

# 나노압입 유기된 소성변형역 크기 측정에 기반한 박막소재의 항복강도 평가

이윤희 · 김주영\* · 허용학 · 남승훈 · 권동일\*

한국표준과학연구원 삶의질표준부 안전그룹  
\*서울대학교 재료공학부

## Strength Assessment of Thin Films Based on the Measurement of Nanoindentation-induced Plastic Deformation Zone

Yun-Hee Lee, Ju-Young Kim\*, Yong-Hak Huh, Seung-Hoon Nahm, and Dongil Kwon

Division of Metrology for Quality Life, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-340 Korea  
\*School of Materials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742 Korea

**Abstract** : Surface yield strength can be estimated by considering the force equilibrium around an indentation-induced plastic zone; the plastic zone dimension is a key information for this analysis. However, conventional approach has analogized the plastic zone radius from few cross-sectional line profiles of the remnant indent and yielded erroneous strength result. Thus, we tried to extract a two-dimensional closed boundary of the plastic zone in this study by plotting a contour graph for the surface pile-up. This image processing was applied to the strength characterization of 1.0  $\mu\text{m}$ -thick Au film on Si substrate. However, shallow indentation for film-only deformation brought about weak surface pile-up, thereby producing the strength overestimation compared to the microtensile results. In order to explain this discrepancy we introduced the concept of impression volume conservation and redetermined an extent of the hemispherical elastic/plastic boundary. Based on the modified data, the recalculated yield strength at 1.0 mN was  $255.5 \pm 37.2$  MPa, comparable with the microtensile strength 243 MPa. This testing result confirms validity of the modified characterization method for the indentation-induced plastic zone.

(Received July 29, 2006)

**Key words** : nanoindentation, yield strength, pile-up contouring, impression volume conservation, matlab® visualization tool.

### 1. 서 론

최근 나노압입시스템과 원자현미경(atomic force microscope)의 복합화 추세에 따라서 표면 변형에 대응하는 압입하중과 침투깊이 정보뿐만 아니라 잔류압흔의 3차원 형상정보를 획득하는 것이 용이해졌고, 이로 인해 나노압입시험은 박막의 기계적 특성을 평가하는 경제적이고 보편적인 방법으로 활용 폭이 넓어지고 있는 추세이다. 나노압입곡선의 분석을 통해 경도와 탄성계수를 평가 [1,2]하는 수준을 넘어 넘어 압입하중 인가곡선의 응력민감도를 이용하여 박막의 잔류응력을 정량적으로 측정하는 것도 가능하다 [3,4].

특히 미세기전소자(MEMS)와 같이 반복·가역적인 구동을 동반하는 소자를 제작하는 경우 적용박막의 탄성물성과 항복강도 자료를 확보하는 것이 중요하며, 가장 간단한 측정개념은 기존 표준역학시험 관련 치수를 마이크로 수준으로 떨어뜨리는 방법이다. 즉 마이크로 인장이나 굽힘시험을 통해 박막의 탄성계수와 항복강도를 평가하는 연구들이 수행되어왔다 [5,6]. 그러나 이들 시험기법들은 정밀한 하

중/면위측정센서와 구동액츄에이터를 구비한 역학시험시스템을 요구하고, 표면 미세가공 등을 통해 특정 형상의 자유막 시편을 제작해야 된다는 점에서 경제성이 떨어지는 측면이 있다. 따라서 구형 압입자를 적용한 압입시험을 통해 일축 인장시험에서 얻어지는 진응력-진변형률의 관계를 유추하는 연구들이 진행되고 있다 [7,8]. 그러나 구형압입시험을 통한 항복강도 및 유동특성의 측정은 벌크 금속의 경우 타당성이 확립되어 있으나 박막과 같이 제한된 소재에 적용하기 위한 최적의 압입자 직경, 마이크로 압입자의 진원도 가공, 대표응력/변형률 정의 및 오프셋 방법을 통한 항복강도 결정의 타당성 등에서 논란의 여지가 있어 적용의 한계를 나타내고 있다.

