

물 기반 탄소나노튜브 나노유체 히트파이프의 열적 특성에 관한 실험적 해석

하 호 준, 공 유 찬, 도 규 형*, 장 석 필**†

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과, *한국기계연구원, **한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Heat Pipes Using Water-based MWCNT Nanofluids

Hyo Jun Ha, Yu Chan Kong, Kyu Hyung Do*, Seok Pil Jang**†

Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea

*Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

**School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea

(Received December 14, 2010; revision received June 29, 2011)

ABSTRACT: In this paper, thermal characteristics of cylindrical grooved wick heat pipes with water-based MWCNT nanofluids as working medium are experimentally investigated. Volume fractions of nanoparticles are varied with 0.1% to 0.5%. Transient hot wire method developed in house is used to measure the thermal conductivity of nanofluids. It is enhanced by up to 29% compared to that of DI water. The thermal resistances and temperature distributions at the surface of the heat pipes are measured at the same evaporation temperature. The experimental results show that the thermal resistance of the heat pipes with water-based MWCNT nanofluids as working fluid is reduced up to 35.2% compared with that of heat pipe using DI water. The reduction rate of thermal resistance is greater than the enhancement rate of thermal conductivity. Finally, based on the experimental results, we present the reduction of the thermal resistances of the heat pipes compared with conventional heat pipes cannot be explained by only the thermal conductivity of water-based MWCNT nanofluids.

Key words: Multi walled carbon nanotube nanofluids(다중벽 탄소나노튜브 나노유체), Effective thermal conductivity(유효열전도도), Thermal resistance(열저항), Groove wick structure(그루브 워크 구조물), Miniature heat pipe(소형 히트파이프)

기 호 설 명

k : 열전도도 [W/mK]
 L : 히트파이프의 길이 [m]

Q_{input} : 입열량 [W]
 R : 열저항, $\frac{\Delta T}{Q}$ [K/W]
 T : 온도 [K]

† Corresponding author

Tel.: +82-2-300-0179; fax: +82-2-3158-2191

E-mail address: spjang@kau.ac.kr

하첨자

a : 증발부

c : 응축부
e : 단열부
eff : 유효

1. 서 론

히트파이프란 금속 밀폐용기 내부에 있는 작동유체의 상변화 메커니즘을 이용하여 증발부에서 응축부로 열을 전달하는 열전달 매체로써, 작동을 위한 추가적인 동력이 불필요하고 열 전달률이 높으며 제작하고자하는 용도 및 온도 범위에 맞게 제작이 가능한 장점을 가진다.⁽¹⁾ 특히 최근 전자 장비들의 성능 향상 및 소형화에 따른 발열량 증가와 발열 유효 면적 감소에 의한 냉각 성능 저하를 해결하기 위해서 히트파이프가 널리 사용되고 있다.⁽²⁾

최근에 히트파이프의 열 성능을 향상시키기 위한 연구의 일환으로 열적특성이 우수한 나노유체⁽³⁻⁹⁾를 히트파이프에 적용하려는 연구가 전 세계적으로 진행되고 있다.⁽¹⁰⁻¹⁷⁾

Table 1은 히트파이프에 나노유체를 적용한 기존 연구자들의 결과를 정리한 것이며, 나노유체를 작동유체로 사용할 경우 히트파이프의 열 저항이 감소한다고 공통적으로 보여주고 있다. 그 원인으로 Ma et al.,⁽¹¹⁾ Kang et al.⁽¹²⁾은 나노유체의 높은 열전도도 향상 때문 이라고 보고하고 있으며, Yang et al.⁽¹⁴⁾은 나노유체의 열전도도 향상 뿐 만이 아니라 추가적으로 나노입자에 의해서 생긴 얇은 박막 층에 의한

