한국에너지공학회(2004년도)
추계 학술발표회 논문집 P83~88

루프 히트파이프의 수직모드 실험에 관한 연구

이욱현, 이기우, 전원표, 박기호, 이계중
한국에너지기술연구원

Empirical Study on Loop Heat Pipe at the vertical mode

Lee Wook Hyun, Lee Ki Woo, Chun Won Pyo, Park Ki Ho and Lee Kye Jung
Korea Institute of Energy Research

1. 서론

모든 에너지의 변환이 최종적으로 열에너지로 변환된다는 측면에서 열에너지의 전달, 변환 등의 효율 향상은 매우 중요하며, 에너지 절약 및 원가 절감을 위해서는 열교환기의 고성능화, 경량화 및 소형화가 중요한 목표가 되기 때문에 많은 연구자들에 의해 이와 관련한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 여러 종류의 열교환기들 중에서 히트 파이프(heat pipe)는 추가적인 동력이 없이 먼 거리에서도 작은 온도차로 대량의 열수송이 가능하고, 설계 및 제작이 간편하며, 다양한 온도 조건에서도 적용 가능하다는 장점이 있기 때문에 고효율 열교환, 온도제어 및 전자냉각 등의 열교환 분야에 적용되고 있으며, 특히 열교환기 중 단위면적당 열 밀도가 매우 높은 전자 기기의 새로운 냉각 열교환 기술로서 그 적용성이 매우 높게 평가되고 있다.

히트 파이프는 밀폐된 용기 내에서 작동유체의 증발 및 응축을 연속적으로 행하여 잠열의 형태로서 열을 수송하는 열전달 기구(heat transfer device)이며, 고온 열과 저온유체가 접촉하는 전열면이 파이프 외부이므로 휜을 부착하여 전열면적의 확대가 용이하여 각종 냉각기술 및 열회수 기술의 고성능화가 가능하므로 첨단 전자부품 및 반도체 냉각장치에 매우 중요한 기술로서 전자산업의 각종 첨단 반도체, 싸이리스터 및 통신장비, 항공우주산업의 히트싱크 등에 매우 광범위하게 사용이 가능한 기술이다. 그러나 기존의 히트파이프 기술은 중력장에서 윅이 없는 경우에 열 발생 부분이 반드시 하부에 위치하여야 하고 사용상의 부주의로 열 발생 부위가 상부에 위치하는 경우에는 작동이 되지 않아 파손의 위험이 있는 등의 제약이 있고, 갈수록 증가하는 발열량을 제거할 수 있는 고성능 냉각용 히트 파이프의 필요성이 대두되고 있으며, 이에 최근에 우주산업 선진국 등에서 항공 우주용으로 개발되었던 루프 히트파이프(Loop Heat Pipe, 이하 LHP)에 대한 연구들이 세계 각국에서 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 수직모드형 LHP를 제작하고 작동실험을 실시하였으며 그 결과 및 기초 특성에 관해서 서술하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 실험장치 및 실험방법

LHP 작동 특성 실험에 사용된 시험부의 개략도를 Fig. 1에 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 일정의 전기적 입열량이 공급되도록 되어 있으며, 냉각수 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

