

마이크로/나노 트라이블로지 기반 기계-화학적 미세가공기술 : 발전과정 및 전망

Mechano-Chemical Microfabrication Technology Based on Micro/Nano-Tribology : Development Process and Prospect

성인하, 김대은*

연세대학교 대학원 기계공학과, 서울 서대문구 신촌동 134

*연세대학교 기계공학부, 서울 서대문구 신촌동 134

Abstract

In this paper, the development process of an unique and creative micro/nano-structure fabrication technique based on micro/nano-tribology are reviewed and discussed. The so-called Mechano-Chemical Process(MCP), which has been developed since 1995 by Tribology Research Laboratory at Yonsei University with the motivation to overcome the demerits of the conventional photolithographic techniques, is based on the fundamental understanding of the interaction between the tool tip and the workpiece surface. This process is a maskless process which offers tremendous flexibility in surface patterns that can be created on a workpiece surface without using any capital intensive equipment. It is capable of fabricating the prototypes of micro/nano-components, micro-structured surface with various geometries, micro-molds for making polymer or metal parts, and micro-fluidic channels for lab-on-a-chip.

1. 서론

경제성, 편리성, 효율성을 향한 그간의 끊임없는 기술적인 노력은 바야흐로 마이크로/나노테크놀로지 시대를 열었다. 다양한 산업

분야로의 응용을 위하여, 기계요소의 초소형화를 실현하기 위한 관련기술들이 급속도로 발전해 가고 있다. 마이크로프로세서, 메모리, 미세기전 시스템(MEMS, Micro-Electro-Mechanical Systems)을 비롯한 여러 극소형 기계시스템 및 초소형 무선통신, 의료, 전자기기의 급속한 발전은 산업구조 뿐만 아니라 향후 인간의 생활패턴 자체를 바꾸어 놓을 것으로 기대되고 있다.

미세구조 제작기술은 시스템의 제조와 바로 직결되는 기술이라는 점에서 이러한 변화와 발전을 주도하는 핵심이므로, 그 기술개발의 필요성은 굳이 언급할 필요가 없을 것이다. 미세구조를 제작하기 위한 방법은 초미세 절삭/전해/연마 가공, 레이저, 플라즈마 등의 특수가공[1,2], 미세 성형기술[3-5] 등 다양하게 개발되고 있는데, 그 중에서 잘 알려진대로 광학 리소그래피가 최근까지 가장 보편적으로 폭넓게 사용되어 오고 있다. 광학 리소그래피는 마스크에 의한 일괄 배치(batch) 프로세스로 대량생산에 적합하고, 매우 우수한 치수정밀도 및 재현성을 가지고 있는 반면, 고가의 마스크 제작비용, 공정의 복잡성, 패턴디자인 변경의 어려움, 패속조형(rapid prototyping)이 요구될 경우나 다품종 소량생산에는 적합하지 않다는 등의 단점도 가지고 있는 것이 사실이다.

본 논문에서 언급하고자 하는 기계-화학적

미세가공기술은 이러한 광학 리소그래피의 단점 및 한계를 극복해 보려고 95년부터 본 연구팀에 의해 최초로 시도, 개발되어 온 기술로서[6], 마이크로/나노 트라이볼로지(micro/nano-tribology) [7,8]를 기반으로 하는 미세가공법이라는 점에서 기술적 독창성을 가진다. 본 논문에서는 기계-화학적 미세가공기술의 그간의 발전과정 및 향후 전망에 대해 소개하고자 한다.

2. 기계-화학적 미세가공기술의 개요

기계-화학적 미세가공기술은 공구-공작물간의 트라이볼로지적 연삭상호작용(abrasive interaction) [8]에 의한 기계적 가공에 이은 화학적 에칭 가공의 간단한 프로세스로 구성되는 것이 특징이다. 따라서, 본 프로세스는 막대한 초기 시설투자나 마스크 제작이 필요없고 패턴 디자인 변경이 공구경로의 프로그래밍에 의해 유연하고 쉽게 이루어질 수 있는 장점을 가지게 되는데, 이는 기존의 포토리소그래피에 비해 매우 큰 기술적, 경제적 잇점이다. 또한, 공작물 가공의 주된 메커니즘이 화학적 작용이므로, 기계적 가공시에 발생할 수 있는 버(burr) 등의 가공 잔유물의 문제가 해결될 수 있다.