본 연구에서는 보편적인 삼각뿔 압입자를 적용한 나노압입시험 결과로부터 박막의 항복강도를 평가하는 방법을 고려하였다. 압입시험에 의해 유기된 소성역(indentation-induced plastic zone)의 크기와 항복강도를 관련짓는 연구는 Harvey 등[9,10]에 의해 시도되었다. 그림 1과 같이 등방성 압입변형에 의해 압흔부 하부에 반경  $c$ 의 반구형태의 소성역 발생을 가정하였고, 이 영역의 구체적인 크기는 압흔 주위의 소성변형에 의한 pile-up 영역의 크기로 근사하

Corresponding author : Yun-Hee Lee  
[Tel.: 82-42-868-5385, E-mail: uni44@kriss.re.kr]

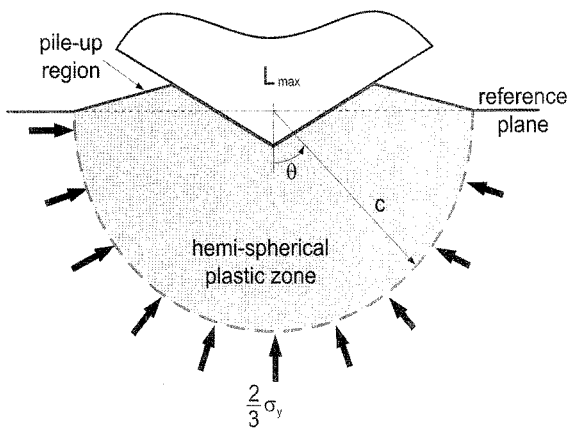


Fig. 1. Force equilibrium around the hemispherical plastic zone beneath surface pile-up.

었다. Pile-up 영역의 크기를 결정하기 위하여 압흔을 가로 지르는 몇 개의 선형 프로파일(cross-sectional line profile)이 형성되었으며, 이로부터 확인되는 pile-up의 전형적인 형상은 압입자와 시편의 접촉영역 외각에서 최고점이 나타난 이후에 완만히 감소하여 압입 전의 기준 표면(reference plane)으로 수렴한다. 즉 z축 방향으로의 높이상승이 사라지는 최외각 경계에서 소성역 반경을 결정하였다. 소재가 강소성(rigid plasticity) 및 등방적인 변형을 한다면 압입자를 통해 인가된 하중은 반구형 탄/소성역 경계면적과 이 경계면에 수직으로 존재하는 방사상 응력의 곱에 의해 지탱된다. 즉 그림 1과 같이 소성역 상부의 압입하중과 하부의 방사상 지탱하중 사이의 힘 평형(force equilibrium)을 고려하면 항복강도  $\sigma_{ys}$ 는 식 (1)로 정의된다 [9,10]. 식 (1)의  $L_{max}$ 는 최대 인가하중을 나타내고, 탄/소성역 경계의 방사상 응력  $\sigma_r$ 은 Hill의 구형공동모델(spherical cavity model)에 의해  $2\sigma_{ys}/3$ 로 주어진다 [11].

$$\sigma_{ys} = \frac{3L_{max}}{2\pi c^2} \quad (1)$$

그러나 일반적인 박막은 강한 섬유상 조직과 표면 거칠기, 잔류응력, 기판 영향으로 인해 비등방적이고 불규칙한 재료쌍임 양상을 나타내기 쉬우며, 단지 몇 개의 단면 프로파일 만으로 소성변형의 3차원적인 크기를 묘사하기에는 부족한 면이 있다.

따라서 본 연구에서는 원자현미경을 통해 잔류압흔의 3차원 형상을 관찰하고, 등고선 분석결과와 원래 기준표면이 만나는 지점들을 연결함으로써 소성역 경계를 몇 개의 점이 아닌 2차원적인 폐곡선(2-dimensional closed loop)으로 연고자 하였다. 또한 얇은 압입에 의해 유기된 미미한 pile-up 영역경계가 표면조도의 중첩으로 불분명할 경우에는 부피보존 개념(volume conservation concept)을 적용함

으로써 원자현미경에서 관찰된 압흔 혹은 pile-up 부피로부터 반구형 소성역 크기를 계산할 수 있는 방법을 제시하였다. 이상 압입 소성역 크기 측정법을 Au 박막의 항복강도 측정에 적용하였으며, 결과치를 동일 Au 자유막의 마이크로 인장시험 결과와 직접 비교함으로써 새롭게 제안된 방법의 타당성을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

