

장기계측에 의한 서해대교 사장교의 동특성 평가

Dynamic Characteristics of Seohae Cable-stayed Bridge Based on Long-term Measurements

박종칠¹⁾ · 박찬민²⁾ · 김병화³⁾ · 이일근⁴⁾ · 조병완⁵⁾

Park, Jong-Chil · Park, Chan-Min · Kim, Byeong-Hwa · Lee, Il-Keun · Jo, Byung-Wan

국문 요약 >> 본 논문에서는 구조건강성모니터링(SHM)시스템이 설치된 케이블교량을 대상으로 장기적인 동적거동 특성을 분석하였다. 3차원 유한요소모델을 사용한 모드해석을 통해 모드변수를 추출하였다. 이를 교량에서 측정된 상시진동신호에 대해 주파수영역에서 분석한 고유진동수와 비교하여 정확한 기저모델이 구축되었음을 알 수 있었다. 지난 5년간의 고유진동수와 온도를 통계분석하여 고유진동수가 온도에 선형 반비례하고 있음을 확인하였고, 이러한 온도효과에 대한 평가를 수행하였다. 또한 상시진동신호를 시간영역에서 TDD기법을 적용하여 모드형상을 추출하였으며, 모드해석 결과와의 비교를 통해 케이블교량에 적용이 가능함을 검증하였다.

주요어 사장교, 진동, 모드해석, TDD기법, 온도효과

ABSTRACT >> This paper presents long-term dynamic characteristics of a cable-stayed bridge where installed SHM (Structural Health Monitoring) system. Modal parameters such as natural frequencies and mode shapes are identified by modal analysis using three dimensional finite element model. The developed baseline model has a good correlation with measured natural frequencies identified from field ambient vibrations. By statistical data processing between measured natural frequencies and temperatures, it is demonstrated that the natural frequency is in linearly inverse proportion to the temperature. The estimation of temperature effects against frequency variations is performed. Mode shapes are identified from the TDD (Time Domain Decomposition) technique for ambient vibration measurements. Finally, these results demonstrate that the TDD method can apply to identify modal parameters of a cable-stayed bridge.

Key words cable-stayed bridge, vibration, modal analysis, time domain decomposition, temperature effect

1. 서론

최근 준공된 서해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 케이블교량에는 체계적인 유지관리와 안전성 평가를 위하여 전산화된 유지관리시스템과 계측시스템이 구축되어 운영되고 있다. 이 들 교량에 있어서 계측시스템의 일부분으로 적용된 구조건강성모니터링(SHM, Structural Health Monitoring)은 교량 관리의 한 분야로 지난 십여 년간 국내외적으로 많

은 발전을 이뤄왔다. 특히, 구조계가 지닌 동특성을 이용하여 구조계를 식별(SI, System Identification)하고 나아가 구조계의 상태 및 손상을 감지하는 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다.

진동에 기초한 손상감지기법은 국부적인 강성변화가 구조물의 전체 동특성에 영향을 끼친다는 사실에 근거하며, 진동 데이터로부터 모달 모델을 찾아가는 과정이 SI라 할 수 있다. 항공, 우주, 기계, 자동차 분야와는 달리 토목 분야에서는 SI 또는 SHM이 제한적으로 적용되고 있는데, 이는 제조와는 달리 시공에 따라 크기, 비용, 수명, 재료성질의 변화, 운영, 재하(load)환경 등과 같은 많은 불확실성이 존재하기 때문이다. 예를 들면, 불확정변수 중 온도와 같은 환경의 영향은 구조물에 손상이 발생하거나 무거운 차량하중이 구조물에 작용하는 것과 같은 모델 변화를 유발시킬 수도 있다. 기존 연구에서는 구조계의 동특성에 있어서 이

¹⁾ 한국도로공사 도로교통기술원 전임연구원, 한양대학교 박사과정 (대표지자: pjseven@freeway.co.kr)

²⁾ 한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원, 공학박사

³⁾ 포항산업과학연구원 강구조연구소 선임연구원, 공학박사

⁴⁾ 한국도로공사 서해대교관리소 전임연구원, 한양대학교 박사과정

⁵⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 11. 6 / 심사종료일 : 2006. 11. 27)

러한 온도효과가 미미하거나 없다고 가정하였고, 또한 수학적으로 정식화하는데 있어서의 어려움으로 인하여 해석에 반영하지 못했다. 그러나 장기간 심한 온도환경에 노출되는 교량의 경우, 온도에 따른 동특성의 변화가 발생하고 이러한 변화가 손상에 의한 변화보다도 클 수 있다는 것이 최근 알려지고 있다.⁽¹⁾

이러한 불확실한 요소들을 정량적으로 평가하고 교량의 동적거동을 보다 신뢰성 있게 분석하기 위한 기반구축을 목적으로 서해대교의 경우, 상시진동을 장기적으로 계측하여 동특성에 대한 데이터베이스를 축적하고 있다. 상시진동을 이용하여 케이블교량의 동적거동 특성을 파악하기 위한 기존 연구는 Chang⁽²⁾이 예시한 것처럼 많으나, 이는 교량의 준공후 초기점검 시나 정밀안전진단 시에만 제한적으로 수행된 경우가 대부분이다. 따라서 실시간 계측을 통해 구조물의 장기적인 동적거동 변화를 모니터링하고 분석한 사례는 드물다고 할 수 있다.

본 논문에서는 상시진동신호를 시간영역에서 TDD(Time Domain Decomposition)기법을 적용하여 서해대교 사장교의 동특성을 추출하고 이를 유한요소해석과 기존의 상시진동해석방법과 비교하여 TDD 기법의 적용성을 검증하였다. 또한 2001년부터 현재까지 장기간으로 축적된 계측데이터를 토대로 온도에 따른 구조계의 동특성 변화가능성을 평가하였다.

