (℃)
Test-01	4.99	407.11	0	20.33
Test-02	5.00	398.83	200	20.22
Test-03	4.99	396.90	400	20.15
Test-04	5.00	398.95	600	20.13
Test-05	20.03	412.04	0	20.41
Test-06	20.02	407.91	200	20.40
Test-07	19.96	411.72	400	20.43
Test-08	20.03	421.16	600	20.50
Test-09	35.01	383.67	0	20.04
Test-10	34.98	403.83	200	20.15
Test-11	34.97	418.25	400	20.24
Test-12	34.98	417.97	600	20.33
Test-13	5.02	574.61	0	19.22
Test-14	5.00	602.89	200	19.22
Test-15	5.00	604.69	400	19.23
Test-16	4.98	604.86	600	19.35
Test-17	19.97	608.02	0	19.77
Test-18	19.97	599.71	200	19.84
Test-19	19.97	596.88	400	20.03
Test-20	19.99	591.00	600	20.22
Test-21	34.99	606.22	0	20.30
Test-22	34.98	607.24	200	20.47
Test-23	34.99	603.10	400	20.53
Test-24	35.01	599.18	600	20.65
Test-25	5.01	800.21	0	19.14
Test-26	5.00	807.42	200	19.10
Test-27	4.99	808.87	400	19.06
Test-28	5.00	803.48	600	19.01
Test-29	20.10	804.54	0	18.99
Test-30	20.10	792.28	200	19.03
Test-31	20.08	797.76	400	19.10
Test-32	20.10	804.96	600	19.19
Test-33	39.30	777.57	0	19.65
Test-34	39.56	801.02	200	19.50
Test-35	39.57	802.85	400	19.80
Test-36	39.56	796.49	600	19.96

인 경우와 유량 20 l/sec에서 평균수위 800mm인 실험을 제외한 실험들은 표면에 판단기준 case-1 이상의 소용돌이가 발생하는 영역에서 실험을 수행하였으나, 소용돌이가 불확실한 영역에서 발생하였다가 소멸 또는 이동하기 때문에 수위의 장시간 평균값에는 그 영향이 나타나지 않고 있다.

그림 5.3.3은 유입유량 5 l/sec이고, 평균수위가 400mm 일 때의 실험결과이다. 이 그림에서 편의상 vane의 위치, 유입구의 크기 및 유출구의 위치를 동시에 나타내었고, x-축의 radial position은 UIS를 모의한 안쪽 벽면에서의 거리이다. 이 그림에서의 특징으로는, vane의 위치가 평균수위와 같으므로 유체가 유입되는 쪽의 수면이 높고 유속이 낮기 때문에 다른 지점에서는 자유액면의 구배가 거의 없는 형태이다. 그림 5.3.4는 유량이 35 l/sec로서 비교적 유속이 높을 경우이나 평균수위가 400mm 이므로 그림 5.3.3에 비해 vane의 영향이 어느 정도 나타난다. 그림 5.3.5에서 그림 5.3.8까지는 평균수위 600mm, 유량 35 l/sec에서 vane의 영향을 보인 것이다. Vane이 자유액면보다 200mm 이상 더 잠겨있을 때에는 서로 간에 큰 영향은 없는 것 같으나 vane이 수면과 같을 경우(그림 5.3.8)에는 다른 경향을 보이고 있다.

시간 관계상 자유액면 구배에 대해서는 차후에 분석하여 실험보고서를 작성할 예정이다.

#### 4. 결 언

자유액면에서의 가스혼입은 vane의 위치가 높을수록 더 잘 일어나는 것을 볼 수 있다. 가스혼입이 일어나는 판단조건을 3가지 경우로 나누어 측정하였는데 모든 경우에 가스혼입이 일어나는 임계조건에서 수위(H)와 유출유량(Q)과의 관계를 나타내면  $H = b \ln(Q - a)$ 로 나타났고 상수인  $a$ ,  $b$ 의 값이 달랐다. 유입되는 최대유속이 17cm/sec 범위에서 vane의 위치에 따라 자유액면의 구배가 최대 5mm 정도 다르게 나타났으나 센서의 오차범위가  $\pm 0.8$ mm이므로 특수한 분석방법이 요구되어 차후에 분석할 예정이다.

Vane이 자유액면보다 200mm 이상 더 잠겨있을 때에는 자유액면의 구배는 vane의 위치에 따라 큰 영향은 받지 않으나 vane이 수면과 같을 경우에는 다른 경향을 보이고 있다.

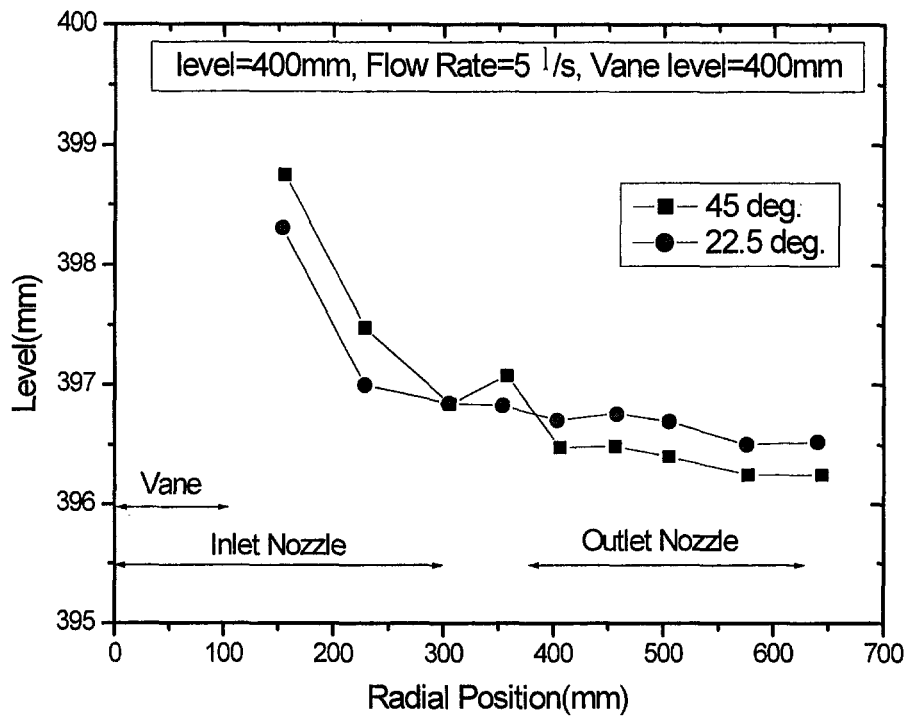


그림 5.3.3 낮은 유량인 5 l/sec에서 자유액면 구배

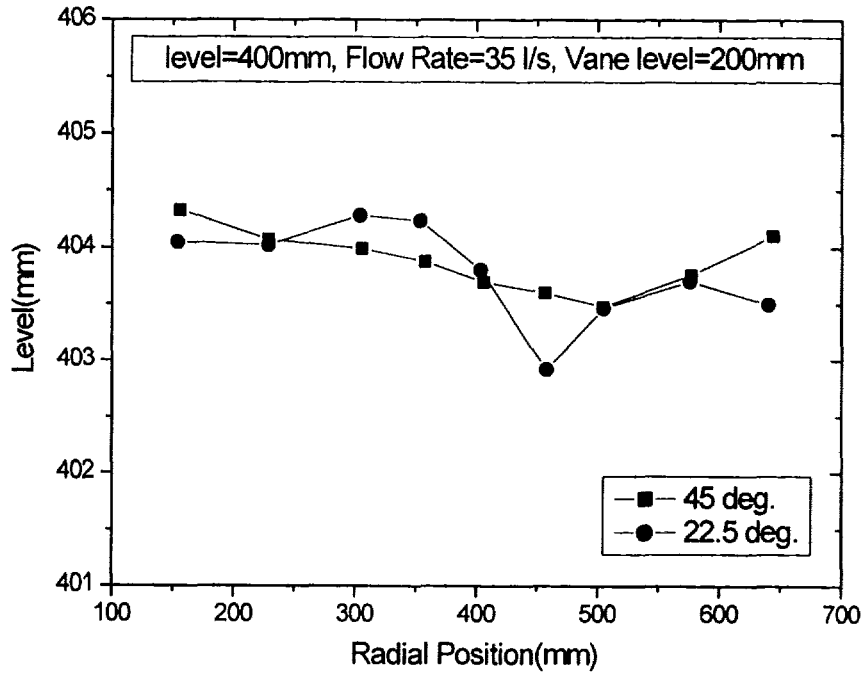


그림 5.3.4 높은 유량인 35 l/sec에서의 자유액면 구배

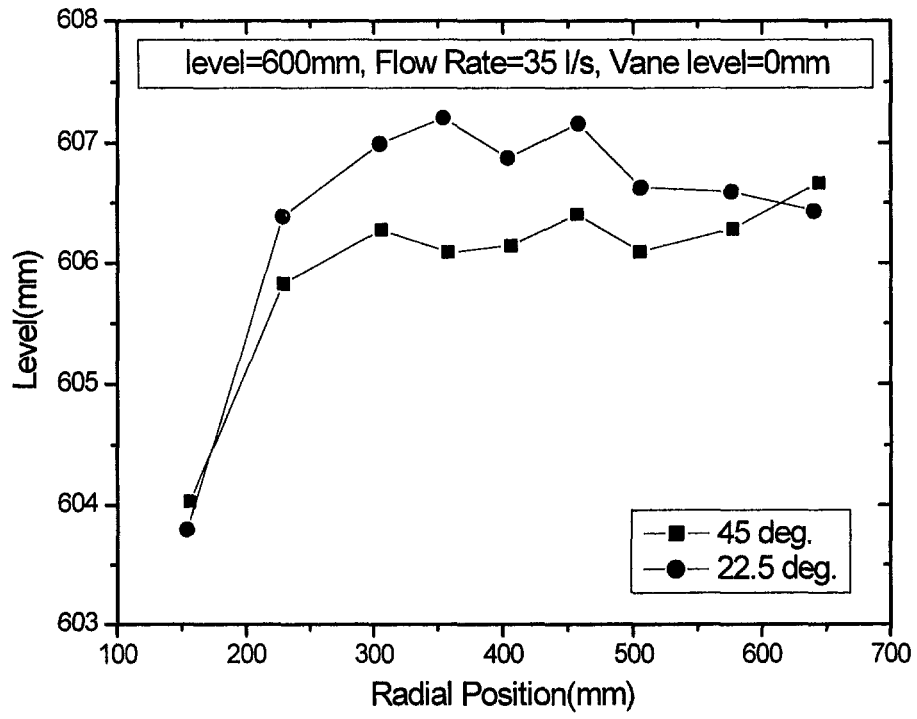


그림 5.3.5 Vane의 위치가 0 mm일 때의 자유액면 구배

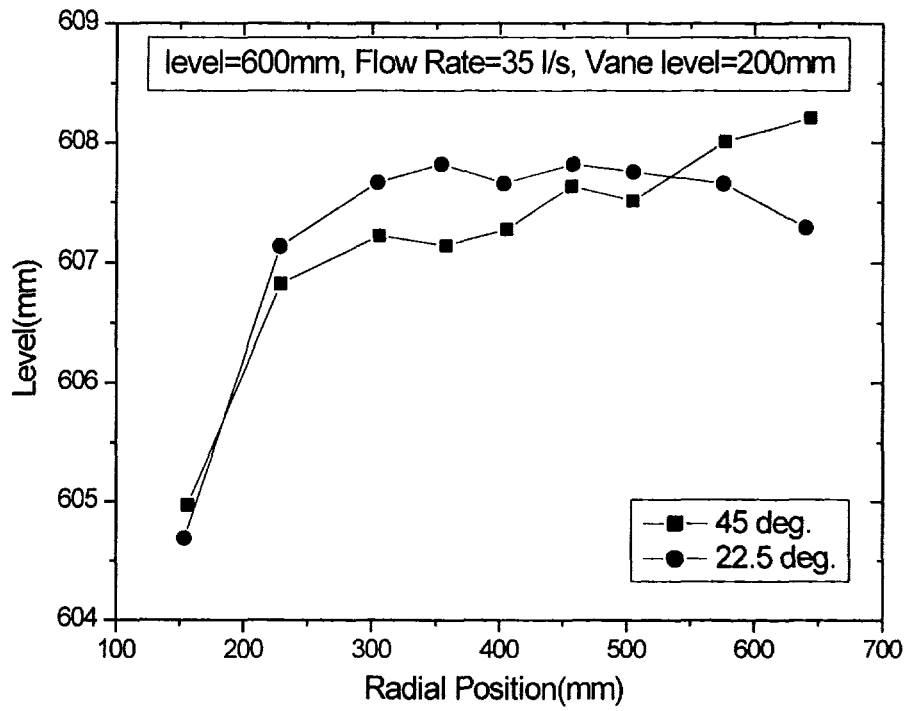


그림 5.3.6 Vane의 위치가 200 mm일 때의 자유액면 구배

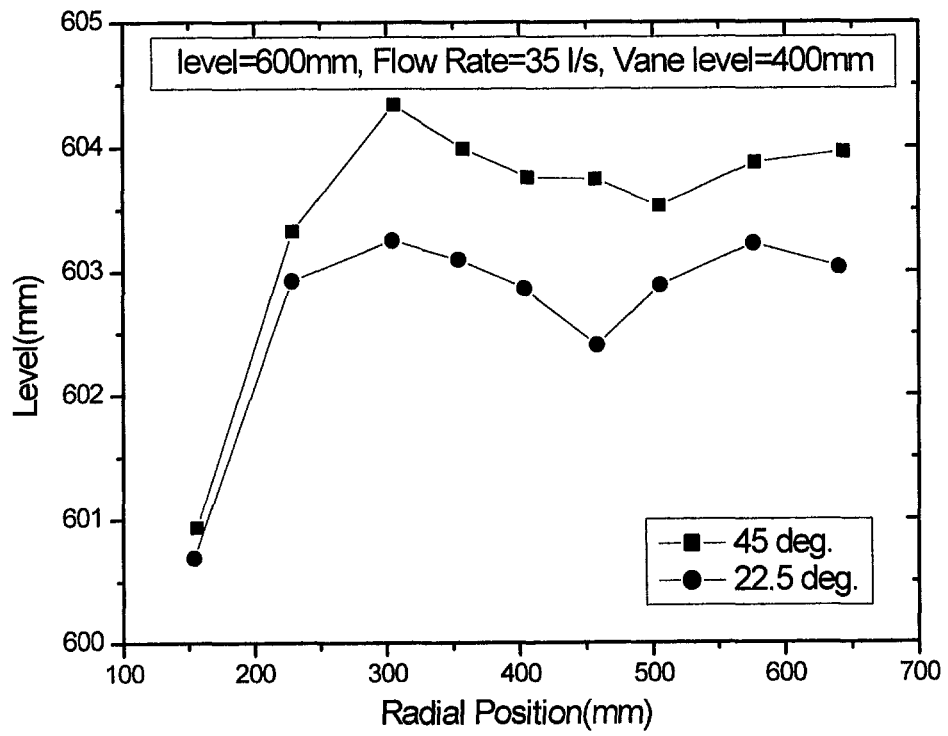


그림 5.3.7 Vane의 위치가 400 mm일 때의 자유액면 구배



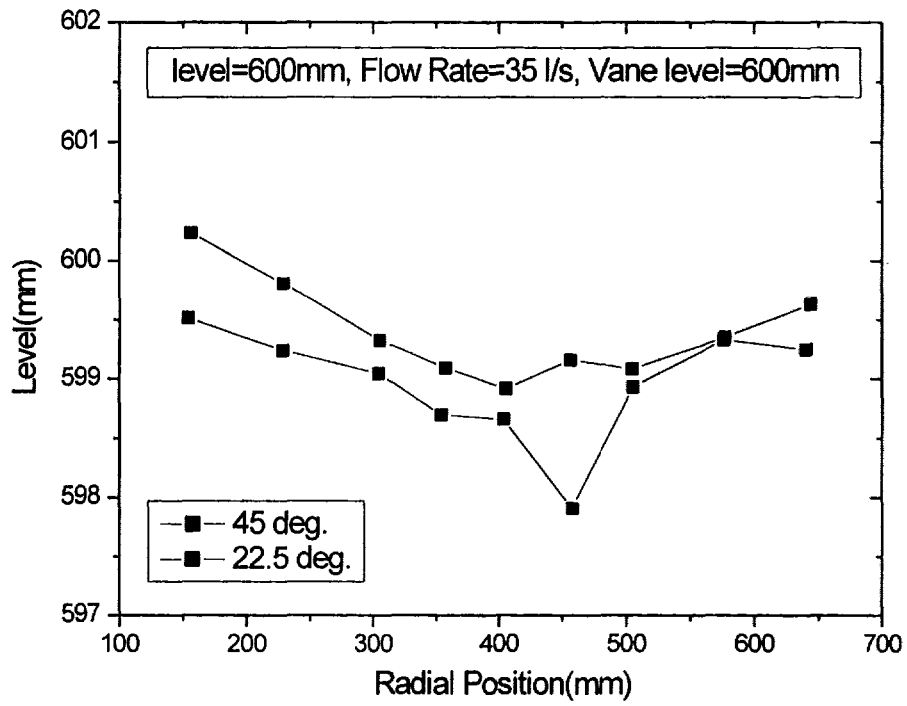


그림 5.3.8 Vane의 위치가 600 mm일 때의 자유액면 구배

## 제 6 절 소듐 열유체 특성실험

### 1. MHD 자장내에서의 유동특성 실험 개요

자장이 소듐 유동의 압력강하에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 기설치한 MHD 압력강하 실험장치(그림 6.1.1)로 실험을 수행하고 있다. 이 실험장치의 형상은 그림 6.1.2에 보이고 있다. 이 실험에서는 전년도에 수행한 자장내에서의 MHD 압력강하의 이론적 계산결과를 실험과 비교하기 위한 자료를 생산하는 것이다. 주요 실험절차는 소듐 유동이 흐르는 상태에서 자장을 변화시켜 전자유량계의 유량변화와 소듐용 차압계의 압력강하를 측정하는 것이다. 그림 6.1.1의 6으로 표시된 Novatome사 전자펌프의 입력전압을 0V에서 최고 380V까지 변화시켜 유량을 조절하며, 그림 6.1.1의 10에 보이는 전자석에 가변 DC 전압(전류)을 걸어주어 자장을 변화시킨다. 자장과 유량을 적절히 변화시켜 이 때 나타나는 차압을 컴퓨터 또는 제어반의 지시계를 통하여 읽었다.

러시아에서 구입한 소듐 차압계는 소듐보다 무겁고 또한 소듐과 150℃ 이하에서 반응하지 않는 오일을 차압계에 채워 오일과 소듐이 직접 접촉하여 압력을 Transducer에 전달하는 방법을 사용하고 있다. 실험수행 도중에 차압계의 눈금이 1기압 이상으로 올라간 뒤 자장 및 유량의 변화에도 불구하고 더 이상 변동하지 않는 현상이 발생하였다. 이는 차압계 내 좁은 배관내로 소듐 또는 소듐 불순물이 차압계 배관 속의 오일을 밀치고 들어가 굳어버려 차압계가 정상적으로 작동하지 않은 것으로 생각된다. 차압계를 분해하여 배관 속을 청소한 후 재실험을 수행하였으나 어느 정도 실험이 수행되다가 다시 오일관이 막히는 현상이 재발생하여, 수차 분해와 실험을 반복하였고 이 과정에서 여러 종류의 오일을 구입하여 비중시험 및 소듐과 반응시험을 동시에 수행하였다. 최종적으로 일본제품 실리콘 오일을 주입하여 실험을 수행하였으나 이 오일의 압축성(5기압에서 3% 정도)으로 인하여 다시 오일관이 막히는 현상이 일어났고, 이를 보완하기 위하여 오일 배관 부분도 가열, 보온하는 방법을 사용하여 측정하고자 현재 시도하고 있는 과정이다. 그러므로 지금까지는 이 실험에서 압력강하 실험자료 생산은 예비 실험 단계에 있으며, 소듐 차압측정기술을 개발하고 측정시험을 수행하는데 대부분의 시간을 소비하였다. 수행한 측정시험으로는 차압측정기의 보정시험, 오일과 소듐의 반응시험, 중력이 미치는 영향 보존시험, 러시아형 차압계의 문제점 분석,

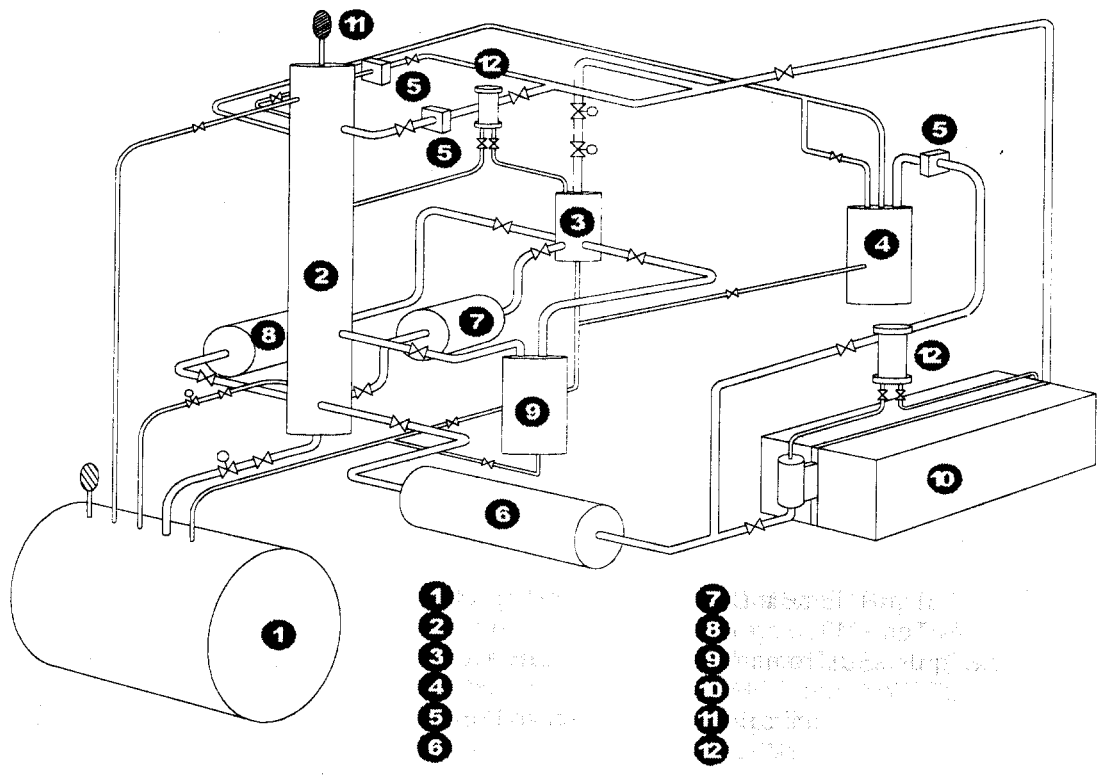


그림 6.1.1 MHD 소듐 압력강하 실험장치의 구조도

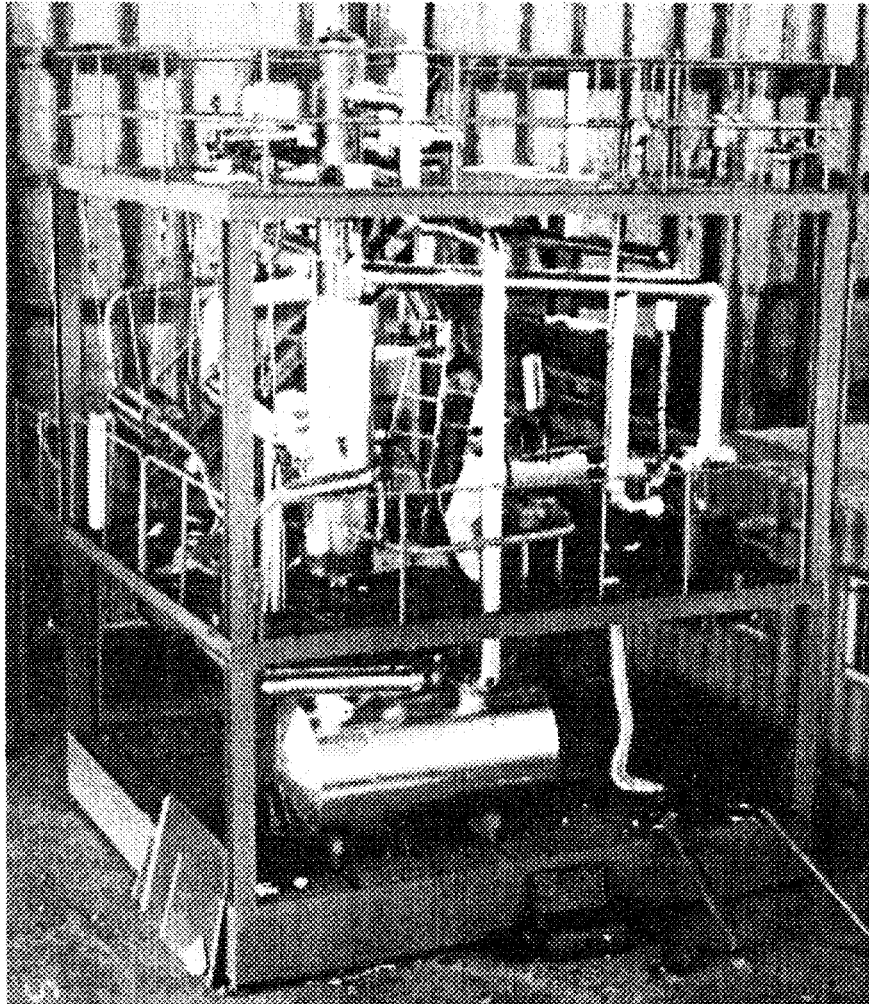


그림 6.1.2 MHD 압력강하 실험장치

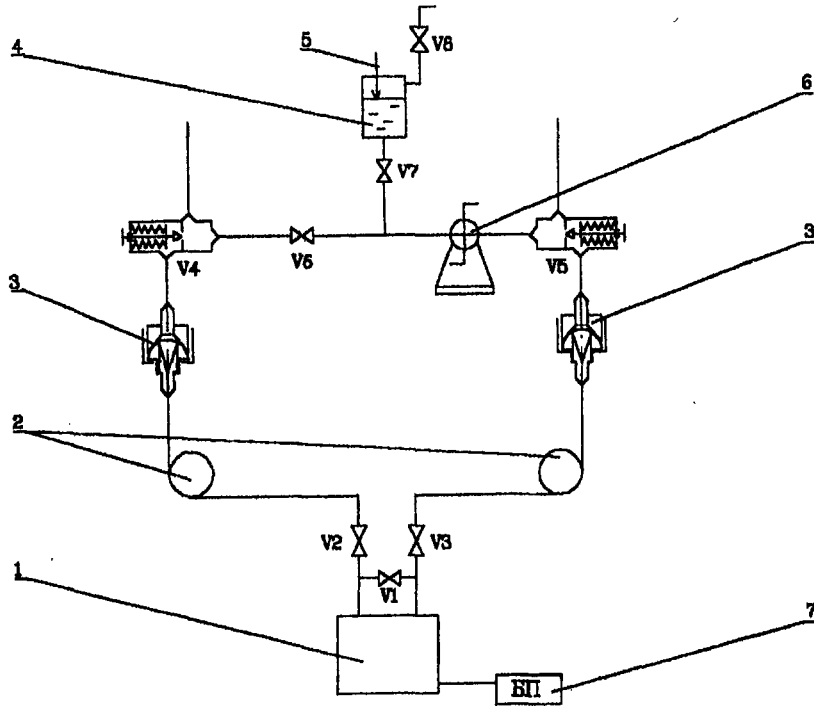
오일관의 형태변화 시험, 실리콘 오일의 압축성 시험 및 아르곤 가스에 의한 소듐 차압계의 특성을 분석 등을 수행하였다.

## 2. 소듐용 차압계의 국산 기술 개발

자장에 의한 소듐 압력영향평가 실험과 아울러 본 연구에서는 러시아형 차압계의 문제점 분석과 아울러 소듐용 차압계의 국산기술 개발을 수행하였다. 그림 6.2.1과 같은 구성을 가지는 액체소듐용 차압계는 러시아 IPPE에서 제작된 장치로서 측정범위가 최고 600 kPa, 사용 소듐의 온도는 600℃이고, 소듐계통의 조건을 이상적으로 유지할 경우 측정오차는 Full Range의 0.5% 정도이다. 소듐용 차압계의 핵심기술은 Transmitter의 Diaphragm 설계인데, 본 차압계는 stainless steel mesh를 porous diaphragm으로 사용하였으며, 시험결과 오차는 0.2%이내의 정확도를 나타내었다.

본 연구에서는 러시아형 차압계의 구조와 동작원리를 분석하여 최고 600kPa, 사용최고온도 600℃의 소듐용 차압계를 자체설계, 제작하였다. 현재 소듐 실험장치에 러시아형 차압계와 병렬로 설치하여 시험을 수행하고 있다. 제작된 차압계의 저압 쪽에는 압력을 가하지 않고 고압 쪽에만 압력변화를 주어 실험하였다. 이 때 고압 쪽에만 압력을 주었으므로 Ar 봄베쪽의 압력계 눈금은 실제로 차압계에 가해진 압력임을 알 수 있다. 그리고 차압계의 압력지시계에 나타난 눈금을 Ar 봄베쪽의 압력계와 비교함으로써 제작된 차압계가 얼마나 정확하게 동작하는지 평가할 수 있다.

표 6.2.1에 자체제작한 차압계의 Ar 특성 실험결과를 나타내었다. 오차는 자체제작한 차압계의 경우  $10^{-1}$  기압 order로서 측정압력 범위가 수 기압인 실제 실험시에 바로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 러시아 차압계의 Ar 시험결과를 보게 되면 그 절대오차가 자체 제작된 차압계와 동일한 order인  $10^{-1}$ 으로 나와 러시아 차압계와 자체 제작된 차압계의 성능이 큰 차이를 보이지 않을 것으로 생각된다. 그러나 소듐보다 비중이 높은 oil과 소듐이 직접 접촉되는 형태의 차압계에서는 접촉 부위의 온도를 일정하게 유지시키는 것이 중요하며, 또한 oil을 충전할 때 oil 속에 포함된 기포를 제거하는 것이 중요하였다.



1 – the pressure difference transmitter; 2 – impulse lines; 3 – dividing chambers oil-sodium with porous diaphragms; 4 – expand tank; 5 – level indicator; 6 – magnetic flowmeter; 7 – power unit; V1 ÷ V8 – valves (V4, V5 – valves for the impulse lines connection; V6 – valve, permitting to connect impulse lines of "high" (+) and "low" (-) pressure).

그림 6.2.1 소듐용 차압계의 Schematic diagram

표 6.2.1 Ar 가스에 의한 소듐 DP-Meter 압력 측정결과

Low쪽 (Kg/cm <sup>2</sup> )	자체제작한 차압계			러시아 차압계		
	High쪽 압력변화측정 (Kg/cm <sup>2</sup> )		오차 (Kg/cm <sup>2</sup> )	High쪽 압력변화측정 (Kg/cm <sup>2</sup> )		오차 (Kg/cm <sup>2</sup> )
	봄베쪽 압력계	차압계 인디케이터		봄베쪽 압력계	차압계 인디케이터	
0	0	0.0051	+0.0051	0	0	0
0	0.14	0.132	-0.008	0.5	0.473	-0.027
0	0.29	0.281	-0.009	1.02	0.992	0.028
0	0.4	0.391	-0.009	2.0	1.951	-0.049
0	0.5	0.485	-0.015	3.0	2.960	-0.04
0	0.6	0.579	-0.021	4.05	3.984	-0.066
0	0.64	0.6163	-0.0237	5.05	4.983	-0.067
0	0.652	0.646	-0.006	5.99	5.913	-0.077
0	0.293	0.3011	+0.0071	.	.	.
0	0.294	0.3002	+0.006	.	.	.
0	0.65	0.6457	-0.0043	.	.	.

### 3. 자장하에서 소듐 압력강하 실험

#### 가. 변환 자장발생장치 설계 및 제작

##### (1) 장치의 목적 및 사양

본 변환전력 공급장치는 MHD 실험장치의 일부분으로 부착된 자장발생 장치에 Oscillation하는 직류전력을 공급하는 장치이다. 제작사양으로 입력전원은 220V, 3 $\phi$ , 60Hz 이고 출력전압은 직류 250V, 정격전류 100A로 출력전압의 형태는 그림 6.3.1과 같이  $V = V_0 + A_0 \sin(2\pi ft)$  이다. 여기에서  $V_0$ 는 평균직류전압이며  $A_0$ 는 Oscillation하는 전압의 진폭이고  $f$ 는 주파수,  $t$ 는 시간이다. 이 변환전력공급장치는 다음과 같은 특성을 갖고 있다.

- 출력의 전압( $V_0$ )은 0~250V까지 전압이 가변되어야 하며, 설정한 출력전압의 변동을 및 Ripple전압이 5mmV이다.
- 입력전압이나 부하의 Impedance의 변동이(약20%이내) 발생될 경우에도 설정전압은  $\pm 0.1\%$  이내로 유지된다.
- Sine wave의 전압진폭( $A_0$ )이  $V_0$ 의  $\pm 20\%$  까지 조절할 수 있으며, 이 때에 진폭의 가변범위의 정도가 0.01V이다.
- Sine wave의 주파수는 0.1Hz~10Hz사이의 조정되며, 조정정도는 0.1Hz이하이다. 이 때의 주파수 변동율은 0.01Hz이내이다.
- 출력측의 과부하 또는 다른 이상이 발생될 경우 보호회로 동작 및 검출된 error는 display된다.
- 검출된 값을 계측기로 출력할 때 모든 값은 Isolation을 하여야하며 검출오차는 0.2%이하이다.
- 계측기로 검출된 값을 출력할 때에 power supply의 switching noise가 유도되지 않도록 출력측에 shield와 filter를 설치하였다.
- 계측기로 입력되는 값의 노이즈는  $\pm 5mV$  이하이다.
- 220V, 3 $\phi$ 의 교류입력측에는 안전을 위하여 고속 fuse를 설치하였다.
- 3개의 자장발생장치는 병렬로 또는 직렬로 선택할 수 있게 제어판넬에서 조작이 가능하다.



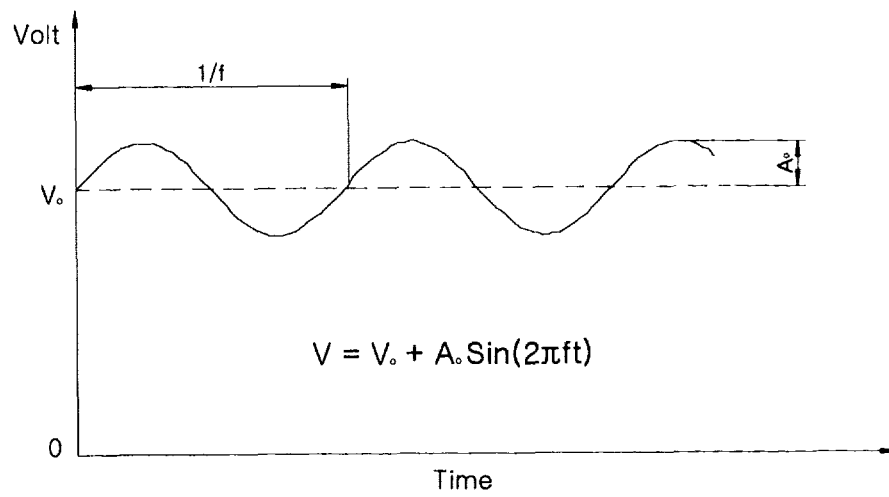


그림 6.3.1 변환자장발생장치의 출력 형태

## (2) 변환 전력공급장치 구성 및 동작 개요

이 장치의 동작개요는 다음과 같다. 출력의 전류가 대전류이면서 전압 ripple이 5mmV이어야 하므로 위상제어방식을 채택할 경우 기본적인 전압 ripple이 발생하게 되어 buck switching을 사용하여 sine wave generator에 안정적인 전압을 공급하였다. Buck switching을 사용함으로써 buck switching의 switching주파수는 최저18KHz 이상이 되어야 하고, Buck switching에 사용되는 평활용 reactor는 Fe Core를 사용하고 coil의 값은 2mmH이하로 설계가 되어야 한다. Buck switching이 부가 동작될 경우 sine wave generator의 정격출력 전류가 100A로서 상당한 전자파가 발생되므로 shield처리가 필히 되어야 한다. Shield처리가 되지 않을 경우 측정장비로 switching noise가 유입되어 측정이 불가능하게 된다. Buck switching에 사용되는 condenser는 filter 주파수가 18 kHz이상이므로 필히 105℃용으로 사용되어야 한다. Buck switching에서 출력되어 sine wave generator로 입력되는 값(0~250V)을 계측기로 입력시켜야 된다. 계측기로 출력되는 전압은 0~10V 이다.(0~250V에 따른 비례값)

Sine wave generator의 출력은 buck switching에서 출력된 DC전압에 의해서 sine wave generator를 동작시켜 출력되어야 한다. Sine wave는 0.1Hz~10Hz까지의 가변폭으로 조절이 되어야 하며, 이 때의 조절정도는 0.1Hz이하야 한다. 그러므로 주파수의 오차정도를 줄이기 위해 완벽한 digital회로를 이용하여 출력주파수의 조절범위를 설정할 수 있도록 설계되어야 한다. Sine wave 발생기에 사용되는 carry frequency는 20kHz 이상을 사용한다. Carry frequency가 낮을 경우 sine wave의 ripple이 커져 자장발생장치의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 이 때 sine wave의 왜곡율은 출력전압의 2%이하이어야 한다. Sine wave의 출력주파수, 출력전압, 출력전류는 display할 수 있어야 하고, 또한 0~10VDC로 계측기에로 출력할 수 있어야 한다. 계측 오차는 0.2%이하로 유지하도록 계측기 및 센서를 사용한다.

Power supply의 냉각방식으로는 실험실에서 소음을 사용하기 때문에 물을 사용할 수 없으므로 냉각장치는 공냉식으로 설계하였다. 제어판넬은 24inch rack을 사용하여 제작하였다. 제작한 장치의 사진은 그림 6.3.2와 같다.

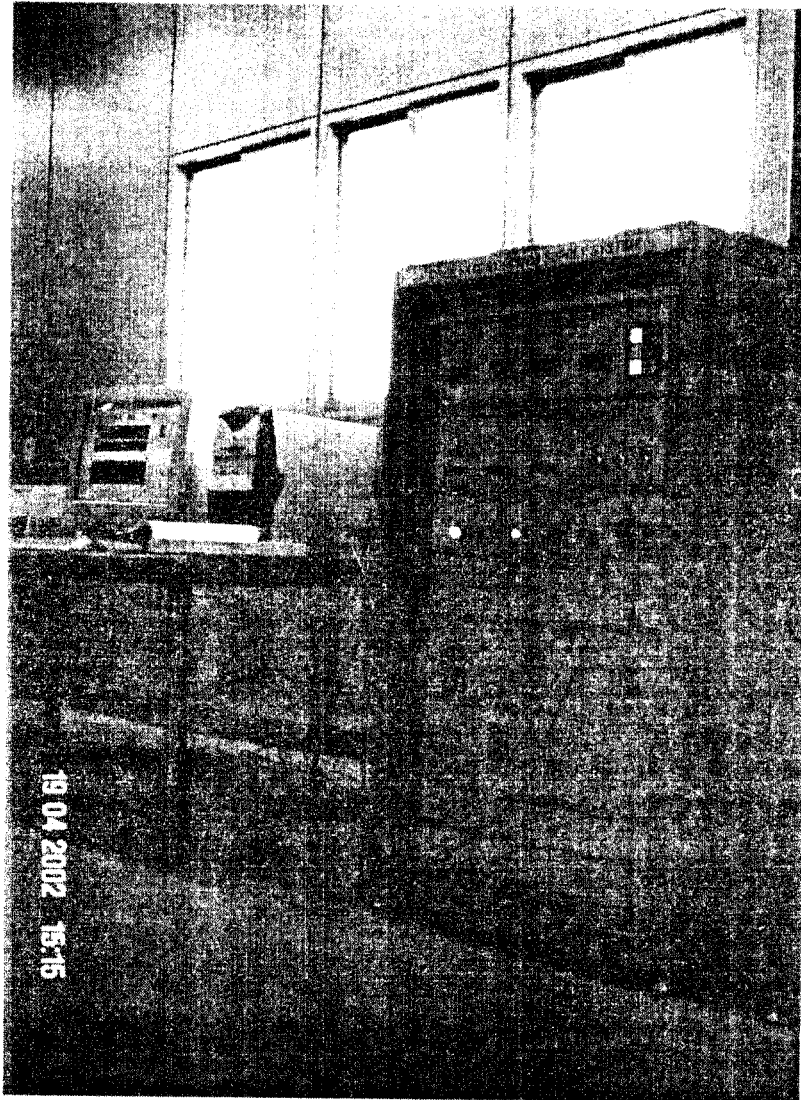


그림 6.3.2 변환 자장발생장치의 사진

#### 나. 압력강하 실험

변환 자장발생장치를 제작하는데 기술적인 문제점들이 많아서 실험이 3개월 이상 지연되었다. 현재는 제작 완료하여 모든 센서들의 보정을 완료하였으며 현재 실험을 수행 중에 있다. 소듐 유량계(0~1.5 l/s), 소듐 차압계(0~1.5 l/s), 자장발생장치의 자장(0~5000gauss), 입력직류전압 (0~200V) 및 입력전류(0~100A)들의 보정을 완료하였다. 자장발생장치의 자장은 전류 90A에 5030 gauss을 나타내었고, 전류가 증가할수록 자장의 증가하는 폭이 감소하고, 전압과 전류의 위상차가 더 증가하는 경향을 보였다. 변환전력공급장치는 전류와 전압은 cosine wave를 잘 출력하였으며, 전자석에 일정한 전압을 걸었을 때 진동수가 증가하면 전자석의 inductance로 인하여 전류의 파형이 감소하는 경향을 보여 실험에 입력전력의 주파수는 0.1~2.5Hz 범위에서 실험을 수행하고 있다. 이 실험자료는 차후에 별도로 실험보고서를 작성할 예정이다.

#### 4. 결 언

소듐 유량계를 자체 제작하여 실험에 활용하고 있다. 소듐보다 비중이 높은 oil과 소듐이 직접 접촉되는 형태의 차압계에서는 접촉 부위의 온도를 일정하게 유지시키는 것이 중요하며, 또한 oil을 충전할 때 기포를 제거하는 것이 중요하다. 직류전력을 consine wave로 입력시킬 수 있는 변환전력공급장치를 설계, 제작하였다. 자장발생장치의 자장은 전류 90A에 5030 gauss을 나타내었고, 변환전력공급장치의 전류와 전압은 cosine wave를 잘 출력하였으며, 전자석에 일정한 전압을 걸었을 때 진동수가 증가하면 전자석의 Inductance로 인하여 전류의 파형이 감소하고, 전압과 전류의 위상차가 더 증가하는 경향을 보였다.

## 제 7 절 측정/분석 및 요소기기 기초기술 개발

### 1. 소듐 열유속 측정실험

#### 가. 서론

열유속(heat flux)은 단위면적당 열전달의 양[단위:  $W/cm^2$ ]을 나타낸다. 열전달 현상의 경계조건 중에서 온도조건과 함께 중요한 매개변수 중의 하나가 열유속조건이다. 원자로의 열수력 종합실증실험과 관련된 관심부위의 열전달 현상 해석을 위해서는 온도, 열유속 등을 정확하게 측정하는 측정기술의 연구가 필수적이다. 이로 인해 열유속을 측정하는 방법에 대한 많은 연구들이 이루어졌다. 열유속 측정 시 측정하고자 하는 부위에 열유속센서를 부착하면 센서를 이루는 물질이 열저항으로 작용하게 되어 열유동을 교란하게 되므로 원래의 열유속을 정확하게 측정하는 것이 어렵다.

본 연구는 원자력발전소를 구성하는 각 요소들의 열전달현상 분석 시 사용될 수 있는 기술로 고온소듐장치와 같은 고온, 고열유속 조건에서 열유속(heat flux)을 효과적으로 측정하는 기술을 개발하기 위한 것이다. 열유속센서의 보정방법(calibration technique)은 다양하게 연구되고 있으나 열전달 현상마다 해석의 관점들이 다르기 때문에 아직 표준 규격이 정해지지 않은 상태이다. 이에 따라 보정방법 및 센서 제작과 관련된 기술의 연구개발을 통해 기술적으로 유리한 위치를 점유하는 것이 중요하다. 이를 위해 열유속 측정과 관련된 기존의 연구논문을 검토하고 분석하였으며, 현재 고온, 고열유속 조건에서 열유속을 효과적으로 측정할 수 있는 상용 열유속센서(commercial heat flux sensor)를 직접 이용할 수 있는 기술을 검토하였다. 이와 함께 열유속의 정확한 측정 및 보정을 위하여 전도방식의 열유속 보정장치(heat flux calibration facility)를 자체적으로 제작하였다.

기존의 기술검토를 통해 선정된 전도방식의 열유속 측정방법을 보다 효과적으로 분석하기 위하여 열유속센서 제작 및 보정업체인 KEM(일본 코토전공)을 직접 방문하여 열유속 보정장치를 참관하고 자료를 수집하여 그 실효성에 대한 분석을 수행하였다.

전도방식의 열유속 보정실험의 경우 주위의 온도조건을 항온조건으로 유지하면 열유속 측정의 정확성을 높일 수 있기 때문에 이를 위한 간이

항온챔버와 온도조절용 송풍기를 설계 및 제작하였다.

이번 연구에서는 고온, 고열유속 측정이 가능한 미국 Vatel 사의 상용 열유속센서(HFM-6D/H) 및 신호증폭기 (Amplifier, AMP-6)를 구입하여 이를 이용한 기본적인 열유속 측정시험을 수행하였다. 상용 열유속센서는 열유속센서를 제작한 회사 혹은 연구소에서 자체적으로 전도방식 혹은 복사방식으로 보정하여 각 센서마다 보정값 및 보정차트를 갖기 때문에 표준적인 열유속센서 보정장치가 없다면 그 센서의 보정 데이터는 큰 의미를 갖기 어렵다. 열유속센서는 온도를 바로 측정하는 열전대 등과는 달리 열유속 단위의 신호가 출력되는 것이 아니라 열유속에 비례하는 전압신호가 출력되기 때문에 이를 보정하는 장치가 꼭 필요하다.

본 연구에서는 상용 열유체 해석프로그램인 FLUENT를 이용하여 전도열유속 보정장치의 내부 열유동을 해석하고, 주시험부의 열전달면에서의 열유속분포 및 온도분포에 대해 해석하였다. Auto-CAD를 이용하여 열유속 보정장치에 대해 설계하였으며, 상용열유속센서의 열유속을 보정할 수 있는 전도방식 열유속 보정장치(conduction type heat flux calibration facility)를 자체적으로 제작하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서는 이와 같은 고온, 고열유속 조건과 같은 열전달 현상 분석에 필요한 전도방식의 열유속센서 보정장치를 자체 제작하고, 이 조건에 해당되는 열전달현상을 FLUENT를 이용하여 해석함으로써 열유속센서의 민감도(sensitivity) 측정에 대한 데이터를 획득하고, 실제 열전달 조건에서는 검출된 출력전압으로부터 열유속을 계산할 수 있도록 하는 것이 가장 중요한 목적이다.

#### 나. 국내.외 기술개발 현황

본 기존자료 분석은 전도방식, 대류방식, 복사방식 등의 열유속 보정방법 중에서 고온, 고열유속에 적합한 전도방식 열유속 보정장치에 대한 기존 연구를 알아봄으로써 상용 열유속센서를 이용한 열유속 측정의 방법과 열유속센서를 보정하는 경우 그 정확성을 평가하기 위해 필요한 노하우를 얻는데 그 목적이 있다.

일반적으로 전도 열유속 보정장치는 열을 발산하는 열원(heat source),

열을 받아들이는 히트싱크(heat sink), 열을 공급하기 위한 주히터(main heater), 주히터의 열손실을 보정하기 위한 보조히터(sub-heater), 주히터에 전원을 공급하는 DC power supply, 주히터와 보조히터 사이에 설치되는 열유속센서 혹은 thermopile, 열유속센서의 신호를 감지해 보조히터의 전원을 on/off 할 수 있는 controller, 전체 장치를 주위조건(온도나 유동)으로부터 차단할 수 있는 단열재와 보호상자 등으로 구성된다.

전도 열유속 보정장치의 연구는 매우 많을 것으로 판단되며, 현재 자료를 보유하고 있는 NIST(National Institute of Sci. and Tech.)[7.1.1, 2], Kyoto Electronics[7.1.3], TNO Institute of Applied Physics[7.1.4], 영남대 [7.1.5] 등에서 연구된 자료를 분석하였다.

#### (1) 열유속 센서의 원리

열유속센서는 미세 가공을 통해 thermopile의 구조를 갖는 열유속 측정용 센서이다. 그림 7.1.1은 열유속센서의 단순화된 모습으로 열유속센서의 구조를 알기 쉽게 표현하고 있다. 그림 7.1.1과 같이 열유속센서의 얇은 박막 구조 내부에는 3개의 금속층이 존재한다. 예를 들어 copper-1, 콘스탄탄(constantan), copper-2층이 존재하면 copper-1과 constantan의 접점에서 electromotive force(이하 emf)가 발생하고, constantan과 copper-2 접점에서 또 다른 emf가 발생한다. 이러한 2개의 접점을 직렬로 2개 이상 연결한 것을 thermopile이라고 하며, thermopile은 신호를 비례적으로 증폭시키는 역할을 한다. 이렇게 제작된 열유속센서를 열유속이 있는 표면에 부착하여 센서상의 두 접점의 미세한 온도차를 측정하고, 이를 thermopile을 통해 온도차에 비례하는 전압신호를 증폭시켜 열유속 신호로 표현할 수 있는 것이다. 그림 7.1.2, 3은 본 연구에서 사용된 Vatel사의 열유속센서와 열유속센서의 출력신호를 증폭하기 위한 출력신호 증폭기(amplifier)를 나타내고 있다.

#### (2) 열유속센서 보정장치

##### (가) NIST 열유속센서 보정장치

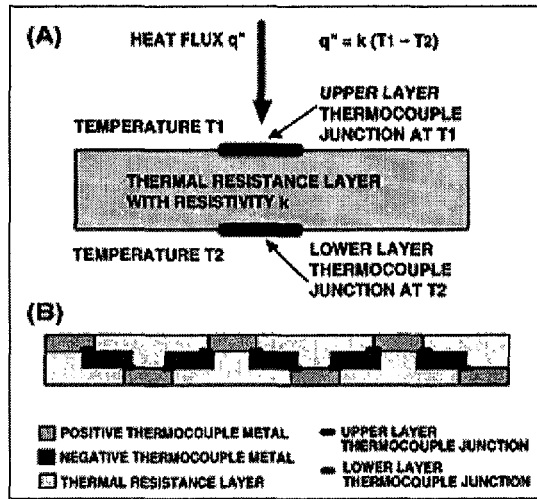
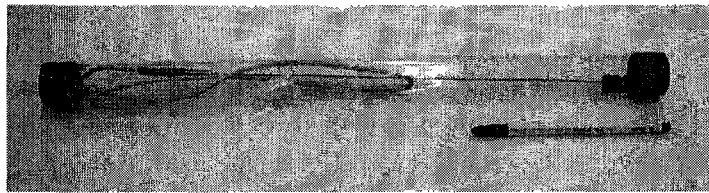
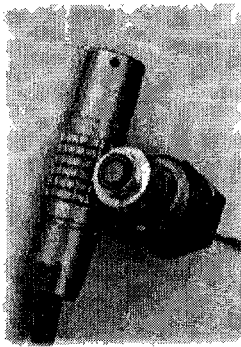


그림 7.1.1 Heat flux 센서의 원리



(a)

(b)

그림 7.1.2 Vatec heat flux 센서(HFM-6C/H)

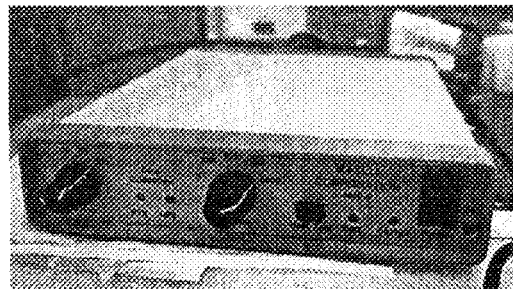
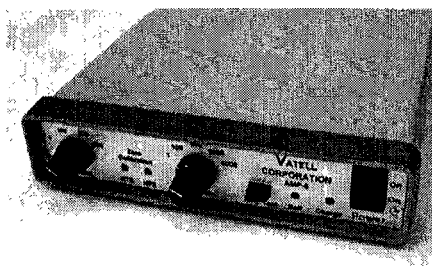


그림 7.1.3 Heat flux amplifier(AMP-6)



1999년 말 미국 NIST에서 발표된 W.L. Grosshandler et al. 연구 [7.1.1,2]에 의하면 고온의 전도 열유속 보정장치를 제작하기 위하여 helium gas(헬륨가스)를 사용하기 위한 연구결과가 나타나 있다. 그림 7.1.4, 5, 6은 각각 열유속 보정장치의 전체개략도, 주시험부-1, 주시험부-2에 대한 것이다.  $\phi 100 \text{ mm} \times H 38 \text{ mm}$ 의 구리블록에 7개의 sheathed heater(용량; 300 W)를 좌우.상하 대칭으로 수직으로 배열하고, 2,000 W의 전원을 이용해 대략 열원의 표면온도를 750 K까지 상승시킬 수 있다고 해석하였다. 수치해석 결과에 의하면 열원의 표면온도는 sheathed heater에 의해 일정하게 유지된다. 이 때 중심부 sheathed heater의 전원 입력값은 상대적으로 매우 낮게(다른 sheathed heater의 10% 정도) 나타난다. 이 해석결과에서는 본 연구와는 달리 주시험부의 단면적이 상대적으로 작기 때문에 구리블록 표면의 온도도 750 K까지 상승하고 이에 따른 열유속의 최대값도  $100 \text{ kW/m}^2$ 까지 가능한 것으로 보고하고 있다. 자료를 살펴보면 위 논문이 발표된 시점까지 실제 전도 열유속센서 보정장치는 제작되지 않은 것으로 판단되며, 실험적인 장치의 개략도(schematic diagram)와 제작할 제품의 크기를 결정한 것으로 보인다. 이 장치의 특징은 고온상태에서 사용하기 위하여 helium gas를 사용한 것이다. Helium gas는 열전도도가 약  $0.2 \text{ W/m.K}$  인 안정된 기체이므로 구리블록 사이에 약 1 mm의 gap을 유지하는 경우 helium gas층을 통과하는 열은 열원 표면온도가 660 K 상태인 경우에 히트싱크 표면온도는 300 K 정도까지 낮아진다. 그리고 이 때 두 구리블록면 사이에서의 대류 및 복사에 의한 열전달은 무시할 수 있을 만큼 작다고 보고하고 있다. 이 논문에서 나타난 보정장치의 경우에는 주시험부의 측면부분을 진공(vacuum)상태로 유지하는 것을 알 수 있는데 이는 실제적인 실험장치 구현에서 상당한 어려움이 수반된다.

#### (나) Kyoto Electronics (京都 電子工業) 열유속 보정장치

KEM(교토전공)은 현재 열유속센서를 시판하고 있는 열유속센서 제작업체이다. 이 회사는 1961년 설립된 일본의 전용분석기기 제작업체로서 주사업 아이템은 자동전위차분석기, 수분측정기, 밀도비중측정기, 당도계 및 열물성측정기이다.

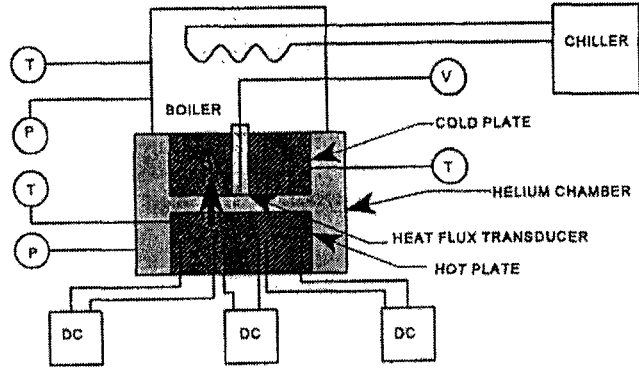


그림 7.1.4 High heat flux의 전도 측정시설의 block diagram

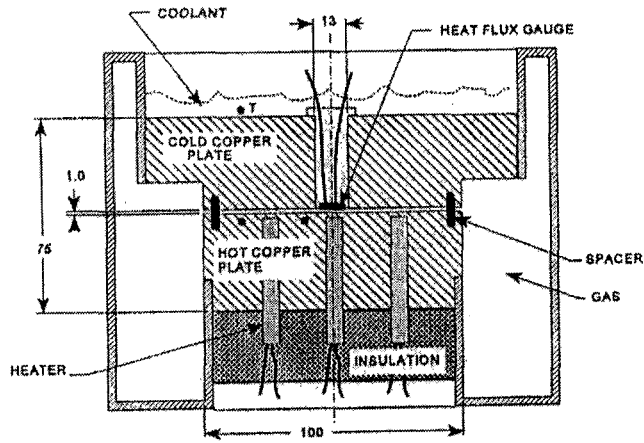


그림 7.1. 5 High flux 전도장치의 단면도

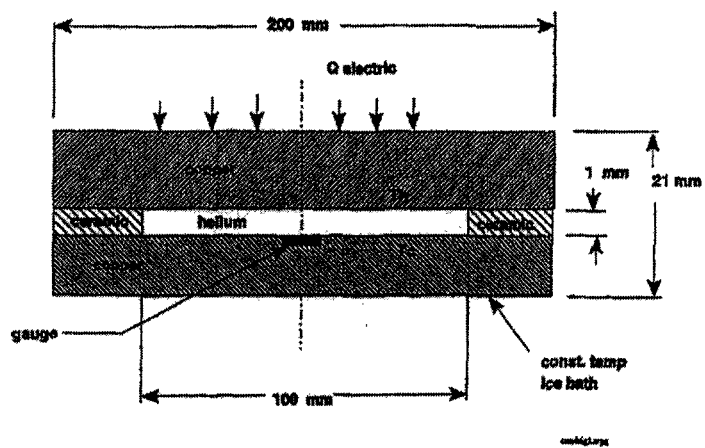


그림 7.1.6 전도장치의 체계도(NIST)

참고문헌[7.1.3]에 소개된 자료에 의하면 Kyoto electronics의 열유속 보정방법은 전도방식을 사용하고 있다. 이 보정장치는 다음과 같은 보정방법을 이용한다.

보정장치에 있어서 열적 조건은 실제측정이 행해지는 장소에서의 조건에 근사시킬 필요가 있지만, 실용상 편리한 감도가 요구되는 것으로는 쇼오와전공의 열유속센서 등이 있으며, 이 보정법에 의해 감도(sensitivity)를 채용하고 있는 것이 많다. 보정장치로는 그림 7.1.7에 나타난 것 같은 표준 열유속센서 보정장치가 이용된다. 이 장치에는 주히터 외에 그 뒷면, 측면에 각각 보조히터가 배치되어 있다. 주히터와 각 보조히터와의 사이에는 열류센서가 존재하고 있다. 그러한 열류센서의 지시값이 영(0)이 되도록 보조히터를 조절하여 줌으로써 주히터로부터의 발열량이 전량 그 방열면으로부터 방산되게 되어 있다. 주히터의 방열면의 재료에 실제의 측정면과 동질의 재료(예를 들면, 철판이라든지, 보온재 등)를 이용해 또 실측시의 열적 조건(예를 들면 자연 통풍 상태)과 같은 조건으로 교정해야 할 열류센서를 상기 방열면에 부착하면 그 실용 감도의 교정을 할 수가 있다. 매설형 열류속센서나 제 냉각면(예를 들면 수냉면)용 열류센서에 대해서도 매설재나 냉각수양을 실제의 경우에 근사하도록 하면 같은 방법으로 실용 감도의 교정을 할 수 있다.

전도 열유속보정장치에 대한 정보를 수집하기 위하여 일본 북구주(Kita-Kyushu)에 있는 Kyoto Electronics Manufacturing Co., LTD.(이하 KEM)을 방문하여 연구소장과의 면담을 통해 열유속센서와 관련된 현황을 파악하고 보정장치와 관련된 장치를 참관하였다.

※

### ① KEM 현황

KEM은 앞에서 언급한 바와 같이 현재 열유속센서를 시판하고 있는 열유속센서 및 계측기 제작업체이다. KEM은 1961년 설립된 일본의 전용 분석기기 제작업체로서 주 사업 아이템은 자동전위차 분석기, 수분측정기, 밀도비중 측정기, 당도계 및 열물성 측정기이다. 1986년 昭和電工(Showa-Denko)의 열측정기기 사업을 인수하여 열유속계, 열전도율측정계, 단열성 측정장치 등을 판매하고 있다.

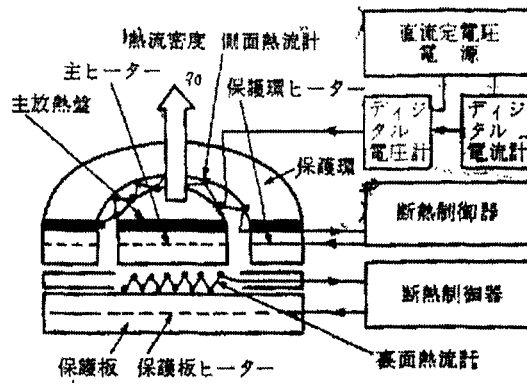
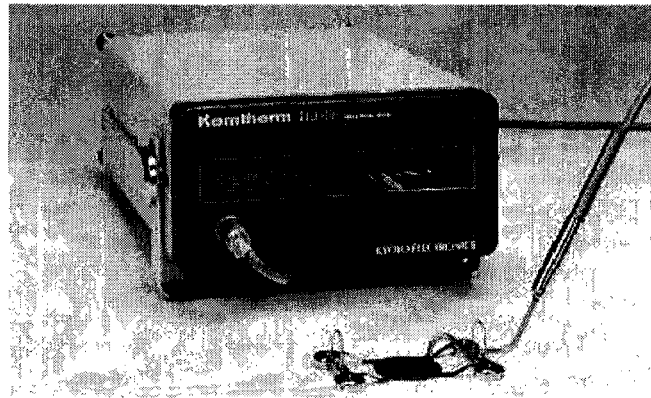
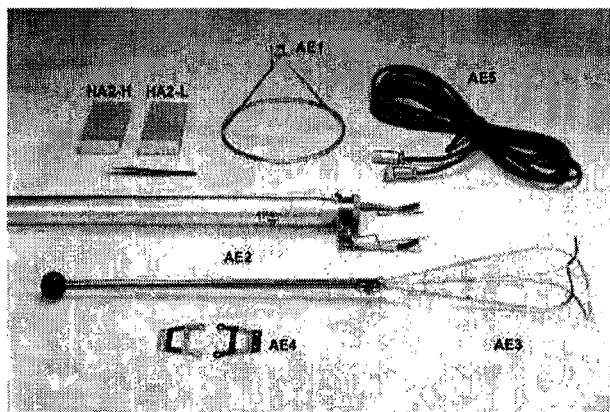


図 3-91 標準熱流発生装置の構造<sup>100)</sup>

그림 7.1.7 전도장치의 도식도(Kyoto Electronics)



(a) KEM Heat Flow Meter



(b) Accessories of KEM Heat Flow Meter

그림 7.1.8 Kyoto electronics - heat flux meter

- 본 사 : 교토
- 영업소 : 도쿄, 오오사카, 후쿠오카, 기타큐슈
- 연구소 : 기타큐슈

기타큐슈의 연구소는 1993년에 개소(開所)하였으며, 기타큐슈에 있는 신일본제철 정문 바로 앞에 있는 약 2만평 정도 규모의 조그만 테크노파크 단지내에 위치하고 있다.

KEM의 방문을 도와준 분은 KEM 본사(교토 소재)의 해외사업부의 Noboru Igaki씨를 통해 성사되었다. KEM 연구소의 소장은 1944년 태생의 교토대학 출신 Mr. Ishihara씨이며 전공은 이학분야(화학계통)이다.

- 소 장 : Shinsuke Ishihara [General Manager]
- 연락처 : 1-2, Nakaharashinmachi, Tobata-ku, Kitakyushu-shi,  
804-0003 Japan.  
Tel : 81-(0)93-861-2131 / Fax : 81-(0)93-873-1790

## ② KEM 전도 열유속 보정장치

### ㉞ KEM(교토전공) 열유속센서

KEM에서 판매하고 있는 열유속센서는 개당 약 100만원선의 가격이고, 센서와 함께 연결하여 사용하는 열유속표시기기(모델명; HFM-101)의 가격은 1,000만원 선이다. 이 열유속표시기기와 열유속센서는 잭으로 연결되는 형태인데 주문에 따라서는 열유속표시기기와 직접 연결하는 포트가 없이 단순 thermopile의 lead선 형태로 제작해 줄 수 있다고 한다. 이 경우 일반적인 data acquisition에서 열유속에 해당하는 전압의 신호를 얻을 수 있다. 그림 7.1.8(a)에서 보는 장치는 1-channel의 열유속을 측정 및 표시할 수 있는 모델로서 아래쪽에 보이는 것은 자석으로 표면에 붙일 수 있는 구조를 갖는 열유속센서를 나타내고 있다. 그림 7.1.8(b)에 보이는 각 장치는 센서를 특정한 부위에 고정하고자 하는 경우에 사용할 수 있는 보조장치를 나타낸다.

KEM에서 제작한 열유속센서의 사용범위는 그림 7.1.9와 같다. 각각의 센서는 사용온도와 열유속에 따라 다양하게 만들어져 있으며, 저열유속의 경우 고무재질로 싸여진 열유속센서가 있고, 고온용의 경우에는 스틸면 등에서 사용할 수 있는 자석이 부착된 열유속센서와 실린더형태의 열유속센서도 있다.

#### ㉞ 항온실

전도 열유속 실험장치는 가로×세로×높이의 크기가 3 m×2.5 m×2.5 m 정도인 완전한 독립공간(항온실과 같음)으로 출입구 1곳이 슬라이드방식의 문으로 되어 있고, 항온시스템이 갖추어져 있어 항상 실내온도를 23 °C로 유지한다.