나노압입시험을 위한 Au 박막은 스퍼터링 방식으로 Si 기판 위에 약 1.0  $\mu\text{m}$  두께로 증착하였으며, PSIA사의 XE100 원자현미경을 통해 3.8 nm의 평균 표면조도가 측정되었다. 나노압입시험은 Berkovich 삼각뿔 압입자를 부착한 MTS사의 Nanoindenter II를 이용하였으며, 압입하중은 1.0, 0.5, 0.25 mN로 결정하여 최대 압입깊이가 박막 두께의 약 10% 남짓이 되도록 제한하였다. 각 압입하중에서 5회 나노압입시험을 반복 수행하여 압입곡선을 얻었고, 원자현미경을 통해 관찰된 잔류압흔의 3차원 변형형상은 ASCII 파일로 저장하였다. ASCII 파일을 Matlab® 형상화 프로그램의 입력 자료로 사용하여 본 연구의 pile-up 기반 소성역 크기 및 압흔부피 분석을 수행하였고, 이로부터 획득된 결과를 식 (1)에 대입하여 최종 박막의 항복강도를 계산하였다. 본 연구에서 제안된 나노압흔 영상분석기술의 타당성을 확인하기 위하여 측정된 항복강도는 선행연구 [5]의 마이크로 인장시험 결과와 직접 비교하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 나노 압입곡선 분석을 통한 경도 및 탄성계수 측정

Au 박막의 나노압입시험에서 얻어진 압입하중-변위곡선들은 그림 2에 중첩하였으며, 1.0 mN의 최대하중에 대응하

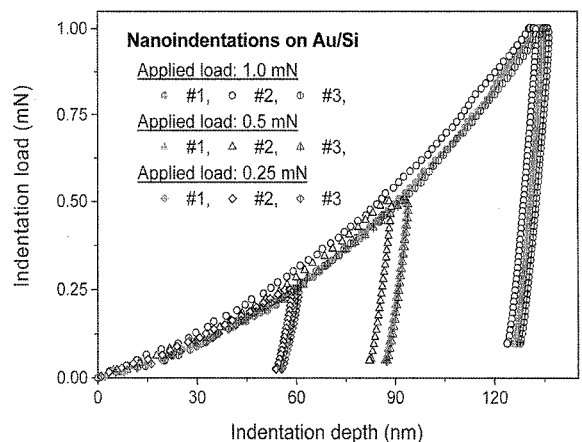
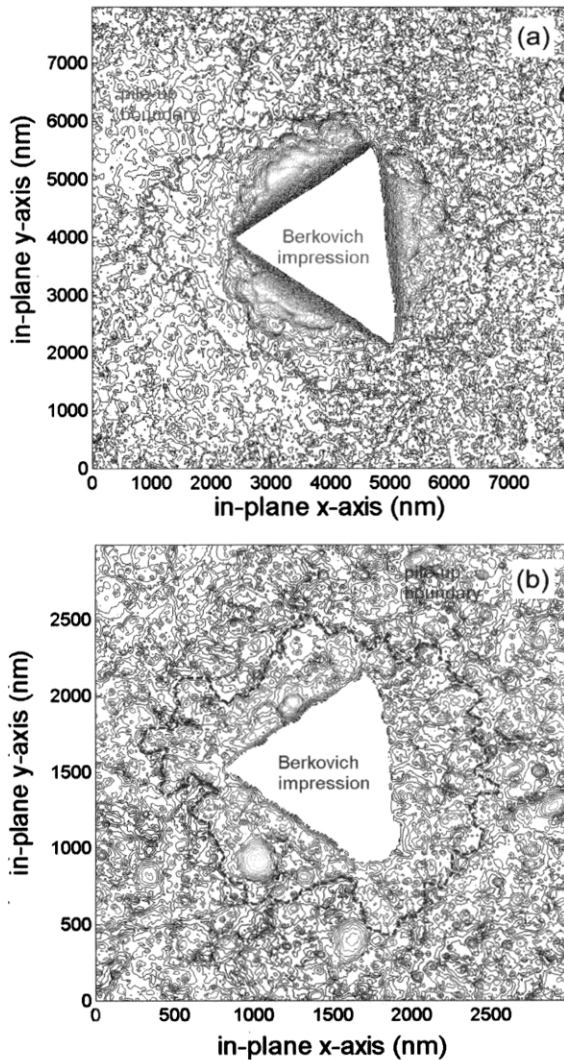


Fig. 2. Nanoindentation load-depth data of Au thin film on Si substrate.

