

나노프로브 공정기술

장원석 | 한국기계연구원

1. 서 론

물질을 이루고 있는 원소들을 점점 작은 단위로 쪼개어 보면 결국에는 분자나 원자의 단위에 다다르게 된다. 결국, 물질은 분자나 원자로 이루어져 있으므로, 물질의 성질이나 특성이 그 물질을 이루고 있는 분자나 원자의 종류로부터 결정된다고 하는 것은 잘 알려진 사실이며, 이러한 개념이 최근 많은 과학자와 공학자들의 관심이 모아지고 있는 나노테크놀러지의 근간이 되고 있다. 그러나 아주 최근까지도 물질의 모양을 만드는 한 개의 원자나 분자를 자유롭게, 직접 관찰할 수 있는 원자분해능의 현미경을 만드는 것은 많은 연구자들의 꿈에 지나지 않았다. 한 개의 원자나 분자를 자유롭게 관찰하는 원자분해능현미경이 실현된 것은 1982년 스위스 쥐리히의 IBM연구소에서 비닝(G. K. Binnig)박사와 로러(H. Rohrer)박사에 의해 주사터널현미경(STM)이 발명된 이후이며, 이들의 연구는 나노의 시대를 여는 공로가 인정되어 1986년 노벨 물리학상이 수여되었다.

산업 전반에 나노테크놀러지가 보급되는 21세기 초기, 즉 2010년에서 2020년경에는 마이크로화가 극한에 달아서, 미세 가공에서 미세 조립으로의 나노프로브 응용기술 특히, 프로브와 근접장 광학계를 응용한 나노스케일 가공기술 및 생체분자 조작기술이 나노테크놀러지 응용분야의 실용화 기술로 발전할 것으로 예상되고 있다. 이러한 세계적 연구동향에 발맞추어 프론티어사업의 일환인 나노메카트로닉스 사업의 세부과제로 '나노프로브 공정기술'의 과제를 수행하고 있다. 이 세부과제에서는 100nm이하 스케일의 가공기술을 나노프로브를 응용하여 개발하는 것을 목적으로 하고 있다. 세부과제의 구성은 주관기관인 한국기계연구원과 협동기관인 표준연구원으로 되어 있으며 해외 위탁으로 MIT 그리고 국내의 연구기관으로 한국과학기술원, 광주과학기술원, 연세대학교, 서울대학교, 성균관대학교가 함께 과제에 참여하고 있다.

본 과제에서는 나노프로브를 이용한 리소그래피 및 가공기술을 다양한 방법으로 접근하고 있다. 이들 과제들은 최근의 세계적 연구동향과 독창적인 방법이 함께 병행하고 있어 나노스케일 가공기술의 확보와 함께 나아가 측정기술 및 바이오 응용에도 폭넓게 응용할 수 있는 기반기술로의 기여를 할 것으로 생각된다. 본 세부과제에서 수행되고 있는 과제를 기술별로 나누어 서술함으로써 그 이해를 돕고자 한다.

2. 본 론

2.1 근접장현미경 리소그래피(NSOM Lithography)

최근 광, 반도체, 생명공학에 이르기까지 많은 분야에서 보다 미세하고 정밀한 패터닝 기술의 수요가 증가하면서, 그 사이즈는 마이크로에서 나노단위로 발전하고 다양한 패터닝 기술이 발표되고 있다. 이러한 기술 중 최근에 주목받고 있는 연구 중의 하나가 티올(thiol)분자들의 자기조립박막(Self-Assembled Monolayer, SAM)을 이용한 방법이다. 금이나 은 위에 화학적 흡착으로 형성된 유기물질의 조박막인 자기조립박막은 마찰, 세포나 단백질 등의 연구를 위하여 활발하게 연구되고 있으며 또한 1-2nm의 매우 얇은 두께를 가지고 있기 때문에 기존의 반도체 공정에서 사용되던 두꺼운 노광물질을 대체할 수 있는 코팅층으로도 관심을 끌고 있다. 티올에 의하여 형성된 자기조립박막은 200nm근처의 짧은 파장을 갖는 UV레이저가 조사될 때 주위의 산소와 결합하여 산화되는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 자기조립박막의 노광특성을 연구하기 위하여 광역의 파장에 대한 자기조립박막의 광 흡수율을 측정하여 박막의 광학적 특성을 분석하였으며, 특히 UV영역이 아닌 800nm의 가시광선 영역의 펄스초 레이저를 조사하여 나노스케일의 패터닝하는 방법을 제안하였다.

SAMs는 지금도 활발하게 연구되고 있는 LB막과 함께 대표적인 유기 분자 박막이다. 그러나, SAMs는 분자막과 표면 사이의 이온결합에만 의존하는 LB막에 비해 기질표면과의 결합력이 강하여 튼튼한 분자막을 만들 수 있고, 비교적 단순한 도구만으로도 단분자막을 쉽게 만들 수 있어 LB보다 한 단계 발전한 유기 분자 박막이라고 하겠다.

