

## 압전전압 제환에 의한 미세구동 연삭테이블의 개발

남 수 룡\*, 김 정 두\*\*

### A Development of Micro-Positioning Grinding Table Using Piezoelectric Voltage Feedback

Soo-Ryong Nam\* and Jeong-Du Kim\*\*

#### ABSTRACT

A micro positioning system using piezoelectric actuators have very wide application region such as ultra-precision machine tool, optical device, measurement system. In order to keep a high precision displacement resolution, they use a position sensor and feedback the error. From the practical point of view, a high-resolution displacement sensor system are very expensive and difficult to guarantee such sensitive sensors work properly in the hard operation environment of industry.

In this study, a micro-positioning grinding table which does not require position sensor but uses piezoelectric voltage feedback, has been developed. It is driven by hysteresis-considering reference input voltage which calculated from computer and then uses actuator/sensor characteristics of piezoelectric materials. From the result of experiments we proved a fast and stable response of micro-positioning system and suggested efficient technique to control the piezoelectric actuator. And through grinding experiments, it is revealed that a characteristics of ground surfaces transient to plastic deformation as extremely small depth of grinding.

**Key words** : Piezoelectric Voltage(압전 전압), Hysteresis Loop(이력 곡선), Micro-Positioning Grinding Table(미세 구동 연삭 테이블), Ductile Mode Grinding(연성모드 연삭)

#### I. 서 론

최근 항공 우주산업, 메카트로닉스 산업 등의 발달로 인해 경취재료의 연성모드 가공이나 실리콘 웨이퍼의

경면 다듬질 가공등은 고부가 가치 기술로써 매우 중요하게 인식되고 있으며, 이러한 초정밀 가공을 위해 연삭깊이 또는 절삭 깊이가 마이크로미터 이하에서 이루어질 수 있는 미세이송능력을 가진 공작기계가 요구되

\* 한국과학기술원 정밀공학과 대학원  
 \*\* 한국과학기술원 정밀공학과, 정희원

고 있다. 미세이송 기구로 대표적인 것 중의 하나는 압전소자를 이용한 미세 이송기구라 할 수 있으며, 비교적 쉽게 마이크로미터 이하의 이송 분해능을 낼 수 있고 기계적 이송장치에서 발생하는 백래쉬, 스틱슬립 등의 문제점을 해결할 수 있는 장점으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 큰 발생력을 낼 수 있는 적층형 압전소자를 이용한 것에는 연삭기의 연삭깊이 미세조절용 연삭 테이블,<sup>(1)</sup> 주사 터널링 현미경의 탐침 이송 기구,<sup>(2)(3)</sup> 동흡진 장치<sup>(4)</sup> 등이 있으며 기하학적으로 큰 변위를 일으킬 수 있는 바이폴프형의 경우에는 하드디스크 헤드 지지용 외팔보계의 진동제어 등에 응용되어왔다.

이들 시스템의 공통적인 특징은 압전소자의 미세변형 특성을 이용한 것으로, 압전소자의 큰 이력을 극복하기 위해 위치제어시 변위센서를 사용한 피루프 제어를 한다는 것인데, 시스템을 실용화 한다는 관점에서 볼 때 높은 분해능의 변위센서를 사용함으로써 시스템의 제작 비용이 고가이고, 또한 열악한 현장의 사용환경을 고려해 볼 때 고정도의 변위센서가 제대로 성능을 발휘하도록 하는 것도 매우 어려운 일이다. 따라서, 본 연구에서는 압전소자의 액츄에이터 및 센서의 성질을 이용하여, 별도의 변위센서를 사용하지 않고, 안정적인 미세 이송을 할 수 있는 구동장치로써 압전구동 연삭테이블을 개발하고자 한다.

## 2. 압전소자의 구동 메카니즘

전왜(Electrostriction)현상에 의해 나노미터 수준의

분해능으로 변위를 발생하는, 압전구동 장치는 Fig. 1 (a),(b)에 나타난바와 같이 압전방정식과 힘의 평형방정식에 의해 기계적으로는 등가 2차 시스템으로, 전기적으로는 압전소자 구동용 전원의 출력측 임피던스와 압전소자의 정전용량을 고려하여 1차 시스템으로 나타난다.<sup>(5)</sup> 이 시스템을 블록선도로 나타내면 Fig. 2(a)와 같은데, 그 특징은 구동기에 의한( $F_i$ )으로서 힘이 작용하면 비례적인 역전압이 발생하여 구동기 앰프의 출력전압을 저하시키며, 인가된 전압을 그에 상응하는 변위로 전환시켜주는 척도를 나타내는 압전상수( $d_{33}$ )와 압전소자의 정전용량( $C_0$ )이 인가전압의 크기에 따라 변하므로 압전소자의 발생변위에 이력을 일으키고, 동적 거동에서 비선형 특성을 나타낸다는 것이다.<sup>(5)</sup>

