

원자력현미경을 이용한 나노임프린트 재료의 접착력 측정

윤형석 · 이몽룡 · 송기국[†]

경희대학교 정보전자신소재공학과 영상정보소재기술연구센터
(2013년 12월 5일 접수, 2014년 1월 6일 수정, 2014년 1월 7일 채택)

Adhesion Force Measurements of Nano-Imprint Materials Using Atomic Force Microscope

Hyeong Seuk Yun, Mongryong Lee, and Kigook Song[†]

Dept. of Advanced Materials Engineering for Information and Electronics, Materials Research Center for Information Display,
Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi-do 446-701, Korea

(Received December 5, 2013; Revised January 6, 2014; Accepted January 7, 2014)

초록: 원자력현미경(AFM) tip을 표면 처리하여 임프린트용 acrylate 레진과의 접착력을 측정하였다. 표면 처리를 하지 않은 실리콘 tip에 비하여 CH₄ 플라즈마로 소수성 처리한 경우 접착력은 38% 감소한 반면 친수성의 O₂ 플라즈마로 처리한 경우에는 접착력이 1.6 배 증가하였다. 이러한 AFM 결과들은 정성적 실험 결과 밖에 얻을 수 없는 cross-cut 접착실험에 비하여 매우 구체적인 정량적 결과들을 제공하였다. 나노 크기의 임프린트 패턴을 전사하는 경우, 몰드와 레진 사이 접촉 면적이 커져서 시료 전체의 접착력이 커지기 때문에 패턴 크기가 작아지는 나노임프린트 공정에서는 몰드 표면 처리 문제가 더욱 중요하게 되는 것을 알 수 있었다.

Abstract: Adhesion forces between acrylate imprinting resin and a surface treated atomic force microscope (AFM) tip were investigated. Compared to the untreated silicon tip, 38% of the adhesion force is reduced for the hydrophobic tip treated with CH₄ plasma whereas 1.6 time increases is found for the hydrophilic tip with O₂ plasma treatment. Such a measurement of the adhesion force using AFM provides very quantitative results on adhesion comparing to the cross-cut adhesion test which gives qualitative results. Since the adhesion area becomes larger as the imprinting pattern size gets smaller, the surface treatment issue becomes more important in the nano-imprinting process.

Keywords: atomic force microscope (AFM), adhesion force, nano-pattern, imprinting, surface treatment.

서 론

임프린트 방법을 이용하여 나노미터 크기의 패턴을 찍어낼 수 있는 나노임프린트(nano-imprint) 기술은 공정이 단순하고 비용이 저렴하여, 기존의 디스플레이 및 반도체 분야 등에서 주로 사용되는 포토리소그래피(photo-lithography) 기술을 대체할 수 있는 기술로써 많은 관심을 받고 있다. 나노 크기의 패턴이 각인되어 있는 몰드(mold)를 기재(substrate) 위에 코팅된 레진(resin)의 표면에 접촉하여 패턴을 전사하는 기술인 나노임프린트는 크게 가열식(thermal)과¹ UV 경화식 임프린트 기술로² 나눌 수 있다. 열가소성 고분자를 사용하는 가열식 임프린트 기술과는 다르게 UV 경화식 임프린트 기술은 접도가 작은 광경화성 레진과 이를 경화하기 위한 UV 램프

를 사용하는 것이 특징이다. 나노임프린트 기술은 다른 패턴 형성 기술과 달리 몰드와 레진을 직접 접촉시켜 패턴을 전사하기 때문에^{3,19} 공정 중 몰드와 레진 사이에 갇힌 공기 방울에 의한 결함,⁴ 경화된 레진과 기재 사이 열팽창 계수 차이로 발생하는 패턴의 변형,⁵ 그리고 레진과 몰드 또는 기재 사이의 접착력에 따른 결함 등의 문제가 발생하기도 한다.

