



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](#)

공학석사 학위논문

Low-GWP 냉매 R-1234yf의 7mm 수평평활관 내
증발열전달 및 압력강하에 관한 실험적 연구



2021년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

김 남 욱

공학석사 학위논문

Low-GWP 냉매 R-1234yf의 7mm 수평평활관 내
증발열전달 및 압력강하에 관한 실험적 연구

지도교수 손 창 효

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2021년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

김 남 욱

김남욱의 공학석사 학위논문을 인준함

2021년 2월 19일



위원장 공학박사

위원 공학박사

위원 공학박사

최광환 (인)

윤정인 (인)

손창효 (인)



목 차

TABLE OF CONTENTS	i
ABSTRACT	iii
LIST OF TABLES, FIGURES	v
NOMENCLATURES	vii

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 종래 연구	3
1.3 연구 목적 및 개요	7

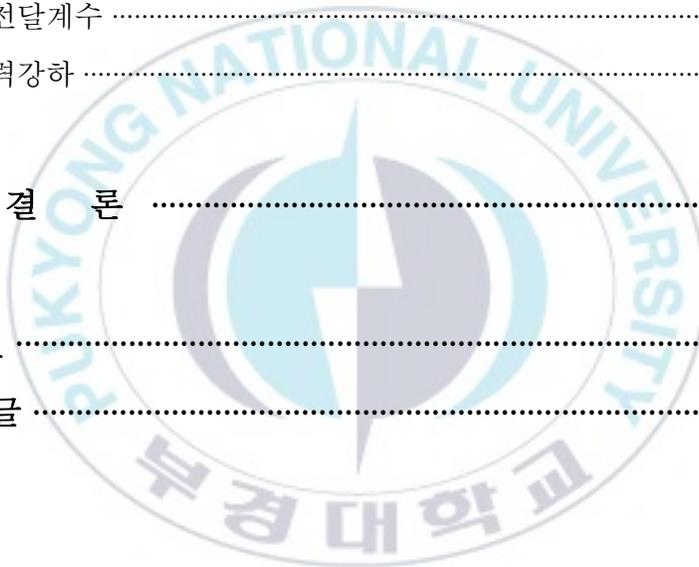
제 2 장 기초 이론

2.1 HFO계 냉매	8
2.2 증발 열전달 상관식	11
2.3 유동양식선도	14

제 3 장 증발 열전달 실험 장치 및 방법

3.1 증발 열전달 실험	17
3.1.1 증발 열전달 실험 장치	20
3.1.2 계측기	25
3.1.3 실험 방법	29

3.1.4 실험 조건	30
3.2 데이터 정리	
3.2.1 열전달	31
3.2.2 압력강하	33
제 4 장 실험 결과	
4.1 열전달계수	34
4.2 압력강하	44
제 5 장 결 론	48
참고문헌	51
감사의 글	54



**Experimental study of evaporation heat transfer and pressure drop in
7mm horizontal smooth tube of Low-GWP refrigerant R-1234yf**

Nam Wook Kim

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

Abstract

Refrigeration and air conditioning are used not only in modern people, but also in various industrial fields such as semiconductors and food storage. The refrigeration system absorbs heat from a low-temperature heat source using a refrigerant and discharges it to a high-temperature heat source. Therefore, the selection of refrigerant in the cycle is a very important factor. Conventionally, there have been many studies on improving the performance of a system using refrigerants with excellent thermodynamic properties. Recently, while environmental issues are attracting attention as one of the important factors, studies related to refrigerants that have less impact on the

environment have been actively conducted. In this study, in the process of evaporation heat transfer in a 6.95 mm inner diameter horizontal tube of R-1234yf, a low-GWP refrigerant, the heat transfer coefficient and pressure drop according to the vapor quality were experimentally analyzed with the mass flow rate, heat flow rate, and saturation temperature as variables. The main results are as follows. As the vapor quality increased, the heat transfer coefficient increased. Also, as the mass flux, heat flux, and saturation temperature increased, the heat transfer coefficient increased. Compared with the existing refrigerant R-134a, the heat transfer coefficient of R-134a was slightly higher than that of R-1234yf. Also, as vapor quality increased, the pressure drop increased. In addition, as the mass flux increased, the pressure drop increased, and as the saturation temperature increased, the pressure drop tended to decrease. Compared with R-134a, the pressure drop of R-134a was slightly higher than that of R-1234yf. The effect of each variable on the evaporation heat transfer process is judged to be determined by the refrigerant flow pattern and thermodynamic properties. The results will provide basic data on the evaporation heat transfer of the 6.95 mm inner diameter tube of R-1234yf and help in the design of the heat exchanger using R-1234yf.

LIST OF TABLES

Table. 1.1	Summary of the evaporation heat transfer performance test results
Table. 2.1	Life time of HFOs Refrigerant
Table. 2.2	Comparison of properties of R-134a and R-1234yf at saturation temperature
Table. 2.3	Constant of Kandlikar's correlation
Table. 3.1	Specification of the accessory components used in this study
Table. 3.2	Specification of the measuring instruments used in this study
Table. 3.3	Experimental conditions

LIST OF FIGURES

Figure. 2.1	Flow pattern map of Taitel and Dukler (1976)
Figure. 3.1	Two-phase flow pattern according to mass flow in horizontal tube
Figure. 3.2	Flow pattern variation in horizontal tube while evaporation
Figure. 3.3	Schematic diagram of test equipment
Figure. 3.4	Schematic diagram of test section
Figure. 3.5	Detail view of test section
Figure. 4.1	R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to mass flux at saturation temperature 5°C

- Figure. 4.3 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to heat flux at saturation temperature 5°C
- Figure. 4.4 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to heat flux at saturation temperature 5°C
- Figure. 4.5 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to saturation temperature
- Figure. 4.6 Comparison of evaporation heat transfer coefficient of R-134a and R-1234yf
- Figure. 4.7 Heat transfer coefficient of top and bottom side
- Figure. 4.8 Flow pattern of experiment result in Taitel-Dukler map
- Figure. 4.9 Comparison between measured and calculated heat transfer coefficients.
- Figure. 4.10 R-1234yf friction pressure drop according to mass flux at saturation temperature 5°C
- Figure. 4.11 R-1234yf friction pressure drop according to mass flux at saturation temperature 10°C
- Figure. 4.12 R-1234yf friction pressure drop according to saturation temperature
- Figure. 4.13 Comparison of friction pressure drop of R-134a and R-1234yf

NOMENCLATURE

SYMBOLS

A	Area	m^2
B_o	Boiling number	
C	Parameter in Kandlikar's correlation	
Co	Convection number	
D	Diameter	m
E	Enhancement factor	
F	Parameter in Tairrel and Dukler	
Fr	Froude number	
F_{fl}	Fluid dependent parameter in Kandlikar's correlation	
G	Mass flux	kg/m^2s
g	Gravity acceleration	m/s^2
h	Heat transfer coefficient	kW/m^2K
i	Enthalpy	kJ/kg
i_{lv}	Latent heat	kJ/kg
j	Volumetric flux	m/s
K	Parameter in Tairrel and Dukler	
k	Thermal conductivity	kW/mK
L	Tube length	m
M	Molecular mass	$kg/kmol$
P	Pressure	MPa
Pr	Prandtl number	
P_r	Reduced pressure	
Q	Heat capacity	kW
q	Heat flux	kW/m^2
\dot{q}	Volumetric heat generation	kW/m^3
Re	Reynolds number	
r	Radius	m
S	Suppression factor	
T	Temperature	$^{\circ}C$
T_{TD}	Parameter in Tairrel and Dukler	
X	Martinelli Parameter	
x	Vapor quality	

GREEK SYMBOLS

α	Void fraction	
Δ	Diffrence	
μ	Viscosity	kg/ms
ρ	Density	kg/m ³
σ	Surface tension	kg/m ³

SUBSCRIPTS

avg	Average
bottom	Bottom
CON	Convection boiling
friction	Friction
i	Inner
in	Inlet
l	Liquid
left	Left
NB	Nucleate boiling
momentum	Momentum
o	Outer
out	Outlet
pred	Prediction
right	Right
sat	Saturation
static	Static
tp	Two phase
top	Top
total	Total
v	Vapor
w	Wall

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

현대 사회에서 냉동, 공조 분야는 현대인뿐만 아니라 산업분야에 있어 필수적이다. 냉동, 공조 분야는 삶의 질을 중요시하는 현대인과 항온항습을 요구하는 산업의 공정 등 사회에서 빼놓을 수 없는 분야로 많은 연구가 진행되고 있다. 냉동 시스템은 냉매를 이용해서 저온의 열원에서 흡열하여 고온의 열원에 방출한다. 이 과정에서 냉매는 온도와 압력이 변화하고 각 열원에서 상변화를 동반한 흡열 및 방열의 과정을 거쳐 열을 운반한다. 따라서 사이클에서 냉매의 선정은 중요한 요소 중 하나이다.

종래의 연구들은 우수한 열역학적 물성치를 가진 냉매들을 적용한 시스템의 성능 향상을 목적으로 한 연구가 많았다. 그러나 오존층 파괴와 지구온난화 등의 환경문제가 주목받게 되면서 기존의 냉매들이 규제되기 시작하였다. 냉매로서 우수한 열역학적 물성치를 가진 CFC (Chlorofluorocarbon)계 냉매들은 오존층 파괴에 심각한 영향을 주는 것이 확인되어 1987년 오존층 파괴물질에 관한 몬트리올 의정서에 따라 규제되었다. 이에 대한 대안으로 HCFC (Hydrochlorofluorocarbon)계 냉매와 HFC (Hydrofluorocarbons)계 냉매가 등장하게 되었다. 그러나 HCFC계 냉매 또한 염소를 포함하고 있어 오존층에 유해하다는 사실이 확인되면서 1992년 코펜하겐 개정의정서에서 규제되었다. 따라서 냉동분야에서는 ODP (Ozone Depletion Potential)의 값이 0에 가까운 HFC계 냉매가 주로 사용되어 왔다. 그러나 HFC계 냉매는 오존층 파괴에 대한 영향은 없지만 지구온난화에 큰 영향을 주는 것으로 확인되어, 높은 GWP (Global Warming Potential)를 가진 HFC계 냉매들은 1997년 교토의정서에 따라 온실가스로 분류되었고, 이후 2016년 키갈리 개정

서에서 구체적으로 규제되었다. HFC계 냉매가 차츰 규제됨에 따라 Low GWP 냉매인 HFO (Hydrofluoroolefin)계 냉매와 자연냉매가 주목받기 시작했다. 자연냉매는 CFC계 냉매가 등장하기 전부터 사용되어 왔고, 오랜 역사를 가지고 있다. 대표적인 자연냉매 중 하나인 이산화탄소는 많은 장점이 있으나 포화압력이 높고 누설 시 안전 문제로 특수한 용도에 사용되고, 암모니아는 독성과 부식의 문제가 있다. HFO계 냉매의 경우 성능이 우수한 기존 냉매와 물성치가 유사하지만 환경에 미치는 영향은 자연냉매와 유사하여 기존 냉매의 대체 냉매로 주목받고 있다.

이처럼 최근의 연구는 냉매규제에 따른 대체 냉매에 관련된 연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문의 작동유체인 R-1234yf는 HFO계 냉매로서 R-134a와 열역학적 물성치가 유사하여 R-134a의 Drop-in 대체 냉매로 주목받고 있다. 두 냉매의 GWP를 비교해보면 R-134a는 1,420으로 높은 값을 가지고 있어 규제 대상에 분류되는 반면 R-1234yf는 4로 낮은 값을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. Low-GWP 냉매로의 전환이 필수적인 만큼 Low-GWP 냉매의 연구 또한 필수적이며, 이에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다.

1.2 종래 연구

기존의 R-1234yf의 종래 연구들은 다음과 같으며 그 요약은 표. 1.2에 나타내었다.

Saitoh 등¹⁾은 내경 2 mm의 스테인리스 재질의 수평관에서 R-1234yf의 증발 열전달계수를 실험적으로 분석하였다. DC Power supply를 사용한 직접 가열방식으로 실험하였으며, 그 결과는 열유속의 영향이 낮은 건도에서는 큰 반면 질량유속의 영향은 높은 건도에서 크다는 것을 보였다. R-1234yf의 비등열전달계수는 R-134a와 거의 동일한 것으로 나타났고, 두 냉매의 열역학적 물성치 차이가 작기 때문이라고 판단했다. 기존 상관식과의 비교에서는 Saitoh²⁾의 상관식이 92.8%의 데이터가 $\pm 20\%$ 의 편차 범위로 양호하게 예측하였고, Yosida³⁾의 상관식은 51.9%의 데이터가 $\pm 20\%$ 의 편차 범위에 있어 가장 낮은 일치율을 보였다.

Oh 등⁴⁾은 내경 1.5 mm 및 3.0 mm인 스테인리스 수평관에서 R-1234yf의 2상 유동 증발열전달 과정의 열전달계수와 압력강하에 대한 연구를 수행하였다. 시험부는 직접가열방식을 택하였다. Oh 등은 층류가 증발하는 작은 관에서 핵비등이 낮은 건도에서 우세하다는 결과를 보였다. R-1234yf의 평균 열전달계수는 R-134a보다 약 20% 높게 나타났다. 이는 R-1234yf가 R-134a보다 표면장력과 밀도비가 작아 핵비등이 활발하게 일어나기 때문이라고 보고하였다.

