

# GNSS를 이용한 사장교의 동특성 평가

## Dynamic Characteristics of a Cable-stayed Bridge Using Global Navigation Satellite System

박종칠\* · 길흥배\*\* · 강상규\*\*\* · 임채운\*\*\*\*

Park, Jong Chil · Gil, Heung Bae · Kang, Sang Gyu · Lim, Chae Woon

### Abstract

This paper presents the extraction of natural frequencies and mode shapes of a cable-stayed bridge using data acquired from GNSS. The response signals of 6 GNSS measuring points installed at the Seohae cable-stayed bridge are used for analysis of dynamic characteristics. Using normalization process and a third order Butterworth filter for the measured signals, the related pass band's signals have been isolated. Then, the acceleration data by double differentiation for these signals are obtained. Total five natural frequencies have been extracted by the fast Fourier transform and compared to the results of different studies. For the acceleration obtained from GNSS signals, the mode shapes of the bridge have been successfully extracted by TDD technique.

**Keywords** : cable-stayed bridge, global navigation satellite system, structural health monitoring, dynamic characteristics, modal analysis

### 요 지

본 논문은 GNSS 데이터를 이용한 사장교의 고유진동수와 모드형상 추출을 다루고 있다. 서해대교 사장교에 설치된 6개의 GNSS 측정점으로부터 응답신호를 얻어 동특성 분석에 사용하였다. 측정된 GNSS 신호에 대해 정규화 과정과 버터워스 필터를 사용하여 관심영역의 신호를 분리한 뒤, 이중 미분을 수행하여 가속도 데이터로 변환하였다. 변환된 가속도에 대한 FFT 분석을 통해 5개의 고유진동수를 추출하였으며, 이를 기존 연구결과와 비교 검증하였다. 또한 TDD기법을 이용하여 GNSS 데이터로부터 교량의 모드형상까지 추출할 수 있었다.

**핵심용어** : 사장교, GNSS, 구조건전성모니터링, 동특성, 모드해석

### 1. 서 론

서해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 국내 케이블교량에는 체계적인 유지관리와 보다 객관적인 안전성 평가를 위하여 전산화된 교량관리시스템(bridge management system)과 더불어 계측시스템이 구축되어 운영되고 있다. 이 들 교량에 있어서 계측시스템 기술인 구조건전성모니터링(structural health monitoring)은 교량 유지관리의 한 분야로서 지난 이십여 년간 국내외적으로 많은 발전을 이뤄왔다. 특히, 구조계를 식별(system identification)하거나 손상을 감지하기 위한 구조계의 동특성을 추출하는 기법은 SHM의 핵심기술의 한 분야로 많은 연구와 실험적 검증이 이뤄져왔다.

2000년에 준공된 서해대교는 준공 시부터 SSHMS(Seohae structural health monitoring system)라는 실시간 상시 계측 시스템을 운영하고 있으며, 이를 통해 교량의 동특성 추출은

물론 다양한 동특성 활용 연구를 수행한 바 있다(박종칠 등, 2006; 김병화 등, 2008a; 김병화 등, 2008b). 서해대교 개통과 더불어 운영을 시작한 SSHMS는 계측기기와 통신장비의 노후화로 인하여 2008년과 2009년에 재구축사업이 수행되었다. 재구축사업에서는 장기적인 관점에서 효율성이 떨어지는 센서는 줄이거나 제외하였으며, GNSS(global navigation satellite system) 안테나와 수신기를 교량의 주요 위치에 새롭게 추가하였다(박종칠 등, 2010). 서해대교 GNSS의 설치 목적은 기상 영향을 비교적 많이 받고 상대적인 물리값을 나타내는 기존 센서의 한계를 극복하고 안정적인 절대변위 측정을 통해 교량의 형상관리를 가능케 함이 주목적이며, 나아가 동특성 추출을 통해 기존 센서를 대체하거나 연계시키기 위한 활용방안을 찾는 것이다.

이러한 활용방안의 하나로 본 논문에서는 GNSS를 이용한 동특성 추출을 다루고 있다. 우선 GNSS의 개념 및 연구사

\*정회원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 (E-mail : pjseven@ex.co.kr)

\*\*정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (E-mail : hgil@ex.co.kr)

\*\*\*정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : kevin@ex.co.kr)

\*\*\*\*한국도로공사 서해대교관리소 과장 (E-mail : jazztruth@ex.co.kr)

를 살펴보고, 재구축된 서해대교 GNSS기반 모니터링시스템을 소개하고, 서해대교 사장교에서 측정된 GNSS 데이터를 이용하여 고유진동수를 추출하고, TDD(time domain decomposition)기법을 이용하여 최초로 GNSS 데이터에 대한 모드형상을 추출하는 과정을 소개하고자 한다. 참고로 비교적 많은 연구가 이뤄지고 있는 형상(또는 변위)에 대한 GNSS의 응용은 논하지 않고자 한다.

## 2. GNSS 개념 및 적용

### 2.1 GNSS 개요

GNSS는 미국의 GPS(global positioning system), 러시아의 GLONASS, 유럽연합의 장래 Galileo를 모두 포함한 위성측위기술이며, 정확한 위치를 알고 있는 인공위성에서 발신한 전파를 수신하여 관측점까지의 소요시간을 측정하므로서 관측점의 위치를 구하는 체계이다. 현재 가장 보편화된 체계가 GPS이기 때문에 용어 사용시 통상 GNSS보다는 GPS를 사용하고 있으며, 본 논문에서도 의미전달에 명확한 구분이 필요하지 않는 경우 GNSS와 GPS를 혼용하기로 한다.

