

Non-inverted Meniscus식 모세관 구조물을 이용한 소형 루프히트파이프에 관한 실험적 연구

정원복[†]·박수용^{*}·V.V.Doctarau^{**}

A Study on the Miniature Loop Heat Pipe with Non-inverted Meniscus type Capillary Structure

Won Bok Chung, Soo Yong Park and Viachaslau. V. Doctarau

Key Words: Non-inverted Meniscus, Loop Heat Pipe(루프히트파이프), Copper Porous Wick (구리 소결육)

Abstract

Experimental study was conducted to evaluate the performance of a miniature loop heat pipe (MLHP) with non-inverted meniscus type capillary structure. All parts of MLHP in this study were made of copper including the capillary structure and the distilled water was used as a working fluid of MLHP. The outer diameter of evaporator was 9 mm and its length was 119 mm. The effective pore size of the capillary structure was 30 micron and its porosity was 60%. The vapor transport line, the liquid transport line and the condenser were consisted of single 4.0 mm copper tube. The distance between the evaporator and the condenser region was 200 mm and the length of the loop was 969 mm. This MLHP was operated successfully at any orientation but the gravity highly influenced the thermal performance of the MLHP. The maximum thermal load was 130 watts at the bottom heat mode and the 20 watts at the top heat mode.

기호설명

Q_{in} : 입력열부하 (W)
 R_{th} : 열저항 (K/W)
 T_s : 열원 표면 온도 (°C)
 T_c : 냉각관의 온도 (°C)
 T_l : 액체이송관 벽온도 (°C)
 T_v : 증기이송관 벽온도 (°C)

1. 서론

전자장비 및 부품의 고성능화로 인한 발열량 증가로 인하여 고성능의 냉각수단에 대한 필요성이 점차 커지고 있는 추세이며, 이를 충족할 수 있는 냉각 수단의 후보로서 루프히트파이프(Loop Heat Pipe, LHP)에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. LHP는 일반적인 히트파이프와 마찬가지로 증발/응축에 의한 열교환과, 외부 동력없이 열을 이송시킬 수 있다. 구조는 증발부, 증기이송관, 응축부, 액체이송관 그리고 액체저장조로 구분되고, 증발부에만 Wick이 있고 나머지 부분은 매끈한 관으로 구성되어 있다. 액체유동저항을 최소화한 구조로 이루어져 있기 때문에 일반 히트파이프와 달리 중력의 역방향으로 액체 순환이 가능하고, 보다 먼 거리로 열을 이송시킬 수 있다.⁽¹⁾

외국의 경우 니켈 또는 티타늄 Wick을 이용한 다

[†] 회원, (주)대흥기업

E-mail : wchung@heatpipe.co.kr

TEL : (031)434-9300 FAX : (031)434-9307

^{*} (주)대흥기업

^{**} Powder Metallurgy Institute

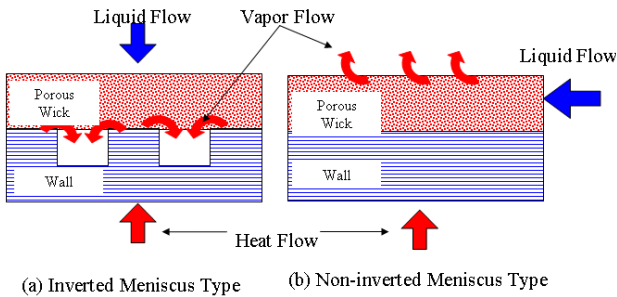


Fig. 1 Heat transfer mode in the evaporator of the LHP

양한 연구가 진행되고 있으나, 국내에서는 워크조물의 제작상 어려움으로 인하여 대학과 연구소를 중심으로 제한적인 연구가 진행되고 있다. 폴리프로필렌 워크⁽²⁾, 세라믹 소결워크⁽³⁾, 청동 소결워크⁽⁴⁾ 그리고 인공위성 열제어를 위한 니켈 금속워크⁽⁵⁾ 등을 이용하여 기본적인 성능연구가 진행되었다.

