

탄소 나노튜브 나노유체의 열전도도에 대한 연구

김 봉 훈[†]

대구대학교 자동차·산업·기계공학부

A Study on the Thermal Conductivity of Carbon-Nanotube Nanofluids

Bong-Hun Kim[†]

Automotive, Industrial and Mechanical Eng. Dept., Daegu University, Gyeongbuk 712-714, Korea

(Received August 18, 2006; revision received February 7, 2007)

ABSTRACT: An experimental study was conducted to investigate the effect of the morphology of CNT (Carbon Nanotube) on the thermal conductivity of suspensions. The effective thermal conductivities of the samples were measured using a steady-state cut bar apparatus method. Enhancements based on the thermal conductivity of the base fluid are presented as functions of both the volume fraction and the temperature. Although functionalized SWNT (Single-Walled Carbon Nanotube) produced more stable and homogeneous suspensions, the addition of small amounts of surfactant to suspensions of "as produced" SWNT demonstrated a greater increase in effective thermal conductivity than functionalized SWNT alone. The effective thermal conductivity enhancement corresponding to 1.0% by volume approached 10%, which was observed to be lower than expected, but more than twice the values, 3.5%, obtained for similar tests conducted using aluminum oxide suspensions. However, for suspensions of MWNT (Multi-Walled Carbon Nanotube), the degree of enhancement was measured to be approximately 37%. It was postulated that the effect of clustering, resulting from the multiple heat-flow passages constituted by interconnecting neighboring CNT clusters, played an important role in significant enhancement of effective thermal conductivity.

Key words: Caron nanotube(탄소 나노튜브), Nanofluid(나노유체) Effective thermal conductivity (유효 열전도도), Clustering(클러스터 효과), Aspect ratio(종횡비)

기 호 설 명

T : 온도 [°C]

A : 단면적 [m^2]

k : 열전도도 [W/mK]

L : 거리 [m]

m : 질량 [g]

q : 열전달률 [W]

하첨자

c : 구리

e : 유효값

f : 유체

g : 상하 동봉 사이의 간극부

p : 고체 또는 입자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-53-850-6682; fax: +82-53-850-6689

E-mail address: bhkim@daegu.ac.kr

1. 서 론

고체-유체 혼합액체가 높은 열전도도를 갖는다는 사실에 대해서는 Maxwell⁽¹⁾ 이래로 많은 연구가 진행되었다. 최근에는 나노공학 분야의 큰 기술적인 진전으로 인하여 획기적으로 높은 열전도도⁽²⁾를 나타내는 탄소 튜브(Carbon Nanotube, CNT)인 SWNT(Single-Walled Nanotube) 및 MWNT(Multi-Walled Nanotube)의 대량 합성공정이 개발되어 나노입자-유체 혼합액인 나노유체⁽³⁾의 산업적인 활용 가능성이 높아지게 되었다.

Choi et al.⁽³⁾은 CVD법(Chemical Vapor Deposition)으로 제조된 MWNT 나노유체의 열전도도를 고체 및 유체의 혼합물에 대한 유효열전도도(Effective Thermal Conductivity, k_e)로 간주하고 유체의 열전도도에 대한 비(k_e/k_f)를 측정하였는데 체적농도 1%에서 약 2.5 이상이었다.

Xie et al.⁽⁴⁾의 경우에도 제조상태 그대로의 AP-MWNT(As Produced MWNT: 평균 직경 및 길이가 각각 15 nm와 30 μ m)를 친수화 처리한 F-MWNT(Functionalized MWNT)를 이용한 F-MWNT/H₂O, 그리고 F-MWNT/EG(에틸렌글리콜)에 대한 열전도도의 향상비율($(k_e/k_f)/k_f$)을 비정상열선법(Transient Hot-Wire Method)를 적용하여 측정하였는데 체적농도 1%에서 각각 7%와 13% 정도로 나타났으며 체적농도의 증가에 따라서 선형적으로 증가되는 경향을 보였다.

근래에 Assael et al.⁽⁵⁾은 Choi et al.⁽³⁾ 및 Xie et al.⁽⁴⁾과 동일한 측정방법(비정상열선법)을 이용하여 AP-MWNT(CVD법)/H₂O 나노유체의 유효 열전도도를 측정하였다. 나노튜브의 체적농도(0.6%)와 온도(상온)를 일정하게 유지한 상태에서 열전도도 향상비(k_e/k_f)가 초음파 처리시간(0~500분)과 계면활성제(SDS)의 농도(SDS 질량/CNT 질량: 0~1.67)에 따라서 변화되는 경향을 조사하였다. 계면활성제의 영향은 무시될 수 있으며 초음파 처리시간이 길어질수록 향상비율이 감소되는 것으로 보고되었다. 0.6%의 CNT 체적 농도에서 최대 향상비율은 39%(평균치 29%)로 나타났다. 이러한 팔목할 만한 열전도도 향상비율은 유사한 나노유체(SDS+AP-MWNT/H₂O)를 적용한 Wen and Ding⁽⁶⁾의 연구에서도 동일하게 나타났다. 유효열전도도는 비정상열선법으로 측정되었으며 체적농도 0.84%에서 열전도도 향상비율은 나노유체

의 온도가 25°C에서 45°C로 증가됨에 따라서 27%에서 30% 변화되는 경향을 보였다.

