

# 무선 가속도 센서노드를 이용한 강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상 모니터링 체계

## Vibration-based Damage Monitoring Scheme of Steel Girder Bolt-Connection Member by using Wireless Acceleration Sensor Node

홍 동 수\*      김 정 태†  
Hong, Dong-Soo      Kim, Jeong-Tae

### 요 지

본 연구에서는 무선 가속도 센서노드를 이용한 강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상 모니터링 체계를 제안하였다. 이 같은 연구목표를 위해, 다음과 같은 연구를 수행하였다. 먼저, 무선 가속도 센서노드의 하드웨어 구성 및 내장된 작동 소프트웨어를 제시하였다. 다음으로, 강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상 모니터링 체계를 제시하였다. 손상 모니터링 체계는 가속도 응답특성 분석을 통해 전역적 손상발생 경보 및 손상위치 추정을 수행한다. 전역적 손상발생 경보는 파워스펙트럼밀도의 상관계수를 적용하였다. 손상위치 추정은 고유 진동수기반 손상검색 기법과 모드형상기반 손상검색 기법을 적용하였다. 마지막으로, 모형 강 거더의 볼트연결 부재 손상을 식별하기 위한 진동기반 손상 모니터링 체계의 적용성을 검증하였다.

**핵심용어** : 손상모니터링, 가속도, 파워스펙트럼밀도, 강 거더, 상관계수, 손상지수

### Abstract

This study propose the vibration-based damage monitoring scheme for steel girder bolt-connection member by using wireless acceleration sensor node . In order to achieve the objective, the following approaches are implemented. Firstly, wireless acceleration sensor node is described on the design of hardware components and embedded operation software. Secondly, the vibration-based damage monitoring scheme of the steel girder bolt-connection member is described . The damage monitoring scheme performed global damage occurrence alarming and damage localization estimation by the acceleration response feature analysis. The global damage alarming is applied to the correlation coefficient of power spectral density. The damage localization estimation is applied to the frequency-based damage detection technique and the mode-shape-based damage detection technique. Finally, the performance of the vibration-based damage monitoring scheme is evaluated for detecting the bolt-connection member damage on a lab-scale steel girder.

**Keywords** : *damage monitoring, acceleration, power spectral density, steel girder, correlation coefficient, damage index*

## 1. 서 론

강 거더는 부재 상부에 가해지는 하중을 휨 및 전단 강성을 통해 지지하여 하부구조로 전달하는 부재로, 고장력 볼트에 의한 이음이 주로 사용된다. 강 거더의 볼트연결 부재는 휨 부재로 구조 이음부 등의 응력집중부에서 균열이 발생한다

다(장동일, 2005; Rolfe 등, 1997). 이러한 균열이 성장하여 최종적으로 부재가 파단에 도달하게 된다. 이와 같은 강 거더의 안전성을 확보하기 위해 구조물의 응답특성을 이용한 손상 모니터링 기법에 관한 연구가 활발히 수행되어 오고 있다(김정태, 1999; 박재형 등, 2007; 윤정방 등, 1996; Rytter, 1993). 저주파수 대역의 동적응답특성을 이용하여

† 책임저자, 정회원 · 부경대학교 해양공학과 교수  
Tel: 051-629-6585 ; Fax: 051-629-6590  
E-mail: idis@pknu.ac.kr

\* 부경대학교 해양공학과 박사후연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2012년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2012년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

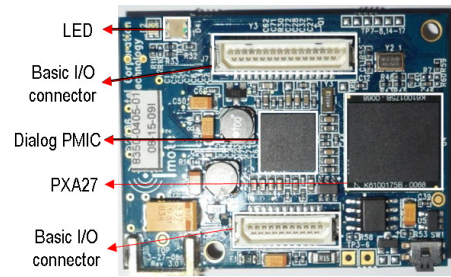
대상구조물의 이상상태를 식별하는 진동기반 손상 모니터링 기법이 널리 적용되고 있다. 대상구조물의 손상은 질량, 감쇠 및 강성과 같은 구조특성치의 변화를 가져오며, 이러한 손상에 의한 구조특성치의 변화는 구조물의 진동 응답특성을 나타내는 고유 진동수, 감쇠 및 모드형상의 변화를 야기한다. 이에 진동기반 손상 모니터링 기법은 저주파수 대역의 동적응답 계측 및 모드해석을 통해 구조물의 상태평가를 수행한다(김정태 등, 2002; Farrar 등, 1998; Stubbs 등, 1990).

기존의 손상 모니터링 시스템들은 집중화(centralization)된 신호계측장치와 케이블(유선)로 연결된 센서들로 이루어졌다. 유선계측시스템의 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 계측시스템의 불안정을 초래한다. 또한, 채널 당 수십 미터에서 수백 미터의 케이블로 구성되고, 높은 초기 센서 설치비용이 소요됨에 따라 계측시스템의 유지관리에 어려움을 초래한다. 높은 초기 센서 설치비용의 원인은 케이블 가격과 케이블 설치에 소요된 인건비로 인한 것이다(Lynch 등, 2004; Mascarenas 등, 2009; Kim 등, 2010; Park 등, 2010).

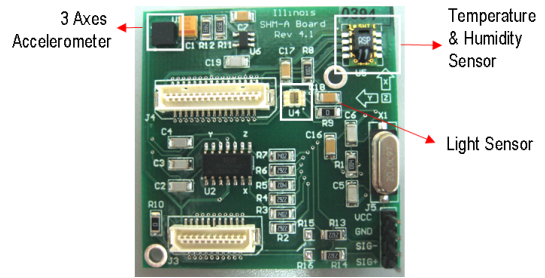
본 연구에서는 무선 가속도 센서노드를 이용한 강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상 모니터링 체계를 제안하였다. 먼저, 무선 가속도 센서노드의 하드웨어 구성 및 내장된 작동 소프트웨어를 제시하였다. 다음으로, 강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상 모니터링 체계를 제시하였다. 손상 모니터링 체계는 가속도 응답특성 분석을 통해 전역적 손상발생 정보 및 손상위치 추정을 수행한다. 전역적 손상발생 정보는 파워스펙트럼밀도의 상관계수를 적용하였다. 손상위치 추정은 고유 진동수기반 손상검색 기법과 모드형상기반 손상검색 기법을 적용하였다. 마지막으로, 모형 강 거더 볼트연결 부재의 볼트 접합부 손상을 식별하기 위한 진동기반 손상 모니터링 체계의 적용성을 검증하였다.

