

## 나노압흔의 3차원 형상분석을 통한 압입경도의 정밀측정

이윤희 · 김주영\* · 김용일 · 남승훈 · 권동일\*

한국표준과학연구원 삶의질 표준부 안전그룹  
\*서울대학교 재료공학부

### Accurate Measurement of Indentation Hardness through a Three-dimensional Analysis for a Nanoindent Morphology

Yun-Hee Lee, Ju-Young Kim\*, Yong-Il Kim, 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 :** The material pile-up around indenter/surface contact region can make the conventional Oliver and Pharr's analysis of the nanoindentation curve inaccurate. We suggests a novel methodology for characterizing pile-up incorporated contact properties by adopting the Matlab® visualization tool in this study. Based on our approximation of contact boundary as peak of the pile-up region, radial indentation surface profiles observed with an atomic force microscope are differentiated with the distance from the indent center and a closed contact boundary is formed by connecting special differentiated points having their values as zero. The calculated load-off hardness was nearly consistent with the result of nanoindentation curve analysis for pile-up free material such as fused quartz. This experimental result supports validity of the newly proposed method. However, the load-off hardness of metallic solids such as (100) tungsten monocrystal and pure copper showed that the nanoindentation curve analysis could overestimate the hardness more than 50% in the cases of severe pile-up.

(Received April 9, 2006)

**Key words :** Nanoindentation, Material pile-up, Load-on/load-off hardness, Matlab® visualization tool

## 1. 서 론

합금 개발이나 대형 설비구조재 선정과 같이 국한된 필요성을 갖던 소재의 역학물성 평가는 최근들어 다양한 기능성 소재들의 출현과 이종소재 간의 접합 및 복합화에 따라 수요영역이 방대하게 확대되는 새로운 국면을 맞게 되었다 [1,2]. 새로운 수요를 만족시키기 위해 역학시험은 아래의 구비조건들을 만족시켜야 한다. 우선 코팅이나 복합소재에 적용하기 위해서는 국소영역의 시험이 가능해야 하며, 운용 중인 설비 및 구조물의 열화 및 안전성 진단을 위해서 in-situ 비파괴 시험이 가능해야 한다. 또한 시험기법 관련 연구영역이 아니라 실 생산라인 및 산업 현장의 품질관리와 진단에 적용하기 위해서는 전문가가 아니더라도 손쉽게 경제적으로 다룰 수 있고, 간단히 물성을 획득하거나 분석할 수 있어야 한다. 마지막으로 하나의 시험 진행만으로 다양한 변형 및 파괴 물성들을 얻을 수 있는 다목적 분석과정이 요구된다.

이러한 구비조건을 만족시키는 역학시험기법의 하나로 압입경도시험(indentation hardness test)을 들 수 있다.

두 개의 구면이 탄성적인 접촉을 일으켰을 때의 응력 해에 대한 Hertz의 이론적인 연구 이후 구형, 사각피라미드형, 원뿔형의 경질 압입자(rigid indenter)에 추 하중(dead weight)을 인가하여 표면을 누르고, 잔류압흔(remnant indent) 크기를 광학적으로 측정하여 접촉압력 개념의 압입경도를 구하는 실험적인 연구들이 이어졌다 [3]. 압입경도 시험에서 가장 중요한 절차는 압흔 대각선 길이나 직경 측정에 기반한 접촉면적의 결정이다. 즉 그림 1과 같은 Vickers 사각 압흔의 경우 두 대각선 길이를 광학현미경으로 측정하게 되지만, 소재의 가공경화 정도에 따라 압흔 주위에 pile-up이나 sink-in이 발생하게 된다 [4-7]. Chaudhri와 Winter의 연구 [4]에 따르면 압흔 주위의 pile-up 부위 역시 압입하중의 일부를 지지하는 것으로 확인되었으며, 이에 따라 정확한 접촉면적의 평가를 위해서는 대각선 길이와 함께 pile-up이나 sink-in 부위의 명확한 기하학적 형상정보를 분석하는 것이 필요하다.

