

< 논문 >

알루미나 나노유체의 유동 특성에 관한 연구

이 지 환* · 장 석 필†

(2006년 1월 24일 접수, 2006년 4월 10일 심사완료)

Fluid Flow Characteristics of Al₂O₃ Nanoparticles Suspended in Water

Ji-Hwan Lee and Seok Pil Jang

Key Words : Nanofluids(나노유체), Pressure Drop(압력 강하), Effective Viscosity(유효 점성계수), Al₂O₃(알루미나)

Abstract

In this paper we report fluid flow characteristics of Al₂O₃ nanoparticles suspended in water. Especially, the effects of volume fraction with the range of 0.01% to 0.3% and tube diameter with 310μm to 1.735mm on the pressure drop and the effective viscosity of Al₂O₃ nanoparticles suspended in water are experimentally investigated. It is shown that the effective viscosity of water-based Al₂O₃ nanofluids with 0.1 Vol. % through a circular tube of 1.024mm diameter is increased to about 6%. The effective viscosity from experimental results is compared with that from Einstein model. With the comparison, we show that Einstein model for determining the effective viscosity of nanofluids is not applicable to water-based Al₂O₃ nanofluids.

기호설명

- A : 면적 [m²]
- B : Bias 오차
- D : 내부 직경 [m]
- f : 부피비
- k : 열전도도 [W/mK]
- L : 파이프의 길이 [m]
- P : 압력 [Pa]
- Re : Reynolds 수
- u : 유속 [m/sec]
- U_t : 측정 불확실도(Uncertainty)
- $t_{v,95\%} P_{pre}$: 95% 신뢰도의 정밀오차 예측값

그리스문자

- μ : 점성계수 [Nsec/m²]
- ρ : 밀도 [kg/m³]

하첨자

- BF : Base 유체
- c : 수축(Contraction)
- e : 확대(Expansion)
- eff : 나노유체
- o : 원형관

1. 서론

최근 나노 기술이 발달함에 따라 수십 나노에서 수 나노 크기를 가지는 입자 제작이 가능해 졌고, 그 결과 일반적인 유체에 나노입자를 균일하게 분산(Dispersion), 부유(Suspension) 시켜서 만든 나노유체가 개발되었다.⁽¹⁾ 이러한 나노유체의 개발과

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : spjang@hau.ac.kr

TEL : (02)300-0112 FAX : (02)3158-2191

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

더불어 최근 10 년간 많은 과학자들과 기술자들⁽²⁻⁹⁾은 나노유체의 열적 특성이 기존의 수 밀리미터에서 수 마이크로미터 크기를 가지는 입자를 첨가한 유체의 열적 특성과는 전혀 다른 결과를 나타낸다는 사실을 발견했다. 실험적으로 발견된 나노유체의 열적 특성 중 대표적인 내용은 열전도도에 관한 것이다. 열전도도에 관한 내용을 정리하면, 일반 유체의 부피에 대한 소량의 부피비를 가지는 나노입자를 일반 유체에 첨가하더라도 나노유체의 열전도도가 10% 정도 향상된다는 것이다.⁽¹⁻⁹⁾ 이런 특징은 나노유체가 새로운 형태의 열 수송 유체로 대두될 것이라는 의견을 뒷받침 해주는 주된 연구 결과이다. Fig. 1 은 기존 연구자들에 의해 제시된 부피비 변화에 따른 알루미늄(Al_2O_3) 나노유체의 열전도도 실험 데이터를 보여주는 것이다.^(1,8,9) Fig. 1 에 나타난 것처럼, 적은 부피비의 나노입자를 첨가한 나노유체는 일반 유체에 비해 열전도도가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 나노유체를 구동 시키기 위한 압력이 일반 유체에 비해 높게 요구된다면, 나노유체가 우수한 열전도도를 지니고 있다 하더라도 냉각효율의 향상은 기대하기 어렵게 된다. 이러한 점을 고려해 볼 때, 나노유체의 유동 특성에 대한 연구는 반드시 수행되어야 한다. 특히 차세대 냉각장치로 주목 받고 있는 마이크로 관이나 현재 많이 사용되는 일반적인 관내 유동에서 나노유체의 유동특성인 압력강하 특성은 나노유체를 냉각 유체로 적용하기 위해서 필수적으로 연구되어야 하는 분야이다.

