

3D 프린팅으로 제작된 베이퍼 챔버용 그루브 워의 워킹 성능에 관한 실험적 분석

박규태^{a,*}, 최윤석^a, 이동현^b, 허재훈^a

Experimental Analysis of Wicking Performance of 3D-printed Grooved Wicks for Vapor Chambers

Kyu Tae Park^{a,*}, Yun Seok Choi^a, Dong Hyun Lee^b, Jae Hun Heo^a^a Mechanical Design Team, Hanwha Systems^b Dae Heung Co.

ARTICLE INFO

Article history:

Received	26	February	2024
Revised	3	April	2024
Accepted	4	April	2024

Keywords:

Wicking performance
Capillary force
Grooved wick
Vapor chamber
Additive manufacturing
Phase change

ABSTRACT

With recent technological developments in various industries, the heat flux of electronic components is rapidly increasing due to their miniaturization and high performance. To reliably and efficiently cool these high-heat flux electronic components, the heat transfer coefficient may be improved using phase change: a vapor chamber is a typical example of such a cooling device. Recently, research on vapor chambers using metal additive manufacturing methods has also been conducted. Accordingly, in this study, the capillary wicking performance of grooved wick for vapor chambers was examined using a metal additive manufacturing method. The wicking performance was investigated according to the printing directions, cutting methods, and geometrical parameters of the groove wick, and evaluated considering the wicking distance and maximum reach height over time. Acetone and Novec 649 were adopted as working fluids, and differences between the experimental and theoretical values for the wicking performance were compared and analyzed.

1. 서론

1.1 연구배경 및 동향

최근 전자부품의 소형화 및 고성능화로 인해, 전자제품에서 발생하는 열유속은 급격하게 증가하는 추세이며 이로 인해 제품의 열적 안전성 보장을 위한 열관리에 예전보다 더 많은 노력이 소요되고 있다. 전자장비의 고열유속을 안정적이고 효율적으로 제거하기 위하여, 많은 연구자들이 단상 냉각 방식뿐만 아니라 상변화 기술을 이용한 다상 냉각에도 많은 관심을 가지고 현재 연구를 수행하고 있다.

전자장비의 효율적인 열관리를 위해서는 냉각부에서의 열교환뿐만 아니라, 내부의 국부 열원에서 발생한 열을 냉각부까지 빠르게 확산 및 전달시키는 구조도 매우 중요하다. 열전도도가 높은 금속을 이용한 구조는 부품 수급 및 제작 용이성, 저렴한 비용, 그리고 환경변화에도 일정한 열적 성능 등의 장점으로 인하여 열원에서 냉각부까지의 열전달 구조로 많이 사용되고 있다. 그런데 최근 집적된 CPU, SoC(system on chip)와 같은 고열유속 부품의 열유속을 효과적으로 배출하기에는 열적 성능의 한계 및 제품의 소형화/경량화 측면의 단점을 가진다.

이에 반하여 히트파이프 또는 베이퍼 챔버와 같은 상변화를 이

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8020-7239

E-mail address: kyutae.park@hanwha.com (Kyu Tae Park).

용한 냉각부품은 금속 도체보다 상대적으로 작은 열저항으로 인하여 소형 chip에서 발생하는 고열유속의 많은 열량을 빠르게 확산시켜 국부 온도를 낮춰주고 냉각부까지 전달할 수 있다. 이러한 장점으로 인해 상변화 냉각부품은 휴대용 전자장치, 자동차 배터리, 조명 등 민수분야뿐만 아니라, 항공우주, 레이더를 비롯한 방산분야에서도 그 활용도가 증가하고 있다.

상변화 부품의 냉각성능 및 적용 효과에 대하여는 이전 많은 연구자들에 의하여 입증되어왔다. Huang, G. et al.^[1]은 두께 0.5 mm의 휴대용 전자장치 냉각용 초박형 베이퍼 챔버에 관한 연구에서 순수한 구리보다 베이퍼 챔버의 수평 유효 열전도도가 최대 52배 이상임을 제시하였다. 또한, Li, W. et al.^[2]은 배터리 관리에 알루미늄 베이퍼 챔버의 가열량, 충전율, 냉각액의 유량에 따른 열적 영향을 분석하여 제시하였다. 이러한 성능적 장점에도 불구하고 상변화 냉각부품은 금속 전도판과 달리 dryout, CHF(critical heat flux)와 같은 열적 한계를 고려한 설계 및 제작이 필요하다. 그리고 복잡한 제작공정, 구현 형상 제약, 높은 제작 비용, 환경성 등 실제 적용을 위해서 고려해야 하는 요소가 많다.

최근 발전하고 있는 3D 프린팅 기술은 제조공정 간략화, 부품 수 감소, 맞춤형 소량 생산의 경제성뿐만 아니라 위상 최적화 기법을 접목하여 경량화, 비강성, 열적 성능의 이점을 제공하고 있다. 특히, 최근 방열 분야에서 Lattice, Kagome 등과 같은 구조를 이용한 경량 고효율 열교환 부품으로 항공우주 분야를 비롯한 여러 분야에 적용이 확대되고 있다^[3,4]. 베이퍼 챔버, 히트파이프와 같은 상변화 냉각부품 제작에 3D 프린팅 공정을 적용한다면, 챔버 내부의 마이크로 워킹 성형이 용이하고 접합 및 용접과 같은 특수공정을 대체할 수 있는 장점이 있다. 또한, 상변화 기능이 통합된 열교환기, 하우징 등을 일체형으로 제작하여 방열성능을 극대화하는 다양한 솔루션을 모색할 수 있다.