1980년대 이후로 마이크로 이하의 두께를 갖는 박막의 역학특성을 압입경도시험법으로 측정하고자 하는 시도들이 있었다 [8-10]. 그러나 수백 나노미터 이하의 얇은 압입자 침투로 발생하는 압흔은 매우 작아서 광학현

Corresponding author: Yun-Hee Lee

[Tel.: 82-42-868-5385, E-mail: uni44@kriss.re.kr]

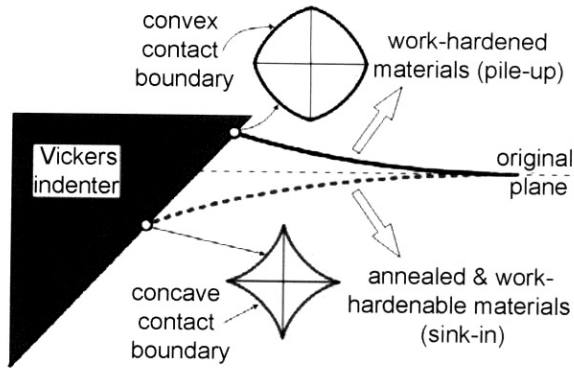


Fig. 1. Pile-up or sink-in response according to work hardenability of a material.

미경 적용이 불가하였고, 일일이 주사전자현미경(scanning electron microscope)을 이용한 접촉면적 측정도 압입시 힘이 갖는 간편성과 경제성을 저해하는 문제점이 있었다. 이에 따라 압입자에 의한 시편 표면의 변형과 회복 과정을 압입하중-변위곡선으로 연속적으로 측정하는 계장화 압입기술(instrumented indentation technique)이 도입되었다 [8-10]. 통상 나노압입시험(nanoindentation test)으로 불리는 박막의 계장화 압입시험을 통해 압입자가 침투하는 단계의 하중인가곡선과 압입자가 시편표면으로부터 후퇴하여 회복하는 단계의 하중제거곡선이 얻어진다. 특히 탄성회복 정보를 포함하는 하중제거곡선을 Doerner-Nix [9] 혹은 Oliver-Pharr 방법 [10]을 이용하여 분석함으로써 최대하중에서의 접촉깊이 계산이 가능하다. 그러나 이 기법들은 하중제거곡선을 압입하중에 따른 압흔 주위의 탄성적인 표면굽힘이 회복되는 과정으로 설명하기 때문에 압흔 주위의 pile-up에 따른 접촉면적의 변화는 전혀 설명할 수 없다. Bolshakov 등 [7]에 따르면 pile-up이 심할 경우 Oliver-Pharr 방법 [10]을 통해 결정한 접촉면적에 비해 실제 접촉면적이 50% 이상 큰 것으로 확인되었다.

최근 나노압입시스템과 원자현미경(atomic force microscope)의 복합화 추세에 따라서 잔류압흔의 3차원 형상정보를 획득하는 것이 용이해졌고, 이에 따라서 pile-up이 심한 몇몇 금속재의 압입경도를 하중제거곡선의 분석 대신에 잔류압흔의 분석을 통해 평가하고자 하는 연구들이 진행되고 있다 [6,11,12]. 그림 2와 같이 Berkovich 삼각뿔 압흔의 수선을 따라서 원자현미경의 line scan 기능을 이용하여 단면형상(cross sectional profile)을 얻고, pile-up 영역의 최고점을 압입자/시편 표면의 접촉경계로 가정함으로써 세 수선에 대응하는 6개의 접촉경계 점들이 결정될 수 있다. 접촉면적은 이들 접촉경계점들을 적절히 이어서 추정할 수 있으며, 직선으로 이어진

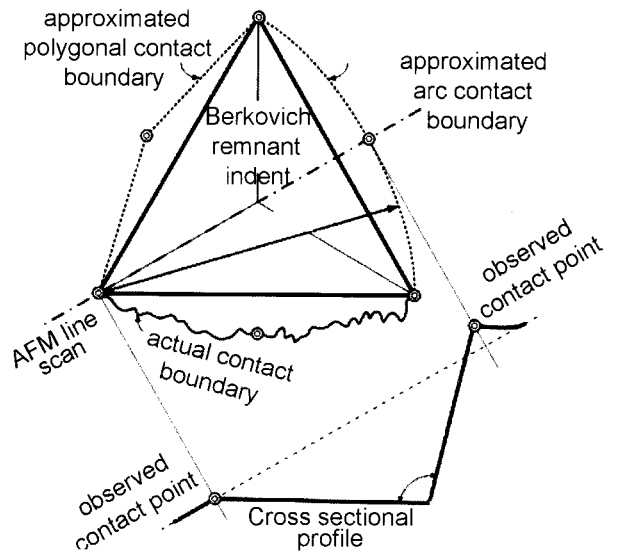


Fig. 2. Contact boundary approximation using peak contact points determined from AFM line scans.

