

# 외부 열적 환경 변화에 따른 압전작동기 제어성능 열화 고찰

## Control Performance Investigation of Piezoelectric Actuators under Variation of External Heat Environment

한영민<sup>†</sup>·문병구<sup>\*</sup>·최승복<sup>\*\*</sup>

Young-Min Han, Byung Koo Moon and Seung-Bok Choi

(Received September 9, 2015 ; Revised September 9, 2015 ; Accepted September 30, 2015)

**Key Words** : Piezoelectric Actuator(압전작동기), Heat Environment(열적환경), High Temperature(고온), Heat Chamber(고온챔버), Control Performance(제어성능)

### ABSTRACT

This paper proposes experimental results for control performance deterioration of a piezoelectric actuator under high temperature conditions due to external heat environment. In this work, a heat environment from 30 °C to 190 °C is established by a heat chamber which is capable of high temperature of heat environment. Inside the heat chamber, an experimental apparatus consisting of the stack type of piezoelectric actuator, laser sensor, gap sensor and temperature sensor is established. After evaluating temperature dependent blocking force, displacement and time response of a piezoelectric actuator inside the heat chamber, tracking control performances are evaluated under various temperature conditions via proportional-integral-derivative(PID) feedback controller. The desired position trajectory has a sinusoidal wave form with a fixed frequency. Control performances are experimentally evaluated at both room temperature and high temperature and presented in time domain.

### 1. 서론

최근 여러 산업분야와 응용장치에서 자기유변유체, 형상기억합금, 압전재료 등의 다양한 지능재료가 작동기 또는 센서의 형태로 활용되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 대표적인 지능재료의 하나인 압전재료는 단순한 구조로서 넓은 대역폭과 빠른 응답 속도 그리고 높은 분해능을 갖고 있어 다양한 형태의 작동기로서 자동차, 선박, 항공, 가전 등의 분야에서 폭넓게 활용되고 있다<sup>(1,3)</sup>. 특히 최근에는 자동차 엔진, 항공기 분사노즐 등과 같이 100 °C 이상의 고온환경에서의 요구가

점점 커지고 있다. 하지만 근본적으로 압전재료는 압전효과를 상실하는 큐리(Curie) 온도를 갖고 있으며, 이로 인해 사용할 수 있는 온도에는 분명한 한계가 존재하게 된다. 특히, 큐리 온도 이하라 하더라도 온도에 따른 작동기 성능의 심각한 열화로 인해 실제 사용할 수 있는 온도범위는 극히 좁은 것이 일반적이다. 나아가 작동온도 내에서의 온도변화라 하더라도 압전작동기의 성능에 심각한 영향을 야기할 수 있는 문제를 안고 있다.

이러한 온도에 따른 성능변화 문제는 현재 압전작동기가 직면하고 있는 가장 큰 기계적인 성능한계로서 압전작동기의 응용을 제한하고 있다. 따라서

† Corresponding Author ; Member, Ajou Motor College  
E-mail : ymhan@motor.ac.kr

\* Ajou Motor College

\*\* Member, Inha University

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

이러한 문제를 해결하기 위한 노력이 일부 연구자들 에 의해 제한적인 범위에서 시도되고 있다. 대표적 으로 Li<sup>(4,5)</sup> 등은 다양한 온도조건에서 강유전성 세 라믹의 분극(polarization)에 대해 연구를 바탕으로 온도변화에 따른 압전센서의 성능변화를 고찰하였으 며, 또한 연료분사 시스템에 응용하기 위해 준정적 상태에서 압전작동기의 열적 전기-기계적(electro-mechanical) 성능을 고찰하였다. Senousy<sup>(6)</sup>는 다양 한 온도 조건하에서 스택형 압전작동의 스트로크 변 화를 고찰하였다. Webber<sup>(7)</sup>는 고온환경에서 압전작 동기의 블로킹포스(blocking force)를 고찰하였다.

