

# 하이브리드모델을 이용한 장단비가 다른 코팅된 단섬유를 갖는 복합재의 등가열전도계수 예측

이재곤<sup>1\*</sup>, 김진곤<sup>1</sup>

<sup>1</sup>대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

## Prediction of Effective Thermal Conductivity of Composites with Coated Short Fibers of Different Aspect Ratios Using Hybrid Model

Jae-Kon Lee<sup>1\*</sup> and Jin-Gon Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

**요약** 일정하지 않은 장단비의 코팅된 충전재가 한 방향으로 정렬된 복합재의 등가열전도계수를 쉽게 예측할 수 있는 하이브리드모델을 제시한다. 코팅된 충전재의 등가열전도계수를 일반화된 자기일치모델로 계산하고, 원래 복합재를 모재와 이 값을 갖는 단섬유로 단순화한 후 수정된 에셀비 모델을 적용한다. 일정한 장단비의 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬된 복합재에 대해 일반화된 자기일치모델과 수정된 에셀비모델의 예측결과를 하이브리드모델과 비교한다. 마지막으로 장단비 2와 10인 코팅된 단섬유가 한 방향으로 배치된 복합재의 등가열전도계수를 하이브리드모델로 쉽게 계산할 수 있음을 보여준다.

**Abstract** A hybrid model is proposed to easily predict the effective thermal conductivity of composites with aligned- and coated-short fibers, whose aspect ratio is not constant. The thermal conductivities of coated fillers are computed by using the generalized self-consistent model, resulting in that composites are simply simulated by the matrix with the equivalent short fibers. Finally, the thermal conductivity of the composites is predicted using the modified Eshelby model. The predicted results by the representative models and hybrid model are compared for the composite with aligned- and coated-short fibers of single aspect ratio. It is demonstrated that the hybrid model can be applied to the composite with aligned- and short-fibers of aspect ratios, 2 and 10, without any difficulties.

**Key Words** : Aspect Ratio Distribution, Coated Short Fiber, Generalized-Self Consistent Model, Modified Eshelby Model, Thermal Conductivity

### 1. 서론

복합재의 등가열전도계수를 예측하기 위해 많은 이론적 연구가 진행되어왔다. 이 중에서 대표적인 것으로 체적비가 높을 경우 복합재의 등가물성치를 잘 예측하는 일반화된 자기일치모델(Generalized Self-Consistent Model)과[1-3] 여러 형상의 충전재를 갖는 복합재에 광범위하게

적용될 수 있는 수정된 에셀비 모델(Modified Eshelby Model)이 있다[4-6]. 일반화된 자기일치모델은 구형 충전재를 포함하거나 단섬유와 연속섬유가 한 방향으로 정렬된 복합재에 대해서만 등가열전도계수를 예측할 수 있다[7]. 반면 수정된 에셀비 모델은 적용의 제한성을 갖는 일반화된 자기일치모델과는 달리 여러 형상의 충전재가 한 방향으로 정렬되지 않더라도 복합재의 등가열전도계수를

이 논문은 2012년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

\*Corresponding Author : Jae-Kon Lee(Catholic Univ. of Daegu)

Tel: +82-53-850-2720 email: [leejk@cu.ac.kr](mailto:leejk@cu.ac.kr)

Received March 27, 2013

Revised May 6, 2013

Accepted June 7, 2013

계산할 수 있는 장점이 있다[6,8].

