

AE를 이용한 AFM 연성 영역 가공 특성 연구

안병운*, 이광호⁺, 이성환⁺⁺

(논문접수일 2006. 1. 5, 심사완료일 2006. 3. 10)

Characteristic of Ductile Regime AFM Machining Using Acoustic Emission

Byoung Woon Ahn*, Kwang Ho Lee⁺, Seoung Hwan Lee⁺⁺

Abstract

Recently, atomic force microscope(AFM) with suitable tips is being used for nano fabrication/nanometric machining purposes. In this paper, acoustic emission(AE) was introduced to monitor the nanometric machining of brittle materials(silicon) using AFM. In the experiments, AE responses were sampled, as the tip load was linearly increased(ramped load), to investigate the machining characteristics during a continuous movement. By analyzing the experimental results, it can be concluded that measured AE energy is sensitive to changes in the mechanism of material removal including the ductile-brittle transition during the nanometric machining. The critical depth of cut value for the transition is evaluated and discussed.

Key Words : Acoustic Emission(음향 방출), Ductile/brittle transition(연성/취성 전이), Nano machining(나노 가공)

1. 서론

최근 정보, 전자 산업의 발달과 더불어 이들 첨단 산업에 요구 되는 부품들의 경우 초정밀, 초미세 가공을 바탕으로 한 초정밀, 고 기능화 추세가 급속적으로 확산되고 있다. 이에 따라 기존의 가공 기술 한계를 뛰어 넘는 나노 스케일 가공 기술 개발에 대한 필요성이 증가 하고 있다. 기계적인 방법에 의한 나노 가공 한계는 공작 기계의 운동 정밀도와 공구 스케일, 그리고 가공 프로세스에 의해 결정 된다. 예를

들어 다이아몬드 터닝이나 그라인딩, 폴리싱등이 우수한 정밀도를 가지는 가공으로 인식 되었으나, 이들 가공도 다나구찌⁽¹⁾가 제안한 바와 같이 초정밀 가공의 정의 자체가 지속적으로 변화되면서, 다양한 가공 재료들의 적용에서는 가공성의 한계를 보인다.

다양한 가공 재료들 중 실리콘을 비롯한 취성 소재에 대한 가공이 학계와 산업계 등에서 새로운 관심을 끌고 있다. 특히 가공 정도의 향상 및 관심 가공 치수의 축소로 재료의 임계값 이하의 절삭 깊이를 가지는 취성 물질의 연성 영역 가

* 한양대학교 대학원 메카트로닉스·시스템과
+ 한양대학교 대학원 메카트로닉스·시스템과
++ 교신저자, 한양대학교 기계공학과 (sunglee@hanyang.ac.kr)
주소: 426-791 경기도 안산시 사1동 1271

공 유용성이 꾸준히 증대⁽²⁾되고 있어 이에 대한 연구가 요구되고 있다. 이에 서브 나노 스케일의 운동을 구현 할 수 있는 원자력 간 힘 현미경(AFM : atomic force microscope)이 측정 분야뿐만 아니라, 나노 가공 및 구조물 제작(Nano-machining, Scan-ning probe lithography(SPL))에 활용 가능성이 알려지면서 그에 대한 기초적 연구가 진행되고 있다. AFM을 이용한 나노 스케일 가공에 대한 실험적인 연구 결과를 살펴보면, Fang⁽³⁾는 scratching 속도, 가공압 등을 변화시켜 가며 나노 가공의 가공조건에 따른 가공 정도를 파악하였다. 또한 Lee⁽⁴⁾는 다구찌가 제안한 실험 계획법을 적용하여 나노 가공 시 가공 파라메타에 대한 최적화 연구를 진행하였다. 하지만 가공 영역의 초 미세화로 인하여 가공 메커니즘 규명이 어렵고, 가공 속도 문제 및 파라메타 제어의 어려움이 있어 다양한 연구가 진행되지 못하였다.

