

KAERI/CM-1199/2009

SMART 증기발생기 및 응축열교환기
열전달 특성 시험

Heat transfer test for the steam generator and
PRHRS Heat Exchanger of SMART

KAERI

연구기관
포항공과대학교

한국원자력연구원

제 출 문

한국원자력연구원장 귀하

본 보고서를 2009 연도 “SMART 증기발생기 및 응축열교환기 열전달 특성 시험” 과제의 연구보고서로 제출합니다.

2010. 1. 28

과제책임자 : 김무환

참 여 자 : 김동억

황경원

양기훈

하영호

요 약 문

I. 제목

SMART 증기발생기 및 응축열교환기 열전달 특성 시험

II. 연구개발의 목적 및 필요성

증기발생기 및 PRHRS 응축열교환기에서의 열전달 특성은 SMART의 전체적인 성능 및 안전성 측면에서 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 그러므로 SMART의 열전달 성능 및 안전성에 관한 해석방법론의 검증 및 개발을 위한 실험적 연구가 반드시 요구된다.

세계적인 중소형 원전의 수요에 대응하기 위해서는 고유의 중소형 원전 모델 개발이 필요하고 현재 국내에서는 중소형 원자로인 SMART에 대한 원천 기술을 확보하고 있다. 그러므로 이러한 SMART의 성능 및 안전성에 관한 해석방법론의 검증 및 개발은 원천 기술의 검증차원에서 필수적이다.

지구온난화로 대변되는 환경문제를 극복하기 위하여 원자력에너지의 이용이 하나의 해결책으로 제시되고 있으며 그 이용이 확대되고 있는 실정이다. 이러한 점에서 국내에서 보유하고 있는 SMART 기술에 대한 원천 기술의 검증이 요구된다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 다음과 같은 내용에 대해서 연구를 수행한다.

첫째, SMART 증기발생기 1차측에 대한 실험적 연구를 수행함으로써 SMART 성능 및 안전해석을 위하여 사용되는 TASS/SMR (Transient And Setpoint Simulation/System integrated Modular Reactor) 코드의 증기발생기 모델을 평가 및 검증하고 새로운 상관식을 개발한다.

둘째, SMART 증기발생기 2차측에 대한 실험적 연구를 수행함으로써 TASS/SMR 코드의 증기발생기 모델을 평가 및 검증한다.

셋째, SMART 피동잔열제거계통(Passive Residual Heat Removal System, PRHRS) 응축열교환기에 대한 실험적 연구를 수행함으로써 TASS/SMR 코드의

PRHRS 응축열교환기 모델을 평가 및 검증하고 새로운 상관식을 개발한다.

IV. 연구개발결과

PRHRS 응축열교환기 실험장치의 경우 단일튜브를 사용한 실험장치를 설계 하였으며 튜브내에서의 질량유속 및 튜브의 길이는 실제 설계와 동일하게 유지 하였다. 실험을 통해 획득되는 최종 결과값은 응축 열전달계수이며 이를 위해 냉각수 온도, 튜브의 벽온도, 튜브내 응축유체의 온도, 시험부 입출구에서의 유체의 온도 및 압력을 각구간별로 측정하여 국부 열전달계수를 측정할 수 있도록 설계 하였다. 그리고 PRHRS 응축열교환기 쉘측에서는 환형시험부를 설계하고 다관 튜브군들로 인한 간섭효과를 고려하기 위해 전열관 피치를 기준으로 쉘측의 수력직경을 계산하였으며 시험부의 길이는 실제설계와 동일하게 유지하였다.

증기발생기 1차측 실험장치는 실제 설계에서와 동일한 질량유속을 유지하였다. 응축열전달 계수 측정을 위하여 헬리컬 코일 내 유체온도, 헬리컬 코일관 외벽온도, 쉘측 유체온도 등을 측정하여 국부 열전달계수를 획득할 수 있는 시험부를 설계하였다.

그리고 PRHRS 응축열교환기 및 증기발생기 1차측 실험장치에 대한 불확실성 해석을 수행하여 각각의 열전달계수에 대한 불확실성을 계산하였고 기 설계된 실험장치의 불확실성이 수용할만한 수준이라는 것을 확인하였다.

마지막으로 시험부에 증기를 공급하고 이를 순환시킬 수 있는 주요 증기루프를 각 컴포넌트별로 상세히 설계하였고, 이러한 증기를 응축시키기 위한 냉각루프도 각 컴포넌트별로 상세히 설계하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

SMART 증기발생기 1차측에서의 2상 응축 열전달 실험을 통하여 사고 상황에서 1차측 열전달 특성에 관한 상관식을 도출하여 관외 응축 열전달 상황의 시스템에 활용할 수 있을 것이다. 그리고 증기발생기 2차측에서의 단상 및 2상 비등 열전달 실험을 통해 기존의 상관식들에 대한 정량적 평가를 실시하여 헬리컬 코일 내 비등현상이 존재하는 에너지 시스템에 적용할 수 있을 것이다. 또한 PRHRS 응축열교환기에서의 관내 응축 열전달 실험을 통해 기존의 상관식들에 대한 정량적 평가를 통해 관내 응축이 발생하는 발전 및 냉동공조 시스템 분야에 널리 활용될 수 있을 것이다. 그리고 PRHRS 응축열교환기 관외 풀비등 열전달 실험을 통하여 현상에 대한 이해와 나아가 실제 상황에서 사용가능한 상관식을 개발하여 이를 유사한 현상이 발생하는 시스템에 적용할 수 있을 것이라 기

대된다.



SUMMARY

I. Project Title

Heat transfer characteristic test of SMART steam generator and condensation heat exchanger

II. Objective and Importance of the Project

The heat transfer characteristics of steam generator and PRHRS condensation heat exchanger are the key parts of SMART's overall performances and safety. Thus It is required to do experiments on verification and development of analytical ways of the project's heat transfer performances and safety.

It is necessary to develop our middle and small size nuclear power generation model in order to meet the global demands for middle and small size atomic power station. Therefore, verifying and developing the analytical methods of SMART's performances and safety are essential for verifying our basic technology.

Nuclear power is proposed a solution to greenhouse problem and more and more used. For these reason, it is required to verify SMART technology of Korea.

III. Scope and Contents of Project

Research as below are performed in this study.

First, steam generator models of TASS/SMR (Transient And Setpoint Simulation/System integrated Modular Reactor) codes analysing performances and safety of SMART are evaluated and verified and new correlation is developed by doing research about SMART steam generator's first part.

Second, steam generator models of TASS/SMR codes are verified and evaluated by doing research about SMART steam generator's second part.

Third, Passive Residual Heat Removal System, PRHRS condensation heat

exchanger models of TASS/SMR codes are evaluated and verified and new correlation is developed by doing research about a PRHRS condensation heat exchanger.

IV. Result of Project

PRHRS condensation heat exchanger's experimental apparatus was designed a single tube which has same mass flux and length with real design. The final result of experiment is condensation heat transfer coefficient. Cooling water's temperature, tube's wall temperature, condensate's temperature inside a tube, and temperature, pressure inlet and outlet position of test section are measured in order to acquire the local heat transfer coefficients. Annular test section was designed for shell of PRHRS condensation heat exchanger and the hydraulic diameter of shell was calculated based on heat pipe's pitch in order to consider the interference of tube bundle.

The first part of steam generator test's experimental apparatus has same mass flux with real design. Fluid's temperature inside a helical coil, helical coil's outer wall temperature, fluid's temperature inside a shell and etc. are measured in order to calculate the condensation heat transfer coefficient, and local heat transfer coefficients were also calculated.

Uncertainty analysis was performed for the PRHRS heat exchanger and the first part of steam generator test. Uncertainty of each heat transfer coefficient is calculated, and it was acceptable level.

Finally, the each component of major steam loops was designed in detail and it can supply and circulate steam. Cooling water loop which condense the steam was also designed in detail.

V. Proposal for Applications

A correlation about the first part's heat transfer characteristic at emergency(LOCA) is made by experimenting on two-phase condensation heat transfer of SMART steam generator's first part and it will be able to apply external condensation systems. Previous correlations about steam generator's

second part are quantitatively evaluated by single and two-phase boiling heat transfer experiments on the second part and they will be able to apply boiling system in helical coil tubes. Present correlations are also quantitatively evaluated by internal condensation experiments on PRHRS condensation heat exchanger and it can be widely used internal condensation at power plant, refrigeration and air conditioning systems. Finally, phenomena are understood and a correlation applying real world is made by PRHRS condensation heat exchanger's internal pool boiling experiments, and it is expected that the correlation can apply similar systems.



CONTENTS

Chapter 1 Introduction

Chapter 2 The present state of foreign and domestic technology development

Section 1 Previous research and development results

Section 2 The weakness of present technology

Section 3 The outlook for research results applications

Chapter 3 Performed research and development contents and results

Section 1 Design characteristics of SMART heat transfer experimental devices

Section 2 Design of each experimental device

Section 3 Uncertainty analysis of heat transfer coefficient for each experimental device

Section 4 Design of experimental loop

Section 5 Summary

Chapter 4 Attainment and contribution of research and development objective

Section 1 Attainment of research and development objective

Section 2 Contribution of research and development objective

Chapter 5 Application plan of research and development results

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- 1절 지금까지의 연구개발 실적
- 2절 현기술상태의 취약성
- 3절 연구결과 활용전망

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- 1절 SMART 열전달 실험장치 설계특성
- 2절 실험장치별 설계
- 3절 실험장치별 열전달 계수에 대한 불확실성 해석
- 4절 실험장치 루프설계
- 5절 요약

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

- 1절 연구개발목표 달성도
- 2절 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 장 서론

수출형 원전 모델 개발의 방안으로 지난 10년간의 기술개발로 원천기술을 확보한 SMART의 표준설계인가 획득을 위해서는 설계에 접목된 기술의 검증이 필수적이다. 특히 증기발생기 및 PRHRS 응축열교환기에서의 유체의 열전달 특성은 SMART의 전체적인 성능 및 안전성 측면에서 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 그러므로 SMART의 열전달 성능 및 안전성에 관한 해석방법론의 검증 및 개발을 위한 실험적 연구가 반드시 요구된다.

최근 세계적인 원전시장의 확장과 개방화에 따라 원전분야의 국제시장 선점을 위한 경쟁이 심화되고 있다. 세계 여러 나라에서 중소형 원자로를 개발하고 있는 실정이며 이렇게 개발된 중소형 원자로의 수출을 위해서는 원천기술의 확보가 필수적이다. 이러한 중소형 원전의 수요에 대응하기 위해서는 고유의 중소형 원전 모델 개발이 필요하고 현재 국내에서는 중소형 원자로인 SMART에 대한 원천 기술을 확보하고 있다. 그러므로 이러한 SMART의 성능 및 안전성에 관한 해석방법론의 검증 및 개발은 원천 기술의 검증 차원에서 필수적이다.

지구온난화는 현재 전 세계적인 환경문제 중에서도 가장 심각한 문제라고 할 수 있다. 이러한 지구온난화로 대변되는 환경문제를 극복하기 위하여 원자력에너지의 이용이 하나의 해결책으로 제시되고 있으며 그 이용이 확대되고 있는 실정이다. 또한 2000년대 이후 비 발전분야 활용 중소형 원자로가 주요 시장으로 부각되고 있으며, 분산전원 지역, 전력 그리드 용량이 작은 개도국에서는 중소형 원자로에 대한 관심과 수요가 증대되고 있다. 이러한 점에서 현재 국내에서 보유하고 있는 SMART 기술에 대한 원천 기술의 검증이 요구된다.

그리하여 본 연구의 최종 목표는 다음과 같다.

첫째, SMART 증기 발생기 1차측에 대한 실험적 연구를 수행함으로써 SMART 성능 및 안전 해석을 위하여 사용되는 TASS/SMR (Transient And Setpoint Simulation/System integrated Modular Reactor) 코드의 증기발생기 모델을 평가 및 검증하고 새로운 상관식을 개발한다.

둘째, SMART 증기 발생기 2차측에 대한 실험적 연구를 수행함으로써 TASS/SMR 코드의 증기발생기 모델을 평가 및 검증한다.

