나노인덴테이션을 이용한 나노물성측정

권동일*(서울대 재료공학부), 이경우(서울대 재료공학부), 김성훈(서울대 재료공학부), 김주영(서울대 재료공학부), 이윤희(한국표준과학연구원)

The measurement of nano properties using nanoindentation

Dongil Kwon (MS&E, SNU), Kyung Woo Lee (MS&E, SNU), Sung-Hoon Kim (MS&E SNU), Ju-Young Kim(MS&E, SNU), Yun-Hee Lee(KRISS)

ABSTRACT

The nanoindentation technique is widely used to investigate the mechanical properties of nano-microscale materials. The nanoindentation method for assessing mechanical properties at low loads and shallow depths is already well established for the characterization of thin films as well as bulk materials. In this study, we evaluated residual stress in DLC and Au thin films usign nanoindentation technique with a new stress-relaxation model. Moreover, We suggest a composite hardness equation and quantify the magnitude of hardness increase by using an equation based on the interface hardness and the interface thickness, derived by comparing results derived from this equation and those determined in nanoindentation tests. Finally, We present an indentation size effect (ISE) model that extends the available contact depth for ISE application down to several tens of nanometers by considering the tip bluntness effect.

Key Words : Nanoindentation(나노인덴테이션), Residual stress(잔류응력), Composite hardness(경도), Indentation size effect(압입크기효과)

1. 서론

마이크로 패키지, MEMS 등 전기적인 역할뿐만 아니라 기계적인 역할을 하는 박막 재료에 대한 물성 평가는 필수 불가결한 상황이다. 하지만 박막은 수 마이크로 혹은 그 이하의 두께를 가지고 있어 물성 평가 시에는 많은 어려움이 존재한다. 이에 그 시험방법이 간단하고 쉬우면서, 수 마이크로 이하의 스케일에서도 평가가 가능한 나노압입시험이 박막재료의 물성 평가에 많이 활용되고 있다. 나노압입시험은 기존의 경도시험과 달리 재료에 μN 수준의 낮은 인가하중과 nm 수준의 압입자 침투깊이를 연속적으로 측정하여 압입하중-변위곡선을 획득 하고, AFM 등의 광학시스템을 병행하여 재료의 국부적 물성을 측정하는 방법이다. 나노 압입시험은 나노경도, 탄성계수는 물론 진응력-진변형률 곡선, 항복강도, 인장강도 등의 유동특성을 비롯하여 박막 등 다층 접합재료의 특징인 잔류응력에 이르기 까지 다양한 기계적 물성을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이중 나노 압입시험을 통해 단일박막 및 다층막 등에 발생하는 잔류응력의 정량화에 대한 연구와 경도 평가를 위한 연구뿐 아니라, 정확한 나노경도 평가를 위해 압입크기효과를 고려한 정성적인 연구가 활발히 진행되고 있다.

먼저 이종소재 접합부 계면에서 발생한 잔류응력이 박막소재의 기계적 물성을 좌우하는 중요한 요소로 보고되고 있다.[1] 그러나 박막소재의 잔류응력 측정에 자주 사용되어 온 레이저를 이용한 곡률측정법[2]은 하나의 평균적인 곡률만을 측정함으로 인해 국소 영역의 잔류응력 분포에 대한 정보를 제공 할 수 없다는 문제점이 있다. 이에 따라, 특별한 시편 채취 없이 in-situ 적용이 가능하고 , 인가하중에 따라 nm 수준의 국소영역 잔류응력까지도 측정할 수 있는 나노 압입시험법[3]이 제안되었으나

기존의 압입시험을 통한 잔류응력 연구에서는 경도 값의 변화[4] 또는 압흔형상의 변화[6]를 조사하는 정성적인 연구가 주를 이루어 아직까지 압입시험을 통한 잔류응력의 정량화 연구는 미진한 형편이다.