Jafari, D. et al.^[5]은 스테인리스를 이용한 금속 3D 프린팅으로 적층한 히트파이프 워킹의 모세관력에 대한 연구를 통하여 기존의 메쉬 및 소결구조의 워킹보다 3D 프린팅을 제작된 다공성 워킹의 워킹 성능이 최대 5배 이상 개선함을 보여주었다. 하지만 지금까지의 대부분의 상변화 냉각부품에 관한 연구는 Cu, Al 등과 같은 금속의 기계가공, 브레이징 공정을 적용한 사례에 집중되어 왔으며, 금속 3D 프린팅을 이용한 연구 결과는 찾기가 쉽지 않다. 3D 프린팅으로 상변화 냉각부품을 제작하여 제품에 적용하기 위해서는 3D 프린팅 적층 방향 및 워킹의 기하학적 형상에 따른 제작 가능성, 워킹 표면 형상 및 조도, 다공성 영향뿐만 아니라 작동유체 종류와 충전율에 대한 영향 등 설계 및 공정 요소에 대한 다양한 연구와 검증이 필요하다.

1.2 연구목표

본 연구에서는 금속 3D 프린터를 이용하여 알루미늄 베이퍼 챔

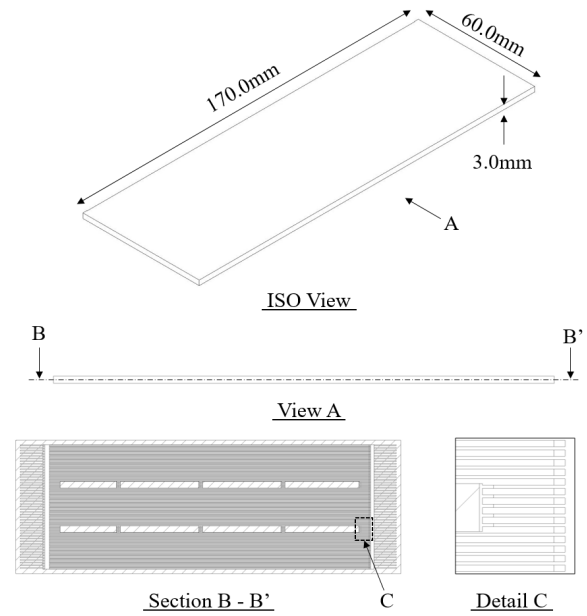


Fig. 1 Vapor chamber size specification and detail shapes

버를 제작하기 위한 선행 단계로 워킹의 기하학적 형상에 따른 워킹 성능(모세관력)을 분석하는 연구를 수행하고자 하였다. 이를 위하여 알루미늄 금속 3D 프린팅과 그루브 워킹 성형 공정에 관한 연구를 수행하고, 워킹의 적층 방향, 커팅 방식과 같은 제작공정 요소, 워킹의 기하학적 형상 요소, 작동유체의 물리적 특성에 의한 워킹 성능을 비교, 분석하여 베이퍼 챔버 제작을 위한 최적의 조합을 제시하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 연구대상

Fig. 1은 본 연구에 적용된 베이퍼 챔버 형상으로 60.0 mm × 170.0 mm × 3.0 mm 크기를 가진다. 베이퍼 챔버 내부 그루브 워킹의 풋프린트 영역은 56.0 mm × 144.0 mm 크기이며, 컨테이너 내부의 작동유체가 동작하는 챔버 영역 높이는 1.7 mm이다.

재질은 1980년대부터 우주 분야 개발의 히트파이프에도 적용되어 온 알루미늄 합금을 적용하였다. 알루미늄은 열전도도가 우수하고 비강도가 높은 장점이 있다. 본 연구에는 3D SYSTEMS 社의 AlSi10Mg 분말을 사용하였으며, 3D 프린팅 제작 시 재질 특성은 Table 1과 같다.

본 연구에 적용된 워킹 형상은 사각 그루브로 워킹의 높이, 폭, 간격에 따라 7개의 서로 다른 기하학적 형상이 사용되었으며, 적층 방향 및 커팅 방식 분류를 추가하여 총 9개의 시료를 제작하였다. 베이퍼 챔버는 양면 워킹 형상으로, Fig. 1에 제시된 B-B'를 기준으로 대칭인 형상을 가지나, 워킹 시험을 위한 시료는 워킹 높이를

Table 1 Material properties of AlSi10Mg^[6]

Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Plastic elongation (%)	Thermal conductivity (W/mK)	Melting range (°C)
290-420	170-270	5.8-17.5	120-170	557-596

Table 2 Grooved wicks parameters

Sample No.	Width (W _{ch})	Height (H _{ch})	Gap (W _s)	Printing direction (D)	Cutting method (C)
1	0.2	0.4	0.4	Horizontal	Wire EDM
2	0.2	0.4	0.4	Vertical	Wire EDM
3	0.2	0.4	0.4	Vertical	Grinder
4	0.1	0.4	0.2	Vertical	Grinder
5	0.1	0.8	0.2	Vertical	Grinder
6	0.2	0.4	0.2	Vertical	Grinder
7	0.2	0.8	0.2	Vertical	Grinder
8	0.8	0.2	0.2	Vertical	Grinder
9	1.2	0.2	0.4	Vertical	Grinder

