

마이크로/나노 폴리머 구조물의 기계적 물성 측정 기술

정수정, 김재현, 이학주 | 한국기계연구원

1. 서 론

최근 MEMS/NEMS, 전자 소자, 광전자 소자, 생체 소자 등과 같은 대부분의 미소 소자 구성에서 폴리머 구조물들이 많이 이용되고 있다. 또한 소자의 고집적화, 공정 속도의 고속화, 소자의 소형화에 대한 시장 요구에 따라 소자뿐만 아니라 폴리머 구조물의 임계 크기도 점점 작아지고 있다^[1]. 특히, 경제적이고 비교적 빠른 속도로 폴리머 구조물을 만들 수 있는 나노 패터닝 (nano-patterning) 기술의 지속적인 개발로 현재는 수십 나노 급의 폴리머 구조물 패터닝을 대량으로 생산할 수 있는 기술이 개발되고 있다.

마이크로/나노 스케일의 폴리머 구조물을 이용하여 신뢰성 있는 소자를 제작하기 위해서는 폴리머 구조물의 여러 가지 물성들을 파악하는 것이 중요하다. 또한, 이러한 물성들은 정확하고 반복성을 가지고 측정되어야 하며, 폴리머 구조물을 이용하는 소자나 부품의 설계 및 성능 예측이나 폴리머 구조물의 제조 공정 개발에 활용될 수 있어야 한다. 특히, MEMS/NEMS 등의 분야와 같이 부품이 기계적인 운동을 포함할 때에는 폴리머 구조물의 다양한 물성 중에서 기계적인 물성이 매우 중요한 역할을 하게 된다. 일반적으로 마이크로/나노 구조물의 기계적인 물성은 거대 구조물의 기계적 물성과 차이가 있다고 알려져 있으므로, 즉 구조물의 크기에 따라 기계적 물성이 다를 수 있으므로, 실제 공정 및 제품에 사용되는 구조물의 크기와 같은 크기를 가지는 시편을 제작하여 그 물성을 측정할 필요가 있다.

대부분의 폴리머 재료의 경우 탄성 변형을 하는 고체의 성질과 점성 (viscosity)의 흐름을 가진 액체의 성질을 동시에 나타내는 점탄성 거동 (visco-elastic behavior)을 주로 보인다. 탄성을 가진 보통 고체는 힘을 제거하면 훅의 법칙 (Hook's law)에 따라 단시간 내에 원상태로 돌아가지만, 폴리머 재료의 경우 원상태로 복원될 때까지 더 많은 시간이 걸린다. 이러한 폴리머의 복잡한 점탄성 거동으로 인해 폴리머 재료의 기계적 물성을 정확히 측정하는 일은 쉽지 않다. 최근 폴리머 재료에 대한 기계적 물성 측정과 관련하여 나노압입 (nanoindentation)을 이용한 연구들이 많이 이루어져 왔지만, 벌크 (bulk) 폴리머나 폴리머 박막 (thin film)에 대한 물성 측정 연구가 대부분이다^[2-7]. 위에서 설명한 것과 같이 폴리머 재료는 점탄성 특성을 갖기 때문에 나노압입 시 압입 하중, 변위에 대한 경계 조건이 변할 수 있다. 이러한 문제를 보완하기 위해 몇몇 연구자들은 일반적으로 쓰이는 뾰족한 형태의 팁 (Berkovich, Conical, etc.) 대신 바닥면이 평평한 기둥 형태의 팁 (Flat Punch tip)을 사용해 폴리머 박막에 대한 나노압입 연구를 많이 수행해 왔다^[8-11]. 그러나 실제 소자나 부품에서 박막 형태뿐만 아니라 패터닝을 갖는 마이크로

나노 폴리머 구조물 형태가 많이 이용되고 있는데, 아직까지 이러한 마이크로/나노 폴리머 구조물의 기계적 물성 측정에 대한 기존 연구나 문헌이 거의 없는 상태이다.

