

〈論 文〉

전자부품 패키지에 내재된 두재료 혹은 세재료 접합점에 대한 응력특이차수

최성렬* · 권용수** · 박상선*** · 박재완**

(1995년 5월 29일 접수)

Order of Stress Singularities at Bonded Edge Corners with Two or Three Dissimilar Materials in the Electronic Package

Sung Ryul Choi, Yong Su Kwon, Sang Sun Park and Jae Wan Park

Key Words : Order of Stress Singularity(응력특이차수), Characteristic Equation(특성방정식), Mellin Transform(Mellin 변환), Bonded Edge Corner(접합점)

Abstract

Order of Stress Singularities at Bonded Edge Corners with two or three dissimilar isotropic Materials is analyzed. The problem is formulated by Mellin transform and characteristic equation is obtained as a determinant of matrix considering boundary conditions. Roots of characteristic equation are determined by numerical calculations with ward method, from which the order of stress singularities is obtained. Applying the results to the electronic packaging, the order of stress singularities at bonded edge corners is calculated as a various bonded edge angle with given material combinations. Comparing the results, the optimal material combinations of bonded edge corners and bonded edge angle to reduce stress singularity could be determined. It suggests that the results are used to the basic design of electronic packaging reducing the stress singularity.

1. 서 론

다양한 특성을 지니는 재료를 여러개 접합하여 목적하는 기능을 얻는 사례는 산업이 고도화됨에 따라 여러분야에서 응용되고 있다. 전자부품 패키지분야에서 단일칩을 패키징하는 방법으로 종래에는 삽입형(insertion mounting type) 패키지가 주종이었으나 고집적화의 요구에 따라 표면실장형(surface mounting type) 패키지로 그 형태가 바뀌고 있다.⁽¹⁾ 표면실장형은 삽입형에 비하여 실장밀

도를 높일 수 있어 고집적화, 소형화 및 박형화의 추세에 부응하는 실장형태로 주목받고 있다. 그러나 패키지 전체가 솔더의 용융온도보다 높은 210℃~260℃에 노출되기 때문에 여러가지 형태의 패키지균열을 야기시키게 된다. 패키지균열이 생성되는 위치는 주로 상이한 재료들의 접합면인 계면과 응력이 집중되는 접합점(bonded edge)부분이 대부분이다. 재료들이 완전히 접합되더라도 재료들의 물성치 차이나 기하학적 형상에 의하여 접합점 부근에는 응력특이성이 존재하게 된다.⁽²⁾

Fig. 1은 단일칩 패키지를 개괄적으로 나타낸 것으로서, 크게 칩(chip)과 리드프레임(L/F) 및 수지(EMC)의 세 부분으로 구성되어 있고, 여기에 기판과 연결을 위해 리드(lead)가 부착되어 있다.

*회원, 영남대학교 기계공학과

**영남대학교 대학원

***한국과학기술원 기계공학과

이와 같은 패키지 내부에는 두재료 및 세재료의 접합점이 존재함을 알 수 있고, 그림내의 원부분 A, B, C는 이들 접합점을 유형별로 표시한 것이다. Hattori 등⁽²⁾은 두재료의 접합점에 대한 응력의 특이성과 응력의 세기를 계산한 바 있으나, A부분, 즉 칩/리드프레임/수지의 세재료 접합점에서 균열이 발생하는 빈도가 증가하고 있다. 접합점 부근의 균열발생을 야기하는 주된 인자로는 응력의 특이성에 관련된 응력특이차수(order of stress singularity)가 된다. 즉, 응력특이차수가 증가할수록 접합점에서 균열형성이 용이하게 되는 바, 전자부품의 기능이 대등하다면 응력의 특이치가 작은 재료들의 선택이 바람직할 것이다.

재료의 접합점에 대한 응력특이성 연구는 Williams⁽³⁾에 의하여 비롯되었으며, 두재료의 접합면에 대한 연구가 대부분이다. 자유면(free surface)을 가지는 두재료의 접합점에 대한 연구는 Bogy,⁽⁴⁻⁶⁾ Fenner,⁽⁷⁾ Hein 및 Erdogan⁽⁸⁾ 등에 의하여 연구된 바 있으며, 한편 두재료가 임의의 각을 유지하며 완전히 접합된 문제는 Bogy 및 Wang,⁽⁹⁾ Chen 및 Nishitani⁽¹⁰⁾에 의하여 연구되었다. Theocaris⁽¹¹⁾는 복소함수에 의한 고유함수 전개방법으로 여러재료들이 접합된 문제의 해석방법을 제시한 바 있으나, 세재료의 접합문제에 관한 구체적인 해석은 수행되지 않았다.

본 연구에서는 두재료 및 세재료의 접합점에 대한 응력특이차수를 정량적으로 구하는 방법을 연구하고, 이를 Fig. 1과 같이 두재료 및 세재료의 접합점이 존재하는 전자부품 패키지문제에 적용하고자 한다. 본 연구는 최적의 전자재료 선정과 접합각(bonded edge angle)의 크기 등 응력특이차수를 줄이는 방법을 정량적으로 제시할 수 있는 바, 반도체패키지의 기본적인 설계에 이용될 수 있다.

접합점에 대한 응력특이차수를 구하는 방법에는 고유함수전개법^(3,7,11)과 적분변환방법^(4-6,8)의 두가지 방법이 사용되고 있다. 두재료가 접합된 문제에서

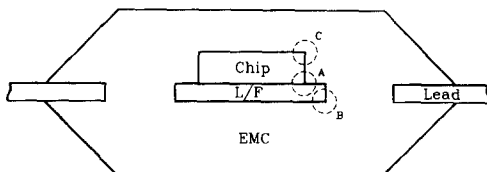


Fig. 1 Various type of bonded edges in a single chip plastic packaging

적분변환에 의한 방법은 응력특이차수를 구하는 특성방정식(characteristic equation)이 한개의 방정식으로 용이하게 압축될 수 있다는 점에서 많이 사용되고 있는 바, 적분변환방법을 사용하여 문제를 해석한다.

2. 문제의 설정

두재료의 접합문제는 세재료가 접합된 문제의 특별한 경우가 됨을 상기하여, Fig. 1에서 보인 수지내의 접합점에 대한 응력특이성을 모두 계산할 수 있는 Fig. 2와 같은 문제를 생각하자. Fig. 2는 반무한 크기의 “재료 1”에 접합각 ω ($0 < \omega < \pi$)인 “재료 2”와 접합각 $\pi - \omega$ 인 “재료 3”의 상이한 세등방성재료가 정점 O에서 방사상으로 완전히 접합되어 있는 문제이다. 본 연구는 접합점 주변의 응력특이차수를 구하는 것인 바, 응력특이차수는 작용하는 하중이 평면(in-plane) 하중이라면 하중의 형태에 무관하다는 점을 고려하여 해석의 편의상 “재료 2”와 “재료 3”의 접합면인 $r=l, \theta=\omega$ 에 크기 b 인 반경방향 인선전위가 한개 존재한다고 두었다.⁽⁸⁾

이와 같은 문제는 재료의 기하학적 접합형태로 볼 때, 정점 O를 중심으로 극좌표계(r, θ)를 도입하여 기술함으로써 그 해석이 용이하게 된다.⁽³⁻⁹⁾ 임의의 점에 관한 응력과 변위를 구하기 위하여, Airy응력함수를 $\Phi_j(r, \theta)$ ($j=1, 2, 3$)라고 하면 Φ_j 는 체적력을 무시할 때

$$\nabla^4 \Phi_j(r, \theta) = 0 \quad (1)$$

인 중조화함수가 되고, 여기서 연산자는

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$$

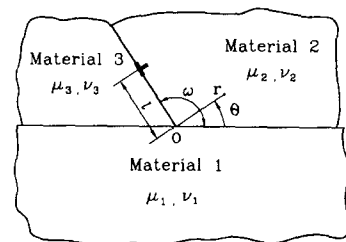


Fig. 2 Geometry of three-material bonded edge problem

를 말한다. 식 (1) 내의 하첨자 $j=1, 2, 3$ 은 각각 “재료 1” “재료 2” 및 “재료 3”에 대응된다.

