

나노유체의 관내 열전달 특성 연구

권정태*, 남택훈*, 김태완*

*호서대학교 기계공학과

jtkwon@hoseo.edu

A Study on In-Tube Convective Heat Transfer Characteristics of Nanofluids

Jeong-Tae Kwon*, Taek-Hun Nahm*, Tae-Wan Kim*

*Department of Mechanical Engineering, Hoseo University

요 약

본 연구에서는 두 가지 종류의 미세관을 사용하여 증류수 및 0.1vol.%, 0.3vol.%의 농도를 가지는 은 나노유체의 층류 유동 조건인 Re 수 500~2500의 범위에서 대류 열전달 실험을 수행하였다. 열전달 계수 실험 결과 0.1vol.%의 경우 증류수에 비해 약 3~69%의 향상이 있었고 0.3vol.%의 경우 약 35~125%의 열전달 계수의 향상이 있었다.

1. 서론

최근 나노 기술의 발달로 인해 금속 입자를 수~수십 나노미터로 제조하는 것이 가능해졌다. 이러한 나노 입자를 유체에 분산시켰을 때 기존 유체에 비해 열전도도가 향상되는 결과를 볼 수 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]

본 연구에서는 외경 1/8, 3/16inch 미세관에서 은(Ag) 나노 입자를 물에 분산시킨 나노유체를 적용하여 층류영역에서의 열전달률과 대류 열전달 실험을 수행하였다. 그리고 대류열전달계수 및 유동 특성을 실험함에 있어서 필요한 나노유체의 물성치(점성, 비열)는 수치적으로 계산하였고 밀도는 직접 부피와 질량을 측정하여 구하였다.

2. 나노유체의 특성

2.1 나노유체의 열전도도

현재 이론적으로 나노유체의 물성을 완벽하게 알아 내기는 어려운 실정이다. 그래서 나노유체의 물성치에 대한 여러 가지 이론적, 실험적 공식 들이 제시되어왔다. 수많은 실험을 통해 나노유체의 열전도도를 구하

기 위한 여러 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 열전도도, Base유체의 열전도도, 나노입자의 열전도도 그리고 입자의 부피 분율을 나타낸다.

최근에 브라운 운동에 의해 나노유체의 열전도도가 상승한다는 이론을 사용하는 모델을 제시한 Jang and Choi[5]의 공식은 식(2)로 기존 실험을 잘 예측하고 있다.

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

여기서 $C_1 = 1.8 \times 10^7$ 는 실험상수이고 d_b , d_p 는 각각 유체 분자의 평균크기, 나노입자의 지름을 나타내고 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 Hydrodynamic Coupling Effect를 고려한 Brownian Diffusion계수, 유체 분자의 평균 자유 경로를 나타낸다.

$k_{bol} = 1.3807 \times 10^{-23} J/K$ 는 Boltzmann 상수를 의미한다.

2.2 나노유체의 점성계수, 비열 및 밀도

나노유체의 점성계수는 대부분 부피비가 1% 미만의 나노입자들을 첨가하기 때문에 거의 영향을 미치지 않을 것이라 예상이 되지만 본 논문에서는 브라운 운동 효과가 포함된 모델[6]인 식(5)을 사용하였다.

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

나노유체의 비열은 Mixing Theory[7]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.

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

식 (5-7)로 구한 물성치를 계산하여 표 1로 정리하였다. 증류수와 비교하면 밀도만 비교적 뚜렷한 차이가 있고 점성과 비열은 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다.

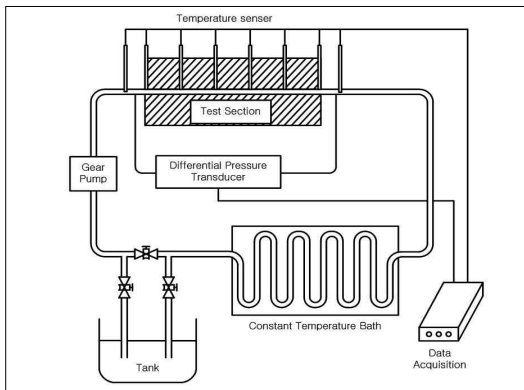
[표 1] 은 나노유체의 물성치

	0.1vol.%	0.3vol.%
밀도 [kg/m^3]	1007.49	1026.48
점성 [kg/ms]	0.001003	0.001008
비열 [$J/kg^{\circ}C$]	4176.05	4168.16

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에서는 그림 1에서 보듯이 폐회로를 구성하여 기어펌프를 사용해서 유체를 유동시켰다. 유체가 흐르는 Stainless steel관에 열전 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 폐회로로 구성된 미세관으로 항온 수조에서 일정한 온도(22°C)로 제어된 유체가 흐르게 되어 열전으로 가열되는 시험부를 지나가게 구성되어 있다. 사용된 관은 Stainless steel로 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

