

나노유체를 이용한 2상유동 2성분 루프형 열사이폰

이 석 호[†], 박 종 찬, 차 경 일, 임 택 규, 이 충 구, 신 동 룬*, 박 기 호**
충북대학교 공과대학 기계공학부, *명지대학교 기계공학부, **한국에너지 기술연구원 건물에너지연구센터

Two-Phase Two-Component Loop Thermosyphon with Nanofluid

Seok-Ho Rhi[†], Jong-Chan Park, Kyeong-Il Cha, Taek-Kyu Lim,
Chung-Gu Lee, Dong-Ryun Shin*, Gi-Ho Park**

School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Chungbuk 316-736, Korea

**School of Mechanical Engineering, Mongji University, Yongin 120-728, Korea*

***Korea Institute of Energy Research, Building Energy Research Center, Daejeon 305-343, Korea*

(Received September 7, 2005; revision received February 24, 2006)

ABSTRACT: Reported are the heat transfer characteristics of a two-phase loop thermosyphon (TLT) with nanofluids consisted of nano-size silver particles and distilled water as the working fluid. The nanofluids used in the present study are dispersed solutions with various amount of silver nanoparticle in distilled water. It is seen from the present study that the heat transfer performance of the test TLT with nanofluids increased as much as about 2 times higher than that of a TLT with pure water as the working fluid based on same heat flux. The study also showed that there was no deterioration of the TLT performance with time, up to a period of 8 days of continuous operation which implies that there was no coagulation of nanoparticles within the working nanofluid during the operation of the test TLT.

Key words: Loop thermosyphon(루프형 열사이폰), Nanofluids(나노유체), Silver particle(은입자), Working fluids(작동유체), Heat transfer(열전달)

기 호 설 명

A : 열전달면적 [m^2]
 F : friction parameter
 F_r : Froude number
 G : 질량유속 [kg/m^2s]
 k_{eff} : 유효 열전도도
 k_m : 모유체의 열전도도
 L : 상당길이(equivalent length)

ΔP : 압력강하
 Q : 열전달량 [W]
 R : 열저항 [K/W]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]
 U : 총 열전달계수 [W/m^2C]
 v : 나노입자와 모유체 간의 체적비
We : Weber number
 x : 건도

그리스 문자

[†] Corresponding author
Tel.: +82-43-261-2444; fax: +82-43-263-2441
E-mail address: rhi@chungbuk.ac.kr

α : 보이드율
 β : 열전도도비 ($k_{fluid}/k_{particle}$)
 ρ : 밀도

하첨자

- a* : acceleration
- b* : bends
- cold* : 응축부 영역
- con* : contraction
- ex* : expansion
- f* : friction
- hot* : 증발부 영역
- h-c* : hot-cold
- l* : liquid
- T* : total
- v* : vapor

1. 서 론

열매체의 전도도 증가에 따른 열교환기 효율 향상은 열매체를 구동하고 있는 펌프의 소요동력을 큰 폭으로 줄일 수 있다. 예를 들면, 기존 대비 열전달계수를 2배 증가시키려면 펌프의 소요동력을 10배 증가시켜야 한다. 이는 동일한 펌프의 소요동력을 고려하면 열교환기의 크기를 소형화할 수 있으며 이를 자동차와 같은 수송수단에 사용할 경우 차체의 무게 감소에 의한 연비의 절감을 가져올 수 있다. 열교환용 열매체 내에 열전도도가 우수한 입자를 주입함으로써 열매체의 열전도도를 증가시킬 수 있다는 이론이 100년 전부터 제시되고 있으며, 이를 실현하기 위하여 많은 연구가 수행되었다.⁽¹⁻⁴⁾ 주요 연구로 주입 입자를 수 mm 혹은 수 μm 크기의 금속입자를 첨가하는 방법을 사용하였으나, 이는 입자의 침전, 관내의 압력강하 증가, 막힘 현상, 큰 입자의 운동량에 의한 장치의 마모 등 많은 문제점을 야기시켜 상용화에 실패하였다. 이러한 작동상의 문제점을 해결하며 열전도도를 증가시킬 수 있는 새로운 방법이 필요하다.⁽¹⁻⁴⁾ 본 연구에서 작동유체로 이용된 나노유체는 크기에 따라 입자의 물리화학적 성질이 변화되는 나노 금속입자 중에서 전도성이 우수한 은(silver) 나노 금속입자를 이용하여 전통적인 열전달유체인 물(증류수)에 소량 혼합한 나노유체(silver nanofluids)로써 루프형 열사이폰의 작동유체로 사용하였다. 나노유체는 열전달면적과 유체의 열용량(heat capacity)를 증가시키고, 유체의 유효열전도도를 향상시킨다. 그리고 나노

