

# 변형률 감지기를 이용한 복합재료 지능구조물의 변형형상예측

윤영복\* · 조영수\* · 이동건\* · 황운봉\*\* · 하성규\*\*\*

(1996년 11월 18일 접수)

## Shape Estimation of the Composite Smart Structure Using Strain Sensors

Young Bok Yoon, Young Soo Cho, Dong Gun Lee, Woon Bong Hwang  
and Sung Kyu Ha

**Key Words:** Smart Structure(지능구조물), Shape Estimation(변형형상예측), Fictitious Force(가상하중), Eigenvector(고유모드)

### Abstract

A shape estimation is needed to control actively a smart structure. A method is, hence, proposed to predict the deformed shape of the structure subjected to unknown external load using the signal from sensors attached to the structure. The shape estimation is based on the relationship between the deformation of the structure and the signal from the sensors. The matrix containing the relationship between the deformation and signal is obtained using fictitious force or eigenvector of global stiffness matrix. Then the deformed shape can be predicted using the linear matrix and signal from sensors attached to the structure. To verify this method, experiment and FEM were performed and it was shown that the shape estimation method based on the fictitious force predicts deflections well and more accurately than that based on eigenvector.

### 1. 서 론

대부분의 구조물은 외부로부터의 예기치 못한 하중, 충격 또는 온도변화 등에 의해 변형을 가지게 된다. 이러한 변형은, 특히 정밀성과 안전성이 요구되는 구조물에 대해, 그 기능에 직접적인 영향을 미친다. 외부환경이 구조물에 미치는 영향을 줄이기 위해 구조물의 변형을 감지하고 이에 대해 적절히 대응할 수 있는 구조물의 연구가 필요하게 되었다. 지능구조물(smart or intelligent structure)<sup>(1)</sup>은 외란에 의해 변형이 발생할 때 자기진단을 수행하고, 구조물의 기하학적 형상과 기계적 성질을 의도

적으로 변화시켜 변형에 대처할 수 있는 새로운 개념의 구조물이다. 지능구조물은 기존의 구조물과 구조물의 변형을 검출하는 감지기(sensor),<sup>(2,3)</sup> 구조물의 특성을 변화시키는 작동기(actuator)<sup>(4-9)</sup> 그리고 감지기의 신호를 평가하고 작동기에 적절한 동작수행을 명령하는 제어기(processor)로 구성된다.

지능구조물은 경량과 고강도가 요구되는 우주항공 등의 분야에 주로 응용된다. 따라서 비강성과 비강도가 우수하며, 특히 제작과정시 재료 내에 감지기와 작동기의 삽입이 용이한 섬유강화 복합재료(fiber-reinforced composite material)<sup>(10)</sup>가 지능구조물의 부재로 널리 응용되고 있다.

지능구조물에 대한 대부분의 노력은 구조물의 변형 또는 진동을 제어하는 연구에 집중되어 왔다.<sup>(11-15)</sup> 지능구조물의 변형을 능동적으로 제어하기 위해서는 구조물의 변형형상예측이 선행되어야 한다. 그

\*한양대학교 대학원 기계설계학과

\*\*회원, 포항공과대학교 기계공학과

\*\*\*회원, 한양대학교 기계공학과

러나 구조물의 변형을 임의의 위치에서 직접 측정하기란 현실적으로 불가능하다. 이러한 난점을 극복하기 위해 Kuwao 등<sup>(16)</sup>은 감지기에서의 변형량을 이용하여 원하는 위치에서의 변형을 계산하는 방법을 제시하였으나 연구 결과의 적용이 트러스 구조물에 국한된다. 또한 Andersson 등<sup>(17)</sup>은 구조물에 부착된 변형률 감지기에서 얻은 신호를 감지기의 크기에 대해 적분하여 구조물의 변형상태를 예측하였으나, 이는 보와 같은 일차원 형상에 대한 변형만을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 구조물의 형상, 감지기의 위치 그리고 변형형상예측 위치에 따른 신호-변형 선형행렬을 구한 후, 이 행렬식과 구조물에 부착된 감지기에서 측정되는 신호를 이용하여 미지의 외부환경에 의해 변형된 구조물의 변형상태를 예측하는 방법을 제시한다. 이의 타당성을 검토하기 위해 감지기가 부착된 복합재료판을 제작하여 실험을 수행하였고 실험에서 측정된 변형상태와 변형형상예측 이론의 결과를 비교하였다. 또한 유한요소법을 이용하여 실험결과의 타당성을 보였으며, 아울러 변형형상예측에 영향을 미치는 인자에 대해 검토하였다.

## 2. 변형형상예측 이론

변형형상예측을 위한 모형으로 Fig. 1과 같이 감지기가 부착된 복합재료 지능구조물을 생각할 수 있다. 감지기의 부착위치와 개수는 구조물의 용도와 특성에 따라 제한된다. 구조물의 변형을 능동적으로 제어하기 위해서는, 구조물 임의의 위치에서의 변형상태가 먼저 예측되어야 하며, 이를 위해 다음과 같은 변형형상예측법을 제안한다. 구조물의 변형상태와 감지기에서의 신호 사이의 관계를 유도하기 위해, n개의 감지기에서 검출되는 신호와 m개의 임의 위치에서의 변형을 고려하여, 다음과 같은 변형성분벡터와 신호성분벡터를 정의한다.

