

## 히트파이프 모세관 성능 개선을 위한 스크린-메쉬 워의 표면 개질

정지윤<sup>1</sup> · 임혜원<sup>1</sup> · 김혜원<sup>1</sup> · 이상민<sup>2</sup> · 김형모<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>경상국립대학교 기계공학부 학부연구생

<sup>2</sup>동의대학교 기계자동차로봇부품공학부 조교수

<sup>3</sup>경상국립대학교 기계공학부 조교수

## Surface Modification of Screen-Mesh Wicks to Improve Capillary Performance for Heat Pipes

Jiyeun Jeong<sup>1</sup>, Hyewon Lim<sup>1</sup>, Hyewon Kim<sup>1</sup>, Sangmin Lee<sup>2</sup> and Hyungmo Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Undergraduate research student, School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University

<sup>2</sup>Assistant Professor, Division of Mechanical, Automotive, Robot Component Engineering, Donggeui University

<sup>3</sup>Assistant professor, School of Mechanical Engineering, Gyeongsang National University

(Received September 15, 2022; Revised October 6, 2022; Accepted October 12, 2022)

**Abstract** – Among the operating limits of a heat pipe, the capillary limit is significantly affected by the characteristics of the wick, which is determined by the capillary performance. The major parameters for determining capillary performance are the maximum capillary pressure and the spreading characteristics that can be expected through the wick. A well-designed wick structure improves capillary performance and helps improve the stability of the heat pipe by enhancing the capillary limit. The capillary performance can be improved by forming a porous microstructure on the surface of the wick structure through surface modification techniques. In this study, a microstructure is formed on the surface of the wick by using a surface modification method (i.e., an electrochemical etching process). In the experiment, specimens are prepared using stainless-steel screen mesh wicks with various fabrication conditions. In addition, the spreading and capillary rise performances are observed with low-surface-tension fluid to quantify the capillary performance. In the experiments, the capillary performance, such as spreading characteristics, maximum capillary pressure, and capillary rise rate, improves in the specimens with microstructures formed through surface modification compared with the specimens without microstructures on the surface. The improved capillary performance can have a positive effect on the capillary limit of the heat pipe. It is believed that the surface microstructures can enhance the operational stability of heat pipes.



© Korean Tribology Society 2022. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

**Keywords** – Capillary performance(모세관 성능), Capillary rise height(모세관 상승 높이), Micro(마이크로 구조), Screen-mesh wick(스크린-메쉬 워), Surface modification(표면 개질)

\*Corresponding author: Hyungmo Kim

Tel: +82-55-772-1629, Fax: +82-55-772-1577

E-mail: [hyungmo@gnu.ac.kr](mailto:hyungmo@gnu.ac.kr)

<https://orcid.org/0000-0003-4765-6835>

### 1. 서 론

전자기기의 고집적화, 이차전지의 발열 이슈 등 최근 여러 분야에서 효과적인 열 관리가 중요해지고 있다. 히트

파이프(heat pipe)는 상변화를 이용한 매우 효율적인 열 전달 장치로, 밀폐된 용기 내부에는 다공성의 워(wick) 구조물이 존재하고 부가적인 동력 장치 없이 모세관 압력(capillary pressure)에 의해 히트파이프를 구동하게 된다.

히트파이프에서 워(wick)은 작동 유체를 순환시키는 중요한 역할을 하며, 워의 종류와 형상은 히트파이프의 성능을 결정 짓는 중요한 설계 인자로 볼 수 있다. 만약, 특정한 운전 조건에서 더 이상 워에 의해 응축된 액체가 증발부로 공급되지 못하면, 증발부는 과열되어 히트파이프는 구동되지 못하고 심한 경우 파손에 이르게 된다[1-4].

