

사단법인 한국소음진동공학회

# 2008 KSNVE Annual Spring Conference

## 춘계 소음진동 학술대회

현대성우리조트



국민소득 2만불 시대의 소음진동 : 소프트웨어냐? 하드웨어냐?

일시: 2008년 4월 17~18일(목, 금)

장소: 현대성우리조트

후원 : 한국과학기술단체총연합회 · 한국학술진흥재단 · 한국철도시설공단



사단  
법인

한국소음진동공학회

<http://www.ksnve.or.kr> / [ksnve@ksnve.or.kr](mailto:ksnve@ksnve.or.kr)

※ 논문번호: KSNVE08S-\*\*\*-\*\* (\* 저자명 뒷번호 구분)

※ 첫 번째 저자가 발표자 임/\* 영어발표/+학생발표

**❖ 실내음향 : 4월 17일(목) 13:20~14:40 - 루비III(5F)**

**좌장 : 정정호(방재시험연)**

- + 확산 지향성을 고려한 확산체의 설계 ..... 김용희, 김재호, 김정준, 전진용(한양대)···02-01
- + 콘서트홀에서 객석과 무대의 음향방사를 위한 확산체 설계 ..... 김재호, 김용희, 전진용(한양대)···02-02
- ISO 방법론을 이용한 음향 확산체 설계 ..... 서춘기, 이평직, 전진용(한양대), 정정호(방재시험연)···02-03
- SCALE MODEL설계를 적용한 남사당 전용공연장의 건축음향설계 ..... 김정중(환경음향연), 손장열(한양대)···02-04
- 다목적 공간의 소음 및 실내음향 제어 ..... 정정호(방재시험연), 김정중(환경음향연), 조창근(서일대학)···02-05

**❖ 토목구조물 소음진동 : 4월 17일(목) 13:20~14:40 - 루비II(5F)**

**좌장 : 이병구(원광대)**

- + 일정한 곡선길이를 갖는 양단회전 아치의 자유진동 ..... 윤희민, 이병구, 이태은, 김권식(원광대)···03-01
- 구형 중공단면을 갖는 원호아치의 자유진동 해석 ..... 이태은, 이병구, 윤희민(원광대), 박광규(대전대)···03-02
- 진동 인텐시티 계측 방법을 이용한 무한 보의 손상감지에 대한 기초 연구 ..... 허영철, 이종원(기계연), 김재관(서울대), 길현권(수원대)···03-03
- +\*Model Updating of an Electric Cabinet using Shaking Table Test ..... Jintao Cui, Dookie Kim(Kunsan National Univ.), Sung Gook Cho(JACE Korea), Ki Young Koo(KAIST), Yang Hee Cho(Univ. of Incheon)···03-04

**❖ 진동제어I : 4월 17일(목) 13:20~14:40 - 루비I(5F)**

**좌장 : 박기환(GIST)**

- + 자기 베어링과 영구자석 베어링으로 이루어진 시스템의 비연성 제어 ..... 박상현, 이종원(KAIST)···04-01
- + 엘리베이터 능동진동제어를 위한 동적 모델링 및 제어기 설계 ..... 김기영, 곽문규(동국대)···04-02
- + 전자기 선터 감쇠기를 이용한 빔의 진동억제에 관한 연구 ..... 성태홍, 임승현, 오일권(전남대)···04-03
- + 압전체를 이용한 에너지 수집 장치 개발 및 실험 ..... 김기영, 곽문규(동국대), 강호용, 김내수(ETRI)···04-04

**❖ 선박진동 : 4월 17일(목) 13:20~14:40 - 난실(5F)**

**좌장 : 허주호(대우조선해양)**

- 원형 고무 세그먼트를 갖는 탄성 커플링의 동특성과 적응성 ..... 이돈출, 남택근(북포해양대), 김진경(동이공업), 유정대(현대중공업)···05-01
- 선박내 접수탱크 진동에 대한 실험/이론적 연구 ..... 김극수, 조현동, 공영모, 허주호(대우조선해양)···05-02
- + 주변 음장과 연동하는 탄성 구조체의 감쇠 효과 ..... 이문석, 박윤식, 박영진(KAIST)···05-03
- 선박용 냉동기 받침대의 임피던스해석 ..... 김현실, 김봉기(기계연), 이두호(동의대), 이경덕, 변정우(현대중공업)···05-04
- + 자켓형 해양 구조물의 동적거동에 대한 민감도 연구 ..... 이정탁, 이강수, 신상학, 손충렬(인하대)···05-05

