

마이크로머시닝 기술에 의해 형성된 막에 있어서의 잔류응력 추정

論 文
49C-6-6

Estimation of Residual Stresses in Micromachined Films

閔英薰*·金容權**

(Young-Hoon Min · Yong-Kweon Kim)

Abstract - A new method of measuring residual stress in micromachined film is proposed. An estimation of residual stress is performed by using least squares fit with an appropriate deflection modeling. An exact value of residual stress is obtained without any of the ambiguities that exist in conventional buckling method, and a good approximation is also obtained by using a few data points. Therefore, the test structure's area could be greatly decreased by using this method. The measurement can be done more easily and simply without any actuation or any specific measuring equipment. The structure and fabrication processes described in this paper are simple and widely used in surface micromachining. In addition, in-situ measurement is available by using the proposed method when the test structure and the measurement structure are fabricated on a wafer simultaneously.

Key Words : Residual stress, Deflection modeling, Least squares fit, Estimation, In-situ measurement

1. 서 론

마이크로머시닝 기술에 의해 형성된 구조물을 구성하는 막의 잔류응력 측정은 마이크로머시닝 기술을 바탕으로 제작된 센서나 액추에이터의 정확한 성능 예측을 가능하게 해준다. 따라서 이러한 잔류응력을 측정하는 여러가지 방법이 연구되고 발표되었다. 웨이퍼의 곡률을 이용하는 방법[1]은 잔류응력이 웨이퍼의 곡률을 변화시킬 수 있을 정도로 충분히 커야 하며 직경 100mm 이상의 큰 웨이퍼와 전용 장비를 필요로 한다. T 모양의 구조물[2]이나 버니어가 달린 긴 빔의 변형을 이용하는 방법[3]이 있으며, 변형량을 더욱 증폭시키기 위해 쌍으로 이루어진 굽은 빔을 이용하는 방법[4]도 있다. 이 방법들은 인장응력이거나 약한 압축응력하에서 자체구조물의 좌굴이 일어나지 않는 경우에 측정이 가능하다. 또한, 회전표시자(Rotating indicator)를 이용한 방법[5,6]은 광학현미경을 이용하여 측정이 가능하지만, 두께방향의 변형이 바닥과 평행인 방향으로의 변형에 비해 아주 작아야 한다. 일반적인 마이크로머시닝을 행하게 되면 표시자는 수 마이크로미터 이하의 두께에 수백 마이크로미터 정도의 길이를 가지므로 수직방향의 응력차이에 의한 휨이 발생하여, 심지어 바닥에 닿게 되면 정확한 측정이 어렵게 된다. 좌굴현상(buckling)을 이용하는 방법으로는 압축응력의 경우[7]와 인장응력의 경우에도 압축응력으로의 변환을 통해 측정이 가능하도록 한 방법[8]이

있다. 기계적 혹은 전기적인 구동을 이용한 방법으로는 멤브레인의 변형을 이용한 방법[9,10], 공진주파수를 이용한 방법[11-13] 및 문턱전압(Pull-in voltage)을 이용하는 방법[14,15] 등이 있다. 멤브레인의 변형을 이용한 방법은 측정대상을 사각형의 멤브레인으로 만들고 여기에 압력을 인가하여 압력에 대한 변형량을 측정하여 잔류응력을 추정한다. 공진주파수를 이용한 방법은 측정을 위해 가진할 수 있는 구조 및 장비를 마련해야 하며 댐핑효과가 공진주파수의 측정에 영향을 준다. 문턱전압을 이용하는 방법은 특정 구조물을 정전력으로 구동시키면서 문턱전압을 측정함으로써 잔류응력을 추정한다. 형성된 구조물의 수직방향 응력차이에 의해 휨이 발생하면 정전력 구동의 초기간격이 변하게 되어 문턱전압에 영향을 주게 된다.

상기의 방법들 중에서 좌굴(buckling)을 이용하는 방법은 가장 간단하고 제작이 쉬우며 형성된 구조물의 구동 없이도 측정이 가능하기 때문에 별도의 장비를 필요로 하지 않는다. 또한, 일반적으로 마이크로머시닝기술에 의해 형성된 막의 잔류응력은 막 형성 공정과 조건 및 주위환경에 의해 영향을 받기 때문에 정확한 잔류응력의 측정을 위해서는 측정을 위한 구조물을 주 구조물과 함께 공정하는 것이 필요한데, 좌굴을 이용하는 방법은 이러한 동시공정이 용이하다. 그러나, 이 방법은 항상 좌굴상태 판별에 있어서의 모호함이 발생하고 빔 길이의 간격이나 링 반경의 간격에 의해 정밀도가 결정된다. 또한, 낮은 잔류응력으로 인해 마련된 패턴 중에서 좌굴이 일어나지 않을 경우에는 판단이 불가능하게 되기 때문에 많은 양의 패턴이 필요하게 된다.

