

## 전단하중하의 반도체 칩 접착계면의 특이응력 해석

이상순

한국기술교육대학교, 메카트로닉스공학부

### Analysis of Singular Stresses at the Bonding Interface of Semiconductor Chip Subjected to Shear Loading

Sang Soon Lee

School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

**초 록 :** 반도체 칩과 리드프레임을 접착하고 있는 얇은 접착제층에 전단하중이 가해질 때 발생하는 응력상태를 조사하고 있다. 계면 응력상태를 해석하기 위해서 경계요소법이 사용되고 있다. 선형 탄성 이론을 적용하여 해석하면, 강체와 접착제의 계면이 자유 경계면과 만나는 부분에서  $r^{-1}$  ( $0 < r < 1$ ) 형태의 응력 특이성이 존재한다. 이러한 특이성으로 인해, 모서리 균열이나 계면 박리가 발생할 수 있다.

**Abstract :** The stress state developed in a thin adhesive layer bonded between the semiconductor chip and the leadframe and subjected to a shear loading is investigated. The boundary element method (BEM) is employed to investigate the behavior of interface stresses. Within the context of a linear elastic theory, a stress singularity of type  $r^{-1}$  ( $0 < r < 1$ ) exists at the point where the interface between one of the rigid adherends and the adhesive layer intersects the free surface. Such singularity might lead to edge crack or delamination.

#### 1. 서 론

전자 제품의 경박단소화 추세에 따라 칩의 두께는 점점 얇아지고 있고, 패키지의 크기도 점차 작아지고 있다. 패키징된 칩은 작동시 열이 발생하고, 사용중에 수분 흡수등의 영향을 받게되어 패키지의 신뢰성이 때로 문제가 된다. 완성된 패키지내에는 여러 계면이 존재하는데 (Fig. 1), 이러한 계면중에서 칩과 EMC(epoxy molding compound)계면, 칩과 리드프레임 계면, 그리고 리드프레임과 EMC계면에서 파손이 많이 발생한다. 이러한 계면들에서 발생하는 파손에 대한 연구는 오래전 부터 진행되어 왔는데, 칩과 리드프레임에서의 거동에 대한 연구는 최근들어 활발히 진행되고 있다.<sup>1-3)</sup> 칩과 리드프레임의 계면에서 발생하는 균열은 EMC내부로 진전되며, 이러한 균열은 전자소자 전체의 불량률을 초래하게 되기 때문에 이 부분에 대한 연구는 칩 패키지의 안정성을 향상시키기 위해서 중요하다.

칩과 리드프레임의 계면 박리로 인한 패키지의 파손

을 막기 위해서는 칩과 리드프레임 사이의 신뢰성 있는 접착 방법이 필요하다. 많이 사용되고 있는 재료로는 에폭시나 폴리이미드 접착제가 있다. 전자패키징 산업에서는, 다이전단시험 (die shear test)으로 칩과 리드프레임의 접합강도를 측정한다(Fig. 2).<sup>3,4)</sup> 측정된 전단강도는 열 응력에 의해 칩과 리드프레임에 계면 박리가 생기는 경우에 임계 물성치로서 의미를 가질 수 있다. 그러나 일반적으로 칩의 접착계면에서의 응력상태는 매우 복잡하며<sup>5,6)</sup>, 응력분포가 위치에 따라 달라지므로 신뢰성 있

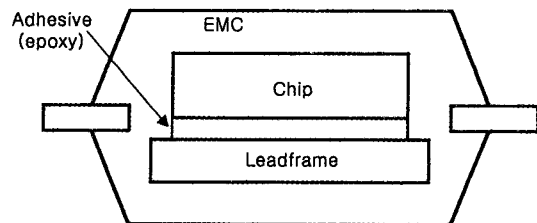


Fig. 1. Plastic Package Configuration.

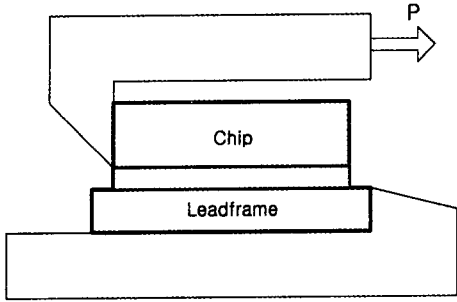


Fig. 2. Die Shear Test.

는 접착방법을 계획하기 위해서는 계면에서의 응력분포에 대한 정확하고 신뢰성있는 예측이 필요하다.

