



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

Multi-stream 플레이트 핀 열교환기의
R-134a 증발 열전달 특성에 관한 연구



2021년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

공 준 영

공학석사학위논문

Multi-stream 플레이트 핀 열교환기의 R-134a 증발 열전달 특성에 관한 연구

지도교수 윤정인



이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2021년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

공 준 영

공준영의 공학석사 학위논문을 인준함.

2021년 2월 19일



Contents

LIST OF FIGURES	III
LIST OF TABLES.....	IV
ABSTRACT	V
NOMENCLATURES.....	VIII
제1장 서론	1
1.1 연구배경 및 목적.....	1
1.2 종래연구.....	4
제2장 실험장치 및 실험방법.....	10
2.1 실험장치.....	10
2.1.1 시험부.....	10
2.1.2 냉매순환 시스템.....	11
2.1.3 수순환 시스템.....	11
2.2 계측장치 및 데이터 수집.....	13
2.2.1 유량 측정장치.....	13
2.2.2 온도 측정장치.....	14
2.2.3 압력 측정장치.....	14
2.2.4 전력 측정장치.....	14
2.2.5 데이터 취득장치.....	15
2.3 실험 순서.....	16

2.3.1 기밀 시험.....	16
2.3.2 냉매 충전.....	16
2.3.3 실험 절차.....	17
2.4 데이터 정리 및 분석	19
제3장 Multi-stream PFHE의 R-134a 증발열전달 실험.....	22
3.1 물측 단상 열전달계수 분석.....	22
3.2 2-stream PFHE의 R-134a 증발열전달 성능특성	23
3.2.1 평균건도 변화에 따른 증발열전달 성능특성	23
3.2.2 포화온도 변화에 따른 증발열전달 성능특성	24
3.2.3 질량유속 변화에 따른 증발열전달 성능특성	24
3.2.4 포화온도, 질량유속 변화에 따른 증발열전달 성능특성 ...	25
3.3 Multi-stream PFHE의 R-134a 증발열전달 성능특성	26
제4장 결론.....	27
참고문헌.....	29

List of Figures

Figure 1 Experimental apparatus	34
Figure 2 Water side thermostat	35
Figure 3 Brine side thermostat.....	36
Figure 4 Schematic diagram of experimental apparatus.....	37
Figure 5 Multi-stream heat exchanger.....	38
Figure 6 Multi-stream heat exchanger after insulation	39
Figure 7 Water tank	40
Figure 8 Additional thermostat on the water side	41
Figure 9 Variation of evaporation HTC according to quality change	42
Figure 10 Variation of evaporation HTC according to quality change.....	43
Figure 11 Variation of evaporation HTC according to quality change.....	44
Figure 12 Variation of evaporation HTC according to quality change.....	45
Figure 13 Variation of evaporation HTC of 2-stream, Multi-stream according to quality change	46

List of Tables

Table 1 Specification of heat exchanger.....	47
Table 2 Specification of fin	47
Table 3 Specification of refrigerant flow meter	48
Table 4 Specification of water flow meter	48
Table 5 Specification of thermocouple	49
Table 6 Specification of pressure transmitter	49
Table 7 Specification of power meter.....	50
Table 8 Specification of data logger	50
Table 9 Experimental range of 2-stream evaporation heat transfer.....	51
Table 10 Experimental range of Multi-stream evaporation heat transfer.....	51

Characteristics of R-134a Evaporation Heat Transfer in Multi-stream PFHE

Joon Young Kong

Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

With the advancement of technology, humanity can live a more peaceful and comfortable life than before. However, behind this, there were disadvantages of environmental pollution and ozone layer destruction. Today, the world is aware of the importance of environmental protection and researches and presents measures and measures accordingly. In the field of refrigeration and air conditioning, efforts are being made to initiate the Montreal Protocol to phase out and ban the use of CFC (chlorofluorocarbon) and HCFC (hydrochlorofluorocarbon) based refrigerants that destroy the ozone layer. An eco-friendly refrigerant that can replace the existing pure refrigerant has been developed, and several studies have revealed that the alternative refrigerant shows lower performance than the existing pure refrigerant. As a method to compensate for such low performance, the plate fin heat exchanger proves economical with its high heat transfer area and performance compared to the same area as other heat exchangers, and is widely used in various fields today. According to the trend of miniaturization of devices, it is receiving a lot of attention for its small

volume. The fins of the plate fin heat exchanger have various shapes such as plain, perforated, louver, serrate, and herringbone, and can be manufactured according to the user's purpose and use.

Currently, many studies on plate heat exchangers and plate fin heat exchangers are being conducted, and studies on 2-stream, sizing, and fin shapes are also being actively conducted. However, research on a Multi-stream plate fin heat exchanger in which three or more fluids exchange heat at the same time is comparatively insufficient. Therefore, this study conducted experiments and analysis on evaporation heat transfer and pressure drop in a Multi-stream plate fin heat exchanger using R-134a as a working fluid. First, a single-phase experiment was conducted, and the evaporation heat transfer performance in 2-stream was analyzed, and by analyzing the evaporation heat transfer in multi-stream, the evaporation heat transfer coefficient of R-134a according to the 2-stream / Multi-stream status were evaluated.

As a result of the experiment, as the flow rate of refrigerant increased and the heat flux increased, the evaporation heat transfer coefficient increased. The heat transfer coefficient according to the change of the mass flow rate did not show a big difference at the beginning of evaporation, but the heat transfer coefficient differed due to the increase of the effect of convection boiling as it went to the high quality region. In the low quality region, the heat transfer coefficient increased as the heat flux increased due to the initial nuclear boiling, and the convective boiling effect was dominant in the high quality region. At the same heat flux and saturation temperature, the mass flux in the low quality region did not appear to have a significant effect on heat transfer, and it was confirmed that the higher the heat flux, the higher the heat transfer coefficient. When the quality reached about 0.6, the liquid

film on the plate wall almost evaporated, causing a dry out phenomenon, resulting in a sharp decrease in the heat transfer coefficient. The evaporation heat transfer coefficient of the multi-stream tends to be higher than that of the 2-stream, which is thought to be due to the change in the flow pattern by the heat transfer heat flux of the refrigerant side due to the stacked structure.



Nomenclatures

R_{ov}	: Thermal resistance	[°C/W]
h	: Convection heat transfer coefficient	[W / m ² °C]
A	: Area	[m ²]
k	: Thermal conductivity	[W/mK]
C_p	: Specific heat at constant pressure	[J/kg°C]
D_h	: Hydraulic diameter	[m]
A_c	: Channel area	[m ²]
\dot{m}	: Mass flow rate	[kg/s]
x	: Quality	[-]

Greek symbols

ρ	: Density	[kg/m ³]
μ	: Viscosity	[Pa * s]

Dimensionless numbers

Re	: Reynolds number	[-]
Pr	: Prandtl number	[-]
Nu	: Nusselt number	[-]

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

기술의 발전으로 인류는 이전보다 평온하고 쾌적한 생활이 가능해졌다. 하지만, 이 이면에는 환경오염과 오존층 파괴라는 단점이 있었다. 오늘날 전 세계가 환경보호의 중요성을 인지하고 이에 따른 대책과 방안을 연구 및 제시하고 있다. 국가 및 정부적인 차원으로는 환경 문제를 해결하기 위한 정책과 제도를 만들어 기업과 국민들이 실천하도록 하고 기업은 공장의 폐수와 매연을 정화하여 배출, 제품 생산 시 낭비되는 에너지나 천연자원의 최소화 등의 노력을 하고 있다. 냉동 및 공조분야에서는 오존층을 파괴시키고 환경을 오염시키는 CFC(염화불화탄소; chlorofluorocarbon) 및 HCFC(염화불화탄화수소; hydrochlorofluorocarbon) 계열의 냉매의 사용을 단계별로 줄이고 결과적으로 사용을 금하기 위해 1989년도에 오존층 파괴물질에 관한 몬트리올 의정서(Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer)를 발효하는 등의 노력들이 이루어지고 있다. 기존에 사용하던 순수 냉매를 대체할 수 있는 친환경 냉매가 개발되고 이를 사용해야 하는데 있어서 여러 연구들을 통해 대체냉매가 기존 순수 냉매 대비 낮은 성능을 보인다는 것이 밝혀졌다. 이러한 낮은 성능을 보완할 수 있는 방법으로는 향상된 냉동 시스템 최적화 및 재설계나 열교

환기의 고성능화 등이 있다. 기존에 사용되었던 열교환기의 종류에는 튜브, 환형, 셸앤튜브, 다관식, 액막식, 판형, 판핀형 등 다양한 열교환기가 있다. 이 중 판핀형 열교환기인 플레이트 핀 열교환기(Plate fin heat exchanger)가 다른 열교환기들과 동일 면적 대비 높은 전열면적 및 성능으로 경제성을 입증하며 오늘날 다양한 분야에서 많이 사용되고 있고 최근 냉동 및 공조 기기의 소형화 트렌드에 따라 적은 부피라는 점으로도 많은 각광을 받고 있다. 플레이트 핀 열교환기는 얇은 금속판을 매우 작은 간격으로 여러 층 붙여놓은 형상이고 박판 사이에 모재보다 낮은 온도에서 녹는 접합체를 접합부에 위치시키고 열을 가하여 접합체를 녹여 모재를 접합하는 방법인 브레이징 접합 방법으로 제작된다. 초기에는 가스켓형 판형열교환기가 사용되었으나 사용 압력 한계를 극복한 용접형 판형열교환기가 개발됨에 따라 더욱 다양한 분야에서 사용이 가능해졌고 LNG 및 수소 액화 등 초저온 분야에서도 사용되고 있다.