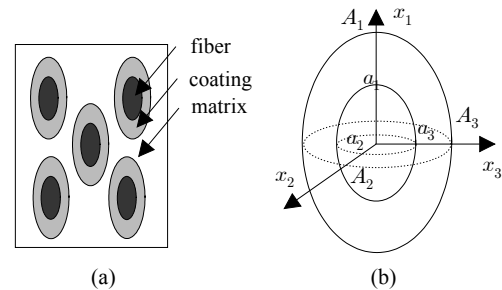
코팅된 충전재는 복합재의 무게 감소, 열 또는 전달 성능 향상, 모재와 충전재의 결합성능 향상 등을 위해 사용되었으며, 이 전도특성을 규명하기 위해 위에 언급된 두 모델에서 코팅층을 모델에 새로이 추가하였다[7-10]. 또한 복합재 제조과정 중 충전재와 모재사이에 접촉영역(interfacial zone)이 생성되며 이는 복합재의 열전도계수가 충전재의 크기에 영향을 받는 원인으로 알려져 있다[11]. 접촉영역은 모재와 충전재가 아닌 제3의 물질로 구성되는 코팅재로 취급되어 모델에 반영되어 이의 영향이 평가되었다[8]. 코팅된 충전재 또는 접촉영역을 포함하는 복합재에 일반화된 자기일치모델을 사용하여 열전도계수를 예측할 때는 이 모델을 연속하여 두 번 적용한다[7]. 먼저 코팅된 단섬유의 등가열전도계수를 구한 후 이 값을 갖는 단섬유가 모재에 존재하는 복합재의 등가열전도계수를 구한다. 반면 수정된 에셀비 모델은 무한체에 포함된 하나의 코팅된 단섬유에 대해 열전도방정식을 풀어 이를 등가계재물법으로 표현한다. 다수의 코팅된 단섬유가 복합재에 존재할 경우 이들의 상호작용을 고려하기 위해 등가계재물법을 한번 더 적용하여 복합재의 등가열전도계수를 구한다[8,9]. 두 모델은 코팅된 구나 미소 중공구 같은 충전재를 포함하거나 코팅된 원기둥 형상의 충전재가 한 방향으로 정렬된 복합재의 등가열전도계수를 동일하게 예측하였다[7]. 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬된 복합재에서 충전재나 코팅층 하나의 열전도계수가 모재보다 1000배 높을 때 일반화된 자기일치모델이 단섬유 길이 방향의 등가열전도계수를 수정된 에셀비 모델보다 높게 예측하였고, 길이 직각 방향의 열전도계수에 대해서는 언급이 없었다[7].

복합재 속에 존재하는 단섬유는 일반적으로 장단비 분포를 가지며 또한 한 방향으로 정렬되어 배치되는 것이 아니다. 지금까지 동일한 장단비를 갖는 코팅된 충전재가 방향분포를 갖는 복합재의 열전도계수는 수정된 에셀비 모델로만 예측할 수 있었다[8]. 하지만 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬되었더라도 장단비의 분포가 있을 경우에는 지금까지 이를 해결할 수 있는 방법이 전무하였다. 본 연구에서는 이러한 기존 모델들의 적용한계를 보완하기 위해 일정하지 않은 장단비의 코팅된 충전재가 한 방향으로 정렬된 복합재의 등가열전도계수를 쉽게 예측할 수 있는 하이브리드모델을 제시한다. 단섬유와 코팅재로 구성된 코팅된 충전재의 등가열전도계수를 일반화된 자기일치모델로 먼저 계산한다[7,12]. 원 복합재는 모재 속에 이 값을 갖고 코팅재의 형상을 갖는 등가의 충전재가 존재하는 가상의 복합재로 모사된다. 다음으로 이 가상의 복합재에 충전재의 장단비 분포를 쉽게 모델에 반영하기

위해 수정된 에셀비 모델을 적용한다[4-6]. 먼저 일정한 장단비를 갖는 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬된 복합재에 대해 일반화된 자기일치모델과 수정된 에셀비 모델 그리고 하이브리드모델로 예측된 길이 및 길이 수직 방향의 등가열전도계수를 비교 및 검토한다[7,9]. 마지막으로 다른 장단비의 코팅된 단섬유가 한 방향으로 배치된 복합재의 등가열전도계수를 하이브리드모델로 쉽게 계산할 수 있음을 보여준다.

