

칩과 리드프레임의 접착과정에서 발생하는 잔류 응력 해석

Analysis of Residual Stresses Induced during Adhesion Process of Chip and Leadframe

이 상 순*

Lee, Sang-Soon

요 지

이 논문에서는, 반도체 칩과 리드프레임을 결합하는 과정에서 점탄성 접착제층에 발생하는 잔류응력 문제를 다루고 있다. 접착제층은 "열유동단순" 거동을 한다고 가정하였다. 접착제층에서의 응력들은 경계요소법을 사용하여 조사하였다. 매우 큰 응력 구배가 계면 모서리에서 발생하는데, 그러한 응력들은 국부 항복을 일으키거나, 칩과 리드프레임의 박리를 야기시킬 수 있음을 보여주고 있다.

핵심용어 : 점탄성 접착제층, 칩, 리드프레임, 접착공정, 경계요소법, 응력 특이

Abstract

This paper deals with residual stresses induced at the viscoelastic adhesive layer between the semiconductor chip and the leadframe during adhesion process. The adhesive layer has been assumed to be "thermorheologically simple". The time-domain boundary element method(BEM) has been employed to investigate the behavior of interface stresses. Numerical results show that very large stress gradients are present at the interface corner and such singularity might lead to local yielding or edge delamination.

Keywords : viscoelastic adhesive layer, chip, leadframe, adhesion process, boundary element method, stress singularity

1. 서 론

서로 다른 기계적 및 열적 성질을 지닌 재료들로 구성된 반도체 칩 패키지는 칩의 기능 수행과정에서나 패키지 제조 공정에서 큰 온도변화를 겪게 된다. 이때 각 재료들의 열 팽창계수의 차이에 의해 잔류 열응력이 발생하게 되는데, 이러한 열응력은 각 재료들의 계면에서 복잡한 응력 상태를 야기시키고 패키지의 파손을 발생시키기도 한다.^{1)~4)} 최근 많은

전자기기들이 경박 단순화 되는 추세에 따라 반도체 패키지의 두께가 얇아지고 있는데, 위와 같은 현상은 패키지의 안정성에 대한 문제를 대두시키고 있다. 즉, 칩 패키지의 안정성, 패키지 된 칩의 작동 시 내부에서 발생하는 열응력에 대한 안정성, 그리고 환경적 영향에 의한 패키지의 신뢰성 등이 문제가 되고 있다.

Fig. 1은 반도체 패키지의 형상을 나타낸다. 패키지 내에서 파손이 발생하는 부분은 칩과 EMC(epoxy

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부, 조교수

• 이 논문에 대한 토론을 2000년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

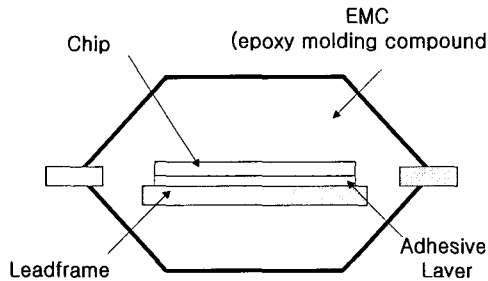


Fig. 1 Semiconductor plastic packaging configuration

molding compound)계면, 칩과 리드프레임 계면, 그리고 리드프레임과 EMC계면이다.⁵⁾ 이 중에서 리드프레임과 EMC계면에서 가장 많은 문제가 발생하기 때문에 이 부분에 대해 많은 연구가 이루어 졌다. 최근에는, 칩과 리드프레임 사이에서도 열 팽창계수의 차이로 인해 균열의 발생가능성이 있다는 연구 결과가 발표되고 있는데, 이러한 균열은 전자 소자의 전체적인 불량률을 초래하기 때문에 칩과 리드프레임의 계면에서의 문제가 관심의 대상이 되고 있다.^{6),7)}

칩과 리드프레임의 계면 박리현상을 예방하기 위해서는, 이 부분에서의 신뢰성 있는 접착 방법이 요구된다. 최근들어 많이 사용되고 있는 접착재료로는 고분자 물질인 에폭시나 폴리이미드가 있다.^{8)~10)} 에폭시의 경우는 130℃ 이상의 온도에서 여러시간 경화를 시켜 접착 시킨 후 상온으로 냉각시키며, 폴리이미드의 경우는 300℃의 온도에서 접착을 시킨 후 상온으로 냉각시킨다. 이러한 고온의 접착 온도에서 상온으로 냉각시킬때 접착제 또는 접착 필름과 주변 재료와의 열 팽창계수의 차이로 인해 잔류 응력이 발생하게 되는데, 이러한 응력은 칩에 직접적으로 영향을 미칠 수도 있으며, 칩과 리드프레임에서 균열을 발생시킬 수도 있다. 따라서 접착공정에서 발생하는 잔류 응력의 발생과정을 정확히 이해하는 것이 칩과 리드프레임의 계면의 신뢰성을 향상시키기 위한 전제조건이라고 할 수 있다.

