

압축 응력 변화에 대한 압전 단결정의 물성 변화를 고려한 압전 복합재료 작동기의 작동 변위 예측

윤범수* · 박지원* · 윤광준**† · 최현영***

Deflection Prediction of Piezo-composite Unimorph Actuator Considering Material Property Change of Piezoelectric Single Crystal for Compression Stress Variation

Bum-Soo Yoon*, Ji-Won Park*, Kwang-Joon Yoon**†, Hyun-Young Choi***

ABSTRACT: In this study, LIPCA-S2 actuator with a piezoelectric single crystal layer and a carbon/epoxy layer was designed and evaluated to increase actuation performance of piezo-composite unimorph actuator. A curvature change model generated by the induced strain of a piezoelectric layer was used to predict the tip displacement of the piezo-composite unimorph cantilever. However, we found that there was big difference between the predicted and the measured tip displacement of LIPCA-S2 cantilever actuator when we used the previous linear prediction model. A new prediction model considering the change of piezoelectric strain coefficient and elastic modulus for the compression stress variation of the PMN-29PT single crystal layer was used and it was found that the difference between the predicted and the measured tip displacement reduced considerably.

초 록: 본 논문에서는 지능 구조물 작동기의 성능 향상을 위해 압전 단결정을 적용한 압전 복합재료 작동기 LIPCA-S2를 설계, 제작하고 성능을 측정하였다. 외팔보 형태로 고정된 LIPCA-S2의 끝단 변위를 예측하기 위하여 공급 전압에 대한 압전 재료 작동층의 변형을 기반으로 곡률 변화 예측 모델을 적용하였으며, 실제 작동기의 성능을 측정하여 두 결과를 비교하였다. 외팔보 상태의 LIPCA-S2의 끝단 처짐에 대한 결과를 비교하였을 때, 예측 결과가 측정 결과에 비하여 4배 정도 크게 예측되었음을 확인하였다. 각 결과의 차이는 LIPCA-S2 내부에 삽입된 압전 단결정에 작용하는 압축 응력에 대하여 압전 단결정 특성이 영향을 미치는 것이라 가정하여, LIPCA-S2를 제작하는 과정에서 발생한 잔류 응력과, 작동층에 전압을 가하며 작동기를 구동했을 때 발생하는 응력 변화를 고전 적층 이론을 통해 계산하였다. 박판 압전 단결정에 평면 방향으로 압축 응력이 변할 때, 압전 변형상수의 변화와 탄성계수의 변화를 측정하였고, 이러한 특성 변화를 고려한 새로운 예측 모델을 활용한 예측 결과는 실제 측정값에 근접함을 알 수 있었다.

Key Words: 유니모프 작동기(Unimorph actuator), 압전 단결정(Piezoelectric single crystal), 지능 구조물(Smart structure)

Received 18 September 2016, received in revised form 16 January 2017, accepted 15 February 2017

*Department of Aerospace Information Engineering, Graduate School, Konkuk Univ.

**†Department of Aerospace Information Engineering, Professor, Konkuk Univ., Corresponding author (E-mail: kjyoon@konkuk.ac.kr)

***Agency of Defense Development

1. 서 론

전기적인 입력에 대하여 물리적인 변형 혹은 힘을 발생 하는 압전 효과를 이용하여, 센서 혹은 작동기의 역할을 수행하는 지능 구조물에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 이러한 특성을 가진 재료들 중에서 압전 세라믹은 다른 재료에 비하여 우수한 압전 성능을 가지고 있으며, 다양한 형태로 제작이 가능하기 때문에 지능 구조물을 구현하는 연구 분야에서 많이 사용되고 있으며, 특히 작동기의 역할을 수행하는 지능 구조물에 많이 사용되고 있다.

현재 개발된 작동기 형태의 압전 복합재료 지능 구조물 작동기로서 LIPCA(Lightweight Piezoelectric Curved Actuator)는 섬유 강화 복합재료(Glass/Epoxy, Carbon/Epoxy)와 다결정 압전 세라믹(PZT 3203HD)을 조합하여 개발하였다[1,2]. 그러나 LIPCA를 항공우주 분야 혹은 로봇 분야 등에 적용하기에는 작동 변위와 작동력이 충분하지 않아, 이것을 향상시키기 위한 연구의 필요성이 대두되고 있다[3].