이러한 히트파이프의 작동 한계(operation limit) 중 워의 특성에 가장 크게 영향을 받는 모세관 한계(capillary limit)는 모세관 성능(capillary performance)에 의해 결정되며, 모세관 성능에 영향을 주는 주요 인자로는 워를 통해 기대할 수 있는 최대 모세관 압력과 퍼짐 특성(spreading characteristics)을 들 수 있다. 증발부의 열유속이 점점 높아지게 되면, 작동유체의 유량 증가로 인한 압력강하가 점차 커지고, 워에 의해 기대할 수 있는 최대 모세관 압력이 작동유체의 순환에 의해 발생하는 압력강하 값을 극복하지 못하면 히트파이프는 구동이 불가능하다. 또한, 모세관 한계와 같은 고열유속(high heat flux) 환경에서는 증발부에 국소적인 드라이아웃(dry-out)이 발생할 가능성이 높으며, 이는 삼중선(triple line)에서의 퍼짐 특성이 중요해짐을 의미한다. 따라서 좋은 모세관 성능을 가지는 잘 설계된 워-구조물이 히트파이프의 안정성과 관련하여 중요해진다. 이때, 좋은 워-구조물을 설계하기 위해서는 높은 최대 모세관 압력과 투과성을 필요로 하게 된다[5-10].

즉, 최대 모세관 압력과 투과성을 동시에 향상시킬 수 있다면, 히트파이프의 모세관 한계를 올릴 수 있으며, 이는 히트파이프가 보다 넓은 작동영역에서 안정적으로 동작할 수 있음을 의미한다. 이를 위해 여러 표면 개질 기술의 발전이 일어나고 있는데, Jiang et al.은 그루브워에 나노 물질 합성을 통해 나노카본 폼의 워를 제작하였다. 생성된 나노 표면 구조를 통해 흡에서 모세관 상승률이 증가했고, 흡이 아닌 부분에서도 액체 상승이 이루어진 것을 확인할 수 있었다. 또 다른 연구에서, Zhong et al.은 초음파 변형을 통해 알루미늄 그루브워에 다공성 미세 구조를 제작하여 습윤성과 최대 모세관 상승 높이가 향상된 것을 확인하였다[11-12].

본 연구에서는 그루브워보다는 최대 모세관 압력이 높은 스크린-메쉬 워를 사용하여 실험을 진행하였다. 스크린-메쉬 워를 사용함으로써 그루브워에서만 표면개질을

하던 이전 연구와 달리, 표면개질이 어려운 스크린-메쉬 워까지 확장하는데 의의가 있다. 따라서 표면 개질을 통하여 스크린-메쉬 워의 표면에 미세구조를 형성하고, 모세관 성능 향상을 통한 모세관 한계의 개선을 실험을 통해 평가하였다.

## 2. 시편 제작

본 연구에서는 와이어 직경과 메쉬 넘버 등의 다양한 사양을 가지는 STS 316 스크린-메쉬 워를 이용하여 시편을 제작하였다. STS 316은 내구성과 내부식성이 뛰어나고 다양한 사양을 가지기 때문에 산업적으로 활용성이 높다. 시편의 크기는 3 cm × 2 cm이고, 메쉬 번호가 100인 스크린-메쉬 워를 선택하였다. 기존 연구에서 1.2%의 질산으로 묽은 왕수를 제작했지만, 본 연구에서는 과도한 에칭이 발생하지 않도록 질산의 농도를 더 낮추어 용액을 제작하였다[13]. 에칭 용액은 3.6% 염화수소 및 0.3% 질산 수용액을 1:1 부피비로 혼합한 묽은 왕수를 사용한다.

Fig. 1은 시편 제작에 사용된 실험 구성을 나타낸다. 탄소판(Carbon Plate)은 음극에 부착하고 양극에는 시편을 부착하였고 이를 평행하게 위치시켰다. 이후, 직류전류를 인가하여 시편이 부착된 양극에서 에칭이 발생할 수 있도록 만들어 주었다. 에칭이 완료된 이후에는 핫플레이트를 이용하여 시편을 건조시켜 주었다.

Fig. 2는 SEM으로 촬영한 스테인리스 스틸 시편의 식각 전후의 사진이다. SEM 이미지에서 볼 수 있듯이, 표면의 미세구조는 전압이 증가할수록 표면에 더 균일한 미세구조가 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이때 만들어진 시편의 미세구조는 수 마이크로미터의 크기로 형성된다. Table 1은 시편 제작 시 사용된 공정 조건이고 공정 변수로는 시편에 인가되는 전압을 선택하였다. Ref.의 경우에는 식각을 하지 않은 메쉬를 나타내며, A, B, C는 각각 인가되는 전압을 6V, 8V 10V로 설정하여 식각을 진행한 시편을 나타낸다.

