

열화상측정기술 응용 증기 챔버 내부 구조물 영향 평가

안은성* · 정재혁* · 정욱철*^{**,†}

Thermographic Investigation of the Influence of the Internal Structure on the Heat-Spreading Performance of a Vapor Chamber

Eun-sueng An*, Jaehyuk Jeong*, Wukchul Jeong*^{**,†}

Key Words : Vapor chamber(증기 챔버), Heat spreading performance(열확산 성능), Thermographic method(열화상측정기술), Internal Flow guide(내부 유동 가이드), Effective thermal conductivity(유효 열전도도)

ABSTRACT

In this study, the effect of flow-guide structures on the heat-spreading characteristics of a vapor chamber was systematically investigated using a non-contact thermographic method. The tested vapor chamber had external dimensions of 106 mm × 106 mm × 4 mm (length × width × thickness) and possessed a 1 mm thick wick on its bottom plate. Flow guides with expansion angles of 0°, 22.5°, and 45° were incorporated into the vapor space to control the flow of the vapor-phase working fluid and to enhance structural rigidity. Approximately 6.5 mL of distilled water, corresponding to approximately 130 % of the wick void volume, was charged into the evacuated vapor chamber. The heat-spreading characteristics of the vapor chamber were evaluated in terms of the temperature distribution and the cumulative effective thermal conductivity distribution, measured by non-contact thermographic camera. The vapor chamber exhibited a central region with a uniform temperature distribution and a high effective thermal conductivity within a radial distance of 3.5 cm from the center, whereas in the outer region, the accumulation of excess liquid-phase working fluid resulted in a rapid decrease in both temperature and cumulative effective thermal conductivity. The cumulative effective thermal conductivity increased with heat flux due to the higher mass flow rate of the working fluid at elevated heat fluxes. At a heat flux of 200 W cm⁻², the measured cumulative effective thermal conductivity reached 8 900 W m⁻¹ K⁻¹ ± 1 100 W m⁻¹ K⁻¹ at an approximately 95 % level of confidence, which corresponded to an approximately twenty-times higher value than that of copper. The heat-spreading performance of the vapor chamber decreased with increasing expansion angle of the flow guide, mainly due to greater contribution of conduction through the solid flow guide relative to convection of the vapor-phase working fluid.

- 기호설명 -

r : 반경 방향 거리
 r_i : 반경 방향 내측 거리
 r_o : 반경 방향 외측 거리
 H : 열확산 기기 두께
 ρ : 냉각수 밀도
 c_p : 냉각수 비열

V_{dnt} : 냉각수 체적유량
 $\Delta t_{\text{HS,rad}}$: r_o 및 r_i 사이 구간의 반경 방향 온도차
 $t_{\text{dnt,in}}$: 냉각 채널 입구에서의 냉각수 온도
 $t_{\text{dnt,out}}$: 냉각 채널 출구에서의 냉각수 온도
 Δt_{dnt} : 냉각 채널 입·출구에서의 냉각수 온도차
 Q_{diss} : 열확산율
 $k_{\text{eff,HS}}$: 열확산 기기 유효 열전도도

* 부경대학교 지능로봇공학과(Department of Intelligent Robot Engineering, Pukyong National University)

** 부경대학교 기계공학부(Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University)

† 교신저자, E-mail : wukchuljeong@pknu.ac.kr

- θ_{exp} : 유동 가이드 확장각
- U_{rep} : 반복도에 의한 불확도
- U_{cal} : 교정불확도
- U_{inst} : 공칭불확도
- U_c : 합성측정불확도

1. 서 론

최근 전자 시스템의 소형화 및 고성능화로 인해 전자기기 내부의 다양한 전자소자(예, IGBT, MMIC PA 등)는 최대 수백 $W\text{ cm}^{-2}$ 수준의 높은 열유속 환경에 노출되어 운전온도 상승에 의한 오작동 및 성능저하 등의 한계상황을 마주하고 있다. 이러한 문제는 열유속의 실질적 저감을 통해 해결될 수 있으며, 이는 고성능 열확산 소재 또는 기기의 적용을 통해 달성될 수 있다. 다만, 구리(Cu)나 알루미늄(Al)과 같은 기존 열확산 소재는 유한한 열전도도로 인해 열확산 성능에 일정한 한계를 가지므로, 최근 유체 상변화 및 유동을 이용하여 고성능 열확산을 달성할 수 있는 증기 챔버형 열확산 기기(이하, 증기 챔버)가 다양한 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 이러한 증기 챔버가 주로 사용되고 있는 분야는 고효율 LED[1], TRM(transmit-receive module)[2], 전기자동차의 전력반도체 모듈[3], 데이터 센터 서버 CPU[4] 등이 있다.

증기 챔버는 상변화 및 고속 대류 열전달 기반 피동형 열확산 장치로서, 내부는 액체상 작동유체를 머금을 수 있는 일정한 두께를 가지는 다공질 Wick과 증기상 작동유체가 유동할 수 있는 증기 유동 영역으로 구성된다. 증기 챔버 내부의 액체상 작동유체는 국부 열원이 부착된 증발부에서 증발하여 증발부와 저온 영역(응축부) 간 포화 증기압차에 의해 증발부에서 응축부로 유동한 후 응축된다. 응축된 액체상 작동유체는 다공질 Wick에서 발생된 모세관 압력차를 통해 다시 증발부로 회귀하여 연속 순환을 통한 열확산 기능을 수행한다. Fig. 1은 증기 챔버형 열확산 기기의 구조 및 작동유체 유동 방향을 보여준다. 이러한 증기 챔버는 일반적으로 증기 유동 영역에 증기 유동 개선 및 구조적 강성 확보를 위한 내부 구조물이 설치되는데, 이러한 내부 구조물의 형상에 따라 열확산 성능이 영향 받는 특성을 가진다. 이와 같이 증기 챔버 내부 구조물 형상에 따른 열확산 성능 변화를 다룬 대표적 기존 연구를 요약하면 다음과 같다[4-9].

G. Zhou 등[4]은 기둥 형태의 내부 구조물(stud)을 적용한 $148\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (가로 × 세로 × 두께) 크기의 구리 재질 증기 챔버를 제작하였으며, 해당 증기 챔버가 약 7.6 W cm^{-2} 의 열유속에서 약 0.047 K W^{-1} 의 열저항을 가짐을 보였다. 또한, M. Muneeshwaran 등[5]은 다양한 개수로 기둥 형태의 내부 구조물(stud)을 배치한 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$ (가로 × 세로 × 두께) 크기의 구리 재질

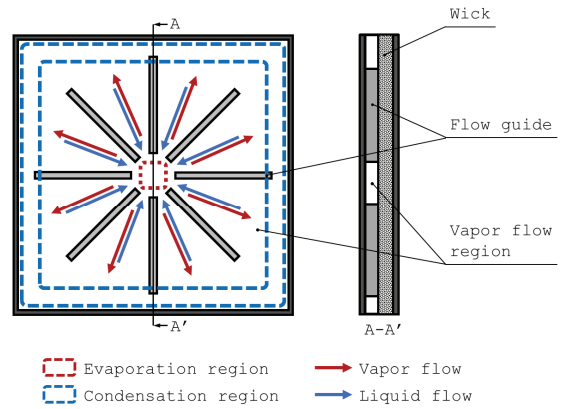


Fig. 1 Schematic of the vapor chamber-type heat spreader

증기 챔버를 제작하였으며, 내부 구조물의 최적 배치 시 약 9 W cm^{-2} 의 열유속에서 약 0.19 K W^{-1} 의 최소 열저항을 가짐을 보였다. 이는 동일한 기둥 개수와 다른 배치를 갖는 조건 대비 약 10 % 감소된 열저항이며, 해당 증기 챔버는 약 200 % 증가한 임계 열유속을 가졌다.