$$\delta = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_m \end{Bmatrix}, \quad V = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_n \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$\delta$ 는 변형예측지점  $x_j (j=1, 2, 3, \dots, m)$ 에서의 변형  $d_j$ 를 요소로 하는 변형벡터이며,  $V$ 는  $i$ 번째

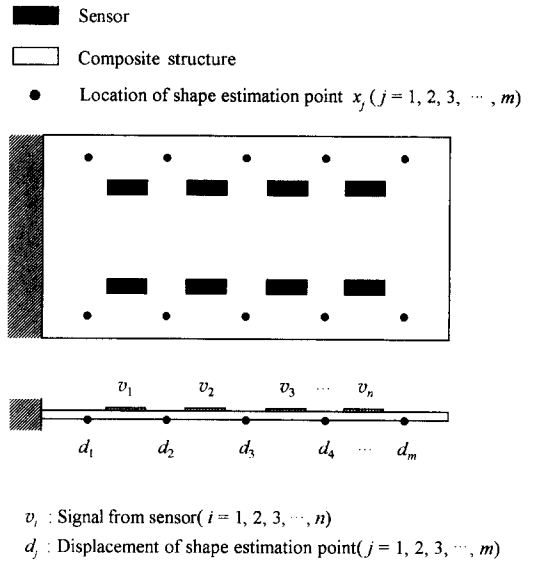


Fig. 1 The composite smart structure with distributed sensors for shape estimation.

감지기에서 나타나는 신호  $v_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ 를 요소로 하는 신호벡터이다. 일반적으로 변형예측지점의 수가 감지기의 수보다 많다. ( $m > n$ )

변형벡터  $\delta$ 는  $m$  차원을 이루므로 다음과 같이  $m$ 개의 기본변형벡터의 선형조합으로 나타낼 수 있다.

$$\{\delta\} = \sum_{j=1}^m \bar{c}_j \{\bar{\delta}^j\} \quad (2)$$

여기서,  $\bar{\delta}^j$ 는 기본변형벡터이며,  $\bar{c}_j$ 는 계수이다.

마찬가지로 감지기에 나타나는 신호벡터  $V$ 도  $n$ 개의 기본신호벡터의 선형조합으로 표현될 수 있다.

$$\{V\} = \sum_{k=1}^n c_k \{\bar{V}^k\} \quad (3)$$

$$= [\bar{V}^1 \ \bar{V}^2 \ \dots \ \bar{V}^n] [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n]^T \quad (4)$$

$$= [L^V] \{c\} \quad (5)$$

여기서,  $\bar{V}^k$ 는 기본신호벡터,  $c_j$ 는 계수,  $L^V [n \times n]$ 는 기본신호조합행렬이다.

식 (2)에서의  $m$ 개 기본변형벡터 중  $n$ 개만을 고려하고, 구조물이 기본변형벡터의 변형상태를 가질 때 나타나는 신호벡터를 식 (3)에서의 기본신호벡터로 사용하면, 식 (2)에서의 계수  $\bar{c}_j$ 는  $c_i$ 로 바뀌며, 식 (2)는 다음과 같이 근사화될 수 있다.

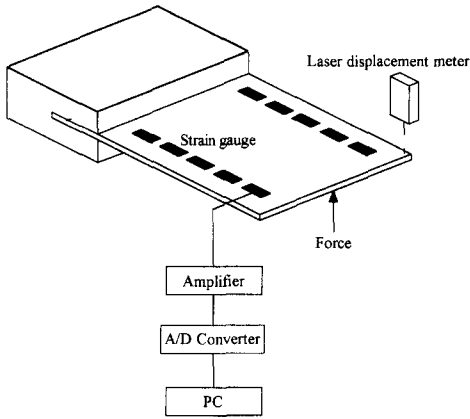


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

$$\{\delta\} \cong \sum_{k=1}^n c_k \{\bar{\delta}^k\} \quad (6)$$

$$= [\bar{\delta}^1 \ \bar{\delta}^2 \ \dots \ \bar{\delta}^n] [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n]^T \quad (7)$$

$$= [L^\delta] \{c\} \quad (8)$$

여기서,  $L^\delta [m \times n]$ 는 기본변형조합행렬이다.

식 (5)와 (8)에서의 계수  $c$ 를 소거하면 감지기에서 나타나는 신호와 변형예측지점에서 발생하는 변형과의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\{\delta\} = [L^\delta][L^V]^{-1}\{V\} \quad (9)$$

$$= [L]\{V\} \quad (10)$$

즉, 식 (10)에서와 같이 감지기의 신호출력  $V$ 와 신호-변형 선형행렬  $L$ 를 이용하여 임의의 위치  $x_j (j=1, 2, 3, \dots, m)$ 에서 발생하는 변형  $\delta$ 를 예측할 수 있다.

외부 하중에 의해 발생하는 변형은 기본변형벡터의 선형조합으로 근사화되기 때문에 기본변형벡터의 선정이 매우 중요하다. 선정된 기본변형벡터가 외부 하중에 의한 실제변형과 유사하면 예측오차는 적어진다. 그러나 외부하중의 크기와 분포를 알 수 없기 때문에 외부하중을 고려한 기본변형벡터의 선정은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 가상하중을 가하였을 때 구조물에 나타나는 변형을 기본변형벡터로 이용하는 방법과 구조물의 고유모드(eigenvector of global stiffness matrix)를 기본변형벡터로 이용하는 방법<sup>(16)</sup> 각각 사용하였다.

