



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

피동격납건물냉각계통 수직
전열관에서의 응축 열전달계수 측정
및 MARS-KS 코드를 이용한 분석

濟州大學校 大學院

에너지공학과

崔 東 在

2016 年 2 月

	<p> 피동각남건물냉각계통 수직 전열관에서의 응축 열전달계수 측정 및 M A R S - K S 코드 를 이 용 한 분 석 崔 東 在 二 〇 一 六 </p>	
--	--	--

피동격납건물냉각계통 수직
전열관에서의 응축 열전달계수 측정
및 MARS-KS 코드를 이용한 분석

指導教授 李 演 鍵

崔 東 在

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 12 月

崔東在의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 金 南 鎮 ①

委 員 李 演 鍵 ①

委 員 崔 秀 錫 ①

濟州大學校 大學院

2015 年 12 月

Experimental and numerical investigation of condensation heat transfer coefficient on a vertical tube of Passive Containment Cooling System

Dong-Jae Choi
(Supervised by professor Yeon-Gun Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of
Master of Engineering

December 2015

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Yeon-Gun Lee, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....
Nam-Jin Kim, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

.....
Sooseok Choi, Prof. of Nuclear and Energy Engineering

Date 2015. 12.

Department of Nuclear & Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
SUMMARY	vi
I. 서론	1
II. 문헌조사	3
III. JNU 응축 실험	7
1. 실험장치 및 계측	7
2. 실험 조건 및 절차	12
1) 실험 조건	12
2) 실험 절차	13
3. 데이터 처리	14
4. 불확실도 측정	15
IV. 실험 결과	18
1. 응축 액막 가시화	18
2. 공기 질량분율 및 온도 분포	19
3. 압력 및 비응축성 기체 분율에 따른 응축 열전달계수	21
4. 벽면 과냉도 효과	23
5. 기존 상관식 비교 분석	24
V. MARS-KS 코드 분석	30
1. MARS-KS nodalization	30
2. 실험 결과 및 MARS-KS 결과 비교	32
1) 압력 및 비응축성 기체 분율에 따른 응축 열전달계수 비교	32

2) 벽면 과냉도 효과 비교	33
3) 실험결과 및 기존 상관식 비교	33
4) 열속 비교	38
VI. 결론	40
REFERENCE	42
감사의 글	

LIST OF FIGURES

[Fig. 1] Schematic diagram of PCCS	2
[Fig. 2] Experimental facility by Dehbi(1991)	5
[Fig. 3] Experimental facility by Liu(2000)	5
[Fig. 4] Experimental facility by Kawakubo(2009)	6
[Fig. 5] Schematic diagram of the JNU condensation experimental facility	8
[Fig. 6] Steam generator	10
[Fig. 7] Test tank	10
[Fig. 8] Thermocouple installation schematic diagram of test tank	11
[Fig. 9] Condensing tube	11
[Fig. 10] Thermocouple installation schematic diagram of condensing tube	12
[Fig. 11] Experiment flow chart	14
[Fig. 12] The condensation phenomena on condensing tube surface	19
[Fig. 13] Local temperature on the condensing tube at 4 bar, W_a 0.4	20
[Fig. 14] Axial distribution of air mass fraction in test at 4 bar	21
[Fig. 15] Condensation heat transfer rate	22
[Fig. 16] Condensation heat transfer coefficient	23
[Fig. 17] Wall subcooling effect at 2 bar	26
[Fig. 18] Wall subcooling effect at 4 bar	26
[Fig. 19] Comparison of Ex data and existing correlations at 2 bar	27
[Fig. 20] Comparison of Ex data and existing correlations at 3 bar	27
[Fig. 21] Comparison of Ex data and existing correlations at 4 bar	28
[Fig. 22] Comparison of Ex data and existing correlations at 5 bar	28
[Fig. 23] Dehbi's and JNU experimental facility	29
[Fig. 24] Nodalization of test tank	31
[Fig. 25] Condensation heat transfer coefficient from MARS-KS	34
[Fig. 26] Wall subcooling effect predicted by MARS-KS at 2 bar	35

[Fig. 27] Wall subcooling effect predicted by MARS-KS at 4 bar	35
[Fig. 28] Comparison of HTC's from MARS-KS, experiments, and existing correlations at 2 bar	36
[Fig. 29] Comparison of HTC's from MARS-KS, experiments, and existing correlations at 3 bar	36
[Fig. 30] Comparison of HTC's from MARS-KS, experiments, and existing correlations at 4 bar	37
[Fig. 31] Comparison of HTC's from MARS-KS, experiments, and existing correlations at 5 bar	37
[Fig. 32] Heat flux comparison result using MARS-KS at 4 bar, W_a 0.4	39

LIST OF TABLES

<Table 1> Specification of experimental facility in previous studies	6
<Table 2> Test matrix	13
<Table 3> Bias error of measurement instrument	17
<Table 4> Existing correlations for heat transfer coefficient	24

SUMMARY

The importance of the passive safety systems has increased to assure the safety of the nuclear power plant after the Fukushima nuclear power plant accident. Especially, the Passive Containment Cooling System(PCCS) will protect and maintain the structural integrity of the containment by condensing phenomena of the released steam mixed with air. In this study, to investigate the condensation heat transfer in the presence of a noncondensable gas, an experimental study was performed on the single vertical condensing tube with 40 mm in outer diameter, 5 mm is thickness, and 1000 mm in the effective heat transfer length. Experiment were carried out at the pressure ranging from 2 to 5 bar and the noncondensable gas mass fraction ranging from 0.1 to 0.8. Almost isothermal wall conditions are maintained and uniform concentration of gaseous mixture is also kept during the experiments to reduce the effect of noncondensable concentration along the height. The heat transfer coefficients from experiments were compared with existing correlations by Uchida, Tagami and Dehbi's correlations. The comparison results show the considerable derivations of the geometrical effect of the test tank and the lack of the physical grounds in the existing models. The experimental results were applied to assess the condensation model of the Korean thermal-hydraulic system code, MARS-KS. The comparison results reveals that the MARS-KS condensation model needs to be improved for more accurate thermal-hydraulic analysis of the PCCS.

I. 서 론

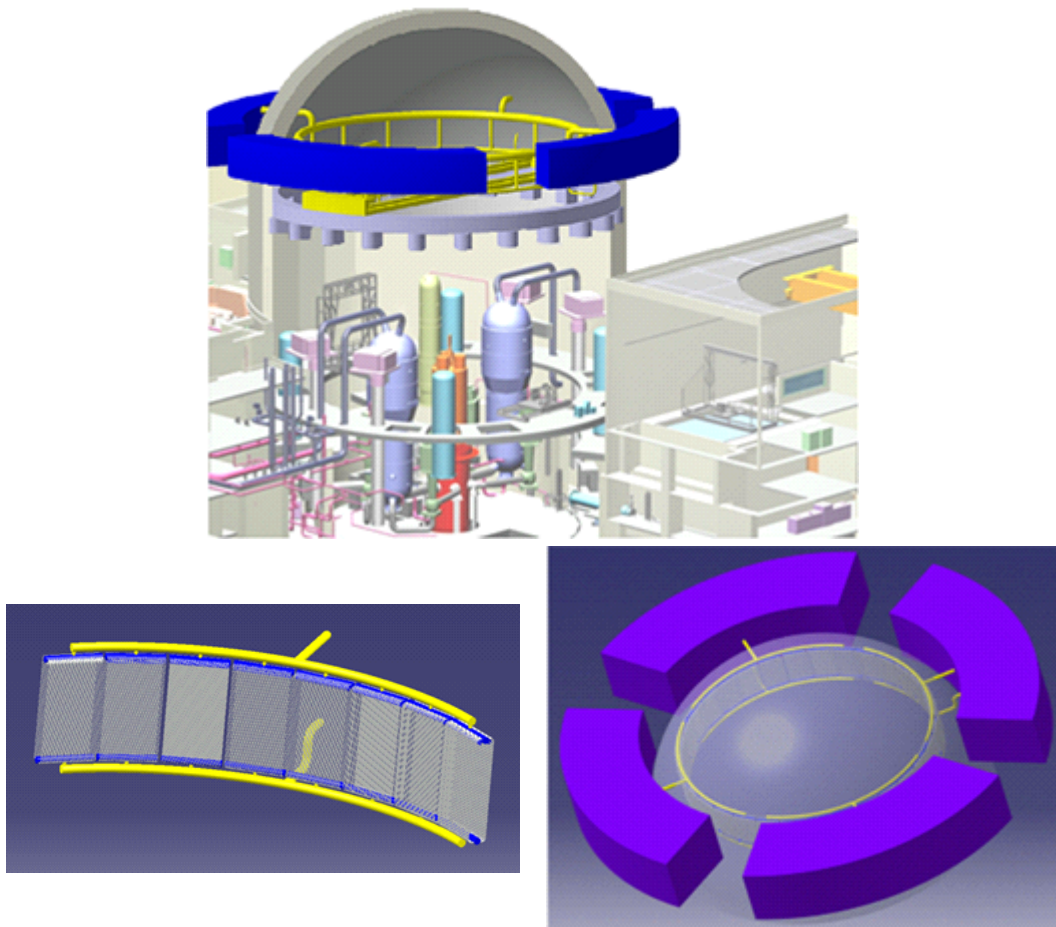
피동격납건물냉각계통(Passive Containment Cooling System, PCCS)은 2011년 일본 후쿠시마 원전사고 이후 많은 관심을 받는 피동안전계통 중 하나로, 냉각재상실 사고나 주증기관파단사고 등의 전력공급이 차단되는 원전 사고 시 원자력 발전소 최후의 방어벽인 격납건물의 내부를 자연적으로 냉각 및 감압시켜 건전성을 유지시켜주는 계통이다.

콘크리트 격납건물을 채택하고 있는 한국형 원전의 PCCS는 그림 1에 보이는 바와 같이 격납건물 내부의 수직 열교환기 다발과 외부의 물탱크로 구성되어 있다. 또한 격납건물 상부에 설치하게 되는데 이는 격납건물 하부 원자로에서 방출된 증기가 격납건물 상부로 상승하는 점을 고려한 것이다. 상승한 증기와 수직 열교환기 외벽간의 열전달 현상을 통해 증기가 응축되어 자연순환 유동이 형성된다. 이때 공기나 수소 같은 비응축성 기체가 증기와 혼합되어 열교환기 주변에 축적되면 증기와 열교환기 사이의 열전달을 방해하여 응축 열전달이 크게 저하된다. 따라서 PCCS 열교환기의 설계와 성능분석을 수행하기 위해서 비응축성 기체 존재 시 수직 열교환기 외벽에서 발생하는 응축 열전달에 대한 실험데이터와 해석모델이 요구된다.

PCCS의 주 현상인 응축 현상에 대한 연구는 이전부터 많이 진행되어 왔다. 그중 비응축성 기체 존재 시 열교환기 외벽 응축 열전달에 대한 연구는 Uchida [1], Tagami [2] 그리고 Dehbi [3]의 연구가 대표적이다. 이들 이외에도 Liu [4], Kawakubo [5] 그리고 Kim [6] 등의 연구자들은 실험연구를 하였고, 응축 열전달 모델들을 제시하였다. 하지만 기존 연구자들의 모델들은 많은 한계점들을 가지고 있다. 특히 시험부 높이에 따른 기체 혼합물의 온도 분포가 고르지 못하고, 벽면 과냉도 효과 및 전열관 직경에 따른 효과를 반영하지 못하는 것이 대표적이다. 이로 인해 이들이 제시한 응축 열전달 모델들은 물리적 현상에 대한 고찰을 충분히 반영하지 못하였다.

본 연구에서는 PCCS를 구성하는 단일 전열관에서 비응축성 기체 존재 시 응축 열전달 성능을 평가하기 위해, 단일 수직 전열관 외벽에서의 증기의 응축 열전달 실험

험을 수행하였다. 외경 40 mm, 길이 1000 mm 인 전열관 외벽에서의 증기-공기 혼합물의 응축 열전달 실험을 수행 하였으며, 압력은 2 ~ 5 bar, 공기의 질량분율 0.1 ~ 0.8의 범위에서 열전달계수 데이터를 수집하였다. 실험을 통해 얻은 응축 열전달 계수와 기존 상관식을 비교하였다. 또한, 1차원 열수력 계통 해석 코드인 MARS-KS를 이용해 실험결과와 비교 하였다. 비교를 통해 MARS-KS내 응축 열전달 모델을 검증하여 응축열전달 해석능력을 향상시키고, 이를 열교환기 번들의 열수력 해석 및 성능평가에 활용할 수 있다.



[Fig. 1] Schematic diagram of PCCS
(김한곤, 획기적 안전성 향상을 위한 신형경수로 기술개발, 2013 KNS)

II. 문헌 조사

앞서 언급한 연구자들의 응축 열전달 연구방법 및 이들이 이용한 실험장치에 대해 소개한다. 이를 통해 이들의 실험장치와 제시한 상관식과 본 연구를 통해 구한 응축 열전달계수가 어떤 차이를 보이는지에 대해 비교할 수 있다.

Uchida는 사각 수직평판에서 공기, 질소, 아르곤 등 비응축성 기체 존재 시 증기의 자연대류 조건에서의 응축 실험을 수행하였다. 실험은 대기압에서 비응축성 기체가 채워진 vessel 내부에 증기를 주입하여 진행하였고 압력은 1 ~ 2.8 bar 범위에 있다.

Tagami는 Uchida와 동일한 장치에서 정상상태 및 과도상태 실험을 수행하였다. 정상상태 실험에서 수직평판에서의 열속, 벽면온도, 기체 혼합물의 온도 등을 측정하였고, 과도상태 실험에서는 시험부로 증기가 공급되는 시점부터 계속하여 과도 시간에 따라 상관식을 제시 하였다.

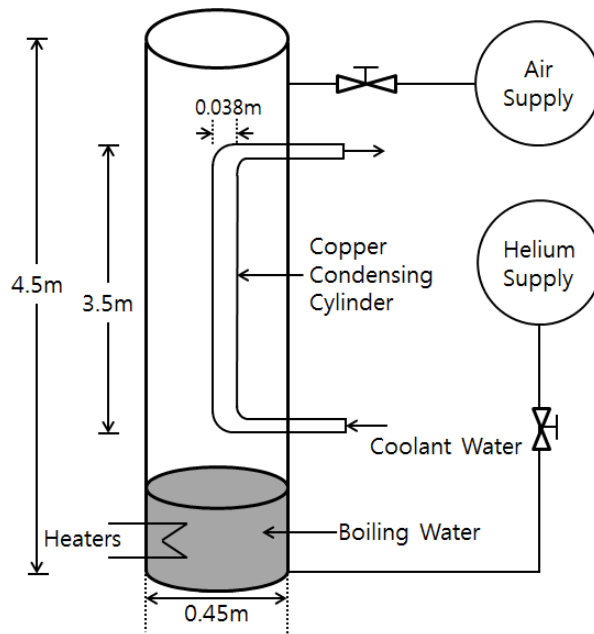
위의 두 연구자가 제안한 응축 열전달 상관식은 오직 비응축성 기체의 질량분율만을 고려하고 있어 압력 상승에 따른 응축 열전달계수 상승효과를 전혀 반영하지 못한다. 이로 인해 보수적인 예측값을 제공한다. 이렇듯 보수적인 예측을 하기 때문에 원전사고 시 격납건물 안전해석에 널리 사용되고 있다.

