

경계요소법에 의한 반도체 패키지의 균열진전경로 예측

송춘호* · 정남용**

Prediction of crack propagation path in IC package by BEM

Chun Ho Song and Nam Yong Chung

Key Words: Stress Singularity Factor(응력특이성계수), Crack Propagation Path(균열진전경로), Crack Propagation Angle(균열진전각도), IC Pakage(IC 패키지), Boundary Element Method(경계요소법)

Abstract

Applications of bonded dissimilar materials such as IC package, ceramic/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 edges in bonded joints of dissimilar materials. In order to understand the package crack emanating from the edge of Die pad and Resin, fracture mechanics of bonded dissimilar materials and material properties are obtained. In this paper, the thermal stress and its singularity index for the IC package were analyzed using 2-dimensional elastic boundary element method. Crack propagation angle and path by thermal stress were numerically simulated with boundary element method.

1. 서 론

IC 패키지와 같은 반도체 부품은 소형·고성능·대용량화의 목적으로 Si 칩, 금속제의 다이패드(die pad)를 수지로 물당제작하고 있다.

이 때, 200°C 이상의 고온에서 제작하기 때문에 냉각 과정중에 이종재료간의 선행창계수와 탄성계수의 차이로 접합계면단에서는 열응력으로 인한 응력특이성이 발생하게 된다.

이러한 열응력은 계면박리를 일으키기도 하고, 패키지 자체의 파괴를 초래하기도 하며, 접합강도에 큰 영향을 주기 때문에 열응력에 대한 연구의 필요성이 요구된다.

IC 패키지에 작용하는 열응력에 의한 파괴에

관한 수치해석 및 실험에 의한 연구는 이미 오래 전부터 행해지고 있다.^(1~4)

또한, IC 패키지의 계면파괴현상이나 리이드프레임과 수지사이 계면박리현상과 균열발생으로 인해 파단된 형태를 microwave(극초단파)를 이용하여 비파괴적으로 검출해내는 방법에 관한 연구가 이루어지고 있다.^(5~9)

그러나 IC패키지 접합계면균열의 열응력에 의한 응력특이성에 관한 강도평가^(10,11)나 균열 진전경로의 예측⁽¹²⁾에 관한 연구가 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 응력특이성계수에 의한 강도평가와 IC 패키지의 균열진전경로 예측에 관한 연구를 수행하고자 한다.

2. 열응력의 BEM해석

2.1. BEM해석 모델

* 성균관대학교 기계공학과 Post-doc.

** 숭실대학교 기계공학과

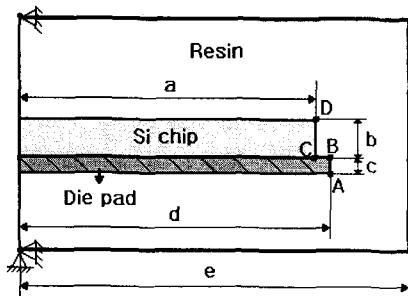


Fig. 1 Model of BEM analysis for IC package

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 BEM수치해석 모델을 사용하였다. IC 패키지의 몰딩접합이 200°C에서 이루어지므로 200°C에서 발생하는 열응력에 대하여 해석하였고, Si 칩과 다이패드 그리고 수지사이 열응력에 의한 응력집중이 발생하는 점 A, B, C, D에 대하여 해석을 수행하였다. IC 패키지 각부의 치수는 $a=38\text{mm}$, $b=5\text{mm}$, $c=2\text{mm}$, $d=40\text{mm}$, $e=50\text{mm}$ 로 하였으며, 재료 물성치는 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical and physical properties of materials

Mechanical properties Specimen materials	Young's modulus E(MPa)	Poisson's ratio, ν	Coefficient of thermal expansion, $\alpha(10^{-6}/^\circ\text{C})$
Si Chip	0.2	0.3	3.0
Die Pad	0.15	0.3	5.0
Resin	0.015	0.3	0.3

