

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2013.37.10.887>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5234(Online)

일반화된 자기일치모델과 수정된 에셀비 모델을 이용한 나노유체의 등가열전도계수 예측에 대한 연구

이재곤** · 김진곤*

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

A Study on Prediction of Effective Thermal Conductivity of Nano-Fluids Using Generalized Self-Consistent Model and Modified Eshelby Model

Jae-Kon Lee** and Jin Gon Kim*

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic Univ. of Daegu

(Received January 16, 2013 ; Revised May 5, 2013 ; Accepted July 18, 2013)

Key Words: Nanofluid(나노유체), Nanolayer(나노층), Thermal Conductivity(열전도계수), Generalized Self-Consistent Model(일반화된 자기일치모델), Modified Eshelby Model(수정된 에셀비 모델)

초록: 복합재의 물성치 해석에 일반적으로 사용되는 일반화된 자기일치모델(Generalized Self-Consistent Model)과 수정된 에셀비모델(Modified Eshelby Model)을 이용하여 나노유체의 열전도계수를 예측할 수 있음을 보였다. 이 유체의 열전달효과를 대폭 향상시키는 대표적인 메카니즘 중 하나인 나노입자와 기본유체 사이에 존재하는 나노층의 영향을 고려하여 나노유체의 열전도계수를 예측하였다. 본 연구는 나노층의 열전도계수가 일정한 값을 가질 때 기존 대표적인 모델과 동일한 결과를 보였으며, 선형적으로 변할 때 역시 문헌에 있는 모델과 동등한 수준의 예측 값을 보였다. 알루미늄과 산화구리를 나노입자로 물과 에틸렌글리콜을 기본유체로 한 나노유체의 열전도계수에 대한 실험결과와 본 모델의 예측결과를 비교함으로써 본 모델의 타당성을 입증하였다.

Abstract: Effective thermal conductivity of nanofluids has been predicted by using generalized self-consistent model and modified Eshelby model, which have been used for analysis of material properties of composites. A nanolayer between base fluid and nanoparticle, one of key factors for abrupt enhancement of thermal conductivity of nanofluids, is included in the analysis. The effective thermal conductivities of the nanofluid predicted by the present study show good agreement with those by models in the literature for the nanolayer with a constant or linear thermal conductivity. The predicted results by the present approach have been confirmed to be consistent with experiments for representative nanofluids such as base fluids of water or ethyleneglycol and nanoparticles of Al₂O₃ or CuO to be validated.

- 기호설명 -

k_{ij}, k_{ijk} : i 와 j 또는 i, j, k 로 구성된 것의 열전도계수
 f_{ij} : i 와 j 로 구성된 것 중 i 의 체적비
 f_{ijk} : i, j, k 로 구성된 것 중 i 와 j 의 체적비
 r : 반지름
 V : 체적

하첨자

b : 기본유체
 p : 나노입자
 l : 나노층

1. 서론

나노유체는 높은 열전도계수를 갖는 나노 크기의 고체 입자를 기본유체에 분산시킨 유체로 기본유체만으로 얻을 수 없는 높은 열전도계수를 얻을 수 있는 장점이 있다. 기본유체로는 물, 에

† Corresponding Author, leejk@cu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

텔렌글리콜, 오일 등 기존의 열전달 작동유체가 사용되며, 나노입자로써 알루미나(Al_2O_3), 산화구리(CuO), 실리카(SiO_2), 이산화티타늄(TiO_2) 등이 사용된다. 나노유체는 높은 열전도계수로 인해 잠재적 이용 가능성이 높아 이에 대한 실험적 및 이론적 연구가 많이 진행되어왔다. 나노유체의 열전도계수를 측정된 결과 나노입자의 체적비가 비록 높지 않더라도 나노유체의 열전도계수는 기본유체의 열전도계수보다 훨씬 높으며, 이는 Maxwell 모델과 Hamilton-Crosser 모델 등과 같은 기존의 모델로는 설명이 불가능함이 밝혀졌다.⁽¹⁻⁴⁾ Maxwell 모델⁽³⁾과 Hamilton-Crosser 모델⁽¹⁻³⁾은 각각 구형과 구형 및 실린더형 나노입자를 포함하는 나노유체에 대해 적용되었으며, 이 유체의 열전도계수는 단지 기본유체와 나노입자의 열전도계수, 나노입자의 체적비 및 형상의 함수로 표현되었다.

