

수정된 에셀비 모델을 이용한 열전 복합재의 등가지백계수 예측에 대한 연구

이 재 곤^{*†}

* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

A Study on Prediction of Effective Seebeck Coefficient of Thermoelectric Composites Using Modified Eshelby Model

Jae-Kon Lee ^{*†}

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

(Received January 16, 2013 ; Revised May 20, 2013 ; Accepted May 21, 2013)

Key Words: Thermoelectric Composites(열전 복합재), Congruence Transformation(합동 변환), Effective Seebeck Coefficient(등가지백계수), Eshelby Model(에셀비 모델)

초록: 열전 복합재의 성능을 파악하기 위해 결합된 형태의 지배방정식은 결합되지 않은 형태로 변환되며, 여기에 수정된 에셀비 모델을 적용하여 복합재의 등가지백계수를 유도한다. 모재와 충전재가 직렬 및 병렬로 배치된 복합재와 모재 속에 구형의 충전재가 포함된 복합재에 대한 본 연구결과는 참고 문헌에 알려진 이론적 및 실험적 결과와 비교되며, 이론적 결과와는 완전히 일치하고 실험적 결과와 잘 일치함을 보인다. 지배방정식의 단순화를 통해 열전 복합재의 등가지백계수는 수정된 에셀비 모델로 성공적으로 예측될 수 있음을 보였다.

Abstract: A coupled governing equation of thermoelectric materials can be converted into an uncoupled form to predict the effective Seebeck coefficient of thermoelectric composites, where modified Eshelby model is adopted. The predicted results by the present approach for serial- and parallel- connected composites and composite with spherical inclusions are compared with theoretical and experimental results from literatures to be justified. It is shown that the predictions by the theoretical approaches coincide exactly and show in good agreement with the experiments.

- 기호설명 -

J_E : 전류밀도(electric current density)
 J_S : 엔트로피 플럭스(entropy flux)
 α : 지백계수(Seebeck coefficient)
 σ : 전기전도도
 γ : 전기장이 없는 상태에서의 열전도계수
 T : 온도
 ϕ : 전위(electric potential)
 J : 필드 플럭스(field flux)
 Q : 전달행렬(transport matrix)
 E : 필드 벡터(field vector)

T : 합동변환행렬(congruence transformation matrix)
 q : Q_{12} 로 무차원화한 Q
 t : T_{12} 로 무차원화한 T
 K : 열전도계수 행렬
 S : 에셀비(Eshelby) 텐서
 I : 단위 행렬
 k : 열전도계수
 f : 충전재의 체적비

아래첨자

m : 모재
 f : 충전재
 e : 복합재

[†] Corresponding Author, leejk@cu.ac.kr

1. 서 론

재료의 양단에 다른 온도가 인가되었을 때 이 온도 차이에 의해 기전력이 발생하는 현상을 지백효과라 부르며 이의 크기는 지백계수로 나타낸다. 이러한 열전현상을 이용한 에너지 수확(energy harvesting)에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 열에너지를 전기에너지로 변환하는 이러한 장치의 변환성능을 표시하는 방법으로 열전성능지수(thermoelectric figure of merit)가 사용된다. 이 지수가 높은 장치를 구현하기 위해 열전재료 자체의 성능을 향상시키거나 열전 복합재를 만들어 사용하는 방법이 제안되고 있다. 주어진 열전 재료는 지백계수(Seebeck coefficient), 전기전도도 그리고 열전도계수가 모두 서로 본질적으로 연관되어 있어 각각을 독립적으로 제어하기 어려워 열전성능지수를 향상시키기가 쉽지 않다. 반면 열전 복합재는 다른 재료를 결합함으로써 하나의 열전재료가 가지는 이러한 한계를 뛰어넘어 열전성능지수가 높은 재료를 얻을 수 있음이 실험적으로 입증되었다.^(1,2) 또한, 폴리머 열전 복합재는 가볍고 비교적 단순한 제조과정으로 인해 관심을 받고 있다. 전형적인 폴리머의 특징인 나쁜 열전도계수는 열전재료에게는 이상적이고 낮은 전기전도도와 지백계수는 폴리머에 충전재를 추가함으로써 복합재의 열전성능지수를 향상시킬 수 있음이 제안되었다.⁽³⁾ 이러한 열전 복합재에 대해 많은 양의 실험적 연구는 진행되었지만, 복합재의 등가지백계수에 대한 이론적 연구는 매우 제한적이었다.⁽⁴⁾