금속입자와 유체, 그리고 유동면적 사이의 상호작용 및 융합을 강화하고, 나노 금속입자의 확산으로 유체의 역 온도구배를 감소시키고, 유체의 혼합 및 난류유동이 강화된다. 이러한 나노유체는 상기의 문제점을 해결할 수 있는 동시에 입자 표면에 많은 전자의 존재는 열전달효율을 향상시키는 열전달 측면의 장점을 가지고 있어 현재 열전달을 향상시키는 대표적 기술로 연구가 되고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나 나노유체에 대한 연구는 아직까지 이론적인 실증이 없는 상태로 실험에 의한 검증만이 연구되는 실정이기에 나노유체를 사용한 응용품으로서 본 연구에서는 이러한 나노유체를 작동유체로 사용한 2상유동 루프형 열사이폰을 나노유체의 농도, 나노입자의 크기, 작동유체의 주입량과 응축된 작동유체를 다시 증발부로 수송시키는 수송관의 크기에 따른 열전달 특성에 따른 안정성 평가 및 열전달 성능을 비교 평가하여 보았으며, 이론적인 모델링을 시도하여 보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 열사이폰 실험장치

본 연구수행에 사용한 루프형 열사이폰은 두 개의 수송라인으로 연결되어 있다. 증발부의 한쪽 수송관은 증발부에서 발생된 증기를 응축부로 이송시키는 관이고, 다른 관은 응축부에서 응축된

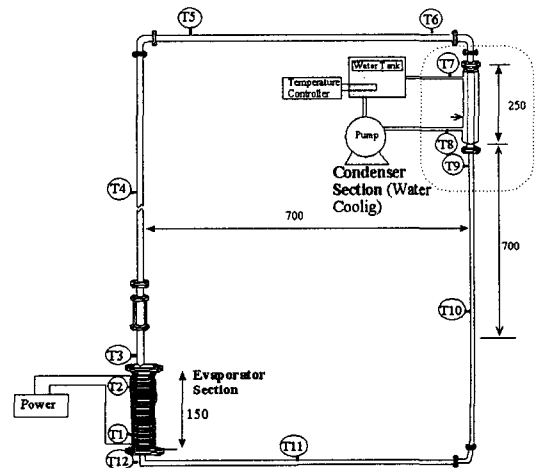


Fig. 1 Schematic diagram of test two-phase loop thermosyphon.

Table 1 Nanofluids used in experiments

Metal powder	Base fluid	Particle size (nm)	Volume concentration (%)
Silver	Water	20~100 nm	Water, 0.05, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 2

액체를 증발부로 다시 귀환시키는 관이다. 루프형 열사이폰의 내부는 진공상태를 유지하여야 하므로 진공펌프로 실험장비의 높은 진공을 유지하였고, 진공게이지를 이용하여 진공도(10^{-3} torr 이하)를 측정할 수 있었다. 또 기밀성이 좋은 Swageloc 진공밸브를 이용 작동유체의 교환을 쉽게 했고, 응축부의 연결관 직경을 쉽게 바꿀 수 있게 설계되었다. 그리고 실험장비의 온도변화를 알기 위해서 접촉식 온도계(K-Type Thermocouple)를 12개 지점에 접촉시켜 사용했다. 온도는 데이터 수집장치(Yokogawa M-100)에 의하여 수집이 되었다. Fig. 1은 실험을 위해 구성된 열사이폰 실험장치를 보여준다.

증발부는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 구리를 재료로 하여 내경이 34 mm이며 전체 길이는 150 mm로 가공하였으며 작동유체 교환이 가능하도록 실험장비에서 쉽게 분리할 수 있게 설계했다.

열원으로는 220 V, 3 A에 최고 1,000 W까지 열을 낼 수 있는 밴드히터를 사용하였고 증발부와 연결관을 높게 하기 위해 밴드를 사용하여 접촉압력을 증가시켜 접촉효율을 증가시켰다.

응축부는 외경 40 mm에 길이 250 mm의 구리관으로 가공했으며, 항온기에서 10°C 로 유지시키는 물을 응축구간으로 순환시키는 형태이다.

또 본 연구에 작동유체와 농도에 따른 실험을

수행하기 위해 Table 1에 제시하였듯이 물과 은나노유체를 선택하였고, 은나노유체는 농도를 0.05~2%까지 준비하여 동일 조건에서 실험하였다.

