

스크린 워를 삽입한 소형 히트파이프에서 열전달 특성에 관한 실험적 연구

박기호* · 이기우* · 고영기* · 이계중* · 전원표*

An Experimental Study on the Heat Transfer Characteristics in Miniature Heat Pipes with Screen Wick

K. H. Park, K. W. Lee, Y. K. Ko, K. J. Lee, W. P. Chun

Key Words: Working fluid ratio(작동유체 충액율), Heat pipe(히트파이프), Heat transfer coefficient(열전달 계수), Heat transport capability(열수송력), Thermal resistance(열저항), Inclination angle(경사각), Screen wick(스크린 워)

Abstract

This study is to research the heat transfer characteristics in copper-water heat pipes with screen wick, #100. Recently, the semiconductor capacity of an electronic unit has been larger, on the contrary, its size is smaller than before. As a result, a high-performance cooling system is needed. Experimental variables are inclination angle and temperature of cooling water. The distilled water was used for the working fluid. At a inclination angle -6° , #100 2layer screen mesh is shown the best heat transfer performance.

1. 서론

전자 및 정보통신 분야가 점점 발달함에 따라 전자부품의 반도체의 용량은 대용량화하면서 크기는 오히려 소형화하는 추세에서 열발생 밀도의 증가로 냉각시스템의 고성능화가 요구되고 있다. 노트북 PC의 CPU에서의 발열량이 CPU의 처리속도의 증가와 함께 계속 상승하여 1999년에 20W, 2000년에 27W, 2001년에 30W로 증가하는 추세이고 PC의 용량 증가와 함께 계속 상승하는 경향에 있다. 현재의 CPU 증가속도라면 냉각장치의 개발이 CPU의 처리속도 증가에 뒤따라지 못할 것이다. 곧 냉각장치의 발전없이는 PC의 CPU 처리속도의 발전이 둔화될 것으로 예상된다. 따라서 최근에는 이러한 문제점을 해결할 수

있는 방법으로 히트파이프를 이용한 냉각방식이 각광을 받고 있다. Mobile PC의 CPU에 3, 4mm 히트파이프를 장착하고 응축부에 초소형 팬을 부착하여 냉각하거나, CPU에서 노트북이 접혀지는 힌지(hinge)까지의 1차 히트파이프와 힌지에서 LCD 패널 뒷면까지의 2차 히트파이프, 즉 2개의 히트파이프로써 CPU의 발열을 제거하기도 한다.[1] 또한 지하철차량 반도체 냉각용이나 PCS 기지국의 옥외용 합체 냉각용으로도 사용된다.[3] 히트파이프에서 기본이 되는 사항들 중 가장 중요한 것은 제작된 히트파이프가 얼마만큼의 열을 전달할 수 있는가와 그만큼의 열을 전달시키기 위해 최적의 내부 작동유체 주입량을 찾아서 최대 열수송능력을 가지는 히트파이프를 설계하는 것이다. 워이 삽입되어 있는 히트파이프의 경우 전달할 수 있는 최대 열전달량은 여러 가지 작동한계 중 모세관 한계(capillary limitation)에 많이 좌우되는데 이것은 모세관 구조물의 펌핑압력과 길이방향의 마찰손실, 그리고 경사각의 영향을

* 정희원, 한국에너지기술연구원

받는다.[2] 문석환 등은 편조형 워를 갖는 직경 3, 4mm, 길이 150, 300mm의 소형 히트파이프에서 가열부 길이를 40mm, 응축부 길이를 변화하여 경사각도에 따른 열저항과 열전달 한계열량을 실험에 의하여 연구하였다.[3] 3~6 mm 정도의 작은 직경을 가지는 히트파이프는 통상 수직모드 보다는 수평모드에 가깝게 설치되므로 내부에 워와 같은 모세관 구조물을 가지게 되는데 이 경우에 히트파이프 내부에 주입되는 작동유체량은 실험에 의해 구할 수 밖에 없다. 실험에 의해 구해진 최적의 작동유체량을 주입한 히트파이프를 실험 대상으로 하였다.

