

온도변화로 인해 고분자 박막에 발생하는 열응력 해석

Analysis of Thermal Stresses Induced in Polymeric Thin Layer Due to Temperature Change

이 상순*

Lee, Sang-Soon

ABSTRACT

In this study, the singular thermal stresses induced during cooling down from high temperature to room temperature have been analyzed for the viscoelastic thin layer. The time domain boundary element method has been employed to investigate the behavior of stresses for the whole interface. Within the context of a linear viscoelastic theory, a stress singularity exists at the point where the interface between the elastic substrate and the viscoelastic thin layer intersects the free surface.

1. 서 론

Fig.1은 고분자 박막이 탄성체인 리드프레임에 접착되어 있는 형상을 나타낸다. 칩과 리드프레임을 결합시키는데 사용되는 접착제의 기계적 성질 및 열적 성질은 칩이나 리드프레임의 성질들과 많이 다르므로, 칩 작동시 열이 발생하거나 사용중에 수분 흡수등의 영향을 받게되면 칩과 리드프레임의 계면에서 균열이 발생하거나 계면 박리가 발생할 수 있다.^{1,2)} 이러한 균열이나 계면 박리는 전자소자 전체의 불량률을 초래하게 되기 때문에 이 부분에 대한 연구는 칩 패키지의 안정성을 향상시키기 위해서 중요하다.

칩과 리드프레임의 균열이나 계면 박리로 인한 패키지의 파손을 막기 위해서는 칩과 리드프레임 사이의 신뢰성 있는 접착 방법이 필요하다. 많이 사용되고 있는 재료로는 고분자 물질인 에폭시나 폴리이미드가 있다. 전자패키징 산업에서는, 일정 시간 시편을 각종 온도와 습도 환경에 노출한 후 다이전단시험 (die shear test)으로 칩과 리드프레임의 접합강도를 측정한다.^{2,3)} 측정된 전단강도는 열 응력에 의해 칩과 리드프레임에 계면 박리가 생기는 경우에 임계 물성치로서 의미를 가질 수 있다. 그러나 일반적으로 칩의 접착계면에서의 응력 상태는 매우 복잡하며, 응력분포가 위치에 따라 달라지므로 신뢰성 있는 접착방법을 계획하기 위해서는 계면에서의 응력분포에 대한 정확하고 신뢰성있는 예측이 필요하다.

점탄성 접착제층에 나타나는 계면 응력에 관한 연구는 오래 전부터 활발히 진행되어 왔다. Weitsman⁴⁾은 에폭시 접착제가 주변으로부터 수분을 흡수하게 될 때 발생하는 계면 응

* 정희원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수

력의 분포와 특성을 설명하였다. Delale과 Erdogan⁵⁾은 랩조인트에서 발생하는 응력분포를 점탄성 모델을 적용하여 해석하였다. 이러한 해석 결과들에 의하면, 계면 응력구배가 계면 모서리 근처에서 급격히 커지는데, 시간이 경과함에 따라 점탄성의 영향으로 응력들의 재분포가 이루어 졌다. 그러나 이들이 해석과정에서 사용한 가정들의 단순성 때문에, 계면 모서리에서 나타나는 응력 특이성을 설명하는 특이 차수(order of singularity)나 응력특이계수(stress singularity factor)등은 설명되지 못했다. 최근에, Lee⁶⁾는 경계요소법(boundary element method)과 라플라스 변형(Laplace transform)을 결합하여, 수분과 온도변화를 동시에 받는 점탄성 재료의 계면모서리에서 나타나는 응력특이성을 수치적으로 구하는 과정을 제시하였다.

이 논문에서는 시간 영역 경계요소법과 실제 점탄성 물성을 적용하여, 높은 온도로부터 상온으로 냉각될 때 칩과 리드프레임의 점탄성 접착계면에 나타나는 응력분포의 해석을 시도하였다. 접착제가 점탄성 거동을 할 때의 기계적 강성은, 결합시키고 있는 칩이나 리드프레임에 비해 매우 작으므로, 해석 과정에서 칩과 리드프레임은 강체(rigid body)로 가정하였다.

