

# 장대교량 수직변위 모니터링을 위한 GPS 적용 연구

최연웅\* · 장영운\*\* · 홍태화\*\*\* · 조기성\*\*\*\*

## Motion Monitoring of Long Span Bridge using GPS

Yun-Woong Choi\* · Young-Woon Jang\*\* · Tae-How Hong\*\*\* · Gi-Sung Cho\*\*\*\*

### 요약

최근 PSC 교량, 사장교, 현수교 등 중·장기간 교량의 건설이 증가하고 있으며 이러한 장대교량의 안정성 및 사용성 확보를 위하여 장대교량의 계측 및 모니터링을 통한 손상도 및 안전도 평가에 보다 많은 관심과 연구개발이 집중되고 있으나 인류의 경험과 이론의 지속적인 발전에도 불구하고 교량구조물의 실제 거동을 예측하고 안전성을 평가하는 것은 현재까지도 쉽지 않은 일이다. 본 연구에서는 GPS를 이용한 RTK 측정기법에 의하여 장대교량의 거동을 측정하고 기설된 교량의 모니터링 계측치를 비교 분석함으로써 GPS를 이용한 교량의 거동분석의 적용가능성 및 신뢰성 확보가능 여부를 파악하고자 하였다.

**주요어** : GPS, 장대교량 거동, 모니터링

**ABSTRACT** : Recently, the various studies has been focused on evaluating the damage and stability of long span bridge through measuring and monitoring to ensure the stability and usability. But, even if various studies are performed, it is hard to predict and evaluate the real motion of structure. The aim of this study is check the application of GPS to the motion monitoring of long span bridge by comparing data acquired form RTK-GPS and laser displacement meter.

**Keywords** : GPS, Long span bridge, Monitoring

### 1. 서론

교량은 고대로부터 발전해온 구조물의 설계, 시공 및 안전에 관한 과학기술을 함축적으로 적용한 대표적 토목구조물로서 최근 중·장기간 교량의 건설이 증가하고 있으며 이러한 장대교량의 안정성 및 사용성 확보를 위하여 장대교량의 손상도 및 안전도 평가에 보다 많은 관심과 연구개발이 집중되고 있다. 그러나, 인류의 경험과 이론의 지속적인 발전에도 불구하고 교량구조물의 실제 거동을 예측하고 안전성을 평가하는 것은 현재까지도 쉽지 않은 일이다.

현재 구조물의 계측이나 모니터링은 소규모 구조물의 경우 재하시험을 수행하거나 특수교량 및 초고층 빌

딩과 같은 대형 구조물의 경우 시공 시 교량 내부에 가속도계, 응력계, 침하계, 변위계 등의 다수의 계측장비를 내부에 삽입하여 설치함으로써 우선으로 직접 데이터를 입력받는 방법 등이 사용되고 있다. 그러나, 재하시험의 경우 많은 인력과 비용이 소요되어 수시 계측작업을 수행하기 어렵고 계측시 교통 통제 등이 필요하기 때문에 교량의 사용성을 제약해야하며, 다수의 계측장비를 삽입하여 계측하는 경우 구조물의 순간적인 미세변위를 정밀하게 관측할 수 있으나 복잡한 분석과정이 필요하며 내부 게이지의 파손시 계측장비의 유지관리에 어려움이 있다. 반면 GPS는 SA(selective availability) 해제 이후 GPS를 이용하여 수 mm 정도의 정밀도로 위치측정이 가능해지면서 지각, 단층 등의 자연물은 물론 가스시설, 교량, 댐 등 각종 인공구조물의 미세변위를

\*전북대학교 공과대학 토목공학과 겸임교수(choiyun@chonbuk.ac.kr)

\*\*교신저자, 전북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정(cloud311@chonbuk.ac.kr)

\*\*\*전북대학교 공과대학 토목공학과 박사과정(cloud311@chonbuk.ac.kr)

\*\*\*\*전북대학교 공과대학 토목공학과 교수(gscho@chonbuk.ac.kr)

관측하고자 하는 노력이 계속되고 있으며 특히, 구조물의 계측시스템으로 GPS를 이용하는 경우 다수의 계이지를 내부에 설치하는 방법에 비해 경제적으로 유리하며 수시로 원하는 위치에 설치가 가능하다는 장점이 있다(이호철 등, 2001; 신상철 등, 2001; 노태호, 2003, 이윤욱 등, 2007).