Das et al.⁽⁷⁾은 나노유체의 열전도도 향상기구(Enhancement Mechanism)로 온도에 좌우되는 브라운 운동(Brownian Motion)과 같이 나노입자들의 확률론적인 운동이라고 추정하였다. Choi et al.⁽³⁾에서는 브라운 운동 이외에 다른 두 가지의 향상기구가 제안되었다. 하나는 CNT 내부에서 양자의 평균 자유거리(Mean Free Path)가 커지면서 기존의 열확산과는 다른 발리스틱 열전도(Ballistic Conduction)이 발생한다는 것이고 다른 것은 나노입자와 액체 간의 계면에 형성되는 정렬구조(Aligned Structure)를 통한 열전도를 제안하였다. 그러나 정렬구조로 인한 향상기구는 Wang et al.⁽⁸⁾과 Lee et al.⁽⁹⁾에서 주장하는 주요한 열유동 원리인 미세대류(Micro-convection)와는 다소 상반되어 아직 입증되지 못하고 있으며 발리스틱 열전도라는 CNT 자체의 새로운 열전도 향상기구도 이론적인 측면에서 충분한 근거가 제시되지 못하고 있다.

본 연구에서는 CNT의 형상학적인 변수가 열전도도 향상률에 미치는 영향을 체적농도와 온도의 함수로 나타내고자 한다. 이 연구목표들을 달성하기 위하여 각 CNT 샘플의 유효 열전도도는 Challoner and Powell⁽¹⁰⁾이 제안한 것과 유사한 정상상태 측정법을 이용하여 측정하였다.

2. 나노유체 제조 및 특성분석

본 연구에서 사용된 CNT 파우더의 종류는 다음과 같이 분류된다.

CNT-A : AP-SWNT(CVD법), Carbon Nanotech Inc. (USA).

CNT-B : F-SWNT(아크 생성법), Carbon Solution Inc. (USA).

CNT-C : 정제된 MWNT(CVD법), MER Corp. (USA).

이 CNT 파우더 샘플의 그라파이트 구조는 알콘 레이저를 장착한 라만(Raman) 분석기⁽¹¹⁾를 이용하여 조사하였다. 모든 CNT 파우더에 있어서 그라파이트 결정구조에 대응하는 G 피크는 1,580 cm^{-1} 에서 나타났고, 결합, 미세 그라파이트 입자

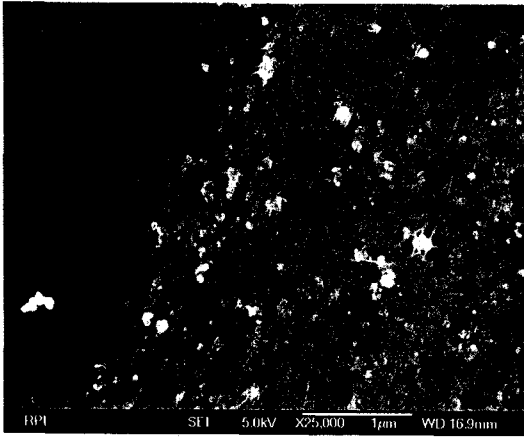


Fig. 1 SEM image of CNT B.

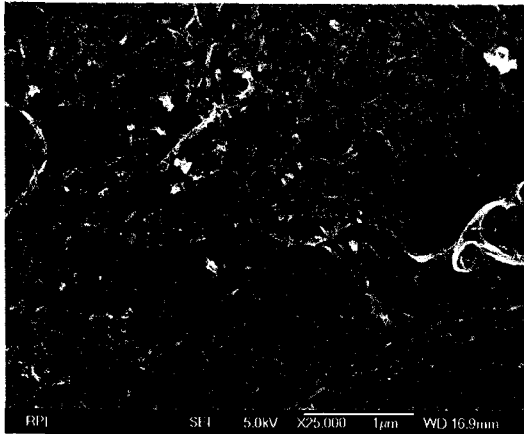


Fig. 2 SEM image of CNT A.

