

띠 굽힘 시험을 통한 100 nm 두께 금 박막의 기계적 특성 평가

김재현[†]·이학주^{*}·한승우^{*}·백창욱^{**}·김종만^{**}·김용권^{**}

Mechanical characterization of 100 nm-thick Au thin film using strip bending test

J.H. Kim, H.J. Lee, S.W. Han, C.-W. Baek, J.-M. Kim, Y.-K. Kim

Key Words : Strip bending test (띠 굽힘 시험), Au (금), mechanical properties (기계적 물성)

Abstract

Nanometer-sized structures are being applied to many devices including micro/nano electronics, optoelectronics, quantum devices, MEMS/NEMS, biosensors, etc. Especially, the thin film with submicron thickness is a basic structure for fabricating these devices, but its mechanical behaviors are not well understood. The mechanical properties of the thin film are different from those of the bulk structure and are difficult to measure because of its handling inconvenience. Several techniques have been applied to mechanical characterization of the thin film, such as nanoindentation test, micro/nano tensile test, strip bending test, etc. In this study, we focus on the strip bending test because of its high accuracy and moderate specimen preparation efforts, and measure Au thin film, which is a very popular material in micro/nano electronic devices. Au film is deposited on Si substrate by evaporation process, of which thickness is 100nm. Using the strip bending test, we obtain elastic modulus, yield and ultimate tensile strength, and residual stress of Au thin film.

1. 서 론

전자 공학 분야에서의 급격한 발전으로 인해 작은 구조물을 제작할 수 있는 기술이 급격하게 발전하고 있으며, 보다 작은 구조물에 대한 요구도 지속적으로 증가하고 있다. 지난 수십 년간 반도체 분야에 적용되어온 Moore's law 에 의하면, 수 년 내에 수십 나노 미터 크기의 특성길이를 가지는 구조물을 이용하여 소자가 제작될 것이 예견되고 있다[1]. 반도체 공정을 응용하여 작은 구조물을 제작하는 기술은, 전자 공학 분야뿐만 아니라 광전자공학(optoelectronics) 분야, 양자 계산(quantum computing) 분야, MEMS/NEMS, 바이오 센서(biosensor) 분야 등에 다양한 응용성을 가질 것으로 예견되고 있다[2]. 이러한 기술을 이용하여 제품을 생산하기 위해서는 수백에서 수십 나노 미

터 수준의 특성 길이를 가지는 나노 구조물에 대한 설계 기술이 요구된다. 특히 전기/전자적인 작동 원리뿐만 아니라 기계적인 작동 원리를 함께 이용하는 MEMS/NEMS 분야에서는, 나노 구조물의 다양한 물성 중에서 기계적인 물성이 매우 중요한 역할을 한다. 나노 구조물의 기계적인 물성은 거대 구조물 (bulk structure)의 물성과는 다르다는 점이 알려져 있고, 따라서 구조물의 크기 효과(size effect)를 고려한 기계적 물성 측정 기술이 요구된다.

수백에서 수십 나노 미터 수준의 특성 길이를 가지는 구조물의 기계적 물성 측정 기술은 아직까지 표준화가 되지 못한 상황이다. 현재 다양한 측정 기술들이 개발되고 있지만, 각각의 측정 기술들은 여러 가지 난제들을 포함하고 있다. 가장 널리 사용되는 방법은 나노 압입 시험 기술이다. 이 기술은 시편 제작 과정 및 시험 과정이 간단하기 때문에, 역학적인 이해가 깊지 않아도 쉽게 물성을 측정할 수 있다는 장점이 있지만, 그 측정 결과를 정량적인 물성치와 연결시키는 데에 여러 가지 어려움이 있다. 정량적으로 기계적인 물성을 측정할 수 있는 방법으로는 미소 인장 시험

† 한국기계연구원 구조연구부 마이크로응용역학그룹
E-mail : jaehkim@kimm.re.kr
TEL : (042)868-7550 FAX : (042)868-7884

* 한국기계연구원 구조연구부 마이크로응용역학그룹
** 서울대학교 전기공학부

(micro tensile test)이 있다. 이 시험은 정밀한 변형을 측정 장치, 시편 정렬 (alignment) 및 고정 장치 (fixture) 등 정교한 시험 장비 기술이 요구된다는 점과 시편 제작이 까다롭다는 단점이 있다. 그러나 가장 정량적인 기계적 물성치를 얻을 수 있다는 장점이 있으므로 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 미소 인장 시험과 같이 재료의 인장 특성을 얻을 수 있는 반면에, 시편 제작 및 시편 정렬, 시편 고정 등이 미소 인장 시험보다 훨씬 용이하다는 장점을 지닌 띠 굽힘 시험 (strip bending test)을 다룬다.