Del Col 등⁵⁾은 내경 1 mm의 원형 마이크로 채널에서 R-1234yf의 국부 열전달계수를 측정하고 R-134a와 비교하였다. 가열방식은 이중관식 열교환기를 사용하였다. 결과는 두 냉매의 열전달계수는 유사한 값을 보였고, 동일한 조건에서 R-1234yf는 R-134a에 비해 10~12% 낮은 압력강하를 나타낸다고 보고하였다. 기존 상관식과의 비교에서는 Sun and Mishima⁶⁾의 상관

식이 평균 편차 -32%, 표준편차 8%로 양호하게 예측하였다.

Lu 등⁷⁾은 내경 3.9 mm 수평관에서 R-1234yf와 R-134a의 2상 대류 증발 열전달계수에 대한 열유속 및 질량유속의 영향을 연구했다. R-134a와 R-1234yf가 비슷한 경향을 보이고 R-1234yf와 R-134a사이의 열전달계수 차이가 매우 작다는 결과를 보였다. 그들은 실험의 결과는 유사한 열역학적 물성치와 핵비등의 영향이 그 원인이라고 판단했다. 또한 R-1234yf에 대한 열전달계수의 급격한 감소는 마이크로채널에서 발생하고, R-134a의 압력강하는 R-1234yf보다 약 5~15% 높다고 결론지었다.

Kim 등⁸⁾은 내경 1.5 mm, 3.0 mm의 수평관에서 R-1234yf의 증발열전달에 대한 실험을 수행하였다. 실험 데이터의 유동양식을 조사하고, 기존 유동양식선도와 비교하였다. 그들은 열전달계수가 Gungor and Winterton⁹⁾의 상관식이 양호한 예측을 보인다고 보고하였다.

Diani 등¹⁰⁾은 미니 마이크로-핀 튜브 내부의 R-1234yf 및 R-134a의 증발 열전달에 대한 실험 결과를 제시하였다. 마이크로-핀 튜브는 핀 끝의 내경이 3.4 mm, 외경이 4.0 mm이며 개수는 40개, 핀의 높이는 0.12 mm이다. 그들은 R-134a가 R-1234yf보다 증기 밀도가 16% 낮기 때문에 일정한 질량 유속에서 증기의 속도가 더 빠르기 때문에 강제대류에서 더 높은 열전달 계수를 가지지만 압력강하 또한 더 높은 값을 가진다고 판단했다.

Anwar 등¹¹⁾은 내경 1.6 mm의 수직관에서 R-1234yf 및 R-134a의 증발열 전달 및 압력강하 특성을 분석하였다. 결과는 비등열전달은 열유속과 작동압력에 의해 지배적으로 제어되고 질량유속과 건도에 크게 의존하지 않는다고 나타났다. 마찰압력강하는 질량유속 및 건도에 따라 증가하고 포화온도가 증가함에 따라 감소하였다. 두 냉매는 거의 동일한 열전달계수가 측정되었고, 국부 열전달계수는 Gungor and Winterton의 상관식이 가장 양호한 예측을 보였는데, R-1234yf는 데이터의 96.22%가 $\pm 20\%$ 의 편차 범

위 내에 있고 R-134a는 데이터의 97.18%가 $\pm 20\%$ 의 편차 범위 내에 있다고 보고하였다.

Yang 등¹²⁾은 내경 4 mm의 수평관에서 R-1234yf와 R-134a의 증발열전달을 분석하였다. 가열방식은 이중관식 열교환기를 사용하였다. 실험은 질량 유속 200~1200 kg/m²s, 열유속 10~57 kW/m², 포화온도 14°C의 범위에서 수행되었고, 결과는 R-134a의 열전달계수와 압력강하가 R-1234yf보다 더 높은 것으로 나타났다. 그 원인으로 Yang 등은 R-134a의 액상의 열전도도와 점성계수가 높기 때문이라고 판단하였다. Gungor-Winterton 상관식과 Shah¹³⁾의 상관식을 통해 예측한 결과는 Shah의 상관식은 데이터의 74%가 $\pm 20\%$ 의 편차 범위 내에 있는 반면, Gungor and Winterton의 상관식은 데이터의 41%만 $\pm 20\%$ 의 편차 범위 내에 있다고 보고하였다.

이처럼 종래 연구들을 살펴보면 R-1234yf의 열전달을 분석한 연구들은 많지만, 대부분 관경이 작은 관에 대해서 연구되어, 다양한 관경에서의 데이터가 부족한 실상이다. 따라서 본 논문에서는 내경 6.95 mm의 수평관내 R-1234yf의 증발열전달의 열전달계수 및 압력강하를 분석하고자 한다.

Table. 1.1 Summary of the evaporation heat transfer performance test results

Author	Refrigerant	D_i [mm]	Mass flux [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]	Heat flux [kW/m^2]
Saitoh et al. (2011)	R-134a, R-1234yf	2.0	100~400	6~24
Oh et al. (2012)	R-134a, R-1234yf	1.5, 3.0	50~600	5~40
Del Col et al. (2013)	R-134a, R-1234yf	1.0	200, 600	6~53
Lu et al. (2013)	R-134a, R-1234yf	3.9	200~400	5.7~19.2
Kim et al. (2014)	R-1234yf	1.5, 3.0	200~600	5~40
Diani et al. (2015)	R-134a, R-1234yf	3.4	190~940	10~50
Anwar et al. (2015)	R-134a, R-1234yf	1.6	100~500	5~130
Yang et al. (2018)	R-134a, R-1234yf	4	200~1,200	10~57

1.3 연구 목적 및 개요

본 논문에서는 R-1234yf를 내경 7mm의 스테인리스 스틸(SUS316)관을 통하여 여러 가지 조건에서 증발 열전달계수 및 압력강하를 분석하여 학술적으로는 해당 관경의 R-1234yf의 유동 특성 데이터를 제공하고, 공학적으로는 7mm 관경에 대한 열교환기 설계 데이터를 제공하고자 한다. 따라서 본 논문은 아래와 같이 구성된다.

제 1장에서는 연구 배경과 여러 종래 연구에 대해 설명하였다.

제 2장에서는 HFO계 냉매, 증발 열전달 상관식, 유동양식 선도 등 증발 열전달 실험 및 데이터 분석에 필요한 기초 이론을 설명하였다.

제 3장에서는 증발 열전달 실험 장치와 구성기기, 실험 방법, 데이터 정리 방법에 대하여 자세히 설명하였다.

제 4장에서는 연구를 통해 얻어진 데이터를 분석하고 고찰하였다.

제 5장에서는 결과를 바탕으로 최종적으로 결론을 도출하였다.

제 2 장 기초 이론

2.1 HFO계 냉매

HFO계 냉매는 간단하게 전술함과 같이 환경문제로 인한 냉매 규제의 대안으로 제시된 냉매이다. 올레핀(Olefin)은 지방족 불포화 탄화수소를 뜻하며 분자구조가 탄소 이중 결합을 가지고 있는 것을 말한다. 올레핀의 탄소 이중결합은 시그마(σ)결합과 파이(π)결합으로 구성되어 있다. 시그마(σ)결합에 비해 파이(π)결합은 쉽게 끊어진다. 그 이유는 시그마(σ)결합은 양성자와 양성자 사이의 직접적인 결합으로 인해 핵이 전자를 강하게 끌어당기는 반면, 파이(π)결합의 경우 양성자 측면에서 결합이 이루어지기 때문에 핵과 전자 사이의 거리가 멀어 상대적으로 약한 결합력을 가진다. 따라서 HFO계 냉매는 대기로 누설되었을 때, 자외선에 의해 이중 결합 중 끊어지기 쉬운 파이결합이 끊어지게 되면서 지구온난화에 큰 영향을 주지 않는다. 즉, HFO계 냉매는 대기 내 수명이 짧다. R-134a의 경우 대기로 누설되었을 때, 약 14년 정도 존속하지만 R-1234yf는 약 11일 정도 존속한다. Table 1.1은 HFO계 냉매의 GWP 및 대기 내 수명을 나타낸다. 그러나 HFO계 냉매에도 단점은 존재한다. 먼저 환경에 무해하지만, 기존에 사용되는 냉매보다 성능이 낮다는 점이 있다. 본 논문의 대상 냉매인 R-134a와 R-1234yf의 비교 연구들을 찾아보면 R-134a가 열전달계수와 압력강하가 높다는 연구결과들이 대부분을 차지한다. 또 다른 단점으로는 인화성이 있다. R-1234yf는 A2L 등급으로 약한 가연성을 가진다고 한다. A2L 등급은 인화성이 크게 높지는 않지만 누설시 화재의 주의가 필요하다. 다만 필수적으로 냉매의 전환이 이루어져야 하는 만큼 기존 냉매와의 차이를 정확히 예측하여 대체 냉매를 적용한 사이클을 설계하는 것이 중요할 것이다.

Table. 2.1 Life time of HFOs Refrigerant

Refrigerant	Chemical formula	Lifetime, days
R-1234yf	$\text{CF}_3\text{CF}=\text{CH}_2$	10.5
R-1234ze(E)	trans- $\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHF}$	16.4
R-1234ze(Z)	$\text{CF}_3\text{CH}=\text{CHF}(\text{Z})$	10.0

본 논문에서 사용되는 R-1234yf는 R-134a의 대체 냉매로서 후술할 실험 조건에서 두 냉매의 물성치는 Table. 2.2와 같다. 밀도, 열전도도, 점성계수, 비열 등 열역학적 물성치에 대해, 액체상태의 물성치는 R-134a가 크고 기체상태의 물성치는 R-1234yf가 크다. 액체, 기체가 상호작용하는 증발 열전달에서는 그 결과가 유사하게 나올 수 있음을 예상할 수 있다.

Table. 2.2 Comparison of properties of R-134a and R-1234yf at saturation temperature

Property	Unit	$T_{\text{sat}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_{\text{sat}} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$	
		R-134a	R-1234yf	R-134a	R-1234yf
Saturation pressure, P_{sat}	kPa	349.66	372.92	414.61	437.53
Liquid density, ρ_l	kg/m^3	1,278.1	1,160.4	1,261.0	1,144.0
Vapor density, ρ_v	kg/m^3	17.131	20.744	20.226	24.267
Liquid thermal conductivity, k_l	W/mK	89.806	73.422	87.618	71.978
Vapor thermal conductivity, k_v	W/mK	11.954	12.044	12.402	12.471
Liquid viscosity, μ_l	$10^{-6}\text{N}/\text{m}^2\text{s}$	250.11	197.10	234.87	185.64
Vapor viscosity, μ_v	$10^{-6}\text{N}/\text{m}^2\text{s}$	10.911	11.363	11.099	11.581
Liquid specific heat, $c_{p,l}$	J/kgK	1.3552	1.3080	1.3704	1.3274
Vapor specific heat, $c_{p,v}$	J/kgK	0.9206	0.94835	0.9455	0.9717
Surface tension, σ	$10^{-3}\text{N}/\text{m}$	10.844	8.6919	10.138	8.0364

2.2 증발 열전달 상관식

관내에서 증발 열전달 과정은 완벽한 해석이 불가능하다. 따라서 기존 연구들은 실험 결과를 바탕으로 상관식을 개발하고 비교하는데 초점이 맞추어져 있다. 본 장에서는 먼저, 증발 열전달에 관련된 상관식을 정리하고자 한다. 증발 열전달 상관식 중 대표적인 상관식은 Gungor and Winterton (1987), Kandlikar (1990), Liu and Winterton (1990)의 상관식이 있다. 세 가지의 상관식을 정리하고 실험 결과와 비교하고자 한다.

(1) Gungor and Winterton's correlation

Gungor and Winterton (1986)은 다음과 같은 상관식을 제시하였다. 다음 상관식은 Chen의 상관식을 기반으로 변형하여 제시하였다.

$$h_{fp} = S \cdot h_{NB} + E \cdot h_{CON} \quad (2.1)$$

이후 Gungor and Winterton(1987)¹⁴⁾은 식 1.1에서 $S \cdot h_{NB}$ 항을 $0.9S \cdot h_{NB}^{0.85}$ 로 수정하였다. 대류 열전달율(h_{CON})은 식 1.2와 같이 표현되며, 여기서 핵비등 열전달율(h_{NB})은 식 1.3과 같이 Cooper¹⁵⁾의 식을 사용하였다.

$$h_{CON} = 0.023 \frac{k_l}{D_i} Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} \quad (2.2)$$

$$h_{NB} = 55 Pr_r^{0.12} (-\log_{10} Pr_r)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67} \quad (2.3)$$

강제대류와 핵비등의 정도를 나타내는 S, E는 다음과 같이 표현된다.

$$S = \frac{1}{1 + 1.15 \cdot 10^{-6} E^2 Re_l^{1.17}} \quad (2.4)$$

$$E = 1 + 24000 \cdot Bo^{1.16} + 1.37 \left(\frac{1}{X_{tt}} \right)^{0.86} \quad (2.5)$$

수평관에서 Fr수가 0.05이하인 경우에는 S와 E에 S₂, E₂를 곱하여 보정한다.

$$S_2 = \sqrt{Fr_1} \quad (2.6)$$

$$E_2 = Fr_1(0.1 - 2Fr_1) \quad (2.7)$$

(2) Kandlikar's correlation¹⁶⁾

Kandlikar은 유체의 영향을 고려한 Bo수를 도입하여 Shah¹⁷⁾의 상관식을 개선하여 제시하였다.

$$h_{fp} = h_{CON} [(C_1 Co^{C_2} (25Fr_1))^{C_5} + C_3 Bo^{C_4} Fr_1] \quad (2.8)$$

$$h_{CON} = 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} \frac{k_l}{D_i} \quad (2.9)$$

C₁부터 C₅까지의 값은 Table 1.2에 나타나있다. Co=0.65를 기준으로 핵비

등($Co > 0.65$)과 대류비등($Co < 0.65$)으로 구분된다. 또한 F_{fl} 은 SUS316 관에서 1의 값을 가진다.

