

운용모드해석에 기반한 사장교의 장단기 동특성 평가

박종칠^{1*}

Evaluation of Short and Long-Term Modal Parameters of a Cable-Stayed Bridge Based on Operational Modal Analysis

Jong-Chil Park^{1*}

Abstract: The operational modal analysis (OMA) technique, which extracts the modal parameters of a structural system using ambient vibrations, has been actively developed as a field of structural health monitoring of cable-supported bridges. In this paper, the short and long-term modal parameters of a cable-stayed bridge were evaluated using the acceleration data obtained from the two ambient vibration tests (AVTs) and three years of continuous measurements. A total of 27 vertical modes and 1 lateral mode in the range 0.1 ~ 2.5 Hz were extracted from the high-resolution AVTs which were conducted in the 6th and 19th years after its completion. Existing OMA methods such as Peak-Picking (PP), Eigensystem Realization Algorithm with Data Correlation (ERADC), Frequency Domain Decomposition (FDD) and Time Domain Decomposition (TDD) were applied for modal parameters extraction, and it was confirmed that there was no significant difference between the applied methods. From the correlation analysis between long-term natural frequencies and environmental factors, it was confirmed that temperature change is the dominant factor influencing natural frequency fluctuations. It was revealed that the decreased natural frequencies of the bridge were not due to changes in structural performance and integrity, but to the environmental effects caused by the temperature difference between the two AVTs. In addition, when the TDD technique is applied, the accuracy of extracted mode shapes is improved by adding a proposed algorithm that normalizes the sequence so that the autocorrelations at zero lag equal 1.

Keywords: Cable-stayed bridge, Structural health monitoring, Modal parameters, Operational modal analysis, Ambient vibrations

1. 서 론

사장교, 현수교와 같은 케이블교량의 체계적 유지관리와 객관적 건전성 평가를 위해 도입된 구조건전성모니터링 (Structural Health Monitoring, SHM) 기술은 전 세계적으로 많은 발전을 이뤄왔다. 특히 시스템 식별(system identification) 및 손상 감지, 진동사용성 검토를 위해 구조계의 동특성(modal parameters)을 추출하는 모드해석(modal analysis) 기법은 교량 SHM의 한 분야로써 다양한 연구와 실험적 검증이 수행되어왔다.

선형 시불변 시스템의 동특성(고유진동수, 모드형상, 감쇠비)을 추출하기 위해 작용하중 및 진동 응답을 모두 사용하는 전통적인 실험모드해석(Experimental Modal Analysis, EMA)과 달리 케이블교량과 같은 대형 구조물에서는 구조계의 진동 응답만을 사용하는 운용모드해석(Operational Modal Analysis,

OMA)이 주로 활용되고 있다(Rainieri and Fabbrocino, 2014). EMA는 대형 구조물을 강제로 가진(forced excitation)하는 것이 현실적으로 어렵고 오랜 기간 연속적으로 모니터링하기에 적합하지 않기 때문이다. 반면 OMA는 바람, 교통, 미진에 의해 야기되는 상시진동(ambient vibrations)만을 이용하기 때문에 교통 차단이 필요하지 않고 연속적인 측정이 가능하여 대다수 케이블교량 SHM 시스템에 적용되고 있다. OMA로 추출된 동특성이 구조계의 실질적인 거동 특성을 잘 보여주는 반면, 평상시에는 교량 진동 진폭은 매우 작고 잡음(noise)의 영향은 크기 때문에 측정된 혼합 신호로부터 구조계의 동특성만을 찾아 분리하는 것이 쉽지 않다. 특히 복잡한 고차 구조체인 케이블교량은 매우 촘촘한 간격으로 모드가 형성되기 때문에 교량 관리자가 각 모드를 정확히 식별하거나 소프트웨어로 자동 추출을 구현하는 것이 어렵다. 이에 따라 모드형상과 감쇠비는 제외하고 비교적 식별이 용이한 저차 고유진동수 몇 개 정도만 SHM 시스템에서 자동 추출, 저장 관리하는 것이 현실이다. 또한 SHM 목적으로 설치된 센서 수량이 많지 않기 때문에 고차 모드의 형상 추출이 어려운 한계도 있다.

이와 같은 문제로 인해 케이블교량에 다수의 센서를 촘촘한 간격으로 임시 설치하여 상시진동실험(Ambient Vibration

¹정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원

*Corresponding author: pjseven@ex.co.kr

Korea Expressway Corporation Research Institute, Hwaseong-si, 18489, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Test, AVT)을 실시하고, 그 결과로부터 더욱 정밀하게 동특성을 추출하는 연구가 다수 수행되었다. Conte et al.(2008)은 현수교인 Alfred Zampa Memorial Bridge에서 개통 전 보강거더 AVT 및 재하시험을 실시하여 교통하중이나 지진 영향을 받지 않은 초기 조건 하에서의 동특성을 추출하였다. Magalhães et al.(2012)은 고교각 다경간 사장교인 Millau Viaduct에서 공용 중 보강거더 AVT를 통해 20개의 고유진동수와 모드형상을 추출하여 AVT의 효용성을 검증하였다. McDonald(2016)은 교폭이 65m로 매우 넓은 사장교인 Port Mann Bridge의 AVT를 통해 동특성 추출과 유한요소모델 개선을 하였다. 국내에서는 남해대교(Jung et al., 2002), 서해대교(Kim et al., 2008; Park et al., 2012), 진도대교(Cho et al., 2010)에서 AVT를 이용한 동특성 추출과 유한요소해석이 수행된 바 있다.

이들 연구는 교량 유지관리용 초기치 동특성을 설정하거나 유한요소 모델링 및 개선, OMA기법 비교 분석에 활용하기 위한 사례가 많았고, 동특성 추출에 필요한 AVT는 일회성으로 실시한 경우가 대부분을 차지하였다. 유지관리 관점에서는 장기적인 동특성 변화 여부도 중요하게 다뤄져야 하는데 이와 관련된 기존 연구는 많지 않다. 즉 구조적으로 중대한 보수보강 실시 전후 또는 장기적으로 수년 이상의 간격을 두고 AVT를 실시하여 동특성을 비교 분석한 사례는 거의 없었다. 또한 장기 동특성은 온도, 풍속과 같은 환경영향을 받는 것으로 알려져 있지만, AVT 및 모드해석 과정에서 이를 고려하지 않거나 비중 있게 다루지 않았다.

본 연구에서는 공용 중인 사장교의 AVT 및 장기 계측을 통해 수집된 가속도 데이터를 이용하여 교량의 동특성을 평가하였다. 교량 준공 이후 6년과 19년이 경과한 시기에 총 2회에 걸쳐 실시한 고해상도 AVT로부터 동특성을 추출하고 경년 변화 여부를 분석하였으며, 대상교량의 SHM 시스템을 통해 연속적으로 수집된 장기 데이터를 활용하여 동특성에 대한 환경영향도 분석하였다. 또한 다양한 OMA기법들을 적용하여 추출된 동특성을 비교 분석하였으며, 그 과정에서 개선된 분석 알고리즘도 제안하였다.

