

편조 직 히트파이프의 개발과 작동특성에 관한 연구

문석환 · 최춘기 · 황 건 · 최태구

한국전자통신연구원 부품기술개발부 실장기술팀

A Study on Operating Characteristics and Development of Woven-Wired Wick Heat Pipe

Seok-Hwan Moon, Choon-Gi Choi, Gunn Hwang and Tae-Goo Choy

Electronic Packaging Technology Team, ETRI

요 약

전자부품 및 시스템의 고속/고밀도화 추세에 따라 발열밀도가 계속 증가하고 있다. 최근 펜티엄II급 이상의 노트북 컴퓨터의 CPU에서는 칩당 발열량이 10 W 이상으로 증가하고 패키징 공간의 제한 때문에 소형히트파이프를 이용한 냉각이 많이 적용되고 있다. 본 연구에서는 모세압구동력이 크고 생산성등이 고려된 편조 형태의 새로운 직을 개발하였으며, 노트북 컴퓨터의 CPU 등 소형 전자부품냉각에 적용 가능한 직경 3, 4 mm 히트파이프를 설계 및 제작하였다. 직경 3, 4 mm Miniature Heat Pipe(이하 MHP)의 작동특성은 일반적인 중형히트파이프와 다르므로 MHP의 열전달특성 및 작동성능에 미치는 각종 인자들의 영향을 파악하고자 성능시험을 수행하였다. 고려된 작동인자로는 작동유체 충전률, 전체 파이프길이 및 증발부, 응축부길이, 설치 경사각, 직의 가닥수, 열부하 등이다. 작동인자의 영향과 관련된 연구결과를 향후 패키징을 위한 응용연구의 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

Abstract — As high speed/high density of electronic parts and systems are required, the heat generation of the CPU of a notebook PC of higher than the Pentium-II grade has been recently increased to be more than 10W, and the available packaging space has been compacted. Therefore, it is being used widely to perform cooling by using miniature heat pipes. In the present study, new woven-wired type wick with a large capillary limit and a high productivity has been developed, and heat pipes with the diameter of 3 mm or 4 mm to cooling of small-sized electronic parts such as CPU of a notebook PC, etc. have been designed and manufactured. Further, inasmuch as the operational characteristics of miniature heat pipe (hereinafter referred to as MHP) with the diameter of 3 mm or 4 mm are different from those of general medium-sized heat pipes, a performance test has been performed in order to review heat transfer characteristics and affects of various factors on the performance of MHP. The operational factors taken into consideration include charging ratio of a working fluid, the total length of pipe, the length of the evaporator and of the condenser, inclination of installation, number of wick strands, thermal load, etc. The results obtained in relation to the affects of operational factors may be used as basic data for further study on their application to packaging.

1. 서 론

최근의 전자 부품 및 시스템 레벨의 고속/고밀도화 패키징 추세는 정보통신부문을 비롯하여 전자산업 전 분야에 걸쳐 일반적인 현상이 되고 있다. 고속의 성능을 발휘하는 CPU 등의 부품을 제한된 단위공간(enclosure or chassis)에 패키징 시 EMI/EMC, 상호연결(Intercon-

nection), 소음, 진동 등과 더불어 노트북 컴퓨터와 같이 초박판형 패키징을 추구하는 분야에서는 냉각이 가장 큰 문제로 대두되고 있다. 펜티엄급 CPU가 출시되기 전 기존의 노트북 컴퓨터에는 CPU(발열량 약 6 W) 상부에 히트싱크를 부착하거나 사시 측면에 소형 팬을 부착하는 것으로 냉각성능을 충분히 만족하였으나, 최근 펜티엄II급 이상의 CPU에서는 칩당 발열량이 10 W 이상으로 증

