

# PMN-PZT 압전 단결정 적층형 액추에이터의 안정성과 신뢰성

오현택<sup>1</sup>, 손민기<sup>1</sup>, 김문찬<sup>1</sup>, 윤운하<sup>2</sup>, 김시현<sup>3</sup>, 임성원<sup>3</sup>, 이호용<sup>4</sup> 

<sup>1</sup> (주)세라콤 연구개발팀

<sup>2</sup> 한국재료연구원 기능세라믹연구실

<sup>3</sup> (주)한화시스템 전자광학체계4팀

<sup>4</sup> 선문대학교 신소재공학과

## Stability and Reliability of PMN-PZT Piezoelectric Single Crystal Multilayer Actuators

Hyeon-Taek Oh<sup>1</sup>, Min-Gi Son<sup>1</sup>, Moon-Chan Kim<sup>1</sup>, Woon-Ha Yoon<sup>2</sup>,  
Si-Hyun Kim<sup>3</sup>, Sung-Won Lim<sup>3</sup>, and Ho-Yong Lee<sup>4</sup>

<sup>1</sup> R&D Department, Ceracomp Co., Ltd., Cheonan 31094, Korea

<sup>2</sup> Functional Ceramics Department, Korea Institute of Materials Science, Changwon 51508, Korea

<sup>3</sup> Electro-Optics Systems Team 4, Hanwha System Co., Ltd., Seongnam 13524, Korea

<sup>4</sup> Department of New Materials Science and Engineering, Sunmoon University, Asan 31460, Korea

(Received October 8, 2024; Revised October 15, 2024; Accepted October 24, 2024)

**Abstract:** With the recent active development of laser-based weapons/monitoring/communication systems, there is a significant increase in the demand for improved performance of piezoelectric actuators, a key component of both deformable mirror (DM) and fast steering mirror (FSM) in the systems. The conventional polycrystalline piezoelectric ceramic actuators have limitations in improving their characteristics, so the ultrahigh strain PMN-PZT piezoelectric single crystal multilayer actuators have been developed. In this study, the basic experimental methods were developed to evaluate their stability as well as reliability. The limitations of deformation and applied voltage were confirmed through the breakdown voltage test, and the degree of stability was confirmed through the hammering test. In this study, the breakdown voltage test and the hammering test were confirmed to be effective methods to evaluate their stability as well as reliability. Through these studies, the next-generation PMN-PZT piezoelectric single-crystal multilayer actuator is expected to be applied to various piezoelectric application fields by securing reliability as well as excellent piezoelectric properties.

**Keywords:** PMN-PZT, Single crystal, Piezoelectric, Actuator, Breakdown, Hammering, Stability

## 1. 서론

압전 액추에이터는 압전 현상을 이용하여 입력된 전기 신호를 통해 정밀하고 즉각적인 기계적인 변위 및 진동을 발생시키는 소자이다 [1]. 그리고 압전 액추에이터는 주로 높은 정확도를 요구하는 기계의 정밀한 변형 및 위치 조정 에 주로 활용되며, 또한 햅틱용 진동자, 압전 스피커, 초음

✉ Ho-Yong Lee; [hlee@sunmoon.ac.kr](mailto:hlee@sunmoon.ac.kr)

Copyright ©2025 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

파 가공기와 초음파 모터 등으로 활용된다. 최근 국내외에서 레이저를 기반으로 한 군사용 무기/감시/통신 체계가 활발하게 개발되고 있다 [2,3]. 레이저 기반 체계에서는 장거리 수치 오차나 여러 외부 환경적인 요인들로 인하여 이미지가 왜곡되거나 초점이 흐려지는 문제가 항상 발생하고, 이를 해결하기 위해서는 압전 적층형 액추에이터를 적용한 변형 거울(deformable mirror, DM)과 고속 조종 거울(fast steering mirror, FSM)이 적극적으로 활용되고 있다 [4,5]. 특히, 레이저 기반 무기/감시/통신 체계가 실용화되기 위해서는 변형 거울의 소형화와 고성능화가 필수적이며, 이를 위해서는 기존 PZT [Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>] 다결정 압전 액추에이터가 가지는 낮은 변형률, 높은 변형 이력 그리고 발열 현상 등의 문제를 해결하는 것이 필요하다. 기존 PZT 다결정 압전 액추에이터가 가지는 문제를 해결하기 위하여, 최근 연구들에서 ‘높은 변형률과 낮은 변위 히스테리시스를 동시에 가지는’ 차세대 고성능 압전 적층형 액추에이터의 개발이 활발히 진행되고 있다.