플레이트 핀 열교환기의 핀에는 plain, perforated, louver, serrate, herringbone 등 다양한 형상의 핀들이 존재하며 사용자의 목적과 용도에 맞게 제작이 가능하다. 현재 판형 열교환기 및 플레이트 핀 열교환기에 대한 많은 연구들이 이루어지고 2-stream, sizing, fin 형상에 대한 연구들도 활발히 이루어지고 있다. 하지만 3가지 이상의 유체들이 동시에 열교환을 하는 Multi-stream 플레이트 핀 열교환기에 대한 연구는 현저히 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 작동유체로 R-134a를 사용하여 Multi-stream 플레이트 핀 열교환기에서의 증발열전달 및 압력강하에

대한 실험 및 분석을 하였다.

우선적으로 단상 실험을 진행하였고 2-stream에서의 증발열전달성능을 분석하였으며 Multi-stream에서의 증발열전달에 대해 분석함으로써 2-stream / Multi-stream 여부에 따른 R-134a의 증발 열전달계수와 압력강하에 대한 연구에 목적을 두고 있다.



1.2 종래연구

앞서 언급하였듯이 현재 Multi-stream PFHE 내에서의 증발열 전달과 관련한 실험적 연구는 다소 부족한 반면, 2-stream PHE, PFHE 및 증발열전달과 관련한 연구들은 국내외로 활발히 이루어지고 있는 실정이며 다음과 같다.

K. E. Nam et al.[1]은 핀 형상에 따라 높이와 피치를 변화시켜 제작한 플레이트 핀 열교환기의 열전달 성능, 압력강하, 그리고 열전달 특성인 j -factor에 관한 실험적 연구를 진행하였다. 연구 결과 offset 핀의 피치를 감소시켰을 때 압력강하는 약 30% 증가하는 반면, 열전달 성능 UA(총합열전달계수)는 약 2배 증가하였다. offset 핀이 louver 핀과 대비 47~60%가량의 높은 열전달 성능을 보였고 같은 높이에서 offset 핀의 피치를 4mm에서 3mm 감소시켰을 때의 j 값은 약 24% 증가하였다.

Y. Y. Yan et al.[2]은 판형 열교환기에서 냉매 R-134a의 증발열전달 및 압력강하에 대한 연구를 진행, 높은 건도에서만 질량유속이 열전달계수에 상당한 영향을 미쳤고 질량유속 효과와 달리 열유속은 고건도에서는 열전달에 큰 영향을 미치지 않지만 저건도에서는 약간의 영향을 주었다는 결과를 확인하였다. 시스템 압력의 증가는 높은 건도영역에서 낮은 열전달계수를 가져오지만 이 이유는 추가 연구가 필요한 실정이라고 밝혔다. 질량유량과 시스템 압력은 모두 전체 건도 범위의 압력강하에 약간의 영향을 미치고 질량유속이 높을수록 압력강하가 높아지지만 시스템 압력이 높을수록 압력강하가 낮아지고, 또한 건도에 따른 열전달계수의 상

승은 압력강하보다 컸으며 특정 조건에서 0.4 ~ 0.5에 가까운 특정 건도에서 열전달계수의 갑작스러운 저하를 추가로 연구해야 한다는 점을 언급하였다.

S. J. Kim et al.[3]은 판각형 열교환기내의 R-134a 증발열전달 특성에 관한 실험적 연구를 진행하였다. 연구 결과 증발열전달계수는 동일 포화온도, 열유속일 때 건도 및 질량유속이 증가할수록 증가하였으며, 특히 질량유속이 120 kg/m²s일 때 증발열전달계수는 건도가 0.23일 때 보다 0.65일 때가 약 24% 높게 나타나는 경향을 확인하였다. 또한 동일 질량유속, 포화온도일 때 저건도 영역에서는 열유속이 증가할수록 증발열전달계수가 증가하였고 높은 열유속의 경우 건도가 0.3이후에는 열전달계수가 급격히 감소함을 확인하였다.

Harry A. J. et al.[4]은 Multi-stream 열교환기에서의 위상 변화 모델링에 대한 연구를 진행, Multi-stream 열교환기의 상변화를 시뮬레이션 하는 새로운 방법이 제시하였다. 제안된 방법은 이진 변수 또는 상보성 제약을 포함하는 어려운 최적화 문제를 해결할 필요가 없다는 점에서 지금까지 문헌에 제시된 방법과 크게 다르다. Nonsmooth 방정식은 서로 다른 위상 거동에 해당하는 서브스트림의 가변 입구/출구 온도를 정의하고 증기-액체 평형 계산을 수행하는데 사용된다. 이 모델은 훨씬 덜 복잡하고 최적화 프레임워크 외부에서 다상 MHEX(Multistream heat exchanger)를 포함하는 프로세스 흐름도의 현실적인 시뮬레이션을 가능케 한다.

E. Zivkovic et al.[5]은 판형 열교환기에서 R-134a 증발 증류 열전달계수에 대한 연구를 하였고 냉매 질량유속, 건도, 시스

템 압력 및 유량 구성이 증발 열전달계수에 미치는 영향을 조사 및 논의하였다. 사용된 실험 설정의 특별한 특징은 PHE 내부의 플레이트를 따라 온도 프로파일을 측정하는 것이었는데, 이를 통해 건도의 함수로서 열전달계수의 국부적 값을 계산할 수 있다. 조사 결과, 건도를 높이면 R-134a의 증발 중에 열전달계수가 증가하였고 냉매 질량유속과 부과된 열유속을 증가시키면 더 높은 증발 열전달계수를 얻을 수 있고, 열유속의 영향은 크지 않았다는 것을 확인하였다. 동시 흐름 구성은 두 유체 사이의 더 높은 온도 차이와 입구 영역의 건도의 빠른 상승으로 인해 역류 구성보다 더 높은 열전달계수 값을 제공한다.

Y. Xue et al.[6]은 3종류의 Wavy fin(천공된(perforated), 비틀거리는(staggered) 형상, 불연속(discontinuous)) PFHE에 대해 너셀수 및 마찰계수에 대한 연구를 진행하였다. 이들은 CFD를 활용하여 기존 Wavy 핀보다는 천공된 핀이 더욱 좋은 열전달률을 보임과 동시에 마찰계수 또한 감소가 되어 파손의 위험이 적어짐을 확인하였다. 또한 불연속적인 Wavy 핀은 기존의 Wavy 핀과 크게 차이점이 보이지 않음을 확인하였다.

M. Amaranatha Raju et al.[7]은 Wavy 핀이 있는 직사각형 채널에서 R-134a의 흐름 비등 열전달 및 압력강하에 대한 연구를 실시하였다. 실험에서 Wavy 핀 표면에 대한 국부열전달 및 압력강하 계수를 얻었다. 2상 열전달계수는 질량유속 및 건도가 증가함에 따라 증가, 건도와 질량속도가 증가함에 따라 압력강하도 증가하였고 열전달계수는 질량유속, 건도에 대한 강한 의존성을 보였다. 2상 실험을 수행하기 전에 단상 실험을 수행하고 $Re < 1000$

에 대한 Wavy 핀 형상에 대해 Colburn j 및 Fanning 마찰 계수 f 를 얻었다. Colburn j 계수와 마찰계수 f 는 레이놀즈수가 증가함에 따라 감소하였고 이론적으로 예측된 j 및 f 값과 실험적으로 측정된 j 및 f 값이 비교되고 그 결과는 잘 일치하였다. 2상 열전달 및 압력강하에 대한 질량유속, 열유속 및 건도의 영향을 분석하였다. 열전달계수는 질량유속, 건도 및 열유속의 중요성에 대한 강한 의존성을 보여준 반면 반대로, 2상 마찰압력강하는 질량유속과 건도에 대한 강한 의존성을 보여주었다. 냉매 흐름 비등 열전달계수 및 Wavy 핀의 2상 마찰계수를 예측하기 위한 새로운 상관관계와 레이놀즈수 계수 F 및 2상 마찰계수와 관련하여 Wavy 핀 형상에 대한 상관관계가 제안된다. 실험적으로 측정된 국부 비등 열전달 값은 현재 연구에서 제안된 상관관계의 $\pm 25\%$ 내에서 예측할 수 있다.

