

나노유체를 이용한 써모사이폰의 열전달 성능 특성에 관한 실험적 연구

이무연* · 조중원** · 이호성** · 원종필** · 임택규***

* 동아대학교 기계공학과, ** 자동차부품연구원 열제어시스템연구센터

Experimental Study on Heat Transfer Characteristics of Thermosyphon Using Nanofluids

Moo Yeon Lee*, Chung Won Cho**, Ho Seong Lee**, Jong Phil Won** and Taek Kyu Lim***

* School of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

** Thermal Management System Research Center, Korea Automotive Technology Institute

(Received March 22, 2012 ; Revised July 26, 2012 ; Accepted August 27, 2012)

Key Words: Heat Transfer(열전달), Nanofluid(나노유체), Thermosyphone(써모사이폰), Thermal Resistance(열저항), Working Fluid(작동유체)

초록: 본 논문은 나노유체를 적용하여 써모사이폰 열전달 성능 특성 변화를 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 위하여, 증발부 내부체적을 공유하는 3 개의 독립된 파이프를 가지는 써모사이폰을 제작하였으며 증류수, Ag 나노유체 그리고 TiO₂ 나노유체에 대하여 충전량, 증발부에 가해지는 입력열량 그리고 농도변화에 따른 써모사이폰 성능특성 변화를 고찰하였다. 증류수를 작동유체로 사용하는 경우 써모사이폰의 최적충진량은 30%로 결정되었고, TiO₂ 나노유체를 적용하는 써모사이폰 열저항이 Ag 나노유체를 적용한 경우에 비하여 평균 18.1% 감소하였다. 또한, 300W 입력열량 및 TiO₂ 나노유체 농도 1%에서 써모사이폰의 열전달 성능은 가장 우수하였다.

Abstract: This study aims to experimentally investigate the heat transfer characteristics of a thermosyphon using nanofluids. A thermosyphon with three individual pipes, which share the internal volume of the evaporator section, was designed, and its performance was tested for various charge amounts, input powers of the evaporator section's heater, and concentrations of working fluids. The optimized charge amount of the thermosyphon using distilled water was 30%, and the thermal resistance of the thermosyphon with TiO₂ nanofluid was 18.1% lower than that with Ag nanofluid. In addition, the heat transfer performance of the thermosyphon with TiO₂-1% was optimized at an input power of 300 W at the evaporator section's heater and a charge amount of 30%.

- 기호설명 -

Ag : 은
D.I water : 증류수 (Distilled water)
H : 가로 (Horizontal)
R : 열저항, °C /W
Q : 열량, W
 ΔT : 온도차, °C
T : 온도, °C
TiO₂ : 산화티타늄
V : 세로 (Vertical)
W : 폭, 두께 (Width)

하첨자

a : 공기
c : 응축부
e : 증발부
e-a : 증발부와 외부공기 사이
e-c : 증발부와 응축부 사이
i : 입력

1. 서론

일반적으로 써모사이폰은 히트파이프의 한 종류로 Wick이 없는 히트파이프라고 정의되며 작동원리는 히트파이프와 동일하다.⁽¹⁾ 즉 써모사이폰은 작동유체의 상변화 메커니즘을 이용하여 증발

† Corresponding Author, tklim@katech.re.kr

부에서 응축부로 열을 전달하는 원리로 작동유체의 구동을 위한 추가적인 동력원이 필요하지 않는 에너지 절약형 열장치 시스템이다.⁽²⁾ 또한 써모사이폰은 구조가 간단하고 작동유체 선정에 따른 다양한 온도대역에 사용될 수 있다는 장점을 가지고 있으며 소형화가 가능하여 단위 면적당 발열량이 큰 집적화된 소형 전자제품들에 많이 적용되는 전자장비 냉각 분야 등에 주로 활용되어 오고 있다.