이러한 비선형적인 특성을 해결하기 위한 일반적인 방법은 변위센서를 사용하여 오차를 보상하는 것이지만, 구동기에 이력을 제거 할 수 있는 특정전압을 인가하고, 압전전압을 오차발생의 척도로 보고 보상회로를 구성하는 것도 위치제어의 한 방법이 될 수 있다. Fig. 2(b)는 이력곡선으로부터 압전구동기에 위치오차가 존재하지 않도록 컴퓨터상에서 소프트웨어적으로 구현한 기준인가전압 산출방법을 나타내었다. 즉, 압전구동기의 이력을 미리 실험으로 파악한 후 Fig. 2(b)와 같이 발생 변위와 해당 전압간의 관계를 미리 정의하여 압전구동기의 작동조건을 입력하면 이력 선도로부터 그에 해당하는 기준전압을 인가하고, 압전소자가 액츄에이트뿐 아니라 센서로서도 사용되는 것에 착안하여 구동기의 변위 발생에 오차를 유발하는 외부하중의 침입시에 생

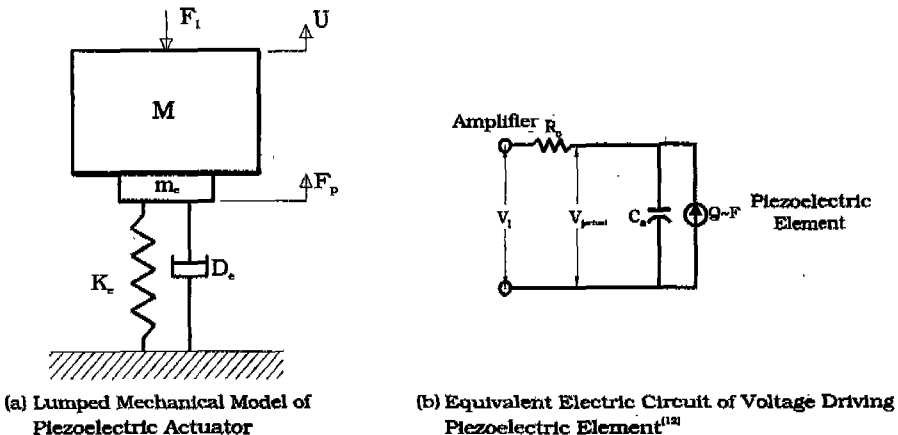
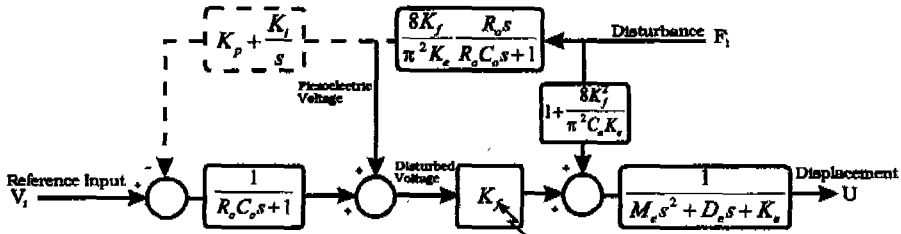
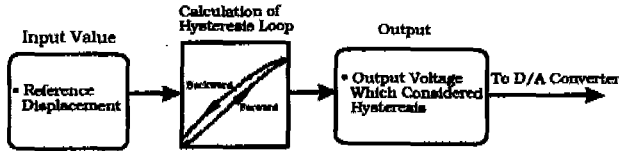


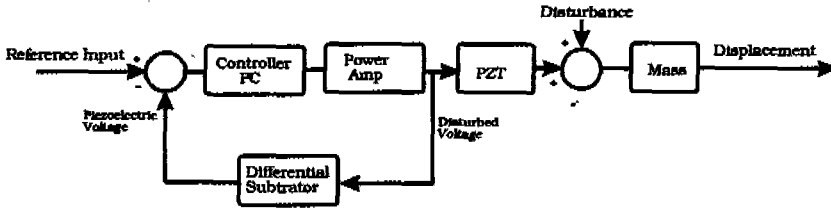
Fig. 1 Mechanical, Electrical Model of Piezoelectric Actuator



(a) Block Diagram of Micro Positioning System Control



(b) Concept of Piezoelectric Voltage Control which considered hysteresis



(c) Block Diagram of Micro Positioning System Control

Fig. 2 Block Diagram of Piezoelectric Voltage Controlled Micro-Positioning System

성되는 압전전압을 측정하여 구동기 앰프에 항상 원하는 전압을 유지할 수 있도록, Fig. 2(c)에 나타난 바와 같은 제어루프를 구성하면 된다. 식 (1)은 압전전압을 이용한 보상회로를 꾸민 Fig. 2(a)의 점선으로 표시한 비례-적분제어기까지 포함한 전달 함수를 나타낸다. 이 전달 함수에 대한 안정성 및 응답특성은 Fig. 3에 나타

내었다. 시뮬레이션에서 압전소자의 정전용량의 변화는 고려하지 않았고, 감쇠계수는 이력곡선으로부터 구한 등가 점성감쇠계수이다. 위 시스템은 개루프이므로 항상 안정적이며, Fig. 3은 38V의 전압과 3N의 계단함수 외란이 동시에 시스템에 인가될 때의 응답이다.

