

압전구동기를 이용한 초미세 압입장치의 개발

박기태*, 박규열**, 홍동표***

Development of Ultra-Micro Indentation Device using the PZT Actuator

K. T. Park*, K. Y. Park**, D. P. Hong***

Abstract

Recently, manufacturing work has been transformed to advanced technology intensive form from mass production with a little items required in the past. It was demanded that superior workpiece surface integrity. However, the study of ductile mode machining was proceeded actively.

In this paper, it is 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 word : PZT actuator(압전구동기), Acoustic Emission sensor system(음향방사 센서 시스템), Ultra-Micro Indentation device(초미세 압입장치), ductile-brittle transition point(연취성 천이점)

1. 서론

최근에 기술 선진국에서는 강력한 기술경쟁

력을 토대로 노동집약형 생산구조로부터 첨단기술 집약형 생산형태로의 전환을 시도하고 있다. 이와 같은 첨단기술 집약형 생산형태의 구축을 위한 기반기술로서 주목받고 있는 대표적인 기술 분야로 초정밀 가공을 들 수 있다. 초정밀 가공에서 요구되는 가공 결과로는 외형상의 정도 이외에도 가공 변질층 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 50~60nm 수준으로 제어함으로써 얻어지는 연성형 가공의 연구가 활발하게 진행되고 있다. 일반적인 기계가공법인 다이아몬드 절삭, 연삭 및 연마 등에 있어서 가공면의 고품위화를 실현하기 위한 가공법인 연성형 가공의 본질중의 하나는 나노미터 단위 수준의 절삭층 생성으로 정의된다. 즉, 절삭날과 재료가 서브 미크론 혹은 나노미터 수준이라는 극히 적은 간섭하에서 절삭층을 생성하는 것을 의미한다. 그러나 이와 같이 미소한 간섭 하에서의 재료의 변형·파괴·분리거동, 즉 절삭층 생성기구에 대해서는 그 직접적인 관찰이 극히 어려운 연유에 현재까지 구체적으로 논의되지 않고 있다. 또한 현재는 재료의 경도나 파괴인성치, MOR치 등의 기계적 특성도 비교적 거시적인 재료시험법에 의한 값을 표준으로 하고 있는 상황이지만, 서브 미크론 수준에서의 절삭날과의 미소간섭 하에서 그들의 값은 거시적인 값과는 상당한 차이가 존재하는 것으로 예측할 수 있다. 초정밀 가공이 요구되는 단결정 재료의 연성형 절삭층 생성의 가능성 등을 포함하는 초미세 절삭층 생성기구의 해명에는

* 울산대학교 기계공학부
** 울산대학교 기계공학부
*** 전북대학교 정밀기계공학과

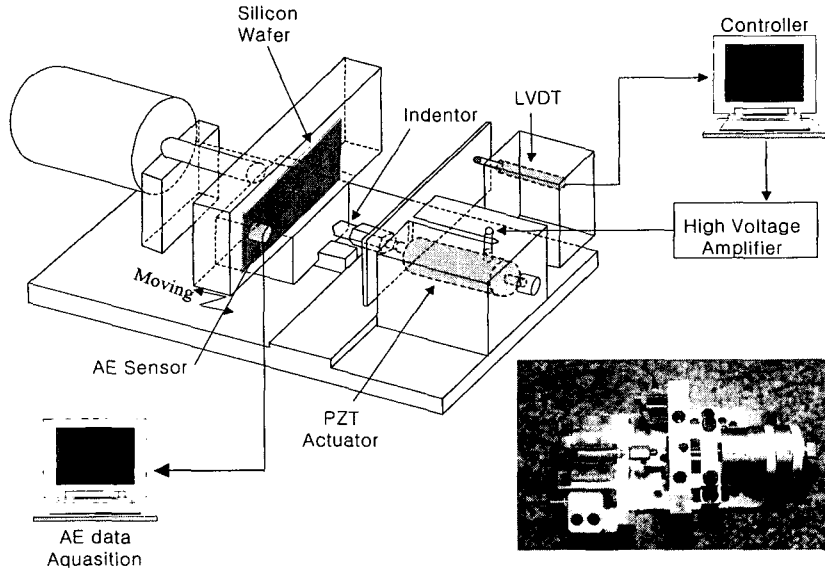


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Apparatus

이와 같이 미세한 간섭 하에서의 재료의 항복응력을 포함하는 정성적 변형현상을 정량적으로 해석하는 것이 필수적으로 요구된다.

본 연구에서는 취성재료의 초미세 절삭층 생성기구를 조사하기 위한 기초연구로서 초정밀 위치제어가 가능한 초미세 압입장치를 구성하고 부가적으로 음향방사센서시스템(Acoustic Emission Sensor System)을 병용하여 경면가공된 단결정 실리콘 재료에 대해 서브 마이크론 단위의 미세한 압입시에 발생하는 재료의 변형거동을 관찰, 분석함으로써 본 시스템의 성능을 확인하고자 한다.

