

論文

전자패키지용 경사조성 Al-SiC_p 복합재료의 열·기계적 변형특성 해석

송대현* · 최낙봉* · 김애정* · 조경목** · 박익민*

Thermomechanical Analysis of Functionally Gradient Al-SiC_p Composite for Electronic Packaging

D. H. Song*, N. B. Choi*, A. J. Kim*, K. Cho** and I. M. Park*

Keywords : Al/SiC_p, FGM, Thermomechanical deformation, Curvature, Internal stress, Electronic packaging material, Multilayered structure design

ABSTRACT

The internal residual stresses within the multilayered structure with sharp interface induced by the difference in thermal expansion coefficient between the materials of adjacent layers often provide the source of failure such as delamination of interfaces etc. Recent development of the multilayered structure with functionally graded interface would be the solution to prevent this kind of failure. However a systematic thermo-mechanical analysis is needed for the customized structural design of multilayered structure. In this study, theoretical model for the thermo-mechanical analysis is developed for multilayered structures of the Al-SiC_p functionally graded composite for electronic packaging. The evolution of curvature and internal stresses in response to temperature variations is presented for the different combinations of geometry. The resultant analytical solutions are used for the optimal design of the multilayered structures with functionally graded interface as well as with sharp interface.

초 록

층상구조재료가 갖는 약점으로는 구성재료층 간의 열·기계적 특성 차이로 인하여 내부응력이 발생되고 비틀림 변형이 유발되어 형상 제어가 매우 어려울 뿐만 아니라, 반복적인 열 하중으로 인해 열이력을 받을 경우 접합부에서의 파손이 생길 수 있다는 것이다. 최근 층상구조에서 조직 혹은 조성이 점차적으로 변하는 계면을 삽입한 경사 조성재료는 열·기계적 변형특성 차이에 의한 재료의 손상을 최소화시킬 수 있으나, 용도에 적합한 구조설계를 위해서 열·기계적 해석이 필요하다. 본 연구에서는 전자패키징용 Al-SiC_p 경사조성 복합재료의 기하학적 구조와 온도변화에 따른 곡면화 변형 및 내부응력분포를 해석하고자 하였다. 한편 층상구조 Al-SiC_p 경사조성 복합재료의 열변형량을 측정하고 내부응력분포를 실험적으로 구하여, 이론적으로 계산한 결과와 비교하였다. 본 연구의 해석결과는 경사조성 층상구조재료의 최적구조 설계에 유용하게 적용할 수 있다.

* 부산대학교 공과대학 금속공학과

** 항공재료연구소 (CAAM)

1. 서 론

경사기능재료 (Functionally Gradient Materials : FGM)는 물성이 상이한 두 종류의 층상 접합재료 계면에서 조성 혹은 미세조직을 점진적으로 변화시켜 경사화하여 계면에서의 급격한 열·기계적 물성 변화를 완화하고자 개발이 진행되고 있는 신소재이다. 경사기능재료는 기존에 사용되고 있던 금속/금속, 금속/세라믹 등의 층상 접합재료 계면 취약성을 보완하여 비틀림 변형이나 파손 등을 방지하고 물성을 향상시키려는 목적에서 1980년대 고안되었다.(4) 이러한 개념으로 개발되고 있는 경사기능재료는 지난 십 여 년 동안 구조설계, 제조 및 특성평가 방법 등에 관련된 연구가 지속적으로 진행되어 왔다.(1~9)

경사기능재료는 물성이 상이한 두 종류 이상의 재료로 구성되었다는 점에서 일종의 복합재료라고 할 수 있다. 한편 복합재료 중에서 가장 널리 연구되고 있는 경량금속기지 복합재료인 Al-SiC_p는 전자패키지용 재료로 활용성이 검토되고 있다.(10~11) 전자부품 소재로 사용되는 반도체 및 세라믹 재료와의 열팽창계수 차이를 최소화하면 Al-SiC_p 복합재료는 충분한 강도와 인성이 확보되고 열방출도 효과적이라서 전자패키지용 재료로서 활용이 기대된다.

