한국소음진동공학회 2005년도 춘계학술대회논문집, pp.184~187.

온도 영향을 받는 보 구조물의 EMI 기반 손상 검색

Electro-Mechanical Impedance-Based Damage Detection in Beams with Temperature Effect

이병준*, 김정태**, 류연선***, 나원배***

Byung-Jun Lee, Jeong-Tae Kim, Yeon-Sun Ryu, Won-Bae Na

Key Words : Impedance, Temperature Effect, Damage Detection

ABSTRACT

Physical changes in a structural system may cause changes in mechanical impedance of the system. Due to the electro-mechanical coupling effect in piezoelectric materials, this change can be monitoring by the electrical impedance of the piezoelectric sensor. In this paper, the variability of electro-mechanical impedance caused by temperature effect is assessed to adjust impedance data used for EMI based damage detection in beams. First, experiments on beams are described. Next, experiments were performed under the temperature varying condition, in the range of 3℃ to 23℃. Finally, the relationship between temperatures and impedance signatures is analyzed empirically temperature-frequency patten for the test structure.

1. 서 론

대형 구조물들을 자연재해나 각종 요인으로 인하여 구조 손상이 발생하고 사용 기간이 경과함에 따라 노후화되어 안전성이 위협을 받게 된다. 이는 구조물에 미세한 균열을 야기하고 이런 초기의 미세한 균열은 성장하여 대형 구조물의 붕괴를 가져오고 인명 피해와 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다. 이에 따라 대형 구조물의 안전성을 확보하고, 대형 구조물에 예상되는 손상을 조기에 발견하는 것이 중요하다. 따라서 구조물의 상태를 정확하게 진단하고 구조상태를 안전하게 유지하기 위해 구조 건전성 모니터링은 필수적으로 확보되어야 한다. [1]

구조물 손상 초기의 미세한 균열은 질량과 강성의 변화에 매우 작은 변화를 일으키며 고주파수영역의 진동특성에서 그 영향이 더 민감하게 나타나므로 일반적인 진동기반 구조 건전성 모니터링에서는 감지하기가 어렵다. 최근 스마트 재료의 출현으로 구조 건전성 모니터링에 새로운 차원의 기법들이 부가되어지기 시작했다. 특히 EMI(electro mechanical impedance) 기법은 EMI 신호로부터 구조를 진단하고 고주파수 영역, 초기손상 식별에 매우 뛰어난 기법이다. [2-4]

그러나 PZT 자체가 온도에 매우 민감하고 온도 변화는 재료특성의 변화와 경계조건의 변화 및 구조물의 열 변형 거동을 야기 시키며 그 결과로 EMI신호의 불확실성을 유발시킨다. 또한 구조물 손상 전후의 서로 다른 온도조건에서 계측된 EMI 신호를 사용하여 구조물의 손상을 예측하고자 하는 경우 이 같은 계측 온도 불확실성 요인은 구조물 손상 예측의 오류로 나타난다.[1]

본 논문에서는 보 모형을 대상으로 실험적으로 계측온도의 변화에 따른 EMI 신호의 변화를 분석하였다. 연구의 주된 관점은 보 모형을 대상으로 EMI 신호와 계측온도와의 관계를 규명하여 보는 것이다.

연구과정은 다음의 단계로 구성 되었다. 첫째 실험 대상인 보 모형의 볼트 풀림에 따른 실험 결과를 요약하였다. 둘째 비 손상 상태에서의 실험 계측 온도에 따른 임피던스의 변화를 분석하였다. 마지막으로 온도변화와 손상 시나리오를 동시에 준 상태에서의 실험 결과를 요약 하였다. 그리고 EMI 신호와 계측온도와의 관계를 분석 하였다.

2.EMI(Electro Mechanical Impedance)기법

EMI(electro mechanical impedance)기법은 PZT센서를 이용한 구조건전성 모니터링이다. PZT센서는 압전현상을 일으키는 piezoceramics로 만들어 졌다. 이는 역 압전효과와 압전효과가 동시에 작용하여 센서와 가진의 역할을 동시에 수반한다. EMI기법은 이 두 효과를 이용한 기법으로 EMI 신호로부터 구조손상이나 구조물의 다른 물리적 변화를 알아

* 부경대학교 대학원 해양공학과
** 부경대학교 해양공학과 부교수
*** 부경대학교 해양공학과 교수
**** 부경대학교 해양공학과 조교수

내는 것이다. 이런 PZT patch의 거동 관한 압전 기본식은 다음과 같다. [2]

$$S_{11} = s_{11}^{E} T_{11} + d_{31} E_3 \quad (1)$$

$$D_3 = d_{31} T_{11} + \varepsilon_{33}^{T} E_3 \quad (2)$$

여기서 T_{11}은 1-1방향의 응력이고 S_{11}은 1-1방향의 변형률, D_3은 3-3방향의 전기적 처짐 s_{11}^{E}은 PZT의 일정 전기장하 1-1방향의 기계적 컴플라이언스, d_{31}은 PZT의 piezoelectric constant, ε_{33}^{T}는 PZT의 일정 응력 하의 3-3방향 유전율이다.