최근에는 써모사이폰 관련 연구는 전자산업뿐만 아니라 자동차산업 분야에서도 많은 관심을 받고 있다. 이러한 이유는 기존의 내연기관을 대체하는 전기자동차, 연료전지 자동차 그리고 하이브리드 전기자동차 등의 무공해 친환경 자동차 (zero emission vehicle)는 고전압 배터리, 구동 모터, 인버터 등의 고발열 전자 장비들을 포함하고 있기 때문에, 이러한 장비들을 냉각하기 위한 효율이 우수하면서 소형화가 가능한 냉각장치들을 필요로 하기 때문이다. 이러한 흐름에 맞추어 작동원리가 간단하면서 소형화가 가능한 써모사이폰 및 히트파이프에 대한 연구가 증가되고 있으며, 나노유체를 적용하여 열전달 성능을 향상시키는 연구 등이 진행되고 있다. 일반적으로 나노유체의 열전달 메커니즘은 아직 명확하게 규명되지 않고 있지만, 나노유체를 작동유체로 사용할 경우 기존의 수송유체들에 비하여 열전달 계수가 증가한다고 보고되고 있다.⁽³⁾

Lim (2011)등은 저온작동 조건에서 자동차용 써모사이폰의 열전달 성능특성에 관한 연구를 실험적으로 진행하였으며, 극한 조건에서 순간적으로 고발열을 얻기 위하여 활용 가능하다고 보고하고 있다.⁽⁴⁾ Ha (2011)은 증류수기반 탄소나노튜브 나노유체 히트파이프의 열적 특성에 관한 실험적 해석을 진행하여 기본 작동유체인 증류수에 비하여 유효 열전도가 최대 29% 상승하고 히트파이프 열저항은 35.2% 감소한다고 보고하고 있다.⁽⁵⁾ Lee (2006)은 나노유체 자체의 열전도율 측정, 온도에 따른 나노유체 열전도율 변화 그리고 열전도율 향상 메커니즘을 제시하였다.⁽⁶⁾ 하지만 이러한 연구들은 나노유체 자체의 열전달 특성, 일반유체를 적용한 써모사이폰, 그리고 나노유체를 적용한 히트파이프의 열전달 성능에 관한 기초적인 연구이다.

따라서 본 연구에서는 다양한 산업에서 응용될 수 있는 소용량 (100W 에서 300W 급) 써모사이폰에 대하여 열전달 성능이 우수한 나노유체를 적용하여 열전달 성능특성 변화에 대하여 고찰하고 일

반적으로 많이 사용되는있는 증류수와 나노유체사이의 열전달 성능을 비교하였다. 이를 위하여 100W, 200W, 300 W 급 써모사이폰을 제작하였으며, 작동유체로 증류수 (D.I water), 은 나노유체 (Ag), 산화구리 나노유체 (TiO₂)를 적용하여 실험을 진행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

Fig. 1 은 본 연구에서 사용된 실험 장치의 개략도 및 사진이다. Fig. 1(a)에서 보는 것처럼, 3 개의 개별적인 pipe 는 1 개의 증발부에 연결되어 있어 내부체적을 공유하도록 설계하였고, 써모사이폰을 구성하고 있는 각 파이프는 가로 길이 100 mm, 세로 길이 50 mm 그리고 폭은 15 mm 로 제작되었다. 응축부는 25 개의 핀이 연결되어 있으며, 핀 가로 길이 100 mm, 세로 길이 10 mm 그리고 두께 1 mm 로 구성되어 있다. 각 파이프 외경은 9.5 mm 의 구리 파이프가 30 mm 간격으로 3 개가 사용되었으며, 증발부를 제외한 파이프 길이는 150 mm 이며 두께는 1.1 mm 이다. 써모사이폰 내부의 진공 (vacuum)을 위하여 2 번째 파이프 상부에 on/off 개폐형 밸브를 장착하여 진공펌프에 연결하여 사용하였고 작동유체 충진을 위하여 작동유체 저장탱크에 호스를 연결하여 사용하는데 활용하였다. 또한, 작동유체 변화에 따른 써모사이폰의 온도 특성을 고찰하기 위하여 정확도 ± 0.1 °C 의 열전대 (T-type thermocouple)를 사용하였고, 증발부 및 각 파이프의 상/하단에 7 개의 열전대와 실험공간의 대기온도를 (room temperature) 측정하기 위하여 써모사이폰 주변에 2 개의 열전대를 설치하였다. 모든 데이터는 1 초 간격으로 측정되었으며, 실시간으로 데이터 습득 장치에 저장되었다.