SAMs에 대해 간단히 말하자면, 그림 1에서 보이는 것처럼 주어진 기질의 표면에 자발적으로 입혀진 규칙적으로 잘 정렬된 단분자막이라 할 수 있다. 흡착분자의 구조를 보면 기질과 반응하는 머리 부분(head group)과 분자막의 기능을 좌우하는 꼬리부분의 작용기(tail group) 그리고 규칙적인 분자막 형성을 가능하게 하는 몸통 부분의 긴 알킬 사슬로 구성되어진다. 이 세가지 부분을 적절하게 바꾸면 광에 대한 노광특성이 달라진다.

여러가지 다양한 도구들을 사용하여 이러한 SAMs 표면특성을 알아낼 수 있다. 가장 널리 사용되는 기술로는 infrared spectroscopy, ellipsometer, contact angle by different liquids, x-ray photoelectron spectroscopy, electrochemistry, scanning probe measurement 등을 들 수 있다.

본 과제에서는 파장 800nm, 펄스폭 200fs의 Ti:sapphire 레이저를 이용한 유기박막과의 기초 가공실험을 수행하고 근접장현미경을 이용하여 광화학적 패터닝 실험을 수행하였다.

시편은 실리콘 웨이퍼 위에 100nm의 금 코팅층을 스퍼터링(sputtering)하였으며 이것을 모재로 하여 hexadecanethiol (HS(CH₂)₁₅CH₃)을 이용하여 2nm 두께의 자기조립박막을 형성하였다. 자기조립박막은 티올을 에탄올에 2mM의 농도로 만들어 모재를 24시간가량 질소분위기로 담가두어 형성하였다. 실험은

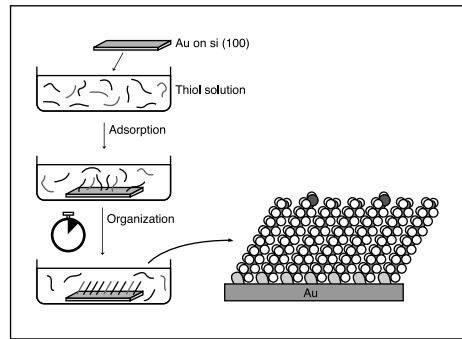


그림. 1 자기조립박막의 형성 개략도

일반적인 반도체 리소그래피 공정과 마찬가지로 각각의 레이저를 조사하였을 때 모재에 직접적인 손상이 가지 않는 에너지 범위로 수행되었으며 레이저가 조사된 시편을 금의 에칭액인 Cyanide용액 (1M KOH, 0.1M KCN)을 사용하여 1시간 동안 에칭하였다.

펨토초 레이저를 이용한 경우 기존의 UV 레이저를 이용한 패턴에 비하여 매우 빠른 공정속도를 가지고 깨끗한 패턴의 가공이 이루어지는 것을 볼 수 있었다. 이것은 박막의 흡수율과 관계있는 것으로 생각된다. 유기박막은 약 160nm 파장에서 최고의 흡수율을 보이므로 355nm와 248nm 파장의 영역에서는 SAM층의 산화가 유발될 만큼의 에너지가 공급되지 않은 것으로 보인다. 반면에 흡수가 거의 없는 800nm 파장의 레이저의 경우 빔의 강도가 높은 펨토초 레이저를 사용하였을 때 패터닝이 매우 잘 일어났다. 이것은 파장대의 흡수가 없으나 멀티포톤 효과에 의한 비선형적 흡수율의 증가로 유기박막층의 산화가 일어난 것임을 생각할 수 있다.

이러한 특성을 이용하여 thiol의 체인의 길이가 다른 두가지 SAM 층에 대하여 펨토초 레이저로 같은 공정을 실시하고 그 결과를 그림 2와 같이 AFM 측정결과를 도시하였다.

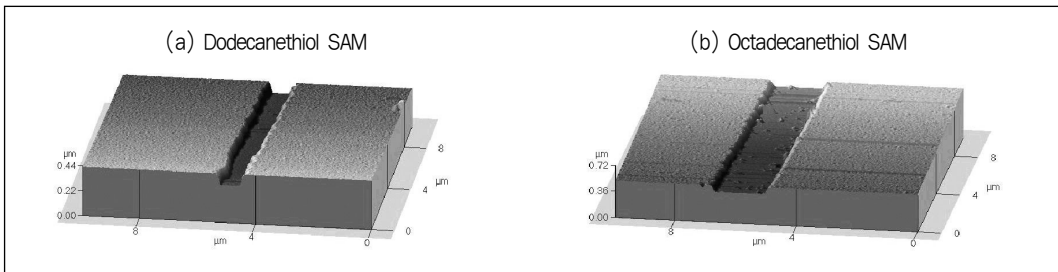


그림 2. AFM을 이용하여 측정한 가공부 표면

위의 실험결과에서 보는 바와 같이 ODT SAM을 이용한 경우 800nm정도의 서브 마이크로 선폴을 얻을 수 있었다. 이것은 DDT SAM 층이 더 큰 흡수율을 가지고 ODT 보다 큰 파장대에도 흡수가 일어나는 결과로부터 유추할 수 있다. 즉 ODT 층의 경우 레이저 빔이 가우시안 분포를 가지므로 빔의 강도가 집중된 가운데 부분에서만 산화가 일어나 가해진 레이저 빔보다 더 작은 패턴을 형성할 수 있는 결과를 주게된다. 이러한 결과를 이용하여 근접장 현미경에 초단펄스 레이저를 커플링하여 나노스케일의 가공을 수행하여 그림 3에 도시하였다.

