가속도와 임피던스를 이용한 볼트 접합부 결함탐지기법

Fault Detection Method of Bolt-joint Using Acceleration and Impedance

이종원*

Lee, Jong-Won*

Abstract

It is necessary to ensure the structural safety of various structures by on-line monitoring of the damages of their bolt-joints. This is an experimental study for the reliable health monitoring of bolt-joints using both acceleration-based global monitoring technique for assessing the global condition of the structure and impedance-based local monitoring technique for small damage estimation. Acceleration and impedance-based damage tests were performed for a specimen composed of bolt-joints. The tightening torque of the bolts was loosened gradually. For global monitoring, the joint damage due to bolt looseness is evaluated by using the modal characteristic and neural network technique obtained from measured acceleration. For local monitoring, the condition of the joint is estimated by measuring the impedance signal for the same bolt loosened state. As a result of applying the acceleration-based technique, it has been found that a damage location can be estimated if the bolt looseness progresses to more than a certain degree, while the damage index increases with the increase in bolt looseness. Further, as a result of applying the impedance-based method, the small damage can be clearly identified by using the damage index. The damage index increases as the degree of bolt looseness increases. The combination of the two techniques may lead to more reliable monitoring.

Key words : Global Monitoring, Local Monitoring, Bolt-joint, Acceleration, Impedance

요 지

다양한 구조물에 사용되는 볼트 접합부의 손상을 상시 모니터링 함으로써 구조적 안전성을 확보할 필요가 있다. 본 연구는 볼트 접합부 건전성 모니터링의 신뢰성 제고를 위하여, 구조물의 전역적 상태를 평가할 수 있는 가속도 기반 전역적 모니터링 기법과 미소손상 추정이 가능한 임피던스 기반 국부적 모니터링 기법을 병행하기 위한 실험연구이다. 고력볼트 접합부가 포함된 실험체에 대하여, 볼트의 조임력을 단계적으로 감소시키며 가속도 및 임피던스 기반 손상실험을 수행한다. 전역적 모니터링을 위하여, 가속도 계측을 통하여 구한 모드특성 및 신경망기법을 이용하여 볼트 이완에 의한 접합부 손상을 평가한다. 국부적 모니터링을 위하여, 동일한 볼트 이완 상태에 대한 임피던스 신호를 측정하여 접합부의 상태를 평가한다. 가속도 기반 기법을 적용한 결과, 일정 정도 이상 볼트 이완의 정도가 진행되면 합리적인 손상위치 추정이 가능하였으며, 볼트 이완의 정도가 커질수록 손상지수도 증가하는 추세를 알 수 있었다. 한편, 임피던스 기반 기법을 적용한 결과, 미소손상을 손상지수를 통하여 확실히 식별할 수 있었으며, 볼트 이완의 정도가 심해질수록 손상지수가 증가함을 알 수 있었다. 즉, 2가지 기법을 병행한다면 보다 신뢰성 있는 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 전역적 모니터링, 국부적 모니터링, 볼트 접합부, 가속도, 임피던스

1. 서 론

볼트 접합은 건축물, 교량, 항공기 등 다양한 구조물에 널리 사용되지만, 반복적인 하중이 작용되고 응력이 집중되

면서 장기간에 걸쳐 볼트의 조임력이 이완될 수 있다. 볼트가 이완되면 접합부의 강성이 저하되며 이러한 접합부의 손상은 전체 구조물의 성능에 영향을 미치며, 손상이 진전되면 구조물의 안전 문제, 사고 및 비용 손실 등을 야기할 수

*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

있다. 따라서 볼트 접합부의 상태를 센서를 이용하여 상시 모니터링 함으로써 구조적 안전성을 확보할 필요가 있다.