2.1.1 나노유체

나노 금속입자란 Bulk 물질과 달리 크기에 따라 입자의 물리화학적 성질이 변화되는 입자를 말한다. 일례로 금입자의 경우 크기가 μm 크기인 경우 용점이 $1,063^{\circ}\text{C}$ 이나 입자의 크기가 5 nm ($5 \times 10^{-9}\text{ m}$)이면 용점이 300°C 로 감소하게 된다. 이는 입자의 표면 대 질량의 비율이 증가되어 단위 질량당 표면적이 증가하며 입자의 표면 에너지 증가로 물리화학적 성질이 변화되기 때문이다.⁽⁴⁻⁸⁾

본 실험에서 사용된 나노유체는 Table 1에서 볼 수 있듯이 은입자를 모유체에 분산시켜 만들어진 유체로 농도에 따라 제작되어 실험에 이용하였다. 사용된 나노유체의 입자크기에 따른 분포도를 입자분석기를 통하여 분석한 결과인 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 입자는 최소 20 nm에서 100 nm까지 다양한 분포를 갖는 것으로 알 수 있으며, Fig. 3은 Confocal Imaging System을 이용하여 촬영한 사진으로써 주요 분포 나노입자의 크기가 약 50에서 60 nm 정도로 갖게 됨을 알 수 있다.

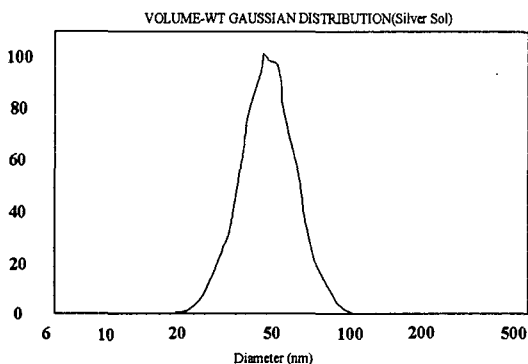


Fig. 2 Particle size distribution (silver-particle dispersed).

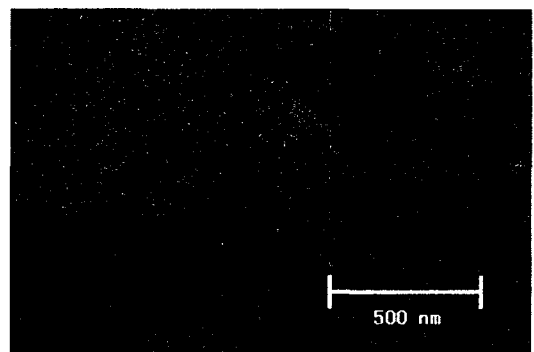


Fig. 3 Confocal image of nanofluid.

2.2 실험분석 및 시뮬레이션

본 연구에서 2상유동 루프형 열사이폰의 실험 결과 처리방법은 비등과 응축에 대한 열전달조건을 고려하여 기본적인 열저항 네트워크에 대한 계산으로 비교하였고, 시스템 전체에 대한 열저항식(1)은 아래와 같다. 그리고 각 부분의 물질특성값은 기존에 주어진 것들을 이용하여 계산하였다.

$$R_T = R_{hot} + R_{loop} + R_{cold} = \frac{1}{U_T A_h} \quad (1)$$

여기에서 각 시스템 열저항들은 다음과 같다.

- R_{hot} : 증발부 열저항
- R_{loop} : 수송부의 열저항
- R_{cold} : 응축부 열저항

정상상태 유동의 운동량방정식(2)은 아래와 같고, 밀폐시스템인 루프형 열사이폰의 시뮬레이션에서 전체 압력강하의 합은 0이 된다.

$$-\frac{dp}{dy} = \left(\frac{dp}{dy}\right)_F + G^2 \frac{d}{dy} \left\{ \frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-a)} + \frac{x^2}{\rho_g a} \right\} + g \sin \theta [\rho_g a + (1-a)\rho_l] + \left(\frac{dp}{dy}\right)_{ms} \quad (2)$$

따라서, ΔP_T 다음과 같은 조건이 된다.

$$\Delta P_T = \Delta P_a + \Delta P_f + \Delta P_h + \Delta P_b + \Delta P_{ex} + \Delta P_{con} = 0 \quad (3)$$

여기서, ΔP_a , ΔP_f , ΔP_h , ΔP_b , ΔP_{ex} , ΔP_{con} 는 각 다음 식으로 나타낸다.

