온도영향을 고려한 임피던스 기반 결함탐지 실험연구

Experimental Study on Impedance-Based Damage Detection Considering Temperature Effect

이종원*

Lee, Jong-Won*

Abstract

The impedance-based damage detection technique has the potential for health monitoring of different types of structures. However, it is necessary to consider the temperature effect on the impedance signal in applying this technique to actual structures. In this study, an effective impedance-based damage detection method that compensates for the temperature effect was developed. Experimental tests on a steel frame structure connected with high tensile bolts were performed. Moreover, the temperature effect on the impedance damage index was compensated for detecting damage caused by bolt looseness; that is, the relationship between the impedance damage index and the temperature was established through long-term measurements. Based on this relationship, damage detection was performed by compensating for the temperature effect. Because the damage index after the bolt loosening reflects the effects of temperature and damage, it is difficult to evaluate the damage by monitoring only the damage index. However, after compensating for the temperature effect, it was observed that the damage could be estimated precisely. The damage was effectively monitored after measuring the impedance signal and temperature over a specific period for the initial healthy structural state, analyzing the correlation between the impedance damage index and temperature, and setting an appropriate warning criterion based on the correlation.

Key words : Temperature Effect, Damage Detection, Impedance, Structural Health Monitoring

요 지

임피던스 기반 결함탐지기법은 다양한 형태의 구조물에 대한 건전성 모니터링을 위한 유용한 기법이다. 그러나 이 기법을 실구조물에 적용하기 위해서는 임피던스 신호에 대한 온도영향을 고려해야 한다. 본 연구에서는 온도영향의 보정을 통한 효과적인 임피던스 기반 결함탐지기법을 제안한다. 고장력볼트로 집합된 강재 프레임 구조를 대상으로 실험연구를 진행하였는데, 볼트이완으로 인한 결함을 탐지하기 위하여 임피던스 손상지수에 대한 온도영향을 보정하였다. 즉, 장기계측을 통하여 임피던스 손상지수와 온도의 관계를 구하고, 이를 기반으로 온도영향을 보정한 결함탐지를 수행하였다. 결함발생 후 손상지수에는 온도의 영향과 결함의 영향이 포함되기 때문에, 손상지수만을 모니터링 하면 결함발생 유무를 판정하기 어려웠으나, 온도영향을 보정한 후에는 결함발생 유무를 명확히 판정할 수 있었다. 즉, 초기 구조물의 건전상태에서 임피던스 신호와 온도를 일정 기간 계측한 후, 임피던스 손상지수와 온도의 상관관계를 분석하고, 이를 기반으로 적절한 경고기준을 설정하여 결함발생 유무를 효과적으로 모니터링 할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 온도영향, 결함추정, 임피던스, 구조물 건전성 모니터링

1. 서 론

전기역학적 임피던스 기법은 다양한 형태의 구조물에 대한 건전성 모니터링을 위한 유용한 기법으로써, 이에 대한

활발한 연구가 진행되었다. 그러나 압전센서로부터 측정되는 임피던스 신호에 대한 온도변화와 같은 환경요소의 영향으로 인하여, 임피던스 기반 기법을 실구조물의 효과적인 결함탐지에 적용하는 것은 한계가 있다. 따라서 임피던스

*교신저자, 정회원, 남서울대학교 건축공학과 교수(Tel: +82-41-580-2761, Fax: +82-41-580-2929, E-mail: jwlee@nsu.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Architectural Engineering, Namseoul University

기반 결함탐지기법을 효율적으로 실구조물에 적용하기 위해서는, 대표적 환경요소인 온도영향을 고려한 결함탐지기법 연구가 필요하다.