따라서 본 연구에서는 물에 알루미늄(Al_2O_3) 나노입자를 분산시킨 나노유체를 사용하여 일반적인 관에서의 압력 강하뿐만 아니라 마이크로 관에서의 압력강하를 측정하였다. 물에 알루미늄(Al_2O_3) 나노입자를 첨가한 나노유체를 사용한 이유는 알루미늄(Al_2O_3) 나노입자가 물에 잘 분산되는 특성

을 지니기 때문에 제작이 수월하며, 일반적으로 많이 사용되는 나노유체이기 때문이다.⁽⁷⁾ Pak and Cho⁽⁸⁾와 Wang et al.⁽⁹⁾은 Al_2O_3 +Water 나노유체에 대한 점성 계수를 실험적으로 측정한 바 있다. 하지만, Pak and Cho⁽⁸⁾와 Wang et al.⁽⁹⁾의 실험결과들은 부피비 1% 이상의 Al_2O_3 +Water 나노유체에서 측정된 점성계수이므로, 1% 미만의 부피비를 가지는 나노유체의 유효 점성계수를 예측하기 위해 기존에 사용되고 있는 Einstein 모델⁽¹⁰⁾에서 얻은 해석적 결과와 정량적으로 비교하기 어려웠다. 또한, 최근에는 나노입자에 대한 유체의 부피비를 1% 미만으로 하여 나노유체를 제작하는 경향이 많이 나타나고 있다.⁽¹¹⁾ 따라서, 본 실험에서는 Al_2O_3 +DI Water 나노유체의 부피비 0.01%~0.3%에서, 원형관의 내부 직경을 변화해 가며 압력강하를 측정하였다. 이렇게 측정된 압력 강하를 바탕으로 알루미늄(Al_2O_3) 나노유체의 유효 점성계수를 실험적으로 측정해 보았고, 이 결과를 1% 미만의 부피비를 가지는 나노유체의 유효 점성계수를 예측하기 위해 기존에 사용되고 있는 Einstein 모델⁽¹⁰⁾을 적용시킨 결과와 비교해 보았다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치 및 방법

Fig. 2 는 실험 장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 본 연구에서는 펌핑 시스템을 사용하지 않고, 저장용기(Reservoir)를 사용하여 나노유체의 유동을 유발시켰다. 그 이유는 나노유체 속에 포함되어 있는 나노입자가 펌핑 시스템에 어떤 영향을 미치는지 밝혀지지 않았기 때문이다. 또한, 저장용기(Reservoir)에서 공급되는 나노유체의 압력을 일정 하게 유지하기 위하여 압력 조절장치(Pressure Regulator)를 설치하였다. Test Section 에서 앞 단과 뒤 단의 압력 강하는 VALIDYNE 사의 압력 변환기

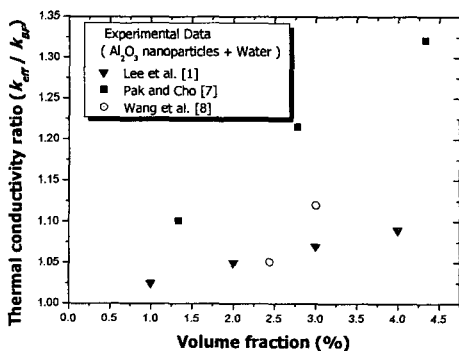


Fig. 1 Experimental data of the effective thermal conductivity of Al_2O_3 nanofluids

