

# 압전소자가 부착된 보의 고주파수 동적응답에 대한 스펙트럼 요소 해석의 실험적 검증<sup>#</sup>

## Experimental Verification of Spectral Element Analysis for the High-frequency Dynamic Responses of a Beam with a Surface Bonded Piezoelectric Transducer

김 은 진\*·손 훈\*\*·박 현 우<sup>†</sup>

Eun Jin Kim, Hoon Sohn and Hyun Woo Park

(2009년 10월 21일 접수 ; 2009년 11월 27일 심사완료)

**Key Words** : Spectral Element Method(스펙트럼 요소법), Frequency Response Function(주파수 응답함수), Piezoelectric Transducer(압전소자), Electro-mechanical Signatures(전기 역학적 신호), Laser Scanning Vibrometer(레이저 스캐닝 바이브로미터), Finite Element Method(유한요소법), Experimental Verification(실험적 검증)

### ABSTRACT

This paper demonstrates the validity of spectral element analysis for modeling the high-frequency dynamic behaviors of a beam with a surface-bonded piezoelectric wafer through a laboratory test. In the spectral element analysis, the high-frequency electro-mechanical interaction can be considered properly with relatively low computational cost compared to the finite element analysis. In the verification test, a cantilever beam with a surface-bonded piezoelectric wafer is forced to be in steady-state motion by exerting the harmonic driving voltage signal on the piezoelectric wafer. A laser scanning vibrometer is used to obtain the overall dynamic responses of the structure such as resonance frequencies, the associated mode shapes, and frequency response functions up to 20 kHz. Then, these dynamic responses from the test are compared to those computed by the spectral element analysis. A two-dimensional finite analysis is conducted to obtain the asymptotic solutions for the comparison purpose as well.

### 1. 서 론

구조물의 동적 응답을 실시간으로 예측하여 사용 중의 구조물의 결함을 탐지하는 구조물 건전성 감시(structural health monitoring)에 대한 연구들이 활발

히 진행되어 왔다<sup>(1)</sup>. 특히 고주파수 대역에서 가진과 탐지를 동시에 수행할 수 있는 lead zirconate titanate (PZT)와 같은 압전소자를 사용하여 금속판 또는 합성판에 발생한 미세손상을 탐지할 수 있는 구조물 손상탐지 기술이 주목 받고 있다<sup>(2-4)</sup>.

구조물에 부착 가능한 압전소자를 이용한 판형 구조물의 손상 탐지기술은 동역학적 관점에서 두가지로 나눌 수 있다. 첫 번째 판형 구조물에 발생하는 유도파의 일종인 램파(lamb wave)가 미세손상을 만났을 때 유발되는 파산란(wave scattering)을 압전소자를 통해 탐지하는 방법이다<sup>(2,3)</sup>. 두 번째는 미세손상이 구조물의 정상상태 응답에 주는 변화를 압

<sup>†</sup> 교신저자; 정회원, 동아대학교 토목공학과  
E-mail : hwpark@dau.ac.kr  
Tel : (051)200-7630, Fax : (051)201-1419

\* 동아대학교 토목공학과

\*\* 한국과학기술원 토목환경공학과

# 이 논문은 2009 추계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

전소자를 이용해 탐지하는 방법이다. 이 때, 구조물의 정상상태 응답은 주파수 영역에서 압전소자의 전기역학적(electro-mechanical; 이하 EM으로 칭함) 신호인 어드미턴스 또는 그의 역수인 임피던스를 통해 측정할 수 있다<sup>(4)</sup>.

구조물에 부착된 압전소자의 EM 신호를 손상탐지에 활용하는 경우 기존 연구들은 주로 압전소자를 중심으로 대상 구조물은 단순화시킨 Liang 모델<sup>(5)</sup>에 기반을 두고 있다. Liang 모델을 이용하는 경우 손상이 없는 구조물의 EM 신호를 기저신호로 미리 설정하고 같은 구조물에서 추후 측정된 EM 신호가 기저신호와 얼마만큼 달라졌는가를 정량화하여 손상유무를 판단하게 된다<sup>(4)</sup>. 이 때, 구조물의 동특성 또는 손상의 위치 및 정도가 압전소자의 EM 신호에 주는 영향을 파악하기 어렵다. 따라서, 구조물의 동특성이 압전소자의 EM 신호에 주는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 구조물과 압전소자의 EM 상호작용을 적절히 고려할 수 있는 해석 모델이 반드시 필요하다<sup>(6-8)</sup>.

구조물과 압전소자의 EM 상호작용 문제의 해를 직접 구하는 것은 매우 어렵다. 따라서 유한요소법을 이용한 근사해석기법으로 해를 구하게 된다<sup>(6)</sup>. EM 상호작용은 수십 kHz에서 수백 kHz의 고주파수 대역에서 발생하는데 주파수 대역이 높아질수록 정상파의 파장 길이는 수 cm단위로 짧아진다. 이 때, 유한요소법에서 정확한 해석결과를 얻기 위해 파장길이 대비 요소망을 10배에서 20배까지 조밀하게 구성해야 한다. 왜냐하면, 저차 다항식의 형상함수를 통해 가정된 변위장을 사용하는 유한요소법에서 구한 구조물의 관성효과가 고주파 대역으로 갈수록 점점 부정확해지기 때문이다<sup>(9)</sup>.

