

은 나노유체의 미세관내 층류 유동의 압력강하 및 열전달계수에 관한 실험적 연구

권정태^{1*}, 남택훈¹, 김태완¹, 권영철²
¹호서대학교 기계공학과, ²선문대학교 기계공학과

An Experimental Study on Pressure Drop and Heat Transfer Coefficient of Laminar Ag Nanofluid Flow in Mini-Tubes

Jeong-Tae Kwon^{1*}, Taek-Hun Nahm¹, Tae-Wan Kim¹ and Young-Chul Kwon²

¹Department of Mechanical Engineering, Hoseo University

²Department of Mechanical Engineering, Sunmoon University

요약 본 연구에서는 두 가지 종류의 미세관(외경 1/8inch, 3/16inch)을 사용하여 증류수 및 0.1vol.%, 0.3vol.%의 농도를 가지는 은 나노유체의 층류 유동 조건인 Re수 500~2,500의 범위에서 압력강하 및 나노유체의 열전달 계수를 실험적으로 구하였다. 압력강하의 경우 나노유체의 압력강하는 증류수에 비해 최대 21% 증가하였다. 대류열전달계수의 경우 나노유체 0.1vol%의 경우 증류수에 비해 1/8inch관에서는 약 3~42%, 3/16inch관에서는 약 3~69%의 향상이 있었다. 또한, 0.3vol%의 경우 1/8inch관에서는 약 35~65%, 3/16inch관에서는 약 62~125%의 향상이 있는 것을 알 수 있었다. 이상의 결과에서 은나노유체를 기계 및 전자 시스템의 냉각제로 사용할 경우 증류수에 비해 매우 우수한 냉각 성능을 보일 것으로 판단된다.

Abstract This study presents the heat transfer and pressure drop characteristics of Ag nanofluid in mini-tubes(outer diameters of 1/8inch, 3/16inch). Experiments were performed for Reynolds numbers ranged from 500 to 2,500 and nanofluid concentrations of 0.1 and 0.3vol.%. The pressure drop of nanofluid flow increased by max. 21% compared with that of distilled water. The heat transfer coefficients of the nanofluid of 0.1 vol.% enhanced 3~42% for 1/8inch tube, and 3~69% for 3/16inch tube. Also, the heat transfer coefficients of the nanofluid of 0.3 vol.% enhanced 35~65% for 1/8inch tube, and 62~125% for 3/16inch tube. From the results Ag nanofluid can be a better candidate as a coolant than distilled water when using in mechanical and/or electronic systems.

Key Words : Nanofluid, Heat transfer, Laminar flow, Mini-tubes

1. 서론

기계 및 전자 기술의 발달로 인하여 각종 기계 및 전자 장비들이 고효율화 및 소형화되어 가고 있다. 이러한 고효율 소형·집적화된 장비들이 최적의 성능을 발휘하기 위하여는 반드시 적절한 냉각기술이 필요하다. 이 발열을 냉각시키기 위한 방법으로는 공랭식 및 수랭식 등을 들 수 있는데 공랭식의 경우는 그 동안 주로 방열판

의 형상과 냉각팬의 성능에 의존해 왔으나 공기의 열유동 특성상 한계가 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 수랭식 냉각방법을 고려하여 물, 오일, 에틸렌글리콜 등과 같은 열전달 유체의 열전달을 이용하고 있다. 하지만 이러한 유체들도 고성능 발열 장비의 요구냉각성능이 미치지 못한 경우가 많다. 따라서 보다 더 열전달 성능이 우수한 전도율의 유체가 필요하게 되었다.

