

## 나노유체를 이용한 열사이폰 히트싱크

이 석 호<sup>†</sup>, 신 동 루<sup>\*</sup>, 임 택 규, 이 충 구, 박 기 호<sup>\*\*</sup>, 이 욱 현<sup>\*\*</sup>  
 충북대학교 공과대학 기계공학부, <sup>\*</sup>명지대학교 기계공학부, <sup>\*\*</sup>한국에너지 기술연구원 페열이용연구센터

### Development of Nanofluidic Thermosyphon Heat Sink

Seok-Ho Rhi<sup>†</sup>, Dong-Ryun Shin<sup>\*</sup>, Taek-Kyu Lim,  
 Chung-Gu Lee, Gi-Ho Park<sup>\*\*</sup>, Wook-Hyun Lee<sup>\*\*</sup>

*School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea*

*<sup>\*</sup>School of Mechanical Engineering, Mongji University, Yongin 120-728, Korea*

*<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Energy Research, Building Energy Research Center, Daejeon 305-343, Korea*

(Received November 29, 2005; revision received September 8, 2006)

**ABSTRACT:** A heat sink system using nanofluidic thermosyphon for electronics systems was studied. The experimental results indicate that a cooling capacity of up to 150 W at an overall temperature difference of 50°C can be attainable. The heat sink design program also showed that a computer simulation can predict the most of the parameters involved. In the experimental study, the volume concentration of nano particles affect the system performance. Nanofluidic thermosyphon with 0.5% volume concentration showed the best performance. Nanofluid can increase CHF of the system compared with water as a working fluid. The current simulation results were close to the experimental results in acceptable range. The simulation study showed that the design program can be a good tool to predict the effects of various parameters involved in the optimum design of the heat sink.

**Key words:** Thermosyphon(열사이폰), Heat sink(히트싱크), Nanofluid(나노유체)

#### 기 호 설 명

<p><math>A</math> : 열전달면적 [<math>m^2</math>]</p> <p><math>D</math> : 직경 [m], 외경 [m]</p> <p><math>d</math> : 내경 [m]</p> <p><math>h</math> : 열전달계수 [<math>W/m^2\cdot C</math>]</p> <p><math>h_{LG}</math> : 증발잠열 [J/kg]</p> <p><math>k</math> : 열전도도 [<math>W/m\cdot C</math>]</p> <p><math>l</math> : 길이 [m]</p> <p><math>Q</math> : 열전달량 [W]</p>	<p><math>R</math> : 열저항 [<math>C/W</math>]</p> <p><math>r</math> : 반경 [m]</p> <p><math>S</math> : 형상계수 [m]</p> <p><math>T</math> : 온도 [<math>C</math>]</p> <p><math>t</math> : 관 두께 [m]</p> <p><math>T_c</math> : 냉각유체온도 [<math>C</math>]</p> <p><math>\Delta T_{h-c}</math> : 열원과 냉각유체의 온도차이 [<math>C</math>]</p> <p><math>u</math> : 공기유속 [m/s]</p>
	<p><b>그리스 문자</b></p> <p><math>\eta</math> : 환(fin) 효율</p> <p><math>\mu</math> : 점성계수 [<math>kg/m\cdot s</math>]</p> <p><math>\rho</math> : 밀도 [<math>kg/m^3</math>]</p>

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-43-261-2444; fax: +82-43-253-2441

E-mail address: rhi@chungbuk.ac.kr

$\sigma$  : 표면장력 [(m·N)/m]

**하첨자**

- c* : 응축부, 응축
- conv* : 대류
- e* : 증발부, 증발
- eff* : 유효(effective)
- g* : 증기
- h* : 발열부
- i* : 내부
- l* : 액상
- o* : 외부
- p* : 파이프
- pad* : 열 접착 패드(thermal pad)
- pl* : 증발부 지지판
- t* : 튜브관
- tot* : 전체(total)

**1. 서 론**

최근의 전자부품 냉각에 있어서 하나의 중요한 열 문제들의 해결책으로 자리매김을 하고 있는 히트파이프의 한 갈래인 열사이폰의 원리는 밀폐용기 내부의 작동유체가 연속적으로 증기-액체 간의 상변화(phase change) 과정을 통하여 용기 양단 사이에 열을 전달하는 장치로 잠열(latent heat)을 이용하여 열을 이동시키는 장치로써, 열사이폰의 기본적인 구조는 밀폐용기에 증발부, 단열부, 응축부로 구분되며, 외벽의 재료 및 작동유체의 종류, 작동유체의 충전량, 작동온도 등에 따라 영향을 받게 된다.<sup>(1-3)</sup>