Dehbi, Liu, Kawakubo의 실험장치는 각각 그림 2 ~ 4에 나타나 있으며, 실험장치의 특징은 표 1에 정리하였다. Dehbi[3]는 수직관 외벽에서의 응축 실험을 수행하였다. 실험 장치는 높이 4500 mm, 직경 450 mm의 원통 내부에 외경 38 mm, 길이 3500 mm의 수직관으로 구성되어 있다. 시험부 하부의 물을 증발시켜 증기와 비응축성 기체의 혼합물을 만들고, 수직관 내부로 냉각수를 흘려주어 수직관 외벽에서 발생하는 응축 열전달에 대한 데이터를 수집하였다. 이 데이터를 기반으로 Uchida, Tagami와 달리 질량분율 뿐만 아니라 수직관의 길이, 압력, 벽면 과냉도를 고려하는 상관식을 제시하였다. 하지만 Dehbi의 실험장치는 직경에 비해 높이가 매우 길어, 증기의 자연대류 속도가 상당히 빠르다. 이는 상관식이 높은 응축 열전달계수를 예측하는 것에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

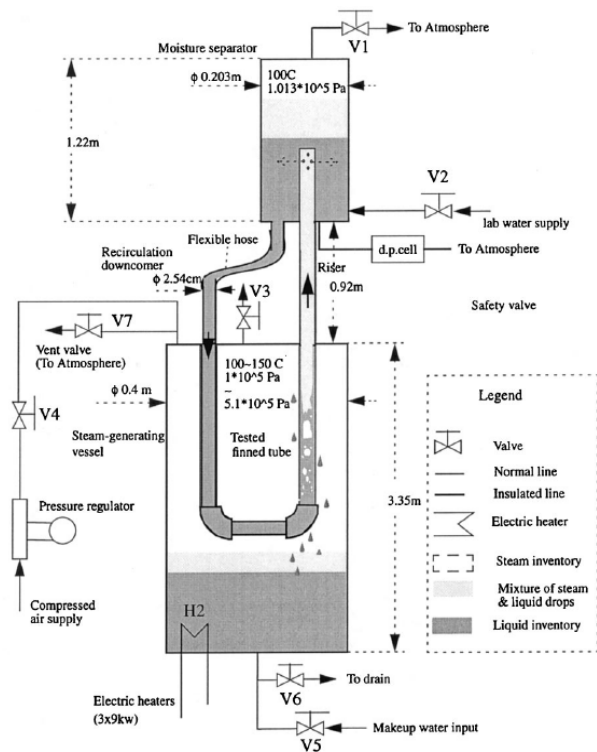
이 외에 Liu는 IEO(Internal Evaporator-Only) 개념의 실험 장치를 구성하여 외경 40 mm, 두께 1 mm, 길이 2000 mm인 전열관 내부의 냉각수를 비등시켜 높이에 따른 벽면온도를 동일하게 하였다. 또한 증기와 비응축성 기체의 성층화 현상에 대해서도 연구를 진행하였다. 실험 시 벽면 과냉도가 매우 작고, 냉각수 유량 측정의 불확실도가 매우 높아 상관식 예측 역시도 이에 의한 영향으로 불확실도가 매우 높을 것으로 추측된다.

Kawakubo의 경우 내경 10 mm, 길이 1 m인 매우 작은 직경의 전열관을 이용해 실험을 수행하였다. 전열관 외벽의 온도를 측정하지 않아, 기체 혼합물의 온도와 냉각수 온도의 LMTD(Logarithmic Mean Temperature Difference)를 이용하여 응축 열전달계수를 계산하였다. 전열관의 외벽 온도를 측정하지 않아 상관식의 예측이 불확실도가 높고, 전열관의 내경이 10 mm로 매우 작아 곡률효과에 의한 영향으로 매우 높은 열전달계수를 예측한다.

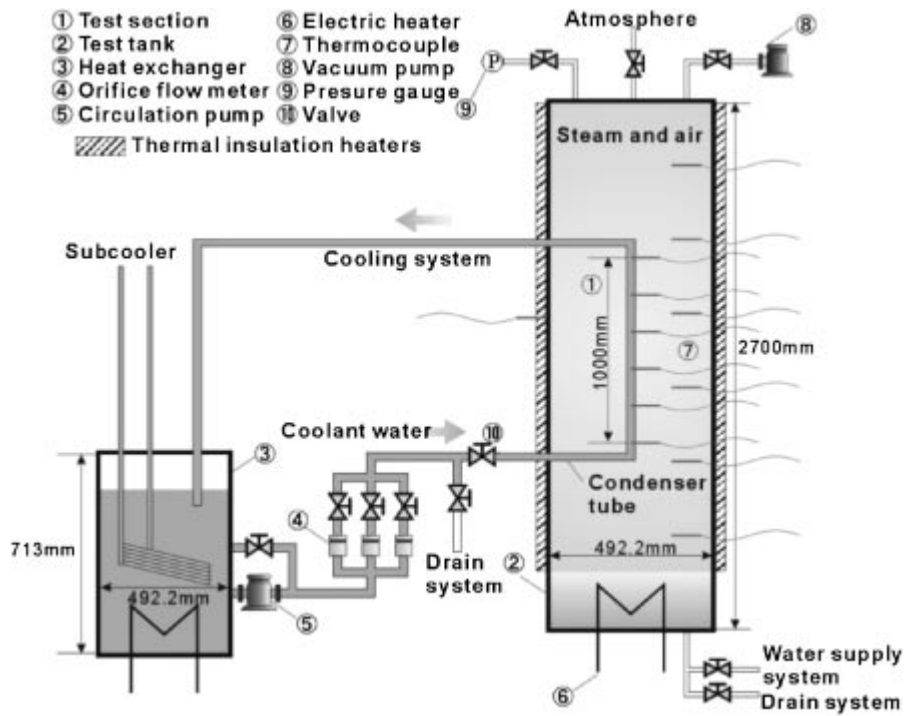
앞서 언급한 연구자들 이외에도 우리나라를 비롯하여 미국, 러시아 등 많은 국가, 많은 연구자들이 PANDA [7], TOSQAN [8] 등과 같은 피동격납건물냉각계통에 대한 실험을 진행하였다. 또한, 자연대류 조건뿐만 아니라 강제대류 조건의 전열관 내·외벽 응축 실험 및 수평 전열관 응축실험에 대해서도 연구가 활발히 진행 되어왔으며 현재에도 진행 중이다.



[Fig. 2] Experimental facility by Dehbi(1991)



[Fig. 3] Experimental facility by Liu(2000)



[Fig. 4] Experimental facility by Kawakubo(2009)

<Table 1> Specification of experimental facility in previous studies

	Dehbi (1991)	Liu (2000)	Kawakubo (2009)
Height of test tank (m)	4.5	3.4	2.7
I.D. of test tank (m)	0.45	0.4	0.5
Design pressure (bar)	-	5.17	5.0
Length of tube (m)	3.5	2.0	2.3
L.D. of tube (m)	0.038	0.04	0.01
Heater capacity (kW)	36	27	12
Measurement of HTC	Measurement of wall temperature	Calculation using steam mass flow rate	Guess from overall HTC and coolant HTC
District feature	Height-to-Diameter very high	Saturated coolant	No wall temperature measured

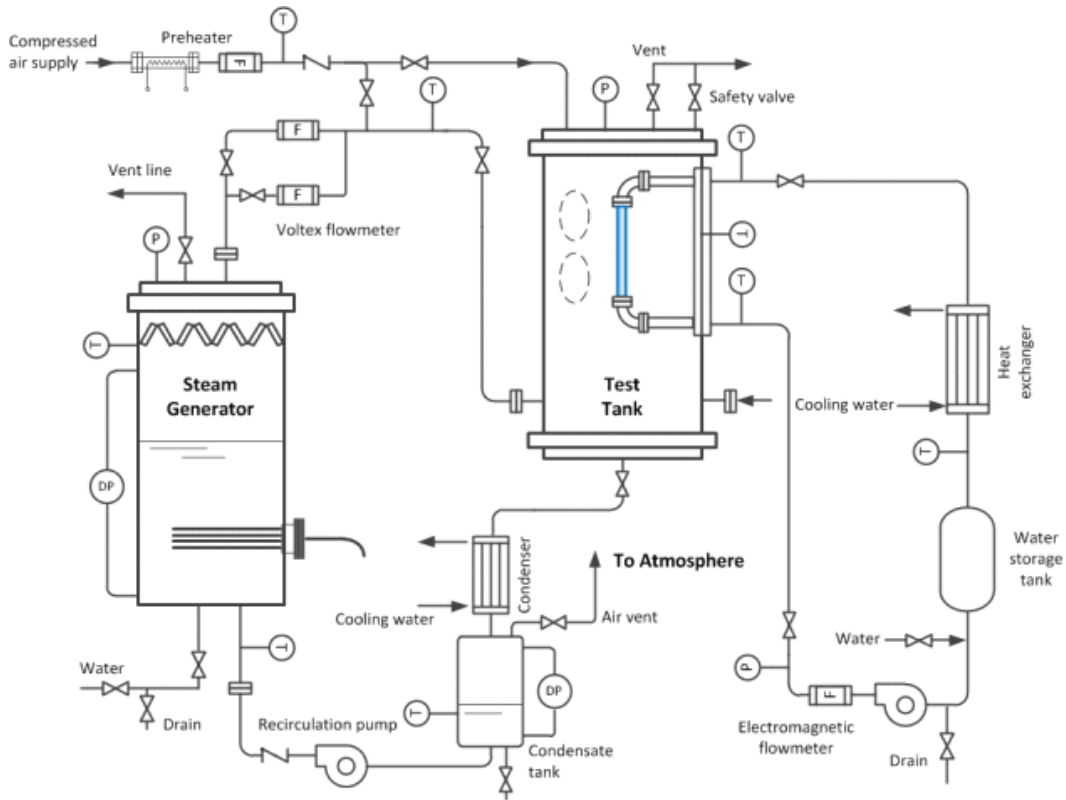
Ⅲ. JNU 응축 실험

앞서 언급한 본 연구의 목적을 달성하기 위하여 기존 연구자들의 한계점을 보완하는 제주대학교 실험장치는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- ▶ 증기와 공기의 성층화를 파악하기 위해 시험부 축 방향 및 반경방향으로 기체 혼합물의 온도를 국부적으로 측정하여 정밀한 증기분율을 측정할 수 있도록 하였다.
- ▶ 기존 연구들에서는 벽면온도를 균일하게 유지하지 않은 상태에서 평균된 온도 값을 이용해 상관식을 도출 하였다. 따라서, 냉각수를 전열관 내부로 고속으로 주입하여 전열관의 축 방향에 따른 벽면온도를 최대한 균일하게 유지할 수 있도록 하였다.
- ▶ 벽면 과냉도의 효과를 파악하기 위해 냉각수의 온도 차 및 유량을 조절하여 벽면온도를 제어하였다.

1. 실험 장치 및 계측

제주대학교에 구축된 응축 열전달 실험장치는 그림 5와 같다. 크게 증기 순환계통과 냉각수 순환계통으로 나뉘며, 주요 기기로는 증기를 발생시켜 증기 순환계통에 공급하는 증기발생기, 응축현상이 발생하는 시험부, 시험부 중앙에 설치되어 응축현상을 발생시키는 전열관이 있다.



[Fig. 5] Schematic diagram of the JNU condensation experiment facility

증기발생기는 직경 800 mm, 높이 1850 mm이며, 하부에 설치된 전열기의 최대 출력은 120 kW(30 kW×4)로 증기발생기 내부의 물을 가열하여 증기를 생산 및 시험부에 공급한다. 그림 6은 증기발생기의 실제사진 및 도면이다. 상부에는 습분분리기가 설치되어 있어 시험부로 공급하는 증기의 습분을 최소화 하였다.

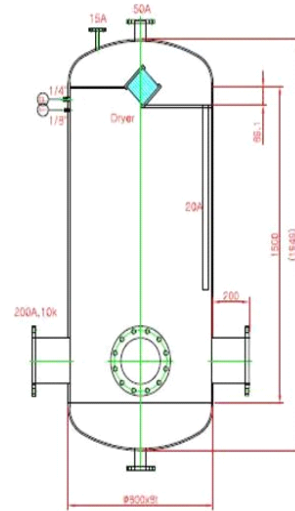
그림 7은 시험부의 실제 모습 및 도면이다. 시험부는 직경 609 mm, 높이 1950 mm의 원통형 용기로, 원전 격납건물을 모의하였다. 증기발생기에서 생성된 증기가 시험부 하부의 두 방향으로 유입되어 보다 균일한 자연대류 조건을 형성한다. 설계 압력은 10 bar이며, 압력이 6 bar에 도달하면 상부에 설치된 안전밸브가 열려 실험 중 사고가 발생하지 않도록 하였다. 또한, 실험 시 시험부 내부에서 발생하는 응축 현상의 가시화를 위해 세 세트의 가시창이 설치되었다. 이는 중앙에 설치된 전열관의 높이에 따른 응축 현상을 가시화하기 위함이다. 시험부의 한쪽 벽면은 내부 전열관의 설치 및 교체가 용이하게 하기위해서 대형 사각 플랜지로 제작 되었다. 그림 8에 나타난 바와 같이 벽면에 다수의 열전대가 설치되어 기체 혼합물의 온도를 시험

부 높이와 반경방향에 따라 측정할 수 있다. 시험부의 반경 90°의 방향으로 두 그룹으로 열전대가 설치되었고, 시험부 높이에 따라서 각 그룹별로 7 개의 열전대가 설치되었다. 이를 통해 기체 혼합물의 높이에 따른 온도를 측정하여 성층화 여부를 판단할 수 있다. 또한 반경 방향으로 두 그룹이기 때문에 보다 확실한 온도분포를 확인할 수 있어 기체 혼합물의 성층화 판단에 높은 신뢰도를 갖는다.