가상하중을 이용하는 방법은 다음과 같다. 임의의 위치  $y_i$ 에 가상하중  $f_i$ 가 가해졌을 때 발생하는 변형벡터를 기본변형벡터  $\bar{\delta}^i$ 로, 이 때 감지기에서 나타나는 신호벡터를 기본신호벡터  $\bar{V}_i$ 로 한다.

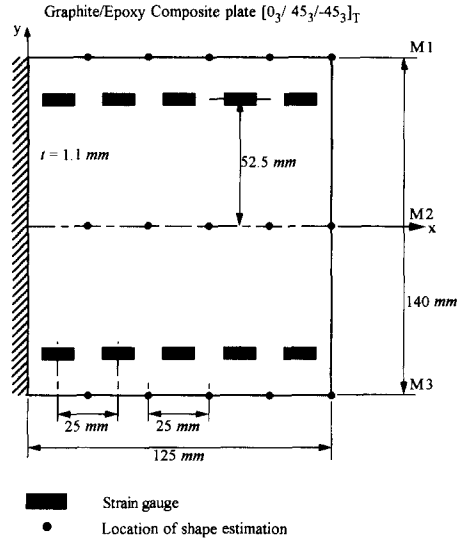


Fig. 3 The specimen of Graphite/Epoxy composite plate with distributed strain gauges.

Table 1 Material properties of graphite epoxy unidirectional composites.

T300/5208	Value	Unit
Young's modulus		
$E_x$	181	[GPa]
$E_y = E_z$	10.3	[GPa]
Poisson's ratio		
$\nu_x$	0.28	
Shear modulus		
$G_{xy} = F_{zx}$	7.17	[GPa]
$G_{yz}$	3.4	[GPa]
Density		
$\rho$	1600	[kg/m <sup>3</sup> ]
Thermal expansion coefficient		
$\alpha_x$	0.02	[ $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ ]
$\alpha_y = \alpha_z$	22.5	[ $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ ]

즉, 가상하중  $f_i$ 가 가해졌을 때 나타나는 변형벡터와 신호벡터는 각각  $L^\delta$ 와  $L^V$ 의  $i$ 번째 열(column)이 되므로,  $m$ 개의 하중 작용점에 가상하중을 반복하여 가하면  $L^\delta$ 와  $L^V$ 를 구할 수 있다.

고유모드를 이용하는 방법은 구조물의 강성행렬

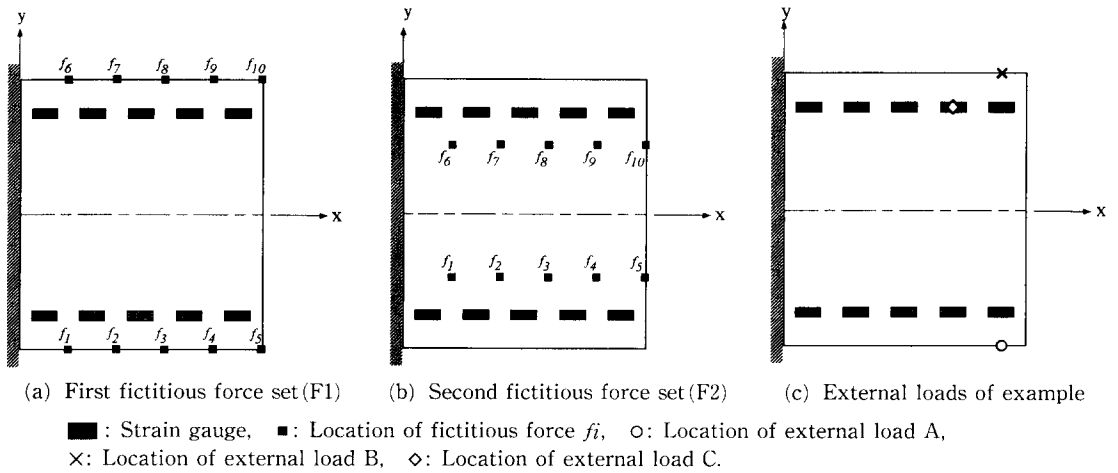


Fig. 4 Location of external loads and fictitious force set for the shape estimation of cantilevered  $[0_3/45_3/-45_3]_T$  composite plate with distributed strain gauges.

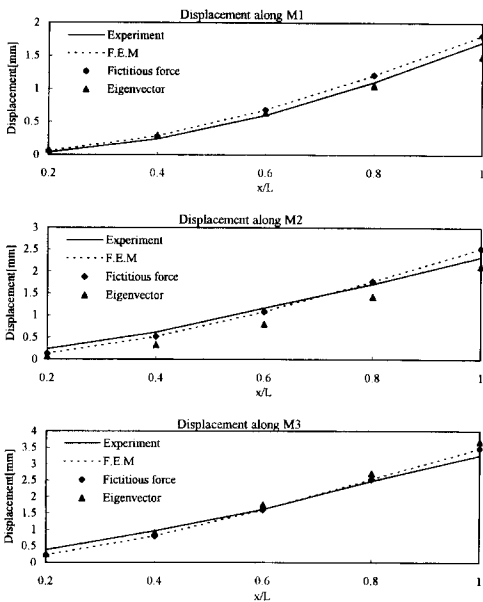


Fig. 5 Comparisons of displacements measured by laser displacement meter, displacements calculated by F.E.M and displacements predicted using the fictitious force and eigenvector under the external load A.