펌핑 효과(Pumping effect) 때문이라고 제시하고 있지만 정확한 근거를 제시하고 있지 못하고 있다. 그러나 최근 Do et al.⁽¹⁵⁻¹⁶⁾은 나노입자가 증발부의 워 표면에 코팅이 되어 열전달 면적을 증가시켜서 히트파이프의 열 저항이 감소 한다는 것을 보고하였으며 그 근거로 이론적 결과⁽¹⁵⁾와 실험적 결과⁽¹⁶⁾를 제시하였다. 또한 Liu and Lu⁽¹⁷⁾의 결과를 보면, 기존의 구형상이 아닌 종횡비(Aspect Ratio)가 333인 다중벽 탄소 나노튜브 나노입자를 사용하여 나노유체를 제작하였고, 제작된 나노유체를 작동유체로 하는 히트파이프의 열 성능을 실험을 통하여 확인 하였다. 그 결과 기존의 구형의 입자를 사용한 결과와는 상반된 결과인 나노유체의 열전도도의 향상 폭보다 히트파이프의 열 저항의 감소 폭이 적은 결과를 보여주는 것을 확인 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 종횡비가 20이고, 입자형상이 튜브 형상인 다중벽 탄소 나노튜브 나노입자를 사용하여 나노유체를 제작하고, 제작 된 다중벽 탄소 나노튜브 나노유체의 열전도도를 측정하였다. 또한, 다중벽 탄소 나노튜브 나노유체를 작동유체로 사용하는 소형 히트파이프를 제작하여 열저항을 측정 하였다. 이를 바탕으로 종횡비가 Liu and Lu⁽¹⁷⁾보다 적은 다중벽 탄소 나노튜브 나노입자를 사용한 나노유체를 작동유체로 사용하는 히트파이프의 특징을 실험적으로 제시 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 나노유체 제작 방법

작동유체로 사용할 나노유체는 촉매제를 첨가하지 않은 기본유체인 물에 수 나노 크기의 다중벽 탄소 나노튜브 나노입자를 분산 부유 시켜 제작하는 2-단계 방법⁽³⁾으로 제작하였으며, 나노유체의 분산 안정성의 확보 및 응집 문제를 해결하기 위하여 40 kHz의 초음파 에너지(Sonic energy)를 5시간 동안 가하여 주었다.⁽¹⁸⁾ 제작된 나노유체의 부피비는 각각 0.1%, 0.2%, 0.5%이며, Fig. 1은 제작 되어진 나노유체를 보여주고 있다.

다중벽 탄소 나노튜브 나노유체의 나노입자 크기 및 종횡비(Aspect ratio)는 Fig. 2와 같이 투과 전자현미경(Transmission electron microscope)을 사용하여 측정하였으며, 그 결과 나노입자 단면의 평균 지름은 약 20 nm이며, 종횡비는 약 20이라는 사실을 확인 할 수 있다.

Table 1 Previous researches of nanofluids heatpipe

	Nanoparticle	Thermal conductivity enhancement	Thermal resistance reduction
Tsai et al. ⁽¹⁰⁾	Gold (Sphere)		37%
Ma et al. ⁽¹¹⁾	Diamond (Sphere)	72%	68%
Kang et al. ⁽¹²⁾	Silver (Sphere)		80%
Lin et al. ⁽¹³⁾	Silver		40%
Yang et al. ⁽¹⁴⁾	CuO		46%
Do et al. ⁽¹⁶⁾	Al ₂ O ₃ (Sphere)	8.1%	40%
Liu and Lu ⁽¹⁷⁾	MWCNT (Tube)	25%	20%

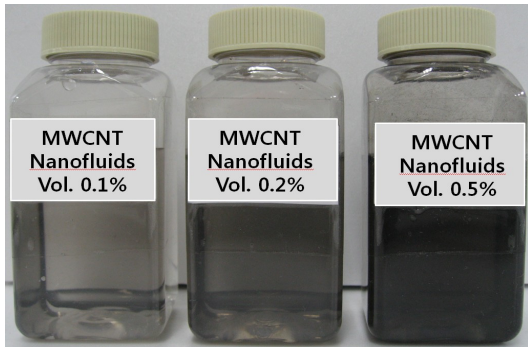


Fig. 1 Water-based MWCNT nanofluids.

