주성분 분석을 이용한 임피던스 기반 구조물 건전성 모니터링의 온도보상기법

Temperature Compensation Using Principal Component Analysis for Impedance-based Structural Health Monitoring

심 효 진* • 민 지 영** • 윤 정 방***
Shim, Hyo-Jin • Min, Jiyoung • Yun, Chung-Bang

요 약

전기역학적 임피던스(electromechanical impedance)를 이용한 구조물 건전성 모니터링(structural health monitoring; SHM) 기술은 구조물의 주요 부재에 압전센서를 부착하여 이로부터 획득한 임피던스 신호의 변화를 관찰함으로써 구조물의 국부적 상태를 실시간으로 진단하는 것이다. 임피던스는 손상뿐만 아니라 외부 온도에도 민감하게 반응하기 때문에 구조물 진단 결과에 상당한 오차를 유발할 수 있으므로 이에 대한 보상을 수행해야 한다. 따라서 본 논문에서는 온도변화가 임피던스 기반 진단 결과에 미치는 영향을 PZT 센서를 사용하여 실험적으로 연구하였다. 리액턴스(reactance)의 주성분 분석(Principal Component Analysis; PCA)을 통해 도출된 첫 번째 주성분과 저항(resistance)으로부터 계산된 손상지수 사이의 관계를 분석함으로써, 온도변화에 의해 구별되지 않았던 손상을 보다 확연하게 구별 할 수 있음을 확인하였다.

keywords : 압전센서, 전기역학적 임피던스, 구조물 건전성 모니터링, 온도보상, 주성분분석

1. 서 론

구조물의 유지관리를 위한 다양한 국부적 구조물 모니터링 기법 중 전기역학적 임피던스 기반 모니터링 기법은 손상에 대한 높은 민감도, 단순(simple)한 시스템 구성, 뛰어난 현장 적용성 등의 장점에 의해 국내외 많은 연구자들에 의해 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 임피던스 신호는 국부적인 부재의 손상뿐만 아니라 외부 온도에도 민감하게 반응하기 때문에 이를 보정하지 않을 경우 false alarm이 발생할 수 있으며 이는 거대한 경제적/사회적인 피해를 초래할 수 있다. 따라서 임피던스 기반의 모니터링에 있어서 온도에 대한 보상은 매우 중요하며, 다양한 온도보상기법이 제안되었다(Park et al., 1999; Bhalla et al., 2003; Koo et al., 2009). 본 논문에서는 온도가 임피던스 신호에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였으며, 리액턴스의 주성분 분석을 통해 온도에 대한 정보를 간접적으로 획득하고 이를 실제 손상진단에 활용함으로써 저항의 변화만을 활용하여 손상진단을 수행하였을 때에 비해 신뢰도 높은 결과를 획득할 수 있는 새로운 기법을 제안하고자 한다.

* 학생회원 • 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 sascha@kaist.ac.kr
** 학생회원 • 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 amote@kaist.ac.kr
*** 정회원 • 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 ycb@kaist.ac.kr

2. 임피던스 기반 구조물 건전성 모니터링

임피던스 기반 SHM 기술은 구조물에 부착된 압전센서로부터 고주파 영역의 전기적 임피던스를 계측하고 이의 변화를 모니터링하여 구조물의 상태를 평가하는 것이다. 구조물의 표면에 압전센서가 부착되어 있을 때 압전센서로부터 획득한 전기적 임피던스(Z)는 구조물의 역학적 임피던스(Z_s)와 압전센서의 역학적 임피던스(Z_a)가 결합된 함수로서 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C}\left(1-\kappa_{31}^2 \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega)+Z_a(\omega)}\right)^{-1} \quad (1)$$

