

AFM 가공 모드 분석 및 AE 모니터링

Characterization of AFM machining mode and Acoustic Emission monitoring

안병운¹, 이성환²

Byoung Woon Ahn¹ and Seoung Hwan Lee²

¹ 한양대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, hanyang Univ.)

² 한양대학교 대학원 메카트로닉스시스템공학과 (Department of Mechanical design & Mechatronics System, hanyang Univ.)

Corresponding author: dme18@hanyang.ac.kr, Tel: 031-400-5288

Manuscript received: 2007.9.27 / Revised: 2008.3.18 / Accepted: 2008.7.1

This study aims to obtain machining characteristics during AFM (Atomic force Microscope) machining of silicon wafers and to monitor the machining states using acoustic emission. As in micro scale machining, two distinct regimes of deformation, i.e. ploughing regime and cutting regime were observed. First, the transition between the two regimes are investigated by analyzing the "pile-up" during machining. As far as in process monitoring is concerned, in the ploughing regime, no chips have been formed and related AE RMS values are relatively low. In the mean time, in the cutting regime, the RMS values are significantly higher than the ploughing regime, with apparent chip formation. From the results, we found out that the proposed scheme can be used for the monitoring of nanomachining, especially for the characterization of nanocutting mode transition.

Key Words: Atomic Force Microscope (원자간 힘 현미경), Nano Machining (나노 가공), Acoustic Emission (음향 방출), Machining Mode (가공 모드)

1. 서론

최근 정보, 전자 산업의 발달과 더불어 이들 첨단 산업에 요구 되는 부품들은 초정밀, 초미세 가공 기술을 바탕으로 한 초소형, 고 기능화를 추구하고 있어,¹ 나노 단위 가공 기술에 대한 연구의 필요성이 지속적으로 증대 되고 있다. 이와 관련하여 서브 나노 스케일의 운동을 구현 할 수 있는 원자 힘 현미경(AFM)이 측정 분야뿐만 아니라, 나노 가공 및 구조물 제작에 활용 가능성이 알려지면서 그에 대한 기초 연구가 진행되고 있다.^{2,3} AFM 을 이용한 나노 가공 기술이 실제 나노 소자 제작 기술에 적용되기 위해서는 보다 다양한 시도와 연구를 통하여 재현성과 신뢰성 있는 동작성

(선폭제어), In-process 모니터링 기법, 다양한 가공 database 의 확보 등이 반드시 필요하다. 아울러 물리적인 측면에서는 가공 가능한 범위의 크기 규모, 가공 공정이 시편에 미치는 영향 등 다양한 부가적인 연구가 필요하다. 추후 이러한 연구가 진행되어 문제점이 해결된다면, AFM 을 이용한 나노 가공 기술은 나노 소자 제작에 있어 중요한 기법 중 하나가 될 수 있을 것이며, 따라서 현재의 반도체 공정을 대체하고 기타 다양한 형태의 나노 가공에 활용될 수 있는 효율적인 차세대 가공 기술이 될 것으로 기대 할 수 있다. 한편 다니구찌가 제안한⁴ 바와 같이 급속한 기술 발전 및 산업계의 요구로 인하여 초정밀 가공의 정의 자체가 지속적으로 변화되고 있으며, 다양한 가공 재료들

이 사용되고 있다. 이 중 실리콘을 비롯한 취성 소재에 대한 가공이 새로운 관심을 끌고 있다. 특히 가공 정도 향상 및 관심 가공 치수의 축소로 재료의 임계 값 이하의 절삭 깊이를 가지는 취성 물질의 가공 유용성이 꾸준히 증대 되고 있어 이에 대한 연구가 요구되고 있다. 취성 재료의 가공 영역에 대한 기술은 diamond turning 및 grinding 을 이용한 critical depth of cut 연구,^{5,6} 임계 깊이 파악을 위해서 AE 센서 적용 연구^{7,8} 가 진행 되었다. 하지만 이러한 연구들은 micro scale 또는 sub micro scale 에 대한 실험으로 한정이 되어 있어 한계를 가지고 있다.

