

AFM을 이용한 나노 인덴터 팁의 면적함수 결정에 관한 연구

박성조*, 이현우#, 한승우**

A Study on Determination of the Area Function of Nano Indenter Tip with AFM

Sung Jo Park*, Hyun Woo Lee# and Seung Woo Han**

ABSTRACT

Depth-sensing indentation is widely used for evaluation of mechanical properties of thin films. It is generally accepted that the most significant source of uncertainty in nanoindentation measurement is the geometry of the indenter tip. Therefore the successful application of the technique requires accurate calibration of the indenter tip geometry. The direct measurement of geometry of a Berkovich indenter was determined using a atomic force microscope. The indentation geometrical calibration of contact area was performed by analyzing the indenter tip profile. The equations of area functions were proposed for nanoscale thin films..

Key Words : Nanoindentation(나노인덴테이션), Indenter tip (인덴터 팁), Atomic Force Microscope(AFM, 원자력간 현미경), Area function(면적 함수)

기호설명

A_c = Contact area
 h_{max} = The depth at peak load
 S_{max} = The initial unloading contact stiffness
 E_r = Reduced modulus
 E_s = Sample modulus
 E_i = Indenter modulus
O&P = Oliver and Pharr

1. 서론

나노/마이크로 가공기술의 발달과 더불어 많은 연구 성과가 IT/BT/NT 분야에서 얻어지고 있다. 그러나, 실제 상업으로 응용된 사례는 매우 적으며, 그 원인 중 하나로 부품의 신뢰성 평가기술의 미 확립을 들 수 있다. MEMS/NEMS 부품의 기계적 성질측정을 위해서는 원자현미경 (SPM)이나 Nano Indenter 와 같은 나노탐침을 기반으로 하는 기술들이 사용된다. 그러나 현재까지는 M/NEMS 부품의 내구성 및 기계적 성질 평가를 위한 표준이 확립되

접수일: 2003년 11월 26일; 게재승인일: 2004년 3월 12일

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail : hywlee@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-1486

** 한국기계연구원

어 있지 않기 때문에, 보고된 기계적 물성치의 변화 폭이 상당히 크다. 이와 같은 문제점들을 개선하기 위하여, 부품의 성능 및 수명의 측정시 신뢰성 있는 값들을 얻기 위한 많은 연구가 이루어져 왔으며, 또한, 나노물성치 측정을 위한 표준이 마련되고 있는 중이다. 그 예로서 ISO/CD14577 와 CENTC184/WG5 등을 들 수 있다.^{1, 2}

이들 표준안은 단종 벌크재료의 나노인덴테이션 실험을 위한 표준으로써, 박막과 같이 이종재료로 이루어진 복합 층 구조로의 적용은 부적합하다.

피 측정 대상이 이종 재료로 이루어진 복합 층 구조인 경우, 일반적으로 기지재의 영향을 배제하기 위하여 박막 두께의 약 10 % 범위 내에서 나노압입 실험을 실시한다 (thumb of rule).^{3, 4} 그러나 박막의 두께가 수십에서 수백 나노 일 경우에는 다이아몬드 팁에 존재하는 반경 때문에 thumb of rule을 지키기가 쉽지 않다. 특히 박막의 두께가 나노 스케일(Scale)정도로 작아지게 되면 오차는 급격히 커지게 된다.⁵

나노인덴터를 이용한 압입실험에서 경도 및 탄성계수의 측정을 위하여 사용되는 형상함수 식에서는 다이아몬드 팁을 이상적으로 첨예한 피라미드 형상으로 가정한다. 그러나 상업적으로 판매 되는 모든 다이아몬드 팁은 일정한 반경을 가진 구형상을 가지고 있다. 따라서 두께가 수십.수백 나노미터인 박막에 대해서 두께의 약 10 % 깊이로 압입실험을 하게 되면, 구형 팁과 박막표면의 탄성접촉이 주로 발생한다. 또한, 이 경우에는 팁과 소재와의 접촉형상이 피라미드가 아닌 구에 가까운 형상임을 예측할 수 있다. 위로부터 나노인덴테이션 실험에서 압입깊이가 수십 나노 정도로 매우 적은 경우에는 측정 값에 큰 오류가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