이에 본 연구에서는 AFM을 이용한 나노 스케일 가공 메커니즘 분석을 위해 필수적인 가공 공정 모니터링에 관한 연구를 진행 하였다. 가공 재료는 최근 관심이 증가하고 있는 취성 재료인 실리콘 재질을 선정 하였으며, 선정된 재료의 연성/취성 영역 가공에 대한 공정 모니터링을 진행하였으며, 그 결과를 이용하여 임계절삭 깊이에 대한 메커니즘을 분석 하고자 하였다.

2. AFM machining

2.1 Critical depth of cut

유리와 같은 비 결정 취성 재료에서 연성/취성 전이의 전통적인 이론은 재료 내에 이미 마이크로 스케일의 크랙이 존재하고 있음을 가정 한다. 이때 재료에 가해지는 가공력에 의해 단위 체적 당 저장된 변형 에너지가 크랙이 성장되기 위해 필요한 에너지 보다 작을 경우 취성 재료의 연성 영역 가공(ductile regime machining)이 가능하다. 그러나 단결정 반도체 재료에서는 마이크로 크랙이 거의 존재하지 않는다. 그러므로 전통적인 에너지 밸런스이론은 단결정 반도체 재료에 그대로 적용할 수 없다. 이에 Bifano⁽⁵⁾는 결합이 없는 취성재료의 연성영역 가공 모델을 이론적으로 제안 하였으며 재료 특성과 임계 절삭 깊이의 관계를 수립하였으며 식 (1)에 나타내었다.

취성 재료의 재료 제거는 연성과 취성 두 가지 모드에서 단계적으로 발생한다. 첫 번째 연성 영역에서의 재료 제거는 소성 변형에 의한 것으로서 대부분 전단에 의해 발생하며, 전단 현상에 대해서는 비교적 자세한 분석이 되어 있다. 두 번째 취성 영역에서의 재료 제거는 크랙, 마찰 등과 같은 취

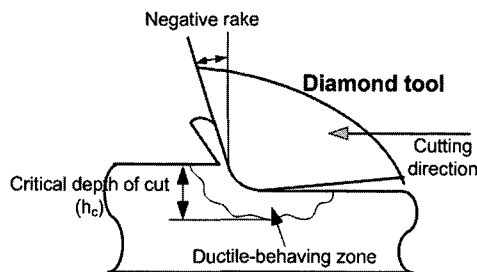


Fig. 1 Schematics of ductile regime machining and critical depth of cut (h_c)⁽⁵⁾

성에 의한 파손 현상에 의하여 발생 한다. 이러한 파손 현상에 의한 재료 제거는 제어 및 분석이 어렵다. 취성 재료의 AFM 가공에서 연성과 취성 영역에 대한 전이는 절삭 깊이에 의하여 구분 되어 진다고 할 수 있다. 그러므로 연성/취성 전이 지점에 대한 절삭 깊이를 파악하면 가공성을 향상 시킬 수 있다.

AFM 가공에서의 절삭 깊이는 수 나노 수준으로 제어 할 수 있어 취성 재료의 연성 영역 내에서의 가공이 가능하다. 그러므로 취성 재료의 AFM 가공에서 일정깊이(h_c)까지는 연성재료의 재료 제거 메커니즘의 적용이 가능하다. 취성 재료의 임계 절삭 깊이에 대해서는 Bifano가 제안한 식에 의하여 이론적으로 예측이 가능하다. 하지만 나노 스케일에서 나타나는 size effect, tip nose radius, rake angle 등의 많은 현상이 마크로 및 마이크로 가공에 비하여 상반되는 부분이 많고 이에 대한 분석이 어려워 실험적 접근이 고려되어야 한다. Fig. 1은 연성에서 취성 가공 모드로 변할 때의 임계 절삭 깊이를 보여주고 있다.

$$h_c = 0.15 \cdot \left(\frac{E}{H}\right) \cdot \left(\frac{K_c}{H}\right)^2 \quad (1)$$