열유속센서의 실험장치는 그림 7.1.10에서와 같이 항온실 내의 한쪽 벽면에 아크릴박스 안에 설치되어 있다. 이 투명 아크릴박스의 크기는 가로×세로×높이의 크기가 800 mm×800 mm×2,000 mm 정도(두께는 약 10 mm 정도)이며, 이 상자의 내부 바닥에 실험장치가 놓여있다. 이 아크릴상자는 완전히 밀폐된 것이 아니라 주위 공기(=23 °C)와 서로 통하도록 되어 있다. 항온장치에서 나오는 직접적인 공기의 유동이 자연대류에 영향을 미칠 수 있기 때문에 아크릴박스를 이용하여 자연대류 상태의 열전달 조건을 맞추고, 이 아크릴박스(box in box 형태)내에서 실험하는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 이 열유속센서 보정장치의 경우 자연대류 열전달에 의한 열유속의 한계로 인하여 낮은 열유속 범위에 대한 보정만 가능할 것으로 판단된다.

#### ㉟ 전도 열유속 보정장치의 기본원리

그림 7.1.7은 昭和電工(Showa-Denko)에서 개발되어 KEM에서 사용하는 전도 열유속 보정장치를 나타낸다. 이는 앞의 기존논문 연구에서 언급한 것과 같으며, 일반적으로 전도 열유속 보정장치는 열을 발산하는 열원(heat source), 열을 받아들이는 히트싱크(heat sink), 열을 공급하기 위한 주히터(main heater), 주히터의 열손실을 보정하기 위한 보조히터(sub-heater), 주히터에 전원을 공급하는 DC power supply, 주히터와 보조히

A coverage of each sensor (application, temp. and heat flow ranges)

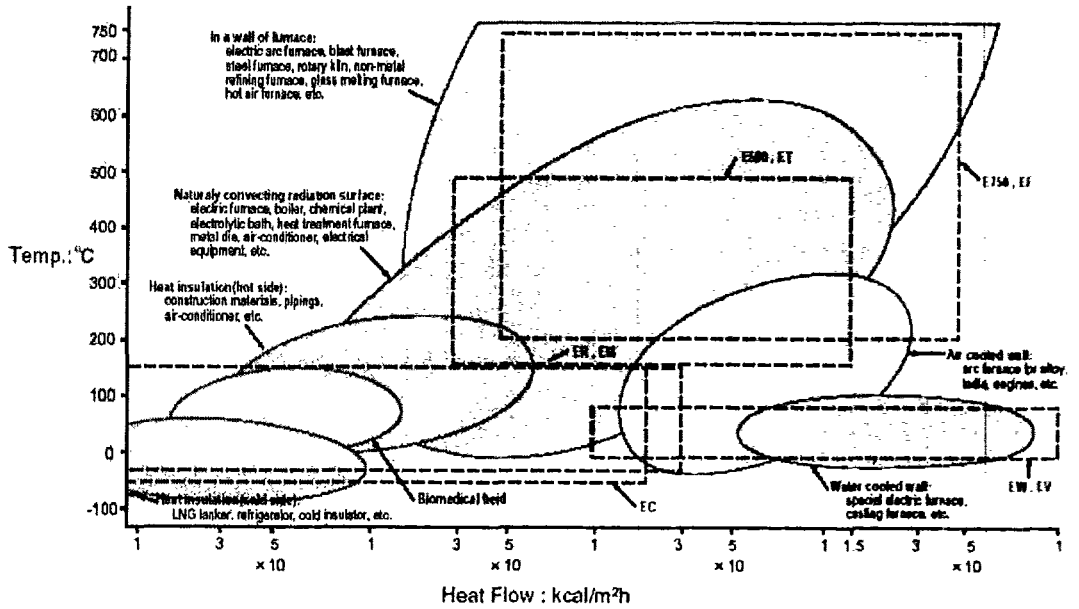


그림 7.1.9 KEM heat flux meter의 측정 범위

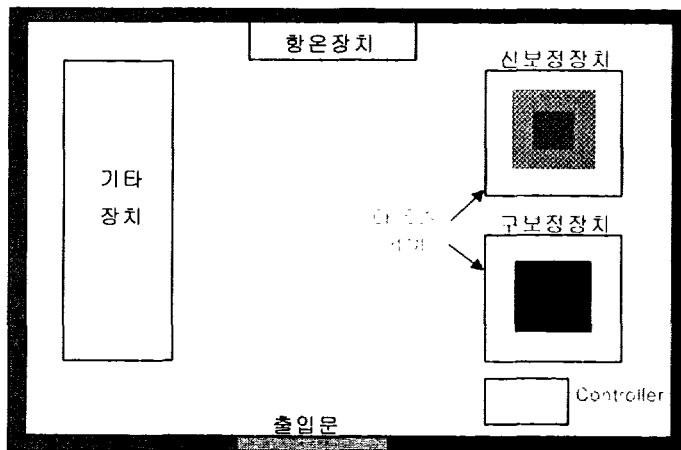


그림 7.1.10 Constant temperature room (Kyoto Electronics)

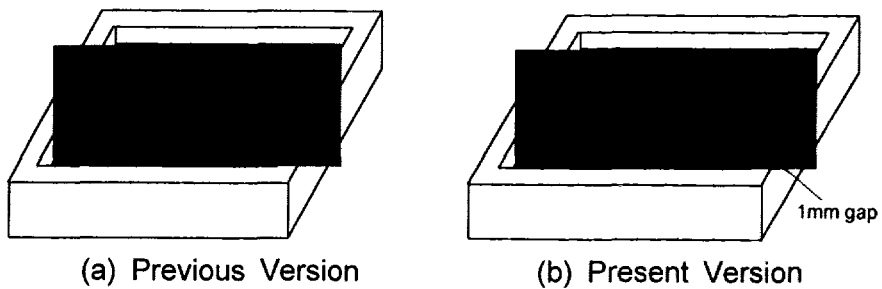


그림 7.1.11 HFS 검정시설(Kyoto 그림 7.1.1 Electronics)

터 사이에 설치되는 열유속센서 혹은 thermopile, 열유속센서의 신호를 감지해 보조히터의 전원을 on/off 할 수 있는 controller, 전체 장치를 주위조건(온도나 유동)으로부터 차단할 수 있는 단열재와 보호상자 등으로 구성된다.

#### ㉔ 전도 열유속 보정장치

KEM에서 사용하는 열유속 보정장치는 전도(conduction)방식을 사용하며, 센서가 부착되는 표면에서는 공기 중으로 자연대류에 의해 열이 발산되는 방식을 사용하고 있다. 약 1,500 W 정도의 전기입력을 주시험부에 가하여 이것이 주위의 정체된 공기와 만나 열전달되는 값을 사용하고 있었다.

열유속측정은 약 4개의 온도대역에 대해 실시하며, 최대표면온도는 약 400°C까지 사용한다. 이는 실제 카탈로그 상에 나와있는 700~750°C의 온도표기와는 다르다.

그림 7.1.10과 같이 전도 보정장치는 2가지가 항온챔버 내에 놓여 있었는데 구식 보정장치와 신식 보정장치로 구분되어 있다.

첫 번째로 구식 보정장치의 시험부는 가로×세로×높이의 크기가 500 mm×400 mm×70~80 mm 정도로 제작되어 있으며, 아래로부터 단열재, 보조히터, 단열재, 열유속센서, 단열재, 주히터, 주방열면(철판 혹은 기타물질)의 순서로 제작한다. 주시험부의 표면은 검은색으로 되어 있다. 주시험부의 표면조건은 실제 사용조건과 유사하도록 제작되어야 하며, 현재 검정색 도료를 사용하여 도장되어 있다.

두 번째로 신식 보정장치는 최근에 만들었다고 하며, 가로×세로×높이의 크기가 600 mm×500 mm×70~80 mm 정도이다. 주시험부의 중간부분은 사방으로 약 1 mm의 gap을 유지하고 있으며, 이는 측면방향 열전달이 차단되도록 설계된 것이다. 이 역시 검은색 도료로 도장되어 있다.

그림 7.1.11에는 구식 보정장치와 신식 보정장치에 대한 개략도가 나타나 있다. 각각의 경우 사각형의 모퉁이 부분은 lead 선을 인출하기 위한 조립흔적이 보이고 다른 부분은 편평하게 유지되어 있다.

그림 7.1.12는 그림 7.1.11에서 나타난 전도 보정장치에서 측면과 바닥



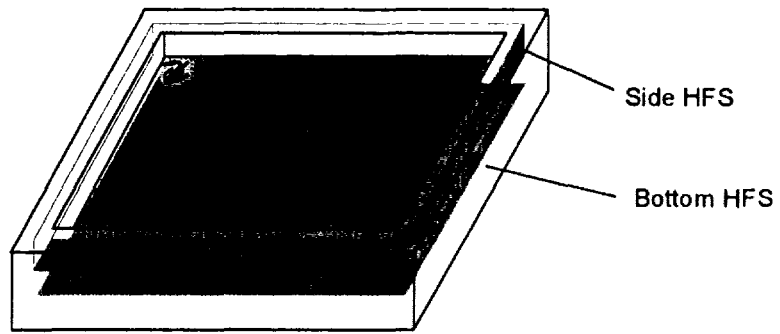


그림 7.1.12 열누출 HFS (Kyoto Electronics)

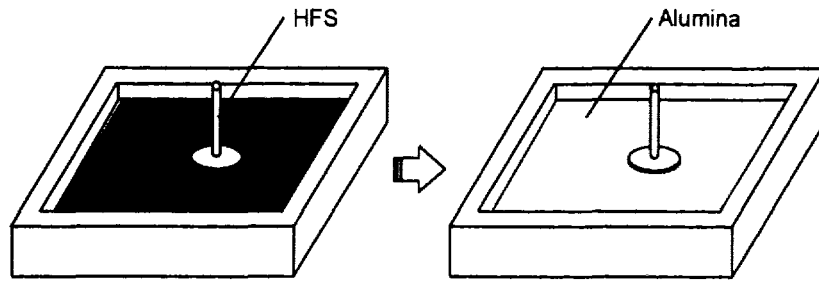


그림 7.1.13 고온조건에서의 전도 측정

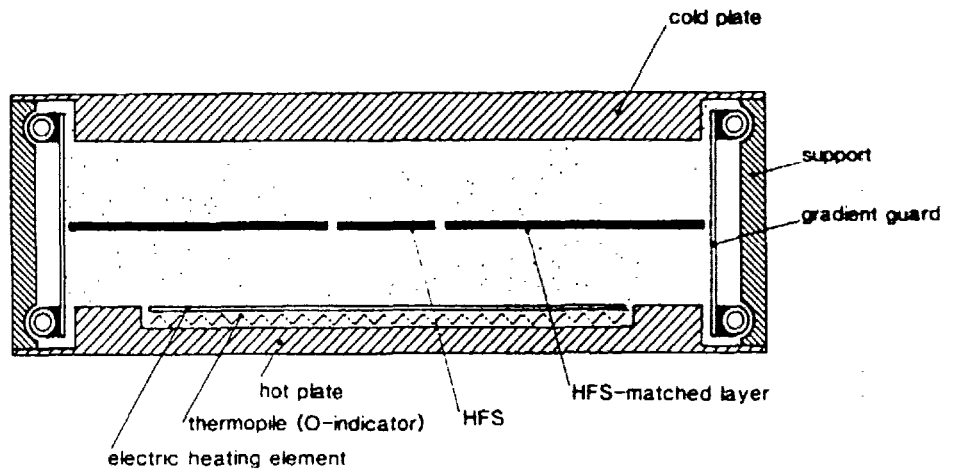


그림 7.1.14 HFS 측정장치의 단면

면으로 누설되는 열을 없애기 위한 보조히터와 열유속센서의 설치에 대한 것이다. KEM에서는 2개의 열유속센서를 사용하였다. 그림 7.1.12에서 보는 바와 같이 측면으로 누설되는 열을 방지하기 위하여 좁고 긴 형태의 (분홍색으로 표시) 측면형 열유속센서를 일체형으로 매설하였고, 바닥면으로 누설되는 열을 방지하기 위하여 (주황색으로 표시) 바닥면에 열유속센서를 매설하였다. 각각의 열유속센서는 주히터와 보조히터 사이에 놓여지며, 이 열유속센서에서 나오는 output voltage의 값이 0 V가 되면 누설되는 열이 없는 것으로 판단한다. 주히터와 보조히터 사이의 공간은 단열재 등으로 채워진다.

열유속센서의 output voltage 가 0 V인 경우 보조히터에 전원을 인가하여 가열을 함으로써 주히터에서 누설되는 열과 서로 열의 흐름이 없도록 한다. 이를 위하여 PID control을 할 수 있는 장치가 필요한데, 열유속센서에서 나오는 output voltage를 입력신호로 받아들여 0 V인 경우에는 보조히터의 전원을 차단하고, 그렇지 않은 경우에는 보조히터에 전원을 인가하는 형태이다.

고온용 열유속센서의 보정방법은 알루미나( $Al_2O_3$ ) 파우더를 사용한다. 그림 7.1.13과 같이 보정장치 위에, 예를 들어 실린더 형태의 센서를 세워 놓고, 적절한 두께(약 5 cm)로 미세한 알루미나 파우더를 부어넣어 열유속이 일정한 조건을 만든 다음 보정실험을 한다. 이 때 알루미나 분말의 열전도도는 약  $7.2 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$  (at  $400^\circ\text{C}$ ) 이다.

#### (다) TNO Institute of Applied Physics

TNO-TPD는 Schmidt-Boelter 방식을 사용하여 열유속센서를 제조하는 업체이다. F. van der Graaf[7.1.4]에 의해 발표된 자료에 의하면 열유속센서의 보정방법으로 그림 7.1.14와 같은 방식을 사용하고 있다.

구조는 바닥면의 핫플레이트(hot plate)와 열을 전기로 공급하는 electric heating element 사이에 15,000개의 copper-constantan 쌍으로 제조되어 있는 thermopile이 내재되어 있으며, 이는 단열재 안에 놓여 있다. 이 thermopile은 핫플레이트의 상부측으로만 열이 공급되도록 하기 위한 "zero-indicator" 역할을 한다. 또한 핫플레이트와 cold plate 사이에도 단

열재를 놓는다. 이 단열재 중간부분에 열유속센서를 놓으며, 열유속센서의 가장자리 부분도 열유속센서와 같은 두께, 같은 물성을 갖는 물질로 선택한다. 단열재를 감싸고 있는 가장자리의 metal wall은 각각 hot, cold water로 공급되어 gradient guard 부분이 선형 구배(linear gradient) 온도 분포를 갖도록 한다.

핫플레이트와 cold plate가 안정되면 전기히터를 조절하여 thermopile의 출력값이 "0"이 되도록 한다. Heater의 면적과 heater에 입력되는 전원으로 부터 열유속센서의 열유속에 대한 정보를 알 수 있다.

#### (라) 국내 연구자료

1988년 기계학회 논문집에 발표된 영남대의 연구결과[7.1.5]는 작은 실리콘을 이용한(MEMS로 제작한 것이 아닌 1.4 mm 정도의 scale) 열유속센서의 제작과 보정장치에 관한 것이다.

그림 7.1.15에 나타난 열유속 발생장치는 이론해(analytic solution)가 알려져 있는 수직벽면에서의 균일 열유속에 의한 자연대류(natural convection) 열전달을 이용하는 형태이다.

주가열판은 고유저항 5.15 W/m, 폭 4.6 mm, 두께 0.16 mm의 니크롬선을 운모판 사이에 2.8 mm 간격으로 "ㄴ" 자 형태로 배열하고, 여기서 발생하는 열이 모두 전면을 통해 방열되도록 하기 위하여 주가열판 뒤쪽에 같은 규격의 보조가열판을 설치하고, 그 사이에 5 mm 두께의 석면판에 100개의 쌍을 갖는 보조열유속계(thermopile)를 설치하여 열손실을 감지하도록 하였다. 주가열판의 전력은 전압조절기에 의하여 일정하게 공급되고, 보조가열판의 전력은 보조열유속계의 전력전위가 "0"이 되도록 위상 제어방식으로 자동조절되게 하였으며, 그 결과 환산된 온도차가 0.05 °C 이내로 유지되었다. 여기서 환산된 온도차가 0.05 °C 이내로 유지되었다는 것은 thermopile에서 나타나는 전압차(이는 온도차에 비례함)가 거의 0에 가깝다는 것을 의미하여 이는 thermopile 전.후로 열의 흐름이 없다는 것을 의미한다. 보조가열판 뒤쪽에는 가열량을 감소시키기 위하여 5 mm의 석고판과 100 mm의 발포우레탄을 붙였다. 또한 장치의 측면에도 발포우레탄으로 300 mm의 단열층을 형성시켰다. 열유속 시험면은 평면성(flatness)

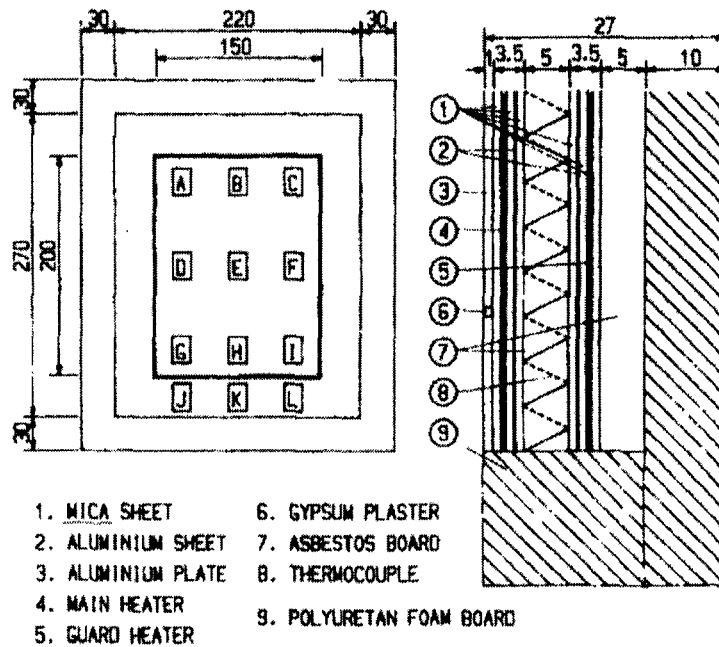


그림 7.1.15 보호가열기를 가진 heat flux generator

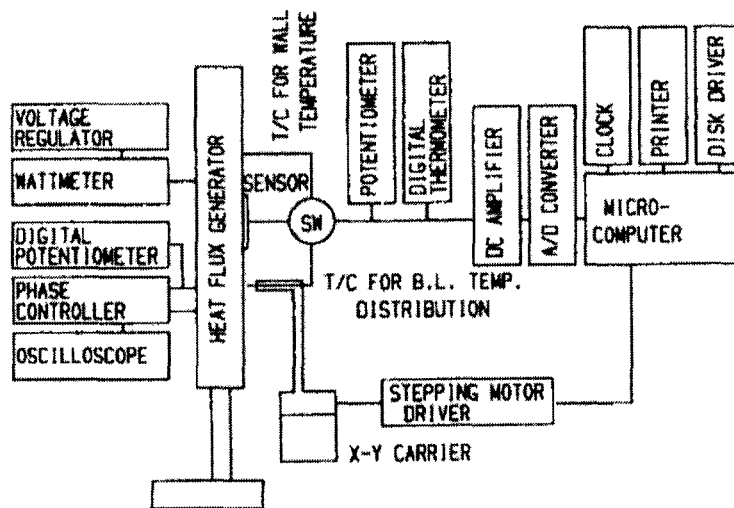


그림 7.1.16 Heat flux 센서를 보상하기 위한 시설 배열도

을 유지하고 요철을 방지하기 위하여 알루미늄판으로 처리하였다. 또한 판과 평행한 방향의 열손실을 줄이기 위하여 알루미늄판 중간에 가로 15 cm, 세로 20 cm 의 시험면을 1 mm 간격으로 구분하고 석고로 메웠다. 벽면온도 측정을 위하여 알루미늄판 뒤쪽에서 T-type 열전대를 삽입하였다. 자체 제작한 열유속센서로 출력전위를 측정한 결과 최대오차 1.81 %, 표준편차 0.66 % 를 갖는다.

이 장치를 이용한 보정장치는 전기로 입력된 전력이 전량 열로 전환되지 않는 것으로 보고하고 있다. 입력한 값의 65 % 정도만 열로 변환되어 방열된다는 결과를 나타내고 있다. 따라서 이 연구에서는 이론치를 대표값으로 사용하였다.

그림 7.1.15에서 나타난 열유속발생장치를 가로 1.5 m × 세로 1.5 m × 높이 1.1 m 의 밀폐공간속에 설치하고, 시험면 중간지점에 보정하고자 하는 센서를 부착한다. 센서의 부착 시에는 접촉저항을 줄이기 위하여 silicon heat sink compound(Dow Corning, USA)제품을 사용하였다. 위상 제어기는 보조열유속계의 출력전위가 "0"으로 나타나도록 보조가열판에 전력을 자동조절하여 공급해주며, 이것을 전위차계와 오실로스코프로 확인한다. 그림 7.1.16은 열전대로 측정한 온도를 이용하여 열유속센서에서 나타나는 출력을 "0"으로 만들어주기 위한 개략도를 나타낸다.

#### 다. 연구개발 수행내용 및 결과

본 연구에서는 열유속센서 보정장치를 제작하기 앞서 FLUENT를 이용한 전도방식 열유속센서 보정장치를 수치해석함으로써 시스템 주시험부의 온도, 열유속 등을 평가하였다. 이는 전체 시스템에 대한 FLUENT 해석과 부분적인 해석으로 나누어져 있다. 이 해석결과를 이용하여 helium gas의 열전도도를 이용한 고열유속용 전도방식의 열유속센서 보정장치를 설계하고 자체적으로 제작하였다.

본 연구의 열유속센서 보정장치는 미국의 NIST에서 제안한 전도방식의 열유속센서 보정장치에 대한 수치해석 결과에서 아이디어를 얻고, 이를 최초로 실험적으로 구현함으로써 전도방식 열전달이 가능하면서도 고열유속 조건을 만족시키는 열유속센서 보정장치를 제작한 것이 중요한 연구결

과이다. 이 열유속보정장치의 가장 중요한 점은 기존 전도방식의 최대의 단점인 고체간의 접촉 즉, 센서와 열유속보정장치 표면간의 열저항을 최소화시키기 위한 방법으로 helium gas를 사용하는 것이다. 이는 일반적인 기체보다 열전도도는 높고 상대적으로 매우 안정적인 기체이다. 그림 7.1.17과 같이 이 helium gas는 온도가 높은 전열면에 존재하는 경우 열전도도가 낮은 고체와 같은 역할을 하여 다른 면(heat sink)의 온도를 낮게 유지시켜줄 수 있고, 이를 통해 열유속센서 부착시 열저항을 최소화하면서 열유속을 측정할 수 있다고 판단된다.

앞에서 언급한 바와 같이 전도방식의 열유속보정장치는 주위 특히, 아래면으로 누설되는 열을 보정해 주는 것이 매우 중요한데 이를 위해 누설되는 열을 체크하기 위한 보조히터조절기를 제작하였다. 이는 on/off 조절을 할 수 있는 relay와 일반적인 thin film type 열유속센서를 이용하여 제작하였다. 전도방식 열유속 보정장치의 치수가 상대적으로 크기 때문에 누설되는 열을 체크하기 위한 열유속센서도 이에 맞게 크게 부착하는 것이 실험의 오차를 줄일 수 있기 때문에 Vatel사의 320 mm×320 mm 크기의 열유속센서를 구입하였다. 상용 열유속센서의 보정실험을 복사열원을 이용하여 수행하였다.

## (1) 열유속 보정장치 모델링

### (가) 열유속 보정장치 모델링의 개요

본 모델링은 전도 열유속 보정장치(그림 7.1.1)에 열유속센서를 부착한다고 할 때 전도 열유속 보정장치 내부의 온도분포 및 열유속 분포에 대한 지식을 얻는 것이 목적이다. 본 연구에서는 주시험부를 제작하기 전에 상용 열유체 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 열전달 해석을 수행하였다. FLUENT를 사용한 열유동 해석의 주목적은 구리블록 내의 sheathed heater(heat source)로부터 발생하는 열이 구리블록을 통해 helium gas와 알루미늄 블록으로 전달되고, 이는 다시 CFC-11 냉매와의 상변화 열전달을 통해 항온조에서 공급되는 냉각수와 열교환 될 수 있는가를 판단하기 위한 것이다.

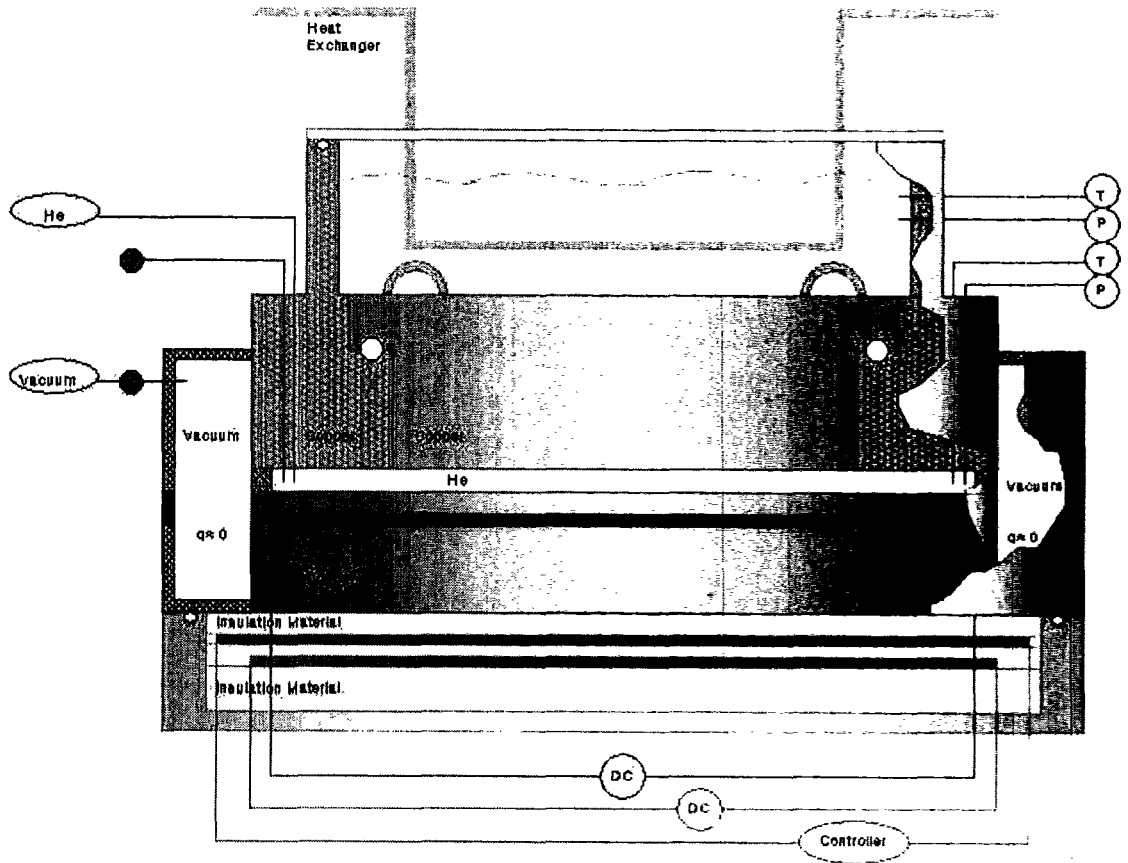


그림 7.1.17 Conduction type HFS calibration facility의 도식도

(나) 열유동 해석방법

본 보고서에는 사각형 DUCT type의 heater를 사용하는 경우와 보다 실제 상황에 가까운 원형 heater를 사용하는 2가지 분석에 대해 정리하였다.

Part 1. - 사각형 heater를 사용하여 전체 시스템의 좌측구조만 해석

Part 2. - 원형 type heater를 사용하여 히터 주위(폭 25 mm)만 해석

① 사각형 heater를 이용한 전체 시스템의 해석

주시험부는 좌우대칭의 구조이기 때문에 전체시스템의 좌측구조만 해석하였다. 그림 7.1.18(a)는 주시험부의 개략도를 나타냈으며, 그림 7.1.18 (b)는 grid generation을 나타내고 있다. 그림 7.1.18 b)와 그림 7.1.18(a)와의 차이점은 sheathed heater 부분을 사각형으로 단순화한 것이다. 실제 실험에서는 원형 sheathed heater를 사용하기 때문에 전기입력의 값은 사각형 sheathed heater 입력을 100 %로 나타낸 경우와 비교할 때 71 %로 볼 수 있다. 따라서 그림 7.1.18(a)는 그림 7.1.18(b)의 grid와 같이 단순화시킬 수 있다고 판단된다.

FLUENT의 해석은 2-dimensional, steady, laminar 조건으로 해석하였다. 주위온도는 293 K를 유지하도록 하였다. 이는 주위의 공기온도가 스티로폼으로 만든 항온챔버와 온도조절기에 의하여 일정하게 유지된다는 가정을 고려한 것이다.

CFC-11 냉매가 위치하게 되는 열교환기부에서 냉매의 증발온도는 약 24 °C이므로 알루미늄 블록의 온도는 이 이상 증가하지 않는 것으로 볼 수 있으며, 이를 고려하면 알루미늄 블록의 온도는 증발온도 이상 올라가지 않는 것으로 해석할 수 있다. 현재 전도 열유속 보정장치의 경우에는 그림 7.1.50에 나타난 실제 실험장치에서 볼 수 있듯이 각 구조물을 O-ring과 볼트를 이용한 플랜지 결합방식을 사용하기 때문에 알루미늄 블록이 볼트와 너트를 결합하는 플랜지 부분까지 나오게 된다. 실제 실험에서는 이로 인한 열손실이 발행하는지의 여부를 판단하기 위하여 FLUENT를 이용한 해석에서도 이와 동일한 격자를 구성하였다.

해석방법은 GAMBIT을 이용하여 격자구성이 완성된 상태에서 grid에



대한 검사를 실시한 후 pre-processor인 GAMBIT을 종료한다. 이후 해석(solving)을 위하여 solver인 FLUENT를 실행하고, GAMBIT에서 제작된 grid file을 불러와 다음과 같은 작업을 실시한 후 지정된 residual 범위에 대해 반복적(iteration)인 계산을 통해 보존방정식을 푼다.

주요한 해석변수들에 대해 정리하면 다음과 같다.

- Solver : 2-Dim. Segregate Implicit method
- Boundary condition
  - 초기 주위온도, 내부물질 온도 :  $T_{\text{ambient}} = 293 \text{ K}$
  - Heat source of sheathed heater :  $2.32 \times 10^7 \text{ W/m}^3$
  - 우측면 : Symmetry
- Material property

Material	Thermal conductivity k (W/m.K)	$C_p$ (J/kg.K)	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
Helium	0.152	5193	0.1625
Insulation board	0.173	2310	700
Copper	387.6	381	8978
Aluminum	202.4	871	2719
Air	0.0242	1006.43	1.225

- Initial condition
  - gauge pressure : 0 pascal
  - temperature : 293 K

그림 7.1.19는 주시험부의 전체 온도분포가 나타나 있다. Sheathed heater가 삽입된 구리블록 부분의 온도가 제일 높게 나타난 것을 알 수 있으며, 그림 7.1.20에 나타난 바와 같이 sheathed heater 부분만을 세밀하게 나누어보면 히터가 있는 부분이 2 K 정도 높은 것을 알 수 있다. 실제 실험에서 열유속센서의 크기(센서의 지름)는 8 mm이므로, 이 해석에서는 그 값의 반인 4 mm에 해당된다. 그림 7.1.21의 결과에 나타난 붉은색 점

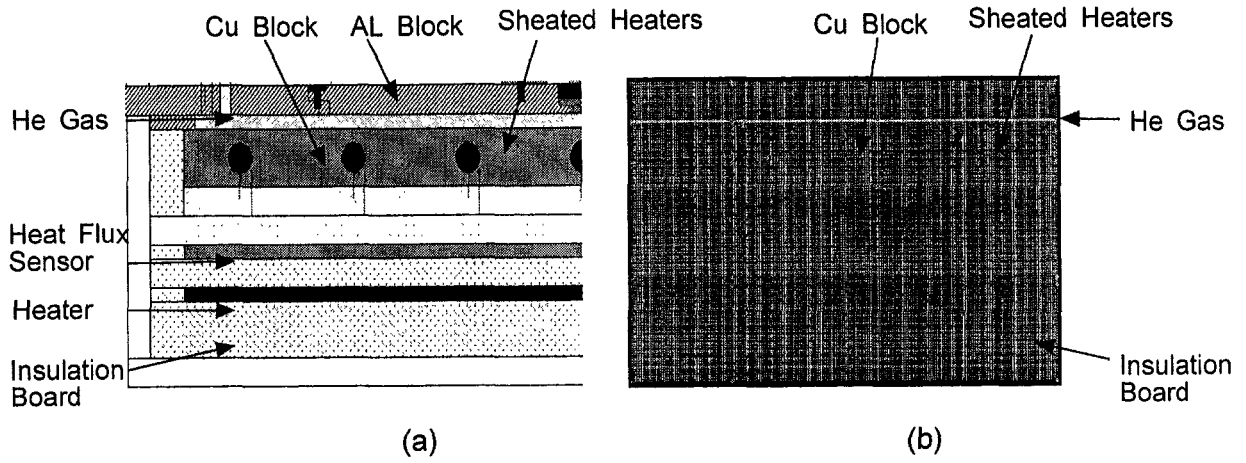


그림 7.1.18 열분석에서의 grid generation(FLUENT)

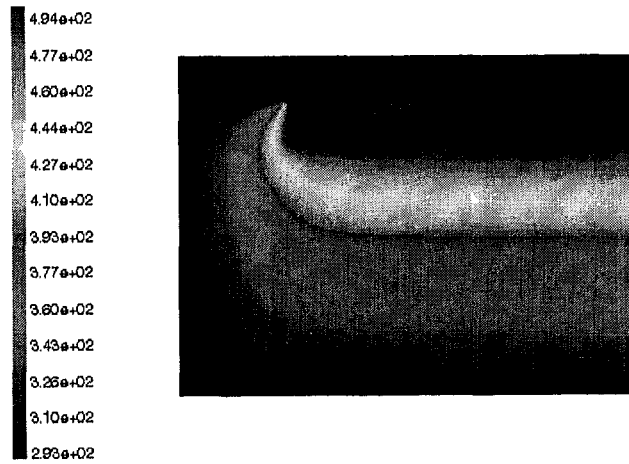


그림 7.1.19 시험부에서의 온도 분포

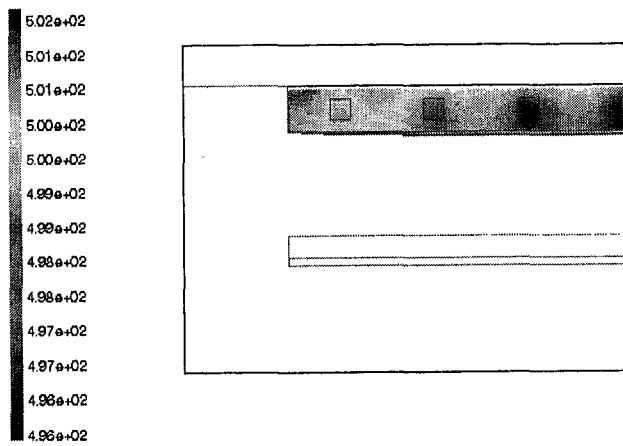


그림 7.1.20 시험부에서의 온도 분포

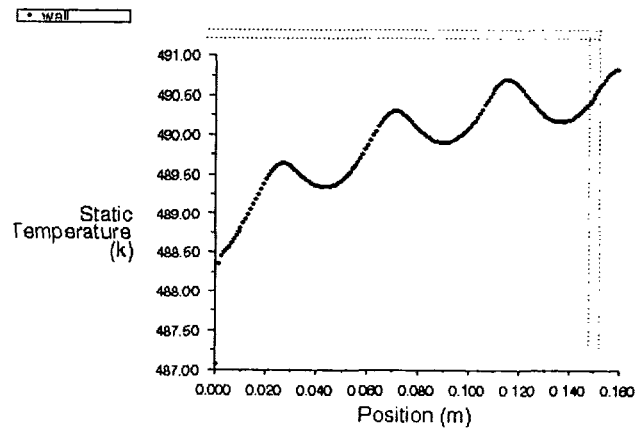


그림 7.1.21 주시힘부에서의 copper block의 온도 분포

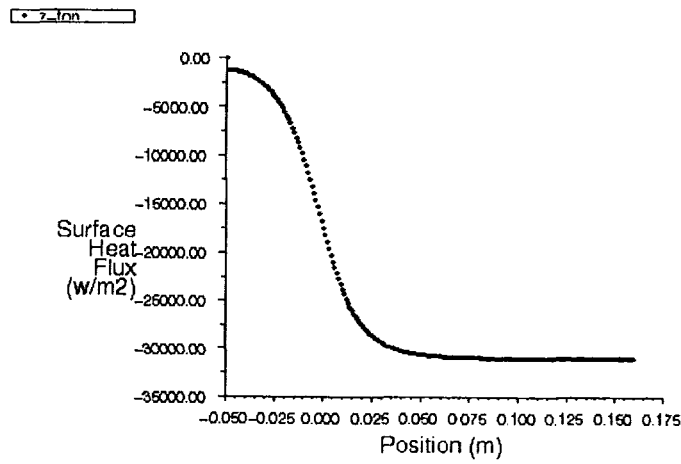


그림 7.1.22 상부판에서의 heat flux 분포

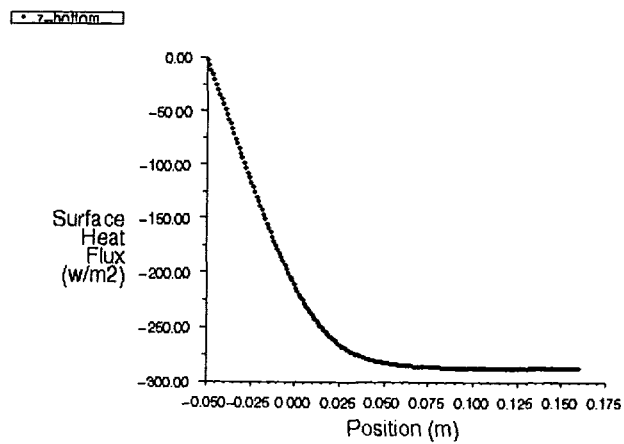


그림 7.1.23 하부판에서의 heat flux 분포

선을 보면 열유속센서의 반지름에 해당하는 부분에 해당하는 구리블록 표면에서의 온도편차 값을 알 수 있으며 이 값은 0.15 K 이다.

그림 7.1.22와 그림 7.1.23은 본 연구에서 제작한 주시험부의 열유속 분포를 분석하기 위하여 알루미늄 블록을 통과하는 열유속 값과 바닥면으로 누설되는 열유속 값을 계산하였다. 그림 7.1.22는 상측면으로 통과하는 열유속 값이며, 이와 동일한 열이 CFC-11 냉매의 상변화 열전달을 통해 시스템 밖으로 누설되지 않는다면 시스템 내부의 온도는 계속적으로 증가하게 될 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 열유속센서를 부착하는 면 주위에서의 열유속은 일정하기 때문에 알루미늄 블록 가장자리 부분이 주위공기와 접촉하는 조건으로 인한 열유속 측정의 오차는 최소화될 수 있을 것으로 판단된다.

Sheathed heater의 입력값을  $2.32 \times 10^7 \text{ W/m}^3$  로 가정하여 입력한 상태에서 알루미늄 블록 상부로의 열유속 값은  $30,000 \text{ W/m}^2 (=3 \text{ W/cm}^2)$  을 나타낸다. 그림에서 (-) 부호는 면에 대해 밖으로 향하는 방향이 (-) 방향이기 때문이다. 반대로 바닥면으로 누설되는 열유속의 값 또한 중요하다. 열유속센서의 보정은 입력되는 전력값을 정확히 알고 있는 경우에만 가능하기 때문이다. 이 해석에서 나타난 바닥면으로의 열유속 값은  $260 \text{ W/m}^2 (=0.026 \text{ W/cm}^2)$ 이다. 이 결과에 따라 구리블록의 하부에 위치되는 보조 heater의 용량이 결정된다. 이 분석에 따라서 실제 실험장치의 Base 내부에 장착한 보조히터의 용량은 가로×세로=320 mm×320 mm 기준으로 50 W / 220 V의 정격 출력값을 사용하였다.

## ② 원형 type heater를 사용한 히터 주위 해석

### ㉠ 모델링

이 절에서는 사각형 heater대신 원형 heater를 적용한 경우의 전도 열유속 보정장치의 내부 열유동에 대해 모델링 하였다. 이는 앞에서 다룬 사각형 heater를 적용한 경우 나타난 분석에서 중심부 주위의 온도분포와 열유속분포가 크게 변하지 않는 점을 이용하였다. 즉 시스템의 중심부는 우측 경계조건(symmetry)으로 사용하고, 중심과 가장 가까운 원형 heater

의 중심부까지 길이를  $L$ 이라고 할 때,  $L/2$  길이(폭=22.5 mm)에 해당하는 부분만 모델링 하였다. 그림 7.1.24는 주시험부의 mesh generation을 나타내고 있다. 1절의 사각형 heater 대신 원형 heater가 사용된 것을 알 수 있다. 중심 부분에서의 열유속과 온도분포에 관심이 있기 때문에 1절에서 분석한 결과와 약간 상이한 결과가 있을 것으로 예상되었고, 분석 결과에서도 이를 확인하였다.

FLUENT의 해석은 1절과 마찬가지로 2-dimensional, steady, laminar 조건으로 해석하였다. 주위온도는 바닥면의 경우 주위온도인 293 K로 주어졌으며, 상측면의 경우 CFC-11 냉매와 닿아 있기 때문에 증발온도인 297 K를 사용하였다. CFC-11 냉매가 위치하게 되는 열교환기부에서 냉매의 증발온도는 약 24 °C이므로 알루미늄 블록의 온도는 이 이상 증가하지 않는 것으로 볼 수 있으며, 이를 고려하면 알루미늄 블록의 온도는 증발온도 이상 올라가지 않는 것으로 해석할 수 있다. 해석방법은 1절과 같은 방법을 사용하였다.

#### ㉠ 실험결과

그림 7.1.25는 주시험부의 전체 온도분포가 나타나 있다. 사각형 heater에서 나타난 결과와 같이 원형 sheathed heater가 삽입된 구리블록 부분의 온도가 521 K로 제일 높게 나타난 것을 알 수 있다. 그림 7.1.26은 sheathed heater 부분을 세밀하게 나누어 본 것으로 히터 부분이 구리블록의 최저온도 부위보다 약 2 K 정도 높은 것을 알 수 있다. 알루미늄 블록 내부의 온도분포는 그림 7.1.27에 나타내었다. 이는 알루미늄 상·하단간의 온도차가 발생하는지를 알아보기 위한 것이다. 이 온도차는 그림 7.1.27과 같이 약 3 K로 나타남을 알 수 있으며, 알루미늄 블록 상하간의 온도차는 센서 주위의 온도보다 크게 나타나기 때문에 실험시 센서를 알루미늄과 부착하는 등의 문제에서 주의 깊게 고려해야 할 부분이다. 또한 그림 7.1.28은 구리블록 상단의 온도를 나타낸다. 이는 앞의 결과와 같이 중심부분과 중심부분으로부터 22.5 mm 떨어진 부분의 주위온도가 0.7 K 차이를 보이는 것을 알 수 있으며, 열유속센서가 부착되는 부위는 더욱 작은 온도차(약 0.3 K)를 나타내는 것을 알 수 있다.

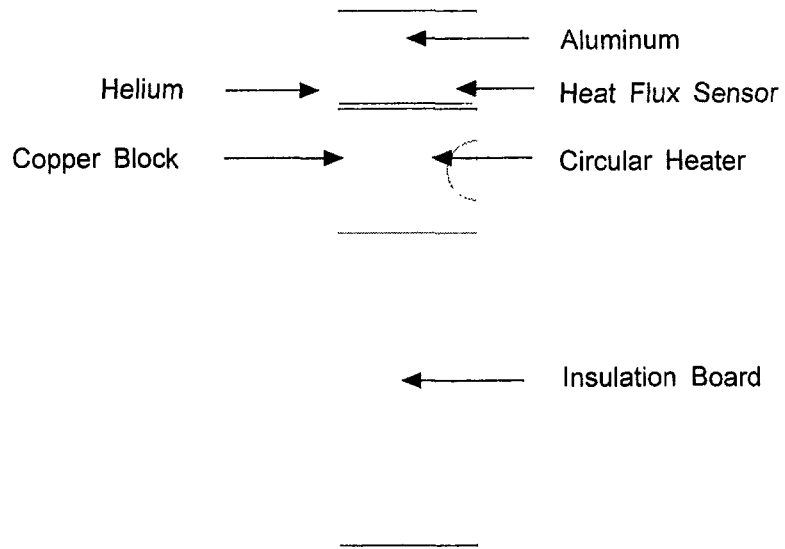


그림 7.1.24 HFS 열전도에 있어서 grid 생성

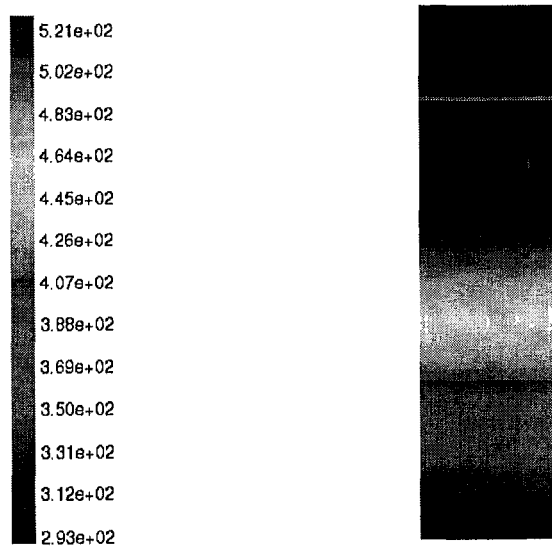


그림 7.1.25 시험부에서의 온도 분포

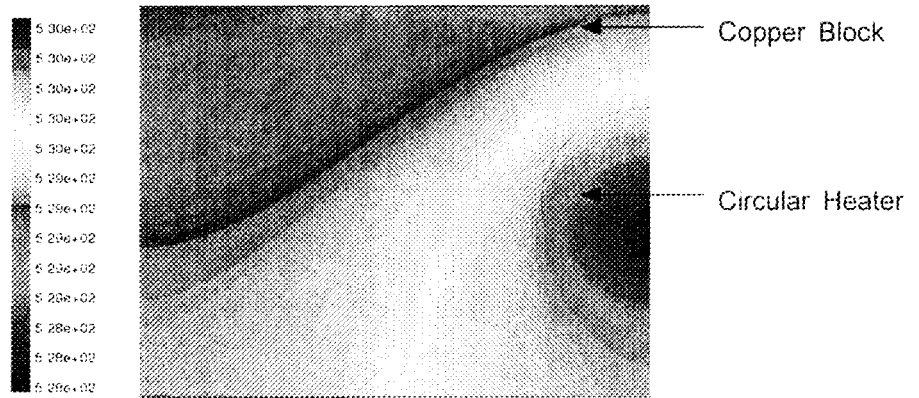


그림 7.1.26 주시험부에서의 copper block의 온도 분포

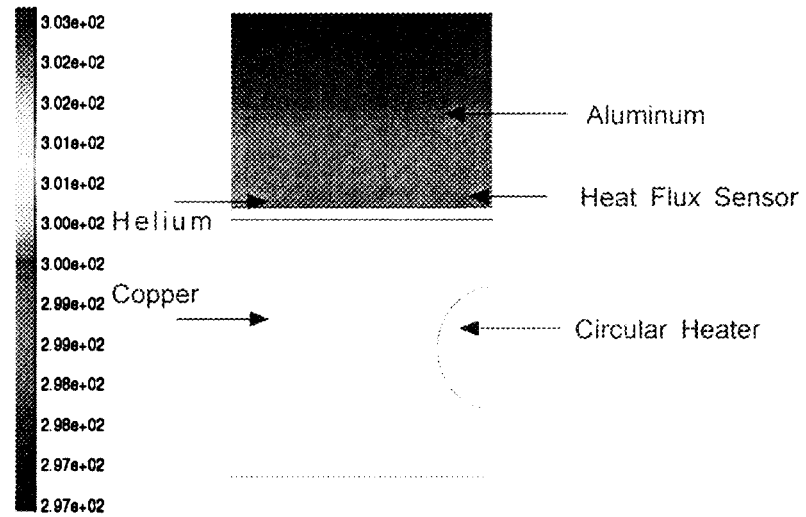


그림 7.1.27 주시험부에서의 aluminum의 온도 분포

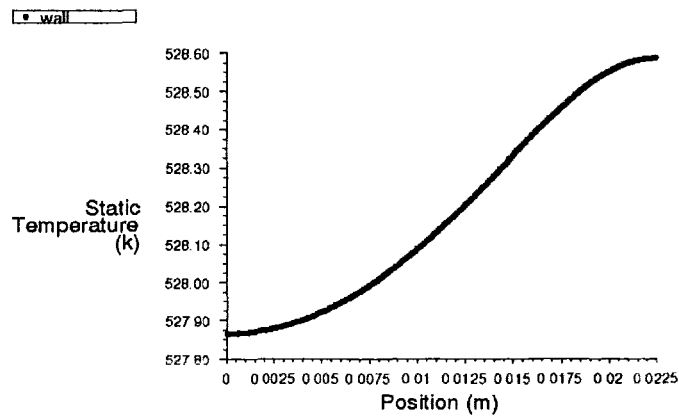


그림 7.1.28 Copper block 상부의 온도 분포

그림 7.1.29는 helium gas 층 내의 온도분포를 나타낸 것이다. Sheathed heater(지름=3/8", 길이 12")의 입력이 500 W이면 heat source의 값은  $2.3 \times 10^7 \text{ W/m}^3$  이 된다. 이 heater를 구리블록에 삽입하는 경우에 구리블록의 상측 온도와 알루미늄 블록의 하측 온도의 차이는 그림 7.1.29와 같이 helium gas 내에 220 K 정도 나타남을 알 수 있다.

그림 7.1.30은 알루미늄 블록의 상측면을 기준으로 유출되는 열유속의 값은 보정장치의 모델치수에서 가로길이에 대해 나타낸 것이다. 약  $34.75 \text{ kW/m}^2$  의 값이 열유속인 것을 알 수 있다. 그림 7.1.31은 단열재의 하측면을 기준으로 유출되는 열유속의 값을 보정장치의 모델치수에서 가로길이에 대해 나타낸 것이다. 약  $465 \text{ W/m}^2$  의 값이 열유속으로 나타난다. 이 결과를 보면 heater의 대부분의 열은 알루미늄 블록의 상측면으로 유출되는 것을 알 수 있다.

## (2) 열유속센서 보정장치

### (가) 주시험부 (Main Test Section)

1999년 말 NIST에서 발표된 W.L. Grosshandler et al.[7.1.1, 2] 연구에 의하면 전도방식의 열유속 보정장치를 제작하기 위하여 helium gas를 사용하기 위한 노력이 나타나 있다. 이 열유속 보정장치의 가장 중요한 점은 기존 전도방식의 최대의 단점인 고체간의 접촉 즉, 센서와 열유속 보정장치 표면간의 열저항을 최소화시키기 위한 방법으로 helium gas를 사용하는 것이다. Helium gas는 열전도도가 약  $0.2 \text{ W/m.K}$  인 안정된 기체이므로 구리블록 사이에 약 1 mm의 gap을 유지하는 경우 helium gas층을 통과하는 열은 열원 표면온도가 660 K 상태인 경우에 히트싱크 표면온도는 300 K 정도까지 낮아진다.

본 연구에서는 이를 응용하여 열유속 보정장치 및 주변기기를 제작하였다. 그림 7.1.32는 실험장치의 전체적인 개략도가 나타나 있다. 그림 7.1.33은 주시험부를 확대하여 나타낸 것이다. 주시험부는 상단에 투명 가시창을 갖는 Cover plate부(그림 7.1.34 (a)), 바퀴가 달려 주시험부의 이동을 자유롭게 하고 구리블록과 단열재 및 보조 heater등을 적재하기 위한



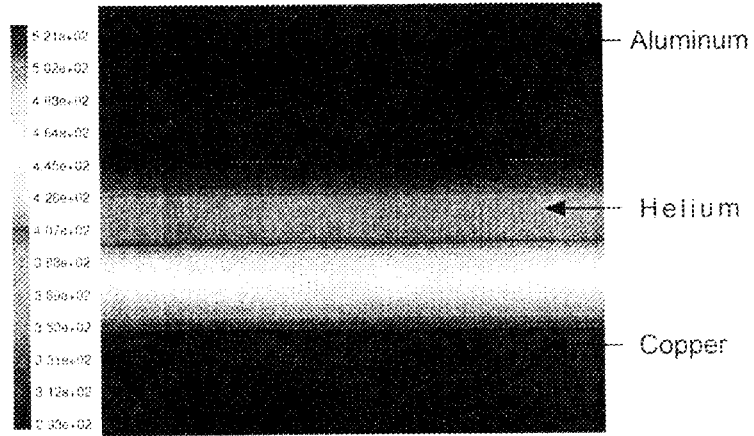


그림 7.1.29 주시힘부에서의 helium layer의 온도 분포

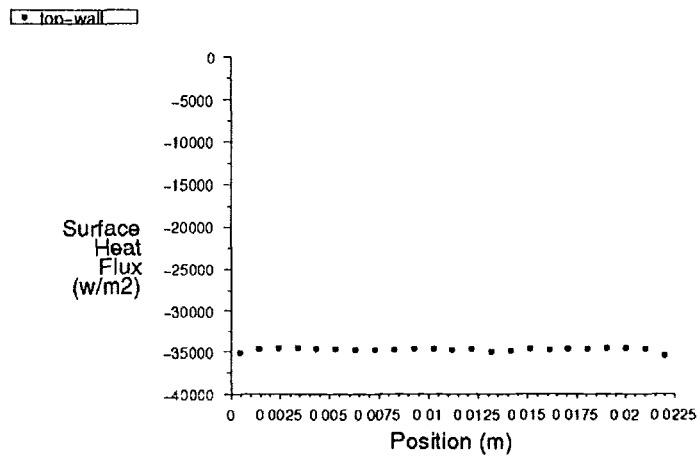


그림 7.1.30 Aluminum block 상부벽에서 heat flux 분포

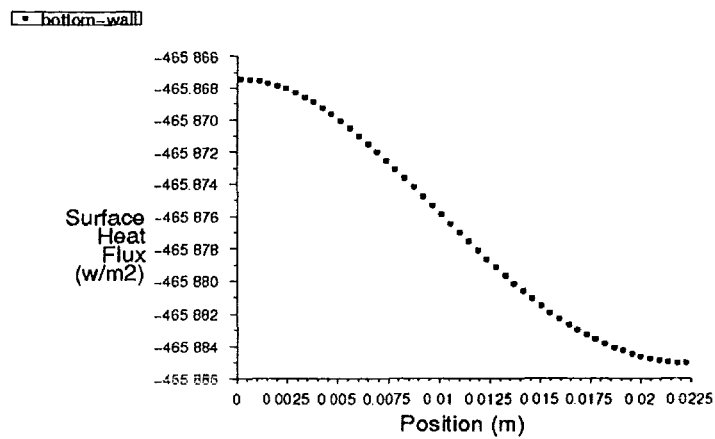


그림 7.1.31 하부판에서의 heat flux 분포

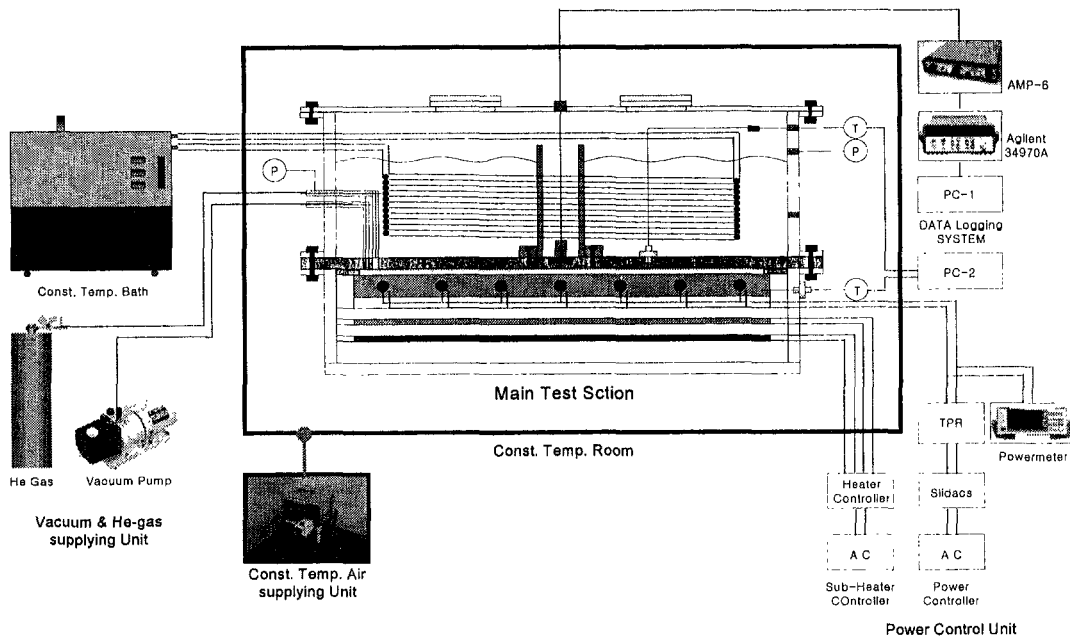
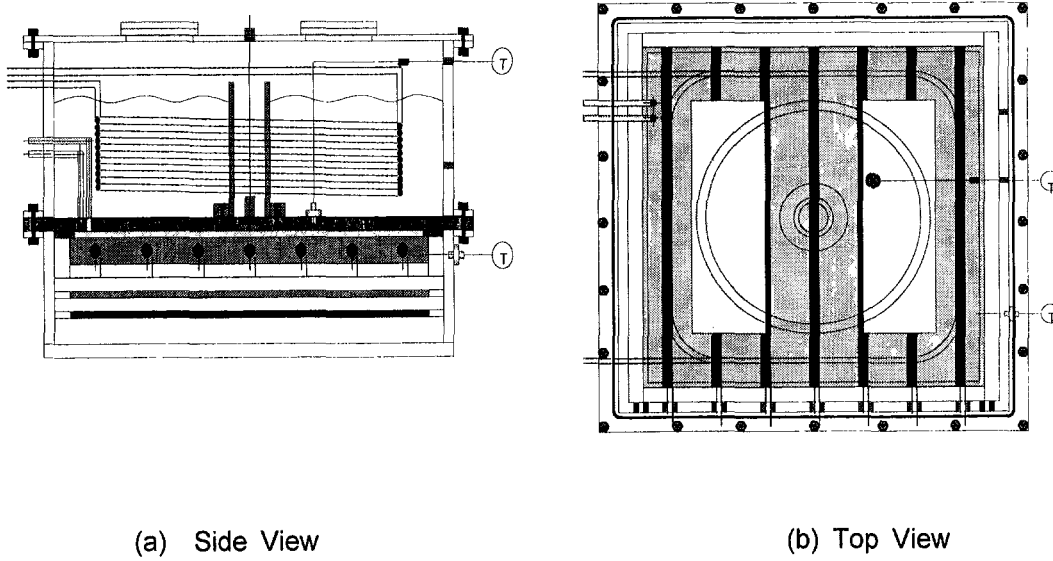


그림 7.1.32 실험장치의 도식도



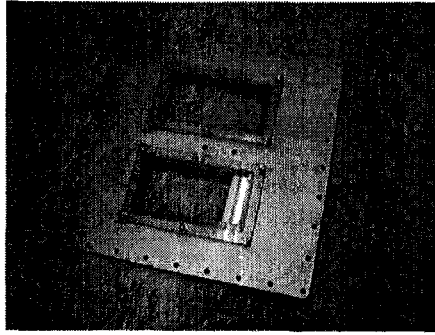
(a) Side View

(b) Top View

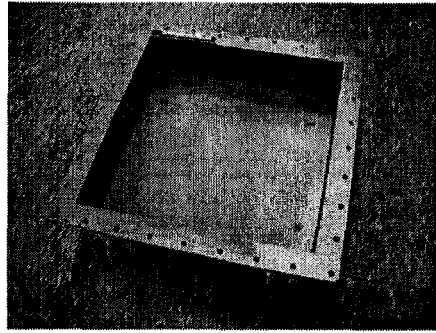
그림 7.1.33 주시험부의 도식도

Base부(그림 7.1.34 (b)), 알루미늄으로 제작되어 하단으로부터의 열전달을 이롭게 하고 열유속센서를 삽입할 수 있는 고정부가 실린더 파이프 형태로 제작되어 있는 센서부착부(그림 7.1.34 (c)), 7개의 3/8" sheathed heater를 구리블록에 삽입하여 총 4,200 W(240 VAC 입력기준)의 전기입력을 공급할 수 있는 Heater부(그림 7.1.34 (d)) 및 구리블록으로부터 나오는 열을 흡수한 CFC-11 냉매와 항온조에서 공급되는 물과의 열교환을 원활하게 하기 위한 구리파이프를 갖는 열교환기부(그림 7.1.34 (e))로 구성되어 있다. 그림 7.1.36의 주시험부의 case 부분(그림 7.1.34 (a),(b),(e))은 스테인리스로 제작되었으며, 그림 7.1.34 (c)는 알루미늄 재질이고, 그림 7.1.34 (d)는 구리 재질이다. 이를 다시 상세하게 설명하면 주시험부의 구리블록은 가로×세로×높이 = 320 mm×320 mm×20 mm의 구리블록 내부에 7개의 sheathed heater(각각 용량 600 W / 240 VAC)를 수평으로 삽입하여 열의 발생을 유도하고 열유동은 주시험부의 상부로 이루어지도록 구성하였다. Sheathed heater에 전원을 공급하기 위하여 슬라이닥스와 relay를 이용하였다. 구리블록 하단으로의 누설 열량을 분석하기 위하여 크기 가로×세로 = 320 mm×320 mm, 용량 50~100 W 급의 보조 heater를 사용하였으며, 구리블록과 보조 heater 사이에는 열유속의 출력값이 0이 되도록 조절하기 위하여 320 mm×320 mm의 평판형 열유속센서를 사용하였다. 이 열유속센서에서의 출력값이 0이 되도록 조절할 수 있는 보조 heater 조절기를 제작하여 사용하였다.

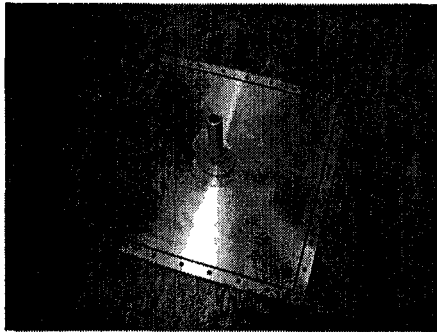
열유속센서가 부착된 알루미늄 판과 구리블록 사이는 1 mm 높이의 공간이 형성되며 여기에 helium gas가 채워진다. Helium gas를 충전하기 위하여 내부의 공기는 진공펌프로 뽑아내고, helium 가스통으로부터 helium이 공급되는 방식으로 구성되어 있다. 열유속센서로부터의 열유속 변화에 따른 출력값은 Lemo connector를 이용하여 신호증폭기로 입력된 후 다시 data logger와 PC를 이용하여 측정한다. 그림 7.1.35는 Vatel사의 평판형 열유속센서이며, 전도 열유속센서의 모든 구성은 이 열유속센서의 크기를 기준으로 제작되었다. 열유속센서의 크기는 가로×세로 = 320 mm × 320 mm 이다. 그림 7.1.36은 판형 구조를 갖는 50 W (220 V 기준) 히터이다.