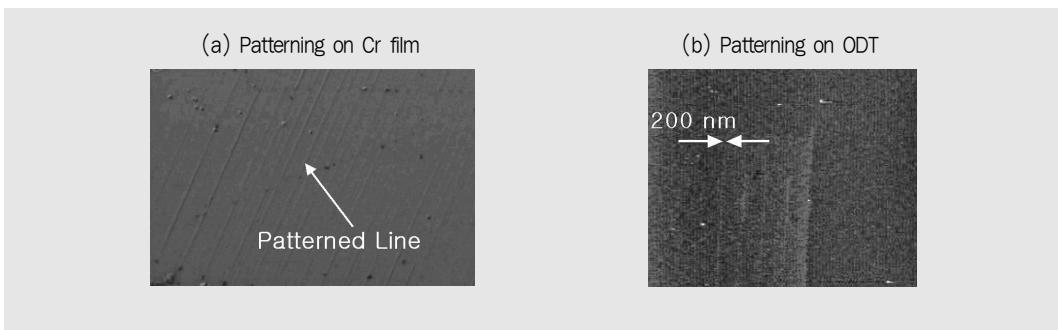


그림 3. AFM을 이용하여 측정한 가공부 표면

2.2 딥펜 리소그래피(Dip-pen Lithography)

나노미터 크기의 구조와 패턴을 형성하는 기술은 극미세 기계부품과 나노전자소자 등의 제작에 있어서 가장 중요하고도 기본적인 요소기술이다. 나노크기의 구조와 패턴을 형성하는 기술은, 광 및 전자빔 리소그래피 기술과 같이 기존기술을 개선하려는 연구와 microcontact printing과 같이 아예 새로운 리소그래피법을 개발하려는 시도로 나눌 수가 있다. 이에 새롭게 주목 받고 있는 신기술 중의 하나가 바로 DPN (Dip-Pen Nanolithography) 기술이다. DPN 기술은 1999년 Northwestern 대학교의 Chad A. Mirkin 교수의 그룹에서 연구결과를 발표한 것을 그 시발점으로 볼 수 있다. 이 그룹은 이후 몇 편의 논문을 연속적으로 발표하며 DPN 기술을 하나의 중요한 연구 주제로 확실히 자리매김하게 된다.

사실 DPN 기술은 그 원리가 매우 간단하다. 펜으로 종이에 글씨를 쓰듯이 나노프로브를 아주 작은 펜으로 사용하여 원하는 물질의 패턴을 기판 위에 직접 '쓰는' 기술인 것이다. 나노프로브는 주사탐침 현미경 (Scanning Probe Microscope, SPM)에서 사용되는 탐침으로서 잘 정비된 SPM 기술을 통해 자유자재로 조작할 수 있으며, 또한 프로브 끝 부분의 직경

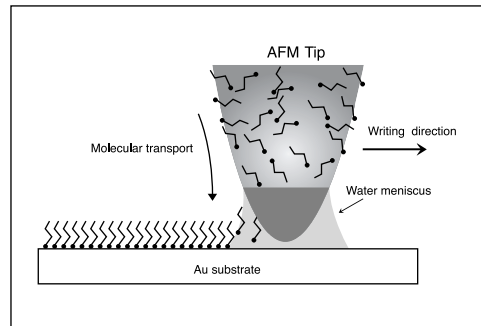


그림 4. 나노프로브를 이용한 분자패턴형성 개념도

이 10nm 이내로 매우 작기 때문에 10nm 이내의 좁은 선폭의 패턴을 그리는 것이 가능하다. 따라서 DPN 기술은 간단한 방식으로 10nm 정도의 미세 패턴을 직접적으로 제작할 수 있는 기술이다. 그림 4에는 SPM 탐침을 이용해 금 표면에 티올 분자의 패턴을 형성하는 과정의 개요도를 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 DPN 방법은 SPM 탐침을 펜으로 하고 패턴을 제작하고자 하는 물질을 잉크처럼 사용하기 때문에, 사용하는 물질의 제약이 거의 없으며 특히 기능성 유기분자나 생체분자의 기능을 손상시키지 않고 직접 패턴링할 수 있다는 장점이 있다. 이외에도 기존 기술에 비해 설치 및 유지비가 지극히 저렴하며, SPM을 사용하는 방법을 배우면 쉽게 패턴제작이 가능하고 또한 패턴을 제작하고 나서 곧바로 SPM을 통해 패턴의 형성여부를 확인할 수 있는 등의 다양한 장점을 갖는다.