고주파 대역에서 구조물과 압전소자의 EM 상호작용 해석시 많은 계산비용이 소요되는 유한요소법의 한계를 극복하기 위한 기법 중 하나로 스펙트럼 요소법(spectral element method)이 있다<sup>(7-10)</sup>. 스펙트럼 요소법에서는 주파수 영역으로 변환된 지배방정식에서 구한 균일해를 변위장을 위한 형상함수로 사용한다. 따라서, 적은 수의 요소를 사용하더라도 고주파 영역에서 구조물의 정확한 질량 관성효과를 계산할 수 있기 때문에 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다<sup>(9)</sup>.

이 연구에서는 압전소자가 부착된 캔틸레버 보에

서 압전소자를 가진 시킬 때 보에 발생하는 동적 응답을 압전소자와 보로 이루어진 복층보 스펙트럼 요소<sup>(8)</sup>를 이용하여 해석하고 이를 실험적으로 검증한다. 실험에서는 레이저 스캐닝 바이브로미터를 이용하여 압전소자에 의해 발생하는 보의 변위 주파수 응답함수와 전체 구조물의 모드형상을 취득한다. 실험 데이터를 스펙트럼 요소, 2차원과 3차원 유한요소 해석결과와 비교하고 분석한다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 구조물과 압전소자층의 EM 상호작용을 고려할 수 있는 스펙트럼 요소 해석에 대해 간략히 기술한다. 3장에서는 스펙트럼 요소와 유한요소를 사용한 수치해석결과와 실험결과를 비교하고 분석한다. 4장에서는 결론 및 향후 연구방향에 대해 기술한다.

## 2. 운동방정식과 스펙트럼 요소 해석 절차

고주파 대역에서 압전소자와 보의 EM 상호작용을 적절하게 모델링하기 위해 사용된 스펙트럼 요소는 Fig. 1(a)의 기저보 요소와 Fig. 1(b)의 기저보와 압전소자층으로 이루어진 복층보 요소로 이루어진다<sup>(8)</sup>.

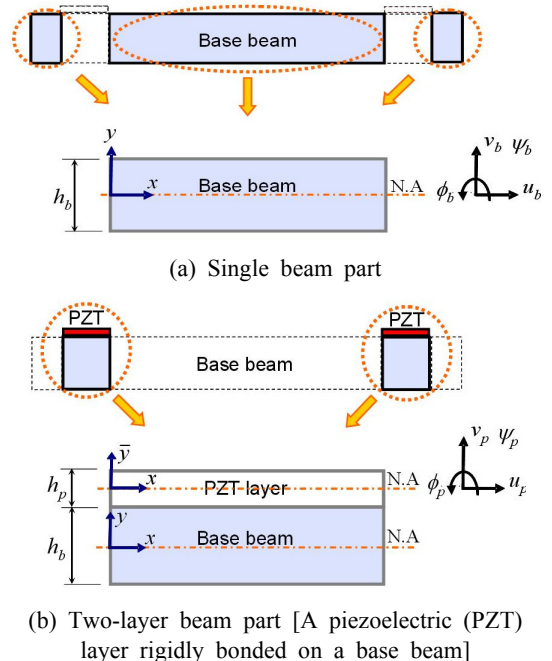


Fig. 1 Schematic illustration of a beam with a piezoelectric wafer<sup>(8)</sup>

Fig. 1(a)와 (b)의 기저보의 경우 고주파 대역의 동적거동을 적절히 모사하기 위해 각각 민들린-허만(Mindlin-Herrmann)이론과 티모셴코(Timoshenko) 보 이론에 의해 정의되는 변위장을 사용한다<sup>(11)</sup>.

$$\begin{aligned} u_{base}(x, y) &= u_b(x) - y\phi_b(x) \\ v_{base}(x, y) &= v_b(x) + y\psi_b(x) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $u_b, \psi_b, v_b, \phi_b$ 는 보의 중립축에서의  $x$ -축 방향 변위,  $y$ -축 방향 수축변형도,  $y$ -축 방향 변위 및 회전각이다.

Fig. 1(b)에서 압전소자층은 두께가 상대적으로 얇은 것을 고려하여 2차원 평면응력상태에서 오일러-베르누이(Euler-Bernoulli) 보 이론이 적용된다. 압전소자층 중립축에서 정의되는 응답변수를 적합조건을 사용하여 기저보의 중립축에서 정의되는 응답변수로 변환하면 식(2)와 같다<sup>(8)</sup>.

$$\begin{aligned} u_p(x) &= u_b(x) - \frac{h_b}{2} \left[ \frac{h_p}{2} \cdot \psi'_b(x) + \phi_b(x) \right] \\ &\quad - \frac{h_p}{2} \cdot v'_b(x) \\ v_p(x) &= v_b(x) + \frac{h_b}{2} \psi_b(x) \\ \phi_p(x) &= v'_b(x) + \frac{h_b}{2} \cdot \psi'_b(x) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $u_p, v_p, \phi_p$ 는 각각 압전소자층의 중립축에서의  $y$ -축 방향 변위,  $x$ -축 방향 변위, 그리고 회전변위이다. 또한,  $h_b$ 와  $h_p$ 는 기저보와 압전소자층의 높이이며, 변수 위에 (')는  $x$ 에 대한 미분을 의미한다.

