

# Flat Plate Type 소형 냉각소자 개발

문석환<sup>†</sup>, 황건, 유인규, 조경익, 유병곤

한국전자통신연구원 융합부품소재연구부문 신소자소재연구부 차세대 I-MEMS팀

## Development of Flat Plate Type Small Cooling Device

Seok-Hwan Moon, Gunn Hwang, In-Kyu You, Kyoung-Ik Cho, Byoung-Gon Yu

*Advanced I-MEMS Team, New Devices & Materials Research Department,*

*Convergence and Components & Materials Research Lab.,*

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

**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 slimness of the devices, so it is not easy to find the optimal thermal management technology 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. In the present study, the silicon and metal flat plate type cooling device with the separated vapor and liquid flow path was designed and fabricated. Through the experimental study, the normal isothermal characteristic by vapor-liquid phase change was confirmed and the cooling device with 70mm of total length showed 6.8W of the heat transfer rate within the range of 4~5°C/W of thermal resistance. In the meantime, the metal cooling device was developed for commercialization. The device was designed to have all structures of evaporator, vapor flow path, liquid flow path and condenser in one plate. And an envelope of that could be completed by combining the two plates of same structure and size. And the simplicity of fabrication process and reduction of manufacturing cost could be accomplished by using the stamping technology for fabricating large flow paths relatively. In the future, it will be possible to develop the commercialized cooling device by revising the fabrication process and enhancing the thermal performace of that.

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

### 1. 서론

각종 전자, 통신기기 내 발열 문제는 점차 중

요한 이슈로 부각되고 있다. 위 기기들의 특성이 소비자의 욕구에 따라 고성능화와 더불어 휴대성이 강조되어 얇아지고 있기 때문이다. 이는 전자 패키징(packaging) 밀도 증가 및 내부 공간 부족으로 이어져 발열밀도의 급격한 상승을 초래하게 된다. 근래 들어 노트북 PC를 비롯해 sub-notebook PC, 게임기 등에 직경 4mm 가량

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: 42-860-6087; fax: 42-860-5202

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

의 히트파이프를 평판형으로 압착하여 열소산을 위한 냉각장치로 이용하고 있다. 히트파이프가 가지는 경량 및 높은 전열 특성은 소형의 전자기기 냉각을 위한 열이송 소자로써 매우 적합하여 점차 그 응용대상이 늘어나는 추세에 있다. 그러나, 선행연구에 따르면 직경 3~4mm의 히트파이프를 두께 2mm 이하로 압착하게 되면 전열성능이 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 압착에 따라 당초 원형 히트파이프가 가지는 내부 모세관 구조의 변형 및 소자 중간부의 함몰로 인한 내부 증기유동공간의 축소 등에 기인하기 때문이다. 일반적으로 휴대형 전자기기는 작은 크기와 함께 두께가 얇아 냉각소자는 원형보다 평판형이 보다 더 적용하기에 유리하다. 특히 앞으로는 휴대성의 편리함을 위해 전자기기들이 더욱더 얇아질 것을 예상해 볼 때, 평판형 냉각소자의 두께는 중요한 인자가 될 전망이다.

본 연구에서는 평판형 구조를 갖는 기-액 상변화 방식의 냉각소자를 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.

상기 냉각소자의 열전달특성 및 전열성능을 파악하기 위해 우선 silicon 및 glass 재질로 flat plate type 소형 냉각소자의 제작 및 성능실험을 수행하였으며, 이를 통해 우수한 모세관 구조의 획득 및 가시화 연구가 가능토록 하였다. 이어 깨지기 쉬운 silicon 및 glass 재질 대신 구리를 envelope용 재질로 사용해 flat plate type 냉각소자를 제작하였다. 이는 silicon, glass 재질의 냉각소자와 달리 동일한 구조의 2개 박판이 마주보며 결합하도록 구성된다. 아울러 제작공정에 압인방식을 도입함으로써 공정의 단순화를 달성할 수 있도록 하였다.

