

저온열교환기 효율 향상을 위한 탄소나노유체의 특성 비교 연구

박성식 · 안응진 · 이경수 · 박윤철¹ · 김남진[†]

제주대학교 에너지공학과, ¹제주대학교 기계공학과

(2011년 4월 29일 접수, 2011년 8월 22일 수정, 2011년 8월 24일 채택)

A Comparative Study on the Characteristics of Carbon Nanofluids for Efficiency Enhancement of Low Temperature Heat Exchanger

Sung-Seek Park, Eoung-Jin An, Kyoung-Soo Lee, Youn-Cheol Park¹, and Nam-Jin Kim[†]

Department of Nuclear & Energy Engineering, Jeju National University

¹Department of Mechanical Engineering, Jeju National University

(Received 29 April 2011, Revised 22 August 2011, Accepted 24 August 2011)

요 약

본 연구에서는 저온 열교환기 효율 향상을 위하여 상온(25°C)과 저온(10°C)에서 탄소나노유체와 산화탄소나노유체의 열전도도와 점도를 측정하였다. 탄소나노유체는 다중벽 탄소나노튜브에 계면활성제 SDS 100 wt%, 고분자 화합물 PVP 300 wt%를 각각 혼합한 뒤 증류수에 초음파 분산하여 제조하였고, 산화탄소나노유체는 산화 처리된 다중벽 탄소나노튜브를 증류수에 초음파 분산하여 제조하였다. 탄소나노유체의 열전도도는 비정상 열선법을 사용하여 측정하였으며, 점도는 회전형 디지털 점도계를 사용하여 측정하였다. 그 결과 같은 혼합비율과 온도에서 다른 탄소나노유체들 보다 산화탄소나노유체의 열전도도가 가장 높게 측정되었고, 점도는 가장 낮게 측정되었다.

주요어 : 저온 열교환기, 탄소나노튜브, 나노유체, 열전도도, 점도

Abstract — In this study, for efficiency enhancement of low temperature heat exchanger, the thermal conductivity and the viscosity of carbon nanofluids and oxidized carbon nanofluids were measured at 10°C and 25°C, respectively. Carbon nanofluids were made by ultrasonic-dispersing ones in distilled water after Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) mixed Sodium Dodecyl Sulfate (SDS, 100 wt%), Polyvinyl pyrrolidone (PVP, 300 wt%) each. Oxidized carbon nanofluids were made by ultrasonic-dispersing Oxidized Carbon Nanotubes (OMWCNTs) in distilled water. The thermal conductivity of carbon nanofluids was measured by using a transient hot-wire method. The viscosity was measured by using a digital viscometer. As a result, the thermal conductivity of oxidized carbon nanofluids was the highest of those compared and the other carbon nanofluids at the same mixture ratio and temperature, and the viscosity was measured the lowest of those compared and the other carbon nanofluids.

Key words : Low temperature heat exchanger, Carbon nanotubes, Nanofluid, Thermal conductivity, Viscosity

1. 서 론

현재 냉·난방, 식품, 수송 및 화학을 비롯한 다양한

산업에 열교환기가 사용되고 있으며, 열교환기를 통하여 막대한 양의 에너지가 사용되고 있다. 따라서 열교환기의 효율을 증가시킬 수 있다면, 사용되는 에너지를 획기적으로 저감시킬 수 있으며, 이산화탄소와 같은 온실가스의 발생도 원천적으로 줄일 수 있다 [1]. 최근에는 열교환기의 효율을 높이기 위하여 열교

[†]To whom corresponding should be addressed.

Department of Nuclear and Energy Engineering, Jeju National University
Tel : 064-754-3643; Fax : 064-757-9276; E-mail : jnkim@jejunu.ac.kr