의 고유모드를 계산하여,  $i$ 번째 고유모드를 기본변형벡터  $\delta^i$ 로, 이 때 감지기에서 나타나는 신호벡터를 기본신호벡터  $\bar{V}^i$ 로 사용한다. 이때  $i$ 번째 고유모드와 신호벡터는 각각  $L^{\delta}$ 와  $L^V$ 의  $i$ 번째 열(column)이 된다.

위의 두 가지 방법에 의한 기본신호조합행렬  $L^V$

와 기본변형조합행렬  $L^{\delta}$ 는 유한요소법 또는 실험을 통하여 구할 수 있다. 이후 미지의 외력에 의해 감지기에서 측정되는 신호벡터  $V$ 와 신호-변형선형행렬  $\bar{L}$ 를 이용하여 식 (10)으로부터 변형량  $\delta$ 를 구할 수 있다.

### 3. 실험 및 결과

본 연구에서 제시한 이론의 타당성을 보이기 위해, 스트레인 게이지를 부착한 복합재료판을 제작하여 실험을 수행하였다.

#### 3.1 실험장치 및 시편

실험장치는 시편을 지지하기 위한 지지대, 변형량을 측정하기 위한 비접촉식 변위측정기(laser displacement sensor), 스트레인 게이지에서 나오는 전압신호를 증폭해주는 증폭기(amplifier) 그리고 데이터 수집을 위한 A/D 변환기와 컴퓨터로 구성되어 있다. 실험장치의 개략적인 구성을 Fig. 2에 나타내었다.

실험에 사용된 시편은 Fig. 3에 표시한 바와 같이 길이  $l=125$  mm, 폭  $w=140$  mm, 두께  $t=1.1$  mm의 Graphite/Epoxy(T300/5208) 직사각형 복합재료평판이다. 복합재료판 중앙에 하중이 작용하였을 때에도 굽힘모드와 비틀림모드가 동시에 작용하도록, y축을 기준으로 하여  $[0_3/45_3/-45_3]_T$ 의 적층순서(stacking sequence)를 사용하였다.  $x=0$  인 면은 완전고정(clamp)하고 다른 면은 자유단이

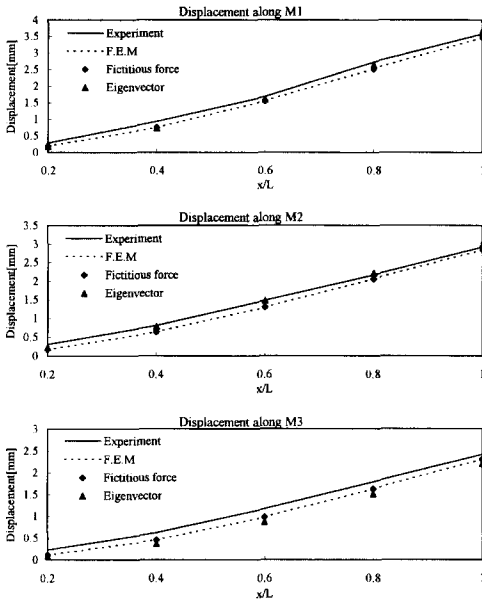


Fig. 6 Comparisons of displacements measured by laser displacement meter, displacements calculated by F.E.M and displacements predicted using the fictitious force and eigenvector under the external load B.

되도록 복합재료판을 고정시켰다. 스트레인 게이지는 복합재료판의 윗면에,  $y = \pm 52.5$  mm 되는 선상을 따라,  $x$ 축에 평행하게, 자유단에서 12.5 mm 떨어진 곳으로부터 25 mm의 간격으로 5개씩 총 10개를 부착하였다. Graphite/Epoxy의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

### 3.2 실험방법

변형을 예측하고자 하는 위치로는, Fig. 3에서와 같이,  $x$ 축에 평행한 M1, M2, M3 선상을 따라 총 15지점  $x_j$  ( $j=1, 2, 3, \dots, 15$ )를 선정하였다. 가상하중조합의 위치에 따른 변형예측의 결과를 비교하기 위해 두 종류의 가상하중조합을 선정하였다. 첫 번째 가상하중조합(F1)으로 복합재료판의  $y = \pm 70$  mm인 선상을 따라  $x$ 축에 평행하게 10곳을 선정하였고 하중작용점의 수직변위가 2 mm가 되도록 가상하중의 크기를 결정하였다. 두 번째 가상하중조합(F2)으로는 복합재료판의  $y = \pm 35$  mm인 곳에  $x$ 축에 평행하게 10곳을 선정하였으며, 가상하중의 크기는 첫 번째 가상하중조합과 마찬가지로 하중작용점의 수직변위가 2 mm가 되도록 하였다. 가상하중조합 F1과 F2를 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에

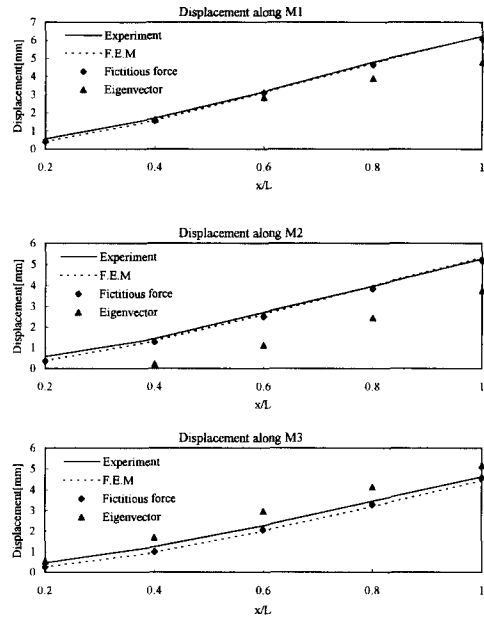


Fig. 7 Comparisons of displacements measured by laser displacement meter, displacements calculated by F.E.M and displacements predicted using the fictitious force and eigenvector under the external load C.

