

# 능동 화이버 복합재의 모델링 및 적용 연구

이영우\* · 김영호\*\* · 하성규†

(2001년 1월 3일 접수, 2001년 6월 8일 심사완료)

## Modeling and Application of Active Fiber Composites

Young Woo Lee, Young Ho Kim and Sung Kyu Ha

**Key Words :** Active Fiber Composites(능동 화이버 복합재), Effective Material Property(등가 물성치), Plane Stress(평면 응력), Rule of Mixture(혼합물 법칙), Anisotropic Actuation(이방성 구동)

### Abstract

Effective material properties of active fiber composites with interdigitated electrodes are derived as a function of the fiber volume fraction. For the purpose of applying the rule of mixture, three unit cell models are introduced; each for the deformation and stress continuities in the out of plane and in-plane directions, and the continuity of the electrical displacement in the longitudinal direction. Derived effective material properties are compared with the results by the finite element method; good agreements are observed between them. As an application, the electromechanical behavior of the angle ply laminates with the active fiber layers bonded on the top and bottom surfaces are investigated; the angle of piezoelectric fiber to maximize the twisting curvature is obtained using the present model.

### 1. 서론

압전 재료는 압전 현상에 의해 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환시키거나, 반대로, 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시킬 수 있는 특성을 가지고 있는 재료로,<sup>(1)</sup> PZT(lead zirconate titanate)와 같은 압전 세라믹 재료나 PVDF(polyvinylidene fluoride)와 같은 압전 필름이 널리 사용되고 있다. 이러한 압전 재료는 그 응용분야가 매우 넓으며, 특히, 구조물 내에 삽입하거나 표면에 부착하여 구조물의 자세 제어(attitude control), 진동 제어(vibration control),<sup>(2-4)</sup> 및 안전 진단(health monitoring)을 하기 위한 감지기 및 작동기로의 사용에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 기존의

압전 재료를 셀 구조물에 적용할 경우, 압전 세라믹은 취성이 강해서 곡률 형상의 구조물에 부착하기 어려우며,<sup>(5)</sup> 유연한 특성을 가지고 있는 압전 필름은 작동력이 약하다는 단점을 가지고 있다. 최근 들어 이러한 문제점을 해결하기 위해서 능동 화이버 복합재(active fiber composites, AFCs)에 대한 연구가 활발히 진행 되고 있다.<sup>(6,7)</sup>

능동 화이버 복합재는 압전 세라믹 화이버와 폴리머 수지를 경화시켜 만들며, Fig. 1 과 같이 표면에 전극판(electrode)을 손가락 깎지킨 형태로 화이버와 수직하게 배열하여 부착한다. 부착된 전극판에 전위를 가하면, 압전 화이버 방향의 전기(electric field)에 의해 작동력이 발생하게 된다. 이러한 능동 화이버 복합재는 곡률 형상의 구조물에 부착이 용이하고, 작동력이 크며, 이방성 구동(anisotropic actuation)이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 능동 화이버 복합재를 적층하여 적층각에 따라 굽힘 모멘트뿐만 아니라 비틀림 모멘트를 쉽게 발생 시킬 수 있으며, 이를 이용하여 헬

\* LG 전자 D/A 연구소

\*\* 한양대학교 대학원 기계설계학과

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계산업공학부

E-mail : sunggha@hanyang.ac.kr

TEL : (031)400-5249 FAX : (031)501-0754

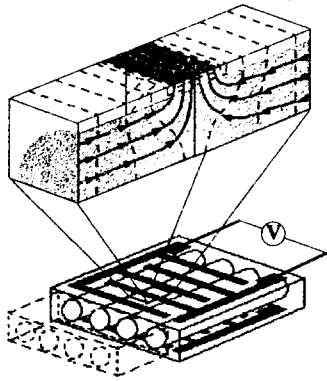


Fig. 1 Active fiber composites (AFCs)

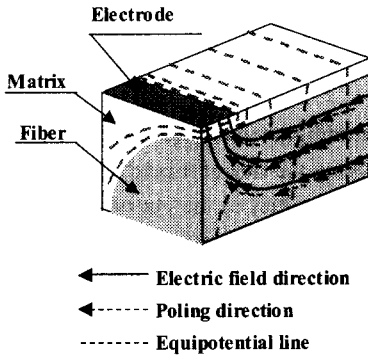


Fig. 2 Representative volume element of AFCs

리콥터 로터 블레이드의 비틀림 각을 용이하게 제어할수 있을 뿐 아니라, 여러 기계 구조물에 부착 또는 삽입하여 구조물을 제어 하는데 응용되어 질 수 있다.<sup>(8)</sup>

본 논문에서는 압전 화이버와 기지로 구성되어 있는 능동 화이버 복합재에 대해 혼합물 법칙을 적용하여 평면응력 상태에서의 기계적, 전기적 등가 물성치를 구하였으며 유한 요소 해석을 통해 이를 검증하였다. 또한 간단한 예제에 대해 비틀림 곡률을 최대로 하는 능동 화이버의 적층 각도를 알아보았다.