이로부터 응력성분은 각각

$$\sigma_{\theta\theta(j)}(r, \theta) = \frac{\partial^2}{\partial r^2} \Phi_j(r, \theta) \quad (2a)$$

$$\sigma_{rr(j)}(r, \theta) = \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \Phi_j(r, \theta) \quad (2b)$$

$$\sigma_{r\theta(j)}(r, \theta) = \left(-\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \right) \Phi_j(r, \theta) \quad (2c)$$

으로 표현되고, 또한 변위성분을 각각

$$\frac{\partial}{\partial r} u_{r(j)} = \frac{1}{2\mu_j} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} - \left(1 - \frac{m_j}{4} \right) \nabla^2 \right] \Phi_j \quad (3a)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} u_{\theta(j)} + \frac{1}{r} u_{r(j)} = \frac{1}{2\mu_j} \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} - \left(1 - \frac{m_j}{4} \right) \nabla^2 \right] \Phi_j \quad (3b)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} u_{\theta(j)} - \frac{1}{r} u_{\theta(j)} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} u_{r(j)} \\ = \frac{1}{\mu_j} \left[-\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \right] \Phi_j \end{aligned} \quad (3c)$$

으로 표현되며, 여기서 상수 $\mu_j (j=1, 2, 3)$ 은 각 재료의 전단계수를 말하고, m_j 는 푸아송비 ν_j 와 다음의 관계에 있는 상수를 말한다.

$$m_j = \begin{cases} 4(1-\nu_j) & \text{for plane strain,} \\ \frac{4}{1+\nu_j} & \text{for plane stress.} \end{cases} \quad (4)$$

계면에 대한 면력과 변위의 연속조건을 극좌표계로 나타내면 다음과 같다. 먼저 “재료 1” 및 “재료 2”간의 계면에 대해서는

$$\sigma_{\theta\theta(1)}(r, 0) = \sigma_{\theta\theta(2)}(r, 0) \quad (5a)$$

$$\sigma_{r\theta(1)}(r, 0) = \sigma_{r\theta(2)}(r, 0) \quad (5b)$$

$$u_{r(1)}(r, 0) = u_{r(2)}(r, 0) \quad (5c)$$

$$u_{\theta(1)}(r, 0) = u_{\theta(2)}(r, 0) \quad (5d)$$

이 되고, “재료 1” 및 “재료 3”에 대해서는

$$\sigma_{\theta\theta(1)}(r, -\pi) = \sigma_{\theta\theta(3)}(r, \pi) \quad (6a)$$

$$\sigma_{r\theta(1)}(r, -\pi) = \sigma_{r\theta(3)}(r, \pi) \quad (6b)$$

$$u_{r(1)}(r, -\pi) = u_{r(3)}(r, \pi) \quad (6c)$$

$$u_{\theta(1)}(r, -\pi) = u_{\theta(3)}(r, \pi) \quad (6d)$$

의 조건이 주어지며, 한편 “재료 2” 및 “재료 3”의 계면에서는

$$\sigma_{\theta\theta(2)}(r, \omega) = \sigma_{\theta\theta(3)}(r, \omega) \quad (7a)$$

$$\sigma_{r\theta(2)}(r, \omega) = \sigma_{r\theta(3)}(r, \omega) \quad (7b)$$

$$u_{r(2)}(r, \omega) - u_{r(3)}(r, \omega) = bH(r-l) \quad (7c)$$

$$u_{\theta(2)}(r, \omega) = u_{\theta(3)}(r, \omega) \quad (7d)$$

의 관계에 있다. 여기서, b 는 r 방향의 burgers 백터를 말하고, $H(r-l)$ 은 Heaviside 단위함수를 나타낸다.

또한 응력의 점근거동은^(4-6,9)

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{rr}, \sigma_{r\theta} &= O[r^{-1-h}], r \rightarrow \infty \text{ for } h > 0 \\ &= O[r^{-\lambda_1}], r \rightarrow 0 \text{ for } 0 < \text{Re}[\lambda_1] < 1 \end{aligned} \quad (8)$$

으로 표현되며, 여기서 λ_1 은 응력의 특이차수로서 본 연구의 해석에서 결정될 값이며, Re 는 복소수의 실수부를 말한다.

3. 적분변환에 의한 문제의 수식화

식 (1)~(8)과 같이 주어지는 경계치문제는 Mellin 변환을 사용함으로써 보다 그 해석이 용이하며, 이와같은 적분변환을 사용한 해석은 Bogy^(4-6,9) 등 많은 연구자에 의하여 수행되었는 바, 이들의 해석방법을 따라 수행한다. $0 < r < \infty$ 에서 정의된 함수 f 의 r 에 관한 Mellin 변환을

$$M[f(r); p] = \int_0^\infty f(r) r^{p-1} dr \quad (9)$$

와 같이 정의하자. 여기서, p 는 Mellin 변환에 관한 복소변수를 말한다.

식 (9)의 정의를 사용하여 $\Phi_j(r, \theta)/r$, $u_j(r, \theta)$, $r\sigma_{ij}(r, \theta)$ 의 r 에 관한 Mellin 변환을 각각 $\bar{\Phi}_j(p, \theta)$, $\bar{u}_j(p, \theta)$, $\bar{\sigma}_{ij}(p, \theta)$ 라고 두자. 그러면 $\bar{\Phi}_j(p, \theta)$ 는 식 (1)을 Mellin 변환함으로써 p 에 관한 상미분방정식을 얻고, 이로부터 다음의 해를 얻는다

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_j(p, \theta) &= A_j(p) \sin(\theta p - \theta) \\ &\quad + B_j(p) \cos(\theta p - \theta) \\ &\quad + C_j(p) \sin(\theta p + \theta) \\ &\quad + D_j(p) \cos(\theta p + \theta), j=1, 2, 3 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, 미지함수 $A_j, B_j, C_j, D_j (j=1, 2, 3)$ 는 면력과 변위에 관한 경계조건 식 (5)~(7)의 도움으로 결정되어야 할 p 에 관한 함수들이다.