복층보 요소의 운동방정식에 반영된 압전소자의 전기역학적 특성은 식(3)과 같은 1차원 전기-역학적 구성방정식을 사용한다<sup>(12)</sup>.

$$\begin{Bmatrix} \sigma(x) \\ E(x) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^D & -h_{31} \\ -h_{31} & B_{33}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon(x) \\ D(x) \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서  $\sigma, \varepsilon, C_{11}^D, E, B_{33}^S, h_{31}$ , 그리고  $D$ 는 각각 압전소자의  $x$ -방향 응력, 변형도, 탄성계수, 전기장, 유전상수, 압전상수, 그리고 전기적 변위를 나타낸다.

복층보 요소에서 유도된 등방성 탄성체의 변위-변형도 관계식과 구성방정식을 통해 압전소자와 기저보에 대한 변형에너지( $U$ ), 운동에너지( $T$ ) 및 포텐셜 에너지( $W$ )를 구할 수 있다. 이들 에너지를 다음의 해밀턴 정리에 대입하면 복층보 모델에 대한 운동방정식을 구할 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} [T - U - \Omega] dt = 0 \quad (4)$$

복층보 모델에 대한 운동방정식은 기저보의 중립축에서 정의되는 응답변수들과 압전소자층의 전기적 응답변수들로 구성된 지배 방정식과 힘 경계조건식으로 표현된다. 운동방정식에 사용되는 응답변수들을 주파수 영역에서 스펙트럼 형태로 변환하면 스펙트럼 요소법을 위한 정식화를 수행할 수 있다<sup>(8,9)</sup>.

Fig. 2는 복층보의 스펙트럼 요소 정식화 과정을 지면관계상 간략히 요약하여 정리한 것이다. Fig. 2의 과정을 거쳐 최종적으로 복층보 스펙트럼 요소는 기저보의 중립축 양끝단에서 정의되는 수평변위, 수축(contraction), 수직변위, 회전에 대한 강성도 요소행렬과 이에 대응되는 절점력 벡터를 구성할 수 있다<sup>(8)</sup>.

### 3. 실험 검증

Fig. 3은 스펙트럼 요소 해석 결과의 타당성을 실내 실험을 통해 검증하기 위해 사용된 모델과 실험

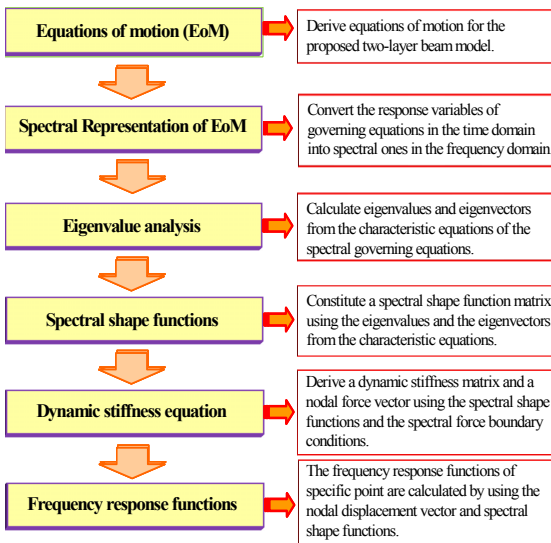


Fig. 2 Procedures for spectral element formulation<sup>(8,9)</sup>

장비를 보여준다. 실험 모델은 압전소자가 부착된 캔틸레버 보다. Fig. 3(a)에서 사용된 기저보 [198 mm(L) × 10 mm(W) × 3 mm(H)]는 알루미늄( $E=70$  GPa,  $\nu=0.33$ )으로 이루어져 있고, 기저보에 부착된 압전소자 [10 mm(L) × 10 mm(W) × 0.507 mm(H)]는 Piezo사의 PSI-5A4E<sup>(13)</sup> 재질을 사용하였다.

보에 부착된 압전소자의 전극(electrode)에 단위 크기(1V)의 조화전압신호를 가하여 전체 구조 시스템이 정상상태가 되도록 가진하였다. 조화전압신호의 가진 입력주파수를 점진적으로 증가시키면서 특정 위치에서 정상상태 응답의 최대값을 순차적으로 취득함으로써 단위 입력 전압에 대한 구조물의 주파수 응답함수와 공진주파수에서의 모드 형상을 각각 구할 수 있다. 그 결과를 스펙트럼 요소 해석결과와 2차원 및 3차원 유한요소 해석 결과와 비교하였다.

