

# 가속도 응답을 이용한 실물 콘크리트 거더 교량의 구조건전성 모니터링

## Structural Health Monitoring of Full-Scale Concrete Girder Bridge Using Acceleration Response

홍 동 수<sup>1)</sup>

김 정 태<sup>2)\*</sup>

Hong, Dong Soo

Kim, Jeong Tae

### Abstract

In this paper, a two-phase structural health monitoring system using acceleration response signatures are presented to firstly alarm the change in structural condition and to secondly detect the changed location for full-scale concrete girder bridges. Firstly, Mihocheon Bridge which is a two-span continuous concrete girder bridge is selected as the target structure. The dynamic response features of Mihocheon Bridge are extracted by forced vibration test using bowling ball. Secondly, the damage alarming occurrence and the damage localization techniques are selected to design two-phase structural health monitoring system for Mihocheon Bridge. As the damage alarming techniques, auto-regressive model using time-domain signatures, correlation coefficient of frequency response function and frequency response ratio assurance criterion are selected. As the damage localization technique, modal strain energy-based damage index method is selected. Finally, the feasibility of two-phase structural health monitoring systems is evaluated from static loading tests using a dump truck.

**Keywords** : acceleration response, concrete girder bridge, damage monitoring, damage alarming, correlation coefficient, auto-regressive coefficient

### 1. 서론

1970년대 이후 이루어진 급속한 경제발전은 교량, 터널, 항만, 공항, 발전소, 댐 등의 사회기반시설물과 초고층 건축물에 대한 수요를 대량 창출하였다. 하지만, 비교적 짧은 기간에 많은 사회기반시설물을 건설함으로써 국내 건설업계는 성과 위주의 외형적인 성장은 하였으나 내부적인 기술경쟁력 측면에서 많은 문제점을 안고 있다(김정태, 1998). 나아가 급속한 사회기반시설물의 건설은 구조물의 부실시공 및 노후화를 급격히 증가시켜 사용내구연한의 감소를 초래하게 되었다. 이와 같은 구조물의 부실시공 및 노후화 문제는 1990년대 중반 이후, 엄청난 인명피해, 경제적 손실 및 사회적 충격을 안겨주었던 대형구조물의 붕괴(성수대교, 삼풍백화점)와 조기철거(당산철교)라는 형태로 표면화되었다(남광현, 2000). 이러한 사회적 충격을 거치면서, 구조물의 유지관리에 대한 관심이 크게 증가하였다. 이에, 교량의 손상에 따른 전역적 거동 메커니즘의 정량적인 변화를 조기에 감지한 후, 손상이 구조물 전체에 미치는 영향을 평가하는 구조건전성 모

니터링(structural health monitoring, SHM) 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한, SHM 기법 중 대상구조물로부터 측정된 동적 응답을 이용하여 구조물의 상태를 모니터링하는 진동기반 SHM 기법이 널리 이용되고 있다. 진동기반 SHM 기법에 관한 연구는 1970년 후반부터 활발히 수행되고 있다. 1970년대 후반에 진동모드섭동이론에 근거하여 선형 구조계의 구조특성의 변화를 추정하는 연구를 시작으로(Adams et al., 1978), 1980년대 후반에는 다자유도 선형 구조계의 민감도 해석을 통해 강성도 또는 유연도 등의 구조 특성치 변화에 대한 연구가 수행되었다(Chen and Garba, 1988). 1990년대 초반에는 균열의 기하학적 형상에 대한 강성도 또는 유연도의 변화를 진동특성치의 변화 및 선형, 비선형 파괴역학이론을 사용하여 해석하는 연구가 수행되었다(Sundermeyer and Weaver, 1993). 1990년대 중반에는 진동모드의 변화를 사용하여 구조계의 손상도를 유연도, 강성도의 상대적인 변화인 손상지수로서 예측하는 방법에 대한 연구가 수행되었다(Kim and Stubbs, 1995). 최근에는 동적 응답을 기준으로 이에 적

1) 학생회원, 부경대학교 해양공학과 박사과정

2) 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수

\* Corresponding author : idis@pknu.ac.kr 051-629-6585

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2010년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

합한 수학적 모델을 재구성하는 구조식별 기법, 유전자 알고리즘, 인공 신경망에 관한 연구가 많은 연구자들에 의해 연구되고 있다(Sohn et al., 2003; Kim et al., 2004; 박재형 등, 2006).

본 논문에서는 실물 콘크리트 거더 교량의 가속도 응답 신호를 이용하여 구조물의 상태변화를 경보한 후 그 위치변화를 검색하는 2단계 구조건전성 모니터링 체계를 제시하였다. 먼저, 2경간 연속 콘크리트 거더 교량인 미호천교를 대상교량으로 선정하였으며, 볼링공을 이용한 강제진동 실험으로부터 동특성을 추출하였다. 다음으로, 미호천교의 2단계 구조건전성 모니터링 체계 구축을 위한 손상 발생 경보 및 손상 위치 검색 기법들을 선정하였다. 손상 경보 기법으로는 시간영역 특징을 이용하는 자기회귀모델과 주파수응답함수의 상관계수, 주파수응답비모증지수를 선정하였다. 손상 위치 검색 기법으로는 모드변형 에너지기반 손상지수법을 선정하였다. 마지막으로, 덤프 트럭을 이용한 정적 재하 실험을 통해 2단계 손상 모니터링 체계의 적합성을 검증하였다.

## 2. 미호천교의 동적응답 특성 분석

### 2.1 미호천교의 구조형식

실험 대상 구조물인 미호천교(구 미호천교)는 1969년 충청북도 청원군 강내면과 강외면의 현 국도 36호선 부근에 건설된 연장 400m의 콘크리트 거더 교량이다. 하지만, 교량의 노후화로 인해 폐교되었으며, 1983년에 새로 운 미호천교가 준공되었다. 이 역시 늘어나는 교통수요량으로 인해 1990년에 확장되었다. 본 연구의 실험은 폐교된 구 미호천교(이하 미호천교로 표현)를 대상으로 수행

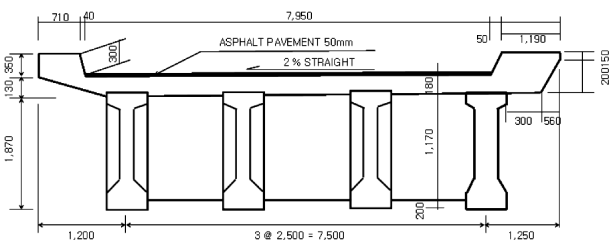


Fig. 1 Cross Section of Mihocheon Bridge.

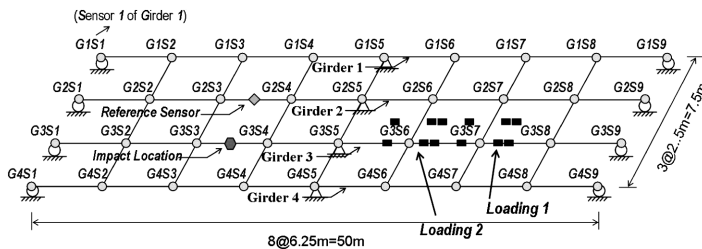
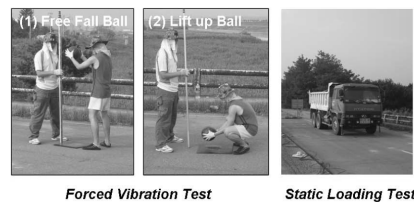


Fig. 2 Test Setup for Extracting Dynamic Response Features and Evaluating Monitoring System of Mihocheon Bridge.