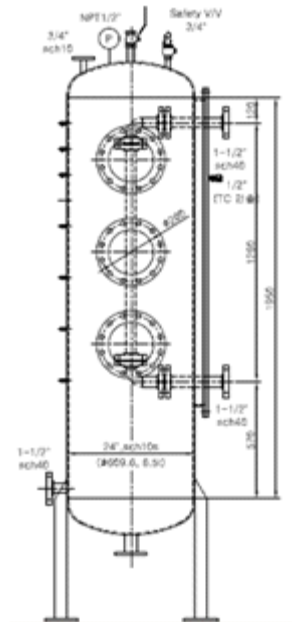
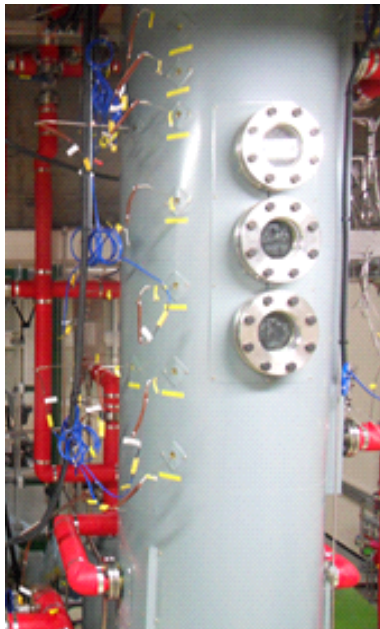
앞서 설명한 증기발생기와 시험부는 증기 순환계통에 속한다. 증기 순환계통과 또 다른 계통인 냉각수 순환계통은 시험부에서 응축현상을 발생시킨다. 냉각수 순환계통은 냉각수 탱크, 냉각수 펌프, 열교환기, 그리고 시험부에서 응축현상을 발생시키는 전열관으로 구성되어있다.

전열관은 그림 9와 같이 외경 40 mm, 두께 5 mm, 유효열전달 길이 1000 mm로, 시험부의 중앙에 위치하도록 설치되었다. 유효열전달 길이 1000 mm이외의 영역은 단열재로 감싸 열전달이 일어나지 않도록 하였다. 전열관에는 외벽 및 내벽의 온도, 냉각수의 온도를 측정하기 위하여 전열관 길이에 따라 각각 6 개의 열전대가 설치되었다. 설치 방법 및 설치 위치는 그림 10에 나타내었다. 외벽과 내벽 온도 측정용 열전대는 같은 위치에서의 설치 깊이를 각각 1.0, 4.5 mm로 달리하여 설치되었다. 이를 통해 국부적인 열속을 측정할 수 있다. 또한, 냉각수의 온도를 측정하기 위한 열전대는 전열관 벽면을 관통하여 내부 정중앙에 위치하도록 설치되었다. 냉각수의 온도 변화를 보기 위하여 전열관의 냉각수 입구 및 출구, 높이에 따라 총 6 개의 열전대를 설치하였다. 또한, 냉각수가 전열관을 따라 흐르면서 관 반경방향에 따라 온도 구배가 발생하기 때문에 출구에 mixing plate를 설치하여 이곳을 거쳐간 냉각수의 온도를 열전대(Tc M-1,2)로 측정하였다.

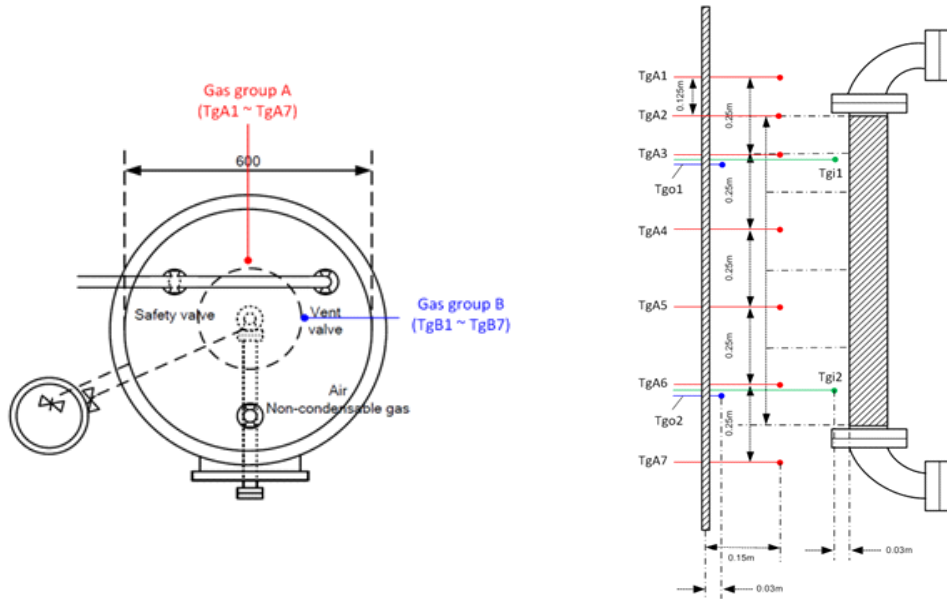
냉각수 탱크는 전열관 내부를 흐르는 냉각수를 저장하는 탱크이고 냉각수 펌프를 통해 탱크에 저장된 냉각수를 전열관으로 공급한다. 냉각수의 유량은 이 냉각수 펌프로 조절한다. 열교환기는 열전달을 통해 온도가 상승한 냉각수의 온도를 낮춰 냉각수의 온도를 조절할 수 있다.



[Fig. 6] Steam generator



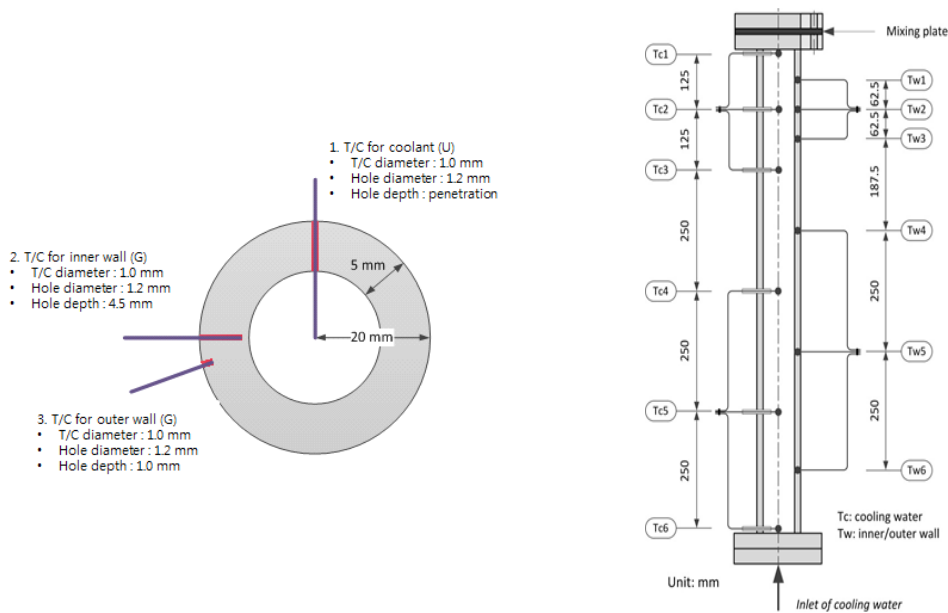
[Fig. 7] Test tank



[Fig. 8] Thermocouple installation schematic diagram of test tank



[Fig. 9] Condensing tube



[Fig. 10] Thermocouple installation schematic diagram of condensing tube

2. 실험 조건 및 절차

1) 실험 조건

표 2는 실험 매트릭스이다. 원전 격납건물의 설계압력은 4 bar이다. 따라서 사고 시 원자로부터 방출된 증기로 가압이 되는 조건인 2, 3, 4 bar와 안전해석에 있어 보수적인 관점에서 120 %정도의 여유를 가질 수 있게 5 bar까지 실험을 진행하였다. 비응축성 기체로는 공기를 사용하였으며, 공기의 질량분율은 0.1 ~ 0.8로 하였다. 실험은 크게 3 개의 카테고리로 분류하였으며, 각각 주요변수의 영향을 보기 위하여 다른 변수들은 거의 일정하게 고정하였다.

<Table 2> Test matrix

Objective	Pressure (bar)	Wall subcooling (K)	Air mass fraction	Number of data
Effect of noncondensable gas and pressure	2	40	0.1 ~ 0.8	8
	3			8
	4			8
	5			8
Wall subcooling effect	2	19 ~ 58	0.61	5
	4	23 ~ 51	0.34	5
Various data	2	19 ~ 47	0.3 ~ 0.8	8
	3	31 ~ 59	0.3 ~ 0.7	10
	4	37 ~ 70	0.2 ~ 0.9	11

우선, 비응축성 기체의 분율과 압력에 따른 응축 열전달계수를 측정하기 위해 압력은 2 ~ 5 bar, 이때의 비응축성 기체인 공기의 질량분율은 0.1 ~ 0.8로 정하였다. 또한 두 변수의 영향을 확인하기 위해 또 다른 변수인 벽면 과냉도는 약 40 K으로 고정시켰다. 벽면 과냉도 영향을 확인하기 위한 실험은 압력 2 bar와 4 bar에서 공기가 1 bar 존재할 때, 기체 혼합물의 온도와 벽면온도 차를 약 19 ~ 58 K으로 달리하여 측정하였다. 마지막으로 추후 기존 상관식들의 한계점들을 보완하는 새로운 형태의 실험 상관식을 제안하기 위해 압력 2 ~ 4 bar에서 공기의 질량분율을 다양한 범위로 설정하여 실험을 진행하였다.

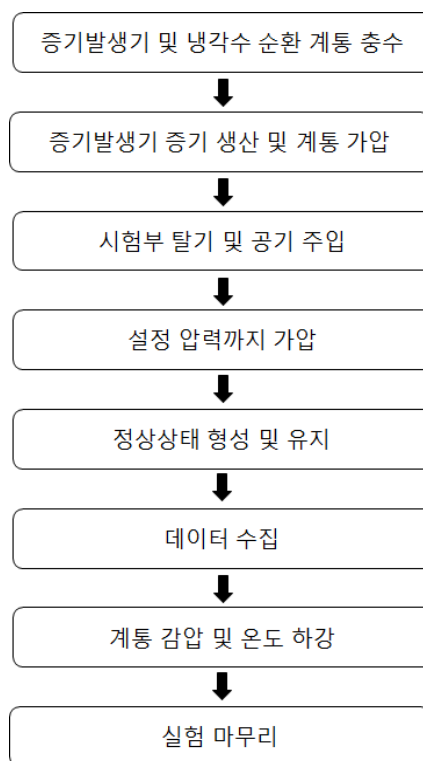
2) 실험 절차

응축 열전달 실험은 정상상태에서의 균일한 기체혼합물 및 벽면온도 조건을 형성하고 이때 측정한 온도를 이용하여 응축 열전달계수를 측정한다. 따라서 다음의 실험절차를 따른다. 또한 그림 11로 실험 절차를 간단하게 순서도로 도식화하였다.

- ① 증기발생기 내부 및 냉각수 계통을 충수한다. 또한 각 계통의 압력계 도관에도 충수한다.
- ② 증기발생기의 전열기를 이용하여 내부의 물을 가열, 증기를 발생시킨다.
- ③ 계통 전체의 압력이 대기압보다 높아지면 시험부의 배기 밸브를 열어 내부의

공기를 방출시킨다.

- ④ 순수증기로 채워진 시험부에 공기를 주입 후 설정 압력까지 가압한다.
- ⑤ 설정 압력에 도달하면 전열기의 출력 및 냉각수의 유량을 조절하여 정상상태 조건을 형성한다.
- ⑥ 정상상태에서의 데이터를 수집한다.
- ⑦ 데이터 수집이 끝나면 계통 전체 배기 밸브를 열어 감압하고 온도가 충분히 감소하면 실험을 마무리 한다.



[Fig. 11] Procedure of the experiment

3. 데이터 처리

실험을 통해 얻은 실험 데이터를 이용하여 데이터 처리과정을 거쳐 응축 열전달

계수를 구하였다. 응축 열전달계수 계산에는 뉴턴의 냉각법칙과 냉각수의 열제거율을 이용하였다.

뉴턴의 냉각법칙은 다음과 같다.

$$q = hA(T_b - T_w) \quad (1)$$

여기서 A 는 전열관의 면적, T_b 는 기체 혼합물의 온도, T_w 는 전열관의 외벽온도이다. 이때 냉각수가 흘러가면서 얻은 열은 식 (2)와 같다.

$$q = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (2)$$

여기서 \dot{m} 은 냉각수의 질량 유량, c_p 는 정압 비열, $(T_o - T_i)$ 는 냉각수의 입·출구 온도차이다. 식 (1)의 증기가 전열관 외벽으로 가한 열과 식 (2)의 냉각수가 흘러가면서 얻은 열이 같다고 가정하면

$$hA(T_b - T_w) = \dot{m}c_p(T_o - T_i) \quad (3)$$

식 (3)을 얻을 수 있다. 따라서 구하고자 하는 열전달계수는 식 (4)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A(T_b - T_w)} \quad (4)$$

4. 불확실도 분석

불확실도 분석은 수행된 실험의 불확실도 혹은 신뢰도를 평가하여 제시하기 위한 것이다. 전체 오차는 계측기 자체 오차인 bias error와 매 측정 시 발생하는 측정 오차인 precision error로 구성된다.

$$U = \sqrt{B^2 + P^2} \quad (5)$$

여기서 U 는 전체 오차를 의미하고, B 는 bias error, P 는 precision error를 의미한다. Precision error는 다음의 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$P = t \times \frac{S_x}{\sqrt{N}} \quad (6)$$

여기서, t 는 신뢰도, N 은 데이터의 개수, S_x 는 실험데이터 표본 집단의 표준편차를 의미한다.