B. S. V. Prasad et al.[8]은 Multi-stream PFHE의 핀을 통한 핀 효율 및 열 메커니즘과 이의 개발 및 적용 평가를 위한 알고리즘에 대해 연구를 진행하였다. 이들은 프로그램을 통해 Multi-stream PFHE를 사용함에 있어서 가로(횡축) 전도가 온전히 이루어지지 않고 일부분에서만 전도가 이루어짐을 확인하였으며 핀의 유무가 아주 큰 영향을 끼침을 확인하였다. 이 프로그램은 또한 Multi-stream PFHE에서 발생하는 특정 특수 상황의 영향을 올바르게 예측하였다. 다중 스트림 열교환기는 종종 2-stream 열교환기 보다 설계, 구축 및 작동에 더 경제적이고 더 효율적이며 경제적인 프로세스 설계를 가져오고, 에너지 및 환경 문제가 증가한

다는 것은 향후 Multi-stream 설계의 사용이 증가한다는 것을 의미한다. Multi-stream PFHE에 대한 새로운 설계 이론 및 관련 컴퓨터 모델의 개발은 일반 Multi-stream 열교환기에 대한 형식화를 개발하려는 전반적인 맥락에서 중요하고 여기에 제시된 자료가보다 일반적으로 적용 가능한 특성의 모델을 생성하는 데 사용될 수 있다.

M. Goyal et al.[9]은 유한 체적 분석을 기반으로 Multi-stream PFHE를 2차원 모델링으로 분석하였다. 이들은 극저온분야 적용을 위한 Multi-stream PFHE의 등급 계산에 성공적으로 사용될 수 있는 모델을 제시하였다. 이 모델은 축방향 및 횡방향 열전도, 가변유체 특성, 금속 매트릭스 전도도의 영향 및 주변에서 유입되는 열과 같은 다양한 2차 매개 변수를 처리하고 측면 온도 프로파일에 따라 모델을 사용하여 적층 패턴을 최적화할 수 있다. 모델이 2D 이산화를 기반으로 하기 때문에 열교환기 폭에 따른 온도 변화를 처리할 수 없다는 점이 있지만 Multi-stream PFHE에 적용될 때 측면 열전도의 영향을 계산하는 데 매우 유용하며 여기서 얻은 결과는 상용 소프트웨어 Aspen MUSE와 잘 일치하였다.

D. Meha et al.[10]은 PFHE의 성능과 작동 유체의 병렬 흐름에 대한 실험 분석에 대한 연구를 진행하였다. PFHE의 성능을 높이는데 있어 주요 매개 변수 중 하나는 작동 유체의 질량 흐름을 변경하는 것인데 온수의 유량이 변하지 않을 경우, PFHE 측면의 질량유량이 가변의 상태일 경우 열교환기의 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 작동유체 사이의 짧은 접촉과 공기가 뜨거운

물의 질량유속에서 열을 흡수할 수 없기 때문에 발생하였다. 공기 질량유속을 위해 열교환기에서 전달되는 실제 및 최대 열이 일정하지 않고 온수 질량유속이 일정하며, 온수 질량유속이 일정하지 않고 공기 질량유속이 일정한 경우보다 훨씬 높은 값을 갖는다는 결론을 내렸다. 이것은 열교환기 공기-물에서 전달되는 열의 가장 큰 영향은 핀 표면에서 공기 흐름의 변화라는 것을 의미한다. 또한 실험적으로 결정된 열전달계수의 전체 효율은 핀 표면 쪽에서 기류를 변화시킴으로써 크게 달라지며 온수의 질량유량이 변화하면 작은 변화가 관찰된다.

상기 연구동향 분석에서 알 수 있듯이 일반 PHE나 PFHE, fin 형상, 2-stream에 대한 연구는 활발한 반면 Multi-stream PFHE 혹은 그 내에서의 증발열전달 특성에 관한 연구가 없는 것을 알 수 있는 실정이므로 본 연구에서는 Multi-stream PFHE에서의 증발열전달에 관한 실험을 진행, 그 결과를 2-stream 열전달 특성과 비교 및 분석하였다.

제2장 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Figure 1은 실제 실험에 사용되었던 장치의 사진이고 Figure 2은 물측 항온조, Figure 3은 브라인측 항온조의 사진이다. Figure 4는 실험장치의 개략도이며 실험장치의 구성은 크게 시험부, 냉매 순환 시스템, 그리고 수순환 시스템으로 나뉜다. 자세한 설명은 다음과 같다.

2.1.1 시험부

본 연구에서는 알루미늄 Multi-stream PFHE를 사용하였으며, 시험부의 자세한 사양은 Table 1, 2에 나타나 있다. 실제 실험장치에 사용되었던 시험부의 사진은 Figure. 5, 6에 나타내었다. 시험부는 가로 124 mm, 세로 244 mm, 높이 66.18 mm 의 채널을 C-A-B-A-B-C 패턴으로 적층하여 구성되었으며, 열교환기 내 라인은 A, B, C로 총 3가지 라인으로 구성되어있다. 냉매는 A라인으로 흐르고 물은 B, C라인으로 흐른다.

2.1.2 냉매순환 시스템

냉매는 일정 건도를 가지고 유입, 시험부를 지나가는 동안 시험부 내에 흐르는 물에 의하여 일부 증발되고 시험부를 나온 2상 냉매는 리시버에 공급된다. 리시버에는 브라인 향온조부터 나오는 차가운 부동액이 흐르며 냉매증기를 응축 및 저장한다. 리시버의 과냉액은 스트레이너를 통과 후 마그네틱 기어펌프에서 가압된 상태의 과냉액의 상태로 질량유량계에 유입된다. 유입된 유량을 측정 후 예열기로 공급된다. 유량의 측정은 코리올리스 방식 질량유량계를 사용하였다. 예열기에는 5 kW (2.5 kW x 2) 히터가 슬라이더(Slide AC)에 연결되어있고 추가적인 예열이 필요할 경우를 대비하여 2.1 kW 히터 하나를 따로 추가적으로 설치하였다. 슬라이더의 전압을 조절함으로 예열기에 공급되는 열량을 조절시켜서 시험부 입구부분의 일정한 건도를 유지시키고, 유량은 마그네틱 기어펌프에서의 토출량을 일부분 재순환시켜 조절한다. 본 실험장치는 냉매의 열유속과 건도 및 유량을 각각 독립적으로 조절할 수 있도록 설계하였다.

2.1.3 수순환 시스템

시험부의 B, C 라인을 따라 흐르는 물은 라인 별 순환펌프로 순환되며 A 라인에 흐르는 냉매와 열교환을 하여 온도가 변화하는데 이는 물 측의 메인 향온조와 추가적인 보조 향온조를 사용하여 향온수조 내부 물을 일정한 온도로 유지시켰다. B, C 라인의 유량

은 항온수조에서 나와 시험부의 유입부로 들어가는 중간 부분에 설치된 질량유량계에서 측정한다. 유량 조절은 1차적으로 순환펌프의 인버터 제어를 해주고 추가적으로 순환펌프 뒤에 위치한 게이트밸브로 세부 조절을 해줌으로써 원하는 유량에 큰 오차 없이 맞춘 뒤 실험을 진행한다. Figure 7에 물탱크, Figure 8에 추가적으로 사용된 항온조의 사진이 있다.



2.2 계측장치 및 데이터 수집

Multi-stream PFHE 내에서의 열전달 및 압력강하 성능특성을 평가하기 위하여 열교환기 입출구의 고온유체 및 저온유체의 상태를 계측할 수 있어야 한다. 이러한 계측을 위하여 본 실험에서는 유량 측정장치, 온도 측정장치, 압력 측정장치, 전력 측정장치, 데이터 취득장치 등을 이용하여 데이터를 수집하였다.

2.2.1 유량 측정장치

냉매의 유량을 측정하기 위하여 지구의 자전 효과로 인하여 발생하는 코리올리 효과를 이용하여 질량유량을 측정하는 코리올리스 질량유량계를 이용하였다. 이 때, 질량유량계는 유량 값에 비례하는 신호(DC 4-20 mA)를 출력하며, 출력신호는 데이터 수집장치에서 유량값으로 변환되어 표기된다. 상세한 제원은 Table 3와 같다. 물의 유량은 유량계 내에 블레이드가 있으며, 블레이드의 회전속도를 통하여 체적유량을 측정하는 터빈 유량계를 이용하였다. 터빈 유량계 또한 질량유량계와 마찬가지로 유량 값에 비례하는 4-20 mA 신호를 출력하며, 데이터 수집장치에서 유량값으로 변환하여 표기하도록 하였다. 상세한 사양은 Table 4에 나타내었다.

2.2.2 온도 측정장치

실험 시 열교환기 입출구에 T-type 열전대를 사용하여 물, 냉매의 온도를 측정하였다. 온도 측정 부위는 모두 8개로 시험부 A라인의 냉매측 입출구 온도, B, C라인의 물측 입출구 온도, 그리고 예열기의 전방의 과냉상태의 냉매온도이다. 열전대의 상세한 사양은 Table 5와 같다.

