



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

극저온 마이크로 핀 힌 히트싱크
설계 및 열성능 평가
Design and performance evaluation
of cryogenic
micro pin fin heat sinks



2024년 2월

국립부경대학교 대학원

기계설계공학과

노우현

공학석사학위논문

극저온 마이크로 핀 힌 히트싱크
설계 및 열성능 평가

Design and performance evaluation
of cryogenic
micro pin fin heat sinks

지도교수 김 경 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2024년 2월

국립부경대학교 대학원

기계설계공학과

노우현

노우현의 공학석사 학위논문을 인준함

2024년 2월 16일



위 원 장 공학박사 김 창 원 (인)

위 원 공학박사 김 경 준 (인)

위 원 공학박사 황 진 하 (인)

목차

목차	i
그림 및 표 목차.....	iii
Nomenclature	v
Abstract.....	vii
I. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적.....	1
1.2 개요	3
II. 이론적 연구	5
2.1 마이크로 핀 흰 히트싱크.....	5
2.2 이상 유동.....	6
2.3 이상 유동 기존 연구.....	7
가. 극저온 튜브에 관한 연구.....	7
나. 마이크로 핀 흰 히트싱크에 관한 연구	12
다. 극저온 마이크로 핀 흰 히트싱크에 관한 연구.....	14
III. 실험적 연구.....	16
3.1 실험 설계.....	16
3.2 실험 장비.....	21
3.3 실험 절차.....	24
3.4 평가 방법.....	25

IV. 결과 및 고찰	27
4.1 열성능 평가	27
4.2 상관식 비교	30
4.3 기존 연구결과 비교	32
V. 결론	35
참고문헌.....	37



그림 및 표 목차

- 그림 1. The schematic diagram of the micro pin fin heat sinks
- 그림 2. Heat transfer coefficient and flow regime with quality for flow boiling in horizontal tube
- 그림 3. The MEMS process flow of micro pin fin heat sink with Ti/Pt film heater
- 그림 4. Micro pin fin heat sinks (a) Front side (b) Back side
- 그림 5. Microscope images (a) Micro pin fin heat sinks (b) Ti/Pt film heater (c) Electrical pad of a heater
- 그림 6. (a) The isometric view of a test rig (b) The cross-section view of a test rig
- 그림 7. Micro pin fin heat sinks with test rig
- 그림 8. A measurement setup for the thermal performance evaluation of micro pin fin heat sinks
- 그림 9. The schematic diagram of the measurement setup
- 그림 10. Temperature change curve during the thermal performance evaluation.
- 그림 11. Temperature differences in zone B as function of heat flux
- 그림 12. Thermal resistance of micro pin fin heat sinks for cryogenic flow boiling
- 그림 13. Comparison of correlations-calculated results and experiment results
- 그림 14. Comparison of thermal performance of micro pin fin heat sinks for flow boiling with water and liquid nitrogen
- 그림 15. Comparison of previous study and present study

- ☞ 1. Summary of correlations for flow boiling for flow boiling in tube
- ☞ 2. Description of components and equipment
- ☞ 3. Test conditions for the thermal performance evaluation



Nomenclature

A_b	Base area [m ²]
A_{tot}	Total surface area of micro pin fin heat sinks [m ²]
Bo	Boiling number
Co	Convection number
c_p	Specific heat [J/kg·K]
D_h	Hydraulic diameter [m]
d	Fin diameter [m]
dh	Clearance [m]
f	Frictional factor
F_{fl}	Fluid-dependent parameter
Fr_{lo}	Froude number
G	Mass flux [kg/m ² ·s]
g	Gravity [m/s ²]
h_{sp}	Single-phase heat transfer coefficient [W/m ² ·K]
h_{tp}	Two-phase heat transfer coefficient [W/m ² ·K]
h_{NB}	Nucleate boiling heat transfer coefficient [W/m ² ·K]
h_{CB}	Convective boiling heat transfer coefficient [W/m ² ·K]
H	Fin height [m]
I	Current [A]

i_v	Vaporization enthalpy [J/kg]
k	Thermal conductivity [W/m·K]
k_f	Thermal conductivity of fluid [W/m·K]
L	Length of heat sinks base [m]
\dot{m}	Mass flow rate [g/s]
μ_l	Kinematic viscosity for liquid state [Pa·s]
P	Power [W]
P_{in}	Inlet pressure [kPa]
Pr	Prandtl number
q	Dissipated heat [W]
q''	Heat flux [W/m ²]
Re	Reynolds number
ρ_l	Density for liquid state [kg/m ³]
ρ_v	Density for vapor state [kg/m ³]
S_T	Transverse spacing of pin fin array [m]
S_L	Longitudinal spacing of pin fin array [m]
T_b	Base temperature [°C]
T_{sat}	Saturation temperature [°C]
T_{in}	Inlet temperature [°C]
t_b	Thickness of heat sinks base [m]
V	Voltage [V]
V_f	Volume of fluid [m ³]
X_{vv}	Martinelli parameter
x_{ex}	Exit quality
$(\Phi_1)^2$	Frictional multiplier

Design and performance evaluation of cryogenic micro pin fin heat sinks

Wooheon Noh

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



Abstract

Nowadays, electronic devices play a significant role in interconnecting through digitization and are rapidly advancing in various industry fields. The desire for more powerful computational performance has led to the miniaturization of electronics; consequently, this generates more heat. Conventional cooling solutions, such as air and water cooling, are insufficient for the thermal management of high-power electronics. Hence, a more efficient cooling solution should be proposed for the reliability of devices.

This study explored several correlations for two-phase flow boiling in tubes and micro pin fin heat sinks. Experimental results were compared with correlation results for cryogenic flow boiling conditions. This study also conducted a comparative analysis of the thermal

performance of micro pin fin heat sinks under different working fluid conditions, specifically water and liquid nitrogen. It was observed that liquid nitrogen flow boiling has better thermal performance than water flow boiling. Finally, the previous study for micro gap and micro pin fin cooler was compared with experimental results to analyze differences.

Proposed micro pin fin heat sinks were configured in a staggered circular pin fins array to explore differences with a previous study, and they were manufactured using a silicon wafer with MEMS. The deposited film heater was employed to reduce contact resistance between the micro pin fin array and the heater. The test rig for evaluating thermal performance was designed with the intention of accommodating further research. This design has the advantage of facilitating the investigation of thermal performances and parametric effects of micro pin fin heat sinks using the same test rig. Finally, cryogenic thermal performance evaluation was conducted under saturated flow boiling conditions. The results of the evaluation show that the thermal resistance of micro pin fin heat sinks decreases as the heat flux increases at low exit quality.

This study is meaningful as it observes the cryogenic thermal performance of staggered micro pin fin heat sinks, serving as a feasibility study. Additionally, it can provide insights for the design of micro pin fin heat sinks and test rigs for future work.

I. 서론

1.1 연구배경 및 목적

현재 다양한 전자장비는 디지털화를 통해 상호 연결되는 현대 사회의 중추 역할을 하며 수많은 산업 분야에 적용되어 지속적으로 발전하고 있다. 전자장비의 연산 처리 능력 증대에 대한 끊임없는 추구는 소자의 소형화와 고밀도화로 이어지고 있으며, 소형화 된 고출력 전자장비는 더 많은 열을 발생시킨다. 공기 혹은 액체를 이용한 기존의 냉각 방식은 소형화 및 고출력화로 인한 열밀도 상승으로 한계에 직면하고 있어, 전자장치의 신뢰성과 성능 보장을 위해, 보다 효과적인 냉각 방식 및 확장표면 설계에 대한 연구가 요구된다. 그 중, 이러한 연구 동향에 맞추어 마이크로 스케일 확장표면에서의 극저온 이상 유동(Cryogenic two-phase flow)에 관한 연구가 많은 주목을 받고 있다.

마이크로 스케일 확장표면은 공간 효율성이 높아 설치 공간이 제한적인 환경이나 소형화 소자에 적용이 용이하다. 특히 마이크로 핀 힌 히트싱크의 경우, 마이크로 채널에 비해 체적 대비 높은 표면적 증대율을 가지는 구조 설계가 가능하다.

이상 유동은 일반적으로 액체-기체 상이 공존하는 유체의 유동을 이야기하며, 작동 유체가 상변화 하는 과정에서 유체의 잠열에 의해 동일 유량 조건에서의 단상 유동(Single-phase flow)에 비해 우수한 열성능을 가진다고 알려져 있다. 또한 극저온 유체를 활용한 이상 유동 냉각 방식은 레이저 다이오드와 같은 고출력 소자의 냉각과 양자컴퓨터와 같은 극저온 환경이 필수적으로 요구되는 분야로 인해 많은 연구가 필요하다고 할 수 있다.

많은 연구자들이 이상 유동 열성능에 관한 연구를 지속적으로 이어

나가고 있으며, 대표적인 연구 사례는 다음과 같다. Kandlikar[1]는 원형 튜브에 대하여 물, 냉매, 극저온 냉매를 포함하는 10종의 작동 유체에 대한 기존 연구 결과를 분석하여 새로운 상관식을 개발하였다. 개발된 상관식은 기존에 개발된 6개의 상관식과 비교하였을 때, 우수한 예측 성능을 보여준다고 밝혔다. Shah[2-4]는 현재까지 개발된 원형 튜브에 관한 이상 유동 열성능 예측 상관식 중, 가장 널리 사용되는 상관식으로 알려져 있다. 해당 상관식은 18종의 기존 실험 결과들을 기반으로 개발되었으며, 19종의 기존 실험 결과와 비교를 통하여 검증되었다. Shah[2-4] 상관식은 기본적으로 물을 포함한 6종의 작동 유체에 대하여 개발되었으나, 향후 액화 질소를 포함한 5종의 극저온 유체에 대해서도 추가적으로 연구되었다. Krishnamurthy[10]는 엇갈림 배열을 가지는 원형 마이크로 핀 흰 히트싱크에서의 이상 유동 열성능 평가와 성능 예측을 위한 상관식을 개발에 관한 연구를 수행하였다. 마이크로 핀 흰 히트싱크는 MEMS 공정을 통하여 정교하게 제작되었으며, 작동 유체는 물을 사용하였다. 해당 연구는 마이크로 핀 흰 히트싱크의 이상 유동 열성능이 인가되는 열유속보다 작동 유체의 질량 유속에 종속적임을 밝혔다. 실험 결과를 통해 개발된 상관식은 약 25%의 오차 범위 내에서 이상 유동 열성능 예측이 가능하다. 마지막으로 Bar-Cohen[5-6]은 고출력 레이저 다이오드 냉각을 위한 정방 배열을 가지는 마이크로 핀 흰 냉각기를 설계하고, 액화 질소를 이용하여 극저온 유동에서의 냉각기 열성능 평가 및 온도 변화에 따른 레이저 다이오드의 출력 효율 변화를 실험적으로 관찰하였다. 마이크로 핀 흰을 가지는 냉매 냉각기는 핀 흰이 없는 구조보다 현저히 낮은 열저항을 가지며, 건도 증가에 따라 베이스 면적 기반 평균 대류 열전달계수는 감소하는 경향을 보인다. 또한 레이저 다이오드의 출력 성능은 소자와 냉매 냉각기 사이 계면의 온도가 약 -100도 일 때 가장 높은 것으로 확인되었다.

이렇듯, 이상 유동 열성능 평가 및 예측에 관하여 다양한 연구가 수행되고 있으나, 극저온 유동에 관한 연구는 원형 튜브 구조가

지배적이며, 마이크로 핀 흰 히트싱크와 같은 확장 표면을 가지는 구조에서는 물 혹은 냉매 계열이 주를 이루고 있다.

따라서 본 연구에서는 극저온 유동에 대한 마이크로 핀 흰 히트싱크의 이상 유동 열성능 평가를 위하여, MEMS 공정을 활용한 마이크로 핀 흰 히트싱크 및 히트싱크 아랫면에 증착 되는 박막 히터 패턴, Test rig 설계에 관하여 논의하고, 실험 결과를 통한 극저온 마이크로 핀 흰 히트싱크의 열성능에 대하여 분석한다.

