

기계 분야에서 접근하는 Nano 관련 기술

이득우¹ · 조용주² · 강충길² · 정용호²*

(¹부산대학교 나노과학기술학부, ²부산대학교 기계공학부)

1. 서 언

Post-반도체 시대를 대비하기 위해 차세대 성장 동력 산업의 원천기술이 요구하는 재료는 구조제가 아닌 기능재료로 된 부품을 요구하고 있다. 이러한 기능재료의 부품 개발을 위해서는 나노 크기의 액상 및 고상재료의 결정립 제어를 통한 기능성 소재로 된 부품의 원천기술 개발이 필요하다. 이러한 기능재료의 부품 개발은 미래 지향적인 근간기술이 필요하지만 국내 관련기술이 일본, 독일, 미국에 비하여 매우 열악하므로, 차세대 성장 동력산업의 원천기술인 미세 금형기술의 독자확보를 위해서는 전문 인력의 양성이 선행 준비되어야 하겠다. 한편, 이러한 기능성 소재로 만들어지는 차세대 IT 부품 등을 생산하기 위한 기술은 기계공학, 재료공학, 전기공학, 물리학, 화학, 나노과학 등의 학제간 전문연구인력에 의하여 확립이 가능하다.

이러한 시대적 기술적 요구에 부응하여, 부산대학교에서는 한국 과학 재단에서 지원한 우수연구센터(ERC/NSDM) 주관의 '정밀정형 협동과정'을 '나노시스템 공학 협동과정'으로 개편하고, 나노 기술과 관련한 대학원 교육과 연구를 수행하고 있다. 이 협동과정은 2003년에 개설되어 매년 석·박사과정생 15명 정도를 모집하고 있으며, 아직 개설된 지 얼마 되지 않았기 때문에 시작단계에 불과하지만 수행하고 있는 관련 연구 내용을 소개하고자 한다. 특히 이 협동과정은 기계공학과 밀접한 관련을 가지고 다학제적 연구를 수행하고 있기 때문에, 관련 연구나 교육이 기계 분야를 배경으로 나노 관련 기술 개발에 접근하고 있다. 따라서 나노 관련 기술 개발을 위해 기계 분야에서 접근할 수 있는 연

구 방향에 대해 하나의 예시가 될 수 있을 것으로 기대하며 관련 내용을 소개하고자 한다.

2. AFM기반의 Tribo-Nanolithography 기술을 응용한 나노 패터닝

2.1 개요

1981년 이래로, 고체표면을 원자 스케일로 관찰하기 위하여 발명된 SPM(Scanning Probe Microscopy)은 나노과학 및 나노공학의 연구에 필수적인 장치이다. 최근, 이러한 SPM의 표면 측정원리를 가공을 위한 수단으로 적용하여 나노 스케일(nano-scale) 미세가공 및 패턴형성을 시도하는 연구가 다수 시도되고 있다.

이러한 SPM기반의 나노 패턴 및 구조물 형성방법의 경우에는 팁과 샘플의 접촉, 비접촉에 따라서 크게 두 가지로 분류가 된다. 첫째는, SPM 팁과 샘플이 접촉한 상태에서 기계적 또는 분자의 이동에 의하여 원하는 패턴이나 구조물을 형성시키는 방법이고, 둘째는, 비접촉 모드에서 SPM 팁과 샘플간의 미소한 전기화학적 반응에 의하여 생성된 산화막 자체를 하나의 구조물, 즉 나노 와이어 또는 나노 패턴으로 형성하는 방법이다.

SPM을 기반으로 하는 대부분의 연구는 Bottom-up방식이 주를 이루고 있는데, 본 연구에서 제안하는 방법은 기계적 가공용 팁이 부착된 쉐퍼를 공구로 하여, AFM에 의한 기계적 나노 스케일 가공과 습식 에칭을 통하여 미세 3차원 구조물을 형성(Tribo-Nanolithography, TNL)하는 방법인 Top-down 방식의 나노 패터닝 프로세스이다. 즉, 다이아몬드 팁에 의한 기계적 변형층의 생성과 동시에 이를 하나의 마스크 패턴으로 하여 기존의 리소그래피에 비하여 장치를 단순화하고, 시간적 소비를

*E-mail: yhj@pusan.ac.kr

최소화 하고자 하여, 마이크로, 나노 영역의 기계적 가공기법을 소개한다.

2.2 AFM based TNL

그림 1은 SPM의 하나인 AFM(Atomic Force Microscopy)의 원리 및 TNL 프로세스의 장치를 나타내는 개념도이다. 3차원 표면 거칠기 측정기와 비슷한 원리로, 날카로운 탐침(probe)을 시편에 근접시켜 표면의 형상을 측정한다. 탐침은 극히 부드러운 마이크로 캔티레버의 선단에 부착되어 있으며, 캔티레버의 휨을 검출하여 탐침의 접촉 하중을 일정하게 피드백 제어한다.

