

< 논문 >

## 나노유체에 잠긴 가는 열선 주위의 자연대류 열전달

이 신 표\*

(2007년 6월 13일 접수, 2007년 7월 19일 심사완료)

### Natural Convection Heat Transfer from a Heated Fine Wire in Nanofluids

Shinpyo Lee

**Key Words:** Nanofluids(나노유체), Natural Convection(자연대류), Base Fluids(기본유체), Effective Thermal Conductivity(유효열전도율), Heated Wire(열선)

#### Abstract

Recent research on nanofluids under forced convection experiment shows that there is little relationship between convective heat transfer and thermal conductivity increase of nanofluids. This kind of new findings are totally different from the traditional theory of nanofluids, which says that the higher thermal conductivity is a prerequisite for convective heat transfer enhancement. To elucidate this controversial issue in a very comprehensible manner, simple natural convection experiment has been carried out for the water- and oil-based nanofluids. (water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, transformer oil-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Present research shows that there exists strong dependence between natural convection performance and thermal conductivity increase of nanofluids.

#### 1. 서론

본 논문은 작동유체로 나노유체가 사용되는 경우의 자연대류 열전달 성능과 나노유체 열전도율 사이의 관계를 실험적으로 연구한 것이다.

잘 알려진 바와 같이 나노유체는 물, 에틸렌그리콜 등과 같은 열전달 기본유체에 열전도율이 매우 높은 나노크기의 입자를 첨가하여 그 열전도율(thermal conductivity)을 높여서 열전달효율을 높이하고자 제안되었다.<sup>(1)</sup> 연구가 시작된 이후 지난 10 여년 동안 다양한 나노입자, 기본유체 그리고 나노유체 제조방식이 다른 많은 관련연구가 수행되었다. 그러나 어느 연구자도 자신있게 열전도율 또는 열전달과 관련된 확립된 이론을 제시하지 못하고 있는 것이 또한 현실이다.<sup>(2-4)</sup>

S. Choi 박사는 나노유체의 개념을 제안했던 그의 최초논문에서 기본유체와 비교하여 대류열전달을 두배 증가시키려면 열전도율이 약 3배 증가되어야 함을 주장하였다.<sup>(1)</sup> 단순한 입자의 혼합에 의하여 열전도율을 3배 증가시키는 것이 현실적으로 어렵다고 해도 일단 열전달 향상효과를 기대하기 위하여 높은 열전도율을 갖는 유체의 제조가 필수적임을 주장한 것이다.

열전도율 향상을 예측하는 많은 이론적 모델들이 입자의 열전도율, 입자크기, 분산안정성 효과를 설명하는 관계식을 제시했으며 매우 낮은 혼합농도에서도 S. Choi가 제시한 열전도율 상승이 가능함을 예측하였다.<sup>(4,5)</sup> 그러나 실제 측정을 통하여 얻어진 열전도율은 이론적인 예측과 많은 차이를 보이는데 현재까지 발표된 열전도율 향상 수준은 매우 높은 입자혼합율(약 10%대)의 경우에도 약 20%를 넘지 못하고 있다.<sup>(6,7)</sup>