E : Young's modulus

H : Hardness

K_c : Fracture toughness

2.2 Process monitoring

나노 스케일의 기계적 가공 방법은 가공 상태를 AFM 및 SEM에 의한 표면 관찰에 의해서만 확인할 수 있다. 그러므로 취성 재료의 나노 스케일 가공에서 연성/취성 전이 지점을 실험적으로 분석하기 위해서는 반드시 가공 시 실시간 공정 모니터링 기술이 필요하다. 하지만 오차의 발생 소지가 많으며 가공 시 발생하는 표면 특성의 형상이 매우 미세하

로, 기존 사용 센서의 가용범위를 벗어나는 경우가 빈발하여 신호가 가공 정보를 전달하지 못하는 경우가 발생하게 된다. 이런 경우 좀 더 민감한 센서가 필요하다^(6,7). 상용화된 모니터링 센서 중 AE 센서는 서브 나노미터 오더의 민감도를 보유하고 있다. 또한 AE 센서를 이용한 마이크로 스케일 가공의 공정 모니터링에 대한 연구가 진행되어 그에 대한 결과가 발표되기도 하였다⁽⁸⁻¹⁰⁾. 이에 나노 스케일 가공에서 공정 모니터링 센서로서 AE 센서는 적용성이 우수함을 예상 할 수 있다. Fig. 2는 AE센서의 우수한 민감도를 보여 주고 있다.

위에서 밝힌 바와 같이 마이크로 가공에서의 공정 모니터링에 대한 연구는 제한적으로 연구 결과가 발표 되고 있으나 나노 영역에서의 연구는 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 AFM을 이용한 나노 가공 중 가공 상태 감시 및 해석을 위하여 민감도가 우수한 음향 방출(AE)센서를 도입하였다. 가공 공정에서의 AE의 발생원은 대상 재료의 특성에 의해 결정 된다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 연성재료는 미세 균열이 정적인 과정으로 진행, 전위이동(소성변형)에 의한 연속

형 AE 신호가 발생된다. 또한 취성재료는 미세 균열시 횡파의 전파속도에 가까운 속도로 진행, 균열 및 파괴에 의한 돌발형 AE 신호가 발생된다⁽⁶⁾. AE 신호에 포함된 다양한 가공 정보를 시간 영역 및 주파수 영역 신호 처리 등에 의하여 현재의 가공 상태 판정 및 실시간 공정 모니터링 등에 사용한다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험 장치

본 연구에서 사용된 AFM은 TM Microscopes사가 개발한 AutoProbe M5이다. 실험에 사용된 cantilever는 스프링 상수가 17N/m인 비접촉식 실리콘 팁이며, 실리콘 Si(100)과 copper를 사용하여 실험을 수행하였다. Fig. 4의 (a)는 실험에 사용된 AFM system의 전체적 구조를 보여주고 있으며, Fig. 4의 (b)는 AE를 이용한 monitoring system을 개략도로 보여주고 있다.

본 실험에서 사용한 AE 센서는 PICO 광대역형 센서를 사용하였다. 가공 공정에서 얻어진 신호는 PAC-1220 전자 증폭기를 이용하여 증폭하였으며, PAC-AEDSP-32 Board