UV 경화식 임프린트 공정 중 이형공정(demolding process)은 레진을 경화한 후 몰드를 패턴으로부터 분리하는 공정으로, 몰드와 경화된 레진 사이의 접착력 때문에 패턴이 변형되거나 경화된 패턴이 기재에서 떨어져지는 문제가 발생하기도 한다. 또한 고분자 재질의 soft 몰드를 사용하면 심한 경우 몰드의 패턴까지 파괴되기도 한다.^{6,7} 따라서 UV 경화식 임프린트 기술을 이용하여 성공적으로 패턴을 형성하기 위해서는 레진과 맞닿은 두 계면에서의 접착력을 평가하는 것이 매우 중요하다. 또한 각각의 계면에서의 접착력을 조절하기 위한 다양한 방법들이 보고되고 있는데, 대표적인 방법으로는 몰

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ksong@khu.ac.kr

드와 경화된 레진 사이의 접착력을 감소시켜 몰드의 이형을 원활하게 하기 위하여 몰드 표면에 표면에너지가 작은 물질을 self-assembled monolayer(SAM) 방법으로 코팅하거나 CH₄ 플라즈마 처리를 한다. 반면에, 경화된 레진과 기재를 단단히 접착시키기 위하여서는 O₂ 플라즈마 처리를 하여 표면 에너지를 증가시키는 방법 등이 이용되고 있다.

나노임프린트 공정에서의 접착력 문제는 제작된 나노 패턴의 생산성과 신뢰성에 큰 영향을 끼치는 주요 원인 중 하나로써, 이와 같은 접착력에 대한 문제점을 해결하고자 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다.⁸⁻¹² 본 실험에서는 UV 경화식 임프린트 공정을 이용하여 선택적 편광필름으로 사용되는 nano-wire grid type polarizer(NWGP)를 제조할 때 표면 처리에 따른 각 계면에서의 접착력 변화를 조사하였다. NWGP는 나노 크기 groove 형태의 임프린트 패턴을 기재에 전사한 후 형성된 패턴 위에 aluminum을 증착하여 제조하기 때문에, 기존의 몰드와 레진 사이 접착력 문제에 더하여 경화된 레진과 aluminum 사이의 접착력에 관한 정보도 필요하다. 고분자 층 사이뿐만 아니라 aluminum과 같은 금속층의 접착력에 관한 평가는 기존의 cross-cut 접착시험(ASTM D3359) 등을 통해 간접적으로 측정하였으나, 본 연구에서는 원자력현미경(atomic force microscope, AFM)을 이용하여 고분자 층 사이 또는 고분자와 금속 층 사이의 접착력을 정량적으로 평가하였다.

실 험

임프린트 실험. Hutem사의 광경화 임프린터(HIS-400C)를 이용하여 UV 임프린트 실험을 수행하였고, 나노 크기의 groove 패턴을 가지고 있는 soft 몰드는 polyurethane acrylate (PUA)로 제작하였다. 기재로 사용한 polymethyl methacrylate (PMMA) 필름 위에 광경화성 레진을 코팅하고, soft 몰드를 접촉한 후 UV 조사를 통해(10 mW/cm², 300 s) 레진을 경화시켜 패턴을 전사하였다. 패턴 형성에 사용된 광경화성 레진은 SSCP사의 urethane acrylate prepolymer(U600C)와 Aldrich사의 2-hydroxyethyl acrylate(2HEA)를 1:1 비율로 혼합하여 사용하였고, 광경화 반응의 개시제로 Ciba사의 Irgacure 907을 레진의 2 wt% 첨가하였다.¹³ NWGP는 임프린트 공정으로 나노 크기의 groove 패턴을 형성한 후 패턴 위에 aluminum을 증착하고 식각 공정을 통해 제작하였다. Figure 1(a)는 임프린트 공정을 통해 광경화 레진에 groove 패턴을 형성한 후 몰드를 이형하는 그림이고, Figure 1(b)는 형성된 패턴 위에 aluminum을 증착하여 만들어진 NWGP를 나타낸 그림이다.

AFM 접착력 측정. AFM tip과 시료 표면 사이 간격에 따른 힘의 변화를 나타낸 Figure 2를 보면 AFM cantilever가 시료 표면으로 수직 방향으로 내려가고 AFM tip이 시료와 매우 가까워지면서 순간적으로 시료와 접촉하는 jump in contact이 일어나게 된다(Figure 2(a)). AFM tip과 시료가 접