위의 문제점들은 박막의 기계적 성질 측정을 위해 제작된 모듈을 추가로 구입하거나, 팁의 형상함수를 보정함으로써 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는 팁의 형상함수의 보정을 통하여 박막의 기계적 성질을 측정하고자 하였다. 나노인덴터에 사용되는 Berkovich 다이아몬드 팁의 AFM 관찰을 통하여 보정된 면적함수를 제안하였다. 또한, 압입실험 결과와의 비교를 통해서 보정된 면적함수의 타당성을 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 나노인덴터의 구조

나노인덴터는 정밀하게 가공된 다이아몬드 압자(indenter)를 시험편 표면에 눌러 생기는 반발력과 압입깊이를 측정해서 압흔 면적을 계산하고, 이로부터 시험편의 탄성계수와 경도를 측정할 수 있다. 본 연구에 사용된 나노인덴터(MTS. Nanoindenter XP)(Fig. 2)의 구조⁶를 Fig. 3에 나타내었다. 나노인덴터에서 압자는 가장 상부에 위치한 Coil/magnet assembly 부분에서 구동되며 이때 가해진 전기적 신호로부터 하중을 계산하며, 중간부에 위치한 용량형 변위 센서(Capacitance gage)에서 압자의 상하 변위를 측정한다.



Fig. 2 Nano indenter XP

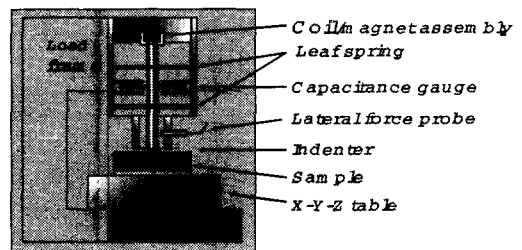


Fig. 3 Schematic of Nanoindenter

2.2 나노인덴테이션의 원리

일반적으로 재료의 기계적 성질의 측정은 일정한 형태의 시편을 가지고 힘이나 변위를 가하여, 시편의 거동을 살펴봄으로써 가능하다. 그러나 매우 얇은 금속박막일 경우 이러한 방법은 불가능하고 기관위에 금속박막을 증착 후 여기에 작은 압흔을 생기게 하는 힘을 측정함으로써, 박막의 탄성, 소성 거동을 알 수 있다.⁷ 나노인덴테이션에 사용되는 압

자는 어떠한 형태도 가능하나, 작은 접촉면적이 요구되기 때문에 일반적으로 피라미드 형상의 베르코비치(Berkovich) 팁을 많이 사용한다. Fig. 4 에 나타난 것처럼 인덴테이션의 총 변위량은 $h_s + h_c$ 이지만 실제로 인덴터와 박막과 접촉하는 깊이는 h_c 만 큼이고 나머지 h_s 는 언로딩후에 회복되는 양이다. 따라서 접촉면적은 베르코비치 인덴터의 경우 기하학적인 관계로부터

$$A = 24.5h_c^2 \quad \text{Perfect Berkovich tip (1)}$$

$$A = 24.5h_c^2 + c_1h_c^1 + c_2h_c^{1/2} + c_3h_c^{1/4} + \dots + c_8h_c^{1/128}$$

$$\text{Oliver \& Pharr Equation (2)}$$

일반적인 베르코비치 인덴터 팁은 가공의 편이성과 재료의 손상으로 인해 팁의 첨단이 일정한 반지름을 가지고 있는 구의 형태를 가지고 있다. 따라서 완벽한 베르코비치 팁과는 접촉 면적에 차이가 있다.

탄성계수는 아래 식에 표시한 Sneddon Stiffness Equation⁸ 으로부터 산출하는데 이식은 압자의 모양이 원통일 때를 기준으로 한 것으로 다른 형태의 압자로 시험하는 경우에는 식(3)에 압자형상보정 상수 β 를 곱하여 (4)식을 사용하여 산출한다.

$$S = \frac{dp}{dh} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{AE_r} \quad (3)$$

$$E_r = \frac{1}{\beta} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (4)$$

여기서 Stiffness, S는 언로딩 커브(curve) 선단의 기울기로 구하며, 압자형상 보정상수 β 는 구형 혹은 원추형 압자의 경우 1, 사각뿔 형태의 베르코비치 팁의 경우 1.034 이다. E_r 은 환산 탄성계수로 시편의 탄성계수 E_s , 압자의 탄성계수 E_i 와 다음과 같은 관계에 있으며, 최종 목적결과는 E_s 이다.

