

[논문] 태양에너지

Solar Energy

Vol. 19, No. 2, 1999

PVA 스폰지 Wick을 갖는 Capillary Pump Loop의 에너지 전달효과

전철호*, 장영석**, 김오근***

* 동아대학교

** 경남정보대학

*** 동아대학원

The Effect of Energy Transport using Capillary Pumped Loop with PVA sponge Wick

C. H. Jun*, Y. S. Jang**, O. G. Kim***

* *Dong-a University*

** *Kyung-nam College of Information & Technology*

*** *Graduate School, Dong-a University*

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the effect of energy transport using capillary pumped loop with PVA sponge wick. The results obtained from this study are as follows. The configuration of capillary pumped loop was adequate and PVA sponge was of great use for the manufacture of capillary pump. The energy transport reached maximum when the working fluid amount was 750cc the wall temperature distribution indicated high values through out the entire length of the pipe. As the opening of a nozzle was increased, energy transport was increased but the effect was decreased.

1. 서 론

저밀도 에너지 중 태양에너지, 풍력, 지열 등은 화석연료의 대체 에너지원으로 전 세계에서 활발하게 연구개발 추진되고 있다. 특히 태양에너지의 경우 1년 동안 지표면에 공급되는 열에너지의 이용이 집광기, 집열기, 솔라셀의 매개체를 이용하여 실용화하는 경우가 있으나 설비의 수명, 신뢰도 측면에서 불확실성이 있고 에너지의 저밀도성 때문에 에너지 회수율이 낮다는 문제점이 있어 상업성이 높지 못하다. 이와 같은 저밀도성 에너지 이용 방법으로서 최근 새로운 개념의 열교환 시스템으로 알려진 히트파이프를 접목하여 그 가치를 판단할 필요가 있다.

히트파이프는 작동방법에 따라 일체형과 증발부와 응축부가 분리되어 순환하는 분리형으로 나누는데 분리형 히트파이프는 증발부와 응축부를 분리한 상태에서 고온측의 열을 거리가 먼 영역에 있는 저온측으로 열을 이동시키는 목적으로 개발되고 있다.

히트파이프에서 이러한 분리형 방식을 채택하게 되면 증발부와 응축부의 자유로운 구성이 가능하게 된다. 이 때 중력에 의한 귀환력을 확보하기 위해서는 구조적으로 응축부가 증발부보다 상부에 있도록 한다.^{1,2)} 이처럼 응축부가 증발부보다 상부에 위치하여야 하는 결점을 보완한 것이 Capillary Pumped Loop이다. CPL은 2상 열전달 시스템으로서 잠열에 의한 열수송을 하고 있으며 응축부에서 응축된 응축수를 증발부로 귀환시키는 능력을 모세관력을 이용한다는 큰 특징이 있다. 따라서 모세관 현상을 이용한 것으로 모세관에 있어서의 유동과 2상 유동에 대하여 많은 연구가 행해지고 있으며 최근에는 모세관력을 이용하는 기술개발이 이루어지고 있다.

CPL에 관한 연구는 1960년대 NASA의 Lewis Research Center의 Stenger에 의해 처음 시작된 이래로 많은 나라에서 활발한 연구가 되고 있다.

1982년 NASA의 Goddard 센터에서 CPL1으로 명명된 알루미늄-암모니아를 이용한 실험을 하였다.³⁾ 1980년대 중반이래로 서구에서는 CPL에 대한 연구가 행하여졌다. 이것은 주로 저 중력장에서 사용할 수 있는 우주선용과 기존의 압축기나 팽창밸브를 없애고 모세관력에 의한 순환을 함으로써 경량화를 할 수 있는 잇점이 있다. 이에 따라 많은 연구가 되고 있으며 성능과 경제성, 신뢰성이 만족되면 많은 분야에서 활용될 수 있다.

CPL에 있어서 열전달 길이를 길게하여 증명된 가장 큰 전달능력은 250kW-m를 가지고 있다고 보고되고 있다.⁴⁾ 1987년에는 NASA Goddard와 AirForce Wright Laboratory에서는 High Power Spacecraft Thermal Management System(HPSTM)을 개발하였다.⁵⁾ 또한 CPL에 대한 능력과 한계에 대한 연구가 행하여졌다.^{6,7)} 국외적으로 히트파이프를 이용한 열교환기로서 많은 연구가 있으며 국내에서는 연구가 진행되고 있다.⁸⁾

또한 공기조화, 냉동기용 등의 시스템으로서 분리형을 가진 히트파이프에 대한 연구가 활발하다.⁹⁾ 공기조화 시스템에 분리형 히트파이프를 채용할 때 증발부와 응축부의 위치를 자유롭게 선택할 수 있으면 응축부에서 응축한 작동유체가 순조롭게 증발부에 귀환할 수 있으므로 분리형 히트파이프의 설계가 자유롭게 된다. 이러한 점을 고려하여 CPL방법을 적용할 수 있다고 판단된다. 특히 태양에너지와 같은 저밀도 에너지 이용은 저온, 저압에서도 충분한 증발력이 필요하고 이에 따른 적절한 장치가 필요하다. 워는 여러 가지 종류가 있으나 모세관력을 고려하여 PVA 스폰지로 할 때 워의 결합법, 워의 특성, 응축표면 형성 등 워의 특성 관찰도 필요하다.

