Journal of the Microelectronics & Packaging Society
Vol. 8, No. 3, p. 25-30. 2001

반도체 칩 접착계면의 모서리 균열에 대한 경계요소 해석

이상순
한국기술교육대학교, 메카트로닉스공학부

Boundary Element Analysis for Edge Cracks at the Bonding Interface of Semiconductor Chip

Sang Soon Lee
School of Mechatronics Engineering Korea University of Technology and Education

초 록: 반도체 칩과 얇은 접착제층의 계면에 존재하는 모서리 균열에 횡방향 인장변형률이 작용하는 경우에 대해 응력확대계수를 조사하고 있다. 이러한 균열들은 자유 경계면 부근에 존재하는 응력 특이성으로 인해 발생할 수 있다. 계면 응력상태를 해석하기 위해서 경계요소법이 사용되고 있다. 복합 응력확대계수의 크기는 균열의 크기에 의존하지만, 균열이 커지면 일정한 값에 수렴한다. 횡방향 인장변형률이 임계값에 도달하면, 계면 균열은 빠르게 전파되리라고 예상된다.

Abstract: The stress intensity factors for edge cracks located at the bonding interface between the semiconductor chip and the adhesive layer subjected to a uniform transverse tensile strain are investigated. Such cracks might be generated due to a stress singularity in the vicinity of the free surface. The boundary element method (BEM) is employed to investigate the behavior of interface stresses. The amplitude of complex stress intensity factor depends on the crack length, but it has a constant value at large crack lengths. The rapid propagation of interface crack is expected if the transverse tensile strain reaches a critical value.

1. 서 론

Fig. 1은 반도체 칩이 접착제를 통해 리드프레임에 결합되어 있는 형상을 나타낸다. 패키징된 칩은 작동시 열이 발생하고, 사용 중에 수분 흡수등의 영향을 받게되어 패키지의 신뢰성이 때로 문제가 된다. 특히 칩과 접착제는 서로 다른 기계적 성질 및 열적 성질을 지니기 때문에, 계면 모서리에서 응력 특이성이 존재하게 되며, 이러한 응력 특이성은 칩과 접착제의 계면 모서리에서 균열을 야기시킬 수가 있다.[1-4] 따라서, 이 부분에 대한 연구는 칩 패키지의 안정성을 향상시키기 위해서 중요하다.

칩과 리드프레임의 계면 박리의 가능성 또는 균열의 거동에 관한 연구는 오래 전부터 활발히 진행되어 왔다. Burger는 재료들의 열 팽창계수의 차이로 인해 칩과 리드프레임사이에서 균열이 생성될 가능성이 있다고 발표하였다[5]. Pearson등은 실험을 통해 칩 접착층의 파괴 인성치를 측정하였다.[6] 이 실험에서는 칩의 영향이 고려되지 않고 실험결과가 측정되었다. 또, 최근에는 온도변화를 고려한 파괴 인성치의 측정이 시도되었다[7]. 그러나 이러한 접근들은 칩과 접착제층의 계면응력에 대해 정밀한 조사 없이 수행되었다. 칩과 접착제층의 계면에 대한 신뢰성을 향상시키기 위해서는 계면응력 분포에 대한 정확한 이해가 요구된다. 그러나 일반적으로 칩의 접착계면에서의 응력상태는 매우 복잡하므로[8,9], 계면 응력을 정확하게 예측할 수 있는 방법을 선택하는 것이 중요하다.

이종재료의 계면에 존재하는 균열은 오랫동안 많은 관심을 받아왔다. 여러 가지 계면 균열 문제에 대한 해들이 발표되었는데, 그들의 대부분은 단순한 형상과 경계조건을 갖는 것들이었다. 보다 일반적인 형상과 하중 조건을 갖는 문제를 해석하기 위해서 수치해석 방법이 사용되고 있는데, 많이 사용되는 방법으로는 유한요소법

