

◆특집◆ 나노테크놀로지와 정밀공학

나노트라이볼로지 - 초정밀 미세시스템에의 응용과 전망

김대은*, 성인하**, 정구현**

Nanotribology - Prospects and Applications in Ultra-precision Micro-systems

Dae-Eun Kim*, In-Ha Sung**, and Koo-Hyun Chung**

Key Words : Nanotribology(나노트라이볼로지), Scanning Probe Microscopy(주사탐침현미경), Molecular Dynamic Simulation(분자동역학적 모의실험), Mechano-chemical micro-machining(기계화학적 미세가공)

1. 서론

트라이볼로지(tribology)는 마찰, 마멸, 윤활 등 표면과 관련된 다양한 현상을 분석, 제어하는 기술분야로서, 자동차, 항공, 선박, 가공시스템 등 전통적인 기계산업에서 제품의 에너지효율 및 수명, 신뢰성향상에 있어서 매우 중요한 기술적 역할을 담당해왔다. 실제로 대부분의 기계요소에 있어 폐기되는 시스템의 70%가 갑작스런 고장이나 파괴가 아닌 부품의 표면파손에 기인한 것으로 보고된 바 있다[1].

21세기로 접어들면서 앞으로의 미래산업을 주도할 기술로서 정보통신, 생명공학, 환경, 우주항공, 로봇틱스, 나노기술 등이 예견되고 있다. 산업혁명이후 지난 두세기에 걸쳐 이루어진 눈부시게 빠르게 축적된 다양한 기술을 기반으로, 최근 들어서는 성숙기로 접어든 전통적인 매크로 기계시스템기술의 성장둔화와 함께 초정밀, 초미세화를 추구하는 마이크로 기술이 경제성, 효율성을 가지고 우리의 실생활에서 쉽게 느끼고 접할수 있을만

큼 발전되어 가고 있는 것이 사실이다. 앞서 언급한 첨단기술들 역시 극초정밀, 저생산비용, 높은 생산성, 저소모전력, 다양한 기능 등을 확보해야 하므로, 나노단위에 이르는 크기의 극초소형제품으로 실현될 것으로 예측된다.

이러한 초미세시스템의 기계요소는 자체질량이 작으면서 표면적 대 체적의 비가 크고, 극저하중 및 저전력에서 작동하므로, 시스템의 안정적인 성능 및 신뢰성과 수명향상을 위해서는 표면특성 및 상대운동을 하는 기계요소간 접촉표면에서의 표면간 상호작용에 관한 이해가 필수적이다. 또한, 부품간 공차가 매우 작기 때문에 외부에서 유입된 오염입자나 상대운동으로 발생된 마멸입자는 시스템의 작동에 치명적인 영향을 끼칠 수 있으며, 부품표면의 수분이나 정전기력, 기타 오염물질로 인해 발생가능한 표면간 흡착은 시스템의 동작자체를 불가능하게 만들기도 한다[2,3]. 따라서, 대부분 기존의 유체에 의한 윤활방식이 적용되기 어렵기 때문에 기능성박막이나 표면의 형상에 의한 마찰제어가 중요해진다. 따라서, 이러한 미래첨단기술의 성공적 실현여부는 나노스케일에서의 트라이볼로지 기술, 즉 나노트라이볼로지 기술의 발전에 달려있다고 할 수 있다.

본 논문에서는 미소마찰 및 마멸 메커니즘 이해를 위한 표면 및 표면상호작용에 대한 기초적 연구에서부터 하드디스크, 광디스크와 같은 초정밀시스템 및 초정밀 미세가공 등으로의 응용분야

* 연세대학교 기계전자공학부
Tel. 02-2123-2822, Fax. 02-312-2159
Email kimde@yonsei.ac.kr

** 연세대학교 기계공학과 대학원
Micro/Nano-tribology, 정보저장기기 및 시스템, 초정밀 미세가공 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

에 이르기까지 나노트라이볼로지에 대한 전반적인 소개를 하고자 한다.

우선, 대상스케일에 따른 트라이볼로지적 현상의 차이에 대해 살펴보고, 분자단위의 모의실험과 주사탐침현미경(Scanning Probe Microscope) 등을 이용한 표면의 형상, 재료 등에 따른 나노스케일에서의 근본적인 마찰마멸현상의 연구결과를 소개한다. 본 연구실에서 제안한 바 있는 기계화학적 미세 표면 가공법은 미소마찰현상을 역으로 이용하여 마멸특성에 대한 고찰을 기반으로 개발된 독창적인 미세가공법으로서, 이에 대한 간략한 소개도 덧붙이고자 한다. 또한, 이러한 기초연구를 토대로 표면의 물리적, 화학적 개질(modification)을 통하여 미소기계부품 또는 정보저장기기 시스템에서 표면의 오염을 줄이고 저마찰, 저마멸 특성을 획득하기 위한 기술적 방안도 언급하고자 한다.

2. 나노트라이볼로지의 개요

2.1 스케일에 따른 트라이볼로지적 현상

대상시스템의 스케일에 따라 트라이볼로지 연구의 측면에서 크게 매크로(macro) 트라이볼로지와 마이크로/나노 트라이볼로지로 분류할 수 있다(Fig. 1). Macro-tribology는 상대적으로 큰 하중조건에서 큰 질량과 치수를 갖는 대상계를 고려한다. 따라서 마멸은 불가피하게 일어나고, 관성력, 중력, 열적 효과(thermal effect), 접촉요소간의 거시적 재료특성이 대상계의 트라이볼로지적 성능을 좌우하게 된다. 반면, micro/nano-tribology에서는 저하중에서 상대적으로 작은 질량을 갖는 대상계의 접촉표면에서 발생하는 현상을 다룬다. 이러한 상황에서

마멸은 거의 일어나지 않으며, 거시적 재료특성보다는 표면특성, 접촉표면간 상호작용이 중요하게 된다[4,5].

