

# 정적 하중하의 굽힘 압전 복합재료 작동기의 작동 성능

우 성 충<sup>†</sup>·박 기 훈\*·구 남 서\*\*

## Actuating Performance of a Bending Piezoelectric Composite Actuator with a Thin Sandwiched PZT Plate under Static Loads

Sung-Choong Woo, Ki Hoon Park and Nam Seo Goo

**Key Words:** Bending Piezoelectric Composite Actuator(굽힘 압전 작동기), Stored Elastic Energy (저장 탄성에너지), PZT softening(PZT 연화), Actuating Displacement (작동변위)

### Abstract

This study presents the static and dynamic actuating performances of a bending piezoelectric actuator with a thin sandwiched PZT plate under a static load. The stored elastic energy within the actuators which occurs during a curing process is obtained through a flexural bending test. An actuating performance is evaluated in terms of an actuating displacement at the simply supported condition. The results reveal that an actuator that consists of a top layer having a high elastic modulus and a low coefficient of thermal expansion exhibits a better performance than the rest of actuators due to the formation of the large stored elastic energy within the actuator system. When actuators are excited at the alternating current voltage, the effect of PZT ceramic softening results in a slight reduction in the resonance frequency of each actuator as the applied electric field increases. It is thus suggested that the static and dynamic actuating characteristics of bending piezoelectric actuators with a thin sandwiched PZT plate should be simultaneously considered in controlling their performances.

### 1. 서 론

압전 작동기는 응답특성이 빠르고 작동변위가 우수하며 작고 가벼워서 능동 진동제어<sup>(1)</sup>가 요구되는 시스템, 초소형 비행기의 형상 가변익 그리고 생체 모방 로봇의 추진 시스템 등에 응용되고 있다. 특히 비 작동층이 섬유강화 복합재료로 이루어진 압전 복합재료 작동기의 경우, 마이크로 펌프<sup>(2)</sup>와 같은 가용 사이즈와 무게가 제한적인 구조물에도 그 적용이 시도되고 있고 작동기와

센서의 기능을 동시에 수행하는 연구도 보고되고 있다<sup>(3)</sup>. 압전 작동기가 가져야 할 조건에는 우수한 작동변위와 작동력을 유지하는 것인데 작동변위를 위해서는 가볍고 유연한 재료의 선정이 중요하며 작동력을 위해서는 강성이 큰 재료를 사용하거나 작동기에 기계적인 예하중(Pre-load)을 부여하여 저장 탄성 에너지를 증가시키는 방법이 있다.<sup>(4)</sup>

섬유강화 복합재료와 PZT세라믹으로 구성된 압전 복합재료 작동기는 가볍고 우수한 작동 변위에 비해 작동력이 작은 것이 사실이다. 이와 같은 이유로 펌핑기구, 고양력장치 작동기<sup>(5)</sup>, 그리고 소형 로봇 시스템<sup>(6)</sup>과 같이 높은 작동력이 요구되는 시스템에 관한 연구가 국내에서도 시도되고 있다. 따라서 이들 작동기의 폭 넓은 응용과 구조설계를 향상시키기 위해서는 압전 작동기

† 회원, 건국대학교 인공근육연구센터  
E-mail : lilsuzy@hanyang.ac.kr  
TEL : (02)3436-7091 FAX : (02)452-7091

\* 건국대학교 항공정보우주시스템공학과

\*\* 회원, 건국대학교 신기술융합학과 지능형 마이크로시스템 전공

의 하중특성에 대한 깊은 연구가 필요하다.