점차 발달하는 산업화에 따른 요구에 의해, 고기능성

*교신저자 : 권정태(jtkwon@hoseo.edu)

접수일 09년 11월 13일

수정일 09년 11월 30일

게재확정일 09년 12월 16일

의 열전달 유체의 개발이 지난 수 십 년간 많은 연구와 함께 열전달 물질의 주요 연구가 되었다. 그 중 하나로 열전도율이 높은 물질인 금속을 미세한 입자로 만들어 유체와 혼합한 용액의 열전달 성능에 관한 연구가 많이 수행되어 왔다. 이러한 연구들을 보면 마이크로미터 혹은 나노미터 사이즈의 입자를 분산시킨 유체를 사용하였는데, 실험 결과를 보면 열전달이 향상되었음을 볼 수 있다. 그러나 유체의 분산 안정성, 입자에 의한 막힘과 착상 현상으로 인한 성능 하락등과 같은 문제가 있다. 최근 나노 기술의 발달로 인해 금속 입자를 수~수십 나노미터로 제조하는 것이 가능해졌다. 이러한 나노 입자를 유체에 분산시켰을 때 기존 유체에 비해 열전도율이 향상되는 결과를 볼 수 있다. 나노유체의 총체적인 열전달 현상을 이해하기 위해서는 나노유체의 열전도율뿐만 아니라 대류에 대한 연구도 병행 되어야 한다. 국내외에서 자연대류와 강제대류에 대해서 연구가 이루어지고 있다. 하지만 나노유체의 대류 특성에 대한 연구는 매우 제한적이며 활발하지 못하기 때문에 미세관에서의 관의 직경이나 유량의 범위가 제한되어 나노유체의 활용에 있어 더욱 넓은 범위의 정량적인 데이터가 요구되는 실정이다.[1-3] 현재까지는 주로 알루미늄(Al_2O_3)을 유체에 분산한 연구 [2, 3]를 통해 나노유체의 열전도도는 0.1%에서 대략 10%향상, 매우 제한된 범위의 층류유동(Re 수 100이하)의 열전달계수는 최대 12%정도 향상된다고 보고되고 있다.

본 연구에서는 외경 1/8, 3/16inch 미세관에서 은(Ag) 나노 입자를 물에 분산시킨 나노유체를 적용하여 보다 넓은 범위(Re 수 500~2,500)층류영역에서의 대류열전달 계수를 측정하였다. 그리고 분산제(화학 첨가물)를 사용하지 않고 나노유체를 제조하였으며, 제조된 은 나노유체에 대한 압력강하, 열전달률, 그리고 대류 열전달 계수를 구하는 실험을 수행하였다. 한편 대류열전달계수 및 유동 특성을 실험함에 있어서 필요한 나노유체의 물성치(점성, 비열)는 기존의 상관식(모델)을 이용하여 계산하였고 밀도는 직접 부피와 질량을 측정하여 구하였다.

2. 나노유체의 특성

2.1 나노유체의 열전도율

현재 이론적으로 나노유체의 물성을 완벽하게 알아내기는 어려운 실정이다. 그래서 나노유체의 물성치에 대한 여러 가지 이론적, 실험적 공식 등이 제시되어왔다. 수많은 실험을 통해 나노유체의 열전도율을 구하기 위한 여

러 가지 모델들이 제시되어왔다. 먼저, 대표적인 모델로 Maxwell model[4]이 있다.

$$k_{eff} = \frac{k_p + 2k_b + 2(k_p - k_b)\alpha}{k_p + 2k_b - (k_p - k_b)\alpha} k_b \quad (1)$$

여기서 k_{eff} , k_b , k_p 그리고 α 는 각각 나노유체의 열전도율, Base유체의 열전도율, 나노입자의 열전도율 그리고 입자의 부피 분율을 나타낸다.

식(1)은 나노유체의 열전도율 특성을 효과적으로 분석하는 모델이다. 입자의 구형정도와 Base유체에서 나노입자의 부피 분율이 변수로 적용된다.[5]

최근에 브라운 운동에 의해 나노유체의 열전도율이 상승한다는 이론을 사용하는 모델을 제시한 Jang and Choi[6]의 공식은 식(2)로 기존 실험을 잘 예측하고 있다.

$$k_{eff} = k_b(1 - \alpha) + k_p\beta\alpha + C_1 \frac{d_b}{d_p} k_b Re_{d_{nano}}^2 Pr\alpha \quad (2)$$

여기서 $C_1 = 12$ 는 실험상수이고 d_b , d_p 는 각각 유체 분자의 평균크기, 나노입자의 지름을 나타고 Re 수는 식(3)으로 정의한다.