본 연구에서는 소형 국부 발열체를 냉각하기 위한 저가 LHP를 개발할 목적으로 구리 소결워크 히트파이프 제작 기술을 이용한 작은 크기의 LHP를 제작, 실험을 통한 성능을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 증발부

Fig. 1(a)는 통상적으로 LHP 증발부에 적용되고 있는 inverted meniscus 개념의 구성을 보이고 있다. 증발부 외벽에서 유입된 열과 가열면에 공급되는 액체상태의 작동유체가 서로 마주보는 형태로 되어있다. 외벽과 접촉되어 있는 모세관 구조물의 액체표면에서 상변화를 통한 증기가 발생되고 증기 배출구를 통해 증기이송관으로 이동하게 된다. 모세관 구조물을 통해 이동하는 경로가 매우 짧게 된다. 이론상으로는 1 kW/cm^2 까지 처리할 수 있다고 알려져 있다.^(6,7)

Fig. 1(b)는 non-inverted meniscus 개념을 보이고 있다. 일반적인 히트파이프에서 사용되고 있는 형태로서 벽을 통해 열이 공급되고, 벽면에 부착되어 있는 모세관 구조물을 통해 축방향으로 액체상태의 작동유체가 공급된다. 벽면을 통해 전달된 열은 벽에 액체로 포화된 모세관 구조물을 통과하여 기-액 경계면에서 증발되어 작동유체와 함께 응축부로 이동한다. Inverted meniscus 개념에 비하여 액체상태의 작동유체 이동에 큰

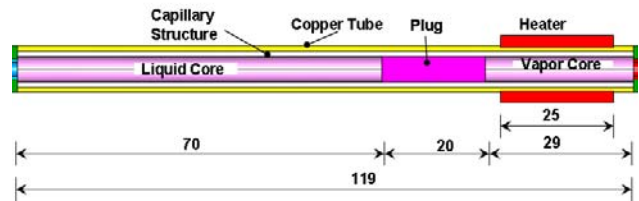


Fig. 2 Non-inverted meniscus type evaporator in this study.

유동저항이 발생하고, 열전달능력 또한 감소하는 단점이 있다.

Inverted meniscus 형태의 LHP용 증발부를 만들기 위해서는 매우 복잡한 과정이 필요하다. 이는 제작 비용의 상승을 동반하게 되는데 본 연구에서는 제작비용이 적게 소요되는 LHP 제작을 위해 non-inverted meniscus 개념의 증발부를 이용하여 작은 열원을 냉각하기 위한 소형 LHP를 제작 성능을 평가하고자 하였다.

Fig. 2는 본 연구에 사용된 증발부에 대한 모습을 보이고 있다. 모든 재질은 구리로 제작되었다. 길이 119 mm, 두께 0.5 mm의 구리관 내부 벽면에 평균 두께 1.75 mm의 모세관 구조물 그리고 모세관 구조물의 안쪽 공간을 구분하는 20 mm 두께의 벽으로 구성되어 있다. 모세관 구조물은 구리 소결 금속으로써, 유효 중공크기가 $30 \mu\text{m}$ 이고 중공도는 60%이었다. 금속소결워크 히트파이프 제작기술을 사용하여 제작하였으며, 일반 히트파이프와 다르게 모세관 구조물 내부 공간에 소결 금속으로 구성된 벽면을 두어 증발부와 액체영역과 증기 영역을 구분하였다. 이로 인하여 액체상태의 작동유체가 모세관 구조물만을 통해서 가열부로 이동할 수 있도록 하였으며, 이 액체영역이 LHP의 액체저장조가 된다. 액체저장조의 길이는 70 mm이었고, 증기영역의 실제로 열을 공급받을 수 있는 영역의 길이는 29 mm이었다.