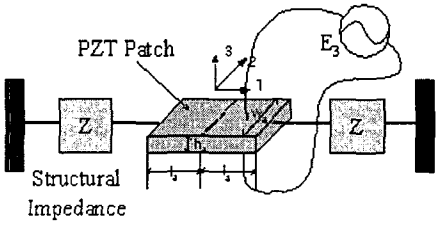


Fig. 1 구조물-PZT patch의 상호작용 모델(Bhalla and Soh, 2003)

다음으로 PZT patch를 부착한 구조를 단자유도계로 등가화 하는 경우, 구조물의 역학적 임피던스($Z = F/\dot{x}$)는 다음과 같다.

$$Z = c + (\frac{m\omega^2 - k}{\omega})i = |Z|e^{i\theta} \quad (3)$$

여기서 F_0는 가진력, $\dot{x}_0$는 속도이며, m, c, k는 각각 구조물의 질량 감쇠 강성을 의미한다.

또 폭 w_a ,높이 h_a 그리고 길이가 $2l_a$인 직육면체 형태의 PZT 패치에 대한 임피던스는(Z_a)는 다음과 같이 구할 수 있다(Bhalla and Soh 2003).

$$Z_a = \frac{\kappa w_a h_a \overline{Y_{11}^{E}}}{(i\omega)\tan(\kappa l_a)} \quad (4)$$

여기서, $\kappa = \omega/c$는 파수(wave number)이며 이 때 c는 파속이다. $\overline{Y_{11}^{E}}$는 일정한 전기장 하에서의 1-1방향으로의 PZT 탄성계수이다. 그리고 구조물-센서 시스템의 EMI는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\overline{Y} = 2\omega i \frac{w_a l_a}{h_a}[(\overline{\varepsilon_{33}^{T}} - d_{31}^2 \overline{Y_{11}^{E}}) + (\frac{Z_a}{Z+Z_a}) d_{31}^2 \overline{Y_{11}^{E}} (\frac{\tan \kappa l_a}{\kappa l_a})] \quad (5)$$

위 식으로부터 구조물의 질량, 감쇠 및 강성과 연관하여 EMI 신호가 생성되며 동특성을 이용하여 특징을 분석할 수 있다. 따라서 손상에 따른 구조계의 변화로부터 손상 전후의 임피던스의 크기와 공진 주파수가 바뀌게 됨을 알 수 있고 이로부터 구조규명이 가능하다. 이런 구조계의 변화는 구조물과 PZT 센서의 상호작용에 관한 어드미턴스로 다음의 식으로 표현 된다.

$$\overline{Y_A} = G_A + B_A i = \omega i \frac{w_a l_a}{h_a} \frac{Z_a}{Z+Z_a} d_{31}^2 \overline{Y_{11}^{E}} (\frac{\tan \kappa l}{\kappa l}) \quad (6)$$

식 6)으로부터 컨덕턴스, 서셉턴스의 신호를 추출하여 질량과 강성, 감쇠의 변화를 알아보고자 한다.[2]

3.보 구조물 실험

실험연구에 사용된 단순보의 치수와 형상, 경계조건 그리고 단면형상이 Fig. 2에 도시 되었고 PZT patch의 치수는 1×1×0.02(cm)이고 PZT 재료의 특성은 Table 1과 같다. 손상 시나리오는 Table 2에 요약하였으며 각 손상시나리오별로 실험을 수행하였다. 실험 온도는 3℃부터 23℃까지 변동하였고 온도외의 환경적인 인자는 고려되지 않았다. 임피던스 분석기는 HIOKI 3532를 사용 하였으며 Fig. 3(b)와 같다. 신호의 샘플링 주파수는 1kHz이고, 전압의 크기는 1V로 하여 신호를 추출하였다.

먼저 실험 온도 10℃, 23℃에서 볼트풀림에 따른 EMI 신호를 획득하였고 실험 온도 3℃부터 23℃까지 4단계에서 공진 주파수의 변화를 구하였다.

Fig. 4는 실험 온도 10℃에서의 볼트풀림에 따른 EMI 신호를 도시하였고 Fig. 5는 실험 온도 23℃에서의 볼트풀림에 따른 EMI 신호를 도시하였다. Fig. 6은 각 온도 단계에서 계측된 임피던스, 어드미턴스, 서셉턴스, 컨덕턴스를 도시 한 것이다.