각각 나타내었다. 스트레인 게이지에서 나타나는 전압신호는 증폭기, A/D 변환기 그리고 노이즈 필터를 거쳐서 컴퓨터로 취득되었으며, 전기적 잡음이 존재하였기 때문에 600번 신호를 취득하여 이의 평균값을 사용하였다. 가상하중을 가하였을 때 나타나는 각 예측지점에서의 변형량은 비접촉식 변위 측정기를 사용하여 측정하였다.

신호-변형 선형행렬을 이용한 변형형상예측의 타당성을 보이기 위해 Fig. 4(c)에서와 같이 A, B, C의 세 가지 외부하중을 설정하였다. A는  $x = 112.5$  mm,  $y = -70$  mm의 위치에 하중을 가해 하중점에 3.0 mm의 수직변위가 생기도록 한 것이며, B는  $x = 112.5$  mm,  $y = 70$  mm의 위치에, 하중 C는  $x = 87.5$  mm,  $y = 52.5$  mm의 위치에 각각 3.0 mm, 3.8 mm의 수직변위를 가한 것이다.

### 3.3 가상하중법과 고유모드법의 변형형상예측 비교

3.2절에서 정의된 첫 번째 가상하중조합(F1)을 택하여 이에 대한 기본변형벡터와 신호-변형 선형행렬을 유한요소법을 사용하여 구하였다. 또한 복합재료판의 10차까지의 고유모드를 유한요소법으로

**Table 2** Comparisons of coefficient for fictitious force set F1 and eigenvector under the external load A, B and C.

(a) External force A

Mode number	Fictitious force (F1)	Eigenvector
1	-0.00010	0.91587
2	0.00300	-0.35555
3	-0.05166	0.00829
4	0.66439	-0.16956
5	0.74557	-0.07322
6	-0.00002	-0.00524
7	0.00000	-0.02191
8	0.00012	0.00837
9	-0.00219	-0.00180
10	0.00465	-0.00032

(b) External force B

Mode number	Fictitious force (F1)	Eigenvector
1	-0.00001	0.95625
2	0.00014	0.28764
3	-0.00235	0.00237
4	0.01180	0.03559
5	-0.01415	0.00454
6	-0.00008	-0.00036
7	0.00246	0.03760
8	-0.04521	-0.00621
9	-0.63445	-0.01022
10	0.77142	-0.00029

(c) External force C

Mode number	Fictitious force (F1)	Eigenvector
1	-0.00005	0.90442
2	0.00069	0.02955
3	0.03411	0.01267
4	0.03272	-0.32090
5	0.23091	-0.23066
6	0.00039	-0.00536
7	-0.02567	-0.14596
8	0.39110	0.01360
9	0.84185	0.05746
10	-0.28657	0.00141

계산하고 이를 기본변형벡터로 하여 신호-변형 선형행렬을 구하였다. 이러한 두 가지 방법으로 구한 신호-변형 선형행렬을 이용하여, 3.2절에서 정의된 하중 A, B, C가 각각 작용하는 경우에 대해 M1, M2, M3 선상에 위치한 변형예측지점에서의 수직 변위를 예측하였다. 하중 A가 작용할 때의 변형예측결과는 Fig. 5에 나타내었고 하중 B를 가하였을 때의 예측결과는 Fig. 6, 하중 C를 가하였을 때의 예측결과는 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 “Fictitious force”로 나타낸 값은 가상하중을 이용하여 예측한 수직변위이며, “Eigenvector”로 나타낸 값은 고유모드를 이용하여 예측한 수직변위이다. 예측된 변형형상의 오차를 비교하기 위해, 유한요소법으로 계산한 변형과 실험에서 측정된 변형을 각각 “F. E. M”과 “Experiment”로 함께 나타내었다. 가로축은 길이 방향에 따른 변형형상예측위치를 복합재판의 길이로 무차원화한 것이며, 세로축은 두께방향의 변형을 나타낸다. 또한 하중에 따른 각각의 계수  $c$  값을 무차원화하여 Table 2에 나타내었다. 계수  $c$ 는 실제의 변형을 기본변형벡터들의 조합으로 근사화할 때의 기여도를 의미한다.

가상하중에 의한 신호-변형 선형행렬을 이용하여 예측된 변형은, 하중의 종류에 관계없이, 실제의 변형과 잘 일치하고 있음을 그림에서 볼 수 있다. 그러나 고유모드를 이용하여 예측된 변형은 가상하중에 의한 예측결과에 비해 큰 오차를 보이고 있

다. 이는 고차의 고유모드는 외부하중이 가해졌을 때 발생하는 변형의 특성을 반영하지 못하기 때문이다. Table 2에서 볼 수 있듯이 고유모드를 이용한 변형형상예측에서는, 하중의 종류에 관계없이, 첫번째 고유모드에 대한 계수가 다른 계수 보다 현저히 크다. 이는 2차 이상의 고유모드는 1차 고유모드에 비해 변형형상예측에 기여하는 정도가 매우 작음을 의미한다. 10개의 고유모드를 기본변형벡터로 고려하였으나 실제로는 거의 1차 모드만이 변형을 근사화하는데 사용되었다. 그러나 가상하중을