기계적 가공은 공구(팁)를 이용, 물리적 힘을 가하고 이를 제어하여 공작물의 가공을 수행하는 과정이다. 이러한 기계적 가공방법은 마이크로 시스템이 요구하는 미세구조나 치수정밀도를 실현하기 어렵다는 인식 때문에 미세구조제작 목적으로는 거의 이용되지 않고있는 것이 사실이다. 그러나 이러한 치수정밀도나 극미세 구조제작의 실현에 있어서의 어려움은, 기계가공 프로세스 자체의 본질적인 문제라기 보다는 위치결정이나 이송제어의 기술적 한계에 그 원인이 있다. 오히려, 나노스케일의 치수정밀도를 갖는 극미세 구조를 제작하려는 관점에서 본다면, 기계적 가공방법이 표면의 미세형상변화를

감지할 수 있고 이를 가공시 반영할 수 있기 때문에 광학 등 비접촉식 가공방법보다 더 유리할 수 있다. 또한, 마이크로시스템 제조관련 기술은 향후 성장기에 들어서게 되면 대형기계 시스템의 기술발전동향, 즉, 동일품종의 대량생산 으로부터 다품종 소량 생산으로의 기술동향 변화 추세를 비슷하게 따라갈 것이다. 따라서, 마이크로시스템 기술이 발전해 감에 따라, 수치제어 기계가공 프로세스가 갖는 저렴한 비용에 의한 디자인변경의 유연성이 점차 중요해질 것으로 예상된다. 이러한 이유들로 인하여, 유연한 기계가공 프로세스에 의한 미세구조 제작기술의 개발이 불가피하게 대두될 것이며, 본 기계-화학적 프로세스의 개발동기도 여기에 있다.

가장 좋은 재료제거 특성을 얻기 위해 기계적 가공에 있어서 반드시 최적화되어야 할 주요변수중 하나는 공구-공작물 간의 상호작용이다. 표면으로부터 극미소량의 재료를 제거하는 이러한 미세가공 프로세스는 단일요철(single asperity) 에 의한 연삭마멸(abrasive wear)과정과 유사하다. 따라서, 트라이볼로지적 관점에서의 이해가 본 기술의 개발에 중요한 배경이 된다.

3. 기계-화학적 미세가공기술의 발전과정

본 기계-화학적 미세가공기술은 현재까지 대상재료 및 가공방법 등 기술적인 측면에서 4세대에 걸친 발전과정을 가지고 있다.

3.1 제1세대 - 전위(dislocation)의 응용

제1세대에서는 실리콘재료의 표면을 수 μm 의 반경을 갖는 팁으로 직접 가공하였다 (Fig. 1a). 가공은 일반적인 절삭이나 연삭가공과 같이 실제 물리적으로 재료를 제거하는 것이 아니라, 공구가 시료표면을 접촉하면서 발생하는 마찰에 의한 표면에너지의 변화를 이용한다. 즉, 원하는 패턴형상을 따라 공구에 의한 기계적 상호작용을