본 연구에서는 열사이폰 내부의 작동유체로 일반적인 순수액체가 아닌 나노 금속입자가 분산된 나노유체를 사용한 연구이며, 나노유체를 이용하여 작동유체의 열전도도를 증가시켜 열전달 성능 향상을 꾀하려 한다. 나노유체는 유체의 열용량(heat capacity)를 증가시키고, 유체의 유효전도성을 향상시킨다. 그리고 나노 금속입자와 유체, 그리고 유동면적 사이의 상호작용 및 융합을 강화하고, 나노 금속입자의 확산으로 유체의 역 온도 구배를 감소시키고, 유체의 혼합 및 난류유동이 강화된다.<sup>(4-8)</sup> 또한 나노유체는 입자 표면에 많은 전자의 존재는 열전달 효율을 향상시키는 열전달

측면의 장점을 가지고 있어 현재 열전달을 향상시키는 대표적 기술로 연구가 되고 있다.<sup>(4-8)</sup>

본 연구는 나노유체를 사용한 응용품에 대한 연구로서 나노유체를 작동유체로 사용한 열사이폰을 이용한 냉각장치의 개발을 통해 나노유체의 냉각매체로서의 가능성을 평가하였다. 본 연구에서는 나노유체의 농도, 작동유체의 주입량과 경사각 등 다양한 영향을 평가하고, 모델링하여 시뮬레이션을 통한 예측 및 실험결과와의 비교도 가능하도록 하였다.

**2. 실험장치**

Fig.1에 보이는 것처럼 본 연구에서 수행된 열사이폰(thermosyphon) 히트싱크(heat sink)는 MCM(MultiChip Module) 냉각용으로 개발된 시스템으로 열원(heat source)과 냉각유체 사이의 온도차가 50℃일 경우에 최대 150 W 이상의 열전달 성능을 갖도록 설계되었다. 실험을 위해 개발된 나노유체 열사이폰 히트싱크는 크게 증발부와 응축부, 그리고 그 사이를 유체가 이동할 수 있도록 연결된 수송부로 구성되어 있다.

본 연구를 위하여 사용된 열사이폰은 외경 6.3 mm, 내경 4.4 mm 동관으로 만들어졌으며 나노유체를 작동유체로 사용했다. 각각의 열사이폰은 50 mm의 증발부, 290 mm의 수송부, 그리고 150 mm

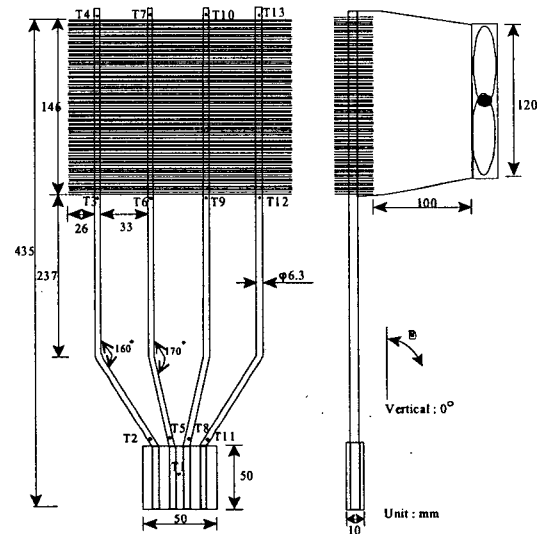


Fig. 1 Test heat sink assembly.

의 응축부로 구성되어 있다. 각 열사이폰은 50×50×10 mm의 증발부인 알루미늄 블록(block)의 상부에 5 mm 간격으로 만들어진 구멍에 삽입되었다. 따라서 네 개의 열사이폰이 알루미늄 블록에 삽입되어진 형태로 히트싱크의 증발부를 구성하고 있다. Fig. 1에 보이는 것처럼 각 열사이폰은 증발부에 삽입된 50 mm와 290 mm의 수송부를 갖고 있으며, 나머지 150 mm는 150×90×1 mm의 황동 핀(fin)이 0.7 mm 간격으로 부착되었다. 또한 Fig. 1에는 본 연구를 위해 히트싱크에 부착한 13개의 열전대의 위치를 표시하고 있다. 가열부에는 1개의 열전대가 가열부 표면에 증앙에 연결되었으며 증발부 출구 4개, 응축부 입구에 4개, 그리고 응축부에 상단에 4개의 열전대를 부착하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 각각의 열전대는 Data Acquisition System(MX 100D, Yokogawa)에 연결되었으며, 컴퓨터를 통해 상시 히트싱크의 온도변화를 관찰할 수 있도록 하였다.

가열부는 3개의 직경 5 mm의 카트리지(Cartridge) 히터를 50×50×10 mm의 알루미늄 블록에 삽입하여 제작되었으며, 전체 최고 300 W 정도의 가열 능력을 갖도록 제작되었다. 가열부는 실험 전에 온도분포를 확인하였으며, 가열부의 온도분포는 50×50 mm의 면적 내에서 균일한 것으로 관찰되었다.