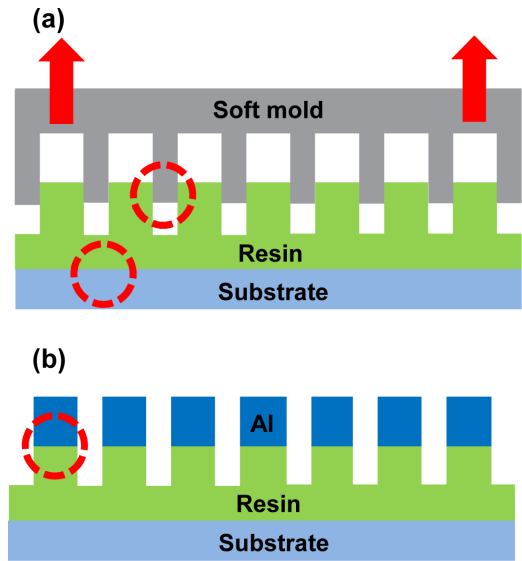


Figure 1. Schematic layout of imprinting fabrication processes for nano wire grid type polarizer (NWGP): (a) demolding process after imprinting; (b) aluminum deposition process after demolding.

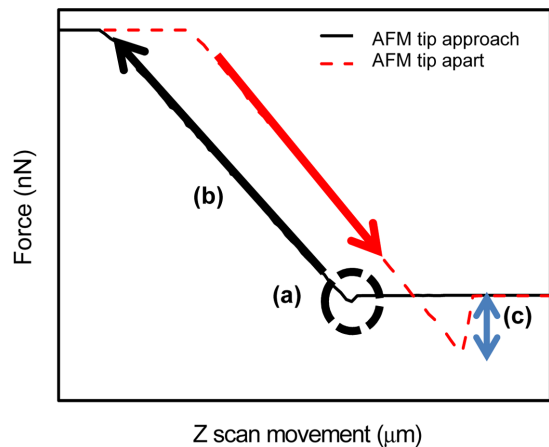


Figure 2. Force-distance curve for different regimes of AFM tip-surface contact: (a) jump-in contact; (b) loading part; (c) pull-off point.

촉한 후에는 tip이 일정 하중 값까지 내려가게 되고 힘의 크기가 변화하는 것을 알 수 있다(Figure 2(b)). 다시 AFM tip이 시료 표면에서 떨어져 올라가게 되면 tip과 시료 표면 사이 상호작용에 의해 잠시 붙어있다가 순간적으로 떨어지는데(Figure 2(c)), 이 힘의 크기와 AFM cantilever의 spring 상수 값을 이용해 접착력에 관한 정보를 얻을 수 있다.¹⁴ AFM은 Park System사의 XE-70을 이용하였고, 실리콘 재질의 cantilever는 Nanosensor사의 제품을 사용하였다. Cantilever의 스프링 상수(K)를 측정하고자 cantilever 길이(L)와 넓이(w)의 측정은 Hitachi사의 scanning electron microscope(TM 1000)

를 이용하였고, resonance frequency(ν_0)와 실리콘의 밀도(ρ), 탄성계수(E)를 바탕으로 수식 (1)을 이용하여 스프링 상수 K 를 계산하였다.¹⁵

$$K = 2\pi^2 w (\nu_0)^3 (\rho^3/E)^{1/2} \quad (1)$$

Cross-cut 접착력 실험. AFM을 이용한 접착력 실험 결과와 비교하기 위하여 이용된 cross-cut 접착실험(또는 tape adhesion)방법은 ASTM D3359 실험 방법을 이용하였다. 가로, 세로가 6 cm인 정사각형의 PMMA기판 위에 몰드 제작용 PUA 레진을 코팅한 후 경화하여 기판으로 제작하였다. 제작된 기판 위에 패턴으로 제작되는 광경화성 레진을 코팅하여 경화한 후, 예리한 칼을 이용하여 패턴용 레진 필름 위에 1 mm 간격으로 정방형 격자 100개를 만들었다. 테이프를 격자 위에 부착한 뒤, 45° 각도로 일정한 힘으로 테이프를 떼어낼 때, 테이프에 붙어서 떨어져 나오는 격자 수에 따라 접착력의 정도를 결정하였다. 기판에 붙어 남아있는 격자의 수가 99개 이상이면 매우 높은 접착 수준을 나타내는 5B, 95~98개는 4B, 85~94개는 3B, 65~84개는 2B, 36~64개는 1B, 그리고 35개 미만의 낮은 접착력인 경우 0B로 나타나 6 단계로 구분하여 평가하였다.