동일한 방법으로 응력과 변위에 관한 식 (2) 및 (3)을 Mellin 변환하고, 식 (10)의 관계를 사용하면, 적분변환된 응력과 변위는 다음과 같이 표현된다

$$\hat{\sigma}_{\theta\theta(j)}(p, \theta) = (p-1)p \hat{\Phi}_j(p, \theta) \quad (11a)$$

$$\hat{\sigma}_{rr(j)}(p, \theta) = \left[-\frac{d^2}{d\theta^2} - (p-1) \right] \hat{\Phi}_j(p, \theta) \quad (11b)$$

$$\hat{\sigma}_{r\theta(j)}(p, \theta) = p \frac{d}{d\theta} \hat{\Phi}_j(p, \theta) \quad (11c)$$

$$\begin{aligned} \hat{u}_{r(j)}(p, \theta) = & \frac{1}{2\mu_j} \left[(p-1) \hat{\Phi}_j(p, \theta) \right. \\ & \left. + m_j C_j(p) \sin(\theta p + \theta) \right. \\ & \left. + m_j D_j(p) \cos(\theta p + \theta) \right] \quad (12a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{u}_{\theta(j)}(p, \theta) = & \frac{1}{2\mu_j} \left[-\frac{d}{d\theta} \hat{\Phi}_j(p, \theta) \right. \\ & \left. + m_j C_j(p) \cos(\theta p + \theta) \right. \\ & \left. - m_j D_j(p) \sin(\theta p + \theta) \right] \quad (12b) \end{aligned}$$

주어진 경계조건 식 (5)~(7)을 같은 방법으로 각각 Mellin 변환하고, 식 (11) 및 (12)를 적절히 대입하면, 식 (10)내의 미지함수에 관한 12개의 대수방정식이 구성된다. 12개의 대수방정식을 풀면 식 (10)의 12개 미지함수 $A_j(p)$, $B_j(p)$, $C_j(p)$, $D_j(p)$ ($j=1, 2, 3$)가 모두 결정될 것이고, Bogy의 문헌에서 제시된 바와 같이 미지함수들은 복소변수 p 에 관한 분수형태로 주어지는 그 형식적인 모양은 다음과 같다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned} A_i(p) &= a_i(p)/\Delta(p) \\ B_i(p) &= b_i(p)/\Delta(p) \\ C_i(p) &= c_i(p)/\Delta(p) \\ D_i(p) &= d_i(p)/\Delta(p) \quad (13) \end{aligned}$$

식 (13)의 우변항에서 분모에 해당하는 $\Delta(p)=0$ 인 방정식을 특성방정식이라고 이른다. $\Delta(p)=0$ 인 근 p 에서 응력특이차수가 결정되는, 결국 본 연구는 $\Delta(p)=0$ 인 근을 구하는 문제에 귀결된다. 특성방정식 $\Delta(p)=0$ 의 근을 구하는 방법에 대해서는 4절에서 설명한다.

일단 식 (10)내의 미지함수가 식 (13)과 같이 주어진다면, 그 결과를 식 (11) 및 (12)에 대입함으로써 Mellin 변환된 응력과 변위의 정보를 얻을 수 있고, 이로부터 Mellin 역변환 공식을 사용하면 응력과 변위에 관한 형식적인 적분식을 얻는다.⁽⁵⁾ 즉 식 (11a)를 Mellin 역변환하면 응력 $\sigma_{\theta\theta(j)}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{\theta\theta(j)}(r, \theta) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \hat{\sigma}_{\theta\theta(j)}(p, \theta) r^{-1-p} dp. \quad (14a)$$

여기서, 적분이 유효한 경로 c 는 식 (8)를 사용함으로써

$$c = -\delta \quad [0 < \delta < \text{Re}(\lambda_1)] \quad (14b)$$

임을 안다. 식 (8)에서 보는 바와 같이 $r \rightarrow 0$ 부근의 응력의 특이치 λ_1 는, Bogy^(4-6,9) 등의 문헌에서 제시된 바와 같이, 식 (13)에서 언급한 특성방정식 $\Delta(p)=0$ 인 근들 중에서 $-1 < \text{Re}(p) < 0$ 에 해당하는 값 p 에서 결정된다. 즉, 식 (14a) 우변 적분내에는 $\Delta(p)$ 가 분모에 위치하고, $\Delta(p)=0$ 인 근 p 는 폴(pole)이 되는 유수정리로부터 $-1 < \text{Re}(p) < 0$ 인 근만이 응력특이성을 지님을 알 수 있다.

4. 특성방정식 $\Delta(p)=0$ 유도과 응력특이차수

경계조건 식 (5)~(7)을 Mellin 변환하고 식 (11), (12)를 대입함으로써 12개의 p 에 관한 대수방정식이 주어지며, 이로부터 3절의 식 (13) 및 (14)에서 언급한 특성방정식 $\Delta(p)=0$ 을 얻을 수 있다. 지면상 그 계산과정은 생략하고 최종 결과를 중심으로 풀이과정을 설명하기로 한다. 먼저 경계조건 식 (5)와 식 (6)에서 얻은 각각 4개의 대수방정식을 연립하여 풀면, 식 (10)내의 미지함수 $A_2(p)$, $B_2(p)$, $C_2(p)$, $D_2(p)$ 와 $A_3(p)$, $B_3(p)$, $C_3(p)$, $D_3(p)$ 는 $A_1(p)$, $B_1(p)$, $C_1(p)$, $D_1(p)$ 의 함수로 표현된다. 이 결과를 나머지 경계조건 식 (7)에 대입하여 정리하면, 최종적으로 미지함수 $A_1(p)$, $B_1(p)$, $C_1(p)$, $D_1(p)$ 에 관한 다음의 4개의 대수방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} & e_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1(p) \\ B_1(p) \\ C_1(p) \\ D_1(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2\mu_2\mu_3 \frac{b}{p} l^p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

식 (15)의 좌변 미지함수에 대응하는 행렬계수 e_{ij} 는 다음과 같다.

$$\begin{cases} e_{11} \\ e_{12} \end{cases} = (p-1) \left[(-\gamma p \mp \eta_3) \sin(\omega p - \omega) \right. \\ \left. + \gamma(p \mp 1) \sin(\omega p + \omega) \right. \\ \left. \mp \eta_2 \sin(2\pi p - \omega p + \omega) \right] \quad (16a)$$

$$\begin{cases} e_{12} \\ e_{21} \end{cases} = (p-1) \left[(\pm \gamma p - \eta_3) \cos(\omega p - \omega) \right. \\ \left. \mp \gamma(p \mp 1) \cos(\omega p + \omega) \right. \\ \left. + \eta_2 \cos(2\pi p - \omega p + \omega) \right] \quad (16b)$$

$$\begin{cases} e_{13} \\ e_{24} \end{cases} = \begin{aligned} & (-\gamma p^2 \pm \xi_3 p + \psi_2 - \psi_3) \sin(\omega p - \omega) \\ & + (\gamma p \pm \psi_3) (p \mp 1) \sin(\omega p + \omega) \\ & \pm \xi_2 p \sin(2\pi p - \omega p + \omega) \\ & \pm \psi_2 (p \mp 1) \sin(2\pi p - \omega p - \omega) \end{aligned} \quad (16c)$$

$$\begin{cases} e_{14} \\ e_{23} \end{cases} = \begin{aligned} & (\pm \gamma p^2 + \xi_3 p \mp \psi_2 \pm \psi_3) \cos(\omega p - \omega) \\ & + (\mp \gamma p + \psi_3) (p \mp 1) \cos(\omega p + \omega) \\ & - \xi_2 p \cos(2\pi p - \omega p + \omega) \\ & - \psi_2 (p \mp 1) \cos(2\pi p - \omega p - \omega) \end{aligned} \quad (16d)$$

$$\begin{cases} e_{31} \\ e_{42} \end{cases} = (p-1) [(\mp \Omega p - \mu_3 \eta_3) \sin(\omega p - \omega) + (\pm \Omega p - \Omega - \Gamma) \sin(\omega p + \omega) - \mu_2 \eta_2 \sin(2\pi p - \omega p + \omega)] \quad (16e)$$

