

## 압전소자 구동장치를 이용한 로봇 손목기구의 개발

◦ 조영화      문창렬      조형석  
한국과학기술원 생산공학과

### Development of a Robot Wrist Using a Piezo Actuator

Y. H. Joh      C. Y. Moon      H. S. Cho  
Dept. of Production Engineering  
KAIST

#### ABSTRACT

Having very small linear displacement, piezoelectric actuators have been restricted in robotic application as positioning devices. In this paper, a mechanical amplifier was developed to enhance the displacement of piezoelectric actuator and the corresponding driving circuit was designed. This equipment was integrated as a robotic wrist having 2 D.O.F micropositioning capability. Each joint was analysed in mechanical and dynamic view points. Experimental result showed that this device has some hysteresis but could be used as vibratory robotic wrist with relatively high frequency. For more fine positioning control, a closed loop approach must be taken into account.

#### I. 서론

최근의 메카트로닉스 분야에서는 기계의 소형화, 고정밀도화 및 고지능화가 급속히 진행되고 있다. 이러한 흐름을 추구하는 과정에서 그 핵심장치인 액츄에이터에 대한 소형, 고속, 고정밀도화가 요구되고 있으나 종래에 액츄에이터로 많이 사용하고 있는 공.유압식 액츄에이터는 유체의 특성상 서브 마이크로 이하의 정밀도를 얻는것이 어렵고 전자식 액츄에이터는 소비전력, 발열, 전자 노이즈(noise)발생등의 여러가지 결점이 있다. 따라서 최근에 형상기억 합금, Mechano-Chemical 재료[1], 자성유체를 응용한 새로운 원리에 기초한 액츄에이터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 압전 액츄에이터도 이러한 흐름의 한가지로 볼수있다.

압전 액츄에이터는 기존의 액츄에이터와 비교할때 많은 장점을 가지고 있는데 기존의 액츄에이터로 많이 쓰이고 있는

전자식 액츄에이터와 비교해 볼때 전자식 액츄에이터가 소비전력이 크고 발열량이 많으며 에너지 변환 효율이 적고 전자 노이즈가 발생하는것 뿐만 아니라 응답성이 그다지 빠르지 않고 구성요소가 복잡한 반면 압전 액츄에이터는 위의 모든점에서 전자식 액츄에이터를 능가하는 특성을 지니고 있다. 이와 같은 성능상의 우위성은 물론 전자식 액츄에이터가 부품수가 많고 또 이때문에 대량생산에 의한 저가격화에 한계가 있지만 압전 액츄에이터는 고체소자이기 때문에 대량생산에 의한 저가격화가 기대 되어질수 있다. 위와 같은 이유에서 압전 액츄에이터는 종래의 전자식 액츄에이터를 대체할 것으로 기대되며 OA 기기와 Mechatronics 관련 기기를 중심으로 여러 분야에서 도입이 검토되고 있다.

본 연구에서는 빠른 응답성을 지니고 서브 마이크로 이하의 정밀도를 쉽게 얻을 수 있는 압전 액츄에이터와 이의 변위를 기구학적으로 증폭 시키는 메카니컬 임프를 사용하여 초정밀 조립을 위한 조립성(Assembly Performance)이 우수한 로봇 손목기구의 개발에 있다. 이를 위하여 기구적 변위 증폭 장치의 설계와 구동회로의 구성 및 제작과 함께 기구의 특성을 파악하는 실험을 행하고 로봇 손목기구로서의 적용 가능성을 검토해본다.

#### II. 압전 액츄에이터의 작동 원리

세라믹스가 평상시에는 딱딱하다해도 온도 변화에 의해 약간의 열팽창을 일으키고, 압력에 의해서도 약간은 수축된다는 것은 주지의 사실이다. 이와 같은 변화가 전계를 인가했을 때 일어나는데 이러한 현상의 설명은 양 이온과 음 이온이 스프링으로 연결되어 결정 격자를 이루고 있는 모델을 도입함으로써 설명 되어질수 있다. 그림 1 은 결정 격자의 일차원적인 스프링 모델을 나타낸다. 전계가 인가되면 전도체가 아닌

한 양이온은 전계 방향으로, 음이온은 역 방향으로 끌려가게 되고, 이것이 용액의 기원이 되어 결정 격자를 변형시킨다.