2. 능동 화이버 복합재의 등가 물성치

능동 화이버 복합재의 대표 체적 요소는 Fig. 2 와 같다. 능동 화이버 복합재는 압전 재료와 기지의 두가지 재료로 구성되어 있으며, 전극판에 전위를 가할 경우 전극판의 바로 아래 부분에서는 압전 화이버와 수직인 전계 성분이 발생함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3 의 combination model 에서 전기적 효과만 고려되는 Case C 의 경우에 압전 섬유유의 체적 비( $v_3^p$ )에 의해 고려되어진다. 등가의

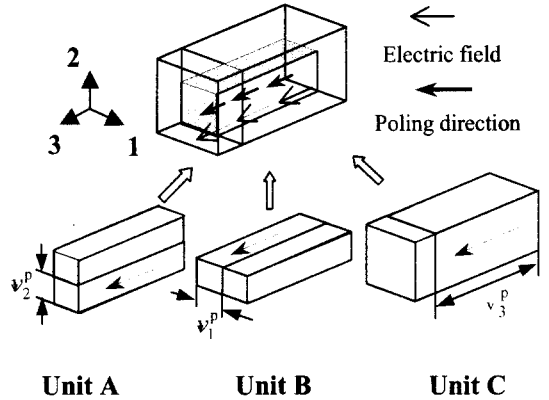


Fig. 3 Combination model of AFCs

물성치를 구하기 위해 먼저, Fig. 3 에서 보는 바와 같이 전체 형상을 unit A, unit B, unit C로 나누어 각각의 등가 물성치를 구한 다음, unit A 의 등가 물성치를 unit B 의 압전 화이버의 물성치로 대입하고, 다시 unit B 의 등가 물성치를 unit C 의 압전 화이버의 물성치로 대입하여 전체 형상의 능동 화이버의 등가 물성치를 구하였다. 본 연구에서는 두께 방향의 스트레스를 무시한 평면 응력 상태 ( $T_2=0$ )로 가정하여 최종적인 등가의 물성치를 유도하였다.

먼저, 압전 재료의 구성 방정식을 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} S \\ D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & \mathbf{d} \\ \text{sym.} & \epsilon^T \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T \\ E \end{pmatrix} \tag{1}$$

여기서  $S$ 와  $T$ 는 변형을 및 응력 벡터,  $D$ 와  $E$ 는 유전 변위(dielectric displacement) 및 전계(electric field) 벡터,  $s^E$ 와  $\mathbf{d}$ 는 일정 전계하에서의 컴플라이언스 행렬과 압전 변형을 상수벡터, 그리고  $\epsilon^T$ 는 일정 응력하에서의 유전 상수행렬이다. Class 6mm 압전 화이버에 화이버 방향, 즉, Fig. 3 의 좌표계에서 3 방향으로만 전계가 가해지고 4 와 6 성분의 응력을 무시할 경우, 식 (1)의 각 성분은 다음과 같다.

$$S = (S_1, S_2, S_3, S_4)^T \tag{2a}$$

$$T = (T_1, T_2, T_3, T_4)^T \tag{2b}$$

$$D = D_3 \tag{2c}$$

$$E = E_3 \tag{2d}$$

$$\mathbf{s}^E = \begin{pmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 \\ s_{13}^E & s_{23}^E & s_{33}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{55}^E \end{pmatrix} \quad (2e)$$

$$\mathbf{d} = (d_{31} \quad d_{32} \quad d_{33} \quad 0)^T \quad (2f)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \boldsymbol{\varepsilon}_{33}^T \quad (2g)$$

식 (2)를 이용하여, 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_5 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & e_{31} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & e_{32} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & -e_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_5 \\ -E_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{c} & \mathbf{e} \\ \text{sym.} & -\boldsymbol{\varepsilon} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{S} \\ -\mathbf{E} \end{pmatrix}$$

여기서

$$\begin{aligned} \mathbf{c} &= (\mathbf{s}^E)^{-1} \\ \mathbf{e} &= (\mathbf{s}^E)^{-1} \mathbf{d} \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= \boldsymbol{\varepsilon}^T - \mathbf{d}^T (\mathbf{s}^E)^{-1} \mathbf{d} \end{aligned} \quad (4)$$

본 연구에서는 각각의 unit 에 대해 압전 화이버와 기지의 두 재료에서 같은 값을 가지는 계의 변수를 독립 변수로 정의하여 혼합물 법칙을 적용하였다. unit A 의 경우, 독립 변수는  $S_1, T_2, S_3, S_5, E_3$  이며 다음과 같은 조건이 성립한다.

