

물-에탄올 기반 이성분 산화탄소나노유체의 특성 비교 연구

박성식*, 김남진**

*제주대학교 에너지공학과(pss5153@jejunu.ac.kr), **제주대학교 에너지공학과(jnkim@jejunu.ac.kr)

A Comparative Study on the Characteristics of Binary Oxidized Carbon Nanofluids Based DI Water and Ethanol

Park, Sung-Seek*, Kim, Nam-Jin**

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

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

Abstract

A nanofluid is a fluid containing suspended solid particles, with sizes on the order of nanometers. Normally, nanofluids have higher thermal conductivities than their base fluids. Therefore, we measured the thermal conductivity and viscosity of oxidized carbon nanofluids based the mixture of distilled water and ethanol (ethanol concentration is 0.2) oxidized carbon nanofluids were made by ultrasonic dispersing oxidized multi-walled carbon nanotubes in the mixture of distilled water and ethanol at the rates of 0.001 ~ 0.1 vol%. The thermal conductivity and viscosity of oxidized carbon nanofluids were measured by using transient hot-wire method and rotational digital viscometer, respectively. And all of experiments were carried out at the same temperature conditions (10°C, 25°C and 70°C). As a result, when volume fraction of nanofluids is 0.1 vol%, thermal conductivity was improved 13.6% (10°C), 15.1% (25°C), and 17.0% (70°C), and its viscosity was increased by 36.0% (10°C), 32.9% (25°C) and 19.5% (70°C) than the base fluids.

Keywords : 나노유체(Nanofluids), 산화탄소나노튜브(Oxidized carbon nanotubes), 이성분(Binary), 열전도도 (Thermal conductivity), 점도(viscosity),

1. 서 론

최근 자원 및 에너지 소비가 크게 증가함에 따라 에너지의 효율적인 사용을 위한 요구가 증가되고 있다.¹⁾ 특히 냉·난방, 제조, 수송, 화학 등 다양한 산업에서 열교환기가 사용되고

있으며, 이를 통하여 막대한 양의 에너지가 소비되고 있다. 열교환기의 효율을 향상시킬 수 있다면, 소비되는 에너지를 획기적으로 저감할 수 있으며, 이산화탄소와 같은 온실가스의 발생도 원천적으로 줄일 수 있기 때문에 열교환기의 효율 향상 문제는 매우 중요한

Submit date : 2012. 11. 06. Judgment date : 2012. 11. 14. Publication decide date : 2012. 12. 26
Communication : Kim, Nam-Jin(jnkim@jejunu.ac.kr)

과제로 대두되고 있다.²⁾

현재 열교환기의 효율을 높이기 위해 열교환기의 내부 형상 및 재질을 변화시켜 전열면적을 극대화시킨 열교환기가 개발되어 사용되고 있다. 하지만 단순히 열교환기의 구조를 변화시키는 것만으로는 효율 상승의 한계가 있다고 판단된다. 따라서 최근에는 기본유체보다 높은 열전도도를 갖는 나노유체를 열교환기의 작동유체로 사용하여 열교환기의 효율을 증가시키고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다.³⁾

Do et al. 은 나노유체를 이용한 그루브 워 히트파이프 열성능에 대하여 연구하였으며, 나노유체에 첨가되는 나노입자의 체적비율과 입자의 크기가 증가함에 따라 히트파이프의 열저항은 감소하고, 열성능은 향상된다고 보고하였다.⁴⁾ M. Rafati et al.⁵⁾은 물과 에틸렌 글리콜을 기반으로 한 Silica, Alumina, Titania 나노유체를 제조하여 컴퓨터의 냉각 장치의 적용에 대해서 연구하였고, 1.0 L/min의 유량을 흘려주었을 때, 1 vol%의 Alumina 나노유체가 6°C의 냉각효과가 있음을 확인하였다. Lin Lu et al.⁶⁾은 나노유체를 적용한 모세관 펌프 루프(Capillary Pumped Loop, CPL)의 열성능 향상에 대하여 연구하였으며, 1 wt%의 나노유체를 CPL에 적용하였을 때, 16%의 냉각 능력이 향상되었다고 보고하였다. 특히, Kim et al.⁷⁾은 순수 물에 산화 다중벽 탄소나노튜브(Oxidized Multi-Walled Carbon Nanotubes, OMW-CNTs)를 분산한 나노유체의 열전도도와 점도를 측정하여 열매체로의 적용 가능성을 연구하였고, 순수 물을 기반으로 제조한 0.1 vol%의 산화탄소나노유체에서 8.34%의 열전도도 향상효과를 확인하였다. 그리고 히트파이프 작동유체로서 물과 에탄올은 우수한 Merit number를 나타낸다. 하지만 물의 경우 동절기 결빙 지역에서는 얼어붙기 때문에 사용이 제한되고 있다. 에탄올은 -30°C ~ 140°C에서 적용할 수 있으나 히트파이프가