**Table 1.** Contact properties analyzed from nanoindentation curves using Oliver-Pharr's method [2].

Peak load (mN)	Peak depth (nm)	Contact depth (nm)	Hardness (GPa)	Young's modulus (GPa)
1.0	135.9 ± 3.2	130.1 ± 3.2	1.40 ± 0.06	133.51 ± 5.37
0.5	93.7 ± 4.0	89.2 ± 4.0	1.30 ± 0.09	117.45 ± 4.99
0.25	60.3 ± 2.1	56.9 ± 2.1	1.31 ± 0.07	107.58 ± 5.40

**Fig. 3.** Pile-up boundary determination as a closed loop for (a) 8.0 mN and (b) 1.0 mN nanoindents.

여 박막 내로 삼각뿔 압입자가 약 130 nm 정도의 얇은 침투거동을 나타내었다. 그림 2의 압입하중제거 곡선을 Oliver와 Pharr가 제안한 방법 [2]을 이용하여 분석한 결과 표 1과 같이 압입하중 증가에 따라 경도와 탄성계수도 증가하는 양상을 나타내었다. 이 거동은 압입깊이가 얇아짐에 따라 표면조도 등에 의한 불완전한 압입과 소성변형량 감소 등의 영향으로 판단되며, 압흔 주변 pile-up 보정이 없는 Oliver와 Pharr의 방법 [2]으로 계산된 경도와 탄성계수는 크게 과대평가되었을 것으로 판단된다. 표 1의 나노 압

입곡선에서 분석된 평균 탄성계수치인 119.5 GPa에 비해 벌크상태의 Au 시편의 탄성계수는 78 GPa이고, 선행 마이크로인장시험 [5]에서 측정된 Au 박막의 탄성계수는 약 55 GPa로 결정되었다. 그림 3의 pile-up에 따른 접촉면적 증가를 선행연구 [12]에서 제안한 미분방법을 도입함으로써 재분석해 볼 수 있고, pile-up이 보정된 접촉면적은 Oliver와 Pharr의 곡선분석 결과치에 비해 약 1.37배 정도 증가한 것으로 나타났다. 실 접촉면적의 증가로 평균 탄성계수치는 100.3 GPa까지 떨어졌으나 마이크로인장시험 결과와는 큰 차이를 나타내었다. 이것은 Au 박막에서 빈번히 관찰되는 강한 섬유상 미세조직(texture microstructure) [13,14]과 소성변형장에 비해 방대한 압입유기 탄성변형장에서 나타나는 경질 기관의 영향 [15]으로 판단된다. 기관으로부터 Au 박막은 강한 주상조직(columnar microstructure)으로 성장하며 인장하중과 압입하중에 대응하는 탄성변형은 큰 차이를 나타낸다. 즉 마이크로인장시험을 수용하는 다량의 주상결정립계들이 탄성계수를 떨어뜨리는 반면에 압입시에는 접촉면적이 국소하고 결정립계면과 응력방향이 수직을 이루므로 인해 탄성계수의 저하가 미미하다. 또한 Au 박막 두께의 증가는 나노압입변형과 기관의 상호작용 [15]과 미세조직의 이방성 [16]을 떨어뜨려서 결과적으로 벌크 Au 시편의 탄성계수에 근접한 결과를 나타내는 것으로 보고되었다.

#### 표면 pile-up 관찰을 통한 소성변형 영역의 정밀측정

나노압흔 주변의 소성역 확장정도를 정밀하게 측정하기 위하여 기존 방식 [9,10] 대신에 그림 3의 등고선 그래프에서 최외각선을 pile-up 영역의 경계로 고려하여 폐곡선을 형성하였다. 그림 3(a)의 8.0 mN과 그림 3(b)의 1.0 mN 압입하중으로 형성된 압흔 등고선 그래프들을 직접 비교해 보면 높은 압입하중에 대응하는 뚜렷한 pile-up 변형에 비해 1.0 mN에서는 미미한 pile-up 변형을 확인할 수 있었다. 그림 3에서 점선으로 표시된 2차원 폐곡선 내부를 적분하여 pile-up 영역 혹은 표면에 노출된 소성역의 면적을 구하고, 이와 등가면적을 갖는 원을 고려함으로써 소성역 반경을 계산하여 그림 4에 나타내었다 (open circle 기호 참조). 0.25 mN에서 1.0 mN으로 압입하중이 증가함에 따라 압흔의 등고선 분석에서 파악된 소성역 반경은  $537.9 \pm 15.6$  nm