본 연구에서는 히트파이프를 전자장비 냉각용으로 사용하고자 할 때 내부에 #100의 스크린 워를 삽입한 6mm 동-물 히트파이프를 제작하여 스크린 워의 겹수 및 냉각수 온도, 히트파이프의 설치 경사각에 따른 열저항 및 성능을 비교 실험하여 열전달 특성을 살펴보고자 하였다.

2. 히트파이프 모델 결정

전자장비 냉각용으로 사용되는 히트파이프는 통상 3~12.7 mm 정도로써, 반도체 냉각에서부터 전축의 amplifier 냉각에 사용되는데, 본 연구에서는 직경이 6mm 인 동(copper)재질의 파이프를 사용하였다. 그리고 작동유체는 히트파이프 용기 재질인 동과 반응하여 불응축 가스를 생성시키지 않는 것으로 알려진 아세톤, 메탄올, 물, 에탄올 중에서 20~120℃ 정도의 범위에서 액체 표면장력과 잠열이 비교적 큰 물을 사용하였다.

내부 작동유체를 중력의 도움없이도 귀환시킬 수 있는 모세관력을 발생시키는 워으로는 스크린 메쉬를 사용하였다. 이는 여러 참고문헌에서 가장 기본적인 모세관 구조물로 자주 언급이 되고 있으며 본 연구에서는 #100의 스크린 메쉬를 삽입한 히트파이프를 제작하여 실험을 하였다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

히트파이프는 직경 6mm의 동파이프를 사용하였고 유효길이는 300mm이고 가열부 길이를 50mm, 단열부 길이를 100mm, 응축부 길이를

150mm로 하여 응축부와 가열부 길이의 비를 3:1로 하였다. 작동유체로는 증류수를 사용하였고 작동유체의 양은 사전 실험에 의해 구해진 양을 각각 주입하였다. screen wick의 wick porosity의 포화도를 100%로 하였을 때, 1겹, 2겹, 3겹 각각의 주입량을 140%, 120%, 110%로 하였다.[6] 이것은 100%의 wick porosity에 내부 체적의 약 8%정도의 양을 더 주입한 것으로 볼 수 있다. 히트파이프의 경사각은 0°, 3°, 6° 이고, 냉각수의 온도는 20℃, 30℃, 40℃로 하여 실험을 하였다. 본 연구에서 사용된 히트파이프의 사양과 실험 조건들을 Table 1에 보여 주고 있다.

본 연구에서 사용된 실험장치는 크게 히트파이프 및 경사각 조절기, 자료획득장치, 항온수조의 세 가지로 나누어진다.

Table 1. Experimental conditions of the heat pipe

parameters	condition
Container material	copper
pipe diameter	6 mm
total length	300 mm
length of evaporator zone	50 mm
length of adiabatic zone	100 mm
length of condenser zone	150 mm
Working fluid	distilled water
Inclination angle	0°, 3°, 6°
Cooling water temperature	20℃, 30℃, 40℃

Fig. 1은 히트파이프 요소의 성능실험을 위한 실험장치의 전체 구성도이며 가변전압조절기를 이용하여 전기가 공급되면 히트파이프의 가열부 주변에 감겨진 니크롬 선(4.5Ω/m)에서 발열이 되어 열량이 공급된다. 이것을 세라크 울(cerak wool)($\kappa=0.075 \text{ W/m}^\circ\text{C}$)로써 1차 단열을 한 후 우레탄을 이용하여 2차 단열함으로써 외부 대기로의 방열손실을 최소화하였다. 열선 주위의 온도와 단열재 외부표면의 온도를 측정하여 방열손실을 계산할 수 있도록 구성하였다. 단열부는 일차적으로 단열테이프를 감은 후 경사각 조절기에 붙어있는 테프론재질의 단열재료로 체결하였으며 테프론재질의 외부에 역시 우레탄 단열재를 감싸는 방식으로 단열하였다. 응축부의 냉각을 위해