열전 복합재의 지배방정식은 연성된(coupled) 형태에서 연성되지 않은(uncoupled) 단순한 형태로 변환되어 열전도 문제와 같이 간단히 표시될 수 있음이 발표되었다.⁽⁵⁻⁷⁾ Bergman 등은⁽⁶⁾ 이 방법을 이용하여 모재와 충전재로 구성되는 복합재의 등가지백계수의 구체적인 값을 구하는 대신 이 복합재가 가질 수 있는 등가지백계수의 상하한 값만을 제시하였다. 충전재의 형상과 체적비를 고려하여 복합재의 등가지백계수를 예측하는 이론적인 연구가 구형의 충전재에 대해 진행되었다.⁽⁸⁾ 이 연구에 따르면 모재로 구성된 무한체 속에 유한한 크기의 구형 복합재가 존재하며, 이 복합재가 관심의 대상이다. 무한체에 전기장이나 온도 구배가 인가되었을 때 구 내외부의 전위와 전류

는 구속에 존재하는 충전재 때문에 교란된다. 모재속의 교란양은 구형 복합재를 균질체로 대체하였을 때 발생하는 교란 량과 같아야하는 조건으로부터 복합재의 등가지백계수를 구하였다. 복합재의 등가지백계수는 복합재의 등가물성치와 같이 모재와 충전재의 물성치, 충전재의 체적비, 형상과 크기, 크기 및 방향 분포 등에 영향을 받을 것이며, 이러한 다양한 변수들을 하나의 이론적 모델에 모두 반영하는 것은 쉽지 않다. 이러한 문제를 극복하기 위해 수치적인 방법인 네트워크 모델을 사용한 복합재의 등가지백계수 예측이 시도되었다.⁽⁹⁻¹³⁾

본 연구는 지금까지 충전재의 형상과 체적비의 영향을 고려하여 복합재의 등가지백계수를 예측할 수 없었던 것을 Eshelby 모델로 이를 해결할 수 있음을 보인다. 합동변환(congruence transformation)을 통해 열전 복합재의 지배방정식을 결합되지 않은 열전도와 같은 두 개의 문제로 변환한다.⁽⁵⁻⁷⁾ 복합재의 등가지백계수는 충전재의 형상을 쉽게 처리할 수 있을 뿐만 아니라 충전재의 체적비가 높을 경우 충전재 사이의 상호작용을 고려하는 수정된 에셀비 모델로 열전도문제를 풀 결과를 이용하여 계산된다.⁽¹⁴⁻¹⁸⁾ 모재와 충전재가 직렬 및 병렬로 배치된 복합재와 모재 속에 구형의 충전재가 포함된 복합재에 대해 결합되지 않은 지배방정식과 수정된 에셀비 모델의 결과를 이용하여 수치적으로 등가지백계수를 구하고 이를 참고 문헌에 알려진 값과 비교한다.⁽¹⁹⁾ 추가로 이 결과와 문헌에서 얻을 수 있는 실험결과와⁽¹⁰⁾ 비교하여 본 연구에서 제시되는 등가지백계수 예측모델의 타당성을 입증한다.

