무선 임피던스 센서노드를 이용한 강-볼트 접합부의 임피던스기반 손상모니터링에 미치는 온도 영향

홍동수* · 김정태*

*부경대학교 해양공학과

Temperature Effect on Impedance-based Damage Monitoring of Steel-Bolt Connection using Wireless Impedance Sensor Node

Dong-Soo Hong* and Jeong-Tae Kim*

*Ocean Engineering Department, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Damage monitoring 손상모니터링, Temperature effect 온도영향, Lead zirconate titanate-impedance PZT-임피던스, Steel bolt connection 강볼트 접합부, Correlation coefficient 상관계수, Linear regression analysis 선형회귀분석

ABSTRACT: This paper presents the effect of temperature on the impedance-based damage monitoring of steel-bolt connections using wireless impedance sensor nodes. In order to achieve the objective, the following approaches are implemented. First, a temperature-compensated damage monitoring scheme that includes a temperature compensation model and damage detection method is described. The temperature compensation model is designed by analyzing the linear regressions between the temperatures and impedance signatures. The correlation coefficient of the impedance signatures is selected as the damage index to monitor the damage occurrence in the target structures. Second, a wireless impedance sensor node is described for the design of the hardware components and embedded software. Finally, the performance of the temperature-compensated impedance-based damage monitoring scheme is evaluated for detecting a loose bolt in the steel-bolt connections on a lab-scale steel girder under various temperatures.

1. 서 론

거더(Girder)는 부재 상부에 가해지는 하중을 휨 및 전단 강성을 통해 지지하여 하부구조로 전달하는 부재이다. 그 중, 강 거더에는 고장력 볼트에 의한 이음주 주로 사용된다. 고장력 볼트 연결은 볼트 이음으로 인한 인장력이 이음부재간의 일정한 마찰력과 압축력이 되는 방식이다. 고장력 볼트로 체결된 강 거더는 휨 부재로 외력에 의한 지속적인 휨 응력이 발생하면 부재의 구조 이음부 등의 응력집중부에서 균열이 발생한다. 이러한 균열이 성장하여 최종적으로 부재가 파단에 도달하게 된다. 이와 같은 거더 구조물의 안전성과 사용성을 확보하기 위해서는 현재 상태를 파악하여 적절한 보수·보강 시기를 결정하고, 잔존 수명을 예측하는 연구가 필요하다. 거더 구조물의 안전성을 확보하기 위하여 구조물의 응답특성을 이용한 구조건전성모니터링(Structural health monitoring, SHM) 기법에 관한 연구가 활발히 수행되어오고 있다(김정태 등, 2006; 홍동수 등, 2009; Kim et al., 2010). SHM은 대상 구조물의 안전성 및 외부 환경조건들에 대한 구조적 건전성 확보를 위해 구조물의 상태를 지속적으로 감시

하는 행위이다. SHM 기법으로 고주파수 대역의 동적응답특성을 이용하여 대상구조물의 이상상태를 식별하는 기법이 활발히 연구되고 있다. 고주파수 대역 신호로부터 구조물의 상태를 식별하는 기법들은 최근에 이슈화되고 있는 스마트재료 개발과 함께 비약적인 발전을 이루고 있다. 가장 대표적인 스마트재료로는 역학적 변형에 의해 전기적 신호가 발생하고, 전압인가에 의해 역학적 변형이 발생하는 특성을 가지는 압전재료(Piezoelectric material)이다. 대표적인 압전재료에는 PZT(Lead zirconate titanate)가 있다. PZT는 역학적 변형에 의해 압력이 가해지면 압전재료에 전하가 발생하는 압전효과와 전기장이 가해지면 압전재료에 역학적 변형이 발생하는 역압전효과를 이용하여 센서(Sensor)와 가진기(Actuator)로 적용가능하다(Park et al., 1999). 기존의 SHM 시스템들은 집중화(Centralization)된 신호 계측 장치와 케이블(유선)로 연결된 센서들로 이루어졌다. 유선계측 시스템의 센서들은 신호처리 개념이 없는 상태로 단지 계측하는 역할만 수행한다. 집중화된 신호계측 서버는 신호를 수집, 저장, 처리 및 분석하는 역할을 모두 수행한다. 이는 서버에 큰 부담을 주어 전체적인 계측 시스템의 불안정을 초래한다. 또한, 채널 당 수십 미터에서 수백 미터의 케이블로 구성되고, 높은 초기 센서

설치비용이 소요됨에 따라 계측 시스템의 유지관리에 어려움을 초래한다(박재형 등, 2010; Park et al., 2010).