2. 진동신호 분석이론

2.1 상시진동 분석기법

일반적으로 구조물의 모드변수는 주파수영역에서의 주파수응답함수(frequency response function)와 시간영역에서의 충격응답함수(impulse response function)를 통한 입력과 출력에 근거하여 추출된다. 교량의 동적응답(출력)은 주요 부위에 센서를 설치하여 쉽게 계측할 수 있지만 공용중인 상태에서 가진력(입력)을 정량화하는 것은 쉽지 않다. 입력으로 가진기나 충격장치를 이용하는 강제진동실험이 중소규모의 교량에 적용되기도 하나, 케이블교량은 규모와 질량이 커서 가진기를 이용한 진동실험이 매우 어렵다. 질량체의 자유낙하를 이용한 가진방법이 사용되기도 하나⁽³⁾, 이는 구조물에 예기치 않은 손상을 줄 우려가 있다. 또한 강제진동실험은 가진을 위해 차량통행을 제한해야 하는 현실적 문제가 따른다.

이러한 이유로 공용중인 상태에서 모달 모델을 추출하는 기법이 다양하게 개발되고 있다. 이러한 관점에서 출력에만

(output-only) 의존하는 추출기법은 차량을 통제하지도 않고, 구조물을 가진할 장비도 필요치 않은 저렴한 방법이라는 장점을 지니고 있다. 바람이나 통행차량에 의해 상시 발생하는 미세진동을 이용하는 상시진동실험(ambient vibration test)은 단지 출력에만 의존하는 모드변수 추출방법의 하나이다. 이러한 상시진동실험은 이미 Golden Gate Bridge⁽⁴⁾, Tsing Ma Bridge⁽⁵⁾, Kap Shui Mun Bridge⁽²⁾, Vasco da Gama Bridge⁽³⁾, 남해대교⁽⁶⁾, Qingzhou Bridge⁽⁷⁾와 같은 많은 케이블교량에 성공적으로 적용된 바 있다.

출력신호 데이터만으로 모드변수를 추출하는 기법에는 PP(Pick-Picking)법, ARMA(Auto Regressive-Moving Average) 모델, NExT(Natural Excitation Technique), SSI(Stochastic Subspace Identification) 등이 있으며, 이 중에서 PP법이 가장 많이 사용되고 있다.

PP법은 추출된 모드변수의 정확성이 사용된 주파수 분해능에 의존하고 추정된 감쇠가 신뢰할 만하지 못하다는 단점을 지니고 있지만, 비교적 간단하고 빠른 연산기능으로 인하여 케이블교량의 모드변수 추출에도 널리 적용되고 있다. 임의의 하중을 받는 n 차 다자유도계의 i 점에서 가속도 응답의 푸리에변환(Fourier transform), $\ddot{X}_i(\omega)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.⁽⁸⁾

$$\ddot{X}_i(\omega) = \omega^2 \sum_{j=1}^n \Phi_{ij} Y_j(\omega) \quad (1)$$

여기서, Φ_{ij} 는 모드형상 j 의 i 번째 요소, Y_j 는 모드 j 의 구조계 모드응답의 푸리에변환을 의미한다. 식 (1)로부터 고유진동수를 결정할 수 있으며, 일반적으로는 상시진동 가속도신호를 FFT분석하여 PSD(Power Spectral Density)의 첨두점(peaks)을 찾아 구조계의 고유진동수(ω_j)를 구한다. 다자유도계에서 모든 측정점의 PSD를 개별적으로 해석하는데 상당한 작업이 소요된다는 점과 가속도 응답 측정점이 특정 모드의 절점이 되거나 가까운 위치일 경우 PSD의 정점은 잘 나타나지 않는다는 단점 때문에 식 (2)와 같이 l 개의 정규화된 PSD의 평균인 ANPSD(Averaged Normalized Power Spectral Density)를 사용하여 보다 정확한 고유진동수와 모드형상을 구하게 된다.

$$ANPSD(f_k) = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^l NPSD_i(f_k) \quad (2)$$

모드형상은 측정점간에 위상차를 갖기 때문에 다음과 같이 전달함수(T), 위상함수(PW), 코히런스함수(CW)를 모두 고려한 MRF(Modal Ratio Function)를 사용하여 추출한다.⁽⁸⁾

$$MRF_{a,b}(f) = |T_{a,b}(f)|PW(f)CW(f)$$

2.2 TDD기법에 의한 모드형상 추출

TDD기법은 고유진동수가 존재하는 주파수영역대의 모드형상을 푸리에변환 없이 시간영역에서 직접 추출하는 새로운 방법으로서, 공간과 시간이 독립이라는 변수분리의 원리를 기본가정으로 취하고 있다. 그러므로 TDD기법은 고유진동수 추출절차와 모드형상 추출절차가 독립적으로 수행될 수 있으며, 케이블교량과 같이 측정하기 위한 센서의 수가 많은 구조물의 모드형상 추출에 특히 적합한 기법이다.

Kim과 Stubbs⁽⁹⁾가 제시한 TDD기법에 의한 모드형상 추출기법을 간단히 설명하면 다음과 같은 세 가지 절차를 갖는다. 첫째, 디지털 대역통과 필터(digital band pass filter)를 이용하여 계측된 시간응답 데이터로부터 *i*번째 고유진동수가 존재할 것으로 예상되는 주파수영역대의 주파수 성분만을 갖는 시간응답 데이터 행렬 *Y_i*를 계산한다. 여기서, *N*개의 시간샘플이 *p*개의 센서위치에서 계측되었다면, *Y_i*의 크기는 *p*×*N* 이다. 둘째, 에너지 상관행렬(energy cross-correlation matrix) *E_i*를 식 (3)과 같이 계산한다.

$$E_i \equiv Y_i Y_i^T \tag{3}$$

마지막으로, 계산된 에너지 상관행렬 *E_i*의 특이치 재구성(singular value decomposition)을 식 (4)와 같이 수행한다.

$$E_i = U \Omega U^T \tag{4}$$

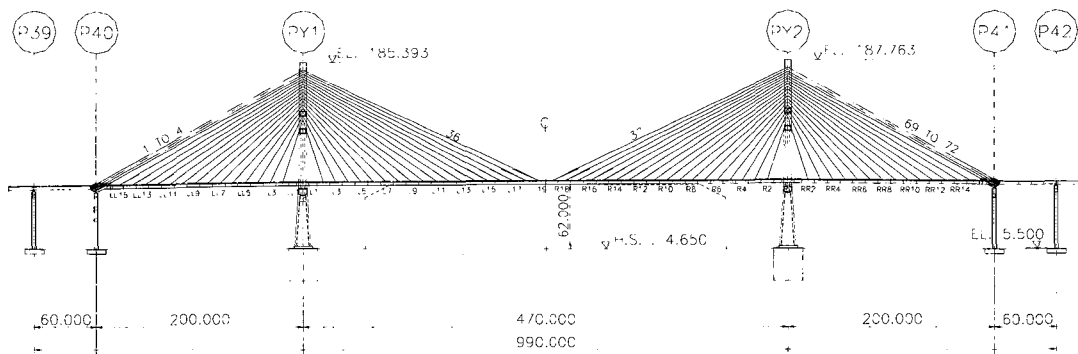
여기서, *p*×*p* 행렬 *U*는 특이치 벡터이고, *p*×*p* 대각선 행렬 *Ω*는 특이치를 나타낸다. 그러면, *i*번째 모드형상은 *U*의 첫 번째 행벡터가 된다.