2. 모델 구성

열전 물질에서 열과 전기의 전달 특성을 나타내는 지배방정식은 식 (1)과 같으며,^(6,7) 열과 전기 전달이 상호 결합되어 있다.

$$\begin{pmatrix} J_E \\ J_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma & \alpha\sigma \\ \alpha\sigma & \gamma/T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\nabla\phi \\ -\nabla T \end{pmatrix} \quad (1a)$$

$$J = QE \quad (1b)$$

식 (1)에서 필드 벡터(E)와 필드 플럭스(J) 사이의 관계를 나타내는 전달행렬(transport matrix, Q)은 열전 복합재를 구성하는 요인 모재와 충전재에 대해 각각 Q_m 과 Q_f 가 존재한다. 식 (1)과 같이

결합된 지배방정식은 합동변환을 통해 결합되지 않은 전도문제로 변형될 수 있음이 알려져 있다.^(5~7) 이에 대한 과정은 Bergman 등^(6,7)의 논문에 자세히 설명되어 있고 여기서는 이를 간단히 정리하였다. 먼저 전달행렬 Q 를 Q_{12} 원소로 무차원화한 것을 q 라 정의하고 식 (2)로 표현된다.

$$q = \frac{1}{Q_{12}} Q = \begin{pmatrix} q_{11} & 1 \\ 1 & q_{22} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Q_m 과 Q_f 를 동시에 대각화하는 행렬 T 는 식 (2)와 같이 T_{12} 원소로 무차원화한 것을 t 라 정의하고 식 (3)으로 나타낸다.

$$t = \frac{1}{T_{12}} T = \begin{pmatrix} t_{11} & 1 \\ 1 & t_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (1b)에 합동변환을 적용하여 전달행렬 Q 를 대각화하면 식 (4)와 같이 된다.

$$TJ = TQTT^{-1}E \quad (4)$$

여기서 J , Q' 및 E' 는 식 (5)로 정의되고 Q' 는 대각행렬이다.

$$J = TJ \quad (5a)$$

$$Q' = TQT \quad (5b)$$

$$E' = T^{-1}E \quad (5c)$$

식 (2), (3) 및 (5)를 이용하여 t_{11} 과 t_{22} 는 다음 식으로 표현된다.

$$t_{11} = \frac{(q_{m22}q_{f11} - q_{m11}q_{f22}) \pm \sqrt{D}}{2(q_{m11} - q_{f11})} \quad (6a)$$

$$t_{22} = -\frac{q_{m11} - q_{f11}}{q_{m22} - q_{f22}} t_{11} \quad (6b)$$

$$D = (q_{m22}q_{f11} - q_{m11}q_{f22})^2 + 4(q_{m11} - q_{f11})(q_{m22} - q_{f22}) \quad (6c)$$

여기서 m 과 f 뒤의 숫자는 행렬의 원소를 나타낸다. 모재와 충전재의 물성치가 주어지면 식 (6)에 의해 합동변환을 위한 행렬 T 가 계산된다.

식 (1)은 식 (4)를 통해 최종적으로 결합되지 않은 다음의 지배 방정식으로 변형된다.

$$\begin{pmatrix} J'_1 \\ J'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q'_{11} & 0 \\ 0 & Q'_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{pmatrix} \quad (7)$$

식 (1)로 표현되는 원래의 문제는 식 (7)과 같이 새로운 문제로 변형되어 복합재에서의 열전 문제는 두 개의 결합되지 않은 열전도 또는 전기전도와 같은 문제로 변환된다. 식 (7)은 모재와 충전재 각 영역에 대해 적용된다. 복합재의 등가열전

도계수는 모재와 충전재의 열전도계수와 모재 속에 포함된 충전재의 형상 및 체적비에 의해 결정되는 것으로 여러 가지 미소역학적 모델을 이용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 충전재의 형상을 쉽게 고려할 수 있고 충전재의 체적비가 높은 경우 충전재 사이의 상호작용을 고려하는 수정된 에셀비 모델을 이용한다.^(14~18)