이러한 연구들은 압전구동 작동기나 센서의 작동 온도 범위 내에서 온도에 따른 분극현상과 전기-기 계적 거동을 다루고 있지만, 이로 인한 작동기의 제 어성능 변화에 대한 심도 있는 고찰로는 진행되지 못하고 있다. 나아가 압전작동기가 응용되는 산업환 경이 다양화 됨에 따라 큐리(Curie) 온도 이하라 하 더라도 압전재료의 제조사가 성능을 보장하는 작동 온도를 넘어서는 경우가 발생하고 있지만 이러한 온 도 환경에서 작동기의 성능변화에 대해 보고된 사례 는 극히 드물다고 할 수 있다.

따라서 이 연구에서는 작동기 외부의 열적환경 변화에 기인하는 고온의 온도조건에서 압전작동기의 제어성능 변화를 실험적으로 고찰하고자 한다. 이를 위해 최대 300 ℃의 온도까지 고온환경을 구현할 수 있는 고온챔버를 구축하였다. 고온챔버 내부에는 압 전작동기의 성능을 실험적으로 고찰하기 위해 스택 형 압전작동기와 함께 레이저센서, 깎센서, 온도센서 를 이용한 위치추적 제어 실험장치를 구축하였다. 먼저 다양한 온도 조건하에서 압전작동기의 블로킹 포스와 변위를 관찰하고, 나아가 시간응답 특성을 고찰하였다. 그리고 PID 제어알고리즘을 적용하여 위치추적 제어를 수행하였으며, 30°와 150 ℃ 온도 에서 추적오차를 비교하여 제어성능의 변화를 확인 하였다.

2. 압전작동기의 고온특성

높은 분해능과 빠른 응답특성의 장점을 갖고 있 는 압전작동기의 최대 변위는 약 0.1 % 내외로 알 려져 있다. 따라서 여러 층의 레이어를 쌓아올린 스택형 압전작동기가 가장 일반적인 형태로 다양한 응

용장치에 적용되고 있다. 이러한 압전작동기의 전기 -기계적 거동은 일반적으로 분극된 방향으로 다음과 같이 표현된다<sup>(1)</sup>.

$$D = d_{33}T + \epsilon_3^T E$$

$$S = \frac{1}{c}T + d_{33}E \tag{1}$$

여기서 S는 스트레인 텐서, c는 컴플라이언스, T는 스트레스 텐서, d는 압전재료 상수, D는 압전변위 텐서, ε<sup>T</sup>는 유전율이다. 식 (1)로부터 압전작동기의 힘은 입력전압에 대해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_p(t) = k_p \delta(t) - f_{ex}(t) = \alpha V(t)$$

Equivalent Spring Constant  $k_p = \frac{Ac}{l}$  (2)

Proportional Constant  $\alpha = \frac{Acd_{33}}{l}$

여기서 f<sub>ex</sub>는 프리로드이며, A는 작동기 단면적, l은 작동기 길이이다. Fig. 1은 이 연구에서 사용된 스택형 PZT(lead-zirconate-titanate) 압전작동기이다. 작동기의 큐리온도는 150 ℃, 최대 작동온도는 80 ℃, 전체 길이는 36 mm이다. 이 연구에서 사용된 압전 작동기의 주요 사양은 Table 1에 나타내었다.

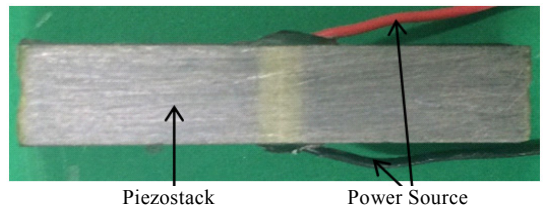


Fig. 1 The piezoelectric actuator

Table 1 The mechanical specifications of the piezo-electric actuator

Specifications	Value
Maximum working temperature	80 ℃
Curie temperature	150 ℃
Input voltage	-30 V~150 V
Thickness of a layer	90 μm
# of layers	400
Total length	36 mm



Fig. 2 The heat chamber

Table 2 The mechanical specifications of the heat chamber

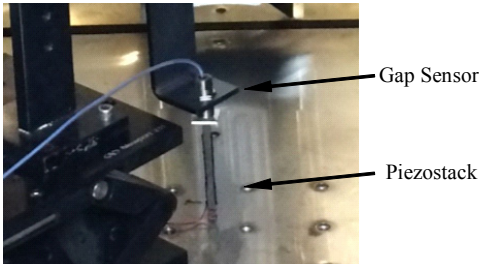
Specifications	Value
External dimensions	1,510×1,070×1,750 mm
Internal dimensions	800×800×800 mm
Temperature range	Room temp. ~ 300 °C
Electric power	14 kW

