

전달 임피던스를 이용한 볼트 접합부 구조 건전성 모니터링 기법

이종원
남서울대학교 건축공학과

Bolt-joint Structural Health Monitoring Technique Using Transfer Impedance

Jong-Won Lee
Department of Architectural Engineering, Namseoul University

요약 본 연구에서는 볼트 접합부 건전성 모니터링을 위하여 이중(dual) 압전재료 기법인 전달 임피던스 기법(transfer impedance technique)을 이용하여 볼트 이완을 탐지할 수 있는 기법을 연구한다. 전달 임피던스 기법에서는 하나의 압전재료가 탄성파를 가진다고 다른 압전재료가 이를 센싱함으로써 결함 등에 의한 탄성파 전파의 변화를 감지한다. 한편, 단일 압전재료 기법을 이용하기 위해서는 고가의 임피던스 분석기(impedance analyser)를 이용해야 하지만, 전달 임피던스 기법은 임피던스 분석기를 대체하여 일반적인 함수발생기(function generator)와 디지털 멀티미터(digital multimeter)를 이용한 결함탐지가 가능하기 때문에 저비용의 결함탐지를 수행할 수 있다. 고력볼트 접합부로 구성된 강판 프레임 실험체를 제작하고, 볼트의 조임력을 단계적으로 감소시키며 실험을 수행하였다. 전달 임피던스 기법을 이용하여 손상지수를 구하였고 이를 이용하여 결함 유무를 합리적으로 판정할 수 있었으며, 볼트 이완의 정도가 커질수록 손상지수가 증가함을 알 수 있었다. 동일한 실험체에 대하여 임피던스 분석기를 이용한 단일 압전재료 기법에 대한 실험을 수행하여 결과를 비교하였는데, 결함정도가 커질수록 손상지수가 모두 증가하는 유사한 경향을 보였다. 즉, 고가의 임피던스 분석기를 배제하고 저비용으로 볼트 접합부의 결함상태 추정이 가능한 것으로 판단된다. 향후 결함위치 및 정도를 판정할 수 있는 연구가 추가된다면 볼트 접합부 건전성 모니터링에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract A technique was researched to detect bolt looseness using a transfer impedance technique (the dual piezoelectric material technique) for monitoring the structural health of a bolt joint. In order to use the single piezoelectric material technique, an expensive impedance analyzer should be used. However, in the transfer impedance technique, low-cost fault detection can be performed using a general function generator and a digital multimeter. A steel plate frame test specimen composed of bolt joints was fabricated, and the tightening torques of the bolts were loosened step by step. By using the transfer impedance method, the damage index was obtained. It was found that the presence of faults could be reasonably estimated using the damage index, which increased with the degree of bolt looseness. An experiment was performed on the same specimen using the single piezoelectric material technique, and the results showed a similar tendency. It could be possible to estimate the damage of a bolt joint at low cost by eliminating the expensive impedance analyzer. This method could be used effectively for structural health monitoring after carrying out a study to estimate the fault location and severity.

Keywords : Transfer Impedance, Bolt-Joint, Structural Health Monitoring, Damage Index, Bolt Looseness

*Corresponding Author : Jong-Won Lee(Namseoul Univ.)

email: jwlee@nsu.ac.kr

Received March 25, 2019

Accepted July 5, 2019

Revised May 30, 2019

Published July 31, 2019

1. 서론

볼트 접합은 건축, 토목, 항공, 기계 등 다양한 산업 분야의 구조물에 널리 사용되며, 반복하중 작용, 응력집중 및 다양한 사용조건 등에 의하여 볼트의 조임력이 이완되는 경향이 있다. 볼트 이완에 의한 접합부의 손상은 전체 구조물의 구조적 안전에 중요한 영향을 미치므로 이에 대한 효과적인 유지관리가 필요하며, 이를 위해서는 센서를 이용하여 볼트 접합부의 상태를 판정할 수 있는 모니터링 기술 개발이 필요하다.