최근 압전 재료에 대한 연구를 통해, 기존에 주로 사용되었던 다결정 압전 세라믹 보다 압전 성능이 뛰어난 압전 단결정(PMN-PT)에 대한 관심이 높아지고 있으며, 많은 분야에서 압전 단결정을 활용하는 지능 구조물에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[4].

본 연구에서는 압전 변형 특성이 기존 다결정 압전 세라믹보다 뛰어난 압전 단결정을 사용한 작동기 형태의 최적 지능 구조물을 구현하기 위하여, 비선형 작동 변위 예측 모델을 제안하고 검증하였다. 제안 모델을 적용하여 압전 복합재료 작동기 외팔보 끝단의 변위를 예측 하였으며, 실제로 제작한 작동기의 변위를 측정하여 그 결과를 비교하였다. 일정한 압전 변형상수를 이용한 선형 모델을 적용할 경우, 측정 결과가 예측 결과 보다 훨씬 낮은 문제점을 발견하였다. 압전 재료 층이 받는 압축 응력 변화에 따른 압전 변형상수와 탄성계수가 변하는 특성을 적용하여, 압전 복합재료 외팔보 작동기 끝단 변위 측정치에 근접하는 결과를 얻을 수 있었다.

2. 압전 복합재료 작동기 구조 해석

2.1 압전 복합재료 유니모프 작동기 작동원리

적층형 지능 구조물은 전압을 공급하였을 때, 발생하는 모멘트로 인하여 곡률이 변경되면서 굽힘이 발생하게 되며, 식 (1)~(5)를 통해서 지능 구조물에 공급되는 전압에 대하여 변화되는 곡률을 예측하였다[5,6].

$$\Delta\kappa = \frac{1}{\Delta\rho} = \frac{\Delta M_a}{D} = \frac{a \cdot \Delta P_a}{D} \quad (1)$$

$$D = \Sigma E_i \cdot I_i \quad (2)$$

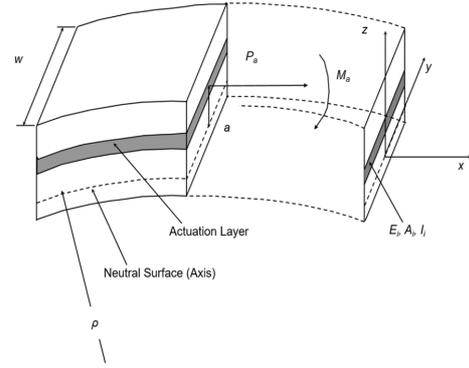


Fig. 1. Schematic for the curvature change of laminated beam with electro active layer [1]

$$\Delta P_a = A_a \cdot E_a \cdot \varepsilon_a = w_a \cdot t_a \cdot E_a \cdot d_{3x} \cdot \frac{\Delta V}{t_a} \quad (3)$$

$$\Delta M_a = a \cdot \Delta P_a \quad (4)$$

$$\Delta\kappa = \frac{a \cdot \Delta P_a}{D} = \frac{a}{D} \cdot E_a \cdot d_{3x} \cdot w_a \cdot \Delta V \quad (5)$$

유니모프 작동기 보의 곡률은 구조물의 총 강성도(D: Total Bending Stiffness)에 대한 작동기의 발생 모멘트(M)의 비율로 나타낼 수 있다. 작동기의 발생 모멘트(M)는 지능 구조물의 중립축과 압전 재료의 중심축 사이의 거리로 이루어진 모멘트 암(a)과, 압전 재료의 탄성계수(E_a), 압전 재료의 단면적(w_a), 압전 상수(d_{3x}) 및 공급 전압(V)으로 구성된 작동력(P)으로 예측할 수 있다.

$$C_{pua} = \frac{a}{D} \cdot E_a \cdot d_{3x} \cdot w_a \quad (6)$$

지능 구조물을 설계할 때, 여러 설계 모델의 적층 구조에 대한 성능을 쉽게 비교하기 위하여, 식 (6)과 같이 C_{pua} (Coefficient of piezoelectric unimorph actuator)를 정의하였으며, 각 모델에 대한 C_{pua} 를 비교하여 가장 높은 성능을 가진 구조를 선정하여 제작하였다.

