

나노 유체(Nanofluids)의 열전도도

장 석 필*

(2004년 3월 18일 접수, 2004년 6월 11일 심사완료)

Thermal Conductivities of Nanofluids

Seok Pil Jang

Key Words : Nanofluids(나노 유체), Thermal Conductivity(열전도도), Brownian Motion(브라운 운동), Nanoscale(나노 크기), Kapitza Resistance (카피자 저항), Kinetic Theory (운동론)

Abstract

Nanofluids have anomalously high thermal conductivities at very low fraction, strongly temperature-dependent and size-dependent conductivities, and three-fold higher critical heat flux than that of base fluids. Traditional conductivity theories such as the Maxwell or other macroscale approaches cannot explain why nanofluids have these intriguing features. So in this paper, we devise a theoretical model that accounts for the fundamental role of dynamic nanoparticles in nanofluids. The proposed model not only captures the concentration and temperature-dependent conductivity, but also predicts strongly size-dependent conductivity. Furthermore, we physically explain the new phenomena for nanofluids. In addition, based on a proposed model, the effects of various parameters such as the ratio of thermal conductivity of nanofluids to that of a base fluid, volume fraction, nanoparticle size, and temperature on the thermal conductivities of nanofluids are investigated.

기호설명

\bar{C} : 평균 속도
 $\bar{C}_{R.M}$: 나노 입자의 random 속도
 \bar{C}_T : 나노 입자의 translation 속도
 \hat{C}_V : 단위 부피당 비열
 d : 등가 지름
 D : Brownian diffusion 계수
 D_o : Einstein diffusion 계수
 D_c : 특성 길이
 D_{nano} : 나노 입자의 특성 길이
 f : 부피비
 h : 열전달 계수
 J_U : 열유속

k : 열전도도
 k_b : Boltzmann 상수
 l : 평균 자유 경로(mean free path)
 M : 분자량
 M_{nano} : 나노 입자의 분자량
 M_{BF} : Base 유체의 분자량
 Nu : Nusselt 수
 Pr : Prandtl 수
 Re : Reynolds 수
 R_k : Kapitza 저항
 T : 온도
 u : 분자의 속도
 \vec{v} : 자유전자 또는 Lattice wave 속도

그리스문자

α : 평균 transmission probability
 δ : 경계층 두께
 δ_T : 열 경계층 두께
 Λ_{nano} : 나노 입자의 평균 충돌 거리

* 회원, 한국항공대 항공우주기계공학과
 E-mail: spjang@hau.ac.kr
 TEL:(02)300-0112 FAX:(02)3158-2191

- μ : 점성 계수
- ν : 동점성 계수
- ρ : 밀도
- ρ_U : 에너지 밀도

하첨자

- BF* : Base 유체
- eff* : 나노 유체
- f* : 유체
- nano* : 나노 입자

1. 서론

최근 전자 부품이 고성능화 고집적화됨에 따라 단위 면적당 발열량이 급격히 증가하고 있으며 더불어 냉각 기술의 중요성이 새롭게 인식되고 있다. 대표적인 예를 들면 Intel Microprocessors의 발열량이 최근 100W 급까지 육박하고 있으며 레이저 장비나 통신기기 산업 등에서는 1000W 이상의 발열을 냉각할 수 있는 고성능 냉각기술이 요구되고 있다.⁽¹⁻²⁾ 따라서 차세대 냉각 장치 개발을 위해서 많은 연구가⁽³⁻⁷⁾ 수행되고 있으며⁽³⁻⁷⁾ 대부분의 연구들이 두 가지 방법론에 치중하면서 냉각 장치의 열전달 계수를 증가시키려고 하였다. 두 가지 방법론은 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 설명할 수 있다.

$$h = \frac{Nu k_f}{D_c} \tag{1}$$

여기서 D_c , h , k_f 그리고 Nu 는 각각 특성길이, 열전달 계수, 유체의 열전도도, Nusselt 수이다. 첫번째는 Nusselt 수를 증가시키는 방법으로 특히 냉각 장치의 형상을 최적화 함으로써 열전달 계수를 증가시키는 방법⁽³⁻⁵⁾이며 두 번째 방법은 냉각 장치의 특성 길이(D_c)를 작게 함으로써 열전달 계수를 증가시키는 방법이다.⁽⁶⁻⁷⁾ 이 두 가지 방법론을 모두 적용한 대표적인 예가 고성능 고발열 전자 부품 냉각에 사용될 수 있는 마이크로 채널 히트싱크⁽⁶⁾이다.