가하고, 패키징 공간의 제한 때문에 히트파이프를 적용한 냉각이 불가피하게 되었다^[1]. 현재 미국과 일본의 히트파이프 전문업체를 중심으로 직경 3~4 mm의 소형 히트파이프(이하 MHP)를 노트북 컴퓨터의 CPU냉각에 적용하는 연구가 활발히 수행되고 있다^{[2][3]}. 팬터엄급 초기에는 직경 3, 4 mm 히트파이프 1개를 CPU 상단에 설치하고, 노트북내의 여유있는 공간에서 알루미늄판에 응축부를 부착하여 냉각시키는 방법을 이용하였다. 그러나 발열량이 증가하면서 MHP 2개를 사용하고 응축부에는 초소형 냉각팬을 부착하는 방식을 대부분 사용하고 있다. 노트북 컴퓨터에 히트파이프를 적용 시 무엇보다도 중요한 것은 매우 제한된 본체 내에서 응축부를 배치하기 위한 공간을 확보하는 것이다. 일부 히트파이프 회사에서는 CPU에 1차 히트파이프와 LCD판넬 뒤에 2차 히트파이프를 부착하고 힌지(hinge)부에서 Thermal Connector에 의해 열저항을 최소화시켜 CPU의 열을 제거하는 기술을 발표한 바 있다^[4].

MHP는 파이프의 직경 크기에 따라 열전달률에 있어 다소 큰 차이를 나타내며, 히트파이프의 작동한계는 모세한계(capillary limit)에 의해 주로 영향을 받는다^{[5][6]}. 현재 노트북 컴퓨터에 적용되는 직경 3, 4 mm 크기의 MHP는 grooved, fine fiber, sintered type 등의 직(wick)을 사용하고 있으며, 각각 직의 pore radius 및 permeability 향상 측면에서 장, 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존 직이 가지고 있는 문제점들을 개선하여 pore radius 및 permeability의 향상과 더불어 구조 및 설치가 간단하고, 생산성을 고려한 새로운 형상의 직을 개발하였다. Fig. 1에 편조형 직(woven-wired wick)의 개략도를 도시하였다. 그림의 편조형 직은 직경 0.08 mm 동선의 4가닥 또는 8가닥이 각각 16다 및 24타씩 편조되어 파이프 내부에 삽입되며 직을 벽면에 밀착시키기 위한 별도의 부가적인 장치가 필요없는 것이 특징이다. 또한 노트북 컴퓨터의 CPU 냉각에 적용할 목적으로 제작된 직경 3, 4 mm MHP의 열전달특성 및 MHP의 작동성능에 미치는 인자들의 영향을 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 연구결과는 차후 노트북 컴퓨터

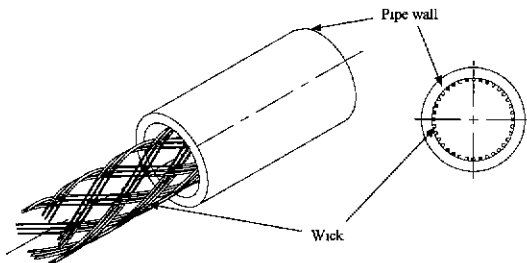


Fig. 1. Woven-wired wick.

에 실장하기 위한 기초자료로써 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

편조형 직을 갖는 직경 3, 4 mm MHP의 열전달특성 및 작동성능에 미치는 각종 인자들의 영향을 파악하기 위한 성능시험 장치는 크게 MHP, 지지대, 그리고 자료 획득 및 전원공급장치의 3부분으로 나뉘어진다. Fig. 2에 전체 실험장치의 개략도를 나타내었다. 열부하는 증발부벽면위에 1.5 mm 간격으로 감겨진 직경 0.36 mm (10Ω/m)의 니켈-크롬열선을 통해 공급하였으며, 유리섬유의 단열재를 사용하여 증발부열선 주위를 감싸므로써 대기로의 열손실을 최소화하고자 하였다. 아세탈 재질의 단열재로 MHP고정용 프레임을 만들어 그 내부에 MHP가 삽입되도록 하고, 이를 아크릴 재질의 지지대와 결합시켜 실험장치를 구성하였다. 지지대는 경사각 등의 조건변화가 가능하다.