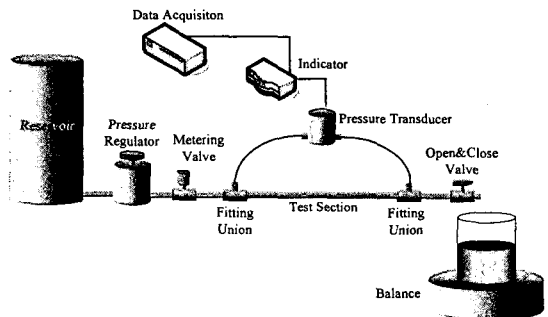


Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus

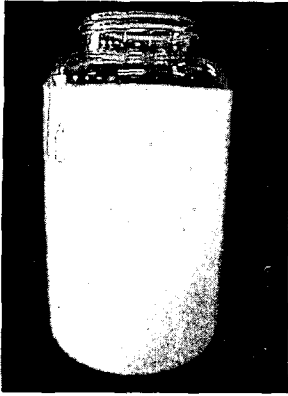


Fig. 3 Al₂O₃ + DI water nanofluids (0.03 Vol. %)

(Pressure Transducer)인 DP15-20, DP15-24, DP15-26 세 종류의 센서와 CD23 Digital Transducer 를 사용하여 측정하였다. DP15 Series 의 Accuracy 는 $\pm 0.25\%$ 이고, DP15-20, DP15-24, DP15-26 센서들의 각각의 Full Scale Range 는 0.86kPa, 2.2kPa, 3.5kPa 이다. 관 내부에 흐르는 유량 측정에는 0.001g 까지 측정되는 정밀 한 Balance 를 사용하였다.

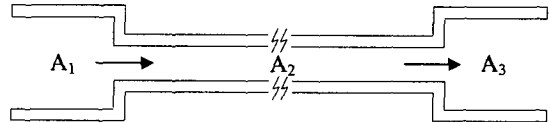
실험에 사용된 원형 관의 내경(Inner Diameter)은 각각 1.735mm, 1.024mm, 581 μ m, 310 μ m 의 네 종류이며 재질은 Stainless Steel 이다. 나노유체는 나노 입자의 부피비가 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.1%, 0.2%, 0.3%가 되도록 Deionized Water(DI Water)를 기본 유체로 사용하여 Al₂O₃ 나노입자를 첨가하는 방식으로 제작하였고, 제작된 나노 유체는 입자가 잘 분산 되도록 제작 직후 초음파 세척기에서 30 시간 동안 에너지를 가하여 주는 2 단계 방법(2 Step Method)을 사용하였다. 초음파 세척기를 통해 에너지를 받은 나노유체와 에너지를 받지 않은 나노유체의 침전속도는 약 62.8% 정도의 차이로 에너지를 받은 나노유체가 에너지를 받지 않은 나노유체 보다 늦게 침전되는 것을 실험적으로 알 수 있었다. 이를 통해 초음파 세척기를 통해 에너지를 가해준 나노유체의 분산이 더 잘 이루어 졌다고 판단하였다. Al₂O₃ 의 나노입자 크기는 30 \pm 5nm 이며 Fig. 3 은 실험에 사용된 0.03% 부피비의 Al₂O₃ + DI Water 나노유체이다.

2.2 검증 실험

실험장치의 정확성을 검증하기 위하여, 알루미늄 나(Al₂O₃) 나노유체로 실험하기 전에 물을 이용하여 압력 강하를 측정해 보았다. 실험 결과는 원형관내의 층류 유동이며 완전 발달 유동 가정으로 해석되었다. 그 이유는 최대 Reynolds 수가 81 이며 Entry Length 가 관내 전체 길이의 최대 2% 미

Table 1 Maximum entry length of each circular tube

Inner Diameter of Circular Tubes	Length of Circular Tubes [mm]	Entry Length [mm]	Percentage of Entry Length
1.735 mm	388	7.02	1.8 %
1.024 mm	200	3.58	1.8 %
581 μ m	387	1.65	0.4 %
310 μ m	150	0.33	0.2 %



(a) Contraction

(b) Expansion

Fig. 4 Pressure drop by contraction and expansion

만이기 때문이다. Table 1 은 실험에 사용된 각각의 원형관에서의 최대 Entry Length 를 보여주는 표이다.

