

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.11.755>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 압출형 박판 히트파이프의 모세관력 향상을 위한 구조 개발<sup>§</sup>

문 석 환<sup>\*†</sup> · 박 윤 우<sup>\*\*</sup>

\* 한국전자통신연구원 3D신소자연구실, \*\* 충북대학교 기계공학부

### Development of the Structure for Enhancing Capillary Force of the Thin Flat Heat Pipe Based on Extrusion Fabrication

Seok Hwan Moon<sup>\*†</sup> and Yoon Woo Park<sup>\*\*</sup>

\* 3 Dimensional New Devices Research Section., ETRI,

\*\* School of Mechanical Engineering, Chungbuk Univ.

(Received January 29, 2016 ; Revised August 3, 2016 ; Accepted September 18, 2016)

**Key Words:** Capillary Force(모세관력), Wire Bundle(와이어 다발), Interposer(인터포저), TSV(관통 실리콘 홀)

**초록:** 전자 통신 분야에서 히트파이프를 활용한 방열기술은 점차 늘어나고 있다. 특히 전자 패키지 응용에서는 원형 단면 히트파이프에 비해 평판 형상의 얇은 히트파이프가 보다 더 적용하기에 용이하다. 압출 공정에 기반한 평판 히트파이프는 내벽에 사각 단면 그루브들로 이루어진 단순한 모세관 Wick 구조를 갖는다. 그루브 Wick 내벽에 다수 개 설치가 된다고 하더라도 상대적으로 높은 모세관력을 달성하기는 어렵다. 본 연구에서는 그루브 Wick의 모세관력 향상을 위해 와이어 다발을 적용한 평판 히트파이프의 제작 및 성능평가 실험을 수행하였다. 실험을 통해 와이어 다발을 Wick으로 갖는 평판 히트파이프의 열저항 및 열전달률이 그루브 Wick 평판 히트파이프에 비해 각각 3.4배와 3.8배 가량 우수한 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 와이어 다발을 통한 모세관력 향상 효과를 실험적으로 확인하였으며, 향후 상용화를 위한 연구를 진행할 계획이다.

**Abstract:** The use of heat pipes in the electronic telecommunication field is increasing. Among the various types of heat pipes, the thin flat heat pipe has relatively high applicability compared with the circular heat pipe in the electronic packaging application. The thin flat heat pipe based on extrusion fabrication has a simple capillary wick structure consisting of rectangular cross sectional grooves on the inner wall of the pipe. Although the groove serves as a simple capillary wick, and many such grooves are provided on the inner wall, it is difficult for the grooves to realize a sufficiently high capillary force. In the present study, a thin flat heat pipe with a wire bundle was developed to overcome the drawback of poor capillary force in the thin flat heat pipe with grooves, and was evaluated by conducting tests. In the performance test, the thin flat heat pipe with the wire bundle showed a lower thermal resistance of approximately 3.4 times, and a higher heat transfer rate of approximately 3.8 times with respect to the thin flat heat pipe with grooves as the capillary wick respectively. The possibility of using the wire bundle as a capillary wick in the heat pipe was validated in the present study; further study for commercializing this concept will be taken up in the future.

- 기호설명 -

$P_{vx}$  : 증기 압력  
 $P_{lx}$  : 액체 압력

$\sigma$  : 표면 장력  
 $R_{1x}$  : 길이방향 곡률반경  
 $R_{2x}$  : 반경방향 곡률반경

§ 이 논문은 대한기계학회 창립 70주년 기념 학술대회 (2015. 11. 10-14., ICC 제주) 발표논문임.

† Corresponding Author, [shmoon@etri.re.kr](mailto:shmoon@etri.re.kr)  
© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

