

論文

전자패키징용 금속복합재료의 제조공정 해석 및 충격특성평가

정성욱*, 정창규*, 남현욱*, 한경섭**

Fabrication Process and Impact Characteristic Analysis of Metal Matrix Composite for Electronic Packaging Application

S.W. Jung*, C.K. Jung*, H.W. Nam* and K.S. Han**

ABSTRACT

This study developed fabrication process of SiC_p/Al metal matrix composites as electronic packaging materials by squeeze casting method. The SiC_p preform were fabricated in newly designed preform mold using about 0.8 % of inorganic binder(SiO₂) and 5 vol.% of Al₂O₃ fiber. To infiltrate the molten metal into the preform, fabrication condition such as the temperature and the pressure were selected. Applying the fabrication conditions, heat transfer analysis were preformed using finite element method and thus analyzed the temperature distribution and cooling characteristic during the squeeze casting. For the fabricated composites, impact toughness and thermal expansion coefficient were measured. The metal matrix composites developed in this study have 0.2~0.3 J impact toughness, 8~10 ppm/°C thermal expansion coefficient and 2.9~3.0g/cm³ density which is appropriate properties for electronic packaging application.

초 록

가압주조법을 이용하여 전자 패키징용 고부피분율 SiC_p/Al 금속복합재료를 제조하였다. SiC_p 예비성형체를 제조하기 위하여 예비성형체 금형을 고안하였으며, Al₂O₃ 섬유 보강재를 SiC_p 입자 보강재의 1/10비율로 첨가하고, 무기 성형제(SiO₂)를 0.8% 이하로 사용하여 49~70 vol.%의 예비성형체 제작에 성공하였다. 제조된 고부피분율 예비성형체를 금속 용탕을 원활히 침투시키기 위해 온도, 가압력 등의 제조조건을 정하였으며, 이러한 새로이 고안된 금형조건을 FEM 열전도 해석에 도입하여 금속복합재료 제조시 몰드 내부에서 발생하는 온도변화를 분석하였다. 제조된 금속복합재료에 대해서는 충격특성 및 열팽창계수 특성평가를 실시하였다. 본 연구를 통해 제조된 금속복합재료의 충격흡수 에너지는 0.2~0.3J, 열팽창계수는 8~10ppm/°C, 밀도는 2.9~3.0g/cm³로 나타나 패키징 재료로서 적합한 특징을 가진 복합재료가 성공적으로 개발되었음을 확인하였다.

1. 서 론

지난 수세기 동안 전자산업의 획기적인 발달로 반도체

소자는 직접도의 증가와 이에 따른 소형화 및 고성능화가 진행되어 왔다. 그러나 반도체 소자의 직접도의 증가로 인해 소재 주위에서 발생하는 열의 밀도가 급격히 높아지게

* 포항공과대학교 기계공학과 대학원

** 포항공과대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:kshan@postech.ac.kr)

되었으며, 이러한 열의 배출문제는 오늘날의 전자 부품산업의 주요 현안이 되고있다[1].

이에 따라, 칩에서 발생한 열을 배출시키는 패키징 소재에 대한 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 이러한 신소재 중 SiC/Al복합재료가 유력하게 대두되고 있다. 이 재료는 패키징 재료에서 요구되는 높은 열전도도, 접합부 소재와 유사한 열팽창계수, 낮은 밀도, 열피로에 대한 기계적, 화학적 안정성 등의 조건에 부합한다[2]. Table 1은 기존 패키징용 소재와 SiC/Al복합재료간의 특성을 비교하는 것으로 기존 재료에 비해, 밀도, 열팽창계수 및 열전도 특성이 우수함을 보여준다[3].

이러한 SiC/Al복합재료가 성공적으로 상용화되기 위해서는 저가의 안정적인 제조공정의 개발이 필수적이다. SiC_p소재는 현재 연마재로 산업적으로 널리 활용되고 있으므로 낮은 가격에 공급되고 있는 반면 패키징 재료에 적용되는 SiC/Al의 제조는 기존의 복합재료 제조공정을 적용할 경우 많은 어려움이 따른다.

