

# 반도체 칩 접착 계면에 존재하는 모서리 균열 거동에 대한 점탄성 해석

## Viscoelastic Analysis for Behavior of Edge Cracks at the Bonding Interface of Semiconductor Chip

이 상 순\*

Lee, Sang Soon

(논문접수일 : 2001년 2월 15일 ; 심사종료일 : 2001년 8월 14일)

### 요 지

탄성 반도체 칩과 점탄성 접착제층의 계면에 존재하는 모서리 균열에 대한 응력확대계수를 조사하였다. 이러한 균열들은 자유 경계면 부근에 존재하는 응력 특이성으로 인해 발생할 수 있다. 계면 응력상태를 해석하기 위해서 시간 영역 경계요소법이 사용되었다. 작은 크기의 모서리 균열에 대한 응력확대계수가 계산되었다. 점탄성 이완으로 인해 응력확대계수의 크기는 시간이 경과함에 따라 작아진다.

**핵심용어** : 시간 영역 경계요소법, 계면 모서리 균열, 점탄성 해석, 반도체 칩

### Abstract

The stress intensity factors for edge cracks located at the bonding interface between the elastic semiconductor chip and the viscoelastic adhesive layer have been investigated. Such cracks might be generated due to a stress singularity in the vicinity of the free surface. The time domain boundary element method(BEM) has been employed to investigate the behavior of interface stresses. The overall stress intensity factor for the case of a small interfacial edge crack has been computed. The magnitude of stress intensity factors decreases with time due to viscoelastic relaxation.

**Keywords** : *time-domain boundary element method, interface edge crack, viscoelastic analysis, semiconductor chip*

### 1. 서 론

Fig. 1은 플라스틱 재료(에폭시)로 패키징된 반도체 칩을 나타낸다. 반도체 칩은 에폭시나 폴리이미드 같은 고분자 접착제를 통해 리드프레임에 결합되어진다. 칩과 접착제는 서로 다른 기계적 성질 및 열적 성질을 지니기 때문에, 온도 변화가 발생하거나, 수분 흡

수가 생기면 계면에 복잡한 응력 상태가 나타나게 된다. 특히, 계면 모서리에는 응력 특이성이 존재하게 되는데, 이러한 응력 특이성은 칩과 접착제의 계면 모서리에서 박리 현상이나 모서리 균열을 야기시킬 수 있기 때문에 이 부분에 대한 연구는 칩 패키지의 안정성을 향상시키기 위해서 중요하다.<sup>1),2)</sup>

칩과 리드프레임 사이에 존재하는 계면 균열에 관한

\* 정회원 · 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

· 이 논문에 대한 토론을 2001년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

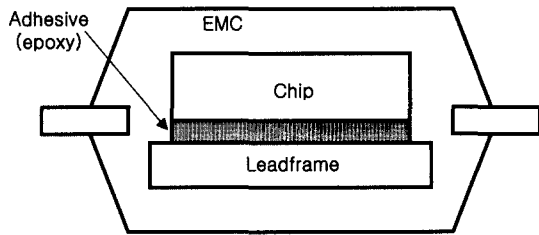


Fig. 1 Plastic Package Configuration

연구는 활발히 진행되어 왔다. Burger는 칩과 리드프레임의 열 팽창계수의 차이로 인해 접착계면에서 균열이 생성될 가능성이 있다고 발표하였다.<sup>3)</sup> Pearson 등은 반도체 칩 접착제에서의 파괴 인성값을 실험을 통해 측정하였다.<sup>4)</sup> 최근에는 온도변화를 고려한 파괴인성치의 측정이 시도되었다.<sup>5)</sup> 그러나 칩과 리드프레임을 접합시키는 접착제는 고분자 재료이기 때문에, 온도가 높아지거나, 수분 흡수가 발생하면, 탄성거동이 아닌 점탄성 거동을 하게 된다. 패키징된 칩은 작동시 열이 발생하고, 사용 중에 수분 흡수등의 영향을 받기 때문에, 칩의 접착계면의 신뢰성을 조사할때는, 탄성 해석이 아닌 점탄성 해석을 수행해야 한다. 일반적으로 칩의 접착계면에서의 응력상태는 매우 복잡하며, 계면 모서리 부근에 응력 특이성이 존재하므로,<sup>1),6)</sup> 신뢰성 있는 접착방법을 계획하고 칩 접착면의 건전성을 예측하기 위해서는, 계면 모서리 균열의 점탄성거동에 대한 이해가 필요하다고 볼 수 있다.