**❖ 항공우주 : 4월 17일(목) 13:20~14:40 - 국실(5F)**

**좌장 : 고한영(ADD)**

- Monte Carlo모의에 의한 항공전자장비의 PSD랜덤진동해석과 등가정적해석의 ... ..... 박희범, 이석규, 양성철, 김진천(LIG넥스원)···06-01
- 응력 분포에 따른 압전 유니모프 작동기의 성능 평가 ..... 이종원, 강래형, 한재홍(KAIST), 정상준, 고한영(ADD)···06-02
- 비접촉 진동측정 시스템을 이용한 블리스크의 진동분석 ..... 정규강, 김명국, 박희용, 전승배(삼성테크윈), 박노길(부산대)···06-03
- + 국부적으로 기울어진 지면을 고려한 제자리비행 로터의 비정상 하중 소음 측정 ..... 장지성, 이용우, 이덕주(KAIST)···06-04

**❖ 일반기계 소음진동 : 4월 17일(목) 13:20~14:40 - 죽실(5F)**

**좌장 : 정진태(한양대)**

- + 진동/충격 완화를 위한 차량용 거치대의 개발 ..... 임형빈, 정진태, 박기선, 김두환(한양대)···07-01
- + 산업용 로봇 손목의 동력 전달계에 대한 동특성 해석 ..... 김우형, 정진태(한양대)···07-02
- 적합적교분해법을 이용한 복잡한 동적응답의 선형화 모델링 기법 ..... 이수일(서울시립대), 홍상혁(서울대)···07-03
- 축대칭 원통 탄성 셀의 진동음향 ..... 박찬일(강릉대)···07-04
- 엔진마운트의 전달경로해석을 통한 실내소음저감 시뮬레이션 ..... 이충휘, 김영호, 최현준, 원종식(GM대우)···07-05

**❖ 포스터 발표 1 : 4월 17일(목) 14:40~15:20 - 골드홀(5F)**

**자동차/항공우주/기계시스템**

- + P1 || 유압설계 변수에 따른 전기유압식 현가장치의 특성 ..... 고희영, 이진복(숭실대)···08-01
- + P2 || 저진동 차량을 위한 결합부 인자 연구 ..... 이재우, 강민석, 성영석, 이상범, 임홍재(국민대)···08-02
- P3 || 해당 논문은 4월 17일(목) 일반기계 소음진동 세션으로 발표시간 변경.
- P4 || 부트스트랩 기법을 이용한 소음진동 스펙트럼 분석법 소개 ..... 전영두, 박종찬, 정의승(항공우주연)···08-03

# 응력 분포에 따른 압전 유니모프 작동기의 성능 평가

## Performance Evaluation for Piezoelectric Unimorph Actuator with Stress Distribution

이종원\*, 강래형\*, 한재홍†, 정상준\*\*, 고한영\*\*

Jong-Won Lee, Lae-Hyoung Kang, Jae-Hung Han, Sang-Jun Jung, Han-Young Ko

**Key Words** : Unimorph Actuator(유니모프 작동기), Piezoelectric Coefficient(압전계수), Stress(응력).

### ABSTRACT

This paper deals with the performance evaluation of piezoelectric unimorph actuator. In the unimorph design, the thickness ratio of substrate to piezoelectric material and the elastic modulus ratio of substrate to piezoelectric material are important parameters. There exists only one structural configuration that satisfies the optimal condition among them, and actuators using that configuration exhibit better actuating displacements. Another design parameter is the piezoelectric coefficient which can be improved due to the induced tensile stress and voltages. The application of the tensile stress to the piezoelectric material makes it get higher piezoelectric coefficient and the total displacement performance of the unimorph actuator is improved. Finally, the piezoelectric actuator system with spring elements is fabricated and it shows higher actuating displacement capability.