또한, 강 거더는 비, 바람, 태양복사 및 온도와 같은 환경적 요인에 항상 노출되어 있다. 이러한 환경적 요인들은 계측 및 분석이 용이하지 않으면서 구조물의 응답특성을 변화시키는 인자이며, SHM 결과의 오류로 작용한다. 이에, 온도와 같은 환경적 요인을 보정하기 위한 해결방안이 강구되어야 한다(김정태 등, 2003; 박재형 등, 2008; 홍동수와 김정태, 2011). PZT를 이용한 임피던스기반 SHM에 미치는 온도영향에 대한 연구사례 및 특징은 다음과 같다. Sun et al.(1995)은 트러스 모형을 이용하여 온도와 임피던스간의 관계를 분석하였다. 온도변화에 따른 임피던스의 좌우이동(Shifting)을 보정하기 위해 온도와 임피던스간의 상호상관성을 이용한 온도보정기법을 제안하였다. Park et al.(1999)은 25-75℃의 온도변화 조건하에서 임피던스기반 SHM의 적용성에 관한 연구를 수행하였다. 볼트접합 구조물, 콘크리트 구조물 및 기계 톱니장치를 대상으로 온도변화 및 손상 조건에 따른 RMSD(Root mean square deviation) 변화로부터 손상 검출의 가능성을 검토하였다. Bhalla et al.(2003)은 트러스 모형에 대한 임피던스기반 SHM에서 온도영향을 최소화하기 위한 방법을 제시하였다. 온도영향을 고려한 손상모니터링 방법으로 PCA(Principal component analysis) 기법을 적용하였다. 적용된 PCA 기법은 임피던스 주파수 구간에 존재하는 공진주파수들의 온도변화에 따른 좌우이동정도를 식별하여 온도영향을 고려한 결과를 도출하였다.

본 연구에서는 강 거더의 강-볼트 접합부를 대상으로, 무선 임피던스 센서노드를 이용한 임피던스기반 손상모니터링에 미치는 온도 영향에 대한 연구를 수행하였다. 먼저, 온도 보정 기법과 임피던스기반 SHM 기법을 이용한 온도 보정된 손상 모니터링 체계를 제시하였다. 온도 보정은 온도와 임피던스 신호간의 선형회귀를 분석함으로써 적용되었다. 임피던스 신호의 상관계수는 강-볼트 접합부에 발생한 손상을 탐지하기 위한 손상 지수로 선정되었다. 다음으로, 무선 임피던스 센서노드의 하드웨어 구성 및 내장된 임베디드 소프트웨어를 제시하였다. 마지막으로, 온도 변화 조건하의 모형 강 거더의 강-볼트 접합부 손상을 대상으로 온도 보정된 임피던스기반 손상 모니터링 체계의 적용성을 검증하였다.

2. 온도 영향을 고려한 임피던스기반 손상모니터링

2.1 임피던스기반 손상모니터링 기법

임피던스기반 손상모니터링 기법은 PZT를 이용하여 국부적 위치에서의 상태 변화를 감지하는 기법이다. PZT가 구조물의 표면에 부착되어 있는 경우 PZT의 전기-역학적 임피던스 $Z(\omega)$ 는 구조물의 역학적 임피던스 $Z_s(\omega)$ 와 PZT의 역학적 임피던스 $Z_a(\omega)$ 가 결합된 함수로서 아래와 같이 나타낼 수 있다(Liang et al., 1994).