Table 1 는 본 연구에서 사용한 써모사이폰 사양을 나타내며, 모든 구성요소들은 구리를 사용하여 제작되었다. Table 2 는 본 연구에서 사용한 실험조건이다. 먼저 작동유체는 증류수, Ag 나노유체 그리고 TiO₂ 나노유체를 적용하였고 나노유체 농도는 체적 기준으로 0.2%에서 2.0%까지 변화시켜가면서 실험을 진행하였다.

Fig. 2 는 본 연구에서 사용한 Ag & TiO₂ 나노유체 사진을 보여주고 있다. 먼저, TiO₂ 나노유체는 입자크기 87 nm 및 2.48 pH 농도를 가지고 있고, Ag 나노유체는 입자크기 50 nm 및 표면장력 69.6 mN/m 가지고 있다. 써모사이폰에 적용되는 작동

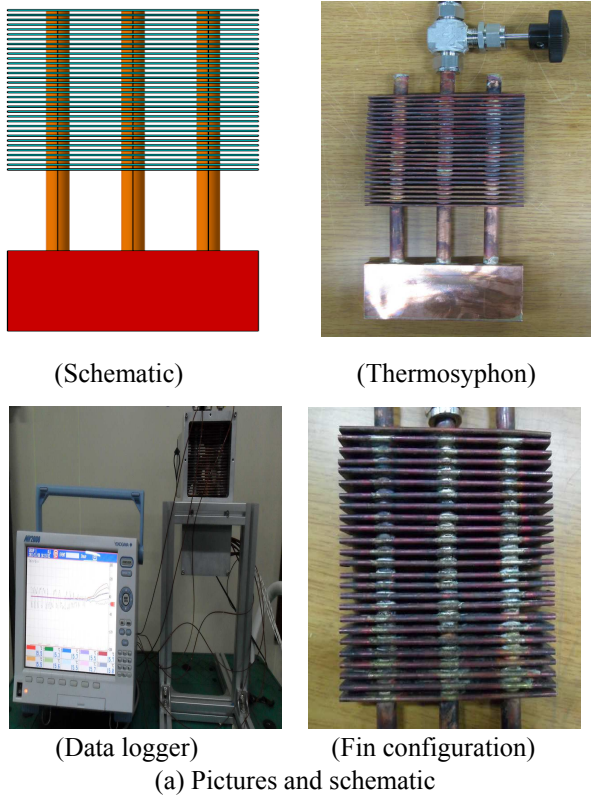
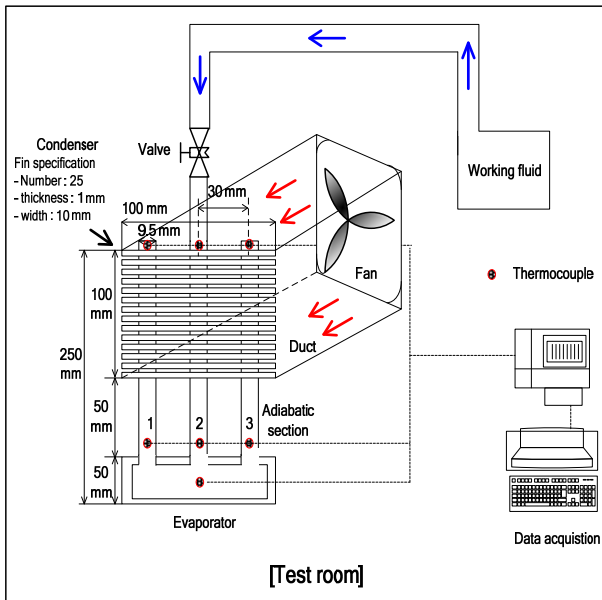


Table 1 Component specifications of the test set-up

Components	Specifications
Evaporator (mm)	H 100 * V 50 * W 15
Condenser (mm)	H 100 * V 100 * W 20
Pipe length (adiabatic section, mm)	150
Pipe diameter (mm)	9.5
Pipe thickness (mm)	1.1
Material	Copper
Duct size (mm)	Diameter : 120 Length : 200