한편 높은 경도와 우수한 계면 접합력과 산화저항성을 요구되는 절삭공구용 다층막 코팅소재는 TiN-기반의 다양한 다층막 시스템이 제안되어 왔다. 특히 마그네트론 스퍼터링을 통한 나노미터 두께의 nitride계 단일막들의 반복적인 적층으로부터 초격자를 형성하도록 제조된 다층막 소재는 50 GPa 이상의 경도 값을 나타내는 것으로 알려져 있다.[7] 최적의 간격에서 형성된 나노다층막 소재는 그것을 구성하는 단일막이 갖는 일반 경도 값의 300%이상 증가하게 된다. 이러한 경도 증가 기구에 대해서는 큰 전단탄성계수 차이를 보이는 두 막의 계면이 전위 이동을 구속함으로써 경도가 증가하게 되는 것으로 보는 이론이 일반적으로 받아들여지고 있다. 하지만 계면에 의한 경도 증가는 정성적으로 설명되고 있으며, 구체적으로 어떠한 계면의 형성을 인한 얼마만큼의 경도 증가 효과가 발생하는지는 알려져 있지 않은 실정이다.

일반적으로 마이크로영역 이하에서 압입깊이가 감소함에 따라 경도 값이 증가하는 압입크기효과(indentation size effect)가 발생하여 그 측정에 어려움이 존재한다. Nix와 Gao는 원뿔형 압입자에 의해 발생하는 기하학적필요전위의 밀도를 고려함으로써 압입크기효과를 명확하게 설명하였다.[8] 하지만, 나노압입시험에 일반적으로 사용되는 Berkovich와 같은 날카로운 압입자의 경우에는 그 첨단에 불가피하게 무딘 영역이 존재하게 되는데, Nix와 Gao 모델의 경우에는 이상적인 날카로운 압입자를 고려한 한계를 가지고 있다. 따라서 Nix와 Gao 모델은 대략 100 nm 미만의 압입 깊이를 가지는 경도 결과를 명확하게 설명하지 못하여[9] 압입 깊이가 제약을 가지는 미세소자에 대해 압입크기효과 모델을 적용하고자 할 때 결정적인 문제를 야기하게 된다.

이에 본 연구에서는 잔류응력과 압입하중의 상호작용에 대한 이론적 고려와 잔류응력 완화에 따른 압입자/시편 간의 접촉형상 변화를 모델링함으로써 박막의 잔류응력을 평가하고자 하였다. 그리고 기판위의 박막이 가지는 고유 물성 평가를 위해 복합경도의 개념을 도입함으로써, 다층막 코팅소재의 계면에 의한 강화 효과를 정량화하고자 하였다. 마지막으로, 압입자 첨단 무딤의 영향을 무딘 첨단을 수용하는 기하학적필요전위의 분포와 소성 대 전체 접촉 깊이 비의 변화로 반영하는 압입크기효과 모델을 개발하여, 100 nm 미만의 접촉 깊이를 가지는 경도 결과를 포괄하는 나노압입시험의 결과를 재연하였다.

2. 이론적 해석

2.1 나노압입시험에 의한 박막 잔류응력 평가

잔류응력이 걸린 박막에 대한 압입거동의 변화는 Fig. 1의 하중인가곡선에서 파악할 수 있다. 동일한 최대 압입깊이에 대해 인장 잔류응력을 갖는 박막은 무응력 상태에 비해 낮은 압입하중을 나타내고, 이와 반대로 압축 잔류응력을 갖는 박막은 높은 압입하중을 나타낸다.[6]

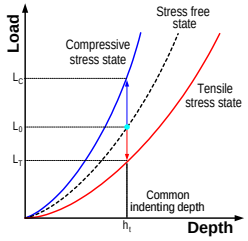

Fig. 1. Variation of the indentation loading curves with the changes in the stress states.

이에 잔류응력에 의해 유도되는 수직하중의 분석을 통해 잔류응력을 평가할 수 있다. 우선 3축 정수압 응력(hydrostatic stress)은 재료의 소성변형과 무관하므로, 소성 변형강도를 나타내는 고유경도와도 무관하여, 박막에 작용하는 2축 등 방향 잔류응력은 소재의 고유경도에 영향을 끼치지 않는 3축 정수압 응력에서 1축 응력을 제한 응력상태와 등가이다. 압입시험 시, 박막 단면에 대한 모식도인 Fig. 2와 같이 면내의 2축 인장 잔류응력은 3축 인장응력에 z축으로 동일한 크기의 1축 압축응력을 인가하면 형성된다.

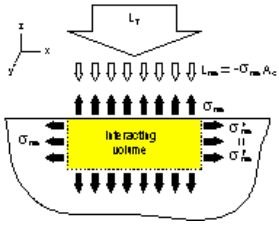

Fig. 2. Interaction of residual-stress-induced normal load(L_{res}) and indentation load(L_T).

