스크린 메쉬를 이용한 판형 히트 파이프의 개발

이용덕† • 홍영호* • 김현태* • 김구영*

Development of Flat Plate Heat Pipe Using Screen Meshes

Yong-duck Lee, Young-ho Hong, Hyun-tae Kim and Ku-young Kim

Key Words : Screen Mesh(스크린 메쉬), Wick(윅), Flat Plate Heat Pipe(판형 히트 파이프), Heat Pipe(히트 파이프), Vapor Passage(증기유로), Liquid Passage(액체유로)

Abstract

The present study proposes a new structure for a flat plate heat pipe which could embody a thin thickness, any shapes and high heat density a unit area. It is on the structure for the formation of vapor passages and the support of the case of the flat plate heat pipe. A screen mesh is used as the one. To verify the validity of the one, the flat plate heat pipe of 1.08mm thickness was made with a layer of the screen mesh with 14 and 100 mesh number respectively and tested. Here the screen mesh with 14 mesh number plays a role of the vapor passage and the support of the case and the screen mesh with 100 mesh number functions as the wick structure. The results show that the screen mesh excellently carries out the function of the vapor passage and the support of the case.

기호설명

T_h : 열원 표면 온도, [℃]
T_c : 냉각수 유입구 온도, [℃]
Q_{in} : 입력 전력, [W]
R : 열저항, [℃/W]

1. 서 론

전자장비는 고집적화 기술의 발전으로 크기가 소형화 되고 두께도 점차 얇아지고 있다. 이와 함께 전자장비의 고응답성과 기능 향상에 대한 요구가 높아짐으로써 소비전력 또한 점차 증가하고 있는 추세이다. 이로 인해 전자장비의 작동 중에 그 내부의 전자 부품으로부터 발생되는 열의 방출량도 함께 증가하고 있다. 따라서 두께 및 부피가 작고 형상의 구성이 용이하며 동시에 단위 면적당 냉각용량이 큰 열전달 장치에 대한 필요성이 증대되고 있다.

기존의 전자장비 냉각을 위하여 히트 파이프가 널리 사용되고 있다. 히트 파이프는 파이프의 내측 벽에 모세관 구조를 갖는 윅을 장착하고 내부를 진공상태로 만든 후, 순수 냉매를 충진하고 밀봉하여 제작한다. 히트 파이프의 한 부분에 발열체를 장착하고 다른 부분에 열 방출부를 장착하면, 발열체의 열은 파이프 내부의 윅 영역 즉, 증발부로 전달되어 액체상태의 냉매를 증발시킨다. 증기상태의 냉매는 파이프 내부의 빈 공간 즉, 증기유로를 통하여 열 방출부가 장착된 윅 영역 즉, 응축부 영역으로 전달되어 응축된다. 이와 같은 구조 및 작동방식을 갖는 히트 파이프를 두께 및 부피가 작은 전자장비의 냉각장치에 적용하기 위하여 직경을 작게 가공하고 파이프의 모양을 변형하여 사용하고 있다. 그러나 직경이 작아질수록 히트 파이프가 전달할 수 있는 열의 양이 감소하고 제작하기 어려워지므로, 이의 대안으로 판형 히트 파이프에 대한 연구가 이루어지고 있다.

기존의 판형 히트 파이프(1)는 증기유로 공간을 확보하여야 하므로 얇게 제작할 경우 진공 공정

† 책임저자, 회원, LG 전선㈜ 기계연구소
E-mail : ydlee@cable.lg.co.kr
TEL : (031)450-8359 FAX : (031)450-8361
* 회원, LG 전선㈜ 기계연구소