$$Re_{d_{nano}} = \frac{C_{R,M} d_p}{\nu} \quad (3)$$

그리고 $C_{R,M}$ 은

$$C_{R,M} = \frac{D}{l_b} = \frac{2D_o}{l_b}, \quad D_o = \frac{k_{bol} T}{3\pi\mu d_p} \quad (4)$$

로 정의된다. 여기서 D , l_b 는 각각 열수력 연성효과(hydro-dynamic coupling effect)를 고려한 Brown운동 확산(Brownian Diffusion)계수, 유체 분자의 평균 자유 경로를 나타낸다. 또한, $k_{bol} = 1.3807 \times 10^{-23} J/K$ 는 Boltzmann 상수를 의미한다.

2.2 나노유체의 점성계수, 비열 및 밀도

[표 1] Ag의 물성치

| 밀도 [kg/m^3] | 비열 [$J/kg^{\circ}C$] | 열전도율 [W/mk] |
|--------------------|---------------------------|--------------------|
| 10491 | 234 | 419 |

표 1은 본 실험에서 사용한 은 나노입자에 대한 물성치를 나타낸 것이다. 나노유체의 물성치에 대한 실험이 부족한 실정이라서 이론적으로 계산하였다.

먼저, 나노유체의 점성계수는 대부분 부피비가 1% 미만의 나노입자들을 첨가하기 때문에 거의 영향을 미치지 않을 것이라 예상이 되지만 본 논문에서는 브라운 운동 효과가 포함된 모델[7]인 식(5)을 사용하였다.

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_b} = 1 + 2.5\alpha + 6.17\alpha^2 \quad (5)$$

즉, 나노유체의 점성(μ_{eff})은 기본유체의 점성(μ_b)에 나노입자의 기본유체에 대한 체적분율(α)을 고려하여 구할 수 있다는 식이다.

나노유체의 비열은 혼합이론 (mixing theory)[8-9]로 계산하였다.

$$C_{p,eff} = C_{p,b}(1 - \alpha) + C_{p,p}\alpha \quad (6)$$

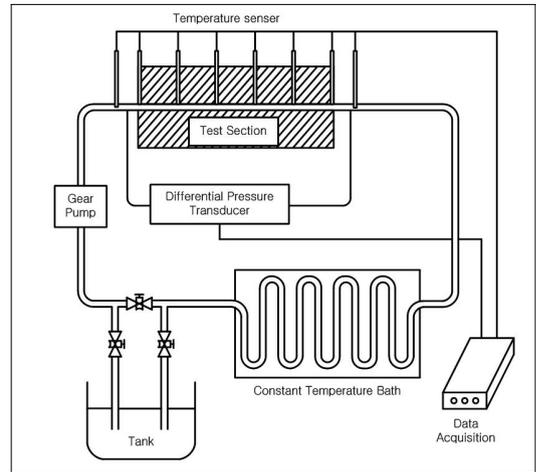
나노유체의 밀도는 식(7)과 같이 질량을 부피로 나눈 값이므로 직접 체적과 질량을 측정하여 구하였다.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

그림 1은 실험 장치의 개략도이다. 실험 장치는 항온조, 기어펌프, 열전대, 히터 및 차압변환기를 이용하였고 유체는 은 나노유체를 이용하여 실험을 하였다. 본 실험에서는 폐회로를 구성하여 기어펌프를 사용해서 유체를 유동시켰다. 유체가 흐르는 스테인리스 스틸관에 열선 히터를 사용하여 열을 가해줘 관 벽면으로부터 유체로의 열전달이 일어나게 하였고, 관 주위에 세라믹재질의 단열재를 감싸 외부로의 열손실을 최소화하였다.