교량의 형상 측정에 사용되는 센서로는 레이저변위계, 가속도계, 경사계, 광파측정기, GPS 수신기 등이 있다. 레이저 변위계는 레이저와 타겟을 이용하는 방식으로 통상 400 m 이내의 상대변위 측정이 가능하나, 안개와 같은 환경요인과 먼지 등의 오염원의 영향으로 측정 정밀도가 떨어지거나 측정이 제한될 수 있다. 가속도계는 측정된 가속도 신호를 시간에 대해 두 번 적분을 통해 변위 추정이 가능하나, 변위와 속도의 초기조건의 불확실성과 가속도에 포함된 저주파 대역 증폭 오차, 드리프트(drift) 등으로 인해 측정시간이 비교적 긴 교량에서는 장기적 활용성이 떨어진다. 경사계는 측정된 경사각을 변위로 환산할 수 있으나, 복잡한 구조계에서는 변위 환산식 산정이 어렵고 측정점간의 상대적인 변위 계산에 한정된다. 광파측정기는 기준점에서 타겟을 시준하여 1~2 km 이내의 절대변위 측정이 가능하나, 시준시 대기환경에 의한 오차가 발생할 수 있고 실시간 자동계측을 필요로 하는 모니터링시스템 적용에는 한계가 있다.

반면 GPS는 기존 센서의 이러한 한계를 상당부분 해결할 수 있다. 정적 및 동적 형상관리가 가능하고, 환경 영향이 적으며, 실시간 자동 관측이 가능하며, 3차원의 절대 변위를 얻을 수 있다. 또한 측정점간 정확한 동기화, 향상된 샘플링 비율(sampling rate), 장기적으로 안정적인 정밀도 등의 장점을 가지고 있다(Meng 등, 2009). 그러나 GPS 하드웨어 및 소프트웨어가 고가이며, 측정점 주위로 적어도 5개 이상의 위성이 적절히 분포되어야 측정 정밀도가 떨어지지 않으며, 수신기로부터 위성까지의 대류층 지연(tropospheric delay)이나 다중경로(multipath)에 의한 반사 등으로 인해 야기되는 오차가 발생하는 단점이 있다.

이러한 다양한 원인에 의한 오차를 줄여 정밀도를 높이기 위해 DGPS(Differential GPS)방식을 사용하며, 이는 이미 알고 있는 기지점 좌표를 이용하여 오차를 일으키는 요소들을 보정하고, 오차를 최대한 줄여서 보다 정확한 위치를 얻기 위한 방식이다. 교량은 적게는 수 mm 이내에서 크게는 수십 mm 이내에서 거동을 보이기 때문에 교량의 거동을 측

정하기 위해서는 높은 정밀도의 GPS 기술을 필요로 하며, 이를 위해 교량 인근에 안정적인 GPS 기준점(reference point)을 설치하고 교량의 주요 부위에 GPS 측정점(measuring point)을 설치하여 교량의 거동을 측정하는 방식을 채택하고 있다.

### 2.2 GNSS 적용 연구

국내 교량분야에서 GPS의 접목은 1990년대 후반에 들어서면서 기초적인 연구가 이뤄지기 시작하였다(박운용 등, 1998). 이후 위성측량을 이용한 교량경보 시스템 구축에 대한 연구에서는 GPS의 교량 활용가능성을 제시하였으며(이종출 등, 2001), GPS와 인터넷을 이용한 장대교량 모니터링시스템 개발에 관한 연구에서는 남해대교에 GPS 센서를 설치하여 인터넷이 연결된 곳에서 실시간으로 3차원 거동을 모니터링하도록 하였다(이호철 등, 2001). 이후 광안대교(박운용 등, 2003), 영종대교(배인환 등, 2007), 제2진도대교(신익순 등, 2008) 등에서 GPS를 이용한 단기 실험을 통해 교량의 변위거동을 분석하여 GPS의 정밀도를 검증하였다. 이와 같은 GPS 데이터의 검증 외에도 응용프로그램의 개발에도 연구가 진행되어 다수의 GPS 센서를 이용하여 실시간으로 교량의 전체적인 변위 및 지점별 변위를 분석할 수 있는 모니터링시스템을 개발하였다(최병길 등, 2008). 최근에는 자정식 현수교인 소록대교에 대하여 차량을 이용한 정·동적 재하 시험을 실시하고, 그 변위응답을 DGPS 기법으로 측정하고 레이저변위계의 측정 결과와 비교를 수행하였다(김형태 등, 2009).

이처럼 GPS를 이용한 교량의 정·동적 계측에 대한 지금까지의 선행연구는 모형을 통한 실험적 연구, 모니터링시스템 개발, 변위거동 측정 및 분석에 대한 분야를 중심으로 수행되었다. 하지만 교량의 유지관리 목적으로 GPS의 장기적 운용이나 교량의 동특성 분석에 대한 GPS의 활용 연구는 거의 없었다. GPS를 이용한 RTK(realtime kinematic) 측정기법으로 서해대교 사장교의 거동을 측정하고 이를 FFT 분석하여 한 개의 고유진동수를 추출하였으나(최연웅 등, 2009), 유한요소모델 해석결과와 가속도계에 의한 장기적인 계측결과(박종철 등, 2006)와 비교하면 20% 이상 차이가 나는 결과를 보였다.

국내 케이블교량의 유지관리를 위한 실제 적용은 영종대교와 서해대교가 처음이며 이제 도입단계에 불과하다. 영종대교는 자정식 현수교의 장기적인 거동 및 형상관리를 위하여 국내 최초로 GPS기반 모니터링시스템을 2008년 구축하였으며(배인환, 2008), GPS와 기존 레이저변위계의 결과 비교, 계절변화에 따른 형상변화를 분석하였다. 이를 통해 교량의 실시간 모니터링 및 형상관리가 가능함을 언급하였으며, 시스템의 안정화 및 주파수 분석을 위한 보완작업을 수행하고 있다(배인환, 2009). 서해대교는 GNSS기반 모니터링시스템을 2009년 구축하였으며, 재구축된 계측시스템과 연계하여 운영 중에 있다.

