

판에 병치된 박막압전소자의 전기역학적 신호를 이용한 무기저 기법의 이해

Understanding a Reference-Free Impedance Method Using Collocated Piezoelectric Wafers.

김은진* · 손훈** · 박현우†

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

1. 서론

센서 및 IT 기술의 발달로 금속판이나 합성판에 발생한 미세손상을 감지하기 위해 구조물과 능동소자간의 전기역학적 상호작용을 이용한 구조물 건전성 감시(structural health monitoring)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다⁽¹⁾. Lead zirconate titanate 로 만들어진 박막 형태의 압전소자 (Piezoelectric transducer; 이하 PZT)는 미세 손상에 민감한 고주파 동적 신호를 발생시키거나 응답을 측정하기 위해 대상구조물에 특별한 손상없이 표면에 쉽게 부착함으로써 건전성 감시를 위한 도구로 각광을 받고 있다⁽¹⁾. 이러한 PZT에 의해 측정되는 전기역학적 신호(Electro Mechanical Signature; 이하 EMS)는 판과 같은 구조물의 손상감지에 큰 잠재력을 가지고 있다. 기존의 임피던스와 같은 EMS를 이용한 손상 판별 기법에서, 손상 전 구조물의 임피던스(기저신호: Baseline impedance signal)를 현재상태 구조물의 임피던스와 비교함을 통해서 손상이 판별되었다⁽¹⁾. 그러나, 실제 구조물에서 측정된 EMS 비교는 환경 변화나 측정조건의 변화에 상당한 영향을 받으며, 손상이 없는 구조물을 손상구조물로 진단하는 신호적인 오류가 종종 발생한다⁽²⁾. 이러한 결점을 보완하기 위해 기저 정보에 의존하지 않는 무기저(Reference-free)에 대한 연구가 수행되어지고 있다⁽³⁾. 최근 무기저를 위한 연구로 손상위치를 통과할 때 발생하는 모드 변환된 램파(Lamb wave)를 PZT의 극성을 이용하여 순간적으로 추출하는 방법이 있다⁽³⁾. 하지만, EMS를 사용한 무기저 접근은 연구 실적이 거의 전무하다. 본 연구에서는 기저 EMS 신호와의 직접적인 비교가 필요없고, 램파의 전파와 구조물의 모드조화운동 이론에 기초한 새로운 개념의 무기저 진단기법으로 판과같은 구조물에 손상감지를 수행하였다. 먼저, 스펙트럼 요소법(Spectral Element Method; 이하 SEM)을 이용하여 주파수 영역에서 한 쌍의 병치된 PZT와 구조물의 상호작용에 의한 EMS를 파악하기 위해 정상상태 동적해석(steady-state dynamic analysis)을 수행하였다⁽⁴⁾. 그리고, 손상에 의해

발생된 모드변환 EMS를 병치된 PZT의 극성에 기인한 신호분해 기법을 적용하여 추출하고, 분해된 모드변환 EMS가 손상의 위치와 크기에 따라 받는 영향을 추가로 분석하였다.

2. 이론적 배경

기존 연구들에서 판의 표면을 따라 전파하는 S_0 와 A_0 로 모드를 가지는 램파가 균열과 같은 불연속 지점을 만나면 램파의 일부는 모드변환(Mode Conversion)이 발생한다. 그림 1은 이러한 과정을 의미하는 간략화 모델과 램파 모드신호(Lamb wave Mode Signal; 이하 LMS)의 상대적인 도착 시간과 위상을 펄스-에코(Pulse-echo)원리로 간략하게 나타낸 것이다⁽⁵⁾. LMS_{AA} 와 LMS_{BB} 는 동일 PZT에서 가진과 탐지를 수행하여 얻은 결과이며, $LMS_{AB/BA}$ 는 PZT A(B)에서 가진, PZT B(A)에서 탐지한 결과이다. 가진과 탐지 PZT의 극성에 따른 각각의 위상정보에서 LMS_{AB} 와 LMS_{BA} 는 상반성이 성립하여 항상 동일하다.

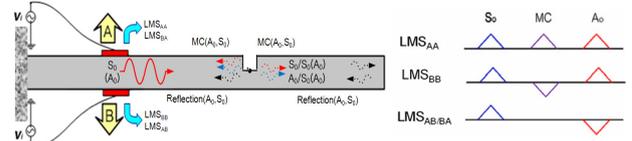


Fig. 1 Comparison of relative phase information among LMS_{AA} , LMS_{BB} and $LMS_{AB/BA}$.