$$U = \frac{(K_f T s + K_e)}{T^2 M s^4 + (T^2 D_e + 2 T M) s^3 + (T^2 K_e + 2 T D_e + M) s^2 + (2 K_e T + D_e) s + K_{el}} V_i \quad (1)$$

$$+ \frac{\frac{8 K_f^2}{\pi^2 K_e C} s^3 + \left\{ T^2 + \frac{8 K_f T}{\pi^2 K_e} \left( K_f R_o + \frac{2}{C_o} \right) \right\} s^2 + \left\{ 2 T + \frac{8 K_f}{\pi^2 K_e} \left( K_p R_o - K_f + \frac{1}{C_o} \right) \right\} s + \left( 1 - \frac{8 K_f^2 K_f R_o}{\pi^2 K_e} \right)}{T^2 M s^4 + (T^2 D_e + 2 T M) s^3 + (T^2 K_e + 2 T D_e + M) s^2 + (2 K_e T + D_e) s + K_e} F_i$$

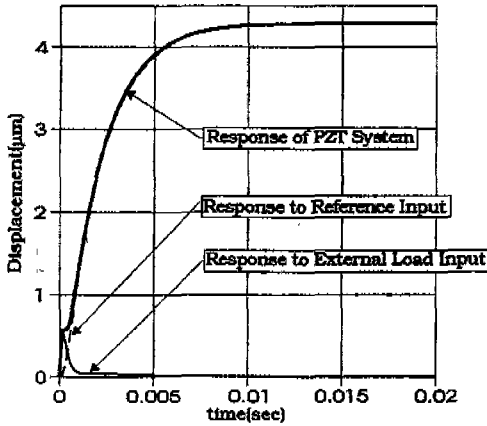


Fig. 3 Simulation of Piezoelectric Driving System Response

여기에서,

$$K_f = \frac{\hat{k}d_{33}A}{l} V_i, \quad M_e = \frac{\rho Al}{2}, \quad K_e = \frac{\pi^2}{8l} \hat{k}A,$$

$$\frac{\hat{k}}{k} = \left(1 + \frac{\hat{k}d_{33}}{\epsilon_3}\right), \quad M + M_e \approx M, \quad T = R_o C_o$$

Fig. 4(b)의 외란 발생으로 인한 응답에서, 압전소자의 일반적인 특징이 전기적으로 콘덴서와 같은 역할을 하므로 정적인 하중이 인가될 때에는 전압이 발생하지 않는다는 것인데, 압전전압을 적분제어기로 보상하고 식 (2)와 같이 계인을 외부하중이 탄성체로서의 압전소자에 유발하는 발생변위와 상쇄되도록 설정하였다. 비례계인은 천이영역에서의 응답의 안정성에 기여하므로 시행착오적으로 설정하였는데, 그 기여도는 비교적 작으며 적분계인의 1%로 하였다. 시뮬레이션의 각 변수는 Table 1,2에, 계인값은 Table 3에 나타내었다.

$$1 - \frac{8K_f^2 K_i R_o}{\pi^2 K_e} = 0, \quad K_i = \frac{\pi^2 K_e}{8K_f^2 R_o} \quad (2)$$

### 3. 압전구동 장치의 실험 및 연삭테이블의 제작

압전구동기의 성능 및 이력을 파악하고 연삭테이블의 제작 후 성능 실험을 위해 Fig. 4와 같은 실험장치를

Table 1 Characteristics of Piezoelectric Actuator

Size(mm)	10×10×18(144layers)
Static Cpactance(nF)	6500
Piezoelectirc Constant d <sub>33</sub> (m/V)	635e-12
Density(g/cm <sup>3</sup> )	8
Elastic Constant(N/m <sup>2</sup> )	5.5e10

Table 2 Parametes of Simulaiton

Kf	20.794
M	20
De	20144
Ke	1.843e8
Co	6.5e-6
Ro	300

Table 3 Optimum Control Gain of Piezoelectric Actuator System

System	P Gain	I Gain
(a) Simulation	17.5	1752.9
(b) Close loop(Real System)	0.5	50
(c) Open loop(Real System)	5	100

구성하였다. 구동기를 안정 시키고 인장에 약한 특성을 보완하기 위해 예압을 받는 수직이송기구 내부에 압전소자를 장착하고 외부방진을 위하여 공압방진베드 위에 설치하였다. 구동시스템의 각종 신호는 A/D, D/A 변환기를 장착한 PC를 통해 처리하였으며, 질량체 상부에 설치된 외란 발생장치를 이용해 압전 구동기에 계단 함수 형태의 외란을 가하여 압전구동기의 위치제어 성능을 실험할 수 있게 하였다.

Fig. 5는 실험을 위해 제작된 연삭깊이 미세조절용 연삭테이블 구동시스템이다. 486 IBM-PC를 이용하여 압전전압, 구동기의 변위, 공작기계의 진동 등의 신호를 모니터링하고, 인가전압의 형태를 사인 함수로 하여 압전구동기를 가진시키거나, 압전소자의 이력을 고려한 전압을 인가할 수 있도록 하였다. 압전 구동기의 드라이버 내부에는 고전압용 연산증폭기를 사용한 압전소자 구동용 전원과 압전전압 분리용 감산회로, 센서의 증폭기 등이 있으며 A/D, D/A 변환기를 통하여 컴퓨터와