Al과 SiC의 조성을 경사화한 Al-SiC_p 복합재료를 개발하면 Al-SiC_p 복합재료가 전자패키지용 재료로서 더욱 효율적으로 활용될 수 있다. 경사조성 Al-SiC_p 복합재료에서 반도체 및 세라믹과의 접촉부는 SiC의 부피분율을 높이고 열방출이 Al의 부피분율이 높은 쪽으로 용이하게 일어나도록 하는 개념이다. 본 연구에서는 경사조성 Al-SiC_p 복합재료의 개발에 앞서 경사화한 Al-SiC_p 복합재료가 열이력에 노출되었을 경우 구성재료 간의 탄성계수 및 열팽창계수 차이에 의한 열·기계적 변형거동을 해석할 수 있는 이론 모델을 정립하고, 이를 통해 구조설계를 최적화하여 제조 및 사용시 변형 및 파손을 방지하는 방안을 검토하였다.

2. 이론적 모델

그림 1과 같은 xy평면에 놓인 판상의 경사조성구조 재료에 대하여 열·기계적 변형특성을 이론적으로 해석하였다. 경사조성재료는 각각 1, 2, GL로 표시되는 A재료층, B재료층, 경사계면층(GL)으로 이루어진 비

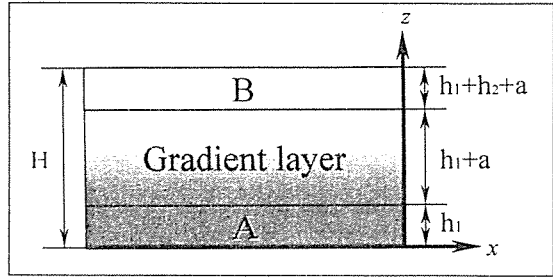


Fig. 1 A geometry of FGM structure with constituents of A and B.

대칭 3층구조로 고려하였다. 또한 경사조성재료의 폭이 두께에 비하여 충분히 크다고 가정하여 가장자리 변형 효과는 고려하지 않았다.

비대칭 3층구조에서 xy평면상의 축방향 등방변형률 $\epsilon(=\epsilon_{xx}=\epsilon_{yy})$ 은 다음과 같이 주어진다.(12)

$$\epsilon(z)=\epsilon_0 + \kappa z \tag{1}$$

여기서 ϵ_0 는 $z=0$ 에서의 변형률, κ 는 판상시편의 곡률반경이다. 이에 상응하는 등방응력분포 $\sigma(z) (= \sigma_{xx}(z)=\sigma_{yy}(z))$ 는 다음과 같다.

$$\sigma(z)=E'(z)[\epsilon_0 + \kappa z - \alpha(z)\Delta T] \tag{2}$$

평면응력 상태에서 탄성계수는 $E'=E/(1-\nu)$ 이며, α 는 열팽창계수, $\Delta T=(T_f-T_s)$ 는 온도변화, 그리고 ν 는 Poisson비이다. 한편 그림 1의 다층구조에서 힘과 모멘트 균형 조건이 만족되어야 한다. 즉,

$$\int_z \sigma(z) dz = 0$$

$$\int_z z \sigma(z) dz = 0 \tag{3}$$

식 (2), (3)으로부터 ϵ_0 와 κ 를 계산하는 식을 구할 수 있다.

$$\epsilon_0 = \frac{I_2 J_0 - I_1 J_1}{I_1^2 - I_0 I_2} \tag{4}$$

$$\kappa = \frac{I_1 J_0 - I_0 J_1}{I_1^2 - I_0 I_2} \tag{5}$$

I_i와 J_i는 다음과 같다.

$$I_i = \int_{z_i}^i E'(z) dz \quad (i=0,1,2) \quad (6)$$

$$J_i = \int_{z_i}^i E'(z) \alpha(z) \Delta T dz \quad (i=0,1) \quad (7)$$

식 (1)~(5)을 이용하여 변형률 (ϵ_0), 곡률반경(κ), 그리고 내부응력분포 (σ)를 계산하기 위해서는 각 구성층의 탄성계수 (E)와 열팽창 계수 (α)를 결정해야 한다. 그림 1의 층상구조에서 두께방향으로 탄성계수와 열팽창계수는 다음과 같이 변화한다고 하였다.

