

레이저 주사법을 이용한 박막 물성 측정 및 잔류응력 예측

이상순

한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

Measurement of Material Property of Thin Film and Prediction of Residual Stress using Laser Scanning Method

Sang Soon Lee

Korea University of Technology and Education

초 록: 고분자 재료가 전자산업분야에서 절연재료나 접착제로 널리 사용되고 있다. 실리콘 기판위에 증착된 고분자 층에는 기판과의 열팽창계수 차이로 인해 열응력이 발생할 수 있다. 고분자 층과 기판사이의 열적 성질의 차이로 인해 큰 잔류응력이 야기된다. 본 연구에서는 레이저 주사법을 이용하여 열적 변형으로 인한 곡률변화를 측정한 후, 해석적 방법을 적용하여 수정된 박막 물성을 구하는 방법을 제시하고 있다.

Abstract: Polymeric materials are widely used in the electronic industry as a common dielectric material or adhesive. The polymeric layer coated on Si substrate can be subjected to thermal stresses due to difference in thermal expansion coefficients. The mismatch in thermal properties between the polymeric layer and the substrate results in significant residual stresses. In this study, the thermal deformation is measured by a curvature measurement method using laser scanning, and the elastic modulus is calculated by an analytic model.

Keywords: Polymeric layer, thermal stress, curvature measurement, laser scanning

1. 서 론

반도체 산업에서는 두께가 매우 얇은 박막(thin film) 형상의 폴리머 재료가 실리콘 모재(substrate) 위에 증착되어 많이 사용되고 있다. 박막이 증착된 실리콘 모재가 고온 공정으로부터 상온으로 냉각될 때, 폴리머 박막과 실리콘 모재의 열팽창계수(coefficient of thermal expansion)의 차이로 인해 잔류 열응력이 발생하게 되는데, 이러한 열응력은 재료들의 계면(interface)에서 복잡한 응력상태를 야기시키고 박막 구조에 파손을 발생시키기도 한다^{1,2)}.

현재까지 열의 영향으로 인해 박막구조에서 발

생하는 잔류 열응력에 대한 접근은 크게 두 가지로 진행되어 왔는데, 하나는 수학 및 수치해석적인 접근³⁻⁶⁾이고, 다른 하나는 실험을 통한 접근법^{7,8)}이다. 수학적 접근법은 대부분 보(beam)와 같은 매우 단순한 기하학적 형상에 국한되어 적용되어 왔다. 이러한 고체역학적인 접근법은 박막구조의 역학적 거동에 영향을 주는 인자들을 쉽게 구별할 수 있는 장점이 있으나, 기하학적 형상이 복잡할 경우에는 적용하기가 어려운 문제점을 지니고 있다. 보다 일반적인 방법으로써 유한요소법이나 경계요소법과 같은 응용수치해석법이 널리 사용되고 있는데, 이러한 접근법은 박막을 포함한 주변

*Corresponding author
E-mail: sslee@kut.ac.kr

의 기하학적 형상이 복잡한 경우에도 효율적으로 사용될 수 있는 장점이 있고, 다층박막구조 전체의 변형상태나 박막의 평균적인 응력 상태를 예측하는 데는 효과적일 수 있다. 그러나 폴리머 재료가 박막 형태로 사용되는 경우에, 일반적인 재료와는 다른 물성을 나타내는데, 정확한 해석 결과를 얻기 위해서는 박막에 대한 물성 값을 구해야 한다.

