J Korean Soc Disaster Secur 16(4): 147-156, 2023
https://doi.org/10.21729/ksds.2023.16.4.147

Print ISSN: 2466-1147 Online ISSN: 2508-285X
www.dssms.org

KSDS

Original Article

포터블 기반 스마트 구조 응답 모니터링 시스템 개발 및 현장 적용성 평가

박상기[1] · 서동우[1]* · 박기태[2] · 김호진[3] · Thanh Bui-Tien[4] · Lan Nguyen-Ngoc[4]

[1]한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원, [2]한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구위원, [3](주)에이테크솔루션 대표이사, [4]베트남 교통통신대학교 토목공학과 교수

Development of a Portable-Based Smart Structural Response Monitoring System and Evaluation of Field Applicability

Sangki Park[1], Dong-Woo Seo[1]*, Ki-Tae Park[2], Hojin Kim[3], Thanh Bui-Tien[4], and Lan Nguyen-Ngoc[4]

[1]Senior Researcher, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

[2]Senior Research Fellow, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

[3]Representative Director, Atech Solution, Inc.

[4]Professor, Faculty of Civil Engineering, University of Transport and Communications, Hanoi, Vietnam

요 약

케이블 교량의 거동은 동적 응답에 의해 지배적이며 상대적으로 복잡하므로 교량의 상태를 평가하기 위한 장단기 현장 계측이 요구되는 경우가 빈번하다. 영구적인 SHMS(Structural Health Monitoring System)가 설치되지 않은 경우 성능평가를 위해 이동식 모니터링 시스템이 필요하다. 이 경우 교량의 위치와 형태에 따라 전력, 통신 등의 제한된 여건으로 인해 이동식 모니터링 시스템 운영에 어려움이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 국내는 물론 동남아 지역 교량의 장·단기 모니터링에 효과적으로 활용될 수 있는 포터블 기반의 스마트 구조응답 모니터링 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 현장에서 자체 전원 공급 시스템을 이용하여 장시간 운용이 가능한 다채널 휴대용 데이터 수집 및 분석 장비이며, 실시간 데이터를 이용하여 케이블 교량의 동적 특성을 자동으로 분석할 수 있는 알고리즘을 탑재하고 있다. 개발된 시스템의 현장 적용성을 평가하기 위해 한국과 베트남의 케이블 교량에서 현장 실증을 수행하였으며, 이를 통해 개발된 시스템의 현장 운영의 신뢰성과 효율성을 확인하였고, 추가적으로 케이블 교량 모니터링 분야에서의 해외 시장 적용 가능성을 확인하였다.

핵심용어: 포터블 모니터링 시스템, 케이블 교량, 실시간 데이터, 현장 실증

ABSTRACT

Because the behavior of cable bridges is dominated by dynamic response and is relatively complex, short- and long-term field monitoring are often required to evaluate the bridge condition. If a permanent SHMS (Structural Health Monitoring System) is not installed, a portable monitoring system is needed for the checking of bridge condition. In this case, it can be difficult to operate the portable monitoring system due to limited conditions such as power and communication according to the location and type of the bridge. In this study, the portable-based smart structural response monitoring system is developed that can be effectively used for short- and long-term monitoring of cable bridges in Korea and Southeast Asia. The developed system is a multi-channel portable data acquisition and analyzer that can be operated for a long time in the field using its own power supply system, and is included with the automated analysis algorithm for the dynamic characteristics of cable bridges using real-time data. In order to evaluate the field applicability of the developed system, field demonstration was conducted on cable bridges in Korea and Vietnam. Through the demonstration, the reliability and efficiency of field operation of the developed system were confirmed, and additionally, the possibility of application to overseas markets was confirmed in cable bridge monitoring field.

Keywords: Portable monitoring system, Cable bridge, Real-time data, Field demonstration

***Corresponding author:** Dong-Woo Seo, dwseo@kict.re.kr **ORCID:** http://orcid.org/0000-0002-0412-7389

Received: 9 November 2023, **Revised:** 14 November 2023, **Accepted:** 14 November 2023

© Korean Society of Disaster & Security. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

우리나라에서는 경간장 200 m 이상의 사장교, 현수교와 같은 케이블 교량에는 계측시스템 구축을 의무화하고 있으며, 최근에는 IoT(Internet of Things) 센서를 활용하여 일반교량까지 계측데이터 기반으로 사용성 및 안전성을 상시적으로 모니터링할 수 있는 관리체계를 전국적으로 구축 중이다. 교량은 타 사회기반시설물과 비교하여 동적 응답이 지배적이며, 상대적으로 거동이 복잡하기 때문에 교량의 상태평가를 위한 장단기 현장 계측이 요구되는 경우가 빈번하다(Chung et al., 2014; Kim and Song, 2016; Ko et al., 2020). 대규모 케이블 교량에 영구적인 계측시스템이 구축되어 있는 경우에는 계측시스템을 통해 데이터를 상시적으로 취득할 수 있지만, 측정하고자 하는 목적에 맞는 위치에 계측 센서가 설치되어 있지 않거나 계측시스템 자체가 아예 구축되어 있지 않은 경우에는 별도로 계측장비를 현장에 반입하여 교량의 응답을 측정하게 된다. 이 경우 교량의 위치, 형식에 따라 계측장비 운용에 있어 전원, 통신 등의 제약이 발생할 수 있다(Hong, 2015; KALIS, 2019, 2020; Kim et al., 2023).