## 2. Flat plate type 냉각소자의 구조

본 연구대상의 flat plate type 냉각소자는 기-액 상변화 열전달 방식의 기존 히트파이프와 크게 다르지 않은 구조를 갖는다. 다만, 기체와 액

체의 유동통로가 분리되어 있고, 증발부 근처에 reservoir를 갖는 것이 구별되는 차이점이다.

그림 1은 본 연구에서 개발한 냉각소자의 개략도를 나타낸 것이다. Silicon 및 glass로 이루어져 있는 그림 1의 냉각소자는 모두 3개의 plate로 구성된다. 하판 plate에는 증발부 모세관 그루브 구조와 넓은 유로의 응축부 유동통로가 가공되어 있다. 하판 plate의 중간부분에는 열전달률 평가시 벽면을 통한 전도 열전달률을 최소화하기 위한 heat block을 설치하였다. 중판 plate에는 증기유동통로 및 액체유동통로가 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. 상판 plate는 소자의 내부 밀폐를 위한 덮개 역할을 수행하며, 하판 증발부와 일치하는 부분에 작동액체 분산을 위한 성긴 그루브들이 평행하게 가공되어 있다.

기-액 상변화 방식의 작동원리를 간략히 설명하면 다음과 같다. 증발부에 가해진 열량에 의해 기화된 증기는 소자의 가운데에 위치한 넓은 단면적의 증기유동통로를 따라 응축부측으로 이동한다. 여기서 잠열을 소산시키 뒤 응축된 작동액체는 소자의 양측에 위치하는 액체유동통로를 따라 증발부측으로 귀환한다. 증발부 내 모세관 그루브 구조는 양쪽 측면이 2단으로 설계되어 있어 응축부로부터 귀환한 작동액체는 2단 그루브 구조의 상단면을 통해 모세관 그루브 내부로 분산하게 된다. 이때 작동액체 유동통로는 2단 그루브의 상단면과 직각으로 교차하면서 연결된다.

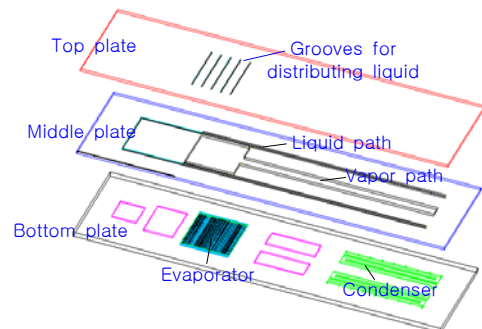


Fig.1 Structure of the cooling device

작동유체는 최초 증발부 근처에 위치하고 있는 reservoir를 통해 공급되며, 별도로 외부에 설치되는 fill tube를 통해 reservoir 내부에 공급된다. 소자의 상판은 glass로 제작함으로써 기-액 상변화 과정의 2상 유동 특성을 육안으로 관찰할 수 있도록 하였다.

### 3. Silicon 냉각소자의 제작 및 성능평가

#### 3.1 Silicon 및 glass 내 유로 제작

상기 그림 1과 같이 3개 plate로 구성되는 flat plate type 냉각소자는 silicon 및 glass 재질로 이루어져 있다. 즉 증발부 내 모세관 그루브 구조 및 응축부 내 작동액체 유로를 갖는 하판은 silicon으로 제작하였으며, 그 외 증기유동통로 및 액체유동통로를 갖는 중판과 덮개 역할을 하는 상판은 glass로 제작하였다. 아래에 silicon 및 glass 내 유로 제작을 위한 공정 순서를 간략히 정리하였다. Silicon 내 모세관 그루브 구조는 DRIE(Deep Reactive Ion Etch) 공정을 이용해 제작하였다. 우선 DRIE의 etch mask로 사용할 TEOS(tetraethyl orthosilicate)를 2.5um 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 8000Å 증착한 후 patterning, TEOS 식각 그리고 PR ashing을 다시 한번 거친다. 이렇게 준비된 masking layer를 이용, 1차 DRIE에서 Si를 60um 식각하고, 이어 200um을 연속으로 식각한다. 1차 DRIE 과정에서 masking layer로 쓰이고 남은 TEOS를 식각으로 제거한 후 2차 DRIE 공정을 시도한다. 최종적으로 표면에 남은 TEOS는 HF용액에 담귀 습식식각을 통해 제거하게 된다. 모든 공정 후에는 황산:과산화수소 (4:1)용액으로 클리닝을 실시하였다. 중판 및 상판 glass 내 유로는 wet etching 공정을 이용해 제작하였으며, masking layer로는 polysilicon을 사용하였다. 작동유체 주입을 위한 through hole 제작은 DFR film을 이용, patterning을 수행한 후 sand blast 공정을 통해 제작하였으며, 관통되는 구조를 갖는다. 위와 같이 별도로 제작된 silicon 및 glass 재질의 하판, 중판, 상판은