셋째, SMART 피동잔열제거계통(Passive Residual Heat Removal System, PRHRS) 응축열교환기에 대한 실험적 연구를 수행함으로써 TASS/SMR 코드의

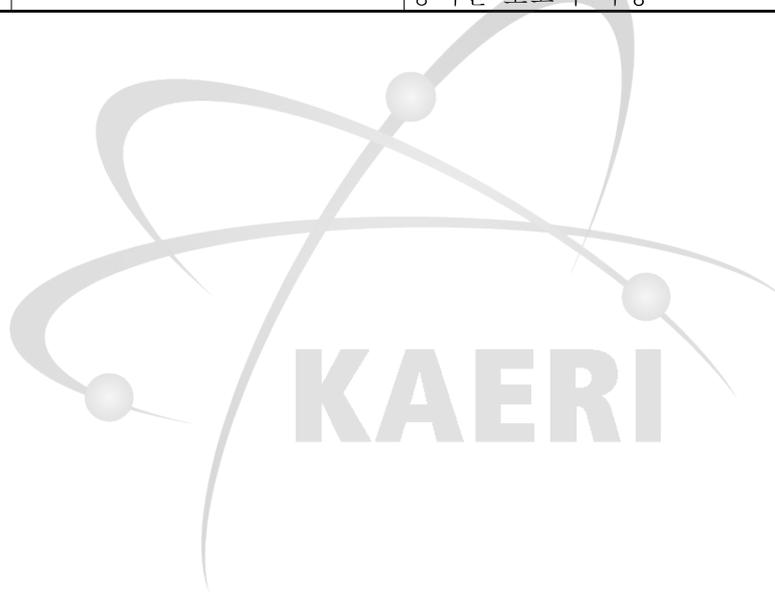
PRHRS 응축열교환기 모델을 평가 및 검증하고 새로운 상관식을 개발한다.
 이에 따른 본 연구의 연차별 세부적인 연구개발 목표 및 내용은 표.1과 같다.

표.1 연차별 연구개발 목표 및 내용

구분	연구개발목표	연구개발내용 및 범위	연구비(천원)
1차년도 (2009)	SMART 증기발생기 및 PRHRS 응축열교환기 관련 열전달 상관식 선행연구조사	<ul style="list-style-type: none"> - SMART 증기발생기 1차측 관련 관군에서의 2상 수직하양류 응축 모델관련 선행연구 조사 - SMART 증기발생기 2차측 관련 직관 및 헬리컬 코일관에 대한 단상 및 2상 관내비등 모델 선행연구 조사 - SMART PRHRS 응축열교환기 관련 직관내 2상 관내 응축 모델 선행연구 조사 - SMART PRHRS 응축열교환기 관련 수직관 외부에서의 풀비등 열전달 모델 선행연구 조사 	450,000
	SMART 증기발생기 1차측 실험장치 설계 및 제작	<ul style="list-style-type: none"> - SMART 증기발생기 1차측 사고시(LOCA) 조건을 고려한 압력, 온도, 유량 등 실험조건 결정 - 증기발생기 1차측 관군 모사를 위한 헬리컬 튜브의 피치, 코일직경 및 회전각 설계 및 헬리컬 튜브 제작 - 증기발생기 1차측 셀측 모사를 위한 환형 관 설계 및 제작 - 운전조건(온도, 압력, 유량 등) 및 열전달 계수 계측을 위한 열전대 삽입을 고려한 시험부 설계 및 제작 - 실험조건을 고려한 실험장치 루프의 설계 및 제작(유량계, 압력계, 펌프, 열전대, DAS 등 구축) 	
	SMART PRHRS 응축열교환기 실험장치 설계 및 제작	<ul style="list-style-type: none"> - PRHRS 응축열교환기 운전조건을 고려한 압력, 온도, 유량 등 실험조건 결정 - 운전조건(온도, 압력, 유량, 열유속 등) 및 국부 열전달 계수 계측을 위한 열전대 삽입을 고려한 시험부 설계 및 제작 - 실험조건을 고려한 실험장치 루프의 설계 및 제작(유량계, 압력계, 펌프, 열전대, DAS 등 구축) 	
2차년도	SMART 증기발생기 2차측	- SMART 증기발생기 2차측	550,000

(2010)	실험장치 설계 및 제작	<p>운전조건을 고려한 압력, 온도, 유량 등 실험조건 결정</p> <ul style="list-style-type: none"> - 증기발생기 2차측 모사를 위한 헬리컬 튜브의 피치 및 코일직경, 회전각 선정 및 헬리컬튜브 제작 - 운전조건(온도, 압력, 유량, 열유속 등) 및 국부 열전달 계수 측정을 위한 열전대 삽입 및 전기적 직접 가열(Joule heating method)을 고려한 시험부 설계 및 제작 - 실험조건을 고려한 실험장치 루프의 설계 및 제작(유량계, 압력계, 펌프, 열전대, DAS 등 구축) 	
	SMART 증기발생기 1차측 실험 및 Data 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 헬리컬 코일 외벽온도 및 셀측 유체온도 측정 및 냉각 열량 측정을 통한 응축열전달 계수 측정 - 입구온도, 입구압력, 입구건도, 유량, 냉각 열유속 등을 변수로 실험을 수행하여 Data 획득 - 획득된 Data를 기존의 상관식들과 비교하여 각 상관식의 신뢰성 평가 - 기존의 상관식의 신뢰성에 문제발생시 상관식 수정 및 개발 	
	SMART PRHS 응축열교환기 실험 및 Data 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 튜브측의 외벽온도 및 튜브내측의 유체온도 측정 및 냉각 열량 측정을 통한 관내 응축 열전달 계수 측정 - 튜브측의 외벽온도 및 셀측의 유체온도 측정을 통한 수직관외 비등 열전달 계수 측정 - 입구온도, 입구압력, 입구건도, 유량, 냉각 열량 등을 변수로 실험을 수행하여 Data 획득 - 획득된 Data를 기존의 상관식들과 비교하여 각 상관식의 신뢰성 평가 	
	SMART 증기발생기 2차측 실험 및 Data 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 시험부 외벽온도 및 인가된 열유속값의 측정을 통한 관내 비등 열전달 계수 측정 - 입구온도, 입구압력, 입구건도, 유량, 인가된 열유속 등을 변수로 실험을 수행하여 Data 획득 - 획득된 Data를 기존의 상관식들과 비교하여 각 상관식의 신뢰성 평가 	
	SMART 증기발생기 1, 2차측	- 증기발생기 1, 2차측 및 PRHS	

	및 PRHRS 응축열교환기 결과 종합	연구결과에서 각 상황에서의 중요변수에 대한 열진달계수 변화 특성의 체계적 분석 - 획득된 결과물의 실제 SMART 운전상황에서의 적용성 평가	
3차년도	SMART 증기발생기 1, 2차측 추가실험	- 증기발생기 1, 2차 측의 기존 실험범위 이외에서의 실험 및 데이터 분석을 통한 상관식의 확장 가능 여부 검토	300,000
	SMART PRHRS 응축열교환기 추가실험	- PRHRS 응축열교환기의 기존 실험범위 이외에서의 실험 및 데이터 분석을 통한 상관식의 확장 가능 여부 검토	
	최종보고서 작성	- 수행된 실험 및 해석에 대한 체계적이고 실제 상황에 적용하기 용이한 보고서 작성	



제 2 장 국내외 기술개발 현황

1절. 지금까지의 연구개발 실적

- Chen 등은 직관에서의 비등열전달에 대한 연구를 통하여 관내 비등열전달에 있어서 핵비등 영역 및 단상 강제대류 영역의 영향을 모두 고려한 열전달 계수 상관식을 제시하였다.

- OWHADI 등은 헬리컬 코일에서의 관내 비등열전달에 관한 연구를 통하여 기존의 Chen 상관식의 강제대류 영역을 직관에서 개발된 Dittus & Boelter 상관식 대신 헬리컬 코일에서 개발된 Seban & McLaughlin의 헬리컬 코일내 단상 열전달 상관식에 진도 및 Boiling number(Bo)의 영향을 고려하여 새로운 헬리컬 코일내 비등 열전달계수에 관한 상관식을 도출하였다.

- Mori-Nakayama 등은 실험적 연구를 통해 헬리컬 코일관의 내경 및 코일 직경의 영향을 포함하는 단상 열전달 계수에 관한 상관식을 개발하고 이를 기존의 상관식들과 비교 분석하였다.

- Zukauskas 등은 관다발군 외측에서의 실험적 연구를 통해 관군의 배열 및 관경 그리고 관사이의 간격을 고려한 관의 단상 열전달에 관한 상관식을 제시하였다.

- Nusselt 은 이론적 연구를 통해 평관위에서 막응축이 발생할 경우에서의 응축열전달 계수에 관한 상관식을 도출하였다.

- Shah 등은 직관 및 환형관에서의 실험적, 이론적 연구를 통하여 관내 응축 열전달 계수의 상관식을 제시하였다.

- Lee and Kim 은 비응축가스의 영향을 고려한 관내 응축 열전달에 관한 상관식을 실험적 연구를 통해 개발하였다.

2절. 현기술상태의 취약성

- SMART 증기발생기 1차측에서의 단상 액체 열전달의 경우 Zukauskas의 상관식을 적용하는데 있어 고온, 고압 조건하에서의 상관식 검증이 필요한 상태

이다.

- LOCA 발생시 SMART 증기발생기 1차측에서 응축 현상이 발생하게 되는데 이러한 헬리컬 코일 외측에서의 응축열전달에 관한 정확한 예측을 위한 상관식 및 실험적 연구는 거의 연구된 바 없는 상태이다.

- SMART 증기발생기 2차측의 경우 헬리컬 코일의 단상 및 2상 열전달에 관한 여러 가지의 상관식이 제시되어 있으나 이를 실제 상황에 적용하기 위해서는 실제 상황에 맞는 조건에서의 실험을 통한 상관식 검증이 필요한 실정이다.

- PRHRS 응축열교환기에서의 관내 응축열전달에 관한 상관식은 비교적 많은 연구자들에 의해 제시되어 왔지만, 실제의 고온, 고압 상황에서의 적용을 위해서는 더 넓은 범위에서의 실험적 연구가 필요하다.

3절. 연구결과 활용전망

- SMART 증기발생기 1차측에서의 2상 응축 열전달 실험을 통하여 사고상황에서의 1차측 열전달 특성에 관한 상관식을 도출될 수 있을 것이다.

- SMART 증기 발생기 2차측에서의 단상 및 2상 비등 열전달 실험을 통해 기존의 상관식들에 대한 정량적 평가가 이루어 질 것이다.

- PRHRS 응축열교환기에서의 관내 응축 열전달 실험을 통해 기존의 상관식들에 대한 정량적 평가가 이루어 질 것이다.

- PRHRS 응축열교환기의 풀비등 열전달 실험을 통하여 현상에 대한 이해와 나아가 실제상황에서 사용가능한 상관식의 개발이 수행될 것이다.

제 3 장. 연구개발수행 내용 및 결과

1절. SMART 열전달 실험장치 설계특성

1. 피동잔열제거계통(PRHRS) 주요 설계특성

SMART PRHRS는 SMART에서 사고 발생으로 인하여 원자로가 정지되는 경우 노심잔열을 제거하기 위한 계통이다. (그림. 1) PRHRS는 단일 고장을 고려하여 4개의 트레인으로 구성되어 있으며, 어떠한 출력준위에서 원자로가 정지되어도 원자로 냉각재계통의 냉각기능을 수행할 수 있다. PRHRS 각 계열은 비상냉각탱크(Emergency Cooldown Tank: ECT), 응축열교환기, 보충탱크, 격리밸브, 체크밸브, 기기의 연결 배관등으로 구성되어 있다. SMART에서 사고 발생으로 인하여 피동잔열제거 작동신호가 발생하면 급수 격리밸브와 주증기 격리밸브가 자동으로 닫히고, PRHRS 격리밸브가 자동으로 개방되면서 운전이 시작되는데, PRHRS 격리밸브는 급수관과 PRHRS 계통이 연결되는 부분에만 설치되어 있다. PRHRS가 작동되면 증기발생기로 유입되는 과냉각 상태의 액체는 일차계통으로부터 전달되는 열에 의해 포화상태의 이상유동 또는 과열증기 상태로 증기발생기를 빠져나오게 된다. 증기발생기 출구로부터 응축열교환기로 유입되는 냉각재는 비상냉각탱크 내부에 있는 냉각재로의 열전달을 통해 다시 상변화 과정을 거쳐 응축열교환기 출구에서는 과냉각 상태의 액상유동이 형성되면서 연속적인 자연순환 유동이 형성된다. 그리고 SMART에서는 PRHRS 작동시 과압을 방지하기 위하여 응축열교환기로 유입되는 배관에 2개의 안전감압밸브가 병렬로 설치되어 있다. SMART PRHRS의 주요 설계자료는 표.1에 나타나 있다.