고주파 영역에서의 동적 응답을 계측하기 위한 장비로는 독일의 폴리텍(Polytec GMBH Co.)사의 레이저 스캐닝 바이브로미터인 PSV-400-B<sup>(14)</sup>를 사용하였다. PSV-400-B (이하 편의상 PSV라고 표기

한다)는 비접촉식으로 진동하는 특정 지점의 속도 및 위치를 나노미터 해상도 범위로 측정이 가능하다. 이 실험에서는 PSV-400-B가 지원하는 주파수 범위인 0~20 kHz에서 3.125 Hz의 주파수 분해능으로 측정하였다. 측정된 구조물의 동적응답은 11차 모드까지 공진주파수, 전체모드 형상 및 목표점에서의 주파수응답함수이다.

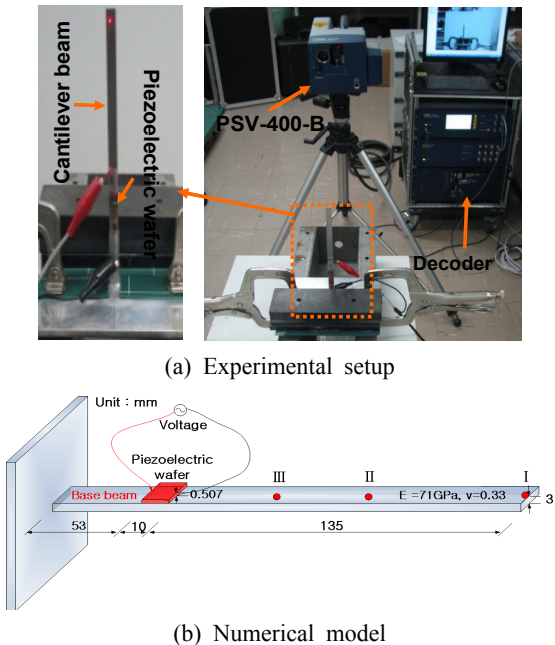
Fig. 3(b)에서는 Fig. 3(a)의 시험체를 모사하기 위한 수치 해석 모델을 나타냈다. 스펙트럼요소(SE) 해석과 2차원(2-D) 유한요소(FE) 해석에서는 평면응력 조건을 가정하였다. 또한 전체적인 3차원(3-D) 모드 형상을 PSV에서 측정한 결과와 비교하기 위해 3-D FE 해석도 병행하여 수행하였다. SE 해석과 FE 해석에서 모두 구조감쇠비 0.5%를 가정하였다.

수치해석에서 기저보와 압전소자는 완전 부착되었다고 가정하였다. SE 해석에서 2절점 기저보 요소 2개와 2절점 복층보 요소 1개를 사용하였다<sup>(8)</sup>. FE 해석에서 3-D 해석의 경우 2차 입방형 고체요소 5940개와 2차 입방형 압전요소 100개를 사용하였고, 2-D 해석의 경우 2차 평면응력요소 594개와 2차 평면응력 압전요소 10개로 이산화하였다. FE 해석은 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터의 HP590에 설치된 ABAQUS 6.7-4 standard의 steady-state dynamic을 사용하였다<sup>(15)</sup>.

Fig. 4는 수치해석과 실험에서 구한 공진주파수에 대응하는 모드 형상들을 비교한 것이다. Fig. 4의 좌측은 3-D FE 해석을 통해 구한 횡변형이 지배적인 모드 형상을 나타냈으며, 우측은 이들 모드에 대응되는 진동모드 형상을 PSV의 스캐닝 기능을 이용하여 취득하였다.

지면관계상 Fig. 4에서는 20 kHz까지 발생하는 총 11개의 횡변형 지배 모드 중 1, 3, 6, 11번째 횡 변형 지배 모드에 대해 비교하였다. PSV로 계측시 고정단으로부터 1.3 cm 떨어진 지점부터 스캐닝을 실시하였기 때문에 왼쪽 고정단 부근의 고차 모드 형상이 3-D FE 해석결과와 다소 차이가 나는 것처럼 보인다. 실제로 스캐닝된 부분에 대해서만 비교하면 전체적으로 잘 일치함을 확인할 수 있다(모드 형상에 대한 분석은 Fig. 6에서 상세히 다룬다).

Fig. 5는 SE 해석과 2-D FE 해석을 이용하여 구한 공진주파수와 PSV를 이용하여 실험에서 구한 공진 주파수의 상대오차를 나타낸 것이다. Fig. 5의 왼쪽



**Fig. 3** An experimental setup and a numerical model for the frequency response function of a cantilever beam with a surface bonded piezoelectric wafer