Forced Vibration Test

Static Loading Test

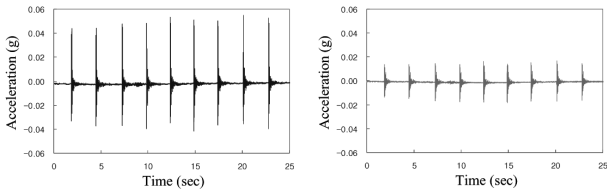
되었다. Fig. 1은 미호천교의 횡단면도를 나타내는 것으로 교폭이 10m이며, 4개의 I형 거더로 구성된 교량이다. 총 지간 400m의 교량 중 본 연구의 실험 구간은 경부고속도로 상행구간의 교대 부근으로 지간 50m(25m×2)의 2경간 연속 구간이다.

### 2.2 미호천교의 동적응답 특성

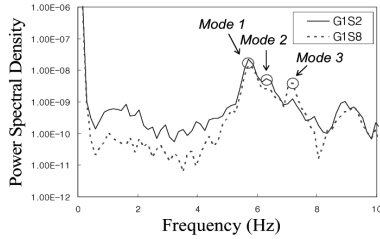
미호천교의 동적응답 특성인 고유진동수와 모드형상을 추출하기 위한 실험 구성은 Fig. 2와 같다. 실험은 2006년 8월 10일(1일간)에 이루어졌다. 가속도 응답은 PCB사의 압전형 가속도계(PCB 393B04) 및 NI사의 8채널 PXI-4482 DAQ 보드 2개와 LabVIEW 프로그램을 이용하여 샘플링 주파수 1,200Hz로 계측되었다. 또한, 4개의 거더로 구성된 2경간 연속구간에 대해 각 거더당 9개의 위치(총 36개 위치)에서 가속도 응답을 계측되었다. 가속도계의 보유 수량의 한계로 인해, Fig. 2와 같이 좌측 경간의 두 번째 거더(Girder 2)에 위치한 가속도 센서 G2S3과 G2S4 사이에 Reference 센서 1개를 고정시킨 후, 9개의 센서를 4개의 거더 위를 이동시키면서 실험을 수행하였다. 가진력은 좌측 경간의 Girder 3에 위치한 가속도 센서 G3S3과 G3S4 사이에서 중량 58N의 볼링공을 1.5m 높이에서 자유낙하시키는 강제진동 실험을 통해 생성하였다.

일반적으로 가진에 의한 구조물의 진동응답이 비교적 작은 경우 모드형상은 노이즈의 영향을 크게 받아 가능한 많은 진동 데이터를 획득하는 것이 필요하다. 따라서 본 실험에서는 자유낙하에 의한 충격 후, 추가적인 충격이 발생하기 전에 볼링공을 잡아 올려 재 낙하시키는 방법으로 1회 계측(25초) 시 8~9회 정도로 가진하였다. Fig. 3은 가진이 가해진 위치에서 비교적 멀리 위치한 가속도 센서 G1S2와 G1S8에서 계측된 가속도 신호와 파워스펙트럼 밀도함수를 보여준다. 파워스펙트럼밀도함수는 실교량의 동특성 분석 시 계측 가능한 고유진동수 및 모드형상이 저주파수영역에서 추출되는 것을 감안하여 10Hz까지만 도시하였다.

모드특성을 추출하기 위하여 실험에서 획득된 가속도 신호로부터 파워스펙트럼밀도(power spectral density, PSD) 행렬을 특이치 분해(singular value decomposition,

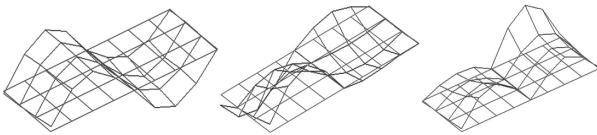


(a) Acceleration Signal of G1S2 (b) Acceleration Signal of G1S8



(c) Power Spectral Density of G1S2 and G1S8

Fig. 3 Acceleration Signal and Power Spectral Density of G1S2 and G1S8.



(a) Mode 1 (5.68Hz) (b) Mode 2 (6.25Hz) (c) Mode 3 (7.03Hz)

Fig. 4 Natural Frequency and Mode Shape extracted from Forced Vibration Test of Mihocheon Bridge.

SVD)하여 고유진동수와 모드형상을 추출하는 주파수영역분해법(frequency domain decomposition, FDD)을 이용하였다(이진학 등, 2003). FDD 기법에서는 구조응답  $y(\in R^{N_m \times 1})$ 의 PSD 행렬  $S_{yy}(\omega)(\in R^{N_m \times N_m})$ 을 다음과 같이 특이치 분해하여  $\Sigma(\omega)$ ,  $U(\omega)$ 와  $V(\omega)$  행렬로 분해한다.

$$S_{yy}(\omega) = U(\omega)^T \Sigma(\omega) V(\omega) \quad (1)$$

$(\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N) \in R^{N_m \times N_m})$   
 and  $U, V \in R^{N_m \times N_m}$

여기서,  $U$ ,  $V$ 는 각각  $U^T U = U U^T = 1$ ,  $V^T V = V V^T = 1$ 를 만족하는 유니타리 행렬(unitary matrix)으로써,  $S_{yy}(\omega)$  행렬이 대칭행렬이면  $U = V$ 가 된다. 한편,  $\Sigma$ 는 특이치로 구성된 대각행렬으로써, 각 특이치  $(\sigma_i(\omega))$ 에서 정점이 발생하는 주파수들이 구조계의 고유진동수들이고, 이 주파수들에서  $U(\omega)$ 의 열벡터를 취함으로써 모드형상들을 구할 수 있다. 통상 여러 특이치  $\sigma_i(\omega)$ 중에 첫 번째 요소인  $\sigma_1(\omega)$ 을 사용한다. Fig. 4는 FDD기법을 이용하여 추출된 미호천교의 초기 3개의 진동모드에 해당하는 고유진동수 및 모드형상을 보여준다. 모드의 추출은 특이치의 정점에 발생하는 주파수를 구하

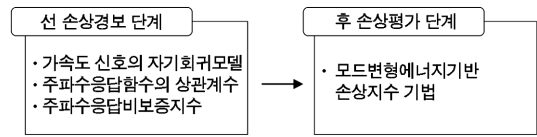


Fig. 5 Two-Phase Structural Health Monitoring System using Acceleration Response.

고 이들의 모드형상을 확인하여 Fig. 4와 같은 3개의 모드를 선정하였다.