마이크로 핀 흰 히트싱크의 극저온 열성능 평가를 위하여, 작동 유체는 액화질소를 이용하였으며, 기존의 연구 결과들과 비교를 통하여 그 차이를 분석하였다.

1.2 개요

본 논문은 총 6장으로 구성되며 각 장의 연구 내용은 다음과 같다.

제 1장 : 서론

연구배경 설명을 위해 최근 전자장치의 발전 소형화와 고밀도화에 따른 보다 효과적인 소자 냉각 방법에 대한 필요성과 마이크로 스케일 확장표면 및 극저온 이상 유동의 장점에 대하여 간략하게 소개하고 이상 유동 열성능 평가에 관한 기존 연구 사례 및 연구 방향을 제시한다.

제 2장 : 이론적 연구

극저온 열성능 평가를 위한 마이크로 핀 흰 히트싱크의 물리적 구조와 강제대류 이상 유동 열전달에 관한 이론을 간략하게 설명한다. 이상 유동 열성능 평가에 관한 기존의 연구 사례들을 조사하고, 상관식이 개발된 연구들은 본 연구에 대한 적용 가능성을 검토한다.

제 3장 : 실험적 연구

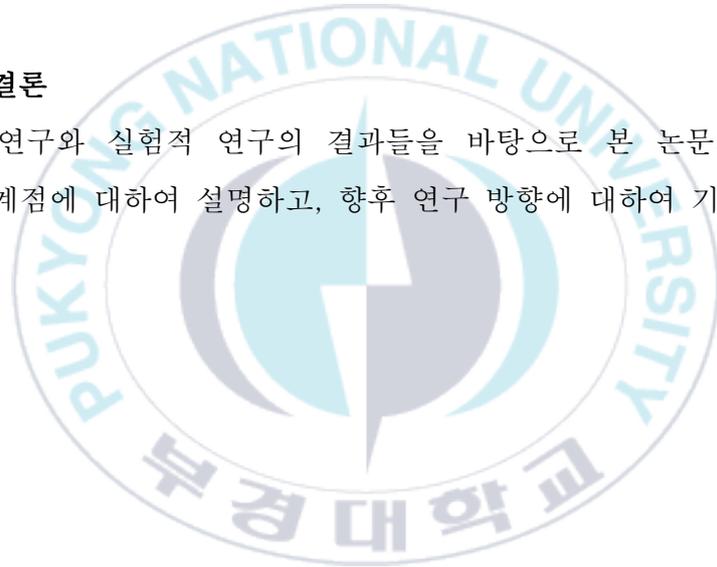
마이크로 핀 환 히트싱크 및 박막 히터 패턴의 설계에 대하여 설명한다. 또한 극저온 이상 유동 열성능 평가를 위한 Test rig 설계와 실험 장비 및 절차, 그리고 평가 방법에 관하여 설명한다.

제 4장 : 결과

극저온 열성능을 분석하기 위하여 열저항을 계산하고, 기존의 연구 결과와 상대 비교를 통해 그 차이를 분석한다.

제 5장 : 결론

이론적 연구와 실험적 연구의 결과들을 바탕으로 본 논문의 결론 및 연구의 한계점에 대하여 설명하고, 향후 연구 방향에 대하여 기술한다.



II. 이론적 연구

2.1 마이크로 핀 힌 히트싱크

마이크로 핀 힌 히트싱크는 일반적으로 히트싱크 베이스의 한 변의 길이가 약 10mm 내외이며, 평판 위에 약 $100\mu\text{m}\sim 300\mu\text{m}$ 수준의 힌 직경 및 힌 높이를 가지는 핀 힌이 정방 혹은 엇갈림으로 배열되어 있는 구조를 가지고 있다. 대부분의 마이크로 핀 힌 히트싱크는 구리, 실리콘 등이 주로 사용되며, 핀 힌 형상은 와이어 방전가공(Wire EDM : Wire Electric Discharge Machining), 혹은 MEMS(Micro Electro-Mechanical System)를 통해 주로 가공된다. EDM의 경우, MEMS에 비해 공정이 비교적 단순한 장점이 있지만, 가공 특성 상 원형 핀 힌을 제작할 수 없다는 단점이 있다.

그림 1은 엇갈림 배열을 가지는 마이크로 핀 힌 히트싱크 형상의 모식도를 나타내며, 베이스의 한 변의 길이는 L , 베이스의 두께는 t_b , 핀 힌 끝으로부터의 채널 상단까지의 거리는 dh , 핀 힌의 높이는 H , 핀 힌의 직경은 d , 횡방향 힌 간격은 S_T , 종방향 힌 간격은 S_L 으로 표현한다.

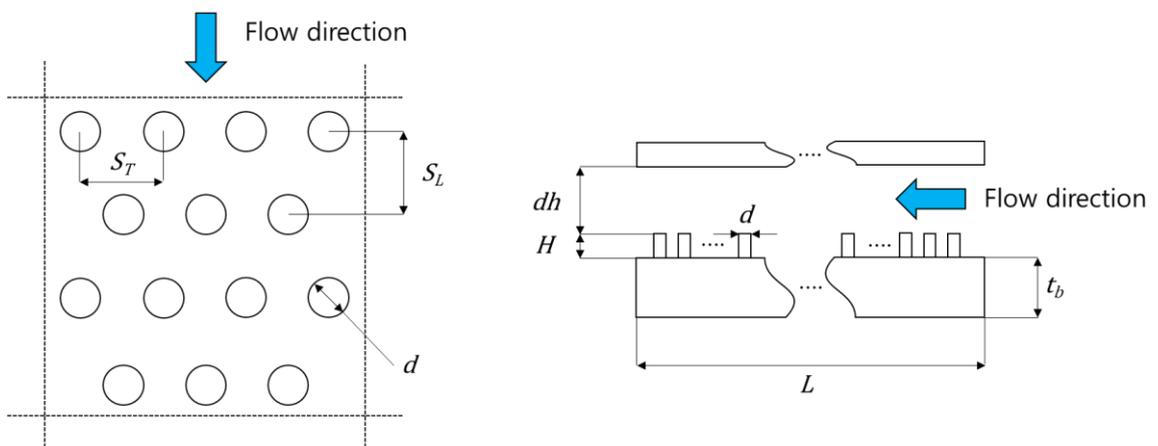


Fig. 1 The schematic diagram of the micro pin fin heat sinks

2.2 이상 유동

이상 유동은 단상 유동에 비해 높은 열성능을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다. 이는 액상에서 기상으로 상변화 하는 과정에서 작동 유체가 많은 양의 에너지를 필요로 하기 때문이다. 더불어 작동 유체의 온도는 상변화 하는 과정에서 일정하게 유지되기 때문에 가열되는 표면의 온도 균일성을 확보하기 유리하다.

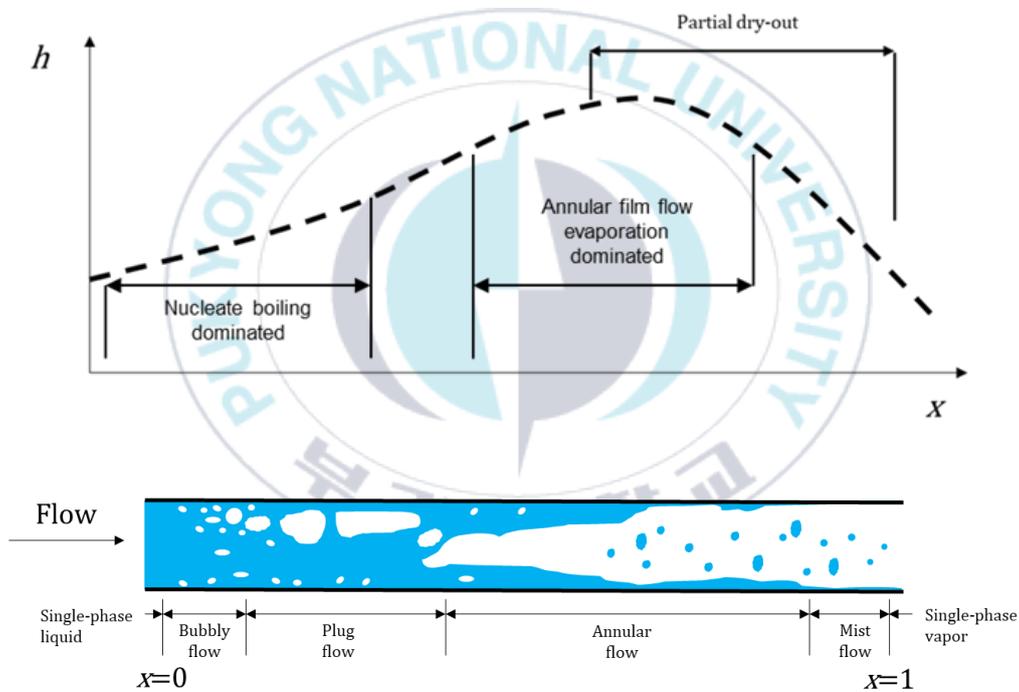


Fig. 2 Heat transfer coefficient and flow regime with quality for flow boiling in horizontal tube

이러한 이상 유동의 열성능은 채널 내부의 유동 양식에 따라 차이가 발생한다. 수평 채널의 경우, 일반적으로 낮은 건도 영역에서 건도가 증가할수록 대류 열전달계수는 상승하는 경향을 가지는 것으로 알려져 있다. 건도가 일정 수준에 도달하면 가열되는 표면이 기체로 인해

부분적으로 Dry-out 되는 현상이 발생하고, 이는 표면의 온도를 상승시키는 원인이 된다. 이러한 현상으로 인하여 발생하는 표면과 유체 사이의 온도 차이로 인해 대류 열전달 계수가 줄어드는 경향을 보이게 된다. 수평 채널 내부에서의 이상 유동 현상에 관한 내용을 그림 2에 나타내어 설명한다. [20]

2.3 이상 유동 기존 연구

마이크로 핀 튜브 히트싱크에서의 극저온 이상 유동 열성능 평가를 진행하기에 앞서, 이상 유동 열성능 평가에 관한 기존 연구 사례에 대하여 조사하였다. 기존 연구에 관한 조사는 크게 세 부분으로 나누어 실시되었다. 첫째는 구조는 상이하나 동일 작동 유체를 사용한 연구, 둘째는 작동 유체는 상이하나 유사한 구조물을 가지는 연구, 마지막으로 셋째는 작동 유체와 구조물 모두 유사한 연구이다.

가. 극저온 튜브에 관한 연구

대부분의 이상 유동 열성능 평가에 관한 기존 연구는 원형 튜브 구조가 지배적이다. 본 장에서는 원형 튜브에 관한 많은 기존 연구들 가운데 극저온 유체를 포함하는 연구들을 중점적으로 조사한다. 이는 구조적 변수와 더불어 밀도, 동점성계수와 같은 유체의 물성 역시 이상 유동 열성능에 큰 영향을 미치기 때문이다. 기존 연구에서 개발된 이상 유동 열성능 상관식들은 약 1mm에서 30mm의 직경 범위를 가지는 원형 튜브 구조에 대하여 실험적으로 개발되었으며, 다양한 실험 결과들을 통해 검증되었다. 각 상관식들에 대한 자세한 내용을 표 1에 나타낸다.

Table. 1 Summary of correlations for flow boiling in tube

Author	Year	Number of data points	Fluids	Flow orientation	Mean deviation (%)
Shah [3]	1982	780	LHe LN ₂ LNe LH ₂ LAr	Vertical flow –upflow –downflow Horizontal flow	30
Kandlikar [1]	1990	5246	LNe LN ₂	Vertical flow –upflow –downflow Horizontal flow	18
Klimenko [7]	1990	3215	LHe LN ₂ LNe LH ₂ LAr	Vertical flow –upflow –downflow Horizontal flow	14.4
Steiner [8]	1986	13000	LHe LN ₂ LH ₂	Vertical flow –upflow	36

Ganesan [9]	2021	3252	LHe	Vertical flow -upflow -downflow Horizontal flow	26.4
			LN ₂		
			LNe		
			LH ₂		
			LAr		
			LCH ₄		

위에서 조사된 상관식들은 극저온 유체 이외에 물, 냉매, 에틸렌 등 다양한 냉매에 대한 실험 결과도 상관식 개발을 위하여 고려되었으며, 표에 정리된 Mean deviation(%)은 상관식 개발을 위해 고려된 모든 작동 유체들에 대한 평균 오차를 나타낸다.