다각형 접촉경계(polygonal contact boundary)를 얻는 대신에 Beegan 등 [12]은 그림 2에 나타난 것과 같이 삼각뿔의 두 꼭지점과 이들 사이에서 확인된 접촉경계점으로 곡률반경  $R_{arc}$ 의 호를 그려서 접촉경계(arc contact boundary)를 결정하였다. 그러나 그림 2의 바닥면에 묘사한 것처럼 실제 접촉경계는 압입축과 시편표면 간 수직도, 표면조도, 압입자 기학적적 불완전성, 소재 이방성 등 다양한 시험인자들에 의해 복잡한 형상을 갖기 때문에 단지 몇 개의 접촉경계점을 이어서 실제 접촉면적을 추정하는 데는 무리가 있을 수밖에 없다.

따라서 본 연구에서는 원자현미경을 통해 측정된 나노압흔의 형상을 Matlab® 전문 분석프로그램을 통해 3차원으로 형상화시키고, 접촉부 주위의 1차 미분으로 얻어진 최대값들의 궤적으로부터 2차원의 접촉경계 폐곡선으로 얻고자 하였다. 이를 바탕으로 하중제거 경도(load-off hardness)를 계산하였으며 기존의 Oliver-Pharr 압입곡선 분석방법 [10]을 통해 얻어진 하중 하 경도(load-on hardness)와의 비교를 통해 새롭게 제안된 방법의 타당성을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

압흔 주위의 pile-up 및 sink-in 등의 영향에 따른 접촉면적 및 압입경도의 변화를 확인하기 위하여 나노압입시험 시 시편 자체의 불균일성 등이 잘 배제될 것으로 판단되는 3 종류의 시편을 사용하였다. 나노압입용 표준시편으로 사용되어온 비정질 fused quartz는 결정립계와 같은 불균일 요소가 없고, pile-up이 거의 없기 때

문에 Oliver-Pharr 압입곡선 분석법 [10]을 통해 압입경도를 정확히 측정할 수 있는 소재 중 하나이다. (100) 결정방향성을 갖는 단결정 텅스텐은 결정학적인 이방성이 낮기 때문에 거의 등방적인 변형이 나타날 것으로 기대된다 [13]. 마지막으로 99.9% 순도의 구리 시편은 뚜렷한 pile-up 양상을 대별할 것으로 판단된다.

나노압입시험은 정전기력 액츄에이터로 구동되는 Hysitron 사의 Triboindenter를 사용하였다. 이 시스템의 하중 및 변위 분해능은 약 100 nN과 0.1 nm 이며, 무부하 압입시험(air indentation)을 통하여 액츄에이터와 하중/변위 센서의 자체교정(self-calibration)을 거쳤으며, Berkovich 삼각뿔 압입자의 실제 형상도 fused quartz 표준시편에 대한 다중 나노압입시험을 통해 보정하였다. 250 μN/sec의 압입속도를 공히 사용하였으며, 압입하중은 fused quartz에는 10000, 6000, 3000, 1000 μN을 인가하였고, (100) 텅스텐에는 6000, 2500, 1000 μN을 인가하였으며, 마지막으로 순 구리에는 2000, 1500, 800, 400 μN을 인가하였다. 각 조건에서 5회 나노 압입 시험을 반복 수행하였으며, 최외각에 편재된 곡선을 제외한 압입곡선들로부터 Oliver-Pharr 분석법 [10]을 통해 하중 하 경도를 계산하였다. 나노압입시험 후 잔류압흔의 변형형상은 압입시스템에 장치된 원자현미경을 이용하여 관찰하였고, 3차원적인 형상정보는 ASCII 파일로 저장하였다. ASCII 파일을 Matlab® 형상화 프로그램의 입력 자료로 사용하여 본 연구의 압흔분석을 수행하였고, 최종적으로 하중제거 경도를 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 압입하중-변위곡선 분석을 통한 하중 하 경도 평가

Oliver와 Pharr [10]는 하중제거곡선을 최대하중 이후 압입자가 시편 표면으로부터 이탈함에 따라 발생하는 표면의 회복반응으로 판단하고, 초기 하중제거곡선의 선형적인 회복거동과 압입자의 기하학적 형상인자를 이용하여 접촉깊이  $h_c^{0-p}$ 의 평가식 (1)을 제안하였다.

$$h_c^{0-p} = h_{peak} - \omega(h_{peak} - h_i) = h_{peak} - \omega\left(\frac{L}{S}\right) \quad (1)$$