본 연구에서는 액체 귀환 워를 PVA 스폰지로 한 CPL를 개발하여 에너지 전달 효과 측정하고자 한다. 일반적인 CPL과 달리 PVA 스폰지를 증발부 외부에 설치하여 증발부의 흡입력 제공하

고 증발부에서 응축부로의 배압형성을 차단하였으며 에너지 수급은 태양에너지 수준으로 하여 에너지의 활용 방법에 대해서도 비교 검토한다. 워를 사용할 PVA 스폰지에 대한 아직 정확한 정보가 없어 PVA 스폰지를 워로서의 결합방법, 워의 특성, 증기발생, 응축영향 등에 대해서도 고찰한다.

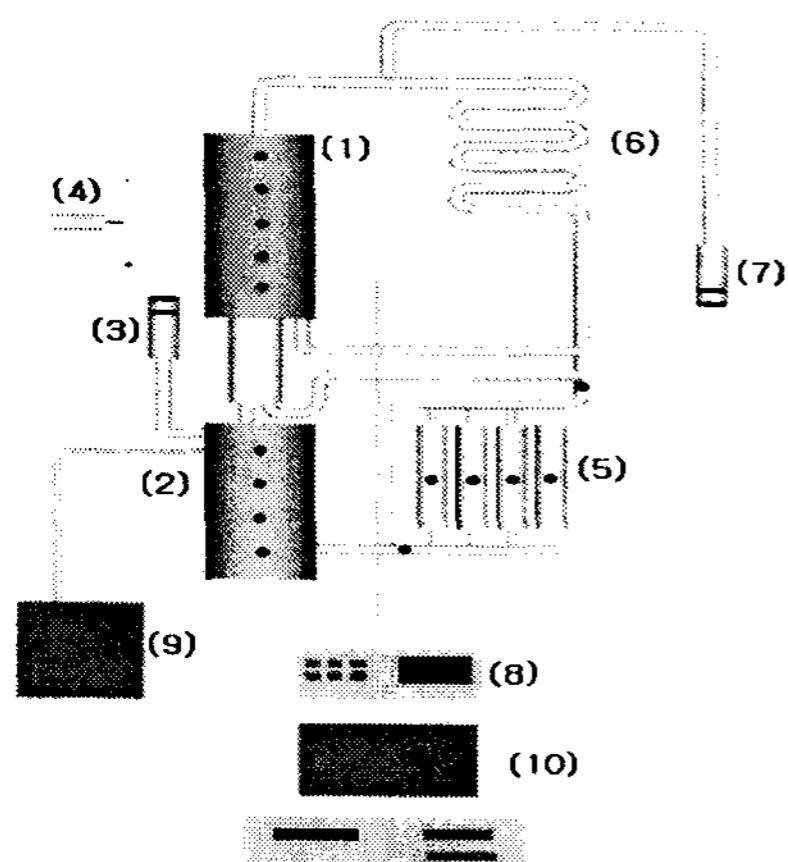
2. 실험

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타나 있다. 증발부는 태양에너지의 집열을 고려하여 가열된 물을 순환하는 것으로 하고 응축부는 공냉식으로 사용하기 위하여 소형 팬을 2개 설치하였으며, 응축부는 증기의 강력한 팽창을 돕기 위하

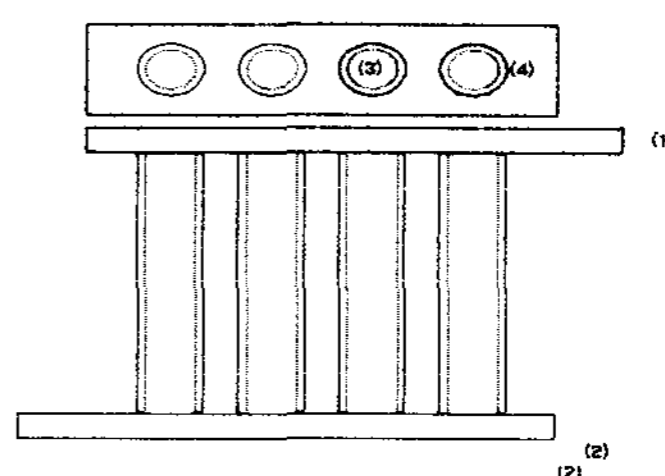
여 하나의 원통관으로 하였으며 작동유체는 증류수를 사용하였다.

또한 증발부와 응축부의 사이에 노즐을 만들고 가시화 창을 만들어 유량변화, 입열량 변화에 따라 증기의 유동 모양을 관찰하였다. 증발부의 열원은 용량이 1 kW인 물 가열기를 설치하여 증발부의 입열량을 40°C에서 80°C까지 변화하도록 하였다. 응축부의 상부에는 진공을 형성하기 위하여 진공 펌프와 진공게이지를 설치하였으며, 응축부의 불응축성가스나 비응축성가스의 증기의 통로를 위하여 냉각코일을 응축부 상부에서 모세관펌프까지 설치하였으며 모세관펌프를 연결과 분리를 할 수 있도록 설치하였으며, 모세관펌프의 워으로는 PVA 스폰지 4개를 삽입하였다. 그리고 각 부분의 온도를 측정하기 위하여 증발부 4개, 응축부 5개, 모세관펌프 6개, 그리고 증발부 입출구에 각각 1개의 K type 열전대를 멀티온도 측정기에 연결하여 온도를 측정하였다. 열전대의 위치는 점으로 나타내었다.