2. 운용모드해석 이론

2.1 해석기법

OMA에 의한 동특성 추출은 진동 응답 측정 신호에 대한 시간 영역 또는 주파수 영역에서의 해석으로 크게 구분된다. 대표적인 주파수 영역 해석 방법으로는 PP(Peak-Picking)기법과 FDD(Frequency Domain Decomposition)기법이 있으며, 시간 영역 해석 방법으로는 ITD(Ibrahim Time Domain)기법, ERADC(Eigensystem Realization Algorithm with Data Correlation)기법, RD(Random Decrement)기법, SSI(Stochastic Subspace Identification)기법, TDD(Time Domain Decomposition)기법

이 있다(Kim et al., 2008). 이들 OMA기법의 이론적 배경 및 특징은 여러 문헌(Cunha et al., 2013; Rainieri and Fabbrocino, 2014)에서 자세히 다루고 있으므로 본 연구에서는 간략히 언급하는 것으로 한다.

PP기법은 측정 응답의 푸리에 변환된 스펙트럼에서 첨두 주파수를 고유진동수로 간주하며, 주파수 영역의 분해능에 따라 정확도가 달라지는 단점이 있지만 적용이 간단하고 빠른 방법이어서 SHM 시스템에 가장 많이 쓰이고 있다. FDD기법은 백색잡음가진(white noise excitation)을 가정하여 응답 스펙트럼행렬(output spectral density matrix)에 특이치 분해를 수행하고 고유치를 추출하는 방법으로 비교적 많은 계산량을 필요로 한다(Hong and Kim, 2010). ERADC기법은 단위 펄스응답(unit pulse response)으로부터 고유치를 추출하며, SSI기법은 실현(realization) 과정을 제외하면 ERADC기법과 거의 같다. 한편 TDD기법은 대형 구조물의 고해상도 모드형상을 실시간으로 신속하게 추출할 수 있는 기법이며, 기본 원리는 시간변수와 공간변수를 분리하여 생각하는 변수분리의 원리를 기초로 하고 있다(Kim et al., 2005).

2.2 환경영향

Han et al.(2021)의 연구에 의하면 구조계의 동특성은 구조 특성뿐만 아니라 환경 요인, 특히 온도 변화의 영향을 받고 알려져 있다. 동특성에 대한 온도 변화의 영향을 크게 세 가지로 제시하고 있다. 첫 번째로 온도 변화는 재료상수(탄성계수(E))의 변화를 야기하여 고유진동수 변동을 가져온다. 온도가 상승하면 탄성계수는 비선형적이거나 반비례의 관계로 감소하여 고유진동수도 낮아지는 경향을 보인다. 두 번째로 온도 변화는 구조계의 온도 신축과 변형을 일으킨다. 세 번째로 온도 변형은 경계조건의 변화와 반력(N)을 야기하여 진동 특성에 영향을 주게 되는데 이를 정량화하는 것은 쉽지 않다. 이와 같은 복합적 요인에 의해 AVT 측정 시 온도에 따라 동특성은 변할 수 있다. 대체로 고유진동수는 온도 변화에 반비례하는 경향을 보이지만 증감률은 모드차수에 따라 일정하지는 않다(Ding et al., 2010; Westgate, 2012). 심지어 Braga Municipal Stadium에 사용된 케이블 지붕의 경우에는 0.553 Hz대의 모드는 온도에 비선형 반비례하는 반면, 0.542 Hz대의 모드는 비례하는 복잡한 특성을 보였다(Cunha et al., 2021).

온도 외에도 풍환경(Wang et al., 2020), 유체-구조물 상호 작용(Hernandez et al., 2022) 등과 같은 환경 요인과 교통 하중(Magalhães et al., 2014)도 구조계의 동특성 변화에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 현수교인 Tamar Bridge의 경우 교통 하중은 일(daily) 고유진동수 변화에, 온도는 일보다는 계절(seasonal) 고유진동수 변화에 더 영향을 주는 것으로 나타났다(Cross et al., 2013).

3. 실교량 동특성 평가

3.1 대상교량

대상교량은 Fig. 1과 같이 총연장 990 m의 사장교로 2000년 준공되어 공용 중인 교량이다. 상부구조는 폭 34 m, 왕복 6차로의 강합성거더이며, 주탑은 높이 약 182 m의 H형 콘크리트 구조이다. 케이블은 72개/면×2면으로 구성되어 있다.

3.2 상시진동실험

고해상도 AVT는 Table 1과 같이 2006년 12월과 2019년 9월에 수행되었다. 두 번의 AVT 측정 사이에는 2007년 케이블 댐퍼 일부 교체, 2009년 SHM 시스템 재구축, 2015년 케이블 3개 교체, 2016년 케이블 댐퍼 전면 교체 및 추가, 2017년 물탱크 등 소방시설 추가, 2018년 내진장치(lock-up device) 교체와 낙뢰보호시설 설치 등의 유지보수가 시행되었다. 가속도계는 부재 표면에 임시로 탈부착하는 방식으로 설치하였으며, 교면 평균풍속(V)과 보강거더 단면 평균온도(T)는 SHM 시스템에 저장된 계측데이터를 활용하였다. 2006년 AVT에는 보강거더를 4개 측정 구간(C1 ~ C4)으로 나누고, 기준점 4개를 포함한 총 80개 측정점에서 센서 이동 기법(roving sensor technique)을 이용하여 가속도 신호를 수집하였다. 신호 샘플링은 20 Hz로 설정하였으며, 측정 지속시간은 각 구간별로 3

세트(1hr/set × 3sets)로 3시간 이상 수집하였다. 2019년 AVT에는 장기 동특성 변화 여부를 파악하기 위해 2006년과 동일한 보강거더 측정 외에도 주탑 측정 구간(C5, C6)도 추가하여 총 108개 측정점에서 가속도 신호를 수집하였으며(Fig. 2), 신호 처리 과정은 2006년과 동일하게 유지하였다. Fig. 3은 2019년 C1 구간의 첫 번째 측정 세트의 가속도 시간이력(Y19-C1-S1)을 대표적으로 나타낸 것이다. 여기서 앞쪽에 배치된 4개 그래프는 보강거더 기준(reference) 센서로 주경간 중앙 수직방향(Ref-Z-CL), 케이블 28번 정착점 수직방향(Ref-Z-C28), 케이블 45번 정착점 수직방향(Ref-Z-C45), 주경간 중앙 수평방향(Ref-Y-CL)에서 측정된 신호이며, 나머지 19개는 보강거더 하행측(southbound)과 상행측(northbound) 이동(roving) 센서에서 측정된 신호이다.

