

# 전자패키지용 경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 복합재료의 열·기계적 변형특성 해석

송대현\*, 최낙봉, 김애정, 조경목\*, 박익민

## Thermomechanical Analysis of Functionally Gradient Al-SiC<sub>p</sub> Composite for Electronic Packaging

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

Keywords : Al/SiC<sub>p</sub>, 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 and 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<sub>p</sub> 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.

### 1. 서론

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.<sup>4)</sup> 이러한 개념으로 개발되고 있는 경사기능재료는 지난 십여 년 동안 구조설계, 제조 및 특성평가 방법 등에 관련된 연구가 지속적으로 진행되어 왔다.<sup>1~9)</sup>

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<sub>p</sub>

\* 부산대학교 공과대학 금속공학과  
\* 항공재료연구센터 (CAAM)

는 전자패키지용 재료로 활용성이 검토되고 있다.<sup>10~11)</sup> 전자부품 소재로 사용되는 반도체 및 세라믹 재료와의 열팽창계수 차이를 최소화하면 Al-SiC<sub>p</sub> 복합재료는 충분한 강도와 인성이 확보되고 열방출도 효과적이라서 전자패키지용 재료로서 활용이 기대된다.

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

## 2. 이론적 모델

그림 1과 같은 xy평면에 놓인 판상의 경사조성 구조 재료에 대하여 열·기계적 변형특성을 이론적으로 해석하고자 한다. 경사조성재료는 각각 1, 2, GL로 표시되는 A재료층, B재료층, 경사계면층(GL)으로 이루어진 비대칭 3층구조로 고려하였다. 또한 경사조성재료의 폭이 두께에 비하여 충분히 크다고 가정하여 가장자리 변형효과는 고려하지 않았다.

비대칭 3층구조에서 xy평면상의 축방향 등방 변형률( $\epsilon = \epsilon_{xx} = \epsilon_{yy}$ )은 다음과 같이 주어진다.<sup>12)</sup>

$$\epsilon(z) = \epsilon_0 + xz \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_0$ 는  $z=0$ 에서의 변형률,  $x$ 는 판상시편의 곡률반경이다. 이에 상응하는 등방응력 분포  $\sigma(z)$  ( $= \sigma_{xx}(z) = \sigma_{yy}(z)$ )는 다음과 같다.

$$\sigma(z) = E^*(z) [\epsilon_0 + xz - \alpha(z) \Delta T] \quad (2)$$

평면응력 상태에서 탄성계수는  $E^* = E/(1-\nu)$ 이며,  $\alpha$ 는 열팽창계수,  $\Delta T = (T_f - T_s)$ 는 온도변화, 그리고  $\nu$ 는 Poisson비이다. 한편 그림 1의 다층구조에서 힘과 모멘트 균형 조건이 만족되어야 한다. 즉,

$$\begin{aligned} \int_z \sigma(z) dz &= 0 \\ \int_z z \sigma(z) dz &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

식(2), (3)으로부터  $\epsilon_0$ 와  $x$ 를 계산하는 식을 구할 수 있다.

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

$$x = \frac{I_1 J_0 - I_0 J_1}{I_1^2 - I_0 I_2} \quad (5)$$

$I_i$ 와  $J_i$ 는 다음과 같다.

$$I_i = \int_z z^i E^*(z) dz \quad (i=0, 1, 2) \quad (6)$$

$$J_i = \int_z z^i E^*(z) \alpha(z) \Delta T dz \quad (i=0, 1) \quad (7)$$

식(1)~(5)을 이용하여 변형률 ( $\epsilon_0$ ), 곡률반경 ( $x$ ), 그리고 내부응력분포 ( $\sigma$ )를 계산하기 위해서는 각 구성층의 탄성계수 ( $E$ )와 열팽창 계수 ( $\alpha$ )를 결정해야 한다. 그림 1의 층상구조에서 두께방향으로 탄성계수와 열팽창계수는 다음과 같이 변화한다고 하였다.