이 식에서 C는 압전센서의 zero-load 커패시턴스(capacitance)이며, κ_{31}은 압전센서의 전기역학적 결합계수이다. 압전센서의 역학적 임피던스와 재료적 특성이 일정할 때 구조물의 역학적 임피던스 Z_s가 변화하면 압전센서로부터 계측된 전기적 임피던스 Z 역시 변화한다. 따라서 구조물에 발생한 손상에 의해 구조물의 국부적 질량, 강성, 감쇠특성이 변화할 경우 Z_s가 달라지므로 압전센서로부터 계측된 임피던스 신호를 비교함으로써 구조물의 상태를 진단할 수 있다. 한편, 손상에 따른 임피던스 신호의 변화를 손상지수로 나타냄으로써 국부적 손상의 판별을 정량화할 수 있다. 일반적으로 식 (2)의 상관관계지수(Cross-Correlation Coefficient; CC)가 손상지수로 주로 사용된다.

$$CC = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} \frac{\{Re(Z_{i,0})-\overline{Z_0}\}\{Re(Z_{i,1})-\overline{Z_1}\}}{\sigma_{Z_0}\sigma_{Z_1}} \quad (2)$$

여기서 Z_0는 건전한 상태에서 계측된 임피던스, Z_1은 이후 계측된 임의의 임피던스, Z_i는 i번째 주파수 성분에 해당하는 임피던스 값, $\overline{Z_0}$과 $\overline{Z_1}$은 Z_0와 Z_1 실수부의 평균치, σ_{Z_0}와 σ_{Z_1}은 Z_0와 Z_1 실수부의 표준편차, n은 주파수 성분의 수이다. 손상지수의 변화를 지속적으로 관찰함으로써 구조물의 이상상태를 효과적으로 모니터링 할 수 있다.

3. 실험 및 결과

3.1. 실험 대상 구조체 및 계측 시스템

6개의 볼트로 연결되어 있는 simple steel beam 구조물에 크기 30x30x0.2 mm^3의 square PZT 센서를 부착한 후, 온도변화와 손상에 따른 임피던스 신호의 변화를 관찰하였다. 일반적으로 사용되는 임피던스 측정기(Agilent 4294A)를 사용하여 10-90 kHz 주파수 대역의 임피던스 신호를 계측하였으며, 구조물에 가한 손상 시나리오는 표 1과 같다. 인위적인 온도 변화를 가하기 위하여 대형 온도조절용 챔버 내부에 대상 구조물을 두었으며, 그림 2와 같이 10-40℃의 온도변화를 각 손상 별 2 회씩 반복하여 가하여 손상과 온도변화를 복합적으로 발생시켰다.

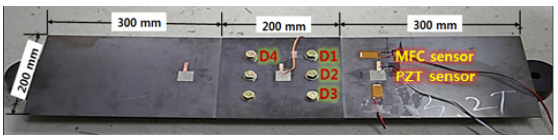


그림 1. 실험 대상 구조체

표 1. 손상 시나리오

	Baseline	Damage 1	Damage 2	Damage 3
Description	No damages	Loose D1	Loose D1 & D2	Loose D1, D2 & D3

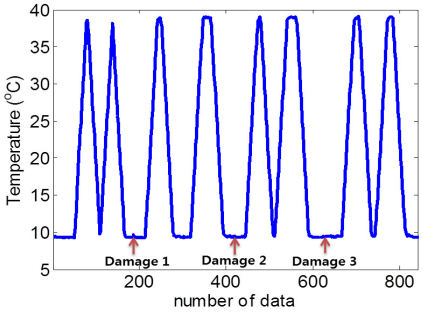
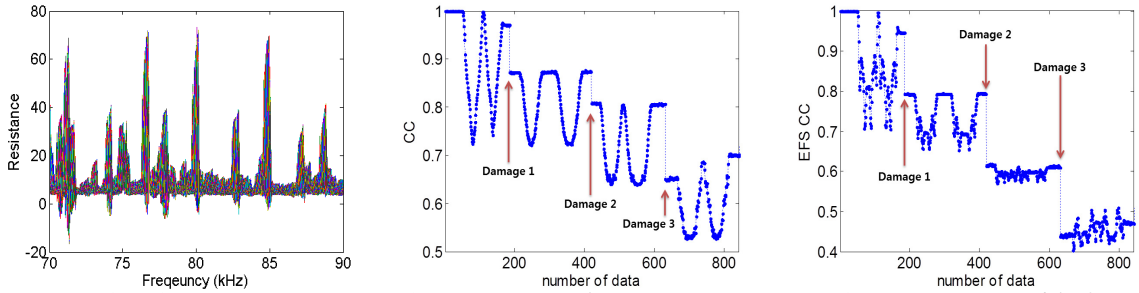