$$\begin{aligned} & (h_1 + a \leq z \leq h_1 + h_2 + a) \\ & E'(z) = E_2', \alpha(z) = \alpha_2 \\ & (h_1 \leq z \leq h_1 + a) \\ & E'(z) = E_i' + (E_2' - E_i') \left(\frac{z - h_1}{a} \right) \\ & \alpha(z) = \alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{z - h_1}{a} \right) \\ & (0 \leq z \leq h_1) \\ & E'(z) = E_i', \alpha(z) = \alpha_1 \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 식 (4)~(8)로부터 변형률(ϵ_0), 곡률반경(κ) 및 응력분포를 구할 수 있는 다음의 식들이 유도된다.

$$\epsilon_0 = [\alpha_1 + \Delta\alpha f(\rho)] \Delta T \quad (9)$$

$$\kappa = \Delta\alpha \Delta T g(\rho) \quad (10)$$

$$\sigma(z) = E'(z) \Delta\alpha \Delta T G \quad (11)$$

식 (9)~(11)에 나타난 함수들은 다음과 같은 물리적 의미를 갖는다. 변형률 (ϵ_0)과 곡률반경(κ)은 온도에 비례한다. 그리고 응력분포($\sigma(z)$)는 금속과 세라믹 층에서는 선형적이며, 경사조성층에서는 포물선적이다. 또한 그림 1의 층상구조에서 구성층간의 두께비 및 탄성계수와 관련된 함수로서 다음과 같다.

$$f(\rho) = \frac{\rho_E^2 f_1 + \rho_E f_2 + f_3}{\rho_E^2 m_1 + \rho_E m_2 + m_3} \quad (12)$$

$$g(\rho) = \frac{\rho_E^2 g_1 + \rho_E g_2 + g_3}{\rho_E^2 m_1 + \rho_E m_2 + m_3} \cdot \frac{1}{H} \quad (13)$$

여기서

$$H = h_1 + h_2 + a \quad (14)$$

$$\rho_1 = \frac{h_1}{H}, \rho_2 = \frac{h_2}{H}, \rho_a = \frac{a}{H} \quad (15)$$

$$\rho_E = \frac{E_i'}{E_2'} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= 2\rho_1^3 \rho_a + 3\rho_1^2 \rho_a^2 + \rho_1 \rho_a^3 \\ f_2 &= 36\rho_1^2 \rho_2 \rho_a + 12\rho_1 \rho_2^2 \rho_a + 18\rho_1 \rho_2 \rho_a^2 \\ &+ 12\rho_1^3 \rho_2 + 18\rho_1^2 \rho_2^2 + 4\rho_1^3 \rho_a + 9\rho_1^2 \rho_a^2 \\ &+ 4\rho_1 \rho_a^3 - 4\rho_2^3 \rho_a - 3\rho_2^2 \rho_a^2 \\ f_3 &= 6\rho_1 \rho_2^2 \rho_a + 6\rho_1 \rho_2 \rho_a^2 + \rho_1 \rho_a^3 - 3\rho_2^2 \rho_a^2 \\ &- 8\rho_2^3 \rho_a - 6\rho_2^4 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} g_1 &= 6\rho_1^2 \rho_a + 6\rho_1 \rho_a^2 + \rho_a^3 \\ g_2 &= 72\rho_1 \rho_2 \rho_a + 36\rho_1^2 \rho_2 + 36\rho_1 \rho_2^2 + 12\rho_1^2 \rho_a \\ &+ 18\rho_1 \rho_a^2 + 12\rho_2^2 \rho_a + 18\rho_2 \rho_a^2 + 4\rho_a^3 \\ g_3 &= 6\rho_2^2 \rho_a + 6\rho_2 \rho_a^2 + \rho_a^3 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} m_1 &= 6\rho_1^4 + 12\rho_1^3 \rho_a + 12\rho_1^2 \rho_a^2 + 6\rho_1 \rho_a^3 + \rho_a^4 \\ m_2 &= 72\rho_1^2 \rho_2 \rho_a + 72\rho_1 \rho_2^2 \rho_a + 72\rho_1 \rho_2 \rho_a^2 \\ &+ 24\rho_1^3 \rho_2 + 36\rho_1^2 \rho_2^2 + 24\rho_1 \rho_2^3 + 12\rho_1^3 \rho_a \\ &+ 24\rho_1^2 \rho_a^2 + 18\rho_1 \rho_a^3 + 12\rho_2^3 \rho_a + 24\rho_2^2 \rho_a^2 \\ &+ 18\rho_2 \rho_a^3 + 4\rho_a^4 \\ m_3 &= 6\rho_2^4 + 12\rho_2^3 \rho_a + 12\rho_2^2 \rho_a^2 + 6\rho_2 \rho_a^3 \\ &+ \rho_a^4 \end{aligned} \quad (19)$$

