

< 논문 >

알루미나 나노유체의 유동 및 대류 열전달 특성

황교식* · 이지환* · 이병호* · 장석필†

(2006년 6월 20일 접수, 2006년 11월 6일 심사완료)

Fluid Flow and Convective Heat Transfer Characteristics of Al₂O₃ Nanofluids

Kyo Sik Hwang, Ji-Hwan Lee, Byeong Ho Lee and Seok Pil Jang

Key Words : Al₂O₃ Nanoparticles Suspended in Water(알루미나-물 나노유체), Heat Transfer Coefficient (열전달 계수), Pressure Drop(압력강하)

Abstract

In this paper, convective heat transfer and flow characteristics of Al₂O₃ nanoparticles suspended in water flowing through uniformly heated tubes are experimentally investigated under laminar flow regime. The heat transfer coefficient and the pressure drop of nanoparticles suspended in water are experimentally presented according to the pumping power. In addition, the heat transfer coefficient and the pressure drop of Al₂O₃ nanoparticles suspended in water are compared with those of pure water under the fixed pumping power. It is shown that the heat transfer coefficient of Al₂O₃ nanofluids with 0.1 % volume fraction is enhanced by about 12% although the increment of the pressure drop of those is 4% compared with those of pure water.

기호설명

- c_p : 비열 [kJ/kgK]
- D : 관의 직경 [m]
- f : 부피비
- h : 대류 열전달 계수 [W/m²K]
- L : 관의 길이 [m]
- \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
- P : 관 표면의 둘레길이 [m]
- ΔP : 압력강하 [Pa]
- q'' : 열유속 [W/m²]
- T_m : 평균온도 [°C]
- T_s : 관의 표면온도 [°C]
- u : 유속 [m/s]

그리스문자

- μ : 점성계수 [Nsec/m²]

하첨자

- BF : Base 유체
- eff : 나노유체

1. 서론

지난 수년 동안 나노유체의 열적 특성에 관한 실험 및 이론적인 연구가 많은 과학자들에 의해서 이루어졌으며 특히 나노유체의 열전도도가 일반유체보다 우수하다는 사실이 보고되어왔다.⁽¹⁻⁶⁾ 여기서 나노유체란 일반적인 유체에 나노입자를 분산(Dispersion), 부유(Suspension)시켜 제작한 유체이다. 특히 실험적으로 발견된 나노유체의 열적 특성 중 대표적인 내용을 정리하면 다음 두 가지를 제시할 수 있다. 첫 번째는 일반 유체의 부피에 대한 소량의 부피비를 가지는 나노입자를 일반 유체에 첨가하더라도 나노유체의 열전도도가 일반유체에 비해 10% 정도 향상된다는 것이다.⁽¹⁻⁹⁾ 두 번째는 나노유체의 대류 열전달 실험 결과에 의하면 층류유동일 때 동일 Reynolds 수에서 일반 유체와 비교할 경우 약 45%의 대류 열전달 성능이 증가하고 관내의 입구영역에서 약 47%까지 증가되는 것으로

† 책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
E-mail : spjang@hau.ac.kr
TEL : (02)300-0112 FAX : (02)3158-2191

* 회원, 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

로 보고되고 있다.⁽⁹⁻¹²⁾ 이런 특징은 나노유체가 새로운 형태의 열 수송 유체로 대두될 것이라는 의견을 뒷받침 해주는 주된 연구 결과이다.

본 연구에서는 물에 알루미나(Al_2O_3) 나노입자를 분산시킨 알루미나 나노유체를 사용하여 원형관에서의 압력강하 특성 및 대류 열전달 특성을 실험적으로 알아보았다. 알루미나 나노유체를 사용한 이유는 알루미나(Al_2O_3) 나노입자가 물에 잘 분산되는 특성을 지니기 때문에 제작이 수월하며, 다른 나노입자들 보다 가격이 저렴하다는 경제적인 입장에서 일반적으로 많이 사용되는 나노유체이기 때문이다.⁽⁷⁾ 본 실험에서는 Al_2O_3 +DI Water 나노유체의 부피비 0.1%에서의 압력강하 특성 및 대류 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다. 1% 미만의 부피비를 가지는 나노유체의 유효 점성계수를 예측하기 위해 기존에 사용되고 있는 Einstein 모델⁽¹²⁾을 적용시켜 해석적으로 압력강하를 계산하였으며, 이 결과를 실험결과와 비교해 보았다. 대류 열전달 계수는 관의 표면 온도와 관 벽면에 가해주는 열량 및 관내로 유입되는 알루미나 나노유체의 입구온도를 실험적으로 측정하고 일정 열유속 조건에서의 관내 대류 열전달 특성을 조사해 보았다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치 및 방법

