

극미세 점 구조체 제작을 위한 나노압입 공정에서 PMMA 의 시간의존적 변형거동에 관한 연구

윤성원#, 김현일*, 강충길**

A Study on the Time-Dependent Deformation Behaviors of PMMA in Nanoindentation Process for Hyperfine Pit Structure Fabrication

Sung-Won Youn#, Hyun-II Kim* and Chung-Gil Kang**

ABSTRACT

The nanoindenter and AFM have been used for nanofabrication, such as nanolithography, nanowriting, and nanopatterning, as well as measurement of mechanical properties and surface topology. Nanoscale indents can be used as cells for molecular electronics and drug delivery, slots for integration into nanodevices, and defects for tailoring the structure and properties. Therefore, it is very important to make indents of desired morphology (shape, size and depth). Indents of different shapes can be obtained by using indenters of different geometries such as a cube corner and conical and spherical tips. The depth and size of indents can be controlled by making indentations at different indentation loads. However, in case of viscoplastic viscoelastic materials such as polymethylmethacrylate (PMMA) the time dependent deformation (TDD) should also be considered. In this study, the effect of process parameters such as loading rate and hold-time at peak load on the indent morphology (maximum penetration depth, elastic recovery, transient creep recovery, residual depth pile-up height) of PMMA were studied for hyperfine pattern fabrication.

Key Words: Nanoindentation (나노압입), Polymethylmethacrylate (폴리메타크릴레이트), Time-dependent deformation (시간의존적변형), Nanoscale indent (나노압흔)

1. 서론

광 리소그래피 공정을 대체 또는 보완하기 위한 다양한 나노프로브 기반 리소그래피 기술들이 연구되고 있다. 그 중에서도 정적/동적 스크래치 또는 정적/동적 나노압입공정은 초기장비설치 및 장비가동에 드는 비용이 매우 저렴하고, 공정이 간

단하며, 소재의 선택이 자유롭다는 장점이 있어 널리 연구되고 있다^{1,3}. 반면에, 팁의 마모, 느린 가공속도, 낮은 공정효율(throughput)등의 단점도 가지고 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 고속 패터닝⁴, 멀티팁을 이용한 패터닝⁵, 나노프로브를 이용하여 제작한 패턴의 대량전사공정용 몰드로의 응용⁶ 등 다양한 연구가 시도되고 있다.

접수일: 2004년 8월 27일; 게재승인일: 2005년 5월 13일

교신저자: 부산대 정밀기계공학과

Email : yswonny@pusan.ac.kr, Tel. (051)510-1455

* 부산대 정밀기계공학과

** 부산대 기계공학부, 텍소/레오성형연구소(NRL)

현재, 나노압입공정은 박막이나 극미소 부품의 기계적 성질 측정에 널리 쓰이고 있는데⁷, 나노압입공정에 의하여 제작된 나노압흔(nanoindent)은 약물전달용 셀(cell), 나노디바이스와의 연결을 위한 슬롯(slot), 나노저장매체를 위한 데이터 비트 등 다양한 분야에 응용될 수 있다^{1,8}. 여기서 중요한 것은 나노압흔의 형상 및 크기를 제어하는 것이다. 나노압흔의 형상은 나노프로브의 형상(Berkovich, Vickers, cube corner, cone, sphere)에 따라 바꿀 수 있으며, 크기 및 깊이는 인가하중의 조절에 의해 제어할 수 있다. 그러나, 피가공재가 폴리머와 같이 점탄성-점소성 소재인 경우에는, 시간의존적 변형거동(TDD)을 반드시 고려해야 한다. 아크릴레이트계 고분자이자 열가소성 플라스틱인 PMMA는 현재 나노/마이크로 기술분야에서 각광 받는 대표적인 폴리머 소재들 중 하나이며, LCD 용 도광판, 콘택트렌즈, DVD 디스크용 소재, 나노임프린트용 피가공재, 나노리소그래피 공정용 레지스트 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 또한, PMMA를 피가공재로 이용할 경우 팁의 마모가 적다는 장점도 있다.

나노압입 공정을 이용한 PMMA의 점 구조체 제작 공정의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 공정은 (1) 압입, (2) 압입유지, (3) 하중제거의 3 단계로 구분될 수 있다. 압입 단계에서는 팁이 소재표면의 깊이 방향으로 압입되면서 점탄성-점소성 변형이 발생하게 되고, 그 결과 압흔과 파일-업이 형성된다. 압입유지 단계에서는 크립에 의한 변위변화가 발생하므로, 그에 따른 압흔 및 버의 크기변화가 발생한다. 팁이 소재표면에서 제거되는 단계인 하중제거 단계에서는 점탄성 회복현상이 발생한다.