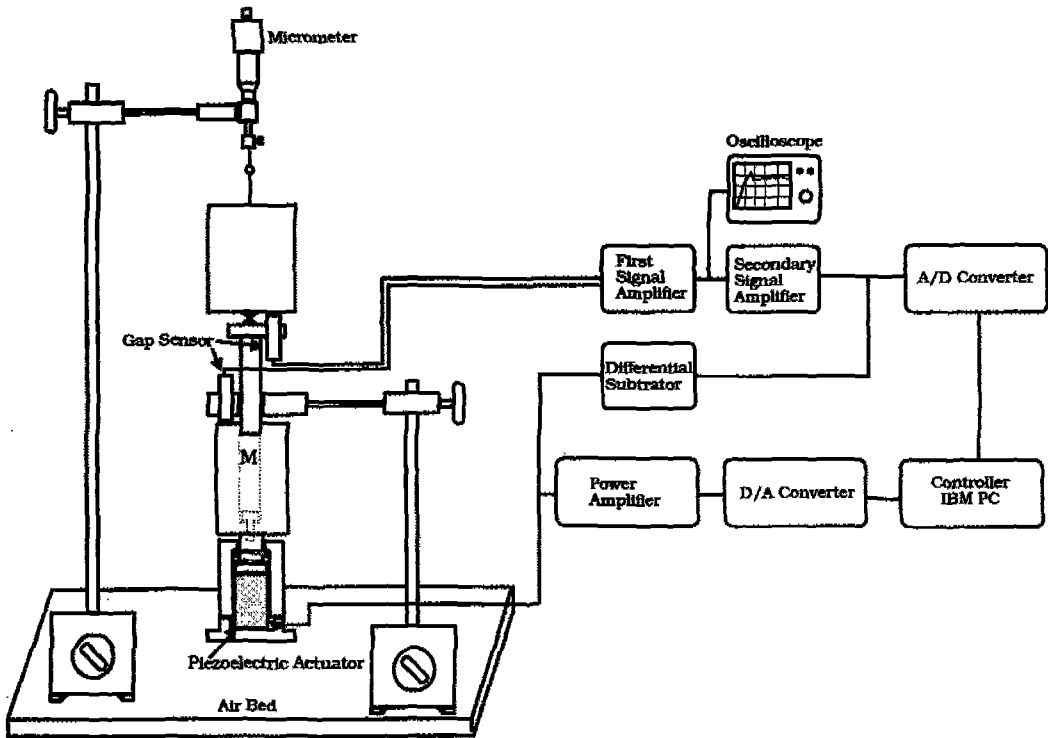


Fig. 4 Schematic Diagram of Piezoelectric Actuator System

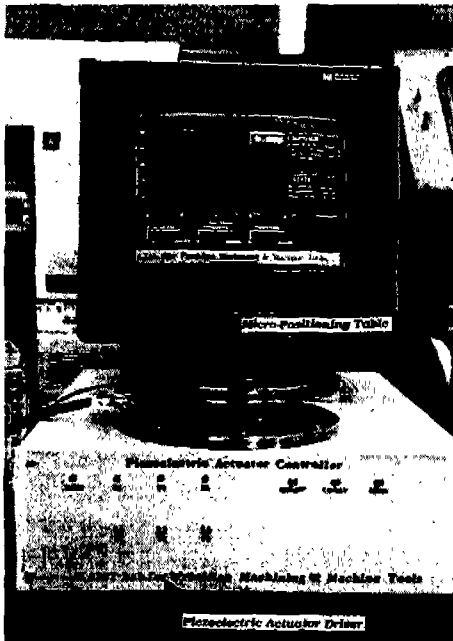


Fig. 5 Piezoelectric Driven Grinding Table

접속되어 있다.

Fig. 6에는 압전 구동테이블의 내부도를 나타내었다. 연삭테이블은 세개의 압전구동 수직이송 기구로 지지되며, 압전전압 궤환 방식으로 제어되고 발생변위의 확인용으로 와전류형 간극센서를 사용하였으며, 연삭테

