

## 소형의 평판형 냉각장치 개발

문 석 환<sup>†</sup>, 황 건, 강 승 열, 조 경 익

한국전자통신연구원 융합부품소재연구부

### Development of Small Flat Plate Type Cooling Device

Seok-Hwan Moon<sup>†</sup>, Gunn Hwang, Seung-Youl Kang, Kyoung-Ik Cho

Convergence and Components and Materials Research Lab.,

Electronics and Telecommunications Research Institute, Deajeon 305-350, Korea

(Received October 20, 2009; revision received July 12, 2010)

**ABSTRACT:** Recently, a problem related to the thermal management in portable electronic and telecommunication devices is becoming issued. That is due to the trend of a slimness of the devices, so it is not easy to find the optimal thermal management solution for the devices. From now on, a pressed circular type cooling device has been mainly used, however the cooling device with thin thickness is becoming needed by the inner space constraint of the applications. In the present study, the silicon flat plate type cooling device with the separated vapor and liquid flow path was designed and fabricated. The normal isothermal characteristics created by vapor-liquid phase change was confirmed through the experimental study. The cooling device with 70 mm of total length showed 6.8 W of the heat transfer rate within the range of 4~5°C/W of thermal resistance. In the future, it will be possible to develop the commercialized cooling device by revising the fabrication process and enhancing the thermal performance of the silicon and glass cooling device.

**Key words:** Thermal management(열관리), Electronic cooling(전자냉각), Phase change(상변화), Thermal packaging(열 패키징)

### 1. 서 론

각종 전자, 통신기기 내 발열 문제는 점차 중요한 이슈로 부각되고 있다. 위 기기들의 특성이 소비자의 욕구에 따라 고성능화와 더불어 휴대성이 강조되어 얇아지고 있기 때문이다. 그러나 이러한 경향은 전자 패키징(packaging) 밀도 증가 및 내부 공간 부족으로 이어져 발열밀도의 급격한 상승을 초래하게 된다. 근래 들어 노트북 PC를 비롯해 서브 노트북 PC, 게임기 등에 직경 4 mm 가량의

히트파이프(heat pipe)를 평판형으로 압착하여 열 소산을 위한 냉각장치로 이용하고 있다.<sup>(1)</sup> 히트파이프가 가지는 경량 및 높은 전열 특성은 소형의 전자기기 냉각을 위한 열이송 냉각장치용으로 매우 적합하여 점차 그 응용 대상이 늘어나는 추세에 있다. 그러나 선행연구<sup>(2)</sup>에 따르면 직경 3~4 mm 의 히트파이프를 두께 2 mm 이하로 압착하게 되면 전열성능이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 압착에 따라 당초 원형 히트파이프가 가지는 내부 모세관 구조의 변형 및 냉각장치 중간부의 함몰로 인한 내부 증기유동공간의 축소 등에 기인하기 때문이다. 일반적으로 휴대형 전자기기는 작은 크기와 함께 두께가 얇아 냉각장치는 원형보다 평판형이 보다 더 적용하기에 유리하다. 특히 앞

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-860-6087; fax: +82-42-860-6495

E-mail address: shmoon@etri.re.kr

으로는 휴대성의 편리함을 위해 전자기기들이 더욱더 얇아질 것을 예상해 볼 때, 평판형 냉각장치의 두께는 중요한 인자가 될 전망이다.

본 연구에서는 평판형 구조를 갖는 기-액 상변화 방식의 냉각장치를 개발하였다. 증발부, 증기라인, 액체라인 및 응축부 모두 같은 평판 내에 위치하고 있어, 두께를 얇게 설계할 수 있는 장점을 갖는다. 또한 기체와 액체의 유동을 분리함에 따라 기존 히트파이프에서 발생하는 기-액 계면에서의 마찰에 의한 유동 저항을 감소시킬 수 있어 전열성능에 유리할 수 있다.<sup>(3-5)</sup>

상기 냉각장치의 열전달 특성 및 전열성능을 파악하기 위해 우선 실리콘 및 유리 재질로 평판형의 소형 냉각장치의 제작 및 성능실험을 수행하였으며, 이를 통해 우수한 모세관 구조의 획득 및 가시화 연구가 가능토록 하였다.