이와 관련하여 이진덕(1998)은 GPS관측기법별로 흙댐 구조물의 변형량을 측정하여 그 이용 가능성을 제시하였으며, 배상호(2000)는 수치근접사진측량기법을 이용, 효율적인 교량의 하중변화에 따른 3차원 변위 데이터 도출을 모색함으로써 구조물의 안전진단은 물론 순간 변형 및 거동해석, 정밀 측정을 요하는 각종 산업분야에의 폭넓은 응용가능성을 제시하였다. 이종출 등(2001)은 위성측량을 이용하여 교량경보 시스템 구축을 연구하여 교량경보시스템 구축에 GPS측량기법의 활용 가능성을 제시한 바 있으며, 이호철 등(2001)은 GPS와 Internet을 이용한 장대교량 모니터링시스템 개발에 관한 연구를 통하여 GPS를 이용하여 장대교량의 거동 자료를 취득하고 자료를 인터넷 전송을 통하여 교량의 거동을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발하였고 임현표(2002)는 위성측량을 이용한 구조물 변위 정보 시스템을 개발하였으며, 노태호 등(2003)은 GPS를 이용한 구조물 변위관리 시스템을 개발하였다. 또한 김형규(2007)는 교량 모니터링을 위한 위성위치정보시스템의 적용성 연구를 통하여 모형교량을 제작하고 기존 모니터링 방식과 GPS를 동시에 설치하여 정적, 동적 실험을 수행함으로써 GPS의 설치 용이성 및 오차 등을 분석하고 효율성을 검증하였으며 배인환 등(2008)은 GPS와 다양한 계측센서를 이용한 계측 모니터링 시스

템을 이용하여 교량의 구조적 거동을 분석하는 등 최근 변형모니터링에 GPS기법을 이용하기 위한 다양한 연구들이 꾸준히 진행되어 왔다.

그러나 대부분의 선행연구에서는 GPS를 이용한 모니터링 시스템 개발에 치중하고 있으며 본 연구에서는 GPS를 이용한 RTK 측정기법에 의하여 장대교량의 수직변위를 측정하고 교량에 기설된 매립형 계측센서로부터 취득된 교량의 모니터링 계측치를 기준으로 GPS 관측값을 비교 분석함으로써 GPS를 이용한 교량의 거동분석의 적용가능성 및 신뢰성 확보가능 여부를 파악하고자 하였다.

## 2. 구조물 관측 및 분석

### 2.1 적용대상 교량 및 관측장비 제원

본 연구에서는 총길이 7,310m, 도로폭 31.4m으로 총연장 353km의 서해안 고속도로 구간 중 경기도 평택시와 충청남도 당진군을 연결하는 교량인 서해대교 중 사장교 구간을 적용대상 교량으로 선정하였다.

서해대교는 한국도로공사가 서해권 교통망과 물류기반 확충을 위하여 1983년 11월 착공, 2000년 11월 개통되었으며 풍속 65m/sec의 강풍 및 리히터 규모 6의 강진에도 견딜 수 있도록 설계되었고 각종 첨단 계측기를 설치하여 과학적인 시공 및 유지관리가 되고 있다. <표 1>은 서해대교 사장교 구간 중 1/2지점에 설치된 매립형 계측센서 설치 현황을 나타낸다.