볼트 접합부 건전성 모니터링과 관련된 연구는 다양하게 진행되어 왔는데, 보다 효율적인 모니터링을 위하여 스마트센서를 적용한 연구가 활발히 수행되었다. 대표적 스마트센서인 압전재료를 이용한 기존 연구를 정리하면 다음과 같다. PZT(lead zirconate titanate) 패치를 부착한 한 쌍의 원형 스마트와셔를 이용하여, 초음파를 발생시킨 후 접촉면을 따라 전파되는 초음파를 감지하여 볼트의 조임력 상태를 추정할 수 있는 기법이 연구되었고[1], 볼트 머리에 PZT 패치를 부착한 후 어드미턴스(admittance)를 측정하여, 볼트의 조임력 상태에 따른 피크 주파수의 변화를 분석하였으며[2], 헬리콥터 후미의 접합부 볼트 근방의 프레임 표면에 PZT 패치를 부착한 후, 볼트 이완에 따라 전기-역학적 임피던스(electro-mechanical impedance)가 유의미하고 통계적으로 안정된 변화가 있음을 입증하였다[3]. 한편, 진동 기반 전역적 모니터링 및 임피던스 기반 국부적 모니터링을 통합할 수 있는 센서노드를 개발하여 이를 볼트 접합부에 적용하였는데, 이음판에 PZT 패치를 부착한 후 임피던스의 제곱평균제곱근편차(root mean square deviation)를 구하여 볼트 이완을 탐지하였으며[4], 진동 및 임피던스 통합 계측을 통한 풍력터빈 타워의 볼트 이완 모니터링을 위하여, 접합판 표면에 PZT 패치를 부착한 후 임피던스의 제곱평균제곱근편차와 상관계수편차(correlation coefficient deviation)를 이용하여 볼트 이완을 추정하였다[5]. 다른 센서 들의 데이터를 연동하고 일반화된 베이스라인을 구축하는 방법을 제안하였으며, 이를 볼트 접합부에 적용하였는데, 브래킷 등 접합부 근방에 PZT 패치를 부착하여 볼트 이완을 탐지하였고 [6], 신경망기법을 이용하여 구조적 손상에 민감한 임피던스의 주파수대역을 식별하고 손상정보를 제공할 수 있는 기법을 제안하여 이를 파이프 시스템과 교량의 볼트 접합부에 적용하였는데, 압전재료를 부착한 후 임피던스의 상관계수편차를 이용하여 볼트 결함을 탐지하였다[7].

압전재료를 이용한 임피던스 기반 결함탐지기법은 단일 압전재료 기법과 이중(dual) 압전재료 기법으로 분류할 수 있다[8]. 단일 압전재료 기법에서 하나의 압전재료는 탄성파를 가진하는 동시에 센싱하는 이중 역할을 하며, 구조물 결함 등에 의한 임피던스의 변화를 감지할 수 있다. 한편 이중 압전재료 기법에서는 하나의 압전재료가 탄성파를 가진하고 다른 압전재료는 이를 센싱하는 역할을 하므로, 결함 등에 의한 탄성파 전파의 변화를 감지할 수 있다. 위에서 조사된 기존 볼트 접합부 모니터링 관련 연구에서는 주로 단일 압전재료 기법을 이용하였고, 이를 위한 압전재료의 부착 위치는 볼트 머리, 와셔 및 접합판 등이다. 우선, 단일 압전재료 기법을 이용하기 위해서는 임피던스 분석기(impedance analyser)를 이용해야 하지만, 이중 압전재료 기법은 임피던스 분석기를 대체하여 일반적인 함수발생기(function generator)와 디지털 멀티미터(digital multimeter)를 이용한 결함탐지가 가능하다[9, 10]. 또한, 볼트 접합부 모니터링을 위하여 볼트 머리 및 와셔 등에 압전재료를 부착하는 방법은 볼트 개수대로 압전재료가 필요할 수 있으나, 접합부 근방의 접합판 등에 압전재료를 부착하면 개별 볼트 이완에 의한 영향을 종합적으로 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 볼트 이완은 접합부의 접촉압력 강도 및 분포, 강성 등에 영향을 미치므로, 이에 따른 접합판의 임피던스 변화를 측정하여 접합부의 상태를 모니터링할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이중 압전재료 기법인 전달 임피던스 기법(transfer impedance technique)을 이용하여 강판에 대한 고력볼트 접합부의 볼트 이완을 탐지할 수 있는 기법을 연구하였다. 고가의 임피던스 분석기를 대체하여 함수발생기와 디지털 멀티미터를 이용하였으며, 볼트 근방의 접합판에 PZT 패치를 부착하였다. 또한, 임피던스 분석기를 이용한 단일 압전재료 기법을 적용하여 결함추정 결과를 비교하였다.