‘높은 변형률과 낮은 변위 히스테리시스를 동시에 가지는’ 차세대 고성능 압전 액추에이터 구현을 위해서는 현재 압전 액추에이터에서 사용되는 다결정 PZT 압전 세라믹 소재의 특성을 뛰어넘는 우수한 압전 소재가 요구된다. 기존 PZT 압전 다결정 세라믹의 압전 상수( $d_{33}$ )는 400 pC/N 수준, 최대 변형률은 약 0.3% 수준, 그리고 변위 히스테리시스는 10~15% 수준(독일 PI사의 적층형 액추에이터 제조에 가장 많이 사용되는 PIC252 세라믹 기준)이다 [6]. 이러한 PZT 다결정 압전 세라믹 소재는 특성 향상 한계가 분명

하여, 최근에 개발된 제1세대(PMN-PT [Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>],  $d_{33}>1,500$  pC/N), 제2세대(PIN-PMN-PT [Pb(In<sub>1/2</sub>Nb<sub>1/2</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-PbTiO<sub>3</sub>], PMN-PZT [Pb(Mg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>)O<sub>3</sub>-Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>],  $d_{33}>1,500$  pC/N)와 제3세대(donor-doped PMN-PZT,  $d_{33}>3,000$  pC/N) 압전 단결정들 [7-11]을 이용하여 순차적으로 차세대 고성능 압전 단결정 액추에이터의 개발이 진행되었다. 이와 같이 고상 단결정 성장법으로 개발된 압전 단결정을 사용하여 기존 세라믹 기반 액추에이터보다 고성능의 압전 단결정 액추에이터를 제작할 수 있다. 다결정 PZT 세라믹 소재의 압전 상수( $d_{33}$ )는 400 pC/N 수준이며, 압전 단결정 소재의 압전 상수( $d_{33}$ )는 제1, 2세대가 1,500 pC/N, 제3세대가 3,000 pC/N 수준을 보이므로 최소 3.75배 이상의 차이를 보인다. 압전 액추에이터의 변형률은 압전 상수( $d_{33}$ )와 인가 전압과 관계가 있으므로 우수한 소재로부터 압전 액추에이터가 우수한 특성을 가질 수 있다. 또한, 상용 세라믹 기반 액추에이터와 같이 적층된 압전 다결정 세라믹 면적의 일부를 절연층을 사용하는 것과 달리, 세라콤에서 자체 제작한 압전 단결정 적층형 액추에이터는 표면에 외부 절연과 전극을 사용함으로써 적층된 압전 단결정의 전체 면적을 효과적으로 활용할 수 있다.

그림 1은 압전 단결정 적층형 액추에이터의 개발 현황을 보여 준다. 압전 단결정 적층형 액추에이터의 개발은 제1세대 PMN-PT 단결정을 이용하여 미국 TRS Technologies Inc.에서 처음 시도되었다 [12,13]. 미국 NASA와 Air Force 등의 지원을 받아서, 레이저 통신 및 무기 체계용

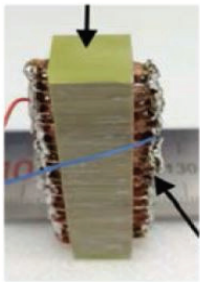
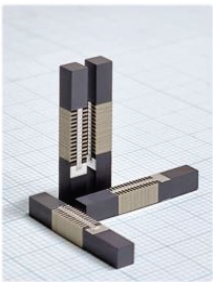
	2015	2020	2023
Photo			
Type of Single Crystals	<ul style="list-style-type: none"> <li>SSCG PMN-PT SC</li> <li>10x10mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SSCG PMN-PZT SC</li> <li>4x4mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SSCG PMN-PZT SC</li> <li>3x3mm</li> </ul>
Purpose	<ul style="list-style-type: none"> <li>Positioning, Dispenser, Pump</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deformable Mirror</li> <li>Positioning, Dispenser, Pump</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deformable Mirror</li> <li>Positioning, Dispenser, Pump</li> </ul>

Fig. 1. Development of piezoelectric single crystal multilayer actuators at Ceracomp Co., Ltd. (South Korea).

