Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 19, No. 12 pp. 265-271, 2018

https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.265
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

임피던스 기반 저비용 구조물 건전성 모니터링 기법

이종원
남서울대학교 건축공학과

Low-cost Impedance Technique for Structural Health Monitoring

Jong-Won Lee
Department of Architectural Engineering, Namseoul University

요 약 본 연구에서는 임피던스(impedance)를 이용하여 저비용으로 구조물의 결함을 탐지할 수 있는 기법을 연구한다. 임피던스 기법은 구조물 건전성 모니터링을 위한 국부적 결함탐지의 대표적인 기법으로써, 압전재료를 구조물의 표면에 부착하여 구조물의 전기-역학적 어드미턴스(electro-mechanical admittance) 신호를 모니터링 함으로써 결함을 추정하는 기법이다. 이 기법을 적용하기 위하여 일반적으로 고가의 임피던스 분석기(impedance analyser)가 사용되는데, 기술의 효과적인 보급을 위해서는 저비용의 기법을 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 임피던스 분석기를 대체하여, 일반적으로 실험실에서 사용되는 함수발생기(function generator)와 디지털 멀티미터(digital multimeter)만을 이용하여 전달 임피던스(transfer impedance)를 측정함으로써 구조물에 발생하는 결함을 탐지할 수 있는 기법을 연구한다. 즉, 건전상태와 손상상태에서 측정되는 전압의 진폭비를 이용한 손상지수를 비교함으로써 결함 유무를 판정할 수 있는 기법을 연구한다. 강재 시편에 대한 전달 임피던스 실험을 수행하였는데, 출력 전압의 진폭비를 이용한 손상지수를 비교함으로써 결함 유무를 합리적으로 판정할 수 있었다. 본 연구는 임피던스 기반 저비용 결함탐지기법을 위한 기초연구로써, 향후 결함의 위치 및 정도를 판정할 수 있는 연구가 보완된다면 구조물 건전성 모니터링에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract This paper presents a method for detecting damage to a structure at low cost using its impedance. The impedance technique is a typical method to detect local damage for structural health monitoring. This is a common technique for estimating damage by monitoring the electro-mechanical admittance signal of the structure. To apply this technique, an expensive impedance analyzer is generally used. On the other hand, it is necessary to develop a low-cost variant to effectively disseminate the technique. In this study, a method based on the transfer impedance using a function generator and digital multimeter, which are generally used in the laboratory instead of an impedance analyzer, was developed. That is, this technique estimates the damage by comparing the damage index using the amplitude ratio of the output voltage measured in the healthy and damaged state. A transfer impedance test was carried out on a steel specimen. By comparing the damage index, the presence of damage could be assessed reasonably. This study is a basic investigation of an impedance-based low-cost damage detection method that can be used effectively for structural health monitoring if supplemented with future research to estimate the damage location and severity.

Keywords : Impedance, Low-cost, Damage detection, Structural health monitoring, Damage index

이 논문은 2017년 대한민국 과학기술정보통신부와 한국연구재단의 중견연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1A2B4006722).

*Corresponding Author : Jong-Won Lee(Namseoul Univ.)
Tel: +82-41-580-2761 email: jwleer@nsu.ac.kr

Received August 22, 2018 Revised (1st September 13, 2018, 2nd October 12, 2018)
Accepted December 7, 2018 Published December 31, 2018

1. 서론

건물, 교량, 항공기, 발전소 등 구조물 및 사회기반시설물의 구조적 안전성 확보를 위해서는 합리적인 설계 및 시공이 이루어져야 하며, 이후 구조물에 대한 효과적인 유지관리가 필요하다. 센서를 통하여 구조물의 상태를 항시 감시할 수 있는 구조물 건전성 모니터링(structural health monitoring) 기술을 적용한다면 효율적인 유지관리가 가능하며, 이를 위해서는 구조물의 결함발생 및 진전여부를 판정할 수 있는 기술 개발이 필요하다.

