

IC 칩 냉각용 초소형 히트 파이프의 제작 및 성능 평가

박진성, 최장현, 조형철, 양상식, 유재석  
 아주대학교 전자공학부, 아주대학교 기계 및 산업 공학부

The Fabrication and Characteristics of Micro Heat Pipe for IC Chip Cooling

Jin Sung Park, Jang Hyun Choi, Hyoung Chul Cho, Sang Sik Yang, Jae Suk Yoo  
 School of Electronics Engineering, Ajou University, Department of Mechanical Engineering, Ajou

**Abstract** - 본 논문은 전자 패키징의 방열 성능을 개선하기 위하여 초소형 히트 파이프를 제작하고 열전달 성능을 시험한 결과를 보여준다. IC 칩이 점점 고성능화 되고 고집적화되어 감에 따라 방열 문제가 대두되는데, 이 열은 전도만으로는 충분히 소산시킬 수 없고 패키징 표면에 별도의 장치를 장착하는 것은 시스템 소형화의 장애 요소가 된다. 따라서, 고성능 칩 개발을 위한 선결 과제로 고성능 초소형 냉각 장치가 요구되고 있다. 히트파이프는 밀봉된 파이프 내의 2상 유동과 상변화 잠열을 이용하여 열원으로부터 히트 싱크로 열을 효과적으로 전달하는 열교환 장치이다. 본 논문에서는 전자 패키징 내에 집적화할 수 있도록 초소형 히트 파이프 어레이를 제작하여 그 성능을 시험한 결과 증발부의 온도가 12.1 °C 감소됨을 보인다.

1. 서 론

기존의 전자 패키징 방식에서는 에폭시와 구리 리드 프레임을 통한 전도에 의해서 칩 작동 시 발생하는 열을 방출한다. 칩 방열 문제를 해결하기 위한 기존 방법으로는 패키징에 사용되는 재료개선과 구조적인 개선을 통해 열 전도도를 향상시키고 있다. 즉, 칩 아래에 전도도가 좋은 방열판(heat sink 또는 heat spreader)을 두어 열 방출 성능을 개선하고 있다. 또한, 패키징 외부 표면에 방열판 또는 히트 파이프를 장착하여 칩을 냉각시키고, 외부 시스템에 관을 설치하여 강제 대류에 의해서 칩을 냉각시킨다. 그러나, 초소형 히트 파이프는 IC 칩 아래에 놓여 패키징됨으로써 방열 효율을 높일 수 없다.

IC 칩 냉각을 위한 최근의 연구 동향으로는 고전도성의 다이아몬드가 증착된 구조의 방열판 [1], 랩탑 컴퓨터 또는 모바일 폰 등과 같이 소형화되고 있는 전자 제품의 방열 문제를 해결하기 위해서 작은 원형관 형태의 히트 파이프가 전자 패키징 외부에 장착되고 있다 [2]. 또 다른 냉각 장치로는 열전 재료를 사용한 thermo-electro-mechanical cooler [3], impinging jet 방식 [4] 등이 있다. 그리고, 초소형 히트 파이프를 새로운 방열 시스템으로 응용하기 위한 연구가 행해지고 있다 [5]. 이러한 여러 가지 냉각 방법들 중에서 초소형 히트 파이프는 외부 전력을 사용하지 않고 상변화를 이용함으로써 열전달 성능이 가장 좋은 장치이다. 본 논문에서는 실리콘기판과 유리기판을 사용하여 초소형 히트 파이프 어레이를 제작하고 그 열전달 성능을 시험한 결과를 보여준다.

2. 본 론

2.1 히트 파이프 동작 원리

히트 파이프는 그림 1과 같이 증발부와 단열부, 응축부의 세 영역으로 나누어진다. 증발부에서는 작동 유체가 증발하면서 열원으로부터 열을 흡수하고 이 증기가