널리 알려진 금속복합재료의 대표적인 제조방법에는 가압주조법(Squeeze casting)과 무가압침투법(pressure-less infiltration)이 있다. 무가압침투법의 경우 기지금속과 보강재의 젖음 반응을 이용한 것으로 기지금속의 종류에 제한이 따르며, 침투속도가 더디게 진행되는 단점이 있다. 한편, 가압주조법은 대량생산에 유리하여 널리 이용되고 있으나 용탕 침투시 침투압을 견딜 수 있는 예비성형체를 필요로 하며 보강재 부피분율이 높아질수록 침투에 어려움이 따른다. 이 방법은 보강재 부피분율이 20% 이하인 낮은 범위에서 섬유형태의 보강재를 사용하여 제조되는 경우가 많은데 패키징용 금속복합재료에서 요구되는 부피분율 50%이상의 입자형 보강재를 사용한 예비성형체 제조하기 위해서는 제조공정에 대한 연구가 필요하다.

본 연구는 가압주조법을 이용하여 SiC_p/Al 복합재료를 제조하였다. 고부피분율 예비성형체 제조를 위해 예비성형체 다이를 새로이 고안하였으며 이를 적용하여 금속복합재료를 제조하였다. 가압주조법의 제조조건을 정하였으며, FEM 해석을 통해 금속복합재료 제조시 몰드 내부에서 발생하는 열전도 특성을 분석하고 예비성형체 다이가 제조 공정에 미치는 영향을 해석하였다. 제조된 복합재료에 대해서는 기초적인 열팽창계수와 충격특성을 평가하였다.

2. 실험

2.1 예비성형체 제조

본 연구에서는 가압주조법을 사용하여 제조하였다. 이 방법을 적용할 경우 두 가지 문제를 직면하게 되는데 첫째로, 가압에 견디는 예비성형체의 제조여부와 둘째로, 예비성형체 내부에 기공발생을 최소화하면서 용탕이 성공적으로 침투가 되는가하는 점이다.

예비성형체에서 받게되는 압력은 보강재의 직경의 제곱에 비례하며 동시에 보강재의 부피분율에 비례하므로[4] 섬유보강재를 사용한 저부피분율의 예비성형체에 비해 고압의 압축하중을 받게 된다. 또한 예비성형체 내에서 보강재간의 결합이 성형제(binder)에 의해 이루어질 경우 섬유보강재에 비해 입자 보강재는 결합력이 현저해 저하되므로 다량의 성형체를 필요로 한다. 이러한 성형체의 함유량의 증가는 열팽창계수에는 큰 영향을 미치지 않으나[5,6] 금속복합재료와 보강재 기지면의 경계면 사이에 결합으로 작용하여 기계적 특성을 크게 떨어뜨리므로 최소의 성형체를 사용하는 것이 바람직하다[7].

Table 1 Al/SiC materials properties compared with common packaging materials

Material	Density (g/cm ³)	CTE ppm/(25-150℃)	Thermal Conductivity (W/mK)	Young's Modulus (GPa)
SiC/Al (60v% SiC)	3.0	6.5-9	170-200	290
Kovar (Ni-Fe)	8.1	5.2	11-17	131
CuW (10-20% Cu)	15.7-17.0	6.5-8.3	180-200	367
CuMo (15-20% Mo)	10	7-8	160-170	313
Cu	8.96	17.8	398	131
Al	2.7	23.6	238	68

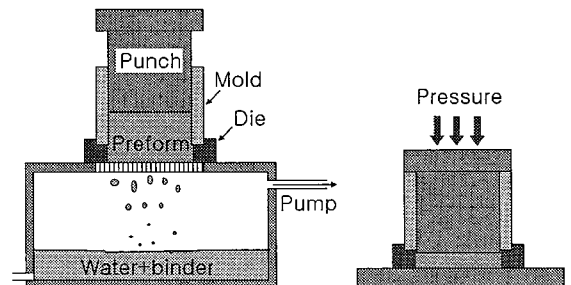


Fig. 1 Schematic diagram of preform fabrication in vacuum equipment.

같이 예비성형체와 다이가 부착된 상태에서 제조될 경우 다이가 MMCs침투공정에 끼치는 영향을 이론적으로 예측하였다.

FEM해석은 Fig. 4의 오른쪽 Mesh부분에 대해 2차원 축대칭 요소를 사용하여 모사하였으며, 사용된 요소수는 450개, 절점수는 510개이다. 해석은 Fig. 4에서 Die부분이 삽입된 경우와, Die부분이 예비성형체로 대체된 두 가지 경우에 대해서 수행하여 온도분포 특성을 상호 비교하였다.

