



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.

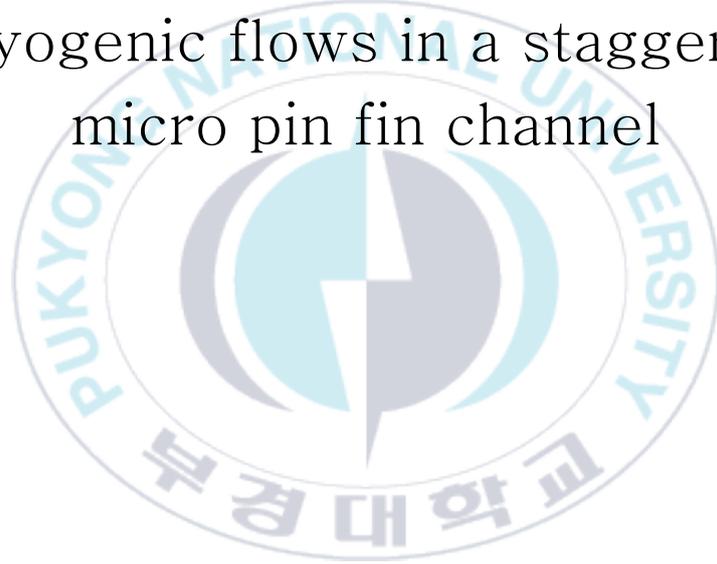
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 힌
채널 내 극저온 유동에 대한
실험적 연구

Experimentally investigated
cryogenic flows in a staggered
micro pin fin channel



2024년 2월

국립부경대학교대학원

기계설계공학 전공

양현호

공학석사학위논문

엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 힌
채널 내 극저온 유동에 대한
실험적 연구

지도교수 김 경 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2024년 2월

국립부경대학교대학원

기계설계공학 전공

양 현 호

양현호의 공학 석사 학위논문을 인준함.

2024년 2월 16일



위원장 공학박사 김창원 (인)

위원 공학박사 김경준 (인)

위원 공학박사 황진하 (인)

목차

표 목차.....	ii
그림 목차.....	iii
NOMENCLATURE	v
ABSTRACT	viii
I. 서론.....	1
1.1 연구 배경	1
1.2 개요	4
II. 관련 연구	5
2.1 매크로-마이크로 튜브에서의 흐름 비등 열전달 연구.....	5
2.2 매크로-마이크로 채널에서의 흐름 비등 열전달 연구.....	9
2.3 마이크로 핀 흰 히트싱크에서의 흐름 비등 열전달 연구.....	9
III. 실험장치 및 실험방법.....	14
3.1 마이크로 핀 흰 히트 싱크.....	14
3.2 실험 장치 및 구성	25
3.3 실험 절차	31
3.4 평가 방법	32
IV. 실험 결과.....	34
4.1 마이크로 핀 흰 채널 내 액체질소 유동 영향.....	34
V. 결론.....	39
참고문헌.....	41

표 목차

표 1.1 1 기압에서의 질소, 물, R134A, R410A 의 물성치[6-7]	3
표 2.1 관련연구들의 시험편 구조, 작동유체 및 작동 범위[8-15]	12
표 2.2 Kandlikar 상관식의 Constant Value[10]	14
표 2.3 Kandlikar 상관식의 작동유체별 F_n [10]	14
표 3.1 마이크로 핀 흰 히트 싱크 구조별 치수	17
표 3.2 유한요소 해석 경계조건	21
표 3.3 박막히터 열 물성치	21
표 3.4 백금 박막히터 의 유한요소 해석결과 및 계산결과	22
표 3.5 실험 장치 및 장비 목록	31

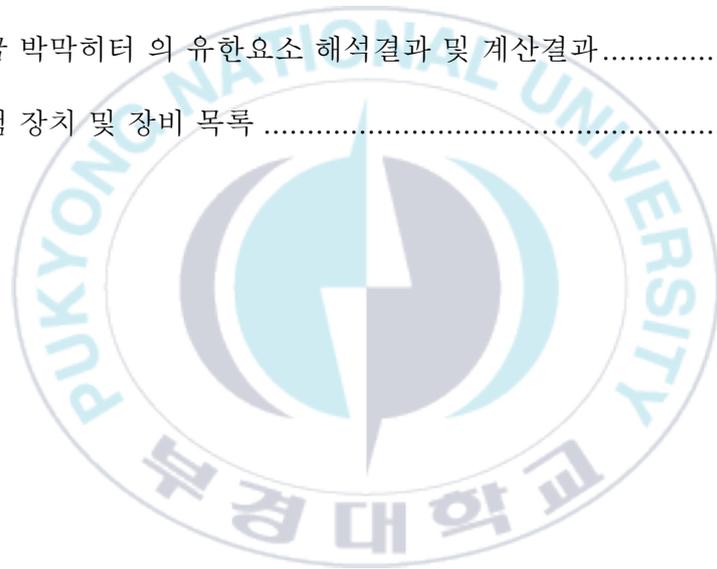


그림 목차

그림 1.1 광원 파장에 따른 최소선폭의 크기[1].....	2
그림 1.2 냉각 방식에 따른 열전달 계수[2].....	3
그림 3.1 Krishnamurthy and Peles 상관식이 적용된 이상 대류 열전달 계수 의 건도에 대한 흰 높이 영향	15
그림 3.2 Krishnamurthy and Peles 상관식이 적용된 이상 대류 열전달 계수 의 건도에 대한 흰 공간 영향	16
그림 3.3 Krishnamurthy and Peles 상관식이 적용된 이상 대류 열전달 계수 의 건도에 대한 질량플럭스 영향.....	16
그림 3.4 핀 흰의 배열 (a) 정방 배열 (b) 엇갈림 배열.....	17
그림 3.5 백금 박막히터 패턴 디자인	18
그림 3.6 백금박막히터 해석 모델 개략도.....	19
그림 3.7 백금 박막히터 유한요소 해석 모델	19
그림 3.8 박막히터의 유한요소해석 결과와 계산결과의 평균 표면온도.....	21
그림 3.9 40, 60 70 V 인가전압에서의 박막히터 온도장	22
그림 3.10 MEMS 공정 순서도	24
그림 3.11 제작순서도 및 시험편	24
그림 3.12 엇갈림 배열 마이크로 핀 흰 히트 싱크(ST,SL=200 μm).....	26
그림 3.13 (a) 마이크로 핀 흰 채널 냉각기 분해도 (b) 마이크로 핀 흰 채널 냉 각기 결합도	26
그림 3.14 (a) 포고핀 및 열전대 위치 (b) 마이크로 핀 흰 채널 냉각기 유동 방 향	27
그림 3.15 실험 장치 및 장비	29
그림 3.16 실험대 개략도.....	29

그림 3.17 온도에 따른 Cryogel Z 의 열전도율[19]	30
그림 4.1 유효열유속에 대한 마이크로 핀 환 채널 베이스 대류열전달계수 ..	34
그림 4.2 출구 건도에 대한 마이크로 핀 환 채널 베이스 대류열전달계수.....	35
그림 4.3 Bar-Cohen et al.[15] 마이크로 캡 및 마이크로 핀 환 히트싱크의 유효열유속에 대한 베이스 대류열전달계수 비교	36
그림 4.4 마이크로 핀 환 히트 싱크 및 멀티 마이크로 채널 흐름 비등 대류열 전달계수 상관식과 유효 열유속에 대한 베이스 대류열전달계수 비교...	37
그림 4.5 마이크로 튜브 및 마이크로 채널 흐름 비등 대류열전달계수 상관식 과 유효 열유속에 대한 베이스 대류열전달계수 비교	38



Nomenclature

A_b	Base area, m^2
A_c	Cross section area of fin, m^2
A_{tot}	Total surface area of micro pin fin heat sink, m^2
Bo	Boiling number
Bo^*	Modified Boiling number
C	Constant in eq.(2.33)
Co	Confinement number
C_p	Specific heat, $kJ/kg \cdot K$
d	Diameter of pin fin, m
D_h	Hydraulic diameter, m
E	Enhancement factor
\vec{E}	Electrical field, V/m
f	Friction factor
Fr	Froude number
F_{fl}	Fluid dependent parameter
g	Gravitational acceleration, m^2/s
G	Mass flux, kg/m^2s
h	Heat transfer coefficient, $W/m^2 \cdot K$
h_{fg}	Latent heat, kJ/kg
H_{fin}	Fin height, m
I	Current, A
\vec{j}	Current field, A/m^2
k	Thermal conductivity, $W/m \cdot K$
K_p	Pressure dimensionless parameter
K_s	Surface dimensionless parameter
L	Length of heater, m
$L_{channel}$	Total length of channel, m
N	Parameter in Saha correlation
N_t	Number of fin
Nu	Nusselt number
\dot{m}	Mass flow rate, kg/s

p	Pressure, Pa
P	Power, W
P_{fin}	Perimeter of a fin, m
Pe	Peclet number
Pr	Prandtl number
ΔP	Pressure drop, Pa
q''	Heat flux, W/m ²
q''_{eff}	Effective heat flux, W/m ²
q'''	Volumetric rate of heat generation, W/m ³
$Q_{channel}$	Net power to the channel, W
Q_{loss}	Heat loss, W
R	Resistance, Ω
Re	Reynolds number
S	Suppression factor
Sc	Subcooling parameter
S_L	Longitudinal pitch, m
S_T	Transverse pitch, m
t	Thickness of heater, m
T	Temperature, K
V	Voltage, V
W	Width of heater, m
We	Weber number
x	Quality
x_{ex}	Exit quality
X	Martinelli parameter
z	Axial coordinate, m

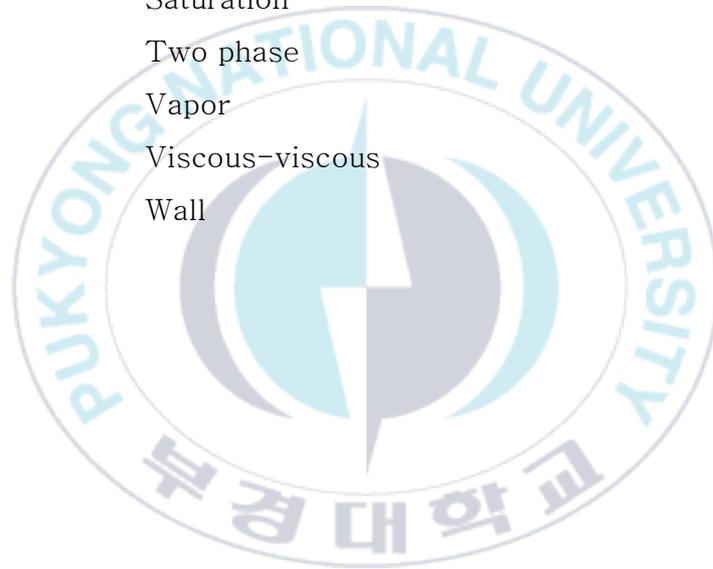
Greek symbols

α	Thermal diffusivity, m ² /s
ζ	Adjustment parameter
η_{fin}	Fin efficiency
μ	Viscosity, Pa·s
ρ	Density, kg/m ³

ρ_e	Specific resistance, $\Omega \cdot m$
σ	Surface tension, N/m
ϕ^2	Two-phase frictional multiplier

Subscripts

f	Fluid
g	Gas
l	Liquid
nb	Nucleate boiling
ONB	Location of on set of nucleate boiling
sp	Single phase
sat	Saturation
tp	Two phase
v	Vapor
vv	Viscous-viscous
w	Wall



Experimentally investigated cryogenic flows in a staggered micro-pin fin
channel

Hyeon Ho Yang

Department of Mechanical Design Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Due to the high integration and miniaturization of semiconductors, the power density and heat density of electronic and photonic device have increased. To address these issues, extensive research on single-phase and two-phase convective heat transfer using various working fluids on micro-scale surfaces had been actively pursued in the past few decades. In various studies for electronic and photonic device cooling, deionized water and synthetic refrigerants were commonly used as working fluids. But deionized water was difficult to use as a coolant in the harsh environment, and synthetic refrigerants have limited to use for high global warming potential(GWP). Therefore, the use of natural refrigerants was considered, and related research was actively conducted.

Bar-Cohen et al. [14, 15] experimentally investigated the thermal performance of cryogenic micro-gap and micro pin fin cooler made of copper with two-phase liquid nitrogen flows. The micro pin fin cooler was made up of a central manifold, an upper insert, a lower insert and a square, inline pin fin array with 150 μm fin width, 300 μm fin height, and 300 μm pin spacing. The micro-gap cooler referred to a cooler without a micro pin fin array in a micro pin fin cooler.

In contrast, in this study, experimental investigation was performed in a circular silicon micro-pin fin heat sink channel and liquid nitrogen as the working fluid. The micro-pin fin heat sink was fabricated using micro-electromechanical systems(MEMS) for mass production of various types. It was designed on an 8-inch silicon wafer with 1 cm \times 1 cm base area, 100 μm fin diameter, 200 μm fin height and 200 to 400 μm fin spacing in inline and staggered arrangement for considering fin spacing and array arrangement effect. Platinum

thin film heater deposited on the back side of wafer to simulate heater, minimize contact resistance, and apply uniform and constant heat flux. Also, the micro cooler with an internal flow path was designed to facilitate specimen replacement.

A micro pin fin heat sink with 200 μm fin spacing in staggered arrangement was selected for experiment and was attached to the internal flow path of the micro cooler. The experiments were conducted at the range of 2.2 to 2.5 g/s mass flow rate and 6.7 to 55.2 W/cm^2 effective heat flux. The experiment results show that a base heat transfer coefficient was determined as 78 $\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ to 133 $\text{kW}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ and expected quality of 0.05 to 0.14 was calculated. The comparison of thermal performance among the current study, previous study, and flow boiling heat transfer coefficient correlations derived results has been conducted.