본 연구에서는 국내뿐 아니라 교량 계측시스템이 많이 적용되지 않은 개발도상국과 동남아시아를 포함하여 교량 장단기 계측에 효과적으로 활용할 수 있는 포터블 기반의 스마트 구조 응답 모니터링 시스템을 개발하였다. 개발된 장비는 현장에서 별도의 전원공급 없이 자체적으로 장기 운용이 가능한 다채널 포터블 계측장비이며, 실시간으로 현장에서 교량의 동특성을 자동 분석할 수 있는 알고리즘을 탑재하는 방식으로 개발되었다. 포터블 계측장비의 하드웨어는 데이터 수집부와 전원공급, 데이터 송수신이 가능한 별도의 다기능 이동식 중계기로 구분되며, 소프트웨어는 교량 동특성 분석을 위한 데이터 필터링, 데이터 가공, 주파수 분석, 감쇠비 분석, 모드형상 확인, 거동변화 트랙킹(tracking) 등의 기능을 포함하고 있다.

한편, 개발된 시스템의 현장 적용성 평가를 위하여 국내 케이블 교량 시공현장과 더불어 베트남의 케이블 교량에서 실내외 실증을 실시하여 개발된 기술의 해외적용성 및 현장운용 효율성을 추가로 확인하였다.

2. 포터블 기반 스마트 구조 응답 모니터링 장비 개발

2.1 포터블 기반 스마트 구조 응답 모니터링 장비 구성

센서와 데이터수집장비를 사용한 계측기술은 건설 분야에 있어 시설물의 거동 확인 및 상태 평가를 위해 과거부터 현재까지 널리 적용되고 있으며, 목적에 맞는 계측장비 운용을 위해서는 내구적이며 효율적인 장비구성과 품질이 확보된 전기 공급, 그리고 수집된 데이터의 송신을 위한 적절한 통신 기술의 접목이 필요하다. 최근에는 원격통신 기술이 발전함에 따라 계측장비가 설치되어 있는 현장에 직접 기술자가 가지 않고, 원격지에서 계측장비를 제어하고 데이터를 수신할 수 있는 기술이 발전하여 현장에 적용되고 있으나, 전원과 통신 문제로 인하여 적용 가능한 현장 조건에 제약이 존재하는 것이 일반적이다.

계측장비 운용에 있어 전원은 매우 중요한 요소이며, 전원의 품질은 계측 신호의 품질에 직접적으로 많은 영향을 미치기 때문에 고품질의 전원을 사용해야 한다. 따라서 현장 상시 전원은 반드시 정압/정류기를 거쳐 장비에 전원을 공급하는 것이 바람직하며, 상시 전원 사용이 어려운 경우에는 노이즈를 배제할 수 있는 배터리 전원을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 교량의 동적응답 측정을 위해서는 최소 10 Hz 이상의 샘플링 속도로 데이터를 취득해야 하며, 원격지로 데이터를 전송까지 해야 하는 상황에서는 전원소모량이 커서 배터리 전원으로 장비를 운용할 수 있는 기간이 1~2일 정도로 길지 못하다. 또한 통신의 경우에도 교량 보강형 및 주탑 내부 등에서는 통신환경이 불량한 경우가 많아 데이터 수집장치가 위치한 곳에서 원격지로 데이터 송신이 원활하지 않은 경우가 대다수이다.

따라서, 본 연구에서는 포터블 모니터링 장비를 데이터 수집부와 이동식 중계기로 구분하여 개발하였으며, 여기서 데이터 수집부는 자체 내장 전원으로 운용되며 센서와 직접 연결되어 데이터를 수집, 저장 및 전송 기능을 담당하며, 이동식 중계기는 추가 전원공급 및 데이터 수집부 내장 전원부 충전, 데이터 수신 및 제어명령 전송, 원거리 데이터 전송 기능을 지원한다.

특히 이동식 중계기에는 데이터 수집부가 전원공급과 통신환경이 불량한 위치에 설치되어야 하는 경우를 고려하여 중계기는 통신환경이 양호한 위치에 위치시킨 후, 한 가닥의 테더(tether) 케이블을 사용하여 데이터 수집부와 연결함으로써 전원공급과 데이터 송수신을 동시에 진행하고 원격지로 데이터를 송신할 수 있도록 시스템을 고안하였다. 개발된 포터블 모니터링 장비는 Fig. 1과 같고 장비 사양은 Table 1과 같다.