일반적으로 재료가 갖는 기계적 특성이 표면 요철(asperity)과 모재(bulk material)에서 일치하지 않고, 트라이볼로지적 반응의 복잡성 등의 이유로 인하여 스케일 및 운동이력에 따라 마찰특성의 차이가 존재한다[5-7]. 일례로 LFM(Lateral Force Microscope)으로 측정된 마찰계수와 conventional tribotester로 측정된 값은 일치하지 않는다. 또한, macro-scale에서는 큰 하중조건에 의해 표면갈림현상(plowing effect)이 마찰에 중요하게 작용하나[8], nano-scale에서는 이러한 현상이 거의 일어나지 않으므로 일반적으로 macro-scale에서보다 마찰 및 마멸이 작으며, 수직하중이 작용하지 않더라도 흡착력, 정전기력, 분자간력과 같은 표면력(surface force)에 의해 마찰력이 발생할 수 있다.

2.2 주사탐침현미경에 기초한 실험적연구

나노스케일에서의 접촉표면간 상호작용을 이해하기 위해서는, 표면특성의 분석 및 표면에 작용하는 표면력의 정량적 측정이 필연적으로 요구되며, 이를 위해서 Fig. 2와 같은 수 나노미터반경의 미소탐침을 이용하여 표면특성을 조사하는 주사탐침현미경이 사용되고 있다. 주사탐침현미경의 여러기능중에서, 나노트라이볼로지의 실험적연구에서는 마찰력측정을 위한 LFM/FFM(Friction Force Microscope), 표면전하에 의한 정전기력을 측정하는 EFM(Electrostatic Force Microscope), 표면의 기하학적 형상 및 조도측정을 위한 AFM(Atomic Force Microscope), 표면의 국소영역에서의 탄성, 경도 등

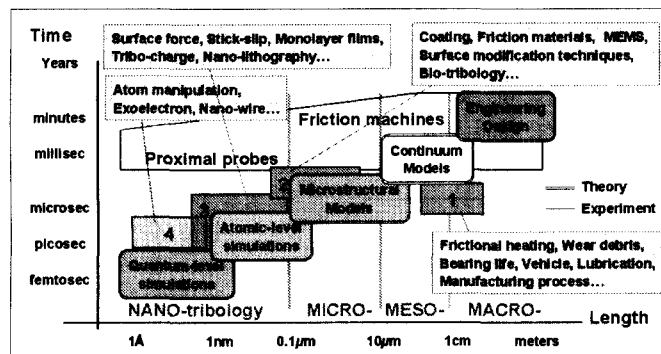


Fig. 1 Time-length scales in Tribology

의 측정을 위한 FMM(Force Modulation Microscope) 등이 주로 사용된다.

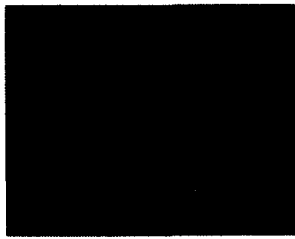


Fig. 2 Micro-cantilever and probe tip for SPM

상용화된 LFM은 대부분 미소탐침이 표면을 스캔할때 표면의 마찰특성에 따라 발생하는 탐침의 비틀림 변형을 laser와 photodiode를 이용하여 측정한다. 즉, Fig. 3 에서 보이는 바와 같이 표면재료와 tip간의 마찰특성의 차이에 따라 탐침의 비틀림 정도 및 방향이 변하게되며, 이에따라 탐침에서 반사된 laser beam이 photodiode에 맺히는 spot의 위치가 바뀌게 되어 lateral force가 측정된다.

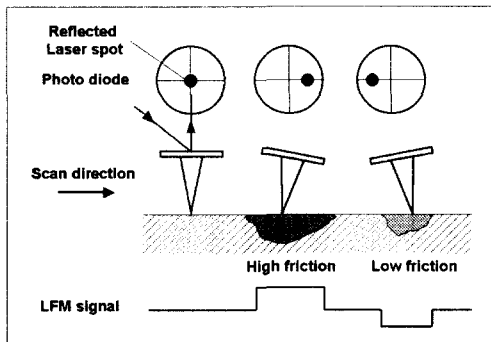


Fig. 3 Principle of friction force detection by LFM

매우 작은 수직방향 강성(vertical stiffness)과 나노미터 수준의 반경을 갖는 AFM tip은 대상표면과의 흡착력(adhesion force) 측정을 가능하게 한다. Fig. 4 는 일반대기상태(25°C, 35%RH)에서 측정한 Si tip과 bare Si(100) 표면과의 force-distance curve 이다. Scanner에 의해 tip이 시편 표면으로 움직일 때 분자간력이 작용하는 범위(~ 10 nm)내로 접근하게 되면 tip과 시편 표면 간에 인력(attractive force)가 작용하여 tip은 표면으로 jump-in 하여 접촉하게 된다(B점). 이후 scanner가 표면으로부터 후퇴(retract)하면 tip과 표면간에 작용하는 흡착력 때문에 tip은 시편 표면에서 떨어지지 못하고 scanner

만이 움직이다가(C-E 구간), 캔틸레버의 변형에 의한 복원력이 흡착력을 이길정도로 커지게 되면 tip은 시편표면으로부터 갑자기 떨어지게 된다(E점). 이때 측정되는 힘이 흡착력이 된다. 일반적으로 흡착력은 표면의 기하형상 및 표면의 오염도, 화학적 상태 등에 따라 달라지게 되며, JKR(Johnson-Kendall-Roberts), DMT(Deraguin-Müller-Toporov) 모델 등 다양한 흡착모델이 알려져있다[9,10].