I. 서론

1.1 연구 배경

2000년대 초 수백 nm 크기의 회로를 인쇄하던 반도체 공정 기술이 현재에 이르러 그림 1.1 같이 수 nm 크기의 회로를 인쇄한다. 회로 선평의 감소로 인한 반도체 집적도 상승은 소자의 소형화 및 전력밀도, 열밀도의 큰 상승을 이끌었다. 전력밀도와 열밀도의 상승으로 소자에서 발생하는 열을 효과적으로 제거하지 못한다면 소자의 성능감소뿐만 아니라 수명, 신뢰성 보장에도 상당한 영향을 미칠 것은 자명한 사실이다. 따라서 소자의 크기 및 전력밀도, 열밀도에 상응하는 적합한 크기의 냉각기 선정 및 냉각 방식 적용은 필수적이며 특히 레이저다이오드, 장거리 무선 전력 송신 등에 사용되는 고성능 반도체의 경우 그림 1.2에서 보이는 바와같이 강력한 냉각 성능을 가지는 냉각기술 적용이 필요하다[1, 2].

이러한 문제의 해법으로 십수 년 전부터 국내외에서 마이크로 스케일의 확장표면에서의 단상 및 이상 유동 열전달 연구가 활발히 이루어져 왔으며 마이크로 스케일의 확장표면은 매크로 스케일에 비해 체적 대비 높은 열전달 면적을 가지고 장치 및 시스템을 소형, 경량화하여 물리적인 공간의 제약에서 벗어날 수 있다는 이점이 있다.

또한 상변화를 통해 잠열을 이용하는 흐름 비등 냉각 방식은 현열만을 이용하는 단상 유동 냉각 방식에 비해 높은 열전달 계수를 얻을 수 있으며 고 열밀도 전자장치에서 국소적으로 더 적은 온도 차이를 보다 잘 유지할 수 있다는 이점이 있다. 그러나 이러한 선행연구들은 작동유체로 탈 이온수 또는 하이드로 플루오르 카본(HFCs, Hydro Fluoro Carbons), 하이드로 클로로 플루오르 카본(HCFCs, Hydro Chloro Fluoro Carbons) 계열의 합성 냉매를 사용한 연구가 다수이다[3-5].

표1.1에 기재된 것과 같이 탈 이온수는 가혹한 환경에서 사용하는데 있어서 HFC, HCFC 계열의 합성 냉매에 비해 높은 비등점 가지는 단점이 있으며 합성 냉매의 경우 환경적인 측면에서 높은 지구온난화지수(GWP, Global Warming Potential)를 가지는 문제가 있다. 따라서 양자컴퓨터,

레이저다이오드, 장거리 무선 송신용 반도체와 같이 고성능의 전자/광전자 장치에서 냉매로서 극저온 유체 중 하나인 액체질소의 사용이 증가하고 있으며 액체질소는 합성이 용이하고 저렴하며 불연성이라는 이점이 있다[6-7].

따라서 본 연구에서는 마이크로 핀 흰 히트 싱크, 마이크로 핀 흰 채널 냉각기 및 극저온 냉각 시스템을 설계하고 제작하였다. 100 μm 흰 직경, 200 μm 흰 높이 200 μm 흰 공간과 엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 흰 채널 내 액체질소 유동에 대한 실험적 연구를 수행하였으며 기존 연구 및 개발된 마이크로 스케일 확장표면에서의 흐름 비등 대류열전달계수 상관식으로부터 도출된 열성능과 비교 분석하였다.

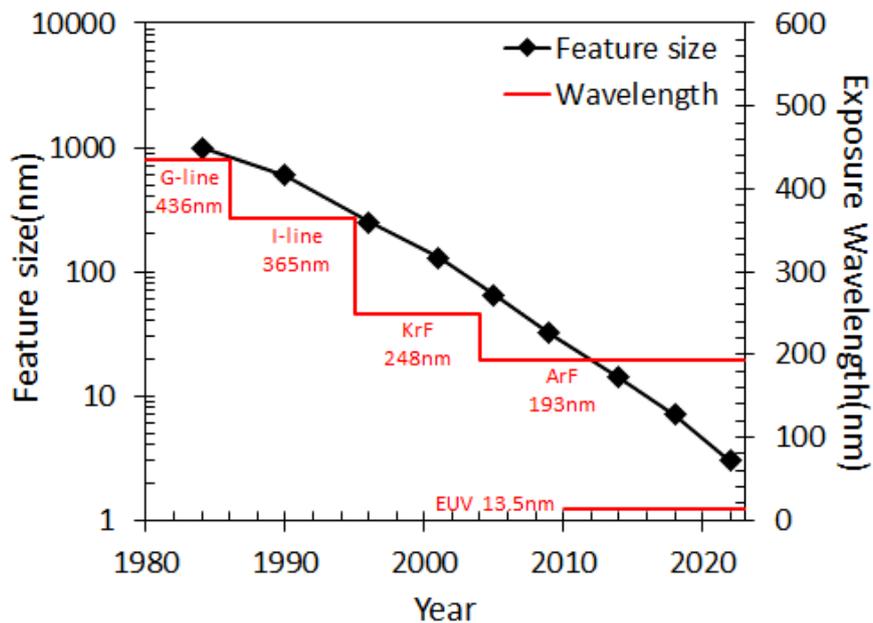


그림 1.1 광원 파장에 따른 최소선폭의 크기[1]

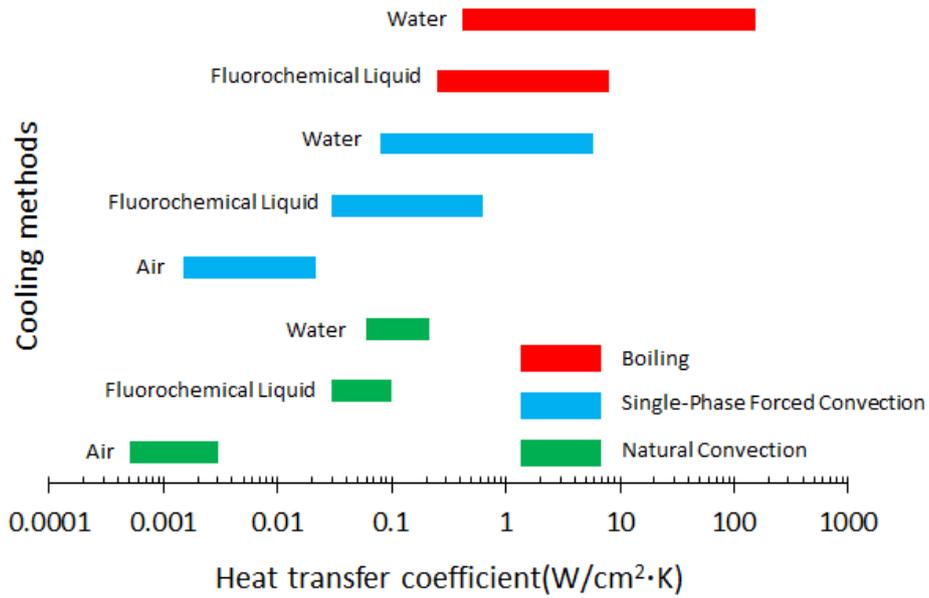


그림 1.2 냉각 방식에 따른 열전달 계수 [2]

표 1.1 1 기압에서의 질소, 물, R134a, R410A 의 물성치 [6, 7]

Property	unit	N ₂	Water	R134a	R-410A
Molecular weight	g/mol	28	18	102	72.58
Boiling point	K	77	373	247	221.7
Melting point	K	63.15	273.15	170	118.15
Liquid enthalpy	kJ/kg	-122	419	165.8	126.3
Latent heat of vaporization	kJ/kg	199	2256	217	276
Liquid specific heat	kJ/kg · K	2.83	1.3	1.28	1.37
Liquid density	kg/m ³	806	958	1377	1349.7
Vapor density	kg/m ³	4.6	0.6	5.26	4.07
Liquid viscosity	μPa · s	160	282	378.7	312.6

Vapor viscosity	$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}$	5.4	12.2	9.78	9.87
Liquid thermal conductivity	$\text{W/m} \cdot \text{K}$	0.145	0.0246	0.1	0.0087
Surface tension	N/m	0.0088 8	0.059	0.0152	0.0175
Thermal diffusivity	$10^6 \text{m}^2/\text{s}$	0.088	0.168	00.59	0.0726
GWP(AR5)	$\text{Co}^2=1$	0	0	1300	1924



1.2 개요

본 논문은 총 5 장으로 서론, 관련 연구, 실험 장치 및 실험방법, 실험결과, 결론으로 구성되어 있으며 각 장의 내용은 아래와 같다.

제 1장 : 서론

반도체 회로 선폭의 감소에 기인하는 소자의 소형화 및 열밀도 증가에 따른 적합한 냉각방식, 작동유체 선정의 필요성 및 연구 목적과 방법에 관해 설명한다.

제 2장 : 관련연구

매크로-마이크로 스케일의 확장표면에서의 흐름 비등 대류열전달 관련 연구가 시험편의 형상 및 구조적 특징을 기반으로 구분되어 검토 및 기술되었다.

제 3장 : 실험장치 및 실험방법

마이크로 핀 ힹ 히트 싱크의 설계 및 제작 과정과 마이크로 핀 ힹ 채널 냉각기의 구조 및 실험장비, 실험 절차 및 평가 방법에 관해 설명한다.

제 4장 : 실험결과

측정된 실험 결과를 바탕으로 도출된 마이크로 핀 ힹ 채널 내 액체질소의 열성능을 기존 연구 결과 및 개발된 흐름 비등 대류열전달계수 상관식으로 도출된 열성능과 비교 분석하여 설명한다.

제 5장 : 결론

수행된 연구에 대한 본 논문의 결론에 관해 기술한다.

II. 관련 연구

마이크로 핀 흰 히트 싱크 구조에서 극저온 유체를 작동유체로 사용한 대류열전달계수 상관식 개발 연구 사례는 전무하다. 따라서 구조, 작동유체, 냉각기의 크기 등 폭넓은 범위에서의 흐름 비등 대류열전달 연구의 검토가 수행되었으며 시험편의 구조 및 형상에 따라 세분화하였다. 표 2.1 는 검토된 연구의 시험편 구조, 수행 조건, 적용 영역 등을 정리한 것이다.

2.1 매크로-마이크로 튜브에서의 흐름 비등 열전달 연구

Kilmenko[8]는 매크로 스케일의 수직, 수평 관에서 액체 질소, 수소, 네온을 작동유체로 수행된 선행연구자들의 실험결과를 이용, 벽의 물성을 고려하여 실험결과 대비 약 $\pm 35\%$ 의 정확성을 가지는 Nusselt 수 상관식을 개발하였다.

$$Nu/Nu_{nb} = \begin{cases} 1 & Bo^* < 6 \times 10^4 \\ 0.0041Bo^{*0.5} & Bo^* > 6 \times 10^4 \end{cases} \quad (2.1)$$

$$(2.2)$$

$$Nu_{nb} = 0.0042Pe^{0.6}K_p^{0.5}K_s^{0.2} \quad (2.3)$$

$$Bo^* = \frac{h_{fg}G}{q''} [1 + x(\rho_l/\rho_v - 1)] \quad (2.4)$$

$$Pe = \frac{q'' \left(\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v)g} \right)^{\frac{1}{2}}}{h_{fg}\rho_v\alpha} \quad (2.5)$$

$$K_p = \frac{p}{[\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{1/2}} \quad (2.6)$$

$$K_S = \frac{(\rho C_p k)_w}{(\rho C_p k)_f} \quad (2.7)$$

Pe 는 Pelect 수이며 K_p 와 K_S 는 압력, 표면과 관련된 무차원화된 수이고 Bo^* 은 수정된 Boiling 수이다. h_{fg} 는 잠열, G 는 질량플럭스, q'' 는 열유속, x 는 건도, ρ 는 밀도, σ 는 표면장력, g 는 중력가속도, α 는 열확산도, C_p 는 정압 비열, k 는 열전도율, 하첨자 l 은 액체상태, v 는 기체상태, w 는 벽, f 는 유체를 각각 의미한다.

Shah[9]는 액체 수소, 네온, 헬륨, 아르곤을 작동유체로 하는 선행연구자들의 실험결과를 사용하여 열전달에서 대류와 비등 중 더 큰 영향을 끼치는 메커니즘을 채택하는 아래와 같은 흐름 비등 대류열전달계수 상관식을 개발하였다.

$$h_{tp} = \max(E, S) h_l \quad (2.8)$$

$$h_l = 0.023[Re_l(1-x)]^{0.8} Pr_l^{0.4} k_l / D_h \quad (2.9)$$

$N > 1$ 일때 E 와 S 는 아래와 같은 식을 가지며

$$E = 230Bo^{0.5} \quad (2.10)$$

$$S = 1.8/N^{0.8} \quad (2.11)$$

$0.1 < N \leq 1$ 일때 E 는 아래와 같은 식을 가지며 S 는 식(2.11) 과 동일하고

$$E = FBo^{0.5} \exp(2.47N^{-0.1}) \quad (2.12)$$

$N \leq 1$ 일때 E 는 아래와 같은 식을 가지며 S 는 식(2.11) 과 동일하다.

$$E = FBo^{0.5} \exp(2.47N^{-0.15}) \quad (2.13)$$

무차원화 된 N 은 수평관에서 아래와 같이 정의되며

$$N = \begin{cases} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.8} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} & Fr_l \geq 0.04 \\ 0.38Fr_l \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.8} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} & Fr_l < 0.04 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$N = \begin{cases} \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.8} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} & Fr_l \geq 0.04 \\ 0.38Fr_l \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.8} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} & Fr_l < 0.04 \end{cases} \quad (2.15)$$

식(2.12), 식(2.13)의 F 는 아래와 같이 정의된다.

$$F = \begin{cases} 0.064 & Bo \geq 11 \times 10^{-4} \\ 0.067 & Bo < 11 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (2.16)$$

$$F = \begin{cases} 0.064 & Bo \geq 11 \times 10^{-4} \\ 0.067 & Bo < 11 \times 10^{-4} \end{cases} \quad (2.17)$$

h 는 대류열전달계수, E 는 열전달 촉진계수, S 는 핵비등 억제계수이며 식 (9)의 Re 는 Reynolds 수를 의미하고 아래와 같이 정의되며

$$Re_l = \frac{GD_h}{\mu_l} \quad (2.18)$$

Bo 는 Boiling 수이며 다음과 같이 정의되고 Fr 은 Froude 수, Pr 은 Prandtl 수, D_h 는 수력학적 직경, μ 는 점성계수를 의미한다.

$$Bo = \frac{q''}{Gh_{fg}} \quad (2.19)$$

$$Fr_l = \frac{G^2}{(\rho_l^2 g D_h)} \quad (2.20)$$

Kandlikar[10]은 매크로 스케일의 수직, 수평 관에서 물, R-11, R-12, R-22, 네온, 질소 등을 작동유체로 하는 선행연구 결과를 사용하여 대류비등

항과 핵비등 항의 합으로 포화 흐름 비등 대류열전달계수 상관식을 개발하였으며 아래와 같이 나타내었다.

$$\frac{h_{tp}}{h_l} = C_1 N^{C_1} (25Fr_l)^{C_5} + C_3 Bo^{C_4} F_{fl} \quad (2.21)$$

상수 $C_1 - C_5$ 및 유체의존계수 F_{fl} 은 표 [2.2-2.3]에 정리하였으며 N 은 식 (2.14), h_l 은 식(2.9), Bo 는 식(2.19)을 사용하였다.