과열이 될 경우 구리와 화학적 반응에 의해 히트파이프 내에 불용축 가스가 발생할 수 있다는 단점이 있다. 따라서 물과 에탄올 혼합 이성분(binary) 유체에서 에탄올 농도가 0.2 일 때 히트파이프의 전열효과 및 작동온도 범위가 가장 우수하게 나타났다고 보고되었다⁸⁾. 하지만 아직까지 물과 에탄올을 혼합하여 제조한 이성분 나노유체의 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 에너지의 효율적인 이용과 각종 열교환기의 효율 향상을 위하여 물과 에탄올을 혼합한 유체에 산화 탄소나노튜브를 첨가하여 이성분 산화탄소나노유체를 제조하였으며, 체적비율과 온도에 따른 나노유체의 열전도도 및 점도 측정실험을 수행하였고, 열교환기 및 태양열 집열기 히트파이프의 작동유체로서의 적용 가능성을 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 이성분 산화탄소나노유체의 제조

본 연구에서는 화학증기증착법(Chemical Vapor Deposition, CVD)으로 제조된 다중벽 탄소나노튜브를 사용하였고, 물성치는 Table 1에 나타내었다. 일반적으로 나노입자를 유체와 단순혼합해서는 나노입자들이 유체 내에 적절하게 분산되지 않는다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 화학적 개질에 의한 분산방법을 초음파 분산기를 이용한 나노유체의 기계적 분산방법과 혼합하여 산화탄소나노유체를 제조하였다⁷⁾. Fig. 1(a)에 산화처리하기 전의 다중벽 탄소나노튜브를 장방출주사현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)으로 촬영한 사진을 나타내었고, 다중벽 탄소나노튜브의 입자표면을 황산(H₂SO₄, 98%)과 질산(HNO₃, 64%)으로 산화 처리한 SEM 사진을 Fig. 1(b)에 나타내었다.

기본유체는 물과 에탄올 혼합의 2성분 유체에서 전열효과 및 작동온도 범위 등이 가장 유리하다고 보고된 에탄올 농도 0.2의 유체를 사용하였다.⁸⁾ 물-에탄올 혼합 유체에 산화탄소나노튜브를 0.001-0.1 vol%의 비율로 2시간 동안 초음파 분산하여 물-에탄올 혼합 이성분 산화탄소나노유체를 각각 제조하였다.

2.2 산화탄소나노유체의 열전도도 측정

비정상 열선법을 이용한 나노유체의 열전도도 실험장치는 Fig. 2와 같이 휘트스톤 브릿지(Wheatstone Bridge)를 이용하여 구성하였다. 휘트스톤 브릿지는 10 Ω, 10 kΩ의 저항과 10 kΩ의 가변저항, 검류계 그리고 직경 76 μm, 길이 130 mm의 테프론 코팅 백금 저항으로 구성되어있다. 또한 직류전원공급기(Agilent E3648A)를 사용하여 휘트스톤 브릿지에 전원을 공급하였고, 데이터 수집과 저장을 위하여 데이터 로거(Agilent 34079A)와 컴퓨터를 이용하였다. 그리고 항온수조를 이용하여 나노유체의 온도를 실험온도로 일정하게 유지하였다. 제조된 산화탄소나노유체의 열전도도 측정은 이전의 연구와 동일하게 진행하였다⁹⁾. 그리고 Bently¹⁰⁾가 제안한 전기저항-온도에 관한 선형식 (1)과 (2)를 이용하여 측정된 백금선의 저항을 온도로 변환하였다.

