

3상 복합재의 등가열전도계수 예측에 대한 연구

이재곤^{1*}, 김진곤¹

¹대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

Analytical Study on Effective Thermal Conductivity of Three-Phase Composites

Jae-Kon Lee^{1*} and Jin-Gon Kim¹

¹School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic University of Daegu

요 약 2상 복합재에 적용되어오던 수정된 Eshelby 모델(MEM)을 두 종류의 구형 입자를 포함하는 3상 복합재로 확장하여 복합재의 등가열전도계수를 간단히 양함수 형태로 표시한다. 이의 유효성 검증을 위해 이 결과를 미소등가물 모델(DEMM)로 구한 결과와 비교하고, 또 참고문헌의 2상 및 3상 복합재의 실험결과와 비교한다. 2상 복합재의 경우 MEM이 충전재의 체적비 0.5 미만에서는 DEMM보다 잘 예측한다. 3상 복합재의 경우 모재 대비 큰 열전도계수비를 갖는 충전재의 체적비가 적은 경우 MEM이 잘 예측하나, 체적비가 증가할수록 DEMM이 잘 예측한다. 이 체적비가 두 모델의 예측결과에 결정적 영향을 주는 인자임이 변수들의 영향 연구를 통해 밝혀졌으며, Molina 등이 제안한 3상 복합재에 대해 MEM과 DEMM은 동등한 예측 수준을 보였다.

Abstract Effective thermal conductivity of three-phase composites, consisting of matrix and two kinds of spherical inclusions, has been derived as an explicit form by extending modified Eshelby model (MEM) for two-phase composites. The present results are compared with those by differential effective medium model (DEMM), which are also compared with the experimental results of two- and three-phase composites in the literatures to be validated. For two-phase composites, the results by MEM are better than those by DEMM for the inclusion volume fraction smaller than 0.5. Comparisons between the results by two models and experimental results have been made for three-phase composite, resulting in that MEM predicts better than DEMM for smaller volume fraction of the inclusion having larger inclusion-to-matrix thermal conductivity ratio, but DEMM predicts better as its volume fraction increases. It has been observed through parametric study that its volume fraction is the critical factor affecting the deviation of predictions by the two models. The results by them show a good agreement with the three-phase composite proposed by Molina et al..

Key Words : Thermal Conductivity, Three-Phase Composite, Modified Eshelby Model, Differential Effective Medium Model

1. 서론

복합재의 등가물성치의 예측은 복합재의 설계, 제조 및 이의 적용성 측면에서 중요한 영역으로 기계적, 열적, 전기적 및 기계-전기적 등가물성치에 대해 많은 연구가 수행되어왔다. 등가물성치는 모재와 충전재의 물성치, 충

전재의 체적비, 분포, 크기 및 모재와 충전재의 접촉상태에 따라 크게 변한다. 이러한 연구의 대부분은 모재와 한 종류의 충전재로 구성되는 2상 복합재에 국한되어왔다. 2상 복합재의 등가물성치를 예측하는 대부분의 모델은 낮은 체적비와 모재와 충전재의 물성치 차이가 작을 때 거의 비슷한 예측 값을 주고, 모델간의 예측치 차이는 물성

이 논문은 2011년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임.

*교신저자 : 이재곤(leejk@cu.ac.kr)

접수일 10년 05월 03일

수정일 (1차 11년 06월 01일, 2차 11년 06월 11일)

계재확정일 11년 07월 07일

치 차이가 클 때와 체적비가 높을 때 주로 발생한다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 무한체인 모재에 하나의 충전재가 포함된 경우 완전 해를 구하고 이 결과를 바탕으로 유한 체적비까지 확장하기 때문이다[1].

그러나 충전재로 한 종류의 입자만이 모재에 포함되더라도 이 입자의 크기가 일정하지 않을 경우 입자와 모재 사이의 접촉저항이 달라 입자마다 서로 다른 물성치를 가지므로 2상 복합재로 모사하여 등가물성치를 예측할 수 없다[2,3]. 또, 2상 복합재를 제조할 때에도 모재와 입자 사이 또는 모재에 기공이 포함될 수 있으며[4,5], 이 역시 2상 복합재 모델로 물성치 해석은 곤란하다. 복합재 자체의 장점을 살려 원하는 등가물성치를 얻을 수 있는 선택의 폭을 넓히기 위해서는 두 종류의 입자를 사용하는 경우도 존재한다[6]. 이러한 경우 복합재의 등가물성치 예측을 위해서 기존 2상 복합재에 사용되던 모델 외에 추가적인 모델이 필요하다.