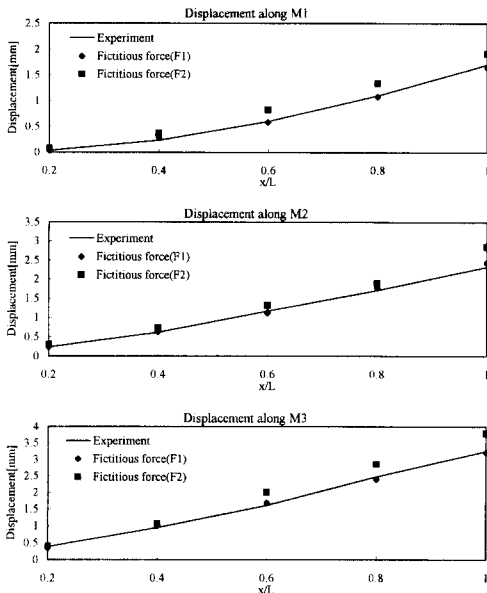


Fig. 8 Comparisons of displacements measured by laser displacement meter and displacements predicted using the fictitious force sets F1 and F2 under the external load A.

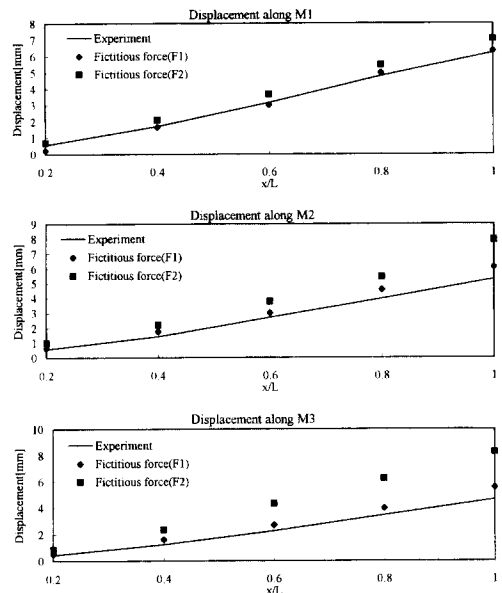


Fig. 10 Comparisons of displacements measured by laser displacement meter and displacements predicted using the fictitious force sets F1 and F2 under the external load C.

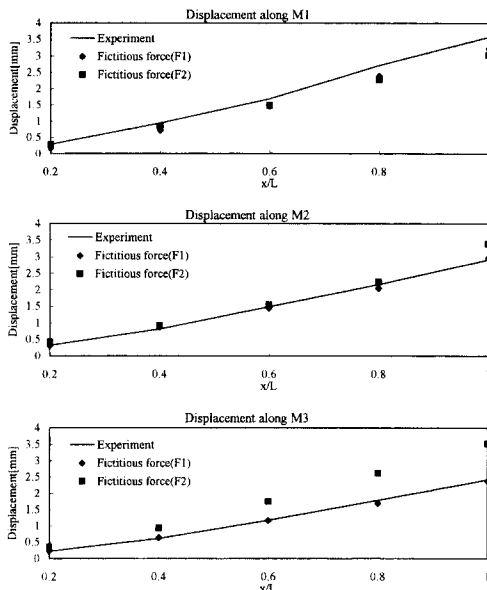


Fig. 9 Comparisons of displacements measured by laser displacement meter and displacements predicted using the fictitious force sets F1 and F2 under the external load B.

이용한 변형예측의 경우, 하중의 위치에 따라 계수의 분포가 바뀌었다. 이는 가해지는 하중의 위치가

변함에 따라 계수의 크기를 적절히 변화시켜 정확한 예측을 할 수 있음을 의미한다.

### 3.4 가상하중조합의 선정이 변형형상에측에 미치는 영향

가상하중조합의 위치 선정에 따른 변형형상에측 결과를 실험을 통해 비교하였다. 3.2절에서 정의된 두 가지 가상하중조합(F1, F2)에 대한 각각의 신호-변형 선형행렬을 실험을 통해 구한 후, 이 신호-변형 선형행렬과 A, B, C 세 가지 하중이 각각 가해졌을 때 나타나는 스트레인 게이지에서의 전압신호를 이용하여 예측한 수직변위를 변위측정기에 의해 측정된 값과 함께 Figs. 8, 9, 10에 나타내었다.

3.3절에서 보인 유효요소법을 이용한 변형형상에측 결과에 비해 상대적으로 큰 오차를 보이지만, 첫번째 가상하중조합에 의해 예측된 수직변위는 하중의 위치와 무관하게 실제 측정된 변위와 대체로 잘 일치하고 있음을 보이고 있다. 그러나 두번째 가상하중조합에 의해 얻어진 예측 값은 첫번째 가상하중조합에 의한 예측 값에 비해 큰 오차를 보이고 있다. 두번째 가상하중조합의 위치는 첫번째 가상하중의 위치에 비해 판의 중앙에 위치해 있으며, 이러한 가상하중은 그 작용위치로부터 자유단(M1,

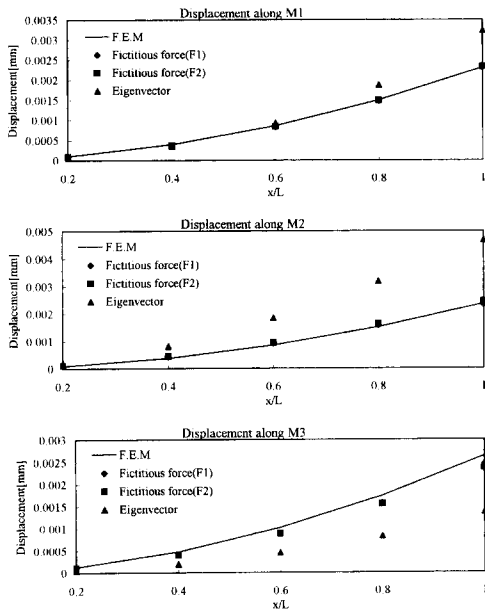


Fig. 11 Comparisons of displacements calculated by F.E.M., displacements predicted using the fictitious force set F1 and F2 and displacements predicted using the eigenvector under the thermal load.