Fig. 2에서 보이듯이 본 실험장치는 경사각을 자유자재로 변화시킬 수 있도록 특별히 제작되었다. 응축부에는 응축부의 전체 핀(fin) 면적에 균일한 냉각유체의 유동을 위해 응축부 크기에 맞게 유동채널이 제작 설치되었다. 응축부의 공기 유동을 위해 120×120 mm의 방열팬(cooling fan)이 설치되었으며, 1~2.5 m/s까지의 유동속도를 조

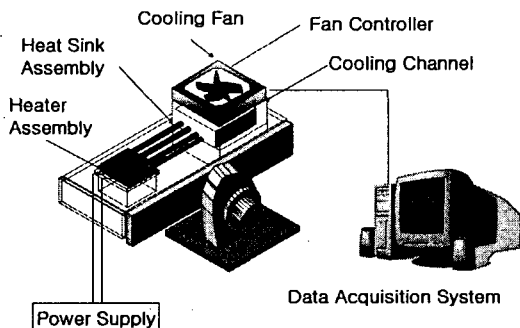


Fig. 2 Experimental setup.

정할 수 있도록 속도조절장치와 연결되었다. 아울러 증발부 및 수송부는 열손실이 적도록 단열되었다.

본 실험에서 사용된 나노유체는 TiO<sub>2</sub> 입자를 모유체에 분산시켜 만들어진 유체로 농도에 따라 제작되어 실험에 이용하였다. 사용된 나노유체의 입자크기에 따른 분포도를 입자분석기를 통하여 분석한 결과 입자는 평균 50 nm의 직경을 가지며 20 nm에서 100 nm 정도까지 정규분포를 갖는 것으로 알 수 있었다.

### 3. 시뮬레이션

Fig. 3은 프로그램의 손쉬운 접근성을 위하여 개발된 윈도우 모듈이다. 시뮬레이션의 논리적인 과정은 열사이폰의 열원(heat source)으로부터 냉각유체까지 열이 전달되기까지 각 경계의 온도를 규명하고 있으며, 열사이폰 히트싱크의 시뮬레이션은 전체 열저항 네트워크에 바탕을 두고 수행하게 된다. 시뮬레이션은 근본적으로 각각의 열저항을 계산하고 열저항 네트워크가 Gauss-Seidel 방법<sup>(9)</sup>에 의한 반복계산에 의해 최종적으로 수렴 조건  $((t_i^{n+1} - t_i^n) \leq \epsilon)$ 을 만족시킴으로써 시뮬레이션을 수행하게 된다. 히트싱크 전체 열전달 성능은 식(1)으로 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{\Delta t_{h-c}}{\sum R} \quad (1)$$

히트싱크에 관계하는 열저항들은 다음과 같다.

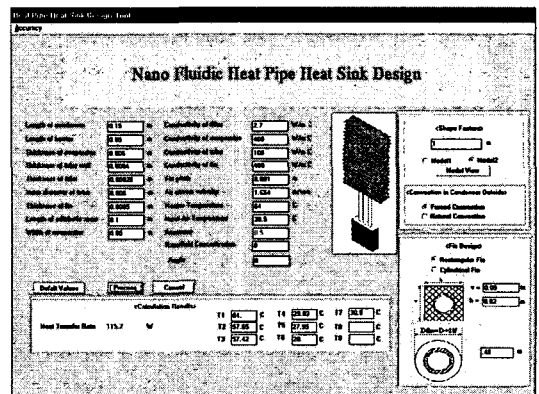


Fig. 3 Simulation software window.

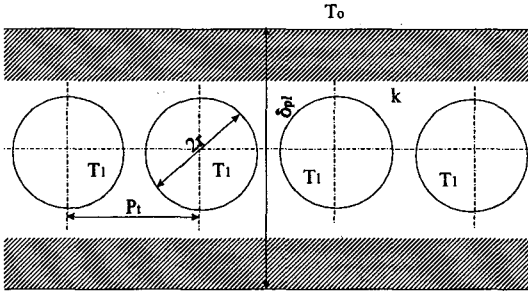


Fig. 4 Conduction shape factor in the evaporator.<sup>(10)</sup>

열원과 히트싱크 사이의 열저항

$$R_{pad} = \left( \frac{L_{pad}}{k_{pad} A_{pad}} \right) \quad (2)$$

히트싱크 증발부 블록과 열사이폰 외벽 사이의 열저항

$$R_{t,b} = \left( \frac{1}{kS} \right) \quad (3)$$

여기서, S는 열전도 형상계수이며, Fig. 4에 보이는 것처럼 일정한 온도의 평행한 평판에 동일한 직경을 갖은 파이프가 삽입되어 있을 경우에 대한 경우이다.<sup>(10)</sup>

$$S = \frac{2\pi l_h}{\ln \left[ \frac{P_t}{\pi r} \times \sinh \left( \frac{\delta_{pl}}{P_t} \right) \right]} \quad (4)$$

증발부의 열사이폰 벽에서의 열저항

$$R_{t,h} = \left( \frac{\ln(D/d)}{2\pi k_t l_h} \right) \quad (5)$$

증발부 비등에서의 열저항

$$R_e = \left( \frac{1}{h_e \pi d l_h} \right) \quad (6)$$

여기서 비등에 의한 열전달계수식은 Forster and Zubar<sup>(11,12)</sup>의 비등 열전달계수식을 사용하였다.

