

음향방출과 다구찌 방법을 이용한 나노머시닝 가공조건 최적화

손정무*, 이성환⁺, 최장은*

Optimization of Nano-machining parameters using Acoustic Emission and Taguchi Method

Jung Moo Son*, Seoung Hwan Lee⁺, Jang Eun Choi⁺

Abstract

Atomic force microscope(AFM) techniques are increasingly used for tribological studies of engineering surfaces at scales ranging from atomic and molecular to microscale. AFM with suitable tips is being used for nanofabrication/ nanomachining purposes. In this paper, machining characteristics of silicon have been investigated by nano indentation and nano scratch. Mechanisms of material removal on the microscale are studied and the Taguchi method is introduced to acquire optimum parameters for nanomachining. This work shows effectiveness of the Taguchi method in nanomachining. Also, Acoustic Emission(AE) is introduced for the monitoring of nanomachining.

Key Words : Atomic force microscope(원자힘현미경), Acoustic Emission(음향방출), Taguchi method (다구찌 방법)

1. 서론

나노테크놀로지가 주요 국가 연구과제 중 하나로 선택되어 분야별 전공별로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 주로 나노소재 등 특정 주제에 편중하는 경향이 있어, 특히 차세대 가공매체 등 초정밀 계가공(nano machining)에 관한 연구가 절실하다. 최근들어 주사터널링 현미경(STM)의 발전된 형태 원자힘현미경(AFM)이 측정분야 뿐만 아니라, 기의 lithography 방법 등을 대체하여 초정밀 가공 분야에서 활용 가능성이 알려졌으며 Scanning probe lithography (SPL), 그에 대한 기초 연구가 진행되고 있으나, 기계 가공 측면에서의 체계적 연구가 부족하다. 그 동안 SPL 기술은 기존의 lithography 기술보

다 더 작은 선폭을 그릴 수 있는 방법으로 입증되어 왔지만 Pattern 전사의 효율성이 매우 낮아 아직은 간단한 소자 제작 단계에 머물러 있다. SPL에 대한 초기의 연구는 주로 직접전사(direct writing)를 하는 방법과 감광물질(resist) 개발이 주를 이루었지만 최근에는 실제 소자를 제작하거나 SPL 기술의 성능(선폭 제어, 재현성, writing speed 등) 개선에 많은 노력을 하고 있다. 이러한 문제점이 해결된다면, AFM을 이용한 SPL 기술은 나노 소자 제작에 중요한 기법이 될 수 있으리라 여겨지고 있다.

지금까지의 실험적인 연구사례를 살펴보면, Bharat Bhushan과 Mingwu Bai 등이 실리콘뿐만 아니라 다양한 재료에 대한 나노 가공의 연구와 실험

* 손정무, 한양대학교 정밀공학과 대학원(sunglee@email.hanyang.ac.kr)

주소: 425-791 경기도 안산시 사1동 1271 기계공학과

+ 이성환, 한양대학교 기계공학과

* 최장은, 한양대학교 정밀공학과 대학원

을 하였다. 그들의 실험 결과를 보면, 개별 가공 파라미터의 영향은 알 수 있지만 가공 파라미터의 구체적인 조합을 통한 결과를 제시되지는 못하였다.

본 연구는 Nano scale 가공에 있어 AFM의 tip을 이용하여 nano machining에 대한 기초실험 및 해석을 수행하고 그에 따른 초정밀 가공 미세니즘을 규명하는 것을 목적으로 한다. 특히, 최적의 가공조건을 찾기 위해서 여러 개의 제어 가능한 설계인자와 제어할 수 없는 잡음인자 중에서 잡음에 강건한 최적의 조건을 보다 합리적으로 빠르게 찾는 방법으로 다구찌 방법을 이용하였다. 다구찌 방법의 절차를 요약하여 도식화 하면 Fig.1과 같다.