$$Z(\omega) = \frac{\omega h}{\omega l j} \left\{ \frac{\bar{\epsilon}_{33}^T}{\epsilon_{33}} - d_{31}^2 Y^E + \left(\frac{Z_a(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} \right) d_{31}^2 Y^E \left(\frac{\tan kl}{kl} \right) \right\}^{-1} \quad (1)$$

이 식에서 w, l, h 는 각각 PZT 패치의 넓이, 길이 및 두께를 의미하며 $\bar{\epsilon}_{33}^T = \epsilon_{33}^T (1 - \delta_j)$ 는 일정한 응력이 작용할 때 PZT 패치의 복소전기유전율이다. δ_j 는 PZT 센서의 유전손실계수, $\bar{Y}^E = Y^E (1 + \eta_j)$ 는 일정한 전기장에서 PZT 센서의 탄성계수, η_j 는 PZT 센서의 감쇠계수, d_{31} 는 PZT 센서의 압전상수, Z_a 와 Z_s 는 PZT 센서와 구조물의 임피던스, $k = \omega \sqrt{\rho / Y^E}$ 는 파수, ρ 는 PZT 패치의 밀도를 의미한다. 국부 구조계의 상태가 변화하면 구조물의 역학적 임피던스 Z_s 가 변화한다. 따라서, 전기역학적 임피던스 $Z(\omega)$ 를 모니터링함으로써 손상을 경보할 수 있다. 본 연구에서는 임피던스의 변화를 정량화하기 위하여 다음과 같은 임피던스 신호의 상관계수(Correlation coefficient, CC)를 적용하였다(Zagrai and Giurgiutiu, 2001).

$$CC_{Z_1 Z_2} = \frac{E[Z_1 Z_2] - \mu_{Z_1} \mu_{Z_2}}{\sigma_{Z_1} \sigma_{Z_2}} \quad (2)$$

여기서 $E[\cdot]$ 는 기댓값을 나타내고, Z_1 와 Z_2 는 각각 임피던스 특징을 나타내며, μ 와 σ 는 각각 임피던스 신호의 평균과 표준편차를 나타낸다. 손상 경보는 임피던스의 상관계수를 이용한 관리도분석으로 아래와 같은 하한관리치(Lower control limit, LCL)를 이용하였다.

$$LCL_{CC_{Z_1 Z_2}} = \mu_{CC_{Z_1 Z_2}} - 3\sigma_{CC_{Z_1 Z_2}} \quad (3)$$

여기서, $\mu_{CC_{Z_1 Z_2}}$ 와 $\sigma_{CC_{Z_1 Z_2}}$ 는 각각 상관계수에 대한 평균과 표준편차를 나타낸다. 상관계수가 하한관리치 LCL 이하로 떨어지게 되면 손상이 발생한 것으로 경보하게 된다.

2.2 선형회귀분석 및 온도 영향 보정 알고리즘

온도 영향을 고려한 임피던스기반 손상모니터링 알고리즘은 Fig. 1과 같이 설정되었다. Fig. 1은 4단계로 구성되었으며, 단계별 신호 분석, 온도 영향 분석 및 손상발생 경보를 수행하도록 구성되었다. 이들 4단계의 온도 영향을 고려한 임피던스기반 손

Fig. 1 Temperature-Compensated Impedance-based Damage Monitoring Scheme for Steel-Bolt Connection

Fig. 2 Prototype of Imote2-Platformed SSeL-I Sensor Node for Impedance Measurement

상모니터링과정은 다음과 같이 설명된다. 먼저, 선정된 위치로부터 임피던스 신호 및 온도 계측을 수행한다. 두 번째로, 임피던스 상관계수 추출 및 하한관리치 LCL를 결정한다. 세 번째로, 온도 영향을 고려한 임피던스 상관계수 추출을 수행한다. 마지막으로, 온도 영향을 고려한 임피던스 상관계수의 하한관리치 LCL 이탈 여부로부터 손상 발생 경보를 수행한다. 온도 영향 분석은 선형회귀분석(Linear regression analysis)을 이용하였다.