Table. 2.3 Constant of Kandlikar's correlation

Constant	Convection boiling region	Nucleate boiling region
C_1	1.1360	0.06683
C_2	-0.9	-0.2
C_3	667.2	1,058.0
C_4	0.7	0.7
C_5	0.3	0.3

(3) Liu and Winterton's correlation¹⁸⁾

Liu and Winterton은 Chen의 상관식과 Kutateladze¹⁹⁾의 상관식을 토대로 다음과 같은 상관식을 제시하였다.

$$h_{fp} = [(S \cdot h_{NB})^2 + (E \cdot h_{CON})^2]^{1/2} \quad (2.10)$$

$$h_{NB} = 55Pr^{0.12} (-\log_{10} Pr)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67} \quad (2.11)$$

$$h_{CON} = 0.023 Re_i^{0.8} Pr_i^{0.4} \frac{k_l}{D_i} \quad (2.12)$$

$$S = \frac{1}{1 + 0.55 E^{0.1} Re_i^{0.16}} \quad (2.13)$$

$$E = [1 + x Pr_i (\frac{\rho_l}{\rho_v} - 1)]^{0.35} \quad (2.14)$$

$$h_{tp} = E \cdot h_{CON} \quad (2.15)$$

$$E = 1 + 3000Bo^{0.86} + 1.12 \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.41} \quad (2.16)$$

2.3 유동양식선도

증발 열전달 과정은 유동의 양상에 따라 열전달계수 및 압력강하가 크게 달라진다. 이러한 사실은 냉매의 열전달 실험 중 유동양식을 분석하는 것이 중요함을 말해준다. 유동양식선도 (Flow pattern map)는 실험적인 연구와 이론적인 근거를 바탕으로 계면의 구조나 계면 영역의 정보를 제공하고 천이구간의 모델링을 가능하게 한다.

Fig. 1.1은 수평 2상유동에 널리 사용되는 Taitel and Dukler (1976)²⁰의 유동양식선도이다. 따라서 본 논문에서는 이 선도를 사용하고자 한다. Taitel and Dukler의 유동양식선도는 이론적인 방법을 기반으로 하였고, 선도의 수평 좌표는 Martinelli 매개 변수이고 수직 좌표는 좌측에 K, 우측에 T or F이다. T는 후술할 온도와 겹치기 때문에 본 논문에서는 T_{TD}로 사용하도록 한다. 식 2.17~2.23은 각 변수와 경계구간을 나타낸다.

$$T_{TD} = \left[\frac{(dp/dz)_l}{g(\rho_l - \rho_v) \cos \theta} \right]^{1/2} \quad (2.17)$$

$$F = \left[\frac{\rho_v j_v^2}{g(\rho_l - \rho_v) d \cos \theta} \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

$$K = \left[\frac{\rho_v j_v^2 j_l}{g(1 - \rho_v/\rho_l) \mu_l \cos \theta} \right]^{1/2} \quad (2.19)$$

$$X = \sqrt{\frac{(dp/dz)_l}{(dp/dz)_v}} \quad (2.20)$$

$$\log f_{T_{TD}} = 0.095456 - 0.08997 \log_{10} X - 0.03097 (\log_{10} X)^2 - 0.0034326 (\log_{10} X)^3 \quad (2.21)$$

$$\log f_F = -[0.67728 + 0.83232 \log_{10} X + 0.25945 (\log_{10} X)^2 + 0.027107 (\log_{10} X)^3] \quad (2.22)$$

$$\log f_K = 0.77997 - 0.11641 \log_{10} X - 0.2378 (\log_{10} X)^2 + 0.0064732 (\log_{10} X)^3 + 0.010108 (\log_{10} X)^4 \quad (2.23)$$

각 구간은 다음과 같다.

Stratified Wavy flow : $F \leq f_F$ and $K \geq f_T$

Intermittent flow : $X \geq 1.6$, $T < f_T$ and $F \geq f_F$

Annular flow : $X < 1.6$ and $F \geq f_F$

Bubble flow : $X \geq 1.6$ and $T_{TD} \geq f_T$

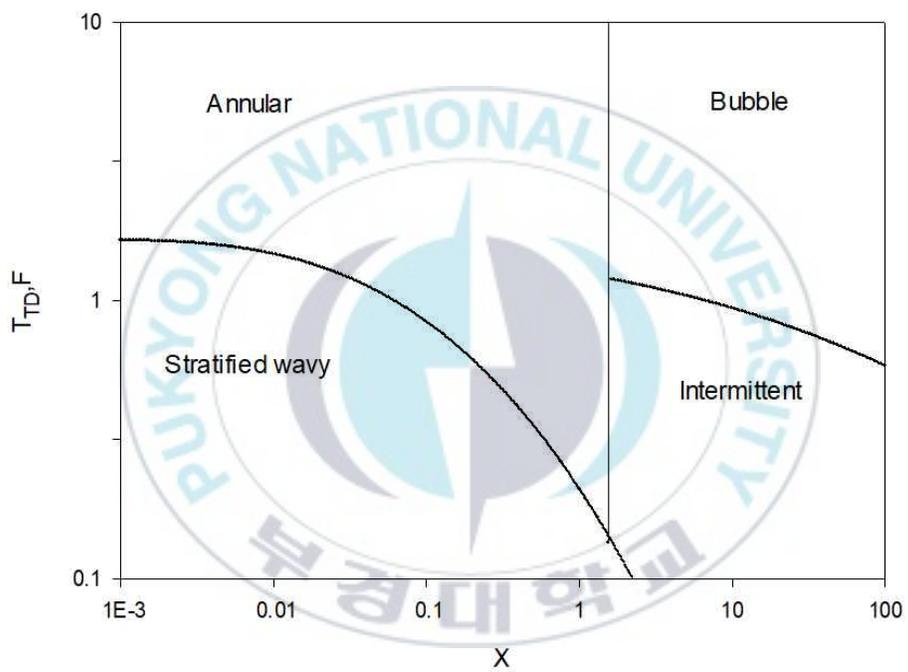


Figure. 2.1 Flow pattern map of Taitel and Dukler (1976)

제 3 장 증발 열전달 실험 장치 및 방법

3.1 증발 열전달 실험

본 논문에서 수행한 강제대류 증발 열전달 과정은 액체-기체의 2상 유동특성때문에 복잡한 형태로 나타난다. 자연대류와 다르게 핵비등 과정에서 가열면 상의 기포는 성장과정 중 냉매의 유동에 의한 유동전단력에 의해 이탈되기 때문에, 기포의 평균 크기는 자연대류비등보다 작고 이탈 빈도는 증가한다. 먼저 과냉각 된 냉매는 액체가 포화온도에 도달할 때까지 가열면의 온도가 핵 생성이 가능한 온도보다 낮게 유지된다. 그러므로 열전달 과정은 액체의 단상 강제대류 열전달로 이루어진다. 과냉액의 단상 강제대류 열전달 영역에서 포화핵비등 영역으로의 천이는 액체가 포화온도에 도달하는 지점을 기준으로 한다. 포화온도에 도달하여 포화 핵비등 영역으로 천이하게 되면 핵비등이 일어난다. 이후 핵비등영역에서 건도가 증가하면 열전달과정은 다시 변화하게된다. 이때를 비등과정에서 증발과정으로 천이되는 구간으로 정의하는데 보통 유동양식이 환상류로 천이할 때를 기준으로 한다. Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 수평관의 유동양상을 나타낸다. Fig. 3.1은 액상 유량에 따라서 달라지는 유동양식을 나타내고, Fig. 3.2는 수평관 내 증발열전달 과정에서의 유동양식의 변화를 나타낸다. 전술하였듯 증발 열전달은 액상의 냉매가 주변으로부터 열을 받아 기상으로 변화하는 과정에 두 상의 상호작용에 의해 복잡한 과정을 거치며 변화한다. 좌측에서 액상의 유체가 공급되고 열유속이 가해졌을 때 먼저, 액상 유체의 온도가 상승하여 포화온도에 도달하게 되면 가열면의 온도가 핵 생성에 충분한 과열도를 가지게 된다. 이때 기포가 생성되고 지속적으로 기포는 성장하게 된다. 기포가 충분히 성장하면 유

동 전단력에 의해 기포는 가열면에서 이탈하게 되고 이러한 과정이 관 전체에서 일어나게 되고 이때의 유동양식을 기포류라 한다. 이후 상대적으로 속도가 빠른 기포들은 유동의 중심부로 모이게 되고 합쳐지면서 파형류 또는 스리그류로 천이하게 된다. 이후 기체의 난류유동에 의해 하부의 액체가 상부에 국소적으로 부딪히게 되는데, 이러한 과정이 이어지며 유체는 유동의 가장자리로 액막이 형성되고 유동의 중간으로 기체가 지나가는 환상류로 천이하게 된다. 이러한 천이구간이 전술하였던 비등 과정에서 증발과정으로 열전달기구가 바뀌는 기준점이 되며, 이때 유동은 핵비등이 억제되고 대류비등이 지배적인 열전달 과정으로 바뀐다. 자세한 과정을 서술하면 환상류영역에서 열유속이 가해지는 관의 내벽면에 액막이 존재하게 되는데, 이때 열유속은 액막을 통해 액체-기체 계면으로 전달되고 액체는 계면에서 지속적으로 증발한다. 따라서 가열면의 온도는 핵 생성에 필요한 과열도를 가질 수 없어 핵비등은 억제된다. 이를 강제대류비등영역이라 한다. 이후 건도가 더 증가하게 되면 액막이 모두 증발하여 드라이아웃 (Dry-out)현상이 발생한다. 이때 가열면의 온도는 급격하게 올라가고 열전달계수는 급격하게 떨어진다. 이렇게 증발 열전달과정은 복잡한 유동형태를 보인다. 유동양식에 큰 영향을 주는 기포의 생성 및 이탈, 기체와 액체의 속도의 차이 등은 유체의 점성계수, 표면장력 등 물성치의 영향이 가장 크다. 따라서 본 논문에서는 R-1234yf의 각 변수에 따른 열전달계수와 압력강하를 분석하고자 한다.