구조물 건전성 모니터링을 위하여, 정적 변위, 정적 변형률 또는 저주파 진동 데이터를 이용하여 왔으며, 이러한 기술은 일반적으로 변위계, 스트레인 게이지 또는 가속도계와 같은 전통적인 센서를 적용하였다. 그러나 기존 센서 및 결함탐지기법들의 한계를 극복하고 보다 효율적이고 신뢰성 있는 구조물 결함탐지를 위하여, 압전재료(piezoelectric material), 광섬유(optical fiber) 및 형상기억합금(shape memory alloy) 등 스마트 재료에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

압전재료를 이용한 임피던스(impedance) 기반 결함탐지기법은 대표적인 스마트 재료 관련 기법 중 하나로써, 최근 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 이 기법은 일반적으로 고가의 임피던스 분석기(impedance analyser)를 이용하므로, 기술의 효율적인 보급을 위해서는 저비용으로 임피던스를 이용할 수 있는 결함탐지기법의 개발이 필요한 것으로 판단된다.

임피던스 기반 저비용 결함탐지기법과 관련된 기존의 연구는 다음과 같다. 고가의 임피던스 분석기를 대체하기 위하여, FFT 분석기와 소규모의 전류측정회로를 개발하여 임피던스를 계측할 수 있는 기법이 제안되었고[1], 일반적인 함수발생기(function generator)와 오실로스코프(oscilloscope)를 이용하여 임피던스 분석기를 대체할 수 있는 방법이 연구되었으며[2], 함수발생기와 디지털 멀티미터(digital multimeter)를 이용하여 어드미턴스(admittance)의 절대값을 계측함으로써 비용을 절감할 수 있는 기법이 제안되었다[3]. 한편, 동일한 압전재료를 이용하여, 전역적 상태평가 및 임피던스 기반 국부적 결함탐지를 통합함으로써 전역적 모니터링에 소요되는 하드웨어와 센서를 제외시켜 구조물 건전성 모니터링에 대한 전체 비용을 절감할 수 있는 방법이 연구되었고[4, 5], 동일 압전재료 및 단일 하드웨어/소프트웨어 시스템을 이용하여 임피던스와 유도 초음파를 동시에 계측하고 분석할 수 있는 방법을 개발함으로써 전체 비용을 경감할 있는 연구가 진행되었다[6].

본 연구에서는 임피던스 기반 결함탐지에 이용되는 고가의 임피던스 분석기를 대체할 수 있는 방법을 제안한다. 즉, 일반적으로 실험실에서 사용되는 함수발생기와 디지털 멀티미터를 이용하고, 전달 임피던스(transfer impedance)를 이용한 손상지수(damage index; DI)를 측정함으로써 구조물에 발생하는 결함을 탐지할 수 있는 기법을 연구한 후 이를 실험을 통하여 검증한다. 즉, 본 연구는 임피던스 기반 결함탐지기법의 효율적인 보급을 위하여 저비용으로 임피던스를 활용하기 위한 기초연구이다.

2. 임피던스 기반 결함탐지기법

임피던스 기법은 구조물 건전성 모니터링을 위한 국부적 결함탐지의 대표적인 기법이다. 이 기법은 대표적인 압전재료인 PZT(Pb-Zr-Ti, lead zirconate titanate) 패치를 구조물의 표면에 부착한 후, 압전특성을 이용하여 구조물의 전기-역학적 어드미턴스(electro-mechanical admittance) 신호를 모니터링 하여 결함을 추정하는 기법이다. 이 기법을 적용하기 위해서는 임피던스 분석기가 널리 사용되며, 일반적으로 수십에서 수백 kHz 범위 내에서 일정 구간 주파수 대역의 전압을 스위핑(sweeping)하여 인가한다. 특정 주파수 대역에서 PZT 패치는 구조물을 가진하고, 이에 대한 구조물의 응답이 패치의 전기-역학적 어드미턴스로 감지되는데, 이는 컨덕턴스(conductance)의 실수부와 서셉턴스(susceptance)의 허수부로 구성된다. 특정 주파수 대역의 컨덕턴스와 서셉턴스를 주파수 영역에서 분석할 수 있으며, 이 결과는 구조물에 이상상태가 발생할 경우 건전상태와 비교하여 변화하고, 이러한 변화를 모니터링 함으로써 구조물의 건전성을 확인할 수 있다.

