

벌지 실험을 통한 Ti 박막의 크기 효과 관찰 및 기계적 물성 측정[§]

정봉부* · 이헌기** · 황경호*** · 박현철*†

* 포항공과대학교 기계공학과, ** MIT 재료공학과, *** 삼성전자

Observation of Size Effect and Measurement of Mechanical Properties of Ti Thin Film by Bulge Test

Bong-Bu Jung^{*}, Hun-Kee Lee^{**}, Kyung-Ho Hwang^{***}, Hyun-Chul Park^{*†}

^{*} Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH,
^{**} Department of Materials Science and Engineering, MIT,
^{***} SAMSUNG Electronics

(Received May 29, 2012 ; Revised September 25, 2012 ; Accepted October 9, 2012)

Key Words : Bulge Test(벌지 실험), Ti Thin Film(티타늄 박막), Young's Modulus(탄성 계수), Residual Stress(잔류응력), Yield Stress(항복 응력)

초록: 본 연구에서는 벌지 실험을 이용하여 티타늄 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. 스퍼터링을 이용해 증착된 티타늄 박막의 두께는 1.0, 1.5, 2.0 μm 이고, 물성의 열처리 시간에 대한 영향을 알아보기 위해 증착된 시편은 600 $^{\circ}\text{C}$ 에서 각각 150, 300, 600 초 동안 열처리 되었다. 박막의 탄성 계수, 잔류 응력, 항복 응력이 벌지 실험을 통해 측정되었고, 실험 결과 항복 응력은 열처리 시간에 의존하는 특성을 확인하였다. 또한 시편 두께가 감소할수록 강도가 증가하는 크기효과를 관찰하였다.

Abstract: In this study, the mechanical properties of a Ti thin film are measured by a bulge test. In the bulge test, 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 of the film. Ti thin films with thicknesses of 1.0, 1.5, and 2.0 μm were deposited on a Si wafer by using an RF magnetron sputtering system. These specimens were annealed at 600 $^{\circ}\text{C}$ for 150, 300, and 600 s to investigate the effect of temperature on the yield stress and mechanical properties of the Ti films. The elastic modulus, residual stress, and yield stress of these membranes are measured by a bulge test. The experimental results suggest that the yield stress is sensitive to the film thickness and annealing time.

- 기호설명 -

C_1 : 중횡비에 따른 상수
 C_2 : 푸아송비에 대한 함수
 C_3 : 종횡비에 대한 함수
 E : Elastic modulus
 P : 박막에 가하는 압력
 R : 벌지 형상의 곡률 반경
 Y : Biaxial modulus

a : 직사각형 박막의 너비의 반
 b : 직사각형 박막의 다른 너비의 반 ($a < b$)
 t : 박막의 두께
 h : 박막의 변형 높이
 h_0 : 박막의 초기 높이
 σ : 박막의 응력
 ε : 박막의 변형률
 ε_0 : 잔류 응력에 의한 박막의 초기 변형률

1. 서론

최근 반도체 집적회로 제조기술을 응용한 미소 기계부품의 제작이 가능하게 됨에 따라 미소부품

[§] 이 논문은 2012년도 대한기계학회 마이크로/나노공학부문 춘계학술대회(2012. 5. 17.-18., KIMM) 발표논문임.

[†] Corresponding Author, hcpark@postech.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

과 집적회로를 하나의 칩으로 일체화시킨 미세전기기계시스템(MEMS)이 등장하게 되었다. 이러한 미세전기기계시스템은 1 마이크로(Micron)이하부터 수십 마이크로 의 크기의 재료들로 구성된다. 그러나 이러한 미세 크기 재료들의 기계적인 물성은 거대 크기(Bulk scale)의 물성과는 다른 크기 의존(Size dependent), 공정 의존(Process dependent)하는 특성을 가지고 있고, 측정 또한 힘들다⁽¹⁾. Fleck⁽²⁾은 미세 구리 선을 이용하여 비틀림 실험(Torsion test)을 진행하여 미세 구리 선의 직경이 170 μm 에서 12 μm 으로 감소하면 전단 강도는 증가하는 것을 보고하였다. Stolken과 Evans⁽³⁾는 마이크로 굽힘 실험(Micro bending test)에서 두께가 100 μm 에서 12.5 μm 으로 감소하는 동안 강도는 증가하는 결과를 측정하였다. Connolley 등⁽⁴⁾은 마이크로/나노 크기(Micro/Nano scale)에서 금속 재료를 여러 실험 방법을 이용하여 물성을 측정하여 기계적 물성의 크기효과(Size effect)에 대하여 정리하였다. 그러므로 MEMS의 신뢰성(Reliability)을 향상시키기 위해서 미세 크기 재료들의 기계적인 물성을 정확히 측정하는 연구의 중요성이 점차 증가하고 있다.

