

경계요소법을 이용한 반도체 패키지의 응력특이성 해석

박철희*, 정남용⁺

(논문접수일 2007. 8. 28, 심사완료일 2007. 10. 9)

Analyses of Stress Singularities on Bonded Interfaces in the IC Package by Using Boundary Element method

Cheol Hee Park*, Nam Yong Chung⁺

Abstract

Applications of bonded dissimilar materials such as large scale integration (LSI) packages, ceramics/metal and resin/metal bonded joints, are very increasing in various industry fields. It is very important to analyze the thermal stress and stress singularity at interface edge in LSI. In order to investigate stress singularities on the bonded interface edges and delamination of die pad and resin in the IC package. In this paper, stress singularity factors(I_i) and stress intensity factors(K_i) considering thermal stress in the IC package were analyzed by using the 2-dimensional elastic boundary element method(BEM).

Key Words : Large Scale Integration(LSI), Bonded Interface Edge(접합계면단), Thermal Stress(열응력), Delamination(층간박리), Stress Singularity Factor(응력특이성계수), Stress Intensity Factor(응력세기계수), Boundary Element Method(경계요소법).

1. 서론

독립된 회로소자들을 전기회로 내에서 특정한 기능을 수행하도록 고밀도로 집적하여 패키지(package)화한 LSI(large scale integration) 반도체 부품은 시스템의 소형화라는 외견상 특성과 함께 제조원가 및 소비전력의 감소, 신뢰성 증가, 동작속도의 개선 등에 의해 시스템의 설계와 합성, 제작, 고

성능화의 목적으로 사용되고 있다. 부품 제작시 실리콘 재료의 칩(chip)과 금속제의 다이패드(die pad)를 수지재료로 몰딩 하여 제작하고 있다.

몰딩시 200°C 이상의 고온에서 제작 되므로 접합계면에서는 냉각과정 중에 열응력이 발생하고 이종재료사이의 재료물성치 차로인해 계면단에는 응력특이성(stress singularity)이 나타난다. 수지와 다이패드의 접합계면에서는 층간박리

* 현대기계기술학원 (admin@gonghak21.com)

주소: 경기도 광명시 광명4동 158-487

+ 숭실대 기계공학과

(delamination)를 일으키기도 하며⁽¹⁾, 응력특이성이 나타나는 점에서는 균열이 발생·진전하므로 열응력을 고려한 계면 파괴의 연구가 필요하다. 접합면의 파괴유형은 응력특이성이 최대인 점의 주위에 한 개의 접합면만이 층간박리로 파괴되는 경우, 두개의 접합면이 층간박리로 한꺼번에 파괴되는 경우, 또는 층간박리와 함께 응력특이성의 최대점에서 초기 균열이 발생하여 수지 쪽으로 균열이 진전되기도 한다. 이와 같은 다양한 파괴유형을 설정하여 파괴역학 인자를 정량적으로 검토하는 것은 매우 중요하며, 반도체 패키지의 수명예측을 위해서는 파괴역학 인자를 이용하여 초기균열진전방향과 균열발생 후 균열진전경로의 예측이 필요하다. 이러한 반도체 패키지의 경우 열응력을 고려한 수치해석 및 실험연구가 있고⁽²⁻⁵⁾, 리드 프레임(lead frame) 과 수지 사이의 계면 박리 현상 및 균열발생으로 인한 파괴양상을 극초단파를 이용하여 비파괴적으로 검출하는 방법에 관한 연구⁽⁶⁻⁹⁾ 등이 있지만, 반도체 패키지의 접합계면의 열응력에 의한 응력특이성 해석 및 층간박리 현상에 대한 파괴역학 인자의 해석 연구는 아직 미비한 상태이다⁽¹⁰⁻¹²⁾. 따라서, 본 연구에서는 반도체 패키지의 수명예측을 위한 선행연구의 일환으로 접합계면에 균열이 존재하지 않는 경우와 계면균열이 존재하는 경우에 대해 경계요소법(Boundary Elementary Method: BEM)을 이용하여 열응력을 고려한 응력특이성계수 및 응력세기계수를 계산한 후 이들의 해석결과를 비교·검토하였다.