## 2. 평판형 냉각장치의 구조 설계

본 연구대상의 평판형 냉각장치는 기-액 상변화 열전달 방식의 기존 히트파이프와 크게 다르지 않은 구조를 갖는다. 다만, 기체와 액체의 유동통로가 분리되어 있고, 증발부 근처에 작동유체(working fluid) 저장소(reservoir)를 갖는 것이 구별되는 차이점이다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발한 평판형 냉각장치의 개략도를 나타낸 것이다. 실리콘 및 유리로 이루어져 있는 Fig. 1의 냉각장치는 모두 3개의 평판으로 구성된다. 하판에는 직사각 단면 형상의 증발부(evaporator) 모세관 그루브(grooves) 구조와 넓은 유로의 응축부(condenser) 유동통로가 가공되어 있다. 하판의 중간부분에는 열전달률 평가 시 벽면을 통한 전도 열전달률(conduction heat transfer rate)을 최소화하기 위해 빈 공간의 단열 블럭을 설치하였으며, 깊이는 증기 및 액체유동통로와 동일한 500  $\mu\text{m}$ 의 크기를 갖는다. 중판에는 증기유동통로(vapor path) 및 액체유동통로(liquid path)가 가공되어 있으며, 비체적이 큰 증기를 고려해 증기유동통로는 상대적으로 큰 단면적을 가지며, 이에 비해 액체유동통로는 매끄러운 표면의 작은 단면적을 갖는다. 액체유동통로는 증기유동통로의 양 옆에 2개가 설치되어 있다. 액체 및 증기유동통로의 상세한 크기는 Table 1에 나타내었다. 상판은 냉각장치의 내부 밀폐를 위한 덮개 역할을 수행하며, 하판 증발부와 일치하는 부

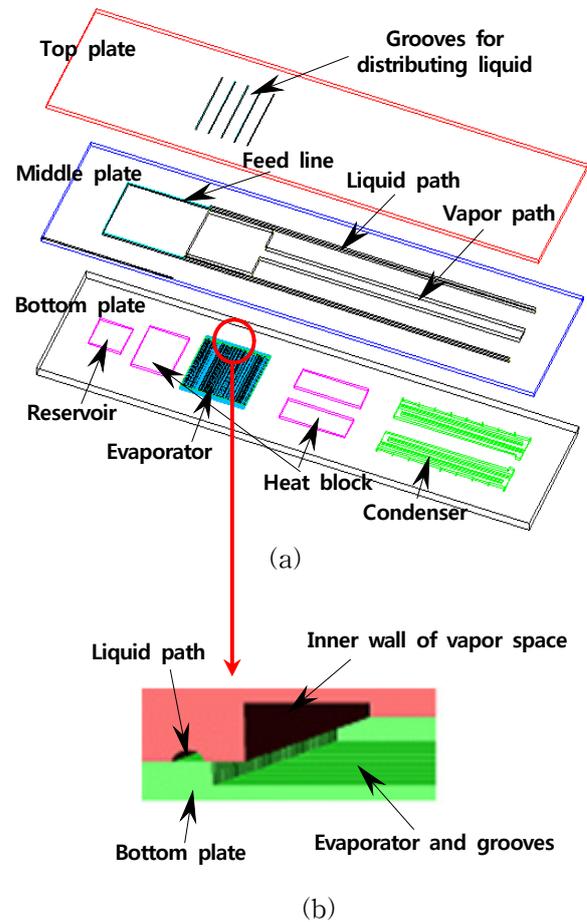


Fig. 1 Structure of the cooling device, (a) three plates for the structure, (b) two stages structure at the evaporator.

Table 1 Specifications of the fabricated cooling device

Section	50 mm length	70 mm length
Evaporator Area	9×10 mm	
Groove Width/Height	20×60 $\mu\text{m}$	
Groove Number	167	
Vapor Line Height/Width	500×2000 $\mu\text{m}$	
Vapor Line Length	20 mm	40 mm
Liquid Line Height/Width	500×250 $\mu\text{m}$	
Liquid Line Length	35 mm	55 mm
Condenser Area	10×20 mm	

분에 원형단면의 성긴 그루브들을 평행하게 가공하여 약한 모세관력에 의해 액적이 분산될 수 있도록

하였다. 냉각장치는 유리 상판과 증판을 실리콘 하판과 anodic bonding으로 밀봉하였으며, 이에 대한 상세 공정은 제 3장에 기술하였다.