2. 초미세 압입장치의 구성 및 특성평가

2.1 초정밀 위치결정시스템의 구성

그림 1에는 본 연구에서 사용된 초미세 압입장치의 개략도를 나타낸다. 본 연구에서는 구동기로서 압전구동기(PZT Actuator)를 사용하였는데 이에 따른 비선형 특성을 보정하기 위한 변위 센서로서 차동트랜스포머(Linear Variable Differential Transformer: LVDT)를 사용하여 압전소자의 직접적인 변위를 검출하고 오차의 범위를 줄이기 위하여 신경회로망(Neural Network) 제어 기법을 적용하였다. 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 다수의 장점이 얻어지는 것으로 알려져 있다⁽¹⁻⁵⁾

또한 재료의 파괴거동을 관찰하기 위하여 미국 Physical Acoustic사의 AE 검출 시스템 MISTRAS 2001형을 사용하여 재료의 변형거동에 의해 발생하는 AE 신호를 실시간으로 검출하였

Table. 1 Specification of Experimental Apparatus

	Specification	
PZT Actuator (P-245.20) [Physik Instrument]	Max Expansion, $\pm 10\%$	20 [μm]
	Stiffness, $\pm 10\%$	150 [$\text{N}/\mu\text{m}$]
	Electrical Capacitance	100 [nF]
	Resonant 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 [%]

다.

2.2 실험장치의 성능

본 연구에서 제안한 초미세 압입장치의 구동기로 사용된 압전구동기의 비선형특성은 전술한 신경회로망 제어기를 적용하여 보정하였다.⁽⁶⁾

신경회로망 제어기에서는 반복적인 학습을 통해서 시스템의 추종오차 범위를 줄이게 된다. 그러므로 학습을 위한 입력치를 얻기 위하여 비례-적분-미분 제어기(Proportional-Integral-Derivative Controller)를 적용하여 출력치를 구하고 이를 학습되지 않은 신경회로망의 학습 입력치로 설정하였다. 우선적으로 원하는 수준의 정밀도와 분해능을 가지는 PID 제어기를 구현하기 위하여 각 계인을 미세조정하면서 반복실험을 수행함으로써 최적의 결과치를 얻었다.

압전소자의 추종성능 확인을 위한 제어 실험의 목표치를 주파수는 1Hz, 진폭은 6 μ m인 사인파형으로 설정하여 수행하였다. PID 제어기에서 구한 결과 데이터를 학습되지 않은 신경회로망의 학습입력치로 입력하고 학습 목표치는 전기에 나타난 실험조건과 동일하게 하여 반복적인 학습을 수행하여 오차를 감소시킴으로서 PID 제어기를 사용한 실험결과에 비해 추종성능이 향상된 것을 확인할 수 있었으며 본 실험에 대한 추종오차는 Peak-to-Peak 값으로 약 100nm 전후인 것으로 확인되었다. 그림 2에 실험결과를 나타내고 있다.

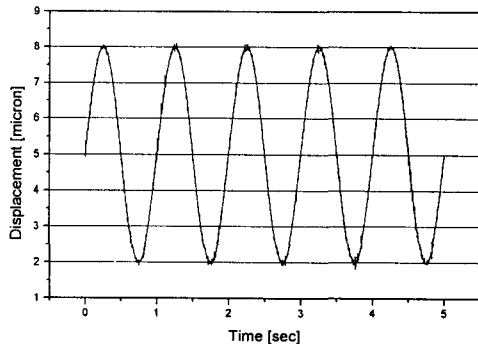


Fig. 2 Experimental Result of Neural Network Control

3. 초미세 압입실험 및 실험결과

3.1 실험 방법

그림 3에는 본 실험에 사용된 대면각 136°의 마이크로 비커스용 다이아몬드 압입자의 최

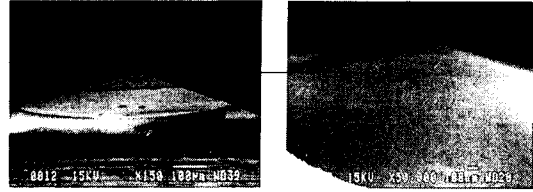


Fig. 3 SEM Image of Diamond Indentor

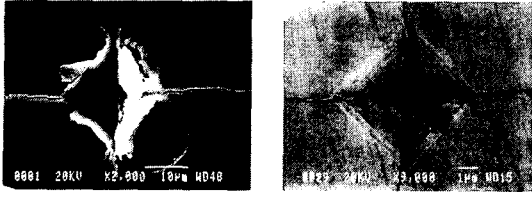
선단 부위의 전자주사현미경(Scanning Electron Microscopy:SEM)상을 나타낸다. 압전소자의 선단부에 상기의 다이아몬드 압입자를 부착하여 미세 압입시험을 수행한다. 시험재료는 웨이퍼 상태의 단결정 실리콘을 사용하였는데 표면이 Ra 10nm 전후로 경면가공이 되어 있는 연유에 미소 압입 시험시에도 표면거칠기의 영향을 무시할 수 있으며 반복 재현성이 높은 것으로 간주할 수 있다.