이들 측정 신호(LMS_{AA} , LMS_{BB} , LMS_{AB})를 식(1)과 같은 대수 방정식으로 표현할 수 있으며, 역행렬을 통한 간단한 계산으로 램파의 S_0 와 A_0 모드와 관련된 LMS_{S_0} , LMS_{A_0} 외에 손상을 의미하는 변환모드 LMS_{MC} 를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} LMS_{S_0} \\ LMS_{MC} \\ LMS_{A_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} LMS_{AA} \\ LMS_{BB} \\ LMS_{AB} \end{bmatrix} \quad (1)$$

그림 2는 PZT에서 발생한 램파가 캔틸레버 보의 정상상태 동적 응답을 어떻게 구성하지 간략히 나타낸 것이다. 그림 2(a)와 (b)는 한 쌍의 PZT가 병치된 캔틸레버보와 15차 고유모드 형상을 나타낸 것이다. 그림 2(b)의 15차 고유주파수($f=26.124\text{kHz}$)를 조화 입력전압으로 PZT에 가하면, 그림 2(c), (d)와 같은 램파의 전파와 중첩과정이 발생하며, 그림 2(e)는 중첩된 램파가 정상상태를 거쳐 공

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

진상상태에 이른 결과로 그림 2(b)와 동일함을 알 수 있다. 결국, 주파수 영역에서 구한 EMS는 시간영역의 램파가 공진상태에 이르렀을 때 나타나는 신호임을 알 수 있다.

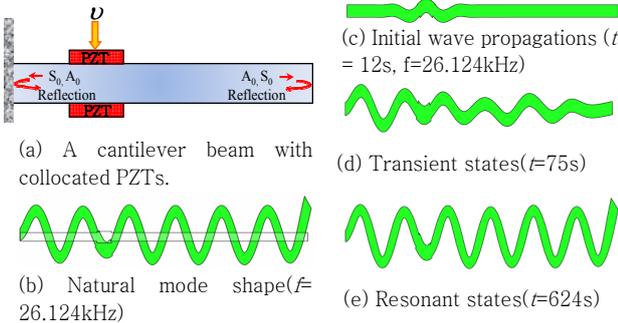


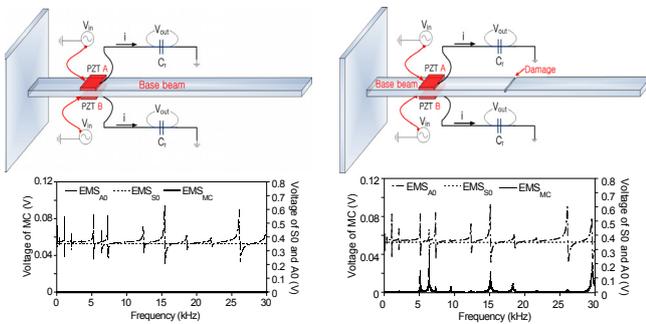
Fig. 2. The propagating Lamb waves to be resonant standing wave on a cantilever beam with collocated PZTs

이러한 시간영역과 주파수 영역 신호들의 상관관계를 통해 LMS로 유도된 식(1)과 유사한 EMS를 사용한 식(2)를 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} EMS_{S_0} \\ EMS_{MC} \\ EMS_{A_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} EMS_{AA} \\ EMS_{BB} \\ EMS_{AB} \end{bmatrix} \quad (2)$$