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (5)$$

식(5)에서 ν_s 와 ν_i 는 각각 시편과 압자의 프와송비(Poisson's ratio)로 여기서 E_i 와 ν_i 는 알고 있어야 하는데 다이아몬드는 압자의 경우 $E_i = 1141$ GPa, $\nu_i = 0.07$ 이다.

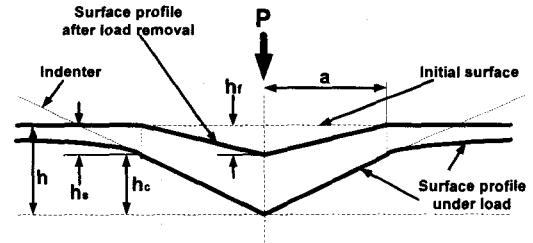


Fig. 4 A Schematic representation of a section through a nano-indentation

$$h_c = h - h_s = h - \epsilon \frac{P}{S} \quad (6)$$

Fig. 4는 h , h_c , h_s 의 각각의 개념을 도식적으로 표시한 것으로 여기서 접촉 투영면적 A는 접촉 깊이(contact depth) h_c 의 함수로 실험적으로 얻는다. h_c 는 총변형량 h 와 탄성 변형량 h_s 의 차이로 식(6)와 같이 표시할 수 있는데 ϵ 는 압자선단 형상 상수로 삼각뿔일 경우 0.75이며, 하중-변형 곡선의 의미는 Fig. 5에 표시한 바와 같다.

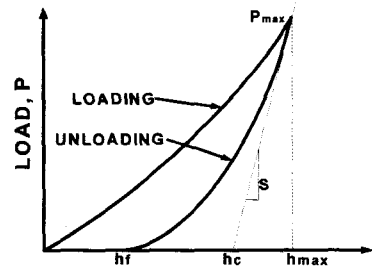


Fig. 5 Schematic of load-displacement curve

2.3 Atomic Force Microscope

Atomic Force Microscope (AFM) 현미경에 의해 인덴터 팁의 형상 측정이 가능하다. AFM에서는 마이크로 머시닝으로 제조된 캔틸레버⁹라고 불리는 작은 막대를 쓴다. 캔틸레버는 길이가 $100\mu m$, 폭 $10\mu m$, 두께 $1\mu m$ 로서 아주 작아 미세한 힘에 의해서도 아래위로 쉽게 휘어지도록 만들어졌다. 또

한 캔틸레버 끝부분에는 뾰족한 바늘이 달려 있으며, 이 바늘의 끝은 매우 첨예하다. 이 탐침을 시료 표면에 접근 시키면 탐침끝이 원자와 시료 표면의 원자사이에 서로의 간격에 따라 끌어당기거나 밀치는 힘이 작용한다.

AFM의 일반적인 구조는 Fig. 6과 같다.

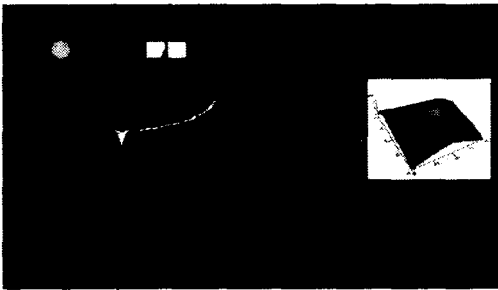


Fig. 6 Schematic of AFM

2.3.1 Non-contact AFM

Non - contact mode의 AFM에서는 원자사이의 인력을 사용하는데 그 힘의 크기는 0.1~0.01 nN정도로 시료에 인가하는 힘이 contact mode에 비해 훨씬 작아 손상되기 쉬운 부드러운 시료를 측정하는데 적합하다. 원자간 인력의 크기가 너무 작아 캔틸레버가 휘는 각도를 직접 잴 수가 없기 때문에 non-contact mode에서는 캔틸레버를 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동시킨다. 시료표면에 다가 가면 원자간의 인력에 의해 고유진동수가 변하게 되어 진폭과 위상에 변화가 생기고 그 변화를 측정한다.