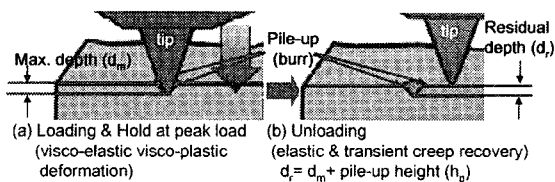


Fig. 1 Layout of the indentation process on PMMA surface for hyperfine pit fabrication

본 연구는 나노인덴터를 이용한 PMMA의 극미세 패터닝 공정개발을 위한 기초연구이며, 하중인가/제거속도(R_{LU}), 압입유지시간(t_H) 등의 압입공정

조건이 변화가 PMMA의 변형거동(가공깊이, 탄성회복 속도, 천이크립회복 속도, 잔류깊이, 파일-업 높이)에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 나노압입 공정 조건의 설정

2.1 장비 및 소재

나노압입실험을 위하여 Nanoindenter® XP (MTS, USA)와 다이아몬드 베르크비치 (Berkovich) 압자를 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 Berkovich 팁에 대한 입체도와 AFM 분석결과를 나타내고 있다. 현재 실제적으로 제작 가능한 다이아몬드 팁 첨단부 반경은 약 40 nm로 보고되고 있다. 따라서, 점 구조체의 크기를 감소시키기 위하여 가공 깊이를 감소시킬 경우 구형의 팁끝과 시편표면과의 탄성접촉이 지배적으로 발생하게 되어 시편의 소성변형량을 감소시킨다. 시험편으로는 0.5 mm 두께의 판재 폴리메틸메타크릴레이트 (polymethylmethacrylate, PMMA)를 사용하였고, 증류수를 이용하여 초음파 세척하였다. 세척 후 시편의 표면조도 R_a 는 4-7 nm였다 (C-AFM, 15 $\mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ scan). 표면조도 측정과 압흔 관찰에는 AFM 장비인 XE-100 (PSIA, Korea)을 사용하였다. 모든 실험은 냉방기로 온도가 조절되는 일반적인 실험실에서 수행하였으며, Nanoindenter® XP 장비 내에 전자 온습도계를 설치하였다.

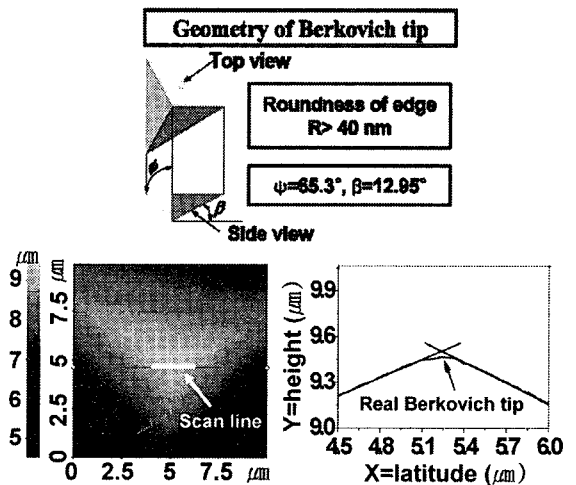


Fig. 2 AFM scan of the diamond Berkovich indenter used in this study

2.2 실험조건의 설정

나노압입 실험에서 표면접근민감도(surface approach sensitivity)나 표면접근속도(surface approach velocity)는 시편의 초기 표면위치를 결정짓는 인자이므로, 기계적 성질 측정뿐만 아니라 가공에 있어서도 매우 중요한 인자이다. 특히, 극미소하중 조건에서도 변형이 발생할 수 있는 폴리머의 경우 주의해야 하는데, 측정이 끝난 후에 하중-변위곡선을 관찰 함으로써 설정한 조건이 적합한지를 확인할 수 있다.

Fig. 3은 10 nm/s (default value)의 표면접근속도 조건에서, 표면접근민감도의 변화(5, 10, 15, 20, 25, 30, 40 %)가 인가하중-압입깊이 곡선에 미치는 영향을 나타내고 있다. 표면접근민감도가 5, 10, 15 %일 때는 팁과 시편 표면이 실제 접촉하기 전에 시스템으로는 접촉이 가정되었음을 알 수 있다(Fig. 3(a), (b), (c)). 이 경우에는 접촉깊이가 증가하기 때문에 Oliver & Pharr 방법⁹에 의해 계산된 겉보기경도가 감소하였다. 반면에, 표면접근민감도가 30, 40 %일 때는 음의 변위 값에서부터 압입이 시작되고 있다(Fig. 3(f), (g)). 이는 시편과 팁의 접촉 여부를 결정하기 위해 설정된 극미세 하중조건에서도 소재의 변형이 발생하였음을 나타낸다. 표면접근민감도가 20, 25 %의 경우에는 위에서 언급한 문제들이 발생하지 않았다(Fig. 3 (d), (e)).

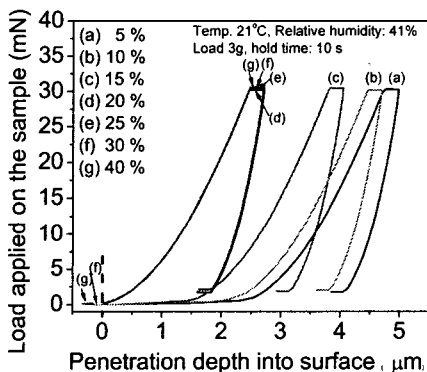


Fig. 3 Effect of the surface approach sensitivity value on the load-displacement curve of PMMA

본 논문에서는 열적변위변화(Thermal drift rate)의 변화가 미치는 영향은 고려하지 않았으며, 열적변위변화 값은 표준시편(fused silica)를 위한 기본값인

0.05로 설정하였다.