[그림 1] 실험 장치 개략도

이 실험 장치는 항온수조에서 일정한 온도(22℃)로 제어된 유체를 기어펌프를 통하여 유동의 입구길이를 위한 구간을 지난 후에 시험부에 진입하게 된다. 시험부 입구에서 Pt100 온도 센서에 의해 입구 온도가 측정되고 양 끝단에서 차압계를 설치하여 압력강하를 측정하게 된다. 시험부는 열선이 감겨져 있으며 열선은 관 외부 표면에 100W의 열량을 전달하게 된다. 대류열전달계수를 구하기 위해 시험부에서 100mm 간격으로 열전대를 부착하여 관 외부의 벽면 온도를 측정하였다. 그리고 시험부를 지난 유체는 다시 항온 수조에 들어가 다시 초기 온도(22℃)로 맞춰지게 된다.

압력강하를 측정하기 위한 차압계는 Cole-Parmer사의 차압변환기를 사용하여 측정하였고 불확실성은 $\pm 0.25\%$ 이고 0~10 psid의 차압을 측정할 수 있다. 기어펌프는 60~1000 ml/min을 조절할 수 있는 Cole-Parmer사의 KH 75211-35를 사용하였다. K-type 열전대와 Pt100은 Misumi사의 제품을 사용하였고 불확실성은 $\pm 0.3K$ 이다. 스테인리스 스틸관은 STS314로 표 2에 크기를 정리하였다.

[표 2] Stainless steel 크기

| 외경[inch] | 내경[mm] | 두께[mm] |
|----------|--------|--------|
| 1/8 | 1.397 | 1.778 |
| 3/16 | 2.9845 | 1.778 |

나노유체는 부피비가 0.1, 0.3vol%가 되도록 증류수를 기본유체로 사용하여 은 나노입자를 첨가하고 초음파 분산기를 사용하여 3시간동안 에너지를 가해 주는 2단계

방법(2 Step method)을 사용하였다. 은 나노입자는 Nanotechnologies사에서 제조되었으며 크기는 평균 150nm이다.

3.2 실험결과 처리 방법

본 실험에서는 먼저 시험부 입구온도를 22℃로 유지 되도록 하였다. 그리고 측정된 출구온도와 저울로 측정한 유량을 통해 열전달률을 식(8)로 구하였다.

$$Q = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (8)$$

여기서 Q , \dot{m} , C_p , T_{in} 그리고 T_{out} 은 각각 열전달률, 질량유량, 비열, 입구 온도와 출구온도를 나타낸다.

대류열전달계수를 구하기 위해서는 관 내부의 표면 온도가 필요한데 관 내부의 온도 측정에는 많은 기술적인 어려움이 따른다. 그래서 출구 온도와 관 외부 표면 온도의 변화가 없을 때부터 1시간이 경과한 후를 정상상태라고 가정하고 관 외부 표면온도를 측정하여 관 내부 표면 온도를 계산한 다음 대류열전달계수를 구하였다. 먼저 표면 열 유속이 일정하다고 가정하면 관 내부 표면 온도는 식(9)으로부터 구할 수 있다.[10]

$$T_{i,s} = T_{o,s} - \frac{Q}{2\pi k_{tube} L} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (9)$$

여기서 $T_{i,s}$, $T_{o,s}$, k_{tube} , r_o 그리고 r_i 는 각각 관 내부 표면온도, 관 외부 표면온도, 관의 열전도율, 관 외부 반지름과 관 내부 반지름이다.

각 구간별 관내 평균 유체 온도는 에너지 평형을 적용해서 식(10)을 통해 구할 수 있다.

$$T_f(x) = T_{in} + \frac{Q}{\dot{m} C_p L} x \quad (10)$$

여기서 $T_f(x)$, L 은 각각 관내 평균 유체 온도와 관의 길이를 나타낸다.

대류열전달계수는 Newton의 냉각법칙[10]에 이용한 식(11)에 위에서 구한 관내 표면 온도와 관내 유체온도를 통해 구할 수 있다.

