

순수 물과 에탄올 산화 탄소나노유체의 열전도도 및 점도 특성 비교 연구

안응진*, 박성식**, 천원기***, 박윤철****, 전용한*****, 김남진*****[†]

*제주대학교 에너지공학과(anej515@jejunu.ac.kr), **제주대학교 에너지공학과(pss5153@jejunu.ac.kr),
제주대학교 에너지공학과(wgchunn@jejunu.ac.kr), *제주대학교 기계공학과(ycpark@jejunu.ac.kr),
*****,상지영서대학교 소방안전과(kcv76@hanmail.net), *****[†] 제주대학교 에너지공학과(jnkim@jejunu.ac.kr)

A Comparative Study on the Thermal Conductivities and Viscosities of the Pure Water and Ethanol Carbon Nanofluids

An, Eoung-Jin*, Park, Sung-Seek**, Chun, Won-gee, Park, Yoon-Chul****, Jeon,
Youn-Han*****, Kim, Nam-Jin*****

*Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(anej515@jejunu.ac.kr)
**Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(pss5153@jejunu.ac.kr)
***Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(wgchunn@jejunu.ac.kr)
****Dept. of Mechanical Engineering, Jeju National University(ycpark@jejunu.ac.kr)
*****Dept. of Protection and Safety, Sang Gi Young Seo College(kcv76@hanmail.net)
*****[†] Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(jnkim@jejunu.ac.kr)

Abstract

Nanofluids are advanced concept fluid that solid particles of nanometer size are stably dispersed in fluid likes water, ethylene glycol and others. They have higher thermal conductivities than base fluids. If using this characteristic, efficiencies of heat exchangers can be increased. Therefore in this study, we measured thermal conductivity and viscosity of carbon nanofluids. They were made to ultra sonic dispersed oxidized multi-walled carbon nanotubes(OMWCNTs) in distilled water and ethanol, respectively. The mixture ratios of OMWCNTs were from 0.0005 vol% ~ 0.1 vol%. Thermal conductivity and viscosity was measured by transient hot-wire method and rotational viscometer. The results of an experiment are as in the following : thermal conductivity of the 0.1 vol% pure-water nanofluid improved 7.98% (10°C), 8.34% (25°C), and 9.14% (70°C), and its viscosity increased by 37.08% (10°C), 33.96% (25°C) and 21.64% (70°C) than the base fluids. Thermal conductivity of the 0.1 vol% ethanol nanofluids improved 33.72% (10°C), 33.14% (25°C), and 32.25% (70°C), and its viscosity increased by 35.12% (10°C), 32.01% (25°C) and 19.12% (70°C) than the base fluids.

Keywords : 산화 다중벽 탄소나노튜브(Oxidized multi-walled nanotubes), 증류수(Distilled water), 에탄올(Ethanol), 열전도도(Thermal conductivity), 점도(Viscosity),

Submit date : 2012. 6. 4, Judgment date : 2012. 6. 4, Publication decide date : 2012. 6. 26
Communication author : Kim, Nam-Jin(jnkim@jejunu.ac.kr)

기 호 설 명

- E_{th} : 검류계에 걸리는 전압
 V_s : 공급 전압
 T : 나노유체의 온도
 R : 온도 T 에서의 백금선 저항
 R_0 : 0°C 에서의 백금선 저항
 α : 백금선의 온도저항계수 $0.0039092/^\circ\text{C}$
 t : 시간
 k_0 : 기본유체의 열전도도
 Δk : 나노유체와 기본유체의 열전도도 차
 η_0 : 기본유체의 점도
 $\Delta\eta$: 나노유체와 기본유체의 점도 차

1. 서 론

지구는 연간 $1.304 \times 10^{21} \text{kcal}$ 의 에너지를 태양으로부터 받고 있으며, 이는 연간 세계 에너지 소비량의 약 20,000배에 달한다.¹⁾ 이처럼 태양열 에너지는 지구상에서 가장 풍부한 에너지 자원이며, 온실가스를 배출하지 않고, 부존량이 풍부한 무공해·무한정의 에너지원이다. 태양열 에너지는 태양열 에너지의 흡수, 저장, 열변환의 과정을 통해 건물의 냉·난방, 온수 급탕, 열 발전에 이용할 수 있다. 하지만 태양열 에너지는 단위 면적당 공급받을 수 있는 에너지의 양이 적다는 단점이 있어 태양열 에너지를 효과적으로 활용하려면 태양열 시스템의 집열 효율을 향상시켜야 한다.

