

마이크로 구조물에 대한 물성 측정에서의 Size effect 고찰

고성현(포항공대 대학원 기계공학과), 한준수(포항공대 대학원 기계공학과), 이헌기(포항공대 대학원 기계공학과), 박현철(포항공대 기계공학과)

Study on the size effect of the mechanical property measurement of microstructures

S. H. Ko(Mecha. Eng. Dept. POSTECH), J. S. Han(Mecha. Eng. Dept., POSTECH), H. K. Lee(Mecha. Eng. Dept., POSTECH), H. C. Park(Mecha. Eng. Dept., POSTECH)

ABSTRACT

Purpose of this study is to investigate the size-dependent mechanical properties in micron scale medium. Theories such as the couple stress theory and strain gradient theory explain that the deformation in the micron scale is dependent upon the size of the medium. Specimens of the cantilever type, bridge type and paddle type beam that have thickness of 900, 1000 and 1200 nm and width of 10, 20, 30 and 50 μm were fabricated by the MEMS technique. We carried out the bending and torsion test to measure the mechanical properties such as the young's modulus, yield strength and torsional rigidity using the AFM(Atomic Force Microscopy).

Key Words : Size effect (크기 효과), Bending test (굽힘 실험), AFM(원자 현미경)

1. 서론

마이크로 스케일에서 구조물이나 시스템을 구성하기 위해서는 구조물에 대한 재료의 물성 측정은 필수적이다. 마이크로 스케일에서의 재료 물성을 측정하는 방법으로 나노 압입 실험, MEMS 기반의 굽힘 실험, bulge 실험 등이 개발되었다. 이러한 마이크로 스케일에서 시편의 크기에 따른 물성들이 변하는 크기 효과(size effect)를 볼 수 있다. 이러한 크기에 따른 물성이 변하는 것을 설명하기 위해 couple stress 이론이나 변형률 구배(strain gradient) [1,2] 이론이 개발되고 Srikar 등은 마이크로 구조물에 대한 실험 방법에 대해 정리를 했으며, 이러한 방법 중에서 외팔보 시편에 대한 실험 방법이 가장 쉽게 접근할 수 있다고 발표하였다[3]. 그리고 Son[4] 등은 알루미늄과 금 박막에 대해 박막 두께가 시편 강도에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 또한 다층 박막에 대한 기계적 물성에 대한 연구도 이루어졌는데 여기에 적용된 방법은 인텐데이션 방법과 마이크로 사이즈의 외팔보의 처짐을 측정하는 방법이다[5]. 본 논문에서는 이러한 마이크로 스케

일에서의 크기에 따른 재료의 변형을 고찰하고 크기 효과를 설명하는 것이다.

마이크로 물성 측정을 위해 굽힘 및 비틀림 실험을 하기 위해서 cantilevered, bridge, paddle 형태의 시편을 MEMS 기술을 이용하여 제작 하였다. 이러한 굽힘 및 비틀림 실험을 위한 시편의 크기는 설계상 두께가 각각 900, 1000, 1200 nm 이고 폭은 10, 20, 30, 50 μm 이며 길이는 세장비에 의해 결정되는데 본 실험에서는 3:1, 5:1, 8:1 로 하였다.

앞서 언급한 시편들은 원자 현미경(AFM)을 이용하여 마이크로 스케일에서 영률, 항복강도 등의 물성들을 측정하였다.

2. 실험

2.1 굽힘 실험

2.1.1 Fabrication of specimen

마이크로 구조물에 대한 실험을 수행하기 위해 앞서 말한 바와 같이 cantilevered, paddle, bridge 형태의 시편을 MEMS 기술을 이용하여 제작하였다.

