

3- ω 방법을 이용한 다중벽 탄소나노튜브 나노유체의 침전 안정성 및 열전도계수 측정에 관한 실험적 연구

오동욱[†] · 이준식^{*}

Stabilization and thermal conductivity measurement of MWCNT nanofluids by using the 3- ω method

Dong-Wook Oh[†] and Joon Sik Lee^{*}

Key Words : Nanofluids (나노유체), MWCNT (탄소나노튜브), effective thermal conductivity (유효 열전도 계수), sedimentation (침전)

Abstract

The 3-omega (3- ω) method is utilized to measure the thermal conductivity of nanofluids. A metal line heater on a silicon nitride membrane bridge structure is microfabricated by a bulk silicon etching method. Localized measurement of the thermal conductivity within the nanofluids droplet is possible by the fabricated 3- ω sensor. Time varying AC temperature amplitudes and thermal conductivities are measured to check the stability of the nanofluids containing multi-wall carbon nanotubes (MWCNTs). Stabilities of MWCNT nanofluids prepared with different chemical treatments are compared. Acid treated MWCNT showed best dispersion stability in water while MWCNTs dispersed in water with surfactants such as Gum Arabic and Sodium dodecyl benzene sulfate showed clear sign of gravity dependence.

	기호설명
b	열선의 반폭 [m]
C_p	비열 [J/kg·K]
I	전류 [A]
k	열전도계수 [W/m·K]
\dot{Q}'	열유속 [W/m]
q	복합열파동수
R	저항 [Ω]
T	온도 [K]
V	전압 [V]

	그리스문자
ΔT	온도진폭 [K]
κ	적분상수

ρ	밀도 [kg/m ³]
σ	표준편차
ω	각속도 [rad/s]
	하첨자
f	유체
h	열선
	MWCNT 다중벽 탄소나노튜브
nf	나노유체

1. 서론

나노유체(nanofluids)는 금속, 산화금속 나노입자 혹은 탄소나노튜브(CNT:carbon nanotube)를 물, 에틸렌 글리콜 등의 기존 열전달 액체에 섞은 것이다. 수 퍼센트 이내 나노입자 질량비만으로도 나노유체의 유효 열전도계수(effective thermal conductivity)는 바탕유체(base fluid)와 비교하여 비약적으로 증가된다고 알려져 있다⁽¹⁾. 나노유체를 전자부품의 냉각시스템, 공기조화기 및 원자력 발전소 등에서 사용되는 열교환기의 작동유체로

[†] 서울대학교 대학원 기계항공공학부
E-mail : elasty5@snu.ac.kr
TEL : (02)880-7123 FAX : (02)875-6632

^{*} 서울대학교 기계항공공학부

사용하기 위해 현재 다양한 연구자들이 나노유체의 열물성치 측정 및 관내유동 시 대류 열전달 특성에 관한 연구를 활발하게 진행하고 있다⁽²⁻⁴⁾. 특히 CNT가 소량 첨가된 유체의 경우 바탕유체와 비교하여 높은 열전도계수 향상을 나타내고 있다. 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT:multi-wall CNT)를 합성 엔진 오일(PAO oil:poly alpha olefin oil)에 혼합한 경우 160%의 유효 열전도계수(effective thermal conductivity) 증가가 보고된 바 있다⁽⁵⁾.

높은 열전도 계수와 금속 혹은 산화금속 나노입자가 함유된 나노유체와 비교하여 낮은 단가를 가지는 CNT 나노유체는 물, 에틸렌 글리콜과 같은 기존 열전달 유체를 대체하여 보다 높은 효율의 열교환기 제작을 가능하게 해 준다. 이는 전 세계적으로 냉방 및 공조에 사용되는 막대한 에너지 비용을 절감해 줄 것으로 기대되고 있다⁽⁶⁾. 하지만 CNT는 자연적으로 소수성인 성질을 지니며 반데르 발스(Van der Waals) 힘에 의해서 CNT끼리 엉겨 붙어 침전 되는 응집 덩어리 상태로 존재한다. CNT의 응집과 침전은 CNT 나노유체의 상용화에 앞서서 해결되어야 할 가장 큰 문제점 중에 하나이다.

