

# 압전섬유 복합재 액츄에이터의 거동 특성

구건형\* · 김철\*\*

## Actuating Characteristics of a Piezoceramic fiber Composite Actuator

Kun-Hyung Koo, Cheol Kim

**Key Words** : Piezoelectric Fiber Composite Actuator, Interdigitated Electrodes, Linear Microelectromechanical Piezoelectric model

### ABSTRACT

Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes (PFCIDE) were previously introduced as an alternative to monolithic wafers with conventional electrodes for applications of structural actuation. This paper is an investigation into the performance improvement of piezoelectric fiber composite actuators by changing the matrix material and actuator shape. This paper presents a modified micro-electromechanical model and numerical analyses of piezoelectric fiber/piezopolymer matrix composite actuator with interdigitated electrodes (PFPMIDE).

Numerical analyses show that the shape of the graphite/epoxy composite plate with the PFPMIDE may be controlled by judicious choice of voltages, piezoelectric fiber angles, and elastic tailoring of the composite plate.

### 기호설명

T : material stress  
S : material strain  
E : electric field  
D : electrical displacement  
C : elastic constants  
 $\epsilon$  : dielectric constants  
e : piezoelectric stress constants  
V : volume fraction

### 1. 서 론

최근에는 지능재료가 새로운 지능구조물의 한 구성요소로서 개발되어 기존의 작동기와 센서를 대체하고 있다[1]. 예를 들면 비행기 날개의 형상을 제어하는 경우 기존의 방식은 링크, 조인트, 유

압기계등과 같은 다양한 기계적인 요소로 구성되어 있다. 특히 항공산업에서는 중량이 가장 중요한 설계변수 중의 하나이기 때문에 기존의 시스템을 지능구조물로 대처하려는 연구가 계속 수행되어 왔다[2]. 특히 압전재료는 다른 지능재료들 보다 빠른 반응속도와 넓은 주파수 영역을 가지며 전압으로 쉽게 제어를 할 수 있는 장점들 때문에 널리 사용되어 왔다.

압전재료는 세라믹[3], 폴리머[4], 압전 섬유[5], 압전 적층판[6,7], 압전필름과 같은 다양한 형태로 발전되어져 왔다. 최근에는 새로운 형태의 작동기인 손가락형상 전극(Interdigitated Electrodes : IDE)이 부착된 압전섬유 복합재 작동기가 성능, 강도, 제작성의 관점에서 연구된 논문이 발표되었다[8,9]. 압전섬유는 압전재료의 특성을 그대로 유지하면서 한 방향으로 배열을 했을 때 그 작동에 있어 직교 이방성을 띤다. 그리고 기지는 섬유사이에서 응력을 전달하는 역할을 하므로 충격에 의한 파손특성과 인장강도가 기존의 압전작동기보다 개선된다.

\* 경북대 기계공학부 대학원

\*\* 경북대 기계공학부 조교수

IDE 는 전기장을 압전섬유방향으로 형성시켜 작동기의 작동력을 높이는 역할을 한다.

본 논문에서는 압전섬유 복합재 작동기의 전기-기계적인 미소 모델을 제시하였고 이 모델을 이용하여 작동기의 강성과 압전상수들을 계산하였으며, 복합재료 판에 부착되었을 때 작동기와 경화과정에서 발생하는 곡면이 고려된 작동기의 거동특성을 살펴보았다.

## 2. 전기-기계적인 미소모델

기존에 제시된 모델은 복합재 작동기를 몇 가지 상으로 나누어 다시 조합하는 방식을 사용하였으며[10], 이는 일반적인 기지를 가진 작동기의 물성치 계산에는 잘 적용이 되나 기지가 지능재료 즉 압전성을 띠게 되면 적용을 할 수 없는 단점을 가지고 있다. 여기서는 압전섬유 복합재 작동기의 기지 종류에 상관없이 적용할 수 있는 모델을 제시하고자 한다.

Fig.1 은 작동기의 대표체적요소와 조합형식을 단순화하여 보여준다. 전체 작동기의 특성을 나타내기 위해 세가지 경우로 나누었다. Case A 와 Case B 는 3 방향으로 균일하게 분극이 되었다고 가정하여 작동기의 전체적인 작동을 표현하며, Case C 는 전극주위의 국부적인 전기-기계적인 현상을 표현한다.