2. PRHRS 응축열교환기 실험요건

본 실험을 통하여 측정되는 변수들은 PRHRS 열교환기 튜브 및 셀측 열수력 변수들의 평균값 보다는 국부적으로 측정되는 변수들이다. 이를 위하여 PRHRS 열교환기 열전달 실험장치는 적절한 모사 실험장치를 이용해야 한다.

3. SMART 증기발생기 주요 설계특성

SMART의 원자로 냉각재계통은 원자로 냉각재의 강제순환 또는 자연순환에 의해 노심에서 생성된 열을 증기발생기를 통해 이차 계통으로 전달하는 기능을 하며 제어봉구동장치 25개, 원자로 냉각재펌프 4대, 증기발생기 카세트 8개, 가압기 공간을 제공하는 원자로 덮개집합체 등의 주요 기기 및 이들이 위치하고 있는 원자로 용기 등으로 구성되어 있다. 그림. 2는 SMART 원자로 집합체의 개략도를 나타낸다. 증기발생기는 노심에서 생성된 열을 이차측으로 전달하는 증기공급계통의 주요 열수력 현상이 결정되는 핵심 기기이다. 증기발생기는 원자로 용기내에 설치되고 운전되어야 하므로 높은 방사선 조사지역에서 문제없이 운전이 가능해야 하며, 무게와 치수는 최소가 되도록 최적화가 되어야 하며, 원자로 냉각재측 유로에서 증기발생기의 유로저항이 작아야 하며, 일부 전열관을 플러그하여도 이로 인하여 노심온도가 국부적으로 올라가는 일이 없어야 하는 등 증기발생기의 성능 기준을 만족하도록 설계된다. 따라서 SMART에서는 상기 성능기준을 만족하는 증기발생기로 관류식 나선형 증기발생기가 채택되었다. SMART 정상 운전시 증기발생기는 과열 증기를 생산하는데, 정격 출력 운전시 30°C 이상의 과열증기를 생산한다. 그리고 원자로 냉각시에는 피동잔열제거계통(PRHRS) 또는 이차 계통과 연결되어 원자로 냉각재계통의 열을 제거하는 기능을 한다. 또한 이차 계통을 통한 유량을 균일하게 분포시키고, 운전 중 유동 불안정성을 방지하기 위하여 증기발생기 카세트 하부 이차측 헤더내에 각 전열관마다 오리피스가 설치되어 있다. 그림. 3은 증기발생기 카세트 개략도를 보여주고 있으며, 증기발생기의 주요 설계자료는 표.2에 나타나 있다.

4. SMART 증기발생기 실험요건

본 실험을 통하여 측정되는 변수들은 가능한 증기발생기 1차측 및 2차측의 열수력 변수들의 평균값보다는 국부적으로 측정되는 변수들이어야 한다. 이를 위하여 증기발생기 열전달 실험장치는 SMART 증기발생기 카세트에 대하여 적절한 증기발생기 모사 실험장치가 설계되어야 한다.

2절. 실험장치별 설계

1. PRHRS 응축열교환기 튜브측

SMART의 PRHRS 응축열교환기의 경우 비상냉각탱크내에 300개의 Inconel 600 튜브가 삽입되게 된다. 본 실험에서는 튜브내 이상유동 응축현상으로 인한

열수력학적 변수들의 국부적인 측정을 위해 단일 튜브에 대한 실험을 수행한다. 튜브의 길이는 축방향으로의 건도변화를 모사하기 위하여 실제 설계와 동일한 1.5 m 로 설계하였다. 실험시의 운전조건은 튜브 입구에서의 온도 및 압력이 각각 $285^{\circ}C$, 7 MPa 의 포화증기 상태가 되도록 설계하였다. 그리고 유량은 전체 설계유량인 2.0 kg/s 를 전체 튜브의 수인 300으로 나눈 $2/300 = 0.00667$ kg/s 로 실험설계를 하였다. 표.3은 본 연구에서 설계된 PRHRS 응축열교환기 튜브측 실험장치의 주요 설계값을 나타낸다. 그리고 본 실험장치에서는 응축열교환기 튜브내에서 입구측 포화증기상태에서 출구측 과냉액체 상태를 유지하기 위하여 상기 유량(0.00667 kg/s)에 대한 열교환량인 13 kW 의 열을 제거하기 위하여 튜브측 외부에 냉각재킷을 설치하는 실험장치 설계를 고안하였으며 냉각 재킷에 설치된 다수의 열전대를 이용하여 튜브에서 방출되는 국부 열유속 값을 측정하게 된다. 그림. 4는 이러한 응축열교환기 실험장치의 시험부를 나타낸다. 그리고 그림. 5는 응축열교환기 실험장치 시험부의 상세도면을 나타낸다. 냉각재킷을 흐르는 유체는 상온, 상압의 물로 선정하였고 유량은 LMTD method를 통해 계산한 0.4 kg/s 로 선정하였다. 본 실험장치에서는 관내 응축열전달 계수 측정을 위해 필요한 열수력 변수들(국부 열유속, 관내벽 온도, 관내 유체온도)를 다음과 같은 방법을 사용하여 측정한다.

우선 국부 열유속 측정을 위해 앞서 언급한대로 냉각재킷에 축방향으로 약 20개의 열전대를 삽입하여 각 구간에서의 유체의 엔탈피 차이를 통해 각 구간으로 유입되는 국부열유속 값(q'')을 측정한다. 그리고 관외벽에 부착된 20개의 열전대를 이용하여 관외벽온도를 측정하고 상기 측정된 열유속값과 재료가 갖고 있는 고유의 열전도도(k) 값 및 튜브의 두께(t)를 이용하여 일차원 열전도 방정식을 사용하여 튜브 내벽의 온도를 산출한다. 마지막으로 관내 이상유체의 온도는 길이 방향으로 튜브내의 중앙에 삽입된 열전대를 사용하여 측정하여 각 구간마다의 국부 열전달 계수를 구할 수 있다. 각 구간마다에서의 건도는 냉각재킷에서 얻은 엔탈피 차이를 통해 산출 할 수 있게 된다. 추가로 시험부의 입출구에서는 열전대, 절대압력계 및 차압계를 이용하여 각각의 온도 및 압력을 측정한다.

2. PRHRS 응축열교환기 셸측

응축열교환기 셸측 실험장치는 튜브측에서의 응축열교환으로 인해 셸측으로 배출되는 열에 의한 이상자연대류 비등현상을 파악하기 위해 설계되었다. 실험시의 운전온도는 셸측 입구를 기준으로 $30, 50, 70^{\circ}C$ 로 설계하였으며 압력은 실제

조건인 상압으로 선정하였다. 유량의 경우 자연대류 유량에 대한 정보부족으로 추후 결정하기로 한다. 그리고 실험장치는 그림. 6에서 보는 바와 같이 내부에 Inconel 600 튜브가 삽입되는 환형의 셸구조로 설계하였다. 실제상황에서의 관다발구조로 인한 인접튜브의 간섭을 고려하기 위해 전열관 피치를 기준으로 셸측의 수력직경을 21.34 mm로 설계하였고 길이는 실제와 동일한 1.5 m로 설계하였다. 실험방식은 응축열교환시 방출되는 열량을 고려하여 중심부의 Inconel 600 관을 전기적으로 직접가열하는 것으로 설계하였다.

3. 증기발생기 1차측 실험장치 설계

본 연구에서는 SMART 증기발생기 1차측에서의 LOCA 발생시 급격한 압력 감소로 인한 이상유동 응축현상을 파악하기 위한 실험을 수행한다. 본 실험에서는 실제상황에서의 정상운전조건에서 형성되는 질량유속의 5 - 15 %의 유량이 LOCA 발생시 형성될 것으로 판단하여 1차측으로 유입되는 포화증기의 질량유속인 $47 - 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 를 유지하여 실험을 설계하였다. 시험부는 이상유동 응축열 전달 현상을 모사하고 국부적인 열수력 변수를 측정하기 위하여 그림. 7에 보이는 바와 같이 반경방향으로 실제 17열의 헬리컬코일(Inconel 690) 다발군중 한 개의 헬리컬코일에 대해 실험할 수 있도록 1/17로 유동면적을 축소하였고 또한 축방향으로 25개의 열이 배치되어 있는 것을 하나의 튜브를 실제상황에서의 피치(25 mm)를 유지하면서 배치하도록 설계하였다. 그림. 8은 상기사항들을 고려하여 설계된 시험부의 개략도를 나타낸다. 이렇게 설계된 시험부에 대해 앞서 언급했던 실제상황에서의 포화증기의 질량유속인 $47 - 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ 을 유지하기 위해 본 실험장치의 유동면적을 고려하여 질량유량을 $0.032 \text{ kg/s} - 0.0691 \text{ kg/s}$ 로 설계하였다. 실험온도 및 압력은 실제의 상황과 동일하게 1차측 입구 기준으로 285°C , 7 MPa로 설계하였다. 증기발생기 1차측의 실제 높이는 약 3.8 m이다. 실험장치에서 시험부의 높이는 1 m로 축소되었다. 이렇게 축소된 높이에서 건도 조건을 실제상황과 동일하게 맞추어주기 위해 헬리컬튜브내로 흐르는 냉각수의 유량을 설계하였다. LMTD method를 이용하여 최종 설계된 냉각수의 유량은 0.8 kg/s 이다. 그리고 셸측에서 헬리컬 튜브로 유입되는 국부 열유속은 헬리컬 튜브의 내부에 삽입되는 열전대를 통하여 계측된다. 표.4는 증기발생기 1차측 실험장치의 주요 설계값을 나타낸다. 증기발생기 1차측 실험에서 응축열전달 계수 측정을 위해 필요한 열수력변수는 국부 열유속, 헬리컬 코일 외벽온도, 1차측 셸내의 이상유체의 온도이다. 국부 열유속(q'')의 측정을 위해서는 단열이 되어있는

셸측 외부의 헬리컬 코일 내부에 20개 정도의 열전대를 삽입하여 이들의 각 구간마다의 엔탈피 차이를 이용하여 국부 열유속을 계산한다. 그리고 헬리컬 코일의 외벽온도는 관벽에 구간마다 약 20개의 열전대를 직접 부착하여 측정한다. 그리고 셸측의 이상유체의 온도 측정을 위하여 셸측 중앙에 5개 정도의 열전대를 삽입하여 응축되는 유체의 온도를 직접 측정한다. 추가로 시험부의 입출구에서는 열전대, 절대압력계 및 차압계를 이용하여 각각의 온도 및 압력을 측정한다.

4. 증기발생기 1차측 축소해석

증기발생기 1차측 시험부는 실제 상황인 360도의 환형 섹션을 모사하기 위해 실험 가능한 유량범위를 고려하여 14도의 부분으로 축소설계하였다. 수평관다발의 응축에서의 가장 중요한 요소인 상부 및 하부 관 사이의 간격(피치)을 25 mm로 실제 상황과 거의 동일하게 유지하였다. 이러한 피치의 유지는 실제 상황에서 관을 타고 흘러내리는 응축수의 흐름을 모사하기 위해 고안된 설계이다. 다음으로 응축과정에서 중요한 요소는 셸측을 흐르는 포화증기의 셸내에서의 속도분포이다. 시험부 환형 섹션의 각도를 14도로 축소한 설계는 이러한 속도분포에 영향을 줄 수 있다. 환형의 반경방향으로는 실제상황과 동일한 5.5 mm로 벽과의 거리를 유지하여 반경방향으로의 속도분포는 유지될 수 있도록 하였다. 셸측의 측면벽으로 인한 속도분포의 변화를 고려하기 위해 유체의 점성으로 인하여 발생하는 경계층(Boundary Layer)에 대한 해석을 수행하였다. 본 해석은 시험부 단면에서 응축이 지배적으로 발생하는 부분은 포화증기의 속도가 최대가 되는 부분이라는 가정하에 수행되었다. 포화증기의 속도가 최대가 되는 부분은 그림. 8에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 이 부분에서의 원주방향으로의 길이 약 60.85 mm는 반경방향으로의 피치인 5.5 mm에 비해 10배 이상 큰 것을 알 수 있다. 이를 근거로 원주방향에서의 경계층의 거동을 평판에서와 유사할 것이라 가정하였다. 그리하여 근사계산법을 통해 유도되는 다음 식을 이용하여 경계층의 두께를 대략적으로 계산하였다.