$$\begin{cases} e_{32} \\ e_{41} \end{cases} = (p-1) [(\Omega p \mp \mu_3 \eta_3) \cos(\omega p - \omega) + (-\Omega p \pm \Omega \pm \Gamma) \cos(\omega p + \omega) \pm \mu_2 \eta_2 \cos(2\pi p - \omega p + \omega)] \quad (16f)$$

$$\begin{cases} e_{33} \\ e_{44} \end{cases} = \begin{aligned} & (\mp \Omega p^2 + \mu_3 \xi_3 p \pm \mu_2 \psi_2 \mp \mu_3 \psi_3 \mp \Gamma) \sin(\omega p - \omega) \\ & + [\pm \Omega p^2 + \varepsilon p + \mu_2 \eta_2 p \pm \mu_3 (m_2 - 1) \psi_3] \\ & \cdot \sin(\omega p + \omega) + \mu_2 \xi_2 p \sin(2\pi p - \omega p + \omega) \\ & + \mu_2 \psi_2 (p \pm m_3 \mp 1) \sin(2\pi p - \omega p - \omega) \end{aligned} \quad (16g)$$

$$\begin{cases} e_{34} \\ e_{43} \end{cases} = \begin{aligned} & (\Omega p^2 \pm \mu_3 \xi_3 p + \mu_3 \psi_3 - \mu_2 \psi_2 + \Gamma) \cos(\omega p - \omega) \\ & + [-\Omega p^2 \mp \mu_3 \xi_3 p \mp \mu_2 \eta_2 p + \mu_3 (m_2 - 1) \psi_3] \\ & \cdot \cos(\omega p + \omega) \mp \mu_2 \xi_2 p \cos(2\pi p - \omega p + \omega) \\ & \mp \mu_2 \psi_2 (p \pm m_3 \mp 1) \cos(2\pi p - \omega p - \omega) \end{aligned} \quad (16h)$$

여기서, 복부호는 복호동순이다. 식 (16) 내의 상수들은 식의 간략화를 위하여 편의상 도입한 값들로서, 재료상수 μ_j , m_j ($j=1, 2, 3$)와 다음의 관계를 지닌다

$$\xi_2 = m_2 [\mu_1 (m_3 - 2) - \mu_3 (m_1 - 2)]$$

$$\xi_3 = m_3 [\mu_1 (m_2 - 2) - \mu_2 (m_1 - 2)]$$

$$\eta_2 = m_2 (\mu_1 - \mu_3 - \mu_1 m_3)$$

$$\eta_3 = m_3 (\mu_1 - \mu_2 - \mu_1 m_2)$$

$$\Omega = \mu_3 m_3 (\mu_1 - \mu_2) - \mu_1 m_2 (\mu_1 - \mu_3)$$

$$\text{and } \gamma = \eta_3 - \eta_2, \psi_2 = -\xi_2 - \eta_2, \psi_3 = -\xi_3 - 2\eta_3$$

$$\Gamma = \mu_3 \eta_3 - \mu_2 \eta_2 - \Omega, \varepsilon = \mu_3 (-\xi_3 - 2\eta_3) \quad (17)$$

식 (13) 및 (14)에서 설명한 특성방정식 $\Delta(p) = 0$ 은 식 (15)의 계수 e_{ij} 의 행렬값(determinant)이

영인 값에 대응되는, 특성방정식은 다음과 같다

$$\Delta(p) \equiv \det(e_{ij}) = 0 \quad (18)$$

Bogy^(4~6,9)는 상이한 두 재료가 접합된 경우 특성방정식을 한개의 식으로 나타내고, 이로부터 특성방정식의 근을 수치적으로 구함으로써 응력특이차수를 결정하였다. 그러나 세재료가 접합된 본 문제의 경우는 식 (16)에서 보는 바와 같이 재료물성치들이 복잡하게 연관되어 행렬계수들이 주어지므로 특성방정식을 하나의 식으로 표현하기란 용이하지 않다. 하지만 한개의 식으로 표현되지 않고 행렬값으로 표현되더라도 수치적으로 특성방정식 (18)의 근을 구하는 데는 무리가 없으며, 특히 식 (15)에서 보는 바와 같이 4×4 행렬값의 계산이므로 개인용 컴퓨터에서도 충분하다. 특성방정식 (18)의 근 p 는 무한히 많지만 식 (14)에서 설명한 바와 같이 $0 > \text{Re}(p) > -1$ 만이 응력특이성을 보이고 있는 바, 결국 $0 > \text{Re}(p) > -1$ 인 근을 찾는 것이 주된 관심사가 된다.

Bogy의 문헌^(4~6,9)에는 식 (14)로부터 $r \rightarrow 0$ 인 부근의 응력의 점근거동을 해석함으로써 근에 따라 세가지 형태의 응력특이치가 존재함을 보였는 바 이를 정리하면 다음과 같다.

(i) $-1 < \text{Re}(p) < 0$ 일때 :

$$\sigma = O(r^{-\lambda}), \lambda = 1 + p \quad (19a)$$

(ii) $\text{Re}(p) \leq -1$ 이고, $p = -1$ 에서 $\frac{d\Delta(p)}{dp} = 0$ 일때 :

$$\sigma = O(\log r) \quad (19b)$$

(iii) $\text{Re}(p) \leq -1$ 이고, $p = -1$ 에서 $\frac{d\Delta(p)}{dp} \neq 0$ 일때 :

$$\sigma = O(1) \quad (19c)$$

여기서, p 는 식 (14)에서 설명한 바와 같은 특성방정식의 근을 말한다. 특히 $0 > \text{Re}(p) > -1$ 인 식 (18)의 근이 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ 와 같이 여러개 존재한다고 하고, 이때 $0 > \text{Re}(p_1) > \text{Re}(p_2) > \text{Re}(p_3) > \dots > -1$ 라고 두자. 그러면 응력특이차수가 가장 큰 근은 식 (19a)에서 p_1 임을 알 수 있다.

2. 특성방정식 $\Delta(p) = 0$ 의 검토

재료의 물성치와 접합각의 변화에 따라 응력의 특이치는 식 (19)에서 보는 바와 같이 세가지 형태

가 있을 수 있지만, 흔히 존재하는 형태는 식 (19 a)가 된다. 이때 $-1 < Re(p) < 0$ 인 근 p 만이 응력 특이성을 보이는, 복소수근 p 를 실수부와 허수부로 구별하여 다음과 같이 표기하자

$$p = -\xi - i\eta, \quad (0 < \xi < 1, \eta > 0) \quad (20)$$

특성방정식 (18)의 근 p 을 수치적으로 구하기 위해서 본 연구에서는 Ward방법⁽¹²⁾을 사용하였다. Ward방법은 $-1 < Re(p) < 0$ 내의 임의의 초기값을 선정하여 식 (18)의 행렬값을 구하고, 행렬값의 절댓값이 작아지는 방향으로 반복적으로 p 의 값을 추적하여 만족할 만한 오차범위내에 있다면 이때 p 를 근으로 간주하는 방법이다. Ward방법은 초기값을 다수 선택함으로써 어떤 영역에 존재하는 근

을 모두 구할 수 있다는 장점을 지닌다.