이에 본 논문에서는 AFM 가공 시 획득한 실험적 결과의 데이터 분석을 통해 나노 영역에서의 가공 모드(ploughing /cutting) 특성과 가공 모드 변환에 대한 메커니즘 연구를 진행하였다. 또한 AFM 가공 모드에 따른 재료의 물리적 변화를 분석하기 위하여 센서 민감도가 우수하며 실시간 공정 모니터링이 가능한 음향 방출 센서를 적용 하여, 절삭 깊이에 따른 특이 신호 검출을 통해 AFM 가공 모드를 판정하였다. 최종적으로 실험적 데이터와 이론적 검증 그리고 실시간 센서 모니터링 결과에 대한 상호 비교 분석을 통해 신뢰성 있는 AFM 가공 메커니즘 연구 방법을 제시하였다.

2. AFM machining

2.1 AFM machining mode

AFM 가공은 tip nose radius 를 수 나노 단위로 구현한 단 결정 다이아몬드 팁을 이용하여 scratching 방식으로 진행되는 가공으로서 나노 단위의 가공 형상 정밀도를 구현할 수 있는 기계적 가공 방식이다. 이러한 AFM 가공은 재료와 가공 팁과의 마찰/마모에 의해서 재료 제거가 진행이 되며, 칩의 발생을 기준으로 가공 모드를 ploughing 모드와 cutting 모드로 구분할 수 있다. Ploughing 모드는 가공 시 칩이 발생하지 않는다. 즉, 가공 재료가 재료의 소모 없이 흠의 양 측면으로 밀려나면서 소성 변형되므로 절삭 깊이에 비해 비교적 큰 pile-up 이 발생한다. 반면 cutting 모드는 재료가 제거되면서 chip 이 발생된다. 그러므로 절삭 깊이에 비해 비교적 작은 pile-up 이 발생하여 Ploughing 모드와는 상반된 특징이 나타난다. 이에 각 가공 모드에서 발생하는 pile-up 을 측정

하여 가공 모드의 변환 지점 분석을 수행하고자 한다.

가공 팁과 가공 재료의 마찰 현상에 의해 재료가 변형된 면적과 마찰계수의 변화는 AFM 가공방식의 가공성을 판단할 수 있는 기준이 된다. AFM 가공에 의해 소성 변형된 면적과 마찰계수를 수식적으로 구하기 위해서 Fig. 1 과 같이 Rabinowicz⁹가 제안한 모델을 적용하였다. 이 모델은 scratching 후 흠의 깊이가 일정하고 재료가 normal load dW 이하에서 항복을 일으킨다고 가정하였다. 하중이 작용하는 부분의 면적 A_1 과 마찰력이 작용하는 부분의 면적 A_p 를 계산하여 마찰계수를 계산하였다.

$$A_t = \frac{1}{2} \pi r^2, \quad A_p = \frac{1}{2} R 2(\theta - \sin 2\theta)$$

여기서, A_p 의 θ 가 작을 경우

$$A_p \approx \frac{2}{3} \frac{r^3}{R} \quad \Rightarrow \quad \mu_p = \frac{A_p}{A_t} = \frac{4}{3\pi} \frac{r}{R}$$

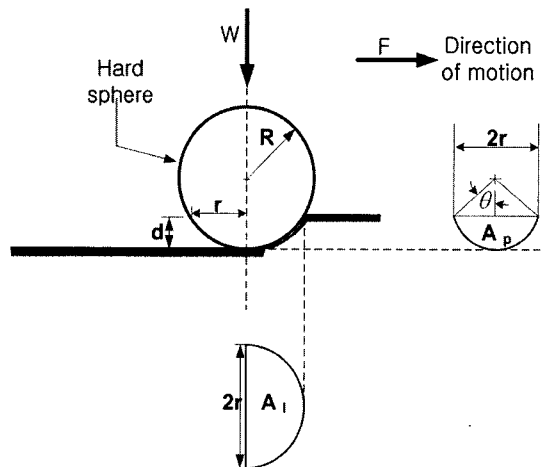


Fig. 1 A hard sphere in sliding contact with a softer surface in wear mode^{10,11}