2. 냉각과정에서 발생하는 응력분포

Fig. 2(a)는 칩과 리드프레임이 에폭시 접착제에 의해 결합된 형상을 나타내고 있다. 서론에서 언급한 것 처럼, 칩과 리드프레임의 강성은 접착제의 강성보다 매우 크므로, 칩과 리드프레임은 해석과정에서 강체(rigid body)로 취급하였다. 접착제층의 길이는 $2L$ 이고 두께는 $2h$ 이다. 여기서 접착제층은 선형 점탄성체로 가정한다. 문제의 대칭성을 고려하여 접착제층의 4분의 1만 모델링하면 된다. 접착제층에 온도 변화가 작용할 때 접착제층 계면에 나타나는 응력을 조사하기 위해서, Fig.2(b)에 나타낸 경계요소모델을 사용한다. 여기에서 접착제층은 평면 변형률(plane strane)상태에 있다고 가정한다. 수치해석은 $L/h=25$ 에 대해서 수행한다.

어떤 체적력(body forces)도 존재하지 않는다는 가정아래, Fig. 2(b)의 해석 모델에 대한 경계 적분방정식은 다음과 같이 주어진다.⁷⁾

$$\begin{aligned}
 & c_{ij}(\mathbf{y}) u_j(\mathbf{y}, \xi) \\
 & + \int_S \left[u_j(\mathbf{y}', \xi) T_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) + \int_{0+}^{\xi} u_j(\mathbf{y}', \xi - \xi') \frac{\partial T_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi' \right] dS(\mathbf{y}') \\
 & = \int_S \left[t_j(\mathbf{y}', \xi) U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) + \int_{0+}^{\xi} t_j(\mathbf{y}', \xi - \xi') \frac{\partial U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi' \right] dS(\mathbf{y}') \\
 & + \int_S \left[\gamma(\xi) n_j U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; 0+) + \int_{0+}^{\xi} \gamma(\xi - \xi') n_j \frac{\partial U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi')}{\partial \xi'} d\xi' \right] dS(\mathbf{y}')
 \end{aligned} \tag{1}$$

식(1)에서, u_j 와 t_j 는 각각 변위와 표면력 벡터를 나타내고, S 는 해석 모델의 경계면을 가리킨다. $c_{ij}(\mathbf{y})$ 는 경계면의 기하학적 조건에 의해 결정되는 항이고, $U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi)$ 와 $T_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}'; \xi)$ 는 점탄성 기본해이다. 이러한 기본해는 탄성-점탄성 대응 원리로부터 구해

질 수 있다.

식 (1)은 수치적으로 처리될 수 있는데, 시간적분에 대해서는 변형된 심프슨 공식을 사용하고, 경계면에 대해서는 이차 선 요소(quadratic line elements)를 사용하면 정확하고 효율적인 계산이 수행된다. 식 (1)을 정리하면 다음과 같은 행렬방정식이 얻어진다.

$$[H]\{u\} = [G]\{t\} + \{B + R\} \quad (2)$$

식 (2)에서, H 와 G 는 영향 행렬을 나타내고, B 는 온도에 의한 영향을 가리키며, R 은 점탄성 이력을 나타내는 항이다. 식(2)에 경계조건을 적용하여 풀면, Fig.2(b)의 해석 모델의 경계면에서의 변위와 표면력 또는 응력들이 얻어진다.

해석 과정에는 다음과 같은 실제 점탄성 물성이 선택되었다.