응축부에는 히트싱크(53×53×32 mm)와 팬 및 덕트를 설치하여 강제공냉이 이루어지도록 하였으며, 응축부의 파이프벽면과 히트싱크 사이에는 열 접촉저항을 최소화하기 위하여 thermal grease(Thermalcote, 0.74 W/m²·C, Thermalloy Inc.)를 충전하였다. 히트파이프 벽면 및 대기 온도는 K type(φ0.08 mm) 열전대를 이용하여 측정하였으며, 히트파이프의 증발부 벽면에 2점, 단열부에 1점, 응축부에 3점을 각각 부착하였다. 열전대는 soldering 용

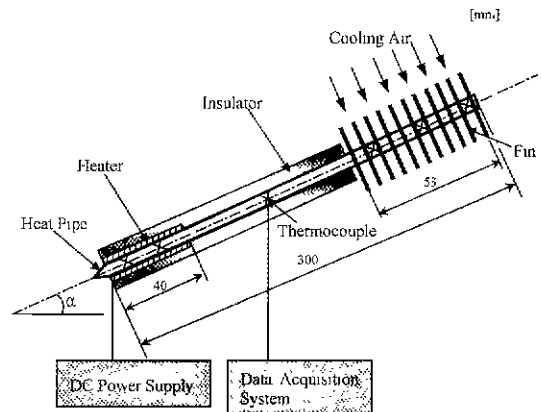


Fig. 2. Schematic diagram of a tested MHP.

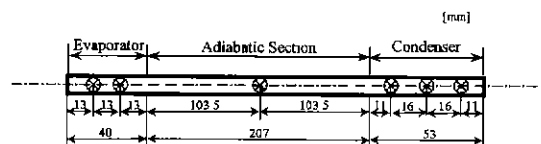


Fig. 3. Locations of thermocouples on MHP wall.

접방법으로 벽면에 접합시켰다. Fig. 3에 열전대의 부착 위치를 나타내었다. 온도는 데이터처리 시스템(8ch, 21X Micro Logger, Campbell Scientific Inc.)을 이용하여 기록하였다.

직경 3, 4 mm MHP의 열전달률에 미치는 영향을 파악하기 위한 작동인자로는 작동유체 충전률, 히트파이프 길이 및 증발부, 응축부길이, 설치 경사각, 워의 가닥수, 열부하 등을 고려하였다. 상당직경(equivalent diameter)이 약 1~2 mm 미만의 극소형 히트파이프(Micro Heat Pipe)에서는 열전달 활동에 참여하지 않는 Liquid Blocking이라고 하는 영역이 존재함에 따라 이를 고려한 액체 충전률이 적용되어야 한다^[67]. 직경 3, 4 mm MHP에서도 작동유체의 량이 많은 경우 Liquid Blocking의 영향으로 추측되는 열전달률의 감소현상이 목격되고 있어 적정량의 액체 충전은 중요하다^[8]. 작동유체는 작동온도 30~150°C 범위에 대해 액체의 표면장력과 접윤이 비교적 큰 물을 사용하였다. 충전률은 충전률변화 실험을 제외하고는 직경 3, 4 mm에 대하여 각각 전체체의 29.3%, 31%를 충전하였으며, 삽입된 워의 가닥수는 가닥수변화 실험을 제외하고는 직경 3, 4 mm에 대하여 각각 4가닥, 8가닥이다.(Fig 4-Fig. 10에 해당)

한편 본 연구대상의 MHP는 노트북 컴퓨터 등의 소형 전자부품 냉각에 적용할 목적으로 설계 및 제작되었는 바 시스템에 패키징(packaging)시 전체 히트파이프길이 변화할 수 있으며, 증발부길이 또한 CPU 등의 발열체 크기 및 배열에 따라 달라질 수 있다. 그리고 열소산을 위한 응축부의 길이도 시스템내부의 공간배치에 따라 크게 좌우된다. 따라서 이를 고려하여 히트파이프 전체 길이는 150, 200, 250, 300 mm로 변화시켜 성능시험을 수행하였으며, 증발부길이는 40 mm와 80 mm의 두 가지로, 그리고 응축부길이는 각각의 직경에 대해 53 mm와 106 mm로 변화시켰다. 설치 경사각은 기울기에 따른 영향을 살펴보고자 -5°~+5° 범위 내에서 변화시켰다.