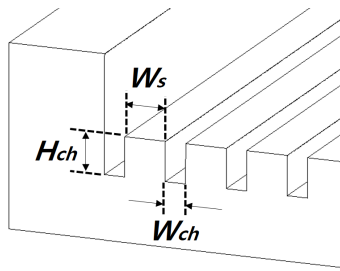


Fig. 2 Geometrical shapes of the groove wick

육안으로 확인하기 위해 단면 직 구조의 전체 폭 60.0 mm, 길이 65.0 mm로 제작되었다. Fig. 2는 단면 형상을 나타낸 것으로 직 높이(H_{ch})는 0.2-0.8 mm, 폭(W_{ch})은 0.1-1.2 mm, 간격(W_s)은 0.2-0.4 mm를 가지며, 베이퍼 챔버 동작 간 증기압에 의한 변형을 방지하기 위하여 중앙부에는 지지 구조를 적용하였다. Table 2에 본 연구에 제작된 그루브 직의 parameter를 나타내었다. 기하학적 형상의 차이뿐만 아니라 3D 프린팅의 적층 방향 및 시료의 커팅 방식에 따른 워킹 성능을 함께 비교하기 위해 각 시료를 구성하였다. 적층 방향은 수평과 수직, 그리고 커팅 방식은 와이어 방전 가공(wire electrical discharge machining)과 그라인더 커팅으로 나뉜다. 각 시료는 그루브 직을 세 구획으로 나누었으며, 워킹 성능 측정 시 세 구획의 평균값을 도출하고자 했다. 시료의 직 구획 분류는 Fig. 3에 나타내었다.

베이퍼 챔버 내부 작동유체로는 증류수, 암모니아, 아세톤, HFE 계열 등이 사용될 수 있다. 증류수는 워킹 성능이 우수하고 비열이 크지만, 알루미늄과의 화학 반응으로 인해 불응축성 가스를 생성하므로 증류수-알루미늄 조합으로 베이퍼 챔버를 제작할 경우 방

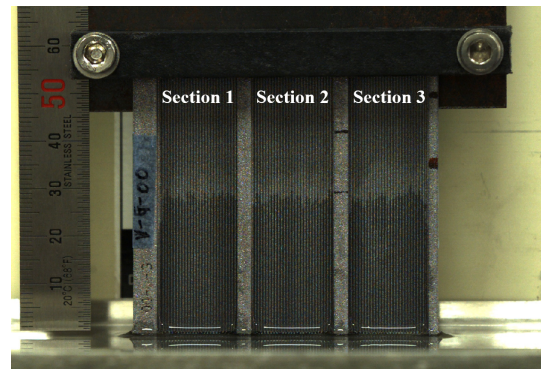


Fig. 3 Separated sections of the grooved wick

Table 3 Physical properties of working fluid (20°C)

Working fluid	Density (g/ml)	Surface tension (mN/m)	Viscosity (mPa·s)	Boiling point (°C)
Acetone	0.791	23.7	0.33	56.5
Novec 649 ^[7]	1.600	10.8	0.64	49.0
DI-water ^[8]	0.998	72.8	1.00	100.0
HFE-7000 ^[9]	1.418	12.3	0.47	34.0
Opteon SF33 ^[10]	1.360	13.0	0.38	33.4

열 성능이 지속적으로 저하될 수 있다. 암모니아는 알루미늄과의 조합 특성은 좋지만, 작동점이 우주환경에 적합하고 상변화 시에 내부 증기압이 매우 높아지는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 알루미늄과의 조합 특성 좋고 전자장비 냉각에 적합한 동작 온도를 갖는 아세톤을 작동유체로 선정하였으며, 액침 냉각에 사용되는 3M社의 엔지니어링 유체 Novec 649를 함께 실험하였다. 또한, 작동유체에 따른 워킹 성능 비교를 위한 이론적 계산에는 작동유체로 성능이 좋은 증류수, 엔지니어링 유체인 HFE-7000, Opteon SF33을 포함하여 수행하였다. 본 연구에서 사용한 작동유체의 워킹 성능과 관련된 물리적 특성은 Table 3에 나타내었다.

2.2 연구방법

Fig. 4는 본 연구에 사용된 베이퍼 챔버의 구성도 및 열전달 메커니즘을 나타낸 것이다^[11]. 작동유체는 고온의 증발부에서 열을 흡수하여 증발하고, 기상의 작동유체는 증기 코어를 통해 응축부로 향하게 된다. 저온의 응축부에서 작동유체는 열을 방출하며 액상으로 상변화되고 직을 따라 다시 증발부로 되돌아가게 된다. 즉, 작동유체의 증발-응축 상변화 원리를 이용한 순환 구조로 열전달이 이루어진다. 일반적으로 베이퍼 챔버의 열적 성능에 가장 큰 영향을 미치는 제한은 capillary limit인데 이는 워킹 성능(워킹 거리)에 따라 좌우된다. 다시 말하면, 워킹 성능이 좋을수록 작동유체가 원활히 순환하여 열적 성능이 좋아지게 된다. Fig. 4의 베이퍼 챔버 열전달 메커니즘을 바탕으로 1차원 열전달을 가정하고 열

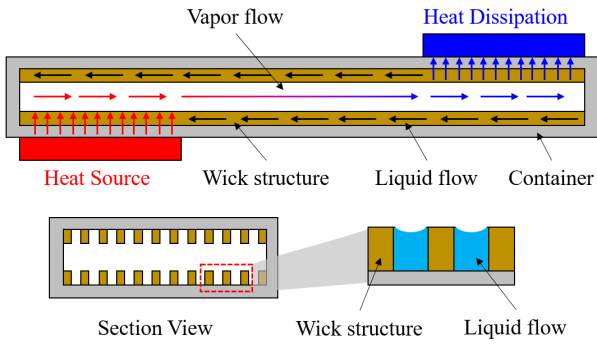


Fig. 4 Schematic diagram and heat transfer mechanism of the vapor chamber

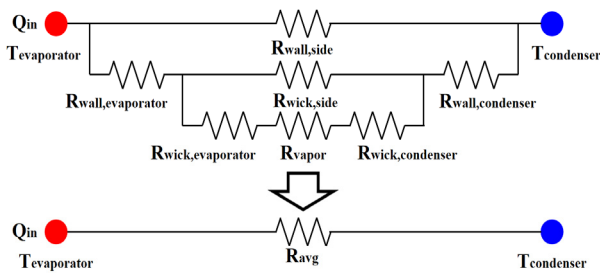


Fig. 5 Thermal circuit diagram of the vapor chamber

전달 회로를 구성하면 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다. 이때, 증발부의 평균온도(T_e)와 응축부의 평균온도(T_c), 증발부에 입력되는 발열량(Q_{in})에 따른 베이퍼 챔버의 평균 열저항(R_{avg})은 아래의 식(1)로 정의된다^[12].