2.2.3 압력 측정장치

냉매 측의 시스템 압력과 열교환기의 입출구의 압력을 측정하기 위하여 압력변환계를 펌프 전후단, 열교환기 입출구 측에 설치하였으며, 열교환기 입출구의 정확한 차압을 측정하기 위하여 차압계를 설치하였다. 이 두 압력은 장치내 유동액이 과냉의 상태인지 포화상태인지의 여부를 확인하는데 사용되었다. 압력변환계와 차압계는 직류전원 공급장치(DC power supply)를 통해 전원을 공급받았으며, 4-20 mA 전류를 출력신호로 가지므로, 데이터 수집장치에 저항과 병렬로 연결하여 전압으로 변환된 데이터를 수집하였다. 압력 측정장치들의 사양은 Table 6과 같다.

2.2.4 전력 측정장치

히터의 소요전력 측정은 냉매의 열교환기 입구 건도를 결정하기에 필수적이다. 이에 따라서 디지털 파워미터를 설치하여 히터

에서 냉매측으로 공급한 전력을 측정하였으며, 그 사양은 Table 7과 같다.

2.2.5 데이터 취득장치

각 측정장치들의 출력신호는 데이터 로거를 통하여 기록하였다. 이 때, 개인용 컴퓨터를 이용하여 데이터 로거로부터 데이터를 저장하였으며, 각 데이터는 2초 간격으로 정상상태에서 약 10분간 수집하였다. 데이터 로거의 사양은 Table 8에 나타내었다.



2.3 실험 순서

2.3.1 기밀 시험

실험장치의 가동은 고압의 환경에서 작동하므로 시험부의 기밀 및 누설여부를 필수적으로 확인하여야 한다. 기밀 시험은 시험부 내에 질소를 채워 약 10 bar로 유지시킨 후 비눗물(거품기)을 사용하여 누설여부를 확인하였다.

2.3.2 냉매 충전

실험장치 내에 냉매를 적정량 충전하는 것은 실험에 있어서 매우 중요한 부분이다. 만일 냉매의 충전량이 너무 적으면 냉매 유량이 간헐적으로 형성되므로 실험시 유량의 조절이 어렵고 마그네틱 기어펌프에 냉매액이 부족하여 펌프 기어에 마모 및 손상을 가져올 수도 있다. 또한 냉매 충전량이 너무 많게 되면 높은 건도에서 열공급에 의해 장치내 압력이 계속 높아져 포화온도의 형성이 어려워지게 된다.

실험장치는 냉매 충전 전에 진공 펌프로 충분히 진공시키고 그 후 소량의 냉매를 실험장치 내로 주입 후 다시 진공시키는 작업을 수 차례 반복작업 하였다. 냉매 주입은 냉매 탱크를 뒤집어 놓고 쓰러지지 않도록 고정시킨 후 주입 함으로서 냉매 탱크

의 공기가 들어갈 가능성을 배제하였으며 냉매를 주입 할 때, 마그네틱 기어펌프도 가동하여 주입을 원활하였다. 시스템이 최대 냉매유량에서 정상적으로 작동이 되면 냉매의 주입을 중단하고 예열기를 가동시켜 실험장치 내의 시스템 압력과 건도가 예정값에 적절히 도달하는지 확인하였다. 이때 시스템 압력과 건도가 예정치보다 작으면 냉매 충전량이 부족하므로 충전을 추가적으로 계속하였고 반대로 압력이 계속 증가하면 일정량의 냉매를 방출시켰다. 본 연구에서 사용된 단일 냉매 R-134a는 기체로 방출시켜도 무방하였다.

2.3.3 실험 절차

본 실험의 절차는 다음과 같다.

(1) 마그네틱 기어펌프를 가동시켜서 원하는 질량유속에 유량을 맞춰준다. 이때, 냉매가 부족하거나 많다면 냉매의 유량이 간헐적으로 형성되기도 하며 포화온도 형성이 어려워질 수 있다. 이때는 냉매를 추가적으로 주입하거나 방출해주어서 유량 및 포화온도가 일정한 상태를 유지할 수 있도록 해준다.

(2) 예열기에서의 공급열량과 과냉기의 냉각수온도와 유량을 조절해주며 시험부 입구의 건도를 맞춰준다. 건도가 바뀌게 되면 압력의 손실도 변화하므로 (1)과 (2)를 반복 작업하여 원하는

건도와 질량유속을 맞춰준다.

(3) 시험부에 공급되는 물의 온도로 열유속을 조절할 수 있는 물측의 항온조 및 예비 항온조를 가동시킨다.

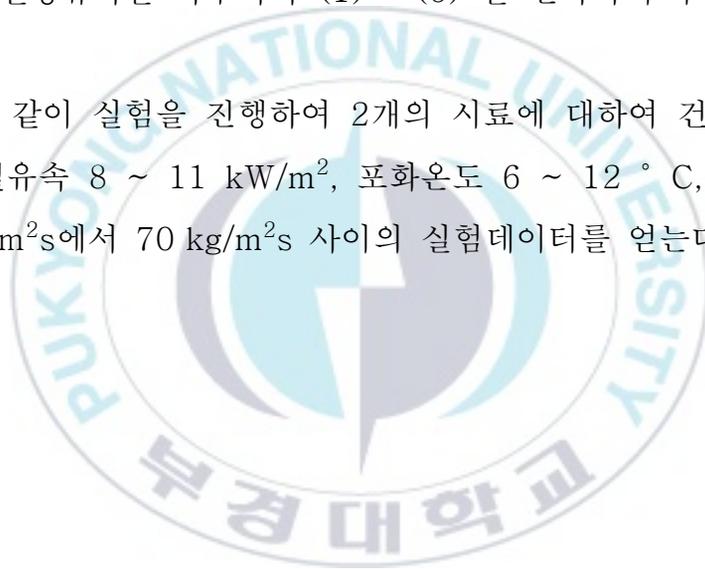
(4) 물측 항온조의 온도를 조절 함으로서 열유속을 감소시키며 실험을 수행한다.

(5) 건도를 바꾸어서 (2) ~ (4) 를 반복하여 수행한다.

(6) 포화온도를 바꾸어서 (1) ~ (5) 를 반복하여 수행한다.

(7) 질량유속을 바꾸어서 (1) ~ (6) 을 반복하여 수행한다.

위와 같이 실험을 진행하여 2개의 시료에 대하여 건도 0.1 ~ 0.8, 열유속 8 ~ 11 kW/m², 포화온도 6 ~ 12 ° C, 질량유속 50 kg/m²s에서 70 kg/m²s 사이의 실험데이터를 얻는다.



2.4 데이터 정리 및 분석

실험데이터 및 결과는 단상 열전달 실험, 2-stream 증발열전달 실험, Multi-stream 증발열전달 실험으로 구분하여 취득하였으며, 결과적으로 2-stream과 Multi-stream의 증발열전달 실험 결과와 데이터를 비교 및 분석하였다.

이 때, 2상 구간 데이터 정리를 위하여 물 측의 상관식이 필요하며, 상관식을 도출하는 과정은 다음과 같다.

$$R_{ov} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{q_w}{A k_w} + \frac{1}{h_2 A} \quad (1)$$

$$h = C G C_p Re^n Pr_2^{-\frac{2}{3}} \quad (2)$$

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (3)$$

$$Re = \frac{\dot{m} D_h}{\mu A_c} \quad (4)$$

$$\left(AR_{ov} - \frac{q_w}{k_w} \right) = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{G_1 C_{p1} Re_1^n Pr_1^{-\frac{2}{3}}} + \frac{1}{G_2 C_{p2} Re_2^n Pr_2^{-\frac{2}{3}}} \right) \quad (5)$$

C는 수송물성의 상수이기 때문에 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$C_{1,2} = \frac{Pr_{1,2}^{\frac{2}{3}}}{G_{1,2} C_{p1,2}} \quad (6)$$

$$C \left(AR_{ov} - \frac{q_w}{k_w} \right) = C_1 Re_1^{-n} + C_2 Re_2^{-n} \quad (7)$$

양변을 $C_1 Re_1^{-n} C_2 Re_2^{-n}$ 로 나뉜다.

$$\frac{C \left(AR_{ov} - \frac{q_w}{k_w} \right)}{C_1 Re_1^{-n} + C_2 Re_2^{-n}} = \frac{1}{C_1 Re_1^{-n}} + \frac{1}{C_2 Re_2^{-n}} \quad (8)$$

$$C Re_1^n Re_2^n = \frac{C_1 C_2}{Ak - \frac{q}{h}} \left(\frac{1}{C_1 Re_1^{-n}} + \frac{1}{C_2 Re_2^{-n}} \right) \quad (9)$$

양변에 \ln 을 취하면 결과적으로 다음과 같은 수식을 구할 수 있다.

$$\ln C + n \ln(Re_1 Re_2) = \ln \left(\frac{h C_2}{AR - \frac{q}{h}} \right) + \ln \left(\frac{1}{C_1 Re_1^{-n}} + \frac{1}{C_2 Re_2^{-n}} \right) \quad (10)$$

식 (10)의 우변을 Y로 놓고 $\ln(Re_1 Re_2)$ 항을 X로 놓게 되면 선형 방정식의 형태를 띠게 된다. 이 때 양변이 n을 포함하고 있으므로 초기값 n을 설정하고 반복계산과정을 통하여 n을 도출한다.

j-factor는 Chilton 과 Colburn이 처음 제안한 무차원 계수이

며, 열과 질량 및 운동량 전달의 기본 메커니즘에 사용된다. Re, Pr 등과 같은 무차원수들로 구성되며 열전달계수, 물질전달계수 및 마찰계수의 계산에 사용된다. j-factor는 다음 식과 같이 표현된다.

$$j = \frac{h}{G C_p Pr^{-\frac{2}{3}}} \quad (11)$$

식 (11)에 근거하여 j-factor 상관식 도출을 위하여 실험데이터를 정리하였으며, 식 (10)에 근거한 반복계산을 통하여 상관식을 도출하였다.