응축 열전달계수의 불확실도는 실험에서 사용한 계측기의 bias error와 실험 시 발생하는 계측기의 precision error를 계산하여 구할 수 있다. 식 (4)에서 계측기를 통하여 측정하는 변수는 온도와 냉각수의 질량유량이다. 따라서 응축 열전달계수의 불확실도를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$U_h^2 = \left[\left(\frac{\partial h}{\partial m} U_m \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \Delta T_c} U_{\Delta T_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial h}{\partial \Delta T_b} U_{\Delta T_b} \right)^2 \right] \quad (7)$$

여기서 ΔT_c 는 냉각수의 입·출구의 온도차 이고, ΔT_b 는 벽면 과냉도이다. 이 두 온도 변화는 다시 $(U_{\Delta T_c})^2 = (U_{T_o})^2 + (U_{T_i})^2$ 그리고 $(U_{\Delta T_b})^2 = (U_{T_b})^2 + (U_{T_w})^2$ 로 나타낼 수 있다. 위 식을 간단하게 식 (8)의 형태로 나타낼 수 있다. 계측기들의 bias error

는 표 3에 요약하였다.

$$\left(\frac{U_h}{h}\right)^2 = \left(\frac{U_m}{\dot{m}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T_c}}{\Delta T_c}\right)^2 + \left(\frac{U_{\Delta T_b}}{\Delta T_b}\right)^2 \quad (8)$$

<Table 3> Bias error of measurement instruments

Parameter	Measurement instrument	Bias error
Coolant temperature	Thermocouple (K-type)	0.2 °C
Wall temperature	Thermocouple (K-type)	1.1 °C
Coolant flow rate	Electrical flow meter	0.1 % of span
Test tank	Pressure transmitter	0.075 % of span

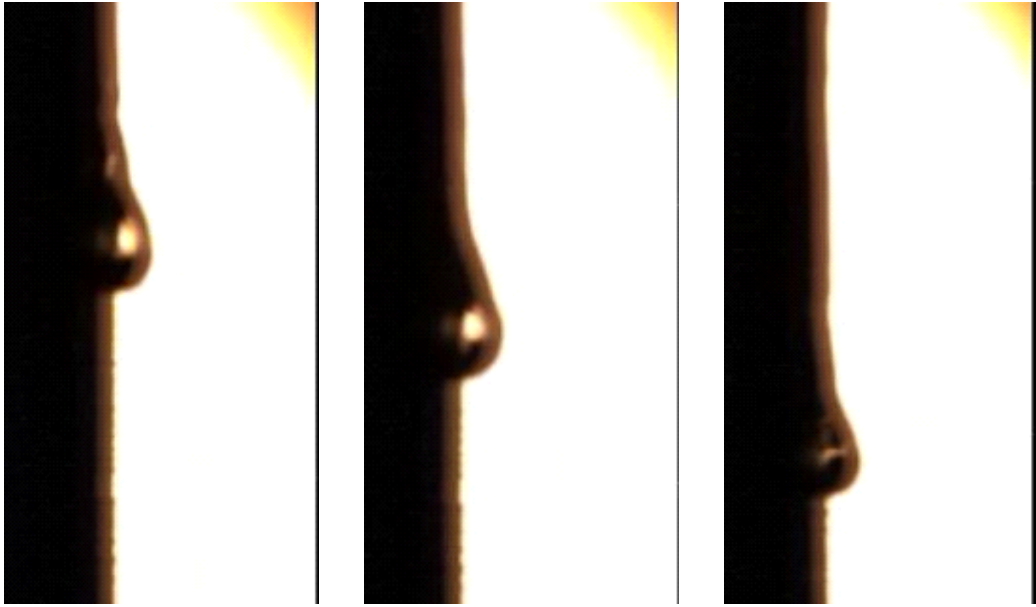
표 3의 bias error와 매 실험마다 얻은 precision error를 이용하여 계측기 각각의 오차를 식 (8)에 대입하면 응축 열전달계수의 전체 오차를 구할 수 있다. 이와 같은 방법을 통해 얻은 응축 열전달계수의 오차는 평균 ±14 %이다.

IV. 실험 결과

1. 응축 액막 가시화

응축이란 기체의 온도가 포화온도 이하로 감소하여 액체로 상변화 하는 것을 뜻한다. 응축에도 차가운 표면 응축, homogeneous 응축, 직접접촉 응축 등 방법에 따라 여러 종류가 있다. 그 중 본 연구는 증기의 온도에 비해 차가운 전열관 표면에서의 응축으로, 차가운 표면 응축에 속한다. 기체는 차가운 물체의 표면에서 잠열을 방출, 물체 표면으로 전달하고 응축수의 형태로 상변화가 일어난다. 이 응축수는 액막 또는 액적 형태로 물체의 표면에 쌓이게 된다. 액막이나 액적 형태로 쌓인 응축수는 기체와 물체 표면에서의 응축을 방해하는 열저항이 된다 [9].

본 연구에서는 응축이 발생할 때 시험부의 가시창을 통하여 전열관 표면에서의 응축현상을 가시화 하였다. 그림 12는 전열관 표면에서의 응축현상을 고속 카메라를 이용하여 촬영한 모습이다. 이는 전열관 외벽에서 액막이 형성되는 기존의 이론적인 모델과는 확연히 다른 모습이다. 기존의 이론 모델에서는 증기의 응축으로 발생한 액막이 전열관을 전체적으로 덮고 있는 모습을 띈다. 하지만 사진을 보면 전열관 주변이 전체적인 막으로 덮여있는 것이 아니라 큰 액적의 물줄기가 흐르는 것을 볼 수 있다. 이 물줄기는 지속적으로 흐르지 않고 축적되어 많은 양의 응축수가 한꺼번에 전열관 표면을 따라 흘러내린다. 또한 물줄기는 일정하지도 않고 대칭적이지도 않다. 물줄기가 전열관 표면을 타고 흐르면서 주변 응축수 및 증기를 쓸고 지나가기 때문에 벽면온도에 요동이 발생하는 것으로 판단된다.



[Fig. 12] The condensation phenomena on condensing tube surface

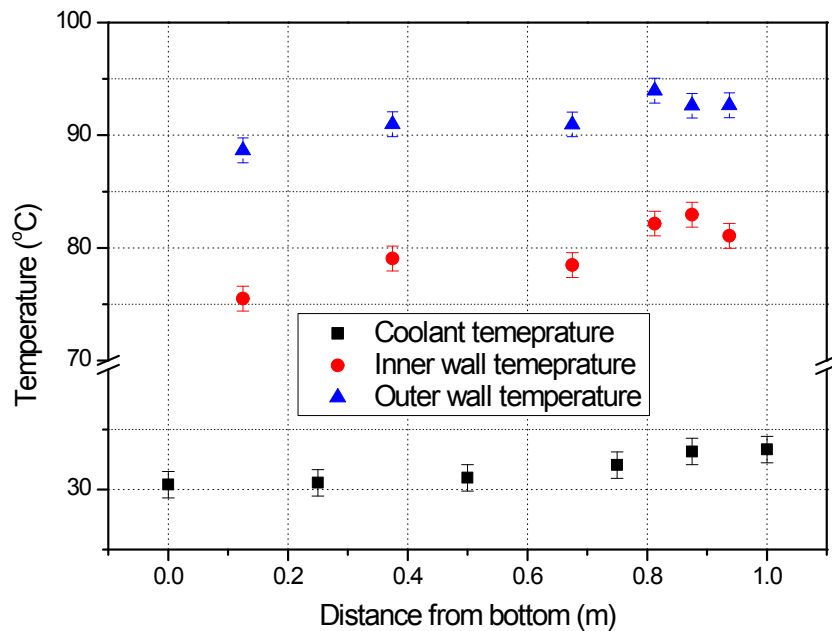
2. 공기 질량분율 및 온도 분포 측정

본 실험을 수행하면서 전열관의 국부적인 온도분포, 공기의 질량분율을 측정하였다. 전열관의 국부 온도분포를 측정함으로써, 균일한 벽면온도 형성 여부를 파악할 수 있다. 또한 시험부 높이에 따른 공기의 질량분율을 측정하여 성층화 여부 및 기체 혼합물의 분포를 확인할 수 있다. 측정은 4 bar 실험 중 수행하였으며, 온도분포 및 공기의 질량분율 분포는 각각 그림 13과 그림 14에 나타냈다.

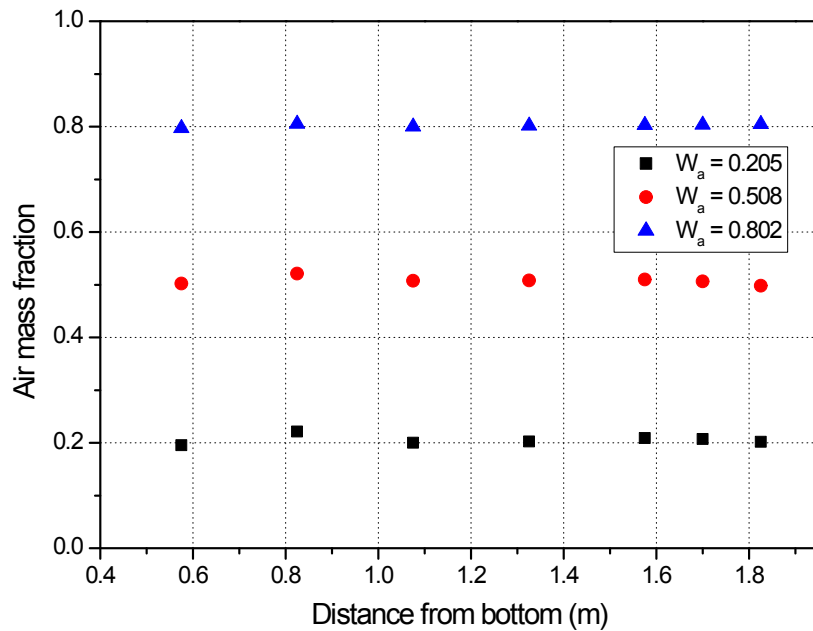
온도분포의 경우 4 bar, 공기 질량분율 0.4의 실험을 기준으로 삼았다. 이는 실제 격납건물 내 공기가 1 bar 존재하고, 원전 사고 시 격납건물의 설계압력이 4 bar이기 때문이다. 이때의 질량분율은 약 0.35이다. 전열관 벽면온도 및 냉각수 온도를 측정한 결과, 전열관 높이에 따른 벽면온도에서 약간의 변동이 발생하였다. 이때의 최고온도와 최저온도의 차는 약 5.3 K으로 나타났다. 실험 전체의 평균 온도차가 약 5 K이고, 측정에 사용된 열전대의 기기오차가 1.1 K인 점을 고려해보면 벽면온도의 차이가 크지 않기 때문에 전열관 벽면의 온도는 잘 제어 되었다고 판단된다. 하지만

전열관에 열전대를 설치함에 있어 정확한 깊이에 설치가 안됐거나 용접과정 중 발생한 오차로 인하여 전열관 높이에 따른 온도차이가 발생한 것으로 판단하였다. 냉각수의 온도는 전열관 내부를 흘러감에 따라 상승하는 것을 볼 수 있다.

공기의 질량분율 분포는 4 bar에서 공기 질량분율 0.2, 0.5, 0.8의 실험 결과이다. 시험부의 높이에 따라 측정한 온도를 바탕으로 질량분율을 계산하였으며, 이 세 가지 경우 모두 높이에 상관없이 고른 분포를 보이는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 실험 진행 시 증기와 공기가 잘 섞여 성층화 현상이 발생하지 않았고, 어느 한쪽으로 편향되지 않고 시험부 전체에 고루 분포하는 것을 확인 하였다. 이는 시험부 하부에 증기가 유입되는 관이 서로 마주보는 방향으로 설치되어 시험부에 고르게 증기를 유입 시켜 주었고, 시험부로 유입된 증기가 시험부 상부로 자연 순환이 잘 되었다는 것을 보여준다.



[Fig. 13] Local temperature on the condensing tube at 4 bar, W_a 0.4



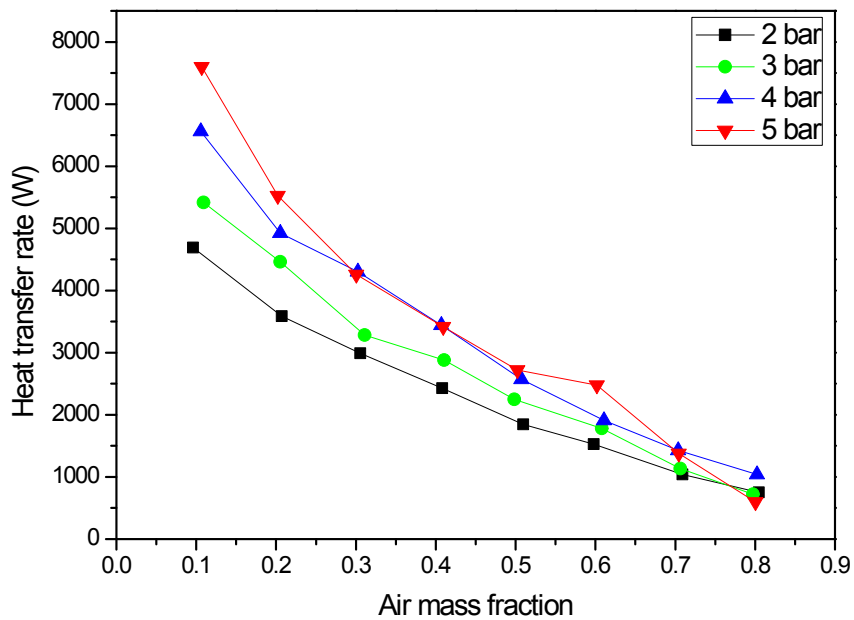
[Fig. 14] Axial distribution of air mass fraction in tests at 4 bar

3. 압력 및 비응축성 기체 분율에 따른 응축 열전달계수 측정

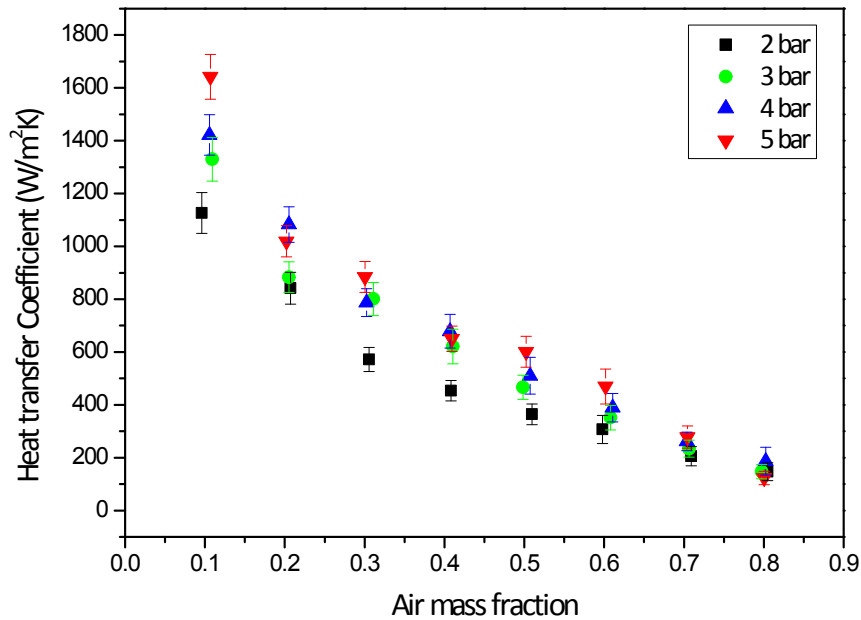
수행한 응축 실험 결과를 이용하여 압력과 비응축성 기체의 질량분율에 따른 응축 열전달계수를 측정하였다. 이를 통해 압력과 비응축성 기체의 질량분율이 응축 열전달계수에 어떠한 영향을 미치는지, 또한 이 두 변수가 왜 중요한 변수인지를 확인할 수 있다. 실험은 표 1에 나타난 조건으로 수행하였다. 각 압력에서 비응축성 기체로 사용한 공기의 질량분율을 증가시키면서 실험을 수행하였고, 이때 벽면 과냉도는 약 $40\text{ K}(\pm 4\text{ K})$ 으로 고정시켰다. 그림 15와 16은 각 압력에서의 공기의 질량분율에 따른 응축 열전달율과 응축 열전달계수를 나타낸 것이다. 두 그래프를 통해 열전달율과 열전달계수는 압력이 커짐에 따라 증가하고, 공기의 질량분율이 높아짐에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 제한된 시험부 공간에서 압력의 증가는 증기 밀도의 증가를 의미한다. 그렇게 되면 온도가 낮은 전열관 벽면과 기체 혼합물 사이에서

발생하는 밀도차가 커지게 된다. 밀도차로 인해 기체 혼합물에서 전열관 벽면으로 가는 증기의 유량이 증가하고 이로 인해 응축 열전달율 및 응축 열전달계수가 증가하게 된다.