2.2 LHP 제작

앞서 언급한 구리 소결금속 모세관 구조물로 제작한 증발부의 양쪽 끝단에 길이 850 mm, 직경 4.0 mm의 구리관을 수소용접기로 부착하여 루프를 구성하였다. 루프의 총길이 850 mm 중에서 증기이송관과 액체이송관의 길이를 각각 300 mm, 응축부를 250 mm로 구분하여 성능시험을 할 수 있게 하였다. 증류수를 작동유체로 사용하

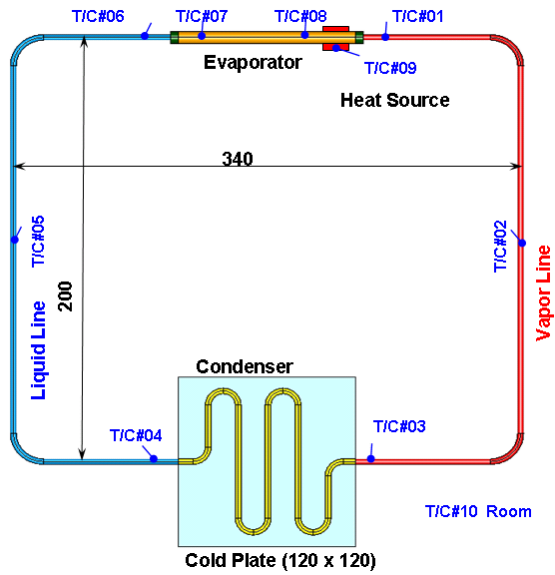


Fig. 3 LHP configuration and thermocouple locations

였으며, 오일확산 진공펌프를 이용하여 2.5×10^{-5} torr 이하로 LHP 내부를 진공상태로 만든 후 7.7 cc의 증류수를 주입하였다. 이때 주입한 작동유체의 양은 증발부의 액체저장조 부피, 모세관 구조물의 중공 부피, 액체이송관 내부 부피, 그리고 응축부의 1/5 부분에 해당하는 부피의 합에 해당한다. Fig. 3에 실험을 위해 제작한 LHP의 개략도를 보이고 있다.

2.3 실험장치 구성 및 실험방법

성능실험을 위해서 증발부는 전기 저항식 가열장치를 부착하여 가열량을 제어하였고, 응축부에서 항온수조를 이용한 냉각관을 부착하여 작동온도에 변화를 줄 수 있게 구성하였다.

카트리지식 전기 히터와 알루미늄 블록을 이용한 가열장치를 구성하였다. 증발부와 가열면 사이의 접촉저항을 최소화하기 위해서 방열그리스를 도포한 후에 나사 체결방식으로 결합하였다. 히터의 용량은 전압조절기를 이용하여 제어하였고, 와트미터(HD-301M, ISM)를 이용하여 입력열부하를 확인하였다. 응축부도 항온수조와 연결된 냉각관을 부착하면서 방열그리스를 바르고, 나사로 고정하였다.

온도측정을 위해서 8개의 T type 열전대 (AWG 28, TC#1 ~ TC#8)를 LHP 외벽에 부착하였고, 히터와 LHP 증발부의 접촉면에 1개 (TC#9)를 부착하였다 (Fig. 3). 열전대는 자료획득장치 (DC100,

Yokogawa)를 통해 PC로 전송하여 실시간 모니터링과 함께 2초 간격으로 저장되도록 하였다.

실험장치의 최대 온도인 T_s (TC#9)가 100°C 를 초과하지 않는 범위내에서 정상작동하는 범위까지 열부하를 증가시켜면서 실험을 수행하였다. 동시에 응축부 냉각관의 온도는 10°C , 20°C 및 30°C 에 대하여 실험을 수행하였다. 열부하 및 냉각온도 변화와 함께 LHP의 자세, 즉 응축부에 대한 증발부의 위치의 변화에 대한 성능검토가 이루어졌다. 증발부가 응축부보다 높은 경우 (Top heat mode, + 40 mm, + 200 mm)와 증발부가 응축부보다 낮게 위치한 경우 (Bottom heat mode, -40 mm, - 200 mm)에 대한 실험을 수행하였다.

