J Rec Const Resources 11(4)355-363(2023)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2023.11.4.355

Online ISSN : 2288-369X

상시 진동을 이용한 교량 정적 처짐 산정 기술의 현장 적용성 연구

A Study on the Field Application of the Measurement Technique for Static Displacement of Bridge Using Ambient Vibration

오상혁[1*] · 문대중[2] · 이광명[3]
Sang-Hyuk Oh[1*] · Dae-Joong Moon[2] · Kwang-Myong Lee[3]

(Received October 15, 2023 / Revised October 23, 2023 / Accepted October 23, 2023)

In safety assessment of a aged bridge, dynamic characteristics and displacement are directly related to the rigidity of the structural system, especially displacement is the most important factor as the physical quantity that the bridge user can directly detect. However, in order to measure the displacement of the bridge, it is difficult to install displacement sensors at the bottom of the bridge and conduct traffic blocking and loading tests, resulting in increased costs or impossible measurements depending on the bridge's environment. In this study, a method of measuring the displacement of a bridge using only accelerometers without installing displacement sensors and ambient vibration without a loading test was proposed. For the analysis of bridge dynamic characteristics and displacement using ambient vibration, the mode shape and natural frequency of the bridge were extracted using a TDD technique known to enable quick analysis with simple calculations, and the unit load displacement of the bridge was analyzed through flexibility analysis to calculate static displacement. To verify this proposed technology, an on-site test was conducted on C Bridge, and the results were compared with the measured values of the loading test and the structural analysis data. As a result, it was confirmed that the mode shape and natural frequency were 0.42 to 1.13 % error ratio, and the maximum displacement at the main span was 3.58 % error ratio. Therefore, the proposed technology can be used as a basis data for indirectly determine the safety of the bridge by comparing the amount of displacement compared to the design and analysis values by estimating the displacement of the bridge that could not be measured due to the difficulty of installing displacement sensors.

키워드 : 상시 진동, 동특성, 처짐, 안전성 평가, 사장교

Keywords : Ambient vibration, Dynamic characteristic, Displacement, Safety assessment, Cable-stayed bridge

1. 서 론

1970년대 본격적인 현대화가 이루어지면서 토목구조물 및 교량의 건설 시장은 급성장하였으며, 2000년대 경제정책부흥으로 도로건설은 비약적으로 증가하여 현재 국내 전체 교량의 절반 가량이 2000년 전후반에 건설되었다. 노후 교량의 감가상각 내용연수를 30~50년으로 정의할 때, 1970년대 교량은 2020년부터 노후화에 접어들었으며 이후 급격한 증가가 예상되고 있다(Lee 2015).

2020년도 국토교통부 조사에 따르면 국내 교량의 노후화율(준공 30년 경과)은 17.9 %(5,662개)이며, 10년 뒤에는 49.7 %(15,752개)로 급증할 것으로 추정된다. 서울시 교량은 2021년 기준 총 683개소 중 30년 이상 교량은 277개소로 노후화율은 40.6 %이며 10년 뒤에는 약 70 %에 육박할 것으로 추정되고 있다. 이러한 추세로 국내 교량의 유지관리 시장은 지속적으로 확대 및 성장하고 있다. 2020년도에 정밀안전진단을 실시한 시설물 중 교량 및 터널 분야가 1,939개소로 전년대비 2.4 % 증가하였다. 정밀안전진단 실시 금액은 946억원으로 전년대비 0.24 % 증가하였으며 대상 시설물

* Corresponding author E-mail: shoh@dot.or.kr

[1]㈜디오티 기업부설연구소 연구소장 (Research & Development Center, DOT CO., Ltd., Kyonggi, 13201, Korea)
[2]㈜디오티 기업부설연구소 대표이사 (Research & Development Center, DOT CO., Ltd., Kyonggi, 13201, Korea)
[3]성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수 (Dept. of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Kyonggi, 16419, Korea)

Copyright ⓒ 2023 by Korean Recycled Construction Resources Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

중 가장 많은 개소와 실시 금액을 보이고 있다(Statistical Yearbook of Facilities 2021).

이러한 노후 교량의 안전성 평가에 있어서 교량의 동특성과 처짐측정은 매우 중요한 지표로 활용되고 있다. 특히 처짐은 구조계의 강성과 직접 관련되어 전체적인 구조 거동 특성을 나타낼 뿐만 아니라 교량 사용자가 직접 감지할 수 있는 물리량이므로 교량의 안전성 평가에 있어서 매우 중요한 측정 항목이다(Yun and Ryu 2011; Yoon et al. 1999). 교량의 처짐을 측정하기 위해 가장 일반적으로 사용되는 처짐계는 높은 정밀도를 보이고 있으나, 교량 하부의 하천, 차량 통행 등의 장애물로 인해 측정이 제한되는 교량에는 적용이 어렵고 추가적인 비용이 발생하는 문제점이 있다(Jeon and Lee 2019). 따라서 교량의 직접적인 처짐 측정이 어려운 교량과 비용, 교통량, 환경 등의 영향으로 기존 기술의 도입이 어려운 교량의 안전성을 평가할 수 있도록 주요 인자인 동특성과 처짐 분석 기술에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다.

Park et al.(2021)은 가속도 및 변형률을 이용하여 교량의 처짐을 추정하는 기술을 제안하였으나, 교량 하부에 변형률을 설치해야 하며 재하시험과 유사한 수준의 차량 하중을 통행시켜야 하는 번거로움이 있다. Choi et al.(2017)은 GPS와 가속도 데이터를 이용하여 동적 변위를 추출하는 센서 모듈을 개발하였으나 고가의 비용과 설치가 어려워 장기 유지관리시스템에 적합한 한계가 있다.