Mirkin 그룹에서는 10nm 이하의 선폭을 제작할 수 있음을 보인 외에도 패턴으로 제작된 분자와는 다른 분자를 사용하여 덮어쓰기가 가능함을 보였다. 또한, 나노프로브를 누르는 힘 등의 공정변수에 의한 선폭의 변화가 미미함을 관찰하였는데, 이는 대면적 공정의 가능성을 보여 준 것이라 할 수 있다. SPM을 기반으로 하는 리소그래피 기술의 가장 큰 약점은 패턴을 하나씩 제작하는 방식이므로 그 작업속도가 매우 느려 실질적 사용에 제한을 받는다는 것인데, 이러한 문제를 해결하기 위하여 여러 개의 프로브를 집적한 어레이를 제작하여 공정을 병렬화하는 연구가 수행되고 있다. 그런데, 현재 여러 가지 형태로 연구 개발 중인 SPM 리소그래피법은 그 대부분이 공정조건에 민감하여 각각의 프로브를 독립적으로 제어하는 시스템을 완벽하게 갖추지 않는다면 여러 개의 프로브를 이용한 병렬공정결과의 균일성을 보장 받을 수 없게 된다. 따라서 DPN 기술은 공정 조건에 민감하지 않으며 외부적 요인인 온도나 습도, 덧쓰기 횟수 등을 통해 선폭의 조절할 수 있으므로 이러한 병렬공정화 연구의 강력한 주자로 여겨지고 있다.

DPN 기술로 형성한 나노패턴은 식각과 self-assembly 등의 후 공정을 통해서 나노구조물의 제작에 사용될 수 있다. 즉, 레지스트 물질을 패터닝한 후 이를 마스크로하여 건·습식 식각에 사용할 수 있으며, 또한 나노입자 등을 포획할 수 있는 분자를 패터닝하면 나노물질의 선택적 공정을 통한 나노구조의 제작이 가능하다. 그림 5에는 DPN 방식으로 금 표면위에 제작한 유기분자의 패턴 위에 금 나노입자 고정을 유도하여 형성한 나노입자 어셈블리의 SPM 사진을 나타내었다.

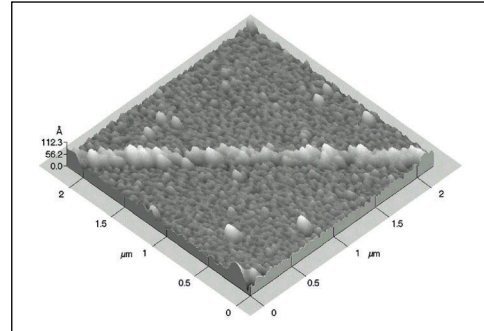


그림 5. DPN 방법으로 그린 hexanedithiol 패턴 위에 고정된 5nm 크기의 금 나노입자 집합체의 SPM 사진

이상과 같이, 최근 들어 크게 주목 받고 있는 DPN 기술은 이 기술이 지니는 기본적인 장점과 후처리 공정 등을 통한 확장성 등을 고려할 때, 집중적인 연구개발이 요망되는 유망한 기술분야라 할 수 있을 것이다. 특히, 나노수준의 생체물질의 임의패턴을 제작할 수 있다는 점을 고려할 때, 나노바이오 기술연구 및 바이오센서 개발 연구 등에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 근접장광원 해석기술

본 연구에서는 나노프로브 근접장에서의 에너지분포해석을 통해서, 나노프로브와 레이저를 함께 사용하는 프로브 응용 공정에서 일어나는 현상들을 이해하고 예측하여, 나노크기 수준의 가공을 수행함에 있어서 공정의 최적화에 기여하고 실험 결과에 근거를 제시하기 위함을 목표로 한다. 해석을 위해 Remcom社의 3차원 전자기장 해석용 프로그램인 XFDTD pro를 사용하고 있으며, 자체적으로 코드를 작성하여 상용프로그램에서 지원하지 못하는 부분에 대한 해석을 시도하고 있다.

그림 6은 NSOM(Near-field Scanning Optical Microscopy)와 펄스 레이저를 커플링하여 대상 물질을 가공하는 경우에 나타나는 현상을 설명하기 위해 수행한 해석에 대한 개념도이다. 프로브를 통한 전기장의 분포는 프로브 끝 각의 크기, 코어와 코팅된 물질에 따라서 달라지게 되며, 코어와 코팅된 물질을 정의하기 위해서 Debye model을 적용하였다. 그림에서 프로브 출력단의 aperture 직경은 프로브에 조사되는 레이저의 파장인 800nm보다 작은 100nm이다. 이러한 경우에 계산되는 출력단을 통과한 전기장의 크기는 출력단에서 멀어질수록 지수적으로 감소하는 경향을 보이게 되며, 해석결과는 출력단에서 10nm인 지점에서는 입력단과 비교하였을 때 27%, 50nm인 지점에서는 0.9%만이 측정되었다. 그림의 오른쪽 하단부에 출력단을 통과한 전기장의 분포를 그림으로 표현하였다. Aperture끝단에서 aperture를 통과한 전기장의 분포를 통해서 aperture의 크기에 준하는 영역에 전기장이 집중되어 있는 것을 확인할 수 있으며 그 분포는 aperture의 중심을 대칭축

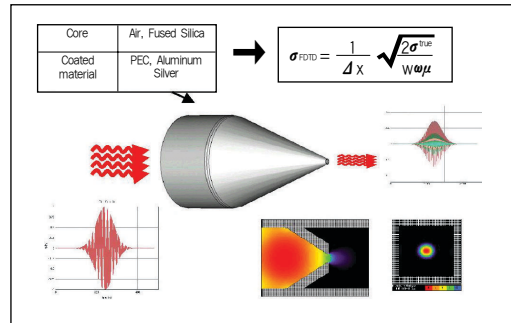


그림 6 나노프로브 근접장에서의 에너지 분포해석에 대한 개념도(1)

으로 하는 가우시안 형태를 띄게 된다.