bonding 공정을 통해 결합함으로써 envelope를 형성하도록 하였다. 앞서 언급한 through hole을 통해 작동유체를 주입하게 되며, 이를 위해 through hole 상단면에 fill tube를 설치하였다. 그림 2에 제작된 silicon 및 glass 재질의 냉각소자 envelope와 그루브 단면사진을 나타내었다. 그림을 통해 3개 plate가 결합된 envelope의 모습과 증발부 내 모세관 그루브 구조를 각각 볼 수 있다.

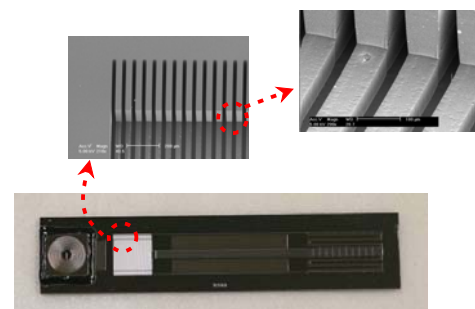


Fig.2 Fabricated cooling device and grooves

#### 3.2 냉각소자의 성능평가

성능평가를 위한 flat plate type 냉각소자의 재원은 다음과 같다. 전체 길이는 50mm와 70mm의 두 가지를 고려하였으며, 증발부는 9\*10mm<sup>2</sup>를, 응축부는 10\*20mm<sup>2</sup>의 크기를 각각 갖는다. 증발부 내 모세관 그루브는 폭 20um, 깊이 60um의 크기로 167개가 가공되어 있다. 제작된 냉각소자의 전열성능 평가는 진공 chamber 내에서 이루어지도록 하였으며, 성능평가 실험동안 진공 펌프의 suction을 통해 일정한 진공환경이 유지되도록 하였다. 증발부내 열량의 공급은 Ni-Cr wire를 이용해 별도로 제작한 히터를 통해 이루어졌으며, 응축부에서의 열소산은 water-jacket을 통한 액체 순환 냉각이 되도록 하였다. 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.

그림 3은 전체길이 50mm를 갖는 flat plate type 냉각소자의 열저항을 나타낸 것이다. 여기

서 열저항이라 함은 증발부와 응축부 간의 온도차를 증발부에 가해진 열량으로 나눈 값을 의미한다. 증발부와 응축부에서의 온도값은 각각 2점에서 측정한 수치를 평균한 것이다. 그림 3의 성능실험은 응축부측에서의 약한 열소산 냉각조건 하에서 이루어졌다. 결과에서 보면 작동유체가 적정량 채워진 냉각소자의 열저항이 작동유체가 채워지지 않고 내부가 비어 있는 냉각소자에 비해 열저항이 약 2배 가량 낮게 나타났다. 이는 작동유체의 기-액 상변화 열전달 메커니즘에 의해 열이 정상적으로 증발부로부터 응축부측으로 이송됨을 말해준다. 한편 구리 재질로만 이루어진 동일 크기의 plate에 비해서도 약 2배 가량의 열저항 차이가 났으며, 이는 두께가 얇은 경우에 열전도도가 높은 소재라도 단면적의 감소에 따라 전열성능이 저하하기 때문이다. 아울러 무게 또한 상대적으로 무거워 본 연구 대상의 상변화 냉각소자 방식이 바람직하다. 그림 4는 전체길이 70mm를 갖는 냉각소자의 입열량 증가에 따른 열저항 변화의 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 3의 실험조건과 달리 응축부측에서의 냉각조건이 water jacket을 통한 강제수냉에 의해 이루어졌다. 결과를 보면, 작동유체가 충전된 경우와 그렇지 않은 경우에 있어서의 전열성능 차이를 뚜렷이 구별할 수 있다. 작동유체가 정상적으로 충전된 냉각소자의 경우, 열저항 4~5°C/W의 범위내에서 6.8W의 열전달률을 기록하였다. 이에 반해 작동유체가 충전되지 않은 냉각소자의 경우에는 약 3.4W의 열전달률을 기록하였다. 여기서의 열전달률은 limiting power가 아니며, 증발부 온도가 120°C를 넘지 않는 범위내에서 얻은 수치이다. 전체 두께가 1.5mm 미만이고, 기-액 유동통로가 분리된 형태를 갖는 flat plate type 냉각소자의 개발을 통해 정상적인 기-액 상변화 열전달 특성을 얻을 수 있었던 점은 매우 고무적인 일로써 향후 두께가 더 얇은 냉각소자로의 발전 가능성도 큰 것으로 생각된다.