국외의 경우, GPS를 이용한 구조물의 동적 모니터링은 1990년대 중반에 시작되었다(Ogaja 등, 2007). 물론 댐이나 독같은 구조물의 변형을 측정하는 정적인 모니터링은 이보다 훨씬 앞서 수행되었다(DeLoach, 1989). 케이블교량에 있

어서는 영국의 Humber교에서 GPS를 이용한 모니터링이 처음 수행되었다(Ashkenazi 등, 1996). 이후 1990년대 말에 중국의 Tsing Ma교, Ting Kau교, Kap Shui Mun교는 상시 계측시스템의 한 부분으로 GPS를 적용하였으며(Wong 등, 2001), 현재 최장 현수교인 일본의 Akashi Kaikyo교도 GPS를 이용하여 교량의 거동을 모니터링하였다(Kashima 등, 2001). 2000년대 들어서는 케이블교량 건설이 활발한 중국을 중심으로 Jiangyin교, Runyang교, Donghai교, Sutong교, Stonecutters교 등에 GPS를 이용한 모니터링시스템이 적용되었으며, 미국의 Sunshine Skyway교는 2003년 기존 시스템을 개선하면서 GPS를 추가 설치하였다(Anderson 등, 2006). Donghai교의 경우, GPS 측정을 통해 태풍시 주탑의 변위가  $\pm 1\sim 3$  cm, 상시 온도변화에 의한 주경간 수직처짐량이 5 cm 정도임을 밝혀냈다(Wang 등, 2008).

이와 같이 국외의 경우도 국내와 마찬가지로 교량의 정·동적 변위거동 측정을 중심으로 GPS 연구가 수행되었으며(Meng, 2009), 교량의 동특성 분석에 대한 연구는 많지 않다. 44층 높이의 빌딩에 대한 모형실험으로 일부 고유진동수를 추출하여 고층건물이나 현수교에 적용 가능성을 보여주기도 하였으나, 이는 축소된 실험체에 대한 결과였다(Celebi, 2000). 중국의 현수교인 Humen교는 12개의 GPS 안테나를 주탑과 보강형에 설치하여 시간영역과 주파수영역 해석으로 0.5Hz이내의 7개 고유진동수를 추출하였다(Xu 등, 2002). 그러나 추출과정에 대한 구체적인 설명이 없고, 해석결과와의 비교나 모드형상 추출은 수행하지 않았다.

앞서 살펴본 바와 같이 국내·외의 GNSS 관련 연구는 교량의 변위형상 모니터링에 치중되어 있으며, 동특성에 대한 연구는 많지 않았다. 특히, 고유진동수의 추출에서도 일부 저차모드의 제한적 추출이었으며, 모드형상의 추출 및 분석을 다룬 연구는 없는 것으로 조사되었다.

### 3. 서해대교 GNSS기반 모니터링

#### 3.1 대상교량

본 연구의 대상교량인 서해대교 사장교는 총길이 7.31 km 인 서해대교 구간의 일부이며, 990 m의 5경간 연속교(60+200+470+200+60 m)로서 강합성형이며, 주경간 기준으로 인천대교 사장교에 이어 국내 두 번째 길이의 공용중인 사장교이다(그림 1). 보강형은 폭이 34 m이며, 두 개의 강형(steel girder)과 프리캐스트 콘크리트 바닥판으로 구성되어 있다. H형의 주탑은 높이 182 m이며, 사용 재료는 콘크리트이다. 케이블은 양쪽 주탑을 중심으로 부채꼴(fan) 모양으로 좌우로 배치되어 주탑과 보강형을 서로 연결하며, 사용된 케이블의 총 개수는 144본으로 길이가 54~247 m에 이른다. 케이블 한 개는 37~91가닥의 강연선(strand,  $\phi 5.7$  mm)으로 구성되며, 지름 18~28 cm의 고밀도폴리에틸렌관에 둘러싸여 외부환경으로부터 보호되어 있다.