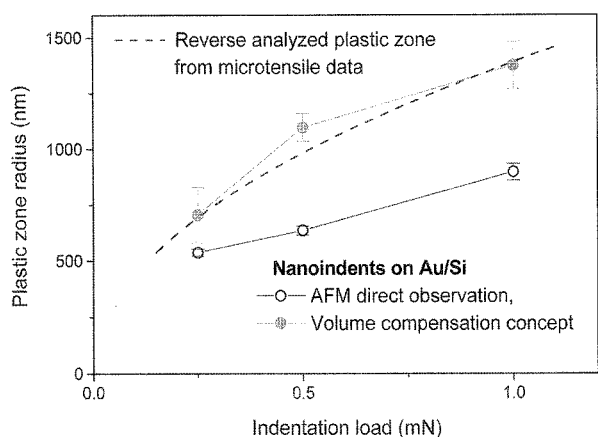


Fig. 4. Modification of plastic zone dimension by considering volume conservation model.

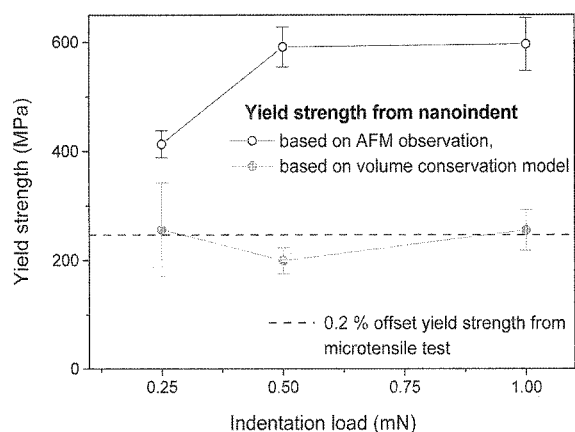


Fig. 5. Comparison of yield strengths from nanoindent image analysis and microtensile test.

에서  $896.8 \pm 38.2$  nm으로 선형적인 증가 양상을 나타내었고, 이 값을 식 (1)에 대입함으로써 얻어진 Au 박막의 항복강도는 그림 5에서 살펴보면  $595.96 \pm 48.76$  MPa에서 점차 감소하여 0.25 mN의 압입하중에 대응해서  $413.35 \pm 24.59$  MPa를 나타내었다 (open circle 기호 참조). 그러나 압입시험 측정치는 마이크로 인장시험 [5]에서 측정된 Au 박막의 0.2% 오프셋 항복강도인 243 MPa의 1.7배 이상의 높은 값을 나타내었다. 높은 압입하중에서 나타나는 항복강도의 과대평가는 Si 기판의 소성변형 구속에서 일부 원인을 찾을 수 있고, 0.25 mN의 낮은 압입하중에서 항복강도의 과대평가는 미미한 pile-up과 상대적으로 큰 표면조도의 영향이 서로 혼재되어 소성역 크기를 명확하게 결정하지 못한 데서 기인하는 것으로 판단하였다. 또한 박막의 이방성 [13,14]으로 인해 그림 1의 등방적인 반구형 소성역 확장이 일어나지 못하는 현상에서도 이유를 찾을 수 있다.

**압흔부피 수용기구를 고려한 소성역 반경의 보정**

따라서 본 연구에서는 압입시험 후 원자현미경을 통해 관

찰한 국소 표면변형 정보에 부피보존(material volume conservation) 개념을 복합함으로써 낮은 압입하중의 미미한 pile-up 특성에도 불구하고 타당한 소성역의 반경을 결정하기 위한 보정방법을 제안하였다. 평활한 시편표면에 압흔이 형성되면 압입자에 의해 압흔부피  $V_I$  만큼 밀려난 재료는 표면방향으로의 소재유동에 의한 pile-up 부피  $V_P$ 로 수용되거나 압흔 주위로 확장한 소성역 외각의 탄성변형에 의한 부피감소  $V_E$ 로 수용된다 [17]. 세라믹과 같이 소결기공(sintering pore)이 존재하면 집축압력에 의한 기공 압착으로 부피감소가 일어나나 Au와 같은 금속박막에서는 기공이 없는 것으로 가정할 수 있으며 압흔 부피는 위에 언급한 두 가지 기구로만 수용된다.