접착제로 사용하고 있는 폴리이미드나 에폭시같은 고분자 재료는 높은 접착온도에서 점탄성 거동을 한다. 이러한 접착제가 상온으로 냉각될때 발생하는 잔류 열응력을 계산하기 위해서는 점탄성 해석을 수행해야만 한다.¹¹⁾ 이러한 해석을 통해서 칩과 리드프레임 계면에서 발생하는 잔류 응력의 크기와 그

영향을 예측할 수 있고, 신뢰성을 향상시키는 접착공정을 제시할 수 있다. 나아가 이러한 연구결과는 반도체 패키지의 전체 안정성을 향상시키는 공정을 연구하는데 기초자료가 될 수 있다.

점탄성 접착제층에 나타나는 계면 응력에 관한 연구는 활발하게 진행되어 왔다. Weitsman¹²⁾은 에폭시 접착제가 주변으로부터 수분을 흡수하게 될 때 발생하는 계면 응력을 해석하였다. Delale과 Erdogan¹³⁾은 점탄성 재료로 결합된 랩 조인트에서 발생하는 응력 분포에 대한 해석을 시도하였다. 이들의 해석 결과에 의하면, 계면 응력들은 계면 모서리에서 매우 커지고, 점탄성의 영향으로 시간이 경과함에 따라 응력들의 재분포가 이루어 졌다. 그러나 이들이 계산 과정에서 사용한 가정들의 단순성 때문에, 계면 모서리에서 나타나는 응력 특이성을 설명하는 특이차수나 자유 모서리 응력확대계수등은 설명되지 못했다. 최근에 Lee¹⁴⁾는 횡방향 변형률을 받고 있는 점탄성 재료의 계면 모서리에서 나타나는 응력특이성을 경계요소법과 라플라스 변형을 결합하여 수치적으로 구하는 과정을 제시하였다.

이 논문에서는, 칩과 리드프레임을 접착하는 공정에서 상온으로 냉각될때 고분자 접착제층에 발생하는 잔류 열응력 특이성을 조사하는데 있다. 접착제가 점탄성 거동을 할 때의 강성은, 결합시키고 있는 칩이나 리드프레임에 비해 매우 작으므로, 칩과 리드프레임을 강체(rigid body)로 취급하였다. 계면 응력들의 분포에 대한 조사는 경계요소법을 적용하여 수행되었다.

2. 계면 응력의 경계요소 해석

Fig. 2(a)는 강체들(칩과 리드프레임)을 결합하고 있는 점탄성 접착제층을 나타내는데, 접착제층에는 주변으로부터 온도 변화가 작용하고 있다. 온도 이외의 다른 외부 하중은 없는 상태이며, 접착제층의 길이는 $2L$ 이고 두께는 $2h$ 이다. 문제의 대칭성을 이용하여 접착제층의 4분의 1만 모델링 하면 된다. Fig. 2(b)는 점탄성 접착제층에 나타나는 계면 응력을 조사하기 위한 2차원 경계요소 모델을 나타낸다. 여기에서 접착제층은 평면 변형률 상태에 있다고 가정한다. 수치해석은 $L/h=25$ 에 대하여 수행한다.