주목할 점은 앞서의 고유형상 추출과정에서 특이치 추출 해석 대상 행렬 *E_i*의 크기가 *p*×*p*이라는 것이다. 즉, 시간샘플의 수 *N*과 전혀 관계가 없다는 것인데, 이는 특이치 추출 해석 과정에서 필요한 막대한 계산량을 상당히 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 특징은 센서수가 많은 대형구조물의 모드형상 추출이 실시간으로 수행될 수 있도록 하는 이론적 기반을 제공한다.

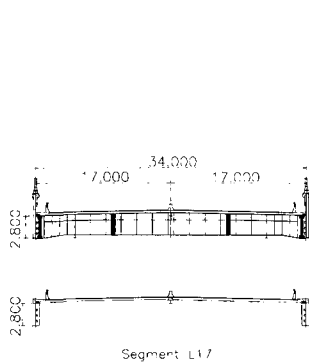
3. 케이블교량에 대한 계측

3.1 대상교량

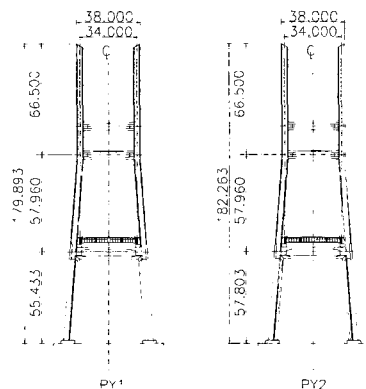
본 연구의 대상교량인 서해대교 사장교는 그림 1과 같이



(a) 정면도



(b) 보강형 단면도



(c) 주탑 단면도

<그림 1> 서해대교

총연장이 990m인 5경간 연속교(60m + 200m + 470m + 200m + 60m) 형식이며, 지난 2000년에 준공되었다. 주경간장은 470m이며, 국내 최장의 합성형 사장교이다. 보강형은 폭이 34m이며, 두 개의 강형(steel girder)과 프리캐스트 콘크리트 바닥판으로 구성되어 있다. H형의 주탑은 높이 182m이며, 사용 재료는 콘크리트이다. 케이블은 양쪽 주탑을 중심으로 마치 부채꼴 모양으로 좌우로 배치되어 주탑과 보강형을 서로 연결하며, 사용된 케이블의 총 개수는 144본으로 길이가 54~247m에 이른다. 케이블 한 개는 37~91가닥의 강연선(strand, $\phi 15.7\text{mm}$)으로 구성되며, 지름 18~28cm의 고밀도폴리에틸렌관에 둘러 싸여 외부환경으로부터 보호되어 있다.

3.2 계측현황

2001년부터 운영 중에 있는 서해대교계측시스템(SSHMS)은 교량의 주요부위에 설치된 센서로부터 수집된 신호를 광통신으로 실시간 전송받아 교량의 상태를 감시하고 분석한다. 사장교에는 가속도계, 지진계, 풍향풍속계, 온도계를 포함하여 10종류 110여 개의 센서가 설치되어 있다. 온도, 신

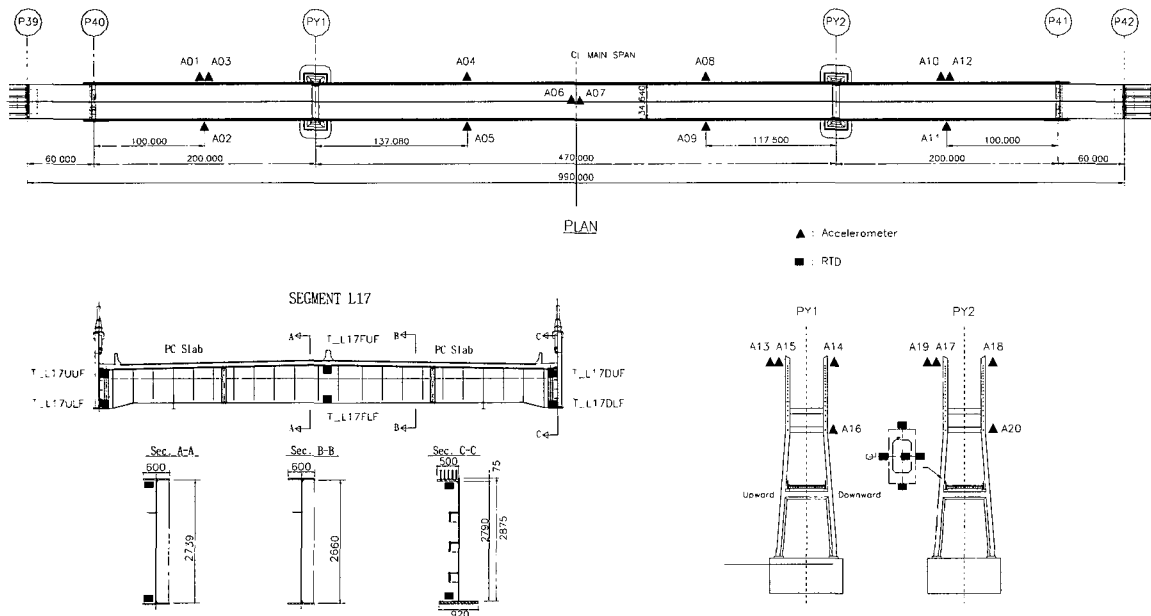
축량과 같은 정적신호는 10분에 1회 데이터를 수집하며, 바람, 진동, 활하중과 같은 동적신호는 초당 100회 데이터를 수집한다. 서해대교 준공시에 재하시험과 구조해석을 통해 센서의 검교정 작업과 신뢰성 검증을 수행하였으며, 이를 계측 데이터의 분석시 고려하였다.