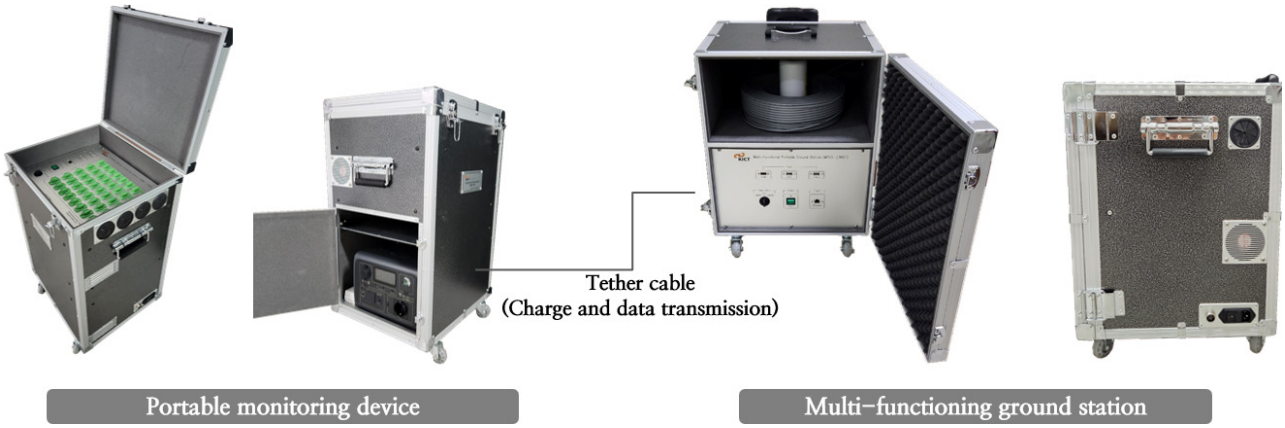


Fig. 1. Portable smart structural response monitoring equipment

Table 1. Specification of portable monitoring equipment

Channels	Sensitivity	Storage	Input voltage	Sampling rate	Output interface
Expandable to 40 chs	24 bit	4 GB (Expandable with external storage)	9 to 30 VDC	0.1 to 50 kHz	Ethernet USB MicroSD

2.2 포터블 모니터링 장비 운용 및 동특성 자동 분석 프로그램 개발

포터블 모니터링 장비를 운용하기 위해서는 장비 제어와 데이터 저장 및 분석을 위한 전용 소프트웨어 개발이 요구되었으며, 이를 위해 본 연구에서는 장비 설정(setup), 실시간 계측(realtime monitoring), 데이터 조회 및 분석(data query and analysis), 감쇠비 분석(damping ratio analysis), 케이블 장력 분석(cable tension calculation)의 5가지 기능으로 구성된 포터블 모니터링 장비 전용 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 포터블 모니터링 장비의 데이터 수집장치는 미국 National Instrument 社의 Compact Rio 시리즈에 기반하고 있기 때문에 해당 장비 제어가 가장 최적화된 Labview 프로그램을 이용하여 소프트웨어를 개발하였다. 사용자 편의를 고려하여 UI를 구성하고 실시간 계측된 가속도 데이터를 바탕으로 주파수 분석과 더불어 FDD(Frequency Domain Decomposition) 기능을 추가하여 센서 위치를 고려한 교량의 모드 형상을 직관적으로 확인할 수 있도록 프로그램을 설계하였으며, 개발된 프로그램의 사용자 인터페이스(User Interface) 화면은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2. Realtime monitoring and automated data analysis software for portable monitoring equipment

2.3 포터블 기반 스마트 구조 응답 모니터링 시스템의 국내 실정

개발된 포터블 시스템의 적용성 검토를 위해 국내 시공 중인 사장교 현장에 장비를 반입하여 케이블 장력 측정을 수행하였다. 국내 교량 현장 실증은 개발된 제품의 현장 반입, 설치, 이동성, 운용 시간 등 다양한 항목에 대한 현장 적용성을 확인하기 위한 목적으로 수행되었으며, 해당 교량 현장에서는 사장재 케이블 4개소에 대한 장기 진동 측정 및 장력을 개발된 시스템을 통해 자동 계산하였다.