Berkovich 압입자에 대해  $\omega$ 는 0.72이며 S와  $h_i$ 는 그림 3(a)에 나타낸 것처럼 각각 하중제거곡선의 초기 기울기와 접선을 외삽하여 압입깊이 축과 만나는 점인 절편깊이(intercept depth)를 나타낸다. 삼각뿔 압입자의 고유형상은 지정되어 있으나 수백 nm 이내의 침단은 다이아몬드 가공의 한계와 결함으로 인해 무더진 형상을 갖고 있기 때문에 하중 하 투영접촉면적(load-on projected

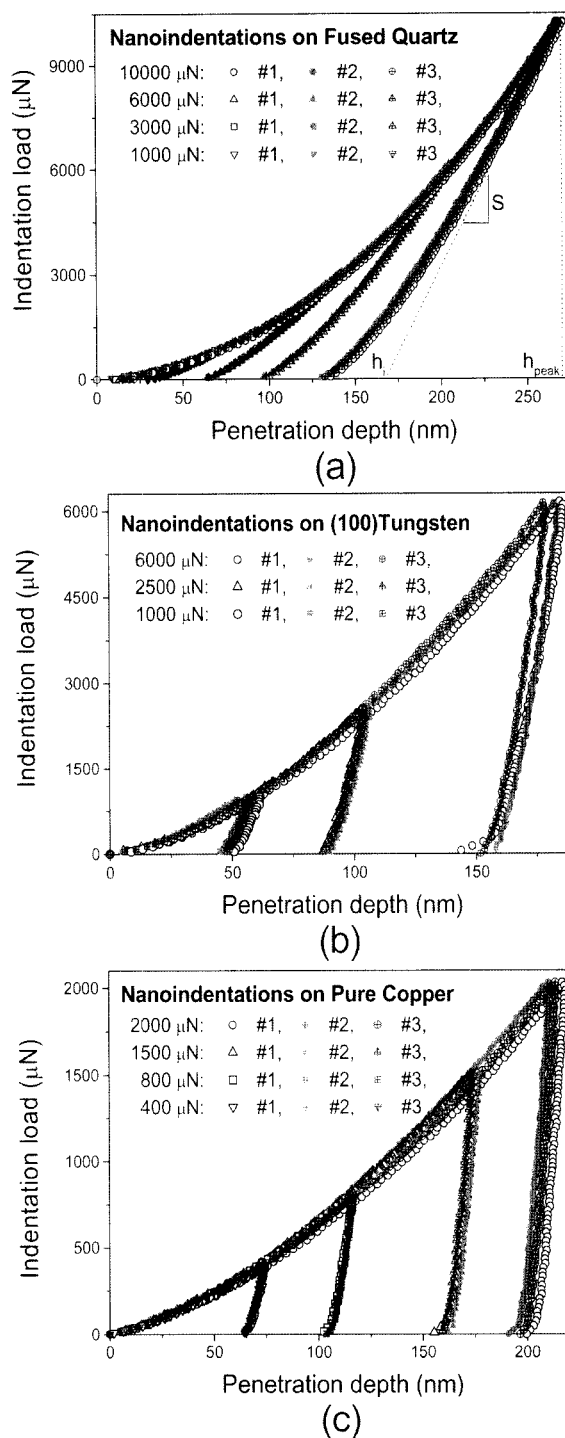


Fig. 3. Nanoindentation curves obtained from (a) fused quartz, (b) (100) tungsten monocystal, and (c) pure copper.

contact area,  $A_c^{on}$ )을 접촉깊이  $h_c^{0-p}$ 의 실험적인 교정함수로 표현하여 사용한다. 식 (2)와 같이 인가하중을 구해진 투영접촉면적으로 나누어 압입경도를 측정한다.