## 2. 하이브리드모델

하이브리드모델은 일반화된 자기일치모델과 수정된 에셀비모델을 결합한 것으로 코팅된 단섬유의 등가열전도계수를 일반화된 자기일치모델로 먼저 계산한다. 원래 복합재는 모재 속에 이 값을 갖고 코팅된 단섬유의 외형을 갖는 충전재가 존재하는 가상의 복합재로 전환된다. 여기에 충전재의 장단비 분포를 쉽게 모델에 반영하기 위해 수정된 에셀비 모델을 적용한다.



[Fig. 1] (a) Composite with aligned- and coated-short fibers and (b) dimensions of two confocal prolate spheroids representing fiber and coating in the rectangular coordinate system.

### 2.1 코팅된 단섬유의 등가열전도계수

Fig. 1(a)와 같이 모재 속에  $x_1$  방향으로 배치된 코팅된 단섬유를 포함하는 복합재를 고려한다. Fig. 1(b)는 하나의 코팅된 단섬유를 확대한 것으로 내부와 외부의 타원체는 각각 단섬유와 코팅을 나타내고 두 타원체는 동일한 초점을 갖는다. 코팅된 단섬유의 등가열전도계수는 일반화된 자기일치모델로 계산된다[7,12,13]. 내부 타원체인 단섬유의 장단비( $c$ )와 외부 타원체인 코팅의 장단비( $\xi$ )는 각각의 장축과 단축의 비로 정의된다.

$$c = a_1/a_2, \quad \xi = A_1/A_2. \quad (1)$$

$a_i$ 와  $A_i$ 는 두 타원체의  $x_i$  좌표를 나타낸다. 두 타원체는 동일한 초점을 가지기에 장축과 단축은 간단한 관계를 갖는다.

$$a_1^2 - a_2^2 = a_1^2 - a_3^2 = A_1^2 - A_2^2 = A_1^2 - A_3^2. \quad (2)$$

코팅의 두께( $\delta$ )는 단섬유의 단축을 기준으로 정의한다.

$$\delta = A_2/a_2. \quad (3)$$

이 값이 주어지면, 식(1)~(3)을 이용하여 외부 타원체인 코팅의 장단비를 계산할 수 있다.

$$\xi^2 = 1 + \delta^{-2}(c^2 - 1) \quad (4)$$

일반화된 자기일치모델의 개념에 의하면 코팅된 단섬유의 등가열전도계수는 코팅재와 단섬유로 이루어진 복합재의 등가열전도계수와 같으므로 코팅된 단섬유의 장축 및 단축 방향의 열전도계수는 각각 다음과 같다.

$$\frac{k_1^c}{k_c} = 1 + \frac{f_{fc}}{\frac{k_c}{k_f - k_c} - \frac{c}{(c^2 - 1)^{3/2}} \ln \left[ \frac{(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})(c - \sqrt{c^2 - 1})}{e^{\xi\sqrt{c^2 - 1}/\xi - \sqrt{c^2 - 1}/c}} \right]} \quad (5a)$$

$$\frac{k_3^c}{k_c} = 1 + \frac{f_{fc}}{\frac{k_c}{k_f - k_c} + \frac{c}{2(c^2 - 1)^{3/2}} \ln \left[ \frac{(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})(c - \sqrt{c^2 - 1})}{e^{\xi\sqrt{c^2 - 1} - c\sqrt{c^2 - 1}}} \right]} \quad (5b)$$

$k_f$ 와  $k_c$ 는 단섬유와 코팅재의 열전도계수를,  $k_1^c$ 와  $k_3^c$ 는 코팅된 단섬유의 장축 및 단축 방향의 열전도계수를 나타낸다.  $f_{fc}$ 는 코팅된 단섬유에서 단섬유의 체적비로 단섬유 부피( $V_f$ )와 코팅재의 부피( $V_c$ )로 정의된다.

$$f_{fc} = V_f/(V_c + V_f). \quad (6)$$

식(1)과 (3)을 이용하여 식(6)은 간단한 형태로 표현된다.

$$f_{fc} = \frac{c}{\xi} \delta^{-3}. \quad (7)$$

단섬유의 장단비, 코팅의 두께, 단섬유와 코팅의 열전도계수가 주어지면 식(5)로 코팅된 단섬유의 장축 및 단축 방향의 등가열전도계수를 계산한다.