또한, 나노 가공 중 음향방출 센서를 사용하여 가공상태를 모니터링하여, 보다 효율적이고 정밀도 높은 가공을 위한 필수 기초자료를 구축하는 것을 목적으로 한다.

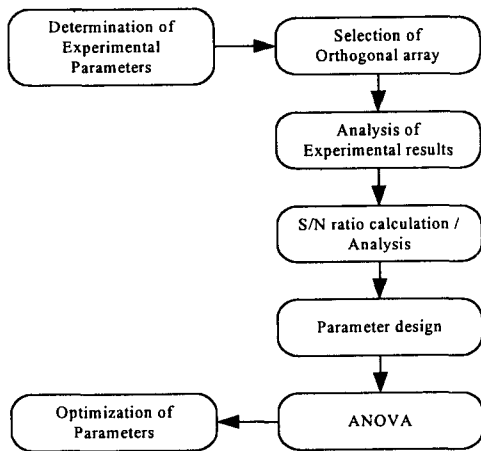


Fig. 1. Optimization using the Taguchi method

2. AE 신호

AE 신호는 재료의 전단, 마찰, 파단 등의 변형으로 발생하는 매우 민감한 응력파이며, 음파의 형태를 가진다. 특히, 나노 가공시 재료의 변형시 정상상태와 상이한 응력파가 방출되게 되며 이 신호가 AE센서에 의해 검출되어 모니터링등에 사용된다. 아래 그림은 각기 다른 정밀도를 요하는 경우에 있어서의 센서의 적용의 예를 보여주고 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 AE 센서는 높은 민감도를 나타내며 고주파의 응답 특성을 가지므로, 초정밀 가공시의 가공상태 모니터링에 널리쓰이고있다.

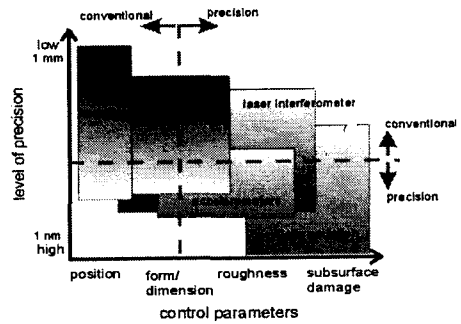


Fig. 2. Sensor application vs. level of precision and error control parameters

3. 실험

3.1 실험재료 및 측정방법

본 연구에서 사용된 AFM은 TM Microscopes사가 개발한 AutoProbe M5를 이용하여 실험을 하였고, 프로그램은 Data Acquisition과 Nanolithography softwear를 사용하였다. 실험에 사용된 cantilever는 force constant가 17 N/m인 non-contact silicon tip을 사용하여 실험을 하였다. 실험재료는 방향성이 다른 실리콘 Si(100), Si(110), Si(111)를 이용해 실험을 수행하였다. Fig. 3은 나노머시닝의 schematic을 보여주고 있다. Fig. 5와 Fig. 6는Si(100)의 표면을 Force 70 μ N, Hold time 30 ms, Approach step 1로 가공했을 때의 실험 결과를 나타내는 그림이다. Height profile로 실험결과의 wear depth와 wear width를 알 수 있다.

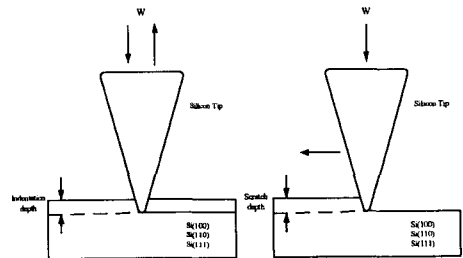


Fig. 3. Schematic diagram of experiment

Fig. 3은 나노머시닝의 schematic을 보여주고 있다. Fig. 5와 Fig. 6는Si(100)의 표면을 Force 70 μ N, Hold time 30 ms, Approach step 1로 가공했을 때의 실험 결과를 나타내는 그림이다. Height profile로 실험결과의wear depth와 wear width를 알 수 있다.

