

## 나노유체 자연대류의 과도 특성

장병훈<sup>†</sup>

시립인천전문대학 컴퓨터응용기계설계과  
(2008년 9월 26일 접수, 2008년 12월 24일 수정, 2008년 12월 24일 채택)

### Transient features of natural convection in nanofluid

Byong Hoon Chang<sup>†</sup>

Department of Computer Aided Mechanical Design, Incheon City College, Incheon 402-750, Korea  
(Received 26 September 2008, Revised 24 December 2008, Accepted 24 December 2008)

#### 요 약

본 논문에서는 알루미늄-물 나노유체를 사용하여 자연대류 실험을 수행하였다. 시험공간은 실린더이며 유체 층 두께를 조절하여 종횡비는 10.9부터 30.4까지 변화를 주었다. 열전달계수는 순 물의 자연대류 실험과 비슷하게 30분 이내에 정상상태에 거의 도달한 것같이 보이나 경사도가 0°인 경우 열전달계수가 1~2시간 이상 감소하며 일부 종횡비에서는 열전달계수의 변동현상이 10시간 이상 측정되었다. 변동형태와 주기는 종횡비와 각도에 따라 다르며 0°의 경사도에서는 열전달계수의 변동주기가 60°의 경사도에 비하여 2배 이상이었다. Rayleigh 수가  $1.0 \times 10^5$  보다 작은 경우, 평균 Nusselt 수는 30°의 경사도에서 가장 높게 나타나며 60°의 경사도에서 가장 낮게 나타났다. 그러나 본 실험결과도 응집된 상태의 나노유체가 사용되었으므로 일반성을 가지고 있지는 않는다.

**주요어** : 나노유체, 자연대류, 유효 열전달율

**Abstract**— This paper reports the experimental study of natural convection heat transfer with  $Al_2O_3$ -water nanofluid. Experimental apparatus was a cylindrical enclosure with adjustable fluid layer thickness, and the aspect ratio was varied between 10.9 and 30.4. Heat transfer coefficients seemed to have reached a steady value within 30 minutes as the case with pure water. But, decrease in heat transfer coefficient continued for over 1~2 hours for inclination angle of 0°, and oscillation in heat transfer was observed for certain inclination angles and aspect ratios for over 10 hours. Oscillation shape and period depended on the aspect ratio and inclination angle. For example, the oscillation period for 0° was more than twice that for 60°. The maximum Nusselt number occurred at the inclination angle of 30°, and the minimum occurred at 60° for Rayleigh number less than 1.E5. However the present results were obtained with aggregated nanofluid and would be devoid of generalities.

**Key words** : Nanofluid, natural convection, Effective thermal conductivity

### 1. 서 론

일반 액체를 사용하면 냉각 시스템의 열전달률을 2배 향상시키기 위해서 펌프동력이 12배까지 요구된다<sup>(1)</sup>. 이

러한 열전도율이 낮은 기존 유체에 비해 일반 액체에 열전도율이 높은 고체 나노입자를 부유시킨 나노유체가 열교환기의 성능 향상에 가능성을 보여준다. 최근에 티타늄 디옥사이드 나노유체를 화학 마이크로 원자료에 적용시킨 결과 기존 유체에 비하여 에너지 효율이 더 높게 나타났다<sup>(2)</sup>. 비등에서는 알루미늄 나노입자를 사용한 경우 임계 열유속이 기존의 물에 비하여 3배로 측정되었다<sup>(3)</sup>. 이러한 열교환기에서 효율을 계산하기 위해서는 정확한

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed  
Dept. of Computer Aided Mechanical Design,  
Incheon City College.  
E-mail : bhchang@icc.ac.kr