나노프로브를 이용한 가공에서는 압입깊이를 감소시킬수록 미세한 구조체를 가공할 수 있다. 그러나, 이론적으로 제작 가능한 Berkovich 다이아몬드 압자의 최소 팁 반경은 약 40 nm로 알려져 있으며, 반도체 공정에 의해 제작된 실리콘 기반 AFM 팁도 10 nm 이상의 팁 반경을 가진다. 따라서, 가공깊이가 수-수십 나노가 되면 팁과 소재표면의 탄성접촉에 의한 압입크기 효과(Indentation size effect, ISE)¹⁰가 발생한다. ISE는 압입 깊이의 감소에 따른 탄성계수와 경도 값의 증가로 조사될 수 있다. ISE는 기계적 성질의 측정 값뿐만 아니라 소재의 변형거동에도 큰 영향을 미치는데, 예를 들면 소재표면과 팁이 탄성접촉된 상태에서 가공을 할 경우 탄성회복량이 현저히 커짐을 예측할 수 있다. Oliver & Pharr 방법⁹을 이용하여 점탄성 소재의 경도 및 탄성계수를 측정하기 위해서는 TDD의 영향을 배제하기 위한 보정이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 ISE의 영향을 배제할 수 있는 압입깊이(인가하중)의 조사를 목적으로 연속 강성측정법 (continuous stiffness measurement, CSM) 실험을 실시하였으므로 별도의 보정은 하지 않았다. Fig. 4의 탄성계수와 경도 값들은 TDD의 영향은 고려 않은 겉보기 기계적 값들이다. CSM 실험 결과 ISE의 영향이 감소되어 측정된 겉보기 기계적 성질 값이 일정하게 유지되는 압입깊이는 약 100 nm였으며, 이 값에 해당하는 수직하중 크기는 약 0.2 mN였다.

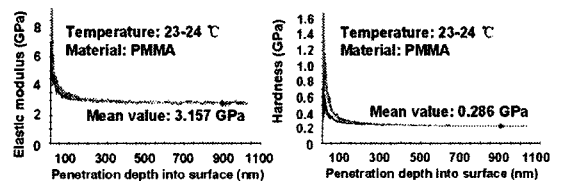


Fig. 4 Apparent mechanical properties of PMMA measured by CSM option of Nanoindenter (Oliver & Pharr method).

Fig. 5는 나노압입실험을 통해 측정된 시간-하중 곡선 (Fig. 5 (a))과 시간-압입깊이 곡선(Fig. 5 (b))을 함께 나타내고 있다. 최대인가하중, 하중제거율, 압입유지시간은 각각 10 mN, 90 %, 10 초로

설정하였다. 하중제거율(percent to unload)은 식 (1) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_p = \left(1 - \frac{L_u}{L_{max}} \right) \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 U_p 는 하중제거율(%), L_u 는 하중제거 공정 후 시편에 부하되는 하중(mN), L_{max} 는 최대압입 하중이다. 하중제거율을 90%로 설정하였기 때문에, 하중제거공정 후에도 소재표면에는 최대압입하중 크기의 10 %에 해당하는 하중(1 mN)이 부하된다. 따라서, Fused silica, 실리콘, 유리 등과 같은 경취성 재료의 경우와는 달리, PMMA 와 같이 연한 재료의 잔류깊이를 측정하기 위해서는, 적절한 하중제거율의 설정이 매우 중요하다. Fig. 5 (b) 에서 관찰할 수 있듯이, 최대하중에서의 유지시간이 경과함에 따라 크립현상에 의해 최대압입깊이가 증가하고 있다. 소재에 인가된 하중이 제거되면서 탄성회복이 발생하였으며, 이어서 시간에 따라 변화하는 변형, 즉 의탄성(anelasticity) 변형이 발생하고 있다. 본 연구에서는 이러한 의탄성 변형을 일반적인 레오로지 모델¹¹에 따라 천이크립회복으로 나타내었다. 천이크립 회복 후 L_u 에 의해 압입깊이가 다시 소폭 증가하였다.