과 경계요소법이 있다. 유한 요소법을 사용하는 경우에, 계면에 놓여있는 균열 선단 부근에서 정확한 응력을 구하는 일이 어렵기 때문에, J-적분법을 사용하거나, 변위 데이터로부터 응력확대계수를 구하는 방법을 사용하고 있다[10,11]. 또한 그러한 방법을 적용하는 경우에도, 균열 선단 부근의 변위를 정확히 표현하기 위해서는 특수 유한요소를 사용해야 할 뿐만 아니라 매우 많은 수의 세밀한 요소들을 요구하고 있어서, 수치 해석적으로 많은 경험과 숙달이 필요하다. 경계 요소법은 균열문제에 대해서는 유한요소법에 비해 매우 정확하고 효율적인 방법임이 발표되어 왔다[12-17]. 유한요소법은 균열을 포함한 문제 영역 전체를 유한요소로 모델링하는것에 비해, 경계요소법은 계면 균열을 포함한 경계면 만을 모델링하면 되므로, 모델링에 요구되는 시간이 단축될 뿐만 아니라 모델링 작업이 보다 용이하다. 유한 요소법을 적용하면 계면에서의 변위 값은 비교적 정확하게 구할 수 있으나, 응력 값은 근사적인 값만 얻게 되고, 정확도는 변위 값에 비해 많이 떨어진다. 경계 요소법은 균열 선단 부근에서의 변위 값뿐만 아니라 응력 값도 정확하게 구할 수 있는 장점이 있다. 현재까지 조사한 결과에 의하면, 국내에서 뿐만 아니라 국외에서 반도체 패키징에 대한 신뢰성 연구에 유한요소법을 적용한 결과는 많이 발표되고 있으나, 경계 요소법을 적용하여 균열 거동을 예측한 경우는 발견하기 힘들다[18-20].

완성된 패키지 내부에 큰 온도 변화가 발생하거나 외부로부터 칩봉지재(epoxy molding compound)에 수분이 침투하게 되면, 열팽창계수의 차이 또는 수분팽창계수의 차이로 인해 칩 접착제층은 전단 변형률뿐만 아니라 인장이나 압축 변형률을 받게된다. 특히 전단 변형률이나 인장 변형률이 작용하게 되면 접착제층의 계면 모서리에는 특이 응력들이 나타나게 되고, 결과적으로 층간 박리를 야기 시킬 수 있다. 본 논문에서는 조사의 초점을 횡방향 인장변형률에 맞추고, 경계요소법(BEM:boundary element method)을 적용하여, 반도체 칩과 리드프레임을 접착하고 있는 접착제층의 계면모서리부근에 발생하는 응력 분포를 조사하고, 계면에 존재하는 균열에 대한 거동을 예측하고자 한다. 먼저, 아무런 균열 없이 칩과 접착제층이 완전하게 결합되어 있는 형상에 횡방향 인장변형률이 작용할 때 자유 경계면 부근에 나타나는 계면 특이 응력들을 경계요소법을 사용하여 조사하고자 한다. 다음에, 칩과 접착제층의 계면에 발생한 모서리 균열들에 대한 응력확대계수를 계산하여 모서리 균열의 거동을 예측하고자 한다. 이러한 연구의 결과는 횡방향 인장 변형률로 인한 접착제층의 거동을 이해하는데 기초자료가 될 뿐만 아니라, 향후 전단 변형률하에서 균열이 전파되는 복잡한 상황에 대한 연구에서 비교 자료로 활용될 수 있다.

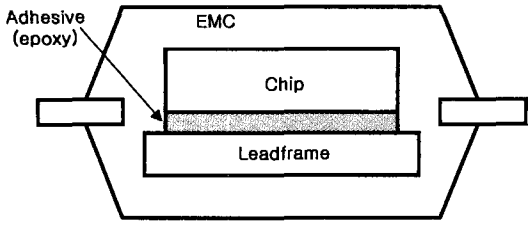

Fig. 1. 플라스틱 패키징 형상.

2. 경계요소 공식화

Fig. 2(a)는 칩이 에폭시 접착제에 의해 결합된 형상을 나타내고 있다. 이 연구에서의 주요 관심사는 칩과 접착제의 계면에서 발생하는 모서리 균열의 거동을 조사하는 것이므로, 해석의 범위를 칩과 접착제의 결합 부분으