소량의 나노입자에 의한 나노유체의 열전도계수의 급격한 증가를 기존 모델에 포함된 인자로는 설명하기 어려워 새로운 물리적 현상이 제안되었다. 나노입자의 크기와 나노입자를 둘러싸고 있는 나노층(nanolayer), 나노입자의 군집(clustering), 브라운운동 등이 나노유체의 열전도계수 상승의 한 요인이라 인식되어 이들을 포함하는 새로운 모델들이 등장하였다. 군집의 크기가 증가할수록 나노입자가 존재하지 않는 기본유체영역의 증가로 인해 나노유체의 열전도계수는 감소하고,⁽⁵⁾ 반면 액체 층이 포함된 클러스터의 경우 클러스터 체적 증가로 인해 나노유체의 열전도계수가 증가되는 상반된 연구결과가 발표되었다.⁽⁶⁾ Wang 등은 Bruggeman model과 fractal theory를 결합한 모델로 나노입자의 군집이 나노유체의 열전도계수에 미치는 영향을 나노입자의 체적비 0.5% 미만까지 잘 예측하였다.⁽⁷⁾ 나노입자의 브라운 운동은 열확산보다 훨씬 느리게 일어나기 때문에 이 자체만으로는 나노유체의 열전도계수 향상의 메카니즘 중 하나로는 인식되지 못하였다.⁽⁶⁾ 그러나 나노입자의 브라운운동에 의해 발생하는 유사 대류현상(convectionlike)에 의해 열전도계수가 향상되며,^(8,9) 또한 이 운동이 나노입자의 클러스터링에 간접적으로 영향을 줄 수 있다는 것이 제안되었다.^(6,10) 나노입자와 기본유체 사이의 경계면에 존재하는 수 나노미터 크기의 나노층의 영향을 고려하여 나노유체의 열전도계

수 향상을 설명하는 모델들이 발표되었다.⁽¹¹⁻¹⁵⁾ 이 현상은 Maxwell 모델,^(11,12) Hamilton-Crosser 모델,⁽¹³⁾ Bruggeman의 effective media theory⁽¹⁴⁾을 기본 모델로 하고, 여기에 나노입자와 기본유체의 열전도계수 사이의 일정한 값을 갖는 나노층을 추가하여 나노유체의 열전도계수를 예측함으로써 설명되었다. 나노입자의 브라운 운동에 의한 나노유체의 열전도계수의 향상 메카니즘 역시 이 운동에 의해 형성되는 나노입자 주위의 유체 층에 의한 것이다.^(8,9) 반면 Xie 등은 나노층의 열전도계수가 선형적인 분포를 갖는 것으로 가정된 후 이 층의 평균열전도계수를 1차원 해석으로 구하여 이를 나노층의 등가열전도계수로 이용하였다.⁽¹⁵⁾ 이 모델에서 고려된 나노입자는 구형이며, 입자의 크기와 나노층의 두께가 나노유체의 열전도계수에 큰 영향을 주는 것으로 밝혀졌다.

본 연구는 복합재의 등가물성치 연구에 적용되던 방법에 나노유체의 열전달효과를 향상시키는 대표적인 메카니즘 중 하나인 나노층의 영향을 포함시켜 나노유체의 열전도계수를 예측할 수 있음을 보이는 것이다. 복합재 해석에 일반적으로 사용되는 일반화된 자기일치모델(Generalized Self-Consistent Model, GSCM)⁽¹⁶⁾과 수정된 에셀비 모델(Modified Eshelby Model, MEM)^(17,18)은 구형입자가 포함된 복합재의 열전도계수를 동일하게 예측하기에,^(19,20) 이 결과를 이용하여 나노층의 영향을 모델에 포함시켜 나노유체의 열전도계수를 예측한다. 기존 모델과 비교하기 위해 나노층의 열전도계수를 상수 또는 선형적으로 변하는 것으로 간주하여 나노유체의 열전도계수를 예측한다. 본 연구 결과를 기존 모델의 예측결과 및 실험결과와 비교를 통해 나노유체의 열전도계수 예측을 위해 간단한 방법인 MEM의 적용 가능성을 확인하고, 이를 바탕으로 향후 다양한 형상의 나노입자가 포함된 나노유체의 열전도계수를 MEM으로 예측할 수 있을 것이다.

2. 나노유체의 열전도계수 모델링

2.1 나노층의 열전도계수: 상수일 때

Fig. 1(a)는 일반화된 자기일치모델(Generalized self-consistent model, GSCM)로 나노유체를 나타낸 것으로 구형인 나노입자(A)와 이를 둘러싸고 있는 구형의 기본유체(B)로 구성되는 하나의 동

심구가 나노유체(C)에 포함된 것을 나타낸다. GSCM에 따르면 동심구의 열전도계수와 동심구를 둘러싸고 있는 나노유체의 열전도계수는 같고, 동심구에서 나노입자의 체적비는 전체 나노유체에서 나노입자가 차지하는 체적비와 동일하다. Fig. 1(b)는 구형의 나노입자(A)가 기본유체(B)에 포함되어 있는 나노유체(C)를 보인 것으로 수정된 에셀비 모델(Modified Eshelby Model, MEM)을 적용하는 기본적인 형태이다. 이에 대한 상세한 내용은 참고문헌에 잘 설명되어있다.⁽²⁰⁾ GSCM과 MEM으로 구한 나노유체의 등가열전도계수(k_{pb})는 식 (1)로 Fig. 1(a)에 보인 동심구의 등가열전도계수와 Fig. 1(b)에 보인 나노유체의 등가열전도계수는 일치한다.

