

나노입자 형상 변화에 따른 알루미늄 나노유체의 유동 특성

황교식* · 하효준* · 장석필*†

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Flow Characteristics of Al₂O₃ Nanofluids with Nanoparticles of Various Shapes

Kyo Sik Hwang*, Hyo Jun Ha* and Seok Pil Jang*†

* School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace Univ.

(Received October 22, 2010 ; Revised November 16, 2010 ; Accepted November 16, 2010)

Key Words : Nanofluids(나노유체), Nanoparticles Shape(나노입자 형상), Pressure Drop(압력 강하)

초록: 본 연구에서는 다양한 형상의 나노입자를 분산시킨 알루미늄 나노유체의 유동 특성을 실험적으로 조사하기 위하여 나노입자의 형상 변화에 따른 알루미늄 나노유체의 압력강하를 층류영역에서 측정하였다. 이를 위해 Sphere, Rod, Platelet, 그리고 Brick 의 형태를 갖는 알루미늄 나노입자를 물에 분산시켜 부피비 0.3%를 갖도록 Two-step 방법으로 제작하였다. 제작된 나노유체의 분산성을 파악하기 위하여 제타포텐셜을 조사하였으며, 나노입자의 형상을 파악하기 위하여 TEM 사진을 측정하였다. 다양한 형상의 나노입자를 분산시켜 0.3%의 부피비를 갖는 나노유체의 압력강하를 측정하였을 때, 입자 형상이 나노유체의 유동특성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 실험 결과를 바탕으로 나노입자의 단위질량당 표면적과 분산된 나노입자의 크기를 이용하여 나노유체의 압력강하 특성을 설명하였다.

Abstract: To study the flow characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids according to the shape of the nanoparticles, we measure the pressure drop in a fully developed laminar flow regime. Water-based Al₂O₃ nanofluids of 0.3 Vol.% with sphere-, rod-, platelet-, and brick-shaped nanoparticles are manufactured by the two-step method. Zeta potential is measured to examine the suspension and dispersion characteristics, and TEM image is considered to confirm the shape characteristics of the nanoparticles. The experimental results show that the pressure drop of Al₂O₃ nanofluids depends on the shape of the nanoparticles although the nanofluids has same volume fraction of nanoparticles. This is explained by the surface area per unit mass of the nanoparticles and the size of the nanoparticles suspended in the base fluids.

- 기호설명 -

A : 입자의 표면적 [m²]
 B : 계측기 오차 [%]
 D : 원형관의 직경 [m]
 F_{Drag} : 항력 [N]
 g : 중력가속도 [m/s²]
 k_B : Boltzmann 상수
 L : 원형관의 길이 [m]
 m : 나노입자 질량 [kg]
 n : 나노입자 수
 ΔP_{tube} : 압력강하 [N/m²]

r : 입자의 반경 [m]
 T : 온도 [°C]
 $t_{\lambda,95\%} P_{precision}$: 95% 신뢰구간에서 측정 오차[%]
 u : 유체속도 [m/s]
 u_{σ} : 측정불확도 [%]
 V : 입자와 유체의 속도차 [m/s]

그리스문자

μ : 유체의 점성계수 [Ns/m²]
 ρ : 유체의 밀도 [kg/m³]
 ρ_p : 나노입자의 밀도 [kg/m³]

1. 서론

나노유체란 일반유체에 나노입자(금속, 비금속)

† Corresponding Author, spjang@kau.ac.kr
 © 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