$$\begin{aligned} \bar{S}_1 &= S_1^p = S_1^m \\ \bar{T}_2 &= T_2^p = T_2^m \\ \bar{S}_3 &= S_3^p = S_3^m \\ \bar{S}_5 &= S_5^p = S_5^m \\ \bar{E}_3 &= E_3^p = E_3^m \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 위 첨자  $p$  와  $m$  은 각각 압전 재료와 기지의 물성치임을 나타낸다. 식 (3)의 압전 구성 방정식을 독립 변수와 그 영향으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{S}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{T}_5 \\ \bar{D}_3 \end{pmatrix} = v_2^p \begin{pmatrix} T_1 \\ S_2 \\ T_3 \\ T_5 \\ D_3 \end{pmatrix}_p + v_2^m \begin{pmatrix} T_1 \\ S_2 \\ T_3 \\ T_5 \\ D_3 \end{pmatrix}_m = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \bar{S}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{S}_3 \\ \bar{S}_5 \\ \bar{E}_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

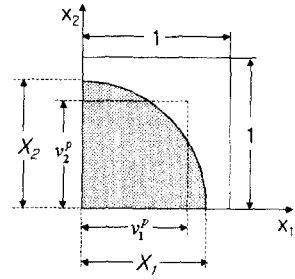


Fig. 4 Representations of AFCs geometry

여기서  $v_2^p$  와  $v_2^m$  은 unit A 의 압전 화이버와 기지의 체적 비를 나타내고, 압전 섬유가 기지 내에 균일하게 분포하고 있다고 가정할 때 Fig. 4 에서 보듯이 1 방향과 2 방향 체적비는 다음과 같이 계산된다.

$$v_1^p v_2^p = \frac{\pi}{4} X_1 X_2 = v_f \quad (7a)$$

$$v_1^p = v_2^p = \sqrt{v_f} \quad (7b)$$

$$v_1^m = v_2^m = 1 - v_f \quad (7c)$$

식 (7)에서  $v_f$  는 압전 화이버의 총 체적 비(volume fraction)를 나타낸다. 식 (6)를 압전 구성방정식 형태로 다시 쓰면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_5 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^{eff} & c_{12}^{eff} & c_{13}^{eff} & 0 & e_{31}^{eff} \\ c_{12}^{eff} & c_{22}^{eff} & c_{23}^{eff} & 0 & e_{32}^{eff} \\ c_{13}^{eff} & c_{23}^{eff} & c_{33}^{eff} & 0 & e_{33}^{eff} \\ 0 & 0 & 0 & c_{55}^{eff} & 0 \\ e_{31}^{eff} & e_{32}^{eff} & e_{33}^{eff} & 0 & -e_{33}^{eff} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_5 \\ -E_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서,

$$c_{11}^{eff} = \frac{c_{11}^m c_{22}^p v_2^m - ((c_{12}^m - c_{12}^p)^2 - c_{11}^m c_{22}^m - c_{11}^p c_{22}^p) v_2^m v_2^p}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} + \frac{c_{11}^p c_{22}^m v_2^2}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} \quad (9a)$$

$$c_{12}^{eff} = \frac{c_{12}^m c_{22}^p v_2^m + c_{12}^p c_{22}^m v_2^p}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} \quad (9b)$$

$$c_{13}^{eff} = \frac{(c_{13}^m c_{22}^m + c_{13}^p c_{22}^p - (c_{12}^m - c_{12}^p)(c_{23}^m - c_{23}^p)) v_2^m v_2^p}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} + \frac{c_{13}^m c_{22}^p v_2^m + c_{13}^p c_{22}^m v_2^p}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} \quad (9c)$$

$$c_{22}^{eff} = \frac{c_{22}^m c_{22}^p}{v_2^m c_{22}^p + v_2^p c_{22}^m}$$

$$c_{23}^{eff} = \frac{c_{22}^p c_{23}^m v_2^m + c_{22}^m c_{23}^p v_2^p}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p}$$

$$c_{33}^{eff} = \frac{c_{22}^p c_{33}^m v_2^{m^2} - ((c_{23}^m - c_{23}^p)^2 - c_{22}^m c_{33}^m - c_{22}^p c_{33}^p) v_2^m v_2^p}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} + \frac{c_{22}^m c_{33}^p v_2^{p^2}}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p}$$

$$c_{55}^{eff} = c_{55}^m v_2^m + c_{55}^p v_2^p$$

$$e_{31}^{eff} = v_2^p \left( e_{31} + \frac{(c_{12}^m - c_{12}^p) v_2^m e_{32}}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} \right)$$

$$e_{32}^{eff} = \frac{c_{22}^m v_2^p e_{32}}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p}$$

$$e_{33}^{eff} = v_2^p \left( \frac{(c_{23}^m - c_{23}^p) v_2^m e_{32}}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} + e_{33} \right)$$

$$\epsilon_{33}^{eff} = -v_2^p \xi_{33}^p + v_2^m \left( -\xi_{33}^m - \frac{v_2^p e_{32}^2}{c_{22}^p v_2^m + c_{22}^m v_2^p} \right)$$

unit B 의 경우, 독립 변수는  $T_1, S_2, S_3, T_5, E_3$  이고, 다음과 같은 조건이 성립한다.