$$(h_1 + a \leq z \leq h_1 + h_2 + a)$$

$$E^*(z) = E_2^*, \quad \alpha(z) = \alpha_2$$

$$(h_1 \leq z \leq h_1 + a)$$

$$E^*(z) = E_1^* + (E_2^* - E_1^*) \left( \frac{z - h_1}{a} \right)$$

$$\alpha(z) = \alpha_1 + (\alpha_2 - \alpha_1) \left( \frac{z - h_1}{a} \right)$$

$$(0 \leq z \leq h_1)$$

$$E^*(z) = E_1^*, \quad \alpha(z) = \alpha_1 \quad (8)$$

따라서 식(4)~(8)로부터 변형률(  $\epsilon_0$  ), 곡률반경(  $\kappa$  ) 및 응력분포를 구할 수 있는 다음의 식들이 유도된다.

$$\epsilon_0 = [a_1 + \Delta\alpha f(\rho)] \Delta T \quad (9)$$

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

$$\sigma(z) = E^*(z) \Delta\alpha \Delta T G \quad (11)$$

식(9)~(11)에 나타난 함수들은 그림 1의 층상 구조에서 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

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

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

$$\rho_E = \frac{E_1^*}{E_2^*} \quad (16)$$

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

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

$$m_1 = 6\rho_1^4 + 12\rho_1^3 \rho_a + 12\rho_1^2 \rho_a^2 + 6\rho_1 \rho_a^3 + \rho_a^4$$

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

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

$$(h_1 + a \leq z \leq h_1 + h_2 + a)$$

$$G = f(\rho) + g(\rho)z - 1$$

$$(h_1 \leq z \leq h_1 + a)$$

$$G = f(\rho) + g(\rho)z - \left( \frac{z - h_1}{a} \right)$$

$$(0 \leq z \leq h_1)$$

$$G = f(\rho) + g(\rho)z \quad (20)$$

### 3. 경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 복합재료의

#### 열·기계적 변형특성 분석 결과

그림 1로부터 정립한 Al-SiC<sub>p</sub> 경사조성 층상구조 복합재료의 열·기계적특성 분석 이론 모델을 이용하여 경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 복합재료가 열이력에 노출되었을 때 곡률반경(식 10) 및 내부응력분포(식 11)의 분석을 행하였다. 경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 복합재료의 열·기계적 변형특성은 탄성거동을 보이고 소성변형은 일어나지 않는다고 가정하였다. 분석에는 표 1의 Al과 SiC의 물성을 사용하였다. 경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 층상구조는 상온(25℃)에서 내부응력이 존재하지 않는다는 가정 하에, 승온 시 온도변화에 따른 열·기계적 변형특성을 분석하였다.

#### 3.1. 곡률반경 분석

곡률반경은 경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 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<sub>p</sub> 층상구조재료의 곡률반경

( $\kappa \times H$ , normalized curvature)을 계산하였다. 곡률 반경은 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 10을 이용하여 계산한 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 SiC층의 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<sub>p</sub> 복합재료에서 변형과 관련된 구조설계에 이용할 수 있다. 경사조성재료의 곡면화 열변형은 열이력에 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<sub>p</sub> 층상구조 복합재료의 곡률반경의 측정치와 계산치를 비교한 경우로서 상당히 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 내부응력 분석

경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 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 4

는 판상의 경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 층상구조 복합재료의 두께 방향으로 온도상승에 따른 내부응력 분포를 식 11을 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 계면분리 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 SiC 층 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 SiC 층 사이에 경사층이 삽입됨으로서 내부응력은 완화되지만 반대 급부로서 곡률반경은 증가하게 된다(그림 2 참조). 따라서 곡면화 변형과 내부응력의 적정 조합을 고려하여 경사조성 Al-SiC<sub>p</sub> 층상구조 복합재료의 구조설계가 이루어져야 한다.

