

〈 논문 〉

## 나노유체 루프형 열사이폰을 이용한 냉각장치

이석호<sup>†</sup> · 박종찬\* · 임택규\* · 이충구\* · 신동륜\*\* · 박기호\*\*\*  
(2005년 9월 6일 접수, 2006년 2월 15일 심사완료)

### Cooling System with Nanofluidic Loop Thermosyphon

Seok-Ho Rhi, Jong-Chan Park, Taek-Kyu Lim, Chung-Gu Lee, Dong-Ryun Shin and  
Gi-Ho Park

**Key Words:** Cooling System(냉각장치), Nanofluid(나노유체), Thermosyphon(열사이폰)

#### Abstract

The present study shows the experimental and modeling results of the cooling system using nanofluidic loop thermosyphon. the experimental results show that nanofluid is not effective for small scale cooling system. The heat transfer performance is not much improved with the current small scale loop system comparing with the convectional water based loop system. In this study, various effects of nanofluids such as the concentration, the kind of particle, host fluid, and heat capacity and so on were investigated. With nanofluid as the working fluid, the flow instability was improved at a certain concentration.

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구의 배경 및 동기

최근 전자제품의 소형화와 고밀도의 직접화면 칩기술은 전력을 적게 사용하려는 방향으로 연구가 진행되고 있으나 곧 그 한계에 이를 전망이며, 고성능 초소형 반도체 기술은 더불어 많은 열의 발생을 야기 시키고 있으며, 이는 매년 칩 개발 속도와 견주어 더 뛰어난 냉각장치의 개발을 요구하고 있음을 절실히 알 수 있다. 고성능 IT장비, PDA, 휴대용 통신 장비의 개발은 부수적으로 더욱 뛰어나고, 소형의 냉각 장치의 개발을 요구하고 있으며, 단순히 반도체만의 열 패키징이 아닌 시스템 레벨까지도 2단계 3단계의 열 패키징 기술을 요구하고 있으며, 이를 극복할 대안

은 고성능 그리고 소형의 나노유체를 이용한 냉각장치가 그 한 대안이라 여겨진다.<sup>(1~4)</sup>

루프형 열사이폰의 열교환용 열매체 내에 열전도도가 우수한 입자를 주입함으로써 열매체의 열전도도를 증가시킬 수 있다는 이론이 100년 전부터 제시되고 있으며, 이를 실현하기 위하여 많은 연구가 수행되었다. 본 연구에서 작동유체로 이용된 나노유체는 Bulk 물질과 달리 크기에 따라 입자의 물리화학적 성질이 변화되는 나노 금속 입자 중에서 전도성이 우수한 은(silver) 나노 금속 입자를 이용하여 전통적인 열전달 유체인 물(증류수)에 소량 혼합한 나노유체(Silver nanofluids)로써 루프형 열사이폰의 작동유체로 사용하였다. 나노유체는 열전달 면적과 유체의 열용량(heat capacity)을 증가시키고, 유체의 유효전도성을 향상시킨다. 그리고 나노 금속 입자와 유체, 그리고 유동면적사이의 상호작용 및 융합을 강화하고, 나노 금속 입자의 확산으로 유체의 역 온도 구배를 감소시키고, 유체의 혼합 및 난류유동이 강화된다.<sup>(4-7)</sup> 그러나 나노유체에 대한 연구는 아직까

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 충북대학교 공과대학 기계공학부  
E-mail : rhi@chungbuk.ac.kr  
TEL : (043)261-2444 FAX : (043)263-2441

\* 충북대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 회원, 명지대학교 기계공학부

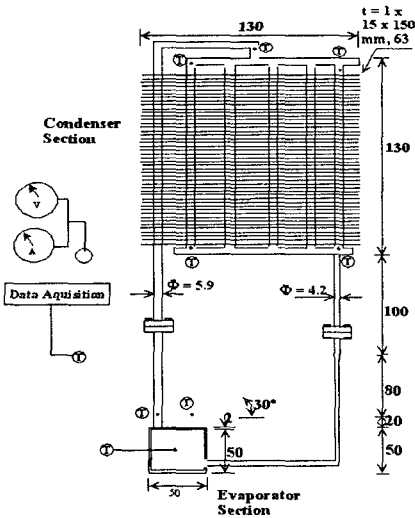
\*\*\*회원, 한국에너지기술연구원 건물에너지연구센터

지 이론적인 실증이 없는 상태로 실험에 의한 검증만이 연구되는 실정으로 나노유체를 사용한 응용품으로서 본 연구에서는 이러한 나노유체를 작동유체로 사용한 2상 유동 루프형 열사이폰을 나노유체의 농도, 나노입자의 크기, 작동유체의 주입량 등 냉각장치의 열전달 특성에 따른 안정성 평가 및 열전달 성능을 비교 평가하여 보았다.

