

황동소결익-물 LHP의 작동 특성에 관한 연구

이육현* · 이기우* · 박기호* · 이계중* · 노승용*

Study on a Operating Characteristics of Loop Heat Pipe Using a Brass Sintered Metal Wick-Water

Wook-Hyun Lee*, Ki-Woo Lee*, Ki-Ho Park*, Kye-Jung Lee*, Seung-Yong Noh*

Key Words: Effective pore diameter(유효기공직경), LHP(루프형 히트파이프), Maximum capillary pressure(최대 모세관 압력), Thermal resistance(열저항).

Abstract

In this study, we have manufactured the LHP(Loop Heat Pipe) with sintered metal wick and investigated the working characteristics of LHP experimentally. Water was used as a working fluid and fill charge rate was changed. LHP basically consist of the separated vapor/liquid channels, evaporator having sintered metal wick(effective pore diameter :16~19 μ m), and condenser cooled by water. The diameter of vapor/liquid line tube are 3.2mm/6.35mm, respectively. Heat transfer rate and thermal resistance was represented to study the basic characteristics of LHP at each conditions

기호설명

- A : 면적, [m]
 D_{eff} : 유효기공직경 [m]
 D_p : 분말입자경 [m]
 d : 관경 [m]
 f : 관마찰계수 [-]
 h : 수두 [m]
 K : 투과성 [m²]
 L : 길이 [m]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 P : 압력 [Pa]
 t : 두께 [m]
 u : 속도 [m/s]
 σ : 표면장력 [N/m]

1. 서론

반도체 등의 소자를 이용한 전자 장비들의 고성능화 초소형화로 더 작은 면적과 공간에 더 많은 고발열 소자가 고밀도 장착화함에 따른 단위 면적당의 발열량은 급속히 증가하고 있다. 이러한 발열량 증대에 따른 온도상승을 억제할 수 있는 냉각기기 및 시스템의 개발을 통해 전열소자에서 발생하는 열을 효과적으로 냉각시킴으로써 제품의 수명과 신뢰도를 높이는 기술들이 소개되고 있으며, 이러한 측면에서 최근 국내외적으로 LHP(Loop Heat Pipe)에 대한 연구가 관심을 모으고 있다.

종래의 히트 파이프는 하나의 관 내부의 모세관 구조물인 익을 통해 응축된 액을 증발부로 환류시키고 증발부에서 발생된 증기는 익을 제외하고 다른 유로를 통해 응축부로 이동하는 메카니즘으

† 한국에너지기술연구원

E-mail : lwhok@kier.re.kr

TEL : (042)860-3169 FAX : (042)860-3133

* 한국에너지기술연구원

로 되어 있으며, 액유동은 응축부에서 증발부 길이방향 전체에 걸친 벽을 통하기 때문에 마찰손실이 상당하며, 액유동과 증기유동은 대항류 형태로 흐르게 되어 일부 벽의 경우 기액 마찰 의한 압력손실이 발생된다⁽¹⁾. 루프형(Looped type) 구조에서는 증발부로의 액 귀환 및 응축부로의 증기 이동이 하나의 평활관을 따라 이루어지기 때문에, 기존의 히트파이프에 비해 작은 유동 마찰 저항을 가지질 수 있어 설계 측면에서 유리하다. 또한, 루프형 벽은 증발부에만 위치하기 때문에 구조적으로 히트 파이프 전체에서 차지하는 기존 히트 파이프의 벽에 비해 작아 벽을 통한 액유동 마찰손실이 상대적으로 작다. 일반적으로 루프형 히트파이프는 구조적 특성상 작은 마찰손실에 기인해 종래의 히트 파이프에 비해 열수송 능력이 뛰어난 것으로 보고되고 있다⁽²⁾.

종래의 히트파이프는 응축부에서 액화된 작동유체를 증발부로 환류시키는 경우, 벽의 모세관 압력을 이용하기 때문에 모세관 압력을 향상시키는 연구와 동시에 작동유체의 유동저항을 작게 하여 투과성(Permeability)을 향상시키는, 즉 유량을 증가하는 쪽의 연구가 필요하다. 그러나, 모세관 압력을 크게 하기 위해 유효 기공 크기(Effective pore size)를 작게 할 경우 유동 저항의 증가로 인해 압력손실이 커지게 되어 히트 파이프의 성능에 미치는 중요한 인자인 유량을 크게 할 수 없으며, 반대로 유동저항을 줄이기 위해 유효 기공 크기를 크게 하면 모세관 압력이 작아지게 되며, 이 또한 히트 파이프의 성능을 저하시키게 된다. 지금까지, 이러한 상반된 특성에 의한 한계를 극복하기 위해 여러 가지 종류의 벽들과 이들을 2개 이상 조합한 조합벽을 이용한 연구들도 수행되어 왔으며, 이와 더불어 금속 소결체를 벽으로 사용하는 히트 파이프에 관한 연구들도 증가하고 있는 실정이다⁽³⁻⁴⁾.