본 연구에서는 최근 차세대 냉각 유체로 대두되고 있으며 냉각 성능 향상에 새로운 방법론을 제시하는 나노 유체의 열적 특성을 소개하고, 나노 유체의 열전도도를 예측할 수 있는 이론적 모델을 제시하고자 한다. 그리고 본 연구에서 제시한 이

론적 모델을 바탕으로 현재까지 실험적으로 발견된 나노 유체의 열적 특성을 설명하고자 한다.

2. 나노 유체(Nanofluids)

나노 유체란 일반적인 유체에 소량의 부피를 가지는 나노 입자를 넣어서 만든 유체이다.⁽⁸⁾ Fig.1은 TEM(Transmission Electron Micrographs)으로 찍은 Base 유체로 Ethylene Glycol을 사용하고 6nm 크기의 나노 입자를 0.56%의 부피비로 넣은 구리 나노 유체 (copper nanofluids)를 보여주고 있다. 현재까지 나노 유체의 열적 특성에 대한 논문 발표수는 Fig. 2에 잘 나타나 있다. Fig. 2에 의하면 최근 2003년도 이후 급격히 나노 유체에 대한 연구가 진행되고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 나노 유체의 열적 특성이 기존에 밀리미터 혹은 마이크로 미터 크기의 입자를 넣은 유체의 열적 특성과는 전혀 다른 특징을 보여주기 때문이다.⁽⁸⁾

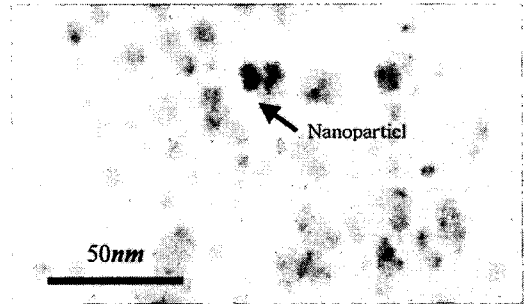


Fig. 1 Nanofluids: Copper based ethylene glycol

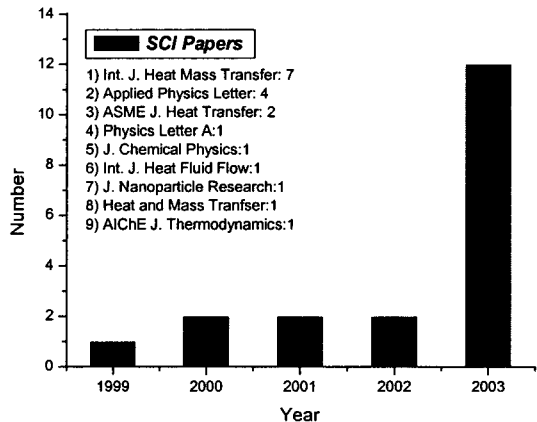


Fig. 2 Research trend for nanofluids

지금까지 실험적으로 발견된 나노 유체의 열적 특성은 4 가지로 요약할 수 있다. 첫번째는 Base 유체의 부피에 대해 소량의 부피(1% 미만)를 가지는 나노 입자를 첨가하더라도 나노 유체의 열전도도가 대략 10% 정도 상승한다는 것이다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 두 번째는 열전도도가 온도 증가에 따라 급격히 상승한다는 것이다.⁽¹¹⁻¹²⁾ 이 결과는 나노 유체를 냉각 유체로 사용할 경우 온도가 증가하면 스스로 열전도도를 증가시켜서 열전달을 많이 일으키도록 한다는 것이다. 세 번째는 나노 입자가 작아질수록 열전도도가 상승한다는 것이다.⁽¹³⁾ 이러한 실험적 결과는 기존의 나노 크기인 박막의 열전도도 특성과는 반대 결과이다. 즉 나노 크기의 박막의 열전도도는 박막의 크기(나노 입자의 크기)가 작아질수록 박막의 열전도도가 급격히 줄어든다.⁽¹⁴⁾ 마지막 나노 유체의 열 특성은 임계 열유속(critical heat flux)이 3 배 정도 향상된다는 사실이다.⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 이런 나노 유체의 열적 특성은 기존의 복합 재료의 열전도도를 예측할 수 있는 Maxwell 모델⁽¹⁸⁾이나 Maxwell 모델을 변형한 모델⁽¹⁹⁾을 이용해서는 전혀 설명되어지지 않는다. 따라서 본 연구에서는 기존의 모델과는 전혀 다른 접근 방법, 즉 기존의 Maxwell 모델⁽¹⁸⁾이나 그 변형 모델⁽¹⁹⁾은 나노 입자가 유체 속에서 정지되어 있다는 가정 하에서 열전도도를 예측하였는데, 본 연구에서는 나노 입자들이 유체 속에서 브라운 운동을 하면서 움직인다는 가정 하에서 나노 유체의 열전도도 모델을 이론적으로 유도하고자 한다.