그림 7은 AFM(Atomic Force Microscopy)과 Laser를 커플링하여 대상물질을 가공하는 경우에 일어나는 현상을 시뮬레이션 한 결과이다. probe의 재질은 결정질 실리콘이며, 대상물질의 재질은 비결정질 실리콘이다. AFM probe의 끝단과 대상물질사이의 거리가 조사되는 레이저의 파장보다 작을 때, 그림 2와 같이 대상물질과 평행한 방향으로 레이저를 조사할 경우에 probe의 끝단과 대상물질 사이에서 전기장의 크기가 조사하는 전기장의 크기보다 약 20배 가량 증폭 되는 현상을 발견할 수 있었다. 전기장의 증폭이 일어나는 범위는 수백 nm의 수준이었으며, 이러한 현상은 극미세 2차원 패턴에 응용하는 것이 가능할 것으로 생각된다.

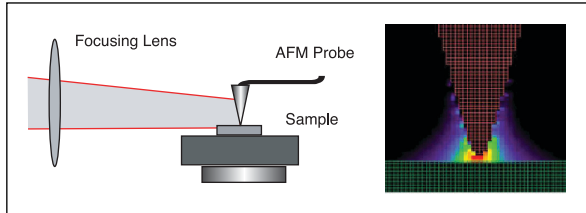


그림 7. 나노프로브 근접장에서의 에너지 분포해석에 대한 개념도(2)

또한 실험적으로 위의 해석의 결과들을 검증하기 위해서 근접장에서의 전자기장 분포를 측정하는 실험을 계획 중이다. 실험방법으로는 Photodetector를 이용하여 전기장의 크기를 직접적으로 측정하는 방법과, 프로브와 레이저를 커플링하여 가공하기 전의 Photo-refractive crystal의 굴절율과 가공후의 굴절율 변화를 측정하여 전기장의 분포를 간접적으로 알아낼 수 있는 방법이 고려되고 있다. 이와 함께 프로브에 조사된 레이저 펄스가 시간축에 대해서 일어나는 변형을 예측하기 위한 해석도 수행하고 있다.

24 나노프로브 응용 기계-화학적 나노구조 제작기술

본 과제에서 제시하는 새로운 나노스케일 미세 패턴제작 기술은 미세탐침(nanoprobe tip)에 힘을 가하여 시료의 표면상태를 변화시키는 mechanical modification 방법과 선택적 식각(selective etching)에 의한 화학적 가공방법을 병행하는 “기계-화학적 나노리소그래피 기술(Mechano-Chemical Scanning Probe Nanolithography)”이다.

기계-화학적 나노 구조물 제작 기술의 기본개념 및 공정은 그림 8과 같다. 우선, 시료표면에 이후의 화학적식각 공정에 대한 보호층역할을 하는 리지스트(resist)로서 수 나노미터 두께의 유기박막인 자기조립분자막(self-assembled monolayer)을 형성시키고 1차적으로 이를 나노스케일 반경의 미세탐침을 이용, 탐침에 힘을 가하여 직접 시료의 표면형상을 변형시키는 기계적 변형방법을 통해 제거한다.

다음으로, 기계가공된 패턴 또는 영역만을 선택적으로 에칭하여 원하는 형상을 얻는다. 기계적 가공후 패턴주위에 남는 돌기(burr) 및 가공 또는 마멸된 시료잔유물은 이러한 화학적 가공에 의해 제거된다. 자기조립분자막 표면은 표면에너지가 낮고 소수성(hydrophobicity)을 나타내어 표면오염과 흡착력(adhesion) 및 마찰을 저감시켜 기계가공시의 팁의 오염 및 마멸을 감소시키는데 이점이 있다. 본 기술은 기타 나노리소그래피 기술에서와 같이

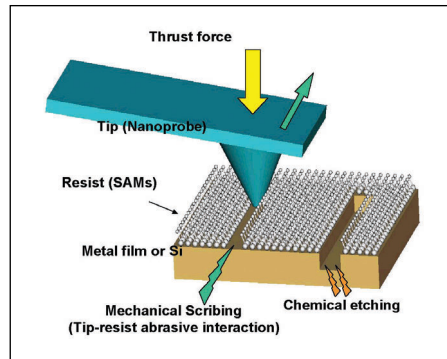


그림 8. 기계-화학적 나노프로브 리소그래피 가공 메커니즘 개략도

X-ray 등 고가의 광 시스템이나 e-beam과 같은 부가적인 설비를 필요로 하지 않으므로 현재 개발 중인 여러 나노 구조물 제작기술 중에서 설비가 간단하며 비용이 저렴하다는 장점을 가지며, 예칭시간 조절에 따라 다양한 크기의 3차원 나노구조물 제작이 가능하다. 또한, 대부분의 미세패턴 제작기술이 실리콘을 기반으로 하는 재료를 주된 가공대상으로 하는 한계를 지니지만, 본 기술은 다양한 금속재료에도 직접 나노 구조물 제작이 가능하다.