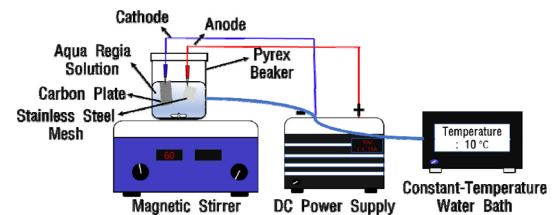


Fig. 1. The schematic diagram of the electrochemical etching process.

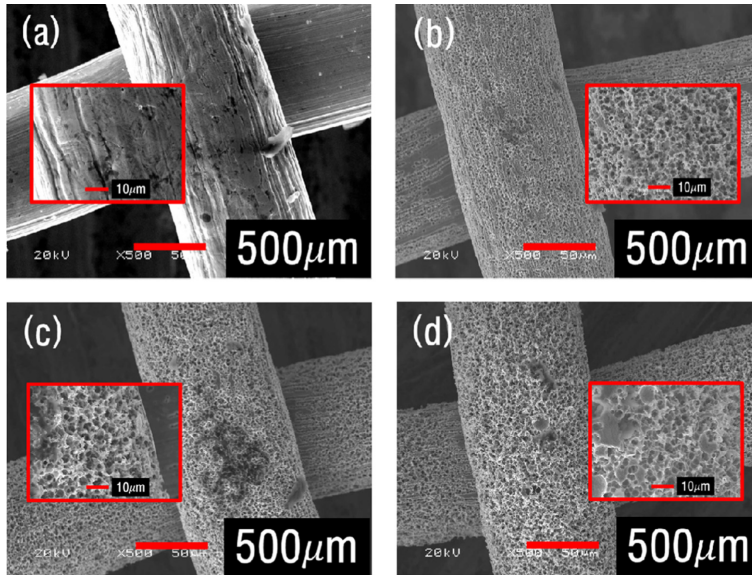


Fig. 2. SEM images of (a) reference wick and applied voltage of (b) 6V wick, (c) 8V wick, (d) 10V wick during electrochemical etching process.

Table 1. Fabrication conditions for specimens produced by electrochemical etching process

Specimen Numbering	Voltage [V]	Current [A]	Etching Time [m]
Ref.	-	-	-
A	6	1.5	2
B	8	2.4	2
C	10	3.1	2

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1 Spreading

##### 3.1.1 Spreading 실험 방법

Fig. 3(a)는 Spreading 실험 시에 사용한 구성(set-up)이며, Fig. 3(b)는 초고속 카메라를 이용해 촬영된 순차적인 이미지(sequential image)를 나타낸다. 작동 유체로는 13.6[mN/m]의 낮은 표면장력을 가지는 HFE 7100 냉매를 이용하였다. 실제 히트파이프의 환경과 유사하게 만들어주기 위해 기판으로 STS 316을 사용해 시편을 고정시켰다. 실험은 Droplet drop method를 이용하였고, 액적이 시편에 닿는 순간을 기점으로 시간의 흐름에 따른 액적의 높이와 너비 변화를 관찰하였다. 이때, 너비는 액적과 시편의 표면이 만나는 길이(contact line)로 측정하였다.

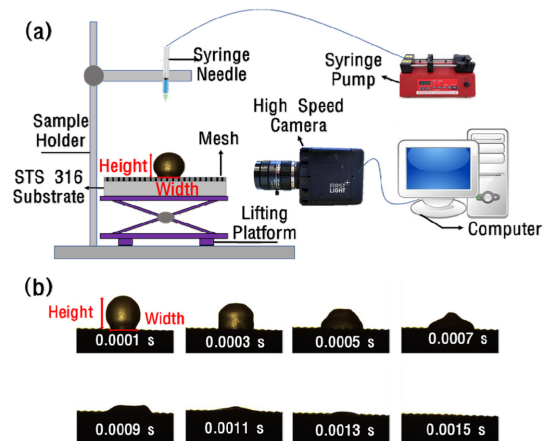


Fig. 3. (a) The schematic diagram of spreading test and (b) spreading images over time.