3. 나노 유체의 열전도도 모델

열전도란 에너지가 많은 입자와 에너지가 적은 입자 사이의 상호 충돌에 의해서 열이 전달되는 것이다. 예를 들면 절연체에서는 Lattice Wave(또는 Phonon Wave)에 의해서 열이 전달되고 도체에서는 자유전자에 의해서 열이 전달되어진다.⁽²⁰⁾ 특히 기체나 유체에서는 불규칙하게 운동하는 분자들의 충돌에 의해서 열이 전달된다.⁽²¹⁾ 본 연구에서도 나노 유체의 내부에서 나노 입자들과 물 분자들의 충돌에 의해서 열이 이동한다고 가정하고 Kinetic Theory, Kapitza Resistance⁽²²⁾ 그리고 브라운 운동을 사용하여 열전도도 모델을 유도하였다.

일반적으로 기체 및 유체 분자들이 서로 충돌한 후 평균 자유 경로 만큼 자유롭게 움직이며 그 결과 한 방향, 예를 들면 z 방향으로 에너지가 다음과 같이 전달된다.⁽²¹⁾

$$J_U = -l_2 \hat{C}_V \bar{C} \frac{dT}{dz} = -\frac{1}{3} l \hat{C}_V \bar{C} \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

여기서 \bar{C} , \hat{C}_V , J_U , l_2 , 그리고 T 는 각각 평균 속도, 단위 부피당 비열, 열유속, z 방향의 평균 자유 경로, 온도이다. 식 (2)에 의하면 기체 및 유체에서 열전도도는 이론적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽²¹⁾

$$k = \frac{1}{3} l \hat{C}_V \bar{C} \quad (3)$$

여기서 k 는 열전도도이다. 그리고 분자의 평균 속도는 다음과 같다.

$$\bar{C} = \left(\frac{8k_b T}{\pi M} \right)^{1/2} \quad (4)$$

여기서 $k_b = 1.3087 \times 10^{-23} J/K$ 는 Boltzman 상수이고 M 은 분자량이다.

이와 유사하게 본 연구에서는 두 가지 사실을 바탕으로 나노 유체의 열전도도를 4 가지 열전달 모드로 나누어 이론적으로 유도한다. 첫번째 사실은 나노 입자들이 유체 분자들과의 충돌에 의해 브라운 운동을 한다는 것이다. 이 사실은 Base 유체에 부유하고 있는 입자들은 초당 수 백만번의 방향을 바꾸면서 움직인다고 Einstein⁽²³⁾에 의해서 지적되었다. 두 번째 사실은 나노 입자 표면에 유체 분자들이 3 개의 층을 형성한다는 것이다. 이 사실은 Yu 등⁽²⁴⁾에 의해서 밝혀진 사실이다. Fig. 3은 나노 유체 내에서의 4 가지의 열전달 메커니즘을 보여주고 있다.

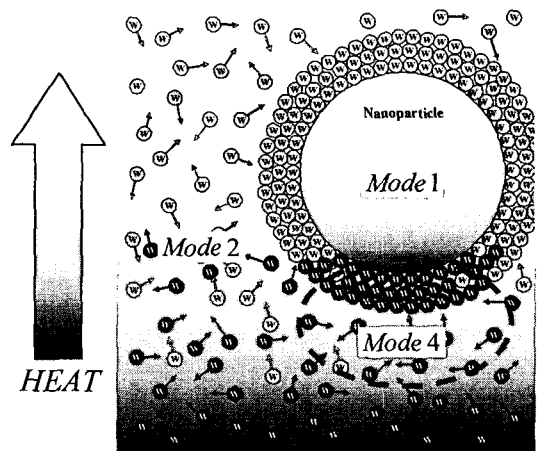


Fig. 3 Modes of energy transport in nanofluids

First Mode (Thermal diffusion in nanoparticles)

첫번째 열전달 메커니즘은 나노 입자 내부에서 열확산 (thermal diffusion)에 의한 열전달이며 물리적 의미는 나노 입자의 열전도도에 의해서 열이 전달되는 것을 의미한다.

$$J_U = -\frac{1}{3}l_{nano}\hat{C}_{V,nano}\bar{v}f\frac{dT}{dz} = -k_{nano}f\frac{dT}{dz} \quad (5)$$