박막내에 발생하는 잔류 응력이나 열 변형을 실험적으로 측정하는 방법으로는 X선 회절법이나 Raman법, 광 간섭계를 이용한 곡률측정법(curvature measurement method)등이 제안되어 왔는데, 최근에는 레이저 주사(laser scanning)를 이용한 곡률 측정법^{7,8)}이 제안되어 사용되고 있다. 특히 레이저 주사를 이용하여 측정한 곡률을 Stoney 공식에 적용하여 잔류응력을 계산하는 방법은 실험적인 접근으로서 신뢰성과 효율성을 기대해 볼 수 있는 좋은 방법이다. 그러나, 레이저 주사법과 Stoney 공식은 박막내에서의 수직응력을 정확하게 구할 수 있는 장점이 있으나 전체적인 거동을 예측하지 못하는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해서 신뢰성 있는 수치해석법과 레이저 주사법을 적용한 실험법을 결합하는 방법을 제안해 볼 수 있다.

본 연구에서는 실리콘 모재위의 박막에서 발생하는 잔류 열응력을 예측하는 방법으로 수치적인 방법과 실험적인 방법을 결합하고자 한다. 수치적인 방법으로는 계면 거동을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 경계 요소법을 사용하고, 실험적인 방법으로는 레이저 주사를 이용한 곡률 측정법을 적용하여 박막에서 발생하는 잔류 열응력을 구하고자 한다.

2. Boundary Element Formulation

Fig. 1은 실리콘 모재 위에 증착되어 있는 단층 박막구조를 나타내는데, 박막에는 주변으로부터 온도 변화가 발생하고 있다. 모재와 박막은 모두 선형 탄성거동을 한다고 가정한다. 온도 변화이외에 다른 외부 하중은 없는 상태이며, 모재와 박막의 두께는 각각 h_s 와 h_f 이다. 박막의 증착 과정은 고온에서 이루어지며 박막내의 용매가 증발되면 상온으로 냉각시키는데, 일반적으로 박막의 열팽

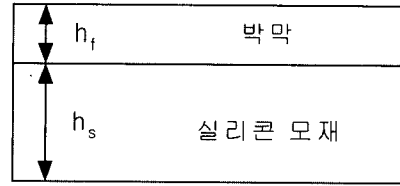


Fig. 1. 실리콘 모재 위에 증착되어 있는 단층 박막구조

창계수 α_f 가 모재의 열팽창계수 α_s 보다 크므로 휘게 되고 박막내에는 잔류 열응력이 발생하게 된다. 본 연구에서는 2차원 해석 모델을 선택하였고, 해석 모델은 평면 변형률(plane strain) 상태에 있다고 가정한다. 일반적으로, 실리콘 모재의 두께는 $380 \mu\text{m}$ 이고, 폴리머 박막의 두께는 $4 \mu\text{m}$ 가 넘지 않는다. 이렇게 얇은 층에 제조공정에서 온도 변화가 발생할 때 모재와 박막 내부에서의 온도 분포는 균일하다고 가정할 수 있다. 즉, $T(x,t) \approx T(t)$ 로 가정한다. 모재와 박막내의 균일한 온도 변화 ΔT 는 각각 $\gamma_s \eta_j$ 와 $\gamma_f \eta_j$ 에 해당하는 표면력(traction)의 증가와 동등한데, γ_s 와 γ_f 는 다음과 같이 주어진다⁹⁾.

$$\gamma_s = 3K_s \alpha_s \Delta T \quad (1)$$

$$\gamma_f = 3K_f \alpha_f \Delta T \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에서, 첨자 s와 f는 각각 모재와 박막을 가리키고, K는 체적 계수(bulk modulus)를 나타낸다. α 는 열 팽창계수를 나타내며, n_j 는 경계면 위에서 단위 외향 법선 벡터(unit outward normal vector)의 성분들을 가리킨다.

어떤 체력(body forces)도 존재하지 않는다는 가정아래, 주어진 해석 모델에 대한 경계적분 방정식은 다음과 같이 주어진다⁹⁾.