기-액 상변화 방식에 의해 작동하는 원리를 간략히 설명하면 다음과 같다. 증발부에 가해진 열량에 의해 기화된 증기는 냉각장치의 가운데에 위치한 넓은 단면적의 증기유동 통로를 따라 응축부측으로 이동한다. 여기서 잠열을 소산시킨 뒤 응축된 작동액은 냉각장치의 양측에 위치하는 액체유동통로를 따라 증발부측으로 귀환한다. 증발부 내 모세관 그루브 구조는 2단으로 설계하여 상단면이 액체유동통로와 맞닿고, 하단면에서 발생 및 성장한 증기 버블이 좁은 교차통로(Fig. 1 및 Fig. 2의 liquid line에 해당)를 만나게 되어 역류 방지가 됨과 동시에 증발부 내 증기공간을 최대한 확보할 수 있도록 하였다. 여기서 증발부 내 모세관 그루브 구조가 양쪽 측면이 2단으로 설계됨에 따라 응축부로부터 귀환한 작동액은 2단 그루브 구조의 상단면을 통해 모세관 그루브 내부로 분산하게 된다. 이때 작동액체 유동통로는 2단 그루브의 상단면과 직각으로 교차하면서 연결된다.<sup>(6,7)</sup>

작동유체는 최초 증발부 근처에 위치하고 있는 저장소로부터 공급라인(feed line)을 통해 증발부로 공급되며, 저장소 내부로의 공급은 별도로 외부에 설치되는 주입관(fill tube)을 통해 이루어진다. 한편 냉각장치의 상판은 유리로 제작하여 기-액 상변화 과정의 2상 유동 특성을 육안으로 관찰할 수 있도록 하였다.

### 3. 실리콘 냉각장치의 제작 및 성능평가

#### 3.1 실리콘 및 유리 내 유동통로 제작

상기 Fig. 1과 같이 3개 평판으로 구성되는 평판형 냉각장치는 실리콘 및 유리 재질로 이루어져 있다. 즉 증발부 내 모세관 그루브 구조 및 응축부 내 작동액체 유로를 갖는 하판은 실리콘 재질로 제작하였으며, 이는 실리콘이 결정질 소재로써 모세관구조물의 제작에 유리하며, 매우 깨끗하고 날카로운 그루브의 모서리를 얻을 수 있는 장점이 있기 때문이다. 그 외 증기유동통로 및 액체유동통로를 갖는 증판과 덮개 역할을 하는 상판은 유리로 제작하였다. 아래에 실리콘 및 유리 내 유로 제작을 위한 공정 순서를 간략히 정리하였다. 실리콘 내 모세관 그루

브 구조는 DRIE(Deep Reactive Ion Etch) 공정을 이용해 제작하였다. 우선 DRIE의 식각용 마스크(etching mask)로 사용할 TEOS(tetraethyl ortho-silicate)를 2.5  $\mu\text{m}$  증착한 후 PR(photoresist)을 patterning한다. 이어 PR 마스크를 이용해 TEOS를 식각하고 ashing 공정을 통해 PR을 제거한다. 여기에 2회의 DRIE 공정을 위한 masking layer 형성을 위해 다시 TEOS를 8000 Å 증착한 후 patterning, TEOS 식각 그리고 PR ashing을 다시 한번 거친다. 이렇게 준비된 masking layer를 이용, 1차 DRIE에서 실리콘(Si)을 60  $\mu\text{m}$  식각하고, 이어 200  $\mu\text{m}$ 을 연속으로 식각한다. 1차 DRIE 과정에서 masking layer로 쓰이고 남은 TEOS를 식각으로 제거한 후 2차 DRIE 공정을 시도한다. 최종적으로 표면에 남은 TEOS는 HF 용액에 담귀 습식식각을 통해 제거하게 된다. 모든 공정 후에는 황산 : 과산화수소(4 : 1)용액으로 클리닝을 실시하였다. 증판 및 상판 유리 내 유로는 습식 식각(wet etching) 공정을 이용해 제작하였으며, masking layer로는 폴리실리콘(polysilicon)을 사용하였다. 작동유체 주입을 위한 관통홀(through hole) 제작은 DFR film을 이용, patterning을 수행한 후 sand blast 공정을 통해 제작하였으며, 관통되는 구조를 갖는다. 위와 같이 별도로 제작된 실리콘 하판, 및 유리 재질의 증판, 상판은 접합공정을 통해 결합하여 밀폐 용기를 구성하였다. 앞서 언급한 관통홀을 통해 작동유체를 주입하게 되며, 이를 위해 관통홀 상단면에 주입관을 설치하였다. 주입관은 저장소를 덮고 있는 상면 유리에 증착된 금속층과 솔더링(soldering)에 의해 결합되어 밀폐가 이루어진다(Fig. 2(c)). Fig. 2(a)에 제작된 실리콘 및 유리 재질의 냉각장치 용기와 그루브 단면사진을 나타내었다. 그림을 통해 3개 평판이 결합된 용기의 모습과 증발부 내 모세관 그루브 구조를 각각 볼 수 있다. Fig. 2(b)에 공급라인의 확대사진을 도시하였다.