온도영향을 고려한 임피던스 기반 결함탐지기법에 대한 기존 연구는 다음과 같다. Kamas et al. (2015)은 온도변화의 조건에서 구조물 건전성 모니터링에 대한 압전센서의 적용성을 이론적 및 실험적으로 평가하였는데, 온도제어실에서 250 °C까지의 온도상승에 따라 압전센서 공진기를 검증하고 정량화하기 위한 방법을 제안하였다. Zhang et al. (2019)은 임피던스 기법을 이용하여 사장교의 스테이 케이블에 발생하는 결빙을 탐지할 수 있는 기법을 연구하였는데, 결빙으로 인한 강성 및 질량의 변화를 기본특성으로, 온도변화를 방해요인으로 고려하였다. D.S. Rabelo et al. (2017)은 회전기계의 회전축에 발생하는 초기결함을 실시간 탐지하기 위하여 임피던스 기반 구조물 건전성 모니터링 기법을 적용하였는데, 별도의 손상지수를 도입한 하이브리드 최적화 기법을 이용하여 온도보정 방법을 제안하였다. Campos et al. (2019)은 실구조물에 효과적인 임피던스 기반 구조물 건전성 모니터링을 위하여 온도변화에 영향이 없는 새로운 특징추출 접근방법을 제안하였는데, 26 °C~36 °C의 온도변화에 대하여 연구하였으며 전기신호로부터 주요 공진피크의 개수를 추출하는 통계적 알고리즘을 적용하였다. D.de.S. Rabelo et al. (2017)은 온도영향을 고려한 임피던스 기반 구조물 건전성 모니터링 기법을 연구하였는데, 통계적 프로세스 제어 방법을 이용하여 결함탐지의 기준치를 설정하고, 알루미늄 판에 손상을 가한 후 온도변화에 따른 결함탐지에 적용하였다. Antunes et al. (2019)은 파이프라인의 결함을 탐지하기 위하여 임피던스 기법을 이용하였는데, 온도영향을 보정하기 위하여 -40 °C~80 °C 사이 8가지 온도의 경우 실험을 수행하였고 주파수 이동 및 진폭 변화에 대한 보정 알고리즘을 각각 제안하였다. Huynh et al. (2018)은 임피던스 모니터링에 대한 온도영향을 배제하기 위하여 주성분 분석 기반 알고리즘을 제안하였는데, 약 7 °C~22 °C의 온도범위에서의 실험연구를 통하여 프리스트레스트 콘크리트 긴장재 앵커의 긴장력 손실과 온도영향을 구분하였다. Dongyu et al. (2015)은 콘크리트 구조물의 건전성 모니터링을 위하여 매입형 압전센서를 제작하여 설치하였는데, 온도제어실에서 -20 °C~40 °C의 온도범위에서 임피던스 및 컨덕턴스에 대한 온도 및 부하의 영향을 조사하였다. Castro et al. (2019)은 환경영향에 의한 노이즈를 고려한 상호상관관계 신호처리 기반 임피던스 손상지수를 제안하였는데, 주파수영역과 시간영역에서 손상지수를 평가하였으며, 알루미늄 실험체에 대한 실험을 수행하였다. Sepchry et al. (2010)은 임피던스 기법에 이용되는 압전재료에 대한 온도영향을 고려하기 위하여 오일러-베르누이 캔틸레버 보에 접합된 압전재료의 온도 의존 모델을 개발하였으며, 알루미늄 보에 대한 실험을 수행하여 결과를 검증하였다.

기존 연구에서는 다양한 구조물 및 결함형태에 대하여 온도영향을 고려한 임피던스 기반 결함탐지기법이 연구되었다. 본 연구에서는 고장력볼트로 접합된 강재 프레임 구조를 대상으로, 볼트접합부에서의 볼트이완으로 인한 결함을 탐지하기 위하여 임피던스 기법을 이용하였다. 임피던스 신호에 대한 온도변화의 영향을 보정하기 위하여 실험연구를 수행하였는데, 장기계측을 통한 임피던스 손상지수와 온도의 관계를 구하고, 이를 기반으로 선형회귀분석을 통하여 온도영향을 보정한 결함탐지를 수행하였다.

2. 임피던스 손상지수

Liang et al. (1996)은 구조물에 부착된 압전센서를 통하여 측정되는 전기-역학적 어드미턴스와 구조물 및 압전센서의 역학적 임피던스와의 관련성을 규명하였다. 즉, 압전센서가 부착된 근방에서 구조물에 균열, 부식, 볼트이완과 같은 결함이 발생되면 구조특성이 변화하고, 이로 인하여 압전센서로부터 측정되는 어드미턴스 신호가 변화한다. 따라서 결함전후 임피던스 신호를 비교분석하여 구조물의 결함을 추정할 수 있다. 그러나 결함뿐 아니라 온도변화 및 압전센서의 내구성과 같은 다른 요인에 의해서도 임피던스 신호는 변화할 수 있다(Na and Baek, 2018).