본 논문에서는 기존 기술의 단점을 보완하여 재하시험 없이 교량의 정적 처짐 추정이 가능한 기술을 제안하였다. 다수의 무선 가속도계로부터 측정된 상시 진동 데이터만을 이용하여 모드형상과 그에 상응하는 고유진동수를 추출하고 유연도 분석을 통한 정적 처짐 산정이 가능한 기술을 정립하였으며, C대교에 적용하여 현장적용성을 검증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 TDD기법을 이용한 모드형상 추출

TDD(Time Domain Decomposition) 기법은 모드형상과 같은 공간변수와 고유진동수 및 감쇠비와 같은 시간변수의 분리를 독립적으로 분리하여 추출할 수 있다는 가정을 기본원리로 한다(Kim et al. 2005). 고유진동수가 존재하는 주파수영역대의 모드형상을 푸리에변환 없이 시간영역에서 직접 추출하는 방법으로서 TDD 기법은 고유진동수 추출절차와 모드형상 추출절차가 독립적으로 수행될 수 있기 때문에 케이블교량과 같이 측정하기 위한 센서의 수가 많은 구조물의 모드형상 추출에 특히 적합한 기법으로 알려져 있다(Park et al. 2006). 또한 가속도 신호로부터 단일모드의 시간응답을 얻기 위해 TDD기법은 FDD기법의 역퓨리에 변환(Brinker et al. 2000)이나 ITD 기법의 RD함수가 아닌(Asmussen 1997), 디지털 밴드 패스 필터(digital band path filter)를 사용한다. 이는 고난이도의 자료처리 기술이 필요하지 않고 간단한 프로그램으로도 구현이 가능하여 방대한 양의 실시간 데이터도 자동화 시스템처리에 용이하다. 또한 이러한 단자유도 접근방법은 ERADC 및 ITD기법이 가지고 있는 가짜모드 발생을 피할 수 있다(Kim et al. 2008).

TDD 기법은 Fig. 1과 같은 절차로 수행된다. 첫째, p개의 가속도계에서 측정된 상시 진동 가속도를 FFT 분석하여 i번째 고유진동수가 존재할 것으로 예상되는 주파수 대역을 선주파수 성분만을 갖는 시간응답 데이터 행렬 Y_i를 계산한다.이때, p개의 가속도계를 이용하여 N개의 시간샘플이 계측되었다면 Y_i의 크기는 $p \times N$이다. 셋째, 에너지 상관행렬 E_i를 식 (1)과 같이 정의한다.

$$E_i = Y_i Y_i^T \tag{1}$$

에너지 상관행렬 Ei의 특이치 분해과정 SVD(singular value decomposition)을 식 (2)과 같이 수행한다.

$$E_i = U \Omega U^T \tag{2}$$

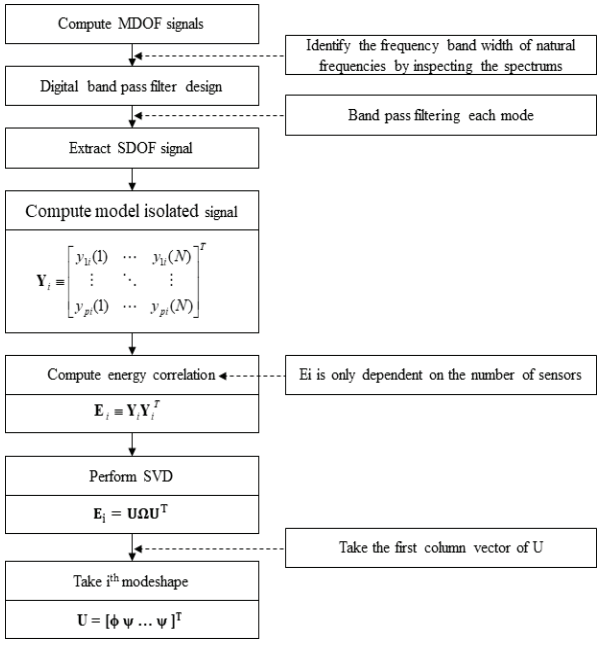


Fig. 1. Mode shape extraction using TDD technique

여기서, U는 특이치 벡터이고 Ω는 특이치를 나타낸다. 그러면, i번째 모드형상은 U의 첫 번째 행벡터가 된다. 에너지 상관관계 행렬 E_i의 크기가 $p \times p$로서 시간 샘플 수 N의 함수가 아니고, 시간변수는 분리된 센서 수 p만의 함수라는 것이다. 즉, 계측된 시간 샘플의 수 N에 비례하지 않기 때문에 특이치 추출 과정에서 필요한 막대한 계산량을 상당히 줄일 수 있어 실시간 자동화에 용이하다. 이러한 특징은 다수의 센서의 설치가 요구되는 케이블 교량과 같은 대형 구조물의 모드형상 실시간 추출에 적합한 기법이다.