3.2 실험결과 처리 방법

본 실험에서는 먼저 시험부 입구온도를 22°C로 유지되도록 하였다. 그리고 측정된 출구온도와 저울로 측정된 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 위해서 관 외부 표면온도를 측정하여 관 내부 표면온도를 식(9)로 계산한 다음 대류열전달계수를 구하였다.[8]

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

여기서 $T_{i,s}$, $T_{o,s}$, k_{tube} , r_o 그리고 r_i 는 각각 관 내부 표면온도, 관 외부 표면온도, 관의 열전도도, 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 $T_f(x)$, P 는 각각 관내 평균 유체 온도와 관 표면의 둘레길이를 나타낸다.

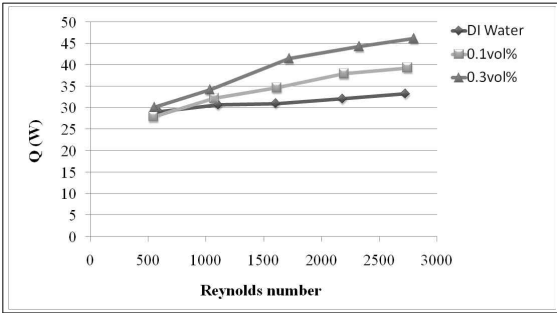
대류열전달계수는 Newton의 냉각법칙[8]에 이용한 식(11)에 식(9)와 식(10)을 대입하여 구할 수 있다.

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

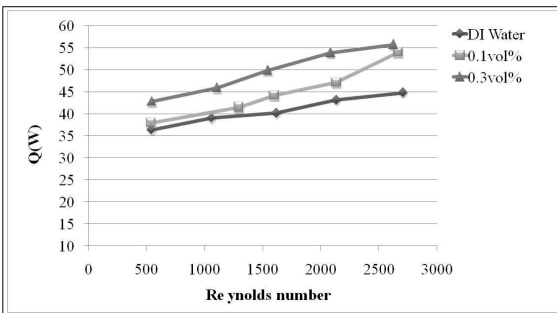
여기서 $T_f(x)$, $T_{i,s}(x)$, A 그리고 $h(x)$ 는 각각 유체의 평균온도, 관내 표면 온도, 관 내부 면적 그리고 국소대류열전달계수이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 은 나노유체의 대류열전달계수



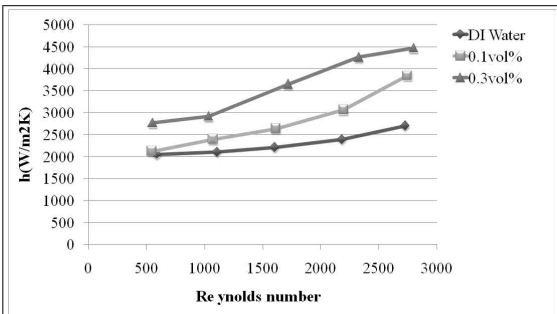
[그림 2] 1/8inch관에서의 열전달률



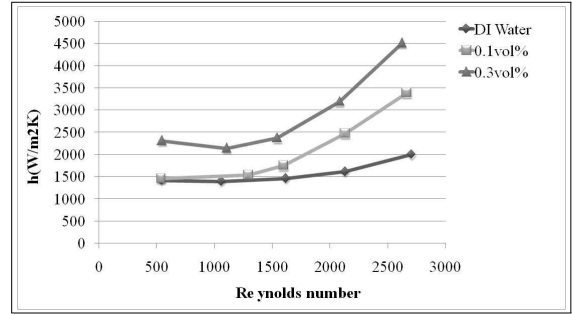
[그림 3] 3/16inch관에서의 열전달률

그림 2와 그림 3은 증류수와 나노유체의 열전달률을 측정된 결과이다. 유량이 증가할수록 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. Re 수 500일 경우에는 큰 차이가 없지만 Re 수가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. Re 수 2500을 제외한 평균을 구하면 0.1vol.%는 약 7%, 0.3vol.%는 약 21%의 향상 효과가 발생함을 알 수 있다.