반면, 전열관 주변에서 응축현상이 발생할 때 증기는 응축되어 소멸된다. 이와 반대로 공기는 응축현상과 상관없이 전열관 주변에 축적되기 때문에 전열관과 증기의 응축현상을 방해하는 열저항으로 작용하게 된다. 때문에 공기 존재 시 응축 열전달율과 응축 열전달계수는 크게 저하된다. 또한, 공기의 질량분율이 높아질수록 더 저하되는 것을 볼 수 있다. 이 결과들로 하여 압력과 공기의 질량분율이 응축 열전달율과 응축 열전달계수에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 이러한 경향성은 Dehbi의 결과에서도 확인 할 수 있다.



[Fig. 15] Condensation heat transfer rate



[Fig. 16] Condensation heat transfer coefficient

4. 벽면 과냉도 효과

벽면 과냉도는 앞서 언급한 바와 같이 기체 혼합물과 전열관 외벽의 온도차이다. 실험은 2와 4 bar에서 공기가 1 bar 존재 시 온도차를 달리하여 수행하였다. 앞서 언급한 이유와 같이 실제 격납건물 내부에는 1 bar의 공기가 존재하기 때문이다. 이때의 질량분율은 압력별로 각각 약 0.61, 0.35이다.

동일한 조건 하에서 벽면 과냉도의 주요인자는 전열관의 벽면온도이다. 기체 혼합물의 온도는 공기의 질량분율에 의해 고정되어 있기 때문에 벽면온도가 낮아지면 벽면 과냉도가 커지고, 벽면온도가 높아지면 반대의 경우가 된다. Rosa [10]에 의하면 벽면온도가 낮으면 액막이 매우 얇기 때문에 액막의 계면온도가 벽면온도와 같아지고, 계면의 온도가 낮으면 증기의 포화온도가 계면온도를 따라 낮아진다. 따라서 계면에서 증기의 포화온도가 낮기 때문에 증기의 분압도 함께 낮아진다. 그렇기

때문에 계면에 축적된 비응축성 기체의 분압은 상대적으로 기체혼합물과 벽면의 온도차가 작을 때보다 클 때 높아지게 된다. 따라서 전열관 주변에 증기보다 비응축성 기체가 많아지기 때문에 벽면 과냉도가 커질수록 응축 열전달계수는 작아진다. 이는 그림 17과 18을 통해 응축 열전달계수의 확연한 변화를 관찰할 수 있다. 또한, 벽면 과냉도가 낮을 때 감소량 보다 클 때의 감소량이 더 큰 것을 알 수 있다. Anderson [11]은 실험을 통해 벽면 과냉도 영향에 따른 경향성을 나타내었고, Dehbi [12]는 이론적으로 벽면 과냉도 영향에 대한 경향성을 분석하였다. 이 연구자들의 실험결과 및 이론적 풀이에 의하면 본 연구의 실험결과와 유사한 경향성을 보이고 있다. 실험 결과 중 전체적인 경향성에서 벗어나는 결과들을 확인할 수 있다. 이는 현재 실험적인 오차라 판단하고 있고 이를 확인하기 위해 추후 반복 실험을 진행할 계획이다.

5. 기존 상관식 비교 분석

많은 연구자들이 응축 열전달 실험을 통해 본인의 응축 열전달 상관식을 제시하였다. 그 중 현재에도 원전 격납건물 안전해석에서 가장 널리 사용되는 Uchida와 Tagami의 상관식 그리고 응축 열전달계수 비교에 있어 대표적으로 쓰이는 Dehbi의 상관식과 비교를 하였다. 이들이 제시한 상관식은 표 4에 나타났다.

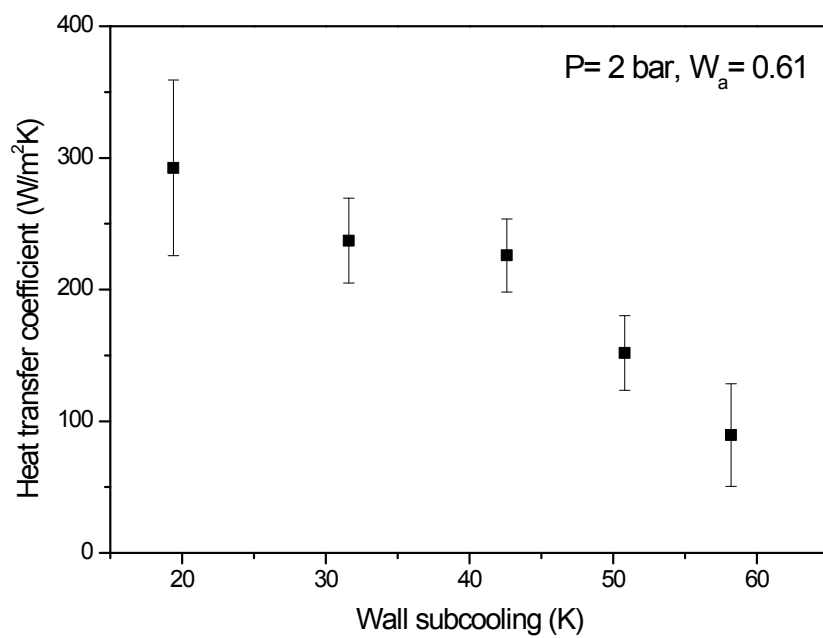
<Table 4> Existing correlations for heat transfer coefficient

Author	correlation
Uchida	$h_U = 379 \left(\frac{W}{1-W} \right)^{-0.707}$
Tagami	$h_T = 11.4 + 284 \left(\frac{1-W}{W} \right)$
Dehbi	$h_D = 1.25 \frac{L^{0.05}(3.7 + 28.7P) - (2438 + 458.3P)\log(W)}{(T_\infty - T_w)^{0.25}}$

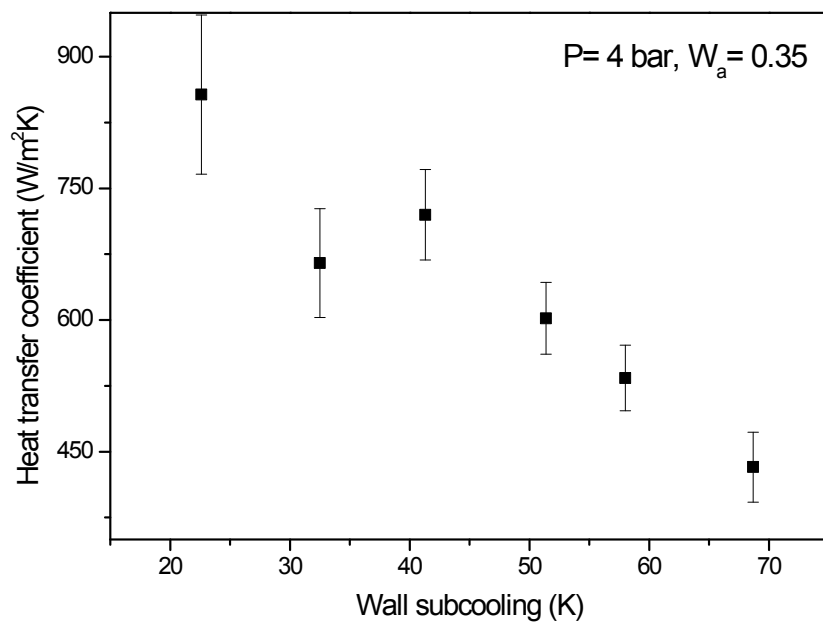
그림 19 ~ 22는 각각의 압력에서 응축 실험을 통해 얻은 응축 열전달계수와 기존 상관식인 Uchida, Tagami, Dehbi의 상관식과 비교한 결과를 보여준다. Uchida와 Tagami의 상관식은 오직 비응축성 기체의 질량분율에만 의존하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 이들의 상관식은 압력에 의한 효과를 전혀 반영하지 못하기 때문에 원전 격납건물 안전해석에 있어 보수적으로 사용되고 있다. 반면 본 응축 실험을 통해 얻은 응축 열전달계수는 압력에 따라 상승한다. 비교 결과를 보면 2 bar에서는 실험결과와 Uchida의 상관식 예측이 거의 비슷하거나 실험결과가 낮은 반면, 압력이 증가할수록 실험결과의 증가에 따라 더 커지게 되는 것을 볼 수 있다.

Dehbi의 경우, 비응축성 기체의 질량분율뿐만 아니라 전열관의 길이, 압력, 벽면 과냉도의 여러 변수들을 고려하였다. 하지만 그림 23에서 볼 수 있듯이 Dehbi의 시험부는 직경과 높이가 각각 450 mm와 4500 mm로 609 mm와 1950 mm의 직경과 높이를 갖는 제주대학교 시험부에 비해 좁고 훨씬 길다. 시험부가 좁고 길기 때문에 시험부 하부에서 생성된 증기가 빠른 속도로 상승, 강한 자연대류 조건을 형성할 수 있다. 증기의 속도가 빨라지면 기체 혼합물로부터 계면으로의 증기 확산이 증가한다. 이로 인해 낮은 속도에 비하여 계면에서의 증기 분압과 온도가 상승하고, 열전달이 더 활발히 발생한다. 따라서 증기의 속도가 빠르면 응축 열전달계수는 증가한다 [13]. 이 때문에 일반적으로 강제대류 조건에서의 응축 열전달계수가 자연대류 조건에서의 응축 열전달계수보다 높게 나타난다. 하지만 한국형 원전에 채택된 PCCS는 자연대류 조건에서의 응축현상을 이용하기 때문에 비록 강제대류 조건에서의 열전달계수가 높다고 하여도 조건이 맞지 않는다. 전열관 역시 직경과 높이가 각각 38 mm와 3500 mm로 40 mm와 1000 mm인 제주대학교의 전열관에 비하여 훨씬 길다. 이로 인하여 전열관 벽면온도가 균일하지 못하였다.

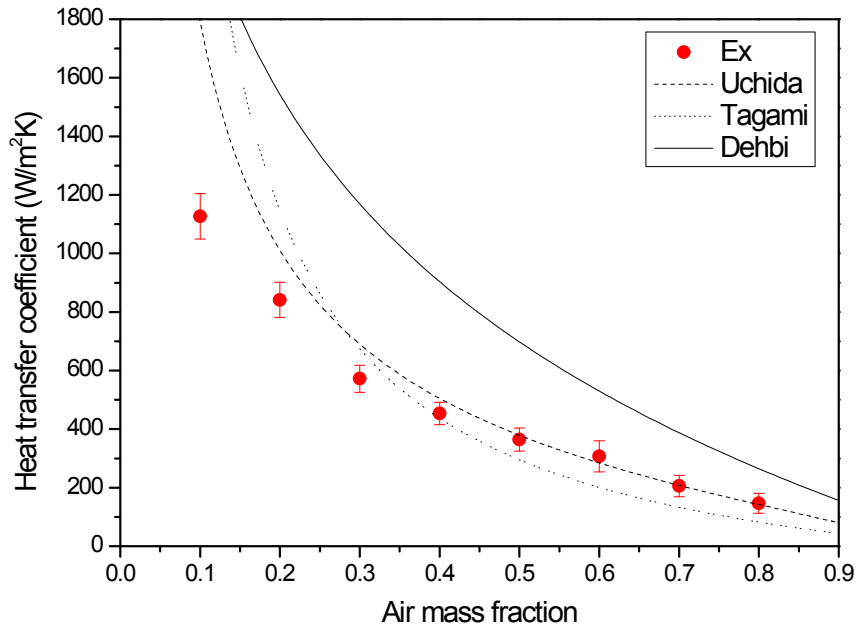
Dehbi의 실험과 제주대학교의 응축실험은 동일한 기체혼합물 조건의 실험이지만 실험장치에 의해 결과는 매우 다르게 나타났다. 이는 매우 중요한 결과로써, 응축 열전달계수가 실험조건 뿐만 아니라 실험장치의 기하학적 형상이 결정하는 자연순환 유동에도 영향을 받는다는 사실도 알 수 있다.



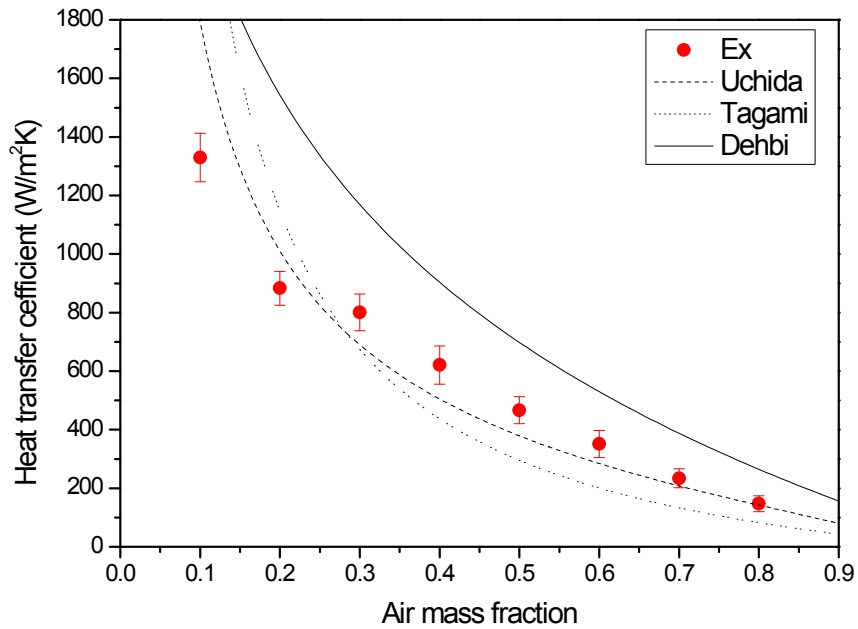
[Fig. 17] Wall subcooling effect at 2 bar



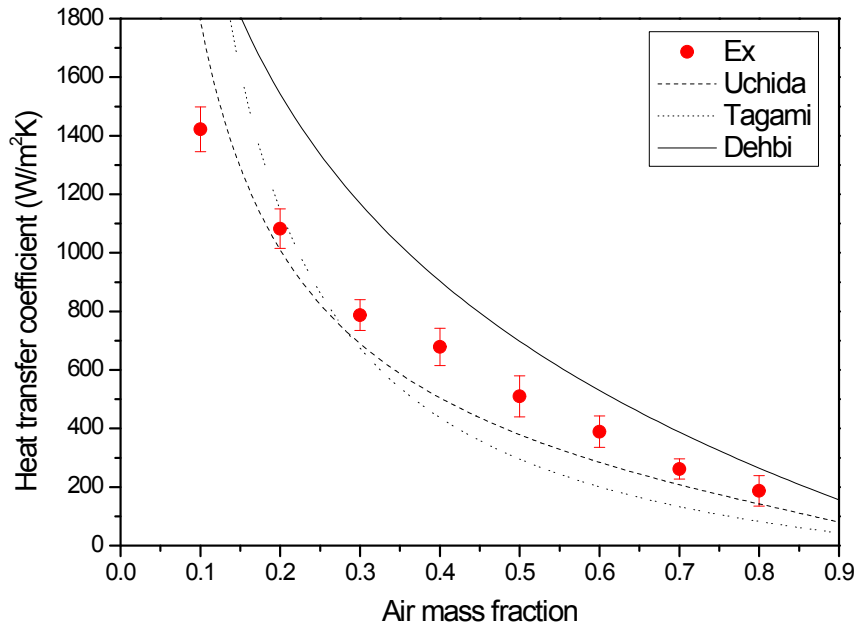
[Fig. 18] Wall subcooling effect at 4 bar



