

나노유체의 열전도율 측정과 열전달 향상

이신포* · 최철** · 오제명***

Measuring Thermal Conductivity of Nanofluids and Heat Transfer Enhancement

Shinpyo Lee*, Cheol Choi** and Jemyung Oh***

Keywords : Nanofluids(나노유체), Heat Transfer Enhancement(열전달향상), Transient Hot-wire Method(THM, 비정상열선법), Steady State Method(정상상태법), Effective Thermal Conductivity(유효열전도율), AlN(질화알루미늄), Aluminum Nitride, Transformer Oil(절연유)

Abstract

A new class of heat transfer fluid with higher thermal conductivity, called nanofluids has been developed by Dr. S. Choi about decade ago. Many exciting experimental and theoretical results have been reported worldwide to predict the thermal conductivity enhancement of nanofluids, however, they sometimes show excessive large discrepancies between each other. This kind of disagreements in thermal conductivity data is partly ascribable to the accuracy of the measuring apparatus, that is, mostly used THM(transient hot-wire method). New thermal conductivity measuring method whose principle is different from that of conventional THM is proposed in this article and measurements and uncertainty analysis were made for the three nanofluid samples with different particle concentration of pure, 2% and 4% of AlN nanofluids.

1. 서 론

운송부문, 화학공정, 건물의 냉난방 등 거의 전 산업분야에서 열교환기(heat exchanger)가 사용되고 있다. 소형 경량이면서 한편 냉각부하도 매우 높은 고효율 열교환기를 설계하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔다. 개발된 대표적인 방법으로는 열교환기 표면에 대하여 코팅을 하거나, 표면에 거칠기를 주거나, 관의 외부에 펀과 같은 확장표면(extended surface)을 사용하는 등의 형상 설계를 통하여 대류열전달계수(heat transfer coefficient)를 증가시키는 방법이 주로 사용되었다. 그러나 열교환기의 설계자는 최종적으로 열교환기 내부를 순환하는 열교환유체를 선정해야 한다. 이 경우 대부분 유체들의 열전도율이 낮기 때문에 유체선택의 어려움에 부딪히게 되고 기존의 유체보다 높은 열전도율을 갖는 유체는 없는가 또는 부가적인 방법으로 기존 유체의 열불성치를 변화시킬 수는 없는 가하는 의문을 갖게 된다. 기존의 전통적인 열전달 유체에 열전도율이 매우 높은 초미세 금속입자를 부유시켜서 그 기능을 변화 향상시키려는 나노유체 관련연구가 시작된 지 약 10년이 지났다.

현재까지의 연구결과 제조된 유체는 기존의 유체보다 열전도율이 약 20%정도 높게 나타나고 있으며 더 낮은 농도의 금속입자를 사용하면서 열전도도를 더욱 향상시킬 수 있는 방법을 개발하기 위한 연구를 진행하고 있다. 유체에 미세금속을 혼합하여 유체의 열불성을 변화시키려는 연구는 실제로 많은 연구가

수행되었으나 실제 열교환 시스템에 적용시 여러 가지 문제점이 발견되었다. 예를 들면, 유로가 막히거나 유체가 사고로 유출되었을 때 첨가제에 의한 환경오염문제 등이다. 미국 알곤 국립연구소의 S. Choi 박사는 산화금속입자를 물과 에틸렌그리콜 등에 혼합하여 새로운 열교환유체를 제조하고 이 유체를 "nanofluids"로 명명하였다. 그는 비정상열선법을 이용하여 nanofluids의 열전도도를 측정하였으며 미세유로열교환기에 이 유체를 적용하였을 경우 동일한 열전달을 수행하면서 얻을 수 있는 펌프동력의 감소에 대하여 연구하였다.

최근 초미세 산화금속입자의 대량 제조에 대한 기술이 확립되었으며 순수 금속입자의 제조 및 nanofluids의 연속 대량제조에 대한 연구가 진행되고 있다. 잘 알려진 바와 같이 상온에서 고체금속의 열전도율은 유체에 대하여 수백배 정도 크다. 예를 들면 Table. 1에 나타낸 것처럼 상온에서 구리의 열전도율은 물보다 약 700배 크며 엔진오일 보다는 약 3000배 크다.