그림 2와 같이 보강형에는 상행과 하행측에 수직방향 진동신호를 측정하는 12개의 가속도계, 주탑에는 교축과 교축 직각방향의 진동신호를 측정하는 8개의 가속도계가 설치되어 있다. 가속도계는 저주파수 영역에 사용되는 Force Balance 형으로 용량은 $\pm 1g$, 주파수 범위는 0.01~50Hz이다. 온도 측정을 위해서 보강형 상·하 플랜지에 6개, 주탑 콘크리트 단면에 5개의 온도계가 설치되어 있다.

센서로부터 실시간으로 수집된 가속도는 PP법에 의해 ANPSD로부터 고유진동수가 20분 간격으로 자동추출되어 SSHMS의 데이터베이스에 저장된다. 보다 자세한 데이터의 수집 및 분석, 조합, 저장방법은 표 1과 같다.

3.3 모드해석

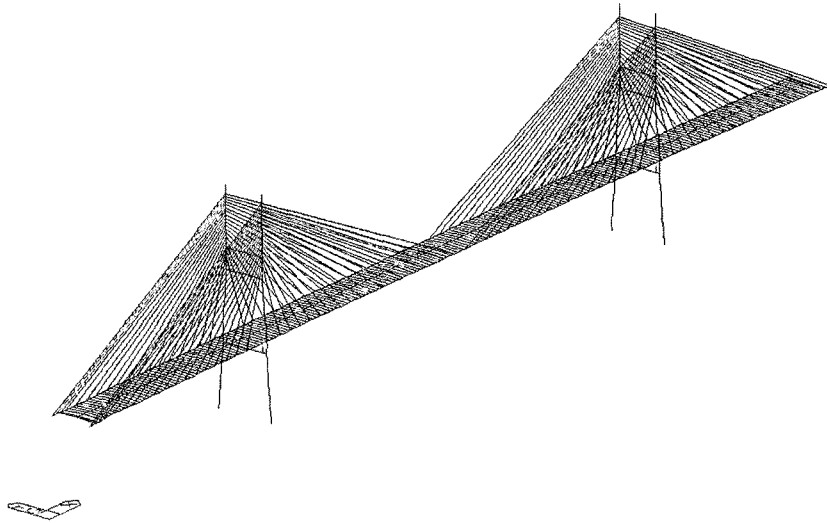
서해대교 사장교의 모드해석을 위해 범용 구조해석 프로



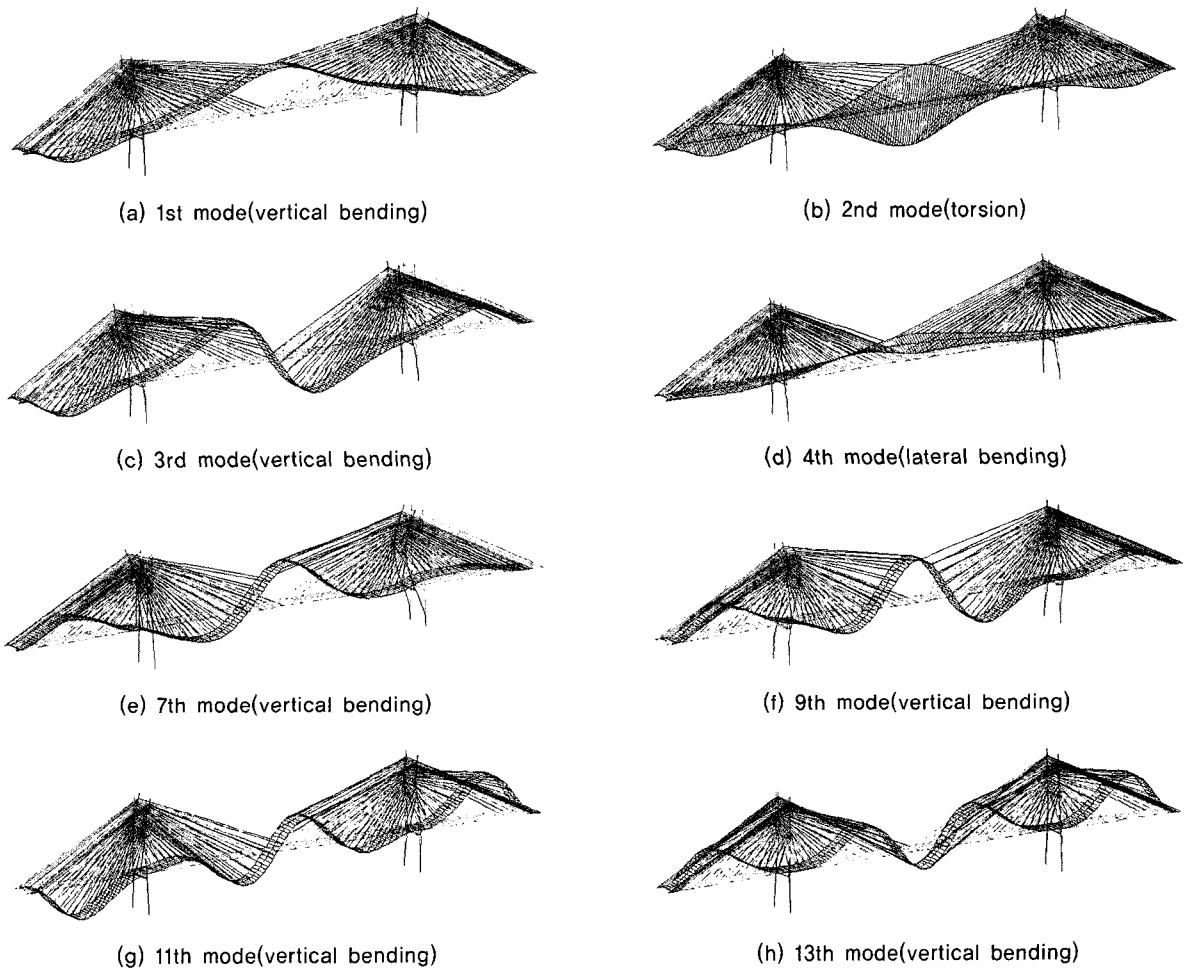
〈그림 2〉 가속도계 및 온도계 설치위치

〈표 1〉 가속도 신호처리 방법

단일시간이력 수집/분석	단일시간이력 조합	추출모드 저장
<ul style="list-style-type: none"> · 샘플링 주파수 : 100Hz · 시간이력 측정수 : $2^{13}=8192$ · 주파수 분해능 : 0.012207Hz · 창함수 : Hanning Window 	<ul style="list-style-type: none"> · 평균 조합수 : 8EA · 측정시간이력 : 10min · 오버래핑 : 50% 	<ul style="list-style-type: none"> · 저장주기 : 20분 간격 (10, 30, 50분) · 저장모드 : 처차모드 5개



