

히트파이프 작동유체 개발을 위한 에탄올-탄소나노튜브 나노유체의 열전도도 및 점도 특성 연구

안응진*, 박성식*, 박윤철**, 김종윤***, 김남진*

*제주대학교 대학원 에너지화학공학전공(anej515@jejunu.ac.kr, pss5153@jejunu.ac.kr),

**제주대학교 기계공학과(ycpark@jejunu.ac.kr),

***서정대학교 소방안전관리과(kimjy@seojeong.ac.kr)

*† 제주대학교 에너지공학과(jnkim@jejunu.ac.kr)

Study on the Thermal Conductivity and Viscosity of Ethanol with Carbon Nanotubes for the Development of a Heat Pipe Working Fluid

An, Eoung-Jin* Park, Sung-Seek** Park, Yoon-Chul*** Kim, Jong-Yoon Kim, Nam-Jin****

*Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(anej515@jejunu.ac.kr, pss5153@jejunu.ac.kr)

**Dept. of Mechanical Engineering, Jeju National University(ycpark@jejunu.ac.kr)

***Dept. of Fire Safety Management, Seojeong College(kimjy@seojeong.ac.kr)

*† Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(jnkim@jejunu.ac.kr)

Abstract

Nanofluids using Carbon Nanotubes have a excellent thermal characteristic. In this study, for increasing the efficiency of solar collector, the thermal conductivity and viscosity of Ethanol-Oxidized Multi-walled Carbon Nanofluids were measured. Nanofluids were manufactured by ultra-sonic dispersing Oxidized Multi-walled Carbon Nanotubes(OMWCNTs) in ethanol at the rates of 0.0005 ~ 0.1 vol%. The thermal conductivity and viscosity of manufactured nanofluids were measured at the low temperature(10°C), the room temperature(25°C) and the high temperature(70°C). For measuring thermal conductivity and viscosity, we used transient hot-wire method and rotational digital viscometer, respectively. As a result, under given temperature conditions, thermal conductivity of the 0.1 vol% nanofluids improved 33.74% (10°C), 33.14% (25°C) and 32.36% (70°C), and its viscosity increased by 37.93% (10°C), 31.92% (25°C) and 29.42% (70°C) than the base fluids.

Keywords : 산화 다중벽 탄소나노튜브(Oxidized Multi-walled Nanotubes), 에탄올(Ethanol), 열전도도(Thermal conductivity), 점도(Viscosity), 태양열 집열기(Solar Collector), 히트파이프(Heat Pipe)

Submit date : 2012. 3. 6, Judgment date : 2012. 3. 15, Publication decide date : 2012. 7. 2

Communication author : Kim, Nam-Jin(jnkim@jejunu.ac.kr)

1. 서 론

최근 현대 사회는 급격한 산업의 발달로 인하여 에너지의 수요가 크게 증가하고 있다. 증가하는 에너지의 수요를 충족시키기 위하여 석유, 석탄, 가스 등 화석에너지의 소비 또한 증가하고 있다.¹⁾ 화석에너지의 소비가 늘면서 CO 및 CO₂와 같은 온실가스 배출이 증가하고 있어 온실가스를 줄이기 위한 대책 마련이 시급하다. 태양열에너지는 온실가스를 발생시키지 않는 대표적인 친환경에너지 중에 하나이며, 태양을 에너지원으로 이용하기 때문에 자원 고갈의 우려가 없어 이를 활용하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 태양열에너지는 단위면적당 공급받을 수 있는 에너지의 양이 적고, 흐린 날이나 비가 오는 날에는 에너지의 공급이 불안정하다는 단점을 갖고 있다. 따라서 이러한 단점을 최소화하기 위해서는 태양열 집열기 시스템의 효율을 증가시켜야 한다.