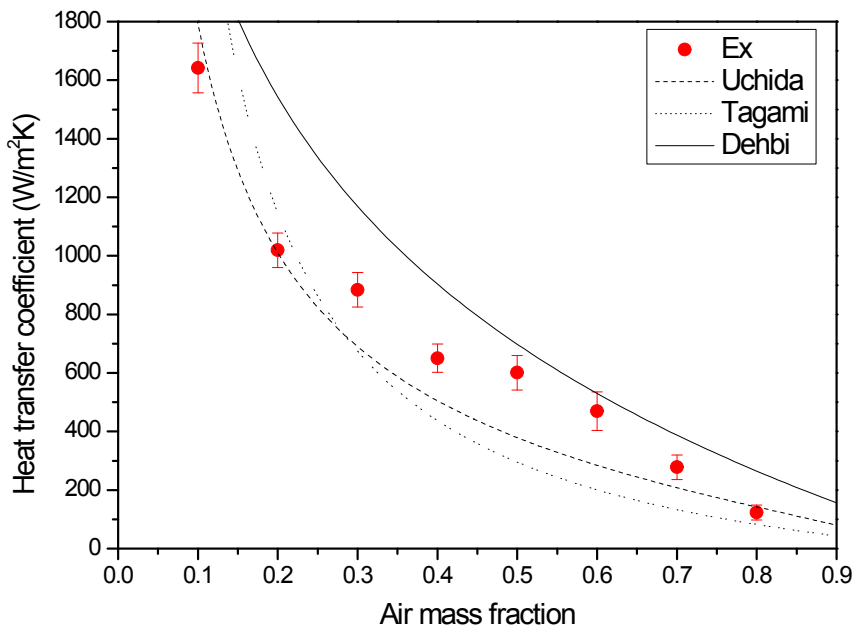
[Fig. 19] Comparison of Ex data and existing correlations at 2 bar



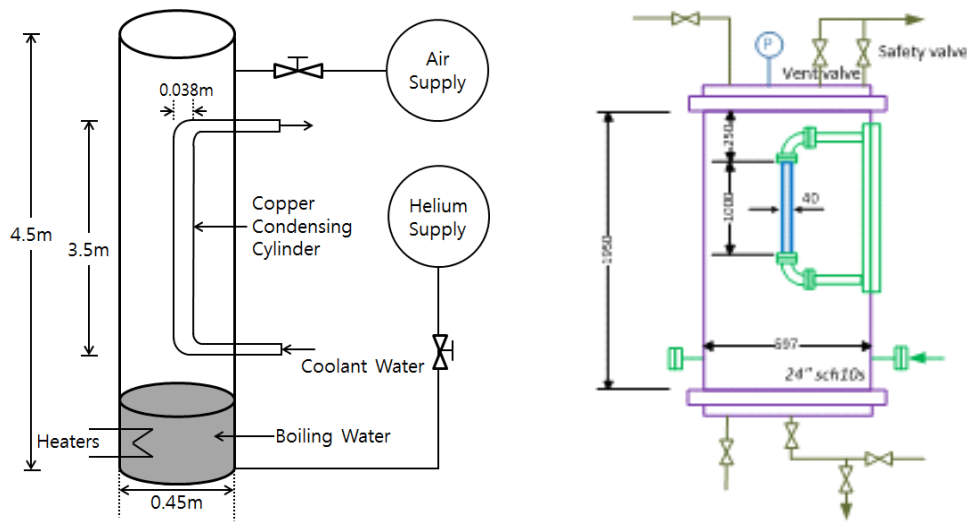
[Fig. 20] Comparison of Ex data and existing correlations at 3 bar



[Fig. 21] Comparison of Ex data and existing correlations at 4 bar



[Fig. 22] Comparison of Ex data and existing correlations at 5 bar



[Fig. 23] Dehbi's and JNU experimental facility

본 실험결과와 비교한 Uchida, Tagami, Dehbi 이 외에도 Liu, Kawakubo, Kim의 실험이 있다. Liu의 실험은 IEO 개념의 실험으로 냉각수를 비등시켜 벽면온도를 일정하게 유지시키는 방법의 실험을 하였다. Liu는 냉각수 유량 및 열전달율을 실험장치 상부의 물탱크의 수위 변화를 이용하여 계산하였다. 또한, 냉각수를 비등시켰기 때문에 벽면 과냉도가 작아 제시한 응축 열전달 상관식의 예측은 상당히 큰 결과를 갖는다. Kawakubo는 전열관의 직경이 10 mm로 매우 작은 실험장치에서 벽면온도를 측정하지 않고 실험을 수행 하였으며, 실험을 통해 얻은 데이터를 LMTD 방법을 이용하여 응축 열전달계수를 얻었다. 즉, 실험 장치의 형상과 그가 제시한 응축 열전달 상관식의 예측 방법의 차이가 있다. 이에 따른 오차가 크게 발생하였다. Kim은 REX-10(Regional Energy Reactor of 10 MW_{th})에 대한 실험을 진행하였다. 실험 압력범위는 4 ~ 20 bar로 매우 광범위하고 높은 압력에서 실험을 진행하였으며 비응축성 기체로 질소를 사용하였다. 실험 시 발생한 응축수를 따로 모아 축적된 응축수를 이용하여 열전달율을 계산하였다. 또한, 냉각수를 상향유동이 아닌 하향유동으로 하여 실험을 진행하였다. 이와 같이 이 세연구자들의 실험개념 및 실험방법이 본 연구와 차이를 보여 실험결과로 얻은 응축 열전달계수를 비교하기 위한 참고로 사용하지는 않았다.

V. MARS-KS 코드 분석

실험을 통해 구한 응축 열전달계수를 토대로 국내 원전 안전해석에 가장 널리 활용되는 MARS-KS[14]의 응축 열전달모델 예측을 검증하였다.

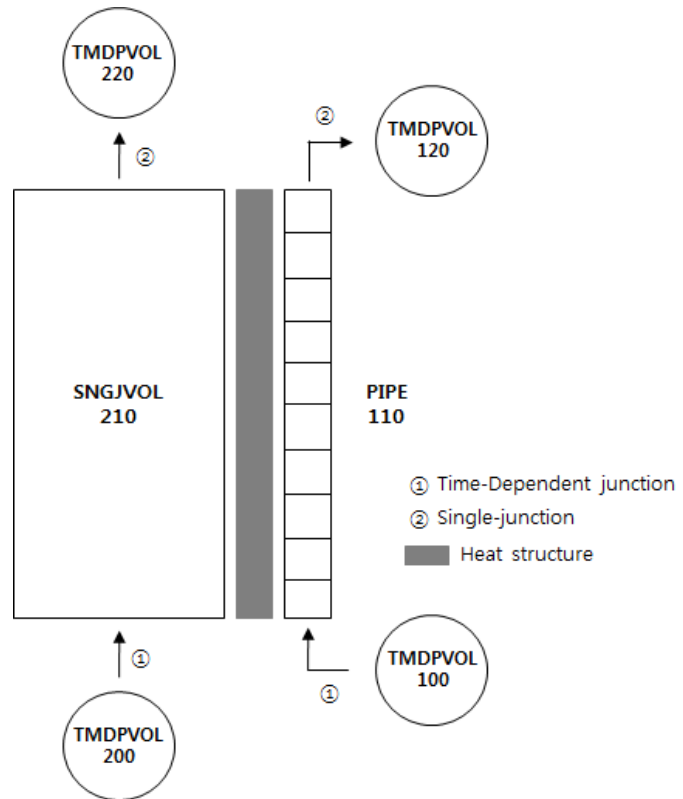
MARS(Multi-dimensional Analysis of Reactor Safety)-KS는 1차원을 기반으로 하는 RELAP5/MOD3.2 코드와 3차원을 기반으로 하는 COBRA-TF 코드를 토대로 다양한 열수력 모델들을 통합하여 국내에서 개발한 코드이다. 그렇기 때문에 코드에 내포된 모델들도 상당부분 동일하다. 이를 이용하여 제주대학교에 구축된 단일 수직 전열관 응축 열전달 실험 장치를 모의하고 계산된 결과 값을 기존 상관식 및 실험 결과와 비교하였다.

1. MARS-KS Nodalization

구축된 실험장치 중 응축현상이 발생하는 시험부를 그림 24와 같이 nodalization 하였다. 냉각수가 공급되는 냉각수 순환 계통은 TMDPVOL(Time-dependent volume)와 PIPE를 이용하여 모의하였다. 전열관(PIPE) 입구에 연결된 TDPVOL을 통해 냉각수의 유량 조건을 설정하였고, 출구에 연결된 TMDPVOL을 통해 냉각수 순환 계통의 압력 조건을 부여하였다. 전열관을 모의하는 PIPE 200은 유효 열전달 영역(1000 mm)을 10개의 노드로 구성하였다.

증기와 공기 기체 혼합물이 존재하는 시험부는 하나의 큰 단일체적인 SINGLVOL(Single-volume)으로 모의하였다. PIPE를 이용하여 축 방향으로의 기체 분포를 계산할 수도 있으나, 실험에서는 기체 혼합물의 분포를 균일하게 조성하였으므로 전체 응축열전달 영역에서 균일한 조건을 적용하기 위해 하나의 체적을 사용하였다. 전열관과 마찬가지로 입구와 출구에 TMDPVOL을 연결하였다. 입구의 TMDPVOL을 통해 증기-공기 혼합물의 조건을 설정하였고, 출구의 TMDPVOL을

통해 시험부 내부의 압력을 일정하게 유지하도록 하였다. PIPE와 SNGLVOL을 연결하는 열구조물(Heat Structure)을 이용하여 기체 혼합물과 냉각수 사이의 열전달이 발생한다.



[Fig. 24] Nodalization of test tank

MARS-KS는 비응축성 기체 존재 시 응축열전달의 해석에 Colburn-Hougen [15] 모델을 사용하고 있다. 이 모델에서 응축열전달에 의한 열속은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{q}'' = h_m h_{fgb} \frac{\rho_{vb}}{x_{vb}} \ln \left(\frac{1 - \frac{P_{vi}}{P}}{1 - \frac{P_{vb}}{P}} \right) \quad (10)$$

위 식에서 h_m , h_{fgb} , ρ_{vb} , x_{vb} , P_{vi} , P_{vb} 는 각각 물질전달계수, 기체혼합물 bulk의 잠열, 포화증기 밀도, 포화증기량, 액막-기체 경계면에서의 증기 분압, bulk 영역에서의 증기 분압을 의미한다. 이 모델은 diffusion layer에서 경계면으로의 sensible heat transfer는 무시할 수 있으며, 부력 효과에 의한 성층화는 무시할 수 있다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 물질전달계수는 heat and mass analogy를 기반으로 계산하며, 층류 및 난류 강제대류 상관식과 자연대류 상관식에 의해 예측된 값들 중 최대값을 적용한다.

위의 식을 통해 얻은 열속과 식 (11)을 이용하여 응축 열전달계수를 구하였다. 이는 식 (4)와 유사한 형태로, 이를 통해 실험과 MARS-KS의 응축 열전달계수 및 열속의 차이를 비교할 수 있다.

$$h = \left(\frac{\dot{q}''}{T_b - T_w} \right) \quad (11)$$

2. 실험결과 및 MARS-KS 결과 비교

MARS-KS 결과와 실험결과 및 기존 상관식을 비교하였다. 표 1에 명시한 압력과 비응축성 기체의 영향과 벽면 과냉도 효과 실험에 대해서 모의 하였다. 본 해석에서는 기체 혼합물의 온도 및 벽면온도는 실험과 동일하게 적용한 반면, 기체 혼합물의 속도, 냉각수의 유량 및 온도를 실험조건으로 코드 계산 시 정상상태를 유지하지 못하였기 때문에 실험조건과는 다르게 적용하였다. 이를 통해 냉각수의 온도는 실험과 차이를 보이지만 전체 압력, 기체혼합물의 온도 및 전열관의 벽면온도가 정상상태를 유지하고, 냉각수의 입·출구 온도차 및 벽면 과냉도를 실험조건과 동일하게 조성하였다.

1) 압력 및 비응축성 기체 분율에 따른 응축 열전달계수 비교

MARS-KS의 예측과 실험결과를 비교하기에 앞서 MARS-KS의 예측은 비응축성

기체의 질량분율과 압력에 따라 어떠한 영향을 받는지에 대해 계산해보았다. 계산결과 MARS-KS의 예측값도 실험결과와 마찬가지로 압력에 따라 증가하고, 비응축성 기체의 분율에 따라 감소하는 것을 그림 25에서 확인할 수 있다. 압력이 증가하면 증기의 밀도가 증가한다. 증기의 밀도는 Colburn-Hougen의 모델에 변수로 포함되어 있기 때문에 증기의 밀도가 증가하면 응축 열전달계수도 증가한다. 또한 비응축성 기체 존재 시 액막-기체 경계면 주변에 비응축성 기체가 축적되면서 큰 열저항으로 작용하여 응축 열전달이 감소한다.