전계에 의해 야기되는 변형에는 결정 구조로 결정되는 이온간 스프링의 성질에 따라 2종류가 있다. 그림 1의 (a)와 같이 중심 대칭성을 갖지 않는 결정에서는 전계 E에 비례하는 변형량 x를 발생시킨다. 이것이 역 압전 효과로  $x = dE$ 로 표현되고, 여기서 비례 정수 d를 압전 정수라 한다. 한편 그림 1의 (b)와 같은 중심 대칭성 결정에서는 스프링의 비 조화성에 의해 인가되는 전계 E의 자승에 비례하는 변형을 가져 오는데 이를 전의 효과라고 부르고  $x = M E^2$ 으로 표시되는데, 여기서 M은 전의 정수라 한다. 또한 그림 1의 (a)와 같이 자발 분극을 갖는 결정에 큰 역바이어스 전계를 인가하면 이온의 상대 위치가 역전된 또 하나의 안정된 결정 격자로 전이 되는데 이를 분극 반전이라고 하고 큰 변형을 동반한다. 특히 이러한 물질을 강 유전체라고도 한다.

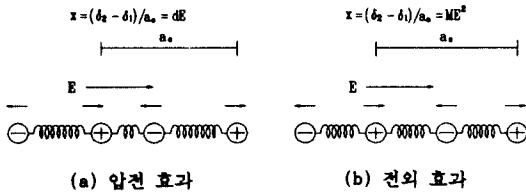


그림 1. 압전 액츄에이터 결정 격자의 모델

실제의 액츄에이터용 세라믹스에 있어서는 위에서 서술한 압전, 전의 및 분극 반전의 3 기본 요소가 복합된 형태로 나타난다. 이상과 같은 전계 유기 변형 효과를 갖고 있는 압전 세라믹스를 이용한 액츄에이터의 작동 원리를 보면 다음과 같다.

전의 재료인 PZT( $Pb(Zr,Ti)O_3$ )의 경우 체적 변화를 동반하지 않는 것이 많으므로 그림(2)와 같이 종방향으로 신장될 경우 횡방향으로는 수축되고, 종방향으로 수축될 경우에는 역이 된다. 그림(2)에 나타난 바와 같이 분극 방향으로 전계를 가한 경우 같은 방향의 변형을 종효과, 수직 방향의 변형을 횡효과라 한다.

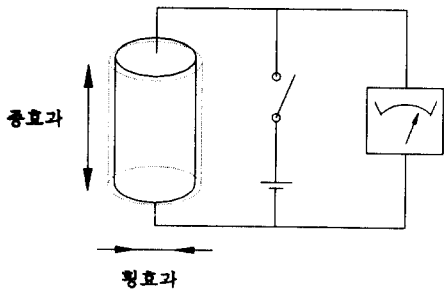


그림 2. 전의 재료의 종효과와 횡효과.

압전 액츄에이터의 종류에 대하여 알아보면, 현재 가장 많이 사용되고 있는 압전 액츄에이터는 적층형과 바이폴프형이 있다. 적층형은 종 효과를 이용한 것으로써 한 장의 세라믹스로부터 종 효과로 얻을수있는 변위는  $0.3\mu m$  정도이지만 적층에 의해 수십  $\mu m$  를 얻을수 있게 된다. 이러한 적층형 압전 액츄에이터는 고가이며 발생하는 변위는 작지만 발생력( $\sim 400kg/cm^2$ )이 크고, 응답 속도( $\sim 100kHz$ )가 빠르며, 전기기계 변환 효율(50%이상)도 클 뿐 아니라 내구성도 뛰어나다( $\sim 10^{11}$  반복회전).