태양열시스템의 효율을 증가시키는 가장 효과적인 방법은 집열기의 히트파이프 효율을 향상시키는 것이다. 최근에는 히트파이프의 효율을 향상시키기 위하여, 히트파이프의 재질 및 내부구조의 형상을 변화시키기 위한 연구가 진행되어왔다. 하지만 이러한 노력만으론 히트파이프의 효율을 향상시키는 것에 한계가 있다고 판단된다. 이러한 한계를 극복하기 위해 히트파이프 작동유체에 우수한 열 성능을 지닌 나노유체를 적용하여 히트파이프의 효율을 증가시키고자 하는 연구가 진행되고 있다.^{2,3)}

나노유체란 순수 유체에 열전도도가 우수한 고체 입자를 안정적으로 분산시킴으로써, 혼합된 유체의 열전도도 역시 증가한다는 개념이 적용된 유체이다. 특히 나노기술이 발달하면서 획기적으로 높은 열전도도를 갖는 다중벽 탄소나노튜브(Multi-walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)의 대량 생산이 가능하게 되었고, 이를 이용한 탄소나노유체의 연구개발 또한 탄력을 받게 되었다.

국외에서는 Liu et al.⁴⁾이 엔진오일에 탄소

나노튜브 혼합하여 나노유체를 제조하여 열전도도를 측정하였고, Choi et al.⁵⁾은 Poly Oil에 탄소나노튜브를 첨가한 유체의 열전도도를 측정하였다. 그리고 Xie et al.⁶⁾은 다중벽 탄소나노튜브를 물과 에틸렌글리콜, Decene에 혼합하여 나노유체의 열전도도를 측정하여 열전도도 향상을 확인하였다. 국내에서는 Kim et al.⁷⁾은 Al₂O₃를 적용한 나노유체의 열전달 성능에 관한 실험을 수행하였으며, Kim et al.⁸⁾은 물에 산화 다중벽 탄소나노튜브를 분산한 나노유체의 열전도도와 점도를 측정하여 열매체로의 적용 가능성을 연구하였다.

따라서 본 연구에서는 태양열 집열기의 효율 향상을 위해 에탄올 기반의 탄소나노유체를 제조하고 온도(10℃, 25℃, 70℃)에 따른 열전도도 및 점도를 측정하여 히트파이프 작동유체로서의 적용 가능성을 비교 분석하였다.

2. 산화 탄소나노튜브의 특성 및 산화 나노유체의 제조

2.1 산화 탄소나노튜브의 특성

본 연구에서는 한화 나노텍에서 화학 증기 증착법에 의해 제조된 다중벽 탄소나노튜브 CM-100을 화학적 개질에 의한 분산법을 이용하여 산화 처리하여 실험에 사용하였다. 산화 다중벽 탄소나노튜브와 다중벽 탄소나노튜브의 가장 큰 차이점은 산화처리에 의해 탄소 기본 구조에 -C=O, -COOH, -OH 등의 기능기가 부착된다는 점이며, 이 기능기를 통해 유체와의 인력이 증가하게 된다. 따라서 산화 다중벽 탄소나노튜브를 이용하여 나노유체를 제조할 경우 다중벽 탄소나노튜브를 유체에 분산하는 것보다 침전 현상 발생이 줄어들어 안정된 나노유체를 얻을 수 있다.

본 연구에 사용된 산화 CM-100 탄소나노튜브의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 그리고 다중벽 탄소나노튜브 CM-100과 산화 CM-100의 SEM 사진을 Fig. 1과 Fig. 2에 각

각 나타내었다.

2.2 산화 나노유체의 제조

나노유체는 순수 유체 내에 nm 크기의 입자들이 안정적으로 분산되어 있는 새로운 개념의 유체를 말하며, 나노입자의 영향으로 순수 유체보다 열전도도가 높다는 특징을 가지고 있다. 하지만 단순히 나노입자와 유체를 혼합하는

표 1. Properties of MWCNTs (CM-100).