성능평가를 위하여 열저항 개념을 사용하였고, 이를 위하여 식(1)과 같이 실험장치의 최대온도인 열원의 표면 온도 (T_s)와 최소온도인 냉각관의 온도(T_c)의 차이를 입력 열부하로 나눈 값으로 표현하였다.

$$R_{th} = \frac{T_s - T_c}{Q_{in}} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 수평상태에서 $T_c = 30^\circ\text{C}$, 20°C , 10°C 일 때 열부하를 가하여 정상상태에 도달한 후 열공급을 중단하여 냉각되는 모습을 보이고 있다. 냉각관 온도에 무관하게 10분 이내에 정상상태에 도달하였다. 열원의 표면온도(TC#9)와 증발부 증기의 출구 온도(TC#1) 사이의 온도차가 최대 20°C 까지 벌어졌다. 이것은 열원과 LHP 증발부 사이의 열저항이 매우 크다는 것을 의미하고 있다. 전반적으로 위치별 온도의 분포가 3개로 구분되어 있는 형상을 보이고 있다. 가장 높은 온도는 열원의 온도이고, 두 번째로 증기이송관의 온도분포 (TC#1 ~ TC#3) 마지막으로 액체이송관의 온도분포 (TC#4 ~ TC#7)영역으로 구분되어 있으며, 증발부의 액체저장조 영역의 온도는 열원과 가까운 위치에 있는 TC#8의 온도는 증기온도 분포에 가까웠고, TC#7는 액체이송관 온도부근에 분포하고 있다. 액체저장조가 가열부와 일체형으로 구성되어 있는 관계로 증발부의 벽면, 위, 그리고 액체를 통한 전도 영향이 TC#8에 끼치고 있음을 알 수 있으며, TC#7의 경우에는 응축부를 통과하면서 온도가 낮아진 작동유체의 영

향으로 인해 낮은 온도 분포를 보이고 있다. TC#7과 TC#8은 동일한 액체저장조 외벽의 온도로서 거리가 50 mm이며 여기서 온도차가 15°C 이상이 차이가 발생하고 있다. 냉각관의 온도가 낮을수록 TC#7의 온도와 액체관의 온도차가 커지는데 이것은 LHP의 작동온도가 낮을수록 작동유체 순환 능력이 감소하고, 전도에 영향이 커졌기 때문이다.