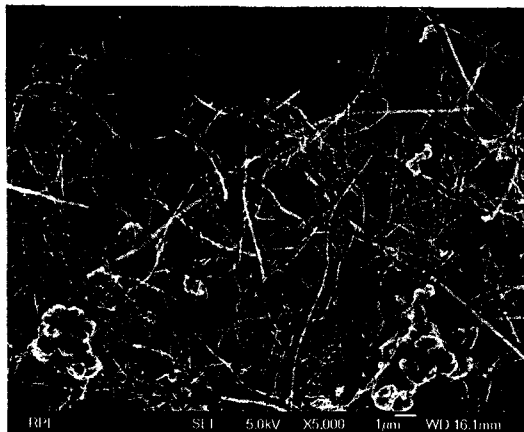


Fig. 3 SEM image of CNT C.

또는 비정질 탄소 등에 기인하는 D 피크는 $1,350 \text{ cm}^{-1}$ 에서 나타났다.⁽¹²⁾ CNT B의 스펙트럼에서는 AP-SWNT의 경우보다 한층 더 강한 D 피크가 나타났다.⁽¹³⁾

Fig. 1에는 CNT B의 전자현미경(SEM) 사진으로 F-SWNT(Functionalized SWNT)를 사용한 CNT B는 잘 분산되고 직경과 길이가 모두 균일하며 직경은 100 KV에서 투과전자현미경(TEM)을 사용하여 조사해 본 결과 대략 10 nm 정도이고 평균 길이가 약 $1.5 \mu\text{m}$ 정도로 나타났다. 그리고 CNT A와 C의 전자현미경 사진에서도 CNT는 계면활성제(SDBS)에 의하여 잘 분산되어 있음을 볼 수 있었다. CNT A의 평균 직경과 길이는 각각 20 nm와 $3 \mu\text{m}$ 정도로 관측되었다. MWNT인 CNT C는 Assael et al.⁽⁵⁾에서 사용된 것처럼 SWNT보다 아주 굵고 평균 직경이 대략 90 nm이고 평균 길이는 $30 \mu\text{m}$ 정도로 관측되었다.

유효 열전도도를 측정하기 위해서 3종의 CNT A, B, C를 3종의 체적농도 0.3, 0.7, 1.0%에 따라서 조합하여 9종류의 나노유체 샘플을 제조하였다. CNT B의 경우에는 계면활성제를 사용하지 않았으며 CNT A와 CNT C 샘플에는 Assael et al.⁽⁷⁾의 연구결과를 토대로 CNT의 질량비로 1:1 만큼 SDBS를 첨가하여 잘 분산된 균일한 샘플을 만들었다. 이러한 샘플에 있어서 체적농도(ϕ)는

$$\phi = \left(\frac{m_p / \rho_p}{m_p / \rho_p + m_f / \rho_f} \right) \quad (1)$$

여기서 m_f 와 m_p 는 각각 나노유체 제조시 사용된 유체와 입자의 질량이며, ρ_f 는 유체의 밀도이다. ρ_p 는 유체에 혼합된 SWNT 및 MWNT 입자의 밀도에 해당되며 각각 1.3 과 2.2 g/cm^3 이 본 연구에 적용되었다.⁽¹⁴⁻¹⁵⁾

3. 실험장치

Fig. 4는 유효열전도도를 측정하기 위한 실험장치의 전체 개략도이다. 실험장치는 시험편을 진공 챔버 내부에 수직으로 정렬하는 클램프장치와 시험편 상부를 가열하는 히터와 직류 전원공급기, 시험편 하부를 냉각하는 냉각재킷과 항온수조, 그리고 시험편에 부착된 열전대들로부터 온도와 온도차를 측정하는 데이터 로거로 구성된다.

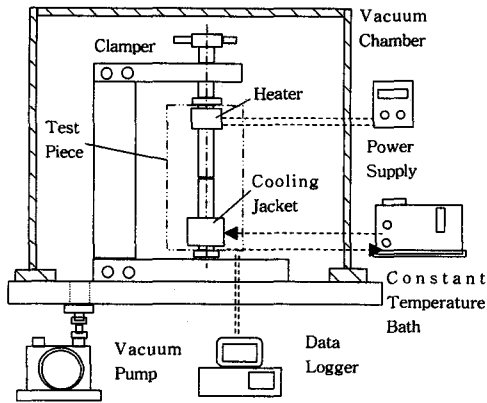


Fig. 4 Schematic diagram of experimental set-up.

Fig. 5는 유효 열전도도를 측정하기 위한 시험편의 세부형상을 나타낸다. 좌측 그림에서 보면 두 개의 동봉(Copper Rod)이 수직으로 정렬되어 상하 동봉 사이에 1.7 mm 간극이 존재하고 CNT 나노유체가 주입될 수 있는 공간을 확보하기 위해 오링(O Ring)이 간극 사이에 위치하고 있다. 우측 그림은 상하 각각의 동봉이 오링과 접하는 A 및 B 지점에서 상방과 하방으로 본 형상을 나

타낸다. 좌측 그림에 도시된 것처럼 상부 및 하부의 동봉의 외경은 26 mm이며 길이는 동일하게 115 mm이다.