2.2.1 검증에 사용된 식

$$\Delta P_{tube} = 32 \frac{uL\mu}{D^2} \quad (1)$$

$$\Delta P_c = \frac{1}{2} \rho u^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\Delta P_e = \frac{1}{2} \rho u^2 \left[\left(\frac{A_2}{A_3} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

$$U_t = \left[B^2 + (t_{v,95\%} P_{pre})^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

식 (1), (2), (3)에서 ΔP_{tube} , ΔP_c , ΔP_e , L , μ , ρ , D , A 는 각각 원형관 내에서의 압력강하, 수축 부위에서의 압력 강하, 확대부위에서의 압력강하, 원형관의 길이, 유체의 점성계수, 유체의 밀도 그리고 원형관의 내부 직경과 관내부의 면적을 나타내며, u 는 Fig. 4 에서 A₂ 부분에 해당하는 원형관 내부에서의 속도를 나타낸다. 또한, 식 (1)은 층류 유동이면서 완전발달 유동일 때 원형관내에서의 압력강하를 나타내는 식이며 식 (2)와 식 (3)은 Fig. 4 와 같이 Fitting Union 의 형상을 고려하기 위해 사용된 입, 출구 영역에서의 압력 강하 특성을 나타낸 식이다.⁽¹²⁾ 식 (2)와 (3)에 의해 Fitting Union 형상에 의한 수두 손실은 0 이 되므로, 압력 강하의 해석적 결과에는 식 (1)이 사용된다. 식

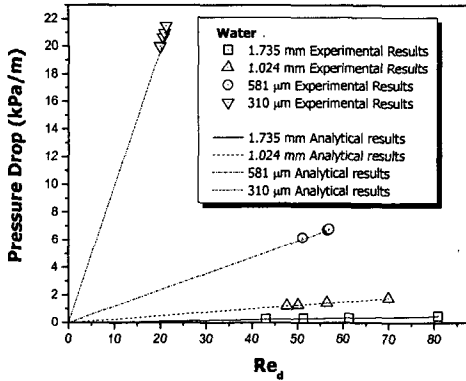


Fig. 5 Comparison between analytical results and experimental results

(4)는 압력강하 측정의 불확실도(Uncertainty)를 나타내는 식이며, U_i , B , $t_{v,95\%} P_{pre}$ 는 각각 측정의 불확실도(Uncertainty), Bias 오차, 그리고 95% 신뢰도의 정밀오차 예측값을 나타낸다.⁽¹³⁾

2.2.2 검증 실험 결과

Fig. 5는 식 (1)을 이용한 해석적 결과와 실험을 통해 얻어진 결과를 비교한 그림이다. 1.735mm, 1.024mm, 581μm, 310μm 네 종류의 원형관 모두 실험적 결과와 해석적 결과와의 차이는 1.56% 이내로 잘 일치함을 알 수 있다. 식 (4)를 사용한 압력강하 측정오차는 1.735mm 관의 경우 1.56%, 1.024mm, 581μm, 310μm 관의 경우는 각각 0.53%, 0.88%, 0.49% 이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 알루미나 나노유체의 압력 강하 특성

본 연구에서는 부피비 0.01%~0.3%로 제작된 알루미나(Al_2O_3) 나노유체를 사용하여 관의 내부 지름이 1.735mm, 1.024mm, 581μm, 310μm 인 원형관에서의 압력 강하 특성을 실험적으로 연구하였다.

Einstein Model⁽¹⁰⁾

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{BF}} = 1 + 2.5f \quad (0 < f < 0.01) \quad (5)$$

식 (5)는 Einstein 모델을 나타낸 것이다. 여기서, μ_{eff} , μ_{BF} , f 는 각각 나노유체의 유효점성계수, 기본 유체(DI Water)의 점성계수, 그리고 부피비를 나타낸다. Einstein 모델은 부피비 1% 미만에서의 점성계수를 예측할 수 있는 관계식으로 알려져 있다.⁽¹⁴⁾ 본 연구에 사용된 나노유체의 부피비도 1%