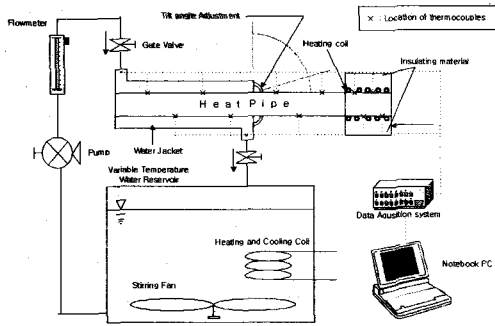


Fig. 1 Experimental apparatus

항온수조(가열용량:750W, 냉각용량:250W)에서 일정온도로 맞춰진 물을 유량계를 통해 응축부에 공급이 되게 하여 가열부에 공급된 열량이 응축부에서 충분히 냉각되도록 하였다. 응축부의 수냉각을 위해 응축부 위에 길이 150mm, 내부 직경 15mm의 파이렉스 유리관을 water jacket을 설치하고 유리관의 외부표면을 10mm 두께의 우레탄으로 단열을 하였다. 히트파이프 요소에 대한 성능을 구하기 위해서는 가열량, 각 부위에서의 표면온도, 내부의 포화 온도 및 압력을 측정하여야 하는데 본 연구에서는 온도를 측정하기 위하여 열전대를 증발부에 8개, 단열부에 4개, 응축부에 6개를 설치하였다. 증발부에는 10mm간격으로 상하로 8개를 설치하였고, 단열부에는 20mm 간격으로 상하로 4개, 응축부에는 30mm 간격으로 상하로 6개를 설치하여 온도를 측정하였다. Fig. 2에 열전대 위치를 나타내었고 이렇게 설치된 열전대로부터 온도를 측정하여 데이터 취득장치(DBK board, 42 channel, IO Tech.)를 통해 PC로 온도 데이터가 저장되도록 하였다. 그리고 물자켓을 통과한 물의 입구와 출구 온도 차이로써 히트파이프의 응축부에서 교환되는 열량을 계산하여 추정한다.

3.2 실험방법

6mm 동-물 히트파이프에 대해서 경사각은 0°, 3°, 6°로 하고 top heating mode로 하였다. 100메쉬의 screen wick을 1겹, 2겹, 3겹으로 하고 워의 porosity에 대해 각각 140%, 120%, 110%에 해당하는 양의 작동유체를 주입한 heat pipe들을 대상으로 예측된 모세관 열전달 한계값

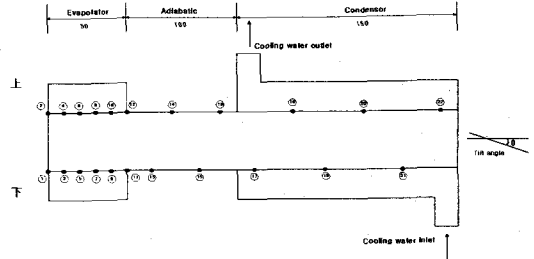


Fig. 2 Locations of thermocouples

을 토대로 10W의 열량에서 시작하여 5W 정도씩 단계적으로 열량을 증가시켜 가열량과 열저항값을 비교하였다. 실험은 가열부 온도가 급격히 상승하여 dryout 상태이거나 급격히 상승하지 않더라도 110°C가 넘을 경우에 종료하였다.

#100 스크린 메쉬를 삽입한 히트파이프의 성능을 평가하기 위하여 스크린 메쉬의 겹수 및 경사각, 냉각수의 온도에 따른 열저항 및 한계열량을 비교 분석하였다.

