

나노입자에 의한 나노유체에서의 열전달 향상에 관한 연구

강현욱, 강승우, 김성현
고려대학교 화공생명공학과

Effects of nanoparticles on Heat Transfer of Nanofluid

Hyun Uk Kang, Seong Woo Kang, Sung Hyun Kim
Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University

1. 서론

현대의 많은 산업 부문에 있어서 열교환은 매우 중요한 문제 중의 하나이다. 기존의 중대형 열교환 시스템에 있어서 주된 열교환 향상방법은 열교환기의 구조를 개선하거나 열교환용 유체의 흐름을 향상시켜 총괄열전달을 향상시키는 것이었다. 그러나 최근의 전자산업 등에서 많이 개발되고 있는 초소형 장치의 경우 장치 자체의 소형화를 위해 열교환을 위한 채널도 소형화되어야 하고, 이 때문에 유체의 흐름을 조절하여 열교환을 향상시키기에는 많은 제약이 따른다. 이를 해결하기 위해서는 열교환을 위한 유체 자체의 열전도도와 같은 특성을 향상시켜야 한다. 이 때문에 여러 가지 방법으로 유체의 열전도도를 높이기 위한 연구가 행해져 왔으나, 금속 입자 등을 첨가한 유체의 경우 열전도도는 부분적으로 상승하지만 첨가된 입자로 인한 점도의 상승 등 부가적인 문제가 발생하여 실제 적용이 어려웠다. 1990년대 중반 Choi와 Eastman가 나노미터 크기의 입자를 미량 첨가하여 순수한 유체보다 월등히 높은 열전도도를 갖는 유체를 제조하였고, 이를 통해 기존 유체의 문제점을 해결할 수 있는 가능성을 제시하였다.

그 후 이러한 유체를 이용한 열전달 향상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [1-5]

나노 유체란 나노미터 크기의 고체입자가 유체에 침전되지 않고 안정적으로 부유된 유체를 말한다. 나노 입자가 첨가된 유체의 열전도도는 입자 자체의 부피 분율에 따른 자연적인 열전도도의 상승폭 이상으로 급격하게 증가된다. 특히 첨가되는 입자가 다이아몬드나 은, 구리 등의 높은 열전도도를 갖는 입자일 경우 약간의 입자 첨가로 인해 열전도도가 급격히 상승하는 효과가 있어 소형 열교환 시스템 등의 열전달 매체로 적합하다. 그러나 이러한 나노유체의 열전달 메커니즘에 대한 전반적인 연구는 시작단계이며 많은 추가적인 연구가 진행되어야 한다.

본 연구에서는 유체의 열전도도 측정에 흔히 사용되는 비정상상태 열선법(Transient Hot wire Method)을 이용하여 여러 가지 나노입자가 유체에 분산된 용액의 열전도도를 측정하고, 이를 입자의 농도 및 점도와 연관지어 해석하여 나노 유체의 열전도에 대해 해석하였다.

2. 이론 (실험 및 방법)

유체에 고체 입자가 분산되어 있는 계의 열전도도는 여러 가지 형태로 표현가능하나 가장 널리 사용되는 것은 다음과 같은 식들이다.

Hamilton and Crosser [6]

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

Jeffery

$$k_{eff} = k_f \left[1 + 3\beta\Phi + \left(3\beta^2 + \frac{3\beta^3}{4} + \frac{9\beta^3(\alpha+2)}{16(2\alpha+3)} + \dots \right) \Phi^2 \right] \quad (2)$$