## 1. 서론

스마트 작동기는 기존의 기계적 메커니즘을 이용한 작동기에 비해 단위 부피당 낼 수 있는 일률이 100에서 1000배에 이르고 단위 질량당 낼 수 있는 에너지는 10배정도에 이른다[1]. 이러한 작동기를 이용하여 구조물 진동제어, 유동흐름 제어, 정밀 제어 등의 다양한 분야에 대해 적용가능성이 연구되고 있다. 특히, 압전 재료를 이용한 작동기는 광범위한 주파수 범위, 빠른 응답속도, 높은 공진 주파수를 가지고 있다. 하지만, 이런 장점에도 불구하고 압전작동기의 사용이 제한되는 가장 큰 문제점은 유발되는 변위가 작다는 점이다. 일반적으로 압전 작동기는 길이방향의 작동 변형률이 0.1~0.2%정도 되는 것으로 알려져 있다[2]. 이를 극복하기 위해 증폭 메커니즘을 이용한 다양한 형태의 압전 작동기가 개발되었다. 그 중에서도 외부의 부가적인 장치 없이 재료의 굽힘(bending)이나 압전 재료의 길이 방향으로의 팽창을 이용하여 변위를 증폭한 내부 증폭형(internally leveraged) 작동기는 다른 형태의 작동기에 비해서 큰 변위를 얻을 수 있다. 유니모프(unimorph), 바이모프(bimorph), RAINBOW(Reduced And Internally Biased Oxide Wafer)나 THUNDER(THin-layer composite UNimorph ferroelectric DrivER and sensor), LIPCA(Lightweight Piezo-composite Curved Actuator) 등의 작동기가 이에 속한다[3].

큰 변위를 얻을 수 있는 내부 증폭형 작동기 중

다른 작동기에 비해 제작이 용이한 유니모프 작동기를 활용하여 좀더 광범위한 응용 분야에 적용하고자 한다. 하지만 실제 적용에 걸림돌이 되는 가장 큰 문제점은 유니모프 작동기가 높은 변위를 유발하는 반면 상대적으로 작동력이 낮다는 점이다.

본 논문에서는 위와 같은 사항을 극복하고자 유니모프 작동기의 작동 변위와 작동력을 모두 증대시키기 위해 작동기의 성능을 결정하는 내외부 요소를 살펴보고 적용 방안을 탐색해 보고자 한다.

## 2. 압전 작동기 설계

### 2.1 압전 유니모프 작동기 설계

압전 유니모프 작동기는 비압전층인 기저층(substrate)에 압전층을 부착시킨 구조를 가진다. 따라서, 압전 유니모프 작동기 설계시 비압전층과 압전층 사이의 관계에 따라 그 성능이 달라질 수 있다. 단순지지(simply supported)조건에서 압전 유니모프 작동기의 변위 및 작동력의 이론식을 살펴보면 다음과 같다.

$$\delta = \frac{6\eta\xi(1+\eta\xi)}{\eta^2\xi^4 + 4\eta\xi^3 + 6\eta\xi^2 + 4\eta\xi + 1} \frac{3}{4} \frac{d_{31}EL^2}{t_{tot}} \quad (1)$$

$$F = \frac{\eta\xi}{(1+\eta\xi)(1+\xi)} \frac{3}{L} \frac{d_{31}wEE_p t_{tot}^2}{L} \quad (2)$$

여기서,  $\delta$ 는 작동변위,  $F$ 는 작동력을 나타내며,  $L$ ,  $w$ ,  $t_{tot}$ 은 각각 작동기의 길이, 너비 및 전체두

† 교신저자; 정회원, KAIST 항공우주공학과

E-mail : jaehunghan@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3723, Fax : (042) 869-3710

\* KAIST 항공우주공학과

\*\* 국방과학연구소

계를 의미한다.  $d_{31}$  과  $E_p$  는 압전재료의 압전계수와 탄성계수이며,  $\xi = t_{sub} / t_p$  로서 비압전층의 두께 ( $t_{sub}$ )를 압전층의 두께( $t_p$ )로 나뉜 두께비이고  $\eta = E_{sub} / E_p$  로서 비압전층의 탄성계수( $E_{sub}$ )를 압전층의 탄성계수( $E_p$ )로 나뉜 탄성계수비이다. 식(1)과 (2)를 최적화시키는 조건은 다음과 같다[4].