이 논문에서는 경계요소법(BEM: boundary element method)을 적용하여, 전단하중하에서 칩과 리드프레임의 접착계면에 나타나는 응력분포의 해석을 시도하였다. 에폭시를 사용하는 경우 150°C 이상의 고온에서 접착하고 경화시킨 후 상온으로 냉각시키는 과정을 갖는다. 이러한 냉각과정에서 접착계면에는 잔류응력이 발생하게 된다. 따라서 칩과 리드프레임의 전단거동을 조사하기 위해서 먼저 이러한 잔류응력을 조사하였다. 다음에 칩과 리드프레임의 접착계면에 전단하중이 작용하는 경우에 접착계면에 발생하는 응력에 대한 해석을 시도하였다.

## 2. 잔류응력 해석

Fig. 3(a)는 칩과 리드프레임이 에폭시 접착제에 의해 결합된 형상을 나타내고 있다. 접착공정에 소요되는 시간은 사용하는 에폭시의 종류에 따라 차이가 나지만, 여기서는 150°C에서 접착하고 상온으로 냉각시키는 과정을 택하였다. 일반적으로 칩과 리드프레임의 강성은 접착제의 강성보다 매우 크므로, 칩과 리드프레임은 해석과정에서 강체(rigid body)로 취급하였다. 접착제층의 길이는 2L이고 두께는 2h이다. 여기서 접착제층은 선형탄성체로 가정한다.  $T_0=150^\circ\text{C}$ 에서 상온( $23^\circ\text{C}$ )으로 냉각되는 과정에서 칩의 접착계면에서 발생하는 잔류응력을 해석하기 위해서 Fig. 3(b)에 나타나 있는 경계요소 해석모형을 택하였다. 문제의 반대칭성을 고려하여 접착제층의 4분의 1만 모델링하면 된다. 여기에서 접착제층은 평면 변형률(plane strain)상태에 있다고 가정한다. 수치해석은  $L/h=25$ 에 대해서 수행한다.

전자 패키지에서 사용되는 접착제층의 두께는 대체로 50 μm를 넘지 않는다. 이렇게 얇은 층에 온도변화가 발생할 때 접착제 내부에서의 온도분포는 균일하다고 가

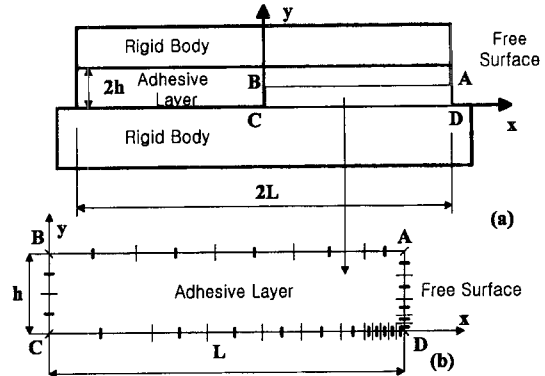


Fig. 3. Boundary Element Modeling.

정할 수 있다. 즉,  $\Delta T(x)=\Delta T$ 로 가정한다. 여기서,  $x$ 는 접착제층내의 위치벡터를 나타낸다. 접착제층에서의 균일한 온도변화  $\Delta T$ 는  $\gamma\Delta Tn_j$ 에 해당하는 표면력(traction)의 증가와 동등한데,  $\gamma$ 는 다음과 같이 주어진다.<sup>7)</sup>

$$\gamma = 3K\alpha \tag{1}$$

여기에서,  $K$ 는 체적 탄성계수를 나타내고,  $n_j$ 는 경계면에서의 단위 외향법선 성분들을 가리키며,  $\alpha$ 는 접착제층의 열 팽창계수를 나타낸다.

어떤 체적력(body forces)도 존재하지 않는다는 가정 아래, Fig. 3(b)의 해석 모델에 대한 경계 적분방정식은 다음과 같이 주어진다.<sup>7)</sup>

$$\begin{aligned} c_{ij}(y)u_j(y) + \int_S u_j(x)T_{ij}(y, x)dS(x) \\ = \int_S t_j(x)U_{ij}(y, x)dS(x) + \int_S \gamma\Delta Tn_j(x)U_{ij}(y, x)dS(x) \end{aligned} \tag{2}$$

식(2)에서,  $u_j$ 와  $t_j$ 는 각각 변위와 표면력 벡터를 나타내고,  $S$ 는 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 (2)는 수치적으로 처리될 수 있는데, 경계면에 대해서 2차 선요소(quadratic line elements)를 사용하면 정확하고 효율적인 계산이 수행된다. 식 (2)를 정리하면 다음과 같은 경계요소 방정식이 구해진다.

$$[H]\{u\} = [G]\{t\} + \{B_T\} \tag{3}$$

식 (3)에서,  $H$ 와  $G$ 는 영향행렬을 나타내고,  $B_T$ 는 온도의 영향을 나타내는 항이다. 식 (3)에 경계조건을 적용하면 경계면에서의 변위와 응력(표면력)이 구해진다. 이

문제에 대한 경계조건은 다음과 같다.