여기서 f , k_{nano} , 그리고 \bar{v} 는 각각 부피비 (volume fraction), 나노 입자의 열전도도, 그리고 자유전자나 Lattice Wave 의 평균 속도를 나타낸다. 특히 나노 입자의 열전도도는 그 물질의 Bulk 열전도도를 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 나노 입자의 열전도도를 예측하기 위해서 Kapitza Resistance⁽²²⁾를 고려하여 계산하였다.

$$R_k = \left(\frac{1}{4}\hat{C}_V\bar{v}\alpha_{nano\rightarrow BF} \right)^{-1} \quad (6)$$

여기서 R_k 와 $\alpha_{nano\rightarrow BF}$ 는 각각 Kapitza Resistance⁽²²⁾와 평균 Transmission Probability 를 나타낸다.

$$\alpha_{nano\rightarrow BF} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_{nano} + Z_{BF})^2} \sim O(10^{-1}) \quad (7)$$

여기서 $Z = \rho\bar{v}$ 이고 ρ 는 밀도이다. 식 (6)과 (7) 을 이용하면 Kapitza Resistance 의 크기를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$R_k \sim O(10^{-7}) \quad (8)$$

식 (8)에 의하면 비록 Kapitza Resistance 의 크기가 매우 작지만 나노 입자의 특성길이가 매우 작기 때문에 Kapitza Resistance 에 의해서 감소되는 열전도도를 고려하여 나노 입자의 등가 열전도도를 계산해야 한다. 따라서 Kapitza Resistance 를 고려하여 나노 입자의 등가 열전도도를 다음과 같이 구하였다.

$$\frac{k_{nano}}{k_{particle}} = \frac{D_{nano}}{D_{nano} + k_{particle}R_k} \sim O(10^{-2}) \quad (9)$$

여기서 D_{nano} , k_{nano} , 그리고 $k_{particle}$ 은 각각 나노

입자의 특성길이, 나노 입자의 등가 열전도도, 나노 입자의 열전도도이다. 그리고 식 (9)를 이용하여 여 식 (5)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J_U = -\beta k_{particle}f\frac{dT}{dz}, \beta = 0.01 \quad (10)$$

여기서 β 는 Kapitza Resistance 를 고려하기 위한 상수이다.

Second Mode (Thermal diffusion of a base fluid)

두 번째 모드는 Base 유체 분자들의 상호 충돌에 의한 열전달이며, 이것은 물리적으로 유체의 열전도도에 의해서 열이 전달되는 것을 의미한다.

$$J_U = -\frac{1}{3}l_{BF}\hat{C}_{V,BF}\bar{C}_{BF}\frac{dT}{dz}(1-f) = -k_{BF}(1-f)\frac{dT}{dz} \quad (11)$$

Third Mode (Collision between nanoparticles)

세번째 모드는 나노 입자의 브라운 운동에 의한 나노 입자들의 상호 충돌에 의해서 열이 전달되는 방법이다.

$$J_U = [\rho_U(z)\bar{C}_{T,z}(z) - \rho_U(z + \Lambda_{nano})\bar{C}_{T,z}(z + \Lambda_{nano})]f = -\Lambda_{nano}\frac{\partial}{\partial T}(\rho_U \cdot \bar{C}_{T,z})f\frac{dT}{dz} = -\frac{2}{3}\Lambda_{nano}\hat{C}_{V,nano}\bar{C}_Tf\frac{dT}{dz} \quad (12)$$

여기서 \bar{C}_T , Λ_{nano} , 그리고 ρ_U 는 각각 나노 입자의 translation 속도, 나노 입자의 평균 충돌 거리, 에너지 밀도이다. 세번째 모드는 order-of-magnitude 분석을 이용하여 다른 모드와 비교해 보면 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 본 모드는 무시할 수 있다.

Last Mode (Nanoconvection due to Brownian motion)

마지막 모드는 Einstein⁽²³⁾이 제시했듯이 입자가 유체에 부유하고 있으면 열에 의해서 발생된 교란 (fluctuation)으로 입자가 초당 수 백만번 방향을 바꾸도록 되도록 만드는 브라운 운동에 의한 열전달이다. 비록 브라운 운동을 시간으로 평균하면 나노 입자의 불규칙 운동은 zero 가 되지만 나노 입자와 유체 분자 사이의 상호 열적 충돌 작용은 존재한다. 따라서 마지막 모드를 본 연구에서는 Nanoconvection 이라고 정의하였다.

$$J_U = h(T_{nano} - T_{BF})f = h\delta_T f \frac{T_{nano} - T_{BF}}{\delta_T} \quad (13)$$

$$\sim h\delta_T f \frac{dT}{dz} = k_{nanoconv.} \frac{dT}{dz}$$

여기서 h , $k_{nanoconv.}$, δ_T 는 각각 나노 입자를 지나가는 열전달 계수, Nanoconvection 에 의한 등가 열전도도, 열 경계층 두께이다.