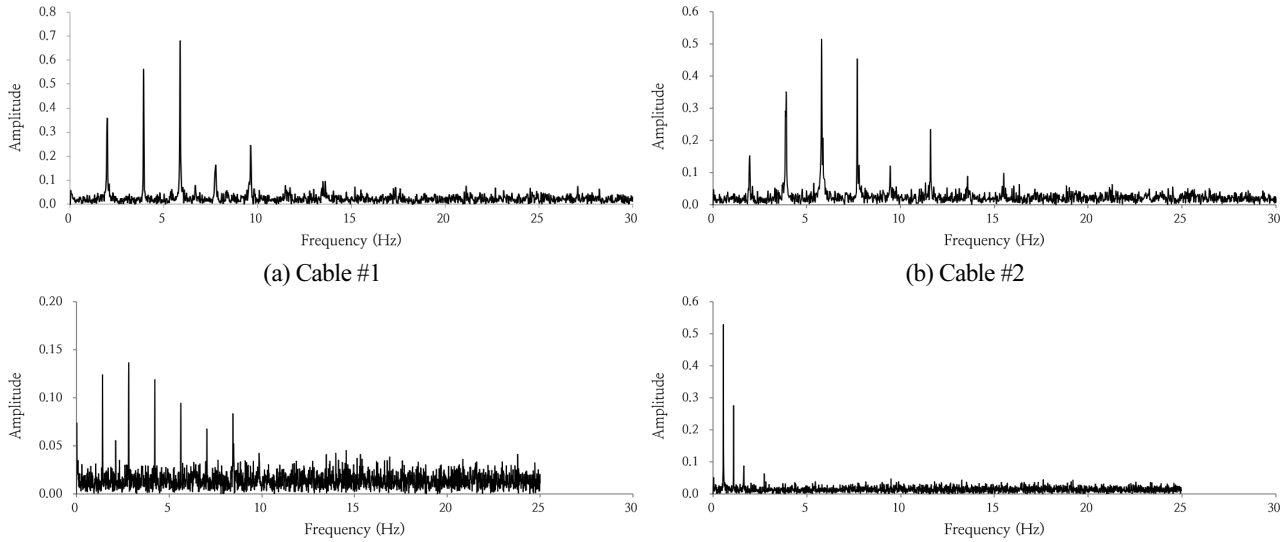
한편, 현장에서 제공되는 발전기 전원을 사용하지 않고 개발된 제품에 내장된 배터리 전원을 사용하였으며, 추가로 이동식 중계기도 연결하여 데이터 원격 송신 및 배터리 충전 등의 기본적인 기능에 대한 검증도 수행하였다. 국내 교량 현장 실증은 약 6시간 이상 수행되었고, 6시간 이상 100 Hz 샘플링 속도로 데이터를 수집하여 실시간으로 LTE통신을 통해 원격지로 데이터를 안정적으로 전송하는 것을 확인하였다. 6시간 동안의 데이터 수집 및 송신 후 시스템의 잔여 전원잔량은 90% 수준이었으며, 해당 자료를 바탕으로 실시간 데이터 전송시에 약 3일 정도 장비의 독립적인 운용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만, 데이터 원격전송에 시스템 전력을 가장 많이 소모하므로, 전송 주기를 10분 이상으로 설정하고 트리거 기능을 통해 비정상적인 데이터 수신시에는 모든 원시데이터를 송신하지만 일상적인 경우에는 통계 데이터만을 전송하여 전송용량을 줄이는 방식으로 장비를 운용한다면 14일 이상 외부 전원 없이도 독립적인 운용이 가능할 것으로 분석되었다.

또한, 14일 이상 장기로 계측이 필요한 경우에는 데이터 수집부의 전원공급 장치에 태양광 패널을 추가로 설치하여 전원을 충전함으로써 장비 가동 기간을 증가시킬 수 있다. 국내에서의 시스템 실내외 실증 전경은 Fig. 3과 같고, Fig. 4에는 사장교 케이블 장력 측정에 필요한 진동 데이터를 측정하고 이를 주파수 분석한 결과를 나타내었다.

Fig. 4에서와 같이 케이블의 제원 및 도입장력에 따라 차수별 주파수의 크기와 형상이 상이하지만 케이블의 진동 모드를 파악하는데 문제가 없이 분석되었으며, 이를 통해 케이블 장력을 계산한 값과 실제 도입된 장력을 비교한 결과 Table 2에서와 같이 최대 오차는 1.5%로서 측정한 모든 케이블에서 모두 약 98% 이상의 높은 정확도로 계산됨을 확인하였다.

(a) Indoor test (b) Outdoor test

Fig. 3. Demonstration in laboratory and cable stayed bridge in Korea



(a) Cable #1 (b) Cable #2

(c) Cable #3 (b) Cable #4

Fig. 4. FFT analysis results of stay cables for cable tension calculation

Table 2. Comparison of cable tension measurements

Categories	Cable #1	Cable #2	Cable #3	Cable #4
Calculated cable tension (kN)	4,975	6,009	8,272	6,582
Applied cable tension (kN)	5,050	6,095	8,355	6,652
Error (%)	1.5%	1.4%	1.0%	1.1%

2.4 포터블 기반 스마트 구조 응답 모니터링 시스템의 해외 실증

베트남은 현재 20개 이상의 특수교를 보유하고 있으며, 인도네시아 및 말레이시아와 더불어 동남아 국가 중에 특수교 시공 및 유지관리 기술에 가장 관심이 높은 국가라 할 수 있다. 최근 특수교 유지관리를 위해 구축된 기존의 교량 계측시스템의 활용 및 유지관리에 어려움을 겪으면서 특수교 모니터링, 거동 분석 등 유지관리 기술 향상 필요성을 크게 인식하고 있는 상황이다. 특히 베트남에서는 계측시스템이 구축되어 있는 특수교의 비율이 50% 이하이기 때문에 현장 성능점검에 포터블 장비의 필요성이 상대적으로 높고, 향후 특수교 통합 유지관리 및 성능평가 기법의 표준화를 추진하고 있어 본 연구에서 개발

된 포터블 기반의 모니터링 시스템의 활용 니즈가 높은 국가라 할 수 있다(Chinh, 2019). 따라서, 본 연구에서는 베트남 하노이에 위치한 교통통신대학교(University of Transportation and Communications, UTC)와 국제공동연구의 일환으로 개발된 시스템의 해외 현지 실증을 통한 적용성 및 현지화 연구를 추가로 수행하였다.