D-A에 대해서,  $\sigma_{xx} = 0, \tau_{xy} = 0$

A-B에 대해서,  $\int_L \sigma_{xx} dL = 0, \tau_{xy} = 0, u_y = 0$

B-C에 대해서,  $\sigma_x = 0, u_y = 0$

C-D에 대해서,  $u_x = 0, u_y = 0$

이 논문의 수치해석 과정에는 접착제에 대해서 다음과 같은 수치 값들이 사용되었다.<sup>3)</sup>

$E = 2 \times 10^3 \text{ MPa}$

$K = 1.67 \times 10^3 \text{ MPa}$

$\alpha = 43^{-6} / ^\circ\text{C}$  (5)

식 (5)에서,  $E$ 는 탄성계수,  $K$ 는 체적 탄성계수, 그리고  $\alpha$ 는 열 팽창계수를 나타낸다.

Fig. 3(b)에 나타난 경계요소 모델을 이용하여 해석한 결과가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4는 접착제층의 계면을 따라 발생하고 있는 수직응력  $\sigma_{yy}$ 와 전단응력  $\tau_{xy}$ 를 나타내고 있다. 계면응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 큰 변화를 보이는데, 이러한 응력분포를 살펴볼 때, 접착제로 결합되어 있는 칩과 리드프레임이 높은 접착온도에서 상온으로 냉각될 때 계면 모서리에는 특이응력들이 나타나며, 이러한 응력 특이성으로 인해 계면 모서리의 접착 결합이 약할 경우에는 모서리 균열이나 박리 현상이 쉽게 발생할 수 있다. 이러한 응력 특이성에 대한

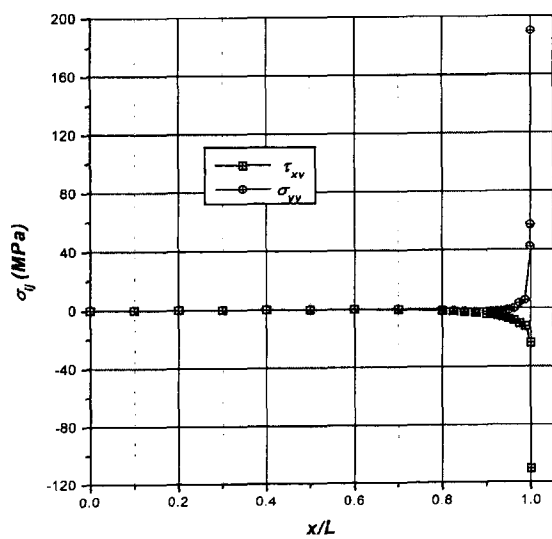


Fig. 4. Distribution of interface normal and shear stresses.

특성을 이해하기 위해서는 특이 차수 (order of singularity)와 응력특이계수(stress singularity factor)에 대한 조사가 필요해 진다.

### 3. 특이 차수와 응력특이계수

앞에서 계산된 응력들에 대해 응력특이계수를 계산하기 위해서, 먼저 특이 차수를 계산한다. Fig. 5는 접착제층이 강체에 결합된 계면 모서리 부근을 보여 주고 있다. 평면 변형을 상태에서, 특이 차수는 다음과 같은 응력함수 식으로부터 계산될 수 있다. 즉,

$$\nabla^4 \phi(r, \theta) = 0 \tag{6}$$

식 (6)을 전개하는데 필요한 경계조건은 Fig. 5에 표현되어 있다. 식 (6)에 대해서, Williams가 제안한 방법을 적용하여 다음과 같은 응력함수를 가정한다.<sup>6)</sup>

$$\phi(r, \theta) = r^{\lambda+1} f(\theta) \tag{7}$$

Fig. 5에 나타난 것 처럼,  $r$ 는 계면 모서리로부터의 거리를 나타내고,  $\theta$ 는 수평 축과  $r$ 이 이루는 각을 나타낸다.  $\lambda$ 는 미지수로써 실수나 허수일 수 있다.  $f(\theta)$ 는 경계조건을 적용하여 구해지는 함수이다. 자세한 설명은 참고문헌<sup>6)</sup>에 설명되어 있다. 식 (7)로 주어진 응력함수를 사용하면, 다음과 같은 특성 방정식이 구해진다.

$$(3 - 4\nu) \cos(\pi\lambda) - 2\lambda^2 + 8\nu^2 - 12\nu + 5 = 0 \tag{8}$$

식 (8)에서  $\nu$ 는 접착제의 Poisson 비를 나타낸다. 접착제의 Poisson 비  $\nu$ 는 탄성계수  $E$ 와 체적 탄성계수  $K$ 를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\nu = \frac{3K - E}{6K} \tag{9}$$

따라서, 식 (5)에 주어진 값들을 식 (9)에 대입하면, 접착제의 Poisson 비  $\nu$ 를 계산 할 수 있다.