- | | |
|-----------------------------|------------------|
| (1) Condenser | (2) Evaporator |
| (3) Pressure Gauge | (4) Cooling Fan |
| (5) Capillary Pump | (6) Cooling Coil |
| (7) Vacuum Pump | |
| (8) Temperature Data Logger | |
| (9) Heater | (10) Computer |

Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus



- | | |
|------------------|-------------------|
| (1) Inlet header | (2) Outlet header |
| (3) PVA sponge | (4) Copper tube |

Fig. 2. Schematic diagram of capillary pump

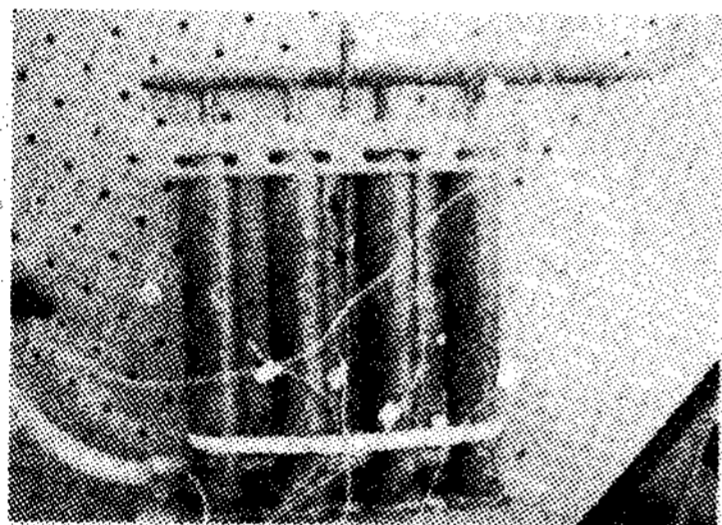
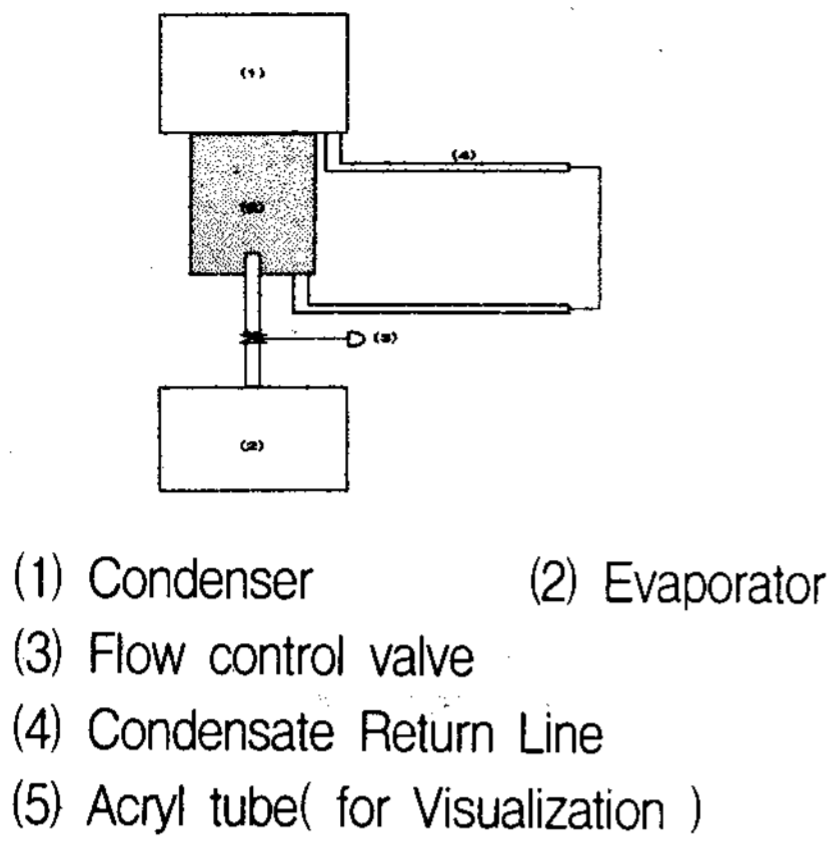


Fig. 3. Schematic diagram of the flow control valve

Table. 1. The Characteristics of PVA Sponge

Materials	Polyvinyl formal resin
Porosity(%)	88 ~ 94
Average pore size(μ)	60 ~ 2000
Tensile strenght (kg/cm ²)	2 ~ 6
Water absorption rate(wt %)	900 ~ 1500
Water absorption speed(sec/cm)	2 ~ 15
Melting point(°C)	1800

Fig. 2는 실험에 사용된 모세관펌프의 형태를 나타낸 것으로, 외곽은 동관으로 하고 직경 30mm, 길이 200mm인 4개의 관내부에는 PVA

스폰지 워를 원통으로 만들어 삽입하였다.

Fig. 3은 증발부와 응축부의 사이에 유량을 조절할수 있는 노즐의 모양을 보여준다. 노즐은 직경 4mm, 길이 50mm 인 관을 부착한 상태이며 노즐을 통한 증기유량은 밸브의 개도를 조절함으로써 증발부에서 응축부로 유량을 조절하였다. 작동유체의 유동형태를 가시화하기 위하여 지름 20mm, 길이 60mm 원통아크릴을 사용하였다.

Table 1은 본 연구에 사용한 PVA 스폰지의 특성을 나타낸다.