따라서 만약 이와 같이 열전도도가 매우 높은 고체 금속입자를 이용하여 기존의 유체에 혼합한 새로운 유체를 제조한다면 이 유체의 열전도율은 기존의 유체보다 매우 높을 것으로 예

Table 1. Thermal conductivity of various materials

materials	k (W/m K)
Silver	429
Copper	401
Aluminum	237
Silicon	148
Aluminum oxide	40
Water	0.613
Ethylene	0.252
Engine Oil	0.145

* 경기대학교 기계공학과, shinpyo@kyonggi.ac.kr

** 전력연구원 신소재그룹, cchoi@kepri.re.kr

*** 전력연구원 신소재그룹, ohjm@kepri.re.kr

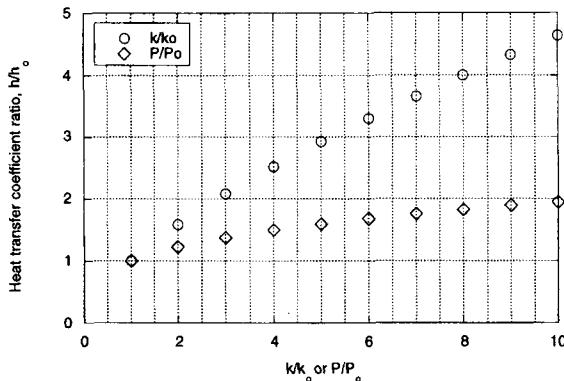


Fig. 1 Potential benefit of nanofluids for heat transfer enhancement

상된다.

S. Choi는 이와 같은 새로운 유체의 가능성을 파악하고 현재의 분말제조기술로 생산할 수 있는 직경 약 10nm의 입자를 이용하여 새로운 기능성 유체에 대한 연구를 수행하였다. 그의 주장에 따르면 nanofluids는 기존의 유체 및 mm크기의 입자가 부유된 유체에 비교하여 매우 우수한 특성을 보이게 된다. 열전달은 입자의 표면에서 일어나고 nano입자들은 극도로 넓은 표면적을 갖기 때문에 열전달에 응용할 경우 매우 높은 잠재적 가능성을 갖는다는 것이다. 현대의 입자제조기술을 이용하면 micro 또는 nano scale로 물질을 대량 제조할 수 있다.

본 논문에서는 열전달측면에서 예상한 나노유체 사용시의 장점을 살펴보고 실제 제조된 나노유체 시료의 대표적인 열전도율 측정 결과를 알아본다. 나노유체의 열전도율 향상 메커니즘을 정리하고 온도변화에 따른 열전도율 변화를 알아본다. 기존에 나노유체의 열전도율 측정을 위하여 예외없이 사용되어 왔던 비정상열선법과 관련된 문제를 알아보고 이를 보완하고 상호 검증할 또 다른 측정 장치로서 정상상태 방법을 이용한 열전도율 측정법에 대하여 고찰한다.

2. 열전달 측면에서의 나노유체의 유용성

열전도율이 증가된 나노유체를 열교환기에 적용할 경우 어느 정도의 열전달 성능향상을 기대할 수 있는가는 S. Choi가 나노유체를 처음 제안하면서 발표한 논문⁽¹⁾에 자세히 서술되어 있다. Dittus와 Boelter가 제시한 파이프내의 난류열전달 관계식은 대류 열전달계수 h 가

$$h \sim V^{0.8} k^{2/3} \quad (1)$$

으로 표시되어 파이프내의 유체속도 V 나 작동유체의 열전도율 k 에 따라 h 가 변화될 수 있음을 보여준다. 이 식을 이용하면 유체의 속도가 동일한 경우 열전도율 변화에 따라 대류열전달계수가

$$\frac{h_{nf}}{h_0} = \left(\frac{k_{nf}}{k_0} \right)^{2/3} \quad (2)$$

의 형식으로 변화함을 알 수 있다. 즉 열전도율이 10배 증가하면 대류열전달계수는 처음보다 4.6배 증가한다. 속도의 효과는 파이프내의 난류압력 강하관계식에 Fanning의 마찰인자를 도입하면 펌프 소요동력으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

