

벌지 실험과 나노 압입 실험을 통한 박막의 기계적 물성 측정

정봉부* · 이헌기** · 박헌철*†

* 포항공과대학교 기계공학부, ** MIT 재료공학과

Measurement of Mechanical Properties of Thin Films Using a Combination of the Bulge Test and Nanoindentation

Bong-Bu Jung*, Hun-Kee Lee** and Hyun-Chul Park*†

* Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH,

** Dept. of Materials Science and Engineering, MIT.

(Received April 22, 2011; Revised November 10, 2011; Accepted November 15, 2011)

Key Words : Bulge Test(벌지 실험), Nano-Indentation Test(나노 압입 실험), Thin Film(박막), Young's Modulus (탄성 계수), Poisson's Ratio(푸아송비)

초록: 본 연구에서는 벌지 실험과 나노 압입 실험을 통해 박막의 기계적 물성을 측정하였다. 벌지 실험은 외적 지지구조를 가지지 않는 박막 시편의 한 면에 일정한 압력을 가하여 박막의 변위를 측정, 압력과 변위의 관계를 이용하여 박막의 기계적 물성을 측정하는 실험이다. 나노 압입 실험은 시편에 압입 방향으로의 하중과 시편의 표면으로부터 압입자의 깊이에 대한 데이터를 통하여 시편의 기계적 물성을 측정하는 실험으로 modified King's model 을 이용하여 모재의 영향이 고려된 박막의 물성을 구할 수 있다. 두 실험은 탄성 계수와 푸아송비의 수학적 관계가 다르기 때문에 벌지 실험과 나노 압입 실험결과로부터 박막의 탄성계수와 푸아송비를 동시에 측정할 수 있다.

Abstract: This paper discusses two different techniques used to measure the mechanical properties of thin films: the bulge test and the nanoindentation test. In the bulge test, a uniform pressure is applied to one side of the film. Measurement of the membrane deflection as a function of the applied pressure allows one to determine the mechanical properties such as Young's modulus, and the residual stress. A nanoindentation test is performed by pushing an indenter tip into the specimen and then withdrawing it, and then recording the indentation force as a function of the indenter position. A modified King's model is used to estimate the mechanical properties of the thin film in order to avoid the effects of the substrate layers. A combination of both the bulge test and the nanoindentation test can determine both Young's modulus and Poisson's ratio simultaneously.

- 기호설명 -

P : 박막에 가하는 압력
 σ : 박막의 응력
 ϵ : 박막의 변형률
 ϵ_0 : 잔류 응력에 의한 박막의 초기 변형률
 t : 박막의 두께
 R : bulge 형상의 곡률 반경
 Y : Biaxial modulus
 a : 박막의 반경
 h : 박막의 변형 높이
 h_0 : 박막의 초기 높이

A : 접촉 면적(contact area)
 S : 접촉강성(contact stiffness)
 β : 압입자의 형상에 따른 상수
 h_C : 접촉 깊이
 h_C : pile-up 높이
 E_r : reduced modulus
 E_f : 박막의 탄성계수
 E_i : 압입자의 탄성계수
 E_s : 모재의 탄성계수
 ν_f : 박막의 푸아송비
 ν_i : 압입자의 푸아송비
 ν_s : 모재의 푸아송비
 C_0, C_1, \dots, C_8 : 접촉 면적 계수
 ϕ : 압입자의 형상각

† Corresponding Author, hcpark@postech.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

최근 반도체 집적회로 제조기술을 응용한 미소 기계부품의 제작이 가능하게 됨에 따라 미소부품과 집적회로를 하나의 칩으로 일체화시킨 미세전기기계시스템(MEMS)이 등장하게 되었다. 이러한 미세전기기계시스템은 1 마이크로론(Micron)이하부터 수십 마이크로론의 두께를 가지는 여러 개의 박막으로 구성된다. 그러나 이러한 박막의 기계적인 물성은 거대 구조물의 물성과는 다르다는 것이 알려져 있고 측정 또한 힘들다.⁽¹⁾ 그러므로 MEMS의 신뢰성(Reliability)을 향상시키기 위해서는 박막의 기계적인 물성을 정확히 측정하는 연구의 중요성이 점차 증가하고 있다.