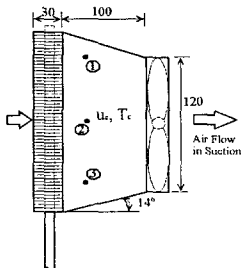
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험장치는 전자부품 중 MCM(Multi-Chip Module) 냉각용으로 개발되었으며, 발열부의 온도가 70℃를 유지하도록 하며 150W이상의 열전달 성능을 갖도록 설계되었으며, 크게 증발부와 응축부 그리고 작동유체가 이동할 수 있는 수송부로 이루어졌다.



(a) Experimental test setup



(b) Condenser section schematic side view

Fig. 1 Experimental setup

열원으로는 120W급 캐트리지 히터 3개를 50mm×50mm×10mm의 알루미늄 블록에 삽입하여 제작되었다. 그리고 증발부와 접촉면적을 최대화하기 위하여 실리콘 Thermal Pad(k=2.7W/m·K)가 열원과 증발부 사이에 삽입되었다.

증발부는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 구리를 재료로 하여 50mm×50mm×15mm로 사각형 상자의 형태를 하고 있으며, 유효 열전달면적은 50mm×50mm이다. 증발부는 열전달 면적의 향상을 위하여 내부표면에 2mm 엔드밀로 가공하여, 2mm×2mm×1mm의 원형태가 가공되도록 하였다. 증발부는 응축부에서 증발부로 돌아오는 파이프가 증발부에 3.4mm 삽입되도록 설계하였다.

증발부는 상부에 두 개의 구멍을 만들어 황동관으로 된 수송부와 연결 되도록 하였다.

응축부는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 직사각형 원(130mm×130mm×15mm)이 황동관 외벽에 접촉된 형태로 1mm간격으로 63개의 핀을 접촉하였다. 응축부는 5.9mm 외경인 6개의 관이 응축부의 입구와 출구의 헤더(header)에 연결된 형태이다. 증발부를 기준으로 출구쪽으로 연결된 수송부는 외경 5.9mm의 황동관을 연결하였고, 증발부 입구쪽에는 외경 4.2mm의 황동관을 연결하였다. 증발부 입출구쪽에는 루프내의 유동불안정을 해소하기 위한 목적으로 서로 다른 직경의 관을 연결하도록 했다.

Fig. 1(b)에 보이는 것처럼 응축부에는 120mm×120mm 팬이 설치 되었으며, 루프형 열사이폰의 응축부 뒷면에 아크릴판으로 연결되었으며, 유입공기의 유속과 온도는 중심과 벽근처에서 세 점을 측정하여 평균값을 사용하였다.

냉각시스템의 증발부와 전체 루프를 통하여 8개의 0.5mm 직경의 K-Type 열전대가 부착되어 온도를 측정하도록 하였다. 온도는 Yokogawa M-100 데이터 수집장치에 의하여 수집이 되었다.

Table 1 Nanofluids used in experiments

Metal Powder	Base Fluid	Particle Size(nm)	Volume Concentration
Silver	Water	20-100nm	Water : 0.1, 0.5, 1%
	Ethanol	3nm	Ethanol : 0.5%
TiO <sub>2</sub>	Water	20-200nm	0.2%, 0.5%

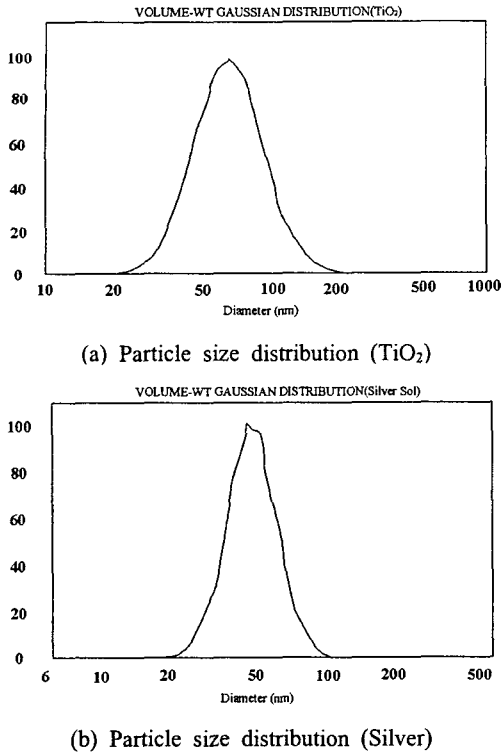


Fig. 2 Particle size distribution of Nanofluid

2.2 나노유체

나노 금속입자란 Bulk 물질과 달리 크기에 따라 입자의 물리화학적 성질이 변화되는 입자를 말한다. 일례로 금 입자의 경우 크기가 μm order 인 경우 용점이 1,063℃이나 입자의 크기가 5nm (5×10<sup>-9</sup>m)이면 용점이 300℃로 감소하게 된다. 이는 입자의 표면 대 질량의 비율이 증가되어 단위 질량 당 표면적이 증가하며 입자의 표면 에너지 증가로 물리화학적 성질이 변화되기 때문이다.<sup>(4)</sup>