(b) Test set-up

Fig. 1 Schematic diagram of the test set up

유체의 최적의 충전률을 선정하기 위하여 작동유체 충전량 실험을 진행하였다. Baseline 실험으로서 증류수를 이용하여 30% 에서 50%로 충전량을 10%씩 변화시켜가면서 실험을 진행하였고, 증발부에 가해지는 입력 열량을 100W, 200W, 300W 로 변화시켜 가면서 실험을 진행하였다. Table 3 은 본

연구에서 사용한 실험 및 측정 장비를 나타내고 있다. 모든 측정된 데이터의 저장은 YOKOGAWA 사의 MV2000 을 이용하였다. 증발부에 가해지는 입력 열량 변화는 전기저항 히터를 사용하였고, 응축부에 설치된 팬-유로 유닛은 팬 직경 114 mm 를 가지는 축류 팬 (tube-axial type)을 장착하였고 유로는 가로 길이 120 mm, 세로 길이 120 mm 그리고 길이 200 mm 로 제작하여 응축부에 위치한 핀들을 방열하도록 설치하였다.

2.2 실험계산

써모사이폰 열저항은 식 (1)과 같이 증발부와 응축부의 온도 차이 및 공급된 열량을 통하여 계산하였다.⁽⁴⁾ 여기서 R_{e-c} , ΔT , Q_i 는 증발부와 응축부 사이의 열저항, 증발부와 단열부 사이의 온도차 및 증발부에 가해진 열량을 의미한다. 증발부 및 응축부 온도는 파이프 3 개의 하단 및 상단에서 측정된 온도의 평균값을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 열저항의 물리적 의미는 써모사이폰 열전달 성능과 밀접한 관련이 있으며, 써모사이폰에서 열저항 증가는 증발부에 공급된 열량의 전달 효율이 감소한다는 것을 의미한다.⁽⁷⁾

$$R_{e-c} = \frac{\Delta T_{e-c}}{Q_i} \tag{1}$$

Table 2 Test conditions

Components	Specifications
Charge amount (%)	30, 40, 50
Volume fraction of nanofluids (%)	0.2, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0
Working fluids	DI water (Baseline), TiO ₂ , Ag
Nano-particle size (nm)	TiO ₂ : 87 nm
	Ag : 50 nm
Outdoor condition (°C)	14
Input power (W)	100, 200, 300

Table 3 Test equipment and measurement

Components	Specifications
Thermocouples (T-type)	± 0.1 °C (Accuracy)
Input heater (W)	Electrical resistance heater 100W : 110V 0.91A 200W : 150V 1.33A 300W : 190V 1.58A
Fan	12P-230HS, Bo Sonic Corp
	Tube-axial type
	Diameter : 114 mm
Data logger	MV2000 (YOKOGAWA)