또는 나노 크기의 Fiber 를 분산(Dispersion), 부유(Suspension) 시켜 제작한 유체이다.⁽¹⁾ 나노유체로 주로 제작되는 것은 $Al_2O_3 + Water$, $Al_2O_3 + EG$, $CuO + Water$, $CuO + EG$, $Cu + EG$, 그리고 $CNT + Oil$ 등이 있다.^(1~7) 이러한 나노유체는 기존의 수 밀리미터에서 수 마이크로미터 크기의 입자를 첨가한 유체의 열적 특성과는 전혀 다른 특성을 나타내는 것으로 보고되고 있다.^(1~16) 실험적으로 발견된 나노유체의 대표적인 열적 특성은 크게 두가지로 제시할 수 있다. 첫 번째는 일반유체의 부피에 대한 소량의 부피비(1 Vol. % 미만)를 가지는 나노입자를 일반유체에 첨가하더라도 나노유체의 열전도도가 일반유체에 비해 10% 정도 향상된다는 것이다.^(1~7) 두 번째 특징은 동일 부피비에서 나노유체의 대류 열전달 계수 상승폭이 나노유체의 열전도도 상승폭보다 더 크다는 것이다.^(8~16) 이와 같은 나노유체를 실제로 열 수송 유체로 사용하기 위해서는 나노유체의 우수한 열적 상승뿐만 아니라 나노유체의 유동 저항인 압력강하도 함께 고려되어야 한다. 이에 따라 나노유체의 압력강하 특성에 대하여 많은 연구자들이 실험적 연구를 수행하였다. Hwang 등⁽¹¹⁾은 완전 발달된 층류영역($400 < Re < 600$)에서 부피비 0.01~0.3%의 알루미늄(Al_2O_3) 나노유체를 이용하여 압력강하를 측정하였고 기존에 알려진 식($f = 64/Re$)에 의해 예측이 가능하다고 보고 하였다. He 등⁽¹²⁾은 이산화티탄(TiO_2) 나노입자의 부피비가 0.24~1.18%가 되도록 나노유체를 제작하여 층류영역에서 압력강하를 측정하였고, $Re < 1500$ 인 영역에서 물과 유사한 결과를 보여주었다. Heris 등⁽¹³⁾은 부피비 0.2~2.5%의 알루미늄 나노유체를 이용하여 압력강하를 측정하였을 때, $700 < Re < 2050$ 의 범위에서 이론식에 의해 예측이 가능하다고 보고하였다. Rea 등⁽¹⁷⁾은 알루미늄과 산화지르코늄(ZrO_2) 나노유체를 이용하여 층류영역에서 압력강하를 측정하였고, 압력강하의 증가량은 점성계수의 증가량과 같다는 결과를 보여주었다. 또한 난류 영역에서도 물에 구리(Cu), 알루미늄, 이산화티탄, 산화지르코늄 나노입자를 0.2~3%의 부피비를 갖도록 분산시킨 나노유체의 압력강하가 기존에 알려진 식에 의해 예측이 가능하다고 보고 되고 있다.^(14~16,18)

이와 같이 층류영역과 난류 영역에서 나노유체의 압력강하는 기존에 알려진 이론에 의해 예측이 가능하다고 보고 되고 있다. 하지만 현재까지 보고된 연구들은 Sphere 형상의 나노입자를 사용하였으며 나노입자 형상 변화에 따른 압력 강하 특

성을 보여주지 못하였다.

따라서 본 연구에서는 나노입자 형상 변화에 따른 나노유체의 유동 특성을 실험적으로 분석하고자 한다. 이를 위해 Sphere, Rod, Platelet, 그리고 Brick의 형태를 갖는 알루미늄 나노입자를 물에 분산시켜 부피비 0.3%를 갖도록 Two-step 방법으로 제작하였다.⁽¹⁹⁾ 또한, 제작된 나노유체의 분산성을 파악하기 위하여 제타포텐셜을 조사하였으며, 나노입자의 형상을 파악하기 위하여 TEM 사진을 측정하였다. 실험 결과를 바탕으로 다양한 형상의 나노입자를 포함한 나노유체의 압력 강하 특성을 설명하기 위하여 나노입자의 단위 질량당 표면적을 나타내는 BET 실험 결과 및 Particle Size Analysis를 이용한 분산된 입자크기를 고려하였다.

2. 나노유체 특성

본 연구에서 사용된 나노유체는 DI Water를 기본 유체로 하여 나노입자의 부피비가 0.3%가 되도록 분산시킨 후, 입자가 잘 분산되도록 초음파 에너지를 5시간 동안 가해주는 Two-step 방법이 사용되었다.⁽¹⁹⁾ 본 연구에 사용된 나노입자는 Sphere, Rod, Platelet, 그리고 Brick 형태의 다양한 형상을 갖는다. Sphere 형상의 나노입자는 Nanophase사에서 제작되었으며 45nm의 직경을 갖고, Rod, Platelet, 그리고 Brick 형상의 나노입자는 Sasol사에서 제작되었으며 크기는 각각 $80nm$ (길이) \times $10nm$ (직경), $15nm \times 15nm \times 5nm$, 그리고 $40nm \times 40nm \times 20nm$ 이다. 이와 같은 다양한 형상의 나노입자는 Fig. 1에서 보이는 것처럼 TEM 사