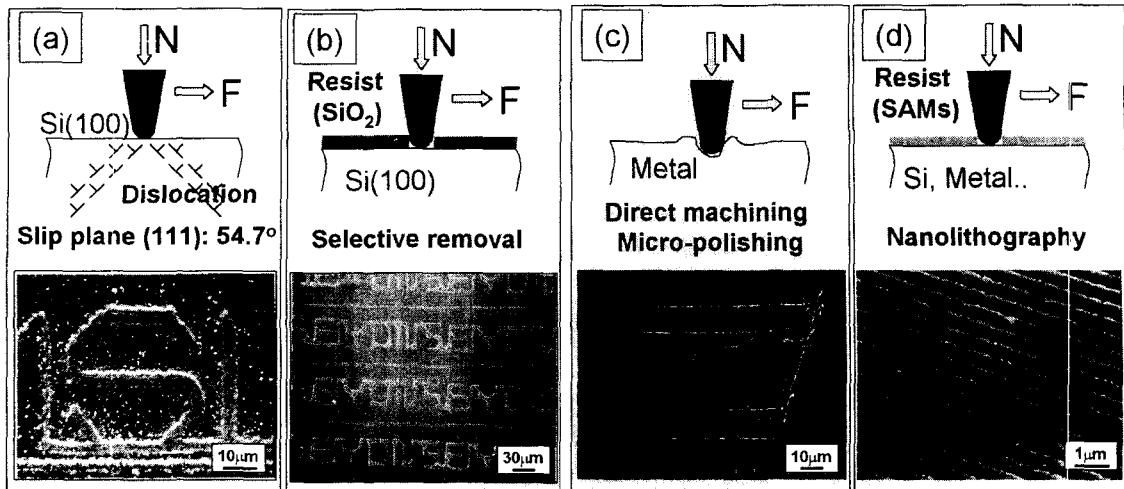


Fig. 1 Development processes of Mechano-Chemical Microfabrication Process – Schematics of machining principles and examples of machined surfaces (SEM images): (a) 1st generation – 3-dimensional hillock pattern on the silicon surface[6,13], (b) 2nd generation – ‘YONSEI’ micro-letters on the silicon (each letter size - 36(height) x 24(width) µm)[21], (c) 3rd generation – a micro-face machined on the silicon surface[22], and (d) 4th generation – nano-patterns on the copper surface (line width - 0.35 µm, spacing - 0.5 µm)

통하여 표면에 에너지를 가하면 공구가 지나간 부분은 미세소성변형(micro-plastic deformation)에 의해 전위(dislocation)를 일으키며, 이 부분은 화학적 에칭가공시 우선적으로 반응하여 패턴이 형성되게 되는 원리이다. 에칭액의 종류 및 표면의 불용성 불순물의 흡착정도에 따라 생성되는 패턴은 돌출(hillock) 또는 함몰(pitting) 형태로 얻어진다[6,9-13].

그러나, 실리콘 표면에 본질적으로 존재하는 결함(defect)때문에 Fig. 1a의 주사전자현미경(SEM) 이미지에서 보이는 것과 같이 화학반응을 거치면서 원하지 않는 부분에서 힐록이 발생하여 좋은 표면품위를 얻을 수 없는 단점을 보였다[13].

3.2 제2세대 - 리지스트(resist)의 도입

따라서, 보다 좋은 표면품위와 치수정밀도를 얻기 위해서 원하는 부분만 선택적으로 에칭할 수 있도록 하기 위하여 실리콘표면에 미리 리지스트를 코팅하는 방법을 도입하였다[14-21]. 본 프로세스에서 리지스트는 포토리소그래피에서의 감광, 현상(developing)하는 프로세스를 하기 위한

것이 아니라 에칭에 대한 보호층(protective layer) 역할이 그 목적이다. 즉, 기계적 가공으로 리지스트만을 원하는 패턴 형상으로 제거한후 화학적 가공을 통해 리지스트가 제거된 부분만 선택적으로 에칭하는 것이다(Fig. 1b). 리지스트로서 폴리머, 금속, 세라믹 등 다양한 재료에 대하여 적합성을 테스트한 결과, SiO₂가 가장 우수하였다[14-16]. ‘YONSEI’ 레터링에서 보이듯이, 실리콘 표면을 직접 가공했던 Fig. 1a에 비해 가공후의 표면 품위가 크게 향상될 수 있었다.

3.3 제3세대 - 다양한 미세구조의 제작 및 금속가공

실리콘의 경우, SiO₂ 리지스트 적용에 의해 좋은 표면품위를 얻을 수 있게 되어, 3세대에 들어서는 보다 향상된 하중 피드백(feedback) 시스템과 공구경로 프로그래밍에 의해 단순한 선(line) 가공에서 벗어나 미세 요철표면, 미세 얼굴형상 (Fig. 1c) 등 여러 다양한 형태의 미세구조를 제작할 수 있었다. 또한, 최종적으로 약 2 µm 내외의 미세한 패턴을 얻을 수

있었다[22-24].