완성된 패키지 내부에 큰 온도 변화가 발생하거나 외부로부터 칩 봉지재(epoxy molding compound)에 수분이 침투하게 되면, 열팽창계수의 차이 또는 수분팽창계수의 차이로 인해 칩 접착제층은 전단 변형률 뿐만 아니라 인장이나 압축 변형률을 받게된다.<sup>7)~8)</sup> 특히, 전단 변형률이나 인장 변형률이 작용하게 되면 접착제층의 계면 모서리에는 특이 응력들이 나타나게 되고, 결과적으로 층간 박리나 모서리 균열을 야기시킬 수 있다.<sup>9)~12)</sup> 본 논문에서는 조사의 초점을 횡방향 인장 변형률에 맞추고, 시간 영역 경계요소법(BEM : boundary element method)을 적용하여, 횡방향 인장 변형률하에서 칩과 접착제층의 접착계면에 나타나는 모서리 균열의 점탄성 거동에 대한 해석을 시도하고자 한다. 먼저, 아무런 균열 없이 칩과 접착제층이 완전하게 결합되어 있는 형상에 횡방향 인장변형률이 작용할 때 자유 경계면 부근에 나타나는 계면 특이 응력

들을 경계요소법을 사용하여 조사하고자 한다. 다음에, 칩과 접착제층의 계면에 발생한 모서리 균열들에 대한 응력확대계수를 계산하여 모서리 균열의 점탄성 거동을 예측하고자 한다. 이러한 연구의 결과는 횡방향 인장변형률로 인한 접착제층의 거동을 이해하는데 기초자료가 될 뿐만 아니라, 향후 전단 변형률하에서 균열이 전파되는 복잡한 상황에 대한 연구에서 비교자료로 활용될 수 있다.

## 2. 경계요소 공식

Fig. 2(a)는 칩이 에폭시 접착제에 의해 결합된 형상을 나타내고 있다. 이 연구에서의 주요 관심사는 칩과 접착제의 계면에서 발생하는 모서리 균열의 점탄성 거동을 조사하는 것이므로, 해석의 범위를 칩과 접착제의 결합 부분으로 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 가정아래, Fig. 2(b)의 해석 모델에 대한 점탄성 경계적분방정식은 다음과 같이 주어진다.<sup>13)</sup>

탄성 칩 영역에 대해서,

$$c_{ij}^c(\mathbf{y}) u_j^c(\mathbf{y}) + \int_S u_j^c(\mathbf{x}) T_{ij}^c(\mathbf{y}, \mathbf{x}) dS^c(\mathbf{x}) = \int_S t_j^c(\mathbf{x}) U_{ij}^c(\mathbf{y}, \mathbf{x}) dS^c(\mathbf{x}) \quad (1)$$

이고, 점탄성 접착제층 영역에 대해서는,

$$c_{ij}^a(\mathbf{y}) u_j^a(\mathbf{y}, t) + \int_S [u_j^a(\mathbf{y}', t) T_{ij}^a(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) + \int_{0+}^t u_j^a(\mathbf{y}', t-t') \frac{\partial T_{ij}^a(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; t')}{\partial t'} dt'] dS^a(\mathbf{y}') = \int_S [t_j^a(\mathbf{y}', t) U_{ij}^a(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) + \int_{0+}^t t_j^a(\mathbf{y}', t-t') \frac{\partial U_{ij}^a(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; t')}{\partial t'} dt'] dS^a(\mathbf{y}') \quad (2)$$