B. Liu 등[6]은 내부에 선형 구조물(strip pillar)을 적용한 $300\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ (가로 × 세로 × 두께) 크기의 스테인리스 스틸 재질 증기 챔버를 제작하였으며, 해당 증기 챔버는 약 7.1 W cm^{-2} 열유속에서 약 0.13 K W^{-1} 의 열저항을 가졌다. M. Wang 등[7]은 방사형 홈 구조(radial groove)를 적용하여 $120\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 7.5\text{ mm}$ (가로 × 세로 × 두께) 크기의 구리 재질 증기 챔버를 제작하였으며, 해당 증기 챔버는 약 26.7 W cm^{-2} 의 열유속 조건에서 약 0.07 K W^{-1} 의 열저항을 달성하였다. W. Liu 등[8]은 내부에 프랙탈 망(fractal network) 구조물을 적용한 $68\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ (직경 × 두께) 크기의 구리 재질 증기 챔버를 제작하였으며, 해당 증기 챔버가 약 60 W cm^{-2} 의 열유속에서 약 0.39 K W^{-1} 의 열저항을 가짐을 보였다.

F. Yao 등[9]은 증발부에 나뭇가지 형상의 유로(tree shaped groove)를 형성하는 내부 구조물을 가진 $50\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ (직경 × 두께) 크기의 황동 재질 증기 챔버를 제작하였으며, 나뭇가지 형상의 유로를 사용한 증기 챔버의 경우 약 25 W cm^{-2} 의 동일 열유속에서 약 0.22 K W^{-1} 의 열저항을 달성하였다. 반면에 내부 구조물을 사용하지 않은 증기 챔버는 동일 조건에서 약 0.25 K W^{-1} 의 열저항을 가져 증발부 내 유로 형성에 따른 열확산 성능이 향상됨을 보였다.

이와 같이 기존 연구들은 증기 챔버의 내부 구조물 형상 및 배치가 증기 유동 제어를 통해 증기 챔버의 열확산 성능에 영향을 미치는 중요한 인자임을 보여준다. 특히, 증기 챔버의 내부 구조물 형상에 따른 증기 유동 영역 및 내부 구조물 간 상대 체적 변화는 증기 챔버의 열확산 성능에 미치는 작동유체 대류 및 구조물 전도 간 상대 효과의 변화를 야기하여 증기 챔버의 열확산 성능에 영향을 미칠 것으로 예상

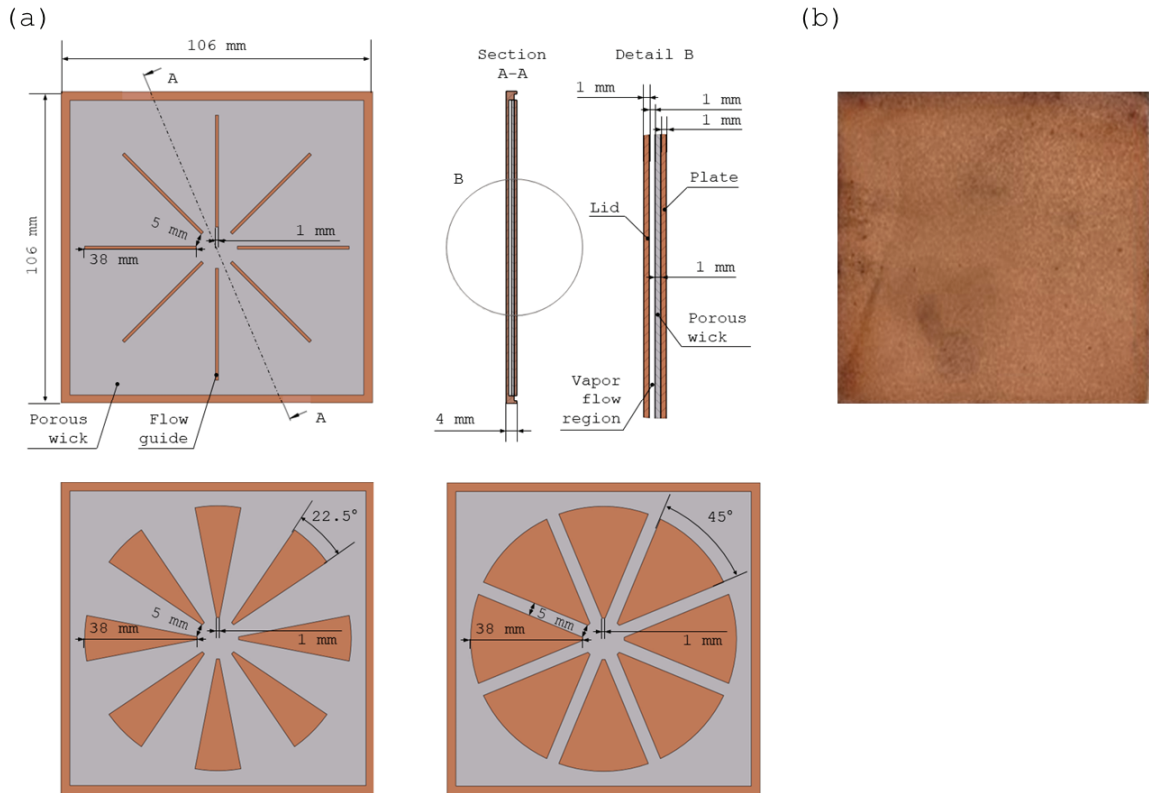


Fig. 2 (a) Internal structure of the vapor chamber with different types of flow guides and (b) photograph of the sintered wick

된다.

이러한 증기 챔버는 작동유체의 분포, 작동유체 주입비 및 시험 열확산 거리 등에 의해 열확산 성능 평가 결과가 영향 받을 수 있으므로, 정확한 열확산 성능 평가를 위해서는 증기 챔버의 열확산 평면 상 다수 지점의 온도를 측정하는 것이 요구된다. 이를 위한 온도측정기술은 크게 접촉식 온도측정기술[4-10]과 비접촉 열확산측정기술로 나뉜다[11-13]. 일반적으로 증기 챔버의 표면 온도측정에 사용되는 접촉식 온도측정기술은 측정기와 온도측정 대상과의 직접 접촉을 통해 온도를 측정하며, 다수 지점의 온도측정 시 측정기 설치에 물리적 한계가 발생하거나 시험 대상의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 반면, 비접촉 열확산측정기술은 다수 지점 온도의 동시 측정이 가능하다는 장점이 있으나, 접촉식 온도측정 기술 대비 측정불확도가 크다는 한계를 갖는다[14].

증기 챔버의 열확산 성능은 열확산 평면 상 온도 분포의 직접 비교를 통해 정성적으로 평가할 수 있으나, 정량적 열확산 성능 평가를 위해서는 열확산 평면 상 특정 거리에서 발생한 온도차로 정의된 열확산 지표를 이용하는 것이 적절하다. 증기 챔버의 정량적 열확산 성능 지표로는 열저항 (thermal resistance)[4-5, 8-9, 11-12]과 유효 열전도도 (effective thermal conductivity)[7, 10, 13]가 주로 사용된다. 이 중 열저항은 특정 기기의 열확산율(heat spreading

rate)에 따라 발생하는 온도차에 대한 정보를 제공해 주지만, 서로 다른 크기나 형상을 가지는 열확산 기기나 재료 간 비교가 어렵다는 한계를 가진다. 반면, 유효 열전도도는 정의상 시험 대상의 형상 특성이 반영되므로 기존 열확산 기기 또는 소재와 정량적 열확산 성능 비교가 용이하다는 장점이 있어 열확산 기기의 정량적 성능 지표로서 적절한 특성을 가진다.