위의 3 가지 열전달 모드를 중첩하면 다음과 같은 나노 유체의 열전도도 모델을 얻을 수 있다.

$$k_{eff} = \beta k_{particle} f + k_{BF}(1-f) + fh\delta_T \quad (14)$$

여기서 k_{eff} 는 나노 유체의 열전도도이다. 그리고 네 번째 모드의 값을 정량적으로 계산하기 위해서 본 연구에서는 유체가 구를 지나갈 때의 Nusselt 수를 이용하여 열전달 계수를 구하였다.^(25, 26)

$$Nu = 2.0 + 0.5 Re Pr + O(Re Pr)^2 \quad (15)$$

본 연구에서는 Reynolds 수와 Prandtl 수의 order 가 각각 1, 10 이므로 식 (15)에서 세 번째 부분이 지배적이다. 따라서 식 (15)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Nu \sim Re^2 Pr^2 \quad (16)$$

식 (16)을 근거로 유체가 나노 입자를 지날 때 열전달 계수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$h \sim \frac{k_{BF}}{d_{nano}} Re^2 Pr^2 \quad (17)$$

또한 나노 크기에서 열 경계층의 크기를 계산하기 위해서 본 연구자는 Yu 등⁽²⁴⁾에 의해 밝혀진 나노 입자 표면에 유체 분자들이 3 개의 층을 형성한다는 사실과 Prandtl 수의 물리적 의미를 바탕으로 열 경계층의 두께를 다음과 같이 표현하였다.

$$\delta_T \sim \frac{\delta}{Pr} \quad (18)$$

여기서 δ 는 경계층 두께이다. 일반적으로 경계층 두께는 Reynolds 수의 역수에 비례한다.⁽²⁷⁾ 그러나 나노 크기에서는 경계층의 크기가 나노 입자 표면에 형성된 Base 유체 분자의 층 수에 비례한다고

가정할 수 있다. 그 이유는 나노 입자 표면에 층을 형성한 유체 분자들의 속도가 자유롭게 움직이는 유체 분자의 속도보다 훨씬 작기 때문이다. 따라서 경계층은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta \sim 3d_{BF} \quad (19)$$

여기서 d_{BF} 는 Base 유체 분자의 등가 지름이다. 식 (17)~(19)를 이용하여 나노 유체의 열전도도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$k_{eff} = \beta k_{particle} f + k_{BF}(1-f) + C_1 3 \frac{d_{BF}}{d_{nano}} k_{BF} Re_{d_{nano}}^2 Pr f \quad (20)$$

여기서 $C_1 = 12$ 는 실험 상수이며 Reynolds 수는 다음과 같이 정의한다.

$$Re_{d_{nano}} = \frac{\bar{C}_{R.M.} d_{nano}}{\nu} \quad (21)$$

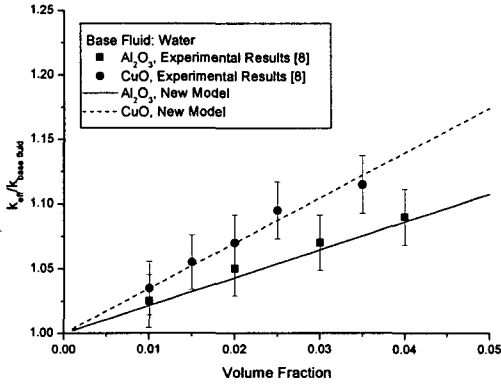
여기서 $\bar{C}_{R.M.}$ 과 ν 는 각각 나노 입자의 Random 속도와 동점성 계수이다. 그리고 $\bar{C}_{R.M.}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{C}_{R.M.} = \frac{D}{l_{BF}} = \frac{2D_o}{l_{BF}}, \quad D_o = \frac{k_b T}{3\pi\mu d_{nano}} \quad (22)$$

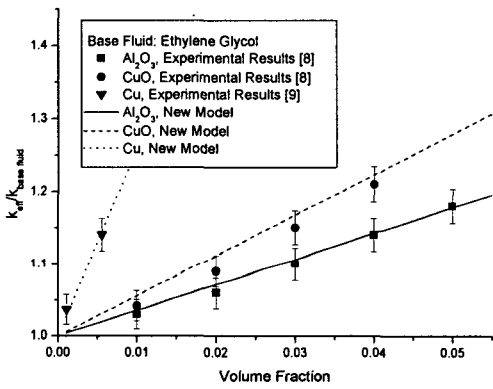
여기서 D , μ , 그리고 l_{BF} 는 각각 hydrodynamic coupling 을 고려한 브라운 확산 계수, Base 유체의 점성 계수, Base 유체 분자의 평균 자유 경로이다.