이런 미세 크기 재료들의 기계적 특성 평가 방법에는 여러 가지가 있는데 그 중에서 벌지 실험(Bulge test)은 외적 지지구조를 가지지 않는 박막 시편을 이용하여 물성을 측정하게 되는데 압력과 변위의 관계로부터 기계적 물성을 직접 얻을 수 있다. 외적 지지 구조를 가지지 않기 때문에 모재(Substrate)의 영향을 받지 않고 시편의 고정과 정렬도 어렵지 않다. 박막의 기계적 물성을 얻기 위한 벌지 실험은 1959년 Beams⁽⁵⁾에 의해 처음 발표되었다. 원형 박막(Circular membrane)을 오리피스(Orifice)에 부착한 후, 한쪽 면에 일정한 압력을 가하였을 때, 박막의 변위를 압력에 관한 함수로 나타내어 응력-변형을 선도와 잔류 응력을 측정하였다. Nix⁽⁶⁾는 원형 박막뿐만 아니라 정사각형, 직사각형 박막에 대한 탄성 계수와 잔류 응력을 측정할 수 있는 이론 식을 정립하였다. Vlassak과 Nix⁽⁷⁾는 실험을 통하여 종횡비가(aspect ratio)가 4 이상인 직사각형 박막은 한 방향으로 무한히 긴 직사각형 박막으로 고려하여도 된다는 것을 보여 주어, 벌지 실험을 평면 변형(plane strain)을 이용하여 해석이 가능하도록 하였다. Nicola⁽⁸⁾는 구리 박막에 대한 소성 변형의 이론을 실험을 통하여 타당성을 확인하였다.

본 연구에서는 벌지 실험을 이용하여 티타늄 박막(Titanium Film)의 기계적 물성을 측정하였다. 두

께에 따른 물성의 변화를 알아보기 위하여 MEMS 공정을 통하여 직사각형 형상의 패턴(Pattern)을 낸 1.0, 1.5, 2.0 μm 두께의 티타늄 박막을 제작하여 벌지 실험을 수행하였다. 또한 열처리 시간에 따른 효과를 알아보기 위해 1.5 μm 두께의 시편을 600 $^{\circ}\text{C}$ 에서 150, 300, 600 초 동안 열처리하여 실험을 수행하였다. 재현성을 위해 시편의 종류에 따라 3 번씩 실험을 수행하였으며, 박막의 두께와 열처리 시간에 따른 기계적 물성을 측정하였다.

2. 기본 이론

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 박막으로 나눌 수 있다.

구형 박막 모델⁽⁵⁾은 여러 형상들 중에서 가장 기본적인 모델로써 변형 형상으로부터 응력과 변형관계를 쉽게 유도 할 수 있다. 그러나 정사각형과 직사각형 박막은 박막 형상의 변형이 비선형으로 보이기 때문에 응력-변형률 관계를 직접적으로 유도 할 수 없다. 따라서 정사각형 및 직사각형 박막에 대한 관계식은 에너지 최소화 방법(Energy minimization method)을 이용하여 해석할 수 있다⁽⁹⁻¹²⁾. 박막에 가해진 압력에 의해서 발생하는 박막의 변위를 가정한 후에 박막의 경계 조건(Boundary condition)을 만족시킨 후 가상 변위의 법칙(Principle of virtual displacement)에 따라 전체 포텐셜 에너지(Total potential energy)가 최소가 되는 점을 찾아 압력-변위의 관계식을 구한다. 위의 과정으로 구해진 벌지 실험의 압력-변위의 관계식은 다음과 같다.

$$P = C_1 \frac{\sigma_0 t}{a^2} h + C_2 (\nu) \frac{Yt}{a^4} h^3 + C_3 \left(\frac{a}{b}\right) \frac{Y}{1+\nu} \frac{t^3}{a^4} h \quad (1)$$

