

2상 액침냉각에서 표면개질에 따른 열성능 비교연구

신상현* · 도수윤* · 이정호*†

Thermal Performance of Surface Characterization for Two-Phase Immersion Cooling using HFE-7200

Sanghyeon Shin*, Su-yoon Doh*, Jungho Lee*†

Key Words : Immersion cooling(액침 냉각), Surface modification(표면 개질), Dielectric liquid(비전도성 유체), Critical heat flux(임계 열유속), Heat transfer coefficient(열전달계수)

ABSTRACT

The recent advancements in AI have led to increased heat generation in CPUs and GPUs used in data center servers. Traditional air-cooling methods used in existing data centers are becoming increasingly inadequate to effectively manage the rising heat loads, prompting extensive research into immersion cooling. While numerous studies have explored thermal performance enhancement through surface modification in two-phase immersion cooling, this research has largely been confined to pool boiling chambers, which do not accurately reflect actual server environments. In this study, we fabricated surface-modified samples using copper foam and sintered copper microporous coating (MPC) with varying thicknesses. We evaluated thermal performance within a chamber that simulates real server immersion cooling conditions. Experimental results showed that, compared to a smooth surface, the surface-modified samples achieved up to a 705% improvement in heat transfer coefficient and a 78% increase in critical heat flux (CHF). Both surface modification methods exhibited a trend where increased thickness led to decreased heat transfer coefficient but increased CHF. The sintered copper MPC was more effective in enhancing the heat transfer coefficient, while copper foam was more effective in increasing CHF. Furthermore, visualization analysis was conducted to identify the mechanism behind the thermal performance improvements due to surface modification. This study analyzes the impact of surface modification techniques and thickness variations under realistic two-phase immersion cooling conditions. It offers practical insights for their application in two-phase immersion-cooled server systems.

1. 서 론

최근 인공지능(AI)의 급격한 발전으로 인해 데이터센터 서버에 사용되는 CPU와 GPU의 소비 전력은 급격하게 증가하고 있으며 대부분 열에너지 형태로 변환⁽¹⁾되기 때문에, CPU와 GPU의 열 설계 전력(Thermal Design Power, TDP) 또한 급격히 증가하고 있다. 일반적으로 전자장비에서 생성된 열이 냉각되지 않으면 작동온도가 상승하고, 이는 장치의 고장률을 급격히 증가시킨다.⁽²⁾ 따라서 데이터센터는 냉각 시설을 통해 서버의 신뢰성을 유지하는 것은 매우 중요하다. 기존의 데이터센터는 대부분 공랭을 사용하였지만⁽³⁾, 공랭은

공기의 낮은 비열로 인해 냉각 효과가 제한적이며 전력 사용 효율(Power Usage Effectiveness) 역시 높다는 단점이 있다.⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 이러한 이유로 공랭에 비해 열성능이 높고 전력소모가 적은 액침냉각(Immersion Cooling) 방식이 주목받고 있다.⁽⁴⁾⁽⁶⁾

액침냉각은 서버를 직접 비전도성 유체에 담귀 냉각하는 방식으로 현열을 이용하는 단상 액침냉각과 잠열을 이용하는 2상 액침냉각으로 나뉜다. 단상 액침냉각은 작동유체와 발열원 간의 온도차에 의한 열전달이 이루어지며, 이를 위해 칠러 및 펌프 등 별도의 외부 동력이 요구된다. 반면, 2상 액침냉각은 잠열을 이용하여 단상 대비 우수한 열전달계수를

* 아주대학교, 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Ajou University)

† 교신저자, E-mail : jungholee@ajou.ac.kr

가지며, 작동유체가 비등과 응축을 반복하며 작동하기에 더 적은 전력을 소모한다는 장점을 지닌다.⁽⁷⁾ 이러한 장점으로 인해, 2상 액침냉각은 데이터센터의 발열 문제 해결과 획기적인 전력 소모에 효과적이다.⁽⁸⁾

2상 액침냉각은 낮은 비등점을 갖고 있어 전자장비 작동 온도 범위 내에서 효과적인 냉각이 가능하며, 동시에 우수한 절연성을 갖는 비전도성 유체가 사용된다. 그러나 비전도성 유체는 일반적으로 낮은 열전도도, 비열, 표면장력을 가지므로 초기 과열이 높고, 임계 열유속(Critical Heat Flux, CHF)이 낮아 열전달 성능에 한계를 보인다.⁽⁹⁾ 이를 극복하기 위해 구리분말 소결⁽¹⁰⁾, 전기화학 증착⁽¹¹⁾, 방전 가공⁽¹²⁾, 핀 배열⁽¹³⁾, 구리폼⁽¹⁴⁾ 등의 다양한 표면개질 방법으로 비등을 촉진시키는 연구들이 수행되어 왔다. Sajjad et al.⁽¹⁰⁾은 구리분말 소결을 통해 11.2~21.35 μm 의 입자 직경과 270~590 μm 두께를 갖는 마이크로 다공성 표면을 제작하였다. 비전도성 유체인 HFE-7200에서 풀비등 실험을 진행하였고, 매끈한 표면에 비해 최대 566%의 열전달계수 향상을 보였다. Cao et al.⁽¹¹⁾은 전기화학 증착 방법을 통해 Ra=10.993~17.003 μm 의 거칠기를 갖는 표면을 제작하였다. Novec 649를 작동유체로 하는 풀비등 실험을 진행했으며, 매끈한 표면에 비해 최대 600%의 열전달계수 향상과 최대 55% CHF 향상을 보였다. Jones et al.⁽¹²⁾은 방전 가공을 통해 Ra=1.08~10 μm 의 기계적 거칠기를 갖는 표면을 제작하였다. FC-77을 작동유체로 하는 풀비등 실험을 진행했으며, 매끈한 표면에 비해 최대 120% 더 높은 열전달계수 향상과 40%의 CHF 향상을 보였다. Yu et al.⁽¹³⁾은 0.5~2 mm 핀 간격과 0.5~4 mm의 핀 높이를 갖는 직사각형 핀 배열 표면을 제작했다. FC-72를 작동유체로 하며, 매끈한 표면에 비해 최대 5배 큰 CHF 향상을 보였다. Manetti et al.⁽¹⁴⁾은 공극률이 90%이고 1~3 mm 두께의 구리폼을 사용하여 납땀 공정을 통해 표면개질을 진행하였다. HFE-7100에서 실험을 진행했으며, 1 mm 두께의 구리폼에서 최대 146.5%의 열전달계수 향상과 34.8%의 CHF 향상을 보였다. 이처럼 앞선 선행연구들은 표면개질을 적용하여 열전달 면적을 늘리거나, 마이크로 다공성 구조를 만들어 핵생성 지점 증가와 미세관 흡수력 향상시키는 방법을 통해 열전달계수와 CHF의 유의미한 향상을 이끌어냈다.

