

초미세 위치결정시스템을 이용한 실리콘 웨이퍼의 파괴거동에 관한 연구

박기태*, 이병룡**, 박규열**, 홍동표***

A Study on the Fracture behavior in Silicon Wafer using the Ultra-Precision Micro Positioning System

Ki-Tae. Park*, Byung-Ryong Lee**, Kyu-Yeol Park**, Dong-Pyu Hong***

Abstract

The background of this study lies in the investigation of the formation mechanism of ductile mode(nanometer-size) chips of brittle materials such as fine ceramics, glass and silicon. As the first step to achieve this purpose, this paper intends to observe the micro-deformation behavior of these materials in sub μm depth indentation tests using a diamond indenter. In this study, it was developed Ultra-Micro Indentation Device using the PZT actuator. Experimentally, by using the Ultra-Micro Indentation device, the micro fracture behavior of the silicon wafer was investigated. It was possible that ductile-brittle transition point in ultimate surface of brittle material can be detected by adding an acoustic emission sensor system to the Ultra-Micro Indentation apparatus.

Key Words : Ultra-Precision Micro Positioning System(초미세 위치결정시스템), Micro Indentation Device(미세압입장치), Acoustic Emission Method(음향방사법), Fracture behavior(파괴거동)

1. 서 론

첨단기술 집약형 생산형태의 구축을 위한 기반기술의 대표적인 예로서 초정밀 가공기술을 들 수 있다. 초정밀 가공에서 요구되는 가공결과로는 외형상의 가공정밀도 이외에도 가공면질층 등과 같은 가공면의 결정상의 무결함 특성을 가지는 가공면의 고품위화를 들 수 있다. 이와 같이 가공면의 성질 혹은 상태에 대한 요구에 대응하기

위한 수단으로서 가공시에 절입량을 수십 나노미터(Nanometer) 수준으로 설정함으로써 얻어지는 연성형 가공의 연구가 활발하게 진행되고 있다.^(1,3) 일반적인 기계가공법인 다이아몬드 절삭, 연삭 및 연마 등에 있어서 가공면의 고품위화를 실현하기 위한 연성형 가공은 나노미터 단위의 절삭층 생성으로 정의할 수 있다.