나노유체의 성질이 필요하며 열전도율에 대하여는 많은 실험이 이루어지고 있다. 0.3 vol%의 10nm Cu 나노입자와 thioglycolic acid(<1 vol %)를 포함한 ethylene glycol 은 열전도율이 40% 높게 나타났으며<sup>(4)</sup>, 1 vol%의 multi-walled carbon 나노튜브(25nm 지름, 50 $\mu$ m 길이, 중횡비=2000)를 포함한 synthetic poly( $\alpha$ -olefin) oil의 열전도율비는 260% 정도<sup>(5)</sup>로 나타났다. 나노유체의 향상된 열전도율의 대한 설명은 여러 연구자들이 제시하였으며<sup>(6-14)</sup>, 열전도율에 미치는 영향들은 나노입자의 크기와 형상, 온도, 응집(agglomeration), 입자의 클러스터(cluster), Brownian 운동에 의한 마이크로 대류, 입자표면의 액체 층 등이 있다<sup>(6)</sup>. 현재 나노유체를 사용한 자연대류의 실험은 강제대류의 실험에 비하여 많이 이루어지지 않았다. Putra et al.<sup>(15)</sup>은 1%와 4% 부피비율의  $Al_2O_3$  와  $CuO$  나노유체를 사용하였고 40mm 지름의 실린더의 원형면을 수직으로 하여 실험하였다. 실린더 공간의 중횡비는 0.5, 1.0, 1.5가 사용되었다. Wen과 Ding<sup>(16,17)</sup>은 0.19%, 0.36%, 0.57% 부피비율의  $TiO_2$  나노유체를 240mm 지름의 수평 알루미늄 디스크 사이에 주입하여 실험하였다. Putra et al.<sup>(15)</sup>과 Wen과 Ding<sup>(16,17)</sup>의 결과에서는 나노유체의 열전달계수가 물에 비하여 모두 낮게 측정되었다. Nnanna<sup>(18)</sup>는 0.2% - 7.9% 부피비율의  $Al_2O_3$  나노유체를 직사각형 공간에서 실험하였으며 수직 벽을 등온으로 유지하였다. Nnanna<sup>(18)</sup>는 Putra et al.<sup>(15)</sup>과 같은 Nanophase Technologies Inc.의 나노유체를 사용하였으나 나노입자의 크기나 나노유체의 열전달율은 측정하지 않았다. 최대 Nusselt 수는 부피비율이 1.2% 정도에서 일어났는데 순물의 결과와 비교하지 않았으며, 순 물의 실험결과도 낮은 Rayleigh 수에서는 다른 연구자의 결과에 비해 오차가 다소 크게 나타났다. 또한 같은 Rayleigh 수에서 측정된 나노유체 열전달계수가 25-35% 차이를 보여주고 있다. Chang et al.<sup>(19)</sup>은 1.31%와 2.72% 부피비율의  $Al_2O_3$  나노유체를 152mm 지름 실린더 공간을 사용하여 0°, 30°, 90°에 대하여 실험하였으며 나노유체의 열전달계수는 물에 비하여 모든 각도에서 낮게 측정되었다. 0°에서는 중횡비가 17과 25인 경우 열전달계수의 진동현상이 관찰되었다. 이러한 진동현상은 soda 유리 마이크로 구슬을 사용한 Okada와 Suzuki<sup>(20)</sup>의 실험에서도 관찰되었다. Okada와 Suzuki<sup>(20)</sup>의 실험에서는 6.51 $\mu$ m 입자보다 4.75 $\mu$ m의 입자가 부유된 물에서 열전달계수의 변동(fluctuation)현상이 더 크게 나타났으며, 최대 열전달계수와 최저 열전달계수의 차이는 30% 정도였다. Nnanna<sup>(18)</sup>의 실험결과에서는 같은 Rayleigh 수에서 측정된 열전달계수가 25-35% 차이가 있으며 데이터가 많이 흩어져 있는데, 열전달계수의 변동현상이 있었는지 의심된다. 본 연구에서는 이러한 열전달계수의 과도현상에 대하여 보고하고자 한다.

## 2. 실험

Figure 1은 본 연구의 실린더 공간 실험 장치를 보여준다. 열유속 미터와 구리 블록의 배치 그림은 Chang et al.<sup>(19)</sup>에 더 자세히 설명되었다. 시험공간의 지름은 15.2cm이며, 양쪽으로 1.58mm 두께의 구리판, 구리판 뒤에는 RTV 630 열유속계가 있으며, 그 뒤에는 고온수와 저온수가 순환되는 구리 블록이 있다. 시험공간의 실린더 벽과 시험공간의 상하단부는 plexiglass로 제작되었다. 저온수는 glycol 냉매가 사용되었으며 냉동기를 사용하여 온도를 조절하였다. 고온수는 전기 히터를 사용하여 온도를 조절하였다. 시험공간의 고온, 저온 구리판들은 등온으로 유지되었으며, 전 시스템이 가동된 후 3 시간 정도 후에 고온과 저온 플레이트가 정상상태에 도달할 수 있었다. 열유속계 양쪽으로 20개의 열전대가 설치되어 있으며, 온도는 10Hz 주파수 간격으로 측정되었다. 시험공간의 높이는 screw shaft를 사용하여 조절하였으며, Fig. 1의 실린더 블록은 수리대 위에서 회전할 수 있도록 설치되어 있다. 열유속계의 보정에서는 유체층에서의 열전달, 플렉시 유리벽에서의 열전달, 플렉시 유리벽 외부와의 열교환의 합이 열유속계를 통과하는 전체 열전달과 같다고 가정하였다. 이러한 가정에서 유체층에서의 열유속 관계식은 다음과 같다<sup>(21)</sup>.

$$q_F = C_M(T_H + T_C) \frac{A_M}{A_F} - \left[ \frac{(kA)_W}{L} + C_E L \right] \frac{T_F}{A_F} \quad (1)$$

0°의 경사도에서 여러 두께의 유체층에 대하여 유체층이 위에서 가열되는 열전도 실험을 하여 유체층을 통과하는 실제 열전도와 식 (1)을 비교하여 계수  $C_E$ 와  $C_M$ 을 구할 수 있다. Nusselt 수는 다음의 식에서 계산하였다.

$$Nu = q_F / (k_F T_F / L) \quad (2)$$

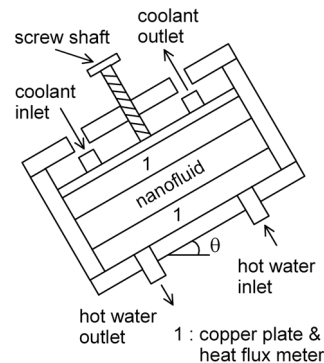


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

이 방법은 Rossby<sup>(22)</sup>와 비슷하나 Rossby<sup>(22)</sup>는 열유속 계 계수  $C_M$ 이 상수로 유지될 수 있도록 벽 열전도항을 수정하였고 Rossby<sup>(22)</sup>의 방법에는 외부와외 열교환 항이 없다. 물을 사용한 실험 데이터를 위의 식 (1)과 (2)로 계산한 결과는 Rossby<sup>(22)</sup>와 Hollands et al.<sup>(23)</sup>의 결과와 잘 일치됨을 보여주었다.

