

압전섬유/압전기지 복합재 작동기의 전기-기계적 마이크로모델

김철*, 구건형**

Micro-electromechanical Model of a Piezoelectric fiber/Piezopolymer matrix composite Actuator

Cheol Kim and Kun-Hyung Koo

Key Words : Piezoelectric fiber/Piezopolymer matrix composite actuator (압전섬유/압전기지 복합재 작동기), Interdigitated Electrodes(IDE : 손가락형상 전극), Linear Piezoelectric Model(선형 압전체 모델)

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. This paper presents a modified micro-electromechanical model of a piezoelectric fiber/piezopolymer matrix composite actuator with interdigitated electrodes (PFPMIDE).

Various concepts from different backgrounds including three-dimensional linear elastic and dielectric theories have been incorporated into the present linear piezoelectric model. The rule of mixture and the modified method to calculate the effective properties of fiber composites are extended to apply to the PFPMIDE model. The new model is validated comparing with available experimental data and other analytical results.

기호설명

- T : material stress
- S : material strain
- E : electric field
- D : electrical displacement
- C : elastic constants
- ϵ : dielectric constants
- e : piezoelectric stress constants
- d : piezoelectric strain constants
- V : volume fraction
- X : line fraction
- p : electrode spacing
- h : wafer thickness

1. 서론

최근에는 압전재료나 형상기억합금과 같은 지

능재료가 새로운 지능구조물의 한 구성요소로서 개발되어 기존의 작동기와 센서를 대체하고 있다 [1]. 예를 들면 비행기 날개의 형상을 제어하는 경우 기존의 방식은 링크, 조인트, 유압기계등과 같은 다양한 기계적인 요소로 구성되어 있다. 특히 항공산업에서는 중량이 가장 중요한 설계변수 중의 하나이기 때문에 기존의 시스템을 지능구조물로 대체하려는 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.

1880년 Curie 형제에 의해 압전효과가 발견된 이래 압전재료는 세라믹[3], 폴리머[4], 압전 섬유[5], 압전 적층판[6-8], 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 발표되었

* 경북대학교 기계공학과 조교수
 ** 경북대학교 기계공학과 대학원

다[9,10]. 압전섬유는 압전재료의 특성을 그대로 유지하면서 한 방향으로 배열을 했을 때 그 작동에 있어 직교 이방성을 띤다. 그리고 기지는 섬유 사이에서 응력을 전달하는 역할을 하므로 충격에 의한 파손특성과 인장강도가 기존의 압전작동기보다 개선된다. IDE 는 전기장을 압전섬유방향으로 형성시켜 작동기의 작동력을 높이는 역할을 한다. 그러나 섬유와 기지의 유전율의 차이는 전기장의 세기와 작동기의 작동력을 감소시키는 원인이 되기도 한다.

본 논문에서는 기지를 압전폴리머로 대체 함으로써 섬유와 기질의 유전율 차이를 줄이고, 작동기의 성능을 향상시키는 연구를 하였다. 새로운 작동기의 전기-기계적인 미소 모델을 제시하였고 이 모델을 이용하여 작동기의 강성과 압전상수들을 계산하였으며, 다른 계산 결과들과[9,10]과 비교하였다. 또한 기존의 일반적인 기지를 사용한 압전섬유 복합재 작동기와 성능을 비교하였다.

2. 압전재료의 지배방정식

압전재료는 압전현상을 일으키는 물질로서 기계적인 변형을 가하면 전하가 발생하여 전기적인 에너지를 생성하고 반대로 전기적인 에너지를 가하면 변형이 일어나는 재료이다[11]. 이 현상을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T_p = C_{pq}^E S_q - e_{kp} E_k \quad (1a)$$

$$D_i = e_{iq} S_q + \epsilon_{ik}^S E_k \quad (1b)$$

여기서 e_{iq} 는 전기장과 발생하는 응력사이의 관계를 규정하는 상수이다. 예를 들면 e_{31} 는 3 방향으로 전기장을 가했을 때 1 방향으로 발생하는 응력과의 관계를 나타낸다. 위 첨자 E 와 S 는 각각 전기장과 변형률의 평형상태를 의미한다.