본 논문에서는 좌굴상태 판별의 모호함을 없애고, 정밀도가 빔 길이의 간격이나 링 반경의 간격에 의해 좌우되지 않는 잔류응력 추정 방법을 제시하였다. 지배방정식을 세우고 주어진 경계조건으로부터 적절한 모델링을 행함으로써 빔의

* 正 會 員 : 三星電子(株) 先任研究員
서울大 工大 電氣工學部 博士課程

** 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學部 副教授·工博
接受日字 : 1999年 8月 16日
最終完了 : 2000年 4月 12日

길이 혹은 링의 반경에 따른 변형량으로부터 최소 오차법을 통하여 잔류응력을 추정하였다. 마이크로머시닝의 종류에 관계없이 희생층이 제거된 빔 혹은 링 패턴의 최대 변형량을 측정하고 이를 모델링 결과와 비교함으로써 보다 신뢰성을 가지는 잔류응력을 추정할 수 있으며 적은 양의 패턴만으로도 잔류응력의 추정이 가능하다. 또한, 본 연구에서는 가장 일반적인 표면 마이크로머시닝 기술을 사용함으로써 측정용 구조물과 주 구조물의 동시공정이 가능하도록 하였다.

2. 모델링

전술한 바와 같이 일반적으로 좌굴을 이용하는 방법은 좌굴상태를 정확히 판별하기 어려우며 정밀도도 빔 길이의 간격이나 링 반경의 간격에 의존한다. 두께방향 잔류응력의 불균일에 의한 초기의 휨 모멘트가 존재하는 상황에서 잔류응력에 의한 압축력과 최대변형량의 관계를 알면 최소오차법에 의해 잔류응력을 추정할 수 있다. 관계식은 경계조건과 제한조건을 가지는 적절한 모델링을 통하여 얻는다. 그림 1에 일반적인 경계조건하에서의 모델링을 나타내었다. 여기서 α 는 회전강성(rotational stiffness)을 나타내며 양쪽이 모두 자유롭게 회전할 수 있는 구조에서는 영이 되고, 양쪽이 모두 고정된 지지부인 경우에는 무한대가 된다. 지배방정식(식(1))으로부터의 해는 식(2)로 주어지며 경계조건(식(3), 식(4))으로부터 구해질 수 있다. 양쪽대칭 구조이므로 식(4) 대신 빔 중앙에서의 경계조건 식(5)를 택하고 정리하면 최대변형은 빔의 중앙에서 일어나며 식(6)으로 주어진다.

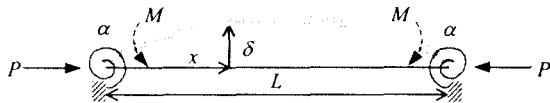


그림 1 일반적인 경계조건하에서의 모델링
Fig. 1 Modeling with general boundary conditions

$$\frac{d^2}{dx^2} (EI \frac{d^2 \delta}{dx^2}) + \frac{d}{dx} (P \frac{d\delta}{dx}) = 0 \quad (1)$$

$$\delta(x) = c_1 + c_2 x + c_3 \cos kx + c_4 \sin kx \quad (2)$$

$$\delta = 0, EI \frac{d^2 \delta}{dx^2} = +\alpha \frac{d\delta}{dx} - M, \text{ at } x=0 \quad (3)$$

$$\delta = 0, EI \frac{d^2 \delta}{dx^2} = -\alpha \frac{d\delta}{dx} - M, \text{ at } x=L \quad (4)$$

$$\frac{d\delta}{dx} = 0, V = -\frac{d}{dx} (EI \frac{d^2 \delta}{dx^2}) = 0, \text{ at } x = \frac{L}{2} \quad (5)$$

$$\delta_{\max} = \frac{M}{P + k\alpha \tan(kL/2)} \left[\sec\left(\frac{kL}{2}\right) - 1 \right] \quad (6)$$