Non-contact mode에서 시료표면의 형상의 측정은 엄밀하게 말해서 탐침과 시료사이에 작용하는 힘의 형상화라기보다는 force gradient(dF/dz)라고 말할 수 있다. 하지만 힘이 반데르발스의 힘과 같이 순수하게 거리에만 의존한다면 force gradient image 또한 표면 형상화에 대응된다고 말할 수 있다. 전기력이나 자기력은 시료의 형상에 관계없이 발생하는 힘이므로, 전기력이나 자기력이 원자사이의 인력보다 강하면 순수하게 표면의 형상만을 구별해 내기 어렵다. 여기서는 시료에 정전기력이나 자기력을 발생시키는 다른 힘이 없다고 가정하고 순수한 인력에 의해 탐침과 시료의 상호작용만을 고려한다면 non-contact AFM은 force gradient로 표면형상을 얻을 수 있다.

3. 인덴터 팁의 측정

3.1 광학현미경을 이용한 관찰

인덴터 팁의 형상을 측정하기 위해 눈으로 식별이 어렵기 때문에 우선 광학현미경으로 전체적인 형상을 관찰하였다. Fig. 7은 100배와 500배율의 광학현미경으로 관찰한 인덴터 팁의 형상이다. 전체적인 형상을 확인하기 위해 우선 100배로 관찰하고 그 뒤 팁의 끝단을 확인하기 위해 500배로 확대해서 관찰하였다. Fig. 8는 제작사에서 제공하는 다이아몬드 인덴터 팁의 초기 측정된 형상 값이다. 팁의 면을 중심축을 기점으로 피라미드 3면으로 나누어지는데 중심축과 빔면간의 각을 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ 를 이루고, 반시계방향으로 1면과 2면간의 각이 β_{1-2} 이고 1면과 3면간의 각이 β_{1-3} 이다.

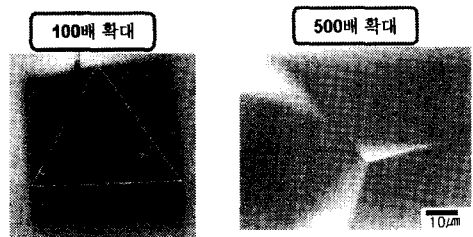


Fig. 7 Photograph of the shape of a Berkovich indenter tip

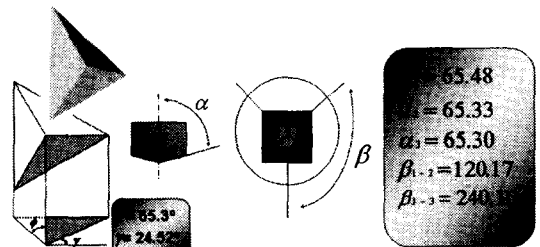


Fig. 8 Measurements diamond indenter angles

3.2 AFM을 이용한 인덴터 팁 측정

이 실험에 사용된 AFM은 PSIA사에서 제작된 장비인 XE-100(Fig. 9)이며, 인덴터 팁은 미국 MTS(Material Testing System)사에서 제작된 Nano Indenter XP에 장착되는 Berkovich 팁(Fig. 10)이 사용되었다.