그림 1. 서해대교 사장교 전경

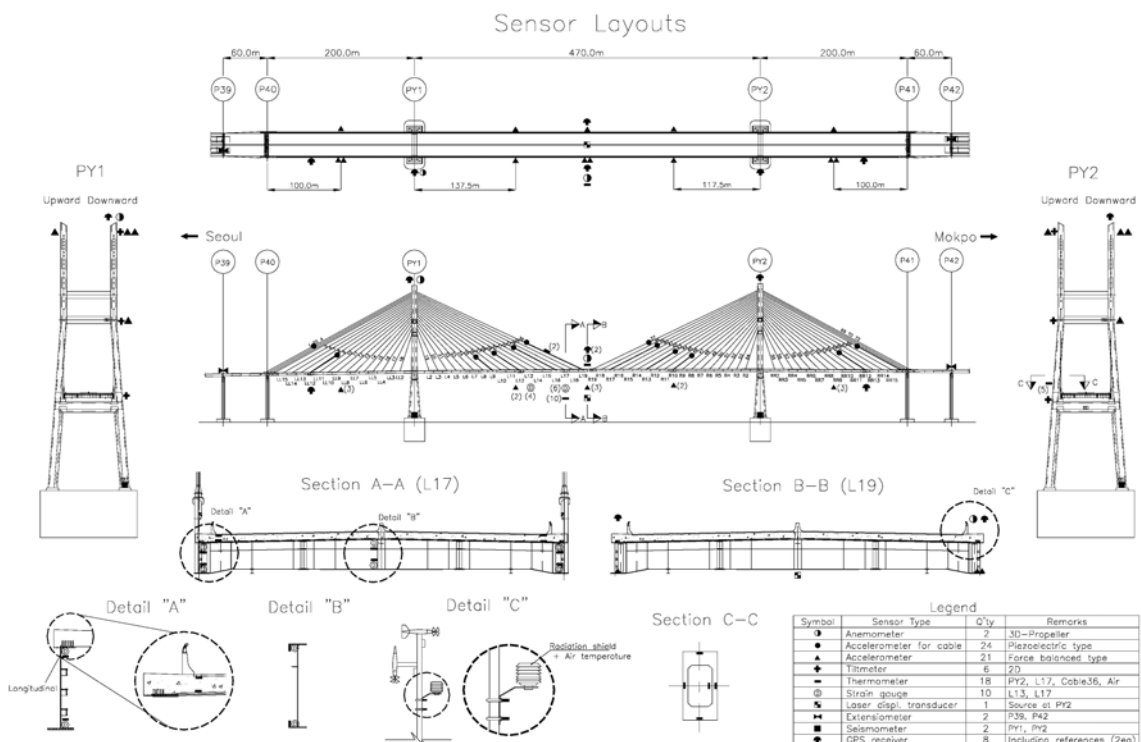


그림 2. 서해대교 사장교 계측센서 배치

### 3.2 GNSS기반 모니터링시스템

서해대교 개통과 더불어 운영을 시작한 계측시스템은 계측 기기와 통신장비의 노후화로 인하여 2008년과 2009년에 재 구축사업이 수행되었다. 재구축사업에서는 장기적인 관점에서 효율성이 떨어지는 센서는 줄이거나 제외하여 기존 190 여개의 센서를 94개 사장교 구간으로 줄여 설치하였다(그림 2). 그러나 그림 2에서 알 수 있듯이 8개의 GNSS 안테나를 활용한 모니터링 시스템을 새롭게 도입하였으며, 교량의 상시 응답에 영향을 미치는 가장 지배적인 요소가 온도와 같은 환경요소이기 때문에 이를 정확히 분석하기 위해 콘크리트 바닥판에 온도계를 추가 매설하였다.

양쪽 주탑 정부 하행측(NPWE, SPWE), 주경간 상판 상·하행측(MSEA, MSWE), 양쪽 측경간 상판 하행측(NSWE, SSWE)에 총 6개의 GNSS 측정점을 설치하였고, 사장교에서 서쪽으로 약 3.1 km 떨어진 서해대교관리소(Ref1)와 북동쪽으로 약 5.3 km 떨어진 서평택영업소(Ref2)에 총 2개의 기준점을 설치하였다. 또한 국토지리정보원에서 제공하는 총 44개의 GPS 상시관측망 중 서해대교와 인접한 인천, 수원, 천안, 서산 4개의 관측망을 활용하여 서해대교 GNSS 기준점의 위치 변동여부 및 위치 정확도를 확보하도록 하였다.

6개로 제한된 GNSS 측정점을 최대한 활용하기 위해 기존의 연구결과(박민석 등, 2007)를 이용하여 교량의 장·단기 거동 및 모드형상이 가장 잘 파악되는 곳을 설치위치로 선정하였다. 이로 인해 NSWE의 경우, 측경간장 200 m의 절반인 100 m 지점이 아니라 P40 교각에서 57 m 떨어진 위치에서 바닥판과 케이블 8번 정착구가 만나는 지점에 설치되었다. 이 지점은 여러 모드의 확인이 가능하고, 활하중에 의한 처짐이 가장 크며, 측경간 끝단과도 가까워 상부구조의 온도 신축거동을 분석하는데도 용이하다.

GNSS 안테나는 GPS, GLONASS, Galileo를 모두 지원하는 Zephyr Geodetic 2를 사용하고 있으며, GNSS 수신기는 RTK시 수평 ±10 mm+1 ppm RMS, 수직 ±20 mm+1 ppm RMS 성능을 가진 NetR5를 적용하였으며, 신호수집은 20 Hz를 기준으로 하고 있다. 서해대교 사장교의 형상관리를 위해서는 칼만필터(Kalman filter)를 적용하였다. 1960년대 초에 제안된 칼만필터는 잡음(noise)이 포함되어 있는 선형 역학계의 상태를 추적하는 재귀 필터로서 예측 분야에서 가장 널리 알려진 기법 중의 하나이다(Kalman, 1960). 본 연구에서는 동특성 분석을 목적으로 하므로 칼만필터가 적용되기 전의 데이터인 원시데이터(raw data) 3축 성분을 사

용하기로 한다.

## 4. 서해대교 GNSS 측정결과 분석

### 4.1 모드해석

서해대교 사장교의 모드해석을 위해 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS를 사용하여 3차원 업데이트 유한요소모델(updated finite element model)을 구성하였다. GNSS 안테나가 설치되어 있지 않은 사장교 양단의 60 m 접속경간은 경계조건이 힌지-롤러인 단순보이므로 모델링에서 제외하였다. 보강형, 가로보, 바닥판, 주탑은 3차원 보(beam) 요소로 모델링하고 사장재인 케이블은 인장력만을 받는 부재이므로 인장(tension-only) 트러스 요소로 모델링하였다. 모드해석 결과 중에서 대표적으로 1차 연직 휨모드( $f_{v1}$ )를 그림 3에 나타냈으며, 고유진동수를 4.2절의 표 1에 나타냈다.

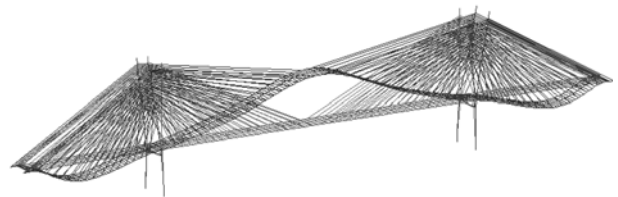


그림 3. 1차 연직 휨모드

### 4.2 고유진동수 추출

고유진동수 추출을 위한 GNSS 데이터로는 바람이 8.0~9.0 m/s로 비교적 센 2010년 3월 26일 16시부터 17시까지 20 Hz로 수집된 한 시간의 신호를 선택하였고, 이는 각 채널당 72,000개의 데이터를 의미한다. 각 GNSS 측정점에서 남북방향(N), 동서방향(E), 연직방향(Z)의 3개 성분을 얻을 수 있었으며, SSWE, SPWE, MSEA, MSWE, NPWE, NSWE의 순서로 총 18개 성분을 그림 4에 나타냈다. 수집된 GNSS 신호는 차량하중에 의한 처짐 영향이 지배적이고 잡음 성분과 초기 설정값을 포함하고 있기 때문에 정규화(normalizing)와 디지털 대역통과필터(band pass filter) 설계의 전처리과정을 거쳤다. 대역통과필터를 통해 관심영역인 0.15 Hz와 0.99 Hz내의 신호만을 추출하였는데, 이는 서해대교 사장교와 비슷한 경간장 400~500 m급 사장교의 첫 번째 고유진동수가 0.20 Hz 이상이었기 때문에 합리적인 범위라고 판단된다(박종철 등, 2005). 또한 통과필터에서 리플