마이크로/나노 구조물에 대한 기계적 물성 측정에서 하중과 변위를 정확히 측정하는 것이 매우 중요한데, 현재 하중과 변위 분해능 (resolutions)이 뛰어나고 시험 절차가 비교적 쉬운 나노압입 장비 (nanoindentation apparatus)가 가장 많이 사용되고 있다. 또한, 나노압입 장비는 마이크로/나노 폴리머 구조물에 대한 기계적 물성 측정에서도 그 활용이 클 것으로 보인다. 현재 본 그룹은 나노 공정 측정 및 평가 기술 개발을 수행하고 있으며, 그 중 마이크로/나노 폴리머 구조물에 대한 기계적 물성 측정 기법으로 나노압입을 응용한 마이크로/나노 기둥 압축 시험 (Micro/Nano Pillar Compression Test) 기술 개발을 진행하고 있다. 앞으로 기술될 내용에서는 나노압입을 응용한 마이크로/나노 기둥 압축 시험에 대한 개략적인 소개와 현재 연구내용, 향후 연구 계획 등을 중심으로 본 연구 내용을 소개하기로 한다.

2. 마이크로/나노 기둥 압축 시험 기술

2.1 마이크로/나노 기둥 압축 시험 개요

마이크로/나노 기둥 압축 시험의 개념은 그림 1과 같이 모재 위에 원기둥 형상의 마이크로/나노 폴리머 구조물을 제작하고, 나노압입 시험기를 이용한 일축 압축 시험 (uniaxial-compression test)을 수행하여 구조물의 기계적 물성을 얻는 시험 방법이다. 마이크로/나노 기둥 압축 시험법은 매우 정밀한 하중 및 변위 센서를 사용하는 나노압입 시험기를 사용하기 때문에, 압축 시험 동안 마이크로/나노 구조물의 하중-변위 관계를 정확히 측정할 수 있다. 측정된 하중-변위 관계로부터 일반적인 압축 시험에 대한 간단한 관계식을 이용하여 응력-변형률 관계를 구할 수 있고, 이로부터 탄성계수 (elastic modulus), 항복강도 (yield strength) 등을 얻을 수 있다.

일반적인 나노압입 시험에서는 대부분 뾰족한 팁을 사용하여 국부적인 영역을 압입하게 되므로 팁의 끝부분에서 응력집중이 많이 발생하게 된다. 그러나 본 연구의 기둥 압축 시험법은 평평한 팁을 이용해 시편에 균일한 하중을 가할 수 있기 때문에 상대적으로 응력 집중으로 인한 모재 영향을 줄일 수 있다. 또한, 압축 시험 동안 하중, 변위 경계 조건의 변화가 없으므로 폴리머의 점탄성 물성을 쉽게 구할 수 있다.

2.2 마이크로/나노 기둥 압축 시험기

마이크로/나노 스케일의 구조물에 대한 압축 시험을 수행하기 위해서는 정밀한 하중 및 변위 측정 장비가 필요하다. 본 연구에서는 그림 2와 같은 MTS사의 상용 나노인덴터 XP를 이용하여 마이크로/나노 폴리머 기둥에 대한 압축 시험을 수행하였다. 그림 2는 시험기에 대한 개념도와 실제 장비 그림을 나타내고 있으며, 이 장비의 경우 0.02 nm의 변위 분해능과 50 nN의 하중 분해능을 갖는다^[13].

나노압입 장비를 이용한 나노 기둥 압축 시험의 개

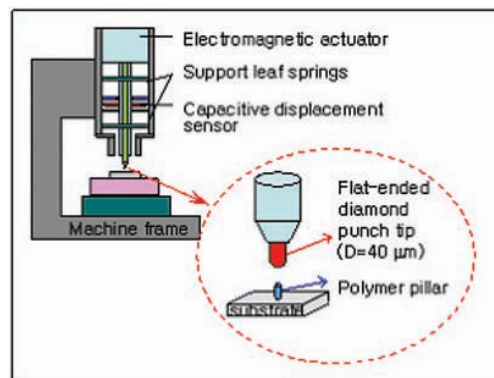


그림 1. Schematic of Nano Pillar Compression Test using a nanoindentation apparatus

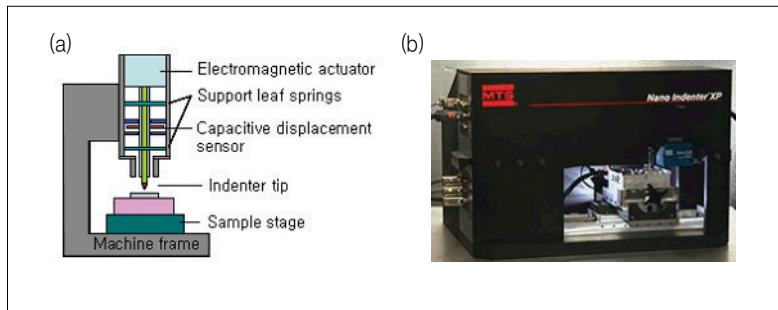


그림 2. (a) Schematic and (b) real image of Nanoindenter XP

략도는 그림 1에 나타나 있다. 그리고 원기둥 시편 윗면에 균일한 하중을 가하기 위해 그림 8(a)와 같이 직경이 약 $40\mu\text{m}$ 이고 바닥 면이 평평한 다이아몬드 팁 (Cylindrical Diamond Flat Punch tip)을 사용하였다.

