

## 단결정 실리콘의 파괴거동을 위한 초정밀 위치결정시스템의 개발

이병룡

울산대학교 기계자동차공학부

### <요 약>

본 연구에서는 신경회로망 제어기와 PID제어기의 장점을 이용한 신경회로망-PID 병렬제어기를 이용하여 압전구동시스템의 동적 모형이나 히스테리시스 모델을 구해야 하는 과정을 생략하였고, 전체 구동시스템의 동특성을 실시간적으로 자가학습(self-learning) 시켜서 히스테리시스와 같은 비선형문제를 보상하도록 하였다. 그리고, 실제실험을 통하여 제안된 신경회로망-PID 제어기가 만족할만한 위치제어성능을 보임을 검증하였으며 개발된 장치를 이용하여 단결정 실리콘의 압입시험을 수행하였다.

## Precision Position Control System for Fracture Test of Mono-crystalline Silicon Material

Byung-Ryong Lee

School of Mechanical and Automotive Engineering

### <ABSTRACT>

A piezoelectric actuator is widely used in precision positioning applications due to its excellent positioning resolution. However, the piezoelectric actuator lacks in repeatability because of its inherently high hysteresis characteristic between voltage and displacement.

In this paper, a controller is proposed to compensate the hysteresis nonlinearity. The controller is composed of a PID and a neural network part in parallel manner. The output of the PID controller is used to teach the neural network controller by the unsupervised learning method. In addition, the PID controller stabilizes the piezoelectric

actuator in the begining of the learning process, when the neural network controller is not learned. However, after the learning process the piezoelectric actuator is mainly controlled by the neural netwok controller.

In this paper, the excellent tracking performance of the proposed controller was verified by experiments and was compared with the classical PID controller.

**Key Words :** Piezoelectric actuator, Neural network, PID controller, Predision position control, Hysteresis, LVDT, Nonlinearity

## 1. 서론

일반적으로 초정밀 가공기는 극히 높은 운동정도를 갖지만, 가공정도에 따라서는 기계고유의 운동정도를 넘는 정도가 요구되는 경우가 존재하게 된다. 이와 같은 경우에는 가공 중에 기계요소의 미소한 진직도 및 진원도의 오차를 보정하여야 한다. 기계공구에 극히 미소한 절입량의 설정이 필요한 경우, 또는 가공 중에 극히 미소한 절입의 변화를 부가하여 미세한 형상가공을 실행하게 되는 초정밀 가공기계에는 높은 정도를 갖는 미세 절입 장치가 필수 불가결한 요소가 된다. 그러나 이와 같은 미소 절입장치는 수 마이크로 정도의 스트로크에 나노미터 정도의 분해능을 요구하며, 또 주파수 응답특성이 우수하고 제어가 용이하여야 하므로 기계 테이블과 주축 등의 통상적인 직선운동 기구와는 별도로 부가적인 구동장치를 설치하는 것이 일반적인 방법이다. 미소절입장치의 구동장치로 주로 사용하는 것이 압전구동기(piezoelectric actuator)인데 압전 구동기는 구동력과 전압의 제어에 의한 높은 분해능을 얻을 수 있고, 또한 구동력이 크며 주파수 응답특성이 양호하다는 이점이 있으나, 전압과 변위의 미세한 비선형 특성으로 인하여 동일 운동의 반복 실행시에 히스테리시스(hysteresis) 루프가 발생하므로 높은 운동정도를 얻기 위해서는 이를 보정하여야 한다. 압전 구동기의 응용 측면에서 히스테리시스 비선형성을 줄이기 위해 이제까지 많은 노력이 있어왔는데, 기존의 히스테리시스 모델링 기법들은 압전구동기의 이력현상에 의한 비선형 특성만을 주로 고려하여 위치정밀도의 향상을 꾀하였다.

S. Jung 과 S. Kim[1]은 압전구동기의 비선형특성이 크게 전기적 비선형 특성과 이력현상에 의해 좌우되는 것으로 보고 먼저 하드웨어로 압전구동기의 전기적 비선형 특성을 억제하여 입력조건에 따라 비선형 특성이 변하는 것을 억제한 후 이력현상의 모형기법을 시도하였다. Newcomb과 Flinn[2]은 변위를 일으키는 제어입력으로 전압대신에 전하(charge)를 이용한다면 압전 구동기의 비선형 특성을 없애고 선형적으로 제어할 수 있다고 제안하였다. 전압대신 전하를 제어입력으로 이용하기 위해서는 특별히 고안된 전하구동증폭기(charge drive amplifier)와 같이 하드웨어적인 요구사항이 많아지게 되고 변위의 감도가 떨어지게 되는 단점이 있다. 이 방법을 이용할 경우에 선형 제어이론을 이용할 수 있어 제어기는 단순해지는 반면에 하드웨어가 복잡해지게 된다. Kaizuka와 Sui[3]는 압전 구동기의 히스테리시스 현상을 줄이는 간단한 방법을 을 제안하였다. 이 방법은 구동기와 직렬로 캐패시터(capacitor)를 연결함으로써 전압을 이용하여 선형적으로 구동기를 제어할 수 있다는 것이다. 하지만 이 방법을 이용할 경우에는 같은 변위 출력을 위해 상대적으로 매우 높은 전압을 가해야 한다는 단점

이 있다. 또 다른 방법으로 페루프 제어기를 이용한 것이 있다.[4] 이 방법은 제어기에 압전 구동기의 히스테리시스 현상이 포함되어 있지 않으며 시스템의 불안정성을 야기시킬 수 있고 정밀도에도 한계가 있다. 그리고 앞먹임 제어방법(feedforward control)이 제안되었는데 이 방법은 히스테리시스 현상에 대한 모형을 만들고 기준 입력과 모형을 이용하여 입력을 미리 예상하여 시스템에 가해주는 것이다. 예를 들면 Ge와 Jouaneh[5]는 Classical Preisach 모형을 이용하여 구동기의 히스테리시스 현상을 모형화하고 이를 시스템에 적용하여 성능의 큰 향상을 보였다. 하지만 제안된 모형은 크기가 일정한 주기 신호만을 추종할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 이와 같이 기존의 제어기를 이용하여 압전구동기를 제어하기 위해서는 히스테리시스 같은 비선형 특성을 수식으로 모델링 하거나 또는 전체 구동시스템의 동적 특성을 실험적으로 해석하여 근사적인 동적식을 구한 다음에 제어알고리즘을 적용하는 것이 일반적인 추세이다.

이에 반하여 신경제어기는 동적 모형이 필요하지 않고 간단한 수식으로 표현되며, 시스템의 변수가 계속 변해도 학습으로 인해 지속적으로 제어가 가능하다. 이러한 특성으로 신경제어방식은 복잡한 시스템이나 비선형 제어에 많이 적용되고 있다.[6][7]

본 연구에서는 신경회로망 제어기와 PID제어기의 장점을 이용한 신경회로망-PID 병렬제어기를 이용하여 압전구동시스템의 동적 모형이나 히스테리시스 모델을 구해야 하는 과정을 생략하였고, 전체 구동시스템의 동특성을 실시간적으로 자가학습(self-learning) 시켜서 히스테리시스와 같은 비선형문제를 보상하도록 하였다. 그리고, 실제실험을 통하여 제안된 신경회로망-PID 제어기가 만족할만한 성능을 보임을 검증하였으며 기존의 PID제어기와도 그 성능을 비교하였다.