Rayleigh 수에 필요한 밀도, 열확산율, 열팽창계수는 다음의 식들을 사용하였다.

$$\rho = (1 - \phi)\rho_F + \phi\rho_N \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{k}{(1 - \phi)(\rho c_p)_F + \phi(\rho c_p)_N} \quad (4)$$

$$\beta = (1 - \phi)\beta_F + \phi\beta_N \quad (5)$$

본 실험에 사용된  $Al_2O_3$ /water 나노유체는 Sigma-Aldrich Co.에서 구입하였으며, pH는 6, 20 nm  $Al_2O_3$  입자의 체적비율은 1.31%이다. Zhang et al.<sup>(24)</sup>도 Sigma-Aldrich Co.에서 구입한  $Al_2O_3$  나노유체를 사용하였으며 그들의 TEM(transmission electron microscope) 사진에서  $Al_2O_3$  입자의 크기가 20nm 정도인 것을 볼 수 있다. 많은 연구자들이 TEM을 사용하여 입자의 크기를 측정하지만 Zhang et al.<sup>(24)</sup>이 언급한 것과 같이 전자현미경의 방법은 나노유체를 건조시킨 후에 촬영하므로 나노입자가 유체 안에 섞여있는 실험중의 실제 부유 상태가 아니다. 본 연구에서는 레이저 분산 방법(laser light intensity scattering technique)이 적용되는 Brookhaven Instruments Co.의 90Plus/BI\_MAS Option particle sizer를 사용하여  $Al_2O_3$  입자의 크기를 측정한 결과 평균 지름이 250nm 정도였다. 그러나 Light scattering 방법에서는 입자들의 병진 확산계수와 동일한 값을 가지는 구의 지름이 계산되는데 확산계수는 응집된 입자들의 표면 형태에 영향을 받으므로 실제보다 더 크게 측정될 수 있다. 자연대류 실험을 실행한 Wen과 Ding<sup>(16)</sup>의 경우에는 34nm  $TiO_2$  입자를 사용하였지만 Light scattering 방법에서 응집된 입자들의 평균지름은 170nm이었으며, Putra et al.<sup>(15)</sup>의 경우는  $Al_2O_3$  입자들의 평균 지름이 131nm였다. Wen과 Ding<sup>(16)</sup>, Putra et al.<sup>(15)</sup>의 경우 모두, 발표된 전자현미경의 사진으로는 입자의 평균 지름을 확인하기가 어렵다.

### 3. 실험결과

일반적으로 나노유체 열전도율 측정에는 과도 열선법이 많이 사용되나 본 연구에서는 과도 열선법과 열전도 실험 둘 다 실행하였다. 열전도 실험은 Fig. 1의 실린더 블록을 회전하여 나노유체가 수평인 상태에서 상단 구리

판을 고온, 하단 구리판을 저온으로 유지하고 유체층을 통과하는 열전달율에서 나노유체의 유효 열전도율을 구할 수 있다. 본 실험에서 두 방법의 오차는 0.3% 이내였다. Figure 2는 본 실험에서 부피비율이 1.31%, 2.72%인 경우 측정된 유효 열전도율을 다른 연구자들의 결과<sup>(24-27)</sup>와 비교하였다. 본 실험 결과와 Das et al.<sup>(25)</sup>, 그리고 Chon et al.<sup>(26)</sup>의 유효 열전도율은 모두 21°C에서 측정된 값이다. Zhang et al.<sup>(24)</sup>의 유효 열전달율은 10°, 30°, 50°C에서만 측정되었으므로, Fig. 2에서 Zhang et al.<sup>(24)</sup>의 데이터는 interpolation을 사용하여 유도한 21°C에서의 유효 열전달율이다. Lee et al.<sup>(27)</sup>의 유효 열전달율은 방 온도에서 측정된 것으로만 명시되어 있다. Figure 2에서 부피비율이 1.31%, 2.72%인 경우 본 실험의 유효 열전달율은 다른 연구자들의 결과에 비하여 0.8%-1.3% 정도 낮게 나타났다. 그러나 본 실험결과를 부피비율 1%로 추정해보면 150nm의 Chon et al.<sup>(26)</sup>의 유효 열전달율보다 높으므로 본 실험의 나노입자 평균 지름은 150nm보다 작을 수 있다고 사료된다. 연구자들의<sup>(24,25)</sup> 결과에 의하면 나노유체의 유효 열전도율은 온도에 대하여 증가하므로 Fig. 2에서는 동일한 온도의 데이터만 비교하였고, 온도가 명시되지 않은 자료<sup>(28)</sup>는 포함하지 않았다. 물론 나노입자의 크기, 응집과 관련이 있는 pH<sup>(29,30)</sup> 또한 나노유체의 유효 열전도율에 영향을 미치므로 동일 조건의 실험결과들을 비교하는 것은 쉽지 않으며, 앞으로는 나노유체의 성질들에 대하여 좀 더 체계적인 실험이 필요하다고 사료된다. 이러한 나노유체의 유효 열전도율에 대한 문제점은 체계적인 실험보다 이론적인 모델링이 더 많다는 지적<sup>(31)</sup>에서도 알 수 있다. Gandhi<sup>(32)</sup>는 나노유체의 유효 열전도율에 대한 연구와 문제점에 대하여 정리하였다.

30°-60°의 온도에서 측정한 Prasher et al.<sup>(3)</sup> 알루미늄 나노유체의 점성과 물의 점성의 비 데이터를 보면 일부는 온도에 대하여 다소 증가하나 일부는 감소하여 온도

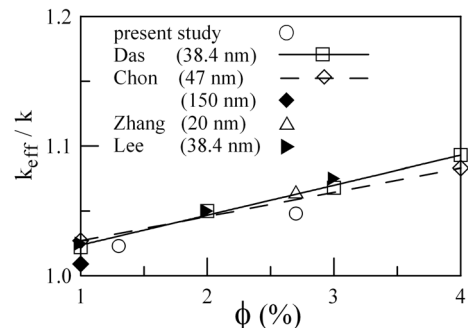


Fig. 2. Comparison of thermal conductivity ratio of  $Al_2O_3$  nanofluid.