$$\frac{k_{pb}}{k_b} = \frac{2(1-f_{pb})k_b + (1+2f_{pb})k_p}{(2+f_{pb})k_b + (1-f_{pb})k_p} \quad (1)$$

나노입자의 체적비(f_{pb})는 나노유체 전체의 부피에서 나노입자가 차지하는 부피의 비로 정의된다.

$$f_{pb} = \frac{V_p}{V_b + V_p} \quad (2)$$

나노입자와 나노층으로 구성된 동심구의 등가열전도계수를 구하기 위해 두 모델의 등가성과 Fig. 1을 이용한다. 여기서 A, B, C는 각각 나노입자, 나노층 그리고 나노입자와 나노층으로 구성된 동심구를 나타낸다. 두 모델에 의한 결과가 동일하기 때문에 동심구의 등가열전도계수를 Fig. 1(b)를 이용하여 MEM으로 구한다. 동심구내에

존재하는 나노입자의 체적비는 나노입자의 부피(V_p)와 나노층의 부피(V_l)로 정의된다.

$$f_{pl} = \frac{V_p}{V_p + V_l} \quad (3)$$

Fig. 1과 식 (1) 및 (3)으로부터 나노입자와 나노층으로 형성된 동심구의 열전도계수(k_{pl})는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{k_{pl}}{k_l} = \frac{2(1-f_{pl})k_l + (1+2f_{pl})k_p}{(2+f_{pl})k_l + (1-f_{pl})k_p} \quad (4)$$

마지막으로 나노유체의 등가열전도계수를 구하기 위해 나노입자와 나노층으로 구성된 동심구가 기본유체에 포함된 것을 고려한다. Fig. 1(a)는 이를 GSCM으로 보인 것으로 안쪽 구(A)는 나노입자와 나노층으로 구성된 동심구를 나타내며 이의 등가열전도계수는 식 (4)와 같다. 그 바깥 구는 기본유체(B)를 나타내고 이를 에워싸고 있는 것(C)이 나노유체이다. 이 나노유체를 MEM으로 나타낸 것이 Fig. 1(b)이고, 이를 이용하여 나노유체의 등가열전도계수를 구한다. 나노유체 속에 존재하는 나노입자와 나노층을 합친 동심구의 체적비(f_{plb})는 다음 식으로 정의된다.

$$f_{plb} = \frac{V_p + V_l}{V_p + V_l + V_b} \quad (5)$$

나노유체의 등가열전도계수(k_{plb})는 식 (4)에 주어진 동심구의 등가열전도계수와 식 (1)과 (5)를 이용하여 표현된다.

$$\frac{k_{plb}}{k_b} = \frac{2(1-f_{plb})k_b + (1+2f_{plb})k_{pl}}{(2+f_{plb})k_b + (1-f_{plb})k_{pl}} \quad (6)$$

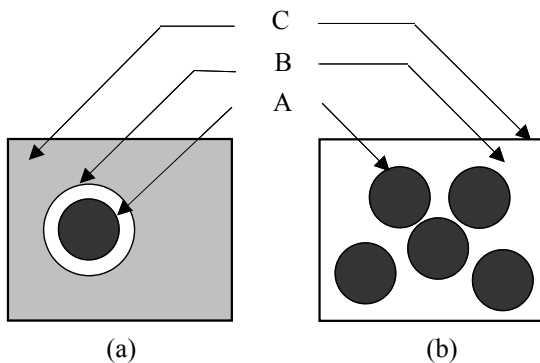


Fig. 1 Schematic representation for predicting the thermal conductivity of nanofluids with spherical nanoparticles; (a) generalized self-consistent model, and (b) modified Eshelby model

2.2 나노층의 열전도계수: 선형일 때

물리적으로 나노층의 열전도계수는 일정한 값을 가질 수 없으며 기본유체와 나노입자의 열전도계수 사이에서 점진적으로 변하는 형태를 가지므로 계산의 단순화를 위해 선형으로 가정한다. 해석을 위해 나노층을 아주 얇은 다층의 구조를 갖는 동심구 형상으로 간주한다. Fig. 2(a)는 나노입자와 이를 둘러싸고 있는 나노층을 나타내며, 나노층의 열전도계수 해석을 위해 나노층을 동일한 두께를 갖는 n개의 층으로 구분한다. 나노입자를