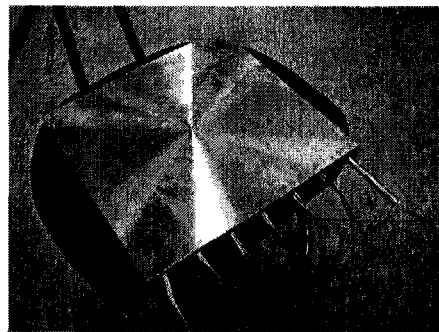
(a) Cover Plate (SUS)



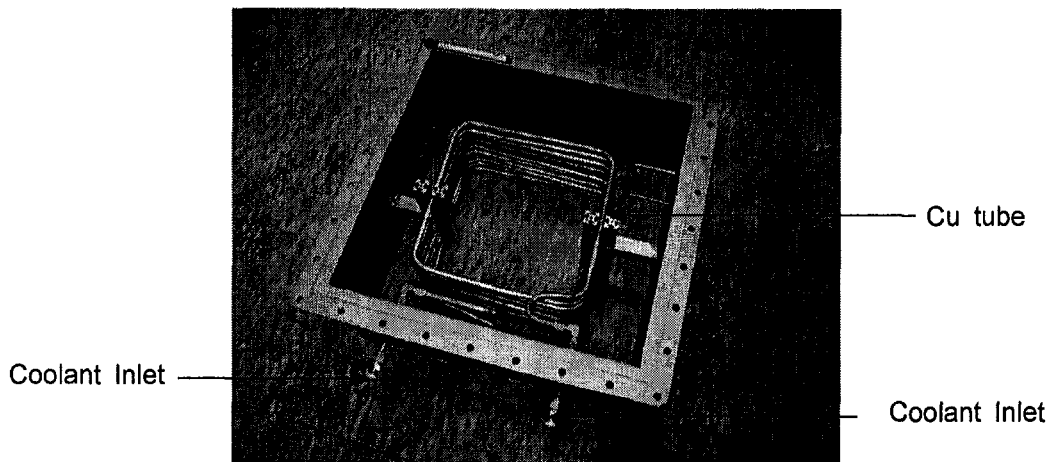
(b) Base Part (SUS)



(c) Sensor Part (Al)



(d) Heating Plate (Cu)



(e) Heat Exchanger Part

그림 7.1.34 주시험부의 부품

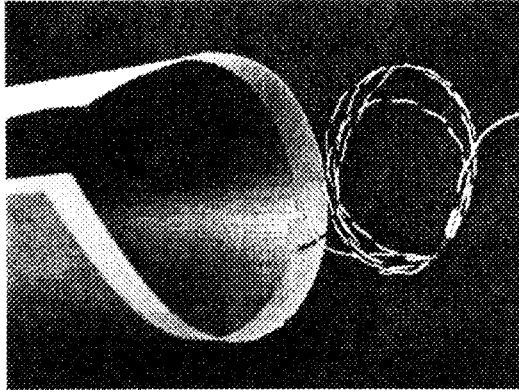


그림 7.1.35 Plate type heat flux sensor

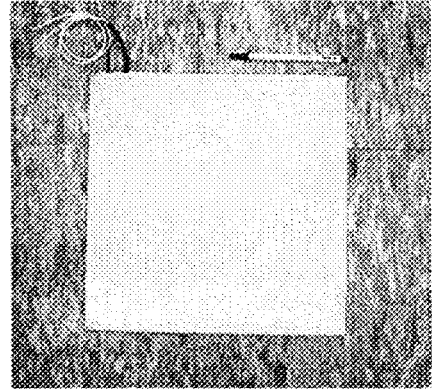


그림 7.1.36 Plate type sub-heater

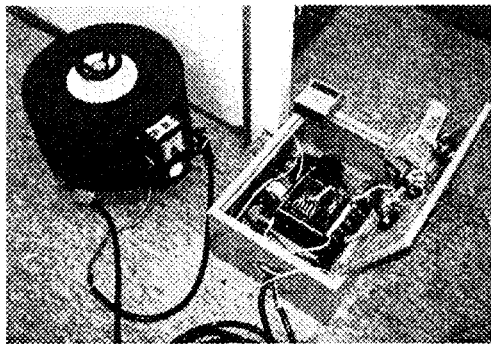


그림 7.1.37 Slidacs and relay

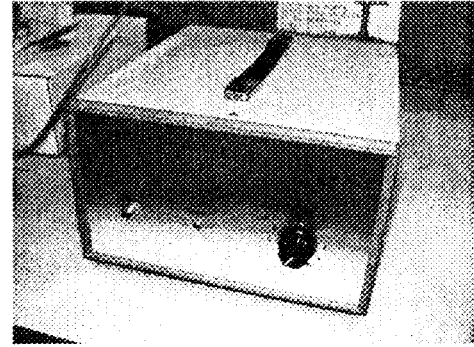
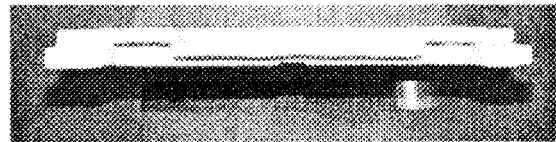
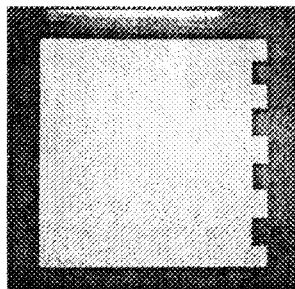


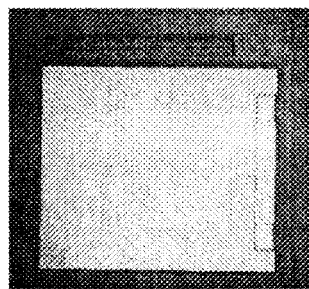
그림 7.1.38 Heater controller



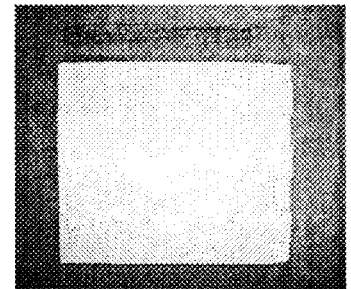
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 7.1.39 Insulation board

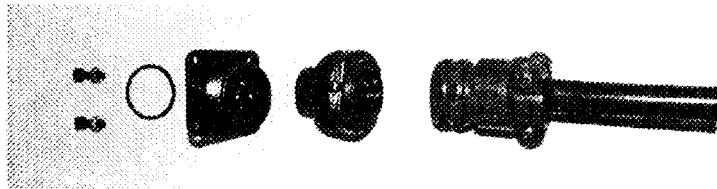
그림 7.1.37은 구리블록에 삽입된 sheathed heater에 전원을 안정적으로 공급하기 위한 슬라이더스와 relay를 나타낸다. 그림 7.1.38은 구리블록 하단에 설치된 보조 heater의 전원을 on/off 시키면서 상단으로부터의 열누설량을 알 수 있도록 장치된 heater controller이다. 이 열누설량은 보조 heater에 입력되는 전력값을 평균하여 구할 수 있다.

그림 7.1.39는 주시험부의 바닥면에 삽입되는 단열재의 종류를 나타낸다. 주시험부의 Base 부분에는 sheathed heater가 삽입되기 때문에 고온에 견딜 수 있고, 밀도가 높은 단열재가 요구된다. 이를 위하여 silica가 함유된 고온용 단열재보드를 구입하여 그림 7.1.39와 같이 가공하였으며, 이는 구리블록의 바닥면에 총 3개 사용된다. 또한 구리블록의 가장자리 부분에도 단열재를 감싸 주시험부의 횡방향 열누설을 최소화한다.

그림 7.1.40은 주시험부에 사용되는 진공용 connector를 나타낸다. 이는 주시험부에 helium gas를 채우는 경우 이 기체의 누설을 막기 위하여 주시험부의 벽면(스테인리스 재질)을 관통하여 sheathed heater에서 인출되는 lead 선과 보조히터 및 판형 열유속센서에서 인출되는 lead선을 진공용 connector에 납땜하여 연결하는 구조를 갖는다. 그림 7.1.41은 볼트와 너트를 이용하여 진공용 connector를 주시험부의 base에 결합한 형태를 보여준다. 그림에서와 같이 단열재의 일부분은 lead선이 용이하게 움직일 수 있도록 부분적으로 조각하여 떼어낸 형태로 만들어져 있다. 본 연구에서는 총 6개의 진공용 connector가 사용되었으며, 4개의 connector는 sheathed heater에 연결되며, 나머지 2개의 connector는 그림 7.1.41과 같이 사용된다. 그림 7.1.41은 진공용 connector가 각각 sub-heater와 판형 heat flux sensor에 연결된 모습을 나타낸다. 그림 7.1.42(a)는 이 진공용 connector를 주시험부의 base에 결합한 모습을 보여준다. 그림 7.1.42(b)는 base의 단열재 위에 판형 열유속센서와 가장자리에 단열재가 나란히 놓인 모습이다. 그림 7.1.42(c)는 그림 7.1.39(d) 단열재를 그림 7.1.42(b) 조립상태 위에 놓은 모습이다. 가장자리의 단열재는 2 inch 보다 높게 만들어 1 inch 두께의 단열재 2개와 단열재 사이에 놓인 열유속센서 및 판형히터 높이만큼의 합과 동일한 높이가 되도록 가공하여 조립한다. 총 높이는 56 mm 이다. 그림 7.1.42(d)는 그림 7.1.39(b) 단열재를 그림 7.1.42(c) 조립

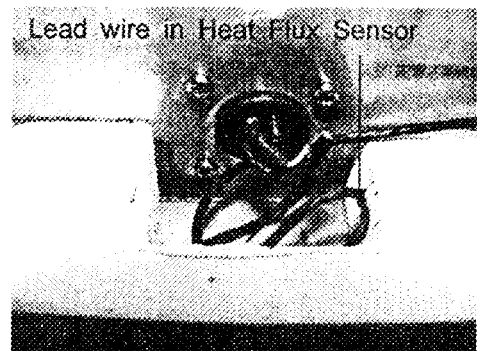
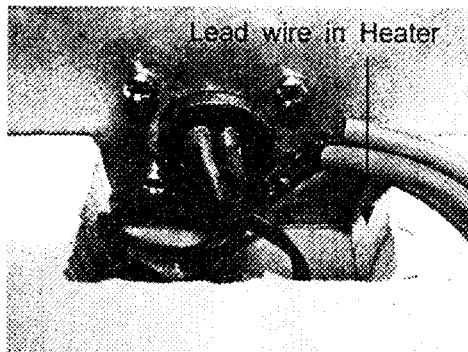


(a) Front View



(b) Rear View

그림 7.1.40 주시험부의 connectors

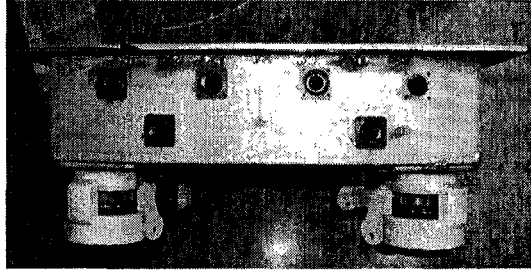


(a) Lead wire in Sub-Heater  
Sensor

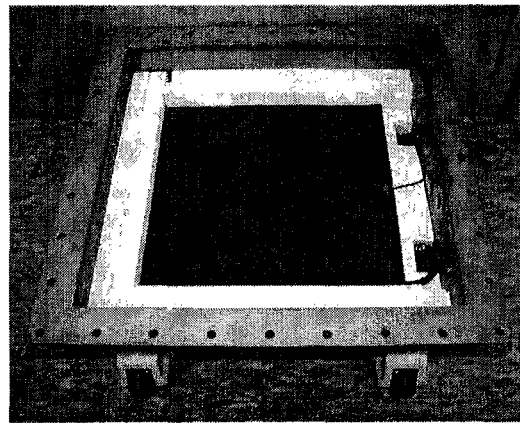
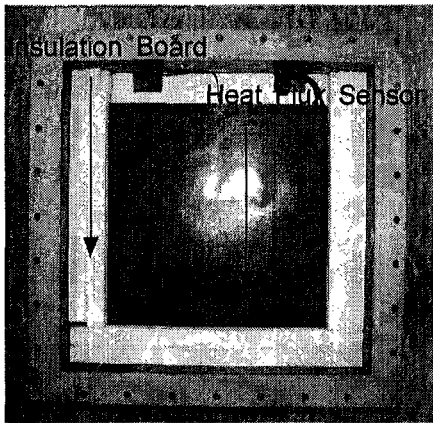
(b) Lead wire in Heat Flux  
Sensor

그림 7.1.41 주시험부의 connectors

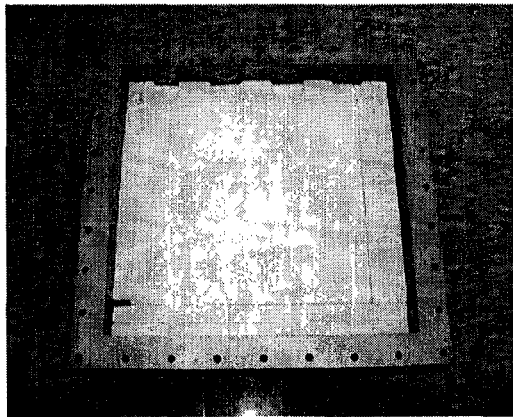
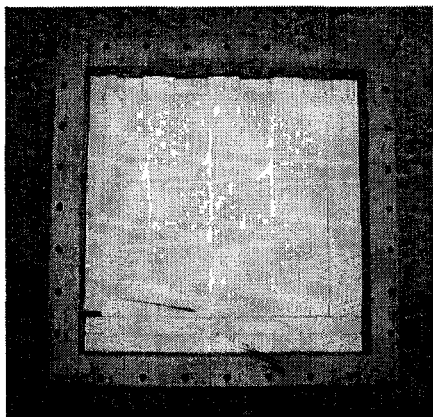
Connector



(a) Lead wire Connector



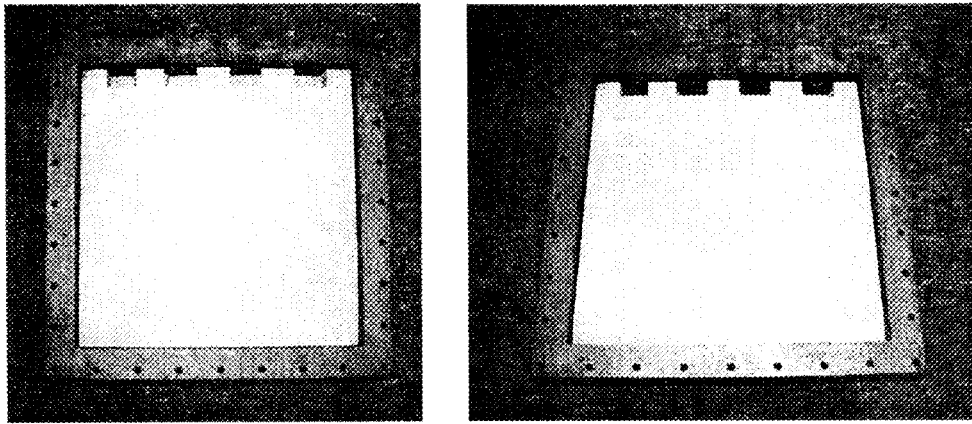
(b) Heat Flux Sensor with Insulation Panel



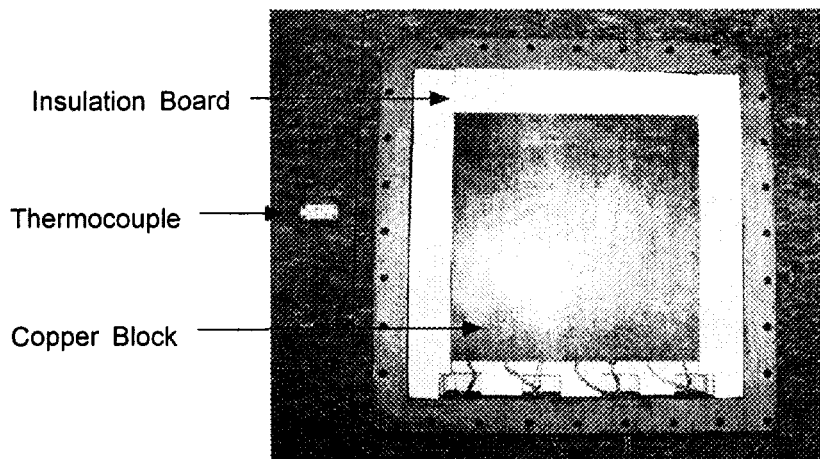
(c) Insulation Panel - Middle Part

그림 7.1.42 주시험부의 base

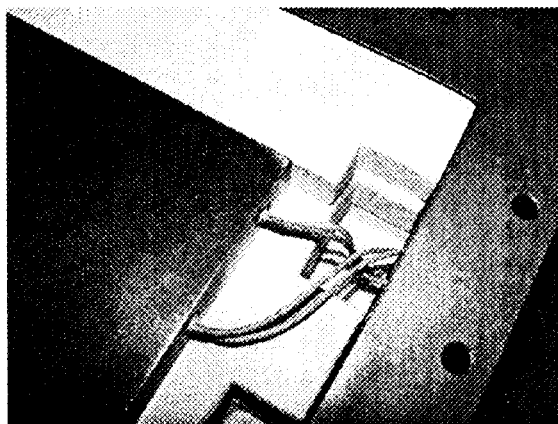




(d) Insulation Panel - Upper Part



(e) Copper Block in Main Test Section



(f) Copper Block in Main Test Section - Detailed

그림 7.1.42 주시험부의 base

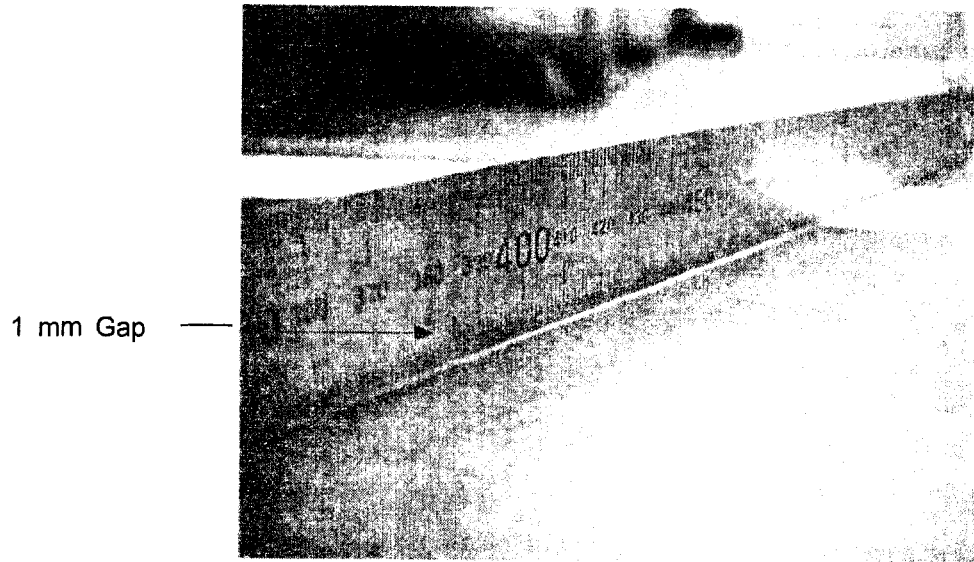
상태 위에 놓은 모습이다. 그림 7.1.42(e)는 그림 7.1.42(d)까지 조립된 상태에 7개의 sheathed heater가 삽입된 구리블록을 얹어놓고 가장자리에 동일두께의 단열재를 놓은 모습이다. 이 때 구리블록의 온도를 측정하기 위하여 지름 2 mm의 크기를 갖는 고온용 sheathed 열전대가 사용된다. 이는 구리블록에 지름 2.1 mm의 hole을 8 mm 깊이로 가공한 후 가장자리에 놓인 단열재에도 2 mm 내외의 hole을 가공한 후 고온용 sheathed 열전대를 주시험부의 밖에서 단열재의 hole을 지나 구리블록에 삽입하는 형태가 된다. 그림 7.1.42(f)는 이렇게 조립된 구리블록과 단열재의 상태를 근접촬영한 것으로 단열재의 높이가 base의 높이에 비해 약 1 mm 정도 낮은 것을 육안으로 구분할 수 있다.

그림 7.1.43(a)는 주시험부의 구리블록 윗면과 이에 조립된 알루미늄 블록과의 사이에 해당하는 1 mm gap을 효과적으로 보여주기 위한 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 곧은 steel 자를 알루미늄 블록이 얹어지는 플랜지의 가장자리 면에 놓으면 1 mm gap을 유지함을 볼 수 있다. 그림 7.1.43(b)는 구리블록의 가장자리에 놓인 단열재와 steel자 간에 발생하는 간격이 그림자로 확인되는 것을 알 수 있다.

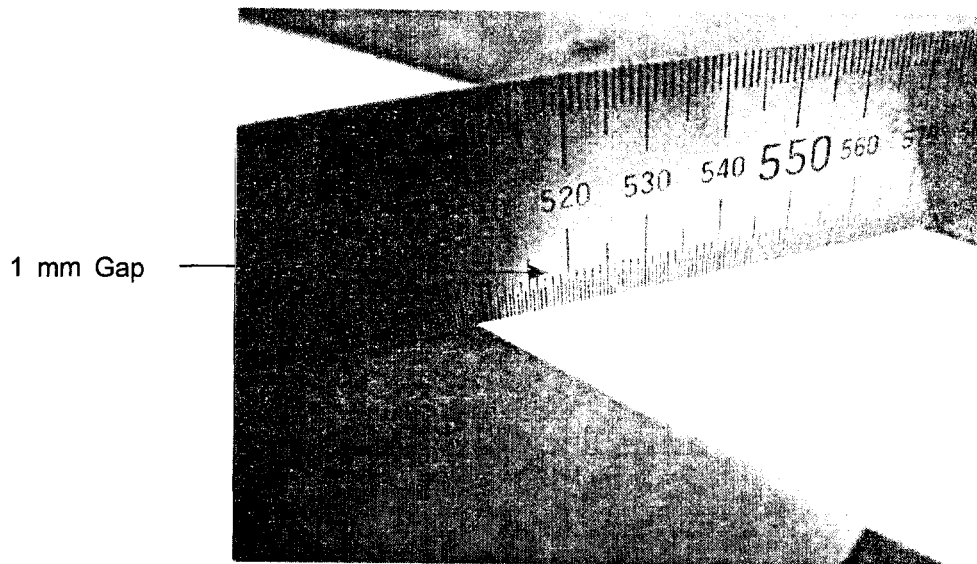
그림 7.1.44(a)는 이렇게 조립된 주시험부의 전체적인 모습으로 base 부분에 알루미늄 블록(그림 7.1.34(c))과 열교환기부(그림 7.1.34(e)) 및 cover plate(그림 7.1.34(a))가 차례대로 조립된 모습을 보여준다. 그림 7.1.44(b)는 열교환기부를 cover plate를 통해 자세히 본 모습이다.

#### (나) 열유속 측정장비

본 연구에서 사용하는 열유속 측정장비는 열유속센서, 신호증폭기(signal amplifier), 오실로스코프 및 data logger이다. 이 중에서 열유속센서와 증폭기는 그림 7.1.2, 3과 같이 미국 Vatell사의 것을 구입하여 사용하였다. Vatell사의 열유속센서는 미세 기전공학(MEMS, Micro Electro-Mechanical Systems) 방법으로 제작된 박막의 센서를 실린더 모양의 Nickel housing 앞에 부착하여 제작한 형태의 것이다. 열유속센서의 가장자리에는 온도가 변화하면 저항이 변화하는 RTS(Resistance Temperature Sensor)가 있기 때문에 온도측정이 가능하다. 일반적으로 상용 열유속센서

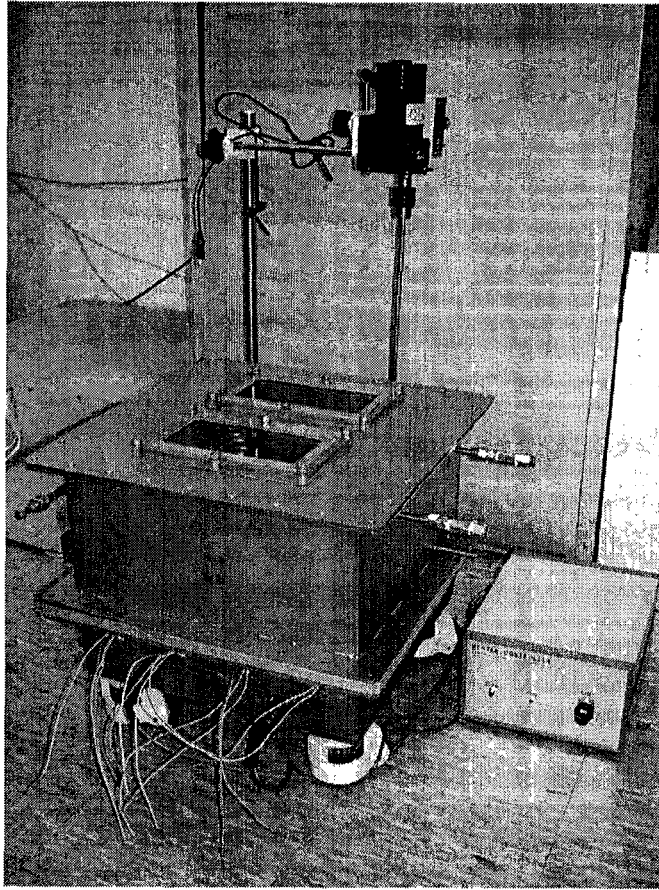


(a) 1 mm gap above copper block in main test section

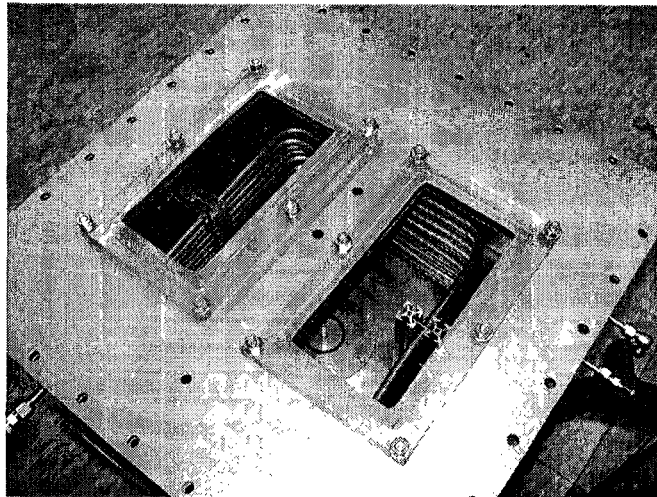


(b) 1 mm gap above copper block in main test section

그림 7.1.43 주시험부의 1mm gap in main test section



(a) Main Test Section



(b) Sight Glass of Main Test Section

그림 7.1.44 전도성 heat flux 센서의 검정시설

는 0.5~수 mm 단위의 두께를 가지는데 반하여 이 제품은 수  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖기 때문에 열유속센서가 가지는 두께에 의한 열저항을 최소화할 수 있는 장점을 가지고 있다.

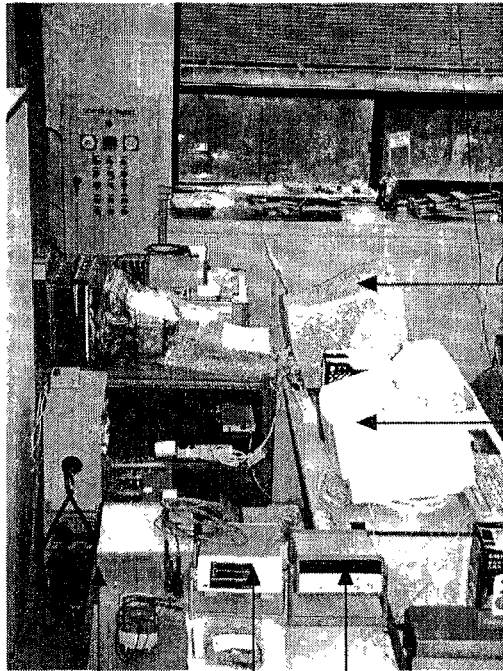
열유속센서는 센서의 상단과 하단의 온도차에 비례하는 열유속을 나타내는데 이는 박막의 두께에 따라 열저항이 증가하기 때문에 박막두께가 얇으면 얇을수록 좋고 응답속도도 빠르며 sensitivity가 높게 된다. 그러나 박막두께가 얇으면 박막간의 온도차가 크지 않기 때문에 sensitivity는 상대적으로 작아지게 된다. 따라서 두께와 sensitivity간의 조화를 이룰 수 있도록 사용자의 상황에 맞는 열유속센서를 택할 수 있는 전문성이 필요하다.

그림 7.1.2는 Vatel사의 열유속센서를 나타낸다. 그림 7.1.2(a)는 MEMS로 제작된 열유속센서의 표면을 볼 수 있으며, 기전력 (emf, electro motive force) 신호를 출력하기 위한 Lemo connector(통신용 connector)가 바로 옆에 나타나 있다. 그림 7.1.2(b)는 열유속센서 구입시 열유속센서가 플라스틱 케이스에 포장된 모습을 나타내고 있다. 고온, 고열유속 조건에서 사용하는 열유속센서의 경우 열유속센서 자체를 물을 이용하여 냉각시켜야 하는 경우도 있으며, 본 연구에서 사용한 열유속센서는 이런 냉각 없이 표면온도가 약 650~800  $^{\circ}\text{C}$  인 조건에서도 사용할 수 있다.

그림 7.1.3은 그림 7.1.2의 열유속센서에서 나온 기전력 값이 매우 작기 때문에 이를 증폭하여 오실로스코프 혹은 data logger로 나타내기 위한 신호증폭기이며, 최대 5,000배의 Gain 값을 가지고 있다. 오실로스코프는 Tektronix사의 11403A모델을 사용하였으며, data logger는 Keithley사의 DAS-TC와 Agilent사의 34970A모델을 사용하였다. 그림 7.1.45(a)는 본 연구에서 사용된 data logger, power meter, heater controller에 대한 사진이다. 그림 7.1.45(b)는 그림 7.1.45(a)의 각 측정장비로 연결된 power line과 PC 2대로 연결되는 신호선을 나타내고 있다.

#### (다) 항온실 및 항온공기 공급기

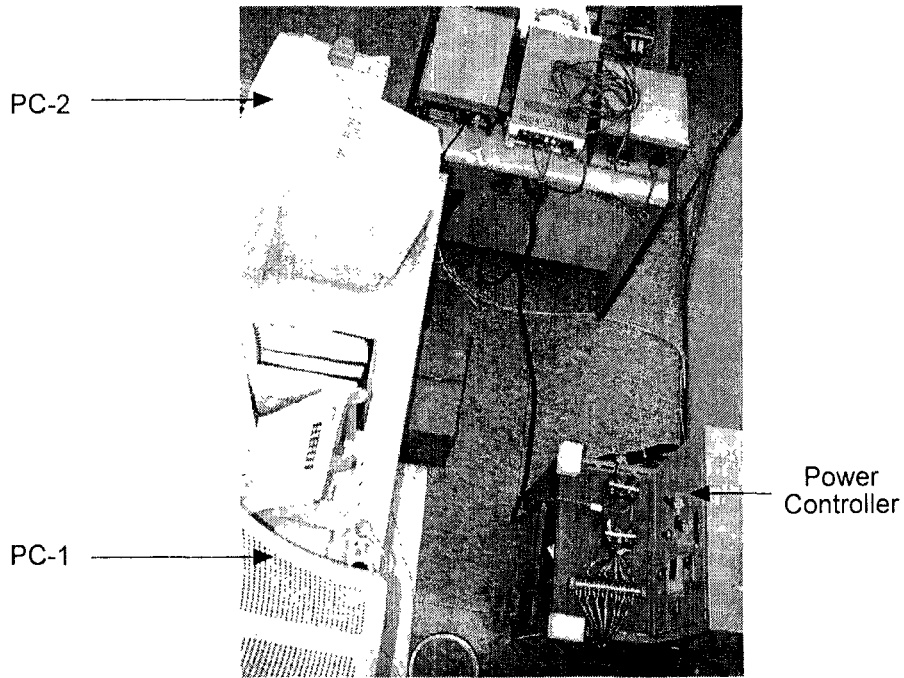
앞에서 언급한 KEM의 경우 전도방식의 열유속 보정장치를 사용하며



PC-1

PC-2

Heater Controller    Power Meter    Data Logger



PC-2

PC-1

Power Controller

그림 7.1.45 Data logging system

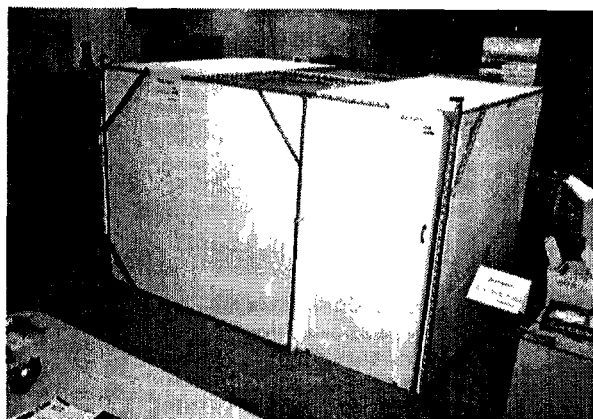
이는 항온을 유지하고 있는 챔버 내에서 그 보정을 실시하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라 본 연구의 보정장치도 이와 유사한 방법을 사용하였다. 그림 7.1.44에서 보는 바와 같이 각각의 크기가 폭×길이×두께 = 900 mm×1800 mm×50 mm인 스티로폼과 앵글을 사용하여 간이챔버를 제작하였으며, 이 챔버 내의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 항온공기 공급기를 제작하였다.

그림 7.1.46(a)와 같이 간이챔버는 폭×길이×높이=1900 mm×2700 mm×1800 mm의 크기로 제작되었다. 이는 규격화된 스티로폼을 길이 방향으로 3장, 폭 방향으로 2장을 접착하여 붙이고, 천장은 2 mm의 아크릴을 이용하여 채광이 유리하도록 제작하였다. 또한 슬라이드식 도어를 부착하여 실험장치가 챔버 주위와 완전히 격리되도록 하고, 사용의 편리성을 증대시켰다. 그림 7.1.46(b)는 간이챔버 내에 일정온도의 공기를 공급하기 위한 항온공기 공급기이다. 이는 창문형 에어컨과 온도조절식 히터를 결합하여 제작한 것으로 에어컨의 토출구에 히터의 흡입구에 부착하고, 히터의 토출구는 간이챔버의 한쪽 귀통이에 연결된 주름관을 통해 간이챔버 내로 일정온도의 공기가 계속적으로 공급되도록 제작하였다. 창문형 에어컨의 경우 과부하시 누수의 위험이 있기 때문에 이를 방지하기 위하여 하단에 에어컨용 물펌프를 부착하고, 일정수위 이상이 되면 호스를 통해 배수구로 물을 배수시키도록 제작하였다. 그림 7.1.46(c)는 항온공기 공급기에서 항온챔버 내부로 연결된 주름식 단열관을 보여주고 있다. 이는 항온챔버의 한쪽 구석 상방향에서 주입되어 챔버 내부의 중심방향으로 공기의 유동이 흘러가는 형태를 갖고 있다. 그림 7.1.46(d)는 주시험부의 열교환기 부분에 저온의 물을 공급하기 위한 항온 Bath를 나타낸다.

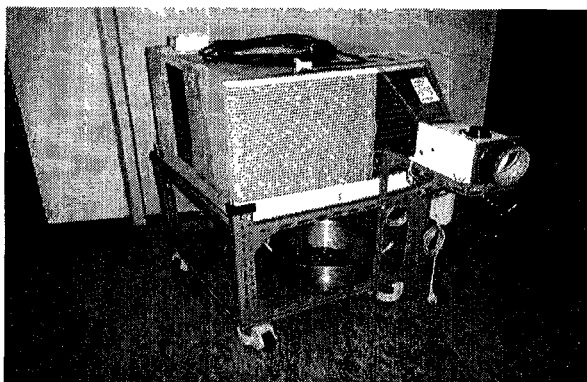
### (3) 열유속 측정방법 및 결과

#### (가) 간이 열유속 측정시험

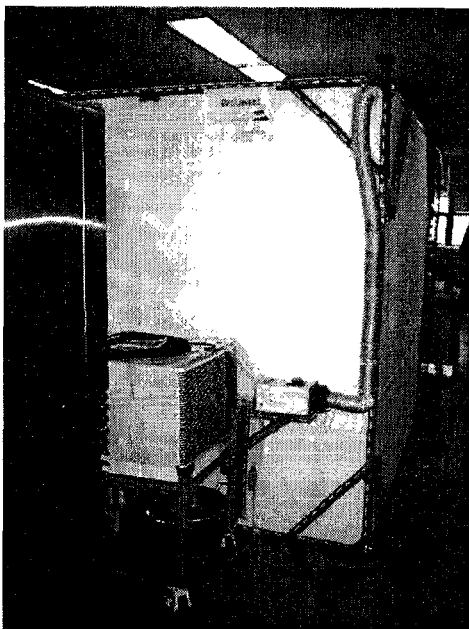
그림 7.1.47, 48과 같이 열유속센서(HFM6-C/H), 신호증폭기(AMP-6), 오실로스코프 및 radiation heat source로 구성된 실험장치를 구성하여 열유속 측정을 수행하였다. Vatel사의 열유속센서를 구입하면 그림 7.1.49와



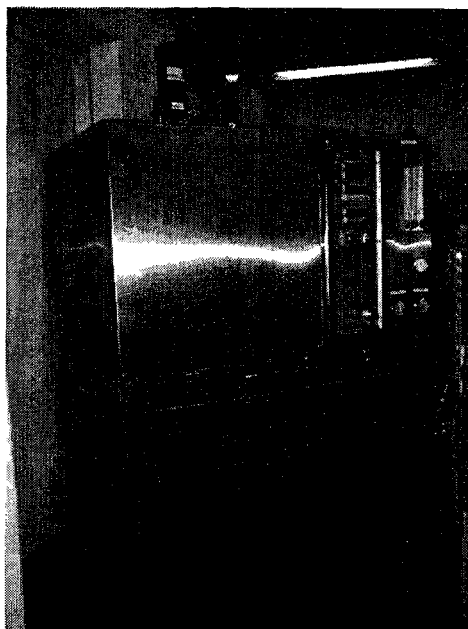
(a) Constant Temp. Room



(b) Air temperature Controller



(c) Const. Temp. Room (side view)



(d) Const. Temp. Bath

그림 7.1.46 Constant temperature room and air-temperature controller



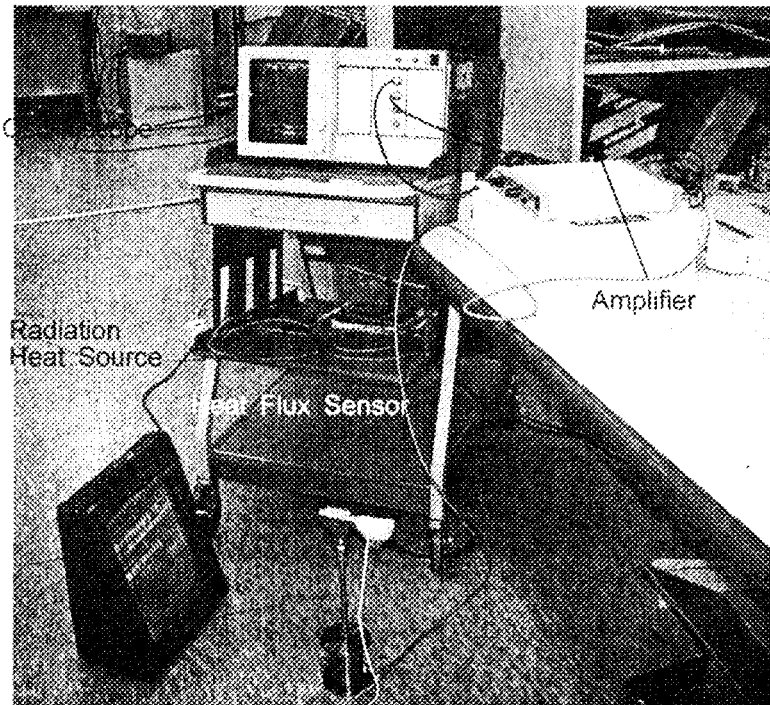


그림 7.1.47 Vatel HFM6-C/H와 AMP-6H를 사용한 heat flux의 측정

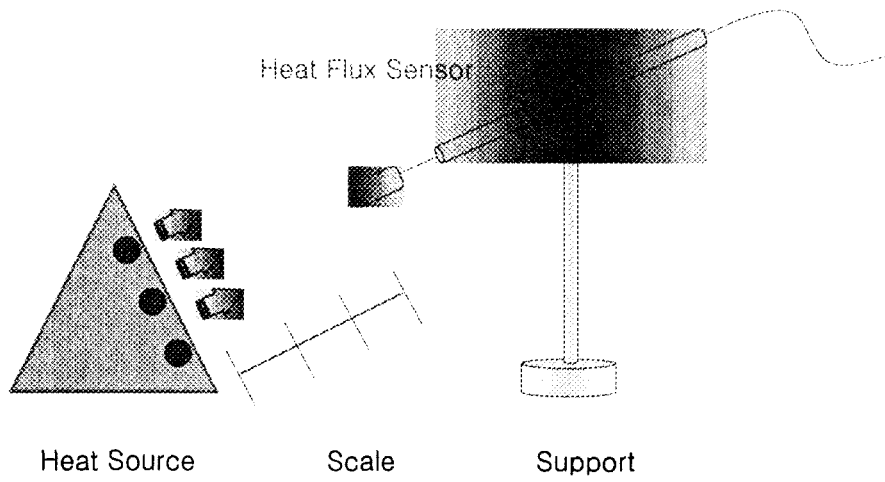


그림 7.1.48 Heat flux의 측정 도식도

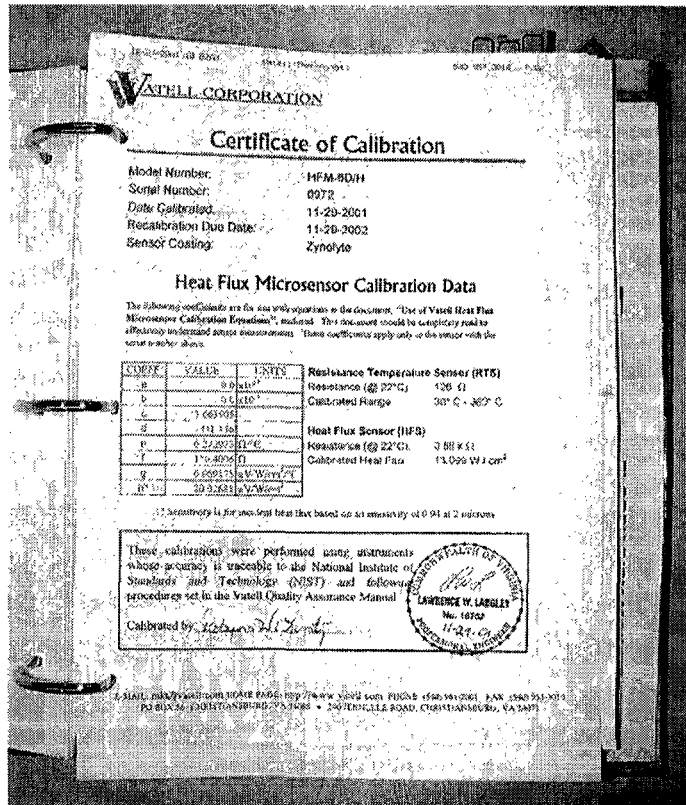


그림 7.1.49 Heat flux의 측정 sheet

같은 Vatell사의 calibration sheet를 받게 된다. 이 자료에는 Vatell사에서 자체적으로 열유속센서를 보정하는 방법에서 도출되는 여러 변수들의 값을 제시하고 있다. 이는 각 센서마다 다른 값을 갖기 때문에 보관에 주의하여야 한다.

그림 7.1.48은 그림 7.1.47에 나타난 장치에서 열유속센서와 radiation heat source 부분을 확대한 개략도로서, heat source로부터 거리가 멀어짐에 따라 주위로의 열손실에 의하여 열유속 출력값이 감소하게 되는 것을 실험적으로 검증하고 열유속센서의 사용방법을 알기 위한 것이다.

열유속센서의 보정방법은 다음과 같다.

1. RTS를 0으로 조절한다.

where RTS : Resistance Temperature Sensor

2. RTS의 가변저항기 knob을 조절하여 출력값을 0으로 만든다.
3. 디지털온도계를 이용하여 실내의 온도( $T_o$ )를 측정한다.

$$R_o = e \cdot T_o + f$$

where  $T_o$  : Ambient temperature

e, f : constants

4. 열유속센서를 실내 분위기에 방치하여 실내온도와 같게 만든 다음, 출력을 모니터링 하면서 신호증폭기 앞부분에 설치된 가변저항기 knob을 조절하여 출력값이 0이 되도록 한다.
5. Heat source를 이용하여 열유속을 측정한다.
6. 1분 경과 후 출력값을 측정한다.
7. RTS의 저항값을 계산한다.

$$R = V_{RTS} / (I_{RTS}) (G_{RTS}) + R_o$$

8. 이 저항값을 이용하여 온도를 계산한다.

$$T = a \cdot R^3 + b \cdot R^2 + c \cdot R + d$$

where a, b, c, d : constants

9. 열유속을 계산한다.

$$q'' = [ V_{RTS} / G_{RTS} ] / [ g \cdot T + h ]$$

where g, h : constants

실험결과는 표 7.1.1과 같으며 그림 7.1.50은 열유속센서의 위치에 따라 열유속값이 변화하는 것을 나타내고 있다. Radiation source로부터의 거리가 0인 지점은 열유속센서가 열원에서 가장 근접한 위치이며, radiation source로부터 멀어지면 센서주위로 누설되는 열이 증가하기 때문에 열유속센서로 측정되는 열유속값은 감소하게 된다. 거리에 따른 열유속의 감소는 4차 polynomial 곡선을 따라 감소하는 것으로 분석할 수 있다.

표 7.1.1 Radiation source의 heat flux 계산

Distance [mm]	0	10	20	30	40
VRTS [mV]	900	865	834	765	700
VHFS [mV]	250	193	170	152	136
Ro [ $\Omega$ ]	126.68	126.68	126.68	126.68	126.68
GHFS	5784	5784	5784	5784	5784
GRTS	494.5	494.5	494.5	494.5	494.5
R [ $\Omega$ ]	144.88	144.17	143.54	142.15	140.83
T [ $^{\circ}$ C]	89.68	87.09	84.79	79.68	74.87
q" [ $W/cm^2$ ]	<b>1.6478</b>	<b>1.2809</b>	<b>1.1351</b>	<b>1.0290</b>	<b>0.9329</b>

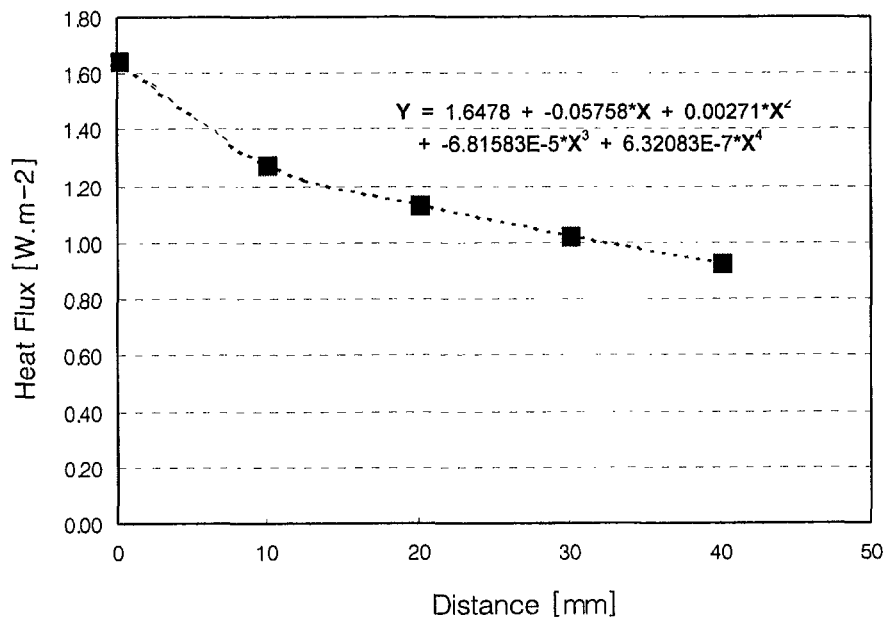


그림 7.1.50 Heat flux 측정

## 기호설명

a	Constant	$[\times 10^{-5}]$
b	Constant	$[\times 10^{-3}]$
c	Constant	
C	Heat capacity	[J/kg.K]
d	Constant	
e	Constant	$[\Omega/^{\circ}\text{C}]$
f	Constant	$[\Omega]$
g	Constant	$[\mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2/^{\circ}\text{C}]$
G	Amplifier gain	
h	Constant	$[\mu\text{V}/\text{W}/\text{cm}^2]$
I	Excitation current	[A]
k	Thermal conductivity	[W/m.K]
L	Length	[m]
p	Pressure	[kgf/cm <sup>2</sup> ]
q	Heat flow rate	[W]
q''	Heat flux	[W/cm <sup>2</sup> ]
R	Electrical resistance	$[\Omega]$
T	Temperature	[ $^{\circ}\text{C}$ ]
V	Voltage	$[\mu\text{V}]$

## 하첨자

o	Ambient temperature
p	Static pressure

## 그리이스어

$\rho$	Density	[kg/m <sup>3</sup> ]
--------	---------	----------------------

## 2. 국소 유속 센서(local velocity sensor) 측정 실험

### 가. 센서 설계의 개요

국소 유속 센서(local velocity sensor)는 KALIMER core 번들 주변을 흐르는 유체의 유속을 측정하거나 중간열교환기(IHX)의 튜브 주변을 흐르는 유체의 유속을 측정하기 위한 것으로서 측정 결과는 유체 관련 장치를 설계하는데 필요한 전산 코드 검증에 활용된다.

센서의 종류는 여러 가지 형태로 제작이 가능한데 측정 정밀도에 따라 혹은 측정 유속의 흐름 방향에 따라 정해진다. 측정 정밀도에 따라서는 Core 혹은 증기발생기 전열관 tube bundle의 국소 유속을 측정하기 위하여 소뿔 속에 전극(probe)이 닫게 하여 정밀히 유속 측정을 할 수 있는 센서형과 열교환기 혹은 core bundle 튜브 속에 전극을 넣고 소뿔에 직접 전극이 닫지 않게 하여 engineering 수준으로 측정할 수 있는 센서가 있다.

한편, 유속 흐름 방향에 따라 만들어지는 경우, 튜브 속에 장착되는 자석(magnet)의 배치와 자석 양편에 놓이는 전극(probe)의 배치 방향에 따라 유체 흐름 방향의 유속을 측정할 수 있다.

사용될 수 있는 자석은 고온용의 자석이 필요하며, 사용에 적합한 자석은 일반적으로 alnico계열의 자석을 사용함이 적절하다. 그림 7.2.1은 alnico 자석의 자기 특성이다.

열교환기에 사용될 센서는 열교환기 튜브 크기가 비교적 커서 제작이 용이하다고 보나 core 번들에 사용될 국소 유속 센서의 경우는 번들 튜브 크기가 약 8mm 이하이어서 제작이 매우 힘들다.

### 나. 센서의 원리

#### (1) 측정 센서의 적용

그림 7.2.2에서 보여주는 Electro-magnetic 측정 센서는 국소 hydro-dynamic 특성인 axial(distribution of local velocity with perimeter and length of the fuel pin), transverse(mass transfer in the inter-pin space), axial-transverse 조합 흐름을 측정하기 위해서 사용된다[1.7.1].



Steady state와 transient 운전조건하에서 낮은 흐름 속도, 강제 혹은 자연 대류가 혼합된 상태의 흐름을 측정한다. 경우에 따라서는 튜브 주변의 각도  $0 < \phi < 360^\circ$  에 따라 측정된다.

**- Alnico(cast)**

Anisotropic Alnico	Density g/cm <sup>3</sup>	Maximum Energy Product BH(max) MGO	Residual Induction Br Gauss	Coercive Force Hc Oersteds	Intrinsic Coercive Force (Hci) Oersteds	Max. Operating Temp., °C	Curie Temp., °C
Alnico 5	7.3	5.5	12800	640	640	525	860
Alnico 8	7.3	5.3	8200	1650	1860	550	860

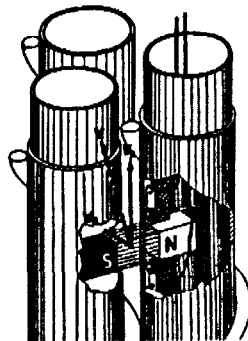
**-Alnico Magnet Size(WxHxL) Available to Use**

**1/4" x 1/4" x 1/2" or 1/4" x 1/2" x 1/2"**

It is produced by Master Magnetics, INC ([www.magnetsource.com](http://www.magnetsource.com))

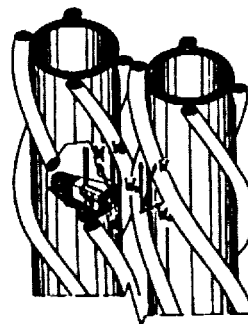
그림 7.2.1 주물형 Alnico 자석의 자기 특성

**Transverse or Axial Flow**



**-One pair of electrode reversed in flow direction**

**Transverse & Axial Flow**



**-Two pairs of electrodes in perpendicular directions**

**-Transverse(cross), axial(longitudinal), transverse and axial flow**

그림 7.2.2 핵연료 번들이나 중간 열교환기의 튜브에 사용되는 센서

- 자기장의 패턴

그림 7.2.3은 자기장 성분을 Hall-effect probe로 측정된 것으로써, 원통형 영구 자석(Cobalt-rare magnet)의 축방향의 성분  $B_z$ 을 자석의 중앙 부분에서 부터 최대 자기장을 나타내는 자기장 분포를 보여준다.  $r=2d$  에서의 자기장 세기가  $10^{-3}T$  (magnetism)에서  $r=0$  에서의 자기장 세기가  $0.044T$  (magnetism)까지 변하는 것을 알 수 있다.

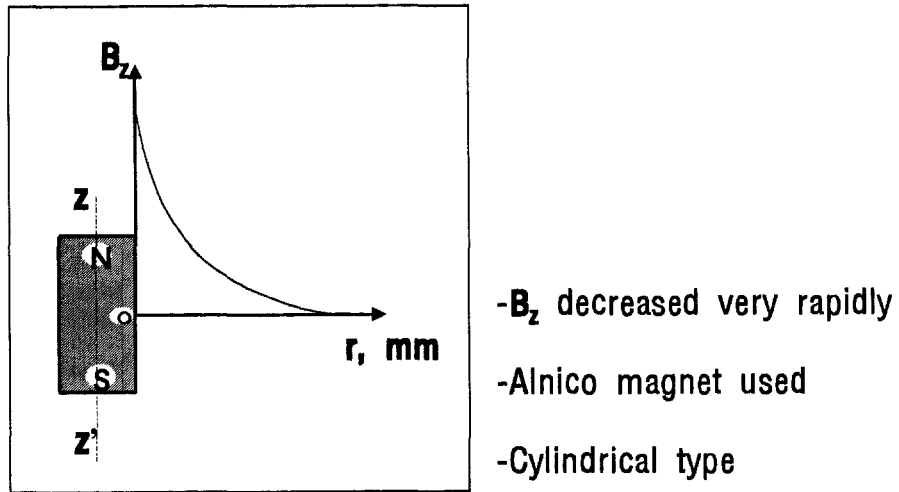


그림 7.2.3 축방향의 자기 분포도

- 원주형 튜브 주변의 압력 분포 특성

Magnetofluidmechanics에 의하면 electromagnetic pressure 구배가 있는 곳에서의 pressure 차이가 있다. 이 압력 drop은 magnetical과 mechanical 경계 조건하에서 Reynold number( $Re$ ;  $Re = Ud/\nu$ ), Hartmann number( $M$ ;  $M = B_0 d \left(\frac{\sigma}{\eta}\right)^{1/2}$ ), Stuart number( $N$ ) 에 의존한다. 만일 자기장이 일정하게 튜브에 수직으로 작용할 때 압력차는 pressure drag 계수값 ( $C_p$ )과 관계된다. 관계식은 다음과 같다.

$$C_p = \frac{2F}{\rho U^2 d}$$

$$F = \int_0^\pi \Delta P_{(\theta)} \cdot d \cdot \cos \theta \cdot d\theta$$

여기서,  $d$ 는 원통형의 지름,  $U$ 는 유체의 유속,  $\rho$ 는 유체의 밀도이다.

그림 7.2.4는 각도에 따른 transverse 자기장에서 원주형 연철봉 주변의 압력분포를 보여주고, 그림 7.2.5는 영구자석 주변의 압력분포를 보여준다. 이 결과의 비교는 자기장 속에서 일반적인 튜브 원주 주변의 각도에 따라 자기장의 변화에 따라 차이를 나타내지만 튜브가 영구자석일 때 튜브 원주 각도에 따라 자기장의 영향을 받지 않음을 보여준다. 즉, 측정하고자 하는 튜브 주변의 국소 유속을 측정할 때 국소 유속 측정 센서 주변으로부터 측정 신호에 영향을 줄 수 있는 외부 자기장의 영향을 받지 않음을 보여주는 결과이다.

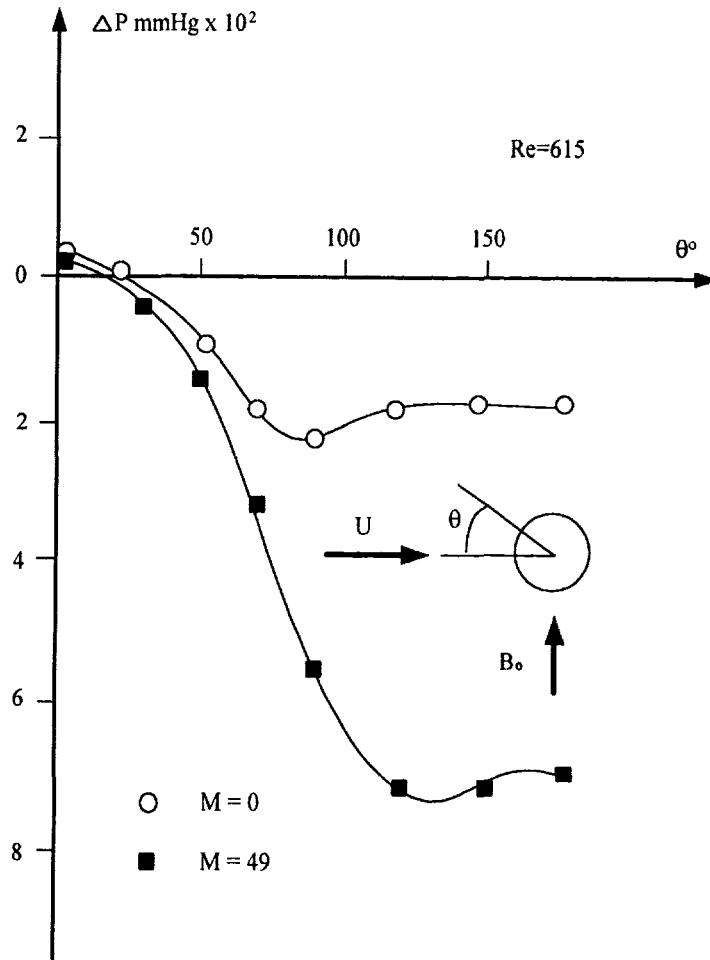


그림 7.2.4 원주 각도에 따른 횡축 자기장이 미치는 soft iron 원통형 주위의 압력

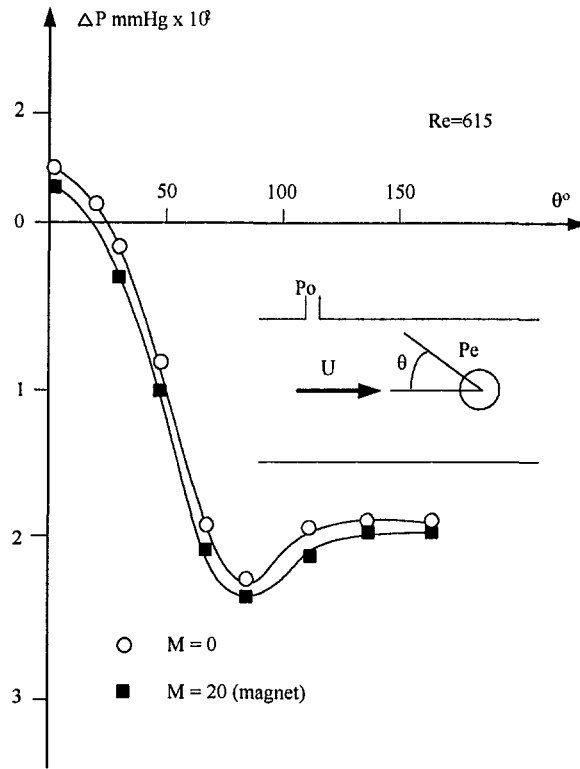


그림 7.2.5 원주 각도에 따른 원통형 영구 자석 주위의 압력

(4) 전기장에서의 전압

앞서 자기장에 대하여 개략적으로 언급하였다. 그림 7.2.6과 같이 annular vessel의 단면 속에 있는 원주형 자석에 유체가 수직으로 흐를 때 원주 각도에 따른 생성 전압에 대하여 언급한다. 원주형의 자석의 semi 원주( $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$ )를 따라 생성 전압은 다음의 관계를 갖는다.

$$V_{AA'} = \int_{\alpha=-\pi/2}^{\alpha=\pi/2} d V_{aa'}$$

여기서,  $d$ 는 지름,  $V$ 는 구간 전압,  $\alpha$ 는 원주의 임의의 각도이다.

즉, semi 원주의 전압은 작은 구간(segment) 전압의 합이 됨을 알 수 있다. 한편, 자석의 중앙부분의 축 방향에서 전기장의 세기는 다음의 관계를 갖는다.

$$E_M = \frac{dV_{ee'}}{dl}$$

여기서,  $l$  은 원통형의 축방향의 길이이다.

전기장에서의 세기는 거의  $E_M$ 과 상대적으로 같다. 따라서 원주 반경에 따라 전기장 세기  $E_r$ 은  $B_z(r)/u$ 의 비(ratio)와 같다. 즉,

$$E \approx u \cdot B$$

의 관계를 갖는다. 여기서,  $B$ 는 자기장의 세기,  $u$ 는 유체의 유속이다.

-Installed nanovoltmeter  
between two probes

- $V_{AA'}$  along a semicircle of  
diameter of cylindrical magnet

$$V_{AA'} = \int_{\alpha=-\pi/2}^{\alpha=\pi/2} dV_{aa'}$$

Defined  $aa'$ , segment voltage  
(1mm)

-Electric field  $E_M$  in mid(M) of  $ee'$   
(2mm)

$$E_M = \frac{dV_{ee'}}{dl}$$

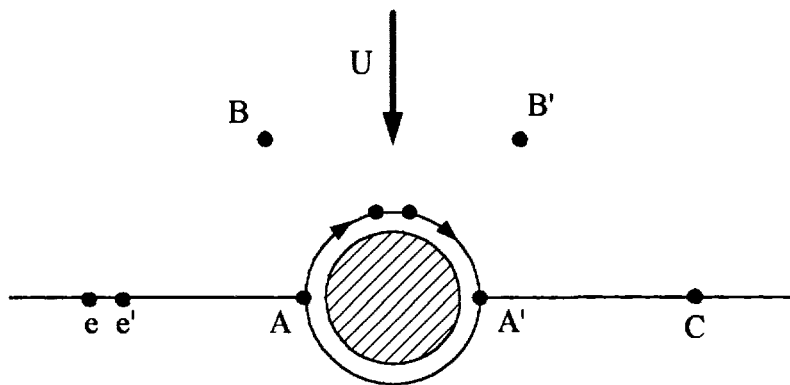
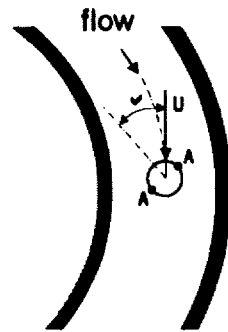
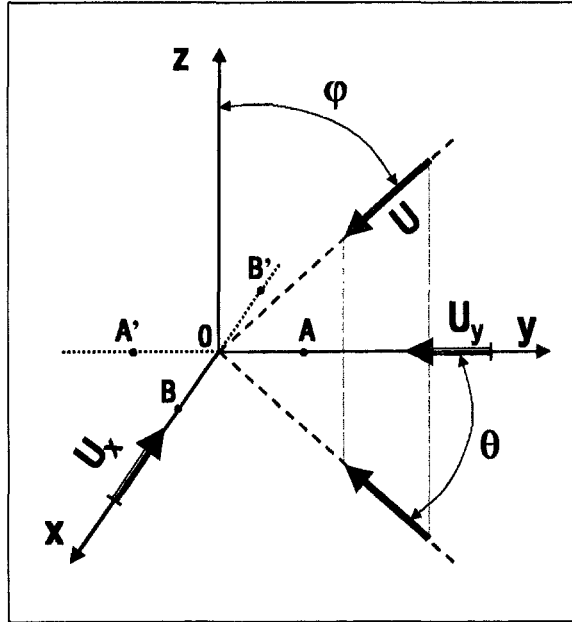


그림 7.2.6 Annular 용기 속을 흐르는 유체의 흐름과 생성 전압과의 관계

- 속도 크기 방향의 결정

그림 7.2.7은 국소 유속의 방향에 따른 성분 속도를 설명해준다.  $\theta$ 와  $\phi$  각도를 흐르는 유체의 속도  $|u|$ 는 각 방향의 속도 성분,  $u_x, u_y, u_z$ 의 합과 같다.



Local Velocity ;

$$|u| \begin{cases} u_x = u \sin \phi \sin \theta \\ u_y = u \sin \phi \cos \theta \\ u_z = u \cos \phi \end{cases}$$

Object ;

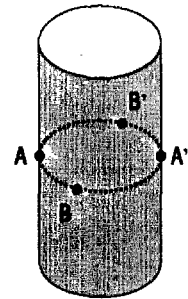


그림 7.2.7 속도 크기 방향의 결정

다. 국소 유속 측정 센서의 설계

- 유체 흐름 방향과 전극(probe)의 배치

그림 7.2.8은 2개의 튜브에 영구 자석을 설치하는 방법에 대하여 설명해 주고 있다. 이 사례는 튜브를 가로지르는 유체의 흐름을 측정하기 위한 것으로서 한 개의 튜브 속에 영구 자석을 설치하고 다른 한 개의 튜브 속에 영구 자석을 설치하여 자기장을 형성하게 하는 방법이다. 이 경우는 반드시 2개의 튜브 속에 있는 자석이 함께 있어야 한다. 그러나 2개의 영구 자석이 짝으로 있을 필요는 없다. 1개의 자석보다도 2개의 자석이 짝을 이룸으로써 더욱 큰 자기장을 형성할 수 있다고 판단된다. 이번 경우의 센서는 튜브의 수직 방향으로 흐르는 유속을 측정하기 방법이며 자석 주변에 설치된 전극(probe)의 배치 방법에 따라 유체의 흐름 방향의 속도를 측정할 수 있다. 따라서 튜브의 축을 따라 움직이는 유체의 유속을 측정할 때에는 전극(probe)를 튜브의 횡축 방향(axial direction)

배치한다.

그림 7.2.9와 그림 7.2.10은 종축과 횡축의 흐름 유속을 측정하기 위해 설계된 상세도이다. 자석은 튜브 길이 방향의 수직으로 배치하고, 배치된 자석의 바로 옆에 튜브의 길이 방향에 전극(probe)을 배치하거나 또는 튜브의 수직 방향에 배치함에 따라 측정하고자 하는 유체의 방향에 따른 흐름 속도를 측정할 수 있다. 전극(probe)은 튜브와 절연하여 설치하는 것이 바람직하다. 따라서 전극과 튜브 몸체와 닿지 않게 절연체로 감싸는 것이 필요하다. 이같은 방식은 전극과 측정하고자 하는 유체와 직접 닿게 하는 방법이며, 닿지 않게 설계하여도 된다. 이런 설계 방식을 따를 경우 측정하고자 하는 유체의 속도 측정치의 정밀도가 떨어질 것으로 보인다. 왜냐하면 전극의 간격과 간격 사이에 흐르는 유체에 미치는 자기장의 세기가 멀리 떨어진 효과가 있기 때문이다. 그림 7.2.11은 KALIMER core의 국소 유속을 측정하기 위한 계측 장치이며, 그림 7.2.12는 설계된 센서의 세부 제작도면이다.