시편과 프로브의 정밀한 상대적 위치 제어에 있어서는, 공작기계의 공구피삭재의 관계와 동일하지만, SPM으로는 피에조 기반의 초정밀 스테이지에 의하여 더욱 정밀한 제어가 가능하다. 따라서 운동오차

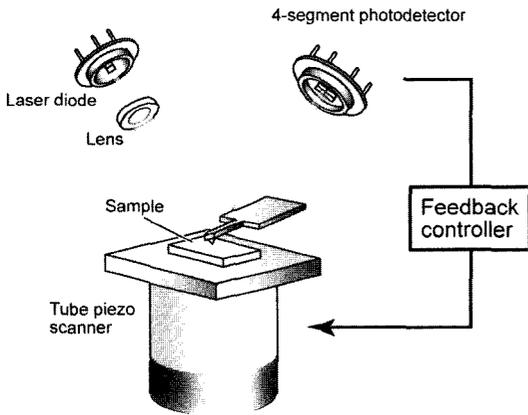


그림 1. Scheme of experimental setup for TNL

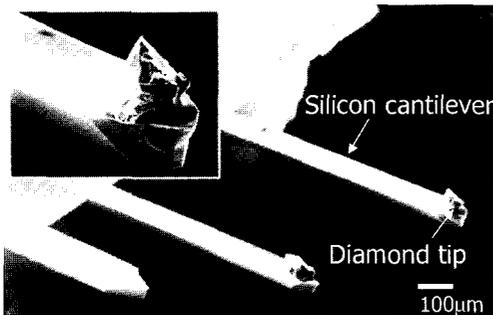


그림 2. SEM image of diamond tip cantilever for TNL

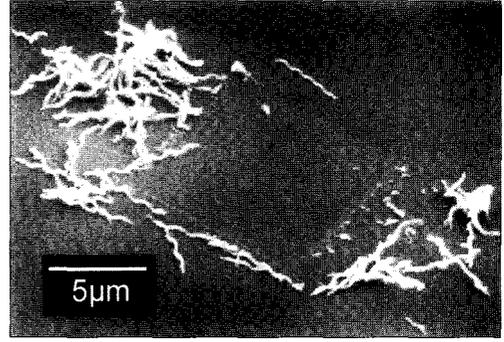


그림 3. SEM image of nanomachined area on single crystal silicon

나 피삭재의 형상오차를 극히 감소시킬 수 있다. SPM에는 그 적용처에 따라 다양한 종류의 프로브가 있는 것처럼, SPM 기구를 이용한 가공도 프로브나 가공 환경을 바꾸는 것을 통하여 다양한 가공을 실현할 수 있다. 그림 2와 같이 가공용 마이크로 캔티레버(선단에 다이아몬드 연마 입자가 장착)를 이용하면, 나노 스케일의 절삭가공이 가능하게 된다.

그림 3은 단결정 실리콘에 나노 스케일 절삭을 수행한 가공부의 AFM 관찰사진이다. 두께 수십 nm의 칩이 가공부 주위에 관찰된다. 즉, 나노 스케일의 절입 조건에서도, 마이크로 스케일과 동일한 절삭이 행해지고 있으며 경취재료에서도 연성모드로 가공할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 또한, 단결정 실리콘을 나노 스케일로 절삭한 후, 가공 변질층을 평가할 목적으로 습식에칭을 수행한 결과, 그림 4와 같이 가공된 영역에는 에칭이 전전되

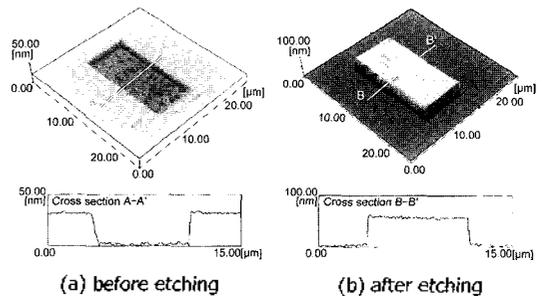


그림 4. AFM topography image showing mask effect of nanomachined area (material removal process) in KOH solution

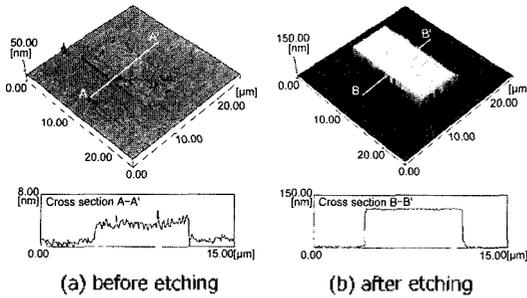


그림 5. AFM topography image showing mask effect of nanomachined area(plastic flow) in KOH solution

지 않고 오히려 마스크 효과가 발생하는 현상을 발견할 수 있었다. 이러한 결과는 가공 변질층의 마스크 효과에 기인한 것이라고 고찰되지만, 그림 5와 같이 가공되지 않고 마찰효과만 발생한 경우(윤기가공)에서도 동일한 마스크 효과가 발생하는 것이 확인되었다.

TEM, AES, SIMS 분석결과, 마스크 효과는 나노 스케일의 가공(제거가공)/마찰(윤기가공)에 의하여 산소농도가 높고 결정성이 낮은 변형층이 생성한 것이 원인이라고 고찰된다. 그림 6은 이러한 TNL 프로세스로 제작한 미세 구조물의 예로서, 기계적 가공조건의 변화를 통한 계단형상의 미세구조물을 제작한 결과를 보여주고 있다.

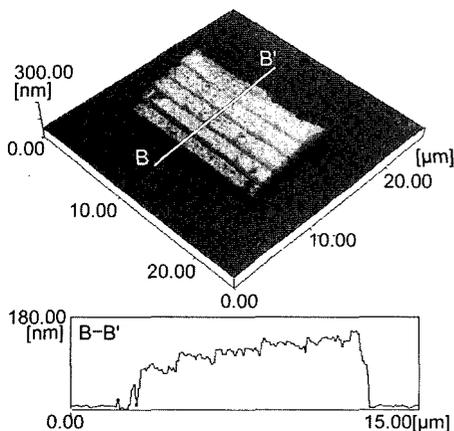


그림 6. AFM topography image of micro-ladder showing different etching selectivity via different machining parameters

2.3 Nanoindenter based TNL

스크래치를 이용한 방법의 특징은 스크래치에 사용된 팁의 형상이 패턴 가공 후 재료에 그대로 전사된다는 것이다.

