

나노입자를 이용한 유체내 열전달 향상 연구

강현욱, 강승우, 김성현*
 고려대학교 화공생명공학과
 (kimsh@korea.ac.kr*)

Effects of nanoparticles on Heat Transfer and Rheological Properties of Nanofluid

Hyun Uk Kang, Seung Woo Kang, Sung Hyun Kim*
 Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University
 (kimsh@korea.ac.kr*)

서론

나노 유체란 나노미터 크기의 입자가 유체에 안정적으로 분산된 유체를 말한다. 1990년대 중반 Choi와 Eastman이 미량의 나노입자가 첨가된 나노유체가 순수한 유체에 비해 월등히 높은 열전도도를 보인다는 사실을 보고한 이후, 나노 유체를 이용한 열전달 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1-4]. 이러한 나노유체를 이용하면 전도 열전달이 향상될 뿐만 아니라 대류 열전달에 있어서도 입자의 유동으로 인한 대류 유발 및 경계층 교란 효과가 있어 효과적으로 열전달을 일으킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 이러한 나노유체의 열전달 메커니즘에 대해서는 아직 개념 정립 수준으로 많은 연구가 진행되어야 한다. 또한 실제 열교환 장치의 조건인 대류 조건에서의 열전달 효과 향상에 대한 연구는 최근에 와서야 부분적으로 진행되고 있다[5].

본 연구에서는 유체의 열전도도 측정에 흔히 사용되는 비정상상태 열선법(Transient hot wire method)을 이용하여 여러 가지 나노유체의 열전도도를 측정하고, 이를 입자의 농도 및 점도와 연관지어 해석하였으며, 이중관 열교환기를 이용하여 나노유체의 열전달 성능을 측정하였다.

본론

유체에 고체 입자가 분산되어 있는 계의 열전도도는 여러 가지 형태로 표현가능하나 가장 널리 사용되는 것은 다음과 같은 Hamilton Crosser 식이다[6].

$$k_{eff} = k_f \left[\frac{k_p + (n-1)k_f - \Phi(n-1)(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \Phi(k_f - k_p)} \right] \quad (1)$$

여기에서 k_f , k_p 는 각각 순수 유체 및 입자의 열전도, Φ 는 입자의 부피분율이며, n 은 입자의 형태를 반영하는 실험적인 factor로 구형일 경우 3이다. 그러나 이 식들을 나노유체에 적용하였을 경우, 실험적인 결과와 많은 오차를 보이는데, 이는 입자의 크기에 대한 인자가 빠져있기 때문으로 알려져 있다. 나노유체에서 나노입자 표면의 분산유체 분자들은 입자에 의해 흐름을 방해받으므로 액막을 형성하게 되고, 이때 원래의 물성과 입자의 물성의 중간 정도의 물리적 특성을 가지게 된다. 이러한 경향성은 유체의 열전달을 향상시키는 효과를 가져오게 된다. 이러한 효과를 보정하기 위해 본 실험에서는 높은 전단속도 장에서의 유체의 점도를 측정 후 이를 아인슈타인 관계식에 대입하여, 입자의 유효부피분율을 추산하는 방법을 선택하였다.

$$\eta_r = 1 + 2.5\Phi_{eff} \quad (2)$$

이렇게 구해진 입자의 유효부피분율을 Hamilton-Crosser 모델식에 적용하면, 입자의 유체 내에서의 크기를 고려한 열전도도를 추정할 수 있다. 이러한 추정은 정확한 방법은 아니나 실험적으로 입자의 유체 내에서의 유효부피를 고려한다는 측면에서 의의가 있다.

실험

실험에 사용한 나노입자 및 분산유체의 기본물성은 표 1과 표 2에 나타내었다. 나노입자를 분산유체에 분산시키기 위해 초음파 하에서 교반시킨 후 20°C로 유지되는 bath 내에서 안정화시킨 상태에서 시간에 따른 온도변화를 수차례 측정하여 열전도도로 환산하였다. 인가된 에너지 q 에 따른 시간 t_1, t_2 에서의 열선의 온도 T_1, T_2 로부터 유체의 열전도도는 다음과 같이 해석 가능하다[7].

$$k = -\frac{q}{4\pi} \frac{\Delta(\ln \xi)}{(\Delta T)} = \frac{q}{4\pi} \frac{\Delta(\ln t)}{(\Delta T)} \cong \frac{q}{4\pi} \frac{(\ln \frac{t_2}{t_1})}{(T_2 - T_1)} \quad (3)$$

유체의 점도는 에틸렌글리콜을 분산매로 사용하였을 경우에는 Brookfield 사의 Viscometer DV-II LV 모델에 온도조절용 어댑터를 장착하여 온도를 20°C로 유지시키면서 입자의 농도를 변화시키면서 측정하였고, 물을 분산매로 사용하였을 경우에는 Rheometric Scientifics 사의 ARES를 이용하여 측정하였다.