표 1. 모드해석과 계측에 의한 고유진동수 비교

모드차수	해석모델 고유진동수 (Hz)	장기계측 <sup>1)</sup>		GNSS		가속도계	
		고유진동수 (Hz)	오차 (%)	고유진동수 (Hz)	오차 (%)	고유진동수 (Hz)	오차 (%)
1차 모드( $f_{v1}$ )	0.2654	0.2603	-2.0	0.2637	-0.6	0.2625	-1.1
3차 모드( $f_{v2}$ )	0.3292	0.3283	-0.3	0.3271	-0.6	0.3296	0.1
7차 모드( $f_{v3}$ )	0.4413	미저장	-	미추출	-	0.4578	3.6
9차 모드( $f_{v4}$ )	0.5371	0.5249	-2.3	0.5273	-1.9	0.5188	-3.5
11차 모드( $f_{v5}$ )	0.5968	미저장	-	0.5811	-2.7	0.5798	-2.9
13차 모드( $f_{v6}$ )	0.6319	0.6248	-1.1	0.6299	-0.3	0.6287	-0.5

주 1) 2001~2007.10까지의 평균값이며, 9차와 13차는 2004.1~2007.10까지의 평균값임

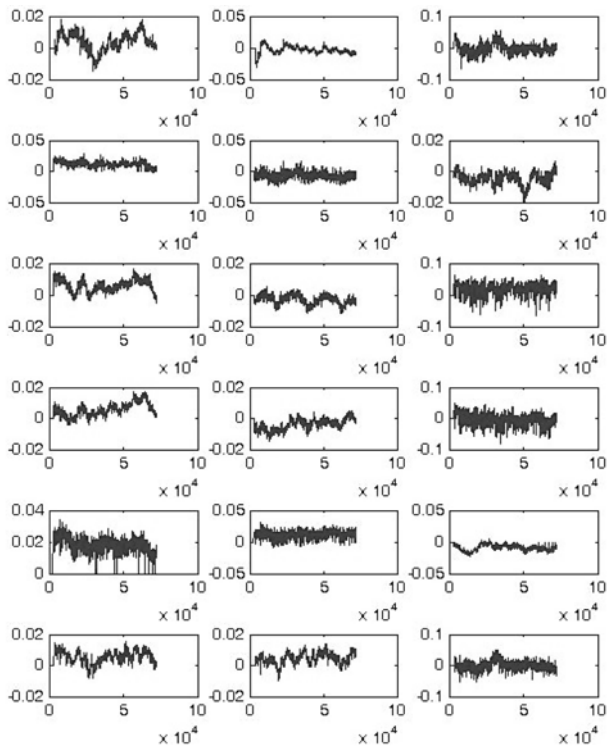


그림 4. GNSS 원시 데이터(단위 : m)

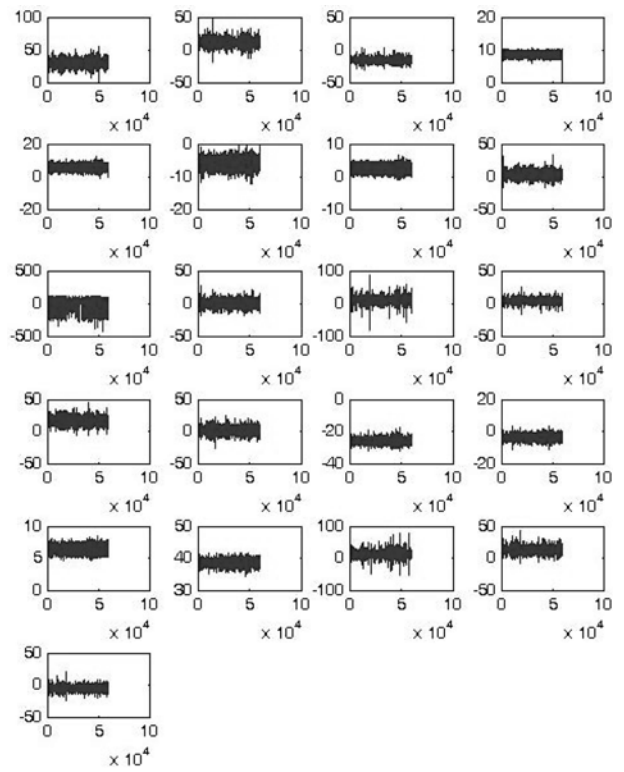


그림 6. 가속도 데이터(단위 : cm/sec<sup>2</sup>)

