

# 열간나노압입공정을 이용한 극미세 점구조체 제작을 위한 플라스틱소재 판의 기계적 특성 조사

이은경<sup>1</sup> · 강충길<sup>#</sup>

## A Study on the Plate-Type Polymer Hyperfine Pit Structure Fabrication and Mechanical Properties Measurement by Using Thermal-Nanoindentation Process

E. K. Lee, C. G. Kang

(Received November 3, 2008)

### Abstract

It's important to measure quantitative properties about thermal-nano behavior of polymer for producing high quality components using Nanoimprint lithography process. Nanoscale indents can be used to make the cells for molecular electronics and drug delivery, slots for integration into nanodevices, and defects for tailoring the structure and properties. In this study, formability of polymethylmetacrylate(PMMA) and polycarbonate(PC) were characterized. Polymer has extreme variation in thermo mechanical variation during forming high temperature. Because of heating the polymer, it becomes softer than at room temperature. In this case it is particularly important to study high temperature-induced mechanical properties of polymer. Nanoindenter XP(MTS) was used to measure thermo mechanical properties of PMMA and PC. Polymer was heated by using the heating stage on NanoXP. At CSM(Continuous Stiffness Method) mode test, heating temperature was 110°C, 120°C, 130°C, 140°C and 150°C for PMMA, 140°C, 150°C, 160°C, 170°C and 180°C for PC, respectively. Maximum indentation depth was 2000nm. At basic mode test, heating temperature was 90°C and 110°C for PMMA, 140°C, 160°C for PC. Maximum load was 10mN, 20mN and 40mN. Also indented pattern was observed by using SEM and AFM. Mechanical properties of PMMA and PC decreased when temperature increased. Decrease of mechanical properties from PMMA went down rapidly than that of PC.

**Key Words** : Thermal-Nanoindentation, Hardness, Elastic Modulus, Plate-type Polymer, Polymethylmetacrylate(PMMA), Polycarbonate(PC), Nanoindenter, SEM, AFM

### 1. 서 론

광 리소그래피 공정을 대체 또는 보완하기 위한 다양한 나노프로브 기반 리소그래피 기술들이 연구되고 있으며, 그 중에 나노압입공정은 초기 장비설치 및 장비가동에 드는 비용이 매우 저렴

하고, 공정이 간단하며, 소재의 선택이 자유롭다는 장점이 있어 널리 연구되고 있다[1~3].

반면, 팁의 마모, 느린 가공속도, 낮은 공정 효율 등의 단점도 가지고 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 고속 패터닝[4], 멀티팁을 이용한 패터닝[5], 나노프로브를 이용하여 제작한 패턴의 대

1. 부산대학교 하이브리드소재솔루션협동과정 (NCRC)  
# 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 급형가공연구소(ERC/NSDM),  
부산대학교 기계공학부, cgkang@pusan.ac.kr

량전사공정용 몰드로의 응용[6]등 다양한 연구가 시도되고 있다. 미국 사우스캐롤리나의 Li 그룹은 나노인텐터를 이용하여 silver nanowire의 기계적 성질측정 뿐만 아니라 절단 및 가공에 이용하였으며, Li 교수는 나노인텐터를 이용할 경우 나노급 속소재의 가공, 절단 등을 손쉽게 할 수 있으며, 소재에 형성된 나노압흔은 약물 전달용 셀(cell), 나노디바이스와의 연결을 위한 슬롯(slot), 나노저장매체를 위한 데이터 비트 등 다양한 분야에 응용될 수 있다고 전망하였다[7]. 미국 MTS Nano-Instruments Innovation Center의 Oliver group은 10um 흡을 가진 구형 사파이어 압자를 이용하여 PVAc (polyvinylacetate) 소재에 대한 열간변형거동 및 성형에 관한 연구를 수행 한바 있다[8]. Oliver group의 연구에서 사용되진 폴리머 소재는 PVAc (polyvinylacetate) 이며 성형에 중점을 두고 수행한 연구였으므로 물성치에 관한 내용이 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 PMMA(polymethylmetacrylate)와 PC(polycarbonate) 소재의 성형과 물성치 연구를 수행하였다.

폴리메틸메타크릴레이트(polymethylmetacrylate, PMMA)는 아크릴계 고분자이자 열가소성 플라스틱으로써 LCD용 도광판, 콘택트렌즈, 치과용 레진, DVD 디스크용 소재, 나노임프린트용 피가공재, 나노리소그래피 공정용 레지스트 등 많은 분야에서 활발히 사용되고 있다. 폴리카보네이트(polycarbonate, PC)는 투명성이 뛰어나며, 내충격성, 내열성, 치수안정성, 전기적 특성, 항균성 등 다른 폴리머 소재에 비하여 뛰어난 특징을 가진다. PC는 핸드폰, 전화기, TV부품등의 전기전자 분야에서부터 자동차정밀기계부품, 펌프부품과 같은 기계 분야, 의료보호용구 분야, 생활 잡화등과 같은 많은 분야에서 사용되어 지고 있다. 이와 같은 폴리머 소재는 우수한 생체 친화성, 광학성 특성을 가지며 응용되는 부품의 크기가 나노/마이크로 수준으로 감소함에 따라, 나노임프린트리소그래피(NIL)공정을 이용한 고품질 부품의 제조를 위해서 폴리머 소재들의 고온 나노 변형거동에 관한 정량적 물성치의 측정 및 D/B구축이 중요하다.

본 연구에서는 폴리머 소재(PMMA, PC)의 열간 나노압입실험에서 발생하는 경도, 탄성계수 및 하중의 변화를 조사하기 위하여 나노인텐터와 Hot stage를 이용한 연속강성측정법(Continuous Stiffness Measurement, CSM)을 실시하였다. 최대압입깊이 2,000nm에서의 온도변화가 폴리머소재의 기계적

성질에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, 유리전이온도 근처에서 압입하중을 달리하여 폴리머소재의 물성치를 측정하였으며, 이때 형성된 패턴 형상을 AFM과 SEM을 통해 관찰하였다.