### 2.1 Case A

모델의 순서와 형식은 Hagood 가 제시한 모델을 기본으로 하였다[10]. 여기서 제시한 모델에서는 전기적, 기계적인 양이 모두 균일하다고 가정을 하였기 때문에 전단 모드는 발생하지 않는다고 할 수 있다. 그러므로 Case A 에서는 섬유와 기지를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ D_3 \end{Bmatrix}_{f,m} = \begin{bmatrix} C_{11}^E & C_{12}^E & C_{13}^E & -e_{31} \\ C_{12}^E & C_{22}^E & C_{23}^E & -e_{32} \\ C_{13}^E & C_{23}^E & C_{33}^E & -e_{33} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix}_f \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ E_3 \end{Bmatrix}_{f,m} \quad (1)$$

여기서 f는 섬유를 m은 기지를 나타낸다. Case A 에서는  $S_1$  과  $T_2, S_3, E_3$  가 독립변수가 된다. 예를 들면 1 방향의 평균 변형률  $S_1$  은 섬유, 기지 각각의 변형률과 크기가 같다는 것이다. 독립변수로 표현된 섬유와 기지의 식을 혼합물 법칙을 이용하여 다시 쓰면 다음과 같다

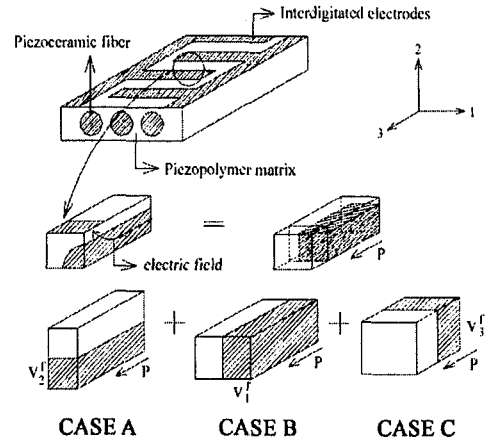


Fig. 1 Schematics of a combining process

$$\begin{Bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{S}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{D}_3 \end{Bmatrix} = v_2^f \begin{Bmatrix} T_1 \\ S_2 \\ T_3 \\ D_3 \end{Bmatrix}_f + v_2^m \begin{Bmatrix} T_1 \\ S_2 \\ T_3 \\ D_3 \end{Bmatrix}_m \quad (2)$$

여기서  $v_2^f$  는 2 방향으로 측정된 섬유 체적률을  $v_2^m$  는 2 방향 기지 체적률을 의미하며  $\bar{T}_1$  는 1 방향으로 평균응력을 의미한다. 위 식을 원래 형태의 식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{D}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{eff} & C_{12}^{eff} & C_{13}^{eff} & -e_{31}^{eff} \\ C_{12}^{eff} & C_{22}^{eff} & C_{23}^{eff} & -e_{32}^{eff} \\ C_{13}^{eff} & C_{23}^{eff} & C_{33}^{eff} & -e_{33}^{eff} \\ e_{31}^{eff} & e_{32}^{eff} & e_{33}^{eff} & \epsilon_{33}^{eff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{S}_1 \\ \bar{S}_2 \\ \bar{S}_3 \\ \bar{E}_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

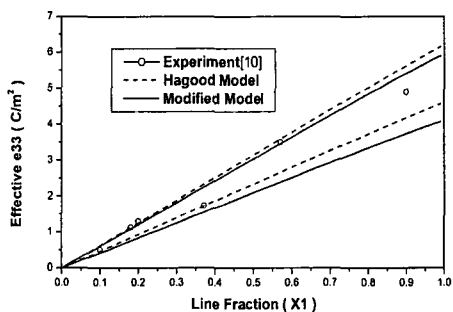
위 순서로 Case A 의 복합재 물성치를 계산하며 Case B 와 Case C 도 유사한 방법과 순서로 물성치를 계산한다.

### 2.2 조합 모델

앞에서 제시된 세가지 Case 는 서로 조합이 되어야만 전체적인 작동기의 특성을 나타낼 수 있다. 전극주위의 전기장이 집중되는 현상으로 인해 이 부분의 섬유와 기지가 다른 부분에서 보다 많은 영향을 받는다. 그로 인해 전기장 주위의 특성을 표현하는 Case C 를 먼저 계산하는 C → A → B 순서로 조합을 한다. Case C 에서 계산된 재료의 물성치를 Case A 의 섬유 물성치 부분에 대입하여 Case A 를 계산하고, 그 계산 결과를 Case B 의 섬유 물성치 부분에 대입하여 계산하면 조합된 모델의 물성치가 계산된다.