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

$$K(\xi) = K_o = 3.556 \times 10^3 \text{ MPa} \quad (3)$$

식 (3)에서, $E(\xi)$ 는 인장 이완계수를 나타내고, $K(\xi)$ 는 체적 계수를 가리킨다. Fig.2(b)는 이차 선 요소로 이루어진 경계요소 해석 모델이다. 큰 응력 구배가 나타나는 계면 모서리 근처에는 세밀한 요소들이 사용되었다. Fig.3에는 경계요소 해석 결과로 얻어진 수직응력 σ_{yy} 와 전단 응력 τ_{xy} 가 나타나 있다. 응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 큰 변화를 보이는데, 이러한 응력 변화는 계면 모서리 부근에 집중되어 있다. 이러한 응력 구배는 시간 경과에 따라 점탄성 영향으로 재분포가 이루어지는데, 여전히 큰 응력 구배가 응력 재분포에 관계없이 계면 모서리 근처에 나타나고 있다. 이러한 결과를 볼 때, 점탄성 접착제로 결합되어 있는 칩과 리드프레임에 온도변화가 발생할 때 계면 모서리에는 특이 응력들이 나타나며, 점탄성으로 인한 응력 분포의 변화에도 불구하고 응력특이성들은 사라지지 않고 여전히 존재한다. 이러한 응력 특이성으로 인해, 계면 모서리의 접착 결합이 약할 경우에는 모서리 균열이나 박리현상이 쉽게 발생할 수 있다고 판단되므로, 이러한 응력 특이성에 대한 특성을 이해하기 위해서는 특이 차수와 응력특이계수에 대한 조사가 필요해 진다.

3. 특이 차수와 응력특이계수

Fig.4는 점탄성 접착제층이 강체에 결합된 계면 모서리 부근을 보여주고 있는데, 그림에서 자유 표면(free surface)에는 아무런 표면력이 작용하고 있지 않다. 평면 변형을 상태에서, 특이 차수는 다음과 같은 응력 함수식으로부터 계산될 수 있다. 즉,

$$\nabla^4 \phi(r, \theta, \xi) = 0 \quad (4)$$

식 (4)를 전개하는데 필요한 경계조건으로는, $\theta = \pi/2$ 에서 수직 응력 $\sigma_{\theta\theta}$ 와 전단 응력 $\tau_{r\theta}$ 가 영(0)이고, $\theta = 0$ 에서 모든 변위 성분들이 영(0)이다. 식 (4)는 시간 ξ 에 대한 라플라스 변환을 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^4 \phi^*(r, \theta, s) = 0 \quad (5)$$

식 (5)에서 ϕ^* 는 ϕ 의 ξ 에 대한 라플라스 변환을 나타내고, s 는 변형 인자를 가리킨다.

Williams⁸⁾가 제안한 방법을 적용하여, 다음과 같은 응력 함수를 가정한다.

$$\phi^*(r, \theta, s) = r^{\lambda+1} f(\theta, s) \quad (6)$$

$$r > 0, 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$$

식 (6)의 r 와 θ 는 Fig.4에 정의되어 있다. λ 는 미지수로써 실수나 허수일 수 있다.

$f(\theta, s)$ 는 경계조건을 적용하여 구해지는 함수이다. 자세한 설명은 참고 문헌⁸⁾에 설명되어 있다. 식 (6)으로 주어진 응력 함수를 사용하면, 다음과 같은 특성 방정식이 구해진다.

$$-\frac{2\lambda^2}{s} - 8s [\nu^*(s)]^2 + 12\nu^*(s) - \frac{5}{s} - \left[\frac{3}{s} - 4\nu^*(s) \right] \cos(\lambda\pi) = 0 \quad (7)$$

식 (7)을 계산하면 λ 가 얻어지는데, $\nu^*(s)$ 는 점탄성 프와송 비 $\nu(\xi)$ 에 대한 라플라스 변환을 나타낸다.