이다. 식(1)과 (2)에서, 윗 첨자 'c'와 'a'는 각각 탄성

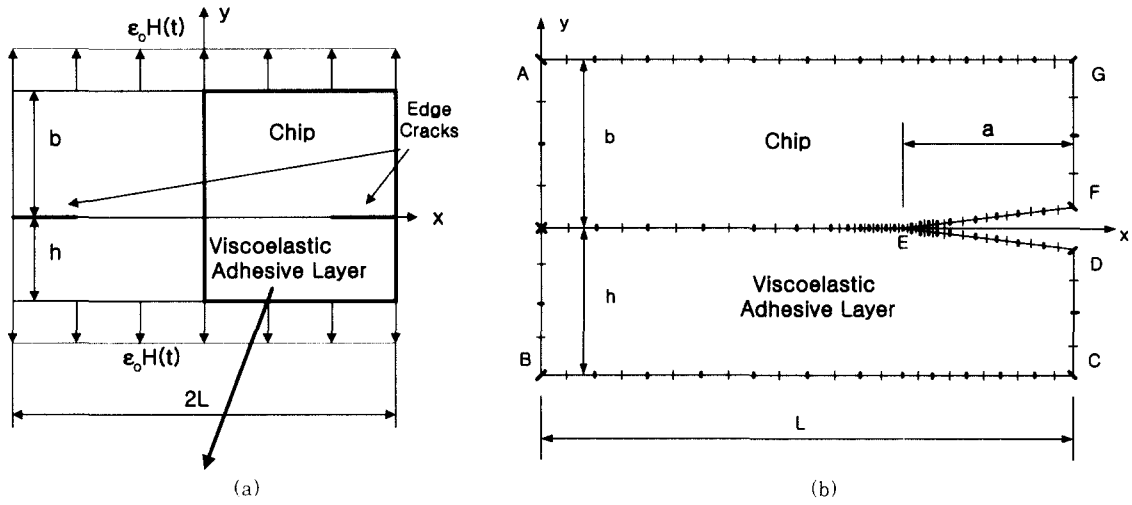


Fig. 2 Idealized Model

칩과 점탄성 접착제층을 가리키고,  $u_i$ 와  $t_i$ 는 각각 변위와 표면력 벡터를 나타내며,  $S$ 는 해석 모델의 경계면을 가리킨다.  $c_{ij}(\mathbf{y})$ 는 경계면의 기하학적 조건에 의해 결정되는 항이고,  $U_{ij}$ 와  $T_{ij}$ 는 점탄성 기본해(elastic fundamental solutions)이다. 이러한 점탄성 기본해는 탄성 기본해에 탄성-점탄성 대응원리를 적용하면 구할 수 있다.

식(1)과 (2)는 수치적으로 처리될 수 있는데, 경계면에 대해서 2차 선 요소(quadratic line elements)를 사용하고, 시간에 대해서는 수정 심프슨 공식을 적용하면 정확하고 효율적인 계산이 수행된다.<sup>13)</sup> 식(1)과 (2)를 정리하면 다음과 같은 경계요소 방정식이 구해진다.

탄성 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

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

이다. 식(3)과 (4)에서, 윗 첨자 '1'과 '2'는 각각 탄성 칩 영역과 점탄성 접착제층 영역을 나타내고, '12'와 '21'은 두 영역의 접착 계면을 가리킨다.  $H$ 와  $G$ 는 영향

행렬을 가리키고,  $R$ 은 점탄성 이력을 나타낸다. 참고 문헌<sup>13)</sup>에 설명된 절차에 따라, 칩과 접착제층의 계면에서 변위의 연속 조건과 표면력의 평형 조건을 적용하면, 다음과 같은 행렬 방정식이 얻어진다. 즉,

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

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

- A-B에 대해서,  $\tau_{xy} = 0, u_x = 0$
- B-C에 대해서,  $u_x = 0, u_y = 0$
- C-D에 대해서,  $\sigma_{xx} = 0, \tau_{xy} = 0$
- D-E에 대해서,  $\sigma_{yy} = 0, \tau_{xy} = 0$
- E-F에 대해서,  $\sigma_{yy} = 0, \tau_{xy} = 0$
- F-G에 대해서,  $\sigma_{xx} = 0, \tau_{xy} = 0$
- G-A에 대해서,  $\tau_{xy} = 0, u_y = (h + b)\epsilon_0 H(t)$  (6)

식(6)에서,  $H(t)$ 는 Heaviside 단위스텝 함수를 나타낸다.