또한, 이러한 방법으로 금속가공이 처음 시도되었는데, 리지스트로 폴리머가 가능하긴 하였으나, 패턴의 정밀도나 진직도 측면에서 매우 안좋은 가공성을 보였다. 따라서, 금속표면을 직접 미세가공한 후 생성되는 가공잔유물을 더 미세한 하중으로 쓸어내는 (sweeping) 방법을 사용하였으나, 역시 좋은 표면 품질을 얻을 수 없었다[22-24].

3.4 제4세대 - 나노리소그래피

본 기계-화학적 프로세스에 의해 보다 미세한 패턴을 제작하기 위한 방법으로서 가장 먼저 생각할 수 있는 것은, 더 작은 반경을 갖는 공구의 사용과 더 얇은 두께의 리지스트를 이용하는 방법일 것이다. 따라서, 4세대에 들어서 공구로서는 서브 마이크로미터 반경의 나노 프로브(probe)를 이용하고, 리지스트는 수 나노미터 두께의 유기박막(organic layer)인 자기조립 분자막(self-assembled monolayers)을 이용한다[25-28]. 자기조립분자막은 실리콘을 기반으로 하는 재료 뿐만 아니라 금속표면에도 강한 화학결합으로 형성될 수 있기 때문에, 금속가공에서의 낮은 표면품질의 문제점을 근본적으로 개선할 수 있다. Fig. 1d 의 이미지는 500 nm 간격으로 구리표면에 형성된 폭 350 nm, 깊이 250 nm 의 나노패턴의 모습이다.

3.5 주요 공정변수

우선, 기계적 가공 및 화학적 가공 양측 모두에서 리지스트의 기계적 특성, 화학적 성질/구조가 매우 중요하다[29-32]. 기계적 가공에 의한 리지스트의 제거는, 표면의 기하학적 형상 및 배분력(thrust force) 변화에 따른 마찰력 및 표면갈림(plowing), 웨지형성(wedge forming), 절삭(cutting) 등 연삭마멸 형태변화의 고찰에 의해 재료에 따른 최적 배분력을 결정, 적용함으로써 이루어진

다[22,24,29-32]. 패턴의 형상, 리지스트 제거정도를 좌우하는 이송속도(feed rate) 및 이송량(feed)은 이후의 화학적 가공에 의한 표면품질에도 중요한 요소이다. 또한, 재료/리지스트의 경도는 가공량 및 제거속도(material removal rate)에 영향을 미치므로, Vickers 압입(indentation) 또는 Hertz 접촉모델과 같은 미세 압입모델 및 기하학적 접촉 해석을 통하여 배분력에 따른 가공후의 패턴 폭 및 깊이를 미리 예측함으로써 원하는 가공폭 및 가공깊이를 얻을 수 있게 된다[14,15].

화학적 가공에 있어서 중요한 변수는 에chant(etchant) 및 농도, 에칭속도, 선택성(selectivity) 등으로서 화학적 에칭은 최종적으로 가공형상의 치수 및 표면 품질을 결정하게 되므로, 매우 잘 제어 되어야 한다.

4. 결론 및 전망

기계-화학적 프로세스는 마이크로/나노 기계 요소의 원형(prototype), 다양한 디자인의 미세 구조표면, 폴리머나 금속 부품제조를 위한 미세주형(micro-mold) 및 랩온어칩(lab-on-a-chip) 또는 μ -TAS(micro-Total Analysis System), DNA나 프로테오믹스(proteomics) 분석을 위한 미세유체채널(micro-fluidic channel) 등으로 다양하게 응용될 수 있으며, 향후 더 응용분야가 넓어질 것으로 기대된다[14,22,33].