#### 3.2 냉각장치의 재원 및 성능평가 장치

성능평가를 위한 평판형 냉각장치의 재원은 다음과 같으며, 상세 재원은 아래 Table 1에 나타내었다. 전체 길이는 50 mm와 70 mm의 두 가지를 고려하였으며, 증발부는 9×10 mm<sup>2</sup>를, 응축부는 10×20 mm<sup>2</sup>의 크기를 각각 갖는다. 증발부 내에는 폭 20  $\mu\text{m}$ , 깊이 60  $\mu\text{m}$  크기의 모세관 그루브가 40  $\mu\text{m}$ 의 간

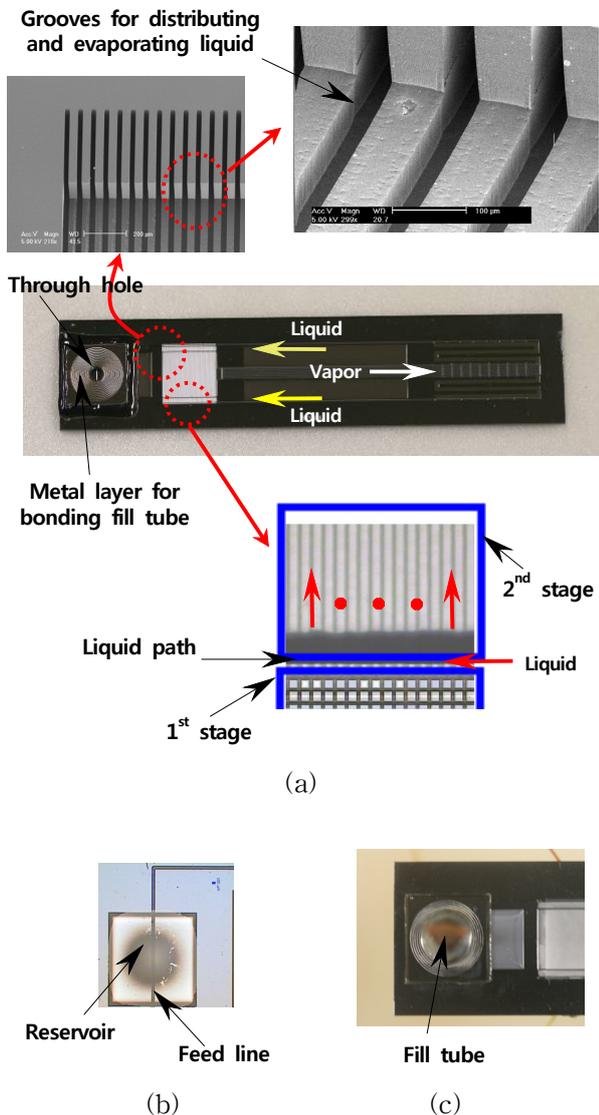


Fig. 2 Fabricated cooling device, (a) grooves and two stages in the evaporator, (b) connection between reservoir and feed line, (c) sealing fill tube.

