

〈논 문〉

복합재료 지능구조물의 제어를 위한 압전소자를 이용한 변형형상예측

하성규* · 조영수** · 박준호***

(1995년 1월 24일 접수)

Shape Estimation for the Control of Composite Smart Structure Using Piezoceramics

Sung Kyu Ha, Young Soo Cho and Juhn Ho Park

Key Words : Smart Structure(지능구조물), Shape Estimation(변형형상예측), Piezoceramic Sensor(신호기 압전소자), Multilayered Brick Element(다층 입체요소), Incompatible Mode(비적합모드)

Abstract

A method is proposed to predict the deformed shape of the structure subjected to the unknown external loads using the signal from the piezoceramic sensors. Such a shape estimation is based on the linear relationship between the deformation of structure and the signal from sensor, which is calculated using finite element method. The deformed shape is, then, calculated using the linear matrix and the signals from the piezoceramic sensors attached to the structures. For the purpose, a structural analysis program is developed using a multi-layered finite element of 8 nodes with 3 displacements and one voltage degrees of freedom at each node. The multiple layers with the different material properties can be layered within the element. The incompatible mode with the element is found to be crucial to catch the bending behavior accurately. The accuracy of the program is, then, verified by being compared with the experimental results performed by Crawley. The proposed shape estimation method is also verified for the different loads and sensor size. It is shown that the results of shape estimation method using the linear matrix well predicts the deflections compared with those of finite element method.

1. 서 론

지능구조물 (smart or intelligent structure)은 변화하는 외부환경과 사용조건에 반응하고 적응할 수 있도록 여러 종류의 감지기(sensor)^(1~4)와 작동기

(actuator)를 구조물의 부재에 부착하여 구조물의 기하학적 형태(geometrical configuration)와 기계적 성질(mechanical properties)을 의도적으로 다양하게 변화시킬 수 있는 새로운 개념의 구조물이다. 지능구조물 가운데 압전소자(piezoceramics)가 부착된 섬유강화 복합재료(fiber-reinforced composite materials)를 이용한 지능구조물은 우주항공 구조물에 응용되어 이에 따른 많은 연구가 진행되고 있다.⁽⁵⁻¹²⁾

*회원, 한양대학교 기계공학과

**한양대학교 대학원 기계설계공학과

***LG전자(주) 영상미디어 연구소

압전재료는 재료의 특성상 재료의 자체에 전기적 성질과 기계적 성질이 존재하기 때문에^(13~15) 구조물의 반응을 측정하기 위한 감지기(sensor for monitoring)^(8,9,16)와 제어를 위한 작동기(actuator for controlling)^(17~20)로서 응용되고 있다. 또한 섬유강화 복합재료는 기계적 특성이 뛰어나고 강성 및 강도에 비해 밀도가 낮아 구조물의 경량화가 용이하므로 그 용도가 다양하여 우주항공 및 로봇 관련분야에 응용이 가속되고 있다. 그리고 섬유강화 복합재료는 제작과정에서 재료의 내부에 감지기 또는 작동기를 삽입하기가 쉽다. 이러한 압전소자가 부착된 섬유강화 복합재료 구조물의 능동제어를 위하여 구조해석이 필요하게 되어^(21~26) 유한요소해석 이론을 근거로 압전소자가 부착된 섬유강화 복합재료의 지능구조물 해석을 위한 프로그램이 개발되고 있다.^(27,28)

지능구조물이 감지기에서 나타나는 신호를 이용하여 작동기를 구동시켜 외부환경에 대처하기 위해서는 구조물의 전체 변형상태를 예측할 수 있어야 완벽한 제어가 이루어 진다. 그러나 그러한 변형상태를 원하는 모든 위치에서 직접적으로 측정하기란 거의 불가능하다. 따라서 Kuwao 등⁽²⁹⁾은 이러한 난점을 극복하기 위해 감지기가 부착된 위치에 나타난 변형량을 이용하여 원하는 위치의 변형량을 계산하는 방법을 제시하였다. 그러나 연구결과의 적용이 Truss 구조물에만 국한되고 또한 측정된 양이 변형량이어야 한다는 제약이 있다. 한편 Crawley⁽³⁰⁾ 및 Tzou 등은 구조물에 부착된 변형률 감지기에서 얻은 정적·동적 신호를 감지기의 크기에 대해 적분하거나 혹은 필터를 이용하여 구조물의 변형상태를 예측하였다.

본 연구에서는 지능구조물의 유한요소해석 프로그램을 개발하고 개발된 프로그램을 이용하여 구조물의 형상과 감지기의 신호 및 변형형상예측 위치에 따른 선형 행렬식을 계산하고 이 행렬식과 구조물에 부착된 감지기 압전소자의 전압으로부터 미지의 외부환경에 의해 변형된 구조물의 변형상태를 예측하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 유한요소해석 및 변형형상예측 이론

압전재료가 부착된 지능구조물의 유한요소해석을 위한 이론은 다음의 2.1절로 요약될 수 있다. 또한 변형형상예측에 관한 이론은 2.2절에 기술하였다.

2.1 압전소자가 부착된 지능구조물의 3차원 유한요소해석

유한요소해석을 위한 모형으로서 Fig. 1과 같은 압전소자가 부착된 복합재료 지능구조물을 고려할 수 있다. 기하학적 형상 및 복합재의 적층순서, 재료의 성질과 경계조건(작동기의 전압, 기계적 하중, 변위경계조건)이 주어질 때, 유한요소해석을 통해 변위와 응력으로 나타나는 기계적 거동과 전압으로 나타나는 감지기 압전소자의 신호를 얻고자 한다. 지능구조물의 전기적·기계적 거동을 지배하는 방정식에서 정적인 변형상태만 고려한 지배방정식 및 유한요소해석 이론은 다음과 같다.

압전소자의 기계적 반응을 지배하는 힘의 평형방정식은

$$\sigma_{ji,j} + f_i = 0 \quad (1)$$

이다.