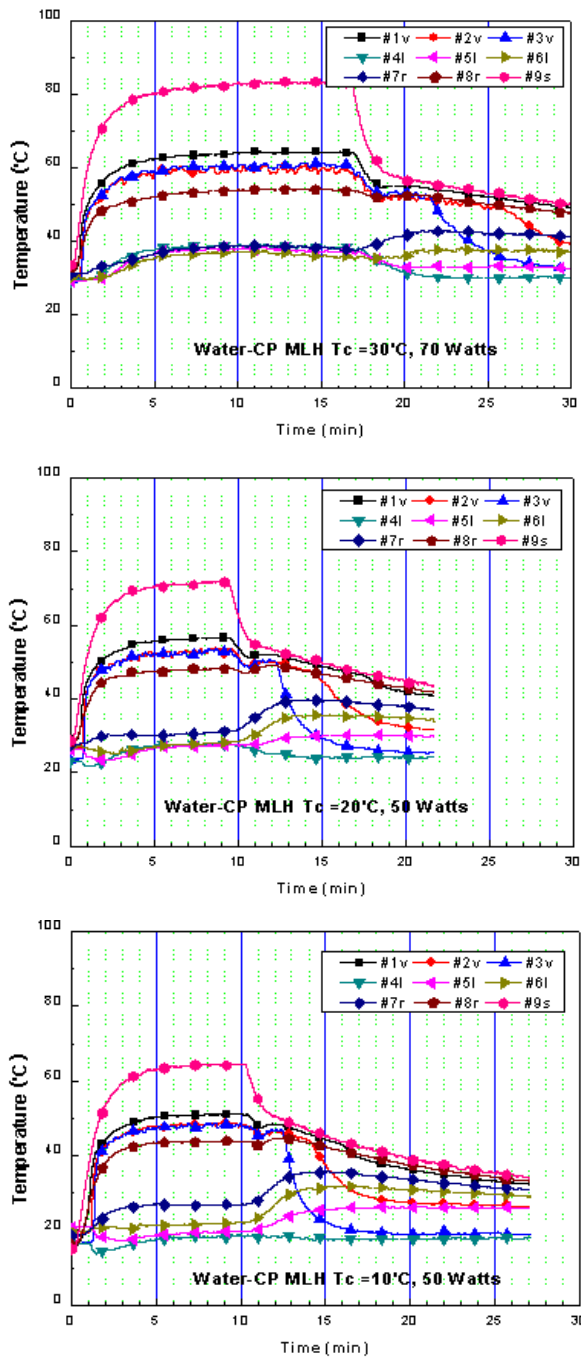


Fig. 4 Start up and cool down characteristics at horizontal position.

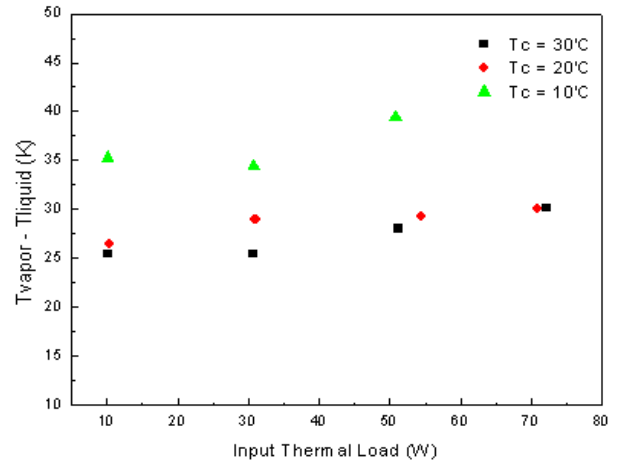


Fig. 5 Temperature difference between the vapor line and the liquid line at horizontal position

Fig. 5는 열부하에 따른 증기관 외벽온도와 액체관 외벽 온도차이를 보이고 있다. 냉각관의 온도가 30°C일 때 열부하가 10 W에서 70 W로 변화하는 동안 $T_v - T_l$ 값의 변화는 5°C 미만으로 변화량이 크지 않았고, 이는 다른 냉각온도에서도 유사한 결과를 보였다.

Fig. 6은 냉각온도 및 증발부와 응축부 사이의 높이 차이에 따른 최대 열전달 성능을 보이고 있다. 각 조건 중에서 가장 낮은 성능을 보인 조건은 증발부가 응축부 보다 200 mm 높게 위치한 경우로 20 W가 열전달 한계였다. 이 값은 액체 순환에 대하여 중력영향이 적어지거나(+20 mm, 수평), 중력의 도움이 커지는 경우 열전달 한계가 증가하여 응축부가 증발부 보다 200 mm 높게 위치하는 경우 열전달량은 130 W로 6배 이상의 성능차이가 발생하였다. 수평상태에서의 최대 열전