전자 패키징용 금속복합재료는 온도 변화에 따라 발생하는 열응력 감소와 전자소자의 직접화에 따라 발생하는 고열을 제거하기 위해 필수적인 열팽창계수와 열전도계수의 요구 성능을 지녀야한다[7]. 특히 직접화의 진행에 따라 열 배출문제는 전자 부품산업의 주요한 영역으로 취급되어 기존에 사용되던 Cu/Mo, Cu/W, Al/SiC 복합재료는 열전도계수가 부족하여 Al/SiC 복합재에 최소 양의 다이아몬드를 추가하여 더 높은 열전도계수를 확보하는 연구가 진행되었다[6,8]. 이러한 복합재의 열전도계수 예측을 위해서도 3상 복합재에 대한 모델이 필요하다.

현재 3상 복합재의 등가열전도계수를 예측하기 위해 사용되고 있는 모델 중 하나는 미소등가물모델(Differential Effective Medium Model, DEMM)로 두 종류의 구형 입자가 포함된 것에 국한되고 있다[6,9]. 2상 복합재에 적용되었던 DEMM은 입자의 체적비가 높을 경우 등가열전도계수를 잘 예측하는 것으로 알려져 있으나[10], 이를 구하기 위해서는 수치적 풀이방법이 요구된다. DEMM으로 3상 복합재의 등가열전도계수를 구할 경우 미분 방정식을 수치적으로 해결하거나[6,9], DEMM을 두 번 연속 사용해야하는 번거로움이 있다[3]. 2장에서 이 이론의 해법을 구체적으로 설명한다. 반면 Hatta와 Taya가[11] 제안한 수정된 Eshelby 모델 (Modified Eshelby Model, MEM)은 Eshelby의 등가개재물법과[12] Mori-Tanaka의 평균장 이론을[13] 바탕으로 한 것으로 복합재의 등가열전도계수 예측을 위해 많이 사용되어 왔으나, 주로 2상 복합재에서 입자의 형상과 체적비의 영향을 파악하기 위해 적용되었다.

본 논문에서는 2상 복합재에 적용되어오던 Hatta와 Taya가[11] 제시한 수정된 Eshelby 모델을 두 종류의 구형 입자를 포함하는 3상 복합재로 확장하여 복합재의 등가열전도계수를 간단히 양함수 형태로 표시한다. 이 함수는 모재와 이에 포함된 두 구형 입자의 열전도계수 및 각각의 체적비의 함수로 표현된다. 이 결과를 문헌에 보고된 2상 및 3상 복합재의 등가열전도계수에 대한 실험결과와[6,14] DEMM으로 예측된 결과와 비교함으로써 본 논문에서 제안된 모델의 유효성을 입증한다. 이를 통해 본 연구에서 제시된 방법이 전자 패키징용 복합재료의 열전도계수 예측에 미치는 두 종류의 입자의 체적비와 모재와 입자의 열전도계수비의 효과를 DEMM의 결과와 비교 평가한다.

2. 모델링

두 종류의 구형 입자가 포함된 복합재의 등가열전도계수를 예측할 수 있는 방법으로 미소등가물모델 (DEM)과 수정된 Eshelby 모델 (MEM)이 있으며, 2.1 및 2.2절에서 각 모델을 상세히 설명한다.

2.1 미소등가물모델 (Differential Effective Medium Model, DEMM)

DEM을 사용하여 3상 복합재의 등가열전도계수를 구하는 방법으로 일반화된 DEM을 적용하는 것[6,9] DEM을 연속 2회 적용하는 것이[3] 있다. 일반화된 DEM을 여러 종류의 구형 입자가 포함된 복합재에 적용하면 등가열전도계수는 다음과 같은 일차 비선형 미분 방정식으로 표현된다.

$$\frac{dk_c}{df} = \frac{k_c}{(1-f)} \sum_i f_i \frac{k_c - k_{fi}}{(k_c - k_{fi})S - k_c} \quad (1)$$

여기서 k_c , k_{fi} , S , f , f_i 는 각각 복합재의 열전도계수, 구형 입자의 열전도계수, polarization 계수, 입자의 총 체적비, 총 체적비중 각 입자의 체적비를 나타낸다. 복합재의 등가열전도계수는 식(1)을 수치적으로 풀어 계산된다.