2.3 마이크로/나노 기둥 압축 시험 절차

나노압입 장비를 이용한 나노기둥 압축실험의 절차는 다음과 같다. (1) 먼저 폴리머 기둥이 올라가 있는 글래스 시편을 나노인덴터의 시편 홀더(sample holder)에 부착한다. 그리고 시편 (폴리머 기둥)의 윗면과 팁의 바닥면 사이가 평행이 되도록 시편 홀더를 시편 트레이 (sample tray)에 고정시킨다. (2) 폴리머 기둥에 균일한 하중을 가하기 위해 바닥면이 평평한 다이아몬드 팁을 나노인덴터의 헤드(head)에 장착한다. (3) 하중이 정확히 폴리머 기둥 중앙에 가해지도록 하기 위해 x-y 위치보정 (position calibration)을 한다. (4) 일정한 변형률 속도 (strain rate) 하에서 일축 압축 시험을 수행한다.

2.4 마이크로/나노 스케일 폴리머 기둥 제작

일축 압축 실험을 수행하기 위해 원기둥 형상의 폴리머 구조물을 나노 스트레오 리소그래피 (Nano Stereo Lithography, NSL) 가공 기술을 이용하여 제작하였다. 나노 스트레오 리소그래피 기술의 기본 원리는 백 나노미터 수준의 얇은 슬라이스를 계속 적층하여 구조물을 형성하는 방법으로, 본 연구에서는 펌토초 레이저를 조사하면 이 광자 흡수 (two-photon absorption, TPA)에 의해 광경

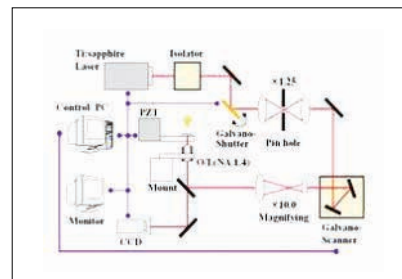


그림 3. Schematic diagram of Nano Stereo Lithography system for TPA-induced photo-polymerization

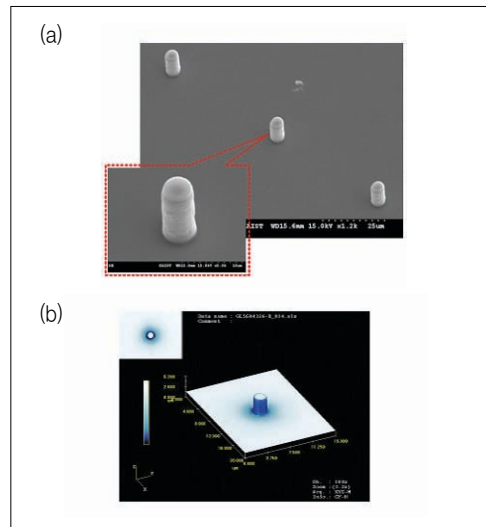


그림 4. (a) SEM image and (b) 3-D shape of UV-curable polymeric pillar

화 수치가 굳어지는 원리^[14]를 이용하였다. 시편 제작에 사용된 나노 스트레오 리소그래피 장비는 그림 3과 같이 구성되어 있다. 그리고 폴리머 기둥을 만들기 위해 사용된 재료는 일본 합성 고무사의 우레탄 아크릴계 단량체와 올리고머가 혼합된 SCR500 레진으로 이 레진에 0.1%의 비율로 photo initiator (TP-Flu- TP2)를 섞어 형상 제작에 사용하였다. 이러한 과정을 통해 직경이 500 nm ~ 10 μm 이고 세장비 (aspect ratio, 기둥의 직경에 대한 높이 비)가 2~3인 폴리머 기둥 시편을 각각 제작하였다. 그림 4는 나노 스트레오 리소그래피 기술로 만들어진 직경이 5 μm 이고 세장비가 2.5인 UV-경화 폴리머 기둥을 SEM으로 찍은 사진을 나타내고 있다.