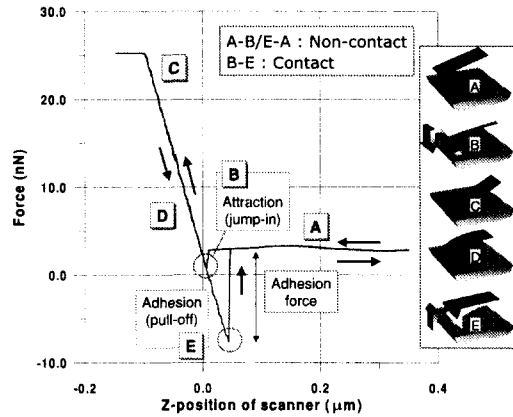


Fig. 4 Force-distance curve for adhesion measurement

3. 나노스케일에서의 마찰/마멸 연구동향

3.1 Atomic-scale simulation

분자동역학 및 정역학 기법을 이용한 연구는 초정밀가공의 실현 가능성 및 한계를 타진하는 것으로부터 AFM 등을 이용한 나노미터 수준의 절삭 가공에 대한 절삭 특성에 관한 연구에 이르기까지 다양하게 이루어지고 있다[11,12].

또한, 이러한 기법은 나노스케일에서의 절삭력 예측 및 가공조건에 따른 분석 뿐만 아니라 AFM tip과 시편 표면간의 상호작용력과 원자단위의 마찰특성을 이해하는데 있어 큰 도움이 된다[13,14]. 원자적 수준에서의 마찰 및 마멸의 근원에 대해 이해하려는 시도는 원자간력의 시뮬레이션을 중심으로 진행된다. 마찰 및 마멸현상의 근원을 규명하기 위해서는 물리적인 마찰력에 대한 원자단위의 이론적계산이 필요하기 때문이다.

이러한 시뮬레이션은 분자간 포텐셜함수와 경계조건을 이용하여 원자들을 배열하여 하나의 표면을 구성하고, 이에 대해 단일원자나 AFM tip이 그 위를 지나갈때 표면원자와의 상호작용으로 인

해 경험하는 수직방향 힘과 접선방향 힘 및 평형 상태에 도달하는 과정에서의 원자들의 움직임을 보여준다.

표면에서 미소접촉점을 살펴보면, 극단적으로는 원자단위의 접촉이 발생하며 원자간의 상호작용, 즉 인력, 척화력 등이 중요한 변수가 된다. 척화력은 원자간의 결합형성 여부와 직결된다. 즉, 화학적결합이 형성되면 강한 흡착으로 인하여 표면이 뜰거나 갈 수 있으므로 경계면에서는 van der Waals force 만 존재할 수 있도록 하고, 재료간 격자구조의 차별화, 상호용해성, 원자간 포텐셜 등을 변수로 이용하여 상대면과 원자적 결합이 이루어 지지 않도록 한다. 예를들어 Fig. 5 와 같이 상대면의 원자배열 간격이 같은 경우(Fig. 5(a))와 다른 경우(Fig. 5(b))를 보면, 원자간 상호작용은 원자간 배열간격, 거리 등과 밀접한 관련이 있다. 따라서 원자배열이 다른 경우에서 확률적으로 원자간 상호작용이 감소할 것으로 기대된다.

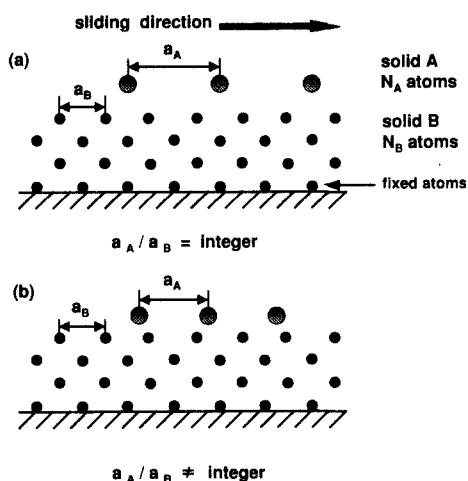


Fig. 5 Atomic interaction: (a) commensurate lattice (b) incommensurate lattice

분자동역학에서는 포텐셜에 의하여 원자간의 힘을 구하고 이로부터 원자의 운동을 기술하는 방법이 많이 이용되고 있다. Fig. 6은 공구와 공작물을 2차원 원자로 배열하고 분자간 포텐셜 함수로써 Lennard-Jones 포텐셜을 이용하여 미소절삭 시뮬레이션을 행한 결과로서, 원자 한 개의 끝단을 가지며 15개의 원자로 구성된 공구를 이용하여 원자 3층 깊이로 강제 이송했을 경우의 결과를 나타

낸다. 이로부터 미소가공시에 공구와 공작물 사이에 작용하는 힘을 예측하고 원자의 거동 등을 파악할 수 있다. 특히 원자층을 직접 가공할 경우 공구가 받는 힘이 커지게 되므로 원자 층 사이에서 전단을 일으켜 가공하는 것이 요구된다[15].

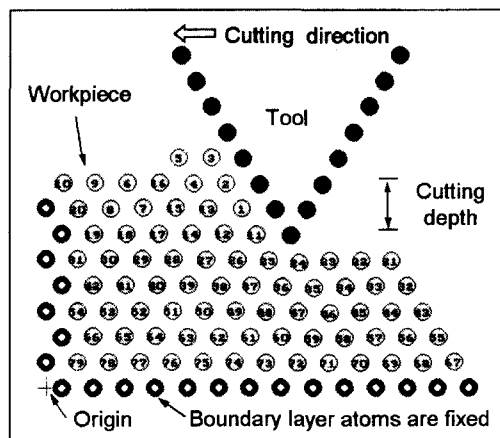


Fig. 6 Atomic-scale machining

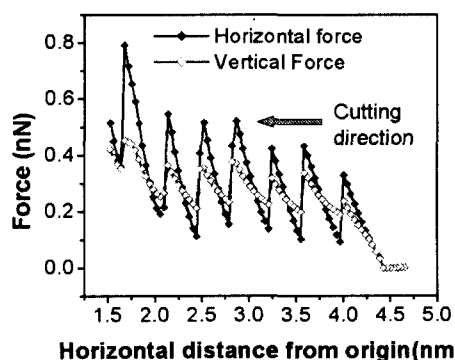


Fig. 7 Atomic scale cutting force simulation

Fig. 7은 Fig. 6의 시뮬레이션시 나타나는 분자간력을 계산한 결과로서, 공구이송에 따른 수평방향의 힘(주분력), 수직방향의 힘(배분력)을 나타낸다. 원자배열에 의한 주기가 주분력 및 배분력에 반영되며, 가공이 진행될수록 구속되는 원자가 많아지고, 이에 따라 각 힘은 더 커지게 된다. 이 때 주분력은 마찰력에 해당하며, 배분력은 수직하중에 해당하므로, Fig. 7에 나타난 결과는 나노스케일에서의 원자간 상호작용으로 인한 stick-slip 현상으로 볼 수 있다. 또한 한 개의 원자를 표면에서

이송시켰을 경우 시뮬레이션 결과에서 원자배열에 따른 주기적인 운동이 발생하며, 순간적으로 진행 방향과는 반대의 힘이 작용하는 것을 알 수 있다.