2.2 Minimum chip thickness

AFM 가공 시 칩 형성에 필요한 최소 절삭 깊이에 대한 이론적 접근을 통해 AFM 가공의 모드 변환 지점에 대한 분석을 진행 할 수 있다. Fig. 2 에서 보인 바와 같이 일반적인 가공에서 제거 되

지 않는 chip 의 두께가 minimum chip formation (a_p) 보다 적은 경우에는 chip 이 발생하지 않는다. 즉, 가공 모드 상으로는 ploughing 모드에 해당된다. 하지만 a_p 보다 큰 절삭 깊이에서는 chip 이 발생하게 되며 cutting 모드에 해당된다. 그리고 가공에서 a_p 를 결정하는 결정요인은 cutting force, tool wear, surface integrity, process stability 가 있다. 즉 a_p 는 가공의 조건과 재료 등에 따라서 유동적으로 변화할 수 있는 값이며, 접촉면적을 기준으로 계산할 수 있다.¹²

$$a_{p(\min)} = R(1 - \cos\phi), \quad \phi = 45 - \arctan\left(\frac{F_f}{F_n}\right)$$

$$\frac{F_f}{F_n} = \mu \Rightarrow \mu = \frac{A_p}{A_t} = \frac{4r}{3\pi R}$$

여기서, 좌변은 최소 칩형성 절삭 깊이로서 R 는 가공 팁의 nose radius, μ 는 가공 팁과 가공재료 사이에 발생한 마찰계수로서 접촉면적으로 나타낼 수 있다.

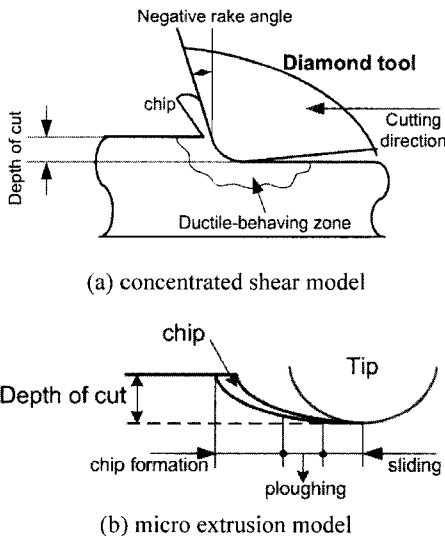


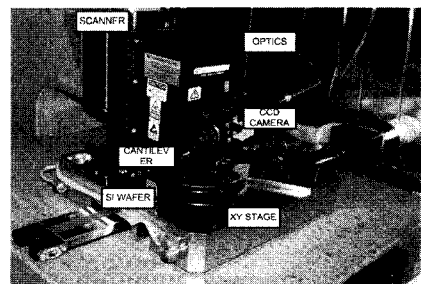
Fig. 2 Minimum Chip formation and material cutting models¹²