향후 1-2 나노미터 수준의 치수정밀도 실현이 요구되는 나노스케일의 미세구조를 제작하기 위해서는, 가공시 표면형상에 대한 정확한 정보를 반영하여야 함은 필수적이며, 이에 따라 현재 연구개발중인 주사탐침 현미경과 나노 프로브를 이용한 나노리소그래피(scanning probe lithography) 기술들에서도 점차 접촉에 의한 방법을 모색해 가는 추세이다[34,35]. 앞서도 언급하였지만, 기계-화학적 프로세스는 트라이블로지적 상호작용을 이용하면서 표면의

기하학적 형상을 감지하고 이를 패터닝공시 반영할 수 있기 때문에, 나노스케일 미세구조 제작에 매우 큰 강점을 가진다. 따라서, 차세대 정보저장장치 등으로의 응용을 위해서도 연구되고 있는 고속, 병렬 어레이 캔틸레버(parallel arrayed cantilver)의 도입[36,37] 등 패터닝의 효율성(throughput)을 개선하기 위한 노력이 지속되면 차세대 리소그래피 기술로서 그 유용성이 한층 커질 것이며 광범위한 응용이 가능할 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발 사업인 지능형 마이크로시스템 개발사업 (<http://www.microsystem.re.kr>)의 연구비 지원을 받아 수행되었음 ; 과제협약번호 MS-02-342-01.

참고 문헌

[1] P. A. McKeown, "The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future", *Ann. CIRP*, 36, 495 (1987).
 [2] N. Taniguchi, "Current Status in, and Future Trends of, Ultraprecision Machining and Ultrafine Materials Processing", *Ann. CIRP*, 32, 373 (1983).
 [3] H. Schiff, R. W. Jaszewski, C. David and J. Gobrecht, "Nanostructuring of Polymers and Fabrication of Interdigitated Electrodes by Hot Embossing Lithography", *Microelectron. Eng.*, 46, 121 (1999).
 [4] F. Gottschalch, T. Hoffmann, C. M. S. Torres, H. Schulz and H. -C. Scheer, "Polymer Issues in Nanoimprinting Technique", *Solid State Electron.*, 43, 1079 (1999).
 [5] Y. Xia and G. M. Whitesides, "Soft Lithography", *Angew. Chem. Int. Ed.*, 37, 550 (1998).
 [6] D. E. Kim, J. J. Yi, "Micro-patterning of Silicon by Frictional Interaction and Chemical Reaction", *J. Tribol. - T. ASME*, 120, 353 (1998).
 [7] 김대은, 성인하, 정구현, "나노트라이볼로지 - 초정

밀시스템에의 응용과 전망", 한국정밀공학회지(특집), 제19권, 제1호, 2002, pp.33-42.

[8] B. Bhushan, *Principles and Applications of Tribology*, John Wiley & Sons, NewYork, pp.494-508, 1999.
 [9] 이재준, 김대은, "기계 및 화학적 가공법을 이용한 신 미세가공기술", 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제10호, 1996, pp.3113-3125.
 [10] 김대은, 이재준, "단결정 실리콘의 3차원 미세패턴 가공 기술", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1996 pp.143-145.
 [11] D. E. Kim, J. J. Yi, "Application of Frictional Interaction and Chemical Reaction for Micro-Patterning of Silicon", *World Tribology Congress*, 1997, pp.374.
 [12] 김대은, 이재준, "기계적 가공과 화학적 에칭가공을 조합한 실리콘 웨이퍼의 패턴가공", 특허 제0151935호, 1998.6., 대한민국.
 [13] 이재준, "기계-화학적 가공기술을 이용한 실리콘 웨이퍼의 미세패턴가공", 연세대학교 석사학위논문, 1995.
 [14] 진원혁, "유연한 미세 패턴 제작을 위한 레지스트 코팅의 기계가공기술", 연세대학교 석사학위논문, 1998.
 [15] J. M. Lee, W. H. Jin, D. E. Kim, "Application of Single Asperity Abrasion Process for Surface Micro-machining", *Wear*, 251, 1133 (2001).
 [16] 진원혁, 김대은, "마스크에 대한 기계적 가공을 이용한 단결정 실리콘의 미세 패턴 가공", 한국정밀공학회지, 제16권, 제2호, 1999, pp.60-67.
 [17] J. M. Lee, W. H. Jin, D. E. Kim, "Selective Removal of Resist on Silicon by Scribing for Micro-Fabrication", *International Tribology Conference*, 2000, pp.450.
 [18] 진원혁, 김대은, "Si에 증착된 연금속 박막가공에 대한 실험적 고찰", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, 1998, pp.137-140.
 [19] 진원혁, 김대은, "유연한 미세 패턴 제작을 위한 마스크의 기계가공법", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 1998, pp.160-164.
 [20] 이재모, 진원혁, 김대은, "가열 증착법을 이용한 미세 구조기술", 한국정밀공학회 추계학술대회 논

문집, 1999, pp.1335-1339.