Fig. 2는 이 연구에서 도입된 고온챔버를 나타낸 것이다. 이 장치는 챔버외함, 가열장치, 제어장치로 구성되어 상온에서 300 °C까지 온도조절이 가능하다. 또한 챔버 내부 크기는 800×800×800 mm로서 압전작동기를 시험할 수 있는 충분한 공간을 확보하고 있으며, 세라믹 히터로 구성된 가열장치는 14 kW의 용량을 갖추고 있다. Table 2는 고온챔버의 주요 사양을 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 작동변위를 측정하기 위한 고온챔버 내부에 설치된 실험장치의 구성을 나타내고 있다. 먼저 함수발생기(33210A, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 입력신호를 발생하고 전압증폭기를 통해 압전작동기에 인가하였다. 작동기에서 발생된 스트로크는 비접촉 변위 캡센서(KD-2306 2SMT, KAMAN, USA)로 측정되었다. 캡센서의 최대 측정범위는 2.5 mm, 분해능은 0.3 m, 작동주파수는 1 MHz. 이 연구에서 사용된 캡센서의 최대 사용온도 조건은 200 °C이다. Fig. 3(b)는 온도에 따른 작동변위의 측정결과를 보여주고 있으며, 인가된 전압은 100 V이다. 결과에 나타난 것처럼 작동온도인 80 °C를 넘어서 약 90 °C까지

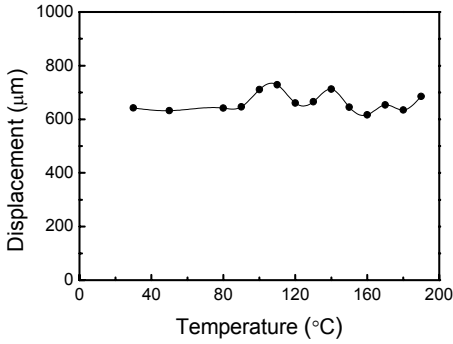
일정한 작동변위를 보여준다. 하지만 100 °C 이후부터 출력 작동변위가 온도에 따라 상당한 차이로 변동하고 있는 것을 보여주고 있다. 실험은 큐리 온도인 150 °C넘어서 190 °C까지 수행되었으며, 역시 온도에 따라 최대 87.2 m 변위차이를 보여주고 있다. Fig. 3(c)는 시간응답에서 온도에 따른 변위의 차이를 보여주고 있으며, Fig. 3(d)는 큐리 온도를 넘어 180 °C까지 가열된 후 다시 상온 30 °C로 복귀하였을 때 나타나는 응답특성 변화이며, 큐리온도 이상으로 가열됨에 따라 압전작동기에 영구적인 손상이 발생하여 성능이 상당히 저하되었음을 알 수 있다.

Fig. 4(a)는 블로킹포스를 측정하기 위한 실험장치의 구성이다. 여기서는 압전작동기만 가열할 수 있는 소형 고온챔버를 구축하였으며, 정확한 온도 계측을 위해 온도센서(MR-3190, MIRAE Tech, Korea)가 압전작동기에 부착되었다. 그리고 로드셀(1203-03A, PCB LOAD & TORQUE, USA)이 설치된 상부 하우징을 베이스 구조물에 볼트로 고정하고 그 사이에 압전작동기를 장착하여 변위 발생을 억제함으로써 블로킹 조건을 구현하였으며, 레이저 센서(LC2430, Keyence, Japan)를 이용하여 변위를 확인하였다. Fig. 4(b)는 30 °C에서 190 °C까지의 온도변화에 따른 블로킹포스 측정결과를 보여주고 있으며, 인가된 전압은 100 V이다. 결과에 나타난 바와 같이 측정 온도구간에서 블로킹포스는 온도증가에 따라 극명하게 줄어들고 있다.