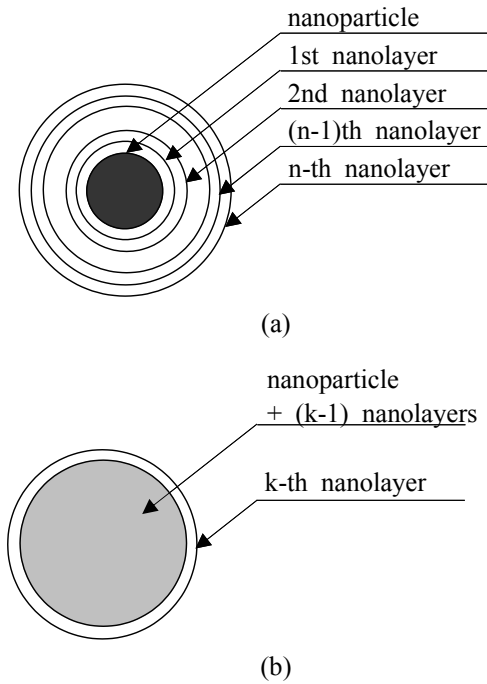


Fig. 2 Schematic representation for nanoparticle and nanolayer, where nanolayer is divided into n layers for the analysis; (a) a nanoparticle and surrounding n nanolayers, (b) a composite sphere of nanoparticle and surrounding k-1 nanolayers and k-th nanolayer

둘러싸고 있는 첫 번째 나노층의 열전도계수는 나노입자의 열전도계수와 동일하고 n번째 나노층의 열전도계수는 기본유체의 열전도계수와 동일하다. n개의 층으로 나누어진 나노층 중 k번째 나노층의 열전도계수($k_{l,k}$)는 다음과 같이 표현된다.

$$k_{l,k} = k_p + (k_b - k_p)(k-1)/(n-1) \quad (7)$$

선형적으로 변하는 나노층의 열전도계수를 고려한 나노유체의 등가열전도계수를 해석하기 위해 Fig. 2(b)에 나노입자와 (k-1)개의 구형 껍질로 구성된 동심구와 k번째의 나노층으로 둘러싸인 동심구를 보인다. 안쪽 구와 k번째 나노층의 열전도계수를 각각 $k_{c,k-1}$ 및 $k_{l,k}$ 라 하자. 식 (1)을 이용하여 k번째 나노층으로 둘러싸진 동심구의 등가열전달계수($k_{c,k}$)는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{k_{c,k}}{k_{l,k}} = \frac{2(1-f_{k-1})k_{l,k} + (1+2f_{k-1})k_{c,k-1}}{(2+f_{k-1})k_{l,k} + (1-f_{k-1})k_{c,k-1}} \quad (8)$$

f_{k-1} 는 k번째 나노층 내부에 존재하는 나노입

자와 나노층의 체적비를 의미하며 다음과 같이 반지름의 함수로 표현된다.

$$f_{k-1} = (r_{k-1}/r_k)^3 \quad (9)$$

k번째 나노층의 반지름 r_k 는 다음과 같이 표현된다.

$$r_k = r_p + (r_l - r_p)k/n \quad (10)$$

여기서, r_p 와 r_l 은 각각 나노입자와 나노층의 반지름을 나타내고 이 차이는 나노층의 두께(δ)를 뜻한다. 식 (8)을 반복하여 계산하면 나노입자와 선형의 열전도계수를 갖는 나노층으로 구성된 동심구의 등가열전도계수($k_{c,n}$)를 구할 수 있다. 마지막으로 이 동심구와 기본유체로 구성된 나노유체의 등가열전도계수는 다음 식으로 계산된다.

$$\frac{k_e}{k_b} = \frac{2(1-f)k_b + (1+2f)k_{c,n}}{(2+f)k_b + (1-f)k_{c,n}} \quad (11)$$

여기서 f 는 나노유체 속에 포함된 나노입자와 나노층의 체적비를 나타낸다.

3. 결과 검토

3.1 나노층의 열전도계수: 상수일 때

2.1절에 이용된 나노입자와 나노층을 통틀어 하나의 구형입자로 생각하는 동심구 개념을 사용하는 Yu-Choi 모델,^(11,13) Xue 모델,⁽¹²⁾ Xue-Xu 모델,⁽¹⁴⁾ Xie 등의 모델⁽¹⁵⁾ 그리고 본 모델은 모두 동일한 나노유체의 등가열전도계수를 예측하며, 이는 식 (4)를 식 (6)에 대입한 결과이다. 나노입자의 크기와 나노층의 열전도계수가 나노유체의 등가열전도계수에 미치는 영향을 파악하기 위해 나노층의 열전도계수는 $10k_b$, $50k_b$, $100k_b$ 및 $142.3k_b$ 로 간주하였으며, 나노입자의 열전도계수는 $142.3k_b$ 로 가정하였다. 이는 EG와 알루미늄을 사용하는 나노유체를 의미한다.⁽²¹⁾ 나노입자의 반지름은 5, 10, 20, 40nm의 값을 갖고, 나노층의 두께는 모든 경우에 대해 2nm의 값을 사용하였으며 이에 대한 이유를 3-3에 설명하였다. Fig. 3은 이러한 각 경우에 대해 예측된 나노유체의 열전도계수를 그래프로 나타낸 것으로 세로축은 이를 기본유체의 열전도계수로 무차원화한 값이다. 동일한 나노층의 두께에 대해 나노입자의 반지름