한편, 결함전후의 임피던스 신호를 비교분석하기 위해서는 임피던스의 변화량을 정량적으로 나타낼 수 있는 지수를 이용해야 한다. 일반적으로 임피던스 기반 결함추정기법에서는 제곱평균제곱근편차(Root Mean Square Deviation)를 이용한 Eq. (1)의 손상지수와 상호상관계수(Cross-Correlation Coefficient)를 이용한 Eq. (2)의 손상지수를 사용할 수 있다(Park and Inman, 2007).

$$DI1 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{Re(Z_i^d) - Re(Z_i^0)\}^2}{\sum_{i=1}^n Re(Z_i^0)^2}} \quad (1)$$

$$DI2 = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^n \{Re(Z_i^0) - \bar{Z}^0\} \{Re(Z_i^d) - \bar{Z}^d\}}{\sigma_{Z^0} \sigma_{Z^d}} \quad (2)$$

여기서 Z 는 측정된 임피던스, $Re(Z)$ 는 임피던스의 실수부, 아래첨자 i 는 이산화된 i 번째 주파수, 위첨자 0 및 d 는 각각 건전상태와 결함상태를 나타낸다. 또한, $\bar{Z}^0$ 와 σ_{Z^0} 는 각각 Z^0 실수부의 평균과 표준편차이고, $\bar{Z}^d$ 와 σ_{Z^d} 는 각각 Z^d 실수부의 평균과 표준편차이며, N 은 분석에 사용된 주파수 성분의 개수이다. $DI1$ 과 $DI2$ 가 각각 0과 1의 값을 가지면 비교하는 2개의 임피던스 신호가 동일한 것이라고 추정할 수 있다. 만약 2개 임피던스 신호의 차이가 커지면 $DI1$ 은 0으로 부터 증가할 것이고 $DI2$ 는 1로부터 감소할 것이다. 또한, $DI1$ 은

임피던스 신호의 진폭 변화에 민감하며, Df_2 는 주파수 이동과 같은 임피던스 신호 간의 형태 변화에 더 민감한 것으로 알려져 있다(Baptista et al., 2011). 앞에서 언급한 바와 같이, 구조물의 결함 뿐 아니라 온도변화 등에 의해서도 임피던스 신호의 차이가 발생할 수 있다. 즉, Eqs. (1) 및 (2)의 손상지수는 구조물 결함에 의한 임피던스 변화 외에 온도변화 등의 영향이 포함되어 계산될 것이다. 따라서 임피던스 손상지수를 이용하여 구조물의 결함을 판정하기 위해서는 결함에 의한 영향 이외의 요인들을 고려해야 한다고 판단된다.

3. 장기계측 실험방법

온도영향을 고려한 임피던스 기반 결함추정기법 연구를 위하여, Fig. 1과 같이 두께 8 mm 및 5 mm의 강판(SS275)을 이용하여 프레임 실험체를 제작하였다. 보와 기둥의 각 접합

Fig. 1. Shape of Specimen (Lengths in mm)

Fig. 2. Bolted Joint (Lengths in mm)

은 Fig. 2에 보인 바와 같이 2개의 앵글(L-65 × 65 × 8)을 이용하여 고장력볼트(F10T M10) 6개로 각각 체결하였는데, 해당 볼트의 100% 조임력(68 N · m)으로 체결하였다.

