

연구논문

# 장대교량의 거동분석을 위한 GPS 모니터링시스템 개발에 관한 연구 Development of GPS Monitoring System for Behavior Analysis of Long Span Bridge

최병길\* · 조광희\*\* · 나영우\*\*\*

Choi, Byoung Gil · Cho, Kwang Hee · Na, Young Woo

### 要 旨

본 연구의 목적은 다수의 GPS 센서를 이용하여 장대교량의 거동을 실시간으로 모니터링 하여 분석 할 수 있는 시스템을 개발하는데 있다. 다수의 GPS 센서를 장대교량의 주요 지점에 설치하고 변위를 실시간으로 측정하여 전체적인 거동을 분석한다. 본 연구에서 개발한 거동분석시스템은 교량의 전체적, 지점별 변위정보를 수치화, 시각화하고 이벤트에 대해 능동적인 대응이 가능하며 측정데이터의 DB화를 통해서 거동분석에 관계된 통계정보를 산출할 수 있다.

**핵심용어 :** 다수의 GPS, 장대교량, 거동분석시스템

### Abstract

This study aims to develop a system which is able to monitor and analyze behavior of long span bridge in real time using multiple GPS. Through setting up many GPS at the important points of long span bridge and measuring displacement in real time, over all behavior of bridge could be analyzed. Behavior analyzing system developed in this study is able to digitize and visualize the overall and points displacement of bridge and deal with events actively. Also it is able to calculate statistical data related to analyze behavior through the constructing a database of measuring data.

**Keywords :** Multi GPS, Long span bridge, Behavior Analysis System

## 1. 서 론

본 연구에서는 다수의 GPS 센서를 장대교량의 주요 지점에 설치하여 실시간으로 거동을 측정함으로써 장대교량의 순간적인 변위는 물론 장기간의 거동까지 모니터링 할 수 있는 거동분석시스템을 개발한다. 장대교량의 거동분석을 위한 기존의 계측시스템은 변형율계, 가속도계 등의 센서를 이용하였는데, 이 방법은 교량의 순간적인 미세변위를 정밀하게 관측할 수 있었지만 교량의 전체적인 거동을 파악하기 위해서는 복잡한 분석과정을 거쳐야 했다.

다수의 GPS 센서를 이용한 교량의 거동분석시스템은

교량의 장기적인 거시적 거동을 분석할 수 있으며 국내 외의 학계 및 업계에서 다수의 실험을 통해 장대교량과 같이 변위가 큰 시설물의 경우 허용되는 범위 내에서 변위를 관측할 수 있음을 입증한 바 있다.

이호철 외 1인의 “GPS와 인터넷을 이용한 장대교량 모니터링시스템 개발에 관한 연구(2001)”와 박운용 외 3인의 “실시간 동적 GPS 측위기법에 의한 교량 거동의 모니터링(1998)” 연구에서는 장대교량인 남해대교에 GPS 센서를 설치하여 교량의 거동 모니터링에 관한 연구를 수행 하였다. 이러한 연구들은 GPS 센서 1대를 현수교 상판의 중앙부에 설치하고 하중에 의한 교량의 변위를 측정하는데 한정되었다. 배인환 외 3인의 “GPS를 이용한

2008년 8월 22일 접수, 2008년 9월 19일 채택

\* 정희원 · 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 교수 (bgchoi@incheon.ac.kr)

\*\* 교신저자 · 정희원 · 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 연구교수 (raphael@incheon.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 인천대학교 공과대학 토목환경시스템공학과 박사과정 (survey@incheon.ac.kr)

장대교량의 거동 측정에 관한 연구”에서는 GPS 센서와 레이저 처짐계, 광파기에 의한 처짐측정을 통하여 cm 수준의 일치하고 있음을 나타내고 있다. 이러한 연구들을 통해 GPS 센서를 이용하여 교량을 실시간으로 모니터링 하는 것이 가능하다는 것을 기술적으로 입증하고 있다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 다수의 GPS 센서를 이용하여 장대교량의 거동을 실시간 모니터링하고 분석하는 시스템을 개발 하고자 한다.