2.2 실험 방법

모세관펌프를 가진 밀폐된 루프 히트파이프의 시스템 개발을 하고 그 기초적 에너지 전달 특성을 측정하기 위하여 작동유체의 양, 노즐의 밸브 개도, 모세관펌프의 위치변화와 가열수의 온도변화에 따라 증발부 온도변화에 대하여 작동유체가 순환하는 전체 영역에서 온도 응답특성을 측정한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PVA 스폰지 특성실험

Fig. 4는 지름이 13.5mm인 동관에 가로 세로 각 10mm인 PVA 스폰지를 삽입하고 5 cm 간격으로 열전대를 설치하여 상부에서 가열할 때 PVA 스폰지에서 작동유체의 흡상높이를 벽면의 온도분포로서 측정한 결과이다. 가열부의 온도를 증가시키면 외벽의 온도 분포도 증가하고 온도구배도 증가하는 것으로 보여준다. 입열량을 30W으로 하였을 경우 PVA 스폰지의 정상부의 온도는 65°C로서 증기건조가 일어나지 않고 작동유체의 원활한 순환을 보여준다. Table 2는 가로, 세로, 높이가 각각 다른 PVA 스폰지를 증류수에 20cm 깊이로 담근 후 PVA 스폰지의 흡상수두 높이를 측정한 결과로서 여러 가지 단면에 따른

Table 2. Capillary height of PVA sponges for the experimental

Type	A type (1×1×30cm)	B type (1×3×30cm)	C type (3×3×30cm)
Height of absorption Head	12 cm	12.5 cm	13 cm
Time	20 min	20 min	20 min

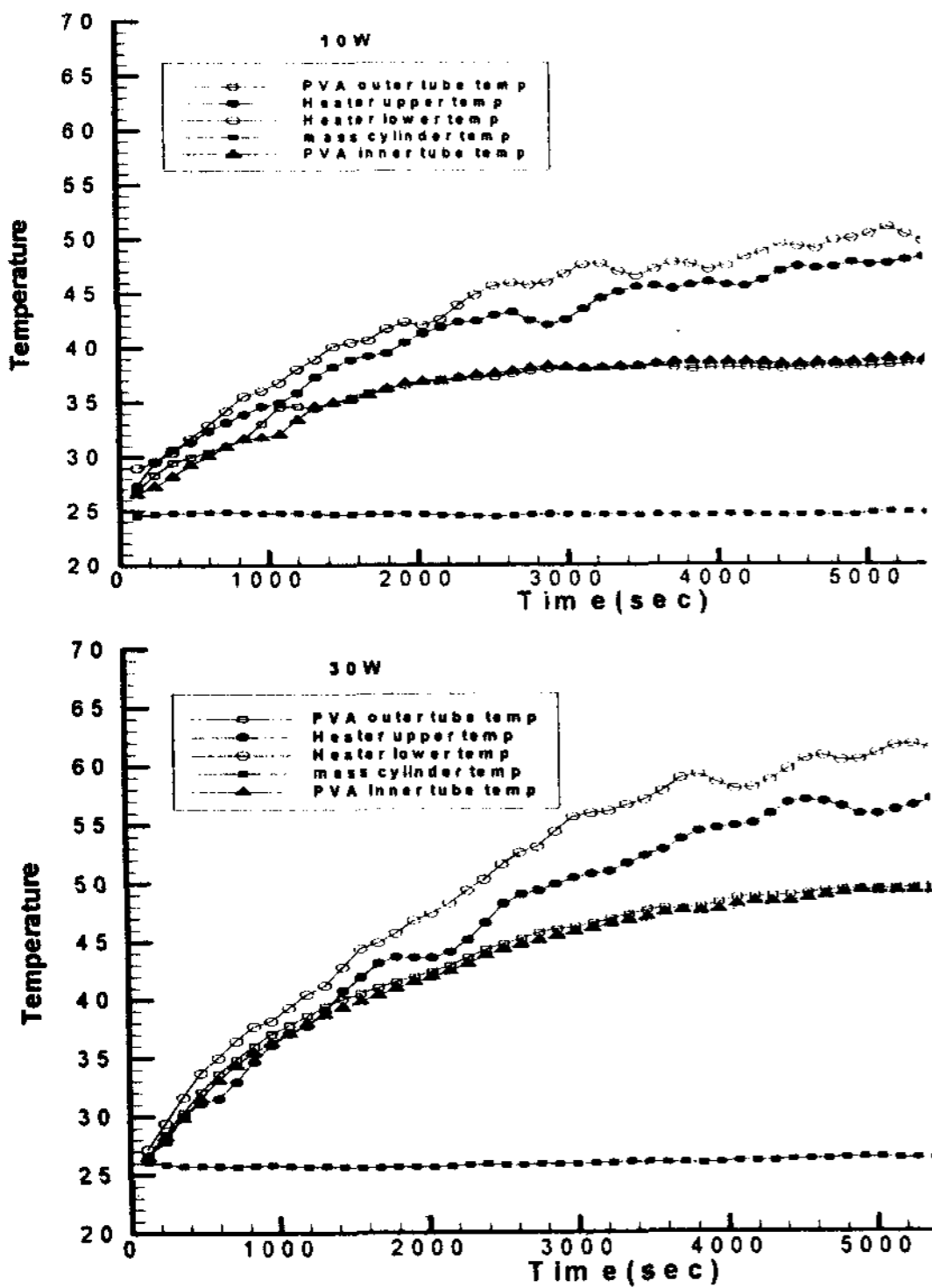


Fig. 4. Temperature change in various heat input

흡상높이를 보여준다. 흡상수두 높이는 큰 차이를 발견할 수 없었으며 부피가 클수록 흡상시간이 빨라진다는 것을 알 수 있다.