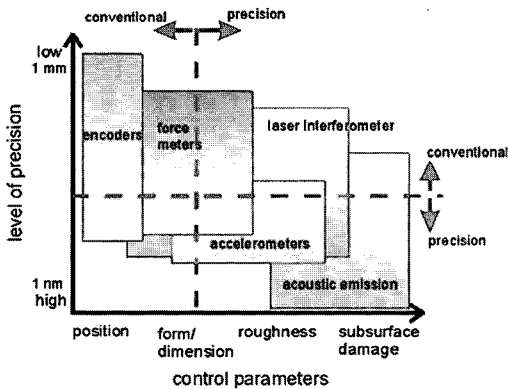


Fig. 2 Sensor application vs. level of precision and error control parameters

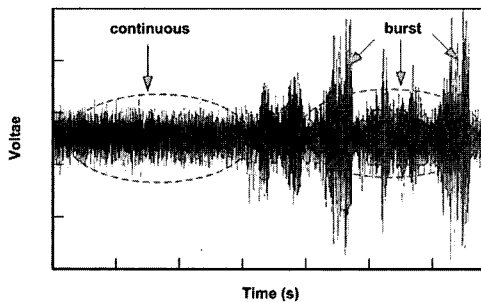
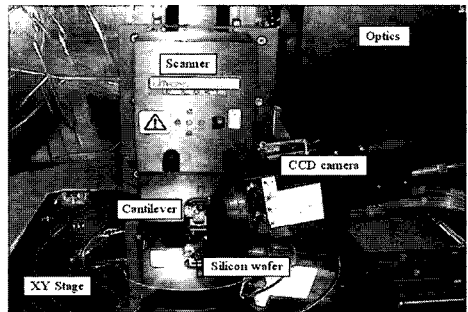
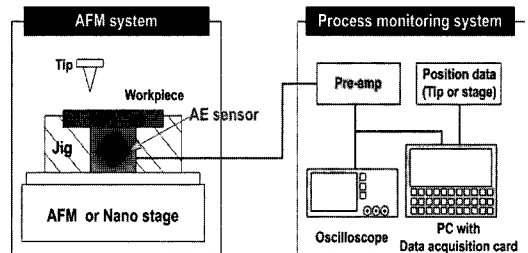


Fig. 3 Example of burst type and continuous type AE⁽⁶⁾



(a) AFM system



(b) AE monitoring system

Fig. 4 Experimental setup

를 통해 신호를 분석하였다. 센서를 통해 얻어진 전기신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭하였고, 증폭된 아날로그 신호는 1MHz의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환하였다.

검출된 신호는 다음과 같은 3가지 신호 처리를 통하여 분석 하였으며, 그 결과를 이용하여 공정을 모니터링 및 분석 하였다. 첫 번째 FFT 분석은 시간영역에서 샘플링된 신호들을 주파수영역의 신호로 변환시켜 주는 방법으로서 공정 신호의 주파수대를 파악 할 수 있다. 두 번째 Count rate 분석은 단위시간당 threshold 값 이상의 값을 가지는 신호의 수를 말한다. 여기서는 단위시간을 1초, 임계값을 0.015mV로 하였다. 세 번째 AE Ratio분석은 low pass filter를 통과한 신호와 high pass filter를 통과한 원신호의 peak의 비로서 공정 신호의 발생량을 분석 할 수 있다. low pass filter는 10~100kHz, high pass filter는 100~1000kHz로 하였다.

3.2 Nano scratching 결과

재료의 연성/취성 전이 지점인 임계 절삭 깊이에 대한 모니터링을 진행하기 위해서는 나노 스크래치 시 절삭 깊이가 점차적으로 증가하여야 한다. 절삭 깊이를 증가시키기 위하여 하중을 선형적으로 증가 하였다.

AFM system의 나노 리소 프로그램을 이용하여 시작점에서 끝점 까지 하중이 0~90μN으로 증가하도록 하였다. 인가된 하중과 절삭 조건은 Table 1에 나타내었다. 하중 증가에 따른 절삭 깊이의 변화를 확인하기 위해 A, B, C로 나누어 측정 하였으며 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 (a)는 AFM을 이용하여 스크래치 전체 형상을 측정 하였으며, (b)~(d)는 하중 증가에 따른 절삭 깊이의 변화를 나타내었다. A, B, C line은 각각 약 4nm, 8nm, 15nm로 하중에 따라 선형적으로 절삭 깊이가 변화 된 것을 확인 할 수 있다.