2.2 압전 복합재료 외팔보 구조물 굽힘 변위 해석

유니모프 작동기 외팔보의 끝단 작동 변위 예측을 위하여 Barret *et al.*[7,8]이 이용한 예측 모델을 수정하여 사용하였다.

유니모프 작동기를 외팔보 상태로 고정하였을 때, 고정점, 끝점 그리고 굽힘이 일어난 끝점의 위치에 대하여 처짐량을 계산하였으며, 지능 구조물 전체의 길이, 압전 단결정의 길이 등을 고려하였다.

Fig. 2는 외팔보 구조물의 굽힘 변형을 도식화 하였으며, 굽힘 변위와 각도를 식 (7) 및 (10)과 같이 정의하였다[7-9].

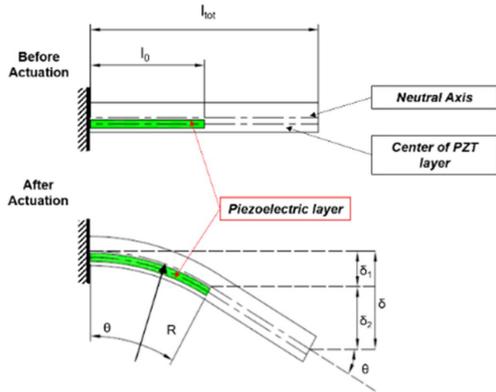


Fig. 2. Schematic for the deflection of LIPCA-S2

$$\delta_1 = R(1 - \omega\theta) = \frac{1 - \cos(kl_0)}{k} \quad (7)$$

$$\delta_2 = (l_{tot} - R\theta)\sin\theta = \left(l_{tot} - \frac{\sin(kl_0)}{k}\right)\sin(kl_0) \quad (8)$$

$$\tan\theta = \frac{\delta_1 + \delta_2}{l_{tot}} \quad (9)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{\left\{ \frac{1 - \cos(kl_0)}{k} \right\} + \left\{ l_{tot} - \frac{\sin(kl_0)}{k} \right\} \sin(kl_0)}{l_{tot}} \right\} \quad (10)$$

식 (10)을 이용하여 LIPCA-S2의 작동 각도를 예측하였으며, 실제 실험 결과와 비교하였다.

3. 압전 복합재료 유니모프 작동기 설계 및 재료 특성 시험

3.1 압전 단결정 복합재료 작동기 구조물 설계

다결정 압전 세라믹(PZT 3203HD)보다 압전 변형 성능이 4배 정도 향상된 압전 단결정(PMN-29PT)을 이용하여 작동기 형태의 지능 구조물을 제작하기 위하여, 작동기에 사용이 가능한 소재들을 조합하여 본 연구팀이 설계한 적층 구조를 선택하였다[10].

식 (6)을 이용하여 각각 설계된 모델에 대한 C_{pua} 값을 구하여 비교하였고, 그중에서 가장 좋은 성능의 적층 구조를 선정하여 압전 복합재료 외팔보 작동기를 제작하였다. 압전 단결정을 이용하였을 때, C_{pua} 값이 가장 큰 적층 구조는 LIPCA-S2로, Polyimide film, Carbon/Epoxy와 압전 단결정(PMN-29PT)으로 구성되며 단면 구조는 Fig. 3과 같다.

LIPCA-S2에 사용된 재료 및 재료의 물성은 Table 1과 같으며, 압전 단결정의 탄성계수는 압축 응력의 변화에 대한, 압전 단결정의 압전 변형 성능을 측정하는 실험에서 측정된 값을 사용하였고, 열팽창계수(α_1 , α_2)는 제조사에서 제공