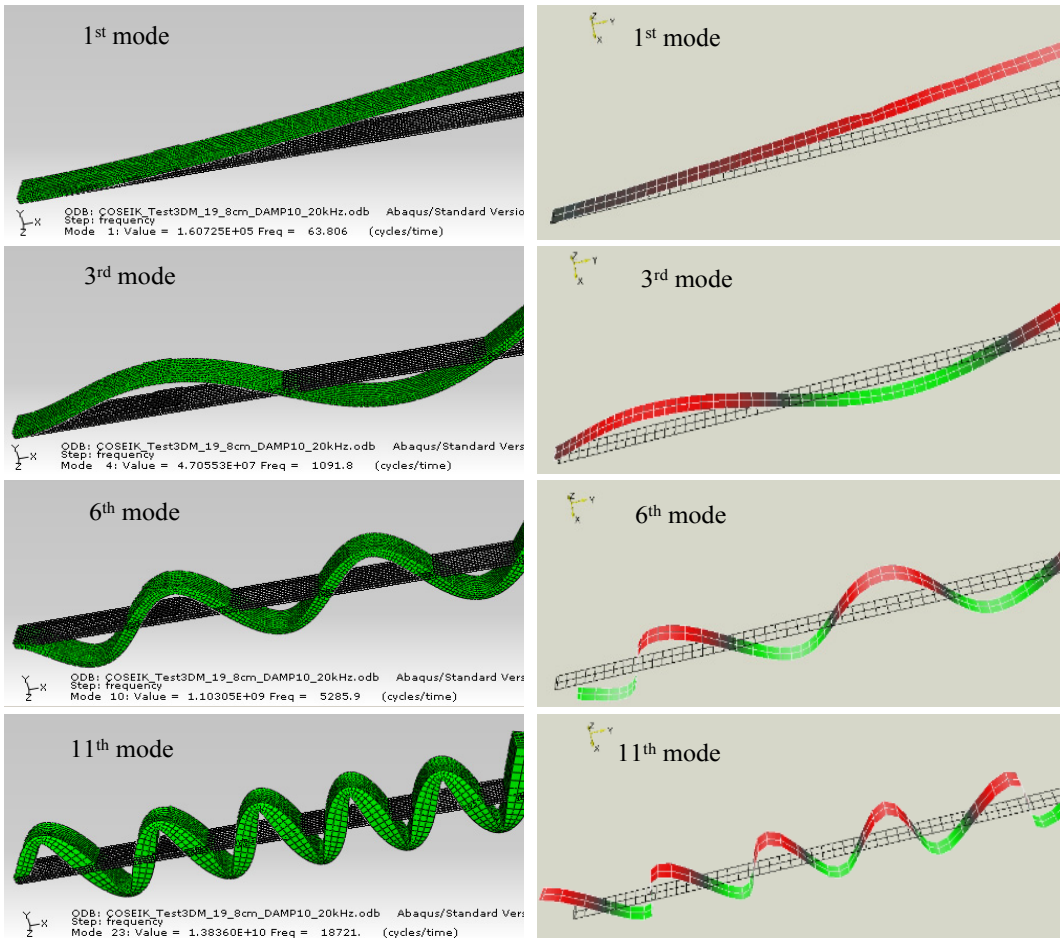


Fig. 4 Perspective view of mode shapes from 3-D FE(left side) and PSV(right side)

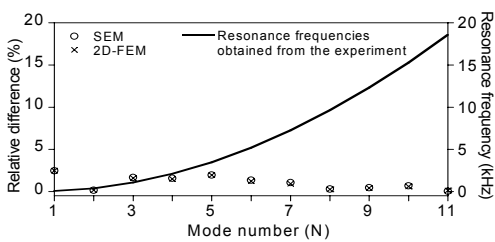


Fig. 5 Relative difference of the resonance frequencies between numerical analyses [SE, 2-D FE] and the test [PSV] up to the 11<sup>th</sup> bending-dominant mode

측은 실험에서 구한 공진주파수와 SE 해석과 2-D FE 해석에서 계산된 공진주파수의 상대차를 백분율로 나타냈다. Fig. 5의 오른쪽 축은 각 모드별 실험에서 구한 공진주파수를 나타냈다. 각 모드별로 SE

해석과 2-D FE 해석이 일치하는 결과를 보여주고 있고 실험에서 구한 공진주파수와 상대오차가 2.5% 이내로 매우 정확한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 4에 도시된 횡모드 형상을 보다 정량적으로 정확하게 비교하기 위해 캔틸레버 보의 윗면 중심선을 따라 추출된 공진모드형상을 비교한 것이다. SE 해석에서는 캔틸레버 보의 윗면 중심선을 고정단에서 자유단까지 1 mm간격으로 198개에 대해 모드 형상을 추출하였다. 공진주파수에서 발생한 최대 정상상태 변위값을 기준으로 다른 지점들의 정상상태 변위값을 기준화 하여 모드 형상을 계산하였다. PSV의 경우는 모드 형상을 계측하기 위해 사용된 153개의 측정점들 가운데 캔틸레버 보 윗면의 중심선을 따라 배치된 51개의 분할점에서 추출된 변위들을 실험을 통해 취득하였다. 이들 변