## 2. 장대교량의 거동분석 시스템

### 2.1 거동분석 시스템 구축방안

GPS 센서를 이용한 장대교량의 거동분석 시스템은 계측부문, 통신부문, 관제부문에 나눌 수 있으며, 계측부문의 GPS 센서에 대한 기본 사양은 L1/L2 code/phase를 모두 수신이 가능하여야 하며 초당 20회(20Hz)의 관측이 가능한 고정밀의 RTK-GPS 센서를 사용하도록 설계하였

다. GPS 센서가 설치될 위치는 변위측정의 안정성과 정확성을 극대화할 수 있으면서 설치가 용이하고 교량의 형상관리나 구조해석에 필요한 경계조건에 해당되는 지점에 설치할 수 있도록 설계하였다. 또한, 상시전원공급 장치는 교류를 직류로 변환하는 장치와 12V 충전 시스템으로 설계하였다. 통신부문에서는 실효전송속도가 20Mbps, 통신반경이 30-40km 이상의 성능을 갖는 무선통신 시스템으로 설계하였다. 관제부문은 통신시스템, 거동분석시스템으로 구성되며 다수의 GPS 센서로부터 전송되는 측정데이터를 분석하고 저장하기 위한 시스템으로 다수의 GPS 센서로부터 전송되는 다량의 정보를 처리할 수 있도록 설계하였다. 다음 그림 1은 본 연구에서 개발하는 시스템의 전체 구성도를 나타내고 있다.

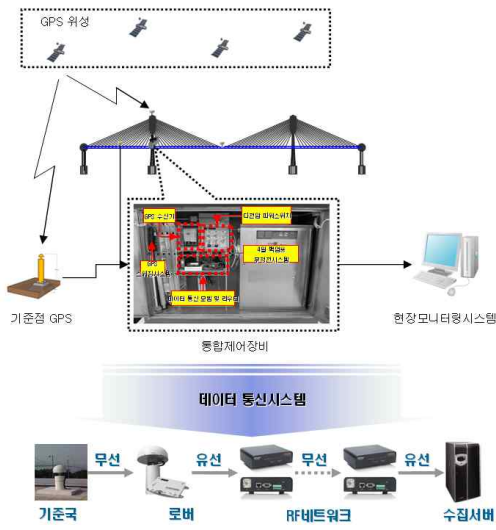
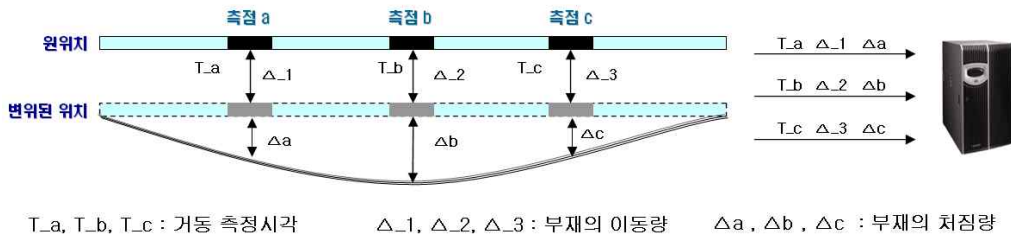


그림 1. 시스템 구성도

### 2.2 교량의 거동측정에서 GPS 센서의 장점 분석

교량의 전체적인 거동분석을 위해서는 센서가 설치된 지점의 변위와 센서가 반응한 시각정보가 필요하다. 변위는 부재 전체의 이동량과 부재의 처짐량을 3차원으로 측정한 절대변위를 의미하고 시각정보는 센서들이 반응한 시각의 동기화가 이루어진 시각정보를 의미한다. 교량의 전체적인 거동분석을 위해서 센서가 전달해야 하는 정보를 표현하면 그림 2와 같으며 부재의 이동량과 처짐량의 측정가능성과 센서의 시각동기화라는 기준으로 볼 때 기존 계측기와 GPS를 비교하면 표 1에서와 같이 GPS가 거의 완벽한 시각동기화를 이루면서 부재의 절대변위를 관측할 수 있는 것을 알 수 있다. 표 1은 장대교량의 변위측정 센서의 측정값 및 시각동기화에 대한 특징을 나타낸 것이다.