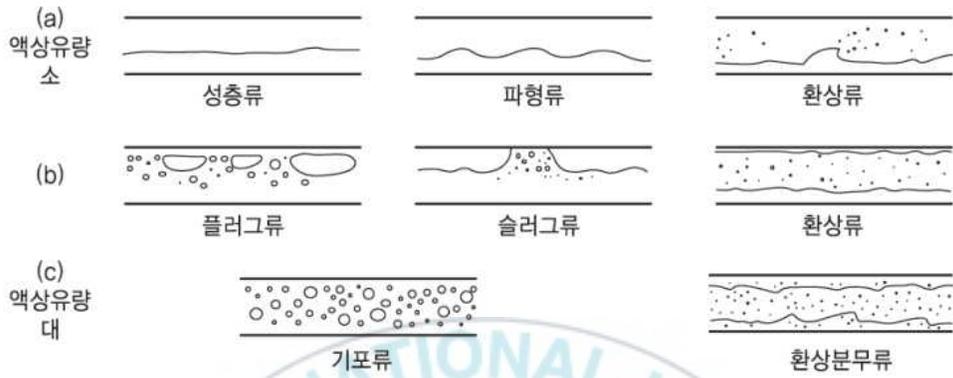


Figure. 3.1 Two-phase flow pattern according to mass flow in horizontal tube

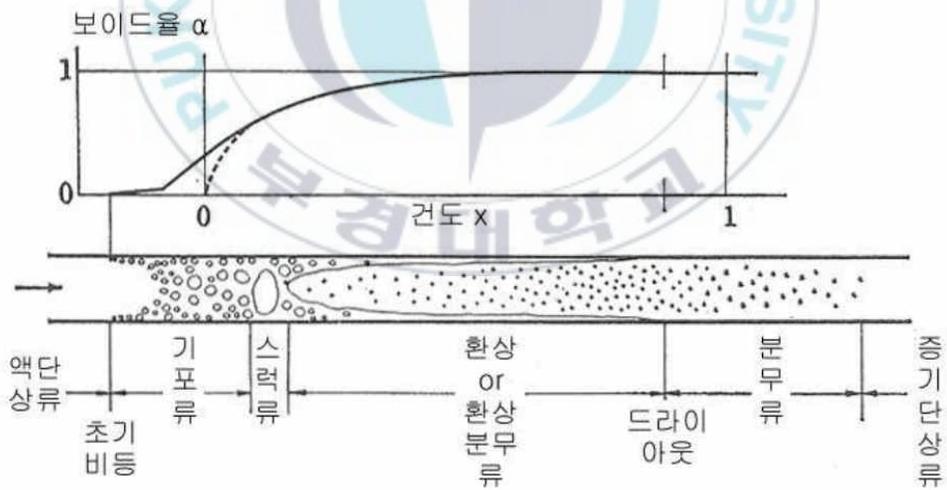


Figure. 3.2 Flow pattern variation in horizontal tube while evaporation

3.1.1 증발 열전달 실험 장치

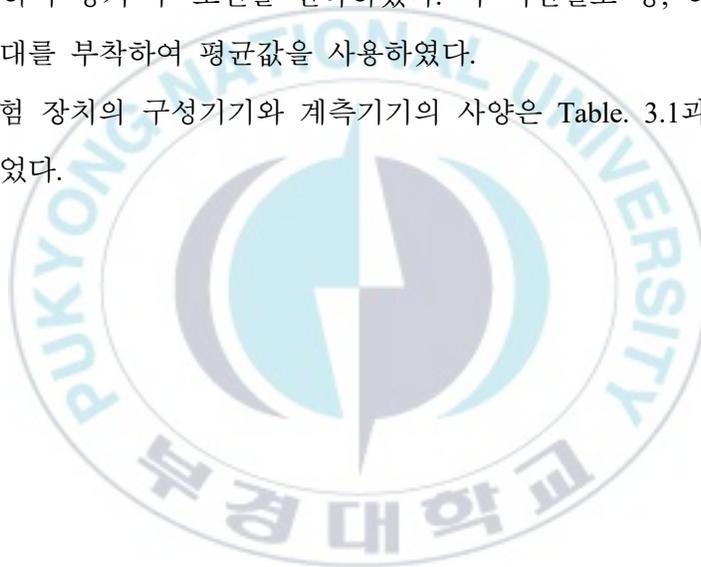
Fig. 3.3은 전체 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 압축기 없이 마그네틱 기어펌프를 이용한 실험 장치로 냉동기유가 제외된 오로지 냉매의 유동 특성을 파악하기 위해 기어펌프를 선택하였다. 장치는 열전달계수와 압력 강하를 측정할 수 있도록 구성되었다. 실험 장치는 수액기와 삽입된 열교환기, 판형 열교환기, 마그네틱 기어펌프, 질량유량계, 예열기, 시험부로 구성되어 있다. 냉매는 수액기에 삽입된 열교환기와 수액기 전단의 판형 열교환기에서 과냉각상태로 냉각된다. 이후 마그네틱 기어 펌프를 통해 토출되고 질량유량계에서 냉매의 질량유량을 측정한다. 이후 2개의 예열기를 통해 입구 건도 조건을 조절하고 시험부로 들어가 증발과정을 거쳐 다시 판형 열교환기와 수액기에서 액화 및 과냉되며 사이클이 완성된다. 예열기의 용량은 각 5 kW, 2 kW이고 시험부는 DC 파워서플라이(20 V, 200 A)에서 공급된 전류를 통해 직접적으로 가열되는 직접가열방식을 사용하였다. 이러한 방식은 시험부 전체에 균일한 열유속이 가해져 실험의 정확도를 높일 수 있다. 이때, 계측기의 측정 오차를 줄임과 동시에 실험의 신뢰성을 높이기 위해서 질량유량계 전단은 약 50 cm, 시험부 전단에서 약 3 m 정도 유동 안정 구간을 확보하였다.

Fig. 3.4는 시험부의 상세 개략도를 나타낸다. 소구간은 15 cm로 총 20 구간으로 구성하였고, 시험부의 총 길이는 3 m로서 낮은 열유속에서 고건도의 데이터를 얻을 수 있도록 길게 설계하였다. 파워 서플라이의 성능을 고려하여 전기저항이 적절하며 저항의 일정함과 열적 균일함을 유지하기 위해서 이음매가 없는 스테인리스 스틸(SUS 316)재질의 관을 사용하였다. 시험부에 사용된 SUS 316관의 고유저항은 $740 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$, 열전도도는 300 K에서 $13.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 이며 외경은 9.25 mm, 내경은 7 mm이다. 실험은 시험부에

직접적으로 전압을 인가하는 방식이기 때문에 시험부 양 끝에 절연피팅을 사용하여 시험부 이외의 부분과 전기적으로 절연하였다. 또한 유리섬유 단열재와 고무발포 단열재를 사용하여 이중으로 단열함으로써 외부로의 발열을 방지하였다.

Fig. 3.5은 시험부의 상세 단면도이다. 열전대의 측정 원리상 시험부와 전기적으로 절연되어야 하고, 벽면 온도와 열전대가 측정한 온도의 차이가 작아야 하므로 열전도도가 높고 전기적으로 절연할 수 있는 써멀 테이프를 사용하여 상기 두 조건을 만족하였다. 각 섹션별로 상, 하, 좌, 우 4개의 열전대를 부착하여 평균값을 사용하였다.

전체 실험 장치의 구성기기와 계측기기의 사양은 Table. 3.1과 Table. 3.2에 나타내었다.



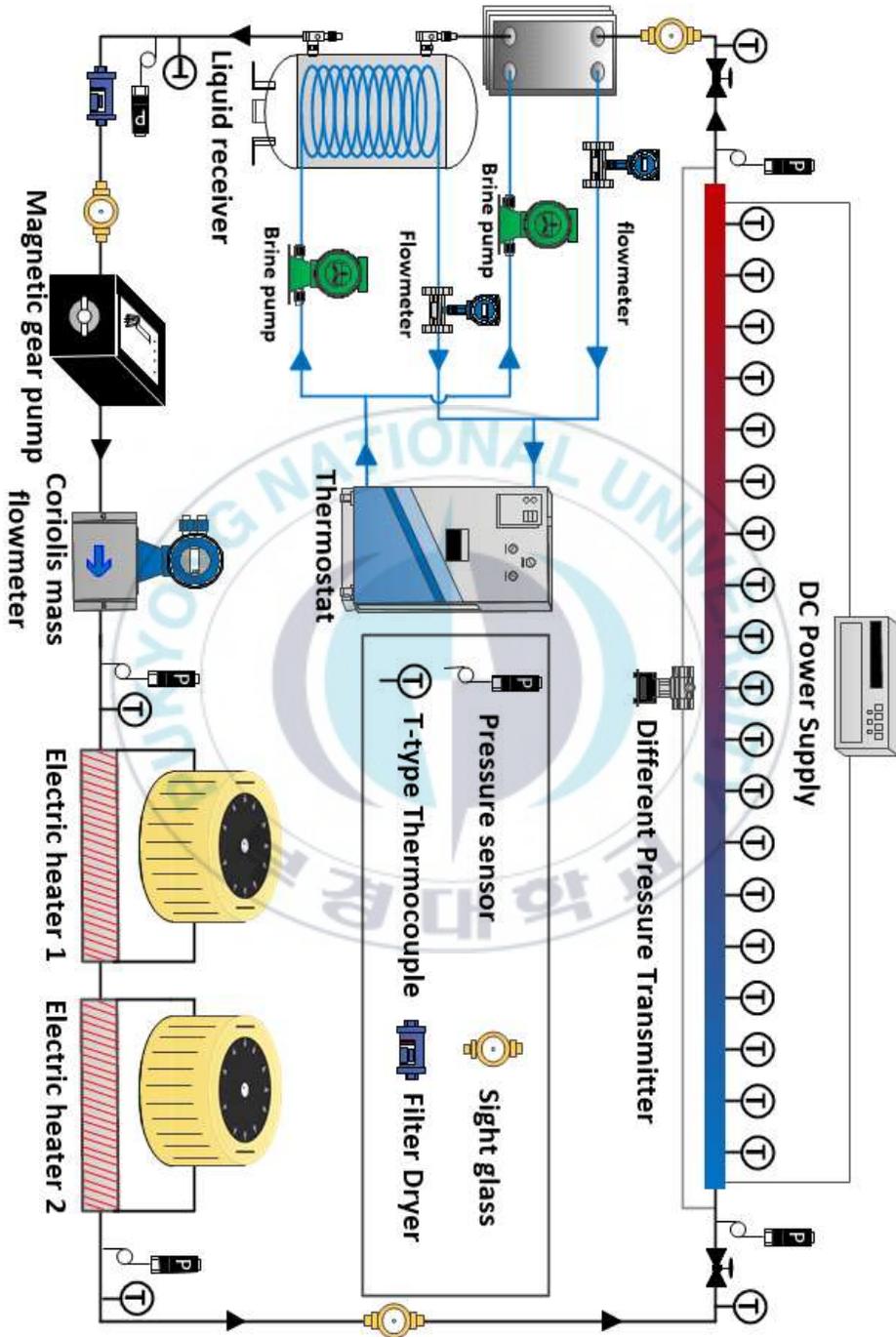


Figure. 3.3 Schematic diagram of test equipment



Figure. 3.4 Schematic diagram of test section

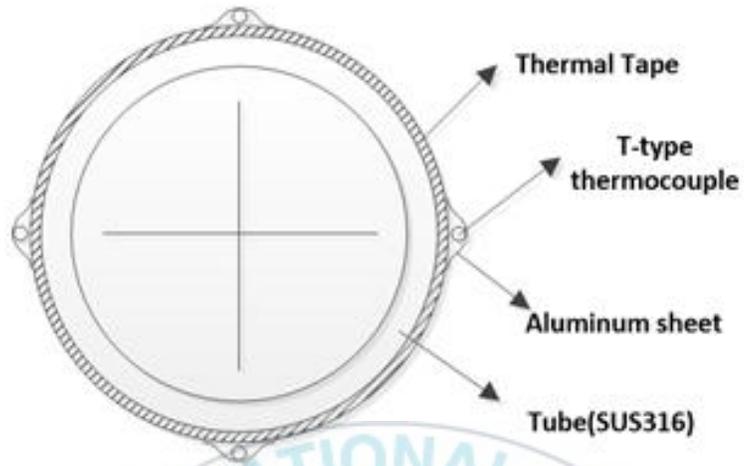


Figure. 3.5 Detail view of test section

3.1.2 계측기

(1) 온도

시험부의 경우, 관 내벽면의 온도를 측정하기 위해 온도센서를 부착하는 것이 불가능하여 외벽면의 온도를 측정하여 1차원 열전도 방정식을 통해 대략적인 값을 이용한다. 시험부 이외의 실험 장치의 온도센서는 삽입형 T-type 열전대를 사용하여 실제 냉매의 온도를 직접 측정하였다.

(2) 압력

전체 실험 장치의 압력센서는 절대압계와 차압계 두 가지의 종류이다. 절대압계는 시스템의 압력을 결정하는 수액기 후단, 냉매에 가해주어야 할 열량을 결정하기 위해 예열기의 전단, 시험부의 양 끝단에 설치되어 절대압을 측정한다. 차압계는 시험부의 양 끝단에 설치되어 시험부의 압력강하를 측정한다. 수평관의 차압은 그 값이 시스템의 압력에 비해 굉장히 작기 때문에 절대압계의 압력 차이로는 정확하게 측정하기 어렵다. 따라서 냉매의 압력강하는 차압계를 사용하여 정밀하게 측정한다.

(3) 전력

예열기에 공급되는 열량은 전력 측정기(WT-210)를 사용하여 냉매에 가해지는 열량을 측정하였다. 시험부에 가해지는 전력은 DC 파워서플라이의 전면부 디스플레이에 표시된다.

(4) 질량유량

예열기와 시험부의 열유속을 결정하기 위해 냉매의 질량유량은 필수적이다. 마그네틱 기어펌프의 후단부에 콜리올리스 질량유량계를 통해 냉매의 질량유량을 측정하였다.



Table. 3.1 Specification of the accessory components used in this study

Magnetic gear pump	Manufacturer : OMP Model : MG300 Connection diameter : 1/4 [inch] Flow range : 300 to 600 [mL/min]
DC Power supply	Manufacturer : MK-POWER Model : MK-30200AS Input : AC 3-phase 380 [V] 60 [Hz] Output : DC 30.0 [V], 200.0 [A]
Liquid receiver	Manufacturer : DongHwaWin Model : DHRV-100 Receiving volume : 15 [L]
Brine thermostat	Manufacturer : P.K. tec Power : 3 Phase, 380 [V] Capacity : 11.58 [kW] Refrigerant : HFC-410A
SLIDE-AC 1	Manufacturer : Daekwang Electric Power : 0~5 [kW]
SLIDE-AC 2	Manufacturer : Daekwang Electric Power : 0~2 [kW]
Dielectric fitting	Model : DEU6 Electrical resistance : $10 \cdot 10^6$ [Ω] Voltage breakdown resistance : DC 3000 [V]

Table. 3.2 Specification of the measuring instruments used in this study

Data logger	Manufacturer : YOKOGAWA Model : GM10 Accuracy : $\pm 0.2\%$
Flow meter	Manufacturer : OVAL Model : CN006-CT9401 Flow range : 0~6 [kg/min] Accuracy : $\pm 0.1\%$
T-type thermocouple	Manufacturer : OMEGA Model : TT-T-24S Range(max) : 200°C Accuracy : $\pm 0.75\%$
Pressure transmitter	Manufacturer : Sensys Model : PSCE0030BCPJB Range : 0 - 30 [bar] Accuracy : $\pm 0.25\%$
Differential pressure transmitter	Model : DPS20 Range : 0 to 100 [kPa] Operating temperature : -25 to 80°C Accuracy : $\pm 0.25\%$

3.1.3 실험 방법

본 논문에 사용된 실험장치는 직접 제작한 것이다. 장치를 완성한 뒤 N₂ 가스를 수액기 후단부의 서비스밸브를 통해 주입한다. 약 1500 kPa의 압력을 가한 뒤, 비눗물을 이용하여 장치 전체의 누설 여부를 확인한다. 이후 24시간 동안 압력을 유지하는 지 확인하여 기밀 시험을 완료한다.