열전달 실험을 위해서 이중관 열교환기를 제조하여 증류 영역에서 냉각수와 나노유체간 열교환량을 측정하여 이를 총괄열전달계수로 표현하였다.

결과 및 고찰

그림 1과 2는 다이아몬드 나노입자를 에틸렌글리콜(EG)에 분산시켜 만든 나노유체에 대해 점도와 열전도도를 측정한 결과이다. 그림 1의 기울기로부터 다이아몬드 나노입자의 유체 내 유효부피분율은 실제 입자 부피분율의 약 14.5배가 됨을 알 수 있다. 이를 Hamilton-Crosser 모델에 적용하여 얻은 결과를 그림 2에 실험에 의한 측정값과 함께 도시하였다. 그림에서 보여지는 것과 같이 입자의 유효부피분율을 이용할 경우 기존의 Hamilton-Crosser 모델로도 나노유체의 열전도도를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 다이아몬드/에틸렌글리콜 나노유체의 경우 입자가 약 1vol%로 첨가되었을 때 약 50% 정도의 열전도도의 향상이 있음을 알 수 있다.

그림 3와 4는 은 나노입자를 증류수에 분산시켜 만든 나노유체에 대해 얻어진 실험 결과이다. 은/증류수 나노유체의 경우 은 나노입자가 약 0.3 vol% 첨가되었을 때 약 12%의 열전도도 향상을 가져왔다. 이 실험에서 얻어진 열전도도는 입자의 유효부피를 고려해 추정된 열전도도값과 상당한 차이를 보이고 있다. 이는 은의 경우 자유전자가 없는 다이아몬드 입자와는 달리 자유전자의 이동에 의한 열전도의 향상도 같이 존재하기 때문일 것이다.

그림 5과 6은 이러한 효과를 확인하기 위하여 전기전도성 및 열전도성이 모두 낮은 실리카 입자를 물에 분산시켜 만든 나노유체에 대해 수행한 실험 결과이다. 이 경우에는 예측된 열전도도가 실제 실험값보다 높은 경향을 보였으나 실리카 자체의 열전도도가 크게 높지 않기 때문에 전체 열전도도 향상 폭은 가장 작았다.

그림 7은 나노유체의 laminar 영역에서의 총괄열전달계수를 구한 것이다. 그림 4에서의 열전도도 향상과 비교할 때, 그 향상폭은 상대적으로 작으나, 대류 열전달 조건에서도 열전달을 10%정도 향상시킴을 확인할 수 있다.

결론

본 연구를 통하여 높은 열전도성을 가지는 다이아몬드 나노입자가 분산된 나노유체와, 높은 열 및 전기전도성을 가지는 은 나노입자가 분산된 나노유체, 그리고 상대적으로 낮은 열 및 전기전도성을 지니는 실리카 나노입자가 분산된 나노유체에 대하여 열전도도를 측정하고, 미량의 나노입자가 첨가되어도 상당한 열전도도 향상이 있음을 확인하였다. 또

한 나노유체의 점도 측정 결과로부터 유체 내 나노입자의 유효부피분율을 추정하고, 이를 이용하여 Hamilton-Crosser 모델식으로부터 나노유체의 열전도도를 예측할 수 있는 방안을 제시하였다. 아울러 나노유체가 대류 조건에서의 열전달 향상에도 기여함을 확인하였다.

감사

본 연구는 한국과학재단(KOSEF, ERC) 유변공정연구센터(ARC)의 연구 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu and L.J. Thomson, *Applied Phys Letters*, **78**, 718 (2001)
2. H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu and F. Al, *J. Applied Phys*, **91**, 4568 (2002)
3. Y. Xuan and O. Li, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **21**, 58 (2000)
4. P. keblinski, S.R. Phillpot, S.U.S. Choi and J.A. Eastman, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **45**, 855 (2002)
5. D. Wen and Y. Ding, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **47**, 5181 (2004)
6. R.L. Hamilton and O.K. Crosser, *IEC Fundamentals*, **1**, 187 (1962)
7. Y. Nagasaka and A. Nagashima, *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **14**, 1435 (1981)

표 1. 나노입자의 기본 물성

Particle	Size	Bulk Density	Thermal Conductivity	Melting Temp.
Carbon	40~50 nm	3.1g/cm ³	895W/m · K	3970K
Silver	7~10 nm	10.1g/cm ³	429W/m · K	1175K
Silica	15~20 nm	2.2g/cm ³	1.4W/m · K	?