또한 압전소자의 전기적 반응평형식은 Maxwell 방정식으로 표현된다. (전극이 있고, 자성이 없으며, 방전상태의 매개체로 가정한다.)

$$D_{i,j} = 0 \quad (2)$$

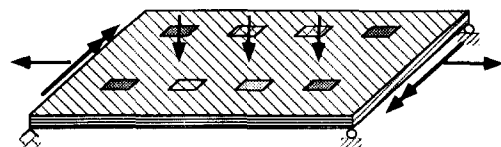
여기서, σ_{ji}, f_i 와 D_i 는 각각 응력(stress), 단위체적당 체력(body force in a unit volume)과 전위(electric displacement)이다.^(13~15)

압전소자에 대한 변형률(ϵ_{ij}) 및 전위(D_i)와 응력(σ_{kl}) 및 전기장(E_k)의 관계식은 다음과 같다.^(27,28)

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl}^E \sigma_{kl} + d_{kij} E_k \quad (3)$$

$$D_i = d_{ikt} \sigma_{kt} + \epsilon_{ij}^E E_j \quad (4)$$

여기서, S_{ijkl}^E 는 전장(electric field)이 일정할 때의 역탄성계수(elastic compliance), d_{ijk} 는 압전소자의 변형률상수(piezoelectric strain constants),






-  Composite Plate
-  Piezoelectric Actuators
-  Piezoelectric Sensors

Fig. 1 Finite element analysis model of composite smart structure with piezoelectric sensors and actuators

ξ_{ij} 는 응력이 일정할 때의 압전소자의 역유전상수 (permittivities)이다.

구조물에 미소변형에 대한 변형률과 변위 (u_i)의 관계식은

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (5)$$

로 표현되며, 전기장 E_i 와 전압 (electric potential) V 의 관계식은 다음과 같다.

$$E_i = -V_{,i} \quad (6)$$

식 (1) ~ (6)은 압전소자의 기계적·전기적인 거동을 표현하는 지배방정식이며 적절한 경계조건을 이용하여 계산되어야 한다. 복합재료에 관하여 식 (1)과 식 (5)가 적용되며, 복합재료의 낱장에 대한 응력과 변형률의 관계식은 다음과 같다.

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl} \quad (7)$$

여기서, S_{ijkl} 은 복합재료의 역탄성행렬 (elastic compliance matrix)이다.

식 (1) ~ (7)의 지배방정식으로 지배되는 압전소자가 부착된 복합재료의 유한요소 해석법을 유도하기 위해 단위체적당 체력 f_i 를 무시하고, 가상일의 원리와 Divergence 이론을 이용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int_V \bar{\epsilon}_s \bar{R}_{st} \delta \bar{\epsilon}_{,t} dv = \int_A \bar{T} - \delta \bar{u} dA \begin{cases} a=1, \dots, 4 \\ s, t=1, \dots, 9 \end{cases} \quad (8)$$

여기서, \bar{R} 는 식 (3), (4)와 (7)에 의해 다음과 같이 정의되는 확장강성행렬 (extended stiffness matrix)이다.

$$\{\bar{R}\} = \begin{bmatrix} [S] - [d][\xi]^{-1}[d]^T & [d][\xi]^{-1} \\ -[\xi]^{-1}[d]^T & [\xi]^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (8)에서 기계적·전기적 물리량을 함께 정의하는 확장변위 (extended displacement), 표면력 (extended surface traction), 변형률 (extended strain) 및 응력 (extended stress)이 다음과 같이 정의되었다.

$$\{\bar{u}\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ V \end{Bmatrix}, \quad \{\bar{T}\} = \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ Q \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\{\bar{\epsilon}\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{31} \\ 2\epsilon_{12} \\ -E_1 \\ -E_2 \\ -E_3 \end{Bmatrix}, \quad \{\bar{\sigma}\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

식 (10)에서 T_i 는 표면적 A 에 작용하는 표면력 (surface traction)이며, Q 는 압전소자의 표면적에 작용하는 축전력 (electrical charge)이다. (27,28) 또한, 식 (8)의 변분식에서 적용 구조물을 유한요소로 분할하여 요소내의 변위 (extended displacement)를 비적합모드 (incompatible mode)를 포함하는 8절점 32자유도 요소의 형상함수 (shape function)를 사용하여 표현하면 다음과 같다. (27~32)

$$\bar{u}_a = \sum_{r=1}^8 q_{ar} N_r + \sum_{i=1}^3 a_{ai} P_i \quad (12)$$

여기서, q_{ar} 은 절점 r 의 변위 ($a=1, 2, 3$)와 전압 ($a=4$)이고, a_{ai} 는 x_i 방향의 비적합변수 (incompatible variable)이며, (33) N_r 및 P_i 는 절점 r 및 비적합모드의 형상함수이다. 식 (9) ~ (12)에서 정의된 물리량을 변분식 (8)에 대입하여 (27,28) 요소의 강성행렬을 유도한 후, 비적합변수 a_{ai} 를 소거하고 이를 전체 영역에 대하여 조합하면 다음과 같은 평형방정식이 얻어진다. 부록에 요소강성행렬을 $[K^e]$ 의 계산과정을 자세히 나타내었다.

$$[K]\{q\} = \{F\} \quad (13)$$

여기서, $\{F\}$ 는 외력으로서의 전압 (electric potential) 항을 포함하는 절점에 작용하는 힘 (force)을 나타내는 힘벡터 (nodal force vector)이고, $\{q\}$ 는 변위로서의 전압 (voltage) 항을 포함한 변위 (displacement)를 나타내는 절점의 변위벡터 (nodal displacement vector)이다. $[K]$ 는 강성행렬 (stiffness matrix)이다.

2.2 변형형상예측 이론

변형형상예측의 모형으로서 Fig. 2와 같은 감지기 압전소자가 부착된 복합재료 지능구조물을 생각할 수 있다. 감지기로서 n 개의 압전소자가 부착되고, 여기서 검출되는 신호(전압)를 $V^s (s=1, 2, 3,$

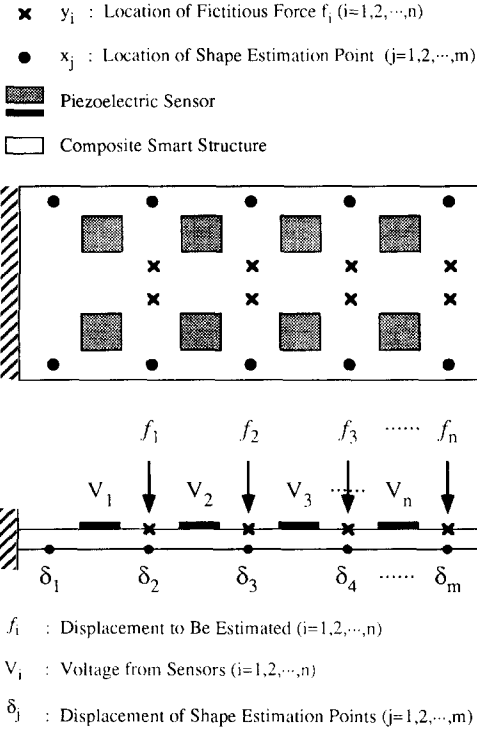


Fig. 2 Shape estimation model of composite smart structure with distributed piezoelectric sensors

\dots, n)라 한다. 이 신호들을 이용하여 m 개의 임의 위치에서 나타나는 구조물의 변형을 예측하고자 한다. 변형을 예측하고자 하는 위치를 x_j ($j=1, 2, 3, \dots, m$)라 하고 x_j 에서 나타나는 처짐량을 δ_j 라 한다. 즉, V_i 의 신호를 이용하여 x_j 의 처짐량 δ_j 를 계산하고자 다음과 같은 방법을 제시한다.