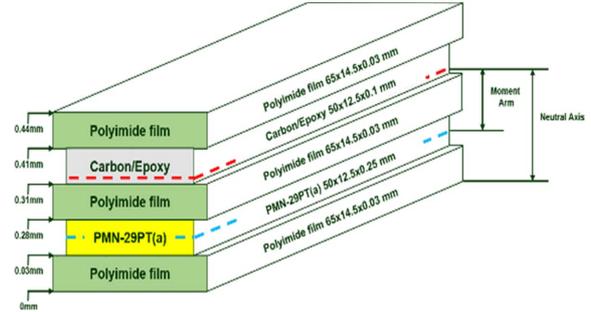


Fig. 3. Lay-up structure of LIPCA-S2[4]

Table 1. Properties of materials used in LIPCA-S2

	Polyimide film (Dupont)	Carbon/Epoxy (SK flex)	PMN-29PT (Ceracomp)
E_1 (GPa)	3.0	231.2	8.90
E_2 (GPa)	3.0	7.20	44.0
G_{12} (GPa)	1.15	4.30	3.42
ν_{12}	0.30	0.29	0.30
CTE	α_1 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{K}$)	-1.58	9.50
	α_2 ($\times 10^{-6}/^\circ\text{K}$)	32.20	9.50
Piezoelectric Constant - d_{32} (pm/V)	-	-	-1,742.0

한 값을 사용하였다.

3.2 압전 단결정 지능 구조물의 내부응력 상태

LIPCA-S2는 적층형 구조이며 복합재료 진공 성형법을 이용하여 수지의 온도 경화 사이클에 따라 제작된다. 사용된 재료의 열팽창계수와 탄성계수의 차이로 성형 후 각 층에 잔류응력이 발생하게 되며, 이것은 복합재료 적층판 응력 계산 방법으로 구할 수 있다.

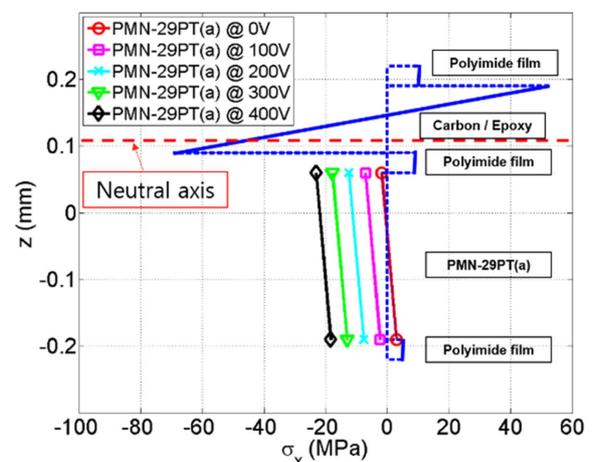


Fig. 4. Internal stress of LIPCA-S2 laminate section

또한, 압전 단결정 층에 전압을 공급할 때, 압전 재료의 변형에 대한 응력이 발생하게 되는데, 내부 응력변화를 Yoon *et al.*[11,12]이 사용한 복합재료 적층판 응력 계산 방법으로 계산하였으며, 결과는 Fig. 4와 같다.

공급 전압이 없을 경우, LIPCA-S2 내부의 압전 단결정 층에는 압축 응력과 인장응력이 동시에 작용 되고 있는 상태이며, 공급 전압이 커질수록 압전 단결정에 작용 되는 압축 응력이 증가하는 것이 확인되었다.

압전 단결정에 작용하는 압축 응력이 압전 단결정의 압전 변형능수에 미치는 영향을 실험을 통해 측정하기로 하였다.

3.3 압축 응력 변화에 대한 압전 단결정의 특성 변화 측정

압전 복합재료 적층판 작동기의 변위 예측은 Kang *et al.* [13,14]이 다결정 압전 세라믹 작동기에 대하여 수행되었으나 압전 단결정 복합재료 적층판에 대한 연구는 현재까지 보고되지 않았다.

압전 복합재료 작동기 적층판에 삽입된 압전 단결정 층에는 고온 성형 과정과 작동기 구동 시 공급된 전압으로 인하여, 내부 응력이 발생하게 되는 데, 발생한 내부 응력이 압전 단결정의 압전 변형상수와 탄성계수 변화에 미치는 영향을 알아보기 위해 본 연구에서는 Fig. 5와 6과 같이 실험 장치를 구성하였다.

