

유한 요소법을 통한 띠 굽힘 시험의 오차 요인에 대한 연구 stud on error sources of strip ending test using finite element anal sis

*박정민, #김재현, 이학주

*J. M. Park, #J. H. Kim(jaehkim@kimm.re.kr), H. J. Lee
한국기계연구원 나노공정장비연구센터

Key words : MEMS, Thin film, Strip bending test, Finite element analysis

1. 서론

MEMS 구조물의 설계를 위해서 박막의 기계적 물성은 반드시 필요하다. 그러나 박막의 두께는 수 마이크로미터(μm)에서 수백 나노미터(nm)로 매우 얇아 시험편의 조작 및 정렬, 부착, 하중과 그에 따른 변위의 측정 등이 까다롭기 때문에 나노압입시험 외에는 기계적인 물성을 측정하기 어려운 실정이다. 이러한 이유로 여타 다른 측정법과 비교할 때 띠 굽힘 시험은 박막의 물성 측정에 다양하게 활용되고 있다.

김정실 등.[1]은 시험편 형상에 따라 탄성계수와 항복응력의 오차가 발생할 수 있음을 유한요소법을 통해 규명하였다. 그러나 시험편의 형상 이외에도 시험 장비 및 시험편의 정렬 등이 실험 데이터의 오차를 유발할 수 있으나 실험적인 방법을 통해 이러한 오차를 분석하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그 이유는 시험편 및 시험 장비의 치수는 마이크론 단위이므로 인위적으로 오차 요인이 발생하도록 시험 장비를 설치, 조작하는 것은 불가능하며, 또한 실험 데이터의 참값에 대한 오차를 분석하기 위해서는 참값을 알아야 하나 실험 데이터로부터 참값을 도출하는 것은 어려운 일이다. 이에 본 연구에서는 띠 굽힘 시험의 오차 유발 요인을 파악하여 각 요인의 오차 정도를 분석함으로써 실제 시험의 실험 결과 분석에 활용하고자 한다.

2. 띠 굽힘 시험

띠 굽힘 시험은 시험편의 양끝단이 고정된 자유지지 띠형상의 시험편의 중앙에 쐐기형 압자(Wedge type indenter)를 이용하여 하중을 가하는 시험을 말한다.

띠 굽힘 시험은 자유지지 박막의 기계적 물성을 비교적 적은 노력으로 정확하게 측정할 수 있는 유용한 방법이지만, 다음과 같은 몇 가지 가정을 전제로 하여 하중과 그에 따른 변위 관계를 해석하기 때문에 시험편 및 시험 설계 시 주의가 필요하다. (1) 띠 굽힘 시험편은 등방성 재료로서 선형탄성 거동을 하고, (2) 굽힘 모멘트를 지지하지 못하며, (3) 시험편의 너비 방향 변형은 평면 응력 또는 평면 변형률 조건으로 단순화된다. 이와 같은 가정하에서 띠 굽힘 시험편의 하중-변위 관계는 다음과 같은 식으로 유도된다[2].

$$= 2\sin\theta \left(\sigma + \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta} E \right) \quad (1)$$

여기서 σ 는 띠형상의 시험편에 가해지는 하중, $\theta = \arctan(\delta)$, σ 는 하중 부하 전의 초기응력, E 는 시험편의 탄성계수, w 와 d 는 시험편의 폭과 두께이다.

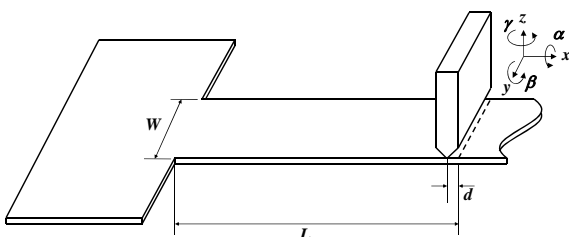


Fig. 1 Configuration of specimen and error sources

띠 굽힘 시험으로 얻은 하중과 변위값으로 시험편의 응력과 변형률을 구하는 단순 모델식은 식(2)와 같다.

$$\sigma = \frac{M}{I} \sin\theta, \quad \epsilon = \frac{\delta}{L} \sqrt{L^2 + \delta^2} - 1 \quad (2)$$

3. 유한요소모델

본 연구에서 띠 굽힘 시험을 위해 검토한 시험편의 형상은 그림 1 와 같으며, 시험편의 폭(w)과 두께(d)는 각각 20, 1.0 μm 로 설정하였다. 시험편은 중앙에 2 길이의 직선구간을 가지며 직선구간의 중앙에서 압자에 의한 하중 부하가 이루어진다. 이때, 하중 부하에 의한 변형이 직선구간 내에서 균일하게 발생하므로, 식(2)에 의한 응력-변형률 관계가 실제 실험 결과와 일치한다.