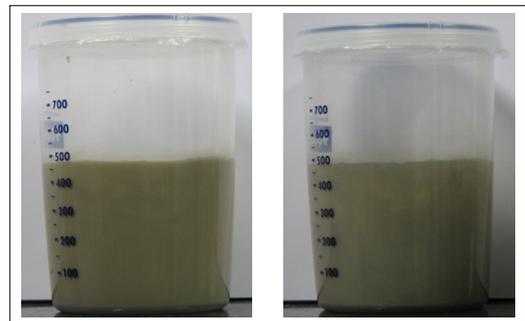
$$h(x) = \frac{Q}{AL(T_{i,s}(x) - T_f(x))} \quad (11)$$

여기서 $T_f(x)$, $T_{i,s}(x)$, A 그리고 $h(x)$ 는 각각 유체의 평균온도, 관내 표면 온도, 관 내부 면적 그리고 국소대류열전달계수이다.

3.3 나노유체 제조 및 분산 안정도

나노유체의 제조는 초음파 분산기를 사용하는 2단계 방법으로 하였고 제조 후에 은 나노유체의 안정도를 보기 위해 일정한 시간에 사진을 촬영하였다. 분산을 위한 장비는 Sonics사의 CW-130 모델을 사용하였고 3시간동안 분산을 시켰는데 10초 동안 Pulse를 가동시킨 후 5초 동안 정지시키도록 설정하였다.이렇게 설정한 이유는 제품의 권장 사항이 10분 가동 후 5분 정지이기 때문이다. 가해진 총 에너지는 400kJ이고 분산이 끝난 후 올라간 온도를 식히기 위해 찬물에 용기를 넣어 두었다.

그림 2는 0.3vol% 나노유체의 분산 안정도를 보기 위해 촬영한 사진이다. 왼쪽 그림은 초음파 분산기를 이용해 분산을 한 직후의 모습이고 오른쪽 그림은 3일이 지난 후의 모습이다. 대략 하루에 100ml씩 침전되는 것이 관찰되었는데 3일 후에 촬영한 모습을 보면 은 나노유체는 완전히 침전되지 않았다.



(a) 분산 직후 (b) 분산 후 3일 경과

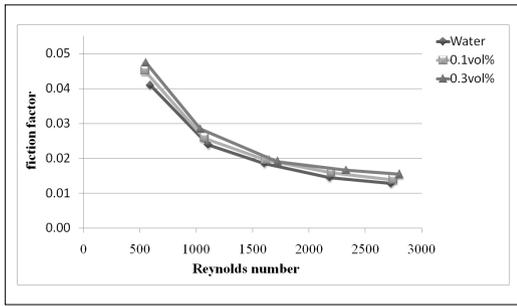
[그림 2] 0.3vol% 나노유체

나노입자가 완전히 침전되는 것을 보기 위해 10일 동안 관찰했어도 3일 후의 침전 모습과 큰 차이를 발견할 수 없었다. 대략 1/2지점까지 침전물이 보이는데 이것은 나노입자 중에 상대적으로 크기가 큰 입자들이 침전된 것으로 보인다.

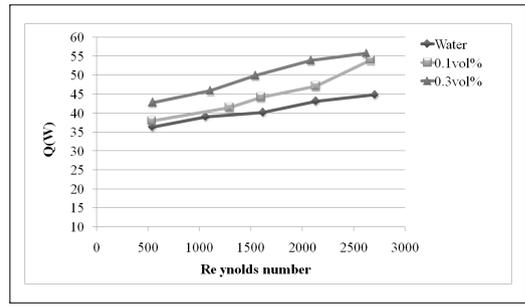
이와 같은 결과를 보면 은 나노유체의 분산 안정도가 비교적 우수하다고 판단된다.