기계-화학적 나노구조 제작기술은 미세탐침과 시료표면과의 직접적인 접촉에 의한 표면의 물리적 변형을 유발하는 것으로서, 팁-표면간 상호작용, 접촉하중 및 가공깊이 제어를 통해 임의의 형상가공이 가능하다는 매우 큰 차별화된 장점을 가진다. 이러한 장점은 나노트라이볼로지(nano-tribology) 기술에 대한 깊이 있는 이해와 그 응용을 전제로 한다. 즉, 보다 미세한 선평의 패턴제작을 위해서는 나노스케일 접촉에서 나타나는 미세 마찰, 마멸특성, 표면간 상호작용, 표면의 물리화학적, 기계적 성질 등에 대한 깊이있는 고찰이 필요로 하게 된다. 나노패턴 및 구조제작과 관련하여 현재 매우 다양한 방법들이 제시되고 있으나, 나노트라이볼로지기술을 응용한 나노구조제작기술은 거의 없다고 해도 과언이 아니다. 현재 탐침을 이용하여 개발되고 있는 신기술은 다양하다. 그 대표적인 예가 IBM의 thermo-mechanical 방식을 이용한 나노스케일 사이즈의 비트에 의한 정보기록 메커니즘이다. 이 방법은 차세대 정보저장기술의 가장 선도적인 위치에 있으면서 가장 빨리 현실적인 응용이 가능할 것으로 예측되고 있다.

당해년도 본 과제에서는 지난 1차 년도의 유기박막의 가공특성고찰 및 공정기술 개발결과를 바탕으로 기존의 여러 나노리소그래피 제작 기술의 한계를 최대한 극복하면서 패턴선평을 줄이고, 재현성 및 공정 기술의 안정성을 확보하는데 노력하고 있다. 궁극적으로는 200nm이하 선평의 극미세패턴 제작 공정 확립

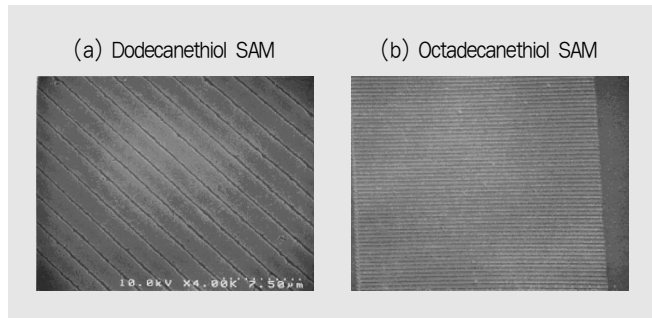


그림 9. 실리콘 (a)과 구리 (b) 표면위에 패터닝된 결과

및 high-speed patterning에 목표를 두고 있다. 이를 위해서는, 보다 정확한 기계가공의 공정조건을 확보하는 것이 무엇보다 중요하다고 보고있다. 또한, 단순히 패턴제작의 시도나 가능성 검증차원에서 더 나아가 실제로 실용성있는 나노패턴제작기술 및 3차원 나노 구조 제조공정을 구축하고자 하며, 패턴선평의 재현성 및 가공표면품위 향상을 위하여 유기박막의 증착기술을 개선하는 데에도 역점을 두고 있다

2.5 근접장광 응용 부가조형 기술(Near-field additive nanostructuring using nanoprobe)

근접장현미경은 광학현미경의 회절한계를 넘어 빛의 파장보다 작은 크기의 대상을 관측하거나 나노미터크기의 영역에서 발생하는 분광학적인 특성을 분석하는데 많이 활용되고 있다. 이와 같이 회절한계 이하의 관측 및 분석이 가능한 배경에는 광원으로 사용되는 레이저빔을 수십에서 수백나노미터 크기의 나노프로브를 통해 관찰영역에 조사함으로써, 빛의 파장이 아닌 나노프로브의 개구부(aperture) 크기에 따라 실제 관찰되는 영역의 정밀도가 결정되는 근접장현미경의 특성이 존재한다. 한편, 근접장현미경에

서 나오는 레이저빔을 관측이나 분석이 아닌 가공용으로 활용할 경우 근접장현미경의 정밀도와 유사한 수십에서 수백나노미터 크기의 구조물 가공이 가능하게 되는데 최근 나노구조물 제조에 대한 관심이 크게 증가하면서 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 근접장의 나노프로브를 이용한 가공기술로는 비교적 높은 에너지의 레이저빔을 나노프로브에 투과시킴으로써 레이저빔에 노출된 재료가 어블레이션(ablation)을 통해 직접 가공되도록 하는 방법과, 이와는 달리 비교적 낮은 에너지를 조사하면서 소재에 광화학적 반응을 유도하여 원하는 형태의 가공이 일어나게 하는 방법 등이 있다. 나노프로브를 이용한 근접장 부가조형 기술은 후자의 경우에 해당하는 기술로, 빛에 민감한 광경화성 액체폴리머에 나노프로브를 통해 빛을 조사하여 빛에 노출된 부분만이 고체구조물로 성형되도록 하는 나노리소그라피기술의 일종이다. 아울러 근접장 부가조형에서는 나노프로브의 이송경로 및 위치를 초정밀이송계를 이용해 임의의 방향으로 제어할 수 있으며 이에 따라 직선 및 곡선 형상을 임의로 가공할 수 있는 장점이 있다. 반도체 공정이나 X-선 리소그라피와 같이 마스크를 필요로 하는 공정의 경우 가공형상이 바뀔 때마다 마스크를 다시 제작하여야 하며 이에 소요되는 경비 및 시간의 부담이 크데 비하여 근접장 부가조형의 경우 별도의 마스크가 필요없고 소프트웨어를 통해 이송계의 운동을 제어함으로써 원하는 형상을 수시로 제작할 수 있다는 장점이 있다.