오링과 상하부 동봉으로 구성된 셀에 나노유체 샘플을 주입하기 위하여 0.6 mm 직경의 도관이 가공되어 있다. 상부 동봉의 끝단에는 밴드형 전기히터(110Ω)가 설치되어 직류 전원공급장치에 연결되어 있고 하부 동봉의 선단은 항온수조에서 공급되는 냉각수(-15°C)가 흐르는 냉각재킷에 연결되어 있다.

동봉의 온도를 측정하기 위하여 14개의 K-type 열전대가 사용되었다. 동봉의 중심까지 닿도록 설치된 두 조의 열전대 T9/T10와 T11/T12로부터 축방향의 온도차가 측정된다. 같은 방법으로 나노유체가 주입되는 셀의 상하부 표면에 근접되게 설치된 4조의 열전대(T1/T5, T2/T6, T3/T7, 그리고 T4/T8)들을 이용하여 셀의 상하 온도차를 측정한다.

4. 실험조건 및 절차

먼저 Fig. 5에 도시된 셀 내부에 0.5 cc 정도의 나노유체 샘플을 채운 후 입출구의 튜브를 막는

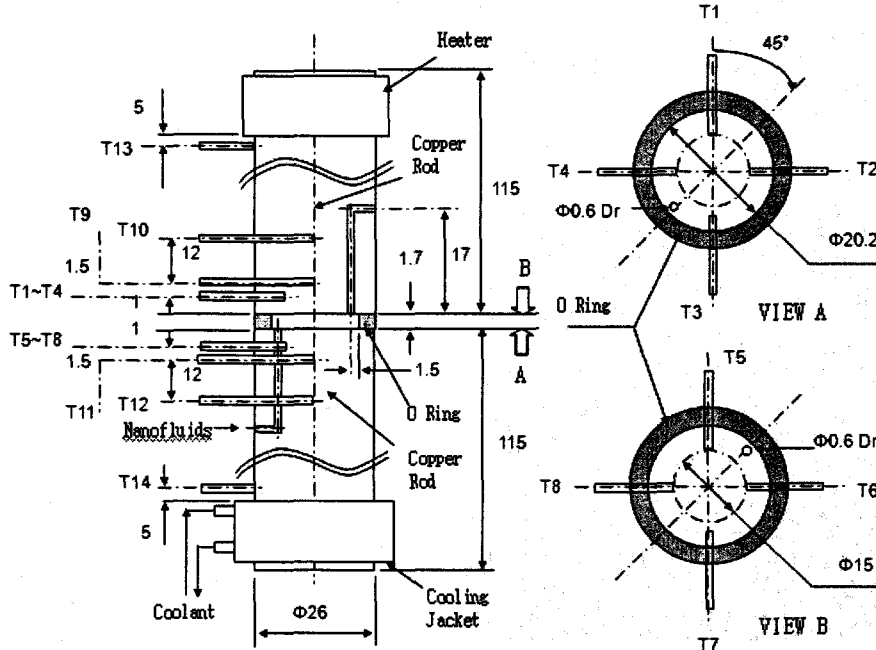


Fig. 5 Detailed configuration of the test piece.

다. 그 다음에는 실험장치를 진공챔버 속에 수직으로 설치하고 진공을 건 후 내부진공도가 0.02 Torr 이하가 되고 각 열전대의 온도변화가 0.1°C 이하가 될 때까지 초기화 과정을 거친다. 초기화가 완료되면 -15°C의 냉각수를 4.9l/min로 조절하여 순환시킨다. 이와 동시에 히터를 켜고 직류 전원공급기의 전압을 3단계(33.1, 40.5, 47.1 V)로 상승시킴으로써 결과적으로 나노유체의 온도를 증가시킨다.

축방향 열전달률(q)은 Fig. 4의 상부 동봉(가열부) 및 하부 동봉(냉각부)의 축방향 평균 온도차로부터 계산된다.

$$\Delta T_c = \frac{(T_{10} - T_9 + T_{11} - T_{12})}{2} \quad (2)$$

$$q = A_c k_c \frac{\Delta T_c}{L_c} \quad (3)$$

여기서 A_c 는 동봉의 단면적이고 L_c 는 T9와 T10 (또는 T11과 T12) 사이의 거리로 12mm이다. Fig. 5의 동봉의 열전도도 k_c (W/cm·K)는 온도의 함수로 다음과 같이 근사된다.⁽¹⁵⁾

$$k_c = 4.06 - 0.08 \frac{(T-2)}{75} \quad (4)$$

나노유체의 유효 열전도도는 1차원 열전도식과 오링의 열저항을 고려하여 계산하면⁽⁸⁾

$$k_e = \frac{1}{A_f} \left(\frac{qL_g}{\Delta T_g} - k_0 A_0 \right) \quad (5)$$