본 논문의 목적은 MEMS 공정으로 제작된 두께 100nm의 Au 구조물에 대한 띠 굽힘 시험 기술을 검토하는 것이다. 본 연구와 유사한 시험 방법을 연구한 연구자들이 있지만, 시편의 크기 및 시편 제작 공정, 시험 절차 및 결과의 해석 과정 상 본 연구와 차이점이 있다. 본 논문은 띠 굽힘 시험의 개요, 띠 굽힘 시험의 절차, 시험 결과, 그리고 요약 및 결론으로 구성된다.

2. 띠 굽힘 시험의 개요

2.1 띠 굽힘 시험의 개념

띠 굽힘 시험 (strip bending test)의 개념을 살펴보자. 본 연구에서 다루고 있는 방법과 같은 형태의 시험 방법을 Espinosa 등[3]은 멤브레인 변형 실험 (membrane deflection experiment)이라고 부르고 있다. 멤브레인은 두께는 작고, 표면 면적 (surface area)이 매우 넓은 구조물을 지칭하는 용어로서, 보통 3 차원적인 변형 형상을 가진다. 또한, 굽힘 모멘트 (bending moment)를 지지할 수 없다는 점에서 셸 (shell)과는 구분이 된다.

본 연구에서 다루는 구조물은 멤브레인과 마찬가지로 굽힘 모멘트를 지지할 수 없을 정도로 얇은 두께를 가진다. 그러나, 구조물의 길이에 비하여 너비가 매우 작기 때문에, 3 차원적인 변형 대신에 2 차원적인 변형으로 단순화할 수 있는 형상을 지닌다. 즉, 길이 방향으로 길고, 두께가 매우 얇아 굽힘 모멘트를 지지할 수 없는 실 (string)이나 띠(strip)와 같은 구조물이다. 본 연구에서는 이러한 구조물을 3 차원적인 변형을 가지는 멤브레인과 구분하여 띠 (strip) 형상으로 지칭하고, 이러한 띠 구조물에 Fig. 1 와 같은 하중을 가하는 시험 방법을 띠 굽힘 시험이라 지칭한다.

2.2 띠 굽힘 시험의 해석

띠 굽힘 시험 시에 가해지는 하중과 그에 따른 변위의 관계를 다음과 같은 가정 하에서 해석한다. (1) 띠 굽힘 시편의 거동은 등방성 선형 탄성으로 묘사된다. (2) 띠 굽힘 시편은 굽힘 모멘트를 지지

하지 못하며, 시편의 길이 방향으로 작용하는 장력 (tension) 만을 지지한다. (3) 시편의 너비 방향 변형은 평면 응력 또는 평면 변형을 조건으로 단순화된다. 이와 같은 가정하에서 띠 굽힘 시편의 하중-변위 관계는, z 방향 힘 평형 방정식, 등방성 선형 탄성 구성방정식과 띠 굽힘 시편의 기하학적인 관계로부터 다음과 같은 식으로 유도된다.

$$F = 2 \sin \theta \left(\sigma_0 + \frac{1 - \cos \theta}{\cos \theta} E \right) Wh. \quad (1)$$

여기서 F 는 띠 멤브레인에 가해진 하중 (force), $\tan \theta = \delta/L$, E 는 띠 멤브레인의 탄성 계수이다. $2L$, W , h 는 각각 띠 멤브레인의 길이, 너비, 두께이다. 특히 σ_0 는 띠 멤브레인에 하중이 작용하기 전에 멤브레인에 존재하는 초기 응력으로서, 박막의 잔류 응력과는 다른 값이므로 물리적인 의미를 부여할 때에 주의가 필요하다. θ 가 작은 경우에는 $\theta \cong \delta/L$ 이므로 다음과 같은 식으로 단순화된다.

$$F = 2 \frac{\delta}{L} \left(\sigma_0 + \frac{1}{2} \left(\frac{\delta}{L} \right)^2 E \right) Wh. \quad (2)$$

식 (2)와 (3)는 띠 멤브레인의 너비가 멤브레인의 두께와 비슷하거나 작은 경우에는 성립하는 식이며, 멤브레인의 폭이 멤브레인의 두께에 비하여 매우 큰 경우에는 탄성계수 E 를 $E/(1-\nu^2)$ 로 교체하여야 한다(ν 는 포와송비).