또한 층상구조의 각 구성층에 해당하는 기하학적 함수, G는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & (h_1 + a \leq z \leq h_1 + h_2 + a) \\ & G = f(\rho) + g(\rho)z - 1 \\ & (h_1 \leq z \leq h_1 + a) \\ & G = f(\rho) + g(\rho)z - \left(\frac{z - h_1}{a} \right) \\ & (0 \leq z \leq h_1) \\ & G = f(\rho) + g(\rho)z \end{aligned} \quad (20)$$

3. 경사조성 Al-SiC_p 복합재료의 열·기계적 변형특성 분석 결과

그림 1로부터 정립한 Al-SiC_p 경사조성 층상구조

Table 1. Properties of Al and SiC.

	Aluminium	SiC
Elastic Modulus	62GPa	319GPa
Poisson's ratio	0.23	0.34
CTE	$23.0 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$4.7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Density	2.70Mg/ m ³	2.55Mg/ m ³
Melting Points	660℃	2410℃
Hardness	40Hv	1920Hv

복합재료의 열·기계적특성 분석 이론 모델을 이용하여 경사조성 Al-SiC_p 복합재료가 열이력에 노출되었을 때 곡률반경(식 (10)) 및 내부응력분포(식 (11))의 분석을 행하였다. 경사조성 Al-SiC_p 복합재료의 열·기계적

변형특성은 탄성거동을 보이고 소성변형은 일어나지 않는다고 가정하였다. 분석에는 표 1의 Al과 SiC의 물성을 사용하였다. 경사조성 Al-SiC_p 층상구조는 상온(25℃)에서 내부응력이 존재하지 않는다는 가정 하에, 승온시 온도변화에 따른 열·기계적 변형특성을 분석하였다.

3.1 곡률반경 분석

곡률반경은 경사조성 Al-SiC_p 층상구조 복합재료에서 두께분율을 변화시킨 Al과 SiC 층 사이의 경사층 두께분율이 0, 0.5, 0.7인 경우에 대하여 분석을 행하였다(그림 1 참조). 상온에서부터 온도상승에 따른 Al-SiC_p 층상구조재료의 곡률반경($\kappa \times H$, normalized curvature)을 계산하였다. 곡률반경은 상부의 Al층 표면이 오목한 형상에 대하여 양(positive)으로 정의하였으며, Al, SiC 및 경사층의 두께분율을 $\rho_1, \rho_2, \rho_{GL}$ 로 각각 표시하였다. 그림 2는 Al과 SiC층의 두께분율이 변화할 경우에 온도상승에 따른 곡률반경을 식 (10)을 이용하여 계산할 결과이다. 온도가 상승함에 따라 곡률반경은 전반적으로 증가하지만 경사층의 두께분율이 커질수록 곡률반경은 작아진다. 경사층이 없이 Al과 SiC가 직접 접합된 층상재료에서는 구성층의 두께변화에 따른 곡률반경의 변화가 매우 크게 나타났고, (그림 2(a)) 경사층의 두께분율이 증가할수록 Al과 SiC 층의 두께변화에 따른 곡률반경의 차이가 감소하였다. 그리고 Al층 혹은 SiC층의 두께분율이 작을수록 곡률반경은 작아지고, 경사층의 두께분율에 관계없이 곡률반경의 최대값은 SiC층이 Al층에 비해 상대적으로 얇은 구조 (Al과 SiC 두께비가 약 70 : 30)에서 나타났다. 이는 열팽창계수가 Al이 SiC에 비해 크고, 탄성계수는 Al에 비해 SiC가 크기 때문이다. 만약 열팽창계수와 탄성계수가 동일한 경우에는 두께비가 50 : 50에서 곡률반경의 최대값이 나타날 것이다. 곡률반경의 분석은 곡면화 변형을 예측할 수 있어 층상구조의 경사조성 Al-SiC_p 복합재료에서 변형과 관련된 구조설계에 이용할 수 있다. 경사조성재료의 곡면화 열변형은 열이