4. 열전도도 모델의 타당성 검증

본 연구에서 제시한 나노 유체의 열전도도 모델에 대한 타당성을 검증하기 위해서 지금까지 발표된 실험결과와 본 열전도도 모델을 이용한 결과와 비교해 보았다. Fig. 4(a)~(b)는 본 연구에서 제시한 모델의 결과와 기존의 제시된 Base 유체로 물 또는 ethylene glycol 을 사용한 것에 38.4nm Al_2O_3 또는 24.4nm CuO 를 첨가한 나노 유체의 volume fraction 에 대한 열전도도의 실험적 결과를 보여주고 있으며 모델이 실험 결과를 잘 예측하고 있음을 보여준다.



(a) Water-based nanofluids



(b) Ethylene glycol-based nanofluids

Fig. 4 Comparison between experimental results and those from a new model

5. 열전도도에 영향을 미치는 인자

5.1 나노 입자의 열전도도에 대한 Base 유체의 열전도도의 비

본 연구에서 제시한 모델을 사용하여 나노 입자의 열전도도에 대한 유체의 열전도도의 비가 나노 유체의 열전도도에 미치는 영향을 이론적으로 계산하였다. Fig. 5는 그 결과를 보여주고 있다. Fig. 5에 의하면 나노 유체의 열전도도는 나노 입자의 열전도도에 대한 유체의 열전도도의 비에 따라 매우 천천히 상승함을 알 수 있다. 즉 나노 입자의 열전도도에 대한 유체의 열전도도의 비가 나노 유체의 열전도도 상승에 중요한 인자가 아님을 알 수 있다.

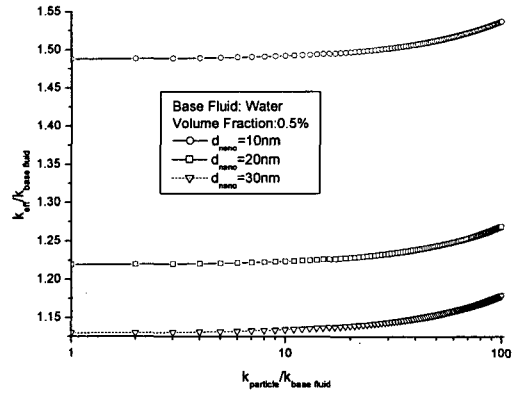


Fig. 5 Effect of the ratio of the thermal conductivity of nanoparticles to that of a base fluid on the thermal conductivity of nanofluids

5.2 나노 입자 부피에 대한 유체의 부피비

Fig. 4는 부피비에 대한 나노 유체의 열전도도 효과를 보여주고 있다. Fig. 4에서 보듯이 부피비가 증가하면 나노 유체의 열전도도가 증가하게 됨을 알 수 있다. 하지만 부피비가 너무 커지면 나노 유체의 유동 특성 즉 압력 강하가 커질 뿐만 아니라 나노 입자들이 유체 내부에 부유한다는 가정 자체에도 문제가 생길 수 있다. 따라서 본 연구에서는 나노 유체의 열전도도 상승은 적은 부피비에서만 가능하다고 생각되어진다. 물론 대부분의 실험 결과도 부피비가 5% 미만에서 실시되었다.

5.3 나노 입자의 크기

본 연구에서 제시한 모델을 이용하여 나노 입자의 크기에 대한 나노 유체의 열전도도 관계를 연구해 보았다. Fig. 6는 나노 유체의 열전도도에 대한 나노 입자 크기의 영향을 보여주고 있다. 현재까지 제시된 실험결과와 모델의 결과를 비교해 보면 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에 의하면 나노 입자의 크기가 작아질수록 나노 유체의 열전도도가 점점 커짐을 알 수 있다. 이런 현상은 기존의 Maxwell 모델⁽¹⁸⁾과 그 변형된 모델⁽¹⁹⁾에서는 전혀 설명할 수 없었다. 하지만 본 연구에서 제시한 모델은 물리적으로 위의 현상을 설명할 수 있다. 그 이유는 다음과 같다. 입자가 작아질수록 브라운 운동이 점점 커지게 되어 나노 유체의 열전달 모드 중 네 번째 모드가 급격히 커지게 되어서 열전도도가 상승하게 된다.