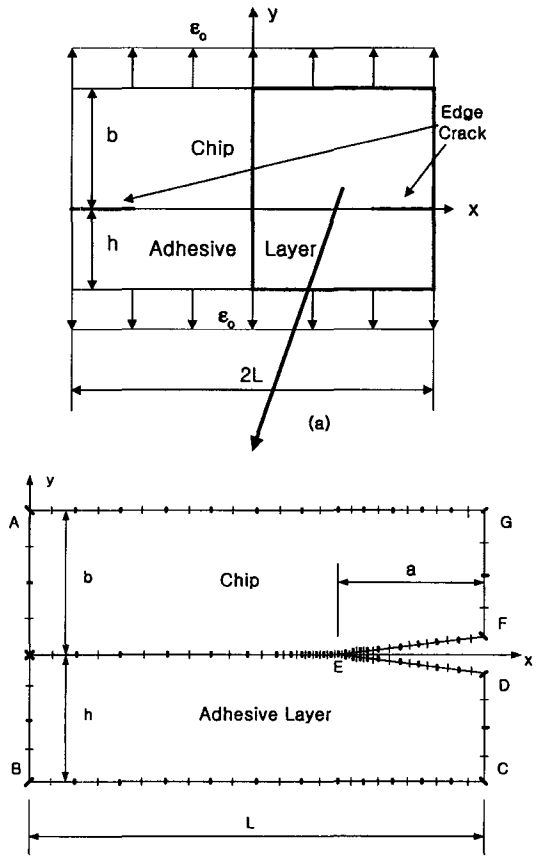

Fig. 2. 경계요소 해석 모델.

로 국한시켰다. 결합된 형상의 계면 모서리에는 모서리 균열이 존재하고 있고, 외부로부터 횡방향 인장변형률이 작용하고 있다. Fig. 2(b)는 응력확대계수의 계산을 위한 2차원 해석 모델을 나타낸다. 문제의 대칭성을 고려하여 2분의 1 부분만 선택하였다. 여기에서 2차원 해석 모델은 평면 변형률(plane strain)상태에 있다고 가정한다.

어떤 체적력(body forces)도 존재하지 않는다는 가정 아래, Fig. 2(b)의 해석 모델에 대한 경계 적분방정식은 다음과 같이 주어진다[21].

칩 영역에 대해서,

$$c_{ij}^{c}(y)u_j^c(y) + \int_S u_j^c(x)T_{ij}^c(y,x)dS^c(x)$$

$$= \int_S t_j^c(x)U_{ij}^c(y,x)dS^c(x) \quad (1)$$

$$c_{ij}^{a}(y)u_j^a(y) + \int_S u_j^a(x)T_{ij}^a(y,x)dS^a(x)$$

$$= \int_S t_j^a(x)U_{ij}^a(y,x)dS^a(x) \quad (2)$$

이다. 식 (1)과 (2)에서, 윗 첨자 'c'와 'a'는 각각 칩과 접착제층을 가리키고, u_j와 t_j는 각각 변위와 표면력 벡터를 나타내며, S는 해석 모델의 경계면을 가리킨다. $c_{ij}(y)$는 경계면의 기하학적 조건에 의해 결정되는 항이고, u_{ij}와 T_{ij}는 탄성 기본해(elastic fundamental solutions)이다.

식 (1)과 (2)는 수치적으로 처리될 수 있는데, 경계면에 대해서 2차 선 요소(quadratic line elements)를 사용하면 정확하고 효율적인 계산이 수행된다. 식 (1)과 (2)를 정리하면 다음과 같은 경계요소 방정식이 구해진다.

칩 영역에 대해서,

$$[H^1 \;\; H^{12}]\begin{bmatrix} u^1 \\ u^{12} \end{bmatrix} = [G^1 \;\; G^{12}]\begin{bmatrix} t^1 \\ t^{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

이고, 접착제층 영역에 대해서는

$$[H^2 \;\; H^{21}]\begin{bmatrix} u^2 \\ u^{21} \end{bmatrix} = [G^2 \;\; G^{21}]\begin{bmatrix} t^2 \\ t^{21} \end{bmatrix} \quad (4)$$