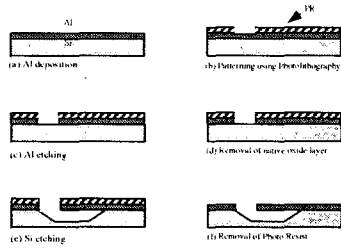


Fig. 1 Fabrication process of Al microstructures

제작 공정은 그림 1 과 같다. 먼저 (100)실리콘 웨이퍼에 알루미늄을 sputter 를 이용하여 증착시키고 크롬 및 필름 마스크를 이용하여 패턴을 만든다. 패턴 생성 후 알루미늄 에칭 공정을 수행하여 알루미늄 박막에 원하는 구조를 만든다. 그리고 산화막이 실리콘 에칭시 보호막 역할을 하기 때문에 에칭을 하기 전에 자연 산화막을 제거한다. 마지막으로 실리콘 에칭액을 이용하여 실리콘을 에칭하여 원하는 시편 형상을 얻게 된다. 여기서 사용된 실리콘 에칭액은 알루미늄은 에칭하지 않고 실리콘을 에칭하는 용액으로서 온도와 여러 용액의 혼합비율에 따라 에칭 속도가 정해진다. 실리콘 에칭 조건은 온도 110 °C, hydrazine mono-hydrate 와 propanol 의 혼합비 9:1 이며 이때 에칭 속도는 35 탸/h 이다. 이러한 에칭 속도로 약 90 분간 에칭 공정을 수행하였다. 이러한 에칭 조건은 그림 2 에 나타냈다.

이러한 시편 제작 공정을 거친 시편의 형상은 두께가 약 900, 1000, 1200 nm 이고 폭이 약 10, 20, 30, 50 μm 이다. 그리고 길이는 세장비에 따라 결정되며 세장비는 3:1, 5:1, 8:1 이다.

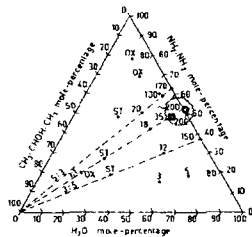


Fig. 2 The etching condition for aluminum[6]

2.1.2 실험 방법

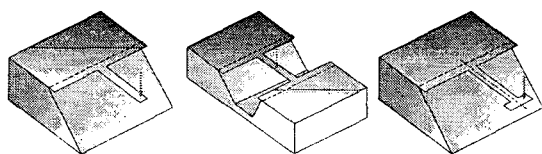


Fig. 3 The shape of specimens and the testing method.

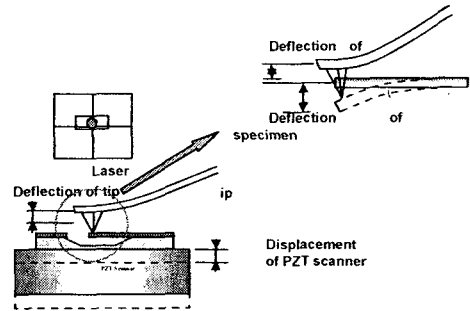


Fig. 4 Schematic of mechanical properties measurement using AFM

마이크로 구조물의 물성을 측정하기 위해 원자현미경을 이용하여 외팔보(cantilevered beam)에 대한 굽힘 실험, 3 점 굽힘 실험을 수행하였다. 이러한 시편 형상들을 그림 3 에 나타내었다.

그림 4 와 같이 원자 현미경을 이용하여 실험을 수행할 때 원자 현미경의 감도(sensitivity)는 중요한 인자이다. 따라서 실험을 수행하기 전에 원자 현미경에 대한 감도를 측정해야 된다. 여기서 말하는 원자 현미경의 감도(sensitivity)란 PZT scanner 의 움직임에 대한 원자 현미경의 tip 의 굽힘 변형의 비이다. 원자 현미경을 이용하여 굽힘 실험을 수행할 때 PZT scanner 를 이동함으로써 시편에 힘을 가하게 되는데 이때 시편과 tip 모두 굽힘 변형이 발생하게 된다.

이러한 실험방법에서 시편의 물성을 측정하기 위해서는 시편에 가한 하중과 그에 상당한 변위를 측정함으로써 시편의 물성을 측정할 수 있다. 본 실험에서는 다음과 같은 식으로 두개의 관계식을 얻을 수 있다.

$$P = ((DIF_0 + DIF) / sensitivity) \times k \quad (1)$$

$$y = D_{PZT} - DIF / sensitivity \quad (2)$$

여기서 DIF_0 는 굽힘 실험하기 전 tip 굽힘에 의해 발생한 전압이고, DIF 는 실험수행중 발생하는 전압신호이다. k 는 tip의 강성이며 D_{PZT} 는 PZT scanner의 z방향 이동거리이다.

또한 본 실험에 대해 하중 P 와 굽힘 변형 y , 비틀림 각 θ , 비틀림 강성 C 에 대한 관계식은 다음과 같다.