2. BEM에 의한 열응력 해석

2.1 LSI 패키지의 BEM 해석모델

반도체 패키지는 실장하는 방법과 패키지를 구성하는 재료 및 제조방법, 사용자의 특수용도 등에 따라 분류되는데 실장방법으로는 표면실장형(SMD Type) 과 삽입형이 있다. Fig. 1(a)는 IC패키지의 대표적인 형태로서 고밀도 집적회로칩을 탑재하는 삽입형의 이중직렬패키지(Dual In-Line Package:

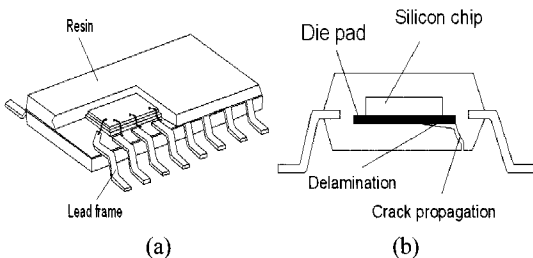


Fig. 1 Structure of LSI package

DIP)의 구조를 나타낸다. DIP의 리드(lead)는 양측면에 일정간격으로 삽입되어 있고, Fig. 1(b)는 칩 내부의 이종재료와 층간박리 및 수지 쪽으로의 균열전파를 보여준다. Fig. 2는 Fig. 1(b)를 BEM 해석모델로 설정한 것으로 패키지의 대칭성을 고려하였고, 구속조건은 그림과 같이 하였다. 이종재료 접합면의 끝점 A, B, C, D에서는 응력특이성이 나타나고, 모델의 각부치수는 $b=40\text{mm}$, $c=2\text{mm}$, $d=5\text{mm}$, $e=38\text{mm}$, $L=50\text{mm}$, $H=30\text{mm}$ 로 하였으며, 재료의 물성치는 Table. 1과 같다.

2.2 2차원 BEM 열응력

본 연구에서는 kelvin의 기본해를 이용한 2차원 열탄성 응력해석을 해석 하였고, 변형률과 응력의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \end{bmatrix} = \frac{1}{E^*} \begin{bmatrix} 1 & -\nu^* \\ -\nu^* & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha^* \Delta T \\ \alpha^* \Delta T \end{bmatrix} \quad (1)$$

(plane stress)

식 (1)에서 E 는 세로탄성계수, ν 는 푸아송 비, α 는 선펡장 계수, ΔT 는 온도차이고, $\epsilon_i = \alpha^* \Delta T$ 는 열변형을 의미한다. 평면변형률 조건하에서는 다음식과 같다.

Table 1 Mechanical and physical properties of materials

Mecanical properties Materials of LSI package	Young's modulus E[GPa]	Poisson's ratio ν	Coefficient of thermal expansion $\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
Si chip	200	0.3	3.0
Die pad	150	0.3	5.0
Resin	15	0.35	30

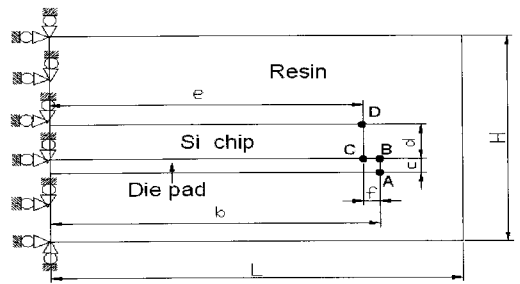


Fig. 2 Model of BEM analysis in LSI package

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2}, \nu^* = \frac{\nu}{1-\nu}, \alpha^* = (1+\nu)\alpha \quad (2)$$

또한, Fig. 2와 같이 이종재료가 접합된 경우 각 재료의 계면에서 수평 및 수직성분에 대한 변위를 u, v 라 하고, 표면력을 t 라 할 때 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$\begin{aligned} u_1 &= u_2 \\ v_1 &= \alpha_1^* y \Delta T = v_2 = \alpha_2^* y \Delta T \\ t_1 &= t_2 \end{aligned} \quad (3)$$

3. 응력특이성계수의 해석

3.1 이종 접합재료의 계면 모델

Fig. 3은 재료의 성질이 다른 이종 접합재료의 계면모델이다. r 은 계면단으로부터 떨어진 임의의 거리이고, 각도 $\theta_1 = -\theta_2 = \pi/2$ 이면 직선경계와 계면이 직교하는 맞대기이음(butt joint)이 되며, $\theta_1 = \pi/2, \theta_2 = -\pi$ 이면 단순접치기이음