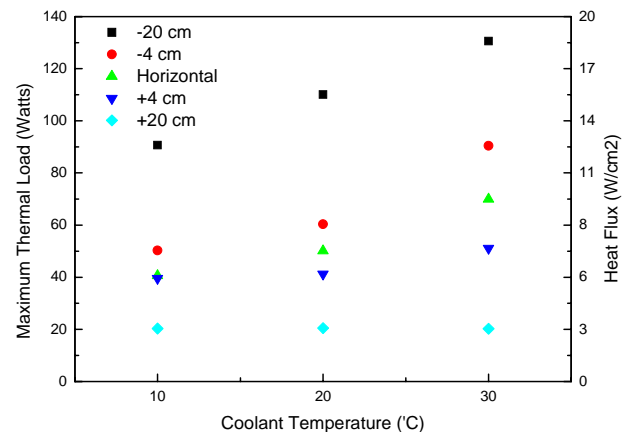


Fig. 6 Maximum thermal load of LHP at various position

달 한계는 90 W이었다. 또한 그림에서 보이는 바와 같이 냉각온도가 높을수록, 즉 작동온도가 높을수록 전송가능한 열전달량이 증가하는 경향을 볼 수 있으며 이 경향은 중력의 도움을 받는 경우 가장 크게 나타났다.

Fig. 7은 입력열부하를 기준으로 LHP의 열저항을 보이고 있다. 증발부가 응축부 보다 200 mm 높게 위치한 경우에 앞서 언급한 바와 같이 열전달 한계가 20 W이었고, 이 범위에서의 열저항은 매우 높게 나타났다. 그러나 증발부가 응축부 보다 40 mm 높게 위치한 경우, 중력방향의 반대로 액체가 순환하지만, 열저항값 분포는 수평 또는 중력방향과 동일한 경우와 거의 유사하게 분포하고 있다. 그러나 냉각온도가 낮을수록 열저항값이 커지는 경향을 보였다. 중력의 도움을 받는 형태에서 작동하는 경우가 가장 열전달한계가 높았기 때문에 열저항값은 중력의 도움을 받는 경우에서 가장 작은 값을 보였다. 각 냉각온도 별로 최저 열저항은 30°C에서 0.52 K/W, 20°C에서 0.72 K/W, 10°C에서 0.94 K/W이었다.

4. 결론

일반적인 구리소결워 히트파이프의 제작기술을 응용하여 non-inverted meniscus식 소형 루프히트파이프를 제작하여 성능시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

중력의 영향에 따라 성능의 차이는 있었지만 모든 경우 정상적인 작동을 보였다. 증발부가 응축부보다 200 mm 높게 위치하여 작동하는 경우 한계 열부하는 20 W이었고 열저항이 가장 높게 나타났다. 수평상태에서는 90 W, 증발부가 응축부보다 200 mm 낮게 위치하는 경우 130 W까지 열을 전달할 수 있었으며, 높이변화가 +40 mm ~ -200 mm 사이에서 열저항은 큰 차이를 보이지 않았다.

보다 단순화된 구조와 제작방식, 그리고 쉽게 구할 수 있는 재료를 이용하여 루프히트파이프를 구현할 수 있었으며, 추가적인 성능개선을 모색하면 일반적인 형태의 히트파이프를 대체할 수 있을 것을 기대 된다.