2. 결함탐지를 위한 손상지수

임피던스 기법은 구조물의 국부적 결함탐지를 위한 대표적인 기법으로서, 압전재료를 구조물에 설치한 후 결함에 의한 구조물의 임피던스 변화를 이용하여 결함을 추정하는 기법이다. 대표적인 압전재료인 PZT 패치를 주로 이용하며 이로 부터 측정되는 임피던스의 변화를 측정하는데, 정량적 결함추정을 위하여 손상지수(damage

index)를 사용한다. 단일 압전재료 기법에서 대표적으로 사용되는 손상지수는 다음 Eq. (1)과 같은 제곱평균제곱근편차이다[11]. 건전상태에서 DI_S 는 영에 가까운 수치이고, 결함정도가 심해질수록 큰 값이 측정될 것이다.

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

where, $Re(Z)$ denotes real electro-mechanical impedance, i is frequency, and 0 and d are healthy and damaged state respectively.

한편, 이중 압전재료 기법인 전달 임피던스 기법에서는, 건전상태와 손상상태에서의 인가전압이 동일하다면 다음 Eq. (2)와 같은 손상지수를 사용할 수 있다[8, 10]. 결함이 없는 경우 영에 가깝게 측정될 것이고, 결함정도가 심해질수록 역시 큰 값이 측정될 것이다.

$$DI_D = \frac{\sum_{i=1}^n abs\left(1 - \frac{|V_{out,i}^d|}{|V_{out,i}^0|}\right)}{n} \quad (2)$$

where, V_{out} denotes measured voltage, i is frequency, and 0 and d are healthy and damaged state respectively.

3. 실험셋업 및 손상 시나리오

단일 압전재료 기법 및 이중 압전재료 기법을 이용하여 고력볼트 접합부의 볼트 이완을 탐지하기 위하여 Fig. 1과 같이 두께 10 mm의 강판을 이용하여 실험체를 제작하였다. 기둥과 보의 접합은 직경 10 mm의 고력볼트 (F10T M10) 4개로 각각 체결하였다. Fig. 1의 우측 상단 접합부를 대상으로 실험을 진행하였는데, Fig. 2에 보인 바와 같이 10(L)×10(W)×0.3(T) 규격의 PZT 패치를 접합판 표면에 부착하였다.

고력볼트 조임력의 이완으로 인한 접합부 상태를 추정하기 위하여 Table 1과 같은 손상경우를 발생시켰다. 즉, Fig. 2에 보인 볼트의 조임력을 1개씩 감소시키며 실험을 진행하였는데, 해당 볼트의 100 % 조임력은 68 N·m, 70 % 조임력은 48 N·m로 설정하였다.

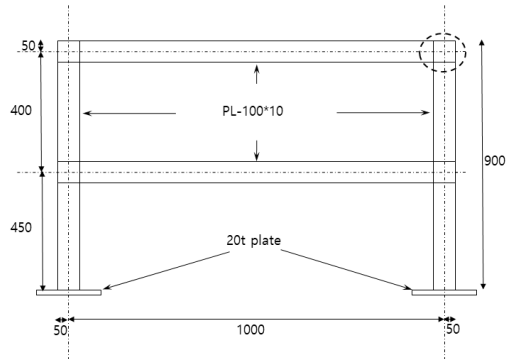


Fig. 1. Shape of the specimen (lengths in mm).

