

모세구동 소형 냉각시스템의 실험적 연구

양재경* · 이규정** · 이정현***

An Experimental Study on Small Capillary Pumped Cooling System

J. K. Yang, K.-J. Lee and J. H. Lee

Key Words: Capillary Pumped (모세구동), Cooling System(냉각시스템), Steady State Flow (정상 상태 유동).

Abstract

The capillary pumped cooling system (CPCS) is a cooling system which controls temperature of the small electronic devices, such as IC device systems, notebook computers, etc. An important feature of CPCS is that a working fluid circulates in a system by capillary force in tubes instead of mechanical input power. The cooling effect of CPCS is investigated with respect to heat flux, condensation temperature under different working fluids (water, ethanol, methanol).

Capillary pumped flows are visualized under various conditions and mass flow rate and temperature are experimentally measured. It is shown that the increasing tendency of mass flux for each working fluid is observed as the temperature of evaporator increases, and that the cooling possibility of CPCS depends on the performance of evaporator and condenser which sustains the steady state temperature continuously.

기호설명

- M : 메탄올
- E : 에탄올
- W : 물
- Tc : 응축온도
- q : 단위 면적당 열유속

1. 서론

급속한 전자기술의 발달로 인하여 장난감, 가전제품에서부터 고출력컴퓨터, 고성능 계측장비, 군사무기에 이르기까지 시스템 성능에 지대한 영향을 주는 전자부품 들이 활용되어 지고 있다. 최근 이러한 전자부품 들은 소형화와 고성능화가

이루어지고 있고, 시스템의 전자부품의 신뢰성이 그 시스템의 성능의 신뢰성을 나타내고 있는 것은 두말할 나위 없다. 계속 발전되는 전자기술은 장비의 모듈화, 소형화 및 고출력화를 유도하였으며, 전자부품의 전기 저항에 의해 전체적 또는 국부적으로 과도의 열을 발산한다. 이러한 고열 발생은 전자부품의 작동 온도를 높게 만들어 시스템의 안정성과 신뢰성에 많은 문제점을 야기하고 있다.

전자부품은 온도의 상승에 따라 지수 함수적으로 안정성이 감소하고, 회로판 (circuit board) 에 장착되어 있는 전자부품의 납접(solder joint) 부분에 큰 열응력을 발생시켜 여러 문제점을 야기한다. 따라서 전자시스템에서는 전자부품의 발생열에 대한 적절한 냉각 능력이 중요한 사항으로 등장하였으며, 기존에 주로 사용되는 온도조절 방식으로는 열전도, 공기의 자연대류/복사(fin), 또는 강제대류(fan, blower), 액체에 의한 냉각, 히트파이프(heat pipe), 열전냉각(thermoelectric cooling) 형태 등이 널리 사용되고 있다.

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학과

*** 삼성종합기술원

위에 열거한 냉각방식은 냉각시스템의 크기 한계와 전력소모, 진동 및 소음이 커 노트북과 같은 소형 전자장비 냉각의 이용에는 사용이 한정될 수밖에 없다. 액체에 의한 냉각방식은 기술 상에 많은 문제점을 가지고 있으며 히트파이프 냉각의 경우 잠열을 이용하기 때문에 열제거율이 크고 정해진 압력에 따른 온도 고정이 용이하며 저압력 쪽으로 증기가 흘러, 워(wick)에서의 액체의 유동이 증력에 상관없이 모세 압력 방향으로 작용하는 이점이 있으나, 증기와 액체간의 대향류에 따른 복잡한 유동형태를 띄고 있어 열전달이 제약받는다. 또한 열전냉각은 구동부, 냉매의 사용 등이 없어 소음, 진동, 크기의 제한이 없고, 환경 친화적 특성은 가지고 있으나, 효율이 낮고 전력 사용량이 큰 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 소형 전자장비 냉각방식으로 외부의 구동력이 없이 작동유체의 표면장력에 의한 모세관효과와 증발잠열을 이용하여 자연 순환, 구동 될 수 있는 환경 친화적 소형 냉각기를 모델링하여 실제 작동유체의 순환 현상을 살펴보고 시스템의 냉각 성능에 영향을 줄 수 있는 인자를 변수로 하여 실험을 수행한다. 실험시 발생하는 증발, 응축의 특성을 살펴보고 모세구동 냉각시스템(capillary pumped cooling system; CPCS)에 대해서 고찰해 본다.