회귀분석은 통계적 방법으로 연속형 변수들에 대한 독립변수와 종속변수사이의 인과관계를 분석한다. 회귀분석의 기본가정으로 잔차(Residuals)는 모든 독립변수 값에 대하여 동일한 분산을 가지며, 평균은 0이다. 수집된 정보의 분산은 정규분포를 이루며, 독립변수 상호간에는 상관관계가 없다. 또한, 시간에 따라 수집한 정보들은 잡음의 영향을 받지 않는다. 회귀분석 중에서 가장 단순화된 형태로 식(4)과 같이 1개의 종속변수와 1개의 독립변수 사이의 관계를 분석하는 선형회귀분석을 적용하였다.

$$Y = \alpha + \beta X \quad (4)$$

여기서, $\alpha (= \bar{Y} - \beta \bar{X})$ 는 절편(상수항)이고, $\beta (= \{(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})\} / (X - \bar{X})^2)$ 은 독립변수의 계수이다. X 는 독립변수로 온도를 나타내며, Y 는 종속변수로 임피던스 상관계수를 나타낸다. $\bar{X}$ 와 $\bar{Y}$ 는 각각 독립변수와 종속변수의 평균을 나타낸다. 또한, α 와 β 의 추정치는 최소제곱법(Least squares method)으로 잔차가 0이 되는 조건하에서 추정된다.

3. 무선 임피던스 센서노드

무선 임피던스 센서노드는 Kim et al.(2011)에 의해 개발된 Imote2 센서플랫폼기반의 SSeL-I 센서노드를 선정하였다. Fig. 2는 임피던스 계측을 위한 Imote2 센서플랫폼기반 SSeL-I 센서노드를 보여준다. Fig. 2(a)와 같이 Imote2 센서플랫폼(Memsic Co., 2010)은 SSeL-I 센서노드를 제어하여 신호 계측 및 응답특성 추출, 결과 저장 및 송·수신 등을 수행한다. Imote2 센서플랫폼은 저전력 32Bit 프로세서 PXA27x를 탑재하고 있으며, 풍부한 메모리 지원(256kB SRAM, 32MB FLASH, 32MB SDRAM)을 보유하고 있다. 또한, 2.4GHz 무선 안테나를 이용한 광대역 통신 및

대용량 데이터 처리가 용이하다. Imote2 센서플랫폼은 고속 모드에서 전력 소비량이 크고 무선데이터 전송거리가 짧다. 하지만, 신호 처리속도가 빠르고 무선데이터 전송거리는 외부 안테나의 사용(전력 소비량 증가)에 의해 최대 125m까지 늘일 수 있다. Fig. 2(b)와 같이 SSeL-I 센서노드는 초소형의 저가형 칩인 AD5933을 이용하여 임피던스 계측을 수행하는 무선 센서노드를 개발한 Mascarenas et al.(2007)의 연구를 기초로 제작되었다. 임피던스 신호계측을 위한 SSeL-I 센서노드는 AD5933 임피던스 칩과 임피던스 측정 명령을 임피던스 칩에 전달하는 I2C 통신용 풀업 저항(Pull-up resistor) 및 노이즈 제거용 Capacitor로 구성되었다. AD5933 임피던스 칩은 신호 발생기, 디지털 아날로그 변환기(DAC), 전류-전압 증폭기(Current-to-voltage amplifier), 저역통과(Low-pass) AA 필터, 아날로그 디지털 변환기(ADC), 이산푸리에변환(DFT) 해석기가 내장되었다. SSeL-I 센서노드는 유선 상용계측기에 비해 상대적으로 작은 임피던스 강도 및 주파수 측정 범위에 적용가능하지만, 유선 임피던스 계측장비에 비해 매우 저가로 제작될 수 있다.