여기서 A_f 는 Fig. 5의 좌측 그림에서 표시된 것처럼 오링을 제외한 나노유체 부분의 단면적이고 L_g 는 상하 동봉 사이의 간극 또는 나노유체 셀의 높이이다. k_0 와 A_0 는 각각 오링의 열전도도와 동봉과 접촉하는 오링부의 단면적을 나타낸다. ΔT_g 는 나노유체에 부과되는 상하의 온도차로 4조의 온도차를 평균하여 얻어진다.

$$\Delta T_g = \frac{(T_1 - T_5 + T_2 - T_6 + T_3 - T_7 + T_4 - T_8)}{4} \quad (6)$$

오링의 열전도도(k_0)는 기존의 데이터를 조사해

본 결과 통상 0.03~0.1⁽¹⁵⁾(W/m·K)로 일정하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 셀에 나노유체를 채우지 않은 예비실험을 통하여 5.0×10^{-4} W/m·K 정도로 산정되었는데 이는 접촉 열저항으로 인하여 기존의 데이터보다 작은 값을 나타내는 것으로 보인다. 식(5)에 있는 셀의 높이(L_g)는 온도에 따라서 변화되므로 가열부 및 냉각부의 동봉의 평균 온도를 고려한 열팽창으로 보정해야 한다.

$$L_g = L_{g_i} - \gamma L (\overline{T_h} - \overline{T_c}) \quad (7)$$

여기서 L_{g_i} 는 히터를 가열하기 전의 초기간극(1.7 mm)이고 L 은 상하부 동봉의 길이로 115 mm이며 γ 는 열팽창계수로 본 연구에서는 1.6×10^{-5} (K⁻¹)을 적용하였다.⁽¹⁶⁾ 그리고 $\overline{T_h}$ 와 $\overline{T_c}$ 는 각각 상부(히터측 가열부)와 하부(냉각재킷측 냉각부) 동봉들의 길이방향 평균 온도로 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{T_c} = \frac{(T_{11} + T_{14})}{2} \quad (8)$$

$$\overline{T_h} = \frac{(T_9 + T_{13})}{2} \quad (9)$$

유효 열전도도의 향상률(%)은 $(k_e - k_f) \times 100 / k_f$ 로 정의되어 나노유체의 체적농도(ϕ , 식(1))와 평균 온도($\overline{T_m}$)의 함수로 분석되었다.

$$\overline{T_m} = \frac{(T_{fh} + T_{fc})}{2} \quad (10)$$

$$T_{fh} = \frac{(T_1 + T_2 + T_3 + T_4)}{4} \quad (11)$$

$$T_{fc} = \frac{(T_5 + T_6 + T_7 + T_8)}{4} \quad (12)$$

실험데이터는 3일 동안 3회 반복 측정하여 나노유체의 안정성을 검토하였다. 각 실험은 정상 상태에서 10초 간격으로 10분간 수집한 데이터를 평균하여 결과 데이터를 획득하였다.

5. 결과 및 토의

식(5)에서 표시된 것과 같이 식(3)으로 계산되는 축방향 열전달과 식(6)에서 정의되는 나노유체 셀의 상하 온도차를 이용하여 1차원 열전도의

기본 원리로부터 9종의 나노유체에 대한 유효열전도도가 측정되었고 각 체적농도(%)에서 식(10)에서 정의되는 평균 온도의 함수로 분석되었다.

우선 CNT를 적용한 열전도도 측정실험 이전에 증류수의 열전도도(k_f)가 온도의 변화에 따라서 측정되었으며 그 결과는 Fig. 6에 나타나 있다. 측정된 데이터의 온도 상승에 따른 1차 근사는 거의 선형적인 양상을 보여주고 있으며 1% 이내의 편차로 기존에 보고된 물성데이터⁽¹⁵⁾와 잘 일치하고 있다. 증류수에 대한 이러한 측정값으로부터 k_f 는 유체의 평균온도를 함수로 한 1차식으로 표시되고 각 온도에 따라서 유효 열전도도의 향상률에 반영된다.

Fig. 7은 친수화 처리된 F-SWNT를 함유한

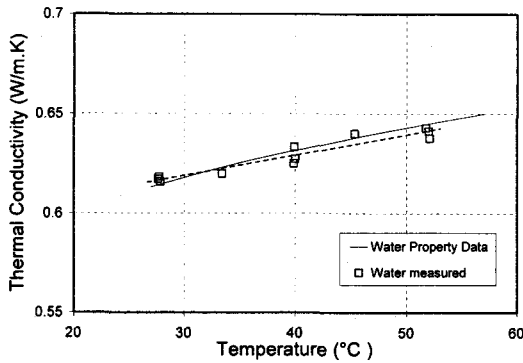


Fig. 6 Validation of present steady-state method to measure the thermal conductivity of the base fluid, distilled water.