C_1 은 상수(Constant)이고, C_2 는 푸아송비(Poisson's ratio)에 대한 함수이며, C_3 는 종횡비(Aspect ratio, $n=b/a$)에 대한 함수이다. 식 (1)의 두 번째 항은 부피의 변형(Cubic deformation)과 같은 큰 변형(Large deformation)을 나타내고, 세 번째 항은 선형 변형(Linear deformation)과 같은 작은 변형

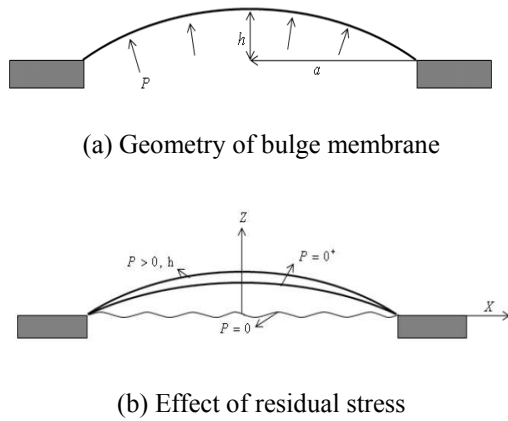


Fig. 1 Schematic of a bulge membrane

(Small deformation)을 나타낸다. 이 세 번째 부분은 작은 변형과 관련되어 있고, 박막의 너비(Width) a 에 비해 두께 t 는 상당히 작기 때문에 무시할 수 있다. 그러므로 일반적으로 식 (1)의 세 번째 항을 무시할 수 있다. 그리고 종횡비가 4 이상인 경우 한 방향으로 무한히 긴 박막으로 가정하여 해석할 수 있다.^(7,13) 이러한 경우 박막의 중심부에서 변위와 압력의 관계식은 다음과 같다.

$$P = \frac{2\sigma_0 t}{a^2} h + \frac{4}{3} \frac{Et}{(1-\nu^2)a^4} h^3 \quad (2)$$

그러나 식 (2)의 관계식은 탄성 변형에 대한 해석으로 시편이 소성 변형을 하게 될 경우 오차가 발생한다. 일반적으로 정사각형 박막에서는 모서리 중앙에서 변형이 시작되어 점차 박막의 중심부로 소성 변형이 발생되므로 박막의 소성 변형 해석이 쉽지 않지만, 종횡비가 큰 직사각형 박막의 경우 평면 변형 상태에 놓여 있다고 가정할 수 있고, 원형의 실린더 모형으로 변형이 발생되므로, 박막의 응력과 변형률은 Fig. 1(a)으로부터 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{PR}{t} = \frac{P(a^2 + h^2)}{2th} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \varepsilon_0 + \frac{a^2 + h^2}{2ah} \sin^{-1} \left(\frac{2ah}{a^2 + h^2} \right) - 1 \quad (4)$$

위의 식은 Fig. 1(b)에서 나타난 바와 같이 변형률의 경우 박막을 증착하는 과정이나 시편을 고정시키는 과정에서 발생할 수 있는 잔류응력에 의한 초기 부풀림에 대해 고려하였다.

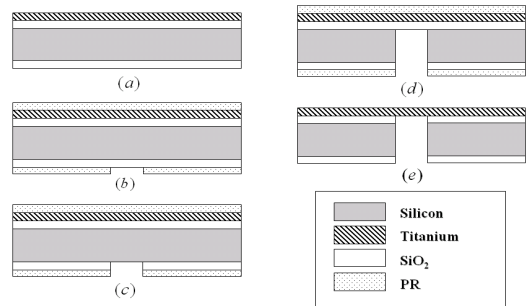


Fig. 2 The process for specimen fabrication: (a) silicon substrate with Ti and SiO₂. (b) Define pattern on back side. (c) Open window in the SiO₂ using BOE. (d) D-RIE of the bulk silicon. (e) BOE and PR remover

3. 실험 장비 및 결과

3.1 실험 시편

본 실험에서 사용된 티타늄은 고강도, 내식성, 무독성의 경금속으로 우주항공, 의료 등의 다양한 용도로 사용되고 있다. 특히 티타늄과 티타늄 합금 박막은 코팅 재료, FRAM(Ferroelectrics Random access Memory), PZT(Lead Zirconate Titanate), 형상 기억 합금(Shape memory alloy) 등 다양한 용도로 사용되기 시작하면서 기계적 물성의 정확한 측정이 요구되고 있다. 티타늄을 증착시키는 방법에는 스퍼터링(sputtering), 전자빔 증착법(E-beam evaporator), 물리 증착법(Physical vapor deposition)등이 이용되고 있다. 본 연구에서는 스퍼터링(Sputtering)을 이용하여 증착된 티타늄 박막을 이용하여 실험을 수행하였다.