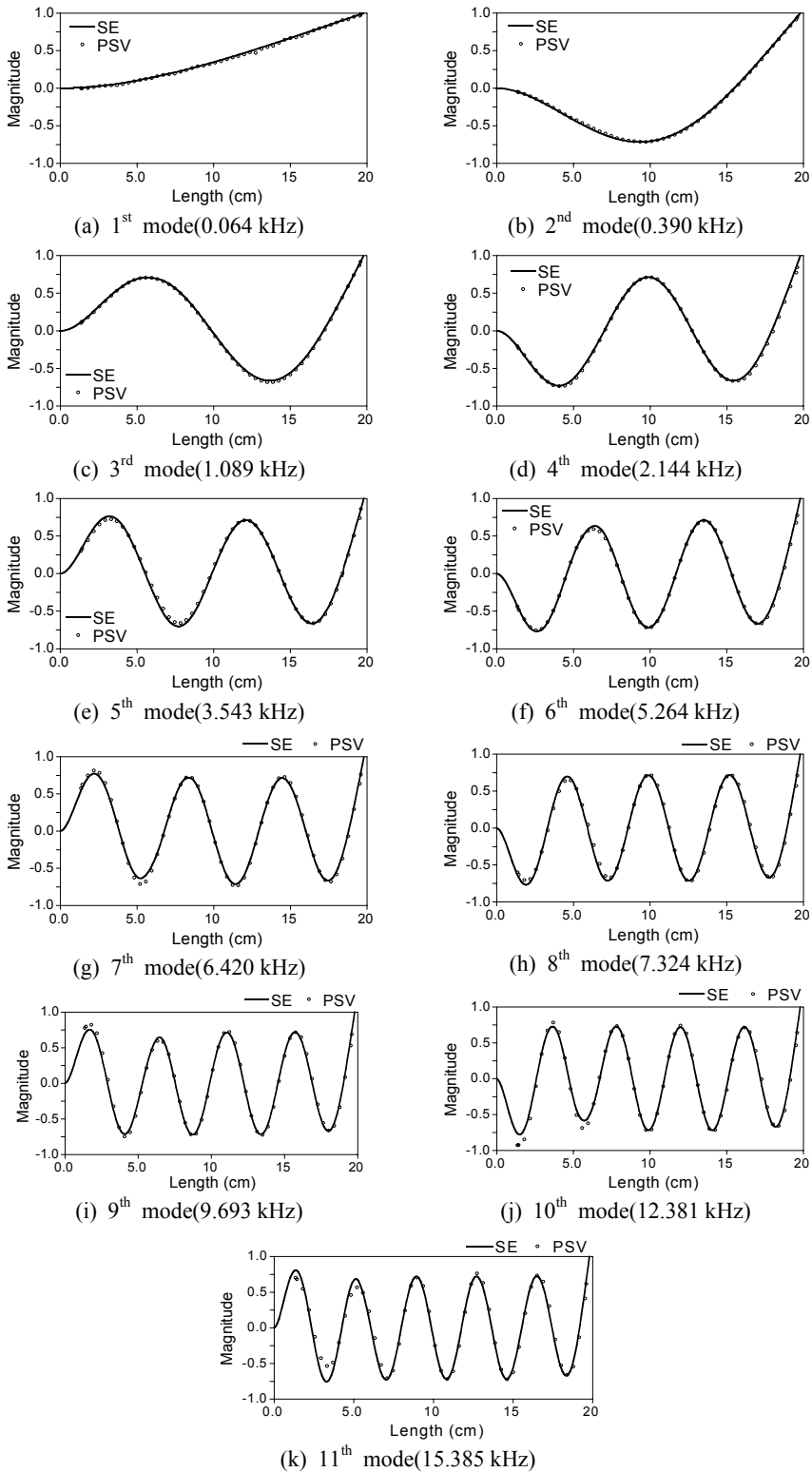
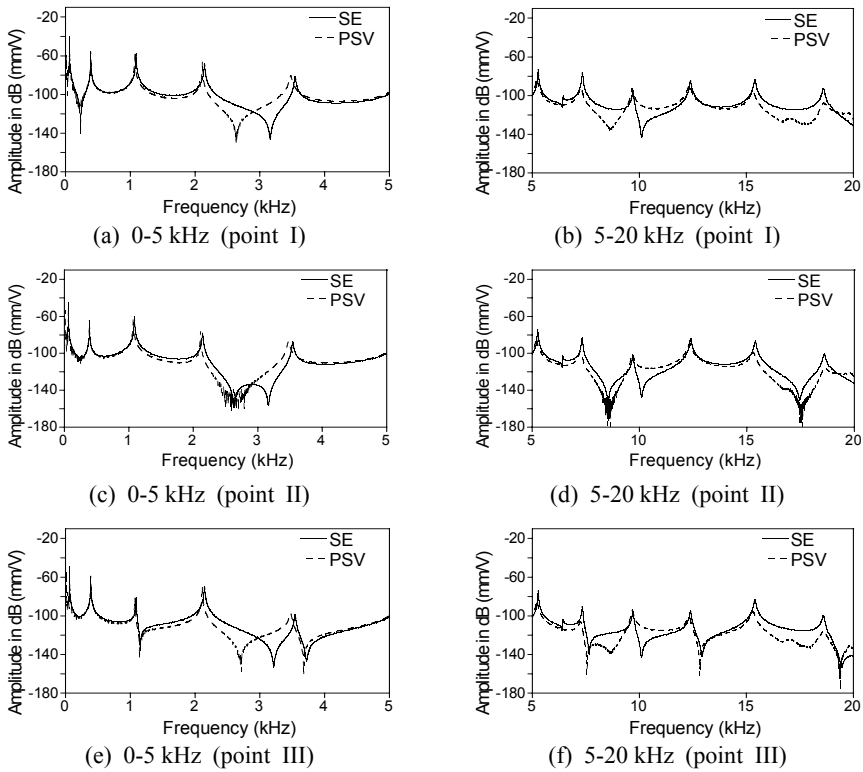