따라서, 태양열 집열기와 집열기 내 히트파이프의 기하학적 특성을 변화시켜 태양열 집열 시스템의 효율을 향상시키려는 연구가 진행되어 왔다. 하지만 단순히 재질 및 구조 등을 변경하는 것만으로는 효율 향상에 한계가 있는 것으로 판단되며, 이러한 한계를 극복하기 위하여 열적특성이 우수한 나노유체의 특성을 이용하여 시스템 전체 효율을 증가시키려는 연구가 진행 중이다.^{2,3)}

나노유체란 나노미터(nm) 크기의 고체 입자

들이 순수 유체 내에 안정적으로 분산되어 있는 유체를 말하며, Al_2O_3 , TiO_2 , CNTs(Carbon nanotubes)와 같이 높은 열전도도를 갖는 고체로 나노유체를 제조할 경우 기본유체보다 열전도도가 증가하는 특성이 있다. Lifei Chen et al.⁴⁾은 실리콘 오일과 1 vol%의 탄소나노튜브를 혼합하여 제조한 나노유체의 열전도도를 측정하여 기본유체인 실리콘 오일 대비 9.5%의 열전도도 향상을 확인하였으며, Min Sheung Liu et al.⁵⁾은 2 vol%의 에틸렌 글리콜 유체의 열전도도를 측정하여 최고 30% 향상 효과를 확인하였다. Wensel et al.⁶⁾은 물을 기본유체로 하여 0.02 wt%의 탄소나노튜브를 혼합하여 나노유체를 제조한 결과 10%의 열전도도 향상 효과를 확인하였다. M. Rafati et al.⁷⁾은 물과 에틸렌 글리콜을 기반으로 나노유체를 제조하여 컴퓨터의 냉각 장치의 적용에 대해서 연구하였다.

이처럼, 나노유체의 우수한 열적특성을 적용하려는 연구가 많은 분야에서 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 태양열 집열기의 작동유체로 적용하기 위하여, 증류수와 에탄올을 기반으로 산화 탄소나노유체를 제조하고 온도에 따른 나노유체의 열전도도 및 점도를 측정하여 비교 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 탄소나노유체의 제조

본 연구에서는 화학 증기 증착법에 의해 제조된 다중벽 탄소나노튜브(CM-100)를 이용하였으며, 황산(H_2SO_4 , 98%)과 질산(HNO_3 , 64%)으로 탄소나노튜브의 표면을 산화 처리하였다. 사용된 CM-100 탄소나노튜브의 물성치를 Table 1에 나타내었으며, CM-100 탄소나노튜브(a)와 산화 CM-100 탄소나노튜브(b)를 장방출주사 전자현미경(JSM-06700F)으로 확대하여 찍은 SEM 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

탄소나노튜브는 입자의 크기가 작은 만큼

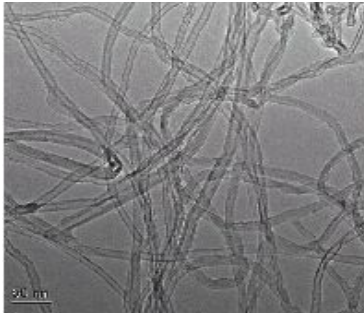
입자 간의 반데르발스 힘이 더욱 강하게 작용하기 때문에 유체 내에 안정적으로 분산시키기 어렵다. 따라서 이용하여 탄소나노튜브의 강한 응집력을 약화시켜 안정적으로 유체 내에 분산시키기 위한 방법이 고안되었으며,

계적 분산법을 동시에 적용하였을 때 가장 우수한 열적특성을 나타낸다고 보고하였다.