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

$$R = R_0(1 + \alpha dT) \quad (2)$$

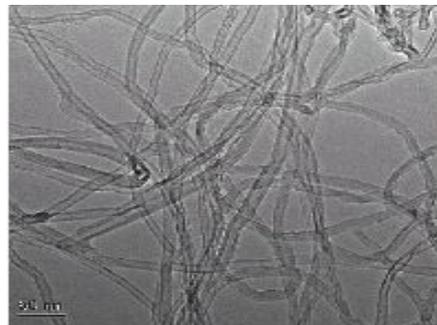
위 식에서, E_{th} 는 검류계로 측정된 전압이며, V_s 는 직류전원공급기의 인가전압, T 는 백금선의 온도이다. R 은 온도 T 에서의 백금선 저항이고, R_0 는 0°C에서 백금선의 저항, α 는 백금선의 온도-저항계수로 0.0039092/°C이다.

식 (1)과 (2)를 이용하여 계산한 결과를

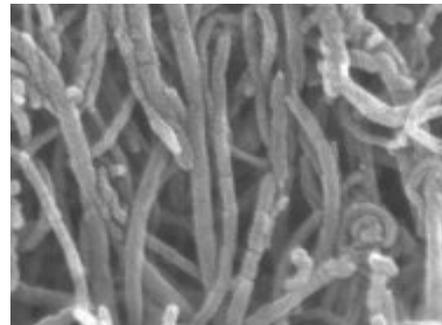
Nagasaka¹¹⁾의 식(3)을 이용하여 최종적으로 나노유체의 열전도도를 계산하였다.

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.

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (1)$$

위 식에서 k 는 나노유체의 열전도도이며, T_1, T_2 는 시간 t_1, t_2 에서의 백금선의 온도, q

는 열선에 가해지는 전력이다.

또한 백금선 표면에 그래핀 입자가 달라붙어 열전도도가 잘 측정되지 않는 현상을 방지하기 위하여 매 실험마다 초음파 세척기를 사용하여 백금선을 충분히 세척하였다. 모든 실험은 유체의 실험온도를 일정하게 유지하여 실시하였고, 실험의 정확도와 신뢰성을 높이기 위하여 동일한 실험조건에서 10번의 반복 실험을 수행하였다. 측정된 결과는 동일 실험조건에서 측정된 기본유체의 열전도도와 비교하여 기본유체 대비 열전도도 증가비율로 나타내었다.

2.3 산화탄소나노유체의 점도 측정

나노유체의 점도 측정 실험 장치는 Brookfield사의 회전형 디지털 점도계(DV II+pro)를 사용하였다. 실험장치는 나노유체의 점도를 측정할 수 있는 저점도용 회전 추(LV-64)와 회전 점도계, 나노유체의 온도를 실험온도로 일정하게 유지시킬 수 있는 항온수조(TC-502) 그리고 측정된 데이터를 저장하고 모니터링하기 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. 실험은 회전 추의 최대 회전수 200rpm, 회전추의 전단율은 0.496(1/sec)의 조건에서 수행하였다. 측정된 나노유체의 점도는 열전도도와 마찬가지로 기본유체인 물-에탄올 혼합유체와 비교하여 점도 증가비율로 나타내었다.

3. 실험결과

3.1 열전도도

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 열전도도 측정 실험장치의 정확성을 알아보기 위하여 온도에 따른 순수 물과 에탄올의 열전도도 실험결과를 문헌 값과 비교하여 나타낸 그래프이다. 순수 물은 CRC Handbook of Chemistry and Physics¹²⁾의 데이터를 이용하였으며, 에탄올은 Chemical Engineering Research Information Center¹³⁾에서 제공하는 데이터를 이용하였다.

