

스펙트럼 요소법을 이용한 압전소자가 부착된 보의 주파수 응답함수 해석

Spectrum Element Analysis for the Frequency Response Functions of a Beam with a Surface-Bonded Piezoelectric Transducer.

김은진* · 손훈** · 박현우†

Kim, Eun Jin · Sohn, Hoon · Park, Hyun Woo

1. 서론

압전소자(이하 PZT)는 고주파 대역에서 가진과 탐지를 동시에 수행할 수 있으므로 관형 구조물의 균열과 박리과 같은 미세손상 탐지 연구부문에서 주목을 받고 있다. 특히, 관형 구조물에 부착 가능한 PZT의 전기역학적(Electro-mechanical; 이하 EM) 임피던스를 이용한 손상진단기법에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔다⁽¹⁾. 그러나 기존 실험 연구들은 구조물에 부착된 PZT의 EM 임피던스 신호를 PZT를 중심으로 단순화된 해석모델에 기반을 두고 정성적으로 분석해왔다. PZT의 EM 임피던스 신호를 정량적으로 분석하기 위해서는 구조물과 PZT의 EM 상호작용을 고려한 해석 모델링이 필수적이다. 실제상황에서 해석 모델링의 유효성을 입증하기 위해 실험결과와의 비교검증이 필요하다. 비교검증의 수월성 관점에서 공진주파수 대역에서 신호의 대역폭이 EM 임피던스 신호보다 넓은 변위에 대한 주파수 응답함수 (Frequency response function; 이하 FRF)가 유리하다. 이 연구에서는 PZT가 부착된 내민 보에서 레이저 변위계로부터 취득된 변위의 주파수 응답함수와 모드형상 등을 이용하여 수치해석결과와 비교, 분석하고 해석 모델링의 유효성을 검증한다. 수치해석에서 적은 수의 요소로 정확한 모델링이 가능한 스펙트럼요소 (SE) 해석과 이론적 접근해를 구하기 위해 충분한 수의 유한요소 (FE)를 이용한 해석을 사용한다. SE해석에 대해서는 2장에서 간략히 기술한다.

2. 스펙트럼 요소 해석기법

그림 1 과 같이 압전소자층과 보로 이루어진 복층보 모델에 기반을 두고 PZT와 보의 상호작용에 의한 고주파 대역의 동적 거동을 적절하게 모델링 할 수 있는 스펙트럼 요소법을 사용한다⁽³⁾.

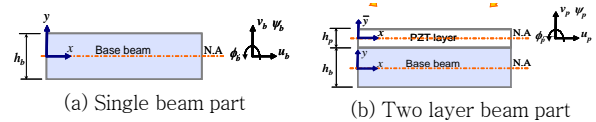


Fig. 1. Schematic illustration of a plate with bonded PZT wafers⁽²⁾

그림 2 는 스펙트럼 요소 정식화 과정과 주파수 응답함수를 구하는 과정을 간략히 도식화 하였다 [스펙트럼 요소 정식화 과정에 대한 상세한 내용은 참고문헌 (2)를 참조].

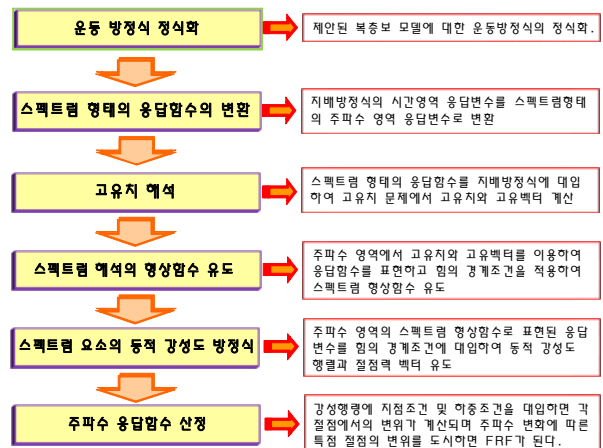
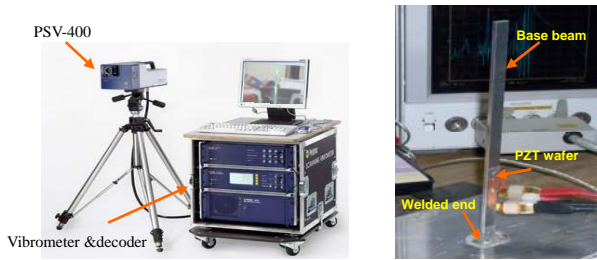