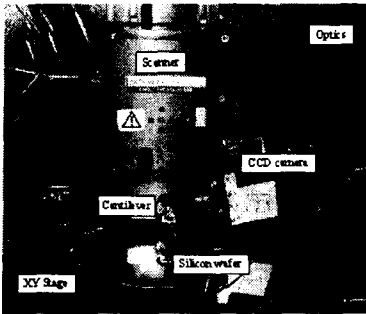


Fig. 4. AutoProbe M5 instrument

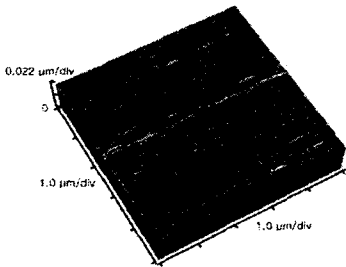


Fig. 5. AFM 3D image of nano indentation

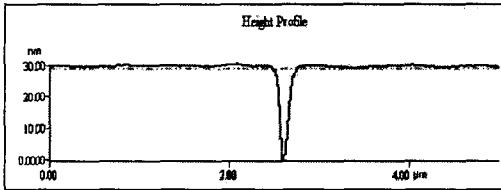


Fig. 6. Profile of AFM image

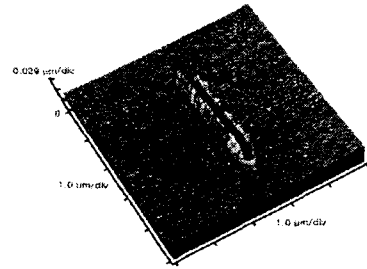


Fig. 7. AFM 3D image of nano scratch

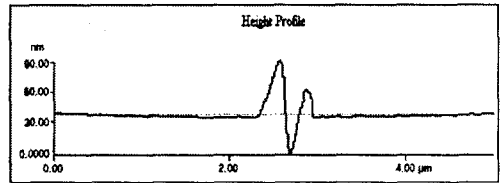


Fig. 8. Profile of AFM image

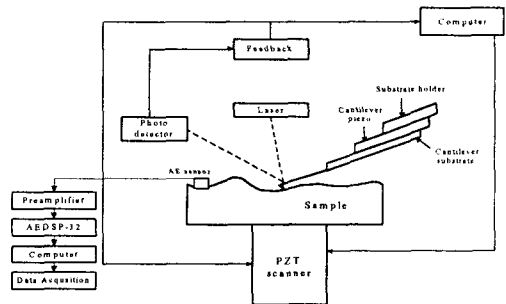


Fig. 9. Experimental setup

Fig. 7과 Fig. 8 은 Si(100)의 표면을 Force 80 μ N, Scan speed 3 μ m/s, Segments 1로 가공했을 때의 실험 결과를 나타내는 그림이다. Height profile로 실험결과의 wear depth와 wear width를 알 수 있다. 나노인덴테이션과 비교해보면 가공 후 버(burr)가 많이 발생 하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 9는 AE모니터링을 위한 실험 장치의 구조를 간략하게 보여주고 있다. 본 실험에서는 Micro-30 광대역형 센서를 사용하였다. 얻어진 신호는 PAC-1220 Pre-Amp를 이용하여 증폭하였으며, PAC-AEDSP-32 Board를 통해 신호를 분석하였다. 센서를 통해 얻어진 전기신호는 preamplifier에서 40dB 증폭하였고, 증폭된 아날로그 신호는 2MHz의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환되어진다. 변환된 신호는 실시간으로 FFT 변환에 의해 주파수 영역에서 표시될 수 있도록 하였다. Fig. 10는 신호처리 과정을 나타낸 것이다