## 2. 신경회로망-PID 병렬 제어기

본 논문에서는 신경회로망 제어기와 PID제어기를 병렬 형태로 연결한 이른바 신경회로망-PID제어기를 이용하여 압전구동시스템의 위치제어를 수행하였다. Fig.1은 병렬제어기의 구조이다.

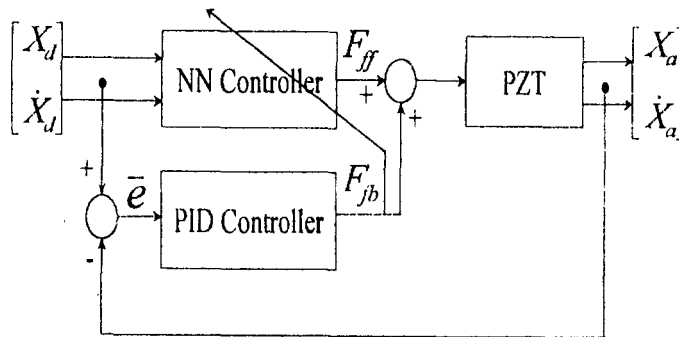


Fig. 1 Structure of Controller

Fig.1에서 병렬제어기의 입력은 압전구동기의 변위와 속도로 주어지고 변위오차 및 속도오차에 의해 PID제어기가 작동하여 피드백 힘  $F_{fb}$  를 출력하게 된다. 신경회로망 제어기는 변위와 속도의 입력만으로 무감독 학습방법으로 학습하게 되는데, 학습에 필요한 목적함수는 PID 제어기의 출력힘인  $F_{fb}$  값의 2차 함수로 구성되며 이 값이 극히 작은 값이 될 때까지 신경회로망 제어기는 실시간적으로 자가학습(self-learning)을 하게 된다.

본 제어기에 사용된 신경회로망 제어기의 구조는 1개의 입력층과 1개 은닉층 그리고 1개의 출력층으로 구성된 다층 피드포워드 신경회로망(multilayer feedforward neural network)[8]을 사용하였다.

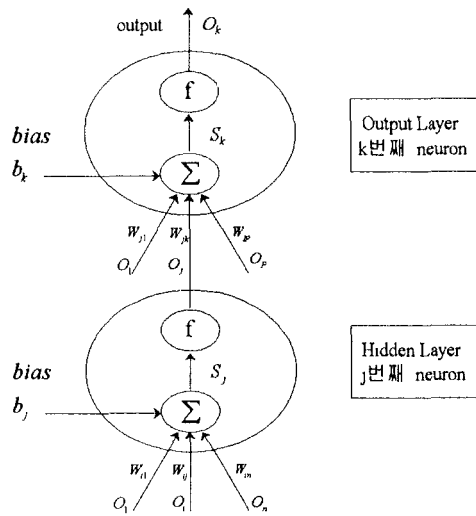


Fig. 2 Neuron of hidden and output layer

신경회로망 내의 은닉층과 출력층의 각 노드(node)는 Fig.2와 같이 이전의 노드(node)로부터 가중치가 곱해진 입력신호들은 바이어스(bias)값과 더해져서 활성화함수(activation function)로 이동된다. 활성화함수는 단조증가(monotonically increasing)하며 미분 가능한 함수를 사용하게 되는데 일반적으로 많이 사용하는 활성화함수는 생물의 뉴런(neuron)처럼 작용하는 시그모이드 함수(sigmoid function)인데 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$f(s_j) = \frac{1}{1 + e^{-s_j}} \tag{1}$$

PID제어기의 출력값을 신경회로망 제어기의 학습신호로 사용하고, 오차를 줄이는 새로운 가중치 값을 구하기 위해서 신경회로망 제어기를 설계해야 한다.

신경회로망 제어압전소자의 학습오차에 해당하는 목적함수  $E(t)$ 를 아래와 같이 정의한다.

$$E(t) = \frac{1}{2} \| o_j(t) - y_j(t) \|^2 \tag{2}$$

여기서  $y_j(t)$ 는 t번째 스텝에서의 출력층 노드의 원하는 출력값이고,  $o_j(t)$ 는 t번째 스텝의 실제 출력값을 의미한다. 그러나 압전구동기를 수학적으로 정확하게 표현하기 어렵기 때문에 원하는 출력값  $y_j(t)$ 를 구할 수 없다. 출력층의 원하는 출력값은 감독 학습 방법에서 목적패턴을 의미하는데, 이 경우와 같이 목적 패턴을 구할 수 없을 때는 무감독 학습 (unsupervised learning) 방법으로 학습해야 한다.[9]

식 (2)에서  $y_j(t)$ 를 구할 수 없기 때문에 식 (2)의 목적함수를 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$E(t) = \frac{1}{2} \| F_{\mathcal{R}}(t) \|^2 \tag{3}$$

위 식에서  $F_{\mathcal{R}}(t)$ 는 다음과 같다.

$$F_{\mathcal{R}}(t) = K_p(X_d - X_a) + K_d(\dot{X}_d - \dot{X}_a) + K_i \int_0^t (X_d - X_a) \tag{4}$$

식 (4)에서  $X_d$ 와  $\dot{X}_d$ 는 압전소자의 원하는 위치와 속도를 나타내고,  $X_a$ 와  $\dot{X}_a$ 는 실제 압전구동기의 위치와 속도를 나타낸다.

식 (2)와 식 (3)은 같은 속성을 갖는다. 즉 식 (2)에서 학습 오차가 0으로 접근한다는 것은 시스템의 위치오차가 0으로 줄어든다는 것을 의미한다. 따라서, 압전 구동기의 위치오차 및 속도오차가 줄어들게 되면  $F_{\mathcal{R}}(t)$ 도 0의 값으로 접근하게 되므로 식 (3)으로 식 (2)를 대체할 수 있다. 학습과정 동안에 목적함수  $E(t)$ 를 최소화 하기 위하여 경사하강법 (gradient descent method)을 이용한 역전파 학습 알고리즘을 사용하여 신경회로망의 가중치  $w$ 를 다음과 같은 방법으로 계속적으로 조정하게 된다.

식 (3)의 목적함수를 이용하여 가중치에 대한 목적함수의 변화량을 구하면 다음과 같다. 출력층 노드에 대하여

$$\frac{\partial E}{\partial w_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial s_j} \frac{\partial s_j}{\partial w_{ji}} \tag{5}$$

과 같고, 식 (5)에서

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial s_j} &= \frac{\partial E}{\partial o_j} \frac{\partial o_j}{\partial s_j} \\ &= (o_j - y_j) o_j (1 - o_j) \end{aligned} \tag{6}$$

과 같다. 따라서

$$\delta_j = -\frac{\partial E}{\partial s_j} = o_j(1-o_j)(y_j - o_j) \quad (7)$$

와 같다. 식 (7)에서  $y_j - o_j$ 는 신경회로망의 학습오차이므로  $y_j - o_j$ 는 피드백 힘인  $F_{fb}$ 에 비례한다고 볼 수 있다. 학습이 잘 진행되면 진행될수록 시스템의 위치오차는 0으로 줄어들고,  $F_{fb}$ 도 0으로 접근하기 때문이다.