금속 소결체 벽은 다른 벽들에 비해 제작이 다소 어렵다고 할 수 있으나, 기공율(Porosity)과 기공 크기를 조절할 수 있을 뿐만 아니라, 모세관 압력이 우수한 벽을 확보할 수 있는 장점이 있어 많이 이용되고 있다⁽⁵⁻⁶⁾.

따라서, 본 연구에서는 LHP용 소결벽을 제작하고, 실험적 기초연구를 통해서 고성능 LHP 개

발을 위한 설계 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 이론

2.1 모세관한계

Fig. 1은 LHP의 개념도로 크게 증발부와 응축부 그리고 연결배관으로 구성되어 있으며, 증발부에는 보상실과 금속 소결벽 그리고 증기배출 통로인 그루브 유로가 있다.

LHP의 원활한 작동을 위해서는 지속적으로 벽에 작동유체가 공급되어야 하며, 이를 위해서는 작동유체가 순환하면서 발생하는 압력손실을 만회할 수 있는 모세관 압력이 유지되어야 한다. 따라서, LHP가 정상작동하기 위한 최대 모세관 압력(ΔP_{cm})은 다음 조건을 만족해야 한다⁽⁷⁻¹⁰⁾.

$$\Delta P_{cm} = \frac{4\sigma}{D_{eff}} \geq \Delta P_{tot} \quad (1)$$

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_v + \Delta P_l + \Delta P_{eva} + \Delta P_{cond} + \Delta P_g \quad (2)$$

$$\Delta P_{eva} = \Delta P_{se} + \Delta P_w + \Delta P_{gv} + \Delta P_{sc} \quad (3)$$

여기서, ΔP_v 와 ΔP_l 는 각각 액상과 기상 연결관에서의 압력손실이며, ΔP_{eva} 와 ΔP_{cond} 는 증발부와 응축부에서의 압력손실이다. 여기서, 증발부내의 압력손실은 다시, 증발부와 응축부 사이를 잇는 기액 연결관의 단면적이 증발부내의 보상실 및 그루브 헤더의 단면적에 비해 상대적으로 작기 때문에 발생하는 급확대 및 급축소에 따른 손실(Δ

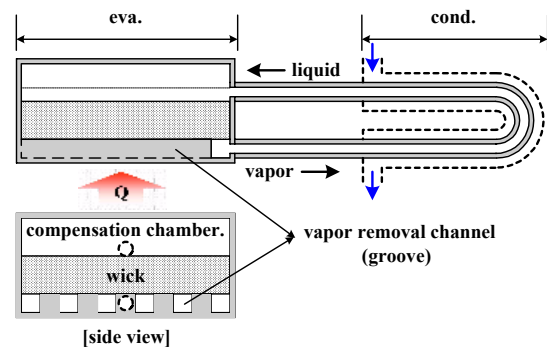


Fig. 1 Schematic diagram of LHP.

P_{se} 와 ΔP_{sc}), 벽을 통한 압력손실(ΔP_w) 그리고, 그 루부내에서의 압력손실(ΔP_{gl})로 나뉜다. ΔP_g 는 중력장에서의 정수압을 뜻한다. 이상적인 LHP 사이클에서의 대표적인 압력손실로는 액관, 증기관 그리고 벽에서의 압력손실이다.

$$\Delta P_v = f_v \left(\frac{L_v}{d_v} \right) \left(\frac{\rho_v u_v^2}{2} \right) \quad (4)$$

$$\Delta P_l = f_l \left(\frac{L_l}{d_l} \right) \left(\frac{\rho_l u_l^2}{2} \right) \quad (5)$$

$$\Delta P_w = \left(\frac{t_w}{A_w} \right) \left(\frac{1}{K} \right) \left(\frac{\mu_l}{\rho_l} \right) \dot{m}_l \quad (6)$$

여기서, K 는 소결벽의 투과성을 나타내는 계수로 Blake-Kozeny의 관계식인 다음 식을 이용하였다.