Properties	Oxidized CM-100
Diameter(nm)	10~15
Length(μ m)	~200
Purity(wt.%)	95
Bulk Density(g/cm^3)	0.05
Surface Area(m^2/g)	225

것만으로는 나노입자들이 유체 내에 안정적으로 분산되지 않기 때문에 열전도도 향상 효과를 기대하기 힘들다. 또한 탄소나노튜브의 경우 흑연판 사이 상호작용과 마찬가지로 튜브와 튜브 간에 반데르발스 힘이 존재하여 안정적으로 분산하기가 어렵다. 탄소나노튜브를 유체 내에 안정적으로 분산시키기 위한 방법으로는 유체 내에 직접 초음파를 발생시켜 분산하는 기계적 분산법과 고분자 화합물 또는 계면활성제에 의한 물리적 고착에 의한 분산, 강산으로 나노입자의 탄화수소 구조를 바꾸는 화학적 개질에 의한 분산법이 있다. Kim et al.⁸⁾은 화학적 개질에 의한 분산법과 기계적 분산법을 함께 적용하였을 때 가장 우수한 열전도도 효과를 나타낸다고 보고하였다.

따라서, 본 연구에서 화학적 개질에 의한 분산법과 초음파에 의한 기계적 분산법을 함께 적용하여 나노유체를 제조하였다. 다중벽 탄소나노튜브를 황산(H_2SO_4 , 98%)과 질산(HNO_3 , 63%)을 이용하여 산화 처리하여 나노유체를 제조하였으며, 에탄올 50ml에 혼합 비율을 0.0005 ~ 0.1 vol%로 변화시키고, 2시간 초음파 분산하여 산화나노유체를 제조하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 열전도도 측정

나노유체의 열전도도는 전기·전도성 유체의 비정상 열선법(Transient Hot-wire Method)을 이용하여 측정하였다. 이 장치는 측정 유체

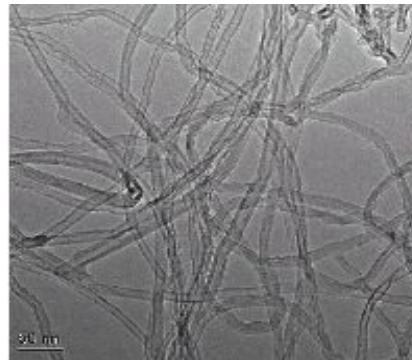


Fig 1. SEM microphoto of CM-100.

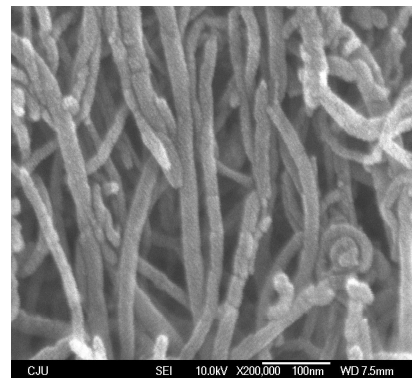


Fig 2. SEM microphoto of oxidized CM-100.

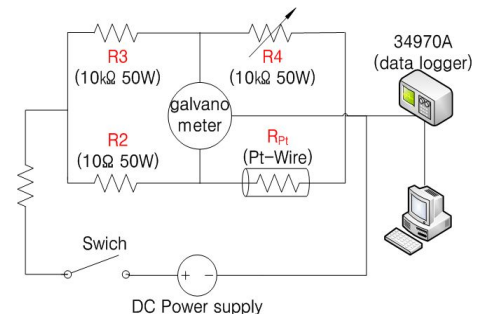


Fig 3. Schematic diagram of Wheatstone Bridge.

내에서 대류효과가 일어나지 않고, 사용자가 기초적인 전기지식만 있으면 쉽게 구성할 수 있다. 비정상 열선법 측정 장치는 Fig. 3과 같이 백금선의 저항변화를 검출하는 휘트스톤 브릿지(Wheatstone Bridge), 데이터 수집과 저장을 위한 데이터 로거(Agilent 34079A)와 컴퓨터, 전원 공급을 위한 파워 서플라이(Agilent E3648A)로 구성된다. 휘트스톤 브릿지는 테프론을 코팅한 직경 76 μm , 길이 130 mm의 백금선과 10 Ω , 10 k Ω 의 저항과 10 k Ω 의 가변저항을 사용하여 제작하였다.