압입시험에서 발생하는 탄/소성 응력과 변형을 해석은 Hill이 제안한 구형공동모델 [11]을 통해 근사되었다. 강소성 소재 내에 존재하는 공동에 압력이 인가됨에 따라 주변 소재는 점차 탄성응력의 축적을 겪게 된다. 이들 응력성분간의 차이가 Tresca 항복조건을 만족하게 되면 공동 주변의 소성변형 영역이 점차 증가하게 된다. 소성변형 영역 외각의 탄성해로부터 식 (2)와 같은 형태의 방사상의 탄성변위  $u_r$ 이 계산된다 [11].

$$u_r = \frac{(1+\nu)\sigma_{ys}c^3}{3Er^2} \tag{2}$$

식 (2)로부터 반구형 소성역 외각의 탄성변형으로 수용되는 부피는 식 (3)으로 계산된다. 본 연구에서는 Au 박막의 이방성 및 두께제한 [13-15]으로 인해 등방성을 전제로 하는 구형공동모델 [11]에 대입할 박막 탄성계수의 결정이 곤란하였다. 따라서 이방적인 변형을 개선하기 위한 하나의 방안으로 마이크로 인장시험에서 결정된 탄성계수와 박막의 포와송 비인  $\nu = 0.3$ 을 식 (2)에 대입하였다.

$$V_E = \int_0^{\pi/2} 2\pi r^2 u_r \sin\theta d\theta = \frac{2\pi(1+\nu)\sigma_{ys}c^3}{3E} \tag{3}$$

식 (3)에서  $\theta$ 는 그림 1에 나타낸 바와 같이 압입축으로부터 표면으로 증가하는 각도를 나타낸다. 압흔부피의 수용 개념을 이용하여  $V_E$ 는  $V_I - V_P$ 로 나타낼 수 있고, 이 값들은 원자현미경을 통해 얻어진 3차원 형상 ASCII 자료로부터 계산된다. 그림 6(a)와 같이 그림 3(b)에서 압입에 의해 유기된 표면 형상변화만을 추출할 수 있고, 이를 그림 6(b)의 압흔부피  $V_I$ 와 그림 6(c)의 pile-up 부피  $V_P$ 로 분리하여 계산한다. 식 (1)의 항복강도 정의와 식 (3)을 결합함으로써 최종적으로 나노압입으로 유기된 소성역의 반경을 식 (4)로 표현할 수 있다.