Zhang et al.[11]은 마이크로 스케일부터 매크로 스케일까지의 수직 관에서 액체질소를 작동유체로 수행한 실험을 바탕으로 흐름 비등 열전달 상관식을 개발하였으며 핵비등이 지배적인 영역과 대류비등이 지배적인 영역을 구분하여 아래와 같이 나타내었다.

$$x < 0.3 \quad Nu_{tp} = 1059.83Bo^{0.454}We^{0.045}K_p^{0.106}X^{0.107}Co^{-1.825} \quad (2.22)$$

$$x \geq 0.3 \quad Nu_{tp} = 0.0042Bo^{-0.872}We^{-0.059}K_p^{0.293}X^{0.065}Co^{-1.704} \quad (2.23)$$

$$X = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v}\right)^{0.1} \quad (2.24)$$

$$We_l = \frac{G^2 D_h}{\rho_l \sigma} \quad (2.25)$$

$$Co = \frac{\left[\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}\right]^{0.5}}{D_h} \quad (2.26)$$

X 는 Martinelli 변수이며 We 는 Weber 수 Co 는 Confinement 수를 의미한다.

2.2 매크로-마이크로 채널에서의 흐름 비등 열전달 연구

Warrier et al.[12] 은 마이크로 스케일의 다채널에서 FC-84 를 작동유체로 사용해 단상 강제대류열전달 및 포화 핵비등 열전달 실험을 수행하였으며 입구조조에 따라 아래와 같은 상관식을 개발하였다.

과냉각 상태 :

$$\frac{h_{tp}}{h_l} = 1 + 6.0Bo^{1/16} + f_1(Bo)Sc^{4.15} \quad (2.27)$$

$$f_1(Bo) = 290[1 - 855Bo] \quad (2.28)$$

$$Sc(z) = \left(\frac{C_{p,l}(T_{sat} - T_l)}{h_{fg}} \right)_{ONB} - \left[\frac{Q_{channel}(z - z_{ONB})}{L_{channel}\dot{m}h_{fg}} \right] \quad (2.29)$$

포화 상태 :

$$\frac{h_{tp}}{h_l} = 1 + 6.0Bo^{1/16} + f_2(Bo)(x)^{0.65} \quad (2.30)$$

$$f_2(Bo) = -5.3[1 - 855Bo] \quad (2.31)$$

식(2.27), 식(2.30)의 h_l 은 식(2.9)이며 Sc 는 과냉각변수, T 는 온도, $Q_{channel}$ 는 채널에 인가되는 열율, z 는 축 방향 위치, $L_{channel}$ 은 채널의 길이, \dot{m} 는 질량유량, 하첨자 sat 는 포화상태, ONB 는 핵비등 시발점이다.

2.3 마이크로 핀 힌 히트싱크에서의 흐름 비등 열전달 연구

Krishnamurthy and Peles[13] 는 실리콘으로 제작된 엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 힌 히트 싱크에서 작동유체로 탈 이온수를 사용하여 실험을 수행하였으며 시각화를 통해 유동양식을 구분하였고 국소적인 온도 측정 및 핵비등과 대류비등의 영향을 중첩의 원리를 통해 대류비등열전달계수 상관식을 개발하였으며 식은 아래와 같다.

$$h_{tp} = \zeta(\phi_l^2)^{0.2475} h_{sp} \quad (2.32)$$

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X_{vv}} + \frac{1}{X_{vv}} \quad (2.33)$$

ζ 는 상수이며 $\zeta = 1.4$ 의 값을 가지고 ϕ^2 는 이상 마찰승수, C 는 경험적으로 결정된 상수이며 0.24의 값을 가진다.

$$X_{vv} = \left[\frac{(\Delta P_f / \Delta Z)_l}{(\Delta P_f / \Delta Z)_v} \right]^{1/2} \quad (2.34)$$

$$(\Delta P_f)_l = \frac{fN(G(1-x))^2}{2\rho_l} \quad (2.35)$$

$$(\Delta P_f)_v = \frac{fN(Gx)^2}{2\rho_v} \quad (2.36)$$

$$f = 63.246 Re_d^{-0.7797} \quad (2.37)$$

X_{vv} 는 Martinelli 변수이고 $(\Delta P_f)_l$ 은 액체의 마찰 압력구배, $(\Delta P_f)_v$ 는 기체의 마찰 압력구배, f 는 Blasius 마찰계수이다. 단상 대류열전달계수는 Reynolds 수에 의해 결정되며 범위와 식은 아래와 같다.

$$Re_d < 100$$

$$Nu_{sp} = 0.0423 Re_d^{0.99} Pr^{0.21} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25} \quad (2.38)$$

$$Re_d > 100$$

$$Nu_{sp} = 0.76 \left(\frac{S_T}{d} \right)^{0.16} \left(\frac{S_L}{d} \right)^{0.2} \left(\frac{H_{fin}}{d} \right)^{-0.11} Re^{0.33} Pr^{0.33} \quad (2.39)$$

S_T 는 가로 피치, S_L 은 세로 피치, H_{fin} 은 핀 높이, d 는 핀 직경을 나타낸다.

Bar-Cohen et al. [14-15] 은 본 연구의 기존연구로서 마이크로 칩, 마이크로 핀 흰 냉각기에서 액체질소를 작동유체로 하여 실험을 진행하였으며 액체질소와 FC-72 를 작동유체로 사용한 경우의 베이스 대류열전달계수를 건도에 대해 비교 분석 하였다. 실험을 통해 마이크로 칩, 마이크로 핀 흰 히트 싱크 모두 액체질소를 작동유체로 사용한 경우 건도에 대한 베이스 대류열 전달계수는 감소하는 반면에 FC-72 경우 건도에 대해 증가하는 경향을 확인 하였다.

표 2.1 관련연구들의 시험편 구조, 작동유체 및 작동 범위 [8-15]

Author	Geometry	Working Fluid	Performed rage	Year
Klimenko [8]	Vertical & Horizontal Tube D _i :1.6-14.1mm L:100-1900mm	LN ₂ LH ₂ LNe	Pressurer: 0.9-22bar Heat flux: 0.04-2.1W/cm ² Mass flux: 20-2200 kg/m ² s	1982
Saha [9]	Vertical & Horizontal Tube D _i :1.09-14mm	LN ₂ LH ₂ LNe LHe	Re _L : 0.27-630 Mass flux: 28-2210kg/m ² s	1984
Kandlikar [10]	Vertical & Horizontal Tube D _i :5-25mm	Water R-11 R-12 R-22 R-113 R-114 LN ₂ LNe	Heat flux: 3-22.8W/cm ² Mass flux: 40-4850kg/m ² s	1990
Zhang et al. [11]	Vertical Tube D _i =0.531, 0.834, 1.042, 1.931mm	LN ₂	Inlet temperature: 78.2-79.8K Inlet Pressure:	2007

			300–920kPa Outlet Pressure: 140–580kPa Heat flux: 5.09–21.39 W/cm ² Mass flux: 440–3000 kg/m ² s	
Warrier et al. [12]	Multi micro channel N: 5 D _h : 0.75mm L=307mm	FC-84	Inlet temperature: 26, 40, 60°C Heat flux: 0–5.99W/cm ² Mass flux 557–1600 kg/m ² s	2001
Krishnamurthy and Peles [13]	Microgap with circular pin fin W×L:1.8×10cm D: 100μm S _T :150μm S _L :150μm H _{fin} : 250μm	DI Water	Heat flux: 20–350W/cm ² Mass flux: 346–794 kg/m ² s	2008
Bar-Cohen et al. [14–15]	Micro gap W×L×H: 12×12×0.33mm Micro pin fin heat sink W×L×H: 12×12×0.33mm N: 1600 D _h : 150μm H _{fin} : 300μm	LN ₂ FC-72	Chip Power: 31, 70, 96W Mass flow rate: 1.6–2.23g/s	2021

표 2.2 Kandlikar 상관식의 Constant Value[10]

Constant	Convective region	Nucleate boiling region
C_1	1.136	0.6683
C_2	-0.9	-0.2
C_3	667.2	1058
C_4	0.7	0.7
C_5^*	0.3	0.3

*수평관에 대해 $Fr_l > 0.04$ 인 경우와 수직관에 대해 $C_5 = 0$

표 2.3 Kandlikar 상관식의 작동유체별 F_{fl} [10]

Fluid	F_{fl}
Water	1
R-11	1.3
R-12	1.5
R-13B1	1.31
R-22	2.2
R-113	1.3
R-114	1.24
R-152a	1.1
Nitrogen	4.7
Neon	3.5

III. 실험장치 및 실험방법

3.1 마이크로 핀 흰 히트 싱크

3.1.1 마이크로 핀 흰 히트싱크 설계

극저온 유체를 작동유체로 하는 마이크로 핀 흰 히트 싱크의 상관식이 존재하지 않음으로 Krishnamurthy and Peles 상관식인 식(2.29)을 사용하여 상관식 기반 매개변수 연구가 실행되었다. 유체 입구 온도, 냉각기 및 마이크로 핀 흰 히트싱크의 구조는 Bar-Cohen et al. 을 참고하여 150 μm 흰 직경, 300 μm 흰 높이, 300 μm 흰 공간을 가지는 엇갈림 배열 마이크로 핀 흰 히트싱크가 기준모델로 선정되었으며 89 K 의 포화온도를 가지는 액체 질소의 열물성치가 사용되었다. 마이크로 핀 흰 매개변수로는 흰 높이, 흰 공간, 질량플럭스를 사용하였으며 결과는 그림 [3.1-3.3]에 그래프로 나타내었다.