$$\Delta P_a = -\Delta P_{lo} \left(E + \frac{3.24FH}{F_r^{0.045} W_e^{0.035}} \right) \quad (4)$$

$$\Delta P_f = f_l \frac{G_v^2}{2\rho_l} \cdot \frac{\Delta Z}{D_l} + f_v \frac{G_v^2}{2\rho_v} \cdot \frac{\Delta Z}{D_v} \quad (5)$$

$$\Delta P_h = \rho g H \quad (6)$$

$$\Delta P_b = \Delta P_{expansion} + \Delta P_{contraction} \quad (7)$$

$$\Delta P_{ex} = -2 \left(\frac{A}{A_b} \right) \left(1 - \frac{A}{A_b} \right) \left(\frac{G^2}{2\rho_l} \right) \quad (8)$$

$$\Delta P_{con} = \left\{ \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 + 1 - \left(\frac{A}{A_b} \right)^2 \right\} \left(\frac{G^2}{2\rho_l} \right) \quad (9)$$

$$\Delta P_b = \rho_v \frac{f_v L_v V_v^2}{d} + \rho_l \frac{f_l L_l V_l^2}{d} \quad (10)$$

여기서, 시뮬레이션 압력강하를 0으로 만족시키는 건도와 질량유속을 반복계산에 의해 찾아냈으며, 아래 식(11)의 Maxwell 식⁽⁸⁾을 이용하여 나노유체의 유효열전도계수 k_{eff} 를 구했고, ⁽⁸⁾ k_{eff} 를 이용하여 Prandtl 수를 구했다. 이 Prandtl 수를 이용 나노유체의 h_l 를 구했다. 또 반복계산으로 구한 건도를 아래 Gungor and Winterton 식(11)에 대입하여 h_{tp} 를 구했다. h_l 은 Dittus-Belter^(9,10) 식을 사용하였다.

$$\frac{h_{tp}}{h_l} = \left\{ 1 + 3000 Bo^{0.86} + \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.75} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.41} \right\} \quad (11)$$

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

열전도계수는 Maxwell⁽⁸⁾의 구형입자가 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, a 는 모유체와 금속입자 간의 열전도도비이며, v 는 나노입자와 모유체 간의 체적비이다.

나노유체의 점성계수에 대한 측정은 많이 이루어지지 않았으며 루프형 열사이폰에서 점성계수의 역할은 나노유체의 모세관력 항상에 표면장력과 함께 중요한 역할을 하기에 물성치 판단이 중요할 것이다. 대부분 나노유체를 만들 때 1% 미만의 소량의 부피비를 갖는 나노입자를 첨가하기 때문에 점성계수에는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 예상하고 있으나, 프로그램에서는 Einstein⁽¹¹⁾ 모

델로 시뮬레이션을 수행하였다.

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

나노유체의 비열과 밀도에 대한 연구사례가 적어 다음과 같은 선형 관계식으로 계산하였다.^(11,12)

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

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

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

Fig. 4는 나노유체 0.7%와 1%를 작동유체로 한 2상 루프형 열사이폰과 2상 루프형 열사이폰의 시뮬레이션 열전달 성능을 작동유체의 농도에 따른 발열부 표면과 응축부 공급냉매의 온도차인 ΔT_{h-c} 에 따라서 비교 분석하였다. 시뮬레이션과 실험결과는 400 W 이하에서는 7% 이하의 오차가

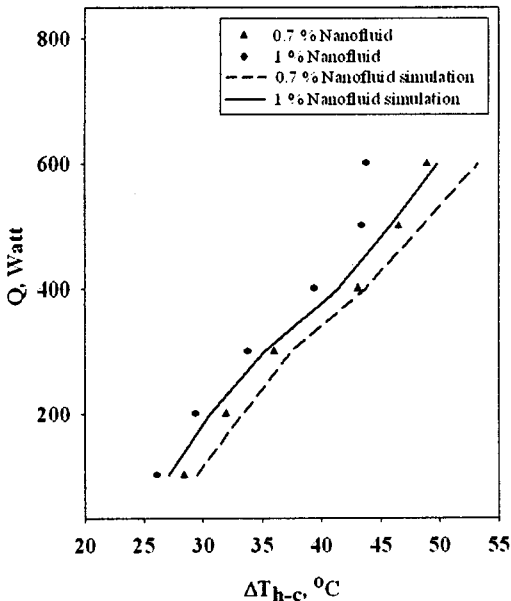


Fig. 4 Comparison of measure data for 0.7 and 1% silver nanofluid and those predicted by simulation method.

생기며 400 W 이상에서는 약 20%가 넘는 오차가 발생하였다. 이는 나노유체의 열전도도를 나타내는 k_{eff} 에 대한 정확한 계산을 할 수 없으므로 나타나는 오차라 생각된다. 레이놀즈수와 프란틀수의 보정으로 어느 정도의 오차를 줄일 수 있지만 계산의 한계가 존재하므로 꾸준한 실험을 통해 실험식의 정립이 필요하다.