에 대한 정확한 경향을 찾을 수 없다. 그러나 Pak과 Cho<sup>(3)</sup> 결과에서는 20°C 부근에서 알루미늄 나노유체의 점성이 물에 비해 좀 더 가파르게 감소하며, 점성의 비 또한 20°C에 비하여 72°C에서는 14% 정도 감소하였다. Pak과 Cho<sup>(34)</sup>의  $Al_2O_3$  나노입자는 13nm이며 응집을 최소화하기 위하여 pH를 3으로 유지하였으나 부피비율이 1.34%, 온도가 20°C인 경우, 점성은  $1.65 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 으로 높게 측정되었다. Pak과 Cho<sup>(34)</sup>는 응집된 입자들의 평균지름을 측정하지 않았다. 본 실험에서 부피비율이 1.31%인 경우 20°C에서 capillary tube viscometer로 측정된 점성은  $1.29 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 이었다. Putra et al.<sup>(15)</sup>의 결과에서는 20°C에서 입자 평균 지름이 131nm, 부피비율이 1%인 경우  $Al_2O_3$  나노유체의 점성은  $1.16 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  이었다. 본 연구의 점성이 Putra et al.<sup>(15)</sup>의 결과보다 다소 높지만 나노유체의 점성은 부피비율에 대하여 증가하므로 두 결과는 같은 부피비율에서 크게 벗어나지 않는다고 보여 진다. 그러나 점성에 대한 자료는 열전도율에 비하여 부족하며 특히 온도, 부피비율에 대하여 더 체계적인 실험이 필요하다.

Figure 3은 유체층의 경사도가 0°, 60°인 세 경우에 대하여 35분까지 측정된 Nusselt 수를 보여주고 있으며, 순물의 자연대류 실험과 비슷하게 30분 이내에 유동이 거의 정상상태에 도달한 것같이 보인다. 그러나 Fig. 3의  $\theta=0^\circ$ ,  $Ra=143940$ 의 Nusselt 수 그래프는 Fig. 4의 첫 번째 결과( $AR=13.8$ )를 35분까지만 그린 것이다. 10시간 측정된 Fig. 4의 결과를 보면, 정상상태에 도달하기에는 거의 6시간 이상 걸리는 것을 볼 수 있으며, Fig. 3과 같이 실험을 30분정도만 하는 경우 실험결과에 큰 오차가 생길 수 있다. 또한 Fig. 4에서는 초기에 Nusselt 수가 1~2시간 이상 감소하는 것을 볼 수 있는데 이러한 결과는 순물을 사용하여 실험할 때는 일어나지 않았다. Figure 4에서  $AR=19, 21.7, 25.3$ 인 경우에는 Nusselt 수의 변동현상을 볼 수 있다. Figure 4에서  $AR=19$ 인 경우와 같이

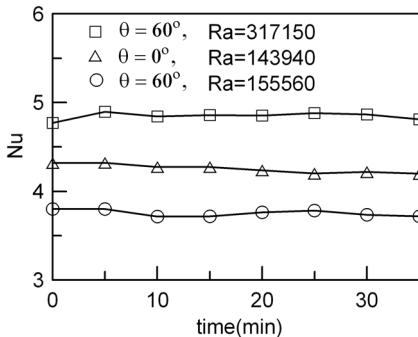


Fig. 3. Nusselt number variation with time.

일부결과에서는 10시간정도에서 Nusselt 수의 변동현상이 줄어드는 것처럼 보여 실험을 반복하였으며, Figure 5는  $\theta=0^\circ$ ,  $AR=16.9$ 인 경우를 각각 11 시간, 15시간 두 번 측정된 결과이다. 두 번째 실험에서도 거의 같은 형태의 Nusselt 수 변동이 측정되었으며 10시간 후에도 변동이 지속됨을 볼 수 있다. 실험시스템을 가동시킨 후 정상상태까지 3시간이 소요되어서 그 후 15시간의 실험에는 어려움이 있었다. Wen과 Ding<sup>(16,17)</sup>은 모든 온도를 24-37분정도만 측정하였으며, 유체층의 경사도가 0°인 그들의 일부 측정결과에서는 정상상태에 도달하지 못한 것을 볼 수 있다. Figure 3에서 60°의 두 결과도 30분 이내에 정상상태에 도달한 것 같이 보이나, Fig. 6( $AR=10.9$ 와  $13.8$ )의 결과를 35분까지만 그린 것이며, 실제 정상상태에 도달하기까지는 7시간 이상 소요되는 것을 볼 수 있

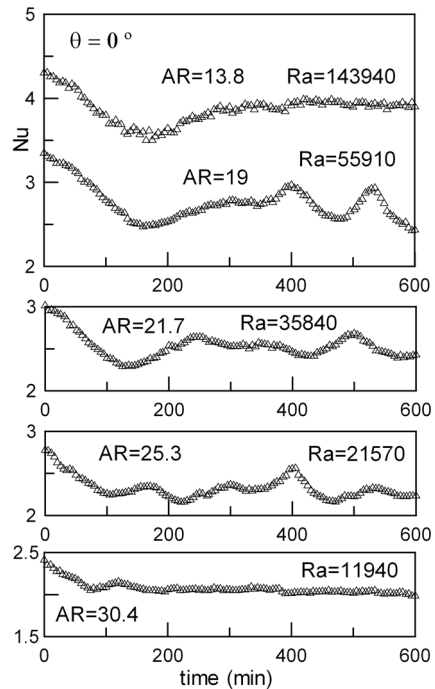


Fig. 4. Nusselt number variation for  $\theta = 0^\circ$ .