본 실험에서 사용된 나노유체는 Table 1에서 볼 수 있듯이 은(Silver)과 TiO<sub>2</sub>입자를 모유체에 분산시켜 만들어진 유체로 입자종류, 크기, 모유체에 따라 3종류의 유체를 사용하였으며, 아울러 농도에 따라 제작되어 실험에 이용하였다. 사용된 나노유체의 입자 크기에 따른 분포도를 입자 분석기를 통하여 분석한 결과인 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 입자는 평균 50nm의 직경을 갖는 것으로 알 수 있으며, 본 연구를 위한 나노유체는 기본적으로 100nm 이하의 나노입자를 분산시키는 기술이 중요하기 때문에 제조에 어려움이

있었으며, 본 연구를 위한 최소의 입자 크기를 같도록 특별의뢰 되었다.

3. 시뮬레이션

2상 유동 루프형 열사이폰에서, 특히 증발부에 유동 비등이 관련됐을 경우를 위해 열저항 네트워크(thermal resistance network)를 기반으로 하는 방법으로 시뮬레이션 방법이 고려되었다.

시뮬레이션 방법은 참고문헌<sup>(8)</sup>에서 시뮬레이션 수행과정을 찾아볼 수 있으며, 먼저 시뮬레이션을 위해서는 다음의 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 만족시켜야 한다.

질량 보존식 :

$$\frac{dm}{dy} = 0 \tag{1}$$

운동량 보존식 :

$$-\frac{dp}{dy} = \left(\frac{dp}{dy}\right)_f + G^2 \frac{d}{dy} \left\{ \frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} + \frac{x^2}{\rho_g \alpha} \right\} + g \sin \theta [ \alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_l ] + \left(\frac{dp}{dy}\right)_{mis} \tag{2}$$

운동량방정식의 전체 압력강하는 마찰, 가속도, 중력, 그리고 기타 다른 영향에 의한 압력강하의 합을 의미한다.

에너지 보존식 :

$$\frac{dH}{dy} = \frac{q\pi D}{GA} \tag{3}$$

시뮬레이션은 1차원적으로 해석되었으며, Fig. 3에 보이는 것처럼 시뮬레이션의 논리적인 수행 과정은 전체적으로 에너지, 질량, 운동량의 평형을 만족시켜야 하며, 루프 전체를 통하여 계산된 압력강하의 값의 합이 영(∑p=0)이 되어야 시뮬레이션이 수렴될 수 있도록 구성되어 있다. 시뮬레이션 과정은 먼저 증발부 유체 입력부에서의 초기 압력, 온도, 질량유량을 계산하게 된다. 그리고 열전달량과 증발부로부터 배출되는 유체의 출구상태를 계산하게 된다. 다음으로는 증발부와 응축부 사이의 압력강하와 열손실 등을 계산하게 된다. 연속적으로 응축부로 유입 그리고 배출되는 유체의 상태를 계산하게 되고, 열전달 및 압

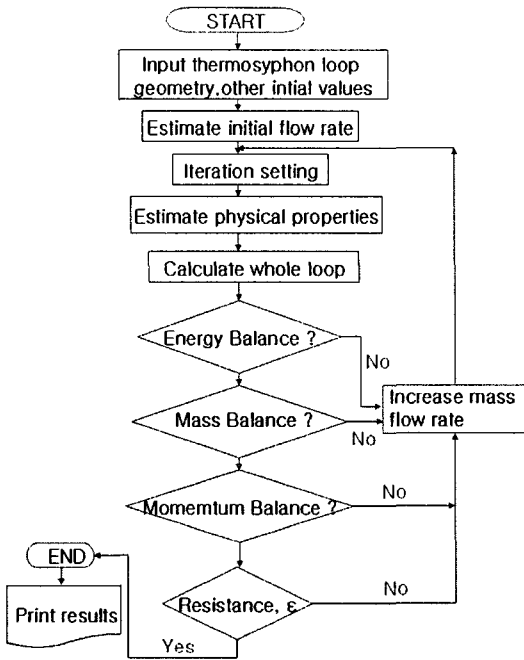


Fig. 3 Simulation flow chart

력강하량을 계산하게 된다. 응축부를 통과해서 다시 증발부로 돌아오는 유체의 상태와 압력강하 등을 계산하게 되고, 최종적으로 증발부로 회귀한 유체는 루프를 한번 순환하게 되며, 압력강하의 합이 영이 될 때까지 이전 질량유량의 값을 변화시키며 계산이 계속 이루어지며, 최종적으로 수렴이 이루어지게 되면 시뮬레이션의 한 과정은 완성되게 된다.<sup>(6,8-10)</sup>