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{\eta}} \quad (3)$$

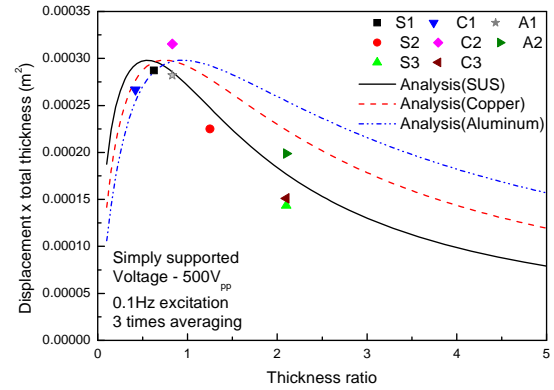
식 (3)에서 알 수 있듯이 비압전층과 압전층의 재료가 결정되면 두 층간의 두께비를 최적화시켜 작동 변위와 작동력 모두 큰 압전 유니모프 작동기를 설계할 수 있다. 본 연구에서는 스테인리스 스틸, 구리, 알루미늄을 기저층로 사용하였으며 압전재료는 Morgan Electro Ceramics 사의 PZT 5A3 을 사용하였다. 기저층은 길이가 63.5mm, 너비가 13.7mm 이며 두께는 Table 1 에 나타내었다. 압전재료는 길이 38mm, 너비 12.7mm 이고 두께는 0.24mm 이다. Table 1 에서 최적이라고 표시한 시편이 식 (3)을 만족하는 경우이다.

**Table 1 Specimens**

Substrate	Elastic Modulus (GPa)	Thickness (mm)	No.	$\xi$
Stainless steel	200	0.15	S1(최적)	0.625
		0.3	S2	1.250
		0.5	S3	2.083
Copper	110	0.1	C1	0.417
		0.2	C2(최적)	0.833
		0.5	C3	2.083
Aluminum	68	0.2	A1(최적)	0.833
		0.5	A2	2.083
PZT 5A3	61	0.24	-	-

## 2.2 압전 유니모프 작동기 성능비교

Fig. 1 에 실제 제작된 압전 유니모프 작동기의 변위 성능을 해석 결과와 비교하여 나타내었다. 실험 조건은 경계조건이 단순 지지 조건에서 0.1Hz 의 가진 주파수로 500V<sub>pp</sub> 까지 인가전압을 가하여 변위를 측정하였다. 변위 실험을 수행한 시편들의 전체두께가 동일하지 않고 각각 다르기 때문에 정확한 비교를 위하여 측정된 변위에 각 시편의 전체두께를 곱하였다. Fig. 1 에서 확인할 수 있듯이 최적화된 시편이 그렇지 않은 시편보다 더 큰 변위 성능을 보이고 있다.



**Fig. 1 Comparison of displacement at simply supported condition(500V<sub>pp</sub>).**

## 3. 압전계수 특성

### 3.1 응력에 따른 압전계수 변화 특성

식(1)과 (2)에서 두께비와 탄성계수비 외에도 압전 작동기의 성능을 향상시킬 수 있는 요소로 압전계수인  $d_{31}$ 을 고려할 수 있다. 일반적으로 압전계수는 압전 재료 자체 특성으로서 하나의 상수로 표기되지만 인가전압이나 가해지는 응력에 따라 큰 영향을 받는다고 알려져 있다[5,6,7]. 벌크(bulk) 압전재료의 수직 압축응력에 따른 압전계수의 변화를 살펴보면 Hard 계열(PZT 4, 8) 압전재료의 압전계수는 적정 수준의 압축응력 이하에서는 압전계수가 증가하다가 그 이상이 되면 압전계수가 감소하며, Soft 계열(PZT 5A, 5H)도 그 특성이 뚜렷하지는 않으나 Hard 계열과 유사한 경향을 보인다[5]. 한편, 압전재료 내의 인장응력은 압전재료의 유효압전계수를 증가시켜 작동기의 변위 및 작동력 성능을 향상시키며 작동기의 압전재료에 생성되는 인장응력이 클수록 더 나은 변위성능을 보인다[6,7].