이다. 식 (3)과 (4)에서, 윗 첨자 '1'과 '2'는 각각 칩 영역과 접착제층 영역을 나타내고, '12'와 '21'은 두 영역의 접착 계면을 가리키며, $\boldsymbol{H}$와 $\boldsymbol{G}$는 영향행렬을 나타낸다. 칩과 접착제층의 계면에서 변위의 연속 조건과 표면력의 평형 조건을 적용하면, 다음과 같은 행렬 방정식이 얻어진다. 즉,

$$\begin{bmatrix} H^1 & H^2 & 0 & G^{12} \\ 0 & H^{21} & H^2 & -G^{21} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u^1 \\ u^{12} \\ u^2 \\ t^{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^1 & 0 \\ 0 & G^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} t^1 \\ t^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에 경계조건을 적용하면 경계면에서의 변위와 응력(표면력)이 구해진다. 이 문제에 대한 경계조건은 다음과 같다. Fig. 2(b)에서,

A-B에 대해서, $\tau_{xy} = 0, \quad u_x = 0$
B-C에 대해서, $\tau_x = 0, \quad u_y = 0$
C-D에 대해서, $\sigma_{xx} = 0, \quad \tau_{xy} = 0$
D-E에 대해서, $\sigma_{yy} = 0, \quad \tau_{xy} = 0$
E-F에 대해서, $\sigma_{yy} = 0, \quad \tau_{xy} = 0$
F-G에 대해서, $\sigma_{xx} = 0, \quad \tau_{xy} = 0$
G-H에 대해서, $\tau_{xy} = 0, \quad u_x = (h+b)\ \varepsilon_o$ (6)

3. 계면 균열에 대한 응력확대계수

Fig. 3은 이종 재료의 계면에 존재하는 균열을 나타낸다. 균열 선단 부근에서의 응력들은 다음과 같이 주어진다[22].

$$[\sigma_{yy}(r,\theta) + i\tau_{xy}(r,\theta)]_{\theta=0}$$

$$= \frac{K_1 + iK_2}{\sqrt{2\pi r}} exp\left\{ i\beta \ln\left(\frac{r}{d}\right)\right\} \quad (7)$$

식 (7)에서, r은 균열 선단으로 부터의 거리를 나타내고, d는 로그 항에서 r를 정규화하기 위해 사용되는 임의의 길이를 가리키며, $i = \sqrt{-1}$ 이다. K_1과 K_2는 계면 균열의 복합 응력확대계수 K의 성분들을 나타낸다. 또한,

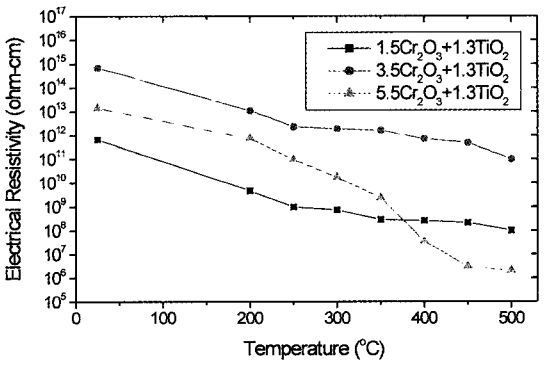

Fig. 3. 이종 재료에 존재하는 계면 균열의 선단 부근.

$$\beta = \frac{1}{2\pi}\ln(\gamma), \quad \gamma = \frac{\chi_I \mu_{II} + \mu_I}{\chi_{II}\mu_{II} + \mu_{II}} \tag{8}$$

$$\chi_i = 3 - 4\ \nu_i \quad \text{(평면 변형률)}$$

$$= \frac{3 - 4\ \nu_i}{3 + 4\ \nu_i} \quad \text{(평면 응력)}$$

이다. 식 (8)에서, 아래 첨자 'I'과 'II'는 각각 칩 영역과 접착제층 영역을 나타내고, μ는 각 영역의 전단계수를 가리키고, ν는 프와송 비를 나타낸다.

응력확대계수의 크기는 다음과 같이 표현된다[9].

$$K^* = |K| = \sqrt{2\pi L}\sqrt{[t_1^A]^2 + [t_2^A]^2} \tag{9}$$

식 (9)에서, t_i^A 는 경계요소법에 의해 계산된 균열 선단에서의 표면력을 나타내고, L은 균열 선단에 있는 경계요소의 길이를 나타낸다. 응력확대계수의 크기는 식 (9)를 이용하여, 균열 선단 부근에서의 응력들로부터 직접 계산할 수 있다. 균열 선단 부근의 거동을 정확히 나타내기 위해서는 특수경계요소가 사용되어야 한다. 이 논문에서는, Fig. 4에 나타난 것처럼, 균열 선단에서의 변위를 나타내기 위하여 사분점 경계요소 (quarter-point boundary element)를 사용하였고, 균열 선단의 응력을 나타내기 위해서 표면력 특이 사분점 경계요소(traction singular quarter-point boundary element)를 사용하였다.