[21] 김대은, 진원혁, "실리콘웨이퍼의 패터닝공을 위한 박막가공방법 및 장치", 특허 제0283338호, 2000.12., 대한민국.

[22] 이재모, "단결정 다이아몬드 팁을 이용한 3 차원 표면 미세가공기술", 연세대학교 석사학위 논문, 2000.

[23] J. M. Lee, I. H. Sung, D. E. Kim, "Process Development of Precision Surface Micro-machining using Mechanical Abrasion and Chemical Etching", *Microsyst. Technol.*, 8, 419 (2002).

[24] I. H. Sung, H. S. Lee, J. M. Lee, D. E. Kim, "Investigation of tip-workpiece interaction for precision surface fabrication", *The 4th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2001)*, 2001, pp.185-192.

[25] I. H. Sung, J. C. Yang, D. E. Kim, "Micro/Nano-tribological Characteristics of Self-Assembled Monolayer and Its Application in Nano-Structure Fabrication", *Wear*, Submitted.

[26] 성인하, 김진산, 김대은, "Non-lithography 방법에 의한 마이크로 구조물 제작 및 응용", *한국정밀공학회지*, 2002, 출판중.

[27] D. E. Kim, I. H. Sung, J. M. Lee, "Mechano-chemical Process for Flexible Surface Micro-machining", *35th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, 2002, pp. 496-499.

[28] D. E. Kim, K. H. Chung, I. H. Sung, "Fundamental Investigation of Micro-wear Using AFM: Characteristics and Implications", *IWM(International Workshop on Micro-tribology)*, 2002, pp. 32.

[29] I. H. Sung, H. S. Lee, D. E. Kim, "Effect of surface topography on the frictional behavior at micro/nano-scale", *Wear*, Accepted.

[30] I. H. Sung, H. S. Lee, D. E. Kim, "Influence of Surface Properties on Micro/Nano-Scale Tribological Behavior of Silicon", *Proceedings of the 32nd ISR (International Symposium on Robotics)*, 2001, pp. 1921-1925.

[31] 성인하, 김대은, "자기조립분자막의 표면파손특성 및 미세 금속 구조물 제작에의 응용", *한국윤활학회 춘계학술대회 논문집*, 2002, pp. 40-44.

[32] I. H. Sung, D. E. Kim, "Effect of oxide layer on the surface damage characteristics of self-assembled monolayers of alkanethiols", *Tribol. Lett.*, Submitted.

[33] 김진산, 성인하, 김대은, "유연하고 신속한 표면미세가공기술을 이용한 Microfluidic channel 제작", *한국공작기계학회지*, 2002, Vol.11, No.4., pp.97-101.

[34] K. Wilder, H. T. Soh, A. Atalar, C. F. Quate, "Hybrid Atomic Force/Scanning Tunneling Lithography System", *J. Vac. Sci. Technol. B*, 15, 1811 (1997).

[35] J. J. Kopanski and S. Mayo, "Intermittent-Contact Scanning Capacitance Microscope for Lithographic Overlay Measurement", *Appl. Phys. Lett.*, 72, 2469 (1998).

[36] S. C. Minne, G. Yaralioglu, S. R. Manalis, J. D. Adams, J. Zesch, A. Atalar and C. F. Quate, "Automated Parallel High-Speed Atomic Force Microscopy", *Appl. Phys. Lett.*, 72, 2340 (1998).

[37] U. Durig, G. Cross, M. Despont, U. Drechsler, W. Haberle, M. I. Lutwyche, H. E. Rothuizen, R. Stutz, R. Widmer, P. Vettiger, G. K. Binnig, W. P. King and K. E. Goodson "Millipede- An AFM Data Storage System at the Frontier of Nanotribology", *Tribol. Lett.*, 9, 25 (2000).