바이폴프형은 횡 효과를 이용하는데, 2장의 세라믹스가 역 방향으로 신축하려는 힘으로 힘 변형을 얻는 액츄에이터이다. 따라서 발생하는 변위는 크지만( $\sim$ 수백  $\mu m$ ) 발생력( $\sim$ 수십 gf), 응답주파수( $\sim$ 수 kHz)는 낮다. 열가이나 내구성이 떨어진다( $\sim 10^8$  반복 회전). [1][3][4][8]

## II. 본론

### II-1. 기구적 변위 증폭 장치

본 연구에서 사용된 압전 액츄에이터는 최대 인가 전압 150 Volt, 이때의 변형량이  $15\mu m$ 인 적층형 압전 세라믹스로 최대 변형량이  $15\mu m$ 밖에 안되므로 이를 로봇 손목 기구의 위치 결정용 구동원으로 사용하기 위해서는 변위를 증폭시켜줄 수 있는 기구적 변위 증폭 장치를 사용하여야 한다.

압전 액츄에이터의 변위를 전달하기 위한 기구적 관절 구조로는 그림 3 과 같은 방식을 사용한다. 즉 그림 3 과 같은

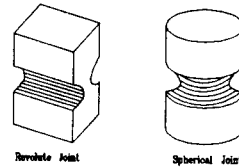


그림 3. 기구적 관절 구조

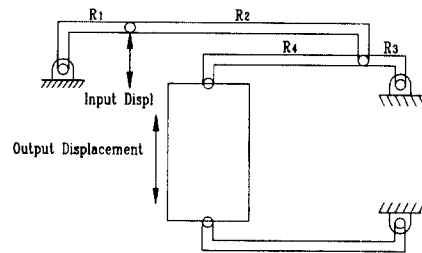


그림 4. 변위 증폭기의 원리

구조에서 노치 부분이 각각 Revolute joint, Spherical joint 등의 역할을 하게 되는데 이와 같은 원리를 이용하여 그림 4와 같이 지렛대의 구조를 갖는 변위 증폭 기구(그림5)를 설계하였다. 이때 변위의 증폭비는 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\varepsilon = \varepsilon_{m1} \varepsilon_{m2} \dots \dots \dots (1)$$

여기서  $\begin{cases} m_1 = 1 + R_2/R_1 \\ m_2 = 1 + R_4/R_3 \end{cases}$

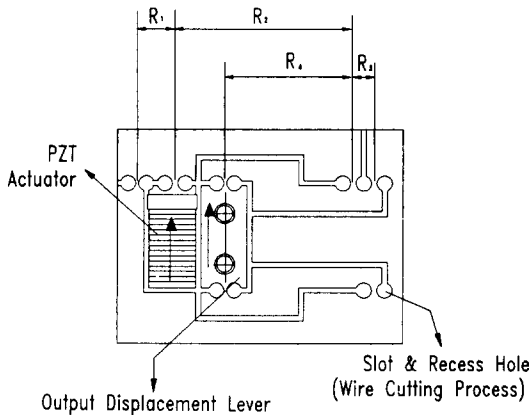


그림 5. 변위 증폭기의 구조

II- 2. 기구적 변위 증폭 장치의 해석

기구적 변위 증폭 장치의 Dynamic Behavior를 해석하고 이를 실험에서 얻은 결과치와 비교해 봄으로써 Dynamic 모델링의 타당성을 검증해 보고 앞으로 변위 증폭 장치를 설계함에 있어 좀 더 개선된 성능을 얻을수 있는 방향을 제시하고자 하였다.

그림 5 와 같은 변위 증폭장치 시스템을 그림 6 과 같이 Eiichi Furukawa 등이 제시한 방법[2]에 따라 변위 증폭 장치의 각 노치 부위를 등가의 Tension spring과 coil spring 으로 치환한 7자유도의 Spring-Mass 시스템으로 가정 하였다(그림 7). 각각의 dimension은 표 1 과 같다.

$$k_b = \frac{2Eb t^{5/2}}{9\pi R^{1/2}} \quad [N/m]$$

$$k_t = \frac{Eb}{\pi(R/t)^{1/2} - 2.57} \quad [N/m]$$

그림 6. 탄성 관절 모델

그림 7 에서 generalized coordinate를  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, y_2, y_3, y_5, y_6$ 로 하면 이 변위 증폭장치 시스템은 식 (2)와 같이 나타내어질 수 있다.