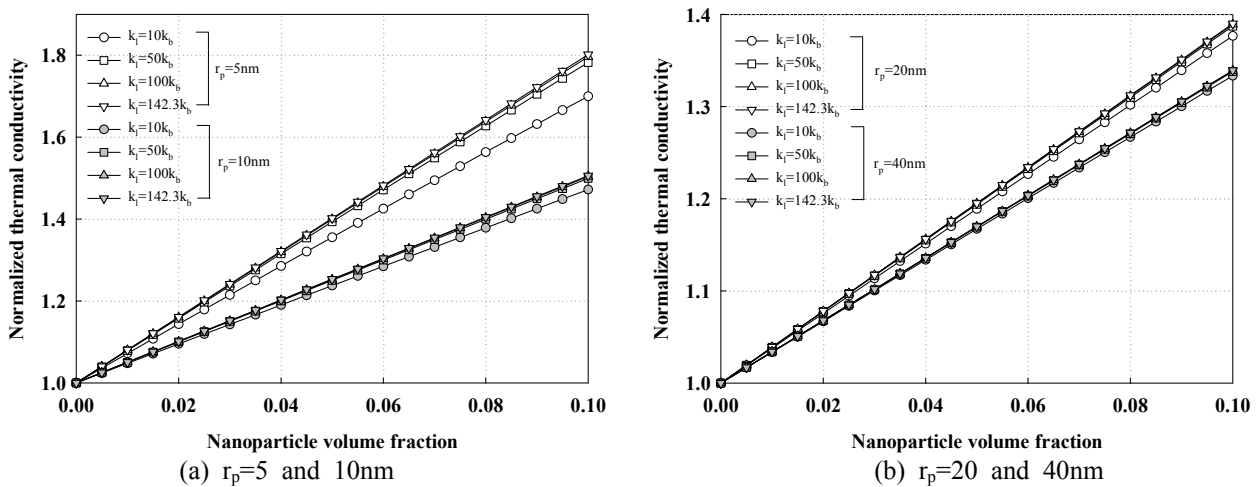


Fig. 3 Comparison of effective thermal conductivities of nanofluids with nanolayer of a constant thermal conductivity for four different nanoparticle sizes predicted by several models, Yu-Choi,^(11,13) Xue,⁽¹²⁾ Xue-Xu,⁽¹⁴⁾ Xie et al.⁽¹⁵⁾ models and the present approach; (a) $r_p=5$ and 10 nm, (b) $r_p=20$ and 40 nm