이러한 특징을 이용하여 다양한 형상을 지닌 팁의 사용과 스크래치 가공방법의 조합으로 여러 가지 형상을 얻을 수 있다. 그리고 단결정 실리콘 소재에서 나노 스크래치에 의한 표면의 가공 변질층을 에칭 마스크로 이용한 마스크리스 나노 가공기술을 응용하면 다양한 형태의 template 제작을 가능하게 할 뿐만 아니라 이를 nanoimprinting에 적용시키면 다양한 형태의 나노급 소자를 가공할 수 있게 된다. 현재 template 제작에 쓰이는 소재로는 quartz가 주로 이용되고 있으나 재료 자체가 고가이고 가공성이 떨어진다는 단점을 지니고 있다. 하지만 유리의 한 종류인 borosilicate는 template가 가져야 하는 가장 중요한 특성인 빛 투과율이 quartz와 비슷한 89~91%이고 저가이며 가공성도 우수하다. 또한 borosilicate는 실리콘과 열팽창계수가 거의 같아, MEMS 분야에서 실리콘 웨이퍼와의 본딩(anodic or fusion bonding) 소재로 널리 쓰인다.

본 연구에서는 borosilicate 소재를 나노/마이크로 머시닝 기술을 이용하여 가공특성 및 마스크 패턴으로서의 가능성을 고찰하였다. Berkovich 팁은 방향에 따라 형상이 달라지는데, 팁의 방향에 따른 스크래치 가공시 동일한 수직력 조건에서 마찰력, 마찰계수가 변화한다. 그림 7(a)에서와 같이 스크래치 방향을 0°로 하고 회전각을 θ 라 할 때, θ 가 변화함에 따라 공구형상이 달라진다. 그리고 공구인선

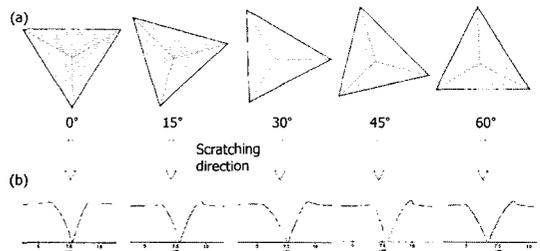


그림 7. (a) Berkovich tip rotation from 0° to 60° (b) Cross section profiles of grooves at each orientation

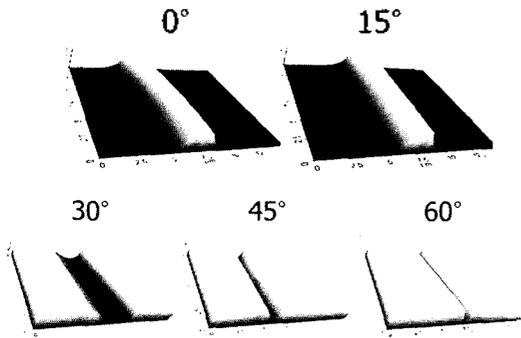


그림 8. AFM topography image showing difference of mask effect against 50% HF solution according to the tip rotation

은 θ 가 증가할수록 좌측으로 이동하여 $\theta = 30^\circ$ 에서는 공구인선이 좌측 끝으로 옮겨져 가공방향으로는 공구인선이 사라지고 팁의 면이 재료와 마찰하게 된다. 그림 7(b)는 30 mN의 힘으로 팁을 0° , 15° , 30° , 45° , 60° 회전시켰을 때 스크래치 가공한 패턴을 AFM으로 측정된 것인데, 팁 형상이 piling-up 생성과 groove의 형상에 영향을 주는 인자임을 알 수 있으며, 어느 각도에서도 borosilicate재료의 나노 스케일 기계가공이 원활히 수행되고 있음을 확인할 수 있었다.

앞서 2.1절에서는 단결정 실리콘 소재에서 나노 스케일의 기계가공에 의한 표면의 결정성이 낮은 변질층이 에칭마스크로 응용되는 결과를 소개하였다. 반면 borosilicate의 경우에서도 스크래칭 후 마스크 역할을 하는 가공변질층의 생성여부를 확인해 본 결과 동일한 결과를 얻었다. 그러나 그림 7의 결과에 의하면, 팁의 가공방향에 따른 그루브의 형상은 그다지 큰 차이를 보이지 않았으나, 에칭 후 각기 다른 결과를 얻었다.

그림 8은 30 mN의 하중으로, 팁 가공방향 $\theta = 0^\circ$, 15° , 30° , 45° , 60° 일 경우, 스크래치 가공을 수행한 패턴을 50 wt% HF 용액으로 10 s 동안 에칭하였을 때의 결과를 AFM으로 측정된 것이다. $\theta = 0^\circ$, 15° 에서는 에칭 후, 돌출 구조의 역상이 발생했지만 그 이상의 가공방향 즉, $\theta = 30^\circ$, 45° , 60° 후의 각에서는 요면(concave)의 형상이 되는 결과를 보여, 가공표면에 마스크 작용을 하는 변질층의 생성이 이루어지지 않았음을 의미한다. 즉,

$\theta = 30^\circ$ 부터 공구인선이 가공에 직접 참여하지 않는 방향으로 이동되는데, 이러한 결과로 인하여, 연성모드의 가공이 이루어 지지 않고, 취성모드로 전이된 것으로 고찰된다. 상기의 결과는 한번의 스크래치 가공으로 돌출형상 및 함몰형상의 두가지 패턴을 동시에 달성 시킬 수 있다는 가능성을 제시하고 있다.