## 2.2 복합재의 등가열전도계수

하이브리드모델은 일반화된 자기일치모델과 수정된 에셀비 모델을 순차적으로 이용하는 것으로 먼저 일정한 장단비를 갖는 코팅된 단섬유가 포함된 복합재에 이를 적용한다. 코팅된 단섬유를 하나의 타원체로 취급함으로써 원래의 복합재는 모재속에 이 타원체가  $x_1$  방향으로 배치되어 있는 것으로 단순화된다. 코팅된 단섬유의 장축 및 단축 방향의 등가열전도계수와 장단비는 각각 2.1의 식(5)와 (4)로 계산된다. 여기에 수정된 에셀비 모델을 적용하여 복합재의 등가열전도계수를 구한다. 이에 대한 내용은 문헌에 상세히 설명되어 있고 여기서는 결과식만을 간단히 정리한다[4-6].

$$K_{eff} = K_m [I + fA(K_m - K_c)]^{-1}. \quad (8a)$$

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

$K$ ,  $S$ ,  $I$ ,  $f$ 는 각각 열전도계수행렬, 장단비의 함수인 에셀비 텐서,  $3 \times 3$ 단위 행렬, 코팅된 단섬유의 체적비를 각각 나타내고 아래첨자  $m$ 과  $c$ 는 모재와 코팅된 단섬유를 뜻한다.

위에 설명된 방법을 이용하여 장단비가 다른 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬된 복합재의 등가열전도계수를 구한다. 임의의 장단비 분포에 대해 등가열전도계수를 구하는 모델은 문헌에 상세히 설명되어 있다[14]. 여기서는 장단비 분포를 갖는 코팅된 단섬유 복합재의 등가열전도계수의 예측 가능성에 초점이 있으므로, 가장 단순한 경우인 두 종류의 장단비를 갖는 코팅된 단섬유가 존재하는 복합재에 대해 필요한 수식을 간략히 정리하였다 [15]. 모재 속에 장단비가  $c_1$ 과  $c_2$ 인 단섬유가  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 의 두께로 코팅되어 있고 이들 코팅된 단섬유의 체적비는  $f_1$ 와  $f_2$ 이다. 복합재의 등가열전도계수는 일반화된 자기일치모델로 계산한 코팅된 단섬유의 등가열전도계수와 식(9)를 이용하여 계산되며,  $f_1$ 와  $f_2$ 를 제외한 모든 문자들은  $3 \times 3$  행렬을 나타낸다.  $S$ 와  $I$ 는 에셀비 텐서와 단위행렬, 아래첨자  $m$ ,  $f_1$ ,  $f_2$ 는 모재, 코팅된 단섬유1과 2를 나타낸다.

$$K_{eff} = [K_m^{-1} + f_1 F_1 + f_2 F_2]^{-1}. \quad (9a)$$

$$F_1 = (A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})^{-1}(D_1 - A_{12}A_{22}^{-1}D_2). \quad (9b)$$

$$F_2 = (A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})^{-1}(D_2 - A_{21}A_{11}^{-1}D_1). \quad (9c)$$