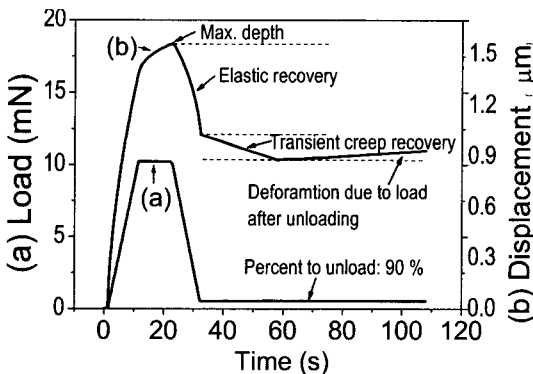


Fig. 5 Relationship between time-displacement curve and time-load curve

참고로 하중제거율의 변화가 시간-압입깊이 곡선에 미치는 영향을 Fig. 6 에 나타내었다. 하중제거율은 99, 96, 93, 90 %로 변화시켰으며, 실험은 각 조

건에서 2 회씩 실시하였다. 하중제거율이 90 %, 93 %인 경우에는 하중제거 후에 압입깊이가 다시 소폭 증가하였다(Fig. 6(a)-(d)). 반면에 99 %인 경우에는 변위가 음의 방향으로 계속 증가하였다(Fig. 6(g)-(h)). 96 %인 경우에는 위에서 언급한 두 가지 양상이 모두 나타났다(Fig. 6(e), (f)). 문제는, 적절한 하중제거율 조건을 조사한다 하더라도 파일-업 또는 싱크-인 높이를 고려할 수 없다는 점이다. 본 연구에서는 각 시험조건에서의 최대압입깊이, 탄성회복 속도, 천이크립회복 속도는 시간-압입깊이 곡선으로부터 계산하였고, 압흔의 잔류깊이와 파일-업 높이 변화는 AFM 으로 측정하였다.

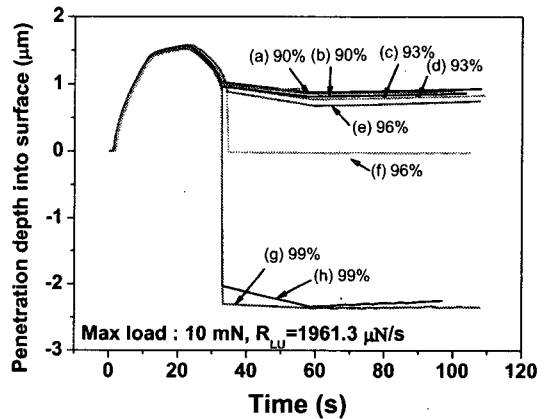


Fig. 6 Effect of percent-to-load conditions on the time-displacement curve of PMMA

3. 결과 및 토론

3.1 압입 유지시간의 영향

압입유지시간(t_H)이 PMMA 의 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 case I 과 case II 의 두 가지 조건에서 실험을 하였다 (Table 1). 압입하중 및 시간의 증가에 따른 변위의 변화를 정량적으로 관찰하기 위하여, 하중-압입깊이 곡선과 시간-압입깊이 곡선을 각각 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다.

Fig. 9 는 Fig. 8 의 곡선으로부터 계산한 압입유지시간(t_H)의 변화에 따른 탄성회복 속도와 천이크립 회복 속도의 변화를 나타내고 있다. 탄성회복 속도는 t_H 가 증가할수록 감소하였으며, 하중제거 속도가 클 때 더 빨라짐을 알 수 있었다. 반면에 천이크립회복 속도는 t_H 의 변화와 관계없이 약 4-

6.6 nm/s 로 일정하였으며, 하중제거속도에도 큰 영향을 받지 않았다.

Table 1 Experimental and environmental conditions to investigate the effect of hold-time at peak load

Environmental conditions		Temperature: 23-24 °C Relative humidity: 45-50 %
Exp. cond.	Common	Max. normal load, L_{max} (mN): 10 Surface approach velocity (nm/s): 10 Surface approach sensitivity (%): 25 Thermal drift rate: 0.05 Percent to unload: 90 %
	Case I	Loading/unloading rate, R_{LU} ($\mu\text{N/s}$): 1961.3 Hold-time at peak load, t_H (s): 10, 100, 200, 400
	Case II	Loading/unloading rate, R_{LU} ($\mu\text{N/s}$): 1307.6 Hold-time at peak load, t_H (s): 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500