마이크로/나노 기둥 압축 시험에서 측정된 하중-변위 선도로부터 응력-변형률 선도를 얻기 위해서는 폴리머 기둥의 초기 단면적과 높이를 정확하게 측정하는 것이 중요하다. 그러나 세장비가 큰 마이크로/나노 폴리머 구조물의 경우 시편에 다른 후처리를 하지 않고 폴리머 시편 자체의 형상과 치수를 정확하게 측정하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 Laser Scanning Microscope를 이용하여 폴리머 구조물의 형상과 치수를 측정하였다. 그림 4(b)는 Laser Scanning Microscope를 이용해 얻은 직경 2 μm 의 UV-경화 폴리머 기둥의 3차원 형상 이미지를 나타내고 있다.

3. 마이크로/나노 기둥 압축 시험법을 이용한 물성 측정 결과

3.1 UV-경화 폴리머 기둥의 탄성계수와 항복강도

본 연구에서 모든 시험은 최대 변형률이 될 때까지 5번의 하중 부하/제하 사이클 (loading/unloading cycle)을 반복하는 조건 하에서 수행되었다. 또한, 모든 시험은 압축 시험에 대한 표준 시험 방법 (ASTM)과 같이 변형률 제어 하에서 수행되었다. 그림 5는 UV-경화 폴리머 기둥에 대한 압축 시험으로부터 얻은 응력-변형률 선도를 나타내고 있다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 각각의 사이클의 하중 부하 구간 동안 UV-경화 폴리머 기둥은 압축 시험에서 폴리머 재료가 나타내는 일반적인 응력-변형률 거동(선형 탄성, 비선형 탄성, 항복과 비슷한 거동, 변형률 완화 그리고 완전 소성에 가까운 거동)을 나타내고 있다.

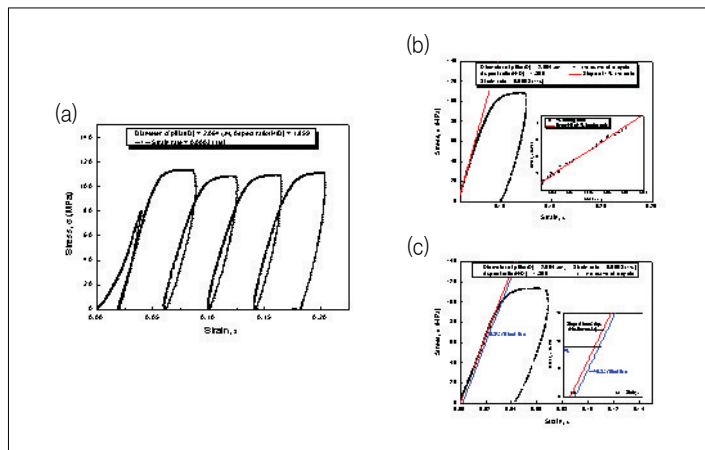


그림 5. (a) Stress-strain curve, (b) linear-curve fitting for obtaining elastic modulus and (c) 0.2% offset method to obtain yield strength of UV-curable polymeric pillar

UV-경화 폴리머 기둥의 탄성 계수는 그림 5(a)와 같이 인텐터 팁과 폴리머 기둥 시편 사이에 완전한 접촉이 일어났다고 판단되는 사이클의 하중 부하 구간에서 변형률 1% 이내의 데이터에 대한 기울기로부터 구했다. 일반적으로 나노압입 실험에서 하중 제하 시의 기울기 (즉, 시편의 강성)으로 부터 탄성 계수를 구하게 된다. 그러나 본 압축 실험 결과에서 모든 사이클의 초기 하중 제하 구간에서 응력과 변형률 사이의 기울기가 음의 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과의 원인은 정밀 측정 센서에 있어서 자주 동반되는 노이즈 중의 하나인 센서의 열적 흐름 (thermal drift)이나 재료의 크리프 거동이 그 원인이라고 판단된다. 현재로는 폴리머 재료의 크리프 거동의 영향이 더 클 것으로 판단되며^[15,16], 이러한 UV-경화 폴리머의 점탄성 거동은 3.3절에서 설명할 것이다. 또한, UV-경화 폴리머 기둥에 대한 항복 강도는 그림 5(b)와 같이 압축 시험에 대한 표준 시험 방법에서 일반적으로 사용되는 0.2% 오프셋 방법 (0.2% offset method)을 통해 구하였다.