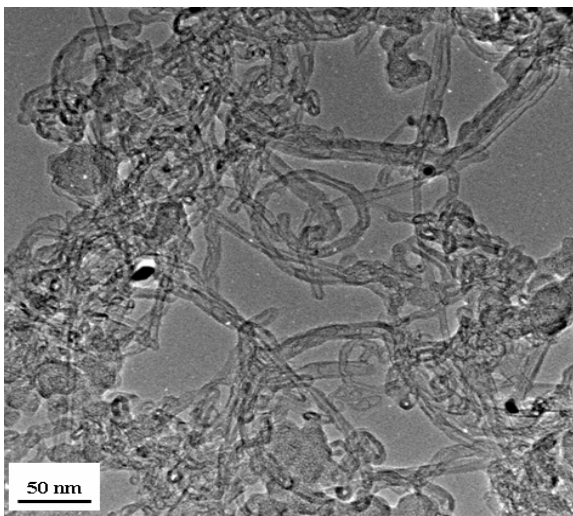


Fig. 2 TEM image of dispersed MWCNT nanoparticles.

제작된 다중벽 탄소 나노튜브 나노유체는 제작 후 분산 안정성을 파악하기 위하여, 제타 포텐셜(Zeta potential)을 측정 하였다. 제타 포텐셜(Zeta potential)이란 액체 속에 부유하는 콜로이드(Colloid) 입자 표면의 전기적 인력과 반발력의 기준으로 사용하는 용어으로써, 일반적으로 측정된 절대 값이 60 mV 이상이면, 분산안정성이 아주 우수 하다고 볼 수 있으며, 30 mV 이상인 경우 유체에 포함된 입자의 분산, 부유 특성이 안정되었다고 볼 수 있다. 또한, 20 mV 이상인 경우 분산안정성이 다소 양호하다고 볼 수 있으며, 5 mV 이하인 경우 나노입자들이 안정적으로 분산, 부유되지 못하고 서로 응집되는 것으로 분산안정성이 아주 안 좋은 것으로 알려져 있다.⁽¹⁹⁾ 본 연구에서 제작된 나노유체의 경우 제타포텐셜(Zeta potential)은 19 mV로 측정되었기 때문에 제작된 다중벽 탄소 나노튜브 나노유체의 분산안정성이 다소 양호한 것을 확인할 수 있다.

2.2 히트파이프 제작 방법

본 연구에서 사용된 히트파이프는 그루브 워 구조를 가지는 외경 4 mm, 내경 3 mm인 구리 관을 이용하여 제작 하였다. 또한, 금속가공 중에 발생하는 재료의 미세 입자들이 워(Wick) 구조물의 기공을 물리적으로 막아버리거나 오일, 표면산화 등에 의한 이물질이 고체표면과 유체 사이의 접촉각을 손상시키지 않도록 구리 관 내부의 표면을 세척액을 이용하여 세척하였다.⁽²⁰⁾

세척 방법으로는 구리 관과 필튜브를 솔벤트 세척, 증류수 세척, 질산 세척, 알코올 세척, 마지막으로 증류수 세척을 다시 하였다. 세척 후 구리 관을 필튜브(Fill tube)와 저온 용접봉을 이용하여 가스 토치 용접을 하고 용접 후에 다시 알코올 세척과 증류수 세척을 하여 용접을 하면서 생긴 그을음을 세척하였다. 세척을 마친 뒤 완전건조 후 진공밸브와 진공펌프에 연결하여 내부 압력을 감압하였다. 내부의 압력은 수냉식 항온조의 한계 최저온도인 10°C를 기준으로 하여, 10°C에서 히트파이프 내부의 작동유체가 응축이 될수 있는 압력(10 Torr)을 기준으로 하였다.⁽²¹⁾ 작동유체의 충전량은 그루브 워의 총 부피를 100% 포화도로 간주하고 이를 기준으로 140%를 주입하였다.