실험은 항온수조를 이용하여 나노유체를 실험온도와 평형이 되게 한 후, 다음의 방법으로 실험하였다. 온도평형이 된 나노유체에 백금선을 완전히 잠기게 한 후, 가변저항을 조절하여 검류계에 걸리는 전압을 0으로 만들고 파워 서플라이를 이용하여 15V의 전압을 인가시킨다. 그러면 백금선의 표면온도가 변하면서 저항도 변하게 되는데, 이 데이터를 수집하여 Bently⁹⁾가 제안한 전기저항과 온도의 선형식에 적용하여 나노유체의 온도 변화를 계산하였다.

$$E_{th} = V_s \left(\frac{R_{pt}}{R_{pt} + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) \quad (1)$$

$$R = R_0(1 + \alpha dT)$$

여기서, E_{th} 는 검류계에 걸리는 전압이며, V_s 는 공급전압, T 는 나노유체의 온도, R 은 온도 T 에서의 백금선 저항, R_0 는 0 $^\circ\text{C}$ 에서 백금선의 저항이며, α 는 백금의 온도-저항 계수이며 0.0039092/ $^\circ\text{C}$ 이다.

위 (1)의 전기저항과 온도의 선형식을 이용하여 계산된 온도 데이터를 Nagasaka¹⁰⁾가 제안한 시간에 따른 열선의 온도 변화식을 이용하여 나노유체의 열전도도를 계산하였다

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

여기서 k 는 나노유체의 열전도도이며, T_1 , T_2 는 각각 시간 t_1 , t_2 에서의 온도, q 는 열선에 가해지는 전력이다.

나노유체의 열전도도 측정실험은 실험온도 (10 $^\circ\text{C}$, 25 $^\circ\text{C}$, 70 $^\circ\text{C}$)를 일정하게 유지하였고, 실험의 오차를 줄이기 위해 동일조건에서 실험을 10번씩 반복 수행하여 평균값을 구하였고, 기본 유체인 순수 에탄올과 비교하여 열전도도 증가량을 나타내었다.

3.2 점도 측정

본 실험에서는 열전도도 측정실험과 같이 10 $^\circ\text{C}$, 25 $^\circ\text{C}$, 70 $^\circ\text{C}$ 의 실험 온도 조건을 유지하면서 점도를 측정하였다. 실험장치의 구성은 점도를 측정하기 위한 점도계(Brookfield DV-II+pro)와 실험온도를 일정하게 유지시켜 줄 항온수조(TC-502), 데이터의 모니터링과 저장을 위한 컴퓨터로 구성되어 있다.

점도 측정실험은 점도계와 연결되어 있는 항온수조로 나노유체를 실험온도로 평형시킨 후에 점도계의 회전추를 충분히 담그고 추를 회전시켜 측정하였다. 나노유체는 비교적 점도가 낮기 때문에 저점도용 회전추 LV-1를 사용하였다. 나노유체의 점도특성은 스피들(spindle)의 최대 회전수인 200 rpm, 전단율 0.496(1/sec)의 조건에서 측정하였다.

회전형 디지털 점도계인 DV-II+pro는 점도를 연속적으로 측정하도록 되어 있다. 따라서 본 실험에서의 점도값은 실험온도를 일정하게 유지하면서 회전추를 유체 내에서 3분간 회전시켜 나온 최저 값을 점도 값으로 하였다.

4. 실험 결과

4.1 열전도도

Fig. 4는 열전도도 실험 장치의 정확성을 알아보기 위하여 온도에 따른 에탄올의 열전도도 값을 문헌 값과 비교하여 나타낸 그래프이다. 에탄올의 물성치는 Chemical Engineering

Research Information Center¹¹⁾에서 제공하는 데이터를 이용하였으며, 순수 에탄올의 온도에 따른 열전도도 값을 측정하여 문헌 값과 비교한

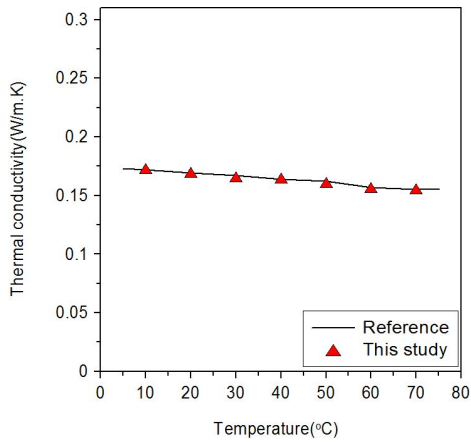


Fig. 4. Validation of Ethanol to measure the thermal conductivity of the base fluid.