변형 거울에 적용하기 위하여 개발되었다. 그리고 싱가포르 Microfine사에서 제1세대 PZN-PT 단결정을 이용하여 stake형 액추에이터(적층형 아님)를 개발하였으나, 낮은 작동력(발생하는 힘)으로 인하여 활용에 한계가 있었다 [14]. 국내에서는 세라콤에서 제1세대 PMN-PT 단결정과 제3세대 PMN-PZT 단결정을 이용하여 적층형 액추에이터를 개발하였다 [15,16]. 이러한 압전 단결정 적층형 액추에이터는 기존 PZT 다결정 액추에이터에 비하여 높은 변형률, 낮은 유전 손실, 낮은 변형 이력 등의 장점을 보이는 것이 확인되었다. 그러나 내전압 특성, 장기 구동 안정성과 신뢰성 등에 대한 연구 및 평가는 아직 이루어지지 못했다.

따라서 본 연구에서는 새로 개발된 압전 단결정 적층형 액추에이터의 안정성과 신뢰성을 확인하는 실험적 방법의 개발을 시도하였다. 기존 적층형 세라믹 캐패시터 (multilayer ceramic capacitor, MLCC)와 기존 PZT 압전 다결정 세라믹 적층형 액추에이터(multilayer ceramic actuator, MLCA)에서는 안정성과 신뢰성을 확인하는 다양한 실험 방법이 개발되었다. 본 연구에서는 기존 평가 방법들 중에서 누설 전류(leakage current), 내전압 특성 (breakdown voltage)과 햄머링 테스트(hammering test) 방법을 통하여 압전 단결정 적층형 액추에이터의 안정성과 신뢰성을 평가하였고, 또한 파괴 전압과 전압 적용 한계치 그리고 결함 존재 유무를 판단하는 방법을 활용하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 고상 단결정 성장법(solid-state single crystal growth method, SSCG method) [17,18]으로 제조된 (001) 방향의 판상형 PMN-PZT 단결정을 사용하여 적층형 압전 단결정 액추에이터를 제작하였다. 사용된 PMN-PZT 단결정은 세라콤에서 자체 제작한 CSL11 압전 단결정(www.ceracomp.com)으로 압전 상수  $d_{33}$ 은 2,000 pC/N이었다 [19]. 그리고 압전 단결정 적층형 액추에이터의 제작은 '장종문 등 [16]'에서 설명된 방법과 동일하게 진행하였으며, 3.0×3.0 mm 면적과 21.5 mm 높이의 크기로 설계되었다 [그림 2].

압전 단결정 적층형 액추에이터의 누설 전류, 내전압 특성과 햄머링 테스트를 진행하기에 전에 먼저 기본 특성인 변형률, 변형 이력과 발열 특성 등을 측정하였다 [그림 3]. 그리고 상대적인 비교를 위하여, 독일 PI사 PZT 다결정 세라믹 적층형 액추에이터(제품 번호: P-883.31) [20]를 작동 조건(PI사의 권장 구동 전압)으로 측정하였다. 파형 발

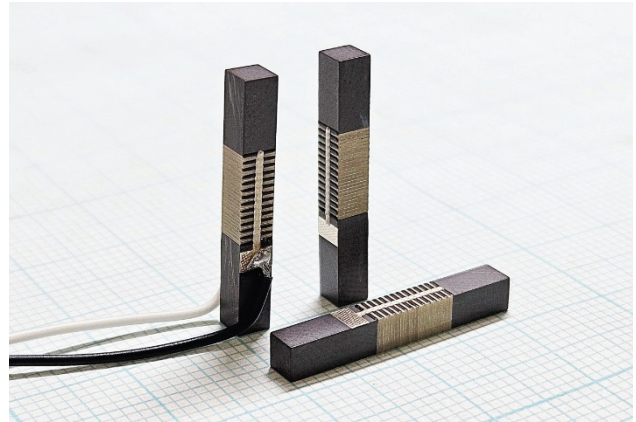


Fig. 2. Fabricated PMN-PZT piezoelectric single crystal multilayer actuators.

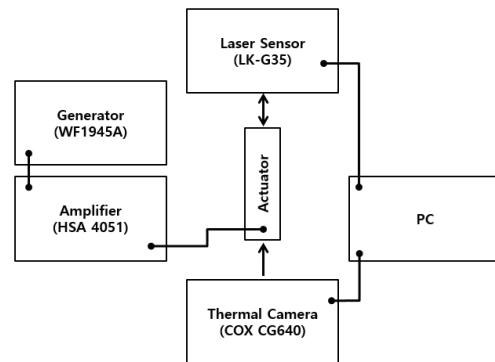


Fig. 3. Schematic diagram for measuring strain and thermal characteristics.