4. 수치해석 결과

이 논문의 수치해석 과정에는 접착제층과 칩에 대해서 다음과 같은 수치 값들이 사용되었다[7].

$$E_a = 2 \times 10^3\ MPa; \quad \nu_a = 0.3$$

$$E_c = 2 \times 10^3\ MPa; \quad \nu_a = 0.3 \tag{10}$$

식 (10)에서, 아랫 첨자 'a'와 'c'는 각각 접착제층과 칩을 가리키고, E는 탄성계수, ν는 프와송 비를 나타낸다.

먼저, 균열이 없는 경우에 횡방향 인장 변형률하에서 계면 모서리 부근에서 나타나는 응력상태를 조사하였다. 이와 같은 경우, Fig. 2(b)에서 a=0이 된다. 해석은 78개의 경계요소가 사용되어 수행되었다. Fig. 5는 계면을 따라 분포하고 있는 수직응력 σ_{yy}와 전단 응력 σ_{xy}를 나타내고 있다. 계면 응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 커지는데, 이러한 특이 응력(singular stresses)은 계면 모서리 부근에 집중되어 있다. 이러한 특이 응력은 접착제층의 전체 길이에 비해 매우 작은 부분에 국한되어 있으나, 응력 구배가 급격히 커지기 때문에 계면모서리 부근에는 계면 박리나 모서리 균열의 발생 가능성이 매우 크다고 볼 수 있다. 다음에, Fig. 2(b)에 나타나 있는 것처럼, 칩과 접착제층의 접착계면에 존재하는 모서리 균열을 해석하였다. 이러한 모서리 균열은 앞에서 설명한 응력 특이성으로 인해 계면 모서리에서 발생할 수 있다. 균열 선단에서의 거동을 정확히 나타내기 위해서, 균열 선단의 변위에 대해서는 사분점 요소 (quarter-point element)를 사용하였고, 균열 선단의 응력을 나타내기 위해서 표면력 특이 사분점 요소(traction singular quarter-point element)를 사용하였다(Fig. 4). 수치해석 과정에서 $(L-a)9h$ 의 조건이 사용되었고, a/h = 1, 2, 3, 4, 5의 경우에 대해서 조사되었다. Fig. 6은 균열 길이에 따른 복합 응력확대 계수 K^*의 크기의 변화를 나타낸다. 균열 길이가 아주 작은 경우를 제외하고는, 복합 응력확대 계수 K^*의 크기는 횡방향 인장 변형률의 크기에 비례하여, 균열의 길이에 무관하게 일정한 값을 유지하게 됨을 알 수 있다.

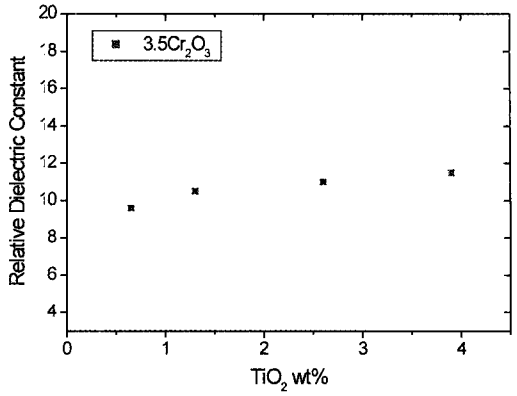

Fig. 4. 균열 선단에서의 사분점 요소와 표면력 특이 사분점 요소.

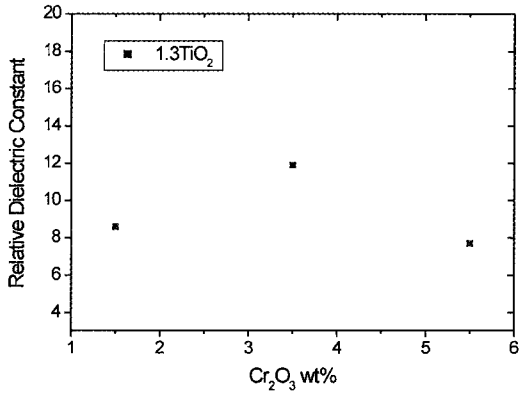

Fig. 5. 칩과 접착제층 사이의 계면에 발생하는 수직응력과 전단응력; (a=0).