이와 같이, 원자단위의 시뮬레이션은 나노스케일에서의 마찰 마멸 현상을 예측하고, 초정밀가공을 위한 기초적인 자료를 제공하는데 중요한 역할을 한다.

3.2 나노스케일에서의 마찰거동 및 제어

3.2.1 표면의 기하학적 형상변화를 이용한 마찰제어

표면의 다양한 기하학적 형상과 마찰, 마멸에 관한 그간의 연구들에 의해서, 일반적으로 표면의 형상은 마찰에 영향을 주는 것으로 알려져 있다 [16-18]. LFM을 이용한 실험결과, 나노스케일에서의 기하학적 형상변화에 대한 마찰력의 변화거동이 표면형상의 기울기(slope)를 반영한다는 기존의 ratchet theory보다는 기울기의 변화(slope change)에 더 밀접한 관계가 있음을 보여준다[19]. 즉, 마찰력의 변화는 동일한 기울기를 갖는 형상내에서는 나타나지 않으며, 기울기가 변화하는 변곡점에서 나타난다.

실제적으로는 표면의 기하학적인 변화에 대한 마찰거동에 표면의 화학적 상태, 기하학적 변화에 의한 표면력 및 접촉면적의 변화 등 다른 인자들이 복합적으로 같이 나타나므로, 표면형상 변화에 대한 마찰거동 및 마찰력변화의 정량적인 예측은 어려운 것이 사실이다. 그러나, 마이크로시스템이나 고진공, 고온과 같이 윤활제의 사용이 불가능한 작동환경으로 인해 표면형상에 의해서 최대정지마찰력인 stiction이나 운동마찰력을 제어해야 할 필요성이 점차 증가하고 있기 때문에, 이러한 기하학적 형상변화에 대한 마찰거동의 깊이있는 이해는 미소기계부품의 트라이블로지적 문제해결 및 마찰제어 표면설계에 있어 크게 도움이 된다.

이미 캠/태핏이나 엔진실린더와 피스톤간의 접촉과 같이 비교적 접촉압력이 크고 고속으로 작동하는 거시적인 기계요소에서는 이러한 기하학적인 형상변화를 이용한 마찰 및 마멸저감효과가 입증된 바 있다[20,21]. 이를 응용하여 미소기계요소에 대해서도 마찰 및 stiction을 제어하고자 하는 방법으로서 micro-structured surface가 이용되고 있다.

Micro-structured surface는 표면형상과 접촉면적에 따른 마찰변화 및 마멸입자가 마찰에 미치는

영향 등 마찰마멸의 기본적인 메커니즘에 대한 고찰을 통해 도출된 것으로[22,23], Fig. 8에 보이는 바와 같이 실질적 접촉면적 감소를 통하여 모세관력(capillary force)을 비롯한 표면력의 영향을 줄이고 접촉시 발생할 수 있는 미소 마멸입자나 외부로부터 유입되는 오염입자를 골에 포집하여 제거함으로써 마찰 및 마멸을 제어하고자 하는 기능성표면이다[24,25]. 시스템의 작동 및 환경조건에 따라 이러한 micro-structured surface의 최적설계가 가능해지면 특수 작동환경에서의 마찰제어에 매우 유용하게 이용될 것으로 기대된다.

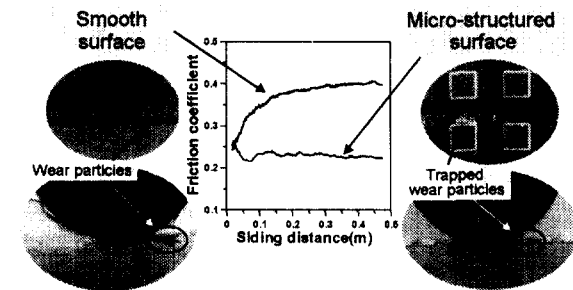


Fig. 8 Comparison of tribological characteristics between smooth and micro-structured surface

3.2.2 Nano-lubrication - SAM (self-assembled monolayer)

마찰마멸 특성에 영향을 미치는 표면의 물리 화학적인 성질을 개선하기 위한 방법으로서 최근 유기박막을 접촉표면에 형성시키는 방법이 개발되고 있다.

OTS(octadecyltrichlorosilane)와 FDTS(perfluorodecyltrichlorosilane)는 화학적 구성성분이 다른 자기조립분자층(self-assembled monolayer)으로서 각각 CH₃-, CF₃-의 functional group을 갖는데, 약 2-3nm 두께로 화학적흡착(chemisorption)에 의해서 모재와의 결합이 형성되므로 결합력이 우수하고 접촉각 측정결과에 의하면 소수성(hydrophobicity)을 나타내므로 표면에너지가 낮으며 수분에 의한 모세관력이 매우 작다는 장점을 가진다(Fig. 9). 따라서, 이러한 특성으로 인해 자기조립분자층은 우수한 저마찰특성을 나타내므로 미소접촉부위의 마찰저감을 위한 보호코팅, 마이크로 모터와 같은 MEMS 부품에서 stiction 저감을 위한 윤활층등으로 사용되고 있다[26-28].