## 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 형상으로서의 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<sub>p</sub> 복합재료에서 Al과 SiC 층 사이의 계면에 경사조성층을 삽입하고 각 층간의 두께비를 변화시켜 열이력에 노출될 시 곡률반경 및 내부응력의 분

포를 조정하고 최적의 구조설계를 위한 방안을 제시하였다. 본 연구에서 확립된 이론 모델은 다양한 경사기능성 재료에서의 열·기계적 변형특성 해석에도 적용할 수 있다.

## 후기

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

## 참고문헌

- (1) B. H. Rabin and Shiota(Eds.) : MRS Bulletin, Jan. (1995) 14
- (2) A. Mortensen and S. Suresh : Intern. Mater. Rev., 40 (1995) 239
- (3) 傾斜機能材料 (Functionally Gradient Materials), 社団法人 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 : J. Jpn. Soc. Comp. Mater., 13(6) (1987) 257
- (5) J. D. Yoo, K. M. Cho, W. S. Bae, M. Cima and S. Suresh : J. Am. Cer. Soc., 81(1) (1998) 21
- (6) S. Suresh, A. E. Giannakopoulos and M. Olsson : J. Mech. Phys. Solids, 42(6) (1994) 979
- (7) A. E. Giannakopoulos, S. Suresh, M. Finot and M. Olsson : Acta Metall. Mater., 43(4) (1995) 1335
- (8) D. G. Nam, K. Y. Baek, H. T. Lee and K. M. Cho : J. Kor. Inst. Met. & Mater., 36(5) (1998) 760
- (9) A. V. Virkar, J. L. Huang and R. A. Cuttler : J. Am. Cer. Soc., 70(3) (1987) 164
- (10) Y. L. Shen, A. Needleman and S. Suresh : Metall. Mater. Trans. 25A (1994) 839
- (11) C. Zweben and K. A. Schmidt : Elec. Mater. Handbook (Advanced Composite Packaging Materials) (1989) 1129
- (12) S. P. Timoshenko and J. N. Goodier : Theory of Elasticity, 3rd edition, McGraw Hill, NY, (1982).

## Captions

Table 1. Properties of Al and SiC

Table 2. Curvature of Al-SiCp FGM plates

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

Figure 2. Curvature variation of Al-SiCp multilayer plates as a function of temperature change  
(a)  $\rho_{GL} = 0$ , (b)  $\rho_{GL} = 0.5$  (c)  $\rho_{GL} = 0.7$   
 $\rho_{GL}$  is thickness ratio of compositionally graded layer(FGM in Fig. 1).

Figure 3. Internal stress distribution of Al-SiCp 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)  $\rho_1=0.2$ ,  $\rho_2=0.1$ ,  $\rho_{GL}=0.7$ .  
 $\rho_1$ ,  $\rho_2$  and  $\rho_{GL}$  are thickness ratios of Al, SiC and FGM respectively(Fig. 1).

Figure 4. Internal stress distribution of Al-SiCp 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 1. Properties of Al and SiC.

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

Table 2. Curvature of Al-SiC<sub>p</sub> FGM plates.

Thickness(mm)	Measured Curvature(m <sup>-1</sup> )	Calculated Curvature(m <sup>-1</sup> )
7.0	181.06	188.24
5.0	193.46	201.57
3.0	231.23	244.33

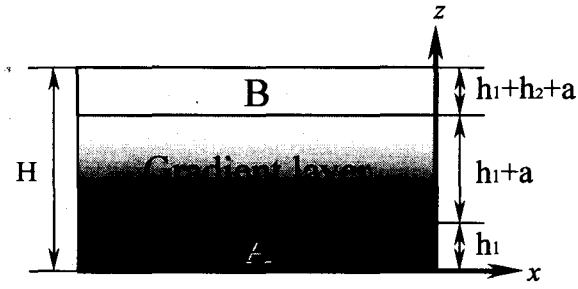


Figure 1. A geometry of FGM structure with constituents of A and B.