Fig. 1 은 관내의 유동 특성 및 대류 열전달 특성을 실험하기 위한 장치를 보여준다. 본 연구에서는 펌핑시스템을 사용하여 유체를 저장용기(Reservoir)로 이송한 후, 저장용기로부터 나노유체의 유동을 유발시켰다. 유체가 흐르는 Stainless Steel 관에 AC Power Supply 를 직접 연결하여 5000W 의 열을 가하여 증으로써 관 벽면으로부터 유체로의 열전달이 일어나게 하였고, 관으로부터

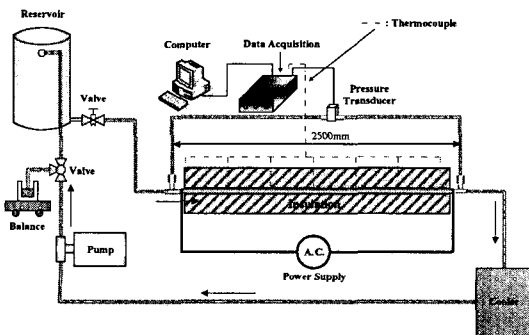


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

외부로의 열손실을 줄이기 위하여 관 주위에 10cm 의 두께로 단열재를 감쌌다. 관을 통해 흐른 가열된 유체는 Cooler 를 통해 냉각된 후, 저장용기로 다시 돌아간다. 또한, 펌핑시스템의 미소 맥동이 원형관의 유동 현상에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 관에서 펌프로 이어지는 튜브의 길이를 충분히 길게 설계하였으며 길이는 약 10 미터로 하였다.

Test Section 에서 앞 단과 뒤 단의 압력 강하는 VALIDYNE 사의 압력 변환기(Pressure Transducer)인 DP10-34 센서와 CD23 Digital Transducer 를 사용하여 측정하였다. DP10 Series 의 Accuracy 는 $\pm 0.5\%$ 이고, DP10-34 센서의 Full Scale Range 는 22kPa 이다. 관 내부에 흐르는 유량을 0.4mL/min 부터 21mL/min 까지 조절할 수 있는 Cole-Parmer 사의 Masterflex HV-77921-40 펌프를 사용하였다. 열전대는 OMEGA 사의 T-type 열전대를 사용하였으며 열전대는 관의 입구에서부터 400 mm 간격으로 관 벽면에 납땜을 통해서 부착하였다. 실험에 사용된 원형 관의 내경(Inner Diameter)은 1.812mm 이며 재질은 Stainless Steel 이다. 나노유체는 나노입자의 부피비가 0.1%가 되도록 Deionized Water(DI Water)를 기본 유체로 사용하여 알루미나(Al_2O_3) 나노입자를 첨가하는 방식으로 제작하였고, 제작된 나노유체는 입자가 잘 분산 되도록 제작 직후 초음파 세척기에서 30 시간 동안 에너지를 가하여 주는 2 단계 방법(2 Step Method)을 사용하였다. 알루미나(Al_2O_3) 나노입자는 Nanotechnologies 사에서 제조되었으며 크기는 $30 \pm 5nm$ 이고, Fig. 2 는 실험에 사용된 0.1% 부피비의 Al_2O_3 + DI Water 나노유체이다.

2.2 실험 장치 검증 실험

실험장치의 정확성을 검증하기 위하여, 알루미나 나노유체로 실험하기 전에 물을 이용하여 압력

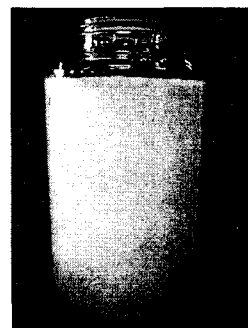


Fig. 2 Al_2O_3 + DI water nanofluids (0.1 Vol. %)

강하 및 대류 열전달 계수를 실험적으로 측정해 보았다.