기존 연구[7]에서는 구조물에 PZT 패치를 부착하였을 때 PZT 패치와 구조물에 대한 각각의 전기적 및 역학적 임피던스를 연구하였고, 패치가 부착된 상태에서의 전기-역학적 임피던스의 관계를 연구하였다. 즉, 구조물에 부착된 PZT 패치로부터 측정되는 전기-역학적 어드

미턴스는 다음 식과 같이 구조물과 PZT 패치의 역학적 임피던스와 직접적으로 연관되어 있음을 제안하였다.

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

여기서 $Y(\omega)$ 및 $Z(\omega)$는 각각 전기-역학적 어드미턴스 및 임피던스의 측정값, $G(\omega)$ 및 $B(\omega)$는 각각 어드미턴스의 실수부인 컨덕턴스 및 서셉턴스, C는 PZT 패치의 zero-load 커패시턴스(capacitance), κ_{31}^2는 PZT 패치의 전기-역학적 결합계수, $Z_s(\omega)$ 및 $Z_a(\omega)$는 각각 구조물 및 PZT 패치의 역학적 임피던스이며, ω는 주파수이다. 즉, 구조물에 결함이 발생하여 구조물의 특성이 변화하면 $Z_s(\omega)$가 변화하고, 이때 PZT 패치의 재료적 및 기하학적 특성이 일정하다면, 결함발생 전후에 PZT 패치로부터 측정되는 어드미턴스를 분석하여 결함을 탐지할 수 있다.

PZT 패치로부터 측정되는 임피던스의 변화를 모니터링 함으로써 구조물의 결함을 탐지할 수 있는데, 이를 위하여 임피던스 변화를 정량화한 손상지수를 사용할 수 있다. 일반적으로 사용되는 손상지수는 다음 식과 같은 제곱평균제곱근편차(root mean square deviation; RMSD)이다[2].

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

여기서 아래첨자 i는 이산화된 i번째 주파수이고, 위첨자 0 및 d는 각각 건전상태와 손상상태를 나타낸다. 결함이 없는 경우 손상지수는 영에 가까운 수치이고, 결함이 발생한다면 영과 크게 다른 값이 측정될 것이다.

3. 전달 임피던스 기법

임피던스 기반 결함탐지를 위해서는 구조물에 부착된 PZT 패치에 일정한 주파수의 정상 상태(steady state) 정현파 전압을 스위핑 하면서 인가함으로써 가진한다. 인가된 전압 또는 전류 흐름을 PZT 패치에서 감지하는데, 측정되는 신호도 정현파이며 인가된 전압의 주파수와 동일하다. 단, 구조물 결함에 의한 탄성파의 상호작용으로 인하여, 측정되는 신호의 진폭비와 위상차가 변화하므로 이를 이용하여 결함을 탐지할 수 있다.

임피던스 기반 결함탐지기법은 사용되는 PZT 패치의 개수에 따라 2개의 방법으로 분류할 수 있다. 즉, 가진과 감지를 동일 PZT 패치로 실시하는 방법과 다수의 PZT 패치를 이용하여 가진과 감지를 별도로 실시하는 방법이다. 후자의 방법이 전달 임피던스 기법이며, 다음 식과 같은 전달함수(transfer function)가 사용된다[8].

$$TF(\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{|V_{out}| e^{j\omega t + \phi(\omega)}}{|V_{in}| e^{j\omega t}} = |TF(\omega)| e^{j\phi(\omega)} \quad (3)$$

여기서 V_{in}과 V_{out}은 각각 인가 전압과 측정 전압, $|TF(\omega)|$는 인가 전압과 측정 전압 간 진폭비(amplitude ratio)이며, $\phi(\omega)$는 위상차이다.

손상지수(Eq. (2))의 Z에 전달함수 TF를 대입하여 결함을 추정할 수 있으며, 기존 연구[8]에서는 이를 확장하여, 전달함수의 실수부와 허수부를 결합한 형태의 손상지수를 다음 식과 같이 제안하였다.

$$DI(\omega)_{TF} = \frac{TF^d(\omega)}{TF^0(\omega)} = \frac{|TF^d(\omega)|}{|TF^0(\omega)|} e^{j\{\phi^d(\omega) - \phi^0(\omega)\}} \quad (4)$$