열저항은 증발부 온도 평균과 응축부 온도 평균의 차를 공급열부하로 나눈 값으로 다음과 같다.

$$R_{HP} = \frac{T_e - T_c}{Q_{in}}$$

여기서 Q_{in} 는 증발부에 가해진 열부하에 방열손실을 고려한 값(W)이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 #100 screen wick 1겹

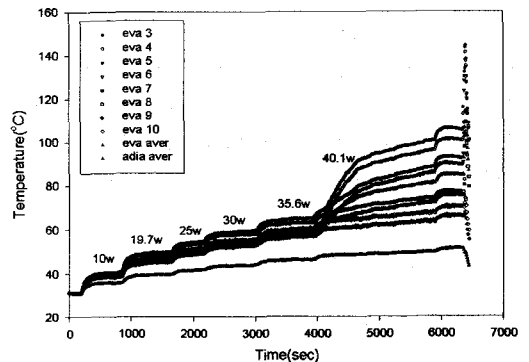


Fig. 3 Wall temperature distribution of heat pipe according to input power(1-layer,3degree)

Fig. 3과 Fig. 4는 #100 스크린 메쉬 1겹의

porosity에 대해 140%에 해당하는 양의 작동유체를 봉입한 경우에 히트파이프 각도의 변화와 공급 열부하에 따른 증발부 및 단열부 벽면의 온도 분포를 나타낸 것이다.

Fig. 3은 #100 1겹, 경사각 3° 일때의 벽면의 온도 분포를 나타내었는데 가열량 35W에서 dryout 현상을 보여주고 있다. Fig. 4는 #100 1겹, 경사각 6° 일때의 벽면의 온도 분포를 나타내었는데 가열량 30W에서 dryout을 보여 주는 것으로 보아 경사각 6° 보다 3° 에서 한계열량이 큰 것을 알 수 있었다.

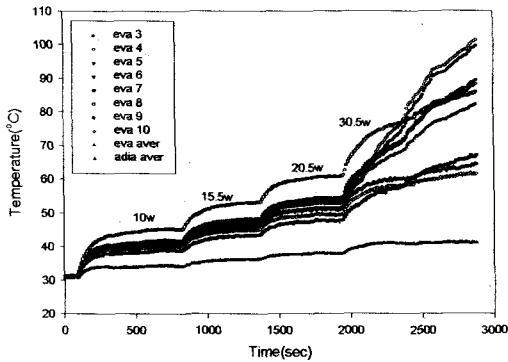


Fig. 4 Wall temperature distribution of heat pipe according to input power(1-layer,6degree)

4.2 #100 screen wick 2겹

Fig. 5와 Fig. 6은 #100 스크린 메쉬 2겹의 porosity에 대해 120%에 해당하는 양의 작동유체를 봉입한 경우에 히트파이프 각도의 변화와 공급 열부하에 따른 증발부 및 단열부 벽면의 온도

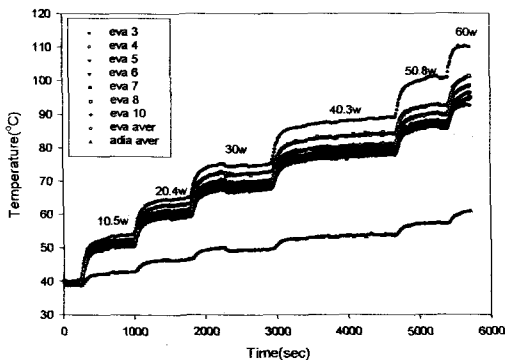


Fig. 5 Wall temperature distribution of heat pipe according to input power(2-layer,0degree)

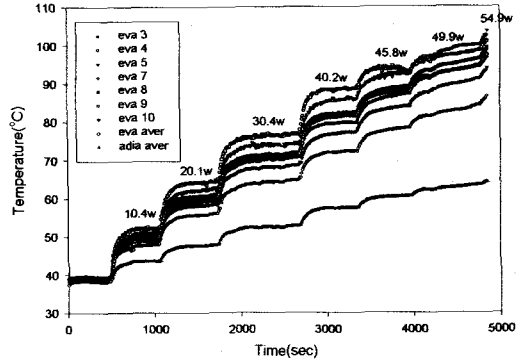


Fig. 6 Wall temperature distribution of heat pipe according to input power(2-layer,6degree)