3.3 동특성 추출

측정된 가속도 신호는 먼저 전처리 과정으로 추세성분 제거를 하였으며, 각각의 가속도 신호는 Fig. 4와 같이 기준점들

Table 1 Conditions of ambient vibration tests

Case	Test date	Location	V (m/s)	T (°C)
Y06-C1	2006.12.14.	North side-span (NSS)	1.59	4.09
Y06-C2	2006.12.14.	North part of mid-span (NMS)	1.69	5.79
Y06-C3	2006.12.15.	South part of mid-span (SMS)	2.87	2.79
Y06-C4	2006.12.15.	South side-span (SSS)	2.15	5.74
Y19-C1	2019.09.24.	North side-span (NSS)	2.65	19.21
Y19-C2	2019.09.24.	North part of mid-span (NMS)	4.96	22.53
Y19-C3	2019.09.25.	South part of mid-span (SMS)	1.47	21.36
Y19-C4	2019.09.26.	South side-span (SSS)	3.18	21.22
Y19-C5	2019.09.27.	North pylon (PY1)	2.83	24.20
Y19-C6	2019.09.26.	South pylon (PY2)	3.14	24.19

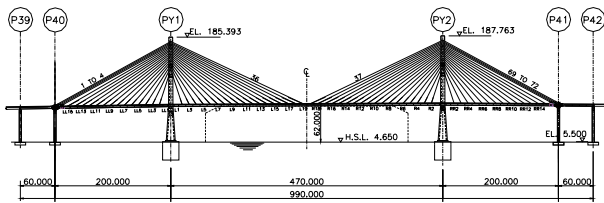


Fig. 1 Elevation view of a cable-stayed bridge

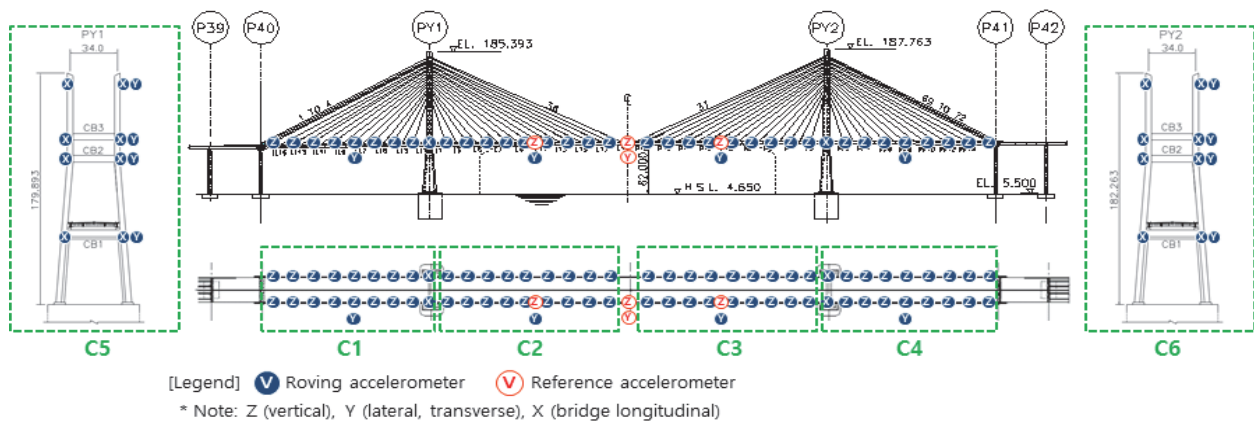


Fig. 2 Sensor layout during AVTs in 2019

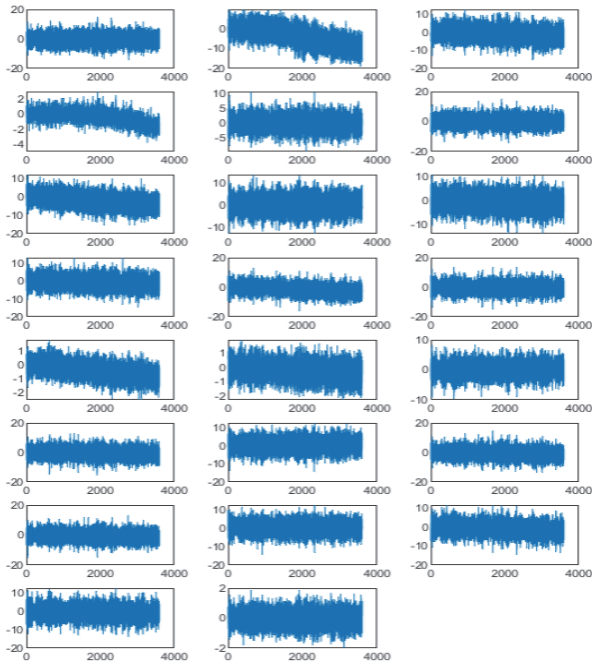


Fig. 3 Acceleration time series during Y19-C1-S1 testing (unit: second, gal)

에서 측정된 가속도 신호에 대한 상호상관(cross correlation)을 구하여 OMA 입력값으로 사용하였다. 여기서 이동 센서 C12D는 하행측 케이블 12번 정착점을 의미한다. Fig. 5는 기준 센서 중 Ref-Z-CL에 대한 상호상관 시계열 집합의 평균 CPSD(Cross Power Spectral Density)를 대표적으로 나타낸 것이다. 서론에서 언급한 것처럼 케이블교량의 특징대로 매우 촘촘한 간격으로 모드가 형성되어 있고, 주요 모드들이 2.5 Hz 이내에서 나타나고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 5를 보면 2019년의 CPSD 형상이 이전 2006년의 분석 결과와 거의 같은 양상이어서 유의미한 구조계 특성 변화가 없다고 볼 수도 있지만, 첨두값에 해당하는 고유진동수들은 2006년과 비교하여 낮은 경향을 보이고 고차 모드로 갈수록 비례적으로 그 차이가 벌어지는 것을 확인할 수 있다.

OMA기법에 따른 동특성 추출을 비교 분석하기 위해 고유진동수(f) 추출은 PP기법, ERADC기법, FDD기법을 적용하였고, 감쇠비 추출(ξ)은 ERADC기법을 적용하였다. 분석에 적용된 OMA기법은 공학용 프로그램인 MATLAB을 사용하여 작성하였다. Table 2는 보강거더의 고유진동수와 감쇠비를 비교 정리한 것으로써 0.1 ~ 2.5 Hz 대역에서 모두 27개의 수직모드와 1개의 수평모드를 추출하였다. OMA기법에 따라 고유진동수 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 앞서의 Fig. 5와 마찬가지로 2006년 대비 2019년 고유진동수가 낮으며, 모드별로 변화율(Δf)에 차이는 있지만 평균 1.8% 감소한 경향을 보였다. 전체적인 고유진동수 감소 경향은 구조계 특성 변