$$H = \frac{L}{A_c^{on}} \quad (2)$$

기존의 나노압입곡선 분석을 통하는 압입경도 [10]는 식 (2)에서 확인해 볼 수 있는 바와 같이 하중 하 투영접촉

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

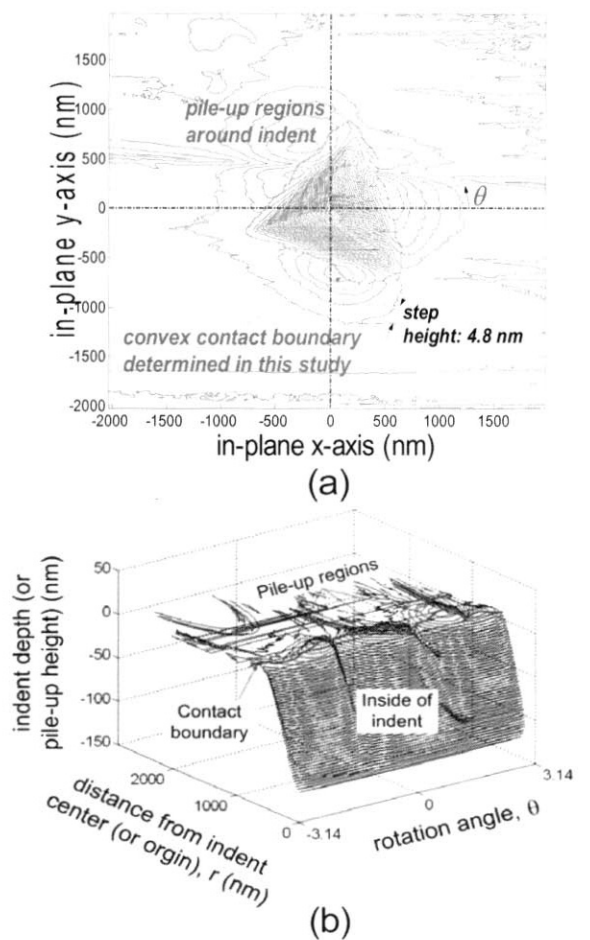
Specimen	Peak load ( $\mu\text{N}$ )	Peak indentation depth (nm)	Contact depth (nm)	Load-on hardness (GPa)
Fused quartz	10000	$269.9 \pm 2.0$	$192.0 \pm 2.3$	$10.0 \pm 0.2$
	6000	$206.5 \pm 1.0$	$144.0 \pm 1.4$	$10.2 \pm 0.2$
	3000	$143.2 \pm 0.4$	$97.4 \pm 0.5$	$10.4 \pm 0.1$
	1000	$78.5 \pm 0.3$	$50.9 \pm 0.3$	$10.9 \pm 0.1$
(100) Tungsten	6000	$180.4 \pm 6.8$	$165.9 \pm 6.0$	$7.6 \pm 0.5$
	2500	$106.7 \pm 2.4$	$96.9 \pm 2.4$	$8.4 \pm 0.4$
	1000	$60.4 \pm 2.6$	$53.4 \pm 2.6$	$9.1 \pm 0.7$
Pure copper	2000	$217.8 \pm 5.6$	$208.8 \pm 5.6$	$1.6 \pm 0.1$
	1500	$175.1 \pm 3.4$	$166.5 \pm 3.2$	$1.9 \pm 0.1$
	800	$116.2 \pm 1.8$	$109.3 \pm 2.1$	$2.1 \pm 0.1$
	400	$74.3 \pm 0.8$	$68.9 \pm 0.8$	$2.4 \pm 0.1$

면적을 사용하여, Vickers 압입경도 등 [3]에서 사용하는 하중제거 접촉면적(load-off contact area)과는 차이가 있다.

본 연구에서 사용한 3종의 소재에서 그림 3과 같은 나노압입곡선을 얻었고, 이를 식 (1)과 (2)를 이용하여 분석함으로써 표 1과 같은 접촉물성을 얻었다. 모든 시험재료에서 압입깊이의 감소에 따라 압입경도가 증가하는 압입크기효과(indentation size effect)가 나타났으며, 최대 인가하중에서 얻어진 하중 하 정도를 정리해 보면 fused quartz의 경우 10000  $\mu\text{N}$  압입하중에서  $10.0 \pm 0.2$  GPa이 얻어졌고, (100) 텅스텐 단결정의 경우 6000  $\mu\text{N}$  압입하중에서  $7.6 \pm 0.5$  GPa이 얻어졌으며, 마지막으로 순 구리의 경우 2000  $\mu\text{N}$  압입하중에 대응하여  $1.6 \pm 0.1$  GPa의 압입경도가 측정되었다. 식 (1)에서 살펴볼 수 있는 것처럼 접촉깊이  $h_c^{0-p}$ 는 최대 압입깊이  $h_{\text{peak}}$ 과 절편깊이  $h_i$  사이에 존재하며, 그림 1과 같이 pile-up이 존재하여 실 접촉깊이  $h_c$ 가  $h_{\text{peak}}$ 를 초과할 경우에는 정확한 접촉깊이의 평가가 불가능하다. 즉 pile-up을 동반하는 연질금속의 나노압입곡선을 Oliver-Pharr 방법 [10]으로 분석하면 접촉깊이의 과소평가가 발생하며, 이로 인해 압입경도의 과대평가가 발생한다. 이를 보완하기 위해 본 저자들은 선행연구 [13]에서 초기 Hertzian 탄성접촉이 발생하는 소재의 경우 탄성계수를 하중인가곡선에서 독립적으로 구하고, 역으로 하중제거곡선 분석에 대입함으로써 pile-up 효과가 보정된 접촉깊이 및 압입경도를 계산한 바 있다.