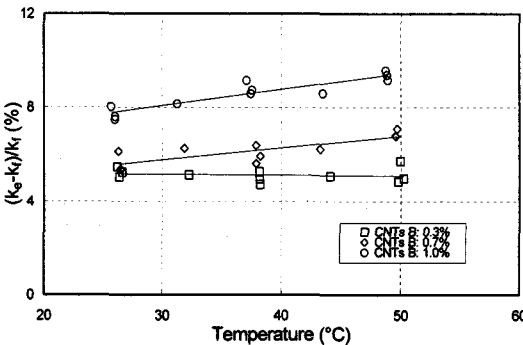


Fig. 7 Variation of the thermal conductivity enhancement of CNT B as a function of mean temperature for a given volume fraction.

CNT B 나노유체의 각 체적농도(0.3, 0.7, 1.0%)에 대하여 열전도도 향상률이 온도에 따라서 변화되는 양상을 보여준다. 전반적인 경향을 보면 향상률은 체적농도가 0.3%인 경우를 제외하면 온도 및 체적농도에 따라서 증가되고 있다. 그리고 향상률이 증가되면서 각 체적농도에 대응하는 데이터들은 낮은 온도방향으로 이동되는 것을 볼 수 있는데 이는 열전도도의 기본원칙에 잘 부합되는 것으로 보인다. 그러나 체적농도가 0.3%로 낮아지면 온도의 상승에 따른 나노유체의 열전도도 증가는 증류수 자체의 증가량과 상쇄되어 향상률은 거의 온도에 무관하게 일정하게 유지되는 경향이 나타나고 있다.

체적농도 1.0%에서 Das et al.⁽⁷⁾의 연구결과를 보면 온도가 25~50°C로 상승하면서 향상률은 대략 8% 정도 증가되었으나, Fig. 7에 나타나 있는 것처럼 CNT B의 경우 2%도 채 되지 않는다. 비록 온도에 따른 향상률의 증가는 미미하지만 최대 향상률은 1.0%의 경우 10%에 달하며, 이는 Das et al.⁽⁷⁾의 3.5%에 비교시 2배 이상이다.^(4,8) 그러나 CNT 자체의 열전도도가 20 W/cm·K 정도로 매우 높다는 것을 감안할 때 친수화된 F-SWNT를 적용한 나노유체의 열전도도의 향상률은 예상 밖으로 낮다.

Fig. 8에는 AP-SWNT를 적용한 CNT A 나노유체의 열전도도 향상률이 각 체적농도에 대하여 온도의 함수로 표시되어 있다. 향상률의 변화 양상은 CNT B와 거의 같으나 데이터들은 전반적으로 1~2% 정도 상향으로 이동된 것으로 보인다

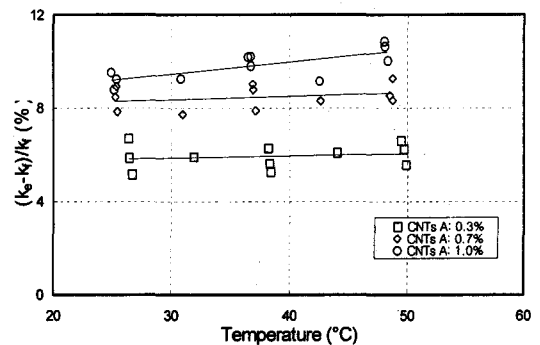


Fig. 8 Variation of the thermal conductivity enhancement of CNT A as a function of the mean temperature for a given volume fraction.

다. 최고 향상률은 체적농도 1%에서 대략 11% 정도에 달하며 CNT B와 동등하거나 약간 높은 향상률을 보였다. CNT 농도가 낮아질수록 편차가 커지는 것은 나노유체의 안정성이 시간에 따라서 변화되는 결과로 추정된다. SDBS를 사용한 CNT A 나노유체가 비록 혼합액의 안정성과 균일성 측면에서는 F-SWNT를 적용한 CNT B보다 못하지만 유효열전도도 측면에서는 좀더 유리하다는 사실을 보여주고 있다.