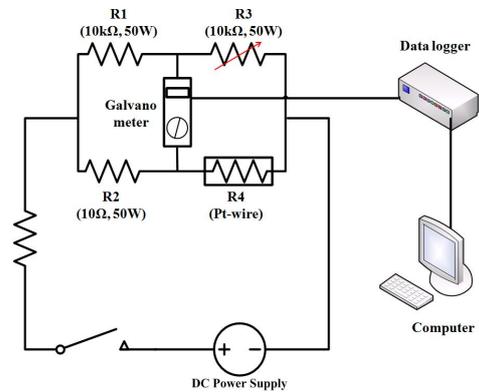


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

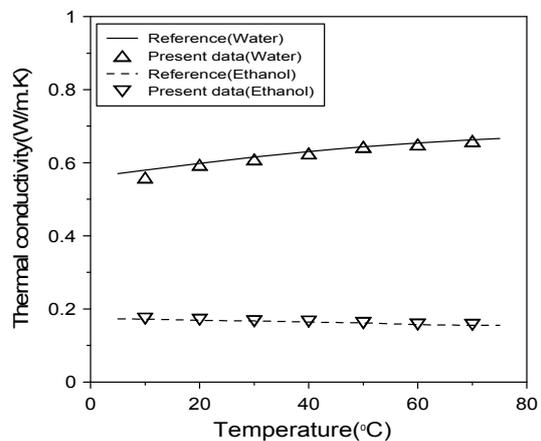


Fig. 3. Measured thermal conductivity of the base fluids and reference values.

그림을 보면 알 수 있듯이 열전도도 측정 실험장치의 실험결과와 문헌 값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 1% 이내의 오차로 실험결과가 보고된 문헌 값과 일치함을 확인하였다.

Fig. 4는 10°C에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율을 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율이 순수 물을 기반으로 제조한 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율보다 높음을 알 수 있으며, 특히 0.1 vol%에서 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율은 13.61%로 순수 물을 기반으로 한 산화탄

소나노유체의 열전도도 증가율 7.98%보다 1.7배 높음을 확인하였다. 이는 기본유체로 적용한 물-에탄올 혼합 유체의 열전달 및 전열 성능이 순수 물보다 높기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5는 25°C에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율을 비교하여 나타낸 그래프이다. 10°C에서와 마찬가지로 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율이 순수 물을 기반으로 한 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율보다 높음을 알 수 있다. 특히 0.1 vol%에서 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율은 15.15%로 10°C의 열전도도 증가율보다 약 11% 증가함을 확인하였으며, 이는 온도가 증가할수록 열전도도가 증가하는 기본유체의 특성 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 70°C에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율을 비교하여 나타낸 그래프이다. 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 경우 10°C, 25°C의 실험결과와는 달리 체적분율이 증가할수록 열전도도 증가율이 크게 상승함을 볼 수 있다. 이는 온도가 증가할수록 열전도도가 증가하는 기본유체의 특성뿐만 아니라 10°C, 25°C보다 70°C에서 물 분자와 탄소나노튜브 입자의 움직임이 크게 증가하여 물 분자 및 탄소나노튜브 입자간의 열적운동과 나노유체의 열전도도를 증가시키는 중요 요인 중 하나인 브라운 운동이 크게 증가하기 때문으로 판단된다.

3.2 점도

10°C에서 0.001-0.1 vol%의 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 점도를 각각 측정 한 결과를 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 두 종류의 산화탄소나노유체 모두 체적분율이 증가함에 따라 점도도 같이 상승하며, 점도 증가율은 서로 비슷함을 알 수 있다. 특히 0.1 vol%에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 점도

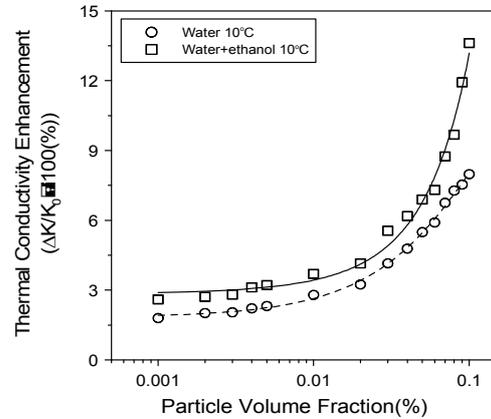


Fig. 4. Comparison of the thermal conductivity water and water-ethanol nanofluids at 10°C

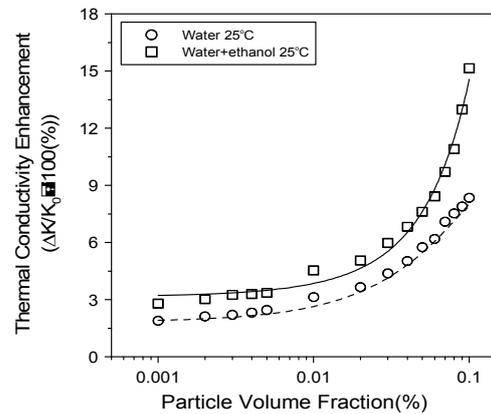


Fig. 5. Comparison of the thermal conductivity water and water-ethanol nanofluids at 25°C