재료의 미세 파괴거동을 조사함에 있어서 AE법의 적용성과 단결정 실리콘 재료의 압입시험에서 부가하중 및 하중 부가시간이 미치는 영향을 파악하기 위한 기초실험에는 하기의 그림 4에 나타난 일본 시마쓰(Shimadzu)사의 마이크로 비커스 경도시험기와 전술한 AE신호 검출시스템을 이용하였다.

실험방법은 구동소자인 압전소자의 선단부위에 다이아몬드 압입자를 고정하고 압전소자가 10nm의 계단 함수적으로 구동하도록 신경회로망 제어기에서 신호가 제어되게 된다. 이 신호가 고전압증폭기에 입력되면 이에 상응하는 전압이 인가되어 압전소자가 신장하게 되고 이에 따라 압전소자의 선단부에 부착된 압입자는 10nm의 계단 함수적으로 시편인 실리콘 웨이퍼에 압입되며 시험재료인 실리콘 웨이퍼에 부착된 AE 센서를 통하여 압입자의 압입시에 발생하는 AE 신호를 실시간으로 검출하고, 검출된 AE 신호는 전치증폭기(Pre-Amplifier)에서 40dB로 증폭되어 100kHz~1MHz의 밴드패스 필터를 통과하고 다시 주증폭기(Main-Amplifier)에서 40dB 증폭된 후에 A/D 변환기로 보내져서 컴퓨터에 처리되어 입력, 저장되고 모니터로 출력된다.⁽⁷⁻⁹⁾ 또한 압흔의 크랙 발생 유무는 SEM을 통하여 관찰하였다.

3.2 압입 실험결과

그림 4는 전술한 마이크로 비커스 경도시험기를 사용한 압입시험 결과로서, 최대 하중에서의 정류시간을 45초로 고정하고 하중을 500g과 10g으로 변화시키면서 시험을 행한 후에 압흔을



(a) Load 500g

(b) Load 10g

SEM으로 관찰한 결과이다. 그림 4 (a)는 압입하
Fig. 4 SEM Images(Holding time 45sec)

중 500g에 정류시간을 45초로 설정하여 실험한 결과로서 취성재료의 압입시험에서 일반적으로 관찰되는 압흔과 동일하게 압흔의 측면부에서 방사형 균열(Radial Crack)과 모서리 부분에서의 횡방향 균열(Lateral Crack)이 발생됨을 알 수 있다. 그림 4 (b)는 압입하중이 마이크로 비커스 경도시험기의 최소 인가하중인 10g, 정류시간 45초의 조건에 따른 압흔을 나타낸다. 그림 7의 결과에 비하여 압입하중이 감소함에 따라서 방사형 균열은 보이지 않고 모서리 부분에 횡방향 균열만이 나타남을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4 (a)에서 제시한 부하하중이 500g, 최대하중에서의 정류시간 45초일 때 검출된 AE 신호를 나타내고 있다. 하중을 부가할 때에 수직방향의 종방향 균열(Median Crack)과 측면부에 방사형 균열의 발생에 따른 돌발형의 AE 신호가 검출되며, 제하중 시에는 압흔의 모서리

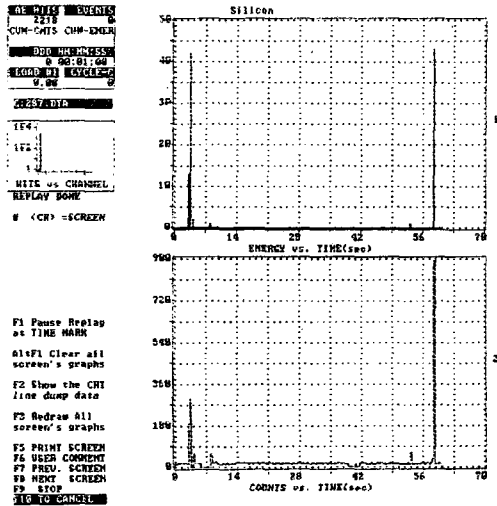


Fig. 5 AE Signal (Load 500g, Holding Time 45sec)

부분에서 횡방향 균열의 발생으로 인하여 역시 돌발형의 AE 신호가 검출되는 것을 알 수 있다.