본 연구에서의 시뮬레이션 방법들은 기본적으로 열저항 네트워크에 의해 수행되었다. 루프형 열사이폰 전체 시스템 열저항은 다음 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$R_T = \frac{1}{UA} = \sum R_i \quad (4)$$

그리고 전체 열전달량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{\Delta t_{h-c}}{R_T} \quad (5)$$

시뮬레이션을 위한 중요 열저항들은 증발 열저항 ( $R_{ev}$ ), 응축 열저항 ( $R_{cond}$ ), 그리고 응축부 외벽의 핀(fin)부의 강제대류 열저항 ( $R_{conv}$ )이다.

시뮬레이션을 위해서는 증발, 응축, 그리고 강제대류 열저항을 규명하기 위해 다양한 열전달계수식들이 필요하게 되며, 이들 실험식들은 예전 연구자료로부터 수집되었다.<sup>(5,13-24)</sup> 본 시뮬레이션에 의한 분석은 Sekeguchi의 2상유동 열전달계수식을 사용하였을때의 실험값과 계산값들이 근사한 것으로 분석되었다.

Sekeguchi<sup>(8)</sup> :

$$h_{tp} = 2.5 h_i \left( \frac{1}{X_u} \right)^{2/3} \quad (6)$$

여기서  $X_u$ 는 Lockert-Martinelli수이다. 응축 열전달식을 위해서는 Nusselt<sup>(9)</sup>의 식 (7)을 그리고 응축부 공기에 의한 강제대류식은 Knudson<sup>(9)</sup>의 식 (8)를 사용했다.

$$h_{cond} = 0.943 \left[ \frac{k_l^3 \rho_l (\rho_l - \rho_g) g h_{fg}}{\mu_l \Delta t_{sat} l_c} \right]^{0.25} \quad (7)$$

$$\frac{h_{conv} d}{k_f} = C \left( \frac{u_{\infty} d}{\nu_f} \right)^n Pr^{1/3} \quad (8)$$

아울러 계산을 위한 물성치중 나노유체에 따른 열전도계수값은 Maxwell<sup>(10)</sup>의 구형 나노입자를 갖는 나노유체를 위한 열전도계수식을 사용하였다.

Maxwell :

$$\frac{k_{eff}}{k_m} = 1 + \frac{3(\alpha-1)v}{(\alpha+2) - (\alpha-1)v} \quad (9)$$

#### 4. 결과 및 고찰

실험은 각 유체마다 100W, 150W, 200W, 322W 이렇게 4가지로 구분하였고, Table 1에서 볼 수 있듯이 한 유체에 대해 몇 가지 농도로 실험을 수행하였다.