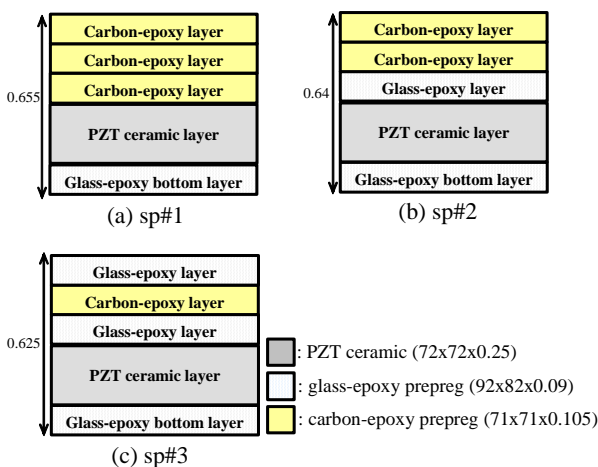
본 연구의 저자들은 선행연구<sup>(7-9)</sup>에서 굽힘 압전 복합재료 작동기를 설계 및 제작하여 최대의 자유변위 성능을 갖는 적층구성을 연구범위 내에서 찾았으며 음향방출법을 이용하여 기계적 굽힘 하중하의 파손기구를 해명하고 건전성을 평가하였다.

본 연구에서는 작동용 시험편을 제작하고 단순지지 조건에서 정적하중하의 정적 및 동적 작동성능을 평가한다. 아울러 성형 후 작동기 내에 존재하는 저장 탄성에너지를 굽힘 시험을 통해 구하고 작동기의 작동력에 미치는 영향을 규명한다.

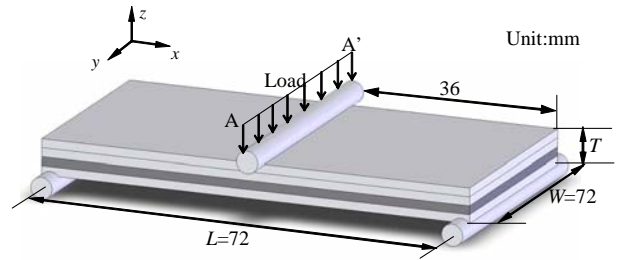
## 2. 실험

### 2.1 재료 및 시험편 제작

Fig. 1은 제작된 작동용 시험편의 적층구성을 보여준다. 두께가 250 $\mu\text{m}$ 인 단일 PZT wafer (3203HD, CTS Co.), 평직형 탄소섬유-에폭시 프리프레그 (WSN1K-B, SK Chemicals) 그리고 평직형 유리섬유-에폭시 프리프레그 (GEP108, SK Chemicals)를 사용하여 작동용 시험편을 제작하였다. PZT세라믹을 외부 환경으로부터 보호하고 작동용 탭 부분을 위해서 PZT세라믹 아래층은 두께가 90 $\mu\text{m}$ 인 평직형 유리섬유-에폭시 프리프레그를 공통적으로 배치하였다. 탄소섬유-에폭시 프리프레그(두께: 105 $\mu\text{m}$ )는 전도체이므로 전압을



**Fig. 1** Lay-up configurations of bending piezoelectric composite actuators with a thin sandwiched PZT plate (unit: mm)



**Fig. 2** Schematic of a flexural bending test to obtain the stored elastic energy occurred after a curing process

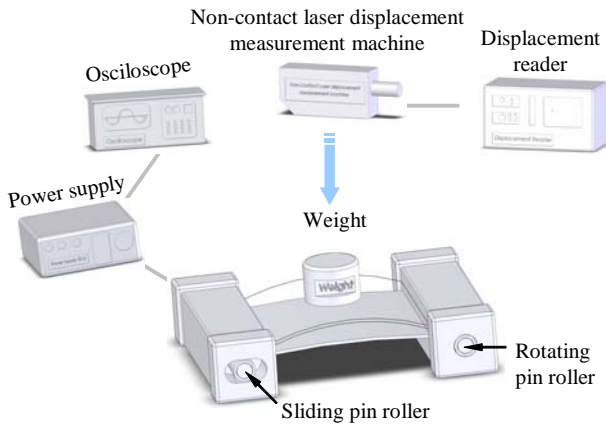
인가했을 때 전기적 단전을 방지하기 위하여 PZT세라믹보다 가로 및 세로로 1mm 작은 크기를 사용하였다. 또한 적층시 전압공급을 위해 PZT세라믹 아래·위에 구리선을 배치하였다. PZT세라믹층과 섬유층 사이의 접착은 경화과정 동안 수지의 자연적인 흐름을 통해 얻을 수 있으므로 별도의 접합제가 필요하지 않다. Fig. 1과 같이 hand lay-up 방법으로 적층된 후, 경화 사이클에 따라 오토클레이브 내에서 진공백(vacuum bag)방식으로 180분 동안 성형되었다.