실험에 쓰이는 시편의 공정 절차는 Fig. 2와 같다. 실리콘 벌크 에칭을 위한 D-RIE(Deep Reaction Ion Etching)의 마스크로 사용하기 위해 실리콘 웨이퍼(Si Wafer)의 양면에 산화막(SiO₂)을 증착시킨 후 스퍼터링을 이용하여 티타늄을 증착시켰다. 증착시킨 티타늄 박막의 두께는 1.0, 1.5, 2.0 μm이다. 증착된 박막의 안정화와 열처리에 따른 물성의 변화를 확인하기 위하여 RTP(Rapid Thermal Process)를 이용하여 600 °C에서 열처리 하였다. 열처리 시간은 150, 300, 600 초 이다. 시편의 두께와 열처리 시간을 Table 1에 나타내었다. 열처리한 후에 시편에 원하는 형상의 박막을 만들기 위하여 양면에 감광액(Photoresist)를 바른 후 티타늄이 증착되지 않은 면에 노광시켰다. 이때 사용된 마스크에는 8 X 2 mm의 직사각형 형상의

Table 1 Thickness and annealing time of titanium thin films

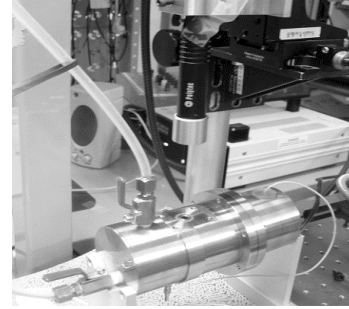
Specimen No.	Thickness (μm)	Annealing time (s)	Measured thickness (μm)
1	1	300	1.02
2	1.5	150	1.41
3	1.5	300	1.37
4	1.5	600	1.35
5	2	300	1.82

패턴이 되어있다. 현상(Development)을 한 후 패터닝된 면의 산화 막을 에칭하기 위해 BOE(Buffered Oxide Etch)을 실시하였다. 그 후 D-RIE공정을 통해 실리콘이 에칭이 된 후 다시 BOE를 이용하여 티타늄 박막 아래의 산화 막을 에칭한 후 감광액을 제거하여 직사각형 패턴을 가진 티타늄 박막을 제작하였다.

3.2 실험 장비 및 방법

벌지 실험을 수행하기 위한 장치는 크게 4 가지로 나눌 수 있다. 유압을 위해 오일(Oil)을 채우고 시편을 고정시키는 벌지 챔버(Bulge chamber), 원하는 압력을 인가해 주는 압전 구동기(Piezo actuator, Piezomechanik, P-247K, max. stroke 120 μm , max. load 3500N), 박막의 변위를 측정하는 변위 센서(Laser displacement sensor, Keyence corporation, LT 8110, resolution 0.2 μm , sensitivity 4 mV/ μm), 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. 3 에서 볼 수 있다.

실험 방법은 시편을 벌지 챔버의 시편 홀더(Specimen holder)에 고정시킨다. 시편 홀더에 시편을 고정시킬 때 시편 홀더에 무리한 힘을 가하여 시편에 영향을 주지 않도록 주의하며 시편을 고정시킨다. 챔버에 있는 주사기(Injector)를 사용하여 고정된 시편에 영향을 주지 않도록 천천히 오일 밸브(Oil valve)에 주사기를 사용하여 오일을 주입시킨다. 이 때 압력에 큰 영향을 미칠 수 있는 공기 방울이나 불순물이 들어가지 않도록 주의한다. 박막의 변위를 잘 측정할 수 있도록 변위 센서를 시편의 중심부에 수직이 되도록 위치시킨다. 변위 센서와 압력 센서의 값이 0 인지 확인 후에 함수 발생기(Function generator)를 사용하여 압전 구동기 작동 신호를 발생시킨다. 압전 구동기 작동