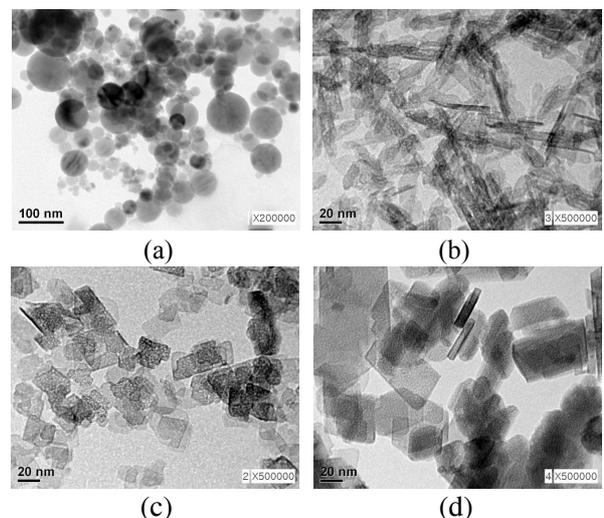


Fig. 1 TEM images of (a) sphere-shaped nanoparticles, (b) rod-shaped nanoparticles, (c) platelet-shaped nanoparticles and (d) brick-shaped nanoparticles

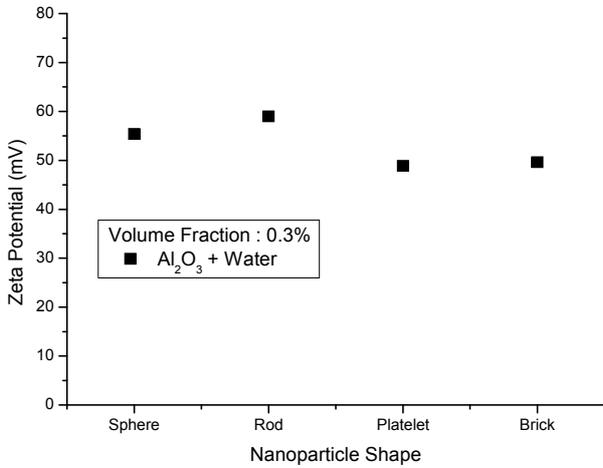


Fig. 2 Zeta potential of Al₂O₃ nanofluids with nanoparticles of various shapes

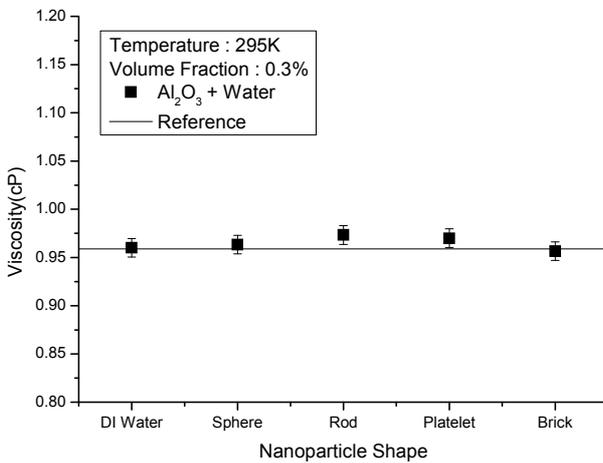


Fig. 3 Viscosity of Al₂O₃ nanofluids with nanoparticles of various shapes

진을 이용해서 확인하였고 나노입자 제작 회사에서 제공한 형상 및 크기와 유사한 것을 알 수 있었다.

또한 제작된 나노유체의 분산성을 확인하기 위하여 Malvern Instrument 사의 Zetasizer Nano ZS 를 이용하여 제타포텐셜을 측정하였으며, Fig. 2 에서 보이듯이 50mV 이상으로 나타났다. 일반적으로 제타포텐셜의 크기가 60mV 이상이면 완벽한 분산을 의미하며, 30mV 이상이면 물리적으로 분산된 상태를 의미하기 때문에⁽²⁰⁾ 본 연구에 사용된 나노유체는 분산성이 매우 우수한 것을 보여준다. 그리고 제타포텐셜은 pH 의 의존성이 강해서⁽²¹⁾ 본 연구에 사용된 알루미나 나노유체의 pH 를 측정 하였고, Sphere, Rod, Platelet, 그리고 Brick 형상의 나노입자를 분산시킨 나노유체의 pH 는 각각 4.76, 5.71, 5.62, 그리고 5.76 의 약 산성이다.