표 2. 분산 유체의 기본 물성

Liquid	Viscosity	Density	Thermal Conductivity	Dispersed Particles
DIWater	1.03 cP	1.0g/cm ³	0.592W/m · K	Silver
Ethylene Glycol	19.2 cP	1.1g/cm ³	0.262W/m · K	Diamond

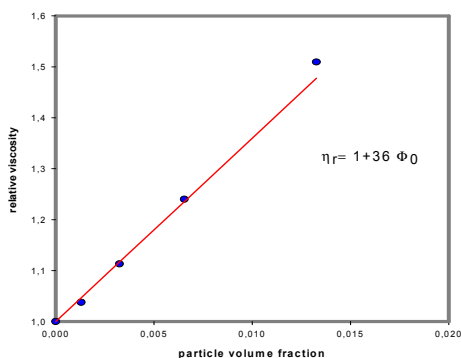


그림 1. 다이아몬드/EG 유체의 점도

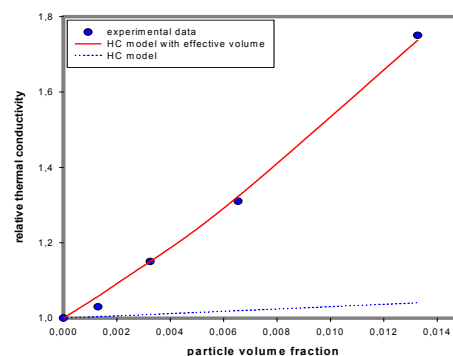


그림 2. 다이아몬드/EG 유체의 열전도도

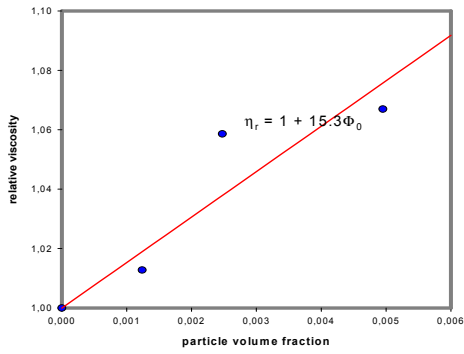


그림 3. 은/중류수 유체의 점도

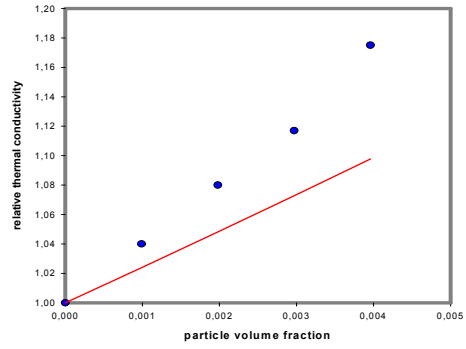


그림 4. 은/중류수 유체의 열전도도

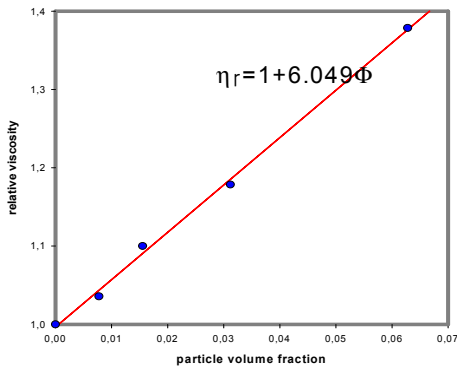


그림 5. 실리카/중류수 유체의 점도

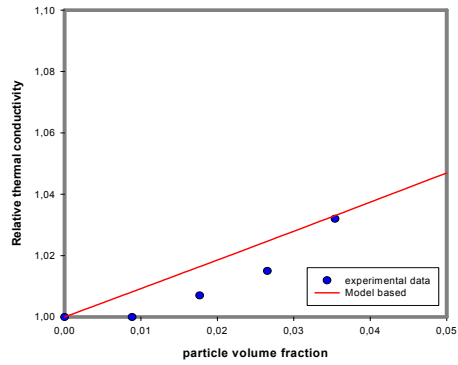
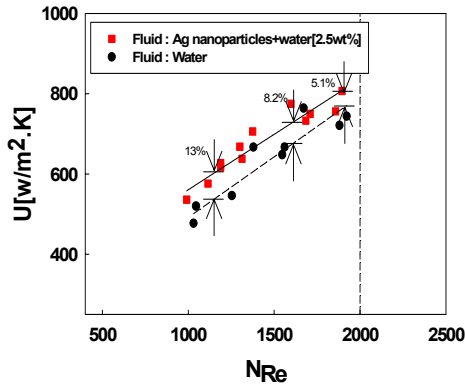
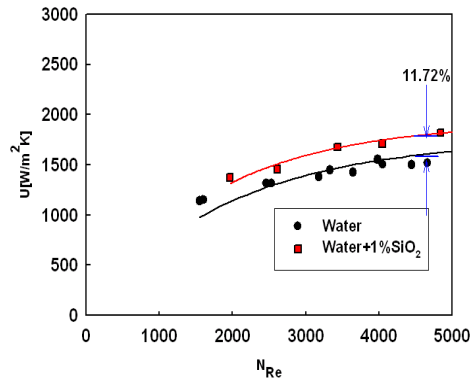


그림 6. 실리카/중류수 유체의 열전도도



(a) 은/중류수



(b) 실리카/중류수

그림 7. 대류조건에서의 총괄열전달계수