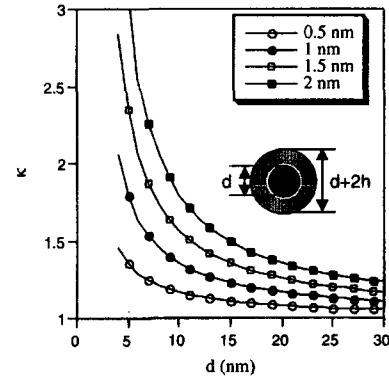


Fig. 2 Thermal conductivity enhancement due to formation of highly conductive layered liquid structure at solid/liquid interface

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0.29} \quad (3)$$

이것은 펌프동력을 10배 증가시키면 대류열전달계수가 처음보다 1.9배 증가함을 의미한다. 위의 내용을 자세히 정리한 것이 Fig. 1로서 열전달 능력을 약 2배 증가시키려면 펌프동력은 10배 증가시켜야 하지만 나노유체를 사용하면 열전도율을 대략 3배 증가시켰을 때 동일한 열전달 효과를 기대할 수 있다.

나노유체의 연구초기에는 쉽게 2배 이상의 열전도율 상승을 이를 것으로 예상하였으나 현재 산화물 나노유체의 경우에는 실제 응용이 가능한 농도범위인 최대 약 5%의 한계농도에서 약 20%의 열전도율 상승이 일어지는 것으로 실험결과들이 발표되고 있다.

3. 나노유체의 열전도율 향상 메커니즘

나노유체의 열전도율 상승효과는 기존의 이론으로 설명할 수 없는 부분이 많았으며 이에 따라 이론연구를 통하여 실험결과를 설명하려는 시도가 많이 이루어졌다. 이론연구에서의 주요 관심사항은 입자의 크기 영향, 혼합유체의 평균온도 상승에 따른 입자의 미세운동(Brownian motion)이 열전도율 상승에 미치는 영향을 설명하는 것이었다. 나노유체의 열전도율 향상에 관한 가능한 메커니즘을 설명한 대표적인 논문으로 Kebinski 등의 논문⁽²⁾이 있다.

그의 논문에서 열전도율 상승의 가능한 요인으로 1)유체입자의 브라운운동 활성화에 의한 고체입자들의 직접접촉 증가 2)고체입자의 표면에 접하여 액체입자들의 규칙적인 층(layer)이 형성되고 이 층은 고체입자의 농도를 증가시키는 효과를 가져와서 열전달이 향상된다는 설명 3)고체 입자 속을 통과하는 열전달 특성이 확산보다는 ballistic한 형태로 이루어져서 고체입자가 열전달의 다리(bridge)역할을 한다는 이론 4) 액체층을 형성한 고체입자들이 효과적으로 연결되고 뭉쳐서 열저항을 감소시킨다는 이론 등으로 설명하고 있다.

이와 같은 요인들은 각각 개별적으로 일어나는 것이 아니라 동시에 함께 발생하므로 이들 효과를 분리하여 각각의 효과를 규명하는 것이 매우 어렵다. 최근 한국 과학자를 중심으로 매우 의미있는 열전도율 예측이론과 관계식들이 발표되고 있다. 대표적으로 Jang 등의 연구⁽³⁾, Chon 등의 연구⁽⁴⁾를 들 수 있으며 다양한 실험결과들을 통합하여 설명하는 시도가 이루어지고 있다.