또한 본 연구에서 사용된 GPS 장비는 Topcon 사의

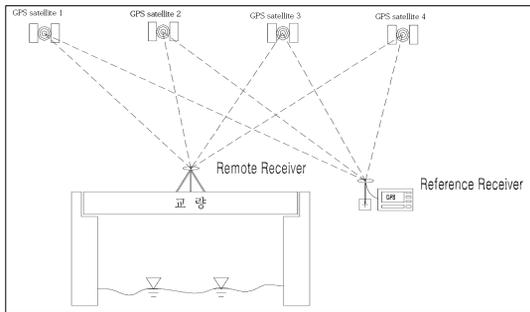
<표 1> 서해대교 사장교 구간에 설치된 센서 및 수량

구분		수량	용도
가속도계	Force Balance	10	구조물 동특성 파악
	Piezoelectric	24	케이블 진동을 이용한 케이블 장력 측정
변위계	레이저식	1	사장교 상부구조의 변위(교축, 교직)측정
변형률계	전기저항식	44	활하중 및 온도에 의한 구조물 응력변화
	진동형식	5	사장교의 장기거동 파악
풍향 풍속계	초음파형	2	구조물에 작용하는 풍하중의 영향 파악
	프로펠러형	1	구조물에 작용하는 풍하중의 영향 파악
경사계		6	사장교 주탑의 장기거동 파악
신축이음계		2	사장교 상부구조 신축거동 및 받침 이상유무 파악
온도계		14	온도 및 구조물 거동의 상관관계 분석
지진계		2	지진시 지진하중의 강도 및 영향 분석
하중계		2	강선 긴장력 변화 추적

GB-1000(기준국) 및 HIPER Plus(이동국)로서 각각 L1/L2 안테나를 사용하며 RTK 관측시 위치오차는 각각 수평 10mm+1ppm 및 수직 15mm+1ppm 이고 최대 20Hz 까지 측정이 가능하다.

## 2.2 장비설치 및 자료취득

본 연구에서는 RTK-GPS를 이용하여 교량의 거동을 관측하였으며 [그림 1]은 장비 설치 및 관측방법을 나타낸 모식도 이다.



[그림 1] RTK 관측 모식도

RTK 측정을 위하여 서해대교 홍보관 옥상에 [그림 2]와 같이 기준국을 설치하고 레이저변위계의 위치와 동일한 위치인 사장교 구간 중심부에 [그림 3]과 같이 이동국을 설치하였으며, GPS 관측빈도의 영향을 파악하기 위하여 GPS 관측빈도를 달리하여 20Hz 및 10Hz로 각각 15분씩 자료를 수신하였다. 그런데 일반적으로 교량의 변위를 측정하기 위해서는 차량 통제 및 측정시에 차량의 통과에 따른 변위를 측정하는 방식으로 수행해야 하지만 서해대교의 경우는 과도한 교통량의 문제로 인하여 교통의 통제가 현실적으로 불가능하였으며 특정 이벤트 상황에서의 교량 거동을 관측하는데 어려움이 있어 본 연구에서는 특정 시간대에 관측된 자료들을 이용한 교량의 수직변위 패턴만을 비교분석하였다.

## 2.3 취득자료 처리 및 분석

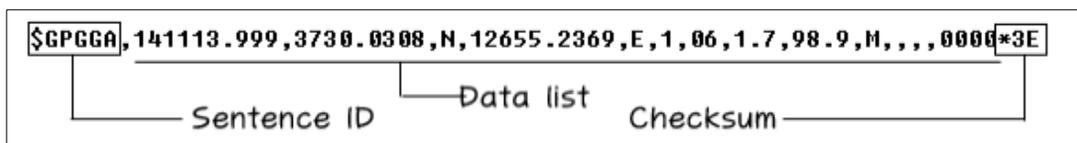
일반적으로 GPS 데이터는 미국 National Marine Electronics Association에서 정의한 데이터 통신 규약인 NMEA 형식으로 취득되며 본 연구에서는 이 중 \$GPGGA 형식으로 데이터를 취득하였다. [그림 4]는 GPS로부터 수신된 NMEA 0183 형식의 데이터의 일부분으로써 본 연구에서 사용된 \$GPGGA 형식의 각 부분에 대한 세부내