FEM 해석 코드는 기존에 본 연구실에서 개발된 것으로 가압주조공정 중에 열분포 실험을 통해 신뢰성이 검증된 바 있다[8,9]. 열의 방출은 공기와 접하는 몰드, 펀치, 바닥 외부에서 Radiation과 Convection에 의해 일어나며, 용탕의 침투는 펀치의 하강에 의해 일정한 속도로 진행된다. 용탕은 열손실에 의해 응고되는데 이러한 상변화는 엔탈피법을 적용하여 모사하였다. FEM해석에서 도입하고 있는 주요 지배방정식은 용탕을 비압축성으로 가정한 수식 (1)의 연속방정식, (2)의 에너지 평형식 및 (3)의 엔탈피 방정식이다.

$$\nabla \nu = 0 \quad (1)$$

$$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_m c_m \nu \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_c \nabla T) \quad (2)$$

$$H(t) = \int_{ref} c(T) dT + L(1 - f_s) \quad (3)$$

여기서,

ν : velocity, ρ : density, c : specific heat
 T : temperature, t : time, H : enthalpy,
 k : thermal conductivity, L : latent heat
 f_s : reinforcement volume fraction

Table 3 Reference condition for simulation

Conditions		
Initial temperature	molten metal	800℃
	preform	500℃
	mold & punch	500℃
Reinforcement volume fraction		49%
Punch velocity		20mm/s
Maximum pressure of press		30MPa

기준이 되는 제조조건은 Table.3에 나타나있다. 해석에는 사용된 각종 물리상수 및 재료상수는 참고문헌[9]과 동일하다.

Fig. 5는 0.5초 후에 용탕 몰드 내부의 온도분포를 보여준다. 용탕이 15mm 예비성형체를 침투하는데는 0.17초의 시간이 소요된다. 따라서 0.5초 후에는 침투가 완료된 시점이다. 예비성형체 다이가 삽입된 Fig. 5(a)와 삽입되지 않은 Fig. 5(b)의 온도 분포는 극명한 대조를 이룬다. 중심으로부터 동심원으로 나타나는 온도분포곡선이 다이의 삽입으로 인해 Fig. 5(a)는 돌출된 형태로 나타나고 있으며 Fig.5 (b)는 타원 형태로 열전도가 일어나고 있다. 이와 같은 온도 분포의 차이는 용탕의 침투계수(permeability)에 영향을 미치게 된다.

온도 분포에서 침투공정에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 Fig. 5에서 용탕과 다이가 접촉하는 A1~A3으로 이어지는 경계선과 용탕이 침투되는 동안 용탕과 예비성형체가 접촉하는 부분이다. 이 부분에서의 온도분포는 용탕의 점성과 침투계수를 결정하므로 용탕 침투되는 동안 이 부분의 온도가 높을수록 침투에 유리하다.

Fig. 5에서의 경계면 각 지점의 시간별 온도 분포는 Fig.6에 나타내었다. Fig. 6은 용탕의 침투완료 시간인 0.17초를 기준으로 침투 시작부터 1초까지의 온도분포를 나타내었다. 0초에서 몰드는 초기 온도인 500℃이며 이후 용탕의 유입에 의해 온도가 상승하게 된다.

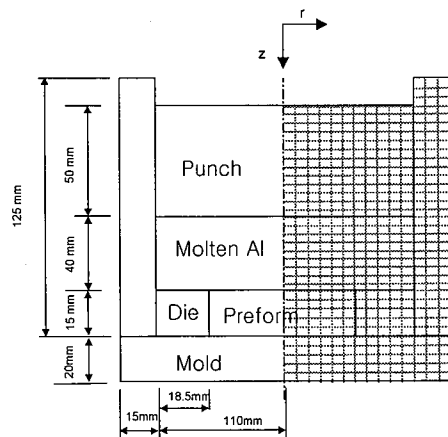


Fig. 4 Axis symmetric FEM model for squeeze casting.

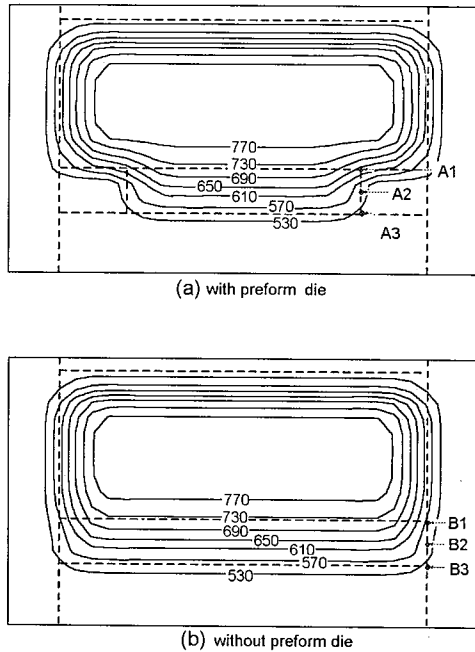


Fig. 5 Temperature distribution during infiltration after 0.5 sec.