시 사각단면의 케이스가 압착되어 변형이 발생된다. 이를 방지하기 위하여 케이스의 두께를 1mm로 하여 전체 두께를 5mm 정도로 제작하였는데, 이 경우 두께가 얇은 전자장비에 적용할 수 없게 된다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 사각 케이스의 한 쪽 면에 액체유로 역할을 하는 윅구조를 , 반대 면에는 케이스를 지지하면서 증기유로를 형성할 수 있는 구조를 형성하여 판형 히트 파이프를 제작하는 방법들이 제시되고 있다.(2~4) 이와 같은 구조를 사용하여 2mm 이하의 두께를 갖는 판형 히트파이프를 제작하는 데는 성공하였으나, 이들 방법들은 미세 가공 기술을 사용함으로써 가공비를 증가 시키고 또한 임의의 형상을 구현하는데 어려움을 갖는다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 스크린 메쉬를 사용하여 증기유로 및 액체유로를 동시에 형성함으로써 미세가공기술과 같은 고가의 기술을 사용하지 않으면서 단위 면적당 냉각능력이 뛰어나고, 얇은 두께와 임의의 형상 구현이 가능한 판형 히트파이프의 구조를 제시하고 작동원리를 설명하였다. 그리고 판형 히트 파이프를 제작하고 판형 히트 파이프에 부착된 열원의 가해지는 입력 전력의 변화에 따른 판형 히트 파이프의 냉각 특성을 고찰함으로써 본 연구를 통하여 제시한 판형 히트 파이프 구조의 타당성을 입증하였다.

2. 구조 및 작동 원리

2.1 기본 구조

Fig. 1 에는 본 연구에서 제시한 판형 히트 파이프의 기본 구조를 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 판형 히트 파이프는 기본적으로 증발부와 액체유로 역할을 하는 윅구조, 증기유로의 역할을 하는 스크린 메쉬 및 이를 둘러싸는 케이스와 케이스 내부에 충진되는 냉매로 구성된다.

윅구조는 모세관력을 유발할 수 있는 구조면

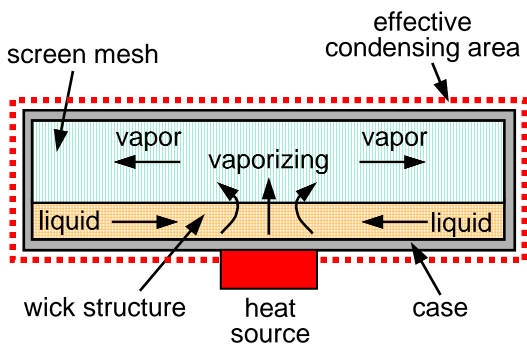

Fig. 1 Basic structure of the flat plate heat pipe

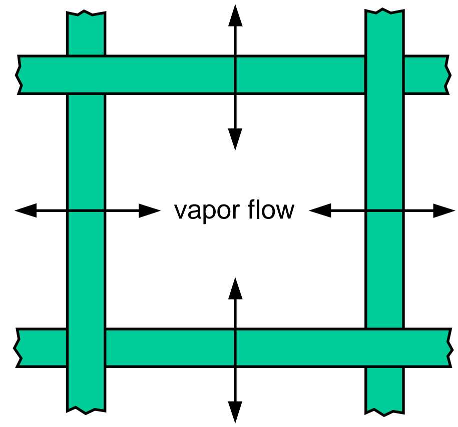

Fig. 2 Schematic of screen mesh

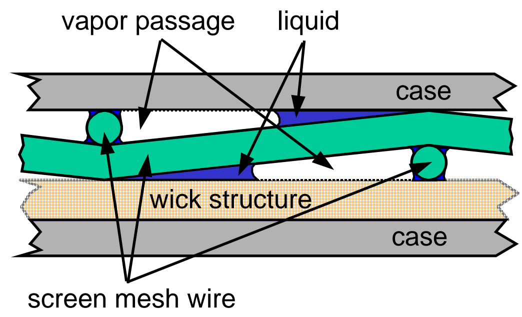

Fig. 3 Detail view of the flat plate heat pipe

어느 재질이나 가능하며, 스크린 메쉬의 경우는 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 강성을 갖는 가는 와이어(wire)가 상하로 겹치면서 직조된 구조로 구성된 것이면 어느 재질이나 사용 가능하다. 케이스는 사용 목적에 따라 다양한 재질을 사용할 수 있으며, 냉매는 사용 목적 및 작동 온도 범위에 따라 선정될 수 있다. 이와 같은 판형 히트 파이프의 구성 요소들은 서로 반응하여 불응축 가스를 방출하지 않도록 재질의 선정이 이루어져야 한다.