**Table1. Properties of composite materials**

	PZT 5H fibers	Co- polymer	Hybrid matrix[9]	Epoxy
$C_{11}^E$ (Gpa)	127	7.98	8.15	5.14
$C_{12}^E$ (Gpa)	80.2	5.10	4.01	2.77
$C_{13}^E$ (Gpa)	84.7	5.10	4.01	2.77
$C_{33}^E$ (Gpa)	117	7.98	8.15	5.14
$e_{31}$ (c/m <sup>2</sup> )	-4.42	-0.05	0	0
$e_{33}$ (c/m <sup>2</sup> )	15.5	0.19	0	0
$\epsilon_{33}^s / \epsilon_0$	1392	8.0	11.2	4.0



**Fig. 2 Effective piezoelectric constants of a PZT 5H fiber/hybrid matrix actuator**

Fig. 2 는 수정된 모델을 검증하기 위해 일반적인 기지로 이루어진 압전섬유 복합재 작동기의 물성치를 실험값과 기존의 모델(Hagood's Model)로 계산된 값, 수정된 모델로 계산된 값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 두 모델은 아주 유사한 값을 가지며 실험 결과는 수정된 모델로 계산된 결과 영역 안에 있는 것을 볼 수 있다. 이는 수정된 모델이 지능재료의 기지 뿐만 아니라 일반재료로 된 기지에서도 적용될 수 있음을 보여준다. 여기서 사용된 재료의 물성치는 Table 1 에 나타내었다.

### 3. 압전섬유 작동기의 거동 특성

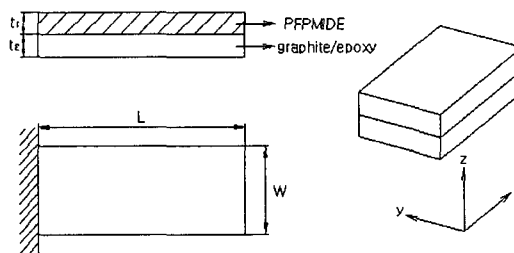
#### 3.1 평판 작동기의 거동

Fig. 3은 곡률이 없는 작동기를 복합재 판에 부착했을 때의 형상을 보여준다. 작동기의 섬유 방향은 길이방향(0°)으로 고정시켰으며 복합재 판의 방향(0°, 30°, 45°, 90°)을 변화시켰다. 압전섬유 복합재 작동기를 해석하기 위해 400개의 8절점 3차원 비적합요소를 사용하였으며 사용된 재료의 물성치는 Table1에, 치수는 Table 2에 나타내었다.

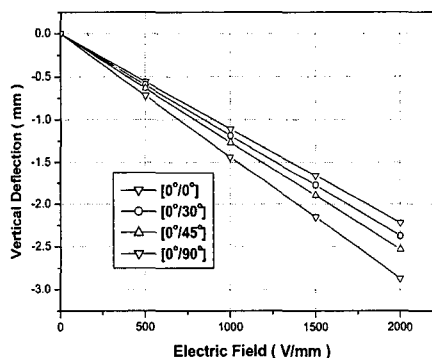
Fig. 4 는 전기장 세기에 따른 구조물 끝부분의 처짐량을 나타내었다. 처짐량은 복합재 판의 적층 각이 커질 수록 증가하는 것을 볼 수 있다.

**Table 2. Plate dimensions (mm)**

Length ( L )	63.5
Width (W)	14
Thickness (t1)	0.145
Thickness (t2)	0.125



**Fig. 3 Schematic of a PPFMIDE and graphite/epoxy**



**Fig. 4 Vertical deflection of a plate**

#### 3.2 곡면형 작동기의 거동

압전섬유 작동기와 복합재판을 같이 경화시켰을 때에는 잔류응력으로 인해 곡률이 생긴다. Fig. 5는 곡률을 가진 작동기의 형상을 보여준다. (a)는 작동기와 복합재판의 적층이 [0°/0°]이고 (b)는 [0°/90°]이다. 이 것은, 적층각에 따라 다른 곡률을 가짐을 보여준다.

해석은 3 차원 8 절점 비적합요소 400 개를 사용하였으며 해석과정에서 곡률을 생성하는 잔류응력을 고려하기 위해 먼저 열을 가해 작동기의 곡률을 생성한 후 작동기에 체적력을 가하는 순서로 해석이 수행되었다. 사용된 경계조건은 열을 가하는 단계에서는 모서리 한 점을 고정하였으며 다른 세 점은 z 방향만 고정하였고, 체적력을 가할 때에는 한면을 고정하였으며 반대편 두모서리에는 z 방향으로만 고정시켰다.