환기의 내부 구조를 변화시키거나 단위부피당 전열면적을 극대화시킨 고효율의 열교환기가 개발되고 있다. 그러나 열교환기의 구조를 변화시키는 것만으로는 한계가 있다고 판단된다. 따라서 이와 같은 한계를 극복하기 위한 방법으로 기존의 열교환기 열매체 내에 열전도도가 우수한 고체입자를 주입하여 열교환기 효율을 증가시키고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 미국 Argonne 연구소의 Choi에 의해 처음으로 명명된 나노유체는 순수 유체 내에 nm 크기의 입자들이 안정적으로 분산되어 있는 새로운 개념의 열전달 유체를 말하며, 우수한 열전도도 특성을 가지고 있어 새로운 열매체로서 각광받고 있다 [2]. 또한 최근에는 나노과학기술의 발달로 인하여 획기적으로 높은 열전도도를 나타내는 다중벽 탄소나노튜브(Multi-Walled Carbon Nanotubes, MWCNTs)의 대량생산이 가능하게 되었고, 이에 따라 열전도도가 우수한 탄소나노튜브를 기능성유체 또는 순수유체에 분산하여 열교환기용 열매체로서 이용하고자 하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [3-4]. 특히, Liu et al. [5]은 탄소나노튜브를 엔진오일과 혼합하여 나노유체를 제조한 뒤 열전도도를 측정하였고, Choi et al. [6]은 poly oil에 탄소나노튜브를 첨가한 유체의 열전도도를 측정하였다. 또한 Xie et al. [7]은 다중벽 탄소나노튜브를 물과 에틸렌글리콜, Decene에 혼합한 나노유체의 열전도도를 측정하였다. 그리고 이들 연구는 공통적으로 탄소나노튜브를 유체에 첨가하였을 때, 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가함에 따라 유체의 열전도도가 크게 증가하였다고 보고하였다 [8].

따라서 본 연구에서는 냉동 및 냉방산업에서 주로 사용되고 있는 저온 열교환기의 효율 향상을 위하여 다중벽 탄소나노튜브와 산화 다중벽 탄소나노튜브(Oxidized Multi-Walled Carbon Nanotubes, OMWCNTs)를 이용하여 탄소나노유체와 산화탄소나노유체를 제조하였다. 그리고 상온(25°C)과 저온(10°C)에서 탄소나노유체와 산화탄소나노유체에의 열전도도 및 점도 특성을 측정하였고, 저온 열교환기 열매체로서의 적용가능성을 비교 분석하였다.

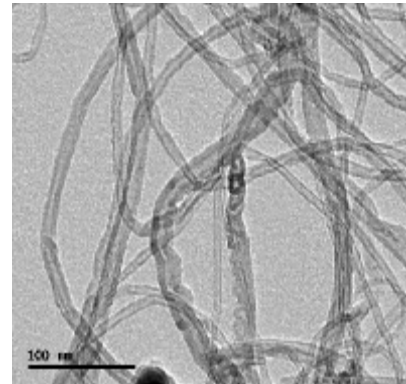
2. 실험장치 및 방법

2-1. 탄소나노튜브의 특성 및 나노유체 제조

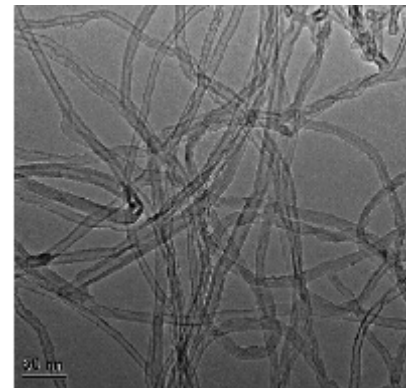
본 연구에서는 CM-95와 CM-100 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브를 사용하였고, 물성치는 Table 1에

Table 1. Properties of MWCNTs.

Properties	CM-95	CM-100
Diameter (nm)	10~15	10~15
Length (μm)	10~20	~200
Purity (wt.%)	95	95
Bulk Density (g/cm^3)	0.1	0.05
Surface Area (m^2/g)	200	225



(a) CM-95



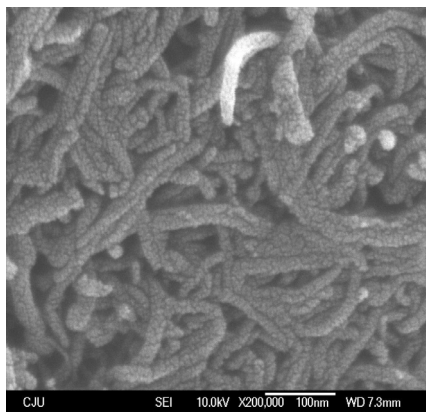
(b) CM-100

Fig. 1. SEM microphoto of MWCNTs.