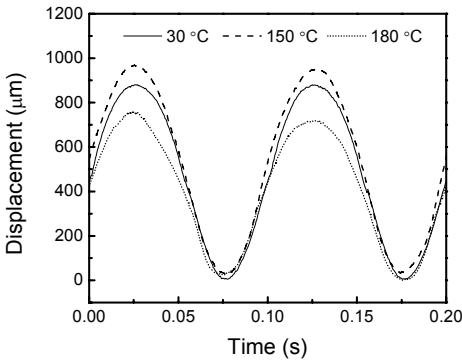
특히 가장 큰 변화는 작동온도 범위인 80 °C 이하에서 나타나고 있으며, 이후 일정한 기울기로 감소하다가 큐리온도 150 °C 이상에서 다시 크게 감소하고 있다. 총 160 °C의 온도가 상승하는 동안 751 N이 감소하였다. 이와 같이 온도에 따른 압전작동기 블로킹포스의 변화는 온도에 따른 발생변위의 변화에 비해 보다 크고 극명하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 시간응답에서 온도에 따른 블로킹포스의 차이를 보여주고 있으며, 온도가 상승함에 따라 발생하는 힘이 큰 폭으로 감소하고 있다. Fig. 4(d)는 큐리 온도를 넘어 가열된 후 다시 상온으로 복귀하였을 때 나타나는 응답특성 변화이며, 압전작동기의 성능이 상당히 저하되어 최대 발생력이 1293.3 N에서 590.7 N으로 감소하였다.



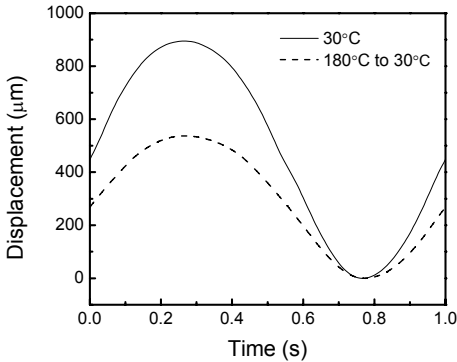
(a) Experimental setup



(b) Displacement

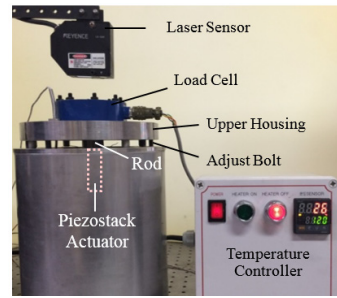


(c) Time response

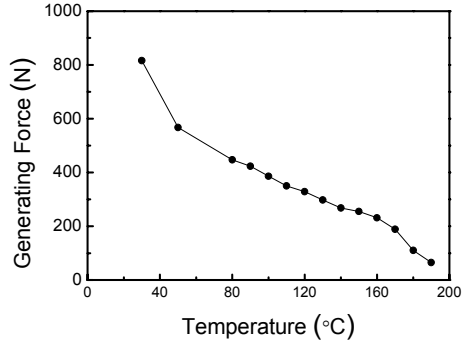


(d) Time response after temperature change return

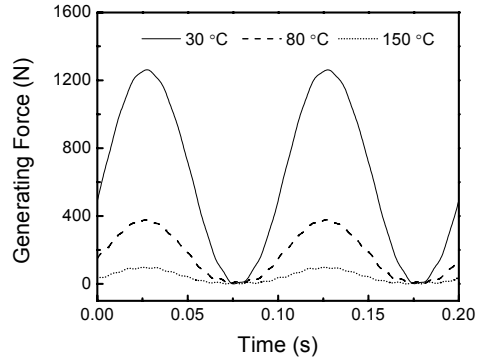
**Fig. 3** Experiment for the generated displacement