표면 처리. 임프린트용 레진 또는 AFM tip과의 접착력 측정을 위하여 여러 가지 표면 처리 방법을 수행하였다. 표면을 친수성으로 만들기 위해서 O_2 플라즈마 처리를 하였으며, 소수성 처리는 CH_4 플라즈마 처리 또는 Aldrich사의 Trichloro (1H,1H,2H,2H-perfluorooctyl) silane(FOTS)를 사용한 SAM 형성 방법으로 처리하였다. 플라즈마 처리는 5000 sccm의 argon 기체와 13.56 MHz의 RF power 조건으로 실험을 수행하였는데, 친수성 플라즈마는 20 sccm의 O_2 기체를 반응기체로 1분간 플라즈마 처리를 진행하였고, 소수성 플라즈마 처리는 0.6 sccm의 CH_4 를 반응기체로 사용하여 30 초간 진행하였다. 소수성 처리를 위한 또 다른 방법으로 불소를 포함하는 실란계 커플링제 FOTS를 증착하여 표면을 SAM 처리하였다. 증착하는 기재 또는 AFM tip 표면을 O_2 플라즈마로 처리한 후, 기재를 FOTS와 함께 진공 챔버에 20분 동안 넣어 상온에서 증착하고 120 °C 오븐에서 1.5시간 동안 annealing 하여 기재 또는 tip 표면에 SAM 처리를 하였다.^{14,16} AFM tip 표면에 aluminum을 증착하여 aluminum과 레진 사이의 접착력을 AFM을 이용하여 조사하였다. Si 재질의 AFM tip과 aluminum의 결합력을 향상시키기 위해 tip 표면에 argon 플라즈마 처리를 먼저 한 후, aluminum을 열 증착 방식을 통해 5×10^{-6} torr 압력에서 3 nm 두께로 코팅하였다.¹⁷

결과 및 토론

접착은 두 물질 사이 계면에서 분자간 접촉에 의하여 이루어

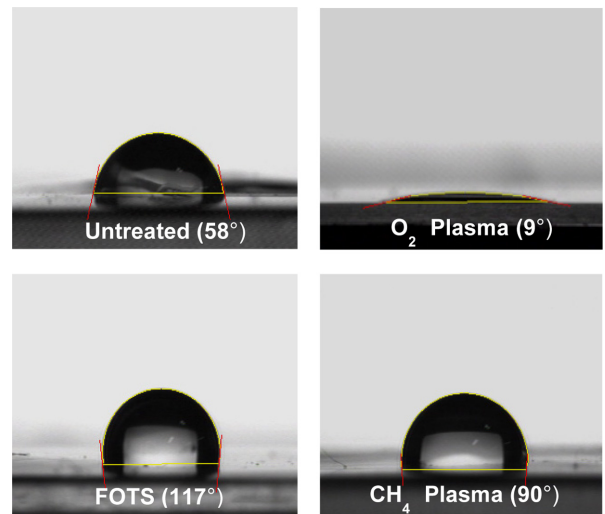


Figure 3. Contact angle measurements of deionized water on PUA mold surface with various surface treatments.

어 지는데, 계면에서 작용하는 접착 메커니즘으로는 기계적인 결합(mechanical interlocking), 정전기적 이론(electrostatic theory), 흡착이론(adsorption theory), 그리고 화학 결합(chemical bonding) 등과 같은 이론들이 제시되어 있다.^{18,19} 이 가운데 흡착이론은 계면에서 발생하는 분자 사이 인력인 쌍극자 상호작용과 같은 극성력(polar force)과 분산력(dispersion force)에 의해서 접착력이 발생한다는 설명이다.²⁰ 접촉각을 측정하여 표면 인력의 척도인 젖음성을 조사하여 물질의 접착 특성을 알아 볼 수 있으며, 일반적으로 접촉각이 작아질수록 표면에너지가 커지는 것을 알 수 있다.²¹ Figure 3은 PUA 몰드의 표면 처리에 따른 접촉각의 변화를 측정한 결과이다. 표면 처리를 하지 않은 초기 soft 몰드의 접촉각은 58°이었으나, O_2 플라즈마를 처리하여 hydroxyl 그룹이 증가한 친수성 표면의 접촉각은 크게 줄어들어 9°로 작아지는 것을 볼 수 있다. 반면에, FOTS로 SAM 처리하여 소수성 표면으로 변화시킨 경우 접촉각이 117°로 가장 높게 나타났으며, 소수성의 CH_4 플라즈마 처리를 한 경우도 접촉각이 90°로 증가하였다. 이와 같이 접촉각을 측정하여 접착력에 영향을 미칠 수 있는 계면의 변화를 알아낼 수 있는데, 불소를 포함한 커플링제 FOTS로 SAM 처리한 경우가 CH_4 플라즈마 처리로 형성된 표면보다 더 큰 소수성을 나타내는 것을 알 수 있다.