고성능 열확산 특성을 갖는 증기 챔버의 온도차 기반 열확산 성능 지표 평가는 증기 챔버의 열확산 평면 상 온도차 분포의 정밀 측정이 요구된다. 이를 위해 사용할 수 있는 온도측정기술 중 접촉식 온도측정기술은 정밀한 온도 측정이 가능하나 다수 지점 측정의 물리적 제약 및 간섭 발생의 한계를 가지며, 비접촉 열확산측정기술의 경우 다지점 온도측정에는 적절하나 측정된 온도의 측정불확도가 비교적 크다는 단점이 있다. 이러한 상황에서 증기 챔버의 열확산 평면 상 온도차를 단일 열확산 측정기를 이용하여 측정할 경우, 계통오차에 의한 불확도 요소가 상관관계에 의해 상쇄되어 반복도에 의한 불확도만 측정불확도에 기여하게 되므로, 비접촉 열확산측정기술을 사용하더라도 보다 정밀한 온도차 측정 및 온도차 기반 열확산 성능 평가가 가능해진다[15].

이에 본 연구에서는 서로 다른 형상의 내부 증기 유동 가이드를 적용한 106 mm × 106 mm × 4 mm(가로 × 세로 × 두께) 크기의 구리 재질 증기 챔버 세 기를 제작하고, 50

$W\text{ cm}^{-2}$ 부터 200 W cm^{-2} 까지의 열유속 범위에서 증기 유동 가이드 형상 변화에 따른 증기 챔버의 열확산 성능 변화를 열확산 측정기술을 이용하여 평가하였다. 본 연구에서 제작한 증기 챔버의 정량적 열확산 성능은 유효 열전도도를 이용하여 평가하였으며, 증기 챔버의 열확산 평면 상 온도 분포는 단일 열확산 측정기를 이용하여 측정하였다.

본 논문은 본 연구에서 시험한 증기 챔버형 열확산 기기의 구조를 2장에서 소개하고, 해당 증기 챔버의 열확산 성능 평가를 위한 실험장치 구성 및 방법을 3장에 설명한다. 본 연구에서 시험한 영향인자 변화에 따른 증기 챔버의 열확산 성능 변화 시험결과는 4장에서 제시하고, 마지막으로 본 연구의 결론을 5장에 요약하여 제시한다.

2. 증기 챔버형 열확산 기기

본 연구에서는 $106\text{ mm} \times 106\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ (가로 \times 세로 \times 두께) 크기의 구리 재질 증기 챔버를 제작하였다. 본 연구에서 제작한 증기 챔버는 각각 1 mm 두께의 상판과 하판, 그리고 그 사이에 층별로 배치된 증기상 및 액체상 작동유체 유동을 위한 각각 1 mm 두께의 증기 유동 영역 및 다공질 워셔로 구성되었다(Fig. 2(a)). 특히, 액체상 작동유체 회귀가 이루어지는 다공질 워셔는 증기 챔버 하판에 평균 입경 약 $100\text{ }\mu\text{m}$ 의 구리분말을 약 1 mm 두께로 소결 부착하여 제작하였다. 작동유체는 증류수를 사용하였으며, 증발부로의 연속적 액체상 작동유체 공급 및 워셔 마름(dry out) 억제를 위해 워셔 기공 체적 대비 작동유체 체적비로 정의된 작동유체 주입비 약 1.3에 해당하는 체적인 약 6.5 mL를 주입하였다. 이와 같은 작동유체 주입비는 본 연구에서 시험한 증기 챔버의 내부 구조물 형상 변화에 따른 증기 챔버 내부 체적 변화에 의한 작동유체 분포 특성 변화 영향을 제한하기 위한 필요 최소량으로 선정하였다[10].

본 연구에서 제작한 증기 챔버는 내부 구조물로 증기상 작동유체 유동 제어 및 구조적 강성 제공을 위한 방사형 유동 가이드를 설치하였다. 특히, 본 연구는 이와 같은 유동 가이드의 형상 변화에 따른 증기 챔버의 열확산 성능 변화를 시험하기 위해 중앙으로부터 서로 다른 확장각(θ_{exp})을 갖는 세 가지 형상의 유동 가이드를 증기 챔버의 상판에 가공하였다. Fig. 2(a)는 본 연구에서 제작한 증기 챔버의 내부 유동 가이드 형상을 보여준다. Fig. 2(a)에 도시된 바와 같이 본 연구는 중앙부 폭 약 1 mm를 가지는 유동 가이드에 대해 0° , 22.5° , 45° 의 반경방향 확장각을 적용한 세 가지 구조를 적용하여 증기 챔버를 제작하였으며, 해당 내부 구조물의 형상 변화가 증기 챔버의 열확산 성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 특히, 본 연구는 증기 유동 영역 내 내부 구조물 점유 체적 변화에 따른 증기 유동 대류 효과와 내부 구조물 전도 효과 간 상대 크기 변화의 영향을 평가

Table 1 Variation in solid fraction of the flow guide for different expansion angles

	Flow guide expansion angle(θ_{exp}) $^\circ$		
	0	22.5	45
Solid fraction of the vapor flow region	0.03	0.23	0.45

하고자 하였으며, Table 1은 유동 가이드의 확장각에 따른 내부 구조물의 증기 유동영역 내 점유 면적 비율을 정리하여 보여준다.

3. 실험 장치 구성 및 방법

본 연구에서는 증기 챔버의 열확산 평면 상 온도 분포 및 반경 방향 온도차 분포를 측정하기 위해 비접촉 열확산 측정 기술을 이용하였으며, 정밀한 온도 분포 및 반경 방향 온도차 측정을 위해 약 40 mK의 온도 민감도와 약 1 K(약 95 % 신뢰의 수준)의 교정불확도를 갖는 단일 복사열 영상 측정기(thermographic camera)를 사용하였다. 이때 열확산 평면 온도의 정확한 측정을 위해, 약 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 에서 $12\text{ }\mu\text{m}$ 까지의 파장대역에서 0.95 ± 0.02 의 분광 방사율(spectral emissivity)을 갖는 고평사율 도료를 증기 챔버의 열확산 평면에 도포하였다.

본 연구는 증기 챔버의 정량적 열확산 성능 지표로 유효 열전도도(effective thermal conductivity)를 사용하였다. 본 연구에서는 원통 좌표계 1차원 열전도 방정식으로 정의된 유효 열전도도를 사용하였으며, 증기 챔버의 전반적인 열확산 성능을 평가하기 위해 내측 반경 거리(r_i)를 0.5 cm로 고정하고 외측 반경 거리(r_o) 증가에 따라 계산된 누적 유효 열전도도를 평가하였다. 본 연구에서 사용한 유효 열전도도 측정 모델과 불확도 전파식은 아래의 식 (1)부터 (3)과 같이 표현된다. Fig. 3은 열확산 기기의 유효 열전도도 결정을 위해 필요한 측정량들의 기하학적 정의를 도시한 개략도를 보여준다.