이전 선행 연구들에서 다양한 표면개질을 통해 비전도성 유체의 비등 열전달 성능 향상을 확인했지만, 대부분이 풀비등 챔버에서만 이루어져 왔으며, 히터의 크기, 방향, 서버 간격, 보드 형상 등 실제 2상 액침냉각 서버 환경과는 다르다. 실제 액침냉각 환경은 열원의 면적이 529~1017 mm^2 으로 크고, 수직 방향으로 배치되며, 1~4U(44.42~176.62 mm)의 제한된 간격을 갖는다. 해당 요소들은 비등 성능을 변화시키기 때문에 무시할 수 없는 요소이며 선행 연구들에서도 그 영향이 실험적으로 확인된다. Rainey et al.⁽¹⁵⁾은 히

터의 크기를 변화해가며 풀비등 성능을 측정하였다. 1, 4, 25 cm^2 의 히터의 크기로 풀비등 성능을 측정했으며, 1 cm^2 에 비해 4 cm^2 의 면적인 경우 최대 32% CHF가 감소하는 결과를 보였다. Priarone⁽¹⁶⁾은 히터의 방향을 0°에서 175°까지 변경해가며 실험을 수행하였고, 수직 배치(90°) 시 수평 배치(0°) 대비 CHF가 최대 19.3% 가량 감소하는 결과를 보였다. Misale et al.⁽¹⁷⁾은 0.5~20 mm의 제한된 간격에서 풀비등 실험을 진행하여, 간격이 감소함에 따라 열전달계수와 CHF 모두 감소하는 결과를 보였다. 이와 같은 연구들은 실제 2상 액침냉각 환경에서의 기하학적 조건들이 비등 특성에 영향을 미친다는 점을 시사하며, 이에 실제 환경을 반영한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 실제 서버 크기의 모사 보드가 장착이 가능한 챔버를 제작하였다. 모사 보드는 E-ATX(13 × 12 inch²)의 규격과 동일하고, 2U 간격을 가지며 수직 방향으로 배치되어 있다. 모사 보드에 부착되는 열원은 마이크로프로세서의 다이 크기와 유사한 1 × 1 inch² 크기의 히터 면적을 가짐으로써 실제 환경과 유사하게 제작하였다. 또한 해당 챔버에서 열원의 표면개질에 따른 영향을 분석하기 위해 구리폼과 소결 구리 마이크로 다공성 코팅으로 표면개질을 진행하였고, 비등 열전달 특성을 비교 분석하였다. 이를 통해 실제 2상 액침냉각 시스템에서 비등 열전달 향상을 위한 표면개질을 적용했을 때, 이에 따른 열성능 측정 및 열전달 향상 매커니즘을 실험적으로 분석하는 것을 목표로 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 1(a)는 실제 2상 액침냉각 서버 환경을 모사한 챔버 및 열성능 평가를 위해 사용된 실험 장치를 나타낸다. 전체 실험 장치는 액침냉각 실험 챔버, 전원공급기, 데이터 취득 장치, 가시화 장치 등으로 구성되어 있다. 액침냉각 실험 챔버는 PCB 보드 규격인 E-ATX(13 × 12 inch²) 크기의 모사 보드를 장착할 수 있도록 제작하였다. 챔버 내부는 포화상태 유지를 위해 카트리지 히터와 응축기를 설치했으며, 챔버 상단에는 내부 압력 측정을 위한 압력계(Omega Engineering, Inc)가 설치되었다. 챔버 전면과 측면에는 아크릴 창을 설치하여 실험 시 단열 효과를 확보함과 동시에 버블 거동을 초고속 카메라(Phantom VEO-440L)를 통해 관찰할 수 있도록 하였다. 실험 시 작동유체 및 실험 시편의 온도를 측정하기 위해 T형 열전대(Omega Engineering Inc)를 사용하였다. 또한 카트리지 히터와 시편에 전원을 인가하기 위해 전원공급기(PSU 300-5 Good Will instrument Co. Ltd & N5769A Keysight Technologies, Inc)를 사용하였다. 측정된 온도와 압력, 샘플에 인가된 전압과 전류 데이터는 DAQ

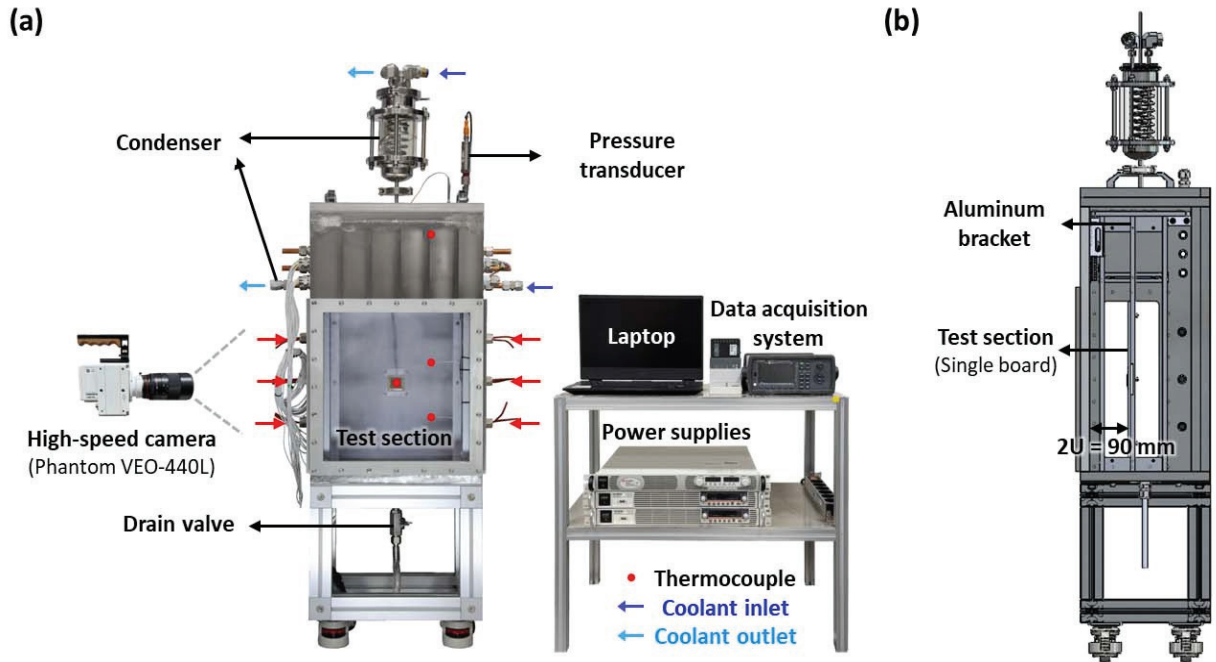


Fig. 1 Experimental apparatus for two-phase immersion cooling. (a) Photograph of the test rig. (b) Cross-sectional 3D model of the immersion chamber

시스템(cDAQ-9185, National Instrument, Inc & DAQ970A, Keysight Technologies, Inc)을 통해 취득하였으며, Labview 소프트웨어를 이용하여 실시간으로 온도, 압력, 전압, 전류 데이터를 취득하고 저장하였다.

Fig. 1(b)는 액침냉각 챔버의 단면을 나타낸다. 챔버 내부에는 탈부착이 가능하도록 설계된 알루미늄 브라켓을 설치했으며, 본 실험에서는 알루미늄 거치대에 하나의 모사보드를 장착하였다. 이때 보드 앞은 서버 간격 규격인 2U(약 90 mm)의 제한된 간격으로 설치하였다.