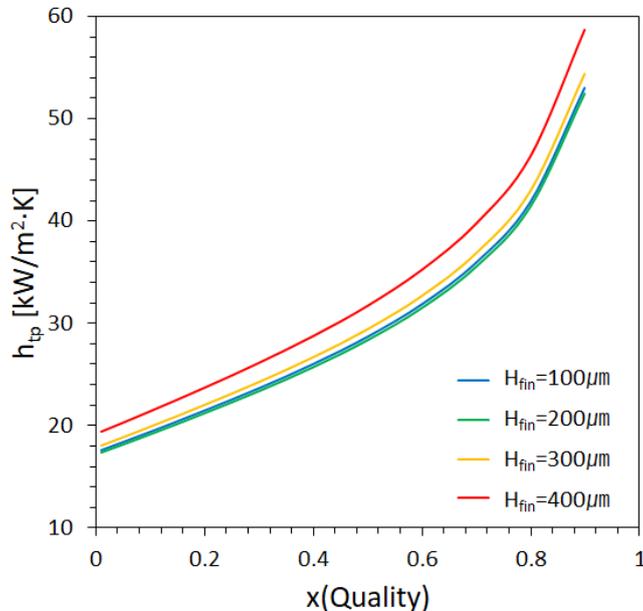


그림 3.1 Krishnamurthy and Peles 상관식이 적용된 이상 대류 열전달 계수의 건도에 대한 흰 높이 영향

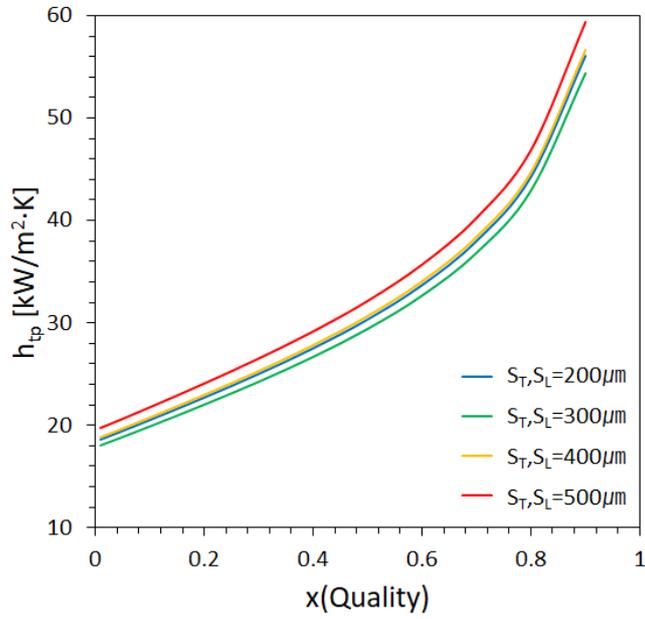


그림 3.2 Krishnamurthy and Peles 상관식이 적용된 이상 대류 열전달 계수의 건도에 대한 흰 공간 영향

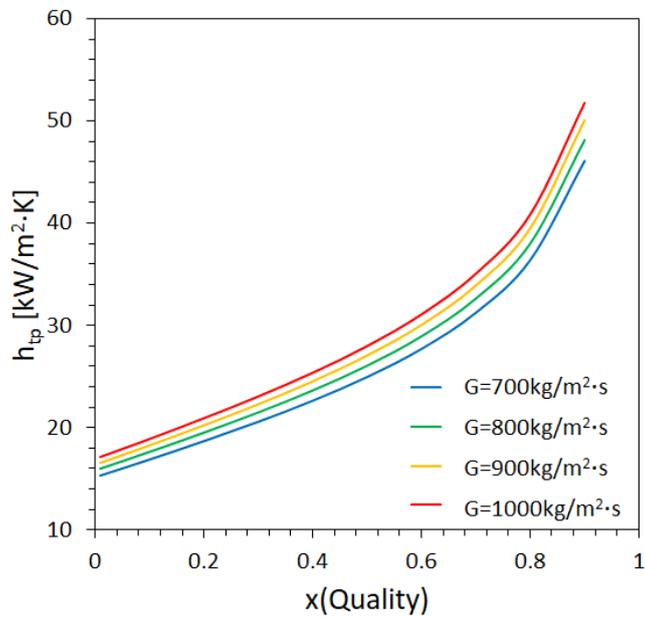


그림 3.3 Krishnamurthy and Peles 상관식이 적용된 이상 대류 열전달 계수의 건도에 대한 질량플럭스 영향

상관식 기반 매개변수 연구 결과 흰 높이가 높고 흰 공간이 넓은 구조가 더 높은 대류열전달계수를 가지는 것으로 예측되지만 구조 안정성 및 제작 가능성을 고려해 정방 및 엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 흰 히트 싱크가 10 mm X 10 mm 의 기초면에 500 μm 의 베이스 두께, 100 μm 의 흰 직경, 200 μm 의 흰 높이, 200-400 μm 의 흰 공간으로 설계되었다. 그림 3.4 과 표 3.1 은 설계된 마이크로 핀 흰 히트 싱크의 배열 구조 및 치수를 나타낸 것이다.

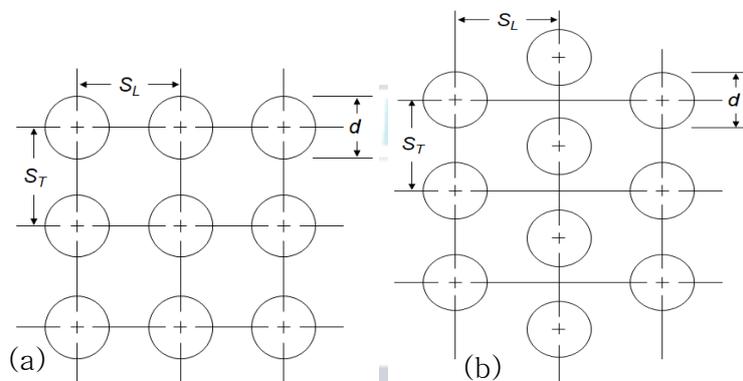


그림 3.4 핀 흰의 배열 (a) 정방 배열 (b) 엇갈림 배열

표 3.1 마이크로 핀 흰 히트 싱크 구조별 치수 Unit: μm

Type	S_T	S_L	d	H_{fin}	N_{fin}
Inline	200	200	100	200	2500
	250	250			1600
	300	300			1089
	350	350			841
	400	400			625
Staggered	200	200			2377
	250	250			1541
	300	300			1073
	350	350			827
	400	400			613

3.1.2 백금박막히터

발열체 모사를 위해 백금 박막히터 설계 및 해석이 수행되었다. 백금은 넓은 온도 영역에서 온도와 전기저항 간의 관계가 연속적이고 선형성이 보장되기에 발열체로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 온도센서로 이용할 수 이점이 있다.

본 연구에서 목표로 하는 일정한 열유속 인가 및 온도 균일성을 위해 백금의 물리적 특성 및 실험환경을 고려하여 설계되었으며 실험환경은 Bar-Cohen et al. 을 참고하였다. 백금 박막히터의 설계를 위해 히터 온도에 따른 백금의 전기저항을 식(3.1)의 캘린더 반 두센(CVD, Callendar-Van Dusen) 방정식을 사용하여 계산되었으며 사용된 계수 A , B , C 는 산업용 백금저항온도계의 계수를 사용하였다. $R(0^{\circ}\text{C})$ 는 식(3.2)으로 부터 계산되었고 ρ_0 는 0°C 에서 백금의 비저항, L 은 히터의 길이, W 는 히터의 폭, t 는 히터의 두께이다. 히터에 인가되는 최대전력 및 전압을 산정하여 그림 3.5 과 같이 히터의 선폭, 두께, 길이가 각각 2000 \AA , $500\text{ }\mu\text{m}$, 119.5 mm 로 선정되었으며 전력공급을 위한 전극패드가 $0.9\text{ mm} \times 1.9\text{ mm}$ 크기로 시험편의 대각방향 끝에 위치해 있다.

$$R(T) = R(0^{\circ}\text{C})[1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3] \quad (3.1)$$

$$R(0^{\circ}\text{C}) = \frac{\rho_0 L}{Wt} \quad (3.2)$$

설계된 백금 박막히터의 열성능을 검증하기 위해 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis) 모델이 생성되었으며 해석이 수행되었다. 그림 3.6은 해석모델의 개략도를 나타낸 것이며 그림 3.7, 표 3.2는 FEA 모델 및 해석조건을 나타낸 것이다. 표 3.3은 해석에 사용된 물성의 열전도율과 비저항을 정리한 것이다. 해석에는 ANSYS Mechanical 이 사용되었으며 경계조건은 Bar-Cohen et al.를 참조하였다. 지배방정식의 수식적 표현은 다음과 같다[16-17].

전압 분포 방정식

$$\nabla \cdot \frac{\nabla \phi}{\rho_e} = 0 \quad (3.3)$$

열전도 방정식

$$\nabla \cdot (k\nabla T) + q''' = 0 \quad (3.4)$$

모델에서 q''' 는 줄 발열의 결과로서 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$q''' = \vec{j} \cdot \vec{E} \quad (3.5)$$

ϕ 는 전압분포, ρ_e 는 비저항, k 는 열전도율, T 는 온도 q''' 는 체적 열발생을 \vec{j} 는 전류밀도, \vec{E} 는 전기장을 나타낸 것이다.

그림 3.8 은 CVD 방정식으로 계산된 저항과 해석적 결과의 차이를 나타낸 것이며 그림 3.9는 해석결과로서 각 인가전압에 대한 온도장을 나타낸다. 각 전력 구간에서 저항은 5.5, 0.18, 3%의 차이를 가지며 표면온도는 0.67, 0.81, 0.84%의 차이를 가지는 것으로 확인되었다. 표 3.4 에 수치계산 결과와 해석 결과를 정리하였다.

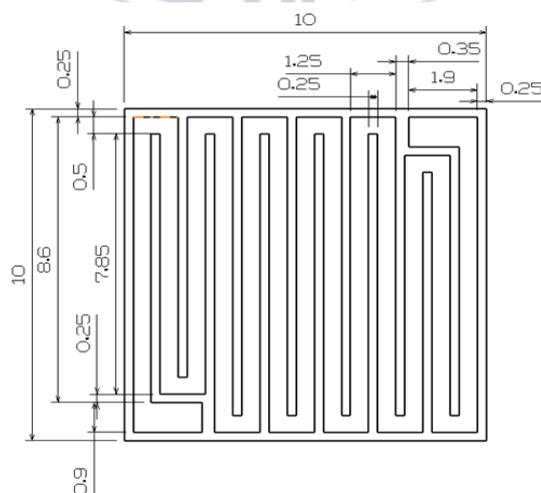


그림 3.5 백금 박막히터 패턴 디자인

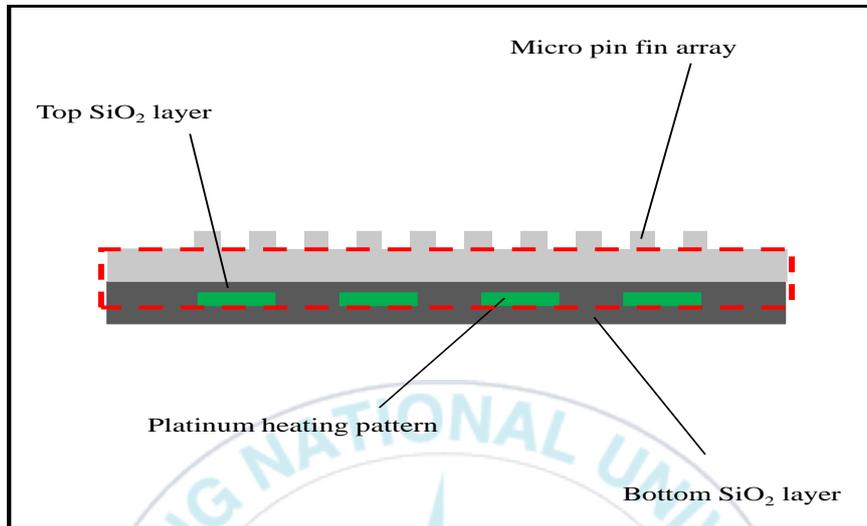


그림 3.6 백금박막히터 해석 모델 개략도

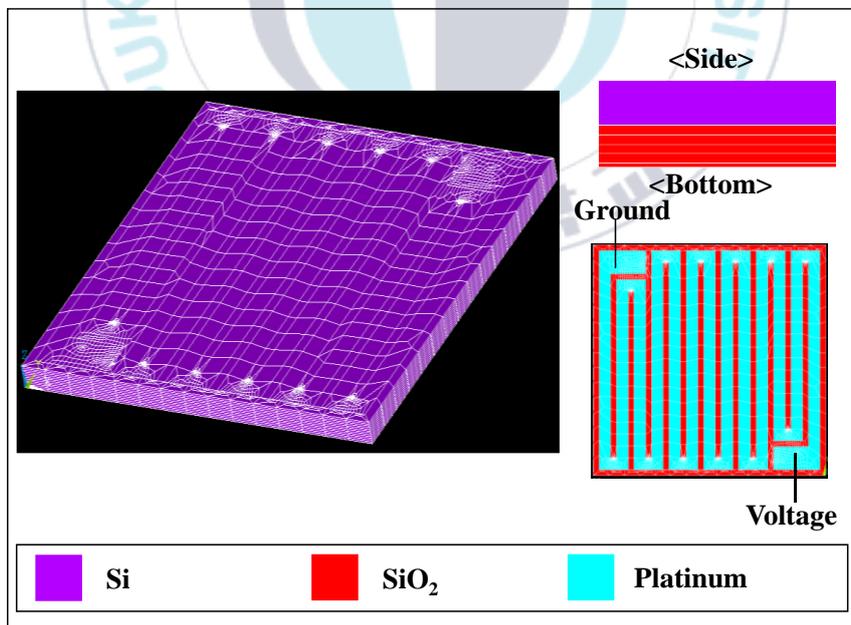


그림 3.7 백금 박막히터 유한요소 해석 모델

표 3.2 유한요소 해석 경계조건

Physical conditions	
FEA model dimension(W×L×t)	10×10×501.2um (500 μm Si layer / 1 μm SiO ₂ layer / 0.2 μm Pt layer)
Boundary and Thermal conditions	
Fluid temperature (K)	89
Applied Voltage (V)	40, 60, 70
Effective heat transfer coefficient (kW/m ² ·K)	150, 200, 250
Software and computational elements	
Software package	Ansys Multiphysics
Number of elements	38.8k
Number of node	162K
Element type	SOLID 226
Mesh type	Free mesh
Solution Methods	
State	Steady-state
Multiphysics model	3D Thermal-electric analysis

표 3.3 박막히터 열 물성치

	Thermal conductivity [W/m·K]	Resistivity [μΩ·cm]
Platinum, Pt	70	1.824 @ 77 K 2.80 @ 100 K 6.90 @ 200 K
Silicon oxide, SiO ₂	1.4	-
Silicon, Si	150	-

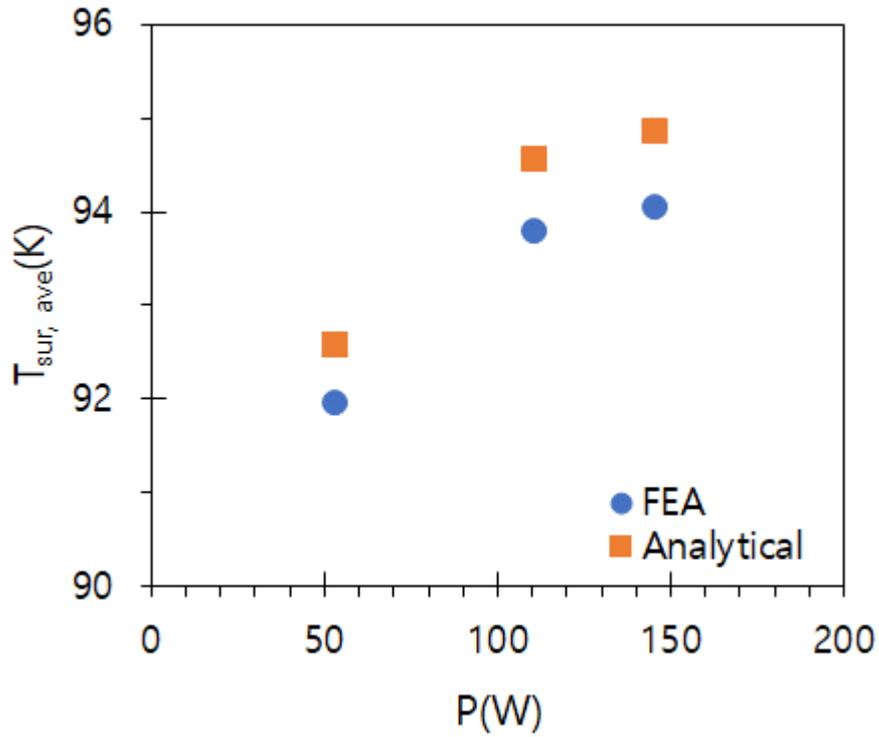


그림 3.8 박막히터의 유한요소해석 결과와 계산결과의 평균 표면온도

표 3.4 백금 박막히터의 유한요소 해석결과 및 계산결과

	P(W)	R(Ω)	T _{sur,ave} (K)
Analytical	53.5	31.5	92.6
	110.8	32.5	94.5
	145.9	32.6	94.8
FEA	53.5	29.8	92
	110.8	32.4	93.8
	145.9	33.6	94