생기와 전압 증폭기를 사용하여 전기장 1 kV/cm에서의 변형률을 측정하고, 동일한 측정 장비 구성과 정현파 1 kHz 주파수에서 각각 1 kV/cm (세라콤), 2kV/cm (PI)의 전기장으로 구동 시에 액추에이터의 시간에 따른 온도 변화를 측정하여 발열 특성을 평가하였다. 그 이후에 내전압 특성을 평가하기 위해 electrometer/high resistance meter 장비를 이용했고 0 V에서 1 kV/mm 전기장까지의 전압을 인가하여 전압에 따른 누설 전류를 측정하였다 [21].

Electrometer/high resistance meter 장비를 이용하여 current limit을 1 mA로 설정한 상태에서 pulse로 인가 전압을 증가시켰고, 인가되는 전압에 따른 누설 전류를 PC로 수집하여 제조된 압전 단결정 적층형 액추에이터가 어느 정도의 전압까지 파손 없이 유지될 수 있는지 확인하였다 [그림 4]. 내전압 특성 테스트는 정격전압보다 높은 전압을 pulse로 주는 내전압 시험을 의미한다 [22,23]. 이를 기반으로 햄머링 테스트 전압을 설정하였다 [24]. 그리

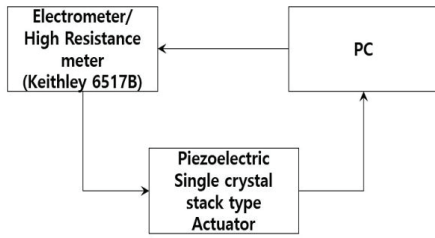


Fig. 4. Hammering test measurement setup diagram.

고 최종적으로 설정한 목표 전압으로 3초간 반복하여 5회 씩 햄머링 테스트를 진행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 변형 특성

그림 5는 제작된 적층형 PMN-PZT 압전 단결정 액추에이터의 전기장에 따른 변형률 특성과 변형 이력을 나타낸 그래프이다. 그리고 독일 PI사 PZT 다결정 세라믹 적층형 액추에이터(제품 번호: P-883.31) [20]를 동일 조건에 측정하여, 두 액추에이터들의 변형 특성을 비교하였다. 변위 히스테리시스(반복적으로 전압이 상승할 때와 하강할 때의 변위 차이를 비교하는 중요한 지표이다. 변위 히스테리시스를 계산하는 방식으로는 전압이 증가하는 구간에서 측정된 기계적인 변위와 감소하는 구간에서 측정된 변위 간의 차이를 이용하여 계산한다. 계산식은 다음과 같다.

$$\text{Strain Hysteresis (\%)} = \frac{\Delta D}{D_{\max}} \times 100 \quad (1)$$

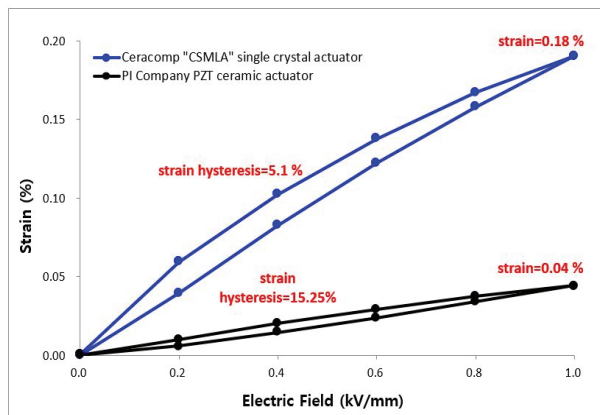


Fig. 5. Comparison of the strain (%) characteristics: PMN-PZT piezoelectric single crystal multilayer actuator vs. PI P-883.31.

여기서  $\Delta D$ 는 전압이 증가, 감소할 때의 가장 변위 차가 큰 전압 값에서의 변위를 의미하며  $D_{\max}$ 는 최대 인가전압에서의 변위 값을 의미한다.

동일한 1.0 kV/mm 전기장 조건에서 두 적층형 액추에이터들을 비교하였을 때, PMN-PZT 압전 단결정 적층형 액추에이터는 PZT 세라믹 기반 PI사 액추에이터보다 변형률이 4배 이상 높았고, 변위 히스테리시스는 1/3 수준으로 낮은 특성을 보였다.