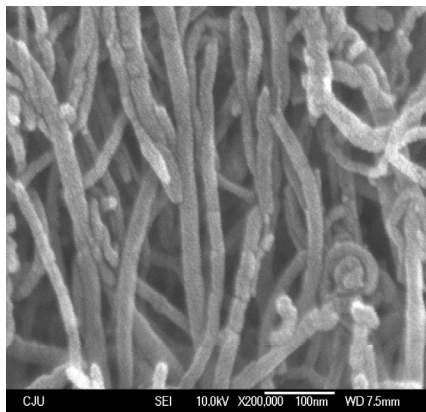
나타내었다. 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브는 직경, 순도 등 동일한 물성을 가지고 있으며, 길이가 다른 특징을 보인다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 두 종류의 다중벽 탄소나노튜브의 SEM 사진이다. CM-95와 CM-100 두 종류의 탄소나노튜브 모두 가늘고 긴 튜브 형태의 모양을 하고 있으며, 응집되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 1의 SEM 사진과 같이 탄소나노튜브는 흑연판 사이의 상호작용과 유사하게 입자와 입자간의 강한 반데르발스 상호 작용으로 인하여 다발이나 응집체 형태로 존재한다. 따라서 탄소나노튜브를 이용하여 나노유체를 제조할 때, 단순히 탄소나노튜브 입자를 열

매체와 혼합해서는 탄소나노튜브가 유체 내에 적절하게 분산되지 않으며, 높은 열전도도를 나타내는 탄소나노튜브의 특성이 나타나지 않는다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 나노유체를 제조할 때, 물리적 흡착에 의한 분산방법과 화학적 개질에 의한 분산방법을 각각 초음파 분산기를 이용한 나노유체의 기계적 분산방법과 혼합하여 제조하였다. 물리적 흡착에 의한 분산방법으로는 계면활성제 Sodium Dodecyl Sulfate(SDS, 100 wt%) [9], 고분자 화합물 Polyvinyl pyrrolidone(PVP, 300 wt%) [10]를 첨가하였다. 그리고 화학적 개질에 의한 분산방법으로는 CM-95와 CM-100 다중벽 탄소나노튜브의 표면을 화학적으로 산화 처리하여 산화 다중벽 탄소나노튜브를 제조하였고, Fig. 2에 CM-95와 CM-100 산화 다중벽 탄소나노튜브의 SEM사진을 나타내었다. 탄소나노유체는 1차 증류수 50 ml에 탄소나노튜브를 0.0005~0.1 vol%의 비율로 혼합하고, 2시간 동안 초음파 분산기로 분산하여 제조하였다.



(a) CM-95 OMWCNTs



(b) CM-100 OMWCNTs

Fig. 2. SEM microphoto of OMWCNTs.

2-2. 열전도도 측정

본 연구에서는 비정상 열선법(Transient Hot-wire Method)을 사용하여 탄소나노유체의 열전도도를 측정하였다. 그리고 CRC Handbook of Chemistry and Physics에 보고된 증류수의 열전도도 데이터와 본 실험 장치를 이용하여 측정한 증류수의 열전도도를 비교한 결과 1% 이내의 편차로 실험 데이터가 일치하였다 [12].

Fig. 3은 본 실험에서 사용된 열전도도 측정 장치의 개략도이다. 실험 장치는 10 Ω, 10 kΩ의 저항과 10 kΩ의 가변저항, 그리고 테프론으로 코팅된 직경 76 μm 길이 15 cm 백금선으로 구성되어 열선의 저항변화를 검출할 수 있는 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge), 전압을 공급해주기 위한 파워 서플라이, 전압과 온도 등의 데이터를 계측하기 위한 Agilent 34970A 데이터 수집 장치, 데이터의 저장과 모니터링을 위한 컴퓨터로 구성되어 있다.

