

수분 흡수로 인해 얇은 필름에 발생하는 계면 응력의 경계요소해석

Boundary Element Analysis of Interface Stresses in a Thin Film Due to Moisture Absorption

이 상 순*

Lee, Sang Soon

ABSTRACT

This paper deals with the stress singularity induced at the interface corner between the viscoelastic thin film and the rigid substrate as the film absorbs moisture from the ambient environment. The time-domain boundary element method is employed to investigate the behavior of interface stresses. The order of the free-edge singularity is obtained numerically for a given viscoelastic model. It is shown that the free-edge stress intensity factor is relaxed with time, while the order of the singularity increases with time for the viscoelastic model considered.

1. 서 론

전자 산업에서 폴리이미드(polyimide)와 같은 아주 얇은 고분자 필름이 절연층(dielectric insulating layer)의 기능을 요하는 분야에 넓게 사용되고 있다. 모재(substrate)위에 입혀진 얇은 필름은 주변으로부터 수분을 흡수하는 성질이 있는데, 이러한 경우에 필름 내부에는 수분 흡수로 인한 변형률이 발생하게 되고 나아가 잔류 응력이 존재하게 된다. 물에 접촉하게 되면 유리나 알루미늄위에 입혀져 있던 폴리이미드 필름은 모재로부터 박리되는 현상을 나타낸다. 서로 다른 성질을 갖는 재료들이 결합되어 있는 구조물에 외력이 작용하게 되면 계면(interface)에 복잡한 응력 상태가 형성되고, 계면 모서리(interface corner)에는 특이 응력(singular stresses)들이 존재한다는 것은 잘 알려져 있다.^(1,3) 이러한 특이 응력은 계면 모서리에서 결합 분리를 일으키거나 모서리 균열을 야기 시킬 수 있다. 응력 특이성의 정도는 결합 상태에 있는 두 재료의 물성의 차이에 따라 달라진다.

* 한국기술교육대학교 기계계열 조교수

고분자 필름은 상온에서 탄성 거동 상태를 유지하게 되나, 주변의 습도가 높아져 수분 흡수가 상당량 있게 되거나, 주변 온도가 많이 높아지게 되면 점탄성 상태로 특성이 바뀌게 된다. 이때 필름은 시간 경과에 따라 역학적 거동이 달라지는 현상을 나타낸다. 따라서 모재 위에 입혀져 있는 고분자 필름이 수분 흡수를 하게 될 때 나타나는 박리 현상을 이해하기 위해서는 점탄성 해석이 수행되어야 한다. 이 논문의 초점은, 점탄성 해석을 통해서 모재와 얇은 필름의 계면 모서리에서 나타나는 응력 특이성의 변화 상태를 조사하는데 있다.

계면 응력의 점탄성 해석은 활발히 진행되어 왔다. Weitsman⁽⁴⁾은 에폭시 접착재가 주변으로부터 수분을 흡수하게 될 때 발생하는 계면응력을 해석하였다. Delale과 Erdogan⁽⁵⁾은 점탄성 재료로 결합된 랩 조인트의 응력 분포의 해석을 시도하였다. 이들의 해석 결과에 의하면, 계면 응력들은 계면 모서리에서 매우 커지고, 점탄성의 영향으로 시간이 경과함에 따라 응력들의 재분포가 이루어 졌다. 그러나 이들이 계산 과정에서 사용한 가정들의 단순성 때문에, 계면 모서리에서 나타나는 응력 특이성을 설명하는 특이차수나 자유 모서리 응력확대계수등은 설명되지 못했다. 최근에 Lee^(6,7)는 횡방향 인장 변형률을 받고 있는 점탄성 재료의 계면 모서리에서 나타나는 응력특이성을 경계요소법과 라플라스 변형, 그리고 멜린 변형을 결합하여 수치적으로 구하는 과정을 제시하였다.

이 논문에서는, 모재 위에 입혀져 있는 얇은 점탄성 필름에 수분이 흡수 되었을 때 나타나는 계면응력 특이성을 조사하고 있다. 일반적으로 모재는 필름에 비해 강성이 매우 크므로, 해석 과정에서 강체로 가정하였다. 계면응력들의 분포에 대한 조사는 Lee와 Westmann⁽⁸⁾이 발표한 경계요소법에 의해 수행되었다.