박막영역에 대해서,

$$\begin{aligned} c_{ij}^f(x)u_j^f(x) + \int_{S^f} u_j^f(x')T_{ij}^f(x, x')dS^f(x') \\ = \int_{S^f} t_j^f(x')U_{ij}^f(x, x')dS^f(x') + \int_{S^f} \gamma_f n_j U_{ij}^f(x, x')dS^f \end{aligned} \quad (3)$$

이고, 모재영역에 대해서는

$$\begin{aligned} c_{ij}^s(x)u_j^s(x) + \int_{S^s} u_j^s(x')T_{ij}^s(x, x')dS^s(x') \\ = \int_{S^s} t_j^s(x')U_{ij}^s(x, x')dS^s(x') + \int_{S^s} \gamma_s n_j U_{ij}^s(x, x')dS^s \end{aligned} \quad (4)$$

이다. 식 (3)과 (4)에서 위 첨자 f 와 s 는 각각 박막과 모재를 가리키고, u_j 와 t_j 는 각각 변위와 표면력을 나타내며, S 는 해석 모델의 경계면을 나타낸다. $c_{ij}(x)$ 는 경계면의 기하학적 조건에 의해 결정되는 항이고, U_{ij} 와 T_{ij} 는 탄성 기본해(elastic fundamental solutions)로서 탄성학(theory of elasticity)의 Kelvin 해를 가리킨다. 탄성 기본해에 대한 표현은 참고문헌[9]에 주어졌으므로 여기에서는 생략한다.

식 (3)과 (4)는 수치적으로 처리될 수 있는데, 경계면에 대해서 2차 선요소(quadratic line elements)를 사용하면 정확하고 효율적인 계산이 수행된다. 식 (3)과 (4)를 정리하면 다음과 같은 경계요소 방정식이 구해진다.

박막영역에 대해서,

$$[H^1 H^2] = \begin{pmatrix} u^1 \\ u^{12} \end{pmatrix} + [G^1 G^{12}] t_{12}^1 + [B_T^1] \quad (5)$$

이고, 모재영역에 대해서는

$$[H^2 H^{21}] = \begin{pmatrix} u^2 \\ u^{21} \end{pmatrix} + [G^2 G^{21}] t_{21}^2 + [B_T^2] \quad (6)$$

이다. 식 (5)와 (6)에서 위 첨자 '1'과 '2'는 각각 박막영역과 모재영역을 나타내고, '12'와 '21'은 두 영역의 계면을 가리키며, H 와 G 는 영향행렬을 나타낸다. B_T 는 온도에 의한 영향을 나타내는 항이다. 박막과 모재의 계면에서 변위의 연속조건과 표면력의 평형조건을 적용하고 경계조건을 적용하면 경계면에서의 변위와 응력(표면력)이 구해진다.

3. Experimental Procedure

3.1 이론적 배경

서론에서 언급한 바와 같이, 서로 다른 물성을 지닌 두 재료가 결합되어 있는 경우, 제작 공정에서 온도변화가 발생하게 되면 두 재료의 열팽창 계수의 차이로 인해 잔류 열응력이 발생하게 된다. 열팽창 계수의 차이로 인해 발생하는 잔류응력을 측정하는 방법으로는 레이저 주사 기술을 적용한 방법이 뛰어난 정확성을 가지므로 많이 사용되고 있다.

레이저 주사법은 거울면을 가지는 시편에 레이저를 주사하여 시편 표면에서 반사된 레이저의 방향이 표면 곡률에 따라 달라지는 것을 이용하는 방법이다. Fig. 2와 같이 시편이 유한한 곡률반경

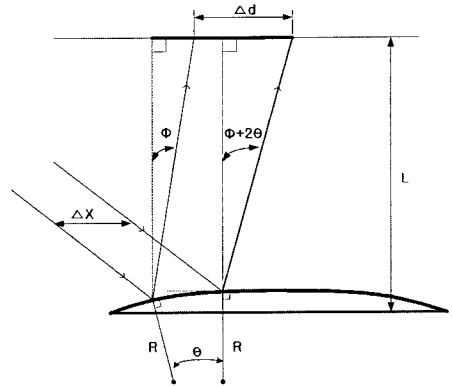


Fig. 2. 반사된 레이저 빔의 경로

을 갖는 경우, 레이저가 시편의 표면에 입사될 때 레이저는 표면에 수직인 벡터에 대하여 입사각과 반사각이 같다는 반사의 법칙을 사용하면 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$R = \frac{2\Delta x L}{\Delta d - \Delta x} \quad (7)$$