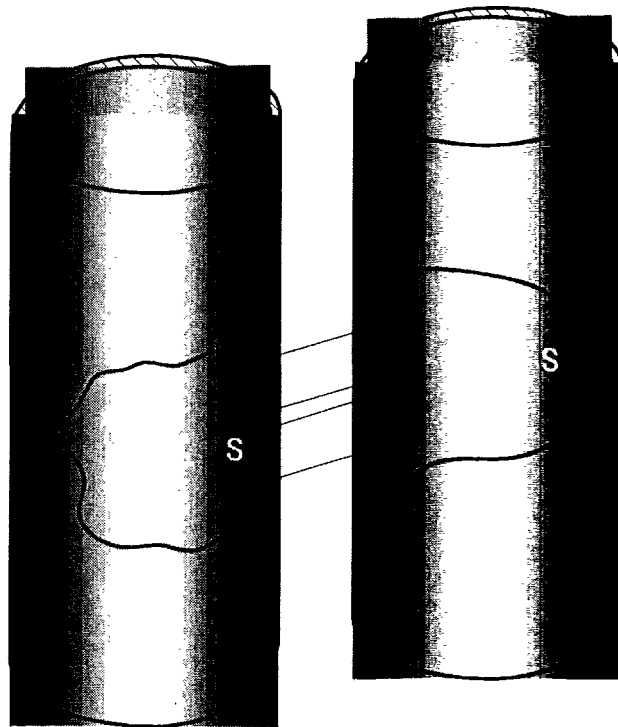
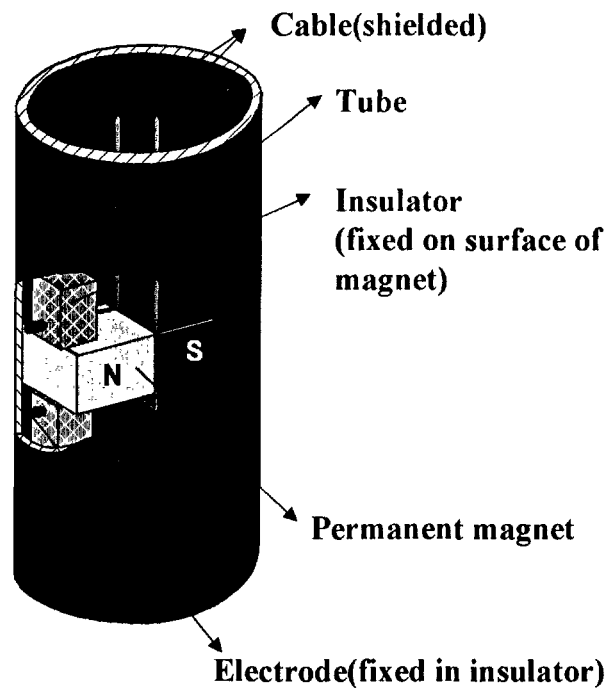
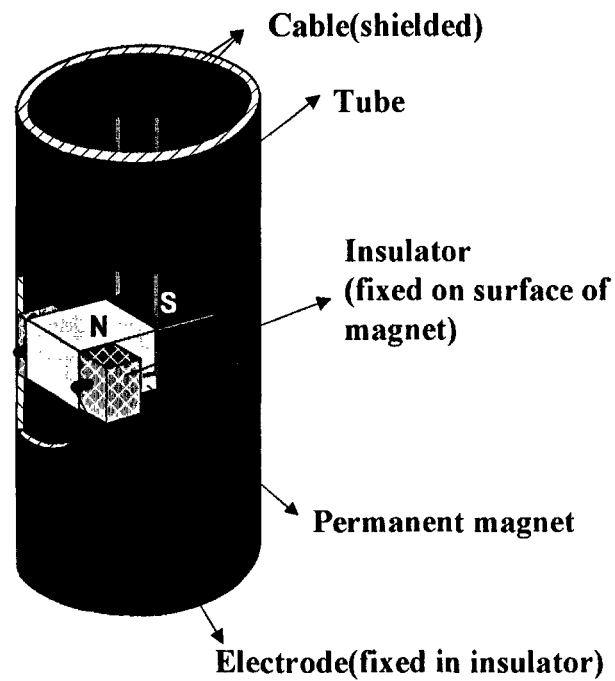


그림 7.2.8 횡축 흐름을 측정하기 위한 국소 유속 센서의 자석 배치 (사례)



**-One pair of electrode reversed in flow direction**

그림 7.2.9 횡축 흐름을 측정하기 위한 측정 센서



**-One pair of electrode reversed in flow direction**

그림 7.2.10 종축 흐름을 측정하기 위한 측정 센서



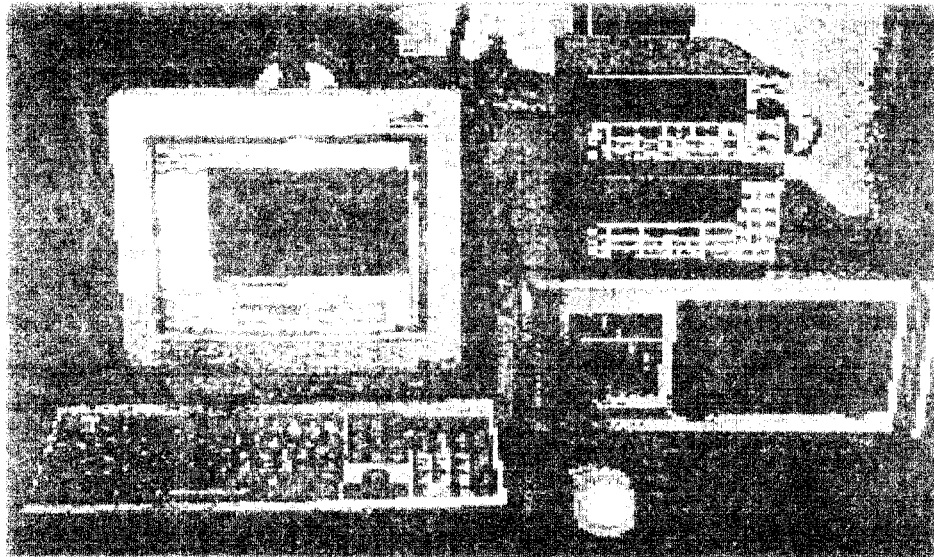


그림 7.2.11 신호 측정 장치

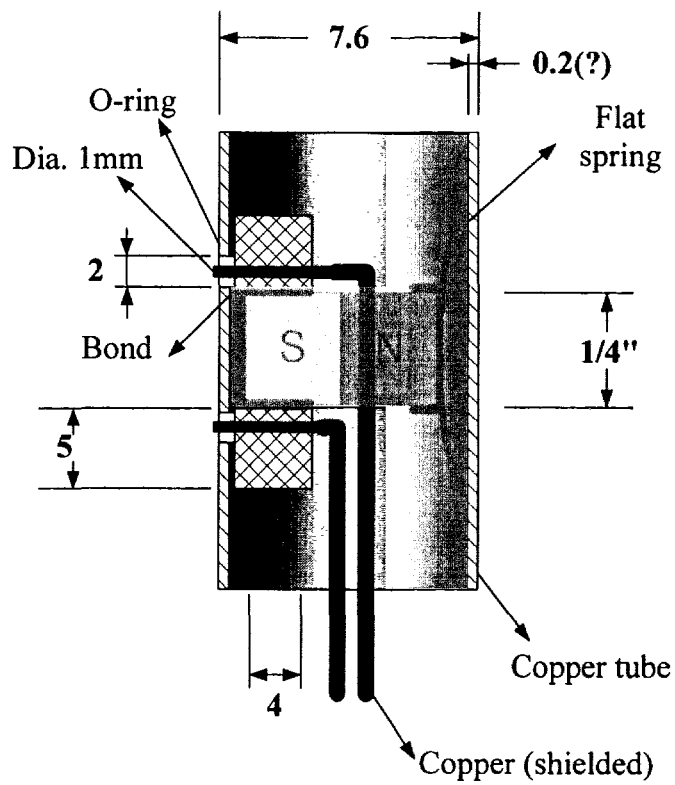


그림 7.2.12 횡축 흐름을 측정하기 위한 국소 유속 센서의 세부 제작 단면도(사례)

(6) 이동형 국소 유속 측정 센서

그림 7.2.13은 KALIMER core 튜브 속을 이동하면서 유속을 측정할 수 있는 이동형 국소 유속 측정을 하기 위한 센서의 제작 단면도이다. 이 센서는 주로 튜브 주변을 흐르는 유체의 속도를 정밀하게 측정하기 보다 대략적인 유체의 속도를 측정하는데 유용하다고 본다. 왜냐하면, 자석 옆에 붙어있는 전극(probe)이 측정하고자 하는 유체에 직접 닿지 않고 측정되기 때문에 정밀도가 떨어진 다. 그러나 튜브 주변의 유속 상태를 비교 측정하는데는 아주 유용하다고 판단 된다.

그림 7.2.14는 KALIMER core 튜브 속을 이동하면서 측정을 할 수 있는 이동형 국소 유속 측정 센서의 다른 제작 설계 도면이다.

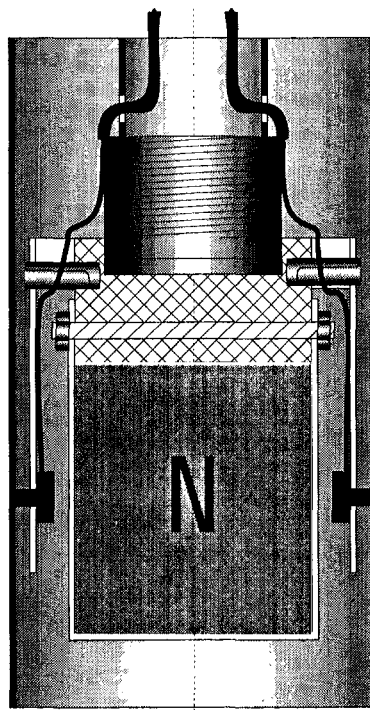


그림 7.2.13 튜브 주변 의 유속을 측정할 수 있는 이동형 국소유속센서의 상세 제작 단면도

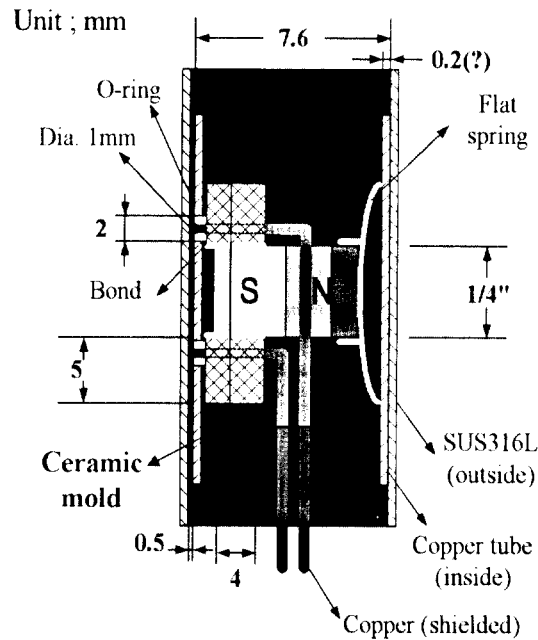


그림 7.2.14 튜브 속을 이동하면서 횡축 흐름을 측정할 수 있는 국소 유속 센서의 세부 제작 단면도(사례)

#### 라. 결론

- KALIMER core의 종축(axial)과 횡축(transverse) 흐름을 측정할 수 있는 국소 유속 측정 센서를 설계하였다. 이 센서의 제작 방법으로 소뿔과 같은 용융 금속의 유속을 측정할 수 있는 장치에 적용이 가능하다.
- Alnico 5 magnet 사용을 사용하는 것이 바람직하며, core의 경우, tube 지름이 약 8mm 속에 Alnico 자석 장착 필요하며, 전극(probe)은 소뿔과 직접 닿는 접촉식과 비접촉식이 가능하다.
- 전극(probe)의 배치에 따라 종축(axial)과 횡축(transverse) 흐름 및 종축과 횡축의 흐름이 복합적으로 일어나는 흐름 측정도 가능한 센서가 가능하다.
- KALIMER core의 경우 튜브 크기가 작아 자석 주변에 놓이는 전극(probe)를 설치에 따른 센서 제작에 어려움이 예상된다.

### 3. 중간열교환기 중규모 전자펌프 설계

#### 가. 등가회로 해석

중간열교환기 열유체 실험장치용으로 본 과제에서는 전자펌프를 자체 설계하였다. 이를 위하여 600°C 소듐을 사용하는 최대 유량이 80 l/sec이며, 최고 구동 압력이 5 bar인 환단면 선형유도전자펌프를 전기적 등가회로 해석을 바탕으로 자체 개발한 코드인 EMPAD로 설계하였다. 이 전자펌프 설계용 전산코드는 소용량(3 l/sec) 전자펌프 설계코드로서 MHD 특성실험으로 검증, 보완하였다. 아울러 소용량 펌프 설계용 전산코드를 대용량에 적용하기 위한 주요 개념들을 분석, 보완하고 있다.

Lorentz 전자기력에 의해 구동되는 선형유도전자펌프는 설계이론에 바탕을 두고 있으나, 기하학적 형태 및 크기와 동작변수들의 변화에 따라 펌핑 구동력과 효율이 달라진다. 이러한 펌프 성능과 관련되는 특성의 분석은 일정 속도로 펌핑되는 선형유도기기 해석에 널리 쓰이고 있는 등가회로법으로 구동 압력관계식을 도출하여 설계변수 변화에 따른 구동압력과 효율을 계산함으로써 가능하다. 설계이론의 기본이 되는 전자펌프 1상당 등가회로(그림 7.3.1)에서 구동출력에 관한 평형방정식으로부터 등가회로상의 변수로 표현된 구동압력  $\Delta P$ 와 평균유량을  $Q$ 와의 관계식과 효율을 도출하면 다음과 같다.

$$\Delta P = \frac{3I^2}{Q} \frac{R_2(1-s)}{s(R_2^2/X_m^2 s^2 + 1)} \quad (7.3.1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta P \cdot Q}{\sqrt{3} VI \cos \phi} \quad (7.3.2)$$

여기에서  $I$ : 입력 전류,  $V$ : 입력 전압,  $R_1$ : 일차 등가 저항,  $X_1$ : 누설 등가 리액턴스,  $X_m$ : 자화 등가 리액턴스,  $I$ : 유체 내 유도 전류,  $R_2$ : 유체의 등가 저항,  $s$ : 슬립 및  $\cos \phi$ 는 역률 이다. 전자펌프에서는 동작시 펌프유로 내부와 펌프와 연결된 배관의 벽에서 나타나는 마찰로 인한 압력강하  $\Delta P_L$ 이 존재한다. 이러한 압력강하식은 Darcy-Weisbach 관계식에 의해 다음과 같이 기술된다.

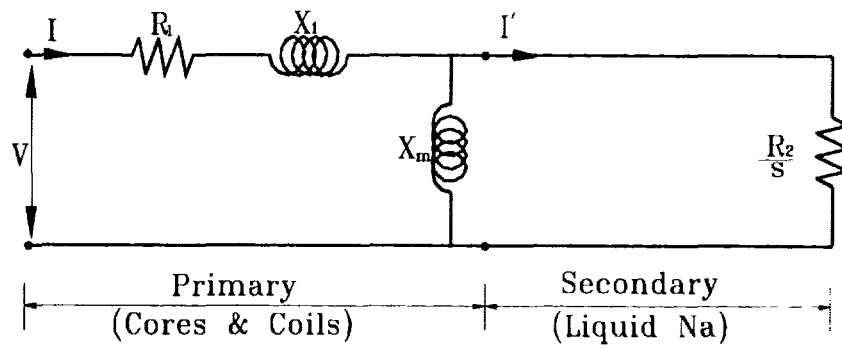


그림 7.3.1 3상용 선형 유도전자펌프의 상당 등가회로의 일례

$$\Delta P_L = \frac{\rho \eta L v^2}{2D_h} + \frac{\rho \eta_l L_l v_l^2}{2D_{h_l}} + \frac{1}{2} \rho K v_l^2 + \rho g h \quad (7.3.3)$$

식(7.3.3)에서 오른쪽 처음 두 항은 펌프유로와 연결 배관에서의 마찰에 의한 압력강하로 각 마찰계수  $\eta$ 와  $\eta_l$ 은 레이놀드수 및 유로와 배관의 표면 거칠기에 의해 주어진다. 세 번째 항은 배관에서의 밸브 부분, 엘보우 및 리듀서 등과 같은 기하학적 형태로 인해 발생하는 minor 손실계수에 의한 압력강하이므로, 네 번째 항은 중력에 의한 압력손실이다. 따라서 식 (7.3.1)과 (7.3.3)으로 각각 표현되는 펌핑 압력과 손실압력이 서로 평형을 이루어 두 식의 값이 일치하는 점에서 펌프 동작조건이 결정된다.

#### 나. 80 l/sec 중규모 환단면 선형 유도전자펌프의 설계

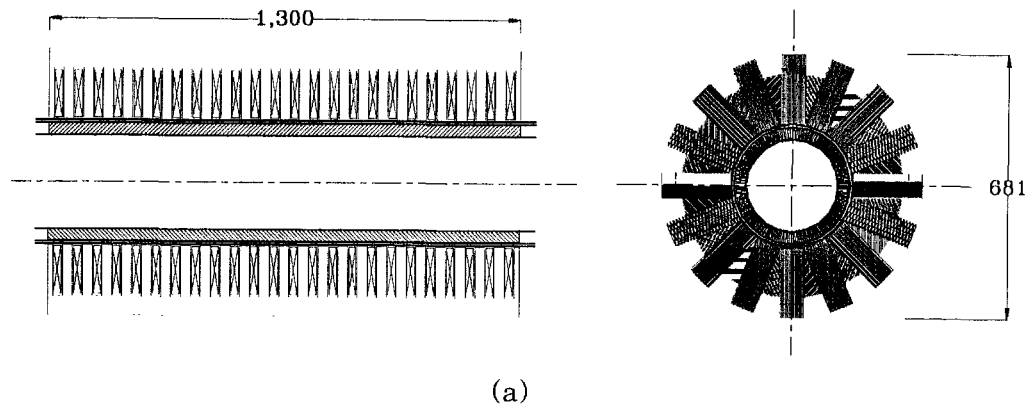
표 7.3.1에 소용량 설계코드인 EMPAD를 바탕으로 하여, 펌프 설계변수 변화에 따른 특성을 검토하여 얻은 80 l/sec 중규모 환단면 선형 유도전자펌프의 설계제원을 나타내었다. 상용주파수와 설계최적주파수의 경우 각각 효율을 비교해보면 최적주파수인 23Hz인 경우가 상용주파수인 60Hz에 비하여 효율이 1.5배 크게 나타났다. 그림 7.3.2에 중규모 환단면 선형 유도전자펌프의 개념설계 단면도를 나타내었으며, 그림 7.3.3에 구동 압력-유량 특성 예상곡선을 나타내었다. 그림 7.3.2에서 보면 상용주파수인 경우 동작점인 80 l/sec, 5bar에서 입력전류는 140 A, 입력전압은 1,082 V이다. 그리고 설계최적주파수인 경우의 입력전류는 120A, 입력전압은 878 V로 상용주파수의 경우에 비해 결과적인 입력전력이 73% 적게 소요될 것으로 예측된다.

#### 다. 결론

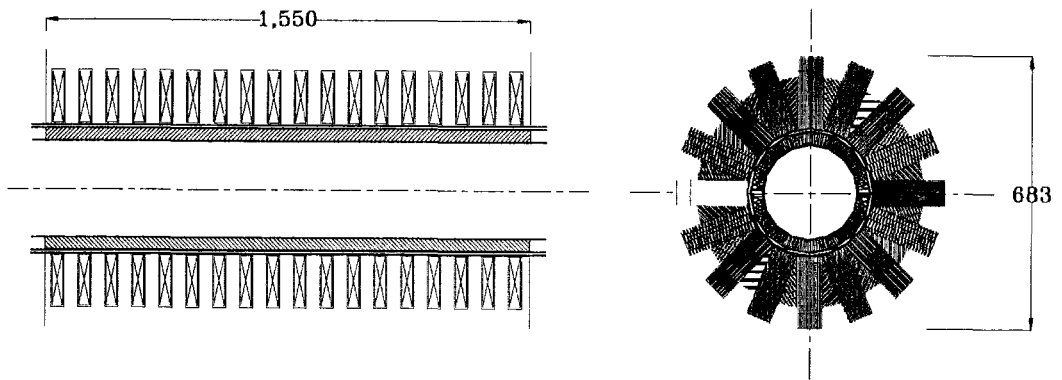
등가회로 해석을 바탕으로 상용주파수 및 최적주파수에서 동작하는 80 l/sec 중규모 환단면 선형 유도전자펌프를 개념설계하였다. 설계된 펌프는 최적주파수의 경우가 상용주파수 입력의 경우보다 73% 적은 입력전력과 1.5배 높은 효율로 동작할 것으로 예상된다. 추후 실험 loop를 구성하여 펌프를 설계, 제작하여 중간 열교환기 열유체 실험장치에 활용할 계획이다.

표 7.3.1 80 l/sec급 중규모 환단면 선형 유도전자펌프의 설계 제원

설계 변수			설계제원	
			상용 주파수의 경우	최적 주파수의 경우
수력학적 변수	유량 구동 압력 슬립	$Q$ [l/sec] $\Delta P$ [bar] $s$ [%]	80 5 65.4	80 5 41.5
기하학적 변수	코아간 간극 펌프 코아 길이 펌프 지름 내부코아지름 자극 피치 자극쌍	$g$ [mm] $L$ [mm] $T$ [mm] $D_o$ [mm] $\tau$ [mm] $p$ [개]	28 1,300 681 350 162.5 4	27 1,550 683 380 258.3 3
전기적 변수	입력 전류 입력 전압 입력 전력 입력 소비 전력 권선 수/슬롯 주파수 효율	$I$ [A] $V$ [V] $VI$ [kVA] $P$ [kW] $N$ [회] $f$ [Hz] [%]	140 1,082 454.5 156.3 30 60 25.8	126 878 331.9 101.3 45 23 39.5



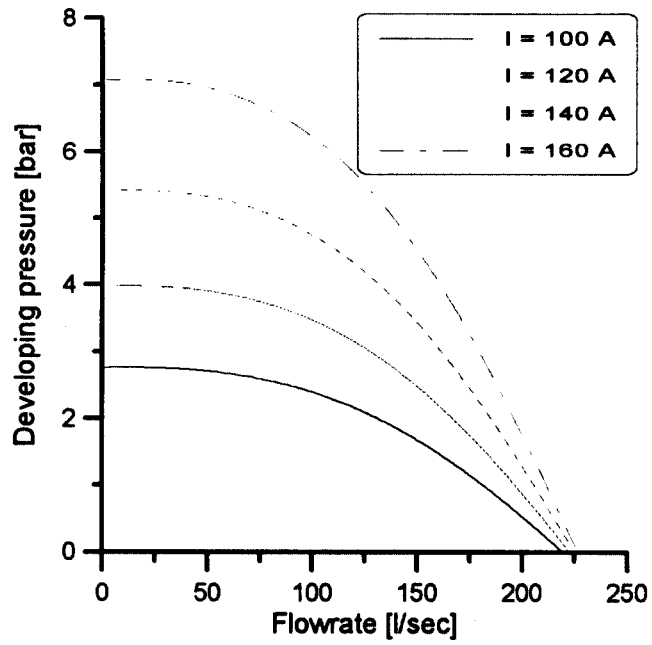
(a)



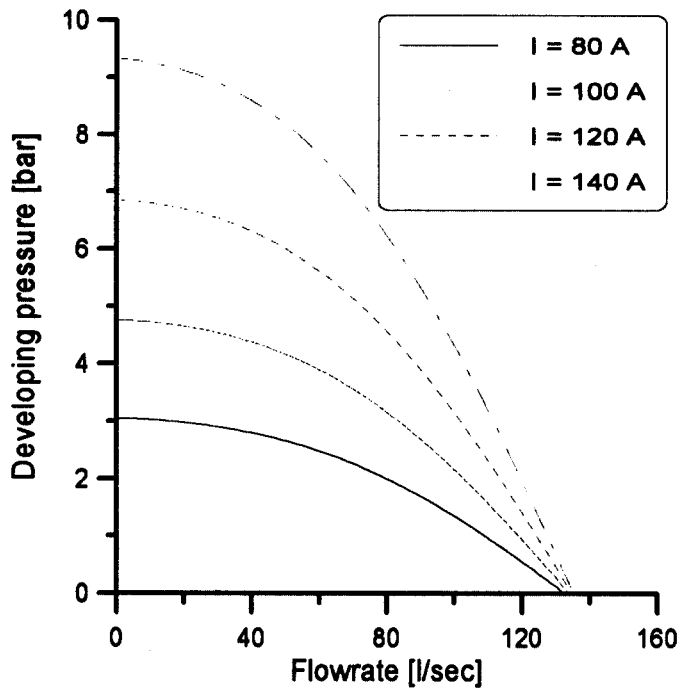
(b)

그림 7.3.2 80l/sec급 중규모 환단면 전자펌프의 개념설계 단면도  
 [(a) 상용주파수 사용시, (b) 최적주파수]





(a)



(b)

그림 7.3.3 80 l/sec급 중규모 환단면 전자 펌프 구동압력-유량 특성예상곡선  
(a) 상용주파수 및 (b) 설계주파수

## 제 8 절 소뚝 화재 감지/소화 실험

### 1. 소뚝 화재 감지 실험

#### 가. 실험 목적

소뚝 누출 감지 기술은 소뚝 시스템에서 사고의 확대 방지와 기기 및 인명 보호에 필수 불가결한 기술이다[8.1.1]. 본 연구에서는 열절연체가 있는 파이프나 용기로부터 소뚝이 누출되었을 경우 이를 조기에 감지할 수 있는 고리형 및 나선형 감지기를 제작하여 누출 감지 특성 연구를 수행하였다.

#### 나. 실험장치 제작 및 설치

실험장치는 크게 소뚝공급계통, 누출감지계통, 자료처리계통으로 구성되어 있다. 그림 8.1.1에 보여진 바와 같이 소뚝공급계통은 사각형 벽돌모양의 소뚝을 용해할 수 있는 용해조, 소뚝을 저장하는 저장조, 콘크리트 시험반응기에 소뚝을 공급하는 공급조, 그리고 시험셀의 가스조건과 소뚝을 공급하기 위한 압력을 제공하는 가스조절계통으로 이루어져 있다. 이들에 대한 상세한 내용은 전년도 보고서[8.1.2]에 수록되어 있다. 누출감지계통은 소뚝이 누출되는 소뚝누출부와 소뚝 누출시 이를 감지하는 전극으로 구성되어 있다. 소뚝 누출부는 800mm 길이의 2" SUS pipe로 제작되었으며, 소뚝이 누출되는 hole의 diameter는 1, 2, 3, 4mm이다. 누출을 감지하는 전극은 첫 번째로 그림 8.1.2에 보여진 것처럼 나선형모양을 가진 Nickel-chrome wire가 SUS tube에 씌어져 있고, 이 tube는 단열재의 홈속에 끼여진다. 이러한 장치는 다음에 유지 보수가 용이하도록 반원형 자켓형태로 제작되었다. 이러한 누출 감지장치 가열과 누출감지 기능을 동시에 가지고 있어 종래 가열기와 누출감지기가 분리되어 있는 장치보다 간단하다는 장점을 가지고 있다.

다른 하나의 소뚝 누출 감지장치는 고리형 누출감지 전극으로서 나선형 누출 감지기의 설계자료를 획득하기 위한 것이다. 소뚝 누출부를 구성하고 있는 장치는 그림 8.1.3과 같으며, 이에 대한 상세도는 그림 8.1.4, 5와 같다. 그림 8.1.4에 나타난 것처럼 SUS로 제작된 wire를 소뚝 누출부로부터 50, 100, 200, 300mm의 간격을 두고 설치하였다. 또한 소뚝 누출시 단열재에서의

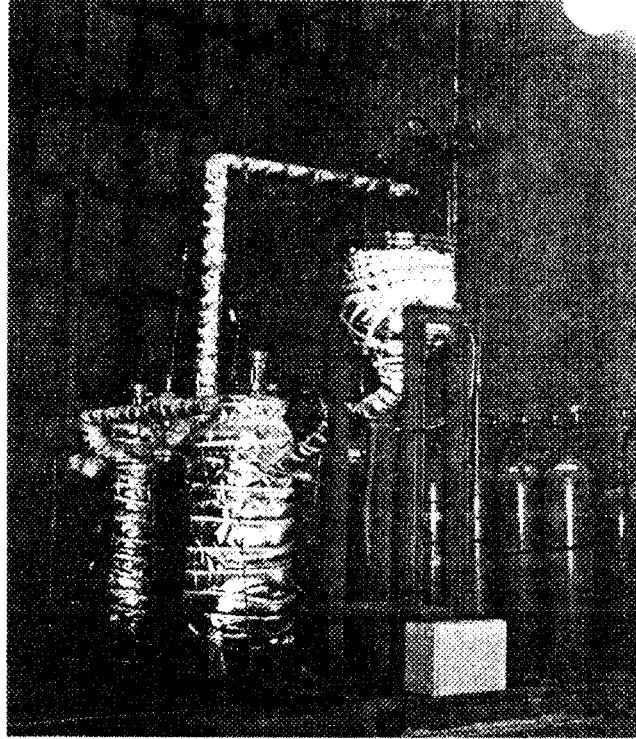


그림 8.1.1 소듐공급계통

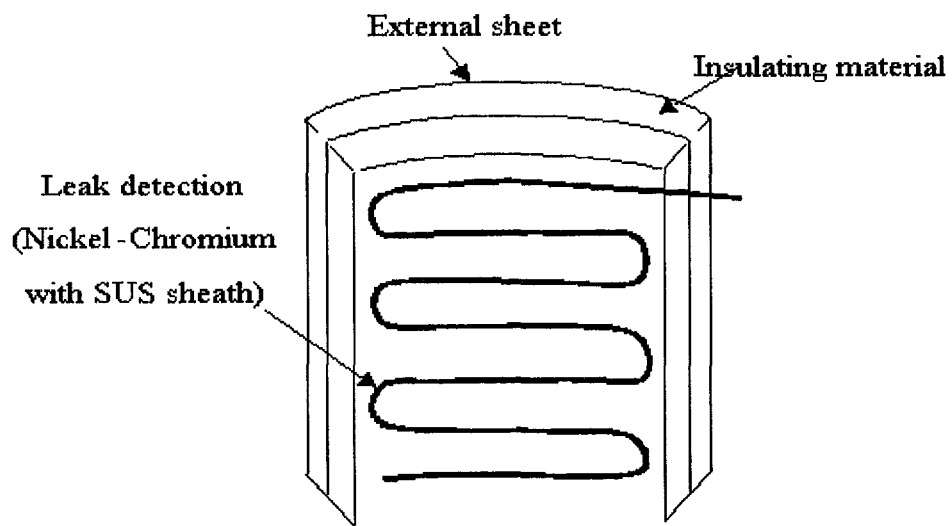


그림 8.1.2 나선형 소듐 누출 감지기

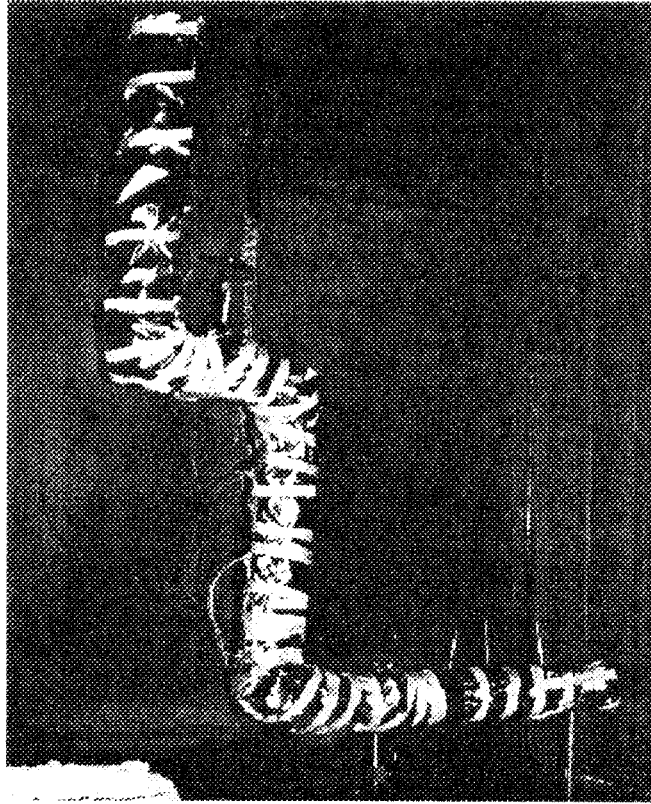


그림 8.1.3 소듐 누출 감지부

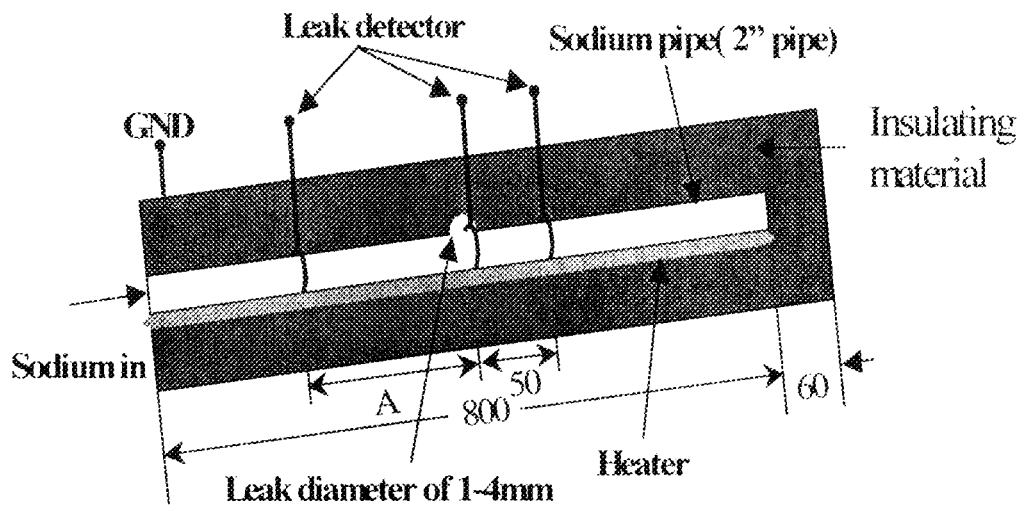


그림 8.1.4 수평배열파이프에서 소듐누출부

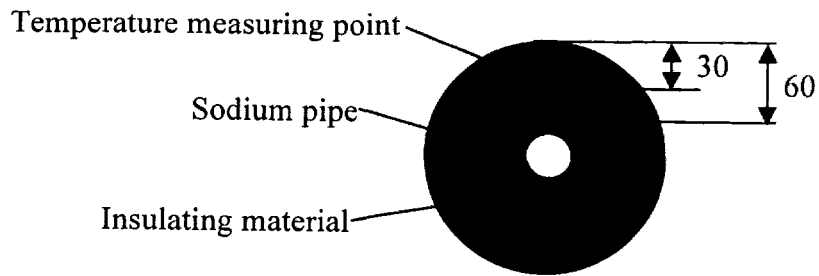
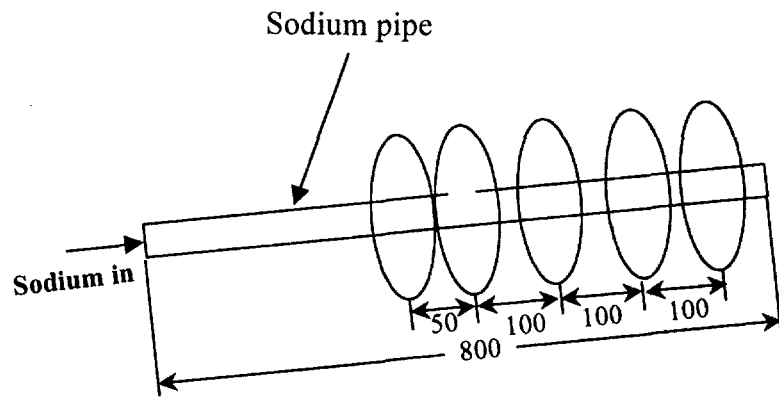


그림 8.1.5 수평배열파이프에서 소듐 누출 온도 측정 부위

온도 변화를 측정하기 위하여 파이프 상부로부터 30mm 떨어진 곳에 열전대를 누출부위로부터 50, 100, 200, 300mm 간격으로 설치하였다. 이 때 단열재의 두께는 60mm로 하였다.

그림 8.3.5는 수평배열파이프에서의 온도 측정부위를 보여주고 있다. 그림에서 보여진 것처럼 각 위치에 열전대를 배열하여 소듐이 누출되었을 때 온도변화를 측정함으로써 소듐 누출과 단열재에서의 온도변화를 분석하고자 하였다.

#### 다. 실험방법

실험은 먼저 소듐공급조와 공급라인을 400℃로 예열한 후 질소가스의 압력을 1, 2, 3, 4kg/cm<sup>2</sup>으로 변화시키면서 소듐을 누출부위로 공급한다. 이 때 공급조에서 소듐 누출부로 공급되는 소듐의 양은 공급조에 설치된 액위 지시계의 높이를 측정하여 실험조건에 맞게 공급하였다. 소듐이 누출되면 파이프 상에 설치된 고리형 전극과 파이프상의 전극에 전도성을 가진 소듐이 연결되어 전류가 흐름으로써 누출이 감지된다. 이와 동시에 각 위치에서의 온도변화와 누출감지 시간 등이 컴퓨터의 자료 처리시스템에 기록된다. 또한 시험반응기에서의 소듐 누출 현상을 시각적으로 살펴보기 위하여 비디오 카메라를 설치하여 소듐 누출 진행 추이를 촬영하였으며, 실험조건은 표 8.1.1과 같다.

표 8.1.1 소듐감지 실험조건

Position of detector on pipe(A, mm)	50, 100, 200, 300
Diameter of leak(mm)	2
Sodium feeding pressure(psi.)	60, 100
Sodium temperature (°C)	290



## 라. 실험결과

이미 설치된 화재 감지시스템에 대하여 공시험을 수행하였다. 소뚝 저장 및 공급조를 포함한 소뚝 공급계통에 대한 기밀시험을 질소압력  $4\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 24시간동안 수행한 결과 질소압력의 변화가 없음을 확인하였다. 저장조, 공급조, 그리고 소뚝 공급라인과 소뚝 누출부에 대한 가열시험을  $400^\circ\text{C}$ 의 온도까지 증가시켜 수행하였다.

소뚝 누출감지기의 신호전달 및 자료 입력 계통을 구성하여 누출 감지기의 성능을 확인하였다. 각 누출 감지기 전극에 연결된 리드선은 제어반의 단자에 연결이 되어 누출이 감지된 경우 제어반에서 지시등이 켜질 수 있도록 하였다. 제어반의 단자로부터 나온 신호는 신호처리시스템을 거친 후 컴퓨터의 A/D converter에 입력되었으며, 소프트웨어적으로 처리된 프로그램에서 양호한 결과를 보였다.

그림 8.1.6은 60, 120psi.의 누출압력에서 누출 감지 시간을 측정하기 위하여 누출압력에 따른 누출 감지 시간 결과를 보여주고 있다. 5kg의 소뚝이  $290^\circ\text{C}$ 에서 60, 120psi.의 누출압력으로 누출되었을 경우 누출부위와 감지기간의 거리가 150cm 이내에서는 비교적 짧은 시간안에 소뚝 누출이 감지되었으나 누출부위와 감지기간의 거리가 150cm 이상일 때에는 소뚝 누출 감지시간이 점차 길어지는 것으로 나타났다. 60psi.의 누출압력에서보다 100psi.의 누출압력에서 소뚝 누출을 감지하는 시간이 빠르게 나타났다.

그림 8.1.7은 누출감지기 설치 위치에 따른 누출 감지특성을 보여주고 있다. 누출부위와 감지기간 거리가 길어 질수록 두 압력에서의 감지시간 차이는 크게 나타났다. 또한 누출시간에 따른 누출감지부위에서의 온도 변화는 소뚝 누출이 감지되기 직전에 급격하게 상승하였다.

## 2. 소뚝화재 소화실험

### 가. 소화실험 개요 및 목적

소뚝화재로부터 초래되는 소뚝 누출의 경우에 이를 제어하여야 하는 문제점이 수반된다. 이와 함께 소뚝화재와 이를 제어하기 위한 다양한 상황들이 필수적으로 숙지되고 아래와 같은 사항이 반드시 고려되어야 한다.

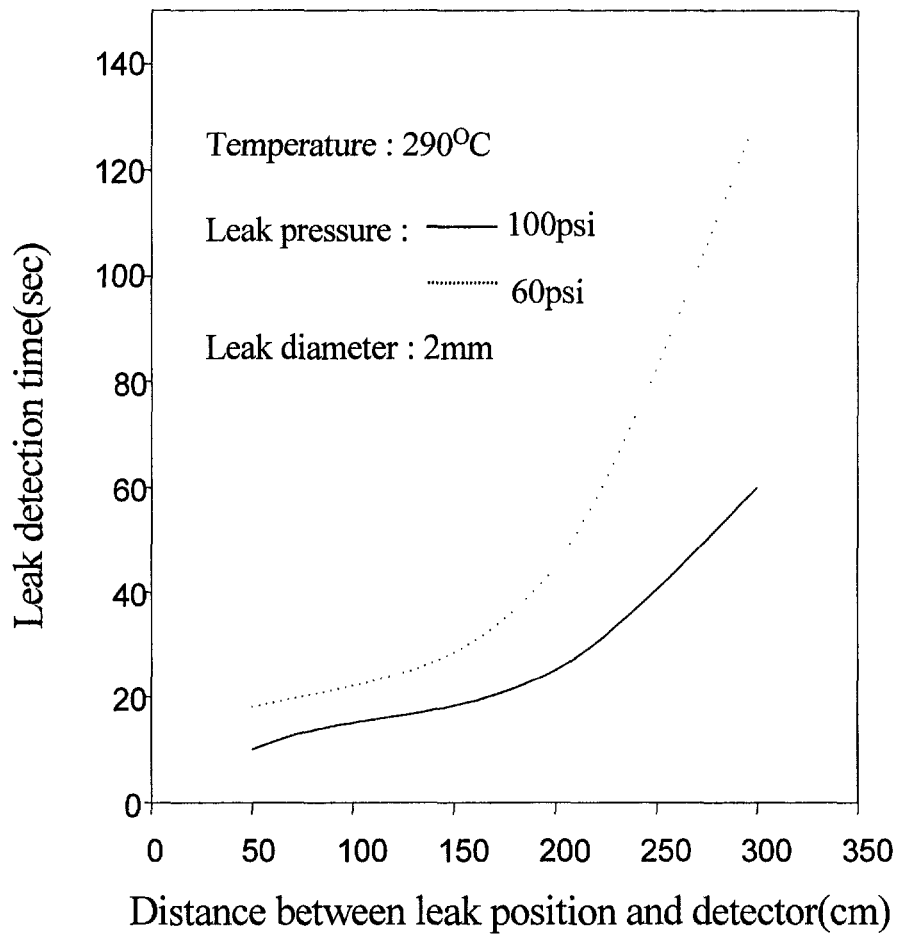


그림 8.1.6 누출압력에 대한 누출 감지시간

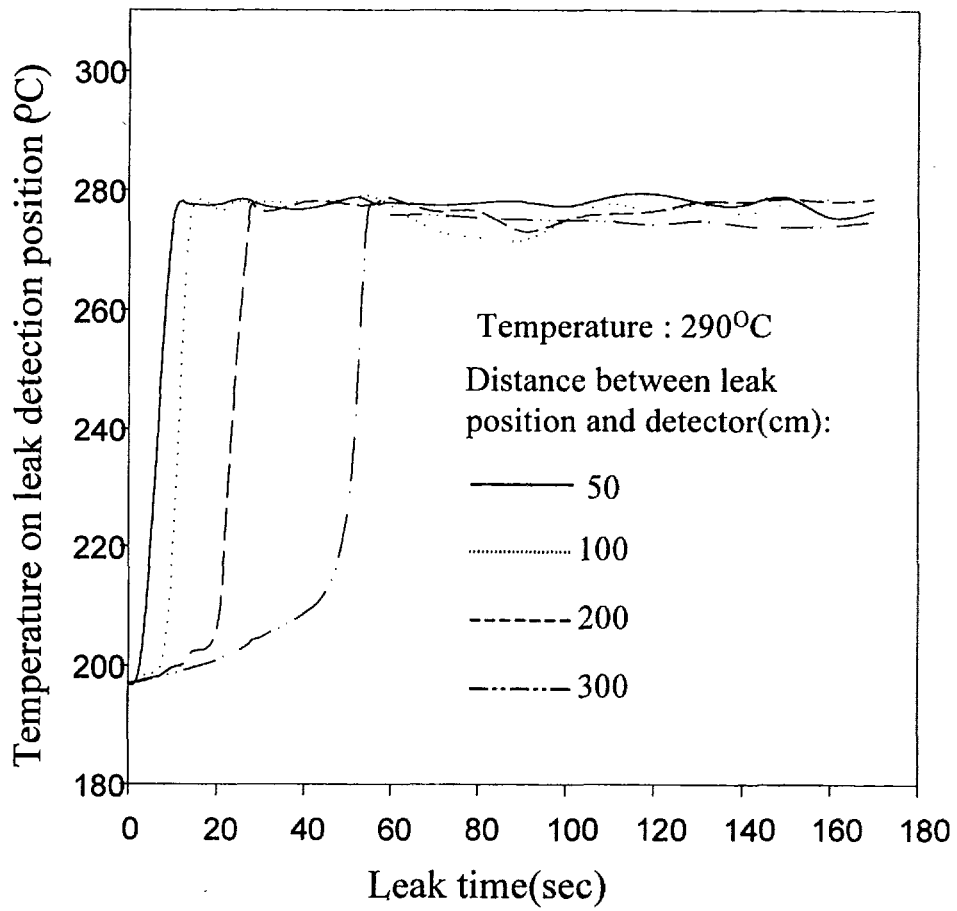


그림 8.1.7 누출감지기 설치 위치에 따른 소듐 누출 감지

- 소듐화재에 대한 일반적인 연구
- 국부적으로 이용 가능한 소화재의 평가
- 화재 방호 및 소화기술
- 기타 소듐 화재 소화방법

액체 소듐은 300℃ 이하에서 공기에 노출되었을 때 발화될 가능성이 있기 때문에 이를 사용할 경우엔 공기와 격리되어야 하며, 액체 소듐이 점화되어 화재가 발생하였을 경우에 대비하여 이를 소화시키는 방법이 개발되어야 한다. 근본적으로 소듐화재는 산소를 배제시키거나 소듐을 냉각시킴으로 소화시킬 수 있다. 자가질식, 불활성 기체로 산소희석 및 소화분말로 소듐의 표면을 덮는 것이 일반적인 소화방법이다. 전자의 두 가지 방법이 화재진화 후 세정할 필요가 없어 소화재를 이용한 방법 보다 좋기는 하나 이들 방법은 소듐이 점화온도 이하로 냉각될 때까지 산소농도를 5% 이하로 유지해야 하는 어려움이 있다. 따라서 이들은 제한된 조건에서만 사용 가능하다. 그러므로 분말 형태의 소화재를 사용하는 것이 보다 실질적인 방법으로 생각된다.

분말형태의 상용 소듐화재 소화재들은 주로 sodium carbonate, sodium bicarbonate, sodium chloride 또는 sodium chloride의 혼합물, potassium chloride, barium chloride 등이 있다. 맨 나중 두 가지는 소듐과 함께 사용되는 고가의 austenitic stainless steel 장치들을 부식시킬 수 있다. 그 이전의 것들로는 장시간 동안 소듐표면을 각질 형태로 덮어 유지시킴에 어려움이 있다. 비록 소듐의 연소속도가 oil의 연소속도보다 훨씬 느리지만 현재 존재하는 소화재의 성능이 좋지 않기 때문에 진화하기가 쉽지 않다. 따라서 화재를 연구하는 일차적인 목적은 국부적으로 이용 가능한 적절한 소화재를 선정함에 있기 때문에 다음과 같은 필요조건을 갖춘 양호한 소화재가 고려되었다.

- 연소성 물질이거나 연소에 도움을 주어서는 안된다.
- 소화재의 밀도는  $0.8\text{g}/\text{m}^3$  이하이어야 한다.
- 안정성이 있고 비잠수성이어야 한다.
- 유동이 좋아야 하며 액체 소듐과 잘 혼합되어야 한다.
- 소듐에 필요한 소화재 분말의 양이 적어야 한다.
- 재발화의 가능성을 줄이기 위해 신속하게 금속을 냉각시켜야 한다.

- 물로 처분하기 쉬워야 한다.
- 소듐과의 반응이 있더라도 발열이나 폭발성이 없어야만 한다.
- 값이 싸야 하며 자유롭게 이용 가능하여야 한다.

또한 온도분포는 소화방법을 개발하거나 화재안전성을 고려한 요소 부품들을 설계할 때 매우 중요한 자료이다. 상기에서 언급한 바와 같이 소화재로서 갖추어야 필요조건을 갖춘 가장 양호한 분말인 sodium bicarbonate(Dry Chemical Powder)가 상용화되어 널리 사용되고 있고, 일반적인 특성은 다음과 같으며 그 물리적 특성은 표 8.2.1과 같다.

- 지글지글 끓지 않는다.
- 분말이 화재 상부에 부유되어 있어 연소 표면을 매우 잘 덮는다.
- 소화재와 불타고 있는 풀의 접촉면에서 소화재의 반응성이 전혀 없다. 상부표면을 깨끗하게 걷어 내었을 때 깨끗한 소듐표면이 아래에 존재한다.
- 적은 양의 분말이 필요로 하며, 화재가 빠른 시간안에 진화된다.
- 분말은 물에 용해되지도 않을 뿐더러 물과 소듐이 쉽게 접촉하지 못하게 하여 잔유물들의 처분을 용이하게 한다.

일반적으로 소화재의 입자크기가 소듐화재의 소화효율에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 소듐화재에 대한 소화 분말의 효율 측정은 비용이 많이 들고 매우 어렵다. 이는 시험 결과가 기상조건, 소화재 적용방법, 취급기법에 영향을 받기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 sodium bicarbonate를 소화재로 사용하여 이의 입자크기가 소화 특성에 미치는 영향을 살펴보았다.

표 8.2.1 Sodium bicarbonate의 특성

Main composition	NaHCO <sub>3</sub>
Density	0.709g/cm <sup>3</sup>
Moisture	1%
Cooling capacity	10°C/min for small Na fire

## 나. 소화실험

본 연구에 사용된 sodium bicarbonate는 다른 소화재에 비하여 유동성이 매우 좋기 때문에 일반 상용 소화기에 충전하여 살포하는 것이 용이하고, 삽을 이용해서도 쉽게 살포시킬 수 있다. 또한 sodium bicarbonate는 방수 성질을 가지고 있으며, 가열되면 팽창되고 액체소뿔 표면에 부유되기 때문에 화재 표면을 산소로부터 차단하여 질식시킴으로써 소뿔화재를 진압할 수 있다.

소화실험은 이미 건조된 중규모 화재 실험장치의 셀내부에서 수행되었으며, 직경과 깊이가 각각 40, 20cm의 크기를 가진 풀팬에서 소뿔 풀형화재가 발생된 후 실험조건에 따라 정량화된 소화재가 쓰레받기에 의하여 살포되었다. 소뿔의 연소는 풀팬에 공급된 소뿔의 온도가 풀팬의 둘레를 따라 설치된 가열기에 의하여 약 200℃까지 증가하면서 시작된다. 소화재는 풀의 온도가 600℃에 도달되었을 때 쓰레받기에 의하여 풀팬 전역에 걸쳐 고루 살포된다. 풀의 온도는 풀팬의 하부에 설치된 열전대에 의하여 측정되고, 측정된 자료는 자료처리시스템에 자동으로 기록된다.

소화재의 입자크기가 소화효율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 소화재를 입자크기별로 분류하였다. 실험에 사용된 sodium bicarbonate의 입자크기는 <20, 30, 40, 50  $\mu\text{m}$ 이었으며, 이들은 vibration sieve에 의하여 얻어졌다. 또한 소뿔양과 소화재 분말의 양의 비에 따라 실험변수가 소화 효율에 미치는 영향도 함께 조사되었다. 상세한 실험조건은 표 8.2.2에 나타나 있다.

## 다. 실험결과

시각적으로 관찰한 결과에 의하면 sodium bicarbonate가 연소중인 약 600℃의 소뿔풀 표면에 살포되었을 때 소뿔과 소화재간의 반응성은 전혀 목격되지 않았으며, 지글지글 끓는 현상도 없었다. Sodium carbonate의 경우에는 소뿔과 접촉시에 지글지글 끓는 현상이 발생하여, 주변 계측장비나 혹은 주요 부품으로 소뿔이 튀기게 된다. 또한 분말이 화재 상부에 부유되어 있어 연소 표면을 매우 잘 덮음으로 초기에 상당한 부분의 화재가 진압되었으며, 화재 진압 후 상부표면을 깨끗하게 걷어 내었을 때 미연소된 깨끗한 소뿔표

면이 풀팬 하부에 존재하였다.

Calcium carbonate분말을 살포하였을 경우 오랫동안 지속되는 노란 화염으로 인하여 계속적으로 분말살포가 어려운 것으로 알려져 있지만, sodium bicarbonate의 경우에는 이런 현상이 목격되지 않았다. 이러한 것은 소화시간에 영향을 미치기 때문에 소화재 선정시 중요하게 고려되어야 할 사항중 하나이다. 또한 sodium bicarbonate분말은 물에 용해되지 않는 특성을 가지고 있기 때문에 화재 진압후에 소뿔과 소화재를 포함한 잔유물을 처분하는 것이 다른 소화재에 비하여 매우 용이하였다.

표 8.2.2 소화 실험조건

Weight of sodium(kg)	Weight of power extinguishant.(kg)	Temp. of sodium pool(°C)	Diameter of pool pan(cm)	Depth of pool pan(cm)
4.8	6.24	400	40	20
9.6	12.48	400		

약 200°C에서 풀팬의 가장자리나 혹은 극히 일부지역에서 발화된 소뿔은 시간이 지남에 따라 풀팬의 전역으로 확대되어 연소된다. 이와 함께 풀의 온도도 급격히 상승한다. 그림 8.2.1은 소화재가 살포되었을 때 풀팬에서 연소되는 4.8kg과 9.6kg의 소뿔 중량에 따른 온도감소를 보여주고 있다. 이 때 소뿔에 대한 살포되는 소화재의 중량비는 1:1.3으로 동일하게 하였다. 그림에서 보여진 바와 같이 동일한 소뿔과 소화재의 중량비임에도 불구하고 온도감소에 차이를 보였다. 하지만 연소되는 소뿔의 양에 따라 온도감소차이는 아주 크게 나타나지 않았다. 소화재 살포초기에 연소되는 소뿔양이 작았을 때 온도 감소율이 소뿔양이 클 때의 온도 감소율보다 크게 나타났지만, 시간이 지남에 따라 비슷한 온도감소율을 보여주는 것으로 나타났다. 따라서 소뿔에 대한 소화재의 중량비를 1:1.3으로 하여 중규모 이상의 소뿔화재를 위하여 소화재를 살포하는 것도 무난할 것으로 사료된다. 하지만 반드시 고려되어야 할 사항은 풀형연소가 이루어지는 풀의 면적이다. 풀의 연소면적이 넓을수록

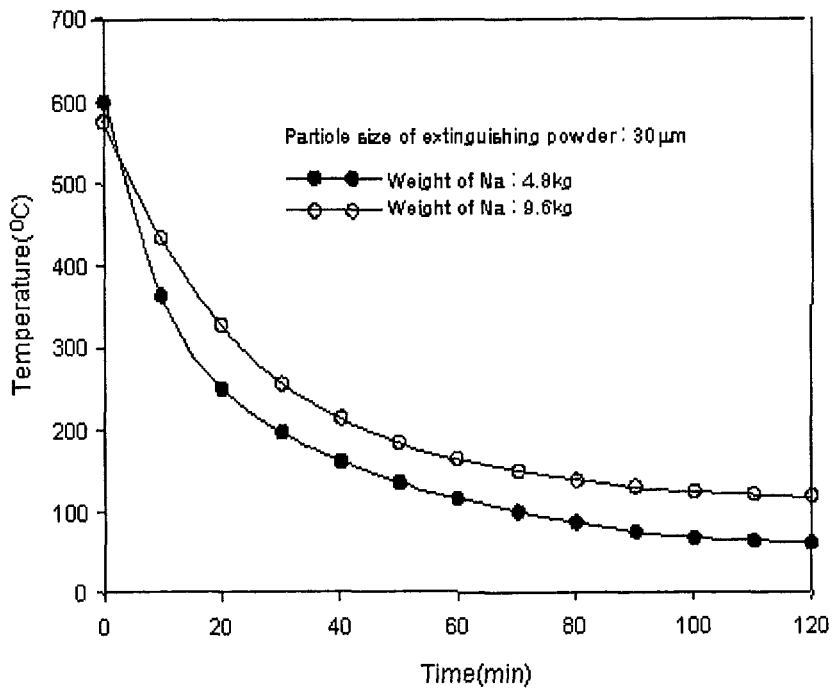


그림 8.2.1 소듐 중량에 따른 온도 변화



소듐에 대한 소화재의 중량비는 커질 것으로 예상된다.

Sodium bicarbonate를 비롯하여 sodium carbonate, calcium carbonate, potassium bicarbonate, graphite와 같이 소듐의 소화에 사용하기 위하여 상용화되어 있는 소화재들은 다양한 입자크기분포를 가지고 있다. 이러한 입자크기분포들은 소화효율에 큰 영향을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 입자크기 분포가 소화효율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 <math>20, 30, 40, 50\mu\text{m}</math> 입자크기를 갖는 네 가지의 sodium bicarbonate를 준비하여 소화실험을 수행하였고, 이에 대한 결과가 그림 8.9와 8.10에 보여져 있다.

그림 8.2.2는 연소되는 소듐의 양이 4.8kg이었을 때 각 입자크기에서의 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 보여진 바와 같이 입자크기 분포가 가장 작은  $20\mu\text{m}$ 의 소화재가 살포되었을 경우 30, 40,  $50\mu\text{m}$ 의 입자크기를 가진 소화재보다 소화재 살포초기에 온도변화율이 가장 크게 나타났다. 이러한 입자크기가 적어짐으로써 소듐 화염에서의 냉각효과가 커지는 것으로 판단된다. 소화재 입자크기에 대한 영향은 그림에서 보여진 바와 같이 20, 30,  $40\mu\text{m}$ 사이에서 크게 나타났고,  $40\mu\text{m}$ 와  $50\mu\text{m}$ 의 크기를 가진 소화재의 소화효율은 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 소화재 선정 및 준비시 소화재의 입자크기를  $40\mu\text{m}$ 미만으로 하는 것이 중요하고, 가급적 작은 입자크기를 갖는 소화재가 소듐화재 소화에 유리한 것으로 나타났다. 하지만  $10\mu\text{m}$ 미만의 입자크기만을 갖는 sodium bicarbonate를 기계적으로 얻는 것은 매우 어렵다.

그림 8.2.3은 연소되는 소듐의 양이 9.6kg이었을 때 각 입자크기에서의 온도변화를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 결과는 소듐의 양이 4.8kg이었을 때 각 입자크기에서의 온도변화와 유사한 경향을 보여주고 있다. 단지 각 입자크기를 갖는 소화재에 따라 온도감소분이 소듐의 양이 4.8kg이었을 때보다 작게 나타났다.

### 3. 결론

가. 5kg의 소듐이  $290^{\circ}\text{C}$ 에서 60, 120psi의 누출압력으로 누출되었을 경우 누출부위와 감지기간의 거리가 150cm이내에서는 비교적 짧은

시간안에 소듐 누출이 감지되었으나, 누출부위와 감지기간 거리가 150cm이상일 때에는 소듐 누출 감지시간이 점차 길어지는 것으로 나타났다.

- 나. 60psi.의 누출압력에서보다 100psi.의 누출압력에서 소듐누출을 감지하는 시간이 빠르게 나타났으며, 누출부위와 감지기간의 거리가 길어 질수록 두 압력에서의 감지시간 차이는 크게 나타났다. 또한 누출시간에 따른 누출감지부위에서의 온도변화는 소듐 누출이 감지되기 직전에 급격하게 상승하였다.
- 다. 시각적 관찰결과 sodium bicarbonate는 소듐과의 반응성이 적을뿐더러 소듐풀의 연소면을 효과적으로 덮는 것으로 관찰되었다. 소화재 살포초기에 연소되는 소듐양이 작았을 때 온도 감소율이 소듐의 양이 클 때의 온도 감소율보다 크게 나타났지만 시간이 지남에 따라 비슷한 온도감소율을 보여주는 것으로 나타났다. 따라서 소듐에 대한 소화재의 중량비를 1:1.3으로 하여 중규모 이상의 소듐화재를 위하여 소화재를 살포하는 것이 적당하다.
- 라. 소화재 입자크기에 대한 영향은 20, 30, 40  $\mu\text{m}$ 사이에서 크게 나타났고, 40  $\mu\text{m}$ 과 50  $\mu\text{m}$ 의 크기를 가진 소화재의 소화효율은 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 소화재 선정 및 준비시 소화재의 입자크기를 40  $\mu\text{m}$ 미만으로 하는 것이 중요하고, 가급적 작은 입자크기를 갖는 소화재가 소듐 화재 소화에 유리한 것으로 나타났다.

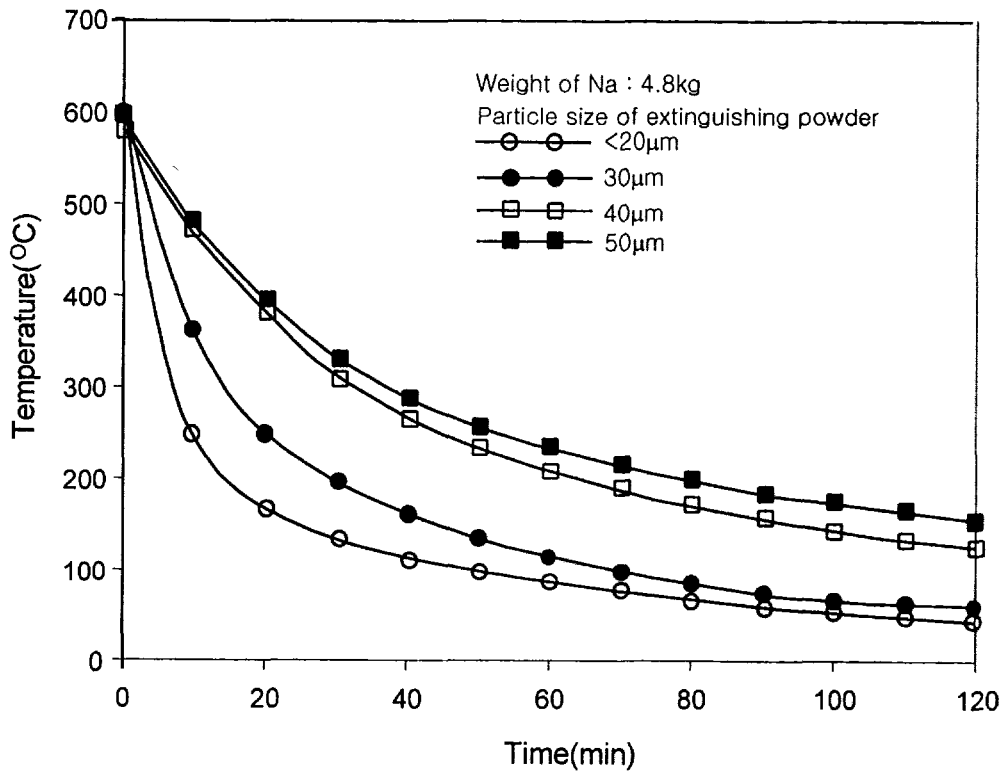


그림 8.2.2 입자크기분포에 따른 온도변화(소듐 중량 : 4.8kg)

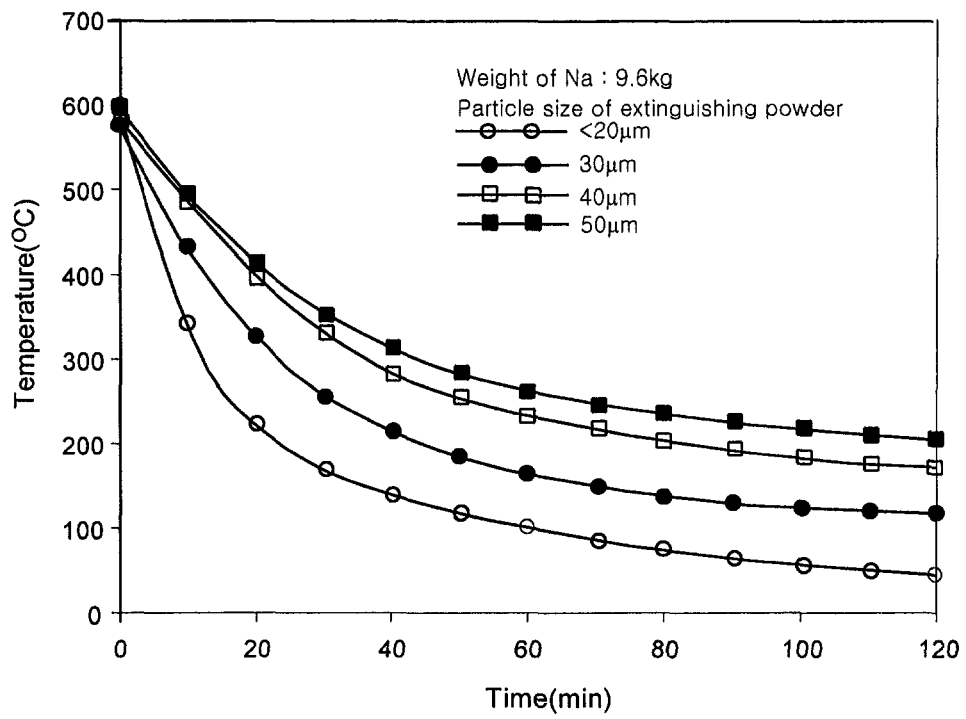


그림 8.2.3 입자크기분포에 따른 온도변화(소듐 중량 : 9.6kg)

## 제 9 절 소규모 물 누출에 의한 표적 손상해석

### 1. 개요

고속증식로의 증기발생기 설계에서는 물 누출에 대한 가능한 한 전 범위에 걸친 누출 현상 해석 자료들을 고려하여야 한다. 일반적으로 물 누출 현상은 물 누출량의 크기에 따라 대규모 누출[9.1.1]과 소규모 누출[9.1.2-9.1.3]로 구분하여 해석하고 있으며, 소규모 누출은 그 누출 규모에 따라 다시 micro-leak, small leak, intermediate leak 등으로 구분되어 연구가 진행되고 있고, 고속증식로 선진국에서는 통상적으로 다음과 같은 누출량을 구분해서 사용하고 있다.