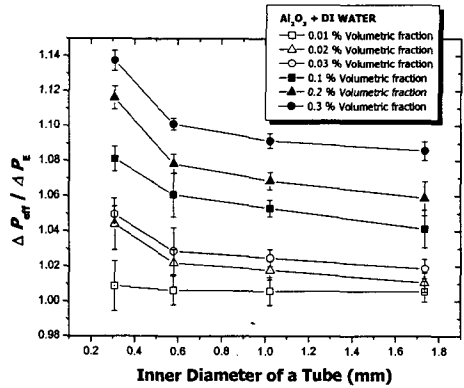


Fig. 6 Ratio of the effective pressure drop obtained from experimental results to that calculated by equation (1) with Einstein model

미만이므로, Einstein 모델을 이용하여 나노유체의 점성계수를 예측해 보았다. Einstein 모델을 적용시켜 얻은 점성계수를 식 (1)에 적용시킨 수치를 압력강하에 대한 해석적인 결과로 사용하였으며, 해석적 결과와 실험적 결과를 비교해 보았다.

$$\frac{(\Delta P_{eff} / L)}{(\Delta P_E / L)} = \frac{\Delta P_{eff}}{\Delta P_E} \quad (6)$$

식 (6)은 실험적 결과와 해석적 결과의 압력강하 비(Ratio)를 표현해 주는 수식이다. 여기서, ΔP_{eff} , ΔP_E , L 은 각각 나노유체를 사용하여 얻은 실험적인 압력강하, Einstein 모델을 사용하여 얻은 해석적인 압력강하, 실험에 사용된 원형관의 전체 길이를 의미한다. Fig. 6은 식 (6)을 적용시켜 구한 부피비와 원형관의 내부직경 변화에 따른 Al_2O_3+DI Water 나노유체의 압력강하 변화를 나타낸 것이다. 식 (4)를 이용하여 구한 각각의 부피비와 원형관에서의 압력강하 측정오차는 0.33%~1.45%였으며, 이는 Fig. 6에 Uncertainty Bar를 사용하여 나타내었다. 또한, 압력강하 실험은 $26 \pm 1.2^\circ C$ 의 온도범위에서 수행되었다.

3.1.1 부피비 변화에 따른 압력강하

부피비 변화에 따른 Al_2O_3+DI Water 나노유체의 압력강하 결과를 고찰하면 다음과 같다. 1.735mm, 1.024mm, 581μm, 310μm의 내부직경을 지나는 원형관들에서 부피비 0.01%일 경우는 실험결과와 Einstein 모델을 이용한 해석적 결과의 차이가 0.55%~0.86%로 잘 일치하는 현상을 나타낸다. 하지만 부피비가 0.1% 이상인 경우를 살펴보면, 1.735mm, 1.024mm, 581μm의 내부직경을 지나는

원형관들에서 해석적 결과와 실험결과는 4~10% 정도의 차이를 보임을 알 수 있다. 특히, 내부직경이 310 μm 인 원형관에서는 부피비 0.1%일 경우, 실험결과와 Einstein 모델을 이용하여 얻은 해석적 결과와의 차이가 8.1%를 나타내며, 부피비 0.3%에서는 실험적 결과가 해석적 결과보다 약 13.7% 증가한 것을 알 수 있다. 즉, 부피비 0.01%의 경우를 제외하고, 부피비가 증가 할수록 Einstein 모델을 이용하여 얻은 해석적 결과와 실험결과의 차이는 증가하는 것을 알 수 있다.

3.1.2 내부직경 변화에 따른 압력강하

원형관의 내부직경 변화에 따른 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI Water}$ 나노유체의 압력강하 결과를 고찰하면 다음과 같다. 부피비 0.01%의 경우는 내부직경 변화에 따른 압력강하 변화가 거의 일어나지 않는 현상을 관측할 수 있다. 하지만, 부피비 0.1%의 경우, 1.735mm의 내부직경을 지니는 원형관의 실험적 압력강하 결과는 해석적 압력강하 결과보다 약 4.13% 높게 나타나며, 1.024mm의 경우는 5.30%, 581 μm 경우는 6.07% 정도로 원형관 내부직경이 작아지면서 실험적 결과와 해석적 결과의 차이가 상대적으로 커지는 것을 알 수 있다. 특히, 내부직경 310 μm 의 마이크로 원형관에서는 해석적 압력강하 결과보다 8.09% 상대적으로 급격히 압력강하가 증가함을 실험적으로 알 수 있다.