2. 모세구동 냉각시스템

기존의 소형 전자장비 냉각시스템은 팬(fan) 또는 송풍기를 이용한 강제대류 냉각시스템을 주로 사용하여 왔다. 이러한 냉각시스템은 팬 또는 송풍기 사용에 따른 전력소모 및 소음과 진동, 냉각시스템 크기의 제한 등의 단점이 있으며, 직접적 온도제어가 힘들어 전자부품의 신뢰성 결여 등을 야기하여 왔다.

2.1 시스템 구성

열유체 유동에 있어 제일 중요한 인자는 유동을 유발하는 구동력이다. 구동력의 형태에 따라 유동 및 열전달 특성이 결정되기 때문에 구동력의 이해는 무엇보다도 중요하다. 실제 실생활에서 주로 접하게 되는 주요 구동기구로는 증력과 온도에 의한 자연대류와 기계적 힘에 의해 구동

력이 좌우되는 강제대류인 경우가 많다. 그러나 크기가 매우 작은 미세유동에서는 경우에 따라서 표면장력이 중요한 구동력으로 대두될 수 있다. 본 연구에서 구현하는 모세구동 냉각시스템은 구동력으로 모세관에서의 표면장력을 이용하여 시스템 내를 작동유체가 순환하고, 작동유체의 증발잠열을 이용하여 발열 부분의 온도 제어가 가능한 냉각시스템이다. Fig. 1은 모세구동 냉각시스템의 기본 모형을 보여주고 있다.

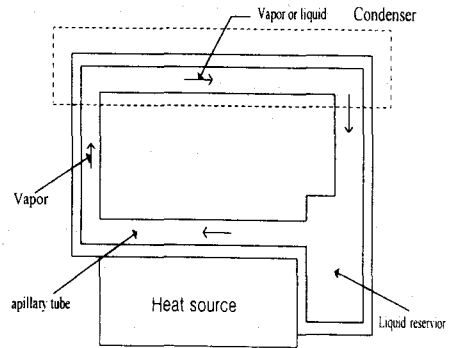


Fig. 1 Capillary pumped cooling system

2.2 작동유체

효율적 냉각시스템을 구성하기 위하여서는 무엇보다도 작동유체의 선정이 중요하다. 작동유체 선정 시 중요하게 고려하여야 할 점은 다음과 같다.

1. 표면장력이 커야 함.
2. 냉각시스템 물질과 반응이 없어야 함.
3. 잘 알려진 상태치를 가져야 함.
4. 잠열이 냉각 부하량과 부합하여야 함.
5. 압력에 따른 증발 및 응축온도가 시스템 작동온도 조건에 적합하여야 함.
6. 다루기가 쉽고 독성이 없어야 함.

Table 1은 전자장비에 있어 적정 냉각온도(300-350K)와 압력을 고려하였을 때 선정할 수 있는 작동유체를 조사하여 수록하였다.

Table 1 Useful temperature range of working fluid

Working fluid	Melting point K at 1 atm.	Boiling point K at 1 atm.	Useful range, K
Pentane	143.1	309.2	253-393
Freon113	236.5	320.8	263-373
Acetone	180.0	329.4	273-393
Methanol	175.1	337.8	283-403
Ethanol	158.7	351.5	273-403
Water	273.1	373.1	303-473

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험부 및 작동유체

CPCS 실험은 증발부와 응축부로 구성되었으며, 작동 시 전체적 시스템의 안정성 및 냉각 성능을 조사하기 위하여 수행되어 진다. Fig. 2는 CPCS의 실험부를 보여 주고 있다. 앞서 2장에서 조사한 바와 같이 본 실험에서는 유용한 온도범위에 들며 상온에서 액체 상태를 유지하면서 비교적 표면장력과 증발 잠열이 큰 메탄올, 에탄올 및 물의 3가지 냉매를 사용해 실험을 수행한다.