$$R_{avg} = \frac{(T_e - T_c)}{Q_{in}} \quad (1)$$

다음으로, 수직방향으로 배치된 워크에 대하여 모세관 상승에 대한 관성 효과를 무시하면 워킹 높이는 다음과 같은 force balance에 의해 결정되며 식(2)와 같이 주어진다. 여기서 P_c 는 워크에서의 모세관 압력, R_h 는 수력 반경이며, h 는 워킹의 높이, g 는 중력가속도, ρ 와 μ 는 각각 작동유체의 밀도와 점성이 된다^[13,14]. 점성과 중력의 효과가 포함된 모세관 모델을 풀면 식(3)과 같이 유도되며, t 는 워킹 경과 시간이다.

$$P_c = \frac{8\mu h \dot{h}}{R_h^2} + \rho g h \quad (2)$$

$$h = \frac{P_c}{\rho g} \left[1 + W\left(-e^{-\frac{\rho^2 g^2 R_h^2}{8\mu P_c} t^{-1}}\right) \right] \quad (3)$$

여기서 $W(x)$ 는 Lambert W 함수로서, $x = W(x)e^{W(x)}$ 의 역지수 함수로 정의된다. 그리고 Fries, N.^[15]가 제시하는 Lambert W

함수의 명시적 표현은 간단히 식(4)와 같이 나타낼 수 있으며, $-e^{-1} \leq x \leq 0$ 범위에서 최대 상대오차는 0.1%이다. 해당 관련식을 활용하면 작동유체 및 그루브 워크의 기하학적 형상을 고려한 시간에 따른 이론적 워킹 높이를 산출할 수 있다.

$$W(x) \approx -1 + \frac{\sqrt{2+2ex}}{1 + \frac{4.13501\sqrt{2+2ex}}{12.7036 + \sqrt{2+2ex}}} \quad (4)$$

그리고 모세관 워킹의 최종 높이는 마찬가지로 모세관 압력과 중력 텀의 평형 관계에서 아래 식(5)와 같이 간단하게 유도된다. 여기서 σ 는 작동유체의 표면장력, θ 는 접촉각이다.

$$h = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{\rho g R_h} \quad (5)$$

2.3 시료제작

베이퍼 챔버는 DMP(direct metal printing) 방식의 3D 프린터를 사용하여 제작하였다. 해당 적층 방식은 금속 분말에 열 소스인 파이버 레이저를 사용하여 분말 금속 입자들 사이의 융합을 유도하여 한 층씩 적층 해나가는 3D 프린팅 방식이다. 해당 프린팅 방식은 몇 가지 특징을 가지고 있다. 첫 번째로, 금속 분말을 한 층씩 적층하여 제품 영역에만 레이저를 조사하기 때문에 제작 후 제품 내부의 금속 분말을 배출시켜야 한다는 점이다. 두 번째로는, 주변의 금속 분말이 물리적으로 서포트 역할을 하고 있음에도 왜곡 현상 발생 가능성을 제한하기 위해 서포트가 필요하다는 점이 있다. 마지막으로, 레이저 조사로 인한 고온 발생의 잔류 인력으로 수축 현상이 발생할 수 있다는 점이 있다.

본 연구에서는 앞서 기술한 3D 프린팅 방식의 특징들을 고려하여 베이퍼 챔버를 제작하였다. 내부 금속 분말의 원활한 배출을 위하여 양방향으로 open된 구조로 베이퍼 챔버 구조를 설계/제작하였다. 또한, 3D 프린팅 시 서포터가 생성되지 않도록 베이퍼 챔버의 길이 방향(그루브 워크와 나란한 방향)을 적층 방향으로 설정하여 제작 수율을 확보할 수 있도록 하고 제품 성형 이후 열처리 과정을 통해 잔류 응력을 해소하였다.

금속 3D 프린팅의 적층 방향에 따른 그루브 워크의 성능 영향 분석을 위해 수직/수평 두 방향에 대하여 제작을 실시하였다. 또한, 공정 제작 간 발생할 수 있는 레이저 조도, 분말, 3D 프린터 세팅 등의 영향을 최대한 배제하기 위하여 시료를 동시에 제작하였다. Fig. 6(a)에는 3D 프린팅을 이용한 그루브 워크를 적층 방향 별로 성형한 모습이다. 3D 프린터는 3D SYSTEMS 사의 DMP Factory 500 모델을 사용하였으며, 공정 적용 간 레이저 출력은 500W, 레이저 파장 길이 1070 nm, 적층두께 30 μ m로 셋팅하여 제작하였다. 반복성 정밀도는 20 μ m(x, y, z축)이며, 평균 정확도