### 2.2 저장 탄성에너지 측정

본 연구에서 제작된 압전 복합재료 작동기는 비대칭으로 적층되어 있고 구성된 재료의 열팽창 계수와 강성의 차이로 인해 성형 후에는 돔 형상을 갖게 된다. 이 돔 높이만큼 작동기 내부에 저장되어 있는 탄성 에너지는 작동기의 작동력에 영향을 주게 된다. 따라서 본 연구에서 제작된 시험편의 저장 탄성 에너지를 실험적으로 평가하였다.

성형 후 시험편 내부에 존재하는 탄성에너지는 돔 형상을 갖는 작동기를 평평해 질 때까지 굽힘 시험을 함으로써 측정할 수 있다. 이를 위해 Fig. 2와 같이 72mm의 간격을 유지한 2개의 고정된 롤러 지지대 위에 시험편을 위치시킨 상태에서 굽힘 시험은 만능 시험기(Zwick250, testXpert)를 이용하여 변위제어 (0.5 mm/min)방식으로 직경 3.2mm의 상부롤러에 의해 A-A' 지점에 하중을 가하였다. 각 시험편별 돔 높이를 측정하여 이에 해당하는 높이만큼 평평해 질 때까지 굽힘 시험을 수행하여 하중 변위 곡선을 구하였다.

성형 후 작동기 시험편 내부에 저장되어 있는 탄성 에너지는 굽힘 시험으로부터 얻은 하중 변



**Fig. 3** Experimental set-up for measuring the actuating displacement at the simply supported boundary condition

위 데이터와 다음 식 (1)을 이용하여 구한다.

$$U = \frac{1}{WT} \int_0^{d_{flat}} Pd \delta \quad (1)$$

여기서,  $d_{flat}$ ,  $W$  그리고  $T$ 는 작동기가 평평해졌을 때, 즉 돔 높iman큼의 처짐 변위가 발생하였을 때의 변위, 작동기의 폭 그리고 작동기의 두께를 각각 나타낸다.

### 2.3 작동변위 측정

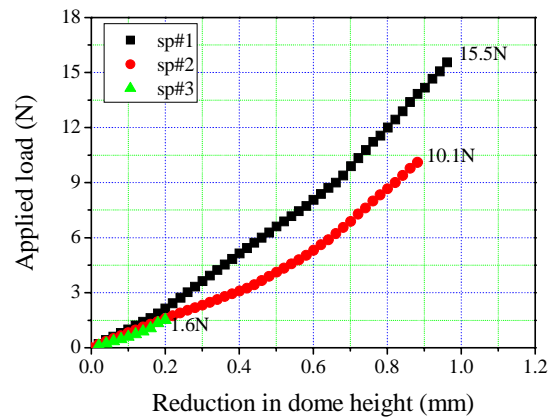
작동변위 측정을 위해 Fig. 3과 같이 실험 장치를 구성하였다. 측정 시스템은 미세 변위측정이 가능한 비 접촉식 레이저 변위계 (Keyence LK-081), 전압 공급기 (TD-2 Power Supplier, Face International Co.), 오실로스코프 (HP 54622A), 시험편 고정 및 지지 장치, 제작된 작동기로 구성된다. 정적 작동변위는 PZT층에 -150V에서 +150V까지 직류 전압(DC voltage)을 가하여 측정하였고 동적 작동변위는 0~200V<sub>pp</sub>(peak to peak voltage)의 교류 전압(AC voltage)을 1~30Hz의 구동 주파수를 정현파의 형태로 가하여 측정하였다. 최대 작동변위를 나타내는 시험편 중앙지점의 수직방향 변위를 작동기별로 3회 반복 측정하여 평균값으로 취하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 저장 탄성에너지

**Table 1.** Specification of each specimen

	sp#1	sp#2	sp#3
Thickness (mm)	0.655	0.64	0.625
Mass (g)	13.16	13.06	12.96
Bending stiffness (Nmm <sup>2</sup> )	80.3	66.7	41.7
Dome height (mm)	0.97	0.89	0.21
Stored elastic energy (J/m <sup>2</sup> )	136.7	78.1	2.9