안정적인 CNT의 분산을 이루기 위해서 초음파 진동기, 고전단 혼합기(high shear mixer)를 이용한 기계적 혼합 방법과 CNT의 산처리, 혹은 아라비아검(GA:gum arabic), 나트륨 도데실 벤젠 설페이트(SDBS:sodium dodecyl benzene sulfate) 등과 같은 계면활성제를 CNT 혼합 시 첨가하는 화학적 혼합 방법이 널리 알려져 있다⁽⁷⁾. 하지만 이러한 방법으로 만들어진 CNT 나노유체의 침전 안정성에 대한 연구는 현재 미흡한 실정이다. 대부분의 나노유체에 관한 연구에서 나노입자 침전 확인은 나노유체를 담은 병 밑바닥에 가라앉은 침전물에 대한 시각적 확인으로만 이루어지고 있다^(4,6,8,9). 검정색 불투명 CNT 나노유체의 경우 위와 같은 침전 확인 방법은 정확하지 못하다. 본 연구에서는 MWCNT 나노유체 내의 국부적인 열물성치 측정을 위해 3-오메가(3- ω) 방법을⁽¹⁰⁾ 도입하여 침전 안정성을 확인하였다.

2. 3- ω 방법과 열전달 모델링

3- ω 방법은 금속 열선(heater)이 놓여있는 기저물질(substrate) 혹은 매질의 열물성치를 측정하는 방법이다. 긴 금속 열선에 1- ω 의 각속도를 가지는 교류 전류를 가하면 줄(Joule)열에 의한 2- ω 각속도의 열유속이 발생한다. 발생한 열유속은 기저물질 혹은 매질의 열확산계수(thermal diffusivity)에 따라서 열선 주변으로 전도열전달된다. 기저물질 혹은 매질의 열물성치에 따라서 열선의 2- ω 온도진폭이 결정되며 금속 열선의

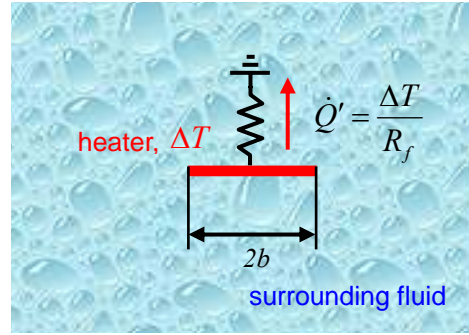


Fig. 1 Cross section and equivalent thermal circuit of the 3- ω heater immersed in fluid.

온도, 저항간 선형적 관계를 통해서 열선 저항역시 2- ω 의 각속도로 진동한다. 열선의 저항 진동과 입력 교류 전류가 합쳐져서 발생한 3- ω 각속도의 전압을 측정함으로써 열선의 온도진폭을 알 수 있다. Figure 1에 측정 대상이 되는 유체에 잠겨 있는 열선의 단면과 등가열회로(equivalent thermal circuit)를 도식화 하였다. 열선이 충분히 길어서 2 차원 모델링이 가능한 경우, 열선에서 발생한 열유속 \dot{Q}' , 온도진폭 ΔT 과 주위를 둘러싸고 있는 유체 열전도계수 k 의 관계는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}'}{2\pi k} \int_0^\infty \frac{\sin^2(\kappa b)}{(\kappa b)^2 (\kappa^2 + q^2)^{1/2}} d\kappa \quad (1)$$

여기서 b 는 열선 반폭, κ 는 적분상수, q 는 입력교류 전류의 진동 각속도 ω , 유체의 밀도 ρ , 유체의 열용량 C_p 로 이루어진 복합열파동수 (complex thermal wave number)이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = \sqrt{\frac{i2\omega\rho C_p}{k}} \quad (2)$$

식(1)이 Cahill 식⁽¹⁰⁾과 다른 점은 분모에 2가 들어가 있다는 점으로 Cahill의 3- ω 방법의 경우, 열선이 증착된 반무한 기저물질(semi-infinite substrate)으로만 열유속이 전달된다. 하지만 본 연구에서는 열선이 유체에 완전히 잠겨있기 때문에 온도진폭은 반무한 기저물질로 전달되는 경우와 비교하여 반값을 가진다.