### 3. 가속도 응답을 이용한 구조건전성 모니터링 체계

가속도 응답을 이용하여 구조물의 손상 위치 및 크기를 평가하기 위해서는 많은 위치에서의 계측 데이터와 비교적 복잡하고 시간소모적인 모드해석 과정이 필요하다. 그러나 손상이 없을 경우에도 이러한 과정을 수행하는 것은 비효율적이다. 따라서 소수의 위치에서 계측된 신호로부터 손상 발생 유무를 판정하고, 다음으로 손상 유무에 따라 손상의 위치, 크기 및 구조물의 성능 변화를 정확하게 평가할 수 있는 체계가 구축되면 보다 효율적인 교량의 손상 모니터링이 가능할 것이다.

본 연구에서는 Fig. 5와 같이 가속도 응답을 이용하여 (1) 실시간으로 손상을 경고하는 선 손상 경고 단계 및 (2) 오프라인 작업을 통해 손상의 위치와 크기를 정확하게 검색할 수 있는 후 손상평가 단계로 구성된 구조건전성 모니터링 체계를 제시하였다. 손상 경고 기법으로 가속도 신호의 자기회귀(autoregressive, AR) 모델(Sohn et al., 2001), 주파수응답함수의 상관계수(Bendat and Piersol, 1993) 및 주파수응답비보증지수(김정태 등, 2008)를 사용하였다. 또한, 후 손상평가 기법으로 모드 변형에너지기반 손상지수법(Kim et al., 2003)을 사용하였다.

#### 3.1 가속도 신호의 자기회귀모델

자기회귀모델은 시계열 자료의 통계적인 분석을 위해 주로 이용되는 방법으로 어떤 시간 단계의 자료가 그 이전 시간 단계의 자료들의 선형 조합과 임의의 오차의 합에 의해서 표현되는 모델이다. 일정한 시간간격으로 계측된 가속도 신호에 대한  $p$ 차 자기회귀모델은 다음과 같이 정의한다.

$$x(t) = \sum_{j=1}^p \phi_j x(t-j) + e(t) \quad (2)$$

여기서,  $x(t)$ 는 임의의 시간  $t$ 에서 계측된 가속도 신호를 나타내며,  $\phi_j$ 는 자기회귀계수를 나타낸다. 또한,  $e(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 예측 오차항을 나타낸다.

시스템에 변화가 발생하게 되면 기존 시스템의 계측 자료들로부터 구해진 자기회귀모델에 의해 계산된 값과 시스템이 변화한 후의 계측 자료 간에 큰 차이가 발생한다. 즉, 계측 자료들로부터 자기회귀모델을 구성하여 시스템의 응답을 추정하고, 추정값과 계측 자료간의 잔차오차를 지속적으로 관찰하여 실시간으로 구조물의 손상을 경보할 수 있다.

자기회귀모델의 가장 큰 장점은 임의의 하나의 위치에서 계측된 가속도 신호를 이용하여 손상 경보를 수행할 수 있다는 것이다. 구조물에 발생한 손상은 식 (2)에서 계산된 자기회귀계수에 대한 이상치 분석(outlier analysis)을 통해 식별되어진다. 자기회귀 계수와 같은 다변량의 정보로부터 이상치의 발생여부는 다음과 같은 마할노비스 제곱거리(Mahalanobis squared distance)를 이용하였다(Sohn et al., 2001).

$$D_c = (X_c - \bar{X})^T S^{-1} (X_c - \bar{X}) \quad (3)$$

여기서,  $X_c$ 는 퍼텐셜 이상치 벡터를 나타내며,  $\bar{X}$ 는 관측치의 평균 벡터를 나타낸다.

또한,  $S$ 는 관측치의 공분산 행렬을 나타낸다. 자기회귀모델을 이용하여 실시간으로 손상을 경보하기 위해 관리도(control chart) 분석으로 아래와 같은 관리상한(upper control limit, UCL)을 도입하였다.

$$UCL_D = \mu_D + 3\sigma_D \quad (4)$$

여기서,  $\mu_D$ 와  $\sigma_D$ 는 각각 마할노비스 제곱거리에 대한 평균과 표준편차를 나타낸다. 만일 마할노비스 제곱거리가 관리상한을 초과하게 되면 손상이 발생한 것으로 경보하게 된다.

### 3.2 주파수응답함수의 상관계수

시간영역의 가속도 응답을 주파수영역으로 변환하여 얻어지는 주파수응답함수로부터 주파수응답함수의 상관계수를 유도할 수 있다. 일반적으로 구조물에 입력하중과 구조물응답사이의 관계로부터 구조물의 주파수응답함수( $H(f)$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H(f) = \frac{V(f)}{U(f)} = \frac{1}{-m(2\pi f)^2 + ic(2\pi f) + k} \quad (5)$$

여기서,  $U(f)$ 와  $V(f)$ 는 각각 주파수영역에서의 하중과 변위 응답을 나타낸다.

어떤 구조물에서 정의되는 두 개의 독립된 주파수응답함수  $H_1(f)$ 와  $H_2(f)$ 가 있을 때, 이 두 함수를 확률변수로 취급하면 두 주파수응답함수간의 상관계수  $\rho_{H_1H_2}$ 는 다

음 식과 같이 나타낼 수 있다(Bendat and Piersol, 1993).

$$\rho_{H_1H_2} = \frac{C_{H_1H_2}}{\sigma_{H_1}\sigma_{H_2}} \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_{H_1}$ 과  $\sigma_{H_2}$ 는 각 주파수응답함수의 표준편차를 나타내고,  $C_{H_1H_2}$ 는 두 주파수응답함수간의 공분산을 나타내며, 이는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{H_1H_2} = E[H_1(t)H_2(t)] - \mu_{H_1}\mu_{H_2} \quad (7)$$

여기서,  $\mu_{H_1}$ ,  $\mu_{H_2}$ 는 각 주파수응답함수의 평균을 나타낸다.

식 (6)과 같은 상관계수는  $-1 \leq \rho_{H_1H_2} \leq 1$ 의 관계를 만족한다. 만약  $\rho_{H_1H_2}$  값이 0이라면 두 주파수응답함수 사이에는 상관성이 없음을 의미한다. 주파수응답함수의 상관계수를 이용하여 실시간으로 손상을 경보하기 위해 관리도(control chart) 분석으로 아래와 같은 관리하한(lower control limit, LCL)을 도입하였다.

$$LCL_\rho = \mu_\rho - 3\sigma_\rho \quad (8)$$

여기서,  $\mu_\rho$ 와  $\sigma_\rho$ 는 각각 주파수응답함수의 상관계수에 대한 평균과 표준편차를 나타낸다. 만일 주파수응답함수의 상관계수가 관리하한이하로 떨어지게 되면 손상이 발생한 것으로 경보하게 된다.