3.3 Process monitoring 결과

Table 1의 조건에 따른 nano scratching를 copper와 Si(100)에 대하여 진행 하면서 AE 센서를 이용한 모니터링

Table 1 parameters of nano machining(ramped load)

Parameter	Value
material	Si(100), Copper
Ramped load	0 ~ 90μN
scan speed	5μm/s
segments	1

을 진행 하였다. 실험을 통해 획득한 AE 신호를 AE ratio, AE count rate에 대한 분석을 진행하였다. Fig. 6에는 copper와 Si(100)의 nano scratching 공정 중 발생된 AE 신호의 AE count rate를 Fig. 7는 AE ratio를 나타내었다. AE count rate 분석 결과 하중이 증가하여 접촉면이 넓어지면서 신호량의 증가로 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한 AE ratio 분석 결과 연성 재료인 copper에서의 AE 신호는 취성 재료인 Si(100)에서의 AE 신호에 비해 고주파 대역인 것을 알 수 있었다. 신호 분석을 통해 Fig. 3에서 나타낸 AE 신호의 특성이 본 실험에서도 적용 된다는 것을 확인 할 수 있었다. AE ratio 분석을 통하여 증가 하중에 의한 nano scratching에서 획득한 AE 신호에 의하여 연성 모드와 취성 모드

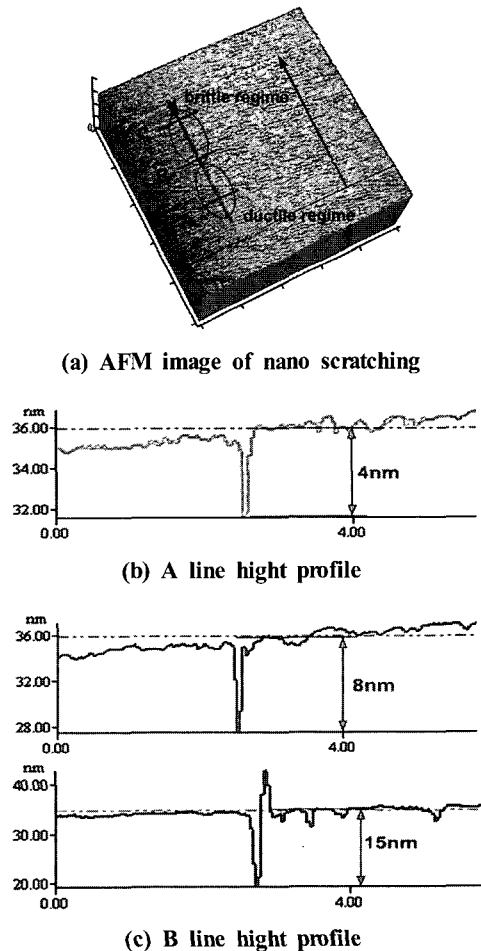


Fig. 5 ramped load nano scratching

구분 된다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, copper의 경우 취성 모드에 의한 신호는 발생되지 않으며, Si(100)의 경우 연성 모드와 취성 모드에 의한 신호가 발생 된 것을 알 수 있다.

AE RMS와 각 영역에 대한 FFT 분석을 통하여 보다 명확하게 취성 재료의 연성/취성 전이 지점에 대해 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 8과 Fig. 9에서 나타낸 바와 같이 검출된 AE 신호는 대상 재료의 특성에 따라 영역이 구분되어 진다.

copper(연성재료)에서의 AE 신호는 Tip 접촉 전 영역과 접촉 후 영역으로 구분 할 수 있다. 그리고 Si(100)(취성재료)는 Tip 접촉 전 영역과 접촉 후(B, C) 영역으로 구분 할 수 있다.