3. 전기-기계적인 미세 모델

적합한 물성치를 계산하기 위해 다양한 전기-기계적 미세 모델이 제시되어 왔다. 본 논문에서는 Hagood 와 Bent 에 의해 제시된 IDE 가 부착된 압전섬유 복합재 작동기 모델을 바탕으로 한다[12]. 기존에 제시된 모델은 복합재 작동기를 몇 가지 상으로 나누어 다시 조합하는 방식을 사용하였으며, 이는 일반적인 기지를 가진 작동기의 물성치 계산에는 잘 적용이 되나 기지가 지능재료 즉 압

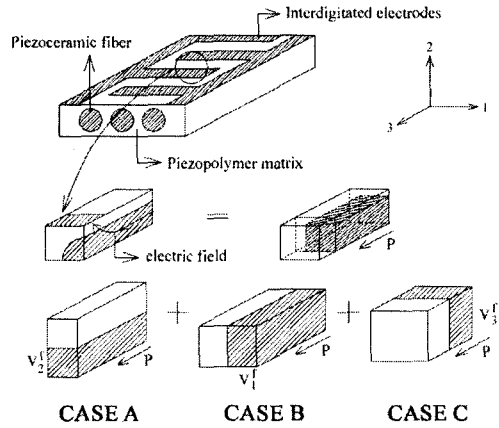


Fig. 1 Schematics of a combining process

전성을 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.

3.1 Case A

모델의 순서와 형식은 Hagood 가 제시한 모델을 기본으로 하였다. 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 각각 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ D_3 \end{Bmatrix}_f = \begin{bmatrix} C_{11}^E & C_{12}^E & C_{13}^E & -e_{31} \\ C_{12}^E & C_{22}^E & C_{23}^E & -e_{32} \\ C_{13}^E & C_{23}^E & C_{33}^E & -e_{33} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & \epsilon_{33}^S \end{bmatrix}_f \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ E_3 \end{Bmatrix}_f \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ D_3 \end{Bmatrix}_m = \begin{bmatrix} C_{11}^m & C_{12}^m & C_{13}^m & -e_{31}^m \\ C_{12}^m & C_{22}^m & C_{23}^m & -e_{32}^m \\ C_{13}^m & C_{23}^m & C_{33}^m & -e_{33}^m \\ e_{31}^m & e_{32}^m & e_{33}^m & \epsilon_{33}^m \end{bmatrix}_m \begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ E_3 \end{Bmatrix}_m \quad (3)$$

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. 위 식을 독립변수로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$T_1 = \frac{1}{C_{22}^E} (C_{11}^E C_{22}^E - C_{12}^{E^2}) S_1 + \frac{C_{23}^E}{C_{22}^E} T_2 + \frac{1}{C_{22}^E} (C_{13}^E C_{22}^E - C_{23}^{E^2}) S_3 - \frac{1}{C_{22}^E} (e_{31} C_{22}^E - e_{32} C_{12}^E) E_3 \quad (4a)$$

$$S_2 = \frac{1}{C_{22}^E} (-C_{12}^E S_1 + T_2 - C_{23}^E S_3 + e_{32} E_3) \quad (4b)$$

$$T_3 = \frac{1}{C_{22}^E} (C_{13}^E C_{22}^E - C_{12}^E C_{23}^E) S_1 + \frac{C_{23}^E}{C_{22}^E} T_2 + \frac{1}{C_{22}^E} (C_{33}^E C_{22}^E - C_{23}^{E^2}) S_3 - \frac{1}{C_{22}^E} (e_{33} C_{22}^E - e_{32} C_{23}^E) E_3 \quad (4c)$$

$$D_3 = \frac{1}{C_{22}^E} (e_{31} C_{22}^E - e_{32} C_{12}^E) S_1 + \frac{e_{32}}{C_{22}^E} T_2 + \frac{1}{C_{22}^E} (e_{33} C_{22}^E - e_{32} C_{23}^E) S_3 + \frac{1}{C_{22}^E} (e_{33}^S C_{22}^E + e_{32}^2) E_3 \quad (4d)$$

$$T_1^m = \frac{1}{C_{22}^m} (C_{11} C_{22} - C_{12}^2) S_1^m + \frac{C_{12}}{C_{22}^m} T_2^m + \frac{1}{C_{22}^m} (C_{13} C_{22} - C_{23}^2) S_3^m - \frac{1}{C_{22}^m} (e_{31}^m C_{22} - e_{32}^m C_{12}) E_3^m \quad (5a)$$