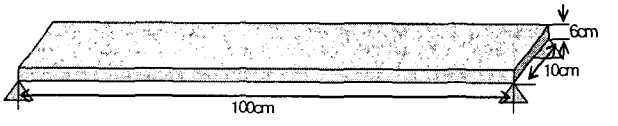
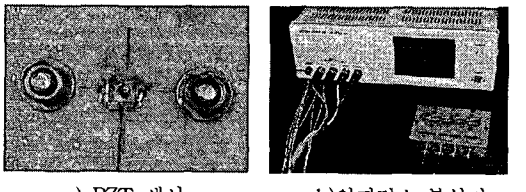


Fig. 2 실험 모델



a) PZT 센서 b)임피던스 분석기

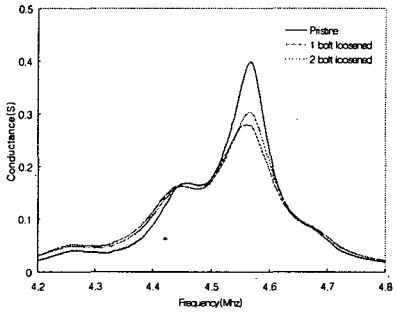
Fig. 3 실험 구성

Table 1. PZT 재료의 특성

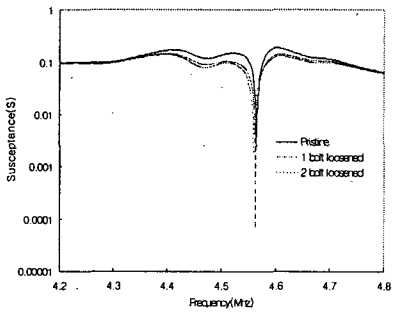
Density(kg/m^3)	7800
Electric permittivity(farad/m)	2.124×10^{-8}
Piezoelectric strain coefficient(m/v)	-2.1×10^{-10}
Young's modulus(N/m^2)	4.667×10^{10}
Dielectric loss factor	0.015

Table 2. 손상 시나리오

Damage Case	Bolt loosened	Temp.(℃)
Damage case 1	1	10℃, 23℃
Damage case 2	2	10℃, 23℃
Damage case 3	0	3℃, 10℃, 13℃, 23℃