#### 잔류압흔의 3차원 형상 분석을 통한 하중제거 경도 평가

원자현미경에서 관찰된 압흔형상은 z축 방향으로의 높낮이 변화정보로 저장되며, Matlab®의 입력정보로 사용하여 (100) 텅스텐 소재에 6 mN으로 압입하였을 때의 압흔 형상을 그림 4(a)와 같이 3차원 등고선 그래프로 그릴 수 있었다. 그림 1에 나타낸 것과 같이 압입자/시편



**Fig. 4.** Remnant indentation morphologies formed at 6 mN on (100) tungsten monocrystal; visualizations (a) in rectangular coordinates and (b) in cylindrical coordinates.

간의 접촉외각부는 모호하고 완만한 변화를 보이기 때문에 정확한 접촉경계를 결정하는 것이 어렵다. Chaudhri 등 [6]에 의해서 접촉중앙부에서 접촉외각으로 진행하면서 기울기가 급변하는 지점을 접촉경계로 잡고

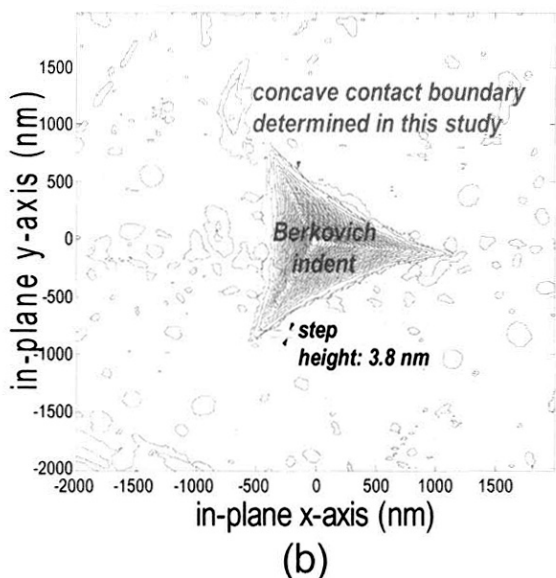
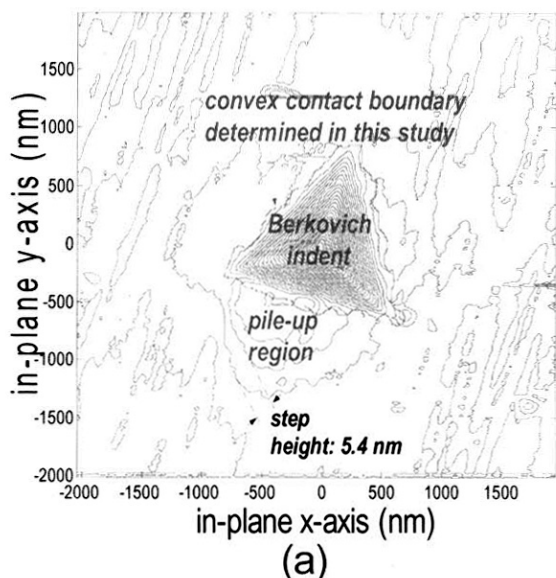


Fig. 5. Remnant indentation morphologies formed (a) on pure copper and (b) on fused quartz.

자 하는 연구가 있었으나 완만한 기울기 변화와 함께 접촉부의 복잡한 회복거동으로 인해 도리어 부정확해질 수 있으며, 따라서 본 연구에서는 Beegan 등 [12]이 제안한 것과 같이 pile-up 최고점을 접촉경계로 결정하는 방법을 사용하였다. 직교좌표에 나타내어진 그림 4(a)의 압흔중심을 원점(origin)으로 오프셋하고, 이를 원기둥 좌표계로 변환시켜서 그림 4(b)에 나타내었다. 압흔을 회전각도( $\theta$ -axis)에 따라 펼쳐서 압흔 중심으로부터의 거리에 따른 z축 높낮이 변화를 미분( $dz/dr$ )하였고, 미분치가 0이 되는 접촉부 가장자리 지점들을 연결한 폐곡선을 접촉경계로 결정하였다. 결정된 접촉경계를 그림 4와 같이 압흔의 등고선에 중첩하였을 때, 접촉경계는 예상과 동일하게 압흔에 근접한 pile-up의 최대점들을 통과하는 것