계면 모서리에서의 특이차수는  $1-\lambda$ 이다. 식 (8)은 Poisson 비  $\nu$ 값에 대해서 일반적인 수치 해석적인 방법

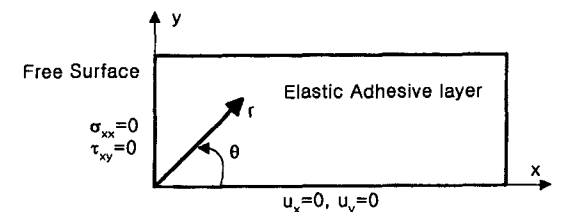


Fig. 5. Region near interface corner of the elastic adhesive layer.

을 이용하여 쉽게 계산된다. 특이 차수를 구하는 문제는  $0 < \text{Re}(\lambda) < 1$ 의 범위에 해당되는  $\lambda$ 값만이 의미를 지닌다.  $0 < \nu < 0.5$ 에 대해서,  $0 < \text{Re}(\lambda) < 1$ 의 조건을 갖는  $\lambda$ 값은 오직 하나만 존재하고, 그러한  $\lambda$ 값은 실수이다. 이러한 내용에 관한 자세한 수학적 설명은 참고 문헌<sup>5)</sup>에 나와 있다. 식 (8)에 식 (5)로 주어진 값들을 대입하여 수치적으로 계산하면,

$$\lambda = 0.711 \tag{10}$$

이 된다. 따라서 특이 차수의 값은  $0.289 (= 1 - \lambda)$ 이다. 자유 경계면에서의 응력특이계수는  $h^{1-\lambda}$ 로 정규화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$K_{ij} = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \frac{r}{h} \right)^{1-\lambda} \sigma_{ij}(r, \theta) \Big|_{\theta=0} \tag{11}$$

식 (11)은 응력 단위를 갖는 양이다. 주어진 문제에 대한 응력특이계수의 값은

$$K_{yy} = 50.3 \text{ MPa}, K_{xy} = -29.1 \text{ MPa} \tag{12}$$

가 된다. 이러한 응력특이계수를 이용하여 접착제층의 신뢰성을 평가하기 위해서는 실험적인 뒷받침이 요구된다고 보여진다. 즉 실험을 통해 얻어진 임계 특이응력계수와 수치적으로 계산된 응력특이계수를 비교하여 접착된 칩의 신뢰성을 평가할 수 있다.

#### 4. 전단하중하의 접착계면에서의 응력분포

접착공정을 거쳐 상온으로 냉각된 접착제층에 전단하중이 작용할 때 접착제층 계면에 나타나는 응력을 조사하기 위해서, Fig.3(b)에 나타난 경계요소모델을 사용한다. 해석과정에 적용한 경계조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{D-A에 대해서, } & \sigma_{xx} = 0, \tau_{xy} = 0 \\ \text{A-B에 대해서, } & \sigma_{yy} = 0, \tau_{xy} = \tau_0 \\ \text{B-C에 대해서, } & \sigma_{xx} = 0, u_y = 0 \\ \text{C-D에 대해서, } & u_x = 0, u_y = 0 \end{aligned} \tag{13}$$

식 (13)에서,  $\tau_0$ 는 접착제층의 중심부에 작용하는 평균 전단응력을 나타낸다. 계산에 사용된 접착제층의 물성은 식 (5)에 나타나 있다.

Fig. 6은 전단하중이 가해진 경우, 접착제층의 계면에 나타나는 응력상태를 나타내고 있다. 냉각과정에서 발생한 계면응력의 경우와 유사하게, 전단하중이 작용하는 경우에 발생한 계면응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 큰 변화를 보이는데, 이러한 응력변화는 계면 모서리 부근에 집중되어 있다. 그러나, 높은 온도에서 상온으