2. 특이 차수 해석

점탄성 필름의 계면 모서리에 나타나는 특이차수는 참고 문헌[6]에서 설명한 방법을 확대 적용함으로써 얻을 수 있다. 모재는 강체로 가정된다. Fig.1은 점탄성 필름이 강체 모재에 결합된 계면 모서리 부근을 보여주고 있다. 그림에서 자유 표면(free surface)에는 아무런 표면력이 작용하고 있지 않고, 주변으로부터 수분의 침투가 필름에 작용하는 유일한 변화이다. 전자 패키지에서 사용되는 고분자 필름의 두께는 대체로 $50\mu m$ 를 넘지 않는다. 이렇게 얇은 필름

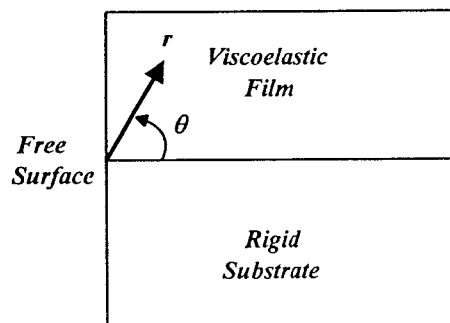


Fig.1 Region near interface corner between the viscoelastic film and the rigid substrate.

에 외부의 수분이 침투했을 때 필름 내부에 나타나는 수분의 분포는 균일하다고 가정할 수 있다. 즉, 수분의 분포 $m(x, t) = m(t)$ 로 가정한다. 또한, 필름과 주변사이의 수분 평형이 순식간에 이루어진다고 가정한다. 즉, $m(t) = m_{\infty}H(t)$ 이다. 여기서, m_{∞} 는 주어진 주변의 상대 습도에 서, 필름과 주변사이에 수분 평형이 이루어 졌을 때 필름이 흡수한 수분 양을 나타내고, $H(t)$ 는 Heaviside unit step함수를 가리킨다. 해석을 효율적으로 수행하기 위해서 다음과 같은 가정들이 추가로 사용되었다.

1) 필름과 모재의 결합은 완벽하다.

2) 필름의 전단 거동은 점탄성이나, 체적계수는 탄성이다.

3) 수분 흡수 영향은 온도 변화 영향과 유사하다. 수분 팽창계수는 일정하다.

평면 변형률 상태에서, 특이 차수는 다음과 같은 응력 함수식으로부터 계산될 수 있다. 즉,

$$\nabla^4 \phi(r, \theta, t) = 0 \quad (1)$$

또는, 위와 동등하게,

$$\nabla^4 \phi(r, \theta, \xi) = 0 \quad (2)$$

식 (2)를 전개하는데 필요한 경계조건으로는, $\theta = \pi/2$ 에서 수직 응력 $\sigma_{\theta\theta}$ 와 전단 응력 $\tau_{r\theta}$ 가 0이고, $\theta = 0$ 에서 모든 변위 성분들이 0이다. 식(2)에서 ξ 는 환산 시간(reduced time)을 나타내는데, 다음과 같이 정의된다. 즉,

$$\xi = \xi(t) = \int_0^t \chi_m(m(\rho)) d\rho \quad (3)$$

이다. 식 (3)에서 χ_m 는 수분의 변화에 의존하는 이동 함수를 나타내는데, 실험에 의해 결정되는 재료의 물성이다. 일정한 수분변화 $\Delta mH(t)$ 에 대해서, 식 (3)의 환산 시간은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\xi = \chi_m t \quad (4)$$

식 (2)는 환산 시간 ξ 에 대한 라플라스 변형을 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 변형을 나타내고, s 는 변형 인자를 가리킨다.

참고 문헌 [9]에 설명된 Williams방법을 적용하면, 다음과 같은 특성 방정식이 구해진다.

$$-\frac{2\lambda^2}{s} - 8s [\nu^*(s)]^2 + 12\nu^*(s) - \frac{5}{s} - \left[\frac{3}{s} - 4\nu^*(s) \right] \cos(\lambda\pi) = 0 \quad (6)$$

식 (6)을 계산하면 λ 가 얻어지는데, $\nu^*(s)$ 는 점탄성 포아손 비 $\nu(\xi)$ 에 대한 라플라스 변형을 나타낸다.

식 (6)은 라플라스 변형 공간에서의 특성 방정식이므로, 시간 공간으로 변환시켜야 한다. 이 논문에서는, 점탄성 모델에 대해서 다음과 같은 모델이 선택되었다.

$$\begin{aligned} K(\xi) &= K_0 \\ \mu(\xi) &= g_0 + g_1 \exp(-\xi/t^*) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서, $\mu(\xi)$ 는 전단 이완계수를 나타내고, $K(\xi)$ 는 체적계수를 가리키며, g_0 와 g_1 , 그리고

K_0 은 양수를 나타내며, t^* 는 이완시간이다. 식 (7)을 식 (6)에 적용하여 변환하면, 시간 영역에서의 특성 방정식이 얻어진다.