박막에서의 접착력을 평가할 때 일반적으로 많이 사용하는 cross-cut 접착실험 방법을 이용하여 PUA 몰드와 광경화 레진 사이 접착력을 조사하였다. 몰드의 재질인 PUA 층과 광경화 acrylate 레진 층 모두 투명하여 실제 실험에서는 테이프를 떼어낼 때 떨어져 나가는 부분들이 잘 구분되지 않아 격자의 수를 정확하게 확인하기 어려웠다. 이를 해결하기 위하여 극소량의 염료(crystal violet 0.0001 wt%)를 PUA 층에만 혼합함으로써 실험 결과를 쉽게 확인할 수 있었다(Figure

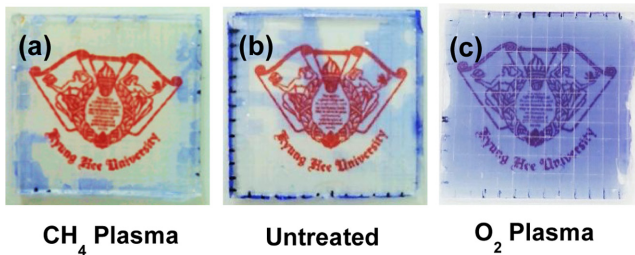


Figure 4. Cross-cut adhesion test for PUA mold and acrylate imprint resin with different surface treatments.

4). PUA 필름 표면에 아무 처리를 하지 않은 경우 격자의 50% 정도가 떨어져 1B 수준의 접착력을 보여주었으나, CH_4 플라즈마 처리를 하여 표면 에너지를 낮추게 되면 낮은 접착력인 0B 수준으로, 그리고 O_2 플라즈마 처리를 한 경우는 떨어져 나오는 격자가 거의 없는 5B 수준의 뛰어난 접착력을 보여주었다. 이와 같이 나노임프린트 공정 중 패턴에서 몰드를 이형할 때 발생하는 이형력은 몰드의 표면 처리를 통하여 조절할 수 있는 것을 알 수 있었으며, 계면의 접착력을 변화시키는데 플라즈마 처리 방법이 효과적인 것을 확인하였다.

정성적 결과의 cross-cut 접착실험법과 더불어 AFM을 이용하여 표면 처리에 따른 접착력 변화를 정량적으로 조사하였다. AFM을 이용한 접착력 측정 실험에서는 AFM tip이 수직 방향으로 이동 중 시료 표면으로부터 받는 힘을 측정하여 tip을 이루는 재질과 시료 사이의 접착 특성을 정량적으로 조사할 수 있다. 나노임프린트 공정에서 몰드를 광경화 레진에 접촉시켜 패턴을 형성한 후 이형을 할 때, 경화된 패턴과 몰드 사이 접착력이 너무 크면 패턴이 몰드와 분리되지 못하는 불량이 발생한다. 그러므로 이와 같은 접착력을 줄이기 위하여 몰드 표면을 소수성 처리하여 경화된 레진에서 몰드의 이형이 쉽도록 하는데, 본 실험에서는 AFM tip 표면을 소수성 처리하여 경화된 레진과의 접착력을 측정하였다. $10\ \mu\text{m}$ 두께로 기재에 코팅된 패턴용 레진과의 접착력을 측정하기 위하여 AFM tip을 소수성 FOTS로 SAM 코팅하거나 CH_4 플라즈마 처리를 하였다. 먼저 AFM tip의 소수성 표면 처리 상태를 확인하기 위하여 tip과 같은 재질인 실리콘 wafer 위에서 동일한 실험 조건으로 접촉각 변화를 조사하였는데, 실리콘 표면에 FOTS 코팅이나 CH_4 플라즈마 처리를 하면 접촉각이 커져 소수성 표면으로 개질되는 것을 확인하였고, 또한 이 실험을 통해 AFM tip의 소수성 표면 처리 조건도 최적화하였다.