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\nu x}{U}}$$

위의 식을 이용하여 시험부 입구에서 출구까지의 경계층의 두께의 오더의 범위를 계산하면 0 - 0.3 mm로 나타난다. 이러한 경계층 두께의 오더는 원주방향의 길이 약 60.85 mm에 비교하여 매우 미세한 크기이므로 본 시험부의 설계는 실

제상황에서의 응축현상을 모사할 수 있는 설계라고 판단된다.

3절. 실험장치별 열전달 계수에 대한 불확실성 해석

1. PRHRS 응축열교환기 튜브측

본 절에서는 앞서 설명한 실험장치 설계에 대한 불확실성을 해석을 수행한다. PRHRS 응축열교환기 실험을 통해 최종적으로 획득해야하는 결과값은 국부 열전달 계수이므로 열전달 계수에 관한 불확실성 해석을 수행하였다. 실험을 통해서 측정되는 변수는 각 구간에서의 응축 열전달량($Q_{r,n}$), 냉각수 유량(\dot{m}_l), 튜브 외벽온도($T_{o,w,n}$), 튜브내측의 유체온도(T_b) 등이다. 관내 응축열전달 계수를 획득하기 위해서는 튜브 내벽의 온도($T_{i,w,n}$)가 필수적인 변수이기 때문에 튜브 내벽 온도를 계산하기 위해 다음의 에너지 밸런스 방정식을 사용한다.

$$Q_{r,n} = \dot{m}_l(i_{l,n-1} - i_{l,n})$$

$$Q_{r,n} = \frac{2\pi Lk(T_{i,w,n} - T_{o,w,n})}{\ln(r_i/r_o)}$$

$$\therefore T_{i,w,n} = \frac{Q_{r,n} \ln(r_i/r_o)}{2\pi Lk} + T_{o,w,n}$$

위 식에서 \dot{m}_l 은 냉각재킷을 흐르는 물의 질량유량, $i_{l,n-1}$, $i_{l,n}$ 은 각 구간의 전단과 후단에서의 엔탈피 값, L 은 각구간의 길이, r_i, r_o 는 각각 튜브의 내외각 반경, k 는 튜브의 재질인 Inconel 600의 열전도도 값이다. 이렇게 획득된 튜브내벽온도를 통해 시험부 각 구간에서의 국부 열전달 계수(h_n)은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$h_n = \frac{Q_{r,n}}{A(T_{i,w,n} - T_b)}$$

위 식에서 A 는 각 구간에서의 튜브 내벽의 면적이다. 위의 국부 열전달 계수식을 이용하여 본 실험에서의 열전달계수에 대한 불확실성은 다음의 식으로 표현

된다.

$$\frac{U_{h_n}}{h_n} = \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{r,n}} U_{Q_{r,n}}\right)^2 + \left(\frac{1}{T_{i,w,n} - T_b} U_{T_{i,w,n}}\right)^2 + \left(\frac{1}{A} U_A\right)^2 + \left(\frac{1}{T_{i,w,n} - T_b} U_{T_b}\right)^2}$$

$$\frac{U_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{U_{r_o}}{r_o}\right)^2 + \left(\frac{U_L}{L}\right)^2}$$

$$\frac{U_{Q_{r,n}}}{Q_{r,n}} = \sqrt{\left(\frac{1}{m_i} U_{m_i}\right)^2 + \left(\frac{1}{i_{l,n-1} - i_{l,n}} U_{i_{l,n-1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{i_{l,n-1} - i_{l,n}} U_{i_{l,n}}\right)^2}$$

$$U_{T_{i,w,n}} = \sqrt{\left(\frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk} U_{Q_{r,n}}\right)^2 + \left(\frac{Q_{r,n}}{2\pi Lkr_i} U_{r_i}\right)^2 + \left(-\frac{Q_{r,n}}{2\pi Lkr_o} U_{r_o}\right)^2 + (U_{T_{o,w,n}})^2}$$

위의 계산식을 바탕으로 계산한 열전달 계수의 불확실성은 최대 약 15 % (열전대 오차 0.2 °C 기준)였으며 각 구간의 건도변화에 따른 불확실성의 변화는 그림. 9에 나타나 있다. 이러한 결과는 선행 연구자들의 관내 응축열전달 계수 측정 실험의 불확실성을 감안하였을 때 수용할 만한 불확실성이라고 판단된다.

2. PRHS 응축열교환기 셀측

PRHS 응축열교환기 셀측의 경우 자연대류 유량에 대한 정보가 부족하므로 불확실성 해석은 자연대류 유량의 확정후 수행할 것이다.

3. 증기발생기 1차측

PRHS 응축열교환기와 마찬가지로 증기발생기 1차측 실험에서 최종적으로 획득해야하는 결과값은 시험부 각 구간에 대한 국부 열전달계수(h_n)이다. 국부 열전달계수의 계산을 위해 실험을 통해 측정되는 변수는 각 구간의 헬리컬 코일 외벽온도(T_{wn}), 헬리컬 코일 내 냉각유체의 온도, 셀측의 응축유체온도(T_b), 냉각수 유량(\dot{m}_c) 등이다. 다음은 국부 열전달계수를 계산하는 식의 유도과정을 나타낸다.

$$q''_n = h_n(T_{un} - T_b)$$

$$q''_n = \frac{\dot{m}_c(i_{c,n-1} - i_{c,n})}{A}$$

$$\therefore h_n = \frac{\dot{m}_c(i_{c,n-1} - i_{c,n})}{A(T_{un} - T_b)} = \frac{\dot{m}_c(i_{c,n-1} - i_{c,n})}{2\pi r_o L(T_{un} - T_b)}$$

위의 최종 유도된 열전달 계수식에서 $i_{c,n-1}, i_{c,n}$ 은 냉각수가 흐르는 헬리컬 코일 각구간의 전후단 엔탈피, r_o 는 헬리컬 코일의 외각반경, L 은 각 구간에서의 헬리컬 코일의 길이이다. 위의 계산식을 바탕으로 응축열전달계수의 불확실성은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\frac{U_{h_n}}{h_n} = \sqrt{\left(\frac{1}{\dot{m}_c} U_{\dot{m}_c}\right)^2 + \left(\frac{1}{i_{c,n-1} - i_{c,n}} U_{i_{c,n-1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{i_{c,n-1} - i_{c,n}} U_{i_{c,n}}\right)^2 + \left(\frac{1}{T_{un} - T_b} U_{T_{un}}\right)^2 + \left(\frac{1}{T_{un} - T_b} U_{T_b}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_o} U_{r_o}\right)^2 + \left(\frac{1}{L} U_L\right)^2}$$

위의 식을 바탕으로 증기발생기 1차측의 응축열전달계수에 대한 불확실성은 약 10 % (열전대 오차 0.2 °C 기준) 정도로 나타났다. 이러한 불확실성 결과는 본 연구에서 충분히 수용할만한 결과라고 판단된다.

4절. 실험장치 루프설계

본 실험에서는 PRHRS 응축열교환기 및 증기발생기 1차측 실험을 단일 실험 루프에서 실험수행할 수 있도록 실험루프를 설계하였다.

그림. 10은 본 실험에서의 주요 증기 루프의 개념도이다. 시험부에서의 응축실험을 위해 필요한 증기를 공급하기 위해 증기발생기를 설계하였다. 증기발생기의 최대 운전압력은 7 MPa 이며, 최대 운전온도는 약 285°C 이다. 증기발생의 열원으로는 30 kW 용량의 카트리지 히터를 5개 설치하여 각각이 PID 제어되도록 설계하였다. 그리고 본 증기발생기에서는 증기의 온도와 압력을 실시간으로 측정할 수 있도록 설계했다. 압력에 대한 안전장치로는 릴리프(relief) 밸브와 자동으로 제어되는 벤팅(venting) 밸브를 부착하는 설계를 고안하였다. 자동으로 제어되는

고립(Isolation) 밸브를 증기발생기 출구측에 배치하여 증기발생기의 가압시 또는 사고상황시 증기발생기와 실험루프를 차단하는 설계를 하였다. 또한 자동으로 제어되는 유량조절밸브를 부착하여 루프내의 증기의 유량조절을 보조할 수 있도록 하였다. 기액분리기(Seperator)는 증기발생기에서 배출된 증기에 남아있는 소량의 액상을 분리하기 위한 장치이다. 그리고 보조 히터(Sub-heater)는 시험부로 증기가 유입되기 전에 증기에 남아있는 액상을 완전히 제거하기 위해 열전대와 연동하여 PID 제어가 가능하도록 설계하였으며 열용량은 약 1 kW 정도이다. 질량유량계는 PRHRS 응축열교환기 및 증기발생기 1차측 실험을 모두 고려하여 저유량 및 고유량 2개의 유량계를 설치하도록 설계하였으며 각 유량계의 유량 범위는 - 0.1 kg/s(high), - 0.01 kg/s(low) 이다. 시험부 출구에서 배출되는 응축수를 완전 응축시켜 순환펌프에 전달하기 위하여 냉각용량 10 kW의 콘덴서(Condenser)를 설계하여 출구에 부착된 열전대와 연동하여 PID 제어가 가능하도록 하였다. 그리고 콘덴서에서 배출된 고온 고압의 유체를 증기발생기로 공급하기 위하여 유량범위 - 0.1 kg/s 인 순환펌프(Circulation pump)를 부착하였다. 그림. 11은 본 실험에서의 냉각수 루프의 개념도이다. 이 루프는 시험부 입구로 유입되는 순수증기를 응축시키는 역할을 한다. 그림에서 쿨러는 냉각재킷을 출구측에서 나온 water를 지정된 입구온도로 냉각하는 장치이다. 쿨러의 냉각용량은 약 150 kW 이며 50 kW의 쿨러를 3개정도 배치하는 것으로 설계하였다. 펌프는 냉각수 유량을 조절하는 장치이며 유량범위는 - 1 kg/s 이다. 그리고 PRHRS 응축열교환기 실험 및 증기발생기 1차측 실험을 모두 고려하여 저유량 및 고유량 2개의 유량계를 설치하였다. 유량계의 범위는 각각 - 0.1 kg/s, - 1 kg/s 이다. 예비히터(Pre-heater)는 열전대와 연동하여 냉각수 입구온도를 PID 제어할 수 있도록 설계하였다. 히터 열용량은 약 - 50 kW 이다.

5절. 요약

본 장에서는 PRHRS 응축열교환기 및 증기발생기 1차측 모사실험을 위한 실험 설계자료들을 제시하였다. PRHRS 응축열교환기 실험장치의 경우 실제 설계인 300개의 튜브 대신 단일튜브를 사용한 실험장치를 설계하였으며 튜브내에서의 질량유속 및 튜브의 길이는 실제 설계와 동일하게 유지하였다. 튜브측 응축실험에서는 냉각재킷을 사용하여 응축열교환시의 열을 제거하는 방식을 채택하였다. 실험을 통해 획득되는 최종 결과값은 응축 열전달계수이며 이를 위해 냉각수

온도, 튜브의 벽온도, 튜브내 응축유체의 온도, 시험부 입출구에서의 유체의 온도 및 압력을 각구간별로 측정하여 국부 열전달계수를 측정할 수 있도록 설계하였다. 그리고 PRHRS 응축열교환기 쉘측에서는 환형 시험부를 설계하고 다관 튜브 군들로 인한 간섭효과를 고려하기 위해 전열관 피치를 기준으로 쉘측의 수력직경을 계산하였으며 시험부의 길이는 실제설계와 동일하게 유지하였다. 이 실험을 통해서는 PRHRS 쉘측 자연대류 비등 열전달계수를 획득할 것이다. 이를 위해 환형 시험부 중앙에 위치한 튜브를 전기적으로 직접가열하여 비등현상의 열원을 제공하고 쉘측 유체온도, 튜브외벽온도, 입출구 유체 온도 및 압력을 측정하는 설계를 하였다. 증기발생기 1차측 실험장치는 실제 설계에서와 동일한 질량유속을 유지하였다. 그리고 시험부는 유동면적을 1/17 로 축소하였고 길이방향으로 25개의 열이 배치되어 있는 것을 하나의 튜브를 실제상황에서의 피치를 유지하면서 배치하는 설계를 하였다. 이 실험에서는 헬리컬 튜브내에 냉각수를 흘려 응축열을 제거하는 방식을 채택하였다. 증기발생기 1차측 응축열전달계수 측정을 위하여 헬리컬 코일 내 유체온도, 헬리컬 코일관 외벽온도, 쉘측 유체온도 등을 측정하여 국부 열전달계수를 획득할 수 있는 시험부를 설계하였다.