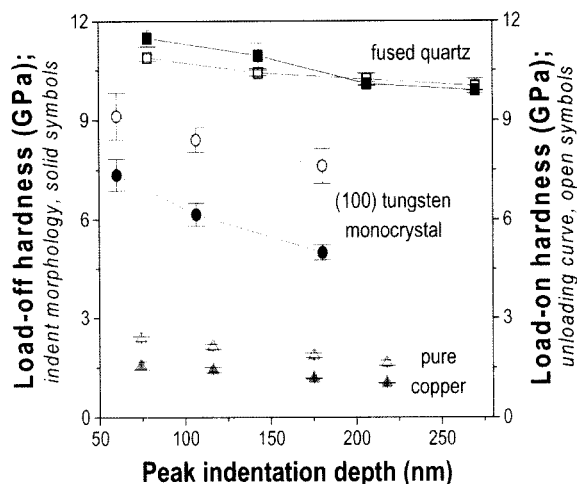


Fig. 6. Comparison of load-on and load-off hardnesses measured from Oliver and Pharr's nanoindentation curve analysis[10] and newly proposed remnant indent analysis, respectively.

으로 확인할 수 있었다. 또한 두드러진 pile-up 양상으로 인해 압흔의 세모서리가 외부로 돌출한 convex형 접촉경계가 나타났으나, Beegan 등 [12]에 의해 제안된 그림 2의 하나의 곡률반경을 갖는 호로 표현하기에는 무리가 있음을 확인할 수 있었다.

그림 5에는 순 구리, fused quartz의 압흔 분석에서 결정된 접촉경계 폐곡선을 그림 4(a)와 동일하게 중첩하여 나타내었다. 순 구리에서는 텅스텐 단결정과 유사한 pile-up 양상이 나타났지만, fused quartz의 경우 pile-up 거동이 거의 없는 concave 형상의 접촉경계가 확인되었다. 그러나 pile-up 혹은 sink-in 거동에 무관하게 본 연구에서 결정된 접촉경계는 압흔의 등고선도에서 확인할 수 있는 최대점들을 명확히 통과하고 있음을 다시 한 번 확인할 수 있었다. 그림 4(a)와 5에서 결정된 접촉경계 내부를 적분함으로써 하중제거 투영접촉면적(load-off projected contact area)을 계산할 수 있었다. 인가하중을 해석된 투영접촉면적으로 나누어 하중제거 경도를 계산할 수 있었다. 그림 6에는 Oliver-Pharr의 나노압입곡선 분석법 [10]으로 얻어진 표 1의 하중 하 경도(open symbols)와 본 연구에서 제안된 압흔의 3차원 분석방법으로 해석된 하중제거 경도(solid symbols)를 직접 비교하였다.

Fused quartz의 경우 탄성회복의 영향이 강한 얇은 압입깊이에서는 압흔분석을 통한 하중제거 경도가 과대평가되는 반면 깊은 압입깊이를 갖는 영역에서는 pile-up의 영향으로 인한 접촉면적 증가가 거의 없는 관계로 본 연구에서 구한 압입경도와 압입곡선 분석치가 동일한 양상을 나타내었다. (100) 텅스텐 단결정에서는 압입곡선 분석 결과에 비해 그림 4(a)의 두드러진 pile-up 영향으

로 인해 접촉면적의 증가와 압입경도의 감소가 뚜렷하게 나타났다. 특히 압입깊이가 감소함에 따라 압입경도가 증가하는 압입크기효과는 압입곡선 분석결과에 비해 본 연구에서 제안된 하중제거 경도에서 두드러지게 나타났다. 이 현상은 fused quartz에서의 양상과 마찬가지로 얇은 압입에서 강한 압흔 탄성회복의 결과로 판단된다. 마지막으로 순 구리에서도 pile-up의 영향으로 인해 잔류압흔 분석을 통한 압입경도가 압입곡선 분석치보다 낮은 값을 나타내었다.

이들 결과로부터 fused quartz와 같이 sink-in 양상이 강한 소재의 경우 고하중으로 압입시험에서는 본 연구에서 제안한 압흔분석법과 Oliver와 Pharr가 제안한 압입곡선 분석법 [10]이 함께 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다. 반면에 pile-up이 두드러진 금속소재의 경우 압입곡선 분석법은 근원적인 오류를 내포하기 때문에 본 연구에서 제안한 잔류압흔 분석기법을 통해 좀 더 정확한 압입경도의 분석이 가능할 것으로 사료된다. 특히 본 연구에서 제안한 잔류압흔의 3차원 분석기법은 국소 표면변형 및 강도특성 분석 연구는 물론 마모 및 피로 등과 같은 표면손상의 기구해석 등에 광범위하게 적용될 수 있는 가능성을 내포하고 있다.