Fig. 5와 같이 PMN-29PT 웨이퍼로부터 절단한 압전 단결정 박판(0.5 mm × 12.5 mm × 25.0 mm)에 스트레인 게이지를 부착하고, 압축 하중을 가했을 때, 굽힘 변형을 방지하기 위한 양 측면 지지판(Support Plate)을 결합한 후, 압축 하중 장치에 구조물을 장착하여 압축 하중을 증가시키며 시편의 스트레인 변화를 측정하였다.

수동 휠 장치를 회전시켜 압축 하중 장치의 중간 판이 수

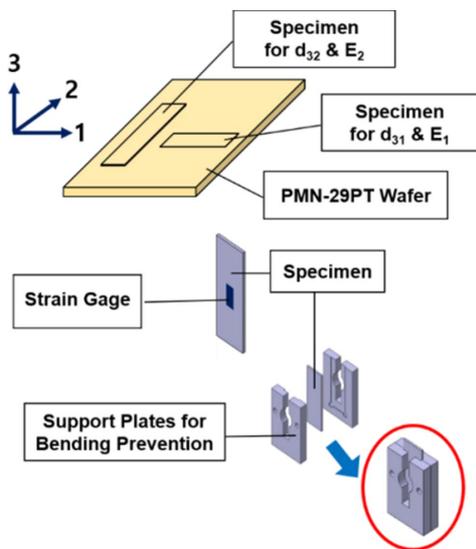


Fig. 5. Compression test equipment system for thin piezoelectric layer

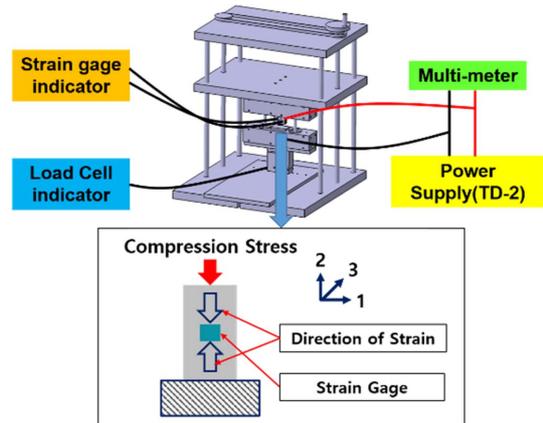


Fig. 6. Schematic of compression test for characterization of thin piezoelectric layer

직으로 움직이도록 하여, 압축 하중을 가하는 구조물을 이용하여, 압전 단결정 박판의 평면 방향으로 압축 응력을 가하였으며, 이때 발생된 압축 하중을 로드셀을 통해 측정하였다. 압전 단결정 박판 단면에 24 MPa까지 압축 응력을 단계적으로 증가시키며 0~450 V(0~0.9 kV/mm)의 전기장을 가하였을 때, 발생한 스트레인을 스트레인 측정기를 이용하여 측정하였다.

또한, 실험을 수행하는 과정에서 압축 응력을 가한 상태로 압전 단결정에 전압이 공급되면, 압전 단결정의 변형으로 압축 응력이 변하게 되는데, 일정한 압축 응력을 작용시키기 위해, 전원이 공급된 상태에서 핸드휠을 조정하여 일정한 압축 응력이 가해지도록 실험을 수행하였다.

Fig. 7은 서로 다른 압축 응력 조건에서 공급 전압을 0 V에서 450 V까지 증감시키며 측정된 스트레인 변화 양상이다. 압전 단결정의 2축 방향으로 압축 응력이 작용하였을 때 발생하는 스트레인 값이 압축 응력이 증가하면서 대폭 감소하는 비선형적인 경향을 확인할 수 있었다.