2.2 작동 원리

Fig. 1 에 나타낸 바와 같은 판형 히트 파이프의 열원에 열이 가해지면 이 열은 케이스를 통하여 열원의 상부측에 위치한 윅구조로 전달된다. 윅구조에 충진되어 있던 액체 상태의 냉매는 열원으로부터 전달된 열을 흡수하여 증발한다. 이와 같이 증발이 일어나는 영역을 이하 '증발부'라 칭한다. 이 증기는 스크린 메쉬 층에 형성된 증기유로를 통하여 사방으로 확산된다.

Fig. 3 에는 판형 히트 파이프 내에 윅구조와 함께 장착된 스크린 메쉬의 단면 형상을 자세하게 나타내었다. Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 강성이 있

는 와이어들이 서로 상하로 교차하며 스크린 메쉬를 형성하는데, 스크린 메쉬 격자 하나의 단면은 Fig. 3 에 나타낸 바와 같은 형상을 갖게 된다. 그림에서 보는 바와 같이 와이어들이 상하로 교차하면서 빈 공간을 형성하게 되는데, 바로 이 공간이 증기유로의 역할을 하게 된다. 이 증기유로는 사방으로 형성되어 있으므로 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 증기는 사방으로 유동할 수 있게 된다.

증기유로를 통하여 사방으로 퍼진 증기는 Fig. 1 에 점선으로 표시한 유효 응축부위에서 응축된다. 증기가 응축되어 액체 상태가 되면 증발부에서의 모세관력에 의하여 윅구조를 통하여 증발부로 귀환한다. 유효 응축부는 열원을 제외한 판형 히트 파이프의 전 면적에서 가능하며, 이 부위의 어느 한 곳 이상에 열방출 장치가 설치되면, 열방출 장치가 장착되는 케이스의 내부에서 응축이 일어나게 된다. 이와 같이 열방출 장치가 설치되어 응축이 일어나는 영역을 이하 '응축부'라 칭한다.

이상에서와 같이 열원을 제외한 판형 히트파이프의 전 영역에서 응축이 일어날 수 있는 것은 스크린 메쉬 구조의 특징 때문이다. Fig. 3 에서 보는 바와 같이 그림의 단면에 수직한 와이어와 수평한 와이어 및 케이스 혹은 윅구조의 표면과 만나서 증기유로를 형성할 때, 이 증기유로는 쐐기 모양을 갖는다. 이 쐐기 모양의 증기유로는 와이어의 직경이 증가할수록 또는 단위 인치(inch)당 메쉬 격자 수로 표시되는 메쉬 수가 감소할수록 증가한다. 쐐기 모양의 끝 부분으로 갈수록 면적이 작아지게 되는데, 이 면적이 어느 일정 수준 이하가 되고, 케이스면 외부 온도가 내부 증기의 포화온도 이하가 되면 이 영역에서 응축이 일어나게 된다. Fig. 3 에는 증기가 응축되어 쐐기 단면의 끝부분에서 액체상태로 존재하는 모습을 나타내었다. 또한 이와 같은 응축은 그림의 단면에 수직한 와이어의 둘레에서도 일어난다. 이렇게 응축된 액체 상태의 냉매는 와이어들의 교차지점에 형성되는 작은 쐐기구조를 통하여 윅구조로 전달된다.

스크린 메쉬는 금속 및 비철금속 와이어 그리고 강성을 갖는 폴리머 와이어 등을 사용하여 쉽게 제작할 수 있고, 임의의 형상을 갖도록 절단하기가 용이하다. 또한 증기는 스크린 메쉬 층에 형성된 증기유로를 통하여 사방으로 쉽게 확산되므로 임의의 형상을 갖는 판형 히트 파이프를 쉽게 제작할 수 있다는 장점을 가진다.

이상과 같이 본 연구에서 제시한 구조를 갖는 판형 히트 파이프는 임의의 형상으로 제작이 가능하고 응축부를 어느 면에다 설치하여도 작동될 수 있는 구조적 특징을 가지므로 두께가 얇고 부피가 작아 냉각장치의 장착이 어려운 전자장비의 냉각에 효율적으로 사용될 수 있다.

3. 실험

3.1 판형 히트 파이프 제작

전술한 바와 같이 판형 히트 파이프는 윅구조, 스크린 메쉬, 케이스 및 냉매로 구성된다. 본 연구에서는 윅구조로 순도가 99% 이상이고 직경이 0.11mm 인 구리 와이어로 제작된 메쉬 수가 100 인 스크린 메쉬를 사용하였으며, 증기유로를 형성하는 스크린 메쉬는 순도가 99% 이상이고 직경이 0.35mm 인 구리 와이어로 제작된 메쉬 수가 14 인 스크린 메쉬를 사용하였다. 케이스는 두께가 0.07mm 인 전해동박을 사용하였으며, 냉매는 정재된 순수 물을 사용하였다.