2.4 결론

AFM 및 Nanoindenter 기반의 TNL기법은 간단한 스크래칭을 수행하는 것만으로 재료표면에 마스크 효과를 지니는 변형층의 발생을 유도하는 특성을 가지고 있기 때문에 나노스케일의 미세구조물 및 패턴을 손쉽게 형성시킬 수 있어, 새로운 마스크리스 리소그래피(maskless lithography) 프로세스의 한 방법으로서 그 가능성이 있음을 시사하고 있다. SPM 응용 가공은, 비교적 소형 경량의 장치구성에서, 마이크로/나노 스케일의 가공을 수행할 수 있다. 또한, 가공기 자체가 고분해능의 측정 장치이기 때문에 가공형상의 측정을 동시에 수행할 수 있다. 이와 같이 SPM 응용 가공 기술은, 종래의 기계가공에서는 찾아 볼 수 없었던 포텐셜을 가지고 있기 때문에, 앞서 언급하였듯이 다양한 SPM 응용 가공법이 연구되고 있는데, 어떠한 방법 이든지 가공기술로서는 미완성의 단계이지만 미지의 가능성을 보유하고 있는 매력적인 프로세스임에는 틀림없다.

3. 나노 트라이볼로지

3.1 마이크로/나노 트라이볼로지

트라이볼로지(tribology)는 상대 접촉 운동 중에서도 상호작용을 연구하는 과학 기술로서, 표면의 마찰이 일어나는 모든 기술수준에서 마찰과 마멸로 인한 손실을 제거하거나 최소화하는 것이 그 목적이다. 최근 마이크로/나노미터 스케일의 기계적 성질을 측정할 수 있는 새로운 기술과 원자 스케일의 시뮬레이션을 위한 컴퓨터 기술의 발달은 나노 트라이볼로지 또는 분자/원자 스케일 트라이볼로지는 새로운 분야의 발달을 가져왔다. 이 분야는 미끄럼 운동을 하는 표면에서 응착, 마찰, 마멸 및 박막운환이 발생하는 동안 원자 및 분자 크기에서

마이크로 크기 범위에 이르는 과정에 대한 실험 및 이론적 고찰과 관련된다. 매크로 트라이볼로지는 과도한 하중조건하에서 비교적 큰 질량에 대하여 다루므로 부재들간의 체적특성이 트라이볼로지 특성을 좌우하게 되지만 마이크로나노 트라이볼로지에서는 가벼운 하중조건하에서 작은 질량의 접촉 시스템을 다루기 때문에 표면의 특성이 트라이볼로지 성능을 좌우하게 된다.

나노 트라이볼로지 연구는 작은 크기의 계면현상에 대한 기본적인 이해를 증진시키고, 자기 저장 시스템, 미소 전자 기계 시스템(MEMS) 및 그 밖의 산업응용분야에서 사용되는 마이크로나노 구조의 계면 현상을 연구하는데 필요하다. 마이크로나노 구조물에서 사용되는 요소는 매우 가볍고(μg 정도) 매우 작은 하중(μg 에서 mg 정도) 하에서 작동된다. 따라서 작은 하중을 받는 마이크로나노 요소 부품에 대한 마찰과 마멸은 몇 개의 원자층에 대한 표면의 상호 작용에 크게 의존하게 되며 이러한 구조는 일반적으로 분자 크기의 얇은 막으로 유회된다. 나노 트라이볼로지 기술은 나노 구조물의 마찰, 마멸과정을 연구하는데 이상적이며 매크로 구조의 계면 현상의 기초적 이해를 돕는데도 유용하다. 다음 절부터는 나노 트라이볼로지의 기본 이론들에 대해 소개한다.

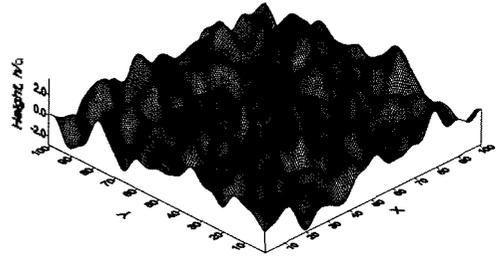
3.2 표면의 특성 및 접촉역학

트라이볼로지적 응용에 있어 공학적 표면의 특성은 표면 분석기술에 있다. 이러한 표면에 대한 연구는 응착, 마찰, 유회 및 마멸에 관련된 중요한 트라이볼로지적 진행 과정과 메커니즘에 대해 어느 정도 기본적인 이해를 줄 수 있다. 기계적인 가공 방법으로 완벽한 표면을 얻는다는 것은 쉽지 않다. 게다가 대기 중에 노출된 고체의 모든 표면은 얇은 오염층이 존재하고 있다. 또한 표면은 미시적으로 살펴보면 절대 매끄럽거나 단순하지가 않다. 표면 형상, 결함, 오염 정도는 거시적 및 미시적 관점에서 응착성과, 마찰 및 마멸과 같은 고체 표면의 특성을 결정하는 중요한 인자이다. 오제이 전자 분광기(AES) 및 X선 광전자 분광기(XPS)와 같은 표면 분석 기술을 활용하여 표면에 관한 정보를 얻을 수 있는데, 가령 깨끗한 표면 또는 흡수된 가스 막과 수증기 막으로 덮여 있는 최외곽 원자층의 성분

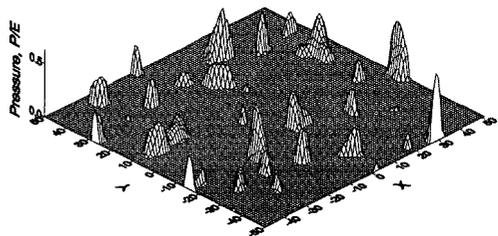
을 분석할 수 있다.