(a) Ag nanofluid

(b) TiO₂ nanofluid**Fig. 2** Ag and TiO₂ nanofluids

3. 실험결과 및 고찰

3.1 작동유체 충전량 실험

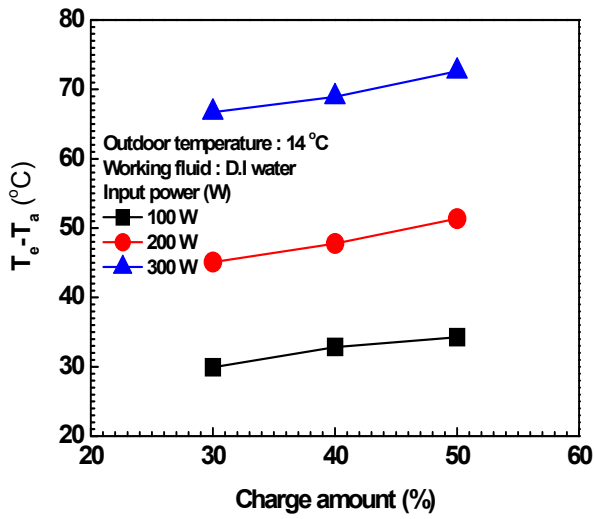
Fig. 3 은 Baseline 작동유체인 증류수에 대하여

충진량에 따른 증발부에서 열전달 성능 변화를 보여주고 있다. 작동유체 충전량 30%에서 증발부에 가해지는 입력 열량을 100 W 에서 300 W 까지 변화시켜가면서 실험을 진행하였으며, 충전량이 증가할수록 증발부와 외기와의 열교환 효율이 감소하여 모든 입력 열량에서 온도 차이가 증가함을 알 수 있다. 결과적으로 써모사이폰의 증발부에 가해지는 모든 입력 열량에서, 작동유체 충전량 30%에서 가장 우수한 열교환 성능을 가진다고 할 수 있다. Fig. 3 (b)은 써모사이폰 증발부에 가해지는 입력 열량에 따른 열저항을 나타내고 있다. 증류수를 작동유체로 사용하는 경우 충전량 30% 이 모든 입력 열량에서 가장 우수하게 나타났으며, 입력 열량 300W 에서 열저항 22.3 °C/kW 로 가장 낮게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 작동유체 변경 실험을 진행할 때 최적 충전량으로 30%를 선정하였다.

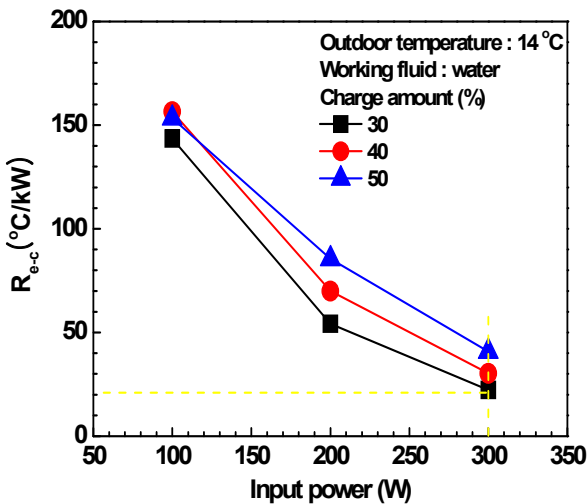
3.2 나노유체 성능 비교 실험

써모사이폰은 구조가 간단하여 써모사이폰의 열전달 성능을 결정짓는 핵심요소는 작동유체이며, 나노유체는 써모사이폰 열전달 성능을 향상시키는 한가지 방법이다. 본 연구에서는 기존의 연구 결과를 바탕으로 Ag 및 TiO₂ 나노유체를 선정하였다.^(8,9)

Fig. 4 는 충전량 30% 및 입력 열량 300W 에서 Ag 와 TiO₂ 나노유체 농도를 0.2%에서 2%로 증가시키면서 써모사이폰 열저항 특성 변화를 보여주고 있다. TiO₂ 나노유체를 적용한 써모사이폰은 Ag 나노유체를 적용한 경우 보다 열저항이 평균 18.1 % 감소하였고, 두가지 나노유체 모두에서 농도가 증가할수록 열저항은 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발된 써모사이폰 최적의 작동유체로 TiO₂ 나노유체를 선정하였다. 그러나 일반적으로 나노유체를 작동유체로 선정할 때는 나노유체 농도뿐만 아니라 입자 크기와 결정구조 형상도 중요한 변수로 알려져 있으며, 특히 나노유체 입자크기가 작아질수록 동일 부피비에서 표면적이 증가하여 압력강하가 증가한다고 보고되고 있다.^(10,11) 즉 본 연구에서도 기존의 연구결과를 바탕으로, Ag 나노유체의 입자크기가 TiO₂ 나노유체 크기에 비하여 작기 때문에 동일한 부피비에서 Ag 나노유체를 써모사이폰에 적용한 경우 내부 유동에 의한 압력 강하량 증가로 인하여 열저항이 증가하여 열전달 성능 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 향후 다양한 나노유체 및 나노유체 입자크기에 따른



