한국정밀공학회지 제 21 권 제 3 호 (2004 년 3 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21. No. 3. March 2004.

음향방출과 다구찌 방법을 이용한 나노머시닝 가공조건의 최적화

이성환# , 손정무*

Optimization of Nano Machining Parameters Using Acoustic Emission and the Taguchi Method

Seoung Hwan Lee# , Jungmu Son*

ABSTRACT

Atomic force microscope (AFM) techniques are increasingly used for tribological studies of engineering surfaces at scales ranging from atomic and molecular to micro-scale. Recently, AFM with suitable tips is being used for nano fabrication/nano machining purposes. In this paper, machining characteristics of silicon were investigated by nano indentation and nano scratch. Nano-scale material removal mechanisms are studied and the Taguchi method was introduced to acquire optimum parameters for nano machining. Also, Acoustic Emission (AE) is used for the monitoring of nano machining.

Key Words : Atomic force microscope (원자힘 현미경), Acoustic Emission (음향 방출), Taguchi method (다구찌 방법), Nano machining (나노 가공)

1. 서론

최근 나노테크놀로지가 주요 국가 연구과제 중 하나로 선택되어 분야별 전공별로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 주로 나노소재 등 특정 주제에 편중되는 경향이 있으며 특히 차세대 가공매체 등 초정밀 기계가공 (nano machining) 에 관한 연구가 절실하다. 최근 들어 주사터널링 현미경 (STM)의 발전된 형태인 원자힘현미경 (AFM) 이 측정분야 뿐만 아니라, 기존의 리소그래피 (lithography) 방법 등을 대체하여 초정밀 가공 분야에서 활용 가능함이 알려졌으며 (Scanning probe lithography (SPL)), 그에 대한 기초 연구가 진행되고 있으나, 기계 가공 측면에서의 체계적 연구가 부족하다. 그 동안 SPL 기술은 기존의 리소그래피 기술보다 더 작은 선폭을 그릴 수 있는 방법으로 입증이 되었지만 패턴 전사의 효율성이 매우 낮아 아직은 간단한 소자 제작 단계에 머물러 있다. SPL 에 대한 초기의 연구는 주로 직접전사(direct writing)를 하는 방법과 감광물질 개발이 주를 이루었지만 최근에는 실제 소자를 제작하거나 SPL 기술의 성능 (선폭 제어, 재현성, writing speed 등) 개선에 많은 노력을 하고 있다. 이러한 문제점이 해결된다면, AFM 을 이용한 SPL 기술은 나노 소자

접수일: 2003 년 5 월 12 일; 게재승인일: 2004 년 1 월 9 일
교신저자 : 한양대학교 기계공학과
E-mail, sunglee@hanyang.ac.kr
* 한양대학교 정밀공학과 대학원

제작에 있어 중요한 기법 중 하나가 될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

지금까지의 실험적인 연구사례를 살펴보면, Bhushan[1-3]과 Bai[4] 등이 실리콘뿐만 아니라 다양한 재료에 대한 나노 가공의 연구와 실험을 하였다. 그러나 그들의 실험은 개별 가공 파라미터의 영향에 초점을 맞추었기 때문에 실가공 시 사용되는 가공 파라미터의 구체적인 조합을 통한 결과는 제시되지 못하였다. 본 연구는 AFM 을 이용한 nano machining 에 대한 실험 및 해석을 통하여, 초정밀 가공에 실제 적용 가능한 기초 자료 획득을 그 목적으로 한다.