유체 속에 혼합된 입자 또는 입자와 유체 사이에 존재하는 계면(interface)이 모두 열전달을 촉진

\* 회원, 경기대학교 기계공학과

E-mail : shinpyo@kyonggi.ac.kr

TEL : (031)249-9814 FAX : (031)244-6300

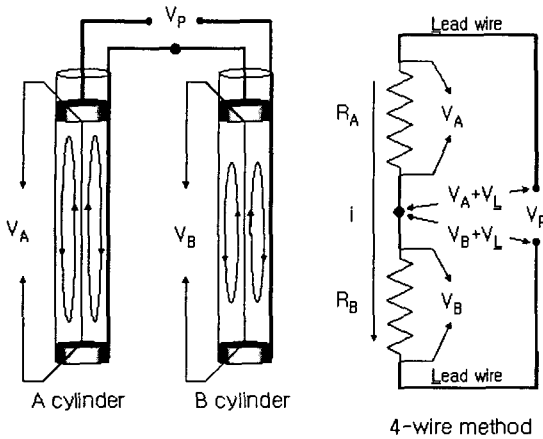


Fig. 1 Schematic of natural convection apparatus

하는 긍정적인 효과(열전달의 다리역할, heat transfer bridge)를 가져올 것으로 고려하였으나<sup>(6)</sup> 최근에는 이 계면들이 열전달의 저항(barrier)으로 작용할 수도 있다는 시각도 증가하고 있다. 나노유체는 순수한 기본유체에 소량의 불순물을 첨가하는 것이다. 실제 응용측면에서 기본유체를 사용하는 경우와 비교하여 이와 같은 단점을 보상할 정도의 효과가 크지 않다면 성공적인 적용 예를 찾기는 힘들 것이다.

나노유체의 열전도를 측정과 관련된 기존 연구에서 벗어나 최근에는 나노유체를 실제 열전달에 응용하려는 기초연구가 수행되고 있다. 일례로서 매우 낮은 혼합농도(0.01-0.3%)의 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체를 마이크로채널 강체대류 열전달 실험에 도입하여 약 10% 이상 대류열전달이 향상된 놀라운 결과가 발표되었다.<sup>(8,9)</sup> 이전의 연구와 비교하여 두 가지 사항이 관심을 갖게 한다. 첫째는 대류 열전달 향상에 나노유체의 열전도율이 큰 역할을 하지 않는다는 것이며, 둘째는 이전 나노유체 연구에서 대부분 효과를 무시하였던 농도 증가에 따른 점성의 증가가 낮은 혼합농도에서도 무시할 수 없을 만큼 크게 나타난다는 것이다.

이 결과는 기존 연구자들이 공통적으로 인정하여 왔던 나노유체 열전도율과 대류열전달 사이의 의존관계에 대한 새로운 학설로 논의의 일반화를 위해서는 조심스러운 고찰이 요구된다. 본 연구에서는 나노유체와 기본유체의 작동비교를 통하여 열전도율과 대류열전달 사이의 관계를 검토해 보고자 한다. 복잡한 수식이나 데이터처리를 배

제하기 위하여 단일 열선이 유체의 중심에서 가열되고 발생된 열이 유체를 통하여 외부벽으로 전달되는 단순한 실험장치를 구상하였다.<sup>(10,11)</sup> 하나의 실험장치를 나노유체와 기본유체에 적용하여 번갈아 실험하지 않고 동일하게 제작된 두개의 장치를 이용하여 동시에 열전달 실험을 실시하였다. 매우 가는 열선을 발열체로 사용한 것은 열량손실과 관련된 오차의 임의적 해석을 최대한 배제하여 데이터 환산의 정밀도를 확보하기 위함이다.

## 2. 자연대류 실험장치

### 2.1 실험장치의 구성

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 자연대류 실험장치의 개략도를 보여준다. 동일하게 제작된 두개의 장치가 각각 A, B cylinder로 표시되어 있다. 실린더의 중심에는 발열체이면서 동시에 온도센서로 작동하는 열선이 위치하며 이들은 전기적으로 직렬로 연결되고 직류 정전압 전원  $V_p$ 에 의해 전류가 공급된다. 미세하지만 그림에 표시된 리드선(lead wire)의 저항까지 포함한다면 다음의 전압관계가 성립한다.

$$V_p = V_A + V_B + 2V_L \quad (1)$$

리드선에 의한 전압강하 효과를 배제하기 위하여 표준저항에 사용되는 개념인 4-wire method를 도입하여 작동 열선의 저항환산에 리드선의 오차가 포함되지 않도록 하였다. Fig. 1의 오른쪽 회로도에는 리드선에 의한 전압강하가 포함된 경우와 배제된 경우가 표시되어 있다.