3.2 벽면의 온도 특성

Fig. 5는 CPL의 전 영역의 온도 분포를 증발부에 들어오는 가열용 순환유체의 온도를 50°C, 60°C, 70°C 그리고 80°C로 할 때 증발부, 응축부,

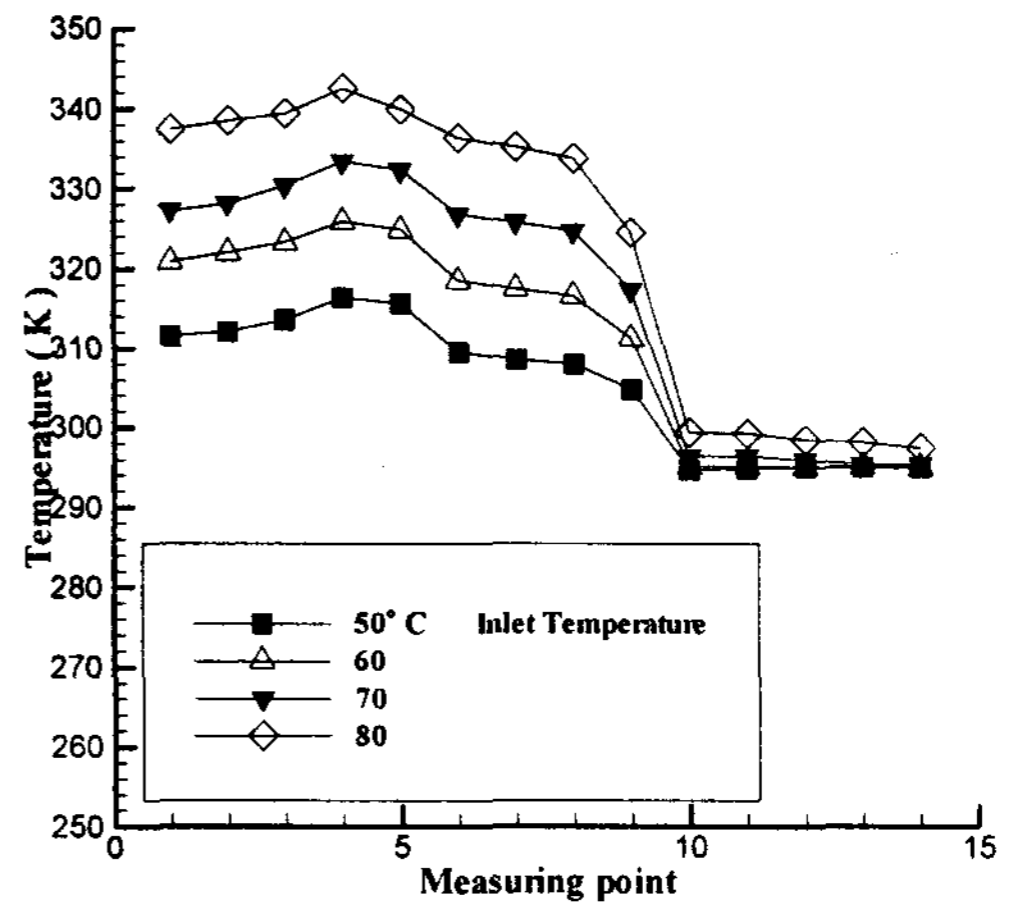


Fig. 5. Wall temperature of Evaporator, Condenser and Capillary pump

모세관펌프 영역의 온도분포를 나타낸 것이다. 여기서 1번에서 4번까지는 증발부영역, 5에서 9번까지는 응축부 영역, 그리고 10번에서 14번까지는 모세관펌프의 외벽온도를 순차적으로 나타낸 것이다. 입열 온도별 벽면의 온도분포는 50°C에서 80°C까지 거의 유사한 경향으로 보여주고 있다. 모세관펌프의 온도는 점점 증가하는 것처럼 보여 지는데 증발부 입구에 가까운 쪽이 낮고 모세관 펌프측으로 들어오는 부분이 약간 높다는 뜻이다. 이것은 작동유체의 유동방향이 펌프측에서 증발부측으로 유동되고 있음을 나타낸 것이고, CPL이 정상적 유동이 되고 있음을 나타낸 것이다.

3.3 노즐밸브 개도 특성

Fig. 6은 증기의 운동이 어느 정도의 유동력을 갖는가를 알기 위하여 가시적 창을 만들고 그 내부에 유량을 조절할 수 있는 노즐을 설치하여 노즐의 개도에 따라서 CPL의 전 영역에 온도 응답 특성을 보여 준 것이다. 이때 가열유체의 온도는 70°C로 하였고 작동유체의 양은 750cc로 한 것이다. 증발부와 응축부의 벽면의 온도는 거의 같은 변화이며, 모세관펌프에서는 약간의 온도 변화 폭을 보여준다. 이것은 개도가 클수록 증발력이 증