본 연구에서 얻은 식 (16)의 행렬계수에 오류가 없음을 검증하기 위하여 기존 연구자들이 해석한 결과와 식 (18)에서 계산된 본 연구의 결과를 비교하기로 한다. Bogy 및 Wang,⁽⁹⁾ Chen 및 Nishitani⁽¹⁰⁾는 Fig. 2의 “재료 1” 및 “재료 3”이 동일할 때, 즉 서로 다른 두재료가 임의의 각을 이루며 완전히 접합되어 있을 때 접합점 부근의 응력 특이성을 연구한 바 있다. 이들은 한개의 특성방정식을 얻고, 이로부터 근을 구하였다. 이때 응력의 특이성을 지배하는 재료상수는 Dundurs⁽¹³⁾에 의하여 제안된 상호매개 상수 α, β 임이 알려져 있다

$$\alpha = \frac{\mu_1 \mu_2 - \mu_2 \mu_1}{\mu_1 \mu_2 + \mu_2 \mu_1}$$

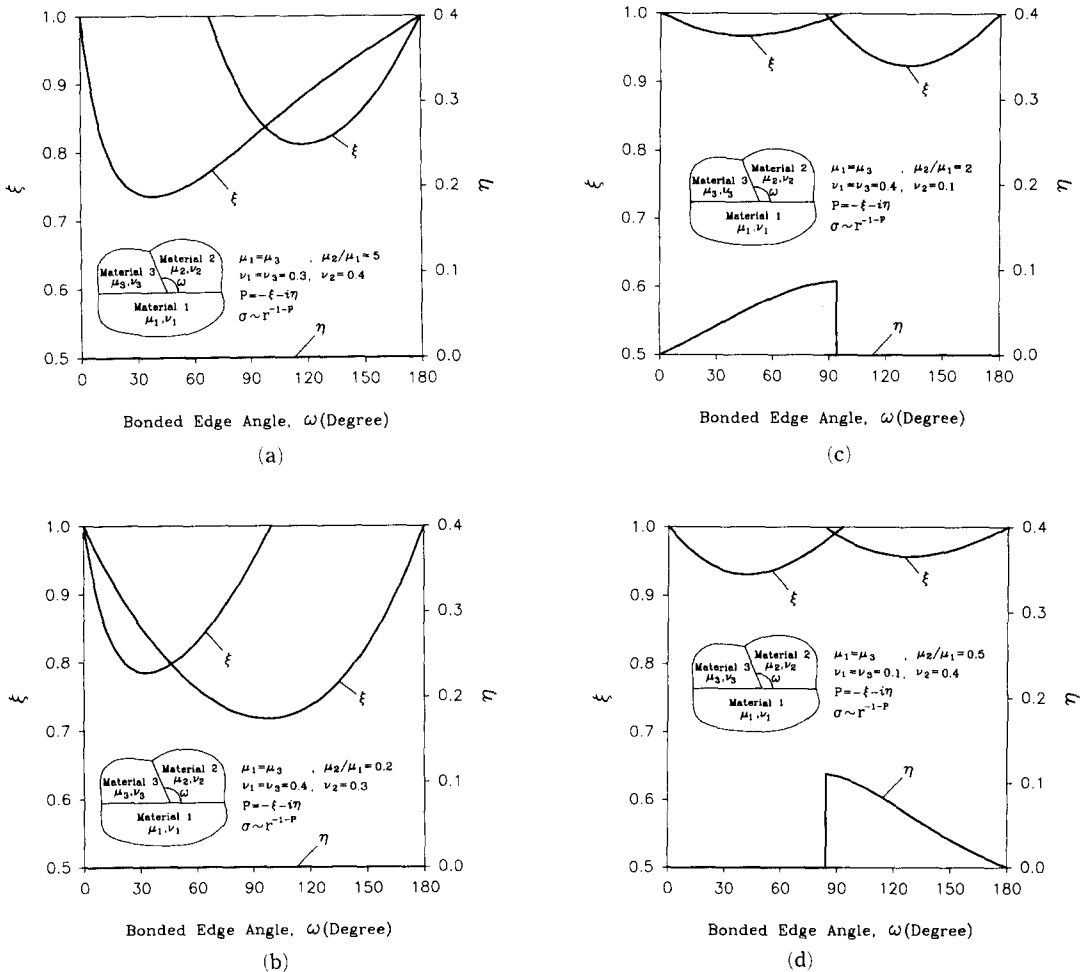


Fig. 3 Roots of $\Delta(p) = 0$ [Eq.(18)] at bonded edge corner for the plane strain problem

$$\beta = \frac{\mu_1(m_2 - 2) - \mu_2(m_1 - 2)}{\mu_1 m_2 + \mu_2 m_1} \quad (21)$$

Fig. 3은 평면변형일때 몇가지 주어진 재료물성치에서 접합각 ω 의 변화에 따라 $-1 < Re(p) < 0$ 에 존재하는 특성방정식 (18)의 근 $p = -\xi - i\eta$ 을 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 $\mu_1 = \mu_3, \mu_2 = 5\mu_1, \nu_1 = \nu_3 = 0.3, \nu_2 = 0.4$ 일 때, 즉 $\alpha = -0.7073, \beta = -0.2195$ 인 경우의 근을 접합각에 따라 나타낸 것이다. 각이 작은 경우에는 1개 실근이 존재하나, 점차 각이 커짐에 따라 두개의 실근이 있음을 알 수 있다. 두개의 근은 모두 응력특이성을 나타내지만, 응력의 특이치에 보다 지배적인 영향을 미치는 근은 ξ 값이 작은 값을 식 (19a)에서 알 수 있다. 이와같은 문제의 해는 기존 연구자들^(9,10)의 결과와 일치됨을 보이고 있다. Fig. 3(a)에서 보면 응력의 특이차수는 대략 접합각 $\omega = 30^\circ$ 부근이 최대임을 알 수 있고 $\omega = 90^\circ$ 근방에서 국부적인 최소 특이차수가 존재함을 알 수 있다. 여기서, 응력특이차수는 식 (19a)의 λ 를 말한다.

한편 Fig. 3(b)는 $\alpha = 0.7073, \beta = 0.2195$ 인 경우의 근을 접합각에 따라 나타낸 것이다. 이 경우는 Fig. 3(a)의 “재료 1” 및 “재료 3”을 “재료 2”와 서로 바꾼 경우로서 접합각이 작을 때 2개의 실근이, 그리고 접합각이 클 때는 1개의 실근이 존재함을 알 수 있다. 또한 응력특이차수는 대략 접합각 $\omega = 40^\circ$ 부근이 국부적인 최소값을 지니고, $\omega = 90^\circ$ 근방에서 최대값을 지님을 알 수 있다.

Fig. 3(c)는 $\mu_1 = \mu_3, \mu_2 = 2\mu_1, \nu_1 = \nu_3 = 0.4, \nu_2 = 0.1$ 즉 $\alpha = -0.1428, \beta = 0.0952$ 인 경우로 접합각이 작을 때에는 복소근이 존재하고 한편 접합각이 증가함에 따라 실근이 존재하고 있음을 보인다. 특히 $\omega = 90^\circ$ 부근의 작은 영역에서는 복소수근과 실근이 공존하고 있다. 응력특이차수의 국부적 최소치는 $\omega = 90^\circ$ 부근에서 존재함을 알 수 있다. 이 결과 역시 기존 연구자의 결과와 일치됨을 보인다. Fig. 3(d)는 $\alpha = 0.1428, \beta = -0.0952$ 인 경우로서 접합각이 증가함에 따라 한개 실근에서 복소수근으로 변함을 알 수 있고, 이 경우 역시 $\omega = 90^\circ$ 부근에서 응력특이차수의 국부적 최소치가 존재함을 보인다.