식 (7)은 라플라스 변환 공간에서의 특성 방정식이므로, 시간 공간으로 역변환시켜야 한다. 식 (3)을 식 (7)에 적용하여 역변환하면, 시간 영역에서의 특성 방정식이 얻어진다.

$$2\lambda^2 - 8M(\xi) + 12N(\xi) - 5 - [3 - 4N(\xi)] \cos(\lambda\pi) = 0 \quad (8)$$

계면 모서리에서의 응력 특이성은 $r^{1-\lambda}$ 의 형태를 갖게된다. 따라서 특이 차수를 구하는 문제는 $0 < \text{Re}(\lambda) < 1$ 의 범위에 해당되는 λ 값만이 의미를 지닌다. 실제 점탄성 접착제층의 프와송 비는 $0 < \nu(\xi) < 0.5$ 를 갖는데, 이러한 범위에 대해서 $0 < \text{Re}(\lambda) < 1$ 의 조건을 갖는 λ 값은 오직 하나만 존재하고, 그러한 λ 값은 실수이다. 이러한 내용에 관한 자세한 수학적 설명은 참고 문헌⁹⁾에 나와 있다. 응력특이계수는 $h^{1-\lambda}$ 로 정규화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.¹⁰⁾

$$K_{\ddot{y}} = \text{Lim}_{r \rightarrow 0} \left(\frac{r}{h} \right)^{1-\lambda} \sigma_{\ddot{y}}(r, \theta, t) \Big|_{\theta=0} \quad (9)$$

식 (9)는 응력단위를 갖는 양이다. 식(8)로부터 얻어진 특이차수 값과 식 (2)로부터 계산 응력 값들을 식 (9)에 대입하면 K_{yy} 와 K_{xy} 가 구해진다.

4. 결론

이 논문에서는 경계요소법(BEM:boundary element method)을 적용하여, 높은 가공온도로부터 상온으로 냉각될 때 칩과 리드프레임을 결합하는 고분자 박막에 나타나는 응력분포의 해석을 시도하였다. 고분자 박막에 대해서는 실제적인 물성 값을 사용하였다. 칩과 리드프레임의 강성은 에폭시 접착제에 비해 매우 크므로 강체로 가정되었다. 계면 모서리에는 매우 큰 응력구배가 나타났는데, 이러한 특이응력들은 접착제층의 두께나 길이에 비해 매우 작은 범위에 걸쳐 나타나고 있으며, 시간의 경과에 따라 증가되다가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 따라서, 칩과 리드프레임의 결합이 건전하게 이루어지기 위해서는 계면 모서리 부근에서 신뢰성있는 결합이 요구된다고 판단된다.

참고문헌

1. Burger, K., "Fracture Mechanical Characterization of IC-Device Interface", *Quality and Reliability Engineering International*, 11, 1995, pp.299-305..
2. 이 세봄, "칩과 리드프레임 사이의 계면파괴인성치에 대한 실험적 고찰", 석사학위논문, 1999,한국과학기술원.
3. Pecht, M.G. and Nguyen, L.T., "Plastic Packaging", in *Microelectronic Packaging Handbook, Part II*, Tummala, R.R., et al.,eds., 1997,Chapman & Hall.
4. Weitsmann, Y., " Interfacial Stresses in Viscoelastic Adhesive Layers Due to Moisture Sorption," *International Journal of Solids and Structures*, 15, 1979, pp. 701-713.
5. Delale, F. and Erdogan, F.,"Viscoelastic Analysis of Adhesively Bonded Joints," *Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics*, 48, 1981, pp. 331-338.
6. 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.
7. 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.
8. Williams, M.L.,"Stress Singularity Resulting from Various Boundary Conditions in Angular Corners of Plates in Extensions", *Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics*, 74, 1952, pp. 526-528.
9. Bogy, D.B., "Edge-Bonded Dissimilar Orthogonal Elastic Wedges under Normal and Shear Loading", *Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics*, 35, 1968, pp. 460-466.
10. Lee, S.S.,"Free-Edge Stress Singularity in a Two-Dimensional Unidirectional Viscoelastic Laminate Model", *Trans. of ASME Journal of Applied Mechanics*, 64, 1997, pp.408-414.