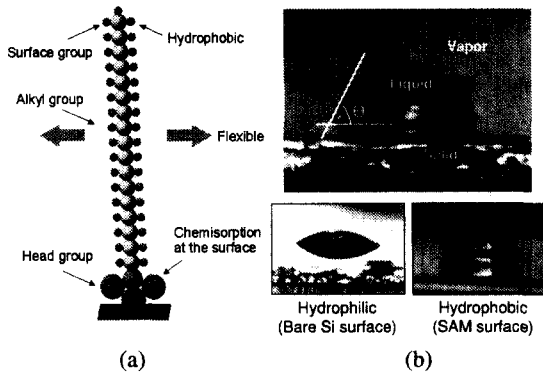


Fig. 9 SAM(self-assembled monolayer) ; (a) Schematic view of molecular structure and (b) Wettability analysis by contact angle measurements

3.3 나노스케일에서의 표면파손 메커니즘

일반적으로 접촉 운동하는 상대면에서의 마멸 메커니즘은 경한 요철 또는 입자에 의한 표면 갈림현상, 강한 흡착력에 의한 뜯김 현상, 피로에 의한 크랙 생성, delamination 현상 등으로 제시되고 있으며, 마멸가능성을 나타내는 인자는 다음과 같은 Archard's wear law[29]에 따라 정량화할 수 있다.

$$V = k \frac{Lx}{H} \quad (1)$$

여기서, V는 마멸체적, k는 마멸발생 가능성을 나타내는 마멸계수(wear coefficient)이며, H는 경도(hardness), L은 수직하중, x는 미끄럼 거리를 나타낸다. 이를 통하여 매크로 시스템에서의 각종 작동조건, 재료간에 따른 마멸계수가 제시되었다[30].

마이크로/나노스케일에서는 AFM의 등장 이후 다양한 scratch, indentation test를 통하여 미소 표면 파손에 대한 연구가 수행되고 있으며[31,32], 이를 정량화 하기 위한 연구가 진행되고 있다. 특히 HDD(Hard Disk Drive)의 슬라이더와 디스크의 접촉에 따른 레이저 범프의 마멸계수는 10^{-10} 정도로서 [33], 매크로시스템에서 제시되는 마멸계수와 비교할때 [30], 파손이 매우 서서히 진행되는 burnishing 효과를 나타냈다. 또한, nN 하중을 경험하는 AFM에서도 tip 및 표면의 파손이 발생한다[34]. Fig. 10은 11 nN의 하중에 대하여 25.6 mm의 미끄럼 (5 x 5 (μm) 영역을 10번 반복스캔) 후의 tip image로서, 이렇게 적은 횟수의 사용으로도 tip에 상당한 마멸이 발생한다는 것을 보여준다. 따라서, 접촉 초기와는 달리 접촉기하, 압력, 면적 등이 변하게 될

것이며, tip에 의한 artifact 등의 이미지 왜곡이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

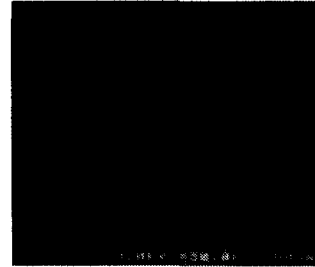


Fig. 10 SEM image of Si tip after 25.6 mm slid against Si(100) surface under 11 nN

일반적으로 매크로 스케일에서 표면파손을 감소시키기 위한 방법은 수직하중, 접촉면적을 적절히 조절하여 접촉압력을 낮추거나, 경도가 높은 protective layer를 이용하거나, 액체 윤활제를 이용하는 방법 등이 있다. 그러나 나노스케일에서는 앞서 언급하였듯이 국부적인 표면의 물리화학적 특성에 따라 작용하는 표면력이 달라지게 되며, 액체 윤활제 사용이 제약을 받게 되므로 낮은 표면에너지로 가지는 각종 박막의 활용이 제안되고 있다. 또한 미세요철의 파손을 막기 위해서는 탄성접촉을 유지하는 것이 유리한데, 이를 위해서 접촉면적을 증가시킬 경우, 높은 흡착력이 작용하여 오히려 접촉압력이 상승할 수도 있다. 그리고 발생하는 마멸입자는 표면을 오염시킬 뿐만 아니라 접촉조건에 영향을 미침으로써, 시스템의 작동 성능에 절대적인 영향을 미친다. 그러므로, 마이크로/나노스케일에서 표면파손을 감소시키기 위해서는 표면의 기계적, 물리 화학적 특성에 따른 표면력과 함께, 표면 기하 형상, 작동 조건 및 환경을 적절히 고려해야 한다.

4. 나노트라이볼로지의 응용

이상에서 살펴본 바와 같이, 나노트라이볼로지에 관련된 문제는 미세기계부품의 표면설계, 작동 조건 및 환경선정에 있어서 반드시 고려되어야 할 사항이다. 뿐만 아니라, 이러한 나노트라이볼로지에 대한 기본적인 연구는 실제 미소기계부품의 제조 프로세스 및 진단시스템 개발에도 응용될 수

있다. 본 장에서는 연세대학교 Tribology Research Laboratory에서 개발해 온 경제적이고 유연한 표면의 초정밀 미세가공기술과, 하드디스크의 성능 및 수명향상을 위한 슬라이더설계에 대한 응용사례를 소개한다.

4.1 유연한 표면 미세가공기술

현재 널리 사용되고 있는 LIGA, 이온 빔, 레이저 등에 의한 미세가공기술들은 고정밀도를 얻을 수는 있으나, 많은 설비투자, 복잡한 공정에 의한 저생산성, 디자인변화의 어려움 및 재료사용의 제한 등 여러측면에서 한계를 지니므로, 보다 유연하고 저렴한 미세가공기술이 요구되어지고 있다.

이러한 배경으로부터, Fig. 11 의 프로세스와 같이 기계-화학적 방법 및 abrasion process를 응용한 경제적이고 유연하며 신뢰성있는 새로운 표면제조 기술이 개발된 바 있다[35-37]. 본 미세가공기술은 단일요철(single asperity)로 모델링 할 수 있는 단결정 다이아몬드 tip을 이용하여 tip-workpiece간의 상호작용에 대한 이해를 기반으로 이에 의해 유발되는 마찰에너지와 다양한 연삭마멸형태(abrasive wear mode)를 재료제거에 이용하는 새로운 3차원 미세가공기술이다.