위치 y_i 에 가상의 수직하중 $f_i=1$ 이 가해져서 n 개의 신호기에 나타나는 n 개의 전압신호를 요소로 하는 전압벡터를 V^s 라 하면, y_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)에 n 개의 가상단위 수직하중 f_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)가 동시에 가해질 때 신호기에서 나타나는 전압벡터 V^s 는 다음과 같이 V^s 를 중첩하여 표현할 수 있다.

$$\{V^s\} = \sum_{i=1}^n f_i \{V_i^s\} \quad (14)$$

$$= [V_1^s, V_2^s, V_3^s, \dots, V_n^s] \{f\} \quad (15)$$

$$= [L^s] \{f\} \quad (16)$$

식 (14)에서 y_i 의 선정에 따라 나타나는 n 개의 전압벡터 V_i^s ($i=1, 2, 3, \dots, n$)가 n 차원을 형성한다면 임의의 하중에 의해 나타나는 전압벡터 V^s 는

식 (14)와 같이 가상의 하중 f_i 와 V_i^s 의 선형조합으로 표시할 수 있다.

회전 임의의 외력에 대해 위치 x_j ($j=1, 2, 3, \dots, m$)에서의 변형벡터 δ 는 m 차원을 이루는 벡터 δ_j 의 선형조합으로 나타낼 수 있으며, 그 계수를 \tilde{f}_j 라 하면 다음과 같다.

$$\{\delta\} = \sum_{j=1}^m \tilde{f}_j \{\delta_j\} \quad (17)$$

식 (17)에서 m 개의 변형모드중 기대되는 n 개의 모드만을 고려하고, 그 n 개의 모드를 y_i 에 가해지는 가상의 하중 f_i 에 의해 나타나는 n 개의 변형모드 δ_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)로 대치하면, 임의의 하중에 의한 변형은 다음과 같이 근사화할 수 있다

$$\begin{aligned} \{\delta\} &\cong \sum_{i=1}^n f_i \{\delta_i\} \\ &= [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n] \{f\} \\ &= [L^s] \{f\} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (16)과 식 (18)에서 가상의 하중 f 를 소거하면 다음과 같이 변형과 전압의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\{\delta\} = [L^s][L^v]^{-1} \{V^s\} \quad (19)$$

$$= [\bar{L}] \{V^s\} \quad (20)$$

즉, 위의 식에서 알 수 있듯이 압전소자의 신호 출력 V^s 를 이용하여 임의위치 x_j ($j=1, 2, 3, \dots, m$)의 변형 δ_j 를 예측할 수 있다. 이때 예측되는 δ_j 는 실제 하중이 가상하중 f_i 의 조합으로 대치되어 계산되어지는 근사량이라 볼 수 있다.

위의 결과식은 실제 구조물에 쉽게 적용될 수 있다. 즉, 지능구조물의 형상이 정해지고 감지기의 위치와 변형예측의 위치가 정해지면 식 (16)과 식 (18)에서 정의된 L^v 와 L^s 를, 앞서 제시된 유한요소법으로 계산한다. 예를 들면 L^v 와 L^s 행렬의 i 번째 열(column)은 $f_i=1$ 의 하중에 따른 V_i^s 와 δ_i 이고 식 (13)에서 구해진다. 이렇게 얻어진 L^v 와 L^s 로부터 식 (19)를 이용하여 \bar{L} ($m \times n$)를 구한다. 이후 미지의 외력에 의해 감지기 압전소자에서 측정되는 V^s 와 저장된 \bar{L} 를 이용하여 식 (20)으로부터 x_j 의 처짐량 δ_j 를 구할 수 있다.

3. 결 과

3.1 지능구조물을 유한요소해석의 검증

지능구조물의 변형상태 및 압전소자의 전압을 동

시에 고려할 수 있는 본 연구의 유한요소해석 프로그램을 검증하기 위하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 작동기로서 PZT G1195N 압전소자를 Gr/Epoxy 복합재료 외팔보에 부착하여 실험을 수행한 Crawley의 실험결과^(10~12)와 비교하였다. 시험편에 쓰인 PZT G1195N 압전소자와 Gr/Epoxy 복합재료의 물성치는 Table 1과 같다.

복합재 판의 상면 및 하면에 부착된 압전소자에 부호가 반대인 일정 전압을 가하게 되면 전위차에 의해 압전재료가 수축 및 팽창을 하게 되고 이로 인해 복합재료 구조물에 두께방향의 처짐이 발생한다. Crawley의 실험에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 y축에 대해 수직인 M_1 , M_2 , M_3 선상을 따라 선상마다 11지점에 부착된 감지기 (proximity sensor)로 두께방향의 처짐을 측정하였다. 이 값을 개

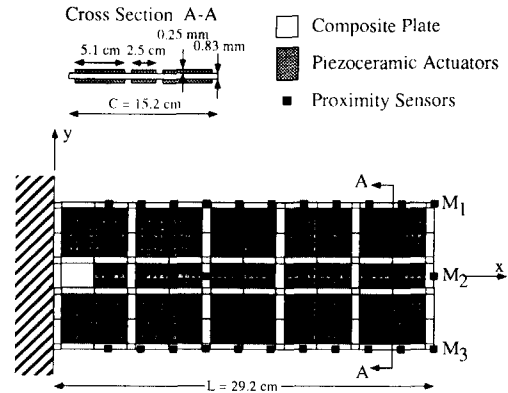


Fig. 3 Description of the experimental set-up by Crawley's cantilevered composite plate containing surface-bonded distributed piezoelectric actuators

Table 1 Material properties of PZT G1195N piezoceramics and gr/epoxy unidirectional composites

	Piezoceramics	T300/976
Young's moduli (GPa)		
E_{xx}	63.0	150.0
$E_{yy}=E_{zz}$	63.0	9.0
Poisson's ratio		
$\nu_{xy}=\nu_{xz}$	0.3	0.3
$\nu_{zy}=\nu_{yz}$	0.3	0.3
Shear moduli (GPa)		
$G_{xy}=G_{xz}$	24.2	2.50
G_{yz}	24.2	2.50
Density (kg/m ³)		
ρ	7600	1600
Piezoelectric strain constants (pm/V)		
$d_{21}=d_{22}$	254	0
d_{y4}	584	0
d_{z3}	374	0
Electric permittivity (nf/m)		
$\zeta_{xx}^{\sigma}=\zeta_{yy}^{\sigma}=15, 3$	0	
ζ_{zz}^{σ}	15.0	0
Thermal expansion coefficient (m/m°C)		
α_x	0.9	1.1
$\alpha_y=\alpha_z$	0.9	25.2
First mode damping coefficient, η		
	0	2.5×10^{-4}