$$A_{11} = \{(K_{f1} - K_m)[(1 - f_1)S_{f1} + f_1I] + K_m\}. \quad (9d)$$

$$A_{12} = f_2(K_m - K_{f1})(S_{f2} - I). \quad (9e)$$

$$D_1 = (K_m - K_{f1})K_m^{-1}. \quad (9f)$$

$$A_{21} = f_1(K_m - K_{f2})(S_{f1} - I). \quad (9g)$$

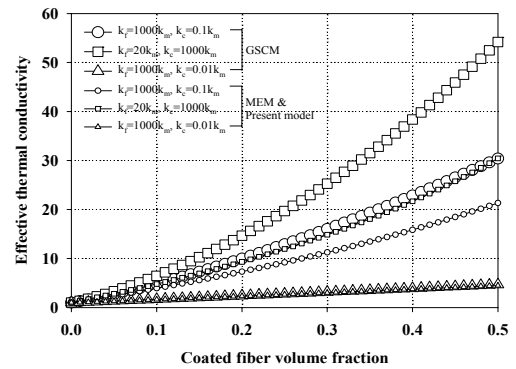
$$A_{22} = \{(K_{f2} - K_m)[(1 - f_2)S_{f2} + f_2I] + K_m\}. \quad (9h)$$

$$D_2 = (K_m - K_{f2})K_m^{-1}. \quad (9i)$$

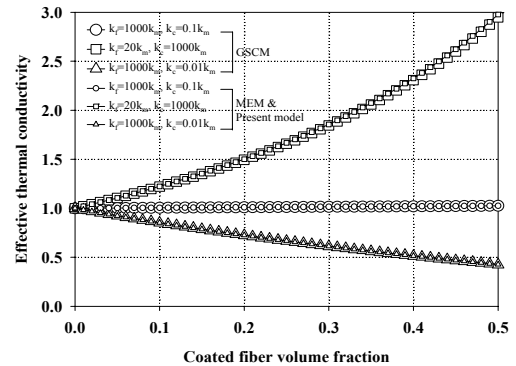
### 3. 결과검토 및 분석

#### 3.1 기존 모델과 결과 비교

장단비가 10이고 단축방향에서 단섬유의 10%의 두께로 코팅되어 있는 코팅된 단섬유가  $x_1$  방향으로 정렬되어 있는 복합재의 등가열전도계수에 대해 이론적 연구가 수행되었다[7]. 이러한 복합재의 등가열전도계수를 연구한 대표적인 Benveniste 그룹은[7] 일반화된 자기일치모델을, Taya 그룹은[9] 수정된 에셀비 모델을 이용하였다. 기존 연구에서 사용된 단섬유, 코팅 그리고 모재의 열전도계수를 사용하여 기존 모델과 본 연구에서 제시된 하이브리드모델의 예측 결과를 Fig. 2에 비교하였다. 여기서 언급되는 모든 열전도계수는 모재의 열전도계수로 무차원화한 것이다. Fig. 2(a)와 같이 주어진 조건에서 수정된 에셀비모델과 하이브리드모델로 구한 복합재의 장축 방향의 등가열전도계수는 정확하게 일치하고, 일반화된 자기일치모델로 구한 결과는 이 값보다 높다. 수정된 에셀비모델과 하이브리드모델로 예측한 단축 방향의 결과는 서로 일치하고 또한 일반화된 자기일치모델로 구한 값과 거의 동일하였다. 비록 일반화된 자기일치모델과 하이브리드모델에 사용되는 코팅된 단섬유의 등가열전도계수가 동일하더라도, 이들 모델로 복합재의 등가열전도계수를 예측할 때 장축 방향의 값은 차이가 발생하였다. 또 코팅된 단섬유의 등가열전도계수가 증가할수록 두 모델의 예측값은 차이가 증가함이 밝혀졌다[13]. Fig. 2의 원, 사각형, 삼각형의 각 기호에 대해 코팅된 단섬유의 장축 방향의 등가열전도계수를 일반화된 자기일치모델로 계산한 결과는 78.6, 190.2, 8.6이고, 단축 방향의 그 값은 1.05, 115.8, 0.105이다. Fig. 2(a)에서 알 수 있듯이 코팅된 단섬유의 등가열전도계수가 클수록 두 모델에 의한 장축방향의 복합재의 등가열전도계수 예측값은 차이가 커진다. 반면 단축방향의 결과는 Fig. 2(b)에서와 같이 코팅된 단섬유의 등가열전도계수의 크기에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.