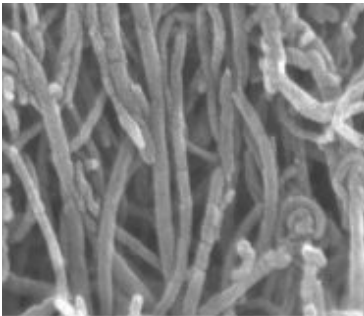
따라서 본 연구에서는 각각 증류수와 에탄올을 기반으로 산화 탄소나노튜브를 0.0005 ~ 0.1 vol%의 비율로 혼합하고 초음파 분산시켜 나노유체를 제조하였다.

Table 1. Properties of MWCNTs (CM-100).

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



(a) CM-100



(b) Oxidized CM-100

Fig. 1. SEM photos of Carbon nanotubes.

현재까지 기계적 분산법과 물리적 고착에 의한 분산, 화학적 개질에 의한 분산법이 보고되었다. Park et al.⁸⁾은 분산 방법에 따라 다르게 제조한 나노유체의 열전도도 및 점도를 비교 분석한 결과, 탄소나노튜브를 산화 처리하는 화학적 개질에 의한 분산법과 초음파를 이용한 기

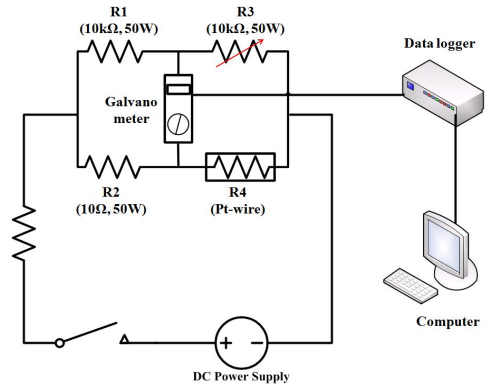


Fig. 2. Schematic diagram of Wheatstone Bridge.

2.2 열전도도 측정

본 연구에서는 비정상 열선법(Transient Hot-wire Method)을 이용하여 나노유체의 열전도도를 측정하였다. 열전도도 측정 장치는 Fig. 2와 같이 10k Ω , 10 Ω 의 저항과 10k Ω 의 가변저항 그리고 백금선 저항으로 이루어진 휘트스톤 브릿지(Wheatstone Bridge), 데이터 수집과 저장을 위한 데이터로거(Agilent 34079A)와 컴퓨터, 전원 공급을 위한 전원 공급기(Agilent E3648A)로 구성된다.

백금선이 완전히 잠긴 나노유체를 항온수조를 이용하여 온도와 평형을 시킨 후, 가변저항을 조절하여 검류계에 걸리는 전압을 0으로 만들고 직류 전원 공급기로 15V의 전압을 인가시킨다. 전압이 인가되면 백금선의 표면 온도가 변하면서 저항도 함께 변하게 되는데, 이 데이터를 전기저항과 온도의 선형식에 적용하여 나노유체의 온도 변화를 계산하였다. 나노유체의 온도 변화 계산은 Bentley⁹⁾가 제안한 식 (1)을 이용하였다.

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

$$R = R_0 (1 + \alpha d T)$$

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

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

나노유체의 열전도도 측정실험은 실험의 오차를 줄이기 위해 동일조건에서 실험을 10 번씩 반복 수행하였으며, 얻어진 결과의 평균 값과 기본 유체인 순수 물과 에탄올의 열전도도와 비교하여 열전도도 증가량을 나타내었다. 또한 0.0005에서 0.1 vol%까지 다양한 농도에서 실험을 수행하면 백금선이 가열하면서 표면에 탄소나노튜브 입자들이 축적될 수 있기 때문에, 이를 방지하기 위해 매 실험마다 기본유체로 사용된 증류수와 에탄올로 백금선을 충분히 세척하였다.

2.3 점도 측정

본 실험에서는 열전도도 측정실험과 같이 동일한 실험 온도 조건(10°C, 25°C, 70°C)에서 점도를 측정하였다. 점도 측정 실험장치는 점도계 (Brookfield DV-II+pro)와 항온수조 (TC-502), 컴퓨터로 구성되어 있다.