이런 박막에 대한 기계적 특성 평가 방법에는 여러 가지가 있는데 그 중에서 나노 압입 실험(Nano-indentation test)은 시편 준비가 용이할 뿐만 아니라 시편의 고정이나 정렬 그리고 하중 문제를 고려하지 않아도 되기 때문에 박막의 물성 측정에 많이 사용되고 있다. 그리고 벌지 실험(Bulge test)은 외적 지지구조를 가지지 않는 박막 시편을 이용하여 물성을 측정하게 되는데 모재의 영향이 없을 뿐만 아니라 압력과 변위를 직접 얻을 수 있어 물성을 쉽게 구할 수 있는 방법이다. 이러한 나노 압입 실험이나 벌지 실험은 푸아송비(Poisson's ratio)를 가정하여 탄성 계수를 측정하는데 많이 이용된다. 따라서 이러한 방법을 통해 얻은 박막의 기계적 물성은 정확하다고 보기 힘들다.

이러한 푸아송비는 탄성 계수와 함께 재료의 기계적인 특성을 결정하는 기본적인 물성이다. 그러나 이전의 MEMS에 관한 많은 연구에서 푸아송비에 의한 영향은 무시되는 경우가 많았다. 그러나 푸아송비는 MEMS 구조물의 뒤틀림이나 굽힘 특성이 포함되었을 때에만 아니라 일반적인 특성에도 영향을 미친다. 한 예로 굽힘 방향과 수직인 방향의 굽힘 곡률에 영향을 줄 뿐 아니라 St. Venant의 원리에 의하여 거리에 따른 응력의 감소나 크랙(Crack)주변의 응력 분포에도 영향을 미친다. MEMS 구조물의 해석을 위해서는 푸아송비의 정확한 측정이 요구되나 박막의 푸아송비의 측정에 대한 연구는 아직 부족하다.⁽²⁻⁸⁾

이에 이전의 연구⁽⁸⁾에서 벌지 실험과 나노 압입 실험 결과로부터 MEMS 공정을 통해 제작된 알루미늄 박막의 탄성계수와 푸아송비를 측정하는 실험을 진행하였다. 그러나 벌지 실험의 경우 잔류 응력으로 인하여 박막의 주름이 발생하였고, 이를

제거하기 위해서는 초기 압력이 필요하기 때문에 응력-변형률 그래프에서 하중을 가하는 초기 부분에서는 탄성 영역을 찾기 어려웠다. 그리고 나노 압입 실험 데이터의 경우 큰 오차를 보이는데 이는 압입 실험에서 발생하는 pile-up 효과로 인하여 실제 접촉면적과 계산된 접촉 면적의 차이로 인한 것으로 판단되었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하고 더욱 정확한 결과를 얻기 위해 벌지 실험의 경우에는 하중을 제거하는 부분에서 이축 탄성계수를 측정하였고, 나노 압입 실험의 경우에는 압입 실험 후 pile-up 높이를 측정하였고, 이를 이용하여 새로운 접촉 면적을 계산하는 방법을 제시하고 이를 결과에 고려하였다.

2. 기본 이론

2.1 벌지 실험

벌지 실험은 외적 지지구조를 가지지 않는 박막 시편의 한 면에 일정한 압력을 가하여 박막의 최대 변위를 측정, 압력과 변위의 관계를 이용하여 박막의 기계적인 물성을 측정하는 실험이다. 벌지 실험에서 가장 중요한 요소 중의 하나는 벌지 형상에 대한 해석이다. 벌지 형태에는 크게 구형, 정사각형, 직사각형 박막이 있다.⁽⁹⁾

구형 박막 모델⁽¹⁰⁾은 여러 형상들 중에서 가장 기본적인 모델이다. 이러한 기본 모델은 Fig. 1에서 나타내고 있다. 박막의 응력은 얇은 두께를 가진 구형 압력용기(Thin-wall spherical pressure vessel)