2.2 실험 시편 제작

실험 시편은 Fig. 2(a)와 같이 열량 공급 및 온도 측정을 위한 구성으로 제작되었다. 시편은 크기 $25.4 \times 25.4 \times 3 \text{ mm}^3$ 의 직육면체 형태를 갖는 구리 블럭을 기반으로 하며, 해당 블럭 표면개질을 진행한 뒤 제작되었다. 구리 블럭 하부에는 동일 면적의 세라믹히터를, 중심부에는 온도 측정을 위한 T형 열전대를 삽입하였으며 납땜을 통해 부착하였다. 열전대는 구리 표면으로부터 1.5 mm 아래에 위치하도록 배

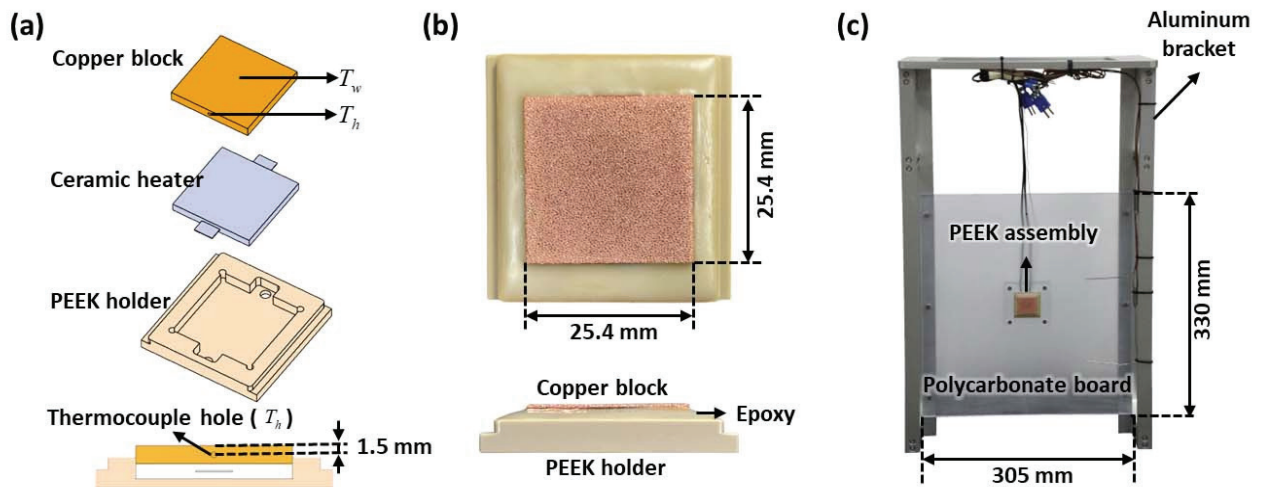


Fig. 2 Test section of two-phase immersion cooling. (a) 3D model of the test sample. (b) Photograph of the PEEK assembly (c) Photograph of the fully assembled test section

치하여 구리 블럭의 정중앙을 측정할 수 있도록 하였다. 제작된 시편은 피크 재질의 틀에 에폭시로 고정했으며, 완성된 실험 시편의 형상은 Fig. 2(b)에 나타나 있다. 완성된 실험 시편은 Fig. 2(c)와 같이 크기 $330 \times 305 \times 5 \text{ mm}^3$ 의 E-ATX 규격의 폴리카보네이트 보드 정중앙에 장착하여 모사보드를 구성하였다. 모사보드는 알루미늄 거치대에 고정하여 액침 냉각 챔버에 넣어 실험을 진행하였다.

2.3 표면개질 제조방법

본 연구에서는 표면개질 방법으로 구리폼과 소결 구리 마이크로 다공성 코팅을 적용하였으며, 표면개질 방법과 비교하기 위한 기준으로 매끈한 표면 시편도 함께 제작하였다. 구리폼은 130 ppi(Pore per inch)의 기공 밀도를 갖고 두께는 200, 300, 500 μm 인 상용 제품을 사용하였다. 해당 구리폼은 구리 블럭 위에 얹은 뒤 200 g의 흑연 블록을 얹어 압착 상태를 유지한 채 진공로에서 소결 공정을 통해 부착하였다. 소결 공정은 1040°C의 진공로에서 1시간 30분 동안 진행되었다. 소결 구리 마이크로 다공성 코팅의

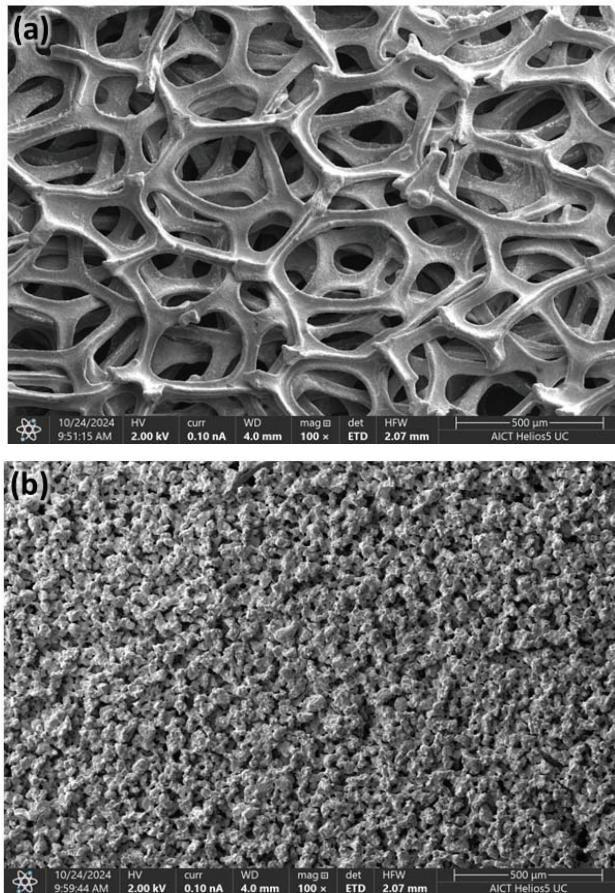


Fig. 3 SEM images of surface-modified samples.
 (a) Copper foam with a pore density of 130 ppi.
 (b) Sintered copper MPC with a particle size of 25 μm

Table 1 Specification of tested surface modification method

Surface modification	Thickness (μm)	Porosity (%)
Copper foam (130 ppi)	200 (± 6.6)	68.5
	300 (± 11.8)	77.6
	500 (± 4.5)	86.7
Sintered copper MPC (Particle size = 25 μm)	214 (± 8.3)	61.4
	311 (± 5.1)	58.3
	499 (± 8.0)	52

경우, 평균 입자크기가 25 μm 의 구리 분말과 신나를 혼합하여 구리 블럭 위에 고르게 도포한 후, 동일한 조건의 진공로에서 소결 공정을 통해 제작하였다. 소결이 완료된 후에는 마이크로미터를 사용해 코팅 두께를 다섯 지점에서 측정하였고 그 평균값이 214, 311, 499 μm 의 두께를 갖도록 제작하였다.