##### 3.1.2 Spreading 결과

Fig. 4(a), (b)는 시간에 따른 액적의 높이와 너비의 변화를 관찰한 결과를 나타낸다. 그래프를 보게 되면 인가된 전압이 증가할수록 너비의 경우 기울기가 가장 가파른 것을 확인할 수 있다. 정량적으로 나타내면, C의 피크점을 기준으로 A, B, C가 Ref. 대비 각각 18.0%, 10.9%, 21.1% 향상되었다. 이때 C의 경우 너비가 증가하다가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 측정할 때 액

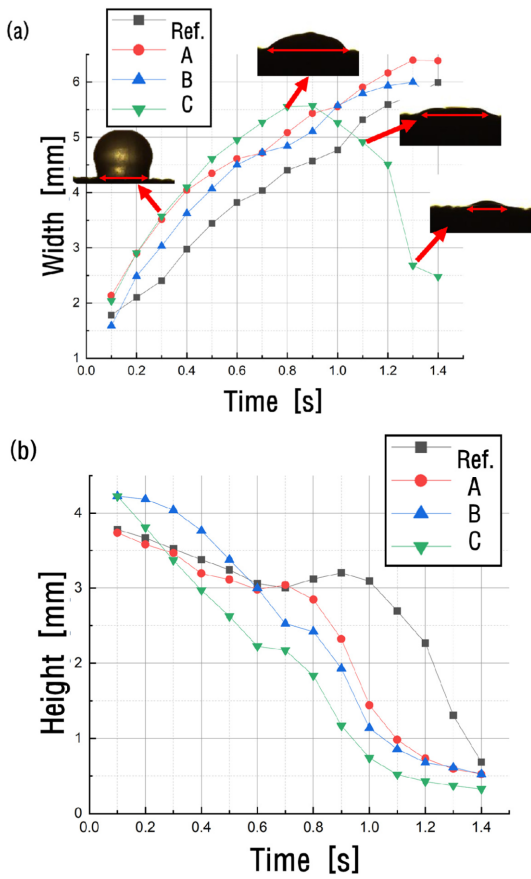


Fig. 4. Changes in (a) width and (b) height of droplets over time.

적이 시편에 빠르게 스며들어 육안으로 보이는 접촉선이 줄어들기 때문이다. 반면, 높이의 경우에는 전압이 증가할수록 기울기가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 정량적으로 나타내면, 0.9s에서 A, B, C가 Ref. 대비 각각 8.7%, 22.3%, 41.2% 향상되었다. 이를 통해, 개질된 표면이 퍼짐 특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

### 3.2 Capillary rise

#### 3.2.1 Capillary rise 실험 방법

모세관 상승은 적외선(IR) 열화상 카메라(A6703)를 이용하여 위의 모세관 상승률과 최대 모세관 상승 높이를 관찰한 것이다. 이 실험의 자세한 구성은 Fig. 5(a)에 나와 있고 작동 유체로는 표면장력이 낮은 HFE 7100을 이용하였다. 실험은 높은 적외선 투과율을 가지는 사파이어 글라스를 시편의 양쪽 면에 고정시킨 후 진행하였다. 이를 통해, 시편과 기판 사이의 공간을 일정하게 유지시

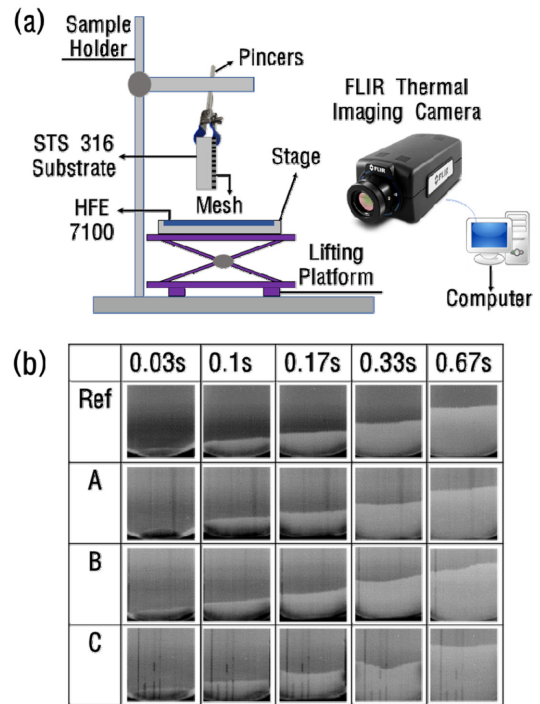


Fig. 5. (a) The schematic diagram of capillary rise test and (b) IR recording images of each specimen.