**Fig. 3** The bulge testing device apparatus

신호는 압전 구동기 제어기(Piezo actuator controller)로 입력 되어, 압전 구동기는 인가된 신호만큼 움직임(Stroke)이 발생된다. 압전 구동기에 의해서 챔버 내에는 압력이 발생하게 되고, 이 압력에 의해서 티타늄 박막은 변형이 발생된다. 변위 센서가 변형된 변위를 측정하고, 챔버 내에 장착된 압력 센서가 챔버 내의 압력을 측정한다. 측정된 데이터는 DAQ(Data Acquisition)장치인 FFT(Fast Furrier Transform)에 수집되고, 수집된 데이터를 통해 변위-압력 선도와 응력-변형률 선도를 얻을 수 있다

4. 실험 결과 및 고찰

직사각형 형상으로 제작된 벌지 시편을 이용하여 벌지 실험 실시하였고, 그 후 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 박막의 정확한 두께를 측정하였다. 실험에 대한 신뢰성을 위해 동일한 조건의 시편이 3 개씩 제작되어 실험에 사용되었다. 동일한 조건의 시편의 경우 압력과 변위의 관계가 유사한 것을 볼 수 있었고, 이는 재현성을 보인 것으로 판단 할 수 있다. 벌지 실험을 통해 두께와 열처리 시간에 따른 티타늄 시편의 압력-변위 선도는 Fig. 4 에 나타내었다. Fig. 4 에 나타낸 압력-변위 곡선은 비선형 함수에 대한 곡선 접합이 우수한 LMA(Levenberg - Marquardt Algorithm)를 이용하여 식 (2)와 곡선 접합(Curve fitting)을 하였다. 이를 통해 박막의 탄성 계수와 잔류 응력을 측정하였다. 이 때 사용된 티타늄의 푸아송비는 벌크 크기에서 사용되는 값인 0.32 를 사용하였다. 또한 실험으로부터 측정된 압력과 변위 관계에 식 (3)과 (4)를 이용하여 얻은 응력-변형률 선도는 Fig. 5 에서 볼 수 있다. 각각의 조건에서의 항복응력을 계산하기 위해 0.2 % 오프셋(Offset)을 이용하였다.

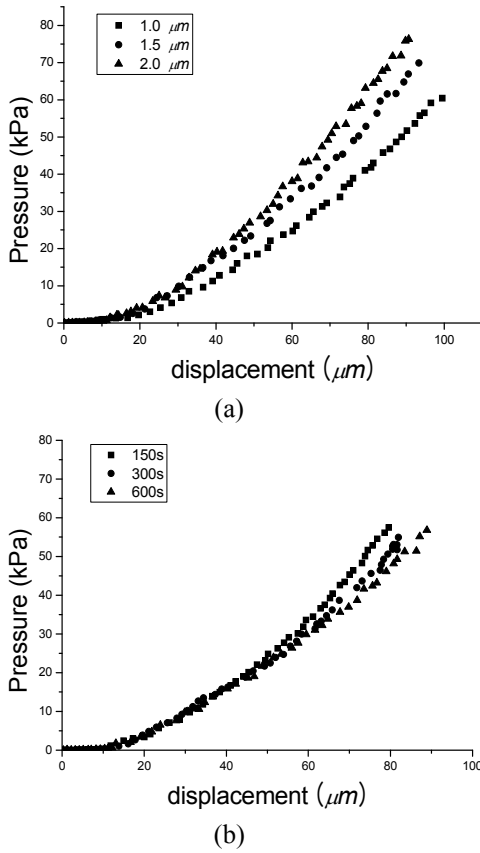


Fig. 4 Experimental measurements of pressure and displacement data by bulge test with (a) different thicknesses and (b) different annealing time

별지 실험을 통해 측정된 티타늄 박막의 물성은 Fig. 6 과 Table 2 에 정리하였다. 결과를 분석해 보면 Fig. 6 (a)에서 보는 바와 같이 박막의 탄성 계수는 박막의 두께(시편 1, 3, 5)와 열처리 시간(시편 2, 3, 4)에 관계없이 거의 일정한 값을 보이고 있다. 측정된 탄성계수의 평균값은 119.61 ± 20.02 GPa 이다. 이 값은 벌크 크기의 티타늄 탄성 계수인 116 GPa 에 근접한 값으로써 티타늄은 박막의 두께와 열처리 시간에 상관없이 벌크 크기의 탄성 계수와 같은 값을 확인할 수 있었다.