Multi-stream 열전달 실험의 경우 총괄열전달계수 개념을 적용하여 도출되는 각 유로의 열평형 방정식과 각 유체가 주고받는 열량에 대한 평형 방정식들을 연립하여 R-134a 측의 대류열전달계수를 도출하였으며, 도출된 열전달계수를 토대로 2-stream 열전달과 Multi-stream 열전달성능을 비교 및 분석하였다.

제3장 Multi-stream PFHE의 R-134a 증발열전달 실험

3.1 물측 단상 열전달계수 분석

Multi-stream PFHE의 R-134a 측 열전달성능을 분석하기 위하여 2.4 절과 같이 Colburn j-factor를 기반으로 Wilson plot method에 대입하여 열전달계수를 구하였고 Colburn j-factor는 다음과 같이 도출되었다.

$$j = 0.00137Re^{0.42} \quad (12)$$

3.2 2-stream PFHE의 R-134a 증발열전달 성능특성

2-stream 실험의 결과는 열유속이 8 kW/m^2 일 때와 11 kW/m^2 일 때의 건도에 따른 열전달계수의 변화를 그래프로 나타내었다. 실험조건상 질량유량과 포화온도에 변화를 주며 실험을 진행하였다. 2-stream의 실험조건은 Table 9에 나타내었고 실험 조건 별 데이터 결과는 다음과 같다.

3.2.1 평균건도 변화에 따른 증발열전달 성능특성

다음은 질량유속이 $50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 포화온도가 $6 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 때의 평균 건도의 변화에 따른 PFHE 내 R-134a의 증발열전달 성능특성을 분석하였다. 질량유속, 포화온도, 열유속 등의 타 조건이 일정한 상태에서 평균건도가 증가함에 따라 증발열전달계수의 변화를 확인할 수 있었다. 실험 결과 그래프는 Figure 9에 나타내었다. 그래프를 확인하면 열유속이 11 kW/m^2 일 때 열유속이 8 kW/m^2 일 때와 비교하여 14.5% 높은 열전달 계수를 보여주었고 모두 저건도 영역일 때 우상향하는 경향을 보이다가 고건도 영역($x \geq 0.7$)으로 들어감에 따라 열전달계수가 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 저건도 영역에서 열전달계수가 초기 핵비 등의 영향으로 열유속이 증가함에 따라 증가하였고 고건도 영역

에서는 대류 비등의 영향이 지배적이라 사료된다. 또한 고건도 영역에서는 판벽에서 액막이 거의 증발하고 드라이아웃(Dry out) 현상이 발생함으로 열전달계수가 급격히 감소함을 확인할 수 있다.

3.2.2 포화온도 변화에 따른 증발열전달 성능특성

다음은 질량유속이 $50 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 포화온도가 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 때의 평균건도의 변화에 따른 PFHE 내 R-134a의 증발열전달 성능특성을 분석하였다. 포화온도를 증가시킨 실험의 결과 그래프는 Figure 10에 나타나있다. 그래프는 우상향 하는 경향을 보이다가 고건도 영역에서 드라이아웃 현상이 발생함과 동시에 급격히 떨어졌고, 포화온도가 높을수록 열전달계수가 수치적으로 20% 낮게 나타내고 있음을 보여주고 있다. 이것은 시스템내 높은 포화온도에서 R-134a 증기의 낮은 비체적에 의하여 낮은 증기속도를 야기, 열전달 표면에서 액막에 낮은 전단력을 발생시킨다고 사료된다. 또한 포화온도가 증가할수록 R-134a의 증발잠열이 감소하기 때문이다.

3.2.3 질량유량 변화에 따른 증발열전달 성능특성

다음은 질량유속이 $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 포화온도가 $6 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 때의 평균건도의 변화에 따른 PFHE 내 R-134a의 증발열전달 성능특성

을 분석하였다. 질량유량을 증가시켰을 때의 실험 결과 그래프는 Figure 11에 나타내었다. 앞의 Figure 9와 비교시, 동일 열유속과 포화온도에서 저건도 영역에서는 질량유량이 열전달계수에 큰 영향은 미치지 않는 것으로 확인이 되었으나 냉매의 유량이 많을수록, 열유속이 높을수록 열전달계수가 다소 증가함을 알 수 있다. 결과적으로 약 17.1%의 차이가 있었다.

3.2.4 포화온도, 질량유량 변화에 따른 증발열전달 성능특성

다음은 질량유속이 $70 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 포화온도가 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 때의 평균건도의 변화에 따른 PFHE 내 R-134a의 증발열전달 성능특성을 분석하였다. 마찬가지로 열전달 계수가 건도의 증가에 따라 일정하게 증가하는 경향을 보이다가 고건도 영역에서 드라이아웃 현상이 발생함과 동시에 열전달계수가 급격히 감소하였다. 질량유속의 변화에 따른 열전달계수는 증발 초기 저건도 영역에서는 다소 큰 차이를 보이지 않지만 고건도 영역으로 갈 수록 대류비등 영향의 증가로 인해 열전달계수가 차이가 남을 확인할 수 있다. 포화온도와 질량유량에 변화를 주었을 때의 실험 결과 그래프는 Figure 12에 나타내었으며 결과는 약 10.9%의 차이가 있었다.

3.3 Multi-stream 플레이트 핀 열교환기의 R-134a 증발열전달 성능특성

다음은 특정 조건에서 2-stream과 Multi-stream 일 때의 평균 건도에 따른 열전달계수 변화를 나타내었다. 실험 조건은 Table 10에 나타내었고 2-stream과 Multi-stream의 결과 비교 그래프는 Figure 13에 나타내었다. Multi-stream 또한 2-stream과 마찬가지로 평균건도의 증가와 동시에 열전달계수의 증가가 확인되었고 일정 고건도 영역의 도달과 함께 드라이아웃 현상이 발생, 열전달계수가 급격히 감소함을 확인할 수 있었다. 그래프를 확인하면 2-stream 보다 Multi-stream의 증발 열전달계수가 약 16.4% 높은 경향을 보이는데 이는 적층구조상(2-stream: A-B-A-B, Multi-stream: C-A-B-A-B-C) 냉매측에 전열 열유속이 생겨 이에 따라 유동양식의 변화가 생김으로 인해 발생하는 현상이라 사료된다.

제4장 결론

본 연구에서는 Multi-stream PFHE의 R-134a 증발 열전달 특성에 관한 연구를 진행하였다. 실험을 통해 얻은 연구 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 1) 냉매의 유량이 많을수록, 열유속이 높을수록 증발 열전달계수가 증가하였다.
- 2) 질량유속의 변화에 따른 열전달계수는 증발 초기에는 큰 차이를 보이지 않지만 고건도 영역으로 갈수록 대류비등 영향의 증가로 인해 열전달계수가 차이가 났다.
- 3) 저건도 영역에서는 열전달계수가 초기 핵비등의 영향으로 열유속이 증가함에 따라 증가하였고 고건도 영역에서는 대류비등의 영향이 지배적 이었다.
- 4) 동일 열유속과 포화온도에서 저건도 영역에서는 질량유속이 열전달에 큰 영향은 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.
- 5) 저건도 영역에서 높은 열유속 일수록 높은 열전달계수를 나타내고 있으나 건도가 0.6 이상의 상태에서는 판벽에서

액막이 거의 증발하고 이로 인해 드라이아웃 현상이 나타남으로써 열전달계수가 급격히 감소하였다.

- 6) 2-stream 보다 Multi-stream의 증발 열전달계수가 높은 경향을 보이는데 이는 적층구조상 냉매측에 전열 열유속이 생겨 이에 따라 유동양식의 변화가 생김으로 인해 발생하는 현상이라 사료된다.