3. 실험 장치

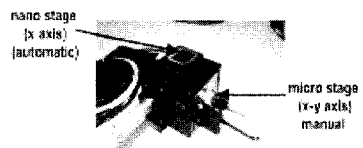
3.1 AFM machining system

본 연구에서 사용된 AFM 은 TM Microscopes

사가 개발한 Auto-Probe M5 를 이용하여 실험을 하였고, 프로그램은 Data Acquisition 과 Nanolithography software 를 사용하였다. Fig. 3 의 (a) 는 Auto-Probe M5 와 cantilever 의 형상을 나타내고 있고, 실험 전 후의 tip 의 형상의 변화는 없다. 실험에 사용된 cantilever 는 force constant 가 40 N/m 인 non-contact silicon (diamond tip) type 을 사용하여 실험을 하였다. Table 1 에서 실험에 사용된 cantilever type 을 설명하고 있다. 또한, 본 연구에서는 AFM 의 구동에 사용되는 원통형 PZT 가 가지는 잉여모션에 대한 제어의 문제와 스크래치 길이의 제한에 대한 문제점을 해결하기 위해서 Fig. 3 의 (b)와 같은 나노 스테이지를 구동시켜 스크래치 실험을 수행하였다. 스크래치 결과를 측정하는 장비는 30KV 에서 3nm 의 image resolution 을 가지는 기존의 SEM(Scanning Electron Microscope)를 대신하여 저온에서 전자를 방출하여 시료표면의 손상을 최소화하며, 15KV 에서 1nm 의 image resolution 을 가지는 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope, Hitachi UHR S-4800)을 이용하여 측정하였다.



(a) AutoProbe M5 instrument



b) Nano stage and diamond tip

Fig. 3 AFM machining system

Table 1 Cantilever specifications

Cantilever type	D
Standard mode of operation	Non-contact
Cantilever length	85 μm
Cantilever width	28 μm
Cantilever thickness	2 μm
Force constant	40 N/m

3.2 Process monitoring system

AFM 가공 모드 변환 시 발생하는 물리적 현상을 실시간으로 모니터링 하기 위하여 나노 단위의 민감도를 보유하고 있는 AE 센서를 적용하였다. Fig. 4는 AE 센서를 이용한 모니터링 시스템의 구조 및 신호처리에 과정에 대해 나타내었다.

AE 센서는 AFM 가공에서 발생하는 가공 특성에 적합한 PAC PICO 센서를 사용하였다. 샘플링 속도는 1MHz 이며, 센서에 의해 획득한 전기 신호는 PAC-1220 Pre-Amp 에서 40dB 증폭되고, PAC-AEDSP-32 Board 에서 2 차 증폭된 후 신호처리 하였다.