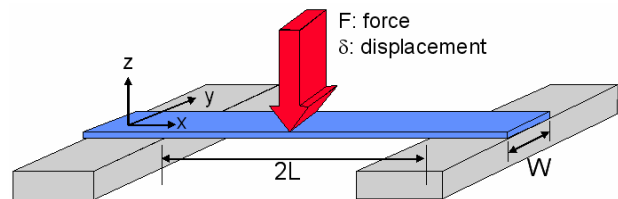


Fig. 1 A line load applied to a strip-bend type specimen.

2.3 띠 굽힘 시험을 통한 물성 평가

띠 굽힘 시험을 통하여 평가할 수 있는 물성은 탄성계수, 박막 초기 응력, 항복 강도, 인장 강도 등이며, 선형 탄성 모델 보다 일반적인 구성 방정식 모델에 적용할 수 있는 재료의 응력-변형을 관계를 직접 측정할 수도 있다. 탄성계수 및 박막 초기 응력은, 실험에서 측정된 하중-변위 관계를 앞서 제시된 식 (1)를 이용하여 곡선 적합 (curve fitting)함으로써 얻어진다. 항복 강도는 다음과 같은 전형적인 단계를 거쳐서 얻어진다. 우선 실험에서 측정된 하중-변위 관계에서 응력-변형을 관계 그래프를 얻고, 선형 탄성 영역의 직선 기울기

를 이용하여 0.2% 읍셋 선을 그려서 항복 강도를 결정한다. 인장 강도는 시편이 파단되는 순간의 응력으로부터 구할 수 있다.

재료의 항복 강도 및 인장 강도를 엄밀하게 측정하기 위해서는 시편의 형상 설계가 매우 중요하다. 즉, 시편의 각진 모서리 (corner)나 노치 (notch)는 응력 집중을 유발하므로, 각진 모서리나 노치 대신 완만한 곡선 부분으로 대체하여 시편 형상을 설계하는 것이 필요하다. 그러나 본 연구는 띠 굽힘 시험 방법을 구축하는 단계로서, Fig. 3와 같이 단순화된 시편을 이용하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 금 박막 띠 (gold thin film strip)가 모재에 고정된 부분에는 각진 모서리 부분이 있어 응력 집중이 발생할 수 있다. 또한, 띠의 중간부분에는 시편과 하중단 (loading edge)이 접촉하는 부분이 있는데, 이 부분에는 국부 소성변형이 발생할 수 있다. 이 시편을 이용하여 항복 강도 및 인장 강도의 측정결과가 제시되지만, 이는 엄밀한 의미에서의 물성이 아님을 기억해야 한다.

보다 엄밀한 항복 강도 및 인장 강도를 측정하기 위하여, 차후에는 시편의 각진 모서리 부분을 완만한 곡선 부분으로 대체하는 것과, 시편과 하중단이 접촉하는 부분은 국부 소성 변형을 견딜 수 있도록 보강하는 것이 필요하다. 보다 두께가 두꺼운 금 박막 시편에 대해서는 이러한 시편이 제작 가능하였지만, 본 연구에서 다루는 100nm 두께의 박막에 대해서는 박막 손상 문제 때문에 제작되지 못하였다.

3. 띠 굽힘 시험 절차

3.1 띠 굽힘 시험 용 시편 설계 및 제작

본 연구에서 다루고 있는 띠 굽힘 시험은 시편에 가해지는 굽힘 모멘트를 무시할 수 있는 경우에 유효하다. 따라서, 시편 설계 시에 굽힘 모멘트가 무시될 수 있도록 설계하는 것이 필요하다. 이를 위하여 시편의 최대 변위 (δ)는 시편의 두께보다 매우 커야 하며 (보통 10 배이상), 시편의 변위가 커져서도 시편이 탄성영역에 있도록 하기 위해서는 시편의 길이 (L)가 시편의 변위보다 커지도록 설계하는 것이 필요하다. 항복이 일어날 때의 변형율을 0.4%라 가정할 때에, Fig. 9에 나타난 변형율 계산 식을 이용하면 시편의 길이는 시편의 최대 변위보다 12 배이상 커져야 함을 알 수 있다.