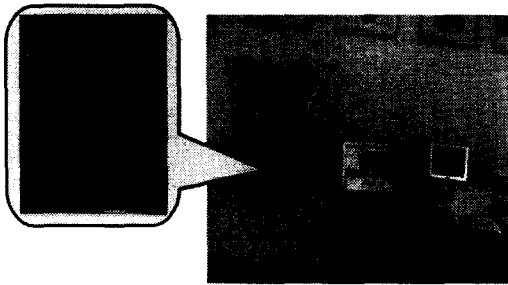


Fig. 9 Atomic force microscope instrument

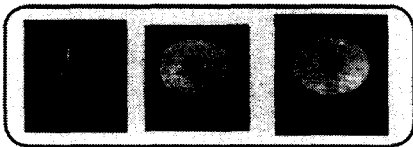


Fig. 10 Indenter tip and of special made tip holder

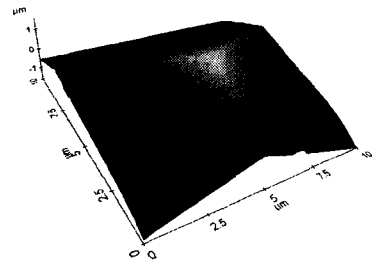
Fig. 10에 나타난 인덴터 팁은 쇠기형으로 AFM에 직접 세워 놓을 수 없어 특수방전 가공된 홀더를 제작하여 홀더에 끼워 세워서 AFM스테이지에 놓고 측정했다.

Table 1에 나타낸 바와 같이 AFM에 의한 측정은 2가지 경우를 설정하여 진행되었다. 하나는 팁의 형상을 나타내기 위해 스캔(scan) 사이즈를 크게 하였고, 다른 하나는 팁의 첨단부를 확인하기 위해 스캔 사이즈를 줄이는 대신 해상도를 최대한 높여서 측정하게 되었다. 두 경우 모두 Non-contact 모드(mode)로 진행되었고, 스캔 사이즈가 큰 $10\mu\text{m}$ 는 해상도가 256픽셀(pixel)이고 이것을 Case 1으로 첨단부를 자세히 보기 위해 스캔 사이즈를 줄인 $2\mu\text{m}$ 는 해상도가 2048픽셀인 것을 Case 2라고 정한다.

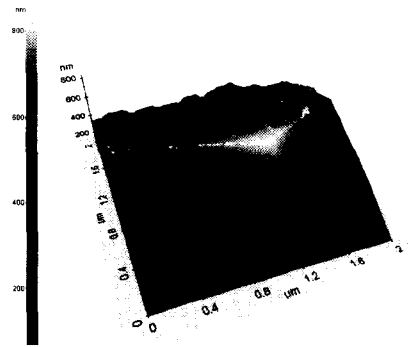
Table 1 Detail parameters for AFM

	Case 1	Case 2
Head mode	NC-AFM	NC-AFM
Data Width	256(pixel)	2048(pixel)
Data Height	256(pixel)	2048(pixel)
X Scan Size	$10\mu\text{m}$	$2\mu\text{m}$
Y Scan Size	$10\mu\text{m}$	$2\mu\text{m}$
Scan Rate	0.3Hz	1.0Hz

Fig. 11은 AFM으로 실제 측정한 3차원 이미지 형상을 보여준다. 전형적인 피라미드 형상을 보여준다.



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 11 Three dimensional shape in Berkovich indenter

4. 면적함수의 결정

일반적으로 인덴터 팁의 이상적인 형상이라고 간주하여 접촉면적과 압입깊이와의 관계식을 나타내면 식(7)과 같다.

$$A_c = 24.5h_c^2 \quad (7)$$

여기서 A_c 는 접촉 면적이며, h_c 는 압입깊이이다.

삼각피라미드 형상을 가진 인덴터 팁은 기하학적 결함과 사용 중에 생기는 스크래치 등으로 인한 마모 때문에 압입실험 등에 나타내어지는 아주 작은 면적을 정확히 나타내지 못한다.¹⁰ 그래서 이러

한 결과로 인해 면적함수의 보정을 위해 여러 가지 식들이 제시 되었다.

여러 방법들 중 첫 번째가 가장 잘 알려진 방법인 Oliver와 Pharr가 제안한 식이다.¹¹ 면적함수 A_c 는 Fused silica라는 표준시편을 이용하여 압입깊이 h_c 와의 관계를 식(8)와 같이 나타낸 것이다.

$$A_c = 24.5h_c^2 + \sum_{i=1}^8 C_i h_c^{1/2^{i-1}} \quad (8)$$

여기서 C_1 에서 C_8 는 상수이다. 식(8)에서 첫 번째 항은 이상적인 피라미드 형상을 표현한 것이고, 다른 항들은 이상적인 형상으로부터 벗어난 정도를 보정한 것이다. 이 방법은 반복되는 과정에서 수렴이 항상 존재하지 않고, $C_1 \sim C_8$ 의 상수에 대한 물리적 정의도 내려지지 않았다.

