

# 판의 무기저 손상 진단을 위한 병치형 압전웨이퍼의 전기역학적 신호 분해

## Decomposing the Electro-Mechanical Signatures of Collocated Piezoelectric Wafers for the Baseline-Free Damage Diagnosis of a Plate.

김 은 진\*\* · 손 훈\*\*\* · 박 현 우\*  
Kim, Eun-Jin · Sohn, Hoon · Park, Hyun-Woo

### 요 약

판과 같은 구조물의 손상 감지를 위해, 손상 전 구조물의 임피던스 신호를 기저신호(Baseline impedance signal)로 이용하여 직접적으로 비교하지 않는 새로운 개념의 무기저 손상진단 기법(Reference-free impedance method)을 제시한다. 박막 압전소자(이하 PZT)를 판의 상하 표면에 부착시킨 한 쌍의 병치 PZT를 이용하여 손상으로 인해 모드변환을 일으키는 전기역학적 신호(Electro Mechanical Signatures ; 이하 EMS)를 추출한다. 이 연구에서는 스펙트럼 요소법(Spectral Element Method ; 이하 SEM)을 이용하여 주파수 영역에서 병치된 PZT의 EMS를 파악하기 위한 수치해석을 수행한다. 특히, 손상에 의해 발생된 모드변환 EMS<sub>MC</sub>를 병치된 PZT의 극성에 기인한 신호분해 기법을 적용하여 추출하고, 분해된 모드변환 EMS<sub>MC</sub>가 손상의 위치와 크기에 따라 받는 영향을 추가로 분석한다.

**keywords** : 무기저 손상진단 기법, 전기역학적 신호(EMS), 스펙트럼 요소법(SEM), 압전소자(PZT)

### 1. 서 론

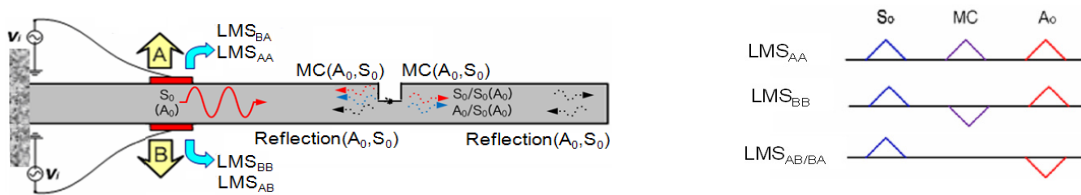
센서 및 IT기술의 발달로 금속판이나 합성판에 발생한 미세손상을 감지하기 위해 구조물과 능동소자간의 전기역학적 상호작용을 이용한 구조물 건전성 감시(structural health monitoring)에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다<sup>(1)</sup>. Lead zirconate titanate로 만들어진 박막 형태의 압전소자(Piezoelectric transducers ; 이하 PZT)는 미세 손상에 민감한 고주파 동적 신호를 발생시키거나 응답을 측정하기위해 대상구조물에 특별한 손상없이 표면에 쉽게 부착할 수 있으며, 가벼운 자중으로 인해 건전성 감시를 위한 도구로 각광을 받고 있다<sup>(1)</sup>. 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 신호(기저신호: Baseline impedance signal)를 현재상태 구조물의 임피던스와 비교함을 통해서 손상이 판별되었다<sup>(1)</sup>. 그러나, 실제 구조물에서 측정된 EMS 비교는 환경 변화나 측정조건의 변화에 상당한 영향을 받으며, 손상이 없는 구조물을 손상구조물로 진단하는 신호적인 오류가 종종 발생한다<sup>(2)</sup>. 이러한 결점을 보완하기 위해 기저 정보에 의존하지 않는 무기저(Referenc-free)에 대한 연구가 수행되고 있다<sup>(3)</sup>. 최근 무기저를 위한 연구로 손상위치를 통과할 때 발생하는 모드 변환된 램파(Lamb wave)를 PZT의

\* 정회원, 동아대학교 토목공학과 조교수  
\*\* 동아대학교 토목공학부 박사과정  
\*\*\* 한국과학기술원 토목환경공학과 부교수

극성을 이용하여 순간적으로 추출하는 방법이 있다<sup>(3)</sup>. 하지만, EMS를 사용한 무기저 접근은 연구 실적이 거의 전무하다. 본 연구에서는 기저 EMS신호와 직접적인 비교가 필요 없고, 램파의 전파와 구조물의 모드조화 운동 이론에 기초한 새로운 개념의 무기저 진단기법으로 관과같은 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<sup>(4)</sup>. 그리고, 손상에 의해 발생된 모드변환 EMS<sub>MC</sub>를 병치된 PZT의 극성에 기인한 신호분해 기법을 적용하여 추출하고, 분해된 모드변환 EMS<sub>MC</sub>가 손상의 위치와 크기에 따라 받는 영향을 추가로 분석하였다.