$$\frac{k_{\text{eff,HS}}}{2\pi H \Delta t_{\text{HS,rad}}} = \dot{Q}_{\text{diss}} \ln(r_o/r_i) = (\rho \dot{V} c_p)_{\text{clnt}} \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi H} \frac{\Delta t_{\text{clnt}}}{\Delta t_{\text{HS,rad}}} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{diss}} = (\rho c_p)_{\text{clnt}} \dot{V}_{\text{clnt}} \quad (2)$$

$$U^2(k_{\text{eff,HS}}) = \left(\frac{k_{\text{eff,HS}}}{V_{\text{clnt}}} \right)^2 U^2(V_{\text{clnt}}) + \left\{ \frac{k_{\text{eff,HS}}}{r_o \ln(r_o/r_i)} \right\}^2 U^2(r_o) + \left\{ -\frac{k_{\text{eff,HS}}}{r_i \ln(r_o/r_i)} \right\}^2 U^2(r_i) + \left(\frac{k_{\text{eff,HS}}}{\Delta t_{\text{clnt}}} \right)^2 U^2(\Delta t_{\text{clnt}}) + \left(-\frac{k_{\text{eff,HS}}}{\Delta t_{\text{HS,rad}}} \right)^2 U^2(\Delta t_{\text{HS,rad}}) + \left(-\frac{k_{\text{eff,HS}}}{H} \right)^2 U^2(H) \quad (3)$$

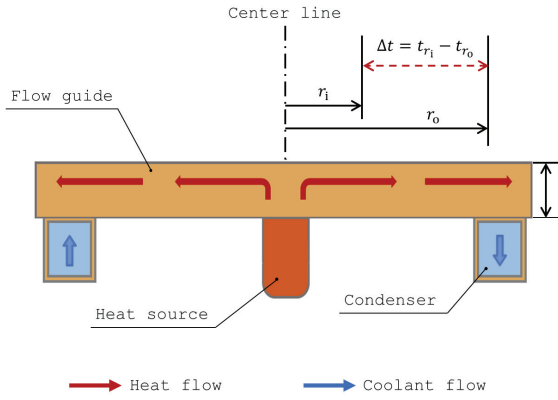


Fig. 3 Dimensional parameters for the determination of the effective thermal conductivity

본 연구에서는 반경 방향 1차원 열확산 환경을 모사하기 위해 열접촉 면적 약 1 cm^2 ($1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$)를 가지는 카트리지 히터가 삽입된 구리 블록을 증기 챔버 바닥면 중앙에 땀 (soldering) 부착하였으며, 구리 블록의 온도가 시험 한계 온도인 약 $125 \text{ }^\circ\text{C}$ 를 초과하는 경우 실험을 중지하였다. 증기 챔버의 확산열 방출을 위해 본 연구는 증기 챔버 외곽 바닥면에 폭 1 cm 의 구리 재질 냉각수 유동 채널(이하 냉각 채널)을 부착하였으며, 냉각 채널에는 약 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 증류수를 약 1.5 L min^{-1} 의 유량으로 지속 공급하였다. 이와 같은 구성을 통해 증기 챔버 중앙에 부착된 국부 열원에서 공급된 열이 증기 챔버 외곽으로 반경 방향 확산이 일어나도록 하였다. 증기 챔버와 같은 열확산 기기는 열을 흡수하는 영역과 방출하는 영역을 상단과 하단 영역으로 나누어 설치하는 것이 일반적이지만, 본 연구에서는 증기 챔버의 열확산 성능을 열확산 평면 상 열확산 측정을 통해 평가하기 위해 집중 열원과 냉각 채널을 하단 영역으로 설치하였다. Fig. 4는 이와 같은 증기 챔버의 열원 및 냉각 채널의 구성을 보여준다.

아울러, 본 연구는 유효 열전도도 평가를 위해 요구되는 열확산율(\dot{Q}_{diss}) 측정을 위해 냉각 채널에 공급되는 냉각수 유량(\dot{V}_{dnt})과 냉각 채널 입구 및 출구에서의 냉각수 온도변화(Δt_{dnt})를 측정하였다. 식 (2)는 본 연구에서 측정한 열확산율의 측정 모델을 보여준다. 냉각수 유량은 측정값의 약 0.26%에 해당하는 상대 교정불확도를 갖는 용적식 유량계 (positive displacement-type flowmeter)를 이용하여 측정하였다. 냉각수 온도변화는 약 $0.06 \text{ }^\circ\text{C}$ (약 95% 신뢰의 수준)의 교정불확도를 갖는 두 개의 산업용 백금 저항 온도계(industrial platinum resistance thermometer, IPRT)를 사용하여 측정하였다. Fig. 5는 본 연구에서 사용한 증기 챔버 열확산 성능 시험장치의 개략도를 보여준다.

본 연구에서는 50 W cm^{-2} 부터 200 W cm^{-2} 까지의 열유속 범위에서 각각 0° , 22.5° , 45° 의 확장각을 갖는 유동 가

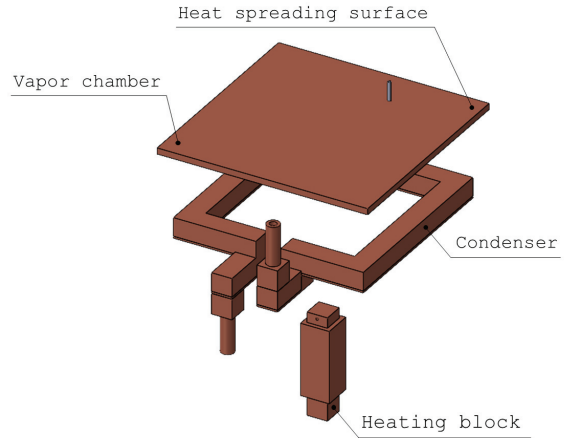


Fig. 4 Configuration of the heat source and the heat sink

이드 적용 증기 챔버에 대해 유효 열전도도 변화를 측정하여, 증기 챔버 내부 구조물이 열확산 성능에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 위해 본 연구는 시험 열부하에서의 정상상태 반경 방향 온도 분포 및 냉각수 온도 변화와 유량을 총 5회 반복 측정하였으며, 온도 분포 및 유효 열전도도는 약 95% 신뢰의 수준으로 측정불확도를 평가하였다. Table 2는 불확도 추정 결과의 예시로서 열유속 200 W cm^{-2} , 유동 가이드 확장각 0° 의 증기 챔버에서 측정된 누적 유효 열전도도의 불확도 총괄표 및 항목별 기여도 분석을 보여준다.

4. 결과 및 논의

4.1 시험 증기 챔버의 일반적 열확산 특성

Fig. 6은 확장각 0° 의 유동 가이드를 적용한 증기 챔버에 대해 열유속 200 W cm^{-2} 에서 측정한 열확산 평면 상 온도 분포 및 누적 유효 열전도도 분포를 보여준다. Fig. 6에도

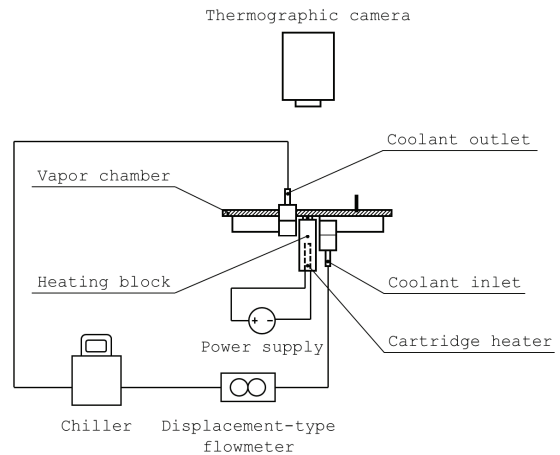


Fig. 5 Schematic of the test set-up

Table 2 Uncertainty budget of the cumulative effective thermal conductivity at a heat flux of 200 W cm^{-2}