#### 3.2 누설 전류(leakage current)

제작된 PMN-PZT 압전 단결정 적층형 액추에이터에 전기장을 1 kV/mm (인가전압 250 V)까지 올리면서, 전압 상승에 따른 누설 전류를 측정하였다. 전압을 3 V씩 올리면서 누설 전류를 전류를 측정하였을 때, 최대 10.5 nA 수준의 전류가 측정되었다 [그림 6]. 이전 실험 결과들과 비교하면, 10.5 nA 수준의 누설 전류는 기존 적층형 세라믹 캐패시터(MLCC)와 PZT 압전 다결정 세라믹 적층형 액추에이터(MLCA)에 비하여 상대적으로 낮았다 [21-23].

#### 3.3 발열 특성(heat generation)

그림 7은 제작된 적층형 PMN-PZT 압전 단결정 액추에이터의 구동 시간에 따른 발열 특성을 나타낸 그래프이다. 적층형 PMN-PZT 압전 단결정 액추에이터의 경우 권장 구동전압인 250 V (전기장=1 kV/mm) 조건이며, PI사 압전 세라믹 적층형 액추에이터의 경우 권장 구동전압인 120 V (전기장=2 kV/mm) 조건으로 전압을 인가하여 구동하였다. 그 외 조건으로는 100 N 예압, 정현파 형태로 1 kHz 구

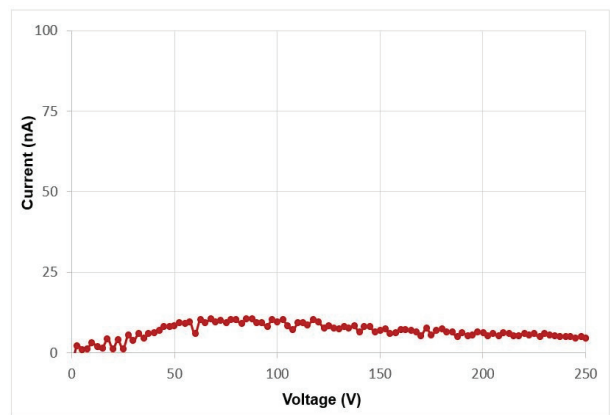
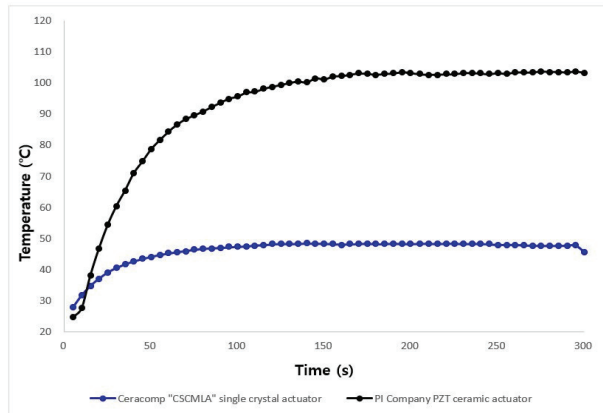


Fig. 6. Leakage current characteristics of the piezoelectric single crystal multilayer actuator.

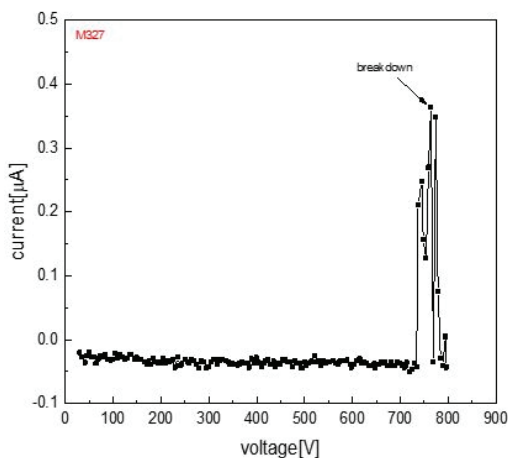


**Fig. 7.** Comparison of the heating characteristics during operation: PMN-PZT piezoelectric single crystal multilayer actuator (@250 V) vs. PI P-883.31 (@120 V).