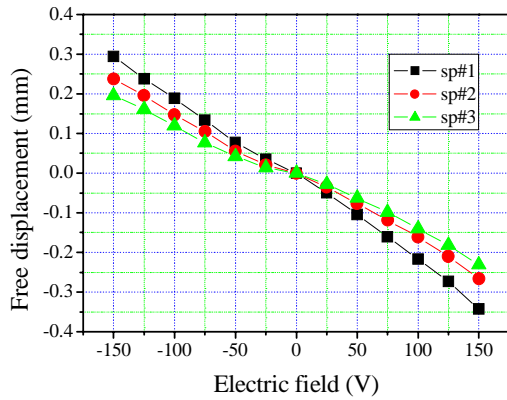


**Fig. 4** The load necessary to flatten each specimen from a flexural bending test at the boundary condition presented in Fig. 2

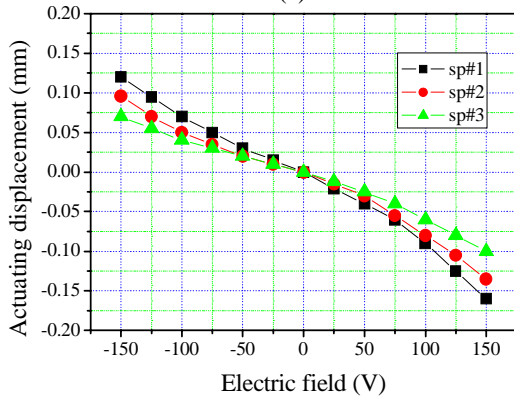
압전 복합재료 작동기는 성형후에 각 층의 열팽창 계수 및 강성의 차이로 인해 돔 형태를 갖게 된다. Table 1은 제작된 작동용 시험편의 두께, 질량, 굽힘 강성, 성형 후 발생하는 돔 높이 그리고 저장 탄성 에너지의 측정값을 나타낸다. 상부층이 탄성계수가 높고 열팽창 계수가 낮은 탄소섬유-에폭시로 구성된 sp#1의 경우 돔 높이가 0.97mm로써 가장 큰 반면 탄소섬유-에폭시와 유리섬유-에폭시가 교대로 적층된 sp#3의 경우 돔 높이가 0.21 mm로써 가장 작았다. 이는 각 작동용 시험편의 질량과 두께는 대동소이하지만 Fig. 1과 같은 적층구조로 인해 sp#1의 돔 높이가 sp#3보다 4.6배 증가된 것이다.

Fig. 4는 초기 돔 높이를 갖는 각 작동기 시험편을 평평해 질 때까지 굽힘 시험하여 측정된 하중-변위 곡선을 나타낸다. sp#1이 평평해지는데 필요한 하중은 15.5N이며 이 값은 sp#2와 sp#3의 그것 보다 각각 1.5배 및 9배 크다. 이와 같은 결과로부터 sp#1이 sp#2와 sp#3보다 굽힘 발생이 어렵다는 것을 예상할 수 있다.

저장 탄성에너지는 Fig. 4의 결과를 식 (1)에 대입하여 계산되었다. 성형 돔 높이가 가장 높은



(a)



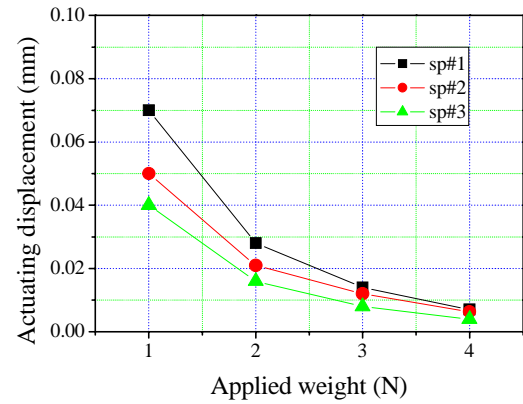
(b)

**Fig. 5** Comparison between free displacement and actuating displacement as a function of electric field for each specimen

sp#1의 경우 가장 큰 저장 탄성에너지 값을 보인 반면, 성형 돔 높이가 가장 작은 sp#3은 가장 낮은 저장 탄성 에너지 값이 측정 되었다. Table 1에 나타내었듯이, 각 적층 구성별로 성형 후의 저장 탄성 에너지 값의 차이는 성형 돔 높이의 차이보다 그 격차가 훨씬 큼을 알 수 있다. 이러한 차이는 각 작동기의 작동성능에 적지 않은 영향을 미쳤을 것이다.