참고문헌

- [1] K. E. Nam, D. W. Oh, C. H. Song, S. H. Yoon, K. H. Lee and O. J. Kim (2011), An Experimental Study on Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Plate-Fin Heat Exchanger with Variation in Fin Configuration, The Korean Society of Mechanical Engineers (Summer conference proceeding), pp. 444-450
- [2] Y. Y. Yan, T. F. Lin and B. C. Yang (1997), Evaporation Heat Transfer and Pressure Drop of Refrigerant R134a in a Plate Heat Exchanger, The American Society of Mechanical Engineers
- [3] S. J. Kim, J. H. Park, M. G. Seo and Y. S. Kim (2001), Experimental Study on R-134a Evaporation Heat Transfer Characteristics in Plate and Shell Heat Exchanger, The Korean Society of Mechanical Engineers (Summer conference proceeding), pp. 248-253
- [4] Harry A. J. Watson and Paul I. Barton (2017), Modeling phase changes in multistream heat exchangers, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 207-219
- [5] E. Zivkovic, S. Kabelac and S. Serbanovic (2009), Local heat transfer coefficients during the evaporation of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R-134a) in a plate heat exchanger, Journal of the Serbian Chemical Society, pp. 427-440
- [6] Y. Xue, Z. Ge, X. Du and L. Yang (2018), On the Heat Transfer Enhancement of Plate Fin Heat Exchanger, Multidisciplinary Digital Publishing Institute
- [7] M. Amaranatha Raju, T. P. Ashok Babu and C. Ranganayakulu (2020), Investigation of flow boiling heat transfer and pressure drop of R134a in a rectangular channel with wavy fin,

International Journal of Thermal Sciences

- [8] B. S. V. Prasad (1997), Fin efficiency and mechanisms of heat exchange through fins in multi-stream plate-fin heat exchangers : development and application of a rating algorithm, International Journal of Heat and Mass Transfer, pp. 4279-4288
- [9] M. Goyal, A. Chakravarty and M. D. Atrey (2014), Two dimensional model for multistream plate fin heat exchangers, Cryogenics, pp. 70-78
- [10] D. Meha, A. Avdiu, F. Krasniqi, A. Muriqi and X. Berisha (2017), Experimental Analysis of Performance of Heat Exchanger with Plate Fins and Parallel Flow of Working Fluids, World Journal of Engineering and Technology, pp. 435-444



감사의 글

모든 것이 처음이고 낯선 대학원에서의 생활에 저 자신이 부족함을 극복하고 과연 무사히 졸업을 할 수 있을까 하루에도 여러 번 수많은 불안과 의문이 있었습니다. 그러던 제가 어느덧 2년이란 시간이 지나 졸업을 앞두고 있다는 것에 새삼 실감이 나지 않습니다. 저의 논문 완성과 석사 졸업에 도움을 주셨던 모든 분들께 진심 어린 감사의 마음을 전합니다.

먼저 저의 지도교수님이자 졸업에 있어서 가장 큰 도움을 주신 윤정인 교수님께 감사의 말씀을 전합니다. 저에게 있어서 대학원이라는 곳은 하나부터 열까지 새로웠으나 동시에 함부로 다가가기 힘든 환경이었습니다. 하지만 교수님 특유의 따뜻한 모습과 위트 있는 농담으로 연구실의 분위기를 따스하게 녹여주셔서 분위기가 한 층 더 좋아지고 교수님께서 계실 때마다 웃음소리가 끊이질 않았던 것 같습니다. 한없이 부족한 저에게 세심한 지도와 따뜻한 격려로 대학원 생활과 논문작성, 연구수행을 비롯하여 인생에서의 갖추어야 할 덕목과 자세까지 가르침을 아끼지 않아주셨던 점에 저는 정말 복 받았다고 생각합니다. 교수님과 함께 해외학회도 갈 수 있었던 점 또한 제 인생에 있어서 잊지 못할 멋진 추억이라 생각합니다.

다음으로 냉동시스템 연구실의 손창효 교수님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 윤정인 교수님과 함께 저희들의 지도에 힘쓰시고 항상 배움에 있어서 동기부여 해주시며 열정을 아끼지 않으셨

던 모습이 아직 눈앞에 아른거리곤 합니다. 늦은 시간에도 종종 방문하셔서 저희들의 이야기를 들어주시고 화목한 분위기를 만들어 주셔서 연구실이 한층 더 밝아질 수 있었던 것 같습니다.

항상 재미있는 농담으로 저희들에게 먼저 다가와 주시고 세세한 부분들과 다양한 분야들에 있어서 가르침을 주신 최광환 교수님, 전공 공부 못지않게 영어의 중요성을 항상 일깨워 주셨던 김은필 교수님, 비록 수업을 듣진 못하였지만 석사세미나를 할 때마다 항상 열정적인 모습과 진심 어린 격려를 해주셨던 정석권 교수님과 대학원생으로서의 갖추어야 하는 자세와 마인드를 가르쳐 주셨던 금종수 교수님과 김종수 교수님, 그리고 대학원 생활에 있어서 학과사무실에서 항상 신경 써주시고 노력해주신 김대한 선생님께 감사의 말씀을 전합니다.

윤정인 교수님과 더불어 학회와 ENRESYS 모임 때마다 많은 조언들을 아끼지 않으시고 저를 대학원으로 이끌어주신 김재돌 교수님, 대학원 생활을 함에 있어서 이론적으로나 실험적으로나 부족함이 한없이 많았던 저에게 시간과 성의를 아끼지 않고 몸소 도와 주시고 가르침을 주셨으며 앞으로의 장래에 대해서도 함께 고민을 해주신 문춘근 박사님, 과제를 진행함에 있어서 친절함 많은 도움을 주셨던 이근태 박사님과 김영민 이사님께 감사의 말씀을 전합니다.

ENRESYS의 모임을 통해 좋은 말씀과 격려를 주신 선배님들과 종종 연구실을 찾아와주고 같이 밥도 먹으며 많은 얘기를 나눠주곤 했던 인호형에게 감사의 말씀을 올립니다.

2년의 시간 동안 연구실에서 함께 동고동락 하고 밥 먹듯이 같이 밤을 새우며 수많은 잊을 수 없는 추억들을 함께 쌓았고 서로의 부족함을 채워가며 끈끈한 버팀목이 되었던, 비록 저보다 어린 나이지만 저에게 많은 도움을 주고 때때론 의지할 수 있었던 항상 고마운 졸업 동기인 지후와 선근이, 연구실에 온 지 얼마 되진

않았지만 항상 열정적인 모습으로 힘든 일들에도 웃음과 남자다운 포부를 잃지 않았던 성수, 석사를 졸업하고 어느덧 열심히 박사과정을 한걸음 한걸음 밟아 나아가고 있는 지훈이, 짧은 기간임에도 불구하고 오시자마자 연구실의 중심을 잡아주고 연구실의 발전을 위해 노력을 아끼지 않으시고 계신 성훈이형, 연구실에서 함께하면 항상 웃음이 끊이지 않았던 두영이, 그리고 함께 본 시간은 얼마 되지 않아 많이 아쉽지만 강인한 리더의 모습을 보여주었고 앞으로의 대학원생활에 있어서 조언을 아끼지 않았던 광석이에게 진심으로 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

동시에 함께 세미나도 하고 학회도 가며 많은 얘기를 나누고 시간을 보낸 손창호 교수님 연구실의 준혁이형, 동익이형, 남욱이, 상우, 그리고 최광환 교수님 연구실의 희웅이형과 광암이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다.

석사 기간 동안 힘든 일을 함께 나누고 옆에서 꾸준한 격려들을 아끼지 않았던 친구들과 동기들에게도 감사의 말씀을 전합니다.

마지막으로 오늘의 제가 있기까지 교육과 성장 및 발전에 있어서 가르침과 지원을 아끼지 않으시고 항상 헌신해 주시는 우리 가족의 기둥이신 아버지와 관심과 사랑으로 지칠 때마다 힘이 나고 동기부여를 해주시는 우리 가족의 활력소와 같은 어머니, 힘든 일이 있으면 서로 나누고 좋은 일이 있으면 서로 챙겨주곤 했던 이제는 어느덧 사회의 첫발을 떼고 있는 동생 덕분에 석사생활을 무사히 끝낼 수 있었던 것이 아닐까 싶습니다. 진심으로 감사하고 사랑합니다.

저의 졸업과 논문에 도움을 주신 모든 분들께 다시 한번 진심으로 감사 드리고 행운이 함께 하시길 바란다는 말씀을 전하며 이 논문을 마무리하겠습니다.