본 논문의 작동유체인 R-1234yf를 충전할 때, 액상의 냉매를 넣어주기 위해 항온조를 작동시켜 저온을 유지하여 충전한다. 또한 모든 데이터는 각 변수들이 정상상태에 도달한 뒤 1초 간격으로 15분간 수집되었다. 데이터들은 데이터로거를 통해 직접적으로 컴퓨터에 전송 및 기록되었으며, 정상상태의 기준은 온도 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 압력 ± 10 kPa, 질량유량 ± 0.2 kg/s이다. 실험 방법은 아래의 과정을 따른다.

1. 마그네틱 기어펌프를 작동시켜 실험 냉매 유량을 조절한다.
2. 브라인 항온조를 작동시켜 시스템 전체 압력을 조절한다. 냉매가 과충전되거나 충전량이 부족하면 시스템의 포화온도, 압력의 형성이 어려워지기 때문에 장치에서 냉매를 주입 및 방출하여야 한다.
3. 예열기 입구의 압력, 온도를 바탕으로 예열기에 가해줘야 할 열량을 계산하여 공급한다.
4. 시험부 입구의 압력, 온도를 바탕으로 측정에 필요한 열량을 계산하여 직류전원 공급기를 사용하여 필요한 열량을 공급한다.
5. 장치의 정상상태 도달을 확인한 뒤 각 변수들을 필요한 만큼 미세 조절한다.
6. 다시 정상상태에 도달하면 실험을 수행한다.
7. 각 변수들의 조건을 변경하여 실험을 반복한다.

3.1.4 실험 조건

냉매의 증발 열전달 과정은 전술하였듯 유동양식에 의존한다. 이러한 유동양식은 열유속, 질량유속, 포화온도 및 압력에 따른 냉매의 물성치에 의해 결정된다. 따라서 본 논문에서는 열유속, 질량유속, 포화온도를 변화시키며 냉매의 열전달계수 및 압력강하를 측정하였다. 질량유속 100~400 kg/m²s, 열유속 6~24 kW/m², 포화온도는 5, 10 °C 범위에서 건도의 변화에 따른 열전달계수와 압력강하를 살펴보았다. 실험의 작동유체인 R-1234yf는 공조용 냉매이기 때문에 포화온도 범위를 5, 10 °C로 정하여 실험하였다. 실험조건은 Table. 3.2에 정리하였다.

Table. 3.3 Experimental conditions

Parameter	Unit	Value
Refrigerant	-	R-1234yf
Quality	-	0 ~ 1
Saturation temperature	°C	5, 10
Mass flux	kg/m ² s	100 ~ 400
Heat flux	kW/m ²	6 ~ 24
Tube length	mm	3,000
Tube diameter	mm	6.95

3.2 데이터 정리

실험에서 얻어진 각 지점에서 냉매의 온도 및 압력을 통하여 이론적 배경을 바탕으로 열전달계수 및 압력강하를 분석하여야 한다. 본 절에서는 열전달 및 압력강하를 분석하는 방법을 설명하고자 한다. 모든 R-1234yf의 물성치 계산에는 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 냉매의 물성치를 계산해주는 프로그램 ‘REFPROP(Ver. 8.0)²¹⁾’을 사용하였다.

3.2.1 열전달

시험부에 전달되는 열량은 줄의 법칙에 의해 DC 파워서플라이가 가해진 열량으로 계산한다.

$$Q = V \cdot I \quad (3.1)$$

Q [kW]는 시험부에 가해지는 열량, V는 전압이고 I는 전류이다. 열유속 q [kW/m²]은 계산된 열량에서 전열면적을 나누어 다음과 같이 계산한다.

$$q = \frac{Q}{\pi D_i L} \quad (3.2)$$

시험부의 각 구간마다 측정된 관 외벽면의 온도는 상, 하, 좌, 우 측정 온도 4개의 평균을 사용한다.

$$T_{wo} = \frac{T_{top} + T_{bottom} + T_{left} + T_{right}}{4} \quad (3.3)$$

측정된 온도는 관외벽면의 온도이고, 관내벽면의 온도는 알 수 없다. 따라서, 관내벽면의 온도는 간접적으로 계산하여야 한다. 시험부는 균일한 열이 발생하며 등방성인 재료로 열적, 전기적으로 균일하기 때문에 발열이 있는 1차원 열전도 방정식을 이용하여 관내벽면의 온도를 다음과 같이 간접적으로 구한다.

$$T_{wi} = \frac{\dot{q}r_o^2}{4k} \left[1 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 \right] + \frac{\dot{q}r_o^2}{2k} \ln \left(\frac{r_i}{r_o} \right) + T_{wo} \quad (3.4)$$

관내벽면의 온도와 냉매의 포화온도, 열유속을 통해 열전달계수를 계산한다.

$$h = \frac{q}{T_{wi} - T_{sat}} \quad (3.5)$$

포화온도는 시험부의 측정된 압력과 차압을 통하여 ‘REFPROP’ 프로그램을 사용하여 구하였다. 이때 압력강하는 선형적이라고 가정한다.

$$X = \frac{i - i_{l,sat}}{i_{lv}} \quad (3.6)$$

건도는 위와 같이 정의되며 각 지점에서의 비엔탈피는 입구 엔탈피에서 열유속에 측정 지점까지의 전열면적을 곱한 뒤 질량유속을 나누어 다음과 같이 계산한다.

$$i = i_{in} + \frac{q \cdot \pi \cdot D_i \cdot L_{measured}}{G} \quad (3.7)$$

3.2.2 압력강하

관 내부에서 상 변화하며 유동하는 유체의 압력강하는 크게 세 가지 항의 합으로 나타난다. 정압에 의한 압력강하(ΔP_{static}), 운동량에 의한 압력강하($\Delta P_{momentum}$), 마찰에 의한 압력강하($\Delta P_{friction}$)이다. 식 3.8은 전체 압력강하를 표현한다.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{static} + \Delta P_{momentum} + \Delta P_{friction} \quad (3.8)$$

측정된 값은 전체 압력강하(ΔP_{total})이고, 분석하고자 하는 값은 마찰에 의한 압력강하이기 때문에 측정된 압력강하에서 두 항을 빼주어야 한다.

먼저 수평관내 유동에서는 정압 수두에 의한 압력손실이 없기 때문에 $\Delta P_{static} = 0$ 이다. 운동량에 의한 압력강하는 다음과 같이 계산하였다.

$$\Delta P_{momentum} = G^2 \left\{ \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_v\alpha} \right]_{out} - \left[\frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_v\alpha} \right]_{in} \right\} \quad (3.9)$$

여기서 기공률(α , Void fraction)은 다음과 같이 계산한다.

$$\alpha = \frac{x}{\rho_g} \left[(1 + 0.12(1-x)) \left(\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \right) + \frac{1.18(1-x)[g\sigma(\rho_l - \rho_g)]^{0.25}}{G^2 \rho_l^{0.5}} \right]^{-1} \quad (3.10)$$

이렇게 계산한 두 항과 측정된 압력강하를 식 2.8을 이용하여 마찰에 의한 압력강하를 계산한다.

제 4 장 실험 결과

4.1 열전달계수

(1) 질량유속의 영향

Fig. 4.1과 Fig. 4.2는 포화온도 5, 10°C에서 질량유속의 변화에 따른 열전달계수를 나타내는 그래프이다. 먼저, 실험 전체적으로 건도가 증가함에 따라 열전달계수도 증가하나, 고건도 영역에서 급격하게 감소하는 구간이 발생한다. 이는 건도가 증가하면 기체 비율이 높아지면서 난류가 형성되고 환상류가 발달하며 열전달계수가 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 액막이 전부 증발하면서 가열면의 온도가 높아져 열전달계수가 급격히 감소하는 Dry-out 현상이 발생한 것으로 판단된다.

질량유속이 증가할수록 열전달계수가 증가한다. 이는 냉매의 속도가 빨라지며 Re수가 커지고 유동이 빠르게 발달하기 때문인 것으로 판단된다. 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서는 질량유속의 영향이 적게 나타나지만 대류비등이 지배적인 고건도 영역에서는 질량 유속의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

(2) 열유속의 영향

Fig. 4.3과 Fig. 4.4는 포화온도 5, 10°C에서 열유속의 변화에 따른 열전달계수를 나타내는 그래프이다. 열유속은 대표적으로 핵비등에 많은 영향을 주는 인자이다. 열유속이 증가할수록 열전달계수가 증가한다. 또한 열유속의 영향은 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서 크게 나타나고

대류비등이 지배적인 고건도 영역에서는 그 영향이 적다. 이는 열유속이 높아지면 가열면의 과열도가 높아져 핵 생성 및 성장이 활발하게 이루어지기 때문인 것으로 판단된다. 증기건도가 증가함에 따라 유동양식은 기포류 및 스텝류에서 환상류로 천이하게 되는데, 전술하였듯 이 때 액막은 충분히 얇아 가열면으로부터 공급받은 열유속을 기체-액체 계면으로 전도와 대류를 통하여 전달한다. 따라서 가열면의 과열도는 핵 생성조건을 만족하지 못하게되고 기체-액체 계면에서 지속적인 액막의 증발이 일어난다. 핵비등이 지속적으로 일어나기 위해서는 액체의 열전도도가 낮거나 액막의 두께가 충분히 두꺼워야 한다. R-1234yf의 경우는 결과에서 알 수 있듯 증기건도 이후 고건도영역에서 환상류로 천이하며, 대류비등이 지배적이고 핵비등이 억제된다.

(3) 포화온도의 영향

Fig. 4.5는 질량유속 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 열유속 12 kW/m^2 에서 포화온도 $5, 10^\circ\text{C}$ 의 열전달계수를 나타내는 그래프이다. 포화온도의 영향은 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서 열전달계수의 차이가 두드러지게 나타나고 고건도 영역으로 갈수록 그 차이가 감소하는 것을 알 수 있다. R-1234yf는 포화온도가 증가하면서 표면장력이 낮아진다. 표면장력이 낮아지면서 핵발생과 기포 성장에 필요한 요구 과열도가 줄어들게 되어 동일한 조건에서 포화온도가 증가할수록 핵비등 영역에서 열전달계수가 증가하는 것으로 판단된다.

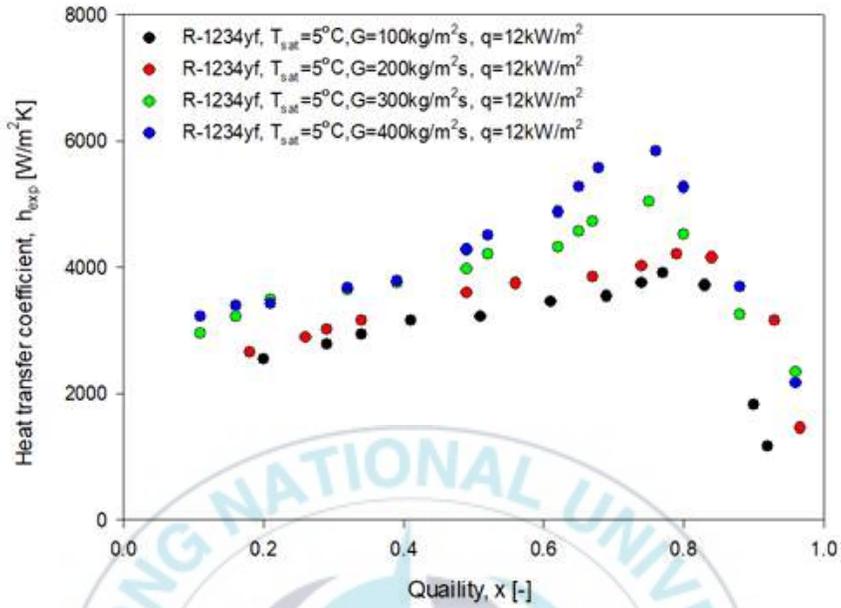


Figure. 4.1 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to mass flux at saturation temperature 5°C

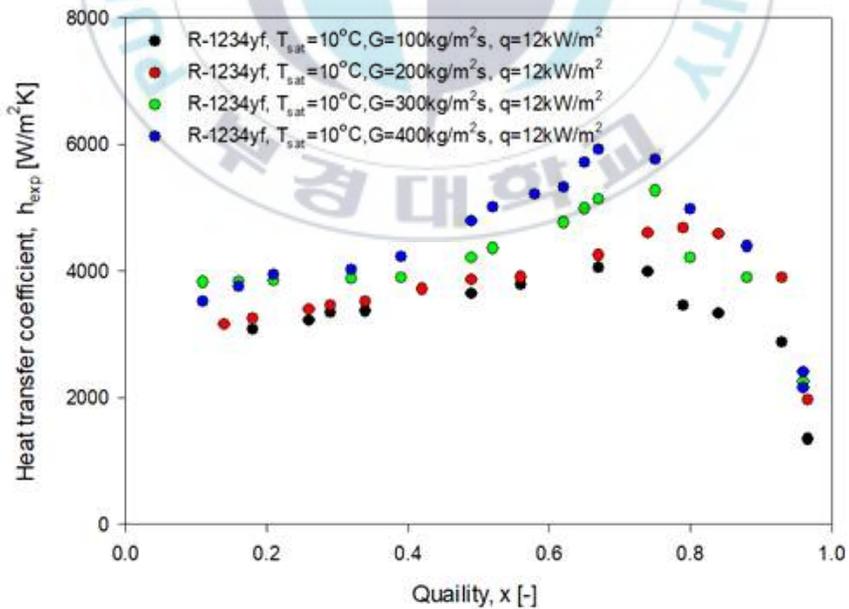


Figure. 4.2 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to mass flux at saturation temperature 10°C