## 2. 실험방법 및 소재

### 2.1 장비 및 소재

나노압입실험을 위한 장비로는 미국 MTS사에서 제작된 Nanoindenter XP가 사용되었다. 압입자로써는 끝나 반경이 >20nm로 알려진 다이아몬드 베르코비치(Berkovich)압자가 사용되었다. Fig.1는 본 연구에 사용된 Berkovich 팁에 대한 형상정보를 나타내고 있다.

실험을 위한 평판형 플라스틱 소재는 두께 2 mm 두께, 15×15mm<sup>2</sup>의 폴리메틸타크릴레이트(polymethylmetacrylate, PMMA)와 폴리카보네이트(polycarbonate, PC) 2종을 사용하였다. 소재의 표면 조도는 PMMA 14.4nm, PC 15.1nm로 측정되었다.

### 2.2 실험방법

Fig. 2는 열간나노압입실험의 개략도를 나타내고 있다. Heating System에 의해 원하는 온도로 가열된 열간스테이지에 시편을 고정시킨 후 인텐터 장비에 장착된 tip을 이용하여 molding과 demolding을 계속해서 수행하여 시편의 열간 물성치 측정을 하는 동시에 패턴 제작을 하게 된다.

PMMA소재의 열간나노압입 실험에서 온도가 변화할 때의 기계적 물성치를 평가하기 위하여 PMMA의 유리전이온도( $T_g$ : glass transition temperature) 105℃ 이상(110℃, 120℃, 130℃, 140℃, 150℃) 연속 강성측정법을 이용하여 9번 압입실험을 실시하였다. PC도 PMMA와 같이 연속강성측정법에 의해 9번 압입실험하여 기계적 특성을 평가하였다. 나노인텐터에서 연속강성측정법은 45Hz의 진동을 연속적으로 가하면서 정해진 깊이까지 압입하여 기계적 물성을 측정하는 방법이다. 이때의 데이터는 연속적인 값을 얻을 수 있다. PC의 유리전이온도는 150℃로 PMMA보다 높고 내열성이 좋은 소재로 알려져 있다. 유리전이온도의 상의함에 의하여 온도 변수를 150℃, 160℃, 170℃, 180℃로 하여 실험하였다.

또한, 하중의 변화에 따른 압흔의 형상의 변화를 알아보기 위하여 Hot stage method를 사용하여 10mN, 20mN, 40mN으로 하중을 변화시켜 실험을

시행하였으며, 온도는 PMMA 90℃, 110℃에서 실험하였으며, PC는 140℃, 160℃에서 실험하였다. 진동을 가하여 연속적인 값을 구하는 연속강성측정법과는 달리 Hot stage method에서는 상온의 basic mode와 같이 정해진 하중이나 압입깊이 만큼의 진동의 영향 없이 압입하여 최대압입깊이에서의 물성치를 구하는 방법이다. 연속적인 값을 구할 수는 없지만 진동의 영향을 최소화 할 수 있기 때문에 나노인덴터를 사용한 열간압입실험에서는 연속강성측정법보다 신뢰성 있는 물성치를 측정할 수 있다. 하중 인가 시간은 2초, 최대하중유지 시간은 2초로 설정하였다.

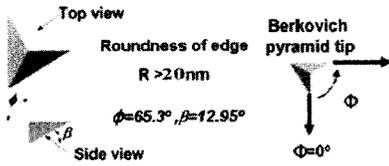


Fig. 1 Geometry of Berkovich tip

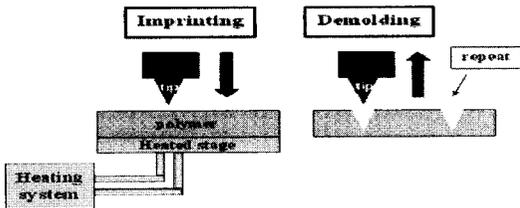


Fig. 2 Layout of the thermal nano-indentation process on polymer surface for hyperfine pit fabrication

### 3. 결과 및 토론

#### 3.1 연속강성측정(CSM) 실험

##### 3.1.1 PMMA 소재의 열간나노압입실험

PMMA소재의 고온에서의 성형성 및 기계적 특성을 관찰하기 위하여 온도를 변화시켜 최대압입깊이 2000nm로 하여 열간나노압입실험을 실시하였다. Fig. 3은 최대압입깊이 (2,000nm)에 따른 소재에 가해진 하중의 변화를 온도변화에 따라 나타낸 그래프이다. 온도가 올라갈수록 탄성회복에 의한 압입깊이의 복귀가 커짐을 관찰할 수 있다

최대깊이에서의 하중의 평균값은 Table 1과 같이 온도가 높아질수록 작아지는 반비례함을 관찰할 수 있었다.

Table 1 Max. load of PMMA according to temp.