나노 압입시험에서 얻어지는 압입하중-변위곡선은 Fig. 1과 같이 동일한 최대 압입깊이h_t에 대해서 인

장, 무 응력 및 압축 잔류응력으로 변함에 따라 외부 인가하중은 L_T에서 L_0 및 L_c로 점차 증가하게 된다. 인장 잔류 응력 시 최대 압입깊이인 h_t를 유지하면서 잔류응력이 제거되면, L_c의 최대 압입깊이에 대응하는 무 응력 상태에서의 압입하중 L_0가 발생하여야 하므로, 압입자에는 잉여하중 L_{res}가 추가 되어야 한다. 인장 잔류 응력 시 압입하중과 최대 압입깊이인 (L_T, h_t)는 최대 압입깊이를 유지하면서 잔류응력을 제거한 상태인 (L_0, h_t)와 등가인 상태(equivalent state)로 볼 수 있으며, 두 상태에 대한 압입하중 사이에는 식(1)의 관계가 존재한다.[10)]

$$L_0=L_T+L_{res} \quad (1)$$

반면에 압축 잔류응력 상태에서 최대 압입깊이를 일정하게 유지하면서 잔류응력을 제거하면, 접촉깊이의 감소와 함께 잔류응력 유도 수직하중 만큼 압입하중이 감소한다. 박막 잔류응력은 인장 및 압축 잔류응력과 무관하게 식 (2)와 같이 잔류응력 유도 수직하중인 L_{res}를 L_0에서의 접촉면적 A_c^0로 나눔으로써 평가할 수 있다.

$$\sigma_{res}=L_{res}/A_c^0 \quad (2)$$

2.2 초격자 다층막의 복합경도

다층막 소재의 복합 물성 평가를 위해 흔히 활용되는 것이 혼합률 이다. 단일구성요소들이 가지는 경도와 부피를 고려한 간단한 혼합률과 전체를 고려한 확장된 혼합률이 있으며, 그 개념은 다음과 같다. 간단한 혼합률의 개념이 Fig. 3의 (a)라면, 확장된 혼합률은 Fig. 3의 (b)와 같이 계면을 특정한 두께를 지니고, 특정한 물성값을 나타내는 하나의 단일막으로 간주하는 것이다.

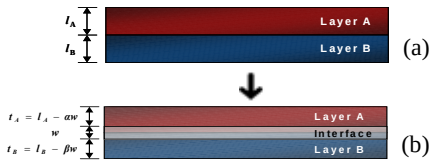

Fig. 3. Schematic diagrams for (a) simple and (b) expanded rule-of-mixture.

경도 값과 부피 분율에 관한 데이터들로부터 식 (3)과 같은 경도 H와 부피분율 V_f의 곱의 합으로 나타나는 혼합율(rule-of-mixture)을 이용하여 복합 경도를 평가할 수 있다.[11)]

$$H_c=H_{i\ominus A}V_{F,i\ominus A}+H_{i\ominus B}V_{F,i\ominus B}+H_{i,j.}V_{F,i,j.} \quad (3)$$

식 (3)은 기판위에 A박막과 B박막이 증착되어 있는 시험편에 대해 압입시험이 이루어졌을 때 압입시험에 의해 소성역이 기판까지 확장된 경우 평가된 복합 경도 값(H_c)을 나타내고 있다. 나노 다층막 소재에서는 반복 증착된 두 박막에 의한 두께 영역에 소성역이 제한될 수 있는 압입깊이로 압입함으로써 기판 효과는 배제되며, 두 막 사이의 계면에 의한 경도 효과가 고려된다.

2.3 압입크기효과 모델

Fig. 4에 보이는 바와 같이, 압입 하중 제거 이후의 압흔 하부 영역에 접촉반경의 반구형 부피에 발생된 기하학적필요전위가 존재한다고 하면, 다음의 수식과 같이 기하학적필요전위의 밀도가 표현된다.