상관식들 가운데 Shah [3] 상관식이 가장 널리 사용되는 것으로 알려져 있으며, 상관식의 역사가 상당히 오래되었음에도 불구하고 상당히 높은 예측 정확도를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. Shah [3]의 연구에 따르면, 극저온 냉매에 한하여 Shah [3]의 상관식이 Klimenko [7] 상관식보다 우수한 예측 성능을 보여준다고 말한다. 따라서 본 연구에서는 조사된 기존 연구 사례들 중, 높은 예측 정확도를 가지는 Shah [3] 상관식과 Kandlikar [1] 상관식을 중점적으로 분석한다.

Shah [3]는 Boiling number, Bo 와 Convection number, Co 를 이용한 이상 유동 열전달 예측 상관식을 제안하였다. 일반적인 이상 유동 상관식은 액상과 기상의 점성 차이로 인해 발생하는 영향을 고려하기 위하여 Martinelli parameter, X_{vv} 를 사용하지만, 개발된 상관식에서는 두 상(Phase) 간의 점성 차이로 인한 영향은 발견되지 않는다고 설명하였다. X_{vv} 는 점성, 건도, 그리고 밀도 비의 곱으로 구성되어 있는데, 밀도를 제외한 X_{vv} 에 포함된 나머지 인자들에 대한 영향은 Co 을 통해 대체되어 상관식에 표현되었다. 해당 연구의 상관식은 아래의 식과 같이 표현된다.
(1-4) [3, 9]

$$h_{tp} = \max\{h_{NB}, h_{CB}\} = \max\{Sh_{sp}, Fh_{sp}\} \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} \frac{1.8}{Co^{0.8}} & (Fr_{lo} \geq 0.04 \text{ with Horizontal flow, Vertical flow}) \\ \frac{1.8}{(0.38Fr_{lo}^{-0.3}Co)^{0.8}} & (Fr_{lo} < 0.04 \text{ with Horizontal flow}) \end{cases} \quad (2)$$

$$F = \begin{cases} 230Bo^{0.5} & (Co > 1, Bo > 3 \times 10^{-5}) \\ 1 + 46Bo^{0.5} & (Co > 1, Bo < 3 \times 10^{-5}) \\ 14.7Bo^{0.5} \exp(2.74Co^{-0.1}) & (0.1 < Co \leq 1, Bo \geq 11 \times 10^{-4}) \\ 14.7Bo^{0.5} \exp(2.47Co^{-0.15}) & (Co \leq 0.1, Bo \geq 11 \times 10^{-4}) \\ 15.43Bo^{0.5} \exp(2.74Co^{-0.1}) & (0.1 < Co \leq 1, Bo < 11 \times 10^{-4}) \\ 15.43Bo^{0.5} \exp(2.47Co^{-0.15}) & (Co \leq 0.1, Bo < 11 \times 10^{-4}) \end{cases} \quad (3)$$

$$h_{sp} = 0.023Re_l^{0.8} Pr^{0.4} \frac{k_f}{D_h} \quad (4)$$

위의 상관식을 살펴보면, Co 및 Bo 의 변화에 따라 이상 유동 열전달을 지배하는 영역이 핵비등과 대류비등 중 하나의 형태로 지배되는 것을 알 수 있다. 이는 핵비등과 대류비등의 영향을 동시에 고려하여 표현하는 일반적인 이상 유동 상관식과 구별되는 큰 차이라고 할 수 있다. 대류비등 영향을 나타내는 계수 S 는 유동 방향 및 Fr_{lo} 의 범위에 따라 그 값이 다르게 계산된다. Fr_{lo} 는 낮은 유량을 가지는 수평방향 마이크로 채널에서 중력 영향을 고려하기 위한 인자로, $Fr_{lo} > 0.04$ 인 수평방향 유동이나 수직방향 유동에서는 고려되지 않는다. 단상 유동 열전달계수, h_{sp} 는 원형관에서의 난류 유동(Turbulent flow) 열성능 예측을 위한 Dittus-Boelter[15]의 상관식을 이용하여 구할 수 있다.

Kandlikar[1]은 수평 및 수직방향 원형 미니 채널에서의 대류비등 상관식 개발을 위하여 기존에 개발된 6개의 상관식과 더불어 24종의 기존 연구 결과를 비교 분석하였다. 개발된 상관식은 기존 연구에서 개발된 상관식과 비교하였을 때 보다 우수한 정확도를 가지며, 평균 20% 내외로

열성능 예측이 가능함을 보인다. 해당 연구에서 개발된 이상 유동 열성능 예측에 관한 상관식은 다음과 같은 형태로 표현된다. (5-6) [1]

$$h_{tp} = C_1 Co^{C_2} (25Fr_{lo})^{C_5} h_{sp} + C_3 Bo^{C_4} F_{fl} h_{sp} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = 1.136, C_2 = -0.9, C_3 = 667.2, C_4 = 0.7, C_5 = 0.3 \\ \text{(Convective region : } Co < 0.65) \\ C_1 = 0.6683, C_2 = -0.2, C_3 = 1058.0, C_4 = 0.7, C_5 = 0.3 \\ \text{(Nucleate boiling region : } Co > 0.65) \end{array} \right. \quad (6)$$

$$(C_5 = 0, \text{ for vertical flow, and for horizontal flow with } Fr_{lo} > 0.04)$$

여기서 C_1-C_5 는 상수이며, Fr_{lo} 는 Froude number, F_{fl} 은 Fluid-dependent parameter을 의미한다. 상기의 수식에서 Co 를 포함하는 항은 대류비등에 관한 항이고, Bo 를 포함하는 항은 핵비등에 관한 항을 나타낸다. 해당 상관식 역시, Shah[3]의 상관식과 마찬가지로 $Fr_{lo} > 0.04$ 인 수평 방향 유동에 대해서만 중력의 영향을 고려하였다. F_{fl} 은 다양한 작동 유체의 고유 특성을 반영하기 위한 상수이며. 액화 질소의 경우 F_{fl} 의 값은 4.7이다. 해당 상관식은 이상 유동 열전달 형태를 핵비등과 대류비등 영향의 합으로 표현되며 Co 의 값에 따라 $Co < 0.65$ 인 경우, 대류비등이 지배적인 영역 구간에 해당하고, $Co > 0.65$ 인 경우, 핵비등이 지배적인 영역 구간에 해당한다. Shah[3]의 상관식과 마찬가지로 h_{sp} 는 Dittus-Boelter [15]의 상관식을 이용하여 얻어진다.

두 상관식에 포함되는 여러 인자들은 아래의 식을 통하여 계산된다. (7-12) [1]

$$Co = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0.8} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l}\right)^{0.5} \quad (7)$$

$$Bo = \frac{q''}{(Gi_{lv})} \quad (8)$$

$$Fr_{lo} = \frac{G^2}{\rho_l^2 g D_h} \quad (9)$$

$$D_h = \frac{4V_f}{A_{tot}} \quad (10)$$

$$Re_l = \frac{GD_h(1-x)}{\mu_l} \quad (11)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu_l}{k_f} \quad (12)$$

여기서 각각 x 는 건도, ρ 는 밀도(kg/m^3), q'' 는 열유속(W/m^2), G 는 질량 유속($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), i_{lv} 는 증발 엔탈피(J/kg), D_h 는 수력학적 직경(m), V_f 는 유체의 부피(m^3), A_{tot} 는 마이크로 핀 흰 히트싱크 전체 표면적(m^2), μ 는 동점성계수($\text{Pa} \cdot \text{s}$), c_p 는 비열($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$), k 는 열전도율($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)을 의미한다.

나. 마이크로 핀 흰 히트싱크에 관한 연구

Krishnamurthy [10]는 엇갈림 배열을 가지는 원형 마이크로 핀 흰 히트싱크에서 물에 대한 이상 유동 열성능을 실험적으로 평가하고, 실험 결과들을 활용하여 우수한 예측 성능을 가지는 상관식을 개발하였다.

제안된 마이크로 핀 흰 히트싱크는 흰 직경이 $100\mu\text{m}$, 흰 높이가 $250\mu\text{m}$, 흰 간격이 $150\mu\text{m}$ 이며, MEMS 공정을 통하여 핀 흰 배열을 제작하였다. 해당 연구는 유동 양식을 직접 관찰하여 자세하게 분석하였으며, 분석 결과, 마이크로 핀 흰 히트싱크에서 대류 비등의 영향이 지배적이며 핵비등 영향은 무시 가능할 정도로 미비하다고 밝혔다. 상관식은 Chen[22] 모델을 기반으로 만들어졌으며 핵비등 영향을 무시하면 다음과 같이 표현된다. (13-20) [10]

$$h_{tp} = F h_{sp} \quad (13)$$

여기에서 F 는 채널에 대한 Enhancement factor를 의미하며, h_{sp} 는 단상 유동에 대한 열전달 계수를 의미한다. 본 연구의 실험 조건은 $Re_d > 100$ 영역에서 이루어졌기 때문에 Short[23]의 상관식을 통해 h_{sp} 를 도출하였고, 해당 상관식을 적용하면 상기의 수식은 아래와 같이 표현된다.

$$h_{tp} = F \times 0.76 \left(\frac{S_T}{d}\right)^{0.16} \left(\frac{S_L}{d}\right)^{0.2} \left(\frac{H}{d}\right)^{-0.11} Re_d^{0.33} \quad (14)$$

그리고 Enhancement factor, F 는 아래와 같이 정의된다.

$$F = \zeta(\phi_l^2)^{0.2475} Pr^{0.333} \quad (15)$$

여기에서 ζ 는 1.4이며 Frictional multiplier, ϕ_l^2 은 아래와 같다.

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X_{vv}} + \frac{1}{X_{vv}^2} \quad (16)$$

C 는 실험적으로 도출되는 상수 값이며, 해당 연구에서는 0.24를

사용하였다. X_{vv} 는 Martinelli parameter로 아래와 같이 정의된다.

$$X_{vv} = \left[\frac{(dP/dz)_l}{(dP/dz)_v} \right]^{1/2} \quad (17)$$

$(dP/dz)_l$ 과 $(dP/dz)_v$ 는 각각, 액체 와 기체 상에 대한 Frictional pressure gradient를 나타내며, 아래의 식을 통해 계산 가능하다.

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_l = \frac{fG^2(1-x)^2}{\rho_l d} \quad (18)$$

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_v = \frac{fG^2x^2}{\rho_v d} \quad (19)$$

여기에서 f 는 friction factor로 다음과 같이 정의된다.

$$f = 63.246Re_d^{-0.7797} \quad (20)$$

실험 결과는 이상 유동 열성능이 질량 유속에 지배적임을 나타내며, 인가되는 열유속 변화에 대해서는 이상 유동 열성능 변화가 미비하였다. 개발된 상관식은 약 25%의 오차범위 내로 이상 유동 열성능 예측이 가능하다.

다. 극저온 마이크로 핀 흰 히트싱크에 관한 연구

Bar-Cohen[5-6]은 고출력 레이저 다이오드 냉각을 위한 극저온 마이크로 핀 흰 냉각기(Micro pin fin cooler)의 열성능 및 작동 온도에 따른 레이저 다이오드의 출력 효율에 관하여 연구하였다. 마이크로

냉각기는 구리로 제작된 냉각기 유로 내부에 사각형 마이크로 핀 형이 정방배열로 배치된 구조를 지니고 있다. 마이크로 핀 형은 폭이 $150\mu\text{m}$, 형 간격 $300\mu\text{m}$, 형 높이 $300\mu\text{m}$ 이며 냉각기 내부 채널의 높이는 $330\mu\text{m}$ 이다. 본 구조물의 가장 큰 특징은 핀 형 배열이 채널 하단에 배치되는 일반적인 마이크로 핀 형 히트싱크와는 달리, 핀 형 배열이 채널 상단에 배치된다는 점이다. 극저온 마이크로 핀 형 냉각기의 열성능 평가를 위하여 액화 질소가 작동 유체로 사용되었고, 실험은 입구 압력 370kPa 및 포화비등 조건에서 실시되었다. 마이크로 핀 형 배열의 열성능은 베이스 면적 기반 평균 대류 열전달계수와 열저항을 통하여 평가되었으며, 핀 형 배열이 없는 마이크로 갭(Micro gap) 냉각기 실험 결과와 상대비교를 통해 성능 증대효과를 분석하였다.