2.4.1 실내 모형에 대한 실증

실내 모형을 사용한 개발된 시스템 실증은 모니터링 장비의 기본적인 기능과 데이터 분석 프로그램의 신뢰성 검증을 위해 수행되었으며, 실내 모형 실험은 UTC 대학의 A3빌딩 실험실에 설치된 사장교 Mock-up 모형을 이용하였다. 사장교 모형은 길이 3,800 mm, 폭 120 mm의 제원으로 철재로 제작되었고, 주탑은 1,800 mm이다. 주탑은 직경 10 mm의 앵커볼트 8개로 바닥에 고정되어 있으며, 보강형과 주탑은 직경 25 mm의 가로보를 통해 연결되어 있다. 또한 총 6개의 아연도금 와이어로 사장재 케이블을 모사하였으며, 주탑의 상단에서 각각의 케이블의 장력을 조정할 수 있도록 구성되어 있다. 실내 실증에 사용된 모형은 Fig. 5와 같다.

Fig. 5. Cable stayed bridge mock-up model in laboratory of UTC

본 연구에서는 개발된 시스템을 이용한 동특성 분석 결과의 신뢰성 검증을 위해 사장교 모형에 대한 유한요소모델을 구축하여 동특성을 분석하였다. 유한요소모델은 ANSYS 19.0을 이용하여 구축하였으며, 보강형과 주탑 모델링에는 BEAM188 요소를 사용하였고, 케이블과 베어링 모델링에는 LINK180 요소를 사용하였다. 총 41개의 노드와 56개의 요소로 구성된 유한요소모델과 모드 해석 결과는 Fig. 6과 같다.

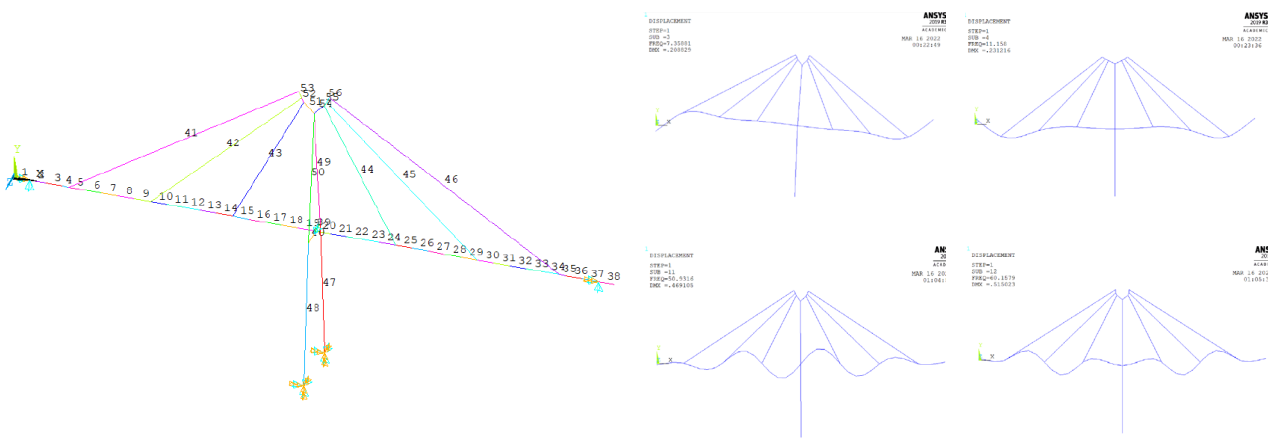
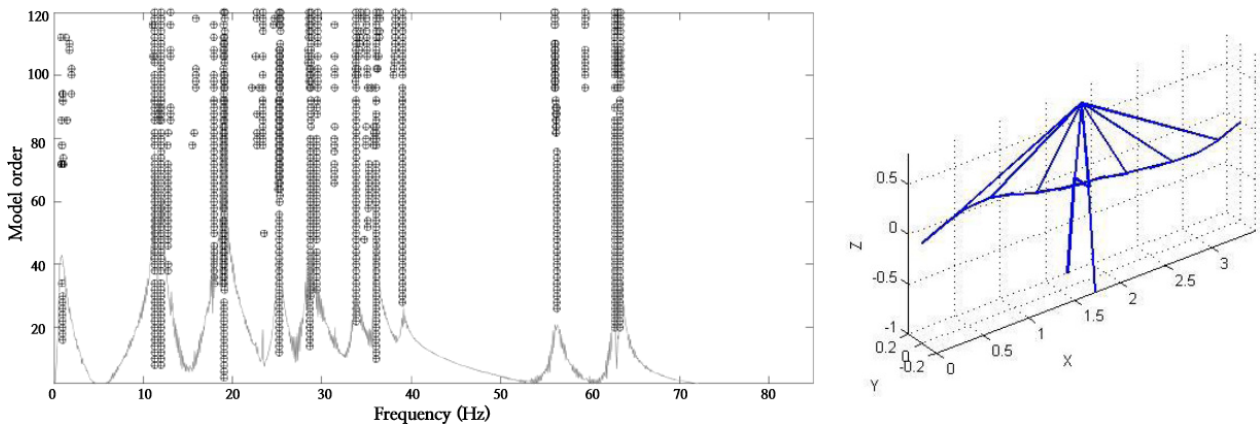