Figure 2. Procedures for spectral element formulation and frequency response function calculation

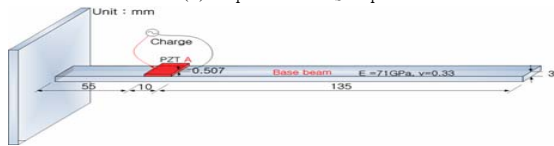
3. 수치 및 실험 예제

그림 3 과 같이 PZT가 부착된 내민 보 예제에서 PZT로 가진된 구조물의 FRF를 실험과 수치해석을 통해 각각 구하고 비교하였다. 그림 3(a)에서 기저보 (200mm×10mm×3mm) 는 알루미늄(E=70GPa, ν=0.33)을 사용하였고 PZT(10mm×10mm×0.507mm)는 Piezo사의 PSI-5A4E⁽⁴⁾ 재질을 사용하였다. 실험에서 도플러 이론을 적용한 레이저 변위계(PSV-400)를 사용하여 0~20kHz까지 3.125Hz의 주파수 분해능으로 취득하여 11 차 모드까지 FRF와 모드형상을 구하였다.

† 교신저자; 정회원, 동아대학교 토목공학부 조교수
E-mail : hwpark@dau.ac.kr
Tel : (051)200-7630, Fax : (051)201-1419
* 동아대학교 토목공학부 박사과정
** 한국과학기술원 토목환경공학과 부교수



(a) Experimental setup



(b) Numerical model

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

그림 3(b)에서는 그림 3(a)의 시험체를 모사하기 위한 수치 해석 모델을 나타냈다. 스펙트럼요소(SE) 해석과 2차원(2-D) 유한요소(FE) 해석에서는 평면응력조건을 가정하였다. 또한 전체적인 3차원(3-D) 모드형상을 PSV에서 측정된 결과와 비교하기 위해 3-D FE 해석도 수행하였다. 수치해석에서 기저보와 PZT는 완전 부착되었다고 가정하였다. SE해석에서 2절점 기저보 요소 2개와 2절점 복층보요소 1개를 사용하였다⁽²⁾. FE해석에서 3-D 해석의 경우 2차 입방형 고체요소와 압전요소를 사용하였고, 2-D 해석의 경우 2차 평면응력요소와 압전요소로 이산화하였다(총요소 개수는 3-D는 6100개 2-D는 610개). FE해석은 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터의 HP590에 설치된 ABAQUS 6.7-4 standard를 사용하였다.

지면관계상 그림 4의 좌측은 3-D FE 해석을 통해 구한 3차와 9차 모드 형상만을 나타냈으며, 우측은 그림 3(a) PSV의 스캐닝 기능을 이용하여 구한 모드형상을 FE 해석에서 구한 동일모드에 대해 나타냈다. 그림 5는 그림 4의 모드들에 대해 보의 윗면 중심선을 따라 추출된 모드형상을 정량적으로 비교하였다. 20kHz 이하에서 발생하는 11개의 모드에 대하여 동일하게 검토한 결과 수치해석과 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