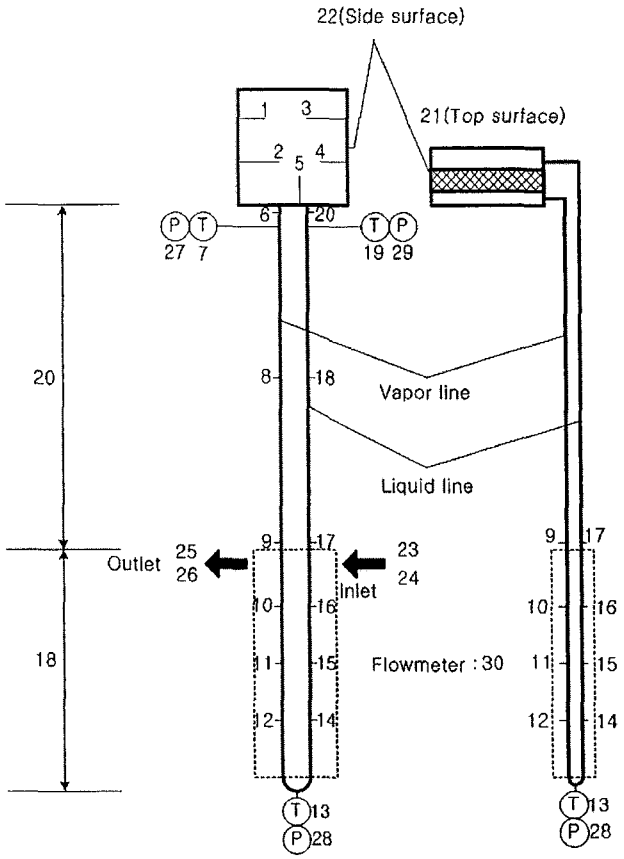

Fig. 1 Schematic diagram of test section.

압력 데이터와 유량계에서 보내오는 유량데이터를 받아서 일정한 형식으로 처리하도록 되어 있다.

시험부는 증발부 및 응축부 그리고 이 둘을 연결하는 증기관과 액관으로 되어있다. 증발부(Fig. 2)는 58mm×58mm×28mm의 육면체형태이며, 가열면인 바닥면을 제외한 전체 외피는 평균두께 3mm의 stainless steel이며, 바닥면은 동판위에 2mm의 홈과 2mm의 산이 엇갈리게 가공되어 증발된 작동유체가 배출되는 유로의 구실과 가열면에서 전달된 열이 소결윅으로 유효하게 전달되도록 하는 heat bridge 구실을 하도록 형성되어 있다. 그루브 바로 위에 소결윅이 얹혀 있으며 증발부 천정과 소결윅 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 5개소, 연결관 외표면에 8개소 그리고 응축부 외표면에 6개소의 K type 열전대를 부착하였으며, 증발부 입출구와 응축부의 포화온도 및 압력을 측정하기 위해 Sheath type의 열전대 및 압력센서를 각각 설치하였다. 압력센스의 측정범위는 0~10(kg_f/cm^2)이고, 측정오차는 ±0.2%이다.

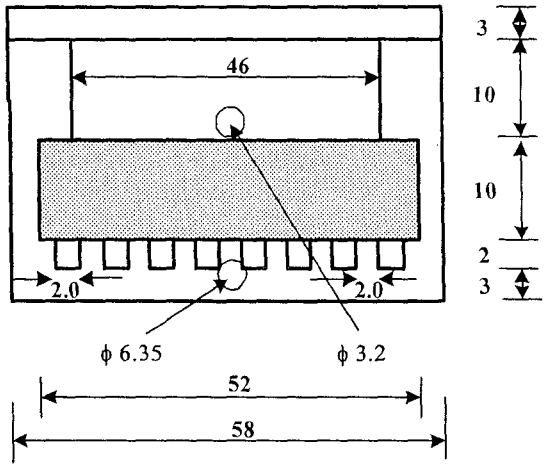

Fig. 2 Specification of evaporator.

Table 1 Specification of LHP

Spec.	Description
Wick	Stainless steel powder 52mm×52mm×10mm D_{eff} = 9.6㎛ ε= 0.40
Working fluid	Distilled water
Vapor/liquid line pipe diameter	Do = 3.2mm/6.35mm
LHP inclination angle	90° (Vertical mode)

시험부에 작동액을 충진하기 위하여 고진공펌프를 사용하여 시험부를 1×10^{-3} torr까지 진공시켰다. 또한 작동유체의 정확한 봉입을 위하여 10ml의 충진 실린더(HPG-10, Taiatsu)를 사용하였으며, 작동유체로는 증류수를 사용하였다.

데이터 계측 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(1)과 같이 열저항(R)값을 이용하였다.