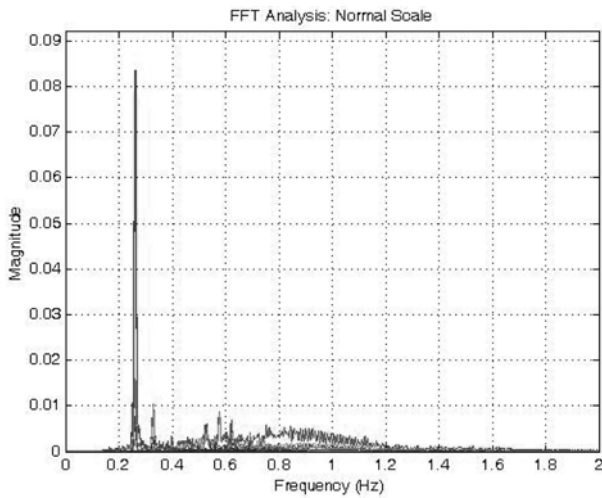


그림 5. GNSS 데이터의 FFT 결과

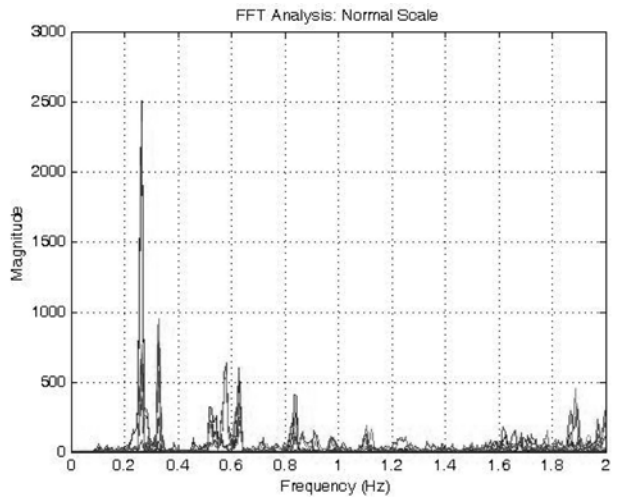


그림 7. 가속도 데이터의 FFT 결과

(ripple)이 가장 작은 버터워스(Butterworth) 3차 필터를 사용하였다.

푸리에 변환(Fourier transform)을 위한 가속도 신호를 얻기 위해 GNSS 신호를 이중 미분하였다. 이것은 변위는 스펙트럼의 낮은 주파수영역을, 속도는 중간 주파수영역을, 가속도는 높은 주파수영역을 잘 표현할 수 있기 때문이다. 변위와 가속도사이에는 주파수 제곱의 관계 때문에 높은 주파수에서는 가속도 신호가 두드러지는 것과 관련이 있다. 고유진동수 추출은 비교적 간단하고 빠른 연산기능으로 인하여 케이블교량의 모드변수 추출에 널리 적용되는 PP(peak picking)법을 사용하였다. 그림 5는 이중 미분을 통해 얻어진 18개의 가속도 성분에 대해 FFT(fast Fourier transform)를 수행한 결과를 중첩하여 나타낸 것이며, 0.2~0.7 Hz 사이에서 5개의 침두(peak) 주파수를 추출할 수 있었다.

GNSS 데이터를 이용한 FFT 결과의 정확성을 검증하기 위해 GNSS 데이터를 수집한 날의 동일한 시간대에 100

Hz로 수집된 10분 동안의 가속도 데이터를 분석하였다. 각 채널당 데이터 길이는 60,000개이다. 주탑과 보강형에 설치된 총 21개의 가속도계로부터 수집된 상시진동(ambient vibration) 신호를 그림 6에 나타냈다. 그림 7은 신호수집 이상이 발생한 9번 채널을 제외한 나머지 20개 가속도 성분에 대해 FFT를 수행한 결과를 중첩하여 나타낸 것이며, 0.2~2.0 Hz 사이에서 여러 개의 침두 주파수를 확인할 수 있다.

표 1은 GNSS와 가속도계의 FFT 결과를 비교한 것이며, 표 2는 이들의 신호처리 방법을 정리한 것이다. 또한 표 1에 업데이트된 유한요소모델의 해석결과와 기존 계측시스템에서 20분 단위로 자동 추출된 장기계측 결과를 함께 나타냈다. 각 열의 오차는 해석모델과의 차이를 나타낸 것으로 모드차수별로 오차가 -3.5~+3.6% 이내로 상당히 정확한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 오차원인으로는 실 교량과 해석모델 구현상의 차이, 측정시의 온도영향, 주파수 분해능

표 2. 신호처리 방법 비교

구분	장기계측	GNSS	가속도계
시간이력 길이(초)	600	3600	600
샘플링 주파수(Hz)	100	20	100
단일시간이력 데이터수	8192(=2 <sup>13</sup> )	4096(=2 <sup>12</sup> )	16384(=2 <sup>14</sup> )
조합(ensemble) 개수	8	18	4
주파수 분해능(Hz)	0.0122	0.0049	0.0061
창(window) 함수	Hanning	Hanning	Hanning

의 차이 등에 기인한다. 또한 GNSS와 가속도계간의 상대적 오차도 최대 1.6%이내여서 GNSS에 의한 고유진동수 추출이 정확히 이뤄졌음을 알 수 있다. 따라서 GNSS 신호에 대해 적절한 필터링 기법과 이중 미분을 적용하면, 다수의 고유진동수를 추출할 수 있음을 확인하였다.

### 4.3 모드형상 추출

PP법은 시간영역에서 수집된 가속도 신호를 푸리에 변환하여 주파수영역에서 고유진동수를 추출한다. 또한 주파수영역에서 전달함수, 위상함수, 코히런스(coherence)함수를 계산하여 모드형상을 찾게 된다. 따라서 모드변수 추출과정이 번잡하며, 케이블교량과 같이 많은 센서가 설치된 경우 실시간 신호처리 및 모드형상 구현이 어려운 단점이 있다. 반면 TDD기법은 푸리에 변환을 거치지 않고 시간영역에서 모드형상을 직접 추출하는 방법이므로 다수의 센서가 설치된 케이블교량에 적합할 수 있다(김병화 등, 2008a). 본 논문에서는 최초로 GNSS 데이터에 대해 TDD기법으로 서해대교 사장교의 모드형상을 추출하였으며, 선행 연구(박종철 등, 2006)와의 비교를 통해 정확성을 비교 검증하고자 하였다.