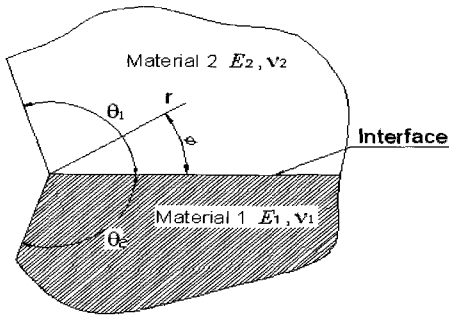


Fig. 3 Model of an interface edge in dissimilar materials

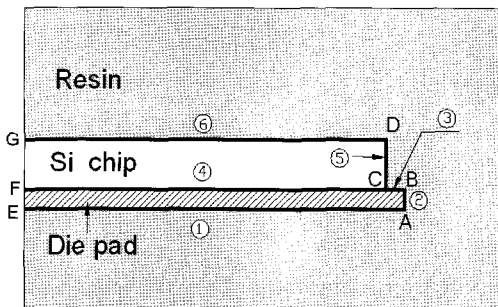


Fig. 4 Model of interfaces for BEM analysis in LSI package

(single-lap joint), $\theta_1 = -\theta_2 = \pi$ 로 하면 계면균열모델이 된다. 또한, $E_1 = E_2, \nu_1 = \nu_2$ 이면 균질재 V notch 모델이 된다.

Fig. 4는 IC 패키지에 대한 접합계면의 응력특이성을 해석하기위한 계면모델을 나타낸 것이다. 계면의 구분을 용이하게 하기 위하여 번호 ①~⑥을 표기하고, 좌측에는 점 E, F, G로 표시하였다. 영역수는 3개, 전체요소수 120개, 온도차는 200°C로 하였고, 해석의 정밀도를 높이기 위하여 서브요소 분할을 하였다.

3.2 응력특이성계수의 계산

계면 모델에 대해 응력특이성을 결정하는 특성방정식은 $Bogyr^{(13)}$ 에 의해 유도되었고, 접합 계면단 근방의 응력장 σ_{ij} 는 계면단으로부터 임의의 거리 r 에 의해 다음 식과 같이 표시된다.

$$\sigma_{ij} = \frac{\Gamma}{r^\lambda} f_{ij}(\Phi) \quad (4)$$

여기서, λ 는 응력특이성지수, Γ 는 응력특이성계수이고, $f_{ij}(\Phi)$ 는 부하조건 및 형상에 의존하는 계수이다.

BEM 수치해석에 의해 각각의 계면에서 구한 응력해석 결과를 대수좌표에 도시하면 그래프의 기울기가 얻어지는데 그 기울기 값이 응력특이성 지수 λ 가 되고, 이때의 λ 값과 응력해석결과를 식 (4)에 대입한 후 외삽에 의해 응력특이성 계수 Γ_1 과 Γ_2 를 구한다^(11,12).

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \sigma_y \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda \\ \Gamma_2 &= \tau_{xy} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda \\ \Gamma &= \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, Γ_1 과 Γ_2 는 각각 계면에서의 수직응력 및 전단응력을 대입하여 구한 분리응력특이성계수이고, Γ 는 Γ_1 과 Γ_2 의 합인 전응력특이성계수이다.

Fig. 5는 계면 ①(EB)의 수직응력성분을 대수좌표에 도시하여 직선부분의 기울기 즉, 응력특이성지수 λ 를 구하는 예를 보여준다. 본 연구에서는 계면 ①~⑥의 열응력 해석 결과를 이용하여 Fig. 6~Fig. 9와 같은 응력분포선도를 작성한 후 점 A~D에서 각각의 응력특이성계수를 구하였다.

응력분포선도에서 가로축은 각 계면단으로부터 임의의 거리 r 을 각 기준계면 길이로 나눈 후 무차원화 하였다.