이상의 실험결과를 살펴본 결과, Einstein 모델을 적용시켜 얻은 점성계수를 사용하여 계산된 압력강하의 해석적 결과는, 부피비 0.01%의 경우를 제외하고는 실험적 결과와는 일치하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 마이크로 크기의 내부직경을 지니는 원형관에서의 압력강하는 일반적인 관에서의 압력강하보다 크게 나타난다는 사실도 알 수 있었다. 실험결과 및 기존 Pak and Cho⁽⁸⁾의 실험결과를 참조하여 대류 열전달 특성까지 고려한다면, 압력강하 특성에 많은 영향을 미치지 않으면서, 열전달 특성을 향상시킬 수 있는 방법으로 1mm 이상의 직경을 지니는 장치에서, 부피비 0.1% 이하의 알루미늄 나노유체를 냉각유체로 사용하는 것이 타당함을 예측할 수 있다.

3.2 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수

실험을 통해서, Einstein 모델을 적용시킨 점성계수를 사용한 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI Water}$ 나노유체의 압력강하 특성은 실험에서 얻은 압력강하 특성과는 일치하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 마이크로 크기의 내부직경을 지니는 원형관에서의 압력강하는 일반 크기의 내부직경을 가지는 원형관에서의 압력강하보다 크게 나타난다는 사실을 관측할 수 있었다.

따라서, 부피비와 원형관의 내부직경 변화가 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI Water}$ 나노유체의 유효 점성계수에 주는 영향을 고찰해 보았다.

일반적인 원형관 내에서 층류유동이고, Entry Length 효과가 없을 경우의 압력 강하 특성은 식 (1)과 같으며, 식 (1)에 의해 다음과 같이 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수를 표현할 수 있다.⁽¹⁵⁾

$$\mu_{eff} = \frac{D^2}{32u} \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \quad (7)$$

여기서 P , D , u 그리고 μ_{eff} 는 각각 압력, 원형관의 지름, 평균 유속, 그리고 나노유체의 유효 점성계수(Effective Viscosity)를 의미한다. 실험을 통해 얻은 압력 강하 결과와 평균유속, 그리고 관의 내부직경을 식 (7)에 적용하여 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI Water}$ 나노유체의 유효 점성계수를 얻을 수 있었으며, 그 결과를 Einstein 모델로 예측한 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI Water}$ 나노유체의 점성계수와 비교 및 분석해 보았다.

Fig. 7은 부피비의 증가에 따른 $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI Water}$ 나노유체의 유효 점성계수와 물의 점성계수 비(Ratio)의 변화를 나타낸 그림이다. 또한, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI Water}$ 나노유체의 유효 점성계수를 예측하기 위해 기존에 사용되었던 Einstein 모델의 결과도 보여주고 있다.

본 실험에 사용된 부피비 0.01%, 0.02%, 0.03%, 0.1%, 0.2%, 0.3% 범위에서, Einstein 모델에 의해 예측된 알루미늄 나노유체의 유효 점성계수는 물의 점성계수와 1% 미만의 차이 안에서 증가하는 결과를 예측하고 있다. 실험결과를 살펴보면, $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI Water}$ 나노유체의 유효 점성계수에 대한 물의 점성계수 비(Ratio)는 부피비 0.01%에서는 내부직경 변화에 관계없이 1% 미만으로 잘 일치하였지만, 부피비 0.3%에서는 9.4%~14.6% 증가되었음을 알

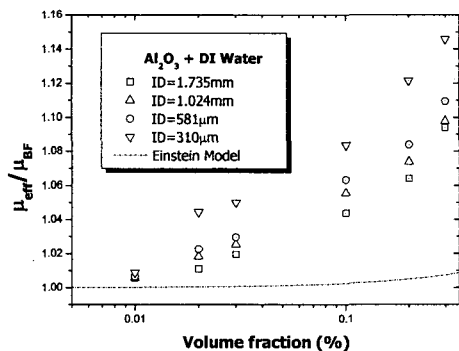


Fig. 7 Effect of volume fraction on the ratio of the effective viscosity of $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{DI water}$ nanofluids to that of base fluid