(a) Effective thermal conductivity along major axis



(b) Effective thermal conductivity along minor axis

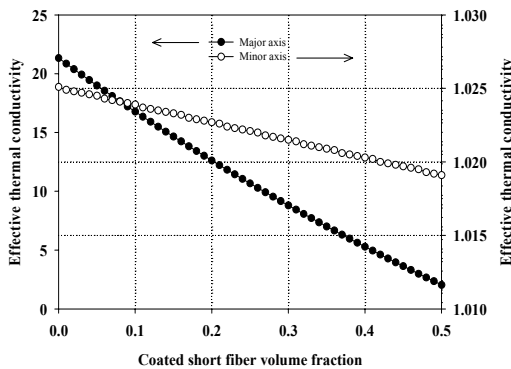
[Fig. 2] Comparison of the predicted thermal conductivities of aligned- and coated-short fiber composites by Generalized Self-Consistent Model (GSCM), Modified Eshelby Model (MEM) and hybrid model as a function of coated filler volume fraction.

#### 3.2 두 종류의 장단비를 갖는 단섬유 복합재의 등가열전도계수 예측

장단비가 2와 10이고 코팅의 두께가 10%인 단섬유가 길이방향으로 정렬된 복합재의 등가열전도계수를 하이브리드모델로 예측하며 코팅된 단섬유의 체적비는 항상 0.5이다. 단섬유와 코팅의 열전도계수는 각각  $1,000k_m$ 와  $0.1k_m$ 로 3-1에서 사용된 것중의 하나이다. 하이브리드모델로 예측한 이 복합재의 장축 및 단축 방향의 등가열전도계수를 코팅된 단섬유의 체적비의 함수로 Fig. 3에 나타내었다.

이 그래프에서 체적비가 0인 경우는 모재에 장단비가 10인 단섬유만이 포함된 복합재를 뜻하고 체적비가 0.5인 경우는 두 충전재가 동일한 체적비로 존재하며, 이 경

우에도 코팅된 단섬유의 체적비는 역시 0.5이다. Fig. 3에서 체적비 0인 경우는 Fig. 2에서 기호가 작원 원중에서 체적비 0.5와 동일한 것으로 3-1과 3-2로 예측된 두 방향의 열전도계수가 각각 21.33과 1.025로 정확히 일치한다. 두 종류의 장단비를 갖는 코팅된 단섬유 복합재는 물론이고 장단비의 분포를 갖는 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬된 복합재의 등가열전도계수 역시 본 연구에서 제시된 하이브리드모델에 장단비 분포를 고려하는 수정된 에셀비모델을 적용함으로써 쉽게 예측할 수 있다[14].



[Fig. 3] Predicted results of effective thermal conductivities of composites with two aspect ratios of short fibers such as 2 and 10 using hybrid model, where x-axis denotes fiber volume fraction of low aspect ratio fibers and total volume fraction of fibers is always kept to be 0.5.

#### 4. 결론

지금까지 동일한 장단비를 갖는 코팅된 단섬유가 방향 분포를 갖는 복합재의 등가열전도계수를 수정된 에셀비 모델로만 예측할 수 있었으나, 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬되었더라도 장단비의 분포가 있을 경우에는 어느 모델로도 해석적인 결과를 얻을 수 없었다. 이러한 모델들의 단점을 해결하기 위해 하이브리드모델이 제시되었다. 일정한 장단비를 갖는 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬된 복합재에 대해 일반화된 자기일치모델과 수정된 에셀비모델의 등가열전도계수 예측 결과를 하이브리드모델의 결과와 비교하였다. 수정된 에셀비모델과 하이브리드모델의 결과는 정확히 일치하였으며 일반화된 자기일치모델은 코팅된 단섬유의 등가 열전도계수가 높을수록 장축 방향의 등가열전도계수를 다른 모델보다 높게 예측하였다. 처음으로 두 종류의 장단비를 갖는 코팅된 단섬유가 한 방향으로 배치된 복합재의 등가열전도계수

를 하이브리드모델로 쉽게 계산할 수 있음을 보였으며 장단비의 분포를 갖는 코팅된 단섬유가 한 방향으로 정렬된 복합재에도 이 모델의 적용 가능성을 제시하였다.