본 실험에서는 대표적 압전센서인 Pb-Zr-Ti, Lead Zirconate Titanate (PZT) 센서를 이용하였다. 임피던스 손상지수를 이용하여 고장력볼트의 조임력 이완에 의한 결함을 추정하기 위하여 Fig. 3에 보인 바와 같이 볼트접합부(Fig. 1의 점선 표시 부분)에 10(L) × 10(W) × 0.3(T) 규격의 PZT 센서를 부착하였다. 즉, 접합 앵글 표면에 1개(PZT 1)와 접합 앵글 근방의 강판 표면에 1개(PZT 2)를 부착하였다. 한편, 온도변화는 압전센서, 접착제 및 구조물 등을 포함한 구성요소 전체의 전기적 및 역학적 특성의 변화를 발생시킬 수 있다(Yang et al., 2008). PZT 센서만의 온도변화에 의한 임피던스 신호의 변화를 관찰하기 위하여, Fig. 3과 같이 PZT 센서 1개(PZT 3)를 PZT 1 및 PZT 2 근방에 위치시켰으며, 실험체에 부착하지 않고 함께 계측을 수행하였다. 한편, 전체적인 실험셋업을 Fig. 4에 나타내었으며, 온도는 실험체 근방의

Fig. 3. PZT Locations (Lengths in mm)

Fig. 4. Experimental Setup

공기온도를 측정하였다.

일반적으로 30~400 kHz 사이의 주파수 범위에서 구조물의 결함에 의한 임피던스 신호의 변화가 발생한다(Bhalla et al., 2009). 본 실험에서는 PZT 센서별 대상 주파수 범위를 결정하기 위하여, 우선 30~400 kHz의 주파수 범위에서 임피던스 분석기(Keysight; E4990A)를 이용하여 PZT 센서에 50 mV (실효값)의 정현파 전압을 인가하면서 이에 대한 임피던스를 측정하였다. Fig. 3의 PZT 1~3에 대하여 각각 동일한 실험을 건전상태에 대하여 수행하였으며, 측정된 임피던스 실수부의 예를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5. Real Impedance for 30~400 kHz

대상 주파수 범위에는 미소한 구조적 변화가 감지될 수 있도록 공진 피크가 포함되어야 한다(Tawie and Lee, 2010). 따라서 대상 주파수 범위를 235~255 kHz (PZT 1), 255~275 kHz (PZT 2) 및 190~210 kHz (PZT 3)로 각각 설정하였다.

온도변화에 의한 임피던스 손상지수의 변화를 파악하기 위하여 장기계측을 수행하였다. 2020년 10월 7일 최초 건전 상태에 대하여, 위에서 설정된 대상 주파수 범위에 대하여 임피던스 실험을 3개의 PZT 센서에 대하여 각각 수행하였는데, 이때 실험실의 온도는 21.5 °C로 계측되었다. 이후 2020년 12월 4일까지 동일한 임피던스 실험을 온도를 함께 계측하면서 진행하였으며, 1주일에 약 4일씩 수행하였다. 하루에 오전과 오후 2회 실험을 수행하였으며, 오전실험은 날짜 뒤에 -1, 오후실험은 -2로 표기하여 구분하였다. 예를 들어 2020-10-16-1은 2020년 10월 16일 오전실험, 2020-10-16-2는 2020년 10월 16일 오후실험을 의미한다.

한편, 2020년 11월 11일에 볼트접합부에 결함을 가한 후 실험을 진행하였다. 즉, Fig. 3의 볼트접합부에서 PZT 1의 좌측 고장력볼트(Bolt 1)의 조임력을 0으로 하여 접합부 결함을 발생시켰다. 따라서 2020-11-11-1은 건전상태 오전 실험, 2020-11-11-2는 결함상태 오전실험, 2020-11-11-3은 결함상태 오후실험을 의미한다.

(a) DI1

(b) DI2

Fig. 6. Relation between Damage Index and Temperature

4. 임피던스와 온도 변화 계측결과

장기계측을 통하여 PZT 1~3에서 측정된 임피던스 신호와, 2020년 10월 7일(21.5 °C) 최초 건전상태에 대하여 측정된 임피던스 신호 사이의 손상지수를 구하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었는데, 온도변화와 함께 비교하였다. 결함이 발생되기 이전 건전상태에서의 손상지수 $DI1$ 과 $DI2$ 는 각각 영보다 큰 값과 1보다 작은 값이 계산되었으며, 따라서 온도 변화에 의하여 2개 임피던스 신호 간의 차이가 발생한 것으로 판단된다. 11월 11일에 고장력볼트 1개의 조임력을 0으로 하여 결함을 발생시켰다. 결함발생 후 손상지수에는 온도변화의 영향과 결함의 영향이 포함되어 계산되기 때문에, 손상지수만을 모니터링 한다면 결함발생 유무를 추정하기 어려운 것으로 판단된다. 한편, 실험체에 부착하지 않은 PZT 3의 경우 PZT 1 및 PZT 2 보다 온도변화에 의한 손상지수의 변화량이 적는데, 이는 센서 자체의 온도변화에 의한 영향만으로 임피던스 신호가 변화하기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 실험체에 부착한 PZT 1 및 PZT 2의 임피던스 신호는 센서, 구조물 및 접착제 등의 온도변화에 의한 영향을 모두 포함하기 때문에 PZT 3의 손상지수 변화량 보다 큰 것으로 판단된다.