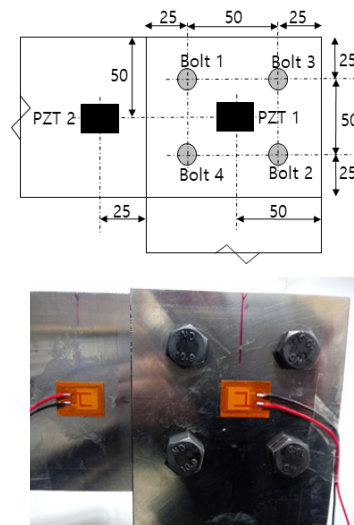


Fig. 2. Bolt and PZT patch locations (lengths in mm).

Table 1. Damage scenario

	Torque (%)			
	Bolt 1	Bolt 2	Bolt 3	Bolt 4
Healthy	100	100	100	100
Case 1	70	100	100	100
Case 2	70	70	100	100
Case 3	70	70	70	100
Case 4	70	70	70	70

4. 단일 압전재료 기법을 이용한 볼트 이완 추정

해당 접합부의 볼트 이완에 민감한 주파수대역을 우선 결정하기 위하여, Fig. 3에 보인 임피던스 분석기

(Keysight: E4990A)를 이용하여 100~300 kHz의 광대역 주파수 범위에서 스위핑 하면서 Fig. 2의 PZT 1에 정현파의 전압을 인가하였다. 이에 대한 임피던스를 역시 PZT 1에서 측정하였으며, 건전상태와 Table 1의 4가지 손상상태에 대하여 각각 실험을 수행하였고, 측정된 임피던스의 실수부를 Fig. 4에 나타내었다. 한편, Eq. (1)의 손상지수 DI_S 를 Fig. 5에 나타내었는데, Case 1, 2, 3 및 4에 대하여 각각 0.0133, 0.0180, 0.0217 및 0.0281로 계산되었으며, 결함정도가 심해질수록 손상지수가 증가함을 알 수 있다.

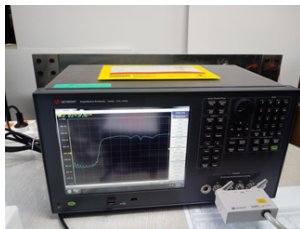


Fig. 3. Impedance analyzer.

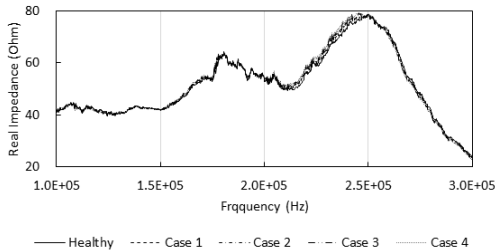


Fig. 4. Real impedance before and after damage (100~300 kHz).

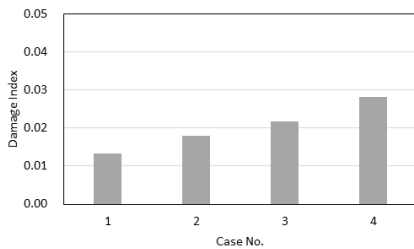


Fig. 5. Damage index, DI_S (100~300 kHz).

Fig. 4로부터, 볼트 이완 정도에 민감한 주파수대역을 230~240 kHz 대역으로 결정한 후, 이 주파수 범위에서 스위핑 하면서 동일한 실험을 수행하였다. 건전상태와 4 가지 손상상태에 대한 임피던스 실수부를 Fig. 6에 비교하였고, Eq. (1)의 손상지수 DI_S 를 Fig. 7에 나타내었다.

Case 1, 2, 3 및 4에 대하여 각각 0.0096, 0.0155, 0.0208 및 0.0368로 계산되었으며, 100~300 kHz 대역에 대한 결과와 마찬가지로 결함정도가 심해질수록 손상지수가 증가함을 알 수 있다.

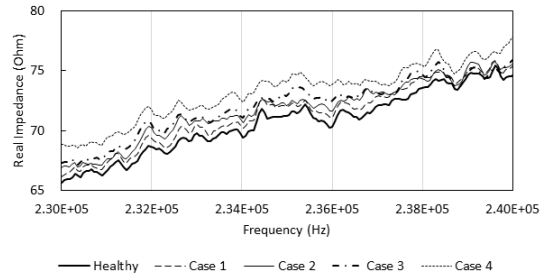


Fig. 6. Real impedance before and after damage (230~240 kHz).