Fig. 6의 그래프에서 Fig. 5(a)의 A1, A2, A3과 Fig. 5(b)의 B1, B2, B3지점을 서로 비교할 때, 침투시 온도의 상승은 A1~A3이 B1~B3보다 더 빠르게 나타난다. 이러한 결과는 예비성형체 다이의 삽입으로 인해 경계면이 용탕의 중심부와 가까워져서 용탕에서 경계면으로의 열전도가 예비성형체 다이가 없는 경우보다 더욱 빠르게 일어났기 때문이다.

각각의 위치별로 비교하면 A1과 B1지점의 온도차이가 A2, B2 또는 A3, B3보다 더 크게 나타나는데 이는 A1지점이 A2, A3에 비해 용탕의 중심부에 가장 가깝기 때문이다. A2와 B2는 용탕이 이 지점까지 침투되는 0.09초부터 온도가 급격히 증가하게 된다. A2와 B2 그래프는 0.3초 지점부터 그래프가 서로 차이를 보이는데 이는 0.3초 이전에는 이 두 부분의 열전도가 몰드의 반경방향으로 일어나는데 반해, 0.3초 이후에는 온도가 급격히 높아지는 인근 A1부분의 온도가 A2지점으로 축방향으로 전도되어오기 때문이다. A3과 B3지점은 용탕의 침투가 완료되는 위치이며 인근 A2, B2의 온도차이도 크지 않으므로 두 지점간의 온도 상승 그래프는 거의 일치한다. 이로부터 예비성형체 다이가 얇아질수록 즉 A3의 지점이 A1에 가까워질수록 다이에 의한 온도상승이 더욱 잘 일어남을 알 수 있다.

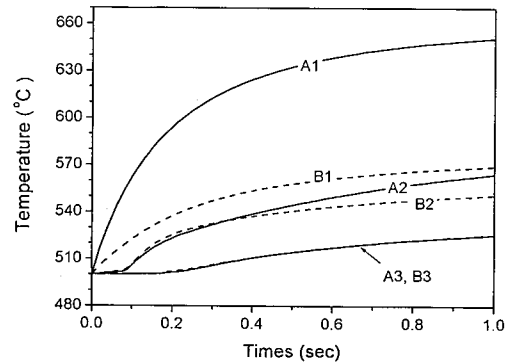


Fig. 6 Heat transfer during squeeze casting.

이상의 결과를 종합하면, 예비성형체 다이의 삽입은 용탕 침투에 유리하게 작용한다고 할 수 있으며 이러한 원인은 예비성형체 다이의 삽입은 예비성형체를 용탕의 중심부에 위치시켜 용탕 침투시 경계면의 온도를 높여주기 때문인 것으로 설명된다.

3.2 충격특성

Fig. 7는 충격속도를 2.33m/s로 일정하게 하고 충격실험을 수행할 때 충격 순간에 해머에서 측정되는 힘-변위를 재질별로 표시한 그래프이다. MMCs의 종류에 관계없이 충격 최대 하중은 1.0kN~1.2kN으로 대체로 비슷하나, 최대 하중 지점에서의 변위는 v49 (49vol.%) MMCs에서 최대 0.22mm에서 v70 MMCs의 최소 0.20mm로 보강재의 부피분율이 증가할수록 점차로 작아진다. 이와 같은 결과는 보강재의 부피분율이 증가할수록 재료가 취화되기 때문이다.

Fig. 8는 v49 MMCs에 대해 충격속도에 따른 충격시험 결과이다. 충격속도가 증가할수록 파단까지 시편의 변형량은 점차로 증가한다. 그래프 아랫부분의 면적은 충격에너지에 해당하며 재료의 종류에 따라 충격에너지 해석결과를 나타내면 Fig. 9와 같다. Fig. 9는 재료의 충격속도에 따른 충격에너지를 MMCs의 종류별로 나타내고 있다. 충격속도의 증가에 따라 충격에너지는 증가하고 있으며, 보강재의 부피분율의 증가에 따라 감소하고 있다. 이는 충격속도가 증가할수록 항복강도 향상과 더불어 변형 능력향상이 향상되기 때문이다. Cho등[10]은 높은 변형률 속도에서 금속복합재료의 항복강도가 증가하는 것을 보였으며, Nieh 등[11]은 Al/SiC 복합재료에 대한 초소성 시험결과에서 변형률