여기서, P 는 압축력, L 은 빔의 길이, δ 는 변형량, E 는 영률, I 는 관성모멘트, k 는 $(P/EI)^{1/2}$ 를 나타낸다. 압축력 P 는 응력 σ 와 빔 단면적의 곱으로 주어지며, 굽힘모멘트 M 은 두께방향의 응력불균형에 기인한 것으로서 양쪽지지보와는 달리 외팔보에서 희생층이 제거되면 압축력은 모두 이완되고 모멘트에 의한 변형이 일어나므로 외팔보 끝단의 변형량 관계식(식(7))으로 둘 수 있는데 θ 는 지지부의 변형에 기인한 항이며 자체변형을 무시할 수 있는 작은 변형의 경우에는 외팔보 끝단의 변형량으로 모멘트를 얻을 수 있다.

$$\delta_c \cong \theta L + \frac{M}{2EI} L^2 \quad (7)$$

양쪽지지빔과 같은 단면적의 동일공정으로 형성된 외팔보는 영률, 관성모멘트 뿐만 아니라 두께방향의 응력구배에 의한 굽힘모멘트가 양쪽지지빔과 같으므로 외팔보로부터 얻어진 굽힘모멘트를 그림 1의 모델에 적용시킬 수 있다.

희생층 제거가 완료된 구조물에서 외팔보 끝단의 변형량으로부터 모멘트 M 을 구하여 전술한 모델링식(식(6))에 대입함으로써 축 방향 힘과 최대변형량의 관계를 얻은 다음 실제의 측정값과 비교하여 오차가 최소가 되는 점을 택함으로써 보다 실제에 가까운 압축력을 추정할 수 있으며 이 힘을 빔의 단면적으로 나눈 값이 단축성(uniaxial)의 잔류응력이 된다. 인장응력을 측정하기 위해서는 링 구조물을 사용하는데[8] 측정을 위한 링 구조물의 중앙빔이 그림 1의 모델이 되어 식(6)의 관계로부터 압축응력이 추정되며 변환효율을 이용하여 원래의 인장응력을 구할 수 있다. 이 때의 변환효율 $g(R)$ 은 링 구조물의 기하학적 형상에 의해 주어지며[8] 회전강성은 지지부의 구조에 따라 결정되는데 링 구조물의 경우에 링의 반경에 따른 중앙빔 양 끝단의 회전강성은 참고문헌[8]에 나타나 있다.

그림 2와 그림 3은 식(6)에서 모멘트 혹은 압축력을 변화시킬 때의 최대변형량 곡선의 경향을 나타낸다. 그림 2는 굽힘모멘트를 변화시킬 때 압축력에 따른 최대변형량을 나타내었다. 횡축은 주어진 회전강성과 길이를 가진 빔에서 좌굴시의 힘을 기준으로 정규화된 압축력을 나타내었으며 종축은 비교를 위한 임의의 최대변형량을 나타내었다. 동일한 길이의 빔에 있어서 굽힘모멘트가 클수록 최대변형량은 증가함을 알 수 있다. 응력 불균일에 의한 굽힘 모멘트가 없거나 혹은 있더라도 회전강성이 무한대인 완전고정 지지빔의 경우에는 좌굴상태에 도달할 때까지 변형이 일어나지 않는다.

또한, 주어진 굽힘모멘트와 회전강성하에서 빔의 길이에 따른 최대 변형량을 도시하면 그림 3과 같다. 횡축은 경향을 도시하기 위하여 그림 3에서의 다른 세가지 크기의 힘 중에 압축력이 가장 작을 때의 좌굴이 일어나는 길이를 기준으로 정규화한 빔 길이이며 종축은 비교를 위한 임의의 최대변형량을 나타낸다. 압축력의 크기에 따라 각각 다른 그래프가 얻어지게 되므로 빔의 길이에 따른 최대 변형량을 측정하면 모델링 결과와의 최소 오차법을 사용하여 압축력, 즉 잔류응력을 추정할 수 있다. 좌굴을 이용하여 잔류응력을 추정하는 방법에서는 회전강성과 휨 모멘트를 고려하지 않은 경우이며 그림 3에서 좌굴길이(Buckling line)에 이르기 전의 짧은 빔에서는 변형이 일어나지 않아야 한다. 그러나 표면 마이크로

머시닝기술에 의해 형성된 빔 구조물, 특히 연성재료의 구조물에서는 지지부가 크지 않은 회전강성이 존재하며 응력불균일에 의한 굽힘모멘트가 존재하게 되므로 좌굴에 이르지 않아도 변형이 일어난다. 따라서 좌굴에 이르지 않았거나 판단이 모호한 경우에도 식(6)을 이용하면 잔류응력의 추정이 가능하다.