발열체 열선이 경험하는 열전달 특성이 정확히 동일하다면 두 발열체의 작동온도는 동일할 것이며 다음의 저항온도 관계식(2)에 의하여 두 열선은 식(3)과 같이 동일한 작동저항을 갖게 된다.

$$R_w = R_0(1 + \alpha T_w) \quad (2)$$

$$R_{wA} = R_{wB} \quad (3)$$

여기서  $T_w$ 는 열선의 작동온도,  $R_0$ 는 0°C에서의 센서의 저항이며  $\alpha$ 는 온도저항계수로 백금선의 경우 0.0039092/°C이다.  $R_{wA}$ 와  $R_{wB}$ 는 두 열선의

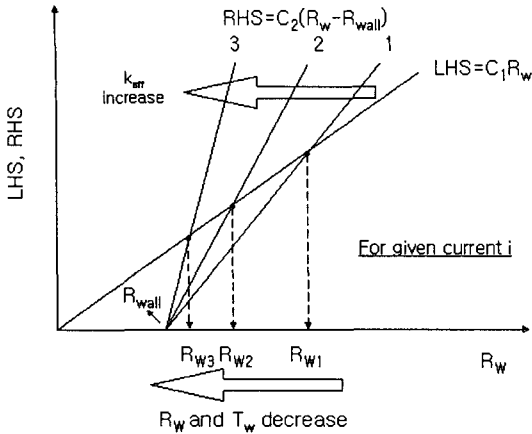


Fig. 2 Determination of the wire working resistance  $R_w$  for given  $i$  and  $k_{eff}$

작동저항이다. 두 열선이 직렬 연결되어 전류가 공통이므로 이 경우 전압은 다음과 같이 동일하게 측정된다.

$$V_A = V_B \tag{4}$$

결과적으로 두 열선 양단의 전압을 측정하여 값이 다르면 두 유체의 열전달 특성이 다른 것으로 추정할 수 있으며 열전달 성능의 차이가 클수록 전압의 차이는 크게 나타날 것이다. 전압과 전류를 측정하여 관련된 대류열전달성능을 어떻게 표시할 것인가 고찰한다. Fig. 1에 표시한 실린더 형태의 유체층을 통과하는 열전달양은 다음과 같이 표시된다.<sup>(10)</sup>

$$Q = 2\pi k_{eff} L \frac{(T_w - T_{wall})}{\ln\left(\frac{r_{wall}}{r_w}\right)} \tag{5}$$

$r_w$ 와  $r_{wall}$ 는 각각 발열체 열선의 반지름과 외벽 실린더 용기의 반지름을 표시하며 이 차이가 반경방향으로의 유체층 두께이다.  $L$ 은 열선의 길이이고  $k_{eff}$ 는 유효열전도율로서 대류의 효과를 설명하는 변수이며<sup>(10)</sup> 정적(static)인 상태에서 측정된 열전도율  $k$ 와는 다르다. 유동내에 대류가 존재하는 경우  $k_{eff}$ 는 항상  $k$ 보다 크다.  $(T_w - T_{wall})$ 은 열선과 실린더 벽과의 온도차를 표시한다.

열전달양  $Q$ 는 주율 발열량으로  $i^2 R_w$ 로 표시되

고 이것을 식 (5)와 결합하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$i^2 R_w = 2\pi k_{eff} L \frac{(T_w - T_{wall})}{\ln\left(\frac{r_{wall}}{r_w}\right)} \tag{6}$$

식 (6)의 온도차  $(T_w - T_{wall})$ 은 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 저항차로 나타낼 수 있다. 여기서  $R_{wall}$ 은 실린더 벽의 온도를 나타낸다. 주어진 전류  $i$ 에 대하여 식 (7)의 좌변(LHS, Left Hand Side)과 우변(RHS, Right Hand Side)은 각각 다음과 같다.

$$i^2 R_w = 2\pi k_{eff} L \frac{(R_w - R_{wall})}{\ln\left(\frac{r_{wall}}{r_w}\right) \alpha R_0} \tag{7}$$

$$LHS = C_1 R_w$$

$$RHS = C_2 (R_w - R_{wall}) \tag{8}$$

여기서  $C_1$ 과  $C_2$ 는 상수로서  $C_1$ 은 전류이며  $C_2$ 는  $k_{eff}$ 가 포함된 상수이다. 이 두식을 그래프 상에 표시한 것이 Fig. 2인데 두 직선이 만나는 곳이 열선의 동작점이 된다. 유체의 유효열전도율  $k_{eff}$ 가 증가하면 식 (8)에서  $C_2$ 가 증가하고 Fig. 2에서 RHS는 번호 1, 2, 3으로 표시된 직선으로 그 기울기가 바뀌게 된다. 이에 따라 교차점도  $R_{w1}$ 에서  $R_{w3}$ 으로 이동하게 되어 작동저항이 감소하는데 이것은 발열체 열선의 온도가 낮아지는 효과를 의미한다.