#### 4. Metal 소재의 냉각소자 개발

앞서 살펴보았듯이, silicon 및 glass 재질로 이루어진 flat plate type 냉각소자의 개발을 통해 기-액 상변화 열전달 특성 및 전열성능을 평가하

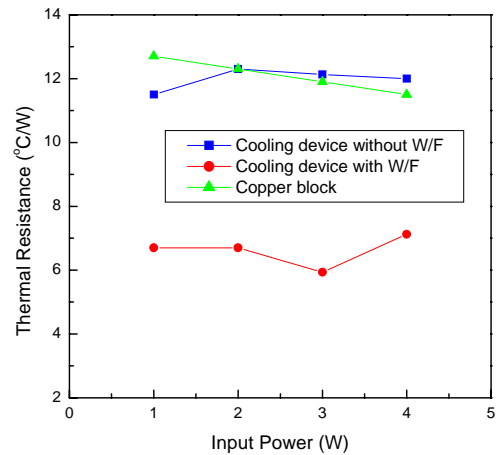


Fig.3 Thermal resistance between evaporator and condenser

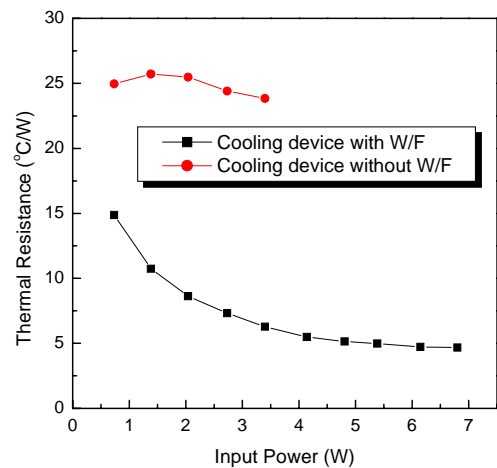


Fig.4 Heat transfer rate of the cooling device with 70mm of total length

였다. 특히 가시화를 통해 증발부, 증기유동통로 및 응축부 액체라인에서의 기체 및 액체의 유동 특성을 파악할 수 있었으며, 증기유동통로 내에서 발생했던 액적에 의한 증기유동저항의 문제점을 해결할 수 있었다. 위와 같이 silicon 및 glass 재질의 냉각소자 연구를 통해 얻은 결과를 토대로 일반 전자, 통신 기기에의 적용이 보다 유리하도록 구리 재질의 냉각소자 개발을 수행하였다. 본 논문에서는 구리 재질 냉각소자의 전열성능 평가결과를 제시하지는 못하고 있으며, 냉각소자의 envelope 설계 및 제작 공정에 대한 연구내용을 기술하고자 한다. 그림 5는 제작된 구리 재질의 냉각소자를 보여주고 있다. 1개의 구리