취성 재료에서의 각 영역에 대한 가공 모드를 확인하기 위하여 AE 신호에 대한 FFT 분석을 진행 하였다. 분석 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 분석 결과 주파수 범위는 100~

600KHZ이며, AE 신호에 의해 구분된 각 영역(tip 접촉 전, 접촉 후 (A, B))에 대한 주파수 대역은 Tip 접촉 후 A 영역에서는 400~500KHZ, B 영역에서는 200KHZ의 저주파가 발생 되었다. FFT 분석에 의하여 Si(100)의 증가 하중에 의한 nano scratching는 고주파 대역의 연성 모드와 저주파 대역의 취성 모드로 구분되어 지는 것을 다시 확인할 수 있었다. AE 신호에 의해 구분된 경계선을 기준으로 임계 절삭 깊이를 계산하면 약 5nm 지점이 연성/취성 전이 지점임을 알 수 있었다.

3. 이론적 결과와 실험적 결과 비교 분석

제안된 이론에 의하여 결정된 임계 절삭 깊이와 AFM

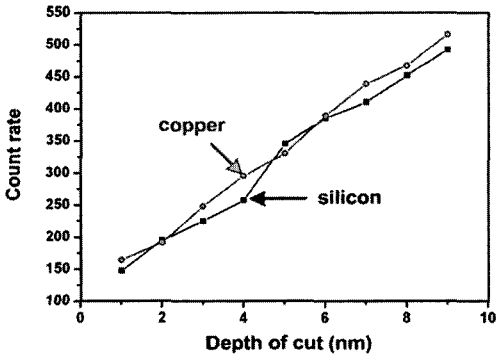


Fig. 6 AE count rate of the nano scratch

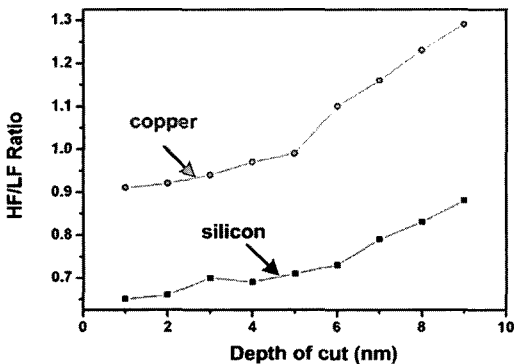


Fig. 7 AE ratio of the nano scratch

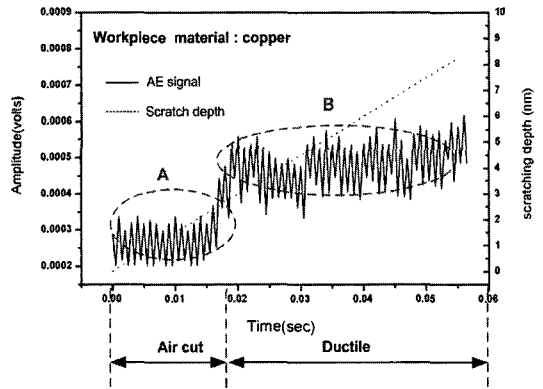


Fig. 8 AE monitoring result (Copper, ramped load 0-90µN). RMS data

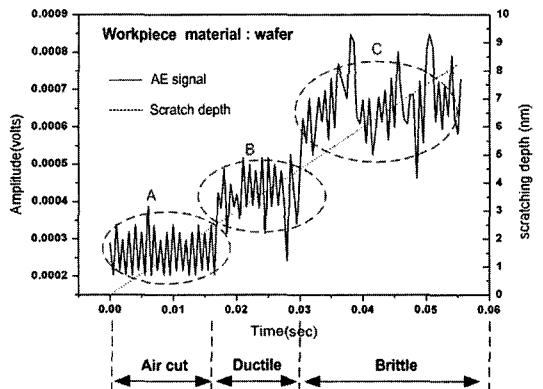


Fig. 9 AE monitoring result (Si(100), ramped load 0-90µN). RMS data

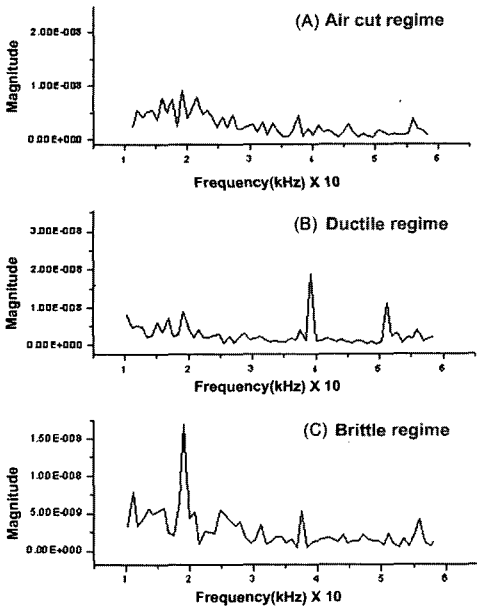


Fig. 10 FFT results of brittle materi

machining에 의한 실험을 통하여 결정된 임계 절삭 깊이들을 서로 비교 하였다. 이론 및 실험에 적용한 재료는 동일하며, 그 특성을 Table 2에 나타내었다. 제안된 이론은 식 (1)에 나타내었으며, 실리콘 재료의 Young' modulus과 hardness, fracture toughness는 nano indentation에 의한 나노 영역의 분석 결과를 적용 하였다⁽¹¹⁾. 적용된 Si(100)의 재료 특성을 이용하여 식 (1)에 의해 임계 절삭 깊이(h_c)를 계산 하였다. 