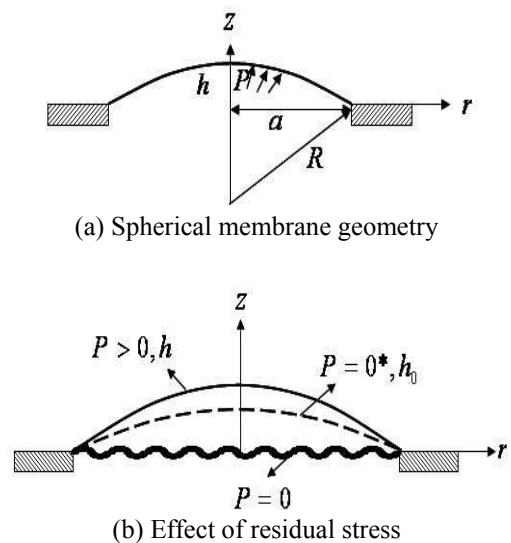


Fig. 1 Schematic of a spherical membrane

에서 힘 평형을 적용하여 유도된 일반 식을 사용한다. 그 식을 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{PR}{2t} = \frac{P(a^2 + h^2)}{4ht} \quad (1)$$

한편 변형률은 처음 호의 길이에 대한 변형된 호의 길이의 비로 정의할 수 있다. 그러나 Fig. 1 (b)에 나타난 바와 같이 박막을 증착하는 과정이나 시편을 고정시키는 과정에서 잔류 응력이 발생할 수 있다. 이러한 잔류응력에 의한 초기 부풀림에 대해 고려해야 한다. 따라서 변형률은 늘어짐에 의한 변형과 압력이 작용함에 따라 생기는 변형의 합으로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \varepsilon_o + \frac{a^2 + h^2}{2ah} \sin^{-1} \left(\frac{2ah}{a^2 + h^2} \right) - 1 \quad (2)$$

2.2 나노 압입 실험

나노 압입 실험은 시편에 압입 방향으로의 하중과 시편의 표면으로부터 압입자의 깊이에 대한 데이터를 통하여 시편의 기계적 물성을 측정하는 실험이다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 임의의 형상을 가진 강체 펀치에 의한 압입 이론은 Sneddon⁽¹⁴⁾에 의해 적립된 이후 Oliver 와 Pharr⁽¹⁵⁾에 의해 압입자가 유한한 탄성계수와 푸아송비를 가지고 있고 회전체가 아닌 경우에 다음과 같은 식을 제시 하였다.

$$S = \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{A} E_r \quad (3)$$

여기서 접촉 강성(S)은 나노 압입 실험에서 얻은 하중-변위 데이터에서 unloading curve 의 초기 기울기를 나타내고, β 는 압입자의 형상에 따른 상수로 Berkovich 압입자의 경우 1.034 이다. E_r 은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_f^2)}{E_f} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (4)$$

그러나 박막과 모재(Substrate)로 이루어진 구조에서 tip 이 압입되는 동안 박막과 모재의 탄성영역과 소성영역의 복합적인 요소로 인하여 위에서 설명했던 기본적인 모델로는 모재의 영향을 고려할 수 없다. 이러한 모재의 영향을 고려하기 위해

King⁽¹⁶⁾는 Reduced modulus 에 모재의 영향을 추가시켰고 Saha 와 Nix⁽¹⁷⁾은 Berkovich 압입자 모델로 수정하였고 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} + \frac{(1-\nu_f^2)}{E_f} \left(1 - e^{-\frac{\alpha(t-h_c)}{a}} \right) + \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} \left(e^{-\frac{\alpha(t-h_c)}{a}} \right) \quad (5)$$

여기서 α 는 수치적 방법(numerical method)으로 계산된 scaling parameter 로써 규격화된 펀치의 크기(normalized punch size, a/t)의 함수로 표현된다. 본문에서는 King 의 값을 사용하였다.

그리고 tip 을 사용함에 따라 무더지거나 오염이 생기는 것을 고려하여 접촉면적 함수는 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁸⁾

$$A(h_c) = C_0 h_c^2 + C_1 h_c^1 + C_2 h_c^{1/2} + C_3 h_c^{1/4} + C_4 h_c^{1/8} + \dots + C_8 h_c^{1/128} \quad (6)$$

첫 번째 항은 perfect indenter 를 표현한 것이고, 나머지 항들은 tip 의 무더짐 등을 표현한 것이다. 나노 압입 실험 전 fused silica 를 이용하여 면적 계수를 결정하였으며, 결정된 면적 계수의 값은 $C_0=24.3385$, $C_1=361$, $C_2=598.3$, $C_3=34$, $C_4=184.4$, $C_5=C_6=C_7=C_8=0$ 이다.