시편 설계를 위하여 시편의 두께를 100nm 로 고정하고, 시편의 최대 탄성 변위는 0.03mm 로 설정하였다(파손 시의 변위는 이보다 커질 수 있다). 이에 따라 시편의 길이는 0.4mm 로 설정하고, 시편의 너비는 시편 두께보다 100 배 큰 0.01mm 로

설정하였다. 이 시편을 제조하기 위하여 박막 증착, 리소그라피, 식각 등의 MEMS 제작 공정을 활용하였다.

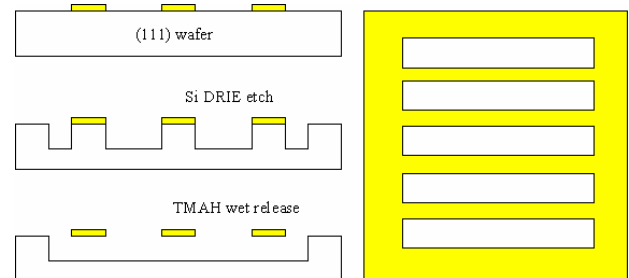


Fig. 2 Fabrication procedures for Au strip bending specimen.

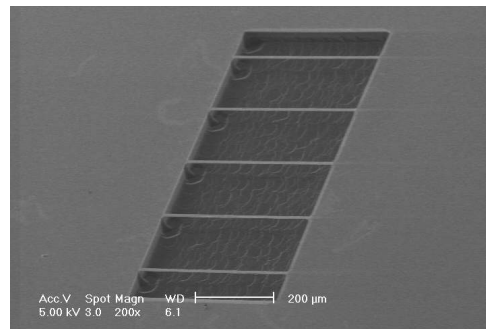


Fig. 3 SEM image of fabricated Au strip bending specimen

시편의 제조 공정(Fig. 2 참조)을 좀더 자세히 기술하면 다음과 같다. (1) 먼저 웨이퍼 위에 금 박막을 증착(evaporation)한다. 금 박막은 실리콘 모재와 접착력이 좋지 않으므로, 접착력 향상을 위하여 2~5nm 의 크롬 박막을 먼저 증착한 후에 금 박막을 증착한다. (2) 증착된 금 박막에 PR(Photo Resist)를 입히고, 리소그라피와 식각을 통하여 그림과 같이 패터닝한다. 띠 굽힘 시험 시에 시편이 최대 50 μm 까지 변형할 수 있도록 DRIE 를 이용하여 실리콘 모재를 50 μm 이상의 깊이로 식각한다. (3) 금 박막을 실리콘 모재로부터 완전히 분리시키기 위하여 KOH 나 TMAH 를 이용한 습식 식각을 한다. 식각 중에 금 박막도 미량 식각되므로 식각 시간은 짧을수록 좋지만, 너무 식각 시간이 짧은 경우에는 금 박막이 완전히 실리콘으로부터 분리되지 않는다. (4) 최종적으로 제작된 시편은 Fig. 3 과 같다. SEM 관찰결과, 박막이 아래로 처지거나, 뒤틀리는 현상은 없었다.

각진 모서리 및 시편 중심부의 국부 소성 영역을 보강하기 위하여 완만한 곡선 영역을 도입한 시편도 같은 공정으로 제조를 시도하였다. 그러나, 곡선 부분이 포함된 시편은 곡선 부분이 없는 시편에 비하여 긴 습식 식각 시간을 요구하므로, 금

박막의 표면에 많은 손상이 발생하였다. 완만한 곡선 부분을 지닌 시편을 성공적으로 제조하기 위하여 시편 제작 공정을 변경하였으며 그 결과는 별도의 논문으로 발표될 예정이다.