### 3.2 압전계수 측정

응력에 따른 압전계수의 변화를 살펴보기 위해 Fig. 2와 같은 실험장치를 구성하고 압전계수를 측정하였다. 먼저 PZT 5A3 (23.5×10.5×0.24 mm)에 스트레인 게이지를 붙이고 이를 실험장치에 접착제를 사용하여 양 끝단을 고정하였다. 변형률은 압전계수와 전계의 곱으로 나타낼 수 있다. 그러므로 변형률과 전계를 알면 압전계수를 구할 수 있다. 전계는 인가된 전압을 압전층의 두께로 나누어 준 값이다. 실험장치에서 압전재료에 인장응력이 존재하도록 한쪽 고정부분을 늘인 후, 전압을 인가하여 변형률을 측정하였다.

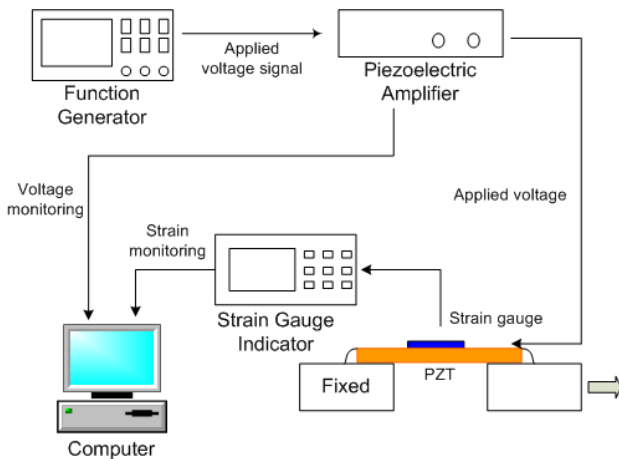


Fig. 2  $d_{31}$  coefficient measurement system.

Fig. 3에서 인장응력이 증가할수록 압전계수가 증가하며, 인가전압이 증가할수록 압전계수가 증가함을 알 수 있다.

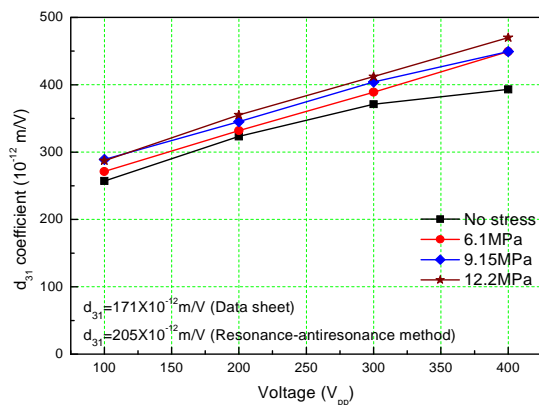


Fig. 3  $d_{31}$  coefficient of PZT 5A3.

## 4. Pre-load 가 가해진 압전 작동기

### 4.1 Pre-load 에 따른 변위 성능 변화

앞선 연구 결과를 토대로 압전층에 인장응력이 가해지도록 추를 이용하여 작동기에 압축력의 pre-load를 가한 후, 압전 유니모프 작동기의 변위 성능을 살펴보았다(Fig. 4). 이때 사용한 시편은 2장에서 변위 성능이 크게 나타난 최적화된 시편이며, 단순 지지 조건에서 0.1Hz의 가진 주파수로 400V<sub>pp</sub>와 500V<sub>pp</sub>의 전압을 가하여 변위 성능을 살펴보았다. Fig. 5에서 보듯 모든 경우에 대해 압축력이 증가할수록 작동변위가 증가하였다.