실험방법은 제조된 탄소나노유체에 백금선이 연결된 측정 장치를 넣고, 항온수조를 이용하여 나노유체의 온도를 실험온도로 만든다. 그리고 휘트스톤 브리지의 가변저항 10 kΩ을 조절하여 검류계(galvano meter)의 전압을 0으로 조절한 뒤, 스위치를 이용하여 회로에 15 V의 전압을 인가시키면 나노유체 내에 있는 백금선의 저항이 변한다. 이 때 백금선의 전압을 측정하고, 저항을 계산하였다. 그리고 Bentley가 제시한 백금선의 전기저항-온도에 관한 선형식과 온도-저항계수 0.0039092/°C를 이용하여 온도를 계산하였다. 탄소나노유체의 열전도도는 계산된 온도를 이용하여 다음과 같은 식으로 계산하였다.

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

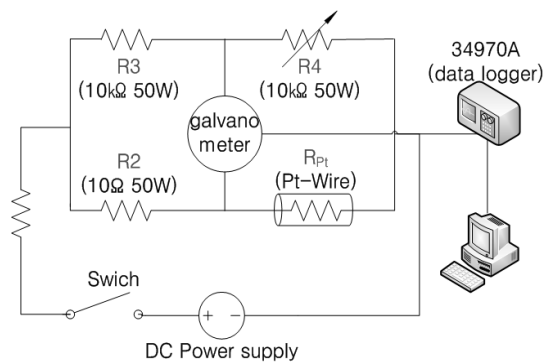


Fig. 3. Schematic diagram of thermal conductivity experimental apparatus.

여기서, k 는 유체의 열전도도이며, T_1 , T_2 는 각각 시간 t_1 , t_2 에서 측정된 백금선의 온도이다. 모든 실험은 유체의 실험온도를 일정하게 유지하여 실시하였고, 실험의 정확도와 신뢰성을 높이기 위하여 동일한 실험조건에서 10번의 반복실험을 수행 한 후 평균값을 구하였다.

2-3. 점도 측정

본 연구에서는 Brookfield사의 회전형 디지털 점도계 DV II+pro를 사용하여 탄소나노유체의 점도를 측정하였다. DV II+pro는 시료 속에 담긴 회전 추를 일정한 속도로 회전시킬 때 발생하는 회전력을 측정하여 점도 값으로 환산시키는 회전형 점도계로서 시료 용액의 전단율을 일정하게 유지시킬 수 있으므로 뉴턴유체와 비 뉴턴유체의 측정에 모두 유용하며, 연속적으로 점도를 측정할 수 있다. 또한 회전 추의 회전수를 0~200 rpm까지 조절할 수 있다. 점도 측정 장치는 실험유체의 온도를 제어하기 위한 항온수조와 측정된 데이터를 저장하고 모니터링하기 위한 컴퓨터로 구성되어있다. 점도실험은 열전도도 실험데이터와의 비교를 위하여 나노유체의 온도를 모두 열전도도의 실험온도와 동일하게 유지하였다. 기본유체의 특성상 비교적 저 점도를 측정하게 때문에 저 점도용 회전 추 LV-64를 사용하여 탄소나노유체의 점도를 측정하였다.

3. 실험결과

3-1. 열전도도

Fig. 4는 CM-95와 CM-100 다중벽 탄소나노튜브에 SDS 100 wt%, PVP 300 wt%를 각각 혼합하여 제조한 네 종류의 나노유체와 CM-95와 CM-100 산화탄소나노유체의 열전도도를 상온(25°C)에서 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 물리적 흡착방법을 이용하여 계면활성제 SDS와 고분자 화합물 PVP를 첨가한 탄소나노유체의 열전도도보다 CM-95와 CM-100 산화탄소나노유체의 열전도도가 높다는 것을 알 수 있다. 이는 탄소나노튜브의 표면을 화학적으로 산화 처리하여 -C=O, -COOH 등의 산소를 함유하는 기능을 부착한 산화처리방법이 탄소나노튜브 흑연구조 고유의 극성을 변화시켜 탄소나노튜브 입자간의 반데르발스 힘을 약화시킴으로써 탄소나노튜브가 유체 내에 안정적으로 분산되기 때문인 것으로 판단된다.