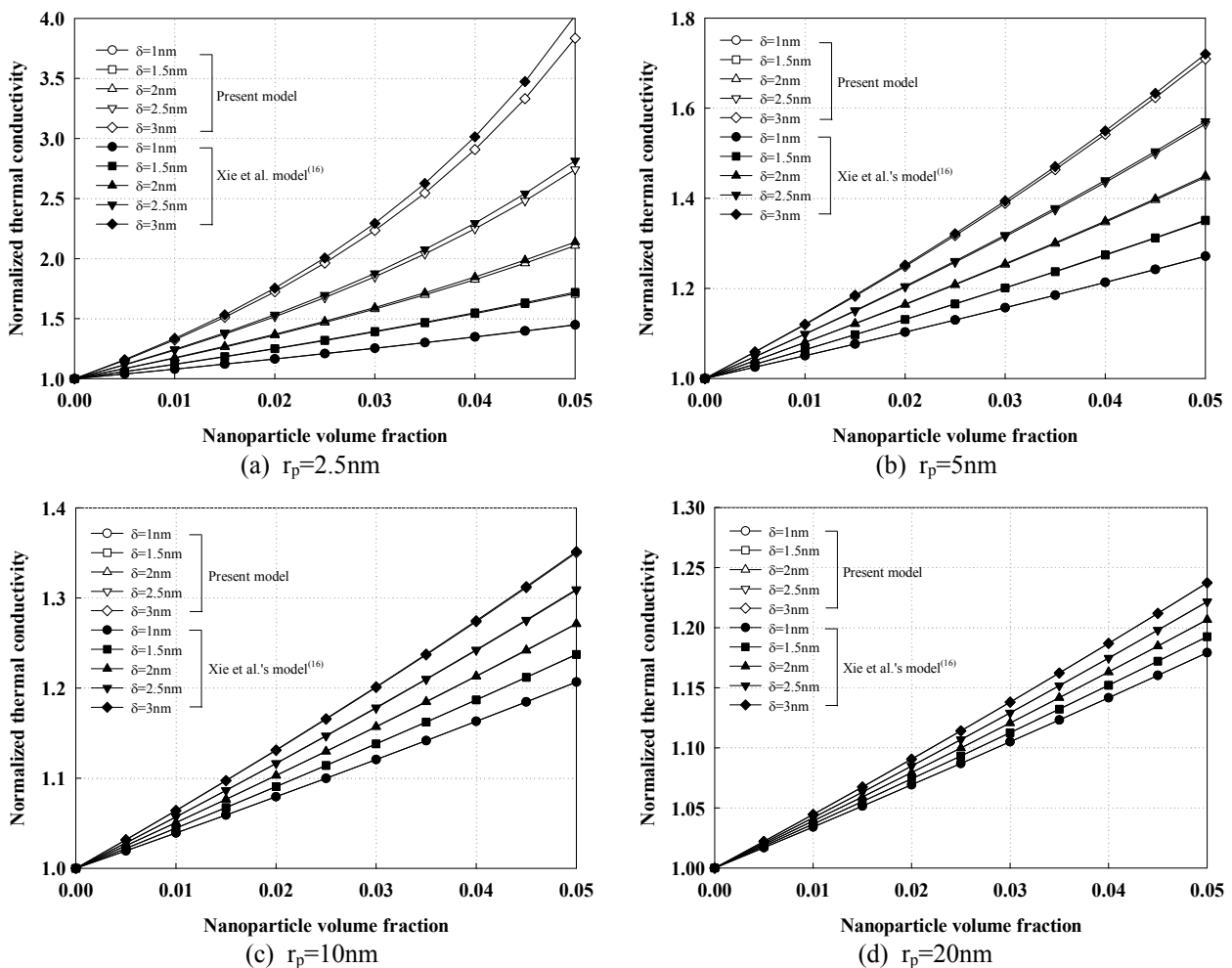


Fig. 4 Comparison of effective thermal conductivities of nanofluids with nanolayer of linear thermal conductivity for four nanoparticle sizes predicted by Xie et al. and present models; (a) $r_p=2.5$, (b) $r_p=5$, (c) $r_p=10$, and (d) $r_p=20$ nm

이 작을수록, 나노입자의 체적비가 증가할수록, 나노층의 열전도계수가 증가할수록 나노유체의 등가열전도계수는 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 위에서 언급된 다른 모델^(11~15)의 예측 결과와 완전히 일치하여 Fig. 3에서 이들 사이에서 구별이 되지 않는다.

3.2 나노층의 열전도계수: 선형일 때

식 (7)과 같이 나노층의 열전도계수는 나노입자 표면에서는 나노입자의 열전도계수를 갖고 기본유체 경계면에서는 기본유체의 열전도계수를 갖는 것으로 고려한다.^(12,22) Yu-Choi 모델,^(11,13) Xue 모델,⁽¹²⁾ Xue-Xu 모델⁽¹⁴⁾은 모두 나노층의 열전도계수를 상수로 취급하기 때문에 나노층의 열전도계수가 반지름의 함수로 표시될 경우, 나노유체의 등가열전도계수를 예측할 수 없다. 그러나 본 모델과 Xie 등의 모델⁽¹⁵⁾은 이 경우에도 적용이 가능하다. Xie 등의 모델⁽¹⁵⁾은 나노층의 평균열전도계수를 전기적 상사를 이용하여 1차원 해석으로 구한 후 이를 식 (6)에 대입하여 계산한 것이다. 본 모델의 해석방법은 2.2절에 상세히 설명되어 있다. Fig. 4는 두 모델로 예측한 나노유체의 등가열전도계수를 비교한 것으로 세로축은 나노유체의 등가열전도계수를 기본유체의 열전도계수로 무차원화한 값을 나타낸다. 나노입자의 열전도계수, 반지름 및 나노층의 두께(δ)는 각각 $142.3k_b$,⁽²¹⁾ 2.5~20nm, 1~3nm를 사용하였다. 나노입자의 반지름이 5nm 이상일 경우 주어진 다른 변수가 다르더라도 두 모델의 예측값은 거의 차이를 보이지 않아 Fig. 4(c)와 (d)의 그래프에서 하나의 기호만 나타난다. 나노입자의 반지름이 2.5nm일 경우 나노층이 얇을 때는 두 모델의 예측값은 동일하나 나노층이 두껍고 나노입자의 체적비가 증가할수록 Xie 등의 모델⁽¹⁵⁾의 예측값이 본 모델보다 높으나 그 차이는 미미하다. 3-1에서의 경향과 같이 나노층의 열전도계수가 선형적으로 변할 때도 나노입자가 작을수록, 나노층이 두꺼울수록, 나노입자의 체적비가 높을수록, 나노유체의 등가열전도계수는 급격히 증가함을 알 수 있다.

3.3 실험 결과와 본 모델의 비교

본 모델의 타당성을 입증하기 위해 예측결과를 실험결과와 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 물과 에틸렌글리콜을 기본유체로 알루

미나와 산화구리를 나노입자로 하는 대표적인 나노유체를 비교대상으로 선정하였다.^(1,4,24,25) 3-1과 3-2의 결과가 보여주듯이 나노층의 두께가 나노유체의 열전도계수에 큰 영향을 주기 때문에, 먼저 나노층을 고려하여 나노유체의 열전도계수를 예측하는 모델에 사용된 나노층의 두께를 조사하였다. Yu 등은^(11,13) 나노층의 두께를 1nm와 2nm로 간주하였고, Xue⁽¹²⁾는 1nm, 2nm, 3nm, 5nm 중에서 3nm의 나노층 두께가 나노유체의 열전도계수를 잘 예측함을 보였다. Xue 등은⁽¹⁴⁾ 참고문헌으로부터 2nm의 나노층을 이용하였으며,⁽²³⁾ Xie 등은⁽¹⁵⁾ 2nm의 나노층을 이용하였다. 이들 결과로부터 본 연구에서 나노층의 두께를 2nm로 가정하였다. 또 물, EG, 알루미늄, 산화구리의 열전도