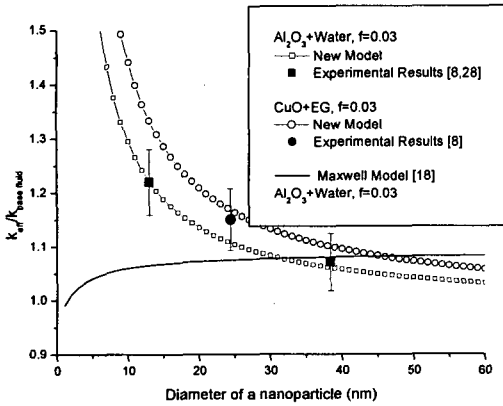


Fig. 6 Effect of nanoparticle diameter on the thermal conductivity of nanofluids

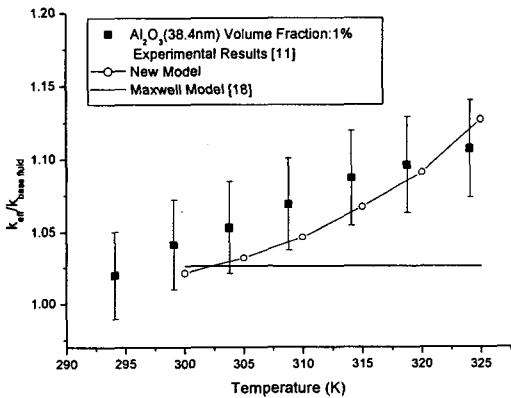


Fig. 7 Effect of temperature on the thermal conductivity of nanofluids

5.4 온도

Fig. 7 은 나노 유체의 열전도도에 대한 온도 효과를 보여주고 있다. 최근 Das 등(11,12)은 실험적으로 나노 유체의 열전도도가 온도에 따라 급격히 증가한다는 사실을 발표하였다. 하지만 이런 새로운 현상은 기존의 Maxwell 모델(18)과 그 변형 모델(19)에 의해 전혀 설명 되어질 수 없었다. 하지만 본 연구에서 제시한 모델은 Das 등(11)의 실험결과를 물리적으로 설명할 수 있다. 그 이유는 다음과 같다. 온도가 증가하면 유체의 동점성도는 감소하고 나노 입자의 브라운 운동은 증가한다. 따라서 이 두 가지 효과에 의해서 네 번째 모드(Nano-convection)가 급격히 증가하게 된다. 그 결과 열전도도가 온도에 따라 상승하게 된다.

6. 결론

본 연구에서는 최근 차세대 냉각 유체로 대두되고 있는 나노 유체의 열적 특성을 소개하고 나노 유체의 열전도도를 예측할 수 있는 이론적 모델을 Einstein(23)의 브라운 운동에 대한 이론을 확장 시켜서 제시하였다. 그 결과 기존의 Maxwell 모델(18)과 그 변형된 모델(19)로 설명할 수 없었던 새로운 현상을 물리적으로 설명할 수 있었다. 특히 나노 유체의 열전도도에 영향을 미치는 4가지 인자 (나노 입자 자체의 열전도도에 대한 Base 유체의 열전도도비, 나노 입자 부피에 대한 유체 부피의 비, 나노 입자의 크기, 온도)에 대해 이론적 모델을 이용하여 연구하였다. 온도가 증가할수록, 나노 입자가 작을수록, 나노 입자 부피에 대한 유체 부피의 비가 증가할수록 나노 유체의 열전도도가 증가함을 알 수 있었다. 또한 나노 입자의 열전도도에 대한 Base 유체의 열전도도 비가 나노 유체의 열전도도에 미치는 영향이 미약함을 알 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학재단(KOSEF)에서 지원하는 해외 박사 후 과정 지원사업으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Hwang, J., Kim, S. Y. and Kang, B. H., 2003, "Thermal Transport from an Aluminum Foam Heat Sink in a Confined Impinging Air Jet," *Transactions of the KSME B*, Vol. 27, No. 4, pp. 496~503.
- (2) Jang, S. P., Kim, S. J. and Paik, K. W., 2003, "Experimental Investigation of Thermal Characteristics for a Microchannel Heat Sink Subject to an Impinging Jet, Using a Micro-Thermal Sensor Array," *Sensors and Actuators A*, Vol. 105, pp. 211~224.
- (3) Bar-Cohen, A. and Jelinek, M., 1986, "Optimum Arrays of Longitudinal, Rectangular Fins in Con-vec-tive Heat Transfer," *Heat Transfer Eng.*, Vol. 6, pp. 595~601.
- (4) Knight, R. W., Hall, D. J., Gooding, J. S. and Jaeger, R. C., 1992, "Heat Sink Optimization with Application to Microchannels," *IEEE Trans. Comp. Hybrids Manuf. Technol.*, Vol. 15, pp. 832~842.
- (5) Wirtz, R. A., Chen, W. and Zhou, R., 1994, "Effect of Flow Bypass on the Performance of Longitudinal Fin Heat Sinks," *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 116, pp. 206~211.
- (6) Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. W., 1981, "High-Performance Heat Sinking for VLSI," *IEEE Electronic Devices*, Vol. 2, pp. 126~129.