후자의 경우 먼저 모재에 포함되는 2가지 종류의 구형 입자중 한 종류만 모재에 포함된 복합재의 열전도계수를 계산하고 이를 새로운 모재로 간주한다. 이 모재의 열전도계수(k_{m1})는 비선형 3차 방정식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{k_{m1}}{k_m}\right)^3 - 3\left(\frac{k_{f1}}{k_m}\right)\left(\frac{k_{m1}}{k_m}\right)^2 + 3\left(\frac{k_{f1}}{k_m}\right)^2\left(\frac{k_{m1}}{k_m}\right) + (1-f_1')^3\left(\frac{k_{f1}}{k_m} - 1\right)^3 \frac{k_{m1}}{k_m} - \left(\frac{k_{f1}}{k_m}\right)^3 = 0 \quad (2)$$

여기서 k_m 은 원 모재의 열전도계수를 나타내고, $f_1' = f_1/(1-f_2)$ 의 관계를 갖으며, 다른 문자는 식(1)에서의 정의와 동일하다. 새로 만들어진 모재에 다른 종류의 구형 입자를 추가하여 최종 복합재를 구성하며, 이 복합재의 등가열전도계수(k_c)는 식(2)와 같이 다음 식으로 나타내어진다.

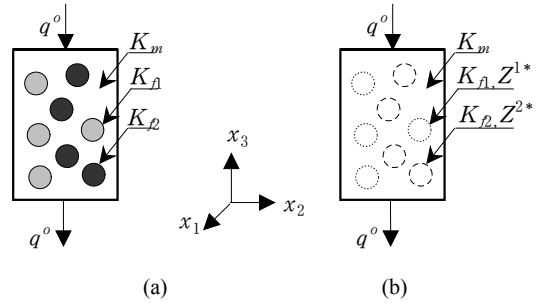
$$\left(\frac{k_c}{k_{m1}}\right)^3 - 3\left(\frac{k_{f2}}{k_{m1}}\right)\left(\frac{k_c}{k_{m1}}\right)^2 + 3\left(\frac{k_{f2}}{k_{m1}}\right)^2\left(\frac{k_c}{k_{m1}}\right) + (1-f_2)^3\left(\frac{k_{f2}}{k_{m1}} - 1\right)^3 \frac{k_c}{k_{m1}} - \left(\frac{k_{f2}}{k_{m1}}\right)^3 = 0 \quad (3)$$

전자와 같이 후자의 방법도 식(2)와 (3)을 수치적으로 풀어 복합재의 등가열전도계수를 구한다. 본 연구에서는 식(1)의 해를 DEMM의 대표 결과로 이용하여 실험 결과 및 수정된 Eshelby 모델로 구한 결과와 비교 검토한다.

2.2 수정된 Eshelby 모델 (Modified Eshelby Model, MEM)

본 연구에서 사용되는 모델 복합재는 그림 1(a)에 보이는 것과 같이 열전도계수가 다른 두 종류의 구형 입자가 무한체인 모재에 불규칙적으로 배치된 것이며, 이 복합재는 x_3 방향의 일정한 열유속 q^o 를 받는다. 그림 1(b)는 그림1(a)를 Eshelby의 등가개재물법으로[12] 변환한 것이다. 모재와 구형 입자는 등방성의 성질을 갖고 각각의 열전도계수는 k_m , k_{f1} 과 k_{f2} 값을 갖는다. 아래첨자 m 및 f 는 모재와 구형 입자를 나타낸다.

3상 복합재의 열전도계수를 구하기 위해 Eshelby의 등가개재물법과 Mori-Tanaka의 평균장이론을 이용하여 Hatta와 Taya가 제안한 2상 복합재의 열전도모델을 확장한다[11~13,15]. 이는 장단비 분포를 갖는 2상 복합재의 열기계적 등가물성치 해석을 위해 적용되었던 수정된 Eshelby 이론을 입자의 장단비는 동일하나 입자의 물성치가 다른 3상 복합재로 확장한 것이다[16,17]. 그림1에 보인 i 종류 입자의 열유속 (q_i^j)과 모재내의 열유속 (q_m)은 각각 다음 식으로 표현되며, i 는 1 또는 2의 값을 갖는다.