2.2. 2차원 BEM 열응력

본 연구에서는 Kelvin의 기본해를 이용한 2차원 탄성해석을 실시하였고, 2차원 열탄성 기초이론에 의한 응력과 변형률의 관계는 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} = \frac{1}{E^*} \begin{bmatrix} 1 & -\nu^* \\ -\nu^* & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha^* \Delta T \\ \alpha^* \Delta T \end{bmatrix}$$

(plane stress) (1)

여기서 E 는 세로탄성계수, ν 는 프와송 비, α 는 선팽창계수이고, ΔT 는 온도차이고, $\varepsilon_i = \alpha^* \Delta T$ 는 열변형률을 의미한다. 또한, 평면변형률 상태에서는 다음 식과 같이 된다.

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

(plane strain) (2)

2.3 응력 특이성계수의 계산

접합계면단에서 균열이 없는경우에 대한 BEM 응력해석을 실시하여 그 해석결과를 이용하여 응력특이성 지수 λ 를 계산하였다.⁽¹⁰⁾

계산된 응력특이성 지수를 이용하여 계면 단에서의 거리 r 에 따른 외삽법으로 응력특이성계수는 각각 다음 식에서 계산하였다.^(10,11)

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \sigma_y \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda \\ \Gamma_2 &= \tau_{xy} \cdot \lim_{r \rightarrow 0} (r)^\lambda \\ \Gamma &= \sqrt{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 Γ_1 과 Γ_2 는 각각 BEM 응력해석 결과인 수직 및 전단응력 성분을 사용한 값이고, 이들의 합을 전용력특이성계수 Γ 로 하였다.

응력특이성 계수를 이용한 강도평가 방법을 사용하여 IC 패키지에 작용하는 열응력에 의한 각부위의 응력집중정도를 파악하여 파괴에 가장 취약한 부분을 구별하도록 한다.

Table 2. Stress singularity factors

Point	Stress singularity factor	
	Γ_1	Γ_2
A	0.2409	0.2512
B	0.2331	0.2109
C	0.2114	0.1954
D	0.2247	0.1475

Table 2.에는 응력특이성계수의 계산결과를 나타내었다. 계산결과에 의하면 Fig. 1의 A점에서 응력특이성계수가 다른 점에서보다 크게 나타나므로 그 부분의 응력집중이 가장 큰 것을 알 수 있다. 따라서 A점에 균열이 가장먼저 발생하여 IC 패키지가 파단될 것 이므로 A점에 균열이 발생하였을 경우에 관한 응력세기계수와 균열진전각도 및 경로에 관하여 연구하였다.

3. 열응력에 의한 균열진전각도 및 균열진전경로의 예측

3.1. 응력세기계수의 해석

3.1.1 계면균열의 응력해석

Fig. 2와 같이 표면력이 자유인 경계조건을 갖는 이종 접합체에 대한 균열선단의 응력은 다음으로 표시된다⁽¹²⁾.

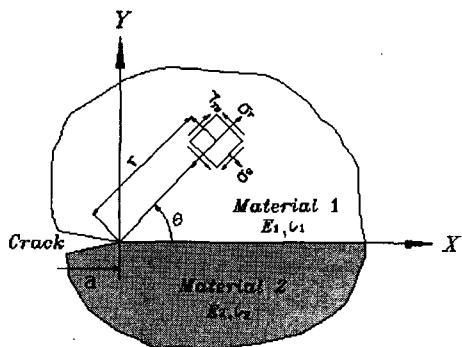


Fig. 2 Crack-tip stress field in the bonded dissimilar materials

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{r} A_{ij}(\theta) \sin(\varepsilon \ln \frac{r}{l}) + \frac{1}{r} B_{ij}(\theta) \cos(\varepsilon \ln \frac{r}{l}) \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \pi \ln \left[\frac{x_1/\mu_1 + 1/\mu_2}{x_2/\mu_2 + 1/\mu_1} \right] \quad (5)$$

$$x_j = \begin{cases} 3 - 4\nu_j & (\text{평면변형률}) \\ \frac{3-\nu_j}{1+\nu_j} & (\text{평면응력}) \end{cases} \quad (j=1, 2) \quad (6)$$

여기서, ε 은 이종재료 정수, μ 는 각 재료의 전단탄성계수, ν 는 푸아송의 비이고, 첨자는 각각의 재료를 의미한다. 또한 A_{ij} , B_{ij} 는 θ 에 의해 결정되는 계수이고, r 은 균열선단으로부터의 거리, l 을 기준길이로 나타낸다.