$$S_2^m = \frac{1}{C_{22}^m} (-C_{12} S_1^m + T_2^m - C_{23} S_3^m + e_{32} E_3^m) \quad (5b)$$

$$T_3^m = \frac{1}{C_{22}^m} (C_{13} C_{22} - C_{12} C_{23}) S_1^m + \frac{C_{23}}{C_{22}^m} T_2^m + \frac{1}{C_{22}^m} (C_{33} C_{22} - C_{23}^2) S_3^m - \frac{1}{C_{22}^m} (e_{33}^m C_{22} - e_{32}^m C_{23}) E_3^m \quad (5c)$$

$$D_3^m = \frac{1}{C_{22}^m} (e_{31}^m C_{22} - e_{32}^m C_{12}) S_1^m + \frac{e_{32}^m}{C_{22}^m} T_2^m + \frac{1}{C_{22}^m} (e_{33}^m C_{22} - e_{32}^m C_{23}) S_3^m + \frac{1}{C_{22}^m} (e_{33}^S C_{22} + e_{32}^{m^2}) E_3^m \quad (5d)$$

혼합물 법칙을 이용하여 위 식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{S}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{D}_3 \end{Bmatrix} = \nu_2^f \begin{Bmatrix} T_1 \\ S_2 \\ T_3 \\ D_3 \end{Bmatrix}_f + \nu_2^m \begin{Bmatrix} T_1 \\ S_2 \\ T_3 \\ D_3 \end{Bmatrix}_m \quad (6)$$

여기서 ν_2^f 는 2 방향으로 측정된 섬유 체적률을 ν_2^m 는 2 방향 기지 체적률을 의미하며 \bar{T}_1 는 1 방

향으로 평균응력을 의미한다. 위 식을 원래 형태 의 식으로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{D}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^{eff} & C_{12}^{eff} & C_{13}^{eff} & -e_{31}^{eff} \\ C_{12}^{eff} & C_{22}^{eff} & C_{23}^{eff} & -e_{32}^{eff} \\ C_{13}^{eff} & C_{23}^{eff} & C_{33}^{eff} & -e_{33}^{eff} \\ e_{31}^{eff} & e_{32}^{eff} & e_{33}^{eff} & \epsilon_{33}^{eff} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{S}_1 \\ \bar{S}_2 \\ \bar{S}_3 \\ \bar{E}_3 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

여기서 각각의 물성치는 다음과 같이 계산된다.

$$C_{11}^{eff} = (\nu_2^f C_{11}^E + \nu_2^m C_{11}^m) - \frac{\nu_2^f \nu_2^m (C_{12}^E - C_{12}^m)^2}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m}$$

$$C_{12}^{eff} = \frac{\nu_2^f C_{12}^E C_{22}^E + \nu_2^m C_{12}^m C_{22}^m}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m}$$

$$C_{13}^{eff} = (\nu_2^f C_{13}^E + \nu_2^m C_{13}^m) - \frac{\nu_2^f \nu_2^m (C_{12}^E - C_{12}^m)(C_{23}^E - C_{23}^m)}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m}$$

$$C_{22}^{eff} = \frac{C_{22}^E + C_{22}^m}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m} \quad (8a)$$

$$C_{23}^{eff} = \frac{\nu_2^f C_{23}^E C_{22}^E + \nu_2^m C_{23}^m C_{22}^m}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m}$$

$$C_{33}^{eff} = (\nu_2^f C_{33}^E + \nu_2^m C_{33}^m) - \frac{\nu_2^f \nu_2^m (C_{23}^E - C_{23}^m)^2}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m}$$

$$e_{31}^{eff} = (\nu_2^f e_{31}^E + \nu_2^m e_{31}^m) - \frac{\nu_2^f \nu_2^m (e_{32}^E - e_{32}^m)(C_{12}^E - C_{12}^m)}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m}$$

$$e_{32}^{eff} = \frac{\nu_2^f e_{32}^E C_{22}^E + \nu_2^m e_{32}^m C_{22}^m}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m} \quad (8b)$$

$$e_{33}^{eff} = (\nu_2^f e_{33}^E + \nu_2^m e_{33}^m) - \frac{\nu_2^f \nu_2^m (C_{23}^E - C_{23}^m)(e_{32}^E - e_{32}^m)}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m}$$

$$\epsilon_{33}^{eff} = (\nu_2^f \epsilon_{33}^S + \nu_2^m \epsilon_{33}^m) - \frac{\nu_2^f \nu_2^m (e_{32}^E - e_{32}^m)^2}{\nu_2^f C_{22}^E + \nu_2^m C_{22}^m} \quad (8c)$$