Fig. 3(a)는 제작이 완료된 구리폼, Fig. 3(b)는 소결 구리 마이크로 다공성 코팅의 SEM 이미지이다. 두 이미지를 통해, 구리폼이 소결 구리 마이크로 다공성 코팅에 비해 큰 기공을 갖는 것을 확인할 수 있다. 제작된 각 표면개질 시편의 두께와 측정된 표준편차 그리고 공극률은 Table 1.에 정리하였으며, 이때 공극률은 식 (1)을 통해 계산하였다.

$$Porosity = 1 - \frac{(m_{copper} / \rho_{copper})}{V_{modification}} \quad (1)$$

2.4 모세관 흡수력 실험

모세관 흡수 성능⁽¹⁸⁾은 Fig. 4(a)와 같이 모세관 내 메니스커스의 위치 변화를 관찰함으로써 정량적으로 평가하였다. 본 실험은 액침냉각 실험에 사용된 작동유체인 HFE-7200을 사용하여 수행되었으며, 내경이 0.68 mm인 모세관, z축 스테이지, 시편, 초고속 카메라 및 LED 조명으로 실험장치를 구성하였다. 모세관은 z축 스테이지에 고정되어 수직 방향으로 정밀하게 움직이도록 하였다. z축 스테이지를 조작해 모세관 내의 작동유체가 시편 표면과 접촉하여 흡수되는 순간을 초고속 카메라로 촬영하였다. 촬영된 영상은 이미지 분석을 통해 메니스커스의 높이 변화를 추적하였으며, 작동유체가 시편에 흡수되기 시작한 시점부터의 메니스커스의 높이 변화 Δh 를 기반으로 식 (2)를 통해 평균 체적 흡수율 \dot{V} 을 계산하였다.

$$\dot{V}_{wicking} = \frac{A_{capillary} \times \Delta h}{\Delta t} = \frac{V_{wicking}}{\Delta t} \quad (2)$$

Fig. 4(b)는 표면개질 방법 및 두께에 따라 1.8 μL 의 작동유체가 흡수되는 데 소요된 시간을 나타낸 그래프이다.

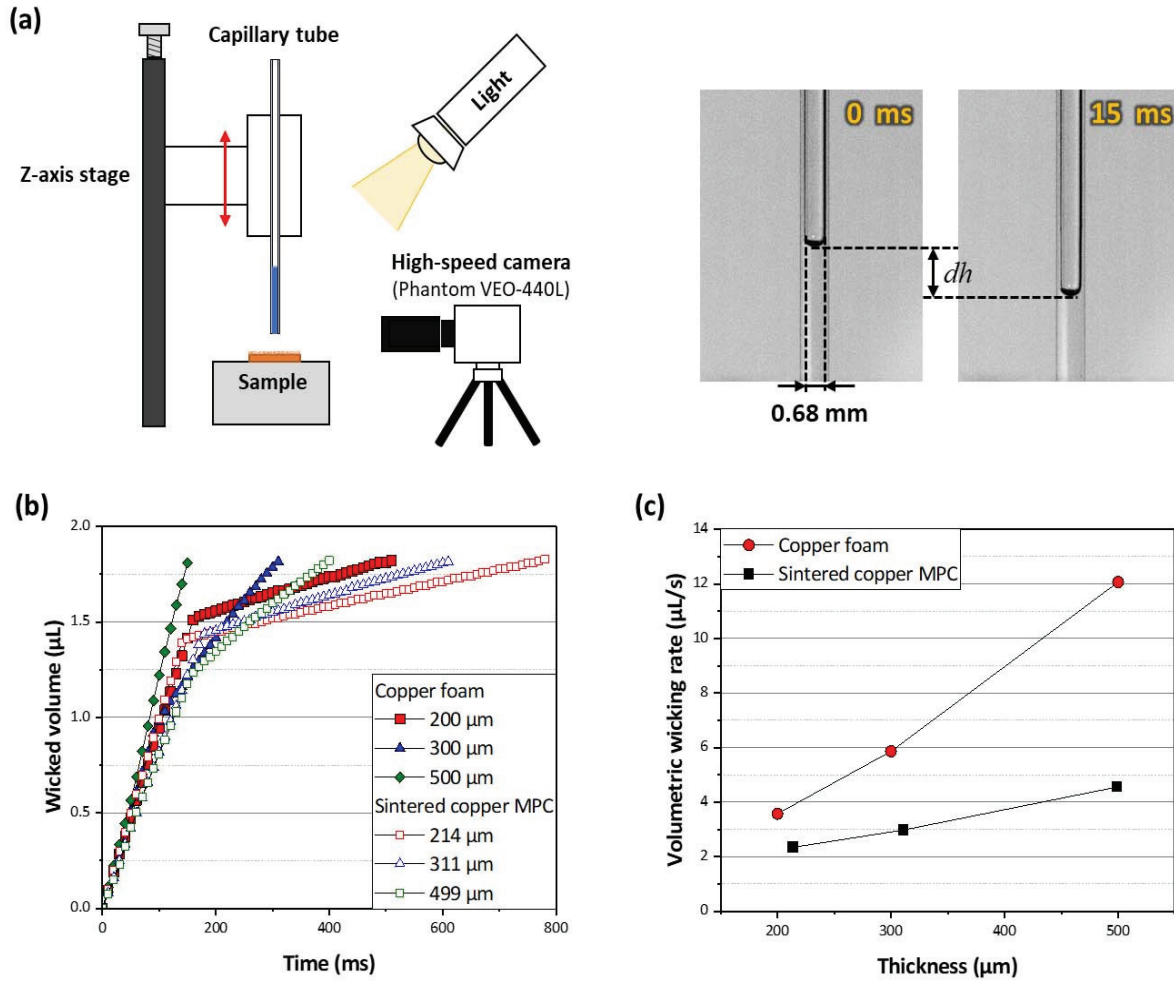


Fig. 4 Wickability test. (a) Schematic diagram and visualization, (b) Wicked volume over time, (c) Average volumetric wicking rate

실험 결과, 흡수된 체적은 초기에는 선형적인 증가를 보이다가 특정 지점에서 기울기가 완만해지는 양상을 보였으며, 이는 모세관 근처의 시편 표면이 충분히 젖고 난 뒤의 거동으로 해석된다.⁽¹⁹⁾ Fig. 4(c)는 각 조건에 대해 계산된 평균 체적 흡수율을 표면개질 방법 및 두께에 대한 그래프로 나타내었다. 모든 두께 조건에서 구리폼이 소결 구리 마이크로 다공성 코팅보다 우수한 흡수성능을 보였다. 이는 Fig. 3에서 확인된 바와 같이 구리폼이 소결 구리 마이크로 다공성 코팅에 비해 큰 기공을 가지기에 유체의 흐름에 대한 저항이 작기 때문으로 판단된다.⁽²⁰⁾ 또한 두께가 증가할수록 모세관 흡수성능이 향상되었으며, 이는 유체가 이동할 수 있는 유효 흡수 경로가 많아지기 때문으로 판단된다.