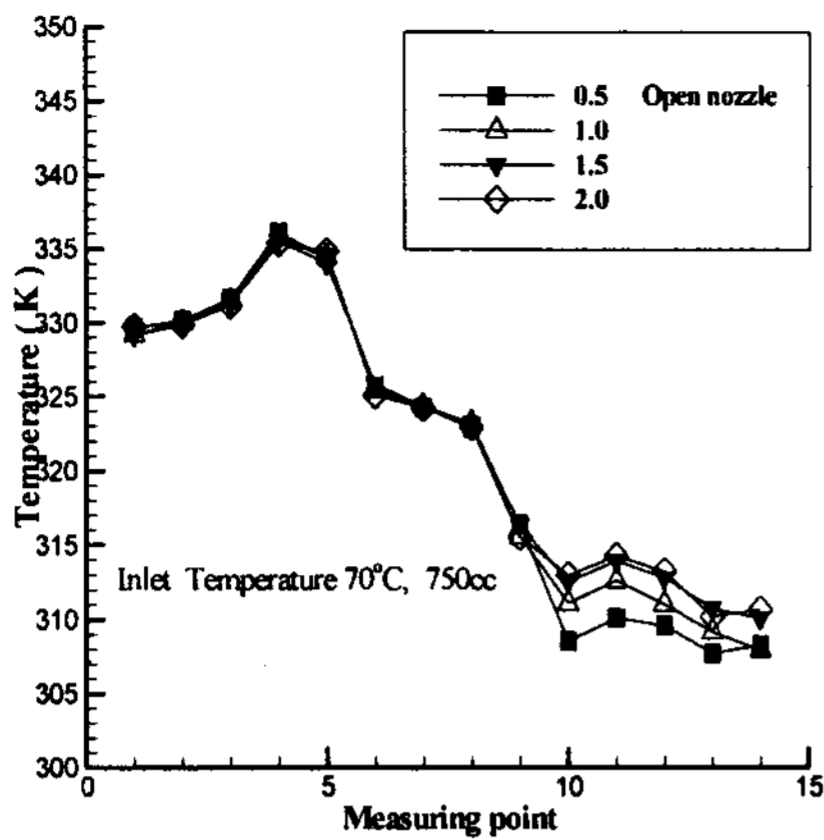


Fig. 6. Wall temperature by various nozzle opening

가하여 순환하는 작동유체가 모세관펌프 상부에 도달하는 시간은 단축되고 작동 유체량은 증가한 결과라고 판단된다.

3.4 모세관펌프의 위치 변화

Fig. 7은 모세관펌프의 위치를 그 출구와 증발부의 입구를 기준으로 하여 50, 100, 150 그리고 200mm로 상승시켰을 때 CPL의 전체 영역의 온도 분포를 나타낸 것이다. 이것은 가열 유체 80°C와 작동유체 충전량이 750cc를 기준으로 한 것으로 측정시간 간격은 20분으로 하였다. 그 결과는 증발부와 응축부의 온도 변화에는 영향을 보여주지 못하고 모세관펌프에서만 약간의 영향을 볼 수 있음을 알 수 있다. 모세관펌프의 위치가 높으면 증발부에 중력작용이 증가하여 모세관 펌프에 유입되는 작동유체의 양이 증가한 이유이라고 판단된다.

3.5 작동유체 유량 특성

Fig. 8은 작동유체량이 150, 600, 750 그리고 1000cc로 변화시켰을 때 CPL의 전 영역의 온도 분포를 나타낸다. 작동유체량은 전체 영역의 온도 변화에 다소 영향을 주고 있으며 150cc경우는 증발부의 온도가 높음에도 응축부의 온도가 감소한

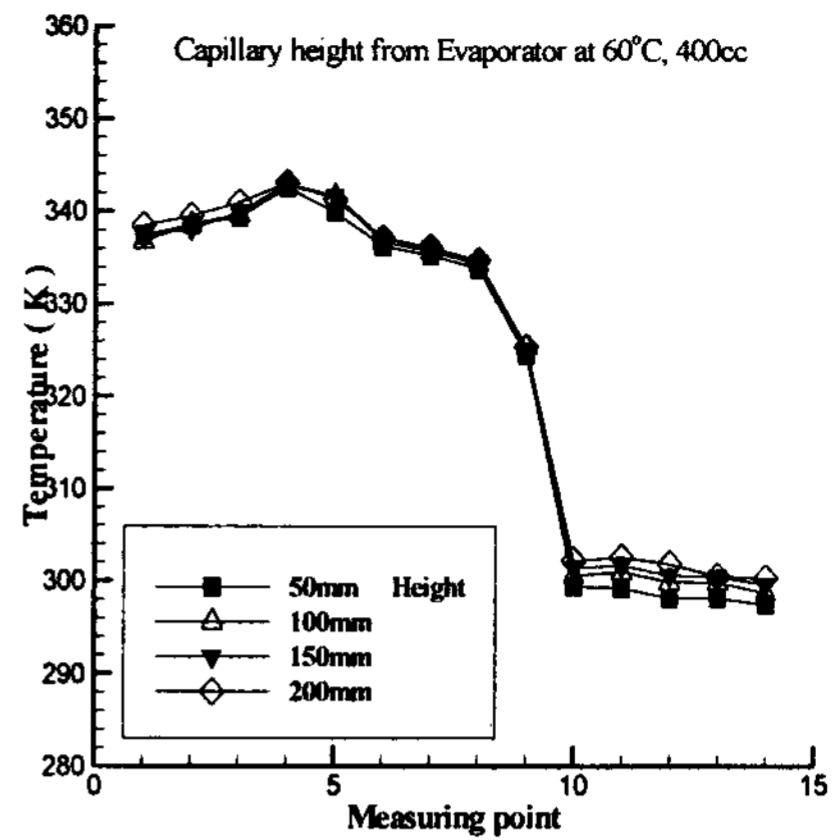


Fig. 7. Wall temperatures with various capillary pump heights

것을 보면 증기보다 낮게 보여준다. 벽면의 온도 및 모세관펌프의 온도가 가장 높게 나타난 것은 750cc의 경우로 보여지며 원활한 운전이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8을 기준으로 하여 작동유체량에 따라 증발부를 가열하는 순환유체의 입출구 온도 차이로서 전열량을 예측한 것이다. 온도가 60, 70 그리고 80°C 일 때 작동유체가 150cc 일 때 2°C 정도의 차이를 보였으나 작동유체가 증가하면 그 온도 차이도 증가하여 작동유체가 750cc부근에서 최대가 되었으며 그 보다 증가한 경우는 다시 감소하는 것으로 나타내고 있다. Fig. 8, 9에서 보면 적정 작동유체는 본 시스템에서 750cc 부근의 작동유체가 최적임을 알 수 있다. 이것은 증발부 내부체적의 20%이다