볼트 접합부의 건전성 모니터링을 위하여 다음과 같은 다양한 연구가 수행되었다. 프레임 구조물의 부재 및 볼트 접합부의 결함을 손상전후 가속도 계측을 통한 모달 데이터를 이용하여 추정하였는데, 근사 매개변수 변경(Approximate Parameter Change) 기법과 손상 신호 매칭(Damage Signature Matching) 기법을 적용하였으며(Lam et al., 1998), 역시 가속도 계측을 통한 모달 데이터와 신경망기법(Neural Network Technique)을 이용하여 강구조물의 접합부 손상을 추정할 수 있는 기법이 제안되었다(Yun et al., 2001). 한편, 볼트 접합부에 이용되는 한 쌍의 원형 와서에 Lead Zirconate Titanate (PZT) 패치를 부착하여 초음파를 발생시킨 후, 전파되는 초음파를 분석함으로써 볼트의 조임력 상태를 평가할 수 있는 기법이 연구되었고(Yin et al., 2016), 볼트 조임력의 감소로 인한 임피던스 변화를 분석하여 접합부 상태를 평가하였는데, 볼트 헤드에 부착된 PZT 패치의 어드미턴스(Admittance)신호를 사용하였다(Shao et al., 2016). 또한, 헬리콥터 후미의 볼트 접합부에 부착된 PZT 패치의 신호를 분석하여, 볼트 이완으로 인한 전기역학적 임피던스(Electro-Mechanical Impedance)가 통계적으로 안정적인 변화가 있음을 확인하였고(Pavelko et al., 2014), 진동 기반 전역적 모니터링 및 임피던스 기반 국부적 모니터링을 통합할 수 있는 센서노드를 개발하여 이를 볼트 접합부 이음판에 PZT 패치를 부착하여 적용하였으며(Kim et al., 2011), 고가의 임피던스 분석기를 배제하고 저비용으로 볼트 접합부의 결함상태를 추정하기 위하여 전달 임피던스 기법(Transfer Impedance Technique)을 이용하였으며, 그 결과를 일반적 임피던스 기법의 결과와 비교하였다(Lee, 2019).

구조물 건전성 모니터링 기법은 크게 전역적(Global) 모니터링 기법과 국부적(Local) 모니터링 기법으로 분류할 수 있다. 전역적 모니터링 기법은 전체 구조물의 상태를 평가하기 위하여, 주로 구조물의 전역적 가속도 응답을 계측하여 손상에 의한 고유주파수와 모드형상 등 모드특성의 변화를 분석한다. 그러나 손상은 특히 초기단계에서는 국부적 현상이지만, 가속도 기반 고유주파수 및 모드형상은 구조물의 전역적 매개변수이므로, 이러한 모드특성은 초기손상 및 미소손상에 민감하지 않다(Shanker et al., 2011).

전역적 모니터링 기법의 이러한 단점을 보완하기 위하여, 압전재료, 광섬유 및 형상기억합금 등 스마트센서를 이용한 구조물 건전성 감시기법들이 연구되고 있다. 스마트 센서 관련 기법 중 하나인 압전재료 기반 전기역학적 임피던스 기법은 최근 관련 연구가 활발히 진행되고 있으며 구조물 건전성 모니터링을 위한 국부적 결함탐지의 대표적인 기법이다. 이 기법은 주로 대표적인 압전재료인 PZT 패치를 구조물의 표면에 부착한 후, 압전특성을 이용하여 구조물의 전기역학적 임피던스 신호를 모니터링 한다. 즉, 결함에

의한 임피던스 신호의 변화를 분석하여 구조물의 상태를 평가하는 기법이다.

가속도 기반 전역적 모니터링 기법은 구조물의 전역적 상태를 평가하므로 구조물 건전성 모니터링을 위하여 필요하고 적용되어야 한다고 판단된다. 그러나 미소손상 및 초기 손상 추정이 어렵다는 단점을 보완하기 위하여 임피던스 기반 국부적 모니터링 기법을 병행한다면 보다 정확하고 신뢰성 있는 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 실험연구로써, 볼트 접합부의 건전성 모니터링을 위하여 가속도 기반 전역적 모니터링 기법과 임피던스 기반 국부적 모니터링 기법을 함께 사용한다. 전역적 모니터링을 위하여, 가속도 계측을 통하여 구한 고유주파수와 모드형상 및 신경망기법을 이용하여 볼트 이완에 의한 접합부 손상을 평가한다. 국부적 모니터링을 위하여, 동일한 볼트 이완 상태에 대한 임피던스 신호를 측정하고 이를 통하여 손상지수를 구함으로써 접합부의 상태를 평가한 후, 이 결과를 전역적 모니터링 기법의 결과와 비교한다.