위에서 언급한 바와 같이 위첨자 0 및 d는 각각 건전상태와 손상상태를 나타낸다. 만약 건전상태와 손상상태에서의 인가 전압 V_{in}이 동일하다면, Eq. (4)에 나타낸 손상지수의 절대값은 다음 식과 같다.

$$|DI(\omega)_{TF}| = \frac{|V_{out}^d(\omega) / V_{in}^d(\omega)|}{|V_{out}^0(\omega) / V_{in}^0(\omega)|} = \frac{|V_{out}^d(\omega)|}{|V_{out}^0(\omega)|} \quad (5)$$

즉, 건전상태와 손상상태에서 측정되는 전압의 진폭비를 이용하여 결함을 탐지할 수 있다. Eq. (5)를 이용하면, 결함이 없는 경우 손상지수는 1에 가깝게 측정될 것이고, 결함이 발생한다면 1과 크게 다른 값이 측정될 것이다.

4. 실험연구

구조물 건전성 모니터링을 위한 고비용의 기술은 경제성 측면에서 부합성이 떨어질 수 있으므로, 본 연구에서는 고가의 임피던스 분석기(20,000-40,000천원)를 배제하고 저비용으로 임피던스 기법을 활용할 수 있는 방법을 연구하였고, 이에 대한 실험적 검증을 수행하였다. 즉, 함수발생기와 디지털 멀티미터만을 이용하여 Eq. (5)의 손상지수를 측정하여 구조물의 결함을 탐지할 수 있는 실험을 진행하였다.

함수발생기(Keysight 33210A, 약 1,500천원)와 디지털 멀티미터(Keysight 34465A, 약 1,500천원)를 이용하여, 강재 시편에 대하여 2개의 PZT 패치를 시편 표면에 부착한 후, 함수발생기를 이용하여 하나의 패치에 전압을 스위핑 하면서 인가하고, 다른 하나의 패치로부터 발생되는 전압을 측정하였다. 건전상태와 손상상태에 대하여 각각 실험을 수행한 후 결과를 비교하였다.

230×23×3 mm 사이즈의 시편에 대하여 실험을 수행하였는데, 전체적인 실험 셋업을 Fig. 1에 나타내었다. 즉, Fig. 2와 같은 전기회로를 구성하여 실험을 수행하였으며, 10(L)×10(W)×0.3(T) 규격의 PZT 패치를 Fig. 3에 보인 위치에 부착하였다. 건전상태 시편에 대하여 실험을 수행한 후, 다음과 같이 3가지 경우의 손상상태에 대한 실험을 수행하였다. 첫 번째, 시편 중앙에 직경 5 mm의 구멍이 있는 손상상태의 시편(Fig. 3 참조)에 대하여 실험을 수행하였다(Damage Case A). 두 번째, 건전상태 시편의 중앙부에 시편 길이방향으로 유사균열을 발생시킨 후 실험을 수행하였는데(Fig. 4 참조), 유사균열의 길이, 폭(최대) 및 깊이(최대)는 각각 22 mm, 2.5 mm 및 1.2 mm이다(Damage Case B-1). 세 번째, Damage Case B-1의 유사균열을 확장하였는데, 유사균열의 길이, 폭(최대) 및 깊이(최대)는 각각 32 mm, 2.6 mm 및 2.1 mm이다(Damage Case B-2).

건전상태와 3가지 손상상태에 대하여 각각 함수발생기를 이용하여 PZT 패치에 정현파(2 V, 실효값)를 150 - 160 kHz의 범위에서 0.25 kHz 간격으로 스위핑 하면서 전압을 인가하였다. 이때 각각의 인가 주파수에 대해서 반대쪽의 PZT 패치에서 측정되는 전압의 실효값을 기록하였다. 이때 측정된 신호의 주파수가 가진 주파수와 동일함을 확인하였다. 반복재현성을 확인하기 위하여 건전상태 및 3가지 손상상태에 대하여 동일한 실험을 각각 3회씩 수행하였다.

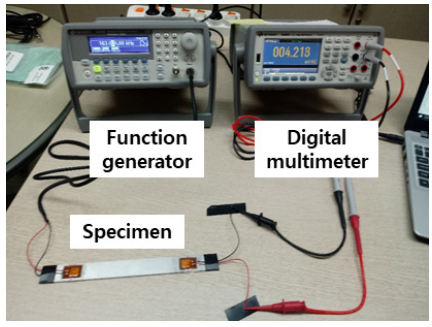


Fig. 1. Experimental set-up.