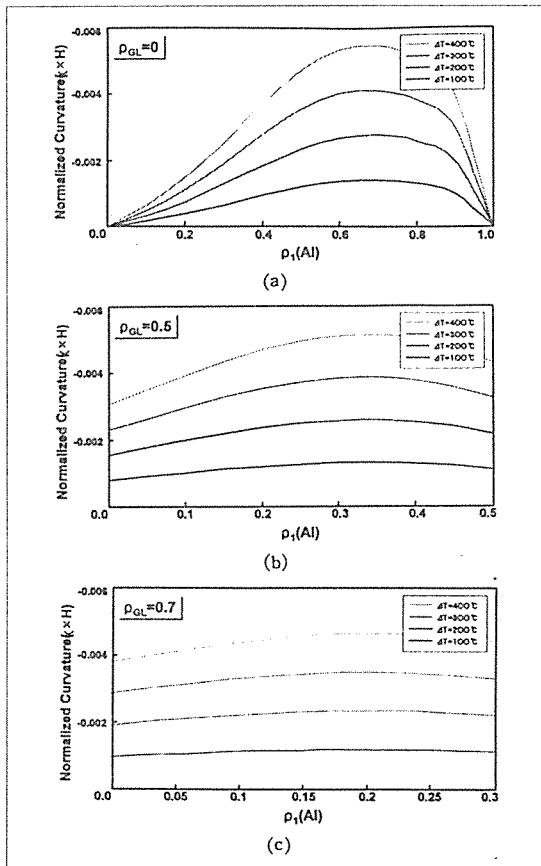


Fig. 2 Curvature variation of Al-SiC_p multilayer plates as a function of temperature change (a) sharp interface, (b) $\rho_{GL}=0.5$ (c) $\rho_{GL}=0.7$. ρ_{GL} is thickness ratio of compositionally graded layer(FGM in Fig. 1)

Table 2. Curvature of Al-SiC_p FGM plates.

Thickness(mm)	Measured Curvature(m ⁻¹)	Calculated Curvature(m ⁻¹)
7.0	181.06	188.24
5.0	193.46	201.57
3.0	231.23	244.33

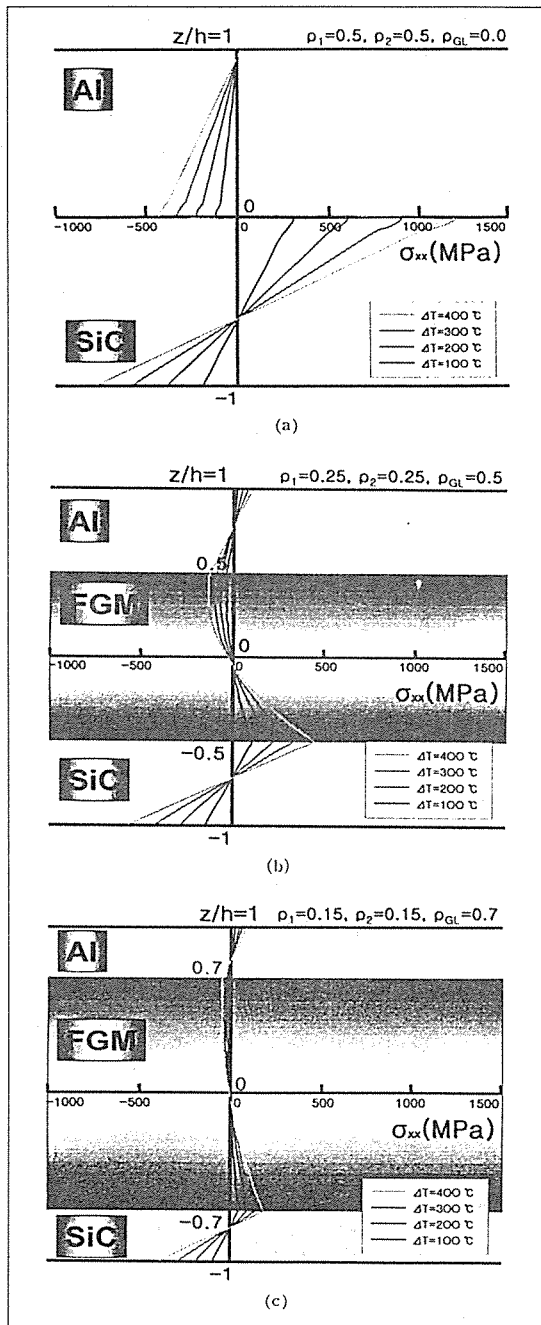


Fig. 3 Internal stress distribution of Al-SiC_p multilayer plates as a function of temperature change (a) $\rho_1=0.5, \rho_2=0.5, \rho_{GL}=0$, (b) $\rho_1=0.5, \rho_2=0.25, \rho_{GL}=0.25$, (c) $\rho_1=0.15, \rho_2=0.15, \rho_{GL}=0.7$.