따라서, 식 (7)은 다음과 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

$$\delta_j = o_j(1-o_j)F_{fb} \quad (8)$$

마찬가지로, 은닉층의 노드에서 가중치에 대한 학습오차의 변화량은 다음과 같이 구해진다.

$$\delta_i = \sum_{k=1}^m [\delta_k w_{ki}] o_i(1-o_i) \quad (9)$$

그리고, 다음 샘플링 단계에서 가중치의 변화량과 새로운 가중치의 값은 다음과 같다.

$$\Delta w_n(t+1) = \eta \delta o_i + \alpha \Delta w_n(t) \quad (10)$$

$$w_n(t+1) = w_n(t) + \Delta w_n(t+1) \quad (11)$$

와 같이 된다. 위 식에서  $\eta$ 는 학습율이고  $\alpha$ 는 모멘텀율이다.

이와 같이 PID 제어기와 신경회로망 제어기를 병렬로 구성하면, 학습초기 신경 회로망의 불안정한 출력으로부터는 비례-적분-미분(PID Controller)제어기가 동작하여 압전소자를 안정하게 만들고, 학습 후에는 대부분의 출력을 신경 제어기가 담당하여 빠른 응답특성을 갖는다.

### 3. 실험 장치의 구성

실험 장치에 사용된 압전구동기는 PI사의 P-245.20 모델을 사용하였고, 압전구동기의 변위량을 측정하기 위한 위치센서는 LVDT로서 SENSOTEK사의 S5 모델을 사용하였다. 압전구동기와 LVDT의 자세한 사양은 Table. 1에 나타나 있다.

Table. 1 Main specification of experimental apparatus

	모 델 명	비 고
압전 구동기	PI (Physik Instrumente) P-245.20	최대변위량 : 20 $\mu$ m
압전구동기 앰 프	PI E-471.00	0 - 1000 V
센 서	SENSOTEK S5	
센서보드	SA-AC Card. AE325	Extation : 3volts RMS at 5KHz

Fig. 3는 본 연구에서 구성한 실험장치의 구성도이다. PC에서는 추종하고자 하는 궤적의 위치정보를 D/A 변환기를 거쳐 압전증폭기를 통하여 압전구동기를 구동시키며 압전구동기의 변위량은 압전구동기의 선단부의 판을 통하여 차동변압기(LVDT)로 전달된다. 차동변압기는 변위량을 전기적인 신호로 변환하고 센서보드에서 증폭되어 A/D보드를 통하여 실제 움직인 변위량을 PC로 전달하게 된다.

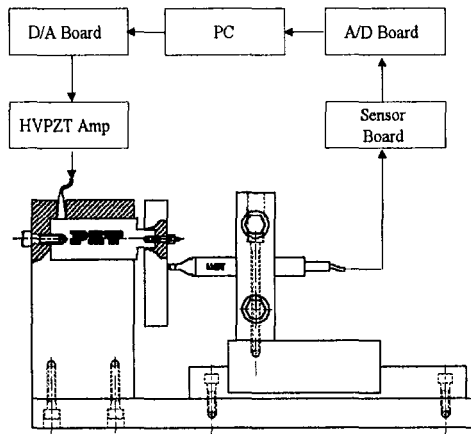


Fig. 3 Schematic of experimental system

#### 4. 실험 및 고찰

Fig. 4 는 제어기를 사용하지 않고 실험장치의 압전구동기에 전압을 0V에서 1000V까지 증가시키면서 변위를 측정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 제어를 행하지 않은 압전 소자는 히스테리시스 특성이 있음을 알 수 있다.

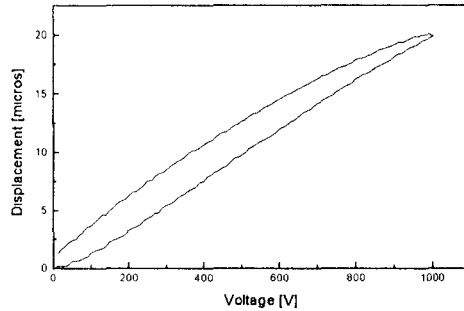


Fig. 4 Hysteresis loop of open loop

본 실험에서는 먼저 주기가 3초인 정현파를 추종목표적으로 하여 신경회로망을 학습하였다. 사용된 신경회로망의 구조는 입력층, 은닉층 및 출력층의 노드수가 각각 2개, 8개, 1개로 구성되어 있으며 샘플링주기는 0.005로서 정현파의 1 사이클을 600분할하여 각 샘플링에서 식 (3)의 값을 최소화하기 위하여 신경회로망의 가중치를 각 샘플링주기마다 변경하도록 하였다. Fig. 5는 학습에 따른 신경회로망의 오차를 나타낸 것인데, 학습 초기에는 오차가 급속도로 줄어들고 어느정도 학습이 지난후에는 일정한 최소점에 다다름을 알 수 있다.

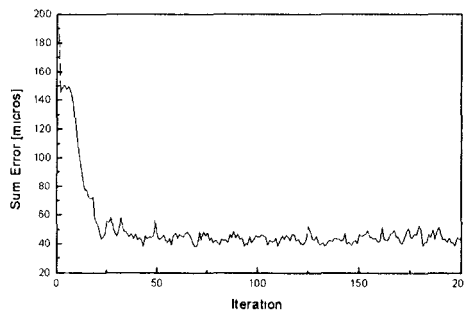
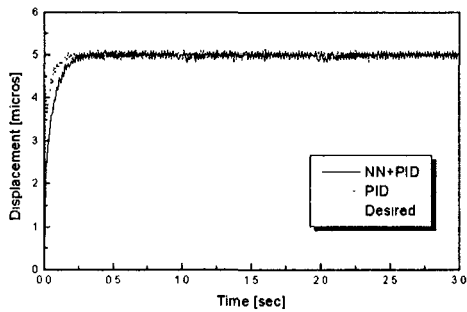


Fig. 5 Training Error

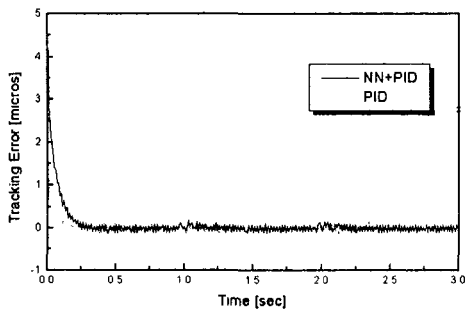
Fig. 6은 신경 회로망 제어기와 PID 제어기를 병렬로 사용한 제어기와 PID 제어기만을 사용한 제어기의 계단함수 추종성능과 추종오차를 나타낸 것이다. PID제어기만을 사용했을 경우에는 초기에 불안정한 특성을 나타내고 있다. Fig. 7의 (a)는 신경 회로망 제어기와



PID 제어를 병렬로 사용한 제어기와 PID 제어기만을 사용한 제어기의 사인함수 추종 성능을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 사인함수 추종성능에서도 병렬로 사용한 제어기의 추종성능이 우수함을 나타내고 있다. Fig. 8은 신경회로망 제어기와 PID 제어기에서 나오는 출력 볼트값을 나타낸 것이다. 즉, 압전구동기의 위치를 제어하는 주 인자는 신경회로망의 출력힘이라는 것을 알 수 있다. 그러나, 외란 및 잡음에 의하여 시스템의 특성이 변동하게 되면 PID 제어기가 출력하여 시스템을 안정시키게 된다. Fig. 9는 주기가 0.5 초인 정현파를 추종목표 패적으로 설정한 경우의 추종성능을 나타낸 것이다. 병렬제어기가 빠른 주기에서도 추종성능이 우수함을 알 수 있다.