2.5 데이터 처리 및 불확도 분석

비등이 발생하는 표면 온도 T_w 와 열전달계수 h 는 다음과 같이 측정된 값으로부터 계산할 수 있다. 표면 온도의 계산은, 비등 면적과 세라믹 히터의 면적이 동일하고, 시편이 PEEK

재질과 에폭시로 단열되어 있으므로 비등 표면 방향으로의 1차원 전도 열전달을 가정하였다. 이에 따라 구리 블럭의 열저항을 고려한 식 (3)을 기반으로 계산하였으며, 열전대가 설치된 지점에서 측정된 온도 T_h , 구리의 열전도율 k , 세라믹 히터에 공급된 열유속 q'' , 온도 측정 지점과 표면 사이의 거리 L 을 사용하여 계산되었다.

$$T_w = T_h - q'' \cdot \frac{L}{k} \quad (3)$$

열전달계수 h 는 뉴턴의 냉각법칙인 식 (4)을 통해 계산되었으며, 공급된 열유속 q'' , 앞서 계산된 표면 온도 T_w , 그리고 챔버 내 작동유체에 설치된 두 곳의 열전대에서 측정된 평균값 T_{sat} 을 활용하였다.

$$h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}} \quad (4)$$

본 실험의 불확도는 Moffat⁽²¹⁾의 불확도 분석 방법에 따라

Table 2 Result of uncertainty analysis

	Wall temperature	Heat Flux	Heat transfer coefficient
Measured value	76.9~80.2 ℃	0.25~21.01 W/cm ²	0.93~71.98 kW/m ² · K
Absolute Uncertainty	0.20~0.21 ℃	0.002~0.17 W/cm ²	0.1~7.21 kW/m ² · K
Relative Uncertainty	0.25~0.26 %	0.015~3.6 %	6.11~21.3 %

계산되었으며, 식 (5)를 기반으로 하였다. 이에 대한 분석 결과는 Table 2에 정리하였다.

$$\delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \quad (5)$$

열전달계수의 상대 불확도는 최소 6.11, 최대 21.3% 범위에서 나타났으며, 최대 불확도는 저 열유속 영역에서 발생하였다. 그러나 열유속이 6 W/cm² 이상인 구간에서는 열전달계수의 상대 불확도가 15% 미만으로 잘 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

2.6 실험 과정

작동유체로는 비등점이 76℃인 3M사의 Novec HFE-7200을 사용하였으며, 모든 실험은 대기압 조건에서 포화상태를 유지한 채 수행되었다. 실험 전에는 챔버 내 작동유체를 약 1 시간 가량 끓여 내부의 불응축 가스를 제거한 후 실험이 진행되었다. 시편에 공급되는 열량은 세라믹 히터에 연결된 전원공급기를 통해 단계적으로 증가시켰으며, 이는 풀비등 실험에서 온도가 급격하게 상승하는 구간인 CHF까지 공급하였다. 각 열량 단계에서는 시편의 온도가 정상상태에 도달할 때까지 실험을 진행했으며, 정상상태는 시편 내부의 열전대의 평균 온도 편차가 0.1℃ 이하인 경우로 정의하였다. 실험 중에는 챔버 내에 작동유체의 하부, 상부 및 증기의 온도 총 세 곳의 온도를 확인함으로써, 실험 시 전 구간에서 포화상태가 유지되는지를 확인하였다. 측정된 T_{sat} 은 HFE-7200의 포화온도 환산식⁽²²⁾인 식 (6)을 통해 계산하여 $T_{sat, cal}$ 과 비교한 결과 최대 0.4℃ 이내의 오차를 보였다.

$$T_{sat, cal} = \frac{-3752.1}{\ln P - 22.289} - 273 \quad (6)$$

실험은 재현성 확인을 위해 총 3회 반복 측정하였으며, 3회 진행된 실험데이터의 평균값을 사용해 결과를 분석하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 2상 액침냉각의 풀비등 곡선

Fig. 5는 2상 액침냉각 챔버에서 수행된 결과로, 표면개질 방법 및 두께에 따른 풀비등 곡선을 나타낸다. 표면개질이 적용된 모든 시편은 매끈한 표면에 비해 낮은 과열도를 보였으며, 열전달계수와 CHF 모두 향상된 성능을 보였다. 열전달계수는 열유속 180 kW/m² 조건에서 두께 200 μm인 소결 구리 마이크로 다공성 코팅이 66.9 kW/m²K로 가장 높은 값을 보였으며, 이는 매끈한 표면 대비 약 70% 증가한 수치이다. CHF는 두께 500 μm의 구리폼에서 330 kW/m²로 가장 높은 값을 보였으며, 이는 매끈한 표면 대비 약 78% 향상된 결과이다. 전반적으로 소결 구리 마이크로 다공성 코팅은 열전달계수 향상에 효과적인 반면, 구리폼은 CHF 향상에 효과적인 것으로 나타났으며 그 정도는 표면개질의 두께에 따라 차이를 보였다.

두 표면개질 방법 모두 두께가 증가함에 따라 열전달계수는 감소하는 경향을 보였다. 구리폼의 경우, 두께가 증가함에 따라 공극률이 증가하면서 핵생성 지점의 수가 감소하고 폼 내부에서 기포가 합쳐짐에 따라 열전달 감소한 것으로 판단된다.⁽²³⁾ 소결 구리 마이크로 다공성 코팅은 두께가 증가함에 따라 공극률이 감소하지만, 얇은 두께에서도 충분히 많은 핵생성 지점이 있고 두께가 증가함에 따라 버블이 탈출하는 저항이 증가하기 때문에 열전달계수가 감소한 것으로 판단된다. CHF는 두 표면개질 모두 두께 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 Fig. 4(c)에서 확인된 바와 같이, 두 표면개질 모두 두께가 증가함에 따라 흡수성능이 증가하기 때문으로 판단된다. 흡수성능이 증가함에 따라 표면으로의 유체 공급이 개선되고, dryout을 지연시켜 결과적으로 CHF 증가된 것으로 확인할 수 있다.

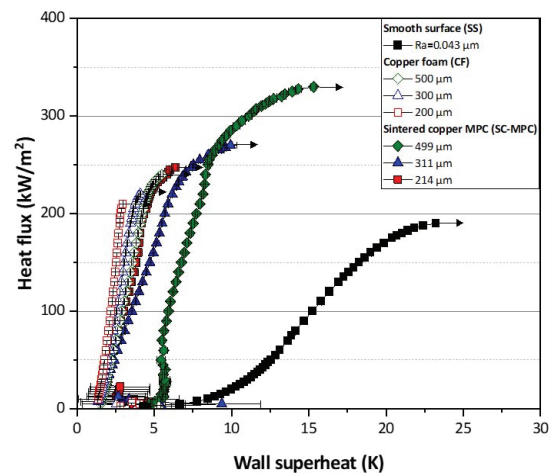


Fig. 5 Pool boiling curves of two-phase immersion cooling experiments

3.2 비등 가시화 및 토의

실험과 동시에 초고속 카메라를 이용해 가시화를 병행하여 수행하였다. 열전달계수는 소결 구리 마이크로 다공성 코팅 및 구리폼으로 표면 개질된 시편에서 매끈한 표면에 비해 큰 향상을 보였다. 이 차이를 분석하기 위해, 저 열유속에서 고 열유속까지의 가시화를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a-d)는 매끈한 표면, Fig. 6(e-h)는 구리폼, Fig. 6(i-l)는 소결 구리 마이크로 다공성 코팅 시편에서의 비등현상을 각각 나타낸다. 그 결과, 모든 구간에서 표면개질 샘플의 버블 생성과 비등이 매끈한 표면에 비해 활발히 일어남을 보였다. 이는 구리폼과 소결 구리 마이크로 다공성 코팅이 표면에 마이크로 다공성 구조를 형성하고 있어 내부의 기공은 많은 핵생성 지점(nucleation site)을 제공하기 때문이다.⁽²⁴⁾ 핵생성 지점이 많을수록 비등이 일어날 수 있는 곳이 증가하기 때문에 보다 향상된 열전달계수를 갖는다. 이와 같

은 구조적 특성으로 인해, 표면개질 샘플은 매끈한 표면에 비해 더 큰 열전달계수를 갖는 것으로 판단된다.

