

# 전하 제어법을 이용한 압전 액추에이터의 이력저감

정순종\*\*, 이대수+, 송재성+, 홍원표\*\*, 강은구\*\*, 최원종\*\*

+전자기소자 연구그룹, 한국전기연구원

\*나노연구그룹, 생산기술연구원

Hysteresis Reduction in piezoelectric actuator by a charge control method

Soonjong Jeong\*, Daesu Lee+, Jaesung Song+, Younpyo Hong\*\*, Eungu Kang\*\*, Wonjong Choi\*\*

## Abstract

This paper presents a method to reduce hysteresis in multilayer ceramic actuator by connecting the actuator with a capacitor in a series circuit. The change in hysteresis with respect to the capacitor was examined.  $0.2\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-0.8\text{Pb}(\text{Zr}_{0.475}\text{Ti}_{0.525})\text{O}_3$  ceramic material was used as a piezoelectric material for the actuator. Displacement of the actuator was measured in a capacitive gap sensor measuring system. In case of inserting a capacitor in a total circuit, hysteresis became dramatically decreased, and then finally the hysteresis value can be reduced below 0.2%. It was found in this present study that reducing the hysteresis in the actuator is dependent upon the characteristics of the capacitor in total circuit and also operating frequency

**Key Words** : Ceramic Multilayer Actuator, Charge Control, Frequency Dependent Characteristics, Hysteresis-free displacement

## 1. 서론

압전 액추에이터 (actuator)란 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 소자로 많은 초정밀 장비의 기계적 이송부로 사용되고 있다. 하지만 이러한 압전 액추에이터의 스트로크에 있어서 비선형적 특성과 이력을 나타낸다는 단점을 지니고 있다. 이러한 이력을 제거할 수 있는 여러 방법상의 연구가 되어왔는데, 이중 전압대신에 액추에이터에 발생하는 전하를 제어하여 스트로크를 발생시키면 효과적으로 이력효과를 줄일 수 있다 [1]. 이 방법은 외부의 센서와 다른 제어기를 부수적으로 연결하지 않고 순수하게 액추에이터만을 가지고 이력 효과를 제거할 수 있다. 그 전하 제어의 하나 방법으로, 본 연구에서는 액추에이터와 정전용량 커패시터를 직렬로 연결한 회로를 구성하여 액추에이터의 이력저감을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### (1) 액추에이터 제작 및 실험방법 결정

사용된 압전 소재는  $0.42\text{PbTiO}_3-0.38\text{PbZrO}_3-0.2\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$  이었다. 이 소재는 큐리온도가 35  $^{\circ}\text{C}$ , 압전상수  $d_{33}$ 은 530 pC/N으로 측정되었다. 제조된 소재 분말을 유기용매 (MEK/Ethyl Alcohol)와 분산제 (Texaphor 963)를 넣고 24시간 동안 불밀링 한 후 결합제 (PVB)와 가스제 (DBP)를 첨가하고 다시 24 시간 동안 불밀링하여 slurry를 제조한 후 닥터 블레이드 (doctor blade) 방법으로 100  $\mu\text{m}$ 의 green sheet를 제조하였다. green sheet 위에 전극면적을 달리하여 screen printing 하고, 200층까지 적층하였다. 이 때 사용된 전극용 paste는 Ag(70)-Pd(30)를 사용하였고, 전극면적은  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 이었다. 표 1에 제조된 시편의 전극 크기를 나타내었다.

\* 발표자, 한국전기연구원, 전자기소자그룹 (sjeong@keri.re.kr)

주소: 641-120 경남 창원시 성주동 28-1

+ 한국전기연구원, 전자기소자그룹

++ 생산기술연구원, 나노공법

측정 실험방법을 그림 1에 나타내었다. 시험된 액추에이터는 100 V 인가시 11  $\mu\text{m}$ 의 변위(스트로크)를 나타내었으며, 1.5  $\mu\text{F}$ 의 정전용량(LCR 측정기로 분석한 결과)을 가지고 있다. 입력 전원으로 신호 발생기(Agilent 33510)와 연결된 전압 드라이버(Trek PZD 350)를 사용하였으며 정전용량 센서(AD 4810)가 그 액추에이터의 스트로크를 감지하였다. 그 센서는 2nm 정도의 노이즈를 가지고 있었다. 보상용 커패시터로 여러 용량의 마일러 타입 커패시터를 사용하였다. 그 용량은 50 nF, 1.7  $\mu\text{F}$ , 2.0  $\mu\text{F}$  이었다.