그리고 PRHRS 응축열교환기 및 증기발생기 1차측 실험장치에 대한 불확실성 해석을 수행하여 각각 열전달계수에 대한 불확실성을 계산하였고 기 설계된 실험장치의 불확실성이 수용할만한 수준이라는 것을 확인하였다.

마지막으로 시험부에 증기를 공급하고 이를 순환시킬 수 있는 주요 증기루프를 각 컴포넌트별로 상세히 설계하였고, 이러한 증기를 응축시키기 위한 냉각루프도 각 컴포넌트별로 상세히 설계하였다.

표.1 SMART PRHRS 주요 설계자료

항목		
열교환기	형태	Straight tube
	설계 유량, kg/s	2.0
	전열관 재질	Inconel 600
	전열관 내경/외경, mm	15.80/21.34
	전열관 피치, mm	32
	전열관 길이, m	1.5
	전열관 개수	300
	전열 면적, m ²	22.3 (상/하부 Header 판 제외)
	SG 중앙에서 PRHRS H/X 중앙까지 높이, m	10.0
비상냉각 탱크	총 체적, m ³	200
	액체 체적, m ³	183
	수위, m	5.5
	ECT 압력, MPa	0.1
	ECT 유체 온도, °C	30
	탱크 높이, m	6.0
보충수탱크	탱크 내경, mm	1,400
	탱크 체적, m ³	5.4
	탱크 높이, m	3.5
	수위	3.5
	액체 체적, m ³	5.4
	운전 압력, MPa	5.2
	운전 온도, °C	30

표.2 SMART 증기발생기 주요설계자료

증기발생기 형태	Modular Helical, Once-Through	
카세트 사양	전열관 개수, 개	375
전열관 사양 (카세트 당)	재질	Inconel 690
	전열관 내경/외경, mm	12/17
	전열관 평균 길이(유효전열지역), m	25
	전열관 열(Coil) 수, 개	17
	전열관 열(Coil) 유효전열지역높이, m	3.8
	전열관 총 열전달면적(외경 기준), m ²	~ 500
	전열관 관막음 여유도, %	10
	설계 압력/온도, MPa/°C	17/360
일차측	운전 압력, MPa	15
	SG 입구 온도, °C	323
	SG 출구 온도(우회유량과 섞인후), °C	295.7
	SG에서의 총 유량(우회유량 포함), kg/s	2090
이차측(주증기/주급수 격리밸브 전단)	급수 온도, °C	200
	급수 총 유량, kg/s	160.8
	SG 출구노즐에서의 증기 압력, MPa	5.2
	SG 출구노즐에서의 증기 온도, °C	≥296

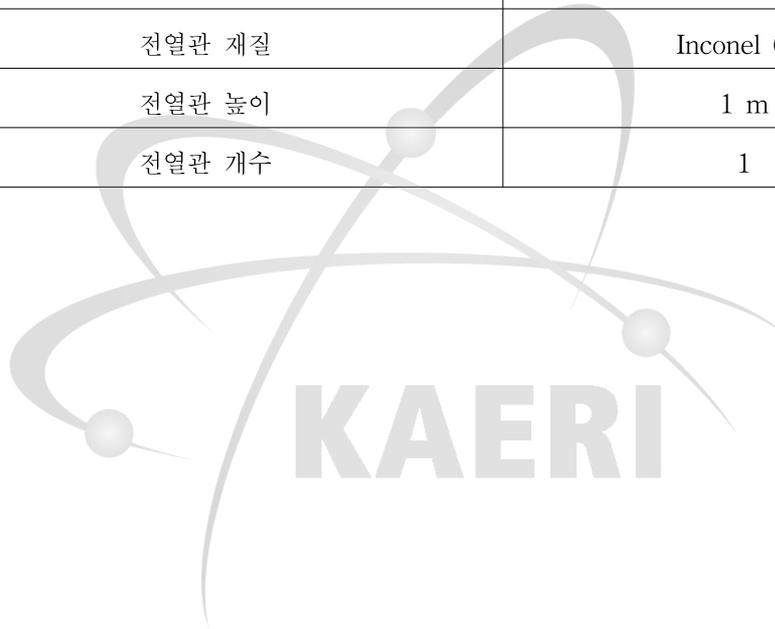
표.3 PRHRS 응축열교환기 튜브측 실험장치 주요 설계값

항목	실험 장치 설계 값
제거 열량	13 kW
설계 압력	10 MPa
운전 온도(전열관 입구)	100~285℃
운전 압력	0.1~7 MPa
운전 유량 (전열관 내부 튜브 1개당)	~0.00667 kg/sec (=2.0/300)
전열관 재질	Inconel 600
전열관 내경/외경	15.80/21.34 mm
전열관 길이	1.5 m
전열관 개수	1
열교환기 수조 압력	0.1 MPa
열교환기 수조 유체 온도	30,50,70 ℃

KAERI

표.4 증기발생기 1차측 실험장치 주요 설계값

항목	실험 장치 설계 값
제거 열량	150 kW
설계 압력	7 MPa
운전 온도(전열관 입구)	100~285℃
운전 압력	0.1~7 MPa
운전 유량	~0.0691 kg/sec
전열관 재질	Inconel 690
전열관 높이	1 m
전열관 개수	1