잔류 응력에 대한 결과는 Fig. 6(b)에서 확인할 수 있다. 잔류 응력의 경우 두께(시편 1, 3, 5)가 증가할수록 감소하고, 열처리 시간(시편 2, 3, 4)이 증가할수록 증가하는 경향을 나타냈지만, 큰 차이는 보이지 않았다. 크기는 평균 22 MPa 정도의 값을 보이고 있는데, 이 값은 Ljungcrantz 등⁽¹⁴⁾의 연구 결과와 일치한다. 이 연구에서는 티타늄의 잔류 응력은 스퍼터링의 공정 조건에 달라진다고 보고하고 있다. 특히 증착 압력이 증가할수록 박막의 잔류 응력은 압축에서 인장으로 변하게 되는데 이 때의 변환되는 압력은 2 mTorr 이다. 본 연구에서

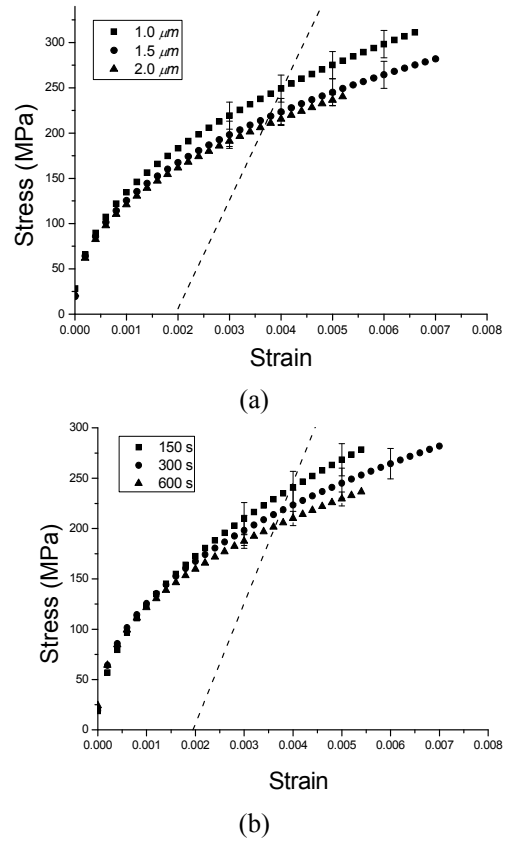


Fig. 5 Stress and strain curve for titanium films with (a) different thicknesses and (b) different annealing time

사용된 박막의 증착 압력은 2 mTorr 이기 때문에 박막의 잔류 응력은 0 을 중심으로 한 저응력(Low stress)임을 확인할 수 있다.

두께에 따른 항복 응력의 변화는 Fig. 6(c)에서 볼 수 있다. 측정된 항복 응력을 분석해 보면 두께가 2.0 μm 에서 1.0 μm 으로 감소할수록 항복 응력은 206 ± 6 MPa 에서 242 ± 16 MPa 으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이전의 많은 연구⁽¹⁵⁻²⁰⁾에서 박막의 두께가 감소할수록 강도가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 본 연구에서도 이러한 두께 효과 (Thickness effect)를 확인할 수 있었다.

열처리 시간에 따른 항복 응력의 경우 Fig. 6(d)에서 보는 것과 같이 열처리 시간이 150 s 에서 600 s 로 증가할수록 항복응력은 236 ± 16 MPa 에서 207 ± 7 MPa 으로 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 재료의 강도는 적층 결함(Stacking fault)이나 격자 결함(Lattice defect) 등과 같은 미세 구조(Microstructure)의 결함(Defect)과 관련이 있다. 이러한 결함들은 재료 내에 존재하는 전위(Dislocation)의 운동을 방해하고, 결과적으로 재료의 강도를 증가시키는 역할을 한다. 그러나 열처