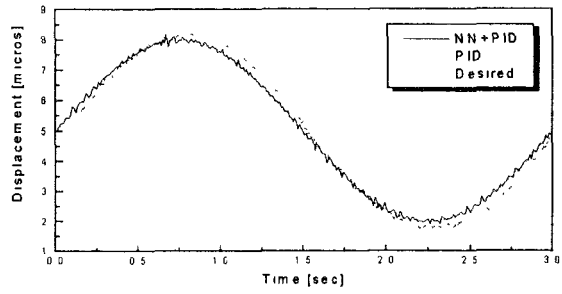


a) Displacement

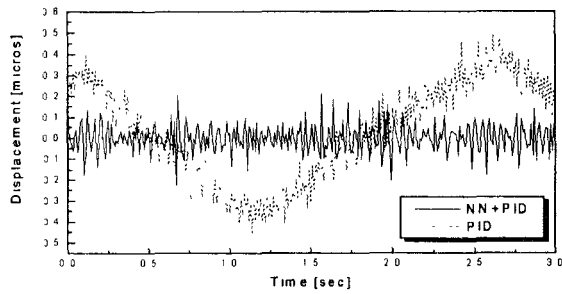


b) Tracking Error

Fig. 6 Comparison of PID and PID + NN compensation tracking of a sine waveform



a) Displacement



b) Tracking Error

Fig. 7 Comparison of PID and PID + NN compensation tracking of a step function

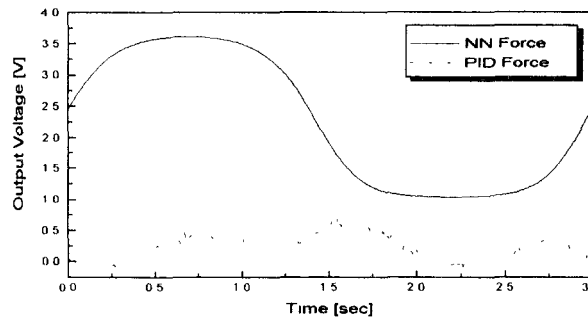
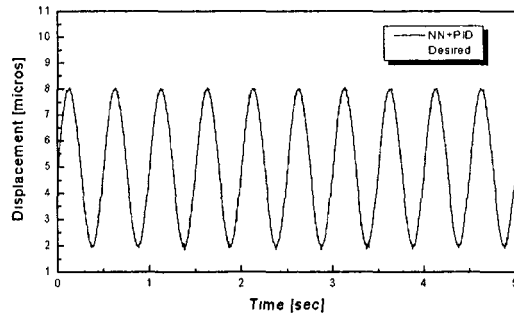
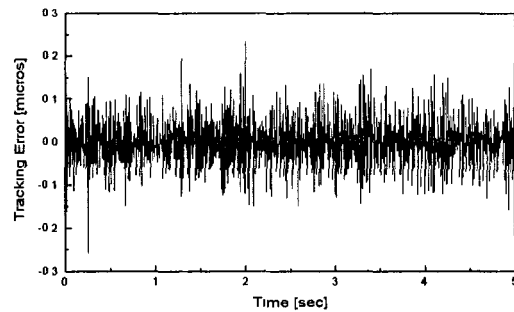


Fig. 8 PID and PID + NN output voltage



a) Displacement



b) Tracking Error

Fig. 9 NN+PID controller

## 5. 정밀위치결정시스템을 사용한 실리콘 단결정의 미소파괴거동 실험

본 장에서는 본 연구에서 제안한 초정밀 위치결정시스템의 위치정밀도, 동작의 반복성 및 신뢰성을 확인하기 위하여 미소압입실험에 적용하였다. 구체적으로는 압입자의 압입깊이를 나노미터 단위로 초정밀하게 제어함으로써 진술한 시스템의 성능을 실험, 평가함과 동시에 단결정 실리콘 재료의 연취성 천이역이라는 극표면층에 발현되는 미세파괴거동을 관찰하였다.

### 5.1 실리콘 단결정의 연취성 천이역 검출을 위한 예비시험

미소압입시험에 있어서는 초정밀한 위치제어가 필수적이며 압자(Indenter)에 의한 재료의 변형 또는 파괴 과정을 연삭이나 절삭의 과정과 유사시켜 접근하는 것이 물리적으로

유용한 정보를 제공할 수 있으므로 본 연구에서 제안한 초정밀 위치결정시스템의 성능 평가를 위해 이러한 방법을 선택하였다. 또한 취성 재료의 파괴실험시 파면의 X선 회절분석 결과 취성파괴면에 극히 작은 영역에서의 소성변형이 관찰되며 취성재료의 가공시 절입깊이를 매우 작게 하면 재료의 거동이 취성파괴에서 소성변형의 상태로 천이한다는 사실이 연구보고되어 있다.

압입자의 압입에 의해 재료에 하중이 가해지면 응력장이 형성되는데 이때 재료에 변형 또는 파괴를 야기시킬 수 있는 강도를 가진 특정영역이 존재하게 되고 이로 인하여 재료 내에 존재하는 결함의 크기와 압입깊이 및 압입력의 크기에 따라 재료의 거동이 달라질 수 있다. 즉 하중이 인가됨에 따라 생성되는 미소크랙의 평균 분포간격보다 임계응력장의 크기가 작다면 최대전단응력에 의해 전위의 이동으로 소성변형이 일어날 수 있고 인가된 하중이 충분히 커서 임계응력장이 미소크랙의 평균간격보다 크다면 최대인장응력에 의해 크랙이 균열전파의 핵이 되어 취성파괴가 일어나게 되는데 이러한 재료의 파괴거동이 소성변형에서 취성파괴로 전환되는 점을 연취성 천이점(Ductile-Brittle Transition Point)이라고 한다.

전술한 연성형 가공에 의한 초정밀 가공법도 이러한 취성파괴가 일어나지 않는 극히 미소한 깊이의 절입으로 연성형의 칩을 배출하므로써 구현할 수 있다. 다시 말하면 절입깊이를 아주 작게 하여 임계응력장의 크기를 재료 내에 분포하는 결함보다 작게 하면 소성변형에 의해 재료를 제거할 수 있어서 경취성 재료에 대해서도 연성형 가공이 가능하다.

본 실험에 앞서 우선적으로 재료의 미세 파괴거동관찰을 위하여 미소 압입시험의 적용과 시험재료의 미소 크랙 발생 등의 관찰에 AE법의 적용이 타당한지를 검토하기 위하여 Fig.10 에 나타낸 일본 Shimadzu사의 미소 비커스 경도계로 압입시험을 수행하고 AE 센서시스템은 미국 Physical Acoustic Corporation의 MISTRAS 2001을 사용하여 AE 신호를 검출하는 예비시험을 수행하였다.