### 3.3 주파수응답비보증지수

시간영역의 가속도 응답을 주파수영역으로 변환하여 얻어지는 주파수응답함수로부터 주파수응답비보증지수를 유도할 수 있다. 식 (5)로부터 비례감쇠를 가지는 구조물의 절점  $j$  위치에 가진주파수  $\omega_k$ 의 동적 하중이 가해진다면, 구조물과의 공진에 의하여  $i$  번째 절점과  $i+1$  번째 절점에서의 응답은  $k$  번째 모드형상에 따라 진동한다. 따라서,  $i$  번째 절점과  $i+1$  번째 절점의 주파수응답함수비는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{V_i(\omega_k)}{V_{i+1}(\omega_k)} &= \frac{\sum_{j=1}^m H_{i,j}(\omega_k) U_j(\omega_k)}{\sum_{j=1}^m H_{i+1,j}(\omega_k) U_j(\omega_k)} \\ &= \frac{H_i(\omega_k)}{H_{i+1}(\omega_k)} \end{aligned} \quad (9)$$

두 점  $i$ 와  $i+1$ 에서의 응답의 주파수응답비(frequency

response ratio, FRR) 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$FRR_{i,i+1} = \frac{ASD_{i,i}(\omega_k)}{CSD_{i,i+1}(\omega_k)} \quad (10)$$

$$= \frac{E[V_i(\omega_k)V_i(\omega_k)]}{E[V_i(\omega_k)V_{i+1}(\omega_k)]} = \frac{H_i(\omega_k)}{H_{i+1}(\omega_k)}$$

여기서,  $CSD_{i,i+1}(\omega_k)$ ,  $ASD_{i,i}(\omega_k)$ 는 각각 상호 스펙트럼 밀도 함수(cross-spectral density function), 자기 스펙트럼 밀도 함수(auto-spectral density function)를 나타내고,  $E[\cdot]$ 는 평균을 의미한다. 비손상 상태의 주파수응답비와 손상 상태의 주파수응답비를 비교함으로써, 다음과 같은 주파수응답비보증지수를 정의한다(김정태 등, 2008).

$$FRRAC(b,d) = \frac{\{FRR_b^T FRR_d\}^2}{\{FRR_b^T FRR_b\}\{FRR_d^T FRR_d\}} \quad (11)$$

여기서, 하첨자  $b,d$ 는 각각 손상 발생 전과 후의 상태를 표시한다.

식 (11)은 손상 발생 전 상태의 주파수응답비  $FRR_b$ 과 손상 발생 후 상태의 주파수응답비  $FRR_d$ 의 선형 관계식이다. 주파수응답비보증지수를 이용하여 실시간으로 손상을 경보하기 위해 관리도(control chart) 분석으로 아래와 같은 관리하한(lower control limit, LCL)을 도입하였다.

$$LCL_{FRRAC} = \mu_{FRRAC} - 3\sigma_{FRRAC} \quad (12)$$

여기서,  $\mu_{FRRAC}$ 와  $\sigma_{FRRAC}$ 는 각각 주파수응답비보증지수에 대한 평균과 표준편차를 나타낸다. 만일 주파수응답비보증지수가 관리하한이하로 떨어지게 되면 손상이 발생한 것으로 경보하게 된다.

### 3.4 모드변형에너지기반 손상지수 기법

모드변형에너지기반 손상지수기법은 손상 전후의 모드 변형에너지 변화로부터 손상의 정도를 판별하는 기법이다. 모드변형에너지기반 손상지수 기법은 국부적인 손상에 대한 민감도가 높고, 대칭 위치의 손상을 판별하기 용의하며 복수 손상에 대해서도 손상검색 성능이 뛰어나다. 또한, 정규 모드형상을 이용할 경우 온도영향으로 인한 오류가 고유진동수를 이용한 기법에 비해 작다. 이와 같은 모드형상 기반 손상검색 기법을 이용한  $j$ 번째 위치의 손상지수  $\beta_j$ 는 아래와 같이 나타낼 수 있다(Kim 등, 2003).

$$\beta_j = \frac{k_j}{k_j^*} = \frac{\sum_i \int_j [\phi_{ij}^{**}(x)]^2 dx}{\sum_i \left( \frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i} \int_0^L [\phi_i^{**}(x)]^2 dx + \int_j [\phi_{ij}^{**}(x)]^2 dx \right)} \quad (13)$$

여기서,  $k_j$ ,  $k_j^*$ 는 각각 비손상 및 손상 상태에서  $j$ 번째 부재의 강성을 나타내며,  $\phi_i^{**}$ 는  $i$ 번째 모드에 대한 모드 곡률을 나타내고,  $\phi_{ij}^{**}(x)$ ,  $\phi_{ij}^{**}(x)$ 는 각각 비손상과 손상 상태의  $i$ 번째 모드에 대한  $j$ 번째 위치의 모드 곡률을 나타낸다.  $\Delta \lambda_i / \lambda_i$ 는 손상 전후의 고유치 변화율을 의미하고, 식 (13)에서 모든 항은 실험 모드 해석으로부터 추출이 가능하다.

주어진 모드에서 손상의 위치는 통계적 가설검증(testing of statistical hypothesis)에 의해 결정될 수 있다. 우선,  $\beta_j$ 를 랜덤변수로서 취급하면  $\beta_j$ 의 집합은 모 집단을 이루며, 정규분포로 가정하여 정규화된 손상위치지수는 아래와 같다.

$$Z_j = \frac{(\beta_j - \mu_{\beta_j})}{\sigma_{\beta_j}} \quad (14)$$

여기서,  $\mu_{\beta_j}$ 와  $\sigma_{\beta_j}$ 는 각각  $\beta_j$ 들의 평균과 표준편차이다.

또한, 가설 검증(hypothesis test) 판정법칙을 이용하여 손상의 위치를 판별할 수 있다. 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 사실 여부를 결정한다. 1) Choose  $H_1$  if  $Z_j \geq z_0$ , 2) Choose  $H_0$  if  $Z_j < z_0$ . 여기서,  $z_0$ 는 손상 위치를 결정하기 위한 신뢰수준을 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.

## 4. 손상 모니터링 체계 실험 검증

### 4.1 실험 구성

먼저, 대상 교량인 미호천교에 균열과 같은 손상을 도입하는 것이 제한되어, 대체방안으로 Fig. 2와 같이 트럭재하>Loading 1과 Loading 2)를 통해 구조물 이상상태를 모사하였다. 트럭재하 실험은 Table 1과 같이 총 253.036kN의 중량을 가지는 덤프 트럭을 이용하여 수행되었다. 또한, Fig. 2에 도시된 것과 같이 재하 트럭의 위치 변화>Loading 1과 Loading 2)를 두 가지 이상상태

Table 1 Wheel Load of Test Vehicle

총중량 (kN)	전륜 (kN)	중륜 (kN)	후륜 (kN)
253.036	31.556	47.481	47.481

Table 2 Natural Frequency for Loading Cases of Mihocheon Bridge

Case	Natural Frequency (Hz)		
	Mode 1	Mode 2	Mode 3
Reference	5.68	6.25	7.03
Loading 1	5.92	6.47	7.25
Loading 2	5.86	6.34	7.26

발생 시나리오로 선정하였다. Loading 1의 경우 전륜과 중륜의 중앙이 Girder 3의 가속도 센서 G3S7 위치에 있도록 재하하였다. Loading 2의 경우 Girder 3의 가속도 센서 G3S5 위치에서 4m 오른쪽에 트럭의 전륜이 위치하도록 재하하였다. 다음으로, 두 재하조건에 대해 가속도 응답은 앞선 2.2절의 미호천교의 동특성 분석과 동일한 방법으로 볼링공의 자유낙하를 이용한 강제진동실험을 통해 계측되었다.