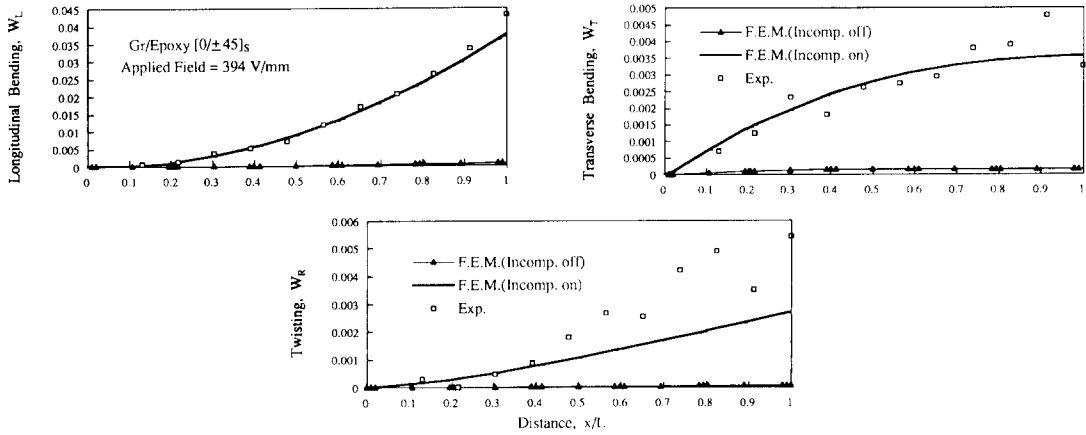


Fig. 4 Comparisons of the longitudinal bending W_L , transverse bending W_T and lateral twisting W_R of a cantilevered $[0/\pm 45]_s$ composite plate with distributed piezoelectric actuators between the experimental measurements and the prediction based on the present analysis

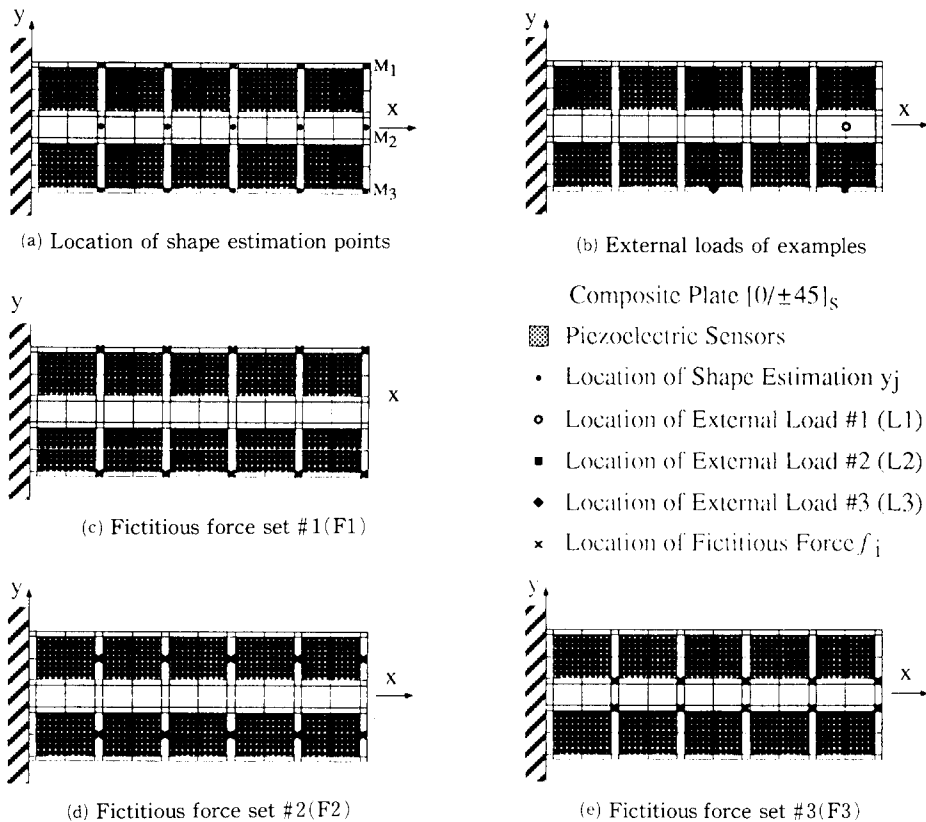


Fig. 5 Locations of shape estimation points, external loads of applications and fictitious force sets for signal-deformation linear matrices for shape estimation application model of cantilevered $[0/\pm 45]_s$ composite plate with distributed piezoelectric sensors

발된 프로그램을 이용하여 얻은 결과와 비교하였다. Fig. 4는 $[0/\pm 45]_s$ 로 적층된 복합재 판의 처짐에 대한 실험의 결과와 개발된 프로그램의 결과를 비교한 그림이다. 여기서, W_L , W_T , W_R 은 각각 종방향 굽힘변형 (longitudinal bending deformation), 횡방향 굽힘변형 (transverse bending deformation), 비틀림변형 (twisting deformation)을 나타내며 다음 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} W_L &= \frac{M_2}{C} \\ W_T &= \frac{M_2 - \frac{M_1 + M_3}{2}}{C} \\ W_R &= \frac{M_1 - M_3}{C} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서, C 는 복합재 판의 폭 (width)이며 M_1 , M_2 , M_3 는 각각 Fig. 3에 표시된 감지기로부터 측정된 두께방향 (z 방향)의 처짐이다.

Fig. 4에 나타난 결과를 보면, 비적합모드 (incompatible mode)를 고려한 유한요소해석의 결과와 비적합모드를 고려하지 않은 유한요소해석의 결과 사이에 현격한 차이가 나타나고 있으며 굽힘이 작용하는 판에 대하여 비적합모드를 반드시 고려해야함을 알 수 있다.

3.2 변형형상예측 이론의 적용

본 연구에서 제시하는 변형형상예측 이론을 압전소자가 감지기로서 부착된 복합재 평판에 적용하고자 한다. 변형형상예측 이론의 적용 대상으로 앞서 3.1절에서 지능구조물의 유한요소해석의 검증에 이용된 Crawley의 실험모형을 선정하였고, 복합재 판의 하단에 부착된 압전소자를 감지기로서 이용하였다. 여기서, 변형형상예측 이론에 필요한 가상단위하중의 위치선정과 감지기의 크기가 예측 이론에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 다음과 같은 예제를 이용하였다.