## 2. 이론적 배경

기존 연구들에서 판의 표면을 따라 전파하는 S<sub>0</sub>와 A<sub>0</sub>로 모드를 가지는 램파가 균열과 같은 불연속 지점을 만나면 램파의 일부는 모드변환(Mode Conversion)이 발생한다. 그림 1(a)는 두 개의 PZT A와 B가 선택적인 가진과 탐지의 역할 수행을 의미하는 간략화 모델이고, 그림 1(b)는 그림 1(a)에서 발생한 램파 모드신호(Lamb wave Mode Signal; 이하 LMS)의 상대적인 도착 시간과 위상을 펄스-에코(Pulse-echo)원리로 간략하게 나타낸 것이다<sup>(5)</sup>. LMS<sub>AA</sub>와 LMS<sub>BB</sub>는 동일 PZT에서 가진과 탐지를 수행하여 얻은 결과이며, LMS<sub>AB/BA</sub>는 PZT A(B)에서 가진, PZT B(A)에서 탐지한 결과이다. 가진과 탐지 PZT의 극성에 따른 위상정보에서 LMS<sub>AB</sub>와 LMS<sub>BA</sub>는 상반성이 성립하여 항상 동일하다.



(a) Extraction of LMS with collocated PZT wafers as an actuator and a sensor simultaneously. (b) Relative phase information in the extracted LMS<sub>AA</sub>, LMS<sub>BB</sub>, and LMS<sub>AB/BA</sub> from (a).

Fig. 1. Comparison of relative phase information among LMS<sub>AA</sub>, LMS<sub>BB</sub> and LMS<sub>AB(or BA)</sub>.

이들 측정 신호(LMS<sub>AA</sub>, LMS<sub>BB</sub>, LMS<sub>AB</sub>)를 식(1)과 같은 대수 방정식으로 표현할 수 있으며, 역행렬을 통한 간단한 계산으로 S<sub>0</sub>와 A<sub>0</sub>모드 외에 손상을 의미하는 LMS<sub>MC</sub>모드를 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 고유 주파수(f=26.124kHz)를 조화 입력전압으로 PZT에 가하면, 그림 2(c), (d)와 같은 램파의 전파와 중첩과정이 발생하며, 그림 2(e)는 중첩된 램파가 정상상태를 거쳐 공진상태에 이른 결과로 그림 2(b)와 동일함을 알 수 있다. 결국, 주파수 영역에서 구해지는 EMS는 시간영역의 램

파가 공진상태에 이르렀을 때 나타나는 신호임을 알 수 있다.

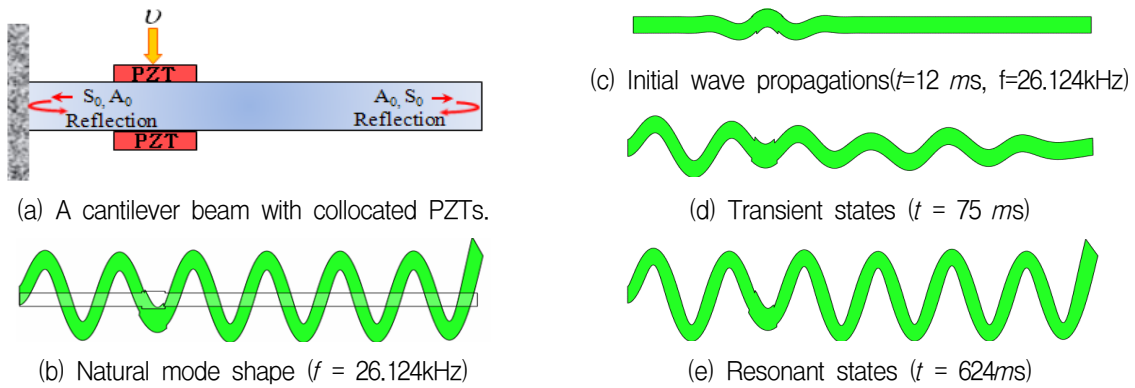


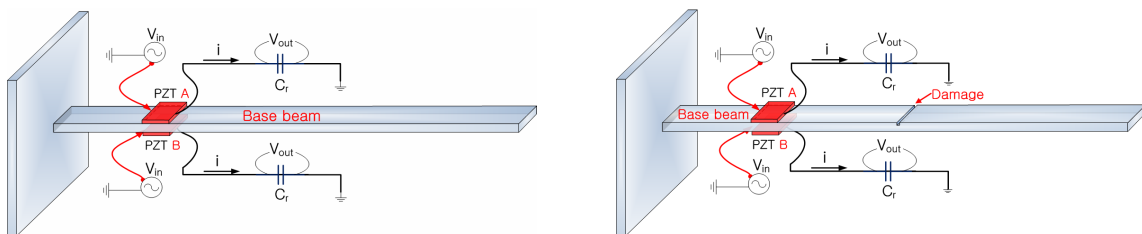
Fig. 2. The propagating Lamb waves to be resonant standing wave on a cantilever beam with collocated PZTs.