Figure 1 Experimental apparatus



Figure 2 Water side thermostat



Figure 3 Brine side thermostat

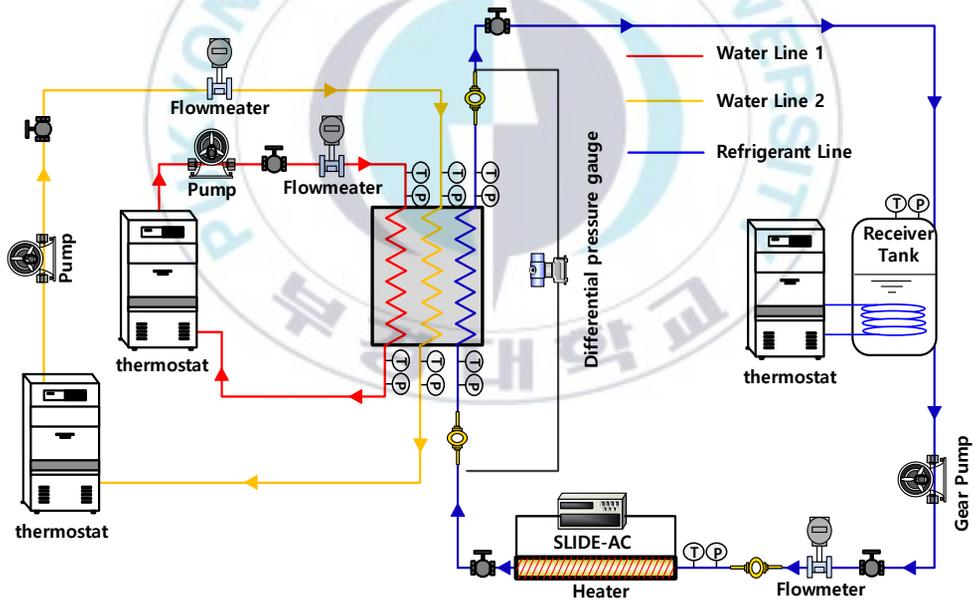


Figure 4 Schematic diagram of experimental apparatus



Figure 5 Multi-stream heat exchanger



Figure 6 Multi-stream heat exchanger after insulation



Figure 7 Water tank



Figure 8 Additional thermostat on the water side

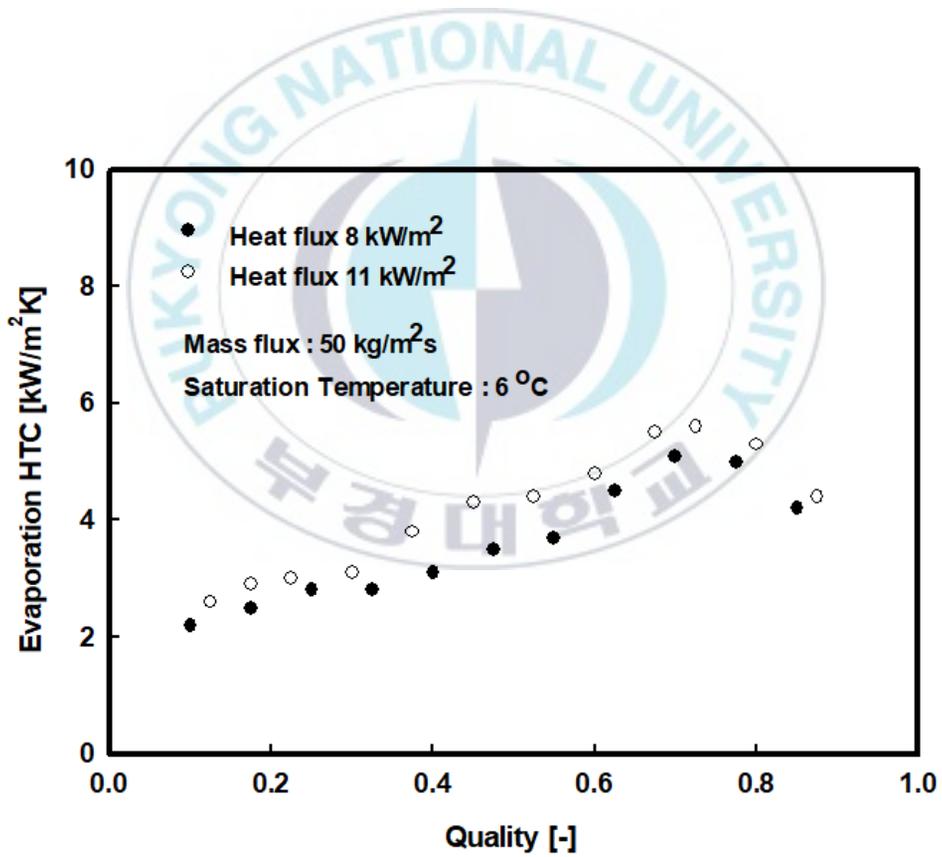


Figure 9 Variation of evaporation HTC according to quality change

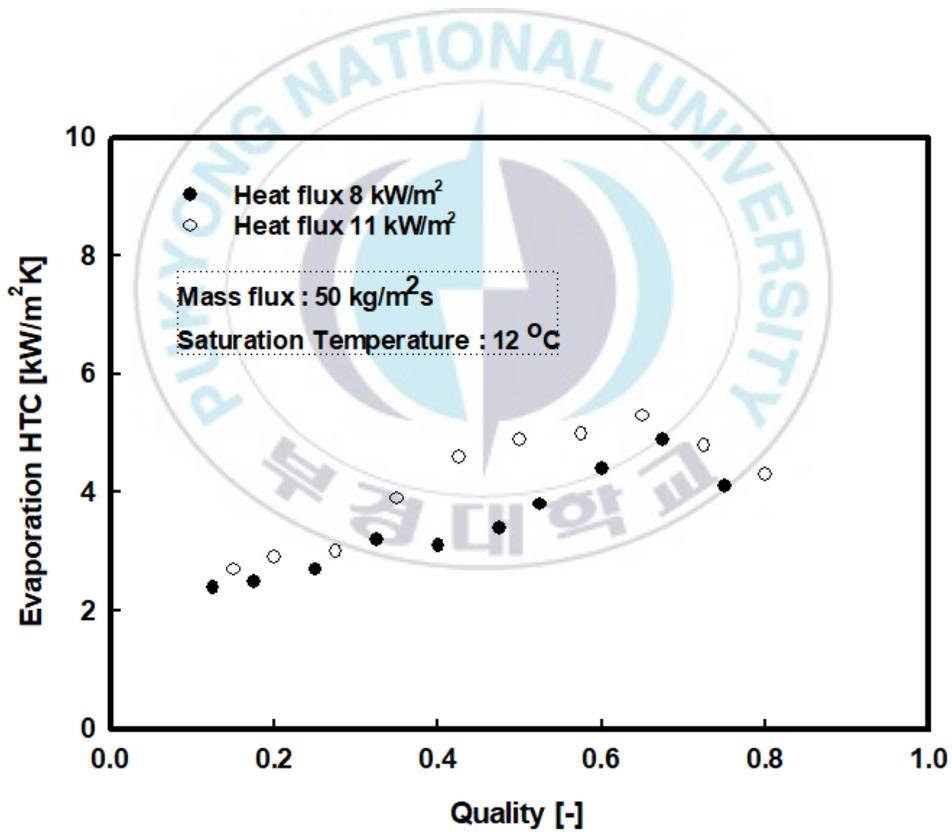


Figure 10 Variation of evaporation HTC according to quality change

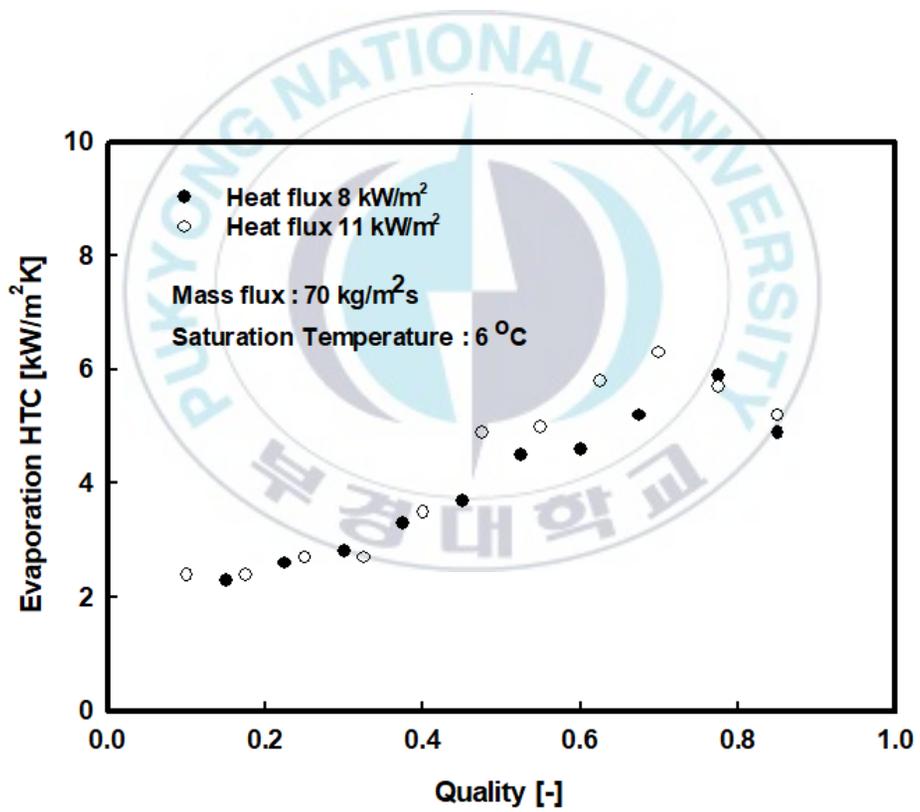


Figure 11 Variation of evaporation HTC according to quality change

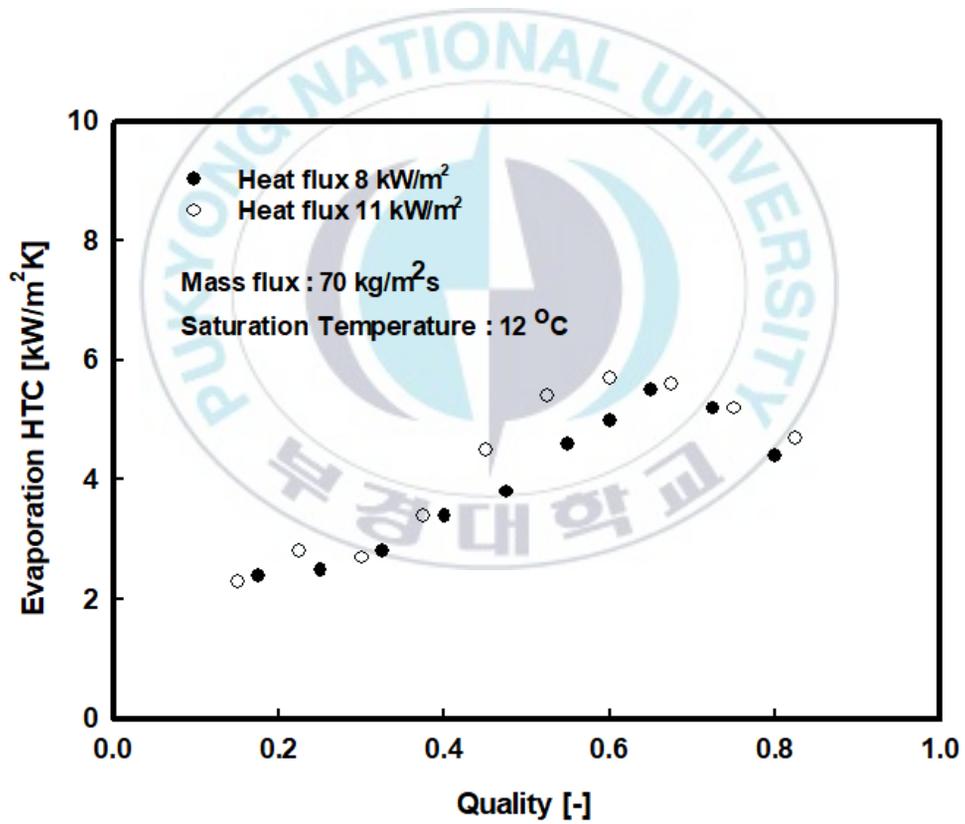


Figure 12 Variation of evaporation HTC according to quality change

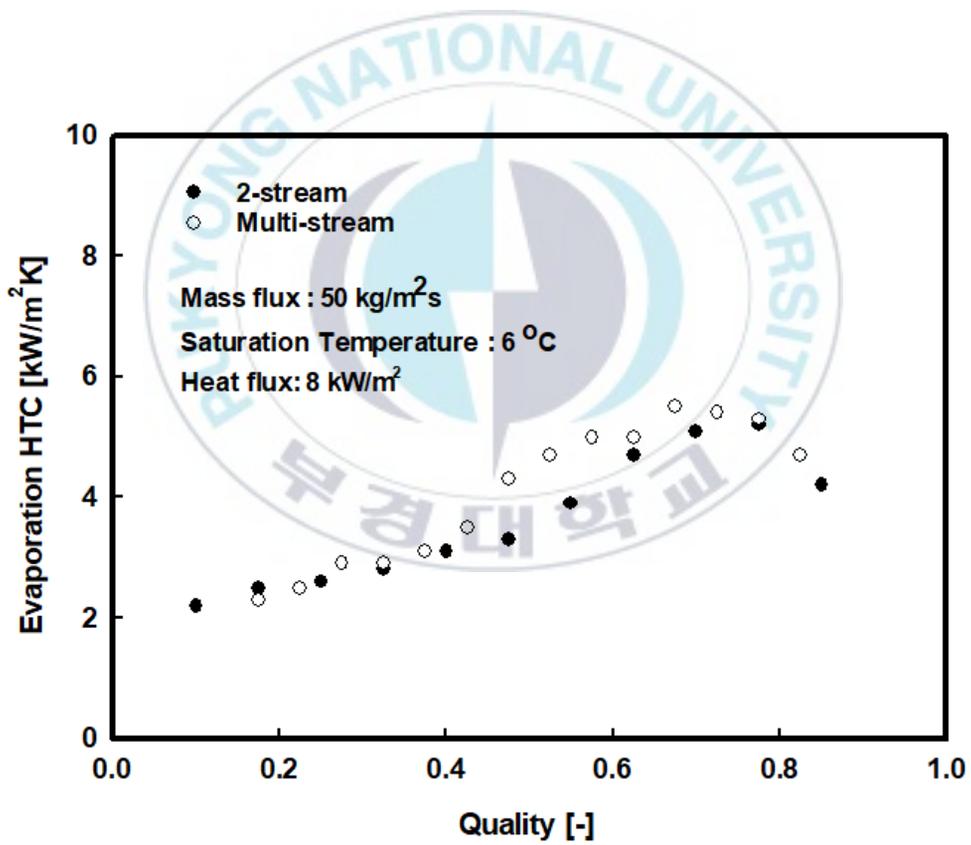


Figure 13 Variation of evaporation HTC of 2-stream, Multi-stream according to quality change

Table 1 Specification of Multi-stream PFHE

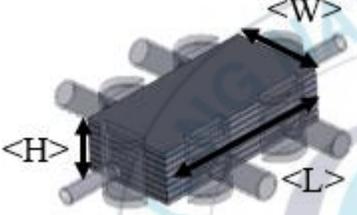
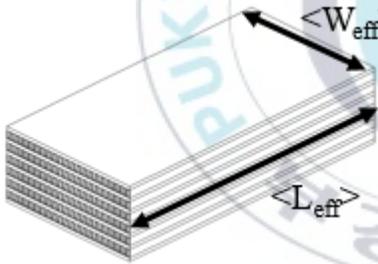
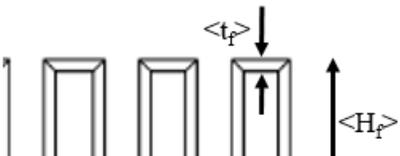
Multi-stream PFHE diagram	PFHE specification
	<p>PFHE Height : $H = 66.18$ mm</p> <p>PFHE Length : $L = 244$ mm</p> <p>PFHE Width : $W = 124$ mm</p>
	<p>PFHE Effective Length : $L_{eff} = 80$ mm</p> <p>PFHE Effective Width : $W_{eff} = 40$ mm</p> <p>Stacking Pattern : C-A-B-A-B-C (A = R-134a, B & C = Water)</p>

Table 2 Specification of PFHE fin

Fin diagram	Fin specification
	<p>Fin type : Plain fin</p> <p>Fin height : $H_f = 6.4$ mm</p> <p>Fin thickness : $t_f = 0.5$ mm</p>