- 미량 누출 : 누출량 0.1 g-H<sub>2</sub>O/sec 이하, 주로 self-wastage 현상 연구,
- 소량 누출 : 누출량 0.1~10 g-H<sub>2</sub>O/sec, 단일관 wastage 현상 연구,
- 중규모 누출 : 누출량 10 g~1 kg-H<sub>2</sub>O/sec, 다중관 wastage 현상 연구, over-heating 현상 연구,
- 대규모 누출 : 2 kg~1 DEG(Double Ended Guillotine), 압력 상승에 대한 연구

본 연구에서는 소규모 물 누출 규모 중 소규모 누출의 경우, 소듐-물 반응에 의해 발생하는 재질 표면에서의 wastage 현상의 해석과 누출 부위에서의 부식 현상 등을 소량 물 누출 실험을 통해 규명함으로써 물 누출이 어떻게 진전될 것인가에 대한 해석을 하고자 하였다.

일반적으로 소규모 누출은, 증기발생기 전열관 제작시 전열관 튜브에서 pin-hole이나 crack, 용접 불량 등에 의한 균열에서 발생하는 것으로 알려져 있으며, 전열관의 결함에 의해 발생된 물 누출은 소듐-물 반응에 의해 형성되는 반응 생성물이 고온의 소듐 속에서 impingement를 형성하고 이웃 전열관 표면에 jet를 형성하면서, 고온의 부식생성물들이 corrosion/ erosion 현상을 발생시키며, 소위 “wastage”라는 현상을 발생시킨다[9.1.4-9.1.5].

소규모 누출에서 발생하는 주요 현상으로 자체 누출부위에서의 누출부위 확대현상과 표적에서의 target wastage가 관찰되는 것으로 알려져 있으며, 이 누출 규모에서는 reacting jet impinge를 직접적으로 맞는 전열관이 주위의 다른 전열관보다 wastage가 훨씬 크게 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서, small leak의 경우 누출효과로서 single target impinged의 wastage를 고려할

필요가 있다.

표 9.1.1에 지난 수십 년간 실험로, 원형로 등의 고속증식로 증기발생기의 운전에서 발생된 물 누출 사고에 대한 자료를 나타내었다.

표 9.1.1 증기발생기 운전시 발생된 사고원인 및 빈도

문 제 점	사고건수
• Shell-tube간의 열팽창 차이	17
• 재료 또는 증기발생기 제작시 결함(용접결함)	17
• 증기발생기 운전시 전열관의 진동	1
• 증기발생기 설치시 전열관 세정시 세척액인 염소에 의한 응력부식	13
• 초기운전시 공기 등의 주입에 의해 발생된 소듐산화물에 의한 응력부식	2
• 물 측에서의 유동 불안정	7
• 시스템 내에서의 증상화 또는 편류 발생	3

## 2. 물 누출에 대한 각국의 현황

물 누출에 대한 각국의 보고서를 수집/분석해 보면(Hori M.,1974), 소규모 물 누출에 대한 세계 각국에서 수행한 연구 내용들을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 미국 : Single wall 전열관의 소듐-물 반응에 대한 연구로 1955년 APDA에서 연구가 시작되었으며, Fermi에 사용할 증기발생기를 설계할 목적으로 APDA에서 NaK를 사용해서 실험이 수행되었다. 그 후 소듐을 이용해서 U-tube type과 Baynot-type을 위한 실험을 수행하였다. 초기 증기발생기의 설계에는 tube rupture와 같은 대규모 사고에 대한 개념이 고려되었으나, 1962년 Fermi에서 소량의 물 누출사고가 발생되어 소규모 누출에 의한 wastage가 원인이 되어 대규모 누출 사고의 원인이 되었음이 발표되자, 이 후부터 소량 물

누출에 대한 중요성이 증대하게 되었으며, APDA는 세계 최초로 소규모 누출 test facility를 건설하여 소규모 누출에 대한 연구가 활발히 수행되었다 [9.2.1-9.2.2].

- 영국 : PFR(Prototype Fast Reactor)의 증기발생기 설계를 위해서 대규모 누출 실험이 1963년 Douneary에 있는 Noah 시험시설에서 수행되었는데, 실제 크기의 1/6 규모에서 실험이 수행되었다. 후에 좀 더 큰 시험시설인 Super-Noah를 제작하여 증기발생기에서 발생하는 대규모 누출사고에 대한 안전성을 검증하였으며, 이러한 연구와는 달리 AEA에서는 glove-box를 이용한 micro-leak 실험으로부터 전열관 재질의 부식 실험과 0-50 g/sec 누출 규모의 실험장치로부터 self-wastage에 대한 실험이 수행되어 소듐-물 반응특성 및 wastage에 대한 현상이 해석되었다. 그 후 Micromegas 시험 시설에서 인근 튜브에 대한 wastage 현상을 해석하기 위한 실험을 수행하여 소듐 온도, 인입 되는 물의 압력, 누출 크기, 튜브 재질 등 다양한 종류의 실험들이 수십 년 동안 계속적으로 진행되어 다양한 자료들을 확보하고 있는 것으로 알려져 있다 [9.2.3].

- 프랑스 : CEA에서 1965년 Phenix를 위해 물 누출 실험이 수행되었다. Phenix 증기발생기는 Modular type으로 각 module에 full size model을 test 할 수 있도록 적게 만들어졌다. 실험은 주로 소규모 누출에 대한 실험을 수행하였고, simple geometry를 사용해서 기초실험을 수행하였다. 물 누출 현상 해석을 위한 code를 개발하였으며, Super-Jonas, Grignotin 시험시설을 건설하여 wastage rate distribution, jet profile, reaction flame model 등을 개발하여 그들이 개발하고 있던 코드에 적용하였다[9.2.4-9.2.5].

- 독일 : Interatom에서 1964년부터 소듐-물 반응에 대한 연구를 수행해 왔다. Interatom에서는 gun-barrel type의 시험시설에서 소듐-물 반응에 대한 기초 연구를 수행하였고, simple geometry를 갖는 hollow cylindrical vessel을 사용해서 정량적인 실험을 수행하였으며, KNK 증기발생기의 유사한 모델을 사용해서 대규모 누출 실험을 진행한 경험이 있다. 그 후에 ASB라 불리는 대규모

시험시설을 사용해서 SNR prototype을 위한 modular-type 증기발생기 설계를 계획하였으며, 이와 병행해서 대규모 누출 컴퓨터 코드, rupture disc, 누출 검출장치 등을 개발하였다. 연구의 일부분은 네덜란드와 공동으로 진행한 것으로 알려져 있다[9.2.6].

● 일본 : 여러 종류의 시험시설들이 PNC에 의해 수행되었으며, 1970년 이래 Monju 1/8 scale의 대규모 소듐-물 반응 시험시설에서 연구를 수행하였다. 소듐-물 반응시 온도와 압력에 대한 많은 데이터들이 수집되었으며, 수소 bubble에 대한 현상, rupture disc와 같은 effluent system의 기능 등도 연구가 수행되었다. 대규모 누출에 대한 안전성도 Monju 1/2.5 scale model로 수행되었고, 계산 model의 타당성을 검증하기 위해 여러 종류의 small scale 유사 실험들이 다양하게 수행되었으며, 공통적인 점은 실험 parameter 들이 Monju 증기발생기 설계에서 사용된 인자들을 실험 조건으로 고정시킨 후 다양한 실험을 수행하였던 것으로 분석되고 있다.

소규모 누출실험을 위해 실제 증기발생기의 운전조건으로 wastage실험을 수행하였고, 누출검출기의 개발과 성능검사도 sensitivity, response, reliability 등에 대한 실험도 수행하고 있다[9.2.7-9.2.9].

이상으로부터 각국에서 수행된 소규모 누출 현상 해석 및 누출 전파 현상 해석을 위해 수행된 연구 내용들을 종합해 보면 다음 표 9.2.1과 같이 정리할 수 있다.



표 9.2.1 각국에서 수행된 소듐-물 반응 특성 연구에 대한 요약

Nations	Large Na-H <sub>2</sub> O Reaction	Leak Propagation	Leak Detection System	Code Development
JAPAN	-SWAT-3 (Monju의 1/2.5) -대형로용 예비 연구(계속)	-SWAT-2에서 9Cr-1Mo에 대한 wastage 실험 -SWAT-3에서 누출전파 시험은 1985년 완료 -DBL 저감을 위한 연구실험	-소듐 및 Cover gas 중의 수소 검출계 개발 -음향계는 개발 중	-대규모 물 누출 평가용 코드 SWACS 개발 및 무역연용으로 개선중 -누출 전파 해석용 LEAP 및 특성 평가용 SWACS 'D' 개발
U.K.	-SuperNoah (PFR의 1/2)는 1970-80년대 실시	-2.25Cr 및 9 Cr강에 대한 미량 누출 시험 -SuperNoah에서 소/중규모 누출 실험으로 DBL=1 DEG 터당성 검증	-수소와 산소 검출계 개발 -음향계는 PFR의 관관에 설치해 BNG 특성을 측정	-대규모 누출 평가 코드 FLOOD 개발 -물 누출전파 평가용 BLUSH 개발
FRANCE	-CASTER Loop 건설 (Cadarach)	-MICROMEGAS(Chatou) 및 Cadarach 에서 미량 누출 시험 -누출전파 시험은 Novatom 시설에서 실시	-SPX-1용 수소 검출계 및 음향계 개발	-대규모 누출 해석용 코드 (3D) VERSEAU 개발 -물 누출을 계산용 BERTHA 개발 -누출 전파 해석용 PROPANA 개발
ITALY	-ISA-1 장치에서 SPX-1용 대규모 누출 시험	-ISA-1 장치에서 Incoloy 800 재질에 대한 누출전파 시험 -TETRA 계획은 Jet의 열 전달 시험을 수행	-50 MW SG를 사용해서 수소 검출계의 보정 -음향 검출계의 Background Noise 측정	
GERMANY	-Interatom의 대규모 누출 실험	-Interatom에서 미량 누출 실험 / 누출전파 실험 -TNO에서 12Cr 강에 대한 미량 누출 실험	-수소 검출계의 내구성 확인 -SNR-300에 수소 검출계 설치 -음향계 개발을 위한 R&D용 개발	-유동 해석용 ROUART, ROPLAST와 구조 해석용 SAP4를 통합한 SAPHYR 개발 -3D 코드 BEREPOT 개발 -누출전파해석 코드 개발 중
U.S.A.	-LLTR(CRBRP) 완성 (1982년)	-미량누출실험은 GE와 Atomic International (AI)사에서 수행	-음향계는 GE와 AI에서 ETEC의 모의증기발생기에 설치해서 평가	-GE에서 TRANSWRAP, -ANL에서 SWAAM-1 개발 -그 후에, ANL에서 존정성 임력해석 코드, SWAAM-1(T) 개발
INDIA		-미량 누출 실험 계획 중	-수소 검출계 검증을 위한 Na loop 건설	-대규모 누출 해석 코드 SWRT 개발 및 개선

### 3. 누출 jet 현상

증기발생기에서 소규모 물 누출 효과를 토의할 때 "flame type reaction zone"을 항상 사용해서 이야기한다. 반응존의 영향을 예측하기 위해 "reaction flame" 크기를 결정하는 것이 증기발생기 설계 및 운전에 매우 효율적이다. 이와 관련하여 Chamberlain, Masanov, Unco, Newman

등에 의해 언급되고 있는데, 이들의 결과들을 종합적으로 평가하기 위해서는 실험조건, wastage 결과, 기타 등에 대한 조절이 필요하다.

- Flame model의 실험적인 사양 : 1971년 Melkess에서 개최된 소듐-물 반응에 대한 결과 발표에서 Masanov에 의해 wastage rate와 누출 크기 (누출거리)와의 관계에 대한 연구결과는 그림 9.3.1에 나타낸 실험조건하에서 매우 negative하게 가정되었음을 알 수 있다. 유사한 실험에 대한 결과 발표에서 Ueno 등은 과열증기를 상대적으로 온도가 낮은 냉수 안으로 누출시키는 동일한 유형의 실험을 수행하여 결과를 발표하였는데, 물론 과열증기 압력과 양은 동일하지 않았지만, jet의 모양이 실험적으로 관찰되고 평가되었다. 과열증기 여부 외에 steam 압력과 jet 길이 사이의 관계식을 발견하였다.

$$H \frac{d_s}{d_i} \cong \Delta P^{0.44} \quad (1)$$

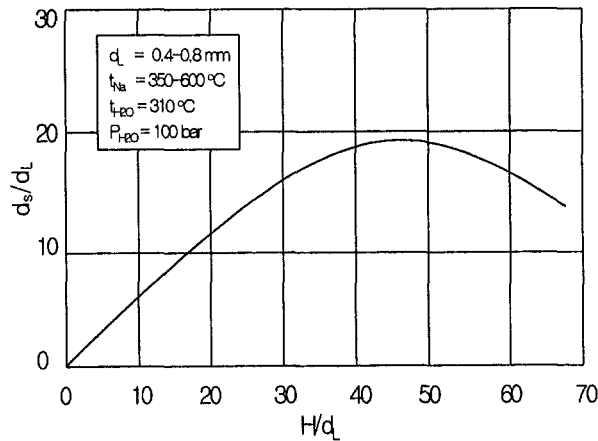


그림 9.3.1. 가정된 반응 flame 모양.

유량을 설명하는데 사용한 방정식에 의하면 Ueno의 방정식은

$$H \frac{d_s}{d_i} \cong \Delta P^{0.5} \quad (2)$$

로 변경되었다. Masanov의 곡선은

$$d_{s/d_L} = 0.75 \cdot \frac{H}{d_L} - 0.008 \left(\frac{H}{d_L}\right)^2 \quad (3)$$

와 같은 방정식을 extrapolated한 것으로 해석할 수 있다. 최대 flame의 길이는 상기 방정식 (2)와 (3)의 조합에 의해

$$H_o = 9.3 \cdot d_L \cdot \Delta P^{0.5} \quad (4)$$

와 같이 평가할 수 있다.

상기 방정식(4)를 그림 9.3.2에 나타내었다. 좀 더 자세한 해석은 그림 9.3.3에 나타내었으며, 독일의 SNR-300 증기발생기 튜브 배열에 적용하여 누출 size 변경에 따른 flame 범위를 함께 나타내었다. 소규모 누출 크기를 0.5mm까지로 고려하면, 스팀이 항상 소듐 쪽으로 누출되는 것으로 가정할 수 있다. 이것은 정상운전조건과 누출에 의한 튜브 벽에서의 큰 압력차에 의한 것이다. 무엇보다도 누출되는 스팀의 온도는 주변의 소듐 온도와 같다고 가정하였다.

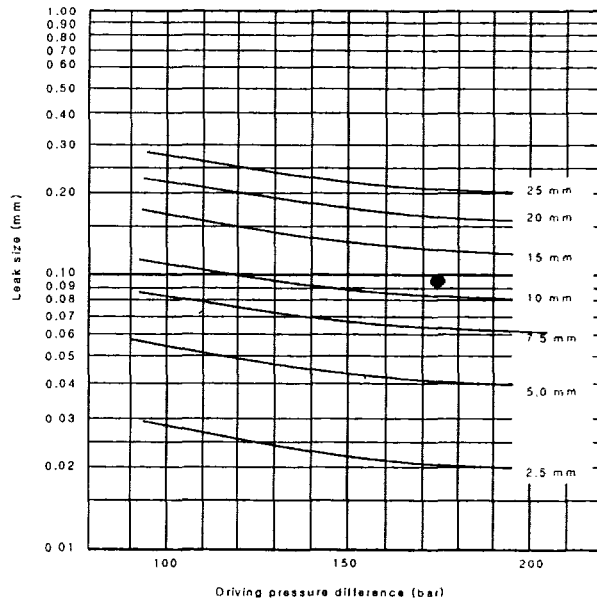


그림 9.3.2. 소듐 부위에서 steam jet에 의한 영향.

Pre-heater와 evaporator에서 효율적인 압력 차이는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta P = P_{sat} - P_{Na} \quad (5)$$

여기서,  $P_{sat}$  는 대응하는 소름 온도에서 포화증기압력이다. 누출율을 계산하기 위해서는 포화 조건에 대한 비용(specific volume)과 adiabatic exponent 값을 알아야 한다.

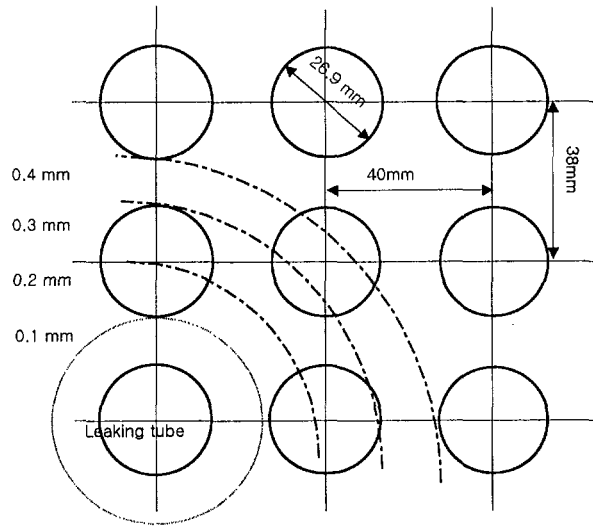


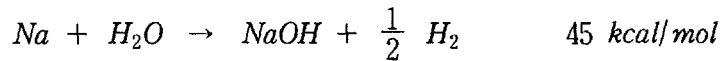
그림 9.3.3. 튜브 배열에 따른 flame의 영향 범위.

상기 4번 방정식에서 가정된 사항들을 확인하기 위해, wastage가 더 이상 발생되지 않는 누출 크기 이하를 결정하기 위해서, 온도 측정 및 wastage test들에 대한 실용성을 검사하여야한다. Interatom에서 수행된 반응온도와 표면온도에 대한 기초자료로 반응 스팀 jet에 대한 일반적인 그림을 그림 9.3.4처럼 만들 수 있다.

스팀 jet는 반응존에서 flame 형태를 만들면서 소름 속으로 들어간다. 반응은 거의 1mm 두께의 boundary mixing zone 안에서 주로 발생된다.

이 flame의 최대온도는 1300~1600 °C를 나타내고, flame이 도달하는 벽면의 온도는 1000~1200 °C를 나타낸다. 이러한 값들은 Interatom에서

수행된 금속 조사시험에서도 밝혀진 바 있으며,



반응에 의해 NaOH 입자들이 형성된다. NaOH의 기화온도는 약 1390°C로 보고되고 있으며, 여기서 형성된 입자들이 약 100 m/sec의 속도로 주변 전열관 표면을 때리게 되는데 wastage 과정은 크게 두 부분으로 구분할 수 있다.

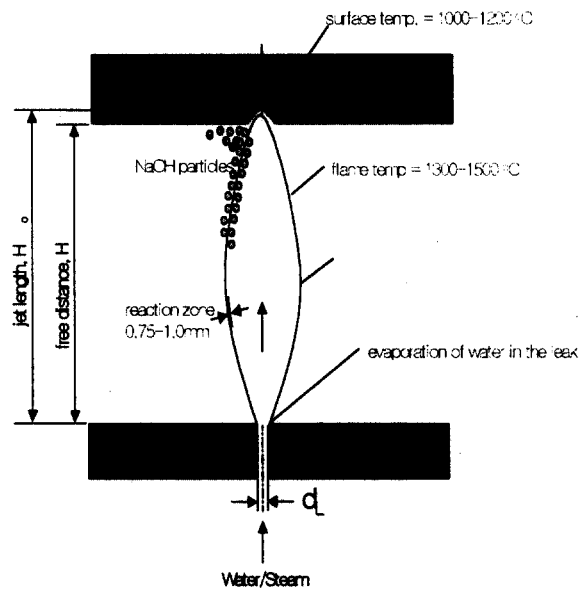


그림 9.3.4. 반응 flame 모델.

- 주변의 튜브 벽은 반응생성물에 의해 온도가 올라가고,
- NaOH가 고온과 고농도에 의해 부식을 일으키고,
- 부식된 표면은 즉시 NaOH droplet에 의해 침식되는데, 이러한 부식 공정이 지속된다.

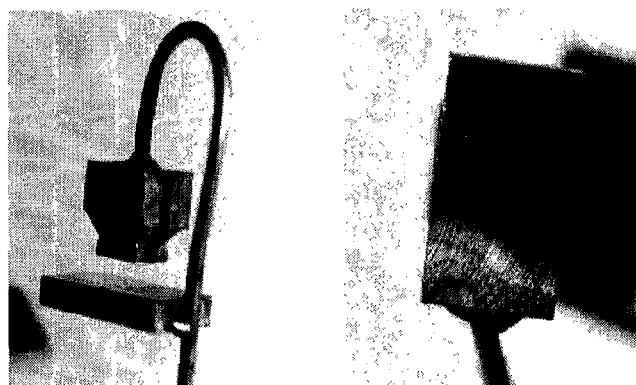
따라서 증기발생기의 전열관 튜브 배열은 상기에서 설명한 wastage 공정에 의한 2차 손상을 피하기 위해 형성되는 flame의 길이가 튜브 배열 시 유지하고 있는 간격보다 길지 않은 곳에서 미리 감지하는 것이 중요함을 간접적으로 예측할 수 있다.

#### 4. 소규모 물 누출 실험 및 표적 손상해석

##### 가. 실험장치 제작

앞에서 언급한 바와 같이 소규모 물 누출실험의 경우, 대부분 물 누출에 의해 발생하는 소듐-물 반응에 의한 자체 시편(specimen)이나 표적(target)에서 발생하는 표면의 wastage현상을 해석하는 것이다. 본 연구에서도 이와 동일한 개념을 도입하여 1차적으로 단일표적 및 자체 시편을 제작하여 물 누출실험을 수행하였다. 먼저 물 누출실험을 수행하기 위한 실험장치의 구성은, 종전에 사용하였던 미량 물 누출장치를 개조하여 소듐의 저장용량을 확대시켰으며, 물 인입장치 및 제어장치는 기존에 사용하던 장치들을 계속적으로 사용하고자 하였다. 본 실험에서는 고온의 소듐 이송을 위해 필요하였던 소듐 저장조를 소듐-물 반응장치 하부에 위치시켜, 소듐-물 반응 실험이 완료된 후, 고온의 소듐을 자연적으로 drain시키는 방법을 선택하였다.

따라서 전년도에 실험장치에 비해 어느 정도 간략한 실험 시스템으로 구성하게 되었으며, 누출시편 및 target material은 2.25Cr-1Mo steel을 사용함으로써 종전에 사용되었던 ferrite steel의 특성을 벗어나게 되었다. 한편, target material로는 flat 형태의 2.25Cr-1Mo steel plate를 가공하여 사용하였으며, 자체시편 역시 동일한 재질을 사용하였다. 자체시편 및 제작된 표적을 그림 9.4.1에 간단히 나타내었다.



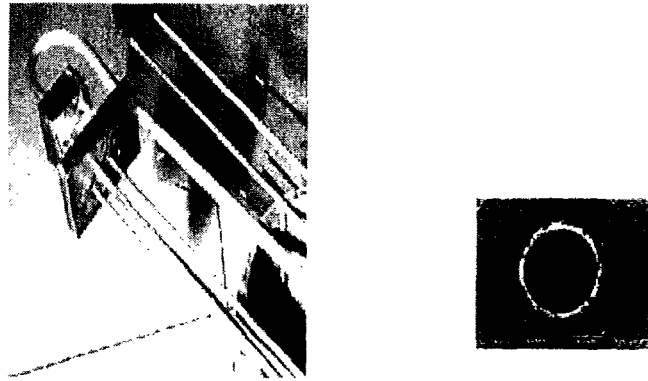


그림 9.4.1. 물 누출 시편 및 단일 표적.

#### 나. 실험방법

- (1) 상기 2.1에서 제작된 누출시편 및 표적을 누출 반응기 상부 flange에 장착하고, 다음 그림에서 보는 고체 소듐 brick을 원하는 용량만큼 투입한 후 flange를 덮고 sealing한다.
- (2) 반응기 상부에는 물 누출시 발생하는 수소가스에 의한 압력상승과 발화의 방지를 위한 expansion type의 용기를 제작부착하고 vent line을 설치하여 실험 전에 반응기 내부에 Ar 가스를 투입하여 공기와의 접촉을 방지한다.
- (3) 상기 (1)항의 누출 표적 후면에 열전대를 설치하고, 이를 온도자료 획득장치와 연결하고 실험준비 상태를 확인한다.
- (4) 투입시키고자 하는 양만큼의 물(증류수)을 물 누출기에 넣은 후 외부 가열기를 작동시켜 고압의 수증기를 생성시킨다.
- (5) 소듐-물 반응기의 외부 가열로를 작동시켜 상기 (1)항의 고체 소듐을 용융시키고 원하는 실험 온도까지 가온한다.
- (6) 온도 획득 장치를 사전에 가동한다.
- (7) 물 누출 중간 라인에 설치된 증기 누출 밸브를 열어 물 누출 실험을 수행한다.
- (8) 물 누출 실험이 종료되면 소듐-물 반응기 하부에 장착된 소듐 저장조 및

이송 라인의 온도를 가온한 후 vent line을 열고 하부로 고온의 소뚝을 drain 시킨다.

- (9) 소뚝-물 반응기의 온도를 낮추고 상기에 설명한 순서의 역순으로 반응기 내부에 장착된 시편 및 표적을 인출하여 공기가 차단되도록 sample 병에 시편을 보관한 후 분석을 수행한다.

#### 다. 분석

자체 시편 및 표적의 손상 정도와 손상 부위의 부식상태를 관찰하기 위해 Electron Probe Micro Analyzer (EPMA, Jeol-Jax 8600, 일본)와 Scanning Electron Microscopy(SEM, Jeol-840A, 일본), X-ray diffractometer를 이용하여 분석하였다.

### 5. 결과 및 고찰

#### 가. 1차 실험

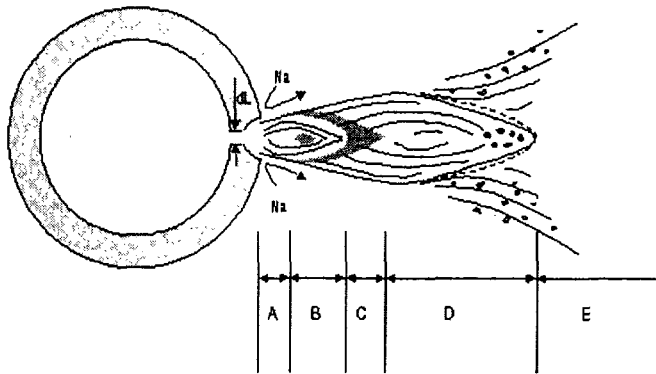
소뚝 용량이 증가된 실험장치의 제작 시, 기존의 미량 누출 실험장치는 제거되는데, 실험장치를 제거하기 전에 이 장치를 이용하여, 자체 시편과 flat 형태의 표적을 제작/설치하여, 실제 소규모 물 누출이 발생하는 경우, 누출되는 스팀이 소뚝-물 반응을 일으키면서 반응 jet를 형성하고, 이 jet가 표적의 표면을 wastage시키는지를 확인하기 위한 예비실험을 수행하였다.

일반적으로 소규모 물 누출에 의해 발생하는 wastage 측정실험의 경우를 보면, 자체시편에서 물 누출의 nozzle은 원형 nozzle에 의한 실험이 대부분으로, 이 때 원형 nozzle을 통해 분출되는 물(증기)의 경우 다음 그림 9.5.1과 같은 형태를 띠면서 분출되는 것으로 알려져 있으며[9.5.1], 여기서 발생하는 jet의 길이는 누출 압력보다는 누출되는 nozzle의 크기에 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다.

그림으로부터 누출되는 leak size에 따라서 분출되는 jet의 길이는 서로 다르게 형성되며, jet의 말단부분에 위치하는 표적(전열관)에서 wastage가 제일 빠르게 진전될 것으로 예상되기 때문에, 표적과 누출 위치간의 관계가 고려된



실험자료의 확보가 필요할 것으로 사료된다.



Region	Name	Wastage Distribution	Phenomena
A	Decompression	-	No wastage
B	Steam core		Toroidal type wastage
C	Transition		Pit type wastage
D	Fully reacted		Smooth abrasion
E	Unaffected	-	No wastage

그림 9.5.1. 물 누출 jet 및 거리별 영향.

이를 기초로 하여 본 연구에서는 기존에 사용하던 미량 누출장치를 이용하여 물 누출실험을 수행하였으며, 실험은 기존의 미량 물 누출 실험 장치를 재사용하였으며, 실험장치와 간단한 P&ID를 그림 9.5.2에 나타내었다.

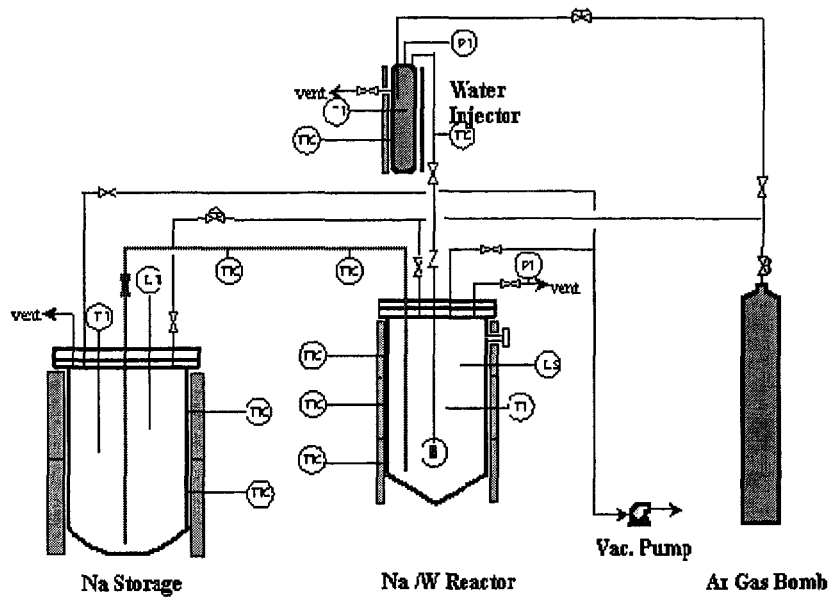
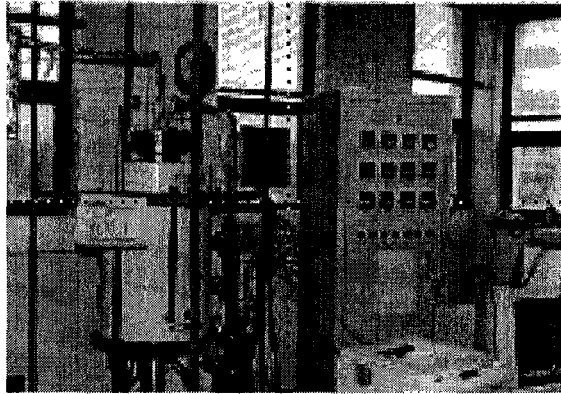


그림 9.5.2. 미량 물 누출 실험장치 및 P&ID.

반응기에 들어가는 소듐은 그림 9.5.3에 보는 것 같은 고체 소듐 벽돌을 반응기에 넣은 후 외부 가열에 의해 용융시킨 후 사용하였으며, 누출되는 물의 양은 기존의 미량 물 누출 실험장치에 장착된 injector를 사용해서 증류수 15ml를 투입한 후 외부 온도를 가열하여 약 150 psi되는 압력의 스팀을 제조하여 누출시켰으며, 누출 시편의 누출 size는 직경이 0.15mm인 원형 nozzle을 사용하였다.

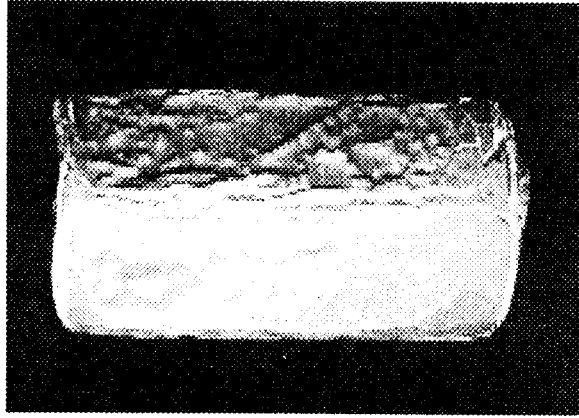
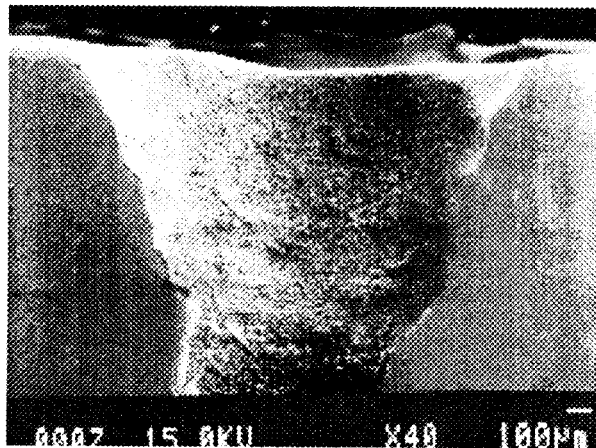


그림 9.5.3. 소듐 brick의 모습 (약 1.8Kg).

누출시편과 표적간의 거리는 예비실험의 성격상 거의 근접시킨 상태로 시편을 제작하였으며, 실험방법 및 분석은 기존의 미량 물 누출실험과 동일하게 수행하였다.

그림 9.5.4에 상기 실험조건으로 2.25Cr-1Mo 시편으로 제작된 표적을 이용하여 1차 실험을 수행한 결과로 1차 실험으로부터 얻어진 자체 시편과 표적의 표면을 전자현미경(SEM)으로 관찰하여 나타내었다. 그림 중 위쪽의 그림은 자체시편을 나타내고 있으며, 아래 그림은 표적에서 물 누출로 발생된 표면의 손상을 나타낸 그림이다.



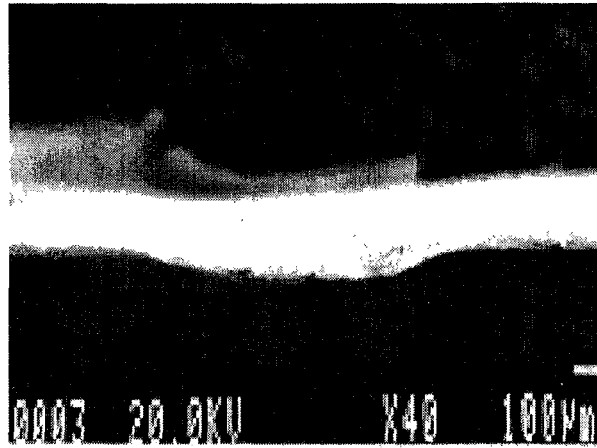


그림 9.5.4. 소규모 물 누출실험에서 관찰된 자체시편과 표적의 표면.

누출시편의 leak hole이 초기의 hole size와 비교해서 소듐 부위에서 손상을 입어 직경이 확대된 것을 알 수 있고, 누출이 진행되면서 소듐-물 반응에 의한 누출부위에서의 부식이나 침식 등과 같은 damage는 소듐부위에서 시작됨을 간접적으로 알 수 있으며, 사진을 자세히 관찰해 보면 시편표면에 흰 침적물들이 붙어있는 것을 관찰할 수 있다.

이를 확인하기 위해 자체시편을 원소분석기(EMPA)를 이용하여 원소분석을 수행하였으며, 분석 결과를 표 9.5.1에 간단히 나타내었다.

표 9.5.1 2.25Cr-1Mo 시편을 사용한 물 누출 실험 후 원소분석 결과

원 소	Elements, Weight %						
	Cr	Ni	Fe	Mo	V	기타	Na
실험전 (Metal base)	3.41	0.17	91.08	1.01	1.38	-	-
실험후 (Metal base)	2.71	0.40	88.21	-	-	-	3.35
(oxide base)	2.87	0.35	89.07	-	-	-	2.83

표 9.5.1은 2.25Cr-1Mo 시편의 물 누출실험 전/후의 원소 함량을 나타낸 것으로, 구성원소들은 물 누출에 의해 형성되는 반응생성물, 반응열 등에 의해 산화물 형태로 부식이 발생된 것으로 예측되었으며, Mo 성분의 경우 소듐-물 반응에 의해 발생된 국부적인 고온의 반응열로 원소가 휘발된 것으로 사료되었

으며, 물 누출이 진행됨에 따라 자체시편 표면에서 소듐 화합물로 추측되는 침적물이 관찰되었는데, 이를 확인하기 위해 시편을 SEM으로 관찰하여, 그림 9.5.5에 간단히 나타내었다.

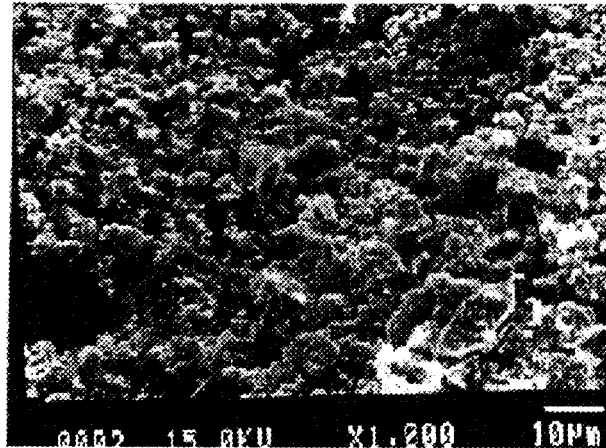


그림 9.5.5. 시편 부식부위 표면의 SEM 사진.

이 사진으로부터 누출부위 하부에 흰색의 침적물들이 부착되어 있는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 미량의 물이 누출되면서 발생하는 소듐-물 반응생성물 중 NaOH나 Na<sub>2</sub>O와 같은 소듐 산화물로 예측되며, 이 화합물과 시편 자체의 substrate 경계면에서 소듐 산화물과 재질을 구성하고 있는 원소(Fe, Cr, Ni 등)와의 반응에 의해 소듐 혼합물 형태로 침적되어 있을 가능성이 크다. 이 실험으로부터 표적 표면은 미량의 물이 누출되는 것에 의해서도 corrosion 및 erosion에 의해 어느 정도 손상이 발생하는 것으로 예측할 수 있다.

한편, 상기 그림 9.5.5의 하부 그림을 보면 표적 표면이 누출되는 스팀 jet에 의해 소듐-물 반응이 발생되면서 생성되는 소듐 화합물의 erosion 및 corrosion에 의해 마모된 것을 알 수 있는데, 이 경우 약 10ml의 물이 누출된 경우로 미량의 물 누출에 의해서도 재질의 손상이 진행되었음을 알 수 있다.

#### 나. Jet simulation 실험

한편, 물 누출에 의해 누출부위에서 steam이 배출될 때, 발생하는 jet 현상이 실질적으로 발생하는지를 확인하기 위해 소듐 분위기가 아닌 일반 물 분위기

에서 질소가스를 이용하여 가스 누출 실험을 수행하였다. 실험은 대형 수조에 약 50 l 의 증류수를 채운 후, 실제 소듐 분위기에서 물 누출실험에 사용될 시편과 유사한 시편(누출 hole dia. 0.15mm 시편과 이를 press로 압축하여 slice 형태의 shape을 만든 시편)을 사용하여 간이 실험장치를 설치하고 일반 질소가스를 이용해서, 누출 시편 각각에 고압의 질소가스를 통과시킴으로써 인위적으로 가스가 누출되도록 누출 실험을 수행하였다.

그림 9.5.6에 누출 압력별로 물 속에서 질소가스가 누출될 때 발생하는 jet의 모양을 관찰하여 나타내었다. 그림 상부는 약 30 psi의 낮은 압력에서 질소가스를 분출시킨 것이고, 하부는 상대적으로 고압인 약 300 psi로 질소가스를 분출시킨 그림이다. 누출시편의 모양이 slice 형태인 경우에 생성되는 기포의 크기 및 누출되는 jet의 길이가 circle 형태의 시편에서보다 상대적으로 약간 크게 나타나는 것을 알 수 있으나, 그 크기에 대한 차이는 정확히 관측할 수 없었으며, 다만 slice형태의 시편인 경우 slice 길이가 상대적으로 길기 때문에 나타나는 현상으로 추측된다.

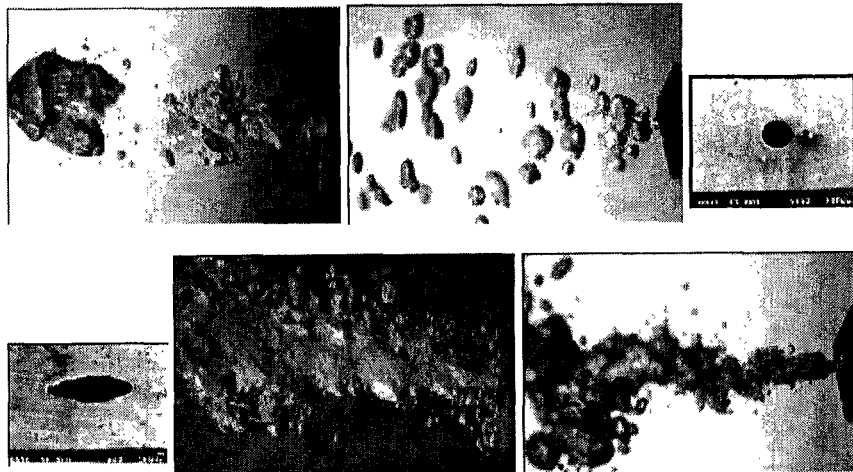
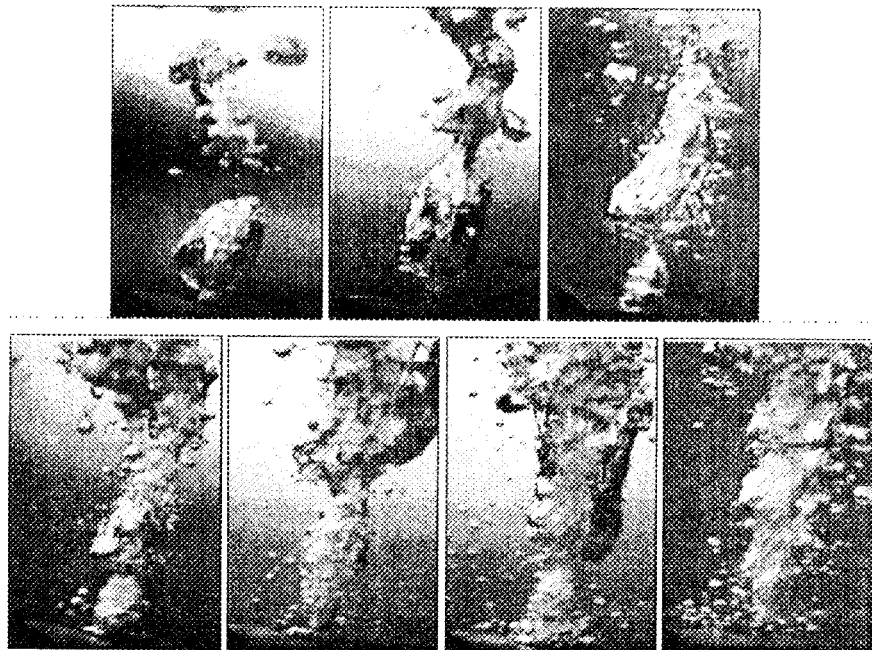


그림 9.5.6. 질소가스를 이용한 누출 hole에서 발생하는 Jet 모습.

한편, 두 시편에서 발생된 jet의 형태를 보면 누출압력이 증가할수록 서서히 jet 모습이 형성되면서 jet와 소위 flame 부위가 확연히 구분되는 현상을 관찰할 수 있었다. 그림 9.5.7에 상기 두 가지 누출 모양에 따라 각 압력별로 누

출되는 모양을 관찰하여 나타내었다. 상부는 slice 형태의 누출 hole에서 질소가스가 누출되는 모습을 나타낸 것이고, 하부의 그림은 circle 형태의 누출기를 통해 누출되는 모습을 나타낸 것이다.

그림에서 누출 압력은 처음의 경우 약 30psi에서 점차 75, 100, 150, 200, 300 psi로 누출 압력을 증가시키면서 질소가스를 누출시킨 경우를 나타낸 것으로, 상부와 하부 그림을 자세히 관찰해보면 앞에서 설명한 leak jet의 모습을 간접적으로 관찰할 수 있으며, 이 그림을 자세히 분석하여 flame 부위와 jet core 길이를 누출 size 변화에 대해 저압에서의 경우와 상대적으로 고압에서의 경우에 대해 구분하여 다음 그림 9.5.8에 간단히 나타내었다.



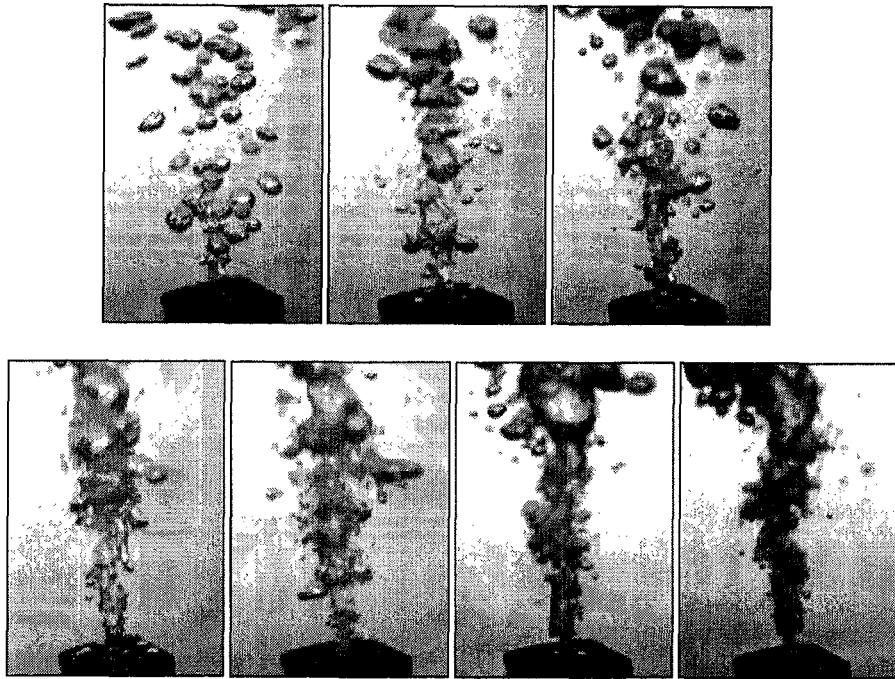


그림 9.5.7. 질소가스를 이용해 slice/circle 형태의 누출기에서 누출 모습.

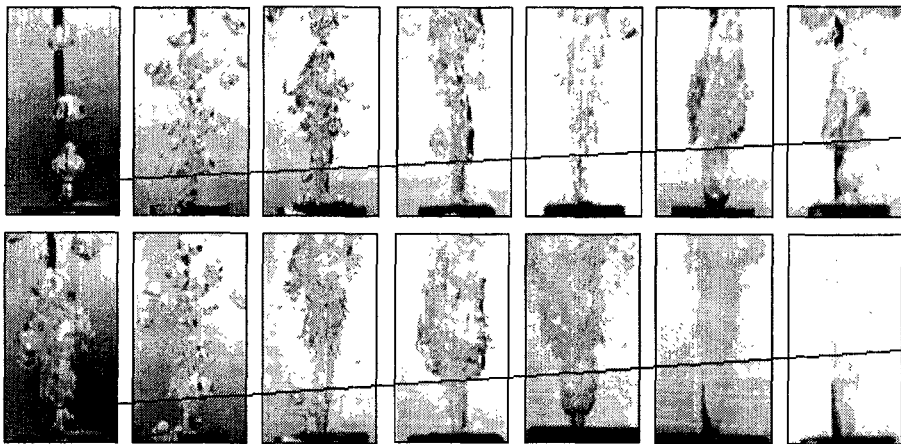


그림 9.5.8. Jet core 부위의 길이.

상기 그림은 동일한 circle 형태의 누출기와 동일한 누출 압력으로 누출 크기를 변경해서 누출 실험을 수행한 결과를 나타낸 것으로, 누출 크기는 초기



0.13mm를 시작으로 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5mm diameter를 갖는 injector를 사용하여 질소가스를 누출시킨 후 발생하는 jet 길이를 나타낸 것이다.

그림에서 상부는 상대적으로 저압으로 유지된 경우, 즉 30 psi의 누출 압력을 사용한 경우를 나타낸 것이고, 하부의 그림은 상대적으로 고압인 300psi의 압력으로 누출시킨 경우를 나타낸 것이다. Jet core의 부위가 두 경우에서 모두 선명히 나타남을 알 수 있으며, 누출 압력의 변화에 따라 거의 동일한 모양으로 누출 길이가 길어지는 것을 알 수 있으며, 누출 압력보다는 누출 크기가 jet core의 길이를 좌우하는 것으로 생각된다.

따라서 실제 소듐 분위기에서 물이 누출되는 경우도 이와 유사할 것으로 판단되기 때문에, 누출되는 leak hole의 size, shape, 각도 등과 jet의 길이와의 상관관계를 해석하는 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것으로 생각되는데, 이는 물 누출크기에 따라 실제 증기발생기 전열관의 배열시 전열관 간의 거리에 영향을 미칠 것으로 사료되기 때문이다.

실제로 소규모 물 누출의 경우 누출 size와 표적에서의 damage에 의한 wastage rate와의 관계에 대한 보고에 의하면, wastage rate는 표적과 시편의 거리를 “L”이라고 하고, 누출되는 leak size를 “D”라고 하면, L/D의 값에 따라 어느 일정한 값까지는 증가하다가, 한계 값을 넘을 경우 다시 감소한다는 보고가 각국의 실험에 의해 밝혀진 바 있으며, 그 한계 값은  $L/D \approx 20$  일 경우 최대 wastage rate를 나타낸다는 보고도 있다[9.5.2].

이러한 보고로부터도 상기에서 수행된 jet core의 길이는 일정한 압력에서 leak size의 증가에 따라 길이는 증가할 것으로 생각되지만, 그 경향은 어느 정도 leak size 이상이 될 경우 더 이상의 증가는 없을 것으로 생각된다.

#### 다. 실험장치 개선 및 물 누출 실험

앞에서 설명한 소듐 분위기에서 물 누출에 의한 표적의 손상 가능성을 예비실험을 통해 확인한 후, 기존의 미량 물 누출 실험장치는 제거되었으며, 물 누출을 확대에 따른 새로운 소듐-물 반응기가 stainless steel로 제작되었고, carbon steel을 이용하여 소듐 drain 탱크를 제작하였다. 물인입 장치와 각종 제어장치들은 기존에 사용되던 장치들을 재 사용하였다. 한편, 물 누출시편 및 표적은 상기 그림 9.4.1의 (a, b)처럼 가로 30mm, 세로 45mm, 두께 3.5mm로

제작되었으며, 표적 후면에 13개의 열전대를 장착하여 원형을 이루도록 hole 가공한 후 고온의 무기접착제를 이용하여 열전대와 시편이 고정되도록 처리하였다.

그림 9.4.1의 (a)는 자체시편 및 표적으로 누출시편의 직경이 0.15mm로 표적에 대한 초기실험인 점을 고려하여 L/D의 비율을 적절히 조절하였으며, (b)는 표적 뒷면을 나타낸 것으로 열전대가 부착될 수 있도록 작은 hole을 내어 접착이 가능하도록 하였으며, 열전대가 들어가는 깊이는 표적의 두께와 거의 동일하게 하여 반대부분에서 발생하는 반응열이 직접 감지될 수 있도록 하였으며(그림 9.5.5 참조), (c)는 누출실험 전에 열전대를 부착하고 있는 시편의 모습을 보여주고 있다. 표적 표면에 접근하도록 그림 9.5.9처럼 구멍을 낸 후 접속시켰다.

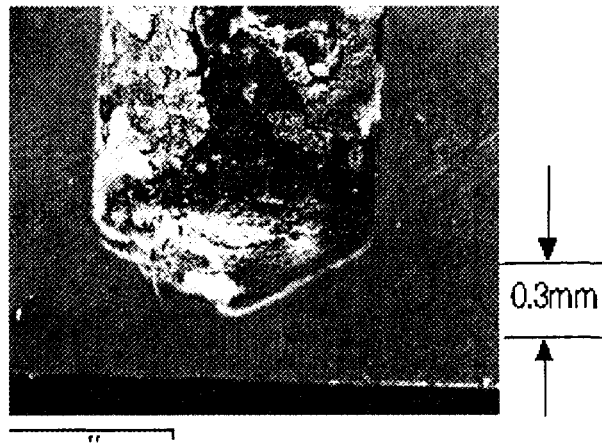


그림 9.5.9. 표적 후면의 열전대 접속을 위한 hole.

물 누출 반응기, drain tank 및 물인입 장치 등이 설치가 완료되어 예비 실험으로 아르곤 가스를 이용한 leak test, 소듐 용융 실험 및 용융 소듐의 drain에 대한 실험을 완료하였으며, 예비실험에서 나타난 문제점으로 소듐 용융시 발생하는 소듐 mist 및 실험의 안전성 확보를 위해, 물 누출실험이 수행될 경우 소듐-물 반응에 의해 발생하는 수소가스의 제거를 위한 라인을 설치하였으며, 완성된 물 누출 실험장치의 최종 모습은 아래 그림 9.5.10과 같다.

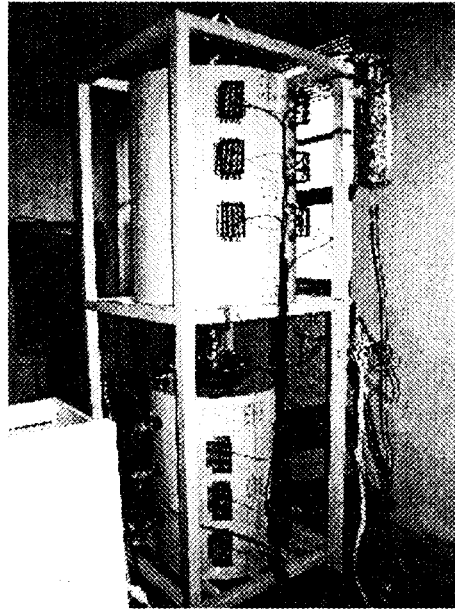


그림 9.5.10. 물 누출 실험장치.

라. 반응 jet에 의한 표적에서의 온도 profile 및 손상현상

고온의 소듐 분위기로 미세 누출 구멍을 통해 고압의 수증기가 분출되면 누출 구멍을 통해 상기 그림에서처럼 jet 현상을 일으키며 이웃 전열관(표적) 표면에 손상을 가하게 되는데, 소듐-물 반응에 의해 발생하는 많은 반응열에 의해 표적 표면에서는 온도 상승부위가 발생하게 되고, 발열부위가 재질의 부식이나 침식의 원인 부위로 발전하고, 시간이 경과함에 따라 이 부위가 집중적으로 손상을 입어 제2차 손상을 일으키는 부위가 될 가능성이 크다.

이러한 현상을 해석하려는 이유는, 2차 손상을 입는 부위의 크기가 추후 발생될 연속적인 물 누출의 2차 누출 크기를 결정하기 때문에 이의 예측은 대단히 중요하고, 이의 크기를 예측하기 위해 2차 표적의 뒷면에 상기 그림 9.1에서 본 것과 같은 열전대를 조밀하게 접착하여 실제 물 누출시 표적 표면에서 소듐-물 반응이 일어날 때 나타나는 반응열의 변화가 표적의 표면에서 발생된다고 가정하면, 표적 표면에서 발생하는 온도를 측정해 볼 경우, 온도의 변화가 나타날 것으로 예측되고, 이 자료로부터 간접적으로 누출부위의 크기를 예측할 수 있을 것으로 생각되었다.

다음은 일본에서 수행된 소규모 물 누출 실험에 대한 결과를 간단히 나타낸 것으로, 누출되는 거리에 따른 표적에서의 소듐-물 반응에 의해 손상되는

wastage에 대한 깊이와 넓이를 해석한 자료를 간단히 언급하였다. 소듐 가열 증기발생기의 전열관의 결함에 의해 물이 소듐 속으로 누출되면, 소듐-물 반응에 의해 형성되는 고온의 반응생성물에 의해 주변의 전열관이 wastage를 입게 되는 것은 초기의 설명과 같다. Wastage 실험은 미국의 APDA를 비롯해서 각국에서 활발하게 연구되었지만 아직 명확하게 밝혀진 바는 없다. 이러한 이유는

- 고온, 고압의 물/수증기를 비교적 소량으로 정량적인 만큼만 제한적으로 주입하는 실험,
- 분출하는 노즐에서의 물의 온도, 압력의 조건을 제어하기 어려운 점,
- 분출되는 현상이 wastage에 큰 영향을 미치는 점,
- 실험에 사용하는 시편마다 소듐 속에서 조작해야하는 필요성

등 실험 기술상 곤란한 점이 많기 때문이다.

따라서, 이제까지 얻어진 실험 결과들을 종합해 보면 wastage에 영향을 미치는 parameter를 보면 노즐 직경, 노즐과 target과의 거리, 물 누출율, jet의 상태, 물이나 소듐의 온도, target의 재질 등을 들 수 있다. 특히 물 누출율과 소듐 온도의 영향이 큰 것으로 나타났다.

Wastage의 메커니즘은

- 1) 부식설
- 2) erosion 설
- 3) 상기 두 인자의 혼합 작용설

등이 있는데 정확히 어느 것이라고 판정하기 어려운 것이 현실이다. 이 때문에 이론적인 고찰은 많이 이루어지지 않고 있으며, 植野 등은 물 속에서 고온의 물을 분출하여 증기 쪽에서 응축될 때 최대 wastage가 발생하는 거리와 물의 온도 및 압력과의 관계식을 유도한 바 있다. 또 Pugh는 wastage가 증기의 cavitation에 의한 erosion 작용에 대해서 연구를 한 바 있다. 그 외에 몇 개의 간단한 정리식이 발표되고 있는데 이 모든 자료들이 소듐-물 반응을 이론적으로 정리하여 표시한 관계식은 없다.

따라서 일본에서는 wastage의 메커니즘으로서 부식 작용이 지배적이라는 관점에서 반응생성물의 jet의 농도와 온도분포의 계산식을 도출해서 부식의 온도 의존성을 나타내는 관계식을 도출하고, 실험 데이터와 비교한 결과를 생산하

였다. Wastage의 실험 데이터는 저자 등이 수행했던 이전의 실험 데이터와 APDA 실험 데이터를 사용하였다. 또 반응생성물 jet의 온도분포를 구하는 실험을 수행하여 이론적인 해석결과와 비교하기도 하였다.

실험은 증기발생기를 국부적으로 모사한 반응용기 내의 유동 소뿔 속에서 과열 수증기를 주입하는 실험을 수행한 것으로 실험장치는 반응용기, 반응 생성물 방출 장치, 주순환 장치, 소뿔 정화 시스템, 물 누출 검출 장치 및 물 주입 장치 등으로 구성하였다. 장치의 구성도는 그림 9.5.11과 같으며, 반응 용기의 내경은 400 mm, 높이는 2300 mm이고 소뿔은 상부에서 하부로 유동한다. 주입되는 수증기의 양은 수증기의 주입 전 후 온도와 압력으로부터 계산하였다.

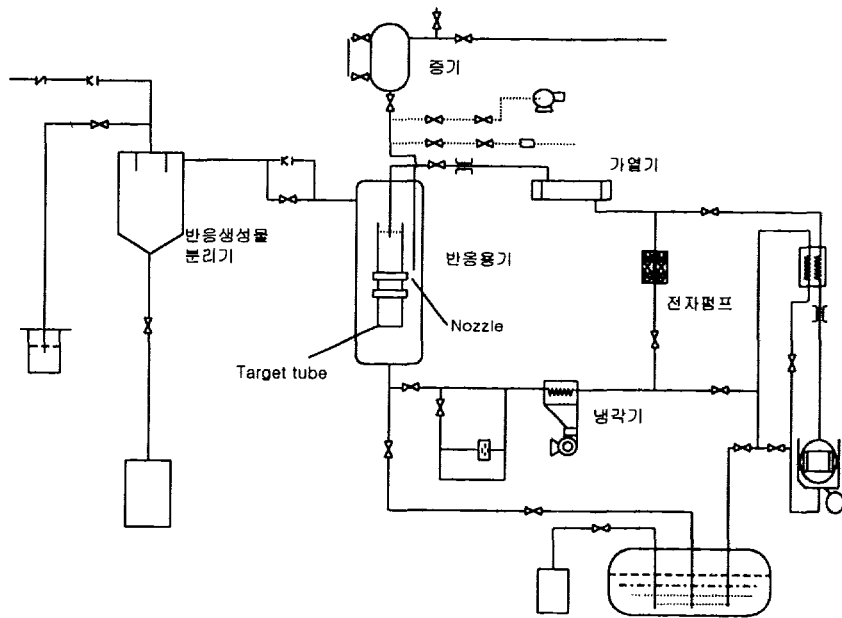


그림 9.5.11. 실험장치 계통도.

그림 9.5.12는 소뿔-물 반응이 일어나는 부위로 a)는 증기발생기의 전열관을 모사해 wastage 상태를 관찰하는 시편(target 판)을 나타내고 있으며, target 판의 재질은 2.25Cr-1Mo steel이다.

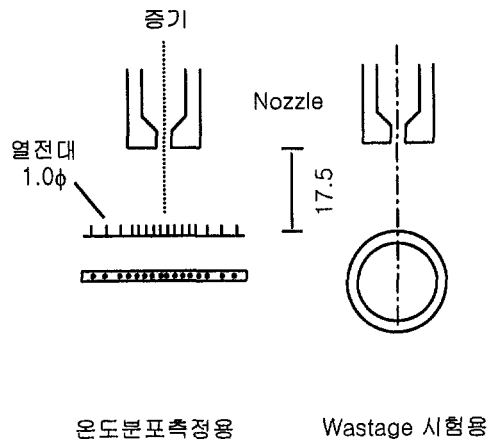


그림 9.5.12. 소듐-물 반응 시험부.

b)는 반응생성물 jet의 온도분포를 구하기 위한 시험부이며, 수증기 분출노즐은 내경은 0.5mm이다. 온도분포 측정용에는 외경 1.0mm 열전대를 상기 그림 9.12와 같이 배열해서 사용했다. 반응생성물이 열전대에 충돌하면 그 열전대 표면을 wastage시키기 때문에 1회의 실험은 4초간으로 하였다. 수증기 분출 노즐과 target과의 거리는 실제 규모 증기발생기 전열관을 고려해서 17.5mm로 하였다.

Jet의 산란이 wastage에 큰 영향을 미치기 때문에 사용되는 노즐을 사용해서 사전에 대기 증으로 상온의 물이나 수증기를 분출시켜 침상의 jet 형태가 형성되는지 확인하였다. 소듐 유속 역시 실제 증기발생기 내에서의와 같은 0.24m/sec로 일정하게 유지하였다. 표 9.5.2에 실험 조건을 간략하게 나타내었다.

표 9.5.2 Wastage 시험 조건

	온도 분포 시험	Wastage 시험
Nozzle 구경, mm	0.5	0.3, 0.5, 0.7, 1.5
Target, mm	1.0φ 열전대	26.5φ 2.25Cr-1Mo steel
Nozzle-target간 거리, mm	17.5	17.5
Na/물 온도, °C	330~530	280~540
물 압력, atg	100	80~130

실험결과로 그림 9.5.13에 target관 표면에서 관측된 wastage에 의한 impingement 상태(wastage 분포)를 나타내었다. 이 경우 소듐과 수증기의 온도는 동일하게 480℃, 수증기 압력은 80-130 atg 이다. 노즐과 target과의 거리가 일정하고 노즐 직경을 0.3, 0.5, 1.5mm로 변경시켜 가며 영향을 관찰하였는데, wastage의 길이는 3배로 확대되어 나타났다. 노즐 직경이 작은 경우 wastage 면은 pit 상태이지만 노즐 직경이 증가하면 노즐의 중심 축 보다도 주변에서의 impingement가 크게되어 소위 torroidal 상태를 이룬다.

Wastage부위에서 최대로 부식 당한 부위의 깊이를 물 주입시간으로 나누어서 wastage 율을 구하면 노즐과 target간의 거리가 일정할 때 노즐 직경이나 물 주입 압력을 증가시켜 물 누출 율을 증가시키면, wastage rate는 증가하지만 10 g/sec 까지는 wastage rate가 증가하는 경향이 있으며, 소듐 온도가 증가할수록 wastage rate는 지수 함수적으로 증가한다.

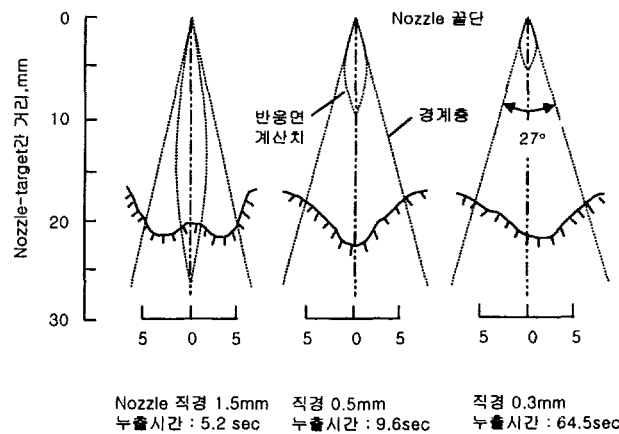


그림 9.5.13. Wastage 분포의 실험 예와 반응 경계면의 계산치.

이러한 실험결과는 다른 나라에서 발표된 실험자료와 일치하는 경향으로 APDA의 포화 수증기를 이용한 wastage 실험결과와 본 연구진에 의해 과열 수증기를 이용한 실험 과와는 본질적으로 차이는 없고, wastage rate는 소듐 온도에 의해 그 차이를 설명할 수 있다. 따라서 wastage rate에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 노즐과 target간의 거리와 노즐 직경 및 소듐 온도라고 간주할 수 있다고 해석하였다.

온도분포를 측정한 결과로 그림 9.5.14는 상기 그림 9.5.13의 b에 나타난 열전대에 의해 측정되었던 반응 생성물 jet의 반경 방향에 대한 온도분포의 예를 나타낸 것이다. 주변의 소듐 온도보다 높은 반응생성물이 존재하는 폭은 약 10mm를 나타냈으며, 그림 9.5.13의 노즐 직경이 0.5mm 인 경우 wastage 면의 크기와 잘 일치하고 있다. 이와 더불어 wastage 분포와 함께 온도분포는 정규 분포에 가까운 형상을 하고 있음을 알 수 있다. 최대 온도를 나타내는 pit의 폭이 좁기 때문에 잘 측정되지는 않았지만 소듐 온도와 함께 반응생성물의 최대 온도는 증대하는 경향을 나타내고 있다. 더구나 그림 중의 실선은 후술할 이론 계산치를 나탠 것이다.

반경 방향의 온도분포의 측정결과를 나타낸 다른 보고서는 없지만 최대 온도 값은 APDA의 실험 값과 비교적 유사하다. 다만 후술하겠지만 그림 9.5.10의 경우 다소 높은 온도 영역이 존재하는 것으로 생각되었다.