## 1. 서론

최근 전력반도체를 적용한 전자패키지 모듈에서의 방열구조는 인터포저(interposer), 관통 실리콘

홀(TSV, Through Silicon Via)를 통해 주로 열전달시키는 삼차원(3 Dimension) 형태로 발전하고 있어, 방열 설계에 어려움이 뒤따르고 있다. 참고로, 인터포저는 서로 다른 부품을 연결해주는 패키지 기판을 의미하며, 방열 통로로도 활용된다. 위와 더불어 패키지 모듈 외부로 전달되어지는 열량이 주위 대기로 또한 원활히 소산되기 위해서는 시스템의 요구에 부응하는 냉각수단이 적용되어야 한다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 주위 대기로의 열 소산 수단으로서 공냉 및 수냉 모두에 적용 가능한 히트파이프를 대상으로, 기존 원형 대비 설치가 용이하고 넓은 면적에 단일 구조로 사용이 가능한 박판형 히트파이프(Thin Flat Heat Pipe, TFHP)를 고려했다. 압출로 제작되어 제조 공정이 단순하고, 알루미늄 소재에 기반한 경량화가 가능한 점은 선행 연구를 통해 장점으로 확인되었으나,<sup>(2)</sup> 상대적으로 좁은 내부의 작동유체 유동 공간 대비 높은 모세관력 달성을 위한 방안이 필요한 것으로 나타났다.<sup>(3-5)</sup> 이는 상대적으로 직경이 작은 히트파이프에서는 별도의 모세관 워(wick)를 삽입하는 것이 어려우며, 일반적으로 파이프 벽을 성형해 모세관 구조를 가공하게 되는 데, 인발 및 압출로 제작되는 파이프의 경우, 가공 한계에 부딪히게 된다.<sup>(6-10)</sup> 여기서의 파이프는 히트파이프 제작 공정의 관통 관을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 모세관력 향상을 위해 별도의 와이어 다발을 내부에 삽입하여 이의 목적을 달성하고자 하였으며, 연구를 통해서 기존 사각단면 그루브 모세관 구조의 박판형 히트파이프 대비 성능 향상 정도를 평가하였다. 아래 식 (1)은 소형 히트파이프 내에서 형성되는 기-액 계면에서의 모세관력을 나타내는 식으로서, 정상적인 작동특성의 기준이 되며, 본 연구 대상의 박판형 히트파이프 또한 식 (1)의 작동한계에 지배된다.

$$P_{vx} - P_{lx} = \sigma \left( \frac{1}{R_{1x}} + \frac{1}{R_{2x}} \right) \quad (1)$$

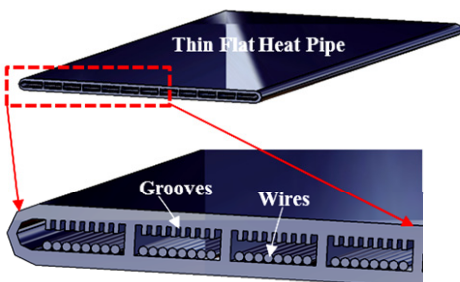


Fig. 1 Design of the thin flat heat pipe

## 2. 박판형 히트파이프 설계 및 제작

### 2.1 모세관 구조 설계 및 제작

모세관력의 향상을 위한 방안으로서 Fig. 1과 같이 내부에 와이어 다발(bundle)을 삽입하는 모세관 구조를 설계하였다. 와이어들이 상호 간에 형성하는 코너(corner)들이 훌륭한 모세관 구조 역할을 수행할 수 있으며, 여러 개의 다발 형태로 이루어져 있어 모세관력 발생의 성공 확률은 높은 편이다. 여기서 사용된 와이어는 파이프 구조이고, 크기는 외경 0.26 mm, 벽 두께 0.135 mm이며, 재질은 스테인레스 스틸(stainless steel)이다.

와이어 다발의 모세관구조가 장착되는 박판형 히트파이프는 폭 40 mm, 두께 2 mm, 길이 300 mm의 크기를 가지며, 알루미늄 파이프는 단면 상 12개의 분리된 공간으로 구성되며, 여기에 와이어 다발이 아랫면에 9개씩 각각 설치되는 구조를 갖는다. 한편 파이프의 내부 윗 면에는 사각단면 형상의 그루브 구조가 가공돼 있다. Table 1에 박판형 히트파이프의 재원을 나타내었으며, Fig. 2는 내부에 모세관 구조로서 삽입된 와이어 다발의 장착 모습을 보여주고 있다.

### 2.2 박판형 히트파이프 제작

상대적으로 크기가 커 내부 공간이 어느 정도 확보될 수 있는 히트파이프들과 달리, 박판형 히트파이프에서는 와이어 다발을 삽입한 후 제작하는 공정에 어려움이 따른다. 즉, 와이어 다발을 벽

Table 1 Specification of the thin flat heat pipe

Section	Groove TFHP	Wire TFHP
Total Length	300 mm	
Evaporator Length	50 mm	
Condenser Length	100 mm	
Thickness	2 mm	2 mm
Number of Grooves	14 ea	7 ea