이와 같은 재하트럭의 정하중 재하 위치 변화에 따른 미호천교의 고유진동수의 변화가 Table 2와 같이 추출되었다. 고유진동수의 변화는 재하트럭에 의해 구조물의 동특성이 변화하였는지, 즉 구조물의 상태 변화가 발생하였는지를 확인하기 위해 추출되었다. 추출된 고유진동수의 신뢰성을 평가하기 위하여, 세 가지 하중재하 조건에 대해 각각 8회 반복 실험을 수행한 결과, 실험 오차의 범위가 0.7% 이내로 나타났다. 이는 고유진동수의 변화가 계측 불확실성에 의한 것이기 보다는 트럭 재하에 의한 것으로 판단하였다.

일반적으로 교량에 질량이 증가되면 고유진동수가 저하된다. 하지만, 본 연구에서는 재하트럭의 정하중 재하에 대해 고유진동수가 증가하였다. 이처럼, 고유진동수가 증가한 원인은 재하트럭으로 인한 단부 구속조건의 변화, 재하전후 온도 변화에 따른 불확실성, 실험 및 해석과정에서의 오류 등에 기인한다고 사료된다. 이 같은 고유진동수 변화상의 불확실성 요인에 대한 보다 정량적 분석을 위해 충분한 실험 계측 및 분석과 경계조건 변화에 대한 해석적 연구가 필요하다.

이상과 같이 고유진동수의 변화를 이용하여 구조물 상태변화를 모니터링할 수 있으나, 전문가에 의한 복잡한 모드해석 과정을 거쳐야하기 때문에 구조건전성 모니터링 자동화에는 알맞지 않다. 따라서 본 연구에서 제안한 구조건전성 모니터링 체계는 실시간 이상상태 정보 단계에서 고유진동수 추출과정이 필요 없는 자기회귀모델 등의 3가지 기법들을 이상상태 경보를 위해 적용하였다.

## 4.2 실험 검증 결과

계측된 가속도 신호로부터 미호천교에 발생한 손상(정

하중재하)을 경보하기 위한 기법 중, 가속도 신호의 자기회귀 모델 및 주파수응답함수의 상관계수는 임의의 한 위치에서 계측된 가속도 신호를 이용한다. 주파수응답비모 증지수는 임의의 두 위치에서 계측된 가속도 신호를 이용한다.

이에, 추출된 2개의 휨 모드에 대한 민감도가 비교적 높은 위치에서 계측된 가속도 신호를 기준으로 미호천교에 대한 손상 경보를 수행하였다. Fig. 2와 같이 총 36개 위치에서 추출된 모드형상(Fig. 4)의 민감도가 비교적 높은 각 경간의 중앙부에 총 8개의 위치(G1S3, G2S3, G3S3, G4S3, G1S7, G2S7, G3S7, G4S7)를 선정하였다. 손상 경보 후 총 36개 위치에서 추출된 가속도 신호를 이용하여 모드변형에너지를 계산하여 손상 위치를 추정하였다.

실 구조물의 경우 계측 가능한 동특성이 비교적 저 주파수 대역(수십 Hz)에 존재한다. 하지만, 구조물 상태변화에 대한 경보를 자동화하고, 전문가에 의한 특정모드 선택과정을 최대한 줄이기 위해 200Hz까지의 넓은 주파수 대역을 이용하여 주파수응답함수의 상관계수 및 주파수응답비모증지수 결과를 도출하였다. 가속도 신호의 계측은 정하중재하 조건별 4회의 실험을 수행하여 실험단계별 변화를 검토하였다.

### 4.2.1 가속도 신호의 자기회귀모델

식 (2)와 같은 가속도 신호의 자기회귀모델을 이용하여 미호천교의 실험조건에 대한 손상 경보를 수행한다. 먼저, Fig. 3(a)와 같이 계측된 가속도 신호에서 1회 가진력에 해당하는 1,024개의 가속도 신호를 Fig. 6(a)와 같이 추출하였다. 추출된 1,024개의 가속도 신호를 이용하여 Fig. 6(b)와 같이 부분자기상관(partial autocorrelation) 해석을 통해 자기회귀 모델의 차수  $p$ 를 결정하였다. Fig. 6(b)의 실선은 부분자기상관의  $2\sigma_\phi$ 를 나타낸다. 부분자기상관이 Lag가 30이후로 0에 수렴해 가는 것을 볼 수 있다. 따라서 자기회귀 모델의 차수는 30 이상의 값을 선정하여야 한다.

하지만, 현장실험에서 측정된 Reference 상태의 신호가 4회로 제한된 것과 각각의 계측 시 가진 횟수가 8~9회 정도인 것을 고려하여 본 연구에서의 자기회귀 모델의 차수를 20으로 선정하였다. 자기회귀 계수는 Reference 신호계측에 대한 총 4회의 실험 중, 3회의 실험과 각각의 계측 시 8회의 가진을 분류하여(총 24개의 가속도 신호) Fig. 6(c)와 같이 계산되었다.

이로부터, 자기회귀 계수의 선정에 제외된 1회의 Reference 상태와 Loading 1과 Loading 2 조건에서 측정된 각각의 4회의 가속도 신호를 이용하여 총 8개 위치에서의 마할노비스 제곱거리 변화를 Fig. 7과 같이 도출하였다. 또한, 식 (4)와 같은 관리도분석을 이용하여 관리

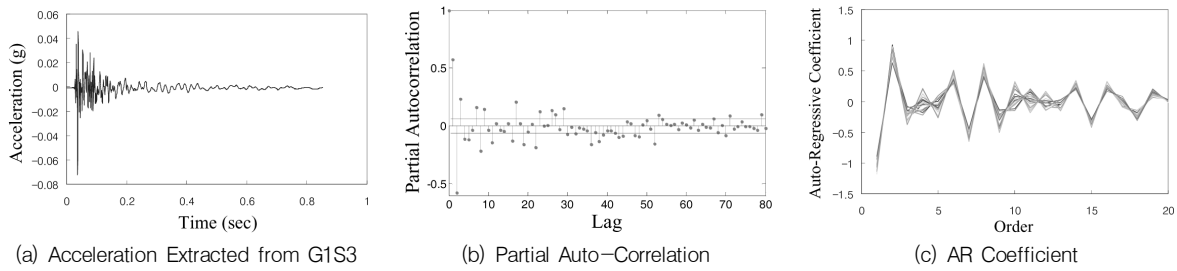


Fig. 6 AR Process Results for Damage Alarming.