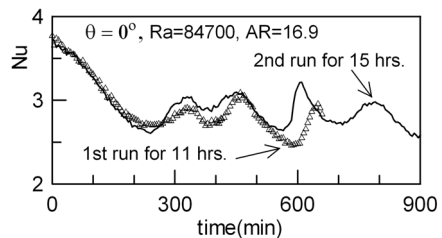


Fig. 5. Nusselt number variation for  $Ra=84700$ .

다. Figure 7에는 Figure 5와 6에서 AR=16.9의 결과와 같은 종횡비에서  $\theta=30^\circ$ 와  $150^\circ$ 인 경우가 같이 비교되었다.  $30^\circ$ 와  $150^\circ$ 인 경우에는 Nusselt 수의 변동 현상이 없으며  $60^\circ$ 의 Nusselt 수 변동 주기는  $0^\circ$ 에 비하여 더 짧게 나타난다. AR=10.9인 Fig. 8에서도  $\theta=30^\circ$ 인 경우에는 AR=16.9에 비하여 초기 천이현상은 길게 나타나지만 Nusselt 수의 변동 현상은 없다.  $\theta=90^\circ$ 와  $120^\circ$ 인 경우는 본 실험의 종횡비범위에서는 Nusselt 수의 변동 현상이 일어나지 않았다.  $\theta=0^\circ$ 의 Fig. 4에서 AR=13.8의 결과는 다른 결과에 비해 극소적으로 Nusselt 수의 아주 작은 변

동 현상이 있으나 Fig. 8의  $\theta=0^\circ$ , AR=10.9 결과에서는 불규칙적인 Nusselt 수의 변동현상이 다소 커진 것도 볼 수 있다. 본 실험에서는 나노유체를 제거하고 순 물을 주입하여  $0^\circ$ 와  $60^\circ$ 에서 변동현상이 일어나는 일부 종횡비에 대하여 실험을 반복하였으나 열전달계수의 변동 상태는 볼 수 없었다. Okada와 Suzuki<sup>(20)</sup>의 실험에서는 3 wt%,  $6.51\mu\text{m}$ 의 경우, 3시간 이내에 열전달계수의 변동 현상이 완전히 사라졌으며, 3 wt%,  $4.75\mu\text{m}$ 의 경우, 2시간 정도에 열전달계수의 변동주기가 많이 길어지며 5시간 후에는 변동현상이 거의 완전히 사라졌다. Okada와 Suzuki<sup>(20)</sup>는 12cm 높이 시험공간에 여러 대류층이 형성되고 입자들이 침전됨에 따라 대류층의 경계가 사라지는 것을 관찰하였다. 열전달계수가 증가할 때는 고온 플레이트 부근의 제일 아래 대류층과 그 위의 대류층이 섞일 때인 것으로 관찰되었다. 열전달계수의 변동 주기에서 열전달계수가 줄어드는 것은 새로 형성된 제일 아래 대류층의 온도가 점차적으로 증가하기 때문이며 이중확산 유동(double diffusive convection)에 의하여 여러 유체층이 형성되는 것으로 설명하였다. Okada와 Suzuki<sup>(20)</sup>의 실험에서는 종횡비는 같아도 높이가 작은 시험공간에서는 열전달계수의 변동 현상이 더 빨리 사라졌으며, 본 실

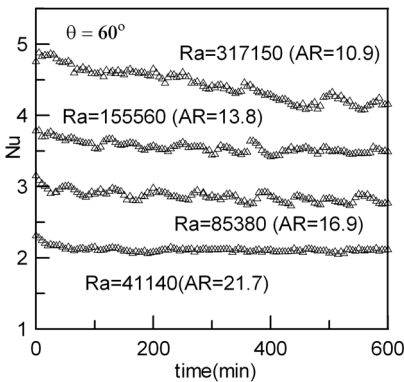


Fig. 6. Nusselt number variation for  $\theta = 60^\circ$ .

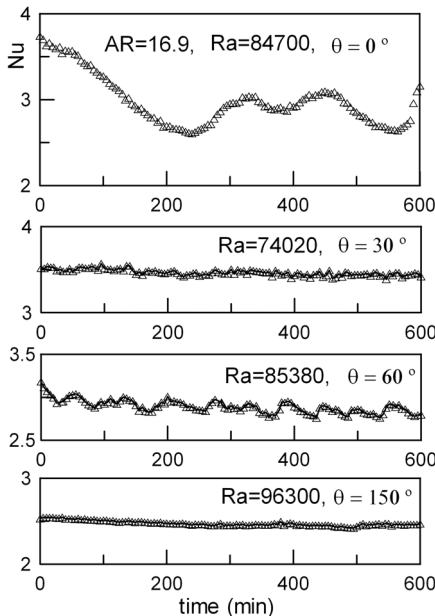


Fig. 7. Nusselt number variation for various angles for AR=16.9.

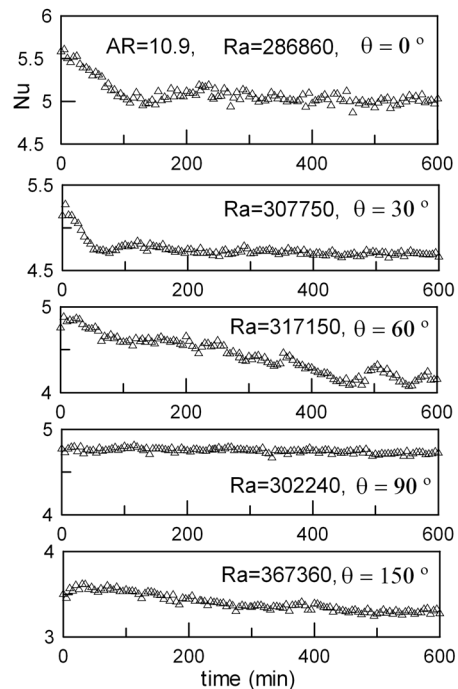


Fig. 8. Nusselt number variation for various angles for AR=10.9.