2.2 고유진동수 추출 방법

시공간분할기법으로 추출된 i번째 모드형상을 이용하여 i번째 모드를 대표하는 가속도 상호상관함수(Cross correlation function) $c_i(k)$는 식 (3)과 같이 구할 수 있다. 여기서, $y(k)$는 $p \times 1$ 벡터로 k번째 계측 가속도 행렬 샘플을 나타낸다.

$$c_i(k) = \frac{\boldsymbol{\phi}_i^T}{\boldsymbol{\phi}_i^T \boldsymbol{\phi}_i} y(k) \tag{3}$$

상기 상호상관함수 벡터는 i번째 모드만 필터링 된 단자유도 시간응답이기 때문에 식 (4)와 같은 i번째 모드를 갖는 자유진동함수(free vibration function)와 동일한 형태이다(Farrar and James 1997).

$$c(t) = Ae^{-\xi_i \omega_i t} \cos(\omega_d k \triangle t - \theta) \tag{4}$$

여기서, A는 진폭, ω_i는 비감쇠 고유진동수, ξ는 감쇠비, ω_d는 감쇠고유진동수 ($\omega_i \sqrt{1-\xi^2}$), θ는 이동각이다. 식 (4)에서 인식해야 할 변수는 고유진동수, 감쇠비, 진폭 및, 이동각(translation angle)이다. Kim and Park(2008)은 TDD기법의 연장선으로 SI(sensitivity-based system identification) 기법을 적용하여 i번째 모드의 고유진동수 w를 추출하였다. SI 기법은 역해석의 일종으로서 계측치와 시뮬레이션 수치가 같을때까지 반복하여 인식변수 변화율이 0이 될 때까지 변수들을 최적화하여 고유진동수 w의 근사치를 추정하는 방법이다. 따라서 SI 기법은 반복 프로세스가 불가피하며 이를 위해서는 많은 양의 계산이 필요하여 자동화 프로그램 구현이 어렵다.

본 논문에서는 반복적인 프로세스 없이 고유진동수를 추출하기 위해 단순하고 신속한 방법을 적용하였다. 3개의 연속된 가속도 상호상관 시간 샘플은 균일한 샘플링 시간 $\triangle t$에 대해 밀접한 관계를 갖는다는 것을 알 수 있다.

$$a_0 c_i(k) + a_1 c_i(k+1) = c_i(k+2) \tag{5}$$
$$k = 0, 1, \cdots, N-2$$

여기서 미지수 a_0와 a_1은 아래와 같이 i번째 고유진동수 w_i와 감쇠비 ξ_i의 함수이다.

$$a_0 = -e^{-\xi_i w_i 2\triangle t} \tag{6}$$

$$a_1 = 2e^{-\xi_i w_i \triangle t} \cos(w_d \triangle t) \tag{7}$$

식 (3)에 표시된 계측된 가속도 상호상관함수 $c_i(k)$를 식 (5)에 적용하면 아래와 같은 과도결정계(Over-determined system, m×n)가 생성된다.

$$\mathrm{Ax} = \mathrm{b} \tag{8}$$
$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} \mathrm{c_i}(0) & \mathrm{c_i}(1) \\ \vdots & \vdots \\ \mathrm{c_i}(\mathrm{N}-2) & \mathrm{c_i}(\mathrm{N}-1) \end{bmatrix},\ \mathrm{b} = \begin{bmatrix} \mathrm{c_i}(2) \\ \vdots \\ \mathrm{c_i}(\mathrm{N}) \end{bmatrix},\ \mathrm{x} = \begin{bmatrix} \mathrm{a_0} \\ \mathrm{a_1} \end{bmatrix}$$

위 식 (8)은 최소제곱법(ordinary least squares)을 사용하여 근사해를 찾을 수 있다.

$$\mathrm{x} = (\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{A})^{-1}\mathrm{A}^{\mathrm{T}}\mathrm{b} \tag{9}$$

식 (9)에서 x항의 계수 a_0와 a_1이 구해지면 i번째 고유진동수 w_i는 식 (6), (7)의 연립방정식으로 구할 수 있다.

2.3 유연도 분석을 통한 처짐 분석

유연도행렬(flexibility matrix)은 전체 강성행렬의 역행렬이다. 모달 변수들(modal parameters)을 조합하여 얻은 유연도행렬의 근사치를 동적유연도 행렬이라 한다. 동적유연도 행렬의 j번째 열벡터에 대한 물리적 의미는, j번째 자유도에 단위하중이 가해졌을 때 처짐 벡터를 나타낸다. 모달 변수들(modal parameters)을 조합하여 얻은 j번째 유연도 행벡터의 근사치를 j번째 동적유연도 벡

터라 한다. j번째 동적유연도 벡터는, $\boldsymbol{f}_j$, 다음 식 (10)을 이용하여 모달 변수 항들의 선형 조합으로 얻을 수 있다.

$$\boldsymbol{f}_j = \sum_{i=1}^{r} \frac{\phi_{ji}}{\omega_i^2 m_i} \boldsymbol{\phi}_i \tag{10}$$

여기서, p×1벡터, $\boldsymbol{\phi}_i$, 는 최대치가 1로 정규화된 i번째 모드형상을 나타내고, 변수 ϕ_{ji}는 i번째 모드형상 벡터 $\boldsymbol{\phi}_i$의 j번째 요소에 위치한 값을 나타낸다. 변수 r은 고려되는 모드의 총 수를 나타낸다. 변수 ω_i 와 m_i는 각각 i번째 고유진동수와 모드 질량을 나타낸다. i번째 모드질량(modal mass)의 추출은 다음 식 (11)을 이용하여 근사적으로 산출할 수 있다.

$$m_i = \rho A \int_0^L \phi_i(x)\phi_i(x)\,dx \tag{11}$$

여기서, 변수 ρ 와 A는 각각 교량의 질량과 단면적을 나타낸다. 단위길이당 질량 ρA는 설계도서로부터 평균 단면적을 산출하거나, 유한요소모델을 이용하여 산출할 수 있다.