이러한 수치해석결과에 의하면, 온도변화나 수분흡수

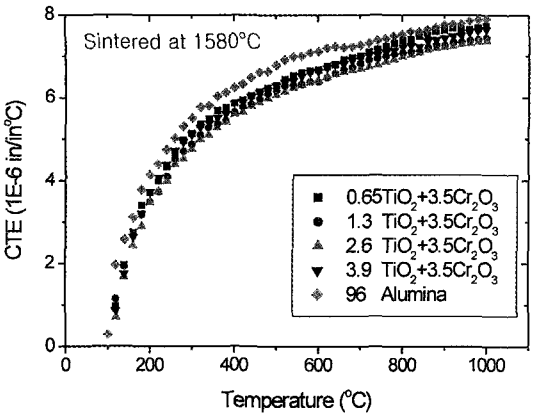

Fig. 6. *a/h*에 대한 복합 응력확대계수 K^*값의 변화.

로 인해 작용하는 횡방향 인장변형률의 크기가 커지면, 칩과 접착제층의 계면 모서리에서 층간 박리나 모서리 균열이 발생할 수 있으나, 응력 특이성이 나타나는 부분이 계면 모서리 부분에 국한 되어있기 때문에, 발생하는 균열도 계면 모서리 부분에서 작은 크기를 갖게 되리라고 예측할 수 있다. 균열의 크기가 작은 경우에, 균열은 성장하지 않고 비교적 안정된 상태를 유지한다고 볼 수 있다. 횡방향 인장변형률이 커지면, K^* 값의 크기도 점차 커지는데, 임계 값을 넘어서면, 균열은 작은 균열에서 점차 큰 균열로 천천히 성장하는게 아니라, 빠르게 성장하여 접착제층 전체를 박리시키는 결과를 가져오리라고 예측할 수 있다. 따라서, 패키내에 큰 온도변화가 발생하거나, 수분흡수가 커져서 횡방향 인장 변형률의 크기가 매우 커지면, 접착제층 전체의 박리가 아주 빠른 속도로 짧은 시간내에 발생한다고 판단된다. 이러한 수치 결과를 칩 접착제층의 신뢰성 연구에 활용하기 위해서는 실험적인 뒷받침이 요구된다고 판단된다.

5. 결 론

이 논문에서는 경계요소법(BEM:boundary element method)을 적용하여, 횡방향 인장 변형률하에서 칩과 접착제층의 접착계면에 나타나는 모서리 균열에 대한 해석을 시도하였다. 먼저, 균열이 없는 경우에 대해 해석을 시도하였다. 횡방향 인장 변형률이 작용하는 경우에 계면 모서리에는 매우 큰 응력 구배가 나타났는데 이러한 특이 응력들은 접착제층의 두께나 길이에 비교해 매우 작은 범위에 걸쳐 나타나고 있다. 이러한 응력 특이성으로 인해, 모서리 균열이나 계면 박리가 발생할 수 있다고 판단되는데, 응력 특이성이 나타나는 부분이 계면 모서리 부분에 국한 되어있기 때문에, 발생하는 균열도 계면 모서리 부분에서 작은 크기를 갖게 되리라고 예측할 수 있다. 다음에, 모서리 균열이 존재하는 계면 문제에 대해 해석을 시도하였다. 해석 결과에 의하면, 복합 응력확대계수의 크기는 균열의 길이가 증가함에 따라 커지다가, 일정한 값을 유지하고 있다. 따라서 완성된 패키지 내부에서 발생한 온도 변화나 외부로부터 칩봉지재(epoxy molding compound)에 침투한 수분으로 인한 횡방향 인장 변형률이 작용하면, 균열의 크기가 작은 경우에, 균열은 성장하지 않고 비교적 안정된 상태를 유지한다고 볼 수 있다. 횡방향 인장변형률이 커져서 임계 K^*값을 넘어서면, 균열은 작은 균열에서 점차 큰 균열로 천천히 성장하는게 아니라, 급격하게 성장하여 접착제층 전체를 박리시키는 결과를 가져오리라고 예측할 수 있다. 따라서, 패키내에 큰 온도변화가 발생하거나, 수분흡수가 커져서 횡방향 인장 변형률의 크기가 작으면 접착제층은 안정된 상태를 유지하지만, 매우 커지면, 접착제층 전체의 박리가 아주 빠른 속도로 짧은 시간내에 발생한다고 판단된다. 이러한 거동을 실제 칩 접착계면의 신뢰성과 연관시키기 위해서는 실험적인 뒷받침이 있어야 한다고 보아진다.