마이크로나노 트라이볼로지서 표면 거칠기는 매우 중요한 역할을 한다. 사실 완벽하게 편평한 표면은 거의 존재하지 않으며 트라이볼로지의 실제적인 연구에서 표면 거칠기의 영향을 포함하여 다루어야 한다. 두 개의 거친 표면들 사이에서 접촉은 불연속적인 점점의 형태로 나타나며, 마찰과 마멸을 발생시키는데 원인이 되는 모든 힘들은 이러한 접촉점에서 작용한다. 계면에 작용하는 힘들은 접촉점의 크기에 의존적으로 나타나기 때문에 접촉점들의 크기 분포를 결정하는 것은 매우 중요하다. 이웃하는 동적 상호간의 작용력 또한 중요하며 접촉점들의 공간적인 분포에 대한 지식도 요구된다. 일반적으로 표면 거칠기는 돌기의 높이 분포와 공간적 분포에 관한 향으로 표현할 수 있다.

접촉하는 두 거친 표면의 접촉점의 크기 분포를 최종적으로 산출하기 위해서는 접촉역학 이론들에 대한 연구도 요구되며 이는 비단 접촉점의 분포 뿐만 아니라 접촉점에서 발생하는 응력 및 그들의 상호작용에 대한 연구가 필요하다. 그림 9는 수치적



(a) 3차원 거친 표면



(b) 접촉응력

그림 9. 수치적으로 생성된 3차원 거친 표면과 단성 접촉 시뮬레이션 결과

으로 생성된 3차원 거친 표면과 탄성접촉 이론을 사용하여 접촉해석을 한 결과로서 접촉 압력의 예를 보인 것이다. 이러한 방법을 이용하면 원하는 거칠기 특성을 갖는 표면을 생성시켜 인접한 돌기의 상호작용에 대한 이론이나 모델의 개발에 활용될 수 있다.

3.3 원자 스케일 마찰

한 표면이 다른 표면에 대하여 미끄럼 마찰을 할 때, 마찰력이라 불리는 힘은 이러한 운동을 방해하고 마찰력에 대하여 행하여진 일은 열, 변형, 돌물체간의 마멸로 변환된다. 두 물질이 서로 마찰을 할 때 두 물질의 원자는 서로 강하게 작용한다. 나노 트라이볼로지에서 가장 관심 있는 의문 중의 하나는 “두 물질이 서로 마찰을 할 때 각각의 원자에는 무슨 현상이 발생할 것인가?”이다. AFM을 이용한 단일 돌기 접촉에 관한 실험적 연구를 통해 원자 크기의 마찰 특성에 대한 자세한 연구가 가능하다. 이 장치를 이용하면 원자 단위의 정밀도를 가진 뾰족한 팁 바로 밑에 시험 샘플을 놓을 수 있고 팁에 작용하는 힘은 μN 까지 작게 측정할 수 있다. 즉 AFM이 가지고 있는 힘의 민감도 및 위치의 정확성을 통해 한 개의 원자만큼 작은 접촉 면적에 작용하는 응착력과 마찰력을 측정할 수 있다.

그림 10은 하드 디스크 드라이브의 디스크가 마멸되는 것을 보호하기 위하여 보통 사용되는 비결정 수소화 탄소막 위에서 미끄럼 운동을 하는 텅스텐 AFM 팁의 전형적인 마찰력과 하중 곡선을 보

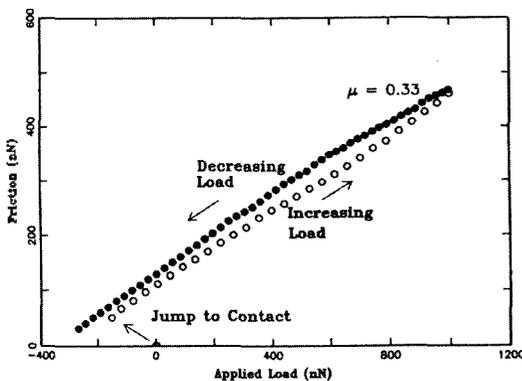


그림 10. 실리콘 웨이퍼에 적층된 탄소코팅위를 텅스텐 팁이 앞뒤로 미끄럼 운동을 할 때의 마찰력

여주고 있다 [1]. 그림 10에서 시편이 팁에 천천히 접촉되고 다시 떨어지는 사이에 시편은 마찰을 측정하는 광학심유에 평행한 방향으로 앞뒤로 진동하게 된다. 팁과 시편이 충분히 근접해 있으면, 응착력은 유연한 캔틸레버의 스프링 상수를 넘게 되고 두 표면은 접촉을 하게 된다. 그리고 나서, 응착력이 두 표면을 접촉하고 있을 때 팁은 반대방향으로 가해진 하중 부위에서 앞뒤로 미끄러진다. 시편은 하중이 증가할 때 뒀 쪽으로 밀리게 되고 마찰력은 하중과 0.33의 마찰계수를 가진 형태로 선형적으로 증가한다. 하중이 감소할 때의 마찰은 하중이 증가할 때 보다 약간 높다. 마찰이 크다는 것은 소성변형이 발생하였다는 것과 미세 돌기가 편평하게 고르게 되었다는 것을 암시한다.