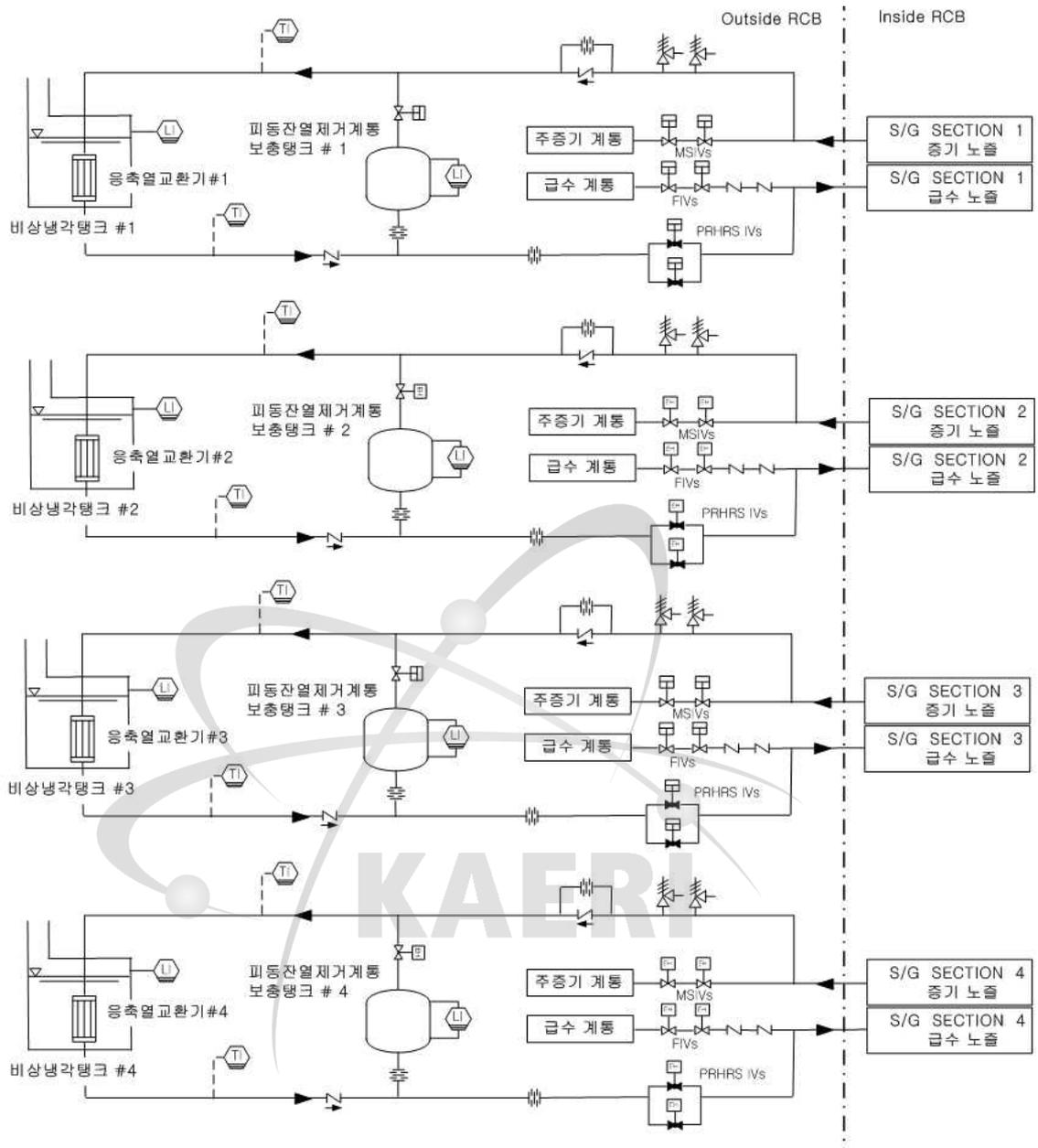


그림 1. 피동잔열제거계통 Schematic diagram

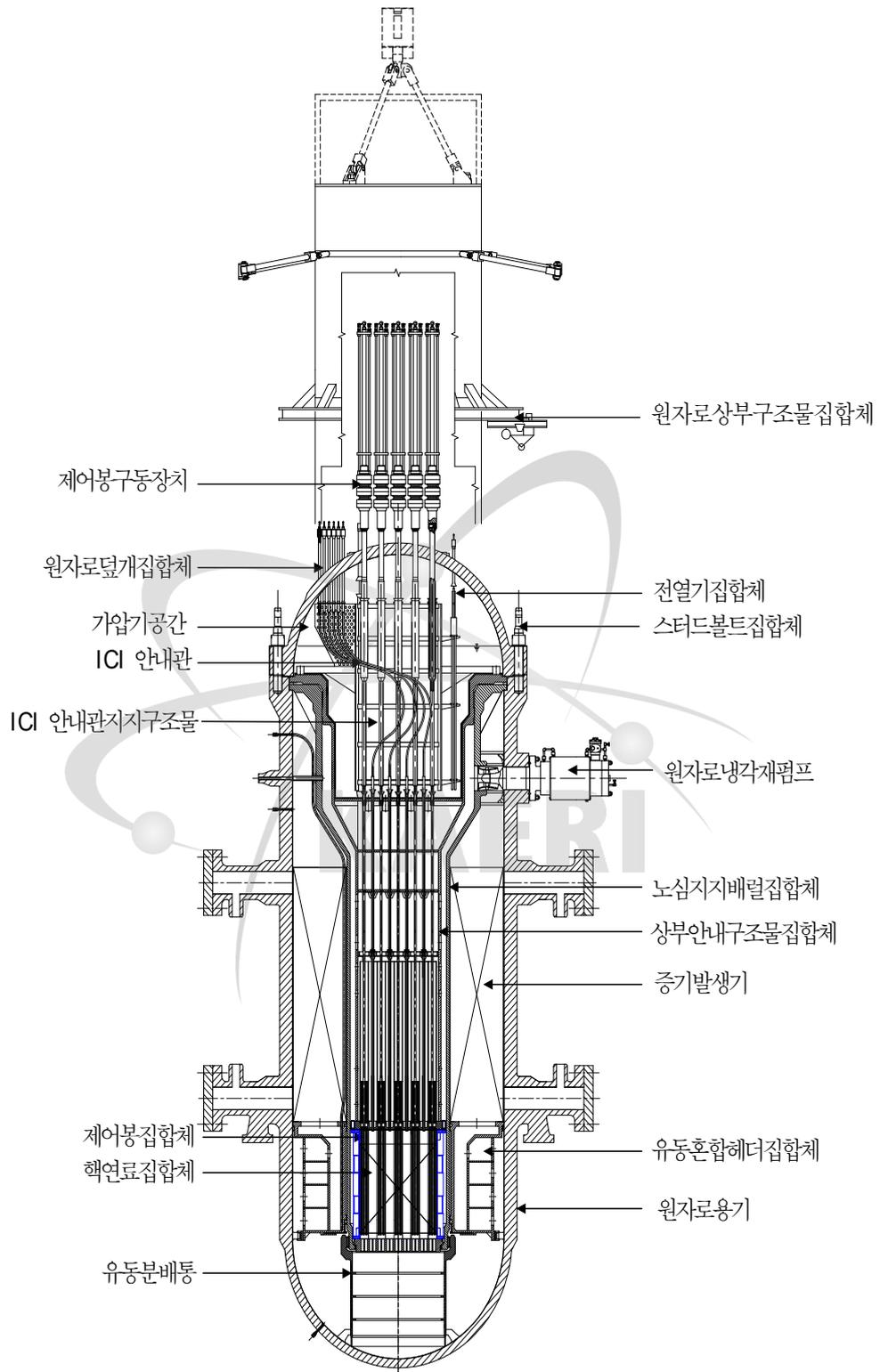


그림 2. SMART 원자로집합체 개략도

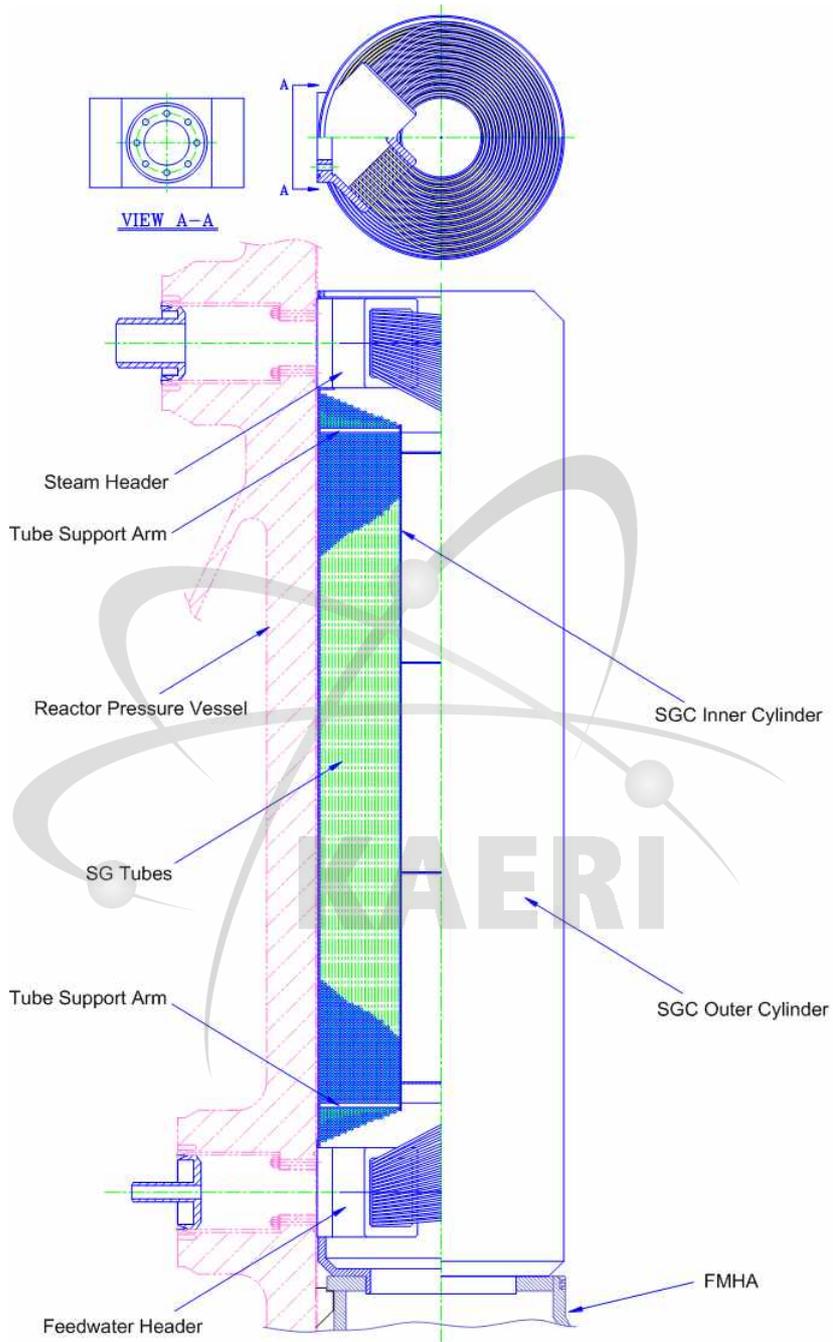


그림 3. 증기발생기 카세트 개념도

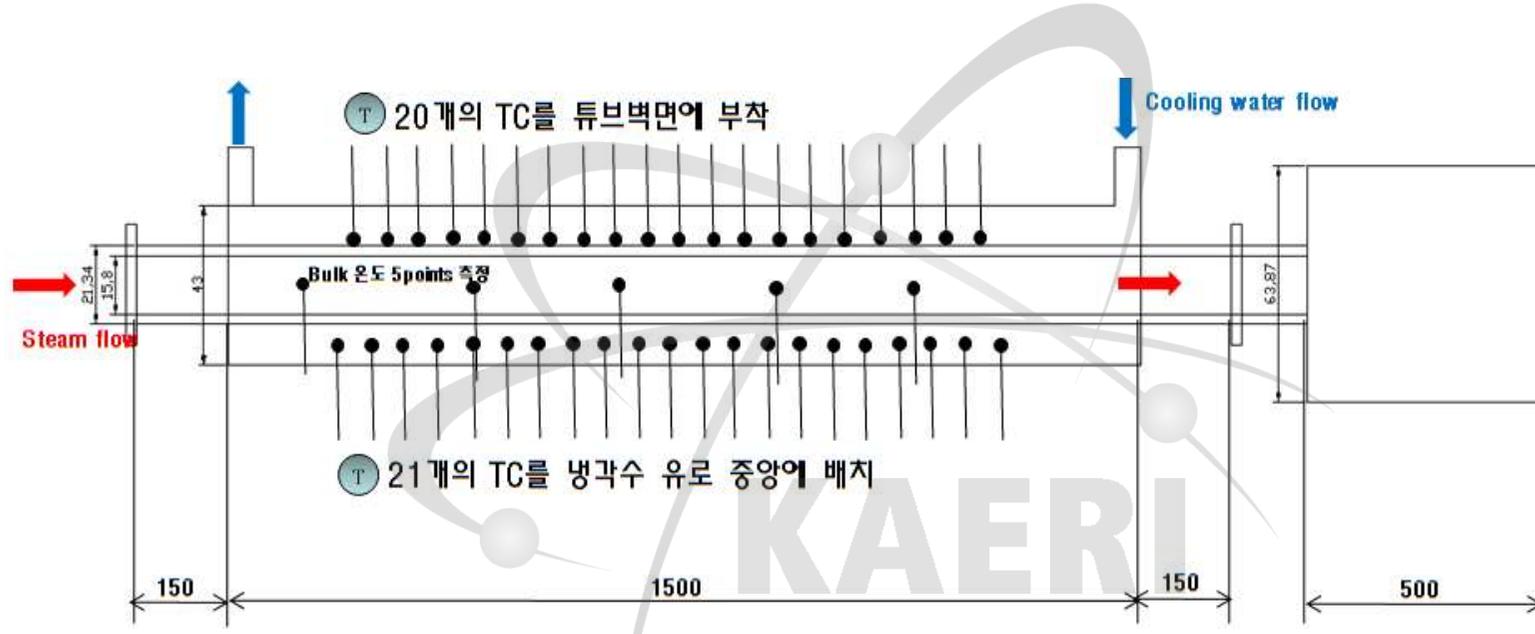


그림 4. PRHS 응축열교환기 튜브측 시험부 개념도

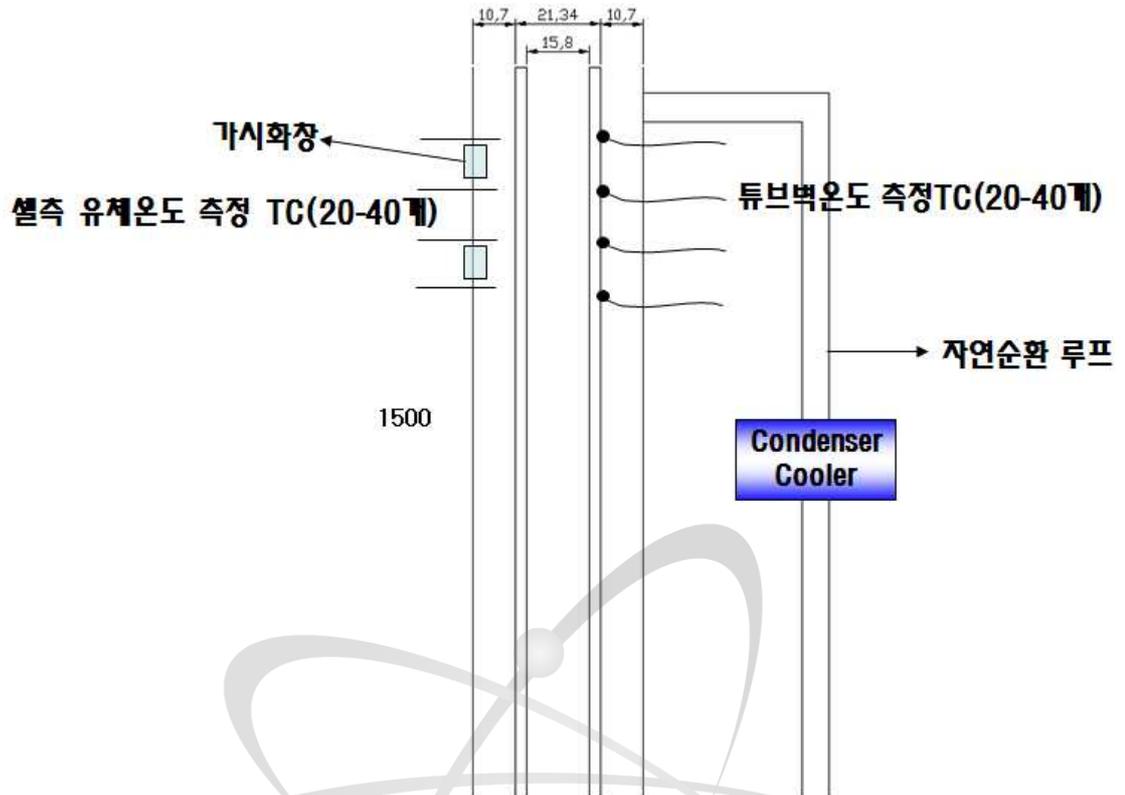


그림 6. PRHRS 응축열교환기 셸측 시험부 개념도

KAERI

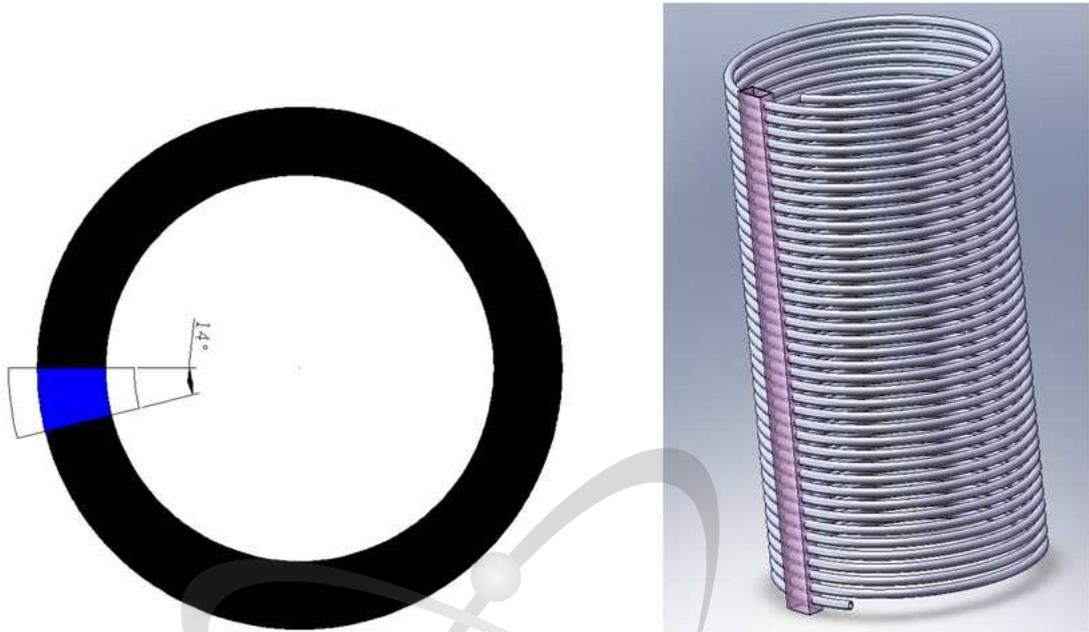


그림 7. 증기발생기 1차측 시험부 모식도

KAERI