격으로 167개 가공되어 있다. 작동유체는 순수한 물이 내부 그루브들에 완전히 채워지도록 하였으며, 전자저울( $10^{-5}$  g)로 계량된 약 0.0854 g이 충전되었다. 제작된 냉각장치의 전열성능 평가는 Fig. 3에서와 같이 진공 챔버 내에서 이루어지도록 하였다. 이는 대기로의 열손실을 최소화하기 위함이며, 성능평가 실험동안 진공펌프의 배기를 통해 일정한 진공환경이 유지되도록 하였다. 증발부내 열량의 공급은 Ni-Cr 열선을 이용해 별도로 제작한 히터를 통해 이루어졌으며, 응축부에서의 열소산은 물 재킷(water-jacket)을 통한 액체 순환 냉각이 되도록

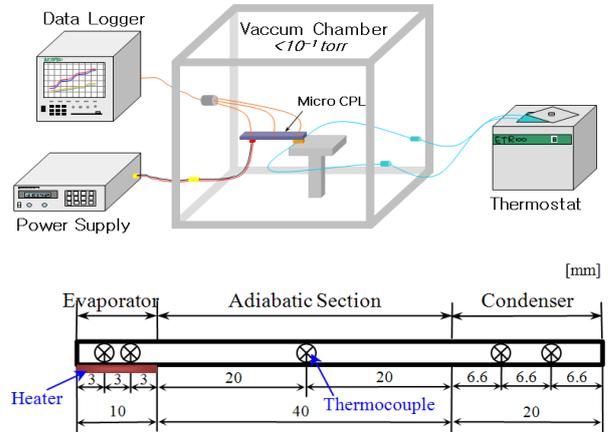


Fig. 3 Experimental set-up and locations of the thermocouples.

하였다. Fig. 3에 이의 실험장치 개략도를 나타내었다. 온도 측정은 K-type 열전대를 이용해 수행하였으며, 증발부, 증기유동통로 그리고 응축부의 온도를 각각 측정하였다. 온도값의 기록은 열량의 최초 공급 및 증가 후 정상상태를 유지하였을 때 수행하였다. 측정결과는 열량 공급장치( $\pm 0.05$  V,  $\pm 0.01$  A)와 온도 측정( $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ )에서의 오차를 포함할 수 있다. 냉각장치를 통한 열전달률은 응축부측에서의 방열량을 측정해 사용하는 것이 바람직하나, 미소한 열전달률로 인해 냉각수량 및 온도차의 측정이 어려워 증발부에 가해진 열량을 사용하는 것으로 하였다.

다만, 진공챔버 내에 위치하고 있는 냉각장치의 증발부 주위는 진공이므로 열전달이 차단될 수 있다. 다만, 열량 공급장치로부터 공급되는 열량에서 히터와 연결된 전선을 통한 열량 손실값을 보정해 공급 열량을 계산하였다.

### 3.3 제작된 냉각장치의 전열성능

휴대용 전자기기에 적용할 목적으로 개발한 본 연구 대상의 냉각장치는 평판형상으로 설계하여 응용성을 높이고자 하였다. 그러나 1.5 mm 두께의 평판형상 내에 증발부, 응축부, 증기 및 액체 유동통로를 모두 설치하여야 하므로 유체의 유동 압력강하가 매우 커질 수 있는 단점을 갖고 있다. 즉 냉각장치의 크기 및 두께가 작아짐에 따라 내부 유체 유동통로는 단순히 비례해 작아지는 것에 그치는 것이 아니라, 성능에 직접적인 영향을 미치는 압력강하가 크게 증가하게 된다.

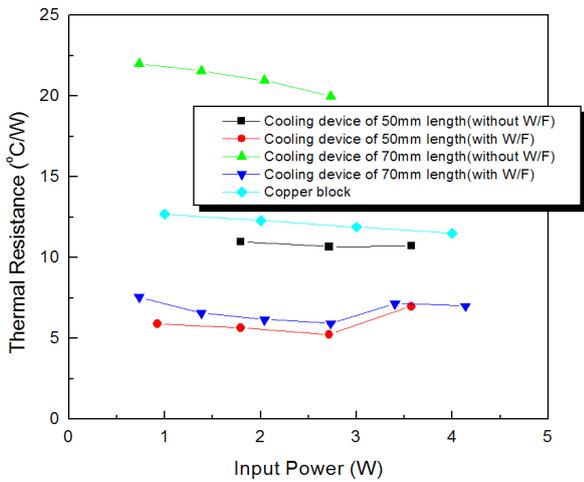


Fig. 4 Comparison of isothermal characteristics between cooling devices of 50 mm length and copper block.