나노유체의 점성 계수는 Brookfield 사의 LVDV-III Ultra+ Rheometer 를 이용하여 측정하였다. 점도

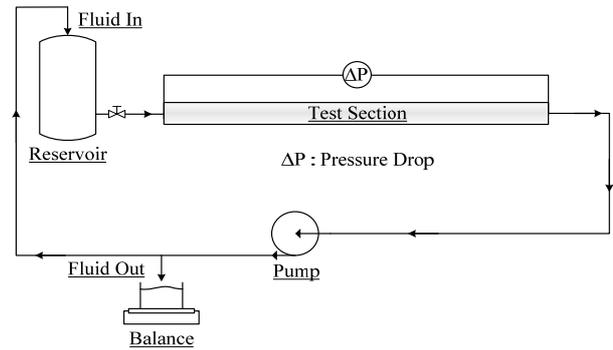


Fig. 4 Schematic diagram of experimental apparatus

계는 유체에 잠겨있는 스피들(Spindle)이 회전하기 위해 필요한 전단응력(Torque)을 측정하여 점성 계수를 구하며 ±1.0%의 정확도를 갖는다. Fig. 3 은 다양한 형상의 나노입자를 부피비 0.3%로 분산시킨 나노유체의 점성계수를 보여준다. 모든 나노유체의 점성계수는 기본 유체인 물과 비슷한 값을 나타내어 점성계수의 큰 증가가 없다는 것을 확인하였다.

3. 알루미나 나노유체의 유동 특성

3.1 실험 장치 및 검증

층류영역에서 나노입자 형상 변화에 따른 나노유체의 압력 강하를 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 실험 장치를 구성하였다. 나노유체의 유동은 펌핑 시스템을 이용하였으며 펌핑 시스템의 미소맥동이 원형관의 유동 현상에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 관에서 펌프로 이어지는 튜브의 길이를 충분히 길게 설계하였으며, 길이는 약 10 미터로 제작되었다. 펌프는 관 내부에 흐르는 유량을 0.4ml/min ~ 21ml/min까지 조절할 수 있는 Cole-Parmer사의 Masterflex HV-77921-40을 사용하였다. Test Section에서 앞단과 뒷단의 압력 강하는 VALIDYNE 사의 차압계인 DP10-34와 CD23 Digital Indicator를 사용하여 측정하였다. DP10-34의 정확도는 ±0.5%이고, Full Scale Range는 22kPa이다.

압력 강하 측정의 불확도는 95%의 신뢰구간을 갖는 범위내에서 식 (1)에 의해 평가되었다.

$$u_{\sigma} = \sqrt{B^2 + (t_{\lambda,95\%} P_{precision})^2} \quad (1)$$

여기서, u_{σ} , B , 그리고 $t_{\lambda,95\%} P_{precision}$ 는 각각 측정 불확도, 계측기가 가지는 오차, 그리고 95% 신뢰구간에서의 측정 오차이다. 본 연구에서 측정된 압력 강하의 불확도는 차압계와 차압계 Calibrator의 계측기가 가지는 오차와 압력 강하 측정의 오차를 이용하여 계산하였으며, 약 1.01%이다.