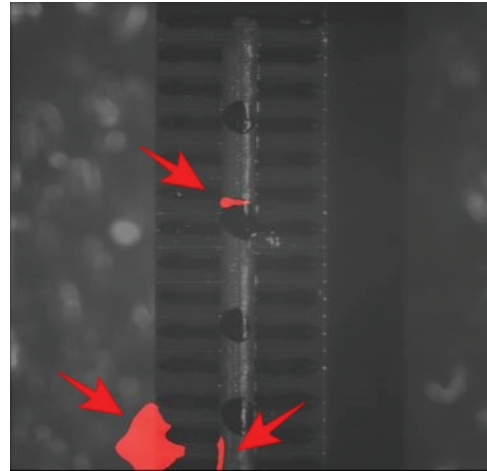
동 주파수 조건에서 5분 동안 구동하면서 비접촉식 온도 측정을 통하여 각각의 압전 액추에이터에서 발생하는 발열을 검사하였다. 5분 이내에 각각의 압전 액추에이터는 최대 온도로 발열이 발생하였는데 PMN-PZT 압전 단결정 적층형 액추에이터는 약 2분이 경과된 이후로 발열 온도가 유지되면서 최대 48°C, PI사 압전 다결정 세라믹 적층형 액추에이터는 약 3분이 경과된 이후로 발열 온도가 유지되면서 최대 103°C 수준으로 발열 정도의 차이를 보였다.

### 3.4 내전압 특성(breakdown voltage test)

제작된 압전 단결정 적층형 액추에이터가 어느 정도의 전압까지 견딜 수 있는지 내전압 시험을 진행하였다. 이 시



**Fig. 8.** A graph depicting the breakdown test under no-load conditions.



**Fig. 9.** The failure occurrence points in the breakdown test under no-load condition.

험은 누설 전류 측정과 유사한 시험으로 전압을 3 V씩 올리면서 전류를 측정하였으나 최대 인가 전압을 1,000 V로 설정하여 시험하였다. 그림 8에서 700 V 수준까지는 안정적인 전류가 흐르다가 720~730 V 수준에서 급격히 많은 양의 전류가 흘렀다는 것을 확인할 수 있다. 700 V는 전기장 2.8 kV/mm 수준이며, 이 전기장 조건에서 단결정의 절연 파괴가 일어난 것을 보여 준다. 그림 9에서 표시된 부분은 균열이 발생된 부분의 사진이다.

### 3.5 햄머링 테스트(hammering test)

내전압 시험(breakdown test) 결과와 실제 구동 조건 ( $E \leq 1.0$  kV/mm)을 고려하여, PMN-PZT 압전 단결정 적층형 액추에이터의 햄머링 테스트 조건을 전기장  $E=1.3$  kV/mm (360 V)로 결정하였다. 햄머링 테스트는 최대 전압 360 V로 rise/fall time 1 msec으로 설정하고, 시간의 간격은 0.5 sec로 설정하였다. 이와 같은 조건으로 3초간 5회 반복하는 조건으로 시험하였다 [그림 10]. 5차례 햄머링 테스트를 실시하고, 추가적으로 leakage current 시험과 외관에서의 burning, fracture 흔적을 검사하였다. 그 결과, 내전압 시험의 700 V 이상에서 보였던 문제점과 같은 문제를 보이지 않으며, 압전 단결정 적층형 액추에이터는 햄머링 테스트에서 안정적이어서 파괴와 관련된 특이점을 보이지 않았다 [그림 11].

이러한 결과는 제작된 압전 단결정 적층형 액추에이터의 절연 파괴 조건인 720 V의 50%인 360 V (즉  $E=1.3$  kV/mm) 이하에서는 안정적으로 사용할 수 있는 것으로 확인하였다.