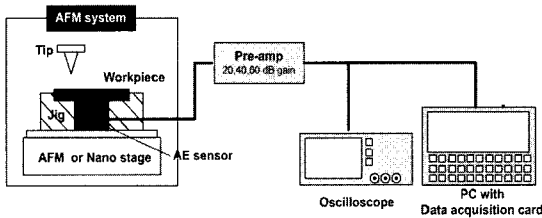


Fig. 4 Schematic of process monitoring

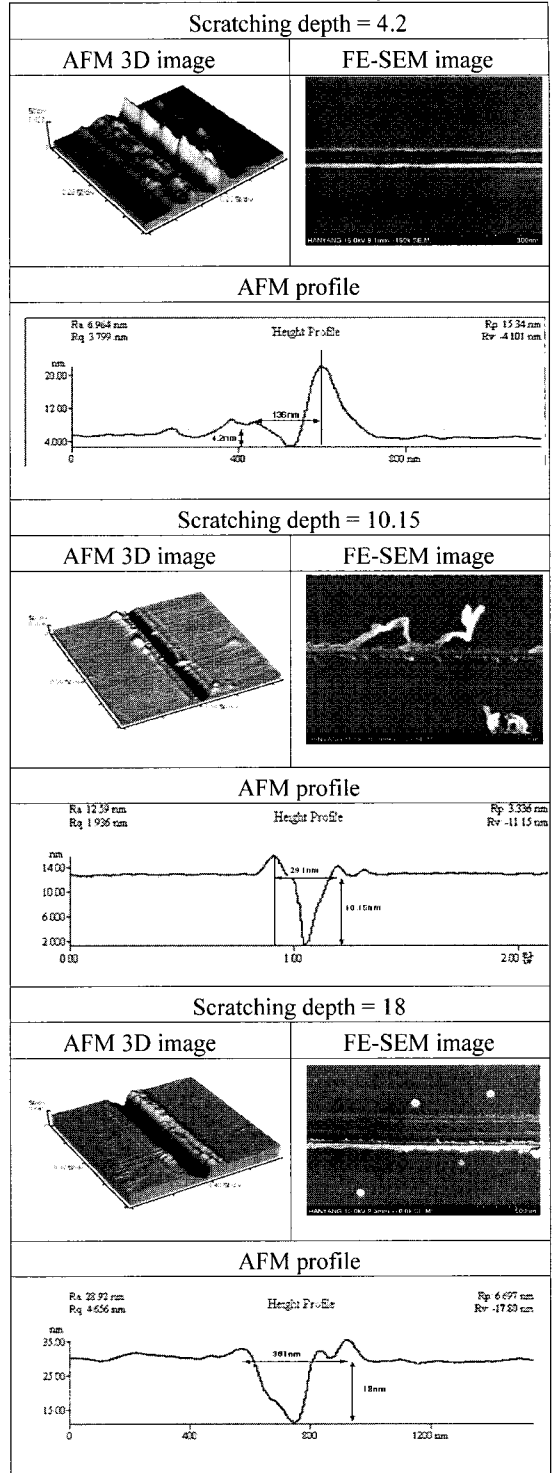
4. 실험 결과

4.1 AFM machining mode 분석

AFM 가공에서의 가공 모드 별 특성 및 모드 변환 지점 분석을 위해 가공 파라메타 중 절삭 깊이만을 변화시키면서 실험을 진행하였다. 절삭 깊이는 AFM 의 시스템에서 Z 축의 Force 의 변화에 따라 감소 및 증가하게 된다. AFM 캔틸레버에 Force 를 30~100 μN 까지 단계적으로 부여하여 절삭 깊이 4~23nm 까지의 AFM 가공을 수행하였다.

AFM 가공 모드는 크게 pile-up 과 칩 형성 두 물리적 현상을 기준으로 구분 할 수 있다. 이에

Table 2 AFM/FE-SEM image results



AFM 을 이용하여 절삭 깊이의 변화에 따른 Pile-up 의 변화를 측정하였다. 하지만 AFM 3D image/profile 의 분석만으로는 ploughing 모드와 cutting 모드를 구별할 수 있는 가장 큰 특징인 chip 형성의 유무를 확인 할 수 없다. 따라서 FE-SEM 을 이용하여 가공 된 표면을 측정하여 AFM 측정 결과와 비교 분석하였으며, 그 결과를 table 2 에 나타내었다. 절삭 깊이에 따른 SEM image 를 보면 절삭 깊이가 4.2nm 에서는 스크래치 형상과 pile-up 만이 나타남을 볼 수 있다. 하지만 절삭 깊이가 7~10nm 에서는 chip 이 부분적으로 발생됨을 시각적으로 확인 할 수 있으며, 10nm 이상에서는 chip 형성이 뚜렷하게 나타났다. 이와 같은 AFM 측정 결과와 SEM 사진 분석을 통해서 나노 가공 영역에서 ploughing 모드와 cutting 모드가 절삭 깊이의 증가에 따라 순차적으로 발생하는 사실을 확인할 수 있다.

4.1.1 AFM 가공 시 Pile-up 기준의 가공모드 분석

AFM 가공 결과를 AFM 측정 모듈을 이용하여 측정하였다. 측정 위치는 Fig. 5 에서 표시된 것처럼 scratching 방향으로 세 지점을 측정하여 측정 위치에 따른 오차를 최소화 하고자 하였다. 측정 결과 모든 절삭 깊이에서 스크래치와 pile-up 이 측정되었으며, 절삭 깊이와 pile-up 의 반비례적 관계를 파악 할 수 있었다. 측정 결과를 이용한 정량적 가공 모드 분석을 위해 pile-up 과 절삭 깊이의 비를 기준¹³⁻¹⁵ 으로 AFM 가공 모드 변환 지점을 분석하였다. 분석 결과를 Fig. 6 에 나타내었다.