그다음 방법으로 Herrmann과 Jenett 등은 식(9)을 제안하였다. 이식은 2차원 측정 데이터로부터 삼각형의 면적을 계산하여 인텐터 팁의 실제 면적 A_c 를 계산한다.¹²

$$\sqrt{A_c} = c_1 h_c + c_2 \quad (9)$$

여기서 c_1, c_2 는 계수이다. 이식은 $h_c \leq 0.1\mu\text{m}$ 에서는 유효하지 않으며, $h_c > 0.1\mu\text{m}$ 에서 선형적인 부분에만 해당된다. Antunes 와 Cavaleiro등은 식(10)을 제안하였다.¹³

$$\sqrt{A_c} = -k_1 \left[\exp\left(-h \frac{k_2}{k_1}\right) - 1 \right] + k_3 h_c \quad (10)$$

여기서 k_1, k_2, k_3 는 실험에 의해 결정되는 계수이다. 이식은 약 $0.6\mu\text{m}$ 이상의 압입깊이에 대한 물성의 측정에 적용되었다.

5. 결과 및 고찰

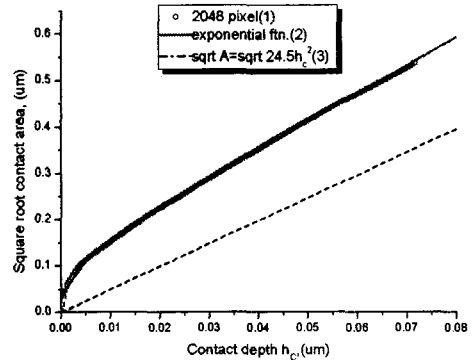
5.1 보정된 면적함수

측정데이터를 이용하여 접촉면적의 근($\sqrt{A_c}$)과 압입깊이 h_c 의 관계를 구해보았다. Fig. 12는 압입깊이가 $0.1\mu\text{m}$ 를 경계로 $h_c \leq 0.1\mu\text{m}$ 과 $0.1\mu\text{m} < h_c \leq 1.0\mu\text{m}$ 의 두 부분으로 나누어 나타낸 것이다. 그리고 두 그림에서 원점을 지나는 점선은 식(7)의 이상적인 인텐터 팁 형상에 대한 그래

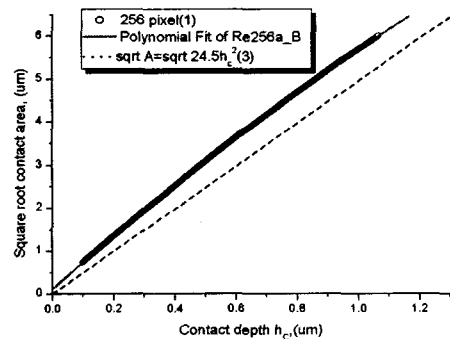
프를 나타낸 것이다.

압입깊이가 깊어질수록 이상적인 팁 형상의 관계인 식(7)과 AFM 측정 데이터의 기울기가 평행해짐을 알 수 있다. 또한 압입깊이가 약 $0.1\mu\text{m}$ 이하에서는 상대적으로 접촉 면적이 급격히 변화됨을 볼 수 있다. 이는 인텐터 팁 제작사에서 보장하는 팁 반경($40 \sim 50 \text{ nm}$) 및 사용 중에 발생하는 마모에 의한 것으로 판단된다.

따라서 면적함수의 정확한 계산을 위하여 압입깊이에 따라 접촉면적의 변화가 큰 영역과 작은 영역의 두 가지로 나눌 필요가 있다.



(a) $h_c \leq 0.1\mu\text{m}$



(b) $0.1\mu\text{m} < h_c \leq 1.0\mu\text{m}$

Fig. 12 Comparison of area function for (a) $h_c \leq 0.1\mu\text{m}$ and (b) $0.1\mu\text{m} < h_c \leq 1.0\mu\text{m}$ in the contact depth range.