[그림 4] 1/8inch관에서의 대류열전달계수



[그림 5] 3/16inch관에서의 대류열전달계수

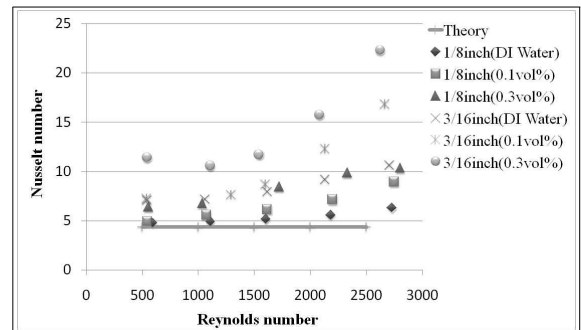
그림 4와 그림 5에서의 대류열전달계수는 시험부 구간에 100mm마다 설치된 열전대를 통해 측정된 관 외부 표면 온도를 식(9)와 식(10)을 이용해 계산된 관 내부 표면 온도와 내부 유체 온도를 식(11)로 계산하여 국소대류열전달계수를 구한 다음 시험부 전체 구간에 대한 평균으로 구한 값이다.

Re 수가 증가할수록 관 내부 표면 온도와 내부 유체 온도간의 차이가 줄어들게 되어 대류열전달계수는 증가하는 경향을 보인다.

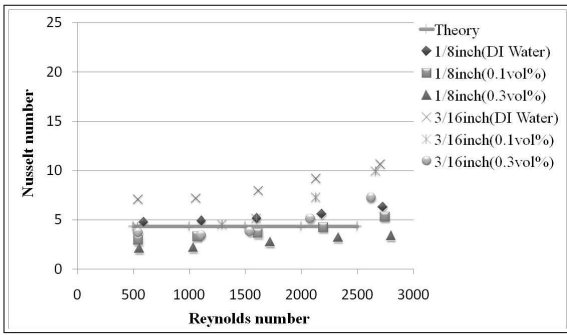
나노유체 0.1vol.%의 경우 증류수에 비해 1/8inch관에서는 약 3~42%, 3/16inch관에서는 약 3~69%의 향상이 있고 0.3vol.%의 경우 1/8inch관에서는 약 35~65%, 3/16inch관에서는 약 62~125%의 향상이 있는 것을 알 수 있었다.

[표 3] 각 모델 별 열전도도

Conduction Equation	부피비[vol.%]	열전도도[W/m.K]
Maxwell Model	0.1	0.5996
	0.3	0.6032
Jang and Choi Model	0.1	1.016
	0.3	1.8531



[그림 6] Nusselt 수(Maxwell Model)



[그림 7] Nusselt 수(Jang and Choi Model)

표 3은 앞서 설명한 Maxwell Model과 Jang and Choi Model로 구한 열전도도에 대한 값으로 물의 열전도도인 $0.5977 [W/m\cdot K]$ 보다 증가되었음을 알 수 있다. 이와 같이 계산된 열전도도로 Nu 수를 계산한 그림 6과 그림 7을 비교하면 Maxwell Model의 열전도도 값으로 계산된 Nu 수보다 Jang and Choi Model이 더 좁은 분포를 보여준다. 그러나 Jang and Choi Model로 계산된 열전도도를 이용해 Nu 수를 구한 결과를 보면 이론값보다 작게 계산된 수치가 보이는데 이와 같은 결과는 열전달률이 작게 측정되었거나 관 내부 표면 온도와 내부 유체 온도 간의 차이가 크게 계산되어 이러한 결과가 나온 것이라 예상된다. 그러나 식(9-11)의 관계를 보면 어느 한가지의 영향으로 인해 Nu 수가 작게 나온 것이라 볼 수 없다. 즉, 두 가지 이유가 복합적으로 발생해 이와 같은 결과가 나온 것이라 예상된다.

5. 결론

본 연구에서는 증류수와 은 나노유체를 사용하여 외경 1/8inch, 3/16inch인 관에서의 대류열전달계수를 실험적으로 구하였다.

관에서의 열전달률은 Re 수가 증가할수록 더 큰 수치를 나타내었다. 또한 Re 수가 증가할수록 일정한 입구 온도에 대한 출구온도와 관 표면온도는 감소하게 되어 대류 열전달계수가 증가하고 Nu 수 또한 증가하게 된다. 대류열전달계수의 경우 전체적으로 Re 수가 증가할수록 더 커지는 경향을 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.

앞으로 나노유체가 단상유동의 고성능 냉각유체로

사용되기 위해서는 열전도도, 점성, 비열 등의 열물성치에 대한 연구와 증류, 난류 및 마이크로 사이즈의 미세관 등 다양한 조건에서의 심도 있는 열전달 연구가 필요할 것으로 사료된다.

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] 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.
- [6] 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.
- [7] Smith, J. M. and Van Ness, H. C., "Introduction to chemical engineering thermodynamics", McGraw Hill, New York, 1987.
- [8] Yunus Cengel., "Introduction to Thermodynamics & Heat Transfer", Mc Graw Hill, 1996.