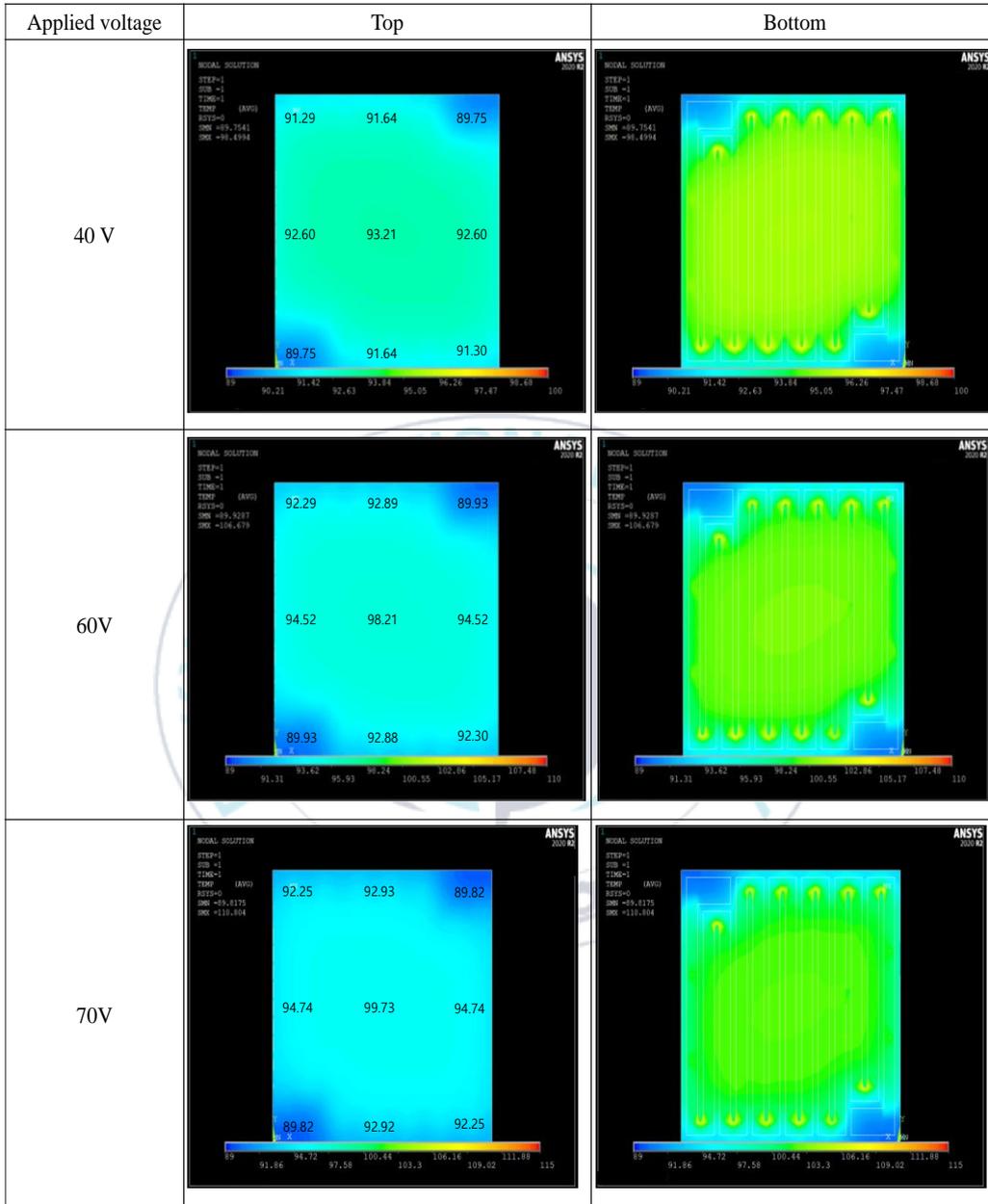


그림 3.9 40, 60 70 V 인가전압에서의 박막히터 온도장

3.1.3 마이크로 핀 흰 히트 싱크 제작

실험에 사용된 마이크로 핀 흰 히트 싱크는 다품종 다량 생산이 가능하고 원형 핀 흰을 가공할 수 있는 미세 전기기계 시스템(MEMS, Micro Electro Mechanical Systems)을 이용해 n<100> type 의 Test 급 8 인치 실리콘 웨이퍼 제작되었다.

제작 과정은 그림 3.10 과 같이 박막증착, 포토리소그래피, 세정, 식각, 패키징 공정으로 나뉜다. 우선 모사된 발열체와 히트 싱크간의 접촉저항을 최소화하기 위해 웨이퍼의 배면에 백금 박막히터를 제작한다.

실리콘 웨이퍼 보호 및 전기절연을 위해 웨이퍼 배면에 3,000 Å 두께의 산화실리콘 증착(TEOS), 감광액을 도포한 후 박막히터의 형상이 그려진 포토마스크를 노광 후 현상한다. 박막히터의 표면 접착성을 향상시키기 위해 티타늄 200 Å를 증착(Sputtering)시킨 후 백금 1,000 Å을 증착시킨다[18]. Lift-off 공정을 통해 박막히터 패턴을 제외, 현상되지 않은 부분을 제거한 후 백금 박막히터의 보호 및 전기절연을 위해 산화 실리콘 10,000 Å을 증착시킨다. 그 후 그림 3.11 과 같이 전극 패드를 노출시키기 위해 감광액을 도포, 마찬가지로 패드 형상이 그려진 포토마스크를 노광 후 현상을 한다. 산화실리콘 10,000 Å을 식각하여 백금 전극패드를 노출시키고 남은 감광액을 세정한다. 마이크로 핀 흰 식각을 위해 웨이퍼의 전면에 감광액을 도포한 후 마이크로 핀 흰 형상이 새겨진 포토마스크를 노광 후 현상한다. 깊은 반응성 이온 에칭(DIRE)으로 200 μm 식각한 후 남은 감광액을 세정, 다이싱(dicing saw) 공정을 통해 10 mm X 10 mm 의 크기로 웨이퍼를 절단하여 마이크로 핀 흰 히트 싱크를 제작하였다. 그림 3.11 은 제작 순서도 및 제작된 시험편을 나타낸 것이다.

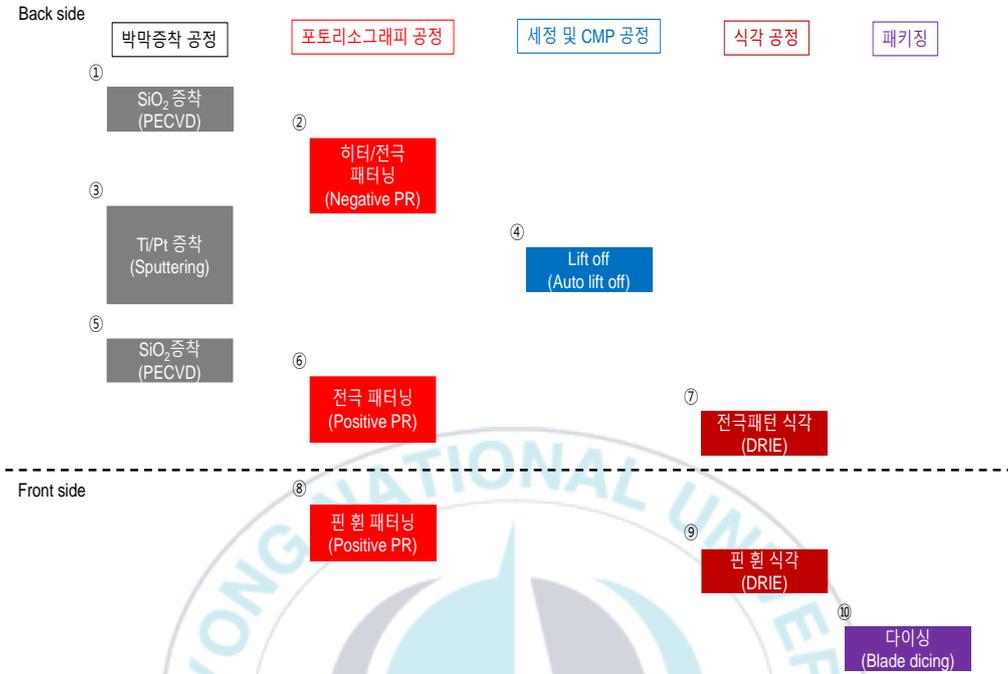


그림 3.10 MEMS 공정 순서도

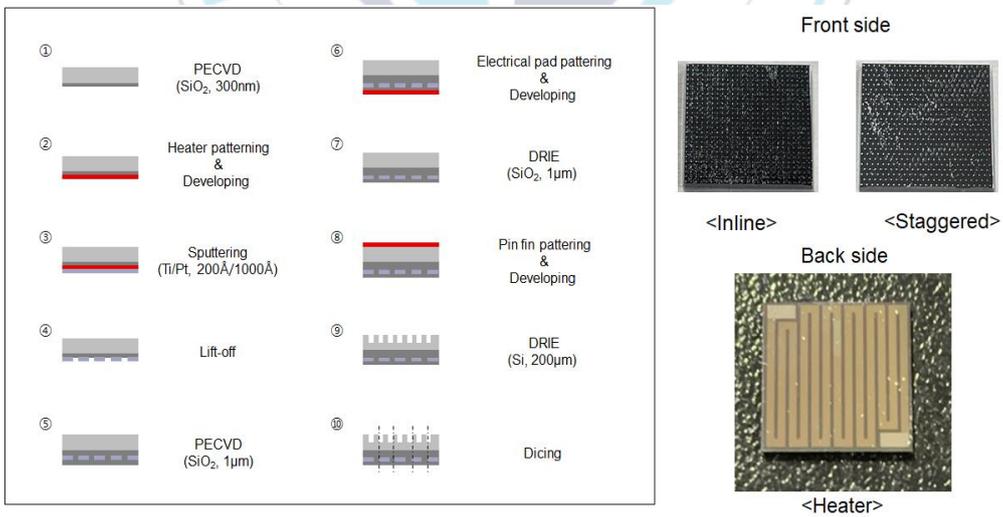


그림 3.11 제작순서도 및 시험편

3.2 실험 장치 및 구성

3.2.1 마이크로 핀 흰 채널 냉각기

실험에 사용된 마이크로 핀 흰 히트 싱크는 그림 3.12 같이 엇갈림 배열, 200 μm 의 흰 공간을 가지는 시험편으로 선정되었으며 내부 유로가 있는 냉각기에 결합되어 마이크로 핀 흰 채널 냉각기를 구성한다. 그림 3.13 은 냉각기의 3 차원 분해도와 결합도이며 그림 3.14 포고핀과 열전대의 위치 그리고 유동 방향을 나타낸다.

냉각기의 물성은 알루미늄이며 누전 방지와 표면 강화를 위해 경질 피막 처리가 되었으며, 총 3 개의 블록으로 커버, 하우징, 캐리어로 구성되어 있다. 커버는 70 mm 길이, 45 mm 폭, 6 mm 두께의 알루미늄 플레이트에 액체 질소의 누설을 막기 위해 2 단으로 구성되어 있으며 하우징과의 체결을 위한 M5 볼트 홀이 가공되어 있다. 하우징은 70 mm 길이, 45 mm 폭, 30 mm 높이를 가지며 액체 질소 수송 시 누설을 방지하기 위한 Lok 피팅 체결을 위해 좌, 우에 1/4" npt 암나사, 입 출구 온도 측정을 위한 열전대 설치를 위해 전면부에 1/8" npt 암나사, 전력공급을 위한 포고핀 포트, 케이스와의 결합을 위한 M5 볼트 홀이 가공되어 있으며 캐리어는 16 mm 길이, 15.4 mm 폭, 6 mm 두께로 극저온용 에폭시를 이용, 마이크로 핀 흰 히트 싱크를 고정하는 역할을 하며 하우징과 커버에 의해 고정된다. 캐리어의 온도를 측정하기 위한 열전대 홀이 캐리어 하부에 1 mm 직경, 1.5 mm 의 깊이로 가공되어 있으며 전력공급을 위한 포고핀 홀이 캐리어 하부에 2.413 mm 직경, 1.7 mm 깊이와 1.27 mm 직경, 6 mm 깊이로 2 단 가공되었다.