2. 다구찌 방법 및 AE 신호

2.1 인자 및 수준의 선정

다구찌 방법을 이용한 최적화에서 파라미터 설계의 목적은 원하는 특성치의 값과 원하는 이론적인 목표값 과의 실제적인 차이를 최소화하기 위한 최적의 값을 찾는 것으로 정의 할 수 있다. 특히, 파라미터 설계 시 손실함수와 S/N 비를 사용하여 도출된 최적의 파라미터는 외부의 환경변화나 다른 잡음 요인에 매우 둔감한 특성을 가지므로 다구찌 방법에 있어 파라미터 설계는 최적화의 성공여부를 결정짓는 관건이라 할 수 있다.[5, 6]

다구찌 방법의 강건설계는 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것이다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 S/N 비(signal to noise ratio)를 사용한다. S/N 비는

$$S/N \quad \text{ratio} \equiv -10\log\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right] \qquad (1)$$

의 형태로 표현되며, 식에서 n 은 측정값의 수를 나타내고 y_i 는 측정한 특성값을 나타낸다. S/N 비가 크다는 것은 각각의 인자가 잡음에 대하여 강건하다는 것을 의미하며, S/N 비는 목적함수, 즉 특성치에 의해 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(The nominal the better), 망소(The lower the better), 망대(The higher the better) 특성의 3 가지로 분류된다. 본 연구에서 적용한 방법은 패턴폭은 작을수록 좋은 망소 특성 분석에 준하여 실행하였으며 패턴깊이의 경우는 깊을수록 좋으므로 망대 특성 분석에 준하여 실행하였다.

2.2 분산분석(ANOVA)

분산분석(Analysis of Variance : ANOVA)은 어떤 파라미터가 특성치에 얼마나 큰 영향을 미치는가를 알기 위한 방법으로, 다구찌 방법의 파라미터 설계에 보완하여 각각의 파라미터의 유의성을 파악하는데 매우 유용하다. 우선, 편차의 제곱의 총합 S_T 는 다음과 같이 표시된다.

$$S_T = \sum_{j=1}^{n}(n_j - n_m)^2 \qquad (2)$$

여기서 j는 직교배열표의 실험번호, n은 전체 실험횟수, η_j는 j 번째 S/N 비, η_m 는 평균 S/N 비를 나타낸다. S_T 는 각 파라미터 편차의 제곱합 성분 (S_i) 과 에러에 의한 제곱합 (S_e) 성분으로 나눌 수 있는데, S_T에 대한 각 파라미터 제곱합 성분의 백분율 (ρ)로 해당 파라미터의 이산 기여도를 표시한다 (Table 6 식 참고). 또한 각 파라미터의 평균 제곱합과 오차제곱합의 비인 F 값을 계산하여 각 파라미터의 오차에 비한 중요도를 수치로 표시할 수 있다. 지금까지 서술한 다구찌 방법의 절차를 요약하여 도식화 하면 Fig.1 과 같다.

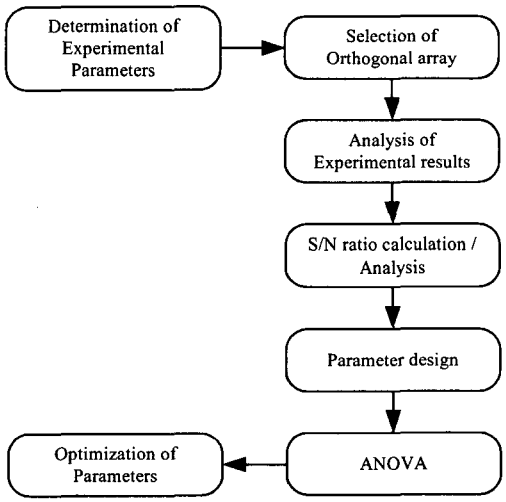


Fig. 1 Optimization using the Taguchi method

2.3 음향방출 신호

Acoustic emission (AE) 신호는 재료의 전단, 마

찰, 파단 등의 변형으로 발생하는 매우 민감한 응력파이며, 음파의 형태를 가진다. 특히, 가공 등으로 인한 재료의 변형 시 정상상태와 상이한 응력파가 방출되게 되며 이 신호가 AE 센서에 의해 검출되어 가공 상태 감시 (monitoring) 등에 사용된다. Fig. 2 는 각기 다른 정밀도를 요하는 경우에 있어서의 센서의 적용 예를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 AE 센서는 높은 민감도를 나타내며 고주파의 응답 특성을 가지므로, 특히 AFM 가공과 같이 통상적으로 사용되는 힘센서 등이 사용될 수 없는 초정밀 가공 시의 가공상태 모니터링에 적합함을 알 수 있다.[7-9]