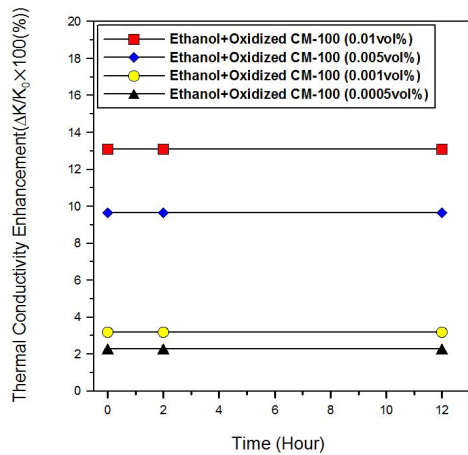
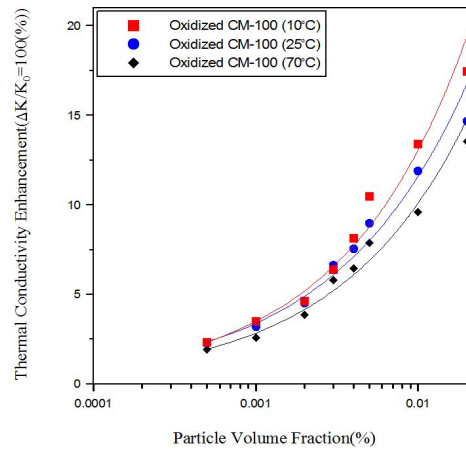


Fig. 5. Comparison of the thermal conductivity as a function of time at 25°C

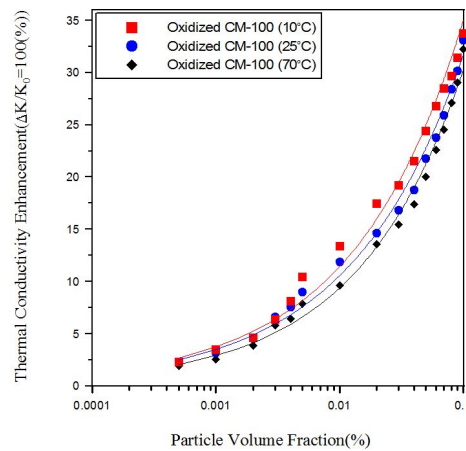
결과 실험 결과 0.6% 이내의 오차로 열전도도가 일치함을 확인하였다. 또한 25°C의 경우 측정된 데이터의 분산은 4.95×10^{-5} 이었으며, 표준편차는 7.309×10^{-3} 이었다. 따라서 본 실험에 사용된 열전도도 측정 장치는 정확하게 만들어졌다고 할 수 있다.

Fig. 5는 시간에 따른 에탄올-산화탄소나

노유체의 열전도도 변화를 관찰한 그래프이다. 기본유체인 에탄올의 열전도도 대비 증가율로 나노유체의 열전도도 변화를 측정하였다. 여기서 K_0 는 기본유체인 에탄올의 열전도도이며, ΔK 는 나노유체와 에탄올 열전도도의



(a)



(B)

Fig. 6. Comparison of the thermal conductivity as temperature(10°C, 25°C, 70°C).

차이다. 나노유체를 제조한 2시간 후, 12시간 후의 열전도도를 측정하였고, 시간이 지남에 따라 나노유체의 열전도도 변화는 거의 없음을 확인하였다.