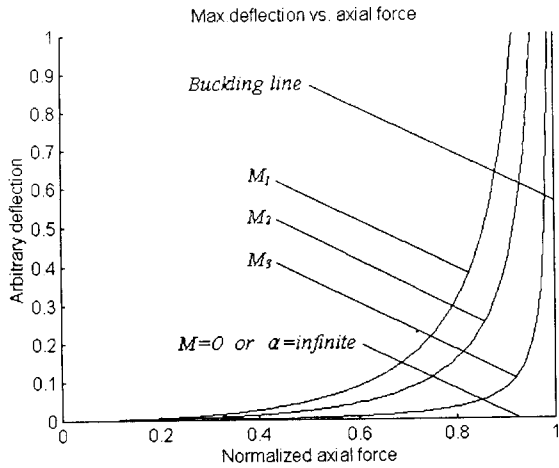


그림 2 압축력에 따른 최대변형량의 예 ($M_1 > M_2 > M_3$)
 Fig. 2 Example of Max. deflections according to axial force ($M_1 > M_2 > M_3$)

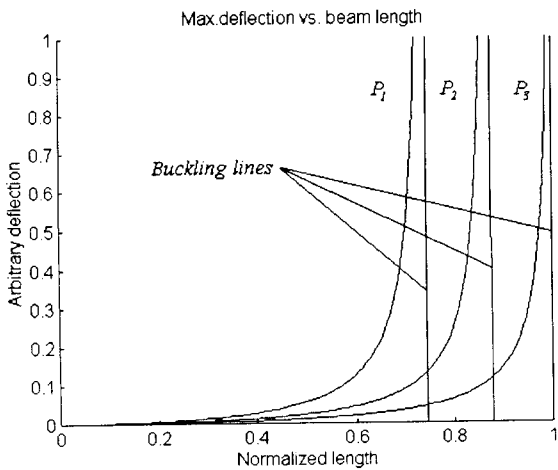


그림 3 빔의 길이에 따른 최대변형량의 예 ($P_1 > P_2 > P_3$)
 Fig. 3 Example of Max. deflection according to beam length ($P_1 > P_2 > P_3$)

3. 실험 결과

그림 4에 측정용 패턴을 나타내었으며, 그림 5에는 형성된 막의 잔류응력을 추정하기 위한 공정순서를 나타내었다. 먼저 그림 5(a)의 상태와 같이 희생층 및 지지홀을 형성하고 원하는 막을 그림 5(b)와 같이 형성, 패터닝한다. 그림 5(c)와 같이 희생층을 제거한 후, 각 구조물의 크기에 따른 최대변형

량을 측정하고 전술한 모델링과 비교를 행함으로써 최소오차법에 의해 잔류응력을 추정한다. 이러한 공정은 일반적으로 널리 사용되는 표면 마이크로머시닝 공정이므로 주 구조물과 동시에 제작하는 것이 가능하다.

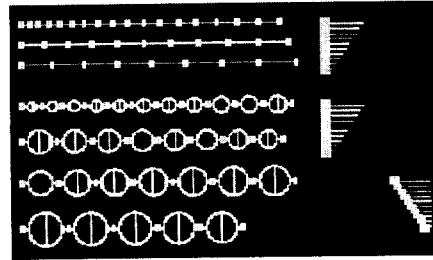


그림 4 측정용 패턴
 Fig. 4 Patterns for measurement

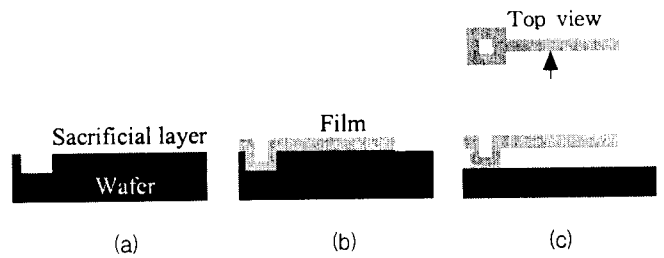


그림 5 공정순서
 (a) 희생층, 지지홀 형성 (b)막 패터닝 (c)희생층제거
 Fig. 5 Fabrication process
 (a)sacrificial layer & post hole (b)patterning (c)release

본 논문에서는 실험을 위한 막으로 알루미늄을 사용하였으며 열 증착 및 스퍼터링 공정을 각각 행하였다. 희생층으로는 후막 PR을 사용하였으며 희생층은 O₂ asher를 사용하여 제거하였다.