한편 $|1/q|$ 는 열침투깊이(thermal penetration depth)로 열선에서 발생한 온도 진동이 매질의 깊이 방향으로 전파되는 물리적인 거리 단위(length scale)이다. 만약 열선 주위를 둘러싸고 있는 유체의 열물성치가 지역적으로 다를 때, 열침투깊이가 작으면 작을수록 열선 주위 국부적으로 정확한 유체 열물성치 측정이 가능하다. 박막 열

선 구조의 $3-\omega$ 센서를 고려할 때, 열침투깊이의 7 배 떨어진 거리에서의 온도진폭은 열선의 그것과 비교하여 0.1% 미만의 값을 가지는 것으로 알려져 있다⁽¹¹⁾. 물의 경우 상온에서 10 Hz 이상의 입력 교류전류 주파수를 가할 때 열침투깊이는 35 μm 미만 이다. 즉, 충분히 작은 열선의 제작이 가능하다면 0.5 mm 미만 직경을 가지는 유체 액적의 열물성치 측정도 $3-\omega$ 방법을 통해서 가능하다. 이와 같은 국부적 열물성치 측정은 나노유체의 침전 안정성 확인을 가능하게 해준다. MWCNT와 바탕유체간의 질량비는 MWCNT 나노유체의 유효 열전도계수에 지배적인 인자 중 하나이다. 그러기 때문에 침전이 일어나고 있는 나노유체 액적 밑바닥에 위치한 열선에서 시간에 따른 온도진폭 및 유효 열전도계수의 변화를 측정하면 나노유체의 침전 유무를 확인 할 수 있다.

3. 센서 제작 및 실험 방법

MWCNT 는 일진나노텍에서 화학기상증착법으로 제조된 것을 사용하였다. MWCNT 를 바탕유체인 초순수수에 분산시키기 위해 3 가지 화학적 방법이 사용되었으며 MWCNT 의 질량비는 모두 동일하게 0.2%로 조절되었다. 분산방법으로 산처리 된 MWCNT 를 초순수수에 직접 혼합하는 방법과 아무 처리가 안 된 MWCNT 를 소량의 SDBS(2% 질량비) 혹은 GA(0.25% 질량비)와 같이 초순수수에 혼합하는 방법이 비교되었다. 제조된 3 가지 종류의 나노유체에 MWCNT 응집덩어리를 분리하기 위하여 16 시간 이상 초음파 진동이 가해졌다. 위 방법으로 제조된 3 종류의 나노유체에 먼지 등 불순물 혹은 CNT 응집덩어리로 추정되는 매우 작은 양의 침전물이 발견되었다. 하지만 이들의 양이 시간에 따라서 증가하는 것으로 관찰되지 않았으며 시각적으로는 매우 안정된 분산을 이룬 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 실리콘 기저물질의 몸체미세 가공(bulk micromachining) 방법으로 공중에 부유해 있는 다리구조의 박막 열선을 제작하였다. 먼저 500 μm 실리콘 웨이퍼에 저압 화학기상증착법(LPCVD:low pressure chemical vapor deposition)으로 1 μm 두께의 저응력 질화 실리콘(low stress silicon nitride)막을 증착하였다. 이 위에 열선으로 사용될 크롬과 백금을 각각 20 nm 와 200 nm 스퍼터링(sputtering) 방법으로 증착하였다. 이 두 금속 박막은 리프트 오프(liftoff) 방법으로 열선 및 접촉패드(contact pad) 부분을 남기고 패틴되었다. 열선의 길이와 폭은 각각 1.78 mm 와 10 μm 으로 제작되었다.