### 3. 계면 균열에 대한 응력확대계수

Fig. 3은 탄성재료와 점탄성 재료로 구성된 이중 재료의 계면에 존재하는 균열을 나타낸다. 탄성-점탄성 대응 원리를 적용하여 라플라스 변환공간에서 응력을 표현하면, 균열 선단 부근에서의 응력들은 다음과 같이 주어진다.<sup>14)</sup>

$$\begin{aligned} & [\bar{\sigma}_{yy}(r, \theta; s) + i\bar{\tau}_{xy}(r, \theta; s)]_{\theta=0} \\ &= \frac{\bar{K}_1(s) + i\bar{K}_2(s)}{\sqrt{2\pi r}} \exp\left\{i\bar{\beta}(s) \ln\left(\frac{r}{d}\right)\right\} \quad (7) \end{aligned}$$

식(7)에서,  $\bar{\sigma}_{yy}$ 와  $\bar{\tau}_{xy}$ 는 라플라스 변환된 점탄성 응력들을 가리키고,  $\bar{K}_1$ 과  $\bar{K}_2$ 는 라플라스 변환된 복합 응력확대계수  $\bar{K} (= \bar{K}_1 + i\bar{K}_2)$ 의 성분들을 나타내며,  $s$ 는 라플라스 변환변수를 가리킨다.  $r$ 은 균열 선단으로부터의 거리를 나타내고,  $d$ 는 로그 항에서  $r$ 를 정규화하기 위해 사용되는 임의의 길이를 가리키며,  $i = \sqrt{-1}$ 이다. 또한,

$$\begin{aligned} \bar{\beta} &= \frac{1}{2\pi} \ln[\bar{\gamma}(s)], \\ \bar{\gamma}(s) &= \frac{\bar{x}_I(s) \mu_{II} + s \bar{\mu}_I(s)}{x_{II} s \mu_I(s) + \mu_{II}} \\ \bar{x}_I(s) &= 3 - 4s \bar{\nu}_I(s) \quad (\text{평면 변형률}) \\ &= \frac{3 - s \bar{\nu}_I(s)}{1 + s \nu_I(s)} \quad (\text{평면 응력}) \\ x_{II} &= 3 - 4 \nu_{II} \quad (\text{평면 변형률}) \\ &= \frac{3 - \nu_{II}}{1 + \nu_{II}} \quad (\text{평면 응력}) \quad (8) \end{aligned}$$

이다. 식(8)에서, 아래 첨자 'I'과 'II'는 각각 칩 영역과 접착제층 영역을 나타내고,  $\bar{\mu}_I(s)$ 와  $\bar{\nu}_I(s)$ 는 점탄성 전단이완계수  $\mu_I(t)$ 와 점탄성 프와송 비  $\nu_I(t)$ 의 라플라스 변환을 나타내며,  $\mu_{II}$ 는 탄성 영역의 전단계수를 가리키고,  $\nu_{II}$ 는 프와송 비를 나타낸다.

라플라스 변환공간에서, 응력확대계수의 크기는 식(7)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \bar{K}_o(s) &= |\bar{K}(s)| = \sqrt{[\bar{K}_1(s)]^2 + [\bar{K}_2(s)]^2} \\ &= \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sqrt{[\bar{\sigma}_{yy}(r, 0; s)]^2 + [\bar{\tau}_{xy}(r, 0; s)]^2} \quad (9) \end{aligned}$$