## 2. 무선 가속도 센서노드

무선 가속도 센서노드는 Rice와 Spencer(2008)에 의해 개발된 Imote2 센서플랫폼기반의 SHM-A 센서노드를 선정하였다. 그림 1은 가속도 계측을 위한 Imote2 센서플랫폼기반 SHM-A 센서노드를 보여준다. 그림 1(a)와 같이 Imote2 센서플랫폼(Memsic Co., 2010)은 SHM-A 센서노드를 제어하여 신호계측 및 응답특성 추출, 결과 저장 및 송·수신 등을 수행한다. Imote2 센서플랫폼은 저전력 32Bit 프로세서 PXA27x를 탑재하고 있으며, 풍부한 메모리 지원(256kB



(a) Imote2 센서플랫폼



(b) SHM-A 센서

그림 1 가속도 신호계측을 위한 Imote2 센서플랫폼기반 SHM-A 센서노드의 원형

SRAM, 32MB FLASH, 32MB SDRAM)을 보유하고 있다. 또한, 2.4GHz 무선 안테나를 이용한 광대역 통신 및 대용량 데이터 처리가 용이하다. 그림 1(b)과 같이 SHM-A 센서노드는 3축 가속도계(LIS344ALH)를 이용한 가속도 신호계측과 더불어 light 센서(TSL2561), 온도/습도 센서(SHT11)를 보유한다. 또한, 전압 신호를 인가받을 수 있는 추가 단자를 이용한 추가적인 센서의 도입이 용이하며, 가속도 신호계측 시 발생하는 Aliasing을 제거하기 위한 디지털 AA(anti-aliasing) 필터(QF4A512)를 내장하였다.

가속도 신호계측을 위해 Imote2 센서플랫폼기반 SHM-A 센서노드에 내장된 임베디드 소프트웨어 체계는 그림 2와 같다. 가속도 신호계측 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 가속도 신호계측 수행은 ISHMP service toolsuite 소프트웨어를 이용한 각 센서노드의 시간동기화를 통해 이루어진다. 시간동기화 수행 후, 각 센서노드(Leaf Node)에서 계측된 가속도 신호는 응답특성 추출을 수행하기 위한 임의의 센서노드(Sentry Node)로 전송된다. Sentry Node에서 수행되는 가속도 응답특성 추출은 SSeL SHM tools(Park 등, 2010)를 이용하여 수행된다. SSeL SHM tools는 고유 진동

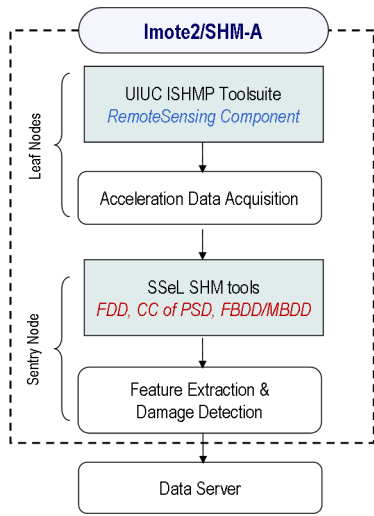


그림 2 Imote2 센서플랫폼 기반 SHM-A 센서노드에 내장된 임베디드 소프트웨어의 구성

수와 모드형상 추출을 위한 FDD(frequency domain decomposition) 알고리즘(Yi 등, 2004)과 진동기반 손상 모니터링 기법들로 구성된다.

### 3. 진동기반 손상 모니터링 체계

진동기반 손상 모니터링 체계는 1) 신호취득, 2) 진동 특징 추출, 3) 손상발생 경보, 4) 손상위치 추정 of 4단계로 구성된다. 1단계에서는 선정된 위치로부터 가속도 신호계측을 수행한다. 2단계에서는 가속도 신호의 파워스펙트럼밀도 상관계수 추출 및 하한관리치 LCL(lower control limit)를 결정한다. 3단계에서는 파워스펙트럼밀도 상관계수의 하한관리치 LCL 이탈 여부로부터 손상발생 경보를 수행한다. 마지막 4단계에서는 고유 진동수 및 모드형상을 이용한 손상지수 추출을 통한 손상위치 추정을 수행한다.

#### 3.1 진동기반 손상 모니터링: 전역적 손상경보

전역적 손상발생 경보를 수행하기 위한 진동기반 손상모니터링기법으로 파워스펙트럼밀도의 상관계수를 적용하였다. 구조물의 고유한 응답특성을 나타내는 고유 진동수는 대상구조물 구조형식과 손상정도에 의존하여 다양한 변화를 나타낸다. 또한, 손상에 의한 고유 진동수의 변화가 온도와 불확실성 요인에 의해 변화 범위 내에 있다면 손상발생 경보수행에 오류로 작용한다. 이와 같이, 구조물의 고유한 응답특성을 나타내는 고유 진동수로 손상발생 경보수행은 다양한 변수들을 포함한다. 본 연구에서는 진동기반 전역적 손상경보로 고유 진동수와 같은 구조물의 고유한 특성 정보를 포함하고, 온도

와 같은 불확실성 요인 영향에 덜 민감한 파워스펙트럼밀도를 기초로 수행하고자 하였다. 또한, 파워스펙트럼밀도 상관계수의 통계적 분석을 통해 손상발생 경보에 미치는 불확실성 요인의 영향을 최소화하고자 하였다.