식각되어야 할 기저물질 실리콘을 노출시키기 위한 사진공정이 수행되었으며 건식식각법을 통해서 다리 구조를 제외한 부분의 저응력 질화 실

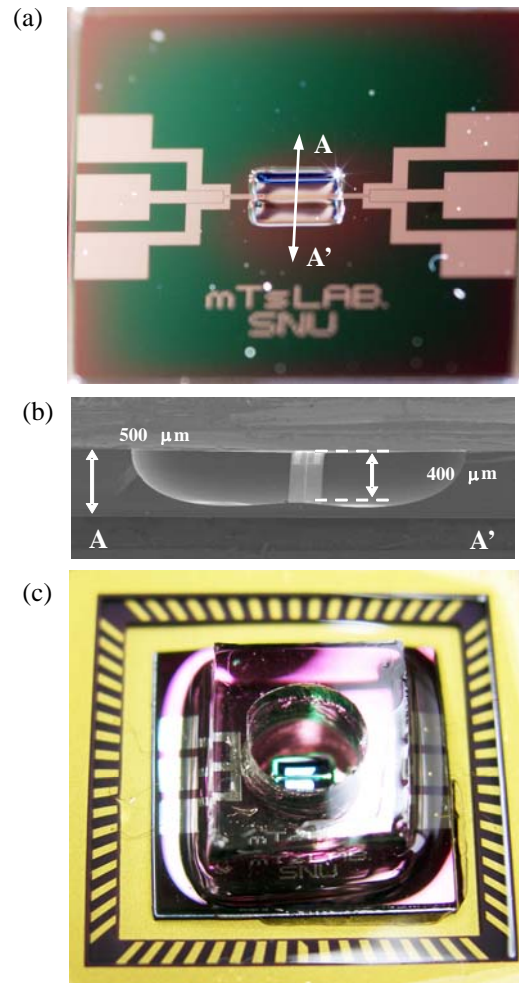


Fig 2. Microfabricated $3-\omega$ device for measuring the thermal conductivity of nanofluids. (a) Top view of the floating bridge structure $3-\omega$ heater device. (b) Cross section of the $3-\omega$ heater device (AA'). (c) Packaged $3-\omega$ device.

리콘막이 식각되었다. 실리콘은 HNA(hydrofluoric nitric acetic acid) 식각액으로 습식 식각되었다. 불산, 질산, 초산은 각각 1:2:1 의 부피비로 혼합되었으며 이렇게 만들어진 HNA 용액의 실리콘 식각속도는 웨이퍼 교반시 7 ~ 9 $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 나타났다. 실리콘 기저물질이 $3-\omega$ 열선에서 측정되는 온도진폭에 미치는 영향을 배제하기 위해서 질화 실리콘막과 크롬/백금 열선으로 이루어진 $3-\omega$ 센서 다리 밑으로 최소 350 μm 의 실리콘이 식각되도록 하였다.

금속 열선에서 측정 유체로의 전류 누전을 막기 위해 200 nm 의 산화 실리콘막이 플라즈마 화학기상증착(PECVD:plasma enhanced chemical vapor deposition)법에 의해 증착되었다. $3-\omega$ 열선과 패키지간의 전기적 접촉을 위해 접촉패드 윗 부분의 절연막은 불산을 사용하여 식각하였다. 완성된 $3-\omega$ 센서는 레이저 절단기로 웨이퍼에서 분리되었다. 분리된 개별 센서는 Figure 2 (a)에서 보

는 바와 같다. $3-\omega$ 열선 다리 밑으로 실리콘이 식각 된 깊이를 확인하기 위해서 주사전자현미경 (SEM:scanning electron microscopy)를 이용하여 센서의 단면을 관찰하였다. Figure 2 (b)에서와 같이 실리콘은 $400 \mu\text{m}$ 식각되었으므로 열선에서 측정되는 $3-\omega$ 신호에 바닥면의 실리콘이 영향을 미치지 않는 것을 확인 하였다.