$$R = \frac{T_{eva} - T_{cond}}{Q} \qquad (1)$$

2.2 소결윅의 제작

본 연구에서는 스테인레스스틸 분말을 이용하여 제작한 소결체를 LHP의 윅(Wick)으로 사용하였다. 실험에 사용된 소결윅은 평균 기공 크기가 9.6㎛이며, 기공율은 40%로 52mm×52mm×10mm인 직육면체이다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 증류수의 충진량이 내체적의 50%일 때, 작동시간에 따른 증발부와 응축부 표면온도 및 연결배관 중앙 표면온도 변화를 나타낸 것이다. 증발부에 공급된 열량은 40W~80W로 열량 공급 후 LHP내 각 부위별 온도가 정상상태에 도달하면10W씩 증가시켰다. 40W에서의 증발부의 표면온도는 약 80℃를 유지하였으며 공급열량의 증가에 따라 증발부 표면온도, 연결배관 표면온도 및 응축부의 표면온도가 증가하였다. 이것은 LHP내에 걸리는 전체 압력손실이 공급열량의 증가에 따라 증가하고, LHP의 원활한 작동을 위해 필요한 윅의 모세관력 또한 공급열량의 증가에 따른 온도상승으로 감소하여 결과적으로 작동유체의 펌핑력이 점차 감소하기 때문에 열전달에 필요한 LHP 전체 순환 작동 유체량의 감소에 기인한 것으로 판단된다. 본 실험에 사용된 증발부는 내부의 윅을 쉽게 교체하도록 설계하여 볼트체결방식으로 상대적으로 두꺼운 외피를 가지기 때문에 열용량이 매우 커 목표온도에 이르는 시간이 많이 걸리는 문제점이 있어 차후 개선이 필요하다. 또한, 무엇보다도 LHP의 성능 및 응답성은 윅의 모세관력에 좌우되기 때문에 모세관력이 높고 및 침투율이 우수한 윅 개발이 요구된다.

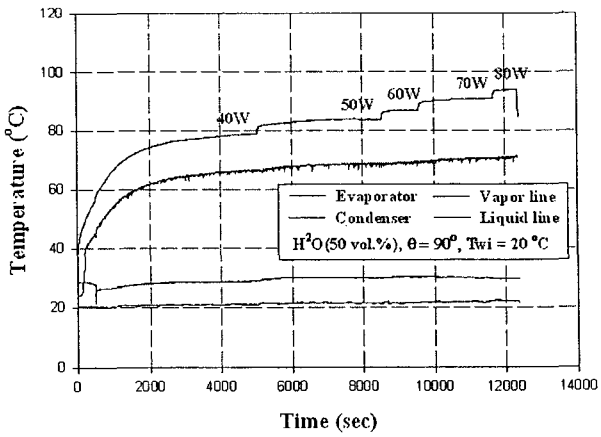

Fig. 3 Temperature variation as a function of operating time.

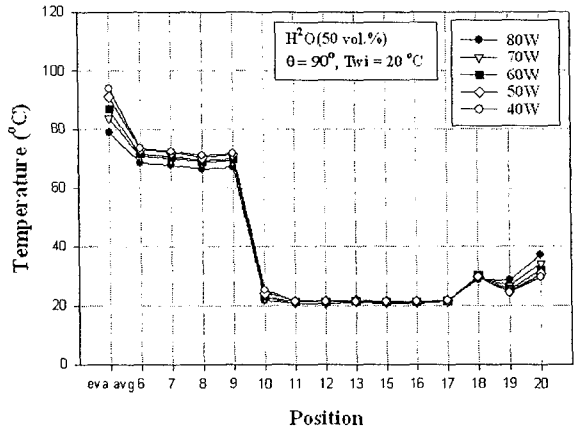

Fig. 4 Temperature profile in LHP.

Fig. 4는 공급열량의 증가에 따른 LHP의 각 위치별 온도 분포를 나타낸 것이다. 공급열량이 증가함에 따라 증발부와 응축부의 온도차가 증가하였으며, 최소 40℃에서 최대 65℃의 온도차를 나타내었다. 이렇게 많은 온도차가 나타나는 것은 응축부를 20℃의 낮은 온도의 냉각수을 이용한 냉각방식에 기인한 것으로 실제 상온의 공기냉각방식을 사용할 경우 그 온도차를 대폭 줄어들 것으로 판단된다.

Fig. 5는 증발부의 공급열량 변화 및 작동유체 충진량에 따른 LHP의 작동특성을 열저항 값으로 나타낸 것이다. 열량이 증가함에 따라 열저항이 감소하였으며, LHP의 전체 내체적의 50, 55%에서의 전열성능이 다른 충진량 조건에서 보다 우수하였다. 좀 더 우수한 전열성능을 확보하기 위해서는 고성능 소결윅 개발이 선행되어야 하며, 각 부위별 열저항을 줄이기 위한 노력이 필요할 것이다.