Fig. 3 Schematic of Embedded Software for Wireless Impedance Sensor Node

무선 임피던스 계측을 위해 Imote2 센서플랫폼기반 SSeL-I 센서노드에 내장된 임베디드 소프트웨어 체계는 Fig. 3과 같다. 임피던스 신호 계측 및 분석은 Imote2의 독자적인 운영체제인 TinyOS를 통해 이루어진다. TinyOS는 센서보드의 제어를 위한 장치와 무선통신 프로토콜, 시간동기화 기술, 신호계측을 위한 프로그램과 Multi-hop 통신 프로토콜, 분산 신호처리 기술과 무선 센서 네트워크 활용 소프트웨어, SHM을 위한 다양한 알고리즘 모듈 및 센서의 성능 테스트를 위한 유틸리티들로 구성되어 있다. Imote2 센서플랫폼을 이용한 임피던스 신호 계측 수행은 ISHMP service toolsuite 소프트웨어를 이용하여 수행된다. 또한, 임피던스 응답특성추출 및 손상 모니터링 기법의 적용은 SSeL-SHM tools 소프트웨어를 이용하여 수행된다.

4. 실험 검증

4.1 대상구조물 및 실험구성

강 거더의 강-볼트 접합부 손상에 대한 온도 영향을 고려한 임피던스기반 SHM 검증은 Fig. 4와 같이 H형 단면(H-200×180×8×100)을 가지는 총 길이 4.14m의 구조물을 선정하였다. 대상구조물은 두 개의 H형강(2.07m)을 고정력 볼트와 접합판(Splice plate)을 이용하여 연결하였다. 고정력 볼트 체결은 토크 렌치(Torque wrench)를 이용하여 체결력(160N·m)을 도입하였다. 구조물은 슬링벨트(Sling belt)와 크레인을 이용하여 양단 자유(Free-free boundary)조건으로 지지되었다. 임피던스 응답 특성 추출은 Fig. 4와 같이 H형강을 연결하기 위한 고정력 볼트와 접합판에 PZT(10×10×0.25mm, PZT5A plate) 센서가 부착된 인터페이스 와셔(Park et al., 2010)를 설치하여 계측되었다. 인터페이스 와셔는 크게 두 가지 목적을 위해 사용되었다. 먼저, 제한적 크기의 PZT 센서 사용과 PZT 대비 강성에 매우 높은 강 구조물에서 PZT 부착 인접부의 임계부재 맞춤형 손상 모니터링을 용이하고자 사용하였다. 다음으로, Park et al., (2010)에 의해 검증된 것처럼, 무선 임피던스 센서노드의 제한적 측정범위(~100kHz 이내)로 특정 주파수범위내에서 뚜렷한 응답특성의 변화를 관찰이 용이하고자 사용하였다. PZT 센서는 Bolt 2의 손상을 감지하도록 Bolt 2의 인터페이스 와셔에 부착되었으며, Bolt 1에는 PZT 센서와 인터페이스 와셔가 부착되지 않았다(실제 임피던스 기법의 적용에서 임피던스가 PZT 센서 부착 인접부의 손상에 민감하게 반응(감지범위가 협소)하고, 인터페이스 와셔의 사용을 통해 Bolt 2의 손상에 직접적인 감지가 용이하다. 상대적으로 PZT 센서로부터 먼 위치이며, 인터페이스 와셔의 도입이 되지 않은 Bolt 1의 손상에 대한 변화는 감지가 용이하지 않다.). 임피던스 신호는 10kHz-100kHz의 주파수 범위를 180Hz의 간격으로 계측하였다. 임피던스 신호는 임피던스 분석기인 HIOKI 3532와 LabVIEW로부터 1V의 교류전압을 PZT에 인가하여 계측하였다. 온도영향 분석을 위한 실험은 2010년 7월 22일부터 약 6개월간 부경대학교 스마트구조공학실험실에서 수행되었다. Fig. 5는 약 6개월간은 계측된 온도와 임피던스의 변화를 보여준다. 임피던스 신호에 대한 계측은 1시간 간격으로 수행하였으며, 수행기간 중 온도는 5.7℃에서 29.9℃까지 변화하였

다. 실험 수행기간 중, 몇 차례 발생한 계측장비의 에러로 인해 불연속적인 실험 계측이 이루어졌다. 온도계측은 KYOWA사의 Universal Recorder (EDX-100A)와 K-type Thermocouple Wire를 이용하였다.