$$\begin{aligned} \bar{T}_1 &= T_1^p = T_1^m \\ \bar{S}_2 &= S_2^p = S_2^m \\ \bar{S}_3 &= S_3^p = S_3^m \\ \bar{T}_5 &= T_5^p = T_5^m \\ \bar{E}_3 &= E_3^p = E_3^m \end{aligned} \tag{10}$$

식 (3)의 압전 구성 방정식을 unit B 에 적용하여 독립 변수와 그 영향으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \bar{S}_1 \\ \bar{T}_2 \\ \bar{T}_3 \\ \bar{S}_5 \\ \bar{D}_3 \end{pmatrix} = v_1^p \begin{pmatrix} S_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ S_5 \\ D_3 \end{pmatrix}_p + v_1^m \begin{pmatrix} S_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ S_5 \\ D_3 \end{pmatrix}_m = \mathbf{B} \begin{pmatrix} \bar{T}_1 \\ \bar{S}_2 \\ \bar{S}_3 \\ \bar{T}_5 \\ \bar{E}_3 \end{pmatrix} \tag{11}$$

식 (11)을 기본 압전 구성 방정식 형태로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_5 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11}^{eff} & c_{12}^{eff} & c_{13}^{eff} & 0 & e_{31}^{eff} \\ c_{12}^{eff} & c_{22}^{eff} & c_{23}^{eff} & 0 & e_{32}^{eff} \\ c_{13}^{eff} & c_{23}^{eff} & c_{33}^{eff} & 0 & e_{33}^{eff} \\ 0 & 0 & 0 & c_{55}^{eff} & 0 \\ e_{31}^{eff} & e_{32}^{eff} & e_{33}^{eff} & 0 & -\epsilon_{33}^{eff} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_5 \\ -E_3 \end{pmatrix} \tag{12}$$

여기서,

$$c_{11}^{eff} = \frac{c_{11}^m c_{11}^p}{v_1^m c_{11}^p + v_1^p c_{11}^m} \tag{13a}$$

$$c_{12}^{eff} = \frac{c_{11}^p c_{12}^m v_1^m + c_{11}^m c_{12}^p v_1^p}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} \tag{13b}$$

$$c_{13}^{eff} = \frac{c_{11}^p c_{13}^m v_1^m + c_{11}^m c_{13}^p v_1^p}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} \tag{13c}$$

$$c_{22}^{eff} = \frac{c_{11}^p c_{22}^m v_1^{m^2} - ((c_{12}^m - c_{12}^p)^2 - c_{11}^m c_{22}^m - c_{11}^p c_{22}^p) v_1^m v_1^p}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} + \frac{c_{11}^m c_{22}^p v_1^{p^2}}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} \tag{13d}$$

$$c_{23}^{eff} = \frac{c_{11}^p c_{23}^m v_1^{m^2} + c_{11}^m c_{23}^p v_1^{p^2}}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} - \frac{((c_{12}^m - c_{12}^p)(c_{13}^m - c_{13}^p) - c_{11}^m c_{23}^m - c_{11}^p c_{23}^p) v_1^m v_1^p}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} \tag{13e}$$

$$c_{33}^{eff} = \frac{c_{11}^p c_{33}^m v_1^{m^2} - ((c_{13}^m - c_{13}^p)^2 - c_{11}^m c_{33}^m - c_{11}^p c_{33}^p) v_1^m v_1^p}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} + \frac{c_{11}^m c_{33}^p v_1^{p^2}}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} \tag{13f}$$

$$c_{55}^{eff} = \frac{c_{55}^m c_{55}^p}{v_1^m c_{55}^p + v_1^p c_{55}^m} \tag{13g}$$

$$e_{31}^{eff} = \frac{c_{11}^m v_1^p e_{31}}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} \tag{13h}$$

$$e_{32}^{eff} = v_1^p \left( \frac{(c_{12}^m - c_{12}^p) v_1^m e_{31}}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} + e_{32} \right) \tag{13i}$$

$$e_{33}^{eff} = v_1^p \left( \frac{(c_{13}^m - c_{13}^p) v_1^m e_{31}}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} + e_{33} \right) \tag{13j}$$

$$\epsilon_{33}^{eff} = -v_1^p \xi_{33}^p + v_1^m \left( -\xi_{33}^m - \frac{v_1^p e_{31}^2}{c_{11}^p v_1^m + c_{11}^m v_1^p} \right) \tag{13k}$$

unit C 의 경우에 기지의 기계적 물성치는 unit A 와 unit B 에서 이미 고려되었으므로, 기지에 의한 전

기계적 물성치의 변화가 고려되어야 한다. unit C의 경우 압전 화이버와 기지에서 같은 값을 가지는 독립 변수는  $S_1, S_2, T_3, T_5, D_3$ 이다. 식 (3)의 압전 구성 방정식을 unit C의 독립 변수와 그 영향으로 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ S_3 \\ S_5 \\ -E_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ S_3 \\ S_5 \\ -v_3^p E_3 \end{pmatrix}_p + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -v_3^m E_3 \end{pmatrix}_m = \mathbf{C} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ T_3 \\ T_5 \\ D_3 \end{pmatrix} \quad (14)$$