Figure 5는 표면 처리가 된 AFM tip을 이용하여 광경화성 레진과의 접착력을 측정한 결과이다. Tip과 레진 사이의 접착력 측정 결과를 보면 표면 처리를 하지 않은 실리콘 tip과 경화된 레진 사이 접착력은 $5.1\ \text{nN}$ 인데 비하여 CH_4 플라즈마로 소수성 처리를 한 tip과의 접착력은 $3.2\ \text{nN}$ 으로 작아져 38% 감소하는 것을 알 수 있다. 그러므로 몰드 이형력에 영

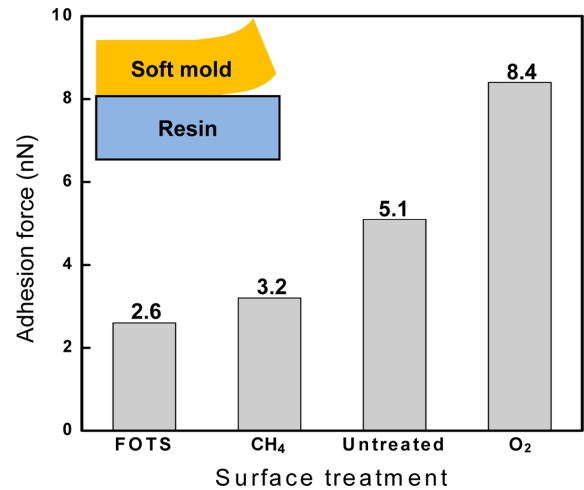


Figure 5. Measurements of AFM adhesion force between surface-treated AFM tip and imprint resin.

향을 미치는 접착력을 감소시키기 위해 CH_4 플라즈마 처리나 FOTS 코팅을 하면 몰드의 표면 에너지를 효과적으로 감소시킬 수 있어 나노임프린팅 공정의 패턴 전사에서 발생할 수 있는 불량 문제를 감소시킬 수 있는 것을 알 수 있다. AFM의 접착력 측정 결과를 Figure 3의 접촉각 결과와 비교하여 보면 동일한 결과가 얻어지는 것을 알 수 있는데, FOTS를 SAM 처리한 경우가 CH_4 플라즈마로 표면 처리한 경우보다 소수성이 더 크게 되어 접착력이 더 작아지는 것이다. AFM tip을 친수성을 가지는 O_2 플라즈마로 처리한 경우에는 접착력이 $8.4\ \text{nN}$ 으로 tip을 처리하지 않은 경우에 비하여 1.6배 증가하였는데, 이러한 AFM 결과들은 정성적 실험 결과 밖에 얻을 수 없는 cross-cut 접착실험에 비하여 매우 구체적인 정량적 결과들을 제공하는 것이다.

LCD의 휘도향상 필름으로 사용되는 NWGP를 제작할 경우 임프린트한 나노 크기의 groove 패턴 위에 aluminum을 증착하는데, 금속 층과 고분자 층의 접착력이 약하게 되면 aluminum을 식각하는 과정이나 향후 완성된 필름의 수명과 성능에 큰 영향이 있다.²² 경화된 임프린트 레진과 aluminum 사이의 접착력은 AFM tip에 aluminum을 증착 코팅하여 측정하였다. Figure 6은 aluminum을 코팅한 AFM tip을 이용하여 측정된 임프린트 레진과의 접착력을 나타내었다. O_2 플라즈마가 처리된 레진의 경우 처리 전에 비해 접착력이 1.9배 증가하는데, 그 이유는 O_2 플라즈마 처리 후 레진의 표면에 형성된 C=O, C-O-O-C, C-O-H 등의 그룹들이 aluminum에 흡착되기 때문에 접착력이 증가하는 것이다.²⁰ 하지만, FOTS 또는 CH_4 플라즈마로 소수성 처리를 하면 레진 표면에 친수성 그룹들이 줄어들고 표면 에너지가 감소하여 접착력이 떨어지게 된다. 일반적으로 금속과 고분자의 접착력을 향상시키기 위하여 SiO_2 를 중간 층으로 사용하는데, Figure 6을 보면 aluminum과 SiO_2 층의 접착력이 표면처리 하지 않은 레