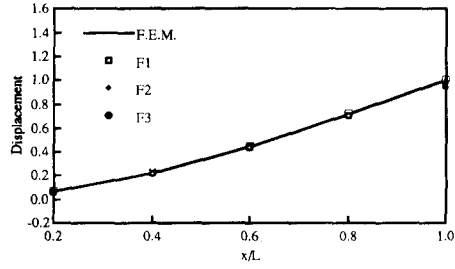
3.2.1 가상단위하중의 선정이 변형형상예측에 미치는 영향

가상하중의 위치 선정에 따른 변형예측 이론의 결과를 비교하기 위하여 세 종류의 가상단위하중 조합을 선정하였다.

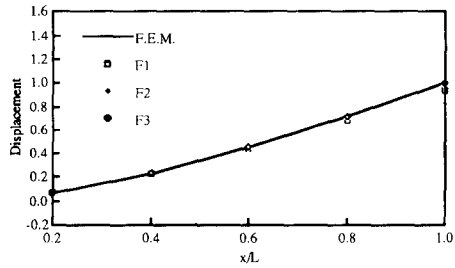
첫 번째 가상단위하중 조합 (Fig. 5(c))으로서 복합재료판의 상단 $y = \pm 7.3025$ cm 되는 곳에 x 축에

평행하게 10곳을 선정하여 각각에 가상단위하중 $f_i = 1$ (F1)을 작용시켜 복합재 판의 하단 10곳에 부착된 감지기의 전압 V_i ($i=1, 2, 3, \dots, 10$)와 x 축에 평행한 M_1 , M_2 , M_3 선상에 각각 5개씩 분포된 15개의 변형형상예측 위치 (Fig. 5(a))의 처짐량 δ_j ($j=1, 2, 3, \dots, 15$)를 계산하였다. 이렇게 계산된 V 및 δ 값으로 L^V 및 L^δ 행렬을 구성하여 신호-변형 선형행렬 \bar{L} 을 식 (19)로부터 구한다. 또한, 두 번째 가상단위하중 조합 (F2) (Fig. 5(d))으로서, $y = \pm 4.4450$ cm, 세 번째 가상단위하중 조합 (F3) (Fig. 5(e))으로서 $y = \pm 1.5875$ cm인 곳에 x 축에 평행하게 각각 10곳을 선정하여 마찬가지로 각각에 따르는 신호-변형 선형행렬 \bar{L} 을 구하였다.

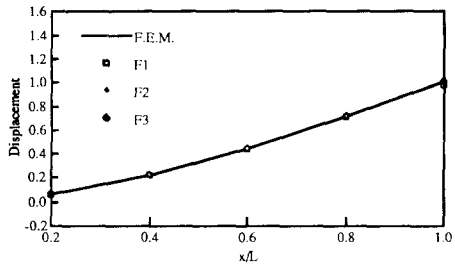
위의 세 가지 경우의 가상단위하중 조합에 대하여 구하여진 각각의 신호-변형 선형행렬 \bar{L} 을 이용하여, Fig. 5(b)와 같이 세 가지 하중 L1, L2, L3가 각각 작용하는 경우의 처짐을 예측하고자 한다. L1은 굽힘하중만을, L2와 L3는 굽힘과 비틀림이 동시에 작용하는 경우이다. 복합재 판의 적층이 $[0/\pm 45]_s$ 임으로 각각의 하중에 의한 변형은 모두 굽힘모드와 비틀림모드를 가진다. 여기서, L1에 의한 변형은 L2와 L3에 비해 비틀림모드가 작은 경우이며, 또한 L2에 의한 변형은 L3에 의한 변형에 비해 비틀림모드의 영향이 작다. 첫 번째 예제로 복합재 판이 굽힘하중만 받도록 Fig. 5(b)의 외력 #1(L1)처럼 10 N의 하중을 $y=0$ cm, $x=26.035$ cm인 지점에 가하여 감지기 압전소자로부터 전압 V 와 위에서 얻어진 세개의 \bar{L} 행렬을 이용하여 예측한 처짐 δ 와 유한요소법으로 구한 처짐을 Fig. 6에 비교하였다. Fig. 6에서 가로축은 길이방향에 따른 변형형상예측의 위치를 최대길이로 무차원화하여 나타낸 것이고, 세로축은 처짐의 양을 유한요소해석의 결과 중 최대값에 대해 무차원화하여 나타내었다. 두 번째 예제로 10 N의 하중을 복합재 판이 굽힘 및 비틀림을 받도록 Fig. 5(b)의 외력 #2(L2)처럼 $y = -7.3025$ cm, $x = 26.035$ cm인 지점에 작용시켜 감지기 압전소자로부터 전압 V 를 얻어, 세 가지 \bar{L} 행렬을 이용하여 처짐 δ 를 예측하고 Fig. 7에 유한요소해석에서 얻어진 결과와 함께 각각 나타내었다. 세 번째 예제는 10 N의 하중을 복합재 판이 굽힘 및 비틀림을 받도록 Fig. 5(b)의 외력 #3(L3)처럼 $y = -7.3025$ cm, $x = 14.605$ cm인 지점에 작용시켜 감지기 압전소자로부터 전압 V 를 얻어, 세 가지 \bar{L} 행렬을 이용하여 처짐 δ 를 예



(a) Displacement distribution along M1

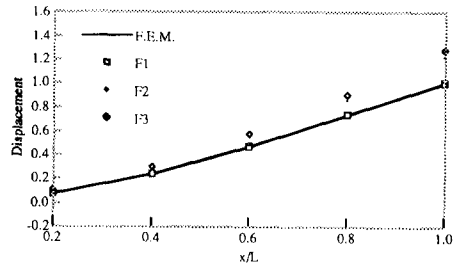


(b) Displacement distribution along M2

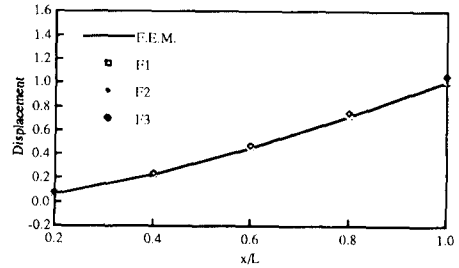


(c) Displacement distribution along M3

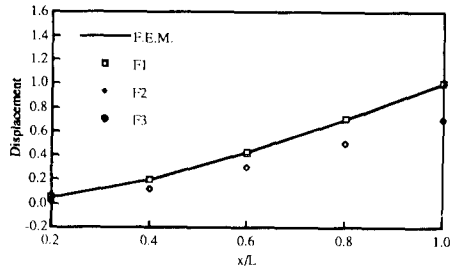
Fig. 6 Comparisons of displacements calculated by finite element analysis and predicted by the shape estimation method for the three different fictitious force set F1, F2, and F3 under external load L1