$3-\omega$ 센서는 패키지에 에폭시를 이용하여 접착되었으며 센서와 패키지의 전기적 연결을 위한 와이어본딩(wire bonding)을 수행하였다. 탄성중합체인 PDMS(polydimethylsiloxane)로 작은 충격에도 쉽게 끊어질 수 있는 전기 연결 와이어를 보호하였다. 나노유체가 위치할 부분을 제외한 센서와 패키지가 figure 2 (c)와 같이 PDMS 로 밀봉되었다. PDMS 구멍의 직경과 높이는 각각 4 mm 와 3 mm 로 약 $36 \mu\text{l}$ 의 나노유체를 채울 수 있었다. 이것은 중력 방향에 따라서 나노유체와 PDMS 벽면 사이에서의 접촉각 변화가 없을 만큼 작은 양으로 나노유체 한 방울에 해당하는 부피이다. 실험 중에는 유체의 증발을 막기 위해서 PDMS 위에 덮개유리를 얹어서 실험 유체를 밀폐시켰다.

$3-\omega$ 신호를 얻기 위해서 lock-in amplifier(LIA), 차동 증폭기(differential amplifier)와 가변저항으로 이루어진 측정회로⁽¹⁰⁾가 사용되었다. 정확한 열유속을 측정하기 위해서 별도의 전압계를 이용하여 열선에서 발생하는 전압강하를 측정하였다. LIA 에서 측정된 $3-\omega$ 전압은 다음 식에 의해서 온도진폭으로 계산되었다.

$$\Delta T = 2 \frac{V_{3\omega}}{I_h} \frac{\partial T}{\partial R} \quad (3)$$

여기서 $V_{3\omega}$ 는 LIA에서 측정된 $3-\omega$ 전압이며, I_h 는 열선에 흐르는 전류, $\partial T/\partial R$ 은 열선의 저항에 따른 온도 기울기이다. $\partial T/\partial R$ 값은 $3-\omega$ 센서를 오븐에 넣고 온도를 변화시키면서 측정된 저항값으로 계산되었으며 $18 \sim 22 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 범위에서 $2.3 \text{ }^\circ\text{C}/\Omega$ 값을 가지는 것으로 나타났다.

제작된 센서는 온도가 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지되는 자연 대류식 오븐 안에 놓여졌으며 모든 실험은 이 안에서 이루어졌다. 피펫을 이용하여 약 1 ml의 실험유체를 센서 위에 흘려줌으로 열선 다리 밑에 잔류한 공기방울이 제거되도록 하였다. 초순수와 실험 경우에 위 방법이 공기방울 제거에 효과적인 것으로 관찰되었다. 30 Hz 와 200 Hz 사이에서 측정된 유체의 온도진폭 실험값은 식(1)을 통해서 계산된 이론값과 비교되었다. 식(1)에서 열전도계수를 변화시키면서 실험값과 가장 작은 오차를 지니는 유체의 열전도계수를 최소자승법(least mean square method)을 통하여 구하였다.

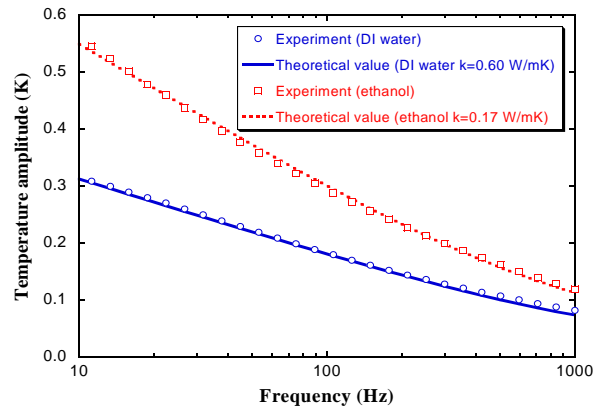


Fig 3. Comparison of experimental data with theoretical value for DI water and ethanol.