최대치가 1로 정규화된 i번째 모드형상 벡터 $\boldsymbol{\phi}_i$ 와 모달질량 m_i 으로 정규화된 i번째 모드형상 벡터 $\boldsymbol{\psi}_i$ 사의의 관계는 $\boldsymbol{\phi}_i = \sqrt{m_i}\boldsymbol{\psi}_i$ 이므로, 식 (12)에 보이는 j번째 동적 유연도는 다음 식으로도 나타낼 수 있다(Ewins 2000).

$$\boldsymbol{f}_j = \sum_{i=1}^{r} \frac{\psi_{ji}}{\omega_i^2} \boldsymbol{\psi}_i \tag{12}$$

식 (11), (12)를 살펴보면, i번째 고유진동수 ω_i 가 분모에 있기 때문에, j번째 유연도에 대한 고차모드의 기여는 작고, 저차모드의 기여가 크다는 것을 알 수 있다.

상기의 식을 통해 구한 동적유연도는 교량의 각 노드(가속도 측정점)에서 1N의 하중이 작용할 때의 처짐을 의미한다. 즉, 교량의 최대처짐이 발생하는 지점의 단위하중처짐에 차량하중, 설계하중 등을 반영하여 교량의 정적 처짐을 실제 하중의 재하 없이 예측할 수 있다.

3. 현장시험을 통한 기술 검증

3.1 현장시험 개요

교량의 정적 처짐 산정 기술을 검증하기 위하여 정밀안전진단 용역을 수행중인 C대교에 대하여 재하시험과 상시 진동 시험을 수행하였다. 상시 진동을 이용한 처짐 분석 결과는 재하시험을 통한 실측값 및 구조해석값과 비교하였다. C대교는 총 경간 442.0 m의 2주탑 사장교로 교량 하부에 충주호가 있어 처짐계의 설치가 불가능한 교량이다. 따라서 재하시험을 통한 처짐 실측값은 주경간 L/2지점에 설치되어 있는 유지관리용 레이저변위계의 계측값을 사용하여 개발 기술의 처짐분석 결과와 비교할 수 있도록 하였다.

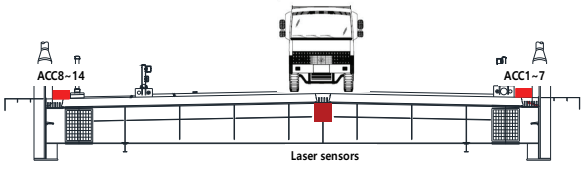


Fig. 2. Load test method and laser sensor location

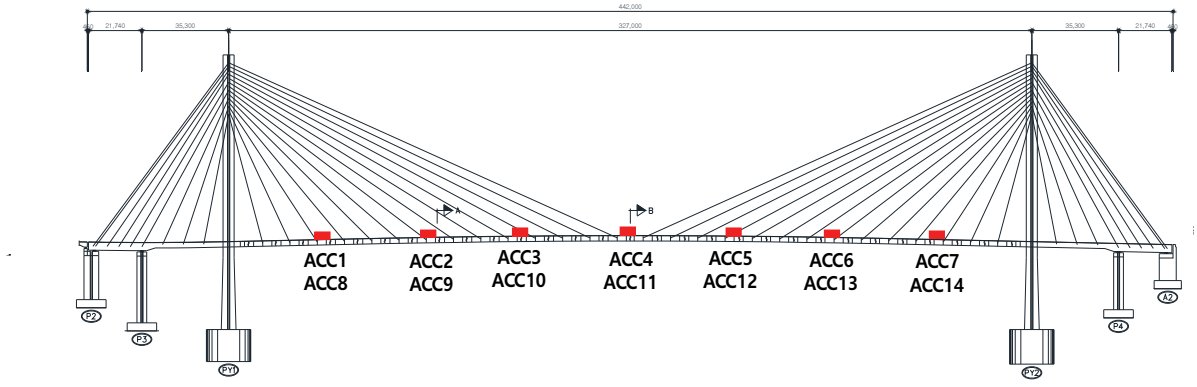


Fig. 3 Installation location of wireless accelerometers for ambient vibration measurement

Table 1. Method of measuring ambient vibration of bridge

Category	Details
Section	Main span (327.0 m)
Points	14 points
Vibration	Ambient (cars, wind etc.)
Time	90 minutes
Sampling	128 Hz
Axial direction	z (vertical direction)

Table 2. Specification of wireless accelerometer

Category	Specification
Model	G-Link-200
Type	Triaxial MEMS Acc., 3channels
Range	± 2 G, ± 4 G, ± 8 G
Resolution	20 bit
Sampling rates	1 sample/hour to 4096 Hz
Synchronization	± 50 μsec

실측값 측정을 위한재하시험은 토사를 만재한 총 중량 270 kN의 덤프트럭 1대를 사용하였고, 교량을 전면 통제 후 Fig. 2와 같이 교량의 중앙에 재하하여 최대 하중이 반영되도록 하였다.

한편, 상시 진동 계측을 위하여 Fig. 3과 같이 C대교의 주경간 327.0 m 에 대하여 교량의 상부 좌우측에 각 7개 지점에서의 상시 진동 측정을 위하여 총 14개의 무선가속도계를 설치하였다. 교량의 모드형상 추출을 위해서 1차 ~ n차 모드형상이 발생하는 위치에서의 진동을 측정해야하기 때문에 가장 지배적인 1차 고유진동수가 발생하는 1/2지점을 기준으로 양방향 등간격으로 배치하였다.

상시 진동 시험은 충분한 데이터 확보를 위하여 차량의 통행이 많은 주간에 실시하였으며, Table 1과 같이 약 1시간 30분 동안 128 Hz의 샘플링 주파수로 연직방향 가속도성분에 대하여 계측하였다. 무선 가속도계에서 측정되는 데이터는 게이트웨이에서 수신이 이루어졌으며 노트북에 연결하여 실시간으로 상시 진동 데이터를 모니터링 및 수집할 수 있도록 무선 계측 네트워크를 구성하였다. 네트워크 내의 모든 센서에서 전송되는 데이터는 게이트웨이에 의하여 서버시간을 기준으로 ± 50 μsec(5×10^{-5}초)의 정확도로 시간동기화하였다. 또한 자체 버퍼 기능을 이용하여 계측 중 방해전파나 장애요소로 계측 신호의 끊김 및 지연이 발생한 경우에도 데이터 손실이 없도록 시스템을 구성하였다. 본 연구에서 사용된 무선 가속도계는 Microstrain社 의 G-Link-200 모델을 사용하였으며 상세 스펙은 Table 2와 같다.