표면개질 샘플 간의 소결 구리 마이크로 다공성 코팅이 구리폼에 비해 더 높은 열전달계수를 갖는 이유를 가시화를 통해 확인할 수 있었다. Fig. 6(e)와 Fig. 6(i) 시편의 하단부 비교 결과, 소결 구리 마이크로 다공성 코팅이 구리폼에 비해 더 많은 곳에서 핵생성이 이루어진다. 이는 소결 마이크로 다공성 코팅은 상대적으로 작고 밀도 있는 기공을 제공하여 더 많은 핵생성 지점을 가지므로 열전달계수 향상에 효과적이다.

CHF는 구리폼, 소결 마이크로 다공성 코팅, 매끈한 표면 순서로 증가하는 경향을 보였다. 특히, 구리폼에서 높은 CHF 성능이 관찰되었으며, 이를 분석하기 위해 시편의 측면에서 가시화를 진행하였다. 두께 200 μm 의 구리폼을 150 W에서 10 ms 간격으로 촬영했으며, 이를 Fig. 7에 나타내었다. 수직 방향 배치와 $1 \times 1 \text{ inch}^2$ 의 비교적 큰 면적을 갖는 시편

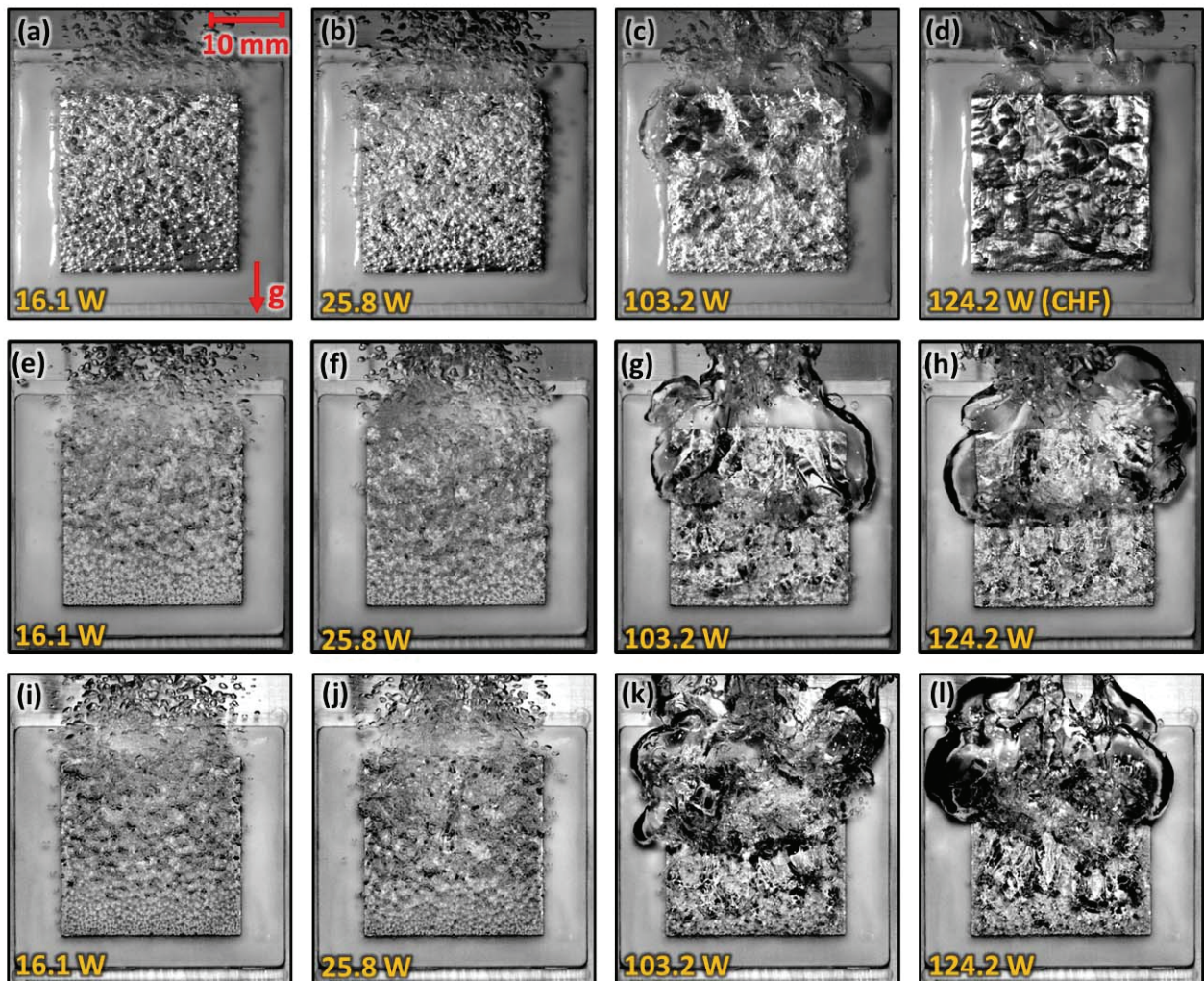


Fig. 6 Visualization of bubble behavior under different power levels. (a-d) Smooth surface, (e-h) Copper foam (200 μm / 130 ppi), (i-l) Sintered copper MPC(214 μm)

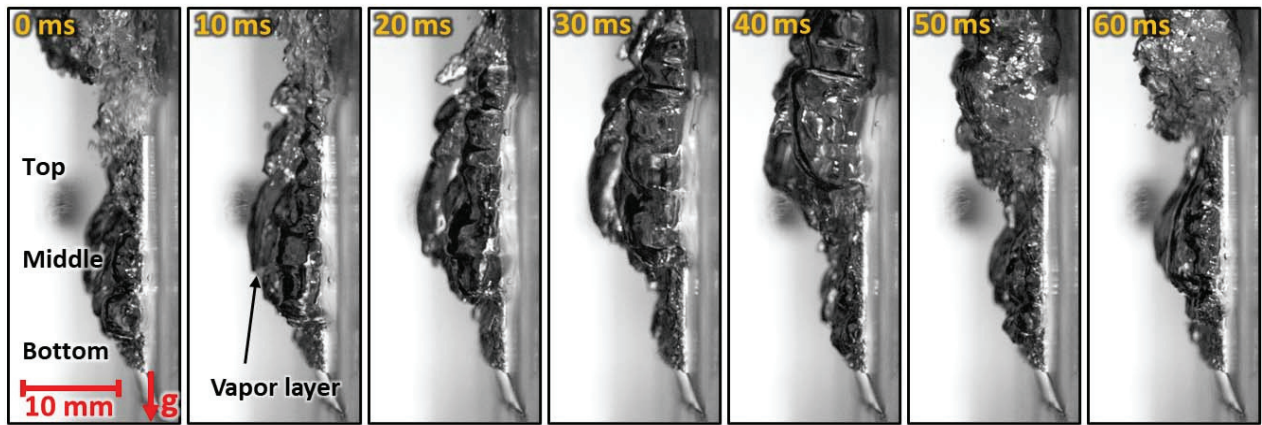


Fig. 7 Time-sequential visualization of bubble behavior at 150 W on copper foam(200 μm / 130 ppi)