Lu-Lin

$$k_{eff} = k_f [1 + 3\Phi + 4.5\Phi^2] \quad (3)$$

여기에서 k_f 는 순수한 유체의 열전도도, k_p 는 순수한 입자의 열전도, Φ 는 입자의 부피분율이며, n 은 입자의 형태를 반영하는 실험적인 factor로 구형일 경우 3이다. 그리고 α 는 k_p/k_f , β 는 $(a-1)/(a+2)$ 의 값을 갖는 인자이다. 이러한 식들은 마이크로미터 크기의 입자가 분산된 유체의 열전도도 추산을 위해 많이 사용되어져 왔다. 그러나 이 식들을 나노유체에 적용하였을 경우, 실험적인 결과와 많은 오차를 보이는데, 이는 입자의 크기에 대한 인자가 빠져있기 때문으로 알려져 있다. 그림1과 같이 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 유체 내의 열전도 메카니즘중 하나인 포논 진동에 의한 열전달을 향상시키는 효과를 가져오게 된다. 특히 나노입자의 경우 이렇게 입자주위에 형성된 유체에 의한 막이 부피에 미치는 영향이 마이크로미터에 비해 훨씬 크므로, 이런 효과를 고려해주어야 한다. 이런 유체내에서의 유효부피를 추산하는 한 방법으로 본 실험에서는 높은 전단속도 장에서의 유체의 점도를 측정한 후 이를 아인슈타인 관계식에 대입하여, 입자의 유효부피분율을 추산하는 방법을 선택하였다.

$$\eta_r = 1 + 2.5\Phi_{eff} \quad (4)$$

이렇게 구해진 입자의 유효부피분율을 Hamilton-Crosser 모델식에 적용하면, 입자의 크기를 고려한 열전도도를 추정할 수 있다. 이상의 방법을 그림 2에 도식화하여 나타내었다.

다음으로 유체의 열전도도를 측정하기 위한 비정상상태 열선법에 대해 간단히 살펴보기로 한다. 비정상상태 열선법은 지름이 수십마이크로미터 정도인 백금선을 수직형 실린더 내에 넣고, 여기에 나노 유체를 채운 다음, 백금선에 전기를 흘려주었을 때 백금선의 온도가 변화되는 정도를 이용하여 다음과 같이 Fourier의 법칙을 변환하여 열전도도를 계산하는 방식이다.[7-8]

$$k = -\frac{q}{4\pi} \frac{\Delta(\ln \xi)}{\Delta\theta} = \frac{q}{4\pi} \frac{\Delta(\ln t)}{\Delta T} \cong \frac{q}{4\pi} \frac{\Delta \left(\ln \frac{t_2}{t_1} \right)}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

여기에서 T_1 과 T_2 는 시간 t_1 과 t_2 에서의 온도이며, q 는 인가된 전력이다. 이 식을 보다 정확하게 이용하기 위해서는 유체에 브라운 운동에 의한 대류가 생기지 않을 정도로 짧은 시간 간격 내에서 실험하여야 한다.

실험에 사용한 나노입자 및 분산유체의 물성은 표 1과 표 2에 나타내었다. 나노입자를 분산유체에 분산시키기 위해 초음파 하에서 30분간 교반시켰으며, 24시간의 시간동안 침전되지 않음을 확인한 후 20°C로 유지되는 bath 내에서 안정화시킨 상태에서 시간에 따른 온도변화를 10번 측정하여 평균값을 취하여 열전도도로 환산하였다.

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.

3. 실험 (결과 및 고찰)

그림 3과 4는 다이아몬드 나노입자를 에틸렌글리콜(EG)에 분산시켜 만든 나노유체에 대해 점도와 열전도도를 측정한 결과이다. 그림 3의 기울기로부터 다이아몬드 나노입자의 유체 내 유효부피분율은 실제 입자 부피분율의 약 14.5배가 됨을 알 수 있다. 이를 Hamilton-Crosser 모델에 적용하여 얻은 결과를 그림 4에 실험에 의한 측정값과 함께 도시하였다. 그림에서 점선은 유효부피분율이 아닌 실제 부피분율을 모델에 적용하여 추산된 열전도도 값이다. 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 5와 6은 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. 따라서 은과 같은 금속 나노입자를 물과 같이 전도성이 있는 유체에 분산시킨 나노유체의 열전도도를 예측하기 위해서는 전자 이동에 의한 열전도 효과를 추가적으로 고려해야 한다.

그림 7과 8은 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. 이러한 경향성을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 유체 내에서의 나노입자에 의한 열전달 향상 메커니즘이 보다 구체적으로 연구되어야 할 것이다.