일반적으로, 주파수응답함수는 가속도 신호의 주파수영역 변환으로 FFT(fast Fourier transform)를 통해 추출된다. 계측된 가속도 신호에서의 잡음(noise)은 추출된 주파수응답함수에서도 잡음으로 존재한다. 잡음에 의한 영향을 최소화한 주파수영역 변환으로 주파수응답함수의 형태인 파워스펙트럼밀도를 사용한다. 파워스펙트럼밀도  $S(f)$ 는 Welch's Procedure를 통해 계산된다. Welch's Procedure는 식 (1)과 같이 취득된 신호를  $n_d$  등분으로 나누고, 각 등분된 신호에 대한 FFT 결과의 제곱을 평균한 뒤, 신호 데이터의 크기  $T$ 로 나누어 파워스펙트럼밀도를 계산한다.

$$S(f) = \frac{1}{n_d T} \sum_{i=1}^{n_d} |Y_i(f, T)|^2 \tag{1}$$

여기서,  $Y_i(f, T)$ 는 등분된  $i$ 번째 가속도 신호의 FFT 결과이다. 대상구조물에서 계측된 두 개의 독립된 파워스펙트럼밀도함수  $S_1(f)$ ,  $S_2(f)$ 가 있을 때, 이들 두 함수를 확률변수로 취급하면 두 함수간의 상관계수  $CC_{S_1 S_2}$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$CC_{S_1 S_2} = \frac{E[S_1(f)S_2(f)] - \mu_{S_1}\mu_{S_2}}{\sigma_{S_1}\sigma_{S_2}} \tag{2}$$

여기서,  $\sigma_{S_1}$ 과  $\sigma_{S_2}$ 는 각 파워스펙트럼밀도의 표준편차이고,  $\mu_{S_1}$ 와  $\mu_{S_2}$ 는 각 파워스펙트럼밀도의 평균을 나타낸다. 손상경보는 파워스펙트럼밀도 상관계수의 관리도분석을 통해 수행되었다. 관리도분석은 하한관리치 LCL를 이용하였다.

$$LCL_{CC_{S_1 S_2}} = \mu_{CC_{S_1 S_2}} - 3\sigma_{CC_{S_1 S_2}} \tag{3}$$

여기서,  $\mu_{CC_{S_1 S_2}}$ 와  $\sigma_{CC_{S_1 S_2}}$ 는 각각 상관계수에 대한 평균과 표준편차를 나타낸다. 상관계수가 하한관리치 LCL이하로 떨어지게 되면 손상이 발생한 것으로 경보하게 된다.

#### 3.2 진동기반 손상 모니터링: 손상위치 추정

전역적 손상발생 경보이후, 손상위치를 추정하기 위한 진동

기반 손상 모니터링 기법은 Kim 등(2003)이 제안한 고유 진동수기반 손상검색(frequency-based damage detection, FBDD) 기법과 모드형상기반 손상검색(mode-shape-based damage detection, MBDD) 기법을 적용하였다.

### 3.2.1 FBDD 손상지수법

FBDD 손상지수법은 고유 진동수로부터 계산된 고유치 변화율과 모드형상으로부터 계산된 모드 민감도를 이용하여 오차 지수를 산정한 뒤, 오차 지수로부터 정의된 손상지수 (damage index)를 적용하여 손상위치를 추정한다. 오차지수는 식 (4)와 같이 산정된다.

$$e_{ij} = Z_i / \sum_{k=1}^{NM} Z_k - F_{ij} / \sum_{k=1}^{NM} F_{kj} \quad (4)$$

여기서,  $e_{ij}$ 는  $i$ 번째 모드에서  $j$ 번째 부재의 오차지수를 나타내며,  $NM$ 은 실험을 통해 추출된 전체 모드 수를 나타낸다.  $Z_i$ 는  $i$ 번째 모드의 고유치 변화율을  $F_{ij}$ 는  $i$ 번째 모드에서  $j$ 번째 부재의 모드 민감도를 나타낸다. 오차지수  $e_{ij}$ 가 '0'일 때,  $i$ 번째 모드의  $j$ 번째 부재의 위치가 손상위치와 일치한다는 것을 나타낸다. 오차지수로부터 전체 모드에 대한 손상위치 추정으로 손상지수는 식 (5)와 같이 산정된다.

$$\beta_j = \left[ \sum_{i=1}^{NM} e_{ij}^2 \right]^{-1/2} \quad (5)$$

여기서,  $j$ 번째 부재의 손상지수  $\beta_j$ 는  $0 \leq \beta_j < \infty$ 의 값을 가진다.

산정된 손상지수  $\beta_j$ 는 통계적 가설검증을 통해 손상위치를 추정한다. 먼저,  $\beta_j$ 를 랜덤 변수로 취급하면  $\beta_j$ 의 집합은 모 집단을 이루고, 이를 정규분포로 가정하면, 정규화된  $\beta_j$ 는 다음과 같다.

$$Z_j = \frac{(\beta_j - \mu_{\beta_j})}{\sigma_{\beta_j}} \quad (6)$$

여기서,  $\mu_{\beta_j}$ 와  $\sigma_{\beta_j}$ 는 각각  $\beta_j$ 들의 평균과 표준편차이다. 다음으로, 가설 검증을 이용하여 손상위치를 추정한다. 먼저, 귀무가설(null hypothesis,  $H_0$ )은 부재  $j$ 에 손상이 발생하지 않았다고 가정하며, 대립가설(alternate hypothesis,  $H_1$ )은 부재  $j$ 에 손상이 발생하였다고 가정한다. 두 번째로, 손상이 부재  $j$ 에 존재한다는 다음의 법칙에 따라 사실여부를

결정한다. 1) Choose  $H_1$  if  $Z_j \geq z_0$ , 2) Choose  $H_0$  if  $Z_j < z_0$ . 여기서,  $z_0$ 는 손상위치를 결정하기 위한 신뢰수준(confidence level)을 나타낸다. 만일,  $z_0$ 이 2이고, 부재  $j$ 에 신뢰수준이 2보다 크다면, 부재  $j$ 에 손상이 있을 확률이 97.2%보다 높다는 것을 나타낸다. 즉, 부재  $j$ 가 신뢰수준을 넘었는지 여부를 확인하여 손상의 위치를 식별할 수 있다.