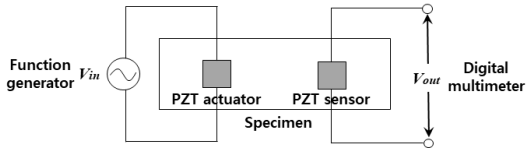


Fig. 2. Circuit for transfer impedance technique.

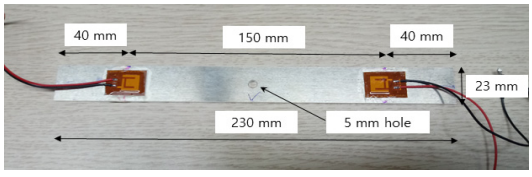


Fig. 3. Dimension of the specimen and damage induction (Damage Case A).

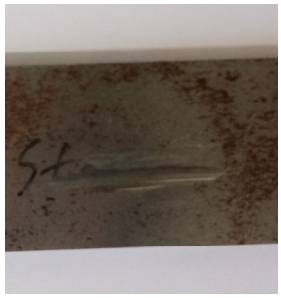
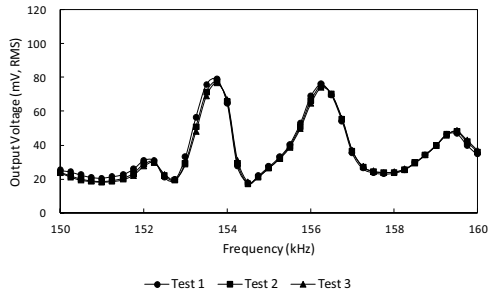
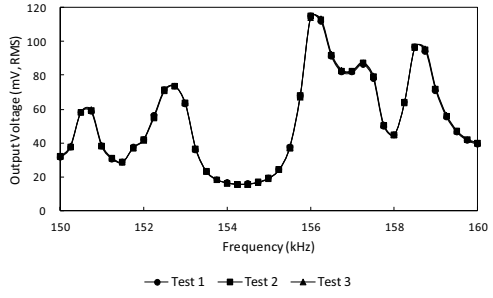


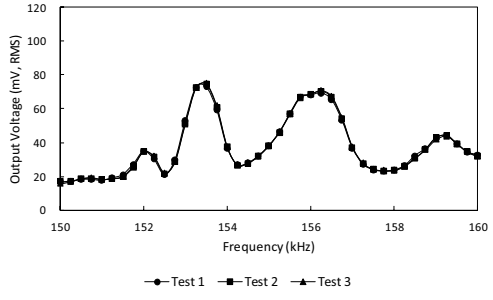
Fig. 4. Inflicted damage (Damage Case B-1).



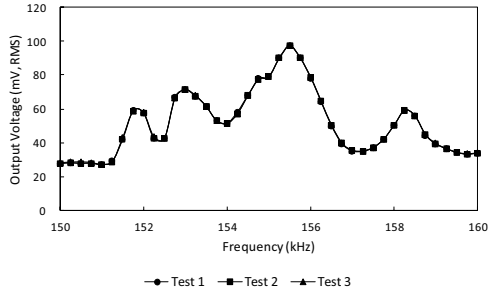
(a) Healthy



(b) Damage Case A



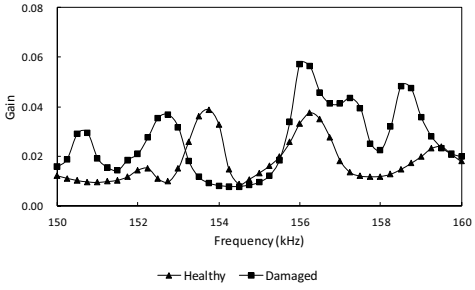
(c) Damage Case B-1



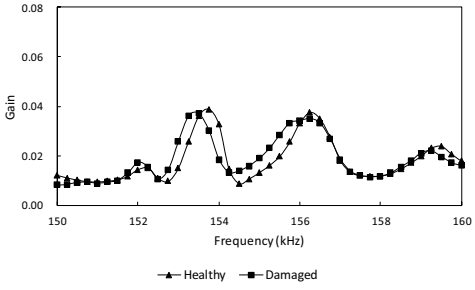
(d) Damage Case B-2

Fig. 5. Results of repeatability tests.