$$M \dot{X} + N X = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

여기서

$$X = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ y_2 \ y_3 \ y_5 \ y_6]^T$$

$$M = \begin{bmatrix} J_{m1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{m2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_{m4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_1(l_{c1}-l_1) & 0 & 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2(l_{c2}-l_3) & 0 & 0 & m_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & -m_4 l_{c2} & 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} N11 & k_{b3} & 0 & N14 & -k_3 l_{c1} & 0 & 0 \\ N21 & N22 & 0 & k_3(l_{c2}-l_3) & N25 & -k_5 l_{c2} & 0 \\ 0 & 0 & N33 & 0 & 0 & -k_8 l_{c2} & N37 \\ k_3 l_2 - k_1 l_1 & 0 & 0 & k_1 + k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ -k_3 l_2 & k_5 l_4 - k_4 l_3 & 0 & -k_3 & k_3 + k_4 + k_5 & -k_5 & 0 \\ 0 & -k_5 l_4 & 0 & 0 & -k_5 & k_5 + k_6 & -k_6 \\ 0 & 0 & -k_7(l_3+l_4) & 0 & 0 & -k_6 & k_6 + k_7 \end{bmatrix}$$

로 정리되고

$$\begin{aligned} N11 &= k_{b1} + k_{b2} + k_{b3} l_{c1} l_1 + k_1 l_{c1} l_1 \\ N21 &= k_{b3} + k_3(l_{c2} - l_3) l_2 \\ N22 &= k_{b3} + k_{b4} + k_{b5} + k_5 l_{c2} l_4 + k_4 l_3 l_{c2} \\ N33 &= k_{b6} + k_{b7} + k_7 l_{c2}(l_3 + l_4) \\ N37 &= k_8 l_{c2} - k_7 l_{c2} \end{aligned}$$

$$0 = \begin{bmatrix} -k_2(l_{c1} - l_1) \\ 0 \\ 0 \\ k_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

로 표시하였다.

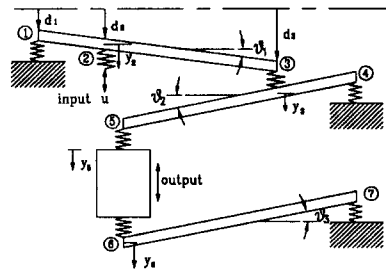


그림 7. 등가의 Spring-Mass 시스템

$b = 10 \text{ mm}$	$m_i$ (각 부위의 질량)
$E = 210 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$	$J_{mi}$ (관성모멘트)
$R = 1.3 \text{ mm}$	(Hole 의 직경)
$l_1 = 7.075 \text{ mm}$	$l_2 = 33.3 \text{ mm}$
$l_3 = 2.975 \text{ mm}$	$l_4 = 22.3 \text{ mm}$
$l_{c1} = (l_1 + l_2)/2$ , $l_{c2} = (l_3 + l_4)/2$	
(각 Lever의 길이)	
$t_1 = 0.45 \text{ mm}$	$t_2 = 0.6 \text{ mm}$
$t_3 = 0.4 \text{ mm}$	$t_4 = 0.35 \text{ mm}$
$t_5 = 0.35 \text{ mm}$	$t_6 = 0.35 \text{ mm}$
$t_7 = 0.35 \text{ mm}$	(각 노치부위의 두께)

표 1. 변위 증폭장치 각 부위의 치수

식(2)를 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\dot{X} = A_{12}X + B_1u \quad \dots \dots \dots (3)$$

여기서

$$A_{12} = -\text{inv}(M)N \quad \dots \dots \dots (4)$$

$$B_1 = \text{inv}(M)O$$

다시  $X = [\dot{X} : X]^T$ 로 하면  $\dot{X} = [\dot{X} : X]^T$ 가 되고 위의 식은 다음과 같이 표현 되어질 수 있다

$$X = \begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ \text{diag}(7) & 0 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} y_{\text{inp}} \quad (5)$$

또한 출력을  $x_6$  라고 하면

$$y_{\text{out}} = [0000000 : 0000010] X \quad (6)$$

와 같이 된다.

위와 같이 모델링한 변위 증폭 장치의 주파수 응답은 그림 8 과 같다.