즉, 절삭날과 재료가 서브 마이크론 혹은 나노미터 수준이라는 극히 적은 간섭하에서 절삭층을 생성하는 것을 의미

* 회원, 울산대학교 기계공학부 대학원
** 회원, 울산대학교 기계공학부
*** 회원, 전북대학교 정밀기계공학과

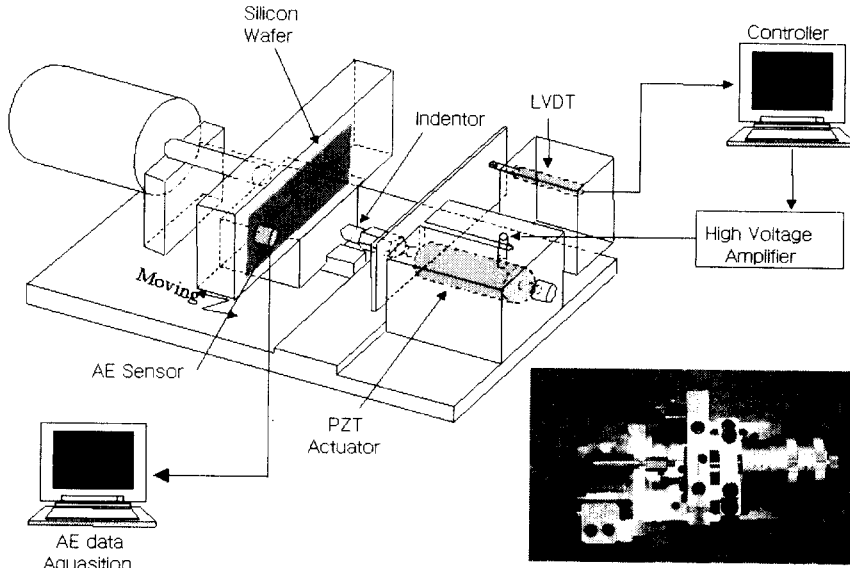


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

한다. 그러나 이와 같이 미세한 간섭 하에서의 재료의 변형·파괴·분리거동, 즉 절삭층 생성기구에 대해서는 그 직접적인 관찰이 극히 어려운 이유로 현재까지 구체적으로 논의되지 않고 있는 실정이다. 또한 현재는 재료의 경도나 파괴인성 및 MOR치 등과 같은 기계적 특성도 비교적 거시적인 재료시험법에 의한 값을 표준으로 하고 있으나, 서브 마이크론 수준에서의 절삭날과의 미세간섭 하에서 소재의 거동은 거시적인 값과는 상당한 차이가 존재하는 것으로 예측할 수 있다. 특히 초정밀 가공이 요구되는 실리콘 단결정의 연성형 절삭층 생성의 가능성 등을 포함하는 초미세 절삭층 생성기구의 해명에는 이와 같이 미세한 간섭 하에서의 재료의 항복응력을 포함하는 정성적 변형 현상을 정량적으로 해석하는 것이 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 단결정 실리콘재료의 초미세 절삭층 생성기구를 조사하기 위한 기초연구로서 서브 마이크론 단위의 미세한 압입시에 발생하는 재료의 변형거동을 관찰하였다. 구체적으로는 초정밀 위치제어가 가능한 미세 압입 장치와 음향방사(Acoustic Emission: AE) 신호 검출시스템을 사용하여 단결정 실리콘 재료의 초미세 단위의 압입시에 발생하는 변형, 파괴 및 분리거동을 조사하였다.^[4-6]

2. 초미세 압입장치 및 실험방법

2.1 압입실험용 장치 구성

Fig. 1에는 본 연구에서 사용된 초미세 압입장치의 개략도를 나타낸다. 압전소자의 비선형 특성을 보정하기 위한 변위센서로서 차동트랜스포머(Linear Variable Differential Transformer: LVDT)를 사용하여 압전소자의 직접적인 변위를 검출하고, 오차의 범위를 줄이기 위하여 신경회로망(Neural Network) 제어기법을 적용하였다.⁽⁷⁻¹¹⁾ 신경회로망 제어기의 경우, 비선형이거나 복잡한 모형 또는 수학적 함수로 표현이 불가능한 시스템을 제어할 수 있다는 점, 실시간 제어가 가능하다는 점 및 입력자료에 생긴 순간적인 외란에 대한 완만한 성능저하를 갖는다는 점과 같은 장점이 얻어지는 것으로 알려져 있다.

또한 재료의 파괴거동을 관찰하기 위하여 미국 Physical Acoustic사의 AE 검출 시스템 : MISTRAS 2001형을 사용하여 압입시험 중에 재료의 변형거동에 의해 발생하는 AE신호를 실시간으로 검출하였다. 실험장치에 사용된 구성요소의 제원을 Table 1에 나타낸다.

2.2 실험장치의 성능

본 연구에서는 초미세 압입장치의 구동소자로 사용된 압전소자의 비선형 특성을 보정하기 위하여 신경회로망 제어기를 적용하였다. 구체적으로는, 신경회로망 제어기

Table 1 Specification of Experimental Apparatus

		Specification	
PZT Actuator (P-245.20) [Physik Instrument]	Max Expansion, ±10 %	20[μm]	
	Stiffness, ±10 %	150 [N/ μm]	
	Electrical Capacitance	100 [nF]	
	Resonance Frequency	15 [kHz]	
	Total Length	45 [mm]	
Amplifier (E-471.00)	Output Voltage	1000 [V]	
	Output Bandwidth	3 [kHz]	
LVDT(S5) [Sensotec]	Stroke Range	±0.254[mm]	
	Resolution	Infinite	
	Input Supply	3V RMS @5kHz	
	Spring Force	2.086[N]	
SA-AC Card	Output	±5[V]	
	Gain Range	1-300	
	Accuracy (Full Stroke)	±0.1[%]	

에서 추종오차의 범위를 줄이기 위한 반복학습 시에 필요한 입력치는 비례-적분-미분제어기(proportional-integral-derivative controller)를 적용하여 구하는 방법을 사용하였다.

이와 같은 방법을 통하여 얻어진 미소압입장치 구동소자의 추종오차는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 Peak-to-Peak 값으로 90nm 전후인 것으로 확인되었다.

