

고분자 박막에서의 열응력 해석

Analysis of Thermal Stresses in Polymeric Thin Film

이 상순*
Lee, Sang-Soon

ABSTRACT

In this study, the stress singularity factors generated during cooling down from high curing temperature to room temperature have been analyzed for the viscoelastic thin film. 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 film intersects the free surface.

1. 서론

Fig.1은 고분자 박막이 탄성체인 실리콘 모재위에 접착되어 있는 형상을 나타낸다. 고분자 박막의 기계적 성질 및 열적 성질은 모재의 성질들과 많이 다르므로, 스피ن 코팅 후 고온에서 저온으로 냉각하는 과정에 잔류 응력이 발생하여 박막과 모재의 계면에서 계면 박리가 발생하거나 굽힘 현상이 발생할 수 있다.^{1,3)} 이러한 계면 박리는 전자소자 전체의 불량률을 초래하게 되기 때문에 이 부분에 대한 연구는 박막 구조의 안정성을 향상시키기 위해서 중요하다.

점탄성 고분자 박막 층에 나타나는 계면 응력에 관한 연구는 오래 전부터 활발히 진행되어 왔다. Weitsman⁴⁾은 에폭시 접착제가 주변으로부터 수분을 흡수하게 될 때 발생하는 계면 응력의 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 응력특이계수(stress singularity factor)는 설명되지 못했다. 최근에, Lee⁶⁾는 경계요소법(boundary element method)과 라플라스 변환(Laplace transform)을 결합하여, 열/수분 변화를 받는 점탄성 재료의 계면모서리에서 나타나는 응력특이성을 수치적으로 구하는 과정을 제시하였다.

* 정회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수

이 논문에서는 시간 영역 경계요소법을 적용하여, 높은 온도로부터 상온으로 냉각될 때 고분자 박막과 실리콘 모재의 계면에 나타나는 응력특이성의 해석을 시도하였다. 해석 과정에서 고분자 박막과 실리콘 모재는 각각 선형 점탄성체와 선형 탄성체로 가정하였다.

2. 냉각과정에서 발생하는 응력분포

Fig. 2(a)는 고분자 박막이 실리콘 모재위에 결합된 형상을 나타내고 있다. 고분자 박막의 길이는 $2L$ 이고 두께는 h 이다. 문제의 대칭성을 고려하여 2분의 1만 모델링하면 된다. 스피ن 코팅 후 고온 경화온도로부터 상온으로 냉각될 때 계면에 나타나는 응력을 조사하기 위해서, Fig.2(b)에 나타낸 경계요소모델을 사용한다. 여기에서 해석 모델은 평면 변형률(plane strain)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⁾

점탄성 박막에 대해서,

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

탄성 모재에 대해서,

$$\begin{aligned} & c_{ij}(\mathbf{y}) u_j(\mathbf{y}, \xi) + \int_S u_j(\mathbf{y}', \xi) T_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}') dS(\mathbf{y}') \\ & = \int_S t_j(\mathbf{y}', \xi) U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}') dS(\mathbf{y}') + \int_S \gamma(\xi) n_j U_{ij}(\mathbf{y}, \mathbf{y}') dS(\mathbf{y}') \end{aligned} \quad (2)$$

식(1)과 (2)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 구해질 수 있다.

식 (1)과 (2)는 수치적으로 처리될 수 있는데, 시간적분에 대해서는 변형된 심프슨 공식을 사용하고, 경계면에 대해서는 이차 선 요소(quadratic line elements)를 사용하면 정확하고 효율적인 계산이 수행된다.

3. 응력특이계수

Fig.3은 점탄성 박막이 탄성체에 결합된 계면 모서리 부근을 보여주고 있는데, 그림에서 자유 표면(free surface)에는 아무런 표면력이 작용하고 있지 않다. 평면 변형률 상태에서,

특이 차수는 다음과 같은 응력 함수식으로부터 계산될 수 있다^{8,9)}. 즉,

$$\nabla^4 \phi(r, \theta, \xi) = 0 \quad (3)$$

식 (3)을 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 (3)은 시간 ξ 에 대한 라플라스 변환을 적용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

식 (4)에서 ϕ^* 는 ϕ 의 ξ 에 대한 라플라스 변환을 나타내고, s 는 변형 인자를 가리킨다. 참고 문헌 [8]에 설명된 방법을 적용하면, 다음과 같은 특성 방정식이 구해진다.

$$\begin{aligned} & [(m_1(p) - m_2(p)) \cos^2\left(\frac{s\pi}{2}\right) - m_1(p)(s+1)^2]^2 \\ & + m_3^2 \cos^2\left(\frac{s\pi}{2}\right) \sin^2\left(\frac{s\pi}{2}\right) - m_2^2(p)(s+1)^2 = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 계산하면 s 가 얻어진다. 식 (5)는 라플라스 변환 공간에서의 특성 방정식이므로, 시간 공간으로 변환시켜야 한다. 이 논문에서는, 점탄성 모델에 대해서 다음과 같은 모델이 선택되었다.

$$\begin{aligned} K(\xi) &= K_0 \\ E(\xi) &= E_0 + E_1 \exp(-\xi/t^*) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서, $E(\xi)$ 는 인장이완계수를 나타내고, $K(\xi)$ 는 체적계수를 가리키며, E_0 와 E_1 , 그리고 K_0 은 양수를 나타내며, t^* 는 이완시간이다. 이 논문에서는, 박막의 점탄성 거동을 조사하기 위해서 다음과 같은 수치 값들이 가정 되었다. 실제적인 점탄성 물성을 적용한 해석은 향후 진행될 예정이다.