1) 증발부

증발부는 가로가 180mm, 세로가 120mm, 높이가 30mm인 직육면체로, 황동판을 사용해 제작하였으며, 실험 시 작동유체 주입 후 유동을 관찰하기 위하여 투명한 내열 유리를 이용해 덮개를 제작하였다. 증발부 내부에는 표면장력에 의한 능동적 유동을 이룰 수 있도록 내경 0.4mm, 외경 1mm, 길이 100mm인 세라믹튜브를 사용하였다. 세라믹튜브는 시스템의 성능을 좌우하는 중요한 부분으로써 증발부에 3mm의 깊이를 파고 여기에 160개의 세라믹튜브를 집어넣어 시스템을 구성하였다. 증발부 열 발생 장치로는 내부에 국부적 열을 주기 위하여 비교적 표면적이 작고 단위 면적 당 고온을 발생시킬 수 있는 정격 220V, 150W 실린더 모양의 열원봉을 2개 사용해 아래로부터 2/3되는 지점을 중심으로 직경 10mm, 깊이 85mm인 2개의 드릴구멍을 낸 후 황동판 내부에 삽입하여 가열한다.

실험 조건에 따라 작동유체의 끓는점을 고려해 최소 30W에서 최대80W 까지의 범위에서 두 개의 열원봉을 조합하여 실험하였다.

증발에 의한 표면장력 유동이 중단되는 것을 막기 위하여 증발부의 아래 부분에 일정량의 유체가 저장되어질 수 있도록 저장부분을 두어 유체가 계속적으로 공급될 수 있게 한다. 증발부를 길이 방향으로 3등분 간격으로 나누어 각 구간마다 열전대를 설치해 온도 값을 측정한다.

2) 응축부

응축부는 증발기에서 나오는 과열증기를 응축시키는 부분으로써 가로70 mm, 세로40mm, 높이 25mm인 직육면체의 황동판 표면에 폭 5mm인 15 개의 홈을 가공하여 응축된 액체가 흐를 수 있도록 제작한다. 응축열을 제거할 수 있도록 황동판 내부, 응축된 액체가 흐르는 홈 바로 아래 부분에 항온수조로부터 일정 온도의 냉각수가 흐를 수 있도록 유로를 두어 응축부의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 한다. 응축된 액체는 다시 증발기의 아래쪽 입구로 공급될 수 있도록 한다. 응축 현상을 관찰 하기 위하여 응축부의 덮개를 투명한 아크릴로 제작하였으며, 4군데에 K-type 열전대를 사용하여 응축부의 온도를 측정하였다.

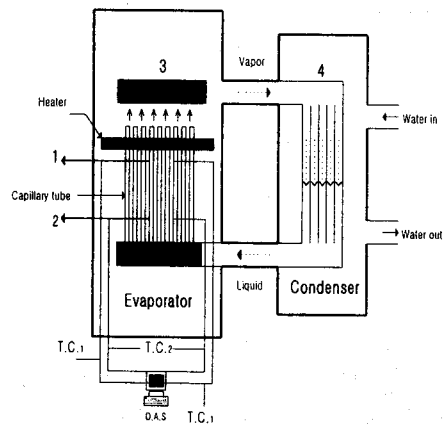


Fig. 2 Schematic diagram of CPCS

3.2 실험 방법 및 측정인자

본 실험에서는 3가지 유체(물, 에탄올, 메탄올)를 사용하여 열원의 열유속, 냉각수 온도를 변수로 하여, 증발온도와 물성치에 따른 유동가시화 및 온도 측정으로 표면장력에 의한 모세구동 유동을 관찰하였다. 또한 응축부의 응축온도를 변

화시켜 가며 응축효과가 전체 유동에 미치는 영향을 살펴보고, 실제 모세구동 냉각시스템의 가능성을 타진하였다.