압력강하 측정실험 결과는 원형 관내의 층류 유동이며 완전 발달 유동 가정으로 해석되었다. 그 이유는 최대 Reynolds 수가 752 이며 Entry Length 가 관내 전체 길이의 최대 3.5 %미만이기 때문이다. 식 (1)은 압력강하 측정에 사용된 식을 나타낸 것이다.

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

여기서, ΔP_{tube} , u , L , μ , D 는 각각 원형관 내에서의 압력강하, 원형관 내부에서의 속도, 원형관의 길이, 유체의 점성계수, 원형관의 직경을 나타낸다. Fig. 3 은 식 (1)을 이용한 해석적 결과와 실험을 통해 얻어진 결과를 비교한 그림이다. 본 실험에서 사용한 원형관에서 얻은 물의 압력 강하량과 해석적 결과의 차이는 1% 이내로 잘 일치함을 보여주고 있다.

원형 관내에서의 대류 열전달 계수는 다음과 같이 구할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$h(x) = q'' / (T_s(x) - T_m(x)) \quad (2)$$

여기서, $T_m(x)$, $T_s(x)$, 그리고 $h(x)$ 는 각각 유체의 Bulk Mean 온도, 관 표면 온도, 그리고, 대류 열전달 계수이다. 표면 열유속이 일정하다는 조건과 완전 발달된 조건에서의 원형 관내 Bulk Mean 온도는 에너지 평형을 적용해서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T_m(x) = T_{m,i} + \frac{q''_s P}{m c_p} x \quad (3)$$

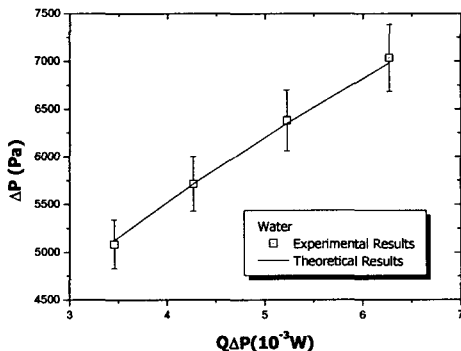


Fig. 3 Comparison between analytical results and experimental results

여기서, $T_{m,i}$, P , \dot{m} , 그리고 c_p 는 각각 유체의 입구 온도, 원형 관 표면의 둘레 길이, 질량 유량, 그리고 비열이다. 관 벽면에 가해주는 열유속, 나노유체의 입구온도 및 질량유량을 측정하여 나노유체의 Bulk Mean 온도를 얻고 그 결과와 식 (2)를 이용하여 열전달 계수를 측정하였다. 본 실험에서 관 벽면에 가해주는 열유속의 손실량은 약 9%이내이며 입구길이에 해당하는 부분을 제외하고, 관의 전 부분에서 관 표면 온도가 일정하게 증가하는 현상을 Fig. 4 에 나타내었다. 이는 식 (2)에서의 가정인 원형관 주위에서의 열유속이 일정하다는 사실을 실험적으로 보여준 결과이다. Fig. 5 는 식 (2), (3)을 적용하여 측정된 원형관내에서의 물의 대류 열전달 계수의 실험 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서 측정된 것과 같이, 층류 유동일 경우에는 관의 입구길이에 해당하는 부분을 제외한 나머지 열전대가 위치한 부분에서 각각 5% 미만의 오차를 보이며 Fig. 5 에서 보듯이 대류 열전달 계수가 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

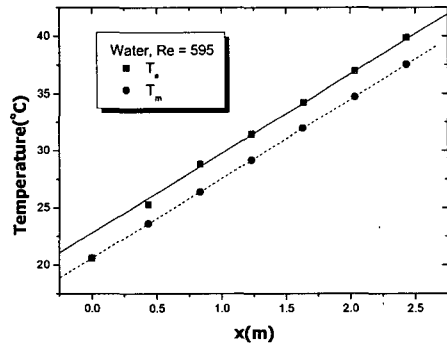


Fig. 4 Wall temperature and bulk mean temperature of water flowing through a circular tube with constant heat flux