지금까지 Fig. 3(a)~(d) 해석결과는 기존 연구자들의 결과^(9,10)와 일치됨을 보이는 바, 식 (16)에는 오류가 없음을 알 수 있고, 또한 Ward방법은 식 (18)의 특성방정식 근을 구하는 유용한 방법임을 알 수 있다.

6. 응력특이차수의 계산결과 및 토의

Fig. 1에서 보는 바와 같이 전자부품 패키지 내부에 두재료 혹은 세 재료가 임의의 접합각을 이루며 완전히 접합된 접합점 부근의 응력특이차수를 식(18)을 사용하여 수치적으로 알아본다. Table 1은 비교적 값이 싸고 많이 사용되는 플라스틱 패키지의 대표적인 부품재료들의 재료상수를 나타낸 것이다.⁽¹⁴⁾

Figs. 4~6은 Table 1에 보인 재료들을 적절히 조합하여 Fig. 1과 같이 반도체 패키징을 할 때, 응력특이성을 보이는 재료들의 접합점인 A, B, C 부분의 응력특이차수를 각각 알아보기 위하여 특성방정식 (18)의 근 p 를 모두 도기한 것이다. 이때 응력의 특이성을 보이는 식 (18)의 근 p 의 범위는 식 (19a) 및 식 (20)에서 보는 바와같이 $-1 < Re(p) < 0$ 에 해당한다. 이중에서 Fig. 4는 Fig. 1의 A부분, 즉 L/F와 EMC 및 칩의 세재료의 접합점에 대하여 $-1 < Re(p) < 0$ 범위의 근 p 를 접합각 ω 에 따라 모두 나타낸 것이다. Table 1에 보인 재료를 선택할 경우에 4가지의 조합이 있게 되는 바, Fig. 4(a)~(d)는 이들 4가지 조합에 따른 근을 각각 도기한 것이다. Fig. 4(a)는 L/F(Cu)와 EMC(plastic 1) 및 칩을 조합할 때 근 p 를 나타낸 것으로, 접합각 ω 의 값에 따라 두개의 실근, 복소수근, 한개의 실근이 존재함을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 다른 조합에서도 같은 경향임을 Fig. 4(b)~(d)에서 알 수 있다. 또한 Fig. 4(a)에서 접합각 $\omega = 90^\circ$ 부근에서 응력특이차수가 가장 큼을 알 수 있는, $\omega = 90^\circ$ 부근에서 균열발생이 가장 용이하다는 결과를 얻을 수 있다. 여기서 응력의 특이차수 λ 는 식 (19a)에서 보는 바와 같이 $\lambda = 1 + p$ 를 말한다. 나머지 세 경우 조합 역시 정도의 차이는 있지만 대략 접합각 $\omega = 90^\circ$ 를 전후하여 응력특이차수가 가장 큼을 알 수 있다. 많이 사용되는 표면실장형 플라스틱패키지의 대표적인 형상인 PLCC(plastic leaded chip carrier)에서는 가공의 편의상 접합각 $\omega = 90^\circ$ 을 사용하고 있다. 그러나 이와 같은 결과를 볼 때 가공이 가능하다면 접합각의 크기를 개선함으로써 균열발생을 보다 줄일 수 있음을 알 수 있다. 가공의 편의상 접합각 $\omega = 90^\circ$ 을 고수한다면, $\omega = 90^\circ$ 에 대한 응력특이차수는 Fig. 4(a)~(d)에서 보는 바와 같이 네가지 조합중에서 Fig. 4(b)인 L/F(Cu)와 EMC(plastic 2) 및

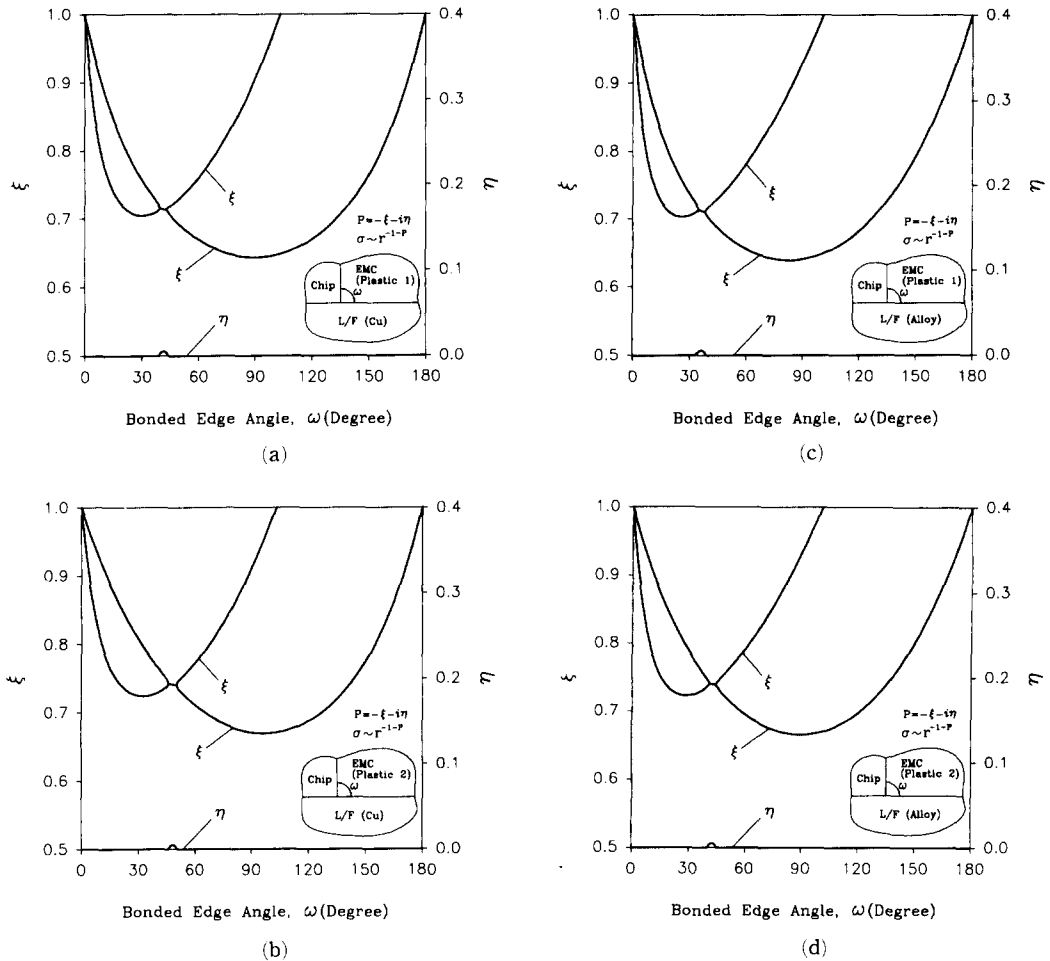


Fig. 4 Roots of $\Delta(p)=0$ [Eq. (18)] as a various edge angle ω for the plane strain condition at L/F -EMC-Chip bonded edge corner, where material properties are shown in Table 1

칩의 조합이 제일 작음을 알 수 있는 바, 이와 같은 재료의 조합이 보다 바람직함을 보인다.