제작된 판형 히트 파이프는 가로 및 세로의 길이가 각각 50mm 및 100mm이며, 두께는 1.08mm 이다. 케이스의 상판과 하판은 변성 아크릴계 이성분 본드를 사용하여 접착 밀봉하였다. 냉매를 주입하기 전 로타리 진공 펌프(rotary vacuum pump) 및 디퓨젼 진공 펌프(diffusion vacuum pump)를 사용하여 판형 히트 파이프의 내부를 8.0×10^{-4}Pa 이하 까지 진공으로 만든 뒤, 냉매인 불응축 가스가 제거된 정재수를 1.06cc 충진하고 최종 밀봉하였다. 진공도는 Diavac사의 이온화 게이지(Ionization gauge, Model IT-L20P)를 사용하여 측정하였다.

3.2 실험장치

본 연구에서 제시한 판형 히트 파이프의 구조 및 작동원리의 타당성을 검증하기 위하여 전술한 바와 같이 판형 히트 파이프를 제작하고 판형 히트 파이프에 부착된 열원(heat block)에 가해지는 입력 전력의 변화에 따른 판형 히트 파이프의 냉각 특성을 고찰하기 위하여 Fig. 4 에 나타낸 바와 같은 실험장치를 구성하였다.

Fig. 5 에는 판형 히트 파이프의 윅구조가 장착된 쪽 케이스의 표면 위에 열원과 물 재킷(water jacket)이 설치된 모습을 나타내었다. 열원은 구리를 사용하여 제작하였다. 판형 히트 파이프에 부착되는 열원 면적은 가로 및 세로가 각각 12mm 이며, 열원의 반대쪽 면에는 카트리지 히터(cartridge heater)를 부착하여 설정된 전력을 공급하였다. 카트리지 히터에는 파워 서플라이(Agilent 6555A)를 사용하여 직류 전원을 공급하였다. 열원 및 카트리지 히터는 테프론을 사용하여 단열시켰다. 판형 히트 파이프에 공급된 열량을 외부로 방

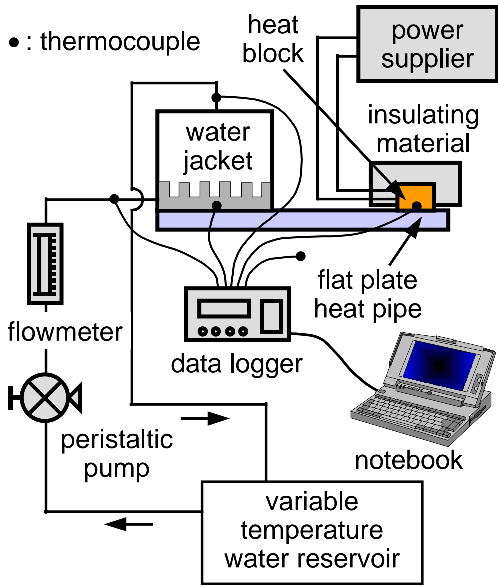

Fig. 4 Schematic of experimental apparatus

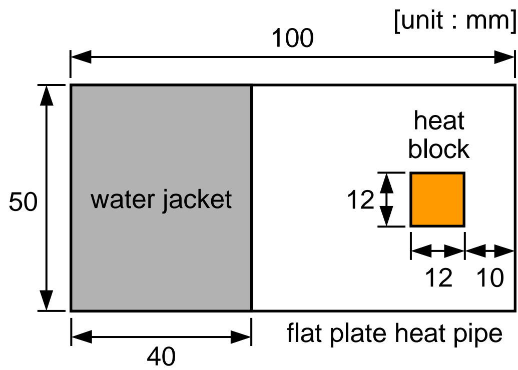

Fig. 5 Installations of heat block and water jacket

출시키기 위하여 열원의 맞은편에 물 재킷을 설치하였다. 판형 히트 파이프와 접촉하는 물 재킷의 하부면은 구리를 사용하여 핀 히트 싱크(heat sink)를 제작하여 형성하였으며, 나머지 면은 아크릴 판재를 사용하여 재작하였다. 물 재킷에 일정 온도의 냉각수를 공급하기 위하여 항온수조(HCTB-3040, BATH-26, RCTB-3060, Omega)를 사용하였으며, 물 재킷에 일정 유량의 냉각수를 공급하기 위하여 연동펌프(FPU500, Omega)를 사용하였으며, 유량 측정은 정밀 유량계(FL-113A, Omega)를 사용하여 측정하였다.