2) 벽면 과냉도 효과 비교

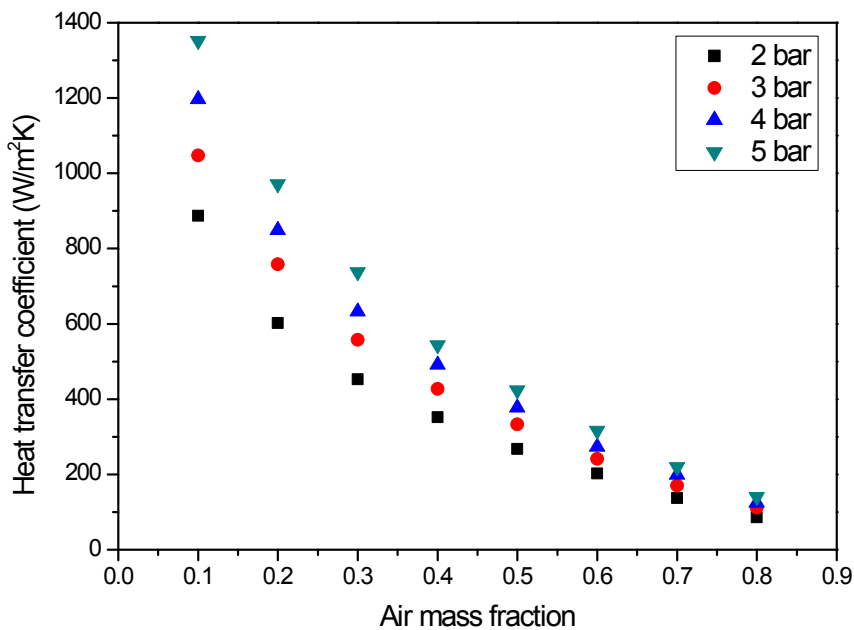
실험을 통해 얻은 벽면 과냉도 효과와 MARS-KS를 이용해 얻은 예측값의 비교 결과를 그림 26과 27에서 보여주고 있다. 그림을 보면 MARS-KS의 예측값도 실험결과와 마찬가지로 벽면 과냉도의 영향을 받는 것으로 나타났다. 하지만 경향성의 차이가 발생하였다. 그 차이는 그림 27의 결과에서 확실하게 나타난다. 실험결과는 벽면 과냉도가 증가함에 따라 위로 볼록하게 감소하는 그래프인 반면, MARS-KS 예측값은 아래로 볼록하게 감소하는 형태의 경향성을 보이고 있다. 벽면 과냉도는 결국 전열관 주변에서의 비응축성 기체에 의해 영향을 받을 것이다. 따라서 시험부 내의 전체적인 비응축성 기체의 분율은 변하지 않더라도 전열관 주변 액막의 계면에서는 비응축성 기체의 질량분율이 상대적으로 증기의 분압보다 높아진다. 이 때문에 비응축성 기체의 질량분율에 따른 응축 열전달계수의 경향성을 보인다고 예측한다. 하지만 이와는 반대로 Anderson과 Dehbi는 실험결과 및 이론적 풀이로 벽면 과냉도 영향의 경향성을 분석하였다. 아직 어느 경향성이 정확히 맞는지에 대해서는 확실하게 결론지어진 바가 없기 때문에 두 상반되는 경향성에 대해서 추가 연구가 필요하다. 실험결과와 MARS-KS 예측의 상대 오차는 2, 4 bar에서 각각 11.3 %, 25.8 %이다.

3) 실험결과 및 기존 상관식 비교

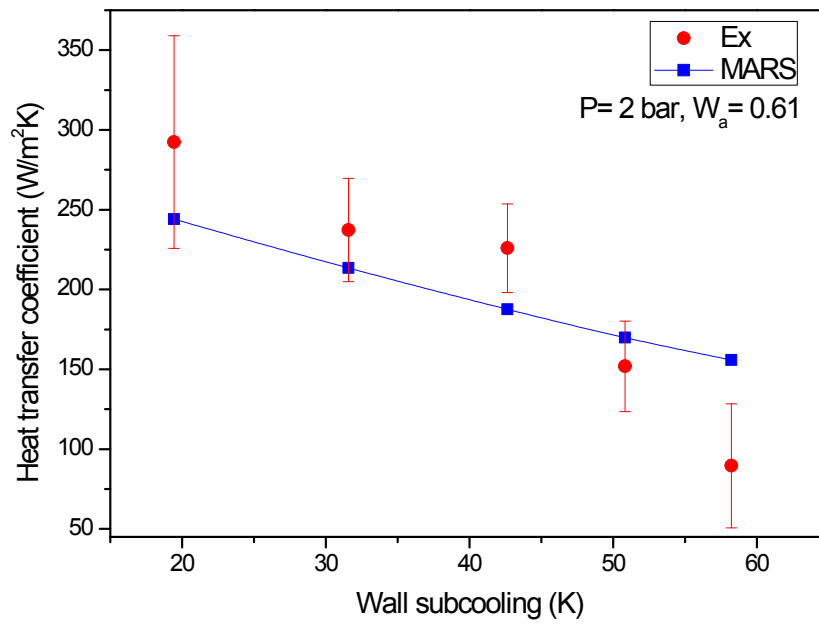
MARS-KS 예측값과 실험결과를 비교해 보았다. 그림 28 ~ 31에서 보이듯이 전체적으로 실험결과에 비해 작게 예측한다. 실험결과와의 응축 열전달계수 예측 상대 오차는 각각의 압력에서 약 28.6 %, 26.0 %, 24.7 %, 19.1 %의 차이로 압력이 증가

함에 따라 오차가 감소하는 것을 알 수 있다. 전체 평균 오차는 약 24.6 %이다. 이를 통해 MARS-KS가 실험결과에 비해 보수적인 결과를 예측하는 것을 확인 할 수 있다.

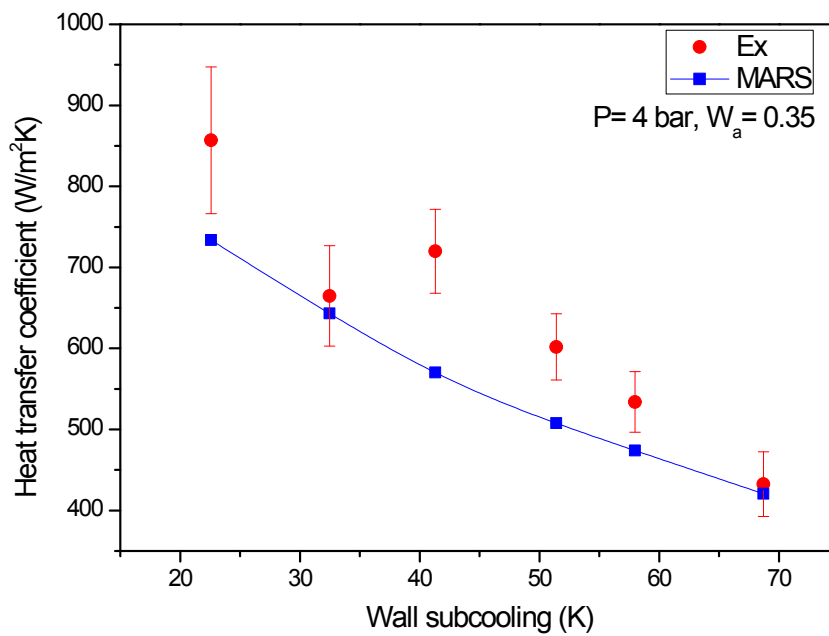
기존 상관식들과의 비교 역시 실험결과 비교와 유사하게 MARS-KS의 예측값이 더 낮게 예측한다. 특히 Dehbi의 상관식과 비교 시 오차가 매우 크게 발생하였다. Uchida의 상관식은 보수적인 결과를 갖는다. 때문에 Uchida의 상관식은 압력 상승에 따른 열전달계수 증가 영향을 전혀 반영하지 못함에도 불구하고 MARS-KS의 예측값은 5 bar의 압력이 되어야만 Uchida의 상관식과 유사한 결과를 보인다. 본 해석결과로부터 비응축성 기체 존재 시 수직 전열관 외벽 응축현상에 대한 신뢰성 있는 해석 결과를 제공하기 위해서는 예측 모델의 개선이 필요하다.



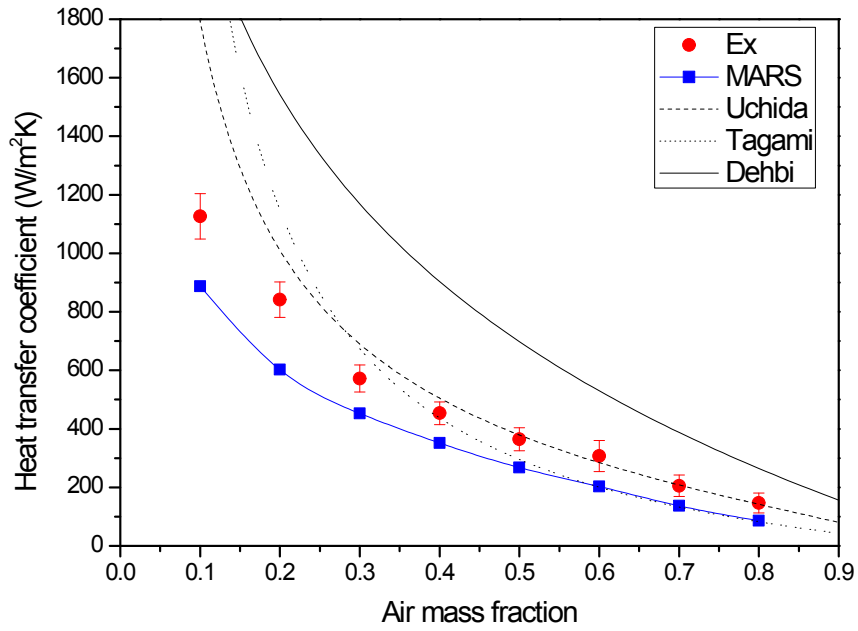
[Fig. 25] Condensation heat transfer coefficient from MARS-KS



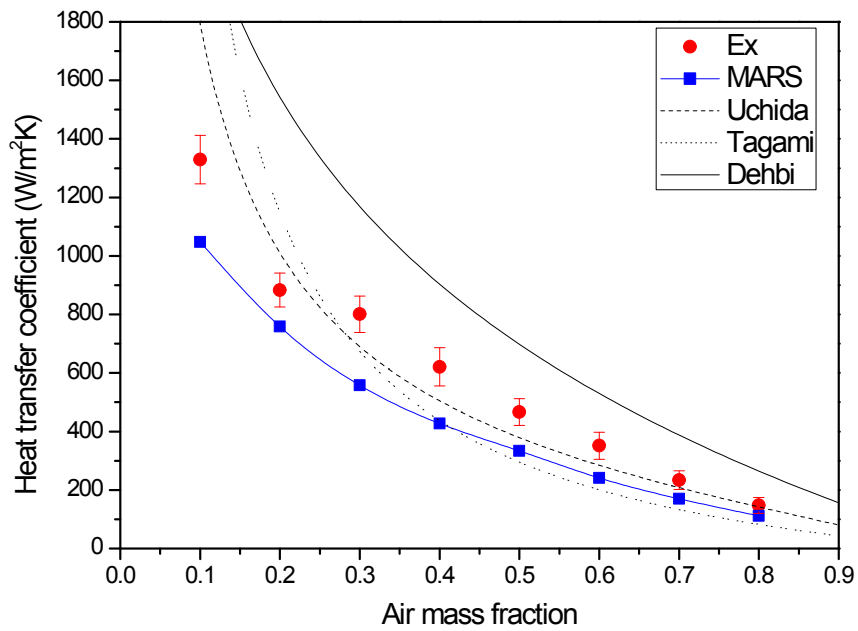
[Fig. 26] Wall subcooling effect predicted by MARS-KS at 2 bar



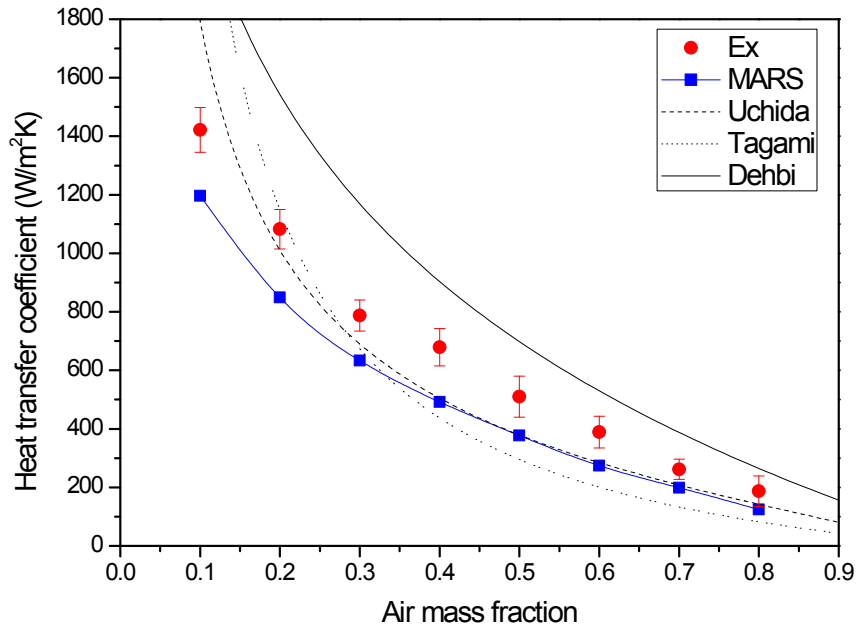
[Fig. 27] Wall subcooling effect predicted by MARS-KS at 4 bar



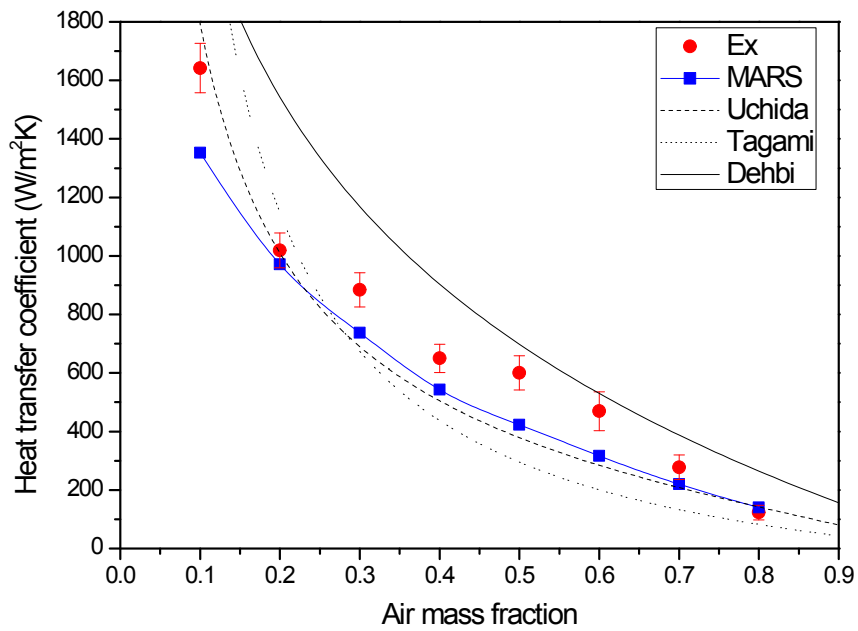
[Fig. 28] Comparison of HTC's from MARS-KS, experiments, and existing correlations at 2 bar



[Fig. 29] Comparison of HTC's from MARS-KS, experiments, and existing correlations at 3 bar



[Fig. 30] Comparison of HTC's from MARS-KS, experiments, and existing correlations at 4 bar



[Fig. 31] Comparison of HTC's from MARS-KS, experiments, and existing correlations at 5 bar