그림 6은 보의 끝단인 자유단과 중간지점에서 수직방향으로 발생하는 변위에 대한 FRF를 나타냈다. 이 때, FRF를 추출하기 위해 PZT에 $\pm 1V$ 의 조화가진 입력전압을 0부터 20kHz까지 가했다(주파수 분해능의 경우 실험은 3.125Hz이고 수치해석은 1Hz). 먼저, 수치해석에서 3개의 스펙트럼 요소를 사용한 SE의 경우 많은 수의 요소를 사용한 FE해와 같은 결과를 보여주는 것은 주목할만하다. 공진주파수의 경우 SE해석결과와 실험결과가 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 주파수 응답함수의 형상은 SE해석결과와 실험결과가 대체적으로 잘 일치하고 있었지만 몇몇 모드들에 대해 공진주파수에서 응답함수의 크기가 차이를 보여준다. 현재까지 분석결과 이러한 차이에 대한 주요원인으로 주파수 대역에 따른 PZT의 가진능력 과 감쇠비를 고려해볼 수 있다. 현재 이에 대한 구체적인 분석을 수행중에 있다.

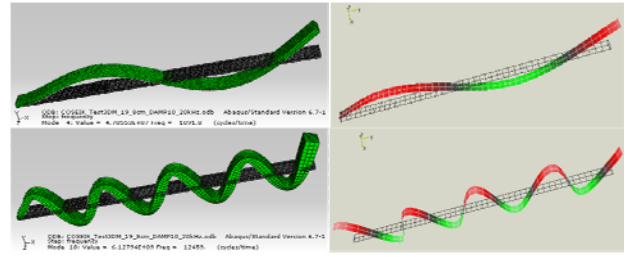
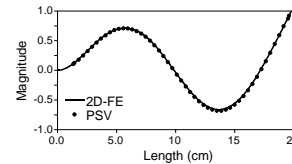
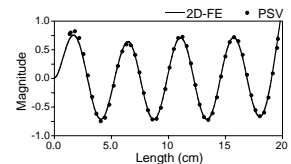


Fig. 4 Perspective view of mode shapes from 3-D FEM (left side) and PSV (right side).

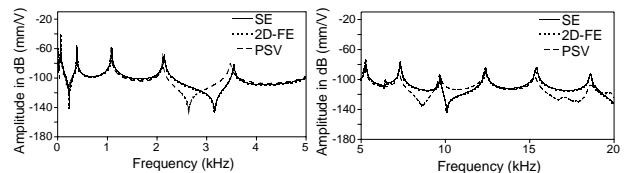


(a) the 3rd mode



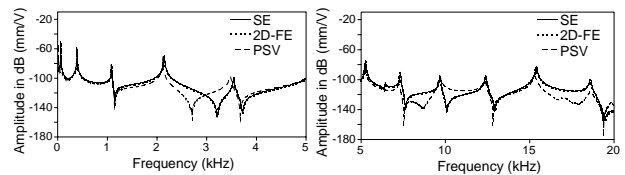
(a) the 9th mode

Fig. 5 Quantitative comparison of mode shapes from 2D-FE and PSV



(a) 0-5kHz (free end)

(b) 5-20kHz (free end)



(c) 0-5kHz (middle point)

(d) 5-20kHz (middle point)

Fig. 6 Comparison of frequency response functions from SE, 2-D FE and PSV at the free end and the middle point of a cantilever beam with a surface-bonded PZT wafer.

후 기

이 논문은 정부재원(과학기술부 방사선 기술개발 사업비)으로 한국과학재단의 지원을 받아 연구되었습니다. (M20703000015-07N0300-01510). 실험을 위해 PSV-400을 사용할 수 있게 해주신 국방과학연구소의 박찬익 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Park, G., Inman, D.J., 2007, "Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 365, 373-392.
- (2) 임기룡, 김은진, 강주성, 박현우, 2008, "표면부착형 PZT 소자에 의해 유발된 판 구조물의 램파 전달 해석을 위한 스펙트럼 요소 정식화", *한국소음진동공학회논문집*, 제 18권 제 11호, pp.1157-1169.
- (3) Piezo Systems, Inc. (<http://www.piezo.com/>)