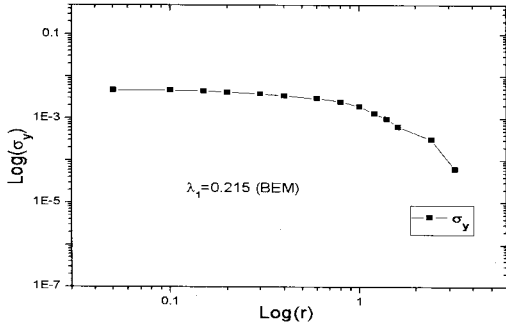


Fig. 5 Stress singularity exponent on an interface①

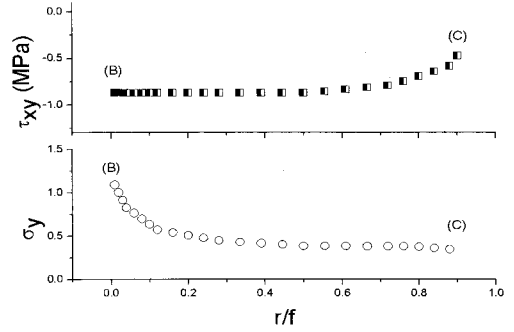


Fig. 8 Stress distribution on an interface③

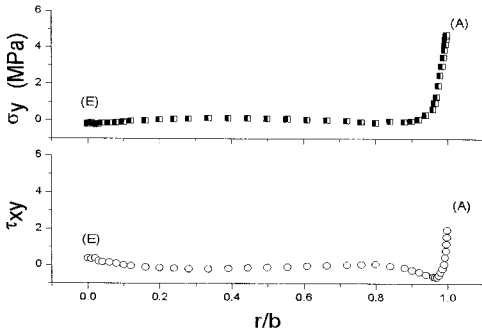


Fig. 6 Stress distribution on an interface① in the LSI package

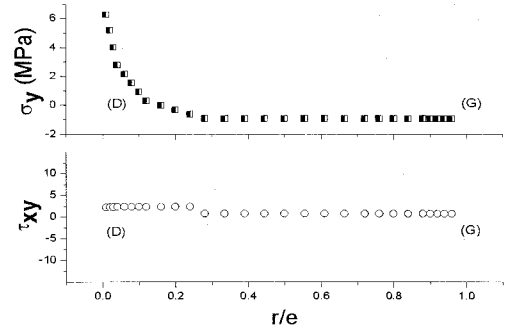


Fig. 9 Stress distribution on an interface⑥

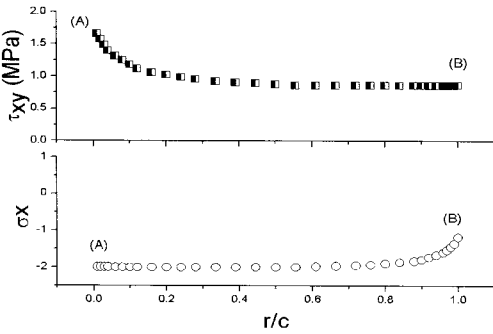


Fig. 7 Stress distribution on an interface②

Fig. 6은 접합계면 ①(\overline{EA})의 수직응력 및 전단응력의 분포를 나타낸 것이고, 점 A에서는 수직응력과 전단응력 성분의 응력특이성이 동시에 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 7은 계면 ②(\overline{AB})의 응력분포를 나타낸 것이며, 계면단 A점은 전단응력성분만의 응력특이성이 발생하고, B점은 수직응력 성분만의 응력특이성이 나타나는 것을 보여준다.

Table 2 Stress singularity factors at interface edge

Point	Stress singularity exponent			Stress singularity factor $[MPa(mm)^\lambda]$		
	λ_1	λ_2	λ	Γ_1	Γ_2	Γ
A	0.215	0.248	0.328	11.7	0.87	11.732
B	0	0.308	0.308	0	0.145	0.145
C	0.287	0.114	0.309	1.573	2.586	3.027
D	0.224	0	0.224	4.9	0	4.9

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 계면 ③(\overline{BC}), 계면 ⑥(\overline{DG})에 대한 응력분포를 나타낸다. 점 B, C, D에서는 수직응력 및 전단응력 양쪽에 의한 응력특이성이 발생하지 않고, 수직응력 성분 또는, 전단응력성분에 의해서만 응력특이성이 발생하는 것을 알 수 있다. 응력해석결과 계면 ④(\overline{CF})는 응력특이성이 없고, 또한, 점 E, F, G에서도 응력특이성이 나타나지 않았다. 따라서, 점 A는 다른 계면단 보다 응력성분도 크게 존재하면서 수직응력 및 전단응력 성분에 의한 응력특이성이 동시에 나타나고 있다.

Table 2는 점 A~D에 대한 응력특이성지수와 응력특이성

계수의 계산결과를 나타낸다. 결국, IC패키지의 경우 A점에서 전응력특이성계수 I 가 최대인 것으로 나타났고, 그 값은 $11.732 [MPa(mm)^{3/2}]$ 이다.

4. 층간박리에 대한 응력세기계수의 해석

4.1 층간박리에 대한 응력세기계수

Fig. 10은 계면균열 모델의 경우 균열선단으로부터 임의의 각 θ , 임의의 거리 r 위치에 있는 점의 응력장을 나타낸 것이다. $\theta=0^\circ$ 일 때 균열선단에 대한 응력장은 다음 식으로 표시된다⁽¹⁴⁾.

$$\sigma_y + i\tau_{xy} = \frac{(K_I + iK_{II})}{\sqrt{2\pi r}} \left(\frac{r}{l}\right)^{i\epsilon} \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{k_1\mu_2 + \mu_1}{k_2\mu_1 + \mu_2} \right) \quad (7)$$

$$k_j = \begin{cases} 3 - 4\nu_j & (\text{plane strain}) \\ \frac{3 - \nu_j}{1 + \nu_j} & (\text{plane stress}) \end{cases} \quad (j=1,2) \quad (8)$$