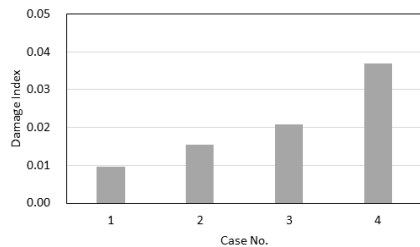


Fig. 7. Damage index, DI_S (230~240 kHz).

5. 이중 압전재료 기법을 이용한 볼트 이완 추정

여기서는, 고가의 임피던스 분석기(20,000~40,000천 원)를 배제하고 Fig. 8에 보인 바와 같이 함수발생기 (Keysight 33210A, 약 1,500천원)와 디지털 멀티미터 (Keysight 34465A, 약 1,500천원)를 이용하여 동일 실험체에 대한 볼트 이완을 탐지하였다. 앞에서 언급된 전달 임피던스 기법을 이용하였는데, 건전상태와 Table 1의 4가지 손상상태에 대하여 각각 실험을 수행하였다. 함수발생기를 이용하여 Fig. 2의 PZT 2에 정현파(3.54 V, 실효값)를 0.25 kHz 간격으로 스위핑 하면서 전압을 인가하였는데, 앞에서 볼트 이완에 민감한 주파수대역으로 결정한 230~240 kHz의 범위에서 인가하였다. 각각의 인가 주파수에 대해서 PZT 1에서 측정되는 전압의 실효값을 기록하였으며, 이에 대한 Eq. (2)의 $abs(1 - |V_{out,i}^t| / |V_{out,i}^0|)$ 를 Fig. 9에 나타내었다. 한편,

Eq. (2)의 손상지수 DI_D 를 Fig. 10에 나타내었는데, Case 1, 2, 3 및 4에 대하여 각각 0.2011, 0.2709, 0.3542 및 0.4791로 계산되었으며, 단일 압전재료 기반 추정결과와 마찬가지로 결합정도가 심해질수록 손상지수가 증가함을 알 수 있다. 따라서, 특정 주파수 대역에서 PZT 패치의 출력값을 모니터링 하고 Eq. (2)의 손상지수를 구함으로써 볼트 이완으로 발생하는 접합부의 결합 유무를 판정할 수 있을 것으로 판단된다, 또한, 볼트 이완의 정도가 커질수록 손상지수가 크게 변화하므로 이를 이용하여 향후 볼트 이완의 정도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 임피던스 분석기를 이용한 단일 압전재료 기법의 결과와 함수발생기 및 디지털 멀티미터만을 이용한 전달 임피던스 기법의 결과를 비교하면, 결합정도가 커질수록 DI_s 및 DI_D 가 모두 증가함을 알 수 있다. 즉, 고가의 임피던스 분석기를 배제하고 일반적인 함수발생기와 디지털 멀티미터를 이용하여, 저비용으로 볼트 접합부의 결합상태 추정이 가능한 것으로 판단된다.



Fig. 8. Function generator and digital multimeter.

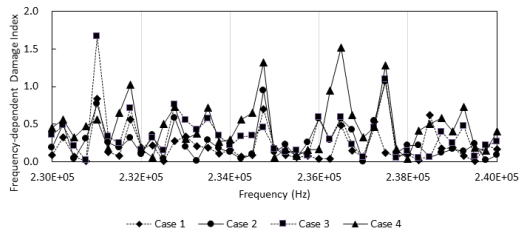


Fig. 9. Frequency-dependent damage index.

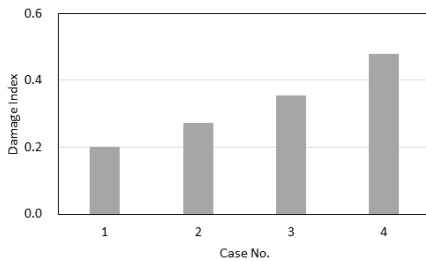


Fig. 10. Damage index, DI_D .