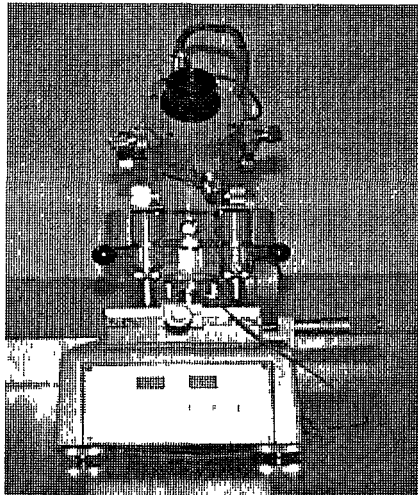


Fig.10 Micro Vickers Hardness Tester

Fig.11 에서는 본 실험에 사용된 마이크로 비커스용 다이아몬드 압입자의 최선단 부위의

SEM상을 도시하고 있으며 마이크로 비커스 경도계는 적용 가능한 하중이 10~1000g까지 이고 최대 하중에서의 정지시간은 5~45초까지 조절 가능하며 부하속도는 0.017mm/s이므로 압입 시험은 부하하중과 최대 압입하중에서의 정지시간을 변화시키면서 수행하였으며 동기하여 시험재료에 부착된 AE 센서를 통하여 압입시험 중의 AE 신호를 검출하였다. 검출된 AE 신호는 Pre-Amp.에서 40dB 증폭되어 100kHz~1MHz의 밴드패스 필터를 통과하고 다시 Main-Amp.에서 40dB 증폭된 후에 A/D 변환기로 보내져서 컴퓨터에 처리되어 입력, 저장되고 모니터로 출력된다.

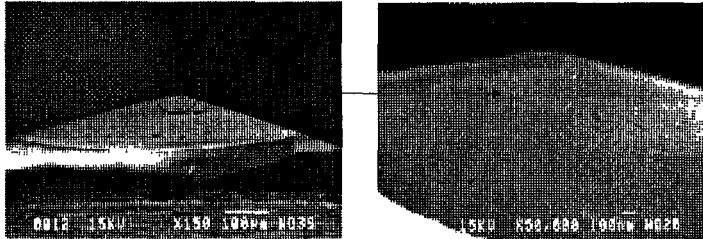
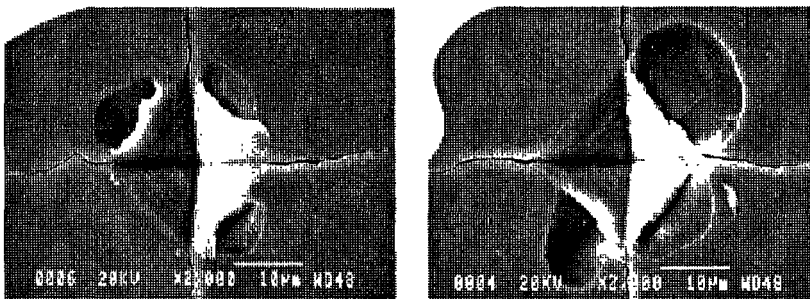


Fig. 11 SEM Image of Indentor

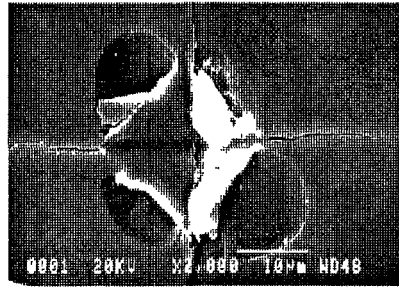
시험재료로서는 단결정 실리콘 웨이퍼를 선택하였는데 웨이퍼는 표면이 10nm Ra 이하의 초정밀 경면가공이 되어 있는 상태이므로 미소 압입시험시에 표면거칠기의 영향을 거의 받지 않으며 또한 단결정 재료이므로 반복 실험에 따른 미소 파괴양상이 거의 유사한 경향을 나타내는 반복 재현성이 아주 높은 재료라고 사료되어 시험재료로 선정하였다.

Fig.12 는 압입 하중을 500g으로 고정하고 최대 하중에서의 정류시간을 변화시키면서 시험을 행한 후에 압입자의 압흔을 전자 주사 현미경(Scanning Electron Microscopy:SEM)을 통해서 관찰한 결과를 나타내고 있는데 압흔의 측면부에 방사형의 균열(Radial Crack)과 모서리 부분에 횡방향 균열(Lateral Crack)이 보인다. Fig.13 은 압입하중이 마이크로 비커스 경도계의 최소 하중인 10g일 때 정류시간을 변화시키면서 측정된 결과의 SEM상을 보여준다. 압입하중 감소에 따른



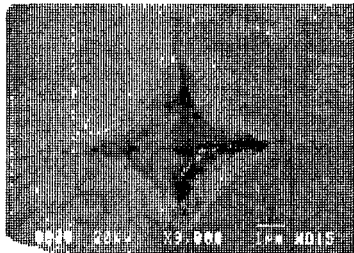
(a) 5 sec

(b) 15 sec

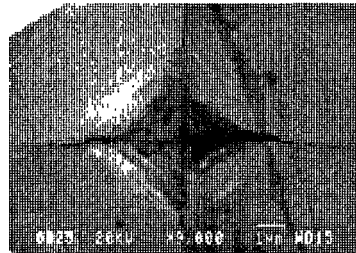


(c) 45 sec

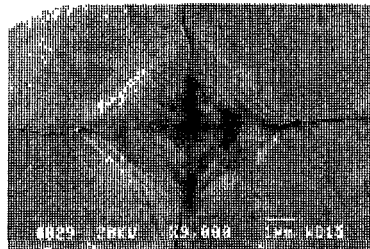
Fig.12 SEM Images (500g)



(a) 5 sec



(b) 15 sec



(c) 45 sec

Fig.13 SEM Images(10g)

압입깊이의 감소로 인해서 방사형 균열(Radial Crack)은 보이지 않고 모서리 부분에 횡분할(Lateral Crack)만이 나타나고 있다.