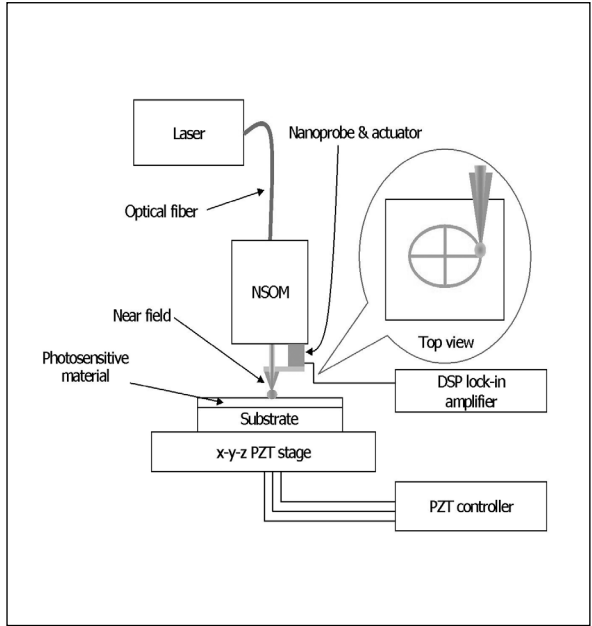


그림 10. 근접장 부가조형을 위한 실험장치 개략도

그림 10은 근접장 부가조형을 위한 실험장치의 개략도를 나타낸다. 우선 레이저빔은 근접장 현미경에 부착된 나노프로브를 통해 초정밀이송계 위에 놓인 시편에 조사된다. 시편표면은 레이저빔의 파장에 민감하게 반응하는 광폴리머가 코팅되어 있으며 나노프로브에서 생성된 근접장에 의해 경화가 일어난다. 일반적으로 나노프로브의 광투과율이 약 10~4 정도로 매우 작은 값을 가지므로 나노프로브를 이용한 가공의 경우 이와 같이 극히 작은 에너지에서도 가공이 가능하다는 것이 전제되어야 하므로 광민감도가 매우 높은 폴리머를 사용하는 것이 필요하다. 나노구조물 가공을 위해서는 제조하고자 하는 구조물의 형상을 따라 초정밀이송계를 제어함으로써 나노정밀도의 구조물 가공이 이루어진다.

근접장 부가조형기술을 통해 임의형상의 2차원 나노패턴이나 세장비가 큰 나노구조물 제조가 가능할 것으로 기대된다. 연구초기에는 나노프로브에서 나온 빛에 의한 광폴리머의 경화특성에 대한 연구 및 2차원 형상제조에 대한 연구를 추진하고 2단계에서는 3차원 구조물가공기술에 대한 연구를 수행할 계획이며, 근접장부가조형 기술과 관련된 선행연구가 국내외적으로 거의 없는 상황이므로 공정개발 및 최적 조건 설계에 많은 연구노력이 필요할 것으로 예상된다. 이와 같은 방법으로 제조된 나노구조물은 광역

자, 광회로, 나노유체소자 등에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 보여 정보통신, 의학, 센서, 생명과학 분야 등의 발전에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2.6 나노 구조물 제작을 위한 프로브 응용 복합 공정 기술 개발

본 연구는 전기 화학적인 방법을 이용하여 서브 마이크로 크기의 기본 단위 형상뿐 아니라 입체 복합 형상을 제작할 수 있는 금속 나노 구조물 제작 기술을 개발하는 것을 연구 목표로 한다. 마이크로/나노 스케일의 복합 형상 구조물의 제작을 위하여 전기화학적 방법을 이용한 전해가공(ECM: electrochemical machining) 기술과 전해증착(ECD: electrochemical deposition) 기술을 각각 개발하고 이들 두 방식의 제작 기술을 복합적으로 적용함으로써, 기존 방식으로는 제작이 곤란한 고강성, 고강도 금속 재료에 나노 입체 형상 구조물을 제작하는 기술(NECS: nano electrochemical structuring)을 확보한다. 초단펄스를 이용한 전해 가공에서 가공 조건에 따른 전해 국부화 현상과 가공면 내부의 부동태막 생성 억제, 테이퍼 감소 방법, 다양한 형상의 가공기술 등에 대해서 연구하고 이 기술들을 응용하여 형상 정밀도가 우수한 미세 구멍과 미세 홈 및 미세 구조를 제작하고 있다.

1) 미세전해가공기술의 원리

일반적인 전해 가공은 가공 정밀도가 방전 가공 등 기타 특수 가공에 비해 좋지 않은 것으로 알려져 있어 미세 형상 제작에 적당하지 않다고 알려져 있다. 하지만, 전기화학적 현상을 국부적으로 집중시킬 수 있다면 서브 마이크로 크기의 구조물을 제작하는 것이 가능하다.