ρ_1, ρ_2 and ρ_{GL} are thickness ratios of Al, SiC and FGM respectively (Fig. 1).

력에 노출된 경사조성재료의 내부응력 분포와 밀접한 관계가 있다. 경사조성재료의 내부응력 상태는 재료의 변형 및 파손을 일으키는 원인이 되고, 이는 내부응력 분석에서 다루게 된다. 표 2는 실제로 제조한 경사조성 Al-SiC_p 층상구조 복합재료의 곡률반경의 측정치와 계산치를 비교한 경우로서 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 곡률반경은 3-D 레이저 디지털라이저(Laser Design Inc., U.S.A)를 사용하여 실험적으로 측정하였다.

3.2 내부응력 분석

경사조성 Al-SiC_p 층상구조 복합재료의 내부응력은 곡률반경 분석에서와 마찬가지로 두께분율을 변화시킨 Al과 SiC 층 사이의 경사층 두께분율이 0, 0.5, 0.7인 경우에 대하여 분석을 행하였다. 경사조성 Al-SiC 복합재료는 상온(25°C)에서 내부응력이 없다는 가정하에 온도 상승에 따른 내부응력 분포의 변화를 분석하였다. 그림 3과 4는 판상의 경사조성 Al-SiC_p 층상구조 복합재료의 두께 방향으로 온도상승에 따른 내부응력 분포를 식 (11)을 이용하여 계산한 결과이다. 전반적인 경향은 온가 증가할수록 두 재료의 열팽창계수 차이로 인하여 내부응력이 높아진다.

그림 3은 Al층과 SiC층의 두께가 동일할 경우이다. 경사조성층이 없는 Al과 SiC가 직접 접합된 층상구조의 계면에서는 Al측의 압축응력에서 SiC측의 인장응력으로 급격한 내부응력의 변화가 생긴다. 따라서 계면 분리 등의 파손이 생길 수 있다. 그러나 경사층이 삽입된 경우에는 인장과 압축의 내부응력 분포는 완화되고 두께 방향 전체에서 완만하게 변화한다. 또한 경사층이 두꺼울수록 내부응력은 낮아진다. 따라서 Al과 SiC층 사이에 경사조성층을 삽입함으로써 계면분리 등의 파손을 효과적으로 방지할 수 있다.

그림 4는 SiC층이 Al층보다 얇은 경우의 내부응력 분포를 나타낸다. Al과 SiC가 직접 접합된 층상구조에서는 열팽창계수가 높은 Al층이 두꺼워서 내부 응력이 전반적으로 높아지고 여전히 계면에서의 급격한 응력 변화가 있다. 마찬가지로 경사층이 삽입된 경우에는 전반적으로 내부응력이 상당히 완화된 것을 알 수 있다.

Al과 SiC층 사이에 경사층이 삽입됨으로서 내부응력은 완화되지만 반대 급부로서 곡률반경은 증가하게 된다(그림 2 참조). 따라서 곡면화 변형과 내부응력의 적정 조합을 고려하여 경사조성 Al-SiC_p 층상구조 복합재료의 구조설계가 이루어져야 한다.