Fig. 6의 (a)는 나노유체의 체적분율 0.0005

vol% ~ 0.02 vol%의 에탄올-산화탄소나노유체의 열전도도를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 각각의 온도에서 나노유체의 체적분율이 증가함에 따라 열전도도가 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 동일한 온도의 에탄올 대비 열전도도의 증가폭은 10°C, 25°C, 70°C 순으로 10°C일 때 열전도도가 가장 높게 증가하였다. 특히, 에탄올-산화탄소나노유체의 열전도도는 체적분율 0.02 vol% 일 때, 10°C의 나노유체는 에탄올 대비 17.44% 증가 하였으며, 25°C일 때는 15.78%, 70°C일 때는 13.55%가 각각 증가하였다.

Fig. 6의 (b)는 체적분율을 0.1 vol%까지 확장하여 실험한 결과를 나타낸 그래프이다. 마찬가지로 체적분율이 증가함에 따라 에탄올-산화탄소나노유체의 열전도도도 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 25°C일 때, 0.1 vol% 에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도는 기본유체 대비 33.14%가 증가하였다. 10°C 나노유체의 경우 25°C보다 0.58% 증가하여 기본유체 대비 33.72%의 열전도도 향상효과를 보였으며, 70°C의 경우에는 25°C보다 0.88% 감소한 32.26%의 열전도도가 향상되었다.

탄소나노튜브의 체적비율이 증가함에 따라 열전도도가 증가하는 에탄올-산화탄소나노유체는 히트파이프 증발부의 열저항의 크기를 감소시키고, 증발부 내부의 핀에 탄소나노튜브 입자가 코팅 층을 형성하여 열전달 면적을 넓혀주기 때문에 히트파이프의 작동유체로 사용되는데 있어 상당히 유리할 것이라고 판단된다.¹²⁾

4.2 점도

Fig. 7의 (a)는 나노유체의 체적분율 0.0005 vol% ~ 0.02 vol%의 에탄올-산화탄소나노유체의 점도를 온도에 따라 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이, 각각의 온도에서 나노유체의 체적분율이 증가함에

따라 점도가 비선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 동일한 온도의 에탄올 대비 점도

의 증가폭은 10°C, 25°C, 70°C 순으로 10°C일 때 점도가 가장 높게 증가하였다. 특히, 점도는 체적분율 0.02 vol% 일 때, 10°C의 나노유체는 에탄올 대비 9.74% 증가 하였으며, 25°C일 때는 8.18%, 70°C일 때는 3.23%가 각각

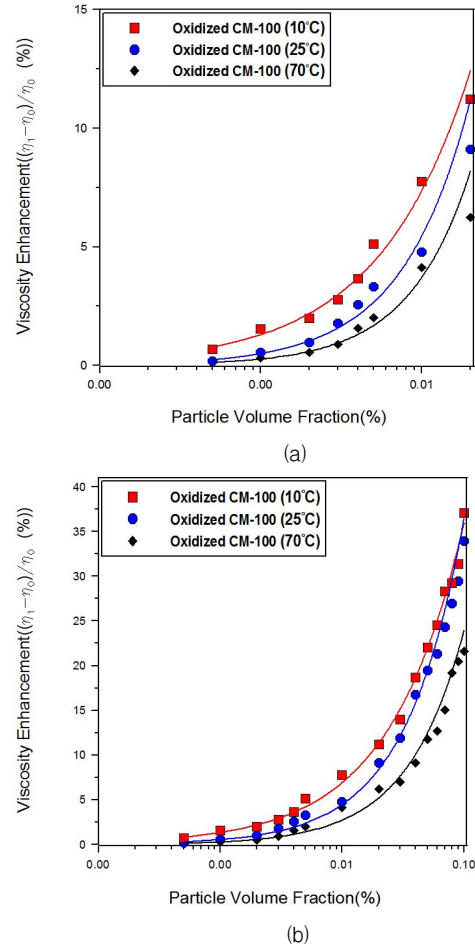


Fig 7. Comparison of the viscosity as temperature (10°C, 25°C, 70°C).