[그림 1] 두 종류의 입자를 포함하는 복합재의 등가열전도계수를 예측하기 위한 모델: (a) 원래 문제, (b) Eshelby의 등가개재물법으로 변환된 문제.

[Fig. 1] Model for predicting the effective thermal conductivity of composites with two types of inclusions: (a) original problem, which is converted into (b) Eshelby's equivalent inclusion problem.

$$q_f^i = -K_f^i(Z^o + \bar{Z} + Z^i) = -K_m(Z^o + \bar{Z} + Z^i - Z^{i*}) \quad (4)$$

$$q_m = -K_m(Z^o + \bar{Z}) \quad (5)$$

여기서 K 는 열전도계수행렬, Z^o 는 입자가 없을 경우 인가 열유속에 의해 발생하는 모재내의 균일온도구배, \bar{Z} 는 모재 영역의 입자에 의한 교란온도구배의 평균, Z^i 는 i 입자 내의 교란온도구배, Z^{i*} 는 Eshelby의 등가개재물법에 의해 발생하는 고유온도구배를 나타낸다. Z^o 는 q^o 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$q^o = -K_m Z^o \quad (6)$$

열유속의 교란치를 복합재 전 체적에 대해 적분하면 0이 되므로, 식(4)~(6)으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{Z} + f_1(Z^1 - Z^{*1}) + f_2(Z^2 - Z^{*2}) = 0 \quad (7)$$

여기서 f_1 과 f_2 는 복합재 속에 존재하는 입자 1과 2의 체적비를 나타낸다. Z^i , Z^{i*} 및 입자의 형상에 의해 결정되는 Eshelby 텐서 S^i 사이에는 다음 관계가 존재한다.

$$Z^i = S^i Z^{i*} \quad (8)$$

식(4) 및 (6)~(8)을 이용하면, 고유온도구배 Z^1 * 및 Z^2 *는 다음 식으로 요약된다.

$$A_{11}Z^1 + A_{12}Z^2 = D_1 q^o \quad (9a)$$

$$A_{21}Z^1 + A_{22}Z^2 = D_2 q^o \quad (9b)$$

여기서

$$A_{11} = \{ (K_f^1 - K_m) [(1-f_1)S^1 + f_1 I] + K_m \} \quad (10a)$$

$$A_{12} = f_2 (K_m - K_f^1) (S^2 - I) \quad (10b)$$

$$D_1 = (K_m - K_f^1) K_m^{-1} \quad (10c)$$

$$A_{21} = f_1 (K_m - K_f^2) (S^1 - I) \quad (10d)$$

$$A_{22} = \{ (K_f^2 - K_m) [(1-f_2)S^2 + f_2 I] + K_m \} \quad (10e)$$

$$D_2 = (K_m - K_f^2) K_m^{-1} \quad (10f)$$

이고, I 는 3×3 단위행렬이다. 고유온도구배는 식(9)로 계산되며 다음 식으로 표현된다.

$$Z^1 = (A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21})^{-1} (D_1 - A_{12}A_{22}^{-1}D_2) q^o = F_1 q^o \quad (11a)$$

$$Z^2 = (A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12})^{-1} (D_2 - A_{21}A_{11}^{-1}D_1) q^o = F_2 q^o \quad (11b)$$

모재와 입자영역의 총 온도 구배를 각각 Z_m 및 Z_f^i 라 하면 다음 식으로 정의된다.

$$Z_m = Z^o + \bar{Z} \quad (12a)$$

$$Z_f^i = Z^o + \bar{Z} + Z^i \quad (12b)$$

따라서 열유속 인가 시 복합재의 총 온도구배는 복합재의 체적 적분에 의해 다음 식으로 표시된다.

$$Z_c = (1-f)Z_m + f_1 Z_f^1 + f_2 Z_f^2 \quad (13)$$

그림1에 보인 복합재의 열유속, 온도구배 및 등가열전도계수 K_c 사이에는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$q_c = -K_c Z_c = q^o \quad (14)$$

따라서 식 (11)~(14)를 이용하여 복합재의 등가열전도계수는 다음 식으로 구해진다.