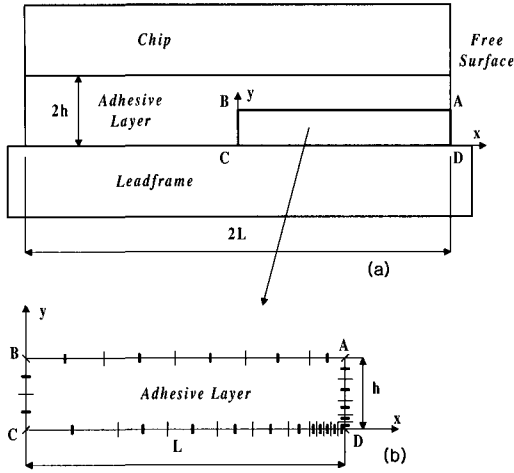


Fig. 2 Boundary element analysis model

Fig. 2(b)의 해석모델에 대한 외부 경계 조건은 다음과 같이 주어진다. 즉,

$$\begin{aligned}
 &D-A \text{에 대해서, } \sigma_{xx}=0, \quad \tau_{xy}=0 \\
 &A-B \text{에 대해서, } \int_L \sigma_{yy}dL=0, \quad \tau_{xy}=0, \quad u_y= c_o \\
 &B-C \text{에 대해서, } \tau_{xy}=0, \quad u_x=0 \\
 &C-D \text{에 대해서, } u_x=0, \quad u_y=0
 \end{aligned} \tag{1}$$

이다. 식(1)에서, 선 A-B에서의 적분식은 그 선 위에서의 표면력(traction)의 합이 영(0)인 것을 나타내고, L은 선 A-B의 길이, 그리고, c_o는 균일한 미지의 변위 값을 나타낸다.

전자 패키지에서 사용되는 고분자 접착제층의 두께는 대체로 50μm를 넘지 않는다. 이렇게 얇은 층에 온도 변화가 발생할 때 접착제 내부에서의 온도 분포는 균일하다고 가정할 수 있다.^{1),2)} 즉, T(x, t) = T(t)로 가정한다. 또한, 접착제층에서의 온도변화는 T(t) = ΔTH(t)로 가정한다. 여기서, ΔT는 고온의 접착온도와 상온과의 온도차의 크기를 나타내고, H(t)는 Heaviside unit step함수를 가리킨다. 해석을 효율적으로 수행하기 위해서 다음과 같은 가정들이 추가로 사용되었다.

- 1) 접착제와 칩 또는 리드프레임과의 결합은 완벽하다.
- 2) 접착제의 인장 거동은 점탄성이나, 체적계수

는 탄성이다.

3) 접착제는 열유동 단순거동(thermorheologically simple)을 하며, 열 팽창계수는 일정하다.

접착제층내의 균일한 온도 변화 ΔTH(t)는 γΔTn_jH(t)에 해당하는 표면력의 증가와 동등한데, γ는 다음과 같이 주어진다.¹⁵⁾

$$\gamma = 3K\alpha \tag{2}$$

여기에서, K는 체적탄성계수를 나타내고, n_j는 경계면 위에서 단위 외향 법선 벡터의 성분들을 가리키며, α는 점탄성 접착제층의 열 팽창계수를 나타낸다.

열 유동 단순거동을 하는 점탄성 접착제층에 대한 경계 적분 방정식은 실제 시간 t보다는, 환산 시간(reduced time) ξ에 대해서 기술하는게 편리하다. 어떤 체적력(body forces)도 존재하지 않는다는 가정아래, Fig. 2(b)의 해석 모델에 대한 경계 적분방정식은 다음과 같이 주어진다.¹⁵⁾

$$\begin{aligned}
 &c_{ij}(\mathbf{y}) u_j(\mathbf{y}, \xi) \\
 &+ \int_S [u_j(\mathbf{y}', \xi) T_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) \\
 &+ \int_{0+}^{\xi} u_j(\mathbf{y}', \xi - \xi') \frac{\partial T_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi'] dS(\mathbf{y}') \\
 &= \int_S [t_j(\mathbf{y}', \xi) U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) \\
 &+ \int_{0+}^{\xi} t_j(\mathbf{y}', \xi - \xi') \frac{\partial U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi'] dS(\mathbf{y}') \\
 &= \int_S [\gamma \Delta T(\xi) n_j(\mathbf{y}') U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) \\
 &+ \int_{0+}^{\xi} \gamma \Delta T(\xi - \xi') n_j(\mathbf{y}') \frac{\partial U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi'] dS(\mathbf{y}')
 \end{aligned} \tag{3}$$

식(3)에서, u_j와 t_j는 각각 변위와 표면력 벡터를 나타내고, S는 해석 모델의 경계면을 가리킨다. c_{ij}(y)는 경계면의 기하학적 조건에 의해 결정되는 항이고, U_{ij}(y, y'; ξ)와 T_{ij}(y, y'; ξ)는 환산 시간 영역에서의 점탄성 기본해이다. 이러한 기본해는 환산시간 함수의 형태로 탄성-점탄성 대응 원리로부터 구해질 수 있다.