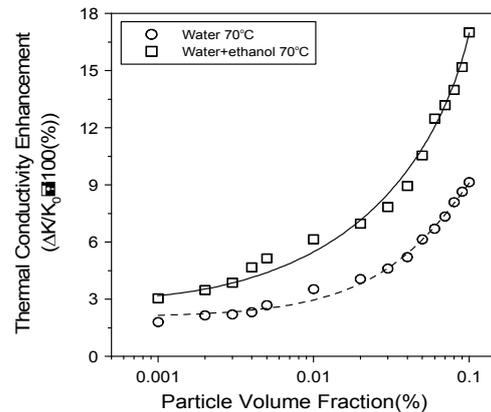


Fig. 6. Comparison of the thermal conductivity water and water-ethanol nanofluids at 70°C

증가율은 각각 37.08%, 36.09%로 3% 이내로 점도 증가율이 일치함을 확인하였다.

Fig. 8은 25°C에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 점도 증가율을 체적분율에 따라 비교하여 나타낸 그래프이다. 10°C에서와 마찬가지로 두 나노유체의 점도 증가율은 서로 비슷하였으며, 체적분율에 따라 점도도 증가하였다. 0.1 vol%에서 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 점도 증가율은 32.98%로 10°C의 점도 증가율보다 약 8.6% 감소함을 확인하였다. 또한 70°C에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 체적분율에 따른 점도 증가율을 비교한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체 모두 10°C, 25°C보다 점도 증가율이 크게 감소됨을 알 수 있었으며, 온도가 증가할수록 점도가 감소하는 특징을 나타낸다는 것을 확인하였다. 이는 고온으로 작동하는 열교환기의 작동유체로 적용할 때 상당히 유리한 조건이라고 판단된다. 또한 0.1 vol%에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 점도 증가율은 각각 21.64%, 19.57%임을 확인하였다. 이와 같은 실험결과로 동일한 온도와 체적분율에서 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체는 순수 물을 기반으로 한 산화탄소나노유체와 점도 증가율은 비슷하나 열전도도 증가율은 높음을 확인하였다. 이와 같은 특성은 물-에탄올 혼합 이성분 산화탄소나노유체가 태양열 집열기 히트파이프의 작동유체로 활용되는데 있어 상당히 유리한 조건이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서 물과 에탄올을 혼합한 2성분 유체에 산화 탄소나노튜브를 첨가하여 제조된 산화나노유체의 열전도도 및 점도 특성을 체적분율과 온도에 따라 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