Fig. 2를 통하여 볼 때, 두 유체의  $k_{eff}$ 가 다르면 두 유체속에 잠긴 열선에서 온도차이(저항차이와 같은 의미)가 생기고 직렬 연결된 회로에서 전류가 동일하므로 이것은 바로 전압차이로 나타나게 된다. 즉,  $V_A$ 와  $V_B$ 는 다르게 측정된다.

### 2.2 장치의 검증

다음의 Fig. 3은 Fig. 1의 장치에 대하여 검증실험을 실시한 예이다.  $V_{A,water}$ 와  $V_{B,water}$ 는 A측과 B측에 모두 물을 넣은 경우이며  $V_{A,water}$ 와  $V_{B,glycerine}$ 은 A측에 물, B측에 글리세린을 넣고 실험한 경우이다. 모두 물을 넣은 경우 두 출력전압  $V_A$ 와  $V_B$ 가 정확히 같은 것을 알 수 있으며 전원 전압  $V_p=9, 7, 5, 3V$ olt를 절반씩 양분함을 알 수 있다.

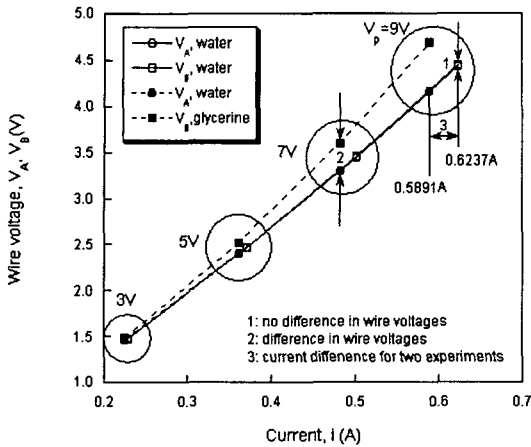


Fig. 3 Two validation tests for natural convection apparatus

(예를 들면 그림에서 1로 표시한 것, 두 전압이 동일함.) 가열전압을 설정하고 1시간이 흐른 후 이 전압에서의 전류 데이터를 기록하고 다음 가열전압을 설정하면서 실험을 진행하였다. 이와 비교하여 두 실린더에 물과 글리세린을 넣은 경우를 생각해 본다.

열전달에 관련된 주요 물성치를 비교해 보면 상온(300K)에서 물의 열전도율은 0.613W/mK로서 글리세린 0.286W/mK보다 약 2.1배 높고 점도의 경우는 물과 글리세린이 각각  $0.855 \times 10^{-3} \text{Ns/m}^2$ ,  $0.799 \text{Ns/m}^2$ 으로 글리세린의 점도가 물에 비하여 900배 이상 높다. 이와 같은 기본 물성치를 고려해 볼 때 당연히 물의 경우가 글리세린에 비하여 자연대류 열전달 특성이 우수하며 그 결과로 물측 열선의 온도가 낮게 유지될 것이다. 이것은 물측 열선 전압이 글리세린측 열선 전압보다 낮게 출력됨을 의미하며 Fig. 3에서 이와 같은 결과를 볼 수 있다. (예를 들면 그림에서 2로 표시한 곳, 전류는 동일하지만 두 전압이 차이를 보임.)