- 굽힘 실험(cantilevered beam)

$$y_b = \frac{P_b}{6EI} (2l^3 - 3l^2z + z^3) \quad (3)$$

- 3 점 굽힘 실험(bridge type beam)

$$y_b = \frac{P_b}{48EI} (l-z)^2 (l+4z) \quad (4)$$

- 비틀림 실험

$$\theta = \frac{M_t}{C} = \frac{P_t d}{C} \quad (5)$$

여기서 P_b 는 굽힘 하중, M_t 는 비틀림 모멘트, P_t 는 편심 하중, d 는 중심축과 편심 하중 사이 거리, C 는 비틀림 강성, y_b 는 굽힘 실험에서의 처짐, z 는 시편 끝단에서 하중까지 거리이다.

일반적으로 원자현미경을 이용하여 굽힘 실험을 한 후 식 (3), (4)를 적용하면 강성 및 영률을 구할 수 있다. 그러나 원자 현미경을 이용하여 시편에 직접적으로 비틀림 모멘트를 주기가 어렵다. 따라서 그림 5 와 같이 편심하중을 이용하여 비틀림 실험을 수행하였으며 이때 그림 5 와 같이 중첩의 원리를 이용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$y_t = y_b + y_i = y_b + \theta d = \frac{P_b}{6EI} (2l^3 - 3l^2 z + z^3) + \frac{M_t d}{C} \quad (6)$$

여기서 y_t 는 편심에 의한 처짐이고 y_b, y_i 는 각각 굽힘 하중과 비틀림 모멘트에 의한 처짐이다.

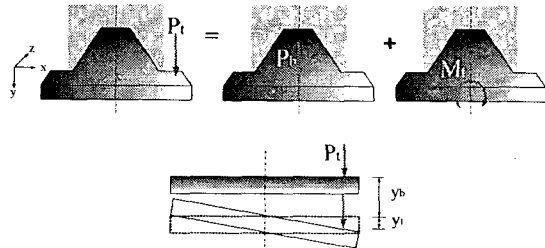
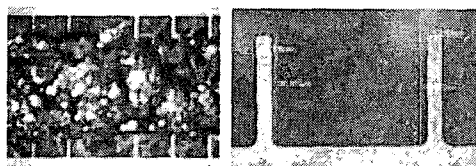


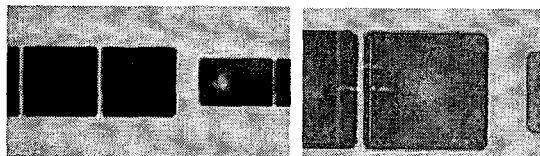
Fig. 5 The superposition principle and the deflection relationship of the torsion test

3. 결과

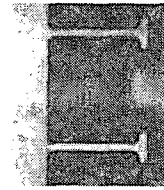
3.1 굽힘 실험



(a) Cantilevered beam (Pure bending test)



(b) Bridge type specimen (3-point bending test)



(c) Paddle type specimen (Torsion test)

Fig. 6 The optical image of each specimen

그림 6 에 시편들의 광학 사진을 나타내었다. 그러나 외팔보 형태 시편과 비틀림 시편은 제대로 제작을 못하였으므로 3 점 굽힘 실험만을 수행하였다. 표 1 에서 보듯이 시편의 두께는 900 nm, 크기는 약 5.76 μm 이고 길이는 146.5 μm 이어서 약 30:1 의 세장비를 갖는다. 이러한 시편에 대해 3 점 굽힘 실험을 수행하여 시편의 탄성계수를 구하였다. 그 결과는 그림 7 에 나타내었고 실험 결과는 다음 표 1 에 나타내었다.

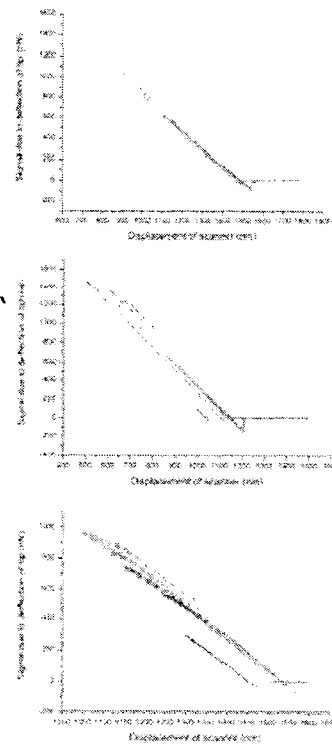


Fig. 7 The force curve of 3-point bending test

Table 1 The summary of bending test result

Specimen	Width (um)	Length (um)	Thickne ss(nm)	Bending stiffness	Young s modulus (Gpa)	
#1	5.79?	.27	146.0?	.8	1.82	83.917
#2	5.94?	.21	146.2?	.2	900	116.238
#3	5.56?	.56	147.3?	.5	2.05	101.027

표 1 에서 보는 바와 같이 알루미늄의 탄성계수는 약 104.5 ± 10.4 GPa 이며 이미 알려진 약 72 GPa 보다는 다소 큰 값을 얻었다. 그리고 시편 형상에 따라가는 굽힘 강성은 2.14 ± 0.15 N/m 이다.