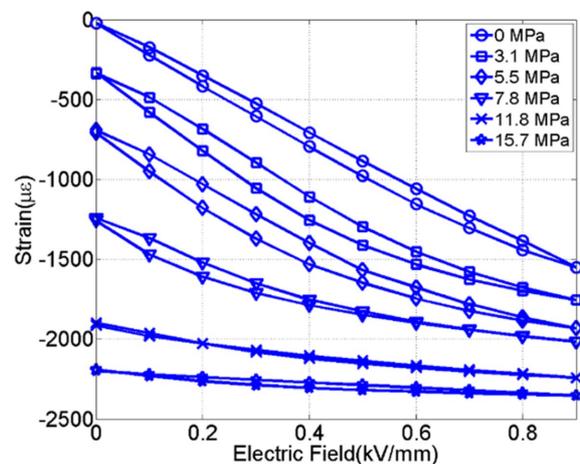


Fig. 7. Measured strain in 2-axis direction and loading

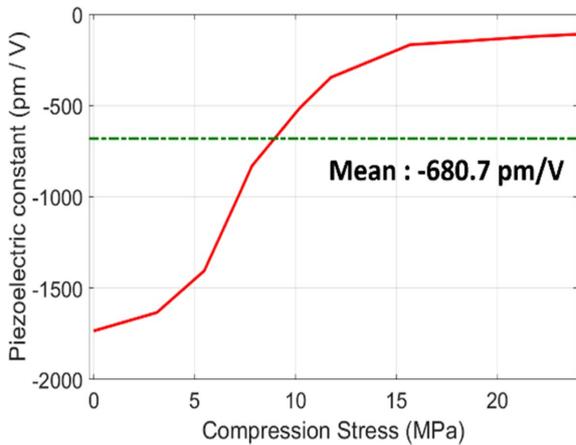


Fig. 8. The piezoelectric deformation coefficient d_{32}

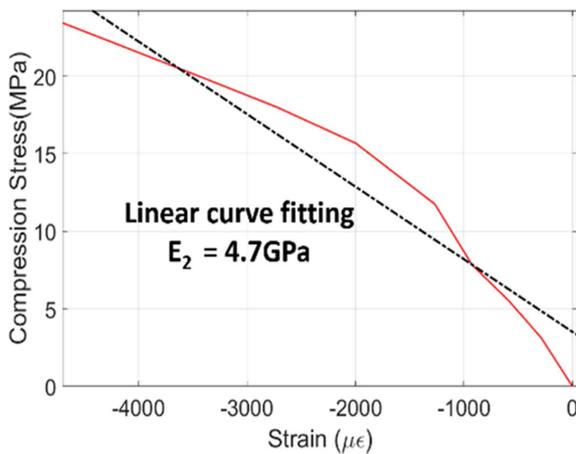


Fig. 9. Measured modulus E_2 in 2-axis direction and loading

Fig. 7의 각 그래프의 기울기는 압전 단결정의 압전 변형 상수를 나타내고, 압축 응력에 대한 압전 상수의 변화는 Fig. 8과 같다.

압전 단결정에 작용하는 압축 응력이 증가하면서, 압전 상수가 큰 폭으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 약 16 MPa 이상의 압축 응력이 작용하였을 때, 압축 응력이 작용하지 않을 때의 압전 변형상수의 약 20%의 정도 수준으로 감소한 상태를 유지하였다.

또한 12 MPa의 압축 응력을 기준으로 압전 변형상수 변화량이 크게 차이 나는 것이 확인 되었는데, 이때 압전 단결정 상(phase)이 Tetragonal 상에서 Rhombohedral 상으로 변이가 발생하여 이러한 경향이 나타난 것으로 추측된다.

또한, 입력 전압을 가하지 않은 상태에서, 압축 응력이 변화될 때 스트레인 변화로부터 Fig. 9과 같은 탄성계수 변화 경향을 측정하였다.

압전 단결정의 탄성계수도 상변이 압축 응력에 해당하는 12 MPa를 기준으로 상당히 변화하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8, 9에 대한 결과를 이용하여 LIPCA-S2 내부 상태에 대한 압전 단결정의 물리적 특성변화가 일어나는 것을 확인하였고, 이 특성 변화에 대한 결과를 고려하여 LIPCA-S2의 성능을 예측하기 위해, 압전 변형상수의 평균값을 도출하였고, strain-stress 그래프의 기울기를 통해 평균 탄성계수(E_2)를 도출하여 성능 예측에 사용하였다.

4. 압전 단결정 외팔보 변형 시험 및 예측

Fig. 10은 복합재료 적층판 진공성형법으로 제작된 LIPCA-S2의 형상이며, 제작된 LIPCA-S2를 외팔보 형태로 고정하고 작동 전압을 가했을 때 발생하는 끝단의 처짐을 측정하였다.