나노 압입 실험 후에 재료의 종류에 따라 압입자의 주위에 재료들이 쌓이는 pile-up 현상이 발생한다. 이러한 경우 실제 압입 깊이는 측정된 압입 깊이보다 더 커지게 되고 계산된 접촉 면적은 실제의 접촉 면적보다 작아지기 때문에 물성 측정에 영향을 준다. 따라서 접촉 면적을 계산할 때 이러한 pile-up 현상을 고려해야 한다.^(19,20)

3. 실험 장비 및 결과

3.1 실험 장비 및 방법

별지 실험을 수행하기 위한 장치는 크게 4 가지로 나눌 수 있다. 유압 등을 채우고 시편을 고정시키는 별지 챔버(Bulge chamber), 원하는 압력을 인가해주는 압전 구동기(Piezo actuator, Piezomechanik, PSt150/14/40, max. stroke 40 μ m), 박막의 변위를 측정하는 변위 센서(Laser displacement sensor, Keyence corporation, LT 8110), 챔버 내 압력을 측정하는 압력 센서(Pressure sensor, Dytran Inc., 2300V3, sensitivity 10.80 mV/psi)로 나눌 수 있다. 실제 실험에 이용된 실험 장치는 Fig.2 에서 볼 수 있다.

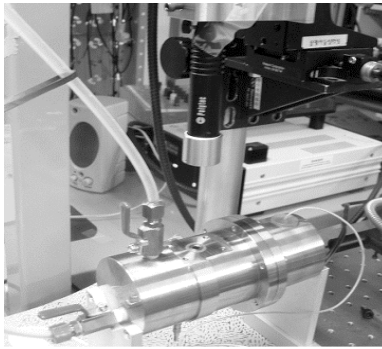


Fig. 2 The bulge testing device apparatus

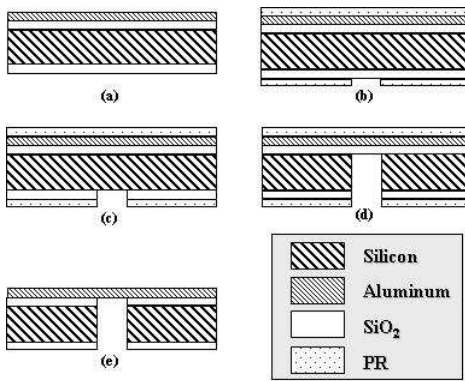


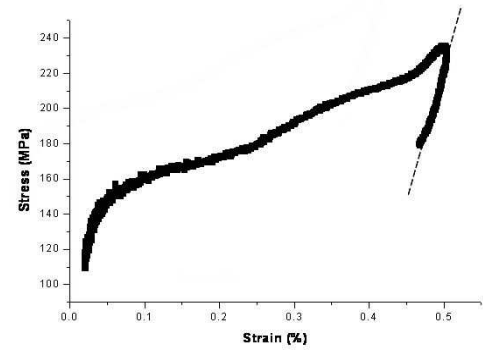
Fig. 3 The process for specimen fabrication: (a) silicon substrate with Al and SiO₂. (b) Define pattern on back side. (c) Open window in the SiO₂ using BOE. (d) D-RIE of the bulk silicon. (e) BOE and PR remover

실험 방법은 시편을 챔버 위에 고정시킨 후 유압에 의한 압력을 시편의 한 면에 작용시킨다. 함수 발생기에서 입력 신호를 압전 구동기에 부가하면 압전 구동기는 신호의 크기만큼 움직임으로 인해 압력이 발생한다. 이런 압력의 변화로 인해 시편에 변형이 발생하고 이를 변위 센서를 이용해 측정한다. 여기서 측정된 압력과 변위를 토대로 응력과 변형률 곡선을 구하여 이축 응력 계수를 구하였다.