M3 선)에 이르는 부분에 비틀림변형을 거의 발생시키지 않게 된다. 따라서 두번째 가상하중조합에 의해 얻어진 기본변형벡터  $L^V$ 는 가상하중위치로부터 자유단의 범위에서 나타나는 비틀림변형의 영향을 포함하지 않게 됨으로, 이 범위에서 작용하는 비틀림하중에 의한 변형은 정확하게 예측하기 어렵다. 즉, 두번째 가상하중조합에 의해 얻어진 신호-변형 선형행렬은 첫번째 가상하중조합에 의한 신호-변형 선형행렬에 비해 비틀림모드를 충분히 고려할 수 없었기 때문에 예측오차가 상대적으로 크게 나타난다.

#### 4. 수치예제

앞서 제시한 변형형상예측 이론을 다음과 같은 수치예제에 적용하였다. 첫번째 경우로 복합재료판 내부에 온도구배가 존재할 때 발생하는 변형을 예측하였다. 복합재료판 윗면에는  $\Delta t_a = -10^\circ\text{C}$ , 아래면에는  $\Delta t_b = 10^\circ\text{C}$ 의 온도변화가 있도록 하고, 내부의 온도구배는 선형을 이루도록 하였다. 두번째 경우로 복합재료판에 여러 하중이 동시에 작용하는 경우에 대해 이론을 적용하였다. 즉, 판의 중앙인  $x=1/2$ ,  $y=w/2$ 의 위치에  $-1\text{N}$  그리고 A와 C의

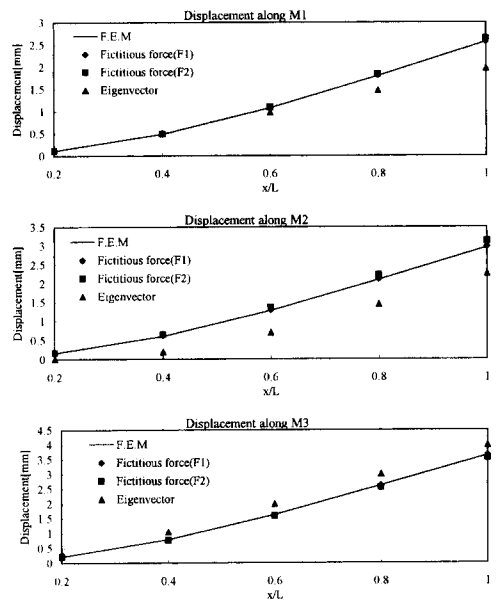


Fig. 12 Comparisons of displacements calculated by F.E.M., displacements predicted using the fictitious force set F1 and F2 and displacements predicted using the eigenvector under multi loads.

위치에 각각 1N의 하중을 동시에 가하였을 때의 변형을 예측하였다. 위의 두 경우에 대한 변형형상 예측의 결과를 각각 Fig. 11과 Fig. 12에, 유한요소법으로 계산한 변형과 함께 나타내었다.

첫번째 가상하중조합(F1)을 사용하여 예측한 변형은 유한요소법의 결과와 거의 일치하였다. 두번째 가상하중조합(F2)을 이용한 예측결과도 비교적 잘 일치하였다. 그러나 고유모드를 이용하여 예측한 결과에서는 오차가 크게 나타나고 있다. 첫번째 경우와 두번째 경우 모두, 하중 A, B, C를 가했을 때 나타나는 변형에 비해 판의 비틀림이 작다. 따라서 두번째 가상하중에 의한 변형형상예측이 비틀림의 영향을 고려하기 어려움에도 불구하고, 예측결과가 실제 변형과 비교적 잘 일치한다. 그러나 고유모드를 이용한 변형형상예측에서는, 3.3절의 결과와 마찬가지로, 계수가 항상 첫번째 고유모드에 집중되어 있음을 Table 3과 Table 4에서 볼 수 있다.

#### 5. 결론

구조물의 변형과 감지기에서 얻어지는 신호 사이



**Table 3** Comparison of coefficients for fictitious for fictitious force sets F1, F2 and eigenvector under the thermal load.

Mode number	Fictitious force (F1)	Fictitious force (F2)	Eigenvector
1	0.00268	0.00182	0.88147
2	-0.00084	-0.00075	0.22881
3	0.03031	0.03867	0.09731
4	-0.41889	-0.41826	0.35156
5	0.65620	0.56214	0.17528
6	0.00208	0.00174	0.00419
7	0.00149	0.00048	-0.07335
8	0.02095	0.02548	-0.00174
9	-0.29040	-0.31798	0.03827
10	0.55519	0.63702	0.00159

**Table 4** Comparison of coefficients for fictitious for fictitious force sets F1, F2 and eigenvector under the multi-load.

