

열원의 위치에 따른 평판형 히트파이프의 열적 성능

박수용[†](한국항공대 원)·부준홍^{*}(한국항공대)

Thermal Performance of Flat-strip Heat Pipe with Various Heat Source Locations

Park, S. Y. and Boo, J. H.

Key Words: Flat-strip heat pipe(평판형 히트파이프), Heat Source Location(열원 위치), Thermal Performance(열성능), Groove(그루브), Aspect ratio(세장비)

Abstract

A series of experiments was conducted to examine characteristics of a grooved flat-strip heat pipe having multiple heat sources. The inner grooves of the heat pipe have the aspect ratio of 1 to 2.5(0.42×1.05 mm) whose pitch was 0.6 mm. Four block heaters (10×20 mm) were placed in the evaporator section at intervals of 20 mm and six different heating modes were tested. The maximum surface heat flux of 80 W/cm² was achieved while the operating temperature was kept below 100 °C. In the nearest heating mode (from the condenser location), the heat pipe exhibited more stable temperature distribution than the far heating mode where the heaters is located furthest from the condenser.

기호설명

A_e (증발부 면적, m²)

A_c (응축부 면적, m²)

\bar{h}_e (증발부 평균열전달계수, W/m²·K)

\bar{h}_c (응축부 평균열전달계수, W/m²·K)

R_{HP} (히트파이프 열저항, °C/W)

Q_{input} (공급 열부하, W)

$T_{e,m}$ (증발부 평균 온도, °C)

$T_{a,m}$ (단열부 평균 온도, °C)

$T_{c,m}$ (응축부 평균 온도, °C)

1. 서론

전기 및 전자 장치의 출력증가와 회로의 고집적으로 인해 발열 문제가 장치 내에서 일어나며, 이를 소산시키기 위해 다양한 방법들이 모색되고 있다. 특히, 히트파이프는 열원에서 발생한 열의 이송 방법들 중 상대적으로 우수한 열전달 성능을 보이는 장치인데, 히트파이프의 여러 형태 중 평판형의 경우에는 발열 장치를 히트파이프 표면에 바로 부착할 수 있는 이점을 가지고 있다⁽¹⁾.

최근의 고성능 소형 히트파이프에 대한 연구들은 히트파이프 내부에 가공한 그루브가 큰 세장비(aspect ratio)를 가지거나, 소결 워(wick)이나 다른 특별한 워 구조물을 삽입하여 큰 열전달 성능을 갖도록 하는 것에 집중되어 있다⁽²⁻⁴⁾. Cheng et al.은 큰 세장비를 갖는 평판형 그루브 히트파이프에 대한 해석을 수행하였으며, Ultra-deep LIGA Process를 통해 구리 재질의 히트파이프를 제작하였고, 히트파이프는 작동 온도 100 °C에서 최대

[†] 한국항공대학교 대학원

E-mail : sy park@mail.hankong.ac.kr

TEL : (02)300-0053 FAX : (02)3158-4429

* 한국항공대학교

391W의 열전달율을 보였다⁽⁵⁾. Lin et al.은 흰(fin) 형태로 접혀진 얇은 구리판을 내부에 삽입하여 고성능의 히트파이프를 제작하였으며, 집중된 열원에서 최대 140 W/cm^2 의 열유속을 보였다(6). Maziuk et al.은 계산을 통해 평판형의 소형 히트파이프에 대한 성능을 예측하였고, 이를 내부에 소결 워 구조를 가지는 구리-물 조합의 히트파이프 실험 결과와 비교하였다⁽⁷⁾.

히트파이프의 내부 워 구조물이 소결 워으로 되어있거나, 특별히 고안된 형태의 워이 삽입된 경우에는 일반적인 그루브 형태의 워만을 가진 히트파이프와 비교하여 보다 큰 성능을 낼 수 있다. 그러나 간단한 형태의 그루브를 가지는 히트파이프는 상대적으로 단순한 제작 방법과 적은 비용을 필요로 하기 때문에 상대적인 장점을 가지고 있다.