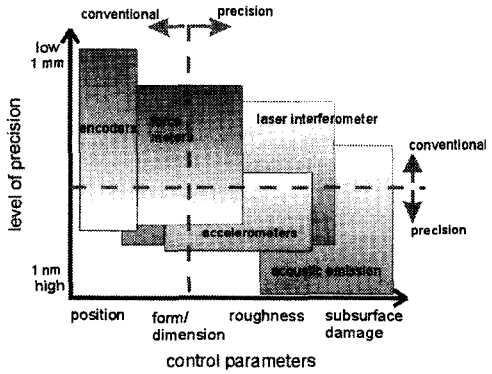


Fig. 2 Sensor application vs. level of precision and error control parameters[7]

3. 실 험

3.1 실험재료 및 측정방법

본 연구에서 사용된 AFM 은 TM Microscopes 사가 개발한 AutoProbe M5 이다 (Fig. 3). 실험에 사용된 cantilever 는 스프링 상수가 17 N/m 인 비접촉식 실리콘 팁이며, 방향성이 다른 실리콘 Si(100), Si(110), Si(111)를 사용하여 실험을 수행하였다. 먼저 나노 압입과 스크래치 실험을 행하여 그 결과를 가지고 최적 가공 파라미터를 추출하였고, 선정된 가공 조건 하에서 AE 모니터링 실험을 수행하여 실시간으로 가공신호를 샘플링하였다.

Fig. 4 는 나노 머시닝의 개략도를 보여주고 있다. 나노 압입의 경우 시편을 AFM 안에 위치시킨 후 tip 을 수직하방으로 일정시간 (hold time) 동안 눌러주는 형태로 실험을 행하였으며, 스크래치의 경우 tip 으로 재료표면을 일정속도 (scan speed) 직선방향으로 진행시키는 방식으로 실험이 수행되었다.

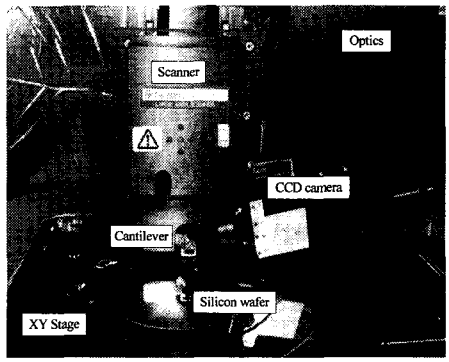
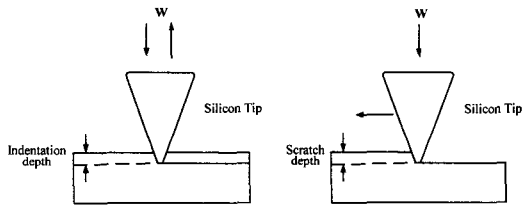


Fig. 3 Auto Probe M5 instrument



(a) nano indentation (b) nano scratch

Fig. 4 Schematic diagram of experiment

Fig. 5 와 Fig. 6 는 Si(100)의 표면을 force 70μ N, hold time 30 ms, approach step 1 로 압입 (indentation) 했을 때의 실험 결과를 나타내는 그림이다. 가공단면 형상을 통하여 실험결과의 마모깊이 (wear depth)와 마모폭 (wear width)을 알 수 있다 (Fig. 6).