4. 실험결과 및 고찰

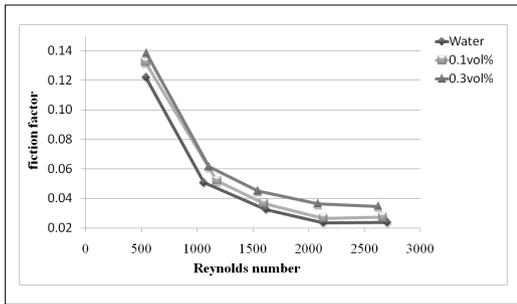
4.1 압력강하 실험결과



[그림 3] 1/8inch관에서의 마찰계수



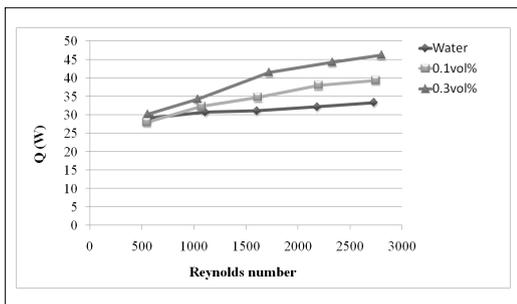
[그림 6] 3/16inch관에서의 열전달률



[그림 4] 3/16inch관에서의 마찰계수

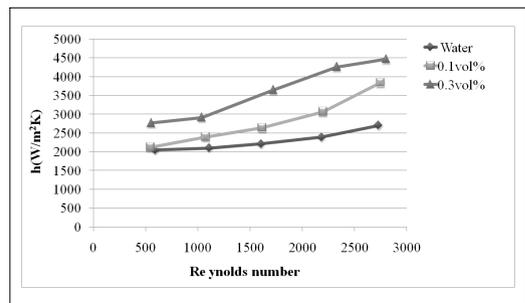
그림 3과 그림 4는 1/8, 3/16inch관에서 측정된 압력강하로 마찰계수를 계산하여 나타낸 수치이다. 1/8inch관일 때 나노유체 0.1vol%는 증류수에 비해 5~10% 증가했고 0.3vol%일 때는 2~21% 증가하였다. 3/16inch관일 때 나노유체 0.1vol%는 증류수에 비해 2~14% 증가했고 0.3vol%일 때는 13~53% 증가하였다. 마찰계수가 증가하는 것은 압력차 또한 증가한다는 의미로 Re 수가 작을 때는 각 유체간의 차이가 크지 않지만 Re 수가 커질수록 그 차이가 커진다는 것을 알 수 있다.

4.2 은 나노유체의 대류열전달계수

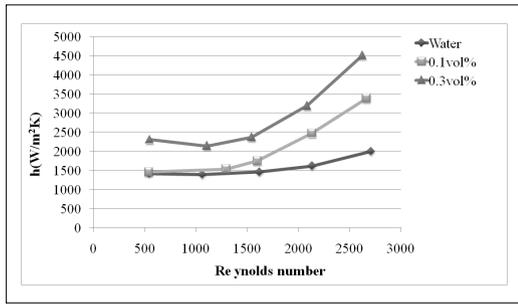


[그림 5] 1/8inch관에서의 열전달률

그림 5와 그림 6은 증류수와 나노유체의 열전달률을 측정된 결과이다. 본 실험에 측정된 데이터는 시험부의 입·출구의 유체 온도와 체적유량을 식(8)로 구한 값이다. Re 수가 증가하면 유량이 증가하게 되는데, 유량이 증가할수록 속도 또한 증가하게 되어 유체가 받는 열이 감소하여 입·출구간의 유체 온도 차이는 줄어든다. 그러나 줄어든 온도 차이에 비해 유량이 증가하는 비율이 높기 때문에 열전달률은 증가하게 된다. 그리고 나노유체의 농도가 진할수록 더 높은 열전달률의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 나노유체 0.1vol%는 1/8inch 관에서 증류수에 비해 -3~18%가 증가하고 0.3vol%는 3~38%가 증가된 것을 알 수 있다. 이 수치는 Re 수 2500인 구간을 포함한 값으로 이 구간을 제외한 나머지 구간의 평균을 보면 0.1vol%는 약 7%, 0.3vol%는 약 21%의 향상 효과를 알 수 있다. 이와 같이 향상되는 요인은 밀도와 점성등과 같은 유동에 관련된 물성치와 나노유체에서 입자와 유동간의 교류(interaction) 등의 특성에 기인하는 것으로 보인다.