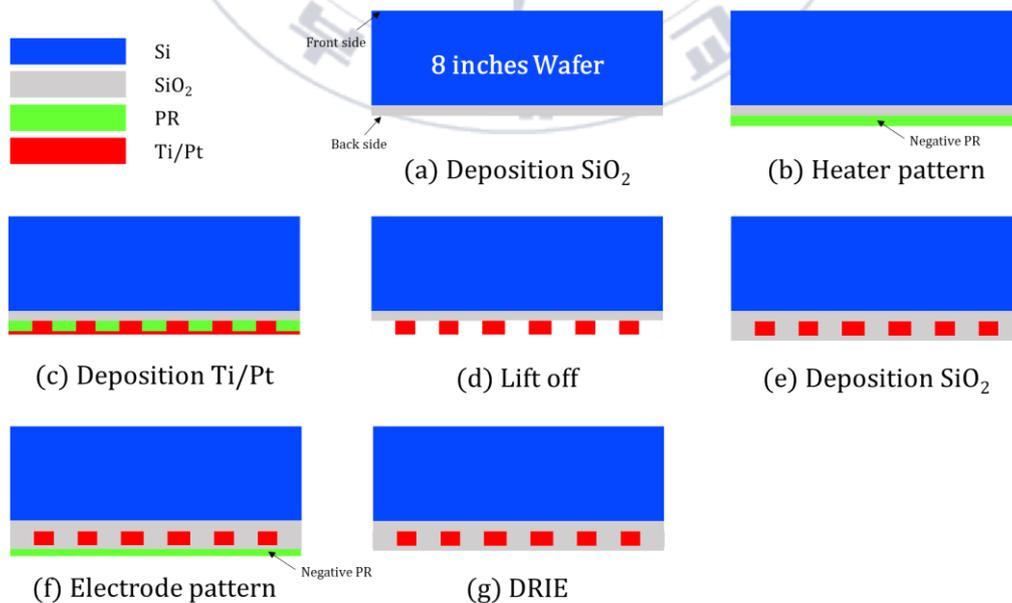
연구 결과에 따르면, 마이크로 갭은 유량이 높을수록 평균 대류 열전달 계수가 증가하는 경향을 보인다. 동일 유량 조건에서는 출구 건도의 증가에 따라 평균 대류 열전달계수가 상승하는 경향을 보이며, 이러한 경향은 낮은 유량일 때 보다 높은 유량에서 보다 큰 변화를 보인다. 이와 반대로 마이크로 핀 형 냉각기의 열성능은 마이크로 갭의 실험 결과 대비 약 2배가량 열성능이 증대되었으나, 건도 증가에 따라 평균 대류 열전달계수가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한 실험 결과에 따르면, 인가 열유속 증가에 따라 질량 유량은 점차 감소하는 경향을 나타내는데, Bar-Cohen[5-6]은 이러한 질량 유량 감소의 원인이 채널 내부의 건도 상승으로 인한 압력 강하 증가에 기인한 것으로 설명한다.

III. 실험적 연구

3.1 실험 설계

본 연구에서는 마이크로 핀 흰 히트싱크 및 증착된 박막 히터 패턴 제작을 위하여 MEMS 공정을 활용하였다.

핀 흰 히트싱크 제작을 위하여 웨이퍼 전면에 Positive PR을 이용하여 형상을 패터닝 한 후 DRIE etching 공정을 통해 제작되었다. 박막 히터 패턴 제작을 위하여 웨이퍼 후면에 SiO₂ 산화막을 증착 시킨 뒤, Negative PR을 이용하여 박막 히터가 패터닝 되는 공간을 형성하였다. 형성된 공간으로 Ti/Pt 소재를 증착 시킨 후, 박막 히터 패턴의 보호를 위해 패턴 위로 SiO₂ 산화막을 한 번 더 증착하는 과정을 거쳤다. 그림 3은 전면 핀 흰 배열 및 후면 박막 히터 제작 공정에 관한 모식도를 나타낸다.



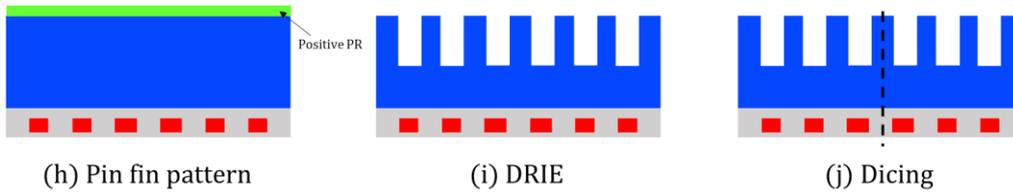


Fig. 3 The MEMS process flow of micro pin fin heat sink with Ti/Pt film heater

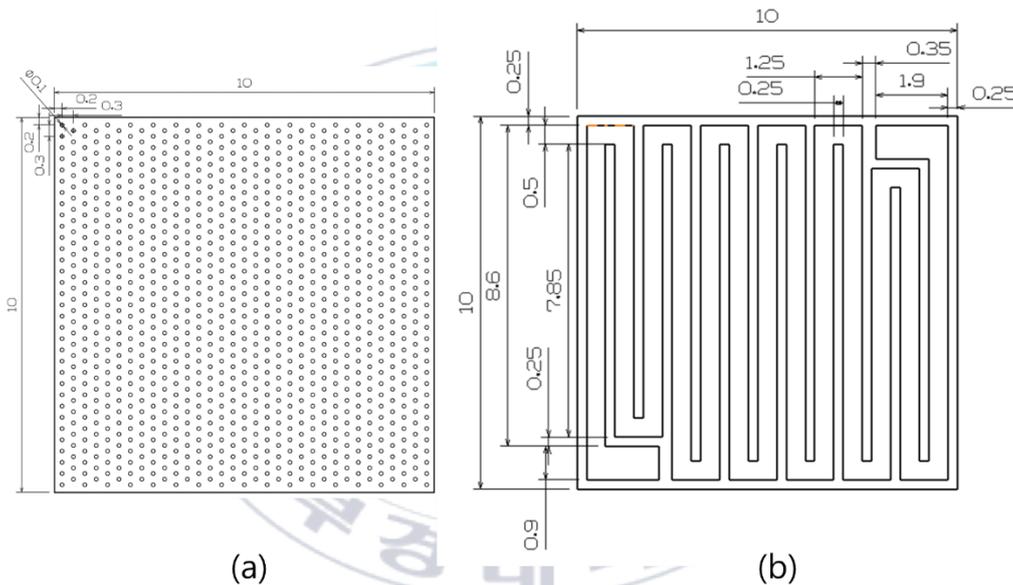


Fig. 4 Micro pin fin heat sinks (a) Front side (b) Back side

마이크로 핀 힌은 엇갈림 배열을 가지는 원형 핀 힌으로, 직경 $100\mu\text{m}$, 힌 높이 $200\mu\text{m}$, 핀 힌 간격 $300\mu\text{m}$ 으로 설계되었다. 핀 힌 직경과 높이의 비($d : H$)는 DRIE 공정 시, 핀 힌이 손상되는 것을 방지하기 위하여 1:2로 설정하였다. 후면 Ti/Pt 박막 히터의 패턴 형상은 필요 전력 범위를 고려하여, 적절한 저항 값을 가지도록 설계되었으며, 본 연구에서는 상온에서 약 450Ω 의 저항 값을 가지도록 설계되었다. 그림 4는 마이크로 핀 힌 히트싱크 배열과 박막 히터에 대한 구체적인 구조와 치수를 나타내며, 그림 5는 MEMS 공정을 통하여 제작된 마이크로 핀 힌

배열과 후면 Ti/Pt 박막 히터에 대한 현미경 촬영 결과를 나타낸다.

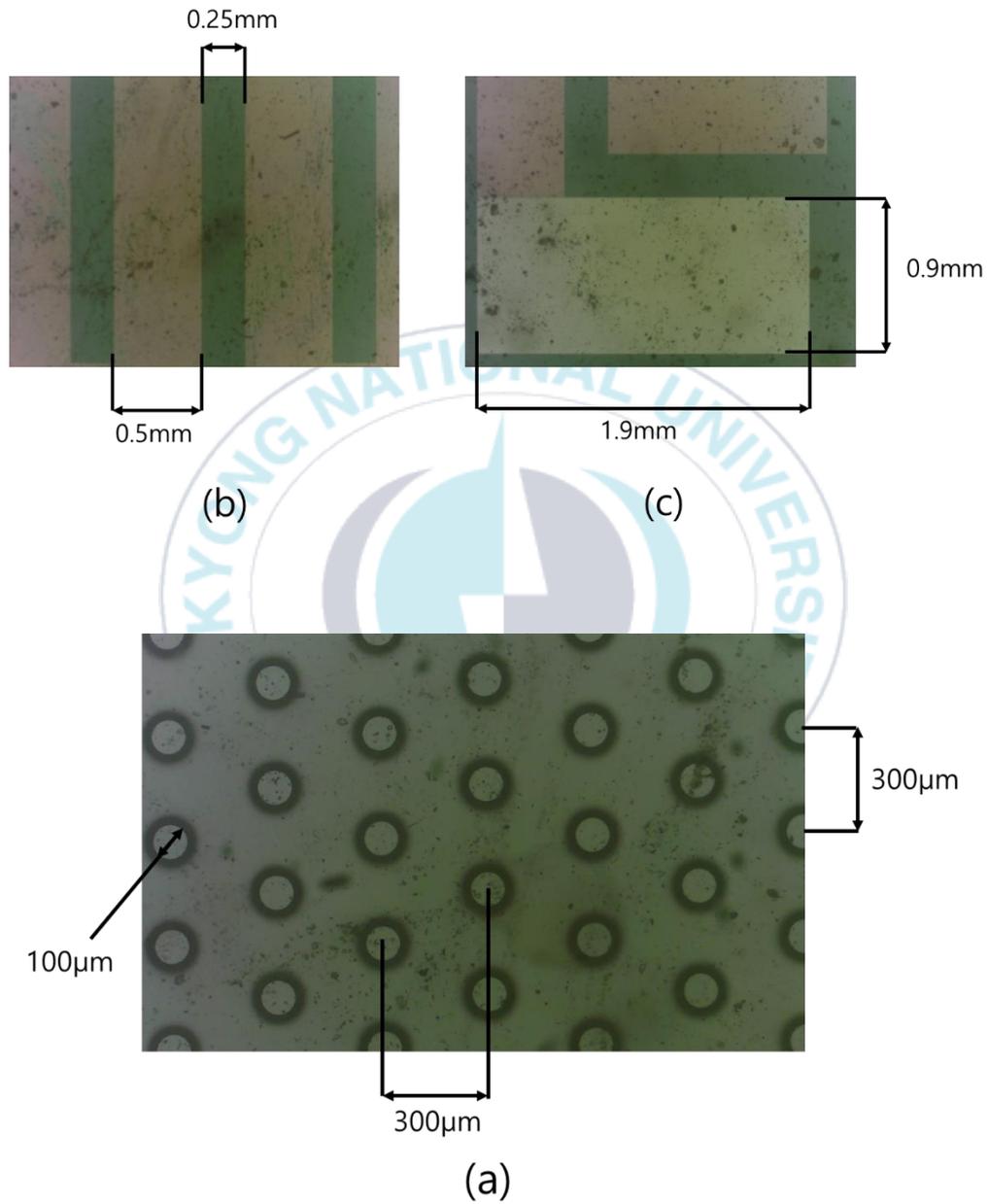
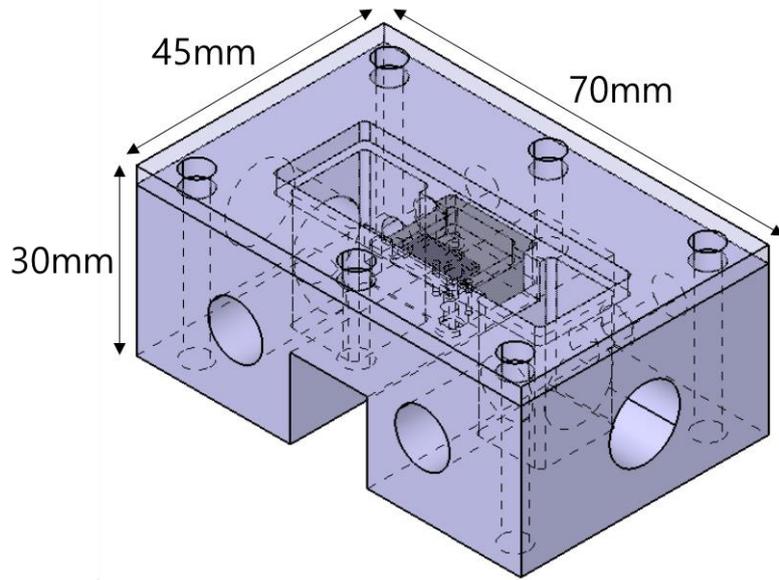