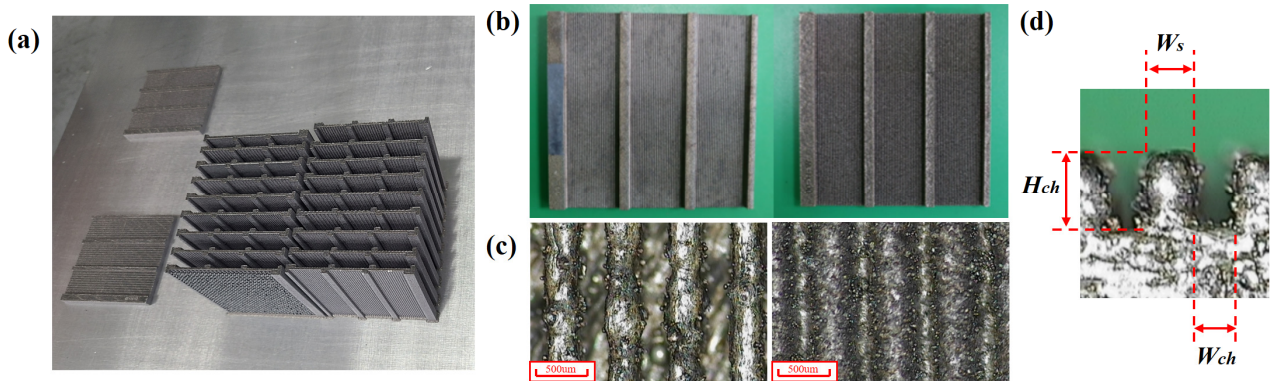


Fig. 6 (a) Fabrication of grooved wicks by printing directions, (b) grooved wick samples, (c) optical microscopic image of grooved wicks (left : sample no. 1, right : sample no. 2), (d) geometries of the grooved wick

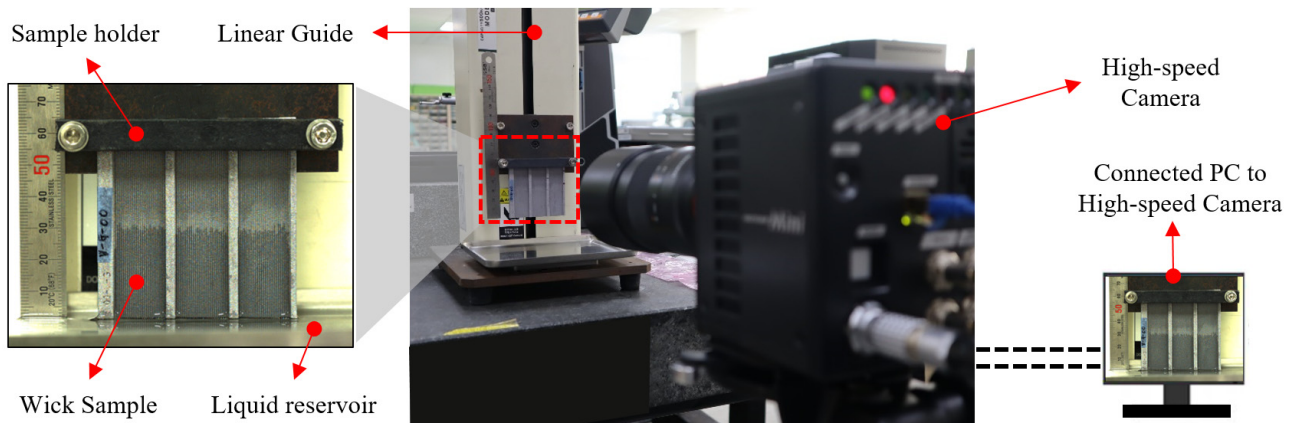


Fig. 7 Experimental setup

는 $\pm 0.1\sim 0.2\%$ with $\pm 50\ \mu\text{m}$ minimum이다. Fig. 6(b)는 제작된 베이퍼 챔버용 시료의 사진이며, Fig. 6(c)는 해당 시료의 워 표면 을 광학 현미경을 이용하여 확대한 것이다. 일반적인 기계 가공품에 비해 3D 프린팅 제품의 표면은 상대적으로 조도가 거칠고 매끈 하지 않은 특성이 있는데 이러한 표면 특성은 작동유체의 워킹 관점에서 모세관력을 높여 도움이 되는 효과를 기대할 수 있다. 반면에, 그루브 워 사이에 완벽히 용융되지 못하고 묻혀진 금속 분말 입자들도 발견할 수 있는데, 이러한 요소는 워킹 관점에서 작동유체의 흐름을 방해(blocking)하는 원인이 될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 요소들의 영향성을 함께 검토하였다.

2.4 시험결과

Fig. 7은 워킹 성능 시험을 위한 구성을 보여준다. 시험은 외기 온도에 따른 물성치 영향을 최소화하기 위해 $20\pm 5^\circ\text{C}$ 환경의 실험실에서 실시하였다. 시간에 따른 워킹 높이 측정을 위하여 Photron 社의 FASTCAM Mini UX100 초고속카메라를 사용하였으며, 각 워킹 시험은 10초 이상을 수행하였다.

먼저, 3D 프린팅의 적층 방향에 따른 워킹 성능 차이를 확인하

기 위한 시료를 준비하였다. 시료 1과 시료 2는 기하학적 형상이 동일하게 디자인되었고 커팅 방식이 동일하나, 3D 프린팅 적층 방향이 각각 수평과 수직으로 다르다. Fig. 8은 작동유체 아세톤 사용 시, 시료 1과 시료 2의 워킹 시험 결과를 나타낸 것이다. 두 시료의 워킹 성능은 실제 베이퍼 챔버 작동 성능에 영향을 미칠 정도의 큰 차이는 없었다. 10초 경과 시 워킹 높이는 시료 1이 30.3 mm, 시료 2가 30.5 mm로 수직 적층 방향에서 워킹 성능이 약 0.2 mm 좋은 결과를 보였으나 이는 허용 가능한 측정 오차 범위로 판단된다. 실제 3D 프린터를 이용하여 베이퍼 챔버 적층 시에는 오버행 구간을 최소화하기 위해 수직 적층 방향을 채택하였으며, 시료 1을 제외한 시료들은 수직 적층 방향으로 제작을 진행하였다.