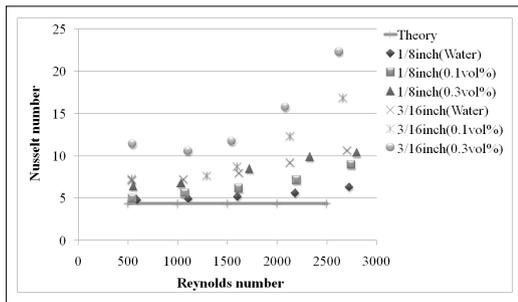


[그림 7] 1/8inch관에서의 대류열전달계수



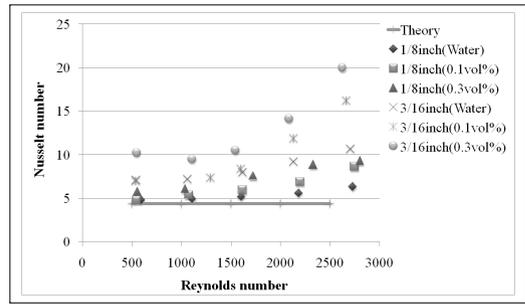
[그림 8] 3/16inch관에서의 대류열전달계수

그림 7과 그림 8은 관 외부 표면 온도를 측정하여 관 내부 표면 온도와 내부 유체 온도를 계산해 대류열전달 계수를 나타낸 값이다. 대류열전달계수는 시험부 구간에 100mm마다 설치된 열전대를 통해 측정된 관 외부 표면 온도를 식(9)와 식(10)을 이용해 계산된 관 내부 표면 온도와 내부 유체 온도를 식(11)로 계산하여 국소대류열전달 계수를 구한 다음 시험부 전체 구간에 대한 평균으로 구한 값이다. Re 수가 증가할수록 관 내부 표면 온도와 내부 유체 온도간의 차이가 줄어들게 되어 대류열전달 계수는 증가하는 경향을 보인다. 나노유체 0.1vol%의 경우 증류수에 비해 1/8inch관에서는 약 3~42%, 3/16inch관에서는 약 3~69%의 향상이 있고 0.3vol%의 경우 1/8inch관에서는 약 35~65%, 3/16inch관에서는 약 62~125%의 향상이 있는 것을 알 수 있었다. 증가되는 비율을 보면 Re 수가 클수록 더 큰 증가율을 보이게 되는데, 이는 시험부의 거의 전 구간이 열적 입구길이 구간에 해당되므로 Re 수의 영향을 받는 것으로 보인다.



[그림 9] Nusselt 수 (k; Maxwell model 사용)

그림 9은 Maxwell model로 계산된 열전도율을 이용해 Nu 수를 구한 결과이다. 나노입자의 농도가 진할수록 더 높은 값을 가진다는 것을 알 수 있었는데 증류수에 비해 0.1vol.%인 경우 0.3%, 0.3vol.%인 경우 0.9%의 증가를 보여주었다.



[그림 10] Nusselt 수 (k; Jang and Choi model 사용)

그림 10은 Jang and Choi model로 계산된 열전도율을 이용해 Nu 수를 구한 결과이다. Jang and Choi Model은 나노입자의 브라운 운동에 의해서 열전도율이 상승한다는 이론을 적용한 공식으로 증류수에 비해 0.1vol.%인 경우 4.2%, 0.3vol.%인 경우 12.6%의 증가를 보여 Maxwell model로 계산된 열전도율에 비해 크게 계산되었다. 두 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 열적 완전발달 가정 하에 구해진 이론 식(그림에서 직선)에 비해서 본 연구의 증류수 및 나노유체의 Nu 수의 값은 모두 큰 값을 나타내고 있으며, 또한, Re 수가 증가함에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 본 시험부가 거의 전영역이 열적 입구길이에 속하기 때문인 것으로 분석된다.

5. 결론

본 연구에서는 증류수와 은 나노유체를 사용하여 외경 1/8inch, 3/16inch인 관에서의 압력강하 및 대류열전달 계수를 실험적으로 구하였다.

먼저 압력강하를 측정하여 마찰계수를 비교하였을 때 1/8inch 관에서 0.1vol% 은 나노유체는 증류수에 비해 5~10%, 0.3vol%인 경우에는 2~21% 증가하였고, 3/16inch 관에서 은 나노유체는 각각 2~14%, 13~53% 증가하였다.