$$K = \frac{D_p^2 \epsilon^3}{150(1-\epsilon)^2} \quad (7)$$

LHP의 기준 기울기는 수평모드인 0° 이고, 경사각에 따른 중력장에서의 정수압은 다음과 같다.

$$\Delta P_g = \rho_l g h_{ce} \cos \theta \quad (8)$$

여기서, h_{ce} 는 증발부와 응축부사이의 평균거리를 나타낸다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 및 방법

LHP 작동 특성 실험에 사용된 장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다. 실험 장치는 크게 전체 시험부 중 증발부를 가열하기 위한 가열부와 응축부를 냉각하기 위한 냉각수 순환부 그리고 데이터 처리부로 구성되어 있다.

가열부는 증발부 바닥면에 부착된 heating block에 전압조절기 및 디지털 파워 메타로 일정한 전기적 입력량이 공급되도록 되어 있으며, 냉

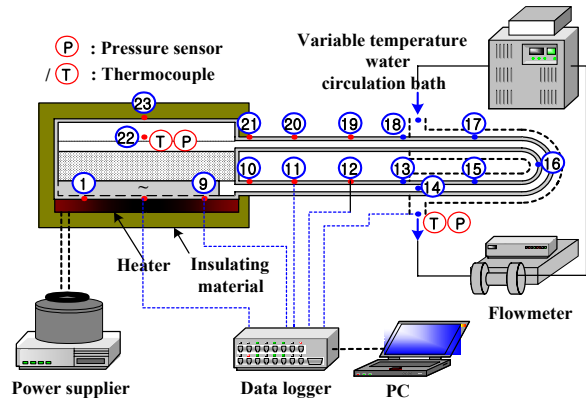


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

각수 순환부는 순환 항온조를 이용하여 일정한 온도로 냉각된 일정량의 물이 유량계를 거쳐 시험부의 냉각부를 순환하도록 되어있다. 데이터 처리부는 시험부 각각의 위치에 설치된 열전대 및 압력센서에서 측정된 온도 및 압력 데이터와 유량계에서 보내오는 유량데이터를 받아서 일정한 형식으로 처리하도록 되어있다.

시험부는 증발부 및 응축부 그리고 이 둘을 연결하는 증기관과 액관으로 되어있다. 증발부는 58mm×58mm×27mm의 육면체형태이며, 가열면인 바닥면을 제외한 전체 외피는 평균두께 3mm의 stainless steel이며, 바닥면은 동관위에 2mm의 홈과 2mm의 산이 엇갈리게 가공되어 증발된 작동유체가 배출되는 유로의 구실과 가열면에서 전달된 열이 소결벽으로 유효하게 전달되도록 하는 heat bridge 구실을 하도록 형성되어 있다. 그루브 바로 위에 소결벽이 없으며 증발부 천정과 소결벽 사이의 나머지 공간은 LHP의 초기기동과 원활한 작동을 위한 작동유체의 보상실이다. 증기관과 액관은 직경이 각각 3.2mm와 6.35인 동관이며, 응축부는 외경 6.35의 동관에 아크릴로 이중유로를 만들어 동관 외측에 냉각수가 흐를 수 있도록 하였다. 시험부의 상세사양은 Table 1에 나타내었다.

시험부의 각 위치에서의 온도 및 압력을 측정하기 위해 증발부의 가열면에 총 9개소, 연결관 외표면에 8개소 그리고 응축부 외표면에 3개소의 K type 열전대를 부착하였으며, 증발부의 보상실의 포화온도 및 압력과 응축부 입구의 포화온도 및 압력을 측정하기 위해 Sheath type의 열전대 및 압력센서를 각각 설치하였다. 압력센서의 측정범위는 $0 \sim 10(\text{kgf}/\text{cm}^2)$ 이고, 측정오차는 $\pm 0.2\%$

Table 1 Specification of LHP

| Spec. | Description |
|---------------------------------|---|
| Wick | Sintered brass powder 52mm×52mm×10mm $D_{eff} = 16 \sim 19\mu m$ $\epsilon = 0.30$ $K = 2.0e-13m^2$ |
| Working fluid | Distilled water |
| Vapor/liquid line pipe diameter | $D_o = 3.2mm/6.35mm$ |
| LHP inclination angle | 0° (Horizontal mode) |