계면 모서리에서의 응력 특이성은 $r^{-\lambda}$ 의 형태를 갖게된다. 따라서 특이 차수를 구하는 문제는 $0 < Re(\lambda) < 1$ 의 범위에 해당되는 λ 값만이 의미를 지닌다. 실제 점탄성 필름의 포아손 비는 $0 < \nu(\xi) < 0.5$ 를 갖는데, 이러한 범위에 대해서 $0 < Re(\lambda) < 1$ 의 조건을 갖는 λ_1 값은 오직 하나만 존재하고, 그러한 λ_1 값은 실수이다. 이러한 내용에 관한 자세한 수학적 설명은 참고 문헌[3]에 나와 있다.

이 논문에서는, 다음과 같은 수치 값들이 사용되었다.

$$\begin{aligned} \mu(0) &= 1.0 \times 10^3 \text{ MPa} \\ \mu(\infty) &= 0.5 \times 10^3 \text{ MPa} \\ K_0 &= 2.0 \times 10^3 \text{ MPa} \\ t^* &= 10^2 \text{ min.} \\ \chi_m &= 100 \end{aligned} \tag{8}$$

Fig.2는 실제 시간 t 영역에서의 특이 차수의 변화를 나타내고 있다. 점탄성 필름에 대한 특이 차수는 시간이 경과함에 따라 점차 커지다가 일정한 값에 수렴하고 있다. Fig.2에 나타난 결과를 탄성 필름과 비교하는 것은 흥미롭다. 전단계수가 각각 $\mu(0)$ 와 $\mu(\infty)$ 인 두 종류의 탄성 필름에 대한 특이 차수를 점탄성 필름의 결과와 비교하였다. Fig.2에서, $t=0$ 인 경우의 점탄성 필름의 특이 차수는 전단 계수 $\mu(0)$ 인 탄성 필름의 특이 차수의 값과 일치하였다. 시간이 매우 많이 경과한 후, 점탄성 필름의 특이 차수는 전단 계수 $\mu(\infty)$ 인 탄성 필름의 특이 차수의 값으로 수렴하였다. 점탄성 필름의 특이 차수는 두 경우의 탄성 필름에 대한 특이 차수 값들 사이에 있었다.

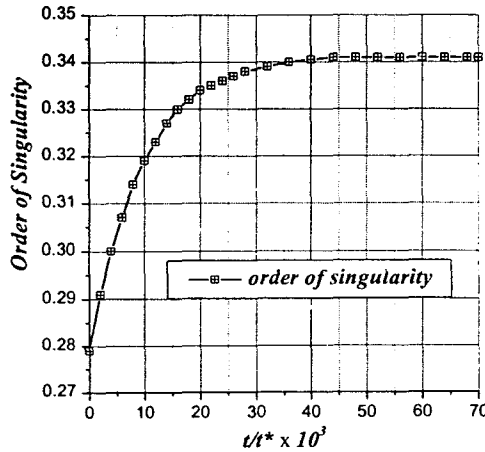


Fig.2 Variation of the order of the singularity

3. 계면 응력의 경계요소 해석

Fig.3(a)는 강체 위에 입혀져 있는 점탄성 필름을 나타내는데, 필름에는 주변으로부터 수분 흡수가 발생하고 있다. 수분 변화이외의 다른 외부 하중은 없는 상태이며, 필름의 두께는 h 이고 길이는 $2L$ 이다. 문제의 대칭성을 고려하여 필름 길이의 2분의 1만 모델링하면 된다. Fig.3(b)는 필름에 나타나는 계면 응력 분포를 조사하기 위해 2차원 경계요소 모델을 나타낸다. 여기에서 필름은 평면 변형률 상태에 있다고 가정한다. 수치해석은 $L/h=25$ 에 대해서 수행한다.

Fig.3(b)의 해석 모델에 대한 외부 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 &D-A \text{에 대해서, } \sigma_{xx}=0, \quad \tau_{xy}=0 \\
 &A-B \text{에 대해서, } \sigma_{xx}=0, \quad \tau_{xy}=0 \\
 &B-C \text{에 대하여, } \sigma_{xx}=0, \quad \tau_{xy}=0 \\
 &C-D \text{에 대하여, } \sigma_{xx}=0, \quad \tau_{xy}=0
 \end{aligned} \tag{9}$$

2장에서, 수분 흡수 영향은 온도 변화 영향과 유사하다고 가정되었다. 필름 내에서의 수분 변화가 균일한 경우에 대한 경계요소 해석과정은, 참고문헌[8]에서 설명한 내용중에서 온도 변화를 수분변화로 대체함으로써 해결된다.