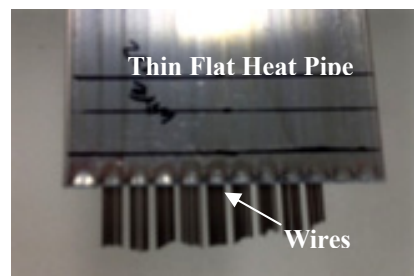


Fig. 2 Inserted wire bundle into the TFHP

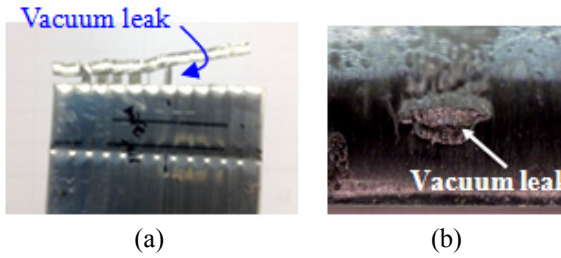


Fig. 3 Fabrication process of the TFHP

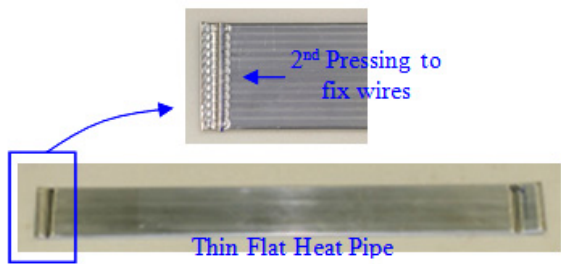


Fig. 4 Fabricated TFHP

면에 밀착시키기 위한 공정 기술, 그리고, 제작하는 동안 이탈하지 않도록 고정하는 방법 등은 다수의 시행착오를 유발하였다. Fig. 3(a)는 진공 및 작동유체 충전 과정에서 발생한 와이어 이탈 현상을 나타낸 것이다. 즉, 와이어의 일부가 이탈하게 되면 파이프 절단면이 접합되지 못하게 되며, 이는 제작공정 완료 후 불응축성 가스의 유입으로 이어져 제작 실패를 하게 된다. Fig. 3(b)에 절단면 또는 구조적 취약 면에서의 와이어 이탈에 의한 제작 실패 예를 나타내었다.

Fig. 4는 제작된 박판형 히트파이프의 외형으로서, 양 끝 단은 와이어 다발을 아랫 면에 고정하기 위한 누름 공정이 적용돼 있음을 보여주고 있다. 작동유체는 아세톤(acetone)을 사용하였다. 박판형 히트파이프 내 와이어 다발의 삽입은 파이프의 한 쪽을 절단하여 밀폐한 상태에서 밀폐되지 않은 다른 쪽으로부터 이루어지며, 파이프를 기울여주면 와이어 다발의 무게에 의해 쉽게 들어가게 된다. 삽입된 와이어 다발은 Fig. 4에서의 확대 그림과 같이 절단선 안 쪽을 눌러 내부 한쪽 면에 고정되도록 하였다. 이때 와이어 다발은 파이프의 양 쪽 면이 아닌 한 쪽 면만을 누름으로써 벽면에 고정되게 된다. 이어 작동유체 충전 공정 후 나머지 한 쪽 또한 동일한 방법으로 절단, 밀폐 및 누름 작업을 진행하게 된다. 참고로, 와이어 다발은 평면 상에 놓았을 때 직진성을 충분히 유지하며, 위와 같이 파이프의 길이방향으로 양 쪽 부분을 누를 때, 작은 직경의 9개 와이어 다발이 강하기도 하지만, 직진성이 유지될 수 있도록 파이프 벽

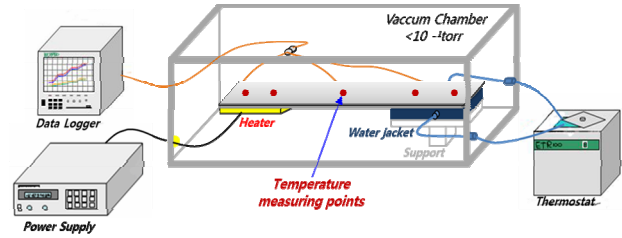


Fig. 5 Experimental set-up

두께, 와이어 두께를 고려해, 누르는 두께를 맞추어 진행하였다.