2. 이론적 배경

2.1 가속도 기반 전역적 모니터링 기법

볼트 접합으로 구성된 구조물의 해석 및 설계는 주로 강철 점 또는 활철점으로 가정하여 수행되지만, 보와 기둥 접합부의 대부분은 반강접 상태이다. 접합부의 변형 모드 중 가장 중요한 모드는 휨모멘트에 의한 회전변형이며, 반강접 접합부의 휨거동은 접합부의 회전강성(Rotational Stiffness)으로 표현될 수 있다. 즉, 볼트 이완 및 탈락 등에 의한 접합부 손상은 접합부 회전강성의 감소로 평가될 수 있으며, 손상전후 접합부 회전강성을 추정할 수 있으면 그 차이에 의하여 손상을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 접합부 회전강성에 대한 보정계수 $\alpha_{\theta,j}$ 및 손상지수 $\beta_{\theta,j}$ 를 다음 식으로 이용하였다(Yi, 2001).

$$\alpha_{\theta,j} = \frac{k'_{\theta,j}}{k'_{\theta,j} + k_{\theta,j}} \quad (1)$$

$$\beta_{\theta,j} \approx 1 - \frac{k'_{\theta,j}}{k_{\theta,j}} \quad (2)$$

여기서 k_{θ} 는 초기 또는 기저상태, k'_{θ} 는 개선(Updated) 또는 손상상태 접합부 회전강성이고 아래첨자 j 는 접합부 위치이다. Yi (2001)에서는 반강접 접합부를 가지는 보 요소의 강성 행렬에서, 접합부 고정도(Fixity Factor)를 보 양단 및 보의 회전강성으로 정의한 후, 접합부 고정도의 민감도를 조사하였다. 이후 강철점, 활철점 및 반강접 등 접합부의 상태를 간편하게 나타낼 수 있는 Eqs. (1) 및 (2)를 유도하여 접합부에 대한 손상을 추정하였다. 손상지수 $\beta_{\theta,j}$ 는 0에서

1 사이의 값이며, 접합부 손상 추정 시 1에 가까울수록 손상 정도가 심해짐을 의미한다.

본 연구에서는 볼트 접합부의 결함을 추정하기 위하여 다중 퍼셉트론 신경망(Multi-layer Perception Neural Networks)을 사용하는데, 이는 다수의 입력과 출력의 관계를 표현하는 일종의 비선형 함수로 볼 수 있으며, 입출력 관계는 인접한 두 층에 존재하는 뉴런(Neuron)간의 관계를 설정하는 연결 강도(Synaptic Weight)에 의해 결정된다. 따라서, 연결 강도가 변화하면 입출력 관계도 함께 변화하며, 이러한 연결 강도를 주어진 패턴으로 훈련시켜 개선시키는 과정을 학습(Training or Learning)이라 하고, 본 연구에서는 보편적으로 이용되는 역전파 (Back-propagation) 학습방법이 적용된다. 한편, 활성화 함수로써, 역전파 학습에서 일반적으로 사용되는 시그모이드 함수(Sigmoid Function)를 이용한다. 다중 퍼셉트론 신경망에서 입력층은 측정된 데이터로부터 얻은 구조물의 거동을, 출력층은 추정할 손상지수로 각각 구성할 수 있다. 또한, 노이즈 첨가학습(Noise Injection Learning)을 적용하는데, 신경망의 훈련패턴에 인위적으로 일정 정도의 노이즈를 첨가시킨 후 학습을 수행함으로써, 신경망의 일반화 성능을 향상시켜 추정결과의 정확성을 개선시킬 수 있다.

신경망기법 기반 시스템인식 및 손상추정의 과정은 패턴 인식의 문제로 정의될 수 있으며, 신경망기법은 이러한 패턴 인식의 문제에 효과적인 기법으로 알려져 있다. 또한, 본 연구에서 사용된 다중 퍼셉트론 신경망은 다양한 비선형 구조물식별 문제에 적용되고 있다.