2.3 히트파이프 열 성능 실험 장치 및 검증

Fig. 3은 전체 성능 실험 장치의 개략도를 나타내고 있다. 열 성능 실험 장치는 크게 다중벽 탄소나노튜브 나노유체를 작동유체로 사용하도록 제작된 소형 히트파이프, 히트파이프의 단열부에 전력을 공급하는 전원 공급 장치, 응축부를 냉각 시키는 수냉식 항온조, 단열 컨테이너, 그리고 자료 획득 장치로 구성된다. 히트파이프의 증발부는 균일 열 부하 조건을 위해서 직경 30 mm크기의 구리 블락을 사용하였으며, 구리 블락 외벽에 2.2 Ω/m의 크기를 가지는 니켈-크롬열선(너비 3 mm, 두께 0.3 mm)을 5 mm 간격으로 일정하게 감았다. 히트파이프와 구리 블락 사이에는 접촉 열 저항을 최소화하기 위하여 써멀 그리스(Thermal grease, $k = 0.74 \text{ W/mK}$)를 사용하였다. 또한, 절연 테이프를 이용하여 구리 블락 표면을 절연시켜 열 입력량이 구리 블락을 가열하는 용도로만 쓰이도록 하였다. 증발부와 단열부는 단열재인 세라믹 섬유($k = 0.075 \text{ W/mK}$)로 1차 단열을 하여

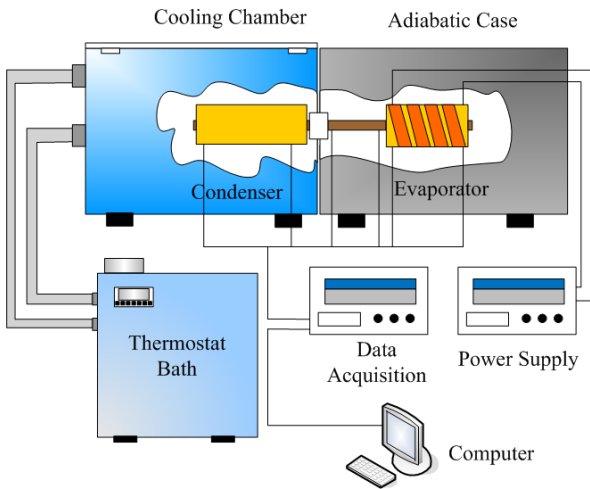


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus.

열손실을 최소화 하였고, 단열재가 움직이지 않도록 단열 컨테이너로 지지하였다. 히트파이프의 응축부는 냉각을 위해 항온조에서 공급되는 냉각수를 소형펌프(펌프용량 : 70 W, 1100 L/h)를 이용하여 냉각 챔버로 이송시켜 가열부에서 공급된 열량이 응축부에서 충분히 냉각이 되도록 제작 하였다.

히트파이프의 열적성능을 파악하기 위해서 증발부의 온도를 일정하게 유지한 상태에서 열 입력량을 변화시켜 가면서 히트파이프의 열저항을 측정하였다. 히트파이프의 벽면온도는 J-Type 열전대를 증발부와 단열부, 응축부의 일정한 위치에 위아래 각 2개씩 총 6개를 히트파이프 외벽에 납땜 접합 하여 측정하였다. Fig. 4는 히트파이프에 접합한 J-Type 열전대의 위치를 나타낸다. 일반적으로 전자장치 냉각에 쓰이는 히트파이프는 수평조건에서 작동되기 때문에, 경사각을 0°로 고정하여 실험을 수행하였다.

열저항 측정의 불확도는 95% 신뢰구간을 갖는 범위 내에서 식(1)에 의하여 평가 되었다.

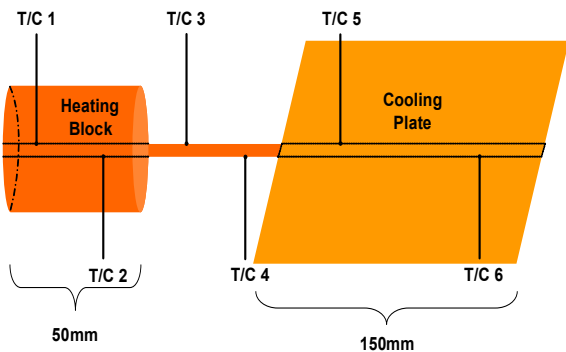


Fig. 4 Attached position of thermocouples.