### 3. 성능평가 실험 및 결과

#### 3.1 실험장치 및 방법

박판형 히트파이프의 다양한 크기에 대응하고, 단일 방법의 방안으로서 Fig. 5와 같이 진공 챔버를 설계 및 제작하였다. Fig. 5의 진공 챔버는 약  $10^{-1}$  torr 이하의 진공 유지가 가능하며, 실험 기간 동안 지속적으로 진공 흡입(suction)을 수행하도록 설계하였다. 한편 열전달 성능 평가와 관련해 다양한 열전달률의 소산이 가능하도록 응축부 측에는 물 재킷(water-jacket)에 의한 액체 냉각이 이루어지도록 하였으며, 다양한 경사각 변화에 효과적으로 실험 수행이 가능하도록 진공 챔버 자체가 경사질 수 있게 또한 설계하였다. 벽면의 온도측정을 위해 K형(K-type) 열전대를 박판형 히트파이프 윗 면과 아랫 면에 각각 5점씩 즉, 증발부 2점(50 mm의 3등분 지점), 단일부 1점(150 mm의 중간 지점) 그리고 응축부 2점(100 mm의 3등분 지점)을 설치하였으며, 각 열량에 대해 정상 상태 도달 후 데이터를 기록하였다. 여기서 정상상태는 증발부에 가해진 각 열량값에서 60초 동안 온도 변화가  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  이하일 때로 정의하였다. 데이터 처리시 증발부 및 응축부에서의 온도값은 평균값을 적용하였으며, 측정결과는 열량 공급장치(HP, 6674A)의 전압( $\pm 0.05\text{ V}$ , 0.05%)과 전류( $\pm 0.01\text{ A}$ , 0.1%)의 개별 오차와 온도 측정기(YOKOGAWA, MV200)의 개별 오차( $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 0.15%)를 포함할 수 있으며, 공급 열량은 오차 해석 결과  $\pm 0.094\text{ W}$ (0.63%)의 크기를 갖는다.<sup>(11,12)</sup>

#### 3.2 등온특성 및 전열성능

Fig. 6은 와이어 다발이 삽입된 박판형 히트파이프의 등온 특성을 나타낸 것으로서, 증발부 내 입열량 증가에 따라 응축부측의 벽면 온도가 민감하게 동조하고 있어, 와이어 다발 삽입에 따른 박판형 히트파이프의 설계 및 제작이 정상적으로 이

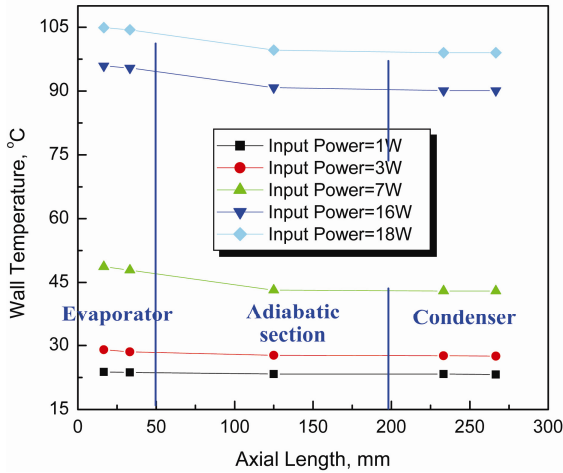


Fig. 6 Constant temperature characteristics of the TFHP

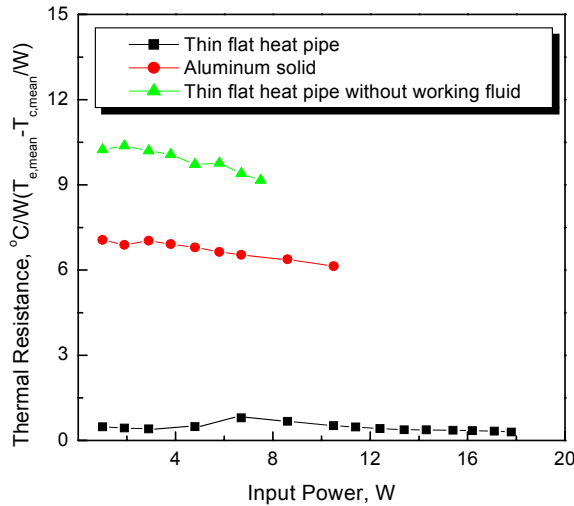


Fig. 7 Comparison of thermal resistance among the Al solid, TFHP with W/F and TFHP without W/F