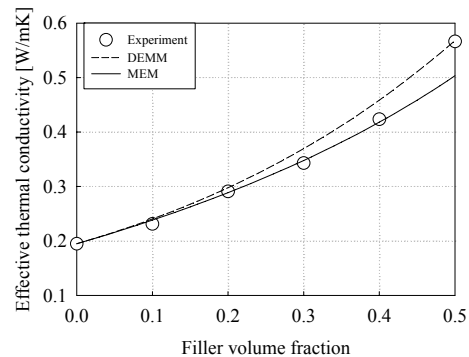
$$K_c = (K_m + f_1 F_1 + f_2 F_2)^{-1} \quad (15)$$

행렬 K_m , F_1 , F_2 는 모두 대각행렬이므로 복합재의 등가열전도계수는 다음과 같은 양함수 형태로 유도된다.

$$k_c/k_m = 1 + 3 \left[\frac{1}{1 - \frac{k_{f1} - k_m}{k_{f1} + 2k_m} f_1 - \frac{k_{f2} - k_m}{k_{f2} + 2k_m} f_2} - 1 \right] \quad (16)$$

3. 결과 및 검토

미소등가물모델 (Differential Effective Medium Model, DEMM)과 수정된 Eshelby 모델 (Modified Eshelby Model, MEM)에 의한 3상 복합재의 등가열전도계수의 예측 정도를 비교평가하기에 앞서 두 모델에 의해 예측되는 2상 복합재의 등가열전도계수를 실험결과와 비교한다. 이를 근거로 3상 복합재의 등가열전도계수 예측 정확도에 영향을 주는 체적비와 구성 요소의 열전도계수비의 효과를 검토한다. 특히 입자의 장단비는 복합재의 등가열전도계수에 큰 영향을 주는 인자이기 때문에 두 모델의 정확한 비교를 위해 완전 구형인 실리카로 강화된 폴리머 복합재의 등가열전도계수의 측정값을 문헌에서 인용한다[14]. 모재와 충전재의 열전도계수는 각각 0.195와 1.5W/mK로 충전재의 열전도계수는 모재의 약7.7배이다. 실험결과와 두 모델에 의해 예측된 결과를 그림2에 보인다.

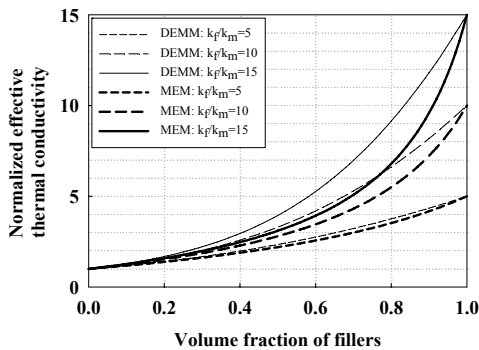


[그림 2] 완전 구형의 입자가 포함된 2상 복합재의 등가열전도계수 측정치[14]와 MEM과 DEMM으로 예측한 결과의 비교

[Fig. 2] Comparison of effective thermal conductivities of 2 phase composite with spherical inclusion predicted by MEM and DEMM and experimental results[14].

체적비 0.1까지는 DEMM과 MEM의 예측결과가 서로 일치하며 또한 실험결과와도 일치한다. 체적비가 증가할수록 두 모델의 예측치는 차이가 발생하며 그 차이는 점점 증가한다. 체적비 0.1~0.4의 범위에서 MEM의 예측결과가 실험결과와 잘 일치하나 체적비 0.5에서 DEMM의 예측결과가 실험결과와 잘 일치한다. 주어진 2상 복합재의 경우 체적비 0.4까지는 MEM 그리고 체적비 0.5에서는 DEMM의 예측결과가 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

다음은 2상 복합재를 구성하는 요소의 열전도계수비를 변화시켰을 때 두 모델 간의 차이를 그림3에 보인다. 모재 대비 충전재의 열전도계수비가 작을수록 두 모델에 의해 예측되는 복합재의 등가열전도계수는 체적비에 관계없이 서로 일치함을 알 수 있다. 반면 열전도계수비가 크고 체적비가 낮을 때는 두 모델에 의한 예측값은 큰 차이를 보이지 않지만 체적비가 증가함에 따라 그 차이는 증가하는 경향을 나타낸다.