3.2 하중 조건과 시편 크기에 따른 영향

서론에서 언급한 것과 같이 일반적으로 폴리머 재료는 응력이 변형률에 비례하는 탄성고체와 응력이 변형률 속도 (변형률의 시간변화율)에 비례하는 점성유체의 중간적인 특성인 점탄성 거동을 나타낸다. 이러한 점탄성 특성을 나타내는 폴리머 재료의 경우, 변형률 속도가 응력에 영향을 주며 응력과 변형률 속도 사이의 관계가 비선형적이라고 알려져 있다. 본 시험에서는 변형률 속도, 즉, 하중 조건에 대한 영향을 알아보기 위해 직경이 같은 UV-경화 폴리머 기둥에 대해 변형률 속도를 변화시켜 가며 압축 실험을 수행하였다.

그림 6은 실험을 통해 직경 $2\mu\text{m}$ 의 UV-경화 폴리머 기둥에 대해 다양한 하중 조건 하에서 측정된 응력-변형률 선도를 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이, 변형률 속도가 응력-변형률 선도에 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 즉, 변형률 속도가 클수록 같은 변형률에 대한 응력의 크기가 더 크고 응력과 변형률 속도 사이의 관계는 비선형적임을 알 수 있다. 그림 6(b)와 (c)는 다양한 하중 조건과 시편 크기가 다른 UV-경화 폴리머 기둥에 대해 각각 수행된 압축 실험으로부터 얻은 탄성계수와 항복강도를 나타내고 있다. 여기서 탄성계수는 하중 조건이나 시편 크기와 큰 상관관계가 없으며, 변형률 속도가 클수록 항복강도가 비선형적으로 증가하고 있고 기둥의 직경이 클수록

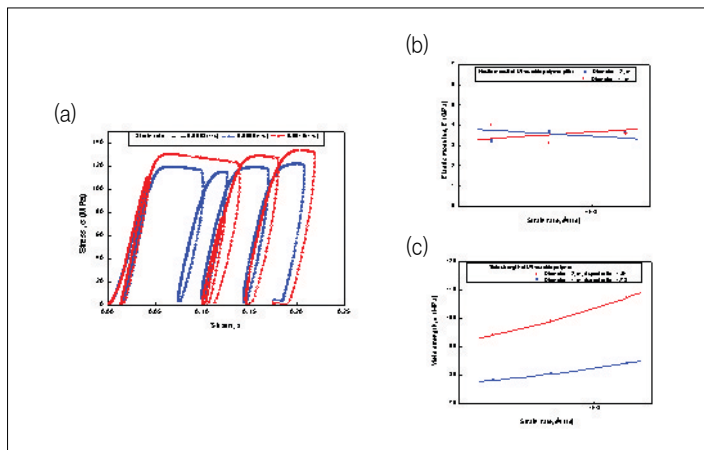


그림 6. (a) Stress-strain curve with a diameter of $2\mu\text{m}$, (b) the elastic modulus and (c) the yield strength of UV-curable polymeric pillar at various strain rates

록 항복강도가 더 큼을 알 수 있다. 이러한 결과는 보통 금속 재료의 미소 구조물에서 나타나는 크기 효과와는 반대이다. 아직 위의 결과에 대한 정확한 원인을 설명할 수는 없으나, 현재로는 직경에 대한 세장비의 차이로 인한 오차와 폴리머 기둥 제작 공정에서의 UV 조사 시간의 차이로 생각된다^[15].