교량의 형상관리, 구조해석을 위한 교량의 전체적인 변위측정에서 GPS 센서는 경사계, 변형율계, Total-Station 등 기존 계측기의 한계를 벗어난 지점, 즉 발생하는 변위의 크기가 계측기의 관측범위를 초과하거나 계측기가 근본적으로 관측할 수 없는 지점과 측정지점들간의 관측시각을 정확히 동기화 시켜야 하는 지점의 변위관측에 큰 장점을 갖고 있다.



T<sub>a</sub>, T<sub>b</sub>, T<sub>c</sub> : 거동 측정시각      Δ<sub>1</sub>, Δ<sub>2</sub>, Δ<sub>3</sub> : 부재의 이동량      Δ<sub>a</sub>, Δ<sub>b</sub>, Δ<sub>c</sub> : 부재의 처짐량

그림 2. 시스템 구성도

표 1. 장대교량의 변위측정 센서의 측정값 및 시각동기화

구 분	측정값	시각동기화	특징
경사계 변형율계 등	$\Delta a, \Delta b, \Delta c$	서버시계 동기화	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ <math>\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3</math> 측정불가</li> <li>■ <math>T_a, T_b, T_c</math>의 동기화 불확실 (데이터 전송시간 차 발생)</li> <li>■ 1차원 측정값</li> </ul>
Total-Station	$\Delta a, \Delta b, \Delta c$ $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$	거의 불가능	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 변위가 큰 경우 측정불가 또는 TS 의 시스템변수 재설정</li> <li>■ 3차원 측정값</li> </ul>
GPS	$\Delta a, \Delta b, \Delta c$ $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$	$10^{-9}$ 초의 정확도	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 변위의 크기에 상관없이 절대변위측정</li> <li>■ <math>T_a, T_b, T_c</math>의 완벽한 동기화 (데이터 전송시간 차와 상관없음)</li> <li>■ 3차원 측정값</li> </ul>

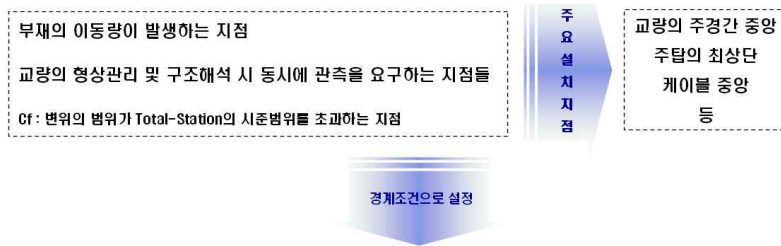


그림 3. 교량의 거동측정을 위한 GPS 센서와 타 계측기의 설치위치

2.3 GPS 센서의 설치지점 선정

GPS 센서가 설치될 지점은 부재의 이동량이 발생하는 지점, 교량의 형상관리 또는 구조해석 시 동시에 관측을 요구하는 지점 등이다. 교량의 경우 특수교인 현수교와 사장교의 주경간 중앙, 주탑의 최상단, 케이블 등이 이에 속한다. 이들 지점의 절대변위는 구조물의 형상관리, 구조해석 시 경계조건으로 사용되며, 타 계측기의 측정치와 조합할 경우 특정시각에 교량의 형상을 보다 객관적으로 재현할 수 있다. 그림 3은 현수교나 사장교와 같은 특수교량을 모니터링하기 위한 타 계측기와 GPS 센서의 일반적인 설치지점을 나타내고 있다.

2.4 장대교량의 거동분석을 위한 GPS 모니터링 시스템 설계

장대교량의 거동을 분석하기 위한 GPS 모니터링 시스템은 그림 4와 같이 GPS 센서와 타 계측기의 정보를 조합하여 이루어진다. 그림 4와 같은 시스템에서 GPS 센서의 역할은 측정지점의 변위를 20Hz의 빈도로 항상 모니터링하고 비정상적인 이벤트나 관리자의 요구 시 주경간

중앙의 3차원 절대변위 및 상판의 수직/수평 비틀림, 주탑의 3차원 절대변위를 제공하며 교량에 설치된 각 종 센서의 시각을 동기화시키는데 필요한 정확한 시각정보를 제공한다.