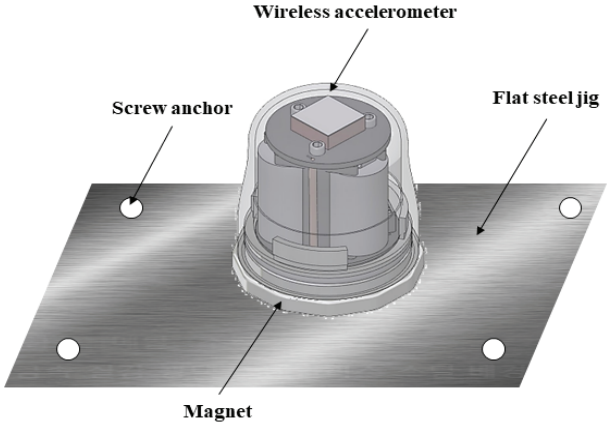


Fig. 4. Installation method of wireless accelerometer

무선 가속도계는 교량의 진동으로 인한 탈락, 이동 등으로 인한 데이터 손실 방지를 위하여 Fig. 4와 같은 설치 지그를 제작하여 교량에 부착하고 초강력 자석을 이용하여 지그와 결착시켰다.

3.2 동특성 분석

일반적으로 교량 동특성 분석에 사용되는 기법인 PP(peak picking)법은 시간영역에서 수집된 가속도 신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 고유진동수를 추출하여 적용이 간단하지만 주파수영역 해상도의 영향을 받는다. 또한 모드형상 분석을 위해서는 전달함수, 위상함수, 코히런스 함수 계산이 필요하기 때문에 센서 설치가 많은 대형 구조물의 경우에는 실시간 처리 및 모드형상 구현이 어려운 단점이 있다(Park et al. 2006). 본 연구에서 사용한 TDD 기법의 경우에는 주파수영역에서 공간변수인 모드형상을 먼저 추출하고 그 후에 상응하는 시간변수를 추출하여 기존 기법들에 비해 간단한 연산으로 현장에서도 실시간 분석이 가능하다.

상시 진동에 의한 C대교의 전형적인 연직방향 가속도 파형은 Fig. 5와 같다. 각 지점에서의 측정된 가속도 신호 에 대한 파워스펙트럼을 Fig. 6과 같이 계산한 후 가진 된 모드의 대략적인 범위를 선택하였다. 0.4~0.6 Hz에서 2개의 첨두가 발견되었고, 0.7 Hz 부근에서 1개의 첨두, 0.8 Hz 부근에서 1개의 첨두가 발견되었다. 각각의 주파수 대역에 대하여 단자유도 신호를 추출하기 위한 디지털 밴드 패스 필터를 선정하였다. Fig. 6의 C대교의 연직방향 가속도에 대한 파워스펙트럼을 보면 가진된 주요 모드의 주파수가 명확한 첨두(peak)를 보이는 저감쇠시스템(underdampled) 인 것을 알 수 있다. 저감쇠시스템에서는 저차 밴드패스필터를 사용하더라도 고차 필터를 사용하는 것과 동일한 효과를 얻을 수 있으며, 또한 고차 필터를 사용할 경우에는 계산량이 증가하고 깁스

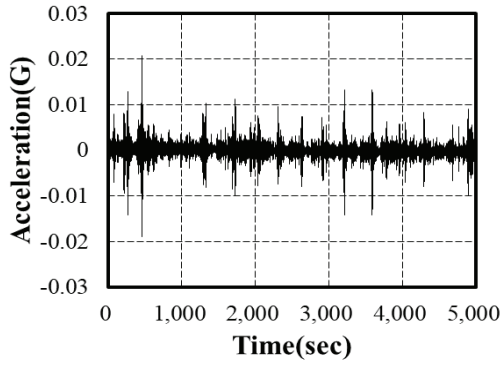


Fig. 5. Acceleration time response (Acc 4)