Factor	Value	Unit	Sensitivity coefficient	Contribution / $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Impact/ %
Coolant flowmeter uncertainty					
$U_{rep}(V_{clnt})$	5.9×10^{-7}	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$	3.5×10^8 $\text{W s m}^4 \text{ K}$	244	5.17
$U_{cal}(V_{clnt})$	6.3×10^{-7}	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$		22.2	0.04
$U_{mea}(V_{clnt})$	3.6×10^{-7}	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$		127	1.40
Outer radius uncertainty					
$U_{mea}(r_o)$	1.0×10^{-3}	m	1.3×10^3 $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	1.31	0.00
Inner radius uncertainty					
$U_{mea}(r_i)$	1.0×10^{-3}	m	9.1×10^3 $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	9.14	0.01
Coolant temperature difference uncertainty					
$U_{rep}(\Delta t_{clnt})$	3.5×10^{-2}	K	4.7×10^3 $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$	165	2.35
$U_{cal}(t_{clnt.in})$	6.0×10^{-2}	K		283	6.94
$U_{cal}(t_{clnt.out})$	6.0×10^{-2}	K		283	6.94
Radial temperature difference uncertainty					
$U_{rep}(\Delta t_{HS.rad})$	1.8×10^{-1}	K	5.1×10^3 $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-2}$	914	72.9
Thickness uncertainty					
$U_{mea}(H)$	1.0×10^{-4}	m	2.2×10^6 $\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$	222	4.28
Cumulative effective thermal conductivity uncertainty					
$U_c(k_{eff.HS})$	1074	$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$			1.00

시된 바와 같이 증기 챔버는 증양부를 기준으로 일정 반경 거리에 걸쳐 균일한 온도 분포와 높은 유효 열전도도를 가지는 영역이 존재함을 확인할 수 있다. 이는 국부 열원이 위치한 증양부 밖에서 증발한 증기상 작동유체가 저온 응축부가 위치한 외곽부로 반경 방향 고속 유동하며 효과적 열확산을 달성하였기 때문이다. 특히, 균일 온도장으로 대표되는 영역($r \leq 3.5 \text{ cm}$)에서 측정된 누적 유효 열전도도가 약 $8900 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1} \pm 1100 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (약 95 % 신뢰의 수준)이라는 점에서 본 연구에서 시험한 증기 챔버는 구리나 알루미늄과 같은 기존 열확산 소재 대비 크게 향상된 열확산 특성을 가짐을 확인할 수 있다. 다만, 증기 챔버 외곽($r > 3.5 \text{ cm}$)에서 온도와 누적 유효 열전도도가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 외곽의 기공 체적을 채우고 남은 과량의 액체상 작동유체가 냉각 채널이 위치한 저온 응축부에 집중 분포하여 증기상 작동유체의 접근을 차단하였기 때문이다.

증기 챔버는 국부 열원이 위치한 중심부에서 저온 외곽부로 열확산이 이루어지므로 최외곽 영역에서 유효 열전도도

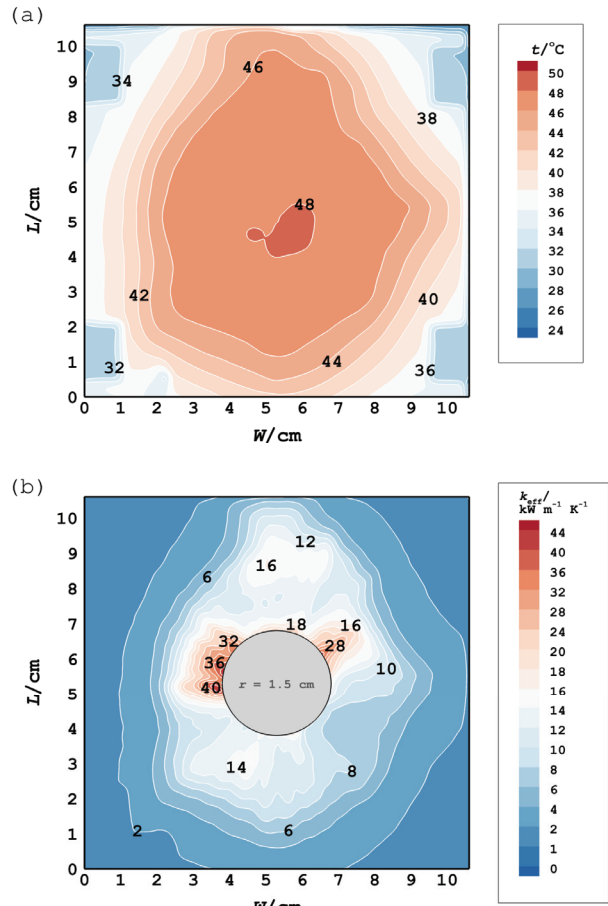


Fig. 6 Distributions of the (a) temperature, (b) cumulative effective thermal conductivity at a heat flux of 200 W cm^{-2} . Flow guide expansion angle: 0°

를 평가하는 것이 적절하나, 위에서 언급한 바와 같이 증기 챔버의 최외곽 냉각 채널 근방에서는 과량 액체상 작동유체의 점유 영향으로 누적 유효 열전도도가 급격히 감소하는 특성을 갖는다. 이에 본 연구에서는 과량 액체상 작동유체 분포 영향을 배제하기 위해 반경 거리 3.5 cm 지점에서 측정된 누적 유효 열전도도를 이용하여 영향인자 변화에 따른 증기 챔버의 열확산 성능 변화를 평가하였다.

Fig. 7은 확장각 0° 의 유동 가이드를 적용한 증기 챔버에 대해 열유속을 50 W cm^{-2} 에서 200 W cm^{-2} 까지 증가시키며 측정된 증기 챔버의 열확산 평면 상 온도 분포 및 이에 따른 누적 유효 열전도도 분포를 보여준다. Fig. 7이 도시하는 바와 같이, 열유속이 증가할수록 증기 챔버의 열확산 평면 상 온도가 전체적으로 상승하며 균일한 온도 분포 영역이 확장하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 누적 유효 열전도도 분포에서도 열유속이 증가함에 따라 높은 유효 열전도도를 갖는 영역이 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 열유속 증가에 따라 증가하는 작동유체의 질량 유량 및 증기 유속에 의해 증기 챔버의 열확산 성능이 향상되었기 때문이다.