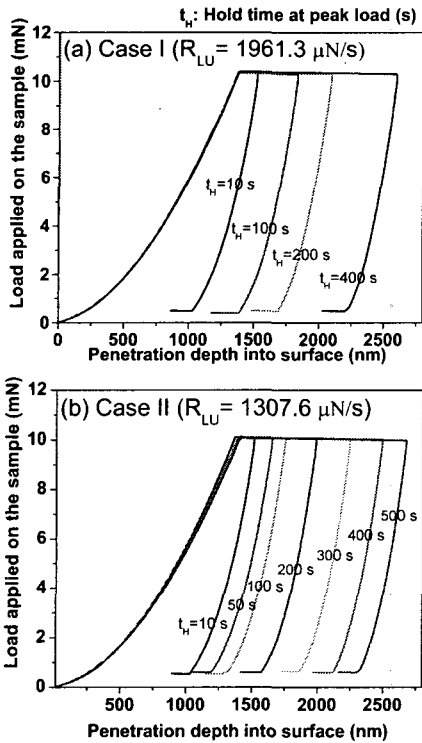


Fig. 7 Effect of hold-time at peak load on the load-displacement curve of PMMA

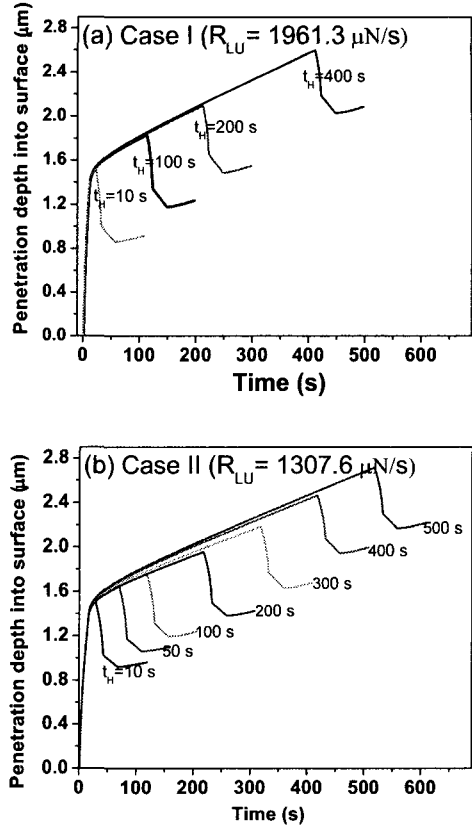


Fig. 8 Effect of hold-time at peak load on the time-displacement curve of PMMA

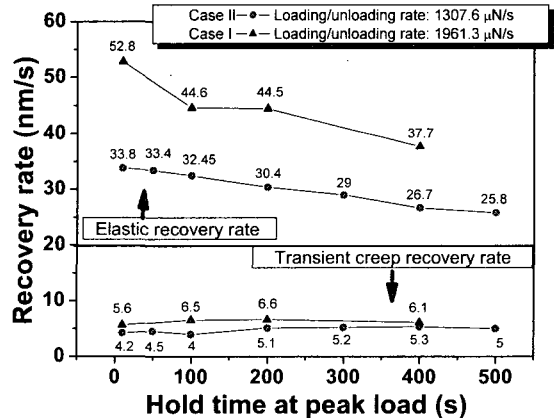


Fig. 9 Effect of hold-time at peak load on the rate of the elastic recovery and transient creep recovery

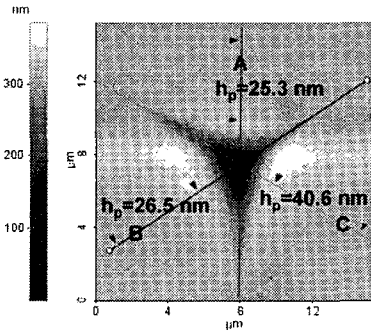


Fig. 10 AFM image of nanoindent on PMMA surface showing the different pile-up height according to analysis directions

천이크립회복 후 압흔의 잔류깊이와 파일-업 높이의 변화를 조사하기 위하여 Case I의 시편에 대하여 AFM 분석을 하였다. 각 t_H 조건 당 두 개의 압흔에 대하여 측정을 하였다. Berkovich 팁의 형상은 구형이나 콘형 팁과 같은 회전체가 아니기 때문에 파일-업의 관찰에 주의를 기울여 한다. AFM 분석방향에 따른 파일-업 높이의 차이를 Fig. 10에 나타내었다. Berkovich 팁을 Nanoindenter 장비에 장착시킬 때 발생하는 편심도 이러한 파일-업 높이 차의 원인이 될 수 있다.

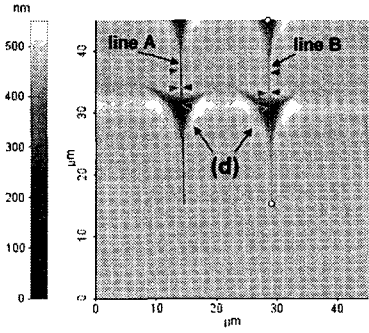


Fig. 11 AFM image of nanoindentations on PMMA surface under different hold-time at peak loads: (a) 10, (b) 100, (c) 200, (d) 400 s