[그림 3] 체적비와 열전도계수비에 따른 2상 복합재의 등가열전도계수를 MEM과 DEMM으로 예측한 결과의 비교

[Fig. 3] Comparison of effective thermal conductivities of 2 phase composite predicted by MEM and DEMM as functions of inclusion volume fraction and constituents' thermal conductivity ratio.

DEM M과 본 연구에서 제시된 MEM의 예측결과를 비교평가하기 위해 문헌에 있는 3상 복합재의 실험 결과를 이용하였다[6]. 복합재는 알루미늄 모재에 SiC와 다이아몬드의 구형 입자가 포함된 것이다. Molina 등이[6] 제작한 시편에서 입자의 총체적비는 0.58±0.01이고 표1에 모재와 입자의 물성치를 나타내었다. 모재의 열전도계수는 모재내의 Si 양에 따라 변하며 SiC의 체적비에 따른 Si 용해도 차이에 의해 모재의 열전도계수는 185~237의 범위를 갖는다. 즉 입자중 다이아몬드가 포함되지 않는 경

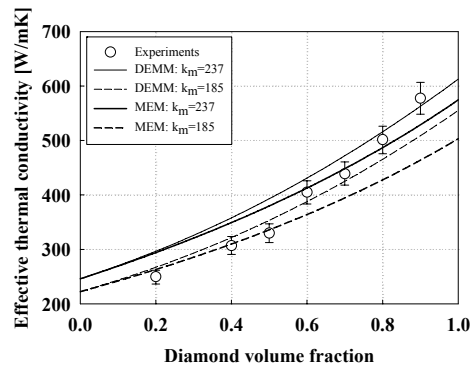
우 SiC의 체적비가 높아 모재의 열전도계수는 185이고 반대인 경우 237이다. 중간영역에서 모재의 열전도계수는 다이아몬드의 체적비에 비례하여 점진적으로 증가한다[3,6]. 따라서 SiC와 다이아몬드는 각각 모재대비 1.07~1.37배와 4.74~6.08배의 열전도계수비를 갖는다.

[표 1] 3상 복합재료의 요소별 물성치[6]

[Table 1] Material properties of 3 phase composite.

복합재	재료	열전도계수 [W/mK]	체적비
모재	알루미늄	185~237	-
입자	SiC	252.8	0.58±0.01
	다이아몬드	1124	

2상 복합재에 대해서는 모델 예측치와 실험결과치의 비교가 많이 진행되었으나 3상 복합재에 대해서는 이와 같은 연구가 진행되지 않았다. 표1에 보인 물성치를 이용하여 DEMM과 MEM으로 예측한 복합재의 열전도계수와 실험결과를 비교한 것을 그림4에 보인다. 여기서 모재의 열전도계수 상하한인 185와 237을 이용하여 복합재의 등가열전도계수를 예측하였다. 모재의 열전도계수가 다이아몬드의 체적비에 따라 점진적으로 증가되는 것을 고려하여 두 모델을 비교한다.



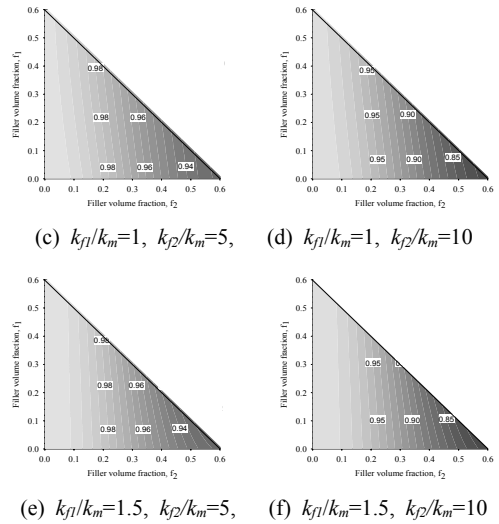
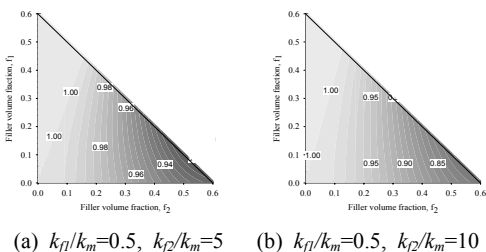
[그림 4] 다이아몬드 체적비에 따른 3상 복합재의 등가열전도계수에 대한 실험치[6]와 MEM과 DEMM으로 예측한 결과의 비교

[Fig. 4] Comparison of effective thermal conductivities of 3 phase composite predicted by MEM and DEMM and experimental results[6] as a function of diamond volume fraction.