식 (14)에서  $v_3^p$ 는 앞서 언급한 바 있는 전극 아래 부분에서 발생하는 압전 화이버방향과 수직한 전계성분을 고려한 것으로 다음과 같이 표현된다.<sup>(9)</sup>

$$v_3^p = \frac{p/2}{p/2 + (h/2)v_2^m} = \frac{p/h}{p/h + (1-v_2^p)} \quad (15)$$

식 (14)를 기본 압전 구성 방정식 형태로 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_5 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^{eff} & c_{12}^{eff} & c_{13}^{eff} & 0 & e_{31}^{eff} \\ c_{12}^{eff} & c_{22}^{eff} & c_{23}^{eff} & 0 & e_{31}^{eff} \\ c_{13}^{eff} & c_{23}^{eff} & c_{33}^{eff} & 0 & e_{33}^{eff} \\ 0 & 0 & 0 & c_{55}^{eff} & 0 \\ e_{31}^{eff} & e_{31}^{eff} & e_{33}^{eff} & 0 & -e_{33}^{eff} \end{bmatrix}_C \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_5 \\ -E_3 \end{pmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$c_{11}^{eff} = c_{11}^p + \frac{v_3^m e_{31}^2}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17a)$$

$$c_{12}^{eff} = c_{12}^p + \frac{v_3^m e_{31} e_{32}}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17b)$$

$$c_{13}^{eff} = c_{13}^p + \frac{v_3^m e_{31} e_{33}}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17c)$$

$$c_{22}^{eff} = c_{22}^p + \frac{v_3^m e_{32}^2}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17d)$$

$$c_{23}^{eff} = c_{23}^p + \frac{v_3^m e_{32} e_{33}}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17e)$$

$$c_{33}^{eff} = c_{33}^p + \frac{v_3^m e_{33}^2}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17f)$$

$$c_{55}^{eff} = c_{55}^p \quad (17g)$$

$$e_{31}^{eff} = \frac{\epsilon_{33}^m e_{31}}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17h)$$

$$e_{32}^{eff} = \frac{\epsilon_{33}^m e_{32}}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17i)$$

$$e_{33}^{eff} = \frac{\epsilon_{33}^m e_{33}}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17j)$$

$$e_{33}^{eff} = \frac{\epsilon_{33}^m e_{33}^p}{v_3^p \epsilon_{33}^m + v_3^m \epsilon_{33}^p} \quad (17k)$$

능동형 압전 복합재의 등가 물성치를 구하기 위해 unit A에서 구한 등가의 기계적 및 전기적 물성치를 unit B의 압전 화이버의 기계적 전기적 물성치에 대입한다. 이를 통해 구한 unit B의 등가의 기계적 및 전기적 물성치를 마찬가지로 unit C

**Table 1** Material properties of piezoelectric fiber and Matrix

	Fiber	Matrix
Young's modulus [Gpa]	61.0	3.05
$\nu$	0.3	0.3
$e_{31}$ [C/m <sup>2</sup> ]	-9.5	0
$e_{33}$ [C/m <sup>2</sup> ]	19.95	0
$e_{15}$ [C/m <sup>2</sup> ]	0	0
$\epsilon_{33}$ [10 <sup>-9</sup> C <sup>2</sup> /Nm <sup>2</sup> ]	1.755	0.01755

**Table 2** Boundary conditions applied to the finite element model to determine the effective material property

	Mechanical load	Electrical load	Properties obtained
1	$u_i=0$ on faces 1a,2a,3a (zero strain)	Apply voltage V on topelectrode	$\epsilon_{31}^{eff}, e_{31}^{eff}, e_{33}^{eff}, e_{35}^{eff}$
2	Apply $u_{11}$ on the face 1a	V=0 on the electrodes (short circuit)	$c_{11}^{eff}, c_{13}^{eff}, c_{15}^{eff}, e_{31}^{eff}$
3	Apply $u_{33}$ on the face 2a	V=0 on the electrodes (short circuit)	$c_{31}^{eff}, c_{33}^{eff}, c_{35}^{eff}, e_{33}^{eff}$
4	Apply $u_{31}$ on the face 1a	V=0 on the electrodes (short circuit)	$c_{51}^{eff}, c_{53}^{eff}, c_{55}^{eff}, e_{35}^{eff}$