대류열전달계수의 경우 Re 수가 증가할수록 더 커지는 경향을 가지고 있는데, Re 수가 2000을 넘어가는 구간부터 급격한 증가를 보여준다. 0.1vol%의 경우 증류수에 비해 1/8inch관에서는 약 3~42%, 3/16inch관에서는 약 3~69%의 향상이 있었고 0.3vol%의 경우 1/8inch관에서는 약 35~65%, 3/16inch관에서는 약 62~125%의 향상이 있는 것을 알 수 있었다.

이상의 결과에서 은나노유체를 기계 및 전자 시스템의 냉각제로 사용할 경우 증류수에 비해 매우 우수한 냉각 성능을 보일 것으로 판단된다.

앞으로 나노유체가 단상유동의 고성능 냉각유체로 사용되기 위해서는 열전도율, 점성, 비열 등의 열물성치에 대한 연구와 층류, 난류 및 마이크로 사이즈의 미세관 등 다양한 조건에서의 심도 있는 열전달 연구를 수행한 후 실험결과를 반영한 압력강하 및 열전달 실험상관식을 개발할 예정이다.

참고문헌

[1] Anoop, K. B., Patel, H. E., Sundararajan, T., and Das, S. K., "Numerical study of convective laminar heat transfer in nanofluids", Int. Heat Tran. Con., NAN-11, 2006.

[2] Hwang, K. S., Lee, J. H., and Jang, S. P., "Convective heat transfer and flow characteristics of Al₂O₃ Nanoparticles Suspended in water under the laminar flow regime", KSME, pp. 2319-2324, 2006.

[3] Lee, J. H., and Jang, S. P., "Fluid flow characteristics of Al₂O₃ Nanoparticles suspended in water", KSME, Vol. 30, No. 6, pp. 546-552, 2006.

[4] Maxwell, J. C., "A Treatise on Electricity and Magnetism", vol 1 (Oxford: Clarendon), 1873.

[5] Lee, K. I. et al., "Heat and Mass Transfer characteristic in nanofluids", Proceedings of the SAREK '06 Winter Annual Conference, pp. 525-532, 2006.

[6] Jang, S. P. and Choi, S. U. S., "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids", Appl. Phys. Lett., Vol. 84, pp. 4316-4318, 2004.

[7] Davalos-Orozco, L. A. and Del Castillo, L. F., "Hydrodynamic behavior of suspensions of polar particles: in Encyclopedia of surface and colloid science", Marcel Dekker, New York, pp. 2375-2396, 2002.

[8] Smith, J. M. and Van Ness, H. C., "Introduction to chemical engineering thermodynamics", McGraw Hill, New York, 1987.

[9] Jang, S. P. and Choi, S. U. S., "Free convection in rectangular cavity with nanofluids", IMECE2004-61054 Anaheim, USA, 2004.

[10] Yunus Cengel., "Introduction to Thermodynamics & Heat Transfer", Mc Graw Hill, 1996.

권 정 태(Jeong-Tae Kwon)

[정회원]



- 1988년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 2005년 2월 : 남부대학교 자동차기계공학과 조교수
- 2003년 3월 ~ 2004년 3월 : Ktushu University, Post-Doc.
- 2005년 3월 ~ 현재 : 호서대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

2상유동, 열전달, 냉동 공조

남 택 훈(Tack-Hun Nahm)

[준회원]



- 2007년 2월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사)
- 2009년 11월 : 호서대학교 기계공학과 (석사 과정)

<관심분야>

CFD, 2상유동, 열전달

김 태 완(Tae-Wan Kim)

[준회원]



- 2004년 3월 : 호서대학교 기계공학과 (공학사 과정)

<관심분야>

2상유동, 열전달, 나노유체

권 영 철(Young-Chul Kwon)

[정회원]



- 1989년 2월 : 부산대학교 정밀기계공학과 (공학사)
- 1991년 9월 : 포스텍 기계공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 포스텍 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 1999년 2월 : 한구전력 전력연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계공학과 부교수

<관심분야>

냉동 공조, 열교환기/시스템 설계, 열전달