Fig. 12의 그래프를 보면 압축 응력이 없을 때, 측정된 압전 변형상수와 탄성계수를 이용하여 변위를 예측한 결과는 실험으로 측정된 변위보다 4배 이상 차이가 났다.

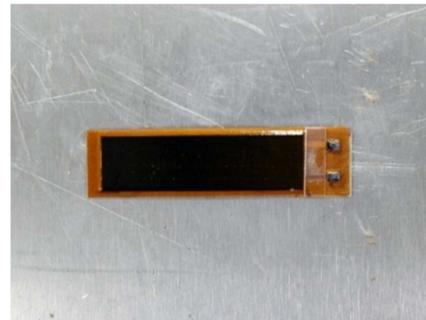


Fig. 10. LIPCA-S2

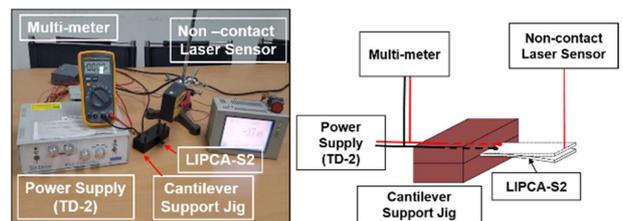


Fig. 11. Measured deflection of LIPCA-S2 [4]

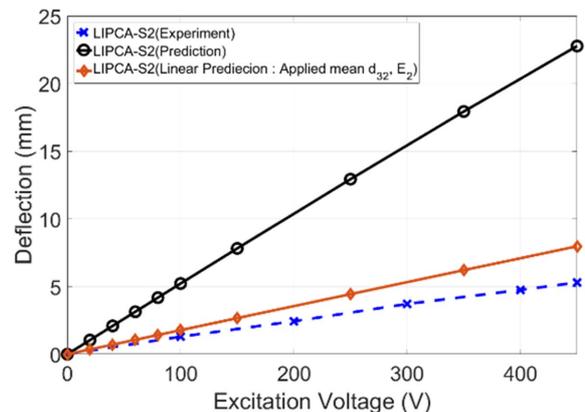


Fig. 12. Comparison result of prediction and experiment

압축 응력에 대한 PMN-29PT 단결정 물리적 특성 변화 값을 평균하여 적용할 경우, 예측 변위 결과는 이전의 예측 결과와 비교 하였을 때 실험 결과의 1.6배 이내로 근접한 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 압전 세라믹을 사용하여 제작한 압전 복합재료 작동기의 성능을 향상시키기 위하여, 압전 세라믹 보다 압전 변형 성능이 뛰어난 압전 단결정 지능 구조물을 설계하여 제작하였고 작동 변위 성능에 대한 시험을 수행하였다.

압전 복합재료 작동기 적층판의 최적 설계를 위하여 곡률 변화 예측 모델을 적용하여, 곡률 변화가 가장 큰 LIPCA-S2 적층 단면 구조를 설계하였다.

제작된 LIPCA-S2의 성능을 예측하기 위해 선형 예측 모델을 적용했을 때, 예측 변위가 실제 측정 데이터의 3배 이상 크게 계산되었고, 이러한 현상은 작동기 설계 및 제작, 그리고 작동기 구동 시 발생하는 내부 응력이 압축 응력으로 압전 단결정 층에 영향을 미치는 것으로 판단하였다.

압축 응력에 대한 압전 단결정의 특성 변화를 측정하기 위해 관련 실험을 통하여, 압축 응력 및 공급 전압에 대한 압전 단결정의 압전 변형상수 및 탄성계수를 측정하였다. 압전 단결정의 압전 변형상수 및 탄성계수는, 압축 응력과 공급전압 변화에 따라 특성이 변화되었음을 확인하였으며, 이러한 특성 변화를 고려하여 압전 복합재료 작동기의 성능을 다시 예측하였다. 압축 응력에 대한 PMN-29PT 단결정 물리적 특성 변화 값을 평균하여 적용할 경우, 예측 변위 결과는 이전의 예측 결과와 비교 하였을 때 실험 결과의 1.6배 이내로 근접한 것을 확인하였다.