여기서, ϵ 은 이종재료 정수, μ 는 전단탄성계수이고, σ_y 와 τ_{xy} 는 각각 수직응력 및 전단응력 성분을 나타내며, l 은 기준 길이로서 균열길이를 나타낸다. 또한, K_I, K_{II} 는 계면균열에 대한 복소 응력세기계수이고, 균질재료의 균열에 대한 모드 I, 모드 II의 응력세기계수 K_I, K_{II} 와 다르고, 항상 혼합모드 균열이 되며 K_I, K_{II} 와 직접적인 대응은 되지 않는다. 반도체 패키지에 층간박리가 발생한 경우 BEM응력해석 결과를 이용하여 다음식과 같이 외삽에 의해 응력세기계수 K_I 과 K_{II}

를 구하였다⁽¹⁵⁾.

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \quad (9)$$

$$K_{II} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \quad (10)$$

$$Q = \epsilon \ln \left(\frac{r}{a} \right) \quad (11)$$

$$K = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2} \quad (12)$$

4.2 층간박리에 대한 해석 모델

Fig. 11은 반도체 패키지의 층간 박리에 대한 해석모델을 나타낸 것이고, a 및 a' 는 계면 ①과 계면 ②에 대한 층간 박리의 길이이다.

Fig. 12는 Fig. 11의 모델에 대한 요소분할의 예를 보여주며, 전체 요소수는 169개로 하였고, 정밀도 높은 해를 얻기 위해 서브요소 분할을 하였다.

본 연구에서는 응력특이성계수 I 가 최대인 A점을 기준으로 A점에서 E점으로 진행되는 수평층간박리(horizontal delamination)길이 a 와 A점에서 B점으로 진행되는 수직층간박리(vertical delamination)길이 a' 또는 A점에서 E점과 B점으로 동시에 2개의 균열이 진전하여 수평과 수직 박

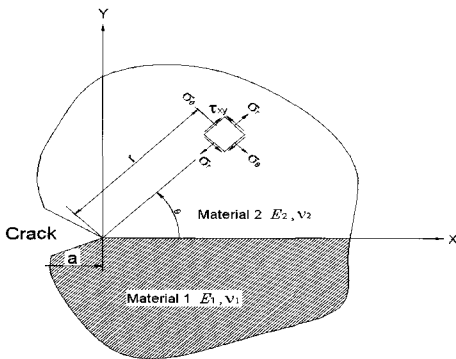


Fig. 10 Crack-tip stress field in the bonded dissimilar materials

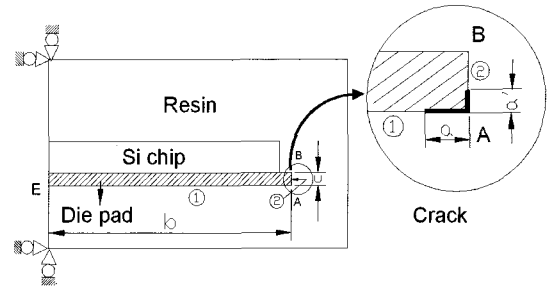


Fig. 11 Shape of delamination in LSI package

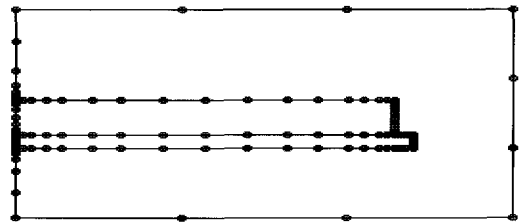


Fig. 12 Mesh pattern of BEM for delamination in LSI package

리가 모두 발생하는 이중 층간박리(dual delamination)의 경우 해석모델을 설정하여 응력세기계수를 구하였다.

4.2.1 수평층간박리의 경우

Fig. 13은 A점에서 계면 ①의 E점 방향으로 수평박리만이 발생할 경우 층간박리길이 $a=1, 3, 5, 7.5, 10, 15\text{mm}$ 로 증가시켜가면서 층간박리길이와 형상비 $a/L=0.02, 0.06, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3$ 일 때 층간박리의 선단에서의 응력세기계수 K_1 및 K_2 를 구한 결과를 나타낸 것이다. a/L 가 작아질수록 K_1 과 K_2 값이 거의 같지만, a/L 가 증가할수록 K_2 가 K_1 보다 커지는 것을 알 수 있다.