특성상, Fig. 7에서는 하단부에서 생성된 기포가 부력에 의해 상단으로 올라가며, 중앙부와 상단부에서 새롭게 생성된 기포들과 합쳐져 주기적으로 증기층을 형성하는 과정을 확인할 수 있다. 이 증기층은 주기적으로 시편의 중단과 상단부를 덮으며 작동유체와의 직접적인 접촉을 방해하고, 유체의 공급을 제한한다. 반면, 하단부는 증기층의 영향을 상대적으로 적게 받아 작동유체의 안정적인 공급이 이루어지는 것으로 판단된다. 이러한 증기층의 주기적인 형성에 따른 유체 공급의 비균일성은 시편의 작동유체 공급 성능에 따라 온도차로 발생할 것으로 판단되며, 이를 분석하기 위해 추가적인 열전대를 삽입한 시편을 제작하여 후속 실험을 수행하였다.

3.3 시편 내 위치에 따른 열성능 분석

Fig. 8과 같이 시편의 중단부와 하단부 끝단에서 2 mm 떨어진 지점에 추가적인 열전대를 삽입하여 시편을 제작하였다. 구리폼 200 μm / 130 ppi, 소결 구리 마이크로 다공성 코팅 243 μm , 매끈한 표면 $R_a = 0.043 \mu\text{m}$ 표면을 갖는 시편을 추가 제작했으며, 이전과 동일한 조건으로 실험되었다. Fig. 9는 실험 결과의 풀비등 그래프이며, 표면개질 시편 간 차이를 더욱 명확히 비교하기 위해 150 kW/m^2 에서 250 kW/m^2 의 열유속 범위를 확대해 나타내었다. 매끈한 표면 시편은 중앙부와 중단부 모두 하단부에 비해 높은 과열도를 보였으며, 이는 상부 영역에 유체 공급 부족이 일어난다고 판단된다. 소결 구리 마이크로 다공성 코팅은 중단부와 하단부와 비슷한 과열도를 보였으나, 중앙부만 상대적으로 높은 과열도를 보였다. 이는 매끈한 표면에 비해 소결 구리 마이크로 다공성 코팅의 모세관 흡수력이 우수하여 증기층에 의해 유체 공급이 주기적으로 제한되는 상황에서도 유체로부터 비교적 거리가 가까운 중단부까지는 안정적인 유체 공급이 가능하지만, 거리가 비교적 먼 중앙부는 유체 공급이 원활하

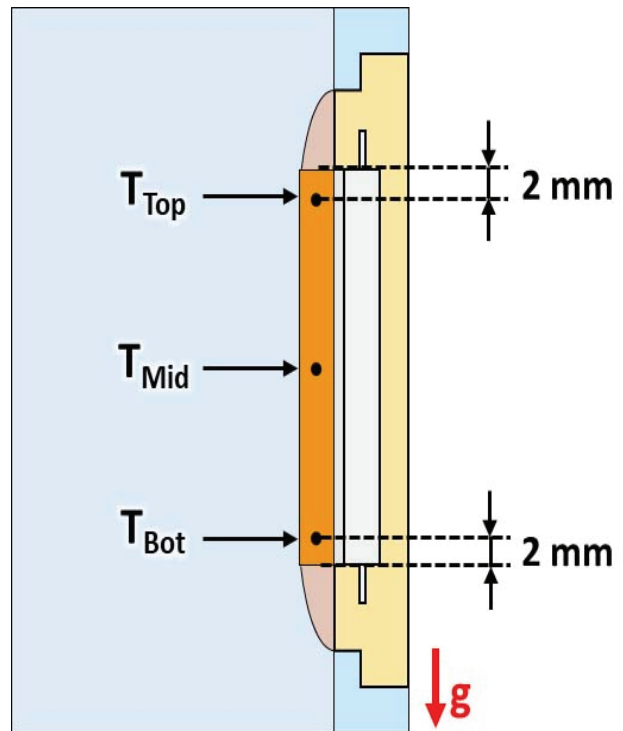


Fig. 8 Schematic of the test sample with three temperature measurement locations

지 않기에 중앙부가 다른 지점에 비해 열성능이 낮은 것으로 확인된다. 반면 구리폼은 고 열유속까지도 세 지점 간의 온도차가 미미한 결과를 보였으며, 이는 모세관 흡수력이 가장 우수하여 중앙부까지도 안정적인 유체 공급이 이루어졌기 때문이다. 결과적으로 증기층에 의해 작동유체 공급이 제한되는 조건에서도 구리폼, 소결 구리 마이크로 다공성 코팅, 매끈한 표면 시편 순서로 안정적인 유체 공급이 가능하다는 것을 의미한다. 따라서 구리폼은 높은 흡수성능을 바탕으로 고열유속 영역에서도 안정적인 유체 공급이 가능하기에 CHF 향상에 효과적임을 확인할 수 있다.

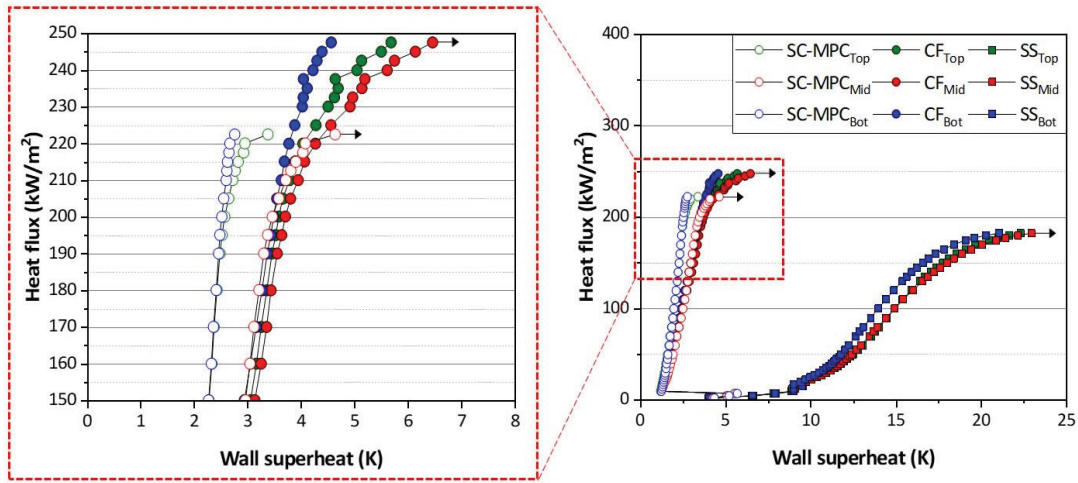


Fig. 9 Pool boiling curves of the test samples with three temperature measurement locations