(a) Charge amount



(b) Thermal resistance

Fig. 3 Baseline test of the thermosyphon with the distilled water

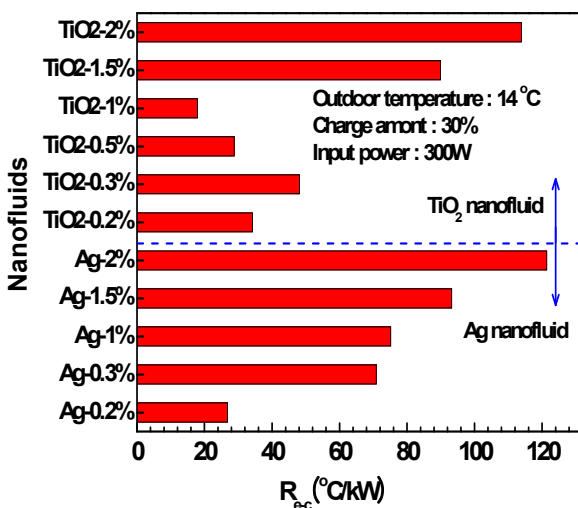


Fig. 4 Thermal resistance of the thermosyphon with the nanofluids

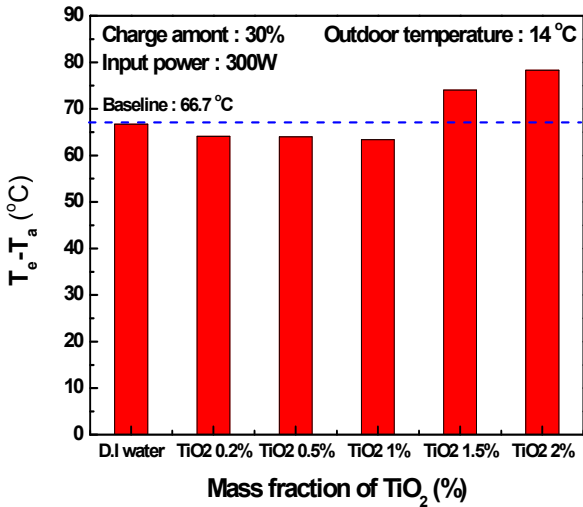
열전달 성능 변화를 고찰 할 필요가 있다.

3.3 TiO₂ 나노유체 농도에 따른 성능 변화 실험

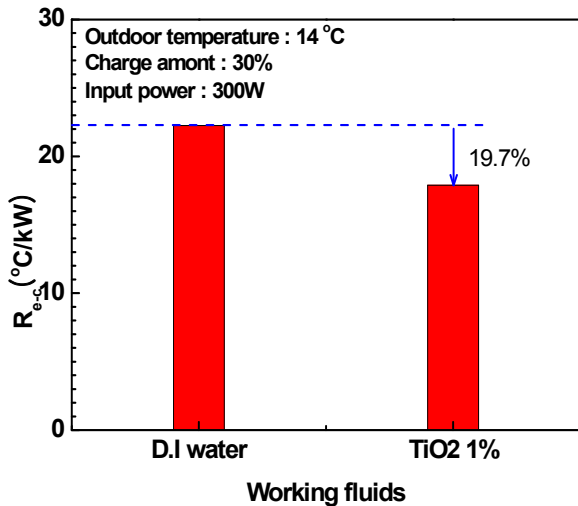
TiO₂ 나노유체 농도를 0.2%에서 2%까지 변화시켜가면서 실험을 진행하였으며, Baseline 작동유체인 증류수와 성능을 비교하였다. Fig. 5(a)는 증발부 입력 열량 300 W 및 충전량 30%에서 TiO₂ 나노유체 농도에 따른 써모사이폰 열전달 성능을 나타내고 있다. TiO₂ 나노유체 농도가 0.2%에서 1%까지 증가할수록 열도도가 증가하여 열전달 효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 Park (2005)의 결과에서도 알 수 있듯이 나노유체 농도가 증가할수록 온도 안정화가 빠르게 진행되어 증발부 온도가 낮아졌기 때문이다.⁽¹²⁾ 그러나 TiO₂ 나노유체 농도가 1.5% 이상에서는 열전달 성능이 증류수보다 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 TiO₂ 나노유체 농도가 일정수준 이상 증가하게 되면, 증발부와 응축부 사이의 온도차이로 발생하는 관성력을 이용하는 써모사이폰의 구동력이 감소하였기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Lim (2008)의 연구결과에서도 유사한 특성이 나타났으며, 향후 다양한 나노유체에 대하여 이러한 현상이 재현되는지 여부를 판단하고 추가적인 물리적 고찰을 해야 할 필요가 있다.⁽¹³⁾ Fig. 5(b)는 TiO₂-1% 나노유체 및 증류수에 대하여 써모사이폰에서의 열저항 특성을 비교하였다. 작동유체로 TiO₂-1% 나노유체를 사용할 경우 써모사이폰의 증발부 및 응축부 온도 차이가 증류수를 사용한 경우에 비하여 1.3 °C 감소하였고, 열저항은 19.7% 감소하였다. 결과적으로 TiO₂ 나노유체의 농도 1%에서 가장 우수한 열전달 성능을 가지는 것으로 확인되었고, 본 연구에서 개발된 써모사이폰의 최적 작동유체 및 농도로 선정되었다.