워의 가닥수 변화에 따른 MHP의 열전달성능을 파악하기 위하여 가닥수를 4, 6, 8가닥으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 히트파이프에 공급되는 열부하는 전기적인 방법으로 최초 2 W에서부터 2 W씩 단계적으로 증가시켰으며, dryout이 발생되어 증발부끝단의 벽면온도가 급격히 증가하는 시점에서 실험을 종료하였다. MHP 벽면온도의 기록은 각 열부하의 단계에서 열량공급에 따라 벽면온도가 증가하기 시작한 후 정상상태에 도달하였을 때 이루어지도록 하였다. 이후 열부하를 다음 높은 단계로 증가시키는 것은 MHP벽면온도를 충분히 냉각시켜 동온을 만든 후에 수행하였다. 증발부 및 단열부, 응축부의 벽면온도는 각부의 여러 점에서 얻은 값을 평균 처리하였다.

열전달성능을 파악하기 위하여 열저항 및 종합열전달 계수를 이용하였으며, 열저항 R (°C/W)은 다음 식(1)로 정의된다

$$R = \frac{T_e - T_{c,air}}{Q} \quad (1)$$

여기서 T_e 는 MHP의 증발부 벽면온도이며, $T_{c,air}$ 는 응축부 입구측 공기온도, 그리고 Q 는 증발부에 가해진 열부하(W)이다. 종합열전달계수(Overall heat transfer coefficient), U 는 식(2)로부터 얻을 수 있다.

$$U = \frac{Q}{A_s(T_e - T_{c,air})} \quad (2)$$

여기서 A_s 는 MHP의 증발부 표면적이다. 연구결과로는 열량공급에서의 오차율($\pm 0.05V$ for voltage, $\pm 0.01A$ for current)과 온도계측상의 오차율($\pm 0.1^\circ C$)을 포함할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 열전달 특성

직경 3, 4 mm 크기의 MHP를 제작 시 작동유체는 steam blow 방식으로 주입되며, 이는 진공펌프에 의해 히트파이프를 진공시킨 후 작동유체를 주입하는 방식과 달리 대기상태에서 히트파이프에 진공탈기된 작동유체를 충전시키고, 이를 가열하여 증기를 발생, 내부의 공기를 밀어내게 하는 충전방식이다. MHP는 기존의 워과 구조 및 특성이 다른 편조형 워를 사용함에 따라 작동유체 충전률이 상대적으로 다소 낮게 주입되며, 별도의 장치없이 워를 효과적으로 설치할 수 있다는 특징을 갖는다.

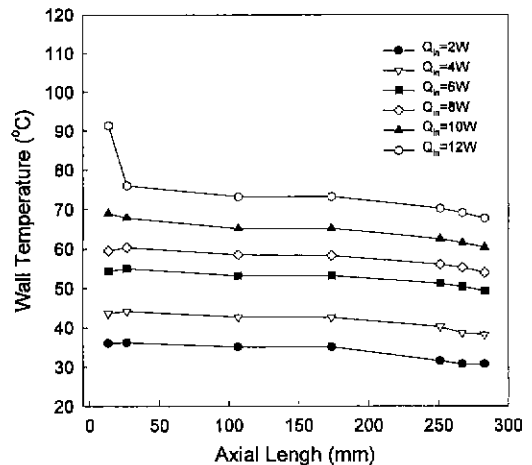


Fig. 4. Wall temperature distribution in input power.

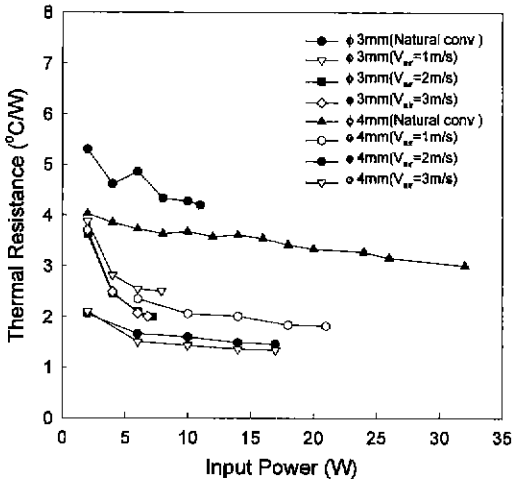


Fig. 5. Thermal resistance vs. input power in length of MHP.