3.1.2 해석모델

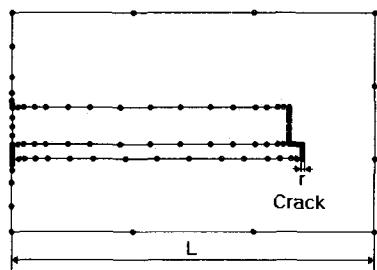


Fig. 3 Numerical analysis model by BEM

IC패키지에 균열이 발생하였을 경우 Fig. 3과 같은 BEM 수치해석모델을 이용하여 열응력에 의한 응력세기계수를 구하였다. 전체 요소수는 230개를 사용하였으며, $r/L=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ 로 변화시켜가면서 응력해석을 수행하였다.

3.1.3 응력세기계수의 결정

균열선단의 BEM응력해석 결과와 다음 식들을 이용하여 외삽에 의해 응력세기계수 K_i 를 구하여 나타내었다.

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\sigma_y \cos Q + \tau_{xy} \sin Q) \quad (7)$$

$$K_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} (\tau_{xy} \cos Q - \sigma_y \sin Q) \quad (8)$$

$$Q = \varepsilon \ln (r/a) \quad (9)$$

Table 3에는 균열길이의 비에 따른 응력세기계수의 해석결과를 나타내었다.

Fig. 4와 Fig. 5에는 균열길이의 비에 따른 열응력에 의한 응력세기계수 K_1 , K_2 를 표시하였는데, 균열길이가 증가함에 따라 응력세기계수 K_1 , K_2 가 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 3 Stress intensity factors for r/L

Crack length	stress intensity factor	
	K_1 (MPa \sqrt{m})	K_2 (MPa \sqrt{m})
0.1	3.11	5.91
0.2	4.73	8.32
0.3	7.17	11.11
0.4	9.12	13.33

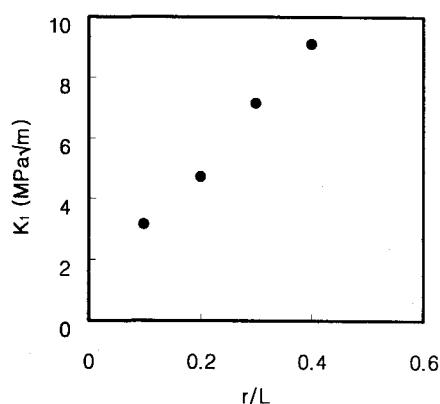


Fig. 4 Stress intensity factors K_1 for r/L

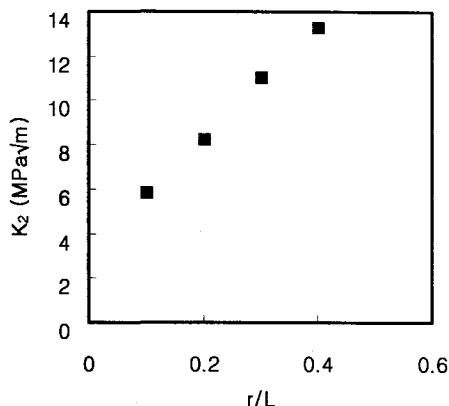


Fig. 5 Stress intensity factors K_2 for r/L

3.2. 균열진전각도 및 경로예측

Fig. 3에 도시한 해석모델에 대하여 Table 1의 재료물성치를 사용하여 구한 BEM응력해석결과를 이용하여 초기균열진전 각도를 계산하여 Table 4에 나타내었다. 이 때 응력특이성 지수가 가장 크게 나타난 부분에 균열길이 $r=0.001\text{mm}$ 로 매우 미소한 초기 균열이 발생한 것으로하여 초기 균열진전각도를 계산하였다.