복합재의 열전도문제를 수정된 에셀비 모델로 풀면 복합재의 등가열전도계수(K_e)는 식 (8)과 같이 간단한 형태로 표현된다. 이에 대한 상세한 유도는 참고문헌에 잘 나타나있고 여기서는 그 결과만을 정리한다.⁽¹⁷⁾

$$K_e = K_m [I + fA(K_m - K_f)]^{-1} \quad (8a)$$

$$A = \{(K_f - K_m)[(1-f)S + fI] + K_m\}^{-1} \quad (8b)$$

식 (7)로 표현되는 두 개의 전도문제는 열전도문제와 같은 형태이기 때문에 식 (8)의 해를 이용하여 Q'_e 를 구할 수 있으며, 이에 대한 방법을 다음 장에서 상세히 취급한다. 식 (5b)에 Q'_e 를 대입하여 Q_e 를 다음과 같이 계산한다.

$$Q_e = T^{-1}Q'_e T \quad (9)$$

식 (9)로 구하는 복합재의 등가전달행렬의 첫 행의 두 원소로부터 복합재의 등가저항계수는 식 (1)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\alpha_e = \frac{Q_e(1,2)}{Q_e(1,1)} \quad (10)$$

3. 결과 검토

2장에서 설명된 모델 내용의 타당성을 입증하기 위해 지금까지 문헌에 알려진 해석 결과 및 실험 결과를 본 연구결과와 비교한다. Fig. 1과 같이 충전재와 모재가 직렬 또는 병렬로 연결된 복합재와 구형인 충전재가 포함된 복합재와 같이 아주 단순한 구조를 갖는 복합재에 대해 등가저항계수의 예측결과가 알려져 있다.⁽¹⁹⁾ 따라서 이 결과와 2장에서 설명된 모델의 예측결과를 비교함으로써 본 연구에서 제시된 모델의 타당성을 입증한다. Fig. 1의 복합재에 온도구배는 x_3 방향으로 인가되고 이로부터 발생하는 전압차이로 x_3 방향의 복합재의 등가저항계수를 정의한다. 결과를 비교하기 위해 선택된 복합재를 구성하는 모재와 충전재의 저항계수, 전기전도도 및 열전도계수는

Table 1 Thermoelectric properties of matrix and filler to predict effective Seebeck coefficients of composites⁽¹⁰⁾

	Filler	Matrix
Seebeck coefficient [V/°C]	-2.9×10^{-6}	-0.01×10^{-6}
Electrical conductivity [A/Vm]	5.85×10^6	56.7×10^6
Thermal conductivity [W/m°C]	51	376

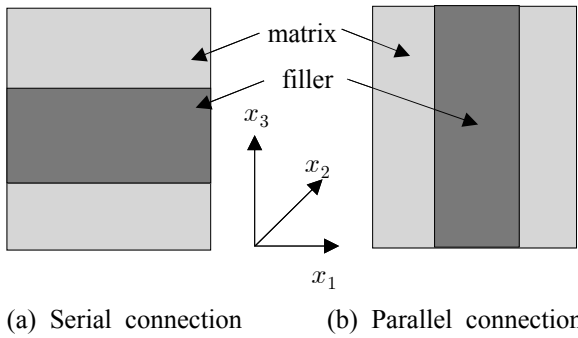


Fig. 1 Simple composites used for comparison of effective Seebeck coefficients of composites, where fillers are simulated as a penny shape for the modified Eshelby model

Table 1과 같다.⁽¹⁰⁾

3.1 직렬 연결된 복합재

Fig. 1(a)에 보인 것과 같이 모재와 충전재가 직렬로 연결된 복합재는 수정된 에셀비 모델에서 충전재를 동전 형상(penny-shape)으로 모델링된다. 이 경우 에셀비 텐서의 각 성분은 $S_{11} = S_{22} = 0$ 와 $S_{33} = 1$ 이다.⁽¹⁶⁾ 이 복합재의 x_3 방향의 등가열전도계수는 식 (8)로 구하면 다음과 같다.

$$k_e = \frac{k_m k_f}{f k_m + (1-f) k_f} \tag{11}$$

식 (7)을 식 (11)에 대입하여 Q'_{e11} 와 Q'_{e22} 는 다음과 같이 계산된다.