#### References

- [1] R.M. Christensen, "Two theoretical elasticity micromechanics", *J. Elasticity*, 50, pp. 15-25, 1998. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/A:1007497600857>
- [2] J.D. Felske, "Effective thermal conductivity of composite spheres in a continuous medium with contact resistance," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 47, pp. 3453-3461, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.01.013>
- [3] R. M. Christensen. K. H. Lo, "Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models". *J. Mech. Phys. Solids*, 27, pp. 315-330, 1979. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096\(79\)90032-2](http://dx.doi.org/10.1016/0022-5096(79)90032-2)
- [4] J.D. Eshelby, "The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems", *Proc. of the Royal Society of London*, A241, pp. 376-396, 1957. DOI: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1957.0133>
- [5] T. Mori, K. Tanaka, "Average stress in the matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions", *Acta Metallurgica*, 21, pp. 571-574, 1973. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](http://dx.doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)
- [6] H. Hatta, M. Taya, "Equivalent inclusion method for steady state heat conduction in composites," *Int. J. Engng. Sci.*, 24, pp. 1159-1172, 1986. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0020-7225\(86\)90011-X](http://dx.doi.org/10.1016/0020-7225(86)90011-X)
- [7] Y. Benveniste, T. Miloh, "On the effective thermal conductivity of coated short fiber composites," *J. Appl. Phys.*, 69, pp. 1337-1344, 1991. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.347269>
- [8] M.L. Dunn, M. Taya, "The effective thermal conductivity of composites with coated reinforcement and the application to imperfect interfaces," *J. Appl. Phys.*, 73, pp. 1711-1722, 1993. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.353206>
- [9] H. Hatta, M. Taya, "Thermal conductivity of coated filler composites," *J. Appl. Phys.*, 59, pp. 1851-1860, 1986. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.336412>

- [10] S. Y. Lu, "Effective conductivities of aligned spheroid dispersions estimated by an equivalent inclusion model," J. Appl. Phys., 84, pp. 2647-2655, 1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.368377>
- [11] H. Bhatt, K.Y. Donaldson, D.P.H. Hasselman, R.T. Bhatt, "Role of the Interfacial Thermal Barrier in the Effective Thermal Diffusivity/Conductivity of SiC-Fiber-Reinforced Reaction-Bonded Silicon Nitride," J. Am. Ceram. Soc., 73, pp. 312-316, 1990.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06511.x>
- [12] T. Miloh, Y. Benveniste, "A generalized selfconsistent method for the effective conductivity of composites with ellipsoidal inclusions and cracked bodies," J. Appl. Phys., 63, pp. 789-796, 1988.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.340071>
- [13] J. K. Lee, J. G. Kim, "Generalized Self-Consistent Model for Predicting Thermal Conductivity of Composites with Aligned Short Fibers," Materials Transactions, 51, pp. 2039-2044, 2010.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.M2010249>
- [14] J. K. Lee, "Prediction of thermal conductivity of aligned short fibre composites with different fibre aspect ratios," Polymers & Polymer Composites, 15, pp. 273-280, 2007.
- [15] J. K. Lee, J. G. Kim, "Analytical Study on Effective Thermal Conductivity of Three-Phase Composites," J. the Korea Academia-Industrial Cooperation Soc., 12, pp. 2931-2938, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.7.2931>

**김진곤(Jin-Gon Kim)**

[정회원]



- 1991년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학학사)
- 1998년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (기계공학박사)
- 1998년 3월 ~ 2001년 2월 : 삼성전자 책임연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

전산역학, 생체역학, 최적설계

**이재곤(Jae-Kon Lee)**

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (기계공학학사)
- 1996년 8월 : 미국 Washington 대 (기계공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1997년 4월 : 현대자동차
- 1997년 9월 ~ 현재 : 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

복합재료, 지능재료