3. 장대교량의 거동분석을 위한 GPS 모니터링 시스템 개발

3.1 GPS 데이터수집 프로그램 개발

본 연구에서 개발한 GPS 데이터수집 프로그램은 데이터로거 및 포트설정, 변위측정데이터의 분리 저장, NMEA 데이터 분석 및 좌표변환, 변위측정데이터의 DB화 기능을 가지고 GPS에서 전달되는 측정데이터를 안정하게 수집토록 설계하였다. 그림 5는 데이터로거 및 포트설정 화면을 나타내고 있다.

그림 6은 변위측정데이터를 지점별로 분리 저장하는 화면을 나타내고 있다. 그림 7은 NMEA 데이터 분석 및 좌표변환 모듈들의 코드를 나타내고 있다. 그림 8은 변위측정데이터의 DB화 화면을 나타내고 있다.

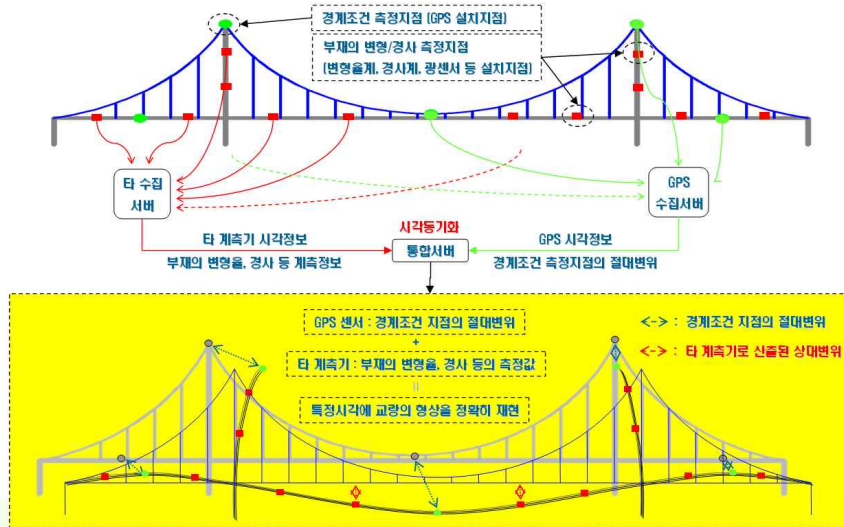
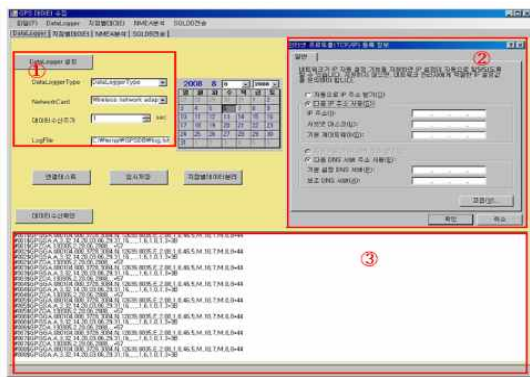