Fig. 5 Microscope images (a) Micro pin fin heat sinks (b) Ti/Pt film heater (c) Electrical pad of a heater

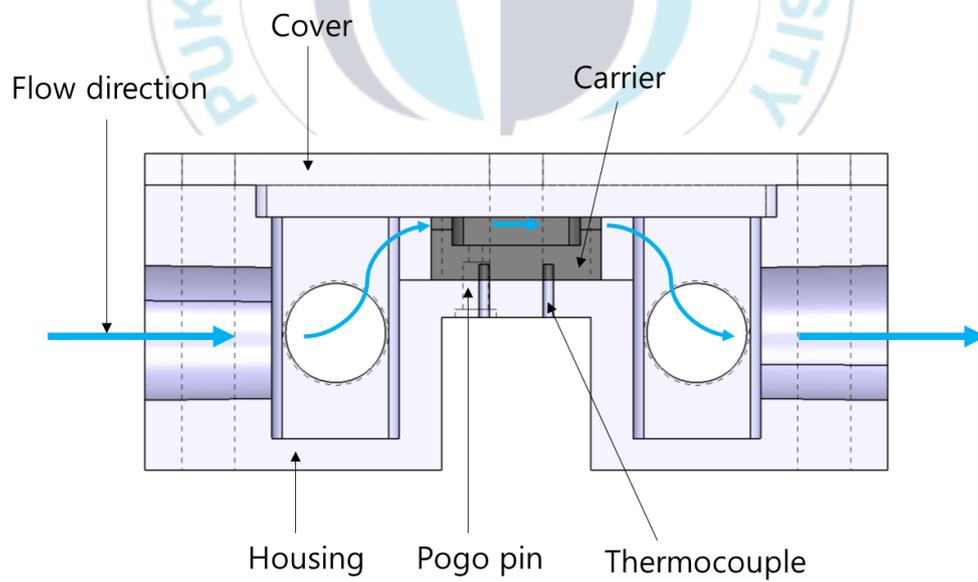
극저온 열성능 평가를 위하여 그림 6에 제시한 바와 같이 Test rig를 설계하였다. Test rig는 크게 Cover, Housing, Carrier의 세 부분으로 구성된다. Test rig는 알루미늄을 사용하여 제작되었으며 전기적 절연을 위해 아노다이징(Anodizing) 공법을 통해 표면에 산화막을 형성하였다.

극저온 환경 실험에서 가장 중요하게 고려되어야 할 부분은 물성 간의 열팽창계수(CTE : Coefficient of Thermal Expansion) 차이이다. 극저온 환경에서 물성 간의 열팽창계수 차이로 인해 수축이 발생하게 되고 이는 시험편의 파손을 초래할 가능성이 있다. 특히 웨이퍼의 주성분이 Si는 취성이 강한 소재이기 때문에 열팽창 계수 차이에 의한 수축을 충분히 고려한 설계가 필요하다.

본 연구에서는 압축에 의한 마이크로 핀 흰 히트싱크의 파손 위험을 방지하기 위하여 히트싱크 측면과 상단 모두 1mm의 간격을 가지도록 설계하였다. 전력 공급은 Pogo pin을 통하여 전극에 전류를 공급할 수 있도록 설계하고, 안정적인 전력공급을 위해 마이크로 핀 흰 히트 싱크와 Carrier 사이를 Adhesion을 통해 단단히 고정하였다. 그림 7은 마이크로 핀 흰 히트싱크가 장착된 Test rig를 나타낸다.



(a)



(b)

Fig. 6 (a) The isometric view of a test rig (b) The cross-section view of a test rig

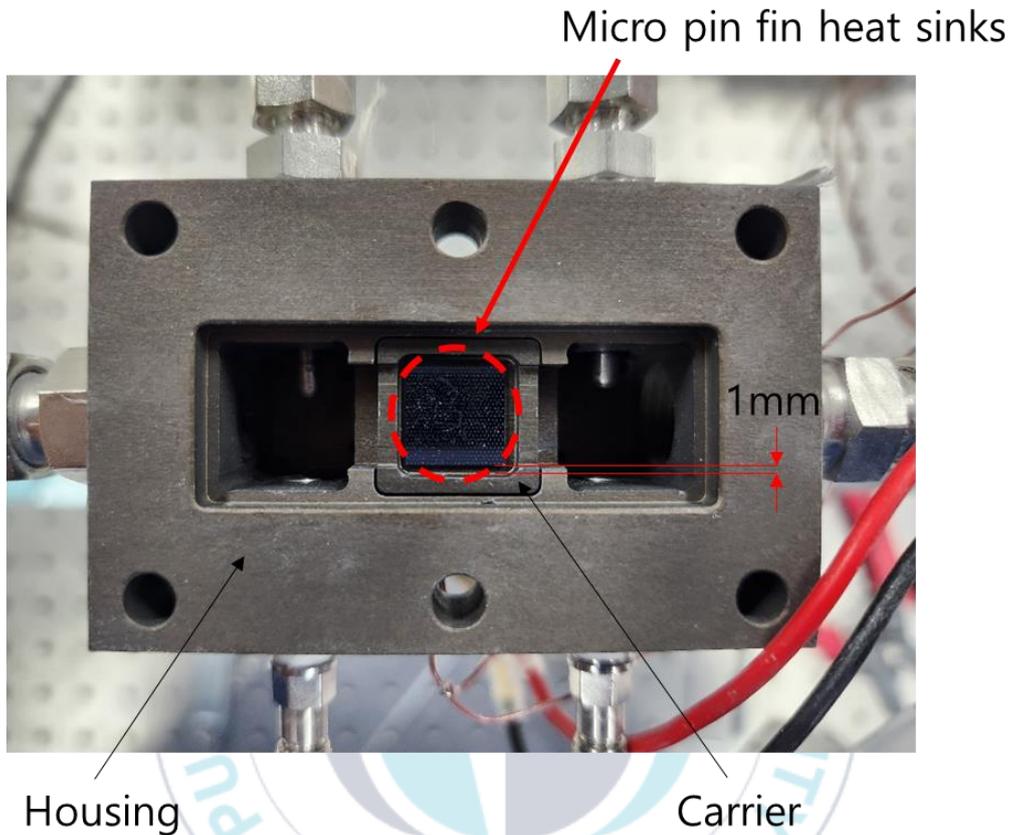


Fig. 7 Micro pin fin heat sinks with test rig

3.2 실험 장비

그림 8은 극저온 마이크로 핀 힛트싱크의 열성능 평가를 위한 구성장비와 Test rig를 나타낸다. DC power supply는 Agilent 6655A와 Agilent E3634A가 사용되었다. 출력 전압 상승을 위하여 2대의 Power supply를 직렬로 연결하여 사용하였다. Data Logger는 Agilent 34970A를 사용하였으며, 온도, 유량의 데이터를 저장하고 획득한 데이터를 DAQ PC를 통해 실시간으로 모니터링 가능하도록 구성하였다. 더불어 DAQ와 박막 히터 사이에 별도의 회로를 구성하여, 박막 히터에 인가되는 전류, 전압 및 저항을 실시간으로 모니터링 가능하도록 구성하였다.

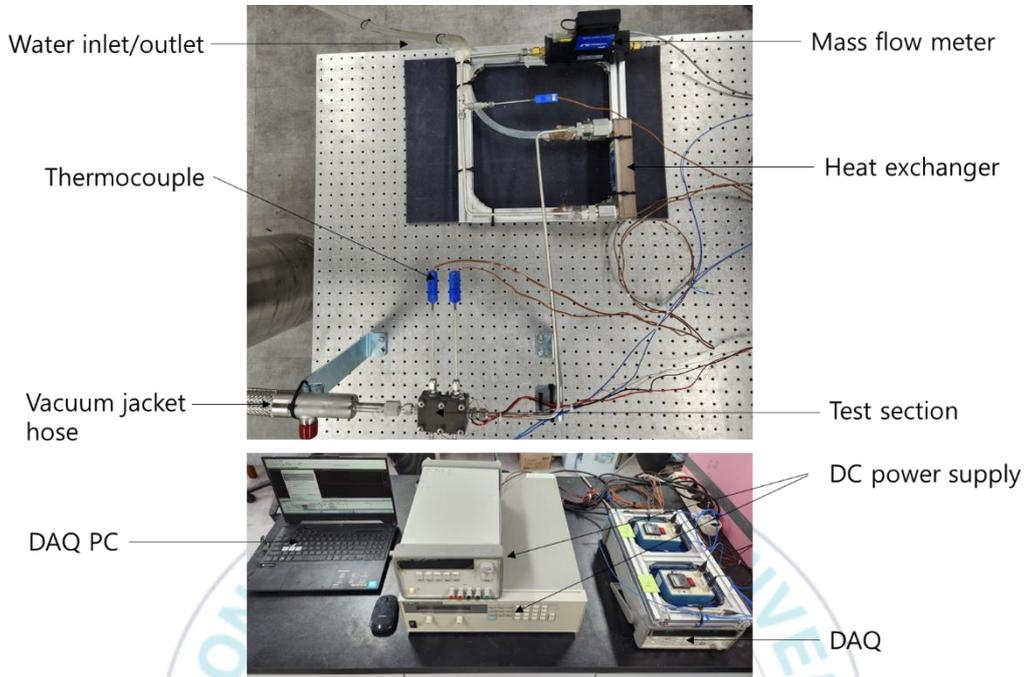


Fig. 8 A measurement setup for the thermal performance evaluation of micro pin fin heat sinks

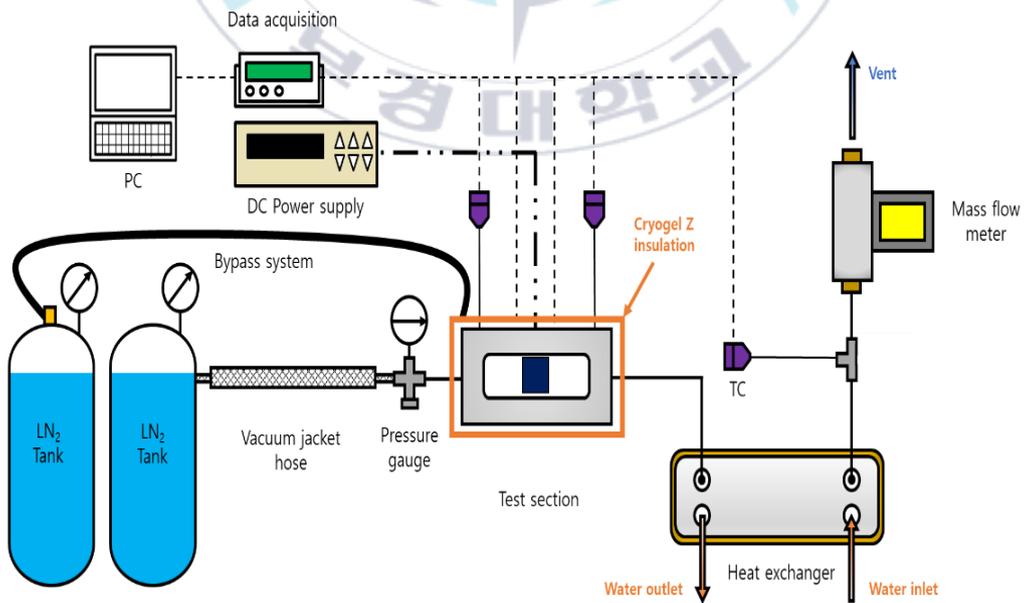


Fig. 9 The schematic diagram of the measurement setup

그림 9은 도식화된 Test rig를 나타낸다. Test rig의 단열을 위해 Aerogel Cryogel Z를 사용하였다. 질량 유량계는 OMEGA FMA-1843A가 사용되었으며, 판형 열교환기를 거쳐 완전히 기화가 완료된 질소의 유량을 측정하였다. 온도 측정은 OMEGA T-type 써모커플을 사용하였고, 입구, 출구, 배기 영역에 설치되어 유체의 온도를 측정하였고, Housing과 Carrier에 설치되어 박막 히터의 및 Test rig의 온도를 측정하였다. Test section을 구성하는 모든 배관은 1/4 inch 규격의 SUS316L 재질 배관을 사용하였으며, 각 배관의 연결부는 Lok fitting type의 배관 피팅과 LOCTITE Teflon sealing을 사용하여 누설을 방지하였다. 마지막으로 전력 인가를 위해 Mill-max power spring pin을 사용하였고, 최대 허용전류는 3A이다. 본 실험에 사용된 장비 및 체원을 표 2에 정리하여 나타낸다.