$$h_e = 0.00122 \frac{\Delta T_s^{0.24} \Delta P_s^{0.75} C_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49} k_l^{0.79}}{\sigma^{0.5} h_{LG}^{0.24} \mu_l^{0.29} \rho_g^{0.24}} \quad (7)$$

응축부 응축에 의한 열저항

$$R_c = \left( \frac{1}{h_c \pi d l_c} \right) \quad (8)$$

여기서 응축에 의한 열전달계수는 Nusselt<sup>(9)</sup>의 응축 열전달계수식을 사용하였다.

$$h_c = 0.943 \left[ \frac{k_l^3 \rho_l (\rho_l - \rho_g) g h_{LG}}{\mu_l \Delta T_s l_c} \right]^{1/4} \quad (9)$$

응축부 열사이폰 벽에서의 열저항

$$R_{t,c} = \left( \frac{\ln(D/d)}{2\pi k_t l_c} \right) \quad (10)$$

응축부 핀에서의 열저항

$$R_{conv} = \left( \frac{1}{h_{conv} n_{tot} A_{tot}} \right) \quad (11)$$

### 3.1 나노유체의 물성치

나노유체를 작동유체로 사용한 실험을 모델링하고 시뮬레이션하기 위하여 나노유체의 물성치 값들을 알아야 한다. 나노유체가 모유체와 다르게 차이를 보이는 물성으로는 크게 열전도계수, 점성계수, 밀도, 비열 등이 있으며, 프로그램에서 앞의 물성값들은 예전 연구사례를 바탕으로 경험식을 사용하였으며, 기타 물성치들은 모유체의 물성값을 사용하였다.

열전도계수의 다수의 이론식들이 본 시뮬레이션을 위하여 시도되어 가장 안정적 결과를 보여준 Maxwell<sup>(13)</sup>의 구형 입자가 분산되었을 경우에 대하여 구한 유효 열전도계수식을 사용하였다.

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = 1 + \frac{3(a-1)v}{(a+2) - (a-1)v} \quad (12)$$

여기서, a는 모유체와 금속입자 간의 열전도도

비이며,  $\nu$ 는 나노입자와 모유체 간의 체적비이다.

히트파이프에서 점성계수의 역할은 나노유체의 모세관력 향상에 표면장력과 함께 중요한 역할을 하기에 물성치 판단이 중요할 것이기에 시뮬레이션에서는 Einstein<sup>(10)</sup> 모델 가지고 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu} = 1 + 2.5\nu, \quad 0 < \nu < 0.01 \quad (13)$$

나노유체의 비열과 밀도에 대한 연구사례가 미약하여 Jang<sup>(14)</sup>의 연구 예를 바탕으로 혼합이론을 바탕으로 계산하였다.<sup>(14,15)</sup>

$$C_{p,eff} = C_{p,f}(1 - \nu) + C_{p,nano} \nu \quad (14)$$

$$\rho_{eff} = \rho_f(1 - \nu) + \rho_{nano} \nu \quad (15)$$

나노유체의 물성치는 현재 지속적으로 연구되어지고 있으나 그 사례가 미약하여 물성값들을 구할 수 있는 식들의 검증된 결과와 함께 제시하기는 어려운 면이 있으나 시뮬레이션 코드에서는 가장 근사한 모델을 구성하기 위하여 해당 식들을 사용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Figs. 5~7은 본 연구에서 개발된 냉각장치의 열전달 성능을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 열원과 냉매의 온도차인  $\Delta T_{h-c}$ 가 50℃ 일 경우 열전달 성능은 150 W 이상인 것으로 알 수 있다. 50℃는 전자부품냉각을 위한 냉각장치 제작시 필요로 하는 기본적인 온도차로 본 연구에서 개발된 나노유체 열사이폰을 이용한 냉각장치는 전자부품냉각을 위한 충분한 냉각성능이 있는 것으로 알 수 있으며, 아울러 물을 작동유체로 사용시에도 충분한 열전달 성능을 발휘하는 것으로 알 수 있다. 본 연구개발에서 개발된 나노유체 열사이폰 냉각장치에서 나노유체를 사용시에는 0.1, 0.5% TiO<sub>2</sub>-Water를 나노유체로 사용시 50 W 이하에서는 물을 작동유체로 사용시보다 큰 차이를 보이지 않았으며, 고열량일 경우 물보다 다소 못한 열전달 성능을 보여주었다. 1%의 TiO<sub>2</sub>-Water 나노유체를 작동유체로 사용시는 물일 경우보다 성능이 많이 저하되는 것으로 관

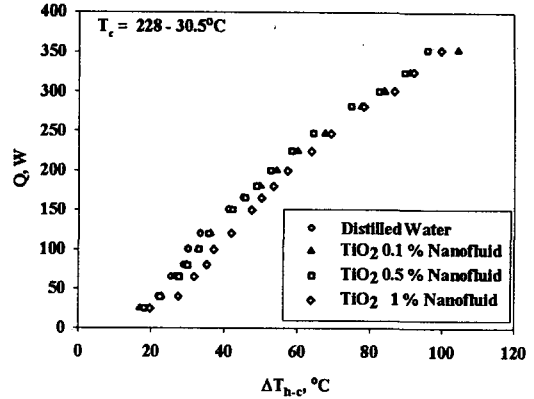


Fig. 5 Heat transfer performance.