다이아몬드의 체적비가 0.5보다 낮을 경우 DEMM보다 MEM이 실험결과를 잘 예측한다. 다이아몬드의 체적비 0.6~0.8사이에서 두 모델의 예측 정도는 비슷하며, 다

이아몬드의 체적비가 보다 증가할수록 DEMM이 MEM 보다 예측결과가 우수하다. 즉 열전도계수비가 큰 다이아몬드 입자의 체적비가 낮을 경우 MEM이 잘 예측하고 체적비가 증가할수록 DEMM이 잘 예측하는 3상 복합재에 대한 두 모델의 예측 결과는 2상 복합재에 대한 두 모델의 결과와 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다. Molina 등은[6] 50~60%의 다이아몬드와 40~50%의 SiC 입자로 구성되는 체적비 0.58인 3상 복합재로 원하는 수준의 열전도계수를 얻었으며, 이는 그림4에서 다이아몬드의 체적비가 50~60%를 의미하므로 이 범위의 체적비에서는 MEM과 DEMM의 예측결과는 유사함을 알 수 있다.

마지막으로 3상 복합재에 사용되는 요소의 열전도계수비와 체적비가 두 모델의 예측결과에 미치는 영향을 파악한다. 본 연구에서 인용된 알루미늄 3상 복합재의 물성치에 근거하여 열전도계수비 k_{f1}/k_m 와 k_{f2}/k_m 를 각각 0.5~1.5와 5~10로 선정하였다. 입자의 체적비는 모재에 불규칙적으로 포함될 수 있는 구형 입자의 최대 체적비인 0.6으로 제한하였다. 또 MEM 예측값을 DEMM 예측값으로 무차원화한 후 용이한 비교를 위해 등오차선을 그림5에 나타내었다. $k_{f2}/k_m=5$ 인 경우, $k_{f1}/k_m=0.5\sim1.5$ 의 범위에서 두 입자의 체적비에 상관없이 두 모델로 예측되는 값은 최대 6% 정도의 오차를 보인다. 특히 열전도계수비가 낮은 입자가 더 많은 경우 MEM과 DEMM으로 예측되는 값의 차이는 약2~3%로 제한된다. 입자의 최대 열전도계수비가 5인 경우 MEM과 DEMM으로 예측되는 결과는 거의 동등한 수준임을 알 수 있다. $k_{f2}/k_m=10$ 인 경우, $k_{f1}/k_m=0.5\sim1.5$ 의 범위에서 두 모델로 예측되는 값은 최대 18% 정도의 오차를 보인다. 이는 열전도계수비가 높은 입자가 입자의 전부를 차지하고 있는 경우에 발생한다. 또 조사된 열전도계수비 범위에서 등오차선은 열전도계수비가 낮은 입자의 체적비축과 평행함을 보이며, 이는 두 모델의 예측치의 오차는 바로 높은 열전도계수비를 갖는 입자의 체적비에 결정적으로 영향을 받는 것임을 나타낸다.



[그림 5] 두 입자의 체적비와 모재 대비 입자의 열전도계수비에 따른 MEM과 DEMM의 예측치 비교
 [Fig. 5] Comparison of effective thermal conductivities of composite predicted by MEM and DEMM as functions of volume fractions of two inclusions and inclusions' thermal conductivities normalized by the matrix.