강 거더의 강-볼트 접합부 손상으로 볼트 체결력 변화 식별을 위해 Table 1과 같은 실험을 구성하였다. 먼저, 전체 볼트 이음부의 체결력이 160N·m로 고정된 비손상 상태(Reference)를 도입하였다. 비손상 상태의 임피던스 신호 계측 시, 6.4℃의 온도 조건에서 수행되었다. 다음으로, 볼트 체결력 변화에 의한 손상은 접합판의 두 개의 볼트 이음부를 기준으로 각각의 체결력이 감소하는 조건(Bolt-1 손상 & Bolt-2 손상)하에서 실험을 수행하였다. 체결력 감소 실험은 일정한 온도인 20.7℃(Bolt-1 손상)과 20.8℃(Bolt-2 손상)의 온도 조건에서 수행되었다. 앞서 언급한 것과 같이, PZT 센서는 Bolt 2의 인터페이스 와셔에 부착되었으며, Bolt 1에는 인터페이스 와셔 및 PZT 센서가 설치되지 않았다.

4.2 온도 영향을 고려한 임피던스기반 손상경보 결과

온도 영향을 고려한 강 거더의 임피던스기반 손상경보는 Fig. 6과 같이 온도와 임피던스 상관계수간의 선형관계를 분석하여 수행되었다. Figures 5(b)와 6에 도시된 바와 같이, 약 6개월간의 장기 모니터링 중 계측장비의 에러로 인해 몇 차례의 불연속적인 실험 계측이 수행되었다. 특히, 2010년 12월 말에 발생한 약 5일간의 계측장비 에러 후, 실내 온도가 급격하게 떨어졌다. 이는 Fig. 6에서와 같이, 특정 온도구간(약 18℃~20℃)의 계측이 이루어지지 않은 결과를 도출하였다. 또한, 이 구간을 전후로 온도와 임피던스 상관계수의 선형관계가 온도 구간 별, 그룹을 이루는 형태로 나타났다. 이와 같은 결과는 계측장비의 에러와 급격한 온도변화로 계측환경의 불확실성 요소가 작용한 것으로 사료된다. 본 논문에서는 온도변화 조건이외의 불확실성 요소를 배제하고, 전체 계측 및 분석된 결과를 활용하여 온도 영향에 대한 선형관계분석을 수행하였다. 선형관계분석은 식 (5)과 같이 계측된 온도 중, 최대 온도 29.9℃를 기준으로 나머지 온도 조건간의 상관성으로 분석되었다.

$$CC = 0.0138 T + 0.4884, \quad R^2 = 0.9078 \quad (5)$$

여기서, T 와 R^2 는 각각 온도와 결정계수를 나타낸다. 결정계수는 추정된 회귀선과 실관측치간의 적합도를 나타내는 척도인데, 이와 같이, 전체 온도 조건과 임피던스 상관계수간의 선형관계 분석결과 R^2 가 0.9078로 매우 높은 상관성을 보였다. 또한, 온도 1℃ 변화조건에 대해 임피던스 상관계수는 0.0138 변화가 발생한다는 것을 도출하였다. 식 (5)과 같은 선형관계식에서 회귀선의 기울기, 즉, 온도 변화에 따른 임피던스의 변화율($\Delta CC = 0.0138 \Delta T$)을 이용하여 온도 변화에 따른 상관계수의 변화를 보정하였다. 먼저, 손상발생 경보를 수행하기 위한 비손상 상태에서 4회 계측된 임피던스 상관계수의 평균(0.9910)과 표준편차(0.0045)를 식 (3)에 적용하여 하한관리치 LCL 0.9774를 도출하였다. 하한관리치 LCL 이하로 임피던스 상관계수가 벗어나게 되면 손상이 발생한 것으로 경보하게 된다. 다음으로, 온도 보정 전후의 Bolt-1 손상과 Bolt-2 손상에 대한 임피던스 상관계수를 도출하였다. 온도 보정 전후의 임피던스 상관계수 변

Table 1 Damage Scenarios for Temperature-Compensated Impedance-based Damage Alarming of Steel-Bolt Connection