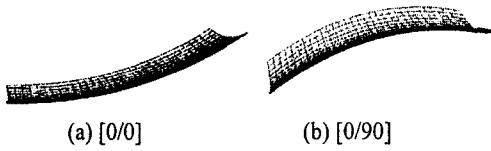


Fig. 5 Schematics of curved actuator

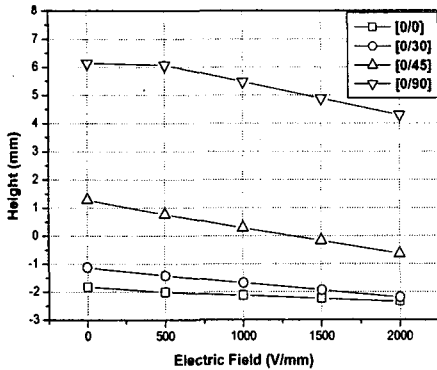


Fig. 6 Height of Curved actuators

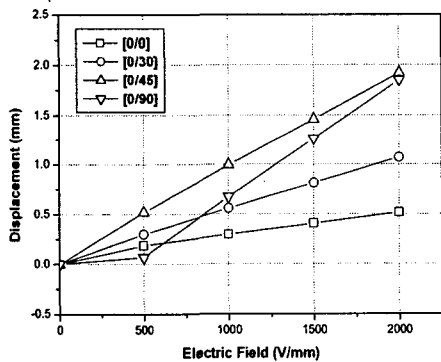


Fig. 7 Displacement of Curved actuators

Fig. 6 은 곡면형 작동기의 중심점 높이를 전기장의 세기에 따라 나타낸 것이다. 적층각이  $[0^\circ/90^\circ]$ 일 때 중심점의 높이가 가장 큰 것을 볼 수 있고,  $[0^\circ/0^\circ]$ ,  $[0^\circ/30^\circ]$ 의 적층각에서는 아래쪽으로 곡면이 형성되는 것을 볼 수 있다. Fig. 7 은 곡면이 생성된 후 전기장세기에 따른 작동기의 중심점 높이 변화를 나타낸 것이다. 이것은 작동기의 성능과도 관계되며,  $45^\circ$ 까지는 적층각이 커질수록 작동변위가 커짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 압전섬유 복합재 작동기의 물성

치를 계산하기 위해 전기-기계적인 미세 모델을 제시하였고 계산된 결과는 실험치와 검증된 해석 결과와도 잘 일치하였다. 이 모델은 새로운 작동기 및 기존의 압전섬유 복합재 작동기의 물성치를 효과적으로 예측할 수 있었다.

평판의 작동기와 곡률을 가진 작동기의 거동을 해석하였다. 부착되는 적층각에 따라 작동기의 곡률과 거동 특성이 달라졌다. 적층각과 제작방법을 적절히 선택하면 필요에 맞는 작동성능과 형상을 가진 압전섬유 복합재 작동기를 얻을 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- (1) C. Y. K. Chee, L. Tong, and G. P. Steven, "A Review on the Modeling of Piezoelectric Sensor and Actuators Incorporated in Intelligent Structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.9, 1998, pp. 3-19.
- (2) A. J. D. Plessis and N. W. Hagood, "Performance Investigation of Twist Actuated Single Cell Composite Beams for Helicopter Blade Control," 6<sup>th</sup> International Conference on Adaptive Structures and Technology, Key West, FL, 1995.
- (3) B. Jaffe, R. S. Roth, and S. Marzullo, "Properties of Piezoelectric Ceramics in the Solid-Solution Series Lead Titanate-Lead Zirconate-Lead Oxide: Tin Oxide and Lead Titanate-Lead Hanate," *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 55, 1995, pp. 239-254.
- (4) H. R. Gallantree, "Review of transducer applications of Polyvinylidene fluoride," *IEE proceedings* 130, 1983, pp. 219-224.
- (5) N. W. Hagood and A. A. Bent, "Development of Piezoelectric Fiber Composites for Structural Actuation," AIAA Paper No. 93-1717, Proceedings of 34<sup>th</sup> AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, La Jolla, CA, 1993.
- (6) K. Uchino, "Electrostrictive Actuators: Materials and Applications," *American Ceramic Society Bulletin* 65, 1986, pp. 647-652.
- (7) A. Chattopadhyay, J. Li, and H. Gu, "Coupled Thermo-Piezoelectric-Mechanical Model for Smarts Composite Laminates," *AIAA Journal* Vol.37, No.12, 1999, pp. 1633-1638.
- (8) A. A. Bent, "Active Fiber Composite for Structural Actuation," Ph. D. thesis, MIT, January, 1997.
- (9) A. A. Bent and N. W. Hagood, "Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.8, 1997, pp. 903-919.
- (10) A. A. Bent, N. W. Hagood and J. P. Rodgers, "Anisotropic Actuation with Piezoelectric Fiber Composites," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.6(3), 1995, pp. 338-349.