표 1. 액추에이터 크기

	Length h (mm)	Width h (mm)	Green sheet thickness( $\mu\text{m}$ )	Layer
MCA	10	10	100	200

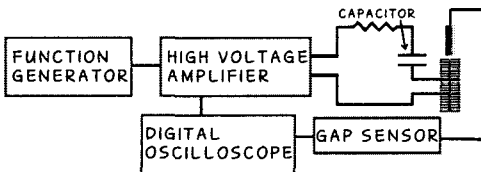


그림 1. 본 연구에서 설정한 측정 장치 개략도

### (2) 기본 개념

위의 실험 측정 장비를 구성하여 이력을 감소하려는 개념은 다음과 같다. 일반적으로 액추에이터의 변위는 전압인가 시 그 액추에이터에서 발생하는 전하량에 거의 비례하며 이력현상은 액추에이터의 정전용량이 전압에 따라 변하기 때문이라는 기본 개념을 전제로 하고 있다. 다시 말해서 액추에이터의 정전용량이 전압에 의해서 변화하기 때문에 액추에이터의 이력현상도 정전용량의 변화에 기인하는 것이다. 액추에이터의 전하량의 크기 및 감도는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{\text{actuator}} = C_{\text{actuator}} \times V_{\text{actuator}}$$

$$\frac{\partial(Q_{\text{actuator}})}{\partial C_{\text{actuator}}} = V_{\text{actuator}} \text{ -----(1)}$$

보상용 커패시터와 액추에이터를 직렬 회로로 만드는 개념은 액추에이터의 정전용량/외부 인가전압 비율의 변화를 줄이고 이력현상을 낮추려는 시도이다. 그림 2에 본 연구에서 고려한 단순 등가회로를 나타내었다. 그 회로에서는 액추

에이터와 보상 커패시터에서 발생하는 전하량이 전체회로에서의 전하량과 같게 되며, 이를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{actuator}} + Q_{\text{capacitor}}$$

$$= C_{\text{total}} \times V_{\text{total}} = C_{\text{actuator}} \times V_{\text{actuator}} + C_{\text{capacitor}} \times V_{\text{total}}$$

$$\frac{\partial Q_{\text{actuator}}}{\partial C_{\text{actuator}}} = V_{\text{actuator}}$$

$$= V_{\text{total}} \times \frac{C_{\text{capacitor}}}{C_{\text{capacitor}} + C_{\text{actuator}}} \text{ -----(2)}$$

그러면 액추에이터의 전하는 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{\text{actuator}}(V) = \int_0^V Q_{\text{actuator}}(0 \rightarrow V) dV$$

$$= V_{\text{total}} \times \int_0^V \frac{C_{\text{capacitor}}}{C_{\text{capacitor}} + C_{\text{actuator}}(V)} dV$$

$$= V_{\text{total}} \times C_{\text{capacitor}} \times \ln\left(\frac{C_{\text{capacitor}} + C_{\text{actuator}}(V)}{C_{\text{capacitor}}}\right) \text{ -----(3)}$$

여기서 만약  $C_{\text{capacitor}} \ll C_{\text{actuator}}(V)$  이라면, log 부분은 1에 접근하게 된다. 그리하여  $Q_{\text{actuator}}(V) = V_{\text{total}} \times C_{\text{capacitor}}$  관계가 성립되며 보상용 커패시터의 정전용량은 인가전압에 관계없이 항상 일정하다고 가정하면 액추에이터의 전하량  $Q_{\text{actuator}}(V)$ 는 전체 회로에 인가되는 전압  $V_{\text{total}}$ 에 비례하게 된다. 또한 액추에이터의 변위  $d$ 는 전하량  $Q_{\text{actuator}}$ 과 비례관계를 가진다는 점을 고려하면 액추에이터의 변위  $d \propto V_{\text{total}}$ 이 유지된다.