	110 °C	120 °C	130 °C	140 °C	150 °C
Load (mN)	6.35	4.78	2.44	2.32	1.90

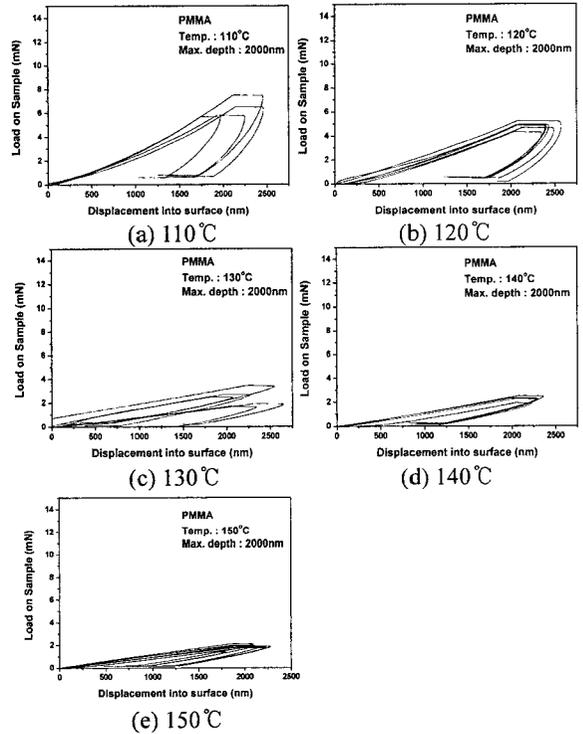


Fig. 3 Load-displacement curve of PMMA

Fig. 4는 CSM법에 의해 구해진 탄성계수의 곡선을 온도별로 나타내고 있다. 여기서 나타나는 300nm이하의 불규칙한 곡선은 팁이 완전히 뺏쪽한 이상적인 형상이 아닌 끝이 반경을 가진 구로 되어있기 때문에 팁 끝과 표면의 탄성접촉 현상에 의한 압입크기효과(Indentation Size Effect)[9]가 발생한다. 따라서 평균값은 압입크기효과를 배제한 500nm~1500nm영역의 평균값을 취하였다. Fig. 5는 PMMA소재를 연속강성측정법을 이용하여 2,000nm까지 압입하여 얻어진 경도값을 온도별로 나타내었다. 탄성계수와 마찬가지로 ISE 현상을 나타내고 있으며, 500~1,500nm영역의 평균값을 취하였다 탄성계수, 경도 모두 온도가 올라갈수록 낮아지는 경향을 확인 할 수 있었다. 연속강성측정법은 연속적인 값을 구하기 위하여 일정한 진동을 계속해서 가하기 때문에 열간나노압입실험에서 안정화 되어 있지 못하며 Hot stage method를 사용할