그림 2. 온도변화 시나리오

3.2. 온도변화가 임피던스 기반 진단결과에 미치는 영향

임피던스 신호는 동일한 손상조건에서 온도가 약 10℃ 상승할 때 피크가 나타나는 주파수 성분이 약 0.1 kHz씩 좌측으로 이동하며 피크의 크기 역시 변화한다. 따라서 다양한 온도 및 손상 조건 하에서 획득한 임피던스 신호로부터 식 (2)의 CC 지수를 계산한 결과, 그림 3(b)에서와 같이 온도변화에 의한 손상지수의 변화가 손상에 의한 손상지수의 변화에 비해 상당히 크기 때문에 손상 탐색이 효과적으로 이루어지지 않았다. 한편, Koo *et al.*,(2009)이 제안한 온도보상을 위한 유효주파수이동법을 사용할 경우 온도변화에 의한 손상지수의 변화가 상당량 보상이 되지만 여전히 온도에 의한 영향은 존재하며 손상을 명확히 구분하기는 어려운 것을 알 수 있다.



(a) 저항의 변화 (b) 기존의 CC지수 기반 손상탐색 (c) 기존의 유효주파수이동 CC지수 기반 손상탐색

그림 3. 손상 및 온도변화에 따른 임피던스 기반 손상탐색 결과

3.3. 리액턴스의 주성분 분석을 이용한 온도보상기법

PCA는 고차원 특징 벡터를 저차원 특징 벡터로 축소하는 특징 벡터의 차원축소 뿐만 아니라 데이터 시각화, 데이터의 특징 추출에도 유용하게 사용되는 데이터 처리 기법 중의 하나이다. 측정 데이터가 $\{x\}_j \ j=1,2,...,M$ 일 때(여기서 M은 전체 측정횟수) 주성분 분석은 다음과 같이 수행한다. 먼저 $\{x\}$의 $N\times N$차원의 공분산 행렬 $[C]$를 계산한 후, 공분산 행렬 $[C]$의 특이값 분해(singular value decomposition; SVD)를 한다.

$$[C] = [A][\Lambda][A]^T \tag{3}$$

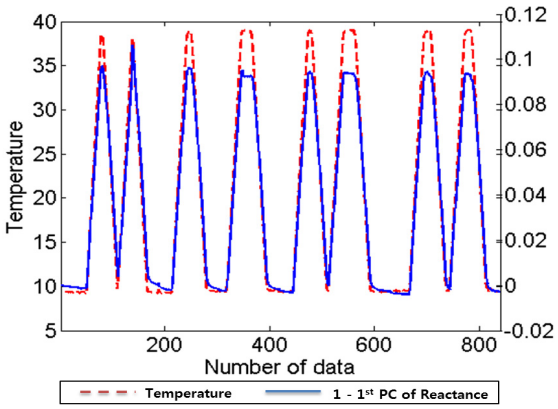
여기서 $[A]$는 $[C]$의 특이행렬(주성분행렬)이고, $[\Lambda]$는 고유치 대각행렬이다. 주성분 $\{z\}$는 다음과 같다.