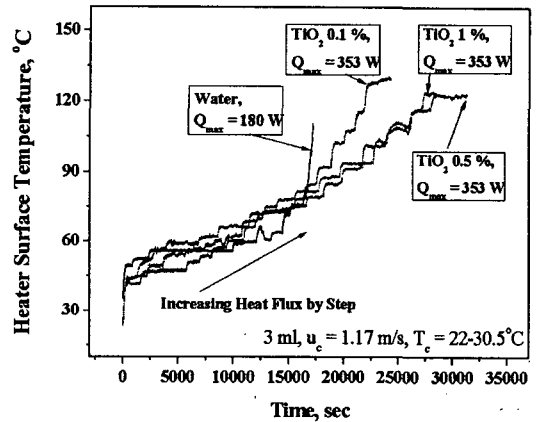


Fig. 6 Heat transfer limitation with transient temperature variation ( $\Theta=0^\circ$ ).

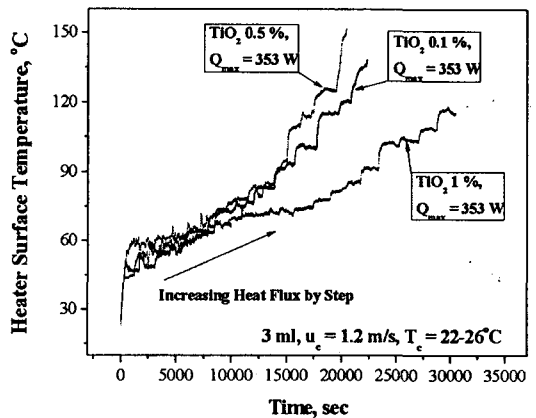


Fig. 7 Heat transfer limitation with transient temperature variation ( $\Theta=60^\circ$ ).

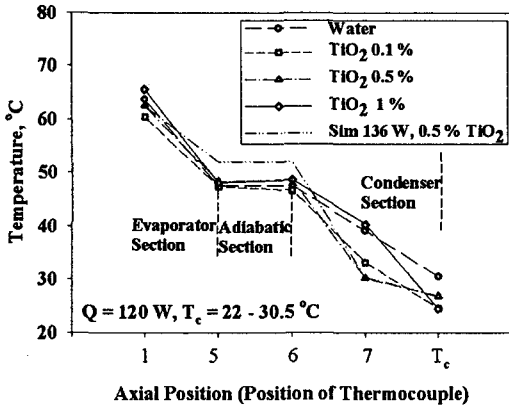


Fig. 8 Temperature profile along the heat pipe.

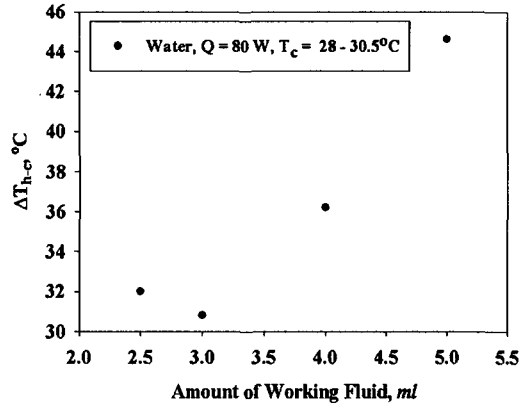


Fig. 9 Effect of working fluid amount.

찰되었다. 그러나 그림 상에서 물을 작동유체로 사용시 열유속을 증가시켜 180 W의 열이 공급되었을 경우 냉각장치의 발열부 표면의 온도는 급격히 상승하여 임계열유속(CHF) 한계에 이르는 것으로 관찰되었다. 그러나 나노유체를 사용시에는 본 연구를 위해 히터가 공급할 수 있었던 최대 공급열량인 353 W에서도 온도의 급상승 없이 지속적으로 안정된 작동상태를 유지하고 있었다. 이는 나노유체를 사용함으로써 임계열유속(CHF)의 상승이 가능함을 보여주고 있다. 이런 경향은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 냉각장치가 60도 경사를 갖을 경우에도 동일한 경향을 보였으며, 나노유체 사용시 최고 1% 이하 농도와 353 W 이상에서는 급격한 온도상승을 보였다. Fig. 8은 냉각장치에 삽입된 네 개의 열사이폰 중 가운데 한 개에서의 온도분포를 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이, 열사이폰 길이방향에 따른 온도분포는 물과 나노유체를 작동유체로 사용시 각각의 특별한 차이는 없었으나, 1%일 경우 다른 농도에 비하여 증발부 온도가 다소 높은 것으로 알 수 있다. 이는 0.1, 0.5%일 경우보다 1%일 경우에 입자의 충돌이 증가하여 작동유체의 상승은 활발하나 모세관력에 의한 유체의 귀환이 늦은 것으로 판단된다. 내부의 작동유체의 충전량을 결정하기 위하여 액체의 양을 변화시키며 물을 이용하여 그 영향을 평가하였다. 실험결과 내부의 작동유체의 양은 3 mL일 경우 최적의 작동성능을 보여주고 있는 것으로 Fig. 9에서 볼 수 있다. 이를 근거로 나노유체를 3 mL를 동일하게 주입하여 실험을 수행하였다. Fig. 10은 내부의 작동유