### 3.2.2 MBDD 손상지수법

MBDD 손상지수법은 고유 진동수로부터 계산된 고유치 변화율과 모드형상으로부터 계산된 모드변형에너지를 이용하여 손상 전후의 부재강성 비를 산정한 뒤, 부재강성 비로부터 손상지수를 정의하여 손상위치를 추정한다. 손상지수는 식 (7)과 같이 산정된다.

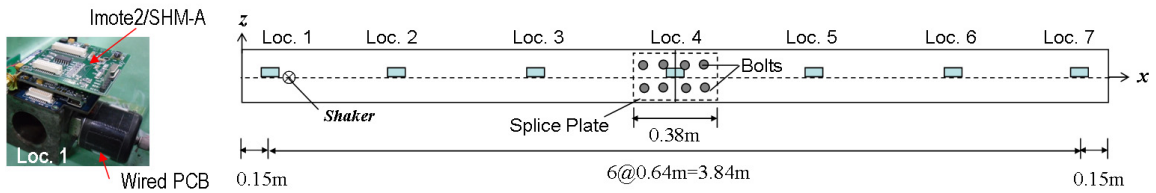
$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{\sum_{i=1}^{NM} (\gamma_{ij}^*)}{\sum_{i=1}^{NM} (\gamma_i Z_i + \gamma_{ij})} \quad (7)$$

여기서, 뿔첨자 "\*"는 손상상태를 나타내며,  $k_j$ 와  $k_j^*$ 는 각각 비손상 및 손상상태에서  $j$ 번째 부재의 강성을 나타낸다.  $\gamma_i$ 는  $i$ 번째 모드의 모드변형에너지를 나타내며,  $\gamma_{ij}$ 는  $i$ 번째 모드에서  $j$ 번째 부재의 모드변형에너지를 나타낸다. 산정된 손상지수는 FBDD 손상지수법과 동일하게 식 (6)과 같은 정규화 과정 및 가설검증을 통해 손상위치를 추정한다.

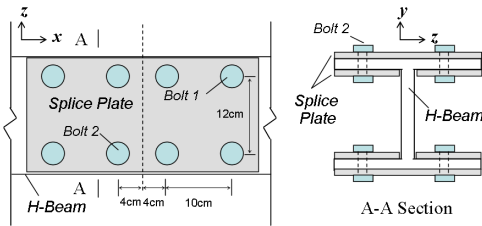
## 4. 실험 검증

### 4.1 대상구조물 및 실험구성

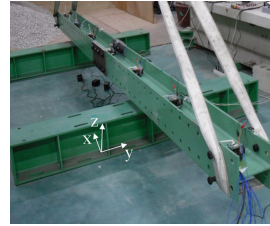
강 거더의 진동기반 손상모니터링 체계검증을 위해 그림 3과 같이 H형 단면(H-200×180×8×100)을 가지는 총 길이 4.14m의 볼트연결 부재를 선정하였다. 대상구조물은 그림 3(b)와 같이 두 개의 H형강(2.07m)을 고장력 볼트와 접합판(splice plate)을 이용하여 연결하였다. 고장력 볼트 체결은 토크렌치(torque wrench)를 이용하여 체결력(160N·m)을 도입하였다. 구조물은 그림 3(c)와 같이 슬링벨트(sling belt)와 크레인을 이용하여 양단 자유(free-free boundary) 조건으로 지지되었다. 가속도 신호의 계측은 그림 3(a)와 같이 Imote2/SHM-A 센서를 등간격(0.64m)으로 총 7개(Loc. 1-7)를 설치하여 계측하였다. 가속도 신호계측을 위한 가진력은 그림 3(d)와 같이 거더 좌측 끝단(Loc. 1 부근)에 설치된 VTS-100 전자기(electro-magnetic) 진동기



(a) 강 거더 볼트연결 부재의 형상



(b) 접합판



(c) 강 거더의 지지조건(양단 자유)



(d) 진동기 설치

그림 3 강 거더 볼트연결 부재의 온도 영향을 고려한 진동기반 손상 모니터링 체계 검증을 위한 실험 구성

표 1 강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상 모니터링 체계 검증을 위한 손상 시나리오

Damage Case	Damage Scenario
Reference	All bolts fastened by 160 N·m
Bolt-1 Damage	Bolt 1 lessened by 35 N·m (all others remained as 160 N·m)
Bolt-2 Damage	Bolt 2 loosened by 35 N·m (all others remained as 160 N·m)

(shaker)를 이용하여 일정한 충격 가진을 주었다. 가속도 신호는 1kHz의 샘플링 주파수로 약 12초간 계측되었다. 또한, Nyquist 주파수 및 구조물의 초기 2차 휨 모드(y축 방향)의 고유 진동수를 고려하여 Cut-off 주파수를 250Hz로 선정하였다.

강 거더 볼트연결 부재의 손상으로 볼트 체결력 변화에 따른 구조 강성의 변화 식별을 위해 표 1과 같은 실험을 구성하였다. 먼저, 전체 볼트 이음부의 체결력이 160N·m로 고정된 비손상 상태(Reference)를 도입하였다. 다음으로, 볼트 체결력 변화에 의한 손상은 접합판의 두 개의 볼트 체결부를 기준으로 각각의 체결력이 감소하는 조건(Bolt-1 손상 & Bolt-2 손상)에서 실험을 수행하였다.