Table 4. Initial crack propagation angle for point A

Stress intensity factor		Crack propagation angle (θ_0)
K_1 (MPa \sqrt{m})	K_2 (MPa \sqrt{m})	(θ_0)
1.2	2.9	-63.357°

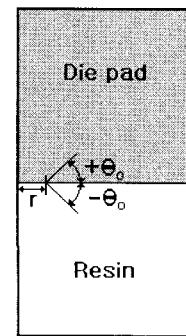


Fig. 6 Crack propagation angle(θ_0) and direction for an interface crack.

Fig. 6에는 균열이 계면에서 초기 진전각도(θ_0) 만큼 + 또는 - 방향으로 진전하는 것을 나타내고 있다. Table 4.의 초기 균열진전각도는 균열이 Resin쪽으로 진전하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에는 열응력에 의한 초기 균열진전각도를 균열길이의 비에 대해서 나타내었다. 균열길이가 증가함에 따라 균열은 다이패드쪽으로 가까이 진전함을 알 수 있다.

균열의 진전은 모드 I 성분에만 의존하는 것으로 하여, $\Delta K_{II}=0$ 이 되도록 미소량의 균열길이를 진전시킨 후, 그 때의 균열진전 방향을 다시 결정하였다. 이러한 BEM계산을 시험편 이 파단될

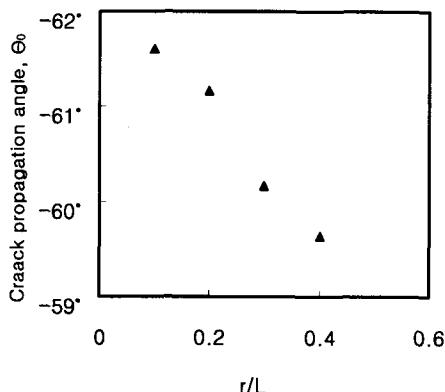


Fig. 7 Initial crack propagation angle for r/L

때까지 수회 반복하여 균열진전 경로를 시뮬레이션 예측하였다. BEM해석시 미소균열의 진전길이는 초기에는 0.1~0.2mm로 하고, 수회 진전시킨 후에는 그 길이를 조금씩 증가시켰다.

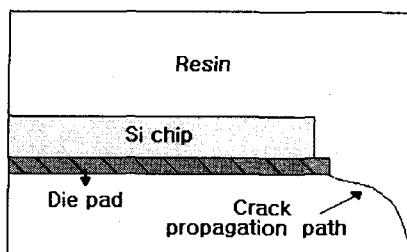


Fig. 8 BEM simulation of crack propagation path

Fig. 8에는 IC 패키지에 대하여 BEM 시뮬레이션으로 열응력에 의한 균열진전경로의 해석결과를 나타내고 있다. 수치해석에 의한 균열진전경로와 실험에 의한 균열진전경로의 비교평가는 이전이 연구⁽¹²⁾에서 검증한 바 있으며, 균열진전경로에 대한 신뢰성을 가지고 수치해석한 결과이다.

Fig. 9에는 IC 패키지에 균열이 없는 경우 및 균열이 존재하는 경우 접합계면의 강도평가를 실시하여 응력집중에 대한 평가후 균열의 진전각도 및 균열진전경로를 예측하는 방법에 대한 일련의 과정을 나타낸 것이다