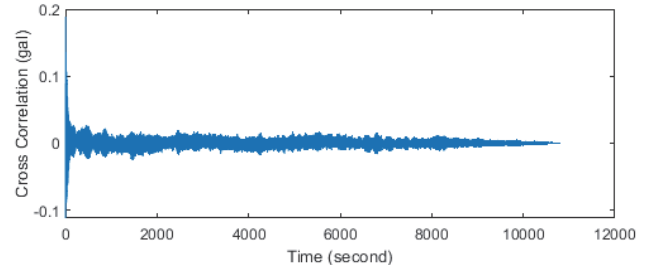


Fig. 4 Cross correlation between Ref-Z-CL and C12D for Y19-C1 case

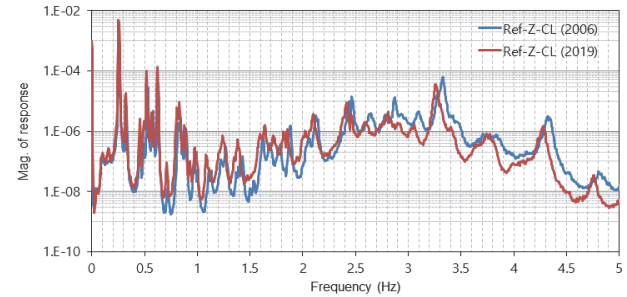


Fig. 5 Averaged cross power spectral density for Ref-Z-CL

화보다는 AVT 측정 시 환경영향에 기인한 것이며, 이는 3.4 절에서 자세히 다루기로 한다.

감쇠비는 모드별 변동성이 다소 존재하지만 평균 감쇠비는 2006년 1.15%, 2019년 1.02% 수준으로 추정되었다. 이는 도로교설계기준에서 규정하는 합성 사장교의 구조감쇠비 0.60%를 상회한다. 감쇠비 변동성은 강재가진이 아닌 상시진동을 이용하는 OMA의 제약성에서 기인한 것으로 판단된다.

2019년 AVT 측정 시 추가한 주탑 측정 구간(C5, C6)의 가속도 신호로부터 Table 3과 같이 6개의 주탑 수평모드를 추출하였으며, 향후 대상교량의 계측기반 관리를 위한 기저치로 활용할 수 있을 것이다.

한편 모드형상(ϕ) 추출은 TDD기법과 FDD기법을 적용하였다. Fig. 6은 TDD기법으로 추출한 보강거더 1차 수직모드(fv01)의 모드형상을 나타낸 것으로써 Fig. 7의 전체계 유한요소해석으로 얻은 모드형상(Park et al., 2010)과 비교하면 형태는 유사하나 C2와 C3 구간 사이(477 ~ 513 m)에서 형상이 꺾인 채 부자연스러운 것을 알 수 있다. 1차 수직모드뿐만 아니라 다른 차수의 모드들에서도 C2-C3 구간 사이에서 동일한 변형 현상이 확인되었다. 이는 측정된 가속도 신호의 응답 크기와 관련이 깊다. 대형 구조물에서의 고해상도 AVT에는 측정 구간 분할과 측정 준비 작업시간이 필요하기 때문에 실제 측정 과정에는 수일이 걸린다. 따라서 측정 Case마다 상시진동을 야기하는 풍속이 달라질 수 있다. Table 1을 보면 Y19-C2 Case는 풍속이 4.96 m/s로 평균풍속보다 훨씬 높고,

Table 2 Comparison of identified modal parameters of the girder

Mode notation	Mode shape	AVTs in 2006					AVTs in 2019			
		PP		ERADC		PP	ERADC		FDD	
		f (Hz)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)		Δf (%) ('19/'06)	f (Hz)		ξ (%)
fV01	V, S	0.2588	0.2593	3.18	0.2539	-1.9	0.2561	1.46	-1.3	0.2539
fV02	V, AS	0.3271	0.3268	0.94	0.3223	-1.5	0.3199	0.64	-2.1	0.3223
fV03	T	0.4590	0.4582	0.25	0.4590	0.0	0.4575	0.84	-0.1	0.4590
fV04	V, S	0.5322	0.5329	2.31	0.5176	-2.7	0.5222	1.73	-2.0	0.5176
fV05	V, AS	0.5811	0.5808	1.64	0.5664	-2.5	0.5703	1.27	-1.8	0.5664
fV06	V, S	0.6299	0.6274	1.88	0.6201	-1.6	0.6226	0.62	-0.8	0.6201
fV07	V, AS	0.7227	0.7210	1.30	0.7129	-1.4	0.7111	1.37	-1.4	0.7129
fV08	V, S	0.8203	0.8217	1.33	0.8057	-1.8	0.8094	1.21	-1.5	0.8057
fV09	T	0.8398	0.8416	0.95	0.8301	-1.2	0.8286	0.72	-1.5	0.8301
fV10	V, S	0.8936	0.8973	0.68	0.8789	-1.6	0.8767	0.85	-2.3	0.8789
fV11	T	0.9717	0.9732	0.56	0.9277	-4.5	0.9316	0.58	-4.3	0.9326
fV12	V, AS	1.0110	1.0085	1.78	0.9912	-2.0	0.9995	1.32	-0.9	0.9912
fV13	T	1.1080	1.1062	0.32	1.0840	-2.2	1.0809	0.83	-2.3	1.0840
fV14	V, AS	1.2300	1.2222	1.74	1.2010	-2.4	1.2155	1.38	-0.5	1.2207
fV15	T	1.2700	1.2709	0.55	1.2400	-2.4	1.2363	0.84	-2.7	1.2402
fV16	T	1.3720	1.3673	1.17	1.3480	-1.7	1.3508	0.88	-1.2	1.3477
fV17	T	1.4110	1.4080	1.02	1.3820	-2.1	1.3835	0.94	-1.7	1.3818
fV18	T	1.4990	1.5015	0.53	1.4790	-1.3	1.4754	0.62	-1.7	1.4795
fV19	T	1.5330	1.5338	0.56	-	-	-	-	-	-
fV20	V, S	1.6260	1.6206	0.86	1.5970	-1.8	1.5932	1.29	-1.7	1.5918
fV21	T	1.6890	1.6952	1.00	1.6410	-2.8	1.6365	0.72	-3.5	1.6406
fV22	V, AS	-	-	-	1.7190	-	1.7194	0.64	-	1.7188
fV23	T	1.7870	1.7886	1.32	-	-	-	-	-	-
fV24	T	-	-	-	1.8260	-	1.8171	0.65	-	1.8164
fV25	V, AS	1.8850	1.8830	0.80	1.8550	-1.6	1.8495	0.75	-1.8	1.8555
fV26	T	2.1240	2.1168	0.65	2.0996	-1.1	2.0988	1.01	-0.8	2.0996
fV27	T	2.4365	2.4275	0.51	2.4170	-0.8	2.4079	0.73	-0.8	2.4219
fL01	L, S	0.3760	0.3698	2.15	0.3662	-2.6	0.3551	2.70	-4.0	0.3613

* V: vertical bending mode, T: torsion mode, L: lateral bending mode, S: symmetric, AS: asymmetric

* '-' is not reliable estimate.