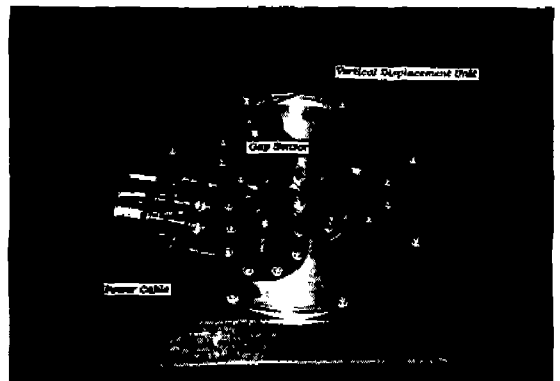


Fig. 6 Internal Setup of Micro-Positioning Grinding Table

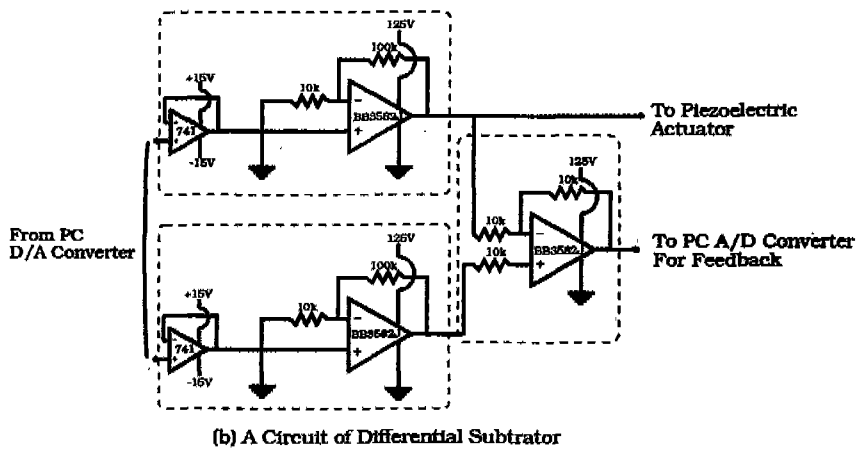
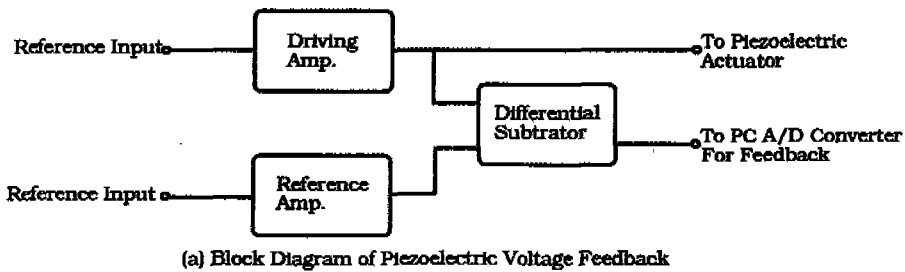


Fig. 7 A circuit of high voltage amplifier for piezoelectric actuator and piezoelectric voltage feedback

이들의 분해능은  $0.5\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이러한 압전구동 연삭테이블은 경취재료의 연성모드 가공을 위한 연삭깊이 미세 조절용으로 사용될 수 있다. 또한 압전소자 구동전원으로부터 순수 압전 전압을 산출하기 위해 Fig. 7과 같이 연산증폭기(Op-amp)의 차동감산 회로로부터 압전전압을 궤환받는 회로를 구성하고 변위센서에 의한 위치제어와 비교실험을 하였다.

#### 4. 압전 구동 테이블의 연삭 성능 실험

연성모드 연삭을 하기위한 실험장치는 연삭깊이를 나노미터 수준으로 제어할 수 있어야 하며, 공구와 공작물의 상대변위의 변화를 최소화하고 연삭숫돌을 양호한 상태로 유지하여 연삭깊이 및 연삭력을 일정하게 하여야 한다.<sup>(6)</sup> 따라서 압전구동 연삭테이블을 이용하여 미세 연삭깊이를 조절하며, 공구의 상태를 최적으로 유지하기 위해 연속 전해드레싱 장치를 사용하였다.

Fig. 8은 본 실험 장치의 구성도이다. 압전 구동 미

소이송 연삭테이블은 연삭기의 자기척(Magnetic Chuck)위에 고정되어 있고 그 위에 연삭력을 측정할 수 있도록 공구동력계를 설치하고 공작물을 고정시켰으며, 가공 중에는 전해드레싱을 실시하였다. Table 4는

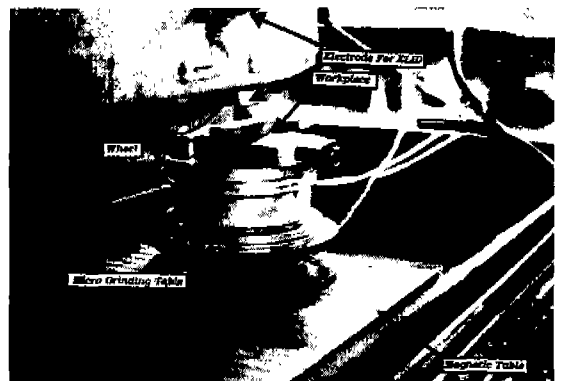


Fig. 8 Experimental Setup for Ductile Regime Grinding

Table 4 Specification of Micro Positioning Grinding Table

Size(mm)	Diameter 220, Height 54.5
Input Voltage(V)	-15~110
Driving Range(μm)	13 (D/A output 0~10V) 6.5(D/A output 0~ 5V)
Resolution(μm)	0.5(measured) 3.17e-3(D/A output 0~10V, Possible not measured) 1.585e-3(D/A output 0~5V, Possible not measured)

Table 5 Grinding Conditions

Grinding Machine	Surface Grinding Machine (Whaceon WGS-64)
Wheel	D4000N100M3
Wheel Speed	1700rpm
Table Speed	5m/min
Wheel for truing	GC180(Break Type Truier)
Workpiece	Ferrite
Power Source	Ip=10A, τon=10, τoff=10μsec
Electrode	Copper

Table 6 Constants for Hysteresis Loop

Direction	Forward	Direction	Backward
F11	-6.985421139590995e-010	B11	-4.552492675557121e-010
F21	1.904302574720577e-007	B21	1.483791256991934e-007
F31	-1.916931328277198e-005	B31	-2.125999326715789e-005
F41	5.1161546546422172e-004	B41	1.433933577180438e-003
F51	1.227700458133560e-001	B51	7.015094534712238e-002
F61	4.279793988881664e-002	B61	5.894988681107062e-002
F12	6.490815261774926e-010	B12	-2.984551823466195e-010
F22	1.769756495853477e-007	B22	9.862014433722472e-008
F32	-1.779012039910072e-005	B32	-2.021943246366318e-005
F42	2.757932453650912e-004	B42	1.663289809857115e-003
F52	1.563923238984797e-001	B52	8.023825411254014e-002
F62	8.764124297787161e-001	B62	-8.927675085903882e-003

미소 이송 연삭테이블의 사양이며, Table 5는 본 실험에 사용한 장비와 드레싱 조건이다.