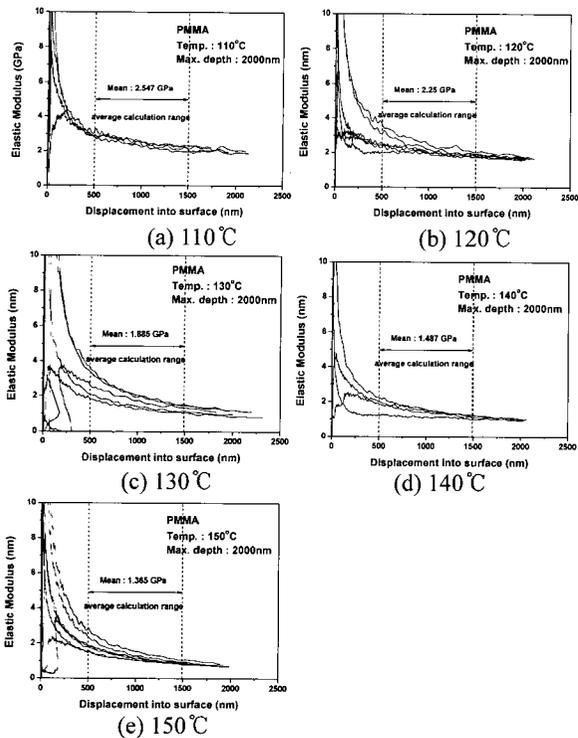


Fig. 4 Elastic modulus-displacement curve of PMMA

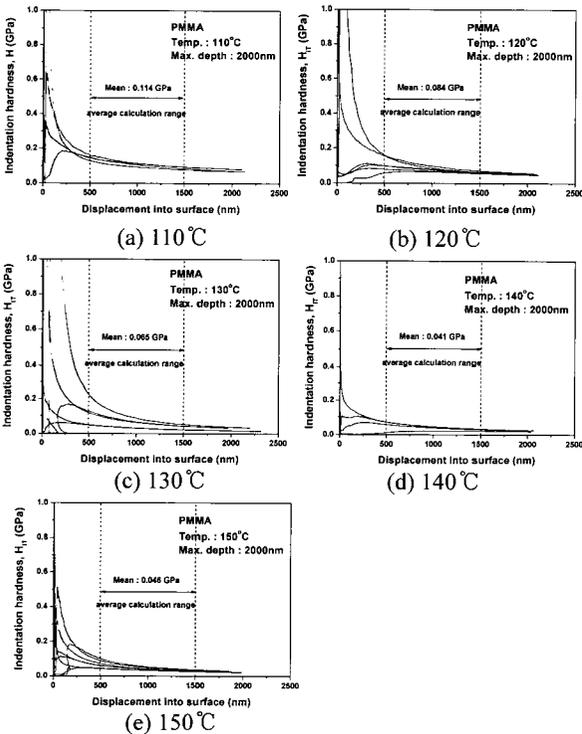


Fig. 5 Hardness-displacement curve of PMMA

**Table 2 Max. load of PC according to temp.**

	140°C	150°C	160°C	170°C	180°C
Load (mN)	10.91	11.50	9.80	7.94	7.32

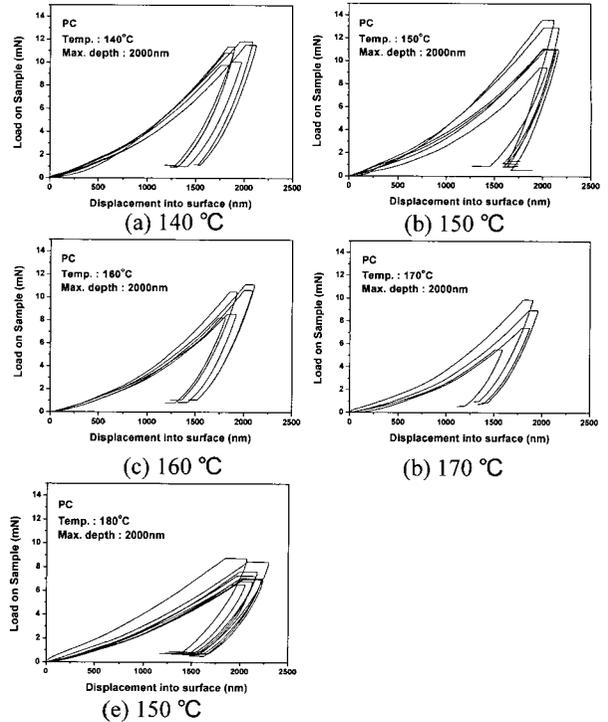


Fig. 6 Load-displacement curve of PC

수 없기 때문에 열간스테이지를 사용하여 시편을 가열한 후 상온에서와 같은 method를 사용하여 실험하였다. 그러므로 본 결과의 신뢰성은 떨어진다고 판단된다.

### 3.1.2 PC 소재의 연속강성측정(CSM)

PMMA와 마찬가지로 PC 또한 연속강성측정법을 사용하여 2,000nm까지 압입실험을 실시하였다. PC의 유리전이온도( $T_g=150^\circ\text{C}$ )보다 낮은 온도에서부터 유리전이온도이상의  $180^\circ\text{C}$ 까지 온도변화를 주어 PC의 고온에서의 기계적 특성 변화를 조사하였다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이 온도가 상승함에 따라 2,000nm까지 압입하는데 드는 하중이 감소하고 있다. PC 또한 하중제거 후 탄성회복이 생겼으며 이 변화량이 온도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. Fig. 3의 PMMA의 하중-변위 곡선과 비교해 보면 PMMA가 PC에 비하여 탄성회복이

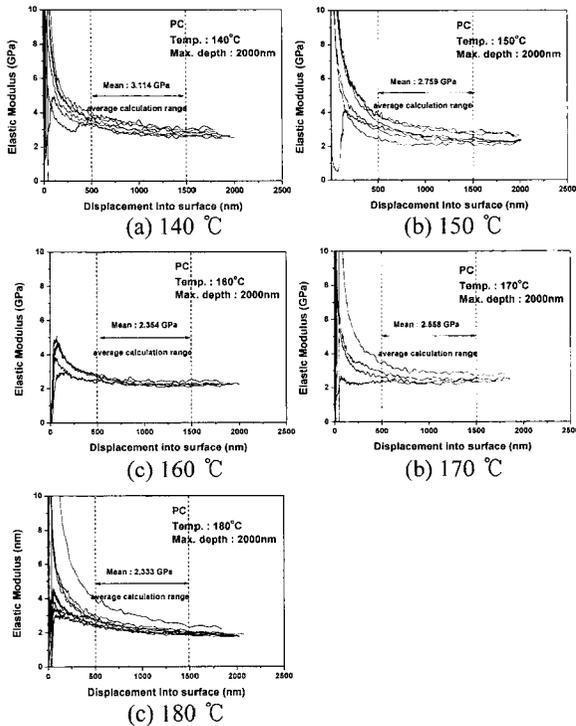


Fig. 7 Elastic modulus-displacement curve of PC

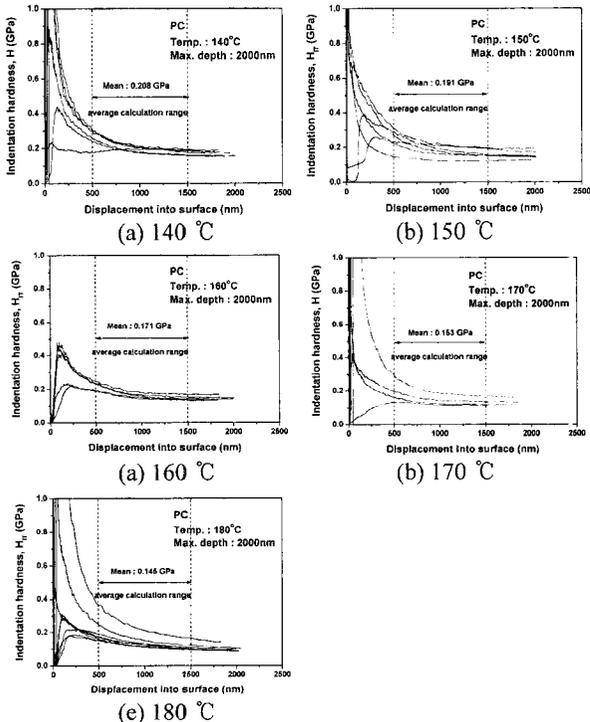


Fig. 8 Hardness-displacement curve of PC

Table 3 reduction rate of mechanical properties according to temperature reduction per 10°C

	PMMA	PC
Elastic modulus	29.55%	19.53%
Indentation hardness	1.70%	1.58%

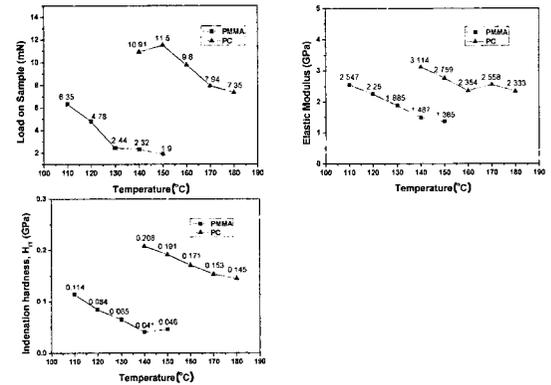


Fig. 9 Comparison of load, elastic modulus and indentation hardness of PMMA and PC according to temperature

더 급격히 나타났음을 알 수 있다.