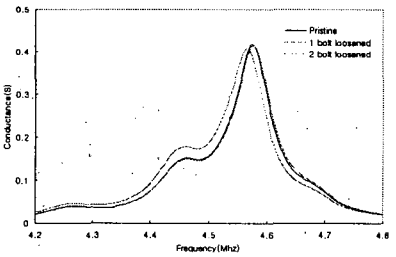


a) conductance

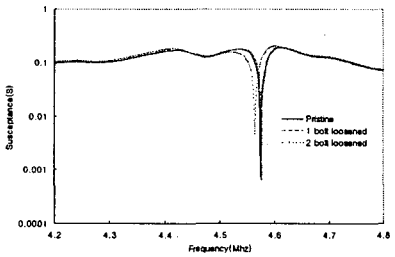


b)susceptance

Fig. 4 손상 시 온도 10℃의 EMI Signature

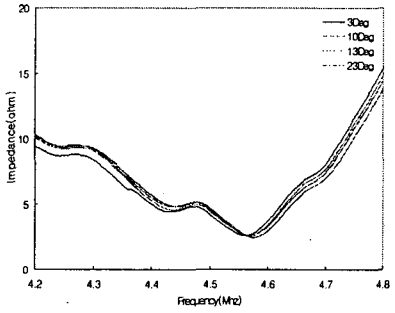


a) conductance

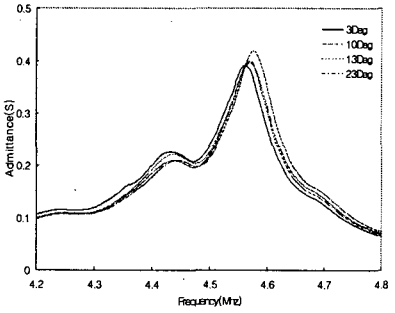


b)susceptance

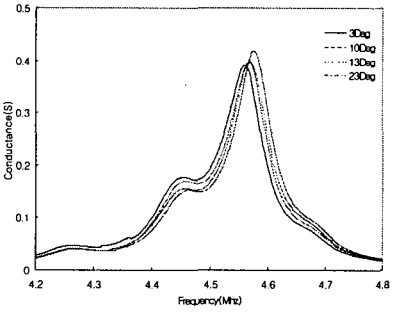
Fig. 5 손상 시 온도 23℃의 EMI Signature



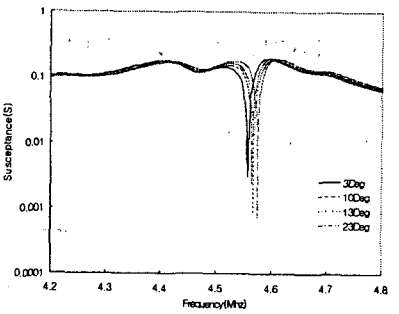
a)impedance



b)admittance



c) conductance



d)susceptance

Fig. 6 비손상시 온도 3℃~23℃의 EMI Signature

4.실험결과

본 논문에서는 실험적 오차가 상대적으로 적은 공진 주파수의 변화를 사용하였다. EMI 신호의 패턴은 구조손상이나 구조물의 다른 물리적 변화로 바뀐다. 계측 온도 10℃에서의 볼트풀림을 실험한 결과 볼트 풀림의 수가 증가할수록 공진 주파수가 감소하였다. 그러나 23℃에서는 공진 주파수의 변화가 다소 불규칙적으로 나타났다.

그리고 비손상시 온도 실험의 경우 온도가 증가함에 따라 공진 주파수가 증가하였다. 그 중에서도 유전율(ε_{33}^{T})는 온도에 매우 민감하게 반응한다. 그리고 d_{31}, $\overline{Y_{11}^{E}}$ 도 역시 온도에 지배적인 인자들이다. [4]

따라서 EMI 기법에서 온도 영향을 보정하는 해석적인 모델을 제시하는 것이 큰 과제이다. Table 3은 실험결과를 정리한 것이다. 이 결과로부터 통계적인 패턴인식 모델을 사용하여 Fig. 7과 같이 도시하였으며 이를 이론식을 쓰면 다음과 같다.

$$Freq(MHz) = 0.0009T + 4.5554 \qquad (7)$$

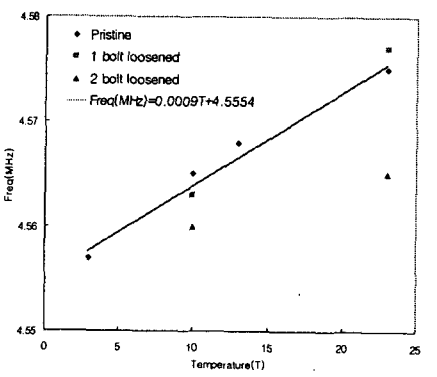


Fig. 7 온도 변화에 따른 EMI 신호의 통계적인 패턴인식 모델

Table 3. EMI 신호에 의한 공진 주파수

Temp (℃)	Resonant Frequency(MHz)		
	Prinstine	1 Bolt Loosened	2 Bolt Loosened
3	4.557	N/A	N/A
10	4.565	4.563	4.560
13	4.568	N/A	N/A
23	4.575	4.577	4.565

5.결 론

본 논문에서는 보 모형을 대상으로 실험적으로 계측온도의 변화에 따른 EMI 신호의 공진 주파수의 변화를 분석하였으며 그 결과를 대상구조물의 EMI 기법에서 온도 영향을 보정하는 해석적인 모델을 제시하였다. 먼저 보 모형을 대상으로 손상시나리오에 따른 EMI 신호를 추출하였다. 다음으로 계측온도의 변화에 따른 EMI 신호의 추출하여 질량과 강성, 감쇠의 변화를 구하였다. 마지막으로 온도-공진주파수의 관계식을 결정하였다.

후 기

이 논문은 2005년도 스마트 사회기반기술 연구센터의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1) 김정태, 류연선, 조현만, 윤재웅, 백종훈, 2002, "강판형교의 진동모드특성에 미치는 온도변화의 영향", 한국전산구조공학회, 2002년 추계학술발표회, 제15권, 제2집, pp.489-496

2) Bhalla s. and Soh, C.K., 2003, "Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers", Earthquake Engng Struct. Dyn. Vol. 32, pp. 1897-1916

3) Park, S.H., Roh, Y., Yi, J.H., Yun, C.B., Kwak, H.K., and Lee, S.H. 2004, "Impedance-based Damage Detection for Civil Infrastructure", Smart Structures and Materials 2004, Proc of SPIE, Vol. 5391, pp. 705-716

4) Park, G., Kabeya, K., Cudney, H.H., and Inman, D.J., 1998, "Removing Effects of Temperature Changes form Piezoelectric Impedance-Based Qualitative Health Monitoring", Smart Structures and Materials 1998, P개. of SPIE, San Diego, CA, March 1998.

5) 소수의 고유진동수를 사용하는 비파괴 균열발견모델의 유도 및 검증", 김정태, 한국전산구조공학회, Vol. 12, No. 2, 1999, pp. 140-159