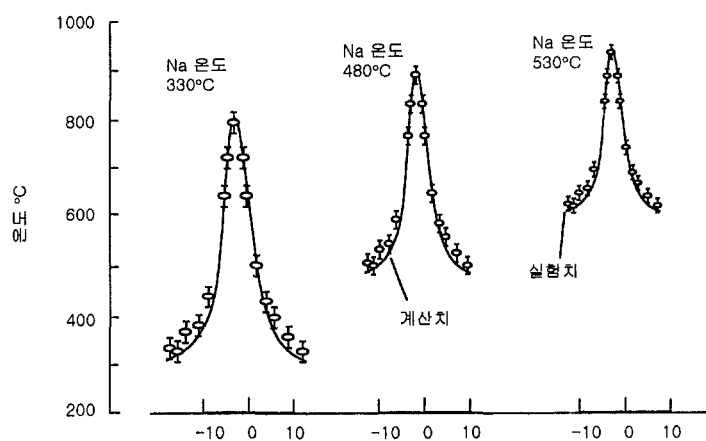


그림 9.5.14. 반응부의 온도분포와 Na온도.

한편, jet가 발생될 경우에 대한 각국에서 발표된 자료를 보면 다음그림 9.5.15 처럼 요약할 수 있다.



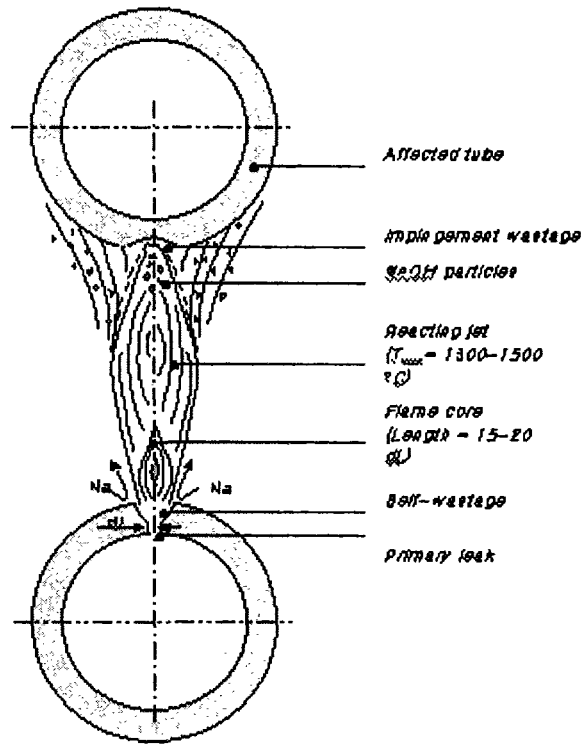


그림 9.5.15. Jet형태와 표적에서의 손상부위.

본 연구에서는 이러한 현상을 해석하기 위하여 자체 시편 및 표적을 설치하여 반응 jet에 의해 발생하는 표적 표면에서의 온도 profile을 얻고자 하였다. 자체 시편의 재질은 2.25Cr-1Mo steel 과 9Cr-1Mo steel을 사용하여 가로x세로 10mm로 제작한 후 아크(arc) 방전을 이용해서 시편 중앙에 0.15mm 직경의 구멍을 만든 후 이곳을 통해 고온, 고압의 물(스팀)이 누출 되도록 하였다.

표적의 제작은 상기 그림에서 보는 바와 같이 가로 15mm, 세로 20mm, 두께 4mm로 만든 후 표적의 후면에 온도측정용 열전대가 접속될 수 있도록 열전대 직경만큼의 크기로 최대한 자체시편 및 표적의 제작이 완료된 후 이를 소듐-물 반응기 안에 장착한 후, 반응기 안에 고체 소듐 벽돌을 적당량 같이 투입한 후 반응기 상부의 플랜지를 완전 장착하여 외부 공기와의 접촉을 차단하였으며, 가스 인입 라인을 통해 Ar가스로 purge를 수행하여 반응기 내부에 잔존할 수 있는 공기(산소)를 제거하였다.

이와는 별도의 작업으로 물 누출기에는 약 15ml의 증류수를 주사기를 통해 투입한 후 외부 가열에 의해 물을 가열함으로써 고온 고압의 수증기를 제조하여

물 누출 실험을 준비하였으며, 소듐-물 반응기 역시 외부 가열에 의해 반응기 내부에 투입된 고체 소듐을 서서히 용융시켜 액체 소듐으로 변환한 후 더욱 가열하여 원하는 소듐 온도인 약 400°C로 조절하였다.

물 누출 실험 준비가 완료되면 물 주입기 상부에 위치한 수증기 누출 밸브를 open 시켜 고온, 고압의 물이 고온의 액체 소듐 안에 위치한 자체 시편의 누출 hole을 통해 jet를 형성시키며 표적을 향해 분출되도록 실험을 수행하였다.

물 누출 실험 조건은

- 액체 소듐의 온도 : 400°C
- 물 누출 량 : 15 ml
- 액체 소듐의 상태 : static state

와 같은 조건에서 물 누출 실험을 수행하였으며, 그림 9.5.16에 상기의 설명에 의해 얻어진 표적 표면에서의 온도 profile을 나타내었다.

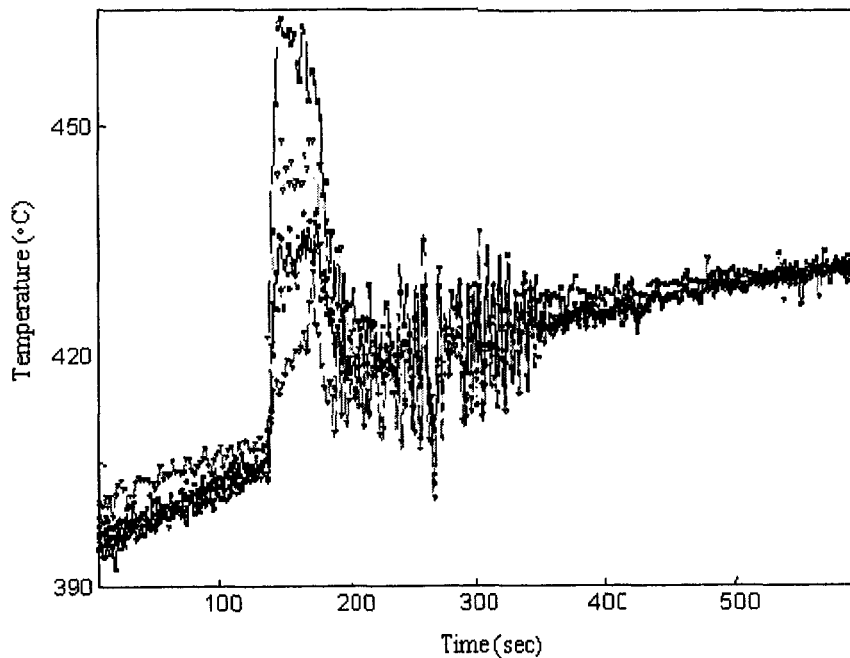


그림 9.5.16. 표적 표면에서의 온도상승 곡선.

그림의 좌측은 표적 표면에서의 온도를 나타내고 있으며, 소듐-물 반응기 내부의 온도가 400°C에 도달된 약 150 sec 후에 고온 고압의 수증기를 인입시킨 것을 알 수 있으며, 실제 약 15ml의 수증기가 외부 가열에 의해 부피 팽창으로 인한 압력 상승에 의해 인입 밸브를 open하는 즉시 누출되고 있음을 알 수 있으며, 약 15-20 sec의 누출 시간을 두어 물 누출기 안의 모든 수증기가 누출되도록 하였다.

물 누출로 인한 표적 표면에서의 온도 상승은 약 70-80°C를 나타내었으며, 이러한 현상은 20 sec 후 누출 밸브를 close한 후에도 약 10 sec 정도 유지되는 것으로 예측되었으며, 물 누출로 인한 소듐-물 반응기 내부의 액체 소듐의 온도도 약간의 증가를 나타내는 것을 알 수 있었다. 일반적으로 물 누출로 인해 발생하는 누출부위에서의 온도 상승에 대한 연구는 액금로 선진국 중 일부 국가에서 연구되었으며, 각국마다 실험장치의 상이성으로 인해 온도 상승 폭이 달리 보고되고 있으며, 그 상승 폭은 대개 물 누출량에 의해 달라진다. 일본의 경우 약 1200°C까지 상승할 수 있음을 보고하고 있으며, 독일의 경우 약 1000°C 내외로 보고하고 있다.

본 연구에서 나타난 약 70-80°C의 온도 상승 폭은 실험장치의 용량이 워낙 작은 규모로 총 누출되는 물의 양이 약 15ml를 넘지 않음으로 인한 경우로, 누출량이 증가하면 외국의 자료들과 거의 동일한 경향을 보일 것으로 예측된다. 단지 누출부위에서 물 누출에 의한 소듐-물 반응으로 반응열이 발생되고 이것이 국부적으로 온도상승을 가져올 수 있음을 확인하는 결과로 나타났으며, 누출부위에서의 부식현상에 미치는 온도의 영향에 대한 연구는 좀 더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

한편 상기 온도 profile 곡선에서 각 line은 표적 후면에 장착된 thermocouple의 위치에 대한 것으로 전체 12개의 thermocouple이 장착되었으나 실제 온도 변화를 나타낸 thermocouple의 개수는 약 5개로 이 thermocouple이 위치한 부위로 물 누출이 집중적으로 이루어 졌음을 간접적으로 알 수 있으며, 각 위치별로 얻어진 온도 profile 데이터를 이용하여 표적 전면의 온도분포에 대한 해석을 수행하는 경우 표적에서의 온도상승 부위에 대한 크기나 재질의 손상에 대한 정보를 획득할 수 있기 때문에 물 누출이 발생될 경우 제2차 누출위치 및 누출 크기를 예측할 수 있는 자료를 얻을 수 있을 것으로 예상

된다.

또한, 상기 실험이 완료된 후 표적 및 자체 시편을 인출하여 각각에 대한 재질의 부식 및 침식 현상에 대한 손상 현상을 관찰하였다. 그림 9.5.17에 자체 시편의 누출부위 주변에 대한 모습을 SEM사진을 촬영하여 나타내었다.

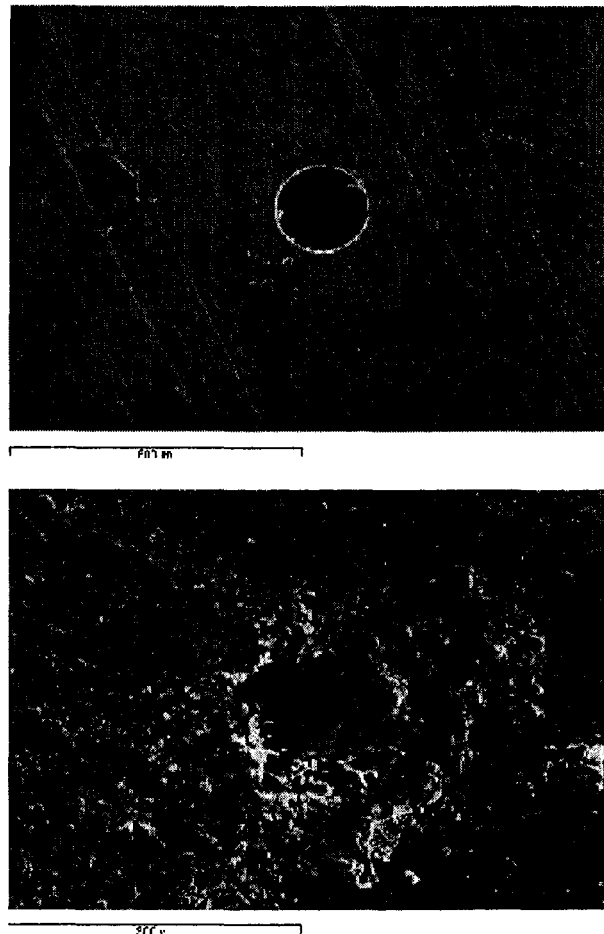


그림 9.5.17. 자체시편의 물 누출 실험 전, 후의 모습  
(상: 실험 전, 하 : 실험 후)

그림에서 상부는 물 누출 실험 전의 모습으로 약 0.15mm 직경의 원형 누출 hole을 나타내고 있으며, 하부의 경우 물 실험이 완료된 후 모습으로 소듐 부위를 나타낸 것이다. 일반적으로 물 누출 부위는 수증기 부분과 leak path 부분, 소듐-물이 직접 만나는 부분으로 세분할 수 있으며, 누출 hole이 상기의 모

습이 아니고 거의 close된 상태인 경우 물이 누출되면 미세한 누출 공간으로 물이 누출되자마자 소듐-물 반응이 생성되고 여기서 생성된 소듐산화물들이 미세 누출 공간을 막음으로써 누출이 진행되지 않는다고 하는 보고도 있으나, 본 연구에서와 같이 누출 구멍이 약 0.15mm로 비교적 큰 경우 누출 경로가 막히는 경우는 없다. 이는 우측에 보인 그림에서도 알 수 있는데, 소듐 부위가 막힌 흔적은 전혀 볼 수 없으며, 단지 부식현상이 소듐 부위에서 발생된 것을 알 수 있다.

한편, 표적 표면의 경우를 SEM 사진으로 관찰하여 그림 9.5.18에 나타내었다. 아래 그림9.5.18에서 볼 수 있는 것처럼 표적 표면에 비교적 흰 부분으로 보이는 부위가 수증기 jet에 의해 표적 표면에서 나타난 부식 부위를 나타낸 것이다. 이 부분을 확대해서 다음 그림 9.5.19에 나타내었다.

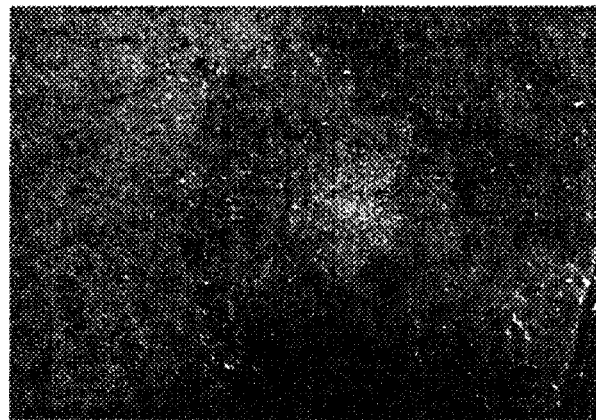


그림 9.5.18. 표적 표면에서의 손상 모습.

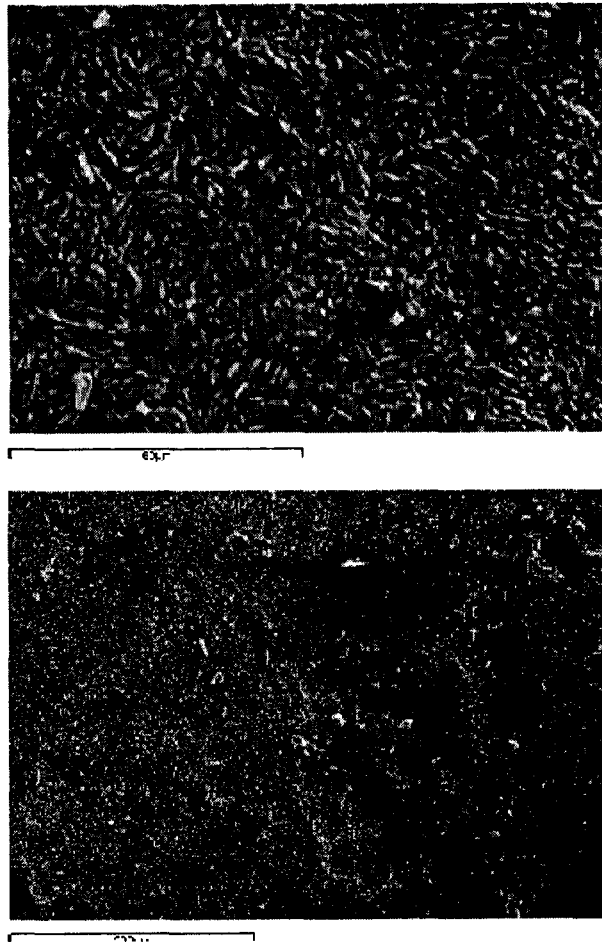


그림 9.5.19. 손상 부위를 확대한 모습.

상기 그림에서 위쪽은 물을 누출시키기 전의 표적의 표면 모습이고, 하부의 경우가 상기 그림을 확대한 것을 비교하기 위해 나타낸 것이다. 상부의 경우를 보면 금속의 표면 조직이 정연하게 형성되어 있어 정상적인 재질의 표면을 나타내고 있는 것을 알 수 있으나, 하부의 경우는 소듐-물 반응에 의해 표적 표면이 부식이 발생되면서 matrix 물질을 포함한 각종 element들이 산화되면서 조직의 변화를 나타내고 있는 것으로 예측된다. 이 부위에서의 부식 상태를 확인하기 위해 표면을 EPMA라는 원소분석 장치를 이용하여 표면 분석을 수행하여 그 profile을 그림 9.5.20에 나타내었다.

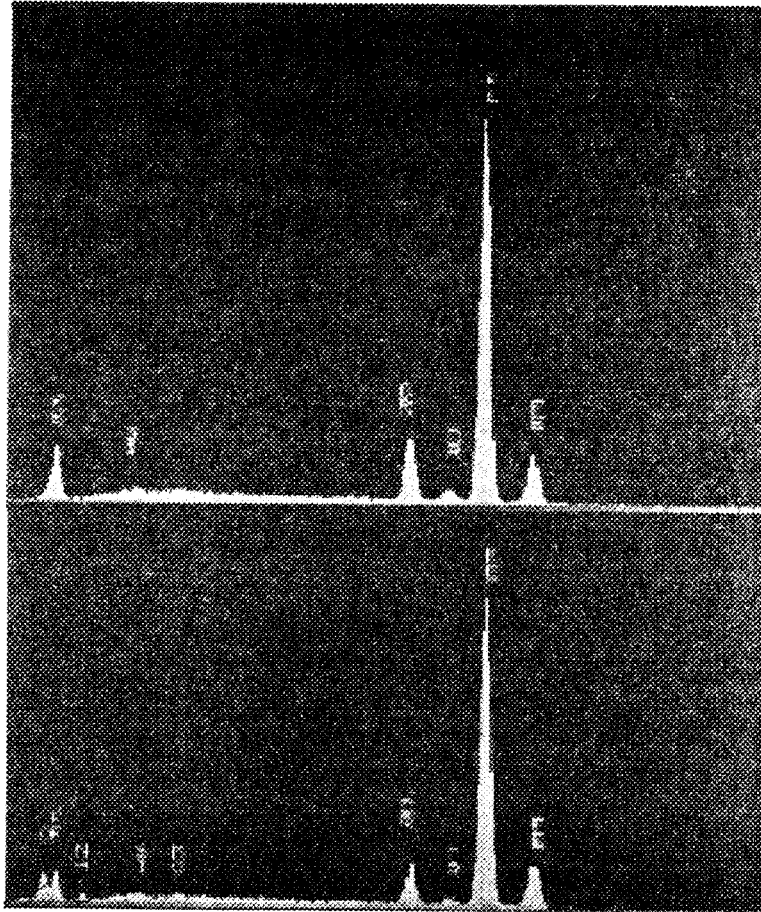
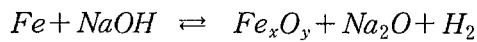


그림 9.5.20. 부식부위 EPMA 분석 profile.

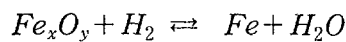
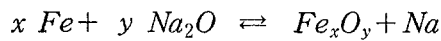
상기 그림에서 상부는 물 누출 실험 전 EPMA의 분석 profile을 나타낸 것이며, 아래 부분이 물 누출 실험 후 부식부위를 분석하여 나타낸 것이다. 위, 아래 그림 모두에서 주 원소들에 대한 peak들이 대부분 다 나타난 것을 알 수 있으며, 상부에서는 나타나지 않은 oxygen 과 Na peak가 아래 그림에서 나타난 것을 알 수 있는데, 이로부터 추측할 수 있는 것이 물 누출 실험이 완료된 후에 표적의 표면에서는 소듐-물 반응에 의해 생성된 소듐산화물들이나 혹은 소듐 산화물들과 matrix 기본 물질이 반응하여 복잡한 철이나 크롬 산화물들이 표적의 표면에 deposit 된 것으로 예상이 가능하다.

실제 외국의 실험 사례를 보면 고온의 소듐분위기에서 물이 누출되는 경우 그 표적에서는 다음과 같은 반응에 의해 복잡한 화합물들이 생성된다는 예를 찾

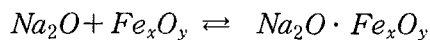
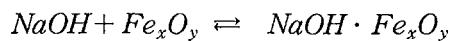
아 볼 수 있는데, 만약 물 누출이 발생되면 소듐-물 반응에 의해 NaOH, Na<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 등과 같은 부식생성물이 형성될 것이고, 물 누출에 의해 생성되는 부식생성물들이 형성되는 위치는, 전열관의 소듐 부위에서 발생될 것이고, 생성된 NaOH는 고온의 철(Fe)과 반응하여



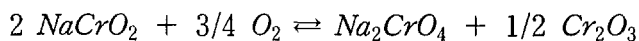
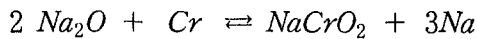
형태로 진행된 후, 반응생성물인 Na<sub>2</sub>O는 다시 Fe와 반응하여, 다음식과 같이 2차 연쇄 반응으로 연결되어



와 같이 되고, 최종적으로는 다음 반응식과 같이 부식생성물들이 혼재되어 있을 것으로 사료된다.



한편, Cr과의 반응에 대해서는 다음식과 같이 복합적인 반응이 일어날 것으로 예상된다.



이러한 부식생성물들은 액체 소듐중에 불순물로 존재하는 산소의 activity가 증가함에 따라, 용해도가 증가되어 부식 진행속도를 빠르게 증가시키기 때문에, 실제 액체 소듐을 냉각재로 사용하는 액체금속로에서의 산소 허용 농도는 운전 조건에 따라 각국마다 약간의 차이는 있으나, 거의 2~10 ppm 이하로 유지해야하는 것으로 알려져 있다.

한편, 상기 그림 9.25에서 나타낸 원소 분석 데이터로부터 표면에 deposit되어 있는 물질들이 소듐 화합물일 것으로 예측되기 때문에, 소듐 원소 분석 결과를 이전에 수행된 5Cr-1Mo 와 2.25Cr-1Mo 재질에 대한 실험결과와 비교하여 그림 9.5.21에 간단히 나타내었다.



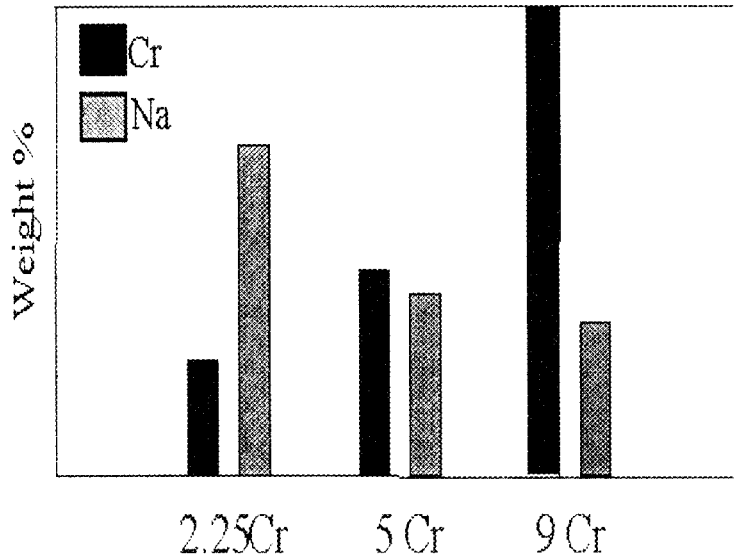


그림 9.5.21. 표적 표면에 deposit된 Na 원소분석 결과.

상기 그림에서 세로 축은 각 재질의 Cr 함량을 분석 데이터를 기초로 해서 나타낸 것이며, 가로 축은 각 재질을 나타내고 있다. 물 누출 실험 후 표적 표면에 침적되어 있는 소듐 원소의 무게 % 분석 데이터를 보면 재질의 Cr 함량이 증가할수록 침적된 Na의 양은 감소하여 역비례하는 것으로 예측되는데, 이는 재질의 Cr 함량이 증가할수록 소듐분위기에서의 물 누출에 대한 내식성이 증가하는 것으로 예측되며, 실제로 증기발생기 전열관 재질의 경우 세계적으로도 종래의 2.25Cr-1Mo steel 전열관에서 9Cr-1Mo steel 전열관으로 재질이 옮겨가고 있는 것으로부터도 이를 간접적으로 평가할 수 있다.

## 6. 결론

액체금속로에서 냉각재로 사용되는 소듐에 소규모 물이 누출되는 연구에 대한 각국의 연구개발 현황과 개요 및 실제 전열관에서 물 누출이 발생되었을 경우 일어나는 소듐-물 반응에 의한 재질의 손상 정도 및 반응열에 의한 온도 상승 등에 대한 실험을 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 세계 각국에서 개발되었거나 개발하고 있는 액체금속로 냉각재는 전열특성이 우수하고 핵물리적 특성이 우수한 소듐이 선택되어 그에 대한 기초연구 및 물과의 반응특성에 대한 연구가 상당히 많이 진행되었으며, 특히 전열관을 사이

에 두고 고압의 물과 저압의 소듐이 열교환을 하는 증기발생기에서의 소듐-물 반응에 대한 연구가 활발히 진행된 것을 알 수 있었다.

소듐-물 반응에 대한 연구는 소규모 물 누출에 대한 연구의 경우 재질의 부식과 침식현상을 다루는 wastage 현상에 대한 연구를 많이 수행하고 있었으며, 물 누출 초기에 신속한 감지를 위한 누출감지 시스템의 개발이 활발히 진행됨을 알 수 있었으며, 대규모 누출의 경우 대량 발생하는 수소 가스에 의한 압력 상승이 시스템에 미치는 영향을 해석하는 연구들이 많이 수행되고 있으며, 대부분 자체 개발된 고유의 컴퓨터 코드를 실험과 결부시켜 검증하는 실험이 수행된 예가 많이 있음을 알 수 있었다.

- 본 연구의 경우 실험장치의 설계, 제작 및 운전을 통해 소규모 물 누출 실험을 수행하였으며, 사용한 재질로는 2.25Cr, 5Cr, 9Cr등과 같은 ferrite계통의 재질을 사용하여 소듐-물 반응부위에서의 부식현상, 표적에서의 부식현상 및 온도변화 등에 대한 실험을 수행하였다.

여기서 얻은 자료들은 소듐-물 반응 특성을 해석하는데 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 무엇보다 액체 금속 취급 특히 액체 소듐의 취급에 대한 기술을 숙지함으로써 차후 이어질 액체 중금속 취급에 대한 자신감을 얻을 수 있었으나, 소듐이 갖는 폭발적인 위험성에 의해 모든 실험장치들이 safety가 고려된 실험을 수행하기 때문에 조그만 실험을 수행하더라도 많은 경비가 투입되는 등 경제적인 어려움이 뒤따르기 때문에 설계검증과 같은 최후의 확인 실험 등이 아닌 경우에는 소규모 실험으로 최대의 효과를 거둘 수 있도록 합리적인 실험이 이루어져야 할 것으로 생각되었다.

## 제 10 절 대규모 물 모의 실험

### 1. 목적

원자로 개념설계를 위한 steam generation system의 기반기술을 확립하고 설계자료를 획득하기 위해서는 소듐-물 반응의 특성을 이해하고, 물 누출 단계별 감시대책 및 누출특성을 평가하여야 하며, 반응생성물(열 포함)의 거동, 누출의 과정 및 반응기내에서의 압력변화 등을 해석하여야 한다. 또한 설계시 누출에 대한 검출방법 및 대책설비를 고려하여야 하고, 물 누출시 2차 사고로 발전되지 않도록 예방하여야 하며, 열교환기 및 vessel 등의 건전성을 해석하여야 할 것이다.

이와 같이 원자로를 안전하게 설계하기 위해서는 여러 사항들을 고려하여야 하지만 그 중에서도 특히 원자로 용기내에 설치하는 증기발생기에서 발생하는 소듐-물 반응 사고에 대해 평가를 하고 해석을 하여야 한다. 따라서 우선 물 모의 실험을 통하여 초기 spike 압력 실험을 수행하여 압력이 IHX에 미치는 영향과 IHX로 유입 가능한 물/수소의 흐름상태 및 실험조건을 확인하며, 초기 spike 압력의 propagation에 대한 해석 및 코드를 검증하고자 한다.

### 2. 서언

소듐-물 반응 사고는 고속증식로(FBR)의 증기발생기(SG)에서 전열관의 파손으로 관내의 물 또는 수증기가 누출되어 주위의 액체소듐과 급격한 화학반응을 일으켜 사고가 발생된다. 이 사고에서는 반응시 발생하는 수소가스로 인해 급격한 압력상승이 동반되므로, 소듐-물 반응 대책은 FBR에서는 특유한 기술과제로 남는다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 KALIMER는 SG를 반응기의 외부에 격리된 silo에 설치하는 것으로 되어 있다. 반응기에서 소듐-물 반응시의 압력거동에 관하여 발생 메카니즘에 따른 압력상승을 해석한다.

### 3. 물 모의 실험장치

#### 가. 개요

소듐-물 반응 특성을 해석하기 위한 물 모의 실험장치를 설계하기 위하여 KALIMER의 2차 계통을 모델링하였고, 이를 근거로 scale-down factor를 결정하였으며, 증기발생기 및 중간열교환기를 포함한 2차 계통의 물질 및 에너지수지를 계산하여 물 모의 실험장치의 규모 및 geometry 등을 결정하였다.

#### 나. KALIMER 2차 계통의 모사 계산

##### (1) 모델링

KALIMER의 2차 계통에 관하여 아직 확정된 배관구조 및 이의 크기가 정하여 지지는 않았으나, 실험장치의 건설을 위한 scale-down factor 결정 및 2차 계통의 압력전파특성을 예견하기 위해서는 자체 개발한 프로그램에 의하여 물 누출시의 압력전달현상을 계산하여야 하며, 이를 위하여서는 정확한 구조적 수치가 요구된다. 따라서 1차적으로 다음과 같이 가정하여 이를 수행하였다. 우선 2차 계통의 개략적 구조는 그림 10.3.1과 같다고 가정하였다.

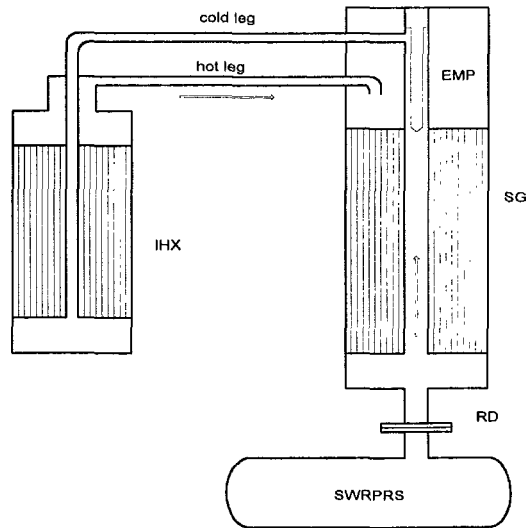


그림 10.3.1 칼리머 2차 계통의 단순구조도

- cold leg보다 높은 위치의 소듐 및 배관이 없다.
- 순환펌프는 EMP로서 증기발생기와 일체형을 사용한다.
- heat transfer tube의 모양은 중간열교환기는 straight, 증기발생기는 helical coil을 사용한다.
- 증기발생기는 과열증기 발생기로서 물은 tube side로 흐르며 밑에서 공급되어 수증기가 되어 위로 배출된다.
- 증기발생기 위쪽에는 cover gas인 알곤이 존재하며, 이 부분이 소듐의 온도변화에 따른 수축을 완화하므로 별도의 expansion tank는 설치하지 않는다.
- 증기발생기의 용량은 424MWt로 한다. 이는 330MWe로부터 2개의 증기발생기를 사용하고 효율 40% 및 가압펌프의 일 효율을 고려한 것이다.
- 열전달계수 등 기본적인 자료가 부족하므로 이에 대해서는 PRISM의 데이터를 기본자료로 이용하였다.

본 프로그램의 기본구성은 junction에 의한 branch들의 연결이며, junction에서는 경계조건이 성립한다는 것이다. 따라서 2차 계통에서의 소듐-물 반응에 의한 압력의 전달현상을 해석하기 위해서는 대상이 되는 배관계통을 branch-boundary 형태의 모델로 단순화 시켜야 한다. 지금까지 알려진 KALIMER 개념의 2차 계통으로 이 모델을 구성하였으며, 결과는 그림 10.3.2와 같다. 이 그림에서 원은 boundary junction을 나타내며 직선은 branch를 의미한다. 번호는 각각 branch number 및 junction number를 나타낸다.

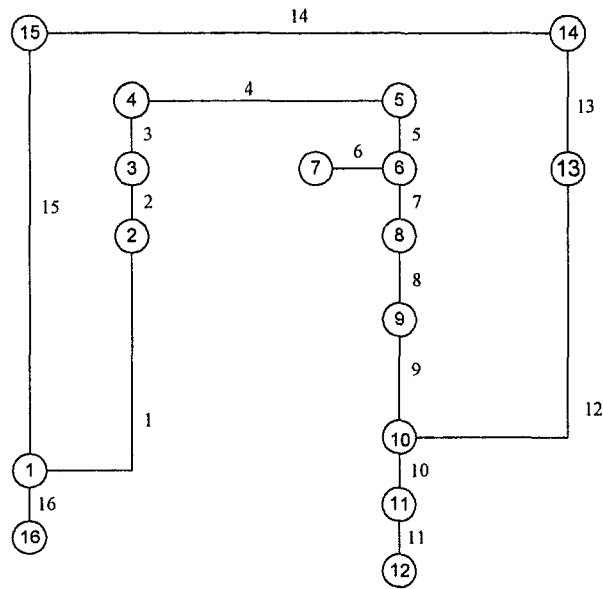


그림 10.3.2 칼리머 2차 계통의 결 가지 및 분기점 모델

(2) 계산결과 고찰

자체 개발된 모델에 기초하여 증기발생기의 상부에서 물이 누출될 경우, 2차 계통의 각 부분에서의 일반적인 압력의 변화는 그림 10.3.3과 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 반응부위 및 증기발생기의 하부에서는 압력이 심하게 요동(fluctuation)되고 있음을 알 수 있는바 이는 증기발생기의 상부 cover gas와 하부의 바다 상호간에 압력전파와 반사의 현상이 계속되기 때문이다. Rupture disc는 약 20msec 만에 파열되어 일정한 기압으로 유지되고 있으며, 중간열교환기에서의 압력은 반응이 시작되어 상승되었던 압력이 이미 낮아졌음에도 반응부위에서는 여전히 상승하고 있으므로 이 때가 최고의 압력을 나타내게 되며, 평가시에는 반드시 긴 시간을 고려하여야 한다. 또 여러 가지 변수의 영향을 확인하기 위하여 누출위치, 누출율, 증기발생기와 중간열교환기간의 거리 및 2차 계통의 크기(scale) 등의 영향을 고찰하였으며, 그 결과는 각각 그림 10.3.4, 5 및 6과 같다. 그림 10.3.3은 물 누출율과 누출위치의 영향을 나타내는 것으로서 누출이 하부에서 일어나는 경우에는 반응부위의 압력이 많이 높아지는 것을 제외하고는 위치의 영향은 많지 않다. 또 화학반응의 영향은 앞에서 설명한 바와

같이 최대의 압력은 누출율의 0.45 승에 비례하고 있다.

그림 10.3.5에서는 중간열교환기와 증기발생기간의 거리의 영향을 나타내고 있으며, 이 그림에서 보는 바와 같이 약 20m 이상의 거리에서는 거리의 영향이 많지 않다. 그러나 20m에서 변화율의 차이가 있는 것에 대해서는 아직 충분한 이유를 이해하지 못하고 있다. 그림 10.3.6에서는 2차 계통의 크기에 따라서 반응부위의 최대압력의 변화를 나타내는 것으로서 물 누출율에 따라서 비슷한 기울기를 가지고 있으며, 최대압력은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서 적어도 계산에 의해서는 2차 계통의 크기와 물 누출율의 비를 적당히 조절하면 동일한 영향이 관찰되는 것을 알 수 있으며, 이 범위내에서는 실험장치의 크기는 압력변화를 예측하는 데에 큰 영향을 주지 못한다고 할 수 있다.

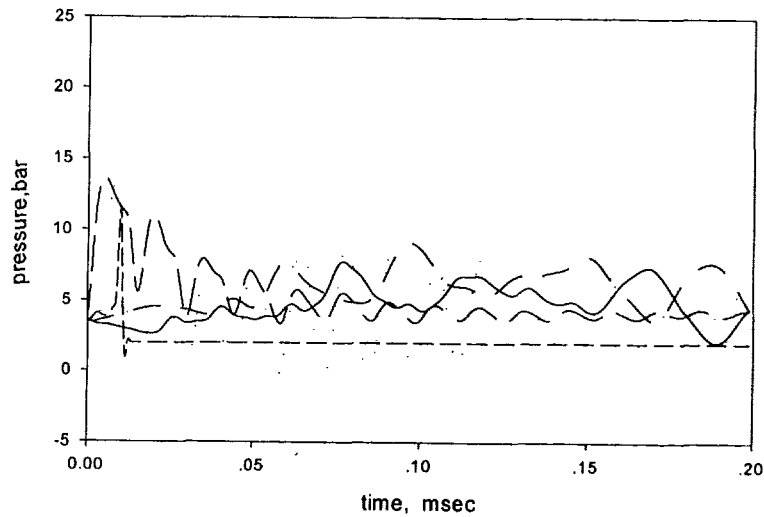


그림 10.3.3 본 모델에 의해 계산된 대규모 물 누출시의 2차 계통의 여러 지점에서의 과도압력에 대한 일반적 경향

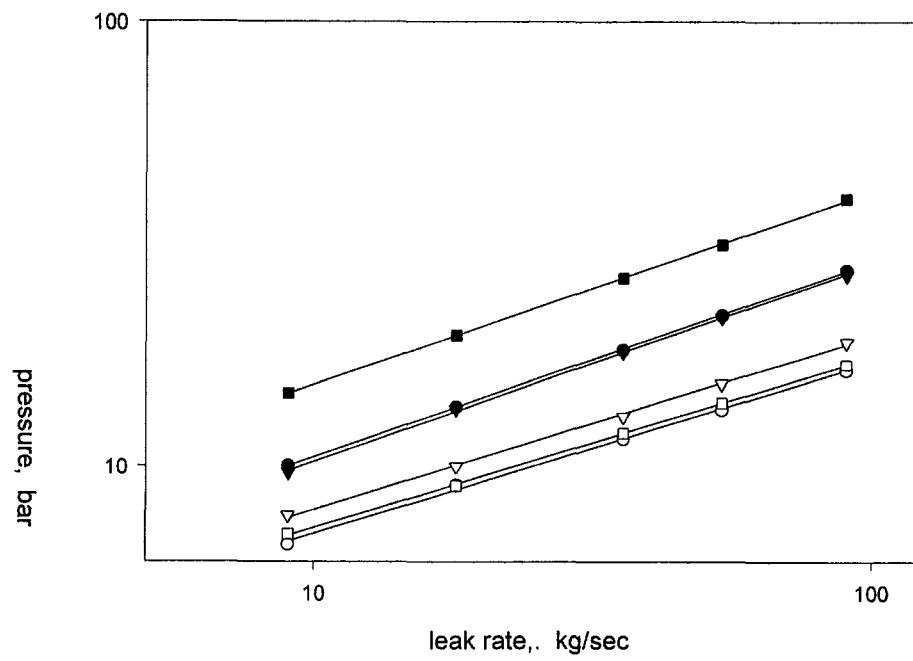


그림 10.3.4 누출부위에서의 압력이 최대일 때 IHX 및 반응 영역에서의 압력영향



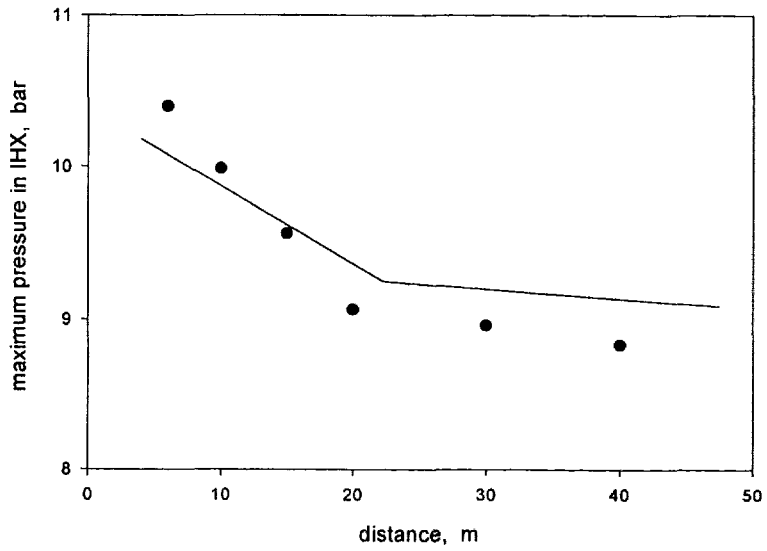


그림 10.3.5 IHX에서의 압력이 최대일 때 IHX와 증기발생기 간의 이격거리에 따른 압력영향

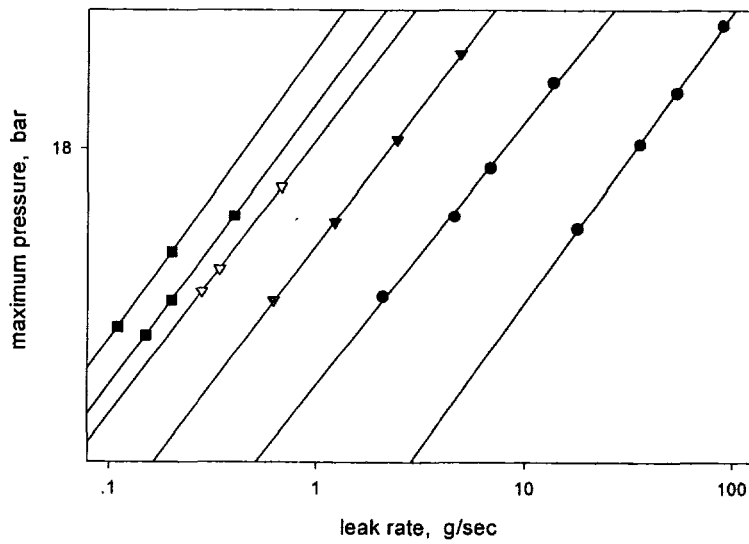


그림 10.3.6 반응영역에서의 압력이 최대일 때의 누출속도 및 장치규모의 영향

다. 루프 구성

물 모의 실험장치는 액체금속로의 1/6 규모로 축소된 장치로서 2차 계통의 주요 장치인 증기발생기 및 중간열교환기를 비롯하여 물(탈염수)의 온도를 약 80 °C로 유지하기 위한 온수 탱크-1/2(Hot Water Tank-1, 2), 압력 발생장치인 질소가스 시스템 및 Pressurizer, 압축가스 저장탱크(Compressed Gas Surge Tank), 물 순환펌프(Water Circulation Pumps), Rupture Discs 및 압력 검출 시스템 등으로 구성되어 있다.

물 모의 실험시설의 Iso-drawing은 그림 10.3.7과 같다.

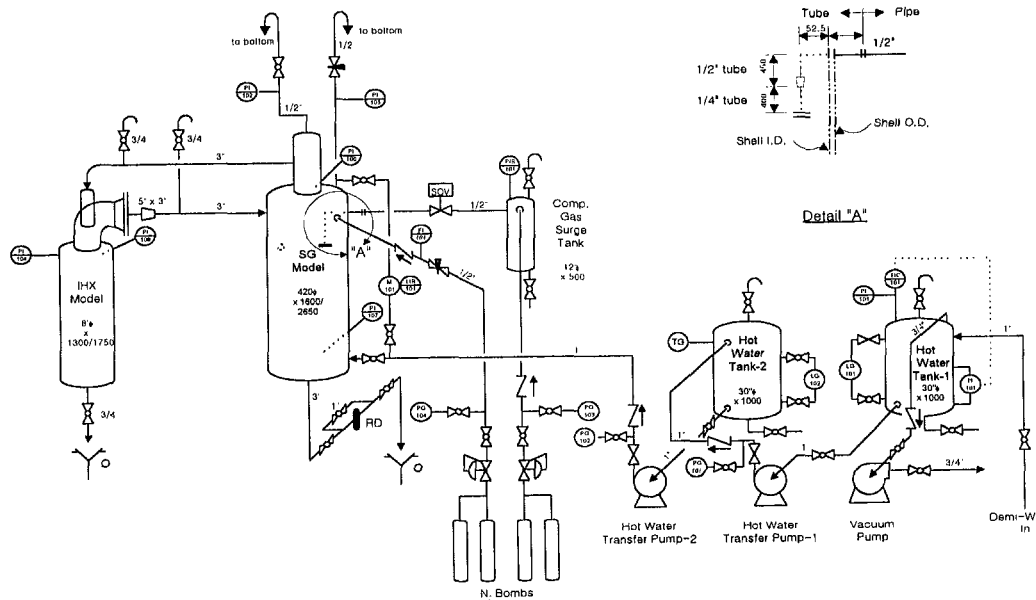


그림 10.3.7 물 모의 실험장치의 등축도

물 모의 실험시설을 설치 완료한 후의 사진은 그림 10.3.8과 같다.

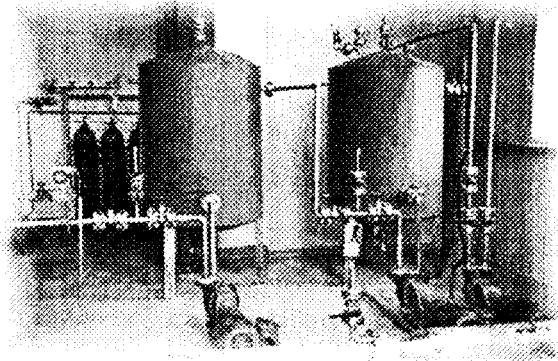
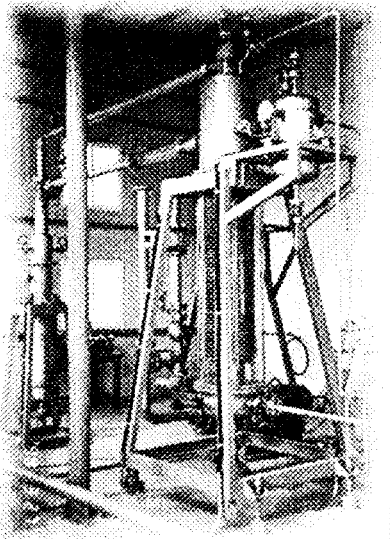
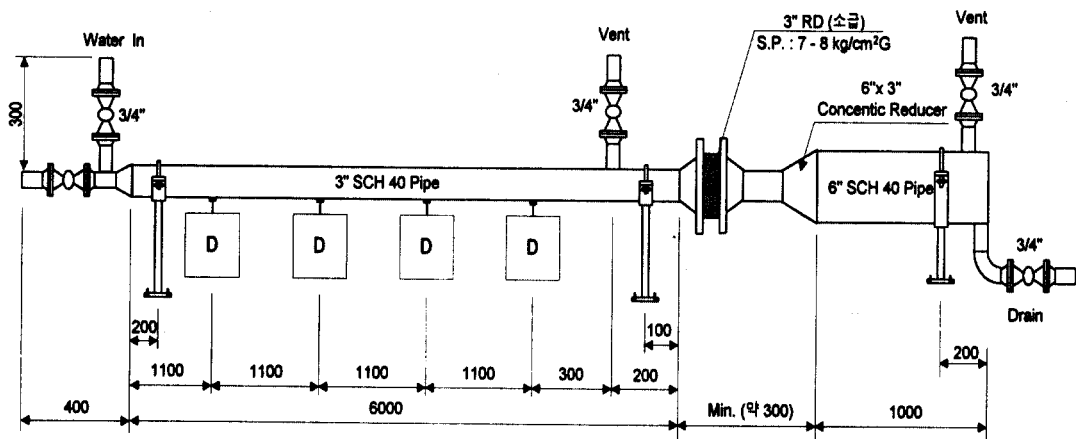
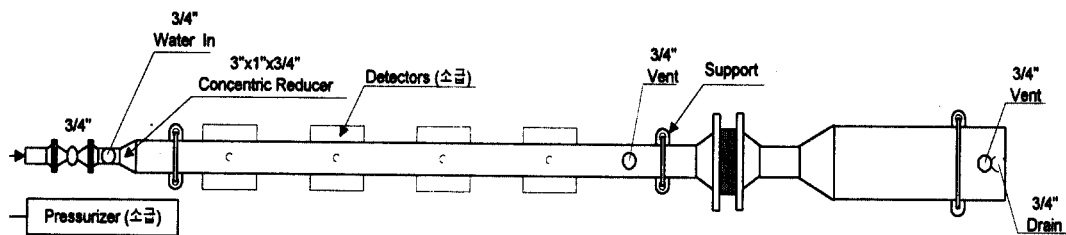


그림 10.3.8 물 모의 실험시설의 사진도



Section Drawing



Plan Drawing

- Type : Air driven liquid pump
- Model : Haekel MS-7
- Max air supply : 125 psi (8.8 kg/cm<sup>2</sup>)
- Actual area ratio : 7.8
- Max. rated output press. : 900 psi (63 kg/cm<sup>2</sup>)

그림 10.3.9 단순배관 압력전과 실험장치

#### 4. Rupture disc(RD) 파열실험

Rupture disc는 물 모의 실험장치에 장착되어 RD가 파열되었을 때의 압력영향을 측정하기 위한 소모품으로서 1회용이다. 그러나 이 RD(3" dia)는 고가인 동시에 수입품이기 때문에 본 실험과 같이 실험빈도가 매우 높은 경우에는 실험비용을 감당하기가 힘들다. 따라서 시행오차를 포함한 경향분석을 위한 실험에서는 RD와 유사한 파열압력( $8\text{kg}/\text{cm}^2$ )을 가진 대체품으로써 실험을 수행하고, 결정적인 데이터를 수집할 경우에 RD를 사용하고자 한다. 본 실험은 RD와 유사한 파열압력을 가진 재질을 선정하기 위한 실험이다.

본 실험은 특수 목적의 실험으로서 그림 10.3.9의 단순배관 실험장치를 이용하였으며, 여기에 RD를 장착할 수 있는 부속품을 부착하였다.

단순배관 실험장치 및 물 모의 실험장치에서 사용되는 rupture disc의 파열압력은  $7\sim 8\text{kg}/\text{cm}^2$  이다. RD를 대응하기 위하여 실험에 사용된 재질은 알루미늄 박판이며, 두께는 0.05, 0.07 및 0.1mm이다. RD를 파열시키기 위하여 가압용수를 사용하였으며, 이 가압용수는 순수(공급압력 :  $3.8\text{kg}/\text{cm}^2$ )를 hydraulic pump를 이용하여  $10\text{kg}/\text{cm}^2$  까지 승압시켰다. 가장 적절한 두께를 선정하기 위하여 박판 두께별로 접수를 조절하면서 반복적으로 수행하였으며, 가능한 한 오차를 줄일 수 있도록 접수를 최소화 하도록 하였다. 이 때 사용된 압력은  $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다.

0.05mm 두께의 알루미늄 박판은 파열압력  $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 유지하려면 접수를 많이 하여야 하기 때문에 실험데이터로는 이용하지 않았으며, 두께 0.07 및 0.1mm의 박판에 대한 실험데이터를 이용하기로 하였다.

그림 10.4.1은 두께가 0.07mm인 알루미늄 박판의 접수에 따른 파열압력으로서 1겹, 2겹 및 3겹일 경우에 대한 파열압력이 각각  $1.6\sim 2.2$ ,  $4.8\sim 5.2$  및  $5.2\sim 6.9\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다. 4겹 이상에서는  $7\text{kg}/\text{cm}^2$  이상에서도 파열되지 않았기 때문에 제외하였다.

그림 10.4.2는 두께가 0.1mm인 알루미늄 박판의 접수에 따른 파열압력으로서 1겹 및 2겹일 경우에 대한 파열압력이 각각  $2.7\sim 3.8$ ,  $6.7\sim 7.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다. 3겹 이상에서는  $7\text{kg}/\text{cm}^2$  이상에서도 파열되지 않았기 때문에

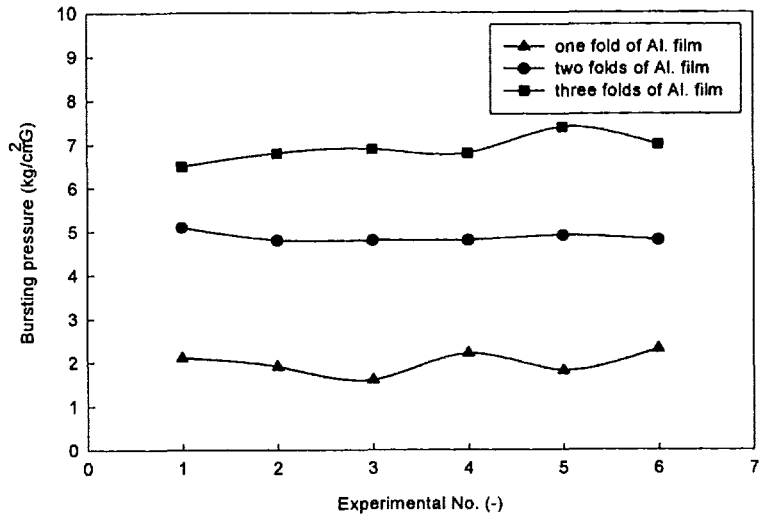


그림 10.4.1 알루미늄 박판의 겹수에 따른 박판의 파열압력  
(1매의 두께 : 0.07mm)

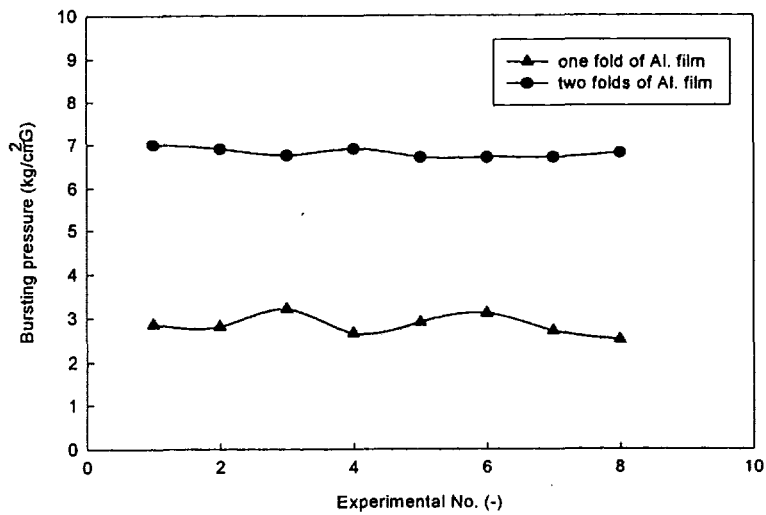


그림 10.4.2 알루미늄 박판의 겹수에 따른 박판의 파열압력  
(1매의 두께 : 0.1mm)

제외하였다. 이상에서 보는 바와 같이 두께가 0.1mm인 알루미늄 박판을 2 겹으로 하였을 경우가 rupture disc의 파열압력과 가장 근접하였다. 따라서 차후 수행되는 모든 시행오차를 포함한 경향분석 실험에서는 이 재질을 사용하고 결정적인 데이터를 수집할 경우에만 RD를 사용하기로 하였다.

## 5. 물 모의 실험

증기발생기 튜브가 파열되는 것을 모사하기 위하여 2차 계통에 약 80°C의 물을 넣고, 약 75ℓ 용기에 고압(약 7 kg/cm<sup>2</sup>)의 질소가스를 저장하였다가 증기발생기의 튜브 번들의 상부로부터 1/3 지점에 1/2" 튜브를 통하여 질소가스를 순간적으로 주입함으로써 증기발생기 하부에 장착되어 있는 파열판(rupture disc)이 파열될 때의 2차 계통 특히, 중간열교환기에 미치는 압력 영향을 해석하였다.

그림 10.5.1은 중간열교환기의 상부 인입관, 그림 10.5.2는 중간열교환기의 하부 플레넘에서의 압력변화를 나타낸 것으로서 상부 인입관에서 약 14 msec 후에 압력이 초기 압력보다 감소하는 것은 압력파가 전달되어 중간열교환기의 하부 플레넘으로 전달되고 이 곳에서 면적의 확대로 인하여 압력이 감소하는 것으로 예상된다.

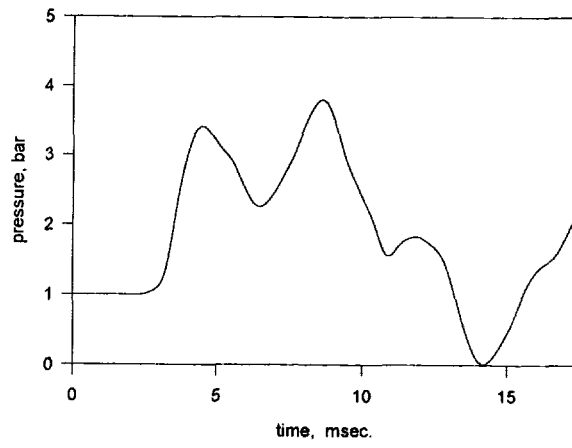


그림 10.5.1 중간열교환기 상부 인입관에서의 압력변화

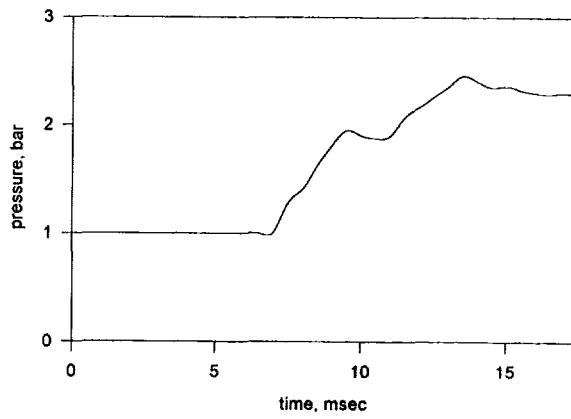


그림 10.5.2 중간열교환기 하부 플레넘에서의 압력변화

## 제 11 절 실시간 물 누출 음향 신호 분석 실험

### 1. 서론

원자력 발전의 개발 중심은 아시아 지역 국가인 중국, 한국, 일본에서 앞서 계획되고 있고, 그 다음 아프리카, 남아메리카 순으로 개발 계획이 되어질 것으로 IAEA는 예측하고 있다. 또 IAEA는 15~20년 후의 유럽, 미국에서는 원자력 발전소의 개발이 중단되어 갈 것이며, 동유럽 국가들은 핵개발을 억제해 갈 것이며, 아시아 국가들은 급속한 원자력 개발을 예측하였다. 약15년 후에 원자로 설계를 위하여 최고의 기계장치, 운전 및 유지 전문적 기술이 사용되며 원자력 에너지의 안전성을 상승시키기 위한 확인된 기술이 요구되어진다.

과거 50년 동안 소듐 냉각 방식의 액체금속로(fast breeder reactor) 개발 내력이 있을 뿐만 아니라 25년의 풍부하고 성공적인 소듐 냉각방식의 액체금속로의 경험이 축적되었다. 그러나 아직까지 좋지 않은 민감도와 응답성 때문에 원만히 검출되는 모니터링 장치는 없다. 이런 모니터링 장치가 운전되고 있는 원자력 발전소의 비상 시스템은 여러 가지 고장이 잦으며, 모니터링과 비상 시스템의 불완전성을 극복하기 위한 장치 개발이 필요하다. 안전성에 관해서 러시아, 미국, 프랑스, 일본 등 여러 국가에서 원자력 발전소에 관한 강력한 비상 조치 방법이 요구되었다.

현재의 원자로 소음 해석 방법은 다음의 주요 영역에서 사용된다. 1차 계통과 증기발생기의 느슨해진 부품의 모니터링, 압력 용기 및 내부의 진동 모니터링, 증기발생기와 isolation 밸브의 건전성을 확인하기 위한 누출 모니터링, 비등 계통의 불안정성과 같은 모니터링, 2상 흐름 측정을 위한 열역학적인 현상 모니터링 등이 있다[11.1.1]. 따라서 원자력발전소의 좀더 새롭고 완전한 응답성 및 검출 신뢰성이 좋은 진단 및 제어장치 개발이 분명히 필요하다.

특히 소듐-물 증기발생기에서는 아주 높은 음향 누출 검출 방법 개발이 요구되어서 수많은 실험적인 조사[11.1.2]와 기술적 해결이 필요하였고, 높은 온도에서 음향 측정 장치와 누출 검출 알고리즘 개발 및 누출 발전에 따른 음향 효과 연구가 필요하였다.



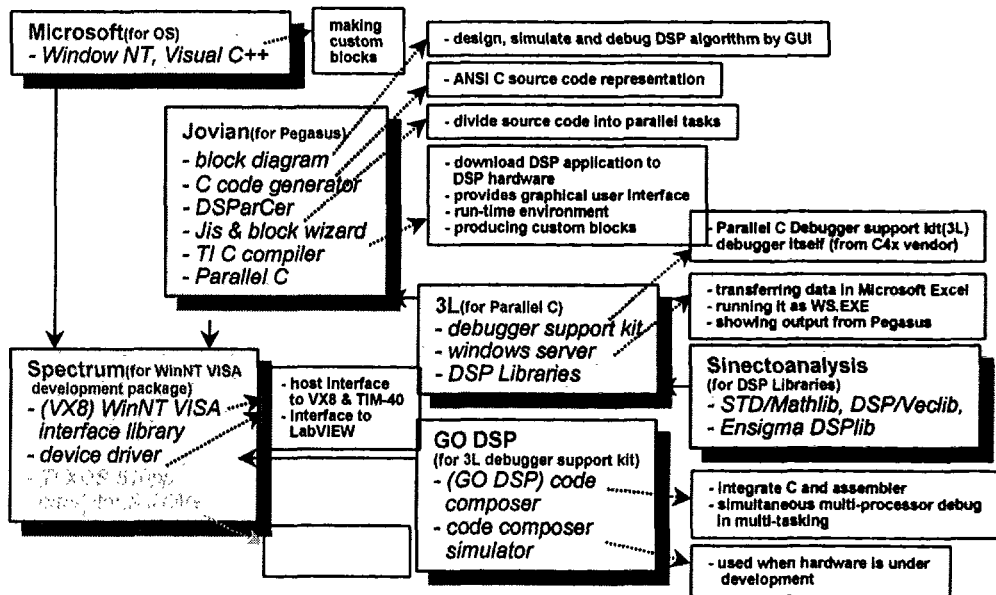
## 2. 실험 장치

그림 11.2.1과 같이 물 mock-up 실험 장치는 SUS304로 만들어진 용기를 사용하였고, 용기의 크기(400 l)는 높이 2000mm, 지름 500mm, 두께 10mm이다. 물 펌프는 용기 안쪽의 물을 순환시키기 위해서 설치되어 있다. 이것은 증기발생기의 순환 조건과 같이 물이 상승하는 것과 똑같이 만들기 위함이다.

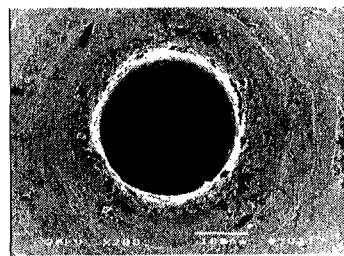
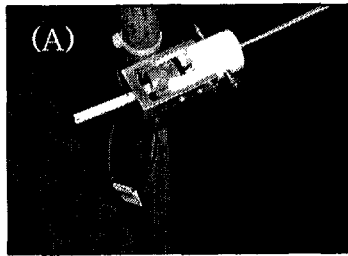
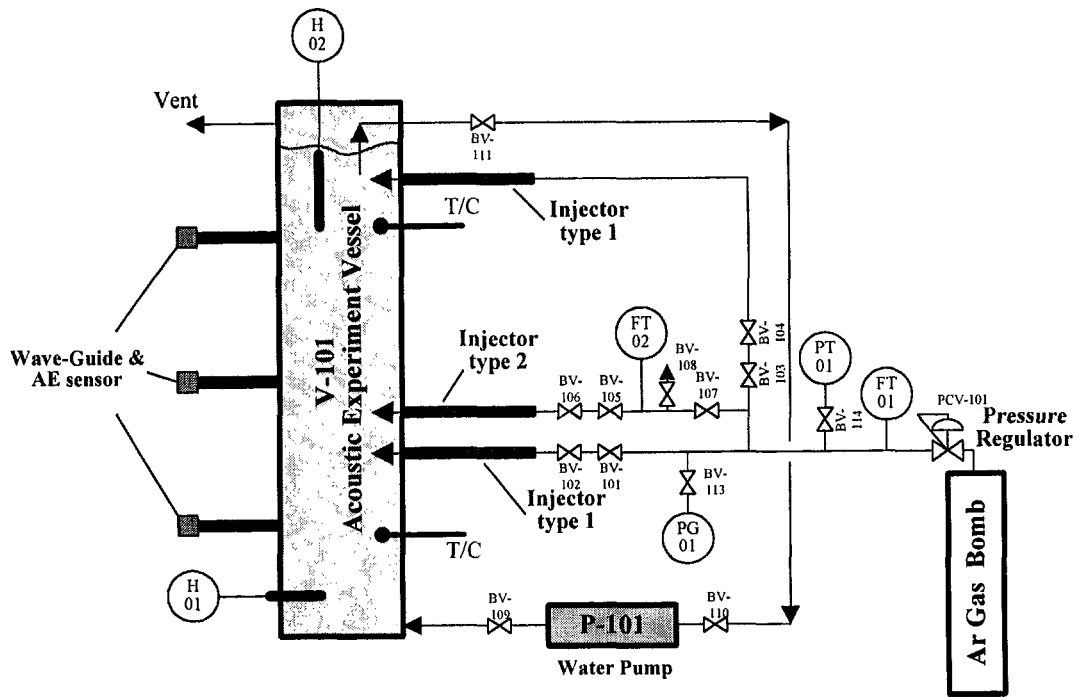
가스 공급 장치는 낮은 압력 공급 장치와 120kg/cm<sup>2</sup>의 고압 공급 장치로 구성되어 있다.