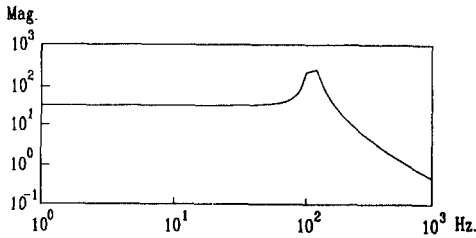


그림 8. 모델링한 변위 증폭장치의 주파수 응답

IV. 실험결과 및 검토

본 연구에서는 실제, 제작된 변위 증폭기구에 대해 압전 액츄에이터 인가 전압에 따른 증폭변위의 변화특성을 측정 한 결과를 그림 9 와 그림 10 에 나타내었다. 실험에서 압전 액츄에이터에 인가되는 전압은 LAB Master의 D/A 채널 출력을 고전압 OP Amp(BB OP3583)를 통해 증폭시켜서 내보내고 변위 값은 Gap 센서(Ono Sokki)를 이용하여 그 값을 LAB Master A/D 변환기를 통해 읽어들인다.(그림11)

실제 제작된 변위 증폭기구의 주파수 특성을 살펴보기 위해 압전 액츄에이터에 White noise를 인가하고 Gap센서로 측정 한 신호를 FFT로 해석한 결과가 그림 12 와 같다.

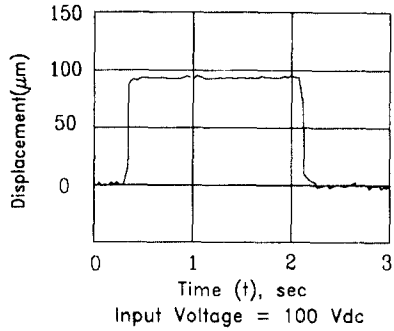
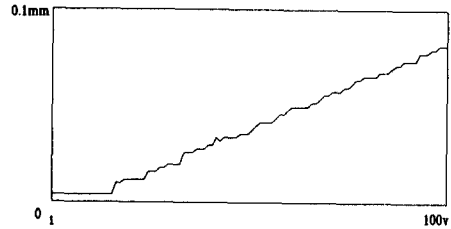
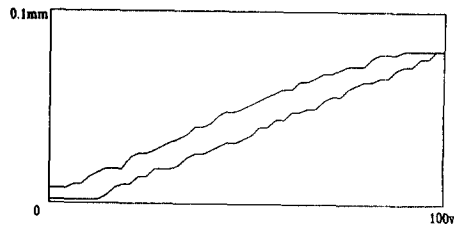


그림 9. 계단 입력에 따른 변위 증폭장치의 응답 특성



(a) 램프 입력 특성



(b) 히스테리시스

그림 10. 램프 입력에 따른 변위 증폭장치의 응답 특성

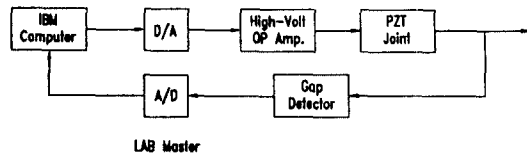


그림 11. 실험장치 블록선도

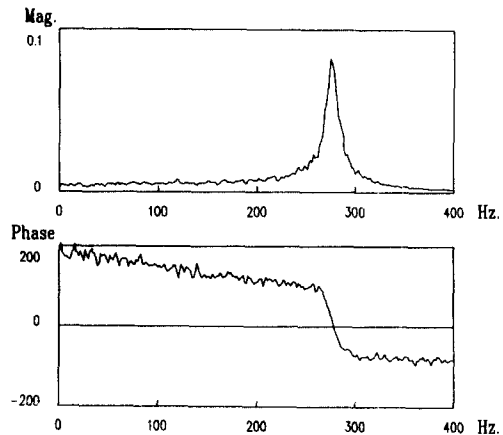


그림 12. 변위 증폭장치의 주파수 응답

실험 결과 압전 액추에이터의 고유특성인 히스테리시스가 증폭기구의 사용후에도 측정되고 있다. 증폭기구에 압전기구를 장착할때에 -공차를 적용 압입 함으로써 야기되는 예압문제로 인해 처음의 약 20V 인가전압은 실제 증폭변위를 일으키지 않음을 알 수 있다. 그림 13 에서 볼 수 있듯이 이론 증폭배율이 45배인것에 반해 실제 변위 증폭배율이 약 9배로 관찰되는데 이는 압전 액추에이터의 변형을 위한 출력의 약 80%는 탄성관절(Flexure Joint)의 인장 또는 압축과 벤딩(Bending)에 소모되고 예압을 극복하는데 따른 손실들이 필연적이기 때문으로 해석 할 수 있다.