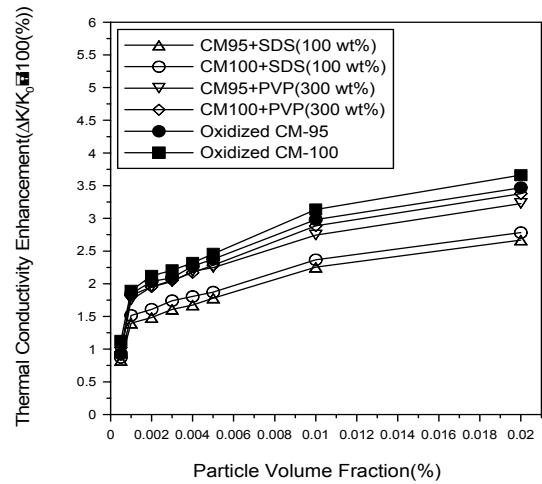


Fig. 4. Comparison of the thermal conductivity as a function of the dispersion method at 25°C.

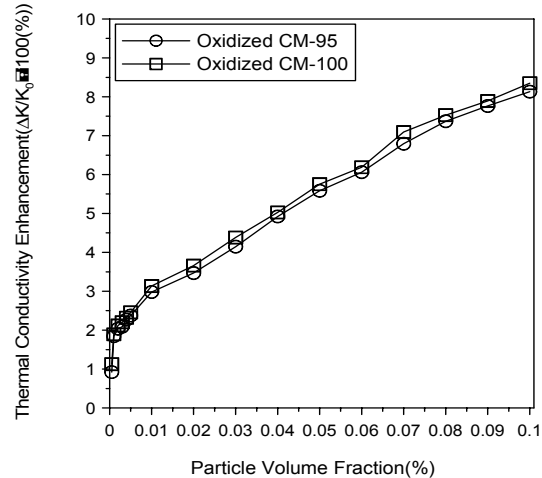
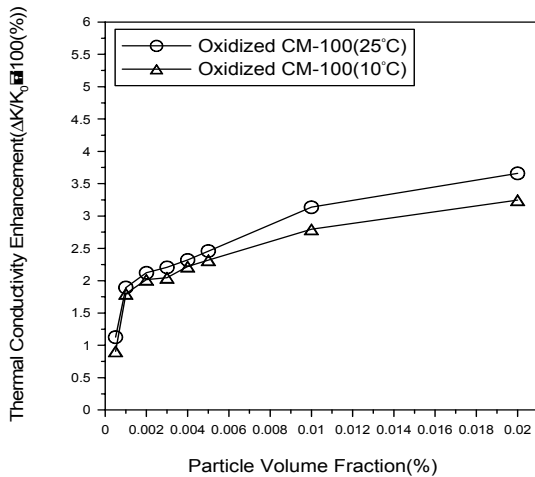
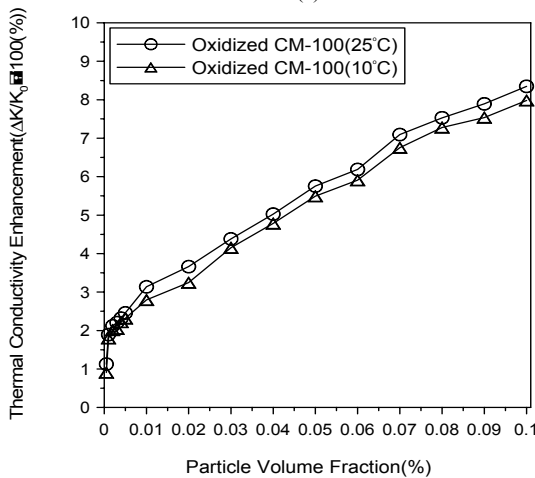


Fig. 5. Comparison of the thermal conductivity as a function of particle volume fraction at 25°C.

Fig. 5는 Fig. 4에서 높은 열전도도를 나타낸 CM-95와 CM-100 두 종류의 산화 다중벽 나노튜브의 혼합비율을 0.1 vol%까지 증가시켜 제조한 산화탄소나노유체의 열전도도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 산화 다중벽 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가함에 따라 두 종류의 산화탄소나노유체 모두 열전도도가 비선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이는 탄소나노튜브 입자의 크기와 형상 때문이라고 판단된다. 또한 CM-95 산화탄소나노유체보다 CM-100 산화탄소나노유체의 열전도도가 더 높음을 확인하였다. 이는 CM-100 산화 다중벽 탄소나노튜브 입자의 길이가 더 길기 때문인 것으로 판단되며, 입자의 길이가 탄소나노유체의 열전도도에 영



(a)



(b)

Fig. 6. Comparison of the thermal conductivity as a function of particle volume fraction at 25°C, 10°C.