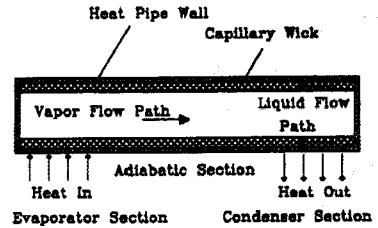


그림 1 히트 파이프 내의 작동 유체 순환 과정

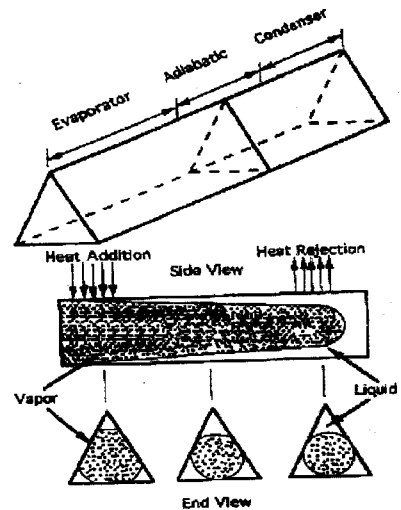


그림 2 히트 파이프 내 작동 유체의 기체와 액체 계면

단열부를 지나 응축부에서 냉각되어 액체가 되고, 모세관력에 의해서 작동 유체가 증발부로 귀환된다. 이러한 과정이 계속되면서 외부 동력원 없이 열을 전달한다. 이때, 응축부에서 증발부로 작동 유체의 귀환 성능, 즉, 히트 파이프의 모세관력이 히트 파이프의 열전달 성능을 좌우하게 된다. 히트 파이프는 모세관력을 최대한 할 수 있는 구조로 설계가 되어야 한다. 그림 1은 히트 파이프 내에서 작동 유체가 순환하는 유동을 보여 준다. 그림 2는 삼각형 홈 형태의 히트 파이프 내에서 작동 유체의 기체와 액체 계면의 모양을 보여 준다. 증발부에서 홈 표면에는 매우 얇은 액체 막이 형성되고 응축부로 갈수록 액체 막이 두꺼워진다. 작동 유체는 증발부에서 증발하여 액체를 모서리로 밀려나게 하여 아주 얇은 액체 막을 형성한다. 이로 인해 증발부에서는 큰 곡률의 기체와 액체 계면, 응축부에서는 작은 곡률의 기체와 액체 계면이 형성된다. 따라서, 히트 파이프 모서리

에서는 모세관력 차이가 발생하고 이로 인해서 액체는 응축부에서 증발부로 귀환하게 된다. 이 모세관력의 차이는 기체와 액체 계면의 곡률 반경에 관련된다. 히트 파이프의 모세관력의 차이는 Laplace-Young 식으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_V - P_L = \frac{\sigma}{R}$$

여기서,  $P_V$ 는 기체의 부분 압력,  $P_L$ 는 액체의 부분 압력,  $\sigma$ 는 작동 유체의 표면 장력,  $R$ 은 기체와 액체 계면의 곡률 반경이다.

초소형 히트 파이프는 일반적인 히트 파이프와 다른 점들은 아주 작고 모세관력을 향상 시키기 위한 획이 없는 구조이다. 대부분의 열전달은 전도에 의한 것이 아니라 증발부와 응축부에서 발생하는 상변화에 의해서 일어난다. 아주 작은 케펠러리 형태의 초소형 히트 파이프는 모세관력의 증대로 인해 열전달 성능이 향상 될 수 있다.

## 2.2 히트 파이프 구조 및 제작 공정

설계된 초소형 히트 파이프는 실리콘과 유리층으로 구성되어 있다. 실리콘층에는 삼각형 홈 형태의 히트 파이프가 38개가 배열된 구조이다. 실리콘 뒷면에는 성능 실험을 위해 열원으로 사용될 히터가 장착되어 있다. 유리에는 온도 측정용 열전대를 장착하기 위한 8개의 구멍들과 작동 유체 주입을 위한 한 개의 구멍이 있다.

초소형 히트 파이프의 삼각형 홈은 이방성 습식 식각으로 제작된다. 삼각형 홈의 크기는 폭이 100  $\mu\text{m}$ , 길이가 15 mm이고 깊이는 약 70  $\mu\text{m}$ 이다. 삼각형 홈과 홈 사이의 간격은 100  $\mu\text{m}$ 이다. 또, 이방성 식각을 할 때 열전대 장착을 위해 2 mm 간격으로 크기가 500  $\mu\text{m}$  × 500  $\mu\text{m}$ 이고 깊이가 70  $\mu\text{m}$ 인 사각형 홈이 함께 제작된다. 열원으로 사용될 히터는 Cr/Au를 증착하여 제작한다. 유리층에는 작동 유체 주입구와 열전대 장착을 위한 8개의 구멍을 전기 방전 가공으로 만든다. 실리콘과 유리층은 양극 접합을 한다. 그림 3은 제작된 히트 파이프의 사진들이다.