그림 9는 입자의 크기에 대한 효과를 확인하기 위해서 다양한 크기의 실리카 입자를 줄겔법을 이용하여 직접 제조한 후 이 입자를 증류수에 분산시켜 나노유체를 만든 다음 실험을 통해 열전도도 변화를 관찰한 결과이다. 그림에서 보는 것처럼 입자의 크기가 커지면서 열전도도의 증가폭이 떨어지는 것을 알 수 있는데, 이는 앞에서 언급하였듯이 입자의 크기가 커지면서 입자 주위의 액막이 전체 부피에서 차지하는 비율이 작아지기 때문이다. 그로 인해 입자의 크기가 커질수록 상대 유효부피분율은 표 3에서 보듯이 작아지게 되고, 열전도도 향상에 미치는 영향도 줄어들게 된다고 판단된다.

4. 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. 또한 나노유체의 점도 측정 결과로부터 유체 내 나노입자의 유효부피분율을 추정하고, 이를 이용하여 Hamilton-Crosser 모델식으로부터 나노유체의 열전도도를 예측할 수 있는 방안을 제시하였다. 그러나, 아직 입자 자체의 특성에 의한 열전달 메커니즘의 차이에 대한 연구는 많이 부족한 상태이다. 이러한 부분의 연구가 추가로 진

행된다면 나노유체의 열전도도를 보다 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

감사

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

5. 참고문헌

1. Eastman, J.A., Choi, S.U.S., Li, S., Yu, W. and Thomson, L.J. : Applied Phys. Letters, 78, 718 (2001)
2. Xuan, Y. and Li, O. : Int. J. Heat and Fluid Flow, 21, 584 (2000)
3. Wang, X., Su, X. and Choi, S.U.S. : Int. J. Thermophysics, 13, 474 (1999)
4. Xie, H., Wang, J., Xi, T. and Liu, Y. : J. Mater. Sci. Letters, 21, 1469 (2002)
5. Choi, S.U.S., Zhang, Z.G., Yu, W., Lockwood, F.E. and Grulke, E.A. : Applied Phys. Letters, 79, 2252 (2001)
6. Hamilton, R.L. and Crosser, O.K. : IEC Fundamentals, 1, 187 (1962)
7. Zhang, X. and Fujii, M. : Int. J. Thermophysics, 21, 71 (2000)
8. Nagasaka, Y. and Nagashima, A. : J. Phys. E, 14, 1435 (1981)