Fig. 6는 TiO₂-1% 나노유체 및 증류수를 사용한 경우의 써모사이폰을 구성하는 3개의 파이프의 개별적인 온도특성을 고찰하였다. 즉 3개의 파이프 상단 및 하단에 온도 차이를 측정하여 파이프 내부의 전반적인 유동 및 열전달 특성을 고찰하였다. 먼저, 각 파이프마다 온도 특성이 다르게 관찰되었으며, TiO₂-1% 나노유체의 경우 각 파이프에서 열전달량 증류수를 사용한 경우에 비하여 상대적으로 균등하게 나타나는 것으로 확인되었다.

TiO₂-1% 나노유체를 사용하는 경우 써모사이폰을 구성하는 각 파이프에서 평균 온도 차이가 8.4 °C로 증류수를 사용한 경우인 6.7 °C에 비하여 1.7 °C 우수하게 나타났으며, 파이프 #3의 경우 두가지 작동유체에서 가장 낮은 열교환량이 나타났



(a) Temperature difference



(b) Thermal resistance

Fig. 5 Heat transfer comparison of the TiO₂ Nanofluid with baseline test

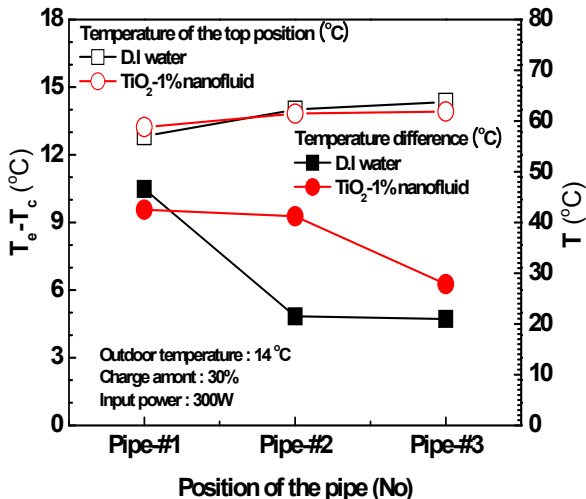


Fig. 6 Temperature difference between bottom and top position of the each pipe

다. 이러한 이유는 파이프 #3 상단의 온도가 가장 높게 나타난 것으로 보아 열교환이 원활하게 이루어지지 않았기 때문이다. 그리고 작동유체로 증류수를 사용하는 경우 파이프 #1 상단온도가 가장 낮게 나타났는데 이러한 이유는 파이프 #1 에서 가장 많은 열전달이 이루어졌기 때문이다. 즉 파이프 1 번과 3 번의 온도차이는 각 파이프 내부를 흐르는 작동유체 순환 유량이 달라지기 때문이다. 이러한 파이프 별 열전달 특성의 차이는 써모사이폰을 구성하는 파이프를 복수로 설계할 경우 고려해야 할 중요한 설계 인자이며, 더불어 복수의 파이프로 구성된 써모사이폰의 안정적인 열전달 성능 및 향상을 위하여 각 파이프에서 열전달 성능을 고려해야 한다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 증류수 및 나노유체를 적용한 써모사이폰의 작동유체 충전량, 증발부에 가해지는 입력 열량 그리고 나노유체 농도변화에 따른 열전달 성능 특성 실험을 진행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) Baseline 실험을 통하여 증류수를 작동유체로 사용하는 경우 충전량 30%에서 써모사이폰 열저항 22.3 °C/kW 로 가장 낮게 나타났으며, 본 연구에서 최적 충전량으로 결정하였다.