환산 시간 ξ는 다음과 같이 주어진다.

$$\xi = \int_0^t \frac{1}{a_T(\rho)} d\rho \quad (4)$$

식(4)에서, a_T 는 "전환함수" (shift function)를 나타내는데, 실험에 의해 결정되는 재료의 물성이다.

식(3)은 수치적으로 처리될 수 있는데, 시간적분에 대해서는 변형된 심프슨 공식을 사용하고, 경계면에 대해서는 이차 선 요소(quadratic line elements)를 사용하면 정확하고 효율적인 계산이 수행된다. 식(3)을 정리하면 다음과 같은 행렬방정식이 얻어진다.

$$[H]\{u\} = [G]\{t\} + \{B_T + R\} \quad (5)$$

식(5)에서, H 와 G 는 영향 행렬을 나타내고, R 은 점탄성 이력을 가리키며, B_T 는 온도의 영향을 나타내는 항이다.

식(5)에 경계조건 식(1)을 적용하여 풀면, Fig. 2(b)의 해석 모델의 경계면에서의 변위와 표면력 또는 응력들이 얻어진다. 얻어진 해를 실제 시간으로 전환하면 최종 해가 얻어진다.

실제 접착제는 복잡한 점탄성 거동을 나타내는데, 이 논문에서는 접착과정에서 발생하는 접착계면의 점탄성 특성을 조사하기 위해서 다음과 같은 간단한 점탄성 모델을 선택하였다.

$$\begin{aligned} E(t) &= E_0 + E_1 e^{-\frac{t}{t^*}} \\ K(t) &= K_0 \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서, $E(t)$ 는 인장 이완계수를 나타내고, $K(t)$ 는 체적 이완계수를 가리키며, E_0 , E_1 , 그리고 K_0 는 양수를 나타내고, t^* 는 이완 시간이다. 이 논문의 수치해석 과정에는 다음과 같은 수치 값들이 사용되었다.

$$\begin{aligned} E_0 &= 3.0 \times 10^3 \text{ MPa} ; E_1 = 0.7 \times 10^3 \text{ MPa} \\ K_0 &= 3.1 \times 10^3 \text{ MPa} ; a_T = 1 \\ \alpha &= 3.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C} ; t^* = 10^2 \text{ min.} \\ \Delta T &= 277 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (7)$$