Fig. 6. Finite element model and modal analysis

한편 해석 결과와 측정 결과를 비교하기 위해 개발된 포터블 장비에 가속도계를 연결하여 연직방향 진동을 측정하였다. 측정실험에는 총 15개의 PCB-352C33 모델의 가속도계가 사용되었다. 모드 분석의 목적은 유한요소모델과 연직 휨모드를 식별하고 이를 비교하는 것으로 해머로 가진 후 15분간 측정한 데이터를 사용하여 분석하였다. 측정된 데이터는 5차 체비쇼프 유형 I(5th order Chebychew Type I) 필터링을 통해 1 Hz 이하와 80 Hz 이상의 주파수 신호를 필터링하여 모든 위상 왜곡을 제거하였으며, AC coupling을 통해 오프셋 데이터를 처리하였다.

모드 분석은 기본적으로 데이터 기반의 확률론적 부분 공간 식별(data-driven stochastic subspace identification) 알고리즘인 Cov-SSI를 적용하였고(Ghosh et al., 2023), 공분산 기반(Covariance-based SSI)를 통해 처리된 안정화 다이아그램과 이를 통한 사장교 모형의 고유진동수 및 진동형상은 Fig. 7과 같고(Friswell and Mottershead, 1995), 해석결과와 측정 데이터 분석을 통한 연직방향 휨모드 주파수 분석결과를 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 측정 결과와 유한요소 해석 결과에서 연직방향 휨 모드의 발생 순서는 동일하지만 하위 차수에서의 주파수는 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 유한요소해석 모델의 경계조건 등의 가정사항 등에 의한 것으로 향후 모델 튜닝을 통해 개선될 수 있을 것으로 판단되며, 측정 데이터를 통해 분석한 결과는 베트남 UTC 대학으로부터 모형 구축 시 예상한 동적 응답과 유사하게 나타난 것을 확인한 결과 포터블 모니터링 장비 및 자동 동특성 분석 프로그램을 실제 교량에서 활용 가능하다고 판단된다.



(a) Stabilization diagram (b) 1st vertical bending mode

Fig. 7. Modal analysis results

Table 3. Comparison between measurement and FE simulated results

Order	Mode	Measured frequency (Hz)	FE simulated frequency (Hz)	Difference (%)
1	Vertical bending	11.3	7.4	35%
2	Vertical bending	19.2	11.2	42%
3	Vertical bending	36.1	50.9	-41%
4	Vertical bending	56.3	60.2	-7%
5	Vertical bending	63.4	68.4	-8%

2.4.2 해외 사장교 현장 실증

베트남의 특수교 현장 실증은 총 2곳의 공용 중인 사장교에서 수행하였다. 첫 번째 현장 실증은 하롱만에 위치한 2006년에 완공된 주경간 435 m의 베트남 최대 규모의 사장교인 Bai Chay교량이며, 다른 실증현장은 하이퐁에 위치한 2005년에 완공된 주경간 260 m의 사장교인 Bính교량이다. 실증대상 교량은 Fig. 8과 같고, 현장 실증 전경은 Fig. 9에 나타내었다. 또한,