그림 4. 장대교량의 거동분석을 위한 GPS 모니터링시스템 개념설계



① : 데이터 로거 설정 ② : TCP/IP 설정 ③ : 수신데이터 확인

그림 5. 데이터로거 및 포트 설정 화면

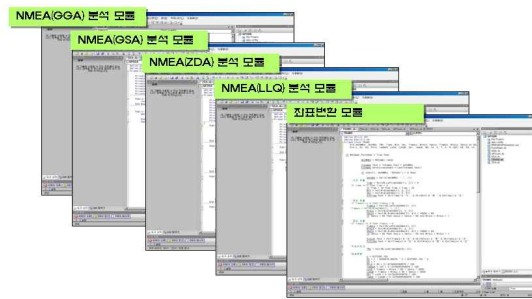
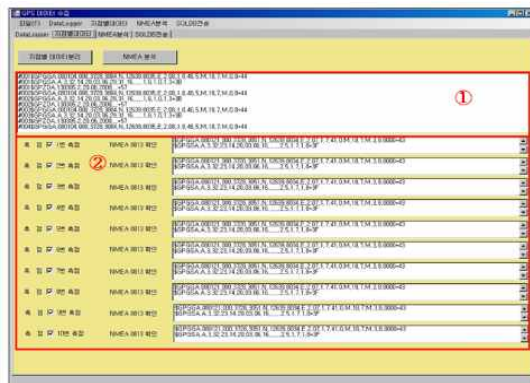
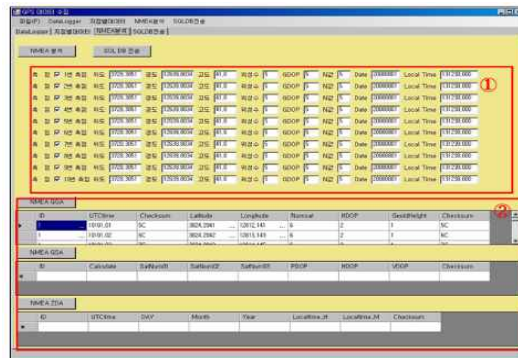


그림 7. NMEA 데이터 분석 및 좌표변환



① : 수신데이터 확인 ② : 지점별 데이터 분리 ③ : 수신데이터 확인

그림 6. 지점별 데이터 분리저장



① : NMEA 분석데이터 ② : 분리된 NMEA의 DB화

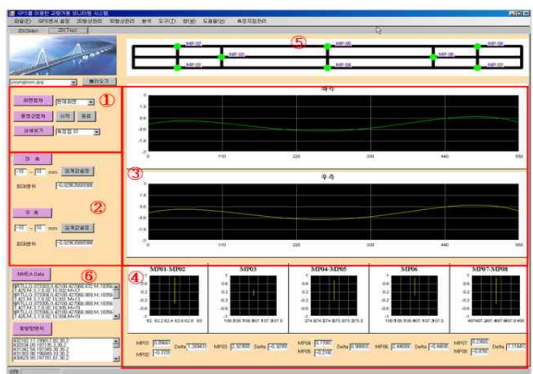
그림 8. 변위측정데이터의 DB화





①: 현재화면출력 및 지점별 상세보기 ②: 지점별 임계치(허용오차)설정  
 ③: 교량의 좌우의 수직거동을 1초단위로 모니터링 ④: 수직비틀림 및 수직변위  
 ⑤: GPS 설치위치 및 시공도면 ⑥: 거동측정데이터

그림 9. 교량 수직방향 모니터링



①: 현재화면출력 및 지점별 상세보기 ②: 지점별 임계치(허용오차)설정  
 ③: 교량의 좌우의 수평거동을 1초단위로 모니터링 ④: 수평비틀림 및 수평변위

그림 10. 교량 수평방향 모니터링



①: 지점선택 ②: 불안정 측정데이터 소거 및 추세선 생성  
 ③: 필터링 범위설정(관측위성수, 모호정수 상태, GDOP/HDOP) ④: 20Hz 변위그래프

그림 11. 지점별 상세거동 모니터링

3.2 장대교량 거동분석 모니터링 프로그램 개발

장대교량의 거동분석을 위한 GPS 모니터링 시스템은 교량의 수직방향과 수직방향의 모니터링, 지점별 GPS 센서의 변위에 대한 모니터링, 지점별 한계값 초과구간에 대한 모니터링, 시간별 한계값 초과구간에 대한 모니터링, 지점별 최대변위 발생에 대한 모니터링 으로 구성된다. 각 기능별 화면 및 시뮬레이션 결과를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 2D(SIDE) 분석

2D(SIDE) 분석에서는 교량의 전체적인 거동을 수직방향으로 수치화/시각화한다. 현재 화면출력 및 지점별 상세보기가 가능하며 지점별 임계치(허용오차)를 설정할 수 있다. 교량 좌우의 수직방향에 대한 전체적인 거동을 1초단위로 형상화하였으며 경간 중앙에 설치된 GPS 센서를 통해 수직비틀림 정보를 산출하고 주탑 상단에 설치된 GPS 센서를 통해 주탑의 수직변위량을 산출한다.