용기의 바깥 표면에 길이 500mm, 지름 5mm인 음향 가이드를 설치하였다. 500mm 간격으로 음향 가이드를 3개 설치하고, 음향 센서는 DECI 사의 SE1000-H를 사용하였고 pre-amplifier가 연결되어 있다. 그림 11.2.1의 (A)와 같이 음향 센서를 DECI의 센서 어댑터를 장착 혹은 탈착이 용이하게 되어 있다. 그림 11.2.1의 (B)는 Injector의 구멍(defect) 크기 0.253mm를 보여준다.

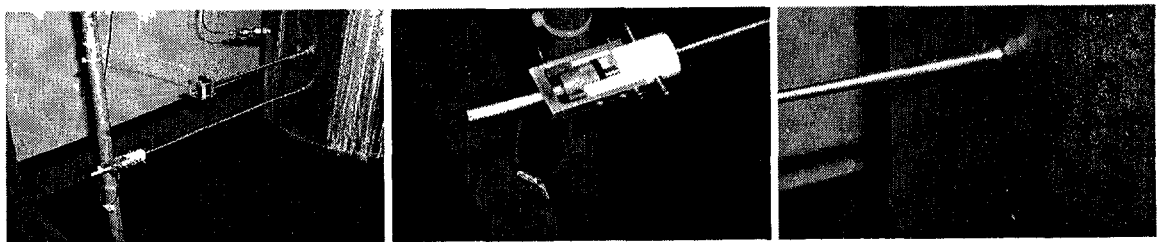
신호 분석기는 Pegasus사의 소프트웨어로 구성되었다. 분석은 4채널이 가능하며, 샘플링은 1024, 2048byte로 하였고, raw 신호와 FFT(Fast Fourier Transform)로 분석한다. DSP(Digital Signal Processing) 장치의 예비 시험으로 이루어졌다.



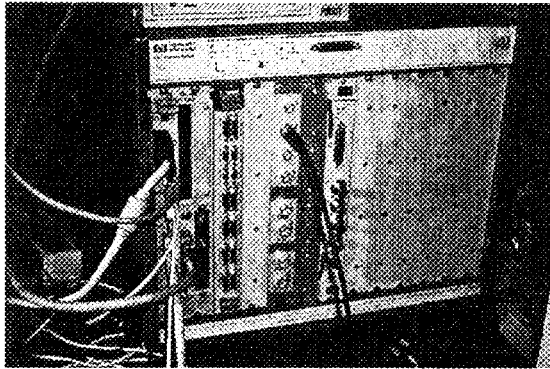
(신호분석기의 소프트웨어 구조)



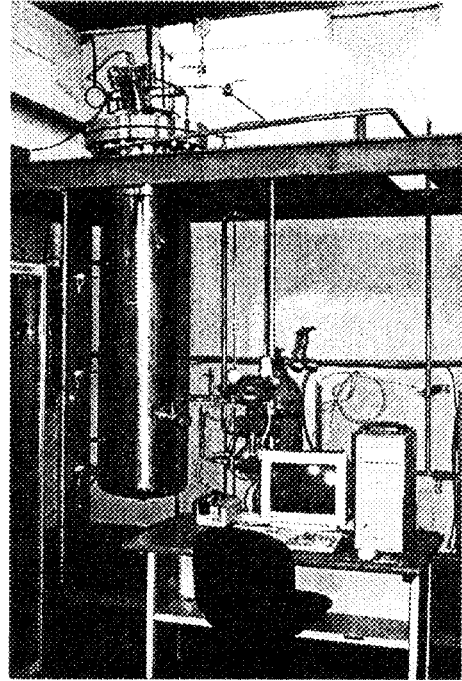
(실험장치 개략도)



(Wave guide 및 AE 센서 설치)



(예비 Prototype DSP 장치)



(음향 water mock-up 실험장치)

그림 11.2.1 실험 장치

### 3. 누출 소음 특성 및 누출 시간 예측

#### 가. 증기발생기에서 물/스팀 누출 현상

증기발생기에서 소뚝으로 스팀/물 누출 가능성 검출은 수소 검출 측정, 음향 검출 측정, rupture disk의 파이프 압력의 측정으로, 물/스팀 누출 정보와 누출 검출 장치로 잘못 운전되는 증기발생기를 감정한다. KALIMER 증기발생기에서 물 누출 규모 분류는 다음과 같다.

소규모 누출(Small leak; <math><10\text{g/sec}</math>)이 있고, 중규모 누출(Intermediate leak; <math>10\text{-}1000\text{g/sec}</math>)은 일반적으로 약 30sec 동안 누출이 유지될 때이며, 음향 검출 시스템으로 3sec 이내에 누출을 판별하여야 한다. 대규모 누출(Large leak; <math>1\text{kg/sec}</math> 이상)은 일반적으로 수 초 동안 계속될 때이며, rupture disk를 파손시키는 수준으로 정의한다.

그림 11.3.1은 구조물의 파괴 과정 때문에 누출의 self-development와 시간, 누출 검출 과정을 보여준다. T1은 매우 작은 누출 속도이며, 누출이 수 시간 동안 아주 안정하다. T2는 누출 통로의 파괴 때문에 누출이 아주 급격

하게 증가한다. T2는 아주 짧고 10분 이내이다. 이런 시간으로부터 근접 튜브의 파괴 과정이 시작된다. T3는 근접 튜브의 파괴가 완료되는 시간이며 누출 속도가 매우 높다. T4는 근처 튜브의 2차 누출 때문에 누출량이 매우 높은 수준으로 된다.

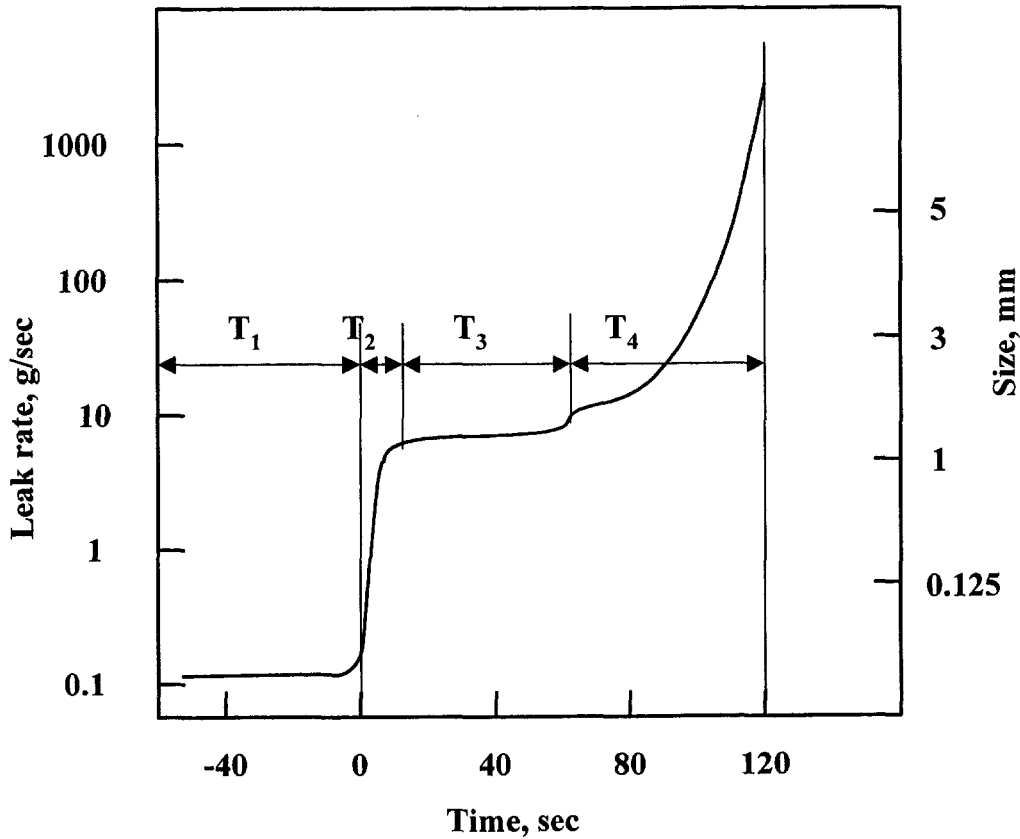


그림 11.3.1 시간 변화에 따른 물 누출량의 변화

그림 11.3.2, 11.3.3, 11.3.4, 11.3.5는 KALIMER 구조재를 사용하였을 때 소듐-물 실험 동안 얻어진 누출 속도와 시간과의 관계를 보여준다. 프랑스, 미국, 러시아 자료와 비교하면 KALIMER 구조재에 대한 실험 결과는 아주 잘 일치한다. 이런 결과를 토대로, KALIMER 증기발생기에서  $\leq 0.01\text{g/s}$ 의 누출 검출 민감도,  $\leq 40\text{min}$ 의 응답 시간 안에 작은 누출 검출을 위한 기본 요구사항을 정의할 수 있었다[11.3.1, 11.3.4].

그림 11.3.6은 소듐속으로 극미량(micro), 소규모(small), 중규모(intermediate), 대규모(large) 물 누출 검출 알고리즘이다.

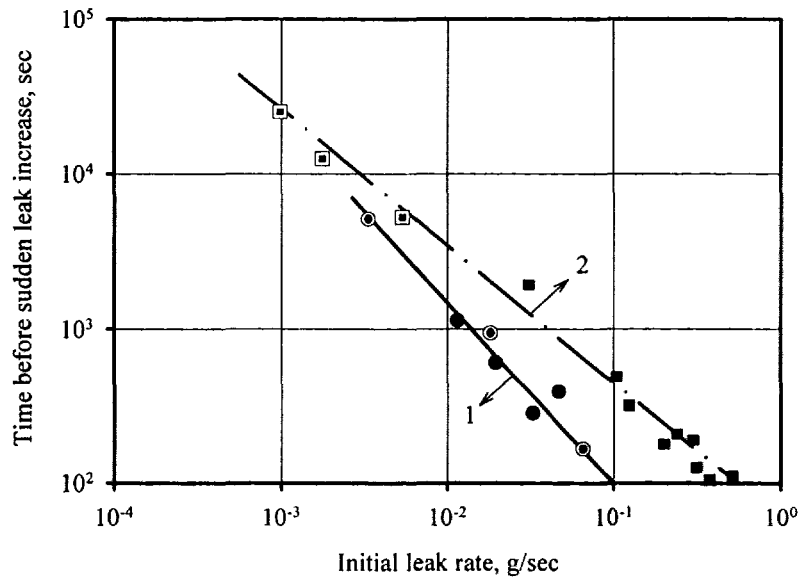


그림 11.3.2 물 누출 시작에서부터 갑작스런 물 누출량 증가가 일어나는 시간(Sodium Temp. 450°C, Wall Thickness 2.5mm) 1. 2.25Cr 1Mo, 2. X18H9 Steel(18Cr 9Ni)

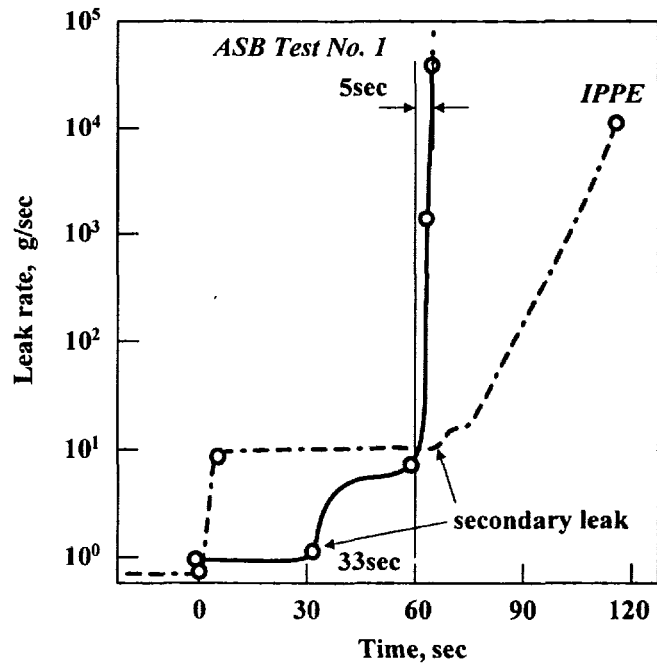


그림 11.3.3 물 누출량과 시간 의존성

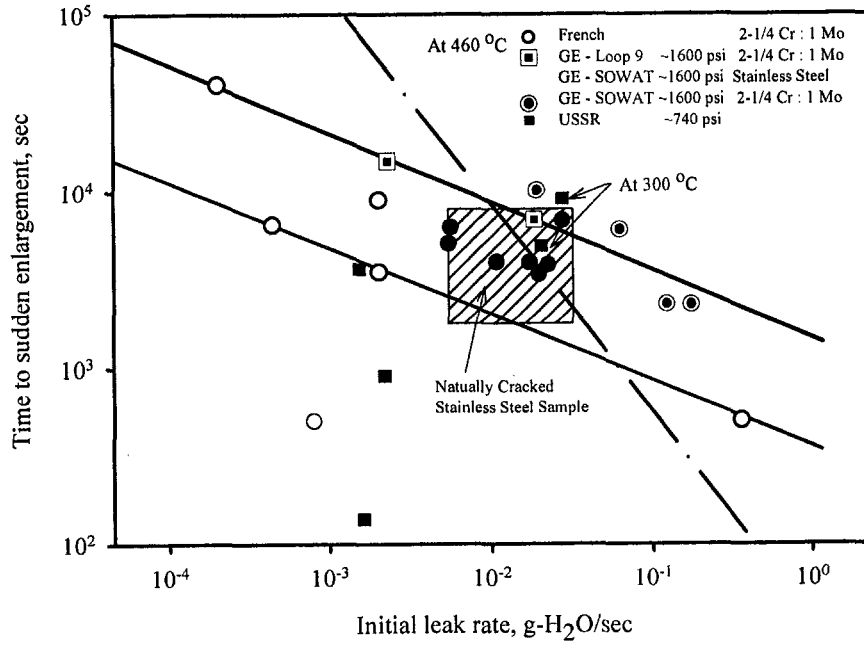


그림 11.3.4 갑작스런 물 누출 증가가 일어나는데 까지 걸리는 시간과 초기 누출 속도와 관계(●; data of IPPE using KALIMER 증기발생기 Structure Mat'1, 2.25Cr 1Mo)

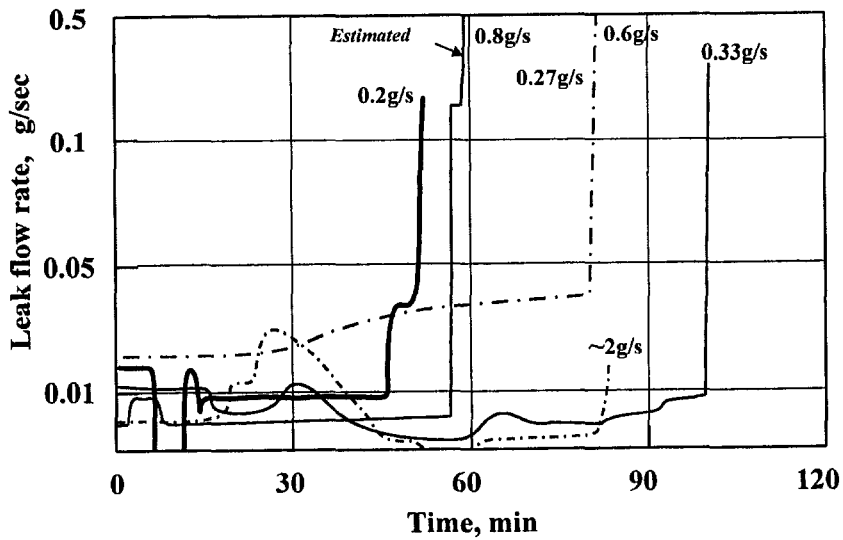


그림 11.3.5 시간에 따른 물 누출량의 의존성(2.25Cr 1Mo를 가지고 IPPE에서 실험한 결과)

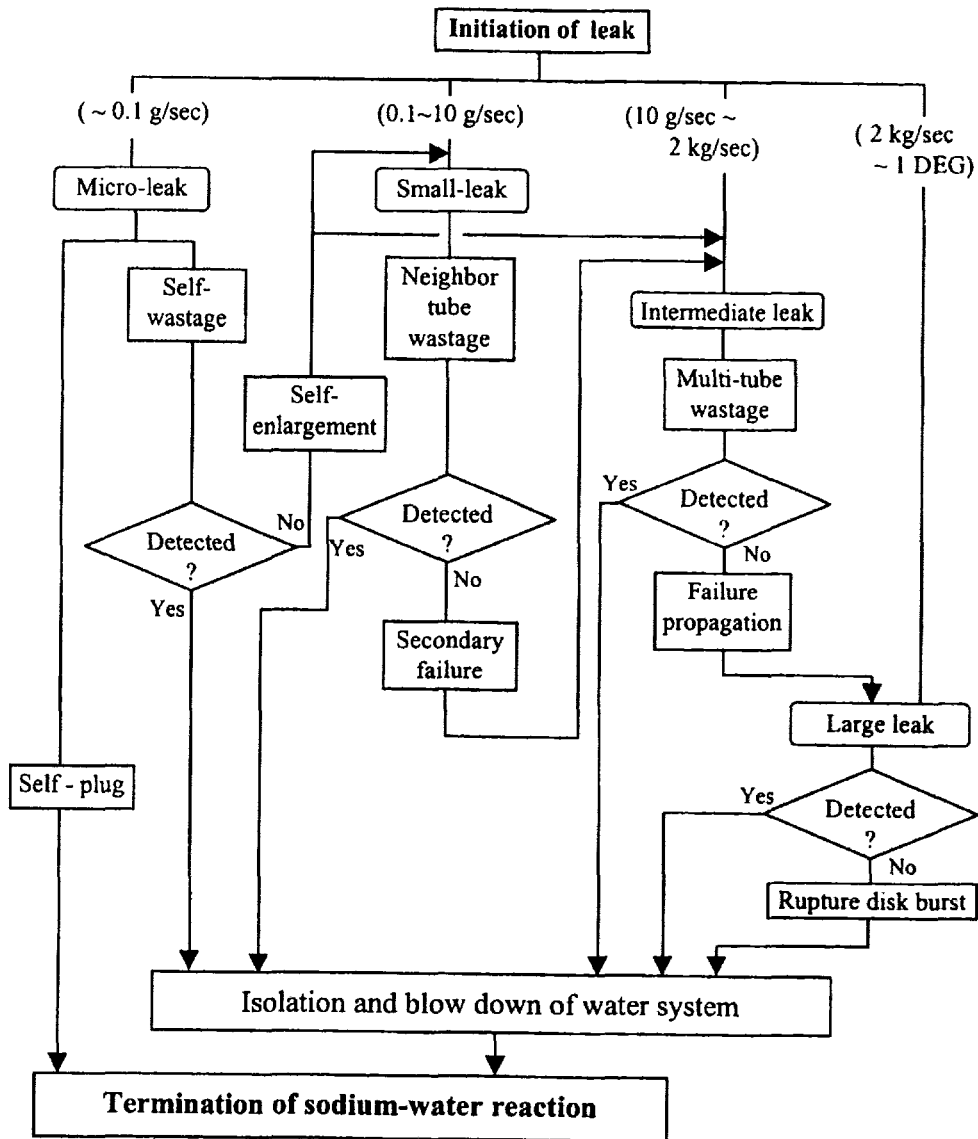


그림 11.3.6 소듐-물 반응 종결 및 검출 과정

나. 음향 전파 특성

- 음향 측정 대상물인 소듐-물 증기발생기의 특징

KALIMER 증기발생기는 구조적으로 높이/지름이 18.8m/ 2.8m인 원통 용기이기 때문에, 낮은 주파수 소음 분포로 볼 때 증기발생기는 가느다란 파이프로 간주된다. 용기는 무한 매체에서 보다 작은 한정된 파동 길이로 음속으로 전파 때문에 탄성체이고, 구조재의 소리 파동 길이보다 작은 용기 원주 길이라면 용기의 성질은 탄성이다. 이런 관계에서 볼 때 증기발생기의 파동

전파 속도는 1kHz보다 작은 주파수에서 변화한다. 용기벽의 탄성과 소듐 압축성의 관점에서 볼 때 증기발생기의 1kHz에서 파동속도는 상대적으로 약 30% 감소한다. 누출 소음 검출에서 주된 배경 소음은 물 비등 소음이며 검출 장벽이다. 그러므로 누출 소음 검출에 관한 배경 소음의 영향은 다음과 같이 고려함이 바람직하다.

소듐속에서 음속은 냉각수의 상태 변수의 함수이다. 소듐 용융점에서 음속에 관한 계산값으로 볼 때 200℃로 증가하면 5%의 음속이 감소한다. 등온 상태에서 증기발생기의 압력 변화는 소듐속에서 음속 변화로 나타난다. 소듐속에서 고체, 기체성의 불순물은 0.2 ~ 200 kHz 범위에서 음향의 국부적인 불균일성으로 나타나기 때문에, 고체 불순물은 밀도에 따라 고려되어야 하며 기체 불순물은 기체 압축성이 고려되어야 한다.

음속은 매체 압축성 변동에 따라 중요하게 작용한다. 그래서 증기발생기 설계가 미치는 영향을 고려하여 주파수 범위를 선정하는 일이며 누출 검출에서 가장 중요한 수단이다.

#### - 소듐속으로 물 누출시 소음 발생 메커니즘

소규모 누출은 검출이 이루어지는 동안 근접 튜브를 손상시키지 않으며, 물/스팀 누출의 검출 과정은 주로 hydrogen gas와 관련되어 있으며 음향 효과에 의해서 영향을 받는다. 따라서 증기발생기의 물/스팀 누출이 동반될 때 여러 가지 가능성의 소음이 발생한다. 즉,

- 증기 발생기의 튜브가 용접되어있는 부분, 혹은 튜브 손상부분에서 스팀 jet의 분사,
- 소듐-물 반응에 의한 hydrogen 기포의 상승과 함께 진동,
- 화학반응 동안 국부 열 방출로 일어나는 누출 부위에서 소듐 비등,
- 누출 증가와 손상 발전 동안에 구조물에서의 음량 방출 등이 음향소음 발생의 원인이 된다.

스팀 jet 분사가 크게 일어날 때 소규모 누출은 기포성이 큰 분사 모드를 가진다. 소듐 속에서 진동하는 hydrogen 기포의 공명 주파수는 누출 소음 원천이 된다. 확실히 주파수 영역을 측정하기 위해서 소듐속으로 물 누출에 의해 생긴 hydrogen 기포의 크기 분포를 아는 것이 중요하다. 실험 자료에 기초하여 <10g/h의 누출시 hydrogen 기포의 최초 크기는 2mm 정도이다



[11.3.2]. 손상 부위에서 떨어져 갈 때 기포 크기는 움직이는 동안 작아진다. 이것은 소뚝 속에서 hydrogen이 녹아들기 때문이다.

2개 이상의 기포가 합쳐질 때는 큰 기포를 따라 작은 기포가 함께 따라간다. Self-development 누출 동안 초기 손상 크기는 증가하고, 결과적으로 생기는 hydrogen 기포 크기 또한 증가한다. 소뚝속으로 물이 누출될 때 bubbling 누출 모드에서 jetting 누출 모드로 이동하며 여러 가지 다른 소음들이 생긴다. 다시 말해서 스팀 jet 분사 소음이 증가한다. 그러므로 증기발생기 속에서 물이 누출되면 복잡한 과정을 거쳐 특징적인 주파수 특성이 사라진다.

- 소뚝속에서 hydrogen 기포의 누출 소음 감쇠

소뚝속에서 음속이 hydrogen 기포에 미치는 간섭은 다음 3가지 에너지 형태로 나타난다.

- Thermal loss는 기포가 뜨거워지면서 소뚝으로 열전달이 일어나면서 부피 변화로 생긴 손실( $\delta_T$ ),
- Emission loss는 기포를 통해서 sound energy가 확산되면서 생긴 손실( $\delta_E$ ),
- Viscosity loss는 소뚝 속에서 진동하는 hydrogen 기포 주위의 소뚝 흐름에 의해서 생긴 손실( $\delta_V$ )이다.

전체 감쇠 계수는 thermal loss, emission loss, viscosity loss의 합( $\delta = \delta_T + \delta_E + \delta_V$ )이다.

그림 11.3.7은  $10^{-6} \sim 10^{-3}$ m의 hydrogen 기포 크기와 감쇠 계수의 주파수 의존성을 나타낸다. 소뚝속에서 계산된 hydrogen 기포의 감쇠 계수를 보면 온도 의존성이 가장 크게 나타난다. 270°C에서 500°C로 소뚝 온도가 증가하면 음파와 초음파의 주파수 영역에 걸쳐서 생성되고 있음이 관측된다.

계산 결과에 따르면, 350°C에서 최대 피크의 소음 스펙트럼은 음파 주파수 영역 쪽으로 이동하며, 500°C까지 온도가 증가하면, 초음파 영역에서와 마찬가지로 음파 소음 레벨이 상당히 나타남을 알 수 있다.

그림 11.3.8과 그림 11.3.9는 측정거리 1650mm, 여러 가지 누출속도에서 350°C와 500°C 소뚝속으로 물이 누출될 때 소음 스펙트라를 보여준다.

그림 11.3.9에서 보면, 누출량이 0.1에서 0.3g/sec로 증가할 때까지는 전체 주파수 밴드의 영향을 나타내지 않다가 0.3g/sec보다 더 많은 누출량이 증가하면 고주파 밴드 영역에서 고주파 성분이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이것은 bubbling 효과보다는 jet 기류에 의한 작은 기포의 생성과 leak hole(일명 defect) 부근에서의 jet 음향 성분이 증가함을 예측할 수 있음을 보여주는 결과라 하겠다. 그러나 이 보다 더 많은 누출이 발생하면 이런 현상은 오히려 줄어드는 현상을 많은 경험적 실험결과에서 찾을 수 있어 누출량과 음향 주파수의 관계가 이와 같다고 단정하기는 힘들다.

그림 11.3.9에서 보면, 앞서의 그림 11.3.8의 실험조건보다 온도를 상승시킨 것이다. 그림 11.3.10과 반대의 현상을 관측할 수 있다. 이것은 온도가 증가하면 소뿔-물 반응이 급격히 증가하므로 소뿔-물 반응에 따른 bubbling 효과가 크게 증가하였기 때문으로 예측하고 있다.

그림 11.3.10은 누출속도는 0.4, 0.5, 0.6 g/s, 소뿔온도는 350°C, 400°C, 450°C, 500°C이고, 측정거리 1650mm에서 실험한 누출 소음 스펙트럼 결과이다. 나타난 결과를 보면 누출소음 감쇠값의 계산결과와 거의 일치한다. 이 결과는 앞서의 그림 11.9와 그림 11.10의 결과를 모두 보여주는 것으로써 온도 상승과 누출량의 증가는 음향 주파수의 전체 밴드 영역에 영향을 주며 일정한 패턴의 양상을 보여주지 못하고 있다. 그러나 64kHz 부근에서 주파수 변화의 현상이 누출량의 변화에 일정한 변화의 특성을 보여주고 있다.

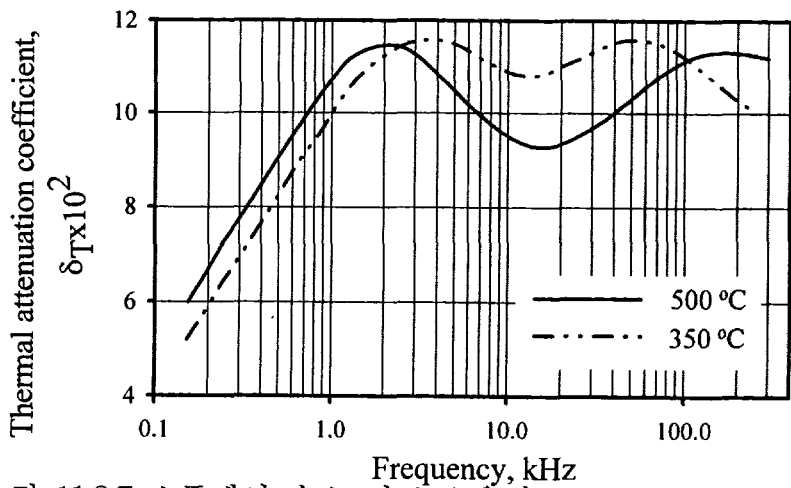
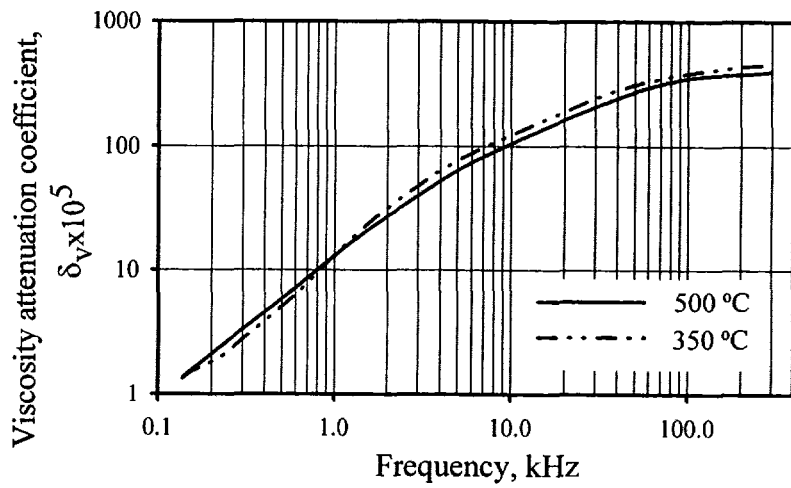
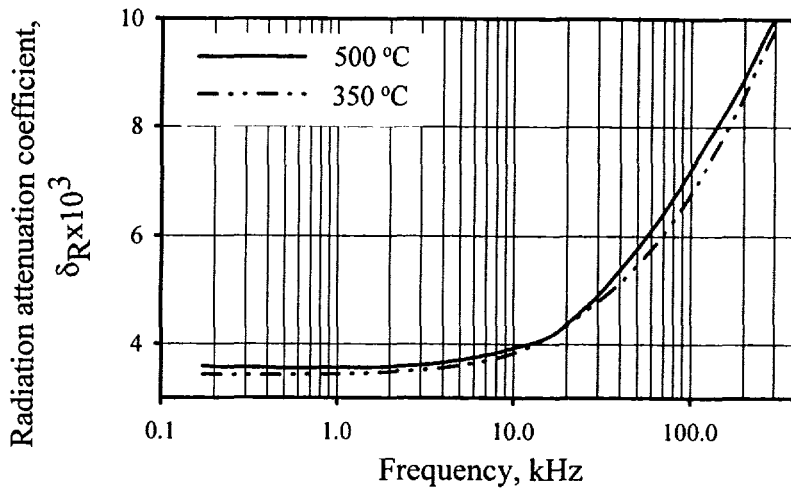


그림 11.3.7 소음에서 수소 기포 소음의 thermal, viscosity radiation attenuation 효과

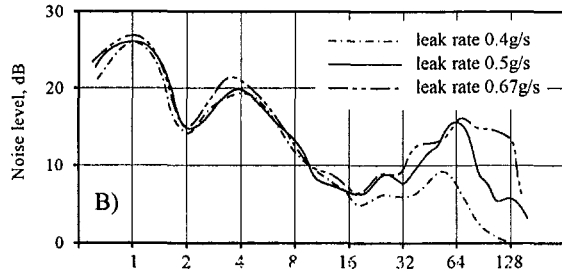
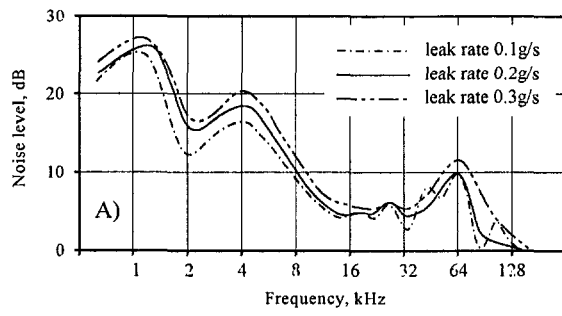


그림 11.3.8 소듐에서 누출 소음의 스펙트라  
(Sodium temp. 350°C, distance 1650mm)

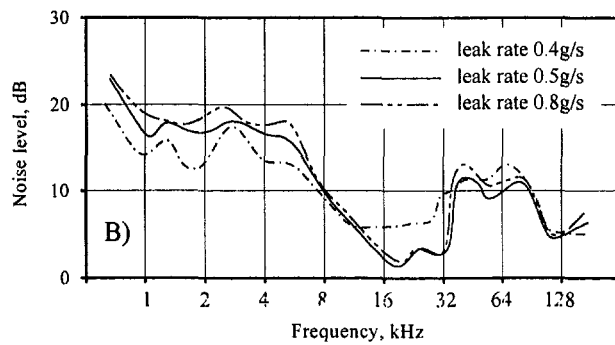
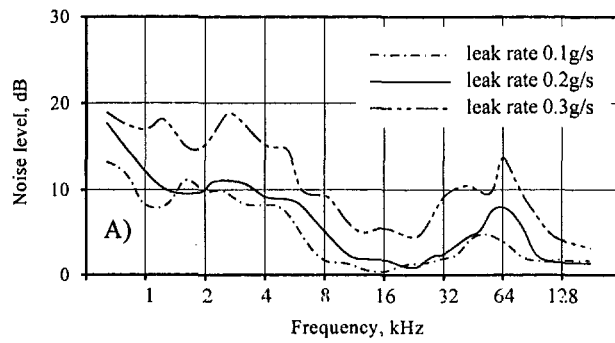


그림 11.3.9 소듐에서 누출 소음의 스펙트라  
(Sodium temp. 500°C, distance 1650mm)

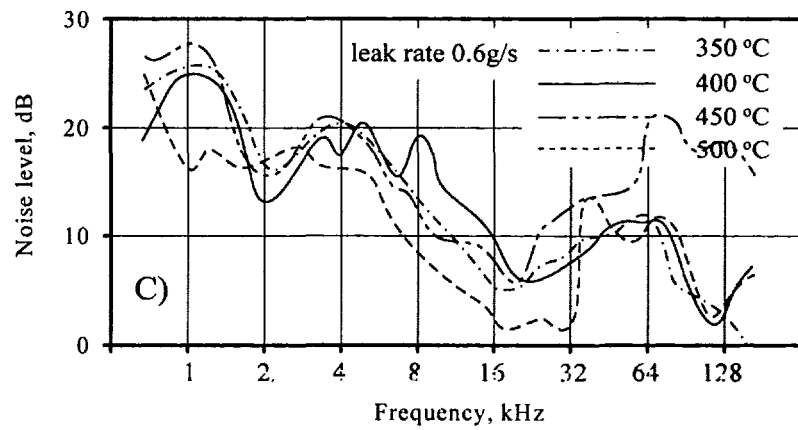
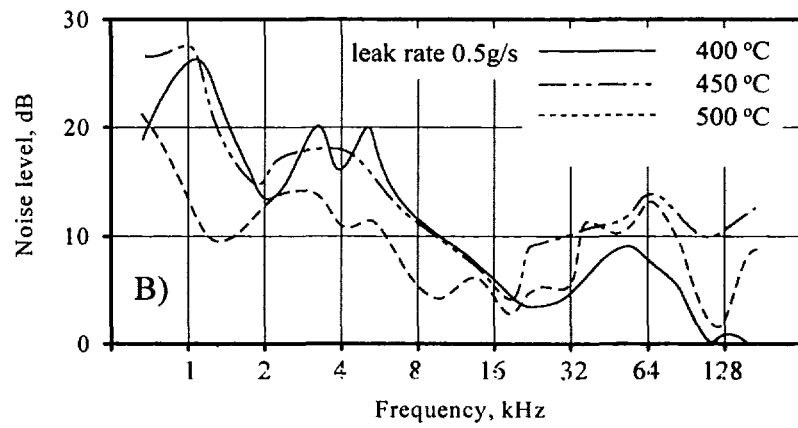
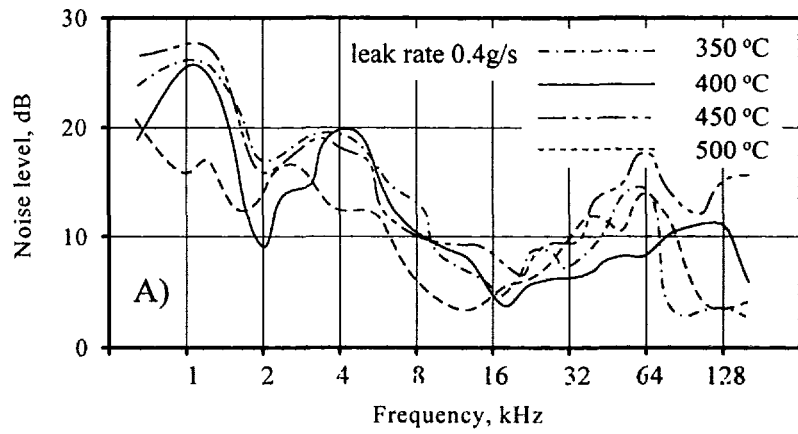


그림 11.3.10 여러 가지 소뚫온도에서 누출 소음 스펙트라  
(distance 1650mm)

다. 물 속에 아르곤 가스의 injection 동안 소음 발생 메카니즘

- 아르곤 가스의 운동 모드

물 속으로 아르곤 가스가 누출되는 동안 음향발생은 아르곤 가스의 성질, 가스 유출 통로의 운동 모드, 물의 성질에 의존한다. 유출 통로를 통하여 아르곤 가스의 viscous 운동은 점성류(laminar) 혹은 난류(turbulent) 일 수 있다. 유출 통로를 통한 아르곤의 난류 운동 동안에 전이의 vortex가 생기고, 압력 진동에 의한 wall boundary pulsation을 만들어 내며, 난류에 의한 누출 소음의 음향 신호를 만들어낸다.

- 아르곤 분사에 의한 bubbling 모드

매우 작은 압력 차이에서 물 속으로 아르곤 가스를 분사하였을 때, 아르곤 기포의 운동은 압력 차이에서 시작하며 유출 통로의 출구에서 아르곤 기포가 만들어진다. 음향 신호 발생의 원인은 압력 차이 증가로 인하여 가스 jet의 기포를 쪼갬다. 이 때 물 속에서 아르곤 기포의 부피 진동 주파수는 모드 0, 모드 2, 모드 3 등은 다음과 같은 식으로 결정된다[11.3.3]. 모드 0에서,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho_w}}$$

모드 2와 모드 3 그리고 그 다음은,

$$f_n = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{(n^2-1)(n+2)\sigma}{\rho R_0}}, \quad n=2,3,\dots$$

아르곤 기포의 반경  $R_0$ 은 평형 조건하에서 injection 순간에 다음과 같다.

$$d\sigma = (\rho_w - \rho_{Ar}) \frac{4}{3} \pi R_0^3$$

그림 11.3.11은 운동 모드 0과 2, 3의 관계식의 실험 결과를 설명해준다. 그림 11.3.11의 (B)에서와 같이 최대 주파수의 피크는 가스 유량 증가에 따라 높은 주파수 밴드 쪽으로 이동하고 있다. 이의 예측으로 볼 때 물 속으로 아

르곤 가스의 높은 유량 분사에서는 기포 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 모드 0에서의 공명 주파수는 기포 자체가 팽창과 수축이 반복하면서 발생하는 주파수 특성이고, 모드 2는 수직으로 상하 방향으로 운동할 때의 주파수 특성이고, 모드 3은 아르곤 가스와 물 사이의 계면에서 non-spherical 운동에 의한 주파수 특성을 나타낸다. 이번 실험에서와 같이 0.253mm의 defect 크기의 injection 시켰을 때 아르곤 기포 크기는 0.77mm로 예측되며, 모드 0의 공명 주파수는 2177Hz로 예측된다.

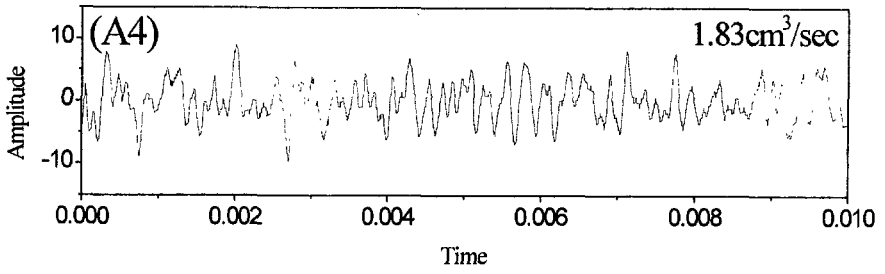
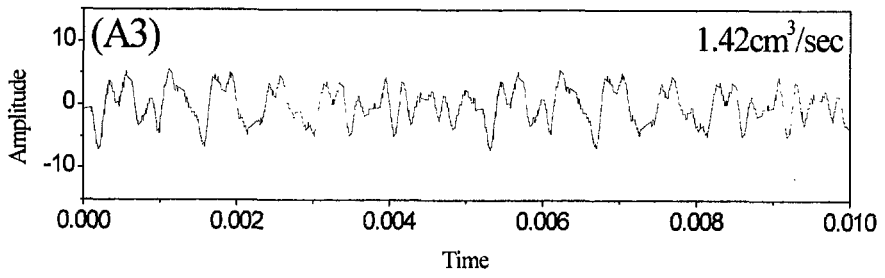
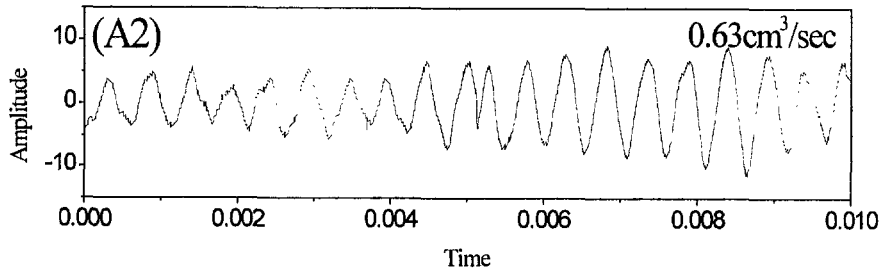
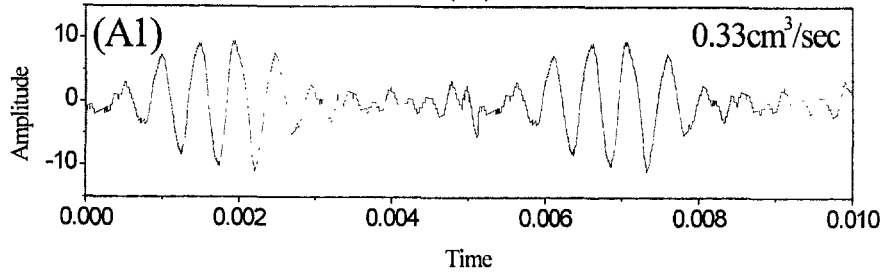
모드 2에서는 70Hz, 모드 3에서는 128Hz이다. 그림 11.3.11에서와 같이 약 2kHz의 주파수 밴드에서 최대피크가 나타남을 볼 수 있어 누출 시에 가스 기포 크기를 예측할 수 있었다.

라. 압력, 유량 변화의 배경에 따른 음향 특성 변화

그림 11.3.12는 10, 20, 30, 40 50kg/cm<sup>2</sup> 압력 변화로 Ar 가스를 주입하면서 200kHz 이상의 주파수 성분을 여과하여 획득된 raw 신호와 FFT로 분석한 결과이고, 그림 11.3.13은 같은 Ar 가스 압력 변화에서 50kHz 이상의 주파수 성분을 여과하여 얻어진 raw 신호와 FFT로 분석한 결과이다. 그림 11.3.12의 주파수 분석 결과를 보면, 압력이 증가할수록 고주파 영역으로 peak 주파수가 이동함을 알 수 있고, peak 값이 감소함을 볼 수 있는데 이것은 200kHz cut-off 여과에 따른 결과이며, FFT 스펙트럼에 나타난 저주파의 주파수 영역이 감소함을 보여준다. 그림 11.14의 50kHz cut-off 여과의 결과도 마찬가지로 그림 11.3.12의 현상과 같다.

한편, 그림 11.3.12와 그림 11.3.13의 결과를 비교하여 보면, cut-off 주파수 값이 작을수록 FFT 스펙트럼의 저주파 영역에 나타난 peak 값의 감소를 현상을 보여준다. 이런 실험 결과를 이용하여 저주파 밴드에 속해있는 peak를 정확히 추출하고 주성분을 알아내기 위한 수단으로 활용하면 유용할 것으로 보인다.

(A)





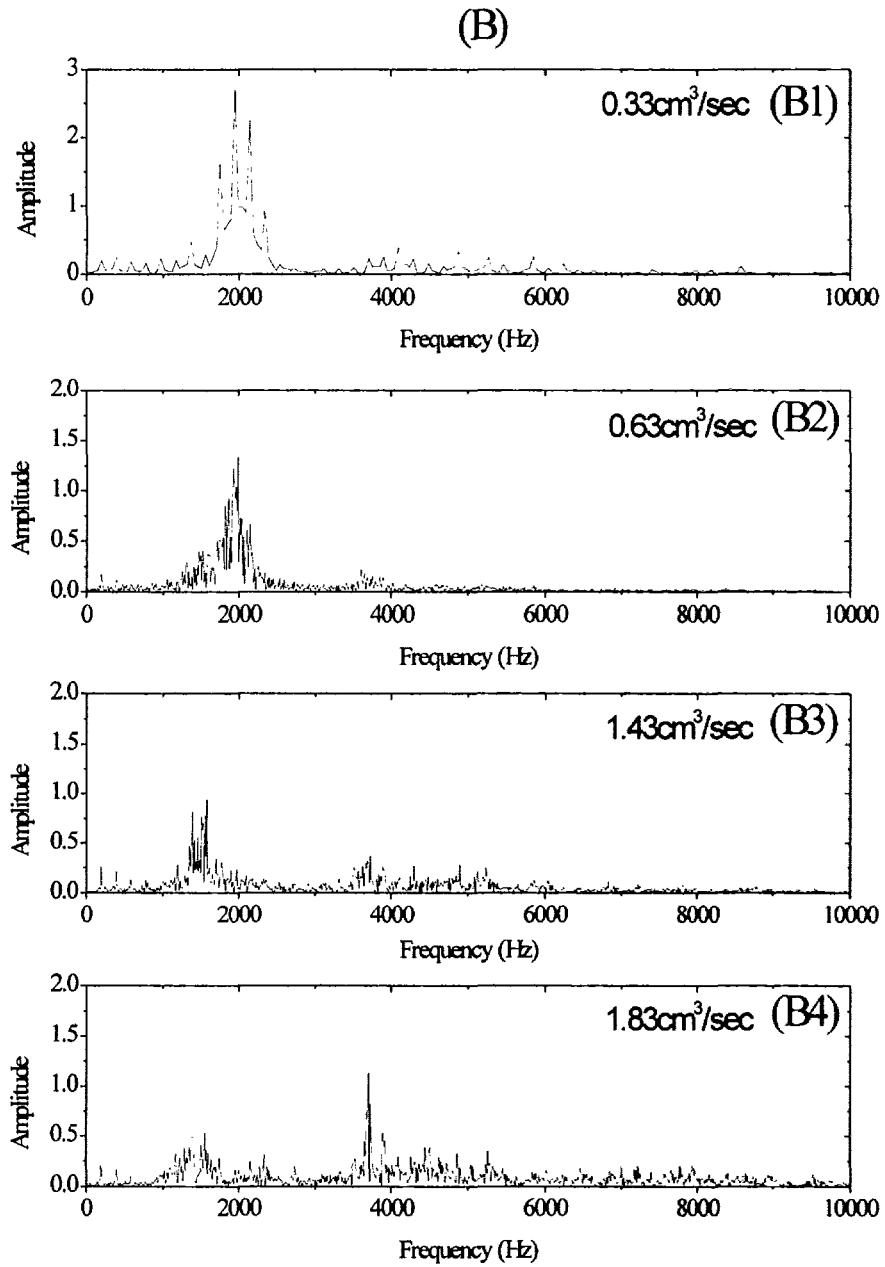


그림 11.3.11 여러 가지 누출량에서 음향신호패턴과 이의 FFT 결과  
 ((A); Raw signals, (B); FFT of raw signals)

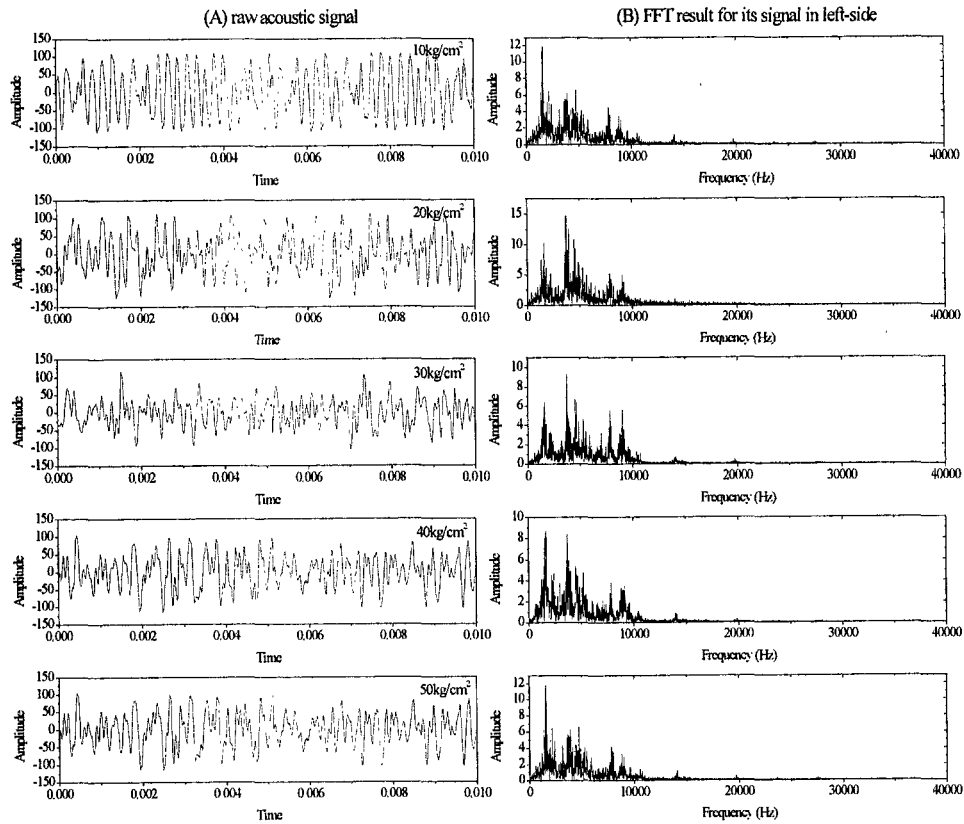


그림 11.3.12 여러 가지 압력 하에서 Ar 가스 주입에 따른 음향 신호를 200kHz cut-off filtering하여 얻어진 raw 신호

그림 11.3.14는 유량 변화시 peak 주파수와 peak 주파수의 세기와의 관계를 파악하기 위한 것이다. 이 결과를 보더라도 앞서의 결과와 일치한다. 유량이 증가함에 따라 고주파 성분이 증가함을 볼 수 있다. 처음엔 약 2kHz 부근의 성분이 많은데 비하여 유량이 증가하면 약 4.5kHz 및 10kHz 부근에서 주 peak가 나타남을 보여준다. 이런 결과는 유량이 증가하면 jet 현상이 나타나 작은 bubble이 많이 증가함을 보여주는 결과이다. 그런 가운데 처음의 유량 증가 시에는 약 2kHz 부근의 peak 값의 세기가 매우 불안정하게 나타나는데 이것은 초기 bubbling 현상에서 bubbling 현상의 전이상태라 판단된다. 다시 말해서 초기 아주 작은 유량에서는 천천히 bubbling 차례로 발생하다가 유량이 약간 증가하면 bubbling 속도가 일정하지 않고 더욱 유량이 증가하면 증

가된 유량에서 bubbling이 일정한 속도로 발생한다고 보고 있다. 그러나 더 이상의 유량이 급격히 증가하면 peak 값은 저주파 성분과 저주파 성분 보다 큰 주파수 성분이 발생함을 알 수 있다.

그림 11.3.15는 배경에 따른 음향 특성 변화를 부분적으로 알아본 것이다. 이를 부분적이거나 파악하기 위하여 유량이 전혀 없을 때, 실험실의 compressor의 작동시, 실험용기에 망치로 두들기거나 꺾었을 때의 음향 특성을 우선적으로 측정하여 비교해 보았다. 물론 실험용기에는 물을 채우고 하였다. Compressor의 경우는 아주 일정한 주파수 패턴이 생성됨을 알 수 있고, 망치로 두들길 때 생기는 음향 특성은 보다 불안정한 주파수 특성이 발생함을 보이거나 생성되는 주파수는 저주파 밴드의 주파수만 생성함을 보여준다.

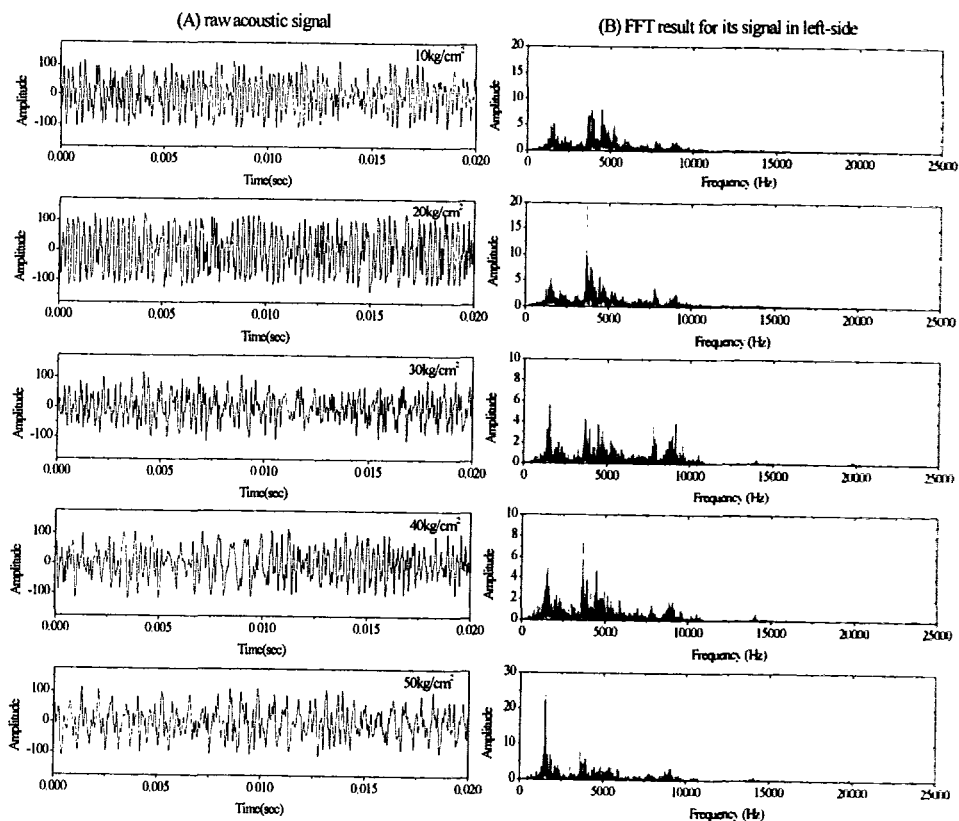
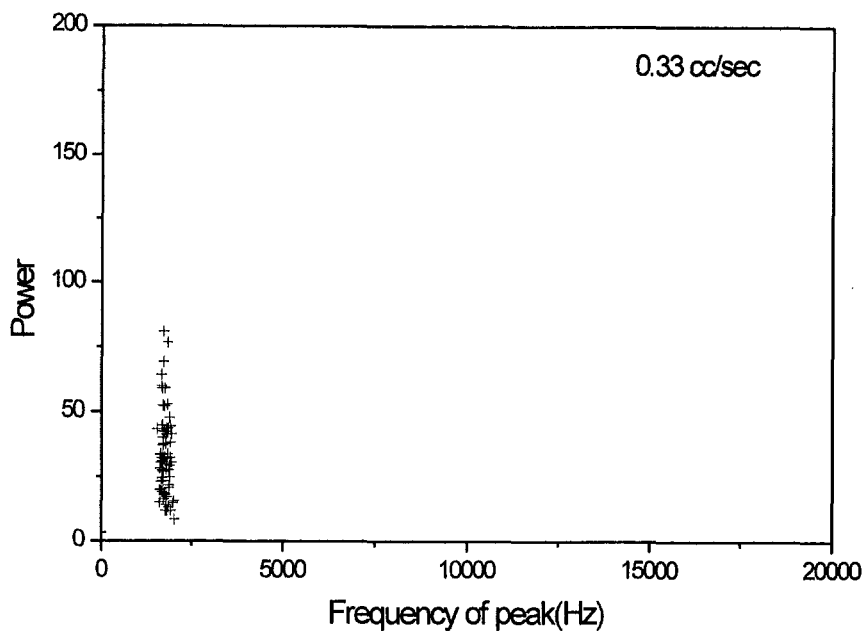
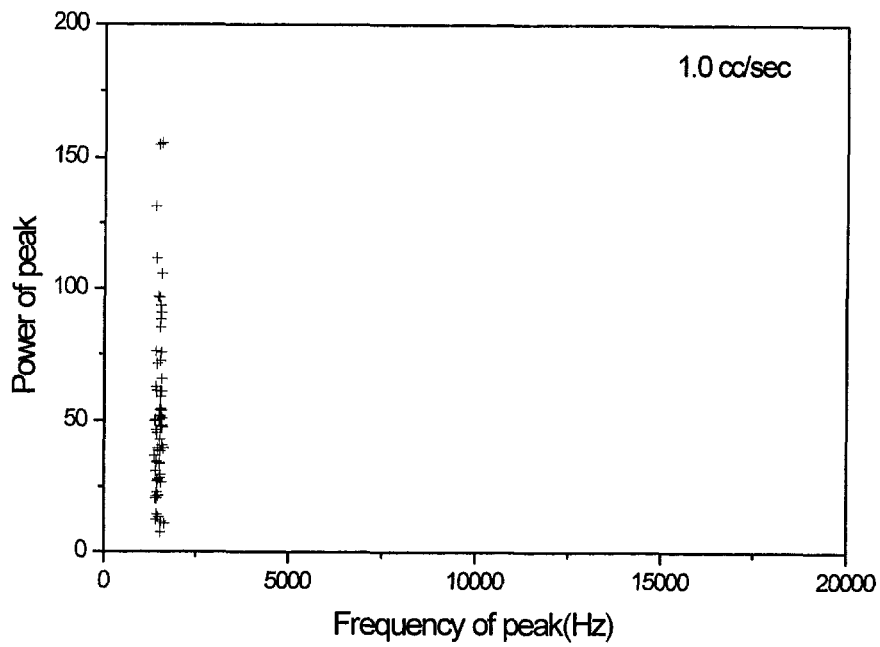
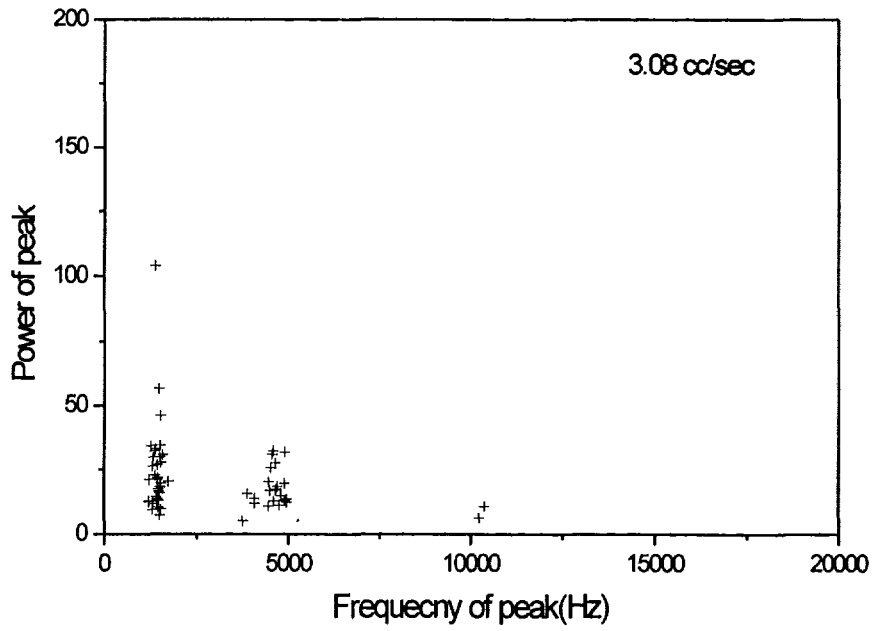
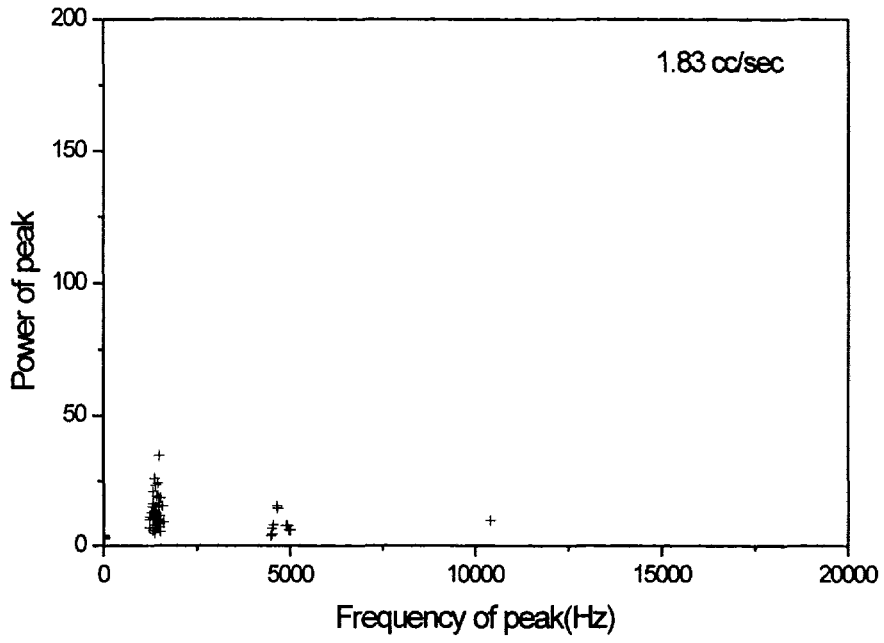


그림 11.3.13 여러 가지 압력 하에서 Ar 가스 주입에 따른 음향 신호를 50kHz cut-off filtering 결과





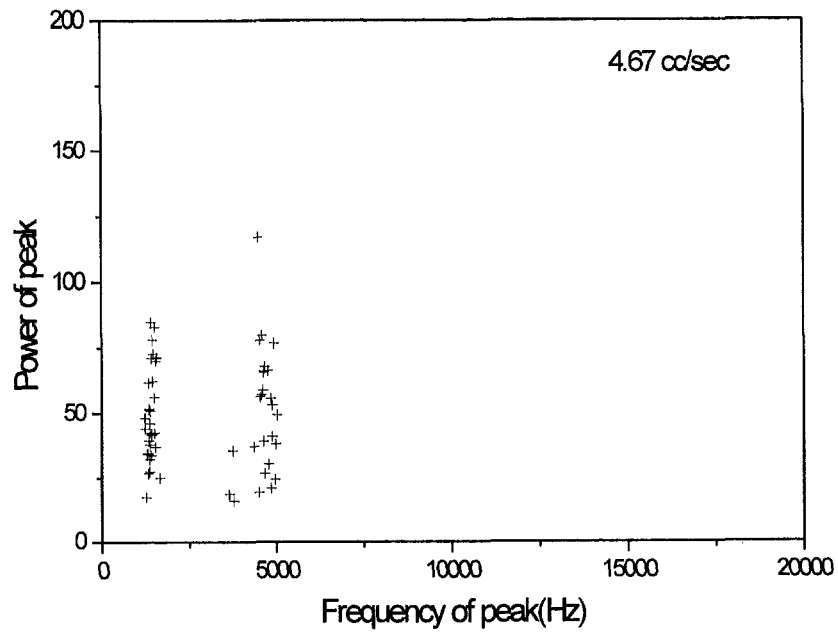
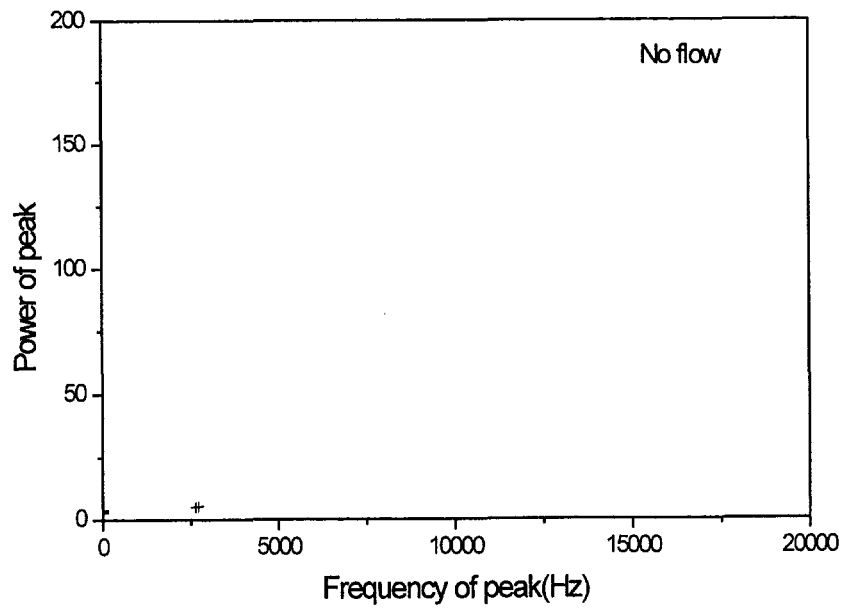


그림 11.3.14 여러 가지 유량 변화에서 peak frequency와 peak 값의 관계



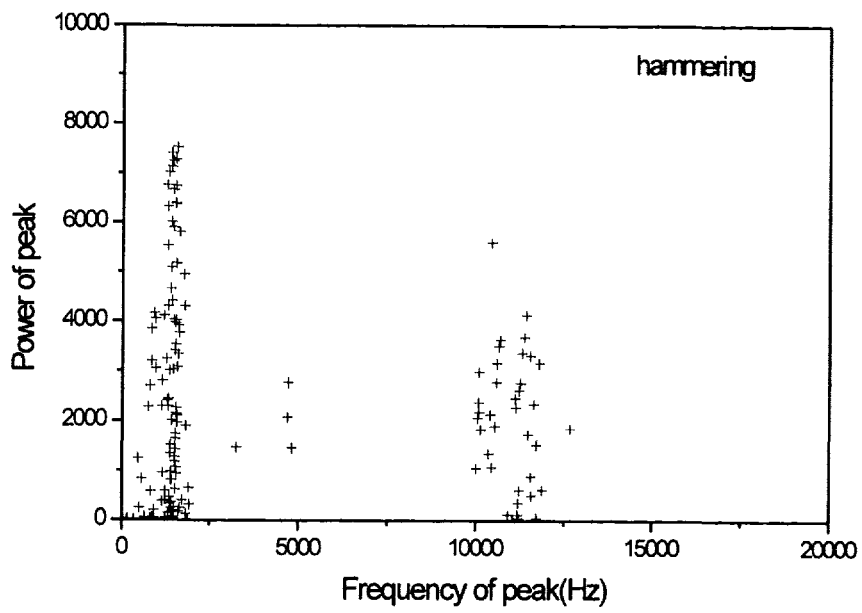
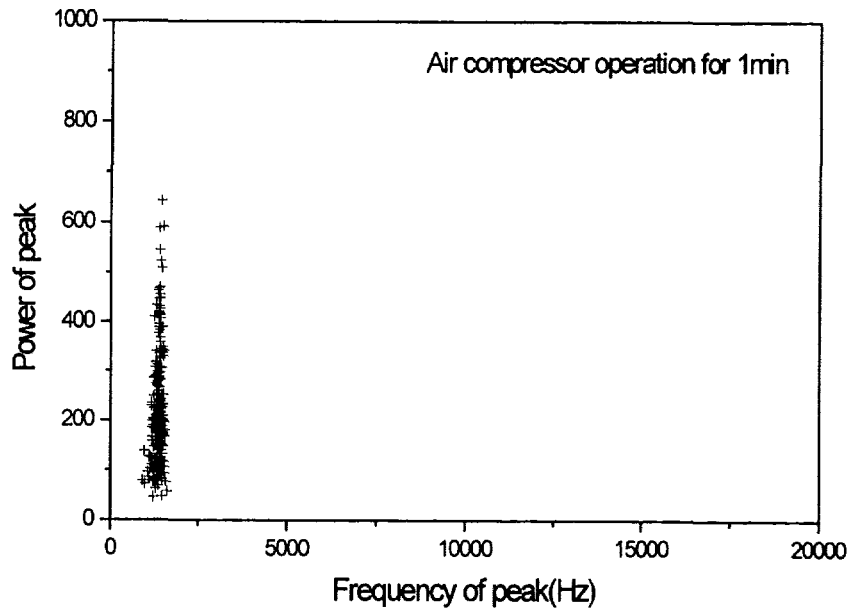


그림 11.3.15 몇 가지 배경 소음에 대한 peak frequency와 peak 값과의 관계

#### 4. Prototype의 설계

##### 가. 신경망의 적용

뉴로 연구의 목적은 '애매한 성질'을 가진 정보처리를 보다 능숙하게 처리하기 위한 것이다. 이런 연구는 1953년에 제안되어, 퍼셉트론 (Perceptron) 이라고 불리는 패턴식별장치 등에 주목되었지만, 1980년대가 되면서 커넥션니즘 (connectionism)라고 불리는 인지심리 학자들을 중심으로 하는 그룹의 연구활동의 성과가 주목되어 뉴로가 크게 발전되었다.