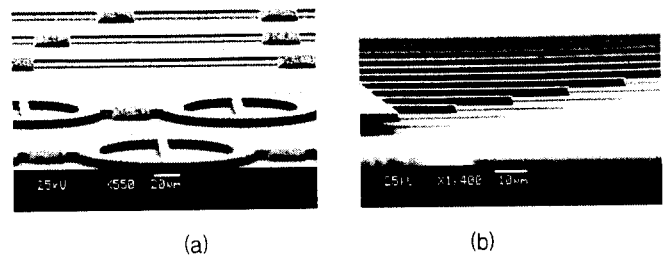


그림 6 희생층이 제거된 패턴 : (a)빔 및 링 구조물 (b)외팔보
 Fig. 6 Released patterns : (a)beams & rings (b)cantilevers

그림 6에 희생층이 제거된 패턴의 전자현미경 사진을 나타내었다. 알루미늄막의 두께는 열 증착의 경우에 1.9 μ m, 스퍼터링의 경우에 1.7 μ m이다. 제작된 빔 구조물과 링 구조물의 폭은 각각 7 μ m, 17 μ m이고 빔의 길이는 5 μ m 간격으로 20 μ m부터 190 μ m까지이며 링의 반경은 2.5 μ m 간격으로 20 μ m부터 105 μ m

까지 이다. 외팔보의 길이는 $20\mu\text{m}$ 간격으로 $20\mu\text{m}$ 부터 $200\mu\text{m}$ 까지 이다.

회생층 제거가 완료된 패턴은 비접촉식 레이저 프로파일러(VF-7500, Keyence)를 사용하여 변형량을 측정하였다. 잔류응력은 식(6)으로부터 추정되며 인장응력의 경우에는 전술한 중앙빔 양 끝단의 회전강성과 링 구조물로부터의 변환효율을 이용하여 추정할 수 있는데 알루미늄 열증착인 경우에는 압축응력을, 스퍼터링의 경우에는 인장응력을 얻었다. 빔 및 링의 변형은 그림 7과 그림 8에 나타내었으며 상단부의 흰선이 변형된 구조물의 형상을 나타낸다.

그림 7에서 빔 양쪽 끝단의 형상은 회생층 제거시 압축응력의 풀림으로 인해 생긴 지지홀 주위에서의 두께방향으로의 부분수축에 기인한 것이다. 초기의 짧은 빔에서는 압축응력에 의한 변형이 거의 없으나 점차로 변형이 일어나서 $190\mu\text{m}$ 길이의 빔에는 큰 변형이 일어나 있음을 볼 수 있다. 이와는 달리 그림 8에서는 $190\mu\text{m}$ 길이의 빔에는 변형이 일어나지 않았다. 이는 인장응력에 기인한 것으로 링 구조물의 중앙 빔에 변형이 일어났음을 볼 수 있다.

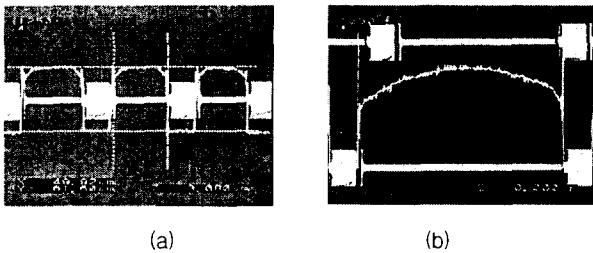


그림 7 압축 응력시의 빔 구조물의 형상
(a)빔의 길이=55, 50, $45\mu\text{m}$ (b) $190\mu\text{m}$

Fig. 7 Shapes under compressive stress
(a)beam length= $55, 50, 45\mu\text{m}$ (b) $190\mu\text{m}$

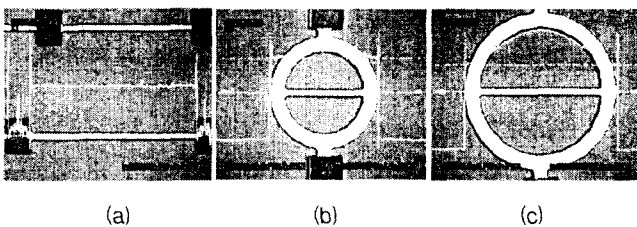


그림 8 인장 응력시의 빔 및 링 구조물의 형상
(a)빔의 길이= $190\mu\text{m}$ (b)링의 반경= $55\mu\text{m}$ (c) $80\mu\text{m}$