### 3.2 정적하중하의 정적 작동변위

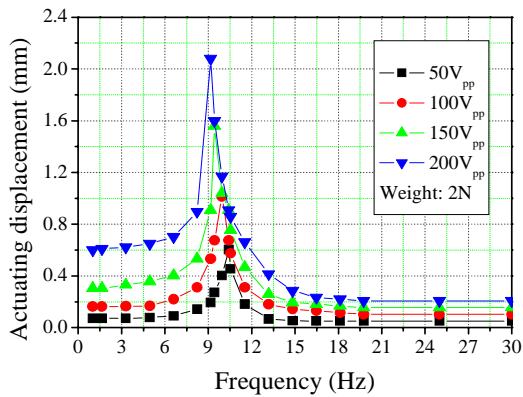
Fig. 5는 추를 올려 놓지 않은 상태에서 측정된 자유변위와 1N의 추를 시험편 상면에 올려놓은 상태에서 -150V에서 +150V까지 25V씩 직류전압을 증가시켜 가면서 정적 작동변위 거동을 측정된 결과를 나타낸다. 여기서, 작동변위는 추의 자중에 의한 처짐 변위를 제외한 순수하게 인가전압에 의해 발생하는 값이다. 따라서 작동변위는



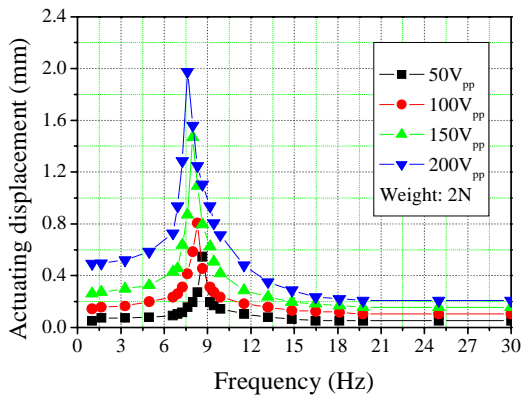
**Fig. 6** Variation of actuating displacement for each specimen with an increasing load

작동기의 작동력을 간접적으로 나타내어 준다. 유니모프형 압전 작동기의 경우 작동력은 굽힘 강성과 인가전압에 비례하고 경계조건에 따라 다른 것으로 알려져 있다.<sup>(10,11)</sup> Fig. 5의 실험결과로부터 동일한 인가전압에 대해 굽힘 강성이 큰 sp#1의 자유 변위 및 작동변위가 sp#2와 sp#3보다 큼을 알 수 있다. 이와 같은 결과에는 두 가지 원인이 작용한 것으로 여겨진다. 첫째, sp#1의 굽힘 강성이 다른 시험편에 비해 크고 성형 후 작동기 내부에 존재하는 큰 탄성 에너지로 인해 곡률을 발생시킴으로써 작동력을 증가시킨 것이다. 일반적으로 곡률을 갖는 셸 구조물은 돔 형상이 현저할수록 더욱 단단해져 곡률이 없을 때보다 강성이 커진다.<sup>(12)</sup> 따라서 성형 후 열 변형에 의해 발생하는 돔 형상과 작동기 내부의 저장 탄성 에너지가 클수록 압전 복합재료 작동기의 작동변위 및 작동력이 우수하게 된다. 둘째, sp#1의 경우 모멘트 암(작동층에서 모멘트 평형에 의한 중립면까지의 거리)이 가장 커서 굽힘력을 증대시켰기 때문이다.<sup>(7)</sup>