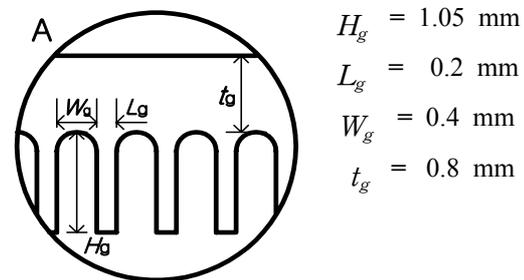
히트파이프의 열원의 위치와 성능에 관한 연구들도 이루어졌는데, Faghri와 Buchko는 다중 열원을 가지는 저온 범용 히트파이프에 대한 해석과 실험을 수행하였다⁽⁸⁾. 이들이 제작한 형태는 길이가 1 m인 구리-물 조합의 히트파이프로서, 4개의 독립된 열원을 가지는 형태였다. 국내에서도 다중 열원을 갖는 저온 히트파이프의 성능 특성에 관한 연구가 진행되었는데, 박종홍은 위성체에서의 열 소산을 목적으로 두 개의 열원을 가지는 구리-물 조합의 히트파이프에 대한 실험과 해석을 수행하였다⁽⁹⁾.

본 연구에서는 히트파이프 내부에 단순한 형태의 그루브만을 갖는 평판형 히트파이프에 다양한 위치의 열원을 부착하였을 때 나타나는 열적 성능 변화를 관찰하였다. 추가적으로, 히트파이프가 동일한 열원 위치를 가질 때 기울기 변화에 따른 성능 변화를 파악하였다. 실험에서 열원이 한 개인 경우는 열원의 위치를 달리하였으며, 두 개의 열원을 가질 때는 두 위치에서 동시에 열부하를 가하여 실험하였다. 실험 결과는 온도 분포와 열저항, 그리고 각각의 열전달계수를 이용하여 성능을 비교하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 히트파이프

본 연구를 위해 제작한 평판형 히트파이프의



$$H_g = 1.05 \text{ mm}$$

$$L_g = 0.2 \text{ mm}$$

$$W_g = 0.4 \text{ mm}$$

$$t_g = 0.8 \text{ mm}$$

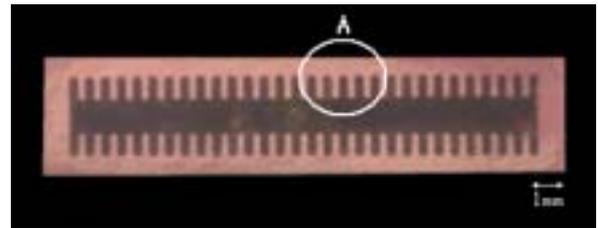


Fig. 1 Cross-section of the flat-strip heat pipe and groove shape

크기는 $150(L) \times 20(W) \times 5(T)$ mm이며, 구리 블록을 이용하여 제작하였다. 히트파이프 내부에는 방전가공기를 이용하여 위아래 각각 30개씩의 그루브를 가공하였는데, 제작한 히트파이프의 단면과 가공한 그루브의 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 그루브의 폭과 깊이는 각각 0.4 mm와 1.05 mm이었으며, 그 피치는 0.6 mm이다. 그루브의 끝은 가공방법으로 인해 반원 형태를 가지며, 그루브 끝에서 히트파이프 바깥면까지는 0.8 mm가 되도록 하였다. 그리고 증기의 통로가 되는 위아래 그루브 사이의 간격은 1.3 mm로 제작하여, 히트파이프의 전체 두께는 5 mm가 되도록 하였다.

히트파이프의 작동 유체로는 증류수를 사용하였으며, 그루브의 전체 체적을 100%로 하여 작동 유체량을 결정하였다. 이 경우 증류수의 양은 3.7cc이었다.