### 5. 실험결과 및 고찰

Fig. 9는 인가전압을 108V까지 선형적으로 증가시킨 후 다시 0V로 감소시켰을 때 나타나는 압전 구동테이블의 이력실험 결과를 나타내었다. Fig. 9(a)는 상면의 하중이 65N인 연삭테이블의 이력곡선과 하중을 가하지 않았을 때의 이력곡선이며 (b)는 이력곡선을 커브 피팅한 곡선으로 정의식을 식 (3)과 Table 4에 나타내었다.

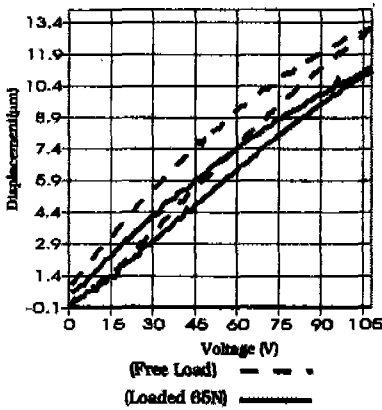
$$U(V) = F_{i1}V^5 + F_{2i}V^4 + F_{3i}V^3 + F_{4i}V^2 + F_{5i}V + F_{6i}(\text{Forward})$$

$$U(V) = B_{i1}V^5 + B_{2i}V^4 + B_{3i}V^3 + B_{4i}V^2 + B_{5i}V + B_{6i}(\text{Backward})$$

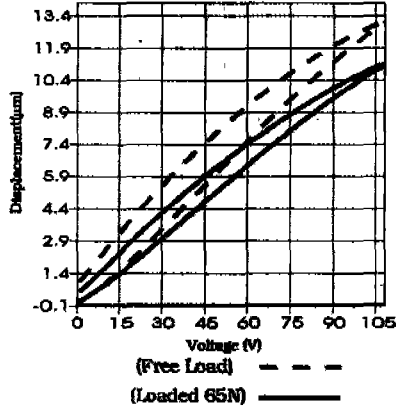
$$i = 1, 2, 1 := \text{Free load}, 2 := \text{Loaded 65N} \quad (3)$$

압전소자도 기계적인 관점에서 볼 때 고유의 강성과 점성계수를 가진 탄성체이므로 하중이 가해지면 발생변위가 감소한다. 위 실험결과로부터, 압전소자에 가해지는 예압의 상태에 따라 신장량이 변하므로 같은 크기와 용량의 압전소자를 사용하더라도 적용 시스템에 따라 이력을 없애기 위한 이력곡선의 기준이 달라져야 한다는 것을 알 수 있다. 식 (3)에 근거하여 Fig. 9(c)와 같이 연삭테이블 발생변위의 이력을 고려한 입력변위에 대한 출력인가전압을 산출할 수 있는데, 이런 형태의 전압을 압전소자에 인가할 경우 압전소자의 이력은 Fig. 9(a)의 최대 20%에서 Fig. 9(d)의 최대 6%까지 줄어들었음을 알 수 있다.

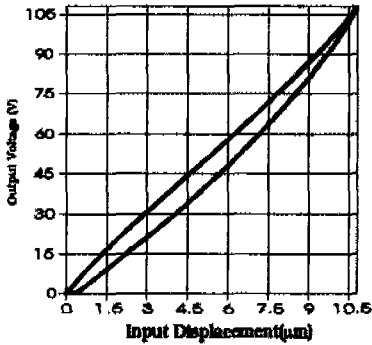
Fig. 10은 38V의 계단함수 입력이 가해질 때의 응답을 나타낸다. (a), (b)는 변위궤환에 의한 응답을 (c), (d)는 압전전압 궤환에 의한 응답을 3μm 지점에서부터 외란이 발생하도록 한 경우와 함께 나타내었다. 시뮬레이션에 비해 변위궤환에 의한 경우는 정상상태에 도달하는 시간이 5배정도 실험치가 늦게 나타났고, 변위궤환에 의한 경우는 3배정도 실험치가 늦게 나타났으며, 천이 영역에서의 거동은 실험치가 시뮬레이션에 비해 오히려 우수하게 나타났다. 응답속도에 대한 실험결과와 시뮬레이션과의 차이는 압전소자 구동전원의 출력속도 임피던스와 압전소자의 정전용량이 실제 시스템이 시뮬레이션 할 때 정한 값보다 다소 크게 나타났기 때문인 것으로 생각된다. 천이영역에서 감쇠계수가 실제 시스템이 더 크게 나타나 거동이 보다 안정적인 것은 시뮬



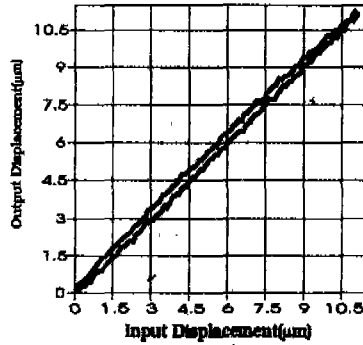
(a) Hysteresis Loop of Piezoelectric Driven Micro Positioning Grinding Table (Real System)



(b) Hysteresis Loop of Piezoelectric Driven Micro Positioning Grinding Table (Curve-Fitting of Real System)