다만, Fig. 7에 보이듯이 증기 챔버 증양부에서 동일 반

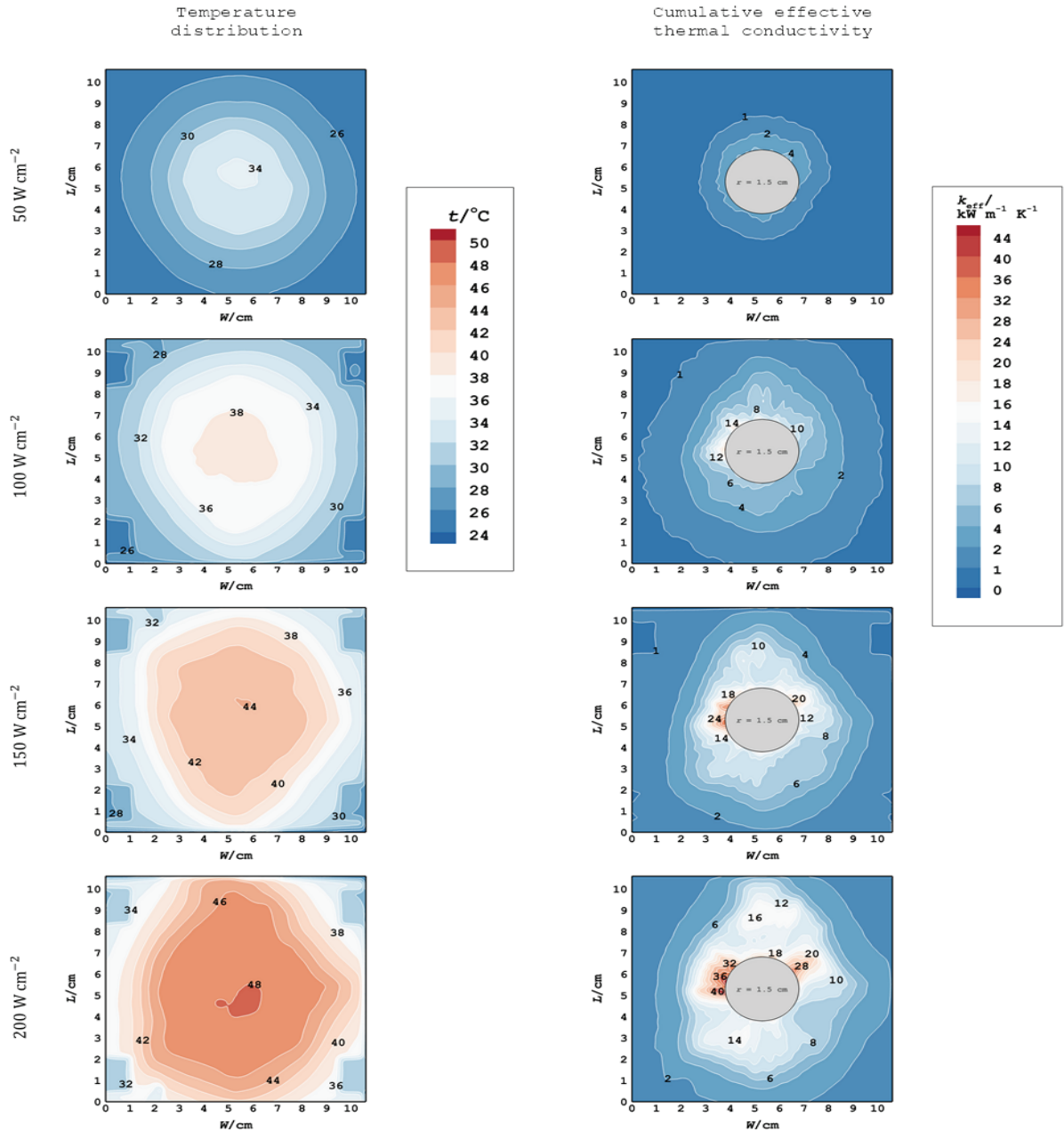


Fig. 7 Variations in the distributions of temperature and cumulative effective thermal conductivity with increasing heat flux from 50 W cm^{-2} to 200 W cm^{-2} (from top to bottom with an increment of 50 W cm^{-2}). Flow guide expansion angle: 0°

경 거리 내에서도 측정 위치에 따라 온도 분포와 누적 유효 열전도도 분포에 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 증기 챔버 외곽에 부착된 냉각 채널의 형상 및 냉각수의 온도 변화에 따라 발생한 작동유체의 비대칭 분포에 의해 발생한 것으로 보인다.

4.2 유동 가이드 형상 변화 영향

본 연구는 내부 유동 가이드의 형상 변화에 따른 영향을 확인하기 위해 서로 다른 확장각을 가지는 세 가지 유동 가

이드(확장각: 0° , 22.5° , 45°)를 적용한 증기 챔버에 대해 열확산 평면 상 온도 분포, 누적 유효 열전도도 분포를 평가 하였다. Fig. 8과 9는 각각 확장각 22.5° , 45° 의 유동 가이드를 적용한 증기 챔버에 대해 열유속을 50 W cm^{-2} 에서 125 W cm^{-2} 까지 증가시키며 측정된 증기 챔버의 열확산 평면 상 온도 분포 및 이에 따른 누적 유효 열전도도 분포를 보여준다. 다만, 확장각 22.5° 및 45° 를 가지는 유동 가이드를 적용한 증기 챔버는 150 W cm^{-2} 이상의 열유속에서 히터 삽입 구리 블록의 온도가 시험 상한을 초과하여 시험이 중단되었다.

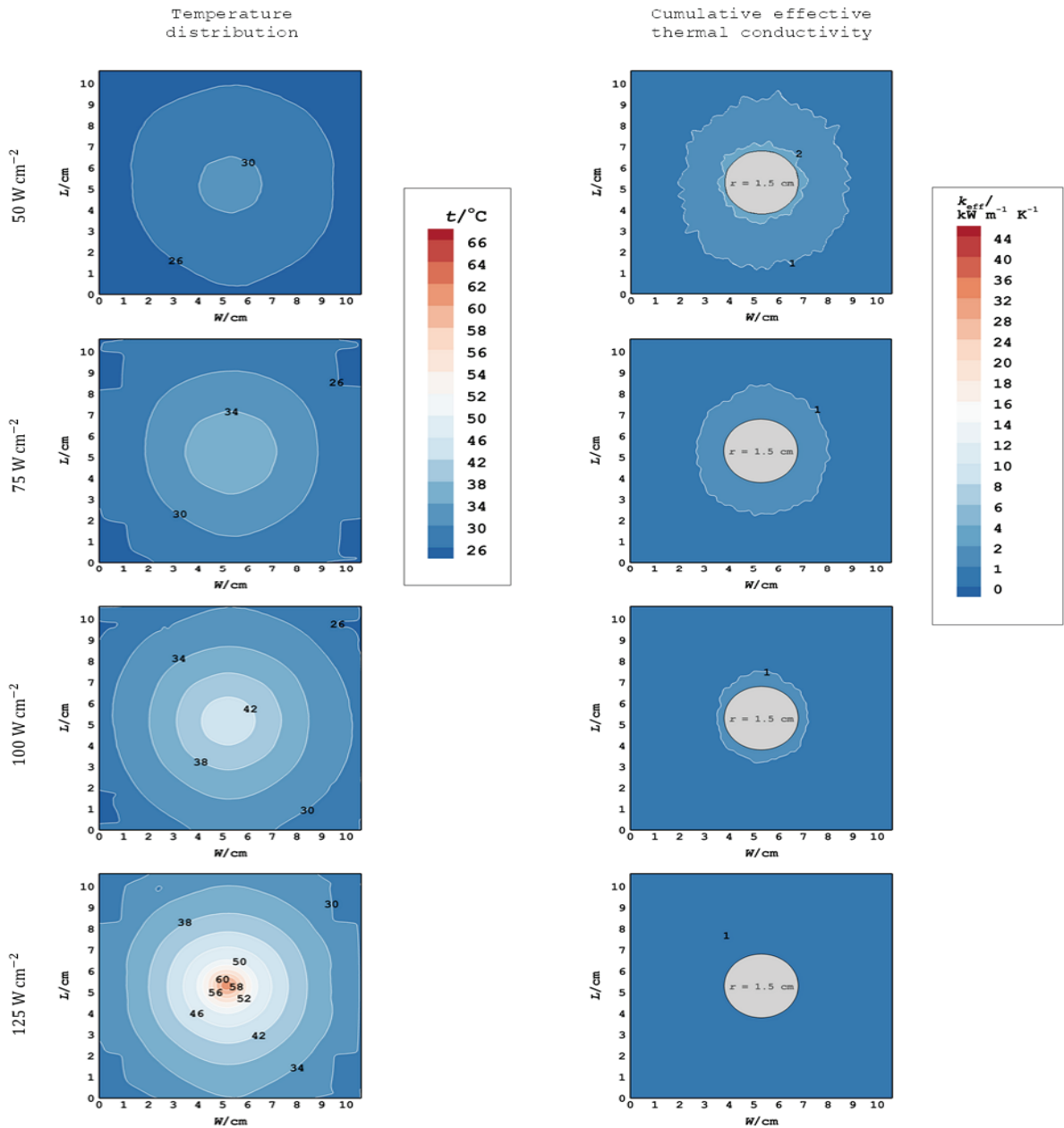


Fig. 8 Variations in the distributions of temperature and cumulative effective thermal conductivity with increasing heat flux from 50 W cm^{-2} to 125 W cm^{-2} (from top to bottom with an increment of 25 W cm^{-2}). Flow guide expansion angle: 22.5°