2.2 히터 및 온도 측정 위치

히트파이프의 온도 측정을 위해서 모두 15개의 열전대를 부착하였다. 부착한 열전대는 모두 K-type인데, 모두 10 mm 간격으로 히트파이프의 윗면에 부착하였다.

Fig. 2는 열전대, 히터, 그리고 냉각 블록의 위치를 보이고 있다. 부착한 히터는 구리 블록에 전기 저항식 카트리지 형태의 히터를 삽입한 형태인데, 구리 블록의 크기는 $10 \times 10 \times 20$ mm이다. 히터는 20 mm 간격으로 모두 4개 위치에 부착하

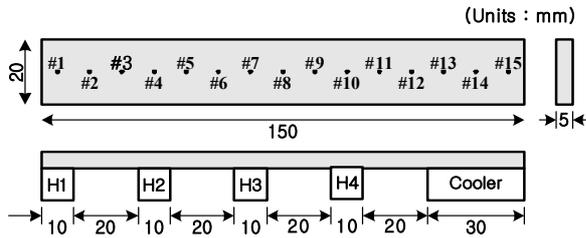


Fig. 2 Heat pipe dimensions and thermocouple location

였고, 모두 독립적으로 작동할 수 있게 하였다.

히트파이프의 응축부는 30 mm인데, 히트파이프의 끝단에 배치하였다. 응축부 평균 온도는 #13, #14, #15번 열전대의 평균 온도를 이용하였다.

2.3 열원의 위치

Fig. 3은 실험을 위해 부착한 히터의 위치를 보이고 있다. 실험은 모두 6가지 히터 위치에 대해 수행되었으며, 각각은 히터 위치에 따라 H1, H2, H3, H1&H3, H4, 그리고 H1&H4 mode로 나타내었다. 예를 들면, H1&H3 mode는 H1 위치와 H3 위치에 히터를 부착하고 동시에 열부하를 공급하여 실험한 것이다.

2.4 기타 실험 장치 및 평가 방법

Fig. 4는 전체 실험 장치의 개략도를 보이고 있다. 실험대는 히트파이프의 기울기를 조정할 수 있게 제작되었으며, 히트파이프는 수평상태와 역구배(-5°) 상태에 대해 실험을 수행하였다.

히트파이프 응축부에 공급된 냉각수 온도와 유량은 항온조와 유량계를 이용하여 조절하였는데,

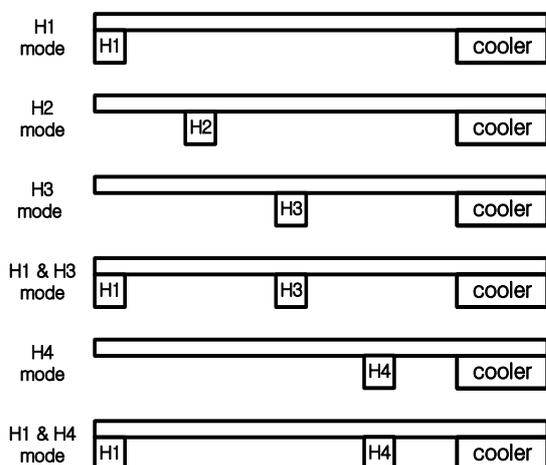
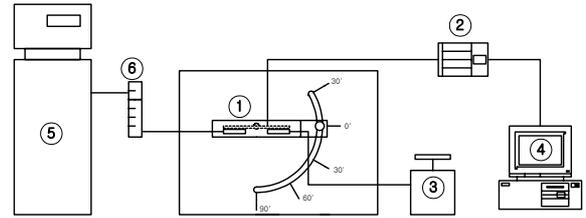


Fig. 3 Tested heating mode



- 1: Heat pipe
- 2: Recorder
- 3: Power supply
- 4: IBM PC
- 5: Circulation bath
- 6: Flow meter

Fig. 4 Experimental Setup

각각 30°C와 0.2 liter/min으로 고정 한 후 실험을 수행하였다.