Table 3 Comparison of identified modal parameters of the pylons

Mode notation	Mode shape	AVTs in 2019			
		PP	ERADC		FDD
		f (Hz)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)
fPL01	Lateral	0.3711	0.3716	1.03	0.3711
fPL02	Lateral	0.7617	0.7648	1.57	0.7617
fPL03	Lateral	0.9082	-	-	0.9082
fPL04	Lateral	0.9619	0.9619	1.22	0.9619
fPL05	Lateral	1.2550	1.2636	0.92	1.2549
fPL06	Lateral	2.2802	-	-	2.2900

* '-' is not reliable estimate.

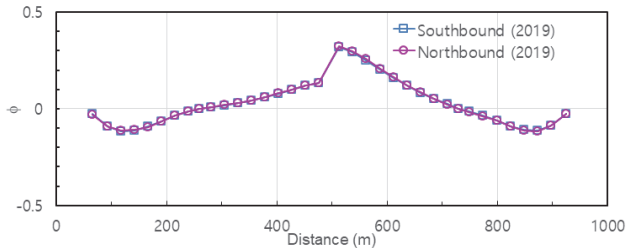


Fig. 6 Identified first vertical bending mode shapes by TDD

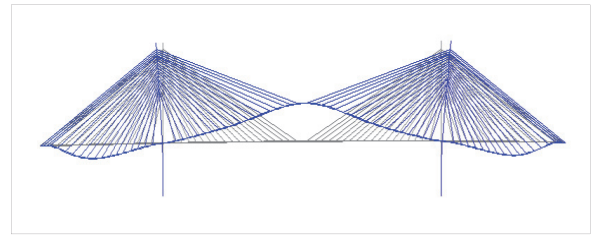


Fig. 7 The first vertical bending mode shape by Finite Element Analysis (FEA)

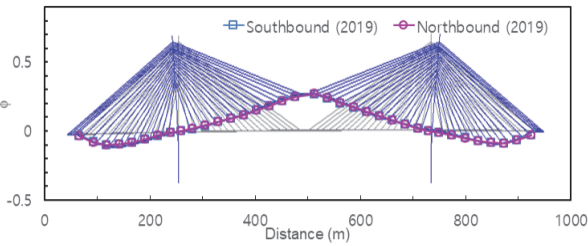


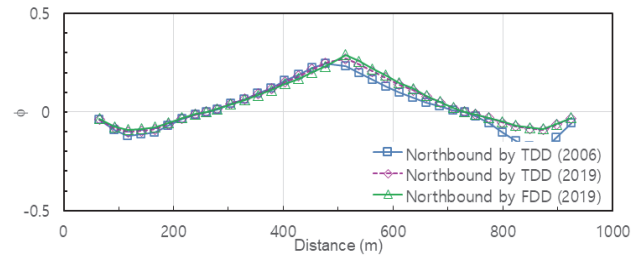
Fig. 8 Comparison of first vertical bending mode shapes by enhanced-TDD vs FEA

Y19-C3 Case는 풍속이 1.47 m/s로 다른 Y19 Case에 비해 훨씬 낮은 조건이었다. 이로 인해 C3 구간의 가속도 응답은 다른 Case에 비해 상대적으로 작게 측정되었다. 반대로 C2 구간의 가속도 응답은 크게 측정되었다. 측정된 가속도 신호에 대해 측정 구간별로 상호상관을 구하고 전체 측정 구간(C1 ~ C6)에 대해 상호상관을 하나로 합치게 되면, 측정 구간별 크기가 다른 가속도 응답도 그대로 반영된다. 이것이 시간영역에서의 TDD 모드형상 추출 시에는 가속도 크기의 역관계로 C2 구간을 작게, C3 구간을 크게 평가하는 원인으로 작용하였다.

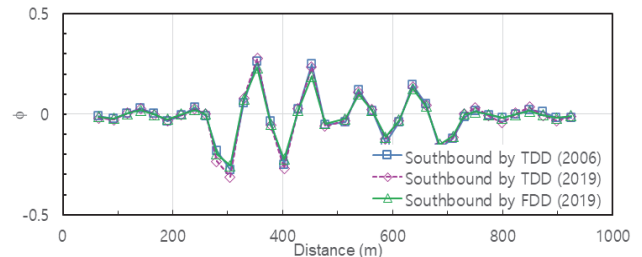
이와 같은 문제점을 개선하기 위해 가속도 신호에 대한 상호상관을 구할 때, Eq. (1)과 같이 지연(lag)이 0일 때 자기상관 (autocorrelation)이 1이 되도록 시퀀스를 정규화하는 알고리즘을 새롭게 추가하였다. 이렇게 하면 전체 측정 구간에 대해 상호상관을 하나로 합칠 때 측정 구간별 가속도 최대 크기가 같게 되어 모드형상 왜곡 현상이 해소된다.

$$\hat{R}_{xy,n}(m) = \frac{1}{\sqrt{\hat{R}_{xx}(0)\hat{R}_{yy}(0)}} \hat{R}_{xy}(m) \quad (1)$$

Eq. (1)을 적용하여 개선된 TDD(enhanced-TDD)기법의 적합성을 확인하기 위해 개선된 TDD로 추출된 모드형상을 유한요소해석 결과와 비교 검증하였다. Fig. 8은 fV01 모드형상과 Fig. 7의 유한요소해석 결과를 동일 스케일로 중첩하여 나타낸 것이다. Fig. 8에서 실험과 해석 결과가 잘 일치함을 확인



(a) fV01



(b) fV27

Fig. 9 Comparison of vertical bending mode shapes by enhanced-TDD and FDD

할 수 있고, 실험과 해석의 모드벡터들 사이의 정량적 유사성을 나타내는 지표인 MAC(Modal Assurance Criterion)도 1.0에 가까운 값을 보였다. 따라서 개선된 TDD기법에 의한 모드형상 추출은 유효하다고 할 수 있다.

Fig. 9는 개선된 TDD기법과 FDD기법으로 추출한 보강거더 1차와 27차 수직모드(fV27) 모드형상을 대표로 나타낸 것이다. 개선된 TDD기법으로 추출한 모드형상이 FDD 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있고, 2019년의 모드형상도 이전 2006년과 유사한 형태여서 기 도출된 고유진동수 결과와 마찬가지로 유의미한 구조계 특성 변화는 없다고 평가할 수 있다.

이처럼 유효성을 검증한 개선된 TDD기법을 적용하여 Table 2에 정리된 28개 모드에 대해 주탑을 포함한 전체계 모드형상을 추출하였으며, 이 중 임의의 선택한 6개 모드형상을 Fig. 10에 대표적으로 도시하였다.