측정된 곡률을 이용해 박막의 잔류응력을 해석하는 방법은 여러 연구자들에 의해 제시되고 있는데, 그중 가장 많이 사용되는 Stoney 공식[7]은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_f = \frac{E_s h_s^2}{6(1-\nu_s) R h_f} \quad (8)$$

식 (8)에서 σ_f 는 박막의 응력을 나타내고, E_s 와 ν_s 는 각각 모재의 탄성계수와 Poisson 비를 가리키며, h_s 와 h_f 는 각각 모재의 두께와 박막의 두께를 나타낸다. 식 (8)은 모재의 길이에 비해 h_s 와 h_f 가 작고, h_f 는 h_s 에 비해 작으며, 모재와 박막은 균질하고 등방성을 가지면서 선형 탄성거동을 보이는 경우에 적용된다.

3.2 시편의 제작

시편은 380 μm 의 두께를 갖는 직경 3 in.의 (100) 방향 p타입 실리콘 웨이퍼 위에 열 가소성 수지인 폴리이미드를 스핀 코팅(spin coating)하여 제작하였다. 웨이퍼가 놓여있는 스핀코터에 폴리이미드 용액을 가해주고, 용매를 제거하면 순수한 폴리이미드가 웨이퍼 위에 코팅된다. 용매를 제거하는 조건은 60°C에서 10분, 120°C에서 10분, 250°C에

Table 1. 실리콘 모재와 폴리이미드의 물성 및 두께

	E(GPa)	ν	$\alpha(\text{ppm}/^\circ\text{C})$	h(μm)
실리콘 모재	141	0.22	2.6	380
폴리이미드	2.96	0.41	40	3

서 30분, 300°C에서 5분이다. 폴리이미드 두께는 스피너의 회전 속도와 시간을 조절하여 결정할 수 있는데, 여기에서는 2000 rpm으로 초간 코팅하여 박막의 두께가 3 μm 가 되는 시편을 제작하였다.

3.3 잔류 응력 계산

곡률측정 장치를 이용하여 실제 측정한 결과, 코팅 전의 실리콘 웨이퍼가 휘어있는 것을 확인하였다. 따라서 코팅으로 인해서 발생한 열변형에 의한 곡률 반경은 초기 변형 값을 보정한 값이 되어야 한다. 즉,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_f} - \frac{1}{R_\infty} \tag{9}$$

식 (9)에서 R_f 는 코팅후의 곡률반경이고 R_∞ 는 코팅 전의 곡률 반경이다. 곡률 측정 과정에 관한 자세한 설명은 참고 문헌^{7,8)}에 나와 있다. 측정된 곡률 반경 값과 계산된 잔류 응력은 Table 2와 같다. 실험에 사용된 폴리이미드의 인장강도는 이므로 계산된 잔류 응력은 비교적 작은 값을 갖는다고 볼 수 있다.

레이저 주사법을 적용하여 구해진 곡률 반경을 식 (8) 로 주어진 Stoney 공식에 대입하여 계산한 잔류 열응력은 Fig. 3에 표시한 바와 같이 박막에서 발생하는 길이방향의 수직응력만을 나타낸다. 이러한 계산 결과는 박막에서 발생하는 잔류응력의 크기 정도를 파악하는데 도움을 주지만, 박막의 신뢰성이나 파손 원인을 조사하는 데는 큰 도움이 되지 못한다. 박막에서 발생하는 잔류 열응력으로 인한 영향은 모재와 박막이 결합되어 있는 계면 모서리에서 크게 나타나므로 전체적인 응력