#### 4.2 무선 가속도 센서노드의 성능검증

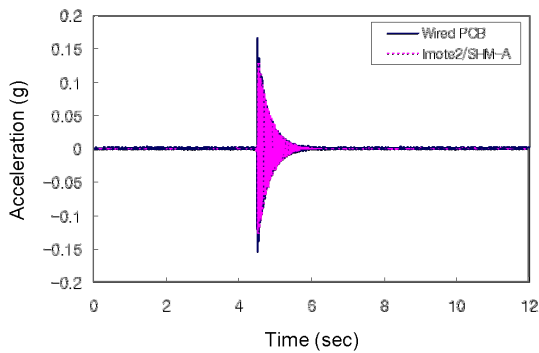
강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상 모니터링 체계 검증에 적용되는 무선 가속도 센서노드의 성능검증 위해 가속도 응답특성 비교를 수행하였다. Imote2/SHM-A 센서노드의 성능 비교를 위해 PCB사의 상용 유선 가속도 계측시스템을 선정하였다. 표 2는 무선 Imote2/SHM-A 센서노드와 유선 PCB 계측시스템의 가속도 계측에 대한 성능을 비교한

표 2 가속도 계측시스템의 성능 비교: 무선 Imote2/SHM-A 센서노드 Vs 유선 PCB 계측시스템

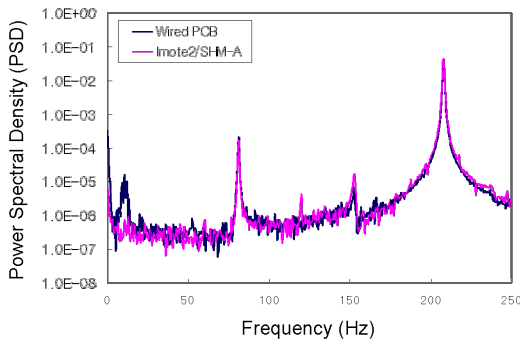
Hardware	Feature	Wireless Imote2/SHM-A	Wired PCB system
Accelerometer	Model	LIS344ALH	PCB393B04
	Sensitivity(mV/g)	660	1000
	Measurable range(g)	±2	±5
	Bandwidth(kHz)	1.5	2
Data acquisition	Noise floor ( $\mu V\sqrt{Hz}$ )	50	0.3
	Model	QF4A512	NI6036E
Signal conditioner	ADC resolution (bits)	16	16
	Model	QF4A512	PCB481A03
	Filter type	Digital filter	Digital filter

것이다. 유선 PCB 계측시스템은 PCB사의 16채널의 Signal Conditioner(481A03)와 NI사의 Terminal Block 및 DAQ card를 이용하여 신호를 계측하였다. 가속도 신호계측은 그림 3(a)와 같이 7개의 위치(Loc. 1-7)에 정육면체의 강블럭(60×60×60mm)을 설치하고, 블록의 상부와 측면에 각각 Imote2/SHM-A 센서노드와 PCB 센서를 부착하여 수행되었다.

두 계측시스템의 성능검증은 3가지 응답특성 비교를 통해 수행되었다. 먼저, 그림 4와 같이 두 계측시스템을 통해 Loc. 3에서 계측된 가속도 신호(시간영역)와 가속도 신호로부터 추출된 파워스펙트럼밀도(주파수영역)의 비교를 수행하였다. Imote2/SHM-A 센서노드가 상대적으로 노이즈 수준이 높았다. 하지만, 초기 2개의 휨 진동모드가 존재하는 주

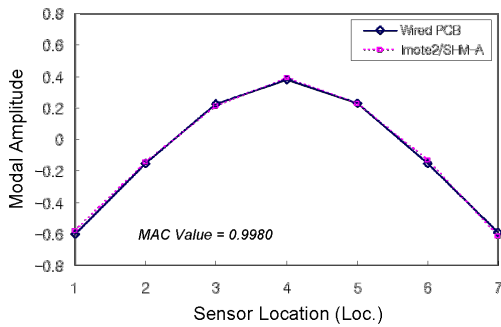


(a) 가속도(시간영역) 신호 비교(Loc. 3)

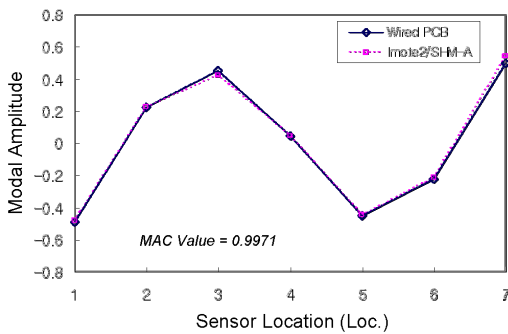


(b) 파워스펙트럼밀도(주파수영역) 응답특성 비교(Loc. 3)

그림 4 강 거더 볼트연결 부재의 가속도(시간 및 주파수영역) 응답특성 비교: 유선 PCB 시스템 Vs 무선 Imote2/SHM-A 시스템



(a) Mode 1



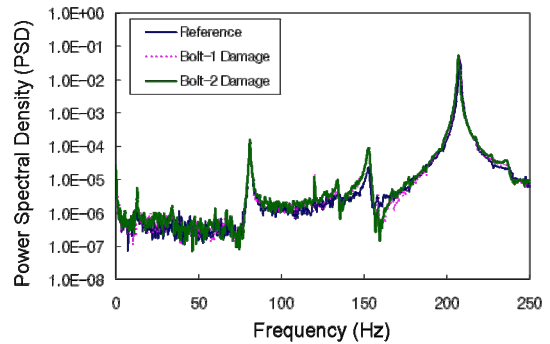
(b) Mode 2

그림 5 강 거더 볼트연결 부재의 진동(모드형상) 응답특성 비교: 유선 PCB 시스템 Vs 무선 Imote2/SHM-A 시스템

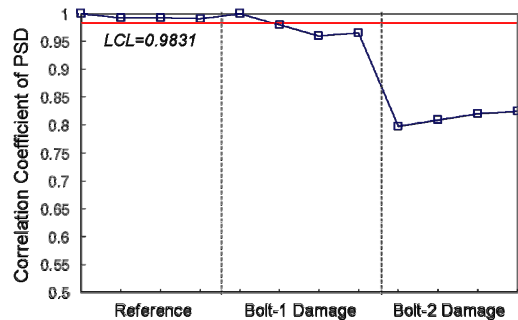
과수범위에서 거의 동일한 크기의 정점(peak)이 존재하였다. 다음으로, 그림 5와 같이 강 거더 볼트연결 부재의 진동응답 특성으로 고유 진동수 및 모드형상의 비교를 수행하였다. 계측된 가속도 신호를 FDD 기법을 적용하여 고유 진동수 및 모드형상을 추출하였다. 고유 진동수는 80.93Hz(Mode 1)와 207.76Hz(Mode 2)로 동일한 값으로 추출되었다. 모드형상의 비교로 MAC(modal assurance criterion)값은 0.9980 (Mode 1)과 0.9971(Mode 2)로 매우 높은 상관성을 보였다.