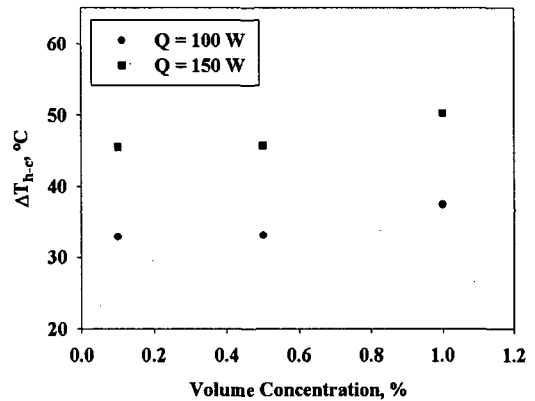


Fig. 10 Effect of TiO<sub>2</sub> concentration.

체를 나노유체(TiO<sub>2</sub>-Water)로 하였을 경우 나노입자의 체적 대비 함유량에 따른 영향을 평가해 본 것이다. 그림에서 나노유체가 농도가 증가하면 열전도도가 증가하기 때문에 당연히 농도의 증가와 선형적으로 열전달 성능도 증가할 것으로 판단하였으나, 실험결과 나노유체의 농도가 어느 시점을 기준으로 열전달 성능은 감소하는 것으로 실험을 통하여 알 수 있었다. 실험결과 0.5%일 경우 열전달 성능은 최적의 결과를 보여주었으며, 농도가 적거나 증가함에 따라 열전달 성능은 오히려 감소하는 것으로 관찰되었다. 이는 Jang and Choi<sup>(8)</sup>의 나노유체에서의 열전달 방법에 대한 모델에서처럼 농도의 증가가 내부의 입자의 활동을 위한 평균 입자(mean free path) 간격의 감소로 입자 간의 충돌과 확산운동의 감소가 영향이 있을 것으로 판단되며, 나노유체의 농도가

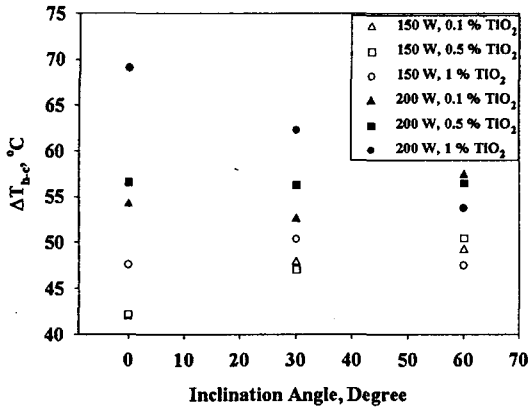


Fig. 11 Effect of heat pipe inclination.

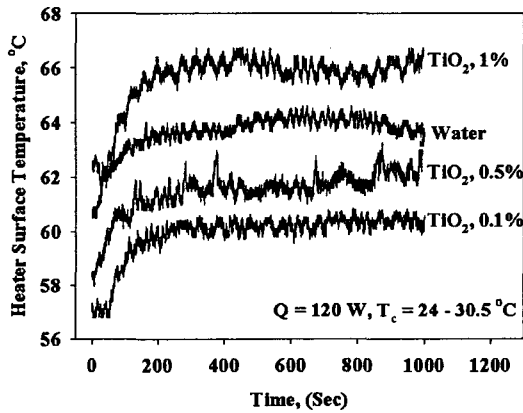


Fig. 12 Effect of concentration on temperature variation.

열전도도 증가와 함께 열전달 성능도 함께 증가하지 않기에 최적의 농도를 선정하여야 함을 보여주고 있다.