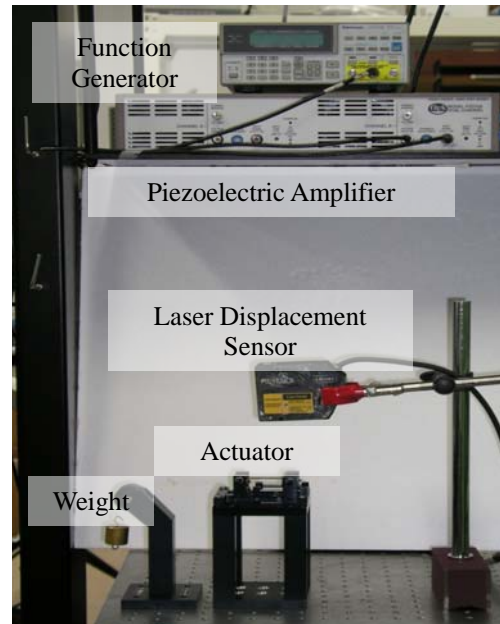


Fig. 4 Displacement measurement of the actuator with compressive pre-load.

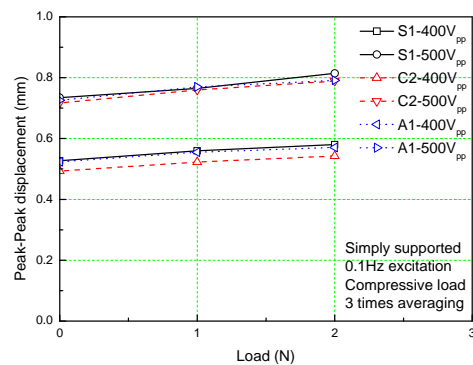


Fig. 5 Displacement of specimens with pre-load.

### 4.2 응력 분포 변화

압축력의 pre-load에 따라 작동기 내부의 응력 상태, 특히 압전층의 응력 상태가 어떻게 변하는지 살펴보았다. 압전층의 응력 상태 변화를 직접적으로 살펴보기는 불가능하기 때문에 pre-load에 따른 압전 작동기 표면의 변형률을 측정하여 결과를 ABAQUS를 통해 해석한 결과와 비교하여 작동기 내부의 응력 상태를 유추하였다. 사용한 시편은 S1이며, 정중앙 지점을 선택하여 pre-load에 따른 표면 변형률을 측정하였다. Fig. 7에서 보듯이 실험결과와 해석결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 이를 통해 pre-load에 따른 실제 작동기 내부의 응력 분포는 해석으로 얻어진 내부 응력 분포와 비슷하다고 가정할 수 있다.

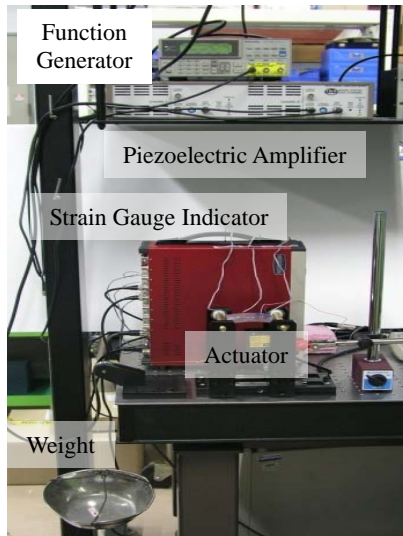


Fig. 6 Surface strain measurement system.

Pre-load에 따른 작동기 내부의 압전층 응력 분포를 해석하여 Fig. 8에 나타내었다. 결과에서 보듯이 pre-load가 증가할수록 압전층 전체에 더 큰 인장응력이 걸리게 되는 것을 확인할 수 있다. Table 2에 pre-load에 따른 유효압전계수와 변위의 변화를 나타내었다. 시편 S1의 결과(Fig. 5)에서 힘을 가하지 않은 경우와 비교하여 변위 향상 정도를 계산하였으며 PZT 5A3의 400V<sub>pp</sub>와 500V<sub>pp</sub>에서의 결과(Fig. 3)를 선형 피팅(fitting)하여 힘이 가해지지 않은 경우와 비교하여 압전계수 향상 정도를 계산하였다. 결과에서 보듯이 압축력의 pre-load로 인해 압전층의 인장응력이 증가하고, 이에 따라 유효압전계수가 증가하여 작동변위가 증가한 것으로 보인다.