3. 수치 및 실험 예제

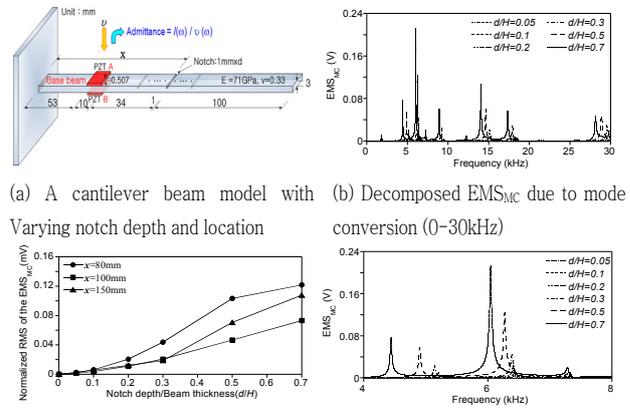
수치해석에 사용된 기저보(200mm × 10m m × 3mm)는 알루미늄(E=70GPa, ν=0.33)을 사용하였고, 보의 구조 감쇠비를 0.5%로 적용하였다. 그리고, PZT (10mm×10mm×0.507mm)는 Piezo사의 PSI-5A4E⁽⁶⁾ 재질을 사용하였다. 그림 3의 손상 전·후의 2 차원(이하 2D) 수치 해석 모델에 SE 해석을 이용하면 각각 3 개의 EM 신호(EMS_{AA}, EMS_{BB}, EMS_{AB/BA})를 구할 수 있다. 이들 신호를 식(2)에 대입하면 그림 3과 같이 분해된 EM 신호(EMS_{A0}, EMS_{S0}, EMS_{MC})를 각각 손상 전·후 모델에 대하여 얻을 수 있다. 특히, EMS_{MC}는 손상 전 모델에서는 신호가 발생하지 않지만, 손상된 모델에서는 해석 모델의 고유주파수 위치에서 신호가 발생한다. 따라서 EMS를 이용한 무기저 손상진단이 가능함을 알 수 있다



(a) Decomposed signals in the Intact case. (b) Decomposed signals in the Damage case.

Fig.3 Signal decomposition of the EMS obtained from collocated PZTs on an intact and a damaged cantilever beam.

그림 4는 EMS를 활용한 무기저 손상 진단의 손상의 정도와 위치의 변화에 따른 추가적인 해석을 수행한 결과이다. 그림 4(b)에서 손상의 위치(x)는 100mm로 고정하고 손상의 깊이(d)를 0에서 70%까지 변화시켜 0-30kHz까지의 EMS_{MC} 신호를 비교한 결과이다. 그림 4(d)는 그림 4(b)의 결과 중 4-8kHz까지 확대한 결과로 손상이 심해짐에 따라 EMS_{MC} 신호의 크기가 커지나 손상이 심할수록 강성이 감소하므로 공진 주파수는 작아짐을 알 수 있다. 그림 4(c)는 손상의 위치를 각각 80, 100, 150mm로 변화시키고, 각 위치마다 0에서 70%까지 손상을 고려한 EMS_{MC} 신호의 RMS 값을 구하였다. 여기서, RMS 값에 사용된 EMS_{MC} 신호의 주파수 대역은 0-30kHz까지를 사용하였다. RMS 값을 통해서도 손상이 심해짐에 따라 RMS 값이 커짐을 알 수 있다. 현재 구조물의 모드형상과 손상의 위치나 PZT의 위치와의 상관관계를 연구하는 중에 있다.



(a) A cantilever beam model with Varying notch depth and location (b) Decomposed EMS_{MC} due to mode conversion (0-30kHz) (c) The RMS values of the decomposed EMS_{MC} (d/d) (d) Decomposed EMS_{MC} due to mode conversion (4-8kHz)

Fig. 4 Decomposed EMS_{MC} and their RMS values due to mode conversion induced by a notch with varying depths and locations.

후 기

이 논문은 정부재원(과학기술부 방사선 기술개발 사업비)으로 한국과학재단의 지원을 받아 연구되었습니다. (M2070300015-07N0300-01510).

참 고 문 헌

- (1) Park G, Sohn H, Farrar CR, Inman DJ., "Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward.", The Shock and Vibration Digest 35, 451-463 (2003).
- (2) Sohn, H., "Effects of Environmental and Operational Variability on Structural Health Monitoring," Philosophical Transactions of the Royal Society A 365(1851), 539-560 (2007).
- (3) Kim, S. B. and Sohn, H., "Instantaneous Reference-free Crack Detection Based on Polarization Characteristics of Piezoelectric Materials," Smart Materials and Structures 16(6), 2375-2387 (2007).
- (4) Park, H.W., Lim, K. L., Kim, E. J. and Sohn, H., "Spectral element formulation for dynamic analysis of a coupled piezoelectric wafer and beam system," Journal Computers & Structures, in press (2010).
- (5) Rose, J. L., [Ultrasonic waves in solid media], Cambridge University Press, (1999).
- (6) Piezo Systems, Inc. (<http://www.piezo.com/>)