켰다. 실험은 HFE 7100 냉매가 들어있는 용기를 올려 시편과 접촉하였고, 접촉한 시점을 기준으로 약 1초 미만의 시간 동안 녹화해 Fig. 5(b)와 같은 결과를 얻었다.

#### 3.2.2 Capillary rise 결과

모세관 상승률과 최대 모세관 상승 높이는 위의 모세관 성능 평가를 하기 위해 아주 중요한 결과로 작용한다. Fig. 6은 시간에 따른 모세관 상승률을 나타내며, ImageJ를 이용하여 픽셀의 면적을 계산하고 이를 높이로 환산하였다. Ref.의 경우 동일 시간에서 모세관 상승이 제일 낮고 A, B, C로 갈수록 모세관 상승이 커지는 것을 알 수 있다. 이를 정량적으로 표현하면 A, B, C가 초기에는 각각 28.5%, 21.5%, 25.9% 정도 Ref. 보다 높게 나타나고, 시간이 어느 정도 흐른 후에는 각각 14.8%, 9.4%, 6.0%정도 높게 나타난다. Fig. 7에서는 최대 모세관 상승 높이를 나타냈다. 결과를 보게 되면 A, B, C가 각각 Ref. 보다 14.3%, 7.9%, 7.6%씩 최대 모세관 상승 높이가 증가한 것을 볼 수 있다. 앞선 Spreading 실험 결과가 실제 히트파이프의 구동환경에서의 유체의 투과성을 나타내는 것은 아니지만, 최소한 표면구조가 투과성에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 따라서 최

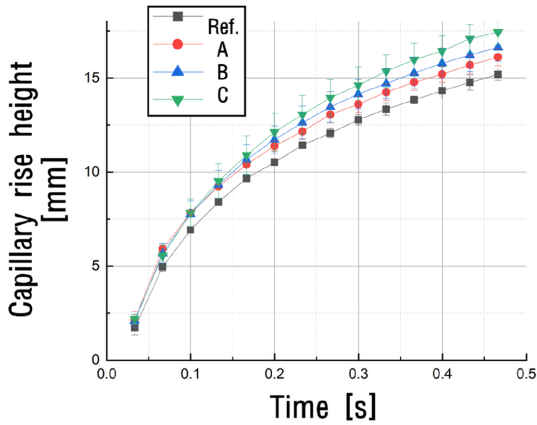


Fig. 6. Capillary rising rate of each specimen.

대 모세관 상승 높이가 증가한 본 실험의 결과와 종합하면 시편의 표면에 만들어진 마이크로미터 스케일의 미세구조가 모세관 성능을 향상시킬 수 있음을 나타낸다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 시편의 퍼짐과 모세관 성능 향상을 위해 에칭을 이용하여 시편을 제작하였다. 특히, 투과성과 모세관 상승 높이의 경우 서로 trade-off의 관계가 있다. 이를 해결하기 위해 표면에 마이크로미터 스케일의 미세 구조를 만들어 최소한 투과성에 악영향을 미치지 않으면서 최대 모세관 압력이 우수한 워를 만들고자 하였다. 이때 퍼짐(spreading) 실험과 capillary rise 실험을 통해 기존 워과 비교하고, 다음과 같은 향상된 결과를 얻었다.

1. 개질된 시편이 개질하지 않은 시편에 비하여 퍼짐 특성이 향상되었고, 이 결과는 히트파이프에서 계면이 생긴 환경에서도 작동 액체를 빨리 공급해줘야 하는 워의 성능 향상에 기여할 가능성이 있음을 보여준다.

2. 모세관 상승률과 최대 모세관 상승 높이와 같은 모세관 성능이 개선되었다. 특히 표면에 균일하게 미세구조가 형성된 시편에서 상승이 가장 크게 나타났으며, 모세관 상승률과 최대 모세관 높이에서 각각 28.5%, 14.3%가 향상되었다. 이는 표면의 미세구조가 스크린-메쉬의 격자 구조의 pitch에 의해 결정되는 모세관력 외에 추가적으로 미세구조에 의해 triple-line에서의 wicking force를 얻어, 워이 액체를 최대로 빨아들일 수 있는 양이 증가한 것을 의미한다.