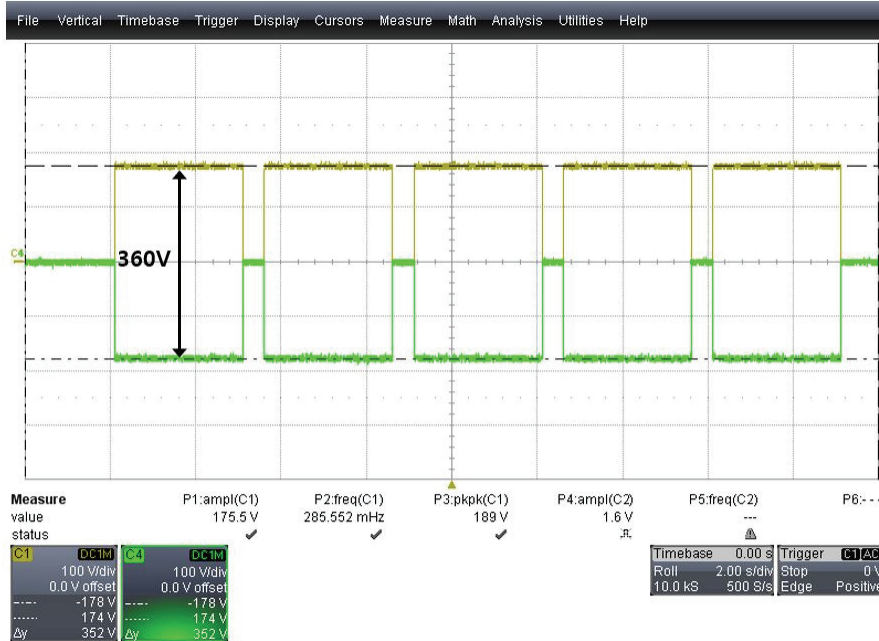


Fig. 10. The diagram depicting the driving conditions of the hammering test.

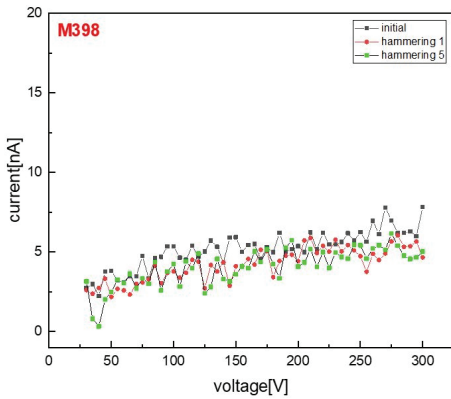


Fig. 11. The graph depicting the hammering test results under no-load conditions.

#### 4. 결론

압전 적층형 액추에이터는 높은 정확도를 요구하는 기계의 정밀한 변형 및 위치 조정 그리고 햅틱용 진동자, 압전 스피커, 초음파 가공기와 초음파 모터 등의 분야에서 활용되었다. 특히, 최근 국내외에서 레이저 기반 무기/감시/통신 체계가 활발하게 개발되면서, 변형 거울(deformable mirror, DM)과 고속 조종 거울(fast steering mirror, FSM)의 핵심 부품인 압전 액추에이터의 성능 향상에 대한

요구가 크게 증가하고 있다. 기존 PZT 다결정 압전 세라믹 액추에이터는 특성 향상의 한계가 분명하여, 최근에 활발히 개발되고 있는 제1세대(PMN-PT,  $d_{33} > 1,500$  pC/N), 제2세대(PIN-PMN-PT,  $d_{33} > 1,500$  pC/N)와 제3세대(doped PMN-PZT,  $d_{33} > 3,000$  pC/N) 압전 단결정을 적용한 ‘차세대 압전 단결정 적층형 액추에이터’가 개발되었다.

본 연구에서는 내전압 시험과 햅머링 테스트의 실험 방법을 활용하여 최근에 개발된 PMN-PZT 압전 단결정 적층형 액추에이터의 안정성과 신뢰성을 평가하였다. 내전압 시험을 통하여 변형과 전압의 한계를 확인하였고, 햅머링 테스트를 통하여 안정성 정도를 확인하였다. 또한 내전압 시험과 햅머링 테스트는 연구 결과 부품의 성능뿐만 아니라 안정성을 평가할 수 있는 효과적인 방법임을 확인하였다. 새로 개발된 압전 단결정 적층형 액추에이터를 실제 적용하기 위해서는 안정성과 신뢰성을 확인하는 다양한 실험적 방법들에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 이러한 연구들을 통하여 차세대 압전 단결정 적층형 액추에이터는 우수한 압전 특성뿐만 아니라 신뢰성을 확보하여 다양한 압전 응용 분야에 적용될 것으로 예상된다.