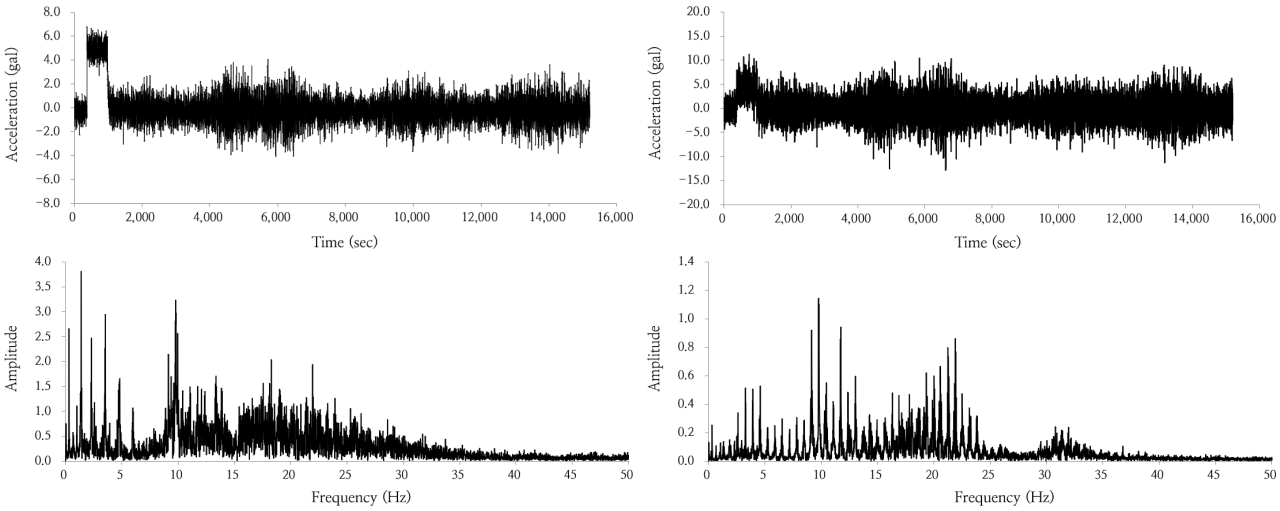
Fig. 10과 Fig. 11에는 Bai Chay 교량과 Binh 교량에서 수집한 보강형 가속도 데이터와 케이블 가속도 데이터를 각각 나타내었다.

(a) Bai Chay bridge (b) Binh bridge

Fig. 8. Target bridges for field demonstration in Vietnam

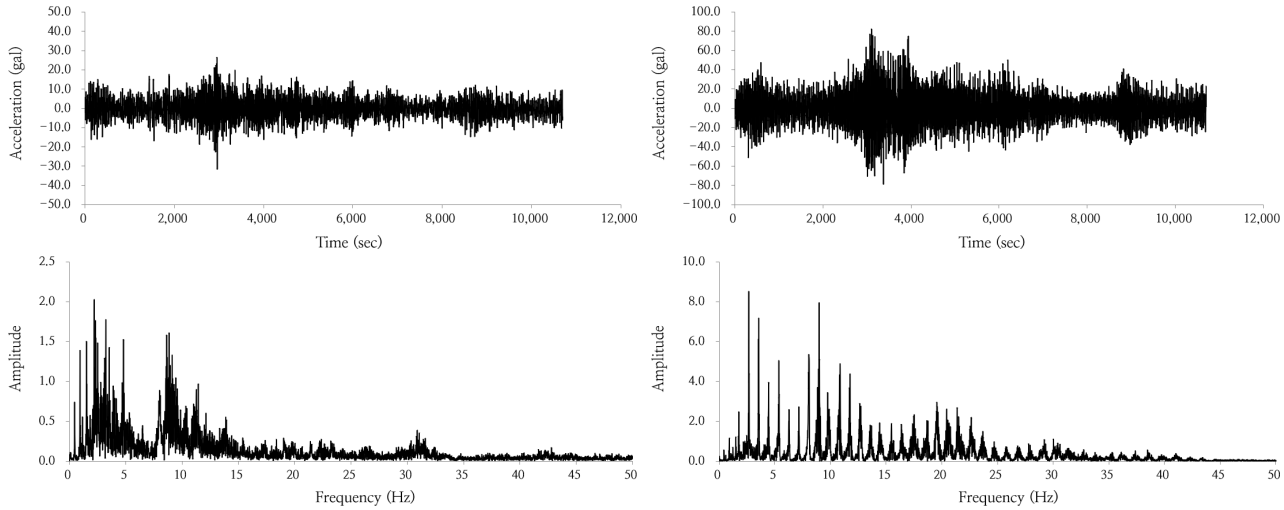
(a) BaiChay bridge (b) Binh bridge

Fig. 9. Field demonstrations in Vietnam



(a) Acceleration and FFT results of girder at mid-span (b) Acceleration and FFT results of the longest cable

Fig. 10. Measurement results at Bai Chay bridge



(a) Acceleration and FFT results of girder at mid-span (b) Acceleration and FFT results of the longest cable

Fig. 11. Measurement results at Binh bridge

베트남 사장교 현장 실증은 베트남 도로총국(Department for Roads of Vietnam, DRVN) 주관하에 이루어졌으며, 공동연구기관인 베트남 교통대학교(UTC), 대상 교량의 유지관리 담당 민간기관인 909 Maintenance Company가 참여하였다. 특히 Bai Chay 교량에서는 본 연구에서 설치한 센서 위치와 동일하게 중앙 경간 1/2지점에 연직, 수평, 수직방향의 가속도계와 최장 케이블 2곳에 가속도계를 설치하여 측정 데이터를 현장에서 즉각 비교하였다. Bai Chay 교량의 사장 케이블의 고유진동수 분석결과 1차 모드가 약 0.7 Hz로 나타나 유지관리 담당기관이 인지하고 있는 값과 유사한 것으로 확인하였다.

3. 결 론

본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 실시간 동적 계측이 가능한 다채널 데이터수집부와 전원공급 및 데이터 송수신이 가능한 다기능 중계기로 구성된 포터블 기반 스마트 구조 응답 모니터링 시스템을 개발하였으며, 추가적으로 실시간 데이터를 이용하여 교량 현장에서 자동으로 동특성 분석이 가능한 소프트웨어도 추가로 개발하였다.