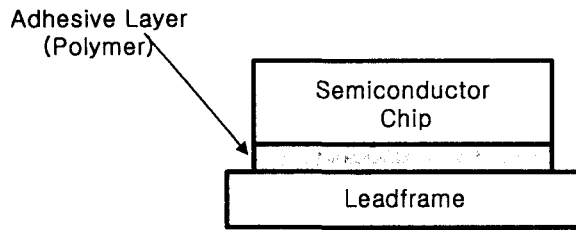


Fig. 1. A thin viscoelastic adhesive layer bonded between the semiconductor chip and the leadframe

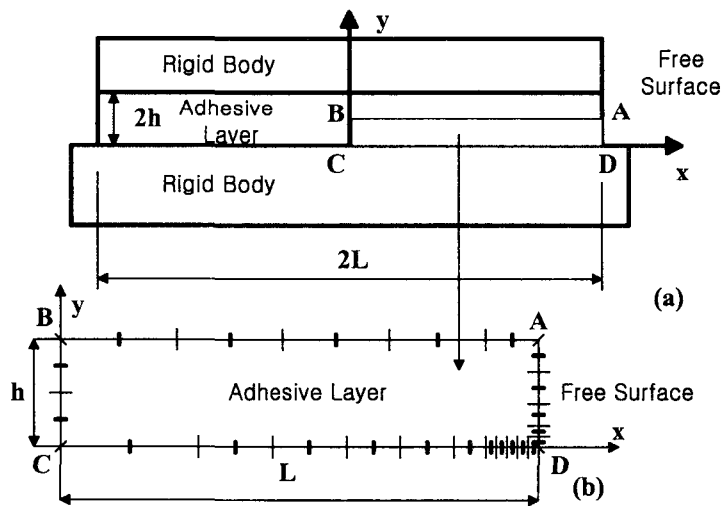


Fig. 2 Boundary Element Modeling

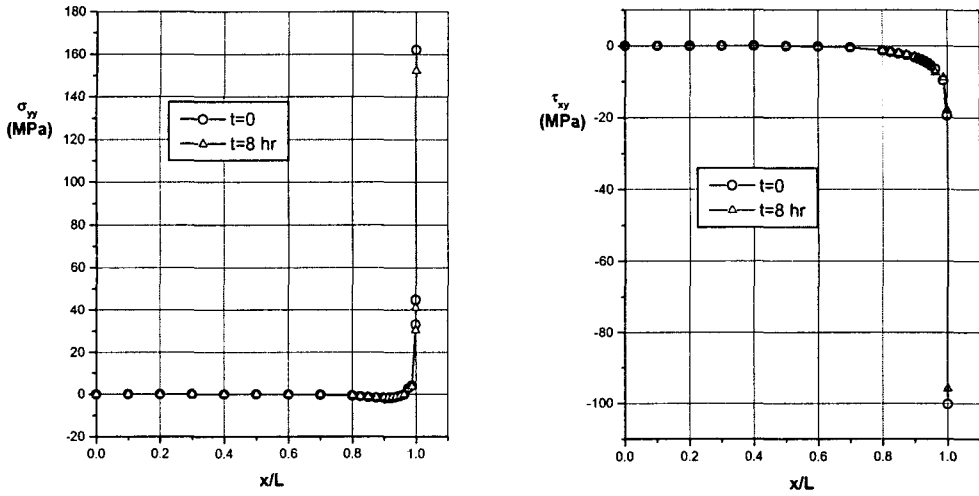


Fig. 3 Interface Stress Results

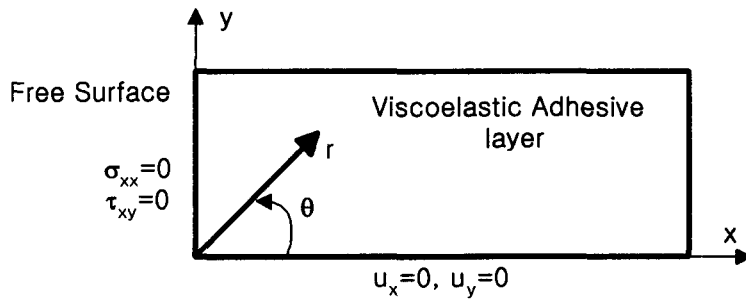


Fig. 4 Region near interface corner of the elastic adhesive layer