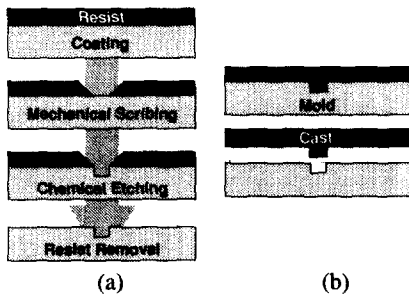


Fig. 11 Mechano-chemical process for precision surface micro-fabrication; (a) basic process (b) micro-mold application

이 기술은 미세구조물제작에 사용되는 대표적인 재료인 silicon 뿐만 아니라 다양한 금속재료에도 적용할 수 있으며, CNC(computerized numerical control)에 의한 공구경로변경만으로 쉽게 디자인 변경이 가능한 점 등 기존의 기술이 갖는 여러 한계들을 극복할 수 있다. 또한, Fig. 12에 보이는 예와 같이 특수 기능성표면 형상 제조, 마이크로 금

형 및 3차원 미소주물 제작에도 응용될 수 있다.

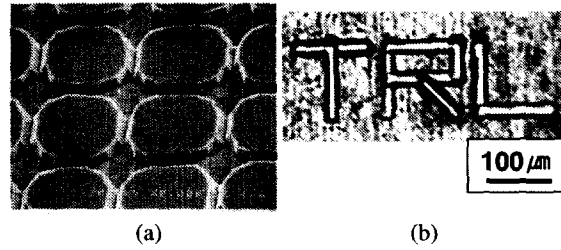


Fig. 12 Examples of micro-machining process; (a) micro-grids on silicon surface (b) micro-lettering on brass surface

4.2 Nano-machining

최근들어 나노패턴제작을 위한 나노리소그래피(nano-lithography)기술이 활발히 연구되고 있는데, 이는 대부분 나노미터반경의 tip과 SPM을 이용한 기술로서 SPL(scanning probe lithography)로 불리운다[38]. 현재 연구개발중인 대표적인 SPL기술은 그 방법에 따라 mechanical modification, E-field enhanced oxidation, Dip-pen lithography 등이 있다. 이 중에서 mechanical modification은 미소탐침에 가하는 힘을 조절하거나, 반복적으로 스크래치를 함으로써 원하는 가공형상을 얻는 것으로, 나노스케일에서의 미소마멸현상을 이용하는 것이다.

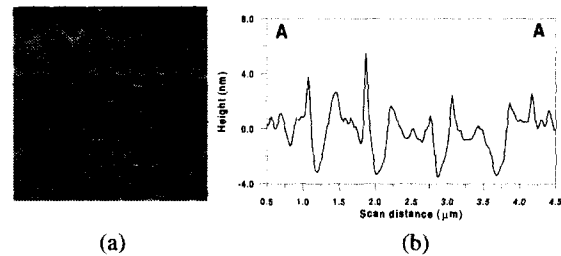


Fig. 13 Nano-scale patterns on Cu/Si(100) surface fabricated by mechanical scribing using AFM tip ; (a) topography image (b) cross-sectional profile

Fig. 13은 Si(100) 위에 90 nm 두께로 증착된 Cu 표면을 10 nm 반경의 다이아몬드 tip에 의해 mechanical scribing 방법으로 시도된 미세패턴이다. 패턴의 길이는 3 μm, 패턴간 간격을 800 nm로 하여 10 nN의 thrust force, 6 μm/s의 feed 로 각 라인당 10번의 반복 스크래치를 통하여 대략 폭 300 nm,

깊이 4 nm의 나노패턴을 얻을 수 있었다. 또한, 선 가공뿐 아니라 연금속박막 및 실리콘 표면에 나노미터수준의 절삭깊이를 갖는 미소포켓을 가공할 수 있다[39].

기계적인 스크래치에 의한 나노리소그래피는 다른 방법들에 비해 공정 및 비용측면에서 매우 큰 장점이 있으나, 위의 Fig. 13에서도 보이듯이 가공된 패턴주위에 burr 나 ridge의 생성으로 인해 재현성이 안좋고 정밀도가 떨어지는 큰 문제를 안고 있다. 따라서 이의 해결을 위해서, 자기조합분자층을 resist로 사용하면서 기계적 방법과 화학적 방법을 병행하는 시도가 연구중에 있다.

4.3 HDD(Hard Disk Drive) slider design

기존의 연구를 통하여 제시된 바와 같이 마멸입자의 거동은 표면파손 및 마멸을 증가시킬 수 있다[6]. 특히 경한 입자의 경우 표면갈림효과(plowing effect)에 의하여 마찰을 상승시키고 연삭마멸을 유발하며, 연한입자의 경우 표면의 기하학적 형상에 따라 응집(agglomeration)되어 표면을 오염시키게 된다[8]. 그러므로 정밀부품의 원활한 작동을 위해서는 마멸입자에 의한 표면파손 가속효과를 감소시키고, 오염에 취약한 핵심부분을 마멸 및 오염입자로부터 보호하는 것이 요구된다.