먼저 $h_c \leq 0.1\mu\text{m}$ 의 영역은 접촉 면적이 지수와 선형적으로 증가하므로 식(11)와 같은 조합곡선으로 표현할 수 있다.

$$\sqrt{A_c} = ae^{bh_c} + ch_c + d \quad (11)$$

여기서 a, b, c, d는 측정 데이터에 의해 구해지는 계수이다.

$0.1\mu\text{m} < h_c \leq 1\mu\text{m}$ 의 영역에서는 접촉 면적이 압입깊이가 작을 때는 비선형적으로 변화하다가 압입 깊이가 커짐에 따라 선형적으로 변화하게 된다. 그러므로 식(12)와 같은 2차식에 의해 면적합수를 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{A_c} = lh_c^2 + mh_c + n \quad (12)$$

여기서 l, m, n은 측정 데이터에 의해 구해지는 계수이다. 따라서 측정데이터에 의해 각 계수들을 구해보면 다음과 같은 면적합수를 구할 수 있다.

(i) $h_c \leq 0.1\mu\text{m}$;

$$\sqrt{A_c} = 0.106489 - 0.075928e^{-191.909h_c} + 6.0896h_c \quad (13)$$

(ii) $0.1\mu\text{m} < h_c \leq 1.0\mu\text{m}$

$$\sqrt{A_c} = 0.11748 + 6.28579h_c - 0.72726h_c^2 \quad (14)$$

Fig. 12의 (a)와 (b)는 $h_c \leq 0.1\mu\text{m}$ 에서는 식(13)이 $0.1\mu\text{m} < h_c \leq 1.0\mu\text{m}$ 에서는 식(14)가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

인텐테이션을 할 때 박막 두께의 10%까지 압입할 경우 식(13)을 이용하면 박막 두께가 $1\mu\text{m}$ 이하의 수백 나노 두께에 대해서도 정확한 물성 측정이 가능하게 되리라 사료된다.

5.2 측정방법에 따른 결과의 비교

Table 2은 두개의 측정 방법에 대한 실험적으로 직접 측정된 압입깊이에 따른 접촉면적의 값을 나타낸 것이다.

Table 2 Average values of Young's modulus

Material	E(GPa)	
	AFM	O & P
Single crystal Aluminum (75.9±5GPa)	73.4	74.2
Fused silica(72±2GPa)	75.9	78.6
PMMA(3.0±0.5GPa)	3.0	3.1
SiAl(Thin film)	188.8	196.4

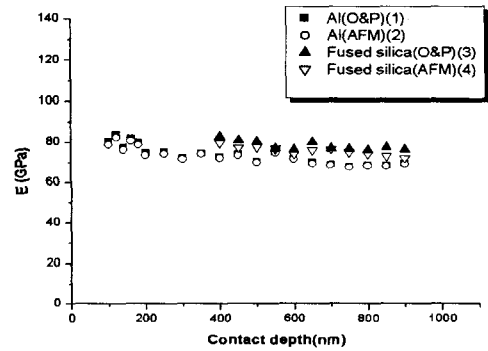


Fig. 13 Young's modulus vs. indentation depth for Al and Fusedsilica

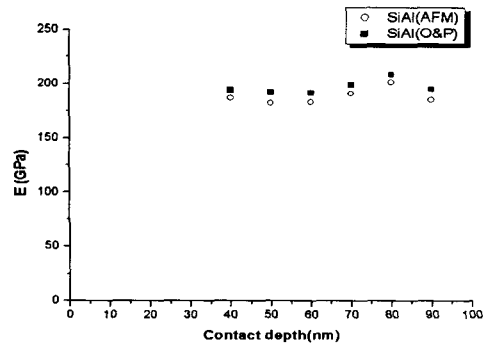


Fig. 14 Young's modulus vs. indentation depth for SiAl.(Thin film)

두 방법으로 벌크재료에 대해 Fig. 13과 박막재료에 대해 Fig. 14에 나타내었다. 전체적으로 탄성계수의 평균을 내어서 비교해 보면 Table 2에 나와

있는바와 같이 O&P방법으로 측정된 값이 AFM방법으로 측정된 값보다 좀더 크다는 것을 알 수 있었다. 그러나 박막에 있어서 SiAl재료는 O&P방법과 AFM에 의한 방법에 있어 비슷한 경향을 나타내지만 다른 벌크 재료에 비해 두 방법의 탄성계수 값이 차이가 많이 발생함을 확인했다. 100nm 이하의 측정은 재료에 있어 어려움이 많았다. 측정이 가능한 수백 나노미터에서는 O&P의 결과와 비슷한 값이 나타남을 알 수 있었다.