[그림 2] 기준국 설치 현황



[그림 3] 이동국 설치 현황



[그림 4] NMEA 형식의 GPS 수신데이터(\$GPGGA)

용은 <표 2>와 같으며 [그림 5] 및 [그림 6]은 해당 형식을 통해 취득된 GPS 데이터 및 레이저 변위계 측정자료이다.

또한 구조물의 진동특성은 사용성 및 안정성에 밀접한 관계가 있다. 진동에 의한 가장 대표적인 손상유형인 균열은 정적, 동적 거동을 변화시키는 중요한 인자들

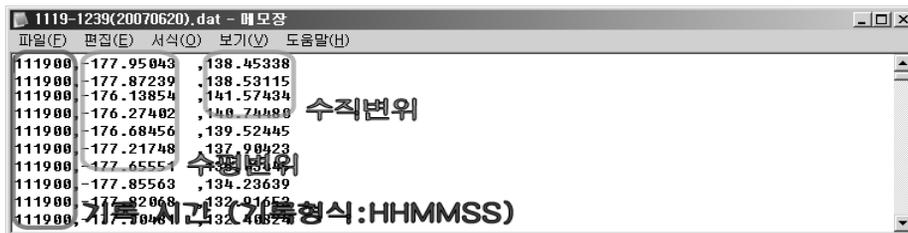
중의 하나로 국부적 부재강성의 감소는 곧 고유진동수의 감소와 연결이 되기 때문에 구조물 손상 전후의 고유진동수 차이는 구조물의 손상상태를 알 수 있는 단서가 될 수 있다. 구조물의 진동수 결정을 위해서는 구조물의 위치변동 값을 정밀 측위한 후에 얻어진 시간영역의 데

<표 2> \$GPGGA에 대한 세부내용

순서	데이터	세부내용
1	UTC Time	HHMMSS.SSS
2	Latitude	DDMM.MMMM
3	N/S Indicator	N = North, S = South
4	Longitude	DDDMM.MMMM
5	E/W Indicator	E = East, W = West
6	Position Fix	0=Invalid, 1=Valid SPS, 2=Valid DGPS, 3=Valid PPS, 4=RTK
7	Satellites Used	Satellites Being Used (0-12)
8	HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
9	Altitude	Altitude According to WGS-84 Ellipsoid
10	Altitude Units	M = Meter
11	Geoid Separation	Ellipsoid
12	Separation Units	M = Meter
13	DGPS Age	Age Of DGPS data in Seconds
14	DGPS Station ID	



[그림 5] GPS 수신 데이터 및 상세내용



[그림 6] 레이저 변위계 측정자료 및 상세내용

이터를 Fourier 변환하여 진동수 영역의 데이터로 바뀌어 한다(서대완 등, 2000).

따라서 본 연구에서는 Microsoft 사의 Visual Basic 6.0을 이용하여 GPS 및 레이저 변위계 측정자료를 도시함으로써 관측한 결과를 시각적으로 비교할 수 있는 기능과 구조물의 고유진동수 파악을 위한 FFT(Fast Fourier Transform)을 수행기능을 구현한 프로그램을 [그림 7]과 같이 개발하여 활용하였다.