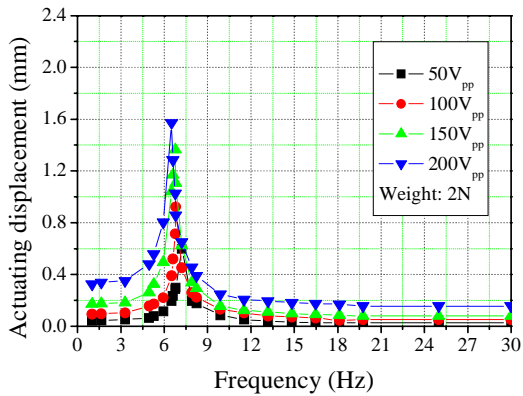
Fig. 6은 추의 하중을 4N까지 1N씩 증가시켜 가면서 각 시험편별로 작동변위를 측정된 값이다. 하중이 증가함에 따라 작동변위는 비선형적으로 감소하며 sp#1의 감소정도가 가장 현저하다. 하지만 동일한 하중에 대한 작동변위는 sp#1이 sp#2와 sp#3의 경우보다 큼을 알 수 있다. 따라서 Fig. 5와 Fig. 6의 결과로부터 정적 상태에서의 작동기의 작동변위는 적층구조로 인한 굽힘 강성과 저장 탄성에너지에 민감하였음을 알 수 있다.



(a) sp#1



(b) sp#2



(c) sp#3

**Fig. 7** Actuating displacement versus drive frequency for each specimen showing the effect of PZT ceramic softening

### 3.3 정적하중하의 동적 작동변위

Fig. 7은 2N의 하중을 갖는 추를 올려놓은 상태에서 주파수 증가에 따른 작동변위를 측정된 결과를 나타낸다. Fig 7에서의 작동변위 값은 음의 값과 양의 값의 총 합으로 표시되었다. Fig. 7을 살펴보면 세 가지 뚜렷한 특징을 관찰할 수 있

다. 첫째, 최대 작동변위는 공진주파수에서 발생하며 각 시험편별 공진주파수는 작동기를 구성하는 재료의 밀도와 강성에 따라 상이함을 알 수 있다. 예를들면 인가전압이 200V<sub>pp</sub>에서 sp#1, sp#2 그리고 sp#3은 9.1Hz, 7.6Hz 그리고 6.5Hz에서 각각 최대 작동변위를 나타내었으며 해당 작동변위의 크기는 각각 2.08mm, 1.97mm 그리고 1.57mm로 측정되었다. 각 작동기를 구성하고 있는 재료의 무게와 강성을 고려하면 이와 같은 결과는 타당한 것으로 사료된다. 둘째, 동일한 작동기에 대해 인가전압이 증가함에 따라 공진주파수 값은 미소하게 작아짐을 관찰 할 수 있다. 예를 들면, sp#1의 경우 인가전압이 50V<sub>pp</sub>, 100V<sub>pp</sub>, 150V<sub>pp</sub> 그리고 200V<sub>pp</sub>일 때 이에 대응하는 공진주파수는 10.4Hz, 9.9Hz, 9.4Hz 그리고 9.1Hz였다. 이와 같은 현상은 PZT세라믹의 연화현상<sup>(13)</sup> (PZT ceramic softening)으로 설명될 수 있는데 PZT세라믹에 높은 전압이 가해지면 연화현상이 발생하여 PZT자체의 강성이 감소하는 현상이 발생한다. 이와 같은 이유로 동일한 작동기에 대해 공진주파수가 미소하게 감소한 것이다. 셋째, 공진주파수를 제외한 주파수 영역에서의 작동변위는 구동주파수에 민감하지 않음을 알 수 있다. 결과적으로 동적상태에서의 작동변위에서도 sp#1이 가장 우수한 작동성능을 나타내었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 성형 후 서로 다른 저장 탄성 에너지를 갖는 굽힘 압전 복합재료 작동기를 대상으로 정적 및 동적상태에서의 작동변위를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) PZT세라믹을 기준으로 하층부는 열팽창계수가 크고 저장성의 유리섬유-에폭시 프리프레그와 상층부는 열팽창계수가 작고 고강성의 탄소섬유-에폭시 프리프레그만으로 적층된 sp#1의 경우가 성형 후 열 변형에 의한 저장 탄성 에너지가 가장 컸으며 정적 및 동적 작동조건에서 가장 우수한 자유 변위 및 하중 특성을 나타내었다. 따라서 저장 탄성에너지가 크도록 적층구성을 조절함으로써 작동성능을 향상시킬 수 있으며 정적 및 동적 상태에서의 작동 및 굽힘 특성을 동시에 평가함으로써 큰 자유변위 및 높은 작동력이 요구되는 시스템에 충분히 적용될 수 있을 것으로 기

대된다.