3.3 점탄성 물성 측정을 위한 Modified Creep Test

3.3.1 나노압입장비에 의한 기존 크리프 혹은 응력완화 시험의 한계

나노압입 장비가 마이크로/나노 폴리머 구조물에 대한 좋은 측정 장비가 될 수 있지만, 점탄성 재료에 대한 크리프 실험 (creep test)나 응력완화 실험 (stress relaxation test)을 수행하는데 한계가 있다. 폴리머 재료에 대한 점탄성 물성을 측정하기 위한 기존의 크리프나 응력완화 시험에서는 시편에 일정한 하중 ($F(t)$)이나 변위 ($\delta(t)$)를 가해야 한다. 그러나 나노압입 장비는 압입 방향으로 매우 작은 강성을 가진 판스프링 구조를 사용함으로써 매우 높은 분해능을 가졌지만, 이러한 판스프링 구조는 기존의 크리프나 응력완화 시험을 어렵게 하는 한 요인이 된다. 대부분의 나노압입 장비에서 피드백 (feed back) 제어장비와 PID gains과 같은 제어 변수의 조정 (tuning)을 필요로 하기 때문에 시편 위에서의 하중, 변위를 제어하기 어렵다. 또한, 제어 루프의 PID gains 값들은 재료의 거동이나 시편의 치수에 영향을 받는다. 물론, 특정 재료의 시편에 대해 (e.g. glassy polymer specimen) 적절한 PID gains 값을 결정하여 시편 위에서의 하중, 변위를 제어할 수 있지만, 이러한 과정은 많은 시간과 많은 양의 시편을 필요로 한다. 특히, 시편이 많은 양의 점성 거동을 나타내는 경우 PID gains tuning에는 훨씬 많은 시간과 시편이 소비되기 때문에 위의 과정은 거의 불가능하다^[17].

이러한 문제점을 보완하고자 본 연구에서는 나노압입 장비를 이용하여 마이크로/나노 폴리머 기둥의 점탄성 물성을 쉽게 측정할 수 있는 Modified Creep Test를 개발하였다. 이 시험 방법은 나노압입 장비를 이용하여 매우 간단하고 쉽게 점탄성 물성 측정 시험을 수행할 수 있는 장점이 있다. 그러나 시험 결과를 해석하는데 기본적인 수학적 계산이 필요하다. 여기서는 재료의 거동보다는 마이크로/나노 폴리머 기둥에 대한 Modified Creep Test의 시험 방법에 큰 초점을 두어 설명하였다.

3.3.2 Modified Creep Test의 원리

Modified Creep test에서는 크리프 시험 동안 폴리머 기둥 시편 위에서의 실제 하중 ($F(t)$) 대신 구동기에서의 하중 ($F_{Raw}(t)$)이 일정하게 유지된다. $F_{Raw}(t)$ 을 일정하게 유지하는 것은 PID gains tuning을 하지 않고 단지 open-loop control로 가능한데, 이러한 점이 기존의 크리프 시험과 다른 점이며 Modified creep test의 가장 큰 장점이라고 할 수 있다. 이 시험법의 또 다른 장점으로는 시험 결과에 대한 해석이 비교적 간단하다는 것이다. Modified creep test에서 $F(t)$ 와 $\delta(t)$ 는 각각 시간에 대해 그림 7(b)와 (c)에서처럼 비선형적인 거동을 보이지만, 나노인덴터의 판스프링 구조 때문에 $F(t)$ 와 $\delta(t)$ 는 서로 선형 비례 관계가 된다(그림 7(d)). 이 비례 상수는 시편과는 무관하며, 단지 판스프링과 장비 프레임 (machine frame)의 강성에 의존하게 된다. 따라서 기존의 크리프 시험과 같이 Modified creep test에서 측정된 시간에 따른 크리프 변위 (그림 7(b))만 해석하면 마이크로/나노 폴리머 기둥에 대한 점탄성 물성을 얻을 수 있다.

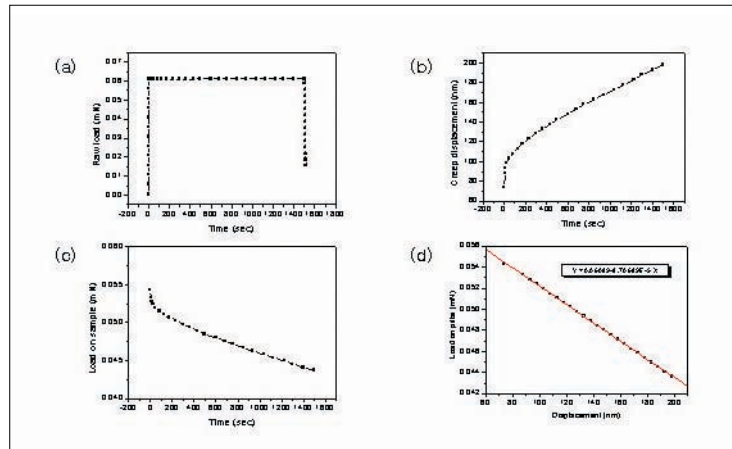


그림 7. load and displacement signals during modified creep test (a) raw load history, (b) creep displacement history, (c) load on pillar history and (d) load vs. displacement relation