3.2 Case B

복합재 작동기는 3 방향으로 대칭을 이루고 있으며 섬유길이 방향으로 균일하게 분극이 일어났다고 가정했기 때문에 Case B 의 지배방정식과 물성치는 Case A 에서 아래 첨자 "1"과 "2"를 서로 바꾸면 쉽게 유도된다.

3.3 Case C

Case C 는 IDE 의 국부적인 영향을 고려하기 위

해 제시된 것이다. 이전의 모델에서는 기지의 재료가 지능재료가 아니었기 때문에 기지에서는 기계적인 힘이 발생하지 않아 기계적인 성질을 고려할 필요가 없었다. 그러나 여기서 제시된 작동기는 기지가 압전폴리머로 되어있어 기존의 모델로는 정확한 물성치를 계산할 수 없다. 따라서 기지가 지능재료인 복합재 작동기에 적용될 수 있는 수정된 모델을 제시한다.

Case C에서 독립변수는 S_1, S_2, T_3, D_3 가 되며 유도되는 과정이나 방법은 Case A와 거의 유사하므로 여기서는 그 과정을 생략하고 지배방정식을 소개하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{S}_3 \\ \bar{E}_3 \end{Bmatrix} = v_3^f \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ S_3 \\ E_3 \end{Bmatrix}_f + v_3^m \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ S_3 \\ E_3 \end{Bmatrix}_m \quad (9)$$

3.4 조합 모델

앞에서 제시된 세가지 Case는 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 C를 먼저 계산하는 $C \rightarrow A \rightarrow B$ 순으로 조합을 한다. Case C에서 계산된 재료의 물성치를 Case A의 섬유 물성치 부분에 대입하여 Case A를 계산하고, 그 계산 결과를 Case B의 섬유 물성치 부분에 대입하여 계산하면 조합된 모델의 물성치가 계산된다.

Fig. 2는 압전섬유 복합재 작동기의 체적률(volume fraction)과 선률(line fraction)의 관계를 보여준다. 원형 섬유를 넓이가 같은 사각형으로 표현을 했을 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

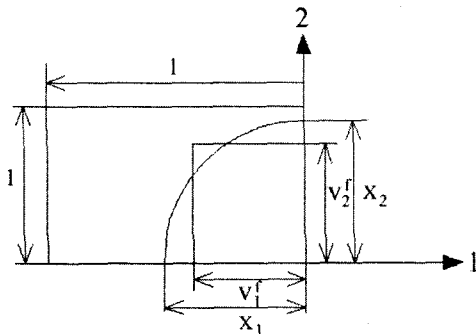


Fig. 2 Geometry of an actual PFPIMDE model

$$v^f = v_1^f v_2^f = \frac{\pi}{4} X_1 X_2 \quad \text{when } v_1^f = v_2^f \quad (10)$$

여기서 X_1 과 X_2 는 실제 원형 섬유 복합재 작동기의 1방향, 2방향의 선률을 의미한다.

Case C에서 섬유 체적률 v_3^f 는 전기장 방향에 수직하는 섬유 부분을 의미하고, 이는 2방향의 섬유 체적률과 전극의 형상 및 패턴에 관계되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_3^f = \frac{p/2}{p/2 + (h/2)v_2^m} = \frac{p/h}{p/h + (1 - v_2^f)} \quad (11)$$

여기서 p 는 전극의 간격, h 는 작동기의 두께를 의미한다.