### 2.2.1 작동 유체 충전

작동 유체는 탈기된 증류수를 사용한다. 작동 유체를 탈기를 하지 않으면 히트 파이프 내에 비응축성 기체가 존재하게 되어 열전달 성능을 떨어뜨린다. 진공 챔버 내에서 히트 파이프를 탈기된 증류수로 완전히 채운다. 100 % 충전된 히트 파이프의 한쪽 끝을 hot plate에 올려 작동 유체가 히트 파이프 길이 비로 20 %가 남을 때까지 증발시킨 후 작동 유체 주입구를 밀봉한다. 히트 파이프 내의 진공도는 작동 유체의 증발 온도를 좌우하게 되고 진공도가 높을수록 낮은 온도에서 작동하는 히트 파이프가 된다.

## 2.3 성능 실험 및 결과

그림 4는 성능 실험 장치를 보여 준다. 2 mm 간격으로 8개의 열전대를 장착하여 히트 파이프 길이 방향으로 실리콘 표면의 온도를 측정한다. 제작된 초소형 히트 파이프의 응축부에는 냉각수를 흘려 보내고 증발부는 실리콘 뒷면에 있는 히터로 열을 인가하여 성능 실험을 한다. 일정한 입력 전력에서 정상 상태가 될 때까지 히트 파이프의 온도를 계속해서 측정한다. 전원 공급 장치로는 HP 6674를 사용하였고 측정 데이터는 Yokogawa DA2500E로 수집하여 컴퓨터로 저장한다. 20 % 작동 유체가 충전된 초소형 히트 파이프와 작동 유체가 충전되지 않은 초소형 히트 파이프의 온도를 측정하여 열전달 특성을 비교하였다. 성능 실험에 사용된 냉각수의 온도는 25.4 ~ 25.7  $^{\circ}\text{C}$ 로 유지하고, 전력은 1.9 W,

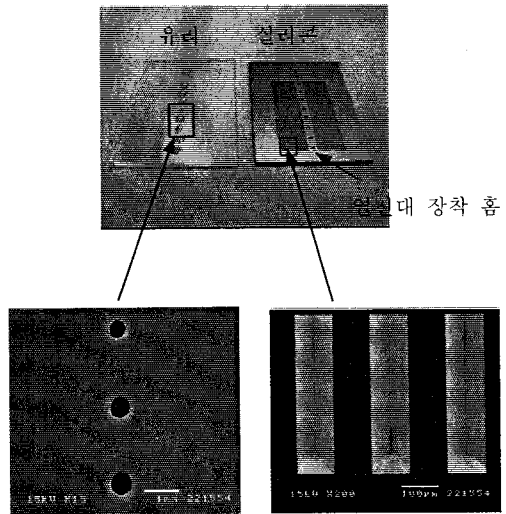


그림 3 제작된 초소형 히트 파이프의 사진

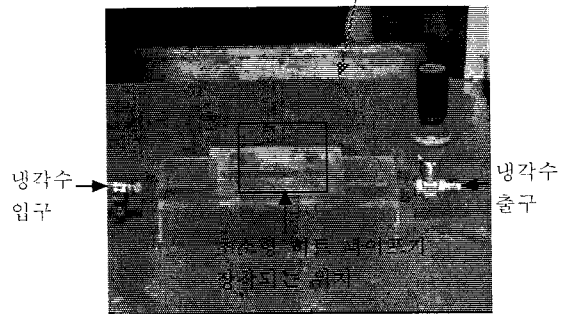
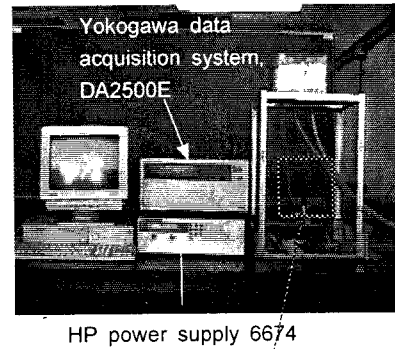