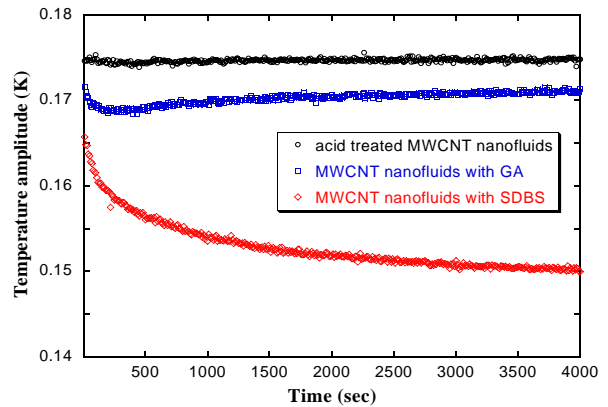


Fig 4. Temperature amplitude changes of MWCNT nanofluids with respect to time at 125Hz of input frequency.

4. 실험 결과 및 분석

먼저 나노유체의 열물성치를 측정하기 전에 물과 에탄올의 열전도계수를 측정하여 이론값과 비교하였다. Figure 3 은 입력 교류주파수에 따른 초순수와 에탄올 각각의 온도진폭을 측정한 그림이다. 최소자승법에 의하여 계산된 초순수와 에탄올 열전도계수의 실험값은 각각 0.591 W/mK 과 0.173 W/mK 으로 이론값과 비교하여 3% 이내의 오차를 가지는 것으로 확인되었다.

화학적으로 처리된 MWCNT 나노유체의 분산 안정성을 측정하기 위해서 먼저 125 Hz 로 입력 교류전류 주파수를 고정시키고 나노유체 방울을 $3-\omega$ 센서에 올려놓은 후 시간에 따른 온도진폭을 측정하였다. Figure 4 에서 보는 바와 같이 산처리 된 MWCNT 나노유체를 제외하고는 온도진폭 값이 시간에 따라서 변화하는 것을 관찰할 수 있다.

$3-\omega$ 열선에서 측정되는 온도진폭 값은 앞서서 언급되었듯이, 열선 주위 매질의 열물성치에 따

라서 결정이 된다. 열선에서 일정한 열유속이 발생하는 경우를 가정해 보면, 높은 열전도계수를 가지는 매질에서는 낮은 열전도계수를 가지는 매질과 비교하여 낮은 온도진폭이 측정된다. 즉 온도진폭이 시간에 따라서 감소하는 것은 열선 주위의 열침투깊이 거리 내에서 열전도계수가 증가한다는 의미이며 온도진폭이 증가하면 그 반대가 된다. 일반적으로 MWCNT 나노유체는 나노입자의 질량비가 증가함에 따라서 유효 열전도계수도 증가하는 경향이 알려져 있으며 낮은 질량비에서는 선형적 관계를 가지는 것으로 알려져 있다⁽¹³⁾. 시간에 따른 열선 온도진폭의 증감은 열선 주위 나노유체의 나노입자 질량비가 감소 혹은 증가한다는 것을 의미한다.

Figure 4 를 관찰해 보면 GA 가 첨가된 나노유체의 경우, 초기 4 분까지 온도진폭이 소폭 감소하였다가 증가하여 40 분 가량이 지난 후에는 초기 온도진폭 값의 약 99%에 해당하는 값으로 수렴하는 것으로 관찰되었다. SDBS 가 분산제로 사용된 나노유체의 경우 시간에 따라서 온도진폭이 꾸준히 감소하여 1 시간이 지난 후에는 최초 온도진폭의 약 90%에 해당하는 값으로 수렴하는 것으로 관찰되었다. SDBS 가 첨가된 나노유체의 경우 MWCNT 의 침전에 의한 농도 증가가 온도진폭 감소의 원인이라고 판단되며 SDBS 이 초순수수에 분산된 MWCNT 의 침전 안정성에는 산처리 방법이나 GA 보다는 작은 영향을 미치는 것으로 결론 내릴 수 있다. 하지만 GA 가 첨가된 나노유체의 시간에 따른 온도진폭 변화의 원인을 규명하기 위해서는 추가 연구가 필요하나 현재로서는 산처리 방법이 MWCNT 를 초순수수에 분산할 때 가장 높은 분산 안정성을 얻을 수 있는 것으로 결론 내릴 수 있다.