또한 증가 하중에 의한 nano scratching에서 획득한 AE 신호 분석을 통해 임계 절삭 깊이를 도출 하였다. 두 방법에 의한 임계 절삭 깊이를 비교 분석 하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 비교 분석 결과 이론 및 실험적 임계 절삭 깊이는 유사하였다. 하지만 Si(100)에 대한 재료 특성이 확립 되어 있지 않아 이론 및 실험에 의해 구해진 임계 절삭 깊이는 오차 요인이 포함되어 있다. 이외에도 공구의 기하학적 오차가 존재한다. 즉 가공 방법에 따른 오차 등이 발생 한다(Fig. 11). 향후 여러 오차 요인에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통해 보다 발전된 결과를 얻을 수 있을 것이다.

5. 결론

취성 재료의 연성/취성 전이 지점인 임계 절삭 깊이에 대하여 분석하고 연성영역 가공 특성을 알아보기 위해 AE를 이용

Table 2 Material properties of Si(100)⁽¹¹⁾

parameter material	E (GPa)	H (GPa)	Kc (Mpa \sqrt{m})
Si(100)	168	12	0.75

Table 3 Critical depth of cut of Si(100)

parameter material	Critical depth of cut(nm)	
	Experimental	Eq.1
Si(100)	5	5.8

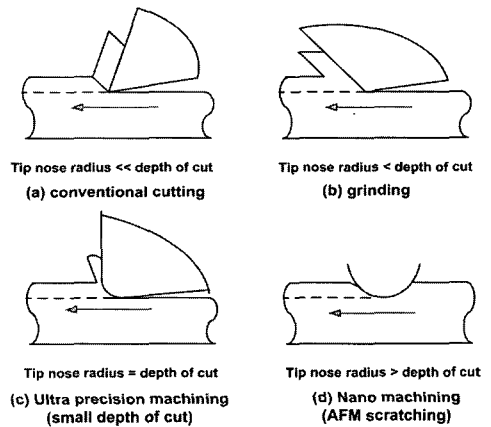


Fig. 11 Effect of Tool nose radius and depth of cut in machining⁽¹²⁾

한 공정 모니터링을 진행 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) AFM machining 공정에서 획득한 AE 신호를 AE count rate, AE ratio, FFT 분석 및 AE RMS 분석을 통하여 취성 재료의 연성 영역에서는 연성 재료에 대한 신호 특성이 나타났으며, 취성 영역에서는 취성재료에 대한 신호 특성이 나타났다. 이를 통하여 취성 재료는 연성 영역과 취성 영역으로 구분됨을 확인 하였으며, 또한 임계 절삭 깊이를 분석 할 수 있었다. AE 신호에 의해 분석된 임계 절삭 깊이는 약 5nm이다.
- (2) 이론적 결과와 실험적 결과의 비교 분석을 통하여 AFM machining에서의 오차 요인을 도출 할 수 있었다.