3. 실험결과 및 고찰

실험은 크게 입자의 농도와 각각의 농도에 따른 열사이폰 내부에 주입되는 용량을 변화시키며 여러 변수에 대하여 열전달 성능을 평가하였다. 실험의 공통적인 조건은 히터를 100~600 W까지 변화시켜 가면서 반복실험을 하였다. 응축부의 온도는 10°C로 유지했고, 본 연구에서는 비교적인 연구목표를 확인하기 위해 모든 변화량에 대한 히터부의 열전달량을 100, 400, 600 W로 고정시켜 비교 결과를 통해 나노유체가 실제 열전달 성능에 영향을 주는가를 순수 유체만을 사용시와 열전달 현상에 대하여 비교 평가였다.

3.1 농도에 따른 실험결과

Fig. 5와 Fig. 6은 히터의 공급 열량이 400 W와 600 W일 때 나노유체의 농도에 따른 영향을 관찰한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 은-물 나노유체의 경우 농도가 증가함에 따라 열전달 성능은 증가하는 것으로 관찰되었고, 농도의 증가에 따라 온도진동이 감소되었다. 하지만 농도의 증가에 따른 열전달 성능의 증가와 온도진동의 감소가 계속적으로 관찰된 것은 아니다. 순수 물부터 나노유체 농도 0.1%까지는 온도진동의 계속적 감소가 보였으나 0.3%부터는 온도진동이 증가하는 것으로 관찰되었다. 순수 물 0.05%와 0.1%일 경우는 히터부의 온도가 높게 유지하는 반면, 온도진동이 0.1% 이상에서 심해짐이 관찰되었고, 온도진동 형태도 비슷하게 전개됨을 관찰할 수 있다. 또 농도의 증가가 선형적인 비례로 열전달 성능의 증가를 가져다 주는 것은 아니다. 또 농도의 증가에 따라 열전달 성능이 비례적으로 향상을 유지한 것은 아니다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 1%가 2%보다 열전달 성능이 더 나은 것으로 관찰할 수 있었고, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 공급 열량의 증가

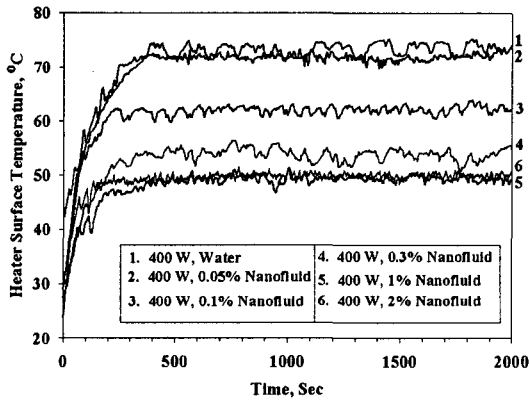


Fig. 5 Effect of particle concentration, 400 W.

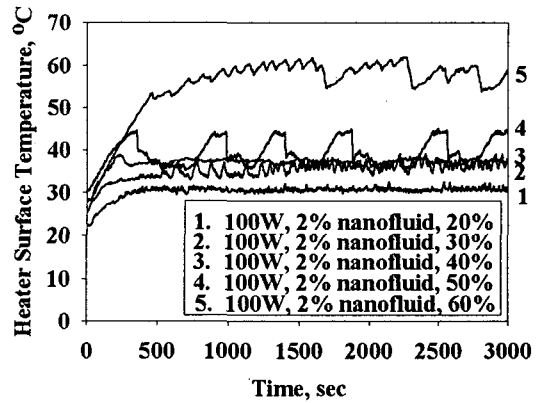


Fig. 7 Effect of working fluid amount, 100 W.

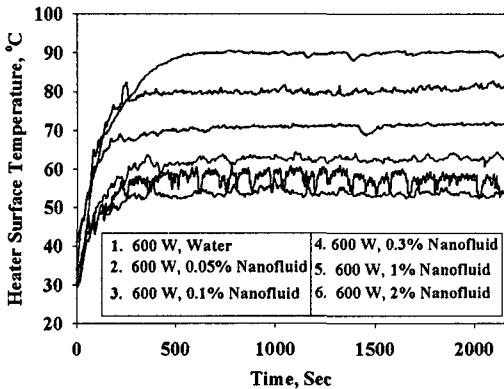


Fig. 6 Effect of particle concentration, 600 W.