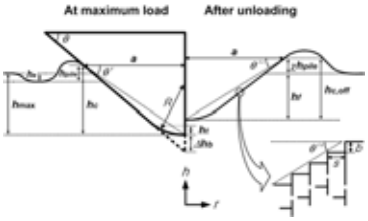

Fig. 4. Nanoindentation contact morphology including pile-up for a conical indenter with a blunt tip, and the distribution of geometrically necessary dislocations.

$$\rho_G=\frac{3\chi}{2bh_c}\tan^2\theta' \quad (4)$$

본 수식에 표현된 χ는 소성 대 전체 접촉 깊이 비이고, b는 Burger's 벡터, h_c는 접촉 깊이, θ'는 최대하중 인가 시 유효 주각이다. 변형의 저항을 평가하기 위해 전단강도 τ에 대한 테일러 관계를 이용하고, von Mises의 흐름 법칙과 3의 Tabor 계수를 사용하면[8)], 다음과 같이 경도에 대한 수식을 표현할 수 있다.

$$H=3\sigma=3\sqrt{3}\alpha\mu b\sqrt{\rho_S+\rho_G} \quad (5)$$

ρ_S는 통계적저장전위의 밀도이고, μ는 전단계수, α는 기하학적 계수인데, ρ_S는 압입 깊이에 의존하지 않고, α는 0.5임을 가정하였다. 수식 (4), (5)를 이용하면 경도에 대한 수식을 다음과 같이 정리할 수 있다.[12)]

$$\frac{H}{H_0}=\sqrt{1+f\frac{h'}{h_c}} \quad (6)$$

H_0는 기하학적 필요전위가 존재하지 않는 상태의

거시 경도, h'는 압입크기효과에 대한 특성거리, J는 나노압입자 첨단의 무딘 효과를 반영하는 압입크기효과에 대한 스케일링 요소로 다음과 같이 표현된다.

$$J=\chi\left(1+\frac{\Delta h_b}{h_c}\right)^{-2} \quad (7)$$

3. 실험방법

나노압입시험은 미국 HYSITRON사의 TriboScopeII를 이용하였다. 압입속도는 100 μN/s를 선택하였으며, 압입자는 삼각뿔형태의 Berkovich 압입자와 사각뿔 형태의 vickers 압입자를 사용하였다.

3.1 박막 잔류응력 측정

화학 진공증착 방법을 통해 실리콘 기판 위에 형성한 0.6 ㎛ 두께의 다이아몬드성 카본 박막과 E-beam evaporator를 통해 증착한 1.0 ㎛ 두께의 Au 박막을 사용하였다. 우선 잔류응력이 걸린 증착박막에서 얻어진 압입하중-변위곡선의 형태와 비교하기 위한 무응력 상태의 박막은 실리콘 기판의 제거를 통해 제작하였다. 잔류응력이 걸린 증착박막과 무응력 상태의 자유막에 대해 10회씩 압입시험을 실시하였다. 나노압입시험을 통해 분석된 잔류응력과의 상호비교를 위하여 레이저 곡률법을 사용하여 DLC 박막의 잔류응력을 평가하였다.

3.2 초격자 나노 다층막 소재의 제조

TiN/VN, TiN/NbN, CrN/NbN 등의 3가지 다층막 시스템을 선택하였고, 각 다층막 시스템은 UBM (Unbalanced Magnetron) 방식에 의해 Si(100) 기판 위에 epitaxial 성장을 통해 증착, 제조되었다. 다층막 증착에서 기본 압력은 10^{-6} Torr이며, 증착 압력은 8 mTorr이다. R.F. 파워를 사용하여 250 ℃의 온도, 120 sccm의 기체유속을 선택하였다.

3.3 압입크기효과 모델

99.99%의 순도를 갖는 다결정 구리시편으로부터 열처리 구리시편과 변형강화 구리시편을 제작하였다. 시편의 표면을 기계적으로 연마한 후 변형층의 제거를 위해 전해 연마하였다. 시편의 표면조도는 AFM을 이용하여 측정하였고, 시편의 탄성계수, Poisson비, 전단계수는 초음파의 파동반향기술을 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 박막잔류응력의 측정 결과

다이아몬드성 카본 박막(diamond-like carbon)과 Au 박막에 대한 나노압입시험 결과 Fig. 5에서와 같이 잔류응력이 걸린 증착박막과 무응력 자유막의 압입하중-변위곡선의 잔류응력에 따른 형상변화를 확인하였다. 무응력 상태의 자유막에 대한 압입하중-인가곡선이 잔류응력이 걸린 증착박막의 압입하중-인가곡선에 비해 오른쪽에 위치함을 통하여, 두 박막의 잔류응력은 압축응력임을 확인할 수 있었다.