라만 스펙트럼과 SEM/TEM 분석결과들은 이러한 현상을 설명하는데 도움이 된다. 강한 D 피크는 CNT B의 경우 화학적인 친수화 처리과정에서 손상되어 많은 결함을 내포하고 있다는 것을 나타내며 결과적으로 축 및 반경 방향으로 더 큰 열저항을 야기시키게 된다. 또한 SEM/TEM 분석사진에서 보면 CNT B는 평균 직경이 10 nm 이고 길이가 1.5 μm 인데 이는 직경이 20 nm이고 길이가 3 μm 인 CNT A보다 가늘고 짧은 형상을 갖고 있다. CNT의 길이가 짧아질수록 더 큰 표면적을 갖게 되고 앞에서 언급한 것과 같이 정렬된 구조의 계면이 형성된다. 비록 이러한 계면구조가 열유동을 증진시킨다고 할지라도 표면의 형상학적인 손상으로 인한 향상률의 감소는 이러한 증진효과를 상쇄시킨다. 다른 측면에서 보면 낮은 중횡비를 갖는 CNT는 작은 크기의 CNT 클러스터(Cluster)를 형성하는데, 특히 친수화 처리된 F-SWNT의 경우에는 CNT 클러스터 크기가 극히 작아지게 된다. 이러한 직경 및 CNT 클러스터의 크기가 감소하는 원인들이 복합적으로 작용하여 각 CNT의 축방향, 그리고 CNT 다발의 바깥쪽에서의 열유동이 억제된다.

MWNT를 증류수에 분산시킨 CNT C 나노유체의 열전도도 향상률이 온도 및 체적농도의 함수로 Fig. 9에 나타나 있다. 전반적인 변화 양상을 보면 향상률은 온도에 따라서는 거의 선형적으로 증가되나 체적농도에 따라서는 비선형적으로 증가되는데, 이러한 경향은 MWNT를 알파 올레핀 오일에 분산시킨 경우⁽³⁾와 유사한 연구결과이다. 그리고 SWNT 나노유체의 경우와 마찬가지로 체적농도에 따라서 열전도도 향상률이 증가되면서 모든 데이터들이 낮은 온도 방향으로 이동되는 것을 볼 수 있다. 동일한 히터 입열에서 나노유체의 평균 온도는 체적농도가 0.3에서 1.0%로 변화됨에 따라서 대략 3°C 정도 감소되었다.

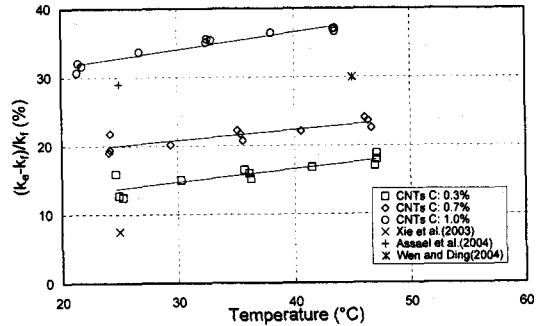


Fig. 9 Variation of the thermal conductivity enhancement of CNT C as a function of the mean temperature for a given volume fraction.

또한 온도에 따른 향상률의 증가는 SWNT 나노유체의 경우보다 더욱 현저하게 나타났는데 5~6%로 CNT A와 B보다 거의 두 배로 높다.

Fig. 9에서 볼 수 있는 CNT C 나노유체의 또 다른 특징은 각 체적농도에서 온도에 따른 향상률의 기울기가 거의 같다는 것이다. 즉, 체적농도 0.3%의 기울기가 1.0%의 경우와 대등한 것으로 나타나 있는데, 이는 SWNT를 사용한 CNT A와 B의 경우와는 크게 다른 양상이다. 이러한 경우에는 주로 체적농도에 좌우되는 미세대류 외에 또 다른 향상기구가 존재한다고 추정할 수 있다.

CNT C가 CNT A 및 B보다 5배 정도로 큰 직경을 갖고 있다는 사실로부터 이러한 현상이 발생할 수 있는 가능성을 추정해 볼 필요가 있다. 일반적으로 큰 직경의 CNT를 함유한 나노유체에 있어서 계면의 정렬구조로 인한 열유동 증진효과는 덜 중요한 것으로 보인다. 큰 직경과 높은 중횡비를 갖는 CNT C 나노유체의 경우에는 CNT 집속체의 크기가 아주 커서 체적농도가 낮은 0.3%에서도 클러스터들은 이미 서로 연결된 상태가 되므로 이러한 클러스터 효과가 주요한 향상기구가 추정된다.