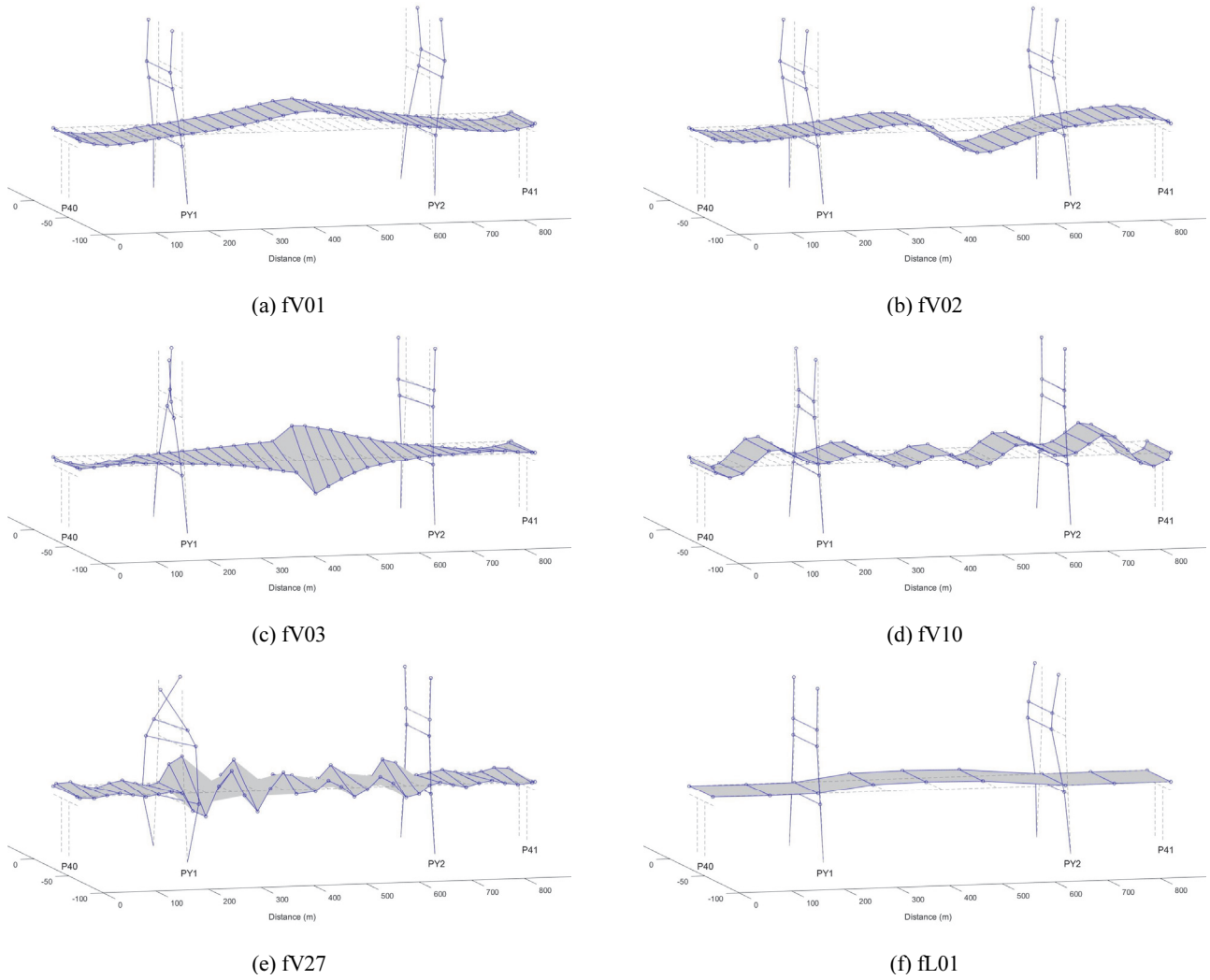


Fig. 10 Identified mode shapes by enhanced-TDD for AVTs in 2019

3.4 장기 계측에 의한 동특성과 환경영향

Fig. 11은 대상교량의 SHM 시스템에 10분 간격으로 저장된 계측데이터로부터 정리한 2019년부터 2021년까지 3년 동안의 일평균(ave) 고유진동수를 나타낸 것이다.

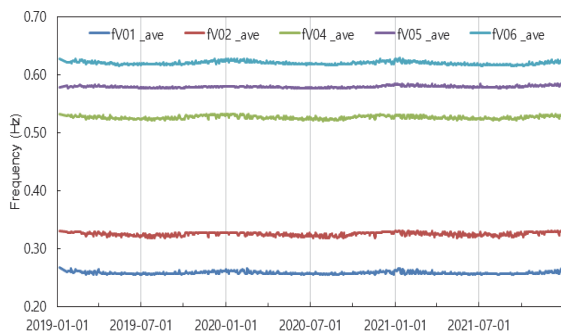


Fig. 11 Daily averaged natural frequencies obtained from the SHM system during 2019 ~ 2021

총 21개의 가속도계가 설치되어 있으며, 신호 샘플링은 100 Hz, 고유진동수는 PP기법으로 자동 추출되어 데이터베이스에 저장된다. 보강거더 1차 수평모드(fL01)와 첫 번째 비틀림모드인 3차 수직모드(fV03), 그리고 7차 수직모드(fV07) 이상의 고차 모드는 정상시 PSD(Power Spectral Density)의 진폭(magnitude) 발현이 낮아 고유진동수를 자동 추출하지 않거나 분산도가 커서 결과의 신뢰성이 떨어져 분석에서 제외하였다. Fig. 11에서 5개 모드 모두 계절 변화에 따라 고유진동수가 여름에는 감소하고 겨울에는 증가하는 양상을 보이고 있음을 볼 수 있다. 이를 정량적으로 평가하기 위해 고유진동수와 부재 유효온도(effective temperature(T_e))의 상관성을 분석하였다.

Fig. 12는 지난 3년 동안의 fV01_ave와 T_e 를 도시한 것이며, 2006년과 2019년 AVT 측정 결과도 함께 표시하였다.

Han et al.(2021)의 온도 영향에 대한 문헌 리뷰와 마찬가지로 고유진동수와 온도가 반비례의 관계를 보이며, 상관관계수 (R)는 0.7 이상으로 높은 상관관계를 가진 것으로 평가된다. 두 변수 간의 선형회귀분석에 의한 단위온도당 고유진동수 변화율은 $-0.065\%/^{\circ}\text{C}$ 로 계산되었다. 이를 Table 1의 2019년과 2006년 AVT 측정 시의 평균온도 변화량($22.12^{\circ}\text{C} - 4.60^{\circ}\text{C}$)에 대입하면 -1.1% 로 계산되며, 이 값을 Table 2의 ERADC기법 고유진동수 변화율(Δf) -1.3% 와 비교하면 비슷한 것을 알 수 있다. 즉, 2019년 AVT 측정 시 고유진동수 감소는 구조 손상과 같은 구조계 특성 변화 보다는 온도 영향이었음을 의미한다.

