

나노입자 분산 유체의 열전도도 변화

강현욱, 강승우, 이찬호, 김성현
고려대학교 화공생명공학과

Thermal Conductivity Change of Nano-fluid

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

서론

나노 유체란 나노미터 크기의 고체입자가 유체에 안정적으로 분산되어 침전되지 않고 부유된 상태로 존재하는 유체를 말한다. 나노 유체의 경우 그 물리적 특성이 마이크로미터 크기의 입자가 분산된 현탁액과 여러 가지 면에서 차이를 보인다고 알려져 있다. 예로 여러 가지 나노 입자가 첨가된 유체의 열전도도는 입자 자체의 부피 분율에 따른 자연적인 열전도도의 상승폭 이상으로 급격하게 증가한다. 이러한 원리를 이용하여 Choi와 Eastman이 나노 유체가 순수한 유체보다 월등히 높은 열전도도를 갖는다는 사실을 보고한 이후로, 나노 유체를 열교환용 매체로 활용하기 위한 연구가 일부 진행되고 있다. [Eastman, et al., 2001; Keblinski, et al., 2002; Xie, et al., 2002, Xuan and Li, 2000]

본 연구에서는 유체의 열전도도 측정에 많이 사용되는 Transient Hot Wire Method를 이용하여 나노 입자가 대표적인 열전달매체인 물과 에틸렌글리콜에 분산된 용액의 열전도도를 측정하고, 이를 이용하여 유체의 열전도에 대해 해석하였다.

본론

Transient Hot Wire Method는 저항과 온도의 관계를 잘 알고 있는 금속 열선을 수직형 실린더 내에 넣고 유체를 채운 다음 열선에 전류를 흘려주었을 때 측정 시간에 따른 온도의 변화를 측정하여 그 변화되는 정도를 이용하여 열전도도를 계산하는 방식이다. 실린더의 축에 가는 열선이 축 방향으로 있는 계의 열전달에 대해서는 대류 효과를 무시할 경우 다음과 같이 에너지 식을 세울 수 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial \left\{ r \frac{\partial T}{\partial r} \right\}}{\partial r} \quad (1)$$

이를 풀면 다음과 같이 열전도도를 일정 측정시간에 대한 유체의 온도 변화량의 함수로 표현할 수 있다.

$$k = - \frac{q}{4\pi} \frac{-(\ln \xi)}{(-T)} = \frac{q}{4\pi} \frac{(\ln t)}{(-T)} \cong \frac{q}{4\pi} \frac{(\ln \frac{t_2}{t_1})}{(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

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 시간 간격을 짧게 해야 한다.

유체에 고체 입자가 분산되어 있는 계의 열전도도에 대해서는 여러 가지 모델 식이 제안되어 있으나 가장 널리 사용되는 것은 다음과 같은 Hamilton and Crosser식이다.[Hamilton and Crosser, 1962]

$$k = k_f \left[\frac{k_p + (n-1)k_f - (n-1)\alpha(k_f - k_p)}{k_p + (n-1)k_f + \alpha(k_f - k_p)} \right] \quad (3)$$

여기에서 k_f 는 순수한 유체의 열전도도, k_p 는 순수한 입자의 열전도, n 은 입자의 형태를 반영하는 실험적인 factor로 원형일 경우 3이다. 그러나 이 식에는 입자의 크기에 대한 인자가 빠져있다. 마이크로미터 이상의 입자에 대해서는 이 식이 비교적 잘 맞으나, 수십나노미터 이하 크기의 나노입자 분산 현탁액에 대해서는 실험적인 열전도도 결과와 모델식에 의한 열전도도 결과가 상당히 큰 차이를 보인다.

실험

본 연구에서는 그림 1의 장비로 Transient Hot Wire Method를 이용하여 온도를 측정하였으며 4초간 샘플링한 후, 초기 2초간의 데이터를 이용하여 열전도도를 계산하였다.

실험에 사용한 나노입자와 유체는 표 1, 표 2과 같은 기본 물성을 갖고 있다. 실험전 나노입자를 분산시키기 위해 초음파 하에서 한시간동안 교반시켰으며, 48시간의 시간동안 침전되지 않음을 확인한 후 20℃로 유지되는 bath 내에서 안정화시킨 상태에서 시간에 따른 온도변화를 10번 측정하여 평균값을 취하여 열전도도로 환산하였다.

결과 및 고찰

그림 2와 그림 3은 다이아몬드 나노입자 분산 유체와 은 나노입자 분산유체의 부피분율에 따른 열전도도를 측정한 그래프이다. 입자의 농도가 증가하면서 유체의 열전도도가 급격히 향상됨을 볼 수 있었다. 한계 농도를 지나면 입자가 침전되어 정확한 열전도도를 측정할 수 없었다.