(2) 써모사이폰 작동유체로 TiO₂ 나노유체가 Ag 나노유체 대비 평균 18.1% 열저항이 감소하였고, TiO₂-1% 농도 나노유체에서 가장 우수한 열전달 성능을 나타내었다.

(3) 써모사이폰 작동유체로 TiO₂-1% 나노유체를 사용할 경우 증발부 및 응축부 온도차이가 증류수를 작동유체로 사용한 경우에 비하여 1.3 °C 감소하였고, 열저항은 19.7% 감소하였다.

(4) TiO₂-1% 나노유체를 사용하는 경우 써모사이폰을 구성하는 각 파이프에서 평균 온도 차이가 8.4 °C 로 증류수를 사용한 경우인 6.7 °C 에 비하여 1.7 °C 우수하게 나타났다.

후기

본 논문은 지식경제부에서 지원하는 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사하는 바이다.

참고문헌

- (1) Lim, T. K., Won, J. P., Cho, C. W., Lee, H. S., Jeon, H.

- B. and Lee, M. Y., 2012, "Experimental Study on the Low Temperature Performance Characteristics of the Thermosyphon With or Without Wick," *Proc. of the SAREK*, pp. 1245~1248.
- (2) Faghri, A., 1995, *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor and Francis.
- (3) Sarit, K. D., Stephen, C., Wenhya, Y. and Pradeep, T., 2007, *Nanofluids Science and Technology*, Wiley-Interscience, New Jersey.
- (4) Lim, T. K., Lee, H. S., Won, J. P., Cho, C. W. and Lee, M. Y., 2012, "Study on the Performance Characteristics of the Thermosyphon Used for the Vehicle Operated at Low Temperature Conditions," *Trans. of the KAIS*, Vol. 13, No. 2, pp. 510~515.
- (5) Ha, H. J., Kong, Y. C., Do, K. H. and Jang, S. P., 2011, "Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Heat Pipes Using Water-based MECNT Nanofluids," *Trans. of the SAREK*, Vol. 23, No. 7, pp. 528~534.
- (6) Lee, S. P., Choi, C. O. and Oh, J. Y., 2006, "Measuring Thermal Conductivity of Nanofluids and Heat Transfer Enhancement," *Proc. of the Fourth National Congress on Fluids Engineering August*, Kyunju, Korea, pp. 147~150.
- (7) Ha, H. J., Baek, I. K., Park, J. H., Do, K. H. and Jang, S. P., 2010, "Thermal Characteristics of Flat Plate Heat Pipes with Nanofluids," *Proc. of the KSME Fall Annual Meeting*, 11, pp. 2607~2611.
- (8) Lim, T. K., 2006, Two-Phase Loop Thermosyphon Cooling System Using Nanofluids, Master thesis, ChungBuk Univ., Korea.
- (9) Shin, D. R., Rhi, S. H., Lim, T. K. and Jang, J. C., 2011, "Comparative Study on Heat Transfer Characteristics of Nanofluidic Thermosyphon and Grooved Heat Pipe," *The Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 6, pp.1391~1398.
- (10) Kang, H. U., Kang, W. W. and Kim, S. H., 2004, "Effects of Nanoparticles on Heat Transfer of Nanofluid," *Proc. of the Autumn KOSEE*, pp. 19~24.
- (11) Hwang, K. S., Ha, H. J. and Jang, S. P., 2011, "Flow Characteristics of Al₂O₃ Nanofluids with Nanoparticles of Various Shapes," *Trans. of the KSME*, Vol. 35, No. 3, pp. 293~299.
- (12) Park, K. H., Rhi, S. H., Shin, D. R., Lee, W. H. and Baek, I. H., 2005, "Study on the Operating Characteristics in Small Size Heat Pipe Using Nanofluids," *Proc. of the KSME Fall Annual Meeting*, 11, pp. 37~42.
- (13) Lim, T. K., Rhi, S. H., Kim, D. H. and Lee, C. G., 2008, "Thermal Characteristics of Nanofluidic Heatpipe Hot Chuck," *Proc. of the KSME Fall Annual Meeting*, 11, pp. 2110~2115.