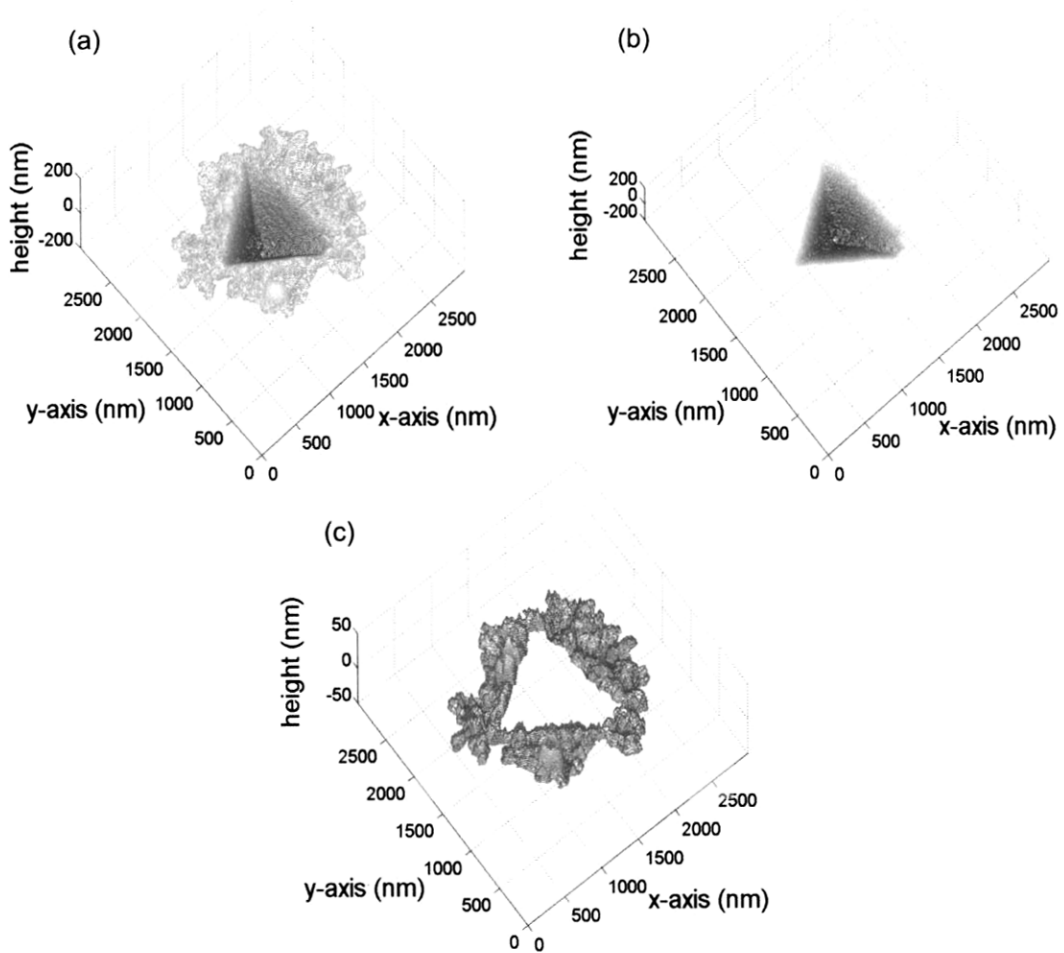


Fig. 6. Separation of (a) indentation-induced surface deformation into (b) impression volume and (c) surface pile-up volume.

$$c = \frac{(V_I - V_P)E}{(1+\nu)L_{\max}} \quad (4)$$

그림 6과 같은 절차를 통해 개별 압흔으로부터  $V_I - V_P$ 를 계산하였고, Au 박막의 탄성물성을 식 (4)에 대입하여 각 압입하중에 대응하는 압입유기 소성역 반경을 보정하였고, 새롭게 평가된 결과를 그림 4에 중첩하여 비교하였다 (solid circle 기호 참조). 식 (1)과 동일하게 소성역 반경이 압입하중의 1/2승에 비례하는 거동을 나타내었고, 덧붙여 마이크로 인장시험 [5]의 항복강도 243 MPa를 식 (1)에 대입함으로써 역으로 추정해 본 소성역 반경의 추이(그림 4의 점선)와도 일치함을 확인할 수 있었다. 원자현미경을 통해 직접 관찰한 소성역 반경에 비해 새롭게 보정된 소성역의 크기가 훨씬 큰 양상을 나타내었다. 이것은 연결 Au 박막의 경우 압입축 방향의 압축 유동이 심하게 나타나고 하중제거시의 탄성적인 회복이 적기 때문에 원자현미경을 통해 관찰한 크기에 비해 표면하부의 소성역은 훨씬 크게 확장될 수 있음을 나타낸다.

그림 4의 보정된 소성역 반경을 식 (1)에 다시 대입함으

로써 Au 박막의 항복강도를 결정할 수 있었으며 그림 5에서 마이크로 인장시험의 항복강도와 직접 비교하였다. 부피보존 개념을 적용하여 이방적인 소성역 형태와 소성역 반경을 보정함으로써 얻어진 항복강도 (solid circle 기호 참조)는 0.5 mN에서 얻어진 결과를 제외하고는 점선으로 나타낸 마이크로 인장시험치와 완전히 일치하는 양상을 나타내었다. 즉 그림 3에서 관찰할 수 있는 바와 같이 pile-up 영역이 협소하고 시편이 가지고 있는 원래 표면조도와 비교해 뚜렷한 차이를 나타내지 못할 경우에는 식 (3)과 (4)에 함축된 압흔 부피보존 개념을 도입함으로써 이론적으로 등방적 변형에 의한 반구형 소성역의 크기를 결정할 수 있으며, 식 (1)을 이용하여 좀 더 타당한 항복강도의 계산이 가능함을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

자유막 시편의 번거로운 미세가공과 실험실 수준에서 제작된 시험시스템의 낮은 구동신뢰성으로 인해 마이크로 인

장이나 굽힘을 통한 박막 항복강도는 한계를 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 마이크로 역학시험 분야에서 시스템의 안정성이 잘 확보되어 있다고 할 수 있는 상용 나노압입시스템을 이용하여 박막의 항복강도를 측정하고자 하였다. 특히 압입유기 소성역 주변의 힘 균형을 고려한 항복강도의 유도에서는 소성역 반경의 정확한 결정이 중요하기 때문에 본 연구에서는 잔류압흔 주변의 pile-up에 대한 등고선 분석과 압흔 부피보존 개념의 복합을 통해 기존의 단면 프로파일 측정의 부정확한 소성역 반경을 보정하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 Au 박막에 적용하여 측정된 항복강도와 마이크로 인장시험 결과를 직접 비교함으로써 새롭게 제시된 소성역 반경 보정방법의 타당성을 검증하였으며 구체적인 결과는 아래와 같이 정리할 수 있다.