$$\mu_R = \sqrt{B_R^2 + (t_{\lambda,95\%} P_R)^2} \quad (1)$$

여기서 μ_R , B_R , 그리고 $t_{\lambda,95\%} P_R$ 는 각각 측정 불확도, 계측기가 가지는 오차, 그리고 95% 신뢰 구간에서의 측정 오차이다. 측정 불확도를 구하기 위하여 열저항 관계식을 이용하여 구하면, 식 (2)와 같이 표현 된다.

$$\frac{u_R}{R} = \left[\left(\frac{u_Q}{Q} \right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

또한 계측기가 가지는 오차는 측정 불확도에 비하여 무시할 만큼 적기 때문에 무시 할 수 있다. 따라서 식(2)에서 측정장치가 가지는 불확도는 각각 $\frac{u_Q}{Q} = 0.001$, $\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T} = 0.0164$ 이며, 이를 식(2)에 대입 하면, 열저항 측정의 불확도는 1.6%가 된다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 MWCNT 나노유체의 유효 열전도도

제작된 다중벽 탄소 나노튜브 나노유체의 열적특성을 평가하기 위해, 0.1 Vol%, 0.2 Vol%, 0.5 Vol% 부피비의 다중벽 탄소 나노튜브 나노유체와 기본유체인 증류수의 열전도도를 측정하여 비교하였다. 열전도도 측정 방법은 비정상 열선 법(Transient hot wire method)이다. 이는 실린더 내부의 백금선을 열선으로 사용하여 열선의 온도변화를 이용하여 실린더 내부의 열전도도를 구하는 방법이며, 나노유체의 열전도도를 구하는 식은 아래의 식(3)과 같이 표현 된다.

$$k = \frac{q}{4\pi} / \frac{d\Delta T}{d(\ln t)} \quad (3)$$

위의 식을 이용하여 열 저항 측정 불확도를 계산한 방법과 동일하게 열전도도 측정 불확도를 구하기 위한 관계식을 표현하면 식(4)와 같이 표현 된다.

$$\frac{u_k}{k} = \sqrt{\left(\frac{u_q}{q} \right)^2 + \left(\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T} \right)^2} \quad (4)$$

위의 식을 이용하여 열전도도 측정의 불확도를 계

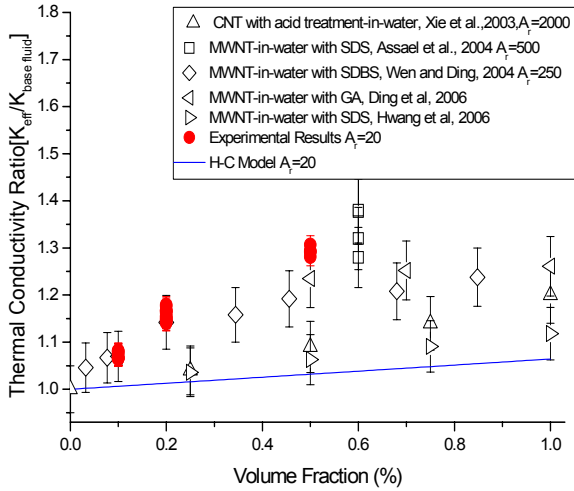


Fig. 5 Thermal conductivity ratio of nanofluids.

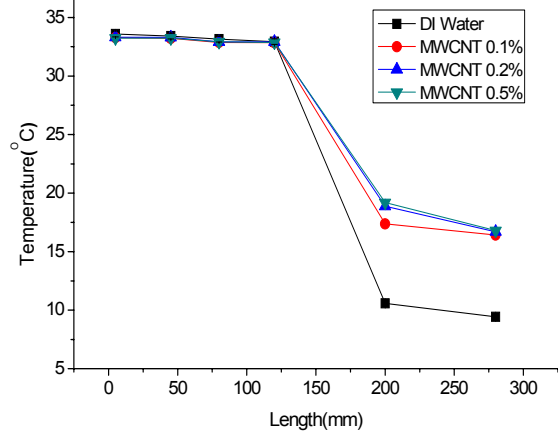
산하여 보면, $\frac{u_q}{q} = 0.08$, $\frac{u_{\Delta T}}{\Delta T} = 0.01499$ 이며, 따라서 최종적으로 열전도도 측정의 불확도는 1.5%이다.