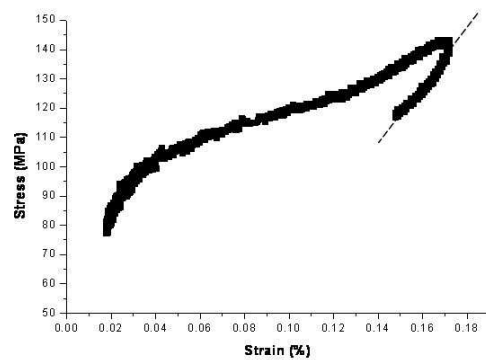
또한 나노 압입 실험은 MTS Nano indenter XP 를 이용하였다. 변위 제어(Displacement control) 모드를 사용하였고 각 시편 당 압입 깊이는 100, 150, 200 nm 였으며, 10 번씩 측정되었다. 사용된 압입자는 Berkovich tip 으로 재료는 다이아몬드이고, 탄성 계수 1141GPa, 푸아송비 0.07 이다. 실험 후 SEM 을 이용해 측정된 박막의 두께는 각각 0.77, 1.136, 1.41 μm 이었다.

3.2 시편 제작

벌지 실험에 쓰이는 시편의 공정 절차는 Fig. 3



(a) 0.77 μm aluminum



(b) 1.136 μm aluminum

Fig. 4 Stress – strain curves

와 같다. 실리콘 벌크 에칭을 위한 D-RIE(Dep Reaction Ion Etching)의 마스크로 사용하기 위해 Si 웨이퍼의 양면에 산화막(SiO₂)을 증착시킨 후 E-gun evaporator 를 이용하여 알루미늄을 증착시켰다. 양면에 감광액(Photoresist)를 바른 후 알루미늄이 증착 되지 않은 면에 노광시키고, 현상을 한 후 패터닝된 면의 산화 막을 식각하기 위해 BOE(Buffered Oxide Etch)을 실시하였다. 그 후 D-RIE 공정을 통해 실리콘이 전부 식각이 된 후 다시 BOE 를 이용하여 알루미늄 박막 아래의 산화 막을 식각한 후 감광 액을 제거하여 원형 패턴을 가진 알루미늄 박막을 제작하였다.

4. 실험 결과

원형 형상으로 제작된 시편을 이용하여 벌지 실험과 나노 압입 실험을 실시하였고, 그 후 SEM 을 이용하여 박막의 정확한 두께를 측정하였다. 벌지 실험을 통해 측정된 압력과 변위를 식 (1)과 (2)를 이용하여 얻은 응력-변형률 곡선은 Fig. 4 에서 볼 수 있다. 본 실험에서 사용된 알루미늄 박막의 경우 잔류 응력으로 인하여 박막에 주름이 발생하였다. 이 때문에 실험 초기의 압력은 박막의 주름을 제거 하기 위해 필요하기 때문에 그래

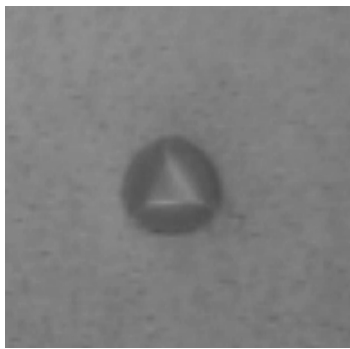
프에서 응력이 증가하는 부분에서는 일정한 기울기의 탄성 영역을 찾기 어렵다. 그러므로 이축 탄성계수, $Y = E / (1-\nu)$, 는 하중을 제거하는 상태에서의 기울기를 이용하여 측정할 수 있다.^(21,22) 이를 통해 푸아송 비와 탄성계수의 관계를 계산할 수 있다.

나노 압입 실험의 경우 각각의 시편에 대한 접촉 강성-압입 깊이 데이터와 식 (3)을 이용하여 reduced modulus 를 구한 후 이를 식 (5)에 적용하면 푸아송비와 탄성계수의 관계를 결정할 수 있다. 본 실험에서 사용된 알루미늄 박막의 경우 나노 압입 실험 후 압입자 주위에 pile-up 현상이 생기는 것을 Fig. 5(a)를 통해 볼 수 있다. 이러한 pile-up 효과를 고려하기 위해 MTS Nano-indenter XP의 나노 비전(Nano vision)을 이용하여 실험 후 압입된