그림 6은 그림 4 (b)에서 나타난 부하하중 10g, 최대하중에서의 정류시간 45초일 경우에 검출된 AE 신호를 나타낸다. 이 경우에 그림 5의 결과와 유사한 경향을 갖게 되는 반면, 작용하중의 감소에 의한 것으로 추정되는 신호의 에너지 값(Energy Level)이 감소됨을 확인 할 수 있다.

일련의 압입시험 결과는 작용하중의 증감에 따른 취성재료의 일반적인 파괴거동과 일치하고 있지만 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 예비실험에 의하면 재료의 미세파괴 거동을 조사하기 위한 압입시험 시에 AE 신호가 매우 유용하게 사용될 수 있다는 사실이 입증되었다.

본 연구에서 제안한 초미세 압입장치를 이용한 실험결과가 하기에 나타나 있는데, 그림 10은 압입자의 변위량이 500nm인 조건하에서 수행된 압입시험에서 관찰된 압흔을SEM을 사용하여 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, 그림 11에 나타난 바와 같이, 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 사용

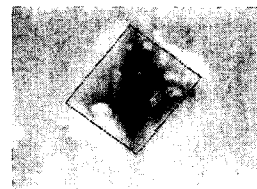


Fig. 6 SEM Image(Ductile Mode)

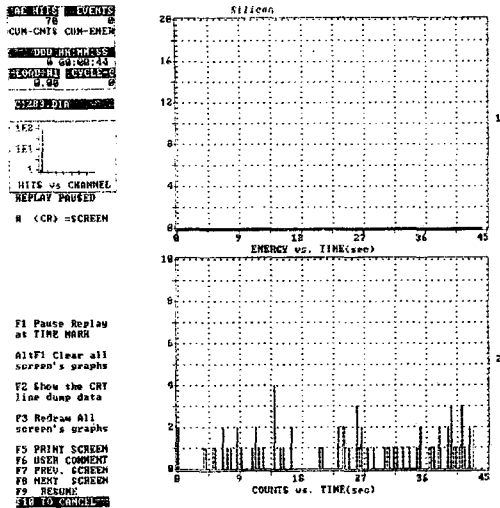


Fig. 7 AE Signal (Ductile Mode)

하여 500nm 이하의 압입깊이를 설정하여 압입시험을 수행하면 취성재료인 실리콘이 완전히 연성형 파괴거동을 갖게되는 것을 알 수 있다.

4. 결론

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

- 1) 압전구동기와 LVDT 및 신경회로망 제어기를 사용하면 간이화되고 Compact화 되면서, nm단위의 극히 높은 분해능을 가지는 초미세 압입장치를 구성할 수 있다.
- 2) 초정밀 위치결정시스템과 AE 신호검출시스템을 병용한 초미세 압입장치를 이용하면 재료의 극표면에서 발생되는 탄·소성 거동을 관찰하는 것이 가능하다.
- 3) 본 연구에서 구성한 초미세 압입시험 장치를 이용한 압입시험에서는 압입깊이 500nm 이하에서 취성재료인 실리콘이 소성변형에 기인하는 연성형 파괴거동을 나타내는 것으로 확인되었다.

후기

본 연구는 과학기술부 한일국제공동연구의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) H. Kaizuka, B. Siu, A Simple Way to Reduce Hysteresis and Creep When Using Piezoelectric Actuators, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 27/5, pp. 773-776, 1988
- (2) W. T. Miler, R. P. Hewes, 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
- (3) Y. Okazaki, A Micro-Positioning Tool Post Using a Piezoelectric Actuator for Diamond Turning Machines, Precision Engineering, Vol. 12/3, pp. 151-156, 1990
- (4) Y. Okazaki, A Micro-Positioning Tool Post Using a Piezoelectric Actuator for Diamond Turning Machines, Precision Engineering, Vol. 12/3, pp. 151-156, 1990
- (5) 岡崎祐一, 壓電アクチュオエータおを用いた超精密旋盤用微動工具台, 精密工學會誌, 53-5, pp. 704, 1987
- (6) P. Ge, M. Jouaneh, Tracking Control of a Piezoceramic Actuator, IEEE Trans. Control Systems Technology, Vol. 4/3, pp. 209-216, 1996
- (7) 岸, 栗林, AEによる材料評價, 日本金屬學會誌, 第20卷, 3號, pp. 167-175, 1981
- (8) McBride, S. L., Hong, Y. and Pollard, M. D., Enhanced Fatigue Crack Detection in Ageing Aircraft using Continous AE Monitoring, Proceedings of 11th IAES, pp. 325-332, 1992
- (9) 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