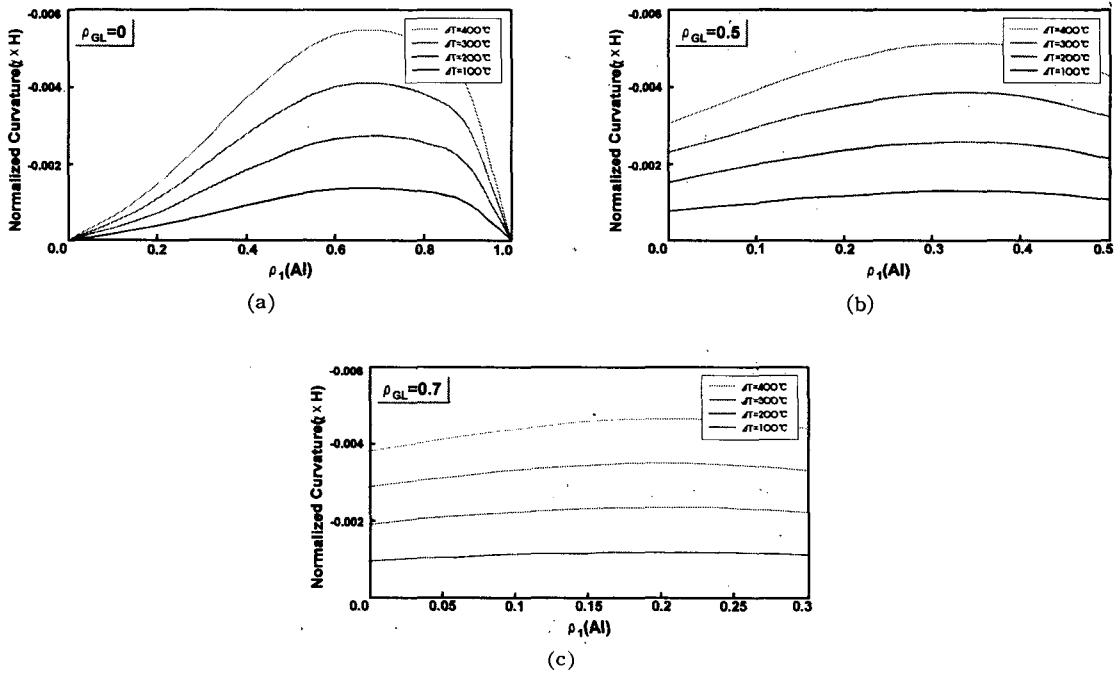


Figure 2. Curvature variation of Al-SiC<sub>p</sub> multilayer plates as a function of temperature change (a) sharp interface, (b)  $\rho_{GL} = 0.5$  (c)  $\rho_{GL} = 0.7$ .

$\rho_{GL}$  is thickness ratio of compositionally graded layer(FGM in Fig. 1)