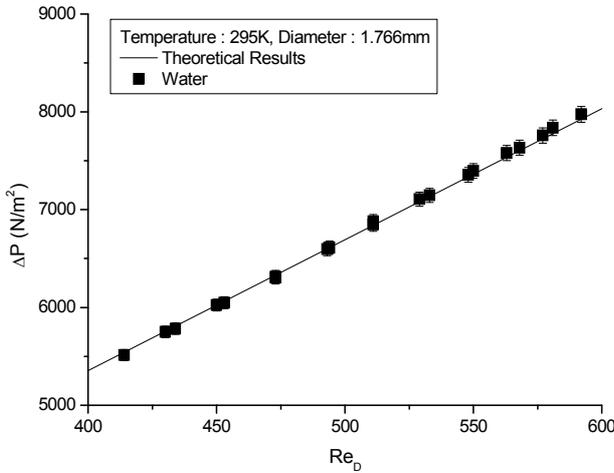


Fig. 5 Comparison between theoretical results and experimental results of water

실험장치의 정확성을 검증하기 위하여, 알루미늄 나노유체의 압력 강하 측정 실험 전에 물을 이용하여 압력 강하를 측정하였다. 압력 강하 측정 실험 결과는 원형 관내 완전 발달된 층류 유동 가정으로 해석되었다. 그 이유는 Reynolds 수가 600 이내이며 Entry Length가 관내 전체 길이의 최대 2% 이하이기 때문이다. Fig. 5에서 보이듯이 물을 이용한 압력강하 측정 결과와 식 (2)의 이론적인 결과를 비교하면 1.01%의 오차범위 내에서 일치하는 것을 알 수 있다.

$$\Delta P_{tube} = 32 \frac{uL\mu}{D^2} \quad (2)$$

여기서, ΔP_{tube} , u , L , μ , D 는 각각 원형관 내에서의 압력강하, 원형관 내부에서의 속도, 원형관의 길이, 유체의 점성계수, 원형관의 직경을 나타낸다.

3.2 실험 결과

본 연구에서는 원형관을 따라 흐르는 나노유체의 유동 특성을 조사하기 위하여 나노입자의 형상 변화에 따른 알루미늄 나노유체의 압력강하를 측정하였다. Fig. 6은 나노입자의 형상 변화에 따른 알루미늄 나노유체의 압력 강하를 나타낸다. Sphere, Rod, Platelet, 그리고 Brick 형태의 다양한 형상의 나노입자를 분산시킨 나노유체의 압력강하는 물과 비교하였을 때, 각각 1.44%, 5.29%, 2.6%, 그리고 1.2% 증가하였다. 즉, 실험 결과는 나노입자의 형상에 따라 압력 강하가 다르게 나타났으며 부피비 0.3%에서 Rod 형상의 나노입자를 분산시킨 나노유체의 압력강하가 가장 높게 측정되었고, Sphere와 Brick 형상의 나노입자를 갖는 나노유체는 기본 유체와 유사하게 측정되었다. 여기서

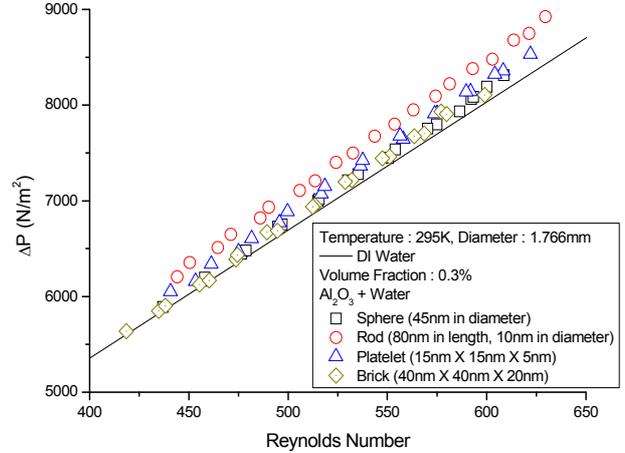


Fig. 6 Pressure drop of Al₂O₃ nanofluids with nanoparticles of various shapes

Sphere 형상의 나노입자를 분산시킨 나노유체의 압력강하 결과는 기존의 연구결과^(11~13,17)와 같으나 Rod 형상의 나노입자를 분산시킨 나노유체의 경우는 기존 이론식보다 높게 측정됨을 확인하였다. 이러한 현상은 동일 부피비에서 나노입자의 단위 질량당 표면적을 측정하여 그 결과를 바탕으로 설명 될 수 있다. 나노입자의 단위 질량당 표면적은 Micromeritics사의 Tristar 3000을 이용하여 측정하였으며, Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보이듯이 Rod 형상의 나노입자가 단위 질량당 가장 넓은 표면적을 나타내는 반면 Sphere와 Brick 형상의 나노입자가 단위 질량당 가장 작은 표면적을 보여준다. 위의 결과는 완전 발달된 층류영역에서 나노유체의 압력강하가 나노유체 속에 분산된 나노입자의 단위 질량당 표면적이 증가할수록 커진다는 것을 보여준다. 동일 부피비에서 나노입자의 표면적은 식 (3)과 같이 입자의 크기에 반비례하기 때문에 유체 속에 분산된 나노입자의 크기를 측정해 보았다.