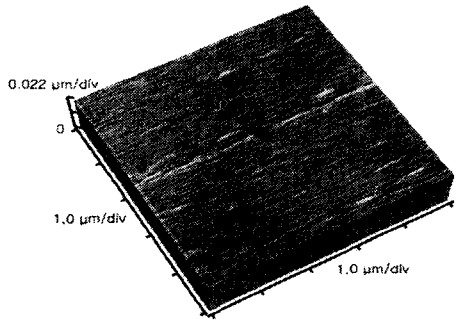


Fig. 5 AFM image of nano indentation (material=si(100), force=70μN, hold time=30ms, approach step=1)

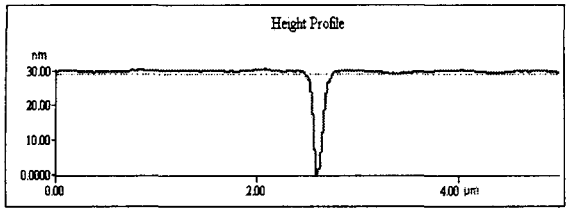


Fig. 6 Profile of AFM image

Fig. 7 과 Fig. 8 은 Si(100)의 표면을 스크래치 했을 때의 실험 결과를 나타내는 그림이다. 압입의 경우와 비교해보면 가공 후 버(burr)가 발생하는 특징을 볼 수 있다.

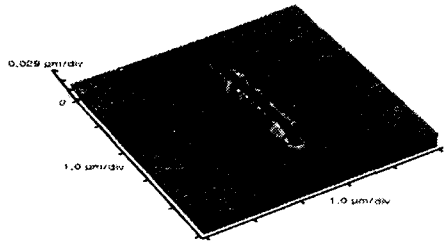


Fig. 7 AFM image of nano scratch (material=si(100), force=80μN, scan speed=3μm/s, segments=1)

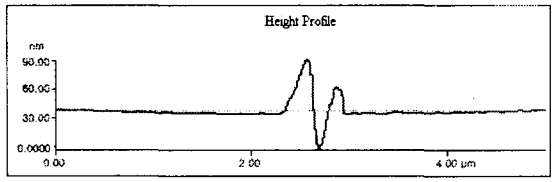


Fig. 8 Profile of AFM image

Fig. 9 는 AE 모니터링을 위한 실험 장치의 구조를 간략하게 보여주고 있다. 본 실험에서는 Micro-30 광대역형 센서를 사용하였다. 얻어진 신호는 PAC-1220 전치증폭기를 이용하여 증폭하였으며, PAC-AEDSP-32 D/A Board 를 통해 신호를 분석하였다. 센서를 통해 얻어진 전기신호는 전치증폭기에서 40dB 로 증폭하였고, 증폭된 아날로그 신호는 2MHz 의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환되어진다. 검출된 신호는 FFT, Count rate, AE Ratio 등의 신호처리 방법을 이용하여 분석하였다. Count rate 는 단위시간당 threshold 값 이상의 값을 가지는 신호의 수를 말하며, 본 실험에서는 단위시간을 1 초, 임계값을 0.015mV 로 하였다. 또 AE Ratio 는 저주파 통과필터를 통과한 신호와 고주파 통과필터를 통과한 원 신호의 최대 peak 값의 비를 말한다. 본 연구에서는 저주파와 고주파의 경계값을 100 kHz 로 하였다.

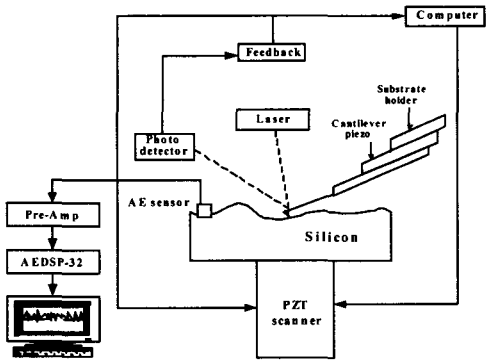


Fig. 9 AE monitoring setup

3.2 가공 변수 설정

예비실험을 통하여 나노머시닝 (스크래치, 압입) 에 영향을 미칠 수 있는 최적의 인자와 수준을 선정하였고 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 parameters and their levels