Fig. 10은 동력 발생목적의 그 기초 작업으로 노즐의 개도를 전체 밸브개도의 1/4, 2/4, 3/4 그리고 4/4로 변화한 경우 증발부의 가열목적인 순환유체의 입·출구 온도차를 순환유체의 온도변화에 따라 나타낸 것이다. 노즐의 개도에 따라 큰 변화는 없으나, 그 경향은 개도가 클수록 약간씩 증가하는 것으로 보여준다. 이것은 개도가 적으면 작동유체의 유동저항이 일어나기 때문이라고 판단되지만 유동관의 적절한 배치로 작동유체

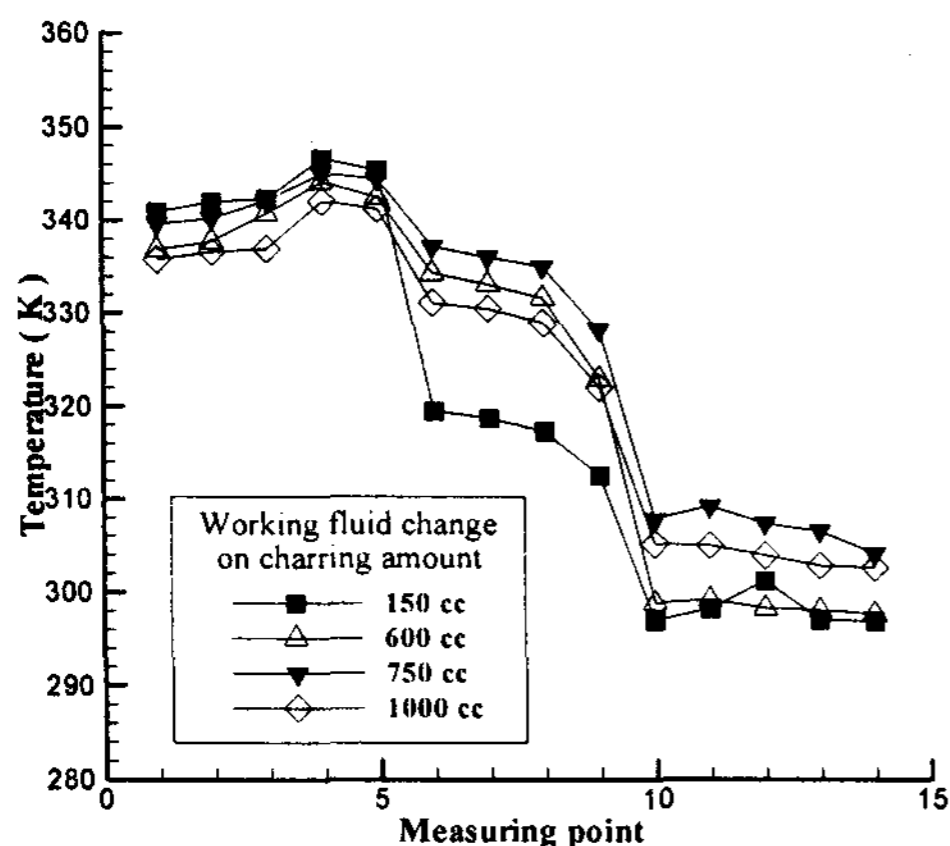


Fig. 8. Wall temperature variation different working fluid change

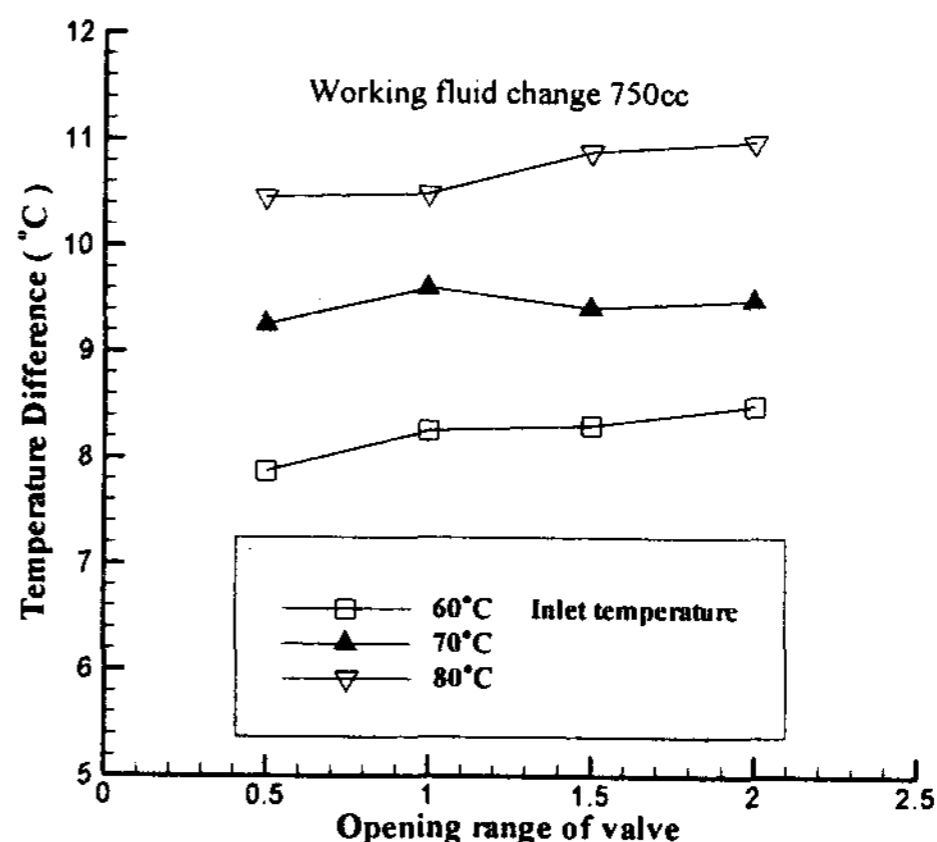


Fig. 10. Temperature difference for nozzle opening

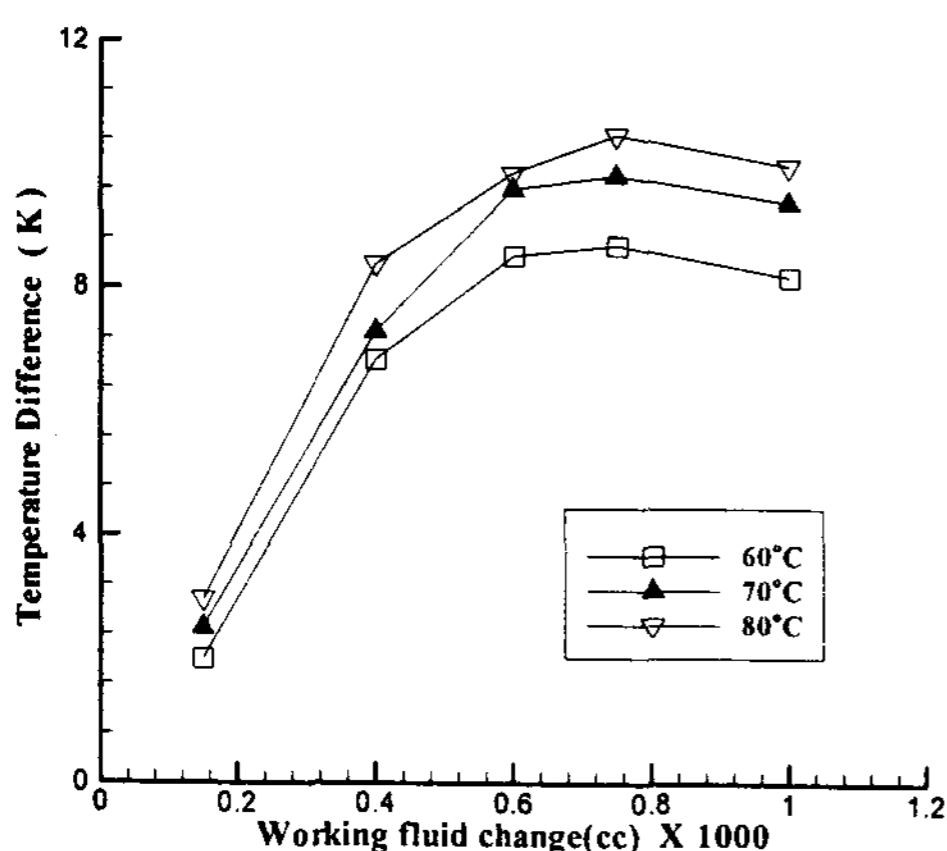


Fig. 9. Temperature difference for Various working nozzle

의 유동을 원활하게 한다면 이러한 문제는 해결되리라 판단되며 노즐에서 유동하는 작동유체의 유동력 측정에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

4. 결론

액체 귀환 워를 PVA 스폰지로 하여 CPL방법을 채용하여 에너지의 전달 효과에 대하여 비교 검토한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. CPL의 구성은 적절하였으며 모세관펌프 제작에 PVA 스폰지는 매우 유용하였다.
2. 작동유체가 증발부 체적의 20% 부근에서 에너지 전달이 최대가 되었으며 벽면의 온도 분포도 전체 영역에서 높게 나타났다.
3. 가시화 창으로 작동유체의 유동 특성을 관찰하였고, 작동유체의 동특성을 이용하는데 기초 자료를 얻었다.
4. 노즐은 개도가 클수록 에너지 전달이 증가되었으나 그 영향은 적었다.

참고 문헌

1. 日本機械學會, 浸水 ヒートパイ 開發. 1995년 61권 591호