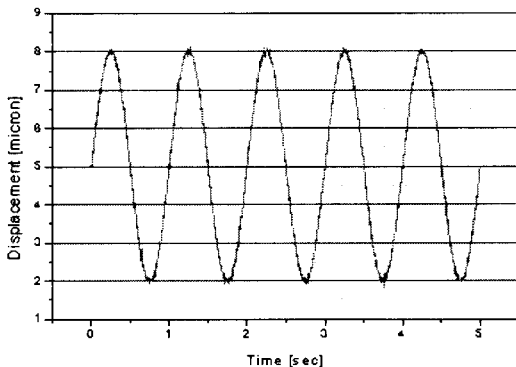


Fig. 2 Experimental Result of Neural Network Control

2.3 압입실험방법

Fig. 3에는 압입실험에 사용된 대면각 136°의 다이아몬드 압입자의 선단부위의 전자주사현미경상을 나타낸다. 압전소자의 선단부에 상기의 다이아몬드 압입자를 부착하여 미세 압입시험을 수행하였다. 시험재료는 압입시험 시에 표면거칠기의 영향을 무시할 수 있도록 표면이 Ra 7nm 전후로 경면가공이 된 웨이퍼 상태의 단결정 실리콘을 사용하였다.

재료의 미세 파괴거동을 조사함에 있어서 AE법의 적용성과 단결정 실리콘 재료의 압입시험에서 부가하중 및 하중 부가시간이 미치는 영향을 파악하기 위한 기초실험에는 일본 시마쯔(Shimadzu)사의 마이크로 비커스 경도시험기와 전술한 AE신호 검출시스템을 이용하였다.

본 연구에서 조사하고자 하는 재료의 미시적인 파괴거동의 관찰은 Fig. 1에 나타난 초미세 압입장치를 사용하여 실험하였다.

실험방법은 구동소자인 압전소자의 선단부위에 다이아몬드 압입자를 고정하고 압전소자가 10nm의 계단 함수적으로 구동하도록 신경회로망 제어기에서 신호가 제어된다. 이 신호가 고전압 증폭기에 입력되면 이에 상응하는 전압이 인가되어 압전소자가 신장하게 되고 이에 따라 압전소자의 선단부에 부착된 압입자는 10nm의 계단 함수적으로 시편인 실리콘 웨이퍼에 압입되며 AE 신호와 SEM을 사용하여 파괴거동을 관찰하였다.

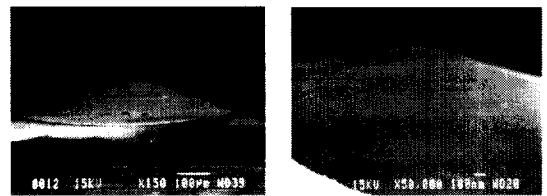
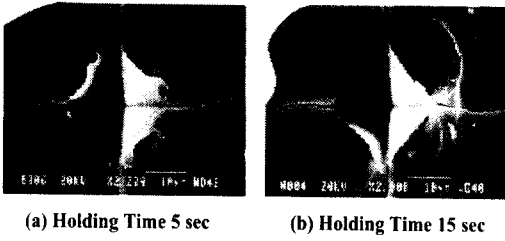


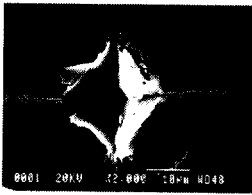
Fig. 3 SEM Image of Diamond Indentor

3. 압입실험결과

Fig. 4는 압입시험 결과로서, 압입하중을 500g으로 고정하고 최대 하중에서의 정류시간을 변화시키면서 시험을 행한 후에 압흔을 SEM으로 관찰한 결과이다. 취성재료의 압입시험에서 일반적으로 관찰되는 압흔과 동일하게 압흔의 측면부에서 방사형 균열(radial crack)과 모서리 부분에서의 횡방향 균열(lateral crack)이 발생됨을 알 수 있다. 이는 압입시간의 증가에 따른 취성재료의 고유특성

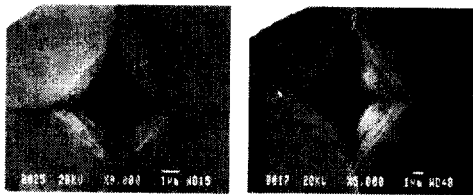


(a) Holding Time 5 sec (b) Holding Time 15 sec

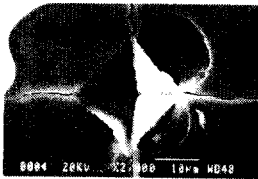


(c) Holding Time 45 sec

Fig. 4 SEM Images (Load 500g)