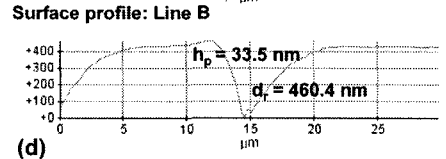
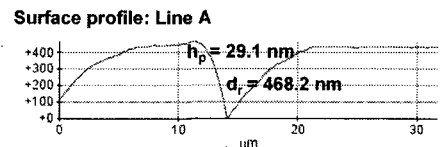
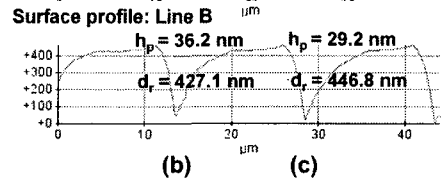
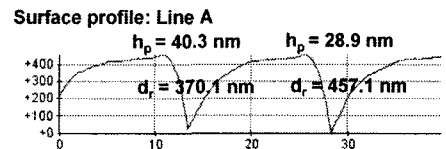
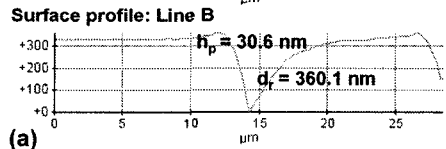
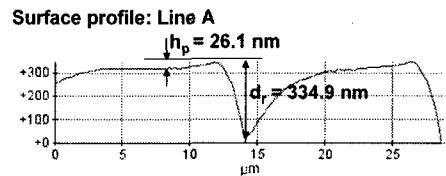
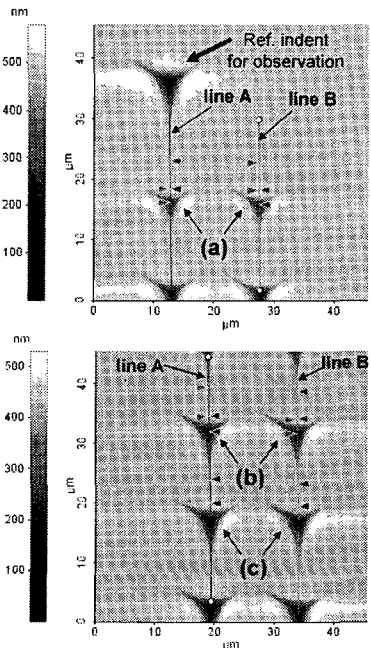


Fig. 12 Surface profiles along lines A and B in Fig. 11

압입유지시간의 변화가 파일-업 및 잔류깊이 변화에 미치는 영향을 조사하는 것이 목적이므로, AFM 분석을 위한 선(영역)은 Fig. 11 과 같이 설정 하였으며 분석결과는 Fig. 12 에 나타내었다.

비교를 위하여, AFM 분석을 통해 조사한 압입 유지시간 증가에 따른 압흔의 잔류깊이 및 파일-업 높이가 변화를 Fig. 8(a)에서 구한 최대압입깊이의 변화와 함께 Fig. 13 에 나타내었다. 압입유지시간이 증가함에 따라, 최대압입깊이와 잔류깊이는 모두 뚜렷하게 증가하였으나, 파일-업 높이가 변화의 경향은 뚜렷하지 않았으며 거의 일정하였다. 일반적으로 압입깊이가 증가하게 되면 파일-업의 높이도 증가한다. 위 실험결과에서 파일-업 높이가 변화의 경향이 뚜렷하지 않았던 것은 시편의 표면조도($R_a=4-7\text{ nm}$)의 영향이 한 원인으로 판단된다.

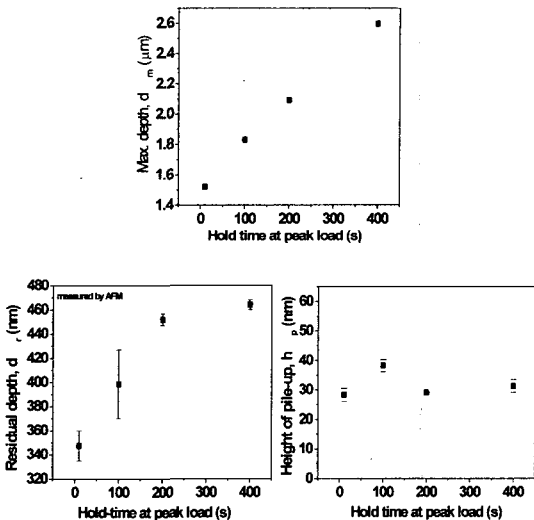


Fig.13 Effect of hold-time at peak load conditions on the morphology of indent

3.2 하중 인가/제거 속도 영향

하중 인가/제거속도(R_{LU})가 PMMA 의 변형거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 Table 2 의 조건에서 실험을 하였다. 하중 인가/제거속도(R_{LU})의 증가에 따른 변위변화를 정량적으로 조사하기 위하여, 하중-압입깊이 곡선과 시간-압입깊이 곡선을 각각 Fig. 14 과 Fig. 15 에 나타내었다. 하중인가속도의 감소와 함께 최대압입깊이가 증가하였으며, 하중제거속도가 느릴수록 회복량이 감소하였다.

Table 2 Experimental and environmental conditions to investigate the effect of loading/unloading rate

Environmental conditions	Temperature: 23-24 °C Relative humidity: 35-40 %
Experimental conditions	Max. normal load, L_{max} (mN): 2 Surface approach velocity (nm/s): 10 Surface approach sensitivity (%): 25 Thermal drift rate: 0.05 Percent to unload: 90 % Hold-time at peak load, t_H (s): 10 Loading/unloading rate, R_{LU} ($\mu\text{N/s}$): 392.3, 261, 130, 78.5, 39