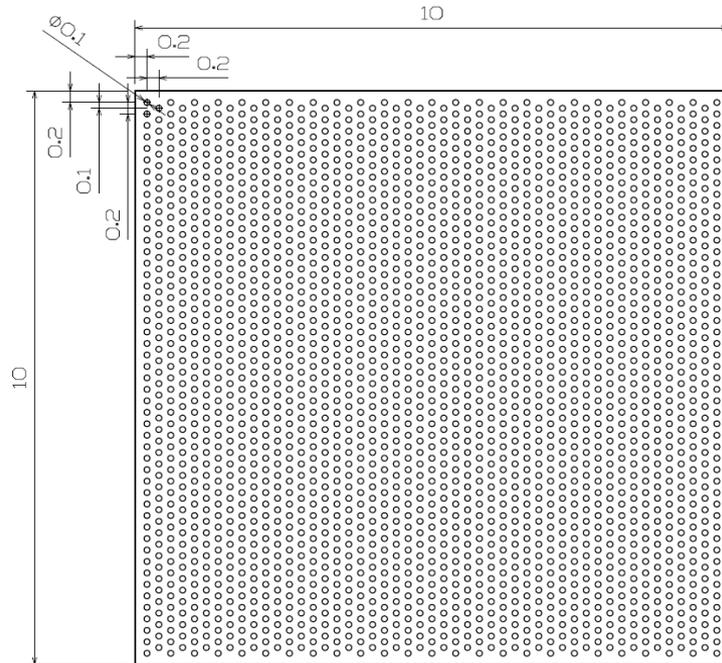


그림 3.12 엇갈림 배열 마이크로 핀 힌 히트 싱크($S_T, S_L=200 \mu\text{m}$)

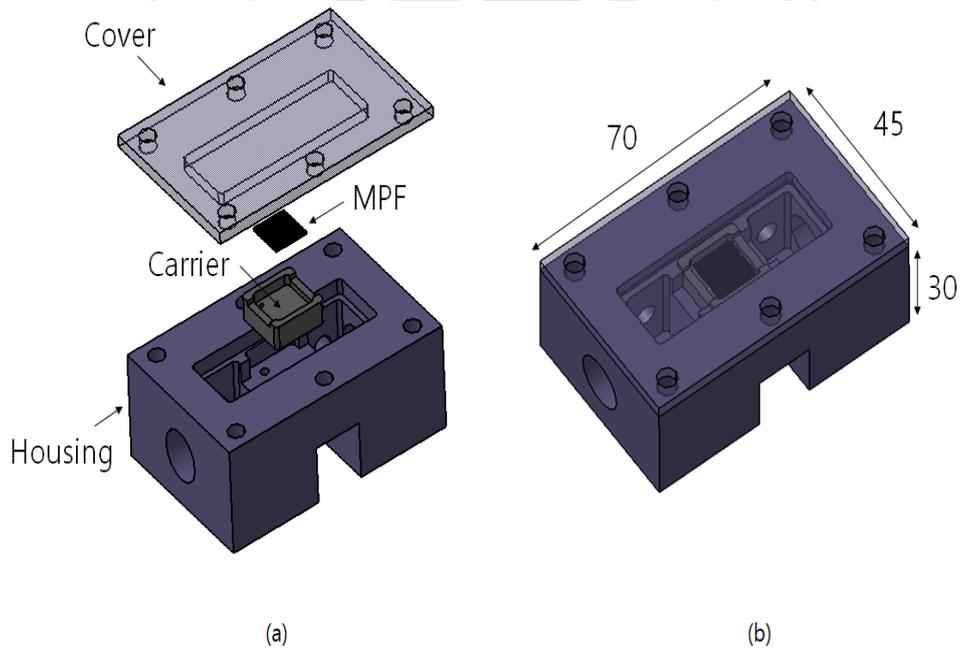
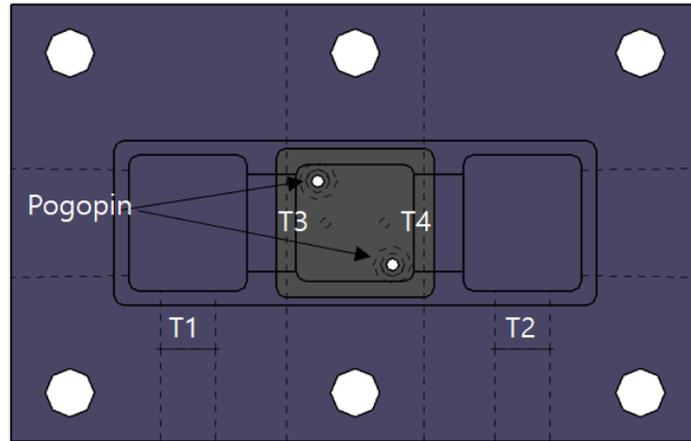
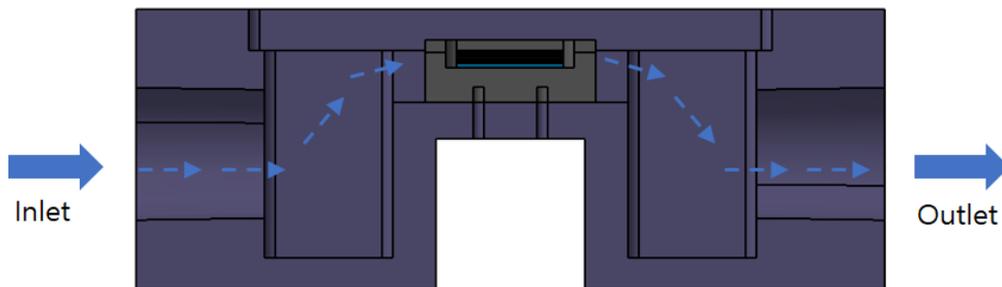


그림 3.13 (a) 마이크로 핀 힌 채널 냉각기 분해도 (b) 마이크로 핀 힌 채널 냉각기 결합도



(a)



(b)

그림 3.14 (a) 포고핀 및 열전대 위치 (b) 마이크로 핀 힌 채널 냉각기 유동 방향

3.2.2 실험 장치 및 장비

엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 흰 채널 내 액체질소 유동 영향을 확인하기 위한 마이크로 핀 흰 채널 냉각기와 장비가 그림 3.15 같이 구성되어 있다.

액체 질소의 1 기압에서 물성은 표 1.1 에 나타나져 있으며 상온 상압 조건에서 폐쇄계로 실험을 설계할 경우 액체 질소 순환을 위해 높은 수준의 열량을 제거할 수 있는 냉동기와 고성능의 압축기가 필요하며 수송 및 저장 과정에서 많은 에너지가 소모되므로 실험 장치는 개방계로 구성하였다. 상온 상압의 환경에서 극저온 환경에 빠르게 도달하기 위해 외부에서 마이크로 핀 흰 채널 냉각기를 직접적으로 강력하게 냉각시키기 위해 바이패스와 액체 질소의 저장 및 수송을 위한 액화 가스 용기(LGC, Liquid Gas Container)가 각각 설치되어 있으며 유체 수송 간 마찰 및 대기와의 열 교환을 최소화하기 위해 LGC 와 냉각기의 입구가 진공단열 호스로 연결되어 있으며 냉각기는 극저온용 단열재인 Cryogel Z 로 둘러싸여져 있다.

그림 3.17 은 온도에 따른 Cryogel Z 의 단열성능을 나타낸다[19]. 누설을 방지하기 위해 각 체결부가 Lok 피팅과 1/4 인치 스테인리스 파이프로 구성되어 있으며 입구 압력을 계측하기 위한 압력계와 입 출구 온도 및 캐리어의 온도를 측정하기 위한 열전대, 액체 질소를 가열하기 위한 열교환기와 유량을 측정하기 위한 가스 식 질량유량계로 구성되었다. 박막히터에 전력을 공급하기 위해 DC 파워 서플라이 가 사용되었으며 Data logger 로부터 획득한 온도값과 전력값을 DAQ PC 를 이용하여 데이터를 저장하였다. 그림 3.16 은 실험 장치의 개략도이며 표 3.5 에 실험 장치와 장비의 목록을 정리하였다.

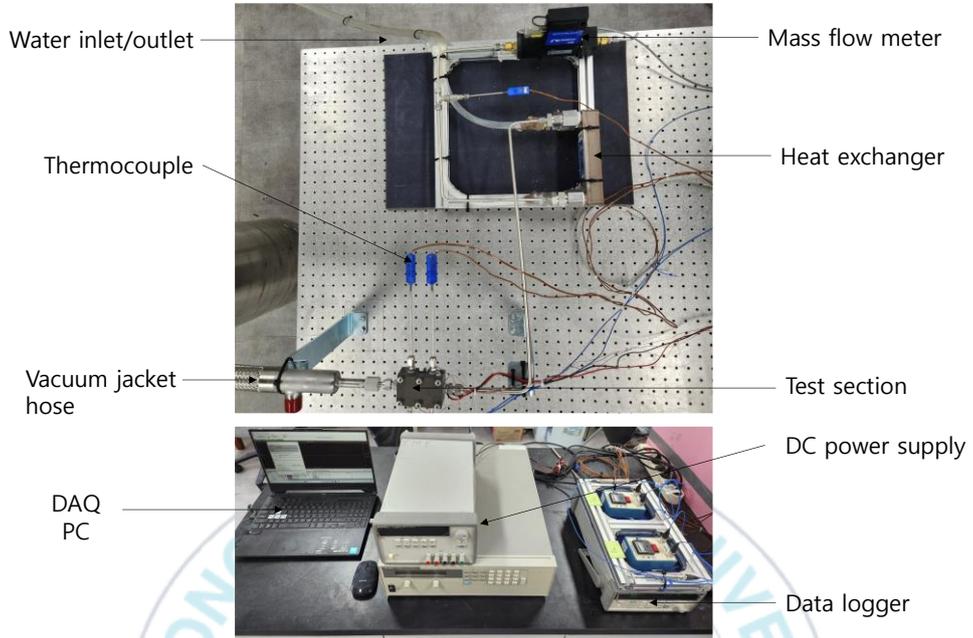


그림 3.15 실험 장치 및 장비

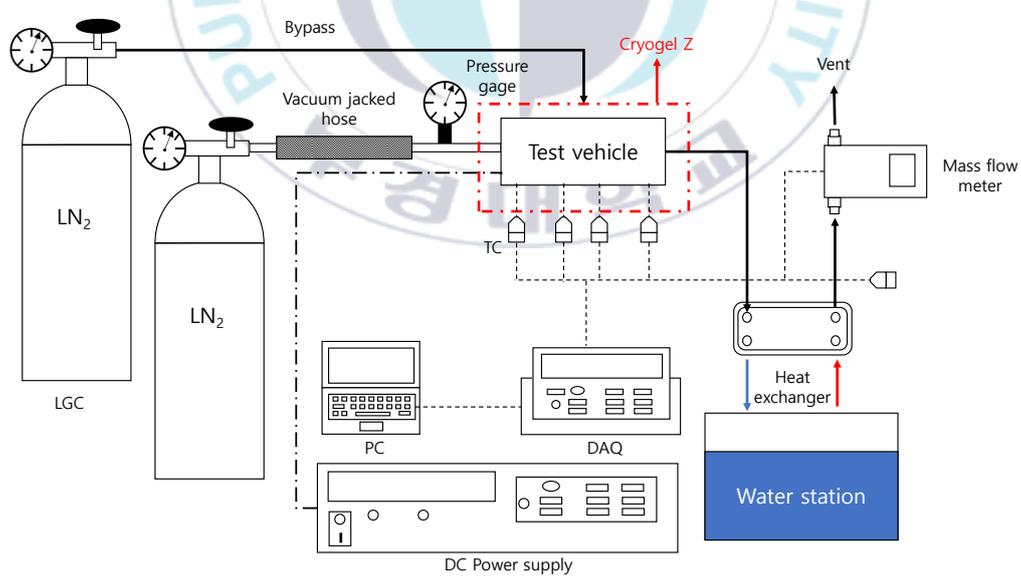


그림 3.16 실험대 개략도

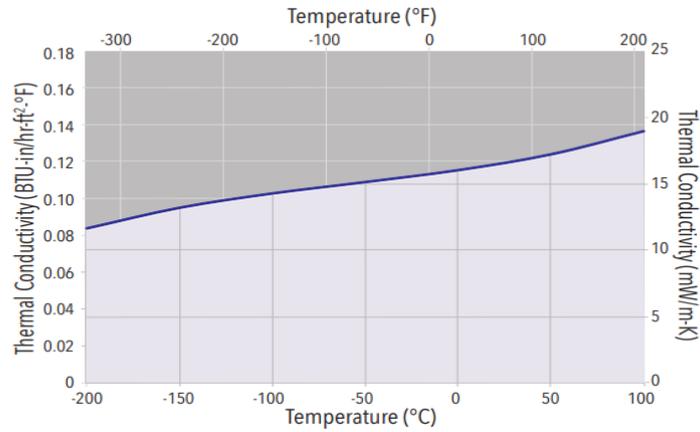


그림 3.13 온도에 따른 Cryogel Z의 열전도율 [19]

표 3.5 실험 장치 및 장비 목록

	장치 및 장비	제조사	모델명
1	LGC	HANBEECRYO	VLC090-MP
2	Vacuum jacked hose	Doo-jin	Custom order
3	Pressure gage	SAM SUNG INSTRUMENT	A type 100 ϕ
4	Data logger	Agilent	34970A
5	DAQ PC	ASUS	-
6	DC Power supply	Agilent	6655A
7	Temperature sensor	OMEGA	T-type Thermo couple
8	Heat exchanger	Alecoil	BP3X8-10
9	Mass flow meter	OMEGA	FMA-1864A
10	Insulator	Aerogel	Cryogel Z
11	Lok-fitting	S-Lok	1/4" npt, 1/8" npt
12	Tube	-	SUS316L 1/4"
13	Pogopin	Mill-max	0856-0-15-20-82-14-11-0

3.3 실험 절차

본 실험은 액체 질소를 작동유체로 엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 흰 채널의 열성능을 평가하고 기존연구 및 개발된 흐름 비등 대류열전달계수 상관식과 비교 분석하기 위한 실험이며 실험 절차는 다음과 같다. 초기 실험 환경은 상온, 상압이다.