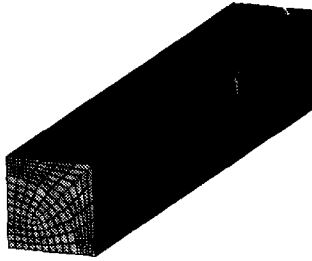


Fig. 5 Finite element model of the representative volume element

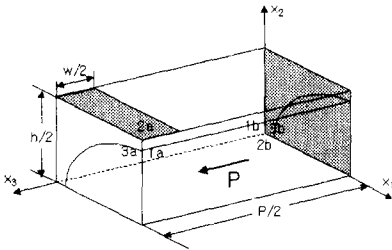


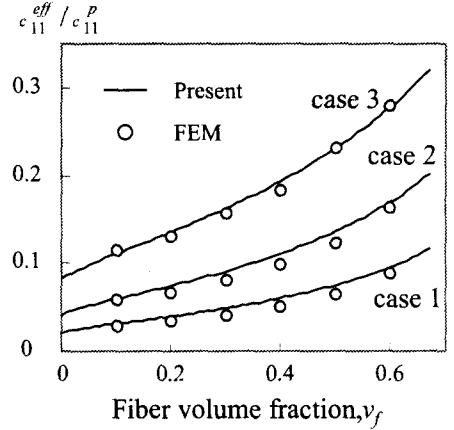
Fig. 6 Applied boundary condition on the representative volume element

의 기계적 전기적 물성치로 대입하여 최종적인 등가의 물성치를 구한다. 구해진 압전 구성 방정식에서  $T_2$  를 0 으로 하는 평면 응력 상태의 최종적인 등가 물성치를 유도하였다.

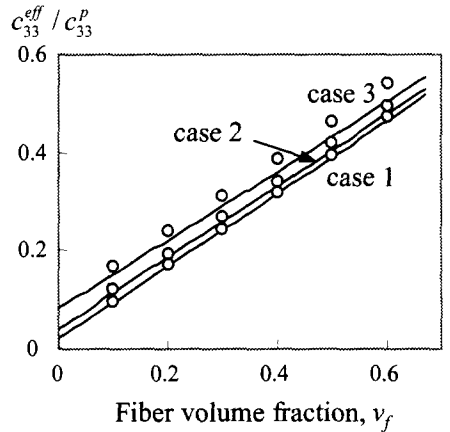
### 3. 능동 화이버 복합재의 유한요소 모델

앞에서 유도한 능동 화이버 복합재의 등가 물성치를 검증하기 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 능동 화이버 복합재는 기계적 하중과 전기적 하중이 연성되어 있으므로 이를 해석하기 위하여 하나의 절점에서 3 개의 변위와 1 개의 전위를 갖는 4 자유도, 8 절점, 3 차원 유한 요소를 사용하였으며,<sup>(10)</sup> 유한요소 모델은 Fig. 5 와 같다. 해석하려는 능동 화이버 복합재의 압전 화이버와 기지의 물성치 비를 변화시키면서 유도된 등가 물성치와 유한 요소 결과를 비교하였다.

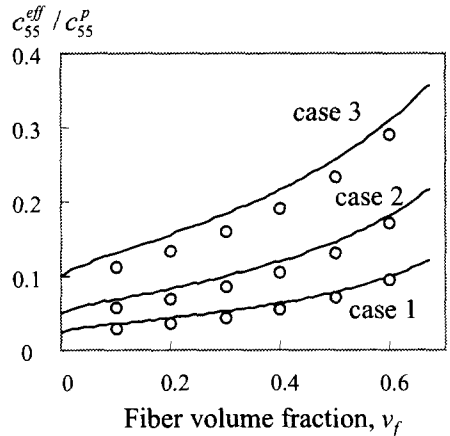
압전 화이버와 기지의 유전율 비( $\epsilon_{33}^p / \epsilon_{33}^m$ )가 200, 100, 10 일 경우와, 강성비( $c_{33}^p / c_{33}^m$ )가 40, 20, 10 일 경우에 대해 각각 등가 물성치를 비교하였으며, 압전 섬유와 기지의 물성치는 Table 1 에 나타내었다. 각각의 기계적 및 전기적 물성치를 구하기 위해 대표 체적 요소(representative volume element)의 유한 요소 모델에 가해진 경계조건을 Table 2 에 나타내었다.