점도 측정실험은 항온수조로 나노유체를 실험온도로 평형 시킨 후에 점도계의 회전축을 충분히 담그고 회전시켜 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 열전도도

Fig. 3은 열전도도 측정 장치의 정확성을

알아보기 위하여 측정된 순수 물과 에탄올의 열전도도 값을 문헌 값과 비교한 그래프이다. 물과 에탄올의 물성치는 각각 CRC Handbook of Chemistry and Physics¹¹⁾와 Chemical Engineering Research Information Center¹²⁾에서 제공하는 데이터를 이용하였으며, 온도에 따른 열전도도 측정값과 문헌값을 비교한 결과 1% 이내의 오차로 일치함을 확인하였다.

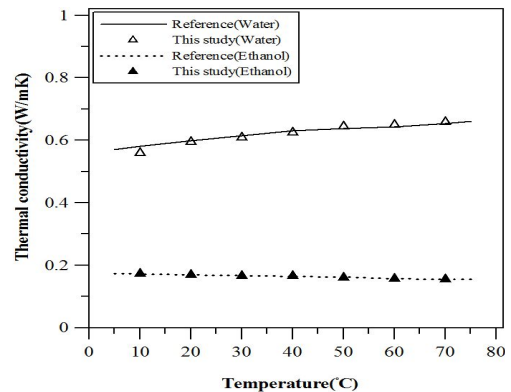


Fig. 3. Validation of Ethanol to measure the thermal conductivity of the base fluid.

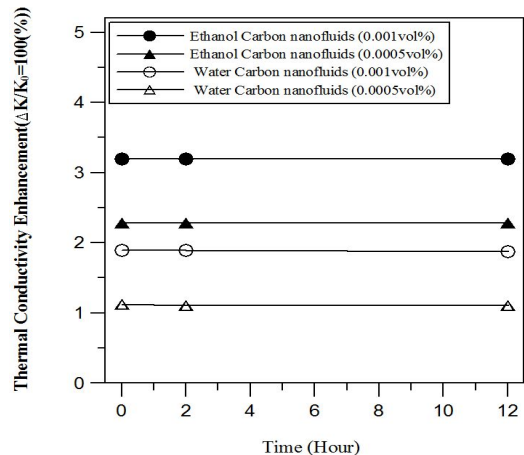


그림 4. Validation of Ethanol to measure the thermal conductivity of the base fluid.

Fig. 4는 각각 0.0005 vol%와 0.001 vol%의 순수 물과 에탄올 산화탄소나노유체 열전도도의 시간에 따른 변화를 관찰한 그래프이다.

나노유체를 제조한 직 후, 2시간 후, 12시간 후의 열전도도를 측정하였고, 시간이 지남에 따라 나노유체의 열전도도 변화는 거의 없다는 것을 확인하였다.

체의 경우 열전도도는 10℃일 때 증류수 대비 3.2% 증가 하였으며, 25℃일 때는 3.65%, 70℃일 때는 9.14% 증가하였다. 에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도는 에탄올 대비 10℃일 때