시간에 따른 온도진폭의 변화를 관찰하면 나노유체의 시간에 따른 유효 열전도계수도 예상을 할 수 있다. 충분한 시간이 지난 후에 나노유체의 유효 열전도계수를 측정한다면 산처리된 CNT 나노유체가 가장 작고 SDBS를 분산제로 사용한 나노유체가 가장 높은 값을 가질 것으로 예상되었다. 이 결과는 기존의 연구결과와 부합되는 내용이다. 물을 바탕유체로 한 산처리 다중벽 CNT의 열전도계수값⁽¹²⁾과 GA, SDBS를 다중벽 CNT의 분산제로 사용하여 측정된 열전도계수값이^{(4),(8)} table 1 에 정리되었다. 동일한 MWCNT의 질량비가 아니기 때문에 이들 연구결과들을 직접적으로 비교할 수는 없지만 SDBS를 분산제로 사용한 나노유체가 가장 높은 유효 열전도계수를 가지며 산처리된 나노유체가 가장 낮은 값을 가지는 경향을 보여주고 있다.

시간에 따른 산처리 MWCNT 나노유체의 유효 열전도계수 측정값은 figure 5 에 표시하였다. 유효 열전도계수의 측정은 센서가 중력에 놓이는

Table 1 Effective thermal conductivity ratio classified by chemical dispersion methods and MWCNT weight fractions.

Dispersion method	MWCNT fraction (wt.%)	Effective thermal conductivity ratio (k_{nf}/k_f)	Comment
Acid Treated ⁽¹²⁾	0.4	1.03	-
	1.0	1.07	
Surfactant GA ⁽⁴⁾	0.7	1.09	-
	1.0	1.10	
Surfactant SDBS ⁽⁸⁾	0.14	1.07	wt. % calculated from vol.% by $\rho_{MWCNT}=1.75 \text{ g/cm}^3$
	0.30	1.14	
	0.47	1.16	

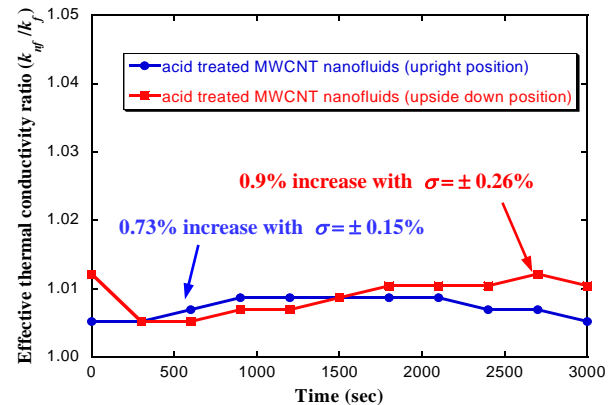


Fig 5. Effective thermal conductivity ratio change of acid treated MWCNT nanofluids with respect to time at upright and upside down sensor position.

방향을 바꾸면서 두 번에 걸쳐서 이루어졌다. 먼저 3- ω 센서를 바로 놓은 상태(upright)에서 나노유체의 시간에 따른 유효 열전도계수가 측정되었다. 그 후에 3- ω 센서에 나노유체를 한 방울 올려 놓고 3- ω 센서의 실리콘 기저물질이 나노유체 위에 올라오도록 센서를 뒤집은 상태(upside down)에서 또 한번 유효 열전도계수를 측정하였다. 실험결과 두 경우 모두 유효 열전도계수의 뚜렷한 변화는 관찰되지 않았다. 바로 놓은 상태와 뒤집은 상태에서 유효 열전도계수와 바탕유체 열전도계수의 비가 각각 1.0073 ± 0.0015 와 1.009 ± 0.0026 로 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 MWCNT 나노유체의 대한 침전 안정성 및 유효 열전도계수를 측정할 수 있는 3-