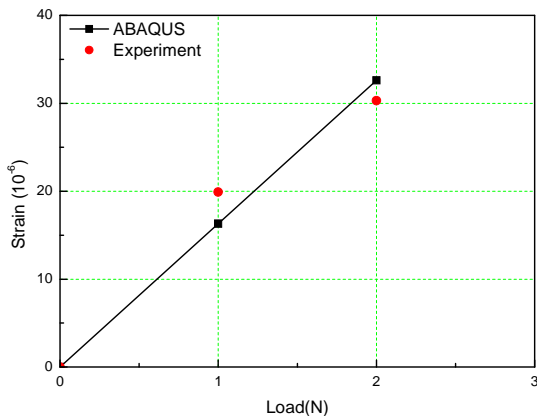


Fig. 7 Surface strain of specimen S1.

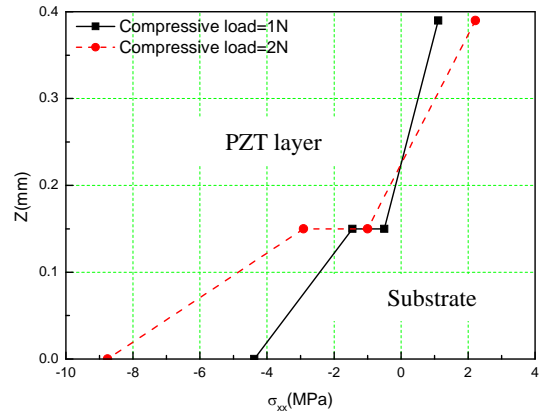


Fig. 8 Stress distribution of specimen S1.

Table 2 d<sub>31</sub> and displacement variation

	1N (400V <sub>pp</sub> )	2N (400V <sub>pp</sub> )	1N (500V <sub>pp</sub> )	2N (500V <sub>pp</sub> )
d <sub>31</sub> variation	3%	6%	3%	6%
Displacement variation	6%	10%	4%	10%

#### 4.3 Pre-load 가 가해진 압전 작동기 모듈

위 연구결과를 반영하여 압축력의 pre-load가 가해진 압전 작동기 모듈을 제작하였다(Fig. 9). 제작된 시편 크기에 맞게 압전 작동기 모듈을 제작하였으며 양 끝단에 용수철을 연결하여 작동기에 pre-load를 가할 수 있게 하였다. 사용된 용수철에 관한 정보는 Table 3에 나타내었다. 시편 S1에 대해서 용수철을 사용하여 변위 성능 실험 후 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 단순 지지 조건에서 0.1Hz 가진 주파수에서 가진 전압을 500V<sub>pp</sub>까지 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 결과에서 보듯이 용수철을 사용하여 압축력을 가한 경우가 힘을 가하지 않은 경우에 비해 변위가 향상됨을 확인할 수 있었다.

Table 3 Max. extension and spring constant of spring elements

Spring	Max. extension	Spring constant
Long length (35mm)	28.7 mm	0.17 N/mm
Short length (30mm)	24.6 mm	0.2 N/mm

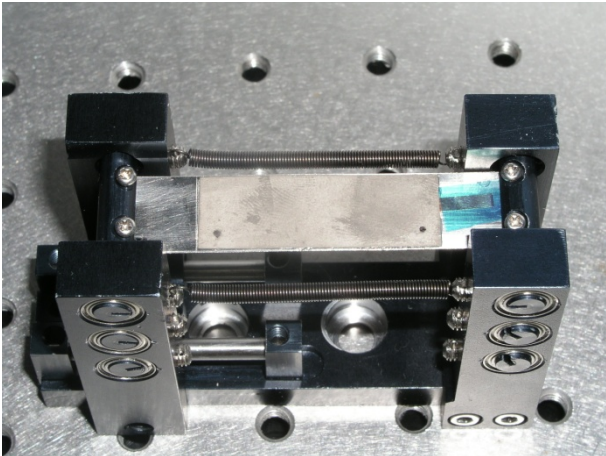


Fig. 9 Piezoelectric actuator system with pre-load.