박판 내에 증발부 내 모세관 그루브 구조, 증기 유동통로, 액체유동통로 및 응축부 내 액체유동라인 모두가 가공되어 있으며, 이 구리 박판 2개를 마주보게 결합함으로써 envelope를 완성하게 된다. 각 부의 기본적인 구조 및 기능은 앞선 silicon 재질의 냉각소자와 크게 다르지 않다. 증발부 내 모세관 그루브 구조를 제외한 모든 그루브 및 유동통로는 압인 공정을 이용해 제작하였다. 여기서 압인 공정이라 함은 별도로 제작된 금형을 이용해 박판의 구리 plate를 눌러 가압함으로써 구조물을 얻는 것을 의미하며, 압인 공정을 이용함으로써 제조 공정의 단순화 및 가격 경쟁력의 향상을 가져올 수 있게 된다. 증발부 내 모세관 그루브 구조는 레이저 가공을 통해 이루어졌으며, 응축부 내 작동액체 유동라인은 앞선 silicon 재질의 냉각소자와 반대 방향의 구조를 가진다. 본 연구를 통해 기-액 유동 분리에 의한 전열성능 향상, 단순한 제작공정을 통한 제조원가 절감 등의 달성이 가능할 것으로 보인다.

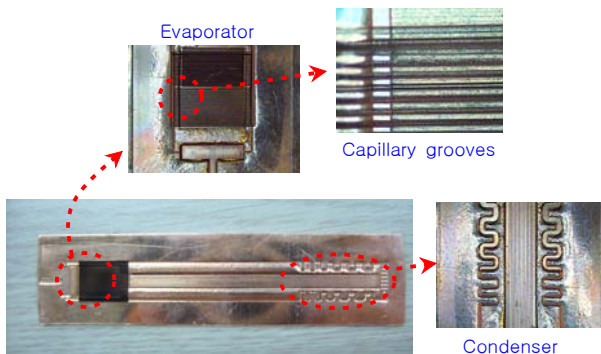


Fig.5 Metal cooling device fabricated by stamping process

#### 4. 결론

두께가 얇으면서도 큰 전열성능을 획득할 수 있도록 기-액 유동분리의 설계 구조를 개발하였으며, 성능실험을 통해 다음의 결과를 얻었다.

(1) 제작된 silicon 재질의 flat plate type 냉각소자는 작동유체가 충전되지 않은 냉각소자 및 동일 크기의 구리 블록에 비해 열저항이 약 2배 가량 작게 나타났으며, 이를 통해 정상적인 상변화

열전달 특성을 확인할 수 있었다.

(2) 전체 길이 70mm의 크기를 갖는 냉각소자의 경우, 정상상태 열저항  $4\sim 5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 의 범위에 대해 약 6.8W의 열전달률을 기록하였다.

(3) Silicon 냉각소자의 실험결과를 토대로 응용성이 더 유리한 metal 재질의 냉각소자를 개발하였으며, 특히 압인공정 기술을 도입함으로써 공정의 단순화 및 제조단가의 절감효과를 달성할 수 있었다.

(4) 본 연구의 flat plate type 냉각소자 개발을 통해 향후 휴대용 전자 기기용 냉각 솔루션으로써 가능성을 확인하였으며, 성능 및 제조기술의 개선을 통해 상용화를 앞당길 수 있을 것으로 보인다.

#### 참고 문헌

1. J. Kirshberg, et al., "Cooling Effect of a MEMS Based Micro Capillary Pumped Loop for Chip-Level Temperature Control," ASME 2000, MEMS Vol.2, pp.143-150, 2000.
2. A. Hoelke, et al., "Analysis of the Heat Transfer Capacity of a Micromachined Loop Heat Pipe," ASME 1999, Vol.3, pp.53-60, 1999.
3. L. Meyer, "A Silicon-Carbide Micro-Capillary Pumped Loop for Cooling High Power Devices," 19th IEEE Semi-Therm Symp., pp.364-368, 2003.
4. S. H. Moon, G. Hwang, et al., "Development of the Micro CPL for a Thin Packaging Structure," 8th International Heat Pipe Symposium, A9-3, 2006.
5. J. S. Suh, et al., "Friction in Micro-Channel Flows of a Liquid and Vapor in Trapezoidal and Sinusoidal Grooves," Int. J. of Heat & Mass Transfer, Vol. 44, pp.3103-3109, 2001.
6. Khurstalev, D., et al., "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, 1994.