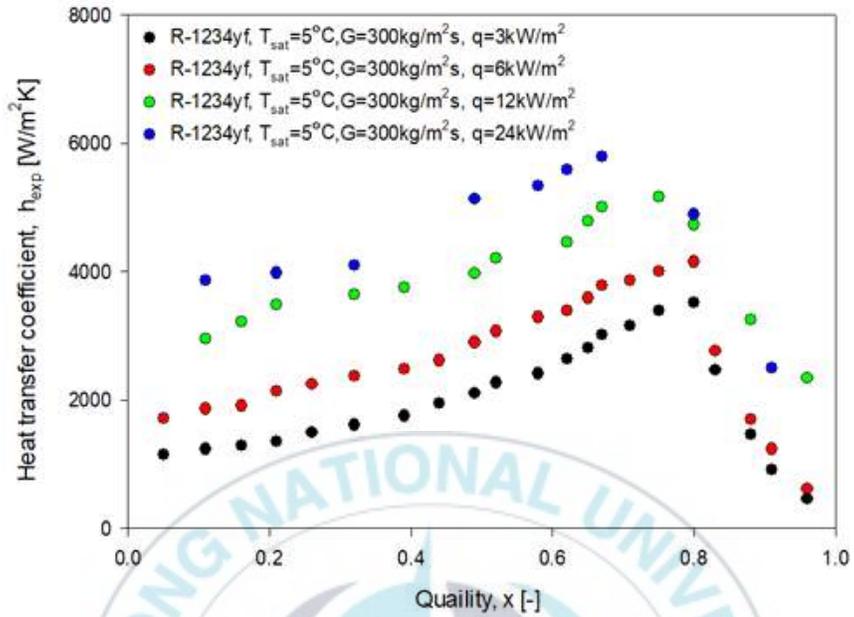


Figure. 4.3 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to heat flux at saturation temperature 5°C

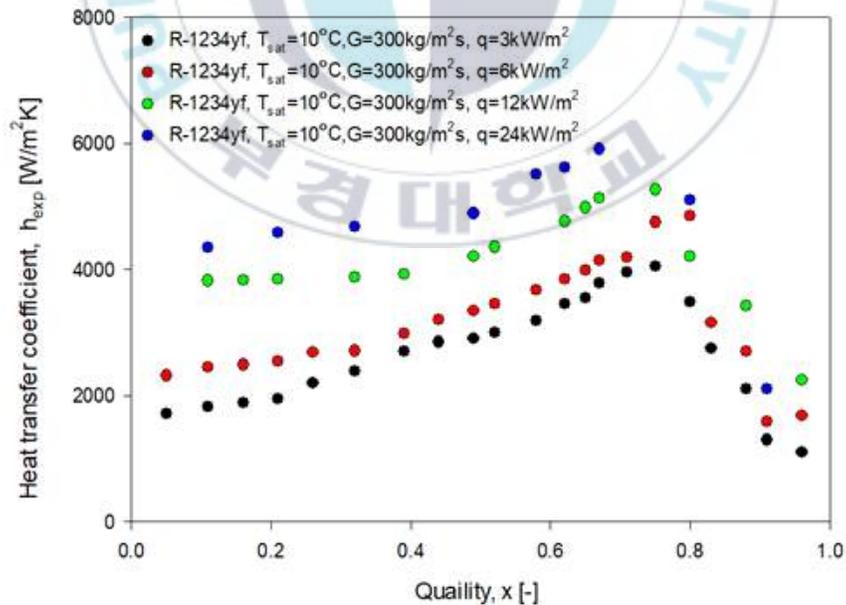


Figure. 4.4 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to heat flux at saturation temperature 10°C

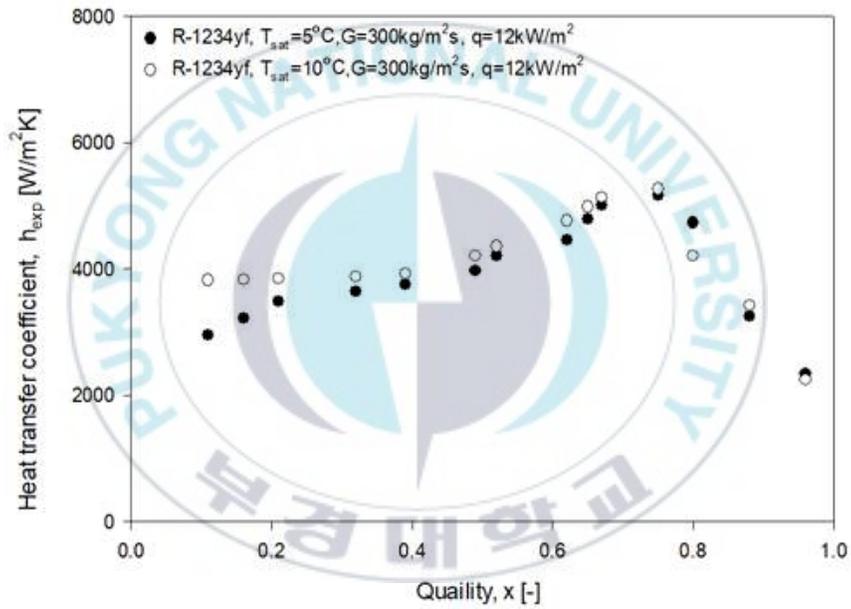


Figure. 4.5 R-1234yf evaporation heat transfer coefficient according to saturation temperature

(4) R-134a와 비교

Fig. 4.6은 R-1234yf와 R-134를 질량유속 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 열유속 12 kW/m^2 , 포화온도 $5, 10^\circ\text{C}$ 에서의 열전달계수를 나타내는 그래프이다. 그래프에 나타나듯 R-134a의 열전달계수가 미세하게 높은 것을 알 수 있다. 이는 앞서 Table. 2.2에서 알 수 있듯, 두 냉매의 열역학적 물성치가 유사하기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

(5) 상부와 하부의 열전달계수 차이

Fig. 4.7은 질량유속 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 열유속 12 kW/m^2 , 포화온도 $5, 10^\circ\text{C}$ 에서의 상부와 하부의 열전달계수의 차이를 나타낸다. 저건도 영역에서는 하부의 열전달계수가 높고 상부의 열전달계수가 낮으나 고건도 영역에서는 상부의 열전달계수가 높고 하부의 열전달계수가 낮다. 이러한 결과의 원인은 핵비등이 지배적인 저건도 영역에서 상대적으로 비체적이 큰 기포가 상부로 올라가면서 상부에 비해 하부의 핵비등이 활성화되어 하부의 열전달계수가 높은 것으로 판단되고, 고건도 영역에서는 환상류가 형성될 때, 중력의 영향으로 관의 하부에 액막이 두껍게 형성된다. 액막은 일종의 열저항 역할을 하기 때문에, 상대적으로 액막의 두께가 얇은 상부의 열전달계수가 높게 나타나는 것으로 판단된다. 또한 얇은 액막이 빠르게 사라진 뒤 나타나는 Dry-out 현상 또한 상부가 빠르게 일어나는 것을 확인할 수 있다.

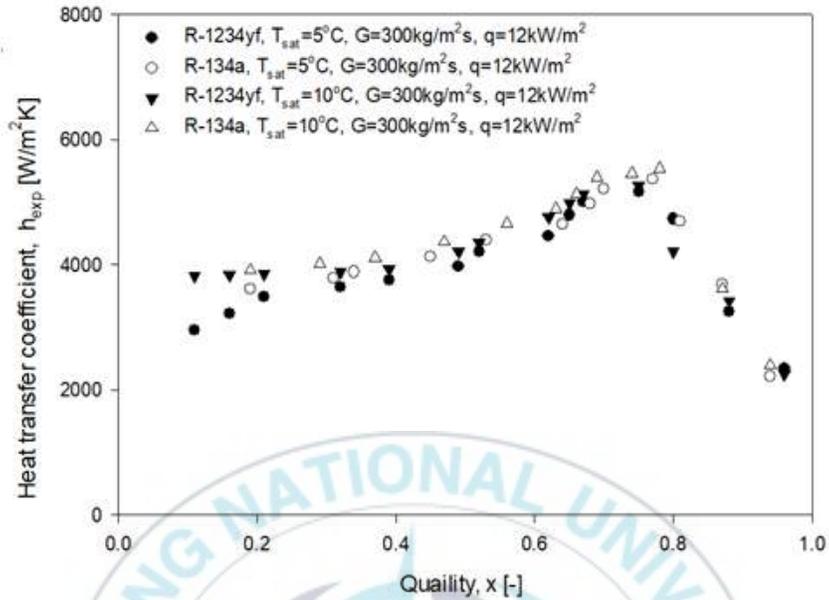


Figure. 4.6 Comparison of evaporation heat transfer coefficient of R-134a and R-1234yf

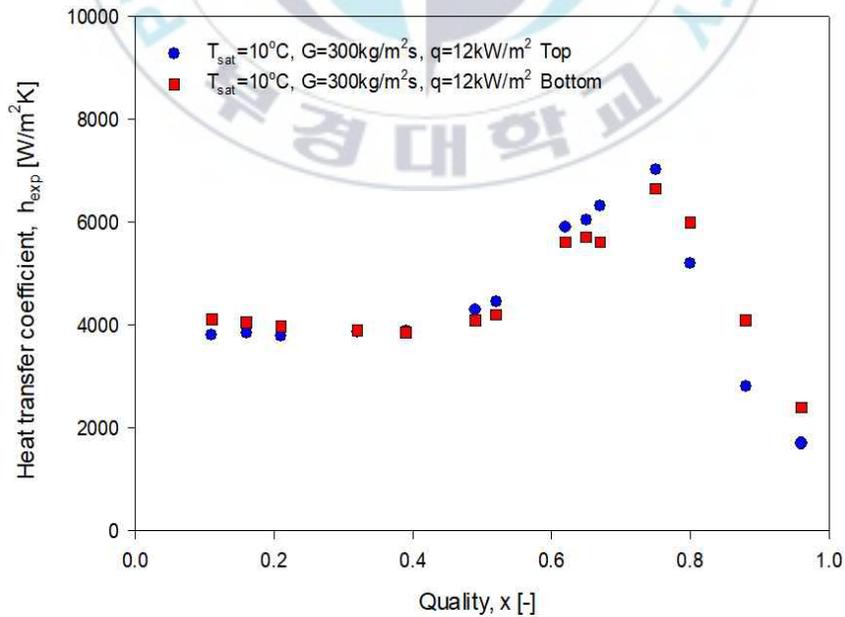


Figure. 4.7 Heat transfer coefficient of top and bottom side

(6) 유동양식선도

Fig. 4.8은 실험 결과를 Taitel and Dukler의 유동양식선도에 나타낸 결과이다. 대부분의 실험 조건에서 환상류가 형성되었으나, 일부는 간헐류가 형성되고 낮은 열유속일 때 성층과형류가 형성되는 것을 보여준다.

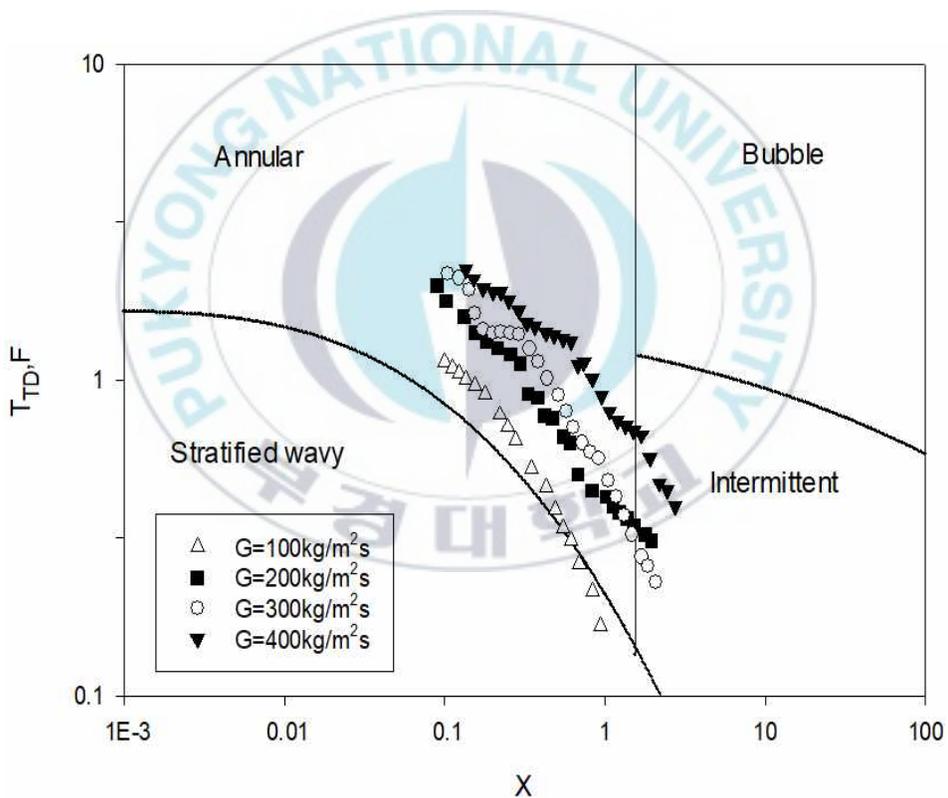


Figure. 4.8 Flow pattern of experiment result in Taitel-Dukler map

(7) 기존 상관식과의 비교

Fig. 4.9는 실험데이터를 1.3.1절에서 전술한 상관식을 실험 데이터와 비교하였다. 통계분석으로는 MAE, MRE, STD가 사용되었고 다음과 같이 정의한다. 표. 4.1은 각 상관식의 MAE, MRE, STD, $\delta_{\pm 30\%}$ 를 정리한 것이다.