동일한 전원전압을 가한 경우 물-물의 경우가 항상 물-글리세린의 경우보다 전류가 많이 흐르는 것을 알 수 있다. 이것은 동일한 전원전압 조건에서 물-물의 경우가 전체적인 열전달 특성이 우수하여 물-글리세린의 경우보다 합성저항 ( $R_{tot}=R_A+R_B$ )이 낮아져서 전류( $i=V_p/R_{tot}$ )가 증가하였기 때문이다. 이것이 그림에서 3으로 표시되어 있다. 두 저항이 직렬 연결되어 전류는 동일하지만 물-물의 경우 0.6237A, 물-글리세린의 경우

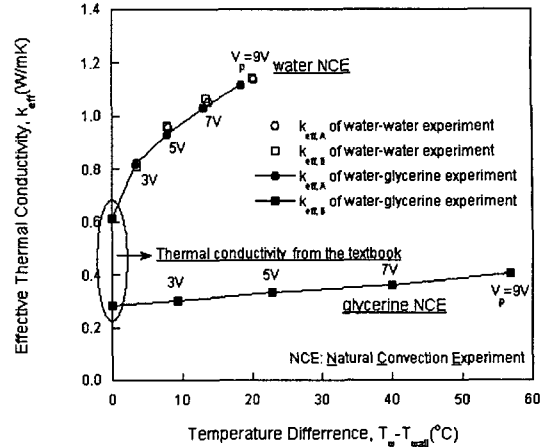


Fig. 4 Effective thermal conductivity of water-water and water-glycerine fluid systems

0.5891A로 차이를 보이고 있다. 이와 같이 Fig. 3에서 측정된 전압, 전류 데이터와 식 (7)을 이용하여 유효열전도율을 계산할 수 있다. 자연대류의 경우 열전달의 구동력은 온도차이므로<sup>(10)</sup> Fig. 4에서 가로축을 열선과 실린더 벽과의 온도차로 세로축을 환산된 유효열전도율로 나타내었다. 물-물, 물-글리세린의 경우 온도차가 증가함에 따라 유효열전도율이 열전도율 보다 크게 증가하고 있음을 보여준다.

동일한 유체를 사용하는 물-물 대류 실험의 경우에는 유효열전도율 데이터가 정확히 일치함을 알 수 있다. 또한 물의 유효열전도율이 글리세린에 비하여 크기 때문에 동일한 전원전압에 대하여(예를 들면 9V) 물의 경우에는 벽과 열선의 온도차가 20도 정도인데 이와 비교하여 글리세린의 경우에는 약 60도의 온도차가 생기는 것을 알 수 있다. 이것은 외부벽의 온도가 일정한 경우 발열체의 온도를 물의 경우가 그만큼 낮게 유지시킬 수 있다는 것을 의미한다.

온도차가 0인 경우의 데이터는 열전달교과서에서 참고한 물과 글리세린의 열전도율  $k$ 이다.<sup>(12)</sup> 열선과 실린더 벽의 온도차가 0인 경우는 전원전압  $V_p$ 를 0V에 접근시킨 경우로 유체층을 통한 열전달은 전도에 의하여 이루어진다. 따라서 유효열전도율  $k_{eff}$ 는 정적인 상태에서 유체의 열전도율  $k$ 에 접근하게 된다. 자연대류 실험데이터를 연결하여 온도차 0으로 접근시킬 때 적절히 곡선 맞춤(curve fitting)하면 열전도율  $k$ 값도 예측가능

**Table 1** Summary of related constants of apparatus

cylinder	L (mm)	R <sub>0</sub> (Ω)	r <sub>w</sub> (μm)	r <sub>wall</sub> (mm)
A side	119	5.82	25	13.3
B side	120	5.85	25	13.3

3. 나노유체 자연대류 실험

3.1 나노유체 시료들의 열전도율

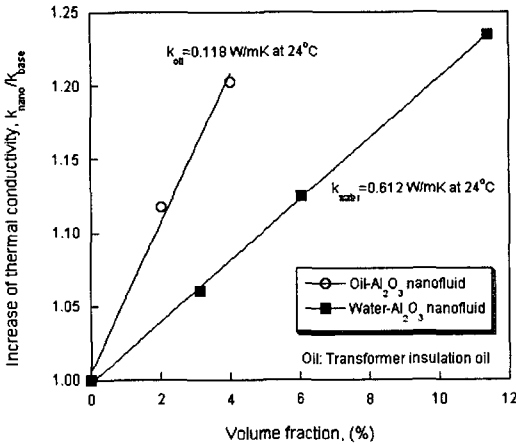
본 연구에서 사용한 나노유체 시료는 증류수에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 알루미나 입자를 혼합하여 제조한 것과 변압기 냉각에 사용되는 oil(transformer insulation oil)에 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 입자를 혼합한 것(이후 나노절연유라고 부름) 두 가지이다. 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체를 택한 이유는 입자의 특성이 친수성이어서 물과의 혼합이 쉬워 초음파 분산기 등의 특별한 장치를 사용하지 않고 용기 속에 물과 같이 넣고 흔들기만 해도 비교적 오랜 시간 동안 침전이 심하게 일어나지 않는 분산성이 우수한 나노유체를 만들 수 있기 때문이다.<sup>(6,7,8,9)</sup> 나노절연유 시료는 한국전력연구원 신소재 그룹에서 입자의 표면을 친유성으로 개질하는 공정을 거쳐서 제조된 것이다.