$$Q'_{e11} = \frac{Q'_{m11} Q'_{f11}}{f Q'_{m11} + (1-f) Q'_{f11}} \tag{12a}$$

$$Q'_{e22} = \frac{Q'_{m22} Q'_{f22}}{f Q'_{m22} + (1-f) Q'_{f22}} \tag{12b}$$

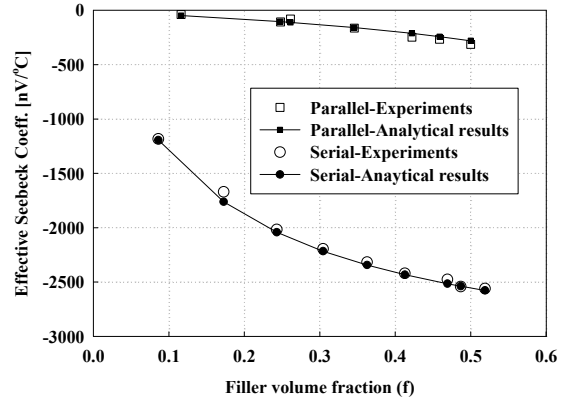


Fig. 2 Comparison of effective Seebeck coefficients of serial- and parallel-connected composites as a function of filler volume fraction, which include the predicted results by the present approach and literature and the experiments⁽¹⁰⁾

식 (12)의 결과를 식 (9)에 대입하면 복합재의 등가지백계수는 식 (10)으로 구해지며, 이 값은 수치적으로 계산이 가능하다. 이 복합재에 대한 참고문헌의 결과는 식 (13)과 같다.⁽¹⁹⁾

$$\alpha_e = \frac{(1-f)\alpha_m k_f + f\alpha_f k_m}{f k_m + (1-f)k_f} \tag{13}$$

Fig. 2에 보인 것과 같이 본 연구에서 수치적으로 계산한 복합재의 등가지백계수는 참고 문헌에서 구한 이론적 결과인 식 (13)과 정확히 일치하였고, Kleber 등이⁽¹⁰⁾ 충전재의 체적비가 복합재의 등가지백계수에 미치는 영향을 실험적으로 연구한 결과와도 잘 일치하였다.

3.2 병렬 연결된 복합재

Fig. 1(b)에 보인 것과 같이 모재와 충전재가 병렬로 연결된 복합재는 수정된 에셀비 모델에서 충전재를 역시 동전 형상(penny-shape)으로 고려한다. 이 경우 에셀비 텐서의 각 성분은 $S_{11} = 1$, $S_{22} = S_{33} = 0$ 이다.⁽¹⁶⁾ 식 (8)로 구한 병렬 연결된 복합재의 x_3 방향의 등가열전도계수는 다음과 같다.

$$k_e = (1-f)k_m + f k_f \tag{14}$$

직렬 연결된 복합재에 적용된 방법과 같은 방법을 적용하면 Q'_{e11} 와 Q'_{e22} 가 다음과 같이 계산된다.

$$Q'_{e11} = (1-f)Q'_{m11} + f Q'_{f11} \tag{15a}$$

$$Q'_{e22} = (1-f)Q'_{m22} + f Q'_{f22} \tag{15b}$$

식 (15)의 결과를 식 (9)에 대입하면 복합재의 등가지백계수는 식 (10)으로 구해지며, 이 값은 3.1

과 같이 수치적으로 계산된다. 참고문헌에서 이 복합재에 대한 등가저항계수는 식 (16)으로 표시된다.⁽¹⁹⁾

$$\alpha_e = \frac{(1-f)\sigma_m\alpha_m + f\sigma_f\alpha_f}{(1-f)\sigma_m + f\sigma_f} \quad (16)$$

3.1에서 설명된 것과 같이 본 연구에서 계산된 복합재의 등가저항계수는 참고 문헌에서 구한 식 (16)과 정확히 일치하고, Kleber 등이⁽¹⁰⁾ 실험적으로 구한 값과도 잘 일치함을 보였다. 이 비교 결과는 Fig. 2에 보인다.