모세관에서 표면장력 효과를 높이고 부력의 효과를 줄이기 위해 증발부가 수평과의 각도를 20°, 25°로 유지하도록 하여 실험을 수행하였다. 응축부의 온도는 5°C, 10°C, 20°C, 30°C, 40°C, 50°C를 사용하였다. 유동가시화는 CCD카메라를 이용하여 미세크기 규모의 유동을 살펴보았으며, 온도 측정은 K-type의 열전대를 이용해 백금 즉 은 저항체를 이용한 디지털 지시 온도계와 DAS(data acquisition system) 연결하여 측정한다. 측정은 2초 간격으로 온도 값을 읽었으며 실제 데이터는 1분 단위로 기록하도록 설정하였다. 또한 시스템의 냉각 성능을 파악 할 때까지 충분한 시간을 두어 측정한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유체의 질량유량 측정

앞서 언급한 바와 같이, 모세관에서의 표면장력 효과를 크게 하고 부력에 의한 영향을 줄이기 위해 실험부를 수평면에 가깝게 하였다. Fig. 3은 수평면과 기울임 각이 20°, 25° 일 때의 증발부 1점에서의 온도에 따른 유량을 나타낸다. 기울임 각은 모세관에서 유체의 평형상승길이가와 관계된다. 이는 모세관전체의 길이 중 작동유체가 액체의 상태로 차있는 부분의 길이를 의미하며, 20°인 경우가 상대적으로 상승길이가 더 길다. 가열에 의해 평형상승길이 이하에서 액적이 증발하면 그 부분에서 대기압과 표면장력에 의한 모세관 효과와의 불균형이 야기되고, 이에 대한 균형을 이루기 위해 액체가 모세관을 따라 계속적으로 공급되어 순환 질량유량이 생기게 된다. 따라서 질량유량은 모세관내의 유체의 상승길이가 클수록 커짐을 알 수 있다.

증발온도에 따라 메탄올(65°C), 에탄올(78°C), 물(100°C)의 순서로 증발되며, 유체의 증발이 시작되는 온도 부근에서는 상승길이의 변화가 크지 않아 순환 질량 유량 값이 작고 온도 상승 시 그 증가량도 크지 않았다. 또한, 증발부내 모세관들의 불규칙적 배열로 인해 온도 및 평형상승길이가 각 부분마다 불균형을 이루어 증발부내 모세

관 다발 각 부분에 유체의 증발이 심한 차이를 보인다. 그러나, 각 유체 증발온도 보다 약 15°C 높은 온도로 증가되면 증발유량이 크게 증가함을 알 수 있으며, 관내 온도 및 유량의 불균형이 사라지고 증발과정이 안정적으로 이루어진다. 이는 가열에 의해 증발부를 이루는 각 모세관들의 상승길이가 비슷한 상태로 안정적이 됨을 말하며, 이러한 상태는 온도 상승에 대해 유량은 크게 증가하지 않고 비교적 일정한 값을 유지한다.

4.2 응축부 온도에 따른 유체의 냉각성능

Fig. 4는 메탄올을 작동유체로 열원의 열 유속이 25W/cm²의 경우 응축부의 온도를 10°C로 유지시켰을 때 1점과 2점의 온도를 시간에 따라 나타내었다. 실험 값을 나타내는 4개의 곡선중 위의 두 곡선은 작동유체가 없는 경우 시스템내의 온도를 나타내는데 이를 통해 작동유체가 순환할 때 증발잠열에 의한 냉각효과를 온도 값의 차이로 알 수 있으며, 유체의 증발온도 부근에서 온도가 정상상태를 유지함을 볼 수 있다.

Fig. 5는 작동유체가 메탄올이고 열원의 열유속이 25W/cm²의 경우 응축부 온도를 5°C, 20°C, 40°C로 달리 하며 각각 1점의 온도를 시간에 따라 나타내었다. 위의 응축온도에서는 충분한 열 제거로 인하여 1점에서 일정 온도의 정상상태 온도(증발온도)를 유지시켜 줌을 보여주고 있다. 60분 이상에서 약간 온도가 과열됨을 보이고 있는데 응축온도가 높을수록 열제거율이 낮아져 빨리 과열됨을 보여주고 있다. 그러나 응축부에서 충분히 증발열량이 제거될 때 응축부의 온도와는 크게 상관없이 일정량의 질량유량이 시스템 내를 순환하는 것으로 유동가시화 되었으며, 증발유량은 전적으로 모세관에서의 증발조건에 따른다. 따라서 시스템 전체적으로 불 때 증발열을 충분히 제거할 때, 표면장력에 의한 능동적 순환이 야기되며, 발열부에 일정온도를 유지할 수 있음을 보여준다. 이러한 현상은 에탄올과 물에 대해서도 같다.