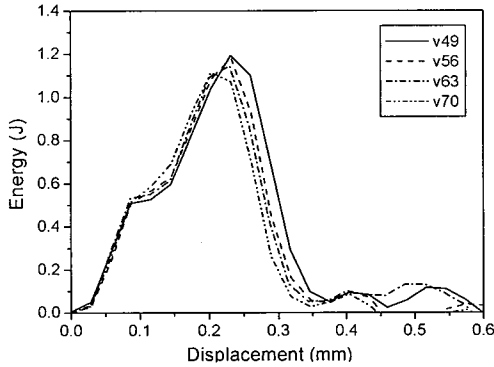


Fig. 7 Energy versus displacement curve during impact test (impact velocity 2.33m/s).

속도를 증가함에 따라 금속복합재료의 변형율이 증가하는 것을 보였다[10]. 이러한 연구들은 30 vol. % 이하의 저부피분율 복합재료에 대해서 나타나는 현상이나 본 연구결과와는 고부피분율 재료에 대해서도 같은 경향이 나타나고 있음을 보여주고 있다.

이와 같이 본 연구에서 제조된 금속복합재료의 충격시험시 최대하중, 충격에너지 등은 기존의 연구결과와 유사한 경향을 보인다. 이는 본 복합재료의 제조가 내부의 기공이나 Defect없이 성공적으로 제조가 되었음을 증명하는 것이다. 참고로 15% $Al_2O_3/AC8A$ 복합재료의 충격하중과 충격에너지는 약 3kN과 0.5J로 측정된다[12,13]. 본 연구에서 제조된 MMCs는 $Al_2O_3/AC8A$ 에 비해 40%정도에 해당하는 최대 충격 하중과 충격에너지를 가지는데 이러한 값은 본 재료의 취성을 고려할 때 타당한 값으로 보인다.

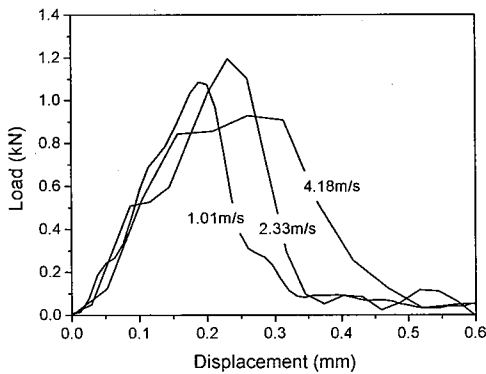


Fig. 8 Load versus displacement curve during impact test. (v49 MMCs).

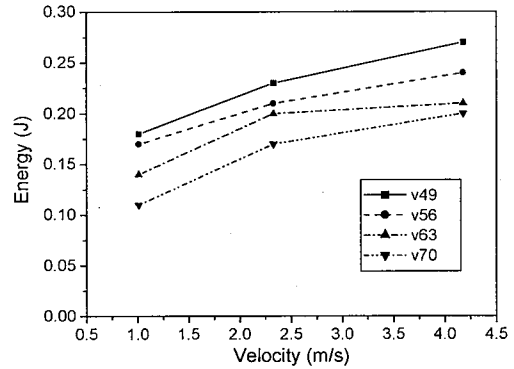


Fig. 9 Effect of impact velocity on energy absorbed.

3.3 열팽창계수

Fig.10는 순간 순간의 시험편의 열팽창계수를 나타낸다. 이 그래프는 열팽창 시험시 측정되는 시험편의 온도와 시험의 길이 관계로부터 계산된다. 열팽창계수는 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 즉 상온에서 70℃까지 급격히 증가하는 부분, 70℃~350℃열팽창계수가 완만히 증가하는 구간, 350℃이상에서 점차로 열팽창계수가 줄어드는 구간이 나타난다. 이와 같은 열팽창계수 세 구간은 기지재(matrix)로 사용된 알루미늄에서도 거의 유사하게 나타나므로 기지재에 의해 복합재료의 열팽창 특징이 결정되고 있음을 알 수 있다. 이러한 온도별 열팽창 특징은 기지재를 은(Ag)으로 사용한 복합재료(SiC/Ag)에서도 유사하게 나타나고 있다[14].