(c) Voltage Variation of Piezoelectric Driven Micro Positioning Grinding Table (Considering Hysteresis of Piezoelectric Actuator)



(d) Displacement of Piezoelectric Driven Micro Positioning Grinding Table (Considering Hysteresis of Piezoelectric Actuator)

Fig. 9 Hysteresis Loop of Piezoelectric Driven Grinding Table

레이션시 감쇠 계수 설정을 압전소자의 이력곡선이 둘러싼 부분을 에너지 손실량이라 가정하고 구한 등가감쇠계수를 사용하였는데 그것이 실제 시스템과 오차를 보였고, 압전소자를 보호하는 수직이송 기구에서의 마찰의 영향도 작용하였기 때문이라 생각된다. 또한, 변위계환과 압전전압 계환에 의한 응답을 비교하면 압전전압 계환에 의한 방법이 입력전압의 계환효과에 의해 응답속도가 빨라 압전전압 계환에 의한 위치제어 방법도 효과적인 제어방법임을 알 수 있다.

Fig. 11은 연삭깊이 따른 표면의 성상을 2000배 확대하여 SEM사진으로 나타낸 것이며, 사진에 나타난 A,B,C는 각각 취성파괴, Grinding Mark로서 소성 변형에 의한 연성모드화 가공, 전가공의 영향을 나타낸

다. 연삭깊이가 1 μm이하에서는 가공면에 전체적으로 연성모드 가공의 흔적이 나타나지만 취성파괴의 영향이 지배적이고 가공표면의 상태는 많이 개선되지 않은 것으로 보여진다. 그러나 (d), (e)의 경우는 연삭깊이가 0.5 μm와 0.3 μm에 해당하는 기준전압을 인가했을 경우에는 취성파괴가 거의 일어나지 않은 비교적 확실한 연성모드 가공의 형상을 볼 수 있다.

## 6. 결 론

압전구동에 의한 연삭깊이 미세조절장치의 연삭실험 결과 연삭깊이 미세조절에 따른 표면거칠기의 향상과 미세 연삭깊이를 적절하게 조정하는 것이 가능하였고,



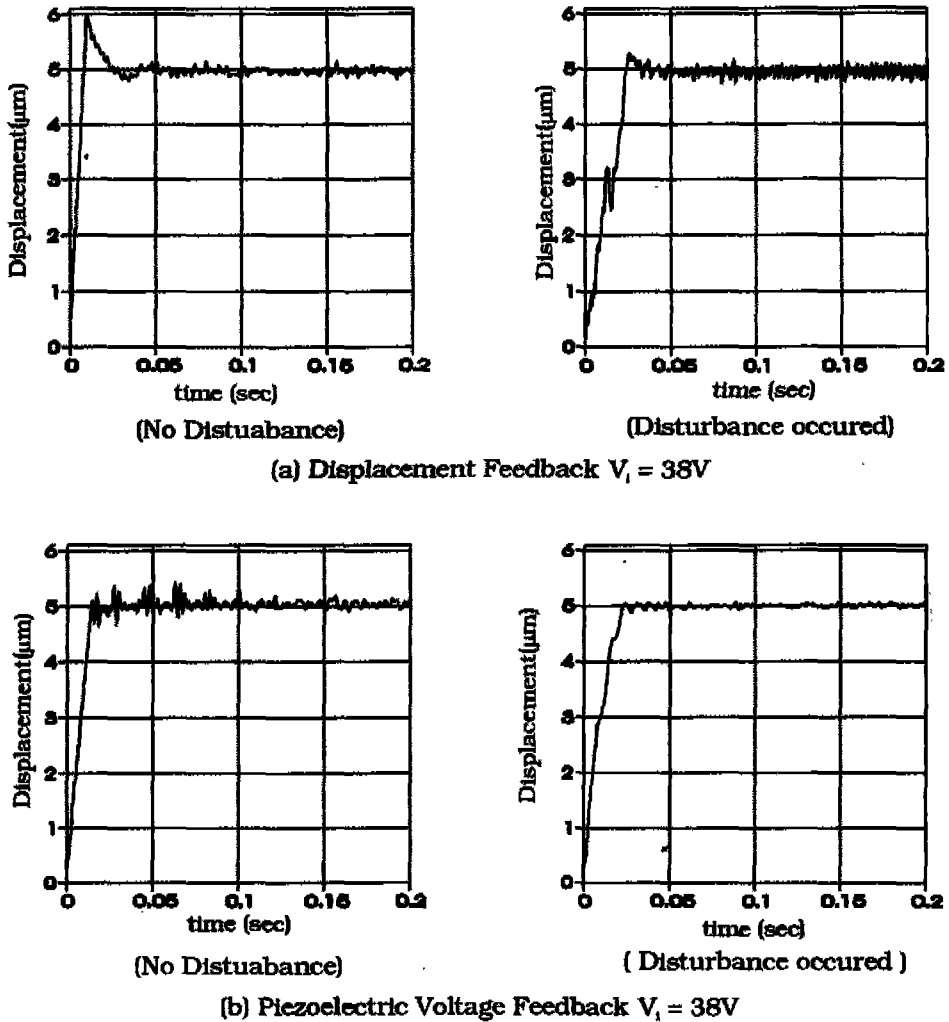


Fig. 10 Step Response of Piezoelectric Actuator

범용의 공작기계에서도 미립자의 연삭 슷들을 사용하고 드레싱 상태가 양호하다면 미세 연삭깊이 조절에 따라 연성모드 가공이 가능함을 알 수 있다. 이상의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 이력을 고려한 압전소자의 발생변위를 계산하여 구동전압을 인가하면 압전구동 장치의 이력을 크게 줄일 수 있다.