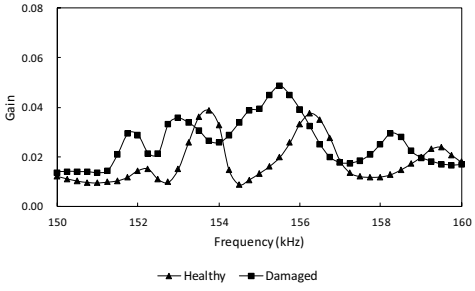
건전상태와 3가지 손상상태에 대하여 각각 수행한 반복재현성 실험의 결과를 Fig. 5에 나타내었는데, 동일 조건에서 PZT 패치로부터 측정되는 전압의 출력값이 3회의 실험에서 거의 유사함을 알 수 있다.



(a) Damage Case A



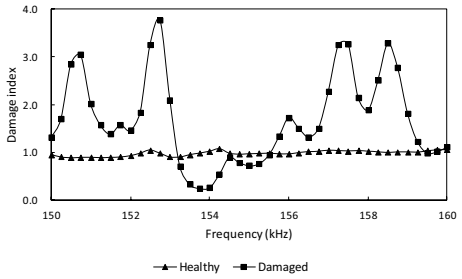
(b) Damage Case B-1



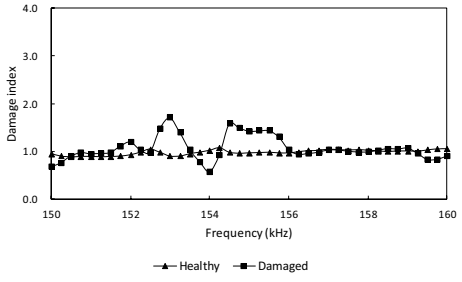
(c) Damage Case B-2

Fig. 6. Gain before and after damage.

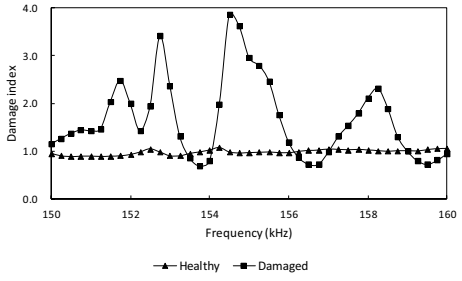
인가 전압에 대한 출력 전압의 비율인 게인(gain)을 건전상태와 3가지 손상상태를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 이때 반복재현성을 확인하기 위한 3회 실험결과의 평균값을 사용하였다. 건전상태 및 손상상태에서 게인은 각각 0.018(Healthy), 0.027(Damage Case A), 0.019(Damage Case B-1) 및 0.026(Damage Case B-2)으로써, 전반적으로 출력값이 손상으로 인하여 증가함을 알 수 있다. 또한, Damage Case B-1과 Damage Case B-2를 비교하면, 유사균열의 크기가 커지는 경우 게인이 증가함을 알 수 있다.



(a) Damage Case A



(b) Damage Case B-1



(c) Damage Case B-2

Fig. 7. Damage index before and after damage.