먼저 필터링 및 이중 미분하여 얻어진 가속도 신호의 파워스펙트럼밀도(power spectrum density)로부터 버터워스 필터링 대역을 선정하였다. 그런 다음 고유진동수가 존재하는 주파수영역대의 주파수성분만을 갖는 시간이력  $Y_i$ 를 구하고, 이를 통해 식 (1)로부터 에너지 상관행렬  $E_i$ 를 구하였다.

$$E_i = Y_i Y_i^T \quad (1)$$

다음으로  $E_i$ 의 특이치 재구성( $E_i = U \Omega U^T$ )을 수행하여 특이치벡터  $U$ 로부터 모드형상을 추출하였다. GNSS 안테나가 설치된 위치(●)·이해를 돕기 위해 P40, PY1, PY2, P41의 상관 위치도 ●로 표시.에서 추출된 5개의 연직 횡모드 형상과 모드해석의 결과(실선)를 그림 8에 나타냈다. 그림에서

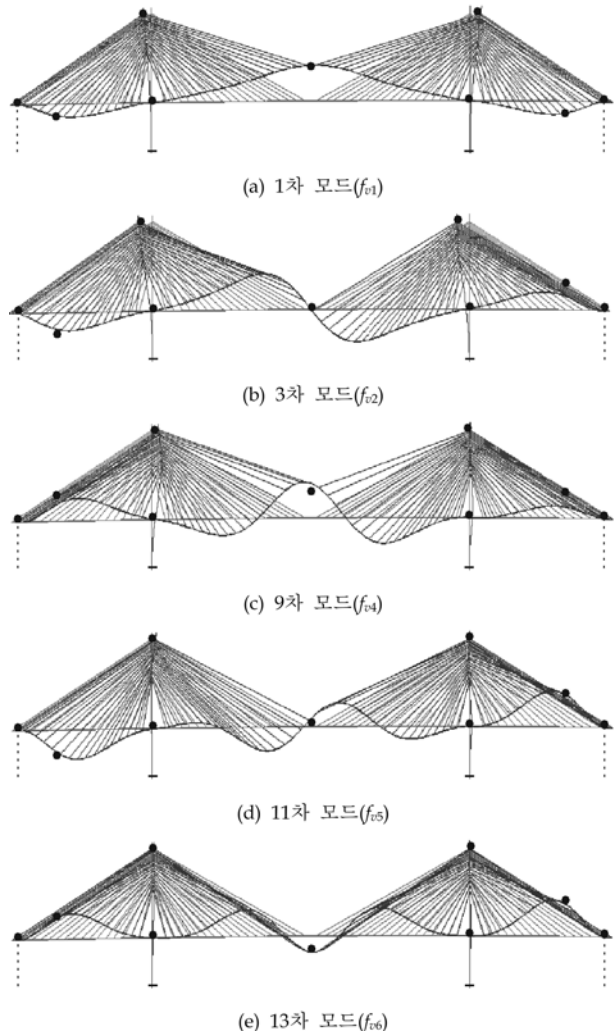


그림 8. 추출된 모드형상 비교

추출결과와 해석결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 참고로 7차 모드( $f_{v3}$ )는 침두 주파수가 낮아 추출되지 않았으며, 14차 이상의 고차모드는 제한된 측정점 개수로 인하여 분석에서 제외하였다.

모드형상의 추출정확도는 식 (2)와 같은 MAC(modal assurance criterion)값으로 확인할 수 있다(Ewins, 2000). MAC은 두 모드형상 사이에 기하학적 연관관계를 평가하며, 두 모드 간에 선형 종속관계가 성립하면 MAC값은 1에 근접하게 된다. 즉, 추출결과와 해석결과가 일치할수록 1에 가깝게 된다.

$$MAC(A, X) = \frac{|\{\psi_X\}^T \{\psi_A\}|^2}{(\{\psi_X\}^T \{\psi_X\})(\{\psi_A\}^T \{\psi_A\})} \quad (2)$$

표 3. 모드해석과 계측에 의한 MAC 비교

모드차수	해석모델 고유진동수 (Hz)	가속도계(선행연구)		GNSS	
		고유진동수 (Hz)	MAC	고유진동수 (Hz)	MAC
1차 모드( $f_{v1}$ )	0.2654	0.2625	0.987	0.2637	0.986
3차 모드( $f_{v2}$ )	0.3292	0.3235	0.955	0.3271	0.874
7차 모드( $f_{v3}$ )	0.4413	0.4517	0.532	미추출	-
9차 모드( $f_{v4}$ )	0.5371	0.5310	0.906	0.5273	0.871
11차 모드( $f_{v5}$ )	0.5968	0.5800	0.942	0.5811	0.900
13차 모드( $f_{v6}$ )	0.6319	0.6225	0.934	0.6299	0.989

여기서,  $\psi_A$ 는 계측된 모드벡터,  $\psi_A$ 는 해석적 모드벡터를 의미한다. 표 3에서 추출이 이뤄지지 않은 7차 모드를 제외하곤 모두 1에 근접한 결과를 보여 GNSS에 의한 모드형상 추출이 정확히 이뤄졌음을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문은 기존 계측시스템을 재구축하면서 새롭게 도입한 GNSS기반 모니터링 시스템을 이용하여 서해대교 사장교의 동특성을 분석하였다. 이상의 분석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. GNSS로부터 얻어지는 신호는 해당 측정점의 시간에 대한 변화량이기 때문에 사장교에서 측정된 GNSS 신호에는 상시 차량하중에 의한 처짐 성분이 지배적이며, 이외에도 다양한 오차 성분과 잡음 성분이 포함되어 있다. 따라서 서해대교 사장교의 GNSS 신호에 대해서는 이러한 영향을 줄이기 위해 정규화 과정과 대역통과필터를 사용하여 0.15~0.9 Hz 대의 관심영역 신호만을 분리해냈다. 또한 보다 높은 주파수영역을 분석하기 위해서 GNSS 신호를 이중 미분하여 가속도 데이터로 변환하였으며, 이를 통해 효과적으로 동특성 추출을 수행할 수 있었다.
2. 고유진동수 추출에 널리 사용되는 PP법을 이용하여 가속도로 변환된 GNSS 신호로부터 0.2~0.7 Hz 영역에서 5개의 침두 주파수를 추출할 수 있었다. 이를 유한요소모델에 의한 모드해석 결과, 계측시스템에 의한 장기계측 결과, 가속도계에 의한 동일 시간대의 가속도 계측 결과와의 비교를 통해 고유진동수 추출이 정확히 이뤄졌음을 확인하였다. 따라서 측정된 GNSS 신호에 대해 적절한 필터링 기법과 이중 미분을 적용하면, 다수의 고유진동수를 추출할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 기존 연구들의 교량 변위형상 분석에서 벗어나 다수의 모드변수를 찾아내는 동특성 추출영역까지 GNSS의 활용범위를 확장시키는 것으로서 본 연구의 의미있는 연구결과물이라 할 수 있다.
3. 실시간으로 시간영역에서 모드형상 추출이 가능한 TDD기법을 이용하여 가속도로 변환된 GNSS 데이터로부터 5개의 침두 주파수에 대한 모드형상을 추출할 수 있었다. 이를 유한요소모델에 의한 모드해석 결과 및 MAC의 비교를 통해 모드형상 추출이 정확히 이뤄졌음을 알 수 있었다. GNSS 신호에 대한 사장교 모드형상 추출은 본 연구에서 최초로 이뤄진 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 초장대교량사업단(08기술혁신E01)의 연구비지원 및 한국도로공사 서해대교관리소의 현장지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

김병화, 박민석, 이일근(2008) 서해대교 사장교의 동특성 추출 : I. 모드형상. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제5A호, pp. 631-639.