(a) Displacement distribution along M1



(b) Displacement distribution along M2



(c) Displacement distribution along M3

Fig. 7 Comparisons of displacements calculated by finite element analysis and predicted by the shape estimation method for the three different fictitious force set F1, F2, and F3 under external load L2

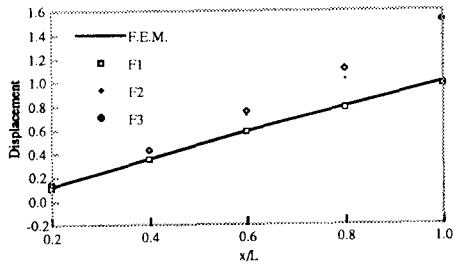
측하고 Fig. 8에 유한요소해석에서 얻어진 결과와 함께 각각 나타내었다.

첫 번째 예제의 결과인 Fig. 6을 보면 세 가지의 가상단위하중 조합을 이용해 얻어진 신호-변형 행렬 모두가 굽힘모드만을 가진 이 예제의 하중에 대해 모두 좋은 예측결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 두 번째 예제의 결과(Fig. 7)를 보면, 굽힘과 비틀림모드를 갖는 이 예제의 하중에 따른 첫 번째 가상단위하중 조합에 의해 예측된 처짐이 유한요소해석의 결과와 잘 일치하고 있으며 두 번째, 세 번째 가상하중 조합에 의해 예측된 처짐은 유한요소해석의 결과와 비교했을 때, 복합재 판의 가장자리인 M_1, M_3 선상의 위치에서 대략 25%의 오차

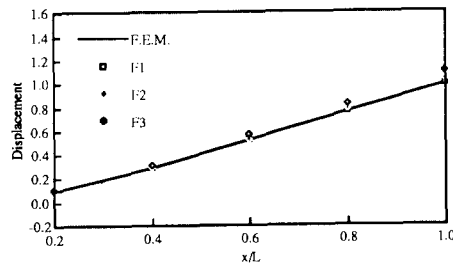
를 보이고 있다. 이러한 오차가 나타난 것은 두 번째와 세 번째 가상단위하중 조합에 의해 얻어진 신호-변형 선형행렬이 가해진 하중이 갖는 비틀림모드를 충분히 고려할 수 없기 때문이다. 즉 두 번째와 세 번째 가상단위하중 조합은 비틀림을 예측하기 위한 가상하중의 위치 선정이 y방향으로 복합재 판 중간에 위치하기 때문에, 이러한 가상하중은 그 위치로부터 자유단(M_1, M_3 선)의 범위에서 비틀림변형률을 거의 발생시키지 않는다. 따라서 식 (16)의 신호-변형 선형행렬 $[L']$ 는 가상하중 위치로부터 자유단의 범위에서 나타나는 비틀림 변형률의 영향을 포함하지 않게 됨으로, 이 범위에 작용하는 비틀림하중에 의한 변형은 정확하게 예측하기

가 어렵다. 세 번째 가상하중 조합의 경우 가상하중 위치로부터 자유단의 범위가 두 번째 가상하중 조합의 경우에 비해 크기 때문에 오차가 더 커졌다. 그러나 첫 번째 가상하중조합의 경우 가상하중의 분포가 복합재 판 전역에 분포하기 때문에, 하중의 작용 위치에 무관하게 가능한 변형모드인 길이방향의 굽힘(longitudinal bending)과 비틀림(twisting)을 모두 고려할 수 있어서 비교적 좋은 결과를 얻었다.

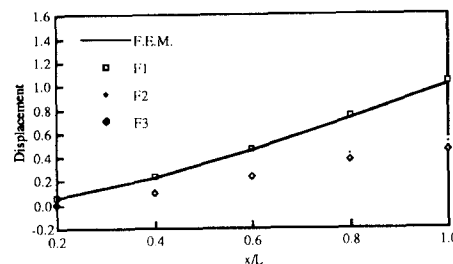
따라서, 가상하중 조합의 위치 선정이 구조물의 사용 중에 구조물에 가해지는 하중의 모든 모드를 가능한 고려할 수 있도록 이루어져야 정확한 예측을 할 수 있다.



(a) Displacement distribution along M1



(b) Displacement distribution along M2

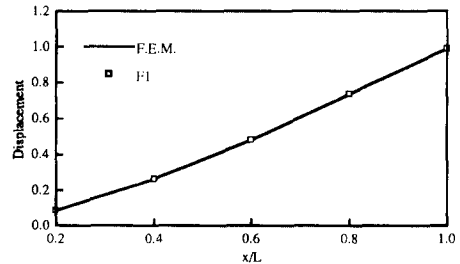


(c) Displacement distribution along M3

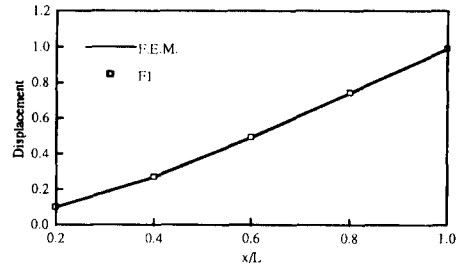
Fig. 8 Comparisons of displacements calculated by finite element analysis and predicted by the shape estimation method for the three different fictitious force set F1, F2, and F3 under external load L3

3.2.2 신호기의 크기가 변형형상예측에 미치는 영향

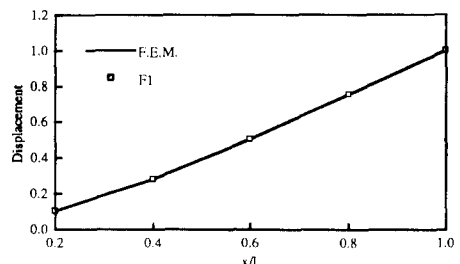
신호기에 나타나는 전압은 신호기가 부착된 면의 평균 변형률과 관계가 있다. 따라서 신호기의 크기를 변화시킬 때, 이것이 변형예측의 결과에 어떠한 영향을 미치는가를 검토할 필요가 있다. 이 영향을 관찰하기 위하여 3.1.1절의 변형형상예측 모형에 이용된 신호기의 크기를 길이 대비 75%, 50%, 25%로 줄여가면서 변형형상예측을 하였다. 예측을



(a) Displacement distribution along M1 with sensor size 75%



(b) Displacement distribution along M1 with sensor size 50%



(c) Displacement distribution along M1 with sensor size 25%

Fig. 9 Comparisons of displacements calculated by finite element analysis and predicted by the shape estimation method for the fictitious force set F1 under external load L2 with sensor size 75%, 50% and 25%

위해 가상하중의 조합으로 3.2.1절에서 가장 좋은 결과를 얻은 첫 번째 가상하중 조합을 이용하였고, 하중은 두 번째 예제와 마찬가지로 $y = -7.3025$ cm, $x = 26.035$ cm인 위치에 굽힘모드와 비틀림모드가 동시에 나타날 수 있도록 작용시켰다.