Ploughing mode 에서는 pile-up 이 절삭 깊이와 비슷하거나 pile-up 이 더 크다. 하지만 절삭 깊이가 깊어 저서 cutting mode 가 되면 절삭 깊이에 비

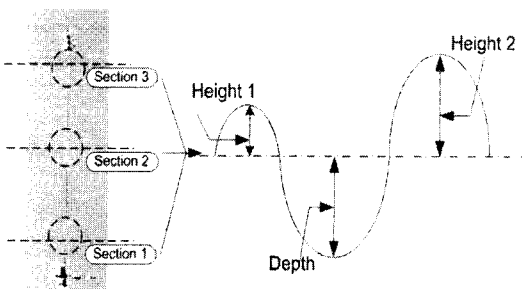


Fig. 5 Pile-up analysis of AFM image scratch results

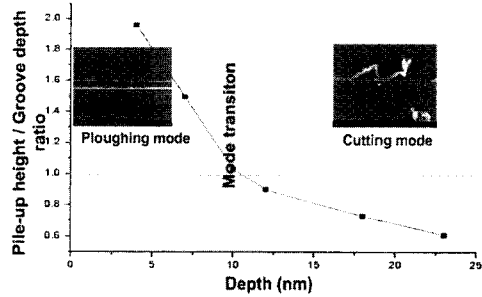


Fig. 6 Pile-up height/groove depth ratio of AFM (nano) machining

해 pile-up 이 보다 작다. 즉, 절삭 깊이가 깊어 지면서 pile-up height/groove depth ratio 가 1 보다 작아진다. 또한, 비가 1 이 되는 지점을 모드 변환 깊이로 추정할 수 있다.¹⁵ Fig. 6 은 pile-up 높이와 groove 깊이의 비를 계산한 그래프이다. 7nm 를 기준으로 하여 pile-up height/groove depth ratio 값이 1 보다 작아진다. 따라서 7~10nm 에서 ploughing 모드에서 cutting 모드로 모드 변환이 발생한다는 것을 알 수 있다.

4.1.2 AFM 가공 시 칩 형성 기준의 가공모드 분석

AFM 가공에서 실험적 데이터인 pile-up 을 이용하여 가공 모드 구분 및 변환 지점에 대한 분석을 진행하였다. 이에 최소 칩 형성 절삭 깊이 및 마찰 계수를 계산 하여 실험적으로 분석 된 가공 모드 변환 지점에 대하여 이론적 검증을 진행하였으며, 그 결과를 Fig. 7 에 나타내었다.

이론적 검증 결과 ploughing 모드에서 보다 cutting 모드에서 AFM tip 과 재료 사이에서 발생하는 마찰이 증가함을 알 수 있다. AFM 가공 모드

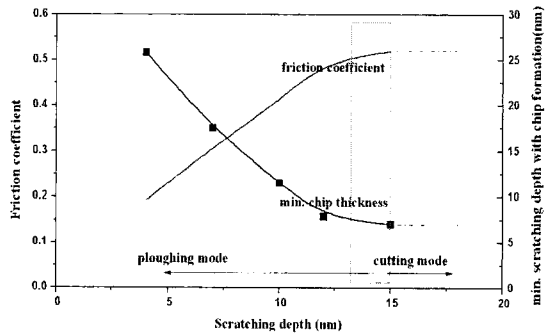
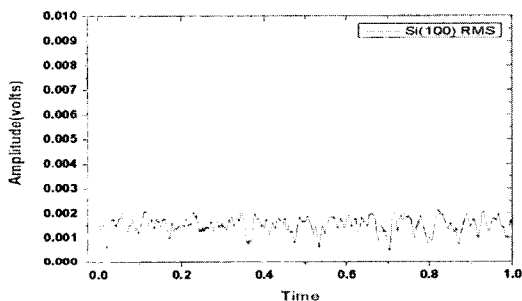


Fig. 7 Friction coefficient and min. chip thickness

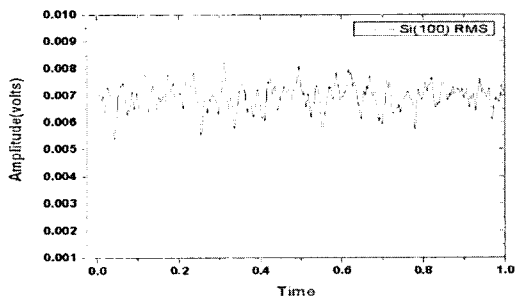
특성에 대한 실험적 데이터를 이용한 분석과 이론적 분석 결과를 통해 절삭 깊이 7~10nm 에서 가공모드가 변환 되는 것을 확인하였다.