(2) 2D(TOP) 분석

2D(TOP) 분석에서는 교량의 전체적인 거동을 수평방향으로 수치화/시각화한다. 현재 화면출력 및 지점별 상세보기가 가능하며 지점별 임계치(허용오차)를 설정할 수 있다. 교량 좌우의 수평방향에 대한 전체적인 거동을 1초단위로 형상화하였으며 경간 중앙에 설치된 GPS를 통해 수평비틀림 정보를 산출하고 주탑 상단에 설치된 GPS 센서를 통해 주탑의 수평변위량을 산출한다.

(3) 지점별 상세거동분석

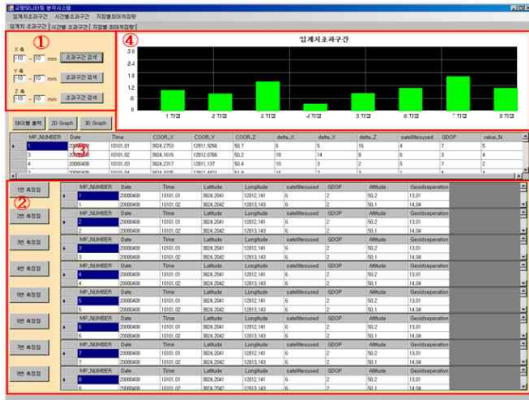
지점별 상세거동분석은 2D(SIDE) 분석과 2D(TOP) 분석 메인화면에서 지점별 상세보기를 선택할 경우에 해당 지점의 변위데이터를 0.05초단위(20Hz)로 나타내며 측정당시 위성수, GDOP(HDOP), N치(모호정수 결정여부) 등을 기준으로 불안정한 변위측정데이터를 필터링한다.

(4) 한계값 초과구간 분석

지점별로 한계값 초과구간 분석은 한계값 초과 발생시 교량의 전체적인 형상을 분석하는 것으로 한계값을 초과한 지점의 변위와 당시 타 지점의 변위정보를 제공한다. 지점별로 한계값이 초과한 시각의 정보를 변위와 함께 누적하여 저장하며 교량의 전체적인 형상을 2D 기반으로 그래픽 처리하고 3축방향의 변위정보와 측정당시 위성수, GDOP 등의 정보를 제공한다.

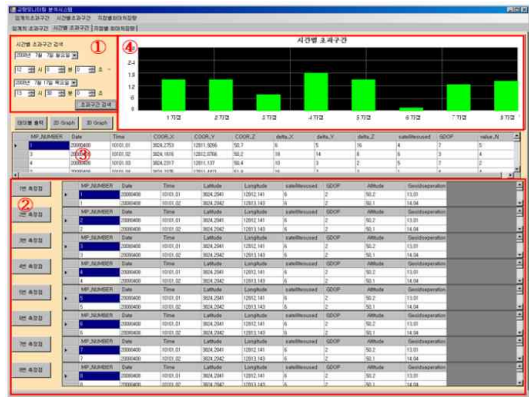
(5) 시간별 변위분석

시간별 변위분석은 관리자가 정의한 시간에 교량의 형



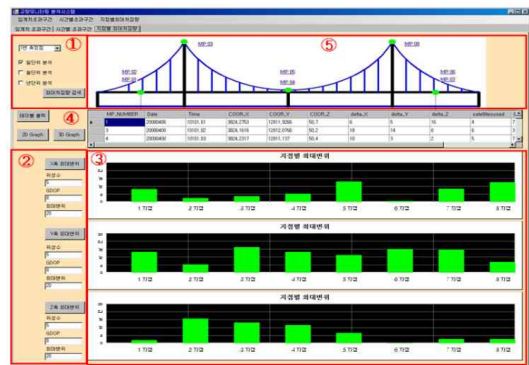
① : 입계치 설정 ② : 지점별 입계치 초과데이터, ③축 변위/GPS 부가정보  
 ④ : ②의 입계치 선택시 타 지점의 변위측정데이터(2D그래프지원, 출력지원)  
 ⑤ : ③의 히스토그램