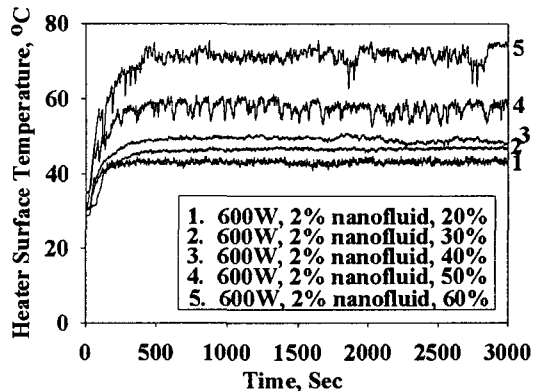


Fig. 8 Effect of working fluid amount, 600 W.

와 함께 600 W에서 2%로 농도가 증가시 온도진동이 진폭이 5°C 정도로 증가하는 것으로 관찰할 수 있었다. 이는 Jang & Choi의 나노유체에서의 열전달 방법에 대한 모델에서처럼 농도의 증가가 내부의 입자의 활동을 위한 평균 입자간격(Mean Free Path)의 감소로 입자 간의 충돌과 확산운동의 감소가 영향이 있을 것으로 판단된다.⁽¹¹⁾

3.2 작동유체의 양에 따른 실험결과

작동유체의 양은 전체 부피에 작동유체가 차지하는 비율을 가지고 20~60%까지 변화시켰고, 작동 나노유체는 Silver-Water Nanofluid 2%를 가지고 실험하였다.

Fig. 7과 Fig. 8은 작동유체의 충전비에 따른 영향을 관찰해 본 것이며, 각 그림의 공급 열량은 100 W, 600 W로서 시간에 관한 온도의 변화로 표

현한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 작동유체의 양의 감소함에 따라 열전달 성능과 시스템의 안정성이 증가됨을 알 수 있다.

3.3 응축부 온도의 변화에 따른 영향

응축부의 온도변화에 따른 실험은 히터의 공급 열량을 400 W로 고정시켰고, 응축부의 온도를 10°C에서 5°C 간격으로 25°C까지 변화시켰다. 그리고 은-물 나노유체 2%를 사용했고, 작동유체의 양은 전체 부피의 30%로 하여 실험하였다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 응축부의 온도를 증가시킴으로써 히터의 온도가 같이 증가됨을 볼 수가 있었다. 이는 응축부의 온도 증가에 따라 응축부의 저항이 함께 증가함으로써 증발부 온도의 상승을 유발하는 것으로 판단된다. 하지만 열전달 성능을 평가할 때 쓰이는 ΔT_{h-c} 가 거의 일정해

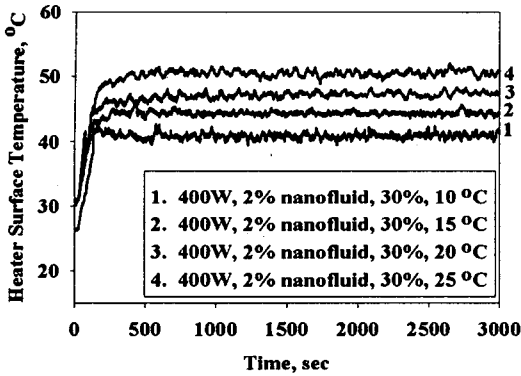


Fig. 9 Effect of cooling water temperature.

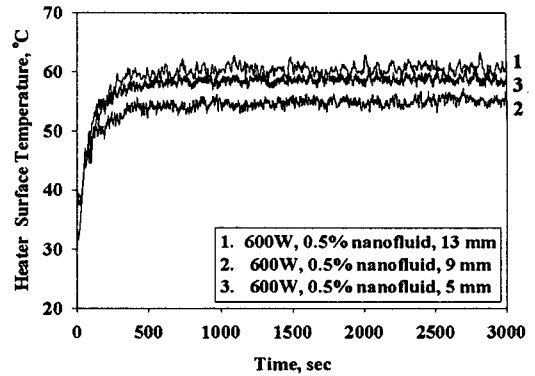


Fig. 10 Effect of evaporator inlet pipe diameter, 0.5%, 600 W.

짐을 알 수 있다.

3.4 응축부 수송관의 직경에 변화에 따른 영향

일반적으로 루프 시스템의 시스템 안정성을 증가시키는 한 방법으로 증발부쪽 유입액체의 유입 속도를 증가시킴으로써 증발부 내부에서의 압력 강하를 줄이는 방법으로 연구가 많이 이루어졌으며, 이런 방법으로 유동불안정을 해소시키고 열 전달 성능을 향상시키는 기술은 보고된 바 있다.^(1,3)

이번 실험은 비교 유체는 순수 물이고, 히터의 공급열량은 100 W, 400 W, 600 W이며, 응축부 수송관의 두께는 외경 13 mm, 9 mm, 5 mm이다. 나노유체를 작동유체로 사용시 Fig. 10과 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 0.5%일 경우 5 mm 관을 사용시 제일 우수한 열전달 성능을 보였으나 온도진동의 감소는 보이지 않았다. 1%일 경우 5 mm, 9 mm의 관을 사용시 온도의 안정성에는 큰 기여를 하지 않았으나 발열부 온도를 10°C 정도 하강시키는 것으로 보아 열전달 성능 향상에는 도움이 되는 것으로 알 수 있다. 열전달 성능과 작동 안정성을 고려하여 열전달 성능과 복합적으로 관찰할 때에는 최적 직경을 선택할 수 있어야 할 것으로 보인다.