Table 2. 측정된 곡률반경 과 잔류 응력

시편 번호	1	2	3	4	5	평균
R(m)	63.7	64.1	74.9	88.5	80.0	74.2
$\sigma_f(\text{MPa})$	23	23	19	16	18	20

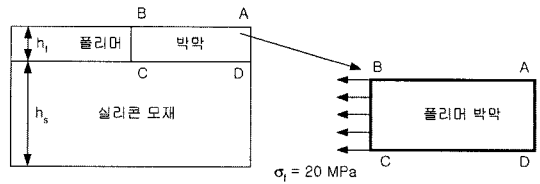


Fig. 3. 곡률 측정법에 의한 박막의 길이방향 수직응력 계산결과

상태를 파악하기 위해서는 2장에서 설명한 경계요소법을 적용해야 한다. 박막이 증착된 시편은 300°C에서 상온(23°C)으로 냉각되므로 경계요소법에 의한 열응력 해석과정에 $\Delta T \approx -277^\circ\text{C}$ 를 적용하였다. 모재와 박막에 대한 물성은 Table 1에 있는 데이터를 사용하였다. 해석에 사용된 경계요소 모델은 Fig. 2에 나타나 있다.

먼저, 경계요소법에 의한 해석 결과의 신뢰성을 조사하기 위해서 박막 내에서 발생한 길이 방향의 수직응력 해석결과를 Table 2에 나타나 있는 실험 값과 비교하였다. Fig. 4는 경계요소법에 의한 해석 결과 중에서 박막의 길이 방향에 대한 수직응력을 나타낸 그림이다. 해석된 수직응력의 크기는 로 레이저 주사에 의한 실험 결과와는 많은 차이를 보이고 있다. 경계요소 해석과정에서 박막에 대한 물성 값으로 Table 1에 나와 있는 데이터를 사용하였는데, 박막의 역학적 거동을 해석하는 과정에는 일반 폴리머 재료의 물성 값이 아닌 박막에 적용된 물성 값을 사용해야 한다. 박막의 역학적 거동을 해석할 때 사용하기 적합한 물성 식으로서 Im^7 은 복합 보 해석(composite beam analysis)이론으로부터 다음과 같은 수정된 탄성계수 식을 제안하였다.

$$E_f = \frac{\frac{1}{6R\Delta\alpha\Delta T} \frac{\bar{E}_s}{h_s^3}}{1 - \frac{1}{6R\Delta\alpha\Delta T} \frac{h_s^2}{h_s + h_f}} \times (1 - \nu_f) \tag{10}$$

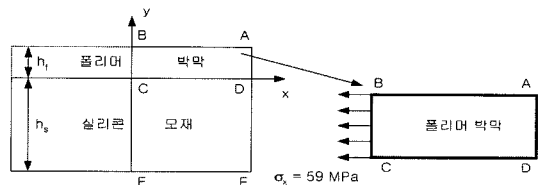
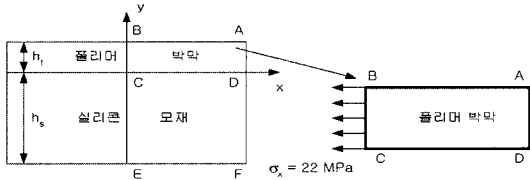


Fig. 4. 경계요소법에 의한 박막의 길이방향 수직응력 해석 결과

Table 3. 박막에 대한 수정된 탄성계수

시편 번호	1	2	3	4	5	평균
E_t (GPa)	1.29	1.28	1.09	0.93	1.04	1.13

**Fig. 5.** 수정된 물성을 사용하여 해석한 박막의 길이방향 수직응력

식 (10)에서 R 은 곡률반경을 나타내고, $\Delta\alpha$ 는 모재와 박막의 열팽창계수의 차를 가리키고, $\bar{E}_s = E_s / (1 - \nu_s)$ 를 나타낸다. 수정된 박막의 탄성계수는 Table 2에 나와 있는 곡률반경을 이용하여 계산한다. Table 3은 식 (16)을 이용하여 계산한 수정된 박막의 탄성계수값을 나타낸다.