특히, HDD에서 자기헤드를 장착한 슬라이더는 디스크 표면 위에서 수십 nm의 부상높이를 떠다니게 되는데, HDD 내부의 각종 기계요소나 슬라이더/디스크 요철의 접촉으로 인하여 발생하는 마멸입자는 헤드를 오염시킨다. 특히 MR(Magneto-Resistive) 및 GMR(Giant Magneto-Resistive) 헤드는 정전기에 매우 약하므로 입자에 의하여 파손되어 데이터를 읽고 쓰는 것이 불가능하게 되는데, 현재 슬라이더의 부상높이가 계속 감소하고, 접촉확률이 증가하는 것을 볼 때 이러한 가능성은 더욱 커지게 된다. 그러므로 HDD의 신뢰성을 증가시키기 위해서는 마멸입자로부터 자기헤드를 보호하는 기술이 필요하다. 앞서 언급한 바와 같은 micro-structured surface는 마멸입자를 포집시켜 표면을 보호하는 역할을 하므로 이를 이용하여 헤드주변에 적절한 형상을 가지는 micro-groove 및 channel을 삽입함으로써 헤드를 보호하는 기술이 제시되었다[40]. 즉, 슬라이더와 디스크 사이로 유입되는 입자를 micro-groove 내로 trapping시키고 이를 다시 channel을 통하여 나오게 하는 것으로써, 입자

에 의한 헤드 파손 확률을 감소시키는 기술이다.

한편 CSS(Contact-Start-Stop)를 경험하는 슬라이더와 디스크에서는 meniscus 효과에 의하여 높은 stiction force가 나타나는데, laser bump를 통하여 가시접촉면적을 줄임으로써 이를 감소시키고 있으며, 최근에는 슬라이더에 패드(pad)를 형성하는 방법이 제시되어 실용화되고 있다. 현재까지 pad의 형상설계는 대부분 경험적으로 이루어지고 있으나, 전통적인 트라이볼로지관점에서 보면, 접촉면적을 감소시켜 liquid film에 의한 흡착력을 감소시킬 수 있으나 상대적으로 접촉압력의 상승이 유발되므로 슬라이더의 패드의 내구성을 고려한 설계가 요구된다. 또한 슬라이더의 부상높이, 피치운동등을 고려하여 trailing edge쪽의 패드는 상대적으로 높이가 낮으며 내구성이 높도록 설계해야 한다.

Fig. 14는 이러한 결과들을 바탕으로 제작된 silicon prototype CF slider에 대하여 CSS 테스트를 진행한 결과이다. 슬라이더의 패드를 가공하여 laser bump가 없는 data zone에서도 원활한 부상이 가능하였으며, 발생하는 입자들은 micro-groove에 삽입되어 dummy head를 나타내는 직사각형의 형상에는 입자가 거의 존재하지 않는 것을 알 수 있다. 즉, 접촉면적을 적절히 선정하여 표면파손을 최소화하고 발생하는 마멸입자를 제어함으로써, 슬라이더뿐만 아니라 기타 정밀기계부품의 신뢰성을 향상시키는데 적절하게 활용될 수 있다.

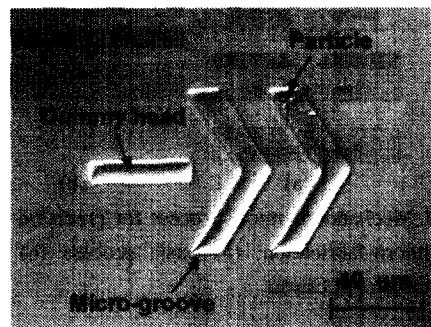


Fig. 14 Particle trapping ability of CF slider

5. 결론

결론적으로, 나노테크놀러지를 비롯, 21세기의 첨단 핵심기술들이 실현되기 위해서는 나노트라이볼로지 기술의 발전이 반드시 선행되어야 함은 필

수적인 요건이다. 본 논문에서 살펴보았듯이 나노 트라이볼로지 기술은 초정밀 마이크로시스템의 내구성과 신뢰성 확보 측면에서 뿐만 아니라 표면의 극초정밀 가공에도 응용될 수 있는 산업전반에 걸친 기반기술이기 때문이다. 또한 나노트라이볼로지 기술은 이와 같은 마이크로시스템의 제조와 관련된 기술 외에도, 향후 필연적으로 요구될 것으로 예상되는 마이크로/나노시스템의 이상진단 (diagnosis) 및 예측, 성능해석 및 평가 등을 위한 분석 시스템개발에 있어서도 다양한 평가지표를 제공해 줄 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Dake, L. S., Russell, J. A., and Debrodt, D.C., "A Review of DOE ECT Tribology Surveys," J. Tribol.-T. ASME, Vol. 108, pp. 497-501, 1986.
2. Komvopoulos, K., "Surface Engineering and Microtribology for Microelectromechanical Systems," Wear, Vol. 200, pp. 305-327, 1996.
3. Maboudian, R., "Surface Processes in MEMS Technology," Surf. Sci. Rep., Vol. 30, pp. 207-269, 1998.
4. Bhushan, B., "Nanoscale Tribophysics and Tribomechanics," Wear, Vol. 225, pp. 465-492, 1999.
5. Kaneko, R., Miyamoto, T., Ando, Y., and Hamada, E., "Microwear," Thin Solid Films, Vol. 273, pp. 105-111, 1996.
6. Robbins, M. O., Smith, E. D., "Connecting Molecular-scale and Macroscopic Tribology," Langmuir, Vol. 12, pp. 4543-4547, 1996.
7. Hwang, D. H., Sung, I. H., Kim, D. E., and Lee, S. J., "Effects of Material Pair Properties on the Frictional Behavior of Metals," Wear, Vol. 225, pp. 600-614, 1999.
8. Oktay, S. T., Suh, N. P., "Wear Debris Formation and Agglomeration," J. Tribol.-T. ASME, Vol. 114, pp. 379-393, 1992.
9. Capella, B., Dietler, G., "Force-distance Curves by Atomic Force Microscopy," Surf. Sci. Rep., Vol. 34, pp. 1-104, 1999.
10. Johnson, K. L., "Mechanics of Adhesion," Tribol. Int., Vol. 31, No. 8, pp. 413-418, 1998.
11. Ikawa, N., Shimada, S., Tanaka, H., and Ohmori, G., "Atomistic Analysis of Nanometric Chip Removal as Affected by Tool-Work Interaction in Diamond Turning," Ann. CIRP, Vol. 40, pp. 551-554, 1991.
12. Maekawa, K., "Friction and Tool Wear in Nano-scale Machining- A Molecular Dynamics Approach," Wear, Vol. 188, pp. 115-122, 1995.
13. Zhang, L., Tanaka, H., "Towards a Deeper Understanding of Friction and Wear on the Atomic Scale: A Molecular Dynamics Analysis," Wear, Vol. 211, pp. 44-53, 1997.
14. Kim, D. E., Suh, N. P., "Molecular Dynamics Investigation of Two-Dimensional Atomic-Scale Friction," J. Tribol.-T. ASME, Vol. 116, pp. 225-231, 1994.
15. 정구현, 이성창, 김대은, "분자정역학 기법을 이용한 초미세 절삭특성에 관한 고찰," 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 3 호, pp. 122-129, 1997.
16. Sundararajan, S., Bhushan, B., "Topography-induced Contributions to Frictional Forces Measured Using an Atomic Force Microscope," J. Appl. Phys., Vol. 88, No. 8, pp. 4825-4831, 2000.
17. Müller, T., Lohrmann, M., Kässer, T., Marti, O., Mlynek, J., and Krausch, G., "Frictional Force between a Sharp Asperity and a Surface Step," Phys. Rev. Lett., Vol. 79, No. 25, pp. 5066-5069, 1997.
18. Guntherodt, H. J., "Friction force microscopy," in *Forces in Scanning Probe Methods*, pp. 285-306, Kluwer Academic Publishers, 1995.
19. Sung, I. H., Lee, H. S., and Kim, D. E., "Effect of Surface Topography on the Frictional Behavior at Micro/Nano-scale," 3rd International Colloquium Micro-Tribology, Poland, 2001. (Wear, Submitted)
20. Tian, H., Suh, N. P., and Saka, N., "Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces," Tribol. T., Vol. 32, pp. 289-296, 1989.
21. Kim, D. E., Suh, N. P., "Decoupled Design of Cylinder Liner for IC Engines," SAE Paper, No. 911231, pp. 99-106, 1992.
22. Suh, N. P., Saka, N., "Surface Engineering," Ann. CIRP, Vol. 36, pp. 403-408, 1987.
23. Hwang, D. H., Kim, D. E., and Lee, S. J., "Influence of Wear Particle Interaction in the Sliding Interface on Friction of Metals," Wear, Vol. 225, pp. 427-439, 1999.