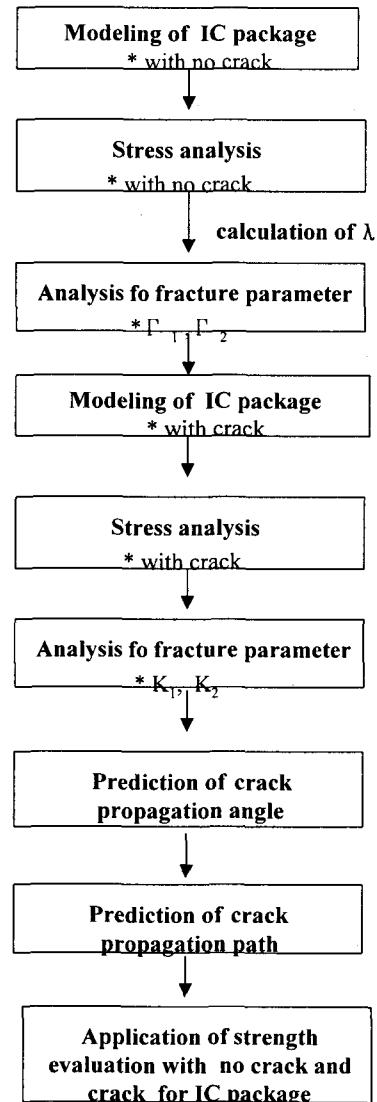


Fig. 9 Flow chart for strength evaluation and crack propagation method for IC package

4. 결론

IC 패키지에 대하여 열응력에 의한 응력특이성 계수 및 균열진전 각도와 균열진전 경로에 대한 BEM 수치해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. IC 패키지에 균열이 없는 경우 BEM 열응력

해석을 통하여 응력특이성계수를 구하여 응력집중이 가장 크게 발생하는 위치를 알아보았다.

2. IC 패키지에 균열이 존재하는 경우 이에 대한 열응력해석을 통하여 초기균열진전 각도를 예측하였다.

3. IC 패키지에 균열이 존재하는 경우 이에 대한 열응력해석을 통하여 수치해석에 의한 균열진전경로를 예측하였다.

4. 본 연구에서 사용한 방법을 통하여 각종 이종접합 구조물에 열응력이 작용하는 경우 이의 BEM 수치해석을 통하여 강도평가와 균열진전각도 및 균열진전경로를 예측하는 것이 가능하다.

참고문헌

- (1) 三浦英生 외 3인, 1989, "ICプラスチックパッケージ内ツリコンチップ残留應力の検討," 日本機械學會論文集(A編), 55卷 516号 pp. 176 3~1770.
- (2) 三浦英生 외 3인, 1990, "ICパッケージ内ツリコンチップ残留應力に及ぼすパッケージ構造の影響," 日本機械學會論文集(A編), 56卷 552号 pp. 365~371.
- (3) 結城良治외 5인, 1994, "LSIパッケージ界面ディンプルのはく離抑制効果の解析," 日本機械學會論文集(A編), 60卷 577号 pp. 1985~1991.
- (4) 이강용외 3인, 1995, "열응력으로 인한 플라스틱 IC패키지의 파괴해석," 대한기계학회논문집, 제19권, 제12호, pp. 3197~3204.
- (5) 이강용, 양지혁, 1998, "폴리이미드 코팅층을 내포하는 플라스틱 IC패키지의 점탄성 파괴해석," 대한기계학회논문집 A권, 제2권, 제10호, pp. 1930~1937.
- (6) 이새봄, 염윤용, 1999, "칩과 리드프레임 사이의 계면파괴인성치에 대한 실험적 고찰," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 A, PP. 560~565.
- (7) P. Alpen, K.C. Lee, etc., 2000, "A simple model for the mode I popcorn effect for IC packages," Microelectronics Reliability, vol. 40, pp. 1503~1508.
- (8) Y. Ju, M. Saka, H. Abe, 2001, "Nondestructive inspection of delamination in IC package by high-frequency microwaves," NDT&E International, vol. 34, pp. 213~217.
- (9) Y. Ju, M. Saka, H. Abe, 2001, "Detection of delamination in IC packages using the phase of microwaves," NDT&E International, vol. 34, pp. 49~56.
- (10) 정남용, 오봉택, 1996, "응력특이성계수에 의한 이종 접합재료의 강도평가," 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제7호, pp. 2087~2096.
- (11) 정남용, 송춘호, 이명대, 2000, "Al/Epoxy 이종 접합체의 계면 강도평가," 대한기계학회 재료 및 파괴부문 학술회의, 제2회, pp. 299~306
- (12) 정남용, 송춘호, 1996, "이종접합재료의 계면 균열에 대한 진전경로의 예측," 한국자동차공학회 논문집, 제4권, 제3호, pp. 112~121.