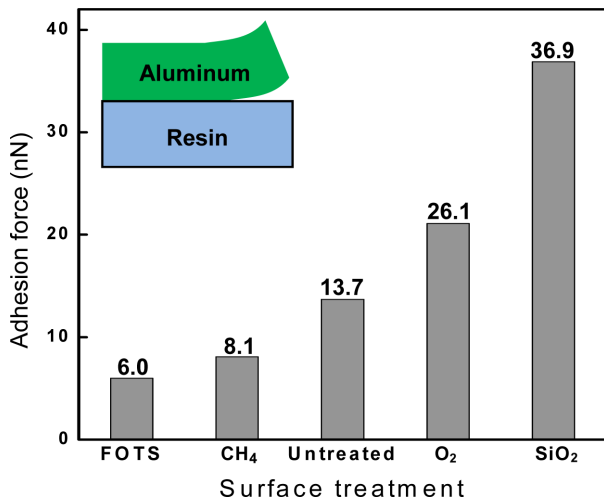


Figure 6. Measurements of AFM adhesion force between aluminum coated AFM tip and imprint resin with various surface treatments.

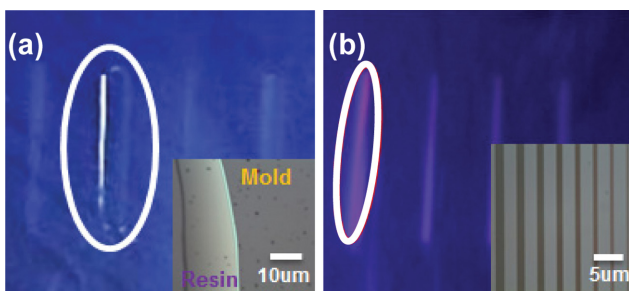


Figure 7. Microscope images of imprinted groove patterns prepared using PUA mold with (a) surface untreated; (b) CH₄ plasma treated.

진과 aluminum 사이 접착력보다 2.7배 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이 실험을 통해 AFM tip에 금속을 나노미터 두께로 코팅하여 금속과의 접착력을 정량적으로 측정할 수 있는 것을 보여주었다.

나노 패턴이 있는 PUA 몰드를 이용하여 임프린트 레진에 패턴을 전사한 후 레진을 광경화하였다. 그 후 몰드를 경화된 레진에서 이형을 할 때 상태는 몰드 표면에 CH₄ 플라즈마 처리 유무에 따라 전혀 다르게 나타나는 것을 Figure 7에서 볼 수 있다. Figure 7(a)를 보면 몰드 이형 후 레진에서 패턴이 있는 부분이 떨어져 나가 그림에서 하얗게 보이며, 실제 패턴을 확대해서 본 작은 이미지를 보면 패턴이 보이지 않고 몰드와 패턴이 붙어 있는 것을 볼 수 있다. 이는 soft 몰드에 경화된 패턴이 달라 붙어서 떨어져 나가기 때문으로 AFM을 사용하여 확인할 수 있었다. 하지만, CH₄ 플라즈마를 몰드 표면에 처리하면 접착력이 5.1에서 3.2 nN으로 감소하면서 Figure 7(b)와 같이 패턴이 성공적으로 전사되는 것을 알 수 있다. 또한 패턴이 없는 부분은 CH₄ 플라즈마 처리 유무와 상관없이 아무런 결함 없이 몰드에서 잘 이형되지만, 패턴이

있는 부분은 몰드와 레진 사이 접촉 면적이 커지기 때문에 시료 전체적인 접착력이 커져 결함이 생길 수 있는 것이다. 그러므로 패턴의 간격이 작아져 나노 크기가 되면 표면적이 매우 커져 이형력이 증가하기 때문에 나노임프린트 공정에서는 몰드의 표면 처리는 더욱 중요한 문제가 되는 것이다.

결론

본 연구에서는 접착력에 관한 정성적 정보를 얻을 수 있는 cross-cut 접착실험 방법과 더불어 AFM을 이용하여 표면 처리에 따른 접착력 변화를 정량적으로 조사하였다. AFM을 이용한 접착력 측정 실험에서는 AFM cantilever의 tip이 수직 방향 이동 중 시료 표면으로부터 받는 힘을 측정하여 tip의 표면 상태와 시료 사이의 접착 특성을 정량적으로 조사할 수 있었다. 표면 처리가 된 AFM tip을 이용하여 광경화 레진과의 접착력을 측정한 결과, 표면 처리를 하지 않은 실리콘 tip에 비하여 CH₄ 플라즈마로 소수성 처리를 한 tip과 레진 사이의 접착력은 38% 감소한 반면 친수성의 O₂ 플라즈마로 처리한 경우에는 접착력이 1.6배 증가하였는데, 이러한 AFM 결과들은 정성적 실험 결과 밖에 얻을 수 없는 cross-cut 접착실험에 비하여 매우 구체적인 정량적 결과들을 제공하는 것이다.