루어졌음을 알 수 있다. Fig. 7은 와이어 다발이 삽입된 박판형 히트파이프와 동일 크기의 알루미늄 솔리드(solid) 그리고 작동유체를 충전하지 않은 박판형 히트파이프에 대한 수평모드에서의 전열 성능을 열 저항 크기로 나타낸 실험결과이다. 그림에서 보면 와이어 다발이 삽입되고 작동유체가 정상적으로 충전된 박판형 히트파이프의 열 저항이 알루미늄 솔리드에 비해 약 9.6배, 작동유체가 충전되지 않은 박판형 히트파이프에 비해 약 13.8 배 가량 낮은 것으로 나타났다. Fig. 7에서의 열 저항이라 함은 증발부와 응축부 간의 온도차를 증발부에 가해진 열량으로 나눈 값을 의미하며, 아래 식 (2)에 의해 계산되어진다.

$$R = \frac{\bar{T}_e - \bar{T}_c}{Q} \quad (2)$$

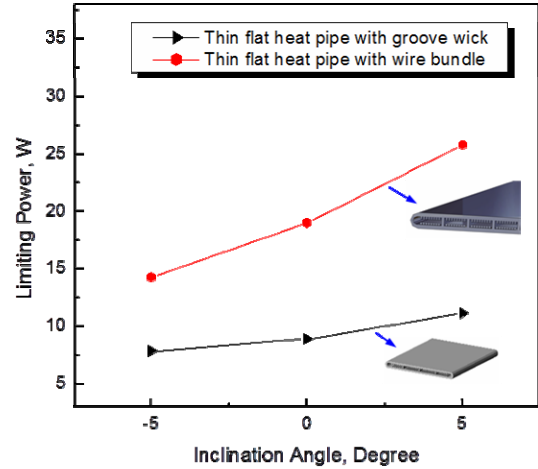


Fig. 8 Comparison of limiting power between the grooved TFHP and the wire bundle TFHP

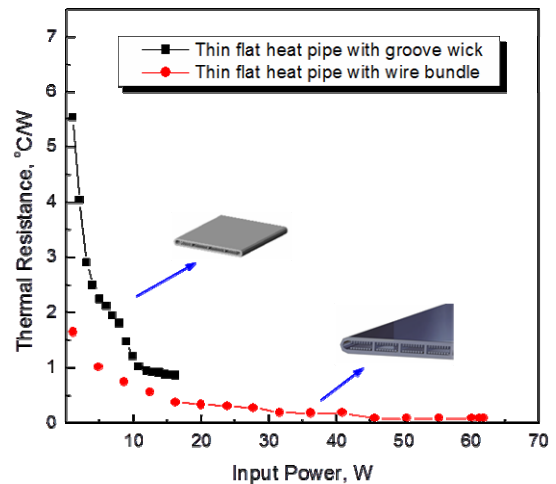


Fig. 9 Comparison of thermal resistance between the grooved TFHP and the wire bundle TFHP

여기서,  $\bar{T}_e$ 는 증발부 내 평균 벽면 온도를,  $\bar{T}_c$ 는 응축부 내 평균 벽면 온도를 그리고 Q는 증발부에 가해진 열량을 각각 의미한다.

Fig. 8은 내부에 사각단면 형상의 그루브 구조를 갖는 (구)박판형 히트파이프와 본 연구를 통해 개발된 와이어 다발 삽입의 박판형 히트파이프 간의 열전달 성능을 상호 비교한 결과이다. 그래프에서 보면 와이어 다발 삽입의 박판형 히트파이프는 (구)박판형 히트파이프에 비해 경사각 변화에 따라 약 1.8~2.3배 가량 증가한 열전달 성능을 보이는 것으로 나타났으며, 이는 와이어 다발 삽입의 박판형 히트파이프의 경우에 와이어 다발에 의한 모세관력 향상에 기인하는 것으로 파악된다. Fig. 8에서의 한계 열량(limiting power)의 정의는 증발부에서의 벽면 온도가 110 °C를 넘지 않는 범위 내