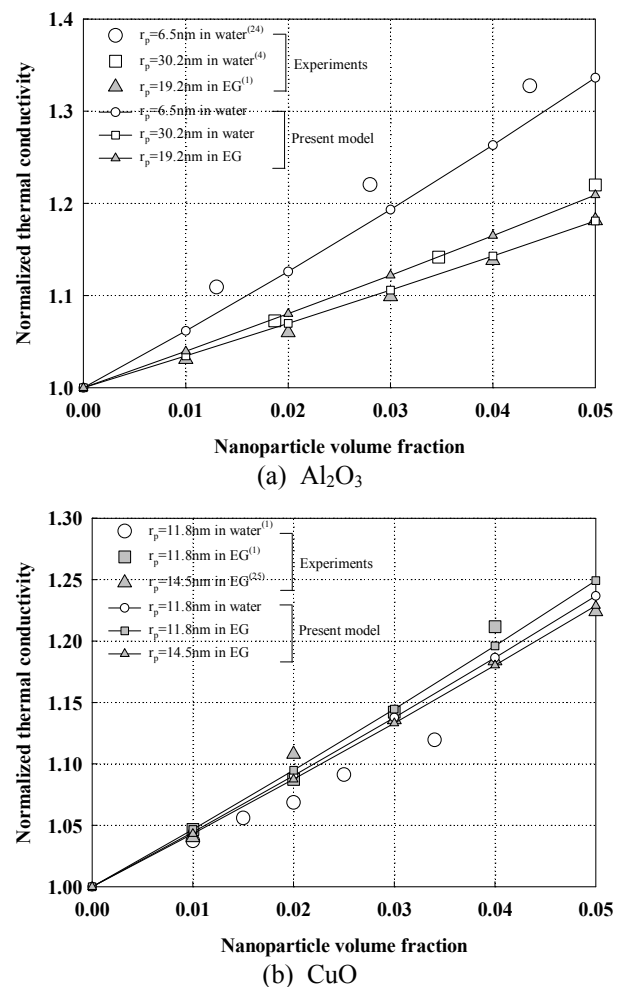


Fig. 5 Comparison of effective thermal conductivities of nanofluids by experiments and present model, where the results are normalized by the thermal conductivity of the base fluid; (a) Al₂O₃ and (b) CuO nanoparticles.^(1,4,24,25)

계수는 각각 0.604, 0.253, 36.0, 32.9 W/mK를 사용하였으며,⁽²¹⁾ 나노입자의 반지름은 Fig. 5에 표시되어있다. Fig. 5에서 세로축은 나노유체의 등가열전도계수를 기본유체의 열전도계수로 무차원화한 값을 나타낸다. Fig. 5(a)에서와 같이 나노입자로 알루미늄이 사용된 경우, 나노입자의 크기가 다르고 기본유체가 다르더라도 예측치와 실험치는 조사된 체적비의 범위에서 잘 일치함을 보인다. 나노입자로 산화구리가 사용된 경우도 알루미늄이 사용된 경우와 같이 물이나 에틸렌글리콜을 기본유체로 한 어느 경우에도 예측결과와 실험결과가 잘 일치한다. Fig. 5(b)에서 예측치와 실험치의 가장 큰 차이는 기본유체로 물을 사용한 경우로 체적비 3.4%에서 발생하고 그 값은 약 3.36%이다. 또한 Fig. 5에 의하면 나노입자의 반지름이 6.5~30.2nm인 범위에서 나노유체의 등가열전도계수 예측치와 실험치가 잘 일치한다.

4. 결론

복합체의 등가 물성치 해석에 사용되던 일반화된 자기일치 모델과 수정된 에셀비 모델을 결합한 모델이 나노유체의 열전도계수를 성공적으로 예측할 수 있음을 보였다. 나노층의 열전도계수가 상수일 때 기존 대표적인 모델과 동일한 결과를 보였으며, 선형적으로 변할 때 역시 Xie 등의 모델과 동등한 수준의 예측 값을 보였다. 그러나 나노입자가 작고 나노층이 두껍고 나노입자의 체적비가 증가할수록 Xie 등의 모델과 본 모델은 차이가 발생하였으나 그 크기는 미미하였다. 반지름이 6.5~30.2nm인 알루미늄과 산화구리를 나노입자로 물과 에틸렌글리콜을 기본유체로 한 나노유체의 실험결과와 본 모델의 예측결과는 잘 일치하였다. 이를 통해 이 연구에서 제시된 모델이 나노층의 열전도계수가 변하는 경우에도 나노유체의 등가열전도계수 예측에 활용될 수 있음을 보였다. 향후 이를 바탕으로 다양한 형상의 나노입자가 포함된 나노유체의 열전도계수를 본 모델로 예측할 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2013년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것이다.