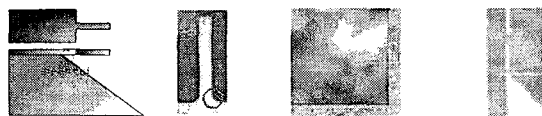
4. 결론

본 연구에서는 마이크로 스케일의 구조물에서 나타나는 크기에 따른 물성 변화를 알아보기 위해 원자 현미경을 이용하여 굽힘 실험을 수행하였다.

그림 6 에서는 MEMS 기술을 이용하여 제조한 시편들에 대한 광학 사진들을 보여주고 있는데 평면상으로는 잘 제조된 것처럼 보이나 잔류응력이나 점착 등의 문제로 시편이 제조공정을 마친 후 형상을 확인해 본 결과 치짐이 발생되어 있는 경우들을 볼 수 있었다. 특히 외팔보 형태의 시편들이 특히 그러한 경향을 보여주었다. 따라서 지금까지는 3 점 굽힘 실험만을 수행하였으나 앞으로 이러한 문제를 해결하여 좀 더 많은 실험들을 통해 마이크로 구조물에서 나타나는 크기 효과들에 대한 연구를 계속해 나갈 것이다.

본 실험에서 얻은 알루미늄의 탄성계수는 약 104.5 ± 10.4 GPa 이며 이미 알려진 약 72 GPa 보다는 다소 큰 값을 얻어 약간의 오차가 발생하였다.

이러한 오차들은 굽힘 실험을 수행할 때 여러 가지 요인들에 의해 발생하게 된다. 이러한 주요인들은 그림 8 에서 보는 바와 같이 과도한 에칭에 의한 undercut, 마스크를 이용한 패터닝 과정상에 나타나는 패터닝의 부정확성, 그리고 박막 증착시 증착 속도 등에 의한 grain size, 원자 현미경을 이용한 힘을 가해주는 위치의 부정확성 등이 있다. 이외에도 하중을 가해주는 Tip 에 의한 압입으로 인한 시편의 치짐의 부정확성 등이 있을 수 있다. 따라서 이러한 문제들을 최소화 함으로써 좀 더 정확한 물성치를 얻을 수 있으며 이런 물성 측정을 바탕으로 마이크로 구조물의 크기 효과를 정확히 살펴 볼 수 있다.



(a)Undercut (b)Roughness (c)Grain size (d)Loading position

Fig. 8 The major factor of inaccuracy

후 기

본 연구는 과학기술부가 지원하고 한국과학재단

이 주관하는 특정연구개발과제 중 나노핵심기술개발 과제(M10214000191-02B1500-02910)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1. Espinosa HD, Prorok BC and Peng B, "Elasticity size effect in free-standing submicron polycrystalline FCC films subjected to pure tension?" *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 52, 667-689, 2004.
2. Gao H, Huang Y, Nix WD and Hutchinson, "Mechanical-based strain gradient plasticity-I. Theory?" *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 47, 1239-1263 1999.
3. Srikar VT and Spearing SM, "A critical review of microscale mechanical testing methods used in the design of meicroelectromechanical systems", *Experimental mechanics*, 43, 3, 238-247, 2003.
4. Son DI, Jeong JH and Kwon DI, "Film-thickness considerations in microcantilever-beam test in measuring mechanical properties of metal thin film", *Thin Solid Films*, 437, 182-187, 2003.
5. Baker SP and Nix WD, "Mechanical properties of compositionally modulated Au-Ni thin films: Nanoindentation and microcantilever deflection experiments?" *Journal of Material Research*, 9,12, 3131-3144, 1994.
6. Lee DB, *Methods of etching semiconductor body surfaces*, US Patent No. 3649395, 1972.
7. Pilley WD, *Formulas for stress, strain, and structural matrices*, Wiley-interscience, New York, 519, 1994.
8. Lekhnitskii SG, *Theory of elasticity of an anisotropic body*, MIR Publishers, Moscow, 1981.