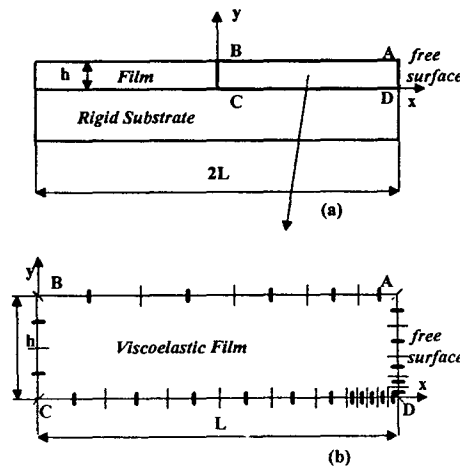


Fig.3 Boundary Element Analysis Model.

수치 해석을 수행하기 위해서, 식 (8)로 주어진 값들 이외에, 다음의 수치 값들이 추가로 사용되었다. 즉

$$\begin{aligned}
 \Delta m &= 1 \text{ \% (by weight)} \\
 \beta &= 0.01 \text{ /wt\%}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Fig.3(b)는 23개의 2차 선 요소로 이루어진 경계요소 해석 모델이다. 큰 응력 구배가 나타나는 계면 모서리 근처에는 세밀한 요소들이 사용되었다. Fig.4 는 경계요소 해석 결과로 얻어진 계면에서의 수직 응력 σ_{yy} 와 전단 응력 τ_{xy} 들이 무시간 차원 $t/t=0$ 과 0.07 에 대해서 나타나 있다. 응력들은 계면 모서리 부근에서 매우 큰 변화를 보이는데, 이러한 응력 변화는 계면 모서리 부근에 집중되어 있다. 이러한 응력 구배는 시간의 경과에 따라 상당히 이완되고 있는데, 여전히 큰 응력 구배가 이완에 관계없이 계면 모서리 부근에 나타나고 있다. 이러한 결과를 볼 때, 점탄성 필름에 수분 흡수가 발생하면, 필름과 모재의 계면 모서리에는 특이 응력들이 나타나며, 점탄성 이완에도 불구하고 응력 특이성들은 여전히 존재한다. 이러한 응력 특이성으로 인해, 계면 모서리에서의 접착 결합이 약하면 결합 분리현상이 발생하거나 모서리 균열이 야기될 수 있다. 이러한 응력 특이성을 이해하기 위해서는 계면 모서리에서의 응력확대계수를 조사할 필요가 있다.

자유 모서리 응력확대계수는 $h^{1-\lambda}$ 로 정규화하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

식 (11)은 응력단위를 갖는 양이다. Fig.5는 응력확대계수의 변화되는 모양을 보여주고 있다. Fig.2와 Fig.5를 비교해 볼 때, 자유 모서리 응력확대계수는 시간의 경과에 따라 점차 이완되다가 일정한 값으로 수렴하는 반면, 특이 차수는 점차 증가되다가 일정한 값으로 수렴하고 있다. 이러한 특이 차수의 증가와 자유 모서리 응력확대계수의 이완중 어느 부분이 실제 결합분리나 국부 항복에 더 큰 역할을 하는지를 알기 위해서는 실험적인 뒷받침이 요구된다고 보여진다.