우선 위에서 언급된 접합부 회전강성을 초기 가정하여 해당 구조물에 대한 유한요소해석 모델을 수립한다. 건전 상태 구조물에 대한 진동실험을 수행하여 고유주파수 및 모드형상을 구하고, 해석 시 가정한 접합부 회전강성을 신경망기법을 이용하여 실험결과에 대하여 개선함으로써 Eq. (1)의 보정계수를 구한다. 이를 바탕으로 기저모델(Baseline Model)을 수립한 후 다양한 손상경우에 대한 훈련패턴을 생성한다. 이후, 구조물 사용 시 진동응답을 상시 계측하여 고유주파수 및 모드형상을 구하고, 이를 학습된 신경망에 입력하여 Eq. (2)의 손상지수를 구함으로써 손상위치와 손상 정도를 추정한다.

2.2 임피던스 기반 국부적 모니터링 기법

임피던스 기반 국부적 모니터링 기법을 위해서는 일반적으로 임피던스 분석기가 사용된다. 수십에서 수백 kHz 범위 내에서 특정 대역의 주파수를 스위핑(Sweeping)하면서 구조물에 부착된 PZT 패치에 전압을 인가한다. 이에 대한 응답을 PZT 패치의 전기역학적 임피던스로 감지할 수 있다. 감지된 신호를 주파수 영역에서 분석할 수 있으며, 이 결과는 구조물에 이상상태가 발생할 경우 건전상태와 비교하여 변화되고, 이러한 변화를 모니터링 함으로써 구조물의 건전성을 확인할 수 있다.

Liang et al. (1996)은 구조물에 PZT 패치를 부착하였을 때 PZT 패치와 구조물에 대한 각각의 전기적 및 역학적 임피던스를 연구하였고, 그 관계를 분석하였다. 즉, 구조물에 부착된 PZT 패치로부터 측정되는 전기역학적 어드미턴스는 다음 식과 같이 구조물과 PZT 패치의 역학적 임피던스와 직접적으로 연관되어 있음을 제안하였다.

$$Y(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = G(\omega) + jB(\omega) \quad (3)$$

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

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

PZT 패치로부터 측정되는 임피던스의 변화를 측정함으로써 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.

$$DI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \{Re(Z_i^d) - Re(Z_i^0)\}^2}{\sum_{i=1}^n Re(Z_i^0)^2}} \quad (4)$$

여기서 아래첨자 i 는 이산화된 i 번째 주파수이고, 위첨자 0 및 d 는 각각 건전상태와 손상상태를 나타낸다. 결함이 없는 경우 손상지수는 영에 가까운 수치이고, 결함이 발생한다면 영과 크게 다른 값이 측정된다.

접합부의 볼트 이완은 접합부의 접촉압력 강도 및 분포, 강성 등에 영향을 미치므로, 이에 따른 접합부의 임피던스 변화를 측정하여 접합부의 상태를 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 실험 셋업 및 손상 시나리오

가속도 및 임피던스를 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. 가속도계(PCB Piezotronics; 333B40 및 482C05) 4개(Acc 1 - Acc 4)를 Fig. 1에 보인 위치에 설치하였다. Fig. 1의 우측 중앙 접합부(점선 표시 부분)를 대상으로 손상실험을 진행하였는데, 이를 확대한 Fig. 2에 보인 바와 같이 10(L) × 10(W) × 0.3(T) 규격의 PZT 패치 1개를 접합판 표면에 부착하였다. 한편 실험체 하부는 견고한 기초 블록에 연결하였다.

Fig. 1. Shape of the Specimen

Fig. 2. Bolt and PZT Patch Locations

고력볼트 조임력의 이완으로 인한 접합부 손상을 평가하기 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.