Fig. 5는 기존유체 대비 MWCNT 나노유체의 열전도도 비를 보여준다. 그래프에서 보듯이 MWCNT 나노유체의 부피비가 증가함에 따라 나노유체의 유효 열전도도비가 증가함을 확인 할 수 있다. 부피비가 0.1 Vol%, 0.2 Vol%에서 MWCNT 나노유체의 유효 열전도도가 기본유체에 비해 7.2%, 15.8% 향상되며, 부피비 0.5 Vol%에서 MWCNT 나노유체의 유효 열전도도가 최대 29.3% 향상됨을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 5에서 확인 할 수 있으며, 물을 기본유체로 하는 MWCNT 나노유체의 기존의 열전도도 결과와 동일 부피비에서 비슷한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다.

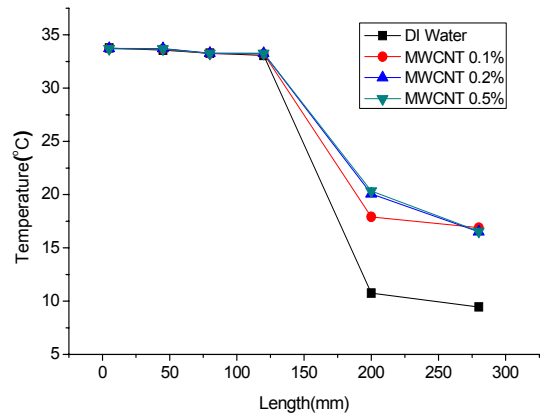
3.2 히트파이프의 열저항

본 연구에서는 MWCNT 나노유체를 작동유체로 적용한 히트파이프의 열 저항을 측정하고, 이를 기본유체를 작동유체로 사용한 히트파이프와 비교하여 히트파이프의 열 성능을 평가 하였다. 히트파이프의 열 저항의 측정은 히트파이프의 크기 및 내부 그루브의 형상, 내부압력, 증발부의 온도 및 증진량을 고정한 상태에서 MWCNT 나노유체의 부피비 및 열 입력량을 변화시키면서 측정하였다. 열 입력량을 각각 8 W, 10 W, 11 W, 나노유체 부피비를 각각 0.1%, 0.2%, 0.5%로 변화시키면서 실험을 실시 하였다. 열 저항을 계산하기에 앞서 히트파이프

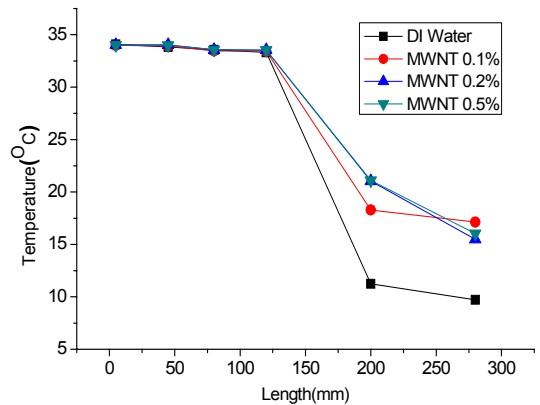
의 벽면의 온도를 측정하였다. Fig. 6이 각각의 열 입력량에 따른 히트파이프의 벽면의 온도분포를 나타낸다. 벽면온도 분포의 결과를 보면, 증발부의 온도가 일정함을 확인 할 수 있으며, 열 입력량 및 작동유체인 MWCNT 나노유체의 부피비가 0.1%에서



(a) 8W



(b) 10W



(c) 11W

Fig. 6 Temperature distribution of heat pipe for (a) 8W, (b) 10W, (c) 11W.