PC의 열간나노압입실험에서 2,000nm까지 압입 시 최대하중 값을 Table 2에서 나타내었다. 표에서도 알 수 있듯이 온도가 올라감에 따라 최대하중 값이 감소하고 있다

Fig. 7은 PC의 온도변화에 따른 탄성계수를 나타내고 있다. 임의의 영역을 9번 압입하였으며, 압입크기효과를 배제한 500~1,500nm 구간의 값을 평균하여 값을 나타내었다. 온도가 높아짐에 따라 탄성계수가 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 8은 2,000nm 압입을 통한 경도 값을 온도 별로 나타내고 있다. 탄성계수와 같이 온도가 높아짐에 따라 경도 값이 감소하는 경향을 보였다. PC도 PMMA와 같이 탄성계수와 경도 모두 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 나타났다. 이와 같이 기계적 물성은 온도에 강하게 의존한다. 온도가 증가하면 유리전이온도에 이르기까지는 높은 탄성율을 유지하나 유리전이온도에서는 급격히 감소한다. 분자들의 움직임이 자유로워지면서 탄성률은 급격한 감소를 보인다. 온도의 증가는 분자들의 얽힘을 풀리는 것을 촉진시키기 때문에 온도가 증가하면 되면 기계적 물성치의 감소하게 된다[12].

### 3.1.3 PMMA와 PC 비교

2 $\mu$ m-CSM법으로 실험한 PMMA와 PC를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 온도변화에 따라 PC가 PMMA에 비하여 탄성회복이 크게 나타났으며, 온도에 따른 기계적물성치 즉 가압하중, 경도, 탄성계수의 변화가 PC보다 PMMA가 더 급격히 나타났다. PMMA와 PC의 물성치 감소률을 Table 3에 나타내었다. 온도가 10 $^{\circ}$ C씩 감소함에 PMMA에 비하여 PC의 물성치 감소률이 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 성질이 하중제거 시 탄성회복률에 영향을 주는 것으로 판단된다.

## 3.2 열간나노압입실험(Hot stage method)

### 3.2.1 PMMA 소재의 열간나노압입실험

PMMA의 열간나노압입실험에서 하중변화에 따른 압입형상, 가공깊이 및 하중제거후의 잔류깊이 측정을 위하여 Hot stage method에 의한 실험을 실시하였다. Hot stage method는 상온의 basic mode와 같이 정해진 하중까지 압입한 후 하중을 제거하여 하중제거점에서의 재료의 물성치를 측정한다. 열간나노압입실험시의 온도는 PMMA의 유리전이 온도 ( $T_g=105^{\circ}$ C) 전후의 온도인 90 $^{\circ}$ C, 110 $^{\circ}$ C로 설정하였으며, 하중은 10mN, 20mN, 40mN으로 실험을 실시하였다.

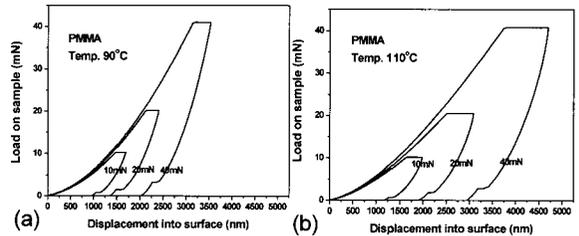
Fig. 10은 PMMA의 하중 및 온도변화에 따른 하중-변위 곡선이다. 여기서 확인할 수 있듯이 온도와 하중이 증가할수록 압입깊이가 증가함을 확인할 수 있다.

Fig 10에서의 최대압입깊이와 잔류깊이의 변화를 table 4에 나타내었으며, Fig. 11에 PMMA의 온도별(90 $^{\circ}$ C, 110 $^{\circ}$ C) 하중의 변화에 따른 탄성회복율을 나타내었다. 탄성회복율은 90 $^{\circ}$ C 에서 하중의 10mN, 20mN, 40mN 변화에 따라 탄성회복율43.3%, 43.1%, 42.5%로 나타났으며, 110 $^{\circ}$ C 에서는 40.8%, 38.4%, 37.4%로 나타났다. 탄성회복률은 하중의 변화의 영향을 거의 받지 않은 것으로 판단되며, 온도가 올라감에 따라 탄성률이 떨어지므로 탄성회복률이 줄어든 것으로 판단된다.

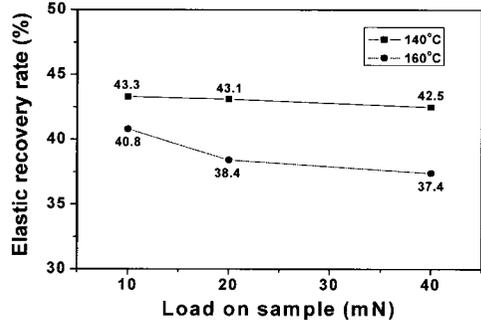
PMMA의 온도변화와 하중변화에 따른 탄성계수, 경도값을 Fig. 12에 나타내었다. 기계적 물성치는 하중의 변화에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보이나, 온도의 증가에 따라 물성치가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 온도가 증가함에 따라 분자들의 얽힘이 풀리는 것을 촉진하여 분자들의 움직임이 자유로워지면서 탄성율, 경도값의 감소를 촉진시킨다[12].