1. 나노압입으로 발생한 소성역 크기는 일반적으로 원자 현미경을 통해 관찰한 압흔의 중심을 가로지르는 몇 개의 단면 선형 프로파일에서 결정되나 정확성이 떨어지는 관계로 본 연구에서는 잔류압흔 주변부를 3차원 등고선으로 나타냄으로써 소성변형에 의한 pile-up 경계를 2차원의 폐곡선으로 결정하는 방법을 제안하였다.

2. 뿐만 아니라 미미한 표면 pile-up 경계가 박막 표면조도의 영향으로 가려지는 얇은 압입의 경우 압흔 부피가 pile-up 부피와 반구형 탄/소성역 경계의 탄성 압축으로 수용된다는 부피보존 개념을 적용함으로써 소성역 반경을 보정하는 방법을 제안하였다.

3. 정밀한 소성역 반경 결정을 위한 이상의 보정 방법들을 Au 박막 표면에 형성된 나노압흔의 형상분석에 적용하였다. 우선 3차원 압흔 형상에 등고선을 추가함으로써 결정된 소성역 반경은 Au 박막의 항복강도를 크게 과대평가하였다. 이것은 Au 박막의 섬유상 조직에 따른 이방적인 소성변형의 영향으로 판단되었다.

4. 등고선 분석 결과에 부피보존 개념과 나노압입시험에서 얻어지는 이방성이 큰 탄성계수 대신에 마이크로 인장시험에서 얻어진 탄성계수를 대입한 소성역 보정법 적용함으로써 Au 박막의 새로운 등방향 반구형 소성역 반경을 결정하였으며 마이크로 인장시험에서 얻어진 항복강도치와 일치하는 강도값을 측정함으로써 본 연구에서 제안된 새로

운 소성역 결정법의 타당성을 실험적으로 확인할 수 있었다. 그러나 나노압입을 통한 박막 역학특성 분석에 있어서 섬유상 조직과 같은 이방성이 탄/소성 변형에 끼치는 영향 분석은 향후 심도있게 다뤄져야 할 주제로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 21세기 뉴프론티어 사업의 일환인 나노메카트로닉스 연구과제 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. M. F. Doerner and W. D. Nix, *J. Mater. Res.* **1**, 601 (1986).
2. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.* **7**, 1580 (1992).
3. Y. H. Lee and D. Kwon, *J. Mater. Res.* **17**, 901 (2002).
4. Y. H. Lee, W. Ji, J.-h. Jeong, and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **40**, 744 (2002).
5. Y. H. Huh, D. I. Kim, J. H. Hahn, G.-S. Kim, C.-D. Kee, S. C. Yeon, and Y.-H. Kim, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **875**, O4.15.1 (2005).
6. D. Son, Y. H. Lee, J. H. Ahn, and D. Kwon, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **562**, 201 (1999).
7. E. C. Jeon, M. K. Baik, S. H. Kim, J. S. Park, and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **42**, 965 (2004).
8. Y. J. Park and G. M. Pharr, *Thin Solid Films* **447-448**, 246 (2004).
9. S. Harvey, H. Huang, S. Venkataraman, and W. W. Gerberich, *J. Mater. Res.* **8**, 1291 (1993).
10. D. Kramer, H. Huang, M. Kriese, J. Robach, J. Nelson, A. Wright, D. Bahr, and W. W. Gerberich, *Acta Mater.* **47**, 333 (1998).
11. R. Hill, *The Mathematical Theory of Plasticity*, 5th ed., p. 97, Oxford Univ. Press, London (1971).
12. Y. H. Lee, J. Y. Kim, Y. I. Kim, S.-H. Nahm, and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **44**, 485 (2006).
13. S. W. Han, H. W. Lee, H. J. Lee, J. Y. Kim, J. H. Kim, C. S. Oh, and S. H. Choa, *Current Appl. Phys.* **6S1**, e81 (2006).
14. D. Faurie, P. O. Renault, E. Le Bourhis, and Ph. Goudeau, *Acta Mater.* **54**, 4503 (2006).
15. Z. H. Xu and D. Rowcliffe, *Surf. Coat. Technol.* **157**, 231 (2002).
16. S. H. Lee and N.-J. Park, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **44**, 556 (2006).
17. Y.-H. Lee and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **41**, 104 (2003).