4. 결론

2상 복합재에 적용되어오던 수정된 Eshelby 모델을 확장하여 두 종류의 구형 입자를 포함하는 3상 복합재의 등가열전도계수를 간단한 양함수 형태로 표시하였다. 3상 복합재에 대한 두 모델의 예측 결과는 2상 복합재에 대한 두 모델을 비교한 결과와 비슷하게 열전도계수비가 큰 입자의 체적비가 낮을 경우 MEM이 잘 예측하고 체적비가 증가할수록 DEMM이 잘 예측함을 보였다. 두 입자의 열전도계수비 0.5~1.5와 5~10의 범위에서 등오차선은 열전도계수비가 낮은 입자의 체적비축과 평행함을 보이며, 이는 두 모델의 예측치의 오차는 바로 높은 열전도계수비를 갖는 입자의 체적비에 결정적으로 영향을 받는 것임을 알 수 있었다. Molina 등이[6] 이용한 50~60%의 다이아몬드와 40~50%의 SiC 입자로 구성되는 총 체적비 0.58인 3상 복합재의 경우 MEM은 DEMM과 대등한 예측 결과를 보였다.

References

- [1] R. Tavangar, J.M. Molina, L. Weber, "Assessing predictive schemes for thermal conductivity against diamond-reinforced silver matrix composites at intermediate phase contrast," *Scripta Materialia*, Vol. 56, pp. 357-360, 2007.
- [2] D.P.H. Hasselman and L.F. Johnson, "Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance," *J. Comp. Mater.*, Vol. 21, pp. 508-515, 1987.
- [3] J.M. Molina, J. Narciso, L. Weber, A. Mortensen, E. Louis, "Thermal conductivity of Al-SiC composites with monomodal and bimodal particle size distribution," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 480, pp. 483-488, 2008.
- [4] K. Chu, C. Jia, W. Tian, X. Liang, H. Chen, H. Guo, "Thermal conductivity of spark plasma sintering consolidated SiCp/Al composites containing pores: Numerical study and experimental validation," *Composite: Part A*, Vol. 41, pp. 161-167, 2010.
- [5] J.M. Molina, R. Prieto, J. Narciso and E. Louis, "The effect of porosity on the thermal conductivity of Al-12 wt.% Si/SiC composites," *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp.582-585, 2009.
- [6] J.M. Molina, M. Rheme, J. Carron, and L. Weber, "Thermal conductivity of aluminum matrix composites reinforced with mixtures of diamond and SiC particles," *Scripta Materialia*, Vol. 58, pp. 393-396, 2008.
- [7] C. Zweben, "Advanced electronic packaging materials," *Adv. Mater. Process*, Vol. 163, pp. 33-37, 2005.
- [8] P.W. Ruch, O. Beffort, S. Kleiner, L. Weber, P.J. Uggowitzer, "Selective interfacial bonding in Al(Si)-diamond composites and its effect on thermal conductivity," *Comp. Sci. & Tech.*, Vol. 66, pp. 2677-2685, 2006.
- [9] A.N. Norris, A.J. Callegari and P. Sheng, "A generalized differential effective medium theory," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 33, pp. 525-543, 1985.
- [10] J.K. Lee, "Prediction of thermal conductivity of composites with spherical fillers by successive embedding," *Arch. Appl. Mech.*, Vol. 77, pp. 453-460, 2007.
- [11] H. Hatta and M. Taya, "Equivalent inclusion method for steady state heat conduction in composites", *Int. J. Engineering Science*, Vol. 24, No. 7, pp. 1159-1172, 1986.
- [12] J.D. Eshelby, "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, 1957.
- [13] T. Mori and K. Tanaka, "Average stress in the matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions", *Acta Metallurgica*, Vol. 21, pp. 571-574, 1973.
- [14] C.P. Wong and R.S. Bollampally, "Thermal conductivity, elastic modulus, and coefficient of thermal expansion of polymer composites filled with ceramic particles for electronic packaging", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 74, pp. 3396-3403, 1999.
- [15] J.K. Lee, "Prediction of thermal conductivity of aligned short fibre composites with different fibre aspect ratios," *Polymer & Polymer Composites*, Vol. 15, No. 4, pp. 273-280, 2007.
- [16] Y. Takao and M. Taya, "Thermal expansion coefficients and thermal stresses in an aligned short fiber composite with application to a short carbon fiber/aluminum", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, pp. 806-810, 1985.
- [17] J.S. Chang and C.H. Cheng, "Thermoelastic properties of short-coated fiber composites: Effects of length and orientation distribution", *Composites Science and Technology*, Vol. 55, pp. 329-341, 1995.

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

김 진 곤(Jin-Gon Kim)

[정회원]



- 1987년 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