$$A_{\text{surface area}} \sim \frac{1}{r} \quad (3)$$

여기서 $A_{\text{surface area}}$ 는 동일 부피비에서 나노입자의 표면적이고, r 은 입자의 반경이다. 나노입자의 크기는 Malvern Instrument사의 Zetasizer Nano ZS를 이용하여 측정하였으며, Table 2에 나타내었다. 측정 결과 Rod 형상의 나노입자 크기가 가장 작았고, Sphere와 Brick 형상의 나노입자 크기는 가장 크게 나타났다. 이는 완전 발달된 층류영역에서 나노유체의 압력강하가 동일 부피비에서 나노입자의 크기가 작아 표면적이 넓을수록 증가한다는 것을 보여준다.

Table 1 BET measurement results

	Sphere	Rod	Platelet	Brick
Surface Area (m ² /g)	32.1	165	102	50.9

Table 2 Particle Size Analysis

	Sphere	Rod	Platelet	Brick
Particle Size (nm)	157.4	81.6	106.4	161.1

이런 현상은 결국 나노입자와 유체의 Slip 현상으로 인해 나노입자 자체에 의해 발생하는 유동저항이 나노유체의 전체 압력 강하 특성에 영향을 미치는 결과를 보여주는 것이다. 즉 Slip 현상^(7,11)에 의해서 발생하는 나노입자와 유체의 속도차이에 의해서 나노입자에 걸리는 Drag Force 는 식 (4)와 같이 Stokes' Drag 로 정의될 수 있다. 그 이유는 입자 주위를 흐르는 유체의 Reynolds 수는 입자의 특성 길이를 기반으로 1 보다 매우 작은 값을 가지기 때문이다.

$$F_{Drag,p} \sim \mu V r \quad (4)$$

여기서 $F_{Drag,p}$ 와 V 는 입자에 의한 유동저항과 입자와 유체의 속도차이다. Slip 현상은 Inertia, Brownian Diffusion, Thermophoresis, Diffusiophoresis, Magnus Effect, Fluid Drainage, Gravity Settling 에 의해 발생한다고 보고되고 있다⁽²²⁻²⁵⁾. 하지만 나노유체에서는 Inertia, Diffusiophoresis, Magnus Effect, Fluid Drainage 의 효과가 무시될 수 있고,⁽¹⁰⁾ 온도차가 없기 때문에 Thermophoresis 는 없다. 따라서, Brownian Diffusion 과 Gravity Settling 의 효과를 고려하면 각각의 속도는 식 (5), (6)과 같다.

$$V_B = \sqrt{\frac{k_B T}{m}} \quad (5)$$

$$V_g = \frac{2r(\rho_p - \rho)g}{9\mu} \quad (6)$$

여기서 k_B , T , m , ρ_p , ρ , 그리고 g 는 각각 Boltzmann 상수, 온도, 나노입자의 질량, 나노입자 밀도, 유체의 밀도, 그리고 중력가속도이다. 본 연구에서 식 (6)에 의한 Gravity Settling 속도는 3×10^{-9} m/s 인 반면에 Brownian Diffusion 에 의한 속도는 0.15m/s 이기 때문에 Gravity Settling 속도는 무시할 수 있다. 따라서 식 (5)에 의한 Slip 속도는 식 (7)과 같이 나노입자 반경의 함수로 나타낼 수 있다.

$$V = \frac{1}{r^{3/2}} \quad (7)$$

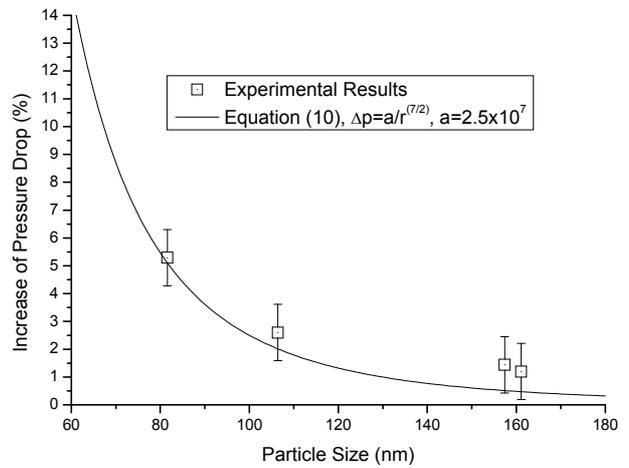


Fig. 7 Pressure drop of Al₂O₃ nanofluids according to the nanoparticles size

동일 부피비를 갖는 나노입자 전체의 유동저항은 식 (8)과 같이 동일 부피비에 분산되어 있는 나노입자의 수를 고려한다.