히트파이프의 작동 온도는 단열부 온도를 히트파이프의 증기 온도로 가정한 후 사용하였다. 실험에서 작동 상한 온도는 100°C로 제한하였으며, 이는 작동유체의 증기압을 고려하여 결정하였다.

히트파이프의 성능을 평가하기 위해 측정된 온도와 공급 열부하를 이용하여 열저항을 계산하였다. 계산에 사용한 히트파이프 열저항 식은 다음과 같다.

$$R_{HP} = \frac{T_e - T_{c,m}}{Q_{input}} \quad (1)$$

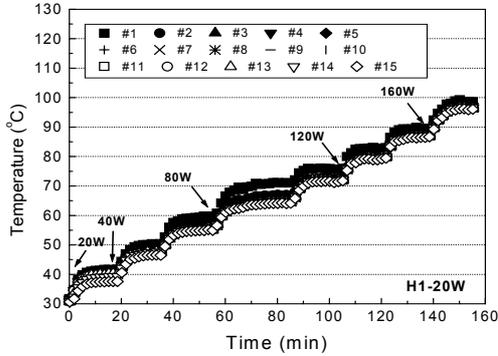
여기서, T_e 와 $T_{c,m}$ 은 각각 증발부 온도와 응축부 평균온도를 의미하며, Q_{input} 은 공급 열부하를 나타낸다.

히트파이프 증발부와 응축부에서의 평균 열전달계수는 히트파이프의 내부 열전달 특성을 평가하고, 향후 모델링 및 성능예측을 필요로 하는 경우에 유용하게 사용될 것이다. 평균 열전달계수는 증발부와 응축부를 나누어 계산하였는데, 이들은 각각 다음과 같다.

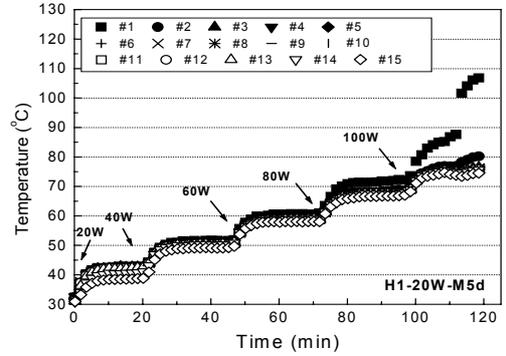
$$\bar{h}_e = \frac{Q_{input}}{A_e(T_{e,m} - T_{a,m})} \quad (2)$$

$$\bar{h}_c = \frac{Q_{input}}{A_c(T_{a,m} - T_{c,m})} \quad (3)$$

여기서, A_e 와 A_c 는 증발부와 응축부의 면적을 의미하며, 각각 2 cm²와 6 cm²의 크기를 가진다.

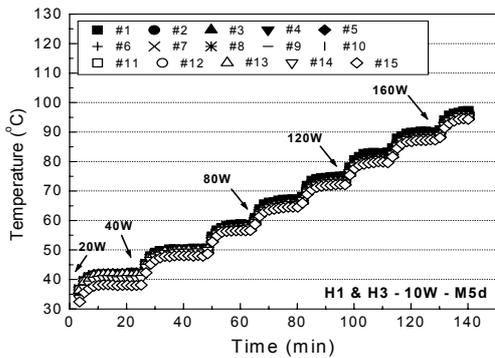


(a) horizontal state

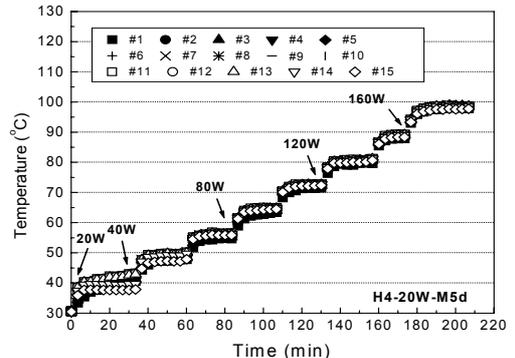


(b) -5 degree

Fig. 5 Comparison of surface temperature variations as a function of tilt angle for H1 mode



(a) H1&H3 heating mode



(b) H4 heating mode

Fig. 6 Comparison of surface temperature variations with adverse tilt (-5 deg.)