3.2 띠 굽힘 시험 용 시험기

100nm 두께의 Au 박막 시편에 대하여 띠 굽힘 시험을 수행하기 위해서는 정밀한 하중 및 변위 측정 장비가 필요하다. 변위는 최대 수십 마이크로미터까지 변화할 수 있으므로, 이러한 범위에 적용할 수 있는 용량형 및 LVDT 형 센서가 필요하다. 굽힘 형 시험에서는 매우 작은 하중이 발생하므로, 매우 정밀한 하중 센서가 요구된다. 본 실험에서는 최대 수십에서 수백 μN 의 하중이 발생하므로 수십 nN 정도의 하중 분해능을 가지는 하중 센서가 요구된다. 이러한 변위 및 하중 센서 뿐만 아니라 정밀한 운동이 보장되는 구동기 (actuator) 역시 필요하다. 이러한 시험기를 직접 구성하는 것은 쉽지 않은 일이므로, 본 연구에서는 MTS 사의 상용 나노인덴터인 XP 를 이용하였다. MTS 사에서 제시하는 나노인덴터 XP 의 사양은 Table 1 과 같다. 나노인덴터를 이용한 띠 굽힘 시험의 개략도는 Fig. 4 에 나타나있다.

Table 1 Specification of Nanoindenter XP (MTS Corp.)

| | |
|-------------------------|-------------------|
| Displacement resolution | Less than 0.01 nm |
| Maximum displacement | 0.5 mm |
| Maximum load | 500 mN |
| Load resolution | 50 nN |

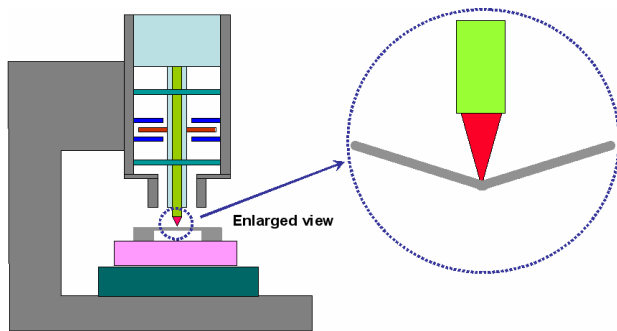


Fig. 4 Schematic of strip bending test using Nanoindenter

3.3 띠 굽힘 시험의 절차

나노인덴터를 이용한 띠 굽힘 시험의 절차는 다음과 같다. (1) 먼저 시편을 나노인덴터의 시편 홀더 (sample holder)에 부착한다. 보통의 나노인덴터 실험에서는 고온에서 경화되는 폴리머 접착제를 이용하지만, 본 연구에서는 온도 영향을 줄이기 위하여 상온에서 경화되는 순간 접착제를 이용

하여 Au 패दी이 형성된 실리콘 모재를 시편 홀더에 부착한다. (2) Au 띠 굽힘 시편에 선접촉하중을 가하기 위하여 쐐기 형 인덴터 팁 (wedge type indenter tip)을 나노인덴터의 헤드(head)에 장착한다. (3) 나노인덴터는 시편의 표면 위치를 미리 인식할 수 없으므로, 시편의 표면 위치를 선정하는 절차가 필요하다. 이 절차는 다음 절에서 상술된다. (4) 쐐기 형 인덴터를 일정 속도로 시편 쪽으로 이송하며, 시편이 완전 과단에 이르기까지 하중을 가한다. (5) 나노인덴터 헤드 내의 인덴터는 판 스프링 (leaf spring)에 의하여 헤드 내에 고정되어 있다. 따라서 나노인덴터에서 검출되는 하중에서 실제 시편에 가해진 하중을 검출하기 위해서는 판 스프링의 강성을 보정하여야 한다. 따라서, 시편이 없는 상태에서 쐐기형 인덴터를 동일한 거리 동안 이송하면서 판 스프링에 의해 발생하는 하중을 측정한다.

3.4 띠 굽힘 시편의 표면 위치 선정

시편의 표면 위치를 선정하기 위해서는 여러 가지 방법이 사용될 수 있다. 전형적인 나노인덴터 실험에서는, 인덴터의 하중 및 변위 센서에서 검출된 강성을 측정하여, 시편의 표면으로 인식하는 방법을 자주 사용한다. 그러나 본 연구에서 다루는 띠 굽힘 시편은 그 강성이 매우 작기 때문에 이러한 방법으로는 시편의 표면을 인식할 수가 없다. Espinosa 등[3]은 시편에 하중을 가하는 방향과 반대 방향에서 간섭 대물 렌즈 (interferometric objective lens)로 시편의 표면을 관찰하면서 간섭 무늬가 발생하기 시작하는 순간을 시편의 표면 위치로 선정하였다. 이들의 방법은 시편이 압축 초기 응력을 받는 경우에는 시편의 표면 위치를 정확하게 설정할 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 Fig. 5 와 같이 3 점 연속 측정법을 통하여 시편의 표면 위치를 검출한다. 이 방법은 시편을 지지하고 있는 양단을 연결하는 직선을 기준으로 시편의 변위를 측정하는 방법으로써, 앞서 제시된 식 (1)에서 이용된 변위 (δ)의 정의와도 직접적으로 연관되며, 시편에 인장 초기 응력 뿐만 아니라 압축 초기 응력이 작용하는 경우에도 그대로 적용할 수 있는 장점이 있다.