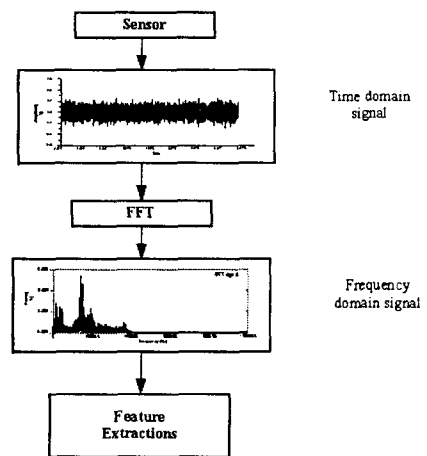


Fig. 10. Data signal process

3.2 가공 변수 설정

본 논문에서 최적화할 가공파라미터를 결정하기 위하여 예비실험을 통하여, Aspect ratio에 영향을 주는 가공 파라미터를 선정하였다. 나노인덴테이션과 나노스크래치의 가공조건을 결정짓는 파라미터 들은 매우 다양하다. 이중 Force, Scan speed, Segments, Hold time, Approach step 등을 사용했다. 위의 파라미터를 선정하게 된 이유는 가장 보편적이면서도 중요 하게 고려될 수 있기 때문이다. 예비실험을 통하여 나노머시닝에 영향을 미칠 수 있는 인자와 수준을 선정하였고 Table 1에 나타내었다.

Table 1. parameters and their levels

(): Nanoscratch

Factor & Symbol	Level		
	1	2	3
A Force (μN)	30 (30)	60 (60)	90 (90)
B Hold time (ms) Scan speed (μm/S)	10 (1)	70 (5)	130 (10)
C Approach step Segment	1 (1)	5 (5)	10 (10)
D Material properties	Si(100)	Si(110)	Si(111)

3.3 직교배열표 선정

나노인덴테이션과 나노스크래치에 대한 직교 배열표 선정은 미리 정한 수준에 알맞은 직교배열표를 선택하였다. 그래서 실험의 횟수를 9번을 하고 4개의 인자에 3수준의 직교배열표 ($L_9 3^4$)를 선택하였다. 또한 직교배열표에 따라 외부 또는 내부의 잡음의 영향을 반영하기 위하여 반복적으로 3회의 실험을 수행하였다. Table 2는 직교배열표를 나타낸 것이다.

본 연구에서 적용한 방법은 패턴 폭은 작을수록 좋은 망소 특성 분석에 준하여 실행하였으며 패턴깊이의 경우는 깊을수록 좋으므로 망대 특성 분석에 준하여 실행하였다.

망소 특성의 경우 S/N비

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

망대 특성의 경우 S/N비는

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (2)$$

이다.

Table 2. Orthogonal array for Nanomachining ($L_9 3^4$)

Exp. No	Factor			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

4. 실험결과

4.1 실험결과와 S/N비 분석

특성치의 구분에 상관없이 S/N비가 클수록 특성치의 성능이 우수하다. 파라미터 설계를 하기 위하여 S/N비를 각각의 파라미터 수준에 따라서 정리할 필요가 있다. 각각의 파라미터의 수준별 평균값 가운데에서 가장 큰 수치를 가지는 값이 가장 좋은 성능치를 가진다. 즉, aspect ratio가 가장 큰 값을 가지는 수준 조합이 되므로, 식(1), (2)를 이용하여 각각의 파라미터에서 가장 큰 S/N비 평균값을 선택하여 줄 때 최적의 가공조건을 선택할 수 있다. Fig. 11의 (a), (b)를 통해서 최적화 조건은 A3, B1, C3으로 할 때 잡음에 강건하고 원하는 패턴을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 자세히 서술하면, Force 90 N, Scan speed 1 m/s, Segments은 10 step이 된다.