흐름 비등 대류열전달에서의 열전달 성능은 입구의 건도에 대해 큰 영향을 받는다. 따라서 바이패스를 활용하여 실험 조건에 부합하는 표면온도 및 입구온도 조정이 필수적이다. 바이패스를 작동, 마이크로 핀 흰 채널 냉각기가 목표 표면온도에 도달한 후 바이패스를 정지한다. 액체 질소의 유동은 오직 LGC 용기의 내부 압력에 의존하므로, LGC 용기에 설치된 압력조절기를 통해 초기 압력 조건을 조정한다. LGC 밸브를 개방해 마이크로 핀 흰 채널 냉각기에 액체질소를 흘려보낸 후 DC 파워 서플라이의 전압과 전류에 따라 6.7~55.2 W 범위의 전력을 공급하였으며 액체질소의 질량유량을 측정하기 위해 관형 열교환기를 거쳐 가스식 질량유량계를 통과한 후 외부 대기로 배출된다. 실험의 목표인 베이스 대류열전달계수를 계산하기 위해 하우징, 캐리어의 온도와 작동유체의 입, 출구 온도 및 입구 압력이 냉각기에 장착된 열전대와 압력계로 측정되었다. 모든 데이터는 준 정상 상태에서 측정되었으며 본 실험에서 사용된 열전대와 DC 파워 서플라이의 오차는 각각 ± 0.2 °C, 0.4%이다.

3.4 평가 방법

본 실험에서 액체 질소를 작동유체로 엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 흰 채널 냉각기의 열성능을 평가하기 위해 베이스 대류열전달계수가 사용되었으며 다음과 같은 과정을 통해 정의된다.

마이크로 핀 흰 히트 싱크의 이상 대류열전달계수는 뉴턴의 냉각법칙과 흰 방정식을 사용해 다음과 같이 정의된다.

$$P - Q_{loss} = h_{tp}(\eta_{fin}N_tP_{fin}H_{fin} + wL)(T_s - T_{sat}) \quad (3.7)$$

여기서 P 는 전력이며 DC 파워 서플라이의 인가 전력과 전압의 곱으로 계산된다.

$$P = VI \quad (3.8)$$

극저온용 단열재로 싸여진 마이크로 핀 환 채널 냉각기에 바이패스를 이용해 입구 온도만큼 충분히 그리고 균일하게 냉각시켜 실험을 진행하였으므로 히터와 냉각기 벽 사이의 전도에 의한 열 손실은 무시한다고 가정할 수 있으며 열전대로 측정된 입구 온도와 압력계로 측정된 포화온도의 차이가 미미하므로 유동에 의한 열손실 또한 무시된다고 가정되며 η_{fin} 은 환 효율로 아래와 같이 계산된다.

$$\eta_f = \frac{\tanh(mH_{fin})}{mH_{fin}} \quad (3.9)$$

$$m = \sqrt{\frac{h_{tp}P_{fin}}{k_sA_c}} \quad (3.10)$$

N_t 는 핀 환의 개수고 P_{fin} 는 핀 환의 둘레, H_{fin} 은 환 높이, w 는 히트 싱크 베이스 폭, L 은 베이스 너비, T_s 는 히트 싱크 표면온도, T_{sat} 는 포화온도, k_s 실리콘의 열전도율, A_c 는 환의 단면적이다. 환이 매우 짧고 실리콘의 열전도율이 높음으로 환 효율이 무시되며 환의 표면온도와 베이스 온도가 근사하다고 가정할 수 있으며 식(3.7)은 아래와 같이 정리된다. A_{tot} 는 마이크로 핀 환 히트 싱크의 전체 면적이고 A_b 는 히트 싱크 베이스 면적이다.

$$P = h_{tp}A_{tot}(T_s - T_{sat}) = h_{tp,b}A_b(T_b - T_{sat}) \quad (3.10)$$

$$T_s \approx T_b(\eta \cong 1) \quad (3.11)$$

포화온도는 아래와 같이 입 출구의 대수평균으로 계산하였으며, 베이스의 온도는 캐리어로부터 측정된 온도의 평균값을 사용하였다.

$$T_{sat} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (3.12)$$

계산된 마이크로 핀 환 히트 싱크의 베이스 대류열전달 계수가 유효열유속 및 출구 건도 대해 평가되었으며 유효 열유속 q''_{eff} 과 출구 건도 x_{ex} 는 다음과 같이 정의된다.

$$q''_{eff} = \frac{P - Q_{loss}}{A_{heater}} \quad (3.13)$$

$$x_{ex} = \frac{P - Q_{loss}}{\dot{m}h_{fg}} = \frac{P}{\dot{m}h_{fg}} \quad (3.14)$$

질량플럭스 G 는 아래와 같이 정의된다.

$$G_{max} = \frac{\dot{m}}{A_{min}} \quad (3.15)$$

A_{min} 은 마이크로 핀 환 히트 싱크의 횡방향 유동의 최소면적이며 다음과 같이 정의된다.

$$A_{min} = W_{channel} \left(H_{channel} - H_{fin} \frac{d}{S_T} \right) \quad (3.16)$$

IV. 실험 결과

4.1 마이크로 핀 흰 채널 내 액체질소 유동 영향

4.1.1 실험 결과

그림 4.1 은 인가 전력별 마이크로 핀 흰 채널의 베이스 대류열전달계수를 나타낸 것이며 그림 4.2 는 그림 4.1 의 각 유효 인가 열유속의 건도 별 마이크로 핀 흰 채널의 베이스 대류열전달계수를 나타낸 것이다. 실험결과 2.2-2.5 g/s 범위의 질량유량, 6.7-55.2 W/cm² 범위의 유효 열유속 구간에서 최소 78 kW/m²·K 최대 133 kW/m²·K 의 베이스 대류열전달계수가 측정되었다. 고정된 질량유량 하에서 수행된 실험결과 마이크로 핀 흰 채널의 열성능은 인가된 유효 열유속의 증가에 따라 상승하는 경향을 확인하였으며 마이크로 핀 흰 히트 싱크에서 물과 FC-72 를 작동유체로 하여 수행된 연구 결과와 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다[20-21].

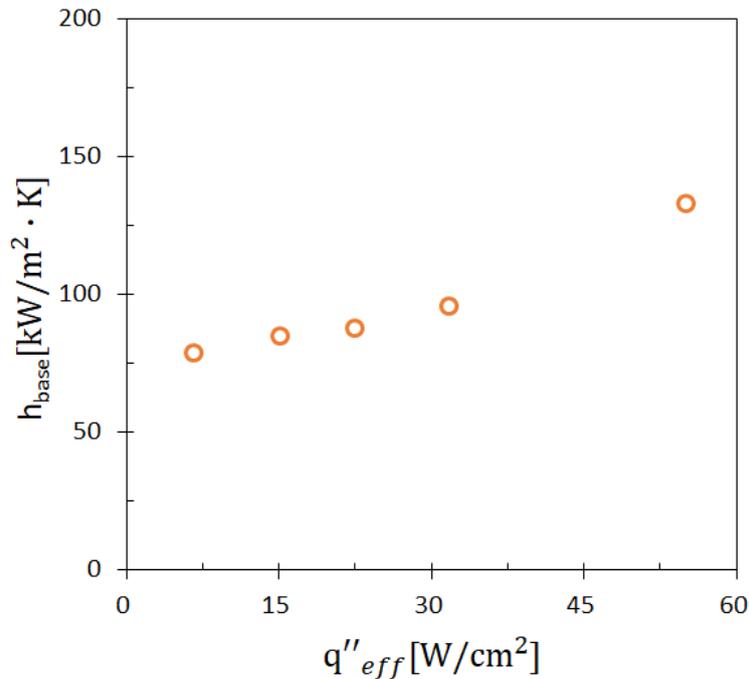


그림 4.1 유효열유속에 대한 마이크로 핀 흰 채널 베이스 대류열전달계수

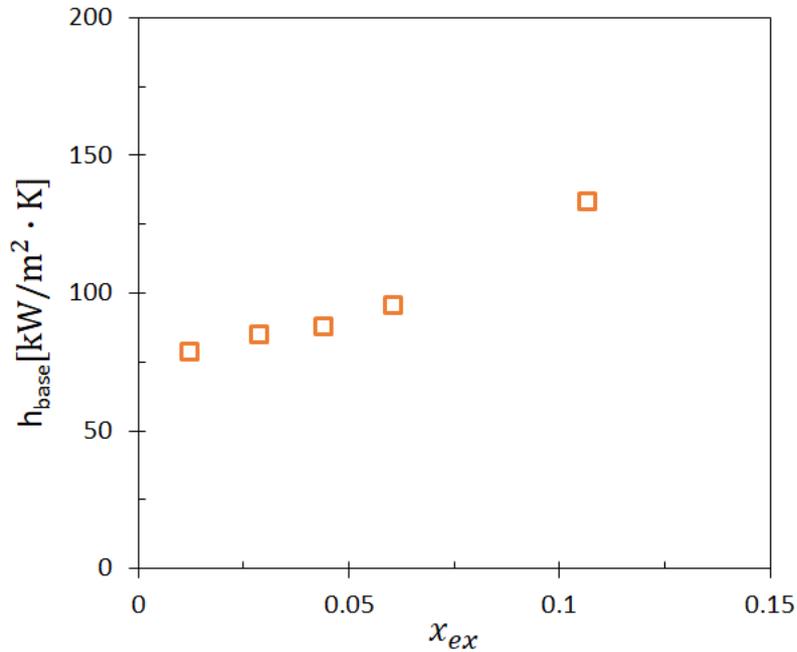


그림 4.2 출구 건도에 대한 마이크로 핀 흰 채널 베이스 대류열전달계수

4.1.2 기존 연구결과 비교

그림 4.3 은 액체질소를 작동유체로 사용하여 마이크로 핀 흰 히트 싱크 및 마이크로 갭 채널에서의 실험이 수행된 Bar-Cohen et al. 의 실험 결과와 본 연구의 실험결과를 비교한 것이다. 마이크로 핀 흰 히트 싱크 실험 결과는 본 연구의 실험 결과와 달리 유효 열유속에 대해 베이스 대류열전달계수가 감소하는 경향을 보이고 동일 유효 열유속에서 약 2.8 배 더 큰 베이스 대류열전달계수를 가지는 반면 마이크로 갭 실험 결과는 열성능이 질량유량에 대해 독립적임을 보이며 실험결과와 인접한 유효 열유속에서 최소 0.8% 차이와 최대 32%의 차이의 베이스 대류열전달계수를 보인다. 선행연구의 마이크로 핀 흰 히트 싱크 실험 결과가 수행된 연구의 결과와 다른 양상을 보이는 것은 유로의 형상, 히트 싱크의 위치, 실험조건의 차이로 인해 발생한 것으로 보이며, 기존 연구의 마이크로 핀 흰 히트 싱크는 10 mm 길이, 10 mm 폭, 300 μ m 의

흰 높이를 가지며 330 μm 높이의 채널내부의 윗면에 위치하고 실험은 27, 61, 84 W/cm^2 의 유효 열유속 및 2.06, 1.84, 1.61 g/s 의 질량유량의 조건에서 수행되었으며 마이크로 갭은 10 mm 길이, 10 mm 폭, 330 μm 높이를 가지며 8.8–52.6 W/cm^2 의 유효열유속 및 2.3, 3.2 g/s 의 질량유량의 조건에서 수행되었다.

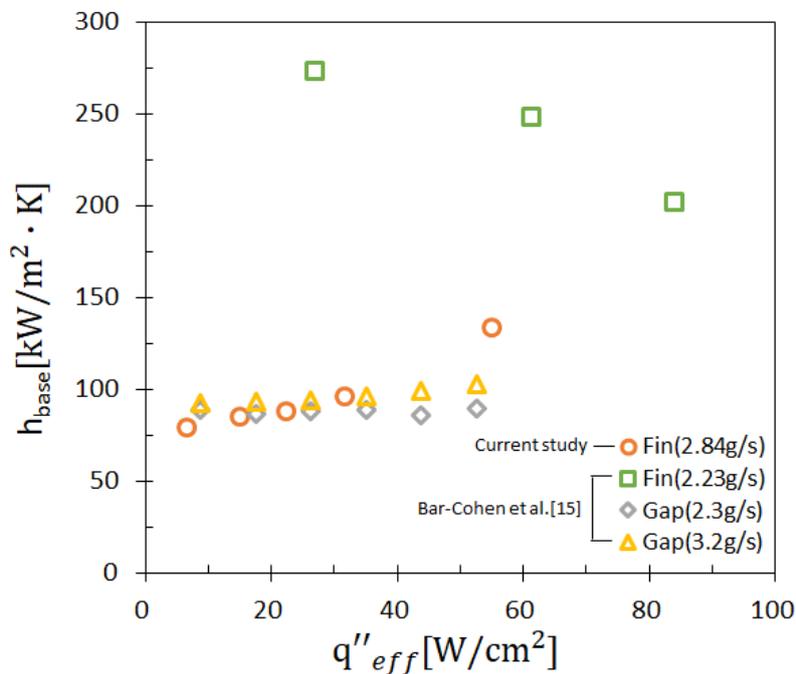


그림 4.3 Bar-Cohen et al.[15] 마이크로 갭 및 마이크로 핀 흰 히트싱크의 유효열유속에 대한 베이스 대류연결달계수 비교

4.1.3 흐름 비등 대류열전달계수 상관식 비교

그림 4.4는 2장에서 소개한 식(2.32)의 마이크로 핀 흰 히트 싱크 흐름 비등 대류열전달계수 상관식과 식(2.30)의 멀티마이크로 채널 흐름 비등 대류열전달계수 상관식으로 계산된 베이스 대류열전달계수와 실험결과를 유효 열유속으로 비교하여 나타낸 것이며 그림 4.5는 식(2.1), 식(2.8), 식(2.21), 식(2.22)의 마이크로 튜브 및 채널의 흐름 비등 대류열전달계수 상관식의 결

과를 실험결과와 유효 열유속으로 비교하여 나타낸 것이다. 앞서 설명하였듯이 본 연구의 실험에 사용된 마이크로 핀 흰 히트 싱크 채널의 구조, 실험조건 및 작동유체가 관련 연구들과 일치하지 않아 낮은 예측 정확도를 보이며 Krishnamurthy and Peles 상관식의 경우 최소 61.5%, 최대 75%의 차이를 보이며 유효 인가 열유속에 대해 베이스 대류열전달계수가 독립적임을 보이고 Warriier의 상관식 경우 평균 75%의 차이를 보이나 본 실험과 유사한 경향을 보인다.