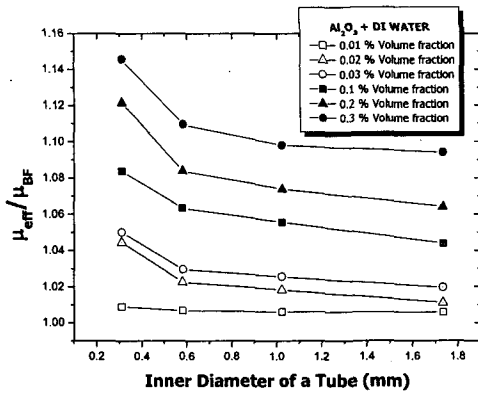


Fig. 8 Effect of inner diameter of a tube on the ratio of the effective viscosity of Al_2O_3 +DI water nanofluids to that of base fluid

수 있다. 따라서, 부피비 0.01% 이상의 Al_2O_3 +DI Water 나노유체의 유효 점성계수는 Einstein 모델로 예측할 수 없다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 은 실험에 사용된 원형관의 내부직경 변화에 따른 알루미나 나노유체의 유효 점성계수와 물의 점성계수 비(Ratio)의 관계를 나타낸 그림이다. 실험결과에 의하면, 알루미나 나노유체의 유효 점성계수는 유체가 지나가는 관의 내부직경에도 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다. 내부직경 변화에 따른 알루미나 나노유체의 유효 점성계수와 물의 점성계수 비(Ratio)의 관계를 살펴보자. 부피비가 0.01%인 경우에는 관의 내부직경에 따른 변화는 거의 없었다. 하지만, 부피비 0.1%인 경우, 내부직경이 1.735mm 인 원형관에서는 알루미나 나노유체의 유효 점성계수가 물의 점성계수보다 4.4% 높게 측정되었지만, 마이크로 크기의 내부직경을 갖는 310 μm 원형관의 경우는 8.4% 증가된 것을 알 수 있다. 다른 부피비의 경우에서도 이와 같은 현상을 보이고 있다.

그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 나노입자가 지닌 관성력(Inertia), Brownian Diffusion, Thermophoresis 등의 특성들에 의해 유체와 나노입자가 혼합된 상태로 흐르는 관에서는 유체와 나노입자 사이에 속도차가 발생하는 것으로 보고되고 있으며, 이런 현상을 유체와 나노입자 사이의 Slip 현상이라고 한다.⁽¹⁶⁻¹⁸⁾ 이런 Slip 현상은 유체가 지나가는 영역인 관의 지름에 대한 Slip 이 직접 발생하는 나노입자 주위의 크기, 즉, 나노입자 크기의 비(Ratio)에 관계가 있을 것으로 예측되며, 이 현상은 관을 통해 흐르는 나노유체의 압력강하와 유효 점성계수에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 본 연구에 사용된 알루미나 나노입자의 크기는 편

차 $\pm 5\text{nm}$ 이고 평균크기 30nm 로 비교적 균일하므로, 관의 지름이 나노유체의 압력강하와 유효 점성계수에 영향을 미친 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미나 나노입자와 기본유체와의 부피비가 0.01%~0.3%이 되도록 제작된 Al_2O_3 +DI Water 나노유체를 사용하여 내경이 1.735mm, 1.024mm, 581 μm , 310 μm 인 원형관에서의 압력강하 특성 및 알루미나 나노유체의 유효 점성계수를 실험적으로 얻었으며, Einstein 모델을 이용하여 해석적으로 얻은 압력강하 특성 및 유효 점성계수를 실험 결과와 비교해 보았다.