Fig. 5는 비정상열선법을 이용하여 나노유체 시료들의 열전도율을 측정된 것이다. 혼합농도 증가에 따라 열전도율이 선형적으로 증가하고 있다. 증가의 정도는 이전 본 연구자의 논문에서 측정하였던 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체의 열전도율 측정데이터와 잘 일치한다.<sup>(6)</sup>(예를 들면 농도 6%에서 약 10%의 열전도율 증가) 비정상열선법을 이용한 유체 열전도율의 측정,<sup>(13)</sup> 오차해석,<sup>(14)</sup> 온도의존성 측정방법<sup>(15)</sup> 등은 기존 선행연구들을 참고하기 바란다.

3.2 나노유체의 유효열전도율

Fig. 6은 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체 그리고 나노절연유에 대하여 유효열전도율을 나타낸 것이다. 입자 혼합에 의한 열전도율 증가를 보여주는 Fig. 5와 연관하여 보면 열전도율 증가에 따라 물-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체의 경우 약 50%, Oil-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 나노유체의 경우 약 70%정도의 유효열전도율 상승이 나타남을 알 수 있다. 즉, 자연대류 모드에서 열전달 성능은 나노유체의 증가된 열전도율과 강한 연관성이 있음을 확인할 수 있다. 이것은 최초 나노유체를 대류열전달 향상에 적용하면서 입자첨가에 의한 유체의 열전도율 향상을 강조해 왔던 이전의 연구이론들과 일치하는 것이다.

강제대류의 경우 유체의 열전도율 향상을 기대할 수 없는 저 혼합농도의 나노유체 시료가 비교적 높은 대류열전달 성능을 갖는다는 이론과는



**Fig. 5** Thermal conductivity of water-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and nano-transformer oil by transient hot-wire technique

하다.<sup>(11)</sup> 이상의 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 자연대류 실험장치가 두 유체의 열전달 성능 차이를 유효열전도율의 관점에서 충분히 검출해 낼 수 있음을 확인할 수 있다. 참고로 Table 1은 Fig. 1의 장치와 관련된 상수들을 요약한 것이다.

Fig. 3, 4의 경우는 물과 글리세린 등 순수한 유체의 대류특성에 대한 것이며 입자를 첨가하여 열전도율을 상승시킨 나노유체의 경우 유효 열전도율의 변화가 얼마나 나타나고 유효열전도율과 열전도율 사이의 의존성이 얼마나 될 것인지 궁금하다. 체적분율로 0.1%이하의 낮은 혼합농도에서는 나노유체의 열전도율 증가를 거의 관찰할 수 없다는 것이 기존 연구의 결과이다. 그러나 이 혼합농도에서 강제대류 열전달 상승분이 약 10%이상 얻어진다는 최근의 결과는 매우 놀랍다.<sup>(8)</sup>

이것은 열전도율과 유효열전도율 사이의 연관성이 거의 없다는 것을 간접적으로 의미하는 것으로 이후 본 연구의 자연대류 실험결과도 이와 같은 열전도율과 유효열전도율 사이의 연관성에 초점을 맞추어 설명할 것이다.