〈그림 3〉 3차원 유한요소모델



〈그림 4〉 모드해석으로 추출된 모드형상

그랩인 MIDAS[®]를 사용하여 그림 3과 같이 3차원 유한요소 모델을 구성하였다. 가속도계가 설치되어 있지 않은 사장교 양단의 60m 접속경간은 경계조건이 힌지-롤러인 단순보로써 모델링에서 제외하였다. 보강형, 가로보, 바닥판, 주탑

은 3차원 보 요소로 모델링하고 사장재는 인장력만을 받는 부재이므로 인장(tension-only) 트러스 요소로 모델링하였다. 모드해석 결과 중에서 대표적인 저차모드 형상을 그림 4에 나타냈다.

4. 결과분석

4.1 장기계측 결과

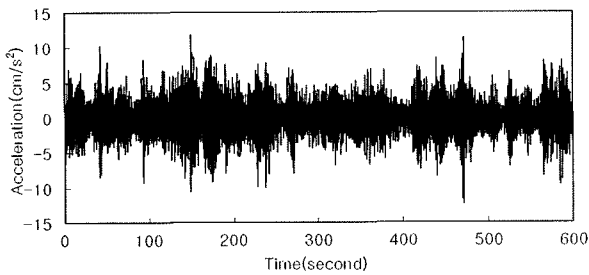
교량에 설치된 가속도계로부터 수집된 가속도 신호는 자동 FFT연산을 통해 고유진동수가 추출된다. 실례로 그림 5는 측정간 하행측 보강형(A02)에서 10분간 측정된 수직방향 가속도 신호를 나타낸 것이며, 그림 6은 같은 위치에서 30시간 동안 측정된 가속도에 대한 ANPSD를 연속적으로 나타낸 것이다. 그림 6에서 보듯이 상시진동을 통해서도 1Hz 미만의 주파수영역에서는 첨두점들이 명확히 나타나고 있어 저차의 고유진동수는 정확히 추출할 수 있다.

서해대교 사장교의 장기적인 동특성변화를 분석하기 위해 2001년부터 현재까지 매 20분 간격으로 추출된 고유진동수 중에서 상대적으로 통계적 유효 데이터가 많은 두개의 저차 수직힘모드인 1차 모드와 3차 모드의 고유진동수(f_{v1} , f_{v2})에 대하여 월 평균값을 구하여 그림 7과 8에 나타내었다. 여기서 통계의 신뢰수준을 높이기 위해 월평균 2,160회(30일×24시간/일×3회/시간)의 측정 중 시간당 1회 꼴인 720회(33.3%) 이상 고유진동수가 추출된 경우에 대해서만 월평균값을 유효한 것으로 간주하였다.

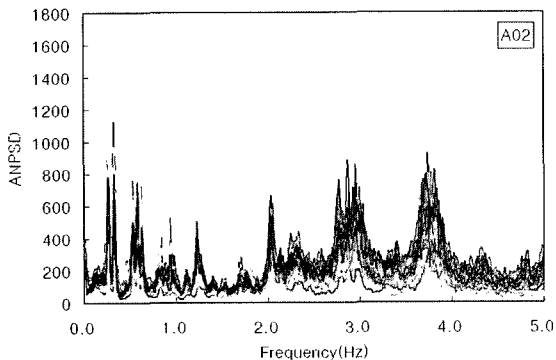
그림 7에서 f_{v1} 의 평균은 0.2600Hz이고 범위는 0.2568~0.2646Hz였다. 그림 8에서 f_{v2} 의 평균은 0.3281Hz이고 범위는 0.3260~0.3296Hz였다. 그림 7과 8의 계측된 f_{v1} 과 f_{v2}

는 유한요소모델에 의한 모드해석값(표 2)인 0.2654Hz, 0.3292Hz와 유사한 결과를 보여 유한요소모델이 정확히 구축되었음을 알 수 있다.

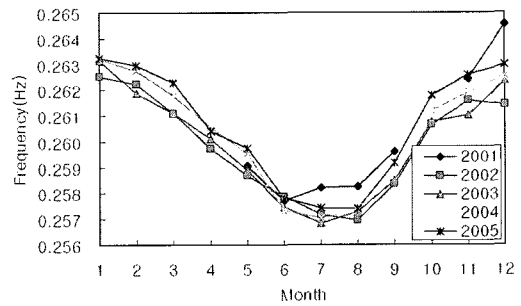
그림 7과 8을 보면 경년에 따른 장기적인 고유진동수의 변화는 없는 것으로 보인다. 이것은 교량 준공이후 구조계의 특별한 변화가 발생하지 않은 것으로서 건전한 상태를 유지하고 있음을 의미한다. 그러나 주목할 점은 일 년을 한 주기로 볼 때, 고유진동수가 일정한 패턴을 보이고 있다는 점이다. 이는 그림 9의 온도와 비교해보면 좀 더 분명해지며, 온도가 높아지면 고유진동수는 낮아지고 반대로 온도가 낮아지면 고유진동수가 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉, 고유진동수는 온도에 반비례하는 경향을 보였다. 온도에 대한 두 고유진동수의 상관성을 알아보기 위해 선형회귀분석을 수행한 결과, 상관계수(R)는 0.93, 0.87로 강한 음의 상관성을 보였다(그림 10, 그림 11). 고차 상관분석을 통해 보