그 결과, Al_2O_3 +DI Water 나노유체의 압력강하 특성에 영향을 미치는 유효 점성계수는 부피비 0.01%에서는 물의 점성계수와 1% 미만의 차이를 보이며 잘 일치하는 것을 알 수 있었으나, 부피비 0.02%~0.3% 에서는 기본유체인 물의 점성계수보다 약 2.4%~11.2% 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 부피비 0.01%에서는 내부직경 변화에 따른 알루미나 나노유체의 유효 점성계수 변화가 거의 일어나지 않았으나, 부피비 0.1%에서는, 관의 내부 직경이 1.735mm 일 경우는 물의 점성계수보다 약 4.4%, 1.024mm, 581 μm , 310 μm 인 경우는 각각 5.6%, 6.3%, 8.4% 정도 증가한 유효 점성계수를 나타냄을 알 수 있었다. 관의 내부직경 변화에 따라 알루미나 나노유체의 유효 점성계수가 변하는 이유를 다음과 같이 생각하였다. 나노유체가 흐르는 관에서는 기본유체와 나노입자 사이에 속도차가 발생한다고 보고된 바 있으며, 이러한 속도차는 유체가 지나가는 영역인 관의 지름에 대한 나노입자의 크기 비(Ratio)에 관계가 있다고 예측하였다. 본 연구에서는 나노입자의 크기가 균일하므로, 관의 지름만을 기본유체와 나노입자의 속도차에 영향을 주는 요소로 보았다. 따라서, 관의 지름이 알루미나 나노유체의 압력강하 특성 및 유효 점성계수에 영향을 줄 수 있다고 생각하였다.

실험결과들을 종합해 볼 때, 부피비 1% 미만의 나노유체의 유효 점성계수를 예측하기 위해 사용되고 있는 기존의 방법인 Einstein 모델은, 1% 미만의 부피비를 지니는 Al_2O_3 +DI Water 나노유체의 점성계수를 예측하기에는 부적절함을 알 수 있었다. 또한, 대류 열전달 특성까지 고려하였을 경우, 알루미나 나노유체를 냉각유체로 사용하기 위해서는 냉각장치의 특성길이가 1mm 이상인 조건에서, 부피비 0.1% 이하로 제작된 알루미나 나노유체를 사용하는 것이 압력강하 특성에 영향을 거의 받지

않으면서 열전달을 향상시키는 방법임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문은 2004 년 한국학술진흥재단의 지원 과제인 신진 연구과제 (KRF-2004-003-D00047)의 지원에 의하여 연구 되었음을 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) Jang, S. P., 2004, "Thermal Conductivities of Nanofluids," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, pp. 968~975.
- (3) Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Yu, W. and Thompson, L. J., 2001, "Anomalous Increased Effective Thermal Conductivity of Ethylene Glycol-based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, pp. 718~720.
- (4) Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E. and Grulke, E. A., 2001, "Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 2252~2254.
- (5) Das, S. K., Putra, N., Thiesem, P. and Roetzel, W., 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.
- (6) 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.
- (7) Putra, N., Roetzel, W. and Das, S. K. 2003, "Natural Convection of Nano-fluids," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 39, pp. 775~784.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) Einstein, A., 1956, "Investigation on the Theory of Brownian Movement," *Dover, New York*.
- (11) Das, S. K., Putra, N. and Roetzel, W., 2003, "Pool Boiling Characteristics of Nano-fluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 851~861.
- (12) Blevins, R. D., 1984, "Applied Fluid Dynamics Handbook," *Van Nostrand Reinhold*.
- (13) Abernethy, R. B. and Benedict, R. P., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.
- (14) Dávalos Orozco L. A. and del Castillo L. F., 2002, "Hydrodynamic Behavior of Suspensions of Polar Particles," *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*, Vol. 4, *Marcel Dekker, New York*, pp. 2375~2396.
- (15) Schlichting, H., 1979, "Boundary Layer Theory," 7th Ed., *McGraw-Hill Part B*.
- (16) Xuan, Y. and Roetzel, W., 2000, "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids," *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701~3707.
- (17) Bott, T. R., 1995, "Fouling of Heat Exchangers," *Elsevier*.
- (18) Whitmore, P. J. and Meisen, A., 1977, "Estimation of Thermo- and Diffusiophoretic Particle Deposition," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 55, pp. 279~285.