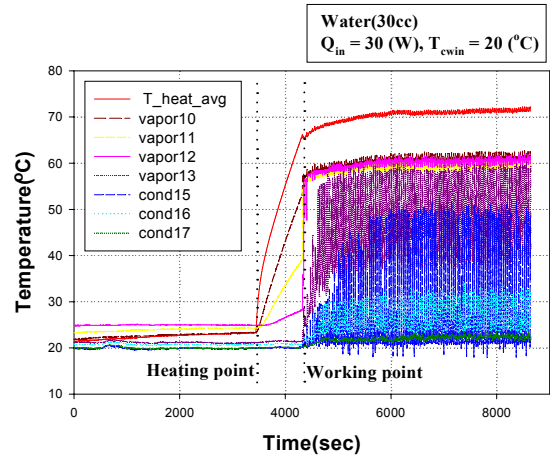


Fig. 4 Starting characteristics of LHP

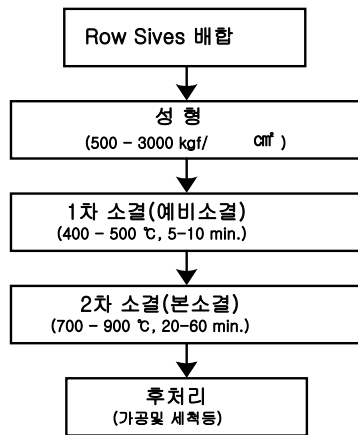


Fig. 3 Process of sintering

이다.

시험부에 작동액을 충전하기 위하여 로터리 및 확산펌프로 구성된 고진공 시스템을 사용하여 시험부를 1×10^{-3} torr까지 진공시켰다. 또한 작동유체의 정확한 봉입을 위하여 10ml의 충전 실린더 (HPG-10, Taiatsu)를 사용하였으며, 작동유체로는 증류수를 사용하였다

데이터 측정 시스템은 컴퓨터 및 데이터 로거 (DR-2500E, Yokogawa사)로 구성되어 있으며, 모든 데이터는 PC에서 처리하도록 하였다. 온도 및 압력은 정상 상태에서 측정한 값을 평균하여 데이터 처리에 이용하였다.

본 연구에서 LHP의 작동성능 지표로 식(9)와 같이 열저항(R)값을 이용하였다.

$$R = \frac{T_{eva} - T_{cond}}{Q_{cond}} \quad (9)$$

3.2 소결워의 제작

본 연구에서는 황동분말 소결체를 LHP의 워 (Wick)으로 사용하였다. 시험용 소결워는 필터용 상용 소결체로 쓰이는 분말을 이용하여 제작하였으며, 실험에 사용된 소결워는 평균 기공 크기가 $16 \sim 19\mu m$ 이며, $52mm \times 52mm \times 10mm$ 인 직육면체이다. Fig. 3은 시험용 소결워 제작 흐름도이다.

4. 결과 및 토의

4.1 LHP의 작동특성

Fig. 4는 증발부에 열량이 공급되었을 때 LHP의 기동시의 작동특성을 나타낸 것이다. 그림에서 증발부에 가까운 위치부터 급격히 온도가 상승하기 시작했으며, 증발부와 히터의 접촉면의 평균 온도가 약 $65^\circ C$ 가 되었을 때 히트파이프가 작동하기 시작하였다. 특히, 응축부 직전(13)과 그리고 응축부 표면온도(15, 16) 순으로 급격한 온도진동 현상을 보였으며, 이는 결과적으로 히트파이프의 전달열량에도 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 또한, 이러한 온도진동은 증발부에서 발생된 증기가 증기관을 통해 응축부로 공급되고 응축된 액은 액관을 통해 다시 증발부에 위치할 보상실로 공급되는데 이러한 액공급이 어떠한 주기를 가지고 간헐적으로 진행됨을 추정할 수 있으며, 작동유체가 일정하게 정상적으로 공급되어 온도진동이 최소화되는 최적의 작동유체 충전량이 존재할 것으로 판단된다.