위의 Fig. 2는 위의 2항에서 설명한 고체입자 주위에 형성

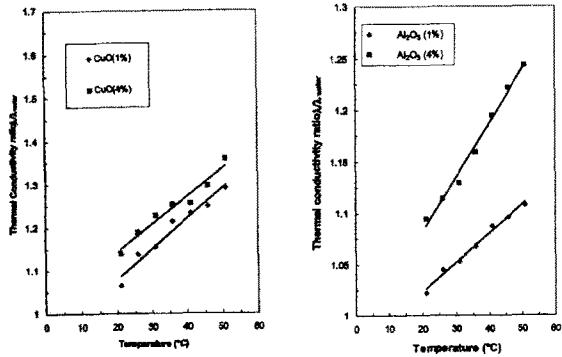


Fig. 3 Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for water-CuO and water-Al₂O₃ nanofluid

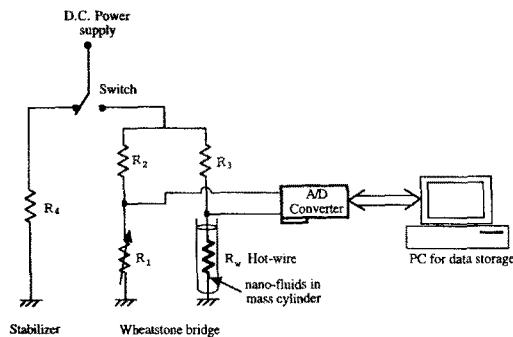


Fig. 4 Schematic diagram of transient hot-wire technique

된 규칙적인 액체층의 형성과 관련된 결과로서 입자의 크기가 작을수록 효과적임을 보여주고 있다.

4. 온도에 따른 나노유체의 열전도율 변화

나노유체의 온도가 높아질수록 그 열전도율이 증가한다는 연구결과가 최근 여러 문헌에서 소개되고 있다. Fig. 3에 Das의 연구결과⁽⁵⁾ 일부를 인용하였다. 물에 Al₂O₃와 CuO 입자를 혼합하여 제조한 나노유체의 열전도율 측정결과이다. 온도의 증가에 따라 열전도율이 상승함을 알 수 있다. CuO의 경우 농도에 관계없이 상승폭이 거의 동일하나 Al₂O₃의 경우 높은 농도의 나노유체가 열전도율 상승폭이 큰 것을 보여준다.

열전도율 측정을 위해 기존에 사용되던 비정상열선법 이외의 새로운 방법(temperature oscillation technique)을 적용했는데 향후 장치와 데이터의 검증을 위하여 더욱 광범위한 조건에서의 실험이 필요하다고 생각된다.

5. 나노유체의 열전도율 측정

5.1 비정상열선법

비정상열선법에서 가느다란 열선센서는 측정하려는 유체 내에 중력방향으로 설치되는데 이때 순간적으로 열선에 가열전류(heating current)를 흘리면 열선에서 발생된 열량은 열선 자체의 온도상승과 또한 열선의 반경방향으로 열선과 접한 유체의 온도를 상승시키는데 사용된다.

예를 들어 열선을 둘러싸고 있는 유체의 열전도율이 높으면 발생된 열은 모두 유체 쪽으로 전달되어 열선자체의 온도상승을 적게 되지만 유체의 열전도율이 낮으면 발생된 열은 유체로

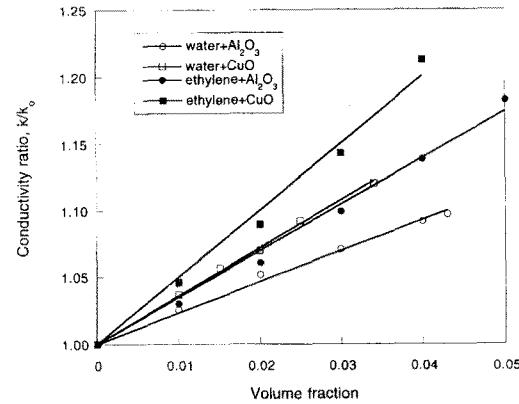


Fig. 5 Thermal conductivity of nanofluids with volume concentration

잘 전달되지 못하고 결과적으로 열선의 온도상승이 크게 나타날 것이다. 이와 같이 열선과 접하고 있는 유체의 열전도율 정도에 따라 열선의 온도상승이 다르게 나타나며 이때 시간에 따른 열선의 온도상승 정도를 측정하면 유체의 열전도율을 환산해 낼 수 있다.