다른 모드에서의 온도 영향을 추가로 확인하기 위해서 Fig. 13은 지난 3년 동안의 $fV06_ave$ 와 T_e 를 도시한 것이다. $fV01_ave$ 와 같은 경향성을 보이며, 단위온도당 고유진동수 변화율은 $-0.037\%/^{\circ}\text{C}$ 로써 AVT 측정 시 온도 차이로 환산하면 -0.7% 로 계산되며, 이 값은 Table 2의 -0.8% 와 거의 같아

역시 온도 영향임을 확인할 수 있다. 한편 2006년과 2019년 AVT에 의한 $fV06$ 은 일평균(ave)보다는 일최대(max) 분포 그래프에 더 가까운 양상을 보였다.

온도 외의 환경 요인인 풍환경에 의한 영향을 분석하기 위해 Fig. 14와 Fig. 15는 고유진동수와 풍속의 관계를 나타낸 것이다. 온도와 달리 상관관계수는 0.4 미만으로 낮은 상관관계를 보이므로 두 변수 간에는 유의미한 연관성은 없다고 평가할 수 있다. 한편 AVT 측정 기간 중 차량 정체나 사고 등은 없었으므로 동특성에 대한 교통 하중의 영향은 없었다. 또한 주탑 기초는 강성이 큰 콘크리트 직접기초이고, 주탑 기둥 하단은 바닷물이 닿지 않는 높이기 때문에 유체-구조물 상호작용에 의한 영향은 미미하다고 판단된다. 따라서 동특성 변화에 영향을 주는 가장 지배적인 요인은 온도로 평가되며, 2006년과 2019년 AVT 측정에서 나타난 고유진동수 감소 경향도 주로 온도 변화에 의한 것으로 설명된다.

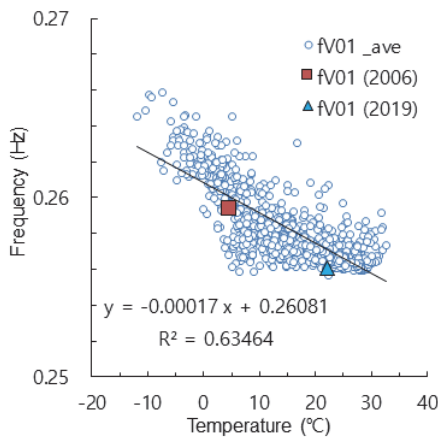


Fig. 12 Relationship between $fV01$ and T_e

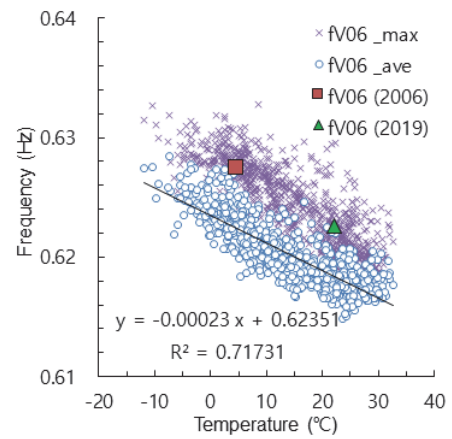


Fig. 13 Relationship between $fV06$ and T_e

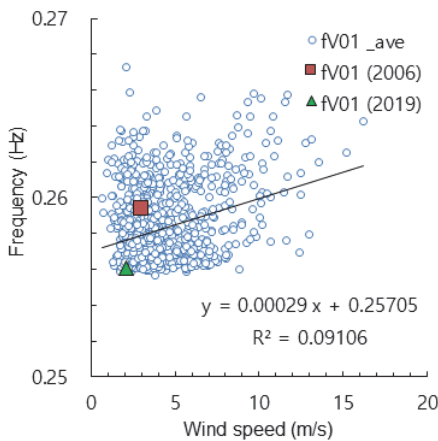


Fig. 14 Relationship between $fV01$ and V

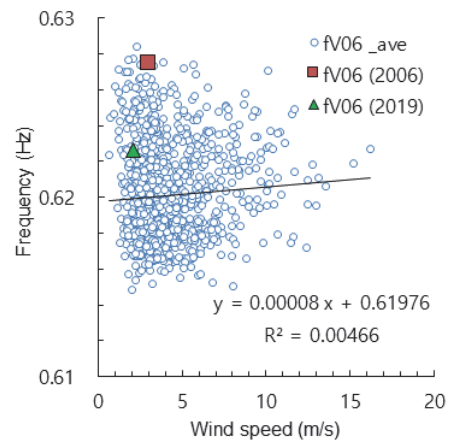


Fig. 15 Relationship between $fV06$ and V

4. 결 론

본 연구에서는 공용 중인 사장교를 대상으로 하여 두 번의 단기 AVT와 함께 SHM 시스템에 의한 장기 계측을 통해 수집된 데이터를 이용하여 교량의 동특성 추출과 환경영향을 분석하였다. 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

고해상도 AVT는 교량 준공 이후 6년(2006년)과 19년(2019년)이 경과한 시점에 수행되었다. OMA에 기반한 동특성 추출은 PP기법, ERADC기법, FDD기법, TDD기법을 적용하였으며, 0.1 ~ 2.5 Hz 대역에서 27개 수직모드(휨, 비틀)와 1개 수평모드를 추출할 수 있었다. 또한 2006년 AVT에서는 측정하지 못한 주탑의 경우, 2019년 AVT에서는 6개의 주탑 수평모드도 추출할 수 있었다. 더불어 동특성 추출에 있어서 적용한 모드해석 기법들 간에 유의미한 차이가 없는 것을 확인할 수 있었다.

2006년 대비 2019년 고유진동수가 모드별로 감소율에 차이는 있지만 평균적으로 1.8% 감소한 경향을 보였다. 그 사이에 케이블 일부 교체 등의 유지보수가 있었지만, 고유진동수 감소는 구조성능과 일체성(integrity)이 변한 것이 아니라 환경영향에 주로 기인한 것임을 밝혔다. 즉, 장기 계측 고유진동수와 환경 요인(온도, 바람)에 대한 상관성 분석으로부터 온도 변화가 지배적인 영향인자임을 확인하였고, 두 번의 AVT 측정 간에 부재 평균온도 차이가 17.52 °C 나서 온도에 반비례하는 관계로 고유진동수 변화가 발생한 것이다. 이는 동특성 추출과 분석에 있어 온도와 같은 환경 요인이 비중 있게 고려되어야 함을 시사한다.

평균 감쇠비는 2006년 1.15%, 2019년 1.02%로 추정되었으며, 이는 도로교설계기준에서 규정하는 합성 사장교의 구조 감쇠비 0.60%를 상회하는 수준인 것으로 나타났다.