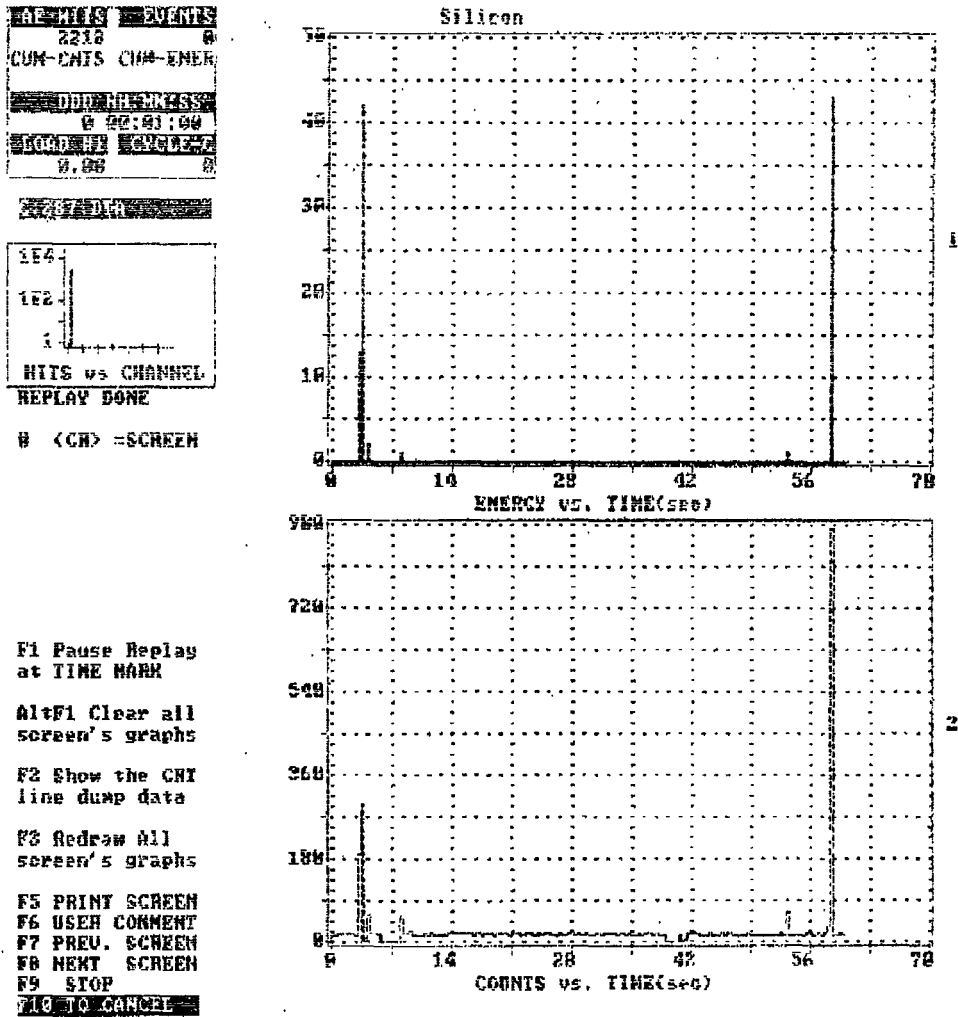


Fig.14 AE Signal (Load 500g, Holding Time 45sec)

Fig.14 에서는 Fig.12 (c)에서 도시한 부하하중이 500g이며, 최대하중에서의 정류시간은 45초일 때 검출된 AE 신호를 나타내고 있는데 부하중시에 발생하는 수직방향의 종분할 (Median Crack)과 측면부에 방사형의 방사분할(Radial Crack)의 발생에 따른 돌발형의 AE 신호가 검출되며 제하중시에도 압흔의 모서리 부분에서 횡분할(Lateral Crack)의 발생으로 인해서 역시 돌발형의 AE 신호가 검출된다.

Fig.15 에서는 Fig.13 (c)에서 도시한 부하하중이 10g이고, 최대하중에서의 정류시간은 45초일 때 검출된 AE 신호를 나타내고 있다.

상기의 마이크로 비커스 경도계를 사용한 압흔의 관찰 결과들은 경취재료에 대해서 부하하중의 증감에 따른 일반적인 미세 파괴거동과 일치하고 있지만 마이크로 비커스 경도





## 5.2 실리콘 단결정의 연취성 천이점 검출시험

전 절에서 수행한 마이크로 비커스 경도계와 AE법을 이용한 예비실험을 통해서 취성재료의 파괴거동에 있어서 크랙이 발생하면서 탄성파를 방출하여 돌발형의 AE 신호가 발생한다는 사실을 확인하였으며 본 연구에서 제안한 초정밀 위치결정시스템과 AE법을 사용한 단결정 실리콘 웨이퍼의 연취성 천이점 검출이 압입자의 초정밀한 위치제어가 가능하다면 충분한 타당성이 있는 것으로 확인되었다.

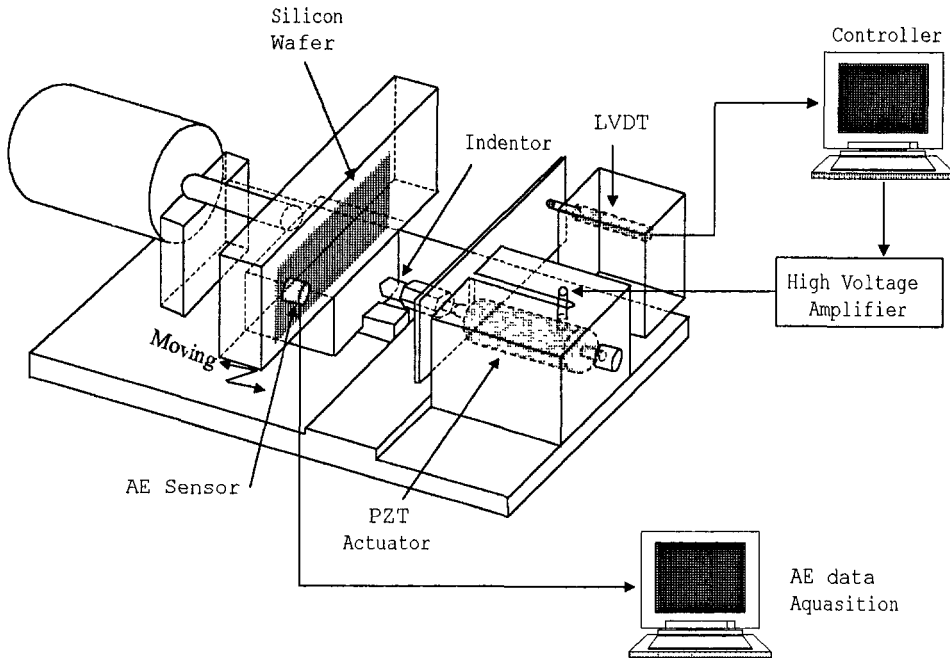


Fig.16 Schematic diagram of Micro Hardness Tester

Fig.16 에 본 연구에서 제작한 미소압입시험장치의 개략도를 도시하고 있으며 Fig.17 에서는 제작된 실제 사진을 나타내고 있다. 연취성 천이점 검출을 위한 미소압입시험장치에는 본 연구에서 제안한 초정밀 위치결정시스템에 부가적으로 시험재료를 고정할 수 있는 보조 장치를 제작하여 부착하였고 연취성 천이점을 검출하기 위한 AE 센서시스템으로는 전문한 미국 Physical Acoustics Corporation의 MISTRAS 2001을 채용하였다.

본 연구에서 제작한 초정밀 위치결정시스템을 적용한 미소 압입장치와 AE법을 사용한 연취성 천이점 이하에서의 미소파괴거동 관찰을 위한 시험방법은 다음과 같다. 마이크로 비커스 경도계에서 사용한 다이아몬드 압입자를 압전소자의 선단부위에 고정하여 압전소자가 10nm의 계단함수적으로 구동하게 신경회로망 제어기에서 신호가 제어되어 고전압증폭기에 입력되면 이에 상응하는 전압이 인가되어 압전소자가 신장하게 되고 이에 따라 압전소자의 선단부에 부착된 압입자는 10nm의 계단함수적으로 단결정 실리콘 웨이퍼에 압입하게 된다. 동시에 시험재료인 단결정 실리콘 웨이퍼에 부착된 AE 센서를 통하여 압입자

의 압입시에 발생하는 탄성파를 AE 신호로 검출하고 이에 따른 크랙의 발생 유무를 확인하였다.

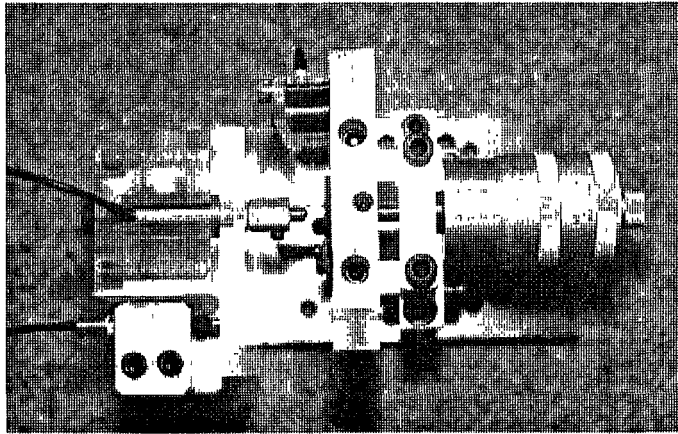


Fig.17 Photo View of Micro Hardness Tester

Fig.18 과 Fig.19 에서는 미세 압입장치를 이용하여 전철의 예비실험에서 수행하였던 같은 조건에서 취성파괴를 관찰하기 위하여 최초의 크랙이 발생하고도 수 마이크로의 압입을 부가하였을 때의 압흔의 SEM 사진과 검출된 AE 신호를 보여준다. 검출된 압흔과 AE 신호에서 나타나듯이 수직방향의 중분할(Median Crack)과 방사형의 방사분할(Radial Crack)이 발생하는 점에서는 전철의 마이크로 비커스 경도계에서 검출된 에너지에 비해서는 미약하지만 순간적으로 에너지와 카운트 수가 급증하는 것이 확인되었으며 제하중시에도 마찬가지로 압자 모서리 부분에서 횡방향의 횡분할(Lateral Crack)이 발생하면서 돌발형의 AE 신호가 검출된다.