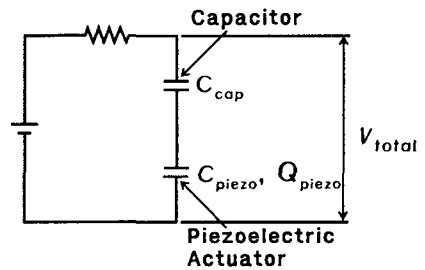


그림 2. 본 연구에서 결정된 연결 구조를 나타내는 단순 등가회로

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 외부 보상용 커패시터와 직렬 형태로 연결된 액추에이터의 변위와 외부 인가 전압간의 관계를 나타낸 것이다. 이때 사용된 보상용 커패시터의 용량은 0, 0.25  $\mu\text{F}$ , 1.7

$\mu\text{F}$ ,  $2.0 \mu\text{F}$ 이었다. 액추에이터의 정전용량은  $1.5 \mu\text{F}$ 이었다. 그림에서 보듯이, 외부 보상용 커패시터가 없는 경우에는  $100\text{V}$  인가시 액추에이터는  $11\mu\text{m}$ 의 변위를 나타내었다. 전압은 0에서  $100\text{V}$ 까지 증가하였다가  $100\text{V}$ 에서 0으로 다시 감소하였다. 전압 증가시 전압에 대한 변위 거동과 전압 하강시 변위거동은 달랐으며 두 거동사이에 이력현상을 관찰할 수 있었다. 그 두 전압 상승과 하강시 사이의 변위의 최대차이는 최대 전압의 1/2인  $50\text{V}$ 에서 관찰할 수 있었으며 그 크기는  $1.5 \mu\text{m}$  (전체 변위의 약 15%)이었다. 작은 용량의 보상용 커패시터를 회로 안에 직렬로 액추에이터와 연결하였을 때, 전체 회로에 훨씬 높은 전압을 인가하여야 했으며 전압 상승 및 하강시 변위 차이는 상당히 감소할 수 있었다.  $0.25 \mu\text{F}$  용량의 커패시터를 연결한 경우, 최대 변위차이는  $0.02 \mu\text{m}$  (전체 변위의 0.2%)이었으며  $11\mu\text{m}$ 의 변위를 얻기 위해서  $580\text{V}$ 를 인가하였다.  $1.7 \mu\text{F}$ 의 커패시터를 연결하였을 경우,  $11\mu\text{m}$ 의 변위는  $210\text{V}$ 인까지 관찰되었으며 최대 변위 차는  $105\text{V}$ 인까지  $0.7 \mu\text{m}$ 이었다.  $2 \mu\text{F}$  커패시터 연결시  $217\text{V}$ 인하였을 때  $10.3 \mu\text{m}$  변위를 얻었으며 변위 차는  $97\text{V}$ 에서  $0.9 \mu\text{m}$ 이었다. 액추에이터 정전용량이 커패시터의 정전용량보다 매우 크면 식 (3)에서의 log 항이 1에 접근하며 그에 따라 액추에이터의 전하량  $Q_{\text{actuator}}$ 는 전체 회로에 인가되는 전압  $V_{\text{total}}$ 에 비례하게 된다. 그러므로 액추에이터의 변위는 전체 회로에 인가되는 전압과 비례관계를 가지게 되며 이력현상도 급격히 감소되어 실제 적용에 유용하게 사용될 수 있다.

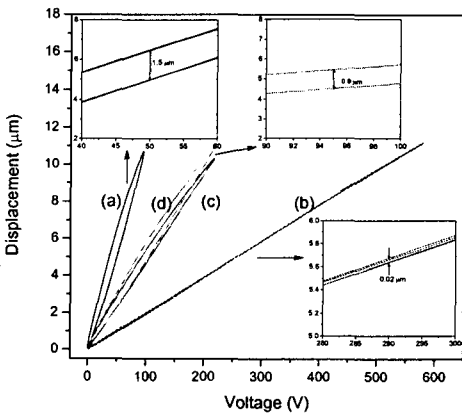


그림 3. 전체 회로에 인가된 전압에 대한 보상용 커패시터와 연결된 액추에이터의 변위. (a)는 외부 보상용 커패시터가 없는 경우의 곡선, (b), (c), (d)들은 각각  $0.25 \mu\text{F}$ ,  $1.7 \mu\text{F}$ ,  $2.0 \mu\text{F}$  용량의 보상 커패시터와 연결된 액추에이터의 변위곡선이다.

본 연구에서는  $0.25 \mu\text{F}$  커패시터와 연결된 액추에이터가 가장 우수한 이력 저감 거동을 나타내었으므로, 그 커패시터와 액추에이터 연결 회로에 대해서만 작동주파수에 따른 변위에서의 이력효과와 변화를 조사하였다.