#### 4.3 진동기반 전역적 손상경보 결과

강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상경보 수행은 가속도 신호의 파워스펙트럼밀도에 대한 상관계수를 이용하였다. 파워스펙트럼밀도의 추출은 그림 4와 같이 Imote2/SHM-A 센서노드를 이용하여 Loc. 3에서 계측된 가속도 신호를 적용하였다. 그림 6은 가속도 신호의 파워스펙트럼밀도 상관계수를 이용하여 손상발생 경보를 수행한 결과를 보여준다. 먼저, 그림 6(a)은 손상발생 경보를 위해 추출된 손상 전후의 가속도 신호의 파워스펙트럼밀도를 보여준다. 다음으로, 손상경보를 위해 Reference 상태에서 4회 계측된 가속도 신호의 파워스펙트럼밀도의 관리치분석을 통해 하한관리치 LCL 0.9831을 추출하였다. 그림 6(b)은 Bolt-1 손상과 Bolt-2 손상에



(a) 파워스펙트럼밀도 변화



(b) 파워스펙트럼밀도 상관계수 변화

그림 6 Loc. 3에서 추출된 파워스펙트럼밀도 상관계수를 이용한 강 거더 볼트연결 부재의 전역적 손상발생 경보 결과

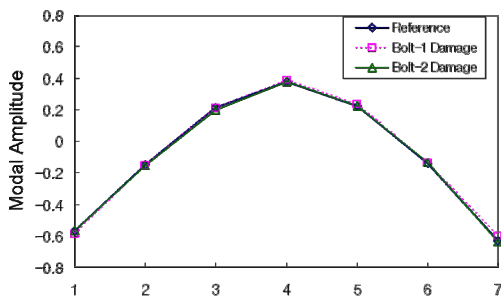
대한 손상경보 결과이다. Bolt-1 손상의 4회 계측된 가속도 신호 중, 첫 번째 계측된 가속도 신호의 상관계수는 하한관리치 LCL 이하로 떨어지지 않았다. 이는, 토크렌치를 이용한 볼트 체결력 감소 도입 직후에 수행된 계측된 가속도 신호에 실험적 오류가 존재한 것으로 생각된다. 이 후, 이와 같은 오차가 발생하지 않았다. 이에, 두 손상유형 모두 가속도 신호의 상관계수 변화로부터 손상발생을 경보하였다.

#### 4.4 진동기반 손상위치 추정 결과

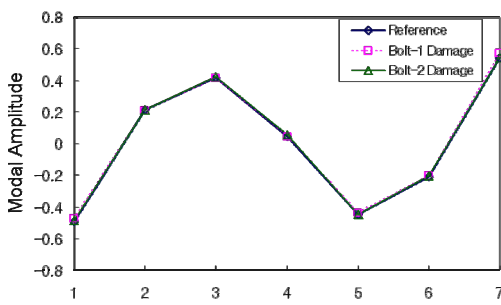
전역적 손상발생 경보를 기초로 강 거더 볼트연결 부재의 Bolt-1 손상과 Bolt-2 손상에 대한 세부적인 손상위치 추정을 수행하였다. 손상위치 추정은 FBDD 손상지수법과 MBDD 손상지수법을 적용하였다. 두 손상지수법을 적용하기 위해 표 3 및 그림 7과 같이 강 거더 볼트연결 부재의 손상 전후의 고유 진동수와 모드형상을 추출하였다. 추출된 고유 진동수와 모드형상은 식 (5), (6)의 손상지수 산정을 위해 그림 8 와 같이 손상전후의 모드변형에너지를 추출하였다.

표 3 강 거더 볼트연결 부재의 손상 전후의 고유 진동수 변화

Damage Case	Natural Frequency(Hz)	
	Mode 1	Mode 2
Reference	80.93	207.76
Bolt-1 Damage	80.81	207.64
Bolt-2 Damage	80.81	207.03