Fig. 4는 평판형 냉각장치의 길이가 50 mm 및 70 mm인 경우에 대한 등온특성 결과를 나타낸 것이며, 두께는 1.5 mm로서 모두 동일하다. 구체적으로는 각 길이를 갖는 냉각장치에 대해 작동유체를 충전한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 등온특성을 상호 비교하였다. 성능실험은 증발부에 가해진 열량에 비해 응축부 측에서의 열소산을 매우 약하게 시켜 상변화에 의한 정상적인 작동여부를 파악하고자 한 것이다. 이는 기-액 상변화 메커니즘에 의해 구동하는 히트파이프의 경우, 내부 진공환경으로 인해 증발부와 응축부 간의 등온특성, 즉 작은 온도차로도 열이 손쉽게 이송되는 특성을 파악하고자 함이며, 일반적으로 히트파이프의 정상적인 제작 및 작동특성을 파악하기 위해 사용하는 기본적인 성능평가 방법이다. 그림에서 보면 냉각장치의 길이가 50 mm 및 70 mm인 경우 모두에서 작동유체를 충전하지 않은 경우에 비해 열저항이 작게 나타남을 알 수 있다. 이는 본 연구를 통해 제작된 평판형 냉각장치가 상변화 열전달 메커니즘에 의해 정상적으로 작동하고 있음을 말해준다. 여기서 열저항이라 함은 증발부와 응축부 간의 온도차를 증발부에 가해진 열량으로 나눈 값을 의미하며, 아래 식 (1)에 의해 계산되어 진다.

$$R = \frac{\overline{T_e} - \overline{T_c}}{Q} \quad (1)$$

여기서,  $\overline{T_e}$ 는 증발부 내 평균 벽면온도를,  $\overline{T_c}$ 는

응축부 내 평균 벽면온도를 그리고 Q는 증발부에 가해진 열량을 각각 의미한다. 한편, 결과에서 보면 50 mm인 경우에는 작동유체를 충전한 냉각장치와 충전하지 않은 냉각장치 간에 약 2배의 열저항 차이가 발생하였으며, 70 mm인 경우에는 약 3배 가량의 열저항 차이가 발생하였다. 이는 냉각장치의 길이가 50 mm에서 70 mm로 길어지더라도 작동유체가 충전된 경우에는 내부 진공환경 및 잠열의 상변화 열전달 특성에 의해 증발부로부터 응축부측으로 열이 원활하게 이송됨을 말해 준다. 한편 냉각장치의 길이가 50 mm에서 70 mm로 길어지게 되면 열저항은 증가하는 전형적인 전열특성을 나타내었으며, 여기서는 그 차이가 크게 나타나지 않았으나, 본 연구에서와 같이 두께가 얇은 경우에는 내부 증기유동공간의 확보가 매우 중요하며 이는 증기의 유동저항 증가 및 냉각장치의 전열성능 감소로 이어질 수 있다. 다만 본 연구의 냉각장치는 증기와 액체의 유동통로가 분리되어 있어 유동에 의한 계면 저항력 감소의 영향이 적게 나타나는 것으로 분석되며, 향후 증기유동라인의 길이변화에 따른 성능평가 또한 뒤따라야 할 것으로 생각된다.

한편 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 구리 재질로만 이루어진 동일 크기의 평판에 비해서 작동유체가 채워진 50 mm 및 70 mm 냉각장치는 약 2배 가량의 열저항 감소효과를 나타내고 있다. 이는 구리가 비록 열전도도가 높은 소재라 하더라도 상기 상변화 냉각 장치에 비해서는 성능측면에서 불리함을 말해준다. 아울러 구리는 무게 또한 상대적으로 무거워 본 연구 대상의 상변화 냉각장치 방식이 응용측면에서 바람직하다.