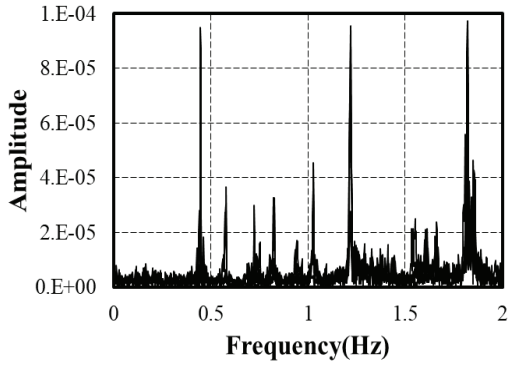
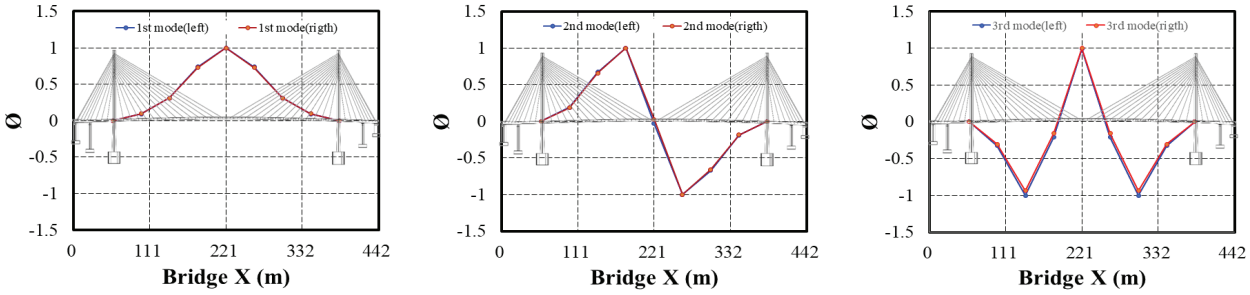
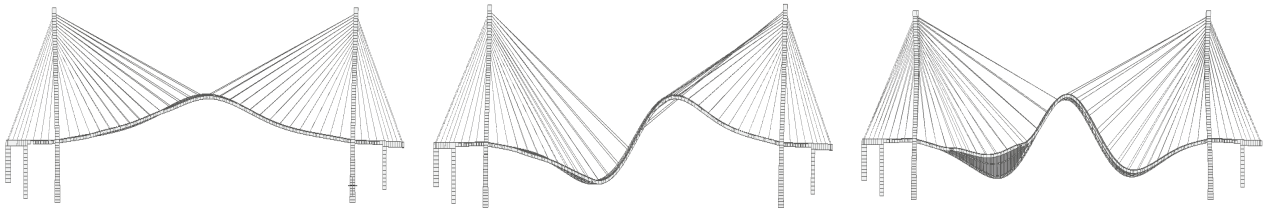


Fig. 6 FFT of ambient vibration acceleration



(a) 1st bending mode - measurement (b) 2nd bending mode - measurement (c) 3rd bending mode - measurement



(d) 1st bending mode - MIDAS (e) 2nd bending mode - MIDAS (f) 3rd bending mode - MIDAS

Fig. 7. Extracted bending mode shape of C bridge

현상이 발생할 수 있기 때문에 디지털 밴드 패스 필터중에서 리플(ripple)이 가장 작다고 알려진 버터워스(butterworth) 3차 필터를 사용하였다(Oppenheim and Schafer 1975; Kim et al. 2008).

디지털 필터를 이용하여 추출된 단자유도 신호(Y_i)를 구하고, 이를 통해 식 (1)로부터 에너지 상관행렬 E_i를 구하였다. 마지막으로 E_i의 특이치분해과정(SVD)을 수행하여 특이치 벡터 U로부터 모드형상을 추출하여 Fig. 7(a) ~ (c)에 나타내었다. C대교 구조해석 모드형상과 분석 결과 Fig. 7(d) ~ (f)와 비교하였을 때 모드별로 형상이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

교량의 고유진동수 추출을 위하여 추출된 모드형상과 식 (3)을 이용하여 각 모드를 대표하는 상호상관함수를 산출하였고(Fig. 8), 식 (5)를 이용하여 고유진동수를 추출하였다. 추출된 고유진동수를 식 (4)에 대입하고 앞서 산출된 식 (5)의 1차 모드의 대표 상호상관함수를 비교한 Fig. 9를 보면 매우 잘 일치하고 있으며 이는 추출된 고유진동수가 높은 신뢰성을 보인다고 말할 수 있다. Table 3에서는 제안 기술로부터 추출된 각 모드의 고유진동수와 재하시험을 통한 1차 고유진동수 및 해석자료를 비교하여 오차율을 검토하였다. 재하시험의 경우 교량의 중앙에 1개의 가속도계만 설치하여 측정하였기 때문에 1차 이상의 모드는 측정되지 않았으며 1차 고유진동수는 제안기술과 0.68 %의 오차를 확인하였다. 해석자료와 제안 기술의 오차율은 1차: 0.42 %, 2차: 0.96 %, 3차: 1.05 %, 4차: 1.13 %로 고유진동수 추정치는 매우 높은 신뢰도를 보이는 것으로 나타났다.