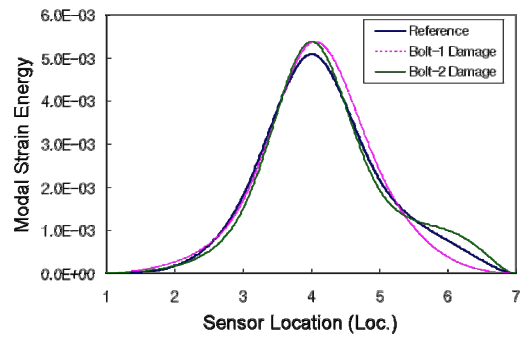


(a) Mode 1

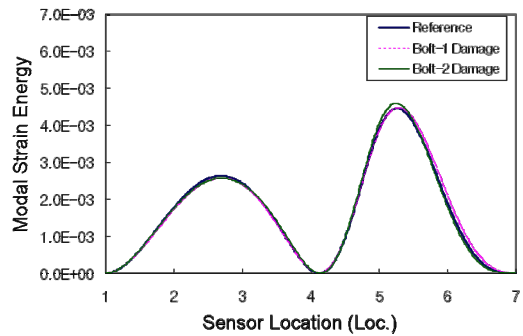


(b) Mode 2

그림 7 강 거더 볼트연결 부재의 손상 전후의 모드형상 변화



(a) Mode 1



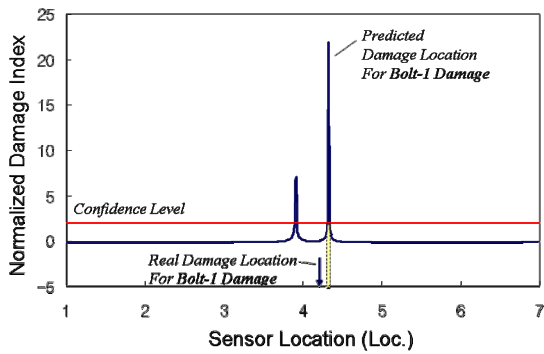
(b) Mode 2

그림 8 강 거더 볼트연결 부재의 손상 전후의 모드변형에너지 변화

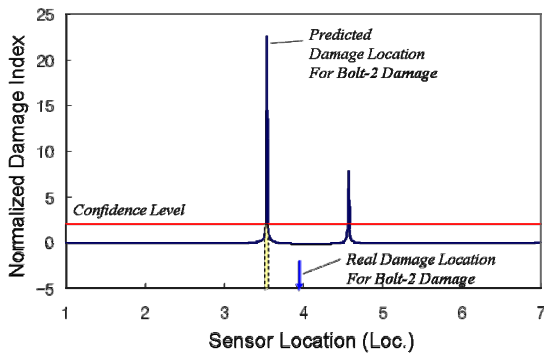
##### 4.4.1 손상위치 추정: FBDD 손상지수

FBDD 손상지수법은 비손상상태의 고유 진동수와 모드형상 및 손상상태의 고유 진동수를 이용하여 손상위치 추정을 수행한다. 먼저, 강 거더 볼트연결 부재의 손상 전의 초기 2개의 휨 진동모드에 대한 고유 진동수, 모드형상 및 모드변형에너지를 추출한다. 다음으로, 손상 후의 초기 2개의 휨 진동모드에 대한 고유 진동수를 추출한다. 추출된 손상 전후의 진동응답 특성들을 식 (4) 및 식 (5)에 적용하여 오차지수 및 손상지수를 산출한다. 손상지수는 식 (6)을 이용한 정규화된 손상지수 산출 및 가설검증을 통해 손상위치를 추정한다.

그림 9는 FBDD 손상지수법을 이용하여 손상위치를 추정 한 결과이다. 손상은 정규화된 손상지수의 가설검증을 통해 신뢰수준이 2 이상인 위치를 손상위치로 추정하였다. 손상위치 추정결과 신뢰수준 2이상인 위치가 Bolt-1 손상과 Bolt-2 손상 모두, 대칭적인 두 위치에서 나타나는 것을 볼 수 있다. 두 위치 중, 정규화된 손상지수가 상대적으로 큰 위치의 결과를 이용하여 손상위치 추정결과를 분석하였다. Bolt-1 손상은 그림 9(a)와 같이 Loc. 4에서 Loc. 5 방향으로 0.14m 떨어진 위치의 볼트 연결부 손상이며, 0.20m 떨어진 위치에 손상이 있는 것으로 추정하였다. Bolt-2 손상은 그림 9(b)와 같이 Loc.4에서 Loc. 3방향으로 0.04m 떨어진 위치의 볼트 연결부 손상이며, 0.29m 떨어진 위치에 손상이 있는



(a) Bolt-1 Damage



(b) Bolt-2 Damage

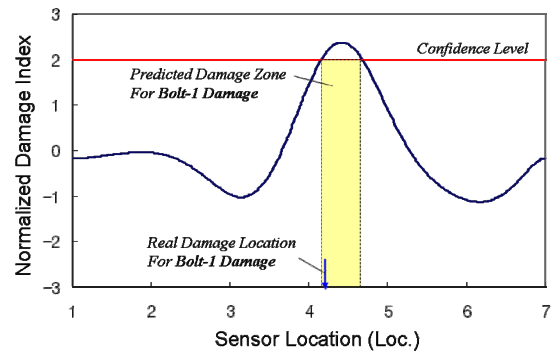
그림 9 FBDD 알고리즘을 이용한 손상위치 추정 결과

것으로 추정하였다. 이상과 같이, Bolt-2 손상이 Bolt-1 손상에 비해 상대적으로 큰 손상위치 추정오차를 가지고 있다. 하지만, FBDD 손상지수법의 적용을 통해 두 손상유형 모두, 매우 정확한 추정 결과를 나타내었다.

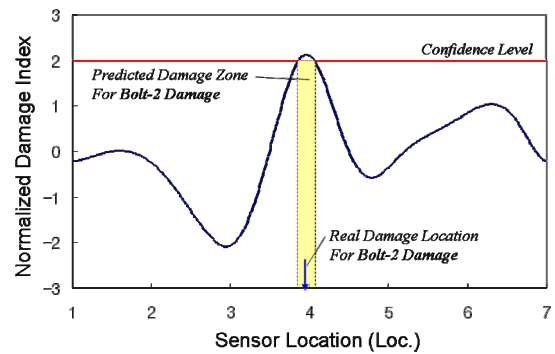
#### 4.4.2 손상위치 추정: MBDD 손상지수

MBDD 손상지수법은 손상전후의 고유 진동수와 모드형상을 모두 적용하여 손상위치 추정을 수행한다. 먼저, 강 거더 볼트연결 부재의 손상 전후의 초기 2개의 휨 진동모드에 대한 고유 진동수, 모드형상 및 모드변형에너지를 추출한다. 다음으로, 추출된 손상 전후의 진동 응답특성들을 식 (7)에 적용하여 손상지수를 산출한다. 손상지수는 식 (6)을 이용한 정규화된 손상지수 산출 및 가설 검증을 통해 손상위치를 추정하였다.