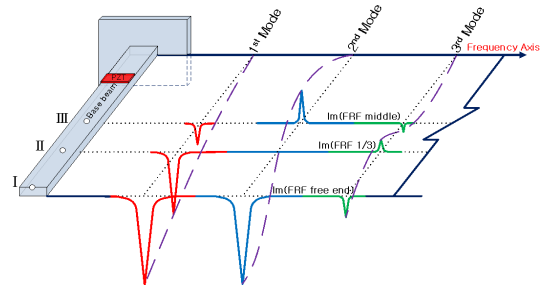
Fig. 6 Quantitative comparison of resonant mode shapes from SE and PSV



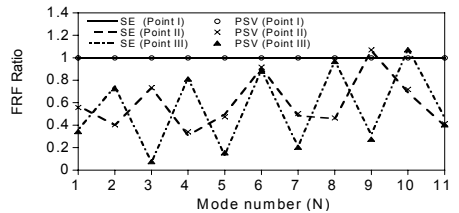
**Fig. 7** Comparison of frequency response functions corresponding to vertical displacement from SE and PSV at three points depicted as I, II and III in Fig. 3

위를 SE 해석과 동일한 기준화를 거쳐 모드형상을 추출하였다. 1차 모드에서 6차 모드까지는 수치해석 결과와 실험결과가 매우 잘 일치하고 있고 7차 모드부터 고정단 부근부터 다소간의 차이를 보이고 있지만 전체적으로 고차 모드의 형상을 매우 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 3에서 I, II, III으로 표시된 지점에서 PSV로 측정된 주파수 응답함수와 SE 해석으로 계산된 주파수 응답함수를 각각 비교하였다. 여기서 주파수 응답함수는 전술한 바와 같이 단위입력전압에 대한 각 지점에서 발생하는 수직방향 변위응답을 의미한다. Fig. 3의 I, II, III은 각각 자유단 끝지점과 자유단에서 보의 길이의 1/3 떨어진 지점, 그리고 보의 중앙지점을 나타낸다. 그림의 가독성을 높이기 위해 각각의 지점에서 주파수 응답함수를 0~5 kHz 대역과 5~20 kHz 대역으로 나눠서 도시하였다. 각 지점에서 4차 공진모드까지 PSV에서 측정된 주파수 응답함수와 SE 해석에서 계산된 주파수 응답함수가 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있



(a) Correlation between mode shape and frequency response function



(b) Mode ratio at points I, II and III

**Fig. 8** Comparison of mode ratio and frequency response functions ratio from SE and PSV at points I, II and III in Fig. 3

다. 5차 모드 이후부터 실험에 의한 주파수 응답함수와 수치해석에서 계산된 주파수 응답함수가 응답 크기가 큰 공진주파수 부근에서는 유사하지만 반공진점과 같이 응답의 크기가 작은 부분에서는 차이를 보여주고 있다.

Fig. 8(a)는 실험예제와 같이 감쇠비가 매우 작은 구조시스템에서 주파수 응답함수와 모드와의 상관관계를 나타낸 것이다<sup>(16)</sup>. Fig. 3의 I, II, III 지점에서 SE 해석과 PSV에 의해 구한 주파수 응답함수의 최대값을 추출하고, I 지점의 값을 이용하여 각각 기준화 시키면 Fig. 8(b)와 같다. Fig. 7에서 5차 모드 이상의 공진주파수에서 응답함수값의 차이가 발생하지만 동일모드상에서 모드 형상비로 나타냈을 때는 SE 해석과 PSV에서 측정된 결과가 일치하는 결과를 보여준다. 따라서 모드해석 관점에서 Fig. 7의 SE 해석에 의한 주파수 응답함수는 관심 주파수 대역에서 실험과 일관된 결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론 및 향후 연구 방향

이 연구에서는 고주파 대역에서 부착형 압전소자와 판형 구조물간의 전기역학적 상호작용을 적은 연산비용으로 적절히 해석할 수 있는 스펙트럼 요소 해석기법의 타당성을 실험을 통해 검증하였다. 실험에서는 압전소자가 부착된 캔틸레버 보를 대상구조물로 사용하였다. 검증을 위한 실험데이터는 레이저 스캐닝 바이브로미터(PSV-400-B)를 통해 0~20 kHz 주파수 대역에서 모드 형상과 주어진 특징지점에서 주파수 응답함수를 취득하였다. SE 해석결과와 비교에 필요한 이론적 접근해는 2차원 유한요소 해석에서 충분히 조밀한 요소망을 설정하여 계산하였다.