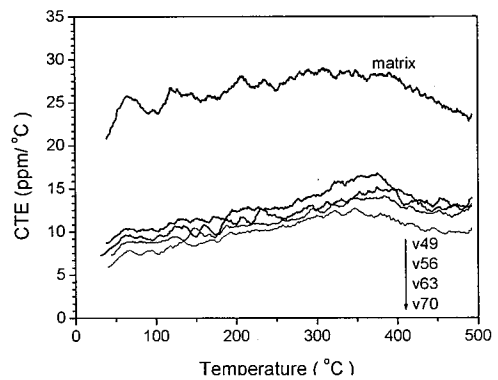


Fig. 10 CTEs of SiCp/Al composites from room temperature to 500℃.

이와 같은 온도별 열팽창계수는 패키징재료의 설계에 있어서 중요한 기초자료이다. 통상적으로 패키징 재료의 열팽창계수는 소자(component)보다 1-2 ppm/℃로 높게 설계를 함으로써, 부품의 납땜 또는 용접 접합후 접합부분에 미세한 압축하중을 받게 한다[3].

Table 4 Average CTE of the SiCp/Al MMCs at different temperature

Materials	Average CTE (ppm/℃)				
	25-150	100-200	100-300	100-400	100-500
matrix	23.45	23.48	24.74	26.51	26.45
v49	10.32	11.39	12.19	13.36	13.41
v56	9.21	10.16	11.18	12.06	12.34
v63	8.55	9.70	10.47	11.46	11.70
v70	7.49	8.70	9.61	10.41	10.44

Fig.10에서 MMCs의 종류에 따라 그래프의 개형은 유사하며 CTE값은 보강재 부피분율이 증가할수록 낮아진다. Table 4는 온 각 온도구간에서 평균적인 열팽창계수 값을 나타낸다.

열팽창계수는 혼합법칙, Kerner, Turner식[2]을 적용하여 예측하였으며 이를 실험과 비교하였다. 이러한 이론적 해석모델은 복합재료 내부에서 발생하는 보강재 주위의 불균일한 응력 분포를 단순화시켜 탄성 영역에서 유도된 것으로 각각의 특징은 다음과 같다.

혼합법칙(ROM)은 보강재와 기지재간의 응력전달(Load transfer)가 없다는 가정하에서 유도되며 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha_c = \alpha_m(1 - V_r) + \alpha_r V_r \quad (4)$$

식에서 아랫첨자 c는 복합재료, r은 보강재, m은 모재를 나타내며, V 는 부피분율, σ 는 강도를 나타낸다. 이 식은 복합재료 열팽창계수의 최대값(Upper boundary)을 예측한다.

Turner식은 온도 상승에 의해 보강재와 기지재가 동일한 변형률을 받는 것으로 가정하고 탄성학을 도입하여 유도되며 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha_c = \alpha_m(1 - V_r) + \alpha_r V_r - V_m V_r (\alpha_m - \alpha_r) \frac{K_r - K_m}{V_m K_m + V_r K_r} \quad (5)$$

여기서 K 는 bulk modulus, G 는 shear modulus를 나타낸다. 이 모델은 복합재료가 가질 수 있는 열팽창계수의 최소값(Lower boundary)을 나타낸다.

Kerner식은 Turner식의 발전된 형태로 Turner식에서 보강재와 기지재의 동일한 변형률 가정을 생략하고 보강재를 구형으로 가정한 후 탄성학을 도입하여 예측된 값값으로 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha_c = \alpha_m(1 - V_r) + \alpha_r V_r - V_m V_r (\alpha_m - \alpha_r) \times \frac{K_r - K_m}{V_m K_m + V_r K_r + (3K_r K_m / 4G_m)} \quad (6)$$

본 MMCs는 그러나 섬유와 입자의 두 종류의 보강재를 사용하게 되므로 (4)~(6)을 그대로 적용할 수 없다. 본 연구에서는 섬유와 입자 보강재를 혼합법칙을 적용하여 다음과 같이 유도한 후 적용하였다.

$$\begin{aligned} \alpha_c &= \alpha_m(1 - V_p - V_f) + \alpha_f V_f + \alpha_p V_p \\ &= \alpha_m(1 - V_f) + \alpha_f V_f + \frac{\alpha_m(1 - V_p) + \alpha_p V_p - \alpha_m}{V_p} V_p \\ &= \alpha_{cf} + \alpha_{cp} - \alpha_m \end{aligned} \quad (7)$$

수식 (7)에서 α_{cf} 와 α_{cp} 는 수식 (5), (6)으로부터 동일 분율의 섬유 또는 입자만 첨가되었을 경우 계산되는 값이다. 이러한 혼합법칙을 적용한 해석은 혼합금속복합재료의 탄성계수 해석과 유사하며[17] 이를 통해 열팽창 계수의 예측이 가능하다.