Fig. 7, 8 및 9에 도시된 열확산 평면 상 온도 분포와 누적 유효 열전도도 분포 변화에서 알 수 있듯이 높은 열유속에서 유동 가이드 확장각 증가에 따라 증기 챔버의 열확산 평면 상 온도 균일도가 악화되고, 이에 따라 높은 유효 열전도도 영역이 축소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 유동 가이드 확장각 증가 시 증기상 작동유체 유속 증가에도 불구하고 유동 가이드의 상대적 점유 체적 증가에 따른 전도 영향 우세에 의해 증기 챔버의 열확산 성능이 감소하였기 때문으로 판단된다. 특히, 유동 가이드 점유 체적이 가장 작은 확장각 0° 조건에서 낮은 증기상 작동유체 유속에도 불구하고 동일 열유속 대비 가장 높은 누적 유효 열전도도가 측정되

었다는 점은 증기 챔버의 열확산 성능이 증기 유동 영역 내 증기상 작동유체의 대류 효과에 의해 지배적으로 결정되며 내부 구조물 체적 증가에 따라 전도 효과가 커질 경우 열확산 성능이 감소할 수 있음을 보여준다.

Table 3과 Fig. 10은 각각 변경 거리 3.5 cm 지점에서 측정된 유동 가이드 확장각 별 평가된 누적 유효 열전도도 값 및 누적 유효 열전도도의 변화 경향을 보여준다. Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, 50 W cm^{-2} 를 초과하는 모든 시험 열유속에서 확장각 0° 의 유동 가이드를 적용한 증기 챔버의 유효 열전도도가 다른 유동 가이드 확장각을 적용한 증기 챔버 대비 월등히 높음을 확인할 수 있다. 특히, 확장각

열확산측정기술 응용 증기 챔버 내부 구조물 영향 평가

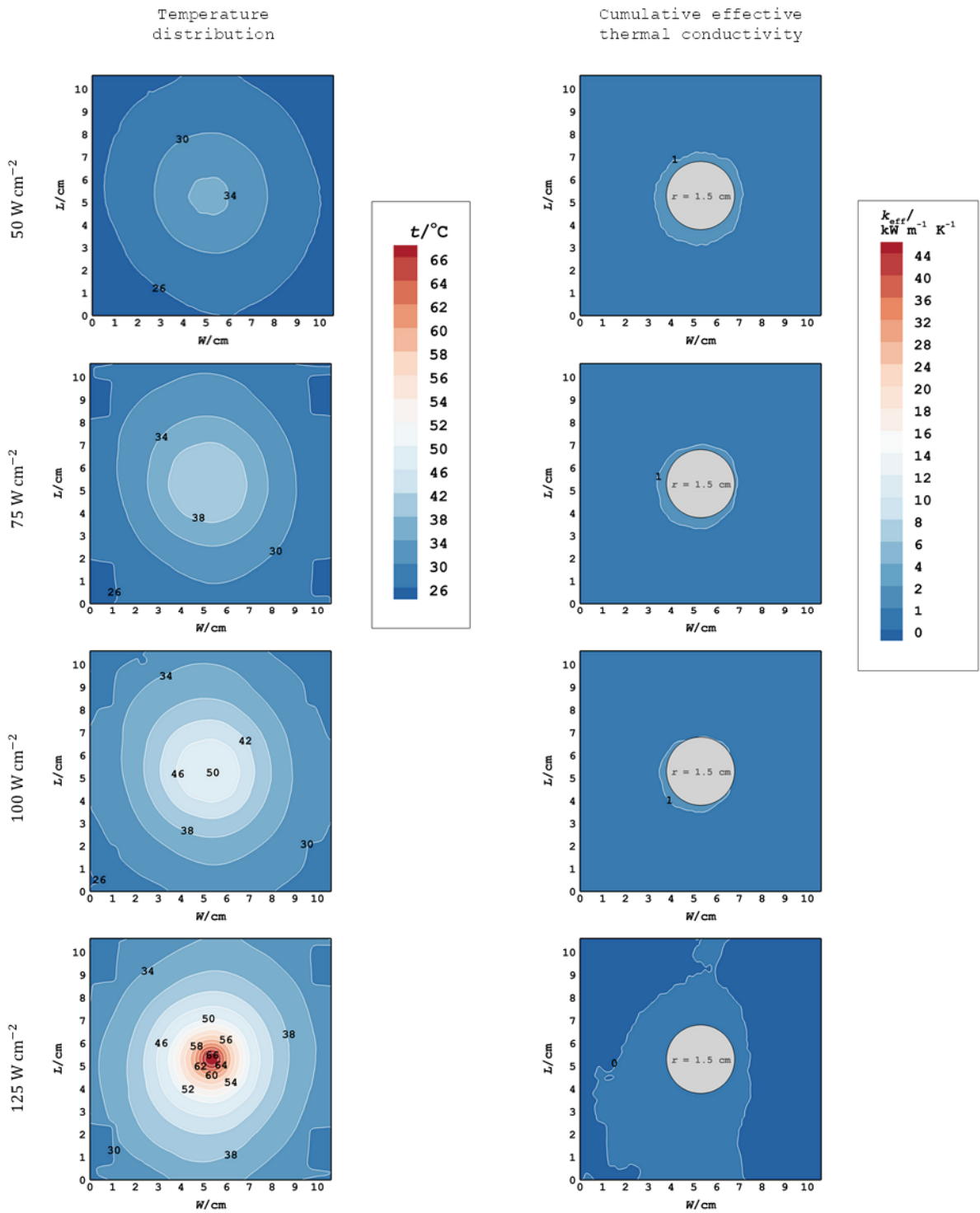


Fig. 9 Variations in the distributions of temperature and cumulative effective thermal conductivity with increasing heat flux from 50 W cm^{-2} to 125 W cm^{-2} (from top to bottom with an increment of 25 W cm^{-2}). Flow guide expansion angle: 45°

22.5° 및 45°의 유동 가이드를 적용한 증기 챔버의 경우 150 W cm^{-2} 이상의 열유속에서 히터 온도가 시험 상한을 초과하여 시험이 중단되었다는 점에서 고열유속 발열체의 열확산 기능을 수행하는 증기 챔버로서 적절하게 작동되지 않았음이 확인되었다. 이는 앞서 기술한 바와 같이 유동 가이드 확장각 증가 시 작동유체 대류 효과 향상 대비 내부 구

조물을 통한 전도 영향 증가에 따른 열확산 성능 감소가 더 우세했기 때문이다. 또한, 유동 가이드 확장각 22.5° 이상의 유동 가이드를 적용한 증기 챔버의 누적 유효 열전도도는 문헌 상 알려진 구리의 열전도도($386 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)[16]에 근접한 값을 보였으며, 이는 유동 가이드 점유 체적 증가에 의한 전도 효과가 지배적이었음에 기인한다. 이를 종합하여