(2) 동적상태인 공진주파수 근처에서 측정된 작동 성능에서도 sp#1의 경우가 가장 우수하였으며 각 작동기별 공진주파수는 인가전압이 증가함에 따라 PZT세라믹 작동층의 연화현상으로 인해 미소하게 감소하였다. 따라서 작동기를 적절하게 제어함에 있어 상기의 동특성이 고려되어야 할 것이다.

(3) 본 연구에서 제작된 굽힘 압전 복합재료 작동기는 상당히 취성적인 PZT세라믹과 면외 하중에 취약한 섬유강화 복합재료로 구성되어 있어 전기적 반복하중을 지속적으로 받을 경우 작동기의 건전성 및 성능저하가 예상되므로 고 사이클 영역에서의 피로특성에 대한 연구가 요구된다.

## 후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 중점연구소 지원사업 (과제번호: KRF-2006-005-J03302)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Akella, P., Chen, X., Cheng, W., Hughes, D. and Wen, J.T., 1994, "Modelling and Control of Smart Structures with Bonded Piezoelectric Sensors and Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, pp. 344~353.
- (2) Teymoori, M. and Ebrahim, A., 2005, "Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications," *Sensors and Actuators A*, Vol. 117, pp. 222~229.
- (3) Gex, D., Berthelot, Y. H. and Lynch, C. S., 2005, "Low frequency bending piezoelectric actuator with integrated ultrasonic NDE functionality," *NDT&E International*, pp. 1~7.
- (4) Schwartz, R.W. and Narayanan, M., 2002, "Development of high stress-biased actuators through the incorporation of mechanical pre-loads," *Sensors and Actuators A*, Vol. 101, pp. 3220~331.
- (5) Liang, Y., Kuga, Y. and Taya, M., 2005,

- "Design of membrane actuator based on ferromagnetic shape memory alloy composite for synthetic jet applications," *Sensors and Actuators A*, Vol. 121, pp. 1~7.
- (6) Heo, S., Wiguna, T., Goo, N.S. and Park, H.C., 2007, "Mechanical design, fabrication and test of a biomimetic fish robot using LIPCA as an artificial muscle," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 1, pp. 36~42.
- (7) Woo, S.C. and Goo, N.S., 2007, "Prediction of Actuating Displacement in a Piezoelectric Composite Actuator with a Thin Sandwiched PZT Plate by a Finite Element Simulation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 21, No. 3, pp. 455~464.
- (8) Woo, S.C. and Goo, N.S., 2006, "Influence of Applied Electric Fields and Drive Frequencies on The Actuating Displacement of a Plate-type Piezoelectric Composite Actuator," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 5, pp. 576~584.
- (9) Woo, S.C. and Goo, N.S., 2007, "Analysis of the bending fracture process for piezoelectric composites actuators using dominant frequency bands by acoustic emission," *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 1499~1508.
- (10) Wang, Q.M. and Cross, L.E., 1998, "Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuator," *Ferroelectrics*, Vol. 215, pp. 187~213.
- (11) Mulling, J., Usher, T., Dessent, B., Palmer, J., Franzon, P., Grant, E. and Kingon, A., 2001, "Load characterization of high displacement piezoelectric actuators with various end conditions," *Sensors and Actuators A*, Vol. 94, pp. 19~24.
- (12) Hazem, K. and Shaukat, M., 2000, "Piezoelectric Induced Bending and Twisting of Laminated Composite Shallow Shells," *Smart Materials and Structures*, Vol. 9, pp. 476~484.
- (13) Wang, Q.M., Zhang, B.X., Xu, B. and Liu, L.E., 1999, "Nonlinear piezoelectric behavior of ceramic bending mode actuators under strong electric fields," *Journal of Applied Physics*, Vol. 86, pp. 3352~3360.