Fig. 2(b)는 23개의 이차 선 요소로 이루어진 경계요소 해석 모델이다. 큰 응력 구배가 나타나

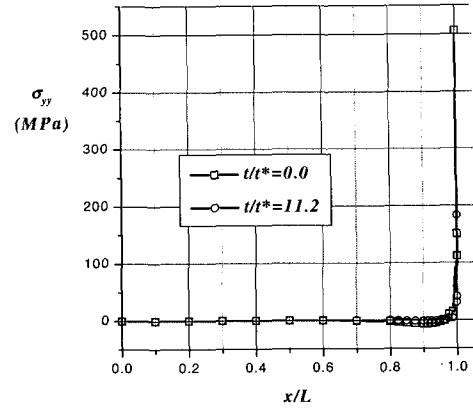


Fig. 3 Distribution of interface normal stresses at times $t/t^*=0$ and 11.2

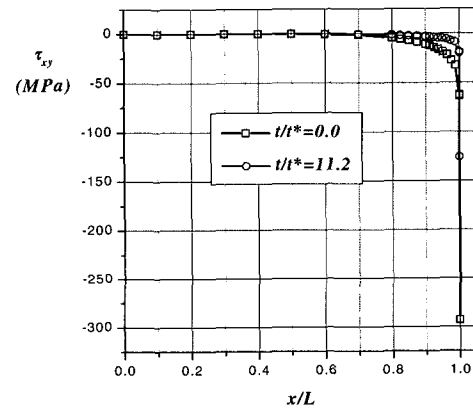


Fig. 4 Distribution of interface shear stresses at times $t/t^*=0$ and 11.2

계면 모서리 근처에는 세밀한 요소들이 사용되었다. Fig. 3과 Fig. 4에는 경계요소 해석 결과로 얻어진 수직응력 σ_{yy} 와 전단 응력 τ_{xy} 가 무차원 시간 $t/t^*=0$ 과 11.2에 대해서 나타나 있다. 응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 큰 변화를 보이는데, 이러한 응력 변화는 계면 모서리 부근에 집중되어 있다. 이러한 응력 구배는 시간 경과에 따라 상당히 이완되고 있는데, 여전히 큰 응력 구배가 이완에 관계없이 계면 모서리 근처에 나타나고 있다. 이러한 결과를 볼 때, 점탄성 접착제로 결합되어 있는 칩과 리드프레임이 높은 접착 온도에서 상온으로 냉각될 때 계면 모서리에는 특히 응력들이 나타나며, 점탄성으로 인한 이완에도 불구하고 응력특이성들은 사라지지 않

고 여전히 존재한다. 이러한 응력 특이성으로 인해, 계면 모서리의 접착 결합이 약할 경우에는 모서리 균열이나 박리현상이 쉽게 발생할 수 있다. 계면 모서리에서 발생하는 응력 특이성에 대한 특성을 이해하기 위해서는 특이 차수 (order of singularity)와 자유 모서리 응력확대계수 (free edge stress intensity factor)에 대한 조사가 필요해 진다.

3. 특이 차수와 응력 확대계수

Fig. 5는 점탄성 접착제층이 강체에 결합된 계면 모서리 부근을 보여주고 있다. 그림에서 자유 표면 (free surface)에는 아무런 표면력이 작용하고 있지 않고, 주변으로부터 온도 변화 ΔT 가 접착제층에 작용하는 유일한 변화이다. 평면 변형을 상태에서, 특이 차수는 다음과 같은 응력 함수식으로부터 계산될 수 있다. 즉,

$$\nabla^4 \phi(r, \theta, \xi) = 0 \tag{8}$$

식(8)를 전개하는데 필요한 경계조건으로는, $\theta = \pi/2$ 에서 수직 응력 $\sigma_{\theta\theta}$ 와 전단 응력 $\tau_{r\theta}$ 가 영(0)이고, $\theta = 0$ 에서 모든 변위 성분들이 영(0)이다. 식(8)에서 ξ 는 환산 시간을 나타낸다.

식(8)은 환산 시간 ξ 에 대한 라플라스 변형을 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^4 \phi^*(r, \theta, s) = 0 \tag{9}$$

식(9)에서 ϕ^* 는 ϕ 의 ξ 에 대한 라플라스 변형을 나타내고, s 는 변형 인자를 가리킨다.

Williams¹⁶⁾가 제안한 방법을 적용하여, 다음과 같은 응력 함수를 가정한다.

$$\phi^*(r, \theta, s) = r^{\lambda+1} f(\theta, s) \tag{10}$$

$r > 0, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$

식(10)의 r 와 θ 는 Fig. 5에 정의되어 있는데, r 은 계면 모서리로부터의 거리를 나타내고, θ 는 r 과 수평축(x축)이 이루는 각을 나타낸다. λ 는 미지 수로써 실수나 허수일 수 있다. $f(\theta, s)$ 는 경계조건

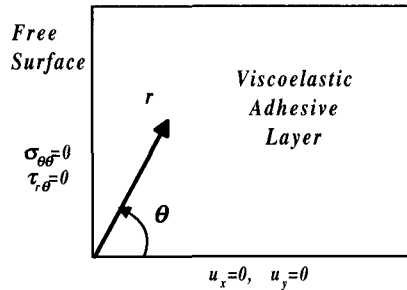


Fig. 5 Region near interface corner of the viscoelastic adhesive layer

을 적용하여 구해지는 함수이다. 자세한 설명은 참고 문헌¹⁶⁾에 설명되어 있다. 식(10)으로 주어진 응력 함수를 사용하면, 다음과 같은 특성 방정식이 구해진다.

$$\frac{2\lambda^2}{s} - 8s [\nu^*(s)]^2 + 12\nu^*(s) - \frac{5}{s} - \left[\frac{3}{s} - 4\nu^*(s) \right] \cos(\lambda\pi) = 0 \tag{11}$$

식(11)을 계산하면 λ 가 얻어지는데, $\nu^*(s)$ 는 점탄성 푸아송 비 $\nu(\xi)$ 에 대한 라플라스 변형을 나타낸다.