먼저 3차원 유한요소 모드해석을 통해 계산된 모드형상과 레이저 스캐닝을 통해 취득된 모드형상을 비교한 결과 레이저 스캐닝을 통해 취득된 모드들은 2차원 평면응력조건하의 수치해석모델로 모사할 수 있는 면외(out-of-plane) 휨모드들로 확인되었다. 평면응력상태의 2차원 유한요소 모드해석과 SE 해석에서 계산된 대상구조물의 공진주파수와 실험에서 취득된 공진주파수를 11차 휨변형 모드까지 각각 정량적으로 비교하였다. 스펙트럼 요소 해석에서 구한 공진주파수는 2차원 유한요소 해석결과와 최대 0.1% 상대오차 내에서 일치하였고 실험결과와

는 최대 2.5% 상대오차 이내에서 일치하였다. 또한, 이들 공진주파수에 대응되는 모드형상의 경우 SE 해석에서 구한 모드형상과 실험에서 취득된 모드형상이 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

캔틸레버 보의 세계의 특징지점에서 압전소자에 가해지는 조화입력전압에 대한 수직방향 변위 주파수 응답함수의 경우 SE 해석과 실험결과가 4차 모드까지 일치하는 결과를 보였고 그 이상의 모드에서도 공진주파수 부근에서는 근사한 결과를 보였다. 또한, 세 지점의 각 공진주파수에서 주파수 응답함수의 상관관계에서 SE 해석과 실험결과가 일관된 경향을 보여줌을 확인할 수 있었다.

향후, 실험에서 취득한 주파수 응답함수와 SE 해석결과의 구체적인 차이에 대해 각 공진주파수 대역에서 유효 감쇠비와 압전소자와 보사이에 존재하는 접착층에 의한 shear lag 효과<sup>(17)</sup> 등을 고려하여 추가적인 분석이 필요하다.

#### 후 기

이 논문은 2007년 동아대학교 학술연구비(공모과제)에 의하여 연구되었음. 실험을 위해 PSV-400-B를 사용할 수 있게 해 주신 국방과학연구소의 박찬익 박사님께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Sohn, H., Farrar, C. H., Hemez, F. M., Czarnecki, J. J., Shunk, D. D., Stinemates, D. W., and Nadler, B. R., 2003, "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001," LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory Report.
- (2) Raghavan, A., Cesnik, C. E. S., 2007, "Review of Guided-wave Structural Health Monitoring," The Shock and Vibration Digest, Vol. 39, No. 91, pp. 91~114.
- (3) Park, S. H., Lee, J. J., Yun, C.-B. and Roh, Y., 2005, "Application of Lamb Wave and Probabilistic Neural Networks for Health Monitoring of Joint Steel Structures," Transactions of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 53~62.



(4) Park, G., Inman, D. J., 2007, "Structural Health Monitoring Using Piezoelectric Impedance Measurements," *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 365, pp. 373~392.

(5) Liang, C., Sun, F. P. and Rogers, C. A., 1994, "Coupled Electro-mechanical Analysis of Adaptive Systems: Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, No. 1, pp. 12~20.

(6) Yang, Y., Lim, Y. Y. and Soh, C. K., 2008, "Practical Issues Related to the Application of the Electromechanical Impedance Technique in the Structural Health Monitoring of Civil Structures: II. Numerical Verification," *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, pp. 1~12.

(7) Lee, U. and Kim, J., 2000, "Dynamics of Elastic-Piezoelectric Two-layer Beams Using Spectral Element Method," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 37, No. 32, pp. 4403~4417.

(8) Lim, K. L., Kim, E. J., Kang, J. S., Park, H. W., 2008, "Spectral Element Formulation for Analysis of Lamb Wave Propagation on a Plate

Induced by Surface Bonded PZT Transducers," *Transactions of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 11, pp. 1157~1169.

(9) Doyle, J. F., 1997, "Wave Propagation in Structure: Spectral Analysis Using Fast Discrete Fourier Transforms-2nd Ed," Springer-Verlag.

(10) Lee, U., 2009, "Spectral Element Method in Structural Dynamics," John Wiley&Sons.

(11) Fung, Y. C., 1965, "Foundations of Solid Mechanics," Prentice-Hall Inc.

(12) Ikeda, T., "Fundamentals of Piezoelectricity," Oxford Science Publications.

(13) Piezo Systems, Inc.(<http://www.piezo.com/>)

(14) Polytec PI Inc.(<http://www.polytecpi.com/>)

(15) KISTI Supercomputer Center(<http://www.ksc.re.kr/>)

(16) Ewins, D. J., "Modal Testing : Theory and Practice," Brüel & Kjaer Research Studies Press Ltd.

(17) Crawley, E. F., de Luis, J., 1987, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, Vol. 25, No. 10, pp. 1373~1385.