Fig. 6과 Fig. 7은 증발부내의 열원의 조건을 20W/cm², 30W/cm² 두 가지 경우에 대해서 10°C의 동일한 응축 온도에서 메탄올, 에탄올, 물의 온도변화를 나타낸다. 이것은 열원의 열부하의 변화에 따른 작동유체의 선정을 보여주는 것이라 할 수

있다. 열원이 20W/cm² 인 Fig. 6에서는 메탄올, 에탄올 인 경우 증발온도에서 상당기간 유지함을 보여주고 있는 반면, 30W/cm² 인 Fig. 7에서는 같은 응축조건 하에서도 쉽게 과열상태가 됨을 보여주고 있다. 반면 물인 경우는 30W/cm² 열원인 경우도 일정온도를 유지함을 보여주고 있다. 작동유체가 정상적으로 작동하는 열원의 온도 범위를 넘어선 과열 경우에는 심한 dryout 현상이 발생하고 더 이상 시스템의 냉각 성능을 유지시켜 주지 못하게 된다. 각 작동유체의 물성치를 비교해볼 때 물의 경우 상대적으로 높은 증발잠열로 인하여 열 제거 효과가 크고 냉각성능도 우수함을 알 수 있다. 이것은 실제 시스템 설계 시 작동유체의 선정의 중요성을 나타내 주는 결과이다.