3D 프린팅 워의 커팅 방식에 따른 워킹 성능 차이를 확인하기 위해 시료 2와 시료 3의 워킹 성능을 비교하였다. 시료 2와 시료 3은 기하학적 형상과 적층 방향은 수직으로 동일하나, 3D 프린팅 제작 후 조형판에서 시료를 추출하는 방식이 각각 와이어컷 방전 가공과 그라인더 커팅으로 다르다. 와이어컷 방전가공은 방전가공 유에 표면이 담귀진다는 점에서 그라인더 커팅 대비 워의 표면 특

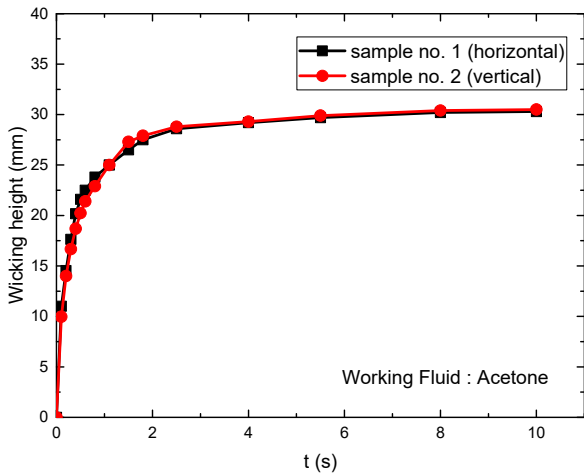


Fig. 8 Experimental wicking performance by printing directions (sample no. 1, 2)

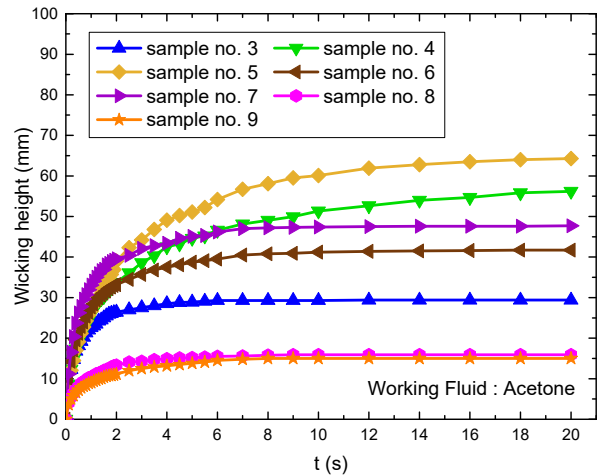


Fig. 10 Experimental wicking performance by geometrical parameters (sample no. 3-9)

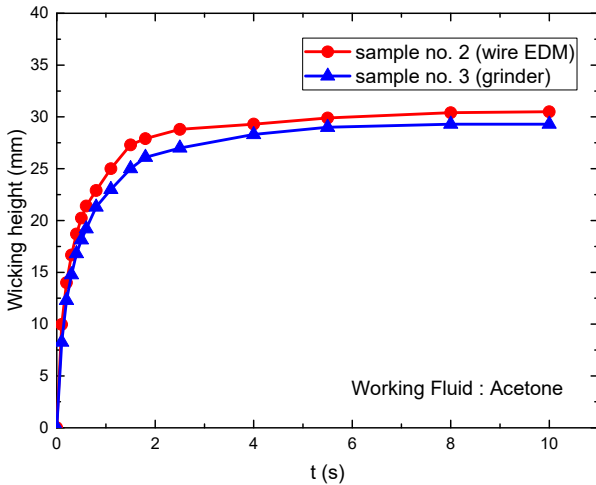


Fig. 9 Experimental wicking performance by cutting methods (sample no. 2, 3)

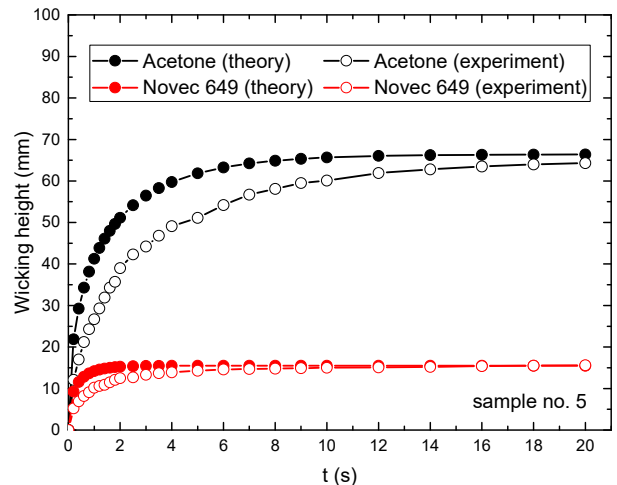


Fig. 11 Theoretical and experimental wicking performance by working fluids (sample no. 5)

성에 영향을 줄 수 있는 가능성이 있다. Fig. 9는 작동유체 아세톤 사용 시 시료 2와 시료 3의 워킹 시험 결과를 비교한 것인데, Fig. 8과 마찬가지로 Fig. 9의 두 시료의 워킹 성능은 실제 베이퍼 챔버 작동 성능에 영향을 미칠 정도의 큰 차이는 관찰되지 않았다. 10초 경과 시 워킹 높이는 각각 시료 2가 30.5 mm, 시료 3이 29.3 mm로 나타났다. 워킹 성능에서 약 1.2 mm 차이를 보이나, 해당 워킹 성능 차이는 무시가능한 수준으로 판단된다.