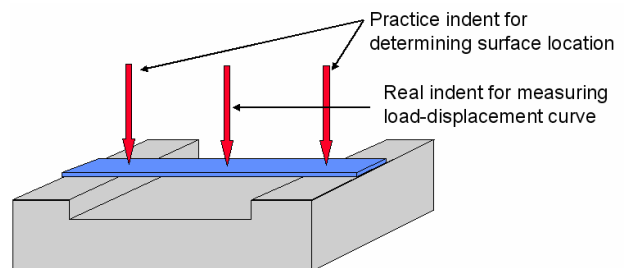


Fig. 5 Three successive indents for detecting the surface location of strip bend specimen

4. 시험 결과

4.1 시험 결과 환산 과정

띠 굽힘 시험 결과로서 얻어진 데이터들에는 센서의 열적 흐름 (thermal drift), 시편 표면 위치의 모호성, 인덴터 헤드의 판 스프링 강성 등이 존재한다. 따라서 몇 단계의 환산 과정을 거쳐서 역학적으로 의미있는 시편의 하중-변위 관계 및 응력-변형을 관계를 얻게 된다.

센서의 열적 흐름은 정밀 측정 센서에 있어서 자주 동반되는 노이즈이다. 이 노이즈는 측정 시스템의 열적 요동 (thermal fluctuation)에 기인하는 것으로 알려져 있으며, 원천적으로 제거하기는 어려운 대상 중 하나이다. 본 연구에서는 시편에 하중을 가한 후에, 미리 설정된 하중(최대 하중의 10%)까지 제한한 후 인덴터를 정지시켰다. 그리고, 10 초간 변위 센서에 존재하는 열적 흐름을 측정하여, 시편에 하중을 가하는 동안 발생된 변위 신호에서 이 열적 흐름량을 선형적으로 보정하는 방법을 사용하였다. 이러한 열적 흐름 보정 방법은 전형적인 나노 압입 시험에서 자주 이용되는 방법이다.

시편 표면 위치의 모호성은 앞의 3.4 절에 기술된 3 점 연속 측정법을 이용하여 해결되었으며, 이렇게 결정된 시편 표면 위치를 이용하여 하중-변위 그래프의 변위 원점을 선정하였다. Fig. 7에 나타난 그래프의 변위 원점은 이러한 방법으로 선정된 것이다.

앞서 3.3 에서 간략하게 기술된 바와 같이 인덴터 헤드의 판 스프링 강성을 보정하기 위해서는 시편이 있을 때와 없을 때의 하중과 변위 신호를 각각 측정하여야 한다. 그 다음 시편이 있을 때의 신호에서 시편이 없을 때의 신호(즉, 판 스프링의 강성 신호)를 빼냄으로써, 순전히 시편에만 작용된 하중 신호를 알아낸다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 시편이 있을 때와 시편이 없을 때에, 검출되는 하중 신호는 차이가 있다. 시편이 없을 때에 변위 증가에 따라 검출되는 하중 신호는 인덴터를 지지하고 있는 판 스프링의 강성에 의한 것이다. 시편이 있을 때의 하중 신호에서 시편이 없을 때의 하중 신호를 빼냄으로써, Fig. 7이 얻어진다. 여기서 한 가지 문제점은 변위의 원점에서 하중이 0이 되지 않는다는 점과 띠 굽힘 시편이 완전히 파단된 후의 하중도 0이 되지 않는다는 점이다. 이는 시편이 있을 때와 없을 때의 시험 시에, 서로 간의 상당한 시간 차이가 있고, 이 시간 차이 동안에 열적 흐름에 의한 노이즈가 누적되었기 때문인 것으로 생각된다. 본 연구에서는 열적 흐름에 대한 선형 보상법 (linear compensation)을 적용하여, 변위의 원점에서 하중이 0이고, 파단 후에도 하중

이 0이 되도록 하는 열적 흐름량을 계산하고 이를 원래 하중-변위 그래프에서 보상함으로써 Fig. 7와 같은 그래프를 얻었다.