#### ORCID

Ho-Yong Lee

<https://orcid.org/0000-0002-7239-5027>

## 감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No.KRIT-CT-21-024, 고에너지 레이저용 변형 거울 설계 및 파면보상 기술).

## REFERENCES

- [1] C. Niezrecki, D. Brei, S. Balakrishnan, and A. Moskalik, *Shock Vib. Dig.*, **33**, 269 (2001).
- [2] J. H. Kong and T. H. Kim, *J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc.*, **25**, 623 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2024.25.6.623>
- [3] S. Kang, *J. Korea Acad. Ind. Coop. Soc.*, **25**, 544 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2024.25.6.544>
- [4] H. Pagès, T. Antonini, T. Aribi, M. Aubry, A. Bastard, E. Beaufort, R. Cousty, G. Dutey, C. Grèzes-Besset, D. Groëninck, H. Krol, N. Marchet, A. Moreau, P. Morin, R. Palomo, and J. C. Siquin, *Proc. Adaptive Optics Systems V* (SPIE, Edinburgh, United Kingdom, 2016).  
doi: <https://doi.org/10.1117/12.2232971>
- [5] M. Strachan, R. Myers, K. Cooke, J. Hampshire, J. Hough, S. Rowan, M. van Veggel, K. Kirk, D. Hutson, E. Uzgur, and S. S. Kim, *Proc. Adaptive Optics Systems II* (SPIE, San Diego, USA, 2010).  
doi: <https://doi.org/10.1117/12.856997>
- [6] PI Ceramics, *Piezoceramic Materials*, <https://www.piceramic.com/en/expertise/piezo-technology/piezoelectric-materials> (2024).
- [7] S. Zhang, S. M. Lee, D. H. Kim, H. Y. Lee, and T. R. Shrout, *J. Am. Ceram. Soc.*, **91**, 683 (2008).  
doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.02190.x>
- [8] S. Zhang, S. M. Lee, D. H. Kim, H. Y. Lee, and T. R. Shrout, *J. Appl. Phys.*, **102**, 114103 (2007).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2817641>
- [9] S. Zhang, S. M. Lee, D. H. Kim, H. Y. Lee, and T. R. Shrout, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 122908 (2008).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2992081>
- [10] S. Zhang, S. M. Lee, D. H. Kim, H. Y. Lee, and T. R. Shrout, *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 232911 (2007).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.2746055>
- [11] H. P. Kim, H. Wan, C. Luo, Y. Sun, Y. Yamashita, T. Karaki, H. Y. Lee, and X. Jiang, *IEEE Trans. Ultrason. Eng.*, **69**, 3037 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2022.3181236>
- [12] S. C. Woody, S. T. Smith, X. Jiang, and P. W. Rehrig, *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 075112 (2005).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.1984974>
- [13] T. B. Xu, L. Tolliver, X. Jiang, and J. Su, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 042906 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.4790142>
- [14] Microfine Materials Technologies PTE Ltd., *Actuators at a Glance*, [https://www.microfine-piezo.com/product\\_cat.php?cat=31](https://www.microfine-piezo.com/product_cat.php?cat=31) (2020).
- [15] H. C. Park, P. Adyatama, and H. Lee, *J. Korean Ceram. Soc.*, **50**, 545 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.4191/kcers.2013.50.6.545>
- [16] J. Jang, S. Park, J. Huh, K. H. Lee, H. Y. Lee, J. J. Choi, Y. Min, and W. H. Yoon, *Sens. Actuators, A*, **342**, 113617 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113617>
- [17] Ceracomp Co., Ltd., *Solid-State Single Crystal Growth [SSCG] Method*, <https://www.ceracomp.com/theme/myweb/html/technique/1.php> (2022).
- [18] S.J.L. Kang, J. H. Park, S. Y. Ko, and H. Y. Lee, *J. Am. Ceram. Soc.*, **98**, 347 (2015).  
doi: <https://doi.org/10.1111/jace.13420>
- [19] Ceracomp Co., Ltd., *Piezoelectric Single Crystal Manufactured by SSCG*, <https://www.ceracomp.com/theme/myweb/html/product/1.php> (2022).
- [20] PI Ceramics, *PICMA Stack Multilayer Piezo Actuators*, <https://www.piceramic.com/en/?type=5600&downloadUId=838&downloadFileUId=746> (2023).
- [21] L. S. Zhang, Y. B. Liu, C. L. Pan, and Z. H. Feng, *Sens. Actuators, A*, **199**, 116 (2013).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.05.014>
- [22] J. Li, J. Zhao, and Z. You, *Proc. 2018 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuits (EDSSC)* (IEEE, Shenzhen, China 2018) p. 1.  
doi: <https://doi.org/10.1109/EDSSC.2018.8487147>
- [23] A. Teverovsky, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, **19**, 1448 (2012).  
doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6260022>
- [24] D. Yu, K. Dai, J. Zhang, B. Yang, H. Zhang, and S. Ma, *Appl. Sci.*, **10**, 8435 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.3390/app10238435>