Fig. 11은 본 연구에서 개발된 나노유체 열사이폰 냉각장치의 경사에 따른 열전달 성능을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 경사각이 0도일 경우 냉각장치가 수직으로 세워져 있는 경우이다. 열사이폰은 중력의 영향을 받기 때문에 경사각이 증가함에 따라 열전달 성능은 감소하게 되는 것이 일반적인 경향이나, 공급열량이 150 W 일 경우 나노유체를 사용시 0.1, 0.5%일 경우 경사각의 증가와 더불어 열전달 성능은 감소하였다. 그러나 농도가 1%일 경우는 높은 공급열량(200 W)에서 오히려 경사각이 증가함에 따라 열전달 성능은 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이

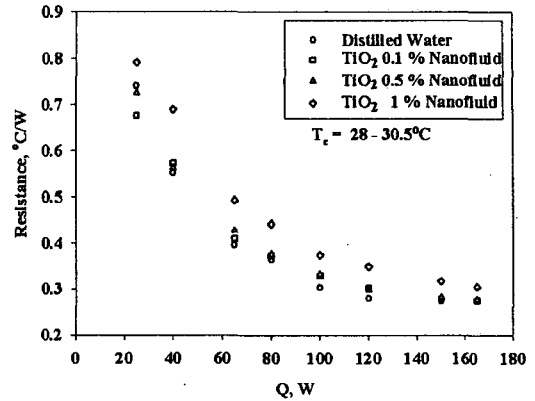


Fig. 13 Thermal resistance on cooling system.

는 앞의 열전달 성능을 설명한 그림에서 볼 수 있듯이 나노유체의 농도가 1%일 경우 오히려 열전달 성능이 감소하는 경향을 보이는 경우와 같은 특이 현상이다. 이는 1% 나노유체를 사용시 농도의 증가와 더불어 열사이폰의 특성상 증발에 의해 상승한 작동유체는 중력에 의해 증발부로 귀환하여야 하나, 나노유체의 농도의 증가는 오히려 증발과 응축의 반복하는 과정을 소화하지 못하는 현상을 보이는 것으로 판단할 수 있다.

본 연구에서 개발된 냉각장치는 발열체를 전자 부품으로 모사한 것이기에 발열부의 온도변화는 전자부품의 작동과 상관관계가 있을 것이다. 그렇기에 발열부 온도관찰이 필요할 것이기에 Fig. 12는 물과 다양한 농도의 나노유체를 사용시 작동상태를 발열부 온도변화로 관찰한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 물을 작동유체로 사용시보다 나노유체를 사용시 온도진동의 진폭이 다소 증가하는 것으로 관찰되었으며, 물을 작동유체로 사용할 경우 0.7°C 정도의 진폭으로 온도진동이 균일하게 진행하고 있는 것으로 보여주고 있으나, 나노유체를 사용시 불규칙한 간격으로 온도상승 고점이 관찰되었다. 0.1%일 경우 진폭이 물과 유사했으며, 이는 0.5%일 경우에 진폭이 2°C 정도로 심했으나 열전달 성능면에서는 더 뛰어난 것으로 앞의 그림에서 확인할 수 있다. 0.1%일 경우 온도진동현상이 물과 유사했으며, 1%일 경우 온도상승과 함께 진폭이 0.4°C 정도 증가하는 것으로 관찰되었다.

Fig. 13은 본 연구에서 개발된 냉각장치의 열전달 성능을 열저항으로 표시한 것이다. 그림에서

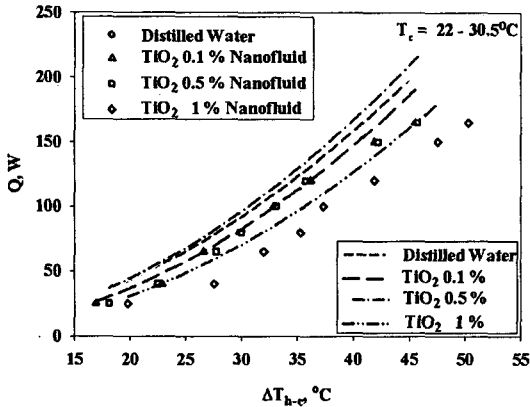


Fig. 14 Comparison between experiment and simulation, effect of  $\Delta T_{h-c}$  on  $Q$ .

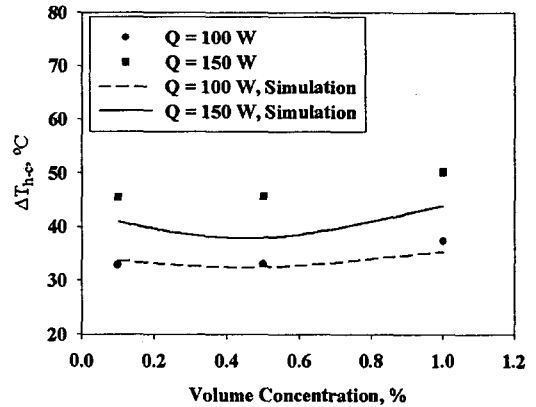


Fig. 15 Comparison between experiment and simulation, effect of volume concentration on  $\Delta T_{h-c}$ .

볼 수 있듯이 본 연구의 목표인 150 W에서 약 0.28°C/W 정도의 열저항을 가지고 있는 것으로 알 수 있으며, 본 열저항은 전체 시스템의 열저항으로 저항값에는 방열부와 냉각장치 사이의 접촉, 핀(Fin)을 통한 방열저항 등을 포함한 값으로 실제 열사이폰만의 열저항은 더 감소할 것이다.