체적농도 1.0%에서 최대 향상률은 37%에 달하는데, 이 결과는 Xie et al.⁽⁴⁾과 비교해 보면 동일한 온도 25°C에서 거의 5배 정도로 크다. Xie et al.⁽⁴⁾이 사용한 MWNT는 직경이 15 nm, 길이가 30 μm 로 본 연구에서 사용한 MWNT보다 높은 중횡비를 갖고 있으나 화학적인 친수처리가 된 것으로 보아 CNT 자체에 내포된 많은 결함과

상대적으로 작은 직경 등의 열유동 방해요인들로 인하여 향상률은 아주 낮은 값을 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 9에는 CNT C의 향상률이 Assael et al.⁽⁵⁾와 Wen and Ding⁽⁶⁾의 연구결과와 비교되어 있다. Assael et al.⁽⁵⁾은 상온에서 초음파 처리시간이 유효열전도에 미치는 영향을 조사하고자 했으며 0.6%의 체적농도에서 측정값은 시간에 따라서 38%에서 20%까지 변화되었으며 평균 29% 정도의 향상률을 나타내었다. 최대 향상률은 최소 초음파 처리시간(20분)에서 얻어졌으며 처리시간이 길어지면 향상률도 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 Assael et al.⁽⁵⁾에서 간과된 열전도 향상률에 미치는 중형비와 클러스트 효과의 영향을 뒷받침해 주는 것으로 판단된다. 한편 Wen and Ding⁽⁶⁾은 체적농도 0.84%, 유체온도 45°C로 Assael et al.⁽⁵⁾보다는 높은 체적농도와 온도에도 불구하고 거의 동등한 향상률($\approx 30\%$)을 보였다. 그러나 양 연구결과는 CNT C의 체적농도 0.7과 1.0%에 대응하는 측정데이터 사이에 위치하고 있다. 이러한 경향은 나노튜브의 종류가 상이하고 또한 초음파 처리시간(즉, 클러스트가 풀어져 있는 상태) 등 많은 변수에 기인하는 것으로 판단된다.

6. 결 론

미량의 SDBS를 가한 SWNT 나노유체는 친수화 처리된 SWNT보다 열전도 향상 측면에서 유리하였고 체적농도 1.0%에서 최고 향상률은 10% 내외로 예상에 못 미치지만 Al_2O_3 나노유체의 3.5%보다 두 배 이상 큰 값을 나타내었다.

MWNT 나노유체의 향상률은 온도에 따라서 선형적으로 증가되나 체적농도에 따라서는 비선형적으로 증가되는 양상을 나타내었고 체적농도 1.0%에서 최고 향상률은 37% 정도였고 기존 연구결과와 잘 부합되었다.

CNT 나노유체의 열전도 향상기구로 클러스트 효과를 제안하며 클러스트 격자구조는 다중 열유동 통로를 형성하게 되고 결과적으로 유효 열전도도가 현격하게 향상된다고 추정된다.

후 기

본 연구는 2006년도 대구대학교 교내연구비의

지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Maxwell, J. C., 1904, *Electricity and Magnetism*, Part II, 3rd ed., Clarendon, Oxford, p. 440.
2. 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.
3. 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, No. 14, pp. 2252-2254.
4. Xie, H., Lee, H., Youn, W. and Choi, M., 2003, Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities, *Journal of Applied Physics*, Vol. 94, No. 8, pp. 4967-4971.
5. Assael, M. J., Chen, C. F., Metaxa, I. and Wakeham, W. A., 2004, Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 25, No. 4, pp. 971-984.
6. Wen, D. S. and Ding, Y. L., 2004, Effective thermal conductivity of aqueous suspensions of carbon nanotubes (carbon nanotube nanofluids), *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 18, No. 4, pp. 481-485.
7. Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567-574.
8. Wang, X., Xu, X. and Choi, U. S., 1999, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474-480.
9. Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S. and Eastman, J. A., 1999, Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles, *Transaction of ASME, Journal of Heat Transfer*,

- Vol. 121, pp. 280-289.
10. Challoner, A. R. and Powell, R. W., 1956, Thermal conductivities of liquids: New determinations for seven liquids and appraisal of existing values, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. 238, No. 1212, pp. 90-106.
 11. Thomsen, C., 2003, Raman scattering in carbon nanotubes, Proceedings of SPIE, Vol. 5219, Nanotubes and Nanowires, Lakhtakia, A. and Maksimenko, S. (ed), Bellingham, WA, pp. 45-50.
 12. Tohji, K., Takahashi, H., Shinoda, Y. and Shimizu, N., 1996, Purifying single-walled nanotubes, Nature, Vol. 383, p. 679.
 13. Zhang, J., Zou, H., Qing, Q., Yang, Y., Li, Q., Liu, Z., Guo, X. and Du, Z., 2003, Effect of chemical oxidation on the structure of single-walled carbon nanotubes, Journal of Physical Chemistry B, Vol. 107, pp. 3712-3718.
 14. Applied Nanotechnologies Inc., Technical Brochure: <http://www.applied-nanotech.com/cnt-properties.htm>.
 15. Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2002, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley and Sons, New York.
 16. American Institute of Physics Handbook, 1972, Section 4, McGraw-Hill, 3rd edition.