( ): Nano scratch

Level / Parameter & symbol	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 (Segments)	1 (1)	5 (5)	10 (10)
D Material properties - direction	Si(100)	Si(110)	Si(111)

3.3 직교배열표 선정

예비실험의 결과에 의해서 실험의 횟수를 9 번으로 하는 4 개 인자- 3 수준의 직교배열표 ($L_9 3^4$) 를 선택하였다. 또한 직교배열표에 따라 외부 또는 내부의 잡음의 영향을 반영하기 위하여 동일실험을 3 회 반복 수행하였다. Table 2 는 선정된 직교

배열표를 나타낸 것이다. 예를 들어 실험 1 은 (압입의 경우) 압입력 30μN, 지속시간 10ms, 1 회 접근으로 Si(100) 시편에 실험을 수행한 경우이다.

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

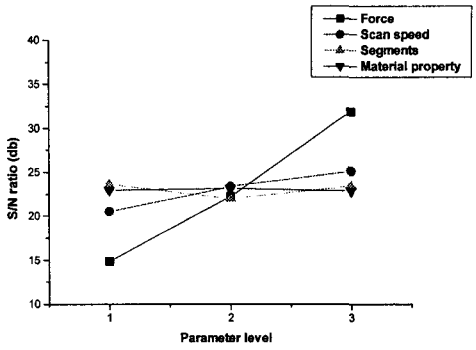
4.1 실험결과와 S/N 비 분석

다구찌 방법을 이용한 가공실험 시, 각 파라메터 별 S/N 비의 평균값을 계산하면 최적의 가공조건을 도출할 수 있다 [5].

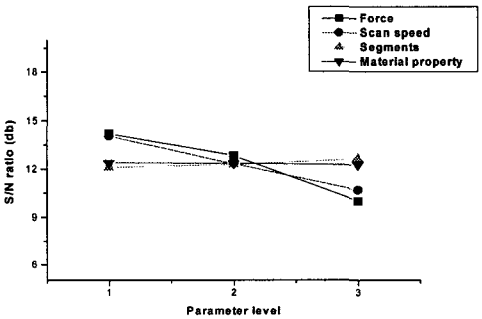
Table 3 Experimental results for nano scratch

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 3 은 가공 후 측정결과 이며, Fig. 10 은 상응하는 S/N 비를 나타낸 것이다 (나노 스크래치).



(a) Wear depth



(b) Wear width

Fig. 10 Mean S/N ratios for each level of nano scratch

Table 4 Sum of S/N ratios for the nano scratch

	1	2	3
A	29.08	35.09	**41.91**
B	34.57	35.7	**35.79**
C	35.7	34.34	**36.02**
D	35.37	**35.51**	35.18

본 연구에서 수행한 나노머시닝의 경우 Aspect ratio 가 가장 큰 값을 가지는 수준의 조합을 최적 가공조건으로 볼 수 있으므로, S/N 비 계산 시 깊이는 망대특성, 폭은 망소특성을 적용하였고, 깊이와 폭의 S/N 비의 합이 최대가 되는 수준이 파라메터 별 최적 가공조건이 된다 (Table 4). 나노 스크래치의 경우 다구찌 방법을 이용해 얻은 최적조건은 A3, B3, C3, D2 이다. 같은 방법으로 도출된 나노 압입의 최적조건은 A3, B1, C1, D2 이다 (Table 5).

Table 5 Optimal Parameters

( ) : Nano scratch

Machining / Parameter	Nano indentation	Nano scratch
Force	90 μN	90 μN
Hold time (Scan speed)	130 ms	10 μm/s
Approach step (Segments)	1 step	10
Material properties - direction	Si(110)	Si(110)

4.2 분산분석

Table 6, 7 의 나노 스크래치의 분산분석 결과를 보면 material property 가 매우 작은 기여도와 F 값을 가지므로, 유의한 항목이라 볼 수 없기 때문에 오차 항으로 간주해서 분산분석을 하였다.