온도 측정을 위한 열전대는 열원 표면, 물 재킷 중앙 하부, 냉각수 유·출입구 및 항온실 내부를 포함하여 총 5 개 위치에 설치되었으며, 0.13mm 의 직경을 갖는 T 형 열전대(TFCP-005, Omega)를 사용하였다. 열전대를 사용한 온도 측정 및 데이터의 처리를 위하여 데이터 로거(Agilent 34970A) 및 노트북 컴퓨터를 사용하였다.

3.3 실험방법

본 연구에서의 실험은 ±2°C의 오차 범위 내로 온도 조절이 가능한 간이 항온실 내에서 실내 온도를 25°C로 설정하고 수행하였다. 판형 히트 파이프의 냉각 특성의 고찰을 위한 실험은 물 재킷의 장착 방향을 달리하여 각각 수행되었다. 첫 번째 경우(case 1)는 Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 물 재킷이 판형 히트 파이프의 윅구조가 장착된 쪽 케이스의 표면 위에 설치된 경우이며, 두 번째 경우(case 2)는 물 재킷이 증기유로 역할을 하는 스크린 메쉬가 장착된 케이스의 표면 위에 Fig. 5 와 같이 설치된 경우이다. 이 두 경우에 대하여 아래와 같은 방법으로 실험을 수행하였다.

수평으로 설치된 판형 히트 파이프의 단위 면적 당 냉각 능력을 측정하기 위하여 파워 서플라이를 통하여 열원에 공급하는 입력 전력을 10W, 20W, 30W 및 40W 로 변화 시켜 가면서 실험을 수행하였다. 물 재킷에는 각 입력 전력의 경우에 대하여 ±0.1°C의 오차 범위 내에서 25°C로 일정하게 유지되는 일정 유량, 95.5cc/min 의 냉각수를 공급하였다. 냉각수의 유량 변동폭은 항온수조로 귀환하는 냉각수를 메스실린더로 단위 시간당 체적유량을 측정하여 유량계를 보정함으로써 ±0.1%의 범위 내로 유지되도록 하였다.

각 입력 전력의 경우에 대하여 열전대와 연결된 데이터 로거를 통하여 온도를 계측하여 열원의 표면에 부착한 열전대의 온도 변화가 ±0.05°C이내로 3 분 이상 유지되면 정상상태로 간주하고, 이때로부터 200 초간 5 개의 위치에 장착된 각각의 열전대로부터 200 개의 온도데이타를 측정하였다. 이와 같이 측정된 온도 데이터를 노트북 컴퓨터를 사용하여 수집한 다음, 각각의 온도를 평균하여 실험결과로 사용하였다. 그리고 측정된 열원 표면 온도, T_h 및 냉각수 유입구 온도, T_c와 입력 전력, Q_{in} 을 사용하여 식(1)과 같이 정의 되는 열저항 계산식을 사용하여 열저항, R 을 구하였다.

$$R = \frac{T_h - T_c}{Q_{in}} \tag{1}$$

이상의 실험과 함께 본 연구에서 제시한 판형 히트의 냉각 특성과의 비교를 위하여 판형 히트 파이프와 동일한 단면의 형상을 갖고 두께가 1.0mm 인 구리 판을 사용하여 전술한 바와 동일한 실험을 수행하였다.