(a) Load 10g (b) Load 200g



(c) Load 500g

Fig. 5 SEM Images(Holding Time 15 sec)

인 크립(creep)의 영향으로 생각할 수 있다.⁽¹²⁾

Fig. 5는 최대하중에서의 정류시간은 15초로 고정하고 압입하중을 변화시킴에 따른 압흔의 차이를 나타낸다. 미소하중의 압입에서는 일반적으로 알려져 있는 취성재료의 균열발생과 동일하게 횡방향 균열만이 발생하다가 하중의 증가에 따라 방사형 균열도 함께 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4 (c)에서 제시한 부하하중이 500g, 최대 하중에서의 정류시간 45초일 때 검출된 AE 신호를 나타

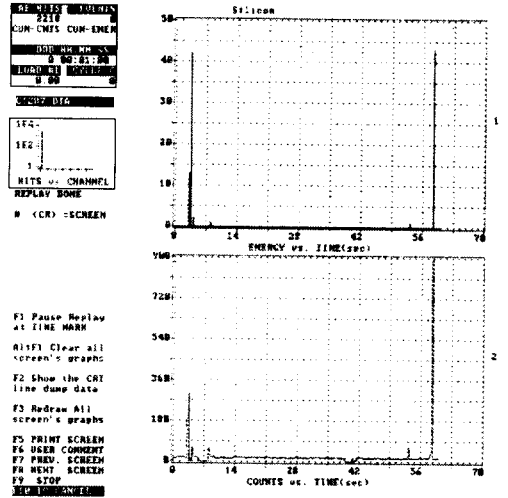


Fig. 6 AE Signal(Load 500g)

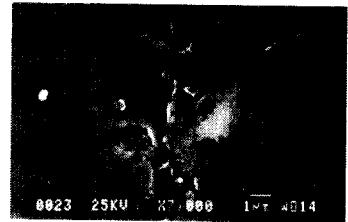


Fig. 7 SEM Image(Crack Mode)

내고 있다. 하중을 부가할 때에 수직방향의 종방향 균열 (median crack)과 측면부에 방사형 균열의 발생에 따른 돌발형의 AE 신호가 검출되며, 제하중 시에는 압흔의 모서리 부분에서 횡방향 균열의 발생으로 인하여 역시 돌발형의 AE 신호가 검출되는 것을 알 수 있다.

일련의 압입시험 결과는 작용하중의 증감에 따른 취성 재료의 일반적인 파괴거동과 일치하고 있다. 하지만 마이크로 비커스 경도시험기로 측정 가능한 최소하중이 10g이며, 따라서 본 연구에서 조사하고자 하는 재료의 극표면층에 존재하는 연취성 천이점 부근에서의 미세파괴 거동에 관한 시험은 불가능하다는 사실을 예측할 수 있다. 단, 이와 같은 예비시험에 의하면 재료의 미세파괴 거동을 조사하기 위한 압입시험 시에 AE 신호가 매우 유용하게 사용될 수 있다는 사실이 입증되었다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 본 연구에서 구성한 초미세 압입시험 장치를 이용한 실험결과로서, 실리콘 재료의 취성파괴가

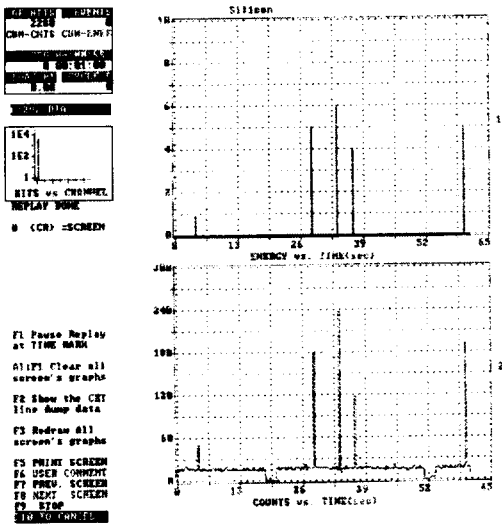


Fig. 8 AE Signal (Crack Mode)

확연하게 관찰되는 변위를 부가하였을 경우에 발생하는 압흔의 SEM상과 검출된 실시간 AE 신호를 나타낸다. 압입깊이는 1.4 μ m으로서 종방향 균열과 방사형 균열이 발생하는 점에서는 앞절의 예비시험 결과에 비하여 에너지 값은 미약하지만 순간적으로 에너지와 카운트 수가 급증한다. 그리고 제하중 시에도 압흔의 모서리 부분에서 횡방향 균열의 발생에 기인하는 돌발형의 AE 신호가 검출됨을 알 수 있다.