4. 결과 및 토의

Fig. 3, 4는 수정된 모델을 검증하기 위해 일반적인 기지로 이루어진 압전섬유 복합재 작동기의 물성치를 기존의 모델(Hagood's Model)과 수정된 모델을 이용하여 계산, 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 두 모델은 아주 유사한 값을 가지는 것을 알 수 있으며 이는 수정된 모델이 지능재료의 기지 뿐만 아니라 일반적인 재료로 된 기지에서도 적용될 수 있음을 보여준다. 여기서 사용된 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다. 특히 Fig. 4는 2방향의 선률이 0.909에서 0.942 범위 안에 있는 작동기의 실험결과와 비교한 것이다. 실험 결과는 수정된 모델로 계산된 결과 영역 안에 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5는 압전폴리머를 기지로 사용한 압전섬유 복합재 작동기의 물성치를 두 가지 모델로 계산한 결과를 비교한 것이다. 기존의 모델은 기지의 압전 특성을 무시했기 때문에 수정된 모델보다 작은 절대값을 가진다.

Fig. 6은 수정된 모델에서 계산된 물성치를 이용해 작동기의 성능을 비교한 것이다. 기지로 에폭시를 사용한 일반적인 작동기 보다는 두배 가량의 변형률을 가지고, Hagood가 제시한 Hybrid matrix를 사용한 작동기보다 성능이 향상된 것을 알 수 있다.

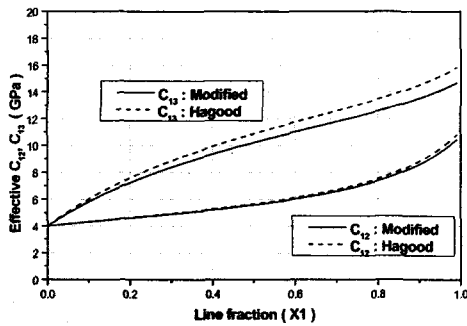
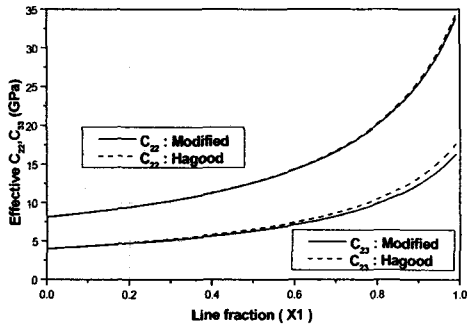
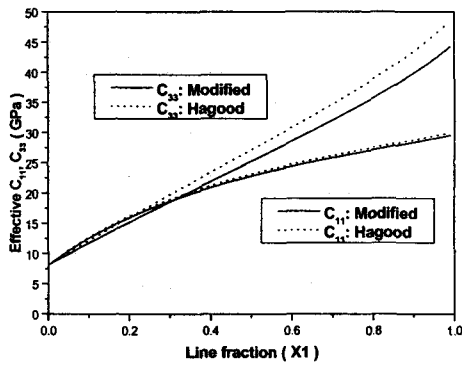


Fig. 3 Effective stiffness of a PZT 5H fiber/hybrid matrix actuator

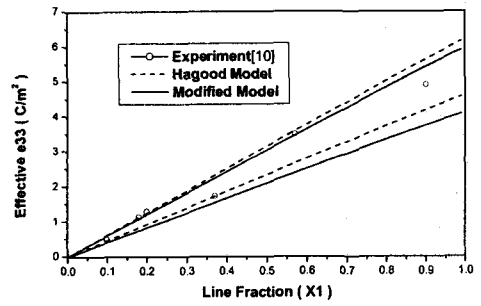


Fig. 4 Effective piezoelectric constants of a PZT 5H fiber/hybrid matrix actuator

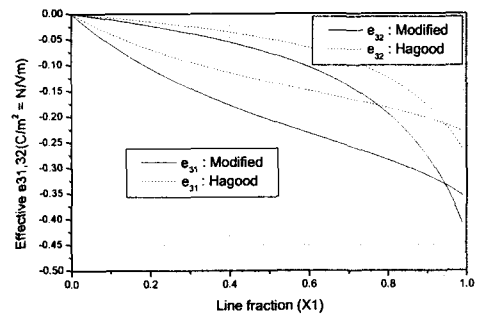


Fig. 5 Effective piezoelectric constants of a PZT 5H fiber/piezopolymer matrix actuator