#### 4. 결 론

박막이나 소재표면의 압입경도 측정은 보편적으로 나노압입시험과 탄성적인 하중제거곡선 분석을 통해 이뤄져왔으나 압입자/표면 접촉부 주위에 pile-up을 동반하는 연질 금속소재에서는 기존의 곡선분석방법이 잘못된 접촉면적을 평가함으로써 인해 적용상의 문제점이 증가하고 있는 상황이다. 본 연구에서는 원자현미경을 이용한 3차원 압흔 정보 확보와 Matlab® 영상분석기술을 접목하여 pile-up 존재에 상관없이 모든 소재의 접촉면적을 계산할 수 있는 방법을 제안하였으며, 몇 가지 대표소재에 적용하여 진행한 타당성 검증의 결과는 아래와 같이 정리하였다.

1. 압흔 주변의 pile-up은 압입하중의 일부를 지탱하며 압입자/소재 표면의 접촉경계는 pile-up 영역의 최고점으로 가정하였다. 즉 삼각뿔 압흔의 정중심으로부터 방사 방향으로 원자현미경에서 확보된 z-축 방향의 높낮이 정보를 거리로 일차미분하여 0이 되는 지점들을 연결하여 폐곡선을 형성하였다. 폐곡선 내부를 적분하여 접촉면적과 하중제거 경도를 계산하였다.

2. (100) 텅스텐 단결정, 순 구리 및 fused quartz에 대한 나노압입시험으로 형성된 3차원 압흔형상을 획득

하고, 미분 분석을 통해 접촉경계를 결정할 수 있었다. 확인된 접촉경계를 압흔의 3차원 등고선과 중첩함으로써 예상과 동일하게 접촉경계는 pile-up의 최대점들을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

3. pile-up 변형이 거의 없는 fused quartz의 압흔 분석을 통해 얻어진 경도는 탄성회복의 영향이 미미한 고하중 영역의 나노압입곡선 분석을 통해 얻어진 하중 하경도와 1.3% 이내로 거의 일치하여 본 연구에서 제안한 압입경도 평가법의 타당성을 확인할 수 있었다. 그러나 잔류압흔의 탄성회복이 큰 저하중 영역에서는 도리어 하중제거 경도가 일부 과대평가되는 것으로 나타났다.

4. pile-up 변형이 심각한 (100) 텅스텐 단결정과 순 구리의 잔류압흔 분석을 통해 계산된 하중제거 경도는 기존의 나노압입곡선 분석이 두 소재의 경도를 각각 52.5 및 59.7 % 과대평가할 수 있음을 확인시켜주었다. 또한 압입하중의 감소에 따라 경도가 증가하는 압입크기효과는 탄성회복의 영향이 복합됨에 따라 잔류압흔의 영상분석에서 더욱 크게 나타났다.

#### 후 기

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

#### REFERENCES

1. G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, 3rd ed., p. 325, McGraw-Hill, London (1988).
2. W. D. Nix, *Metall. Trans A.* **20**, 2217 (1989).
3. The Industrial Advancement Administration, *Hardness*, p. 49 (1985).
4. M. M. Chaudhri and M. Winter, *J. Phys. D* **21**, 370 (1988).
5. N. X. Randall, C. Julia-Schmutz, and J. M. Soro, *Surf. Coat. Technol.* **108-109**, 489 (1998).
6. Y. Y. Lim, M. M. Chaudhri, and T. Enomoto, *J. Mater. Res.* **14**, 2314 (1999).
7. A. Bolshakov and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.* **13**, 1049 (1998).
8. J. L. Loubet, J. M. Georges, and J. Meille, *Nanoindentation Techniques in Materials Science and Engineering*, ASTM STP 889, p. 72-89, ASTM Publication, Philadelphia (1986).
9. M. F. Doerner and W. D. Nix, *J. Mater. Res.* **1**, 601 (1986).
10. W. C. Oliver and G. M. Pharr, *J. Mater. Res.* **7**, 1580 (1992).
11. K. W. McElhaney, J. J. Vlassak, and W. D. Nix, *J. Mater. Res.* **13**, 1300 (1998).
12. D. Beegan, S. Chowdhury, and M. T. Laugier, *Surf. Coat. Technol.* **176**, 124 (2003).
13. Y.-H. Lee and D. Kwon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* **41**, 104 (2003).