$$F_{Drag,total} \sim n F_{Drag,p} \quad (8)$$

그리고 나노입자의 수는 식 (9)와 같이 나노입자 반경의 3 제곱에 반비례한다.

$$n \sim \frac{1}{r^3} \quad (9)$$

식 (4), (7)과 (9)를 식 (8)에 대입하여 정리하면 동일 부피비를 갖는 나노입자 전체의 유동저항은 유체의 점성계수가 일정할 때 식 (10)과 같이 나노입자 반경의 7/2 승에 반비례한다.

$$F_{Drag,total} \sim \frac{1}{r^{7/2}} \quad (10)$$

따라서 동일 부피비를 갖는 나노입자 전체에 의해 발생하는 유동저항은 입자의 크기가 작을수록 표면적이 넓을수록 증가하게 되고 이에 따라 나노유체의 압력강하가 증가하게 되는 것을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 식 (10)에 실험 상수, $a = 2.5 \times 10^7$ 를 적용하면서 Fig. 7 에서 보이는 것과 같이 입자의 크기 변화에 따른 압력강하의 증가량을 나타낼 수 있다. 실험 장치의 불확도인 1.01% 내에서 실험결과와 식 (10)에 의해 예측된 결과가 일치하는 것을 확인하였고, 완전 발달된 층류영역에서 점성계수가 일정할 때 나노입자의 크기가 작을수록 압력강하가 증가하는 것을 직접적으로 보여주었다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 형상의 나노입자를 분산시킨 알루미늄 나노유체의 유동 특성을 실험적으로 조사하기 위하여 나노입자의 형상 변화에 따른 완전발달된 층류영역에서 알루미늄 나노유체의 압력강하를 측정하였다. 이를 위해 Sphere, Rod, Platelet, 그리고 Brick의 형태를 갖는 알루미늄 나노입자를 물에 분산시켜 부피비 0.3%를 갖도록 Two-step 방법으로 제작하였다. 제작된 나노유체의 분산성을 파악하기 위하여 제타포텐셜을 조사하여 분산성이 우수함을 보여 주었고, 나노입자의 형상을 파악하기 위하여 TEM 사진을 측정하였다.

Sphere, Rod, Platelet, 그리고 Brick 형태의 다양한 형상의 나노입자를 분산시킨 나노유체의 압력강하는 물과 비교하였을 때, 각각 1.44%, 5.29%, 2.6%, 그리고 1.2% 증가하였다. Sphere 형상의 나노입자를 분산시킨 나노유체의 경우 기존의 연구결과^(11-13,17)와 동일하나, Rod 형상의 나노입자를 분산시킨 나노유체의 경우 기존 이론식에 의해 예측할 수 없고 압력강하가 이론식 보다 증가하는 것을 확인하였다. 실험 결과를 바탕으로 동일 나노입자 부피비를 가지는 나노유체에서 단위질량당 표면적이 큰 나노입자가 포함된 나노유체의 압력강하가 단위질량당 표면적이 작은 나노입자가 포함된 나노유체의 압력강하보다 훨씬 크다는 사실을 BET 결과를 이용하여 확인하였다. 또한, Particle Size Analysis를 이용하여 측정된 입자크기가 작을수록 동일 부피비에서 표면적이 증가하여 압력강하가 증가하는 것을 보여주었다. 이런 이유는 나노입자와 유체의 Slip 현상으로 인해 나노입자 자체에 의해 발생하는 유동저항이 나노유체의 전체 압력 강하 특성에 영향을 미치기 때문임을 확인하였다.