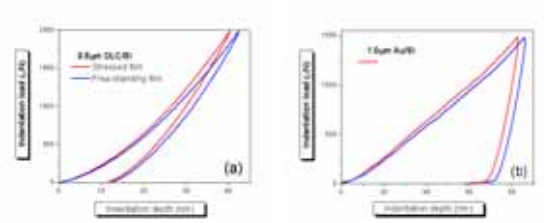

Fig. 5. Comparisons of the analyzed residual stress values for (a) DLC/Si and (b) Au/Si by the effect of thin film residual stress.

곡률법을 통해 다이아몬드성 카본 박막과 Au 박막의 표면 잔류응력치로 측정된 -3.8±0.5 GPa과 -93.4±28.5 MPa과 비교해 보면, 나노 압입시험을 통해 곡률법에 상응하는 잔류응력치를 평가하기 위해서는 압입자가 시편에 실제로 침투하는 접촉 깊이가 박막 두께의 5% 미만이어야 함을 확인할 수 있었다. 이 영역내에서 나노 압입시험을 통해 평가된 박막의 잔류응력은 다이아몬드성 카본 박막과 Au박막에 대해 -3.75 GPa과 -104.8 MPa로 곡률법에서 측정된 평균 잔류응력치와 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 잔류응력 상태와 무응력 상태의 박막에 대해 각각 10회 나노압입시험을 행하고, 이로부터 각 응력 상태를 대표하는 압입하중-변위곡선을 선택하여 분석함으로써 곡률법과 호환적인 결과를 나타내었다.

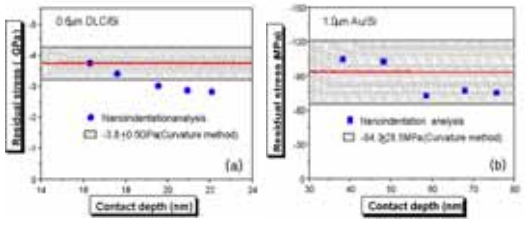

Fig. 6. Comparisons of the analyzed residual stress values for (a) DLC/Si and (b) Au/Si with the results from curvature method.

4.2 혼합률을 이용한 다층막 복합경도 해석

3가지 소재복합시스템에 대해 나노압입시험으로부터 평가된 나노복합경도는 Fig. 7과 같다.

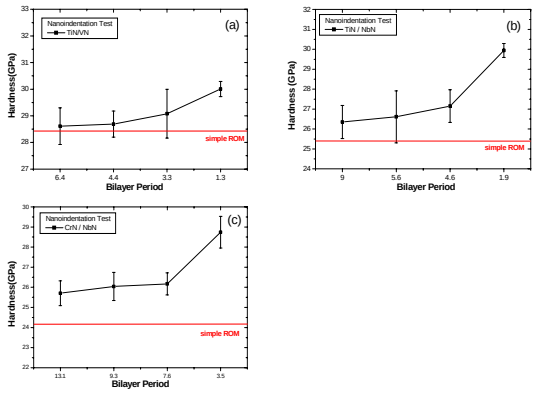

Fig. 7. Hardness data of 3 multilayer systems for the different bilayer periods: (a) TiN/VN, (b) TiN/NbN, and (c) CrN/NbN.

간단한 혼합률을 통해 평가된 복합경도 값은 동일한 소재 시스템내에서는 두겹층 간격이 달라짐과 무관하게 일정하게 구해지게 된다. 결국 간단한 혼합률을 통해서는 두겹층 간격이 변함에 따라 경도 값이 증가하는 현상을 설명하기에는 부적합하여 확장된 혼합률을 적용하였다. 하지만, 확장된 혼합률을 적용하기 위해서는 간단한 가정이 필요하다. 실험에서 사용되는 같은 소재시스템 내의 시편들은 두겹층 간 간격에 무관하게, 계면이 일정한 두께와 일정한 경도 값을 가지는 것으로 가정한다.[13] 이러한 가정을 기반으로 식 (3)과 같은 확장된 혼합률을 설정하여, 계면의 경도와 계면의 부피분율을 평가함으로써 계면 강화 효과를 정량화하였다. 식 (3)에서 각 부피분율들의 합은 1이므로, 미지수는 결국 계면의 부피분율과 계면의 경도 값이 된다. 따라서 앞서 나노압입시험을 통해 평가된 각 다층막들의 결과를 좌변에 대입하고, 임의의 계면 두께를 입력함으로써 회귀법(iteration)을 통해 4개의 시험편으로부터 얻어진 결과를 가장 잘 만족시키는 계면경도 값, HI와 계면 두께, w를 얻을 수 있었다. 그 결과는 Table 2과 같다.