**Table 4** Variation of Indentation depth according to load of PMMA

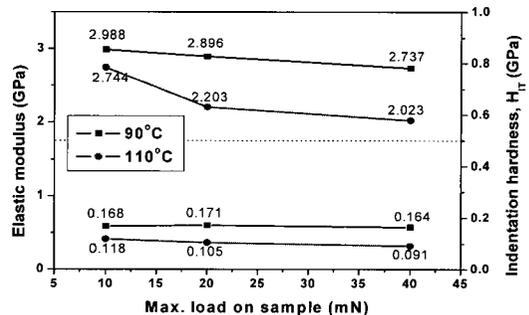
		10mN	20mN	40mN
90 $^{\circ}$ C	Max. depth (nm)	1,688	2,397	3,533
	Residue depth(nm)	960	1,358	2,031
110 $^{\circ}$ C	Max. depth (nm)	1,986	3,091	4,699
	Residue depth(nm)	1,175	1,905	2,942



**Fig.10** Effect of indentation load on the load-displacement curve of PMMA (a) temperature 90 $^{\circ}$ C and (b) temperature 110 $^{\circ}$ C



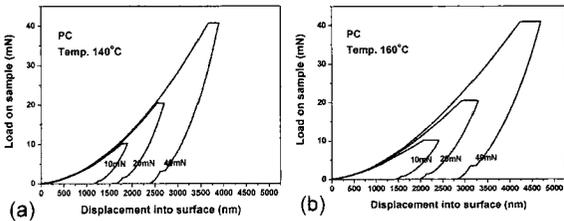
**Fig.11** Elastic recovery rate of PMMA according to loads and temperatures



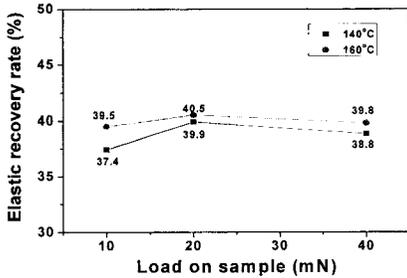
**Fig.12** Mechanical properties of PMMA according to variation of temperature

**Table 4** Variation of indentation depth according to load of PMMA

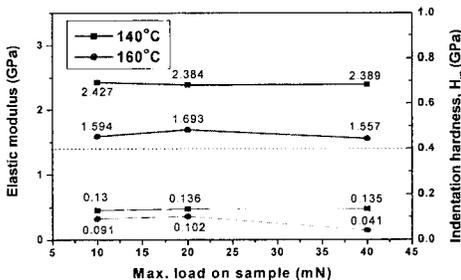
		10mN	20mN	40mN
140°C	Max. depth (nm)	1,894	2,705	3,893
	Residue depth(nm)	1,152	1,626	2,382
110°C	Max. depth (nm)	2,412	3,290	4,695
	Residue depth(nm)	1,442	1,990	2,825



**Fig.13** Effect of indentation load on the load-displacement curve of PC (a) temperature 140°C and (b) temperature 160°C



**Fig.14** Elastic recovery rate of PC according to loads and temperatures



**Fig.15** Mechanical properties of PC according to variation of temperature

### 3.2. PC 소재의 열간나노압입실험

PC또한 PMMA와 마찬가지로 하중변화와 온도 변화에 따른 가공깊이, 잔류깊이, 압입형상의 변화

를 측정하기 위하여 Hot stage method 를 사용하여 열간나노인덴테이션 실험을 실시하였다. 온도는 PC 의 유리전이온도( $T_g=150^\circ\text{C}$ ) 전후의 온도인 140°C, 160°C에서 실험하였으며, 하중은 PMMA와 같이 10mN, 20mN, 40mN으로 변화시켜 실험하였다.

Fig. 13는 온도 140°C, 160°C에서의 PC의 하중변화별 하중-변위곡선이다. 하중의 증가와 온도에 증가에 따라 가공깊이가 증가하였음을 알 수 있다. Fig. 13에서 알 수 있듯이 온도가 올라가면 PMMA와 마찬가지로 탄성계수, 경도 값등의 온도의 영향으로 감소하였다. 이에 따라 같은 하중에서도 온도가 증가하면 가공깊이가 증가하게 된다.

PC가 140°C, 160°C 일 때의 하중의 변화에 따른 가공깊이와 잔류깊이의 양상을 Table 5에 나타내었다. Fig.14는 이때의 탄성회복률을 나타내고 있다. 140°C에서는 10mN, 20mN, 40mN에서 37.4%, 39.9%, 38.8%로 약 38%의 회복률을 보였으며, 150°C에서는 같은 하중에서 39.5%, 40.5%, 39.8%로 약 40% 정도의 회복 양상을 보였다. 온도가 올라갈수록 회복률이 높았으며, 이는 PMMA의 경우와는 달리 탄성률의 영향만이 아닌 하중제거 후 PC 온도의 영향을 많이 받은 것으로 판단된다.

극미세 패턴 제작을 위한 압입실험에서 얻어지는 PC의 기계적 물성치를 Fig. 15에 나타내었다. PMMA와 마찬가지로 기계적 물성치는 하중이 증가한다고 하여 기계적 물성치의 차이가 크지 않고 거의 일정하였으나, 온도의 증가에 따라 물성치가 감소하고 있다. 이 또한 온도의 증가로 분자들의 얽힘을 풀어 생기는 현상에 의한 것이다.

### 3.2.3 압흔 형상의 관찰

Fig. 16와 Fig. 17은 Basic method를 사용하여 실험한 PMMA, PC의 압입형상의 SEM image를 보여주고 있다. Fig. 14(b)는 PMMA의 110°C에서의 SEM image지만 110°C에서는 thermal reflow로 인하여 모두 복귀되어 압흔의 관찰이 어려웠다.