Table. 2 Description of components and equipment

Equipment	
DC power supply	Agilent 6655A Agilent E3634A
Data logger	Agilent 34970A
DAQ PC	Notebook PC
Mass flow meter	OMEGA FMA-1864A
Component	
Tube	SUS316L 1/4 inch

Pipe fittings	S-LOK
Pogo pin	Mill-max power spring pin
Plate heat exchanger	Alecoil BP3X8-10
Temperature sensor	OMEGA TT-T-30-36 TMQSS-125G-6
Pressure gauge	SAMSUNG Instrument co.
Insulation layer	Aerogel Cryogel Z
Vacuum jacket hose	DOOJIN Vacuum insulated hose
Sealing	LOCTITE65 Teflon

3.3 실험 절차

본 실험은 액화 질소를 이용한 마이크로 핀 흰 히트싱크의 열성능을 평가하기 위한 실험으로, 인가 열유속에 따른 마이크로 핀 흰 히트싱크의 열저항 측정을 통하여 평가되었다. 인가되는 열유속은 2개의 DC power supply를 통하여 제어되었으며, 열유속 범위는 $1.7\text{W}/\text{cm}^2 \sim 51\text{W}/\text{cm}^2$ 이다. Test rig 입구 영역의 압력은 액화 질소 저장용 압력 용기에 설치된 압력 조절기(Pressure regulator)를 통해 일정한 압력으로 유지되며, 본 실험에서 사용된 입구 압력 조건은 320kPa이다. 해당 입구 압력 조건에서 측정되는 유량은 2.4g/s이며, 본 실험의 세부 조건을 표 3에 정리하여 기재한다.

Table. 3 Test conditions for the thermal performance evaluation

P_{in} (kPa)	T_{sat} (°C)	\dot{m} (g/s)	q'' (W/cm ²)
320	-184.2	2.4	1.7-51

이상 유동 열성능 평가를 위해서는 입구 측에서 작동 유체의 상이 액체 상태로 유지되어야 한다. 이를 위해 Test rig 전체를 Cryogel Z을 이용하여 단열 후, Bypass system을 통해 Cryogel Z 내부로 액화 질소를 강제 주입한다. 이는 전체 Test rig가 포화 온도에서 등온 조건(Isothermal condition)을 만족할 수 있도록 하기 위한 절차이다. Housing, 박막 히터, 입구, 출구를 포함하는 전체 Test rig의 온도가 포화 온도에서 안정되면 Bypass system을 중단하고, 진공 호스를 통해 압력 용기로부터 Test rig 내부로 액화 질소를 흘려 보낸다.

Test rig를 거치며 증발한 혼합 상(Mixture phase)의 질소는 열교환기를 통해 완전히 기화되고, 유량 측정을 위해 배기부에 설치된 질량 유량계를 거친 후 배출된다.

유체의 온도를 측정하기 위해 입구, 출구, 배기 영역에 각 1개, Housing의 온도를 측정하기 위해 Housing 하부에 2개, 박막 히터의 온도를 측정하기 위해 Carrier와 박막 히터 사이에 1개의 써모커플을 설치하였다. 써모커플을 통해 획득한 측정값들은 모두 정상상태 도달 후 측정된 결과이며, 본 실험에서 사용된 써모커플의 오차는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, DC Power supply의 오차는 0.4%이다.

3.4 평가 방법

본 실험에서는 마이크로 핀 흰 히트싱크의 극저온 열성능 평가를 위하여 열저항을 계산하였다. 마이크로 핀 흰 히트싱크의 열저항은 다음과 같이

정의된다. (21)

$$R_{th} = \frac{(T_b - T_{in})}{q} = \frac{(T_b - T_{sat})}{q} \quad (21)$$

여기서 q 는 박막 히터에 공급되는 열 율(W), T_b 는 마이크로 핀 흰 히트싱크 아랫면의 온도(°C), T_{in} 은 입구 측 유체의 온도(°C), T_{sat} 는 포화 온도를 의미한다. 포화비등 이상 유동 열전달에서 채널 내부의 유체의 온도는 포화 온도와 동일하므로 $T_{in} = T_{sat}$ 의 관계가 성립하여, 위와 같이 표현 가능하다.



IV. 결과 및 고찰

4.1 열성능 평가

그림 10은 마이크로 핀 흰 히트싱크에서의 극저온 이상 유동 열성능에 관한 실험 결과를 나타낸다.

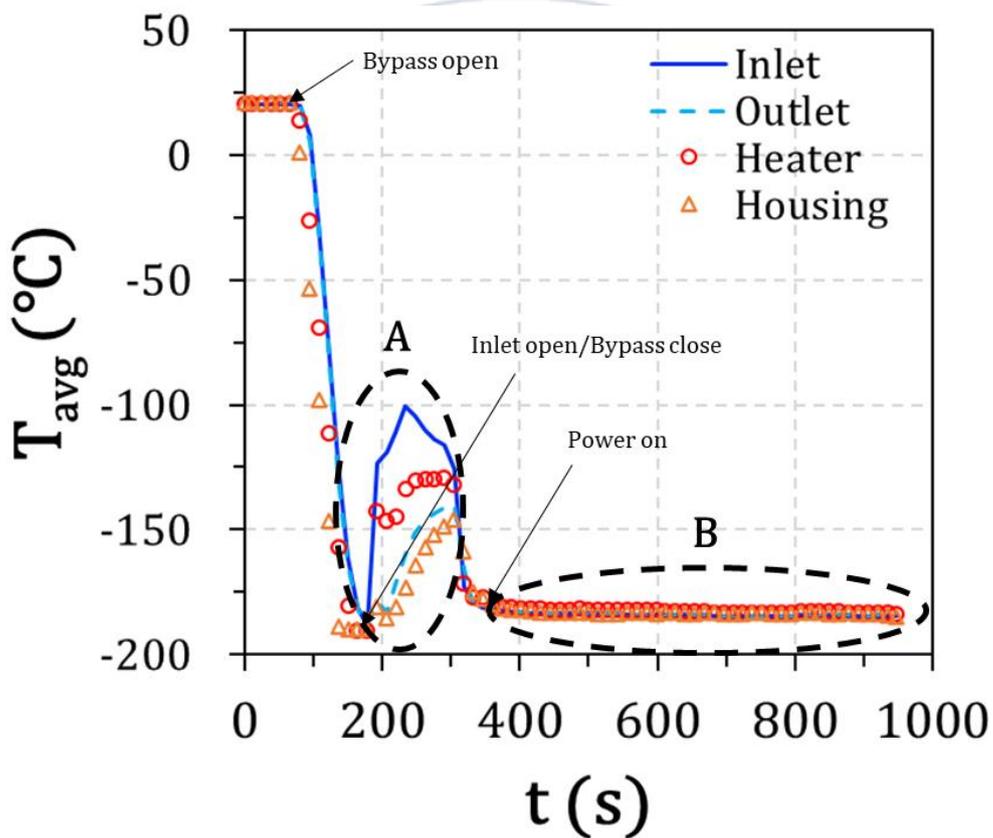


Fig. 10 Temperature change curve during the thermal performance evaluation.

실험 시작으로부터 약 1분 30초 경과 후, Bypass system을 작동한다. Bypass system에 의해 박막 히터와 Housing의 온도는 약 -186°C 까지

하강한다. Test rig의 모든 영역의 온도가 동일한 온도에 도달하게 되면 Bypass system을 중지하고 압력 용기로부터 액화 질소를 흘려 보낸다. 본 실험에서는 실험 시작으로부터 약 3분 경과한 시점에서 액화 질소를 흘려 보내기 시작한다. 영역 A에서는 Test rig 내부 압력이 포화 압력 수준으로 형성되어 있지 않기 때문에 입구 영역에서 작동 유체의 증발로 인하여 상당히 불안정한 온도 변화를 보인다. Test rig에 내압이 형성되면 입구 영역에서 증발이 더 이상 일어나지 않으며, 안정된 상태인 영역 B에 진입하게 되며, 해당 영역부터 열유속 인가를 통하여 이상 유동 열성능을 관찰한다. 본 실험의 열유속 인가 시작은 실험 시작으로부터 약 8분 경과한 시점에 해당한다. 그림 11은 영역 B에서의 인가 열유속에 대한 온도 변화를 나타낸다.

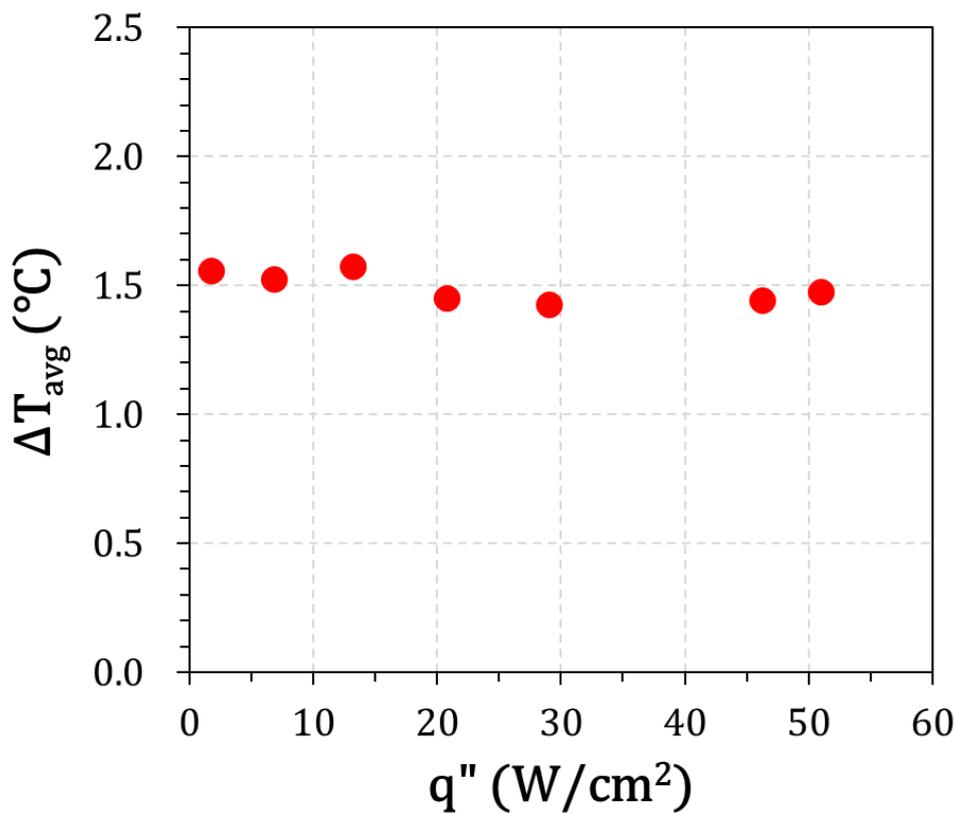


Fig. 11 Temperature differences in zone B as function of heat flux

그림 11에서 ΔT_{avg} 는 마이크로 핀 흰 히트싱크의 평균 베이스 온도와 입구 측 유체 온도 사이의 평균 온도 차를 나타낸다. 실험 결과, 인가 열유속 변화에 대하여 온도차의 변화는 미비함을 알 수 있다. 일반적으로 포화 비등 조건의 강제 대류 이상 유동에서 채널 내부에 Plug 유동 및 Annular 유동이 형성되면 가열면과 작동 유체의 사이의 온도 차이가 열유속 증가와 무관하게 일정하게 유지되는 현상이 발생하나, 해당 실험의 결과만으로는 명확한 판단이 어려우며, 보다 넓은 열유속 범위에서의 실험이 추가적으로 이루어질 필요성이 있다. 해당 실험 결과를 통하여 도출된 극저온 이상 유동에 대한 마이크로 핀 흰 히트싱크의 열저항을 그림 12에 나타낸다.