Fig. 14와 Fig. 15는 나노유체 열사이폰을 모델링을 통하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 시뮬레이션 결과를 보면 물일 경우 실험결과와 계산결과가 잘 일치했었지만, 나노유체에 대한 실험결과와의 비교에서는 농도가 1% 이상에서와 고발열량에 대한 시뮬레이션 결과는 많은 이격을 보이는 것으로 알 수 있었다. 이는 앞에서 언급하였듯이 나노유체의 농도가 증가함에 따라 일반적인 열유체유동에서 이론적으로 규명된 거시계의 이론으로 나노유체를 설명한다는 데에 어려움이 있는 것으로 판단되며, 기존의 순수액체를 이용한 계산방법에 단순히 물성치값을 나노유체에 대한 실험식을 가지고 계산하는 것은 무리가 있으리라 생각이 든다. 더욱이 나노유체에 대한 물성치가 1% 이하 농도를 가지고 얻어진 실험식이기 농도가 증가함에 따라 실험값과 오차가 큼을 보인 연구결과<sup>(10)</sup>와는 일맥상통한다고 할 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구는 전자부품 냉각을 위한 열사이폰

(thermosyphon) 히트싱크(heat sink)를 개발하였다. 내부의 작동유체를 나노유체(TiO<sub>2</sub>-Water)로 사용하였으며, 개발된 냉각장치는 150 W 이상의 열전달 성능이 있는 것으로 실험으로 알 수 있었다. 일반적인 물과 같은 유체를 작동유체를 사용 시와 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 나노유체의 농도는 농도가 증가함에 따라 열전달 성능이 선형적으로 증가하는 것은 아니며, 본 연구에서는 0.5% Vol. 농도일 경우에 최적의 작동상태와 성능을 보여주고, 농도의 증가와 함께 성능은 저하되는 것으로 알 수 있었다.

(2) 경사각에 따른 영향은 물일 경우와 마찬가지로 경사각의 증가는 성능의 저하를 가져왔으나, 농도가 높을 경우 경사각의 증가와 성능이 다소 증가하는 것으로 알 수 있었다.

(3) 나노유체를 작동유체로 사용하는 열사이폰을 모델링하기 위해 나노유체의 물성치를 사용한 계산을 수행하였으나, 1% 이상의 고농도와 고발열량에 대한 시뮬레이션값은 많은 오차를 보이는 것으로 알 수 있었다.

(4) 본 연구에서는 기존의 일반적인 순수유체가 아닌 나노 금속입자를 포함하는 나노유체를 작동유체로 사용하는 열사이폰에 대한 실험 및 시뮬레이션을 수행하였으며, 물성치 등의 이론적인 일반식의 부재로 시뮬레이션 결과가 실험결과와는 많은 이격을 보이는 부분도 있었으나 열사이폰의 작동상태를 예측할 수는 있었다.



## 후 기

이 논문은 2005학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Rhi, S. H. and Lee, K. W., 2002, Simulation study on various scale of two-phase loop thermosyphons, SAREK Journal, Vol. 14, No. 5, pp. 388-407.
2. Lee, K. W., Park, K. W., Rhi, S. H. and Yoo, S. Y., 2002, Heat pipe heat sink development for electronics cooling, SAREK Journal, Vol. 14, No. 8, pp. 664-670.
3. Lee, K. W., Park, K. W. and Rhi, S. H., 2002, Study on two-phase loop thermosyphon heat exchanger, SAREK Journal, Vol. 14, No. 9, pp. 717-724.
4. Lee, S. P., 2003, Heat transfer enhancement technology using nanofluid, KSME Journal, Vol. 43, No. 3, pp. 65-70.
5. Das, K., Putra, N. and Roetzel, W., 2003, Pool boiling characteristics of nano-fluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, pp. 851-862.
6. Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, Conceptions for heat transfer correlations of nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 43, pp. 3701-3707.
7. Xuan, Y. and Li, Q., 2000, Heat transfer enhancement of nanofluids, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 21, pp. 58-64.
8. Jang, S. P. and Choi, S. U. S., 2004, Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids, Appl. Phys. Lett., Vol. 84, pp. 4316-4318.
9. Holman, J. P., 1996, Heat Transfer, 8th ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
10. Kutateladze, S. S., 1963, Fundamentals of Heat Transfer, Edward Arnold Ltd., New York.
11. Forster, H. K. and Zuber, N., 1955, Dynamics of vapor bubbles and boiling heat transfer, AIChE J., Vol. 1, p. 531.
12. Hewitt, G. F., Shires, G. L. and Bott, T. R., 1994, Process Heat Transfer, CRC Press, London.
13. Xue, Q. Z., 2003, Model for effective thermal conductivity of nanofluids, Physics Letters A 307, pp. 313-317.
14. Jang, S. P., 2005, Cooling performance of a microchannel heat sink with nanofluids, SAREK J., Vol. 17, No. 9, pp. 849-854.
15. Smith, J. M. and Van Ness, H. C., 1987, Introduction to chemical engineering thermodynamics, McGraw Hill, New York.