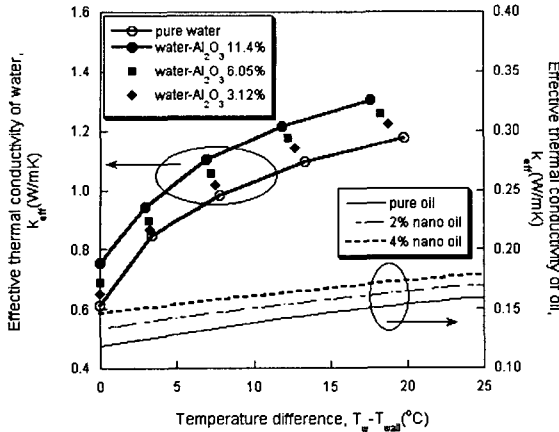


Fig. 6 Effective thermal conductivity of water- $\text{Al}_2\text{O}_3$  and oil- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids

다른 특성인데 이것이 자연대류와 강제대류의 열전달방식의 차이에서 기인한 것인지 향후 이와 같은 원인을 명확히 설명할 수 있는 연구가 필요하다고 생각된다.

### 3.3 나노유체의 점도특성

Fig. 6의 결과는 대류상태에서 유효열전도율이 열전도율에 따라 단조 증가하는 경향을 보이며 혼합농도에 따른 열전달성능의 대폭적인 증가는 나타나지 않는 것을 보여주고 있다. 이전의 이론 연구에서는 나노입자의 혼합에 의한 나노유체의 점도변화를 거의 언급하지 않거나 무시하였다. 예를 들어 S. Choi는 슬러리의 결과를 예로 들어 혼합농도 20%까지는 단일상의 경우와 거의 동일한 점도특성(압력강하 특성)을 갖게 될 것으로 가정하였다.<sup>(1)</sup>

그러나 나노유체 유동과 관련된 최근의 연구에서 1% 정도의 혼합농도를 갖는 물- $\text{Al}_2\text{O}_3$  나노유체의 경우 점도 변화가 기존 모델인 Einstein의 점도예측 모델보다 더 높게 나타나는 것을 확인하였다.<sup>(8)</sup> 즉, 점도의 증가가 기존 연구에서 예측하던 것보다 크다는 것이다. 점도는 대류열전달 성능과 밀접한 관련이 있다. 강제대류 뿐만 아니라 자연대류의 구동력을 나타내는 Grashof 수에도 분모에 점도가 제곱의 형태로 나타나므로 높은 점도는 대류열전달의 효과를 크게 감소시킬 것으로 예상된다. 이와 같은 배경에서 본 연구에서 사용한 시료들에 대하여 미세관점도계를 이용

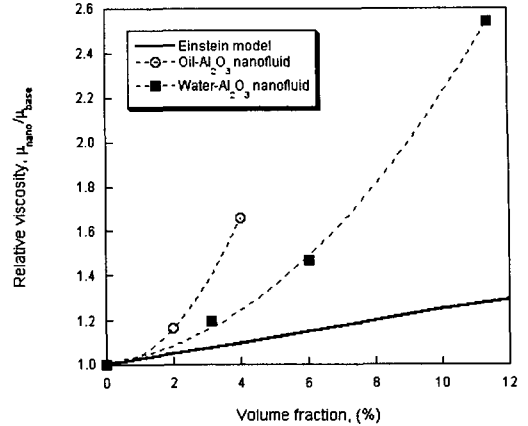


Fig. 7 Relative viscosity of water- $\text{Al}_2\text{O}_3$  and oil- $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanofluids

하여 점도를 측정하였다.

Fig. 7은 상대점도의 변화를 보여주는데 체적분율에 따라 순수 유체의 경우보다 점도가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이것은 기존 강제대류와 관련된 연구에서 제시된 결과와 일치한다.<sup>(8,9)</sup> 점도의 급격한 증가가 나노유체의 열전도율 상승을 방해할 뿐만 아니라 대류 상황에서의 열전달 구동력을 감소시키는 주요 원인이 아닌 가 추측된다. 나노유체 연구의 초기부터 많은 연구자들이 바라던 것은 점도의 증가없이 극소량의 나노입자를 혼합하여 높은 열전도율을 갖는 혁신적인 유체를 제조하는 것이다. 이와 같은 나노유체 제조 기술 확립이 대류열전달 향상을 위해서도 필수적이며 부가적으로 나노유체의 정확한 물성측정과 열전달 실험과정의 정밀도 향상이 무엇보다 우선되어야 할 향후 연구 주제를 알 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 동일하게 제작된 두개의 자연대류 실험장치에 기본유체와 나노유체를 채우고 동시에 대류열전달 실험을 실시하는 새로운 실험방법을 채택하여 자연대류 열전달 특성을 비교 검토하였다. 실험장치가 열전달 성능비교의 타당성을 갖는지 설명하기 위하여 기본이론을 설명하였으며 물-글리세린 기본유체들에 대한 유효열전도율을 산출 비교하여 장치의 타당성을 검증하였다. 제시된 실험결과를 통하여 기본유체와 나노