Table 3에 나타나 있는 탄성 계수 값을 사용하여 경계요소 해석을 수행하였다. Fig. 5는 경계요소법에 의한 해석 결과 중에서 박막의 길이 방향에 대한 수직응력을 나타낸 그림이다. 해석된 수직응력의 크기는 22 MPa로 레이저 주사에 의한 계산 결과와 근접하고 있다. 따라서 식 (10)으로 표현된 수정된 탄성계수 식을 사용한 경계요소 해석은 신뢰할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실리콘 모재위의 박막에서 발생하는 잔류 열응력을 예측하고 개선된 공정을 제시할 수 있는 방법으로 수치적인 방법과 실험적인 방법을 결합하는 시도를 하였다. 실험적인 방법으로는 레이저 주사를 이용한 곡률 측정법을 적용하여 박막에서 발생하는 잔류 응력을 구하고자 하였으며, 수치적인 방법으로 경계요소법을 사용하여 박막에서 발생하는 잔류 열응력을 해석하고자 하였다.

실리콘 모재위에 증착된 폴리머 박막구조가 높은 공정온도에서 상온으로 냉각될 때 발생하는 곡률변화를 레이저 주사법을 적용하여 측정하였으며, 측정된 데이터를 Stoney 공식에 대입하여 잔류 응력을 계산하였다. 계산된 박막의 열응력은 박막의 길이방향에서 발생하는 수직응력을 나타낸다.

실험을 통하여 얻어진 잔류응력은 약 20 MPa의 크기를 나타내었는데, 폴리머 재료의 인장강도 120 MPa과 비교할 때 발생한 잔류응력의 크기는 박막의 파손에 큰 영향을 주지 않을 것으로 보인다.

경계요소법을 적용하여 얻어진 해석결과를 보면 실험적인 결과와는 달리 박막내에서 뿐만 아니라 박막 전체에서의 응력 변화를 보여주므로 잔류 응력의 발생으로 인한 박막의 신뢰성 연구를 진행하는데 보다 효과적이라고 볼 수 있다. 그러나, 본 연구에서 보여준 것처럼, 박막의 물성은 일반 체적상태의 물성과는 다르므로 박막에 적합한 수정된 물성을 입력시켜야 해석결과를 신뢰할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 물성은 레이저 주사법으로 얻어진 곡률반경을 이용하여 얻을 수 있으므로, 박막에 대한 신뢰성 있는 해석결과를 얻기 위해서는 레이저 주사법에 의한 방법과 경계요소법에 의한 해석방법이 결합될 때 효과적임을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 선도 연구자지원사업(과제번호 KRF-2003-041-D00006)의 지원을 받아 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. J. W. Tierney and J. W. Eischen, *ASME Journal of Electronic Packaging*, 119, pp. 281-287 (1997).
2. D. Post et al. *ASME Journal of Applied Mechanics*, 61, pp.192-198 (1994).
3. E. Suhir, *Journal of Applied Mechanics*, 55, pp.143-148 (1988).
4. E. D. Reedy, Jr. *Engineering Fracture Mechanics*, 36, pp. 575-583 (1990).
5. S. S. Lee, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 64, pp. 408-414 (1997).
6. S. S. Lee, *International Journal of Solids and Structures*, 35, pp. 1385-1394 (1998).
7. Y. T. Im, KAIST Department of Mechanical Engineering, M.S. Thesis (2001).
8. Y. T. Im, J. H. Kim, and S. T. Choi, *Proceedings of EMAP2001*, S. B. Lee and K. W. Baik (eds), Nov. 19-22, 2001, Cheju, Korea, pp. 341-346 (2001).
9. C. A. Brebbia and J. Dominguez, *Boundary Elements: An Introductory Course*, McGraw-Hill Book Co. (1989).