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
Case 5	0	100	100	100
Case 6	0	0	100	100
Case 7	0	0	0	100
Case 8	0	0	0	0

4. 가속도를 이용한 볼트 접합부 결함탐지

4.1 진동실험 방법

건전상태와 Table 1의 손상상태에 대하여 각각 10회씩 자유진동실험을 수행하였다. 데이터 취득속도는 8192 Hz로 설정하였으며, National Instruments사의 데이터 취득 장치(NI cDAQ-9178, NI 9234)와 소프트웨어(LabView)를 사용하였다. Fig. 1에 나타난 4개의 가속도계로부터 취득한 진동신호를 이용하여 주파수 영역 분해(Frequency Domain Decomposition) 기법으로 실험체의 고유진동수와 모드형상을 건전상태와 Table 1의 8가지 손상상태에 대하여 각각 구하였다.

4.2 기저모델 개선

건전상태에 대한 자유진동실험 결과로부터 추정된 고유주파수를 Table 2에 정리하였으며, 이를 접합부를 모두 강결점으로 처리한 경우의 유한요소해석 결과와 비교하였다. 유한요소해석 시 Fig. 3과 같이 32개의 요소와 4개의 접합부 회전스프링을 가지도록 모델링하였으며, 탄성계수는 2.05E+11 Pa, 부재의 관성모멘트는 8.333E-7 m⁴로 입력하였다. 실험결과와 모든 접합부를 강결점으로 처리한 경우 해석결과가 차이가 있음을 알 수 있는데, 이는 접합부의 반강접 효과와 접합부 근방 요소들(Fig. 3에서 굵은 실선으로 표시)의 관성모멘트 차이 때문인 것으로 판단하였다. 즉, 접합부 근방의 요소는 실질적으로는 Fig. 2에 보이는 바와 같이 2개의 강판이 중첩되어 있으므로 하나의 강판에 대한 단면 특성치는 차이가 있을 것으로 판단하였다.

우선, 접합부의 회전강성을 초기 가정하였는데, 시행착오 방법(Trial and Error)으로 초기치를 결정하였다. 즉, 초기 4개 접합부의 회전강성(k_{θ})을 $6 \times 3EI/L (=3.083E+6 \text{ N} \cdot \text{m})$ 로 설정한 후 수행한 유한요소해석 결과를 Table 2에 비교하였다.

Table 2. Natural Frequencies (unit: Hz)

Mode no.	1	2	Error (%)
Experiment	115.51	442.37	-
FEM w/ rigid joint	122.60	446.21	3.50
Initial FEM model $k_{\theta}^i=3.083\text{E}+6 \text{ N} \cdot \text{m}$ $I_{\text{joint}} = I$	114.49	435.19	1.25
Updated FEM model $k_{\theta}=3.047\text{E}+6 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($\alpha_{\theta}=0.497$) $I_{\text{joint}} = 1.065I$	115.45	442.13	0.05

Fig. 3. Finite Element Model

이후 신경망기법을 이용하여 4개 접합부의 회전강성(k_{θ})과 접합부 근방 요소들의 관성모멘트(I_{joint})를 개선함으로써 기저모델을 수립하였다. 즉, 2000 세트의 k_{θ} 와 I_{joint} 를 무작위로 샘플링하고, 각각에 대해 2차까지의 고유주파수와 모드형상을 유한요소해석을 통하여 계산함으로써 훈련패턴을 생성하였다. 신경망의 입력층은 2차까지의 고유주파수 및 모드형상으로, 출력층은 k_{θ} 와 I_{joint} 로 구성하였고, 2개의 은닉층을 구성하여 신경망을 학습시켰다. 한편, 노이즈 첨가학습을 위하여 훈련패턴에 1% Root Mean Square (RMS) 수준의 노이즈를 첨가하여 신경망을 학습시켰다. 신경망의 훈련 손실(Training Loss)과 검증 정확도(Validation Accuracy)는 Mean Square Error (MSE)로 각각 0.001125% 및 0.001133%이다.

학습된 신경망에 건전상태 실험결과를 입력하여 k_{θ} 와 I_{joint} 를 추정하였다. 즉, Eq. (1)의 보정계수(α_{θ})가 0.497 ($k_{\theta}=3.047\text{E}+6 \text{ N} \cdot \text{m}$)로 추정되었고, $I_{\text{joint}} = 1.065I$ 로 개선되었다. 개선된 k_{θ} 와 I_{joint} 를 이용한 유한요소해석을 수행하여 계산된 고유주파수를 Table 2에 비교하였는데, 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 한편, Table 2의 오차는 실험결과에 대한 평균절대오차이다. 따라서 이후 수행되는 결함탐지를 위하여 개선된 k_{θ} 와 I_{joint} 를 적용하여 기저모델을 수립하였다.