이것의 결과 중에서 M_1 선상에 위치한 변형형상 예측 위치만의 결과를 Fig. 9에 나타내었으며 각각의 그림에서 보는 바와 같이 신호기의 크기에 관계없이 유한요소해석의 결과와 변형형상예측의 결과가 최대 4%의 근소한 오차를 나타내며 거의 일치하고 있음을 볼 수 있고, M_2 M_3 에서도 같은 경향을 보였다.

4. 결 론

구조물의 변형과 감지기 압전소자에서 얻어지는 신호사이의 선형관계를 이용해 복합재료 지능구조물의 변형상태를 예측하기 위한 방법으로 본 연구 논문에서 제안된 변형예측이론은, 선형관계를 찾기 위한 가상단위하중 조합이 구조물에 가해지는 하중의 모드를 가능한 모두 고려할 수 있도록 선정될 경우, 구조물의 변형상태를 정확하게 예측할 수 있다. 아울러 신호를 얻기 위한 감지기 압전소자의 크기가 제안된 변형예측이론의 결과에 영향을 미치지 않음을 보였다.

제안된 변형예측방법은 압전소자 감지기가 부착된 지능구조물 뿐만 아니라 strain gauge 및 optic fiber가 신호기로 쓰인 구조물에도 적용할 수 있다. 그리고, 본 연구에서는 평판구조물의 굽힘변형만을 고려하였으나, 일반적인 쉘(shell)형상 구조물의 변형에도 적용이 가능하리라 본다.

참고문헌

- (1) Kim, Ki-Soo Youseff Ismail and Springer, George S., 1993, "Measurements of Strain and Temperature with Embedded Intrinsic Febr-Petrot Optical Fiber Sensors," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, No. 17, pp. 1663~1667.
- (2) Nwagboso, Christopher O., 1993, *Automotive Sensory Systems*, Chapman and Hall, pp. 323~337.
- (3) Lee, Wu T. W. and Lee, C. K., 1989, "A New Differential Laser Interferometer Vibrometer for Nanometer Structural Displacement Vibration Measurements," *Proceeding of the 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Material Conference*, pp. 3600-3607.
- (4) Gackstatter, Christian G. and Fairles, Russel T., 1993, "Embedded Sensors for Composite Structures," *Proceedings of the ICCM/9*, Vol. 2, pp. 413~418.
- (5) Peter Gardiner, Brian Culshaw, Alaster McDonach, Craig Michie and Richard Pethrick, 1991, "Smart Structures Research Institute Activities-Plans and Progress," *Proceedings of the 2nd. Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 49~56.
- (6) Ephraim Garcia, Jeff Dosch and Inman, Daniel J., 1991, "The Application of Smart Structures to the Vibration Suppression Problem," *Proceedings of the 2nd. Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 332~339.
- (7) Wu, Whang-Zong and Tzeng, Ming-June., 1991, "Experimental and Numerical Study on Intelligent Structures," *Proceedings of the 2nd. Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 263~279.
- (8) Hanagud, Sarkar, S. Nageshbabu, S. G. L. and Hall, E. K., 1991, "Adaptive Sensors and Actuators in the Vibration Control of Rotating and Pointing Systems," *Proceedings of the 2nd. Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 164~183.
- (9) Sadao Akishita, Yu Ichiro Mitani, and Hiroshi Miyaguchi., 1991, "Sound Transmission Control Through Rectangular Plate by Using Piezoelectric Ceramics as Actuators and Sensors," *Proceedings of the 2nd. Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 445~460.
- (10) Crawley, E. F. and Luis, J. de., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.
- (11) Crawley, E. F. and Lazarus, K. B., 1989, "Induced Strain Actuation of Isotropic and

- Anisotropic Plates," *Proceeding of the 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Material Conference*, pp. 1451~1461.
- (12) Crawley, E. F. and Lazarus, K. B., 1989, *Induced Strain Actuation Rept. of Composite Plates*, GIL 197
- (13) Tiersten, H. F. and Mindlin, R. D., 1962, "Forced Vibrations of Piezoelectric Crystal Plates," *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 20, No. 10, pp. 107.
- (14) Zelenka, J., 1986, *Piezoelectric Resonators and Elseier*, Their Applications, New York.
- (15) Auld, B. A., 1990, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Vol. 1, 2nd Ed., R. E. Krieger, Melbourne, FL, pp. 265~356.
- (16) Andersson, Mark S. and Crawley, Edwary F., 1991, "Discrete Distributed Strain Sensing of Intelligent Structures," *Proceedings of the 2nd Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 737~754.
- (17) Shigeto Shibuta, Yushiki Morino, Yuzo Shibayama and Sekine., 1991, "Koji Adaptive Control of Space Truss Structures by Piezoelectric Actuator," *Proceedings of the 2nd Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 245~262.
- (18) Takafumi Fujita, Yasutaka Tagawa, Nobuyoshi Murai, Sadao Shibuya, Akiharu Takeshida and Yoshinori Takahashi., 1991, "Active Microvibration Control System Using Piezoelectric Actuator," *Proceedings of the 2nd Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 357~374.
- (19) Lin, M. W. and Rogers, C. A., 1993, "Modeling of the Actuation Mechanism in a Beam Structure with Induced Strain Actuators," *Proceedings of the 34th AIAA/ASME/ASCE/ AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, pp. 3608~3617.
- (20) Hagood, N. W. and Bent, A. A., 1993, "Development of Piezoelectric Fiber Composites for Structural Actuation," *Proceedings of the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, pp. 3625~3638.
- (21) Hwang Woo-Sook, and Park Hyun-Chul., 1992, "Finite Element Modeling of Piezoelectric Sensors and Actuators," *AIAA Journal*, Vol. 31, No. 5
- (22) Shah, D. K., Chan, W. S. and Joshi, P., 1993, "Finite Element Analysis of Plate with Piezoelectric Layers," *Proceedings of the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, pp. 3189~3197.
- (23) Pong, C. Shieh., 1993, "Finite Element Formulation for Dynamic Response Analysis of Multiaxially Active 3-D Piezoelectric Beam Element Structures," *Proceedings of the 34th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, pp. 3250~3260.
- (24) Lee, C., Chiang, W. and O'Sullivan, T., 1989, "Piezoelectric Modal Sensors and Actuators Achieving Cristal Active Damping on a Cantilevered Plate," *Proceeding of the 30th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics and Material Conference*, pp. 2018~2026.
- (25) Allik, H. and Hughes, T. J. R., 1970, "Finite Element Method for Piezoelectric Vibration," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 2, pp. 151~157.
- (26) Naillon, M., Coursant, R. and Besnier, F., 1983, "Analysis of Piezoelectric Structures by a Finite Element Method," *Acta Electronica*, Vol. 25, No. 4, pp. 341~362.
- (27) Ha, Sung K., Charles Keilers and Fu-Kuo Chang., 1992, "Finite Element Analysis of Composite Structures Containing Distributed Piezoceramic Sensors and Actuators," *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 3, pp. 772~780.
- (28) Ha, Sung K. and Fu-Kuo Chang., 1990, "Finite Element Modelling of Response of Laminated Composites with Embedded Piezoelectric Actuators," *Proceedings of the 31st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural*