4.2 AE sensor 에 의한 가공모드 변환지점 분석

AFM(nano) 가공에서의 가공 모드에 따른 특성을 파악하기 위해 AE 센서를 이용하여 실시간 가공 공정 모니터링을 진행하였다. 센서를 이용한 실시간 공정 모니터링은 ploughing 모드와 cutting 모드에서 발생하는 물리적 변화에 대한 특이 신호를 획득/분석/처리하여 AFM 가공 모드 판별 기준을 결정할 수 있다.



(a) Scratching depth: 4~7nm [ploughing mode]



(b) Scratching depth: 10~18nm [cutting mode]

Fig. 8 typical AE signals

AE 센서를 이용하여 AFM 가공 중 실시간으로 획득한 신호를 AE RMS 를 이용하여 분석을 진행하였다. 대표적인 AE 신호를 Fig. 8 에 나타내었으며, 계산된 마찰계수와의 관계를 Fig. 9 에 나타내었다. AFM 가공에서 절삭 깊이의 변화에 따라 AE RMS 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 비교 결과를 통해 절삭 깊이 4~7nm 지점은 ploughing 모드로 판단할 수 있다. 이 모드에서는 재료의 소성

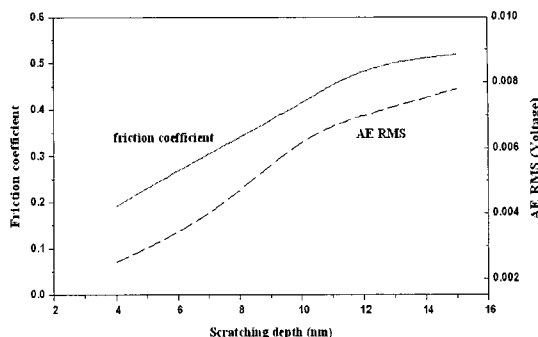


Fig. 9 Friction coefficient and AE RMS

변형만 발생하고, 칩이 발생되지 않으며 상대적으로 낮은 AE RMS 값이 관찰되었다. 반면, 절삭 깊이가 10nm 지점 이후에서는 AE RMS 가 증가하다가 일정 값으로 유지되는 현상이 관찰되었다 (cutting 모드). cutting 모드에서 AE RMS 가 증가하는 것은 재료 제거 현상 및 칩 발생 등으로 재료 내부의 탄성파가 증가하기 때문이다.

AE 를 이용한 AFM 가공 모드 분석 결과는 실험적 분석과 이론적 검증 결과가 일치되는 경향을 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구는 Si wafer(100)를 가공 재료로 하여 AFM(nano) 가공을 진행하였다. 실험을 통해 가공 재료의 나노 단위의 손상 거동 및 가공 모드 판별 방식에 대한 연구를 진행하였다. AFM 가공 모드와 모드 변환 지점에 대한 분석을 위해 pile-up 을 기준으로 실험적 결과 데이터를 이용하여 분석 하였으며, 마이크로/나노 트라이볼로지 관점의 마찰력과 최소 칩 형성 절삭 깊이에 대한 이론적 검증을 진행하였다. 또한 극 미세 가공에 적합한 센서 (AE 센서)를 이용하여 AFM 가공의 가공 모드 및 모드 변환 시 발생하는 물리적 현상을 측정하여 실험적/이론적 분석 방법과 비교하여 다음과 같은 결론은 얻었다.