향을 미친다는 것을 의미한다.

Fig. 6은 탄소나노유체들 중에서 가장 좋은 열전도도를 보였던 CM-100 산화탄소나노유체의 열전도도를 상온(25°C)과 저온(10°C)에서 비교한 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 저온에서는 산화탄소나노유체의 열전도도가 감소하였다. 특히, 상온에서 0.1 vol% 산화탄소나노유체의 열전도도는 증류수보다 8.34% 증가하였으나 저온에서는 7.98%로 열전도도가 0.36% 감소하였다. 이는 저온에서 물분자와 탄소나노튜브 입자의 움직임이 감소하여 물분자 및 탄소나노튜브 입자간의 열적운동과 나노유체의 열전도도를 증가시키는 중요 요인 중 하나인 브라운 운동이 감소하기 때문으로 판단된다. 하지만 저온에서도 열전도도는 기본유체 대비 7.98% 증가였으므로 저온 열교환기 열

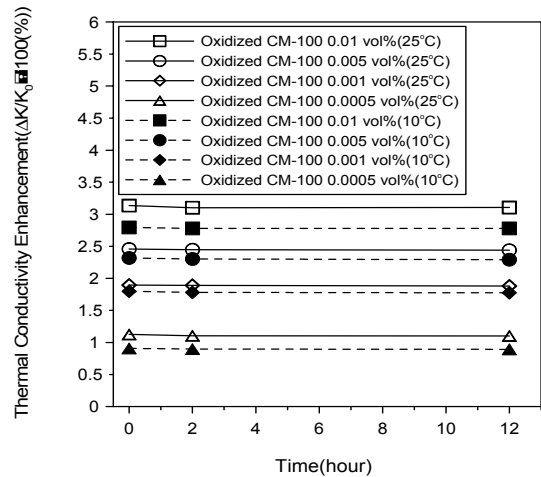


Fig. 7. Comparison of the thermal conductivity as a function of time at 25°C, 10°C.

매체로서 충분히 뛰어난 성능을 나타낼 것이라고 판단된다.

Fig. 7은 상온(25°C)과 저온(10°C)에서 CM-100 산화탄소나노유체의 시간에 따른 열전도도 변화를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 분산 직후 산화나노유체를 상온과 저온에서 측정된 열전도도는 12시간이 흐른 뒤에도 거의 변화가 없는 것을 알 수 있으며, 이는 12시간이 지나도 산화나노유체의 분산 안정성이 계속 유지되기 때문인 것으로 사료된다. 이 실험결과는 산화탄소나노유체를 열교환기의 열매체로 사용할 때 상당히 유리한 조건이라고 판단된다.

3-2. 점도

Fig. 8은 본 연구에서 제조한 탄소나노유체와 산화탄소나노유체의 점도를 상온(25°C)에서 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 탄소나노튜브의 혼합비율이 증가함에 따라 점도도 같이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 같은 혼합비율에서 계면활성제 SDS보다 고분자 화합물 PVP를 첨가한 탄소나노유체의 점도 증가가 더 높다는 것을 알 수 있으며, 두 종류의 산화탄소나노유체가 다른 탄소나노유체들 보다 점도가 상당히 낮음을 확인하였다. 따라서 가장 낮은 점도를 보인 CM-95와 CM-100 산화탄소나노유체의 점도를 Fig. 9에 나타내었다. 그림을 보면 알 수 있듯이 나노튜브 입자의 길이가 짧은 CM-95 산화나노유체의 점도가 조금 더 낮다는 것을 알 수

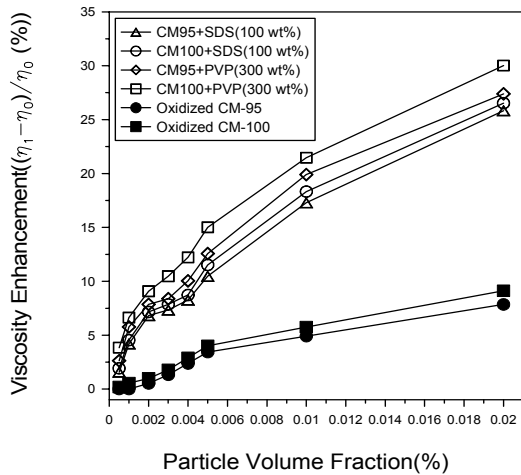


Fig. 8. Comparison of the viscosity as a function of the dispersion method at 25°C.