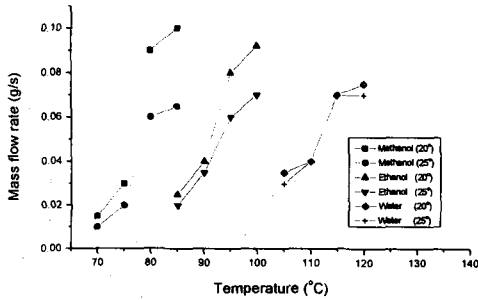


Fig. 3 Mass flow rate for each working fluid

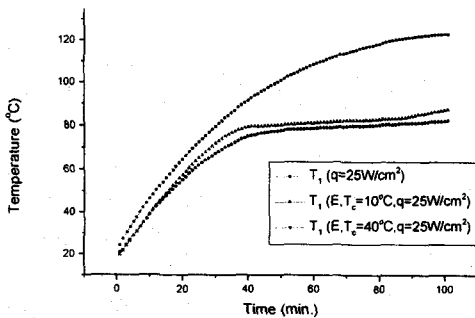


Fig. 4 Temperature difference of T1&T2 for methanol

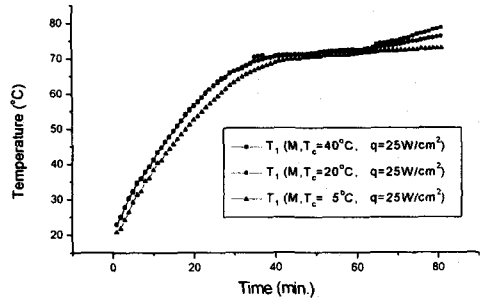


Fig. 5 Temperature-time relation with varying condensation temperature

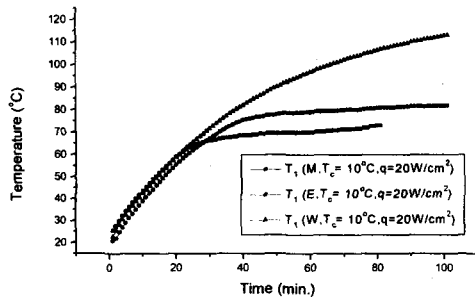


Fig. 6 Temperature-time relation with same condensation temperature

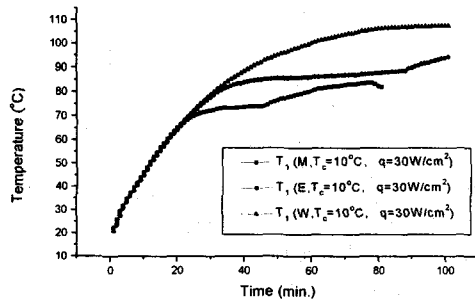


Fig. 7 Temperature-time relation with same condensation temperature

5. 결론

본 연구는 전자장비 냉각방식으로 표면장력과 증발잠열을 이용한 모세구동 냉각 시스템의 냉각 성능에 대하여 실험 해석을 수행하였다. 실험 해석을 위하여 증발부에서는 발열체의 열유속, 작동유체를 변화 시켜가며 모세구동에 의한 질량유속과 냉각 성능, 유동의 특성을 살펴보았으며, 응축부에서는 응축 온도를 달리해 시스템의 냉각 성능 및 안정성을 관찰하였다.

1) 유동 관찰 결과 표면장력과 증발 잠열을 이용하여 모세구동 냉각시스템의 가능성을 확인하였다.

2) 본 시스템에서는 증발부의 온도가 각 유체의 증발온도 보다 약 15°C 정도 높은 온도를 유지할 때 순환 질량 유량이 커지나, 증발부의 열부하가 커질수록 모세관 내에서의 dryout 현상이 심화된다.

3) 충분히 열을 제거 할 수 있는 응축인 경우 시스템의 순환 유량은 전적으로 증발부의 가열조건에 의해 결정된다.

4) 열원의 크기와 온도 조절 범위에 따른 유체의 선정이 이루어져야 하며, 작동유체가 적절하지 않으면 냉각성능이 떨어진다.

후기

본 연구는 (주)삼성종합기술원의 후원 하에 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) S. W. Chi, Heat Pipe Theory and Practice, hemisphere Pub. Co., 1976.
- (2) R. Bhatia, "The Application of Heat Pipes in Personal Computers," Proc. Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, 1997.
- (3) A. Faghri, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis., 1995.
- (4) A. Abhat and P. A. Seban, "Boiling and

Evaporation from Heat Pipe Wicks with Water and Acetone," ASME J. Heat Transfer, Vol. 90, No. 3, p.331, 1974.

(5) D. Khrustalev and A. Faghri, "Heat Transfer During Evaporation and Condensation on Capillary-Grooved Structures of Heat Pipes," Proc. ASME Winter Annual Meeting, Chicago. HTD-Vol. 287, pp. 47-59., 1994.

(6) W. T. Kui, S. Y. Yoon and Y. P. Lee, "Experimental Study of Heat Transfer in Two-Phase Loop Thermosyphon for Cooling of MCM," Proc. Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, 1996.

(7) K. W. Lee et al. , "Flow and Heat Transfer Characteristics in the Evaporation Section of Separate Type Heat Exchanger," 4th International Symposium on Heat Transfer, Beijing, 1996.

(8) Y. P. Wen and S. Guo, "Experimental Heat Transfer Performance of Two-Phase Thermosyphons," Proc. 5th Int. Heat Pipe Conf., Tsukuba, Japan., 1984.

(9) F. J. Stenger, "Experimental Feasibility Study of Water-Filled Capillary Pumped Heat Transfer Loops," NASA X-1310, NASA LeRC Report, 1966.

(10) E. J. Krolczek, J. Ku and S. Ollendorf, "Design, Development, and Test of a Capillary Pump Heat Pipe," AIAA-84-1720, Proc. AIAA 19th Thermophysics Conf., Snowmass, Colorado, 1984.

(11) D. R. Chalmers, J. J. Pustay, C. B. Moy and E. J. Krolczek, "Application of Capillary Pumped Loop Heat Transport Systems to Large Spacecraft," AIAA-86-1295, Proc. AIAA/ASME 4th Joint Thermophysics and Heat Transfer Conf., Boston, Massachusetts., 1986.