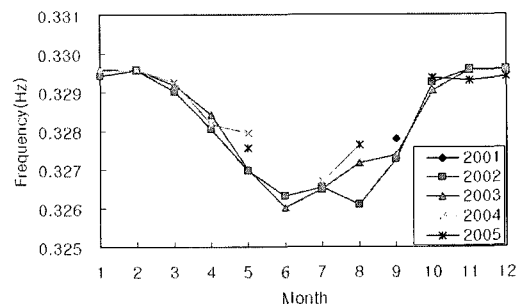
〈그림 5〉 보강형(A02) 수직방향 가속도 시간이력



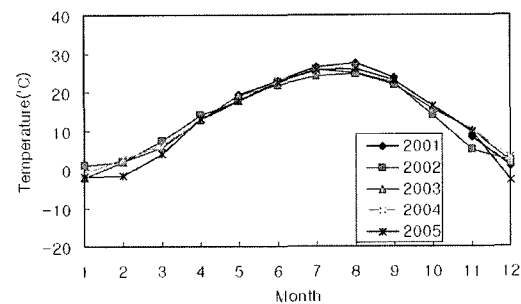
〈그림 6〉 ANPSDs(A02)



〈그림 7〉 월별 고유진동수 변화(f_{v1})



〈그림 8〉 월별 고유진동수 변화(f_{v2})



〈그림 9〉 월별 온도 변화(T_L17FUF)

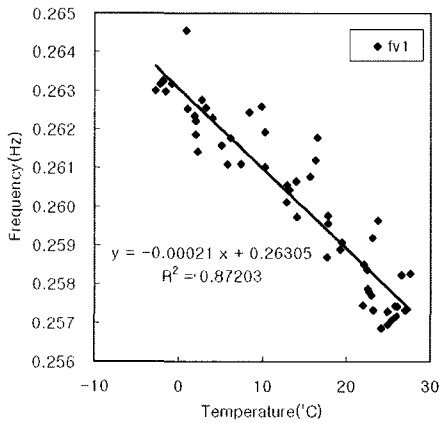
다 적절한 상관식을 찾을 수도 있으나 여기서는 선형으로 볼 때, f_{v1} 의 단위온도당 고유진동수 변화율은 $0.00021\text{Hz}/^\circ\text{C}$ (0.081%), f_{v2} 는 $0.00011\text{Hz}/^\circ\text{C}$ (0.034%)로써 만일 연간 온도변화폭을 40°C 로 가정한다면 변화율은 각각 3.24%, 1.36%에 이른다. 이러한 변화율은 고차의 부정정구조인 케이블교량에 있어서는 매우 큰 의미를 가진다. 참고적으로 서해대교 사장교에 대한 수치해석상 보강형 일부 단면의 강성을 크게 저하시키거나 케이블 파단을 가정하여 해석한 결과로 나타나는 고유진동수의 변화량이 2% 이내인 것과 비교할 때 상당히 큰 값이라고 할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 따라서 케이블 교량의 해석모델구축, 진동실험, 상태평가 등 동특성을 반영해야 하는 경우 반드시 온도효과를 고려해야 함을 알 수 있다.

4.2 모드형상 추출

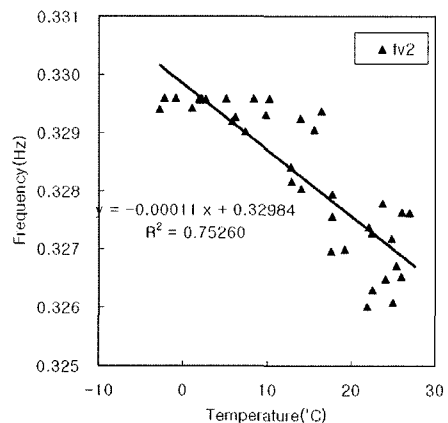
PP법은 시간영역에서 수집된 가속도 신호를 푸리에변환하여 주파수영역에서 고유진동수를 추출한다. 또한 주파수 영역에서 전달함수, 위상함수, 코히런스함수를 계산하여 모드형상을 찾게 된다. 따라서 모드변수 추출과정이 번잡하며, 케이블교량과 같이 많은 센서가 설치된 경우 실시간 신호처리 및 모드형상 구현이 어려운 단점이 있다. 반면 TDD기법

은 푸리에변환을 거치지 않고 시간영역에서 모드형상을 직접 추출하는 방법이므로 다수의 센서가 설치된 케이블교량에 적합할 수 있다. 본 연구에서는 TDD기법으로 서해대교 사장교의 모드형상을 추출하여 기존의 해석결과와 비교함으로써 TDD기법의 적용성을 검토하였다.

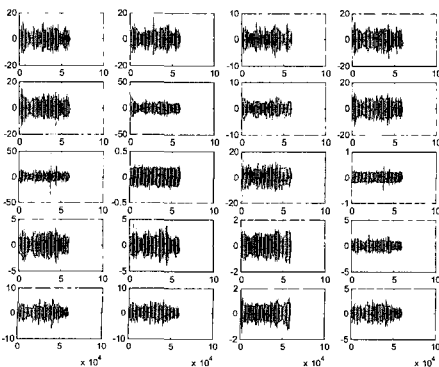
먼저 대상교량의 평균온도에 근접한 임의의 시간대인 2004년 3월의 가속도 신호(그림 12)를 택한 후 PSD(그림 13)를 구해 신호수준 판단 및 Butterworth 필터링 대역을 선정하였다. 다음으로 고유진동수가 존재하는 주파수영역대의 주파수성분만을 갖는 시간이력 Y_i 를 구하고, 이를 통해 식 (3)으로부터 에너지 상관행렬 E_i 를 구하였다. 마지막으로 E_i 의 특이치 재구성을 수행하여 특이치벡터 U 로부터 모드형상을 추출하였다. 가속도계 위치에서 추출된 수직힘모드의 형상과 모드해석의 결과를 그림 14에 나타냈으며, 계측결과와 해석결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 참고로 13차 이상의 고차모드는 제한된 측정점으로 인하여 분석에서 제외하였다. 분석결과와 객관적 비교를 위해 상진동신호와 유한요소해석의 모드형상으로부터 구한 MAC(Modal Assurance Criterion)값을 표 2에 나타냈다. 7차 모드를 제외하곤 모두 1에 근접한 결과를 보여 TDD기법에 의한 모드형상 추출이