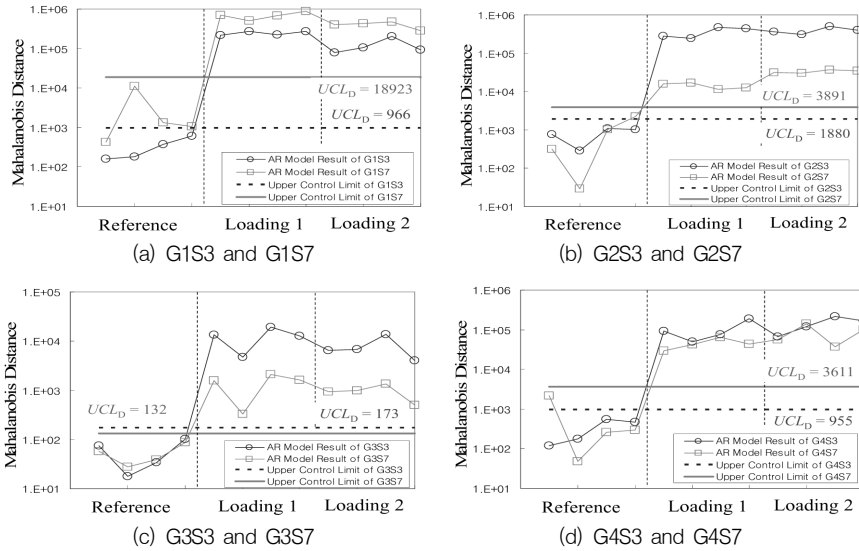


Fig. 7 AR Model Results on 8 Acceleration Locations for Experimental Cases.

상한( $UCL_D$ )을 도출하였다. 만일, 마할노비스 제곱거리의 값이 관리상한을 초과하면 손상 발생을 경보하게 된다. 실험단계별 마할노비스 제곱거리의 변화가 명확하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 모든 위치에서 손상 발생을 경보하는 것을 볼 수 있다.

#### 4.2.2 주파수응답함수의 상관계수

식 (6) 과 같은 주파수응답함수의 상관계수를 이용하여 미호천교의 실험조건에 대한 손상 경보를 수행한다. 먼저, 총 8개의 위치에서의 가속도 신호의 주파수응답함수를 산정하였다. Fig. 8은 산정된 예로 G1S3 위치에서의 정하중재하 조건별 주파수응답함수를 보여준다. 다음으로, 각 실험단계별로 주파수응답함수의 상관계수를 산정하였다.

Fig. 9는 총 8개의 위치에서 실험단계별 상관계수의 변화를 보여준다. 또한, 식 (8)과 같은 관리도 분석을 이용하여 도출된 관리하한( $LCL_{CC}$ )을 보여준다. 관리하한을 이용한 손상 경보의 결과, G4S7를 제외한 모든 위치에서 주파수응답함수의 상관계수를 이용한 손상 경보가 명확하게 이루어지고 있음을 볼 수 있다. G4S7의 경우, Reference 상태 신호 중 하나의 결과가 급격히 떨어짐으

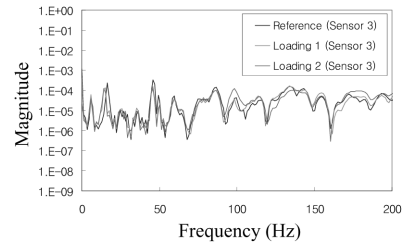


Fig. 8 Frequency Response Function on G1S3 Location

로 인해 이와 같은 결과가 도출되었다. 이를 감안하여 급격히 떨어지는 부분의 결과가 다른 Reference 상태 신호와 유사하다고 가정하면 G4S7의 결과 역시, 매우 좋은 손상 경보 결과인 것으로 사료된다. 오히려 G1S7과 같이, 실험단계별 변화가 작게 나타난 것이 온도와 같은 환경적 변화가 발생 시에 손상 경보의 오작동을 초래할 수 있다.

#### 4.2.3 주파수응답비모증지수

식(11)과 같은 주파수응답비모증지수를 이용하여 미호천교의 실험조건에 대한 손상 경보를 수행한다. 먼저, 실험단계별로 임의의 두 위치에서 가속도 신호를 계측한다. 두 위치에서 계측된 가속도 신호를 이용하여 식(10)와 같은 주파수응답비를 산정한다. 다음으로, 실험 전·후의

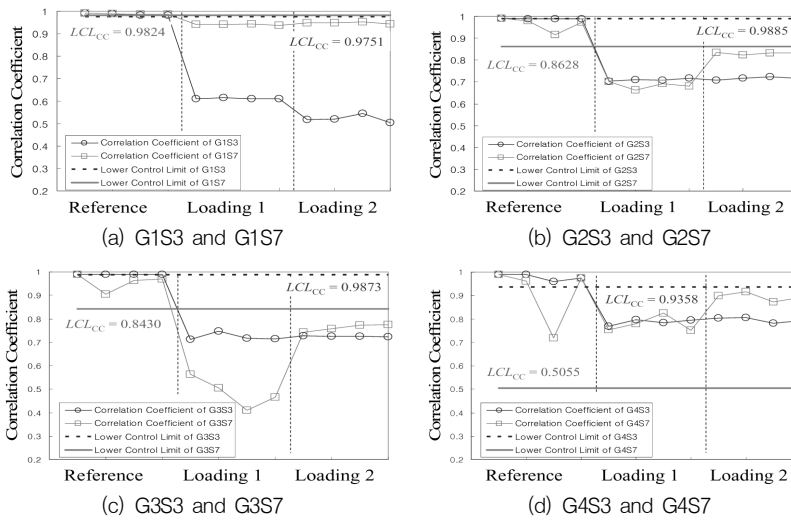


Fig. 9 Correlation Coefficient of Frequency Response Function on 8 Acceleration Locations for Experimental Scenarios.

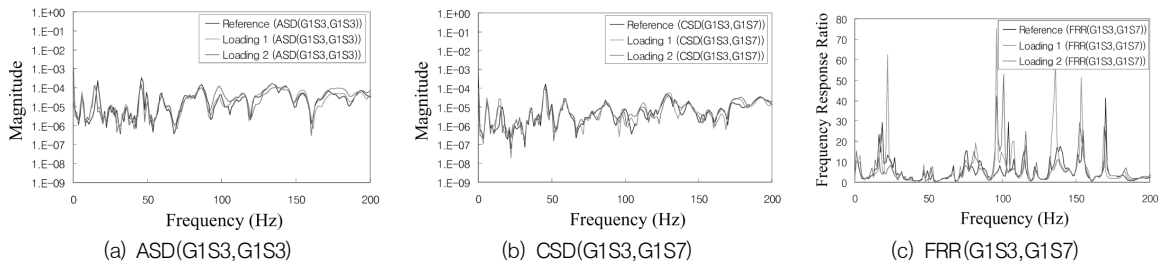


Fig. 10 FRRAC Result by a Pair of Sensors (Sensor 3 & 7) for Experimental Scenarios.