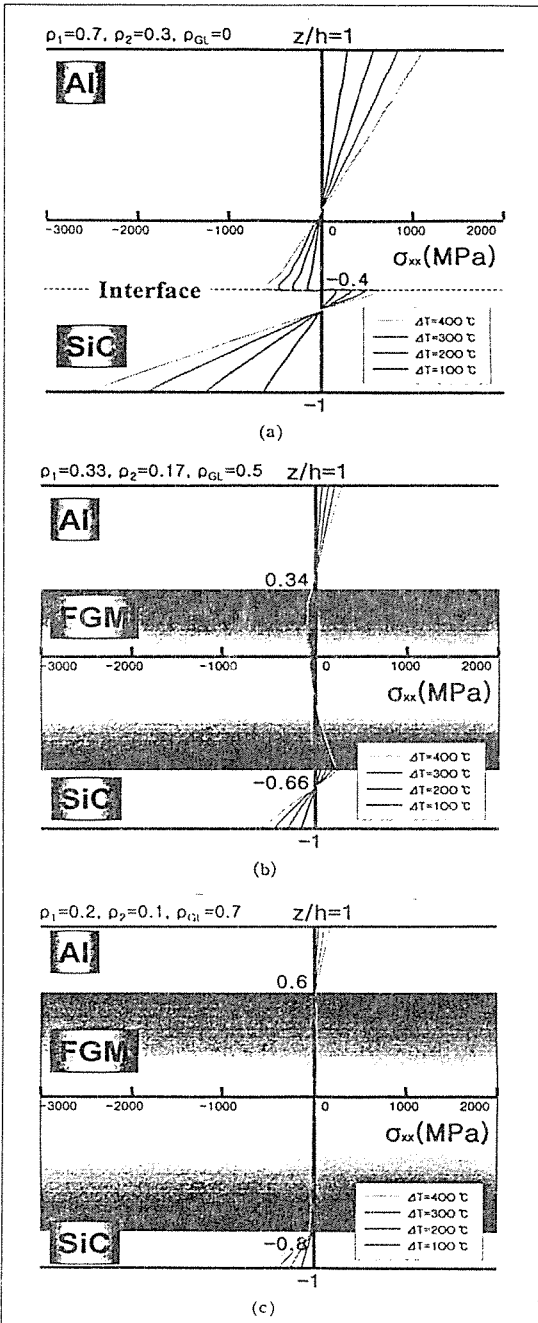


Fig. 4 Internal stress distribution of Al-SiC_p multilayer plates as a function of temperature change (a) $\rho_1=0.7, \rho_2=0.3, \rho_{GL}=0$, (b) $\rho_1=0.33, \rho_2=0.17, \rho_{GL}=0.5$, (c) $\rho_1=0.2, \rho_2=0.1, \rho_{GL}=0.7$.

Table 3. Internal stresses in Al-SiC_p FGM plate of 5mm-thickness. Positions are indicated in Fig. 5.

Position	Calculated stresses from calculated curvature(MPa)	Observed stresses from measured curvature(MPa)
1 (5.00mm)	-45.29	-54.17
2 (3.75mm)	-44.08	-50.36
3 (2.50mm)	-6.17	-4.18
4 (1.25mm)	68.44	80.34
5 (0.00mm)	179.75	172.02

상기에서 확립한 이론적 모델을 검증하기 위하여 실제로 제조한 두께 5mm의 판상 경사조성 층상구조 Al-SiC_p 복합재료에 대하여 실험적으로 측정된 곡률반경(표 2)으로부터 내부응력분포를 구하여 표 3에 나타내었다. 그림 5에서는 (a)연속적으로 조성이 변하는 경사조성 Al-SiC_p 복합재료의 내부응력분포를 계산한 결과이고, (b)10개 층으로 이루어진 경사조성 Al-SiC_p 복합재료의 내부응력분포를 실험적으로 구한 결과이다. 두

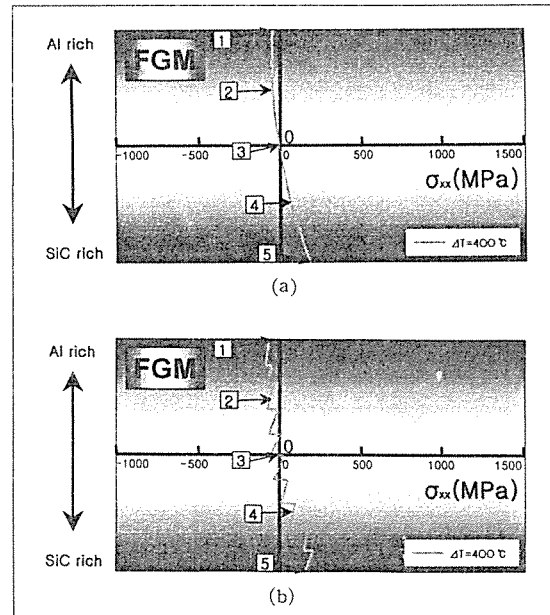


Fig. 5 Internal stress distribution of Al-SiC_p FGM : (a) theoretically calculated, linear variation of composition, (b) Experimentally observed, stepwise variation of composition. Temperature rise is 400°C and the total thickness of the plate is 5mm.