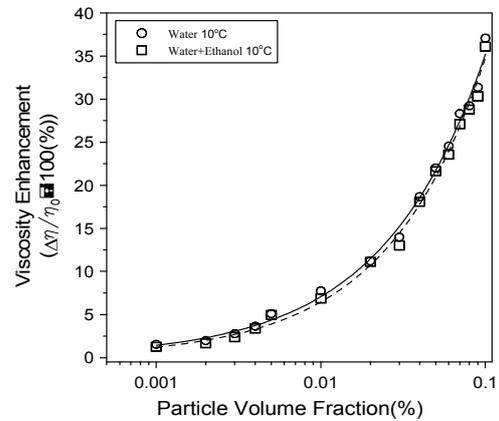


Fig. 7. Comparison of the viscosity water and water-ethanol nanofluids at 10°C

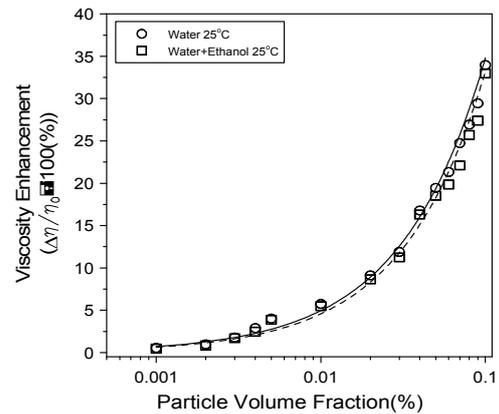


Fig. 8. Comparison of the viscosity water and water-ethanol nanofluids at 25°C

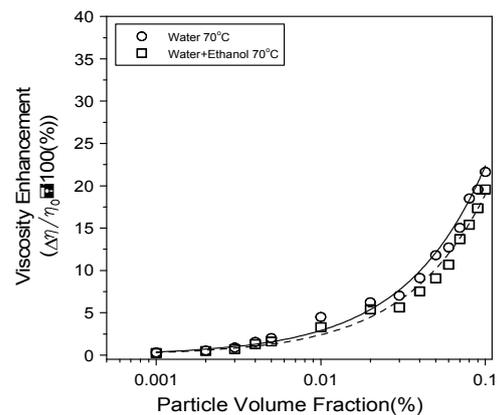


Fig. 9. Comparison of the viscosity water and water-ethanol nanofluids at 70°C

- (1) 10°C, 25°C, 70°C에서 모두 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율이 순수 물을 기반으로 제조한 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율보다 높음을 알 수 있었다.
- (2) 10°C, 0.1 vol%에서 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율은 13.61%로 순수 물을 기반으로 한 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율 7.98%보다 1.7배 높음을 확인하였고, 25°C, 70°C에서 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 열전도도 증가율은 15.15%, 17.01%로 10°C의 열전도도 증가율보다 각각 11%, 25% 증가함을 알 수 있었다.
- (3) 10°C, 25°C, 70°C에서 두 종류의 산화탄소나노유체 모두 체적분율이 증가함에 따라 점도도 같이 상승하고, 점도 증가율은 서로 비슷함을 알 수 있었으며, 특히, 10°C, 0.1 vol%에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 점도 증가율 각각 37.08%, 36.09%로 3% 이내로 점도 증가율이 일치함을 확인하였다.
- (4) 70°C, 0.1 vol%에서 물과 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체의 점도 증가율은 각각 21.64%, 19.57%로 10°C, 25°C보다 점도 증가율이 크게 감소됨을 알 수 있었으며, 온도가 증가할수록 점도가 감소하는 특징을 나타낸다는 것을 확인하였다.
- (5) 물-에탄올 혼합 산화탄소나노유체는 순수 물을 기반으로 한 산화탄소나노유체와 점도 증가율은 비슷하나 열전도도 증가율은 높음을 확인하였다. 따라서 적정비율로 혼합한 이성분 유체를 기반으로 나노유체를 제조할 경우 단일성분 유체를 기반으로 한 나노유체보다 우수한 성능을 나타낸다는 것을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NO. 2012029406)

References

1. International Energy Agency, Key World Energy STATISTICS, 2010.
2. Afgam, N., New Developments in Heat Exchanger, Gordon and Breach Publishers, pp. 1-696, 1996.
3. Das. S.K., Choi. S.U.S., Yu. W., Nanofluids Science and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
4. Do. K.H. and Jang. S.P., Effect of nanofluids on the thermal performance of a flat micro heat pipe with a rectangular grooved wick, In. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 53, pp. 2183-2192, 2010.
5. M. Rafati, A.A. Hamidi, M. Shariati Niaser, Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids), Applied Thermal Engineering, Vol. 45-46, pp. 9-14, 2012.
6. Lin Lu, Lun-Chun Lv, Zhen-Hua Liu, Application of Cu-water and Cu-ethanol nanofluids in a small flat capillary pumped loop, Thermochimica Acta, Vol. 512, No. 102, pp. 95-104, 2012.
7. 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), Int. Com. in Heat and Mass Transfer, Vol. 38 No. 3, pp. 313-318, 2011.
8. Park. C.K., A Study of the heat transfer characteristics of Rotating heat pipe with water-ethanol mixture as working fluid, Solar Energy, Vol. 11, No. 1, pp. 78-86, 1991.
9. An E. J., Park S. S., Park Y. C., Kim J. Y. and Kim N. J., Study on the thermal conductivity and viscosity of ethanol with carbon nanotubes for the development

- of a heat pipe waorking fluid, J. of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 4, pp. 9-16, 2012.
10. Bently, J.P., Temperature sensor characteristics and measurement system design, Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 17, pp. 430-435, 1984.
 11. 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, Vol. 14, pp. 1435-1440, 1981.
 12. D.R. Lide, Ed., CRC Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, 89th ed., 2008.
 13. Chemical Engineering Research Information Center, <http://www.cheric.org/research/kdb/hcprop/showcef.php?cmpid=818&prop=THL>