$$\begin{aligned} E(0) &= 3.7 \text{ GPa}; E(\infty) = 3.0 \text{ GPa} \\ K_0 &= 3.1 \text{ GP}; t^* = 10^2 \text{ min.} \\ \chi_m &= 1; \alpha = 3.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C} \\ \Delta T &= -277 ^\circ\text{C} \end{aligned} \quad (7)$$

실리콘 모재에 대해서는 다음과 같은 수치 값들이 사용되었다.

$$\begin{aligned} E &= 170 \text{ GPa} \\ \nu &= 0.28 \end{aligned} \quad (8)$$

응력특이계수는 \dot{n}^{s+2} 로 정규화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.⁸⁾

$$K_{ij} = \text{Lim}_{r \rightarrow 0} \left(\frac{r}{h} \right)^{s+2} \sigma_{ij}(r, \theta, t) \Big|_{\theta=0} \quad (9)$$

식 (9)는 응력단위를 갖는 양이다. 식(5)로부터 얻어진 특이차수 값과 식 (1)과 (2)로부터 계산된 응력 값들을 식 (9)에 대입하면 K_{yy} 와 K_{xy} 가 구해진다. Fig.4는 계면 모서리에서 발생하는 특이응력들에 대한 응력특이계수를 나타내고 있다. 응력특이계수는 시간의 경과에 따라 감소하다가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상이 실제 고분자 박막의 건전성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 실험적인 뒷받침이 요구된다 고 판단된다.

4. 결 론

이 논문에서는 경계요소법(BEM:boundary element method)을 적용하여, 높은 가공온도로부터 상온으로 냉각될 때 실리콘 모재위에 결합된 고분자 박막 에 나타나는 응력특이성의 해석을 시도하였다. 고분자 박막과 모재는 각각 선형 점탄성체와 선형 탄성체로 가정하였다. 계면 모서리에서 발생하는 특이응력들에 대한 응력특이계수는 시간의 경과에 따라 감소하다가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상이 실제 고분자 박막의 건전성에 어떠한 영향을 미치는지에 대해서는 실험적인 뒷받침이 요구된다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-01268-0(2003))지원으로 수행되어진 것으로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Burger, K., "Fracture Mechanical Characterization of IC-Device Interface", *Quality and Reliability Engineering International*, 11, 1995, pp.299-305..
2. 임 영태, "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*, Turmala, 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. 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.
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.

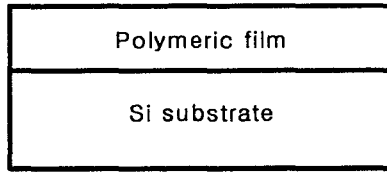


Fig. 1. A viscoelastic thin film bonded to the Si substrate

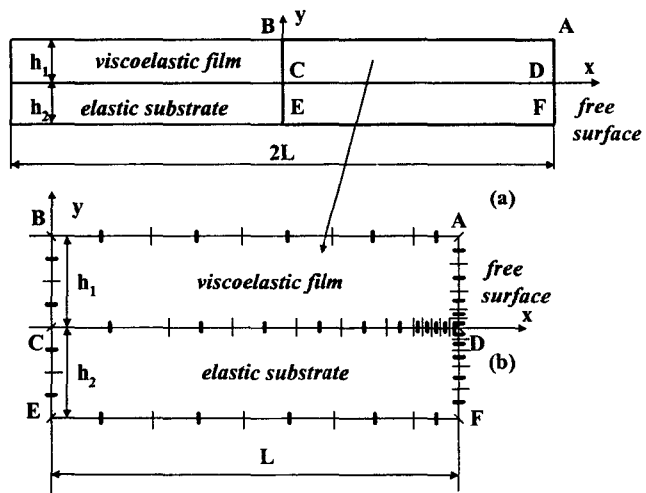


Fig. 2 Boundary Element Modeling

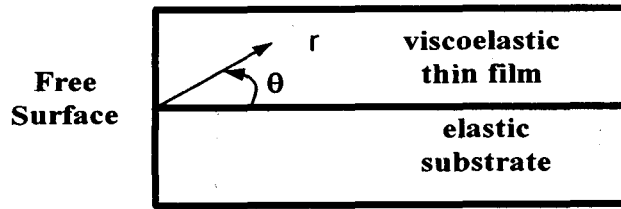


Fig. 3 Region near interface corner

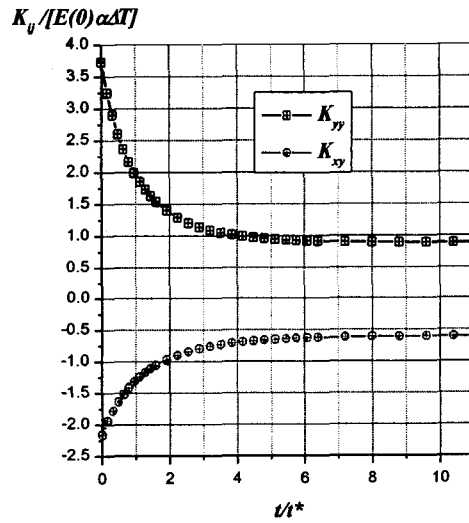


Fig. 4 Variation of stress singularity factors