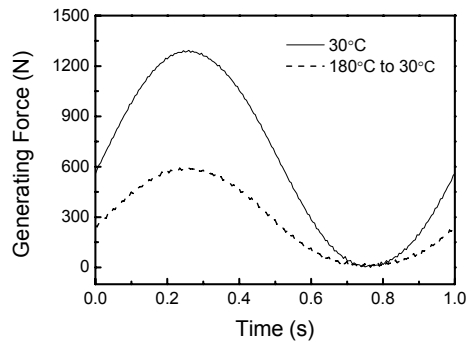
(a) Experimental setup



(b) Blocking force



(c) Time response



(d) Time response after temperature change return

**Fig. 4** Experiment for the generated blocking force

### 3. 압전작동기의 고온 제어성능

이 연구에서는 고온환경에서 압전작동기의 제어 특성 변화를 고찰하고자 한다. 물론 온도변화에 따른 불확실성을 제어대상 모델에 적용한 강건제어기나 온도에 따른 히스테리시스모델 기반의 역모델 제어를 설계한다면 온도환경이 변화하더라도 우수한 제어성능을 도출할 수 있을 것이다. 하지만 이 연구의 목적이 온도에 따른 제어성능 변화를 고찰하는 것이므로 제어대상의 수학적 모델을 고려하지 않는 단순하지만 광범위하게 활용되고 있는 PID(proportional-integral-derivative) 제어를 적용한 위치제어를 수행하였다. 이때 제어입력은 다음과 같이 결정할 수 있다<sup>(1)</sup>.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (3)$$

여기서  $u(t)$ 는 되먹임 제어입력이며,  $e(t)$ 는 요구궤적과의 오차이다. 그리고  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$ 는 각각 비례, 적분, 미분계인이다. 만약 입력이 점진적으로 증감한다면 미분계인은 중요한 역할을 하지 않는다. 이 연구에서는 비례계인 0.8, 적분계인 1.27, 미분계인 0.0007이 적용되었다. 이 연구의 목적은 PID 제어기의 강건성을 보여주는 것이 아니므로 온도환경이 변화하더라도 각 제어계인 값은 일정하게 유지되었

다. 따라서 압전작동기에 인가되는 제어입력 전압은 식 (2)와 식 (3)으로부터 결정할 수 있다.

Fig. 6는 압전작동기의 위치추적을 위한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 이때 압전작동기와 갭센서는 고온챔부 내부에 설치하였다. 그리고 고온특성 시험에 사용된 압전작동기는 큐리온도 이상 가열하였기 때문에 폐기되었으며, 800개의 세라믹 레이어로 구성된 72 mm 길이의 새로운 압전작동기가 추적제어에 적용되었다. Fig. 7의 추적제어 실험결과에서는 상온 30 °C와 큐리온도 150 °C에서의 제어성능을 비교하였다. 이때 요구궤적은 0.1 Hz의 사인파형을 인가하였다. 결과에 나타난 바와 같이 상온에서는 우수한 제어성능을 보여주고 있지만, 150 °C로 온도가 상승함에 따라 약간의 페이즈(phase) 지연과 함께 추적오차가 커지고 있음을 알 수 있다. 이때 두 온도 사이의 최고점 변위오차 차이는 약 13.1 mm이다. 이러한 결과는 30 °C 환경에서 압전작동기를 위해 튜닝된 PID 제어기가 150 °C 온도환경에서는 작동기의 특성 변화로 인한 불확실성으로 인해 제대로 동작하지 않음을 알 수 있다.

Fig. 7은 추적제어가 수행되는 동안 주변온도가 변화하는 것을 상정한 것이며, 이 연구에서는 에어쿨링 방법으로 14초 동안 130 °C에서 98 °C로 온도를 떨어뜨리면서 위치추적제어를 수행하였다. 온도가 낮아짐에 따라 추적오차가 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과에 나타난 것처럼 제어대상