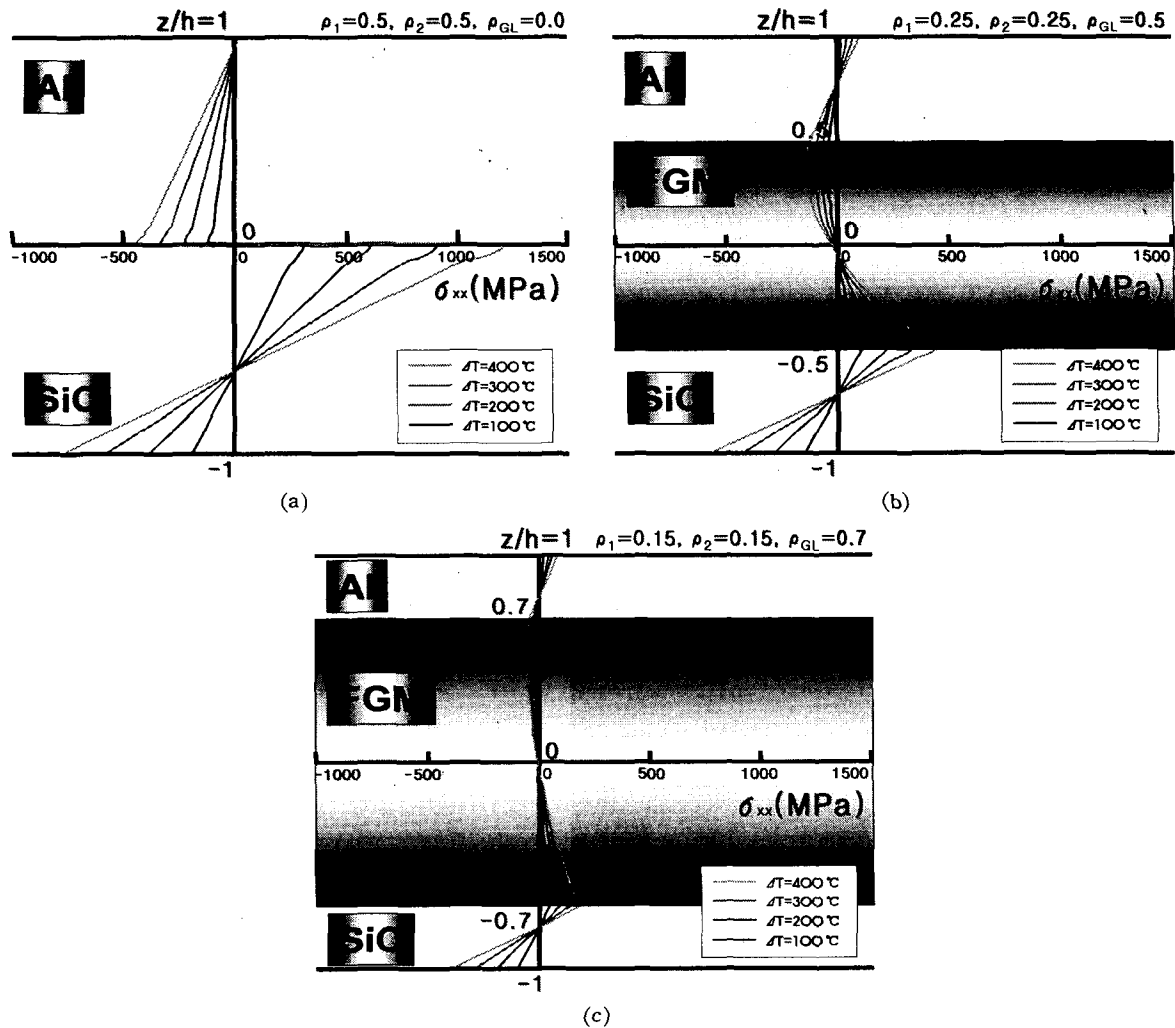


Figure 3. Internal stress distribution of Al-SiC<sub>p</sub> multilayer plates as a function of temperature change (a)  $\rho_1=0.5$ ,  $\rho_2=0.5$ ,  $\rho_{GL}=0$ , (b)  $\rho_1=0.5$ ,  $\rho_2=0.5$ ,  $\rho_{GL}=0.5$ , (c)  $\rho_1=0.5$ ,  $\rho_2=0.5$ ,  $\rho_{GL}=0.7$ .

$\rho_1$ ,  $\rho_2$  and  $\rho_{GL}$  are thickness ratios of Al, SiC and FGM respectively (Fig. 1).