Fig. 17은 하중에 따른 압흔의 형상 및 크기의 변화를 보여준다. 하중이 증가할수록 압흔의 크기는 커지며 PC의 경우 온도가 증가함에 따라 압흔의 크기는 커졌으나 높은 온도에 의해 소재에 비틀림 생겨 압입형상이 약간 뒤틀려 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 18, 19, 20은 PMMA와 PC의 온도와 하중변화에 따른 압입형상의 AFM image를 보여주고 있다. SEM image에서 확인할 수 있었듯이 하중의 증가와

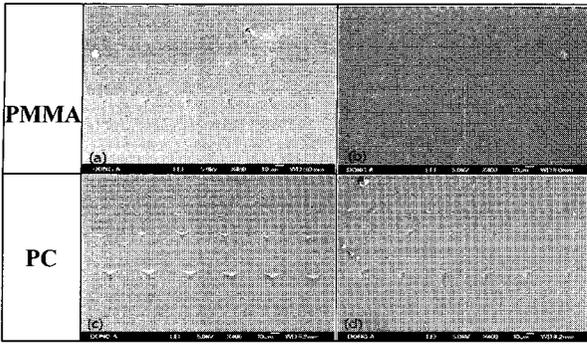


Fig.16 SEM image of nanoindent PMMA and PC surface according to temperature

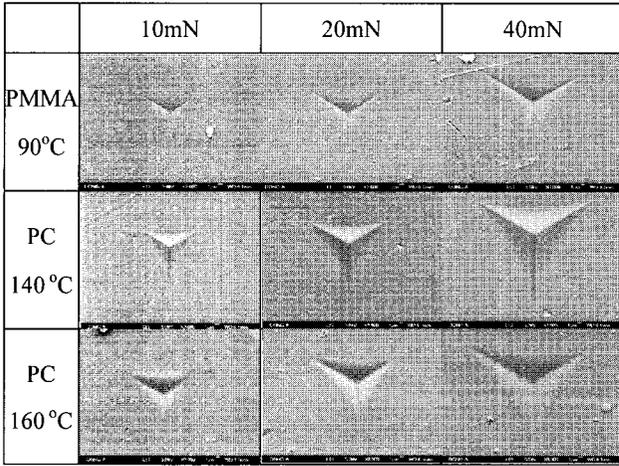


Fig.17 SEM image of nanoindent on PMMA and PC under different indentation loads

온도의 증가가 압입형상에 영향을 주고 있다. Fig. 18, 19, 20의 붉은 선(line A, B, C)의 surface profile을 Fig. 21과 22에 나타내었다. 보통 폴리머 소재의 상온 나노압입실험에서의 압입형상은 pile-up 현상이 나타난다. 하지만 열간에서 실험한 결과 90°C의 PMMA에서는 pile-up 현상이 생기긴 하였으나 상온에서의 pile-up 현상에 비하여 완화된 것을 확인할 수 있다. 또한 fused silica와 같은 유리 재료에서 관찰되는 Sink-in 현상도 나타났다. Pile-up 현상의 완화와 Sink-in 현상등이 나타나는 이유는 폴리머 소재가 고온으로 가열되어 생겨난 것으로 생각되며 이에 따른 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

또한, Fig. 21 과 Table 4의 잔류깊이를 비교하여 보면, 하중제거 직후의 잔류깊이는 10mN, 20mN, 40mN 에서 960nm, 1,358nm, 2,031nm로 나타났으나, 실험이 완료된 후의 잔류깊이의 양상을 관찰해 보면 약 150nm, 230nm, 320nm로 나타난다.

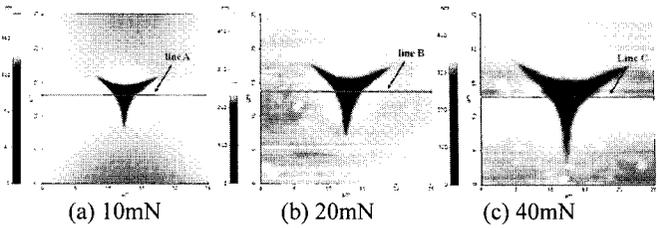


Fig.18 AFM image of nanoindent on PMMA under different indentation loads:(a) 10mN, (b) 20mN and (c) 40mN at 90 °C

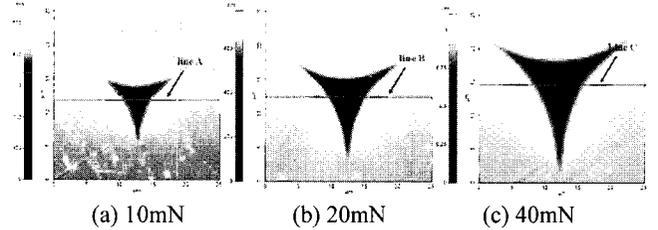


Fig.19 AFM image of nanoindent on PC under different indentation loads: (a) 10mN, (b) 20mN, (c) 40mN at 140 °C

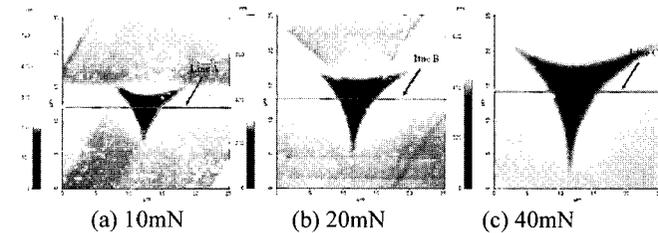


Fig.20 AFM image of nanoindent on PC under different indentation loads: (a) 10mN, (b) 20mN, (c) 20mN at 160 °C

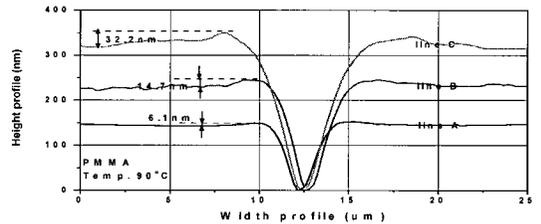
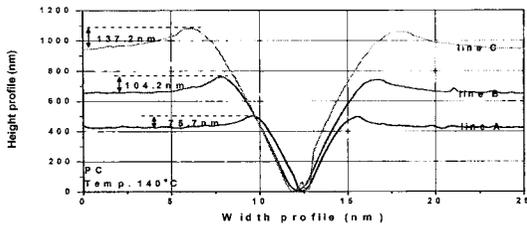


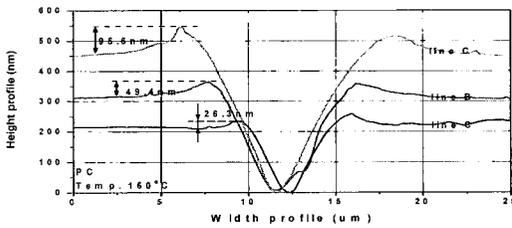
Fig.21 Surface profiles along line A, B and C in Fig. 18

#### 4. 결론

고온에서 폴리머 소재의 나노압입을 이용한 패턴제작을 위하여 열간나노압입실험을 통해 열간에서의 폴리머(PMMA, PC)의 기계적 특성을 평가하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.