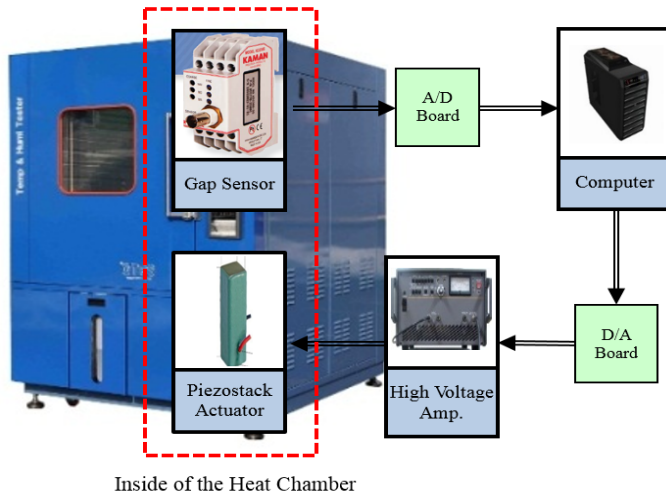
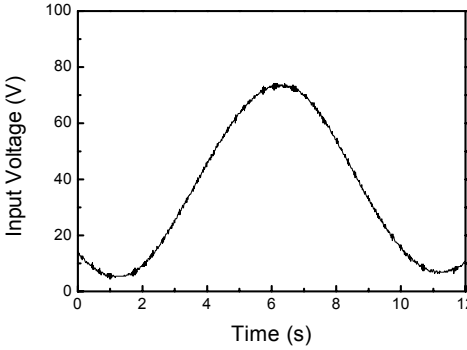
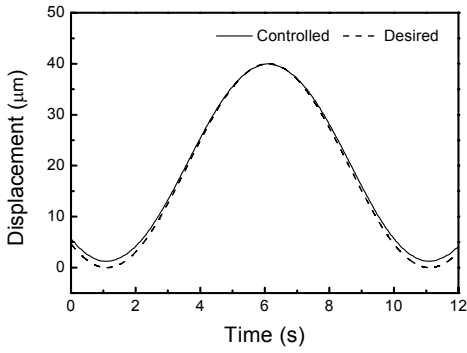
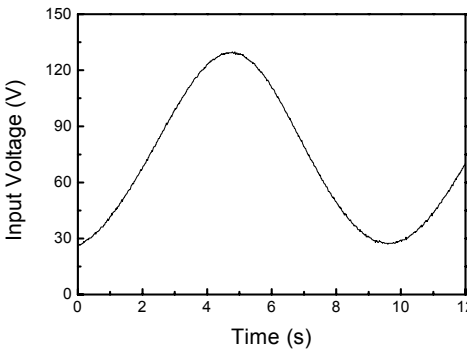
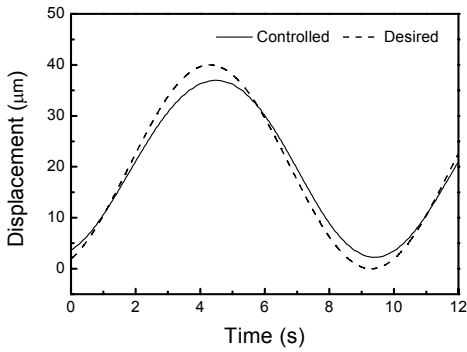


Fig. 5 Experimental setup for position tracking control



(a) At 30 °C



(b) At 150 °C

Fig. 6 Position tracking control results

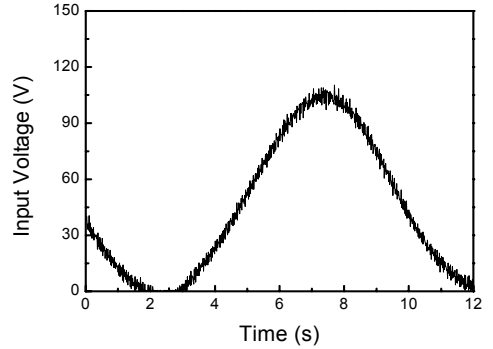
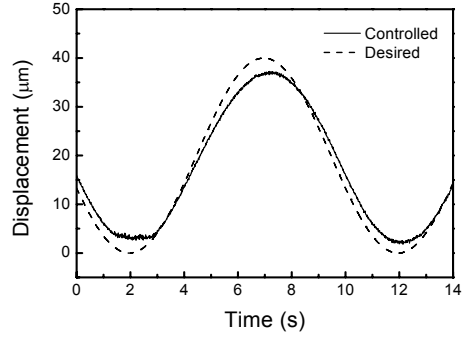


Fig. 7 Position tracking control results during temperature change

으로서 압전작동기 특성은 온도에 따라 일정하게 유지되지 않으며, 그 변화에 의한 제어대상 모델의 불확실성은 일반적인 PID 제어기로 요구성능을 유지할 수 없는 수준이라고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