3.5 열전달 성능

Fig. 12는 작동유체의 농도에 따른 열전달 성능을 발열부 표면과 응축부 공급 냉매의 온도차인 ΔT_{h-c} 에 따라서 비교 분석하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 농도의 증가에 따라 ΔT_{h-c} 값은 감소

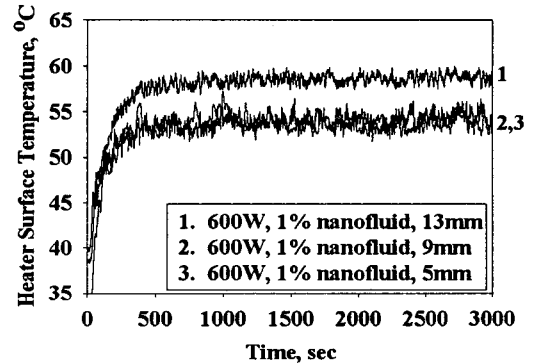


Fig. 11 Effect of evaporator inlet pipe diameter, 1%, 600 W.

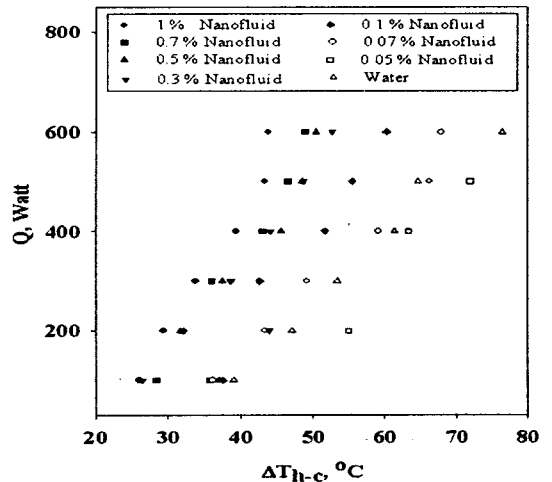


Fig. 12 Heat transfer performance with ΔT_{h-c} and Q .

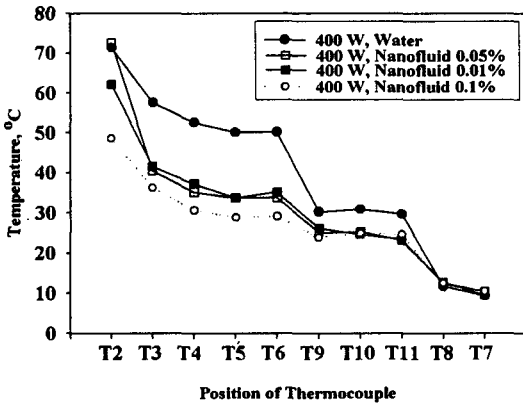


Fig. 13 Temperature profiles along TLT, 400 W.

하는 것으로 관찰되었으며, 그림에서 볼 수 있듯이 동일한 600 W 공급열량을 기준으로 비교시 순수 물을 사용시보다 1%의 은나노입자가 함유되었을 경우 2배 가까이 열전달 성능이 향상됨을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 루프형 열사이폰의 발열체의 표면부터 응축부의 냉매 유입온도까지의 전체 루프형 열사이폰을 따라서 공급열량에 따른 표면 온도분포를 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 400 W 일 경우 0.05%의 나노유체를 작동유체로 사용시 루프 전체의 온도분포가 현저히 낮은 온도를 유지하고 있다. 이런 현상은 100 W일 경우 가장 큰 차이를 보였으며, 공급열량이 증가함에 따라 나노유체를 사용시 증류수 사용시보다 온도분포의 현저히 낮은 온도에서 작동하는 차이를 보였다. 이는 나노유체를 작동유체로 사용시 루프 내부의 작동유체의 순환이 빠르고 아울러 나노유체의 열전도계수의 향상에 따른 열의 이동이 원활함을 보여주고 있다.