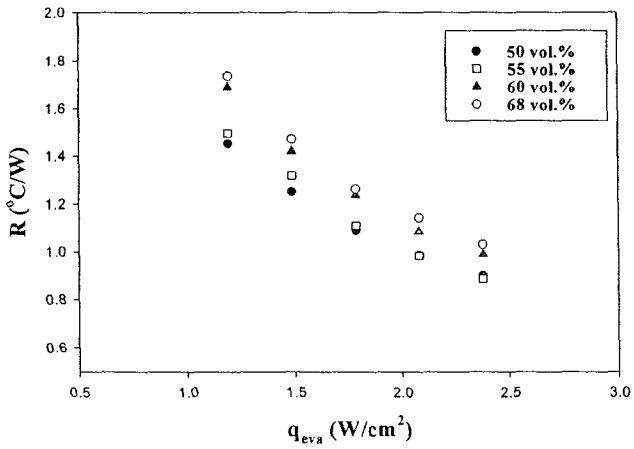

Fig. 5 Thermal resistance as a function of heat flux.

4. 결론

본 연구에서는 스테인레스스틸 분말형 소결윅을 제작하고 증발부가 상부에 있는 수직모드에서 LHP의 작동실험을 실시하였으며, 증발부의 공급열량 및 작동유체의 충진율을 변화시켜 LHP의 전열특성을 고찰하였다. 향후 전열량을 향상시키기 위해서는 고성능 윅의 개발 및 LHP의 각 요소별 열저항 감소를 위한 추가적인 데이터 획득 등 더욱 더 많은 설계 자료가 요구된다.

5. 참고문헌

1. Y. F. Maidanick, V. C. Pastukhov and Y. G. Fershtater, "Development, Analytical and Experimental Investigation of Loop Heat Pipes", 7th IHPC, pp. 539-546(1990).
2. V. M. Kiseev, A. G. Belonogov and A. A. Belvaev, " Heat and Mass Transfer in Fine-Porosity Structures of Loop Heat Pipes", 8th IHPC, pp. 476-481(1992).
3. Y. F. Maidanick, Y. G. Fershtater, V. C. Pastukhov, S. V. Vershinin and K. A. Gondharov, "Some Results of Loop Heat Pipes Development , Tests and Application in Engineering", 5th IHPS(1996).
4. Y. F. Maidanick, S. V. Vershinin and Y. G. Fershtater, "Heat Transfer Enhancement in a Loop Heat Pipe Evaporator", 10th IHPC, A1-3(1997).
5. J. H. Rosenfeld, W. G. Anderson and M. T. North, "Improved High Heat Flux Loop Heat Pipe Using Bidisperse Evaporator Wicks", 10th IHPC, A1-5(1997).
6. V. M. Kiseev and N. P. Pogorelov, "A Study of Loop Heat Pipe Thermal Resistance", 10th IHPC, A1-9(1997).
7. T. Qgushi, M. Murakami and A. Yao, "Heat Transfer Performance of Flexible Looped Heat Pipe", 10th IHPC, A2-3(1997).
8. T. Ogushi, A. Yao, J. J. Xu and H. Masumoto, "Heat Transport Characteristics of Flexible Looped Heat Pipe under Micro-gravity Condition", 11th IHPC, pp. 48-53(1999).
9. L. L. Vasiliev, A. A. Antuh and L. L. Vasiliev Jr., "Electronic Cooling System with a Loop Heat Pipe and Solid Sorption Cooler", 11th IHPC, pp. 54-60(1999).
10. M. A. Chemysheva, Y. F. Maidanik and S. V. Vershinin, "Heat Exchange in the Evaporator of a Loop Heat Pipe with a Biporous Capillary Structure", 11th IHPC, pp. 69-75(1999).
11. Z. Hou, C. Sun, S. Guo, J. Cao and J. Miao, "Performance Test Study on a Loop Heat Pipe", 6th IHPS(2000).
12. W. H. Lee, K. W. Lee, K. H. Park, K. J. Lee and S. Y. Noh, "Study on a Operating Characteristics of Loop Heat Pipe Using a Brass Sintered Metal Wick-Water", Proceedings of the KSME Spring Annual Meeting, 03S252(2004).