Fig.20 과 Fig.21 은 연성모드에서 취성모드로 전환되는 영역으로 생각되는 최초 크랙 발생 직후까지의 압흔 형상과 검출된 AE 신호를 나타내고 있는데 검출된 AE 신호는 압입자가 시험재료에 압입하기 시작하면 노이즈 레벨보다 약간 상위의 카운트 수가 발생되다가 크랙이 발생하는 시점에서는 돌발형의 AE 신호가 검출된다.

Fig.22 와 Fig.23은 크랙이 발생하기 전까지 압입자가 압입되었을 때의 압흔의 SEM 사진과 검출된 AE 신호를 나타낸다. 위의 결과에서 나타나듯이 크랙이 발생하기 전에는 에너지는 전혀 검출되지 않고 카운트 수에 약간의 변화만이 관찰되고 있다.

본 시스템의 구동특성이나 실험조건 등을 고려하여 상기의 실험결과를 평가, 분석하여 볼 때 본 시스템을 사용한 압입실험에 의해서 얻어진 경취성재료인 단결정 실리콘 웨이퍼의 연취성 천이점은 약 500nm 전후인 것으로 확인되었다.

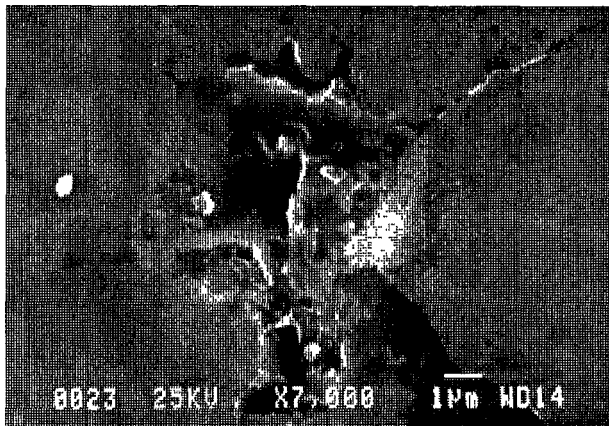


Fig.18 SEM Image  
(Indentation depth  $5\mu\text{m}$ )

```

AE HITS 2288
CUM-CNTS CUM-ENER
000 HITS/MS
0 00:01:00
LOAD HI 0.80
0.80
    
```

```

1E4
1E2
1
HITS vs CHANNEL
REPLAY DONE
    
```

# <CR> =SCREEN

F1 Pause Replay  
at TIME MARK

AltF1 Clear all  
screen's graphs

F2 Show the CRT  
line dump data

F3 Redraw All  
screen's graphs

F5 PRINT SCREEN

F6 USER COMMENT

F7 PREV. SCREEN

F8 NEXT SCREEN

F9 STOP

ESC TO CANCEL

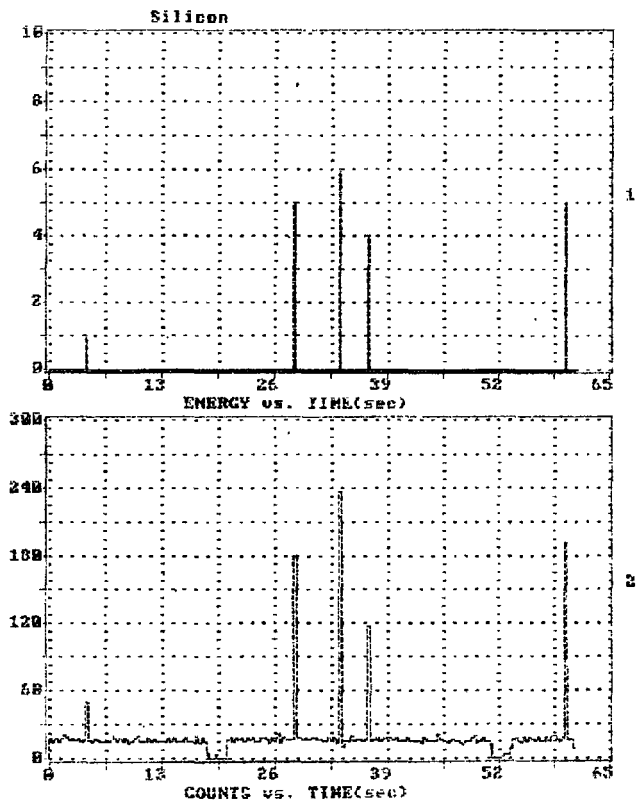


Fig.19 AE Signal (Indentation depth  $5\mu\text{m}$ )

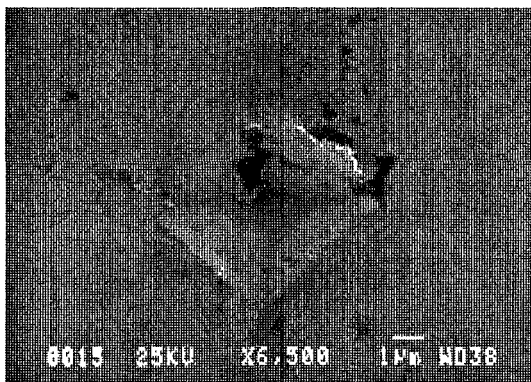
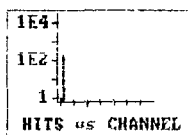


Fig.20 SEM Image (Cracking)

```

AE-HITS  EVENTS
    164      0
CUM-CNIS  CUM-EMER
-----
DDD:HH:MM:SS
  0 08:03:32
LOAD:MI  CYCLES-C
  0.00      0
    
```