Table 2 Interface hardness and thickness for TiN/VN, TiN/NbN, and CrN/NbN systems

	TiN/VN	TiN/NbN	CrN/NbN
H_I (GPa)	47.78	53.04	48.94
w (nm)	0.212	0.330	0.654

계면에 의한 경도 강화 효과의 척도인 계면 경도는 세 가지의 시편에 대해 50 GPa 전후의 값으로 평가되어 문헌들에서 추정되는 값과 비슷한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 평가된 다층막 계면 경도와 두께를 바탕으로 두겹층 간격 변화에 따른 경도 변화 추이를 예상해 보면 Fig. 8과 같이 얻어질 수 있다. 결과적으로 확장된 혼합률을 이용하여 계면경도와 계면두께를 평가함으로써, 두겹층 간격 변화에 따른 경도 추이를 예측해 볼 수 있다.

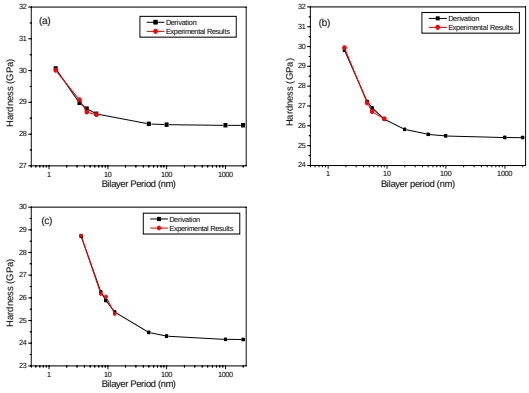

Fig. 8. Transition of hardness values for bilayer periods: (a) TiN/VN, (b) TiN/NbN, and (c) CrN/NbN

4.3 압입크기효과 모델

Fig. 9에서는 A, B 압입자를 이용하여 열처리 구리 시편에서 획득한 경도 결과를 나타내었다. A, B 압입자를 이용하여 획득한 경도 값은 앞서 언급되었던 첨단 무딤 영향의 개시 접촉 깊이 이하에서 명확하게 구분되기 시작한다.

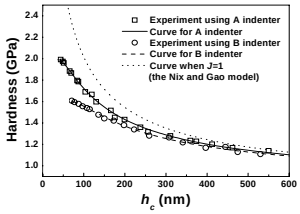

Fig. 9. Hardness results with contact depth and curves fitted by the present model for annealed Cu using A and B indenters.

본 모델을 적용한 곡선은 전체적인 접촉 깊이 구간에 대해 경도 결과들을 포괄한다. 본 모델의 적용을 통해 구해진 H_0와 h'의 값은 A 압입자를 이용한 결과에 대해서는 0.846 GPa, 463 nm 이고, B 압입자를 이용한 결과에 대해서는 0.842 GPa, 472 nm 이다. 서로 다른 무딤을 갖는 압입자를 이용해 구한 경도 결과들이 낮은 접촉 깊이 영역에서 차이를 보임에도

불구하고, 측정된 H_0와 h'값은 유사하게 일치하는 결과는 나타낸다. 미세소자에 나노압입시험을 수행하는 경우와 같이 압입 깊이가 낮게 제한되는 경우를 감안하여 앞서 언급한 첨담 무딤 영향의 개시 접촉 깊이 보다 낮은 접촉 깊이에서 구해진 경도 결과들만을 가지고 본 모델을 적용하였다. 구해진 H_0와 h' 값은 A 압입자를 이용해 획득한 결과에 대해서는 0.798 GPa, 538 nm이고, B 압입자를 이용해 구한 결과에 대해서는 0.820 GPa, 505 nm이다. 전체 접촉 깊이 구간에 대해 구한 결과들과 합리적인 범위 내에서 유사한 결과를 획득하였다.

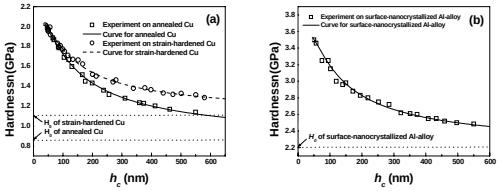

Fig. 10. Hardness results with contact depth and curves fitted by the present model for (a) annealed and strain-hardened Cu, and (b) surface-nanocrystallized Al-alloy.