반면, Fig. 9와 Fig. 10은 연성형 파괴와 취성형 파괴가 동시에 발생하는, 소위 미세크랙형(micro crack mode) 파괴에 해당하는 변위영역에서의 검출된 압흔의 형상과 AE 신호를 나타낸다. Fig. 9에서 나타낸 SEM상은 압입깊이 1 μ m일 때의 압흔으로 6,500 배율로 관찰된 것으로서 육안으로는 균열이 확인되지 않는 것을 알 수 있다. 단, 이 경우에 실시간으로 검출된 AE 신호에서는 압입자에 의해서 압입이 진행되면 노이즈 레벨보다 약간 상위의 카운트 수가 검출되다가 어느 시점에서는 크랙의 발생에 의한 것으로 추정되는 돌발형의 AE 신호가 검출됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 압입자에 의한 압입깊이를 미세화하면 높은 취성을 갖는 소재에 대해서도 파괴의 양상이 취성형 파괴에서 소성변형을 동반하는 연성형 파괴로 천이되어 질 수 있다는 사실을 시사하는 것으로 생각할 수 있다.

한편, Fig. 11은 500nm의 압입자의 변위량의 조건하에서 수행된 압입시험에서 관찰된 압흔을 SEM을 사용하여

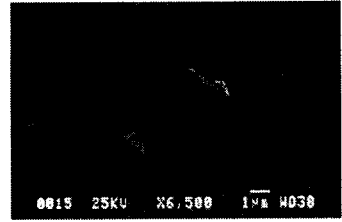


Fig. 9 SEM Image(Micro Crack Mode)

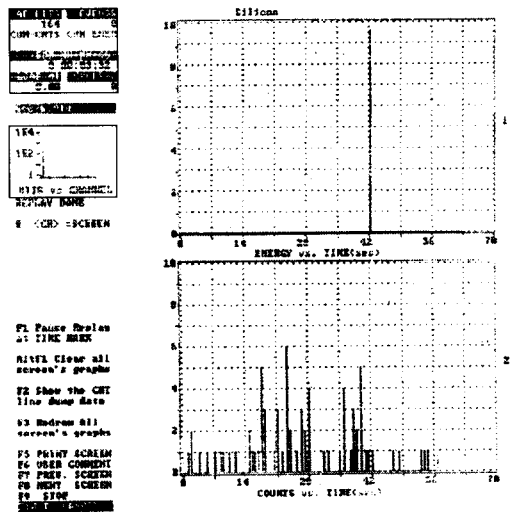


Fig. 10 AE Signal (Crack Mode)

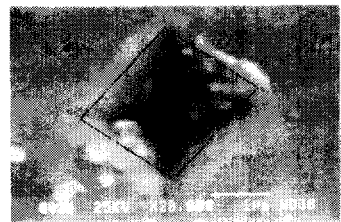


Fig. 11 SEM Image(Ductile Mode)

20,000 배로 확대 관찰한 결과이다. 동 결과에 의하면 SEM에 의해서는 압흔을 명료하게 관찰하는 것이 어려우며 압흔의 외곽부위에서 압입자의 극히 미세한 형상·표면상태의 불균일 혹은 소재의 소성유동에 기인하는 것으로 추정되는 압흔 형상의 변형을 관찰할 수 있다. 또한 동 실험 중에 검출된 AE 신호는, Fig. 15에 나타낸 바와 같