온도변화 및 결함에 의한 임피던스 신호의 변화를 살펴보기 위하여, 건전상태에서 10월 7일(21.5 °C), 10월 8일(21.6 °C)

및 11월 5일(17.1 °C)에 계측된 임피던스 신호의 실수부와 결함상태에서 11월 11일(20.0 °C)에 계측된 임피던스 실수부를 PZT 1 및 PZT 2에 대하여 각각 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 10월 7일과 10월 8일의 온도 차이는 0.1 °C이며 따라서 거의 유사한 임피던스 신호가 측정되었음을 알 수 있다. 그러나 11월 5일 온도와는 차이가 있으며, 온도변화에 의한 임피던스 신호의 진폭 변화와 주파수 이동을 확인할 수 있다. 2장에서 언급한 바와 같이 $DI1$ 은 임피던스 신호의 진폭 변화에 민감하며, $DI2$ 는 주파수 이동에 민감하므로, 온도변화가 $DI1$ 과 $DI2$ 의 변화에 모두 영향을 미치는 것으로 판단된다. 한편, 11월 11일 결함상태에서의 임피던스 신호는 10월 7일 신호와 비교하여 역시 진폭 변화와 주파수 이동을 확인할 수 있는데, 이 현상은 온도변화 및 결함에 의한 영향을 함께 포함한 것으로 판단된다.

5. 온도영향을 고려한 결함추정

온도영향을 고려한 임피던스 기반 결함추정을 위하여, Figs. 8~10에 온도변화량에 대한 임피던스 손상지수의 변화를 정리하였다. 즉, 온도변화량은 건전상태에서의 최초실험시 온도인 21.5 °C를 기준으로 변화된 온도의 절대값으로 계산하였고, 이에 대한 11월 11일 결함발생 이전까지의 손상지수 $DI1$ 및 $DI2$ 의 변화를 PZT 1~3에 대하여 각각 정리하였

(a) PZT 1

(b) PZT 2

Fig. 7. Variation of Real Impedance

(a) $DI1$

(b) $DI2$

Fig. 8. Relation between Temperature and Damage Index (PZT 1)

(a) $DI1$

(b) $DI2$

Fig. 9. Relation between Temperature and Damage Index (PZT 2)

(a) $DI1$

(b) $DI2$

Fig. 10. Relation between Temperature and Damage Index (PZT 3)

다. 두 가지 손상지수 모두 온도변화량과 근사적인 선형관계임을 알 수 있으며, $DI1$ 은 비례관계, $DI2$ 는 반비례관계임을 알 수 있다. 따라서 각각의 데이터들에 대하여 선형 회귀분석을 수행한 후 온도변화량과 손상지수의 관계를 구하였다. 선형 회귀분석 결과에 따르면 $DI1$ 의 경우 PZT 1, 2 및 3는 1°C 온도변화 시 각각 약 0.49%, 0.31%, 및 0.17%의 변화가 발생하고, $DI2$ 의 경우 PZT 1, 2 및 3는 1°C 온도변화 시 각각 0.023, 0.022, 및 0.0044의 변화가 발생한다. PZT 3의 경우 온도변화에 대한 민감도가 PZT 1 및 2 보다 적는데 이는 실험체에 미부착되어 구조물과 접촉체 등의 온도영향이 배제되었기 때문인 것으로 판단된다.