분포를 나타낸 것이다. 냉각수 온도 40°C의 경우 증발부 벽면의 온도가 100°C가 넘을 때까지 dryout 현상은 나타나지 않고 있어 1겹의 경우와는 달리 한계열량이 상당히 증가하였음을 알 수 있다. 냉각수의 온도에 따른 증발부 벽면의 온도 상승을 살펴보면 냉각수의 온도에 따라 증발부 온도가 100°C에 도달하는 입열량은 거의 변하지 않고 있는 것을 알 수 있었다. 2겹의 경우 경사각 0° 일 때에는 40W까지 가열부의 온도가 상승하지 않고 있으나 6° 일 때에는 30W이후에는 가열부의 온도가 상승하는 것을 보아 각도의 영향으로 모세관력이 모자라 한계열량이 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 스크린 워 2겹, 경사각 6°, 냉각수 온도 40°C일 때 가열량에 따른 히트파이프의 표면 온도를 나타낸 것으로 응축부 끝단의 온도가 시작점보다 낮은 것은 냉각수 입구가 응축부 끝단에 위치하고 있기 때문이며 가열부 끝부분이 중

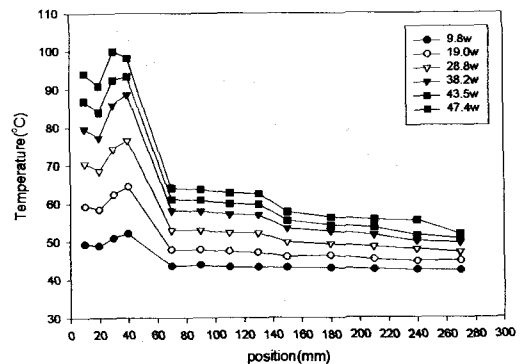


Fig. 7 Wall temperature distribution(6degree)

양분보다 낮게 나타난 것으로 보아 작동유체의 양은 적지 않은 것으로 사료된다.

4.3 #100 screen wick 3겹

Fig 8과 Fig 9는 #100 스크린 메쉬 3겹의 porosity에 대해 110%에 해당하는 양의 작동유체를 봉입한 경우에 히트파이프 각도의 변화와 공급 열부하에 따른 증발부 및 단열부 벽면의 온도 분포를 나타낸 것이다. 냉각수 온도 40℃의 경우 증발부 벽면의 온도가 100℃가 넘을 때까지 dryout 현상은 나타나지 않고 있어 한계열량이 상당히 증가하였음을 알 수 있다. 냉각수의 온도에 따른 증발부 벽면의 온도상승을 살펴보면 냉각수의 온도에 따라 증발부 온도가 100℃에 도달하는 입열량은 거의 변하지 않고 있는 것을 보아 2겹의 경우와 마찬가지로 냉각수의 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다.

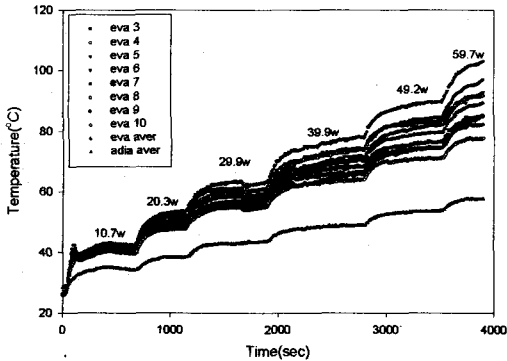


Fig. 8 Wall temperature distribution of heat pipe according to input power(3-layer,0degree)

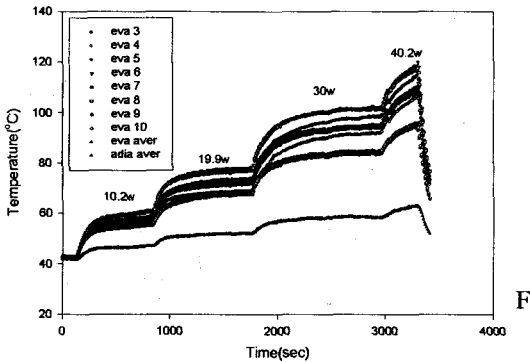


Fig. 9 Wall temperature distribution of heat pipe according to input power(3-layer,6degree)