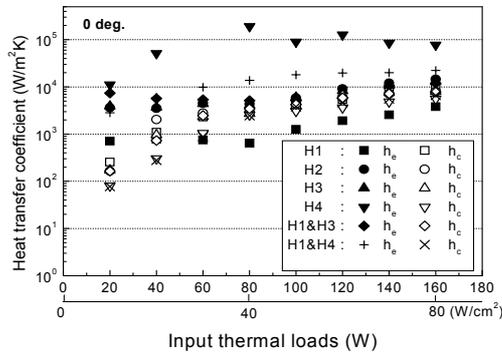
3. 실험 결과 및 토의

3.1 온도 분포

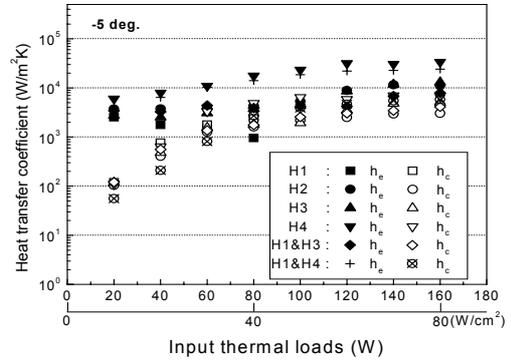
Fig. 5는 H1 mode에서 히트파이프가 수평상태와 역구배(-5°) 상태에 있을 때 공급 열부하 증가에 따른 히트파이프 표면의 온도 변화를 나타낸 것이다. 수평상태의 경우 최대 열부하로 160 W를 공급하였으며, 드라이아웃(dry-out) 현상은 관찰되지 않았다. 80 W 열부하를 공급하였을 때, 열원 위치인 #1 열전대의 온도가 상대적으로 상승하는 것을 확인하였으며, 히트파이프 표면에서의 최대 온도차는 7°C를 보였다. 히트파이프가 역구배로 놓인 경우, 최대 공급열부하는 80 W로 감소하였고, 100 W의 열부하를 가하였을 때에 드라이아웃 현상이 확인되었다.

Fig. 6은 동일한 역구배 상태에서 가열 방법을

달리 하였을 때의 온도 변화를 보인 것이다. (a) 그림은 H1&H3 heating mode인데, 역구배 상태에도 불구하고 H1 에서 나타난 드라이아웃 현상은 나타나지 않았다. (b)의 경우에도 드라이아웃 현상은 나타나지 않았다. 히트파이프가 역구배 상태에 있고, 임의의 중간 부분에 열원이 있는 경우에 히터에서 응축부까지는 역구배 형상의 작동 모습을 보이지만, 응축부 반대 방향은 오히려 정구배 형태로 작동하는 것을 볼 수 있다. 따라서 히트파이프의 작동 한계는 증가하고 성능은 향상된다. 이는 Fig. 5의 (b)에서 나타난 드라이아웃 현상이 Fig. 6에서는 나타나지 않은 것으로 확인할 수 있다. H1&H3 와 H4 heating mode에서 히트파이프 표면의 평균 온도차는 1.8°C로서, H1 mode의 평균 온도차인 2.5°C와 비교하였을 때 상대적으로 작은 값을 보였다.