Fig. 10은 A 압입자를 이용하여 열처리 구리시편, 변형강화 구리시편, 표면나노결정화 알루미늄합금에 대해 획득한 경도 결과들을 보여주고 있다. 표면나노결정화 알루미늄합금의 스케일링 요소 J는 A 압입자를 이용하여 변형강화 구리시편에서 획득한 결과와 동일하다고 가정하였다. 본 모델을 적용하여 구한 곡선들은 전체 접촉 깊이 구간에 대해 경도 결과들을 재연한다.

5. 결론

나노 압입시험을 통한 잔류응력 측정 모델링의 타당성을 검증하였고, 복합경도의 개념을 도입하여 다층막 소재의 계면강화효과를 정량화 하였다. 그리고 압입크기효과를 고려한 모델링을 통해 나노 압입시험 결과의 재연함을 보였으며, 그에 대한 구체적인 결론은 다음과 같다.

1. 나노 압입시험 시 잔류응력에 따른 압입하중-변위곡선의 형상변화를 응력완화 과정을 고려하여 다이아몬드성 카본 박막과 Au 박막의 잔류응력을 정량적으로 평가하였다. 이들 곡선을 다양한 압입하중에 대하여 본 연구에서 제시된 이론적인 분석기법을 적용하여 박막의 잔류응력을 평가하여, 나노압입시험을 통한 잔류응력 측정 모델링의 타당성을 검증하였다.

2. 나노다층막 소재의 계면은 일정한 두께와 경도를 가지고 있음을 이용하여, 계면 강화 효과를 정량화하기 위해 확장된 혼합률을 적용하였다. 단일막들에 대해 평가된 고유경도와 소성 부피 분율을 바탕으로 확장된 혼합률을 적용하고 회귀법을 통해 계면경도와 계면 두께를 평가할 수 있었고, 두겹층 간격 변화에 따른 경도 변화의 추이를 예측할 수 있었다.

3. 기하학적필요전위 이론에 기반하여 압입자 첨단의 무딤 효과를 반영하는 압입크기효과 모델을 개발하였다. 열처리 구리시편, 변형강화 구리시편, 표면나노결정화 알루미늄합금에 대해 본 모델을 적용하였다. 전체 접촉 깊이 구간에 대해 재연성있게 실험결과들을 포괄하였으며, 합리적인 거시적 경도와 압입크기효과의 특성 거리 값을 획득하였다.

후기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업인 '나노소재기술개발사업단'의 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. A.W. Eberhardt, R Pandey, J.M. Williams, J. J. Weimer, D.lla and R. L. Zimmerman : Mater. Sci. Eng., A228 (1997)
2. A. J. Perry, J. A. Sue and P. J. Martin : Surf. Coatings & Technol., Vol.25, pp.17, 1996
3. J.H. Ahn, Y. Choi and D. Kwon : J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol.38, pp.1606, 2000
4. G. Sines and R. Carlson : ASTM bulletin, Feb., pp.35, 1952
5. W.C. Oliver and G.M. Pharr, J. Mater. Res. 7, 1564 (1992).
6. J.H Underwood : Experimental Mechanics, Vol. 13, pp.373, 1973
7. U. Helmersson, S. Todorova, S.A. Barnett, J.E. Sundgren, and L.C. Markert and J.E. Greene, J. Appl. Phys., Vol.62, pp.481, 1987.
8. W.D. Nix and H. Gao, : J. Mech. Phys. Sol. Vol.46, pp.411, 1998.
9. Y. Wei, X. Wang, and M. Zhao, : J. Mater. Res. Vol.19, pp.208, 2004.
10. Y.H. Lee and D. Kwon, : Acta Mater., Vol. 52, pp. 1555-1563, 2004
11. S.H. Kim, Y.J. Paik, D. Kwon : Surf. Coatings & Technol., Vol.187, pp.47-53, 2004
12. J.-Y. Kim, B.-W. Lee, D.T. Read, and D. Kwon, : Scripta Mater. Vol.52, pp.353, 2005.
13. A. Madan, P. Yashar, M. Shinn and S.A. Barnett, : Thin Solid Films, Vol.302, pp.147, 1997.
14. J.H. Ahn and D. Kwon, : Mater. Sci. & Eng. A, Vol.285, pp.172, 2000.