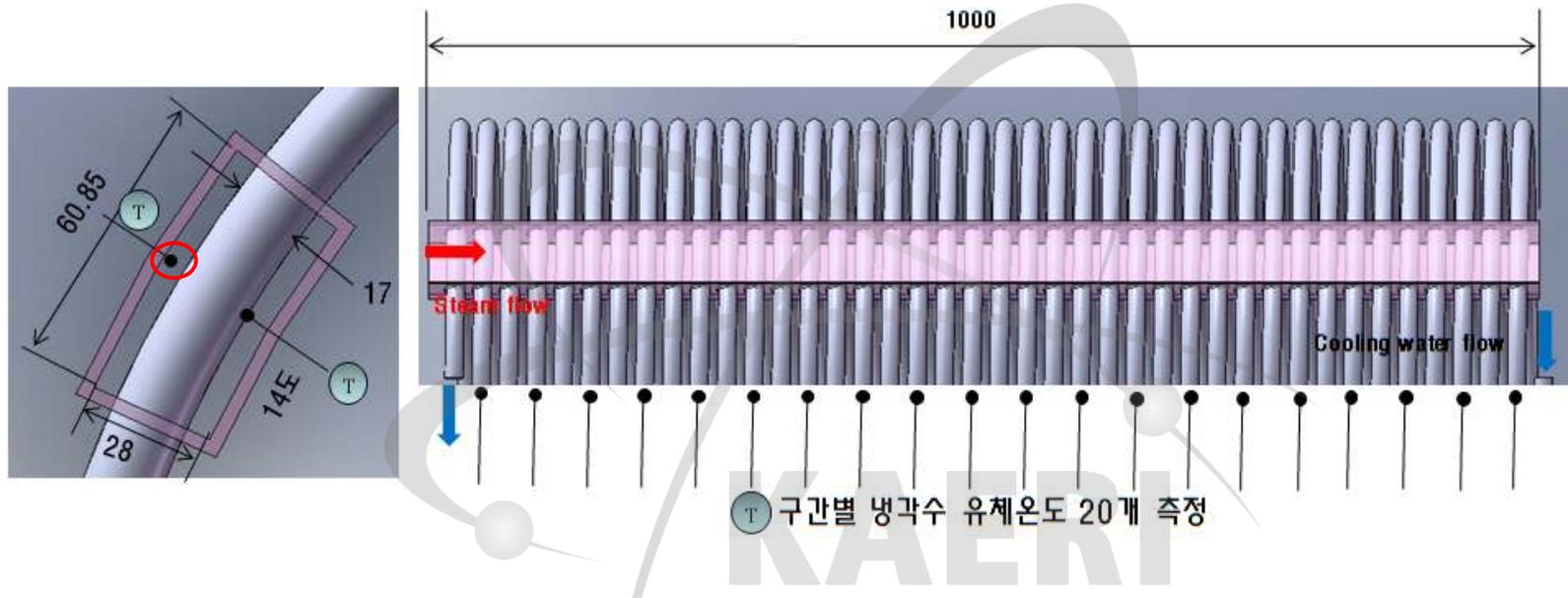


그림 8. 증기발생기 1차측 시험부 개념도

건도에 따른 불확실성

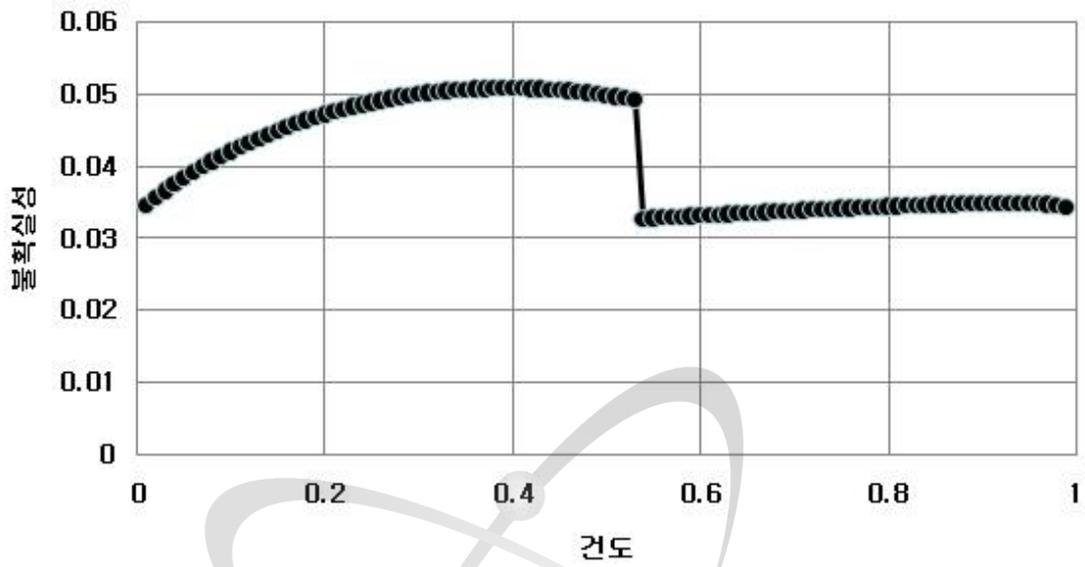


그림 9. PRHRS 응축열교환기 튜브측 건도에 따른 불확실성

KAERI

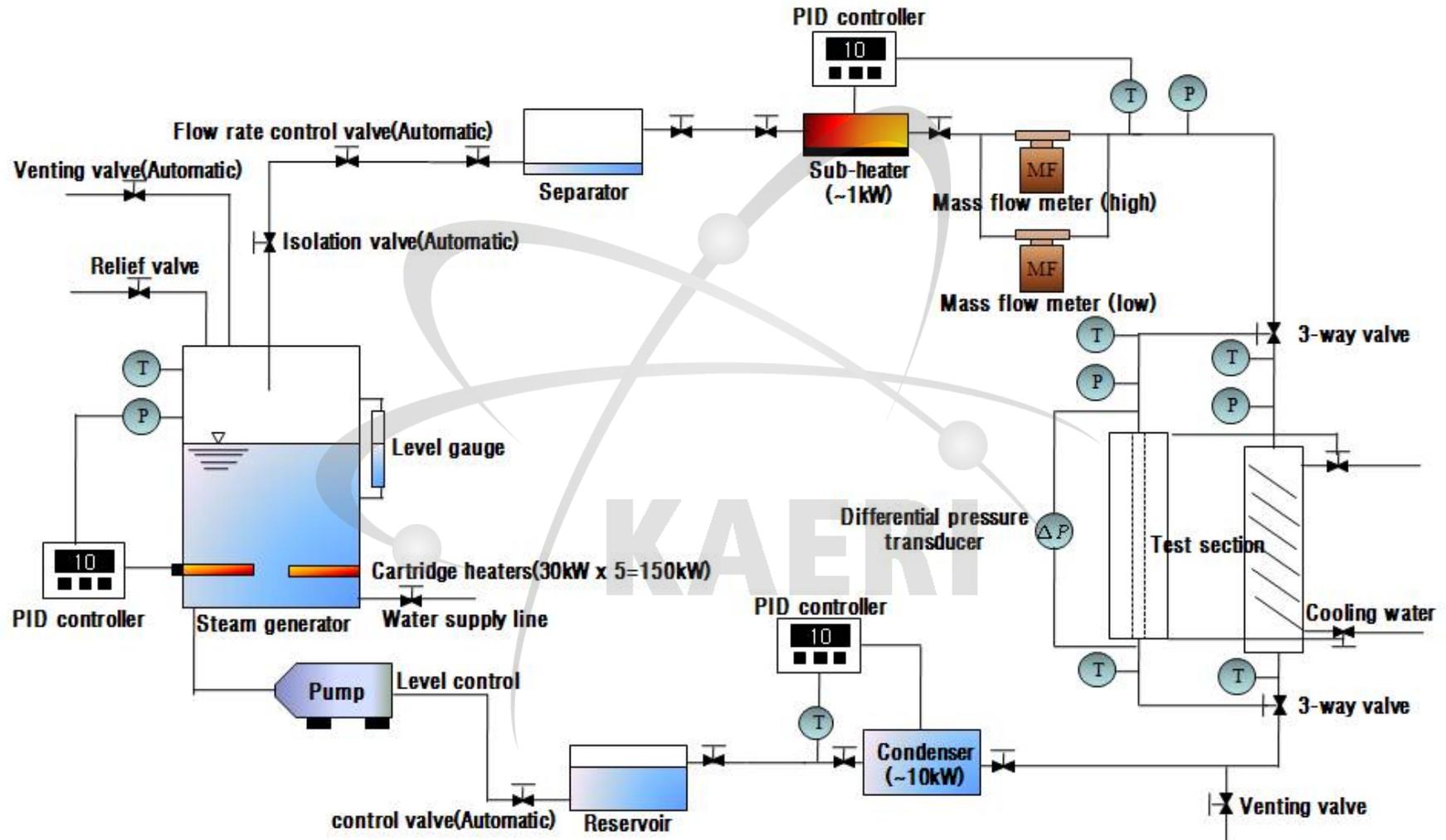


그림 10. 주요 증기 실험루프 개념도

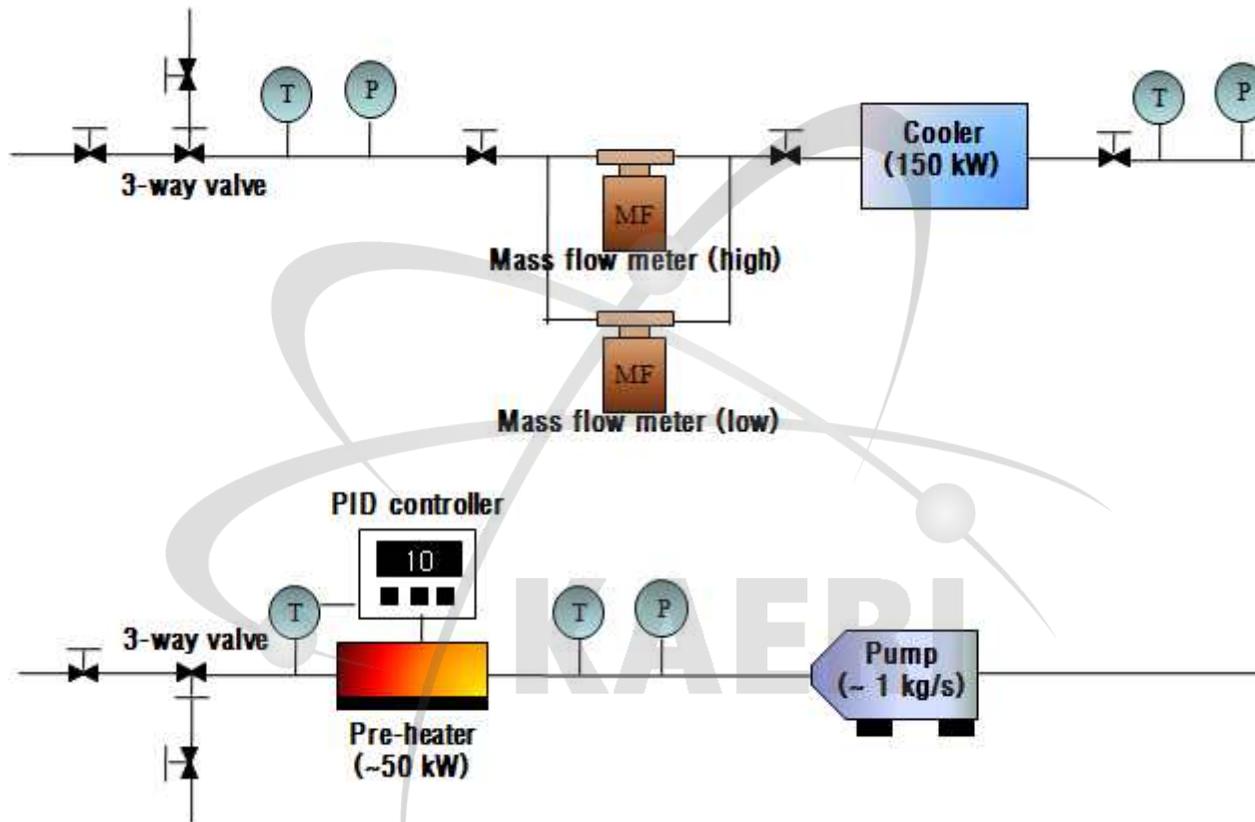


그림 11. 냉각수 루프 개념도

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도

1절. 연구개발목표 달성도

본 절에서는 2009 연구목표 및 평가의 착안점을 기준으로 연구개발목표의 달성도에 대한 평가를 수행하였다. 당해연도 세부연구목표 및 평가의 착안점 및 척도는 아래의 표와 같다.