보강재의 부피분율에 따라 각각의 이론값과 실험결과를 비교해서 나타내면 Fig. 11과 같다. 이 때 열팽창계수는 모재 및 복합재료에 대해 Table 1과 같은 25-150℃범위에서 평균적인 열팽창계수로 표시하였으며 보강재의 열팽창계수는 Table 2로부터 예측하였다.

실험결과와 각각의 ROM과 Turner's model의 중간값을 취하며 Kerner's model보다 다소 낮게 나타난다. ROM과 Turner's 모델의 중간값을 취하는 것은 두 예측식이 탄성영역 내에서 이론적으로 가질 수 있는 열팽창계수의 최대값과 최소값을 예측하기 때문이다. 실험값이 Kerner's 모델보다 더 낮은 것은 Kerner's 모델에서 고려하지 못한 잔류응력과 소성변형등에 의한 보강재와 모재사이의 불균일한 분포에 의한 원인으로 해석된다[14-16]. 특히 잔류응력의 경우 열팽창계수에 큰 영향을 미치므로 열처리 조건을 달리 함으로써 복합재료의 열팽창계수를 조절하는 방법도 연구되고 있다[14,15]. 그러나 복합재료 내부에 분포하는 잔류

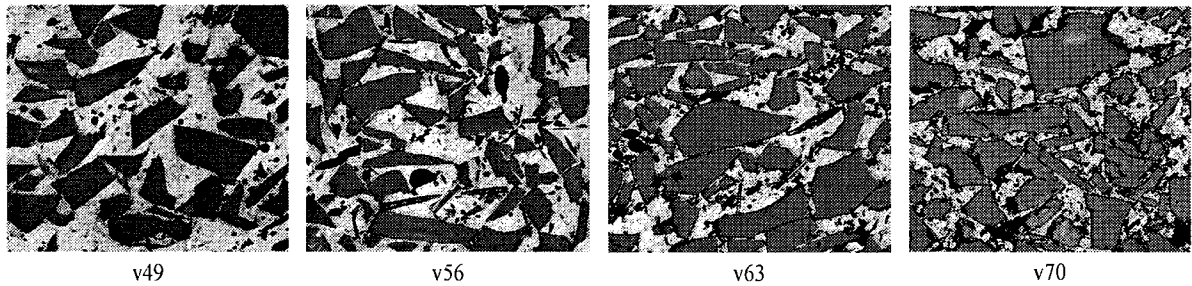


Fig. 12 Typical optical microphotography on polished composites sections.

Table 5 Typical properties of SiC_p/Al by squeeze casting, SiC_p:Al₂O₃=10:1

Materials	Reinforcement volume percent (%)	Density (g/cm ³)	Rockwell hardness (HRB)	Impact toughness (J)	CTE (ppm/°C)
v49	49	2.94	96.0	0.23	10.32
v56	56	2.97	98.1	0.21	9.21
v63	63	3.00	101.2	0.20	8.55
v70	70	2.99	101.5	0.17	7.49

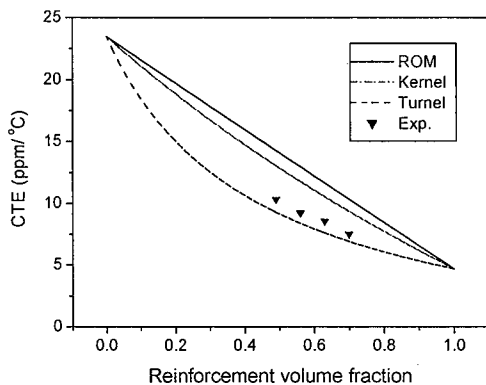


Fig. 11 Theoretical CTE value predicted by Eq.(4)~(6) and experimental data of SiC_p/Al MMCs.

응력은 측정이 쉽지 않으므로 열팽창계수의 정량적인 예측은 향후 수행되어야 할 과제가 되고 있다.

이러한 오차의 원인을 감안하고 Fig.10의 결과를 기준으로 결정하면, Turner's 예측이 대체로 가장 유사한 예측값을 보이고 있음을 알 수 있다.

Table 5는 본 연구의 결과로 제조된 금속복합재료의 각종 특성을 종합적으로 보여주고 있으며 Fig.12는 제조된 금

속복합 재료의 광학현미경 사진을 보여준다. 섬유가 첨가된 금속복합재료는 기포나 기공없이 양호하게 제조된데 비해 v70의 복합재료에서는 입자간의 파손이 관찰된다. v49, v56, v63에서 보이는 검은 점은 입자와 10:1의 비율 첨가된 섬유의 단면을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구는 패키징용 고부피분율 금속복합재료를 제조하였으며 이를 통해서 얻어지는 결론은 다음과 같다.