전해 현상의 국부화를 위한 방법으로 초단파를 이용하는 방법이 제시되었는데, 이 방법의 원리를 살펴보면 다음과 같다. 공구와 공작물 양단에 전위를 걸어주면 전극과 용액의 경계면 부근에 존재하는 전하들은 분극 전위에 의해 서로 마주하는 층을 형성한다. 이것을 전기이중층이라고 한다. 전기적으로 축전기의 역할을 하고 있는 전기이중층은 용액 저항과 더불어 축전기-저항으로 이루어진 등가 전기회로로 근사될 수 있다. 초단펄스 형태의 전위를 가할 경우, 공구 전극과 먼 거리에 위치한 가공물은 용액 저항이 크기 때문에 전기이중층의 충전 시정수가 비교적 크다. 만약 이 시정수 보다 작은 온-타임을 갖는 펄스가 가해질 경우, 분극은 거의 이루어지지 않고 따라서 전해 작용이 발생하지 않는다. 반면 공작물과 가까운 위치에서는 상대적으로 작은 용액저항으로 인해 충전 시정수는 작은 값을 갖게 된다. 공구와 가까운 위치의 전기이중층 시정수를 t_1 , 먼 위치의 전기이중층 시정수를 t_2 라고 할 때, $t_1 \leq T \leq t_2$ 인 온-타임 T 동안 펄스 전원이 양단에 가해질 경우, 시정수 t_1 인 가까운 거리까지만 전해 작용이 일어나게 되고 따라서 가공 영역은 국부화된다. 그리고 이 때의 가공 범위 d 는 $d = t/r \text{CDL}$ 로 표현될 수 있다.

여기서 r 는 전해액의 비저항이고, CDL 은 전기이중층의 단위면적당 축전용량을 의미한다. 이를 응용하여 DC 대신 초단펄스 전원을 이용하여 전해 영역을 국부화 함으로써, 전해 가공에서 마이크로 이하의 형상 제작이 가능함을 보였으며 수 마이크로미터 크기의 미세 형상을 제작하였다.

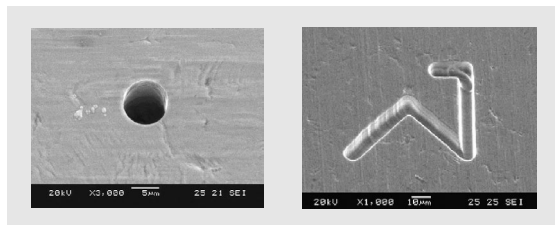


그림 11. 전해가공 실험으로 가공한 결과

2) 미세전해가공에 의한 구멍 및 홈 가공

0.1M 황산 전해액에서, WC 미세축과 공작물을 근접시킨 후 양단에 수십 ns의 전압 펄스를 인가하여 전해 영역을 국부화함으로써 304SS에 미세 구멍과 미세 홈을 가공한다. 초단펄스 전해 가공에서 가공 영역이 더 이상 증가하지 않는 전해 국부화가 이루어지고, 가공 조건을 적절히 선정하면 반경 방향 가공 여유를 1 μ m 이내로 유지할 수 있어서 가공면 품위와 형상 정밀도가 우수한 미세 형상을 제작할 수 있다. 위의 결과를 이용한 가공 예를 그림 11에 나타내었다.

3) 미세전해증착에 의한 구조물 제작

초단펄스 전해 증착을 이용하여 구리 기판 위에 구리 미세 구조물을 제작한다. 0.5M CuSO₄와 0.5M H₂SO₄ 혼합 수용액에서, STM 팁과 구리 기판 사이에 수 백 ns의 펄스 전압을 인가하여 팁의 끝단에 전기장을 집중화시킴으로써 증착 영역을 국부화하고, 이를 통해 미세 구리 기둥을 제작하였고, 미세 writing에의 응용 가능성에 대해서도 연구하고 있다. 본 연구는 전해 가공 기술과 더불어 마이크로미터에서 나노미터 크기까지의 금속 삼차원 미세 구조물을 제작하는데 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

3. 결론

이와 같이 나노프로브를 이용한 다양한 공정을 개발하는 연구가 상호 정보교환과 보원의 방법으로 이루어지고 있다. 현재까지 나노스케일의 가공을 생산적인 방법까지 끌어올리는 데는 많은 한계가 있으며, 또한 나노스케일의 가공을 전자빔을 이용하지 않고 손쉽게 할 수 있는 대안도 마련되어 있지 않다. 이런 점에서 나노프로브를 이용한 패터닝 및 가공 기술은 이에 대한 또다른 가능성을 제시하고 있다. 이렇게 개발된 기술을 병렬형 나노프로브와 결합하여 생산성을 향상시키고, 또한 간단한 공정비용으로 개발단계의 나노패턴을 성형을 구현하는데는 매우 유용한 도구로 사용될 것으로 예상된다.

아울러 나노프로브를 이용한 측정기술 및 대용량 저장장치로의 기술적 응용에 더 많은 파급효과를 줄 수 있을 것으로 예상하고 있다.



장 원 석

- 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 선임연구원
- 관심분야 : 나노프로브 응용기술
- E-mail : paul@kimm.re.kr