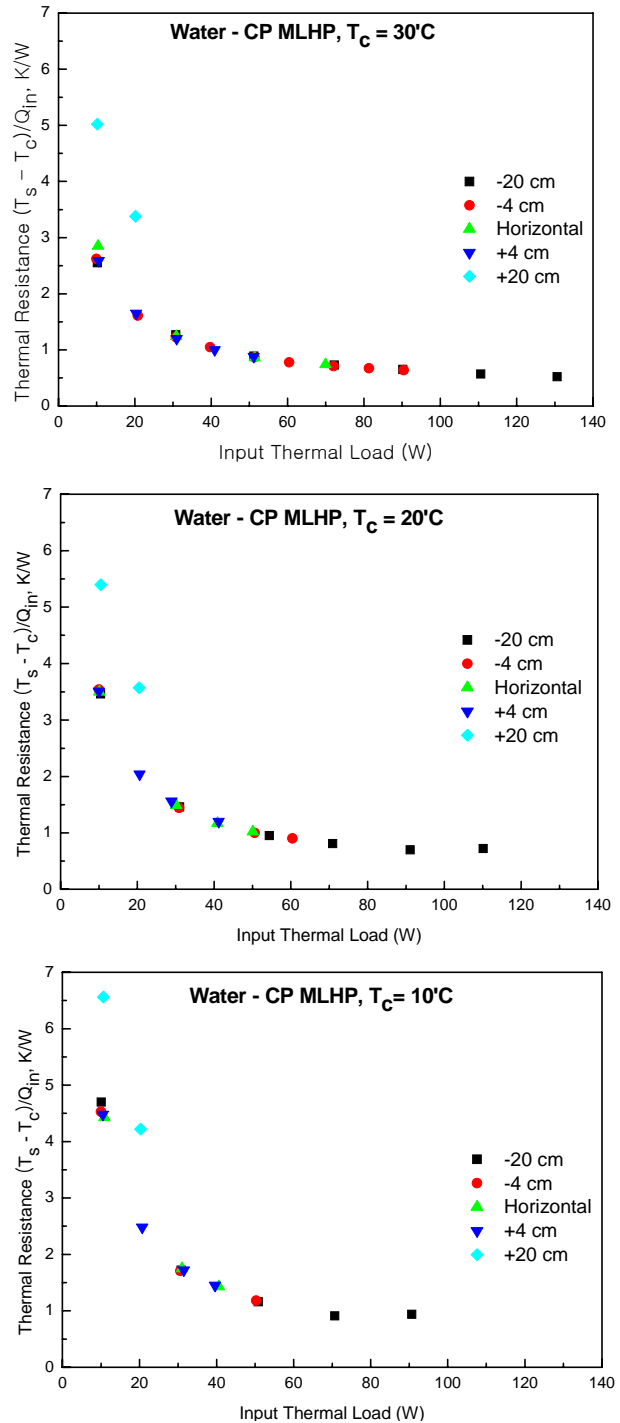


Fig. 7 Thermal Resistance of the LHP in this study

참고문헌

- (1) Maidanik, Yu.F., 1999 "State-of-the-art of CPL and LHP Technology," *the 11th International Heat Pipe Conference*, Tokyo, Japan, K-II.
- (2) Boo, J.H., and Chung, W.B., 2005,

- "Experimental Study on the Thermal Performance of a Small-scale Loop Heat Pipe with Polypropylene Wick," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19, No. 4, pp. 1052~1061.
- (3) Lee, W., Lee, K., Chun, W., Park, K., Lee K. and Rhi, S., 2006, "Experimental Study on Heat Transfer Performance of Loop Heat Pipe," *Summer Proceedings of the KSME*, pp.2473~2477.
- (4) Ryoo, S., Byung, S., Choi, J., Kim, C. and Lim K., 2006, "Study on the Analysis of Wick-drying Limitation for a Miniature Loop Heat Pipe with Flat Plate Wicks," *Summer Proceedings of the KSME*, pp.2478~2485.
- (5) Kim, B. and Choi, J., 2006, "An Experimental Investigation on the Operating Characteristics of a Reversible Loop Heat Pipe," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp.231~239.
- (6) Feldman, Jr., K.T., and Noreen, D. L., 1980, "Design of Heat Pipe Cooled Laser Mirror with Inverted Meniscus Evaporator Wick," *AIAA 18th Aerospace Sciences Meeting*, AIAA-80-0148, Pasadena, California.
- (7) Zhang J., and Hou Z., "Operation Mechanism of the Inverted Meniscus Type Capillary Wick and Hydrodynamics Analyses of Working Fluid in CPL/LHP", *the 12th International Heat Pipe Conference*, pp.82-86, Moscow, Russia, 2002.
- (8) Phillips, F., 2003, "Non-inverted Meniscus Loop Heat Pipe / Capillary Pumped Loop Evaporator," *United States Patent*, US 6,533,029 B1