Fig. 10은 워킹의 기하학적 형상에 따른 워킹 성능을 비교한 것이다. 시료 3 - 9의 적층 방향과 커팅 방식은 수직 및 그라인더로 동일하지만, 그루브 워킹의 폭, 높이, 간격은 각각 다르게 제작되었다. 그루브 워킹의 형상에 따른 워킹 성능 시험에서는 각 시료의 결과들이 의미있는 차이를 보였다. 20초 경과 시, 시료 5에서 64.3 mm로 가장 뛰어난 워킹 성능을 보였으며, 시료 9의 워킹 높이가 15.0 mm 대비 4배 이상의 성능을 보였다. 본 시험 결과를 통해 몇 가지

경향성을 확인하였다. 시료 4, 5 및 시료 6, 7의 결과를 비교해 볼 때, 그루브 워킹의 높이가 높은 시료일수록 워킹 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 또한, 시료 4, 6 및 시료 5, 7의 결과를 비교해 볼 때, 그루브 워킹 간 폭이 좁을수록 워킹 성능이 좋아진다는 점을 확인할 수 있었다. 본 시험의 특이점으로는 시료 3, 6의 비교 결과이다. 작동유체의 경우 기본적으로 그루브 워킹의 홈 부분에서 모세관력을 이용하기 때문에 워킹의 간격은 워킹 성능에 큰 영향이 없을 것으로 예상되었다. 그러나 워킹의 간격이 좁을수록 워킹 성능이 뛰어난 것으로 시험 결과가 나타났다. 본 결과로 추론한 바, 워킹의 간격이 일정 두께 이하로 줄어들게 되면 이웃한 그루브 워킹은 완전 단절되기보다는 3D 프린팅 제품의 부분적인 기공 발생으로 인해 이웃한 워킹과 작동유체를 공유하여 워킹 성능에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 Fig. 10에서 워킹의 기하학적 형상에 따른 워킹 성능이

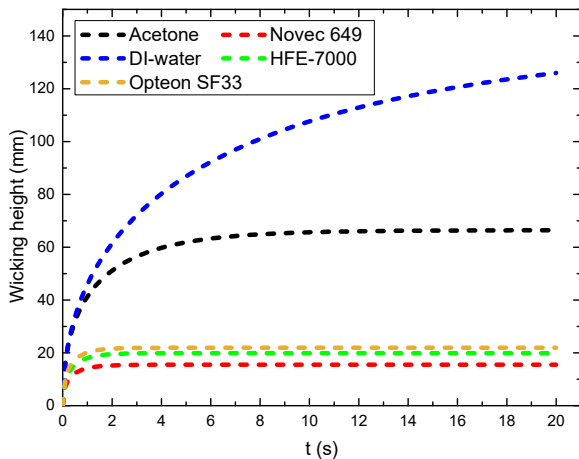


Fig. 12 Theoretical wicking performance by working fluids (sample no. 5)

64.3 mm로 가장 좋은 시료 5에 대하여 작동유체를 변경하여 수행한 워킹 시험 결과이다. 작동유체에 따른 시험 결과에 대하여 이론적인 워킹 높이(식(3))를 함께 비교하였다. 이론적 워킹 높이 계산에서 아세톤에는 15°의 접촉각이 사용되었으며, 고습윤성 Novec 649의 경우 접촉각은 0°로 가정하였다^[13]. 워킹 시험 결과, 시험 초기에는 이론-시험 측정값에서 다소 이격이 발생하는데 이는 작동유체 점성이 이론-실제 차이 또는 워 수력 반경(Rh)의 이론-실제 차이에서 기인하는 것으로 판단된다. 최종적으로 20초 경과 시 아세톤은 64.3 mm에 도달했고, Novec 649는 동일 경과 시간에 15.6 mm 높이를 유지했다. 또한, 동일 경과 시간에서의 아세톤과 Novec 649의 이론적 워킹 높이는 각각 66.4 mm, 15.5 mm인데 Fig. 11에서 작동유체에 따른 이론-시험 결과를 비교해보면 아세톤과 Novec 649 모두에서 비교적 좋은 일치성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이론-시험 측정값 오차는 약 3% 수준으로 나타났다. 본 시험 결과를 통해, 3D 프린팅 워의 거친 표면 상태 및 몽쳐진 금속 분말이 워킹 성능에 미치는 영향은 각각의 효과를 상쇄하여 최종 워킹 성능에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 워킹 성능이 좋을수록 작동유체를 원활히 순환시킬 수 있기 때문에 아세톤이 Novec 649에 비해 더 뛰어난 열적 성능을 나타낼 것으로 예상된다.

Fig. 12는 다양한 작동유체에 대한 이론적 워킹 높이를 비교한 것인데 증류수, 아세톤, Opteon SF33, HFE-7000, Novec 649 순으로 워킹 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. 이론 계산식(식(5))에서 확인할 수 있듯이, 작동유체는 표면장력이 크고, 밀도가 작고, 접촉각이 작을수록 워킹 성능이 좋아진다. 점성의 경우 초기 워킹의 기울기를 결정한다. 앞서, Fig. 11에서 확인한 이론-시험 워킹 성능의 비교 결과가 좋은 일치성을 보여준 점을 고려할 때, 작동유체의 이론적인 워킹 성능 비교를 통해 사전에 작동유체 후보를 선