이러한 실험 결과를 통해 종합적으로 스크린-메쉬 워의 모세관 성능이 향상된 것으로 판단할 수 있으며, 이

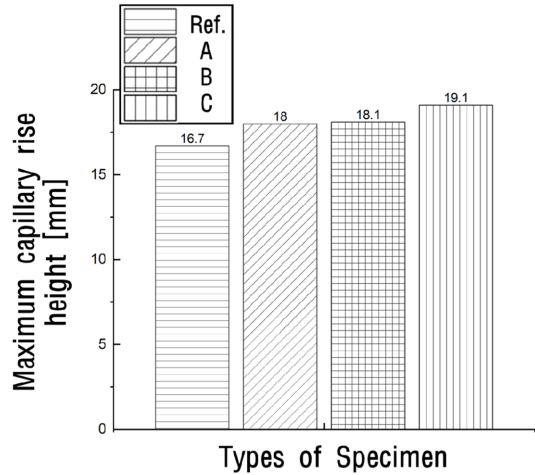


Fig. 7. Maximum capillary rise height of each specimen.

는 결과적으로 히트파이프의 모세관 한계를 올려 보다 넓은 범위에서 운전이 가능해지는 등 히트파이프의 안정성과 성능 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

#### Acknowledgements

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1F1A1065553, 2020R1F1A1050735).

#### References

- [1] Jiang, G., Tian, Z., Luo, X., Chen, C., Hu, X., Wang, L., Peng, R., Zhang, H., Zhong, M., "Ultra-thin aluminum wick with dual-scale microgrooves for enhanced capillary performance", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.190, p.122762, 2022.
- [2] Robinson, A. J., Colenbrander, J., Deavile, T., Durfee, J., Kempers, R., "A wicked heat pipe fabricated using metal additive manufacturing", *Int. J. Thermofluids*, Vol.12, p.100117, 2021.
- [3] Wang, Y., Vafai, K., "An experimental investigation of the thermal performance of an asymmetrical flat plate heat pipe", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.43, No.15, pp.2657-2668, 2000.
- [4] Ramachandran, R., Ganesan, K., Rajkumar, M. R., Asirvatham, L. G., Wongwises, S., "Comparative study of the effect of hybrid nanoparticle on the thermal performance of cylindrical screen mesh heat pipe", *Int. C. Heat and Mass Transfer*, Vol.76, pp.294-300, 2016.

- [5] Kim, K. M., Bang, I. C., "Effects of graphene oxide nanofluids on heat pipe performance and capillary limits", *Int. J. Heat Thermal Sciences*, Vol.100, pp. 346-356, 2016.
- [6] Jafari, D., Wits, W. W., Geurts, B. J., "Metal 3D-printed wick structures for heat pipe application: Capillary performance analysis", *Applied Thermal Engineering*, Vol.143, pp.403-414, 2018.
- [7] Faghri, A., Thomas, S. "Performance characteristics of a concentric annular heat pipe : Part 1 – Experimental prediction and analysis of the capillary limit", *J. Heat Transf.-Trans. ASME*, Vol.111, pp.844-850, 1989.
- [8] Wong, S. C., Deng, M. S., Liu, M. C., "Characterization of composite mesh-groove wick and its performance in a visualizable flat-plate heat pipe", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.184, p.122259, 2022.
- [9] Li, Y., He, H. F., Zeng, Z. X., "Evaporation and condensation heat transfer in a heat pipe with a sintered-groove composite wick", *Appl. Therm. Eng.*, Vol.50, pp. 342-351, 2013.
- [10] Huang, G., Li, W., Zhong, G., Abdulshaheed, A. A., Li, C., "Optimizing L-shaped heat pipes with partially-hybrid mesh-groove wicking structures", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.170, p.120926, 2021.
- [11] Li, J., Zhang, M., "Enhanced capillary performance of grooved nanocarbon foams as wicks for heat pipes", *Int. C. Heat and Mass Transfer*, Vol.130, p.105763, 2022.
- [12] Zhong, G., Tang, Y., Ding, X., Chen, G., Li, Z., "Experimental investigation on wettability and capillary performance of ultrasonic modified grooved aluminum wicks", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol.179, p.121642, 2021.
- [13] Lee, C., Kim, J. M., Kim, H., "A study on Water-Proof Characteristics of a Stainless Steel Mesh by Electrochemical Etching Process", *Tribol. Lubr.*, Vol.37, pp.189-194, 2021, <https://doi.org/10.9725/kts.2021.37.5.189>