Damage Case	Damage Scenario	Temperature T (°C)	Temperature Change ΔT (°C)
Reference	All bolts fastened by 160 N-m	6.4	-
Bolt-1 Damage	Bolt 1 loosened by 35 N-m (all others remained as 160 N-m)	20.7	-14.3
Bolt-2 Damage	Bolt 2 loosened by 35 N-m (all others remained as 160 N-m)	20.8	-14.4

Fig. 4 Experimental Setup for Temperature-Compensated Impedance-based Damage Alarming of Steel-Bolt Connection **Fig. 5** Time History of Temperature-Impedance during Long-term Monitoring of Undamaged Steel-Bolt Connection

화로, Bolt-1 손상은 온도 보정 전, 임피던스 상관계수는 4회 계측에 대한 평균으로 0.7810을 보였다. 이는, 비손상 상태와 Bolt-1 손상간의 온도 차 14.3°C와 온도변화에 따른 임피던스 변화율($\Delta CC = 0.0138 \Delta T$)에 의해 온도 보정 후, 0.9779(4회 계측 평균)로 수정되었다. 또한, Bolt-2 손상은 온도 보정 전, 임피던스 상관계수는 4회 계측에 대한 평균으로 0.2395를 보였다. 이는, 비손상 상태와 Bolt-2 손상 간의 온도 차 14.4°C와 $\Delta CC = 0.0138 \Delta T$ 에 의해 온도 보정 후, 0.4378(4회 계측 평균)로 수정되었다.

Fig. 7은 온도 보정 전후의 임피던스기반 손상경보 결과이다. 먼저, 온도 보정 전(Fig. 7(a)) 손상경보 결과에서는 'Bolt-1 손상'과 'Bolt-2 손상' 경우에서 하한관리치 LCL을 벗어났으며, 손상발생을 경보하였다. 하지만, PZT 센서의 모니터링 범위 밖에 있는 'Bolt-1 손상'을 모니터링한 결과는 오류로 추정된다. 다음으로, 온도 영향 분석을 통해 임피던스기반 손상모니터링의 보정이 이루어졌다. 온도-임피던스 선형회귀 보정식($\Delta CC = 0.0138 \Delta T$)을 사용해서 비손상과 손상상태간의 온도영향을 보정하였다. 온도 보정 후, Fig. 7(b)에는 'Bolt-2 손상' 경우에서 하한관리치 LCL을

Fig. 6 Result of Linear Regression Analysis between Temperature and Impedance

Fig. 7 Temperature Compensated Impedance-based Damage Monitoring Results for Steel-Bolt Connection

벗어났으며, 손상발생을 정확히 경보하였다. 즉, 온도 보정을 통해 손상정보 오류가 발생하지 않았다. 이로부터, 온도 영향 분석을 통해 강-볼트 접합부에 대한 임피던스기반 SHM 기법 적용 결과의 개선이 이루어졌다.

4. 결 론

본 연구에서는 강 거더의 강-볼트 접합부를 대상으로 무선 임피던스 센서노드를 이용한 임피던스기반 손상모니터링에 미치는 온도 영향에 대한 연구를 수행하였다. 먼저, 강-볼트 접합부에 발생한 손상을 탐지하기 위해 1)임피던스 상관계수를 이용한 손상지수 산정 및 2)임피던스-온도간의 선형회귀분석을 이용한 온도 영향 분석을 통해 온도 보정된 임피던스기반 손상 모니터링 체계를 제시하였다. 다음으로, 무선 임피던스 센서노드의 하드웨어 구성 및 내장된 임베디드 소프트웨어를 제시하였다. 무선 임피던스 센서노드는 Imote2 센서플랫폼기반의 SSeL-I 센서노드를 선정하였다. 임베디드 소프트웨어는 Imote2의 독자적인 운영체제인 TinyOS를 기반으로, ISHMP service toolsuite와 SSeL SHM tools를 이용하여 임피던스 신호 계측, 특성 추출 및 손상모니터링의 적용이 수행되었다. 마지막으로, 온도 변화 조건하의 모형 강 거더의 강-볼트 접합부 손상을 대상으로 온도