Fig. 8 Shapes of under tensile stress
(a)beam length= $190\mu\text{m}$ (b)ring radius= $55\mu\text{m}$ (c) $80\mu\text{m}$

그림 9는 압축응력하에서의 빔 길이에 따른 최대변형량을 나타내었으며 실제의 측정값과 함께 전술한 모델링에 의한 추정결과도 함께 도시하였다. 제작한 패턴상에서는 좌굴이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 그림 10은 인장응력하에서의 링 반경에 따른 최대변형량을 나타내었으며 측정값들로부터는 좌굴상태를 판단하기 어려움을 알 수 있다. 본 논문에서의 모델링은 작은 변형이론(small deflection theory)에 근거

한 것으로 큰 변형이론(large deflection theory)을 따르게 되는 경우 비선형 효과로 인해 모델링 결과를 적용시킬 수 없게 된다. 가장 비선형성이 강하게 되는 양쪽 고정빔의 중앙부에 전단력이 가해지는 경우에는 최대변형이 빔 폭의 1/4이상에서 점차로 비선형으로 된다[16]. 따라서 빔 폭의 1/4이하인 경우에 측정값이 유효하다고 볼 수 있으며 링 구조물의 경우에 이 조건을 적용시켜도 충분하다. 본 연구에서의 빔의 폭이 약 $7\mu\text{m}$ 이므로 약 $1.75\mu\text{m}$ 이하의 변형이 일어난 그림 9에서의 측정값은 모두 유효하며 그림 10에서는 약 $1.75\mu\text{m}$ 이상 측정값은 더 이상 모델링 곡선을 따르지 않게 되므로 추정을 위한 측정값에서 제외시켰다.

식(7)에 의해 여러 길이의 외팔보로부터 구해진 초기 모델트는 열 증착의 경우에 $(10.9\pm 1.1)\times 10^{-10}\text{Nm}$ 이었고 스퍼터링의 경우에 $(7.0\pm 0.8)\times 10^{-11}\text{Nm}$ 이었다. 본 논문을 위한 실험시에 외팔보의 폭과 두께를 양쪽지지빔과 같게 하였으므로 얻어진 굽힘모멘트를 식(6)에 적용할 수 있다. 따라서, 얻어진 굽힘모멘트와 식(6)에 의해 최소오차법으로 구해진 회전강성과 잔류응력은 각각 $0.4\times 10^{-8}\text{Nm/rad}$, $-5.2\pm 0.6\text{MPa}$ (그림 9의 결과)이었고 인장응력의 경우에 얻어진 잔류응력은 $45.2\pm 1.2\text{MPa}$ (그림 10의 결과)이었다. 이 때, 빔 양 끝단의 회전강성은 응력의 영향이 포함된 상용 회전강성을 의미하며 링 구조물에서의 회전강성은 전술한 바와 같이 구조물의 재료특성과 기하학적 형상에 의해 주어지는데 링의 반경에 따라 변하는 값이다[8]. 얻어진 잔류응력은 단축성(Uniaxial)의 값을 의미한다. 이로부터 일반적인 좌굴조건을 이용하여 좌굴이 시작되는 점을 계산해 보면 압축응력의 경우 빔 길이가 약 $282\mu\text{m}$, 인장응력의 경우 링 반경 약 $97\mu\text{m}$ 이다. 즉, 그림 9의 측정값에서는 좌굴이 일어나지 않았으며, 그림 10의 측정값에서는 좌굴의 판별이 모호해서 이 측정값만으로는 잔류응력의 결정이 불가능하였다. 그러나 본 연구에서 제시한 빔의 길이 및 링의 반경에 따른 모델링을 통하여 잔류응력의 추정이 가능하였다.