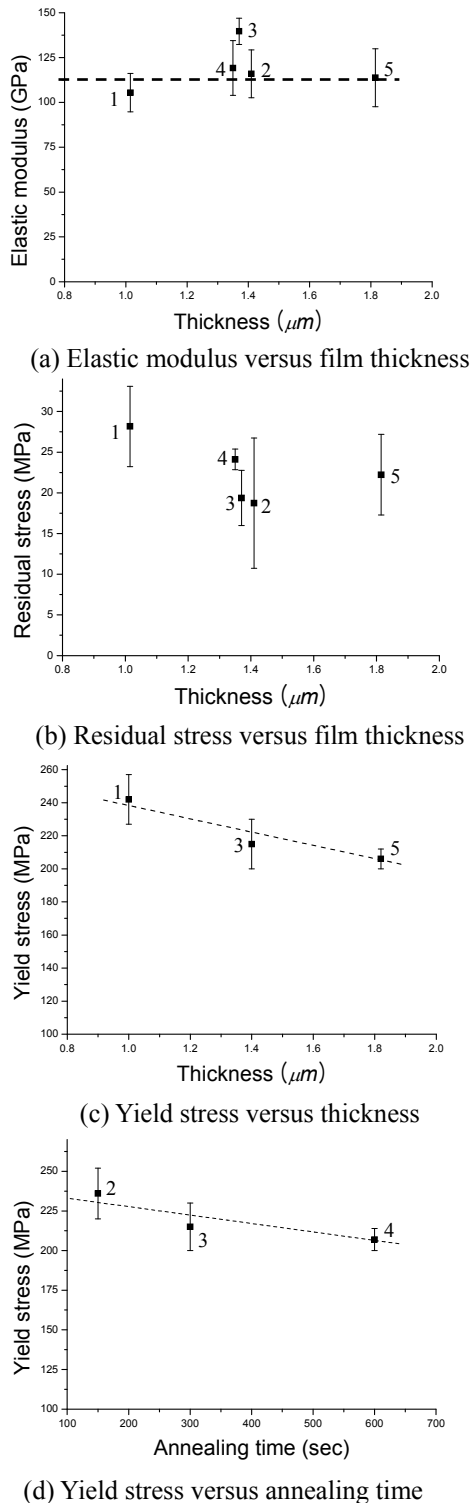


Fig.6 Measured mechanical properties of Ti films with thickness and annealing time

리를 하게 되면 안정화되면서 이러한 결함들이 제거되어 재료의 강도를 저하시킬 수 있다. 또 다른 이유는 열처리를 하면서 결정립(Grain)의 크기가 증가할 수 있다. 일반적으로 결정립의 크기는 열

Table 2 Mechanical properties of Ti thin films by bulge test

Specimen No.	Elastic Modulus (GPa)	Residual Stress (MPa)	Yield stress (MPa)
1	105.4±10.7	28.2±4.9	242±15
2	115.9±13.4	18.7±8.0	236±16
3	139.6±7.4	19.4±3.4	215±15
4	119.2±15.3	24.1±1.2	207±7
5	113.8±16.2	22.2±5.0	206±6

처리 시간이 증가할수록 증가한다.^(21,22) 따라서 Hall - Petch^(23,24) 관계식으로부터 열처리 시간이 증가할수록 항복 응력이 감소하는 것을 설명할 수 있다. 향후 티타늄 박막의 미세 구조를 조사하면 열처리 시간에 따라 항복 응력이 변하는 원인을 조사할 수 있다고 판단된다.

5. 결론

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

- (1) 벌지 실험을 통해 두께와 열처리 시간에 따른 티타늄 박막의 탄성 계수, 잔류 응력과 항복 응력을 측정할 수 있었다.
- (2) 실험을 통해 측정된 탄성 계수는 두께와 열처리 시간에 관계없이 일정한 값을 보였고, 그 값은 119.61 ± 20.02 GPa 이었다.
- (3) 잔류 응력은 두께와 열처리 시간에 관계없이 일정하였고, 평균 22.52 ± 3.83 MPa 로 공정 조건의 값과 일치하는 저응력이었다.
- (4) 항복 응력의 경우, 시편의 두께가 감소할수록 항복 응력은 증가하는 크기 효과를 보였고, 열처리 시간이 증가할수록 항복 응력이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

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) Fleck, N. A., Muller, G. M., Ashby, M. F. and Hutchinson, J. W., 1994, "Strain Gradient Plasticity : Theory and Experiment," *Acta Metal. Mater.*, Vol. 42, No.2, pp. 475~487