후 기

본 논문은 한국연구재단 재원으로 지원을 받아 출원된 연구임(특정기초 우수 신진 연구지원 사업 20090053682)

참고문헌

- (1) Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S. and Thompson, L.J., 1997, "Enhanced Thermal Conductivity through the Development of Nanofluids," *Proc. Symp. Nanophase and Nanocomposite Mater. II*, Vol. 457, pp. 2~11.
- (2) Lee, S., Choi, S.U.S. and Eastman, J.A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280~289.
- (3) Wang, X., Xu, X. and Choi, S.U.S., 1999, "Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture," *J. Thermophysics and Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 474~480.
- (4) Xie, H.Q., Wang, J.C., Xi, T.G., Liu, Y., Ai, F. and Wu, Q.R., 2002, "Thermal, Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles," *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, pp. 4568~4572.
- (5) Das, S.K. and Putra, N., 2003, Thiesen, P., Roetzel, W., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567~574.
- (6) Patel, H.E., Das, S.K., Sundararajan, T., Nair, A.S., George, B. and Pradeep, T., 2003, "Thermal Conductivities of Naked and Monolayer Protected Metal Nanoparticle Base Nanofluids Manifestation of Anomalous Enhancement and Chemical Effects," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, pp. 2931~2933.
- (7) Jang, S.P. and Choi, S.U.S., 2004, "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, pp. 4316~4318.
- (8) Wen, D. and Ding, Y., 2004, "Experimental Investigation into Convective Heat Transfer of Nanofluid at the Entrance Region Under Laminar Flow Conditions," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5181~5188.
- (9) Ding, Y., Alias, H., Wen, D. and Williams, R.A., 2006, "Heat Transfer of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 240~250.
- (10) Buongiorno, J., 2006, "Convective Transport in Nanofluids," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 128, pp. 240~250.
- (11) Hwang, K.S., Jang, S.P. and Choi, S.U.S., 2009, "Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Water-Based Al₂O₃ Nanofluids in Fully Developed Laminar Flow Regime," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 193~199.
- (12) He, Y., Jin, Y., Chen, H., Ding, Y., Cang, D. and Lu, H., 2007, "Heat Transfer and Flow Behaviour of Aqueous Suspensions of TiO₂ Nanoparticles (Nanofluids) Flowing Upward Through a Vertical Pipe," *Inter-national Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2272~2281.
- (13) Heris, S.Z., Esfahany, M.N. and Etemad, S.G., 2007, "Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Al₂O₃/Water Nanofluid in Circular Tube," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, pp. 203~210.
- (14) Pak, B.C. and Cho, Y.I., 1998, "Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particle," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 11, pp. 151~170.
- (15) Xuan, Y. and Li, Q., 2003, "Investigation on

- Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids,” *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 151~155.
- (16) Duangthongsuk, W. and Wongwises, S., 2009, “Heat Transfer Enhancement and Pressure Drop Characteristics of TiO₂-Water Nanofluid in a Double-Tube Counter Flow Heat Exchanger,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2059~2067.
- (17) Rea, U., McKrell, T. and Hu, L., Buongiorno, J., 2009, “Laminar Convective Heat Transfer and Viscous Pressure Loss of Alumina-Water and Zirconia-Water Nanofluids,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2042~2048.
- (18) Williams, W., Buongiorno, J. and Hu, L., 2008, “Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/Water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in Horizontal Tubes,” *Journal of Heat Transfer*, Vol. 130, pp. 042412.
- (19) Lee, J.H., Hwang, K.S., Jang, S.P., Lee, B.H., Kim, J.H., Choi, S.U.S. and Choi, C.J., 2008, “Effective Viscosities and Thermal Conductivities of Aqueous Nanofluids Containing Low Volume Concentrations of Al₂O₃ Nanoparticles,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 2651~2656.
- (20) Müller R.H., 1996, “Zetapotential und Partikelladung in der Laborpraxis,” 1st Ed., Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- (21) Probstein, R.F., 2003, “Physicochemical Hydrodynamics,” 2nd Ed., Wiley.
- (22) Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, “Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701~3707.
- (23) Bott, T.R., 1995, “Fouling of Heat Exchangers,” Elsevier, New York.
- (24) Lister, D.H., 1980, “Corrosion Products in Power Generating Systems,” AECL-6877, June.
- (25) Whitmore, P.J. and Meisen, A., 1977, “Estimation of Thermo- and Diffusiophoretic Particle Deposition,” *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 55, pp. 279~285.