4. 결 론

본 연구에서는 실제 2상 액침냉각 환경을 모사한 챔버를 제작하고, 다양한 표면개질 방법에 따른 열전달 특성을 실험적으로 분석하였다. 표면개질 방법으로는 구리폼과 소결 구리 마이크로 다공성 코팅을 적용했으며, 각각 세 가지 두께 (200, 300, 500 μm) 두께로 제작되었다. 제작된 시편과 비교를 위해 기준이 되는 매끈한 표면 시편까지 제작하여 실험하였다. 2상 액침냉각의 비등 열전달 성능을 비교를 위해 열전달계수와 CHF를 측정 및 계산했으며, 비등 가시화를 통해 표면개질 방법에 따른 비등 열전달 현상을 비교 분석하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

1) 구리폼과 소결 구리 마이크로 다공성 코팅은 매끈한 표면에 비해 각각 최대 705% 향상된 열전달계수와 최대 78% 향상된 CHF를 보였다. 소결 구리 마이크로 다공성 코팅은 열전달계수 향상에, 구리폼은 CHF 향상에 효과적인 것으로 확인되었다.

2) 두 표면개질 방법 모두 두께가 증가함에 따라 열전달계수는 감소하고, CHF는 증가하는 모습을 보였다. 구리폼에서는 두께 증가로 인한 공극률 증가와 이에 따른 핵생성 지점의 감소로 열전달계수가 감소한 것으로 판단되며, 소결 구리 마이크로 다공성 코팅은 버블 탈출 저항 증가하면서 열전달 성능이 감소한 것으로 판단된다. CHF는 두께가 증가함에 따라 향상된 흡수 성능으로 인해 작동유체의 공급이 고 열유속에서도 원활히 유지되었기 때문으로 판단된다.

3) 비등 가시화를 통해 표면개질 방법에 따른 기포의 거동을 분석한 결과, 소결 구리 마이크로 다공성 코팅은 더 작은 기공과 더 많은 핵생성 지점으로 인해 열전달계수 향상에 효과적이고, 구리폼의 경우 높은 흡수성능으로 인해 고 열유속까지도 안정적인 유체 공급이 가능하여 CHF 향상에 효과적인 모습을 보였다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 연구비 지원을 받았으며 한국에너지기술평가원의 에너지국제공동연구개발 프로그램 (과제번호: RS-2024-00436521)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- (1) Cho, J., Lim, T., & Kim, B. S., 2012, "Viability of datacenter cooling systems for energy efficiency in temperate or subtropical regions: Case study." *Energy and Buildings*, 55, pp. 189-197.
- (2) Murshed, S. S., & De Castro, C. N., 2017, "A critical review of traditional and emerging techniques and fluids for electronics cooling." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, pp. 821-833.
- (3) Ni, J., & Bai, X., 2017, "A review of air conditioning energy performance in data centers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, pp. 625-640.
- (4) Khalaj, A. H., & Halgamuge, S. K., 2017, "A Review on efficient thermal management of air- and liquid-cooled data centers: From chip to the cooling system." *Applied Energy*, 205, pp. 1165-1188.
- (5) Saini, M., & Webb, R. L., 2002, May, "Heat rejection limits of air cooled plane fin heat sinks for computer cooling." In *ITherm 2002. Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems* (Cat. No. 02CH37258) (pp. 1-8). IEEE.
- (6) Sun, X., Han, Z., & Li, X., 2022, "Simulation study on cooling effect of two-phase liquid-immersion cabinet in data center." *Applied Thermal Engineering*, 207, 118142.
- (7) Mudawar, I., 2001, "Assessment of high-heat-flux thermal

- management schemes.” *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 24(2), pp. 122–141.
- (8) Mudawar, I., 2013, “Recent advances in high-flux, two-phase thermal management.” *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 5(2), 021012.
- (9) Sajjad, U., Sadeghianjahromi, A., Ali, H. M., & Wang, C. C., 2021, “Enhanced pool boiling of dielectric and highly wetting liquids—A review on surface engineering.” *Applied Thermal Engineering*, 195, 117074.
- (10) Sajjad, U., Kumar, A., & Wang, C. C., 2020, “Nucleate pool boiling of sintered coated porous surfaces with dielectric liquid, HFE-7200.” *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 27(8).
- (11) Cao, Z., Wu, Z., & Sundén, B., 2019, “Heat transfer prediction and critical heat flux mechanism for pool boiling of NOVEC-649 on microporous copper surfaces.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 141, pp. 818–834.
- (12) Jones, B. J., McHale, J. P., & Garimella, S. V., 2009, “The influence of surface roughness on nucleate pool boiling heat transfer.”
- (13) Yu, C. K., & Lu, D. C., 2007, “Pool boiling heat transfer on horizontal rectangular fin array in saturated FC-72.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(17–18), pp. 3624–3637.
- (14) Manetti, L. L., Moita, A. S. O. H., de Souza, R. R., & Cardoso, E. M., 2020, “Effect of copper foam thickness on pool boiling heat transfer of HFE-7100.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 119547.
- (15) Rainey, K. N., & You, S. M., 2001, “Effects of heater size and orientation on pool boiling heat transfer from microporous coated surfaces.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(14), pp. 2589–2599.
- (16) Priarone, A., 2005, “Effect of surface orientation on nucleate boiling and critical heat flux of dielectric fluids.” *International Journal of Thermal Sciences*, 44(9), pp. 822–831.
- (17) Misale, M., Guglielmini, G., & Priarone, A., 2009, “HFE-7100 pool boiling heat transfer and critical heat flux in inclined narrow spaces.” *International Journal of Refrigeration*, 32(2), pp. 235–245.
- (18) Ahn, H. S., Park, G., Kim, J. M., Kim, J., & Kim, M. H., 2012, “The effect of water absorption on critical heat flux enhancement during pool boiling.” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42, pp. 187–195.
- (19) Rahman, M. M., Ridwan, S., Fehlinger, D., & McCarthy, M., 2020, “Wicking enhanced critical heat flux for highly wetting fluids on structured surfaces.” *Langmuir*, 36(32), pp. 9643–9648.
- (20) Byon, C., & Kim, S. J., 2012, “Capillary performance of bi-porous sintered metal wicks.” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(15–16), pp. 4096–4103.
- (21) Moffat, R. J., 1988, “Describing the uncertainties in experimental results.” *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1(1), pp. 3–17.
- (22) 3M™Novec™ 7200 Engineered Fluid technical data sheet, 3M Company, (https://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b40045142/)
- (23) Lim, H., Doh, S. Y., Choi, J., Moc, J., You, S. M., & Lee, J., 2024, “Pool boiling heat transfer enhancement using the micro-thick metallic foam surface in saturated water.” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 152, 107310.
- (24) Sajjad, U., Sadeghianjahromi, A., Ali, H. M., & Wang, C. C., 2020, “Enhanced pool boiling of dielectric and highly wetting liquids—a review on enhancement mechanisms.” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 119, 104950.