3.3.3 시험 결과

그림 8은 크리프 시험 후에 직경이 $2\ \mu\text{m}$ 인 폴리머 기둥의 변형 형상을 SEM으로 찍은 것이다. 일반적인 압축 시험에서 볼 수 있듯이 기둥 가운데 부분이 볼록하게 변형되고 있으며, 폴리머 기둥 윗면에 원형 형상의 영역이 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 팁과 폴리머 기둥 사이의 마찰 구속으로 인해 발생하는 영역이라고 판단된다. 그림 7은 Modified creep test 동안 폴리머 기둥 시험편에서 나타나는 전형적인 하중, 변위 결과를 보여주고 있다. 여기서 구동기에서의 하중(그림 7(a))은 일정하게 유지되고 있다. 폴리머 기둥 시편에 대한 점탄성 물성인 크리프 컴플라이언스 (creep compliance)는 Prony series와 Laplace transformation을 이용한 간단한 수학적 계산을 통해 구할 수 있으며, 그 결과는 그림 9와 같다. 여기서 Modified creep test 결과에 영향을 줄 수 있는 주된 오차 요인은 하중과 변위 센서의 분해능, 팁과 폴리머 기둥 시편 사이의 평행도, 정밀 측정 센서에서 자주 동반되는 노이즈 중의 하나인 센서의 열적 흐름, 댐핑 효과 (damping effect)^[16] 등이 있다. 신뢰성 있는 시험 결과를 얻기 위해서는 이러한 오차를 최소화 시키는 것이 중요하며, 현재 이에 대한 검증 작업을 통해 마이크로/나노 폴리머 구조물에 대한 물성 측정 기술에 대한 신뢰성을 확보하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 매우 높은 하중, 변위 분해능을 가진 나노압입 장비를 이용하여 마이크로/나노 폴리머 구조물의 기계적 물성을 평가하는 기술을 개발하고 있다. 특히, 나노압입을 응용한 마이크로/나노 기둥 압축 시험 기술 개발을 통해 마이크로/나노 폴리머 기둥의 탄성계수, 항복강도 등을 측정하였고, 기계적 물성에 대한 하중 조건과 크기 효과에 대한 연구도 수행하였다. 또한 이 시험법을 바탕으로 마이크로/나노 폴리머 구조물에 대한 점탄성 물성을 쉽고 간단하게 측정할 수 있는 Modified creep test 기술을 개발하고 이에 대한 검증이 이루어지고 있다. 이러한 마이크로/나노 폴리머 구조물에 대한 물성 측정 기술 개발은 그 자체로서 기술적/학술적 가치를 가질 뿐만 아니라,

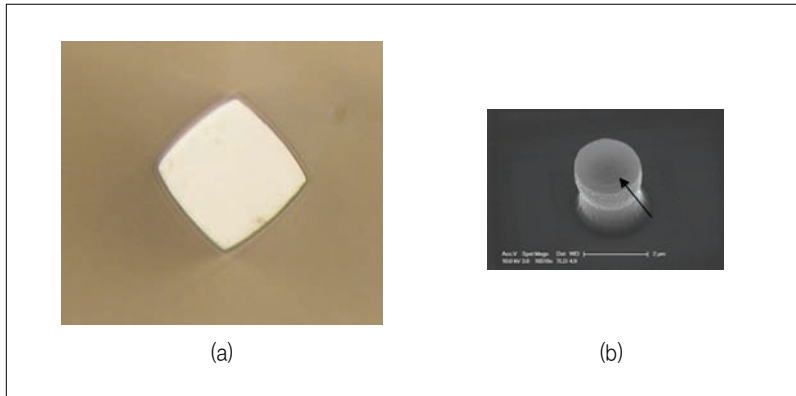


그림 8. (a) a microscope image of a flat punch indenter surface and (b) FE-SEM image of a deformed pillar

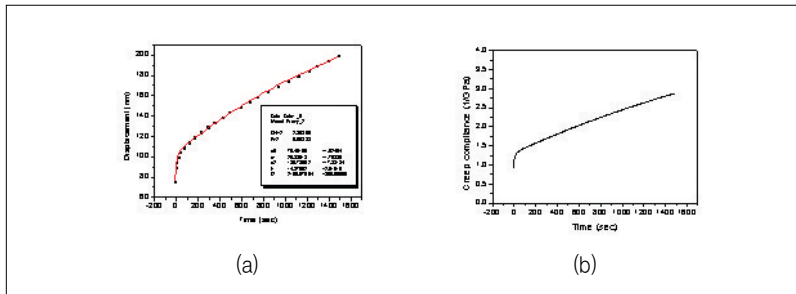


그림 9. (a) a creep displacement and its curve fit by Prony series and (b) the estimated creep compliance with respect to time of UV-curable polymeric pillar ($D=2\mu m$)

측정 장비 상용화를 통하여 부가가치를 창출하는 데 기여할 것이다. 또한 나노 메카트로닉스 사업에서 진행 중인 공정 개발에 적용되어 마이크로/나노 폴리머 구조물, 소자 등의 대량 생산 및 신뢰성 확보, 기계적 거동 예측 등에 크게 기여하게 될 것이다.