Mode number	Fictitious force (F1)	Fictitious force (F2)	Eigenvector
1	-0.00008	-0.00002	0.90058
2	-0.02794	-0.01932	-0.28768
3	-0.10695	-0.12142	0.02800
4	0.59576	0.51718	-0.27146
5	0.70795	0.65621	-0.15703
6	0.00064	0.00047	-0.00607
7	-0.02858	-0.02333	-0.07931
8	0.08446	0.09163	0.01156
9	0.32916	0.32172	0.02443
10	-0.12395	-0.41756	0.00075

의 선형관계를 이용해 복합재료 지능구조물의 변형 상태를 예측하기 위한 방법으로 본 연구논문에서 제안된 변형예측 이론은 고려하고자 하는 기본변형 벡터가 실제로 일어날 수 있는 변형을 반영할 경우, 구조물의 변형상태를 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 단일 정하중의 경우뿐만이 아니라 온도구배 또는 복합적인 하중이 가해지는 경우에도 정확하게 예측할 수 있었다. 가상하중을 이용한 변형형상예측이 고유모드를 이용한 변형형상예측에 비해 실제의 하중이 가지는 변형모드를 잘 반영할 수 있

었기에 예측오차가 적었다. 또한 가상하중을 이용한 변형형상예측 시에는 기본변형벡터가 구조물에 나타날 수 있는 모든 변형을 고려할 수 있도록 가상하중의 위치가 선정되어야 한다.

제안된 변형형상예측방법은 스트레인 게이지가 부착된 구조물뿐만이 아니라 압전소자(piezoelectric material) 또는 광섬유센서(optic fiber sensor) 등의 감지기가 부착된 구조물에도 적용이 가능하다. 그리고 본 연구에서는 평판구조물의 굽힘변형만을 고려하였으나, 일반적인 셸(shell)형상 구조물의 변

형에도 적용이 가능하리라 본다.

## 후 기

본 연구는 한국학술재단의 1996년도 자유공모과제(과제번호 ME96-C-26) 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Peter Gardiner, Brian Culshaw, Alaster McDonach, Craig Michie and Richard Pethrick, November 12-14, 1991, Smart Structures Research Institute Activities, Planes and Progress, 2nd. Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures, pp. 45~56.
- (2) Christopher O. Nwagboso, 1993, *Automotive Sensory Systems*, Chapman and Hall, pp. 323~37.
- (3) Christian G. Gackstatter and Russel T. Fairles, July 12-16, 1993, "Embedded Sensors for Composite Structures," *ICCM/9*, Vol. 2, pp. 413~418.
- (4) Sadao Akishita, Yu Ichiro Mitani and Hiroshi Miyaguchi, November 12-14 1991, "Sound Transmission Control Through Rectangular Plate by Using Piezoelectric Ceramics as Actuators and Sensors," 2nd. Joint Japan/U. S. conference on Adaptive Structures, pp. 445~460.
- (5) 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.
- (6) Crawley, E. F., and Lazarus, K. B., 1989, "Induced Strain Actuation of Isotropic and Anisotropic Plates," Proceeding of the AIAA/ASME/ASCE/AHS 30th Structures, Structural Dynamics and Material Conference, pp. 1451~1461.
- (7) Mitsugi, J., Yasaka, T. and Miura, K., 1989, "Shape Control of the Tension Truss Antenna," *AIAA Journal*, Vol. 28, No. 2, pp. 316~322.
- (8) Crawley, E. F. and Lazarus, K. B., 1989, "Induced Strain Actuation Rept. of Composites Plates," GIL 197.
- (9) Lin, M. W. and Rogers, C. A., April 19-22 1993, "Modeling of the Actuation Mechanism in a Beam Structure with Induced Strain Actuators," the 34th AIAA/ASME/ASCE/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, pp. 3608~3617.
- (10) 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.
- (11) Burrdisso, R. A. and Haftka, R. T., 1989, "Optimal Location of Actuators for Correcting Distortions in Large Truss Structures," *AIAA Journal*, Vol. 27, No. 10, pp. 1406~1411.
- (12) Shigeto Shibuta, Yushiki Morino and Yuzo Shibayama, November 12-14, 1991, Koji Sekine, "Adaptive Control of Space Truss Structures by Piezoelectric Actuator," 2nd Joint Japan/U. S. Conference on Adaptive Structures, pp. 245~262.
- (13) Hagood, N. W. and Bent, A. A., April 19-22, 1993, "Development of Piezoelectric Fiber Composites for Structural Actuation," The 34th AIAA/ASME/ASCE/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, pp. 3625~3638.
- (14) Batra, R. C., 1995, "Deflection Control During Dynamic Deformations of a Rectangular Plate Using Piezoceramics Elements," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 8, pp. 1547~1548.
- (15) Ghosh, K. and Batra, R. C., 1995, "Shape Control of Plates Using Piezoceramic Elements," *AIAA Journal* Vol. 33, No. 7, pp. 1354~1357.
- (16) Fumihiro Kuwao, Gun-Shing Chen and Ben K. Wada, November 12-14, 1991, "Quasi-Static Shape Estimation and Control of Adaptive Truss Structures Using Internal Displacement Sensors," 2nd. Joint Japan/U. S Conference on Adaptive Structures, pp. 375~392.
- (17) Mark S. Andersson and Edwary F. Crawley, November 12-14, 1991, "Discrete Distributed Strain Sensing of Intelligent Structures," 2nd Joint Japan/U. S. conference on Adaptive Structures, pp. 737~754.