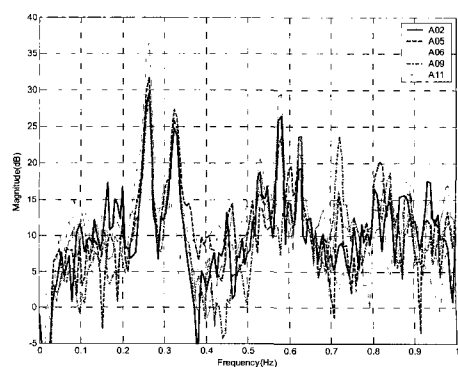
〈그림 10〉 온도와 f_{v1} 의 상관관계



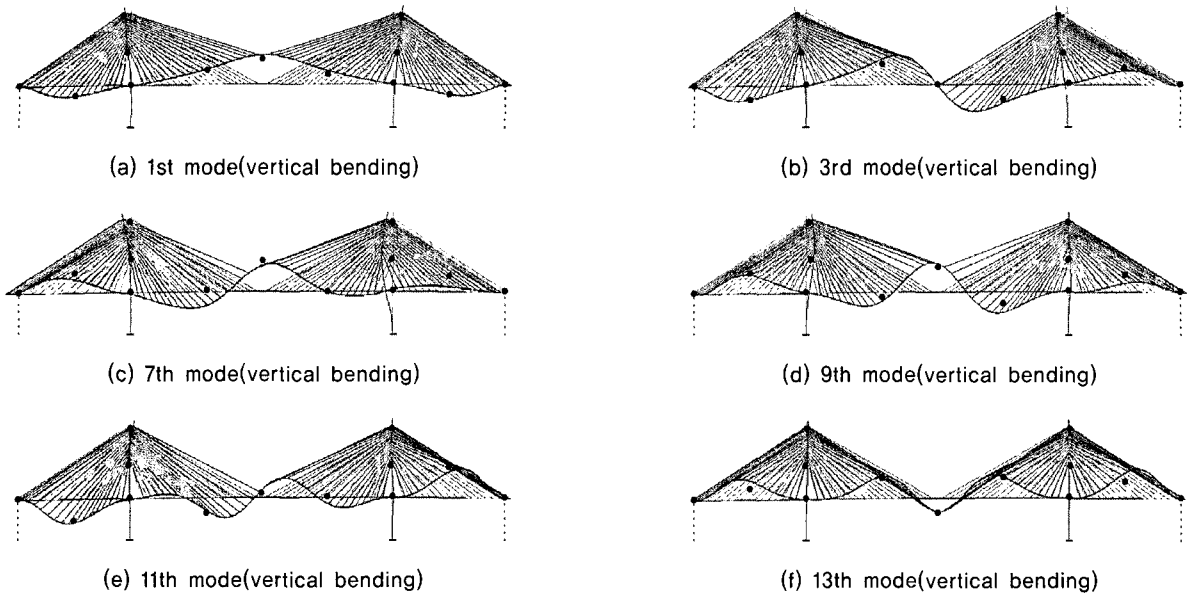
〈그림 11〉 온도와 f_{v2} 의 상관관계



〈그림 12〉 전체 가속도 시간이력(A01~A20)



〈그림 13〉 보강형 PSDs



〈그림 14〉 TDD기법과 모드해석에 의한 모드형상비교

〈표 2〉 모드해석과 계측에 의한 모드변수 비교

Mode No.	FE Model Frequency (Hz)	2001~2005		2004.3.11			
		Measured Frequency (Hz)	Frequency Error (%)	Frequency by PP (Hz)	Frequency by ERADC* (Hz)	MAC (deck+pylon)	MAC (deck only)
1st mode(f_{v1})	0.2654	0.2600	2.08	0.2625	0.2609	0.987	0.989
3rd mode(f_{v2})	0.3292	0.3281	0.33	0.3235	0.3200	0.955	0.954
7th mode(f_{v3})	0.4413	-	-	0.4517	0.4511	0.532	0.659
9th mode(f_{v4})	0.5371	-	-	0.5310	0.5279	0.906	0.927
11th mode(f_{v5})	0.5968	-	-	0.5800	0.5755	0.942	0.950
13th mode(f_{v6})	0.6319	0.6249**	1.12	0.6225	0.6252	0.934	0.940

주) * : Eigensystem Realization Algorithm using Data Correlation

** : Measured frequencies during 2004~2005

정확히 이뤄졌음을 알 수 있었다.

4.3 온도에 따른 고유진동수 변화에 대한 평가

온도와 같은 환경의 영향은 구조체에 모델 변화를 유발시킬 수 있음이 많은 연구자들에 의해 밝혀지고 있다.^(1,6,11-13) Peeters⁽¹¹⁾는 Z24교를 대상으로 장기계측을 수행하여 0°C 이하에서 고유진동수의 급격한 변화가 아스팔트 탄성계수의 변화에 기인한다고 밝혔다. Wenzel⁽¹⁾은 온도변화에 따른 고유진동수 변화는 구조물의 전(global)강성에 달려 있는데, 강성 교량인 Z24교에서 약 1%/10°C, 유연한 교량인 올림픽대교에서 0.2%/10°C 정도로 분석하였다. Macdonald⁽¹²⁾는 바람, 온도, 차량하중이 모드변수 변화에 미치는 영향을 분석하여 고유진동수가 풍속에 반비례하는 경향이 있음을 보이기도 하였다. 최근에는 Xia⁽¹³⁾ 철근콘크리트 슬래브 시험체를 장기간 야외에 노출시키면서 가진실험을 통해 온도

와 습도의 효과를 정량적으로 평가하였다.