(a) Temp. = 140°C



(b) Temp. = 160°C

Fig.22 Surface profiles along line A, B and C in (a) Fig. 18 (Temp. = 140°C), (b) Fig. 19 (Temp. = 160°C)

(1) PMMA, PC 소재 모두 온도가 높아질수록 같은 깊이를 압입할 때의 가해 지는 최대하중이 감소하였으며, 또한 온도의 영향에 의하여 기계적 특성(탄성계수, 경도)도 감소하였다.

(2) 이는 PMMA 와 PC 는 온도의 영향에 의하여 유리전이온도 이하에서는 탄성의 영향을 강하게 받으며 유리전이온도 보다 높을 경우 점성을 띠게 되는 고분자의 점탄성 성질을 영향으로 기계적 성질이 감소 한 것으로 판단되며 이는 분자들의 자유부피의 증가에 따라 나타나는 현상이므로 분자량과 분자들의 움직임에 따른 열간에서의 추가적 실험이 필요하다.

(3) Hot stage method 에서도 이러한 점탄성 성질의 영향으로 유리전이 온도에 가까워질수록 기계적 성질(탄성계수, 경도)이 감소였다. PMMA 에서는 90°C에 비하여, PMMA 의 유리전이 온도 이상인 110°C에서 탄성회복률이 낮게 나타났으나, 하중제거후의 온도의 영향으로 110°C에서는 압흔의 관찰이 어려웠다.

(4) 이에 비하여, PC 에서는 유리전이온도 이상에서의 (test temp.=160°C) 회복률이 유리전이온도 이하 (test temp.=140°C)에서 보다 회복률이 약간 높게 나타났으며 이는 고분자의 점탄성 성질에 따라 유리전이온도 이상에서 탄성의 영향보다 점성의 영향이 높아져 나타난 현상으로 판단된다.

(5) 열간에서의 실험으로 인하여 pile-up현상은

완화되었으나, sink-in 현상이 나타났으며, 하중제거 후에도 높은 온도로 인한 복귀현상이 나타났다. 이와 같은 고온에서 하중제거 후의 압입형상, 압입깊이의 변화는 패턴 제작 시 중요하게 고려되어야 할 사항이다.

## 후 기

본 연구는 학술진흥재단의 기초연구지원 기초과학과제 (과제번호: D00309)지원 하에 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. Hardt, B. Grnesan, W. Qi, M. Dirckx, A. Rzepniewski, 2004, Process Control in Micro-Embossing-A Review, Singapore MIT Alliance Programme (SMA) in Innovation in Manufacturing Systems and Technology (IMST).
- [2] C. G. Choi, 2004, Fabrication of optical waveguides in thermosetting polymers using hot embossing, J. Micromech. Microeng., Vol. 14, pp. 945~949.
- [3] W. S. Kim, K. B. Yoon, B. S. Bae, 2005, Nanopatterning of photonic crystals with a photocurable silica-titania organic-inorganic hybrid material by a UV-based nanoimprint technique, J. Mater. Chem., Vol. 15, pp. 4535~4539.
- [4] K. Ishihara, M. Fujita, I. Matusubara, T. Asano, S. Noda, 2006, Direct Fabrication of Photonic Crystal on Glass Substrate by Nanoimprint Lithography, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 45, No. 7, pp. 210~212.
- [5] B. Heidari, I. Maximov, L. Montelius, 2000, Nanoimprint lithography at the 6 in. wafer scale, J. Vac. Sci. Technol. B Vol. 18, No. 6, pp. 3557~3560.
- [6] N. S. Cameron, H. Roberge, T. Veres, S. C. Jakeway, H. J. Crabtree, 2006, High fidelity, high yield production of microfluidic devices by hot embossing lithography: rheology and stiction, Lab Chip, Vol. 6, No. 7, pp. 936~941.
- [7] X. Li, B. Bhushan, 2003, Fatigue studies of nanoscale structures for MEMS/NEMS applications using nanoindentation techniques, Surface and Coatings Technology, Vol. 163-164, pp. 521~526.

- [8] Graham L. W. Cross, Barry O'Connell, John B. Pethica, Warren Oliver, 2003, Mechanical Aspects of Nanoimprint Patterning, Nanotechnology, 2003. IEEE-NANO 2003. 2003 Third IEEE Conference on, Vol. 2, pp. 494~497.
- [9] L. J. Guo, 2004, Recent Progress in nanoimprint technology and its application, J. Pzhys. D. Vol. 37, pp. 123~141.
- [10] H. C. Scheer, H. Schulz, 2001, A contribution to the flow behaviour of thin polymer films during hot embossing lithography, Microelectronic Eng., Vol. 56, pp. 311~332.
- [11] D. Yao, V. L. Virupaksha, Study on Squeezing Flow During Nonisothermal Embossing of Polymer Microstructures, Polymer eng. and Sci., Vol. 45, No. 5, pp. 652~660.
- [12] P. S. Malcolm, 1999, Third edition Polymer-chemistry, Oxford University Press, pp. 100~106.