험에서도 Fig. 4에서 유체층이 얇은 경우( $AR=30.4$ )에는 열전달계수의 변동 현상이 없어 변동현상과 유체층의 두께가 관계가 있음을 볼 수 있다. 본 실험에서는 온도측정을 시작하기 전에 나노입자의 분포를 고르게 유지하기 위하여 screw shaft를 사용하여 시험공간을 여러 번 열고 닫아 나노유체가 잘 섞이게 하였다. 그러므로 실험이 시작될 때에는 나노유체 온도와 농도가 고른 상태에서 시험공간의 고온, 저온 플레이트에 온도 차이가 가해진다. 자연대류의 구동력인 부력은 유체밀도의 차이에서 일어나는데, 균일한 크기의 나노입자가 포함된 유체층의 안정성에 대한 해석<sup>(19)</sup>에서 보여준 것과 같이 thermophoresis 속도와 침전속도가 밀도의 분포에 큰 영향을 미칠 수 있다. 경사도가 0°인 본 실험의 한 조건에서는 나노입자의 평균지름이 110nm 이하인 경우, thermophoresis의 영향이 더 커지고<sup>(19)</sup> 저온 플레이트 방향으로 밀도구배가 양의 값을 가지며 유체층이 불안정하게 된다. 나노입자의 평균지름이 110nm 이상인 경우, 침전의 영향이 더 커지고<sup>(19)</sup> 저온 플레이트 방향의 밀도구배가 반대로 음의 값을 가지게 된다. 그러나 실제 부유입자의 모양과 크기는 일정하지 않으므로 입자 유동형태에 의한 밀도구배는 더 복잡하다고 사료 된다. 또한 thermophoresis 속도가 영향을 미칠 수 있을 정도의 온도구배가 형성되기까지는 많은 시간이 걸릴 수 있다. 6cm 높이 사각형태의 시험공간에 115 $\mu\text{m}$  평균 지름의 유리구슬과 침전속도를 조절하기 위해 실리콘 기름을 사용한 Chen et al.<sup>(35)</sup>의 실험에서는 시험공간위에서 침전에 의해 형성되는 무입자 유체층 때문에 아랫면 가열에 의한 대류 cell이 형성되기에는 입자가 없는 순 유체실험에 비해 시간이 많이 걸리는 것이 관찰되었다. 입자가 부유된 유체층과 입자가 침전된 윗층에 각각 대류 cell이 형성되었으며 Okada와 Suzuki<sup>(20)</sup>의 실험과 같이 무입자 유체층의 대류 cell이 점차적으로 아래로 확산되었다. 4분 정도 후에는 입자가 모두 침전된 무입자 유체층이 전체 높이의 반 이상 내려온 것이

관찰되었다. 본 실험에서는 가열된 면이 위에 있는 150°의 경우에도 10시간 동안 이러한 침전 현상은 관찰되지 않았으나, 침전에 대한 영향은 실험을 더 오래 관찰해야 정확한 결론을 지을 수 있을 것으로 보인다. 그러나 본 실험의 나노유체는 응집된 상태이므로 결과의 일반성은 결여되어 있다.

순 유체의 경우인 Yang과 Yang<sup>(35)</sup>의 결과( $AR=7.5$ )에서는 경사도가 30°일 때에 대류 cell 수가 0°에 비해 거의 반으로 줄고 일부 cell의 모양은 길게 바뀌었으며 양 끝에서는 3차원 유동이 형성되었다. 대류 cell들은 40°정도의 경사도에서 한 개로 합쳐졌다. 열전달율은 경사도에 따른 이러한 대류순환 cell 형태에 밀접한 관계를 가지며, 사각 시험공간의 Yang과 Yang<sup>(36)</sup>의 결과에서는 측면 방향 종횡비가 작은 경우에는 측면으로의 유동 형성이 제한되어 열전달율에 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다. ElSherbiny et al.<sup>(37)</sup>과 Chang and Mills<sup>(21)</sup>의 결과에서는 Rayleigh 수가  $1.0 \times 10^5$ 보다 작은 경우, 거의 모든 결과에서 평균 Nusselt 수는 경사도가 15°일 때에 제일 높게 측정되었으며  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 에서 Nusselt 수의 최저점은 60°와 75° 사이에 일어났다. Figure 9는  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 의 경사도에서 본 실험의 나노유체 평균 Nusselt 수를 보여주고 있으며 Rayleigh 수가  $1.0 \times 10^5$ 보다 작은 경우에는 경사도가 30°일 때에 Nusselt 수가 제일 높게 나타나며 60°의 경사도에서 Nusselt 수가 제일 낮게 나타난다. 그러나 순 유체를 사용된 ElSherbiny et al.<sup>(37)</sup>과 Chang and Mills<sup>(21)</sup>의 결과와 같이 나노유체의 경우도 15°의 경사도에서 Nusselt 수가 제일 높을 수 있다고 생각된다. 그림에는 순 물의 결과가 같이 비교되지 않았지만 90°의 경사도에서는 알루미늄 나노유체 Nusselt 수가 순 물의 결과와 같았으며, 30°의 경사도에서는 임계 Rayleigh 수와  $Ra > 1.0 \times 10^5$ 의 영역을 제외하고는 순 물의 결과와 거의 같게 측정되었다. 0°의 경사도에서는  $Ra \sim 9 \times 10^4$ 에서 나노유체 Nusselt 수가 17%까지도 낮으며, 60°의 경사도에서는 거의 모든 영역에서 8~11%정도 낮게 나타났다. 기존에 발표된 나노유체 실험<sup>(15-17)</sup> Nusselt 수도 순 유체의 결과보다 작으나 나노입자의 응집문제가 해결되어 입자의 원래 크기가 어느 정도 유지될 수 있으면 기존 유체보다 더 높은 Nusselt 수를 얻는 것이 가능하다고 사료된다.