4.3 가속도 기반 결함탐지

Fig. 3의 4개 볼트 접합부에 대하여, 접합부 회전강성($k_{\theta,1} \sim k_{\theta,4}$)을 달리하는 여러 손상경우들을 샘플링하고 이에 해당되는 고유주파수 및 모드형상을 유한요소해석을 통하여 구한 후 이를 이용하여 신경망의 훈련패턴을 생성할 수 있다. 생성된 훈련패턴을 이용하여 학습된 신경망에, 손상실험 시 계측된 고유주파수 및 모드형상을 입력하면 볼트 조임력 이완에 의하여 감소된 접합부의 회전강성을 평가할 수 있고, 이를 통하여 손상된 접합부의 위치 및 정도를 추정할 수 있다.

2000 세트의 4개 접합부 회전강성($k_{\theta,1} \sim k_{\theta,4}$)을 무작위로 샘플링하고, 각각의 경우에 대하여 변화된 1차 및 2차 고유진동수와, 가속도 응답이 구해지는 4개 위치(Fig. 1 참조)에서의 1차 및 2차 모드형상을 구하였다. 이후 손상전후 고유진동수 비율과 높(Norm)으로 정규화(Normalizing)한 모드형상으로 훈련패턴을 생성하였다. 즉, 각각의 훈련패턴은 2개의 고유진동수 비율, 8개의 모드형상 성분 및 이에 해당하는 4개 접합부의 회전강성으로 구성된다. 즉, 신경망 입력자료는 10개, 출력자료는 4개로 구성하였으며, 8개 및 7개의 노드를 가지는 2개의 은닉층을 구성하였고, 생성된 훈련패턴을 이용하여 신경망을 학습시켰다. 노이즈 첨가학습을 위하여 훈련패턴에 1% RMS 수준의 노이즈를 첨가하여 신경망을 학습시켰다. 한편, 신경망의 훈련 손실과 검증 정확도는 MSE로 각각 0.0163% 및 0.0222%이다.

학습이 종료된 후 Table 1에 보인 8가지 손상경우에 대한 고유진동수와 모드형상을 구한 후 이를 학습된 신경망에 입력하여 접합부 회전강성을 추정하였다. 그 결과를 Fig. 4에 나타내었는데, 세로축은 Eq. (2)의 손상지수 β_{θ} 이다. 즉, 영이면 건전상태를 의미하고, 1에 가까울수록 손상정도가 심해짐을 의미한다.

볼트 이완의 정도가 미소한 Case 1, 2, 3의 경우, 손상이 발생한 접합부(Joint 2)에서 손상지수가 0보다 큰 수로 계산되기는 하지만 미소한 값이다. 또한 다른 접합부(Joint 1)에서 유사한 값의 손상지수가 함께 추정되어, 확실한 손상위치의 평가가 어려운 것으로 판단된다. 그러나 볼트 이완의 정도가 일정 정도 진행된 Case 4 이후부터는 손상 발생 접합부에 대한 손상지수가 다른 접합부들의 손상지수보다 상대적으로 크게 추정되므로 합리적인 손상위치의 추정이 가능한 것으로 판단된다. 한편, 볼트 이완의 정도가 커질수록 손상지수 추정치도 증가하는 추세를 알 수 있다. 다만, 접합부 손상이 극심한 Case 8의 경우 1에 가까운 손상지수가 추정되었다. 이 경우에도 실험체 진동 시 해당 접합부가 미소하게나마 접합부로서 기능하는 것으로 추정되나, 실제 상황에서는 가속도로 결함을 탐지하는데 부적합한 면이 있는 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 극심한 손상까지의 추정결과를 살펴보고자 한 것이다. 또한, 볼트 이완에 따라 접합부의 회전강성이 비선형적으로 변화하는 것으로 추정되며, 손상추정결과도 볼트 이완에 따라 선형적인 변화를 보이지 않는다.