띠 굽힘 시험의 유한요소해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 를 사용하였다. 본 연구의 목적이 띠 굽힘 시험시 발생할 수 있는 오차 요인을 분석하는 것이므로, 비선형 유한요소해석을 수행하였으며 이를 위하여 식(3)과 같이 Ramberg-Osgood 모델을 사용하였다.

$$E\epsilon = \sigma + \alpha \left(\frac{|\sigma|}{\sigma^0} \right)^n \sigma \quad (3)$$

여기서, E 는 탄성계수, σ 는 항복 응력, α 는 항복 응력, n 은 소성경화지수이며, 각 변수의 값은 실제 실험 데이터로부터 얻어진 응력-변형률 관계로부터 결정하였고 각각 50GPa, 372MPa, 0.11, 7 이고 프아송비는 0.3 이다.

유한요소해석을 수행하기에 앞서, 유한요소의 수렴성을 파악하여 수치해석적 오차를 최소화하고자 하였다. 시험편의 직선구간의 길이(L)가 200 μm 인 모델에 대하여 유한요소의 종류와 크기에 따라 띠 굽힘 시험시 얻어지는 하중을 계산하였다. 그림 2 는 0.5 μm 크기의 2 차 육면체 요소(Quadratic hexagonal element)를 사용하여 10 μm 의 변형이 발생하였을 때의 하중값을 기준으로 각 요소 크기 및 종류에 대한 하중의 오차를 계산한 결과이다.

1 차 육면체 요소(Linear hexagonal element)를 사용할 경우 요소의 크기가 2 μm 이면 약 5.0%의 오차가 발생하고, 1.0 μm 크기의 2 차 육면체 요소를 사용한 경우 오차는 0.1% 이하임을 알 수 있다. 따라서 해석 결과의 수렴성 및 해석 소요 시간을 고려하여 1.0 μm 크기의 2 차 육면체 요소를 사용하여 모델을 작성하였다.

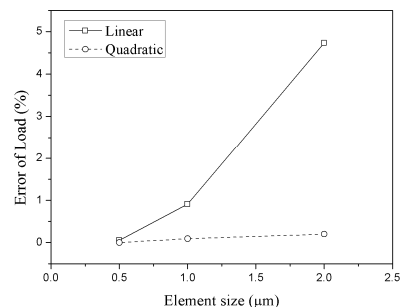


Fig. 2 Error of load at the deflection of 10 μm according to the type and size of elements

4. 해석 결과

띠 굽힘 시험시 시험편과 압자의 정렬을 목측으로 정확하게 맞추는 것은 어려운 것이 사실이다. 그림 1 은 띠 굽힘 시험에서 발생 가능한 오차 요인을 $\alpha, \beta, \gamma, d,$ 의 다섯 가지로 정리하여 시험편 및 압자와 함께 도시하였다. 즉, 각 축에 대한 시험편과 압자의 경사각, X 축 방향으로 시험편 중앙으로부터 압자의 편심 거리, 그리고 압자 선단의 곡률 반지름이다. 띠 굽힘 시험시 각 요인은 복합적으로 발생하여 실험결과와 오차에 영향을 미치게 되며 이를 줄이기 위한 세심한 주의가 필요하다. 따라서, 각 요인이 실험 결과에 미치는 오차의 정도를 파악하기 위하여 각 경우에 대한 해석을 수행하였다.

띠 굽힘 실험을 통해 얻을 수 있는 데이터는 하중과 변위이다. 따라서, 직선구간()이 200 μm 인 시험편에 대하여 유한요소해석을 수행하고 그 결과로 얻은 하중과 변위의 데이터중 변형률이 0.1 ~ 0.3%에 해당하는 데이터로부터 탄성계수를 도출하여 실험 결과인 50GPa 과 비교하였다.