- 김병화, 박종철(2008) 서해대교 사장교의 동특성 추출 : II. 고유진동수와 감쇠비. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제5A호, pp. 641-647.
- 김형태, 서주원(2009) DGPS 기법을 이용한 지정식 현수교의 정동적 변위응답 측정 및 분석. **한국소음진동공학회논문집**, 한국소음진동공학회, 제19권, 제11호, pp. 1126-1132.
- 박민석, 이일근, 박종철, 장은석(2007) **케이블교량의 장기계측데이터 활용에 관한 연구**. 연구보고서, ST-07-09, 한국도로공사 도로교통연구원.
- 박운용, 장상규, 이현우, 김진수(2003) GPS와 가속도계를 이용한 거대구조물 모니터링. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 4287-4290.
- 박운용, 장상규, 정성모, 이홍규(1998) 실시간 동적 GPS 측위 기법에 의한 교량 거동의 모니터링. **대한토목학회 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, pp. 377-380.
- 박종철, 강행택, 박찬민(2005) 실적조사에 의한 사장교의 경향분석. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 1008-1011.
- 박종철, 박찬민, 김병화, 이일근, 조병완(2006) 장기계측에 의한 서해대교 사장교의 동특성 평가. **한국지진공학학회논문집**, 한국지진공학학회, 제10권, 제6호, pp. 115-123.
- 박종철, 임채운, 김홍배, 박찬민(2010) 서해대교의 유지관리. **한국전산구조공학회지**, 한국전산구조공학회, 제23권, 제1호, pp. 12-18.
- 배인환(2009) 지정식 현수교에 적용된 RTK GPS 기술, **특수교량 유지관리 기술세미나**, 한국도로공사 서해대교관리소.
- 배인환, 하강희(2008) GPS를 이용한 대형 케이블교량의 구조진도 모니터링. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 286-289.
- 배인환, 하강희, 함형진, 최인혁(2007) GPS를 이용한 장대교량의 거동측정에 관한 연구. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 1764-1767.
- 신익순, 김성곤, 손민철, 박희구(2008) GPS를 이용한 교량 모니터링 시스템 연구. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 2440-2443.
- 이종출, 박운용, 차성렬, 서동주(2001) 실시간 동적 GPS를 이용한 교량 경보 시스템 개발. **대한토목학회 학술발표회논문집**, 대한토목학회.
- 이호철, 윤홍식(2001) GPS와 Internet을 이용한 장대교량 모니터링 시스템 개발에 관한 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제21권, 제6D호, pp. 875-883.
- 최병길, 조광희, 나영우(2008) 장대교량의 거동분석을 위한 GPS 모니터링시스템 개발에 관한 연구. **한국지형공간정보학회논문집**, 한국지형공간정보학회, 제16권, 제3호, pp. 111-116.
- 최연웅, 장영운, 홍태화, 조기성(2009) 장대교량 수직변위 모니터링을 위한 GPS 적용 연구. **한국GIS학회지**, 한국GIS학회, 제17권, 제3호, pp. 301-307.
- Andersen, J.E. and Fustinoni, M. (2006) *Structural health monitoring systems*. COWI A/S, Denmark, pp. 54-56.
- Ashkenazi, V., Dodson, A.H., Moore, T., and Roberts, G.W. (1996) Real time OTF GPS monitoring of the Humber Bridge, *Surveying World*, Vol. 4, No. 4, pp. 26-28.
- Celebi, M. (2000) GPS in dynamic monitoring of long-period structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 20, pp. 477-483.
- DeLoach, S.R. (1989) Continuous deformation monitoring with GPS. *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 115, No. 1, pp. 93-110.
- Ewins, D.J. (2000) *Modal Test: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., Hertfordshire, England.
- Kalman, R.E. (1960) A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, Vol. 82, No. 1, pp. 35-45.
- Kashima, S., Yanaka, Y., and Mori, K. (2001) Monitoring the Akashi Kaikyo Bridge: First experiences. *Structural Engineer-*

- ing International*, Vol. 11, No. 2, pp. 120-123.
- Meng, X. and Huang, W. (2009) Global navigation satellite systems (GNSSs) for monitoring long suspension bridges. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons, United Kingdom, pp. 1169-1187.
- Ogaja, C., Li, X., and Rizos, C. (2007) Advances in structural monitoring with global positioning system technology: 1997-2006. *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 1, No. 3, pp. 171-179.
- Wang, Y.Q., Zhai, C.R., Zhang, Y.H., and Gao, W. (2008) A new GPS deformation monitoring algorithm applied to Donghai Bridge, *Journal of Shanghai Jiaotong University*, Vol. 13, No. 2, pp. 216-220.
- Wong, K.Y., Man, K.L., and Chan, W.Y. (2001) Monitoring hong kong's bridges: real-time kinematic spans the gap, *GPS World*, Vol. 12, No. 7, pp. 10-18.
- Xu, L., Guo, J.J., and Jiang, J.J. (2002) Time-frequency analysis of a suspension bridge based on GPS. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 254, No. 1, pp. 105-116.
- (접수일: 2010.4.22/심사일: 2010.6.23/심사완료일: 2010.6.23)