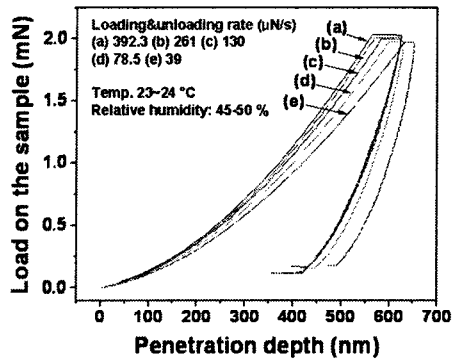


Fig. 14 Load-displacement curve for PMMA under various loading/unloading rates

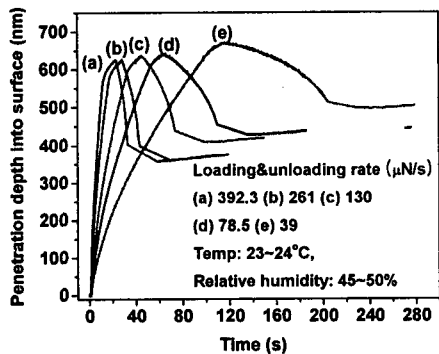


Fig. 15 Time-displacement curve for PMMA under various loading/unloading rates

Fig. 16 은 Fig. 15 의 곡선으로부터 계산한 하중 인가/제거속도(R_{LU})의 변화에 따른 탄성회복 속도

와 천이크립회복 속도의 변화를 나타내고 있다. R_{LU} 가 큰 경우 탄성회복 속도는 천이크립회복 속도에 비하여 현저히 크지만, R_{LU} 가 감소할 수록 탄성회복 속도와 천이크립회복 속도가 접근하고 있음을 관찰할 수 있다. 또한, 천이크립회복 속도도 R_{LU} 의 증가와 함께 소폭 증가하였는데, Fig. 9에서 확인했듯이 하중인가/제거속도가 1307.6 $\mu\text{N/s}$ 일 때는 약 4.5 nm/s 까지 증가하였다 (Fig. 9). 이 결과는 하중제거 후 시간의 증가에 따라 발생하는 천이크립회복의 회복속도도 R_{LU} 의 영향을 받는다는 것을 나타낸다.

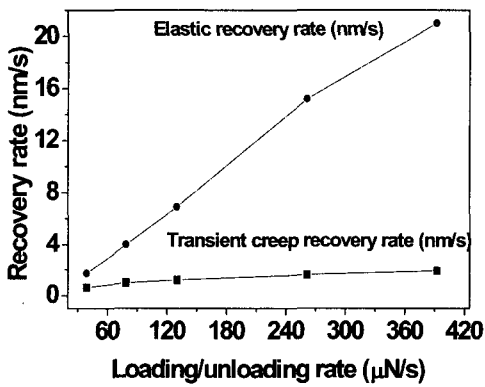


Fig. 16 Effect of unloading rate on the elastic recovery rate and transient creep recovery rate

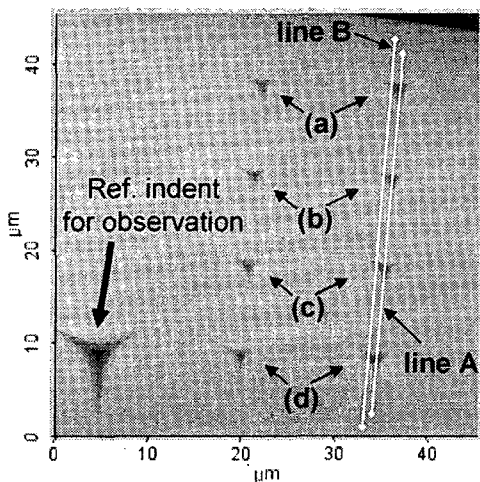
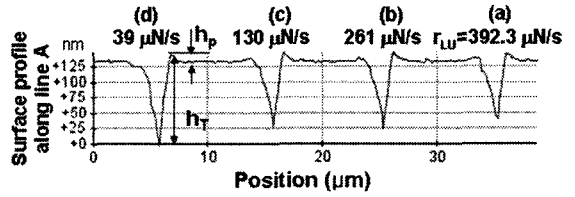
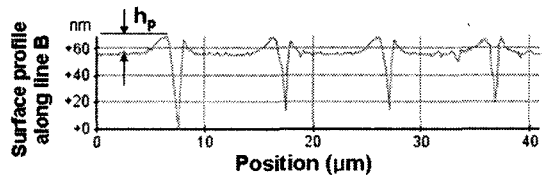


Fig. 17 AFM image of nanoindents on PMMA surface under different loading/unloading rates: (a) 392.3, (b) 261, (c) 130, (d) 39 $\mu\text{N/s}$