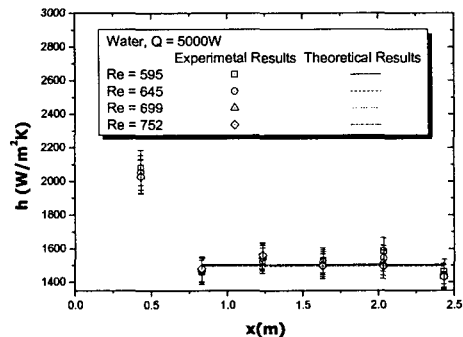


Fig. 5 Heat transfer coefficients of water flowing through a circular tube with constant heat flux

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 알루미나 나노유체의 압력 강하 특성

본 연구에서는 부피비 0.1%로 제작된 알루미나 나노유체를 사용하여 관의 내부 지름이 1.812mm 인 원형관에서 압력 강하 특성을 실험적으로 연구하였다.

Einstein Model⁽¹³⁾

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{BF}} = 1 + 2.5f \quad (0 < f < 0.01) \quad (4)$$

식 (4)는 Einstein 모델⁽¹³⁾을 나타낸 것이다. 여기서 μ_{eff} , μ_{BF} , f , 는 각각 나노유체의 유효점성계수, 기본 유체(DI Water)의 점성계수, 그리고 부피비를 나타낸다. Einstein 모델⁽¹³⁾은 부피비 1% 미만에서의 점성계수를 예측할 수 있는 관계식으로 알려져 있다.^(13, 15) 본 연구에 사용된 나노유체의 부피비도 1% 미만이므로, Einstein 모델을 이용하여 나노유체의 점성계수를 예측해 보았다. Einstein 모델을 적용시켜 얻은 점성계수를 식 (1)에 적용시킨 해석적인 결과와 실험적 결과를 비교해 보았다.

$$\frac{(\Delta P_{eff} / L)}{(\Delta P_E / L)} = \frac{\Delta P_{eff}}{\Delta P_E} \quad (5)$$

식 (5)는 실험적 결과와 해석적 결과의 압력강하비(Ratio)를 표현해 주는 수식이다. 여기서, ΔP_{eff} , ΔP_E , L 은 각각 나노유체를 사용하여 얻은 실험적인 압력강하, Einstein 모델을 사용하여 얻은 해석적인 압력강하, 원형관의 전체길이를 의미한다.

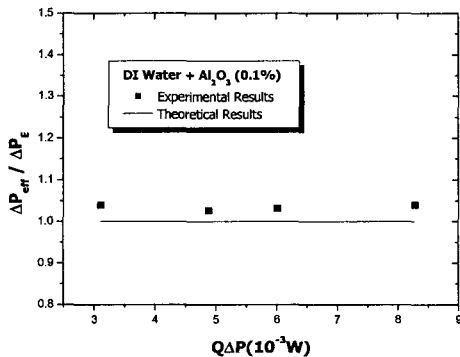


Fig. 6 Ratio of the effective pressure drop obtained from experimental results to that calculated by equation (1) with Einstein model

Fig. 6 은 식 (5)를 적용시켜 구한 부피비 0.1%의 Al₂O₃+DI Water 나노유체의 압력강하 변화를 나타낸 것이다. 부피비 0.1%인 Al₂O₃+DI Water 나노유체의 경우는 실험결과가 Einstein 모델을 이용한 해석적 결과보다 약 4%정도 증가하여 나타나는 현상을 보인다. 이는 Lee and Jang⁽¹⁶⁾의 결과와 유사한 경향을 나타내고 있다.