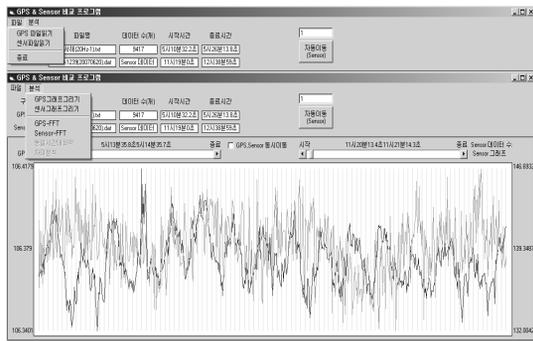
그러나, 본 연구에서 GPS의 정확도를 비교하기 위하여 기준자료로 사용된 서해대교의 레이저 변위계 측정자료 분석결과 원인을 알 수 없는 자료의 유실이 발견되었고 GPS 관측자료는 GPS 위성시간을 기준으로 기록되는데 반하여 레이저 변위계의 관측시간의 관측 센서의 시간기록이 GPS의 위성시간과 달라 정확한 비교시간을 파악하는데 어려움이 있어 GPS의 정확도 파악을 위한

전체자료의 1:1 비교 및 시간동기화가 불가능하였다.

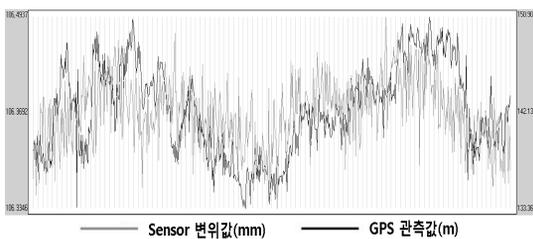
그러나 서해대교에 기설된 레이저 변위계는 사장교 구간 상부구조의 변위를 측정하고 모니터링 하기 위하여 교량 시공당시 엄격한 품질관리하에 매설된 장비이므로 본 연구에서는 이 장비로부터 취득된 자료 중 유실된 부분을 제외한 나머지 부분의 정확도에는 문제가 없다고 가정하고 레이저 변위계의 측정자료 중 유실이 없는 구간을 검토한 후 유사한 패턴이 60초 이상 계속되는 구간을 파악하고 이를 통하여 GPS와 레이저 센서의 관측자료를 이용한 교량 수직변위 패턴을 비교분석 하였으며 교량의 수직변위량 분석 및 FFT에 의한 교량의 고유진동수 파악을 통하여 GPS에 의한 교량의 수직변위 모니터링 및 취득자료의 신뢰성 확보 가능성을 평가하였다.

[그림 8]과 [그림 9]는 각각 다른 시간대에 20Hz 및 10Hz로 관측된 GPS 측정자료와 100Hz로 관측된 레이저 변위계 측정자료의 60초간 수직변위량을 나타낸 것이며 각 관측빈도수별 GPS 관측자료와 레이저 변위계 측정자료의 최대 수직변위는 <표 3> 및 <표 4>와 같다.

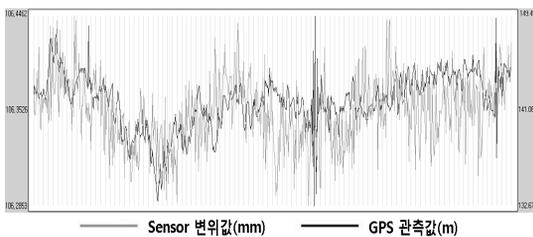
GPS에 의하여 관측된 교량의 최대 수직변위는 관측 빈도수에 따라 20Hz에서 0.1609m, 10Hz에서 0.1691m로 나타났으며 레이저 변위계 측정값과 비교할 때 각각 -0.0070m, -0.0063m의 오차를 나타냈다. 또한 [그림 10]은 교량의 고유진동수를 파악하기 위하여 관측된 자료들을 이용하여 FFT(Fast Fourier Transform)을 수행한 결과로써 [그림 10-㉔]의 관측빈도 20Hz로 관측된 GPS 관측자료 및 레이저 변위계 측정자료에 의한 FFT 결과는 각각 0.200Hz 및 0.197Hz으로 나타났으며 [그림 10-㉕]의 관측빈도 10Hz로 관측된 GPS 관측자료 및 레이



[그림 7] 취득자료 처리/분석 프로그램 초기화면



[그림 8] 관측결과(20Hz GPS 관측자료)