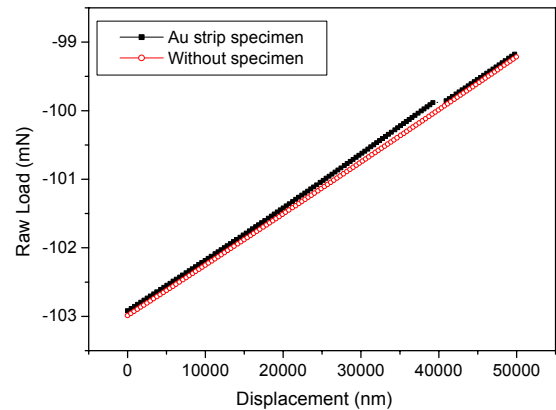


Fig. 6 Raw load signals measured by nanoindenter.

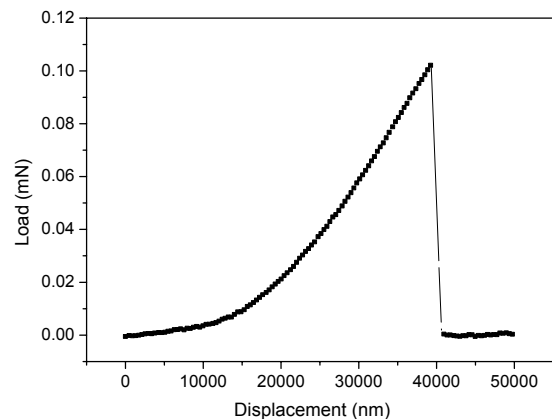


Fig. 7 Applied load vs. displacement curve for Au strip specimen.

4.2 시험 결과

총 6 개의 Au 띠 굽힘 시편을 시험하였다. 이 중 열적 흐름이 선형적이지 않아서 띠 굽힘 시편에 가해지는 하중과 변위를 정확하게 산출할 수 없는 2 개의 시편의 데이터를 제외하였다. 나머지 4 개의 시편에서 얻어진 데이터에 대하여 앞서 제시한 환산 과정을 거쳐서 하중과 변위 관계 그래프를 얻었고, 이를 Fig. 8에 나타내었다. 시험에 사용된 띠 굽힘 시편의 두께는 100 nm이며, 이는 Au 박막의 증착 장비에 부착된 두께 모니터 (thickness monitor)에서 얻어진 값이다. 띠 굽힘 시편의 길이와 너비는 각각 0.430 mm, 0.01046 mm이며, 이는 SEM (Scanning Electron Microscope)으로 측정된 값이다.

하중-변위 곡선으로부터 응력-변형을 관계 곡선을 얻는 과정은 Fig. 9에 나타나 있다. Espinosa 등 [3]은 변형을 정확하게 측정하기 위하여 시편에 하중이 가해지는 방향과 반대 방향에서 간접 대물

렌즈를 사용하였지만, 본 연구에서는 시편의 변위 (δ)가 정확하게 측정된다는 점을 이용하여 시편의 기하학적인 형상과 변위로부터 변형율을 계산하는 방법을 사용하였다. 2.3 절에서 기술된 절차를 따라 Au 띠 굽힘 시편에서 측정된 탄성 계수, 초기 응력, 항복 강도, 인장 강도를 구할 수 있다. Fig. 8 에 나타난 4 개의 시편에 대하여 평균하면, 탄성계수는 27 GPa, 초기 응력은 14 MPa, 항복 강도는 237 MPa, 인장 강도는 289 MPa 를 얻을 수 있다.