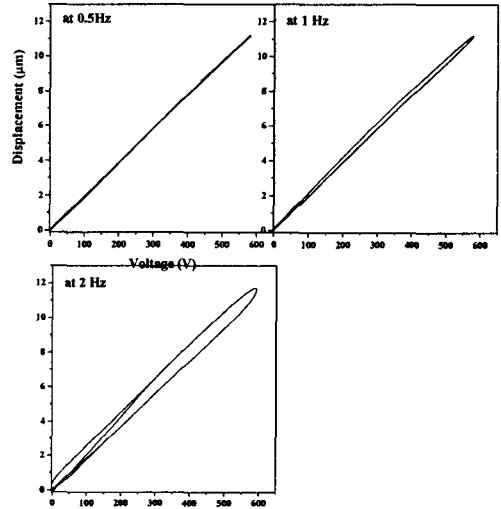
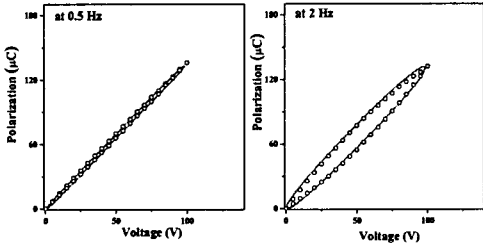


그림 4. 동 주파수  $0.5\text{Hz}$ ,  $1\text{Hz}$ ,  $2\text{Hz}$ 에서  $0.25 \mu\text{F}$  커패시터와 연결된 액추에이터의 변위-전압 곡선

그림 4는 작동 주파수  $0.5\text{Hz}$ ,  $1\text{Hz}$ ,  $2\text{Hz}$ 에서  $0.25 \mu\text{F}$  커패시터와 연결된 액추에이터의 변위-전압 곡선을 나타낸 것이다. 위 단락에서 언급한 바와 같이  $0.5\text{Hz}$ 에서는 가장 작은 변위치  $0.02 \mu\text{m}$ 를 얻을 수 있었다. 반면, 작동 주파수가 증가할수록 그 변위차는 증가하였다.  $1\text{Hz}$ 와  $2\text{Hz}$ 에서는 변위차가 각각  $0.4 \mu\text{m}$ ,  $0.84 \mu\text{m}$ 이었다. (본 연구에서 사용된 정전용량 센서의 유효주파수가  $5\text{Hz}$ 이므로 작동 주파수를  $2\text{Hz}$  이내로 제한하였다.) 작동주파수에 따른 변위차 변화는 액추에이터에서 발생하는 전하량이 주파수 함수라는 사실과 관련이 있다. 그러므로 작동 주파수에 따른 이력 거동 변화를 잘 이해하기 위하여 액추에이터에서 발생하는 전하량을 인가전압의 함수로서 측정하였다. 그런 다음, 전하량의 주파수 의존성에 따른 변위의 이력 거동을 평가하기 위하여 Rayleigh 모델을 적용하여 인가전압-전하량을 결정하였고 이에 파생되는 변수를 이용하여 평가하였다.

그림 5는  $0.5\text{Hz}$ 와  $2\text{Hz}$ 에서 압전 액추에이터의 인가전압-전하량을 나타낸 결과이다. 그림에서 보듯이  $100\text{V}$  인가시 액추에이터에서 얻어진 전하량은 두 주파수에서 거의 같다. 그러나 그 곡선들에서의 이력기여도는 달랐으며  $2\text{Hz}$ 에

서는 상당한 이력거동이 발생되었는데 이는 도메인 재배열에 따른 비선형 거동으로부터 결과 되어진 것이다. 본 연구에서



연구된 액추에이터의 전하 밀도는 인가전압에 대하여 강그림 5. 0.5 Hz와 2 Hz에서 압전 액추에이터의 인가전압-전하량

한 의존성을 보이고 있으며 이것은 단순화된 Rayleigh 모델로 표현할 수 있다. 그 모델 기반 전하량은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$D/\epsilon_0 = (\epsilon_r' + \epsilon_0)E \pm \alpha/2 (E_0^2 - E^2) \text{-----(4)}$$

D는 전하 밀도 (=전하량 (Q<sub>actuator</sub>)/면적 (A)),  $\epsilon_r'$ 는 저전계에서의 상대유효 유전율,  $\alpha$ 는 상대유전율의 전압 의존성에 대한 기울기이다. 위의 식 (4)을 그림 5의 두 곡선에 적용하였을 때 그 기울기  $\alpha$ 는 0.5 Hz에서는  $0.949 \times 10^{-4}$  m/V 이었고 2 Hz에서는  $5.04 \times 10^{-4}$  m/V이었다. 그 기울기  $\alpha$  값의 변화는 주파수에 따라 전하량에 대한 도메인 재배열의 기여도가 바뀌는 것을 의미한다. 그 단순화된 Rayleigh 모델을 이용하여 0.25  $\mu$ F 커패시터와 연결된 액추에이터의 변위 특성을 평가하였다. 이용된 관계식은 단순 압전 방정식이며 다음과 같다.