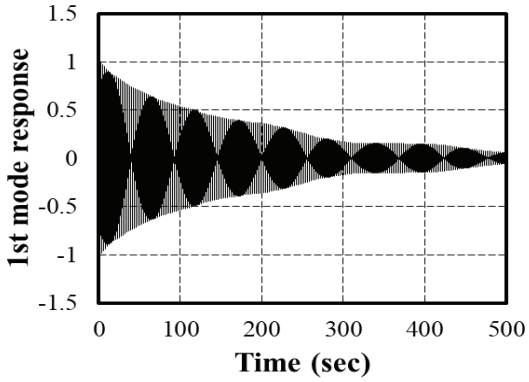


Fig. 8. Measured 1st mode acceleration cross correlation

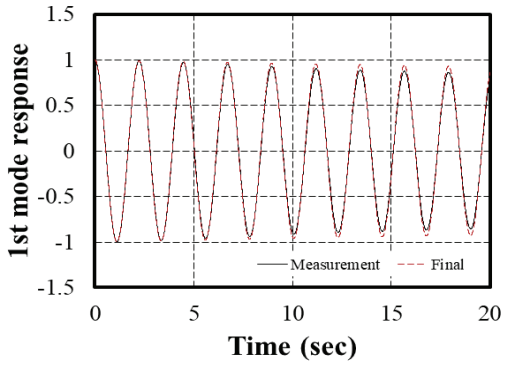


Fig. 9 Measured and final cross correlation of 1st mode

3.3 처짐 분석

정적 처짐 분석에는 3개의 휨 모드형상과 각 모드에 상응하는 고유진동수를 이용하였다. 각 모드의 모드질량(modal mass)은 식 (11)을 이용하여 산출하였으며 Table 4와 같다. 교량의 단위질량 ρA는 설계자료를 참고하여 단위 길이당 146.066 kN/m 가 산출되었다. 추출된 모드질량과 휨 모드형상 및 고유진동수를 식 (10)에 대입하여 교량 1/2지점에 단위하중(1 N)이 재하되었을 경우의 처짐 곡선을 Fig. 11에서 나타내었다. 이때 단위하중 처짐은 최대 -1.09×10^{-4} mm이 발생하는 것으로 분석되었으며, 교량의 정적 처짐은 하중과 처짐의 관계는 선형을 보인다는 기본 가정하에 단위하중에 대한 처짐에 임의의 하중 P를 적용하여 추정할 수 있다. 하중 P는 재하시험에서 사용한 덤프트럭 하중 270 kN를 단위처짐에 반영하여 정적 처짐을 추정하였으며 C대교에서 운영중인 계측유지관리시스템의 레이저변위계 실측값과 구조해석 결과와 비교하였다.

Table 3. Comparison of identified natural frequency

Mode	Model	Load-test	Proposed	Mark
1	0.4450	0.45	0.4469	bending
2	0.5730	-	0.5785	bending
3	0.7110	-	0.7185	torsion
4	0.8350	-	0.8256	bending

Table 4. Estimated modal mass for each mode

Modal mass (kg)	Mode 1	Mode 2	Mode 4
	1.48 × 106	0.76 × 106	1.53 × 106

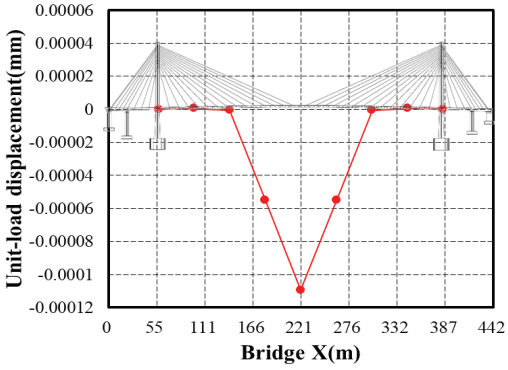


Fig. 10. Unit load displacement for loaded 1 N at 221.0 m

Table 5. Comparison of displacement when loaded 270 kN

Category	Laser	Model	Proposed	
			Unit-load	Static Disp.
Disp. (mm)	-28.47	-30.21	-1.09 × 10-4	-29.49

Table 5를 보면 교량에 270 kN의 하중이 재하된 경우의 추정 정적 처짐은 -29.49 mm, 레이저변위계 실측값은 -28.47 mm, 해석값은 -30.21 mm 이며, 실측값과의 차이는 1.02 mm로 약 3.58 %의 오차율을 보였다. 이러한 결과는 처짐계의 설치가 어려워 실측이 불가능한 교량의 처짐을 추정하여 설계값 및 해석값 대비 처짐 발생량 비교로 교량의 안전성을 간접적으로 파악할 수 있는 근거자료로 활용 가능하다. 다만, 제안 기술의 실무 도입을 위해서는 경제성을 고려한 설치되는 최적 센서의 수량을 정립하고 교량의 경간 길이 및 경간 수에 따른 설치 방법에 대한 추가 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 교량의 처짐 측정을 위해서 차량통행의 차단 없는 간편한 처짐 추정 기술을 제안하였다. 제안 방법은 무선 가속도계를 교량 상부에 설치하여 상시 차량 통행에 의한 진동으로부터 교량의 모드형상과 고유진동수와 같은 동특성을 추출하고, 이를 이용하여 유연도 분석을 통해 단위하중 및 정적 처짐이 가능하도록 하였다. 제안 기술을 사장교인 C대교에 적용하여 기존 기술과 비교를 통해 동특성과 처짐 분석 정확도를 검증하였으며, 그 결과를 다음과 같이 요약하였다.

1. 사장교의 경우 1 Hz 미만에서 다수의 모드가 발생되기 때문에 정확한 동특성 추출을 위해서 교량의 상시 진동은 128샘플링으로 약 1시간 30분 동안 장시간 계측하여 교량의 모드형상을 분석하였다. 3개의 휨모드와 1개의 비틀림 모드가 분석되었고, 처짐 분석이 필요한 휨모드의 상호상관함수 추출을 통해 고유진동수를 추정하였다. 추정된 고유진동수는 재하시험 실측 및 해석자료와 비교하여 0.42~1.13 %의 오차율을 보였다.
2. 추출된 3개의 휨 모드형상과 고유진동수를 이용하여 단위하중처짐을 추출하였다. 추출된 단위하중처짐 곡선은 교량의 최대하중이 발생하는 주경간의 1/2 지점에서 -1.09×10^{-4} mm 가 발생하는 것으로 나타났다. 단위하중 처짐에 재하차량의 하중 270 kN을 반영하여 추정 정적 처짐을 산정한 결과 -29.49 mm로 레이저 변위계 -28.47 mm, 구조해석값 -30.21 mm로 추정 정적 처짐의 오차는 각각 3.58 % 와 2.38 % 수준으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.
3. C대교는 충주호를 횡단하는 교량으로 기존 접촉식 처짐계의 설치가 불가능한 교량이지만, 본 제안기술을 통하여 상시 진동을 이용한 경제적인 처짐 계측이 가능하였다. 또한 사장교와 같은 대형 구조물의 모드형상과 고유진동수는 구조물의 거동 파악, 손상도 추정, 수치모델의 개선 등의 기본 자료로 활용될 수 있기 때문에 제안 기술은 장기 유지관리에 효율적이라고 판단된다. 특히, 교량의 시간변수와 공간변수를 분리하여 추출하고, 디지털 필터로 간단한 연산으로 계산량을 줄인 TDD기법은 측정 센서의 수가 증가할수록 기존 동특성 분석 기법들에 비해 신속한 분석이 가능할 것으로 사료된다.