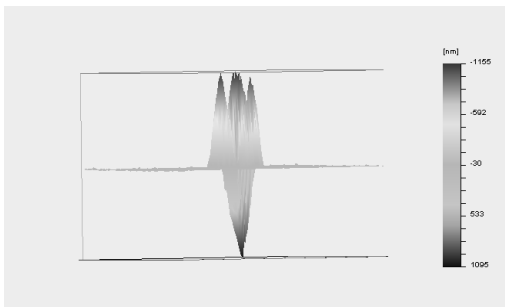
흔적 주변의 표면 분포를 측정하였다. Fig. 5(b)는 표면 분포 측정 결과를 보이고 있다. 이를 통해 pile-up 높이(h_p)를 측정하였고, 이러한 pile-up 효과를 접촉 면적 결정에 고려한 새로운 접촉 면적 함수는 다음과 같이 표현된다.⁽¹⁹⁾

$$A = C_0(h_c + h_p)^2 + C_1(h_c + h_p)^1 + C_2(h_c + h_p)^{1/2} + \dots + C_8(h_c + h_p)^{1/128} \quad (7)$$

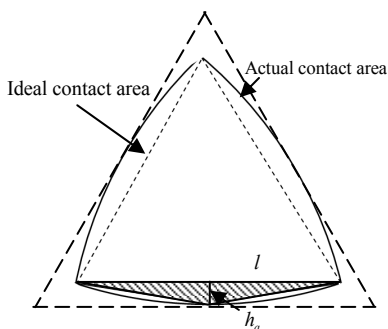
위의 식 (7)은 conical tip 등과 같이 pile-up 높이가 균일한 경우 유효하다고 판단된다. 그러나 본



(a) Image of a deformed shape

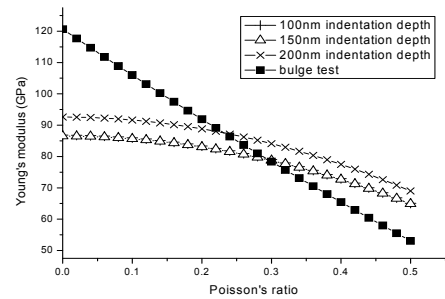


(b) Surface profile measured by nano-vision

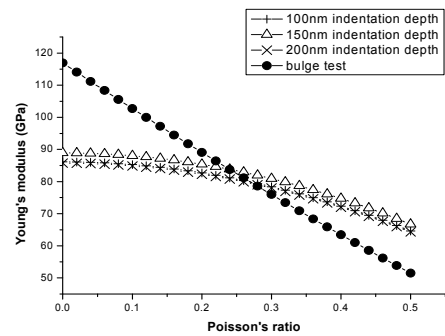


(c) Effect of pile-up on the actual contact area

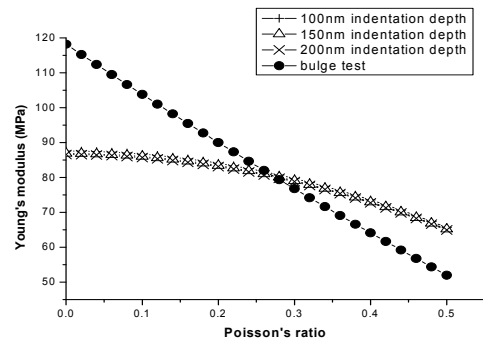
Fig. 5 Pile-up effect for nano-indenter test



(a) 0.77 um aluminum



(b) 1.136um aluminum



(c) 1.41um aluminum

Fig. 6 Comparison of Young's modulus vs. Poisson's ratio calculated from the bulge and the nano-indentation of the aluminum films with pile-up

Table 1 Mechanical properties of aluminum thin films with the pile-up effect

Thickness	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
0.77 μ m	81.33 \pm 1.32	0.264 \pm 0.017
1.136 μ m	80.99 \pm 2.47	0.261 \pm 0.019
1.41 μ m	81.89 \pm 1.64	0.270 \pm 0.005

실험의 경우 Berkovich tip 을 사용하였고, Fig. 5 에서 보는 바와 같이 압입 흔적의 꼭지점 부분에서는 pile-up 이 거의 발생하지 않고 pile-up 높이가 일정하지 않다. 식 (7)은 Fig. 5(c)에서 보는 바와 같이 실제의 접촉 면적보다 큰 값(가장 바깥 쪽 점선 삼각형의 면적)을 얻게 되므로 본 연구에서는 Fig. 5(c)에서 실제 면적과 이상적인 면적의 차이(음영 부분)를 삼각형으로 가정하여 실제 면적을 계산하였다. 계산 방법은 식 (8)에 나타내었다. 실제 접촉 면적은 압입 깊이가 증가할수록 원형에 가깝게 변하는 것을 볼 수 있었다.