6. 결론

AFM에 의해 Berkovich 인덴터 팁의 형상을 직접 측정하였다. 실제 인덴터 팁에서는 팁 첨단부와 면의 모서리에 있는 반경에 의해 이상적인 인덴터 팁과 차이가 발생하므로 접촉 면적이 달라질 수 있음을 확인하였다. 측정 결과 압입깊이가 깊을수록 실제 접촉면적의 근이 이상적인 팁 형상의 식과 기울기가 평행해짐을 알 수 있었다.

압입깊이가 $h_c \leq 0.1\mu\text{m}$ 과 $0.1\mu\text{m} < h_c \leq 1.0\mu\text{m}$ 인 두 영역으로 나누어 면적함수를 제시하였다. 제안된 면적함수를 이용하면 수백 나노 이하 두께의 Aluminum single crystal, Fused silica의 벌크(Bulk)재료와 SiAl과 같은 박막재료를 이용하여 탄성계수를 구하였다. 벌크재료에 있어서는 탄성계수 값이 비슷한 경향으로 나왔으며, 두 방법은 압입깊이가 깊을수록 잘 일치함을 알 수 있었다. SiAl박막에 있어 100nm 이하에서 값은 두 방법이 차이가 있음을 확인했다. 팁 끝의 반경 등을 고려해본 결과 AFM으로 측정된 보정 함수를 사용한 탄성계수 값이 정확할 것이라 추측된다. 따라서 박막에 대해서도 나노인덴테이션에 의한 정확한 물성 측정이 가능하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지역전략산업 석·박사 인력 양성사업 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ISO/CD 14577-1 to -3 ; Metallic material - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.

2. Draft of CEN TC184 : Advanced Technical Ceramics, WG5 : Methods of Test for Ceramics Coatings, WI 121-132: Determination of Hardness and Young's Modulus by Depth Sensing Indentation.
3. Pollock, H.M., Maugis, D. and Barquins, M., "Characterisation of sub-micrometer surface layers by indentation," in Microindentation Techniques in Materials Science and Engineering, ASTM SPT 889, Philadelphia, PA, pp.47-71, 1986.
4. Lu, C.J. and Bogy, D.B., "The effect of Tip Radius on Nano-indentation Hardness Tests," Int. J. Solids Struct., 32, pp.1759-1770, 1995.
5. Anthony, C. Fischer-Cripps, "Nanoindentation," Springer, pp.67- 69, 2002.
6. MTS. Nano Indenter XP User Manual, MTS Systems Corporation, 2002.
7. Han, J. H., Lee, K. R., Kim, K. S., Lee, S. Y., "Principal and Applications of Nanoindentation Test," J. KSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 19-26, 2002.
8. Sneddon, "The Relation between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch of Arbitrary Profile," Int. J. Eng. Sci., Vol. 3, pp. 47-57, 1965.
9. Albrecht, T.R., Akamine, S., Carver, T.E. and Quate, C.F., J. Vac. Sci. Technol, A8, 3386, 1990.
10. McElhaney, K.W., Vlassak, J.J., W.D. Nix, J. Mater. Res. 13, p.1300, 1998.
11. Oliver, W.C. and Pharr, G.M., "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments," J. Mater. Res., 7 pp.1564-1583. 1992.
12. Herrman, K., Jennett, N.M., Wegener, W., Meneve, J., Seemann, R., "Progress in determination of the area function of indenters used for nanoindentation," Thin Solid Films. 377, pp.394-397, 2000.
13. Antunes, J.M., Cavaleiro, A., Menezes, L.F., Simoes, M.I., Fernandes, J.V., "Ultra-microhardness testing procedure with vickers indenter," Surface and Coatings Technology 149, p.31, 2002.