향후 계획으로, 본 연구팀은 현재까지 개발된 측정 기술을 지속적으로 개발하여 앞으로 10 nm급 폴리머 구조물에 대한 기계적 물성 측정의 기반 기술 개발에 대해 연구할 계획이다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 나노메카트로닉스 기술개발사업단의 연구비 지원(05K1401-00913)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] NSTC, 2000, "National nanotechnology initiative".

- [2] Li H., Huck W. T. S., Polymers in nanotechnology, Current Opinion in Solid State and Materials Science Vol. 6, pp.3-8, 2002.
- [3] Shinozaki D. M., Lu Y., Micro-indentation relaxation measurements polymer thin films, J. Electronic Materials, Vol.26, pp. 852-858, 1997.
- [4] Cheng L., Xia X., Yu W., Scriven L. E., Gerberich W. W., Flat-punch indentation of viscoelastic material, Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, Vol. 38, pp. 10-22, 2000.
- [5] VanLandingham M. R., Villarrubia J. S., Guthrie W. F., Meyers G. F., nanoindentation of polymers: An overview, Macromol Symp., Vol. 167, pp. 15-43, 2001.
- [6] Krupi ka A., Johansson M., Hult A., Viscoelasticity in polymer films on rigid substrates, Macromol. Mater. Eng., Vol. 288 No.2, pp. 108-116, 2003.
- [7] Yang S., Zhang Y. W., Zeng K., J. Appl. Phys., Analysis of nanoindentation creep for polymetric materials, Vol. 95., pp. 3655-3666, 2004.
- [8] Sneddon I. N., 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] 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. pp. 1564-1583, 1992.
- [10] Christensen R. M., Theory of viscoelasticity. New York, USA, Academic Press, 1982.
- [11] Larsson P. L., Carlsson S., On microindentation of viscoelastic polymers, Poymer Testing, Vol. 17, pp. 49-75, 1998.
- [12] K. J., Johnson, Contact mechanics (Cambridge university press, Cambridge), pp. 184-196, 1985.
- [13] Nano Indenter XP User's Manual, Ver. 16 & .
- [14] S. H. Park, S. H. Lee, D. -Y. Tang, H. J. Kong and K. -S. Kong, Sensor Mater. Vol. 17, 2005.
- [15] S. -J. Jeong, J. -H. Kim, H. J. Lee, S. W. Han, B. I. Choi, S. H. Park. and D. -Y. Yang, "Viscoelastic property measurement of small-scale UV-curable polymer structure by Nano Pillar Compression Test," International J. Precision Eng., Submitted., 2005.
- [16] S. -J. Jeong, J. -H. Kim, H. J. Lee, S. H. Park. and D. -Y. Yang, "A study on stress-strain relation measurement for micro scale UV-curable polymer structure", KSPE Fall Annual Meeting, Kwangju, Korea, 20-21 October, 2005.
- [17] J. -H. Kim, S. -J. Jeong, H. -J. Lee, S. -W. Jan, B. -I. Choi, S. H. Park, and D. -Y. Yang, "A modified creep test for visco-elastic property measurement of polymeric micro pillar using nanoindentation apparatus", ECI Instrumented Indentation Conference, Greece, 9-14, October, 2005.



정수정

- 한국기계연구원 나노공정장비연구센터 연구원
- 관심분야 : 마이크로/나노 구조물의 결합 해석 및 물성 측정
- E-mail : sjeong@kimm.re.kr



김재현

- 한국기계연구원 나노공정장비연구센터 선임연구원
- 관심분야 : 나노구조물 설계, 측정 및 평가
- E-mail : jaehkim@kimm.re.kr



이학주

- 한국기계연구원 나노공정장비연구센터 책임연구원
- 관심분야 : 마이크로/나노 구조물 설계, 측정 및 평가
- E-mail : hjlee@kimm.re.kr