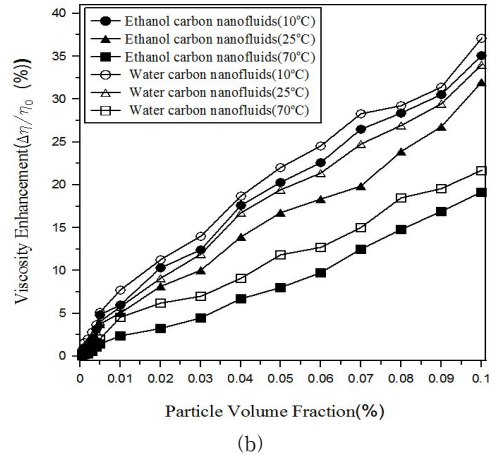
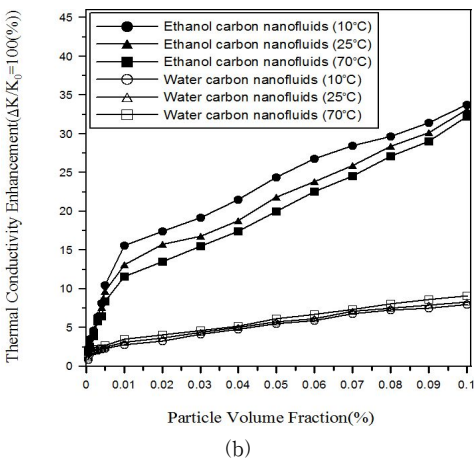
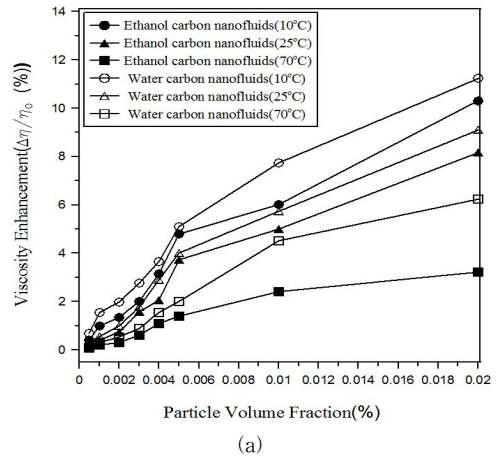
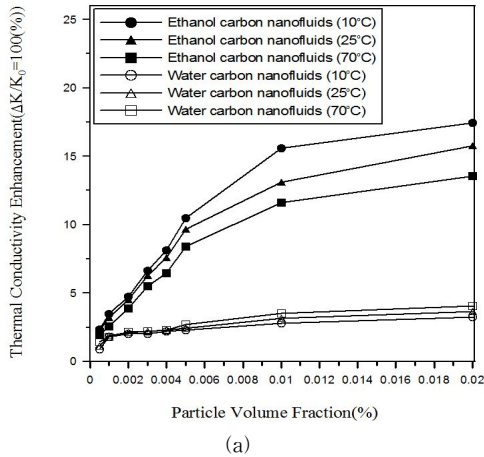


Fig. 5. Comparison of the thermal conductivity as Temperature(10℃, 25℃, 70℃).

Fig. 6. Comparison of the viscosity as Temperature(10℃, 25℃, 70℃).

Fig. 5의 (a)는 제조한 증류수, 에탄올 산화 탄소나노유체의 열전도도 값을 0.0005 vol%에서 0.02 vol%까지의 열전도도 변화를 온도 에 따라 나타낸 그래프이며, (b)는 0.1vol%까지 체적분율을 확장하여 실험한 결과를 나타낸 그래프이다. 특히 탄소나노튜브의 혼합비가 0.1 vol% 일 때, 순수 물 산화탄소나노유

33.72%로 가장 높게 증가하였으며, 25℃일 때 33.14%, 70℃일 때 32.25%의 향상 효과가 있음을 확인하였다.

이처럼 나노유체의 열전도도 향상은 유체 내 분산되어 있는 입자의 브라운 운동으로 설명되어질 수 있으며, 탄소나노튜브의 혼합비가 증가할수록 나노유체의 열전도도가 증가

하는 것은 탄소나노튜브-탄소나노튜브, 탄소나노튜브-유체 간의 브라운 운동으로 인한 충돌 확률이 증가하기 때문이다.

또한 증류수를 기반으로 한 탄소나노유체는 온도가 증가함에 따라, 브라운 운동이 활발해져 열전도도가 증가하였다. 하지만 에탄올을 기반으로 한 탄소나노유체의 경우는 온도가 증가함에 따라 열전도도가 낮아졌으며, 이는 온도와 열전도도가 반비례 관계에 있는 에탄올의 기본 특성에 기인한 것으로 판단된다.

3.2 점도

Fig. 6은 순수 물 산화탄소나노유체와 에탄올 산화탄소나노유체의 온도에 따른 점도 증가량을 나타낸 그래프이다. 그림 6의 (a)는 체적분율 0.0005 vol%에서 0.02 vol%까지의 점도 변화를 온도에 따라 나타낸 그래프이며, (b)는 0.1 vol%까지 체적분율을 확장하여 실험한 결과를 나타낸 그래프이다.