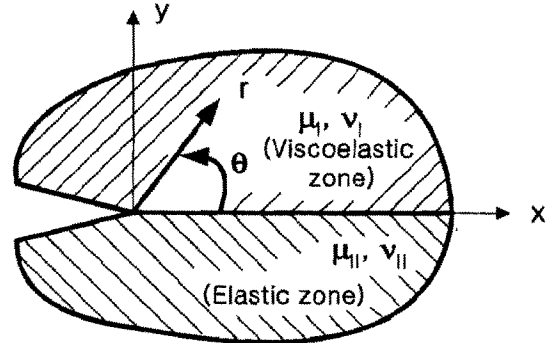


Fig. 3 Region near crack-tip along elastic-viscoelastic bimaterial interface

시간공간에서의 응력확대계수의 크기는 식(9)로부터 다음과 같이 계산된다.<sup>14)</sup>

$$K_o(t) = \sqrt{2\pi L} \sqrt{[t_1^A(t)]^2 + [t_2^A(t)]^2} \quad (10)$$

식(10)에서,  $t_i^A$ 는 경계요소법에 의해 계산된 균열 선단에서의 표면력을 나타내고,  $L$ 은 균열 선단에 있는 경계요소의 길이를 나타낸다. 응력확대계수의 크기는 식(10)을 이용하여, 균열 선단 부근에서의 응력들로부터 직접 계산할 수 있다. 균열 선단 부근의 거동을 정확히 나타내기 위해서는 특수 경계요소가 사용되어야 한다. 이 논문에서는 Fig. 4에 나타난 것처럼, 균열 선단에서의 변위를 나타내기 위하여 사분점 요소(quarter-point element)를 사용하였고, 균열 선단의 응력을 나타내기 위해서 특이 사분점 요소(traction singular quarter-point element)를 사용하였다. 이러한 경계 요소에 대한 설명 및 수치해석 결과는 참고문헌<sup>15), 16)</sup>에 자세히 나타나 있다.

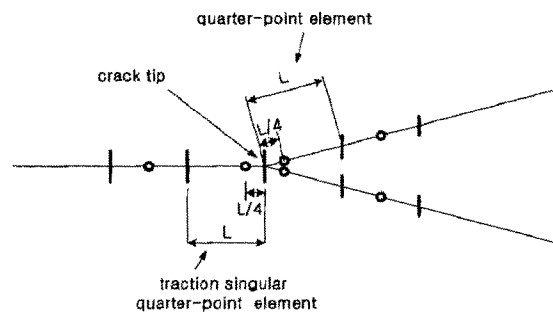


Fig. 4 Crack-tip modelling

### 4. 수치해석 결과

이 논문의 수치해석 과정에는 칩에 대해서 다음과 같은 수치 값들이 사용되었다.<sup>51</sup>

$$E_c = 168.9 \times 10^3 \text{ MPa} ; \nu_c = 0.28 \quad (11)$$

식(11)에서, 아래 첨자 'c'는 칩을 가리키고,  $E$ 는 탄성 계수,  $\nu$ 는 포와송 비를 나타낸다. 점탄성 접촉제(에폭시)에 대해서는 다음과 같은 수치 값들이 사용되었다.<sup>17)</sup>

$$E_a(t) = \frac{3.2 \times 10^3}{1 + 0.0336 t^{0.19}} \text{ MPa}$$

$$k_a(t) = 3.556 \times 10^3 \text{ MPa} \quad (12)$$

식(12)에서,  $E_a(t)$ 는 점탄성 인장이완계수를 나타내고,  $k_a(t)$ 는 체적이완계수를 나타낸다.

먼저, 균열이 없는 경우에 횡방향 인장 변형률하에서 계면 모서리 부근에서 나타나는 응력상태를 조사하였다. 이와 같은 경우, Fig. 2(b)에서  $a=0$ 이 된다. 해석은 60개의 경계요소가 사용되어 수행되었다. Fig. 5는 계면을 따라 분포하고 있는 수직응력  $\sigma_{yy}$ 와 전단 응력  $\tau_{xy}$ 를 나타내고 있다. 계면 응력들은 점탄성 영향으로, 시

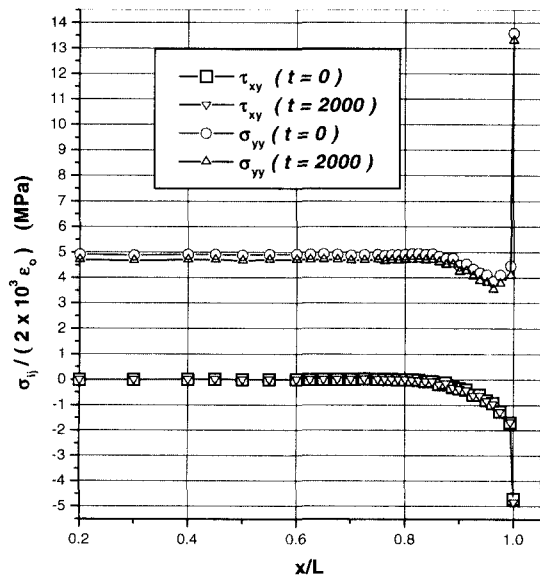


Fig. 5 Distribution of interface normal and shear stresses ( $a=0$ )