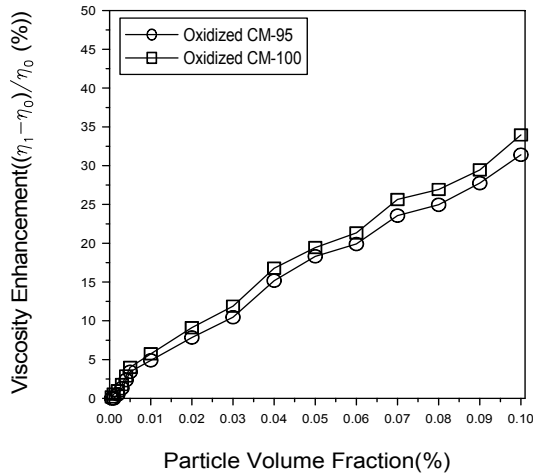


Fig. 9. Comparison of the viscosity as a function of particle volume fraction at 25°C.

있으며, 이는 나노유체의 점도 역시 열전도도와 마찬가지로 탄소나노튜브 입자의 길이에 영향을 받는다는 것을 의미한다.

Fig. 10은 앞선 탄소나노유체의 열전도도 측정실험에서 가장 우수한 효과를 보인 CM-100 산화탄소나노유체의 점도 특성을 알아보기 위하여 0.0005~0.1 vol% 비율로 제조한 산화탄소나노유체의 점도를 상온(25°C)과 저온(10°C)에서 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 저온에서 CM-100 산화탄소나노유체의 점도는 상온보다 높음을 알 수 있다. 특히, 상온에서 0.1 vol% CM-100 산화탄소나노유체의 점도는 증류수보다 33.96%, 저온에서는 37.08% 증가하여 저온에서 점도가 3.12% 높음을 확인하였다. 저

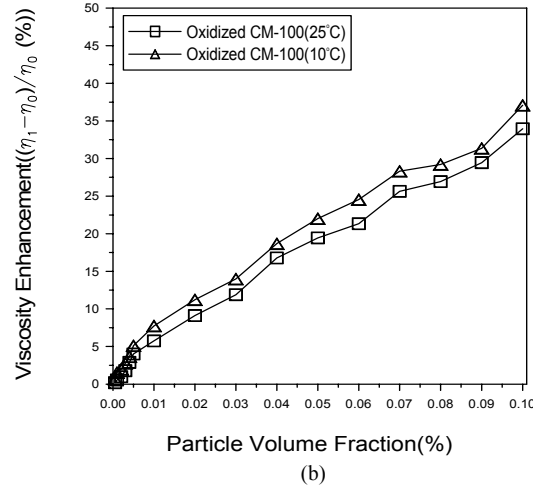
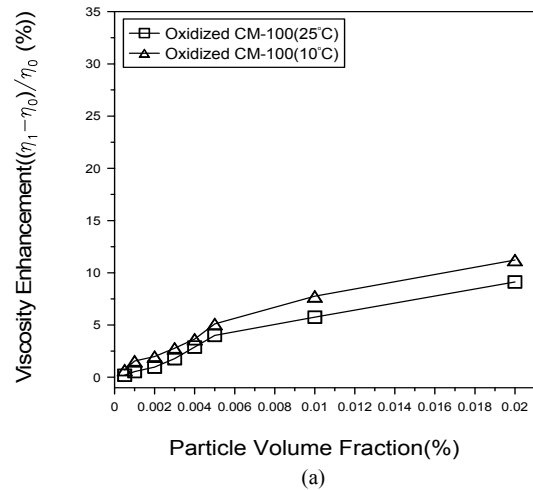


Fig. 10. Comparison of the viscosity as a function of particle volume fraction at 25°C, 10°C.