3.3 구형 입자 포함된 복합재

모재에 구형 입자가 충전재로 포함된 복합재의 등가열전도계수는 식 (8)에 $S_{11} = S_{22} = S_{33} = 1/3$ 값을 대입하면 식 (17)로 표현된다.^(16,18) 또한 복합재의 등가전기전도도는 식 (17)에서 k 대신 σ 를 대입하여 구해진다.

$$k_e = \frac{2(1-f)k_m + (1+2f)k_f}{(2+f)k_m + (1-f)k_f} k_m \quad (17)$$

3.1과 3.2에 설명된 방법을 이용하여 Q'_{e11} 와 Q'_{e22} 가 다음 식으로 표현된다.

$$Q'_{e11} = \frac{2(1-f)Q'_{m11} + (1+2f)Q'_{f11}}{(2+f)Q'_{m11} + (1-f)Q'_{f11}} Q'_{m11} \quad (18a)$$

$$Q'_{e22} = \frac{2(1-f)Q'_{m22} + (1+2f)Q'_{f22}}{(2+f)Q'_{m22} + (1-f)Q'_{f22}} Q'_{m22} \quad (18b)$$

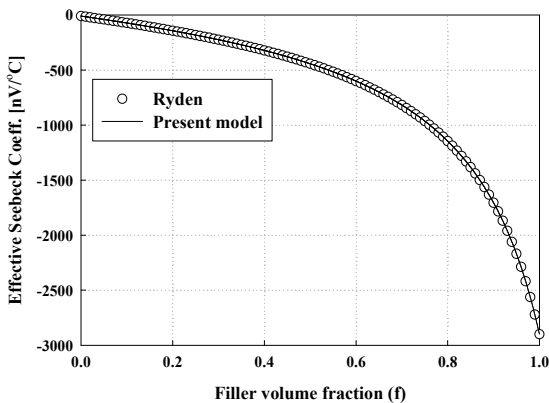


Fig. 3 Comparison of effective Seebeck coefficients of composites with spherical fillers as a function of filler volume fraction, which are predicted by the present approach and literature⁽⁸⁾

식 (18)의 결과를 식 (9)에 대입하면 복합재의 등가저항계수는 수치적으로 계산가능하며, 이 결과는 참고문헌에 있는 다음 식과 비교된다.⁽⁸⁾

$$\alpha_e = \alpha_m + f(\alpha_f - \alpha_m) \frac{\sigma_e + 2\sigma_m}{\sigma_f + 2\sigma_m} \frac{k_e + 2k_m}{k_f + 2k_m} \frac{\sigma_f}{\sigma_e} \quad (19)$$

Fig. 3에 보인 것과 같이 Table 1에 주어진 복합재에 대해 본 연구에서 제시된 방법을 수치적으로 계산한 결과와 식 (19)에 의한 결과는 완전히 일치한다.

4. 결 론

결합된 열전재료의 지배방정식은 합동변환을 통해 결합되지 않은 지배방정식으로 변환되고, 여기에 수정된 에셀비 모델을 적용하여 열전복합재의 등가저항계수를 성공적으로 예측할 수 있음을 보였다. 모재와 충전재가 직렬 및 병렬로 배치된 복합재에 대해 본 연구 결과는 참고문헌에 알려진 이론적 결과와 정확히 일치하고 실험적 결과와도 잘 일치함을 보였다. 또 구형 충전재가 포함된 복합재에 대해 예측된 등가저항계수는 참고문헌의 이론적 결과와 정확히 일치함을 보였다. 본 연구는 열전복합재의 성능을 예측하기 위해 수정된 에셀비 모델이 처음으로 적용된 것으로 단순한 형상의 충전재를 포함하는 복합재에 대해 모델의 적용 타당성이 입증되었기에 이를 기반으로 향후 충전재의 형상과 충전재와 모재의 접촉 상태 등에 대한 추가적인 연구가 가능할 것이다.