4) 열속 비교

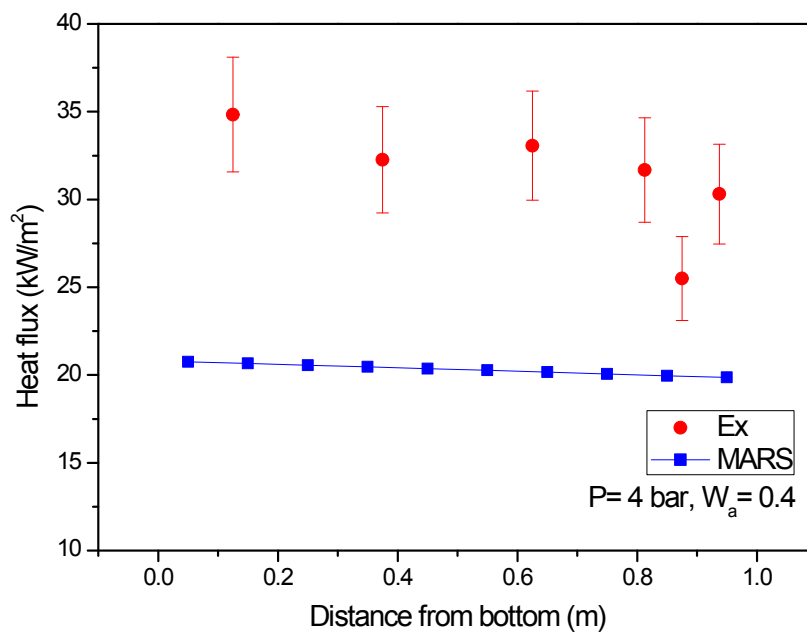
코드에서는 열전달계수 뿐만 아니라 열속의 예측도 상당히 중요하다. 전열관 국부적으로 열전달이 얼마나 발생하고 높이에 따라 발생하는 차이는 어느 정도인지 중요하기 때문이다. 또한 열속과 냉각수 에너지 밸런스 법칙의 상대오차가 작을수록 응축 열전달계수의 신뢰성이 증가한다. 그렇기 때문에 실제 격납건물의 최대 압력 4 bar, 공기의 질량분율 0.4일 때의 실험을 대표로 삼아 전열관 높이에 따른 열속을 그림 32에 나타내었다. 그림을 보면 실험결과와 MARS-KS의 예측 둘 다 냉각수가 전열관 내부를 흐르면서 온도가 변하기 때문에 전열관의 높이에 따라 열속이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 하지만 실험의 불확실도를 고려하면 높이에 따라 상관 없이 국부 열속은 거의 일정하다. 실험결과에서는 경향성을 이탈하는 값이 존재한다. 이는 전열관에 열전대가 설치될 때 정확한 위치에 설치되지 못하였거나, 용접과정에서 발생한 오차로 인해 벽면온도 및 열전달에 오차가 발생한 것으로 판단된다. MARS-KS 예측은 선형적으로 조금씩 감소한다. 하지만 보수적인 예측을 하기 때문에 실험결과가 전체 평균 약 35 %정도 높은 것으로 나타났다. 전체 평균은 각 지점 별로 비교를 한 것이 아닌 전열관 길이에 따른 총 열유속 합에 대한 평균으로 나타낸 것이다.

RELAP5 나 MARS-KS를 이용하여 응축 실험에 대한 모의는 이전 연구에서도 많이 찾아볼 수 있다. 증기가 전열관 내부로 흐르고 외부로 냉각수가 흘러 열전달을 하는 전열관 내부 응축 실험에 대해 Park [16] 등 많은 연구자들의 해석 연구가 있고, 피동안전계통중 하나인 피동보조급수계통(Passive Auxiliary Feedwater System, PAFS)에 대해서도 Jeon [17] 등 수많은 연구자들의 연구가 있다. 이들은 공통적으로 MARS-KS나 RELAP5의 Colburn-Hougen의 응축 모델이 정확한 영향을 반영하는데 한계가 있다고 지적 하였다. 때문에 Park, Bang [18] 등의 연구자들은 Colburn-Hougen 수정 모델들을 제시하여 코드에 적용시켜 그 정확성이 확실히 나아진 결과를 보이고 있다. 하지만 이들의 모델들도 강제대류에서의 전열관 내부 및 수평 전열관 응축 현상을 모의한 것들로서 수직 전열관 및 전열관 외벽에서의 증기 응축과는 거리가 있다.

Hassan [19]은 Dehbi의 실험장치를 RELAP5로 해석 하였다. Dehbi의 실험장치는

수직 전열관 외벽에서의 응축 열전달 및 자연대류 조건 등 제주대학교에 구축된 응축 실험장치와 매우 유사하다. 하지만 Hassan 역시도 코드와 실험결과가 전체적으로 잘 일치하나, 1차원 코드의 한계의 가능성을 들어 비응축성 기체 존재 시 응축 열전달 모델의 개선이 필요하다고 하였다.

자연대류 응축 열전달 현상에 영향을 미치는 인자들을 기반으로 MARS-KS에 적용함으로써 보수적인 Uchida의 상관식에 의존하던 기존의 격납건물 안전해석 방법에서 보다 현실적인 PCCS 열교환기 성능평가가 가능해질 것으로 기대하고 있다.



[Fig. 32] Heat flux comparison result using MARS-KS at 4 bar, $W_a = 0.4$

V. 결론

본 연구에서는 피동격납건물냉각계통 수직 전열관에서의 응축 열전달계수를 구하기 위해 비응축성 기체 존재 시 외경 40 mm, 두께 5 mm, 유효 열전달 길이 1000 mm의 단일 수직 전열관 외벽에서의 증기 응축 실험을 진행하였다. 실험은 압력 2 ~ 5 bar에서 기체 혼합물과 벽면온도가 잘 조절된 조건에서 진행되었다. 비응축성 기체와 압력에 따른 영향, 벽면 과냉도 영향, 임의의 조건에서 응축 열전달계수 측정을 하였고, 기존에 널리 사용되는 Uchida, Tagami, Dehbi의 상관식과 비교하였다. 또한 실험을 통해 얻은 응축 열전달계수를 계통 해석 코드인 MARS-KS로 모의해 비교하였다.

실험 시 발생하는 응축 현상을 통해 전열관 표면에서의 액막의 형태를 확인하였다. 이론적인 액막의 형태와는 달리 몇 개의 큰 물줄기가 전열관 표면의 응축수들을 쓸고 가는 것을 볼 수 있었고, 액막의 형태는 없었으며 물줄기의 형태 또한 대칭적이거나 주기적이지도 않다는 것을 확인할 수 있었다.

응축 열전달계수는 압력이 증가할수록 증기의 밀도가 증가하므로 같은 비응축성 기체의 질량분율일 때 압력이 응축 열전달계수의 상승 요인임을 확인하였다. 반면, 비응축성 기체는 증기와 전열관 외벽 사이에서 열저항으로 작용한다. 따라서 비응축성 기체의 질량분율이 증가함에 따라 응축 열전달계수는 감소하는 것을 확인하였다. 또한 벽면 과냉도 온도차가 클수록 전열관 외벽 근처의 증기의 분압보다 비응축성 기체의 분압이 높아 비응축성 기체가 더 많이 축적되기 때문에 응축 열전달계수는 감소하는 것을 알 수 있었다.

실험을 통해 구한 응축 열전달계수와 기존 상관식과 비교 시 압력이 증가함에 따라 Uchida의 상관식보다 높은 결과를 보였고, Dehbi의 상관식보다는 낮은 결과를 보였다. Uchida는 압력에 대해 전혀 고려를 하지 않았기 때문에 보수적인 예측값을 가졌고, Dehbi는 실험장치가 직경에 비해 큰 높이 비를 갖기 때문에 자연대류 유속이 영향을 받아 응축 열전달계수가 크게 예측되는 것으로 판단하였다. 이를 통해 실험 조건 뿐만 아니라 실험장치의 기하학적 형상에도 응축 열전달계수가 영향을 받는다

는 것을 알 수 있었다.

실험결과를 이용하여 1차원 계통해석 코드인 MARS-KS로 모의하였다. 압력과 비응축성 기체의 질량분율에 따른 응축 열전달계수의 영향에 대해서 알아보았다. MARS-KS 예측도 압력의 증가에 따라 열전달계수가 증가하며, 비응축성 기체의 분율 증가에 따라 열전달계수가 감소하는 실험결과와 동일한 경향성을 보였다. MARS-KS로 예측한 응축 열전달계수는 실험결과와 더불어 기존 상관식과도 비교하였다. MARS-KS는 Uchida의 상관식보다도 더 보수적인 결과를 예측했다. 예측 값이 압력에 따라 상승하고, 비응축성 기체의 질량분율에 따라 감소함에도 불구하고 상당히 보수적인 예측을 하였다. 이를 통해 MARS-KS내 응축 열전달 모델의 개선이 필요함을 알 수 있었다. 이미 많은 연구자들이 수정한 모델들을 제시하였지만 이 역시도 본 연구의 조건과 부합하지 않는 강제대류 및 전열관 내부 응축 실험에 대한 모의이기 때문에 자연대류 및 전열관 외벽 응축 열전달 모델의 개선이 필요함을 알 수 있었다.

차후 전열관의 직경을 달리하여(외경 10 mm, 두께 3 mm) 직경에 의한 영향에 대해서 연구 할 예정이며, 전열관의 응축 표면을 늘려 이에 대한 효과가 어느 정도 인지 판단할 수 있는 핀튜브 실험도 계획 중이다. 그리고 이 두 실험의 실험결과까지 포함하여 새로운 실험 상관식을 제시 할 예정이다. 또한, MARS-KS의 nodalization을 달리하여 보다 더 정밀한 모의를 수행 할 예정이다.

REFERENCE

[1] H. Uchida, A. Oyama, Y. Togo, "Evaluation of Post-incident Cooling Systems of Light-water Power Reactors," Proceedings of the Third International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, Geneva, August 31 - September 9, 1964

[2] T. Tagami, "Interim Report on Safety Assessment and Facilities Establishment Project for June 1965," No. 1, Japanese Atomic Energy Agency, Unpublished work, 1965

[3] A.A. Dehbi, "The effects of Noncondensable Gases on Steam Condensation under Turbulent Natural Convection Conditions," Ph. D thesis, MIT, USA, 1991

[4] H. Liu, N. E. Todreas, M. J. Driscoll, "An experimental investigation of a passive cooling unit for nuclear plant containment," Nuclear Engineering and Design, 199, 243 - 255, 2000

[5] M. Kawakubo, M. Aritomi, H. Kikura, T. Komeno, "An experimental study on the cooling characteristics of passive containment cooling systems," Journal of Nuclear Science and Technology, 46, 339-345, 2009.

[6] J.W. Kim, Y.G. Lee, H.K. Ahn, G.C. Park, "Condensation heat transfer characteristic in the presence of noncondensable gas on natural convection at high pressure," Nuclear Engineering and Design, 239, 688-698, 2009.

[7] D. Paladino, O. Auban, M. Huggenberger, J. Dreier, "A PANDA integral test on the effect of light gas on a Passive Containment Cooling System (PCCS)," Nuclear Engineering and Design, 241, 4551-4561, 2011.

[8] E. Porcheron, P. Brun, P. Cornet, J. Malet, J. Vendel, "Optical diagnostics applied for single and multi-phase flow characterization in the TOSQAN facility dedicated for thermal hydraulic containment studies," The 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics (NURETH-10), 2003.

[9] P.I. Frank, P.D. David, L.B. Theodore, S.L. Adrienne, "Principle of heat and mass transfer-seven edition," John Wiley & Sons Inc, 2012.

[10] J. Rosa, A. Escriva, L. Herranz, T. Cicero, J. Munoz-Cobo, "Review on Condensation on the Containment Structures," Progress in Nuclear energy, 51, 32-66, 2009.

[11] M. H. Anderson, L. E. Herranz, M. L. Corradini, "Experimental analysis of heat transfer within the AP600 containment under postulated accident conditions," Nuclear Engineering and Design, 185, 153-172, 1998.

[12] A.A. Dehbi, "A generalized correlation for steam condensation rates in the presence of air under turbulent free convection," Heat and Mass Transfer, 86, 1-15, 2015

[13] H. C. Lee, M. H. Kim, S. K. Park, "The effect of non-condensable gas on direct contact condensation of steam/air mixture," Korean Nuclear Society, 33, 585-595, 2001.

[14] Thermal Hydraulic Safety Research Department, MARS Code Manual Volume I: Code Structure, System Models, and Solution Methods, Korea Atomic Energy Research Institute, 2007.

[15] A.P. Colburn, O.A. Hougen, "Design of Cooler Condensers for Mixtures of Vapors with Non-Condensing Gases," Industrial and Engineering Chemistry, 26, 1178-1182, 1934.

[16] H.S., Park, H.C No, "A condensation experiment in the presence of noncondensables in a vertical tube of passive containment cooling system and its assessment with RELAP5/MOD3.2," Nuclear Technology, 127, 1999

[17] B.G. Jeon, H.C. No, "Thermal-hydraulic evaluation of passive containment cooling system of improved APR+ during LOCAs," Nuclear Engineering and Design, 278, 190-198, 2014.

[18] Y.S. Bang, J.H. Chun, B.D. Chung, G.C. Park, "Improvements of condensation heat transfer models in MARS code for laminar flow in presence of non-condensable gas," Nuclear Engineering and Technology, 41, 2009.

[19] Y.A. Hassan, L.A. Raja, "Analysis of Experiments for Steam Condensation in the Presence of Noncondensable Gases Using the RELAP5/MOD3 code," Nuclear Technology, 104, 76, 1993.

감사의 글

지도 교수님을 비롯하여 선배, 친구 등 많은 분들의 걱정과 우려 속에 대학원 생활을 하고 어느덧 이 글을 적고 있습니다. 대학원 생활을 하면서 더 능글맞고, 더 뻔질거리고, 더 살찌고, 짜증이나 화도 많이 늘었지만 무엇보다 웃음이 제일 많아진 것 같습니다. 한분, 한분 찾아뵙고 인사드려야 하지만 그러지 못해서 간단하게 감사의 말을 전합니다.

먼저 저를 지도하면서 많이 답답하셨을 텐데 화 한번 안내고 보듬어주신 이연건 교수님께 감사드립니다. 또한, 저의 논문심사를 맡아주시고, 소중한 충고와 조언을 해주셨던 김남진 교수님, 최수석 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

항상 후배 말에 귀기울여주고, 후배 의견도 들어주시는 보안이형, 사수와 부사수로 만나 매일 보면서 이런저런 일도 많지만 항상 호통과 조언을 아끼지 않은 영준이형, 성가시게 할 때도 있지만 본인이 공부하는 부분 이 외에도 폭 넓게 보면서 많은 도움을 준 바로형, 동기로 만나 때로는 짓궂게 장난쳐도 받아주고, 좀 귀찮게 할 때도 있지만 많은 지식으로 도움을 준 우연이형, 못난 선배 만나 고생한 현미, 현미는 더 이상 막내가 아니니까 앞으로는 지금보다 더 잘해야 된다. 그리고 실험실 학부생인 연하, 운기, 준희, 형남이, 소현이 까지 모두에게 감사의 말을 전합니다.

대학원 동기인 승현이, 영규, 정민이, 우중이형에게도 모두 고생했고 앞으로 더 고생하고, 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 부모님과 같이 졸업하는 동생에게도 직접 말은 안하지만 항상 감사하고 사랑한다는 말 전합니다. 학교 외적으로도 많은 도움을 준 친구, 지인 분들 일일이 이름을 언급하지 못해서 죄송하고 항상 감사하다는 말을 전합니다.

감사합니다.