그림 4은 만들어진 유체를 점도계를 이용하여 점도를 측정한 후 Einstein relation을 이용하여 유체 내의 입자의 유효 부피분율을 계산한 것이다.

$$\eta_r = 1 + 2.5\Phi \quad (4)$$

주어진 데이터로부터 입자의 유효 부피분율은 순수한 입자의 부피분율의 14.4 배임을 알 수 있으므로, 이를 이용하여 입자의 질량분율을 유효 부피분율로 환산하여 그림 5에 나타내고 모델에 의한 값과 비교하였다. 그림에서 보듯 Hamilton

and Crosser 모델식에 입자의 부피분율을 실제 유체 내에서의 입자의 유효 부피분율로 적용할 경우 나노유체의 열전도도를 잘 모사할 수 있었다. 한편 이러한 열전도도의 향상은 타 용매 등을 사용하거나 용액의 pH 등을 조절하여 분산도가 저하되었을 경우 급격히 줄어들었다.

결론

본 실험에서 기존의 연구결과와 같이 나노입자가 유체 속에 소량 첨가되었을 때 유체의 열전도도가 급격히 향상되었다. 특히 기존의 마이크로미터 이상의 입자 분산계에 적용되던 모델식에 나노입자의 유효 부피분율을 적용하면 나노유체의 열전도도를 잘 모사할 수 있음을 확인하였다. 그러나 아직 나노유체의 열전도도의 향상에 대한 메카니즘에 대해서는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사

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

참고문헌

Eastman, J.A., S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu and L.J. Thomson, 2001, *Applied Phys Letters*, **78**, 718~720
 Hamilton, R.L. and O.K. Crosser, 1962, *IEC Fundamentals*, **1**, 187
 Koblinski, P., S.R. Phillpot, S.U.S. Choi and J.A. Eastman, 2002, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **45**, 855-863
 Xie, H., J. Wang, T. Xi, Y. Liu and F. Ai, 2002, *J. Applied Phys*, **91**, 4568~4572
 Xuan, Y. and O. Li, 2000, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **21**, 58~64

표 1. 나노입자의 물성

입자	크기	밀도	비표면적	열전도도
다이아몬드	20~40nm	3.1g/cm ³	평균 300m ² /g	895W/m-K
은	10~20nm	10.1g/cm ³		429W/m-K

표 2. 분산 용매의 물성

용매	점도	밀도	열전도도	분산 입자
DI Water	1.03 cP	1.0g/cm ³	0.592W/m-K	은
Ethylene Glycol	19.2 cP	1.1g/cm ³	0.262W/m-K	다이아몬드

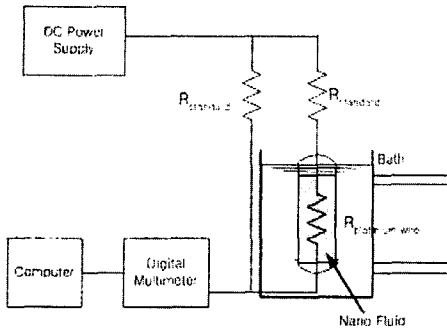


그림 1. 실험장치도

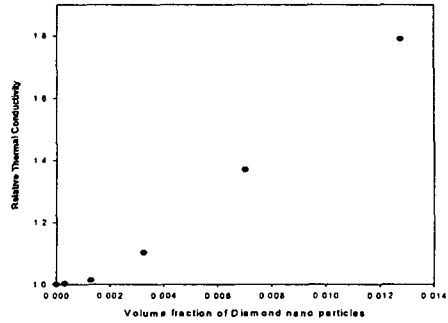


그림 2. 다이아몬드-EG 유체의 열전도도

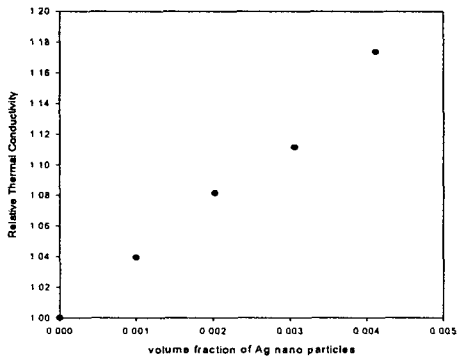


그림 3. 은-물 유체의 열전도도

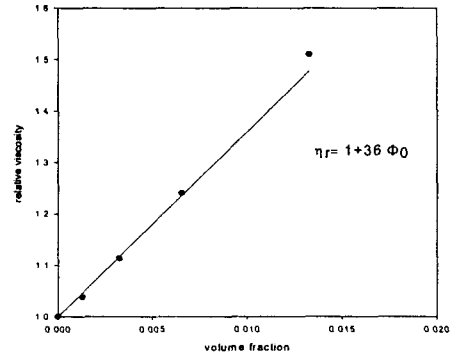


그림 4. 다이아몬드-EG 유체의 점도

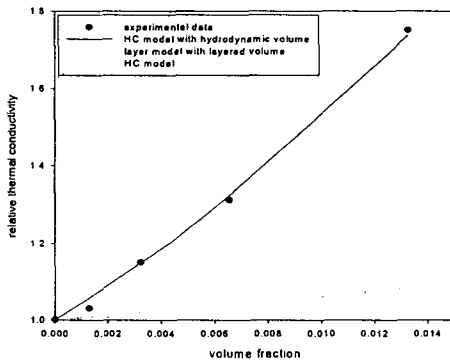


그림 5. 유효부피에 따른 다이아몬드-물 나노유체의 열전도도