0.5%로 증가함에 따라서 히트파이프의 증발부와 응축부 사이의 온도차이가 적어 짐을 확인 할 수 있다. 측정되어진 벽면온도를 바탕으로 증발부와 응축수 사이의 열 저항 식(5)을 통하여 확인 할 수 있다.

$$R_{e-c} = \frac{(\overline{T}_e - \overline{T}_c)}{Q_{input}} \quad (5)$$

여기서 R_{e-c} , $\overline{T}_e - \overline{T}_c$, Q_{input} 는 증발부와 응축부 사이의 열저항, 증발부와 응축부의 평균 온도차이 그리고 열 입력량을 나타낸다.

Fig. 7은 열 입력량 및 MWCNT 나노유체 부피비 변화에 따른 증발부와 응축부 사이의 열 저항을 나타낸 그래프이다. 열 입력량이 증가하여도 히트파이프의 열 저항은 측정오차 범위 내에서 동일하게 측정되는 것을 알 수 있으며, 이는 히트파이프의 Dry-out되는 열 입력량이 11 W보다 크다는 것을 알 수 있다. 또한 MWCNT 나노입자의 부피비가 증가할수록 증발부와 응축부 사이의 열 저항이 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 특히 11 W 열 입력량 조건에서 부피비 0.5%를 가지는 나노유체 히트파이프의 증발부와 응축부 사이의 열 저항은 동일 작동유체 충전량을 가지는 기본유체를 작동유체로 사용하는 히트파이프 대비 최대 35.2%까지 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 5와 Fig. 7을 바탕으로 부피비 0.5%에서 MWCNT 나노유체의 유효 열전도도 향상은 약 29%인 반면에, 히트파이프의 열 저항의 감소는 약 35%라는 사실을 확인 할 수 있다. 이는 기존의 MWCNT 나

노유체를 사용하여 히트파이프의 열적 성능을 실험한 Liu and Lu⁽¹⁷⁾의 결과와는 다른 경향을 보이는 것이며, 나노유체의 열전도도 향상 만으로는 나노유체를 작동유체로 사용하는 히트파이프의 열저항 감소의 원인을 모두 설명할 수는 없다는 Do et al.^(15,16)의 결과와 동일한 경향성을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서는 그루브 벽을 가지는 히트파이프에 물-기반 MWCNT 나노유체를 작동유체로 적용하여 히트파이프의 열성능 특성을 실험적으로 연구하였으며, 실험적 결과를 바탕으로 히트파이프의 열 성능 향상 원인에 대하여 설명하였다. 이를 위해, 0.1%, 0.2%, 0.5%의 부피비를 가지는 MWCNT 나노유체를 제작하여 열전도도를 측정하였으며, 그루브 벽을 가지는 히트파이프에 적용하여 증발부와 단열부 사이의 열 저항을 측정하였다. 그 결과 MWCNT 나노유체의 부피비가 0.5%일 때, 기본유체와 비교하여 유효 열전도도는 최대 29% 상승했으며, MWCNT 나노유체 히트파이프의 열 저항은 35.2% 감소된다. 이는 나노유체의 유효열전도도 상승만으로는 히트파이프의 열저항 감소를 모두 설명할 수 없다는 사실을 확인할 수 있는 결과이다.

후 기

본 연구는 2008년 한국학술진흥재단의 지원 과제인 신진 연구과제의 지원(KRF-2008-331-D00065)에 의하여 연구 되었음을 감사드립니다.

참고문헌

1. Faghri, A., 1995, Heat Pipe Science and Technology, Taylor and Francis.
2. Jang, S. P., Kim, S. J., Paik, K. Y., 2003, Experimental Investigation of Thermal Characteristics for a Microchannel Heat Sink Subject to an Impinging Jet, Using a Micro-thermal Sensor Array, Sensors and Actuators A : Physical, Vol. 105, pp. 211-224.
3. Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S., and Eastman, J. A., 1999, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, ASME