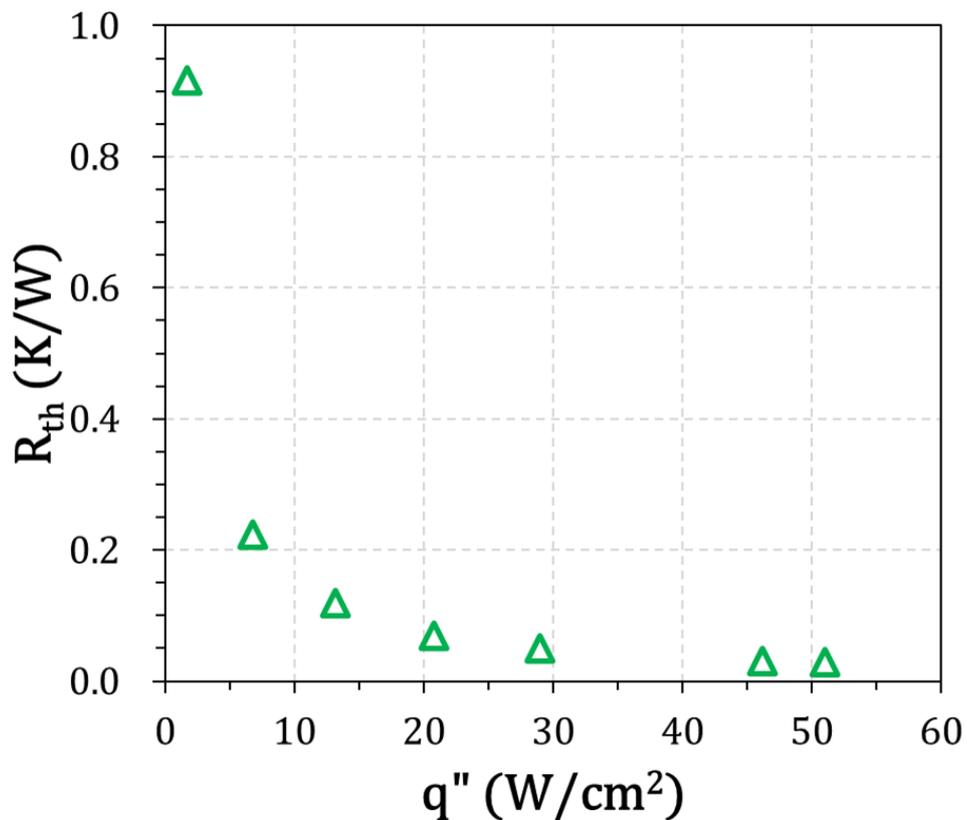


Fig. 12 Thermal resistance of micro pin fin heat sinks for cryogenic flow boiling

4.2 상관식 비교

본 장에서는 마이크로 핀 흰 히트싱크에서의 극저온 열성능 평가에 관한 실험 결과와 이상 유동 열성능 예측 상관식을 통해 도출된 예측 결과를 비교하여 분석한다. 비교 대상이 되는 상관식은 원형 튜브 내 극저온 이상 유동에 관한 Shah[3]와 Kandlikar[1] 상관식과 마이크로 핀 흰 히트싱크 이상 유동에 관한 Krishnamurthy[10] 상관식이다. 그림 13은 해당 실험 조건에 대한 상관식과 실험 비교 결과를 나타낸다.

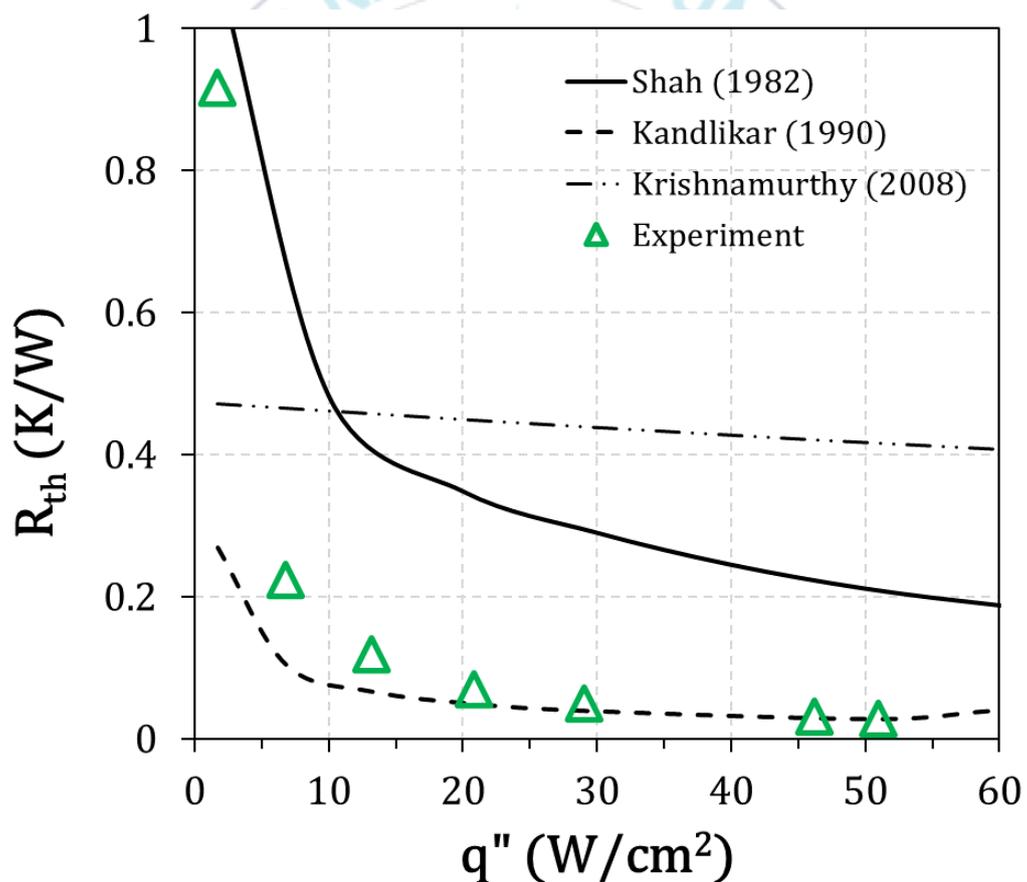


Fig. 13 Comparison of correlations—calculated results and experiment results

그림 13을 살펴보면, 상관식과 실험 결과 모두 인가 열유속 증가에 따라 감소하는 경향을 보인다. 원형 튜브에 관한 상관식은 낮은 열유속 영역에서 다소 급격한 감소 경향을 보이며, 열유속 증가에 따라 감소 경향이 점점 줄어든다. 반면에, 마이크로 핀 흰 히트싱크 상관식의 경우, 열유속 증가에 대하여 일정한 감소 경향을 보인다.

상대 비교 결과, 마이크로 핀 흰 히트싱크 상관식을 통한 예측 결과 보다, 원형 튜브 내 극저온 이상 유동에 관한 상관식 예측 결과와 유사함을 알 수 있다. 하지만 본 실험의 실험 결과만으로 튜브 상관식을 통해 마이크로 핀 흰 히트싱크의 열성능을 예측 가능하다 단정짓기 어려우며, 보다 다양한 구조적 변수 조건과 실험 조건에서 추가적인 연구를 통한 분석이 필요할 것을 보인다.

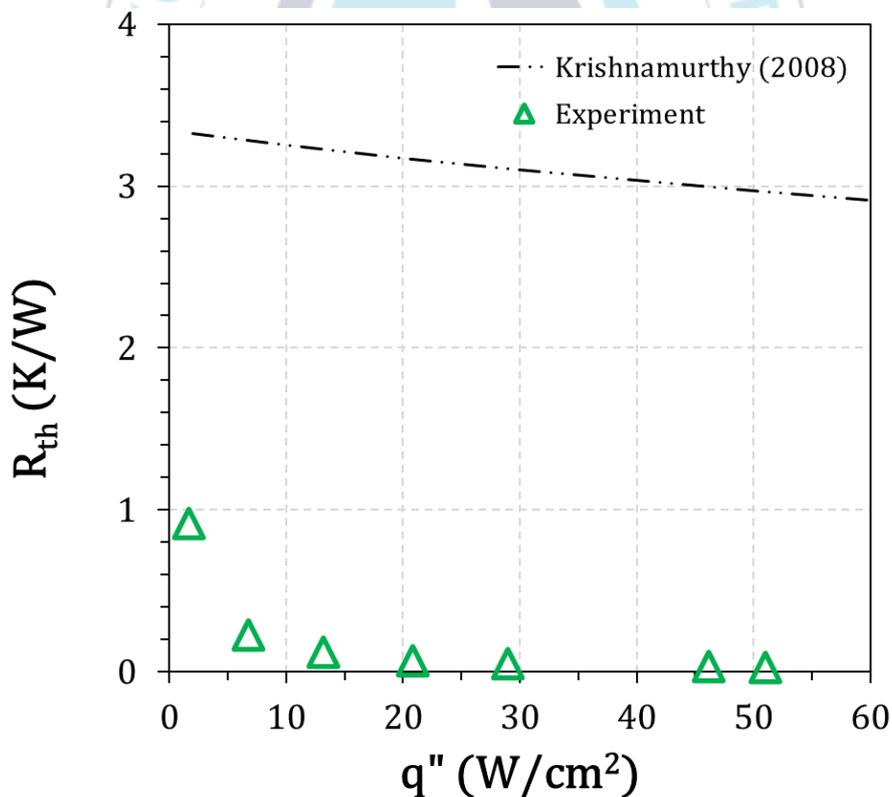


Fig. 14 Comparison of thermal performance of micro pin fin heat sinks for flow boiling with water and liquid nitrogen

Krishnamurthy [10] 상관식은 극저온 이상 유동에 관한 실험 결과와는 큰 차이를 보이거나, 해당 상관식은 작동 유체가 물인 경우에 대하여 약 25%의 오차범위 내로 이상 유동 열성능 예측이 가능하다고 알려져 있다. 따라서 작동 유체가 물인 경우에 대한 열성능을 해당 상관식을 통하여 도출 후, 실험 결과와 비교하여 극저온 유체 사용을 통한 열성능 증대 효과에 대하여 분석한다. 그림 14는 물에 대한 마이크로 핀 흰 히트싱크 열성능 예측 결과와 극저온 이상 유동 실험에 대한 비교 결과를 나타낸다. 물에 대한 마이클 핀 흰 히트싱크 열성능 예측은 포화 온도 100°C 조건에서의 열 물성을 기준으로 계산되었다.

비교 결과, 액화 질소를 이용한 마이크로 핀 흰 히트싱크의 열저항은 물에 대한 상관식 예측 결과 보다 확연히 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 극저온 마이크로 핀 흰 히트싱크의 열저항은 인가 열유속 $2\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 약 72%, $51\text{W}/\text{cm}^2$ 에서 99% 이상의 열저항 저감율을 가지며, 평균 열저항 저감율은 93.7% 이다. 이를 통해, 극저온 유체를 이용한 이상 유동 냉각 방식이 물을 이용한 이상 유동 냉각 방식 보다, 동일 인가 열유속 조건에서 작동 유체와 가열 면 사이의 온도 차이를 줄이는데 효과적임을 예상할 수 있다. 하지만 열성능 평가 실험이 낮은 열유속 조건에서만 이루어졌기 때문에 보다 신뢰성 있는 결과 비교를 위해서는 추가적인 연구를 통한 검증이 필요할 것으로 보인다.