Fig. 5는 시간에 따른 증발부에서 응축부로 전달된 열량을 나타낸 것이다. LHP 내의 주기적인

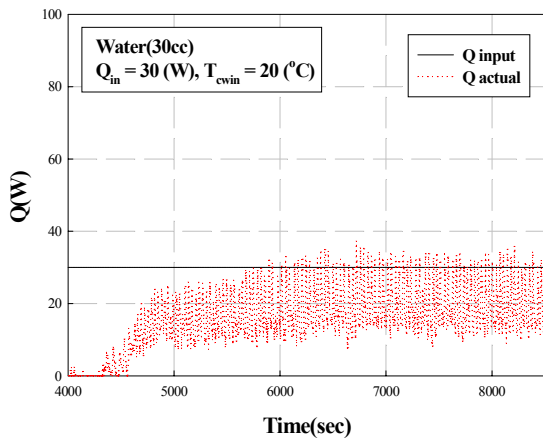


Fig. 5 Heat transfer rate vs. time

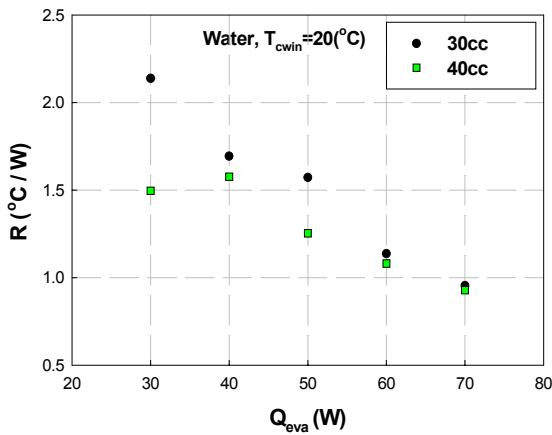


Fig. 6 Thermal resistance of LHP

작동유체의 공급에 기인하는 것으로 추정되는 온도진동에 따른 열전달량의 변동이 나타났으며, 이러한 값들의 평균을 열저항 값에서의 열전달량으로 고려하였다.

4.2 열저항

Fig. 6은 증발부의 입열량 변화 및 작동유체 충전량에 따른 LHP의 작동특성을 열저항 값으로 나타낸 것이다. 입열량이 증가함에 따라 열저항이 감소하였으며, 40cc에서의 전열성능이 다른 30cc 조건 보다 우수하였다. 향후 LHP의 온도진동에 기인한 열전달량과 증발부와 응축부 온도차의 변동에 따라 발생하는 에너지를 최소화하여, 최적 충전량 및 열유속 조건 등에 대한 연구를 계속할 필요가 있다

5. 결 론

본 연구에서는 LHP용 소결윅을 제작하고, 고성능 LHP 개발을 위한 실험적 기초연구를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. LHP용 소결윅 제작 및 LHP 실험장치를 자체 제작하여 시험작동을 완료하였다.
2. LHP의 작동유체의 충전량과 작동조건에 따라 내부공급 유체의 진동에 기인한 온도진동 현상을 관찰하였다.
3. 최적작동을 위한 충전량 및 증발부 입열량 등의 최적조건이 존재함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. S. W. Chi, 1976, Heat Pipe Theory and Practice, A Source book, McGraw-Hill.
2. Amir Faghri, 1995, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis.
3. Park, Y. J., Kyun, W. S. and Suh, J. S., 1998, Effects of the groove shape on the thermal performance of a axial groove heat pipe, Winter Proceedings of the SAREK, pp. 257-261.
4. Hong, J. K., Boo, J. H. and Chung, W. B., 1999, Experimental study on the working characteristic of a heat pipe with combined wick, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 11, No. 2, pp.236-243.
5. Ryoo, S. R. An, Y. G. and Kim, C. J., 2002, A study on manufacturing and operating characteristics of a small scale CPL heat pipe, Summer Proceedings of the SAREK, pp. 50-57.
6. Yun, H. G., Moon, S. H., Ko, S. C., Hwang, G. and Choy, T. G., 2002, Manufacturing and operating performance of the heat pipe with sintered wick, Transactions of KSME Part B, Vol. 26, No. 9, pp. 1260-1266.
7. Lee, K. W., Noh, S. Y. and Park, K. H.,

- 2002, Theoretical analysis of factors affecting to heat transfer limitation in screen mesh wick heat pipe, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 11, pp.880-889.
8. P.C. Chen and W.K. Lin, 2001, The application of capillary pumped loop for cooling of electronic components, Applied Thermal Engineering, Vol. 21, pp.1739-1754.
 9. I. Muraoka, F.M. Ramos and V.V. Vlassov, 2001, Analysis of the operation characteristics and limits of a loop heat pipe with porous element in the condenser, Int. J of Heat and Mass Transfer, Vol 44, pp. 2287-2297.
 10. T. Ogushi, M. Murakami and A. Yao, 1997, Heat transfer of flexible looped heat pipe, 10th IHPC, A2-3.