1. 예비성형체 다이가 부착된 형태의 예비성형체의 제조방법을 적용하면 무기성형체의 양을 최소화하고도 고압에서 건딜 수 있는 패키징용 복합재료 예비성형체 제작이 가능하다.
2. 보강재의 부피분율의 증가는 충격흡수에너지를 저하시키며 및 열팽창계수를 떨어뜨린다. 충격흡수에너지는 충격속도의 증가에 따라 증가한다.
3. 금속복합재료의 열팽창 계수는 Turner와 혼합법칙의 중간값을 취하며, Kerner의 예측값보다 낮은 값을 나타낸다. 이는 보강재와 기지재간의 불균일한 응력분포 및 잔류응력에 기인한다.

후 기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-041-E00055)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Deborah D.L. Chung, *Materials for Electronic Packaging*, Butterworth-Heinemann, Boston, 1995.
- 2) Clyne, T.W., *Comprehensive Composite Materials*, Vol. 3 Elsevier, 2000, pp. 703-714.

- 3) Occhionero, M., Adams, R., and Fennessy, K., "A new substrate for electronic packaging: aluminum- silicon carbide (AlSiC) composites," *Proceeding of the 4th Annual Portable by Design Conference*, pp. 398-403.
- 4) Berdichevsky, A.L., and Cai, Z., "Preform permeability prediction by self-consistent method and finite element simulation," *Polymer Composites*, Vol. 14, 1993, pp. 132-143.
- 5) 이효수, 홍순형, "가압침법에 의한 고열전도도-저열팽창계수 SiC_p/Al 금속복합재료의 제조공정 및 특성평가," 한국복합재료학회 추계학술대회 논문집, 1999, pp. 83-87.
- 6) Lee, H.S., and Jeon, K.Y., Kim, H.Y, and Hong, S.H, "Fabrication process and thermal properties of SiC_p/Al-Si metal matrix composites for electronic packaging applications," *Journal of Materials Science*, Vol. 35, 2000, pp. 6231-6236.
- 7) Song, J.I., and Han, K.S., "Squeeze Casting Conditions of Al/Al₂O₃ Metal Matrix Composites with Variations of Preform Drying Process," *Journal of Materials Science*, Vol. 31, 1996, pp. 2615-2621.
- 8) 정창규, 변현중, 정성욱, 남현욱, 한경섭, "용탕주조법을 이용한 금속복합재료 제조공정의 열전달 해석" *대한기계학회 춘계학술대회 논문집 D*, 2001, pp. 319-324.
- 9) 안인혁, "용탕주조를 이용한 금속복합재료의 침투와 열전달 해석," 2000, 포항공대 석사학위논문.
- 10) Cho, K. , Lee, S, Chang,Y.W and Duffy, J. "Dynamic Fracture behavior of SiC whisker reinforced aluminum alloys," *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 22A, 1991, pp. 367-375.
- 11) Nieh, T. and Wadsworth, J. "High-strain-rate superplasticity in aluminum matrix composite," *Material Science and Technology*, Vol. A147, 1991, pp. 129-142.
- 12) Nam, H.W., Aggag, G.A., Takahashi, K., Han, K.S. "The dynamic behavior of metal-matrix composites under low-velocity impact," *Composites Science and Technology*, Vol. 60, 2000, pp. 817-823.
- 13) 남현욱, Gammal A. Aggag, K. Takahashi, 한경섭, "저속충격하에서의 금속복합재료의 동적특성," *한국복합재료학회지*, 12권 1호 1999, pp. 68-75
- 14) Shou-Yi Chang, Su-Jien Lin, and Merton C. Flemings, "Thermal expansion behavior of silver matrix composite s," *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 31A, 2000, pp. 291-298.
- 15) Byung G. Kim, D.L. Dong, Su D. Park "Effects of thermal processing on thermal expansion coefficient of a 50 vol.% SiC_p /Al composite," *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 72, 2001, pp. 42-47.
- 16) Y.L. Shen, "Thermal expansion of metal-ceramic composites: a three-diemnsional analysis," *Materials Science and Engineering*, Vol. A252, 1998, pp. 269-275.
- 17) 정성욱, 남현욱, 정창규, 한경섭, "섬유/입자 혼합 금속복합재료의 제조 및 특성평가," *한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집*, 2001, pp. 34-37.