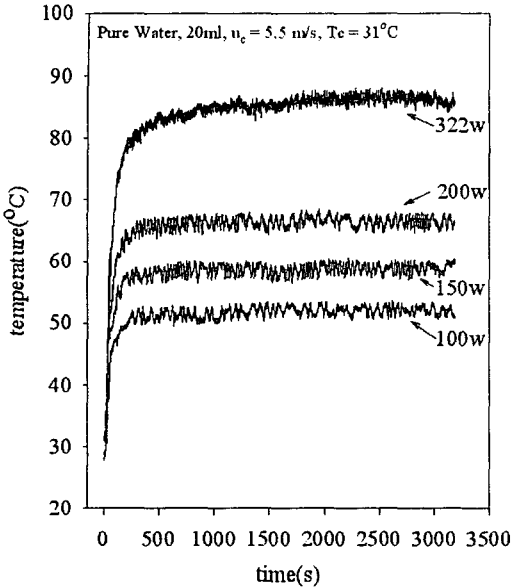


Fig. 4 Heater temperature variation, distilled water

Fig. 4에서 8가지의 그림들은 나노유체와 물을 작동유체들로 사용 시의 본 연구에서 개발된 냉각장치의 열전달 성능을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 모든 작동유체를 사용하여 거의 동등한 200W 이상의 열전달 성능을 발휘하는 것을 볼 수 있다. 본 연구개발에서 목표로 설정한 70°C 히터온도에서 150W 이상의 열전달 성능을 발휘하는 것으로 알 수 있다. 작동 유체로 물, 나노유체를 사용하였으며, 나노유체를 사용 시 히터의 온도는 큰 편차를 보여주지는 않았지만, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 Fig. 4의 물을 사용 시의 실험 결과와 비교 시 0.1%의 은-물 나노유체를 사용 시 온도진동은 동일 공급 열량을 기준으로 비교 시 현저히 감소하는 것으로 관찰 되었다. 그러나 Fig. 6과 Fig. 7을 보건데 농도의 증가와 함께 온도진동이 함께 감소하는 것은 아닌 것으로 관찰되었으며, 실험에서 0.1%일 경우 온도진동이 감소하다가 0.5%일 경우는 더욱 심해지고 1%일 경우는 다시 감소하는 불규칙한 경향을 보였다. Fig. 9과 10은 나노유체의 농도 및 종류에 따른 영향을 관찰한 것이다.

그림에서 볼 수 있듯이 은-물 나노유체의 경우

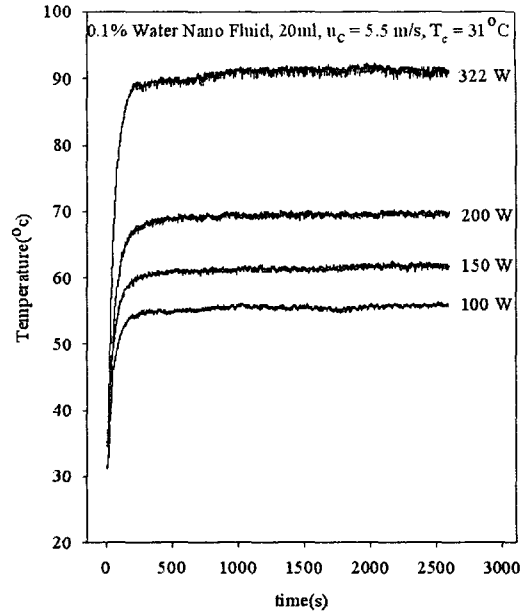


Fig. 5 Heater temperature variation (Silver-water 0.1%)

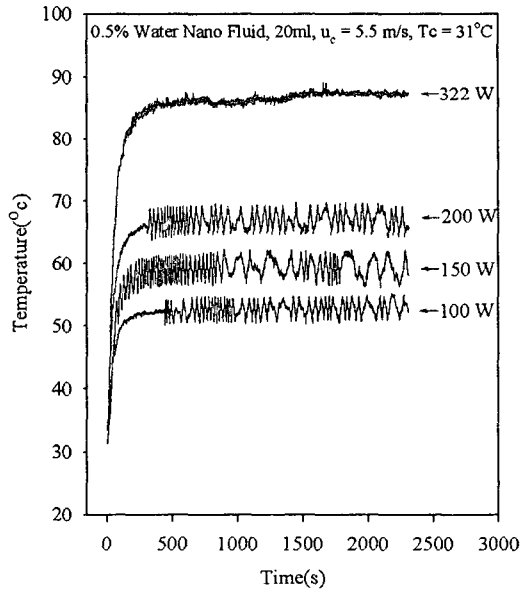


Fig. 6 Heater temperature variation (Silver-water 0.5%)

농도가 증가함에 따라 열전달 성능은 증가하는 것으로 관찰 되었으나, 0.5% 은-물 나노유체의 경우 열전달 성능은 증가하나, 오히려 온도진동이

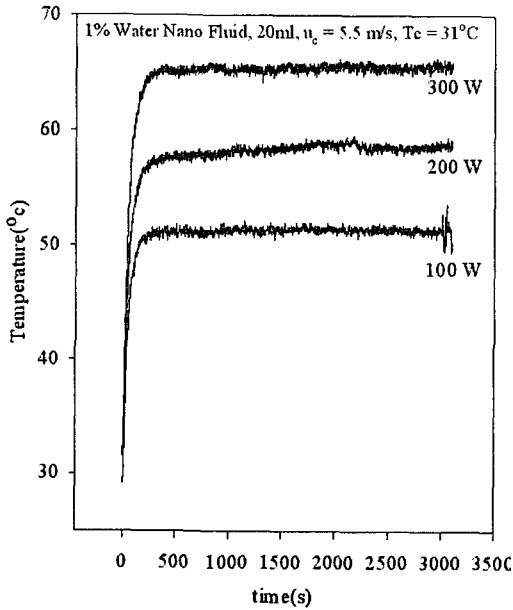


Fig. 7 Heater temperature variation (Silver-water 1%)