Table 1 Material Properties

		Elastic constant E(GPa)	Poisson's ratio ν
L/F	Cu	119.3	0.34
	Alloy	167	0.29
EMC	Plastic 1	12.753	0.25
	Plastic 2	16.3	0.3
Chip		165.5	0.25

Fig. 5(a)~(d)는 L/F와 EMC의 접합점인 Fig. 1의 B부분에 대한 특성방정식 (18)의 근을 나타낸 것으로, 실근들만 존재하고 있다. 이 경우는 Fig. 4의 경우와는 상반되게 접합각 $\omega=90^\circ$ 부근의 응력특이차수가 국부적인 최소값을 보이는 바, 접합각 $\omega=90^\circ$ 정도로 할 때 균열발생 가능성을 줄일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 5(a)~(d)를 비교할 때 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 L/F(Cu)와 EMC(plastic 2)의 조합이 보다 바람직함을 보인다.

Fig. 6(a)~(b)는 Fig. 1의 C부분인 칩과 EMC 접합점 부근에 대한 식 (18)의 근을 나타낸 것이며 실근들만 존재하고 있다. 이 경우 Fig. 5와 같이 접합각 $\omega=90^\circ$ 부근의 응력특이차수가 국부적인

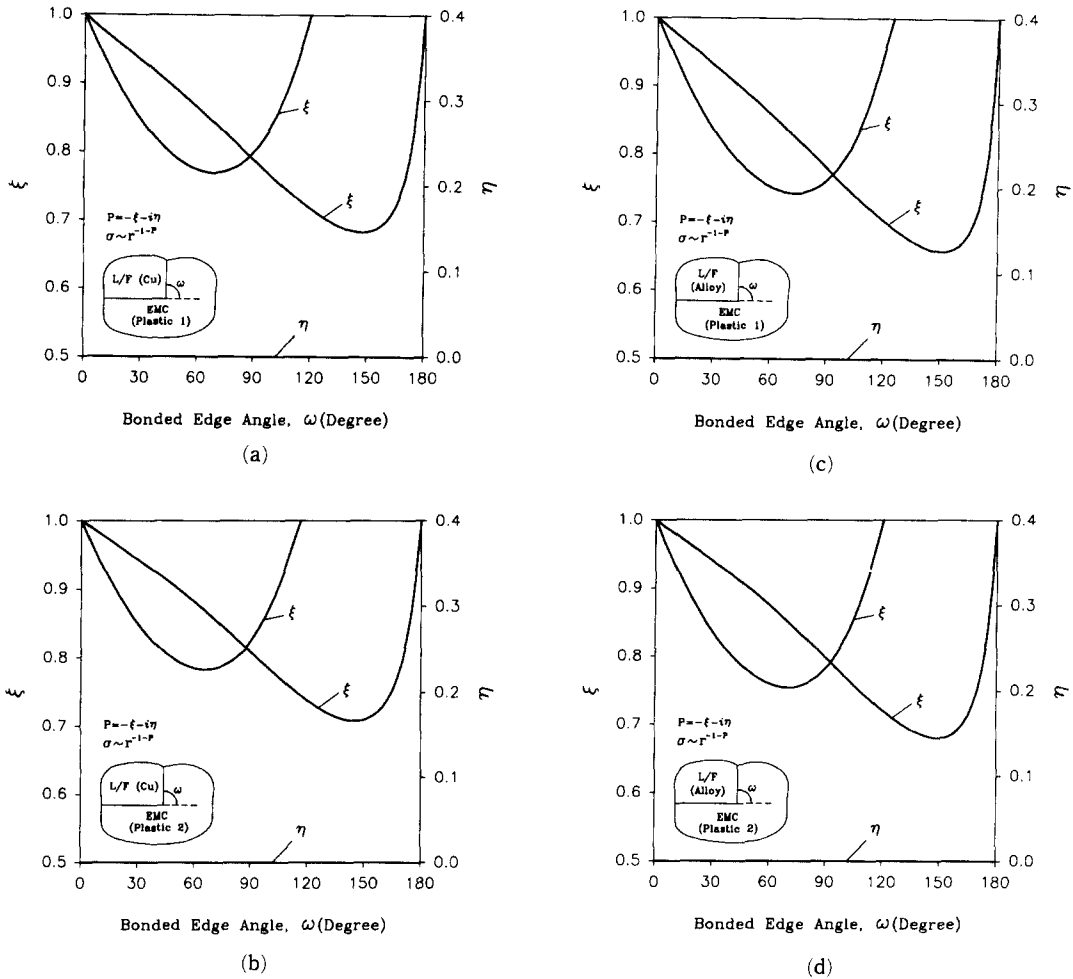


Fig. 5 Roots of $\Delta(p)=0$ [Eq.(18)] as a various edge angle ω for the plane strain condition at L/F-EMC bonded edge corner, where material properties are shown in table 1

최소값을 보이고 있는 바, 접합각 $\omega=90^\circ$ 으로 할 때 균열발생 가능성을 줄일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 6(a), (b)를 비교할 때 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같은 칩과 EMC(plastic 2)의 조합이 보다 바람직함을 보인다.

지금까지 Table 1에 주어진 재료를 조합하였을 때 Fig. 1에서 보는 바와 같은 A, B, C 세종류의 접합점 부근의 응력특이치수치를 알아 보았는 바, Figs. 4~6의 결과를 종합하여 바람직한 재료의 조합과 접합각 및 응력특이치수를 도표로 나타내면 Table 2와 같다. 먼저 Fig. 1의 A, B, C 세 접합점의 응력특이치수를 줄일 수 있는 재료의 조합은 L/F(Cu)와 EMC(plastic 2) 및 칩의 조합임을 알

수 있었다. 이와 같은 재료의 조합으로 패키징할 때, Fig. 5(b) 및 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 B 접합점과 C접합점의 접합각은 $\omega=90^\circ$ 이 적절함을 알 수 있다. 한편 Fig. 4(b)로부터 A접합점의 접합각을 보면, 접합각 $\omega=90^\circ$ 부근에서 응력특이치수가 제일 큰 반면에 $\omega=45^\circ$ 부근에서 국부적인 최소를 보인다.

많이 사용되는 PLCC형 플라스틱패키지에서는 가공의 편의상 접합각을 $\omega=90^\circ$ 으로 가공하고 있는 바, Table 2에서 보는 바와 같이 $\omega=90^\circ$ 으로 할 때 세 접합점에 대한 응력특이치수를 비교하면 A접합점의 응력특이치수가 $\lambda=0.3293$ 으로서 최대가 되는 바 균열발생 가능성이 가장 높음을 알 수