FFT로 분석된 결과를 살펴보면 제작된 변위 증폭기구의 공진 주파수는 약 300Hz로서 압전 액추에이터 단독으로 사용될 때 보다는 주파수 추종범위가 많이 낮아졌음을 알 수 있다. 그림 8 에서와 같이 모델링에 따른 주파수 특성과 비교할때 나타나는 차이는 각 탄성관절의 기하학적 형상치수 및 물성치의 오차와 모델링에서 가정한 Spring-Mass 시스템외에도 정확한 댐핑(Damping) 이 고려되지 않은 때문으로 분석된다. 실제 측정결과를 살펴볼때 Coherence는 약 0.7로 나타났는데 이는 변위 증폭기구 자체의 관성부하효과 및 압전 액추에이터 본체와 구동회로 소자들이 주파수 특성등에 종합적으로 영향을 받은 결과 비선형성이 시스템에 내재해있기 때문으로 볼 수 있다.

각 축의 진동 입력파형에 따른 출력은 그림 13 과 같은데 위 실험결과를 토대로 살펴볼때 100Hz Order에서도 유효한 진동파형을 형성하므로 진동식 X-Y 미세 손목기구로의 사용 가능성이 확인 할 수 있다.

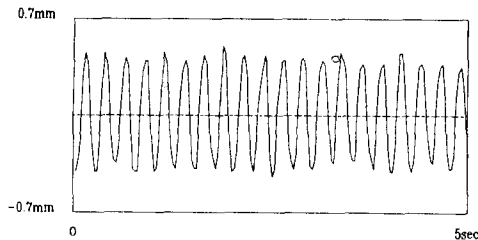


그림 13. 변위 증폭장치의 진동 입력에 따른 응답 특성

## V. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 적층형 압전 액추에이터를 변위 발생 구동원으로 삼고 미세한 변위량을 기구적으로 증폭시키는 기구와 구동회로를 설계, 제작하여 2축 미세 운동 로봇 손목기구를 구성하였다(그림14). 실험결과 변위 발생시 히스테리시스가 내제 되지만 주파수 특성으로는 약 200Hz 내에서는 진동 변위를 제어 할 수 있음을 알 수 있다. 추후 연구과제로는 변위 증폭 배율을 향상시키기 위한 탄성관절의 기하학적 형상과 예

압문제에 대한 설계기준 제시 및 실제의 조립작업을 위한 알 고리준 구현등을 고려하고 있다.

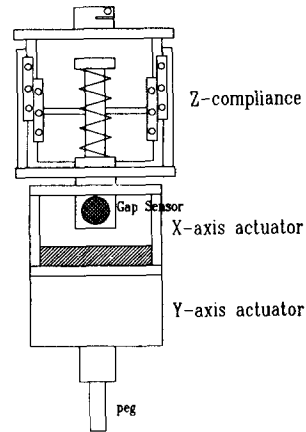


그림 14. 2축 미세 운동 로봇 손목기구

## 참고문헌

- [1] 津田辰宏, 省力と自動化, 1989.9
- [2] 古川 英一, 水野 誠, Displacement Amplification and Reduction by Means of Linkage, 精密工學會誌, No.56, Vol.10, 1990
- [3] エレクトロニク・セラミクス, 3,1987
- [4] エレクトロニク, 12,1986
- [5] Sadayuki Mitsuhashi, Kazutoshi Wakamatsu, Yoshiki Aihara, "Relay Using Multilayer Piezoelectric Actuator", Jap. j. Appl. Physics Suppl., Vol.24, 1985
- [6] E.Kouno, "A Fast Response Piezoelectric Actuator for Servo Correction of Systematic Errors in Precision Machining", Annals of the CIRP, Vol.33, No.1, 1984
- [7] 박 규연, "압전형 다축하중계의 설계, 제작 및 보정", 한국과학기술원 석사학위논문, 1990
- [8] 박 찬엽, "압전세라믹스", 김영출판사, 1987