3.2 알루미나 나노유체의 대류 열전달 계수

본 연구에서는 부피비 0.1%로 제작된 알루미나 나노유체를 사용하여 관의 내부 지름이 1.812mm 인 일정 열유속 조건을 가지는 원형관에서 대류 열전달 실험을 수행하였다. Fig. 7 은 실험을 통해 측정된 펌핑파워에 따른 관 벽면의 최대온도와 유체의 입구온도의 차이를 나타내는 것이며 동일 열유속 조건과 동일 펌핑파워 조건에서 물에 비해 알루미나 나노유체의 온도차가 약 1.5°C 낮게 측정되는 것을 볼 수 있다. 이는 알루미나 나노유체를 사용했을 경우 물에 사용했을 경우보다 대류 열전달이 잘 일어난다는 사실을 입증하는 것이다. Fig. 8 은 실험적으로 구한 대류 열전달 계수를 펌핑파워에 따른 변화를 보여주고 있다. 본 실험은 층류 유동 실험이므로 펌핑파워와 관계없이 거의 일정한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. Fig. 8 에서 보듯이 0.1% 부피비의 알루미나 나노유체는 물보다 대류 열전달 계수가 약 12% 상승되어 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 나노유체의 대류 열전달 특성이 일반유체에 비해 우수하다는 것을 입증하는 결과이며, 일반유체에 소량의 나노입자를 첨가한 나노유체가 차세대 냉각유체로 사용될 가능성을 보여주는 결과라고 사료된다.

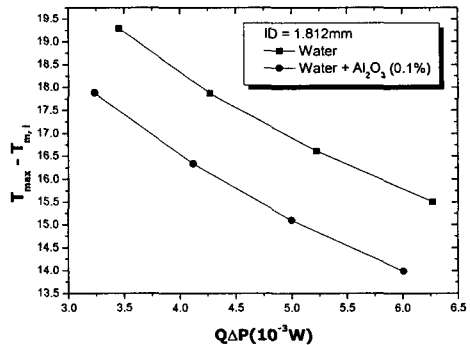


Fig. 7 Temperature difference between the maximum temperature at the tube wall and the inlet temperature of fluid

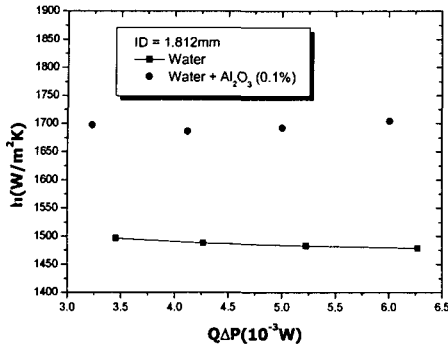


Fig. 8 Heat transfer coefficient of Al₂O₃ nanofluids flowing through a circular tube with constant heat flux

4. 결론

본 연구에서는 기본유체에 대한 나노입자의 부피비가 0.1%가 되도록 제작된 Al₂O₃+ DI Water 나노유체를 사용하여 내경이 1.812mm 인 원형관에서 압력강하 특성 및 대류 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다.

그 결과, Al₂O₃+DI Water 나노유체의 실험적 압력강하는 Einstein 모델을 적용시킨 해석적 결과에 비해 약 4% 증가하여 나타나는 현상을 관측할 수 있었으며, 이는 Lee and Jang⁽¹⁶⁾의 결과와 유사한 경향을 보이는 것이었다. 또한, 본 실험에 사용된 0.1% 부피비의 알루미나 나노유체는 물보다 대류 열전달 계수가 약 12% 상승되어 나타나는 것을 실험적으로 관측하였다. 이는 나노유체의 대류 열전달 특성이 일반유체에 비해 우수하다는 것을 입증하는 결과이다. 실험결과들을 종합해 볼 때, 일반유체에 소량의 나노입자를 첨가한(부피비 1% 미만) 나노유체는 열적 성능이 일반유체에 비해 우수하기 때문에, 차세대 냉각유체로 사용되기에 적절함을 예측할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2004 년 한국항공대학교 교비 지원 연구비에 의하여 지원된 연구 결과이며, 이에 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., Thiesen, 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) 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.
 (9) 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.
 (10) 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.
 (11) 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.
 (12) Yang, Y. et al., 2005, "Heat Transfer Properties of Nanoparticle-in-fluid Dispersions(nanofluids) in Laminar Flow," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1107~1116.
 (13) Einstein, A., 1956, "Investigation on the Theory of Brownian Movement," *Dover, New York*.
 (14) Incropera, F.P. and Dewitt, D.P., 2002, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer," 5th Eds., *John Wiley & Sons*.
 (15) 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.
 (16) Lee, J. H. and Jang, S. P., 2006, "Fluid Flow Characteristics of Al₂O₃ Nanoparticles Suspended in Water," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 30, No. 6, pp. 546~552.