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ER_i) \quad (4.1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ER_i| \quad (4.2)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ER_i - MRE)^2} \quad (4.3)$$

$$ER_i = \frac{h_{pred} - h_{exp}}{h_{exp}} \times 100 \quad (4.4)$$

$\delta_{\pm 30\%}$ 는 전체 데이터 중 $\pm 30\%$ 이내에 있는 데이터의 백분율이다.

먼저 Gungor and Winterton의 상관식은 실험결과를 전반적으로 과대평가하였다. Kandlikar의 상관식은 84%의 데이터가 $\pm 30\%$ 이내로 양호하게 예측하였으며, Liu and Winterton의 상관식은 낮은 열전달계수에서 양호하게 예측하였으나 열전달계수가 높아질수록 과소평가하는 경향을 보였다.

Table. 4.1 Comparison heat transfer coefficient with correlation

Correlation	MAE	MRE	STD	$\delta_{\pm 30\%}$
Gungor and Winterton	48.55	47.5	27.33	43 %
Kandlikar	17.35	-6.22	20.3	84 %
Liu and Winterton	26.97	20.3	18.17	49 %

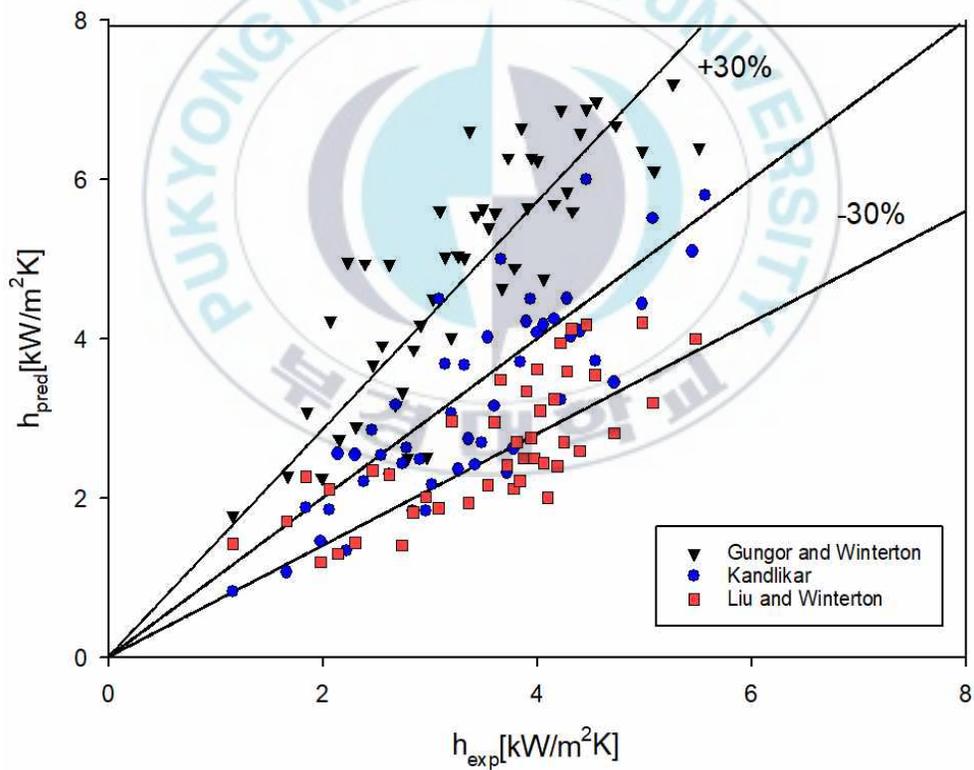


Figure. 4.9 Comparison between measured and calculated heat transfer coefficients.

4.2 압력강하

(1) 질량유속의 영향

Fig. 4.10와 Fig. 4.11은 포화온도 5, 10°C에서 질량유속의 변화에 따른 압력강하를 나타내는 그래프이다. 건도가 증가할수록 압력강하는 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 건도가 증가하면서 기체의 양이 많아지게 된다. 이때 기체와 액체는 비체적의 차이로 인한 속도차이가 발생한다. 이로 인해 체와 액체 사이의 계면에서 속도 차이에 의한 전단력에 의해 압력강하가 증가하는 것으로 판단된다. 건도가 증가할수록 기체가 많아지고 기체의 속도가 더욱 빨라지기 때문에 압력강하는 열전달계수와는 달리 고건도 영역으로 갈수록 증가한다. 질량 유속이 증가하게 되면 전체 냉매의 속도가 증가하기 때문에 전단력이 증가하여 압력강하가 증가하는 것을 알 수 있다.

(2) 포화온도의 영향

Fig 4.12는 질량유속 200 kg/m²s, 열유속 12 kW/m², 포화온도 5, 10°C의 열전달계수를 나타내는 그래프이다. 포화온도가 높아지면 압력강하는 낮아짐을 알 수 있다. R-1234yf는 포화온도가 높아지면서 점성계수와 표면장력이 낮아진다. 이로 인하여 마찰압력강하가 감소하게 되는 것으로 보여진다.

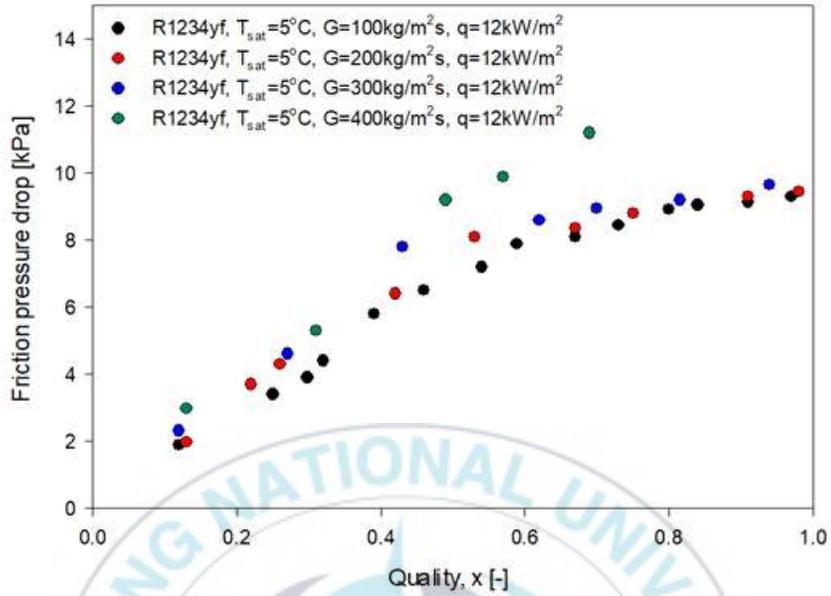


Figure. 4.10 R-1234yf friction pressure drop according to mass flux at saturation temperature 5°C

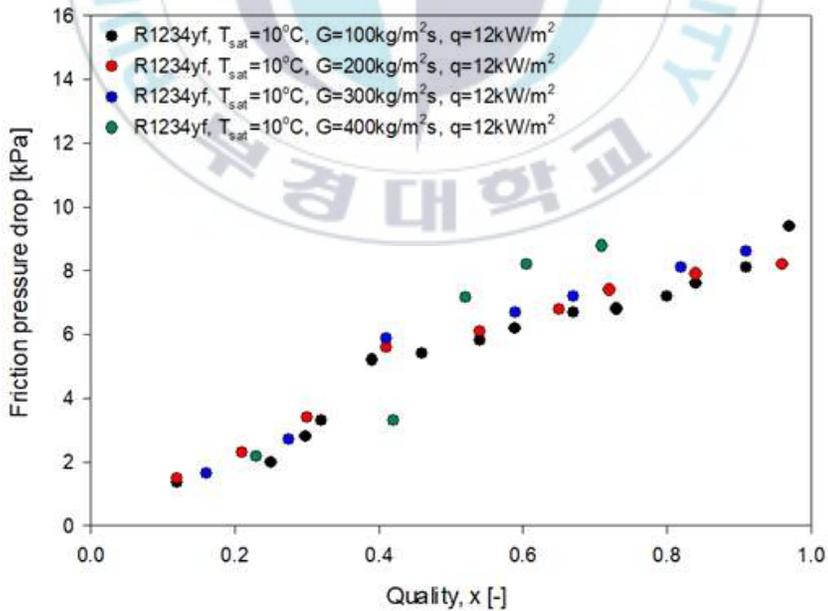


Figure. 4.11 R-1234yf friction pressure drop according to mass flux at saturation temperature 10°C

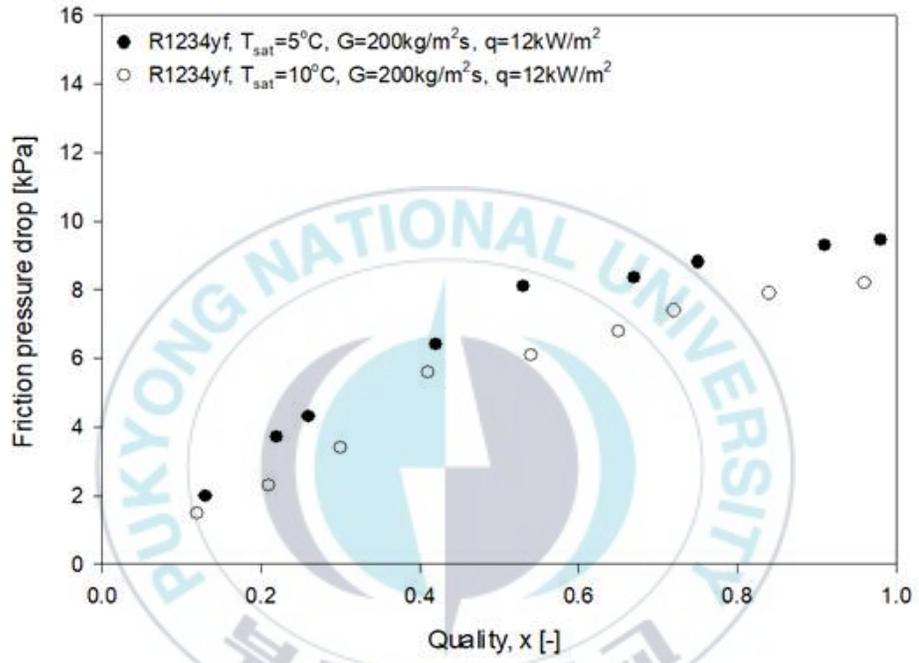


Figure. 4.12 R-1234yf friction pressure drop according to saturation temperature

(3) R-134a와의 비교

Fig. 4.13은 R-1234yf와 R-134를 질량유속 $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$, 열유속 12 kW/m^2 , 포화온도 $5, 10^\circ\text{C}$ 에서의 압력강하를 나타내는 그래프이다. 그래프에 나타나듯 압력강하는 R-134a가 미세하게 높은 것을 알 수 있다. 이는 앞서 Table. 2.2에서 알 수 있듯, 표면장력이 R-134a가 더 크다. 그러나 점성계수는 액체는 R-134a, 기체는 R-1234yf가 크기 때문에 전체적인 압력강하는 유사하지만 R-134a의 압력강하가 조금 더 큰 값을 가지는 것으로 판단된다.

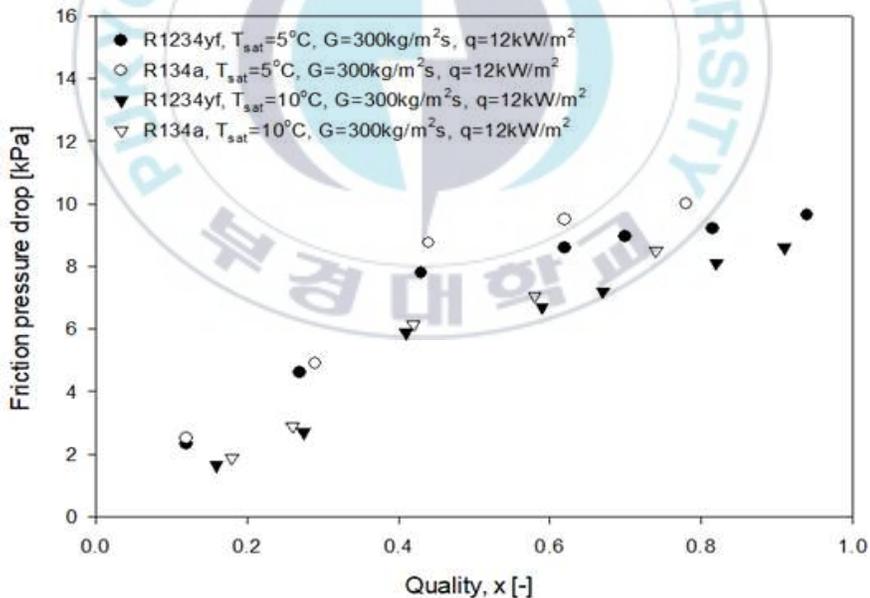


Figure. 4.13 Comparison of friction pressure drop of R-134a and R-1234yf

제 5 장 결 론

본 논문에서는 R-1234yf의 내경 6.95 mm의 수평관내 증발 열전달 및 압력강하 특성에 관한 실험을 수행했다. 실험을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 건도가 증가할수록 열전달계수는 증가하는 경향을 보이다가 고건도 영역에서 급격하게 감소하는 구간을 보인다. 이는 유동양식이 환상류로 천이하면서 대류비등에 의해 열전달계수가 높아지다가 액막이 전부 증발하고 가열면의 온도가 급격하게 올라가고, 열전달기구가 기체 단상열전달로 변화하면서 열전달계수가 감소하는 것으로 판단된다.