4.4 열저항 및 한계열량

Fig. 10에서 Fig. 12는 각각의 메쉬 겹수에 따른 열저항값을 히트파이프 경사각도, 냉각수의 온도에 따라 나타내었는데 1겹의 열저항값이 가장 낮은 것을 알 수 있으나 1겹의 경우는 2겹, 3겹의 경우보다 한계열량이 작은 것을 알 수 있었고 낮은 열량에서도 dryout이 일어나서 높은 열량의 경우에는 적용이 힘든 것을 알 수 있다. 2겹과

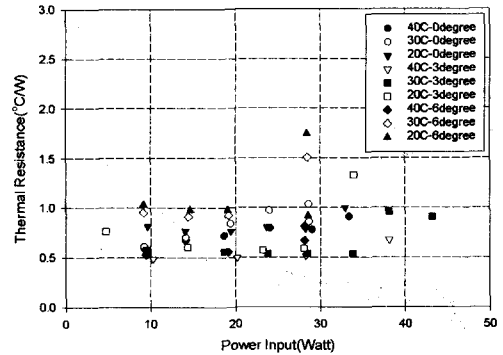


Fig. 10 Thermal resistance at 1-layer

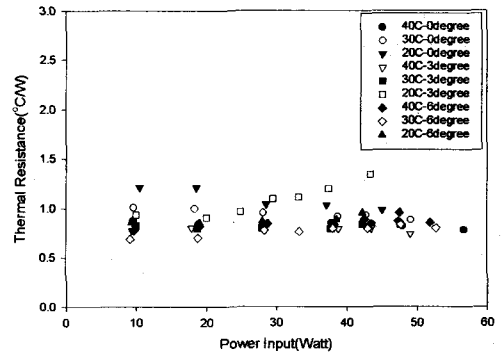


Fig. 11 Thermal resistance at 2-layer

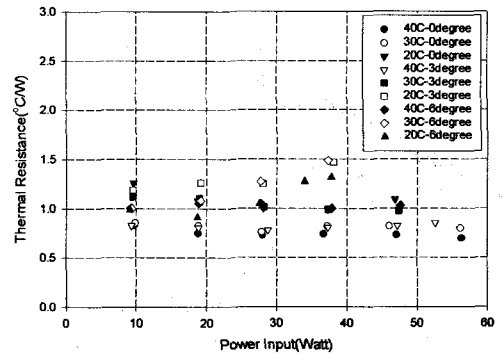


Fig. 12 Thermal resistance at 3-layer

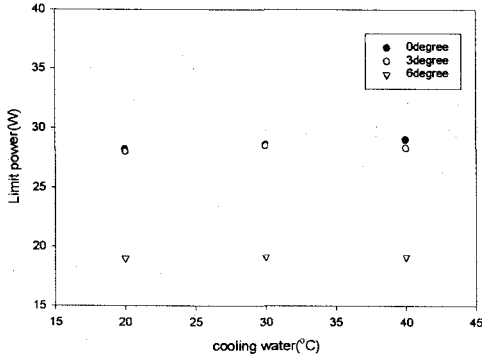


Fig. 13 Limit power of heat pipe (1-layer)