만일 구조체의 질량과 경계조건은 변하지 않고 온도가 형상과 물리적 특성에만 영향을 끼친다고 가정하면, 다경간보의 비감쇠 횡진동수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(13,14)

$$f_n = \frac{\lambda_n^2 \pi h}{2l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}} \quad (5)$$

$$\frac{\delta f_n}{f_n} = \frac{\delta h}{h} - 2 \frac{\delta l}{l} + \frac{1}{2} \frac{\delta E}{E} - \frac{1}{2} \frac{\delta \rho}{\rho} \frac{\delta f_n}{f_n} = \frac{1}{2} (\alpha_t + \alpha_E) \delta T \quad (6)$$

여기서 λ_n 은 경계조건함수로서 무차원변수이며, l 은 보의 길이, h 는 높이, ρ 는 밀도, E 는 탄성계수, δ 는 각 변수의 증분, α_t 는 선팽창계수, α_E 는 탄성온도계수를 의미한다. 식 (6)은 온도변화에 대한 무차원 진동수변화율이라고 할 수 있으며, 선팽창계수와 탄성온도계수에 따라 진동수가 변함을 직관적으로 알 수 있다. 콘크리트와 강재의 선팽창계수는 각

각 1.0×10^{-5} , 1.2×10^{-5} 정도로 알려져 있다. 또한 화재, 폭열 등에 관한 많은 연구를 통해 고온에서 콘크리트와 강재의 탄성계수가 감소한다는 사실이 잘 알려져 있지만, 상온에서의 탄성계수의 변화에 대해 언급한 문헌^(13,15)은 그다지 많지 않다. Xia⁽¹³⁾가 적용한 콘크리트와 강재의 탄성온도계수 4.5×10^{-3} 과 3.6×10^{-4} 는 선팽창계수보다 매우 커서 식 (6)의 진동수변화율에 지배적인 요소가 된다. 즉 온도에 따른 탄성계수의 변화가 고유진동수 변화를 일으킨다는 것이다. 이를 0°C에서 20°C까지의 단계적 온도변화(δT)에 따라 재료의 탄성계수를 변화시키는 방법으로 유한요소모델에 적용하여 모드해석을 수행한 결과, 1차 모드(f_{v1})와 3차 모드(f_{v2})에서 단위온도당 고유진동수의 변화율이 $0.000073\text{Hz}/^\circ\text{C}$ (0.028%), $0.000162\text{Hz}/^\circ\text{C}$ (0.049%)로 분석되었다. 비록 장기계측 결과에 의한 값과 다소 차이를 보이기는 하나, 온도에 따른 탄성계수 변화가 고유진동수의 변화를 일으키는 가능성을 어느 정도 설명해주고 있다. 물론 앞서의 가정조건이나 온도 이외에도 기하선형, 습도, 케이블장력 변화, 센서의 온도 선형성 등 다양한 원인이 존재할 수 있으며, 이에 대한 연구를 수행하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 구조건전성모니터링(SHM)시스템이 설치된 서해대교 사장교에서 2001년부터 측정된 계측데이터를 이용하여 장기적인 동적거동 특성을 분석하였다. 3차원 유한요소모델을 작성하여 수행한 모드해석 결과와 상시진동 신호를 푸리에변환을 통해 주파수영역에서 PP(Peak Picking) 방법으로 구한 고유진동수와 비교한 결과, 매우 정확한 해석모델이 구축되었음을 확인하였다.

20분 간격으로 5년간 측정된 고유진동수를 통계분석한 결과, 고유진동수가 온도에 반비례하는 음의 상관성을 보였다. 즉, 온도가 높아지면 고유진동수는 낮아지고 반대로 온도가 낮아지면 고유진동수가 증가하는 경향을 나타냈다. 고유진동수 변화율은 연간 온도변화폭을 40°C로 가정할 때, 3.24% (f_{v1}), 1.36% (f_{v2})에 달해 구조계의 손상에 의한 변화보다도 클 수 있어 해석시 온도효과를 고려해야 함을 알 수 있었으며, 온도에 따른 고유진동수의 변화 가능성을 평가하였다.

실시간으로 시간영역에서 모드형상 추출이 가능한 TDD 기법을 적용하여 서해대교 사장교의 모드형상을 추출하였으며, 이를 유한요소모델에 의한 모드해석 결과 및 MAC값의 비교를 통해 정확히 모드형상을 추출할 수 있었다.

참고 문헌

1. Wenzel, H. and Pichler, D., *Ambient vibration monitoring*, John Wiley & Sons, England, 2005, 291pp.
2. Chang, C. C., Chang, T. Y. P. and Zhang, Q. W., "Ambient vibration of long-span cable-stayed bridge," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 1, 2001, pp. 46-53.
3. Cunha, A., Caetano, E. and Delgado, R., "Dynamic tests on large cable-stayed bridge," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 1, 2001, pp. 54-62.
4. Abdel-Ghaffer, A. M. and Scanlan, R. H., "Ambient vibration studies of Golden Gate Bridge. I: Suspended structure," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 111, No. 4, 1985, pp. 463-482.
5. Xu, Y. L., Ko, J. M. and Zhang, W. S., "Vibration studies of Tsing Ma Suspension Bridge," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 2, No. 4, 1997, pp. 149-156.
6. 정대성, 김철영, 김남식, 윤자걸, "상시진동실험을 이용한 남해대교의 동특성 평가", 대한토목학회논문집, 제 22권, 제 6-A호, 2002, pp. 1501-1514.
7. Ren, W. X., Peng, X. L. and Lin, Y. Q., "Experimental and analytical studies on dynamic characteristics of a large span cable-stayed bridge," *Journal of Engineering Structures*, Vol. 27, No. 4, 2005, pp. 535-548.
8. Felber, A. J. and Cantieni, R., *Introduction of a new ambient vibration testing system: Description of the system and seven bridge tests*, EMPA, Switzerland, 154pp.
9. Kim, B. H., Stubbs, N. and Park, T., "A new method to extract modal parameters using output-only responses," *Journal of sound and vibration*, Vol. 282, 2005, pp. 215-230.
10. 대림산업(주), "서해대교 해석모델 구축 및 초기재하시험에 의한 모델개선", 보고서, 한국도로공사, 2001.
11. Peeters, B., Maeck, J. and Roeck, G. D., "Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects," *Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 3, 2001, pp. 518-527.
12. Macdonald, J. H. G. and Daniel, W. E., "Variation of modal parameters of a cable-stayed bridge identified from ambient vibration measurements and FE modelling," *Journal of Engineering Structures*, Vol. 27, No. 13, 2005, pp. 1916-1930.
13. Xia, Y., Hao, H., Zanardo, G. and Deeks, A., "Long term vibration monitoring of RC slab: Temperature and humidity effect," *Journal of Engineering Structures*, Vol. 28, No. 3, 2006, pp. 441-452.
14. Blevins, R. D., *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Krieger Publishing Co., Florida, 2001, 492pp.
15. Bangash, M. Y. H., *Concrete and Concrete Structures*, Elsevier, New York, 1989, 668pp.