선형 회귀분석 결과를 기반으로, 온도영향이 보정된 결함 추정을 수행하였다. 즉, 회귀분석 직선식을 이용하여 해당 온도변화량에 대한 손상지수를 계산하고 이를 실제 측정된 손상지수에서 제함으로써 보정을 수행하였다. 이를 통하여 온도변화에 의한 손상지수의 변화를 배제하고 결함에 의한 변화가 나타날 수 있도록 하였다. PZT 1~3에 대한 보정된 $DI1$ 및 $DI2$ 를, 결함 전후 10회씩의 실험결과에 대하여 Figs. 11~16에 각각 나타내었다.

구조물의 결함에 대한 모니터링 수행 시 경고기준을 설정할 필요가 있다. 여기서는 Figs. 8~10에 보인 측정된 손상지수와, 회귀분석 직선식을 이용하여 구한 손상지수의 차에 대한 표준편차의 2배를 경고기준으로 설정하였으며, 이를 일점체선으로 Figs. 11~16에 함께 나타내었다. 경고기준은 향후

(a) Before Compensation

(b) After Compensation

Fig. 11. Temperature Compensated Damage Index, $DI1$ (PZT 1)

(a) Before Compensation

(b) After Compensation

Fig. 12. Temperature Compensated Damage Index, $DI1$ (PZT 2)

(a) Before Compensation

(b) After Compensation

Fig. 14. Temperature Compensated Damage Index, $DI2$ (PZT 1)

(a) Before Compensation

(b) After Compensation

Fig. 13. Temperature Compensated Damage Index, $DI1$ (PZT 3)

(a) Before Compensation

(b) After Compensation

Fig. 15. Temperature Compensated Damage Index, $DI2$ (PZT 2)

Fig. 16. Temperature Compensated Damage Index, DI_2 (PZT 3)

좀 더 광범위한 온도범위 및 장기간의 계측데이터를 활용하여 보다 적절한 기준 값으로 개선할 수 있을 것으로 판단된다.

Figs. 11~16을 살펴보면, 온도영향을 보정하기 전에는 결함발생을 판정하기 어렵지만 온도영향을 보정한 후에는, 경고기준을 함께 모니터링하면서 결함발생 유무를 명확하게 판정할 수 있는 것으로 확인할 수 있다. 즉, 온도영향을 보정한다면 건전상태의 손상지수는 거의 경고기준 내에 위치하지만, 결함발생 후에는 경고기준을 크게 벗어나기 때문에 결함을 명확히 추정할 수 있다. 미부착된 PZT 3의 경우에는, 결함에 의한 손상지수 변화가 배제되고, 온도영향에 의한 손상지수의 변화가 경고기준 내에서 발생하고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 임피던스 기반 구조물 건전성 모니터링의 실구조물 적용을 위하여, 임피던스 신호에 대한 온도영향의 보정을 통한 효과적인 결함탐지기법을 제안하였다. 고장력 볼트로 집합된 강재 프레임 구조를 대상으로 실험연구를 진행하였는데, 볼트이완으로 인한 결함을 탐지하기 위하여 임피던스 손상지수에 대한 온도영향을 보정하였다. 즉, 임피던스 손상지수와 온도의 관계를 장기계측을 통하여 실험적으로 구한 후 회귀분석을 수행하였다. 이 결과를 기반으로

임피던스 손상지수에 미치는 온도영향을 보정하여 볼트이완에 의한 결함을 추정하였다. 결함발생 후 손상지수에는 온도변화의 영향과 결함의 영향이 포함되기 때문에, 손상지수만을 모니터링 하면 결함발생 유무를 판정하기 어려웠으나, 온도영향을 보정한 후에는 결함발생 유무를 명확히 판정할 수 있었다. 제안된 기법을 실구조물에 적용하기 위해서는, 초기 구조물의 건전상태에서 임피던스 신호와 온도를 일정 기간 계측한 후, 임피던스 손상지수와 온도의 상관관계를 분석하고, 이를 기반으로 적절한 경고기준을 설정하여 결함발생 유무를 모니터링 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서의 계측기간은 약 2개월이지만, 향후 좀 더 광범위한 온도에 대한 임피던스 신호의 변화를 규명하기 위하여 온도제어실에서의 실험 또는 장기간의 계측이 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다. 이를 통하여 임피던스 신호에 대한 온도영향이 좀 더 명확히 규명될 것으로 기대되며, 이에 대해 본 연구의 결과를 적용하여 확장한다면 임피던스 기법의 효과적인 실적용에 기여할 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 본 연구에서는 임피던스를 기반으로 결함발생 유무만을 판정하였으나, 온도영향이 보정된 결함위치 및 정도 판정기법이 향후 진행된다면 구조물 건전성 모니터링을 통한 효율적인 유지관리가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 볼트이완에 의한 전체 구조물의 손상정도 정량화 및 온도영향 선형보정 방법의 다양한 결함형태에 대한 적용성 확인 등에 대한 연구가 향후 진행될 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 2020년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음(과제번호: R20X002-30).