ω 방법이 제안되었다. 먼저 유체의 열물성치 측정을 위한 열전달 모델링이 수행되었으며 다리구조의 박막 열선 $3\text{-}\omega$ 센서를 반도체 미세공정을 통해서 제작하였다. 제작된 $3\text{-}\omega$ 센서를 이용하여 산처리, GA 와 SDBS 를 이용하여 화학적으로 분산된 MWCNT 나노유체의 시간에 따른 온도진폭을 측정하였다. 실험결과 GA, SDBS 를 이용하여 만들어진 MWCNT 나노유체는 시간에 따른 뚜렷한 온도진폭의 변화를 발견할 수 있었다. 이는 MWCNT 의 응집과 침전의 결과로 열선의 열침투깊이 내에서 시간에 따른 MWCNT 질량비 변화가 감지되는 것으로 판단되었다. 반면 산처리 MWCNT 나노유체의 경우 시간에 따른 온도진폭의 변화가 발견되지 않았다. 산처리 MWCNT 나노유체 액적이 중력 방향에 바로 놓인 상태와 뒤집어서 놓인 상태에 대한 유효 열전도계수의 측정 결과에서도 중력의 영향은 발견되지 않았다. 측정된 유효 열전도계수 실험값은 초순수수와 비교하여 각각 0.7%와 0.9% 증가한 것으로 나타났다. 이 두 값의 차이는 실험오차 범위 이내로 산처리 MWCNT 나노유체가 높은 분산 안정성을 가지고 있다는 결과를 내릴 수 있다.

후 기

본 연구는 마이크로열시스템연구센터(ERC)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Choi, S. U. S., 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, D. A. Siginer, and H. P. Wang, eds., ASME, FED-Vol. 231/MD-Vol. 66, pp. 99~105.
- (2) Wang, X., Xu, X., and Choi, S. U. S., 1999, "Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture," *J. Thermophys. Heat Transfer*, **13**, pp. 474~480.
- (3) Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P., and Roetzel, W., 2003, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *J. Heat Transfer*, **125**, pp. 567~574.
- (4) Yulong Ding, Hajar Alias, Dongsheng Wen and Richard A. Williams, 2006, "Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, **49**, pp. 240~250.
- (5) Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., and Grulke, E. A., "Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, No. 14, 2001, pp. 2252~2254.
- (6) Marquis, F.D.S. and Chibante, L.P.F. 2005, "Improving the Heat Transfer of Nanofluids and Nanolubricants with Carbon Nanotubes," *JOM*, **57**, pp. 32~43.
- (7) Jenny Hilding, Eric A. Grulke, Z. George Zhang, and Fran Lockwood, 2003, "Dispersion of Carbon Nanotubes in Liquids," *J. Disp. Sci. Technol.*, **24**, pp. 1~41.
- (8) Wen, D. and Ding, Y., 2004, "Effective Thermal Conductivity of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (Carbon Nanotube Nanofluids)," *J. Thermophys. Heat Transfer*, **18**, pp. 481~485.
- (9) Assael, M., Metaxa, I., Arvanitidis, J., Christofilos, D. and Lioutas, C., 2005, "Thermal Conductivity Enhancement in Aqueous Suspensions of Carbon Multi-Walled and Double-Walled Nanotubes in the Presence of Two Different Dispersants" *Int. J. Thermophys.*, **26**, pp. 647~664.
- (10) Cahill, D. G., 1990, "Thermal Conductivity Measurement from 30 to 750 K : the 3ω Method," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 61, No. 2, pp. 802~808.
- (11) Ulf G Jonsson and Ove Andersson, 1998, "Investigations of the low- and high-frequency response of 3ω -sensors used in dynamic heat capacity measurements," *Meas. Sci. Technol.* **9**, pp. 1873~1885.
- (12) H. Xie, H. Lee, W. Youn, M. Choi, 2003, "Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal properties," *J. Appl. Phys.* **94**, pp. 4967~4971.
- (13) 고권현, 허경윤, 이경준, 김대성, 김종엽, 손양수, 최만수, 2006, "탄소 나노튜브 나노유체의 수평판에서의 압력강하 특성에 관한 연구," 대한 기계학회 2006 년 춘계학술대회논문집, pp. 2287~2292.