뉴로는 학습 능력을 갖고 있다. 즉, 외부환경에 맞도록 자기 자신을 변화시켜서 자기 조직화(Self-organization)이라는 능력을 가지고 있다. 학습은 종래의 컴퓨터에 있어서 자체적으로 자신이 프로그래밍하는 것과 같은 것으로서, 주어진 프로그래밍에 의해서 뉴로는 주어진 학습 데이터로부터 스스로 학습을 한다.

본 음향신호 판별연구에 적합한 Perceptron, Back propagation 네트워크에 대하여 그 특성을 검토하였다.

퍼셉트론(Perceptron)은 미국에 Rosenblatt가 패턴을 분류하기 위해 제안했던 neural network모델이다. 여기서의 패턴을 두 종류로 나눈 단순 퍼셉트론(simple Perceptron) 모델이다. 단순 퍼셉트론에서의 뉴런은 층상으로 나열되어 있어 각층은 S유닛 (Sensory unit), A유닛 (Associative unit) 및 R유닛(Response unit)로 나뉘어진다.

이 단순 퍼셉트론은 다음과 같이 동작하는 neural network이다. 우선 분류 대상 패턴을 입력하면 S유닛이 반응한다. 다음에 A유닛은 S유닛으로부터 입력을 받아서 신호를 출력한다. 그리고 R유닛은 A유닛으로부터의 입력에 의해 응답하고 입력 패턴의 분류에 대응하는 신호, 예를 들면 두 종류의 분류를  $P_a$ 와  $P_b$ 로 하고 분류  $P_a$ 라면 1, 분류  $P_b$ 라면 0를 출력한다. 여기서 A유닛과 R유닛에는 비선형 입출력 응답의 일종인 McCulloch-Pitts 모델을 사용한다. 또 S유닛으로부터 A유닛으로의 결합의 강도는 최초의 부여된 값으로 정해지는 것에 대해 A유닛에서 R유닛으로는 학습에 의해서 변화한다. 그 때문에 이 단순 퍼셉트론에서는 A유닛으로부터 R유닛에의 결합 강도가 중요하고 그것이 학습의 대상이 된다.



나. 다층 신경망(Multilayer neural network)

Back Propagation은 입력층, 중간층, 출력층으로 되는 계층형 구조를 한 네트워크에 대해서, 라멜하트(Rumelhart)에 의해 제안된 교사달린 학습방법이다. 이 학습법은 디프킨(Tsykin)에 의해 제안된 확률적 강하법이라고 불리는 평가 기준 최소화 학습의 특수한 경우에 해당된다. 이 뉴럴 네트워크에서는 1층에 패턴p가 입력 되었을 때, 0층 유닛이 k의 출력  $O_{kp}$ 는, 1층 유닛 i의 출력  $I_{ip}$ 와의 결합계수  $W_{ki}$ 와의 하중합에 의해 결정된다. 이 하중합은 다음과 같이 표현된다.

$$O_{kp} = \sum_i W_{ki} \cdot I_{ip}$$

여기서, 간단히 처리하기 위해 옵셋 값은 생략한다. 출력층에서의 오차를 교사 신호에서의 차이 정도로 하면, 출력과 교사 신호와의 차의 2승, 즉 2승 오차의 함수가 오차 함수로 된다. 패턴 p에 대한 오차 함수  $E_p$ 와 모든 패턴에서의 오차  $E_t$ 는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$E_p = \sum_k \frac{(T_{kp} - O_{kp})^2}{2}$$

$$E_t = \sum_p E_p$$

오차  $E_t$ 가 최소로 되는 상태를 최적 네트워크로 하고, 네트워크 학습을 생각한다. 그래서 오차  $E_p$ 를 결합 계수  $W_{ki}$ 에 관해서 최소화하는 것으로 한다. 오차  $E_p$ 는 0층의 출력  $O_{kp}$ 의 함수이고, 그 출력  $O_{kp}$ 는 1층의 출력  $I_{ip}$ 의 함수이다. 따라서 결합 계수  $W_{ki}$ 의 미소 변화에 대한 오차  $E_p$ 에 영향  $\delta E_p / \delta W_{ki}$ 는 다음과 같이 분해할 수 있다.

$$\frac{\delta E_p}{\delta W_{ki}} = \frac{\delta E_p}{\delta O_{kp}} \cdot \frac{\delta O_{kp}}{\delta W_{ki}}$$

여기서,

$$O_{kp} = W_{ki} \cdot I_{ip} + \dots + W_{ki} \cdot I_{ip} + \dots$$

$$E_p = \frac{(T_{1p} - O_{1p})^2}{2} + \dots + \frac{(T_{kp} - O_{kp})^2}{2} + \dots$$

라고 쓸 수 있으므로

$$\frac{\delta E_p}{\delta O_{kp}} = -2 \cdot \frac{(T_{kp} - O_{kp})}{2}$$

$$\frac{\delta O_{kp}}{\delta W_{ki}} = I_{ip}$$

가 얻어질 수 있다. 결국

$$\frac{\delta E_p}{\delta W_{ki}} = -(T_{kp} - O_{kp}) \cdot I_{ip}$$

로 된다. 그러나, 최소치가 얻어질 수 있다고는 할 수 없다. 따라서, 극소치를 구하는 방법으로서 최급강하법이라고 불리는 방법을 사용한다. 패턴 p를 입력했을 때 최급강하법을 사용한  $W_{ki}$ 의 수정량  $\Delta p W_{ki}$ 는,

$$\Delta p W_{ki} = -\alpha_1 \left( \frac{\delta E_p}{\delta W_{ki}} \right) = \alpha_1 (T_{kp} - O_{kp}) \cdot I_{ip}$$

라고 나타낼 수 있다. 여기서 패턴 p를 입력했을 때 오차함수가 감소하는 부(음)의 방향으로 결합 계수를 수정하는 것을 의미하고 있다. 그래서 모든 패턴을 입력하여 수정한 후의 수정량  $\Delta W_{ki}$ 는 오차 함수의 합인 오차  $E_i$ 가 감소하는 방향으로 결합 계수를 수정하는 것이 된다. 그 때문에 오차  $E_i$ 가 감소하는 방향으로 결합 계수를 수정하는 학습을 반복하면, 오차  $E_i$ 는 결합 계수  $W_{ki}$  공간의 최소점(극소치)에 도달하게 된다. 이 최급강하법에서의 2층 오차를 최소화 하는 방법은 델타법이라고도 불려지고, 패턴 인식 분야에서는 이전부터 사용되던 방법이며, 음향 패턴 인식에 적절하다고 사료된다.

## 5. 결론

이번 실험과 계산결과는 칼리머 증기발생기의 음향 누출 소음 검출을 위한 것이며, 특히  $<0.1\text{g/s}$ 의 소규모 누출을 검출하기 위함이다. 현재의 신호 검출에서는 저주파 밴드의 신호만 예측 및 측정되었으나, 앞으로 micro leak의 검출을 위해서는 고주파 밴드의 음향 신호를 획득하는 것이 매우 바람직하다.

KALIMER 증기발생기의 음향 누출 소음 검출 개발은 무엇보다도 음향 누출 소음 검출 측정의 민감도, 응답성, 신뢰성이 좋은 누출 검출 기술 개선이 필요하고, 이를 위해서는 raw 음향 신호의 adaptive filtering과 neural network 신호처리 및 소음 모니터링과 제어기술이 필요하다.

## 제 12 절 대체냉각재 특성연구

### 1. 서론

지구상에 있는 많은 국가들의 에너지수급에 있어서 원자력발전이 차지하는 비중이 매우 큼에도 불구하고, 오늘날 대부분의 국가들에 있어서 원자력발전에 대한 투자 및 개발에 대한 전망은 그다지 밝지 못한 것 같다. 여기에는 선진 국가들에 있어서의 전력수지가 어느 정도 수급 안정화를 이루는 등의 몇 가지 이유들이 있겠지만 가장 큰 이유 중 하나가 복잡한 원자력시설의 안전성 때문이다. 원자력 발전시설에 있어서의 안전성 문제는 곧 시설의 부지확보 단계에 있어서 주민들의 저항을 불러일으키고, 방호시설의 확충에 따른 경제성 저하를 가져와 이에 대한 연구개발을 둔화시킨다.

액체금속로는 원자력 발전시설의 취약점인 사용후 핵연료 처분과 우라늄 자원의 유한성을 극복할 수 있는 기술적 대안으로 제시되어 개발되었으며, 열 물리적 특성이 우수한 액체소듐을 그 냉각재로 채택한 일명 꿈의 원자로였다. 하지만 액체소듐이 갖고있는 공기, 물과의 높은 화학적 활성으로 인한 화재 및 폭발 등의 위험적인 요소에 대한 뚜렷한 해결책을 오늘날까지 제시하지 못함으로 인한 안전성 시비와 방호시설의 증대에 따른 경제성 저하가 문제되어 이 사업을 추진한 많은 국가들에 있어서 이의 개발 및 수급이 철회되거나 제한적으로 이루어지게 되었다.

그러나 화석연료의 사용에 따른 지구환경 파괴 및 이들 연료의 고갈과 국제적 사용제한 법안 등에 대해 우리 나라와 같이 부존자원이 적어 뚜렷한 대안이 없는 국가들의 경우 원자력발전에 대한 의존성은 당분간 지속될 수 밖에 없다. 따라서 현재 개발 중인 액체금속로 역시 고유의 안전성 및 경제적 타당성을 확보해 대 내외적으로 경쟁력을 갖추기 위해서는 소듐을 대체할 수 있는 보다 안전한 냉각재 개발에 대한 연구를 병행하는 것이 필요하다 하겠다. 많은 대체냉각재 후보물질들 가운데 액체금속성 물질들이 열 물리 및 핵적 특성이 가장 우수하며, 그들 가운데서도 K, Li, Pb, Bi, Sn 등이 대체 가능한 냉각재로 알려졌다. 하지만 K, Li 등은

소듐과 마찬가지로 화학적 활성이 높아 이를 사용할 경우 안전성 문제가 여전히 남게되고, Sn은 물과 약간의 반응성이 있고 결정적으론 구조재의 주성분인 Fe, Cr, Ni 등과의 산화반응에 대한 자유에너지 값이 비슷한 것으로 나타나[12.1.1] 현재까지의 조사 결과로는 Pb-Bi 합금 또는 Pb가 액체금속로의 대체 냉각재로서 그 타당성을 갖는다.

Pb-Bi 합금 등과 같은 비활성 액체금속은 화학적 활성이 낮아 대기 중의 산소 또는 물 등과 반응하여도 화재 및 폭발의 위험성이 없어 원자력 안전성을 보장해주는 매우 바람직한 냉각재로 알려져 있다.[12.1.2-12.1.5]

## 2. 기술개발 현황

### 가. 국내·외 기술개발 현황

#### (1) 러시아

1950년대 초 Alexander Ilyich Leipunskii에 의해 납-비스무트 공융합금을 원자로 냉각재로 사용하는 방안이 처음으로 제안된 이래 오늘날까지 총 80 reactor-year의 운전 경험을 갖고 있다.

러시아의 납-비스무트 냉각재에 대한 연구 및 이용 역사는 40년 이상으로 냉각재 순도관리 및 부식문제를 해결한 이후 지금까지 이를 원자로에 이용함에 있어 별다른 기술적인 문제는 발생되지 않은 것으로 알려져 있다.

현재 수행되고 있는 주요 연구 내용으로는 75MW(e)급의 액체금속로 SVBR-75를 상세설계하는 중에 있으며, 지역 난방이나 제염 등과 같은 특수 목적에 사용할 수 있는 이동성 소형 장주기운전의 소형로 설계작업, 그리고 순수 납만을 냉각재로 사용하는 300 및 1200MW(e)급의 중대형 원자로 BREST-300과 -1200 개발을 위한 국제적인 협력추진 등이 IPE와 RDB 'Gidropress' 주도로 이루어지고 있다. 이 외에도 약 15개의 관련 실험시설을 보유하여 이를 운영 중이며, 미국과 공동으로 납-비스무트를 냉각재와 핵파쇄 표적으로 사용하는 가속기 구동형 핵변환로 개발을 수행하고 있다. 납-비스무트를 원자로 냉각재로 이용하는 분야에 있어서만큼은 러시아가 가장 선진 기술을 보유하고 있으며, 개발 및 이용에 선도적인 역

할을 하고 있다.

## (2) 미국

제 2차 세계대전 후 미국 원자력위원회에서는 원자력을 평화적으로 이용하기 위한 원자로 개발 연구의 일환으로 납, 비스무트 및 이들 공융합금의 좋은 핵적특성을 들어 이를 냉각재로 활용할 것을 제안하여 이에 대한 연구를 착수하였다.

BNL(Brookhaven National Laboratory)이 주도한 연구 결과는 결국 이들 냉각재의 구조재에 대한 부식성 문제를 근본적으로 해결하지 못하여 이에 대한 연구를 포기한 것으로 알려져 있다.

하지만 구 소련의 붕괴와 함께 납-비스무트 공융합금이 원자로 냉각재로 사용된 사실이 알려지면서부터 이에 대한 연구를 재개하여, 현재 Los Alamos National Laboratory에서는 납-비스무트를 냉각재와 핵파쇄 표적으로 사용하는 가속기 구동형 핵변환로의 설계를, 국가적으로는 NERI(Nuclear Energy Research Initiative) program을 통해 납이나 납-비스무트를 냉각재로 사용하고 원자로 수명기간 중 핵연료 재 장전이나 재배치가 필요 없는 장주기(약 15년) 운전의 소형 모듈로 원자로 개념인 ENHS(Encapsulated Nuclear Heat Source)의 개념설계 연구를 수행하는 중에 있다.[12.2.1]

## (3) 일본

현재 일본은 고속로 실용화를 위한 장기전략을 수립하기 위하여 1999년부터 '고속로 주기의 상용화 전략조사 연구'를 일본 핵연료주기회사(JNC)를 위시하여 전력중앙연구소(CRIEPI), 일본 원자력연구소(JAERI) 등이 협력하여 공동으로 수행하고 있다. 여기에서는 기존의 경수로와 비교해서 경제성 및 안전성 등에 있어 경쟁력있는 원자로의 형태, 관련 핵연료 및 핵연료 주기, 냉각재 선정 등과 같은 고속로 개발에 필요한 모든 분야에 대한 타당성 평가를 전반적으로 수행하고 있는데, 납과 납-비스무트를 냉각재로 사용하는 원자로 연구개발 관련 타당성 조사(그림 12.2.1) 역시 이곳에서 체계적으로 수행되고 있다.[12.2.2]

일차적인 연구검토 결과 일본에서는 액체중금속을 냉각재로 사용하는

원자로의 경우 납을 냉각재로 이용한 중·대형 원자로 보다는, 납-비스무트를 냉각재로 사용하는 medium- and small-scale modular reactor가 경제성 및 안전성 등을 포함한 여러 가지 기술적인 측면에서 볼 때 연구개발에 타당성 있는 것으로 판단하고, 이의 개념설계를 추진하기 위한 세부 사항 검토작업에 들어가 있다.

#### (4) 국내

우리나라의 경우 서울대학교 황일순 교수팀이 이들 냉각재의 물리화학적 특성연구 및 이에 따른 구조재 부식 현상 연구를 통해 가장 먼저 이 분야에 대한 연구를 시작하였으며, 뒤이어 KAERI에서 수행중인 핵변환로 과제에서 납-비스무트를 원자로 냉각재 및 중성자원 표적으로 사용할 것을 결정하고 기초 연구를 수행 중이다.[12.2.3]

#### 나. 납-비스무트계 액체중금속의 활용

납-비스무트계 액체 중금속 활용 계획 및 연구분야를 종합해보면 다음과 같다.

- 액체금속로의 소듐 대체냉각재
- 가속기 구동 핵변환로의 냉각재 및 중성자원 표적
- 소형 특수 목적로(지역난방, 제염 등)의 냉각재
- 납-비스무트 냉각재를 이용한 자연순환로(美, ANL)
- 차세대 연료처리 공정인 건식재처리 방식에서의 추출용매
- 수송용 NPI(Nuclear Power Installations)의 냉각재 등

### 3. 냉각재 특성[12.1.2, 12.1.4, 12.3.3, 12.3.4]

#### 가. 주요 물리적 성질

##### 표 12.3.1 참조

#### 나. 부식성 및 방사성 위해성

납-비스무트계 액체 중금속을 냉각재로 사용함에 있어서 가장 문제

표 12.3.1 액체금속의 물리적 성질

Properties (at atmospheric pressure)	Pb	Pb-Bi (44.5wt%Pb)	Na
Atomic weight	207.21	208(cal.)	22.997
Melting point (°C)	327.4	125	97.8
Boiling point (°C)	1737	1677	883
Density at 500°C (g/cm <sup>3</sup> )	10.39	10.05	8.33
Thermal conductivity at 300°C (cal/sec.cm.°C)	0.039	0.026	0.181
Viscosity at 500°C (cP)	1.90	1.29	0.25
Heat capacity at 500°C (cal/g.°C)	0.037	0.035	0.303
Saturated vapor pressure (bar)	$5.1 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^{-6}$	0.009

가 되는 것은 이들 금속이 원자로 구조재를 부식시키며 방사성 위해 물질인 폴로늄-210을 생성시키는 것이다.

#### (1) 구조재의 부식

납-비스무트계 금속은 원자로 냉각재로서 많은 장점을 가지고 있는 반면에 구조재로 사용되는 강과 합금 등에 대한 부식력이 강한 단점을 지니고 있다. 예를 들어 재래적으로 사용되어 온 강(ferritic-martensitic and austenitic)은 Na와 K에 대해 700°C 이상의 온도까지 내식성을 가지나, 납이나 납-비스무트 합금에 대해서는 Cr-Ni강은  $\cong 400^\circ\text{C}$ , Cr강은  $\cong 450^\circ\text{C}$ 의 온도 이하에서만 사용이 가능하다.[12.3.5]

납-비스무트 냉각재를 사용하는 구조재에 있어서의 부식은 주로 구조재 강 성분 중 이 합금에 용해되기 쉬운 원소들(Fe, Cr, Ni 등)이 강과 냉각재의 계면에서 냉각재 중에 녹아 들어가거나, 강의 표면에 형성된 산화물 보호막( $\text{Me}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Me}_2\text{O}_3$ )이 기계적인 응력이나 방사선 조사 영향 등으로 인해 깨짐에 따라 이 부분이 냉각재에 침식되어 일어난다.

구조재 강의 일부 성분이 녹아 들어간 부위는 기계적 강도가 약화됨과 동시에 고온으로 순환되는 냉각재에 의해 침식되며, 냉각재 중에 형성된 금속 산화물들은 특정한 조건하에서 열 전달 표면에 퇴적됨으로 인해 slag blockage를 형성하고, 펌프 및 밸브의 작동을 방해하며, 루프의 수력학적 저항성을 증가시킬 수 있어 결국 냉각재 계통을 운전할 수 없는 심각한 문제를 야기한다. 따라서 구조재의 부식을 억제하기 위한(내식성 향상) 기술개발이 최우선되어야 한다.



납-비스무트계에 사용되는 구조재의 부식을 억제시키고 강에 내식성을 주는 방법으로는 다음과 같은 것들이 있다 :

(가) 적합한 강의 선정 및 개발

강의 내식성은 강을 구성하고 있는 일부 성분의 양을 조절하거나, 강에 새로운 성분을 첨가시켜 줌으로써 향상될 수 있다. 가장 큰 영향을 미치는 것은 강에 Si나 Al을 첨가시켜 합금화 하였을 때 얻어지는 것으로 밝혀졌다.[12.1.2, 12.3.4]

납-비스무트를 냉각재로 사용하는 원자로에 있어서 모든 구조재 중 내식성 항목에서 가장 엄격한 요구조건을 갖는 것이 바로 핵연료 피복관이다. 러시아에서 수행된 연구 결과를 보면, 기존의 ferrite-martensitic 강에 1.5~2%의 Si를 첨가한 강이 600~650℃의 온도 범위에서 납-비스무트 합금에 대해 내식성, 고온강도, 방사선 저항, 실용성 및 핵연료와의 공존성 등에 최적의 성질을 보인 것으로 알려져 있다. 러시아의 납-비스무트를 냉각재로 이용한 기존의 NPPs에 있어서는 핵연료 피복관의 재료로 EI852강이 가장 널리 사용되었으며, 현재 상세설계 중인 소형 납-비스무트 냉각 원자로(SVBR-75)의 핵연료 피복관 후보 재료로 EP823강이 선정되었는데 이들 강의 조성은 아래 표 12.3.2와 같다.

표 12.3.2 핵연료 피복관 재료의 화학적 조성

Steel	Element's content, mass%												
	C	Si	Mn	S	P	W	Cr	Ni	Mo	V	Nb	B	Ce
EI852	0.10 - 0.15	1.4 - 2.1	up to 0.6	up to 0.02	up to 0.03		12.0 - 14.0	up to 0.30	1.2 - 2.0				
EP823	0.14 - 0.18	1.0 - 1.3	0.5 - 0.6	up to 0.01	up to 0.015	0.5 - 0.8	10.0 - 12.0	0.5 - 0.8	0.6 - 0.9	0.2 - 0.4	0.2 - 0.4	up to 0.006	up to 0.1

(나) 강 위에 산화물 보호막을 형성

이 방법은 납, 비스무트에 비해 상대적으로 높은 산소 친화력을 가진 강의 조성물(Fe, Cr, Si 등)이 용해되면서 산화반응을 일으켜 금속 산화물 보호막( $Me_3O_4$ ,  $Me_2O_3$ )을 강 표면 위에 형성, 이 막이 강의 표면과 부식성

을 지닌 냉각제와의 직접적인 접촉을 막아 강에 내식성을 제공토록 하는 것이다.



다른 방법으로는 부식억제제인 Zr, Ti 등을 50~300ppm정도 첨가해 줌으로써, 이들이 질소 및 탄소와 반응하여 강의 표면에 질화/탄화물 막을 형성하여 내식성을 갖도록 하는 것이 있다.

이들 방법을 사용함에 있어 주의해야 될 점은 만일 냉각재 중 산소 농도가 충분하지 않으면 국부적으로 균일하지 않은 막을 형성하게 됨으로써 막이 형성되지 않은 부분에서 재료의 부식이 일어날 수 있으며, 반대로 과량의 산소가 존재하게 되면 냉각재 중에 산화물을 형성시킴으로 인해 또 다른 문제를 일으키게 된다는 것이다. 또한 기계적 응력이나 방사선 조사 영향으로 인해 이들 보호막이 깨져 공식(孔蝕)을 일으킬 수도 있다.

#### (다) 냉각재 중의 산소농도( $O_2$ ) 제어

보호막의 성질이 저하됨으로 인하여 구조재 강에 부식이 일어나는 현상을 예방하기 위해서는 냉각재 중의 산소 농도를 다음 식(12.2)에 의해 얻어진 값 이상으로 유지시켜(일반적으로 루프 운전시에는 “하한 값  $\times 10^2$ ” 이상으로) 주어야 된다[12.3.5].

$$\log C = -0.33 - \frac{2790}{T} + \log C_s + \log fC_{Pb} \quad (12.2)$$

여기서

$C$  = 냉각재 중에 용해된 산소의 농도 ( $mass\%$ )

$T$  = 루프 내에서 냉각재의 최대온도 ( $^{\circ}K$ )

$C_s$  = 온도  $T$ 에서 냉각재에 용해된 산소의 포화농도 ( $mass\%$ )

$f$  = 냉각재 중 납의 열역학적 활동도 계수 ( $inverse\ mass\%$ )

$C_{Pb}$  = 냉각재 중의 납 농도 ( $mass\%$ ) 이다.

#### (2) 냉각재 순도관리 기법

납-비스무트계 냉각재 순도관리 기법으로는 수소 혼합물을 이용한

금속 환원법과 여과법이 있다.

(가) 수소 혼합물을 이용한 금속 환원법

이는 수소+수증기+불활성 기체로 구성된 기체 혼합물을 냉각재 흐름 속으로 주입하여 강 표면에 퇴적되어 있는 냉각재 성분의 혼합 산화물 ( $PbO+Bi_2O_3+ \alpha \dots$ )을 환원시켜 냉각재 기본 성분(Pb, Bi)를 냉각재 속으로 되돌려 주는, 일종의 냉각재 재생 기법이다.



이 기법을 사용할 경우 기체 혼합물은 반드시 유동성 냉각재와 함께 공급되어야 하며, 비록 수증기가 보완적 역할을 할지라도 수소에 의한 보호막의 환원 가능성에 유의해야 된다.

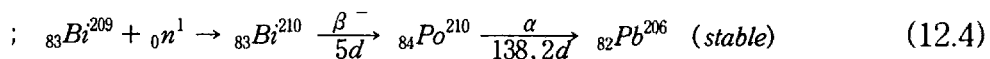
(나) 여과법

여과법은 흡착성 유리섬유, 특수섬유 또는 알루미늄 산화물을 기초로 한 grain material을 여과기 재료로 사용하여 냉각재 중의 부유 산화물과 수소 환원 후 냉각재에 남아있는 잔류물을 제거하는 방법이다.

만일 여과기가 불순물로 어느 정도까지 차게되면 수소 환원기법과 동일한 기체혼합물을 이용하여 여과기 내부를 재생시킨 후 계속 사용할 수 있다.

(3) 폴로늄 생성문제[12.3.8-11]

납-비스무트계 금속을 냉각재로 사용함에 있어서 문제가 되는 것 중의 또 하나가 냉각재 중의 비스무트가 중성자에 조사되어 반감기가 약 138.4일인 알파방출 방사성 동위원소인 polonium-210을 발생하는 것이다



이는 정상가동 중에는 별다른 문제가 되질 않으나 일차냉각계통이 건전성을 상실하게 되면 공기와 접하게 됨으로써 방사선을 가진 에어로졸과 폴로늄 수화물을 생성시켜 안전성을 저하시킨다.



$\alpha$ -에어로졸 방사능의 위해성은 공융물 온도, 냉각재 중 폴로늄 농

도, 공융물을 흘린 면적(또는 불활성 기체 루프계통으로부터 가스 누출), 방의 통풍 시설 등 같은 많은 인자들에 의존된다.

납 냉각재의 경우엔 폴로늄에 의한 위해성이 납-비스무트 합금의 1/1000정도로 크게 감소된다.

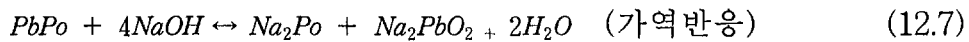
#### (가) Po 제거 방법

##### ① 진공 승화법

이는 냉각재가 700°C까지 가열되었을 때 증발에 의해 polonium을 제거하는 방법으로 군사적인 목적에 사용된다.

##### ② 알칼리성 물질에 의한 추출

알칼리 용융물과 냉각재를 접촉시켜 추출하는 방법으로 IPPE 경험에 의하면 접촉 2분 이내에 Po의 90%가 전송되며, 다른 핵파쇄 생성물도 함께 제거하는 부수적인 이득이 있다. 계에 있어서 산화제는 Po의 역 전송을 일으킨다.



##### ③ 저장

산화제를 첨가하여 알칼리 용융물로부터 LBE나 Pb로 역 전송

다. 냉각재로서의 장, 단점

#### (1) 장점

- 낮은 화학적 활성으로 인해 공기, 물, 수증기와의 반응에 의한 화재 및 폭발의 가능성이 거의 없어 중간 열교환계통 등의 배제로 인한 계통의 단순화가 가능하다.
- 융점이 낮고(Pb-Bi ; 125°C) 비등점이 높아(1670°C), 운전의 여유도가 높으며, 가장 심각한 사고상황에서도 냉각재 비등되고 기포가 발생할 가능성이 거의 없다.
- 냉각재 자체가 방사성 물질에 대한 좋은 차폐막이 된다.
- 열중성자 반응 단면적이 작고, 방사선에 의한 방사화 정도가 낮다.
- 자연대류 특성이 좋다.

- 경한 중성자 스펙트럼으로 고증식비 달성이 가능하다.
- 음의 기화반응도 및 작은 연소반응도 값을 가져 안전성이 확보된다.
- 냉각재 압력이 낮아 원자로 용기 설계, 건조 및 운전에 대한 신뢰도가 향상된다.
- 납 냉각재의 경우 재료를 얻기가 쉽고 구매비용 역시 소듐과 비슷하며, Po의 활성 역시 납-비스무트의 1/1000 수준으로 낮다.

## (2) 단점

- 구조재에 대한 부식성이 크다. 현재 러시아에서 내식성있는 신 재료 및 기존 재료들의 내식성 향상 방법이 개발되었으나 절차가 다소 복잡하고, 대형 시설에 적용된 사례가 없다.
- 점도가 크고, 소듐에 비해 열 전달 특성이 좋지 못함으로 인해 양수력이 커진다.
- 비스무트가 반감기 138.4일인 위해성 방사성 물질인 Po-210을 생성시킨다.
- 비스무트의 매장 및 생산량이 적고 비스무트의 생산단가가 높아(소듐의 10배) 납-비스무트를 중, 대형 NPPs 냉각재로 다량 사용하기에는 어려움이 있다.
- 액체 중금속 냉각재의 경우 금속연료를 사용하면 냉각재와 핵연료 피복관 사이의 온도차가 소듐 보다 훨씬 커져(약 5배) 열효율이 낮아진다.
- 냉각재 순도관리 공정이 복잡하며, 납 냉각재의 경우 그 융점이 높아(327.4℃) 원자로 운전·보수 시 계를 고온으로 유지시켜야 됨으로 인해 부대 비용이 증가되고 일부에서는 냉각재가 응결될 가능성도 있으며, 구조재와의 양립성에 따른 냉각재 활용 운전온도범위가 축소된다.
- 냉각재 밀도가 커서 기계적 구조의 건전성에 영향을 줄 수 있다.
- 액체 중금속을 냉각재로 사용할 경우 구조재의 부식 방지를 위해

유속이 제한된다.

- 관련 기술의 개발 및 활용실적이 특정국가에 한정되어 있으며, 중·대형 시설에 적용되어 사용된 사례가 없다. 특히 개발된 관련 기술 역시 납-비스무트 합금에만 적용되어 활용되었을 뿐이다.
- 납 냉각재의 경우 납-비스무트 합금에 비해 불순물의 양과 정도가 심해 냉각재 순도관리에 어려움이 따른다.

#### 4. 결론

액체 중금속 냉각재에 관한 기술현황분석 결과 납-비스무트를 냉각재로 사용하는 중, 소형 원자로 개발이 가장 안전성있고 기술적인 측면에서도 가능성이 매우 높은 것으로 사료된다. 러시아에서 추진 중인 중, 대형 납 원자로(BREST-300, -1200)의 경우엔 아직은 기술적으로 보완하고 해결해야 할 부분들이 많은 것으로 평가되고 있다. 향후 세부 분야별로 보다 상세한 검토를 수행할 필요가 있다.

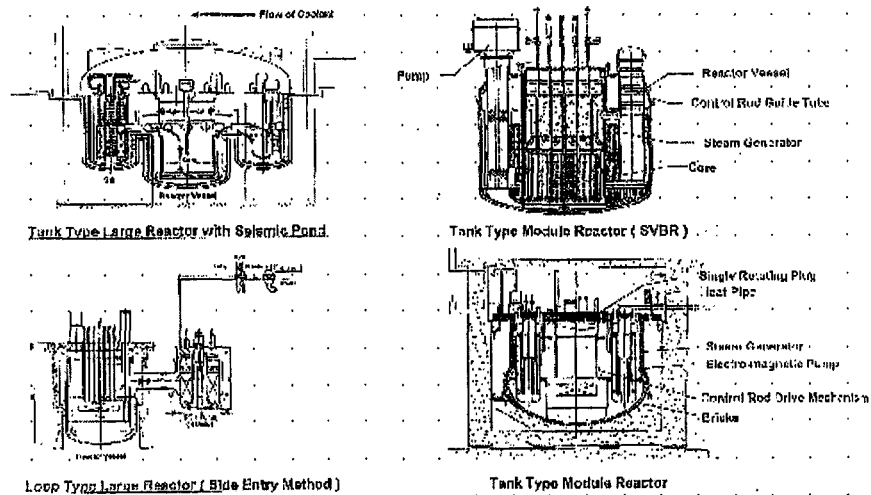


그림 12.2.1 액체 중금속 냉각 원자로 설계개념

# 여 백

## 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

- PSDRS 실험의 경우 적은 비용을 고려하여 실험요건서 재검토 및 실험장치 재설계를 수행하였고, 실험장치 제작 및 설치과정에서 당초 제작에 참여하였던 업체가 설계 및 기술상의 문제로 중도에 포기하는 사태가 발생하여 제작기간이 약 3개월 정도 지체하게 되었으나 이를 보충하기 위하여 부단히 노력한 결과 시운전 및 본 실험을 수행하여 목표에 달성할 수 있었다. 그러나 실험결과를 연계과제인 유체설계과제에서 이용하기에는 시기적으로 약간 늦은감이 있었다. 또한 PSDRS 실험장치에 사용할 스테인레스 스틸 316L과 304의 방사율을 온도와 표면산화도에 따라 측정하였고, 실험식을 개발하였다. 이는 복사열전달의 기본 실험인자인 방사율 기초자료로 활용된다.
- 스테인레스 스틸 방사율 측정실험, 중간열교환기 물모의 실험, 관성보완장치 성능특성실험, 핵연료 집합체 압력강하 및 진동특성실험, 상부플레넘 액면요동 특성 실험등의 실험결과들은 설계부서와 연계되는 실험들로 실험보고서를 작성하여 이송하였으며 설계부서들에서 활용하였다
- 중간열교환기 물모의 실험은 계획한 바와 같이 수행되어 필요한 실험자료를 획득하였으며, 정삼각형 및 회전정삼각형 배열의 관다발의 유입부, 유출부 및 중심부에서의 유량에 따른 압력강하 실험자료를 유체계통설계 과제에 송부하였다
- 핵연료집합체 압력강하 측정 실험은 계획한 바와 같이 수행되어 필요한 실험자료를 획득하였으며 유량에 따른 핵연료집합체 각 부위별 압력강하 실험자료를 노심설계 과제에 송부하였다.
- MHD 압력강하 실험에서 비균질 자장에 의한 압력강하 실험은 현재 시점에서는 장치 제작처의 기술력 부족으로 계획보다 2개월 가량 지연되었으나 기간내에 요건에 따른 실험일정을 모두 마칠 수 있었다.
- 액체금속로는 근본적으로 고온구조로서 열충격문제 등으로 인하여 일반 경수로에 비하여 박판 설계로 되어 있으며, 핵연료집합체 또한 완전히 다른 형상을 가지고 있다. 그러므로 액체금속로에서는 유체유발진동현상



에 의한 영향을 설계단계에서부터 미리 고려하여야 한다. 그 동안 미국, 일본, 프랑스, 독일 등 선진국에서는 일찍이(1980년대) 액체금속로의 유체유발진동과 관련하여 많은 연구를 한 바 있다. 이와 관련하여 우리나라에서는 처음으로 핵연료핀다발의 유동진동특성 기본실험을 수행하였다. 예산이 부족하여 유동진동을 위한 고유의 실험장치를 구성하지는 못하였으나 압력강하 특성 실험장치를 이용하여 핵연료핀다발의 수중 진동특성에 대한 데이터를 확보할 수 있었다. 이 자료는 노심, 유체설계 및 기계설계분야와 연계하여 전산모델검증, 노심의 안전성 및 구조건전성 평가 등에 유용하게 활용되리라 판단된다.

- 미국의 NIST에서도 numerical simulation 수준에 머물러 있는 전도방식의 열유속센서 보정방법을 실험적으로 최초로 구현하여 실험함으로써 고열유속 조건에서의 열유속센서 보정이 가능하게 되었다. 전도열전달방식을 적용한 열유속센서 보정장치는 보정장치의 제작기술과 함께 다양한 적용성을 갖는 해석방법을 확립하였다. FLUENT를 이용한 전도열유속센서 보정장치의 열유동 해석을 통해 이와 유사한 조건에서의 열전달 특성을 파악할 수 있는 기술을 보유하게 되었다. 기초적인 기술력을 확보하였으며 이는 추 후 원자력 안정성 해석에 대한 기반을 마련하였다고 볼 수 있다.
- 국소 유속 센서는 매우 낮은 전압을 측정하여야 하는 매우 힘든 작업이다. 5mm 크기의 자석 사이에 흐르는 전기장의 세기를 측정하기 위해서 계측회로를 설계하고 구축하였다.
- 소듐 감지/소화실험에 의하여 액체금속로에서 소듐 화재의 조기 감지와 소듐화재를 신속히 진압하기 위한 기반자료를 확보하였고 이들 기술들은 소듐 관련 실험 시설에 적용될 예정이다.
- 전열관 튜브에서 물 누출이 발생하는 경우 소듐-물 반응에 의해 시스템의 안전성에 중대한 영향을 미침으로 물 누출 현상에 대한 해석은 안전성 평가에서 중요하게 취급되고 있다. 본 연구에서는 물 누출현상 해석과 관련하여 선진국에서 발표된 각종 실험자료들을 수집/분석하여, 물 누출 현상 해석을 위한 기초자료가 확보되었고, 자체 설계,제작된 소규모 물 누출 실험장치를 고온의 소듐분위기에서 직접 운전함으로써, 소듐

취급에 대한 기본 기술을 획득함과 함께 미세 누출부터 소규모 누출에 이르기까지 발생하는 소듐-물 반응으로 인한 전열관에서의 damage 현상을 해석함으로써, 안전성 평가시 예상되는 누출 전파현상 해석을 위한 기본 토대를 마련하였다.

- 물 누출 검출 기술 개발은 증기발생기의 안전성 유지에 있기 때문에 조기에 물 누출 사고를 검출하는 기술 개발이 필수적이다. 이번 연구에서는 micro leak 검출을 위한 기초 기술 확보의 실험이 이루어졌으며, prototype을 개발하기 위한 준비 단계로 판단된다.

여 백

## 제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

- 스테인레스 스틸의 방사율은 PSDRS 실험자료 분석에 활용되고, 벽면냉각 잔열제거방식의 타당성을 평가하는 기초자료로 활용될 것이다
- 정삼각형 및 회전정삼각형 배열의 관다발의 유입부, 유출부 및 중심부에서의 유량에 따른 압력강하 실험자료는 유체계통설계 과제에서 중간열교환기 셀 측의 압력강하 상관식 개발 및 열수력 코드 검증에 사용된다.
- 핵연료집합체 각 부위별 압력강하 실험자료는 노심설계 과제에서 핵연료집합체 압력강하 상관식 개발 및 열수력 코드 검증에 사용 될 것이다.
- 전자펌프 관성보완 실험자료는 전자펌프를 1차냉각재측의 주 펌프로 채용할 때 외부전원 상실시 펌프의 관성력을 고려하는데 중요한 자료로 활용되며, 또한 관성력에 의한 에너지 보존장치를 활용하는데 사용된다.
- 상부플레넘 액면요동 실험자료는 액체금속로 상부 자유액면에서의 열피로 현상 분석, 중간열교환기의 노내 배치 등을 고려하는데 활용된다.
- 전자펌프 실험자료 및 설계는 소듐 시설의 주 구동펌프 개발 및 실험의 경제성을 도모하는데 활용된다.
- 핵연료핀다발의 수중동특성 해석 및 실험데이터는 핵연료 노심의 설계 및 운전 조건에 따른 구조건전성 여부를 판단하는데 있어 매우 중요한 자료이다. 따라서 노심설계시 뿐만아니라 열수력 설계시 유체유발진동 현상에 의한 안전성 영향평가를 위한 필수적인 자료로 활용된다.
- 국소 유속 센서가 개발되면 실험에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 소듐이 취급되는 유체 유동 특성을 측정하고자 할 때 사용하므로 실험 비용을 크게 절약할 수 있다. .
- 소듐 감지/소화실험을 통하여 획득된 자료는 소듐실험장치의 화재 안전성 확보를 기할 수 있고 현재 소듐관련 실험장치에 활용할 예정이다.
- 액체소듐을 냉각재로 사용하는 원자로의 경우 2차계통에서의 물 누출은 안전성에 치명적인 영향을 치기 때문에 SG설계에서 고려하여야 할 중요 항목중의 하나이며, 물누출이 미량부터 시작됨을 감안할 경우, 본 연구의 소규모 물누출 실험자료들을 차기SG설계시 안전성 확보를 위한 기본자

료로 활 할 수 있을 것으로 예상된다.

- 음향검출법은 micro leak범위 내에서 검출 가능하게 함으로서 대국민의 액체금속로의 물누출 사고관련하여 KALIMER의 안전신뢰성을 높일 수 있다.

## 제 6 장 참고문헌

- 1.2.1 Willian H. McAdams, "Heat Transmission," McGraw-Hill book Co., 1954.
- 1.2.2 Siegel-Howell, "Thermal Radiation Heat Transfer," McGraw-Hill book Co., 1972.
- 1.2.3 이준상, "반사경 흑체법을 이용한 스펙트럼 방사율 측정," 숭실대학교, 석사학위논문, 1993.
- 1.2.4 이종복, "등에 방사되는 적외선 방사율에 미치는 표면상태의 영향", 충남대학교, 석사학위논문, 2000.
- 1.2.5 최진, "알루미늄의 표면 상태와 열방사율에 관한 연구," 충남대학교, 석사학위논문, 2000.
- 1.2.6 A.J. Otter, "Thermocouples and Surface Temperature Measurement", AECL-3062, 1968.
- 2.1.1 O. P. Bergelin, E. S. Davis and H. L. Hull, "A Study of Three Arrangements in Unbaffled Tubular Heat Exchangers," Trans. of the ASME, Vol. 71, pp. 369-374, 1949.
- 2.1.2 O. P. Bergelin, G. A. Brown H. L. Hull and F. W. Sullivan, "Heat Transfer and Fluid Friction During Viscous Flow across Banks of Tubes, Part III," Trans. of the ASME, Vol. 72, pp. 881-888, 1950.
- 2.1.3 O. P. Bergelin, G. A. Brown and S. C. Doverstein, "Heat Transfer and Fluid Friction During Viscous Flow across Banks of Tubes, Part IV," Trans. of the ASME, Vol. 72, pp. 881-888, 1952.
- 2.1.4 A. J. Gram, C. C. Mackey and E. S. Monroe, "Convective Heat Transfer and Pressure-drop of Air Flowing across in-line tube Banks, Part II," Trans. of the ASME, Vol. 80, pp. 25-35, 1958.
- 2.1.5 A. Y. Gunter, W. A. Shaw, "A General Correlation of Friction Factors for Various Types of Surfaces in Crossflow," Trans. of

- the ASME, Vol. 67, pp. 643-660, 1945.
- 2.1.6 K. Hammeke, E. Heinecke and F. Scholz, "Heat-transfer and Pressure-drop Measurements in Smooth Tube Bundles with Transverse Flow, Especially at High Reynolds Numbers," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 427-446, 1967.
- 2.1.7 C. E. Jones and E. S. Monroe, "Convective Heat Transfer and Pressure-drop of Air Flowing across in-line tube Banks, Part I," *Trans. of the ASME*, Vol. 80, pp. 18-24, 1958.
- 2.1.8 T. H. Chilton, R. P. Genereaux, "Pressure Drop across Tube Banks," *Trans. of the ASME*, Vol. 29, pp. 161-173, 1933.
- 2.1.9 G. A. Omohundro, O. P. Bergelin and A. P. Colburn, "Heat Transfer and Fluid Friction during Viscous Flow across Banks of Tubes," *Trans. of the ASME*, Vol. 71, pp. 27-34, 1949.
- 2.1.10 O. L. Pierson, "Experimental Investigation of the Influence of Tube Arrangement on Convection Heat Transfer and Flow Resistance in Crossflow of Gases over Tube Banks," *Trans. of the ASME*, Vol. 59, pp. 563-572, 1937.
- 2.1.11 E. D. Grimson, "Correlation and Utilization of New Data on Flow Resistance and Heat Transfer for Cross Flow of gases over Tube Banks," *Trans. of the ASME*, Vol. 59, pp. 583-594, 1937.
- 2.1.12 S. B. H. C. Neal and J. A. Hitchcock, "Heat Transfer and Gas Flow Processes within a Bank of Close Pitched Plain Tubes in Cross-flow," *C.E.R.L. Note No.RD/L/N9/67*, 1967.
- 2.1.13 E. Achenbach, "Distribution of Local Pressure and Skin Friction around a Circular Cylinder in Cross Flow up to  $Re = 5 \times 10^6$ ," *J.F.M.*, Vol. 34, pp. 625-639, 1968.
- 2.1.14 A. Zukauskas, "Heat Transfer from Tubes in Cross Flow," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 8, pp. 93-160, 1972.
- 2.1.15 F. P. Kazakevich, "Influence of Angle of Approach of a Gas

- Stream on the Aerodynamic Resistance of a Tube Bundle," Izu. Vses. Insti. Imoni F.E. Dzerzhimkogo, Vol. 8, pp. 7-12, 1980.
- 2.1.16 H. G. Groehn, "Thermal Hydraulic Investigation of Yawed Tube Bundle Heat Exchangers," S. Kakac et al. Edition, Hemisphere Publishing, pp. 97-109, 1981.
- 2.1.17 S. V. Mueller, "Un Modelo Constitutivo Para o Escoamento Atraves de Um Arranjo de Barras de Secao Circular," M.Sc. Thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1979.
- 2.1.18 H. Boettgenbach, "Messungen von Stroemungsfeldern in engen Stabbundeln zur Ueberprufung einer anisotropen Stroemungsfwlt theorie," Koktrorarbeit Ruhr-Universitat, Bocum, 1977.
- 2.1.19 ESDU, "Pressure Loss during Cross-flow of Fluids with Heat Transfer over Plain Tube Banks without Baffles," Engineering Science Item No.74040, 1974.
- 2.1.20 ESDU, "Cross-flow Pressure Loss over Banks of Plain Tubes in Square and Triangular Arrays Including Effects of Flow Direction," Engineering Science Item No.79034, 1979.
- 2.1.21 I. E. Idel'chik, "Handbook of Hydraulic Resistance," ACE-TR-6630, 1960.
- 2.1.22 B. E. Derek, "Hydrodynamics of Single- and Two-phase Flow in Inclined Rod Arrays," Doctoral Thesis, M.I.T., 1984.
- 2.1.23 B. E. Launder and T. H. Massey, "The Numerical Prediction of Viscous Flow and Heat Transfer in Tube banks," Journal of Heat Transfer, Vol. 100, pp. 565-571, 1978.
- 2.1.24 J. K. Watterson, W. N. Dawes, A. M. Savill, A. J. White, "Predicting Turbulent Flow in a Staggered Tube Bundle," Intl. J. of Heat and Fluid Flow, Vol. 20, pp. 581-591, 1999.
- 2.1.25 C. Yeon, N. B. Antony and E. M. Efstathios, "Numerical Study of Heat and Momentum Transfer for Tube Bundles in Crossflow," Intl. J. Numer. Methods in Fluids, Vol. 9, pp.



- 1381-1394, 1989.
- 2.1.26 M. Faghri, N. Rao, " Numerical Computation of Flow and Heat Transfer in Finned and Unfinned Tube Banks," Intl. J. Heat. Mass. Transfer, Vol. 30, No. 9, pp. 363-372, 1987.
- 2.1.27 K. A. Antonopoulos, "Heat Transfer in Tube Banks under Conditions of Turbulent Inclined Flow," Intl. J. Heat. Mass. Transfer, Vol. 28, No .9, pp. 1645-1656, 1985.
- 2.1.28 K. A. Antonopoulos, "The Prediction of Laminar Inclined Flow Through Tube Banks," Computers & Fluids, Vol. 14, No. 2, pp. 171-180, 1986.
- 2.1.29 심윤섭, "Requirements for IHX Experiment I," KALIMER/FS200 -XR-01/1998, 1998.
- 2.1.30 남호윤, 김민준, 박진호, "번들 압력강하 물 실험장치 제작시방서," LMR/ST211-TW-02 Rev.1/99, 1999.
- 2.1.31 ANSI/ASME PTC 19.1-1985 Measurement Uncertainty.
- 2.1.32 남호윤, 최석기, 박진호, 김종만, 최일곤, 이길용, "중간열교환기 물 모의 유동 실험자료 및 분석", LMR/ST1212-TD-01-Rev.1/00 (ST1212200)
- 4.1.1 W. S. Kim and Y. G. Kim, MATRA-LMR Code for Thermal-Hydraulic Subchannel Analysis of LMR, *NTHAS98: First Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety*, Pusan, Korea, October 21-24, pp. 227-234, 1998.
- 4.1.2 C. L. Wheeler, COBRA-IV-I : An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores, *BNWL-1662*, 1976.
- 4.1.3 Y. J. Yoo and D. H. Hwang, Development of Subchannel Analysis Code MATRA  $\alpha$ -version, *Proceedings of Korea Nuclear Society Autumn Meeting*, Taegu, Korea, October 24-25, 1997.
- 4.1.4 E. H. Novendstern, Turbulent Flow Pressure Drop Model for

- Fuel Rod Assemblies Utilizing A Helical Wire-Wrap Spacer System, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 22, pp. 19-27, 1972.
- 4.1.5 K. Rehme, Pressure Drop Correlations for Fuel Element Spacers, *Nuclear Technology*, vol. 17, pp. 15-23, 1972.
- 4.1.6 F. C. Engel, R. A. Markley and A. A. Bishop, Laminar, Transition, and Turbulent Parallel Flow Pressure Drop Across Wire-Wrap-Spaced Rod Bundles, *Nuclear Science and Engineering*, vol. 69, pp. 290-296, 1979.
- 4.1.7 S. K. Cheng and N. E. Todreas, Hydrodynamic Models and Correlations for Bare and Wire-Wrapped Hexagonal Rod Bundles-Bundle Friction Factors, Subchannel Friction Factors and Mixing Parameters, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 92, pp. 227-251, 1986.
- 7.1.1 Grosshandler W., "Heat flux transducer calibration: Summary of the 2nd workshop", NISTIR 6424, 1998.
- 7.1.2 Grosshandler W., Blackburn D. "Development of a high flux conduction calibration apparatus", *Prod. ASME HTD*, Vol. 353, pp. 153-158, 1997.
- 7.1.3 Sadao SUMIKAMA, Introduction of Heat Flux Sensor - Its principle, construction and use, Keigaku Publishing Co., Ltd. , 1984.
- 7.1.4 Gopel. W., Hesse J., Zemel J. N., *Sensors : a comprehensive survey*, Vol. 4, pp. 297-321, 1989.
- 7.1.5 Hwang D. W., Jung P. S., Joo H. H., "Performance of the heat flux sensor using thermoelectric semiconductor material", *Proc. Instrn. Mech. Engrs.*, Vol. 213, pp. 655-677, 1999.
- 7.1.6 T. E. Diller, "Advances in Heat Flux Measurements", *Advances in Heat Transfer*, Vol 23, pp. 279-368, 1993.
- 7.1.7 T. E. Diller, *The measurement, instrumentation, and sensors*

- handbook, CRC Press, 1999.
- 7.1.8 Keltner N.R., Thermal measurements in electronics cooling, CRC Press, 1997.
- 7.1.9 Fluent Inc., FLUENT 5 User's Guide, 1998.
- 7.2.1 Zhukov, A.V., A.P.Sorokin, et al. Interchannel Exchange in Fast Reactors Fuel Subassembly: Theoretical Notions and Physics of the Process. M., Energoatomizdat, 1989.
- 8.1.1 M. Kuroha and M. Sata, "PNC Status Report on Leak Detection Development for LMFBR Steam Generators" IWGFR/50, 1980.
- 8.1.2 D. Antonakas et al, "Leak Detection Large Sodium Pipe Development of Alumino-Silicate Shells" Science and Technology of Fast Reactor Safety, CEA-CONF-8796.
- 8.2.1 J. Higson, "The Chemistry of Burning Sodium and Its Extinguishment", ISPRA Course, 1981.
- 8.2.2 R.K. Hilliard, "IAEA-IWGFR Meeting on Sodium Combustion and Its Extinguishment" Nuclear Safety, Vol.15, No.2, 1974.
- 9.1.1 J.O. Sane, J.J.Regimbal and J.A.Fairbairn, "Analysis of the U.S. Large Leak Test Programm Series I", Proceedings of the International on Fast Reactor Safety Technology, vol.4, 1979.
- 9.1.2 D.W.Sandusky, "Behavior of Small Leaks in LMFBR Steam Generators", *Trans. ANS*, vol.19, 1974.
- 9.1.3 J. A. Bray, "A Review of Some Sodium/Water Reaction Experiments", *J. Brit. Nucl. Energy Soc.*, vol. 10. P.107, 1970.
- 9.1.4 R.Currie, R.J.Popplestone and J.M.Simpson, "The Modelling of the Development of a Sodium-Water Reaction Incident in an Operating Steam Generator", Proc. Int. Conf. on Sci. tech. Fast Reactor Safety, held in Guernsey, May 12-16, vol. 2, 1986.
- 9.1.5 D.A.Greene, "The leakage of Water into Sodium in Steam Generators and Test Rigs", *Nuclear Technology*, vol. 18, P.267, 1973.

- 9.2.1 D.W.Sandusky, "Small Leak Shut-down, Location and Behavior in LMFBR Steam Generators, Int. Conf. on Liquid Metal Tech. in Energy Production, San Jose, California, P. 226, 1976.
- 9.2.2 D.A.Greene, "Small Leak Damage and Protection Systems in Steam Generators, Int. Conf. on Liquid Metal Tech. in Energy Production, San Jose, California, P. 233, 1976.
- 9.2.3 J.F.B.Payne, "Prediction of Metal Wastage Produced by Sodium-Water Reaction Jet", *Nuclear Energy*, vol.18, P.327, 1979.
- 9.2.4 E.Cambillard, P.Finck, A.Lapicore and C.Simeon, "Sodium Water Reaction R&D for French LMFBR", ANS/ENS Int. Meeting Fast Reactor Safety,P.655,1985.
- 9.2.5 V.Feburie, T.Demas and B.Cronier, "A Study of Small Leaks of Water into Sodium heated Steam generators - Self Evolution and Wastage", Sci. and Tech. of Fast Reactor Safety, BNES, London, P.509, 1986.
- 9.2.6 K.Dumm, H.Mausbeck, "Studies on the Safety Engineering Design of the Steam generators",*Kemtechnik*, vol.16, P.121, 1974.
- 9.2.7 M.Hori,K.Kawashima,T.Saito, N.Kanegae and H.Hiroi, "Safety Evaluation of the MONJU Steam Generator", Int. Meeting on Fast Reactor Safety Related Physics, Chicago, Oct.1976.
- 9.2.8 H.Tanabe, "Tests and Analysis on Steam Generator Tube Failure Propagation", IWGFR Specialist Meeting on Steam Generator, Aix-en-Provence, France, 1990.
- 9.2.9 H.Tanabe and E.Wachi, "Review on Steam generator Tube Failure Propagation Study in Japan", IWGFR Specialist Meeting on Steam Generator, Aix-en-Provence, France, 1990.
- 9.5.1 R.Anderson, "Analysis of Experimental Data on Material Wastage by Sodium-Water Reaction Jets", *Nuclear Energy*, vol. 18, P.333, 1979.
- 9.5.2 D.A.Greene, "Sodium-Water Reaction Phenomena Associated with

- Small Leaks in LMFBR Steam Generator", Liquid Metal Engineering and Technology, Proce. of the 3'rd Int. Conf. Held in Oxford, 1984.
- 11.1.1 Beynon T.D, .Reactor Noise SMORN V. Progress in Nuclear Energy. Volume 21. "Proceedings of the Fifth Specialists Meeting on Reactor Noise", Munich, F.R.G. 12-16 October 1987. Pergamon Press. 1988.
- 11.1.2 IAEA report, IAEA-TECDOC-946, "Acoustic signal processing for the detection of sodium boiling or sodium water reaction in LMFBRs", May, 1997.
- 11.3.1 Kim Tae-Joon, Valery S. Yughay, Hwang Sung-Tai, "Simulation of Water/Steam into Sodium Leak Behaviour for Acoustic Noise Generation Mechanism Study", Korean Nuclear Society, Vol 33(2), 2001.
- 11.3.2 Subbotin V.I., e.a., "Detection of Water into Sodium Leak", Proc. IAEA Symp., "Sodium-Cooled Fast Reactor Engineering", Vienna, 1970.
- 11.3.3 Kim Tae-Joon, Valery S. Yughay, Hwang Sung-Tai, "Hydrogen bubble characteristics during a water-sodium leak accident in a steam generator", J. Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 6(6), 395-402, 2000.
- 11.3.4 Kim Tae-Joon, Valery S. Yughay, Hwang Sung-Tai, "Advantages of Acoustic Leak Detection System Development for KALIMER Steam Generator", 2001.
- 12.1.1 황일순 등, "비활성 액체금속에 대한 물리화학적 특성연구", MOST-251/98, pp.24
- 12.1.2 Yu.I.Orlov et al., "The problems of technology of the heavy liquid metal coolants(Lead-Bismuth, Lead)", Conference on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Vol.1, 1999.
- 12.1.3 Yu.I.Orlov, "Stages of development of Lead-Bismuth as a coolant

- for nuclear reactors in Russia", MIT ATW Technical Review, 1998.
- 12.1.4 Stanley J. Stachura et al., "The lead-bismuth eutectic", IS-316, 1960.
- 12.1.5 B.F.Gromov et al., "Use of lead-bismuth coolant in nuclear reactors and accelerator-driven systems", Nucl. Eng. and Des., Vol.173, 1997.
- 12.2.1 E. Greenspan et al., "The Encapsulated Nuclear Reactor HeatSource Reactor Concept", Proc. of ICON-8, 8th International Conf. on Nucl. Eng., April 2-6, Baltimore, USA, 2000.
- 12.2.2 "FBR cycle의 실용화전략 조사연구(진척상황 개요)", 일본장기계획 정책회의 제3분과 회의 자료, JNC, 2000
- 12.2.3 Won S. Park et al., "HYPER System Design Study", KAERI/TR-1316, 1999
- 12.3.1 S. Zaki and H. Sekimoto, "Accident analysis of lead or lead-bismuth cooled small safe long-life fast reactor using metallic or nitride fuel", Nucl. Eng. and Design, vol. 162, 1996.
- 12.3.2 Won S. Yang, "ANL의 ATW 활동", 초청 세미나, 2000.
- 12.3.3 Richard N. Lyon et al., "Liquid-metals handbook", Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, June 1952.
- 12.3.4 Gromov et al., "Physical and chemical properties of Pb-Bi eutectic, used as coolant for liquid metal target", Proceedings of the 2. international conference on accelerator-driven transmutation technologies and applications, vol.2, Uppsala, 1997.
- 12.3.5 A.Ye.Rusannov et al., "The problems of structural materials corrosion in lead-bismuth coolant", Conference on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Vol.1, 1999.
- 12.3.6 V.G.markov et al., "Structural materials for power plants with heavy liquid metals as coolants", Conference on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Vol.1, 1999.
- 12.1.7 Gromov et al., "Method of maintaining the corrosion resistance of a steel circulation system with a lead-containing coolant", P0829556 A1, 1998.

- 12.3.8 Pankratov D.V. et al., "Polonium problem in nuclear power plants with lead-bismuth as a coolant", Conference on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Vol.1, 1999.
- 12.3.9 Ermolaev N.P. et al., "Methods of removal and containment radioactive polonium from lead-bismuth coolant", Conference on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Vol.1, 1999.
- 12.3.10 B.F. Gromov et al., "The experience in Handling of Lead-Bismuth Coolant Contaminated by Polonium-210", Transactions of the American Nuclear Society, Vol.67(supl.1), 1993.
- 12.3.11 Ning Li, "Polonium Removal Technology", Presentation materials for MIT ATW Technical Review, Jan. 15-16, 1998.

**서 지 정 보 양 식**

<b>수행기관보고서번호</b>	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/RR-2203/2001	KAERI/CM-489/2001				
<b>제목 / 부제</b>	<b>액체금속로 설계기술개발 / 소듐기술개발</b>				
<b>연구책임자 및 부서명</b>	최 종 현 (KALIMER 기술개발팀)				
<b>연구자 및 부서명</b>	황성태, 남호운, 최운동, 김태준, 최석기, 정경채, 박진호(A), 김병호, 정지영, 김종만, 최병해, 김희령, 박진호(B), 최일곤, 이길용, 김봉수				
<b>출판지</b>	대전	<b>발행기관</b>	한국원자력연구소	<b>발행년</b>	2002. 5.
<b>페이지</b>	p.	<b>도표</b>	있음(○), 없음( )	<b>크기</b>	A4
<b>참고사항</b>					
<b>비밀여부</b>	공개(○), 대외비( ), — 급비밀	<b>보고서종류</b>	연구보고서		
<b>연구위탁기관</b>	과학기술부	<b>계약번호</b>			
<b>초록</b>	<p>본 연구는 전산모델검증실험에 필요한 실험시설을 설계, 제작하여 액체금속로의 설계에 필요한 실험자료를 생산하고, 앞으로 액체금속로에 채용될 중요 측정 및 요소기기들을 개발과 함께 성능 확인 시험을 통하여 이들 기기들의 개발에 필요한 기술을 축적하기 위하여 소듐기반실험을 수행함과 아울러 소듐안전특성실험을 병행하여 소듐의 안전 취급기술을 확립하였다. 본 연구에 의하여 생산된 기초실험자료는 액체금속로 개발과제의 내부연계에 따라 설계분야에 제공되어 전산코드 개발 및 검증에 필요한 기초자료로 활용되고 측정기술, 기반실험 및 소듐 안전실험자료는 앞으로 수행될 실험장치 설계 및 액체금속로의 소듐 관련장치에 적용될 예정이다.</p>				
<b>주제명키워드 (10단어내외)</b>	잔열제거계통, 방사율, 관성보완장치, 자유액면, 가스혼입, 전자펌프, 압력강하, 핵연료집합체, 중간열교환기, 열유속 측정, 국소 유속 센서, 소듐화재 소화, 소듐-물반응, 음향 누출 검출				



BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	INIS Subject Code
KAERI/RR-2203/2001		KAERI/CM-489/200 1			
Title / Subtitle		Development of Sodium Technology			
Project Manager and Department		Jong Hyun Choi(KALIMER Technology Development Team)			
Researcher and Department		S.T. Hwang, H.Y. Nam , Y.D. Choi., T.J. Kim, S.K. Choi, K.C. Jeong J.H. Park(A), B.H. Kim, J.Y. Jeong, J.M. Kim, B.H. Choi, H.R. Kim, J.H. Park (B), I.K. Choi, K.Y. Lee, B.S. Kim			
Publication Place	Taejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2002. 5.
Page	p.	Ill. & Tab.	Yes(○), No ( )	Size	A4
Note					
Classified	Open(○), Restricted( ), ___ Class Document		Report Type	Research Report	
Sponsoring Org.				Contract No.	
Abstract		<p>This study was performed to produce the experimental data required for design of LMR by installing the experimental facilities for the computer code verification experiments, and develop the elemental components which can be used in sodium facilities or in the LMR, accumulate the basic technology for the developments of these components through the experiment based on sodium. And this study was performed to assure the technology for the safety and the handling of sodium through the sodium safety experiment. The results of this study are to be used as the data for the verification of computer code, and the basic data for the design of KALIMER. The measuring technology and the data based on sodium are to be used for the development of elemental components and the design of experimental facility related to sodium.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		PSDRS, Thermal radiation emissivity, Inertia support system, Free surface, Gas entrainment, Electromagnetic pump, Pressure drop, Fuel assembly, IHX, Heat Flux measurement, Local velocity sensor, Sodium fire extinguishment, Na-H <sub>2</sub> O reaction, Wastage Acoustic leak detection			