향후, 압전 단결정의 압축 응력 변화에 따른 물리적 특성 변화에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단하며, 압전 단결정의 물리적 특성 변화를 고려한 비선형 변형 예측에 대한 연구를 지속해서 수행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2014학년도 건국대학교의 연구년 교원 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- (International Journal) Yoon, K.J., Park, K.H., Lee, S.K., Goo, N.S., and Park, H.C., "Analytical Design Model for a Piezo-composite Unimorph Actuator and its Verification Using Lightweight Piezo-composite Curved Actuators", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, No. 3, 2004, pp. 459-467.
- (Korean Journal) Park, K.H., Yoon, K.J., and Park, H.C., "Development of Lightweight Piezo-composite Curved Actuator", *Journal of the KSAS*, Vol. 30, No. 5, 2002, pp. 94-100.
- (Korean Journal) Nguyen, N.-T., and Yoon, K.-J., "Actuation Displacement of Unimorph Piezoelectric Actuators with External Loading", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 51, No. 1, 2007, pp. S11-S15.
- (Internal Journal) Park, J.H., Yoon, B.S., and Yoon, K.J., "Experimental Investigation on the Piezo-composite Actuator with Piezoelectric Single-crystal Layer", *Advanced Composite Materials*, Vol. 25, No. 5, 2016, pp. 487-496.
- (International Journal) Kim, K.Y., Park, K.H., Park, H.C., Goo, N.S., and Yoon, K.J., "Performance Evaluation of Lightweight Piezo-composite Actuators", *Journal of the Sensor and Actuators*, 2005, A 120, pp. 123-129.
- (International Journal) Ron Barrett, R Steven Gross, Fred Brozoski, "Missile Flight Control Using Active Flexspar Actuators", *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 2, 1996, pp. 121-128.
- (Korean Journal) Yoon, B.S., Park, K.H., and Yoon, K.J., "Piezo-Composite Actuator for Control Surface of a Small Unmanned Air Vehicle", *Journal of the Composite Research*, Vol. 27, No. 2, 2014, pp. 47-51.
- (International Journal) Ron Barrett, "Active Aeroelastic Tailoring of an Adaptive Flexspar Stabilator", *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 6, 1996, pp. 723-730.
- (Internal Journal) Yoon, B.S., Park, J.H., and Yoon, K.J., "Experimental Study on Control Fins of a Small Flying Vehicle Using Piezo-composite Actuators", *Advanced Composite Materials*, 2016, pp. 1-9.
- (Korean Conference) Yoon, B.S., and Yoon, K.J., "Design/Fabrication/Performance Test of UAV Actuator S-LIPCA with PMN-29PT Piezo-electric Single Crystal", *KSAS Fall Conference*, Vol. 2013, No. 11, 2013, pp. 985-988.
- (International Journal) Yoon, K.J., Park, K.H., Lee, S.K., Goo, N.S., and Park, H.C., "Analytical Design Model for Piezo-Composite Unimorph Actuator and Its Verification Using Lightweight Piezo-Composite Curved Actuators", *Smart Materials and Structures*, No. 13, 2004, pp. 1-9.
- Lee, S.K., Kim, Y.S., Park, H.C., Yoon, K.J., Goo, N.S., Yu, Y., and Cho, C., "Performance Analysis of a Lightweight Piezo-composite Actuator Considering the Material Non-linearity of an Embedded PZT Wafer", *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, No. 6, 2005, pp. 1101-1106.
- (International Journal) Kang, L.-H., Lee, J.-W., Han, J.-H., Chung, S.-J., and Ko, H.-Y., "Development of a Piezoelectric Unimorph Using a Mechanically Pre-stressed Substrate", *Smart Materials and Structures*, Vol. 18, No. 10, 2009, pp. 1-9.
- (International Journal) Kang, L.-H., and Han, J.-H., "Prediction of Actuation Displacement and the Force of a Pre-stressed Piezoelectric Unimorph (PUMPS) Considering Nonlinear Piezoelectric Coefficient and Elastic Modulus", *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, No. 9, 2010, pp. 1-11.