년도	세부연구목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도 (2009)	SMART 증기발생기 및 PRHS 응축열교환기 관련 열전달 상관식 선행연구조사	10 %	관외비등, 관내비등 및 관내 응축 모델을 포함하는 상관식에 대한 충분한 조사 및 상호 비교 분석 여부
	SMART 증기발생기 1차측 실험장치 설계 및 제작	45 %	- 실험장치 루프 및 시험부의 실험조건 구현 가능 여부 - 실험의 재현성 및 불확실성 계산을 통한 실험의 정확성
	SMART PRHS 응축열교환기 실험장치 설계 및 제작	45 %	- 실험장치 루프 및 시험부의 실험조건 구현 가능 여부 - 실험의 재현성 및 불확실성 계산을 통한 실험의 정확성

우선 SMART 증기발생기 및 PRHS 응축열교환기 관련 열전달 상관식 선행연구조사의 목표는 대부분 문헌조사 및 조사된 문헌의 분석을 통해 이루어졌다. 비등 열전달에 관한 연구로서 Chen 등, Owhadi 등, Guo 등의 문헌조사를 통하여 제시된 열전달 계수 상관식들을 비교 분석하였다. 그리고 헬리컬 코일 내 단상 열전달에 대해서는 Mori-Nakayama 등 및 Seban & McLaughlin 의 문헌을 조사하여 그들의 상관식을 상호 비교분석 하였다. 그리고 Zukauskas 등의 문헌조사를 통하여 관외 단상 열전달에 관한 상관식을 분석하였다. 또한 관내 및 관외 응축에 대해서는 Nusselt, Shah 등, Lee and Kim, Kim and No 등의 연구문헌을 이용하여 응축열전달에 관한 상관식들의 비교분석을 수행하였다.

다음으로 SMART 증기발생기 1차측 실험장치 설계 및 제작의 목표는 다음과 같이 달성되었다. 증기발생기 1차측 실험장치는 실제 설계에서와 동일한 질량유속을 유

지하였으며 시험부는 유동면적의 축소 및 실제상황에서의 튜브피치를 유지하면서 배치하는 설계를 하였다. 그리고 응축열전달계수 측정을 위하여 헬리컬 코일 내 유체온도, 헬리컬 코일 관 외벽온도, 쉘측 유체온도 등을 측정하여 국부 열전달 계수를 획득할 수 있는 시험부를 설계하였다.

마지막으로 SMART PRHRS 응축열교환기 실험장치 설계 및 제작의 목표는 단일 튜브를 사용한 응축 실험장치를 설계하는 것으로 달성되었다. 튜브내에서의 질량유속 및 튜브의 길이는 실제 설계와 동일하게 유지하였으며 실험을 통해 획득되는 최종결과값인 응축 열전달계수의 측정을 위해 냉각수 온도, 튜브의 벽온도, 튜브내 응축유체의 온도, 시험부 입출구에서의 유체의 온도 및 압력을 각 구간별로 측정하여 국부 열전달 계수를 측정할 수 있도록 설계하였다.

추가로 PRHRS 응축열교환기 및 증기발생기 1차측 실험장치에 대한 불확실성 해석을 수행하여 각각 열전달계수에 대한 불확실성을 계산하였고 기 설계된 실험장치의 불확실성이 수용할만한 수준이라는 것을 확인하였다.

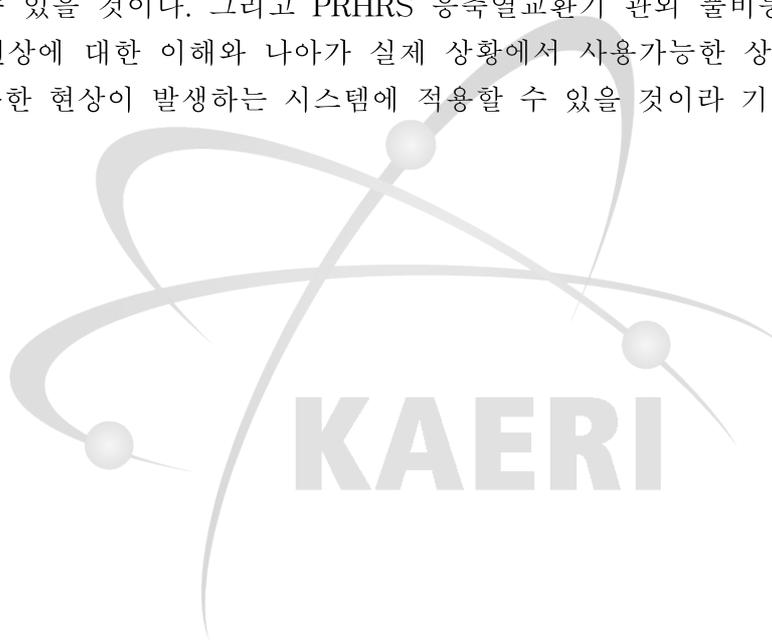
2절. 대외기여도

당해연도 수행된 본 연구의 결과를 통해 우선 유동 비등 및 응축에 관한 종합적 선행연구조사를 통해 열전달 관련 상관식들의 사용범위 및 신뢰성들을 종합 평가할 수 있을 것이다. 그리고 비등 및 응축 열전달 상관식들에 대한 물리적 및 기술적 접근을 통해 SMART 및 기타 에너지 관련 시스템에서의 열전달 현상에 대한 이해가 증진될 것으로 기대된다. 또한 SMART 증기발생기 1, 2차측 및 PRHRS 응축열교환기 실험을 통해 에너지 시스템에서의 열 및 유동에 관한 계측기법 및 실험 데이터 해석방법의 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

궁극적으로는 현재 원천 기술이 확보된 중소형 원자로인 SMART의 성능 및 안전성에 관한 해석방법론의 검증 및 개발을 통해 원천기술을 실험적으로 검증함으로써 중소형 원전에 대한 세계시장의 수요에 대응하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

제 5 장. 연구개발 결과의 활용계획

본 장에서는 본 연구에서 수행된 연구결과의 대략적인 활용계획에 대해 설명할 것이다. 우선 SMART 증기발생기 1차측에서의 2상 응축 열전달 실험을 통하여 사고 상황에서의 1차측 열전달 특성에 관한 상관식을 도출하여 관외 응축 열전달 상황의 시스템에 활용할 수 있을 것이다. 그리고 증기발생기 2차측에서의 단상 및 2상 비등 열전달 실험을 통해 기존의 상관식들에 대한 정량적 평가를 실시하여 헬리컬 코일 내 비등현상이 존재하는 에너지 시스템에 적용할 수 있을 것이다. 또한 PRHRS 응축열교환기에서의 관내 응축 열전달 실험을 통해 기존의 상관식들에 대한 정량적 평가를 통해 관내 응축이 발생하는 발전 및 냉동공조 시스템 분야에 널리 활용될 수 있을 것이다. 그리고 PRHRS 응축열교환기 관외 풀비등 열전달 실험을 통하여 현상에 대한 이해와 나아가 실제 상황에서 사용가능한 상관식을 개발하여 이를 유사한 현상이 발생하는 시스템에 적용할 수 있을 것이라 기대된다.



서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/CM-1199/2009					
제 목 / 부 제					
SMART 증기발생기 및 응축열교환기 열전달 특성 시험					
연구책임자 및 부서명 (AR,TR등의 경우 주저자)	김무환, 포항공과대학교 기계공학과				
연구자 및 부서명	김동익, 포항공과대학교 기계공학과, 하영호, 포항공과대학교 기계공학과, 황경원, 포항공과대학교 환경공학과, 양기훈, 포항공과대학교 기계공학과				
출판지	대전	발행기관	KAERI	발행년	2010
페이지	34 p.	도 표	있음(○), 없음()	크 기	27 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개(○), 대외비(), 급비밀		보고서종류	위탁보고서	
연구위탁기관	KAERI		계약 번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>본 연구에서는 SMART의 열전달 성능 및 안전성에 관한 해석방법론의 검증 및 개발을 위해 SMART 증기발생기 1차측, 2차측, PRHRS에 대한 실험적 연구를 수행함으로써 SMART 성능 및 안전해석을 위하여 사용되는 TASS/SMR 코드의 각각의 모델을 평가 및 검증하고 새로운 상관식을 개발한다. PRHRS 응축열교환기 실험장치의 경우 단일튜브를 사용한 실험장치를 설계하였으며 튜브 내에서의 질량유속 및 튜브의 길이는 실제 설계와 동일하게 유지하였다. 실험을 통해 획득되는 최종 결과값은 응축 열전달계수이며 이를 위해 냉각수 온도, 튜브의 벽온도, 튜브내 응축 유체의 온도, 시험부 입출구에서 유체의 온도 및 압력을 구간별로 측정하여 국부 열전달계수를 측정할 수 있도록 설계하였다. 그리고 PRHRS 응축 열교환기 셸측에서는 환형시험부를 설계하고 다관 튜브군들로 인한 간섭효과를 고려하기 위해 전열관 피치를 기준으로 셸측의 수력직격을 계산하였으며 시험부의 길이는 실제설계와 동일하게 유지하였다. 증기발생기 1차측 실험장치는 실제 설계에서와 동일한 질량 유속을 유지하였다. 응축열전달계수 측정을 위하여 헬리컬 코일 내 유체온도, 헬리컬 코일관 외벽온도, 셸측 유체온도 등을 측정하여 국부 열전달계수를 획득할 수 있는 시험부를 설계하였다. 시험부에 증기를 공급하고 이를 순환시킬 수 있는 주요 증기루프를 각 컴포넌트별로 상세히 설계하였고, 이러한 증기를 응축시키기 위한 냉각루프도 각 컴포넌트별로 상세히 설계하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	2상 응축열전달, 2상 비등열전달, 헬리컬 튜브,				
피동잔열제거계통, 증기 발생기, 응축 열교환기, 열전달 계수, 2상 자연대류 비등					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No. INIS Subject Code	
KAERI/CM-1199/2009					
Title / Subtitle					
Heat transfer test for the steam generator and PRHRS of SMART					
Project Manager and Department (or Main Author)		M.H. Kim, POSTECH Department of Mechanical Engineering			
Researcher and Department		D.E. Kim, POSTECH Department of Mechanical Engineering			
Y.H. Ha, POSTECH Department of Mechanical Engineering, K.Y. Hwang, POSTECH School of Environmental Science and Engineering, K.H. Yang, POSTECH Department of Mechanical Engineering					
Publication Place	DaeJeon	Publisher	KAERI	Publication Date	2010
Page	34 p.	Ill. & Tab.	Yes(<input type="radio"/>), No (<input type="radio"/>)	Size	27 Cm.
Note					
Classified	Open(<input type="radio"/>), Restricted(<input type="radio"/>), ___ Class Document		Report Type	Commission Report	
Sponsoring Org.		KAERI		Contract No.	
Abstract (15-20 Lines)		<p>In the present study, steam generator models of TASS/SMR codes analysing performances and safety of SMART are evaluated and verified and new correlation is developed by doing research about SMART steam generator's first part, second part and a PRHRS condensation heat exchanger for verification and development of analytical ways of SMART's heat transfer performances and safety. PRHRS condensation heat exchanger's experimental apparatus was designed a single tube, which has same mass flux and length with real design. The final result of experiment is condensation heat transfer coefficient. Cooling water's temperature, tube's wall temperature, condensate's temperature inside a tube and temperature, pressure inlet and outlet position of test section in order to acquire the local heat transfer coefficients. Annular test section was designed for shell of PRHRS condensation heat exchanger and the hydraulic diameter of shell was calculated based on heat pipe's pitch in order to consider the interference of tube bundle. The first part of steam generator test's experimental apparatus has same mass flux with real design. Fluid's temperature inside a helical coil, helical coil's outer wall temperature, fluid's temperature inside a shell and etc. are measured in order to calculate the condensation heat transfer coefficient, and local heat transfer coefficients were also calculated. The each component of major steam loops was designed in detail and it can supply and circulate steam. Cooling water loop which condense the steam was also designed in detail.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		Two phase condensation heat transfer, Two phase boiling heat transfer, Helical tube, PRHRS, Steam generator, Condensation heat exchanger, Heat transfer coefficient, Two phase natural convection boiling			