- (7) Min, J. Y., Jang, S. P. and Kim, S. J., 2004, "Effect of Tip Clearance on the Cooling Performance of a Micro Channel Heat Sink," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 2823~2827.
- (8) Lee, S., Choi, S. U. S., Li, S. and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 121, pp. 280~289.
- (9) Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Yu, W. and Thompson, L. J., 2001, "Anomalously Increased Effective Thermal Conductivity of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 78, pp. 718~720.
- (10) Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E. and Grulke, E. A., 2001, "Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 79, pp. 2252~2254.
- (11) Das, S. K., Putra, N., Thiesen, P. and Roetzel, W., 2003, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 567~574.
- (12) Patel, H. E., Das, S. K., Sundararajan, T., Nair, A. S., George, B. and Pradeep, T., 2003, "Thermal Conductivities of Naked and Monolayer Protected Metal Nanoparticle Base Nanofluids: Manifestation of Anomalous Enhancement and Chemical Effects," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, pp. 2931~2933.
- (13) Jang, S. P. and Choi, S. U. S., 2004, "The Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," *Appl. Phys. Lett.* (In Review).
- (14) Chen, G., 1996, "Nonlocal and Nonequilibrium Heat Conduction in the Vicinity of Nanoparticles," *ASME J. Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 539~545.
- (15) You, S. M., Kim, J. H. and Kim, K. H., 2003, "Effect of Nanoparticles on Critical Heat Flux of Water in Pool Boiling Heat Transfer," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 83, pp. 3374~3376.
- (16) Das, S. K., Putra, N. and Roetzel, W., 2003, "Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 851~862.
- (17) Vassallo, P., Kumar, R. and Amico, S. D., 2004, "Pool Boiling Heat Transfer Experiments in Silica-water Nano-Fluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 407~411.
- (18) Maxwell, J. C., 1873, "Electricity and Magnetism Clarendon," Press Oxford UK.
- (19) Hamilton, R. L. and Crosser, O. K., 1962, "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems," *I&EC Fundamental*, Vol. 1, pp. 187~191.
- (20) Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 1996, "Fundamental of Heat and Mass Transfer," 4th Ed., John Wiley & Sons.
- (21) Kittel, C. and Kroemer, H., 1980, "Thermal physics," 2nd Ed., W.H. Freeman and Company.
- (22) Kapitza, P. L., 1941, "The Study of Heat Transfer in Helium II," *J. Phys. (USSR)*, Vol. 4, p. 181.
- (23) Einstein, A., 1956, "Investigation on the Theory of Brownian Movement," Dover, New York.
- (24) Yu, C. -J., Richter, A. G., Datta, A., Durbin, M. K. and Dutta, P., 1999, "Observation of Molecular Layering in Thin Liquid Films Using X-Ray Reflectivity," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 82, pp. 2326~2329.
- (25) White, F. M., 1991, "Viscous Fluid Flow," 2nd Ed., McGraw-Hill.
- (26) Tomitika, S., Aoi, T. and Yosinabu, H., 1953, "On the Forces Acting on a Circular Cylinder Set Obliquely in Uniform Stream at Lower Values of Reynolds Number," *Proc. Roy. Soc. London Ser. A*, Vol. 129, pp. 233~244.
- (27) Schlichting, H., 1979, "Boundary Layer Theory," 7th Ed., McGraw-Hill Part B.
- (28) Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K. and Hishinuma, N., 1993, "Alternation of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion γ - Al_2O_3 , SiO_2 , and TiO_2 Ultra-Fine particles)," *Netsu Bussei (Japan)*, Vol. 4, pp. 227~233.