그림 4 초소형 히트 파이프 성능 실험 장치

3.5 W, 4.9 W와 5.9 W로 인가하였다.

그림 5는 성능 실험 결과로 초소형 히트 파이프의 정상 상태 온도 곡선을 보여 준다. 5.9 W일 때 작동 유체가 충전되지 않은 초소형 히트 파이프와 작동 유체가 충전된 초소형 히트 파이프의 증발부의 온도는 각각 139.2  $^{\circ}\text{C}$ 와 127.1  $^{\circ}\text{C}$ 이고 12.1  $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 저하 효과가 있음을 보여준다. 작동 유체가 충전된 초소형 히트 파이프가 충전되지 않은 초소형 히트 파이프 보다 온도 구배가 완만함을 보인다. 증발부에서는 충전된 초소형 히트 파이프

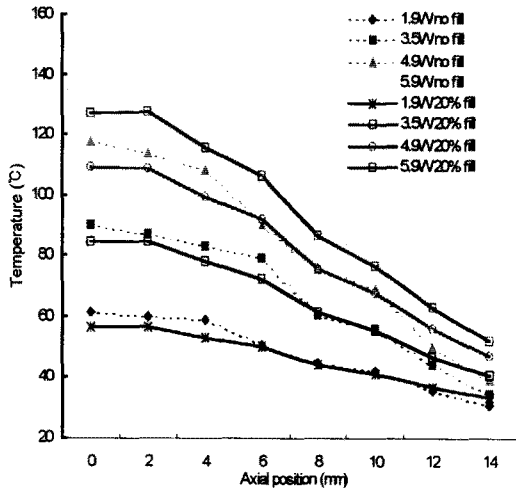


그림 5 초소형 히트 파이프의 길이 방향 정상 상태 온도 곡선

프, 응축부에서는 충전되지 않은 초소형 히트 파이프의 온도가 더 낮게 나타났다. 즉, 증발부 끝단과 응축부 끝단의 온도차는 20 % 충전된 초소형 히트 파이프가 더 작음을 보이고, Fourier의 열전도 법칙 ( $q = -k \frac{dT}{dx}$ )에 따르면, 이러한 결과는 충전된 초소형 히트 파이프가 충전되지 않은 초소형 히트 파이프보다 열전달이 향상되었다는 것을 의미한다.

### 3. 결 론

마이크로 머시닝 기술을 이용해 초소형 히트 파이프를 제작하였고, 작동 유체로 탈기된 증류수를 사용해 20 % 충전된 초소형 히트 파이프와 충전되지 않은 히트 파이프와의 열전달 성능 비교를 하였다. 본 연구에서 제안한 초소형 히트 파이프는 1.25 mm 두께로 편평하여 전자 패키징 내에 집적화가 가능한 구조로 제작되었다. 고성능 냉각 장치가 IC 칩 아래에 놓여 패키징 된다면, IC 칩의 발열 문제를 크게 개선할 수 있을 것이다. 그리고, 본 연구를 통해 마이크로 머시닝 기술을 이용한 초소형 히트 파이프 제작 및 열전달 성능에 대한 기초 연구를 완료하였다. 이를 바탕으로 향후 워 구조를 갖는 초소형 히트 파이프를 설계하고 여러 변수들에 대한 최적화 연구를 수행하고 실험을 통해 그 성능 향상을 입증할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 2000년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다.

### (참 고 문 헌)

- [1] K. E. Goodson, K. Kurabayashi, and R. Fabian W. Pease, "Improved Heat Sinking for Laser-Diode Arrays Using Microchannels in CVD Diamond", IEEE CPMT, part B. vol. 20, pp. 104-109, 1997
- [2] T. Kishimoto, S. Sasaki, K. Kaizu, K. Genda, and K. Endo, "Heat-Pipe Cooling Technology for High-Speed ATM Switching Multichip Modules", IEICE Trans. Electron., vol. E78 C, no. 5, pp. 564-573, 1995

[3] A. Miner, A. Majumdar, U. Ghoshal, "Thermo-Electro-Mechanical Refrigeration Using Transient Thermoelectric Effects", Applied Physics Letters, vol. 75, pp. 1176-1178, 1999.

[4] S. Wu, J. Mai, Y.C. Tai, and C.M. Ho, "Micro Heat Exchanger by Using MEMS Impinging Jets", MEMS 99, pp. 171-176, 1999.

[5] GP Peterson, "Modeling, Fabrication, and Testing of Micro Heat Pipes: An Update", Appl. Mech. Rev. vol. 49, no. 10, part 2, pp. S175-S183, 1996.