(a)  $c_{11}^{eff} / c_{11}^p$

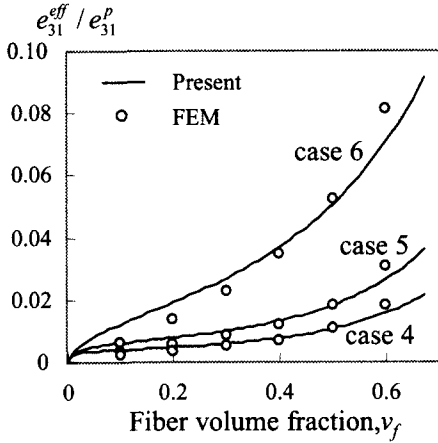


(b)  $c_{33}^{eff} / c_{33}^p$

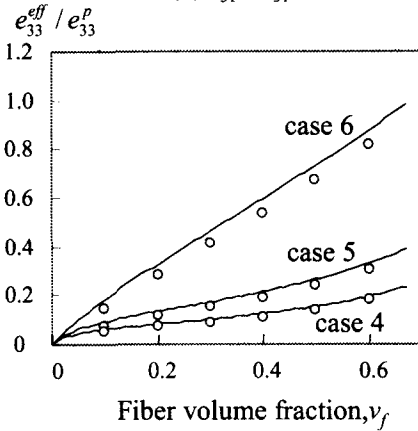


(c)  $c_{55}^{eff} / c_{55}^p$

Fig. 7 Normalized effective stiffness constants for  $\epsilon_{33}^p / \epsilon_{33}^m = 100$  with  $c_{33}^p / c_{33}^m$  of 40, 20, 10 for the case 1, 2 and 3



(a)  $e_{31}^{eff} / e_{31}^p$



(b)  $e_{33}^{eff} / e_{33}^p$

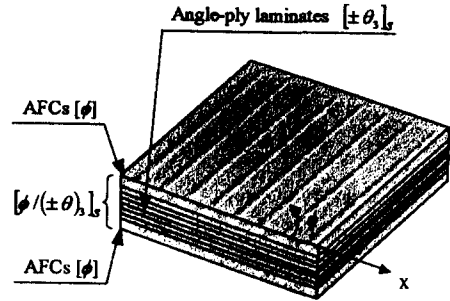
**Fig. 8** Normalized effective piezoelectric stress constants for  $c_{33}^p/c_{33}^m=20$  with  $\epsilon_{11}^p/\epsilon_{11}^m$  of 200, 100, 10 for case 4, 5 and 6

#### 4. 결과 및 고찰

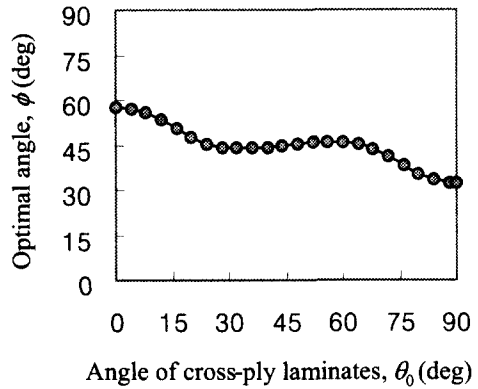
##### 4.1 등가 물성치

본 장에서는 유도된 능동 화이버 복합재의 평면 응력 상태의 등가 물성치와 유한요소 해석결과를 비교 검증하였다.

해석하려는 능동 화이버 복합재의 대표 체적 요소의 길이( $p/2$ )는 0.5mm 이며, 높이( $h/2$ )와 전극의 폭( $w/2$ )은 0.0833mm 이다 (Fig. 6 참조). Fig. 7 은 압전 섬유와 기지의 유전율 비를 100 으로 하고, 강성비( $c_{33}^p/c_{33}^m$ )를 40, 20, 10(case 1, case 2, case 3)으로 변화시키면서, uniform field model로부터 구한 등가 물성치와 유한 요소 해석으로부터 구한 등가 물성치를 비교한 것이다.



**Fig. 9** Angle-ply laminates with AFCs



**Fig. 10** Curvature versus the angle of piezoelectric fiber

Fig. 8 은 압전 섬유와 기지의 강성비( $c_{33}^p/c_{33}^m$ )는 20 으로 하고, 유전율 비( $\epsilon_{33}^p/\epsilon_{33}^m$ )를 200, 100, 10(case 4, case 5, case 6)으로 하였을 때, uniform field model로부터 구한 등가 물성치와 유한 요소 해석으로부터 구한 등가 물성치를 비교한 것이다. 결과에서 보듯이 uniform field model 과 유한 요소 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

##### 4.2 적용 예제

앞 절에서 구한 능동 화이버 복합재의 등가 물성치를 이용하여 적층 복합재의 비틀림 곡률 (twisting curvature)을 최대화 하는 적층 각도를 구하는데 적용하였다. 이는 헬리콥터 로터 블레이드의 비틀림 곡률을 제어하기 위한 기본적인 연구로 적용되어 질 수 있다.