한편, Eq. (5)의 손상지수를 건전상태와 3가지 손상상태에 대하여 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 건전상태에서는 1회 실험의 비율 즉, Test 1과 Test 2의 결과를 이용하였고, 손상상태에서는 건전상태와 손상상태에서 3회씩 수행한 결과의 평균값을 사용하였다. 건전상태에서의 손상지수는 1과 유사한 값을 보이지만 손상상태에서는 1과 다른 값을 보인다. 또한, 유사균열의 크기가 커지는 경우 손상지수가 1과 크게 다른 값을 보인다. 손상지수의 1과의 차이(절대값)에 대한 평균값을 살펴보면, 건전상태 및 손상상태에서 각각 0.047(Healthy), 0.868(Damage Case A), 0.174(Damage Case B-1) 및 0.757(Damage Case B-2)이다. 따라서, 특정 주파수 대역에서 PZT 패치의 출력값을 모니터링 하고 Eq. (5)의 손상지수를 구함으로써 구조물에 발생하는 결함 유무를 판정할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 임피던스 기반 결함탐지기법의 효율적인 보급을 위하여 저비용으로 임피던스를 활용하기 위한 기초연구를 수행하였다. 즉, 임피던스 기반 결함탐지에 이용되는 고가의 임피던스 분석기를 대체하여, 일반적으로 실험실에서 사용되는 함수발생기와 디지털 멀티미터만을 이용하였다. 전달 임피던스를 이용한 손상지수를 측정함으로써 결함을 탐지할 수 있는 기법을 연구한 후 이를 실험을 통하여 검증하였다. 강재 시편에 대하여 실험을 수행하였으며, 건전상태와 손상상태에서 측정되는 전압의 진폭비를 이용한 손상지수를 비교함으로써 결함유무를 합리적으로 판정할 수 있었다. 즉, 강재에 구멍 또는 유사균열의 손상이 있는 경우, 저비용으로 측정할 수 있는 전달 임피던스 기반 손상지수를 이용하여 결함의 유무를 판정할 수 있었으며 특히, 유사균열의 크기가 커지면 손상지수가 크게 변화하므로 이를 이용하여 향후 결함의 크기를 유추할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 결함발생의 유무만을 판정할 수 있었으나 향후, 효과적인 기술의 보급을 위하여, 저비용으로 결함의 위치 및 정도를 판정할 수 있는 체계적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

References

[1] D. M. Peairs, G. Park, and D. J. Inman, “Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 15, pp 129-139, 2004. DOI: https://dx.doi.org/10.1177/1045389X04039914

[2] R. Panigrahi, S. Bhalla, and A. Gupta, “A Low-Cost Variant of Electro-Mechanical Impedance (EMI) Technique for Structural Health Monitoring”, *Experimental Techniques*, Vol. 34, pp 25-29, 2010. DOI: https://dx.doi.org/10.1111/j.1747-1567.2009.00524.x

[3] S. Bhalla, A. Gupta, S. Bansal, and T. Garg, “Ultra low-cost adaptations of rlectro-mechanical impedance technique for structural health monitoring”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 20, pp 991-999, 2009. DOI: https://dx.doi.org/10.1177/1045389X08100384

[4] R. Shanker, S. Bhalla, and A. Gupta, “Integration of

Electro-mechanical Impedance and Global Dynamic Techniques for Improved Structural Health Monitoring", *Journal of Intelligent Material Systems And Structures*, Vol. 21, pp 285-295, 2010.
DOI: https://dx.doi.org/10.1177/1045389X09356609

[5] R. Shanker, S. Bhalla, A. Gupta, and M. P. Kumar, M.P. "Dual use of PZT patches as sensors in global dynamic and local electromechanical impedance techniques for structural health monitoring", *Journal of Intelligent Material Systems And Structures*, Vol. 22, pp 1841-1856, 2011.
DOI: https://dx.doi.org/10.1177/1045389X11414219

[6] V. Gulizzi, P. Rizzo, A. Milazzo, and E. L. M. Ribolla, "An Integrated Structural Health Monitoring System Based on Electromechanical Impedance and Guided Ultrasonic Waves", *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, Vol. 5, pp 337-352, 2015.
DOI: https://dx.doi.org/10.1007/s13349-015-0112-0

[7] C. Liang, F. Sun, and C. A. Rogers, "Electro-mechanical impedance modeling of active material systems", *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, pp 171-186, 1996.
DOI: https://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/5/2/006

[8] M. Dziendzikowski, P. Niedbala, A. Kurnyta, K. Kowalczyk, and K. Dragan, "Structural Health Monitoring of a Composite Panel Based on PZT Sensors and a Transfer Impedance Framework", *Sensors*, Vol. 18, pp 1521-1537, 2018.
DOI: https://dx.doi.org/10.3390/s18051521

이 종 원(Jong-Won Lee) [정회원]

- 1991년 2월 : 연세대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2003년 2월 : KAIST 대학원 건설및환경공학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 2008년 8월 : 한국기계연구원 책임연구원
- 2008년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 건축공학과 교수

<관심분야>
구조물 건전성 모니터링, 손상추정, 스마트센서 기술