증가하였다. Fig. 7의 (b)는 기존의 체적분율을 0.02 vol%에서 0.1 vol% 까지 확장하여 점도를 측정 한 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 마찬가지로 체적분율이 증가함에 따라 에탄올-산화탄소나노유체의 점도가 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 10°C의 체적분율 0.1

vol% 에탄올-산화탄소나노유체의 점도는 에탄올 대비 35.1%로 가장 높게 증가하였으며, 25°C일 때 32.14%, 70°C일 때 19.02%로 각각 증가하였다. 에탄올-산화탄소나노유체의 점도는 온도별로 평균 33% 증가하였으나, 이는 순수 에탄올의 점도가 1.074 cP 임을 감안한다면 이는 그다지 큰 증가율이 아니며, 에탄올-산화탄소나노유체가 히트파이프의 작동유체로 사용하는데 있어 아무런 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.

5. 결 론

태양열 집열기의 효율 향상을 위해, 히트파이프의 작동유체로 적용시킬 에탄올-산화탄소나노유체의 열전도도 및 점도 특성을 측정 한 본 실험의 결과는 다음과 같다.

- (1) 에탄올-산화탄소나노유체의 열전도도 측정에서, 0.1 vol% 비율의 에탄올-산화탄소나노유체의 경우 열전도도는 순수 에탄올보다 10°C에서 33.74%, 25°C에서 33.14%, 70°C에서는 32.36%가 증가하였다.
- (2) 온도가 증가함에 따라 열전도도가 감소하는 에탄올의 특성과 같이, 에탄올-산화탄소나노유체 역시 온도가 증가함에 따라 열전도도가 감소함을 확인하였고, 체적분율이 증가함에 따라 열전도도의 감소폭이 줄어드는 것을 확인하였다.
- (3) 에탄올-산화탄소나노유체의 점도는 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 0.1 vol% 비율의 에탄올-산화탄소나노유체의 점도는 10°C에서 35.1%, 25°C에서 32.14%, 70°C에서는 19.02%가 증가하였다.

후 기

이 논문은 지식경제부 산업 원천 기술 개발 사업(과제번호 : 10035530)의 지원을 받아 수행되었음.

References

1. International Energy Agency, Key World Energy STATISTICS, 2010.
2. Jung E. G., Boo J. H., Performance Characteristics of a Heat Pipe Having Water-Ethanol Mixture as Working fluid for Evacuated Solar Collectors, Journal of the Korean Solar Energy Society, 2006, Vol. 28, No. 5 ,pp. 78-84.
3. Ha H. J., Kong Y. C., Do K. H., Jang S. P., Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Heat Pipes Using Water-based MWCNT Nanofluids. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 2011, Vol. 23, No. 7, pp. 528-534.
4. Liu, M. S., Lin, M. C., Huang, I. Te., Wang, C. C., Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, Vol. 32. No. 9, pp. 1202-1210.
5. Choi. S. U. S., Zhang. Z. G., Yu. W., Lockwood F. E., Crylke, E. A., Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspension, Appl. Phys. Lett., 2001, Vol. 79, No. 14, pp. 2252-2254.
6. Xie, H., Lee, H., Youn, W., and Choi, M., 2003, Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities, Journal of Applied Physics, 2003, Vol. 94, No.8, pp. 4967-4971.
7. Kim J. H., Hwang K. S., Kong Y. C., Jang S. P., Experimental investigation on thermal characteristics of miniature heat pipes using water-based Al₂O₃ nanofluids, 2008 Journal of the Korean Society of mechanical Engineering Spring Conference

- 2008, 2008, pp. 310-313.
8. Kim N. J., Park S. S., Lim S. H., Chun W. G., A study on the characteristics of Carbon nanofluids at the room temperature (25°C), International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011, Vol. 38 No. 3, pp. 313-318.
 9. Bently, J. P., Temperature sensor characteristics and measurement system design, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1984, Vol. 17, pp. 430-435.
 10. Nagasaka, Y. and Nagashima, A., Absolute Measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, Vol. 14, pp. 1435-1440.
 11. Chemical Engineering Research Information Center <http://www.cheric.org/research/kdb/hcprop/showcef.php?cmpid=818&prop=THL>
 12. Kyu Hyung Do, Seok Pil Jang, 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, 2010, Vol. 53, Issues 9-10, pp. 2183-2192.