간이 경과함에 따라 이완되어 일정한 값으로 수렴됨을 보이고 있다. 계면 응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 커지는데, 이러한 특이 응력(singular stresses)은 계면 모서리 부근에 집중되어 있다. 이러한 응력 특이성으로 인해 계면모서리 부근에는 계면 박리나 모서리 균열의 발생 가능성이 매우 크다고 볼 수 있다.

다음에, Fig. 2(b)에 나타나 있는 것처럼, 칩과 접착제층의 접촉계면에 존재하는 모서리 균열을 해석하였다. 해석은 78개의 경계요소가 사용되어 수행되었다. 수치해석 과정에서  $(L-a) > 9h$ 의 조건이 사용되었고,  $a/h=0.03, 0.1, 1.0, 2.0$  등 4가지 경우에 대해서 조사되었다. Fig. 6은 각 균열 길이에 대해서, 시간에 따른  $K_0(t)$ 의 변화를 나타낸다. 각 균열에 대해서, 복합 응력확대계수의 크기  $K_0(t)$ 는 시간이 경과함에 따라 점차 작아지다가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있는데, 이러한 거동에 대한 이유는 점탄성 영향으로 균열 선단에서 발생하는 계면 응력이 시간이 경과함에 따라 점차 이완되어 일정한 값에 수렴하기 때문이다. 또한, 균열의 길이가 커짐에 따라  $K_0(t)$ 도 커지고 있는데, 증가되는 정도는 균열이 커질수록 줄어들고 있다.

이러한 수치해석 결과에 의하면, 횡방향 인장 변형률의 크기가 커지면, 칩과 접착제층의 계면 모서리에서 층간 박리나 모서리 균열이 발생할 수 있으나, 응력 특

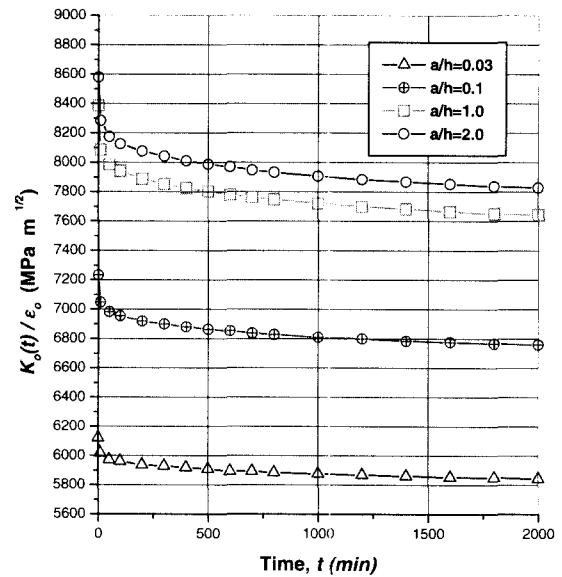


Fig. 6  $K_0(t)$  vs. time for  $a/h=0.03, 0.1, 1, 2$

이성이 나타나는 부분이 계면 모서리 부분에 국한되어 있기 때문에, 계면 모서리에서 발생하는 균열도 작은 크기를 갖게 되리라고 예측할 수 있다. 균열의 크기가 매우 작은 경우에는  $K_o(t)$  값이 크지 않으므로, 횡방향 인장 변형률이 매우 커지지 않을 경우에 균열은 성장 없이 안정된 상태에 있게 되리라 판단된다. 균열의 성장을 야기시키는 임계 응력확대계수의 크기와 횡방향 인장변형률의 크기를 결정하기 위해서는 실험적인 뒷받침이 요구된다고 판단된다.