에서 증발부에 가해진 열량 값을 의미한다. 한편 수직모드에서 와이어 다발 삽입의 박판형 히트파이프가 (구)박판형 히트파이프에 비해 열 저항은 약 2~3.4배 가량 감소, 그리고 열전달률은 약 3.8배 가량 높은 열전달 성능을 나타내었다. 이는 내부 증기 유동 공간이 상대적으로 작아 기-액 계면에서의 마찰력에 의한 압력강하가 전열 성능에 크게 영향을 미치는 본 연구에서의 박판형 히트파이프에서는 수직 모드에서도 응축 액의 증발부로의 귀환이 증력에만 의존하는 것이 아닌 내부 워 구조의 모세관력 영향에 크게 지배되기 때문으로 생각된다. 직경이 상대적으로 작아 Fig. 9에 수직 경사각모드에서의 성능평가 결과를 나타내었다. 여기서 수직 모드는 증발부가 응축부보다 증력 방향을 기준으로 아래에 위치함을 의미한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 압출로 제작돼 공정이 단순하고, 경량화 냉각솔루션으로서 장점을 갖는 박판형 히트파이프의 상대적으로 낮은 모세관력 향상을 위한 구조 개발을 수행하였다. 모세관 구조로서 와이어 다발의 박판 구조 내 아랫 면 설치를 고려하였으며, 연구를 통해 와이어 다발의 삽입 및 고정을 효과적으로 시키고, 작동유체 주입 및 진공의 제작 공정 기술을 확보하였다. 등은 특성 평가를 통해서 와이어 다발의 박판형 히트파이프가 열량 공급에 따라 증발부와 응축부의 양단 간 온도차가 매우 잘 동조함을 알 수 있어 정상적 설계 및 제작이 이루어졌음을 확인하였다. 전열 성능 평가를 통해서 그루브 박판형 히트파이프에 비해 와이어 다발 박판형 히트파이프가 -5~+5의 경사각 범위에 대해 약 1.8~2.3배 가량 우수한 것으로 나타났다. 한편 수직모드의 전열성능 평가에서도 열 저항 약 2~3.4배 감소 및 열전달률 약 3.8배 가량 우수한 것으로 평가되었다. 본 연구를 통해 와이어 다발의 모세관력 향상 특성을 확인할 수 있었으며, 향후 다양한 종류 및 구조의 개발을 통해 모세관력 향상의 극대화를 달성할 계획이다.

#### 후 기

본 연구는 ETRI의 R&BD 기관연계형 사업과 대덕특구 기술사업화 과제(과제번호:15DD1007)에 의해 지원되었음.

#### 참고문헌

(References)

- (1) Xie, H., Aghazadeh, M. and Toth, J., 1995, "The Use of Heat Pipes in the Cooling of Portables with High Power Packages," *Proc. of the 45th Electronic Components & Technology Conference*, pp. 906~913.
- (2) Moon, S. H., Hwang, G., Chun, C. H. and Kim, Y. T., 2002, "Manufacturing and Thermal Performance of the Flat Plate Micro Heat Pipe," IMAPS ATW.
- (3) Faghri, A., 1988, "Performance Characteristics of a Concentric Annular Heat Pipe Part II Vapor Flow Analysis," *ASME Proc. of the 1988 National Heat Transfer Conference*, Vol. 96, pp. 389~396.
- (4) Wang, Y. X. and Peterson, G. P., 2002, "Optimization of Micro Heat Pipe Radiators in a Radiation Environment," *J. of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 16, No. 4, pp. 537~546.
- (5) Park, S. Y. and Boo, J. H., 2005, "An Experimental Study on the Thermal Performance of a Flat-Ship Hear Pipe with Inner Grooves and Screen Mesh Cover," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 29, No. 7, pp. 805~813.
- (6) Ding, C., Soni, G., Bozorgiet, P., Piorek, B., Meinhart, C. D. and MacDonald, N. C., 2008, "A Titanium-based Flat Heat Pipe," 2008 IMECE, IMECE2008-68967.
- (7) Mansouri, J., Sassi, M. B. H., Maalej, S. and Zaghdoudi, M. C., 2010, "Theoretical and Experimental Study on the Thermal Performance of Flat Miniature Heat Pipes including Rectangular Axial Grooves," ThETA3, Article number 5766379, pp. 51~61
- (8) Wang, C., Liu, Z., Zhang, G. and Zhang, M., 2013, "Experimental Investigations of Flat Plate Heat Pipes with Interlaced Narrow Grooves or Channels as Capillary Structure," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 48, pp. 222~229.
- (9) Yang, Y. X., Wang, X. D., Luo, Y. and Zou, L. L., 2014, "Heat Transfer Characteristic of Flat Trapezoid Grooved Micro Heat Pipes," *Key Engineering Materials*, Vol. 609, pp. 1526~1531.
- (10) Ghajar, M. and Darabi, J., 2014, "Evaporative Heat Transfer Analysis of a Micro Loop Heat Pipe with Rectangular Grooves," *Int. J. of Thermal Sciences*, Vol. 79, pp. 51~59.
- (11) Moon, S. H., Hwang, G. and Lim, H. T., 2011, "Development of a Flat-Plate Heat Pipe for Electronic Packaging," *ETRI Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 645~647.
- (12) Holman, J. P., 2001, "Experimental methods for Engineers," McGraw Hill Com., New York.