참고문헌

1. H. Lee and Y. Earmme, "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*, 19, 168 (1996).
2. Z.Q. Jiang, Y. Huang, and A. Chandra, "Thermal Stresses in Layered Electronic Assemblies", *ASME Journal of Electronic Packaging*, 119, 127(1997)
3. 이강용, 양지혁, "점탄성을 고려한 플라스틱 IC패키지의 파손해석", 대한기계학회논문집 A권, 제 22권 제 3호, 671 (1998).
4. J. Wang and S. Liu, "Sequential Processing Mechanics Modeling for a Model IC Package", IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part C, 20, 335 (1997).
5. K. Burger, "Fracture Mechanical Characterization of IC-Device Interface", Quality and Reliability Engineering International, 11, 299 (1995).
6. R.A. Pearson, T.B. Llod, and H.R. Azimi, "Adhesion Issues in Epoxy Based Chop Attach Adhesives", IEEE Trans. On Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Part A, 20, 31 (1977).
7. 이새봄, "칩과 리드프레임 사이의 계면파괴인성치에 대한 실험적 고찰", 석사학위논문, 한국과학기술원 (1999).

8. Y. Weitsman, "Interfacial Stresses in Viscoelastic Adhesive Layers due to Moisture Sorption", International Journal of Solids and Structures, 15, 701 (1979).
9. S.S. Lee, "Boundary Element Analysis of the Stress Singularity at the Interface Corner of Viscoelastic Adhesive Layers", International Journal of Solids and Structures, 35, 1385 (1998).
10. S.A. Hamoush and S.H. Ahmad, "Mode I and Mode II Stress Intensity Factors for Interfacial Cracks in Bi-material Media", *Engineering Fracture Mechanics*, 33, 421 (1989).
11. M.A. Aminpour and K.A. Holsapple, "Finite Element Solutions for Propagating Interface Cracks with Singularity Elements", *Engineering Fracture Mechanics*, 39, 451(1991).
12. P.K. Banerjee, The Boundary Element Methods in Engineering, McGraw-Book Company, 1994.
13. M.H. Aliabadi and D.P. Rooke, Numerical Fracture Mechanics, Kluwer Academic Publishers, 1991.
14. G.E. Blandford, A.R. Ingraffea, and J.A. Liggett, "Two-dimensional Stress Intensity Factor Computations Using the Boundary Element Method", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 17, 387 (1981).
15. R. Yuuki and S.B. Cho, "Efficient Boundary Element Analysis of Stress Intensity Factors for Interface Cracks in Dissimilar Materials", *Engineering Fracture Mechanics*, 34, 179 (1989).
16. C.L. Tan and Y.L. Gao, "Treatment of Bimaterials Interface Crack Problems Using the Boundary Element Method", *Engineering Fracture Mechanics*, 36, 919 (1990).
17. S.T. Raveendra and P.K. Banerjee, "Computations of Stress Intensity Factor for Interfacial Cracks", *Engineering Fracture Mechanics*, 40, 89 (1991).
18. S. Liu, J. Zhu, D. Zou, and J. Benson, "Study of Delaminated Plastic Packages by High Temperature Moire and Finite Element Method", *IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, 20, 505 (1997).
19. R. Dudek, M. Scherzer, and A. Schubert, "FE-Simulation for Polymeric Packaging Materials", *IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, 21, 505 (1998).
20. Z.Q. Jiang, Y. Huang, and A. Chandra, "Thermal Stresses in Layered Electronic Assemblies", *ASME Journal of Electronic Packaging*, 119, 127 (1997).
21. C.A. Brebbia and J. Dominguez, Boundary Elements: An Introductory Course, McGraw-Hill Book Company (1989).
22. J.R. Rice, "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks", *ASME Journal of Applied Mechanics*, 55, 98 (1988).