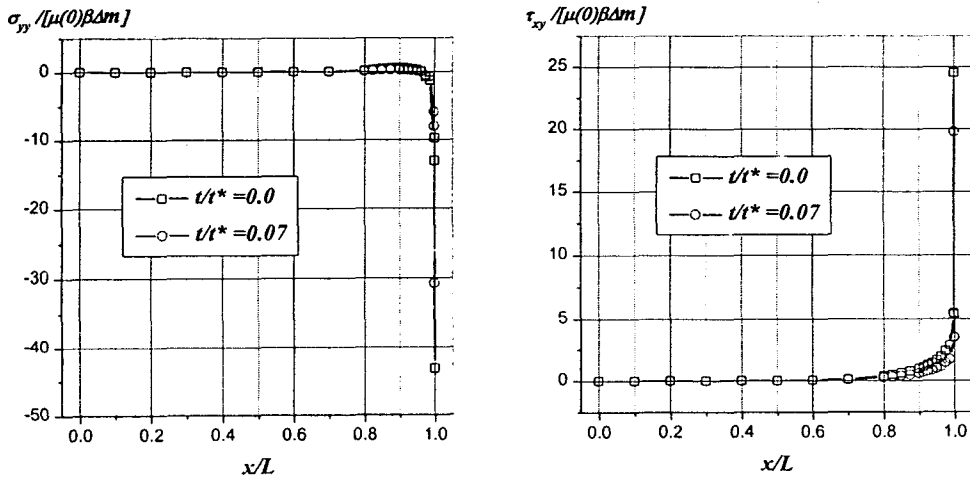


Fig.4 Distribution of interface normal stresses and shear stresses at times $t/t^*=0$ and 0.07 .

4. 결론

모재 위에 입혀져 있는 얇은 점탄성 필름이 주변으로부터 수분을 흡수하게 될 때, 계면 모서리에 발생하는 응력 특이성이 조사되었다. 필름에 비해 모재는 강성이 매우 크므로 강체로 가정되었다. 계면에 발생하는 응력해석은 시간 영역 경계요소법을 적용하여 수행되었는데, 계면 모서리에는 매우 큰 응력 구배가 나타났다. 이러한 특이 응력들은 필름의 길이나 두께에 비교해 비교적 작은 범위에 걸쳐 나타나고 있으며, 시간의 경과에 따라 이완되는 경향을 보여주고 있다. 특이 차수는 Williams방법과 라플라스 변형을 이용하여 계산되었는데, 점탄성 필름의 물성이 변함에 따라 점차 증가하다가 일정한 값으로 수렴하였다. 경계요소법에 의해 얻어진 응력들과 특이 차수를 사용하여 계산된 자유 모서리 응력확대계수는 초기 값에서 점차 이완되다가 일정한 값으로 수렴되는 현상을 보여 주었다.

수분 흡수로 인해 필름의 계면 모서리에 나타나는 응력 특이성은 피할 수 없는 현상으로, 수분 흡수가 많게 되거나, 계면 모서리 부근에서 결합 상태가 건전하지 않으면 외력이 작용하지 않는 상태에서도 모서리 균열이 발생하거나 결합 분리 현상이 나타날 수 있다. 해석 과정에서 점탄성 물성이 시간의 경과에 따라 변할 때, 특이 차수는 증가하고 자유 모서리 응력확대계수는 이완되어 가는데, 이러한 두 현상중 어느 부분이 필름의 건전성에 더 큰 영향을 주는지를 확인할 수 있는 실험적인 검증이 요구된다고 판단된다.

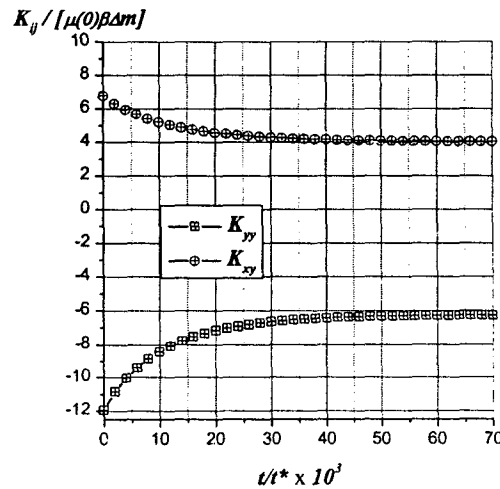


Fig.5 Variation of the free-edge stress intensity factors.

참고 문헌

- (1) Reedy, E.D., Jr., 1990, *Engr. Frac. Mech.*, Vol.36, pp.575-583.
- (2) Tsai, M.Y. and Morton, J., 1991, *Int. J. Solids and Structures*, Vol.28, pp.1053 - 1075.

- (3) Bogy,D.B., 1968, *ASME J.Applied Mechanics*, Vol. 35, pp. 460-466.
- (4) Weitsman,Y.,1979,*Int.J.Solids and Structures*,Vol. 15, pp.701-713.
- (5) Delale, F. and Erdogan, F., 1981, *ASME J. Applied Mechanics*, Vol.48, pp. 331-338.
- (6) Lee, S.S., 1998, *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 35, pp. 1385-1394.
- (7) Lee, S.S.,1997, *ASME J.Applied Mechanics*, Vol. 64, pp. 408-414.
- (8) Lee, S.S. and Westmann, R.A., 1995, *Int. J. Numerical Methods in Engineering*,Vol. 38 pp.607-629.
- (9) Williams, M.L., 1952, *ASME J.Applied Mechanics*, Vol. 74, pp.526-528.