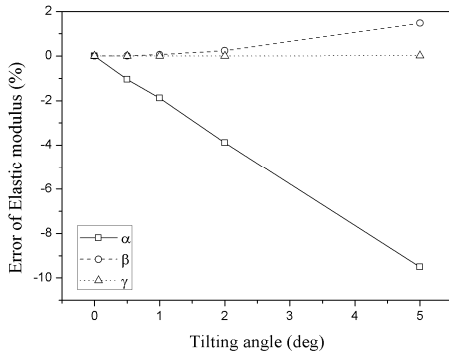


Fig. 3 Error of elastic modulus according to the tilting angle of the indenter

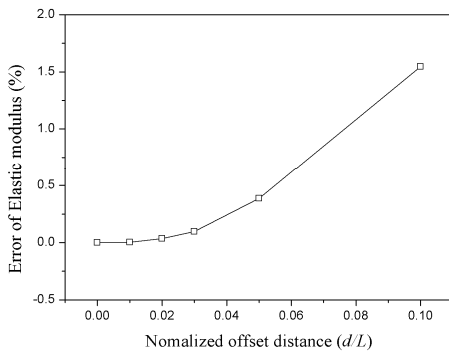


Fig. 4 Error of elastic modulus according to offset distance

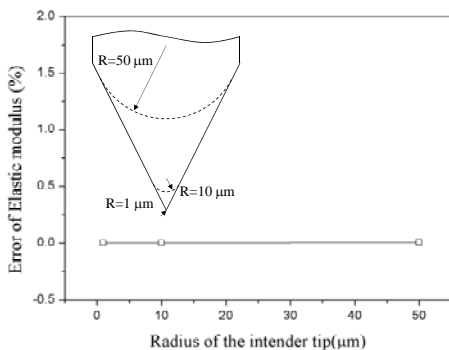


Fig. 5 Error of elastic modulus according to the radius of the indenter tip

경사각 0° 를 기준으로 탄성계수의 오차는 그림 3 과 같다. Y, Z 축 방향의 경사(β, γ)에 의한 영향은 미비하나 X 축 방향의 경사각이 커질수록 탄성계수의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 하중 부하시 X 축(시험편의 길이 방향)에 대해(α) 경사지게 치구된 시험편은 압자와 시험편의 모서리부터 접촉하므로 시험 초기에 하중을 지지하는 면적이 작다. 따라서 탄성계수를 계산하는 구간에서 하중이 낮아져 탄성계수가 작아진다. 그러나 Y, Z 축에 대해 시험편이 경사진 경우, 하중 부하시 접촉면적에는 변화가 없으므로, 경사각에 대한 오차가 크지 않거나 거의 없는 결과를 얻을 수 있다.

그림 4 는 시험편 중앙으로부터의 압자의 편심(d)에 따른 탄성계수의 오차이다. 시험편의 중앙으로부터의 압자의 편심이 시험편 길이의 10% ($d/l = 0.1$) 이하이면 1.5% 이하의 오차가 발생하므로 편심에 의한 오차는 거의 없음을 보여준다. 띠 굽힘 시험의 특성상 전체 시험편의 직선구간의 중앙에 하중이 부하되어 길이 의 띠가 하중을 지지하게 되고 좌/우의 띠에는 동일한 응력이 발생한다. 그러나 중앙으로부터 Δ 만큼 편심되면 길이 $-\Delta$ 와 $+\Delta$ 이 나누어 하중을 지지하여 좌/우의 응력상태는 차이가 나지만, 전체 시험편은 편심되지 않은 상태와 동일한 하중을 지지하게 되므로 단순히 식(2)에 의해 계산된 응력-변형률 관계로부터 계산된 탄성계수의 오차는 크지 않을 것이다.

마지막으로 압자 선단의 곡률 반지름()의 영향은 그림 5 와 같이 압자 선단의 곡률 반경이 1 ~ 50 μm 로 변화할 때 탄성계수의 오차는 0.01% 미만으로 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이 결과는 시험편과 압자의 접촉문제에 유한요소의 크기에 의한 수치해석적 오차가 영향을 미칠 수 있다고 생각할 수 있으나, 요소의 크기가 1 μm 임에 반해, 압자 선단의 곡률 반지름이 50 μm 인 경우에도 오차가 0.01% 미만이므로 곡률 반지름의 영향은 없다고 할 수 있다.

· 결론

본 연구는 띠 굽힘 시험시 발생할 수 있는 오차 요인을 정의하고 각 요인에 의한 탄성계수의 오차 정도를 유한요소해석을 통해 확인하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 시험편과 압자의 정렬시 시험편 길이방향을 축으로 하는 경사각은 시험결과와 5% 이상의 오차를 유발할 수 있으므로 시험편 치구시 주의가 필요하다.
2. 상기 요인을 제외한 다른 요인은 목측으로 보정이 가능한 범위 내에서는(2° 이내) 0.5% 이하의 오차를 유발할 수 있으나 이는 무시할 수 있는 수준이다.
3. 압자의 곡률 반경은 실험결과에 영향을 미치지 않는다.

후기

본 연구는 21 세기 프론티어 연구개발 사업인 나노 메카트로닉스 기술개발사업단의 지원(07-K1401-00910)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김정실, 이학주, 김재현, 최병익, 좌성훈, 이창승, “자유 지지 MEMS 구조물의 띠 굽힘 시험 설계를 위한 유한요소해석,” 대한기계학회추계학술대회, 2005.
2. Espinosa, H. D., Prorok, B. C., Fisher, M., “A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS materials,” J. of the Mechanics and Physics of Solids, 51, 47-67, 2003.