$$A = A(h_c) + 3 * \frac{1}{2} h_a \cdot l = A(h_c) + 3\sqrt{3}h_c h_p \tan \phi \quad (8)$$

본 실험에서 사용된 Berkovich tip 의 형상 각(ϕ)은 65.09°으로 측정되었다.

두께에 따른 박막의 기계적 물성은 Fig. 6 을 통해서 구할 수 있다. 벌지 실험과 나노 압입 실험을 통해 얻어진 그래프의 교점을 통해 박막의 탄성계수와 푸아송비를 구할 수 있다. 이러한 방법으로 측정된 실험 결과값은 Table 1 에 정리되어 있다. 측정된 알루미늄 박막의 평균 탄성 계수는 81.4 GPa, 푸아송비는 0.266 으로 벌크 크기의 물성과 비교하면 탄성 계수는 큰 경향을 보였고, 푸아송비는 작아지는 경향을 보였다.

Son 등⁽²³⁾의 연구에서 측정된 알루미늄 박막의 물성은 푸아송비는 벌크 알루미늄과 같은 0.33 으로 가정하였고, 탄성 계수의 경우 77-80 GPa 이었다. 이 연구에서는 E-gun evaporator 와 sputter 로 증착된 알루미늄 박막을 이용하여 마이크로 외팔로 굽힘 실험을 통해 박막의 물성을 측정하였다. 푸아송비를 가정하기는 했지만 본 연구의 결과와 큰 오차는 없었다.

Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 나노 압입 실험의 경우 박막 두께의 20%를 넘는 압입 깊이에서는 큰 오차가 나타나는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 modified King's model 이 전체 압입 깊이에서는 타당하지 않기 때문으로 판단된다. 이는 King's

model 은 끝 단이 평평한 압입자를 기준으로 제시되었지만 본 연구에서는 Berkovich 압입자를 기준으로 하는 modified King's model 을 사용하였기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 벌지 실험과 나노 압입 실험을 이용하여 알루미늄 박막의 기계적 물성을 측정하는 실험을 수행하였고, 그 결과를 고찰하였다. 다음은 본 연구를 통하여 얻은 결론이다.

(1) 벌지 실험과 나노 압입 실험을 통해 박막의 탄성 계수와 푸아송비를 동시에 측정할 수 있었고 측정된 값은 탄성 계수는 81.403 \pm 1.81 GPa , 푸아송비는 0.266 \pm 0.013 이었다.

(2) 나노 압입 실험의 경우 더 정확한 결과를 얻기 위해 실험 후 pile-up 효과를 고려하여 접촉 면적을 계산하였다.

(3) 본 연구를 통해 벌크 크기와 마이크로 크기의 푸아송비의 차이를 비교할 수 있었고, 이를 통해 푸아송비의 영향을 고려해야 하는 뒤틀립이나 굽힘 특성이 포함된 MEMS 구조물의 해석에 활용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Ding, J. N. and Meng, Y.G., 2000, "Specimen Size Effect on Mechanical Properties of Polysilicon Microcantilever Beams Measured by Deflection Using a Nanoindenter," *Mater. Sci. Eng.*, B83, pp. 42-47.
- (2) Jayaraman, S., R Edwards, L. and Hemker, K.J., 1999, "Relating Mechanical Testing and Microstructural Features of Polysilicon Thin Films," *Journal of Materials Research*, Vol. 14, No. 3, PP. 688-697.
- (3) Cho, S.-J., Lee, K.-R., Eun, K. Y. and Ko, D.-H., 1999, "Determination of Elastic Modulus and Poisson's Ratio of Diamond-Like Carbon Films," *Thin solid films*, Vol. 341, pp.207-210.
- (4) Zhao, J.-H. Ryan, T. and Ho, P. S., 1999, "Measurement of Elastic Modulus, Poisson Ratio, and Coefficient of Thermal Expansion of on-Wafer Submicron Films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, , pp.6421-6424.
- (5) Bhushan, B., Mokashi, P. S. and Ma, T., 2003, "A Technique to Measure Poisson's Ratio of Ultrathin Polymeric Films Using Atomic Force Microscopy," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 74, No. 2, pp. 1043-1047.
- (6) Luo, C., Schneider, T. W., White, R. C., Currie, J. and Paranjape, M., 2003, "A Simple Deflection-Testing