	(d)	(c)	(b)	(a)
h_p (nm)	12.1	14.5	14.5	11.45
r_e (nm)	143.9	117.1	120.21	105.6



	(d)	(c)	(b)	(a)
h_p (nm)	14.1	13.2	12.1	11.2

Fig. 18 Surface profiles along lines A and B in Fig. 17

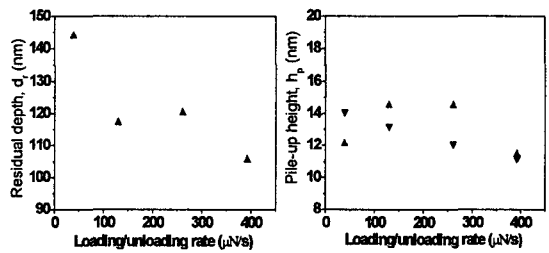
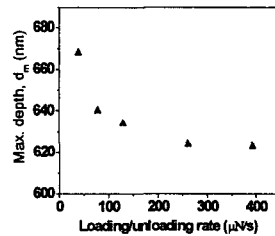


Fig. 19 Effect of loading/unloading rate conditions on the morphology of indent

천이크립 회복 후 압흔의 잔류 깊이와 파일-업 높이가 변화를 관찰하기 위하여 AFM 관찰을 하였다. AFM 분석을 위한 선(영역)은 Fig. 17 과 같이 설정하였으며 분석결과는 Fig. 18 에 나타내었다. 비교를 위하여, AFM 분석을 통해 조사한 하중인가/제거속도의 증가에 따른 압흔의 잔류깊이 및

파일-업 높이 변화를 Fig. 15 에서 구한 최대압입깊이의 변화와 함께 Fig. 19 에 나타내었다. 하중인가/제거속도가 증가함에 따라, 최대압입깊이와 잔류깊이는 감소하였다. 파일-업 높이 변화의 경향은 뚜렷하지 않았으나 감소하는 경향을 보였다.

4. 결론

나노인텐터를 이용한 PMMA 표면가공에서 압흔의 크기를 제어하기 위한 기초연구로써, 압입속도 및 압입유지시간의 변화에 따른 가공깊이, 탄성회복 속도, 천이크립회복 속도, 잔류깊이, 파일-업 높이의 변화를 정량적으로 조사하였다. 압입유지시간이 증가함에 따라, 최대압입깊이와 잔류깊이는 모두 증가하였다. 그러나, 파일-업 높이 변화의 경향은 뚜렷하지 않았는데, 시편의 표면조도가 한 원인으로 판단된다. 탄성회복속도는 감소하였으나 천이크립회복 속도는 ± 1.3 nm/s 의 오차범위 내에서 유지되었다. 하중인가/제거 속도의 변화는 탄성회복거동에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 하중인가/제거 속도가 증가함에 따라, 최대 압입깊이와 잔류깊이는 감소하였고, 파일-업 높이는 감소하는 경향을 보였다. 또한, 하중 인가/제거속도의 증가와 함께 탄성회복속도는 뚜렷하게 증가하였고, 천이크립회복 속도는 소폭 증가하였다.

후 기

이 논문은 2003 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었음 (KRF-2003-041-D20042).

참고문헌

1. Chang, W. S., Shin, B. S., Whang, K. H., "Nanoprobe Application Technologies," J. Kor. Soc. Prec. Eng., Vol. 20, No. 3, pp. 5-14, 2003.
2. Cappella, B., Sturm, H., Weidner, S.M., "Breaking polymer chains by dynamic plowing lithography," Polymer, Vol. 43, pp. 4461-4466, 2002.
3. Wiesauer, K., Springholz, G., "Fabrication of semiconductor nanostructures by nano-indentation of photo resist layers using atomic force microscopy," J. Appl. Phys., Vol. 88, No. 12, pp.7289-7297, 2000.
4. Sung, I.H., Kim, D.E., Chang, W.S., "Mechano-chemical high-speed nanopatterning technology," Proc. of KSME Autumn Conference (KSME 03PD13), pp. 57-60, 2003.
5. Despont, M., Brugger, J., Drechsler, U., Du"rig, U., Ha"berle, W., Lutwyche, M., Rothuizen, H., Stutz, R., Widmer, R., Binnig, G., Rohrer, H., Vettiger, P., "VLSI-NEMS chip for parallel AFM data storage," Sensor. Actuat. A-Phys., Vol. 80, pp. 100-107, 2000.
6. Youn, S.W., Kang, C.G., Key Eng. Mater., "Maskless fabrication of the silicon stamper and its application to the PDMS casting process," Vol. 204-276, pp. 445-450, 2004.
7. Hahn, J. H., Lee, K. R., Kim, K. S., Lee, S. Y., "Principal and applications of nanoindentation test," J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 19, No. 3, pp. 19-26, 2002.
8. Li, Xiaodong, Gao, Hongsheng, Murphy, Catherine J., Caswell, K. K., "Nanoindentation of silver nanowires," Nano Lett., Vol. 3, No. 11, pp. 1495-1498, 2003.
9. Oliver, W. C., Pharr, G. M., "An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments," J. Mater. Res., Vol. 7, No. 6, p. 1564-1583, 1992.
10. Fischer-Cripps, Anthony C., "Nanindentation (Mech. Eng. Series)," Springer-Verlag, 2002.
11. Dowling, N.E., "Mechanical behavior of materials – Engineering methods for deformation, fracture, fatigue," Prentice hall(New Jersey, USA), pp.689-690, 1993.