제안 기술은 경제적이고 신속한 동특성 및 처짐 평가가 가능하기 때문에 대형 교량 뿐만이 아니라 3종 교량과 같은 소규모 교량에 도입이 용이할 것으로 보인다. 다만, 교량의 다양한 형태, 규모, 조건 등에 대한 추가 연구를 통하여 시험 방법이 정립되고 정확도가 검증된다면 현재 수행되고 있는 정밀안전진단 용역에도 활용이 가능할 것으로 사료된다.

Conflicts of interest

None.

References

Asmussen, J.C. (1997). Modal Analysis Based on the Random Decrement Technique Application to Civil Engineering Structure, Ph.D Thesis, Alborg University, Denmark.

Brinker, R., Zhang, L., Anderson, P. (2000). Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, Proceedings of 18th International Modal Analysis Conference, IMAC, 625–630.

Choi, J.M., Kim, K.Y., Chung, J.Y., Koo, G.H., Kwon, N.U., Sohn, H. (2017). Development of Sensor Module for Seismic response measurement of structures based on RTK-GPS and acceleration data, Proceedings of the Earthquake Engineering Society of Korea, Earthquake Engineering Society of Korea, 85–86 [in Korean].

Ewins. D.J. (2000). Modal Testing: Theory, Practice and Application, Wiley, England.

Farrar, C.R., James III, G.H. (1997). System Identification from ambient vibration measurements on bridge, Journal of Sound and Vibration, **205(1)**, 1–18.

Jeon, J.C., Lee, H.H. (2019). Development of displacement estimation method of girder bridges using measured strain signal induced by vehicular loads, Engineering Structures, **186**, 203–215.

Kim, B.H., Stubbs, N., Park, T. (2005). A new method to extract modal parameters using output-only responses, Journal of Sound and Vibration, **282(1-2)**, 215–230.

Kim, B.H., Park, M.S., Lee, I.K. (2008). Modal parameter extraction of Seohae cable-stayed bridge: I. Mode shape, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, **28(5A)**, 631–639 [in Korean].

Kim, B.H., Park, J.C. (2008). Modal parameter extraction of Seohae cable-stayed bridge: II. Natural frequency and damping ratio, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, **28(5A)**, 641–647 [in Korean].

Lee, T. (2015). Current status and prospects of aging bridge maintenance, Ssangyong Engineering & Construction Research Institute, **71**, 48–55 [in Korean].

Openheim, A.V., Schafer, R.W. (1975). Digital Signal Processing, Prentice–Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.

Park, J.Y., Shin, J.S., Won, J.B., Park, J.W., Park, M.Y. (2021). Development of low–power IoT sensor and cloud–based data fusion displacement estimation method for ambient bridge monitoring, Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea, **34(5)**, 301–308 [in Korean].

Park, J.C., Park, C.M., Kim, B.H., Lee, I.K., Jo, B.W. (2006). Dynamic characteristics of Seohae cable–stayed bridge based on long–term measurements, Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, **10(6)**, 115–123 [in Korean].

Statistical Yearbook of Facilities (2021). Korea Authority of Land & Infrastructure Safety [in Korean].

Stubbs, N. (1987). A general theory of non–destructive damage detection in structures, Proceedings of the 2nd International Symposium on Structural Control, University of Waterloo, 694–713.

Yun, Y.K., Ryu, H.J. (2011). Calculation of deflection using the acceleration data for concrete bridges, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **15(5)**, 92–100 [in Korean].

Yoon, J.K, Jo, E.K., Jang, S.P. (1999). Mode shape measurement of Jin–Do bridge, Proceedings of Korean Society of Civil Engineering in 1999, Korean Society of Civil Engineering, 39–42 [in Korean].

상시 진동을 이용한 교량 정적 처짐 산정 기술의 현장 적용성 연구

노후 교량의 안전성을 평가하는 방법에 있어서 동특성과 처짐은 구조계의 강성과 직접 연관이 있으며, 처짐의 경우에는 교량 사용자가 직접 감지할 수 있는 물리량으로 가장 중요한 인자이다. 하지만 교량의 처짐을 측정하기 위해서는 교량의 하부에 처짐계를 설치하고 교통 차단 및 재하시험을 실시해야 하는 번거로움이 있어 교량의 환경에 따라서 비용이 증가하거나 측정이 불가능한 문제들이 발생하고 있다. 본 연구에서는 처짐계의 설치 없이 가속도계만을 이용하고 재하시험 없이 상시 진동을 이용하여 교량의 처짐을 측정하는 방법을 제안하였다. 상시 진동을 이용한 교량 동특성 및 처짐 분석을 위해 단순한 연산으로 빠른 분석이 가능하다고 알려진 TDD 기법을 이용하여 교량의 모드형상과 고유진동수를 추출하였으며, 유연도 분석을 통하여 교량의 단위하중 처짐을 분석하여 정적 처짐까지 산정하였다. 본 제안 기술의 검증을 위해 공용중 교량인 C대교(사장교)에 적용하여 모드형상, 고유진동수, 정적 처짐 분석을 수행하였으며 재하시험 실측값과 구조해석 자료와 비교하였다. 그 결과 모드형상 및 고유진동수는 0.42~1.13 %, 중앙경간에서의 최대 처짐은 3.58 %의 오차율을 확인하였다. 따라서 제안기술은 처짐계의 설치가 어려워 실측이 불가능한 교량의 처짐을 추정하여 설계값 및 해석값 대비 처짐 발생량 비교로 교량의 안전성을 간접적으로 파악할 수 있는 근거 자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.