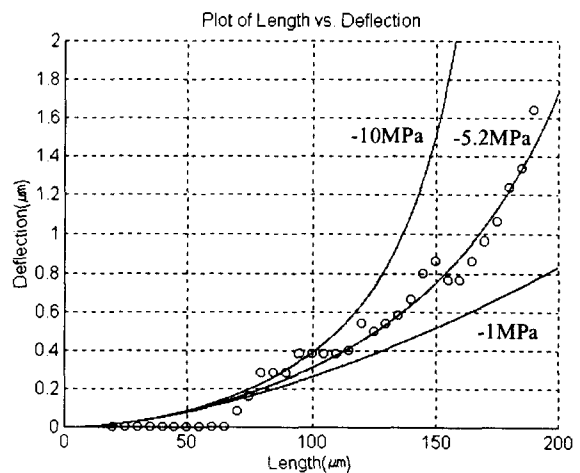


그림 9 빔 길이에 따른 최대변형량 : 측정값(점), 모델링(선)
Fig. 9 Max. deflections according to beam length : measured(dots) & modeling(line)

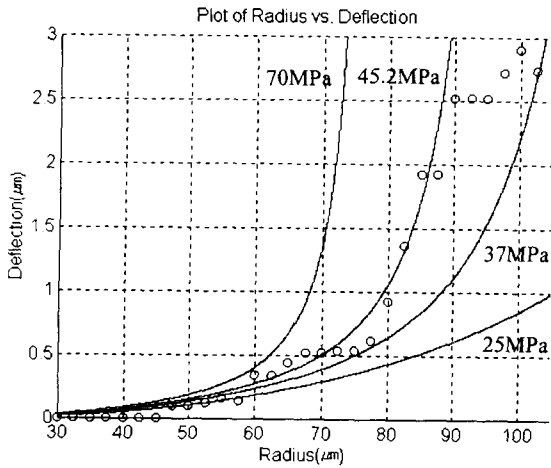


그림 10 링 반경에 따른 최대변형량 : 측정값(점),모델링(선)
 Fig. 10 Max. deflections according to ring radius :
 measured(dots) & modeling(line)

그림 9에서는 35개의 측정값을 이용하여 잔류응력을 추정하였고 그림 10에서는 24개의 측정값을 이용하여 잔류응력을 추정하였다. 이렇게 많은 패턴을 제작하면 넓은 면적을 차지할 뿐 아니라 변형량 측정에 많은 시간이 걸린다. 본 논문에서 제안한 방법을 이용하여 표 1에서와 같이 유효측정값의 일부만을 이용하여 추정하더라도 거의 같은 결과를 얻을 수 있었다. 표 1에서의 간격은 추정에 사용된 구조물간의 길이 혹은 반경의 차이를 의미한다. 또한, 여기서 사용한 알루미늄의 영률은 일반적인 값인 70GPa이다.

표 1 측정값의 수에 따른 추정값
 Table 1 Estimated value according to number of data

	σ (MPa)	$\alpha (\times 10^{-8})$	간격(μm)	측정점의 수
압축응력 (그림 9)	-5.2	0.4	5	35
	-5.7	0.4	20	9
	-4.6	0.3	40	5
인장응력 (그림 10)	45.2	0.7~2.4	2.5	24
	45.2		10	6
	45.2		20	3

4. 결론

본 논문에서는 종래의 좌굴에 의한 잔류응력 추정법에 있어서의 여러 가지 장점을 가지면서도 좌굴이 일어나지 않았거나 좌굴의 판단이 모호한 경우에도 사용이 가능하며 정밀도가 빔 길이의 간격이나 링 반경의 간격에 의해 좌우되지 않을 뿐 아니라 적은 량의 패턴만으로도 판단이 가능한 새로운 잔류응력 추정방법을 제안하였고 실험값과 비교하여 이의 타당함을 보였다. 지배방정식을 세우고 주어진 경계조건으로부터 적절한 모델링을 행함으로써 빔의 길이 혹은 링의 반경

에 따른 최대변형량으로부터 최소 오차법을 통하여 잔류응력을 추정하였다.