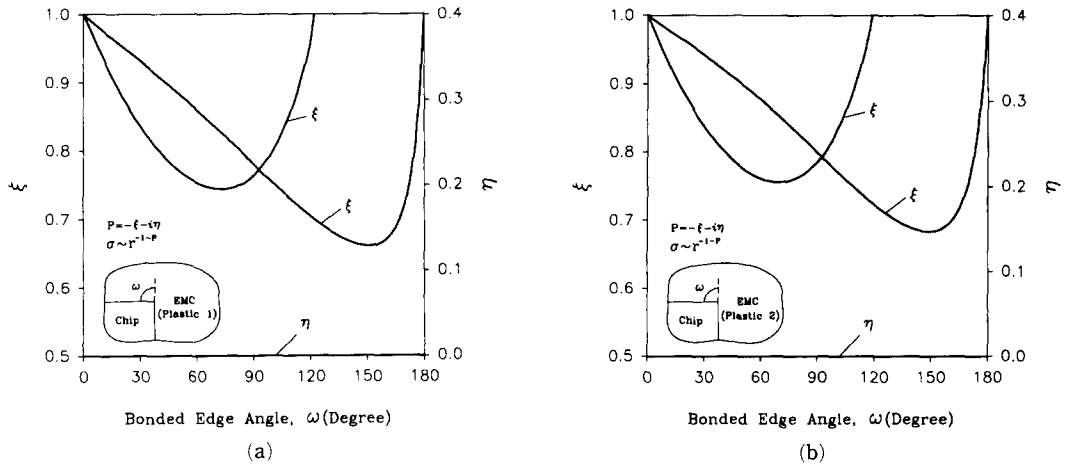


Fig. 6 Roots of $\Delta(p)=0$ [Eq.(18)] as a various edge angle ω for the plane strain condition at EMC - chip bonded edge corner, where material properties are shown in table 1

Table 2 Recommended material combination and order of stress singularity at bonded edges (A, B and C in Fig. 1) by using material properties in table 1

Recommend material combination	Bonded edge corner	Bonded edge angle, ω	Order of stress singularity, $\lambda (=1+p)$	Recommend edge angle ω
L/F (Cu) EMC (plastic 2) chip	B : L/F(Cu)/EMC(plastic 2)	90°	0.1915	90°
	C : EMC(plastic 2)/chip	90°	0.2150	90°
	A : L/F(Cu) /EMC(plastic 2)/chip	90°	0.3293	45°
		45°	0.2626	

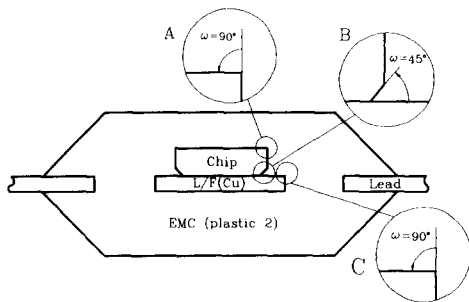


Fig. 7 Recommended material combinations and geometry of bonded edges to reduce the order of stress singularity based on the material properties in table 1

있다. 만일 접합각을 45°로 가공이 가능하다면, B 및 C점의 각은 $\omega=90^\circ$ 으로 유지하고 단지 A점의

접합각을 $\omega=45^\circ$ 으로 가공함으로써 응력특이차수를 $\lambda=0.2626$ 로 낮출 수 있다. 이와 같은 결과를 기초로하여 응력특이차수를 낮출 수 있는 적절한 패키지를 설계하면 Fig. 7과 같다. 즉 Table 2에 보인 재료조합을 택하고 칩을 45°로 모따기한다면 균열발생을 줄일 수 있는 보다 바람직한 패키징이 되리라 사료된다.

7. 결 론

본 연구에서는 전자부품 패키지내에 존재하는 접합부분의 응력특이성을 검토하기 위하여, 상이한 세 등방성 재료가 완전히 접합된 접합점부근에 대한 응력특이차수를 정량적으로 구하는 방법을 연구 하였다. 해석방법은 Mellin 적분변환방법을 도입하

여 특성방정식을 얻고, 특성방정식의 근을 Ward 방법에 의하여 수치적으로 계산하고 응력특이차수를 구하였다. 기존 연구자들이 해석한 특정한 경우의 결과와 비교하였는 바 잘 일치함을 알 수 있었다. 이를 두재료 및 세재료의 접합점이 존재하는 전자부품 패키지문제에 적용하였다.

비교적 값이 싸고 많이 사용되는 플라스틱패키지의 대표적인 부품재료들에 대하여 접합점 주변의 응력특이차수를 정량적으로 구함으로써, 응력특이차수를 줄일 수 있는 재료의 선정과 접합각의 크기를 결정할 수 있었다. 특히 많이 사용되는 표면실장형 플라스틱패키지의 대표적인 형상인 PLCC에서는 가공의 편의상 두재료 및 세재료의 접합점 모두 접합각 $\omega=90^\circ$ 로 가공하고 있지만, 응력특이차수를 줄일 수 있는 바람직한 칩/리드프레임/수지의 세 재료 접합점의 접합각은 45° 임을 알 수 있었다. 본 연구는 전자부품 패키지에 대한 재료 물성치가 주어질 때, 보다 응력특이차수를 줄일 수 있는 접합재료의 선정뿐만 아니라 접합각의 결정 및 이때의 응력특이차수를 용이하게 결정할 수 있는 바, 이 결과는 패키지의 기본적 설계에 직접 응용될 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 1994년도 한국과학재단 특정연구과제(과제번호: 94-0200-02-02-3) 연구비지원에 의하여 수행된 것으로, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Manzione, L. T., 1990, *Plastic Packaging of Microelectronic Devices*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- (2) Hattori, T., Sakata, S. and Murakami, S., 1989, "A Stress Singularity Parameter Approach for Evaluating the Interfacial Reliability of Plastic Encapsulated LSI Devices," *ASME J. Electronic Packaging*, Vol. 111, pp. 243~248.
- (3) Williams, M. L., 1959, "The Stresses Around a Fault or Crack in Dissimilar Media," *Bull. Seis. mol. Soc. Am.*, Vol. 49, pp. 199~204.
- (4) Bogy, D. B., 1968, "Edge Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 35, pp. 460~466.
- (5) Bogy, D. B., 1970, "On the Problem of Edge Bonded Elastic Quarter Planes Loaded at the Boundary," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 6, pp. 1287~1313.
- (6) Bogy, D. B., 1971, "Two Edge Bonded Elastic Wedges of Different Materials and Wedge Angles under Surface Traction," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 38, pp. 377~386.
- (7) Fenner, D. N., 1976, "Stress Singularities in Composite Materials with an Arbitrarily Oriented Crack Meeting an Interface," *Int. J. of Fract.*, Vol. 12, pp. 705~721.
- (8) Hein, V. L. and Erdogan, F., 1971, "Stress Singularities in a Two Material Wedge," *Int. Fract. Mech.*, Vol. 7, pp. 317~330.
- (9) Bogy, D. B. and Wang, K. C., 1971, "Stress Singularities at Interface Corners in Bonded Dissimilar Isotropic Elastic Materials," *Int. J. Solids Structures*, Vol. 7, pp. 993~1005.
- (10) Chen, D. H. and Nishitani, H., 1991, "Stress Fields Near the Corner of Jointed Dissimilar Materials," *JSME Series A (in Japanese)*, Vol. 57, pp. 366~372.
- (11) Theocaris, P. S., 1974, "The Order of Singularity at a Multi-Wedge Corners of a Composite Plate," *Int. J. Engng Sci.*, Vol. 12, pp. 107~120.
- (12) Carnahan, B., Luther H. A. and Wilkes, J. O., 1969, *Applied Numerical Methods*, John Wiley and Sons Inc., New York.
- (13) Dundurs, J., 1969, Discussion of [4], *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 36, pp. 650~652.
- (14) 박상선, 반응운, 엄윤용, 1994, "반도체패키지내에서의 층간박리 및 패키지균열에 대한 파괴역학적 연구(1)," 대한기계학회논문집, 제18권 제8호, pp. 2139~2157.