참고문헌

(1) 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.

(2) Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W. and Thompson, L. J., 2001, "Anomalous Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," *Applied Physics Letters*, Vol. 78, pp. 718~720.

(3) Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E. and Grulke, E. A., 2001, "Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions," *Applied Physics Letters*, Vol. 79, pp. 2252~2254.

(4) Xie, H., Wang, J., Xi, T., Liu, Y. and Ai, F., 2002, "Thermal Conductivity Enhancement of Suspensions Containing Nanosized Alumina Particles," *J. of Applied Physics*, Vol. 91, pp. 4568~4572.

(5) Hong, K. S., Hong, T. K. and Yang, H. S., 2006, "Thermal Conductivity of Fe Nanofluids Depending on the Cluster Size of Nanoparticles," *Applied Physics Letters*, Vol. 88, pp. 031901~1~3.

(6) Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S. and Eastman, J. A., 2002, "Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-Sized Particles (Nanofluids)," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 855~863.

(7) Wang, B. X., Zhou, L. P. and Peng, X. F., 2003, "A Fractal Model for Predicting the Effective Thermal Conductivity of Liquid with Suspension of Nanoparticles," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 2665~2672.

(8) Jang, S. P. and Choi, S. U. S., 2004, "Role of Brownian Motion in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids," *Applied Physics Letters*, Vol. 84, pp. 4316~4318.

(9) Prasher, R., Bhattacharya, P. and Phelan, P. E., 2005, "Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluids)," *Physical Review Letters*, Vol. 94, pp. 025901~1~4.

(10) Xuan, Y., Li, Q. and Hu, W., 2003, "Aggregation Structure and Thermal Conductivity

- of Nanofluids," *AIChE Journal*, Vol. 49, pp. 1038~1043.
- (11) Yu, W. and Choi, S. U. S., 2003, "The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Nanofluids: A Renovated Maxwell Model," *J. of Nanoparticle Research*, Vol. 5, pp. 167~171.
- (12) Xue, Q. Z., 2003, "Model for Effective Thermal Conductivity of Nanofluids," *Physics Letters A*, Vol. 307, pp. 313~317.
- (13) Yu, W. and Choi, S. U. S., 2004, "The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Hamilton-Crosser Model," *J. of Nanoparticle Research*, Vol. 6, pp. 355~361.
- (14) Xue, Q. and Xu, W. M., 2005, "A Model of Thermal Conductivity of Nanofluids with Interfacial Shells," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 90, pp. 298~301.
- (15) Xie, H., Fujii, M. and Zhang, X., 2005, "Effect of Interfacial Nanolayer on the Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 2926~2932.
- (16) Miloh, T. and Benveniste, Y., 1988, "A Generalized Selfconsistent Method for the Effective Conductivity of Composites with Ellipsoidal Inclusions and Cracked Bodies," *J. of Applied Physics*, Vol. 63, pp. 789~796.
- (17) Eshelby, J. D., 1957, "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems," *Proc. of the Royal Society of London*, Vol. A241, pp. 376~396.
- (18) Mori, T. and Tanaka, K., 1973, "Average Stress in the Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions," *Acta Metallurgica*, Vol. 21, pp. 571~574.
- (19) Lee, J. K. and Kim, J. G., 2011, "Derivation of Governing Equation for Predicting Thermal Conductivity of Composites with Spherical Inclusions and Its Applications," *Physics Letters A*, Vol. 375, pp. 3739~3744.
- (20) Park, Y. K., Lee, J. K. and Kim, J. G., 2008, "A New Approach to Predict the Thermal Conductivity of Composites with Coated Spherical Fillers And Imperfect Interface," *Materials Transactions*, Vol. 49, pp. 733~736.
- (21) Ren, Y., Xie, H. and Cai, A., 2005, "Effective Thermal Conductivity of Nanofluids Containing Spherical Nanoparticles," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 38, pp. 3958~3961.
- (22) Yu, C. J., Richter, A. G., Datta, A., Durbin, M. K. and Dutta, P., 2000, "Molecular Layering In a Liquid on a Solid Substrate: An X-Ray Reflectivity Study," *Physica B*, Vol. 283, pp. 27~31.
- (23) 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," *Physical Review Letters*, Vol. 82, pp. 2326~2329.
- (24) Masuda, H., Ebata, A., Teramae, K. and Hishinuma, N., 1993, "Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles (Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ Ultra-Fine Particles)," *Netsu Bussei*, Vol. 4, pp. 227~233.
- (25) Liu, M. S., Lin, M. C. C., Huang, I. T. and Wang, C. C., 2006, "Enhancement of Thermal Conductivity with CuO for Nanofluids," *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 29, pp. 72~77.