2. 日本機械學會, 宇宙用 Capillary Pump Loop (CPL) 關限 研究(復水 平板形 蒸發器 使用限 CPL 作動特性), 1996년 62권 597호
3. F. J. Stenger, "Experimental Feasibility study of water-Filled capillary - pumped Heat Transfer Loops .NASA TM-x-310. 1966, pp1-32
4. J. Kuetal, "Capillary pumped Loop GAS and

- Hitch-hiker Flight Experiments. AIAA-86-1249. AIAA/ASME 4th Joint Thermophysics and Heat Transfer conference. June 1986
5. M.E. McCabe ,Jr.etal Design and Testing of a High power Spacecraft Thermal Management System. NASA TM 4051. June 1988
 6. B.Cullimore ,Recent Advances in capillary pumped Loop Technology, proceedings of the Areospace Corporation spacecraft Thermal Control Technology workshop. February 1992
 7. P.D.Dunn, D.A.Reay, "Heat Pipes", Fourth Edition, 1994
 8. 이기우, 장기창, 홍성화, "A study on the Heat Transfer Characteristics by Counter Flow and Parallel Flow in Seperate Heat Transfer Heat Pipe Heat Exchanger", Proceeding of the Second Heat Pipe Workshop, Korea, 1998
 9. 장기창, "분리형 써모사이폰에서 열전달 특성에 관한연구", 충남대학교 박사학위논문, 1998.