	Fin frequency : 19 fin/inch
	Flow path width : $W_f = 0.84$ mm

Table 3 Specification of mass flow meter

Equipment	Specification
	Mass flow meter – Endress Hauser Promass 40
	Flow rate range : 0.6 ~ 6 kg/min
	Analog output : 4 ~ 20mA

Table 4 Specification of water flow meter

Equipment	Specification
	Corea flow turbine flow meter
	Flow rate range : 2.84 ~ 28.4 LPM
	Analog output : 4 ~ 20 mA

Table 5 Specification of T-type thermocouple

Equipment	Specification
	ONDI T-type Thermocouple – TT-TE
	Temperature range : -270 ~ 400 °C
	Error range : ± 0.5°C

Table 6 Specification of pressure transmitter

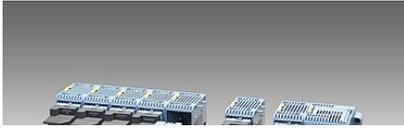
Equipment	Specification
	Differential pressure transmitter – DPS 20
	Pressure range : 0 ~ 40 kPa
	Accuracy : 0.25 %
	Pressure transmitter – DP520D
	Pressure range : 0 ~ 1600 kPa

	Accuracy : 1 %
--	----------------

Table 7 Specification of power meter

Equipment	Specification
	Yokogawa wt 210
	Accuracy : 0.1 %
	Frequency range : DC, 0.5 ~ 100 Hz

Table 8 Specification of data logger

Equipment	Specification
	Yokogawa WT210

	Measurement interval : 100 ms / 10ch minimum
--	---

Table 9 Experimental range of 2-stream evaporation heat transfer

Parameter	Experimental condition/range
Quality	0.1 ~ 0.9
Mass flux	50 ~ 70 kg/m ² s
Heat flux	8 ~ 11 kW/m ²
Saturation temperature	6 ~ 12 °C

Table 10 Experimental range of Multi-stream evaporation heat transfer

Parameter	Experimental condition/range
Quality	0.1 ~ 0.9
Mass flux	50 kg/m ² s

Heat flux	8 kW/m ²
Saturation temperature	6 °C