3.4 미세 마멸

마이크로/나노 트라이볼로지 시스템에 사용되는 1 mN 이나 이 보다 더 작은 하중에서 발생하는 마멸 종류에는 어떤 것이 있을까? 이러한 질문에 대답하기 위하여 STM, AFM 등을 이용한 원자단위의 마멸실험을 하기도 하고 분자 동역학(molecular dynamics) 시뮬레이션을 하기도 한다. 시뮬레이션과 관련해서는 원자단위의 매우 정교한 니켈 팁과 편평한 금 평판과의 접촉에 관하여 원자 메커니즘을 연구하여 니켈 팁 끝에 금원자가 달라붙은 것을 보였다 [2]. 이는 응착마멸이 매우 작은 경하중에서도 발생한다는 것을 보여준다. 분자 동역학 시뮬레이션은 다이아몬드 팁에 의해 금속 표면의 금힘을 연구하는데도 이용되었는데 [3], 이러한 시뮬레이션은 원자 레벨의 연삭마멸을 설명할 수 있다.

미세마멸 시험에 관련해 이온주입 실리콘 표면에 대한 시험 결과 [4]에 대해 소개한다. 이온 주입은 극소의 고정도 부품들의 마이크로 트라이볼로지적 문제를 해결하기 위해 표면에 이온을 주입하여 표면의 형상에는 큰 변화 없이 표면을 단단하게 만드는 방법이다. 표 1은 C^+ 이온을 주입한 실리콘과 그렇지 않은 단결정 실리콘에 대하여 스케닝 스크래칭 실험을 한 후 단위 스캔 면적당 평균 마멸 체적과 그 분포를 나타낸 것이다. 각 시편의 평균 마멸 체적은 하중에 따라 증가한다. 50 μN 이하인 경우에는 C^+ 주입된 실리콘의 평균 마멸 체적이 단결정 실리콘의 것보다 약간 크나 높은 하

표 1. 단결정 실리콘과 C⁺ 주입된 실리콘의 평균 마멸 체적 및 그 분포

하중(μN)	단결정실리콘<100>	C ⁺ 주입 실리콘
30	1.8(1.7~2.0)	2.1(1.8~4.4)
40	2.5(1.5~4.6)	3.5(2.9~7.3)
50	7.5(3.5~12)	12(6.5~14)
60	23(14~31)	13(0.9~23)
70	36(33~39)	29(20~34)
80	64(55~73)	39(27~57)
90	84(78~91)	68(61~75)

표 2. 단결정 실리콘과 C⁺ 주입된 실리콘의 평균 마멸 깊이 및 그 분포

하중(μN)	단결정실리콘<100>	C ⁺ 주입 실리콘
30	9(5~14)	29(19~47)
40	27(14~47)	44(26~69)
50	63(30~132)	107(59~163)
60	233(131~327)	176(77~257)
70	369(310~414)	299(178~379)
80	656(448~788)	420(250~587)
90	908(714~979)	728(641~779)

중에 대해서는 C⁺ 주입된 실리콘의 평균 마멸 체적이 단결정 실리콘 보다 거의 절반 정도임을 보이고 있다. 표 2는 마멸 중심 지역에서 평균 마멸 깊이와 마멸 깊이 분포를 나타낸 것으로 하중과 마멸 깊이 간의 깊은 상관관계를 보이고 고하중에서 C⁺ 주입된 실리콘이 단결정 실리콘 보다 높은 마멸 내구성을 보임을 알 수 있다.

4. 기계화학적 극미세 가공기술을 이용한 소프트리소그래피 공정용 스탬프 제작 기술

4.1 기계화학적 극미세 가공

나노/마이크로 기술의 응용범위가 확대됨에 따라 저비용/고정밀도/다품종 소량 생산을 위한 극미세 패턴 가공기술의 중요성이 증대하고 있다. 수-수십 나노미터의 팁반경을 가지는 프로브(이하 나노 프로브)를 이용한 극미세 패터닝 기술이 지속적으로 연구되고 있다. 나노프로브를 이용한 가공 기술이

활발히 연구되고 있는 이유는 수십 나노 이하의 가공이 가능하고 마스크리스 공정이므로 설계변경이 용이하며 에너지 및 비용 절감 측면에서 우수하기 때문이다. 뿐만 아니라, 표면조도와 같은 기하학적 형상 변화를 감지할 수 있고 이를 가공시 반영할 수 있다는 장점도 있다. 또한, 가공과 동시에 소재의 변형거동 및 기계적/화학적 성질을 측정할 수 있는데, 이러한 데이터는 가공정밀도 및 재현성 향상 측면 뿐만 아니라 유한요소해석을 위한 입력데이터로서도 중요한 데이터이다. 그러나, 느린 패터닝 속도, 팁의 마모 등의 문제로 인하여 대량생산에 부적합하고 재현성이 좋지 않다는 단점들이 있기 때문에, 이를 개선하기 위해 다양한 연구(병렬 팁을 이용한 가공, 전사공정용 스탬프 제작, 고속도 가공)가 시도되고 있다.

실리콘, 유리, 및 세라믹 등의 경취성(hard-brittle) 재료의 가공에 있어서, 날카로운 팁을 가지는 공구에 의하여 임계가공깊이(critical depth)를 고려한 극미세 가공을 하면, 소재의 물리적 제거가 아닌 탄소성변형에 의한 재료제거기구가 성립되는 데, 이 결과 크랙이 없는 양호한 가공표면을 얻을 수 있다. 이러한 가공법을 경취성 재료의 연성영역 가공(ductile-regime machining)이라 부른다. 연성영역 가공의 개념은 기계화학적 연마(CMP) 공정이나 원자력간 현미경을 이용한 단결정 실리콘 웨이퍼의 나노가공 공정 등에서 응용되고 있다.