나노 패턴이 있는 PUA soft 몰드를 이용하여 광경화 레진에 임프린트 패턴을 전사한 후 몰드를 경화된 임프린트 레진에서 이형할 때 몰드 표면의 소수성 처리 유무에 따라 전혀 다른 결과를 얻었다. 표면처리를 하지 않은 몰드를 사용한 경우 몰드에 레진이 붙어 기체로부터 떨어져 나갔으나, CH₄ 플라즈마를 몰드 표면에 처리하면 계면의 접착력이 감소하여 패턴이 성공적으로 전사되는 것을 볼 수 있다. 표면의 소수성 처리 유무와 상관없이 패턴이 없는 부분은 몰드의 이형이 잘되는 반면, 패턴이 있는 부분은 몰드와 레진 간의 접촉면적이 커지게 되어 접착력이 증가하게 된다. 그러므로 패턴이 나노 크기로 작아지게 되면 표면적이 커지기 때문에 시료 전체적인 접착력이 커져 결함이 발생한다. 따라서 나노임프린트 공정에서는 몰드의 표면 처리는 더욱 중요한 요인으로 작용한다.

감사의 글: 이 논문은 산업자원부의 산업원천 기술과제 (10031783) 지원과 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단이 지원한 기초연구사업의 결과입니다(과제번호: 2013058642).

참고 문헌

1. S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 3114 (1995).
2. J. Haisma, M. Verheijen, and K. Heuvel, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **14**, 4124 (1996).

3. M. Austin, H. Ge, W. Wu, M. Li, and Z. Yu, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 5229 (2004).
4. D. Morihara, H. Hiroshima, and Y. Hirai, *Microelectron. Eng.*, **86**, 684 (2009).
5. S. Thoms, D. S. Macintyre, D. Moran, and I. Thayne, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **22**, 3271 (2004).
6. H. C. Scheer, H. Schulz, T. Hoffmann, and C. M. Sotomayer Torres, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16**, 3927 (1998).
7. Y. Hirai, S. Yoshida, and Y. Tanaka, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **21**, 2765 (2003).
8. T. Bailey, B. J. Choi, M. Colburn, M. Meissl, S. Shaya, J. G. Ekerdt, S. V. Sreenivasan, and C. G. Willson, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **18**, 3575 (2000).
9. Y. Hirai, N. Takagi, S. Harada, and Y. Tanaka, *Sens. Micromach. Soc.*, **122**, 404 (2002).
10. H. Scheer, H. Schultz, T. Hoffmann, and C. Torres, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16**, 3917 (1998).
11. J. Jeong, Y. Sim, H. Sohn, and E. Lee, *Microelectron. Eng.*, **75**, 5299 (2006).
12. D. Choi, J. Jeong, Y. Sim, E. Lee, W. Kim, and B. Bea, *Langmuir*, **21**, 9390 (2005).
13. S. Kim, S. Park, S. Moon, W. Lee, and K. Song, *Polymer(Korea)*, **36**, 536 (2012).
14. Vladimir V. Tsukruk and Valery N. Bliznyuk, *Langmuir*, **14**, 446 (1998).
15. J. P. Cleveland and S. Manne, *Rev. Sci. Instrum.*, **64**, 403 (1993).
16. G. Y. Jung, W. Wu, Z. Li, Y. Chen, S. Y. Wang, W. M. Tong, and R. S. Williams, *Langmuir*, **21**, 1158 (2005).
17. A. Schirmeisen, D. Weiner, and H. Fuchs, *Surf. Sci.*, **545**, 155 (2003).
18. M. Arif Butt, A. Chughtai, J. Ahmad, R. Ahmad, U. Majeed, and I. H. Khan, *J. Faculty. Eng. Tech.*, **15**, 21 (2008).
19. S. E. Lee, H. G. Lim, S. S. Lee, D. G. Choi, D. Lee, and S. U. Hong, *Macromol. Res.*, **21**, 916 (2013).
20. C. W. Lee, B. K. Song, J. Jegal, and Y. Kimura, *Macromol. Res.*, **21**, 1305 (2013).
21. W. C. Wask, *Polymer*, **19**, 291 (1978).
22. C. C. Chen and C. H. Chen, *Opt. Rev.*, **16**, 416 (2009).