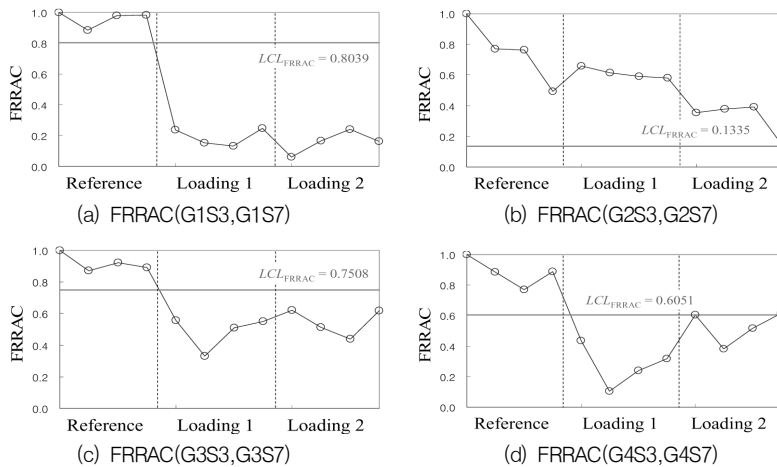


Fig. 11 FRRAC Results from 4 Pairs of Sensors for Experimental Cases.

주파수응답비를 이용하여 식(11)과 같은 주파수응답비보 증지수를 산정한다. 마지막으로, 주파수응답비보 증지수의 변화로부터 실험단계에 대한 손상 정보가 이루어진다.

Fig. 10은 예로써 G1S3과 G1S7의 두 위치에서 주파수응답비보 증지수를 산정하기 위한 과정을 보여준다. 먼저, 두 위치에서 측정된 가속도 신호를 이용하여 Fig. 10(a)와 같은 G1S3에 대한 자기 스펙트럼밀도함수(ASD

(G1S3, G1S3))와 Fig. 10(b)와 같은 G1S3과 G1S7에 대한 상호 스펙트럼밀도함수(CSD(G1S3, G1S7))를 산정하였다. 이로부터, Fig. 10(c)와 같은 주파수응답비(FRR(G1S3, G1S7))를 산정하였다.

다음으로, Reference 상태 신호간의 주파수응답비를 기준으로 실험단계의 주파수응답비를 비교함으로써 주파수응답비보 증지수(FRRAC(G1S3, G1S7))를 산정하였



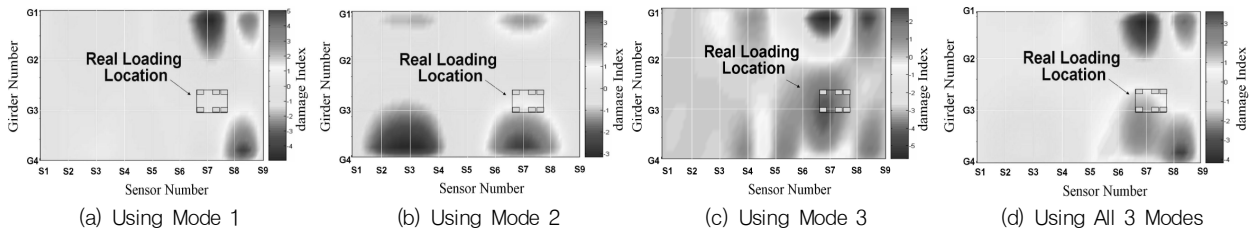


Fig. 12 Damage Estimation Results using Modal-Stain-Energy-based Damage Index in Mihocheon Bridge (Loading 1).

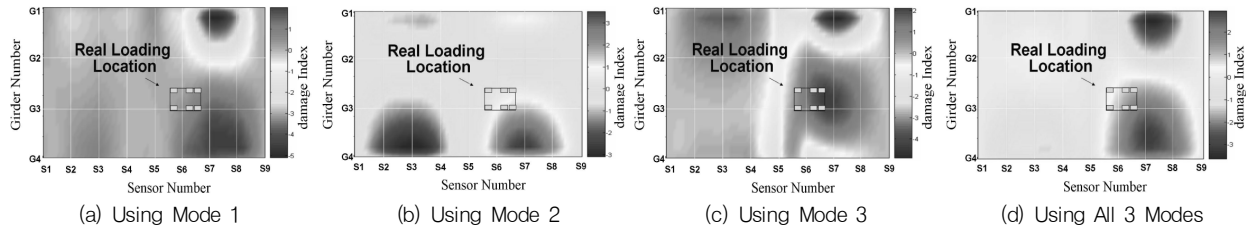


Fig. 13 Damage Estimation Results using Modal-Stain-Energy-based Damage Index in Mihocheon Bridge (Loading 2).

다. 주파수응답비모증지수를 이용한 손상 경보의 결과가 Fig. 11과 같다. 먼저, Fig. 4와 같이 좌측 경간에 위치한 4개의 가속도 센서(G1S3, G2S3, G3S3, G4S3)를 기준으로 선정하였다. 다음으로, 4개의 기준센서로부터 우측 경간의 4개의 가속도 센서(G1S7, G2S7, G3S7, G4S7)를 각각 조합하여 주파수응답비모증지수를 산정하였다. 모든 조합의 결과에서 실험단계별 주파수응답비모증지수의 변화가 명확하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

또한, 식 (12)과 같은 관리도 분석을 이용한 관리하한 ( $LCL_{FRRAC}$ )으로부터 도출된 손상 경보의 결과, G2S3과 G2S7의 조합을 제외한 모든 위치에서 주파수응답비모증지수를 이용한 손상 경보가 명확하게 이루어지고 있음을 볼 수 있다. G2S3과 G2S7의 조합 역시 Reference 상태 신호간의 변화가 크게 나타난 것에 기인하였다. 이를 감안한다면 매우 좋은 손상 경보 결과인 것으로 사료된다.

#### 4.2.4 모드변형에너지기반 손상지수 기법

앞선 세가지의 손상경보 기법을 이용한 손상경보 후, 식 (13)과 같은 손상지수를 이용하여 미호천교의 실험조건에 대한 손상평가를 수행하였다. 손상평가는 정하중재하에 사용된 재하트럭의 위치를 식별하는 것이다. 모드변형에너지기반 손상지수 기법을 이용하여 Loading 1과 Loading 2에 대하여 3개의 진동 모드 각각을 이용하였을 경우와 1, 2, 3차 진동 모드를 모두 이용하였을 경우에 대한 손상검색 결과가 Fig. 12와 Fig. 13과 같이 나타났다. Loading 1과 Loading 2에 있어 3차 모드형상만을 이용하였을 경우 그 위치를 정확하게 예측하고 있으나, 미호천교 전반에 걸쳐 손상이 있는 것(손상지수가 1이상인 붉은색 계열로 표시된 부분)으로 나타나고 있다. 또한, 1차 모드보다는 2차 모드만을 이용하였을 경우 손상위치

추정에 더 좋은 결과를 보였다.