무한 유체 속에 수직으로 잠겨있는 열선에 순간적으로 열량이 공급되었을 때 열선의 온도변화는 Carslaw와 Jaeger의 해석해에 의하여 다음과 같이 표시된다.

$$T(t) - T_{ref} = \frac{q}{4\pi k} \ln \left(\frac{4K}{\alpha^2 C} t \right) \quad (4)$$

여기서 T-T_{ref}는 열선의 온도상승, q는 열선의 단위길이당 공급된 열량, k는 유체의 열전도율, K는 열확산율, t는 경과시간, C는 상수이며 α 는 열선의 반지름이다. 이 식을 두 시간 t₁과 t₂에 대하여 적용하고 정리하면 다음과 같이 열전도율의 표현을 얻을 수 있다. 즉, 시간 t에 따라 열선의 온도 T를 기록하고 데이터를 로그시간-온도로 표시하면 선형관계가 얻어지는데 여기서 직선의 기울기를 얻으면 유체의 열전도율을 계산할 수 있다.

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

Fig. 4는 비정상열선법을 이용한 열전도율 측정장치의 개략도이며 Fig. 5는 기본유체로 물과 에틸렌그리콜 그리고 nanoparticle로서 Al₂O₃와 CuO를 이용하여 모두 4가지 다른 nanofluids를 제조하고 농도에 따른 이들 유체의 열전도율 변화를 나타낸 것이다.⁽⁶⁾ 4가지 nanofluids의 경우 모두 혼합입자의 농도가 높아질수록 열전도율이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이 결과로부터 알 수 있는 두 가지 중요한 사실은 첫째, 유체가 동일한 경우에는 입자의 열전도율이 높을수록 동일한 농도에서 nanofluids의 열전도율 상승이 크며 둘째, 입자가 동일한 경우에는 유체의 열전도율이 낮을수록 nanofluids의 열전도율 상승효과가 크다는 것이다.

5.2 정상상태법

비정상열선법은 액체의 열전도율 측정에 오래전부터 사용되어 왔으며 그 관련 이론도 잘 알려져 있다. 그렇지만 장치를 구성하기 위하여 센서신호의 획득과 데이터 저장 등에 초보적인 전자회로 지식이 사용되는데 단기간에 재현성 있게 이 기술을

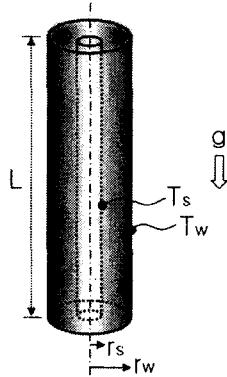


Fig. 6 Heat Transfer from heated wire in concentric cylinder

구현하는 것이 쉬운 것은 아니다. 정상상태법에서 제시할 장치는 가능한 한 전자회로의 구성을 필요로 하지 않고 실제 열전달 과정을 통하여 물질의 열전도율을 구하는 방법으로서 측정이론이 단순하여 누구나 직관적으로 이해할 수 있는 방법이다.

잘 알려진 열전달문제로서 중심이 가열되고 열전달이 반경방향으로 일어나는 원통형 좌표에서의 정상상태 열전달을 생각한다. Fig. 6에 나타낸 환상공간 속에 열전달 대상물질이 채워진 경우에 단위길이당 열전달은 원통좌표계에서 1차원 전도열전달과 유사하게 식 (6)과 같이 표시된다.⁽⁷⁾

$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi k_e (T_s - T_w)}{\ln\left(\frac{r_w}{r_s}\right)} \quad (6)$$

여기서 r_s 와 r_w 는 환상공간의 내측 및 외측 반지름을 표시하며 T_s 와 T_w 는 각각 내측벽의 온도와 외측벽의 온도이고 L 은 환상공간의 길이이다. k_e 는 유효열전도율(effective thermal conductivity)로서 열전달이 완전히 전도에 의해서만 일어난다면 물질의 열전도율 k 와 동일하다. 본 연구에서 제시하는 정상상태 열전달 장치의 경우 열선의 가열선류가 유한한 경우 열선주위로 자연대류가 발생하여 항상 k_e 가 k 보다 크게 될 것이나 전류를 0에 가깝게 줄이면서 데이터를 획득하고 최종적으로 전류가 0인 상태를 외삽(extrapolation)하여 추정하면 이때 얻어진 유효열전도율이 액체의 열전도율과 일치하게 됨을 예상한다.