- Method to Determine Poisson's Ratio for MEMS Applications," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 13, pp. 129~133.
- (7) Kim, J.-H., Yeon, S.-C., Heon, Y.-K., Kim, J.-G. and Kim, Y.-H., 2003, "Nano-Indentation Method for the Measurement of the Poisson's Ratio of MEMS Thin Films," *Sensor and Actuators A*, Vol. 108, pp. 20~27.
- (8) Jung, B. B., Ko, S. H., Lee, H. K. and Park, H. C., 2008, "Measurement of Young's Modulus and Poisson's Ratio of Thin Film by Combination of Bulge Test and Nano-Indentation," *Advanced Materials Research*, Vol. 33-37, pp. 969~974.
- (9) Beams, J. W., 1959, in *Structure and Properties of Thin Films of Gold and Silver*, New York, John Wiley and Sons, p. 183.
- (10) Martha, K. S. and Nix, W.D., 1992, "Analysis of the Accuracy of the Bulge Test in Determining the Mechanical Properties of Thin Films," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 1553~1563.
- (11) Kim, B.-M., Lee, C.-J. and Lee, J.-M., 2010, "Estimations of Work Hardening Exponents of Engineering Metals Using Residual Indentation Profiles of Nano-Indentation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 73~76.
- (12) Rathinam, M., Thillaigovindan, R. and Paramasivam, P., 2009, "Nanoindentation of Aluminum (100) at Various Temperatures," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, No. 10, pp. 2652~2657.
- (13) Kim, A. and Tunvir, K., 2006, "Study of Al-Alloy Foam Compressive Behavior Based on Instrumented Sharp Indentation Technology," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 20, No. 6, pp. 819~827.
- (14) Sneddon, I. N., 1965, "The Relation Between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch of Arbitrary Profile," *International Journal of Engineering and Science*, Vol. 3, pp. 47~57.
- (15) Pharr, G. M., Oliver, W. C. and Brotzen, F. R., 1992, "On the Generality of the Relationship Among Contact Stiffness Contact Area, and Elastic Modulus During Indentation," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 613~617.
- (16) King, R. B., 1987, "Elastic Analysis of Some Punch Problems for a Layered Medium," *International Journal of Solids structures*, Vol. 23, No. 12, pp. 1657~1664
- (17) Saha, R. and Nix, W. D., 2002, "Effect of the Substrate on the Determination of Thin Film Mechanical Properties by Nanoindentation," *Acta Materialia*, Vol. 50, pp. 23~38.
- (18) Oliver, W. C. and Pharr, G. M., 1992, "An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 6, pp. 1564~1583.
- (19) Cao, Y., Allameh, S., Nankivil, D., Sethiaraj, S., Otit, T. and Soboyejo, W., 2006, "Nanoindentation Measurements of the Mechanical Properties of Polycrystalline Au and Ag Thin Films on Silicon Substrates: Effects of Grain Size and Film Thickness," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 427, pp. 232~240.
- (20) Laursen, T. A. and Simo, J. C., 1992, "A Study of the Mechanics of Microindentation Using Finite Elements," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 3, pp. 618~626.
- (21) Catlin, A. and Walker, W. P., 1960, "Mechanical Properties of Thin Single-Crystal Gold Films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 31, No. 12, pp. 2135~2139.
- (22) Xiang, Y., Chen, X. and Vlassak, J. J., 2005, "Plane-Strain Bulge Test for Thin Films," *Journal of Applied Physics*, Vol. 31, No. 12, pp. 2135~2139.
- (23) Son, D., Jeong, J.-h. and Kwon, D., 2003, "Film-Thickness Considerations in Microcantilever-Beam Test in Measuring Mechanical Properties of Metal Thin Film," *Thin solid films*, Vol. 437, pp. 182~187.