Fig. 4는 직경 3 mm, 길이 300 mm인 MHP에 대하여 자연대류공냉하에서 축방향 길이에 따른 벽면온도분포를 도시한 것이다. 자연대류공냉하에서 증발부와 응축부의 평균온도차는 열부하 2~10 W 범위에 대하여 약 4.9~5.1°C로써 히트파이프의 등온성을 잘 나타내고 있다. 열부하 10 W에서 증발부끝단의 온도가 인접한 증발부상단부의 온도보다 약간 상승하는 것을 볼 수 있으며, 이때의 열부하를 dryout의 시작점으로 볼 수 있다. Dryout은 Peterson^[5]이 제시한 기준에 유사하게 증발부끝단의 벽면온도가 인접한 증발부상단의 벽면온도보다 미소량 날카롭게 증가하는 시점의 열부하로 정하였다. Dryout 발생 직후 증발부끝단의 벽면온도는 어느정도 증가한 상태에서 곧 정상상태를 유지하며, 이후 열부하가 미소량 증가함에 따라 증발부끝단의 온도는 급격한 기울기로 상승하게 되고, 곧 작동불능 상태에 도달하게 된다.

Fig. 5는 직경 3, 4 mm, 길이 300 mm인 MHP에 대하여 열부하에 따른 열저항을 도시한 것이다. 각 직경 크기에서 MHP의 열저항은 공급된 열부하의 크기에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다. 본 연구의 실험은 내부 작동온도를 변화시키지는 못하였으며, 작동온도는 열부하의 변화에 종속된다 따라서 위의 경향은 열부하의 증가로 이어지는 작동온도의 상승이 증기발생 밀도를 증가시켜 결과적으로 열전달률이 증진되는 데 기인하는 것으로 추측된다. 한편 응축부의 냉각공기 유량이 증가함에 따라 응축열전달률이 향상되어 열저항이 감소하고 있다.

3-2. 작동성능에 미치는 각종 인자

본 절에서는 MHP의 작동성능에 미치는 여러 인자들

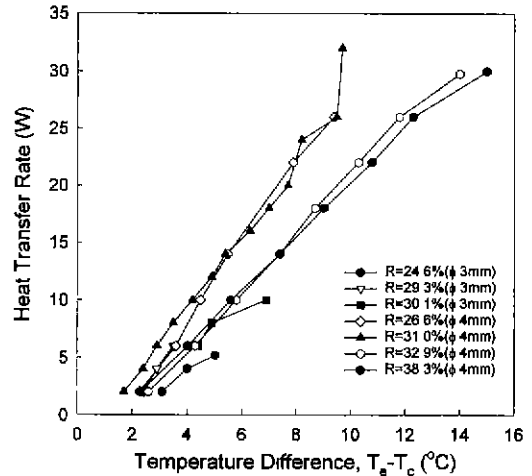


Fig. 6. Optimum charging ratio in diameter of MHP.

의 영향을 파악하고자 하였다.

Fig. 6은 직경 3, 4 mm MHP에 대하여 최적의 작동유체 충전률을 실험적으로 결정하기 위하여 성능시험을 수행한 결과를 나타낸 것으로써 각각의 작동유체 충전률에 대한 열전달률을 히트파이프의 열저항에 따라 도시하였다. 여기서 충전률은 전체 히트파이프 체적에 대한 주입 액체량의 비율을 의미한다. 직경 3, 4 mm MHP의 열수송능력을 고려할 때, 약 30 W 미만의 열전달률 범위내에서 각 직경크기에 대해 최적의 충전률은 히트파이프 열저항이 최소값일 때로 볼 수 있다. 그림에서 보면 직경 4 mm MHP에서는 31%일 때가 열전달률이 32 W이고 $T_e - T_c = 9.7^\circ\text{C}$ 로써 다른 충전률에 비하여 가장 낮은 열저항 수치를 나타내고 있어 최적의 충전률로 파악된다. 한편 직경 3 mm에서는 29.3%일 때가 동일 열전달률의 범위에 대하여 $T_e - T_c = 3.5^\circ\text{C}$ 로써 최소 열저항 수치를 나타내었다