Dynamics and Materials Conference, pp. 2323~2330.

- (29) Fumihiro Kuwao, Gun-Shing Chen, and Wada, Ben K., 1991, "Quasi-Static Shape Estimation and Control of Adaptive Truss Structures Using Internal Displacement Sensors," *Proceedings of the 2nd. Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures*, pp. 375~392.
- (30) Tsai, S. W. and Hahn, H. T., 1980, *Introduction to Composite Materials*, Technomic Co., Westport, U. S. A., Think Composites, Dayton, U. S. A., pp. 1~24.
- (31) Taylor, R. L. Beresford, P. J. and Wilson, E. L., 1976, "A Non-Conforming Element for Stress Analysis," *Internal Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 10, pp. 1211~1219.
- (32) Wu, H. Y. and Chang, F. K., 1989, "Transient Dynamic Analysis of Laminated Composite Plates Subjected to Transverse Impact," *Computers and Structures*, Vol. 31, No. 3, pp. 453~466.
- (33) Hughes, T. J. R., 1987, *The Finite Element Method*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, pp. 132~135, 242~245.
- (34) Ha, Sung K. and Kim, O. S., 1993, "A Study on the Design Optimization of Hip Prosthesis of Advanced Fiber Reinforced Composites," *Proceedings of the ICCM/9*, Volume IV, pp. 729~239.

부 록

요소강성행렬 $[K^e]$ 의 계산

식 (12)에서 절점의 형상함수 N_r 은 자연좌표계 (natural coordinate) ξ, η, ζ 를 이용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$N_1 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_2 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$N_3 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1-\zeta)$$

$$N_4 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)$$

$$N_5 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta)$$

$$N_6 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta)$$

$$N_7 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1+\eta)(1+\zeta)$$

$$N_8 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta) \quad (A1)$$

한편 식 (12)에서 P_i 는 incompatible mode의 형상함수이며

$$P_1 = (1-\xi^2)$$

$$P_2 = (1-\eta^2)$$

$$P_3 = (1-\zeta^2) \quad (A2)$$

로 표현된다.

변형률과 변위 사이의 관계식을 이용하면

$$\bar{\epsilon}_s = \sum_{r=1}^8 \sum_{a=1}^4 [B_{sa}]_r q_{ar} + \sum_{i=1}^3 \sum_{a=1}^4 [G_{sa}]_i a_{ai} \quad s=1, 2, \dots, 9 \quad (A3)$$

과 같다. 여기서, 절점변위행렬 $[B_{sa}]$ 과 $[G_{sa}]$ 는 아래의 식으로 정의된다.

$$[B_{sa}]_r = \begin{bmatrix} N_{r,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & N_{r,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & N_{r,3} & 0 \\ 0 & N_{r,3} & N_{r,2} & 0 \\ N_{r,3} & 0 & N_{r,1} & 0 \\ N_{r,2} & N_{r,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & N_{r,1} \\ 0 & 0 & 0 & N_{r,2} \\ 0 & 0 & 0 & N_{r,3} \end{bmatrix}$$

$$[G_{sa}]_i = \begin{bmatrix} P_{i,1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{i,2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{i,3} & 0 \\ 0 & P_{i,3} & P_{i,2} & 0 \\ P_{i,3} & 0 & P_{i,1} & 0 \\ P_{i,2} & P_{i,1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{i,1} \\ 0 & 0 & 0 & P_{i,2} \\ 0 & 0 & 0 & P_{i,3} \end{bmatrix}$$

r 은 절점의 개수이며 각 절점은 4개의 자유도를 갖는다. 일반적인 유한요소해석 과정⁽³¹⁻³³⁾ 통해 얻어진 식들로부터 정적인 거동만을 고려하면, 절점변위 (external nodal displacement)는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{qq}^e & K_{qa}^e \\ K_{aq}^e & K_{aa}^e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q^e \\ a^e \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F^e \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (A5)$$

식 (A5)에서 적층재료의 물성치 변화를 고려한 적분을 수행하기 위하여 Ha and Kim⁽³⁴⁾이 제안한 방법을 이용하여 다음과 같이 적용할 수 있다.

$$[K_{qq}^e] = \sum_{k=1}^n \times \int_{-10}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{R}}^k \mathbf{B} |J| \mathbf{J}^k d\xi^k d\eta^k d\zeta^k \quad (A6)$$

$$[K_{qa}^e] = \sum_{k=1}^n \times \int_{-10}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{R}}^k \mathbf{G} |J| \mathbf{J}^k d\xi^k d\eta^k d\zeta^k \quad (A7)$$

$$[K_{qq}^e] = \sum_{k=1}^n \times \int_{-10}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{G}^T \bar{\mathbf{R}}^k \mathbf{B} |J| \mathbf{J}^k d\xi^k d\eta^k d\zeta^k \quad (A8)$$

$$[K_{aa}^e] = \sum_{k=1}^n \times \int_{-10}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}^T \bar{\mathbf{R}}^k \mathbf{G} |J| \mathbf{J}^k d\xi^k d\eta^k d\zeta^k \quad (A9)$$

여기서, $\bar{\mathbf{R}}^k$ 는 각 적층의 강성행렬이고, \mathbf{J} 는 전체 요소의 Jacobian행렬이며, \mathbf{J}^k 는 요소내의 K 번째 층의 Jacobian행렬이다. 식 (A5)에서 a^e 를 소거하면 요소강성행렬은 다음과 같다.

$$[K_e] = [K_{qq}^e] - [K_{qa}^e][K_{aa}^e]^{-1}[K_{aq}^e] \quad (A10)$$