현장실험으로부터 모드변형에너지기반 손상지수 기법을 이용하여 재하위치를 찾는 데 있어 모드형상 추출이 얼마만큼 정확한지는 위치 추정 정확도에 영향을 주게 된다. 이는 모드변형에너지기반 손상지수가 모드형상의 2차 미분값을 이용하기 때문이다. 또한 위치 추정 정확도는 해당 모드가 해당 손상 상태에 얼마만큼 민감하나에 따라 달라질 수 있고, 초기 상태로 가정하였던(재하 전) 상태의 구조물에 손상이 이미 있을 시에도 추정 정확도는 떨어지게 된다. 이와 같은 영향으로 인해 각 모드 별 위치 추정 결과에 다소 차이가 발생한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문은 구조계의 전역적인 이상거동을 감지하는데 용이한 가속도 응답 신호를 이용하여 교량의 이상상태를 실시간으로 경보하고 위치를 빠르고 정확하게 검색할 수 있는 2단계 구조건전성 모니터링 체계를 제시하였다. 이를 위해, 다음과 같은 연구를 수행하였다.

먼저, 미호천교를 대상구조물로 선정하였다. 선정된 대상구조물에 대한 구조형식을 파악하고, 가속도 신호의 계측을 통해 동적응답 특성을 분석하였다.

다음으로, 실험 조건은 실 교량인 미호천교에 직접적인 손상을 도입하기 어려워 재하트럭을 이용한 정하중재하 실험을 수행하였다. 재하 트럭의 정하중 재하 위치 변화로부터 미호천교의 손상을 간접적으로 묘사하였다.

마지막으로, 선정된 모니터링 기법들을 이용한 실 교량인 미호천교를 대상으로 정하중 재하 조건에 대한 손상경보 및 손상위치 추정을 수행하였다. 먼저, 손상 경보는 세 가지 모니터링 기법 모두 정하중 재하단계별 매우 정확하게 손상 경보를 수행하였다. 다음으로, 모드변형에너지기

반 손상지수법을 이용한 정하중 재하 단계별 재하트럭 위치 추정결과, 1, 2차 진동모드를 이용하였을 경우보다 3차 진동모드를 이용하였을 때, 정하중 재하에 대한 위치 추정오차가 적은 것을 알 수 있었다. 또한, 1, 2, 3차 진동 모드를 함께 이용하였을 때는 1, 2차 진동모드의 재하트럭 위치 예측 오차로 인하여 약간의 추정 오차를 가지고 있으나, 비교적 정확하게 재하트럭 위치를 예측하였다.

이와 같은 연구를 통해, 가속도 신호를 이용한 구조건전성 모니터링 체계의 구축으로 보다 효과적이고 신뢰할 수 있는 구조 건전성 모니터링을 수행할 수 있었다. 차후, 제안된 모니터링 체계의 신뢰성을 높이기 위해서 온도유발 가속도 특성변화 및 손상유발 가속도 특성변화를 구분할 수 있는 온도보정기법에 대한 연구를 수행하고자 한다. 또한, 제안이론의 개별 검증은 추후의 소규모 실험체를 통해 연구를 수행하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 우수연구센터인 스마트 사회 기반 연구센터의 연구비 지원(R11-2002-101-03002-0)에 의해 수행되었습니다. 또한, 연구에 참여한 대학원생들은 BK21 프로그램의 지원을 받았습니다.

#### 참고문헌

1. 김정태, “소수의 고유진동수를 사용하는 비파괴 균열발견모델의 유도 및 검증”, 한국전산구조공학회 논문집, 제12권, 제2호, 1998, pp.149-159.
2. 김정태, 박재형, 홍동수, 나원배 “가속도 및 임피던스 신호를 이용한 PSC 거더교의 하이브리드 손상 모니터링 체계”, 대한토목학회지, 대한토목학회, 제28권, 제1A호, 2008, pp.135-146.
3. 남광현, 교량의 점검과 복원, 도서출판 과학기술, 서울, 2000.
4. 박재형, 김정태, 류연선, 이진학 “고유진동수와 모드변형에너지를 이용한 향상된 유전알고리즘 기반 손상검색기법”, 한국전산구조공학회 논문집, 제19권, 제3호, 2006, pp.313-322.
5. 이진학, 윤정방 “구조물의 응답자료만을 이용한 모드계수 추

정법에 관한 비교연구”, 대한토목학회지, 대한토목학회, 제23권, 제2A호, 2003, pp.187-201.

6. Adams, R.D., Cawley, P., Stone, C. J. and Stone, B. J., “A Vibration Technique for Non-destructively Assessing the Integrity of Structures”, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 20, 1978, pp.93-100.
7. Bendat, J.S. and Piersol, A.G., “Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis”, New York, NY, Wiley-Interscience, 1993.
8. Chen, J., Garba, J.A., “On-orbit Damaged Assessment for Large Space Structures”, AIAA Journal, Vol. 26, No. 9, 1988, pp.1119-1126.
9. Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M., and Stubbs, N. “Damage Identification in Beam-type Structures: Frequency-based Method Vs Mode-shape-based Method”, Engineering Structure, Vol. 25, 2003, pp.57-67.
10. Kim, J.T., Stubbs, N., “Model-uncertainly Impact and Damaged-detection Accuracy in Plate-girder”, Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 10, 1995, pp. 1409-1417.
11. Kim, J.T., Yun, C.B., and Park, J.H. “Thermal Effects on Modal Properties and Frequency-based Damage Detection in Plate-girder Bridges”, Proc. of SPIE 2004, San Diego, USA, 2004.
12. Sohn H., Farrar C.R., Hemez, F.M., Shucnk, D.D., Strnemates, D.W., and Nadler, B.R. A Review of Structural Health Monitoring Literature 1996-2001, LA-13976-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 2003, p.301.
13. Sohn, H., Farrar, C.R., Hunter, N. and Worden, K., Applying the LANL Statistical Pattern Recognition Paradigm for Structural Health Monitoring to Data From a Surface-effect Fast Patrol Boat, Report No. LA-13761-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 2001.
14. Sundermeyer, J.N., Weaver, R.L., On Crack Identification and Characterization in Beam by Nonlinear Vibration Analysis, TAM Report, No. 74, UILU-ENG-93-604, Univ. of Illinois, 1993.

(접수일자 : 2009년 2월 24일)  
 (1차수정일자 : 2009년 12월 8일)  
 (심사완료일자 : 2009년 12월 18일)

#### 요 지

본 논문에서는 실물 콘크리트 거더 교량의 가속도 응답 신호를 이용하여 구조물의 상태변화를 경보한 후 그 위치 변화를 검색하는 2단계 구조건전성 모니터링 체계를 제시하였다. 먼저, 2경간 연속 콘크리트 거더 교량인 미호천교를 대상교량으로 선정하였으며, 볼링공을 이용한 강제진동 실험으로부터 동특성을 추출하였다. 다음으로, 미호천교의 2단계 구조건전성 모니터링 체계 구축을 위한 손상 발생 경보 및 손상 위치 검색 기법들을 선정하였다. 손상 경보 기법으로는 시간영역 특징을 이용하는 자기회귀모델과 주파수응답함수의 상관계수, 주파수응답비증지수를 선정하였다. 손상 위치 검색 기법으로는 모드변형에너지기반 손상지수법을 선정하였다. 마지막으로, 덤프트럭을 이용한 정적 재하 실험을 통해 2단계 손상 모니터링 체계의 적합성을 검증하였다.

**핵심 용어 :** 가속도 응답, 콘크리트 거더 교량, 손상 검색, 손상 경보, 상관계수, 자기회귀 계수