적용된 적층 복합재의 적층 순서(laminate sequence)는 Fig. 9 와 같고, Kev/Ep[ $\pm\theta$ ]<sub>s</sub> 복합재의 윗면과 아래면에 능동 화이버 복합재 G1195N/Ep[ $\phi$ ]를 부착한 것이다. 능동 화이버 복합재의 물성치는 Table 1 과 같고, 능동 화이버의 총 체적비는 0.6 으로 하였으며, 능동 화이버 복합재가 부착된 전극판에 10V 의 전압을 가하였다. 우선 일방향 적층재( $\theta = 0$ )에 능동 화이버 복합재의

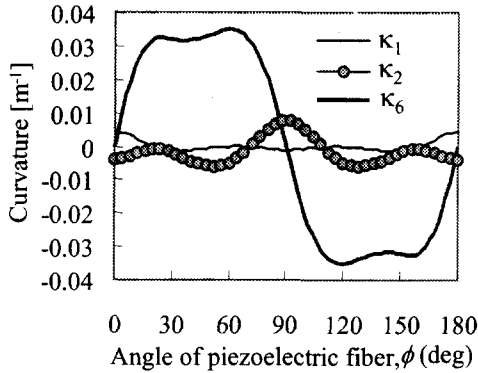


Fig. 11 Optimal angle of piezoelectric fiber maximizing twisting curvature

적층각도( $\phi$ )를  $0^\circ$  부터  $180^\circ$  까지 변화시켰을 때의 휨 곡률(bending curvature,  $k_1$ ,  $k_2$ )과 비틀림 곡률(twisting curvature,  $k_6$ )을 계산하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보듯이 비틀림 곡률(twisting curvature,  $k_6$ )은 능동 화이버의 적층 각도( $\phi$ )가  $58^\circ$  일 때 최대가 됨을 알 수 있고,  $90^\circ$ 를 기준으로 반대칭(anti-symmetric)임을 알 수 있다.

$K_{ev}/E_p$ 의 적층 각도( $\theta$ )를  $0^\circ$  부터  $90^\circ$  까지 변화시켰을 때 비틀림 곡률(twisting curvature)을 최대화하는 능동 화이버 복합재의 적층 각도( $\phi$ )를 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보듯이  $30^\circ < \theta < 60^\circ$ 에서  $\phi = 45^\circ$ 가 최적임을 확인할 수 있다. 본 연구 결과에서 얻어진 값은 차후 헬리콥터 로터 블레이드나 초소형 비행체의 날개 부분을 제어 하기 위한 기본 자료로 적용되어질 수 있을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

능동 화이버 복합재를 적층하여 구조물에 적용하기 위해서는 등가의 물성치를 필요로 하게 된다. 본 연구에서는 uniform field model을 적용하여 기계적 성질과 전기적 성질이 연성되어 있는 능동 화이버 복합재의 등가 물성치를 구하고, 유한 요소 모델의 해석을 통하여 이를 검증하였다. 또한 유도된 등가 물성치를 이용하여 적층 복합재의 비틀림 곡률을 최대화 하는 적층 각도를 구하였다. 이는 헬리콥터 로터 블레이드의 비틀림 각도를 제

어하는데 적용 되어 질 수 있고, 초소형 비행체의 날개 부분에도 응용되어 질 수 있다.

향후 연구 과제로는 전극 아래 부분에서의 극화 방향 (poling direction)의 변화를 고려한 해석이 요망된다. 연성 문제를 해결하는데 있어서 압전 상수의 결정은 중요한 요소이며, 이러한 요소의 도입은 능동 화이버 복합재의 좀 더 정확한 등가 물성치의 계산을 가능하게 하기 때문에 앞서 수행한 등가 물성치의 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고문헌

- (1) 김호기, 신병철, 1991, 압전 전왜 세라믹스-원리와 응용 사례, 반도 출판사.
- (2) 최승복, 1992, "지능 복합재료의 구성과 특성," 한국항공우주학회지, 제 20 권, 제 4 호, pp. 117~129.
- (3) Crawley, E.F. and de Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (4) 이인, 한재홍, 1997, "압전 재료를 이용한 스마트 구조물의 진동제어에 관한 연구 동향," 한국항공우주학회지, 제 25 권, 제 3 호, pp.168~176.
- (5) Lalande, F., Chaudhra, Z., and Rogers, C. A., 1997, "Impedance-Based Modeling of Induced Strain Actuators Bonded on Ring Structures," *Journal of Sound and Vibration*, 201(2), pp. 169~187.
- (6) Dieter Sporn and Andreas Schoenecker, 1998, "Composites with Piezoelectric Thin Fibers-First Evidence of Piezoelectric Behavior," *Innovations in Materials Conference*, Washington, D.C., July 19-22.
- (7) Dieter Sporn, Winfried Watzka, Andreas Schonecker and Kord Pannkoke, "Smart composites with integrated tiny piezoelectric fibers," *ICCM*, Vol. 10.
- (8) Wilkie, W. Keats; Park, K. C.; Belvin, W. Keith, 1998. "Helicopter Dynamic stall Suppression using Piezoelectric Active Fiber Composite Rotor Blades," *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference* Vol. 4, pp. 2458~2472.
- (9) Aaron Alton Bent, 1997, "Active Fiber Composites for Structural Actuation," PH. D thesis (MIT).
- (10) ANSYS, ANSYS User's Manual, Swanson Analysis Systems, Inc. Houston, PA, 1995.