3:276, DTA



HITS vs CHANNEL

REPLAY DONE

# <CR> =SCREEN

F1 Pause Replay  
at TIME MARK

AltF1 Clear all  
screen's graphs

F2 Show the CRT  
line dump data

F3 Redraw All  
screen's graphs

F5 PRINT SCREEN  
F6 USER COMMENT  
F7 PREV. SCREEN  
F8 NEXT SCREEN  
F9 STOP

F10 TO CANCEL

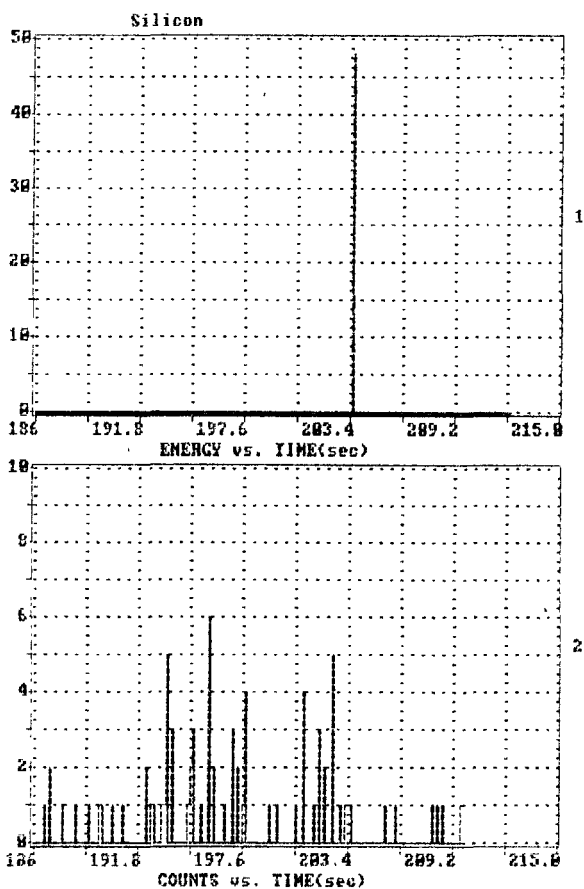


Fig.21 AE Signal (Cracking)

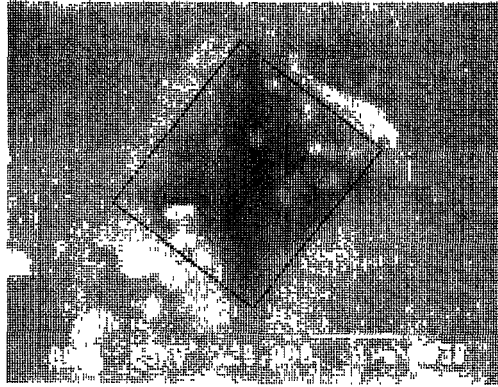
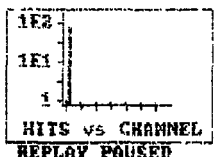


Fig.22 SEM Image (Non-Crack)

```

AE HITS  REQUENES
78
CUM-CNTS  CUM-ENEN
000:00:00:00
0 00:00:44
0.00
0
    
```

0.00 DIA



H <CR> =SCREEN

- F1 Pause Replay at TIME MARK
- AltF1 Clear all screen's graphs
- F2 Show the CRT line dump data
- F3 Redraw All screen's graphs
- F5 PRINT SCREEN
- F6 USER COMMENT
- F7 PREV. SCREEN
- F8 NEXT SCREEN
- F9 RESUME
- ESC TO CANCEL

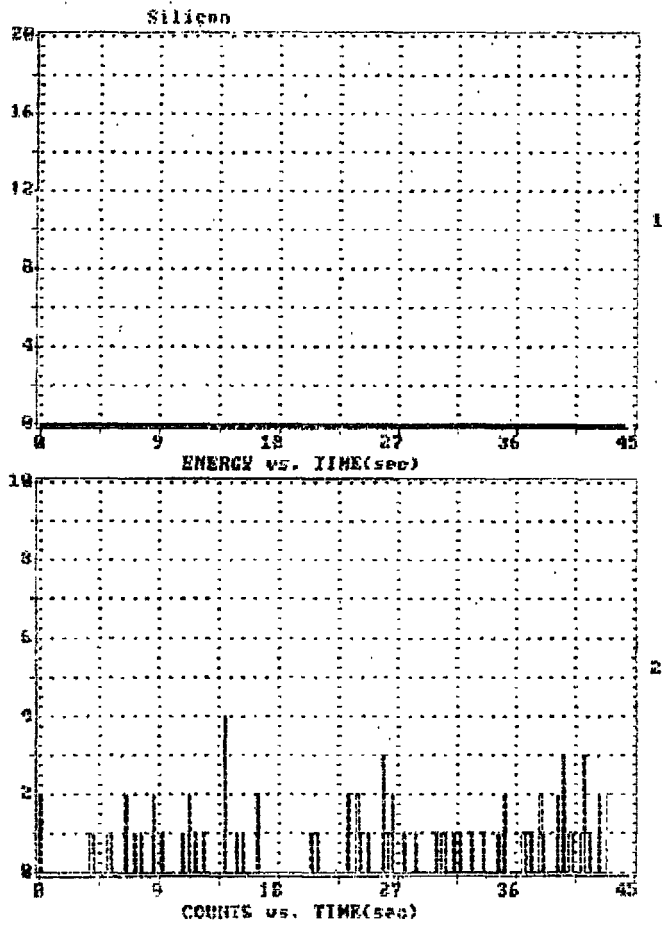


Fig.23 AE Signals (Non-Crack)

## 6. 결론

본 연구에서는 신경회로망 제어기와 PID제어기의 장점을 이용한 신경회로망-PID 병렬제어기를 이용하여 압전구동시스템의 동적 모형이나 히스테리시스 모델을 구해야 하는 과정을 생략하였고, 전체 구동시스템의 동특성을 실시간적으로 자가학습(self-learning) 시켜서 히스테리시스와 같은 비선형문제를 보상하도록 하였다. 그리고, 실제실험을 통하여 제안된 신경회로망-PID 제어기가 PID 제어기 만을 사용하였을 때 보다 성능이 향상됨을 보였다. 그리고, 개발된 시스템의 응답성, 위치결정능력 및 반복성을 확인하기 방법으로 취성재료인 단결정 실리콘 웨이퍼의 연취성 천이영역 검출을 위한 미소압입실험에 AE법을 병용하여서 취성재료의 미세파괴거동을 관찰하기 위한 실험을 수행하였다. 본 논문에서 압전구동기의 추종 오차는 평균적으로 50nm 정도이다. 향후, 보다 지능적인 학습알고리즘을 신경회로망에 적용시키고 실제 위치를 감지하는 위치센서를 LVDT에서 정전센서(capacity sensor)로 대체하여 추종오차를 10nm 이하로 향상시킬 예정이다.

## 감 사

본 연구는 “과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가 연구센터”의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- [1] S. Jung and S. Kim, "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feedforward model-reference control", Precision Eng. P. Ge and M. Jouaneh, Vol.16, No.1, pp.49~55, 1994
- [2] C. V. Newcomb and I. Flinn, "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators", Electronics Letters, Vol.18, No.11, May, pp.442~444. 1982
- [3] H. Kaizuka and B. Sui, "A simple way to reduce hysteresis and creep when using piezoelectric actuators", Japan J. Appl. Phys, Vol.27, No.5, pp.773~776, 1988
- [4] M. Tanaka, Z. W. Jiang and S. Chonan, "Force Control of a Flexible Finger with Distributed Force Sensors and Piezoelectric Actuators", Proceedings of the 1st International Workshop on dvanced Mechatronics, pp.237~241, 1995.
- [5] P. Ge and M. Jouaneh, "Tracking Control of a Piezoceramic Actuator", IEEE transactions on control systems technology, Vol. 4, No. 3, 1996.
- [6] Q. H. Max Meng, "A Neural Network Adaptive Controller For Robots with Unknown Dynamics", Proceeding of 1993 International Joint Conference on Neural Networks.
- [7] T. Yabuta, and T. Yamada, "Possibility of Neural Networks Controller for Robot Manipulator", IEEE, 1990.

- [8] 이상원 “학습하는 기계 신경망”, Ohm Company, 1995.
- [9] Jacek M. Zurada “Introduction to Artificial Neural Systems”, West Publishing Company, 1992.