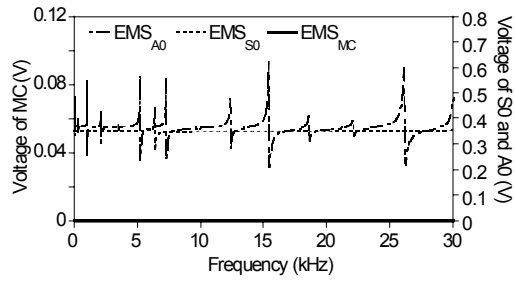
이러한 시간영역과 주파수 영역 신호들의 상관관계를 통해 LMS로 유도된 식(1)과 유사한 EMS를 사용한 식(2)를 유도할 수 있다.

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

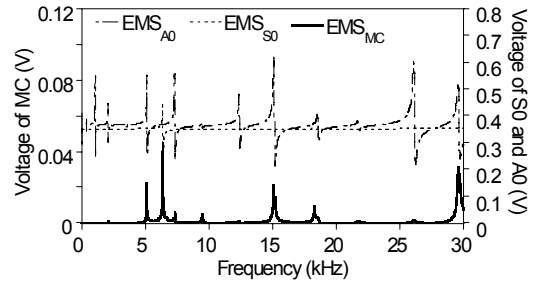
### 3. 수치 해석 및 검증

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





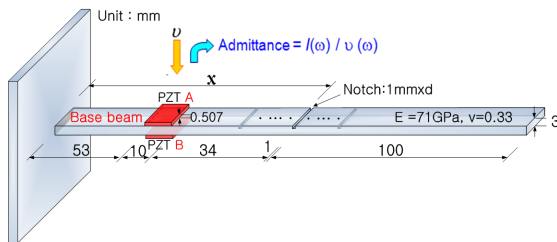
(a) Decomposed signals in the Intact case.



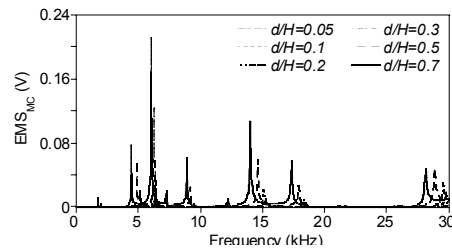
(b) Decomposed signals in the damage case

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

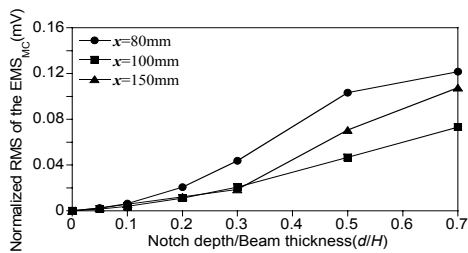
그림 4는 EMS를 활용한 무기저 손상 진단의 손상의 정도와 위치의 변화에 따른 추가적인 해석을 수행한 결과이다. 그림 4(b)에서 손상의 위치( $x$ )는 100mm로 고정하고 손상의 깊이( $d$ )를 0에서 70% 까지 변화시켜 0~30kHz 까지의  $EMS_{MC}$  신호를 비교한 결과이다. 그림 4(d)는 그림 4(b)의 결과중 4~8kHz까지 확대한 결과로 손상이 심해짐에 따라  $EMS_{MC}$  신호의 크기가 커지나 손상이 심할수록 강성이 감소하므로 공진 주파수는 작아짐을 알 수 있다. 그림 4(c)는 손상의 위치를 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. RMS값을 통해서도 손상이 심해짐에 따라 RMS값이 커짐을 알 수 있다. 현재 구조물의 모드형상과 손상의 위치나 PZT의 위치와의 상관관계를 연구하는 중에 있다.



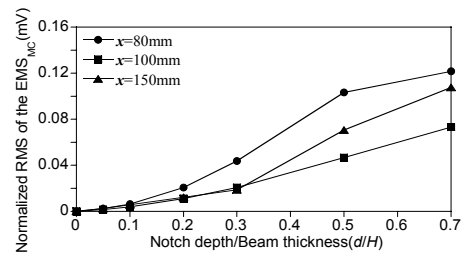
(a) A cantilever beam model on the collocated PZT wafers with varying notch depths and location.



(b) Decomposed  $EMS_{MC}$  due to mode conversion (0-30kHz). The location of a notch( $x$ ) is 100mm



(c) The RMS values of the decomposed  $EMS_{MC}$  due to mode conversion in terms of ( $d/H$ ).



(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.

### 감사의 글

이 논문은 정부재원(과학기술부 방사선 기술개발 사업비)으로 한국과학재단의 지원을 받아 연구되었음.  
(M20703000015-07N0300-01510).

### 참고문헌

- (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).
- (3) 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/>)