유체의 열전달성능을 비교할 수 있었으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 나노유체의 자연대류 열전달 성능(유효열전도율)은 나노입자의 혼합으로 변화된 나노유체의 열전도율에 강한 의존성을 보인다. 즉, 열전도율이 높을수록 유효열전도율이 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 열전도율 상승을 기대할 수 없는 매우 낮은 혼합농도의 나노유체가 강제대류 상황에서 비교적 높은 대류열전달 성능을 보인다는 기존 연구 결과는 열전도율과 유효열전도율의 관련성이 크지 않다는 것을 의미하는데 이는 본 연구의 결과와 다르다.

(3) 위의 (1), (2)항의 결과는 자연 또는 강제대류 유동방식의 차이에서 기인한 것인지 현재로서는 불분명하며 향후 더 연구가 필요하다.

(4) 체적분율에 따라 나노유체의 점도가 급격히 증가하는 결과는 기존의 연구결과와 일치하며 이것이 나노유체의 대류 열전달 성능을 저하시키는 하나의 원인으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 2006년도 경기대학교 교내연구과제 지원사업에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

- (1) Choi, U. S., 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, San Francisco, CA, Nov., 12~17.
- (2) Kim, S. H., Choi, S. Hong, J. and Kim, D. S., 2005, "Measurement of the Thermal Conductivity of Alumina/Zinc-Oxide/Titanium-Oxide Nanofluids," *Journal of KSME B*, Vol. 29, No. 9, pp. 1065~1073.
- (3) Jang, S. P. and Choi, U. S., 2004, "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," *Applied Physics Letters*, Vol. 84, Issue 21, pp. 4316~4318.
- (4) Lee, D. and Kim, J., 2006, "A New Mechanism for Enhanced Heat Transport of Nanofluid," *Journal of KSME B*, Vol. 30, No. 6, pp. 560~567.
- (5) Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. and Eastman, J. A., 2002, "Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-sized Particles(Nanofluids)," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855~863.
- (6) Lee, S., Choi, U. S., Li, S., and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME Tran. J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280~289.
- (7) Das, K. D., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *ASME Tran. J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567~574.
- (8) Hwang, K. S., Lee, J., Lee, B. H. and Jang, S. P., 2007, "Fluid Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofluids," *Journal of KSME B*, Vol. 31, No. 1, pp. 16~20.
- (9) Lee, J. and Jang, S. P., 2006, "Fluid flow Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticles Suspended in Water," *Journal of KSME B*, Vol. 30, No. 6, pp. 546~552.
- (10) Holman, J. P., 1981, *Heat Transfer*, 5th Ed., McGraw Hill, pp. 289~290.
- (11) Lee, S., 2006, "Measuring Thermal Conductivity of Nanofluids by Steady State Method," *Journal of KSME B*, Vol. 30, No. 9, pp. 898~904.
- (12) Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 2001, *Introduction to heat transfer*, 4th Ed., Wiley.
- (13) Carslaw, H. S. Jaeger, J. C., 1959, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd Ed., Oxford University Press.
- (14) Johns, A. I., Scott, A. C., Watson, J. T. R. and Ferguson, D., 1988, "Measurement of the Thermal Conductivity of Gases by the Transient Hot-wire Method," *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* Vol. A 325, pp. 295~356.
- (15) Lee, S., 2007, "Validation Test for Transient Hot-wire Method to Evaluate the Temperature Dependence of Nanofluids," *Journal of KSME B*, Vol. 31, No. 4, pp. 341~348.