그림 10은 MBDD 손상지수법을 이용하여 손상위치를 추정한 결과이다. 손상은 정규화된 손상지수의 가설검증을 통해 신뢰수준이 2이상인 위치를 손상위치로 추정하였다. MBDD 손상지수법은 손상위치 추정에 있어, 손상 전후의 모드형상의 변화가 영향을 미쳐 FBDD 손상지수법과는 달리 넓은 범위로 손상위치를 추정하였다. 손상위치 추정결과, Bolt-1 손상은 그림 10(a)와 같이 Loc. 4에서 Loc.5 방향으로 0.1m에서 0.45m 떨어진 위치로 추정하였다. Bolt-2 손상은 그



(a) Bolt-1 Damage



(b) Bolt-2 Damage

그림 10 MBDD 알고리즘을 이용한 손상위치 추정 결과

림 10(b)와 같이 Loc. 4에서 Loc. 3 방향으로 0.03m에서 0.08m 떨어진 위치로 추정하였다. MBDD 손상지수법 결과 역시, Bolt-1 손상과 Bolt-2 손상에 대한 실제 손상위치를 매우 정확하게 추정하였다.

## 8. 결 론

본 연구에서는 무선 가속도 센서노드를 이용한 강 거더 볼트연결 부재의 진동기반 손상 모니터링 체계를 제안하였다. 먼저, 무선 가속도 센서노드의 하드웨어 구성 및 내장된 작동 소프트웨어를 제시하였다. 무선 가속도 센서노드는 Imote2 센서플랫폼기반의 SHM-A 센서노드를 선정하였다. 임베디드 소프트웨어는 Imote2의 독자적인 운영체제인 TinyOS를 기반으로, ISHMP service toolsuite와 SSeL SHM tools를 이용하여 가속도 신호계측, 특징추출 및 손상모니터링의 적용이 수행되었다. 다음으로, 강 거더 볼트연결 부재에 발생한 손상을 탐지하기 위해 1) 가속도 신호의 파워스펙트럼밀도 상관관계수를 이용한 손상경보 및 2) 손상지수를 이용한 손상위치 추정을 수행하는 진동기반 손상 모니터링 체계를 제시하였다. 마지막으로, 모형 강 거더 볼트연결 부재의 손상을 식별하기 위한 진동기반 손상 모니터링 체계의 적용성을 검증하였다. 선정된 두 손상유형에 대한 파워스펙트럼밀도의



상관계수를 이용한 손상발생 경보가 정확하게 수행되었다. 손상위치 추정 결과 역시, FBDD 손상지수법은 Bolt-2 손상이 Bolt-1 손상에 비해 상대적으로 큰 오차가 존재하였으나, FBDD 손상지수법과 MBDD 손상지수법 모두 매우 정확하게 손상위치를 추정하였다.

**감사의 글**

본 연구는 2010년도 지식경제부 원자력기금으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(2010T100101077).

**참 고 문 헌**

**김정태** (1999) 소수의 고유 진동수를 사용하는 비파괴 균열발견 모델의 유도 및 검증, 한국전산구조공학회 논문집, 12(2), pp.149~159.

**김정태, 류연선, 조현만** (2002) 고유 진동수 이용 손상추정법과 모드형상 이용 손상추정법에 의한 PSC 보의 비파괴 손상검색, 한국전산구조공학회 논문집, 15(1), pp.43~57.

**박재형, 김정태, 이용환** (2007) 보 구조물의 가속도 신호를 이용한 인공신경망 기반 실시간 손상검색기법, 한국전산구조공학회 논문집, 20(3), pp.229~237.

**장동일** (2005) 구조공학에서의 파괴와 피로, 동명사, 대한민국, p.316.

**윤정방, 김두기** (1996) 민감도행렬을 사용한 구조물의 손상추정법, 한국전산구조공학회 논문집, 9(4), pp.117~126.

**Farrar, C.R., Jauregui, D.A.** (1998) Comparative Study of Damage Identification Algorithm Applied to a Bridge: I. Experiment, *Smart Materials and Structures*, 7, pp.704~719.

**Kim, J.T., Park, J.H., Hong, D.S., Park, W.S.** (2010) Hybrid Health Monitoring of Prestressed Concrete Girder Bridges by Sequential Vibration-Impedance Approaches, *Engineering Structures*, 32, pp.115~128.

**Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., Stubbs, N.** (2003) Damage Identification in Beam-Type Structures: Frequency-based Method vs Mode-Shape-based Method, *Engineering Structure*, 25, pp.57~67.

**Lynch, J.P., Law, K.H., Kiremidjian, A.S., Carryer, E., Farrar, C.R., Sohn, H., Allen, D.W., Nadler, B., Wait, J.R.** (2004) Design and Performance Validation of a Wireless Sensing Unit for

Structural Monitoring Applications, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3~4), pp.393~408.

**Mascarenas, D.L., Park, G., Farinholt, K.M., Todd, M.D., Farrar, C.R.** (2009) A Low-Power Wireless Sensing Device for Remote Inspection of Bolted Joints, *The Journal of Aerospace Engineering*, 233(5), pp.565~575.

**Memsic Co.** (2010) Datasheet of ISM400, Available from: <http://www.memsic.com>.

**Rice, J.A., Spencer, B.F.** (2008) Structural health monitoring sensor development for the Imote2 platform, *Proc. SPIE*, San Diego, CA, USA.

**Rolfe, S.T., Barsom, J.M.** (1997) Fracture and Fatigue Control in Structures: Application of Fracture Mechanics, *Prentice-Hall*, New York, p.562.

**Rytter, A.** (1993) Vibration based Inspection of Civil Engineering, *PhD Dissertation*, University of Aalborg, Denmark.

**Park, J.H., Kim J.T., Hong, D.S., Mascarenas, D., 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*, 6(5~6), pp.711~730.

**Stubbs, N., Kim, J.T.** (1996) Damage Localization in Structures Without Baseline Modal Parameters, *AIAA Journal*, 34(8), pp.1649~1654.

**Stubbs, N., Osegueda, R.** (1990) Global Nondestructive Damage Evaluation in Solids, *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, 5, pp.67~79.

**Yi, J.H., Yun, C.B.** (2004) Comparative Study on Modal Identification Methods using Output-Only Information, *Structural Engineering and Mechanics*, 17(3~4), pp.445~466.

- 논문접수일 2011년 10월 20일
- 논문심사일  
1차 2011년 11월 8일  
2차 2011년 12월 20일
- 게재확정일 2012년 2월 2일