온(10°C)에서 증류수의 점도가 1.3 cP이며, 기본유체의 특성상 비교적 저 점도이므로 측정된 산화나노유체의 점도는 크지 않음을 알 수 있으며, 저온 열교환기의 열매체로서 충분히 적용 가능할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 저온 열교환기의 효율 향상을 위하여 상온(25°C)과 저온(10°C)에서 탄소나노유체와 산화탄소나노유체의 열전도도 및 점도를 측정하고 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄소나노유체의 열전도도는 계면활성제 SDS와 고분자 화합물 PVP를 혼합하여 제조한 탄소나노유체보다 산화탄소나노유체의 열전도도가 더 높다는 것을 알 수 있었다.

- (2) CM-95 산화 다중벽 나노튜브를 혼합한 산화탄소나노유체보다 입자의 길이가 긴 CM-100 산화 다중벽 탄소나노튜브를 혼합한 산화탄소나노유체의 열전도도가 더 높음을 확인하였다.
- (3) 저온(10°C)에서 0.1 vol% CM-100 산화탄소나노유체의 열전도도는 상온(25°C)보다 약간 감소하였으나, 기본유체보다 7.98%의 열전도도가 증가하였다. 그리고 상온(25°C)과 저온(10°C)에서 측정된 열전도도는 12시간이 흐른 뒤에도 거의 변화가 없는 것을 알 수 있었다.
- (4) CM-95와 CM-100 산화 다중벽 탄소나노튜브를 첨가한 두 종류의 산화탄소나노유체가 다른 탄소나노유체들 보다 점도가 상당히 낮음을 알 수 있었다.
- (5) CM-95 산화탄소나노유체보다 CM-100 산화탄소나노유체의 점도가 높음을 확인하였고, 저온(10°C)에서 CM-100 산화탄소나노유체의 증류수 대비 점도 증가량은 상온(25°C)보다 3.12% 높음을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(No. R01-2008-000-20575-0)과 지식경제부 산업원천기술개발 사업(과제번호 : 10035530)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. Afgam, N., "New Developments in Heat Exchanger", Gordon and Breach Publishers, 1-696, (1996).
2. Choi, S. U. S., "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, Development and applications of non-newtonian flows", edited by Singer, D. A. and Wang, H. P., FED-Vol. 231/MD-Vol.66, ASME New York, pp. 474-480, (1995).
3. Berber, S., Kwon, Y. and Tomanek, D., 2000, "Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes", Physical Review Letters, Vol. 84, No. 20, pp. 4613-4616, (2000).
4. Lee, Y. H., "Application of carbon nanotube", Physics & High Technology, Vol. 12, pp. 24-30, (2003).
5. 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, Vol. 32. No. 9, pp. 1202-1210, (2005).
6. Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., Grulke, E. A., "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions", Applied Physics Letter, Vol. 79, NO. 14, pp. 2252-2254, (2001).
7. Xie, H., Lee, H., Youn, W., and Choi, M., "Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities", Journal of Applied Physics, Vol. 94, No.8, pp. 4967-4971, (2003).
8. Li, Y., Zhou, J., Tung, S., Schneider, E., Xi, S., "A review on development of nanofluid preparation and characterization, Power Technology", Vol. 196, No. 2, pp. 89-101, (2009).
9. Assael, M. J., Chen, C. F., Metaxa, I. and Wakeham, W.A., "Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water", International Journal of Thermophysics, Vol. 25, No.4, pp. 971-984, (2004).
10. Park, S. S., Park, Y. C., Kim, N. J., "A comparative study characteristics of the MWCNTs and PVP added Nanofluids", Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 23, No. 1, pp. 47-53, (2011).
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. Seo, H. M., Park, S. S., Kim, N. J., "Characteristics of carbon nano fluid added PVP, Journal of Air-conditioning and Refrigeration", Vol. 22, NO. 5, pp 289-295, (2010).
13. Bently, J. P., "Temperature sensor characteristics and measurement system design", Journal of Physics E: Scientific Instruments, Vol. 17, pp. 430-435, (1984).