#### 4. 결론

대부분의 연구자들은 열선 방법만 사용하여 나노유체 유효 열전달율을 측정하였으나 본 실험에서는 열선 방법과 평행 플레이트 두 방법을 모두 사용하여 유효 열전달율 값을 비교하였다. 본 실험에서 두 방법의 오차는 0.3%

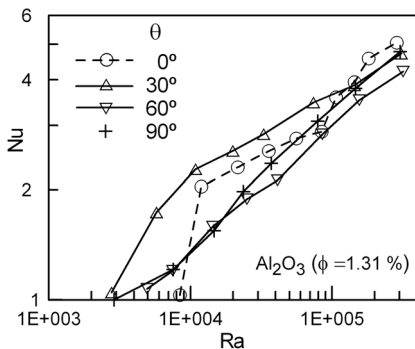


Fig. 9. Comparison of Nusselt number for  $Al_2O_3$  nanofluid.

이였으며, 21°C에서 측정된 다른 연구자들의 결과에 비하여 0.8%-1.3% 정도 낮게 나타났다. 유체층의 경사도가 0°의 경우  $16.9 \leq AR \leq 25.3$ 에서는 주기적인 Nusselt 수의 변동현상이 있으며 10시간이상 지속되었다. 60°의 경우에는 AR=10.9까지 열전달계수의 변동현상을 볼 수 있었다. 침전에 대한 영향은 실험을 15시간 이상 더 오래 관찰해야 정확한 결론을 지을 수 있을 것으로 보인다. 평균 Nusselt 수는 Rayleigh 수가  $1.0 \times 10^5$  보다 작은 경우, 30°의 경사도에서 가장 높게 나타나며 60°의 경사도에서 가장 낮게 나타났다. 순 유체의 실험과 같이 Nusselt 수는 15°의 경사도에서 가장 높을 수 있으나, 본 실험의 나노유체도 기존의 결과들과 같이 응집된 상태이므로 실험결과가 일반성을 가지고 있지는 않는다. 그러나 나노입자의 응집문제가 해결되면 순 유체 자연대류 결과보다 더 높은 열전달률을 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

## 후 기

본 연구는 시립인천전문대학 교내 연구비로 지원되었다. 나노입자 크기 측정장치를 제공하고 측정에 도움을 주신 U.C.L.A. 토목 환경 공학과 E.M.V.Hoek 교수님과 Anna Jawor, 열전도율 측정을 위한 열선 장비와 도움을 주신 U.C.L.A. 기계항공 공학과 Y.S.Ju 교수와 Ming-Tsung Hung에게 감사드린다. 또한 귀중한 조언과 자연대류 실험장비를 제공해 주신 U.C.L.A. 기계항공 공학과 A.F.Mills 교수에게 깊은 감사를 드린다.

## 기호설명

$AR$	: 종횡비
$A_M$	: 열유속계의 단면적
$A_F$	: 유체층의 단면적
$C_E$	: 유리벽 외부와의 열교환 계수
$C_M$	: 열유속계 계수
$D$	: 지름
$k$	: 열전도율
$k_{eff}$	: 나노유체 유효 열전도율
$H$	: 유체층 두께
$Nu$	: Nusselt 수
$q$	: 열유속
$Ra$	: Rayleigh 수, $\rho\beta\Delta TH^3/\mu\alpha$
$T_C$	: 저온 열유속계의 온도차이
$T_H$	: 고온 열유속계의 온도차이
$T_F$	: 유체층의 온도차이

## 그리스 문자

$\alpha$	: 열확산율
$\beta$	: 열팽창계수
$\rho$	: 밀도
$\mu$	: 점성계수
$\theta$	: 유체층의 경사도

## 하첨자

$C$	: 구리
$E$	: 외부
$F$	: 유체
$M$	: 열유속계
$N$	: 나노입자
$W$	: 플렉시 유리벽

## 참고문헌

1. Keglinski, P., Phillpot, S.R., Choi, S.U.S., Eastman, J.A.: "Mechanics of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 45, 855-863, (2002).
2. Fan, X., Chen, H., Ding, Y., Plucinski, P.K., Lapkin, A.A.: "Potential of 'nanofluids' to further intensify microreactors", *Green Chemistry*, vol. 10, 670-677, (2008).
3. You, S.M. and Kim, J.H., Kim, K.H.: "Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer", *Applied Physics Letters*, vol. 83, 3374-3376, (2003).
4. Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W., Thomson, L.J.: "Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles", *Applied Physics Letters*, vol. 78, no. 6, 718-720, (2001).
5. Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, Grulke, E.A.: "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions", *Applied Physics Letters*, vol. 79, no. 14, 2252-2254, (2001).
6. Bahrami, M., Yovanovich, M.M., Culham, J.R.: "Assessment of relevant physical phenomena controlling thermal performance of nanofluids", *J. Thermophysics Heat Transfer*, vol. 21, no. 4, 673-679, (2007).
7. Li, C.H., Peterson, G.P.: "Mixing effect on the enhancement of the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions(nanofluids)", *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 50, 4668-4677, (2007).
8. Prasher, R., Bhattacharya, P., Phelan, P.E.: "Brownian-motion-based convective-conductive model for the effective thermal conductivity of nanofluids", *J. Heat Transfer*, vol. 128, 588-595, (2006).
9. Prasher, R.: "Thermal transport due to phonons in ran-