$$\{z\}_j = [A]^T(\{x\}_j - \{\bar{x}\}) \tag{4}$$

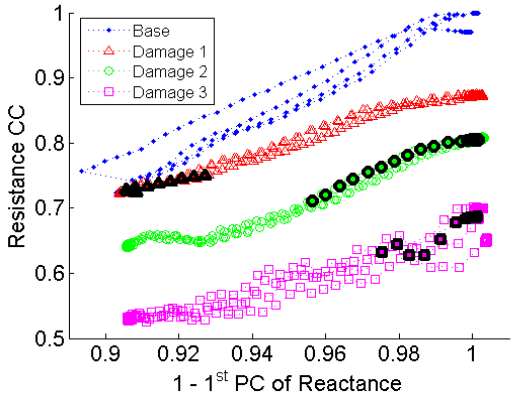
신호의 주성분 행렬인 $[A]$는 각각의 데이터들의 특징을 주요한 순서로(기여도가 큰 순서로) 정렬한 행렬이다.

본 연구에서는 저항(임피던스의 실수부)보다 리액턴스(임피던스의 허수부)가 온도에 더욱 민감하다는 특징을 활용하여, 리액턴스의 주성분 분석을 통해 온도에 대한 정보를 추출하였다. 그림 4(a)에서와 같이 리액턴스의 첫번째 주성분은 온도의 영향을 지배적으로 나타내며, 온도변화에 대한 정보를 간접적으로 제공한다. 저항의 변화로부터 계산된 CC 손상지수와 주성분 분석을 통해 추출된 간접적인 온도 정보(리액턴스의 첫 번째 주성분)를 함께 활용한 결과를 그림 4(b)에 나타내었다. CC 손상지수는 온도가 변화함에 따라 일정한 기울기를 가지고 증가 또는 감소하며 손상이 발생하면 이 일정기울기 데이터의 경향이 바뀌어 손상이 발생했음을 알린다. 즉, 제안된 기법은 온도에 관한 정보를 임피던스 신호를 활용하여 간접적으로 획득하여 사용하기 때문에 손상진단의 신뢰성을 높일 수 있는 것이다. 제안된 기법을 검증한 결과 그림4(b)의 그래프에 도시한 바와 같이(각 손상경우에 대해 굵게 표시된

검정색 마크) 손상지수의 값이 유사함에도 불구하고 다른 손상으로 확연히 구분할 수 있음을 확인하였다.



(a) (1-리액턴스의 첫 번째 주성분)과
온도 데이터의 비교



(b) (1-리액턴스의 첫번째 주성분)과
저항으로부터 계산된 CC 손상지수의 비교

그림 4. 주성분 분석기법을 이용한 온도정보 추출 및 손상 진단

4. 결론

본 연구에서는 볼트로 체결된 Beam 구조물을 대상으로 온도변화 환경 하에서의 임피던스 기반 국부적 모니터링에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 대상 구조물에서 획득한 임피던스 신호는 외부 온도의 변화에 상당히 민감하게 반응하였으며, 기존의 손상지수를 활용하여 구조물 진단을 수행할 시 그 결과에 상당한 오차를 수반함을 보여주었다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 리액턴스의 주성분 분석을 수행하여 온도에 관한 간접적 정보를 추출하였으며, 이를 저항으로부터 계산된 손상지수와 함께 비교하였다. 실험 결과 제안된 리액턴스의 주성분을 이용한 기법이 기존의 기법에 비해 온도변화 환경 하에서 보다 신뢰성 있는 손상진단을 수행할 수 있음을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 U-City 석·박사과정 지원사업 및 지식경제부의 원전기술혁신사업(단기핵심기술)의 재정적인 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

Giurgiutiu, V., (2008) Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors, Academic Press,

Park, G., Kabeya, K., Cudney, H.H., Inman, D.J., (1999) Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications, *JSME Int'l J.*, Series A, 42(2), 249-258.

Koo, K.Y., Park, S., Lee, J-J, Yun, C-B., (2009) Automated Impedance-based Structural Health Monitoring Incorporating Effective Frequency Shift for Compensating Temperature Effects, *J. of Intell. Mat. Sys. and Str.*, 20, 367-377.

Bhalla, S., Naidu, Akshay S. K., Soh, C.K, (2003) Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for NDE, *Proc. SPIE 5062,* CA, USA