나노/마이크로 기술 분야에서 널리 쓰이는 가장 대표적인 경취성 소재는 단결정 실리콘과 Pyrex 7740 glass이다. Pyrex 7740 glass는 실리콘과의 접합, 나노 임프린트용 몰드 재료, 의료용 기기 등에 사용된다. 같은 경취성 재료들이지만 기계적 가공 시 발생하는 두 소재의 변형거동에는 차이가 있다. 예를 들면, 단결정 실리콘의 경우 파일-업 현상이 주로 발생하지만, 비정질 Pyrex 7740 glass의 경우 싱킹-인이 주로 발생하는 반면(그림 11(a)), Si(100)의 경우 파일-업(그림 11(c))이 발생한다. 소재가 소성변형 될 때 발생하는 파일-업(또는, 싱킹-인)의 형상 및 높이는 결정구조와 소재의 E(탄성계수)/Y(항복강도)값과 가공경화 지수와 밀접한 있다. Si(100)의 경우, 팁과 접촉된 표면 부위가 표면의 초기 높이보다 높게 융기되는 현상이 발생하였는데, 이는 팁과 실리콘 표면과의 마찰에 의해

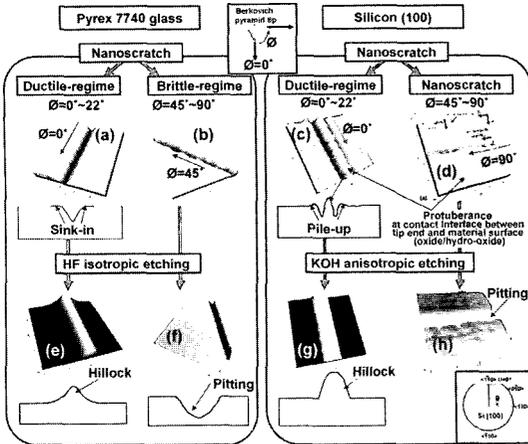


그림 11. 기계화학적 극미세 가공에 의해 얻어지는 구조체 형성

발생하는 기계화학적 반응이 주 원인으로 알려져 있다.

다이아몬드 팁과 피 가공 소재와의 접촉형상(팁 배향성)은 소재의 변형거동 및 제거기구에 큰 영향을 미치는 인자들 중 하나이다. 예를 들면, $\Phi = 45^\circ$ (그림 11(b)) 또는 $\Phi = 90^\circ$ (그림 11(d))인 경우는 $\Phi = 0^\circ$ 에 비하여 변형에 대한 저항을 많이 받으므로 파인-업의 높이와 마찰계수 값이 상대적으로 크다고 알려져 있다. 또한, 탄소성 변형보다 취성파괴 기구가 더 지배적으로 작용하였기 때문에 그루브의 깊이가 깊고 거친 가공표면을 나타낸다.

일반적으로, 나노프로브를 이용한 기계적 가공 후에는 극미세 버(pile-up), 움기, 기타 잔류물의 제거와 표면조도 개선을 위하여 식각 공정을 실시하는데, 이 때 서브마이크로 스케일로 가공된 소재 표면은 식각 후 돌출(hillock)(그림 11(c),(g)) 또는 함몰(pitting)(그림 11(f),(h))된다. 식각 후 얻어지는 최종 구조체 형상에 영향을 미치는 인자들을 요약해 보면, (1) 가공 팁과 소재간의 마찰에 의해 발생하는 기계화학적 반응에 의한 산화물 생성, (2) 가공모드(연성 및 취성), (2) 가공조건(수직하중) 변화에 따른 소재표면의 에너지 상태 변화, (3) 미세 탄소성 변형에 의한 전위층의 형성, (4) 식각조건(식각액의 종류, 농도, 식각시간, 식각액의 온도) (5) 가공 표면의 불용성 불순물의 흡착 정도 등이 있다.

4.2 기계화학적 가공기술과 복제물딩기술을 병용한 소프트리소그래피 용 스템프 제작

기계화학적 가공기술로 제작된 음(negative tone)/철(positive tone)형 구조체 들은 리소그래피(soft lithography) 공정용 스템프로 사용될 수 있다. 미소접촉인쇄(micro contact molding, μ CP)은 철형 스템프를 이용하여 나노/마이크로 패턴을 복제하는 기술이다 단층잉크에 적셔진 PDMS 스템프는 패턴을 인쇄하는데 사용되고, 표면에 형성된 잉크패턴 이어지는 식각공정에서 금속 기층을 보호하는 역할을 한다. μ CP 공정에서는 스템프와 기층 표면의 정합접촉이 매우 중요하기 때문에 표면에 요철 구조를 가지는 일래스토머(폴리디메틸실록산, 폴리우레탄, 페놀포름알데히드 수지) 스템프가 사용되고 있다. 이 중에서 폴리디메틸실록산(PDMS)은 시편 표면과의 정합 접촉성, 낮은 제면자유에너지와 화학적 불활성을 가지는 표면, 균질성 및 등방성, 무독성 등의 특징으로 인하여 극미세 패턴, 구조물, 바이오 칩을 만드는 데 널리 쓰이고 있다. 미세접촉 인쇄에 사용되는 스템프는 크게 마이크로 패턴 전사를 위한 소프트스템프와 나노패턴 전사(>50 nm)를 위한 하드스템프로 나뉠 수 있는데, 두 경우 모두 철형 패턴을 복제할 수 있는 요철 마스터가 필요하다.