[그림 9] 관측결과(10Hz GPS 관측자료)

<표 3> GPS(20Hz) 및 레이저 변위계 관측자료 및 수직 변위량

	GPS(20Hz)	레이저 변위계	오차
Max	106.4462m	1.4946m	-
Min	106.2853m	1.3267m	-
Max - Min	0.1609m	0.1679m	-0.0070m

<표 4> GPS(10Hz) 및 레이저 변위계 관측자료 및 수직 변위량

	GPS(10Hz)	레이저 변위계	오차
Max	106.5037m	1.5091m	-
Min	106.3346m	1.3336m	-
Max - Min	0.1691m	0.1754m	-0.0063m

### 3. 결 론

본 연구에서는 GPS를 이용한 교량의 거동분석의 적용가능성 및 신뢰성 확보가능 여부를 파악하기 위해 GPS를 이용한 RTK 측정기법에 의하여 서해대교 사장교 구간의 수직변위량을 측정하고 기설된 교량의 모니터링 계측값을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 서해대교 사장교 구간을 대상으로 RTK-GPS를 이용하여 교량의 수직변위를 측정하고 교량을 고유진동수를 취득하였으며, NMEA 형식의 GPS 수신자료 및 레이저 변위계의 측정결과를 도시하여 시각적으로 비교 분석하고 교량의 고유진동수 파악을 위한 FFT기능을 구현한 프로그램을 개발하였다.

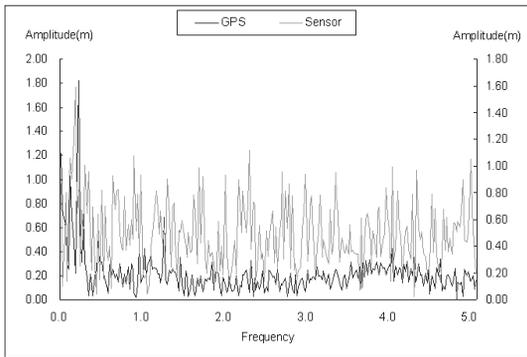
둘째, GPS에 의한 교량의 거동 관측 결과 수직변위 관측에 있어 기 설치된 레이저 변위계의 측정값과 GPS 관측빈도에 따라  $-0.0067\text{m}$  및  $-0.0070\text{m}$ 의 오차가 발생하였으나 사용된 GPS 관측장비의 오차를 고려할 때 매우 양호한 결과를 취득할 수 있었다. 또한, 교량의 고유진동수 파악을 위한 FFT 수행결과 동일하거나 유사한 결과를 얻음으로써 GPS를 이용한 교량의 수직변위량 분석 및 취득자료의 신뢰성 확보가능성을 확인하였다.

셋째, GPS 관측빈도의 영향을 파악하기 위하여 10Hz 및 20Hz로 GPS 관측빈도를 달리하여 자료를 취득하여 분석한 결과 10Hz로 취득된 자료로도 20Hz로 취득된 자료와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 분석목적에 따라서는 보다 높은 관측빈도의 자료가 필요할 수 있고 관측빈도는 GPS 장비의 경제성과 직접 관련이 있으므로 이에 관한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