노트북 컴퓨터의 CPU 등 발열부품에의 적용을 고려할 때 발열부에 부착되는 증발부의 길이는 큰 변화가 없을 것이므로 실험시에 길이는 일정하게 둘 수 있다. 다만 본 연구에서는 증발부의 길이변화에 따른 열전달 성능을 파악하고자 성능시험을 수행하였다. Fig. 7은 직경 4 mm, 길이 300 mm인 MHP에 대하여 증발부길이를 각각 40 mm, 80 mm로 변화시켜 성능시험을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 증발부길이 80 mm인 경우가 40 mm일 때보다 5 W 이상의 열부하범위에서 총합열전달계수가 더 높게 나타났다. 이는 증발부길이의 증가로 증기유동 거리가 감소한 데 따른 것으로 생각한다. 그러나 5W미만의 저열부하 범위에서는 국소 열유속이 증발부길이 40 mm일 때가 더 큼에 따라 증기발생 밀도가

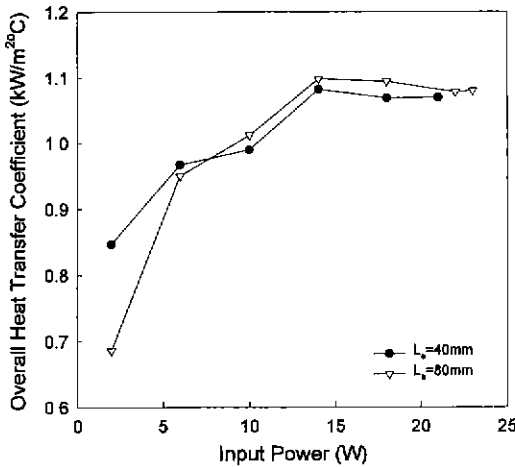


Fig. 7. Effect of length of evaporator on overall heat transfer coefficient.

오히려 증대되어 총합열전달계수가 높게 나타났다. 한편 열부하가 15 W 이상으로 증가함에 따라 총합열전달계수는 dryout의 한계에 도달할 때까지 더 이상 증가하지 않았으며, 이는 응축액의 증발부로의 귀환과 증발부에서의 증기발생이 균형을 이루게 된 데 따른 것으로 판단된다. 전체적으로 5 W 이상의 열부하범위에서 증발부길이에 따른 총합열전달계수의 변화는 약 2~3% 가량의 차이를 보일 뿐 큰 영향은 없는 것으로 파악된다.

Fig. 8은 수평방향 설치모드에서 V_{air}=1 m/s(응축부 냉각공기 유속)로 강제공냉시켰을 때 직경 3, 4 mm MHP의 응축부길이 변화에 따른 총합열전달계수를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 직경 3, 4 mm MHP에서 응축부길

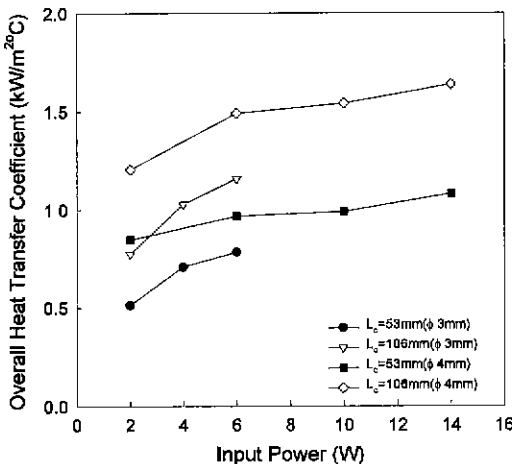


Fig. 8. Effect of length of condenser on overall heat transfer coefficient.