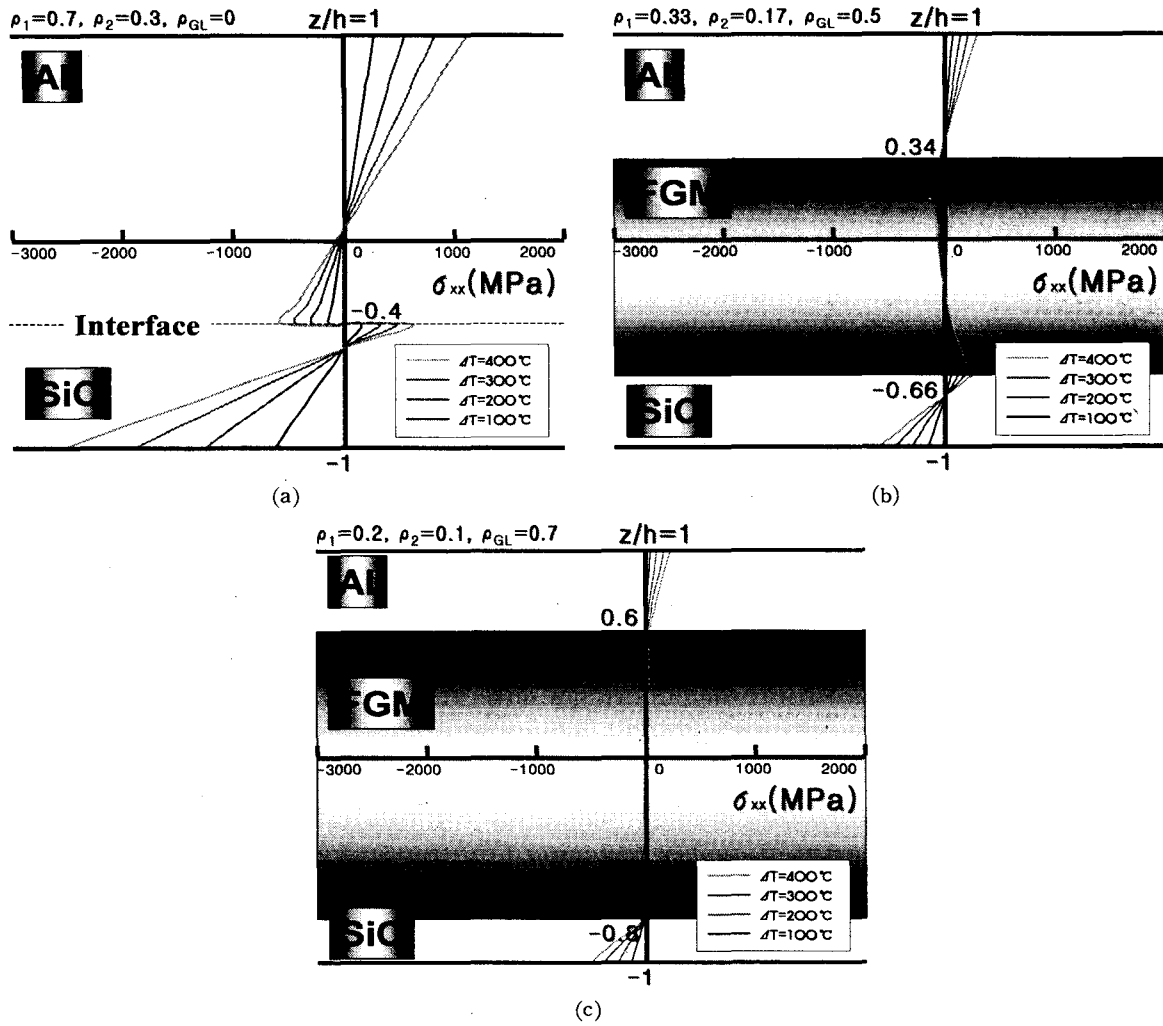


Figure 4. Internal stress distribution of Al-SiCp multilayer plates as a function of temperature change (a)  $\rho_1=0.7, \rho_2=0.3, \rho_{GL}=0$ , (b)  $\rho_1=0.33, \rho_2=0.17, \rho_{GL}=0.5$  (c)  $\rho_1=0.2, \rho_2=0.1, \rho_{GL}=0.7$ .