24. Cha, K. H., Chung, K. H., and Kim, D. E., "Effect of Slider Load on the Wear Debris Contamination Tendency of Head/Slider," *IEEE T. Magn.*, Vol. 35, No. 5, pp. 2355-2357, 1999.
25. Cha, K. H., Kim, D. E., "Tribological Properties of Micro-Undulated Silicon Under Light Load," *International Tribology Conference, Nagasaki, Japan*, pp. 296, 2000.
26. Deng, K., Collins, R. J., Mehregany, M., and Sukenik, C. N., "Performance Impact of Monolayer Coating of Polysilicon Micromotors," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 142, pp. 1278-1285, 1995.
27. Cha, K. H., Kim, D. E., "Investigation of the Tribological Behavior of Octadecyltrichlorosilane Deposited on Silicon," *Wear*, Vol. 251, pp. 1169-1176, 2001.
28. Srinivasan, U., Houston, M. R., and Howe, R. T., "Alkyltrichlorosilane-Based Self-Assembled Monolayer Films for Stiction Reduction in Silicon Micro-Machines", *J. Microelectromech. S.*, Vol. 7, pp. 252-260, 1998.
29. Archard, J. F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," *J. Appl. Phys.*, Vol. 24, pp. 981-988, 1953.
30. Rabinowicz, E., *Friction and Wear of Materials*, John Wiley & Sons, 1995.
31. Wienss, A., Persch-Schuy, G., Vogelgesang, M., and Hartmann, U., "Scratching Resistance of Diamond-Like Carbon Coatings in the Subnanometer Regime," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 75, No. 8, pp. 1077-1079, 1999.
32. Bhushan, B., Koinkar, V. N., "Nanoindentation Hardness Measurements Using Atomic Force Microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 64, No. 13, pp. 1653-1655, 1994.
33. Chung, K. H., Han, D. K., Park, J. W., Lee, S. C., and Kim, D. E., "Feasible Method for Accelerated Testing of Head-Disk Interface Tribological Behavior," *J. Inf. Stor. Proc. Syst.*, Vol. 3, pp. 17-26, 2001.
34. Knurshudov, A., Kato, K., "Wear of the Atomic Force Microscope Tip under Light Load, Studied by Atomic Force Microscopy," *Ultramicroscopy*, Vol. 60, pp. 11-16, 1995.
35. Kim, D. E., Yi, J. J., "Micro-patterning of Silicon by Frictional Interaction and Chemical Reaction," *J. Tribol.-T. ASME*, Vol. 120, No. 2, pp. 353-357, 1998.
36. Lee, J. M., Jin, W. H., and Kim, D. E., "Application of Single Asperity Abrasion Process for Surface Micro-machining," *Wear*, Vol. 251, pp. 1133-1143, 2001.
37. Lee, J. M., Sung, I. H., and Kim, D. E., "Process Development of Precision Surface Micro-machining Using Mechanical Abrasion and Chemical Etching," *Microsyst. Technol.*, 2002, In press.
38. Wendel, M., Kuhn, S., Lorenz, H., Kottahaus, J. P., and Holland, M., "Nanolithography with an Atomic Force Microscope for Integrated Fabrication of Quantum Electronic Devices," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 65, No.14, pp. 1775-1777, 1994.
39. Sung, I. H., Lee, H. S., and Kim, D. E., "Influence of Surface Properties on Micro/Nano-Scale Tribological Behavior of Silicon," *Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics)*, Seoul, Korea, pp. 1921-1925, 2001.
40. Kim, D. E., Park, J. W., Han, D. K., Park, Y. S., Chung, K. H., and Park, N. Y., "Strategies for Improvement of Tribological Characteristics at the Head/Disk Interface," *IEEE T. Magn.*, Vol. 37, No. 2, pp. 912-917, 2001.