위와 같은 결과에 의하여 AE 센서는 AFM machining 공정 모니터링에 있어서 그 적용성이 우수함을 알 수 있었으며, 향후 나노 가공에서의 오차 요인 해석을 통한 가공 메커

니즘 분석에 매우 유용함을 확인 하였다.

후 기

이 논문은 2005년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국 학술 진흥 재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF- 2005-041-D00078).

참 고 문 헌

- (1) Taniguchi, N., 1988, *Fundamentals and applications of nano technology*, Kogyo Chosakai.
- (2) Nakazawa, H., 1994, *principles of precision engineering*, Oxford science publications.
- (3) Fang, T. H., Weng, C. I. and Chang, J. G., 2000, "Machining characterization of the nano-lithography process using atomic force microscopy," *Journal of Nanotechnology*, Vol. 11, pp. 181~187.
- (4) Son, J. M. and Lee, S. H., 2004, "Optimal of nano machining parameter using acoustic emission and Taguchi method," *Journal of KSPE*, Vol. 21, No. 3, pp. 163~170.
- (5) Bifano, T. G., Dow, T. A. and Scattergood, R. O., 2002, "Ductile-regime grinding : A New technology for machining brittle materials," *Precision Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 184~189.
- (6) Lee, Y., 2000, "Monitoring and planning for open architecture manufacturing of precision machining using Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley.
- (7) Lee, S. H. and Dornfeld, D. A., 2001, "Precision Laser Deburring and Acoustic emission feedback," *Trans. of ASME, Journal of Manuf. Sci. and Engineering*, Vol. 123 (2), pp. 356~364.
- (8) Chen, X., 1998, "Monitoring and Analysis of Ultra-Precision Machining Processes Using Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley.
- (9) Dornfeld, D., 1998, "Process Monitoring for Precision Manufacturing," *Proc. CIRP/VDI Conference on High Performance Tools- the Key to Innovative Machining Technologies*, Duselndorf, Germany.
- (10) Bifano, T.G. and Yi, Y. 1992, "Acoustic emission as an indicator of material-removal regime in glass micro-machining," *Precision engineering*, Vol. 14, No. 4, 219~228.
- (11) Xiaodong, Ki. and Bharat Bh., 1999, "Micro/nano mechanical characterization of cermaic films for microdevices," *Thin Dolid Flims*, Vol. 340, pp. 210~217.
- (12) Komanduri, R., Chandrasekaran, N. and Raft, L. M., 1998, "Effect of tool geometry in nanometric cutting: a molecular dynamics simulation approach," *Journal of Wear* 219, pp. 84~97.
- (13) Bharat Bhushan, 1996, *Handbook of micro nano-tribology*, CRC Press, Inc.
- (14) Rangawala, S., 1988, "Machining process characterization and intelligent tool monitoring using acoustic emission signal analysis," Ph. D Thesis, University of California, Berkeley.
- (15) Inamura, T., Shimada, S., Takezawa, N. and Nakahara, N., 1997, "Brittle/ductile transition phenomena observed in computer simulation of machining defect-free monocrystalline silicon," *Annals of CIRP*, Vol. 46, pp. 31~34.
- (16) Kim, Y. S., Na, K. H., Choi, S. O. and Yang, S. H., 2004, "Atomic force microscopy-based nano-lithography for nano-patterning: a molecular dynamic study," *Journal of Materials processing technology*, 155-156, pp. 1847~1854.
- (17) Park, I., 1996, "Modeling of Burr Formation Processes in Metal Cutting," Ph. D. dissertation, Univ. of California, Berkeley.