$$\text{액추에이터 변위 } X = \text{압전 상수 } d_{33} \times V$$

$$= 2 Q_{11} \times \epsilon_{33} \times P_s \times V = [2 Q_{11} P_s] \times Q_{\text{actuator}} \text{-----(5)}$$

$Q_{11}$ 은 전하량과 연관된 전왜 상수,  $\epsilon_{33}$ 은 유전율,  $P_s$ 는 최대 포화 분극량, V는 인가전압,  $Q_{\text{actuator}}$ 는 액추에이터에서 발생하는 전하량이다.

또한 위 그림 2에서 언급한 전체회로에 인가된 전압  $V_{\text{total}}$ 은 액추에이터에 인가된 전압  $V_{\text{actuator}}$ , 액추에이터의 전하량  $Q_{\text{actuator}}$ , 보상용 커패시터의 정전용량  $C_{\text{capacitor}}$ 의 함수로 나타낼 수 있으며 다음과 같다.

$$V_{\text{actuator}} = V_{\text{total}} \times (C_{\text{capacitor}}) / (C_{\text{capacitor}} + C_{\text{actuator}})$$

$$= V_{\text{total}} \times (C_{\text{capacitor}}) / (C_{\text{capacitor}} + Q_{\text{actuator}} / V_{\text{actuator}})$$

$$\text{그러면, } V_{\text{total}} = V_{\text{actuator}} \times (1 + Q_{\text{actuator}} / (C_{\text{capacitor}} \times V_{\text{actuator}})) \text{-----(6)}$$

식 (5)과 (6)를 이용하여, 액추에이터의 변위와 전체회로

에 인가된 전압의 관계를 계산할 수 있었으며 이 단순 계산 결과들을 실험 결과들과 비교하였다. 그 결과들을 그림 6에 나타내었다. 주파수 0.5 Hz에서는 실험값과 계산 값이 거의 유사한 결과를 나타내었으며 주파수가 2 Hz로 증가함에 따라 계산결과와 측정 결과 모두 이력 거동이 증가함을 알 수 있었다. 작동주파수가 증가함에 따라 식 (4)에서의  $\alpha$ 는 증가하였으며 이는 도메인 재배열과 관련이 있다. 그러나 2 Hz에서 실험결과는 측정결과보다 상당히 작은 이력 거동을 나타내었다.

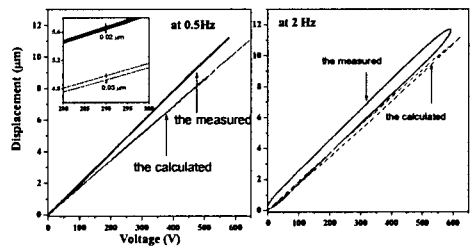


그림 6. 0.5 Hz와 2Hz에서의 액추에이터의 인가전압-변위 측정 및 계산 결과

## 4. 결론

압전 액추에이터와 한 개의 보상용 커패시터를 직렬형태로 연결한 회로에서 액추에이터에서 발생하는 변위를 전체 회로에 인가한 전압의 함수로서 조사하였다. 낮은 정전용량의 커패시터가 회로 안에서 사용되었을 때 저감된 이력현상을 나타내었다. 그러나 같은 변위를 얻기 위해서는 보다 높은 전압이 인가되어야 한다. 작동 주파수가 증가함에 따라 보다 큰 이력 거동이 관찰되었으며 이는 액추에이터에서 발생한 전하량의 변화와 관련이 있다.

## 후기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발 사업 중 이온빔이용 나노가공용 장비 개발의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- (1)H. Kaizuka and B. Siu, "A simple way to reduce hysteresis and creep", JJAP, Vol. 27 pp.

L773 -779, 1988.

- (2) D. Damjanovic, M. Demartin, "The rayleigh law in piezoelectric ceramics", J. Phys. D, Vol. 297, pp. 2057-2060, 1996.
- (3) D. A. Hall and P. J. Stevemson, "High field dielectric behavior of ferroelectrics ceramics", Ferroelectrics, Vol. 223, pp. 319, 1999.