4. 결과 및 검토

Fig. 6 에는 case 1 의 경우, 열원에 10~40W 의 입력 전력, Q_{in} 이 가해질 때, 열전대가 설치된 각 위치에서의 온도변화를 나타내었다. 각 입력 전력의 경우에 물 재킷으로 유입되는 물의 온도가 25℃로 유지되고, 물 재킷 출구 온도 및 물 재킷 중앙 하부면의 온도는 입력 전력의 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이것은 판형 히트 파이프가 열원에 공급되는 입력 전력에 의하여 발생되는 열을 증발부에서 흡수하여 증기 상태가 된 냉매를 물 재킷에 장착된 하부 즉, 응축부로 원활히 이송 시키고 또한 응축과정을 통해 물 재킷으로 열을 전달함에 기인한 것이다. 열원 표면의 온도는 10~30W 까지는 선형적으로 증가하며, 40W 에서는 낮은 입력 전력의 경우 보다 큰 기울기를 가지고 온도가 증가하는 모습을 보여주고 있다. 이것은 본 연구에서 제작한 판형 히트 파이프의 구조에서 냉매 충진률을 1.06cc 로 할 때의 특성으로 여겨진다.

Fig. 7 에는 case 1, case 2 및 구리 판의 경우에, 입력 전력, Q_{in} 의 변화에 따른 열원 표면의 온도, T_h 의 변화를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 경우에 대하여 입력 전력의 증가에 따라 열원 표면의 온도는 상승하고 있으나, 판형 히트 파이프를 적용한 경우인 case 1 과 case 2 는 구리 판에 비하여 상당히 낮은 온도를 나타내고 있음을 볼 수 있다. 특히 입력 전력의 크기가 증가할수록 그 차이는 더욱 커짐을 알 수 있다. 이와 같이 판형 히트 파이프는 구리 판에 비하여 뛰어난 냉각 성능을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 판형 히트 파이프는 얇은 두께를 가지면서도 성공적으로 히트 파이프의 기능을 수행함을 알 수 있다.

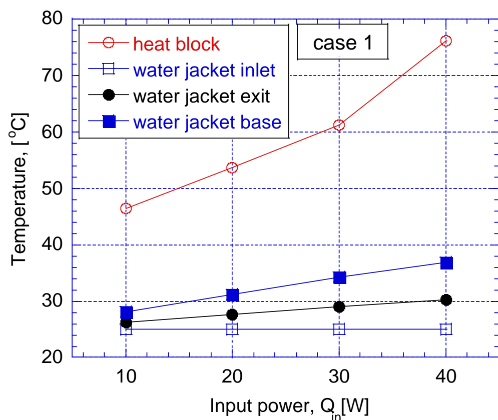

Fig. 6 Variations of temperature according to input power at each positions in case 1

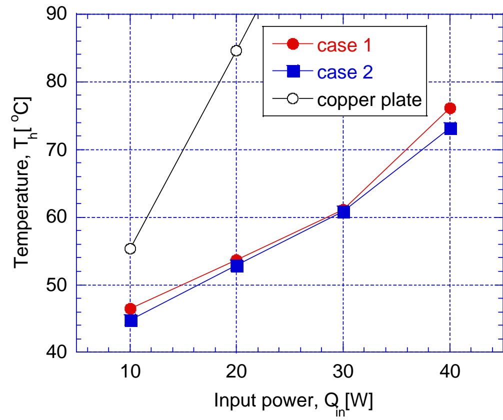

Fig. 7 Variations of heat block surface temperature according to input power

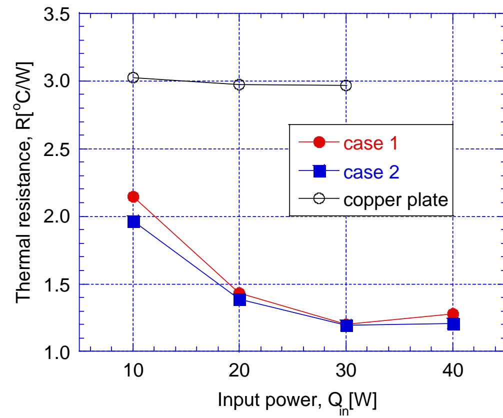

Fig. 8 Variations of thermal resistance according to input power

특히 case 1 과 case 2 의 결과가 거의 동일하게 나타나고 있음을 볼 수 있는데, 이것은 윅 구조체로 사용한 100 메쉬 수를 갖는 스크린 메쉬 층 뿐만이 아니라 증기유로를 형성하기 위하여 사용한 14 메쉬 수를 갖는 스크린 메쉬 층에서도 Fig. 3 에서 설명한 바와 같이 응축 현상이 일어남을 보이는 것이다. 이것은 본 연구에서 제시한 판형 히트 파이프를 사용하여 전자장비용 냉각장치를 제작할 때 응축부를 어느 면에다 설치하여도 가능하다는 것을 입증하는 것이다. 즉 핀 열교환기를 사용하여 방열부를 구성할 경우, 핀 열교환기를 판형 열교환기의 표면 어디에나 부착하여 사용할 수 있게 되므로 공간을 효율적으로 사용할 수 있음은 물론 접촉 열저항을 최소화 할 수 있으므로 냉각장치의 성능을 향상시킬 수 있게 된다.