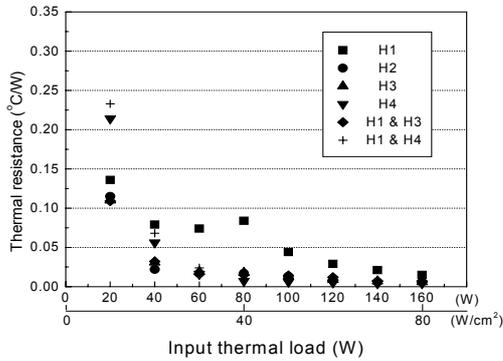


(a) horizontal state

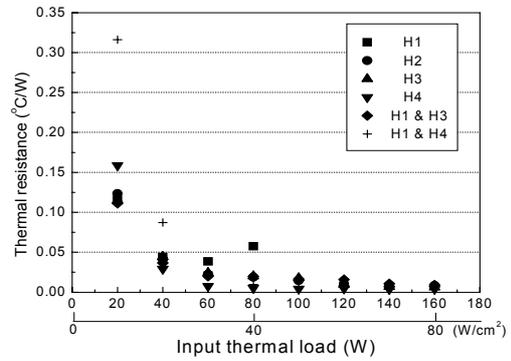


(b) -5 degree

Fig. 7 Variation of the heat transfer coefficients as a function of heating mode and thermal loads

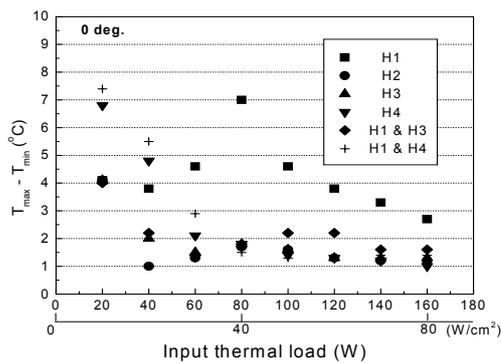


(a) horizontal state

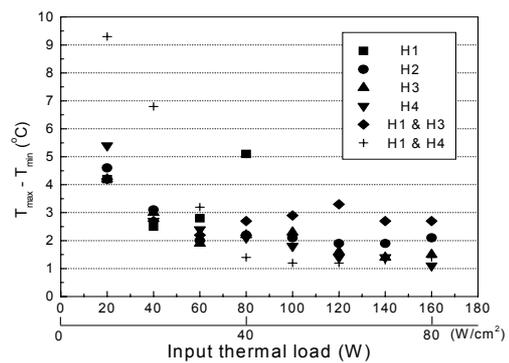


(b) -5 degree

Fig. 8 Variation of the thermal resistances as a function of heating mode and thermal loads



(a) horizontal state



(b) -5 degree

Fig. 9 Variation of the temperature difference as a function of heating mode and thermal loads

3.2 열적 성능

Fig. 7은 공급 열부하와 가열 위치에 따른 평균 열전달계수를 보여주고 있다. 수평상태의 히트파이프에서 증발부 열전달계수는 $10^3 \sim 10^5$ 사이의 값을 나타내었는데, H4 mode의 열전달계수가

$100,000 \text{ W/m}^2\text{K}$ 이상으로 가장 높게 나타났다. 응축부에서의 열전달계수 역시 H4 mode에서 가장 높에 나타났으나, 전체적인 범위가 $10^3 \sim 10^4$ 으로 증발부에 비해 낮게 형성되었다.

Fig. 8은 기울기에 따른 히트파이프의 열저항을

나타낸 그림이다. 두 경우 모두 H1 mode의 열저항이 상대적으로 크게 나타났는데, 80 W의 열부하까지 열저항이 증가하다가 이후 160W까지 감소하는 것을 볼 수 있다. 히트파이프가 역구배 형태인 경우에는 80 W에서 열저항이 감소하지 않고 드라이아웃 현상이 발생하였다. 열원의 위치에 따라 열저항은 평균적으로 0.02 °C/W를 보였으며, H1 mode와는 큰 차이를 보였다.