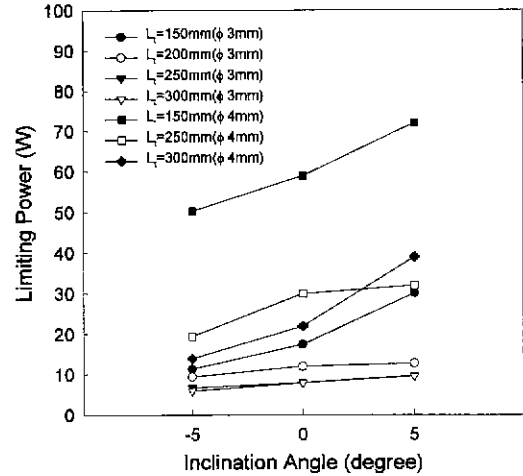


Fig. 9. Comparison of limiting power in length and in diameter of MHP.

이를 53 mm에서 106 mm로 2배 늘림에 따라 총합열전달계수는 각각 45%와 54%씩 증가하였다. 응축부의 길이증가는 응축열전달 면적을 증가시키게 되며, 따라서 응축부측으로 이동되어진 증기의 응축량이 증가될 수 있어 결과적으로 총합열전달계수가 상승하는 것으로 생각된다.

Fig. 9는 직경 3, 4 mm MHP에 대하여 열전달한계에 미치는 전체 히트파이프의 길이 및 설치 경사각의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 열전달한계(Limiting Power)는 각각의 직경크기에서 전체 히트파이프의 길이가 늘어남에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있어 직경 3, 4 mm의 소형 히트파이프에서는 기-액 계면 사이의 마찰에 의한 압력손실이 매우 크울 알 수 있다.

MHP의 설치경사각에 따른 중력의 영향을 파악하기 위하여 -5°~+5°의 범위 내에서 성능시험을 수행하였다. 그림에서 보면 증발부가 상단에 위치하는 설치 경사각의 경우에서 열전달한계는 다소 낮은 값을 보이고 있으며, 이는 응축액의 증발부로의 귀환이 중력을 극복하면서 뒤편을 통한 모세압 구동에만 의존하게 되기 때문이다. 노트북 컴퓨터에 탑재되는 MHP의 경우 현재 일반적으로 200~250 mm의 길이를 갖는다. 이를 고려할 때 Fig. 9에서 보면 -5°~+5°의 설치 경사각에 대해 열전달한계는 직경 3 mm에서 6.8~9.5 W, 직경 4 mm에서 19.5~47.5 W를 보이고 있어 향후 10 W의 CPU 등의 전자소자 냉각에 1개 또는 2개를 병렬사용함으로써 그 활용 가능성이 충분한 것으로 생각된다.

본 연구대상 MHP의 내부에는 직경 3, 4 mm 별로 삽입되는 편조형 워의 wire 가닥수가 각기 다른 데 그것은 직경크기에 따라 설치할 수 있는 최대 가닥수에 한

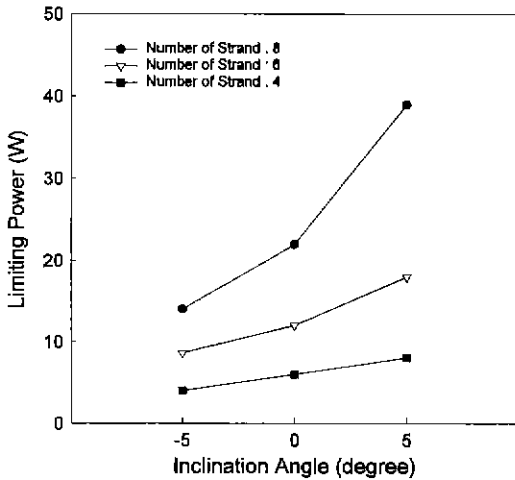


Fig. 10. Effect of number of wick strand on limiting power.