3.6 나노유체 열사이폰의 신뢰성

나노유체를 작동유체로 사용시에 가장 큰 고려점은 나노입자의 침전 혹은 관 벽에의 흡착에 따른 마찰저항의 증가에 따라 성능의 저하 및 유동의 불안정에 따른 영향일 것이다. 비록 입자의 크기가 나노크기로 유체입자크기에 어울려 운동을 한다고 하나, 아직까지 그 현상이 규명된 것이 없기에 실험적으로 관찰하고자 하였다. 우선 실험을 통하여 일주일을 작동시키고, 3일 후 재작

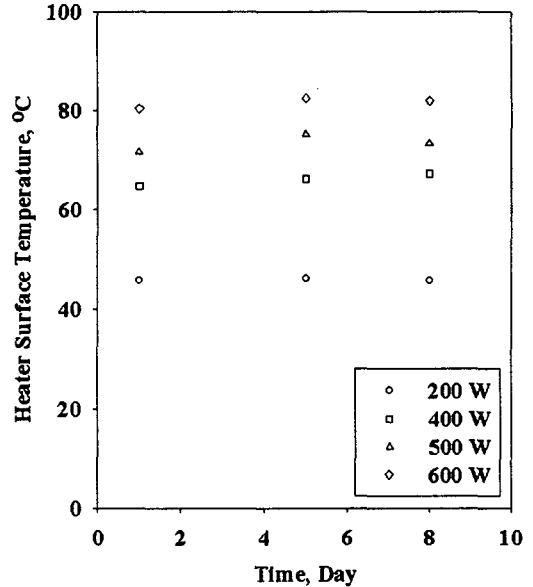


Fig. 14 Homogeneity in nanofluids with time.

동시키는 방법으로 한 달을 운용해 보았으나, 루프형 열사이폰의 성능은 그리 큰 변화가 관찰되지는 않았다. Fig. 14에서는 일주일 동안 연속적으로 작동시켰을 경우 열전달 성능 측면에서 관찰한 실험결과이다. 발열부 표면온도의 약간의 상승은 있었으나, 작동은 계속해서 동일한 성능을 발휘하고 있는 것으로 관찰할 수 있다.

4. 결 론

본 연구의 2상 루프형 열사이폰은 최고 600 W 까지 실험을 하였고, 순수 물을 이용한 루프형 열사이폰의 열전달 성능보다 동일 공급 열량기준으로 약 2배 가까이 향상된 성능을 확인하였다. 최적화 지점의 농도와 최적 나노유체의 양을 선택하면 최고 600 W에서 발열부와 응축부 냉각유체와의 온도차이를 35°C 정도로 유지하며 작은 온도차이에서도 작동이 가능함을 확인할 수 있었다. 그리고 나노유체를 사용함으로써 루프작동시 온도진동이 현저히 감소하는 것으로 알 수 있었다. 아울러 본 연구에서 나노유체의 농도의 증가함에 따라 열전달 성능은 증가하나, 은-물 나노유체의 농도가 2%일 때는 1%보다 별다른 열전달 성능의 향상이 보이지 않음을 알 수 있었고, 온도진동도 농도가 높아짐에 따라 어느 한계점까

지는 향상이 되다 그 이상이 되어 버리면 오히려 더 심하게 온도가 진동함을 알았다.

루프형 열사이폰의 설계를 위하여 작동유체의 농도, 작동유체의 양, 응축부의 온도 등이 루프형 열사이폰의 성능에 지대한 영향을 미치는 것으로 알 수 있으며, 무조건적인 농도의 증가와 작동유체 양의 감소가 최대의 열전달 성능을 내지 않음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(과제번호 : KRF-2003-003-D00048).

참고문헌

- 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.
- 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.
- 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.
- Lee, S.P., 2003, Heat transfer enhancement technology using nanofluid, KSME Journal, Vol.43, No. 3, pp. 65-70.
- 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.
- 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.
- Xuan, Y. and Li, Q., 2000, Heat transfer enhancement of nanofluids, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.21, pp. 58-64.
- Xue, Q.Z., 2003, Model for effective thermal conductivity of nanofluids, Physics Letters A 307, pp. 313-317.
- Gungor, K.E. and Winterton, R.H.S., 1985, A general correlation for flow boiling in tubes and annuli, J. of Heat Mass Transfer, Vol. 29, No. 3, pp. 351-359.
- Holman, J.P., 1996, Heat Transfer, 8th ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
- Kim, J., Kang, Y.T. and Choi, C.K., 2003, Analysis of convective instability and heat transfer characteristics of nanofluids applicable to absorption refrigeration, SAREK Winter Conference Proceeding, pp.202-207.
- Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, Conceptions for heat transfer correlations of nanofluids, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.43, pp. 3701-3707.
- 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.