식(11)은 라플라스 변형 공간에서의 특성 방정식이므로, 시간 공간으로 변환시켜야 한다. 식(6)을 식(11)에 적용하여 변환하면, 시간 영역에서의 특성 방정식이 얻어진다.

$$2\lambda^2 - 8M(\xi) + 12N(\xi) - 5 - [3 - 4N(\xi)] \cos(\lambda\pi) = 0 \tag{12}$$

식(12)에서,

$$M(\xi) = \frac{1}{36K_o^2} \left[(3K_o - E_o)^2 + E_1 \left(2E_o + E_1 - 6K_o - E_1 \frac{\xi}{t^*} \right) e^{-\frac{\xi}{t^*}} \right]$$

$$N(\xi) = \frac{3K_o - \left[E_o + E_1 e^{-\frac{\xi}{t^*}} \right]}{6K_o} \tag{13}$$

계면 모서리에서의 응력 특이성은 $r^{1-\lambda}$ 의 형태를 갖게된다. 따라서 특이 차수를 구하는 문제는 $0 < Re(\lambda) < 1$

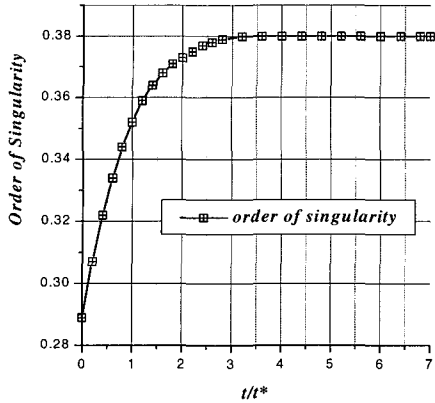


Fig. 6 Variation of the order of the singularity

의 범위에 해당되는 λ 값만이 의미를 지닌다. 실제 점탄성 접착제층의 푸아송 비는 $0 < \nu(\xi) < 0.5$ 를 갖는데, 이러한 범위에 대해서 $0 < \text{Re}(\lambda) < 1$ 의 조건을 갖는 λ 값은 오직 하나만 존재하고, 그러한 λ 값은 실수이다. 이러한 내용에 관한 자세한 수학적 설명은 참고 문헌¹⁷⁾에 나와 있다. Fig. 6은 실제 시간 t 영역에서의 특이 차수의 변화를 나타내고 있다. 점탄성 접착제층에 대한 특이 차수는 시간이 경과함에 따라 점차 커지다가 일정한 값에 수렴하고 있다.

자유 모서리 응력확대계수는 $h^{-1-\lambda}$ 로 정규화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_{ij} = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{r}{h} \right)^{1-\lambda} \sigma_{ij}(r, \theta, t) \Big|_{\theta=0} \quad (14)$$

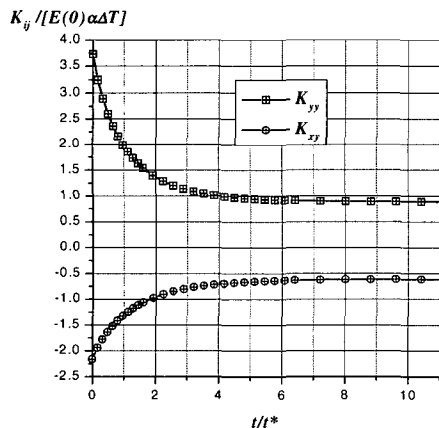


Fig. 7 Variation of the free-edge stress intensity factors

식(14)는 응력단위를 갖는 양이다. Fig. 7은 응력 확대계수의 변화되는 모양을 보여주고 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 비교해 볼 때, 자유 모서리 응력확대계수는 시간의 경과에 따라 점차 이완되다가 일정한 값으로 수렴하는 반면, 특이 차수는 점차 증가되다가 일정한 값으로 수렴하고 있다. 이러한 특이 차수의 증가와 자유 모서리 응력확대계수의 이완중 어느 부분이 계면 모서리에서의 박리나 국부 항복에 더 큰 역할을 하는지를 알기 위해서는 실험적인 뒷받침이 요구된다고 보여진다.