그림 12. 한계값 초과구간 분석화면



① : 검색시간 설정(초단위) ② : 지점별 검색시간 측정데이터(③축 변위, GPS 부가정보)  
 ④ : 선택 시간에 교량의 전체적인 변위정보(동영상/2D그래프 등) ⑤ : ③의 히스토그램

그림 13. 시간별 변위분석 메인화면



① : 지점설정, 일/월/년 주기설정 ② : 측정당시 GPS 부가정보 ③ : 선택지점의 최대변위 발생시 타 지점의 변위정보 (③축 방향 분석) ④ : ③의 수치화/시각화 (2D 그래프, 데이터출력)

그림 14. 지점별 최대변위량 분석화면

상을 분석하는 것으로 검색시간을 설정하고 선택된 시간에 교량의 전체적인 변위를 연속적인 화면으로 제공한다.

(6) 지점별 최대변위량 분석

지점별 최대변위량 분석은 관리자가 일/월/년으로 정해진 시간동안 선택된 지점에서 발생한 최대변위를 검색하며 최대변위가 발생된 당시 타 지점의 변위정보와 전체적인 교량의 형상을 2D 기반으로 재현한다.

본 연구에서 개발한 거동분석 시스템은 교량의 전체적, 지점별 변위정보를 수치화, 시각화하며 이벤트에 대한 능동적인 대응이 가능하고 측정데이터의 DB화를 통해서 변위분석에 관계된 통계정보를 산출할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 다수의 GPS 센서를 이용하여 장대교량의 거동을 실시간 모니터링하고 분석할 수 있는 시스템을 개발하였다. 데이터 수집 프로그램을 이용하여 다수의 GPS 센서가 획득한 측정데이터를 지점별로 분리하여 데이터베이스화할 수 있었고, 거동분석 시스템을 이용한 시뮬레이션을 통하여 교량의 전체적인 변위 및 지점별 변위를 수치화, 시각화하고 분석할 수 있었다. 본 논문에서 개발된 시스템은 현장에 적용하여 기존 계측기와의 연동 및 비교분석에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발한 시스템은 장대교량의 거동 모니터링 및 분석에 활용하여 국가주요시설물의 안전관리 및 유지관리 업무에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 건설기술혁신사업인 “GPS 센서를 이용한 시설물거동 모니터링 및 분석 기술 개발 연구” 과제의 성과 중 일부로서 연구를 지원해주신 국토해양부에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박민석, 김성근, 장정환, 서해대교 교량계측 모니터링시스템 개발, 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 2000 No. 1, 대한토목학회, 2000.
2. 박홍석, 교량구조물의 상시계측 시스템, 소음진동 Vol. 10 No. 6, 한국소음진동공학회, 2000.
3. 윤석구, 교량모니터링 시스템의 적용성 분석, 대한토목학회 학술발표회 논문집, Vol. 2000 No. 1, 대한토목학회, 2000.
4. 이호철, 윤홍식, GPS와 인터넷을 이용한 장대교량 모니터링시

- 스텝 개발에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, Vol. 21 No. 6, 대한토목학회, 2001.
5. 배인환, 하강혁, 함형진, 최인혁, GPS를 이용한 장대교량의 거동측정에 관한 연구, 2007 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, 2007.
  6. Frees, E.W., Data Analysis Using Regression Models, Prentice Hall, 1996.
  7. Henderson, D.W., Differential Geometry - a Geometric Introduction, Prentice Hall, 1998.
  8. Hoffmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., Global Positioning System Theory and Practice 4th revised edition, Springer Wein NewYork, 1997.
  9. Leick, A., GPS Satellite Surveying, John Wiley & Sons, 1990.
  10. Logsdon, T., The Navstar Global Positioning System, Van Nostrand Reinhold, 1992.
  11. McLeod, R.J.Y. and Baart, M.L., Geometry and Interpolation of Curves and Surfaces, Cambridge University Press, 1998.