두 종류의 나노유체는 온도가 증가함에 따라 점도가 감소하였다. 특히 탄소나노튜브의 혼합 비율이 0.1 vol% 일 때, 순수나노유체의 경우 10℃일 때 증류수 대비 37.08%의 점도가 증가 하였으며, 25℃일 때는 33.96%, 70℃일 때는 21.64% 증가하였다. 에탄올 산화탄소나노유체의 점도는 에탄올 대비 10℃일 때 35.1%로 가장 높게 증가하였으며, 25℃일 때 32.01%, 70℃일 때 19.12%가 증가함을 확인하였다.

4. 결 론

태양열 집열기의 효율 향상을 위해, 히트파이프의 작동유체로 적용시킬 순수 물, 에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도 및 점도 특성을 측정본 실험의 결과는 다음과 같다.

(1) 나노유체의 열전도도 측정에서, 0.1 vol% 체적분율로 혼합하였을 때, 순수 물 산화탄소나노유체는 10℃일 때 증류수 대비

7.98%, 25℃일 때는 8.34%, 70℃일 때는 9.14% 증가하였으며, 에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도는 에탄올 대비 10℃일 때 33.72%, 25℃일 때 33.14%, 70℃일 때 32.25%가 증가하였다.

- (2) 0.0005 vol%와 0.001 vol%의 순수 물, 에탄올 산화탄소나노유체의 열전도도를 시간이 경과함에 따라 측정할 결과, 나노유체의 열전도도 변화가 거의 없음을 확인하였다.
- (3) 동일 체적분율에서의 나노유체의 열전도도는 기본유체의 열전도도 특성과 마찬가지로 순수 물 나노유체의 경우 온도가 증가함에 따라 열전도도가 증가하였으며, 에탄올 산화탄소나노유체의 경우 온도가 증가함에 따라 열전도도가 감소함을 확인하였다.
- (4) 탄소나노유체의 점도는 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 체적분율 0.1 vol%의 순수 물 산화탄소나노유체는 증류수 대비 10℃에서 37.08%, 25℃에서 33.96%, 70℃에서는 21.64%가 증가하였다. 또한 에탄올 산화탄소나노유체의 점도는 기본유체인 에탄올 대비 10℃에서 35.12%, 25℃에서 32.01%, 70℃에서는 19.124%가 증가하였다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NO. 2011-0029820)

참 고 문 헌

1. BP, Statistical Review of World Energy 1986. 6.
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. Lifei Chen, Huaqing Xie, Silicon oil based multiwalled carbon nanotubes nanofluid with optimized thermal conductivity enhancement, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2009, Vol. 352, pp. 136-140.
 5. Min-Sheng Liu, Mark Ching-Cheng Lin, I-Te Hunang, Chi-Chuan Wang, Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids, *Heat and Mass Transfer*, 2005 Vol. 32, pp. 1202-1210.
 6. Wensel, Jesse, Enhanced thermal conductivity by aggregation in heat transfer nanofluids containing metal oxide nanoparticles and carbon nanotubes, *Applied Physics Letters*, 2008, Vol. 92, Issue 2, pp. 23110-23113
 7. M. Rafati, A.A. Hamidi, M. Shariati Niaser, Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids), *Applied Thermal Engineering*, 2012, Vol. 45-46, pp. 9-14.
 8. Sung Seek Park, Eoung Jin An, Kyung Soo Lee, Youn Chul Park, Nam Jin Kim, A comparative study on the characteristics of carbon nanofluids for efficiency enhancement of low temperature heat exchanger, *Journal of Energy Engineering*, 2011, Vol. 20, No. 3, pp. 209-215
 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. Lide, David R, *CRC Handbook of Chemistry and Physics 90/e*, 2009.
 12. Chemical Engineering Research Information Center, <http://www.cheric.org/research/kdb/hcprop/showcef.php?cmpid=818&prop=THL>