Fig. 9는 히트파이프 벽면에서의 최대-최소 온도차를 나타낸 것이다. 수평상태에서, H1 mode를 제외하면 공급 열부하에 따라 평균적으로 2°C 정도의 온도차를 보였다. 히트파이프가 -5°의 역구배 상태인 경우에는 온도차가 약간 증가하였는데, 평균 3°C 정도를 나타내었다. 두 경우 모두 H1&H4 mode에서 가장 작은 온도차를 보였으며, 이로 인해 가장 낮은 열저항을 나타내었다.

4. 결 론

두께가 5mm이며 내부에 그루브를 가지는 flat-strip 히트파이프에 대하여 여러 위치에 열원이 놓일 때의 성능을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 단, 모든 실험에서 히트파이프의 작동온도는 100°C 이하로 제한하였다.

(1) 실험한 히트파이프는 H1 mode를 제외하고 수평상태와 역구배(-5°) 기울기에서 뚜렷한 성능변화를 보이지 않았다. 정상 작동한 경우 히트파이프에 공급한 최대 열부하는 160W이었으며, 이때의 열유속은 80 W/cm²이었다. 이때 수평상태의 모든 mode에서 드라이아웃이 발생하지 않았으므로 이 수치들은 작동한계 열부하가 아니다.

(2) 히트파이프가 가장 안정적으로 작동하며, 우수한 성능을 보인 것은 응축부와의 거리가 가장 짧은 H4 상태이다. 히트파이프가 역구배(-5°) 상태이고, 임의의 위치에 열원이 놓인 경우, 가열되지 않는 증발부의 위쪽은 열원을 기준으로 길이가 짧아진 정구배 상태의 히트파이프 형상이 되고, 역구배 영역은 상대적으로 줄어들어 히트파이프의 작동 한계가 증가한다.

(3) 열원이 분산된 형태는 단일 열원인 경우와 비교하였을 때 히트파이프의 열적 특성을 향상시킨다. 특히, 동일한 열부하를 가지는 경우에는 히트파이프의 작동 한계가 개선되는 것을 확인하였

는데, 이는 히트파이프 길이가 감소하는 효과가 있기 때문이다.

참고문헌

- (1) Faghri, A., 1995, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, pp. 625-631
- (2) Park, S. Y. and Boo, J. H., 2001, "Experiment Study of a Flat-Strip Heat Pipe with a Combined Wick of Axial Groove and Screen Mesh," Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting, Heat Engineering Division, pp. 741-745
- (3) Chen, Y. M. et al., 2001, "Thermal Performance of Sintered Miniature Heat Pipes," J. of Heat and Mass Transfer, Vol.37, pp. 611-616
- (4) Moon, S. H., Kim, C. J., Kim, B. H., Hong, S. E., Lee, J. S., 1999, An Experimental Study on the Performance Limitation of A Micro Heat Pipe with Triangular cross-section, 11th IHPC.
- (5) Cheng, Y. 2002, "High Performance Flat Miniature Heat Pipes Fabricated by UD-LIGA Process," Microsystem Technologies, Vol.9, pp. 23-24
- (6) Lin, L. et al., 2002, "High Performance Miniature Heat Pipe," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.45, pp. 3131-3142
- (7) Maziuk, V. et al., 2001, "Miniature Heat-Pipe Thermal Performance Prediction Tool-Software Development," Applied Thermal Engineering, Vol.21, pp. 559-571
- (8) Faghri, A. and Buchko, M., 1991, Experimental and Numerical Analysis of Low-Temperature Heat Pipes with Multiple Heat Sources, Journal of Heat Transfer, Vol.113, pp. 728-734
- (9) Park, J. H., 1997, A Study on Thermal Performance of Heat Pipe for Optimum Placement of Satellite Equipment, ETRI Journal, Vol. 19, No. 2, pp. 59-70