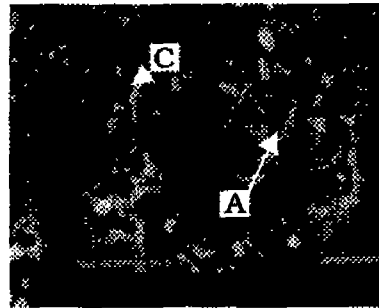
(2) 압전 구동기에 외란이 작용할 때, 외란 인가시에 발생하는 압전전압을 비례-적분 제어기로 보상하여 위치 오차를 제거할 수 있다.

기호해설

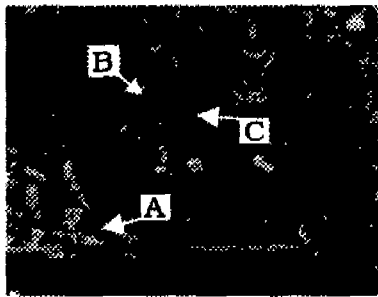
- $A(m^2)$  : 압전소자의 단면적
- $C_0(\mu F)$  : 압전소자의 정전용량
- $D_0(N/sec)$  : 압전소자의 등가 감쇠계수
- $d_{33}(m/v)$  : 압전상수
- $F_1(N)$  : 외부 하중
- $K_f(N/v)$  : 압전소자의 등가힘 계수
- $K_s(N/m)$  : 압전소자의 등가 스프링 상수
- $k(m^2/N)$  : 압전소자의 탄성 계수
- $l(m)$  : 압전소자의 길이



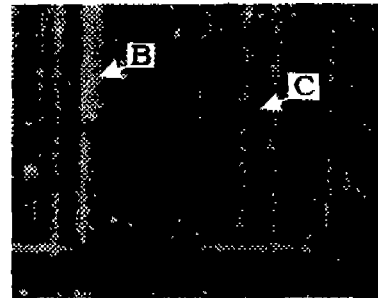
(a)  
d= 30μm



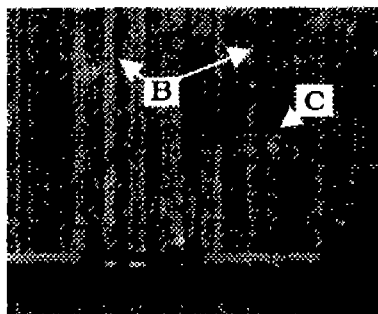
(b)  
d= 1 μm



(c)  
d= 0.75μm



(d)  
d= 0.5μm



(e)  
d= 0.3μm

**A** → Brittle Fracture

**B** → Grinding Mark

**C** → Premier Crack

Wheel: D400N100M3, Wheel Speed: 1700rpm  
Dressing Power:  $I_p=10A$ ,  $\tau_{on}=10$ ,  $\tau_{off}=10\mu sec$   
Workpiece: Ferrite

Fig. 11 SEM Photograph of Ground Surface

$M(\text{kg})$  : 하중  
 $M_0(\text{kg})$  : 압전소자의 등가 질량  
 $R_0(\Omega)$  : 구동전원의 출력측 저항  
 $U(\text{m})$  : 변위  
 $V_i(\text{V})$  : 입력전압  
 $\epsilon(\text{F/m})$  : 압전소자의 유전율  
 $\rho(\text{g/cm}^3)$  : 압전소자의 밀도  
 $d(\mu\text{m})$  : 연삭깊이

### 참고문헌

1. Z. Zhong, T. Nakagawa, 1992, Development of a Micro-Displacement Table for Ultra-Precision Machining and Grinding for Gurved Surfaces by the Use of It, JSPE, Vol. 26, No. 2, pp.102-107
2. Seung-Bae Jung and Seung-Woo Kim, Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuator by feed-forward model-reference control, 1994, Precision Engineering, Vol.16, No.1, pp.49-55
3. 정승배, 이용호, 김승우, 터널링 효과를 이용한 초미세 가공표면의 형상측정, 1993, 대한기계학회논문집, 제17권, 제7호, pp.1731-1739
4. 정승배, 전압구동시 압전구동기의 취치결정 정도에 대한 비선형 모델링에 관한 연구, Ph.D Thesis KAIST, pp.23-94
5. H.S.Tzou, 1991, Design of a Piezoelectric Exciter/Actuator for Micro-Displacement Control: Theory and Experiment. Precision Engineering Vol.13, No.2, pp.104-110
6. 김석구, 1993, 압전형 구동기를 갖는 이동기구의 운동해석 및 제어, M.S.Thesis, KAIST
7. C.V.Newcomb, 1982, Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators, Electronic Letters Vol.82 No.11, pp.442-444
8. Y.Namba, M.Abe, and A.Kobyashi, 1993, Ultraprecision Grinding of Optical Glasses to Produce Super-Smooth Surfaces, Annals of the CIRP, Vol.42/1, pp.417-420