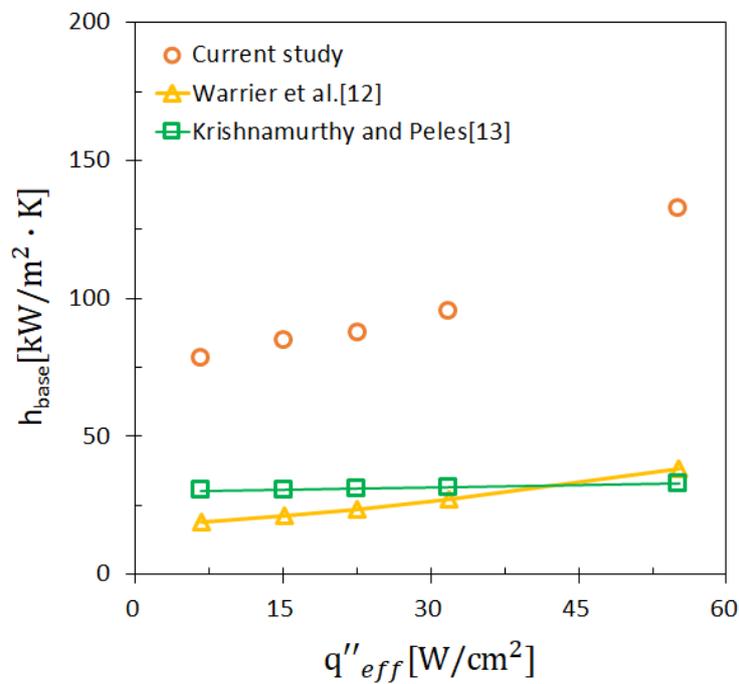


그림 4.4 마이크로 핀 흰 히트 싱크 및 멀티 마이크로 채널 흐름 비등 대류열 전달계수 상관식과 유효 열유속에 대한 베이스 대류열전달계수 비교

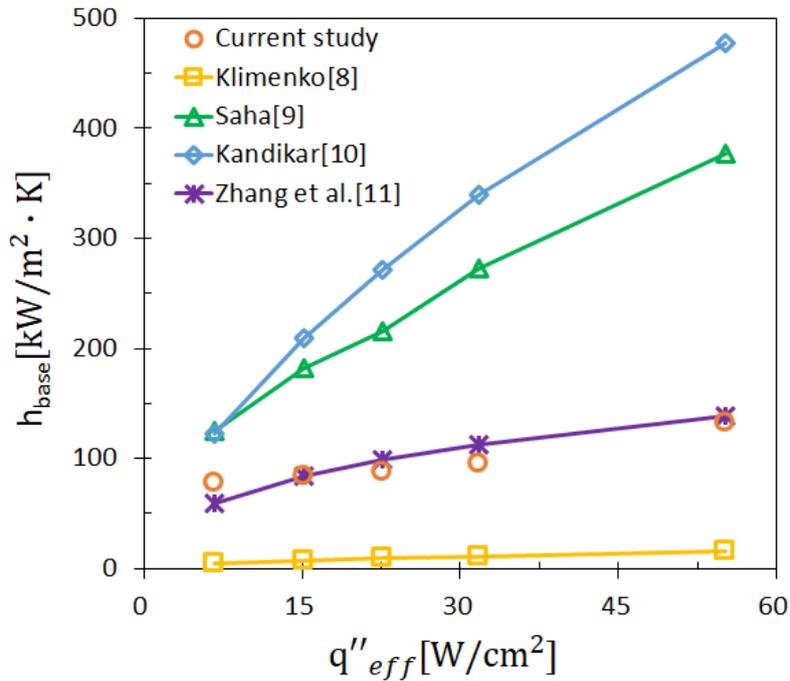


그림 4.5 마이크로 튜브 및 마이크로 채널 흐름 비등 대류열전달계수 상관식과 유효 열유속에 대한 베이스 대류열전달계수 비교

그림 4.5 에서 보여지는 바와 같이 매크로-마이크로 튜브 상관식에서도 모든 상관식들이 유효열유속의 증가에 따라 베이스 대류열전달계수 또한 증가하는 경향을 보이며 특히 Zhang et al. 의 마이크로 튜브 흐름 비등 대류열전달계수상관식은 현재 연구의 베이스 대류 열전달 계수와 최소 0.8% 최대 25%의 차이를 가지며 매우 유사한 경향을 보이니 상관식 적용 가능성을 판단하기 위해서는 보다 다양한 경계조건에서 실험이 수행되어야 한다.

따라서 기존의 개발된 상관식 적용 및 본 연구의 시험편 구조 및 실험 조건에 적합한 상관식 개발을 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

V. 결론

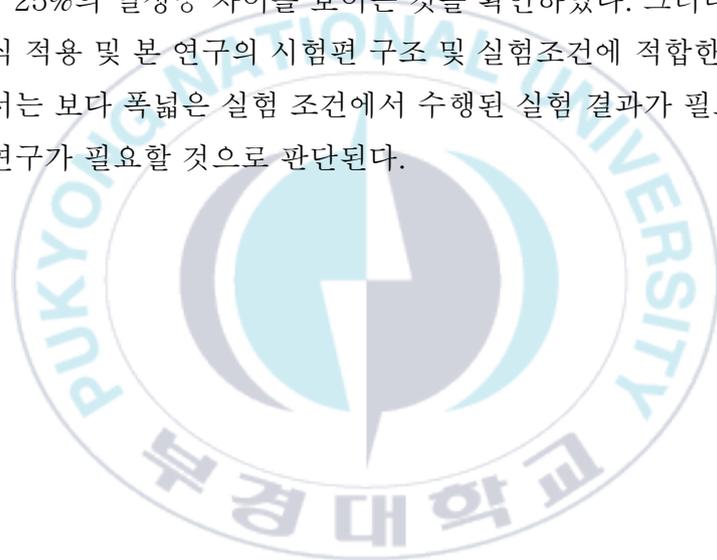
본 연구에서는 마이크로 핀 흰 채널 내 극저온 유동에 대한 실험적 연구를 위해 마이크로 핀 흰 히트 싱크가 설계되었고 MEMS 공정을 통해 제작되었으며 극저온 유동 실험대가 설계 및 구성되어 실험이 수행되었으며 실험으로 도출된 마이크로 핀 흰 채널의 열성능을 극저온 유체를 포함한 다양한 작동유체가 사용된 매크로-마이크로 스케일의 확장 표면에서 선행 연구된 결과 및 상관식으로 도출된 열성능과의 비교 분석을 통해 기존 개발된 상관식의 적용 가능성을 검토하였으며 세부적인 연구 결과를 아래에 정리하였다.

1) 기존연구인 Bar-Cohen et al.[14-15] 및 Krishnamurthy and Peles의 마이크로 핀 흰 히트 싱크 흐름 비등 대류열전달계수 상관식을 이용한 매개변수 연구를 통해 마이크로 핀 흰 히트 싱크의 흰 직경, 흰 높이, 흰 공간이 선정되었으며 균일하고 일정한 열유속 및 온도 균일성을 위해 백금 박막히터가 설계되었으며 해석이 수행되었다. 동일한 인가 전압 하 해석결과와 수치계산 결과가 0.67, 0.81, 0.84%의 표면온도 차이를 가지는 것으로 확인되었으며 설계된 마이크로 핀 흰 히트 싱크가 MEMS 공정을 통해 제작되었다.

2) 마이크로 핀 흰 채널 내 액체질소 유동 실험을 통해 2.2-2.5 g/s 범위의 질량유량, 6.7-55.2 W/cm² 범위의 유효 인가 열유속 구간에서 최소 78 kW/m²·K 최대 133 kW/m²·K의 베이스 대류열전달계수가 측정되었으며 인가 열유속의 증가에 따라 열성능이 증가하는 경향을 확인하였다.

3) Bar-Cohen et al.[15]의 극저온 마이크로 깎 및 마이크로 핀 흰 히트 싱크 실험결과와 비교한 결과 마이크로 핀 흰 히트 싱크 실험결과와 2.8 배의 열성능 차이를 가지며 유효 인가 열유속이 증가함에 따라 열성능이 감소하는 경향을 확인하였으며, 마이크로 깎 실험결과와는 최소 0.8%, 최대 32%의 열성능 차이를 가지는 것을 확인하였으며 이는 시험편 및 냉각기의 구조 및 실험조건의 차이로 인해 발생한 것으로 판단하였다.

4) 동일 유효 인가 열유속 구간에서 개발된 매크로-마이크로 스케일의 확장표면에서의 흐름 비등 대류열전달계수 상관식과 비교한 결과 Krishnamurthy and Peles 의 마이크로 핀 흰 히트 싱크 흐름 비등 대류열전달계수 상관식과는 최소 61.5%, 최대 75%의 열성능 차이를 보이며, Warrier 의 멀티 마이크로 채널 흐름 비등 대류열전달계수 상관식은 평균 75%의 열성능 차이와 유사한 경향성을 보인다. 마이크로 튜브 및 마이크로 채널 흐름 비등 대류열전달계수 상관식들은 모두 본 연구 결과와 유사한 경향을 보이며 특히 Zhang et al. 의 마이크로 튜브 흐름 비등 대류열전달계수 상관식은 최소 0.8%, 최대 25%의 열성능 차이를 보이는 것을 확인하였다. 그러나 기존의 개발된 상관식 적용 및 본 연구의 시험편 구조 및 실험조건에 적합한 상관식 개발을 위해서는 보다 폭넓은 실험 조건에서 수행된 실험 결과가 필요하며 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



참고문헌

- [1] L. Zhang, "Silicon Process and Manufacturing Technology Evolution: An overview of advancements in chip making," in IEEE Consumer Electronics Magazine, vol. 3, no. 3, pp. 44-48, July 2014.
- [2] I. Mudawar, "Assessment of high-heat-flux thermal management schemes," in IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 24, no. 2, pp. 122-141, June 2001.
- [3] W. Qu and A. Siu-Ho, "Experimental study of saturated flow boiling heat transfer in an array of staggered micro-pin-fins," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 52, no. 7-8, pp. 1853-1863, 2009.
- [4] S. In and S. Jeong, "Flow boiling heat transfer characteristics of R123 and R134a in a micro-channel," International Journal of Multiphase Flow, vol. 35, no. 11, pp. 987-1000, 2009.
- [5] A. Greco and G. P. Vanoli, "Flow boiling of R22, R134a, R507, R404A and R410A inside a smooth horizontal tube," International Journal of Refrigeration, vol. 28, no. 6, pp. 872-880, 2005.
- [6] W. M. Haynes, "CRC Chemistry/Physics Handbook," 93rd ed., CRC Press, New York, USA, 2013.
- [7] "Freon Product Information," DuPont, [Online]. Available: <https://www.freon.com/en/products/refrigerants>.
- [8] V. V. Klimenko, "Heat transfer intensity at forced flow boiling of cryogenic liquids in tubes," Cryogenics, vol. 22, no. 11, pp. 569-576, 1982.
- [9] M. M. Shah, "Prediction of heat transfer during boiling of cryogenic fluids flowing in tubes," Cryogenics, vol. 24, no. 5, pp. 231-236, 1984.
- [10] S. G. Kandlikar, "A General correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes," Journal of Heat Transfer, vol. 112, no. 1, pp. 219-228, 1990.
- [11] S. L. Qi, P. Zhang, R. Z. Wang, and L. X. Xu, "Flow boiling of liquid nitrogen in micro-tubes: Part II-Heat transfer characteristics and critical heat flux," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.

50, no. 25-26, pp. 5017-5030, 2007.

[12] G. R. Warrier, V. K. Dhir, and L. A. Momoda, "Heat transfer and pressure drop in narrow rectangular channels," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 26, no. 1, pp. 53-64, 2002.

[13] S. Krishnamurthy and Y. Peles, "Flow boiling of water in a circular staggered micro-pin fin heat sink," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 5-6, pp. 1349-1364, 2008.

[14] K. J. Kim, B. Han, and A. Bar-Cohen, "Thermal and optical performance of cryogenically cooled laser diode bars mounted on pin-finned microcoolers," *Applied Physics B*, vol. 127, pp. 1-9, 2021.

[15] K. J. Kim, H. H. Yang, W. Noh, B. Han, and A. Bar-Cohen, "Thermal Performance of Cryogenic Micro-Pin Fin Coolers with Two-Phase Liquid Nitrogen Flows," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 22, p. 11071, 2021.

[16] ANSYS Inc., "ANSYS Multiphysics User's Guide," 2016.

[17] M. N. Ozisik, "Heat Conduction," John Wiley and Sons Inc., 1993.

[18] R. M. Tiggelaar, R. G. Sanders, A. W. Groenland, and J. G. Gardeniers, "Stability of thin platinum films implemented in high-temperature microdevices," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 152, no. 1, pp. 39-47, 2009.

[19] "Cryogel@ Z Datasheet," Aspen Aerogels, [Online]. Available: <https://www.aerogel.com/wp-content/uploads/2021/06/Cryogel-Z-Datasheet-English.pdf>.

[20] A. Reeser, A. Bar-Cohen, and G. Hetsroni, "High quality flow boiling heat transfer and pressure drop in microgap pin fin arrays," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 78, pp. 974-985, 2014.

[21] Y. M. Lie, J. H. Ke, W. R. Chang, T. C. Cheng, and T. F. Lin, "Saturated flow boiling heat transfer and associated bubble characteristics of FC-72 on a heated micro-pin-finned silicon chip," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 19-20, pp. 3862-3876, 2007.

[22] V. P. Carey, "Liquid-vapor phase change phenomena,"

Hemisphere Publishing Corporation, 1992.

[23] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine,
"Principles of Heat and Mass Transfer," Wiley, 2020.