보정된 임피던스기반 손상 모니터링 체계의 적용성을 검증하였다. 손상은 강-볼트 접합부에 인터페이스 와셔와 PZT 센서가 부착되어 손상 감지가 용이한 경우(Bolt-2 손상)와 부착되지 않아 손상 감지가 용이하지 않은 경우(Bolt-1 손상)를 구분하였다. 두 손상에 대한 온도 보정전후의 임피던스기반 손상경보 결과를 비교하였다. 이로부터, 온도 보정을 통해 임피던스기반 손상경보 결과가 개선되는 것을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2011-1-D00063)을 통해 수행되었습니다. 또한, 연구에 참여한 대학원생은 BK21 프로그램의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- 김정태, 나원배, 홍동수, 이병준 (2006). "가속도 및 임피던스 신호의 특징분류를 통한 교량 연결부의 하이브리드 손상 모니터링 기법", 한국지진공학회 논문집, 제20권, 제6호, pp 57-65.
- 김정태, 윤재웅, 백중훈 (2003). "강판형의 진동모드특성에 미치는

- 온도의 영향", 한국해양공학회지, 제17권, 제6호, pp 58-64.
- 박재형, 이소영, 김정태 (2010). "Development of Acceleration-PZT Impedance Hybrid Sensor Nodes Embedding Damage Identification Algorithm for PSC Girders", 한국해양공학회지, 제24권, 제3호, pp 1-10.
- 박재형, 홍동수, 김정태, 조현만 (2008). "불확실한 온도 조건하의 모형 강관형교의 진동기반 손상 모니터링", 한국해양공학회지, 제22권, 제1호, pp 75-82.
- 홍동수, 김정태 (2011). "불확실한 온도 조건하의 PSC 거더 교량의 가속도-임피던스 기반 손상 모니터링", 한국전산구조공학회 논문집, 제24권, 제1호, pp 107-117.
- 홍동수, 도한성, 나원배, 김정태 (2009). "가속도-임피던스 특성을 이용한 강관형교의 하이브리드 구조건전성 모니터링", 대한토목학회지, 제29권, 제1A호, pp 61-73.
- Bhalla, S., Naidu, A.S.K. and Soh, C.K. (2003). "Influence of Structure-Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE", Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials, Vol 5062, pp 263-269.
- Kim J.T., Park. J.H., Hong. D.S. and Ho, Duc-Duy (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.
- Kim J.T., Park. J.H., Hong. D.S. and Park. W.S. (2010). "Hybrid Health Monitoring of Prestressed Concrete Girder Bridges by Sequential Vibration-Impedance Approaches", Engineering Structures, Vol 32, pp 115-128.
- Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A. (1994). "Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems-Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol 5, pp 12-20.
- Mascarenas, D.L. Todd, M.D., Park, G. and Farrar, C.R. (2007). "Development of an Impedance-based Wireless Sensor Node for Structural Health Monitoring", Smart Materials and Structures, Vol. 16, pp 2137-2145.
- Memsic Co. (2010). "Datasheet of ISM400", Available from: <<http://www.memsic.com>>.
- Park, G., Cudney, H., and Inman, D., (1999), "Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures," in Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, Proceedings of the SPIE, Vol 3670, pp 461-69.
- Park, J.H., Kim, J.T., Hong, D.S., Mascarenas, D. and Lynch, J.P. (2010). "Autonomous Smart Sensor Nodes for Global and Local Damage Detection of Prestressed Concrete Bridges Based on Accelerations and Impedance Measurements", Smart Structures and Systems, Vol 6, No 5-6, pp 711-730.
- Sun, F., Chaudhry, Z. and Rogers, C.A. (1995). "Automated Real-Time Structure Health Monitoring via Signature Pattern Recognition", Proceedings of the SPIE Conference on Smart Structures and Materials, Vol 2443, pp 236-247.
- Zagrai, A. and Giurgiutiu. V. (2001). "Electro-Mechanical Impedance Method for Crack Detection in Thin Plates", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol 12, No 10, pp 709-718.

2011년 10월 14일 원고 접수

2012년 1월 9일 심사 완료

2012년 2월 13일 게재 확정