- (3) Stölken, J. S. and Evans, A. G., 1998, "A Microbend Test Method for Measuring the Plasticity Length Scale," *Acta Materialia*, Vol. 46, No. 14, pp. 5190~5115
- (4) Connolly, T., Mchugh, P. E. and Bruzzi, M., 2005, "A Review of Deformation and Fatigue of Metals at Small Size Scales," *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 28, pp.1119~1152
- (5) Beams, J. W., 1959, in *Structure and Properties of Thin Films of Gold and Silver*, New York, John Wiley and Sons, pp. 183
- (6) 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
- (7) Vlassak, J.J. and Nix, W. D., 1992, "A New Bulge Test Technique for the Determination of Young's Modulus and Poisson's Ratio of Thin Film," *Journal of Materials Research*, Vol. 7, No. 12, pp. 3242~3249
- (8) Nicola, L., Xiang, Y., Vlassak, J.J., Van Der Giessen, E. and Needleman, A., 2006, "Plastic Deformation of Freestanding Thin Film: Experiments and Modeling," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 54, pp.2089~2110
- (9) Dieter, M.S., Maibach, J. and Obermeier, E., 1995, "A New Analytical Solution for the Load - Deflection of Square Membranes," *Journal of Microelectromechanical systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 238~241
- (10) Bonnotte, E., Delobelle, P. and Bornier, L., 1997, "Two Interferometric Methods for the Mechanical Characterization of Thin Films by Bulging Tests. Application to Silicon Single Crystal," *Journal of Materials Research*, Vol. 12, No. 9, pp. 2234~2248
- (11) Tabata, O., Kawahata, K., Sugiyama, S. and Igarashi, I., 1989, "Mechanical Property Measurements of Thin Films Using Load-Deflection of Composite Rectangular Membranes," *Sensors and Actuators*, Vol. 20, pp. 135~141
- (12) Pan, J.Y., Lin, P., Maseeh, F. and Senturia, S.D., 1990, "Verification of FEM Analysis of Load-Deflection Methods for Measuring Mechanical Properties of Thin Films," in *Tech. Dig. IEEE Solid-State Sensors and Actuators Workshop*, pp. 70~73
- (13) Xiang, Y., Chen, X. and Vlassak, J. J., 2005, "Plane-Strain Bulge Test for Thin Films," *Journal of Materials Research*, Vol. 20, No. 9, pp. 2360~2370
- (14) Ljungcrantz, H., Hultman, L., Sundgren, J. E., Johansson, S., Kristensen, N., Schweitz, J. A. and Shute, C. J., 1993, "Residual Stresses and Fracture Properties of Magnetron Sputtered Ti Films on Si Microelements," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 11, No. 3, pp. 543~553
- (15) Yu Denis Y. W. and Spaepen, F., 2004, "The Yield Strength of Thin Copper Films on Kapton," *J. Appl. Phys.*, Vol. 95, pp. 2991~2997
- (16) Hommel, M., Kraft, O. and Arzt, E., 1999, "A New Method to Study Cyclic Deformation of Thin Films in Tension and Compression," *Journal of Materials Research*, Vol. 14, pp. 2373~2376
- (17) Hommel, M. and Kraft, O., 2001, "Deformation Behavior of Thin Copper Films on Deformable Substrates," *Acta Materialia*, Vol. 49, pp. 3935~3947
- (18) Renault, P. O., Villain, P., Coupeau, C., Goudeau, P. and Badawi, K. F., 2003, "Damage Mode Tensile Testing of Thin Gold Films on Polyimide Substrates by X-Ray Diffraction and Atomic Force Microscopy," *Thin Solid Films*, Vol. 424, pp. 267~273
- (19) Kraft, O., Hommel, M. and Arzt, E., 2000, "X-Ray Diffraction as a Tool to Study the Mechanical Behaviour of Thin Films," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 288, pp. 209~216
- (20) Nix, W. D., 1989, "Mechanical Properties of Thin Films," *Metall. Trans. A*, Vol. 20, pp. 2217~2245
- (21) Engler, O. and Huh, M.-Y., 1999, "Evolution of the Cube Texture in High Purity Aluminum Capacitor Foils by Continuous Recrystallization and Subsequent Grain Growth," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 271, pp. 371~381
- (22) Czerwinski, F., Li, H., Megret, M., Szpunar, J.A., Clark, D.G. and Erb, U., 1997, "The Evolution of Texture and Grain Size During Annealing of Nanocrystalline Ni-45% Fe Electrodeposits," *Scripta Materialia*, Vol. 37, pp. 1967~1972
- (23) Hall, E. O., 1957, "The Deformation and Aging of Mild Steel: III. Discussion of Results," *Proc. Phys. Soc. Lond. B*, Vol. 64, pp. 747~753
- (24) Petch, N. J., 1953, "The Cleavage Strength of Polycrystals," *J. Iron Steel Inst.*, Vol. 174, pp. 25~28