3겹의 경우를 비교하면, 2겹의 경우가 각도나 냉각수의 온도의 차이에 비해서 열저항값의 차이가 적게 남을 알 수 있었다. Fig. 13은 #100 스크린 메쉬 1겹 히트파이프에서의 한계열량을 보여주고 있는데 히트파이프의 경사각이 0° 와 3° 에서는 한계열량의 차이가 나타나고 있지 않고 6° 에서는 19W 정도로 한계열량을 보여주고 있는데 #100 스크린 메쉬 1겹의 히트파이프에서는 0° 와 3° 의 경우는 한계열량의 차이가 나지 않는 것으로 보아 모세관력의 영향이 미치지 않는 것을 알 수 있고 6° 에서는 모세관력의 영향이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 히트파이프의 경사 각도가 증가할수록 한계열량이 줄어드는 것을 알 수 있고 경사각 6° 에서는 냉각수 온도의 영향은 거의 받지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 14에 냉각수 온도 20°C일 때 각 겹수에 따른 한계열량을 나타내었는데 1겹에서는 0° 나 3° 의 경우에 경사각의 영향을 받지 않고 있는 것을 알 수 있고 2겹이나 3겹에서는 모세관력의 차이에 따라 각도가 증가할수록 한계열량의 급격한 감소를 보이는 것을 알 수 있었다. 그러나 3겹보다는 2겹에서 더 높은 한계열량의 값을 보이는 것으로 보아 2겹의 열전달 성능이 더 좋을 수 있다. Fig. 15에 히트파이프의 경사각 6°, 냉각수 온도 40°C일 때 각 겹수에 따른 열저항값을 나타내었는데 낮은 열량에서는 0° 나 3° 의 경우와 마찬가지로 1겹이 낮은 열저항값을 보이거나 30W 이상의 열량에서는 3겹, 2겹의 순으로 낮은 열저항값을 보여 주고 있는 것으로 보아 30W 이상의 열량에서는 2겹이 가장 열전달 성능이 좋은 것을 알 수 있다.

Fig. 16에 히트파이프의 경사각 6°, 스크린 메쉬

1겹일 때 냉각수의 온도에 따른 열저항값을 나타내었는데 냉각수 온도 40°C일 때 가장 낮은 열저

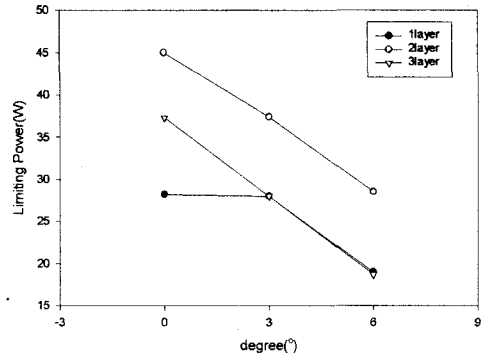


Fig. 14 Limiting power

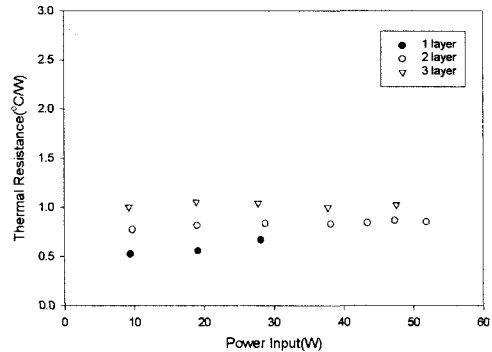


Fig. 15 Thermal resistance according to screen wick layers at 6 degree

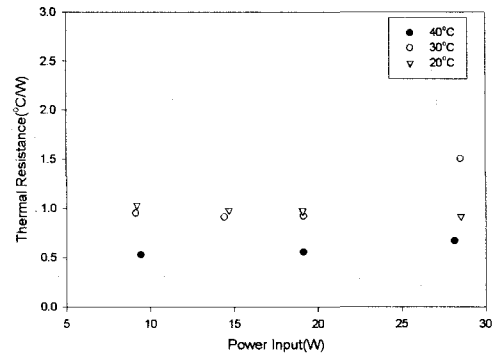


Fig. 16 Thermal resistance at 1-layer(6 degree)

항값을 보여주고 있고, 20°C와 30°C는 거의 차이가 나지않지만 30W에서 20°C가 낮은 열저항을 보여주고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 17에 히트파이프의 경사각 6°, 스크린 메쉬 2겹일 때 냉각수의 온도에 따른 열저항값을 나타

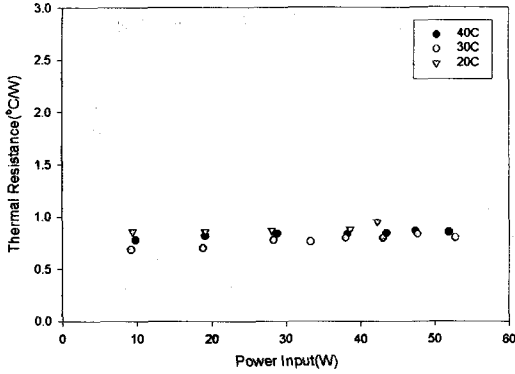


Fig. 17 Thermal resistance at 2 layer(6 degree)