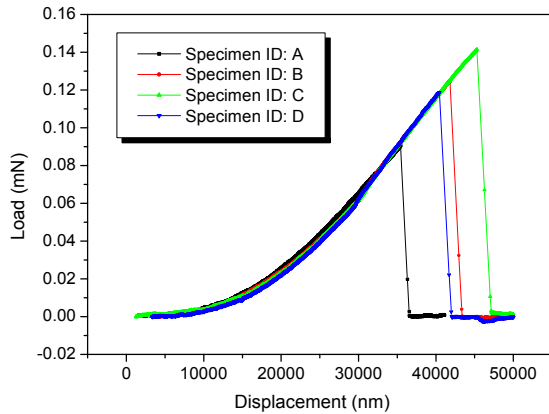


Fig. 8 Applied load-displacement curves for Au strip bending specimens

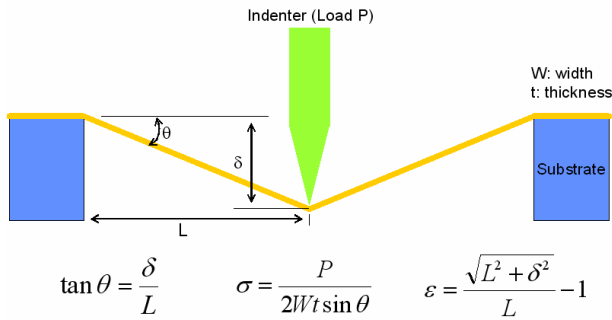


Fig. 9 Estimation method for stress and strain in strip bending test

4.3 결과 토의

본 연구에서 측정된 Au 박막의 탄성계수는 27 GPa 로서, 거대 재료의 탄성계수 78 GPa [4]보다 매우 작다. 또한, Espinosa 등[3,5]이 보고한 500 nm 두께의 Au 박막의 탄성계수 54 GPa 보다도 작은 값을 가진다. 이러한 결과가 나온 이유는, 현재의 실험 장비로는 시편의 변형율을 직접 측정할 수 없기 때문에, Fig. 9 와 같이 시편 전체의 변형율이 균일하다는 가정하에 변형율을 산출하였기 때문인 것으로 생각된다. 실제 시편의 고정단에서는 변형율이 균일하지 않고, 큰 변형을 구배가 발생할 수 있다. 정확한 탄성계수 측정을 위해서는 변형율 측정을 좀더 보완해야 할 필요가 있다.

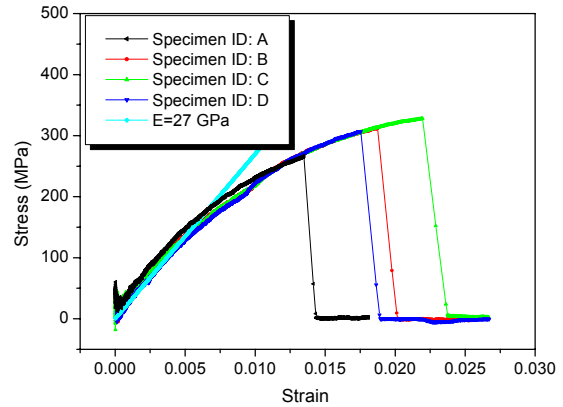


Fig. 10 Stress-strain curves for Au strip bending specimens

5. 요약 및 결론

띠 굽힘 시험법을 이용하여 100nm 두께의 금 박막에 대한 기계적 물성 측정을 시도하였다. 탄성 계수, 박막의 초기 응력, 인장 및 항복 강도 등을 측정할 수 있었다. 기존에 발표된 결과보다 더 얇은 박막의 물성을 측정할 수 있었지만, 실험 기법 상 변형율 측정에 있어서 좀더 보완이 필요하다는 점을 알았다.

후 기

본 연구는 21 세기 프론티어연구개발사업인 나노메카트로닉스기술개발사업단의 연구비 지원 (04-K14-01-013-1-0)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) NSTC, 2000, "National nanotechnology initiative".
- (2) Westmoreland, P.R., Kollman, P.A., Chaka, A.M., Cummings, P.T., Morokuma, K., Neurock, M., Stechel, E.B. and Vashishta, P., 2002, "Application of molecular and materials modeling," WTEC Panel report.
- (3) Espinosa, H.D., Prorok, B.C. and Fischer, M., 2003, "A methodology for determining mechanical properties of freestanding thin films and MEMS materials," Journal of the Mechanics and Physics of Solids 51, pp. 47-67.
- (4) Nix, W., 1989, "Mechanical properties of thin films," Metallurgical Transaction A20, pp. 2217-2245.
- (5) Espinosa, H.D., Prorok, B.C., and Peng, B., 2004, "Plasticity size effects in free-standing submicron polycrystalline FCC films subjected to pure tension," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, in press.