종류의 구조를 비교하면 계산값과 실험값이 비교적 일치되는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

경사조성의 층상구조 복합재료는 구성재료 간의 상이한 열·기계적 특성차이(탄성계수, 열팽창계수)로 인해, 열적 및 기계적 부하 환경에서는 곡면화 변형이 생길 뿐만 아니라, 내부응력이 발생하여 원치 않은 형상으로의 변형이나 파손이 생기게 된다. 본 연구에서는 전자패키지용 경사조성 Al-SiC 복합재료의 열·기계적 변형 거동을 해석하고 최적 구조설계를 할 수 있는 이론적 모델을 확립하였다. 경사조성 층상구조 Al-SiC_p 복합재료에서 Al과 SiC 층 사이의 계면에 경사조성층을 삽입하고 각 층간의 두께비를 변화시켜 열이력에 노출될 시 곡률반경 및 내부응력의 분포를 조정하고 최적의 구조설계를 위한 방안을 제시하였다. 한편 실제로 제조한 경사조성 Al-SiC_p 복합재료에 대하여 열이력에 따른 곡률반경을 측정하고 내부응력분포를 구하여 이론을 검증하였다. 본 연구에서 확립된 이론 모델은 다양한 경사가능성 재료에서의 열·기계적 변형특성 해석에도 적용할 수 있다.

후 기

본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단 선도연구자 지원사업(과제번호: KRF-99-E00477-E5103) 연구비로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. B. H. Rabin and Shiota(Eds.), "Functionally Gradient Materials", MRS Bulletin, Jan.1995, pp.14-18.
2. A. Mortensen and S. Suresh, "Functionally Graded Metals and Metal-Ceramic Composites : Part I. Processing", Inter. Mater. Rev., Vol.40, No.6, 1995, pp.239-265.

3. 傾斜機能材料 (Functionally Gradient Materials), 社 法人 未踏科學技術協會, 傾斜機能材料研究會 編, 工業調査會, 1992.

4. M. Niini, T. Hirai and R. Watanabe, "Functionally Graded Materials for Aerospace Thermal Barrier Materials", J. Jpn. Soc. Comp. Mater., Vol.13, No.6, 1987, pp.257-264.

5. J. D. Yoo, K. M. Cho, W. S. Bae, M. Cima and S. Suresh, "Transformation-Toughened Ceramic Multilayers with Composition Gradients", J. Am. Cer. Soc., Vol.81, No.1, 1998, pp.21-32.

6. S. Suresh, A. E. Giannakopoulos and M. Olsson, "Elastoplastic Analysis of Thermal Cycling : Layered Materials With Sharp Interfaces", J. Mech. Phys. Solids, Vol.42, No.6, 1994, pp.979-1018.

7. A. E. Giannakopoulos, S. Suresh, M. Finot and M. Olsson, "Elastoplastic Analysis of Thermal Cycling : Layered Materials With Compositional Gradients", Acta Metall. Mater., Vol.43, No.4, 1995, pp.1335-1354.

8. D. G. Nam, K. Y. Baek, H. T. Lee and K. M. Cho, " Thermomechanical Analysis of Functionally Graded Multilayers for Optimal Structural Design", J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol.36, No.5, 1998, pp.760-767.

9. A. V. Virkar, J. L. Huang and R. A. Cuttler, "Strength of Oxide Ceramics by Transformation-Induced Stresses", J. Am. Cer. Soc., Vol.70, No.3, 1987, pp.164-170.

10. Y. L. Shen, A. Needleman and S. Suresh, "Coefficients of Thermal Expansion of Metal-Matrix Composites for Electronic Packaging", Metall. Mater. Trans. Vol.25A, No.4, 1994, pp.839-850.

11. C. Zweben and K. A. Schmidt, Elec. Mater. Handbook : Advanced Composite Packaging Materials, 1989, pp.1129.

12. S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, Theory of Elasticity, 3rd Ed., McGraw Hill, NY, 1982.