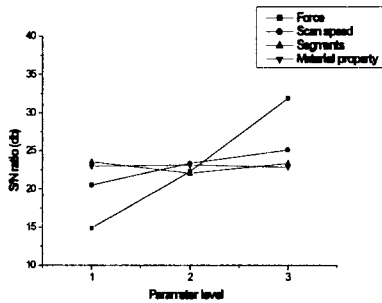
Table 3. Experimental results for nano scratch

Exp. No	Wear depth(nm)			Wear width(μm)		
	1th	2nd	3rd	1th	2nd	3rd
1	4	4	6	0.16	0.16	0.17
2	6	5	5	0.19	0.20	0.20
3	7	8	7	0.23	0.24	0.22
4	9	8	8	0.18	0.20	0.19
5	13	15	13	0.22	0.23	0.21
6	18	17	17	0.27	0.29	0.29
7	33	31	34	0.26	0.24	0.25
8	46	44	45	0.32	0.32	0.34
9	47	45	48	0.37	0.38	0.40

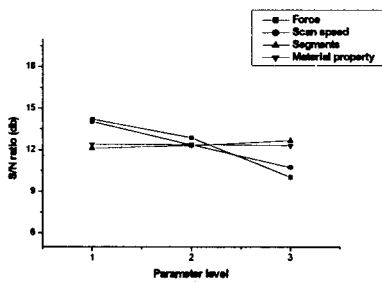
Table 4. S/N ratio of nano scratch result

Exp. No	Wear depth(nm)	Wear width(μm)
1	12.93	15.73
2	14.44	14.12
3	17.25	12.75
4	18.37	14.41
5	22.65	13.14
6	24.76	10.94
7	30.26	12.03
8	33.05	9.71
9	33.37	8.32

Table 3은 측정의 결과값을 나타내며, Table 4는 측정 데이터로부터 SN비를 나타낸 것이다.



(a) Wear depth



(b) Wear width

Fig. 11. Mean S/N ratios for each level of nano scratch

4.2 분산분석

Table 5, Table 6의 나노스크래치의 분산분석 결과를 보면 material property가 매우 작은 기여도와 F값을 가지므로, 유의한 항목이라 볼 수 없기 때문에 오차항으로 간주해서 분산

분석을 하였다. 분석결과 wear depth는 Force의 영향이 가장 컸으며, wear width는 Force와 Scan speed의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 기여도를 보면 wear depth에서 Force가 약 92%정도, wear width는 Force가 약 62%, Scan speed가 37% 정도를 차지하는 것을 볼 수 있다. 그러나 다른 파라미터의 경우는 그다지 커다란 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 F 테스트에서도 Force와 Scan speed가 매우 큰 값을 가지므로, 이 파라미터의 변화에 aspect ratio가 매우 민감하게 변화될 수 있음을 말하여 준다.

Table 5. ANOVA of wear depth

	Sum of square	DOF	Mean square	F ₀	ρ(%)
	S _i	Φ _i -1	S _i / (Φ _i -1)	S _i / S _ε	S _i / S _T × 100
A	48.55	2	24.27	4045.83	92.27
B	3.596	2	1.798	299.66	6.83
C	0.458	2	0.229	38.16	0.87
D	0.012	2	0.006		
ε	0.012	2	0.006		0.03
Total	52.616	8			100

* i : Parameter symbol, □ : Error symbol

Φ_i : Level of parameter

Table 6. ANOVA of wear width

	Sum of square	DOF	Mean square	F ₀	ρ(%)
	S _i	Φ _i -1	S _i / (Φ _i -1)	S _i / S _ε	S _i / S _T × 100
A	3.204	2	1.602	1602	62.13
B	1.904	2	0.952	952	36.92
C	0.047	2	0.024	23.5	0.91
D	0.002	2	0.001		
ε	0.002	2	0.001		0.04
Total	5.157	8			100

가공 중 AE(acoustic emission)신호를 이용해서 가공상태를 모니터링 하였다. 스크래치와 비스크래치 상태를 비교해 보면 스크래치 가공 시 전반적으로 amplitude가 비스크래치 보다 높고, 특히 250kHz~450kHz 사이에서 높다는 것을 알 수 있었다. 이러한 신호 패턴 경향을 기초로, 스크래치와 비스크래치 상태를 AE 신호로써 감지할 수 있는 모니터링 시스템 구축 가능성을 보였다. Fig. 12, Fig. 13은 실리콘과 구리의 실험의 FFT 신호 경향이다.