Table 1. 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 ²)	-4.42	-0.05	0	0
e_{33} (c/m ²)	15.5	0.19	0	0
$\epsilon_{33}^s / \epsilon_0$	1392	8.0	11.2	4.0

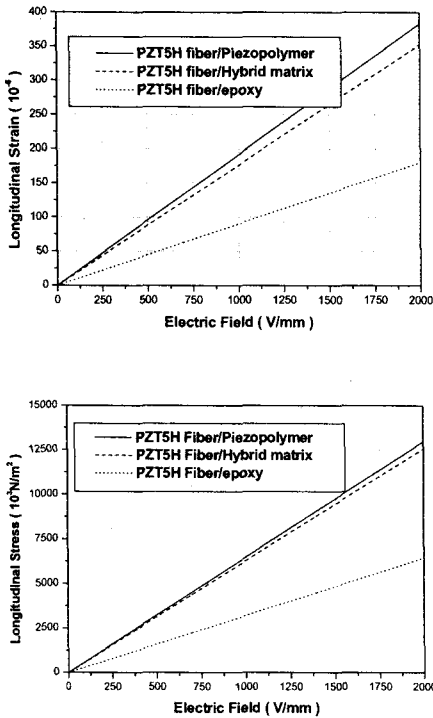


Fig. 6 Performance comparisons of piezoelectric fiber composite actuators

5. 결론

본 논문에서는 기존의 지지재료를 압전폴리머로 대체 함으로써 섬유와 기지의 유전률 차이를 줄이고, 압전섬유 복합재 작동기의 성능을 향상시켰다. 이 작동기의 물성치를 계산하기 위해 전기-기계적인 미세 모델을 제시하였고 계산된 결과는 실험치와 검증된 해석결과와도 잘 일치하였다. 이 모델은 새로운 작동기 및 기존의 압전섬유 복합재 작동기의 물성치를 효과적으로 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) C. Y. K. Chee, L. Tong, and G. P. Steven, 1998, "A Review on the Modeling of Piezoelectric Sensor and Actuators Incorporated in Intelligent Structures," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.9, pp. 3-19.
- (2) A. J. D. Plessis and N. W. Hagood, 1995, "Performance Investigation of Twist Actuated Single Cell Composite Beams for Helicopter Blade Control,"

- 6th International Conference on Adaptive Structures and Technology, Key West, FL.
- (3) B. Jaffe, R. S. Roth, and S. Marzullo, 1995, "Properties of Piezoelectric Ceramics in the Solid-Solution Series Lead Titanate-Lead Zirconate-Lead Oxide: Tin Oxide and Lead Titanate-Lead Oxide," *Journal of Research of the National Bureau of Standards* 55, pp. 239-254.
- (4) H. R. Gallantree, 1983, "Review of transducer applications of Polyvinylidene fluoride," *IEE proceedings* 130, pp. 219-224.
- (5) N. W. Hagood and A. A. Bent, 1993, "Development of Piezoelectric Fiber Composites for Structural Actuation," *AIAA Paper No. 93-1717*, Proceedings of 34th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, La Jolla, CA.
- (6) K. Uchino, 1986, "Electrostrictive Actuators: Materials and Applications," *American Ceramic Society Bulletin* 65, pp. 647-652.
- (7) H. Banno, 1983, "Recent Developments of Piezoelectric Ceramic Products and Composites of Synthetic Rubber and Piezoelectric Ceramic Particles," *Ferroelectrics*, Vol.50, pp. 3-12.
- (8) A. Chattopadhyay, J. Li, and H. Gu, 1999, "Coupled Thermo-Piezoelectric-Mechanical Model for Smarts Composite Laminates," *AIAA Journal* Vol.37, No.12, pp. 1633-1638.
- (9) A. A. Bent, 1997, "Active Fiber Composite for Structural Actuation," Ph. D. thesis, MIT, January.
- (10) A. A. Bent and N. W. Hagood, 1997, "Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.8, pp. 903-919.
- (11) IEEE Std 1978, IEEE Standard on Piezoelectricity, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- (12) A. A. Bent, N. W. Hagood and J. P. Rodgers, 1995, "Anisotropic Actuation with Piezoelectric Fiber Composites," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.6(3), pp. 338-349.