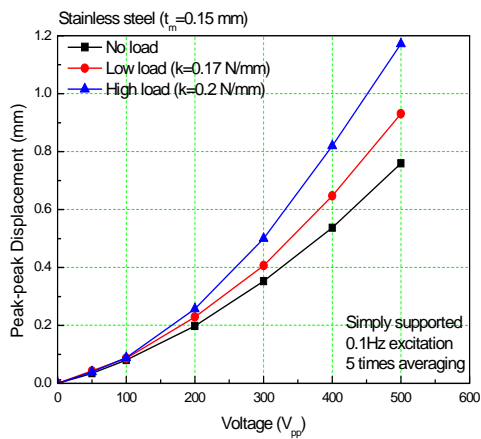


Fig. 10 Displacement of the actuator system.

## 5. 결 론

본 논문에서는 압전 유니모프 작동기의 작동 변위와 작동력을 모두 증대시킬 수 있는 설계 기법을 확립하였다. 우선, 작동기 성능을 결정하는 작동기 내 외부의 요소를 판단하기 위하여 압전 유니모프 작동기의 최적화 설계를 수행하였으며, 압전재료의 압전계수 증대를 위해 인가 전압 및 응력에 따른 유효압전계수 변화를 살펴보았다. 유니모프 작동기의 성능 해석을 통해 압전층과 비압전층간의 최적 두께비를 찾아내고 이를 반영해 최적 두께비를 가지는 압전 작동기와 그렇지 않은 압전 작동기를 제작하여 변위 성능비교를 하였으며 해석을 통한 예측과도 비교하였다. 최적 두께비를 가지는 압전 작동기가 변위 성능이 가장 뛰어난 것을 확인할 수 있었다. 또한, 압전 유니모프 작동기에 압축력의 pre-load를 가하여 변위 성능 실험을 수행하였다. 압축력의 pre-load를 압전 작동기에 가하면 힘을 가하지 않은 경우보다 변위가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 변위 증가 요인을 분석하기 위해 압전층의 내부응력에 대한 영향을 평가하였다. 압전층의 인장응력으로 인해 유효

압전계수가 증가함을 확인하였으며, 압전 작동기의 변위 향상 정도와 압전계수의 증가 비율을 비교한 결과 압전층의 내부응력이 변위 향상의 주된 요인임을 알 수 있었다. 최종적으로 용수철을 사용하여 pre-load가 가해진 압전 작동기 모듈을 제작하여 힘이 가해지지 않은 압전 작동기와 변위 성능을 비교하였다. 용수철을 사용한 압전 작동기가 더 향상된 변위성능을 보임을 알 수 있었다. 이와 같이 압축력의 pre-load가 가해진 압전 작동기 모듈은 큰 변위를 필요로 하는 여러 분야에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.(계약번호 UD060009AD)

## 참 고 문 헌

- (1) Culshaw, B., 1996, Smart Structures and Materials, Artech House.
- (2) Park, S.E. and Shrout, T. R., 1997, " Ultrahigh Strain and Piezoelectric Behavior in Relaxor Based Ferroelectric Single Crystals", Journal of Applied Physics, Vol.82, No.4, pp.1804-1811.
- (3) Nierzrecki, 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.
- (4) Smits, J.G., Dalke, S.I., and Cooney, T.K., 1990, " The Constituent equations of piezoelectric bimorphs", Sensors and Actuators A, Vol. 28, pp.41-61.
- (5) Zhang, Q. M. and Zhao, J., 1999, " Electromechanical Properties of Lead Zirconate Titanate Piezoceramics under the Influence of Mechanical Stresses", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol.46, No.6, pp. 1518-1526.
- (6) Li, X., Shih, W. Y., Vartuli, J. S., Milius, D. L., Aksay, I. A., and Shih, W. H., 2002, " Effect of a Transverse Tensile Stress on the Electric-field-induced Domain Reorientation in Soft PZT : In Situ XRD Study", Journal of American Ceramic Society, Vol.85, No.4, pp. 844-850.
- (7) Li, G., Furman, E., and Haertling, G. H., 1997, " Stress-enhanced Displacements in PLZT RAINBOW Actuators", Journal of American Ceramic Society, Vol.80, No.6, pp. 1382-1388.