계가 있기 때문이다 편조형 워ick은 구조상 가닥수를 늘리게 되면 응축액의 유동량증가와 유효 증발 및 응축전 열면적이 증가될 수 있어 열전달률의 향상을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 직경 4mm MHP에 대하여 워ick의 가닥수를 4, 6, 8가닥으로 변화시켜 성능시험을 수행하였으며, 이를 통해 워ick의 구조를 최적화하고자 하였다. Fig. 10에서 보면 워ick의 가닥수가 늘어남에 따라 열전달한계는 증가하고 있으며, 4가닥인 경우보다 2배인 8가닥에서 약 3.5~4.9배 가량 높은 수치를 나타내었다.

4. 결 론

노트북 컴퓨터 등의 소형 전자부품에 적용할 목적으로 설계 및 제작된 직경 3.4mm 편조형 워ick 구조의 MHP에 대한 열전달특성 및 작동성능에 미치는 각종 인자들의 영향을 파악하기 위해 성능시험을 수행하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) Steam blow방식으로 제작된 편조형 워ick 구조의 MHP는 히트파이프의 특성인 등온성을 잘 나타내었으며, MHP의 열저항은 열부하의 증가와 더불어 내부 증기온도의 상승으로 감소하였다.

2) 편조형 워ick을 갖는 MHP의 충전률변화 실험에서는 직경 3, 4mm에 대하여 각각 전체체적의 29.3%와 31%일 때 최소치의 열저항을 나타내었다.

3) MHP의 증발부길이 변화에 따라서는 작동성능에 영향이 없는 것으로 나타났으나, 응축부길이가 53mm에서

106mm로 2배 늘어남에 따라 총합열전달계수는 각각 45%와 54%로 증가하였다.

4) 열전달한계는 직경이 클수록 그리고 파이프길이 짧을수록 증가하며, 파이프길이 200~250mm, 경사각 -5°~+5°의 범위에 대해 열전달한계는 직경 3mm MHP가 6.8~9.5W를, 직경 4mm MHP가 19.5~47.5W를 기록하고 있어 향후 10W의 CPU 냉각에 1개 또는 2개를 설치함으로써 적용 가능성이 충분할 것으로 생각된다.

5) 직경 4mm MHP에서 워ick의 가닥수가 늘어남에 따라 열전달한계는 증가하였으며, 8가닥일 때가 4가닥일 때보다 약 3.5~4.9배 가량 높은 값을 나타내었다.

참고문헌

- Saito, Y., *et al*: "The Application for Personal Computer Using Heat Pipe Technology", 10th Int. Heat Transfer Conf., Poster Session E-5 (1997).
- Eguchi, K., Mochizuki, M., Mashiko, K., Goto, K., Saito, Y., Nagaki, Y., Takamiya, A. and Nguyen, T.: "Cooling of CPU Using Micro Heat Pipe", Fujikura Co., Technical Note, Vol. 9, (1997) pp. 64-68.
- Xie, H., Aghazadeh, M. and Toth, J.: "The Use of Heat Pipes in the Cooling of Portables with High Power Packages", Thermacore Co., Technical Note.
- Mochizuki, M., Mashuko, K., Nguyen, T., Saito, Y. and Goto, K.: "Cooling CPU Using Huge Heat Pipe", Heat Pipe Technology, Pergamon. (1997) pp. 218-229.
- Babin, B.R., Peterson, G.P. and Wu, D.: "Steady-State Modeling and Testing of a Micro Heat Pipe", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 112, No. 3, August, (1990) pp. 595-601.
- Moon, S.H., Kim, C.J., Hong, S.E., Lee, J.S. and Kim, B.H.: "An Experimental Study on The Performance Limitation of a Micro Heat Pipe with Triangular Cross-Section", 11th Int. Heat Pipe Conf., Japan, Sep. 12-16, A1-4 (1999)
- Kurustalev, D. and Faghri, A.: "Thermal Analysis of a Micro Heat Pipes". Accepted for Publication in The ASME J. of Heat Transfer, ASME HTD, Vol. 236, (1993) pp. 19-30.
- Kim, K.S., Moon, S.H. and Choi, C.G.: "Cooling Characteristics of Miniature Heat Pipes with Woven-Wired Wick", 11th Int. Heat Pipe Conf., Japan, Sep. 12-16, A1-5 (1999)