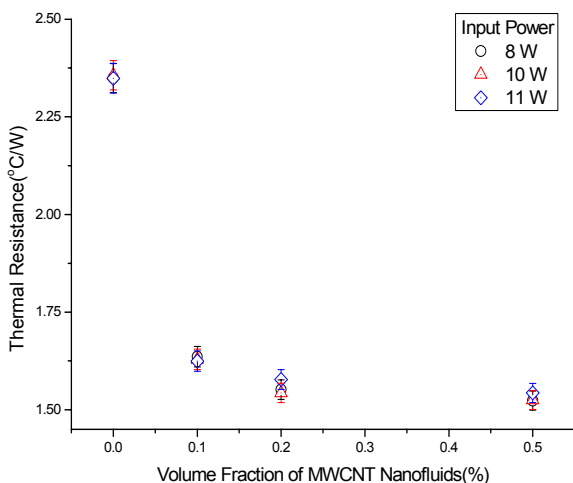


Fig. 7 Thermal resistance of heat pipe.

- Journal of Heat Transfer, Vol. 121, pp. 280-289.
4. Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., and Yu, W., Thompson, L. J., 2001, Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, Applied Physics Letters, Vol. 78, pp. 718-720.
 5. Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., and Grulke, E. A., 2001, Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions, Applied Physics Letters, Vol. 79, pp. 2252-2254.
 6. Wang, X. Q., Mujumdar, A. S., 2007, Heat transfer characteristics of nanofluids : a review, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 46, No. 1, pp. 1-19.
 7. You, S. M., Kim, J. H. and Kim, K. H., 2003, Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, Applied Physics Letters, Vol. 83, pp. 3374-3376.
 8. Pak, B. C. and Cho, Y. I., 1998, Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particle, Experimental Heat Transfer, Vol. 11, pp. 151-170.
 9. Yang, Y., Zhang, Z. G., Grulke, E. A., Anderson, W. B., and Wu, G., 2005, Heat Transfer Properties of Nanoparticle-in-fluid Dispersions (nanofluids) in Laminar Flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 1107-1116.
 10. Tsai, C. Y., Chien, H. T., Ding, P. P., Chan, B., Luh, T. Y., and Chen, P. H., 2004, Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe thermal performance, Materials Letters, Vol. 58, pp. 1461-1465.
 11. Ma, H. B., Wilson, C., Borgmeyer, B., Park, K., Yu, Q., and Choi, S. U. S., Tirumala, M., 2006, Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe, Applied Physics Letters, Vol. 88, pp. 143-116.
 12. Kang, S. W., Wei, W. C., Tsai, S. H., and Yang, S. Y., 2006, Experimental investigation of silver nano-fluid on heat pipe thermal performance, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 2377-2382.
 13. Lin, Y. H., Kang, S. W. and Chen, H. L., 2008, Effect of Silver Nano-fluid on Pulsating Heat Pipe Thermal Performance, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1312-1317.
 14. Yang, X. F., Liu, Z. H. and Zhao, J., 2008, Heat Transfer Performance of a Horizontal Micro-grooved Heat Pipe Using CuO Nanofluids, J. Micromech. Microeng, Vol. 18, pp. 35-38.
 15. Do, K. H. and Jang, S. P., 2010, Effect of nanofluids on the thermal performance of a flat micro heat pipe with a rectangular grooved wick, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 2183-2192.
 16. Do, K. H., Ha, H. J. and Jang, S. P., 2010, Thermal resistance of screen mesh wick heat pipes using the water-based Al₂O₃ nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 5888-5894.
 17. Liu, Z. H. and Lu, L., 2009, Thermal Performance of an Axially Microgrooved Heat Pipe Using Carbon Nanotube Suspensions, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 23, pp. 170-175.
 18. Lee, J. H., Hwang, K. S., Jang, S. P., Lee, B. H., Kim, J. H., Choi, S. U. S., and Choi, C. J., 2008, Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃ Nanoparticles, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, pp. 2651-2656.
 19. Müller, R. H., 1996, Zetapotential und Partikel-ladung in der Laborpraxis, 1st Ed., Stuttgart : Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
 20. Chi, S. W., 1976, Heat Pipe Theory and Practice a Sourcebook, McGraw-Hill, New York, pp. 197-210.
 21. Cengel, Y. A. and Boles, M. A., 1989 Thermodynamics : an engineering approach, McGraw-Hill, New York.