교량을 몇 개의 구간으로 분할하여 AVT 측정하는 경우 풍속, 교통량 등에 따라 가속도 신호 응답 크기가 달라질 수 있는데, 기존 TDD기법에서는 각 측정 구간에서의 데이터 상호상관을 구하고 전체를 하나로 합치는 과정에서 이를 고려하지 않아 모드형상이 변형되는 문제점이 확인되었다. 이에 가속도 신호에 대한 상호상관을 구할 때, 지연이 0에서 자기상관이 1이 되도록 시퀀스를 정규화하는 알고리즘을 추가한 개선된 TDD기법을 제안하였다. 개선된 TDD기법으로 추출한 모드형상을 유한요소해석과 FDD기법과 비교한 결과, 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 또한 2019년의 모드형상은 이전 2006년과 유사한 형태여서 유의미한 구조계 특성 변화는 없는 것으로 평가할 수 있다.

References

1. Cho, S., Jo, H., Jang, S., Park, J., Jung, H. J., Yun, C. B., Spencer,

- B. F., and Seo, J. W. (2010), Structural Health Monitoring of a Cable-Stayed Bridge Using Wireless Smart Sensor Technology: Data Analysis, *Smart Structures and Systems*, 6(5-6), 461-480.
2. Conte, J. P., He, X., Moaveni, B., and Masri, S. F. (2008), Dynamic Testing of Alfred Zampa Memorial Bridge, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 134(6), 1006-1015.
3. Cross, E. J., Koo, K. Y., Brownjohn, J. M. W., and Worden, K. (2013), Long-Term Monitoring and Data Analysis of the Tamar Bridge, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 35(1-2), 16-34.
4. Cunha, Á., Caetano, E., Magalhães, F., and Moutinho, C. (2013), Recent Perspectives in Dynamic Testing and Monitoring of Bridges, *Structural Control and Health Monitoring*, 20(6), 853-877.
5. Cunha, Á., Caetano, E., Magalhães, F., Moutinho, C., and Pereira, S. (2021), Dynamic Testing and Continuous Dynamic Monitoring of Transportation, Stadia and Energy Infrastructures, *International Workshop on Civil Structural Health Monitoring, CSHM 2021*, 156, 15-55.
6. Ding, Y. L., Li, A. Q., and Geng, F. F. (2010), Variability of Measured Modal Frequencies of a Suspension Bridge under Actual Environmental Effects, *Proceedings of the 5th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS*, 1380-1387.
7. Han, Q., Ma, Q., Xu, J., and Liu, M. (2021), Structural Health Monitoring Research under Varying Temperature Condition: a Review, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11, 149-173.
8. Hernandez, W., Viviescas, Á., and Riveros-Jerez, C. A. (2022), Water-Structure Interaction Analysis of a Segmental Bridge Using Ambient Vibration Testing at Different Water Levels, *Proceedings of the 1st Conference of the European Association on Quality Control of Bridges and Structures, EUROSTRUCT 2021*, Padua, Italy, 200, 1226-1233.
9. Hong, D. S. and Kim, J. T. (2010), Structural Health Monitoring of Full-Scale Concrete Girder Bridge Using Acceleration Response, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 14(1), 165-174 (in Korean).
10. Jung, D. S., Kim, C. Y., Kim, N. S., and Yoon, J. G. (2002), Estimation of Dynamic Characteristics of Namhae Suspension Bridge Using Ambient Vibration Test, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 22(6A), 1501-1514 (in Korean).
11. Kim, B. H., Park, M. S., and Lee, I. K. (2008), Modal Parameter Extraction of Seohae Cable-Stayed Bridge: I. Mode Shape, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 28(5A), 631-639 (in Korean).
12. Kim, B. H., Park, T., and Stubbs, N. (2005), A New Method to Extract Modal Parameters Using Output-Only Responses, *Journal of Sound and Vibration*, 282(1-2), 215-230.
13. McDonald, S. (2016), Operational Modal Analysis, Model Updating, and Seismic Analysis of a Cable-Stayed Bridge, Master's Thesis, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
14. Magalhães, F., Caetano, E., Cunha, Á., Flamand, O., and Grillaud, G. (2012), Ambient and Free Vibration Tests of the Millau Viaduct: Evaluation of Alternative Processing Strategies, *Engineering Structures*, 45, 372-384.

15. Magalhães, F., Cunha, Á., and Caetano, E. (2014), Five Years of Continuous Dynamic Monitoring of Infante D. Henrique Bridge, *Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics*, EUROLYN 2014, Porto, Portugal, 2263-2270.
16. Park, J. C., Gil, H. B., Kang, S. G., and Lim, C. W. (2010), Dynamic Characteristics of a Cable-Stayed Bridge Using Global Navigation Satellite System, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, 30(4A), 375-382 (in Korean).
17. Park, W., Kim, H. K., and Park, J. (2012), Finite Element Model Updating for a Cable-Stayed Bridge Using Manual Tuning and Sensitivity-Based Optimization, *Structural Engineering International*, 22(1), 14-19.
18. Rainieri, C. and Fabbrocino, G. (2014), *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*, Springer, New York, 1-210.
19. Wang, H., Mao, J. X., and Xu, Z. D. (2020), Investigation of Dynamic Properties of a Long-Span Cable-Stayed Bridge During Typhoon Events Based on Structural Health Monitoring, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 201, 104172.
20. Westgate, R. J. (2012), Environmental Effects on a Suspension Bridges's Performance, Ph.D. Dissertation, The University of Sheffield, Sheffield, UK.

Received : 06/07/2022

Revised : 07/01/2022

Accepted : 07/15/2022

요 지 : 상시진동을 이용하여 구조계의 동특성을 추출하는 운용모드해석 기법은 케이블교량 구조건전성모니터링의 한 분야로써 다양한 연구와 실험적 검증이 수행되어왔다. 본 연구에서는 두 번에 걸친 상시진동실험과 함께 3년간의 장기 계측을 통해 수집된 가속도 데이터를 이용하여 공용 중인 사장교의 장단기 동특성을 평가하였다. 교량 준공 이후 6년과 19년이 경과한 시기에 실시한 고해상도 상시진동실험으로부터 0.1 ~ 2.5 Hz 대역에서 27개 수직모드(휨, 비틀)와 1개 수평모드를 추출하였다. 운용모드해석에 기반한 동특성 추출은 PP기법, ERADC기법, FDD기법, TDD기법을 적용하였으며, 적용한 기법들 간에 유의미한 차이가 없는 것을 확인하였다. 장기 계측 고유진동수와 환경 요인(온도, 바람)에 대한 상관성 분석으로부터 온도 변화가 고유진동수 변동에 지배적인 영향인자임을 확인하였다. 대상교량의 고유진동수 감소 경향은 구조성능과 일체성이 변한 것이 아니라 두 번의 상시진동실험 간 온도 차이에 의한 환경영향이 컸음을 밝혔다. 또한 TDD기법 적용 시, 지면이 0에서 자기상관이 1이 되도록 시퀀스를 정규화하는 알고리즘을 추가하여 모드형상 추출의 정확도를 개선하였다.

핵심용어 : 사장교, 구조건전성모니터링, 동특성, 운용모드해석, 상시진동