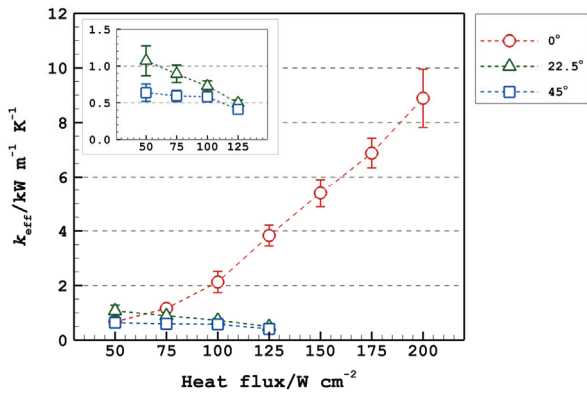


Fig. 10 Variations in the cumulative effective thermal conductivity at a 3.5 cm radial distance from the center with increasing heat flux at different flow guide expansion angles. The error bars indicate the measurement uncertainties at an approximately 95 % level of confidence

Table 3 Variation in the cumulative effective thermal conductivity with flow guide expansion angle. The measurement uncertainties are expressed at an approximately 95 % level of confidence

Cumulative effective thermal conductivity/W m ⁻¹ K ⁻¹			
Heat load/W	Flow guide expansion angle(θ_{exp})		
	0°	22.5°	45°
50	670 ± 120	1070 ± 200	640 ± 120
75	1160 ± 150	890 ± 120	590 ± 80
100	2120 ± 390	730 ± 70	590 ± 80
125	3900 ± 380	500 ± 40	410 ± 30
150	5390 ± 500		
175	6880 ± 540		
200	8900 ± 1100		

볼 때, 증기 챔버의 증기 유동 개선 및 구조적 강성 확보를 위해 내부 구조물을 사용할 경우 내부 구조물의 증기 유동 영역 내 상대 점유 체적을 최소화하여 내부 구조물의 전도 영향 증가에 의한 열확산 성능 감소를 방지하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 데이터센터의 연산소자, 전력반도체 등의 고열유속 운용 환경을 가지는 기기의 실질적 열유속 감소를 위해 사용되는 증기 챔버의 내부 구조물 형상 변화에 따른 상대 체적 변화가 열확산 성능에 미치는 영향을 확인하고자 하였다. 이를 위해 본 연구는 서로 다른 확장각(0°, 22.5°, 45°)을 가지는 세 가지 유동 가이드를 적용한 106 mm × 106 mm × 4 mm(가로 × 세로 × 두께) 크기의 구리 재질 증기 챔버를 제작하여 유동 가이드 형상 변화에 따른 열확

산 성능 변화를 시험하였다. 본 연구에서 제작한 증기 챔버의 열확산 성능은 비접촉 열확산측정기술을 이용하여 시험하였으며, 열확산 평면 상 다수 지점 온도를 동시 측정하고 유효 열전도도를 평가함으로써 열유속 및 확장각 변화에 따른 증기 챔버의 열확산 성능 변화를 시험하였다.

증기 챔버의 열확산 성능에 대한 열유속 영향은 확장각 0°의 유동 가이드를 적용한 증기 챔버를 이용하여 시험하였으며, 시험 결과 50 W cm⁻²에서 200 W cm⁻²까지의 열유속 범위에서 열유속 증가에 따라 작동유체 질량 유량 및 증기 유속 증가에 의해 열확산 성능이 향상됨을 확인하였다. 200 W cm⁻²의 열유속에서 측정된 시험 증기 챔버의 누적 유효 열전도도는 약 8 900 W m⁻¹ K⁻¹ ± 1 100 W m⁻¹ K⁻¹(약 95 % 신뢰의 수준)로 측정되었다. 증기 챔버 내부 유동 가이드 형상 영향 시험 결과, 유동 가이드 확장각 증가 시 증기상 작동유체 유속 증가에도 불구하고 증기 유동 영역 내 유동 가이드의 상대 점유 체적 증가에 따른 전도 영향 우세에 의해 증기 챔버의 열확산 성능이 감소하는 것을 확인하였다. 이에 따라, 증기 챔버의 증기 유동 개선 및 구조적 강성 확보를 위해 내부 구조물을 사용할 경우 증기 유동 영역 내 내부 구조물의 상대 점유 체적을 최소화하여 전도 영향 증가에 의한 열확산 성능 감소를 방지하는 것이 필요함을 확인하였다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00280 026).

References

- (1) Zhou, F., Zhou, G., Zhou, J., Huai, X., and Jiang, Y., 2023, "A novel ultra-thin vapor chamber with radial-gradient hierarchical wick for high-power electronics cooling," *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 183, 107896.
- (2) Moon, S., Choi, K., Lee, J., and Kim, H., 2020, "Application of aluminum flat heat pipe for dry cooling near the hot spot of a radar array with a multiscale structure," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 169, 114894.
- (3) Luo, Y., Tang, Y., Zhang, X., Wang, H., Zhou, G., and Bai, P., 2022, "A novel composite vapor chamber for battery thermal management system," *Energy Conversion and Management*, Vol. 254, 115293.
- (4) Zhou, G., Zhou, J., Huai, X., Zhou, F., and Jiang, Y., 2022, "A two-phase liquid immersion cooling strategy utilizing vapor chamber heat spreader for data center servers," *Applied Thermal Engineering*, Vol. 210, 118289.
- (5) Muneeswaran, M., Lin, Y., Lin, L., Lin, V., and Wang, C.,

- 2022, “A parametric study on the performance of vapor chamber in association with pillar distribution,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 207, 118217.
- (6) Liu, B., Li, H., Li, K., Meng, Q., Yang, C., and Fu, C., 2019, “Effects of heat source positions on temperature uniformity of large vapor chamber antigravity flat plate heat pipe,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, Vol. 44, pp. 6571–6579.
- (7) Wang, M., Cui, W., and Hou, Y., 2019, “Thermal spreading resistance of grooved vapor chamber heat spreader,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 153, pp. 361–368.
- (8) Liu, W., Peng, Y., Luo, T., Luo, Y., and Huang, K., 2016, “The performance of the vapor chamber based on the plant leaf,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 98, pp. 746–757.
- (9) Yao, F., Miao, S., Zhang, M., and Chen, Y., 2018, “An experimental study of an anti-gravity vapor chamber with a tree-shaped evaporator,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 141, 10001008.
- (10) Han, J., Bae, H., and Joung, W., 2022, “Effect of the Working Fluid Charge Ratio and Heat Flux on the Temperature Homogenization Characteristics of a Vapor Chamber-Type Heat Spreader,” *International Journal of Thermophysics*, Vol. 43, 168.
- (11) Mizuta, K., Fukunaga, R., Fukuda, K., Nii, S., and Asano, T., 2016, “Development and characterization of a flat laminate vapor chamber,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 104, pp. 461–471.
- (12) Li, Y., and Wong, S., 2021, “Effects of vapor duct thickness on the capillary blocking and thermal performance of ultra-thin vapor chambers under natural convection cooling,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 195, 117148.
- (13) Lv, L., 2017, “Effect of charging ratio on thermal performance of a miniaturized two-phase super-heat-spreader,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 104, pp. 489–492.
- (14) Bond, W., Panicker, V., McMillan, J., Simpson, R., Hayes, M., Machin, G., Casarosa, G., and Etchells, J., 2022, “A metrology enabled thermal imager for thermal vacuum testing,” *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, (Online: 28 Mar 2022), DOI: 10.1080/17686733.2022.2056986.
- (15) Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), 2008, *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*, JCGM 100:2008, BIPM, Paris, pp. 18–23.
- (16) Carvill, J., 1993, *Mechanical Engineer’s Data Handbook*, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, pp. 102–145.