결과로부터 열 증착에 의한 알루미늄은 압축응력을 가지나 스퍼터링에 의한 알루미늄은 인장응력을 가짐을 볼 수 있는데 같은 재질이라도 막의 형성환경과 조건에 따라 잔류응력이 다르게 결정됨을 알 수 있다. 따라서, 주 구조물과 함께 측정용 구조물을 마련하여 동시에 막을 형성시킨 후, 본 논문에서 제시한 방법을 이용하면 마이크로머시닝 기술에 의해 형성된 막의 잔류응력을 보다 정확하고 손쉽게 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] G. G. Stoney, "The tension of metallic films deposited by electrolysis", *Proc. Roy. Soc.*, vol.9, pp.172-175, 1909
- [2] M. Mehregany, R. Howe, and S. Senturia, "Novel microstructures for the in situ measurement of the mechanical properties of thin films", *J. Appl. Phys.*, vol.62, no.9, pp.3579-3584, 1 Nov. 1987
- [3] P. M. Zavracky, G. G. Adams, and P. D. Aquilino, "Strain analysis of silicon-on-insulator films produced by zone melting recrystallization", *J. Microelectromechanical Systems*, vol.4, no.1, pp.42-48, Mar. 1995
- [4] Y. Gianchandani and K. Najafi, "Bent-Beam Strain Sensors", *J. Microelectromechanical Systems*, vol.5, no.1, pp.52-58, Mar. 1996
- [5] J. F. L. Goosen, B. P. van Drieënhuizen, P. J. French and R. F. Wolffenbuttel, "Stress measurement structures for micromachined sensors", *Tech. Dig. 7th Int. Conf. On Solid State Sensors and Actuators, Transducers 93 (Yokohama, Japan)*, pp.783-786, 1993
- [6] F. Ericson, S. Greek, J. Söderkvist and J.-Å. Schweitz, "High-sensitivity surface micromachined structures for internal stress and stress gradient evaluation", *J. Micromech. Microeng.*, vol.7, pp.30-36, 1997
- [7] H. Guckel, T. Randazzo, and D. W. Burns, "A simple technique for the determination of mechanical strain in thin films with applications to polysilicon", *J. Appl. Phys.*, vol.57, no.5, pp.1671-1675, Mar. 1, 1985
- [8] H. Guckel, D. Burns, C. Rutigliano, E. Lovell and B. Choi, "Diagnostic microstructures for the measurement of intrinsic strain in thin films", *J. Micromech. Microeng.*, vol.2, pp.86-95, 1992
- [9] O. Tabata, K. Kawahata, S. Sugiyama, and I. Igarashi, "Mechanical property measurements of thin film using load-deflection of composite rectangular membrane", *Proc. IEEE Microelectromechanical Systems*, pp.152-156, 1989
- [10] D. Maier-Schneider, J. Maibach, E. Obermeier and D. Schneider, "Variations in Young's modulus and intrinsic stress of LPCVD-polysilicon due to

- high-temperature annealing", *J. Micromech. Microeng.*, vol.5, pp.121-124, 1995
- [11] L. M. Zhang, D. Uttamchandani, and B. Clushaw, "Measurement of the mechanical properties of silicon microresonators", *Sensors and Actuators A*, 29, pp.79-84, 1991
- [12] Y. Gianchandani and K. Najafi, "A bulk silicon dissolved wafer process for Microelectromechanical devices", *J. Microelectromechanical Systems* vol.1, no.2, pp.77-85, June 1992
- [13] X. Y. Ye, Z. Y. Zhou, Y. Yang, J. H. Zhang and J. Yao, "Determination of the mechanical properties of microstructures", *Solid State Sensors and Actuators (Transducers 95 Eurosensors IX)*, pp.100-103, 1995
- [14] K. Najafi and K. Suzuki, "A novel technique and structure for the measurement of intrinsic stress and Youngs modulus of thin films", *Proc. IEEE Microelectromechanical Systems*, pp.96-97, 1989
- [15] P. M. Osterberg and S. D. Senturia, "M-TEST:A Test Chip for MEMS Material Property Measurement Using Electrostatically Actuated Test Structures", *J. Microelectromechanical Systems*, vol.6, no.2, 107-118, 1997
- [16] R. Legtenberg, A. W. Groeneveld and M. Elwenspoek, "Comb-drive actuator for large displacements", *J. Micromech. Microeng.*, vol.6, pp.320-329, 1996

저 자 소 개



민영훈 (閔英薰)

1987년 서울대 공대 기계설계학과 졸업.
 1995년 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 졸업(석사). 현재 서울대 공대 전기공학부 박사과정. 1987년~현재 삼성전자 근무.
 Tel : 02-888-5017, Fax : 02-873-9953
 E-mail : yhmin@snu.ac.kr



김용권 (金容權)

1985년 서울대 전기공학 및 동 대학원 졸업(석사). 1990년 동경대 전기공학과 졸업(공학박). 1990년~1992년 일본 히타치제작소 중앙연구소 연구원. 1992년~1996년 서울대 전기공학부 조교수. 1996년~현재 서울대 전기공학부 부교수
 Tel : 02-880-7440, Fax : 02-873-9953
 E-mail : yongkkim@plaza.snu.ac.kr