6. 결론

본 연구에서는, 볼트 접합부 건전성 모니터링을 위하여 이중 압전재료 기법인 전달 임피던스 기법을 이용하여 강판에 대한 고력볼트 접합부의 볼트 이완을 탐지할 수 있는 기법을 연구하였다. 고가의 임피던스 분석기를 대체하여 함수발생기와 디지털 멀티미터를 이용하였으며, 이 결과를 임피던스 분석기를 이용한 단일 압전재료 기법을 적용한 결합추정 결과와 비교하였다.

고력볼트 접합부로 구성된 강판 프레임 실험체를 제작하고, 볼트의 조임력을 단계적으로 감소시키며 실험을 수행하였다. 전달 임피던스 기법을 이용하여 손상지수를 구하였으며, 이를 이용하여 결합 유무를 합리적으로 판정할 수 있었다. 또한, 볼트 이완의 정도가 커질수록 손상지수가 크게 변화하므로 이를 이용하여 향후 결합정도를 추정할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 임피던스 분석기를 이용한 단일 압전재료 기법의 결과와 비교하였는데, 결합정도가 커질수록 손상지수가 모두 증가하는 유사한 경향을 보였다. 즉, 고가의 임피던스 분석기를 배제하고 저비용으로 볼트 접합부의 결합상태 추정이 가능한 것으로 판단된다.

향후, 효과적인 볼트 접합부 구조 건전성 모니터링을 위하여, 전달 임피던스 기법을 이용한 결합위치 및 결합 정도 판정을 위한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] H. Yin, T. Wang, D. Yang, S. Liu, J. Shao, and Y. Li, "A Smart Washer for Bolt Looseness Monitoring Based on Piezoelectric Active Sensing Method", *Applied Sciences*, Vol.6, pp.320-329, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app6110320>
- [2] J. Shao, T. Wang, H. Yin, D. Yang, and Y. Li, "Bolt Looseness Detection Based on Piezoelectric Impedance Frequency Shift", *Applied Sciences*, Vol.6, pp.298-308, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app6100298>
- [3] I. Pavelko, V. Pavelko, S. Kuznetsov, and I. Ozolinsh, "Bolt-joint structural health monitoring by the method of electromechanical impedance", *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, Vol.86, pp.207-214, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/AEAT-01-2013-0006>
- [4] J. T. Kim, J. H. Park, D. S. Hong, and D. D. Ho, "Hybrid acceleration-impedance sensor nodes on

Imote2-platform for damage monitoring in steel girder connections”, *Smart Structures and Systems*, Vol.7, pp.393-416, 2011.

DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2011.7.5.393>

- [5] T. C. Nguyen, T. C. Huynh, J. H. Yi, and J. T. Kim, “Hybrid bolt-loosening detection in wind turbine tower structures by vibration and impedance responses”, *Wind and Structures*, Vol.24, pp.385-403, 2017.
DOI: <http://dx.doi.org/10.12989/was.2017.24.4.385>
- [6] H. K. Jung, H. J. Jo, G. Park, D. L. Mascarenas. and C. R. Farrar, “Relative baseline features for impedance-based structural health monitoring”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.25, pp.2294.2304, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X14551435>
- [7] J. Min, S. Park, C. B. Yun, C. G. Lee, and C. Lee, “Impedance-based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity”, *Engineering Structures*, Vol.39, pp.210-220, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.01.012>
- [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: <http://dx.doi.org/10.3390/s18051521>
- [9] S. Bhalla, A. Gupta, S. Bansal, and T. Garg, “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, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org//10.1177/1045389X08100384>
- [10] J. W. Lee, “Low-cost Impedance Technique for Structural Health Monitoring”, *Journal of the Korea Academic-Industrial Cooperation Society*, Vol.19, pp.265-271, 2018.
DOI: <http://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.265>
- [11] 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: <http://dx.doi.org/10.1111/i.1747-1567.2009.00524.x>

이 종 원(Jong-Won Lee)

[정회원]



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

〈관심분야〉

구조물 건전성 모니터링, 손상추정, 스마트센서 기술