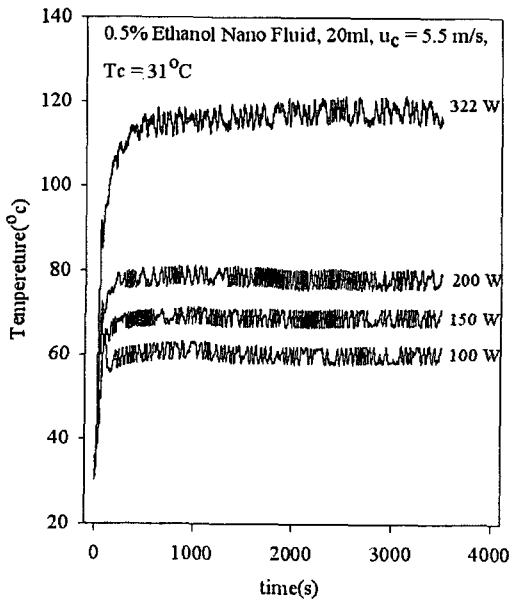


Fig. 8 Heater temperature variation (Silver-ethanol 0.5%)

증가하는 것으로 관찰되었다. 농도를 증가시켜 1%일 경우 열전달 성능은 다시 증가하고, 온도 진동이 감소하는 것으로 관찰 되었다. 아울러 은-에탄올 나노유체는 열전달 성능이 크게 감소하는

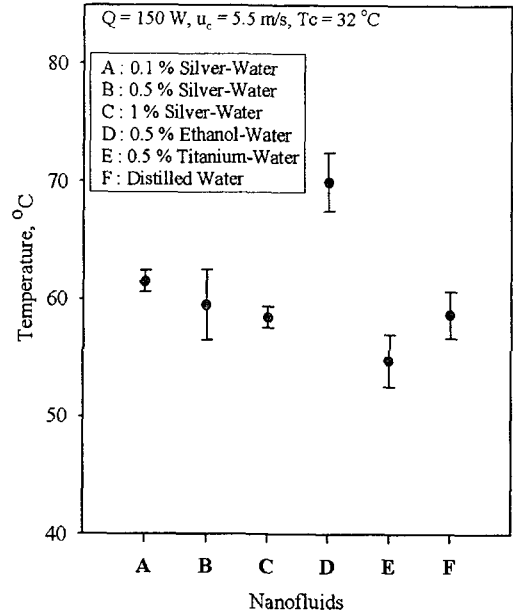


Fig. 9 Effect of NanoFluids,  $Q = 150$  W

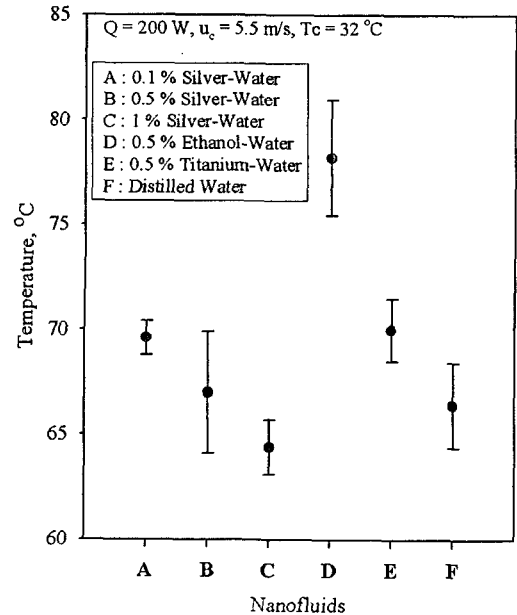


Fig. 10 Effect of NanoFluids,  $Q = 200$  W

것으로 볼 수 있으며, 이는 나노유체가 열전달 성능 및 작동에 영향을 미치는 것은 알 수 있으나, 아직 이론적, 실험적 근거를 마련하기 위해서는 지속적인 연구가 필요할 것이다.  $\text{TiO}_2$ -물의 나