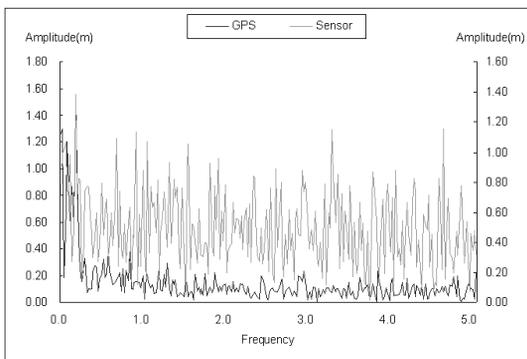
추가적으로 GPS 장비의 관측 정밀도를 고려할 때 외력에 의한 거동이 크지 않은 소규모 구조물의 거동 파악에는 한계가 있을 것으로 판단되며, 장비활용 및 취득자료처리 방법에 따른 연구를 지속적으로 수행한다면 비틀림 거동 등 교량의 3차원적 거동 모니터링이 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 김형규, 2007, “교량 모니터링을 위한 위성위치정보시스템의 적용성 연구”, 서울산업대학교 대학원 석사학위논문.
- 노태호, 이종출, 2003, “GPS를 이용한 구조물 변위 관리 시스템 개발”, 한국지형공간정보학회논문집 제11권 제2호, pp.53-59.
- 배상호, 2000, “구조물 변위해석을 위한 수직사진측량의 컴포넌트 개발”, 충남대학교 대학원 박사학위논문.



㉠ 20Hz GPS 관측자료 적용



㉡ 10Hz GPS 관측자료 적용

[그림 10] FFT 수행결과

저 변위계 측정자료에 의한 FFT 결과는 모두 0.197Hz로 파악되었다.

그런데 GPS에 의하여 관측된 교량의 수직변위량의 경우 연구에서 사용된 GPS 장비의 RTK 관측시 수직위치 오차가  $15\text{mm}+1\text{ppm}$ 임을 고려할 때 이 오차는 장비의 오차범위를 벗어나지 않고 있어 매우 양호한 결과로 판단되며 FFT 수행결과에서도 관측빈도 20Hz로 관측된 GPS 관측자료에서 다소 상이한 결과를 나타내고 있으나 이는 레이저 변위계의 측정자료에서 발견된 자료 유실 및 부정확한 관측시간의 동기화, 그리고 관측빈도가 20Hz인 GPS 자료에 비하여 100Hz의 관측빈도를 갖는 레이저 변위계의 자료취득 밀도의 차이에서 기인하는 것으로 판단되며 또한 관측빈도 10Hz로 관측된 GPS 관측자료를 이용한 FFT 결과가 레이저 변위계에 의한 FFT 결과와 동일하게 나타나 GPS를 이용한 구조물 모니터링시 GPS 데이터 수신에 있어 초당 10번의 관측빈도면 신뢰할 만한 자료의 취득이 가능할 것으로 판단된다.

- 배인환, 하강희, 2008, “건전도모니터링시스템을 이용한 3차원 자정식 현수교의 구조거동”, 2008년 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp.513-516.
- 서대완, 이영재, 박훈철, 윤광준, 지구인, 박찬국, 2000, GPS 반송파를 이용한 구조물의 3차원 진동측정, 창립10주년기념 소음진동학술대회 논문집 Vol. 2000 No. 2, pp.1303-1310.
- 신상철, 서철수, 2001, RTK GPS 측량에 의한 3차원 지형 해석, 한국GIS학회지 제9권 제2호, pp.309-324.
- 이용욱, 배경호, 2007, “네트워크 기반의 GPS 반송파 상대 측위 정확도 향상”, 한국GIS학회지 제15권 제2호, pp.111-121.
- 이진덕, 1998, “Kinematic GPS 측량기법에 의한 구조물의 변형 모니터링”, 한국측지학회지 제16권 제1호, pp.27-40.
- 이종출, 차성렬, 서동주, 노태호, 2001, “위성측량을 이용한 교량 경보 시스템 구축”, 2001년 한국측량학회 국제 세미나 및 추계학술발표회 논문집, pp.91-95.
- 이호철, 윤홍식, 2001, “GPS와 Internet을 이용한 장대 교량 모니터링 시스템 개발에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제21권 제6D호, pp.875-883.
- 임현표, 2002, “위성측량을 이용한 구조물 변위 경보 시스템 개발”, 부경대학교 대학원 석사학위논문.

접수일	(2009년 7월 16일)
최종수정일	(2009년 9월 29일)
게재확정일	(2009년 9월 29일)