4.2.2 수직층간박리의 경우

Fig. 14는 A점에서 계면 ②의 B점 방향으로 수직박리만이 발생할 경우 층간박리길이 $a'=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\text{mm}$ 로

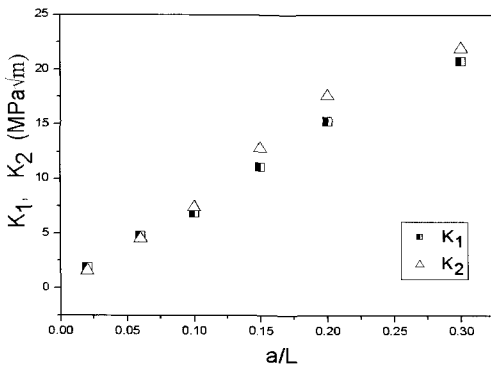


Fig. 13 Stress intensity factors at-tip on interface ① of horizontal delamination

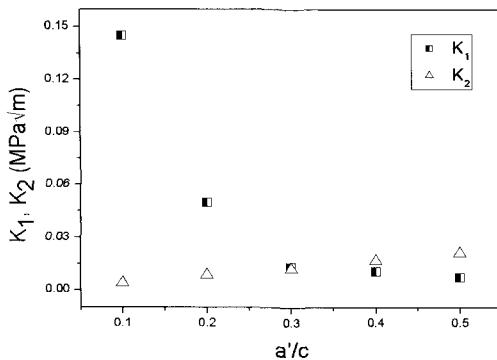


Fig. 14 Stress intensity factors at tip on interface ② of vertical delamination

증가시켜가면서 층간박리길이와 형상비 $a'/c=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ 일 때 응력세기계수 K_1 과 K_2 를 구한 결과를 나타낸 것이다. 박리초기에는 K_1 값이 K_2 보다 매우 크지만 a'/c 가 증가함에 따라 K_1 과 K_2 의 값의 차는 작아져서 $a'/c=0.3$ 에서 값이 일치한다. 그 후, K_2 값이 K_1 보다 커지는 것을 알 수 있으며, 수직층간박리의 경우는 전체적으로 층간박리길이가 증가할 때 K_1 은 급격히 감소하고, K_2 는 점차 증가한다. Fig. 13과 Fig. 14를 통하여 수평, 또는 수직층간박리만 발생하는 경우는 층간박리길이가 증가할수록 전단응력성분에 의한 응력세기계수 K_2 가 K_1 보다 증가함을 알 수 있다.

4.2.3 이중 층간박리의 경우

Fig. 15는 A점으로부터 계면 ①과 계면 ②의 양쪽방향으로 층간박리가 발생할 경우 층간박리길이 ($a=1\text{mm}, a'=0.2\text{mm}$), ($a=3\text{mm}, a'=0.4\text{mm}$), ($a=5\text{mm}, a'=0.6\text{mm}$), ($a=7.5\text{mm}, a'=0.8\text{mm}$)로 변화시켰을 때 계면 ①의 층간박리선단에서의 응력세기계수 K_1, K_2 의 결과를 나타낸 것이다.

수평 및 수직층간박리가 동시에 발생할 경우 K_1 과 K_2 는 Fig. 13의 수평층간박리만이 있는 경우보다 큰 값으로 감소하는 것을 알 수 있고, 층간박리길이 (a, a')=(1mm, 0.2mm)일 때 전단응력성분에 의한 K_2 값이 수직응력성분에 의한 K_1 보다 매우 크고, (a, a') 값이 증가할수록 K_2 값은 감소되어 (7.5mm, 0.8mm)에서는 K_1 과 거의 동일한 값을 갖는다.

Fig. 16과 Fig. 17은 층간박리길이 (a, a')가 변화할 때 계면 ①과 계면 ②의 층간박리선단에서의 K_1 과 K_2 를 각각 비교한 것이다. Fig. 16에서는 (a, a')의 증가에 따라 계면 ①에 대한 층간박리선단의 K_1 값은 큰 폭으로 증가하지만 계면 ②에 대한 층간박리선단의 K_1 값은 거의 일정함을 보여 준다.