참고문헌

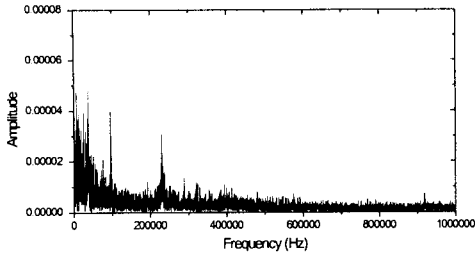


Fig. 12. AE signal of the scratch (material=si(100), force=90N, scan speed=5m/s, segment=1)

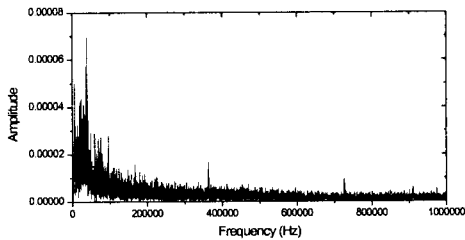


Fig. 13. AE signal of the scratch (material=cu, force=90N, scan speed=5m/s, segment=1)

5. 결론

본 논문에서는 나노 가공에 있어 AFM의 tip을 이용하여 nano machining에 대한 기초실험 및 해석을 수행하고 그에 따른 초정밀 가공 미세패턴에 대한 연구와 최적의 가공조건을 찾기 위해 다구찌 방법을 이용하였다. 실리콘의 방향성에 따른 aspect ratio는 큰 영향이 없었으며, 나노인덴테이션과 나노스크래치의 최적화된 조건도 상이함을 알 수 있었다. 이번 연구 결과에서 만족할 만한 가공품위를 얻기에는 부족했지만, 적용한 다구찌 방법은 이러한 문제들을 보다 효율적으로 최적의 가공조건을 찾는 효과적인 수단이라 할 수 있다.

앞으로 음향방출과 다구찌 방법을 이용하여 효율적인 실험 데이터베이스를 구축하고 이것을 AFM 소프트웨어에 적용시키면 최적의 가공조건을 도출하고 정밀도 높은 가공을 할 수 있을 것으로 기대 된다.

- (1) 백남국, 김대은, 2002, "다구찌 방법을 이용한 레이저 리소그래피 미세패턴 가공조건 최적화" 한국정밀공학회지 제19권 제7호
- (2) Bharat Bhushan, 1996 "Handbook of micro nanotribology" CRC Press, Inc.
- (3) Bharat Bhushan, 2001 "Nano- to microscale wear and mechanical characterization using scanning probe microscopy" Wear 251, pp. 1105-1123.
- (4) Xingzhong Zhao, Bharat Bhushan, 1998, "Material removal mechanism of single-crystal silicon on nanoscale and at ultra loads" Wear 223, pp. 66-78.
- (5) Bharat Bhushan, 1999, "Nanoscale tribophysics and tribomechanics" Wear 225-229, pp. 465-492.
- (6) Sriram sundararajan, Bharat Bhushan, 1999, "Micro/ nanotribology of ultra-thin hard amorphous carbon coatings using atomic/ friction force microscopy" Wear 225-229, pp. 678-689.
- (7) Mingwu Bai, 2000, "Scratch-wear resistance of nanoscale super thin carbon nitride overcoat evaluated by AFM with a diamond tip" Surface and Coatings Technology 126, pp. 181-194.
- (8) 박성현, 1998, "응용실험계획법" 영지문화사.
- (9) Xuemei Chen, 1998, "Monitoring and Analysis of Ultra-Precision Machining Processes Using Acoustic Emission" Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley
- (10) J. von Stebut, 1999, "Acoustic emission monitoring of single cracking events and associated damage mechanism analysis in indentation and scratch testing" Surface and Coatings Technology 116-119, pp. 160-171.