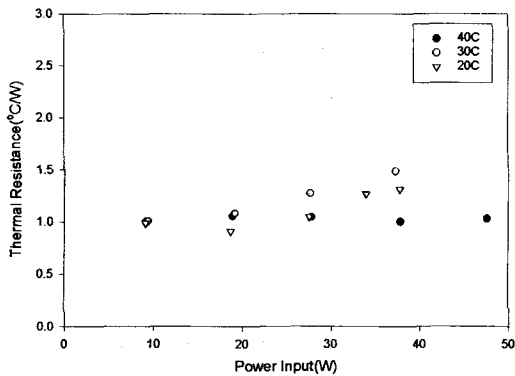


Fig. 18 Thermal resistance at screen wick 3 layer(6 degree)

내었는데 냉각수의 온도에 따라서는 거의 열저항 값은 차이가 나지않으나 열량 30W 이하에서는 30℃, 40℃, 20℃의 순으로 약간의 차이가 나는 것을 알 수 있다. 30W이상에서는 30℃, 40℃에서는 거의 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 18에 스크린 메쉬 3겹, 히트파이프의 경사각 6° 일 때 냉각수의 온도에 따른 열저항값을 나타내었는데 열량 30W이상에서는 40℃가 열저항값이 가장 낮은 것을 알 수 있다.

5. 결론

소형 전자부품 냉각용으로 사용되는 히트파이프에서 #100 스크린 메쉬를 사용한 6mm 동-물 히트파이프를 제작하여 스크린 메쉬의 겹수, 경사각 및 냉각수의 온도에 따라 열전달 성능 실험

을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 6mm, 동-물 히트파이프를 0° - 6° top-heating 모드에서 사용할 때 #100 스크린 메쉬에서는 1겹, 3겹의 경우보다도 2겹이 가장 열전달 성능이 좋다.

(2) # 100의 스크린 워를 사용하였을 경우 냉각수의 온도가 20℃일 때보다 40℃일 때가 열저항 값에서 약 20% 낮은 값을 나타내었다.

(3) # 100의 스크린 워 1겹을 사용하였을 경우 한계열량은 냉각수의 온도 변화에는 영향이 없었고 히트파이프 경사각의 영향도 경사각 3°까지는 없었고 경사각 6°에서는 약 30%의 감소를 보였다.

(4) # 100의 스크린 워 2겹을 사용하였을 경우 열저항은 0.7 ~ 0.9 °C/W의 값을 나타내었다.

참고문헌

- [1] Mochizuki M., Mashiko K., Nguyen T., Saito Y., and Goto K., 1997, "Cooling CPU using Hinge Heat Pipe" Heat Pipe Technology, Pergamon Press, pp. 218-229.
- [2] S. W. Chi, 1976, Heat Pipe Theory and Practice :A Source Book, Hemisphere Publishing Corporation.
- [3] S. H. Moon, K. S. Kim, and C. G. Choi, 2000, "A Study on Cooling Characteristics of Miniature Heat Pipes with Woven-Wired Wick," 설비공학 논문집 Vol. 12, No. 3, pp. 227 - 234.
- [4] H, Imura, K. Sasaguchi and H. Kozai, 1983, "Critical Heat Flux in a Closed Two-phase Thermosyphon," Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 26, No. 8, pp. 1181-1183.
- [5] P. D. Dunn and D. A. Reay, 1978, "Heat Pipes", Pergamon Press.
- [6] 박기호, 이기우, 고영기, 이계중, 2001, "스크린 워를 삽입한 동-물 히트파이프에서의 최적 작동 유체 주입량에 관한 연구", 제3회 히트파이프 워샷 논문집, pp36-pp42.