압전작동기는 우수한 기계적특성과 제어성능으로 인해 자동차, 가전, 로봇시스템 등 다양한 응용장치의 작동메커니즘에 적용되고 있으며 최근에는 자동차 엔진이나 항공기 노즐 등과 같이 100 °C 이상의 고온환경으로 활용범위를 넓히고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 따라서 이 연구에서는 외부의 열적 환경에 기인하는 고온의 온도조건에서 압전작동기의 제어성능 변화를 실험적으로 고찰하였다. 이를 위해 다양한 온도환경을 구현할 수 있는 고온챔버 내부에 압전작동기 시험환경을 구축하였다. 이를 이용하여 먼저 다양한 온도 조건하에서 압전작동기의 블로킹포스, 변위, 시간응답 특성을 고찰하였다. 그리고 제어대상 모델의 불확실성을 고려하지 않는 PID 제어알



고리들을 적용하여 위치추적 제어를 수행하여 30 °C 와 150 °C 온도에서 추적오차를 비교하였고, 온도가 증가함에 따라 제어대상의 특성이 변하고 그에 따른 불확실성의 증가로 인해 제어성능이 떨어짐을 확인하였다. 이상의 결과로부터 고온에서 압전작동기의 제어성능이 크게 열화되는 것을 실험적으로 증명하였으며 향후 이러한 압전작동기의 온도 특성을 고려한 제어알고리즘 개발을 통해 압전작동기의 고온 제어성능을 개선하는 연구로 발전시켜 나갈 예정이다.

## References

- (1) Choi, S. B. and Han, Y. M., 2010, Piezoelectric Actuators: Control Applications of Smart Materials, CRC Press.
- (2) Niezrecki, C., Brei, D., Balakrishnan, S. and Moskalik, A., 2001, Piezoelectric Actuation: State of the Art. The Shock and Vibration Digest, Vol. 33, No. 4, pp. 269~280.
- (3) Han, Y. M. and Min, C. G., 2013, Performance Evaluation of Vehicle Gear-Shifting Supportive Device Utilizing MR Haptic Cue, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 160~166.
- (4) Li, Y. W., Zhou, X. L. and Li, F. X., 2010, Temperature-dependent Mechanical Depolarization of Ferroelectric Ceramics, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 43, No. 17, pp. 1~8.
- (5) Li, F. X., Rajapakse, R. K. N. D., Mumford, D. and Gadala, M., 2008, Quasi-static Thermo-electro-mechanical Behaviour of Piezoelectric Stack Actuators. Smart Materials and Structures, Vol. 17, No. 1, pp. 1~10.
- (6) Senousy, M. S., Li, F. X., Mumford, D., Gadala, M. and Rajapakse, R. K. N. D., 2009, Thermo-electro-mechanical Performance of Piezoelectric Stack Actuators for Fuel Injector Applications, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 20, No. 4, pp. 387~399.
- (7) Webber, K. G., Aulbach, E. and Rödel, J., 2010, High Temperature Blocking Force Measurements of Soft Lead Zirconate Titanate, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 43, No. 36, p. 365401.



**Young-Min Han** was born in Changwon, Korea on December 1, 1969. He received the Ph.D. degree in mechanical engineering from Inha University, Incheon, Korea in 2005. Since 2011, he has been a Professor at Ajou Motor College, Chungman, Korea. His current research interest includes design and control of functional mechanisms utilizing smart materials such as active mounts, semi-active shock absorbers, hydraulic valve systems, robotic manipulators and human-machine interfaces. Professor Han is the author of over 50 international journal papers and 25 international conference proceedings.



**Byung-Koo Moon** was born in Seoul, Korea on May 2, 1961. He received the M.S. degree in mechanical engineering from Ajou University, Suwon, Korea in 2011. Since 2002, he has been a Professor at Ajou Motor College, Chungnam, Korea. His current research interest includes vehicle electronics and automotive human machine interface.



**Seung-Bok Choi** was born in Hwaseong, Korea on January 2, 1955. He received the B.S. degree in mechanical engineering from Inha University, Incheon, Korea in 1975, and the M.S. and Ph.D. degrees in mechanical engineering from Michigan State University, East Lansing, U.S.A. in 1986 and 1990, respectively. Since 1991, he has been a Professor at Inha University, Incheon, Korea. Before joining Inha University, he worked at Korea Institute of Metals and Machineries(KIMM). His current research interests include design and control of functional structures and systems utilizing smart materials such as electrorheological fluids, magnetorheological fluids, piezoelectric materials and shape memory alloys.