후 기

본 연구는 2012년 대구가톨릭대학교 연구년에 의한 것임

참고문헌

- (1) Heremans, J. P., Thrusch, C. M., Morelli, D. T. and Wu, M. C., 2002, "Thermoelectric Power of Bismuth Nanocomposites," *Physical Review Letters*, Vol. 88, 216801.
- (2) Poudeu, P. F. P., Gueguen, A., Wu, C. I., Hogan, T. and Kanatzidis, M. G., 2010, "High

- Figure of Merit in Nanostructured N-type KPb_mSbTe_{m+2} Thermoelectric Materials," *Chemistry of Materials*, Vol. 22, pp. 1046~1053.
- (3) Kim D., Kim, Y., Choi, K., Grunlan, J. C. and Yu, C., 2010, "Improved Thermoelectric Behavior of Nanotube-Filled Polymer Composites with Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) Poly(styrene)," *ACS NANO*, Vol. 4, No. 1, pp. 513~523.
- (4) Yang, Y., Xie, S. H., Ma, F. Y. and Li, J. Y., 2012. "On the Effective Thermoelectric Properties of Layered Heterogeneous Medium," *Journal of Applied Physics*, Vol. 111, 013510.
- (5) Straley, J. P., 1981, "Thermoelectric Properties of Inhomogeneous Materials," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 14, pp. 2101~2105.
- (6) Bergman, D. J. and Levy, O., 1991, "Thermo Properties of a Composite Medium," *Journal of Applied Physics*, Vol. 70, No. 11, pp. 6821~6833.
- (7) Bergman, D. J. and Fel, L. G., 1999, "Enhancement of Thermoelectric Power Factor in Composite Thermoelectrics," *Journal of Applied Physics*, Vol. 82, No. 12, pp. 8205~8216.
- (8) Ryden, D. J., 1974, "The Effects of Isolated Inclusions upon the Transport Properties of Semiconductors," *Journal of Physics C: Solid State Physics*, Vol. 7, pp. 2655~2669.
- (9) Webman, I. and Jortner, J., 1977, "Thermo Power in Inhomogeneous Materials," *Physical Review B*, Vol. 16, No. 6, p. 2959~2964.
- (10) Kleber, X., Simonet, L., Fouquet, F. and Delnondedieu, M., 2005, "Thermoelectric Power of a Two-dimensional Metal/Metal Composite: A Numerical Approach," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 13, pp. 341~354.
- (11) Kleber, X., Simonet, L. and Fouquet, F., 2006, "A Computational Study of the Thermoelectric Power of 2D Two Phase Materials," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 14, pp. 21~31.
- (12) Gather, F., Heiliger, C. and Klar, P. J., 2011, "NeMo: A Network Model Program for Analyzing the Thermoelectric Properties of Meso and Nanostructured Composite Materials," *Progress in Solid State Chemistry*, Vol. 39, pp. 97~107.
- (13) Gather, F., Heiliger, C. and Klar, P. J., 2011, "Modeling of Interface Roughness in Thermoelectric Composite Materials," *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 23, 335301.
- (14) Eshelby, J. D., 1957, "The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion and Related Problems," *Proceeding of the Royal Society of London*, Vol. A241, pp. 376~396.
- (15) 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.
- (16) Hatta, H. and Taya, M., 1986, "Equivalent Inclusion Method for Steady State Heat Conduction in Composites," *International Journal of Engineering Science*, Vol. 24, pp. 1159~1172.
- (17) Lee, J. K., 2008, "Prediction of Thermal Conductivities of Laminated Composites Using Penny-Shaped Fillers," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, pp. 2481~2488.
- (18) Lee, J. K., 2006, "A Study on Effective Thermal Conductivity of Particulate Reinforced Composite," *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, Vol. 10, pp. 133~138.
- (19) MacDonald, D. K. C., 1962, *Thermoelectricity: An Introduction to the Principles*, Wiley, New York.