4.3 기존 연구결과 비교

본 장에서는 극저온 마이크로 핀 흰 냉각기와 마이크로 깎 냉각기에 관한 기존 연구 결과와 본 연구의 실험 결과를 상대비교 하여 차이를 분석한다. 그림 15는 극저온 마이크로 핀 흰 냉각기와 마이크로 깎 냉각기에 관한 기존 연구 결과와 본 연구의 열성능 평가 결과를 인가 열유속 변화에 대하여 나타낸 그림이다. 마이크로 핀 흰 냉각기는 약

2.3g/s의 단일 질량 유량 조건에 대하여 실험되었으며, 마이크로 갭 냉각기는 2.3g/s와 3.2g/s의 두 조건에 대하여 실험되었다.

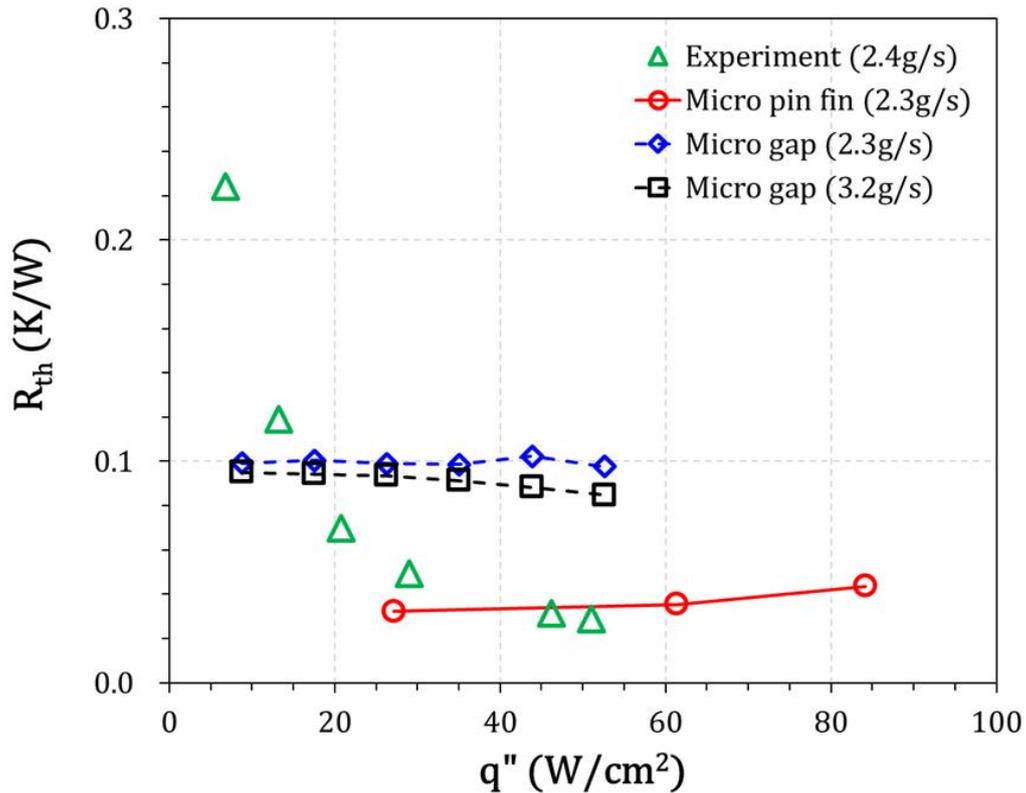


Fig. 15 Comparison of previous study and present study

마이크로 갭 냉각기에 대한 기존 연구 결과는 열유속 증가가 열성능에 미치는 영향이 매우 미비하며, 질량 유량이 증가할수록 열저항이 낮아지는 경향을 가진다. 반면 마이크로 핀 힌 냉각기는 열유속 증가에 따라 열저항이 상승하는 추세를 보인다. 또한 본 실험의 마이크로 핀 힌 히트싱크와 기존 연구의 마이크로 핀 힌 냉각기는 20W/cm^2 이상의 열유속 조건에서 마이크로 갭 냉각기에 대한 기존 연구 결과보다 우수한 열성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 다만 본 실험에서의 예상 출구 건도는 $0 < x_{ex} < 0.12$ 사이의 범위인 반면, 마이크로 핀 힌 냉각기에 관한

기존 연구는 $0.08 < x_{ex} < 0.3$, 마이크로 갭 냉각기는 $0.01 < x_{ex} < 0.13$ 사이의 범위를 가지어 명확히 열성능을 비교하기에 어려움이 있다. 보다 넓은 범위의 열유속 조건에서의 추가적인 연구를 통한 비교 검증이 필요할 것으로 보인다.



V. 결론

본 연구에서는 마이크로 핀 흰 히트싱크의 극저온 열성능 평가를 위하여 마이크로 핀 흰 히트싱크 설계 및 열성능 평가를 위한 Test rig 설계에 관하여 논의하였다. 극저온 환경에서의 마이크로 핀 흰 히트싱크 열성능을 관찰하기 위하여, 극저온 유체에 대하여 개발된 원형 튜브 상관식, 마이크로 핀 흰 히트싱크에 관한 이상 유동 열성능 상관식을 조사하였고, 그 중 우수한 예측 정확도를 가지는 3 개의 상관식에 대하여 자세히 분석하였다. 또한 작동 유체가 물인 경우에 대한 마이크로 핀 흰 히트싱크 열성능 예측 결과와 실험 결과를 비교하여 극저온 유체 사용에 대한 열성능 증대 효과를 예측하였다. 마지막으로 마이크로 핀 흰 냉각기 및 마이크로 깎 냉각기에 관한 기존연구 결과와 비교를 통해 그 차이를 분석하였다. 마이크로 핀 흰 히트싱크의 극저온 열성능 평가를 위하여 액화 질소를 작동 유체로 포화 비등 조건에서 이상 유동 실험을 진행하였다.

극저온 이상 유동 열성능 평가 실험 결과, 히트싱크 베이스와 작동 유체 사이의 온도 차는 인가 열유속에 무관하게 일정한 경향을 보였으며, 이를 통해 계산된 열저항은 인가 열유속의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 해당 실험 결과와 극저온 원형 튜브 상관식, 마이크로 핀 흰 히트싱크 상관식을 통한 예측 결과와 비교한 결과, 원형 튜브 상관식이 마이크로 핀 흰 히트싱크 상관식보다 실험 결과에 가깝게 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 다만 보다 다양한 구조적 변수에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 보인다.

작동 유체가 물인 경우에 대하여 마이크로 핀 흰 히트싱크 상관식을 통해 열성능을 예측하였고, 예측한 열성능과 극저온 마이크로 핀 흰

히트싱크 실험 결과 간의 비교를 통해 극저온 이상 유동 냉각 방식 채택으로부터 기대되는 열성능 증대 효과에 대하여 분석하였다.

마지막으로 마이크로 핀 흰 냉각기 및 마이크로 깎 냉각기에 관한 극저온 이상 유동 기존 연구 결과와 비교를 통해 그 차이를 분석하였다. 본 실험의 경우 인가 열유속에 대하여 열저항이 감소하는 경향을 가지지만 마이크로 핀 흰 냉각기에 대한 기존 연구 결과는 인가 열유속에 대하여 열저항이 증가하는 경향을 보였다. 두 실험은 서로 다른 예상 출구 온도 범위를 가지어 정확한 열성능 경향 비교가 어려우며, 명확한 원인 분석을 위해서는 보다 넓은 인가 열유속 조건에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

마이크로 핀 흰 히트싱크에 대한 극저온 열성능 평가에 관한 기존 연구가 찾아보기 어려운 만큼, 본 연구는 마이크로 핀 흰 히트싱크 극저온 열성능 평가에 대한 가능성 연구 측면에서 의미를 가지며, 향후 추가적인 연구를 통해 보다 명확한 비교 분석이 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

- [1] S. G. Kandlikar, 1990, A General correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes, *Journal of Heat Transfer*, 112(1), 219–228.
- [2] M. M. Shah, 1976, A new correlation for heat transfer during boiling flow through pipes, *ASHRAE Transactions*, 82(2), 66–86.
- [3] M. M. Shah, 1982, Chart correlation for saturated boiling heat transfer : Equations and further study, 1982, *ASHARE Transactions*, 88(1), 185–196.
- [4] M. M. Shah, 1984, Prediction of heat transfer during boiling of cryogenic fluids flowing in tubes, *Cryogenics*, 24(5), 231–236.
- [5] K. J. Kim, B. Han, & A. Bar-Cohen, 2021, Thermal and optical performance of cryogenically cooled laser diode bars mounted on pin-finned micro coolers, *Applied physics B*, 127(3)
- [6] K. J. Kim, H. H. Yang, W. Noh, B. Han, & A. Bar-Cohen, Thermal performance of cryogenic micro-pin fin coolers with two phase liquid nitrogen flows, 2021, *Applied science*, 11(22)
- [7] V. V. Klimenko, 1990, A generalized correlation for two-phase forced flow heat transfer—second assessment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 33(10), 2073–2088.
- [8] D. Steiner, & J. Taborek, 2010, Flow boiling heat transfer in vertical tubes correlated by an asymptotic model, 13(2), 43–69.

- [9] V. Ganesan, R. Patel, J. Hartwing, & I. Mudawar, 2021, Review of databases and correlations for saturated flow boiling heat transfer coefficient for cryogenics in uniformly heated tubes, and development of new consolidated database and universal correlations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 179.
- [10] S. Krishnamurthy, & Y. Peles, 2008, Flow boiling of water in a circular staggered micro-pin fin heat sink, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(5-6), 1349-1364.
- [11] A. Kosar, & Y. Peles, 2006, Thermal-hydraulic performance of MEMS-based pin fin heat sinks, *Journal of Heat Transfer*, 128.
- [12] A. Reeser, A. Bar-Cohen, & G. Hetsroni, 2014, High quality flow boiling heat transfer and pressure drop in micro gap pin fin arrays, 78, 974-985.
- [13] W. Qu, & A. Siu-Ho Experimental study of saturated flow boiling heat transfer in an array of staggered micro-pin-fins, 2009, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(7-8), 1853-1863.
- [14] H. Zhang, I. Mudawar, & M. M. Hasan, 2002, Experimental and theoretical study of orientation effects on flow boiling CHF, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(22), 4463-4477.
- [15] F. W. Dittus, & L. M. K. Boelter, 1985, Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 12(1), 3-22.
- [16] R. W. Lockhart, & R. C. Martinelli, 1949, Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes, *Chemical Engineering Progress*, 45(1), 39-48.

- [17] S. L. Qi, P. Zhang, R. Z. Wang, & L. X. Xu, 2007, Flow boiling of liquid nitrogen in micro-tubes : Part I –The onset of nucleate boiling, two-phase flow instability and two-phase flow pressure drop, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(25–26), 4999–5016.
- [18] J. D. Seader, W. S. Miller, & L. A. Kalvinskas, 1965, Boiling heat transfer for cryogenics, National Aeronautics and Space Administration.
- [19] P. P. P. M. Lerou, G. C. F. Venhorst, C. F. Berends, T. T. Veenstra, M. T. Blom, J. Burger, M. T. Brake, & H. Rogalla, 2006, Fabrication of a micro cryogenic cold stage using MEMS-technology, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 16(10), 1919–1925.
- [20] V. P. Carey, 1992, *Liquid-vapor phase change phenomena*, Hemisphere Publishing Corporation.
- [21] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, & A. S. Lavine, 2020, *Principles of heat and mass transfer*, Wiley.
- [22] J. C. Chen, 1966, Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow, *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 5(3), 322–329.
- [23] B. E. Short, P. E. Raad, D. C. Price, 2002, Performance of pin fin cast aluminum, cold walls, Part 2: Colburn j -factor correlations, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 16(3), 397–403.