## 5. 결 론

이 논문에서는 경계요소법(BEM : boundary element method)을 적용하여, 횡방향 인장 변형률하에서 탄성 칩과 점탄성 접착층의 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 접착층의 두께나 길이에 비교해 비교적 작은 범위에 걸쳐 나타나고 있다. 이러한 특이성으로 인해, 모서리 균열이나 계면 박리가 발생할 수 있다. 그러나, 특이응력은 계면 모서리에서 매우 작은 범위에 걸쳐서 나타나므로, 발생하는 균열도 작은 크기를 갖게 되리라고 예측할 수 있다. 다음에, 모서리 균열이 존재하는 계면 문제에 대해 해석을 시도하였다. 해석 결과에 의하면, 균열의 길이가 커짐에 따라  $K_o(t)$ 도 커지고 있는데, 증가되는 정도는 균열이 커질수록 줄어들고 있다. 또한, 각 균열의 길이에 대해, 점탄성 영향으로 시간에 따라 응력확대계수의 값이 점차 이완됨을 보여주고 있다. 따라서 균열의 크기가 매우 작은 경우에는  $K_o(t)$  값이 크지 않으므로, 횡방향 인장 변형률이 매우 커지지 않을 경우에 균열은 성장 없이 안정된 상태에 있게 되리라 판단된다. 이러한 거동을 실제 칩 접착계면의 신뢰성과 연관시키기 위해서는 실험적인 뒷받침이 있어야 한다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Weitsman, Y., "Interfacial Stresses in Viscoelastic Adhesive Layers due to Moisture Sorption," *International Journal of Solids and Structures*,
2. Lee, S. S., "Boundary Element Analysis of singular hygrothermal stresses in a bonded viscoelastic thin film," *International Journal of Solids and Structures*, 38, 2001, pp.401~412
3. Burger, K., "Fracture Mechanical Characterization of IC-Device Interface," *Quality and Reliability Engineering International*, 11, 1995, pp.299~305
4. Pearson, R. A., Llod, T. B., and Azimi, H. R., "Adhesion Issues in Epoxy Based Chop Attach Adhesives," *IEEE Trans. On Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Part A, 20, 1977, pp.31~37
5. 이세봄, "칩과 리드프레임 사이의 계면파괴인성치에 대한 실험적 고찰", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1999
6. Lee, S. S., "Boundary Element Analysis of the Stress Singularity at the Interface Corner of Viscoelastic Adhesive Layers," *International Journal of Solids and Structures*, 35, 1998, pp.1385~1394
7. Zhu, J., Zou, D., and Liu, S., "Real-Time Monitoring and Simulation of Thermal Deformation in Plastic Package," *ASME, Journal of Electronic Packaging*, 120, 1988, pp.160~165
8. Wang, J. and Liu, S., "Sequential Processing Mechanics Modeling for a Model IC Package," *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part C*, 20, 1997, pp.335~342
9. Pearson, R. A., et al., "Adhesion Issues in Epoxy-Based Chip Attach Adhesives," *IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A*, 20, 1997, pp.31~37
10. Reedy, Jr., E. D., "Intensity of the Stress Singularity at the Interface Corner of a Bonded Elastic Layer Subjected to Shear," *Engineering Fracture Mechanics*, 38, 1991, pp.273~281
11. Reedy, Jr., E. D., "Connection between

- Interface Corner and Interfacial Fracture Analyses of an Adhesively-Bonded Butt Joint," *International Journal of Solides and Structures*, 37, 2000, pp.2429~2442
12. 이강용, 양지혁, "접탄성을 고려한 플라스틱 IC 패키지의 파손해석", *대한기계학회논문집 A권*, 제 22권 제3호, 1998, pp.671~679
  13. 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*, 38, 1995, pp.607~629
  14. Lee, S. S., "Time-Dependent Boundary Element Analysis for an Interface Crack in a Two-Dimensional Unidirectional Viscoelastic Model Composite," *International Journal of Fracture*, 77, 1996, pp.15~28
  15. Aliabadi, M. H. and Rooke, D. P., *Numerical Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, 1991
  16. Banerjee, P. K., *The Boundary Element Methods in Engineering*, McGraw-Hill Book Co., 1994
  17. Weitsman, Y., "Residual Thermal Stresses due to Cool Down of Epoxy Resin Composite," *ASME Journal of Applied Mechanics*, 46, 1979, pp.563~567