Fig. 4. Estimation Results Using Acceleration

5. 임피던스를 이용한 볼트 접합부 결함탐지

임피던스를 이용하여 손상 접합부(Joint 2)의 볼트 이완을 적절히 추정하기 위하여, 가진 주파수대역을 결정하기 위한 예비실험을 우선 수행하였다. 구조물 건전성 모니터링을 위한 전기역학적 임피던스 기법에서, 일반적으로 30~400 kHz의 주파수 범위에서 임피던스 분석기를 이용하여 PZT 패치에 교류 전압을 인가한다(Bhalla et al., 2009). 따라서 임피던스 분석기(Keysight; E4990A)를 이용하여 건전상태에서 30~400 kHz의 광대역 주파수 범위에서 주파수를 스위핑 하면서 Fig. 2의 PZT 패치에 정현파의 전압(50 mV, 실효값)을 인가하였다. 이에 대한 임피던스를 역시 동일 PZT 패치에서 측정하였으며, 측정된 임피던스의 실수부를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5. Real Impedance for 30~400 kHz

Fig. 5에서 300~320 kHz 주파수 대역에서 임피던스 실수부의 피크가 존재하므로, 이 주파수대역에서 주파수를 스위핑하면서 건전상태와 Table 1의 8가지 손상경우에 대한 실험을 위 예비실험과 동일하게 진행하였다. 건전상태와

8가지 손상상태에 대한 임피던스 실수부를 Fig. 6에 비교하였는데, 손상정도가 증가할수록 건전상태에 대한 임피던스 실수부의 변화가 심해짐을 알 수 있다. 한편, Eq. (4)의 손상지수 DI 를 Fig. 7에 나타내었는데, 300~320 kHz 주파수 대역에서 측정된 모든 주파수에 대한 임피던스에 대하여 손상지수를 구하였다. 건전상태에 대한 실험은 2회 수행되었으며, Fig. 7에서 x축의 0에 대한 값은 2개의 건전상태 간 손상지수를 나타낸다. 건전상태 간 손상지수는 0.008%로, 손상정도가 가장 적은 Case 1의 0.481보다 훨씬 적어서, 미소손상을 확실히 식별할 수 있음을 알 수 있다. 또한 볼트 이완의 정도가 심해질수록 손상지수가 증가함을 알 수 있다. 한편, 볼트 이완과 임피던스 변화의 관계는 비선형이라고 추정되며, 결함탐지결과 역시 볼트 이완에 따라 선형적인 변화를 보이지 않는다.

Fig. 6. Real Impedance Before and After Damage

Fig. 7. Damage Index DI

본 연구에서는 볼트 접합부의 건전성 모니터링을 위하여

가속도 기반 전역적 모니터링 기법과 임피던스 기반 국부적 모니터링 기법을 함께 사용하여 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있는 방법을 연구하였다. 즉, 2가지 방법을 병행하면서, 전역적 모니터링 기법에 의하여 손상발생이 감지될 경우 해당 접합부에 대하여 국부적 모니터링 기법을 적용할 수 있다. 만약 국부적 모니터링 기법에 의하여 손상발생이 감지될 경우, 건전 접합부 및 부재 등에 대한 신경망의 미지수를 감소시키는 등의 방법으로 전역적 기법을 적용하여, 해당 접합부에 대한 집중적인 모니터링을 수행할 수 있다. 위 내용을 정리한 모니터링 절차를 Fig. 8에 정리하였다.

Fig. 8. Bolt-joint Health Monitoring Scheme

6. 결 론

본 연구에서는 가속도 기반 전역적 모니터링 기법과 임피던스 기반 국부적 모니터링 기법을 함께 사용하여 볼트 접합부의 건전성을 모니터링하기 위한 실험연구를 진행하였다. 전역적 모니터링을 위하여 가속도 측정을 통하여 구한 구조물의 모드특성 및 신경망기법을 이용하였고, 국부적 모니터링을 위하여 임피던스 신호를 측정하고 이를 통하여 손상지수를 구함으로써 볼트 이완에 의한 접합부 손상을 추정하였다. 고력볼트 접합부로 구성된 강판 프레임 실험체를 제작하고, 볼트의 조임력을 단계적으로 감소시키며 동일한 손상경우에 대하여 가속도 및 임피던스 기반 손상실험을 수행하였다.