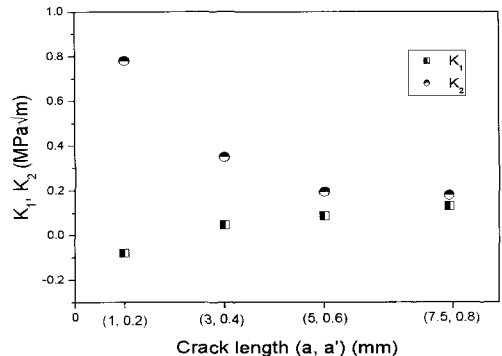


Fig. 15 Stress intensity factors at tip on interface ① of dual delamination

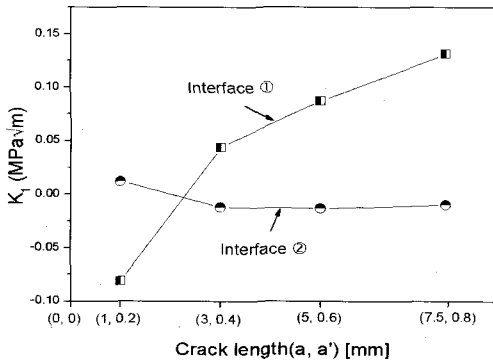


Fig. 16 Comparison of K_1 at tip on interface① and interface② of dual delamination

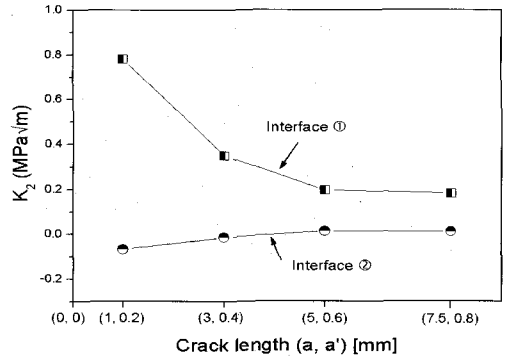


Fig. 17 Comparison of K_2 at tip on interface① and interface② of dual delamination

Table 3 Stress intensity factors at tip of horizontal delamination and vertical delamination

Horizontal delamination				Vertical delamination			
Interface ①				Interface ②			
Crack: a(mm)	a/L	K_1 (MPa√m)	K_2 (MPa√m)	Crack: a'(mm)	a'/c	K_1 (MPa√m)	K_2 (MPa√m)
1	0.02	1.91	1.62	0.2	0.1	0.145	0.004
3	0.06	4.79	4.54	0.4	0.2	0.051	0.009
5	0.1	6.91	7.42	0.6	0.3	0.013	0.012
7.5	0.15	11.06	12.8	0.8	0.4	0.011	0.017
10	0.2	15.28	17.6	1	0.5	0.007	0.021

Table 4 Stress intensity factors at tip of dual delamination

Dual delamination					
Interface ①			Interface ②		
Crack: a, a'(mm)	K_1 (MPa√m)	K_2 (MPa√m)	Crack: a, a'(mm)	K_1 (MPa√m)	K_2 (MPa√m)
(1, 0.2)	-0.0812	0.780	(1, 0.2)	0.012	-0.067
(3, 0.4)	0.0437	0.349	(3, 0.4)	-0.012	-0.015
(5, 0.6)	0.0869	0.195	(5, 0.6)	-0.013	0.012
(7.5, 0.8)	0.131	0.180	(7.5, 0.8)	-0.010	0.010

Fig. 17에서는 (a, a')가 증가할 때 계면 ①에 대한 층간박리 선단의 K_2 값은 큰 폭으로 감소하는 반면, 계면 ②에 대한 층간박리선단의 K_2 는 점차 증가한다.

Table 3은 A점으로부터 수평층간박리만이 발생하는 경우와 수직층간박리만이 발생하는 경우에 대한 응력세기계수 K_1 과 K_2 를 계산한 결과를 나타낸다. 수평층간박리가 발생한 계면 ①의 경우가 수직층간박리가 발생한 계면 ②의 경우보

다 응력세기계수의 값이 매우 크다. Table 4는 A점으로부터 이중 층간박리가 발생할 경우 계면 ①과 계면 ②의 층간박리 선단에서의 응력세기계수 K_1 , K_2 를 계산한 결과이다. Table 3, Table 4에서 이중 층간박리의 경우 계면 ①에 대한 층간박리 선단에서의 K_1 , K_2 값은 큰 폭으로 감소하지만, 계면 ②에 대한 층간박리 선단에서는 변화가 거의 없음을 알 수 있다.