별할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구는 알루미늄 금속 3D 프린팅을 활용한 베이퍼 챔버용 그루브 워 성형 및 워킹 성능을 분석하고 시험하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. 금속 3D 프린팅 DMP 방식을 활용하여 베이퍼 챔버용 그루브 워를 성형할 경우, 챔버의 길이 방향 즉, 그루브 워와 나란한 방향을 적층 방향으로 설정하는 것이 제품 형상의 왜곡, 분말 배출 및 누수를 방지할 수 있는 제작 방식이다. 또한 금속 3D 프린팅의 적층방향 및 커팅방식에 따른 워킹 성능은 베이퍼 챔버의 열 성능에 영향을 주지 않을 정도로 미미한 수준의 결과를 확인하였다. 다만, 워의 기하학적 형상에 대한 워킹 시험 결과, 그루브 워의 폭이 좁은 형상일수록, 워의 높이가 높을수록, 워의 간격이 좁을수록 좋은 워킹 성능을 나타내었다. 그리고 금속 3D 프린팅으로 제작된 워의 작동유체에 따른 워킹 시험 결과, 아세톤은 Novec 649보다 좋은 워킹 성능을 나타내었다. 이론적인 워킹 성능 비교 결과, 증류수가 가장 좋은 성능을 나타내지만 증류수는 알루미늄과의 반응성 문제로 인해 함께 사용되지 않으므로 아세톤을 해당 베이퍼 챔버의 작동유체로 활용한다면 좋은 열 성능을 나타낼 것으로 판단된다. 향후 본 연구 결과를 바탕으로, 베이퍼 챔버에 대한 열적 성능시험 구성을 통해 알루미늄 3D 프린팅 베이퍼 챔버의 그루브 워 형상에 따른 열적 성능을 분석 예정이다.

References

- [1] Huang, G., Liu, W., Luo, Y., Li, Y., 2020, A Novel Ultra-thin Vapor Chamber for Heat Dissipation in Ultra-thin Portable Electronic Devices, *Appl. Therm. Eng.*, 167 114726, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114726>.
- [2] Li, W., Li, L., Cui, W., Guo, M., 2021, Experimental Investigation on the Thermal Performance of Vapor Chamber in a Compound Liquid Cooling System, *Int. J. Heat and Mass Transf.*, 170 121026, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121026>.
- [3] Shen, B., Li, Y., Yan, H., Boetcher, S. K. S., Xie, G., 2019, Heat Transfer Enhancement of Wedge-shaped Channels by Replacing Pin Fins with Kagome Lattice Structures, *Int. J. Heat and Mass Transf.*, 141 88-101, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.059>.
- [4] Chen, Y., Jia, Z., Wang, L., 2016, Hierarchical Honeycomb Lattice Metamaterials with Improved Thermal Resistance and

- Mechanical Properties, Composite Structures, 152 395-402, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.048>.
- [5] Jafari, D., Wits, W. W., Geurts, B. J., 2018, Metal 3D-printed Wick Structures for Heat Pipe Application: Capillary Performance Analysis, *Appl. Therm. Eng.*, 143 403-414, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.111>.
- [6] 3D Systems, 2023, viewed 29 January 2024, LaserForm AlSi10Mg (A) Datasheet, <<http://www.3dsystems.com/materials/laserform-alsi10mg>>.
- [7] 3M, 2009, viewed 2 February 2024, 3M Novec 649 Engineered Fluid, <http://www.3m.com/3M/en_US/p/d/b5005005025>.
- [8] eFunda Inc., n.d., viewed 2 February 2024, <http://www.efunda.com/materials/common_matl/show_liquid.cfm?MatlName=WaterDistilled4C>.
- [9] Rauch, M. H., Kretschmer, L., Will, S., Leipertz, A., Fröba, A. P., 2015, Density, Surface Tension, and Kinematic Viscosity of Hydrofluoroethers HFE-7000, HFE-7100, HFE-7200, HFE-7300, and HFE-7500, *J. Chem. Eng. Data*, 60:12 3759-3765, <https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00691>.
- [10] The Chemours Company, 2018, viewed 31 January 2024, Opteon SF33 Specialty Fluid, <<http://www.opteon.com/en/products/specialty-fluids/sf33>>.
- [11] Yun, M., Hsu, W., Shim, D. I., Nam, J., Heo, J. H., Song, J., Park, K. T., Lee, D. H., Cho, H. H., 2024, Design and Fabrication of Heat Pipes Using Additive Manufacturing for Thermal Management, *Appl. Therm. Eng.*, 236 121561, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121561>.
- [12] Chang, C., Han, Z., He, X., Wang, Z., Ji, Y., 2021, 3D Printed Aluminum Flat Heat Pipes with Micro Grooves for Efficient Thermal Management of High Power LEDs, *Sci. Rep.*, 11 8255, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87798-4>.
- [13] Kim, J. S., Shin, D. H., You, S. M., Lee, J., 2021, Thermal Performance of Aluminum Vapor Chamber for EV Battery Thermal Management, *Appl. Therm. Eng.*, 185 116337, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116337>.
- [14] Masoodi, R., Pillai, K. M., 2012, Wicking in Porous Materials: Traditional and Modern Modeling Approaches, CRC Press, England.
- [15] Fries, N., 2010, Capillary Transport Processes in Porous Materials – Experiment and Model, Cuvillier Verlag, Germany.

	<p>Kyu Tae Park Engineer in Mechanical Design Team, Hanwha Systems. His research interest is Phase-change Cooling Components and Thermal Management for Defense Industry. E-mail: kyutae.park@hanwha.com</p>
	<p>Yun Seok Choi Junior Engineer in Mechanical Design Team, Hanwha Systems. His research interest is Heat Transfer in Multi-phase Flow. E-mail: yunseok99.choi@hanwha.com</p>
	<p>Dong Hyun Lee Vice President of Dae Heung Co.. His research interest is AM and Vacuum Brazing. E-mail: dhlkh@dhckr.com</p>
	<p>Jae Hun Heo Chief Engineer in Mechanical Design Team, Hanwha Systems. His research interest is AM and Heat and Mass Transfer. E-mail: jh77.heo@hanwha.com</p>