(2) 개발된 시스템을 이용하여 국내 시공 중인 사장교 현장에서 케이블 장력 측정을 통한 성능 실증을 실시하였으며, 현장 반입, 설치 및 운용에서 매우 효과적이라는 것을 확인하였고, 케이블 장력 자동 측정 결과에서도 도입 장력과 매우 유사한 결과가 나타나 장비의 활용성을 확인하였다.

(3) 추가적으로 베트남과 같은 계측 인프라가 부족한 국가에서의 적용 가능성을 확인하기 위하여 베트남 교통통신대학과 함께 실내외 실증을 베트남 현지에서 실시하였으며, 사장교 모형을 이용한 실내 실증에서는 유한요소해석 모델을 통한 동특성 해석 결과와 개발된 시스템을 이용하여 계측 및 분석한 결과를 비교하여 시스템의 신뢰성을 검증하였다.

(4) 또한, 베트남 내 공용 중 사장교 2개소에서 케이블 장력과 보강형의 거동 계측 및 분석 기술 실증을 실시하였으며, 베트남 현지의 전력 및 통신 상황에서도 효과적으로 장비를 운용할 수 있다는 것을 확인하였으며, 계측 및 분석 결과의 신뢰성을 확인하였다.

Acknowledgments

This work was supported by Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (Project Number: 20230363-001), granted financial resource from the Ministry of Science and ICT, Republic of Korea.

References

Chinh, L. M. (2019). Analysis and Assessment of Existing Structural Health Monitoring Systems (SHMS) of Cable-Stayed Bridge in Vietnam. Structure and Environment. 11(3): 190-200.

Chung, Chul-Hun, Ho-Hyun An, Soo-Bong Shin, and Yu-Hee Kim. (2014). Reset of Measurement Control Criteria for Monitoring Data through the Analysis of Measured Data. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 18(6): 105-113.

Friswell, M. I. and J. E. Mottershead. (1995). Finite Element Model Updating in Structural Dynamics. Kluwer Academic Publishers. ISBN 978-94-015-8508-8.

Ghosh, A., A. Chakraborty, and A. Dutta. (2023). Experimental Verification of Improved SSI-COV Method for Health Monitoring of Base-Excited RC Structures. Proceedings of the 17th Symposium on Earthquake Engineering. 273-283.

Hong, Seong-Soo. (2015). Guideline for Installation and Operation of Health Monitoring System for Cable Supported Bridges. Journal of the Korean Society of Civil Engineers. 63(11): 25-29.

Kim, Haeng-Bae and Jae-Ho Song. (2016). Study for Determination of Management Thresholds of Bridge Structural Health Monitoring System Based on Probabilistic Method. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 20(3): 103-110.

Kim, Jaehwan, Sangki Park, Kyu-San Jung, and Dong-Woo Seo. (2023). Development of Automated Statistical Analysis Tool Using Measurement Data in Cable-Supported Bridges. Journal of Korean Society of Disaster & Security. 15(3): 79-88.

Ko, Byeong-Chan, Gwang-Hee Heo, Chae-Rin Park, Young-Deuk Seo, and Chung-Gil Kim. (2020). Development of Damage Evaluation Technology Considering Variability for Cable Damage Detection of Cable-Stayed Bridges. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. 24(6): 77-84.

Korea Authority of Land & Infrastructure Safety. (2019). Development of AI-Based Dynamic Response Evaluation Model Using Big Data to Secure the Reliability of Accelerometer Frequency Analysis. Jinju: KALIS.

Korea Authority of Land & Infrastructure Safety. (2020). Optimization of Maintenance Measurement System Using Long-Term Measurement Data. Jinju: KALIS.

Korean References Translated from the English

고병찬, 허광희, 발채린, 서영득, 김충길 (2020). 사장교의 케이블 손상 검출을 위한 변동성이 고려된 손상평가 기술 개발. 24(6): 77-84.

국토안전관리원 (2019). 가속도센서 주파수분석 신뢰성 확보를 위한 빅데이터 활용 인공지능기반 동적응답 평가모델 개발. 진주: 국토안전관리원.

국토안전관리원 (2020). 장기계측데이터를 활용한 유지관리 계측시스템 최적화 방안. 진주: 국토안전관리원.

김재환, 박상기, 정규산, 서동우 (2023). 특수교 계측 데이터 자동 통계 분석 툴 개발. 15(3): 79-88.

김형배, 송재호 (2016). 확률론적 방법에 의한 교량계측시스템의 관리기준치 설정에 관한 연구. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집. 20(3): 103-110.

정철헌, 안호현, 신수봉, 김유희 (2014). 계측데이터 분석을 통한 모니터링 데이터의 계측관리기준 재설정. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집. 18(6): 105-113.

홍성수 (2015). 특수교 계측시스템 설치 및 운영 지침(안) 소개. 대한토목학회지. 63(11): 25-29.