Table 6 ANOVA of wear depth in nano scratch

	Sum of square	DOF	Mean square	F	ρ(%)
	S_i	$\phi_i - 1$	$S_i / (\phi_i - 1)$	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, ε : Error symbol
ϕ_i : Level of parameter

Table 7 ANOVA of wear width in nano scratch

	Sum of square	DOF	Mean square	F	ρ(%)
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

또, 마모깊이는 force 의 영향이 가장 컸으며, 마모폭은 force 와 scan speed 의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 기여도를 보면 마모깊이에서는 force 가 약 92%정도, 마모폭은 force 가 약 62%, scan speed 가 37% 정도를 차지하는 것을 볼 수 있으며, 그 외의 파라미터의 경우는 그다지 커다란 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 또한 F 테스트에서도 force 와 scan speed 가 매우 큰 값을 가지므로, 이 파라미터의 변화에 aspect ratio 가 매우 민감하게 변화될 수 있음을 말하여 준다.

Table 8 ANOVA of wear depth in nano indentation

	Sum of square	DOF	Mean square	F	ρ(%)
A	104.880	2	52.44	546.25	95.69
B	0.192	2	0.096		
C	3.862	2	1.931	20.12	3.52
D	0.664	2	0.332	3.46	0.606
ε	0.192	2	0.096		0.184
Total	109.598	8			100

Table 9 ANOVA of wear width in nano indentation

	Sum of square	DOF	Mean square	F	ρ(%)
A	5.894	2	2.947	842	50.98
B	0.038	2	0.019	5.43	0.328
C	5.623	2	2.812	803.28	48.63
D	0.007	2	0.0035		
ε	0.007	2	0.0035		0.062
Total	11.562	8			100

나노 압입의 경우, 마모깊이는 force, 마모 폭은 force 와 approach step 의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다. 기여도에서 마모깊이는 force 가 약 95%정도, 마모 폭은 force 가 약 51%, approach step 이 48% 정도를 차지하는 것을 볼 수 있다 (Table 8, 9).

4.3 AE 실험결과

직교배열표의 각각의 실험조건에 대하여 가공시 발생하는 AE 신호를 모니터링하고 분석하였다. 비교분석을 위하여 연성 재료인 구리시편을 사용한 실험도 병행하였다.

스크래치 가공 시 스펙트럼의 특성을 살펴보면, 100KHz 이하의 저주파 대역과 250kHz~450kHz 사이의 고주파 대역에서 각각 민감도를 보였다. Fig. 13 은 AE count rate 를 나타낸 것으로, 접촉력의 증가에 따른 신호량의 증가를 나타내고 있으며,

Fig. 14 는 AE ratio 를 나타낸다. 이 경우 고 연성 재료인 구리의 경우 소성변형 등에 의한 고주파 영역신호가 크랙 발생 등의 저주파 신호보다 상대적으로 우세하다는 것을 보여주고 있다.[10]

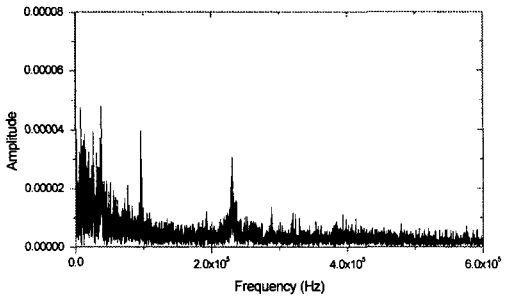


Fig. 11 AE signal spectrum (scratch, material=si(100), force=90μN, scan speed=5μm/s, segment=1)