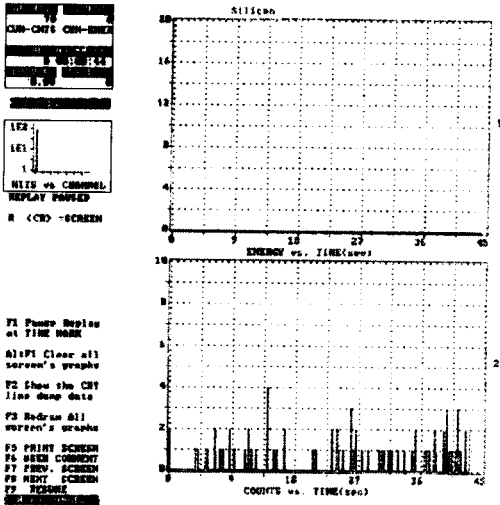


Fig. 12 AE Signal (Micro Crack Mode)

이, 카운트 수에 약간의 변화가 관찰되며 에너지 값에는 어떠한 변화도 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 이 때 발생하는 카운트 수의 변화는 소재의 탄·소성역에서 발생하는 신호로서 극히 낮은 에너지 값을 갖게 되며 실제로 AE 신호검출시스템으로는 검출이 거의 불가능한 정도의 크기를 갖는 것으로 추정할 수 있다. 본 결과에 의하면, 제 2장에서 특성평가된 초미세 압입장치를 사용하여 500nm 이하의 압입깊이를 설정하여 압입시험을 수행하면 취성 재료인 실리콘이 완전히 연성형 파괴거동을 갖게 되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 AE 신호검출시스템을 부가하여 초미세 압입장치를 구성하고 실리콘 웨이퍼의 압입시험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

- (1) 초정밀 위치결정시스템과 AE 신호검출시스템을 병용한 초미세 압입장치를 이용하면 재료의 극표면에서 발생하는 탄·소성 거동의 관찰이 가능하다.
- (2) 실리콘 단결정의 미소파괴 시험에서 파괴거동은 압입하중, 압입시간 및 압입깊이가 커질수록 취성과 파괴 현상이 현저하게 나타난다.
- (3) 본 연구에서 구성한 초미세 압입시험 장치를 이용한 압입시험에서는 압입깊이 500nm 이하에서 취성

재료인 실리콘이 소성변형에 기인하는 연성형 파괴 거동을 나타내는 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부지원 한·일 국제공동연구 및 울산대학교 지역협력연구센터(RRC)의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 宮下政和, “ぜい性材料の延性モード研削技術”, 精密工學會, 56, 5, 782~784, 1990.
- (2) 稻崎一郎, “フイインセラミチグスの研削加工”, 日本機械學會論文集, 56, 530, 2527~2531, 1990.
- (3) Jiwang Yan, Hirofumi Suzuki, Tsunemoto Kuriyagawa, Katsuo Syoji, “Tool Shape Effects on Diamond Cutting Process and Finished Surface Quality”, Proc. of Intl. Conf. on MM21, 83~88, 1997.
- (4) 栗林, 岸, “AEによる材料評價”, 日本金屬學會誌, 第20卷, 3號, pp. 167~175, 1981.
- (5) McBride, S. L., Hong, Y. and Pollard, M. D., “Enhanced Fatigue Crack Detection in Ageing Aircraft using Continuous AE Monitoring”, Proceedings of 11th IAES, pp. 325~332, 1992.
- (6) Hardy, H. R. Jr., “Geotechnical Application of Acoustic Emission Techniques ; Present States and Future Goals”, Proceedings of the 7th Int'l AE Symposium, pp. 632~641.
- (7) Kaizuka, H., Siu, B., “A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 27/5, pp. 773~776, 1988.
- (8) Okazaki, Y., “A Micro-Positioning Tool Post Using a Piezoelectric Actuator for Diamond Turning Machines”, Precision Engineering, Vol. 12/3, pp. 151~156, 1990.
- (9) Ge, P., Jouaneh, M., “Tracking Control of a Piezoceramic Actuator”, IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol. 4/3, pp. 209~216, 1996.
- (10) 岡崎祐一, “壓電アクチュエータを用いた 超精密

- 旋盤用微動工具台”, 精密工學會誌, 53, 5, p. 704, 1987.
- (11) Miller, W. T., Hewes, R. P., “Real Time Dynamic Control of an Industrial Manipulator Using a Neural Network Based Learning Controller”, IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol 6, No.1, pp.1~8 Feb. 1990.
- (12) Kalpakjian, S., “Manufacturing Process for Engineering Materials(3rd Edition)”, Addison Wesley, pp. 59~60, 1997.