그림 12는 기계화학적 가공과 복제물딩(replica molding) 공정을 병용한 μ CP 공정용 PDMS 스템프 제작공정을 나타내고 있다. PDMS 복제물딩 공정을 간략하게 설명하면 다음과 같다. PDMS (Sylgard 184, Dow-Corning; 1:10 curing agent: Sylgard) 레진을 실리콘 스템퍼에 부은 후 진공처리를 통해 기공을 제거한다. 그 후 가교반응(다리결침 반응 cross-linking)을 촉진시키기 위하여 90°C 로 가열하여 경화(curing) 시킨다.

반면에, 철형 구조체는 PDMS 유로 제작에 사용될 수 있다. 그림 13은 기계화학적 극미세 가공기술과 복제물딩 기술을 병용한 PDMS 유로 제작공정을 나타내고 있다. 최종 유로의 크기 및 형상은 스템프 표면의 마스터 구조체에 의해 결정된다. Hillock 구조체의 크기 및 형상을 제어할 수 있는 주요 공정인자로는 식각 시간과 스크래치 수직하중 등이 있다. 특히 식각조건은 최종 가공형상의 치수뿐만 아니라 표면평위를 결정하므로 매우 중

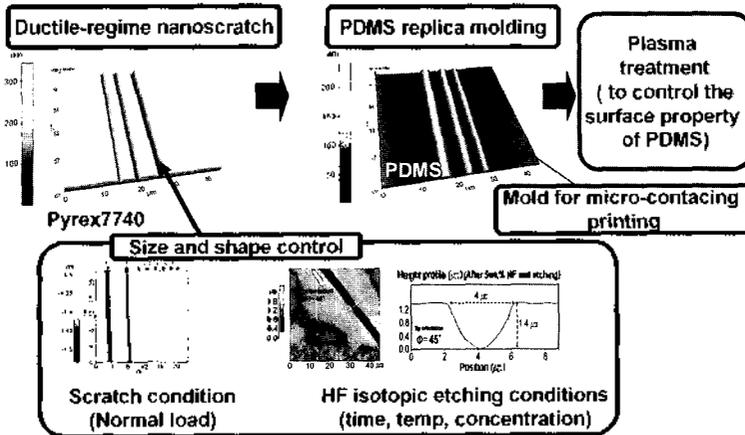


그림 12. 기계화학적 극미세 가공기술과 복제몰딩 기술을 병용한 미소접촉인쇄 공정용 PDMS 스탬프 제작 공정 (Pyrex 7740 glass)

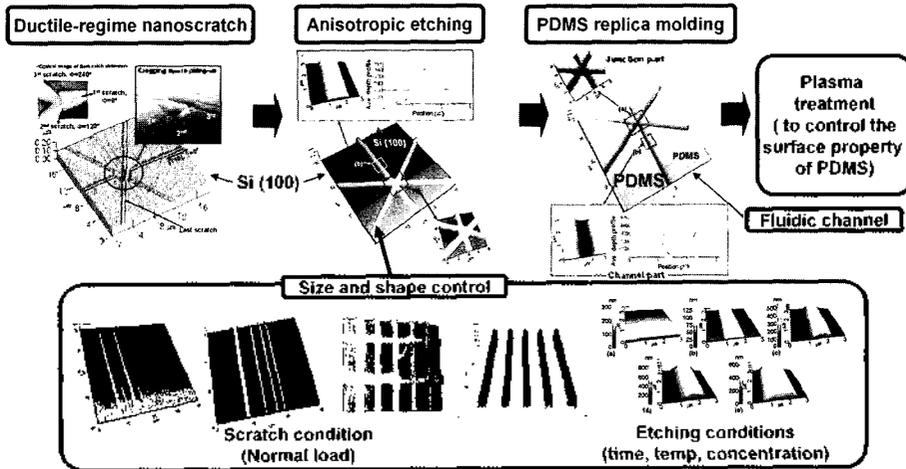


그림 13. 기계화학적 극미세 가공기술과 복제몰딩 기술을 병용한 PDMS 유로 제작 공정(Si(100))

요하다.

앞서 언급한 바와 같이 기계화학적 극미세 가공 기술은 느린 패터닝 속도, 팁의 마모, 재현성 등의 문제로 인하여 대량생산에 부적합하다는 단점이 있어 실제 산업에는 거의 이용되지 않고 있다. 그러나, 이러한 단점들은 프로세스 자체에 본질적인 문제보다는 가공 팁, 위치/이송제어 정밀도 등의 기술적 한계가 원인이 된다. 따라서, 장비 개발 및 공정 효율성을 높이기 위한 노력이 계속된다면 나노/마이크로 기술분야에서의 광범위한 응용이 기대된다.

참고문헌

- [1] Mate, C.M., "Nanotribology Studies of Carbon Overcoats on Magnetic Disks Studies by Friction Force Microscopy," *Wear*, Vol. 168, pp. 17-20, 1993.
- [2] Landman, U., Luedtke, W.D., Burnham, N.A., and Colton, R.J., "Atomistic Mechanisms and Dynamics of Adhesion, Nanoindentation, and Fracture", *Science*, Vol. 248, pp. 454-461, 1990.
- [3] Belak, J. and Stowers, I.F., "The Indentation and Scraping of Metal Surface: A Molecular

Dynamics Study”, *Fundamentals of Friction*, Vol. 220, pp. 511-520, 1992.

- [4] Myamoto, T., Miyake, S., and Kaneko, R., “Wear Resistance of C⁺ implanted Silicon investigated by Scanning probe Microscopy,” *Wear*, Vol. 162-164, pp. 733-738, 1993.