Fig. 5는 전체길이 70 mm를 갖는 냉각장치의 입열량 증가에 따른 열저항 변화의 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 5의 실험조건과 달리 응축부측에서의 냉각조건이 물 재킷(water jacket)을 통한 강제수냉에 의해 이루어졌다. 결과를 보면, 작동유체가 충전된 경우와 그렇지 않은 경우에 있어서의 전열성능 차이는 뚜렷이 구별된다. 작동유체가 정상적으로 충전된 냉각장치의 경우, 열저항 4~5°C/W의 범위내에서 6.8 W의 열전달률을 기록하였다. 이에 반해 작동유체가 충전되지 않은 냉각장치의 경우에는 약 3.4 W의 열전달률을 기록하였다. 여기서의 열전달률은 한계 열전달률(limiting power)이 아니며, 증발부 온도가 120°C를 넘지 않는 범위내에서 얻은 수치이다. 전체 두께가 1.5 mm 미만이고, 기-액 유동통로가 분리된 형태를 갖는 평판형 냉각장치의 개

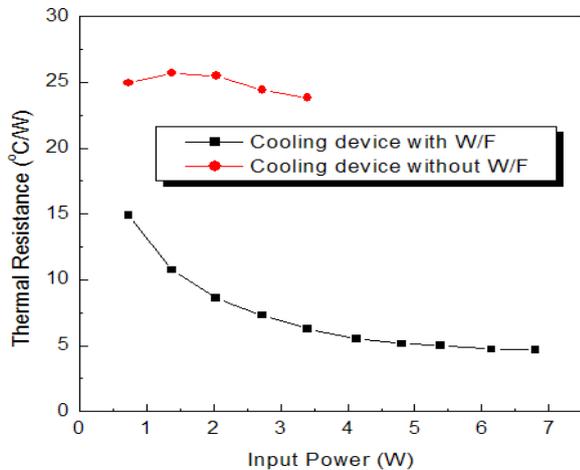


Fig. 5 Heat transfer rate of the cooling device with 70 mm of total length.

발을 통해 정상적인 기-액 상변화 열전달 특성을 얻을 수 있었던 점에서 본 연구결과는 상당히 중요하며, 향후 두께가 더 얇은 냉각장치로의 발전 가능성이 클 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

두께가 얇으면서도 큰 전열성능을 획득할 수 있도록 기-액 유동분리의 설계 구조를 개발하였으며, 성능실험을 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다. 우선 제작된 실리콘 재질의 평판형 냉각장치는 작동유체가 충전되지 않은 냉각장치 및 동일 크기의 구리 블록에 비해 열저항이 약 2배 가량 작게 나타났다. 이를 통해 정상적인 상변화 열전달 특성을 확인할 수 있었다. 냉각장치의 전체 길이가 50 mm에서 70 mm로 증가함에 따라 열저항은 커졌으며, 증발부온도가 120°C를 넘지 않는 범위내에서 열전달률 또한 감소하는 경향을 나타내었다. 한편 전체 길이 70 mm의 크기를 갖는 냉각장치의 경우, 정상상태 열저항 4~5°C/W의 범위에 대해 약 6.8 W의 열전달률을 기록하였다. 본 연구의 평판형 냉각장

치 개발을 통해 향후 휴대용 전자 기기용 냉각 솔루션으로 활용될 수 있는 가능성을 확인하였으며, 성능 및 제조기술의 개선을 통해 상용화 또한 앞당길 수 있을 것으로 보인다.

#### 참고문헌

1. Moon, S. H. et al., 2008, Development of Flat Plate Type Small Cooling Device, 2008 Proc. of SAREK Winter Conf., pp. 170-174.
2. Moon, S. H. et al., 2000, A Study on Cooling Characteristics of Miniature Heat Pipes with Woven-Wired Wick, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 227-234.
3. Kirshberg, J. et al., 2000, Cooling Effect of a MEMS Based Micro Capillary Pumped Loop for Chip-Level Temperature Control, ASME 2000, MEMS, Vol. 2, pp. 143-150.
4. Hoelke, A. et al., 1999, Analysis of the Heat Transfer Capacity of a Micromachined Loop Heat Pipe, ASME 1999, Vol. 3, pp. 53-60.
5. Meyer, L., 2003, A Silicon-Carbide Micro-Capillary Pumped Loop for Cooling High Power Devices, 19th IEEE Semi-Therm Symp., pp. 364-368.
6. Suh, J. S. et al., 2001, Friction in Micro-Channel Flows of a Liquid and Vapor in Trapezoidal and Sinusoidal Grooves, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, pp. 3103-3109.
7. Khrustalev, D., et al., 1994, Heat Transfer During Evaporation and Condensation on Capillary-Grooved Structures of Heat Pipe, Proc. ASME Winter Annual Meeting, Chicago, HTD-Vol. 287, pp. 47-59.