(1) Si wafer(100)의 경우 AFM/FE-SEM 측정 결과를 통해 칩의 발생 영역을 확인 하였고, 나노 가공에서 발생하는 가공 데이터의 pile-up 분석을 통하여 pile-up 이 ploughing 모드와 cutting 모드의 변환과 직접적으로 연계됨을 확인하였다

(2) 칩 형성을 위한 최소 절삭 깊이에 대한 이

론적 계산 값과 FE-SEM 에 의해 측정된 결과치를 비교 분석하여 AFM 가공 모드를 구분하였다. 또한 가공 모드 변환 시 발생하는 물리적 변화를 AE 센서로 측정 후, RMS 분석을 통해 AFM 가공 공정 실시간 모니터링 시스템에 대한 가능성을 제시하였다.

(3) 본 연구 수행을 위해 진행한 실험적 데이터를 이용한 분석과 이론적 검증, 그리고 실시간 센서 모니터링을 이용한 신호처리 및 분석 방법은 Si wafer (100)이외의 재료에도 적용할 수 있는 방법이며, 따라서 향후 본 논문에서 제시한 연구 방법을 통해 다양한 재료의 나노 단위 가공에 대한 가공 모드(ploughing/cutting)와 모드 변환 지점에 대한 분석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2005 년도 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00078)

참고문헌

1. Nakazawa, H., "Principles of precision engineering," Oxfordscience publications, 1994.
2. Sundararajan, S. and Bhushan, B., "Micro/nanotribology of ultra-thin hard amorphous carbon coatings using atomic/ friction force microscopy," *Wear*, Vol. 225-229, Part 1, pp. 678-689, 1999.
3. Bai, M., "Scratch-wear resistance of nanoscale super thin carbon nitride overcoat evaluated by AFM with a diamond tip," *Surface and Coatings Technology* Vol. 126, No. 2, pp. 181-194, 2000.
4. Taniguchi, N., "Fundamentals and applications of nano technology," Kogyo Chosakai, 1988.
5. Blackley, W. S. and Scattergood, R. O., "Ductile-regime grinding : A new technology for machining brittle materials," *Journal of precision engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 95-103, 1991.
6. Ngoi, B. K. and Sreejith, P. S., "Ductile regime finish machining-A review," *International journal of Adv. Manuf. Technology*, Vol. 16, No. 8, pp. 547-550, 2000.
7. Koshimizu, S. and Otsuka, J., "Detection of ductile to brittle transition in micro indentation and micro scratching of single crystal silicon using acoustic emission," *Journal of machining science and technology*, Vol. 5, Issue 3, pp. 101-114, 2001.
8. Xuemei, C., "Monitoring and Analysis of Ultra-Precision Machining Processes Using Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of California, 1998.
9. Rabinowicz, E., "Friction and wear of materials," 2nd edn., John Wiley & Sons, 1995.
10. Hokkirigawa, K., Kato, K. and Li, Z., "The effect of hardness on the transition of abrasive wear mechanism of steels," *Wear*, Vol. 123, Issue 2, pp. 241-251, 1988.
11. Bhushan, B., "Principles and Applications of Tribology," Wiley, pp. 350-450, 1999.
12. Faulkner, L. L., "Micromachining of engineering materials," Joseph McGeough, 1999.
13. Komanduri, R., Chandrasekaran, N. and Raff, L. M., "MD Simulation of nanometric cutting of single crystal aluminum effect of crystal orientation and direction of cutting," *wear*, Vol. 242, Issue 1-2, pp. 60-88, 2000.
14. Mulliah, D., Kenny, S. D., McGee, E., Smith, R. and Wolf, B., "Atomistic modeling of ploughing friction in silver, iron and silicon," *Nanotechnology*, Vol. 17, No. 8, pp. 1807-1818, 2006.
15. Yan, Y. D., Sun, T., Dong, S., Luo, X. C. and Liang, Y. C., "Molecular dynamics simulation of processing using AFM pin tool," *Applied surface science*, Vol. 252, Issue 20, pp. 7523-7531, 2006.
16. Kim, C. I., Yang, S. H. and Kim, Y. S., "Computer simulation of nano material behavior using molecular dynamics," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 12, No. 3, pp. 171-178, 2003.