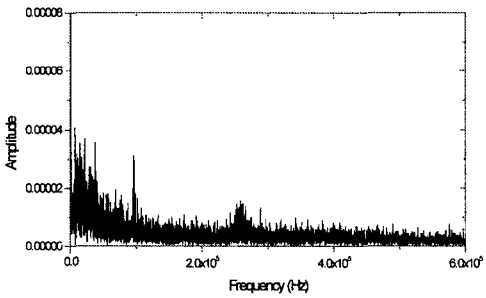


Fig. 12 AE signal spectrum (scratch, material=cu, force=90μN, scan speed=5μm/s, segment=1)

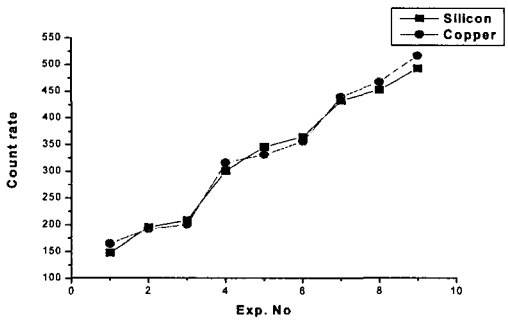


Fig. 13 AE count rate of the nano scratch

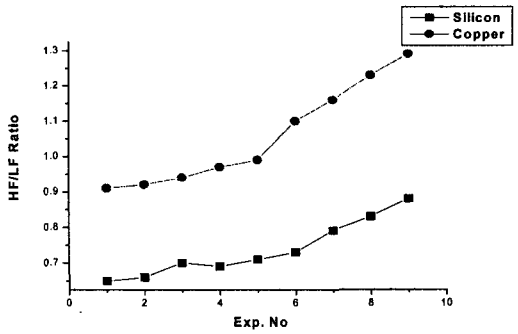


Fig. 14 AE Ratio of the nano scratch

5. 결론

본 연구는 AFM 을 이용한 nano machining 에 대한 기초실험 및 해석을 통하여, 초정밀 가공 미캐니즘에 대한 기초연구를 수행하는 것을 목적으로 하며, 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 나노 가공 시 최적의 가공조건을 찾기 위해 다구찌 방법 및 분산분석을 이용하였으며, 나노 압입과 나노 스크래치의 각각의 경우에 대하여 최적화된 조건 (Aspect ratio)을 도출하였다.

(2) 나노 가공의 실시간 모니터링을 위한 기초연구로써 최적화에 사용된 주요 파라미터와 AE 신호간의 상관관계 DB 구축을 위한 실험을 수행하였다. 연구결과는 향후 다양한 가공조건과 파라메터를 가지는 초미세 가공에의 실제 적용 가능성을 보였으며, 특히 AE 신호의 경우 물질특성이나 가공 특성에 따른 신호간의 차별성을 보여, 나노 가공의 실시간 모니터링에의 적합성을 보였다.

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

참고문헌

1. Bhushan, B., "Handbook of micro nanotribology," CRC Press, 1996.
2. Bhushan, B., "Nano- to microscale wear and mechanical characterization using scanning probe microscopy," Wear, Vol. 251, pp. 1105-1123, 2001.

3. Zhao, X. and Bhushan, B., "Material removal mechanism of single-crystal silicon on nanoscale and at ultra loads," Wear, Vol. 223, pp.66-78, 1998.
4. 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, pp. 181-194, 2000.
5. Lee, S. H. and Lee S., "Optimization of Cutting Parameters for Burr Minimization," J. of KSPE, Vol. 18, No. 12, pp. 130-136, 2001
6. Park, S., "Experimental design and applications," (in Korean), Youngji Press, pp. 93-225, 1998
7. Lee, Y., "Monitoring and Planning for Open Architecture Manufacturing of Precision Machining using Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 2000.
8. Chen, X., "Monitoring and Analysis of Ultra-Precision Machining Processes Using Acoustic Emission," Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1998.
9. Stebut, J. von, "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, 1999.
10. Liu, J. J., "Monitoring the Precision Machining Process: Sensors, Signal Processing and Information Analysis," Ph. D dissertation, Mech. Eng. Dept., Uni. of Calif. at Berkeley, 1991.