4. 결론

LSI 반도체 패키지의 이중접합계면에 층간박리가 발생하지 않은 경우와 층간박리가 발생한 경우에 대한 BEM 수치 해석 모델을 설정하여 열응력을 해석하고, 그 결과로부터 응력특이성을 해석한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) LSI 패키지의 접합계면에서 BEM에 의한 열응력을 해석한 후 해석결과를 이용하여 응력특이성계수와 응력세기계수를 구하는 방법을 제시하였다.
- (2) LSI 패키지의 접합 계면단의 점 A-D에서 응력특이성계수 I 를 계산한 결과 A점에서 최대이며, 그 값은 $11.732 [MPa(mm)^{1/2}]$ 이다.
- (3) LSI패키지의 A점에서 수평층간박리, 수직층간박리, 이중 층간박리의 3가지 유형에 대한 층간박리선단의 응력세기계수를 계산하여 비교한 결과 이중 층간박리일 때 응력세기계수는 큰 폭으로 감소한다.
- (4) LSI 패키지의 A점에서 초기균열이 발생하며, 박리유형에 관계없이 계면 ①에 대한 층간박리선단의 응력세기계수는 계면 ②에 대한 층간박리선단의 응력세기계수보다 크다.

후기

본 연구는 숭실대학교 교내 연구비 지원으로 이루어 졌음.

참고 문헌

- (1) Ju, Y., Saka, M. and Abe, H., 2001, "Detection of Delamination in IC Packages Using the Phase of Microwaves," *International Journal of NDT & E*, Vol. 34, pp. 49~56.
- (2) Miura, H., Nishimura, A., Kawai, S. and Nishi, K., 1998, "Residual Stress in Resin-Molded IC Chips," *Transaction of the JSME*, Vol. 55, No. 516, pp. 1763~1770.
- (3) Miura, H., Nishimura, A., Kawai, S. and Murakami, G., 1990, "Effect of Package Structures on the Residual Stress of Silicon Chips Encapsulated in IC Plastic Packages," *Transaction of the JSME*, Vol. 56, No. 522, pp. 175~181.
- (4) Sato, M., Ruuki, R., Yoshoka, S. and Inoue, A., 1994, "Analysest of Delamination Arrest Effect of Dimples on Interface in LSI Package," *Transaction of the JSME*, Vol. 60, No. 577, pp. 1985~1991.
- (5) Lee, K. Y., Moon, H. S., Lee, T. S. and Kim, K. S., 1995, "Plastic IC Package Cracking Analysis due to Thermal Stress," *Transaction of the KSME*, Vol. 19, No. 12, pp. 3197~3204.
- (6) Lee, K. Y. and Yang, J. H., 1998, "Viscoelastic Cracking Analysis of Plastic IC Package with Polyimide Coating Layer," *Transaction of the KSME*, Vol. 22, No. 10, pp. 1930~1937.
- (7) Park, S. S., Pahn, L. O. and Earmme, Y. Y., 1994, "A Fracture Mechanics Approach on Delamination and Package Crack in Electronic Packaging(2)," *Transaction of the KSME*, Vol. 18, No. 8, pp. 2158~2166.
- (8) Alpen, P. and Lee, K. C., 2000, "A Simple Model for the Mode I Popcorn Effect for IC Packages," *Microelectronics Reliability*, Vol. 40, pp. 1503~1508.
- (9) Ju, Y., Saka, M. and Abe, H., 2001, "Nondestructive Inspection of Delamination in IC Package by High-frequency Microwaves," *International Journal of NDT & E*, Vol. 34, pp. 213~217.
- (10) Chung, N. Y. and Oh, B. T., 1996, "Evaluation Method of Bonded Strength Considering Stress Singularity in Adhesively Bonded Joints," *Transaction of the KSME*, Vol. 20, No. 7, pp. 2087~2096.
- (11) Chung, N. Y. and Park, C. H., 2005, "Analysis of Stress Singularities on Interfaces of Friction Welded Dissimilar Materials," *Transaction of the KSAE*, Vol. 13, No. 2, pp. 142~148.
- (12) Chung, N. Y. and Park, C. H., 2005, "Analysis of Residual Stress Singularities on Interfaces of Friction Welded SUH35/SUH3," *Transaction of the KSAE*, Vol. 13, No. 5, pp. 104~111.
- (13) Bogy, D. B., 1975, "The Plane Solution for Joined Dissimilar Elastic Semistrips under Tensions," *J. Appl. Mech*, Vol. 42, pp. 93~98.
- (14) Chung, N. Y. and Song, C. H., 1996, "Prediction of Propagation Path for the Interface Crack in Bonded Dissimilar Materials," *Transaction of the KSAE*, Vol. 4, No. 3, pp. 111~121.

(15) Chung, N. Y. and Park, C. H., 2007, "An Evaluation Method of Fracture Toughness on Interface Crack

in Friction Welded Dissimilar Materials," *Transaction of the KSAE*, Vol. 15, No. 4, pp. 171~177.