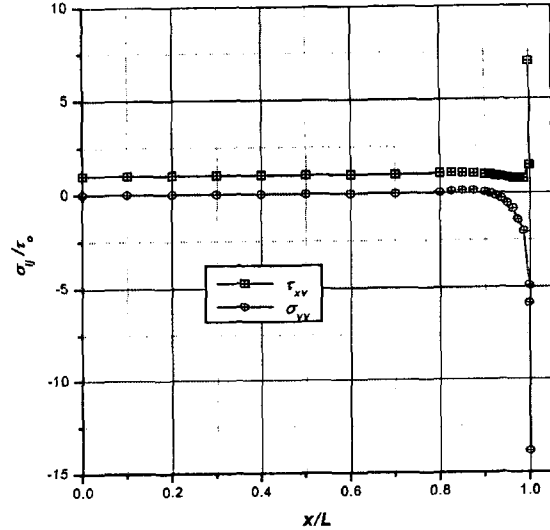


Fig. 6. Distribution of interface normal and shear stresses.

로 냉각될 때 발생하는 수직 특이응력이 인장상태에 있던 것과는 달리, 전단하중하에서의 수직 특이응력은 압축응력상태에 있게 된다. 따라서, 전단하중에 의해 발생한 계면응력에 냉각과정에서 발생한 계면응력을 중첩해보면, 모서리에서의 박리현상은 냉각과정에서 발생한 특이응력과 전단하중하에서 발생한 특이응력들의 상대적인 크기에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 즉, 전단하중의 크기가 비교적 작을 경우에는, 전단하중은 냉각과정에서 발생한 계면 모서리에서의 응력특이성을 줄이는 결과를 가져와 계면 모서리에서의 박리가능성이 줄어들 수 있다. 반면에, 외부 전단하중이 매우 커지면 계면 모서리에서의 응력특이성은 전단하중에 의한 영향을 주로 받게 된다. 이와 같은 경우에, 계면 모서리에서의 수직응력은 압축상태에 있게되므로, 모서리에서의 박리현상은 박리를 발생시키려는 전단응력과 이를 억제하려는 압축응력의 상대적인 크기에 영향을 받는다고 볼 수 있다. 현재의 해석결과에 의하면, 접착제의 결합과정에서 모서리 부근에서의 접착이 약할 경우, 쉽게 박리되거나, 모서리에서부터 쉽게 균열이 발생하리라고 예상된다. 따라서, 칩과 리드프레임의 결합을 신뢰성있게 처리하기 위해서는 전체 계면을 따라 접착제의 결합이 잘 이루어져야겠지만, 특히 계면 모서리에서의 신뢰성있는 결합이 요구된다고 판단된다.

#### 5. 결 론

이 논문에서는 경계요소법(BEM:boundary element

method)을 적용하여, 전단하중하에서 칩과 리드프레임의 접착계면에 나타나는 응력분포의 해석을 시도하였다. 에폭시 접착제의 경우 150°C의 고온에서 접착하고 경화시킨 후 상온으로 냉각시키는 과정을 갖는다. 이러한 냉각과정에서 접착계면에는 잔류응력이 발생하게 된다. 따라서 칩과 리드프레임의 전단거동을 조사하기 위해서 먼저 이러한 잔류응력을 조사하였다. 다음에 칩과 리드프레임의 접착계면에 전단하중이 작용하는 경우에 접착계면에 발생하는 응력에 대한 해석을 시도하였다. 냉각과정에서 뿐만 아니라 전단하중이 작용하는 경우에 계면 모서리에는 매우 큰 응력 구배가 나타났다. 이러한 특이 응력들은 접착제층의 두께나 길이에 비해 비교적 작은 범위에 걸쳐 나타나고 있다. 이러한 특이성으로 인해, 모서리 균열이나 계면 박리가 발생할 수 있다. 따라서, 칩과 리드프레임의 결합이 건전하게 이루어지기 위해서는 계면 모서리에서 신뢰성있는 결합이 요구된다고 판단된다.

### 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. K. Burger, "Fracture Mechanical Characterization of IC-Device Interface", Quality and Reliability Engineering International, 11, 299(1995).
3. 이 세범, "칩과 리드프레임 사이의 계면파괴인성치에 대한 실험적 고찰", 석사학위논문, 한국과학기술원 (1999).
4. M.G. Pecht and L.T. Nguyen, "Plastic Packaging", in Microelectronic Packaging Handbook, Part II, Tummala, R.R., et al., eds., Chapman & Hall (1997).
5. D.B. Bogy, "Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading", Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics, 35, 460 (1968).
6. M.L. Williams, "Stress Singularity Resulting from Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extensions", Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics, 74, 526 (1952).
7. C.A. Brebbia and J. Dominguez, Boundary Elements: An Introductory Course, McGraw-Hill Book Company (1989).

1. H. Lee and Y. Earmme, "A Fracture Mechanics Analysis of the Effects of Materials Properties and Geom-