References

- Antunes, R.A., Cortez, N.E., Giancesini, B.M., and Jozue, J.V. (2019). Modeling, simulation, experimentation, and compensation of temperature effect in impedance-based SHM systems applied to steel pipes, *Sensors*, Vol. 19, 2802.
- Baptista, F.G., Filho, J.V., and Inman, D.J. (2011). Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, Vol. 11, pp. 173-186.
- Bhalla, S., Gupta, A., Bansal, S., and Garg, T. (2009). Ultra low-cost adaptations of electro-mechanical impedance technique for structural health monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, pp. 991-999.

- Campos, F.de.S., Castro, B.A.de., Budoya, D.E., Baptista, F.G., Ulson, J.A.C., and Andreoli, A.L. (2019). Feature extraction approach insensitive to temperature variations for impedance-based structural health monitoring. *IET Science, Measurement & Technology*, Vol. 13, pp. 536-543.
- Castro, B.A.de., Baptista, F.G., and Ciampa, F. (2019). New signal processing approach for structural health monitoring in noisy environments based on impedance measurements. *Measurement*, Vol. 137, pp. 155-167.
- Dongyu, X., Sourav, B., Yanbing, W., Shifeng, H., and Xin, C. (2015). Temperature and loading effects of embedded smart piezoelectric sensor for health monitoring of concrete structures. *Construction and Building Materials*, Vol. 76, pp. 187-193.
- Huynh, T.C., Dang, N.L., and Kim, J.T. (2018). PCA-based filtering of temperature effect on impedance monitoring in prestressed tendon anchorage. *Smart Structures and Systems*, Vol. 22, pp. 57-70.
- Kamas, T., Poddar, B., Lin, B., and Yu, L. (2015). Assessment of temperature effect in structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors. *Smart Structures and Systems*, Vol. 16, No. 5, 835-851.
- Liang, C., Sun, F., and Rogers, C.A. (1996). Electro-mechanical impedance modeling of active material systems. *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, pp. 171-186.
- Na, W.S., and Baek, J. (2018). A review of the piezoelectric electromechanical impedance based structural health monitoring technique for engineering structures. *Sensors*, Vol. 18, 1307.
- Park, G., and Inman, D.J. (2007). Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. 365, pp. 373-392.
- Rabelo, D.S., Tsuruta, K.M., Oliveira, D.D.de., Cavalini Jr, A.A., Neto, R.M.F., and Steffen Jr, V. (2017). Fault detection of a rotating shaft by using the electromechanical impedance method and a temperature compensation approach. *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 36, 25.
- Rabelo, D.de.S., Steffen Jr, V., Neto, R.M.F., and Lacerda, H.B. (2017). Impedance-based structural health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-T3 aluminum panels under varying temperature. *Structural Health Monitoring*, Vol. 16, pp. 365-381.
- Sepehry, N., Shamshirsaz, M., and Bastani, A. (2010). Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature. *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, pp. 573-585.
- Tawie, P., and Lee, H.K. (2010). Piezoelectric-based non-destructive monitoring of hydration of reinforced concrete as an indicator of bond development at the steel-concrete interface. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 1697-1703.
- Yang, Y., Lim, Y.Y., and Soh, C.K. (2008). Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. Experiment. *Smart Materials and Structures*, Vol. 17, 035008.
- Zhang, X., Zhou, W., and Li, H. (2019). Electromechanical impedance-based ice detection of stay cables with temperature compensation. *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 26, e2384.

Received	September 3, 2021
Revised	September 3, 2021
Accepted	September 27, 2021