가속도 기반 기법을 적용한 결과, 볼트 이완의 정도가 미소한 경우에는 확실한 손상위치 평가가 어려웠으나, 일정 정도 이상 볼트 이완의 정도가 진행되면 합리적인 손상위치의 추정이 가능하였다. 또한, 볼트 이완의 정도가 커질수록 손상지수 추정치도 증가하는 추세임을 알 수 있었다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이, 가속도 기반 고유주파수 및 모드형상은 구조물의 전역적 매개변수이므로 미소손상에 민감하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 임피던스 기반 기법을 적용한 결과, 미소손상을 손상지수를 통하여 확실히 식별할 수 있었으며, 볼트 이완의 정도가 심해질수록 손상지수가 증가함을 알 수 있었다.

볼트 접합부가 포함된 구조물의 건전성 모니터링을 위하여 모든 부재 및 접합부에 임피던스 기법을 적용하는 것은 경제적인 측면에서 불합리한 것으로 판단된다. 따라서 구조물의 전역적 상태를 평가하기 위한 가속도 기반 전역적 모니터링 기법은, 미소손상 추정이 어렵다는 단점이 있지만, 여전히 필요하고 적용되어야 한다고 판단된다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 주요 접합부에 대한 임피던스 기반 국부적 모니터링 기법을 병행한다면 보다 정확하고 신뢰성 있는 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

향후, 효과적인 볼트 접합부 구조 건전성 모니터링을 위하여, PZT 패치의 위치별 손상지수 차이를 검토할 필요가 있을 것으로 판단되며, 결합정도를 정량적으로 평가하기 위한 임피던스 기반 기법에 대하여 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- 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, No. 8, pp. 991-999.
- Kim, J.T., Park, J.H., Hong, D.S., and Ho, D.D. (2011). Hybrid acceleration-impedance sensor nodes on Imote2-platform for damage monitoring in steel girder connections. *Smart Structures and Systems*, Vol. 7, No. 5, pp. 393-416.
- Lam, H.F., Ko, J.M., and Wong, C.W. (1998). Localization of damaged structural connections based on experimental modal and sensitivity analysis. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 210, No. 1, pp. 91-115.
- Lee, J.W. (2019). Bolt-joint structural health monitoring technique using transfer impedance. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 7, pp. 387-392.
- Liang, C., Sun, F., and Rogers, C.A. (1996). Electro-mechanical impedance modeling of active material systems. *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, No. 2, pp. 171-186.
- Pavelko, I., Pavelko, V., Kuznetsov, S., and Ozolinsh, I. (2014). Bolt-joint structural health monitoring by the method of electromechanical impedance. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, Vol. 86, No. 3, pp. 207-214.
- Shanker, R., Bhalla, S., Gupta, A., and Kumar, M.P. (2011). 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, No. 16, pp. 1841-1856.
- Shao, J., Wang, T., Yin, H., Yang, D., and Li, Y. (2016). Bolt looseness detection based on piezoelectric impedance frequency shift. *Applied Sciences*, Vol. 6, No. 10, 298. doi:10.3390/app6100298
- Yi, J.H. (2001). *Damage assessment of structural joints using structural identification techniques*. Ph.D. dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea.
- Yin, H., Wang, T., Yang, D., Liu, S., Shao, J., and Li, Y. (2016). A smart washer for bolt looseness monitoring based on piezoelectric active sensing method. *Applied Sciences*, Vol. 6, No. 11, 320. doi:10.3390/app6110320
- Yun, C.B., Yi, J.H., and Bahng, E.Y. (2001). Joint damage assessment of framed structures using a neural networks technique. *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 5, pp. 425-435.

Received	December 6, 2019
Revised	December 10, 2019
Accepted	January 10, 2020