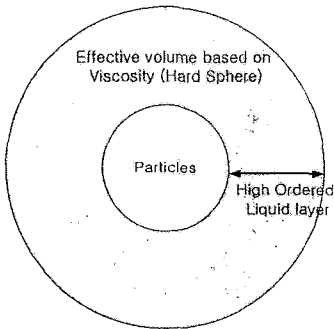


그림 1. 입자 주위의 액막 형성

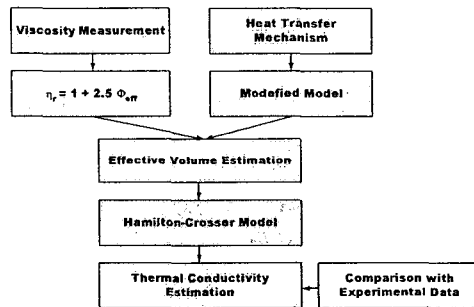


그림 2. 나노유체의 열전도도 추정 과정도

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

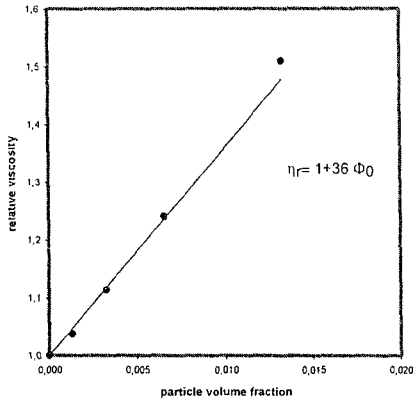


그림 3. 다이아몬드/EG 유체의 점도

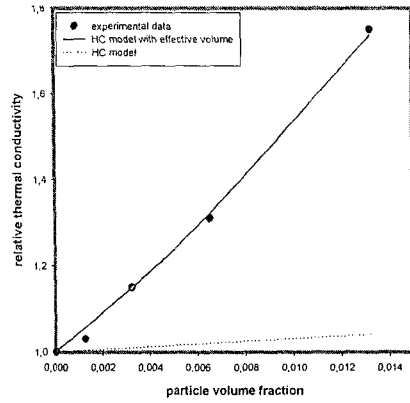


그림 4. 다이아몬드/EG 유체의 열전도도

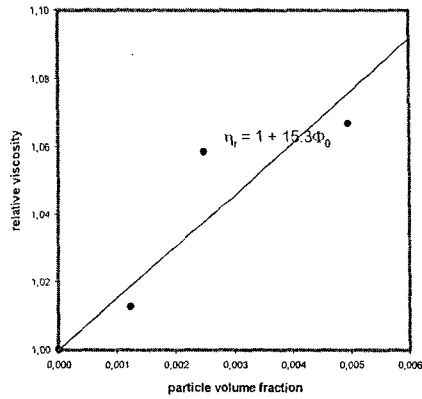


그림 5. 은/증류수 유체의 점도

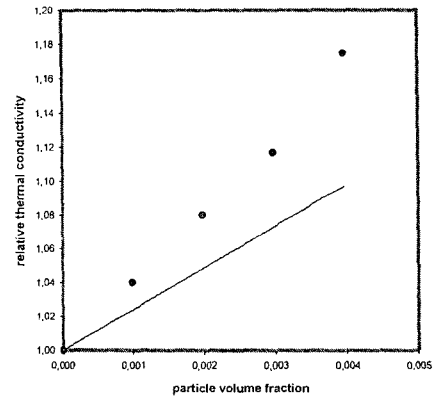


그림 6. 은/증류수 유체의 열전도도

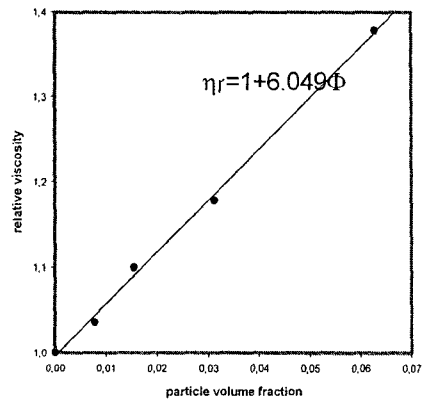


그림 7. 실리카/증류수 유체의 점도

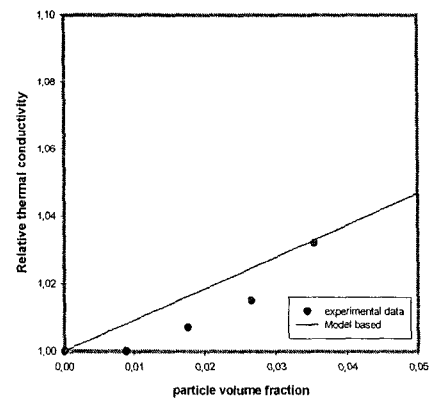


그림 8. 실리카/증류수 유체의 열전도도

표 3. 실리카 입자의 크기에 따른 상대유효부피 변화

particle size(nm)	9	12	100	250	550
relative effective volume (Φ_{eff}/Φ)	3.02	2.42	1.62	1.05	1.02

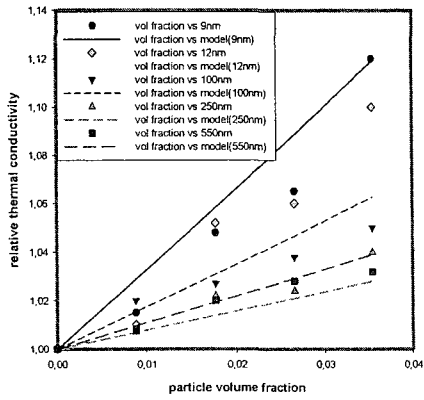


그림 9. 실리카/물 유체에서 입자의 크기에 따른 열전도도 변화