현재 사용되고 있는 Intel Pentium IV 급 노트북 컴퓨터 전용 CPU 의 경우 최대 발열량은 30W 이고, 최고 허용 온도는 100℃ 이하로 규정하고 있다.[5] 본 경우를 위한 냉각장치를 설계할 때, 최대 사용 외기 온도를 40℃로 하고, 이때의 CPU 표면의 최대 허용 온도 설계점을 90℃ 설정하여 냉각장치를 설계한다면, 외기 온도가 25℃ 일 때는 Newton 의 냉각법칙의 선형성에 따라 CPU 표면의 최대 허용 온도는 70℃가 된다. Fig. 7 에서 열원 표면에서의 온도가 30W 일 때 70℃를 넘지 않고 있으므로 본 연구에서 제시한 판형 히트 파이프를 노트북 컴퓨터의 CPU 냉각과 같은 전자장비 냉각용으로 적용 가능함을 알 수 있다.

Fig. 8 에는 case 1, case 2 및 구리 판의 경우에, 입력 전력, Q_{in} 의 변화에 따른 열저항, R 의 변화를 나타내었다. 구리 판의 경우 3.0[℃/w]로 거의 일정한 열저항을 보이고 있는 반면, case 1 과 case 2 의 경우는 거의 유사한 경향으로 입력 전력이 30W 까지 증가할수록 열저항이 1.2[℃/w] 까지 감소하다 이후 증가하는 모습을 보이고 있다. 30W 의 입력 전력을 기준으로 할 때, 본 연구에서 제시한 판형 히트 파이프의 경우가 구리 판을 사용한 경우 보다 열저항이 60% 감소함을 알 수 있다.

이상의 결과들을 볼 때, 본 연구에서 제시한 구조를 갖는 판형 히트 파이프는 기존 히트 파이프의 작동특성을 성공적으로 구현함을 알 수 있으며, 급속도로 두께 및 부피가 작아지고 있는 전자장비용 냉각장치로서 적용 가능함을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 스크린 메쉬를 사용하여 증기유로 및 액체유로를 동시에 형성함으로써 단위 면적당 냉각능력이 뛰어나고, 얇은 두께와 임의의 형상 구현이 가능한 판형 히트파이프의 구조를 제시하고 작동원리를 설명하였다. 그리고 판형 히트파이프를 제작하고 판형 히트 파이프에 부착된 열원의 가해지는 입력 전력의 변화에 따른 판형 히트 파이프의 냉각 특성을 고찰함으로써 본 연구를 통하여 제시한 판형 히트 파이프 구조의 타당성을 입증하였고 자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 제시한 구조를 갖는 판형 히트파이프는 기존 히트 파이프의 작동특성을 성공적으로 구현함을 알 수 있었다.

(2) 열원을 제외한 판형 히트 파이프의 전체 표면을 응축부로 사용할 수 있음을 입증하였다.

참고문헌

(1) http://www.thermacore.com/thermabase.htm

(2) Thomas, D. L., “Thin Planar Heat Spreader”, United States Patent, Patent No. : 6167948 B1

(3) Jones, W. K., Liu, Y. and Gao, M., 2002, “Micro Heat Pipes in Low Temperature Cofire Ceramic(LTCC) Substrates”, The 18th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems(Itherm), San Diego, California, USA, pp. 230~235.

(4) Gillot, C., Avenas, Y., Cezac, N., Poupon, G., Schaeffer, C. and Fournier, E., 2002, “Silicon Heat Pipes used as Thermal Spreaders”, The 18th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems(Itherm), San Diego, California, USA, pp. 1052~1057.

(5) http://www.intel.com/support/processors/mobile/pentium4/thermal.htm