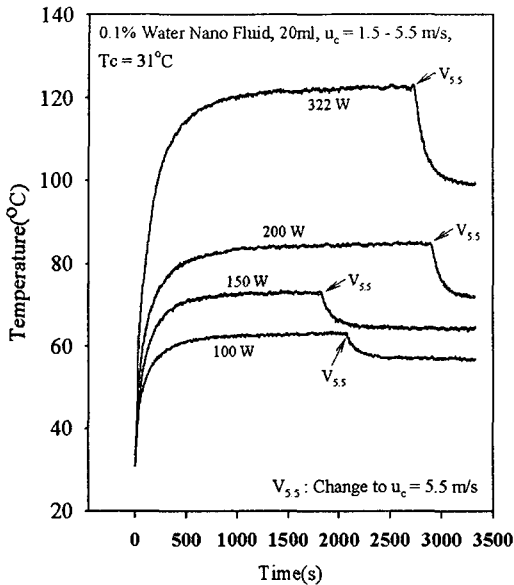


Fig. 11 Effect of cooling air velocity on heater temperature

노유체를 작동유체로 사용 시 150W일 경우 온도 진동은 증가하나, 열전달 성능은 오히려 증가하였으며 200W로 공급열량이 증가 시 오히려 히터의 온도 증가와 함께 열전달 성능이 떨어지는 것으로 관찰되었다. Fig. 9와 10을 통하여 공급열량이 증가했을 경우 은-물 나노유체의 경우 동일한 경향으로 농도증가와 함께 열전달 성능은 증가하는 것으로 관찰되었으나, 0.5% 농도일 경우에는 온도진동이 더욱 증가하는 불안정성을 보여주었다. 에탄올을 사용하였을 때는 온도진동이 크게 나타나며 온도도 200W에서 80°C로 가장 높게 측정되어 있었다. 이런 점으로 보아 나노입자와 유체의 조합이 열전달 성능에 상당히 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 본 냉각 시스템이 공랭식 장치이므로 응축부 유입공기의 유속에 따른 열전달 성능을 평가한 것이다. 1.5m/s로 작동 시 150W의 공급열량에서 설계목표인 70°C 이하의 히터온도를 유지하는 것으로 관찰 할 수 있으며, 5.5m/s로 유속을 증가시킬 경우 히터의 온도는 10°C 정도 급강하를 하는 것으로 알 수 있다. 이는 루프형 열사이폰이 응축부와 증발부의 압력차에 따라 작동

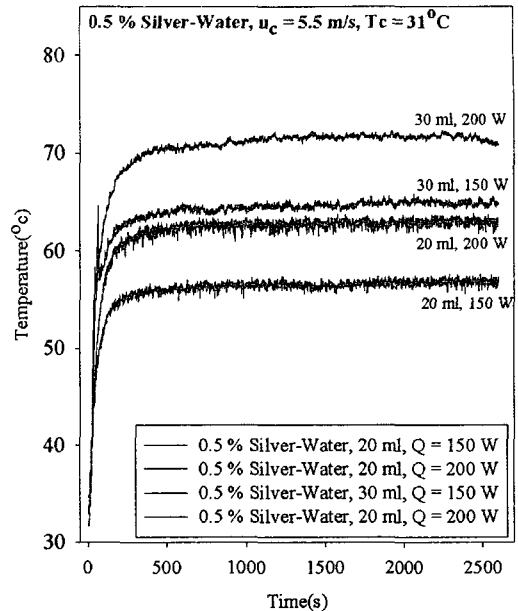


Fig. 12 Effect of amount of working fluid on heater temperature

하기 때문에 응축부의 유속의 증가는 압력강하를 유발하고 증발부와 응축부 사이의 압력차를 증가시켜 내부의 유속을 증가시켜 열전달을 원활하게 만들기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12는 본 연구 개발에 사용된 루프형 열사이폰 냉각장치의 작동유체의 용량에 따른 열전달 성능을 평가한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 150 W와 200 W의 두 경우에 대하여 0.5%의 은-물 나노유체를 작동유체로 사용 시 용량의 변화에 따라 열전달 성능이 확연히 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 용량이 20ml(루프 전체 체적의 28%)에서 30ml(루프 전체 체적의 42%)로 증가 시 각각의 공급열량에 대하여 약 8°C 정도의 히터 온도 상승을 유발하고 있는 것으로 알 수 있다. 이는 루프형 열사이폰의 설계 시 작동유체의 용량의 평가가 성능평가에 중요한 인자가 됨을 알 수 있으며, 최적의 용량을 각각의 작동 유체에 대하여 평가를 수행하여야 함을 알 수 있다.

시뮬레이션 결과는 실험결과와 비교되었다. 시뮬레이션 결과는 실험결과에 의해 검증되었을 경우에만 그 유용성이 입증되었다. 작동유체를 나노유체로 사용 시 루프형 열사이폰 냉각장치의