Fig. 7은 정상상태 실험을 수행하여 얻은 데이터와 이것을 온도차가 0이 될 때의 값을 예측하기 위하여 곡선 맞춤하여 얻은 y -축상의 절편을 함께 표시하고 있다. 이 값들은 비정상열선법으로 측정한 값과 약 2%의 차이 내에서 잘 일치함을 확인하였다. 정상상태의 방법은 비정상열선법과 비교할 때 정밀도는 비슷하나 열전도율 측정에 매우 오랜 시간이 소요되는 단점이 있다. 그러나 비정상열선법으로 측정한 나노유체의 열전도율이 매우 높은 경우에는 정상상태 방법을 적용하여 데이터를 비교 검증하는 것도 매우 의미있는 시도가 될 것이다.

6. 결 론

나노유체와 관련된 연구의 시작부터 최근 진행되고 있는 연구들과 관련하여 대표적인 내용을 정리하여 소개하였다. 관련 연구가 시작된 지 약 10년이 지났으나 확립된 이론이나 데이터는 많이 부족한 편으로 향후 흥미있는 많은 연구가 가능한 분야

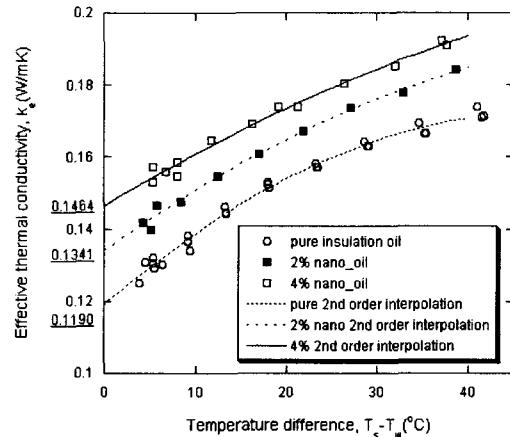


Fig. 7 Effective thermal conductivity of three fluid samples and its curve fitting

로 생각된다.

최근 한국인 학자들을 중심으로 나노유체의 열전도율을 성공적으로 예측하는 이론식들이 많이 발표되고 있어서 매우 고무적이다. 열전도율 이외에 나노유체와 관련된 여러 가지 열물성을 정밀하게 측정하는 방법과 데이터가 많이 발표되기를 기대한다. 또한 실제 유동상태에서의 마찰과 열전달에 관련된 실험결과도 가치있는 연구가 될 것이다. 향후 나노유체를 실제 시스템에 적용하여 성공한 적용 예들이 많이 발표되기를 기대한다.

참고문헌

- [1] Choi, S. U. S., 1995, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," ASME International mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, CA.
- [2] Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S. and Eastman, J. S., 2002, "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 855-863.
- [3] Jang, S. P. and Choi, U. S., 2004, "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," Applied Physics Letters, Vol. 84, Issue 21, pp. 4316-4318.
- [4] Chon, C., Kihm, K. D., Lee, S., Choi, U. S., 2005, "Empirical Correlation of Finding the Role of Temperature and Particle Size for Nanofluid (Al₂O₃) Thermal Conductivity Enhancement," Applied Physics Letters, Vol. 87, 153107.
- [5] Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids," Journal of heat transfer, Vol. 125, pp. 567-574.
- [6] Lee, S., Choi, U. S., Li, S., and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," ASME Tran. J. Heat Transfer, Vol. 121, pp. 280-289.
- [7] Holman, J. P., 1981, Heat Transfer, 5th Ed., McGraw Hill, pp. 289-290.