4. 결 론

칩과 리드프레임을 결합하는 얇은 점탄성 접착제층이 고온의 접착 온도에서 상온으로 냉각될 때 계면 모서리에 발생하는 응력 특이성이 조사되었다. 접착제에 비해 칩과 리드프레임은 강성이 매우 크므로 강제로 가정되었다. 계면에 발생하는 응력해석은 시간 영역 경계요소법을 적용하여 수행되었는데, 계면 모서리에는 매우 큰 응력 구배가 나타났다. 이러한 특이 응력들은 접착제층의 길이나 두께에 비교해 비교적 작은 범위에 걸쳐 나타나고 있으며, 시간의 경과에 따라 이완되는 경향을 보여주고 있다. 특이 차수는 Williams방법과 라플라스 변환을 이용하여 계산되었는데, 점탄성 접착제층의 물성이 변함에 따라 점차 증가하다가 일정한 값으로 수렴하였다. 경계요소법에 의해 얻어진 응력들과 특이 차수를 사용하여 계산된 자유 모서리 응력확대계수는 초기 값에서 점차 이완되다가 일정한 값으로 수렴되는 현상을 보여 주었다.

온도 변화로 인해 접착제층의 계면 모서리에 나타나는 응력 특이성은 피할 수 없는 현상으로, 계면 모서리 부근의 결합 상태가 건전하지 않으면 외력이 작용하지 않는 상태에서도 모서리 균열이 발생하거나 박리 현상이 나타날 수 있다. 해석 과정에서 점탄성 물성이 시간의 경과에 따라 변할 때, 특이 차수는 증가하고 자유 모서리 응력확대계수는 이완되어 가는데, 이러한 두 현상중 어느 부분이 계면의 건전성에 더 큰 영향을 주는지를 확인할 수 있는 실험적인 검증이 요구된다고 판단된다.

참고 문헌

1. Krishna, A., "Edge delamination of residually stresses thin film: viscoelastic effects", *International Journal of Fracture*, Vol. 75, 1996, pp.215~228
2. Srinivas, M.V. and Ravichandran, G. "Interfacial crack propagation in a thin viscoelastic film bonded to an elastic substrate", *International Journal of Fracture*, Vol. 65, 1994, pp.31~47
3. Jiang, Z.Q., Huang, Y., and Chandra, A., "Thermal stresses in layered electronic assemblies", *Trans. of ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 119, 1997, pp.127~132
4. Yi, S. and Sze, K.Y., "Cooling rate effect on post cure stresses in molded plastic IC packages", *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 120, 1998, pp.385~390
5. Lee, H. and Earmme, Y., "A fracture mechanics analysis of the effects of materials properties and geometries of components on various types of package cracks", *IEEE Transactions, Packaging, and Manufacturing Technology -Part A*, Vol. 19, June, 1996
6. Burger, K. "Fracture mechanical characterization of IC-device interface", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 11, 1995, pp.299~305
7. 이 새봄, "칩과 리드프레임 사이의 계면파괴인상치에 대한 실험적고찰", 석사학위논문, 1999, 한국과학기술원
8. Pecht, M.G. and Nguyen, L.T., *Plastic Packaging*, Microelectronic Packaging Handbook, Part II, Tummala, R.R., et al.(eds.), Chapman & Hall, 1997, pp.394~508
9. Czornyj, G., et al. *Polymers in Packaging*, Microelectronic Packaging Handbook, Part II, Tummala, R.R., et al.(eds.), Chapman & Hall, 1997, pp.509~623
10. Tummala, R., et al. *Thin-Film Packaging*, Microelectronic Packaging Handbook, Part II, Tummala, R.R., et al.(eds.), Chapman & Hall, 1997, pp.624~813
11. Qian, Z., Lu, M., and Liu, S., "Constitutive modeling of polymer films from viscoelasticity to viscoplasticity", *Trans. of ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 120, 1998, pp.145~149
12. Weitsmann, Y., "Interfacial stresses in viscoelastic adhesive layers due to moisture sorption," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 15, 1979, pp.701~713
13. Delale, F. and Erdogan, F., "Viscoelastic analysis of adhesively bonded joints," *Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 48, 1981, pp.331~338
14. Lee, S.S., "Boundary element analysis of the stress singularity at the interface corner of viscoelastic adhesive layer", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35, 1998, pp.1385~1394
15. Lee, S.S. and Westmann, R.A. "Application of high order quadrature rules to time-domain boundary element analysis of viscoelasticity", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 38, 1995, pp.607~629
16. Williams, M.L., "Stress singularity resulting from various boundary conditions in angular corners of plates in extensions," *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 74, 1952, pp.526~528
17. Bogy, D.B., "Edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading," *Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, 1968, pp. 460~466

(접수일자 : 1999. 10. 8)