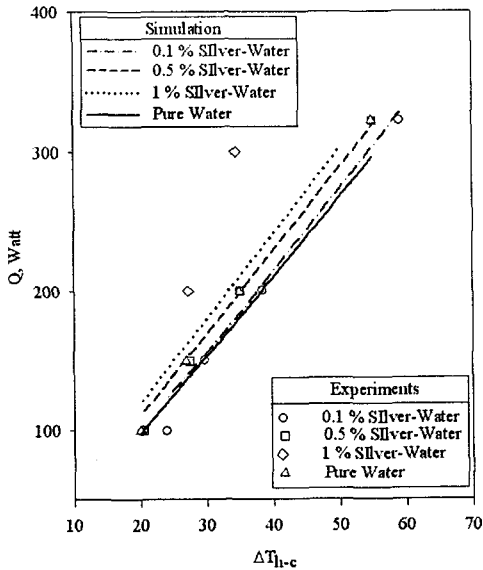


Fig. 13 Comparison between experiment and simulation

실험결과와 시뮬레이션 결과 사이의 비교가 만들어졌으며, Fig. 13에 보이는 것처럼 Maxwell의 유효열전도계수식을 이용하여 루프형 열사이폰을 시뮬레이션 했을 경우 실험결과는 나노유체의 농도가 낮을 경우 근사하게 일치하는 것으로 알 수 있으나 농도가 1%로 높아졌을 경우 시뮬레이션 결과는 실험 결과와 많은 오차가 생기는 것으로 관찰 알 수 있었다. 이는 Maxwell식이 고농도로 갈수록 열전도 계산값의 오차가 크게 발생하는 것으로 판단되며,<sup>(7)</sup> 더욱이 시뮬레이션결과는 농도의 증가와 공급열량의 증가와 더불어 오차가 증가하는 것으로 알 수 있었으며, 이는 실험 결과에서 볼 수 있듯이 공급열량의 증가는 내부 나노유체의 유동형태의 커다란 혼란의 증가와 더불어 예측이 힘든 현상이 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 Fluent사에서 만들어진 Icepak이라는 프로그램을 이용하여 본 실험에서 사용된 열사이폰 냉각장치를 모델링하여 얻어진 해석결과로 실험에서 얻어진 결과와 완벽하게 일치하지는 않지만 200W급의 실험결과와 유사하게 해석결과가 나타났으며 본 연구 개발된 실험장치를 냉각장치로 충분히 이용 가능한 것으로 예측할 수 있었다.

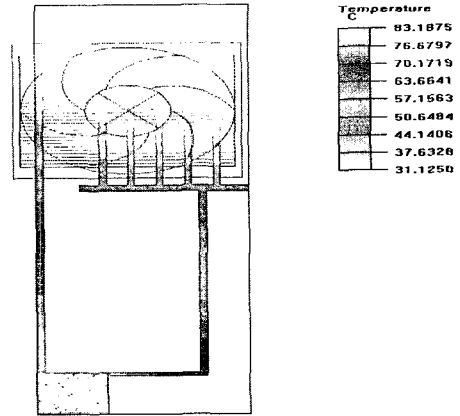


Fig. 14 CFD modeling of current setup

### 5. 결론

이러 나노유체가 증류수보다 더 큰 열전달계수를 가지고 있다는 것이 예전의 실험을 통해 입증된바 있다. 이번 연구의 목표는 나노유체의 높은 열전달계수를 이용하여 루프형 열사이폰 냉각장치의 냉각효율을 높이는 것이다. 이번 실험을 통해 기존의 루프형 열사이폰 냉각장치를 구성하는 작동유체를 물이 아닌 나노입자가 함유된 나노유체를 사용함으로써 증가된 효율을 기대할 수 있다는 결론을 얻었다. 하지만 증가된 열전달율과 함께 온도진동이 발생하기도 하였으며 은-물 나노유체를 사용 시는 열전달 성능의 증가를 가져왔으나 다른 나노유체를 사용 시는 오히려 온도진동의 증가와 열전달 성능의 하락을 관찰할 수 있었다. 아울러 작동유체의 사용후 응집현상을 관찰할 수 있었으며, 이는 나노유체를 사용시 지속적인 해결 문제이기도 할 것이다. 또한 나노유체를 작동유체로 사용 시 나노입자 및 모유체의 종류, 입자 크기 등 다양한 변수 요인을 고려해야 할 것을 알 수 있으며, 나노유체를 이용한 응용 연구 사례가 없는 현실에서 다양한 연구의 필요성이 강조된다.

### 후 기

이 논문은 2004학년도 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. H., 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. H. 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. H., 2003, "Heat Transfer Enhancement Technology Using Nanofluid," *KSME Journal*, Vol. 43, No. 3, pp. 65~70.
- (5) Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43 pp. 3701~3707.
- (6) Xuan, Y. and Li, Q., 2000, "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 21, pp. 58~64.
- (7) Xue, Q. Z., 2003, "Model for Effective Thermal Conductivity of Nanofluids," *Physics Letters A* 307, pp. 313~317.
- (8) Sekeguchi, K., Han, Z. X., Kaji, M., Imasaka, T. and Sumiyoshi, Y., 1992, "An Analogy Between Heat Transfer and Pressure Drop in Forced Convective Boiling Flow," *Dynamics of Two-Phase Flows*, CRC Press Inc., pp. 669~688.
- (9) Holman, J. P., 1996, *Heat Transfer*, 8th ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- (10) Das, S. 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.