- dom nano-particulate media in the multiple and dependent (correlated) elastic scattering regime”, *J. Heat Transfer*, vol. 128, 627-637, (2006).
10. Evans, W., Fish, J., Keblinski, P.: “Role of Brownian motion hydrodynamics on nanofluid thermal conductivity”, *Applied Physics Letters*, vol. 88, 093116, (2006).
  11. Hong, K.S., Hong, T.K., Yang, H.S.: “Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles”, *Applied Physics Letters*, vol. 88, 031901, (2006).
  12. Jang, S.P., Choi, S.U.S.: “Effects of various parameters on nanofluid thermal conductivity, *J. Heat Transfer*”, vol. 129, 617-623, (2007).
  13. Keblinski, P., Eastman, J.A., Cahill, D.G., “Nanofluids for thermal transport”, *Materialstoday*, June, 36-44, (2005).
  14. Vadasz, J.J., Govender, S., Vadasz, P.: “Heat transfer enhancement in nano-fluids suspensions: possible mechanisms and explanations”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 48, 2673-2683, (2005).
  15. Putra, N., Roetzel, W., Das, S.K.: “Natural convection of nano-fluids, *Heat Mass Transfer*”, vol. 39, 775-784, (2003).
  16. Wen, D., Ding, Y.: “Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications”, *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 26, 855-864, (2005).
  17. Wen, D., Ding, Y.: “Natural convective heat transfer of suspensions of Titanium Dioxide nanoparticles (nanofluids)”, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 5, no. 3, 220-227, (2006).
  18. Nnanna, A.G.A.: “Experimental model of temperature-driven nanofluid”, *J. Heat Transfer*, vol. 129, 697-704, (2007).
  19. Chang, B.H., Mills, A.F., Hernandez, E.: “Natural convection of microparticle suspension in thin enclosures”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 51, 1332-1341, (2008).
  20. Okada, M., Suzuki, K.: “Natural convection of water-fine particle suspension in a rectangular cell”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 40, 3201-3208, (1997).
  21. Chang, B.H., Mills, A.F.: “Natural convection heat transfer in cylindrical enclosures”, *The 6th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference TED-AJ03-526*, March 16-21, Hawaii, USA., (2003).
  22. Rossby, H.T.: “A study of Bernard convection with and without rotation”, *J. Fluid Mechanics*, vol. 36, 309-336, (1969).
  23. Hollands, K.G.T., Raithby, G.D., and Konicek, L.: “Correlation equations for free convection heat transfer in horizontal layers of air and water”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 18, 879-884, (1975).
  24. Zhang, X., Gu, H., Fujii, M.: “Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles”, *Experimental Thermal Fluid Science*, vol. 31, 593-599, (2007).
  25. Das, S.K., Putra, N., Thiesen, Peter, Roetzel, W.: “Thermal dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids”, *J. Heat Transfer*, vol. 125, 567-574, (2003).
  26. Chon, C.H. and Kihm, Kenneth D.: “Empirical correlation finding the role of temperature and particle size for nanofluid( $Al_2O_3$ ) thermal conductivity enhancement”, *Applied Physics Letters*, vol. 87, 153107, (2005).
  27. Lee, S., Choi, S.U.S., Li, S., Eastman, J.A.: “Measuring thermal conductivity of fluids containing Oxide Nanoparticles”, *J. Heat Transfer*, vol. 121, 280-289, (1999).
  28. Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y., Ai, F., Wu, Q.: “Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles”, *J. Applied Physics*, vol. 91, no.7, 4568-4572, (2002).
  29. Lee, D., Kim, J.W., Kim, B.G.: “A new parameter to control heat transport in nanofluids: surface charge state of the particle in suspension”, *J. Physical Chemistry B*, vol. 110, no. 9, 4323-4328, (2006).
  30. Prasher, R., Phelan, P.E., Bhattacharya, P.: “Effect of aggregation kinetics on the thermal conductivity of nanoscale colloidal solutions (nanofluid)”, *Nano Letters*, vol. 6, no. 7, 1529-1534, (2006).
  31. Putnam, S., Cahill, D.G., Braun, P.V., Ge, Z., Shimmin, R.G.: “Thermal conductivity of nanoparticle suspensions”, *J. Applied Physics*, vol. 99, 084308, (2006).
  32. Gandhi, K.S.: “Thermal properties of nanofluids: controversy in the making?”, *Current Science*, vol. 92, no. 6, 717-718, (2007).
  33. Prasher, R., Song, D., Wang, J., Phelan, P.: “Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications”, *Applied Physics Letters*, vol. 89, 133108, (2006).
  34. Pak, B.C., Cho, Y.I.: “Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles”, *Experimental Heat Transfer*, vol. 11, 151-170, (1998).
  35. Chen, B., Mikani, F., Nishikawa, N.: “Experimental studies on transient features of natural convection in particles suspensions”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 48, 2933-2942, (2005).
  36. Yang, H.Q., Yang, K.T.: “Laminar natural convection flow transitions in tilted three-dimensional longitudinal rectangular enclosures”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 30, no.8, 1637-1644, (1987).
  37. ElSherbiny, S.M., Raithby, G.D., Hollands, K.G.T.: “Heat transfer by natural convection across vertical and inclined air layers”, *J. Heat Transfer*, vol. 104, 96-102, (1982).