(2) 질량유속이 증가할수록 열전달계수는 증가한다. 그 영향은 저건도 영역보다 고건도 영역에서 두드러지게 나타난다. 이는 질량유속이 증가하면서 냉매의 속도가 빨라져 난류 형성이 빠르게 일어나고 환상류 영역으로 빠르게 천이하는 것이 원인으로 판단된다.

(3) 열유속이 증가할수록 열전달계수는 증가한다. 그 영향은 고건도 영역보다 저건도 영역에서 그 영향이 두드러지게 나타난다. 이는 열유속이 증가하면서 벽면의 과열도가 증가하고, 이로 인해 핵비등이 활발하게 일어나는 것이 원인으로 판단된다.

(4) 포화온도가 증가하면 열전달계수는 증가한다. 그 영향은 고건도 영역보다 저건도 영역에서 그 영향이 두드러지게 나타난다. 이는 포화온도가 증가하면서 표면장력이 낮아지고, 이로 인해 핵비등이 활발하게 일어나는

것으로 판단된다.

(5) R-134a와 비교하였을 때, 열전달계수는 두 냉매의 값이 유사했지만, R-134a가 높았다. 이는 기체의 비체적이 R-134a가 R-1234yf 대비 미세하게 크기 때문에 난류가 보다 빠르게 형성되는 것으로 판단된다. 그러나 그 차이가 크지 않고 대부분의 물성치가 액체상태에서는 R-134a가 크고 기체상태에서는 R-1234yf가 크기 때문에 전체적인 열전달계수는 비슷한 값을 보이는 것으로 판단된다.

(6) 실험 결과를 Taitel and Dukler의 유동양식선도에 대입해 보았을 때, 대부분의 실험이 환상류 영역에 포함되고, 일부 영역에서 간헐류 및 성층파형류 영역에 포함되는 것을 보였다.

(7) 실험 결과를 Gungor and Winterton, Kandlikar, Liu and Winterton의 상관식과 비교하였을 때, Kandlikar의 상관식이 실험데이터의 84%가 $\pm 30\%$ 이내로 가장 양호한 예측을 보였다.

(8) 건도가 증가할수록 압력강하도 증가한다. 이는 기체와 액체의 속도 차이에 의해 계면에서의 전단력이 증가하는 것이 원인으로 판단된다.

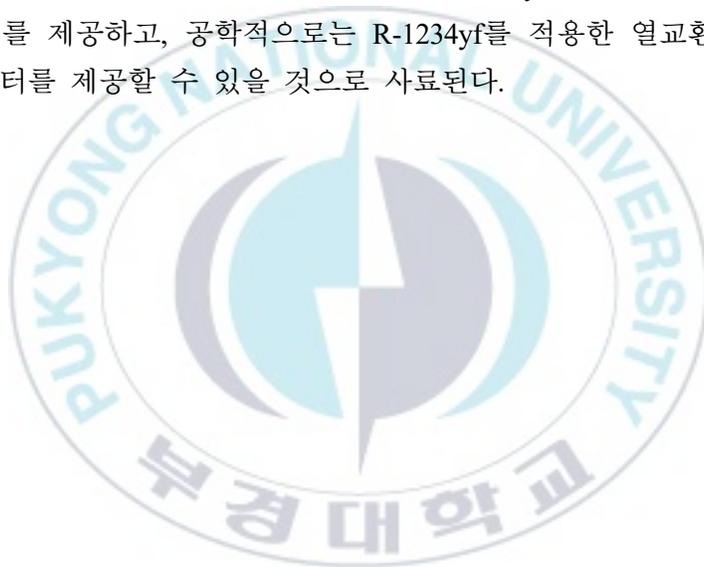
(9) 질량유속이 증가할수록 압력강하도 증가한다. 이는 질량유속이 증가하면 냉매의 속도가 빨라지고, 이에 따라 전단력이 증가하여 압력강하가 증가하는 것으로 판단된다.

(10) 포화온도가 증가할수록 압력강하는 감소한다. 이는 포화온도가 높아

지면서 점성계수와 표면장력이 줄어들면서 전단력이 작아져 압력강하가 감소하는 것으로 판단된다.

(11) R-134a와 비교하였을 때, R-134a의 압력강하가 더 큰 값을 얻었다. 이는 R-134a의 표면장력이 R-1234yf 대비 미세하지만 크기 때문인 것으로 판단된다.

본 논문의 실험 결과는 차세대 대체냉매 R-1234yf의 유동양식에 대한 기초 데이터를 제공하고, 공학적으로는 R-1234yf를 적용한 열교환기 설계에 대한 데이터를 제공할 수 있을 것으로 사료된다.

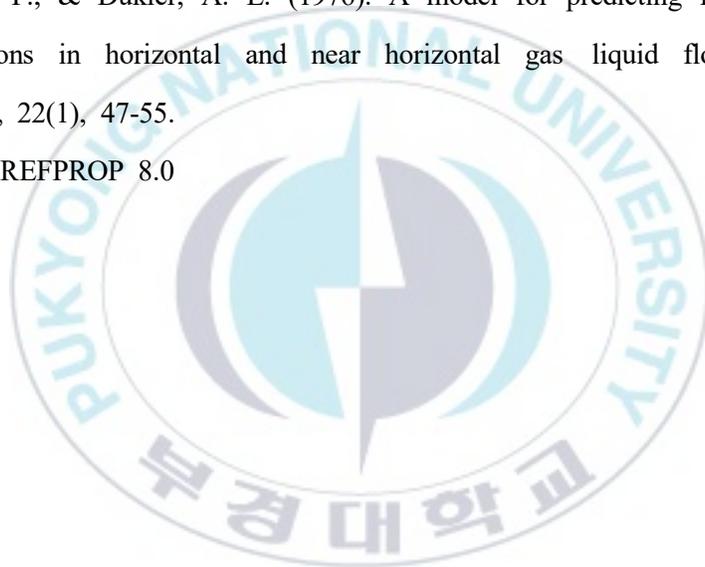


참 고 문 헌

1. Saitoh, Shizuo, et al. "Boiling heat transfer of HFO-1234yf flowing in a smooth small-diameter horizontal tube." *International Journal of Refrigeration* 34.8 (2011): 1846-1853.
2. Saitoh, Shizuo, Hirofumi Daiguji, and Eiji Hihara. "Effect of tube diameter on boiling heat transfer of R-134a in horizontal small-diameter tubes." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 48.23-24 (2005): 4973-4984.
3. Yoshida, Suguru, et al. "Prediction of heat transfer coefficient for refrigerants flowing in horizontal evaporator tubes." *TRACE* 11.1 (2011): 67-78.
4. Oh, Jong-Taek, et al. "Boiling Heat Transfer of R-1234yf in Horizontal Circular Small Tubes." (2012).
5. Del Col, Davide, et al. "Flow boiling of R1234yf in a 1 mm diameter channel." *International journal of refrigeration* 36.2 (2013): 353-362.
6. Sun, L., Mishima, K., 2009. An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels. *Int.J. Heat Mass Transfer* 52, 5323-5329
7. Lu, Ming-Chang, Jing-Rei Tong, and Chi-Chuan Wang. "Investigation of the two-phase convective boiling of HFO-1234yf in a 3.9 mm diameter tube." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 65 (2013): 545-551.
8. Kim, Kyoo Woan, et al. "Measurement and correlation of boiling heat transfer coefficient of R-1234yf in horizontal small tubes." *Journal of Mechanical Science and Technology* 28.10 (2014): 4301-4308.

9. Gungor, Kernal Ersin, and R. H. S. Winterton. "A general correlation for flow boiling in tubes and annuli." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 29.3 (1986): 351-358.
10. Diani, A., S. Mancin, and L. Rossetto. "Flow boiling heat transfer of R1234yf inside a 3.4 mm ID microfin tube." *Experimental Thermal and Fluid Science* 66 (2015): 127-136.
11. Anwar, Zahid, Björn Palm, and Rahmatollah Khodabandeh. "Flow boiling heat transfer, pressure drop and dryout characteristics of R1234yf: Experimental results and predictions." *Experimental Thermal and Fluid Science* 66 (2015): 137-149.
12. Yang, Chien-Yuh, Hamid Nalbandian, and Fu-Chen Lin. "Flow boiling heat transfer and pressure drop of refrigerants HFO-1234yf and HFC-134a in small circular tube." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 121 (2018): 726-735.
13. Shah, M. Mohammed. "Chart correlation for saturated boiling heat transfer: equations and further study." *ASHRAE transactions* 88 (1982).
14. Gungor K. E. and Winterton R. H. S. "A general correlation for saturated flow boiling and comparisons of correlations with data." *Chem. Eng. Res. Des.*, 1987. Vol. 65, pp.148-156.
15. Cooper M. G. Saturation nucleate poolboiling. "A simple correlation. 1st U. K. National Conference on Heat Transfer." 1984. Vol. 2, pp. 785-793.
16. Kandlikar, S. G., 1990, A General Correlation for Saturated Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer Inside Horizontal and Vertical Tubes." *J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 219-228
17. Shah, Mirza M., and SHAH MM. "A new correlation for heat transfer

-
- during boiling flow through pipes." (1976).
18. Liu Z. and Winterton R. H. S. "A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation." *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1991. Vol. 34. pp. 2759-2766.
 19. Kutateladze S. S. "Boiling heat transfer, *Int. J. Heat Mass Transfer* 4. 1961. pp. 31-45
 20. Taitel, Y., & Dukler, A. E. (1976). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas liquid flow. *AIChE journal*, 22(1), 47-55.
 21. NIST, REFPROP 8.0



감사의 글

지금까지 달려오면서 제가 결실을 볼 수 있도록 많은 조언과 격려를 해 주신 모든 분께 이 장을 빌려 감사의 말씀을 드립니다.

학부와 석사과정 총 5년간 부경대학교 냉동공조공학과에 있었습니다. 학부 3학년 본격적인 전공과목을 배우면서 더 배우고 싶다는 생각이 들어 대학원 진학을 선택했습니다. 제 생각보다 저는 더 바보였던 채로 연구실에 들어갔습니다. 하지만 많은 분의 도움 덕분에 이제는 한 사람의 역할을 할 수 있게 되었다고 생각합니다. 처음 연구실에 들어왔을 때, 졸업 논문을 쓰던 선배들을 볼 때 대단하다는 생각을 많이 했는데 어느새 저도 감사의 글을 적고 있으니, 감회가 새롭습니다.

먼저, 대학원 생활 동안 많은 가르침을 주신 손창효 교수님께 감사드립니다. 연구실 생활 동안 논문 세미나와 학회참석 등 많은 배움의 기회를 주셨기 때문에 제가 한 사람의 석사로서 성장할 수 있었다고 생각합니다. 그리고 부족한 학생에게 많은 가르침을 주셨던 김종수 교수님, 금종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께도 감사의 인사 드립니다. 또한 대학원의 서류나 업무를 물심양면 도와주신 김대한 조교님, 전은희 조교님께도 감사 인사드립니다.

그리고 우리 실험실 인원들에게도 감사드립니다. 실험실에 잘 적응할 수 있도록 도와주시고, 장치들의 사용법을 친절하게 알려주신 하수정 박사님과 전민주 박사님, 바보 같던 학생 한 명을 하나부터 열까지 친절하지만 스스로 헤쳐나갈 수 있게 도와주던 실험실의 정신적 지주 준혁이 형, 같이 보낸 시간은 짧았지만 많은 이야기를 해주신 대호형과 용기형, 같이 힘들었던 목표까지 함께 달려온 동기 상우, 나이는 많지만, 항상 장난치기를 좋아하고 알게 모르게 많이 챙겨준 동익이 형, 선배로서 많이 알려주지 못했지

만, 실험실에 잘 적응하고 실험실의 분위기를 지배해버린 우리 막내 한숨이, 은민이. 그리고 마지막에 새로 들어온 승윤이까지 실험실의 인원 모두에게 다시 한번 감사드립니다. 힘들기도 많이 힘들었고, 그만큼 또 재미있을 땐 한없이 재미있었던 냉동시스템 연구실을 저는 평생 잊지 못할 것 같습니다.

우리 마산의 친구들에게도 감사드립니다. 쿠광에서 포장속도 1위의 윤도, 거제와 진해에서 열심히 일하고 있는 현명이와 치원이, 취준하느라 고생하고 있는 보영이와 지훈이, 대학원에서 고생하고 있는 동신이, 호주에 있는 경호까지. 중간에 마산에 갈 때마다 얼굴 보면서 웃던 기억이 많이 힘이 되었습니다.

마지막으로 한없이 큰 사랑을 주셨던 우리 가족, 어려운 결정이었지만 대학원 진학을 허락해주신 어머니, 아버지, 못난 아들이 좀 더 배워보고 싶다는 말을 믿고 기다려주신 부모님께 감사드립니다. 그리고 힘들 때, 옆에서 같이 술도 먹고 야식도 먹은 우리 과 후배이자 제 친동생 창민이에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다.

제가 맺은 결실이 오롯이 제힘이라고 생각하지 않습니다. 많은 분의 도움이 있었기에 지금의 제가 있다고 생각합니다. 이 마음이 변하지 않고 항상 노력하고 정진해서 부끄럽지 않은 냉동공조인이 되도록 하겠습니다.