

GPS의 OTF 측위기법에 의한 교량의 거동 측정에 관한 연구 A Study on Bridge Behavior Measurement by Kinematic On The Fly Technique of GPS

최병길* · 김영곤** · 정진우***

Choi, Byoung-Gil · Kim, Young-Kon · Jung, Jin-Woo

요 旨

최근 대형구조물의 거동 측정에 GPS를 활용하려는 시도가 부분적으로 이루어지고 있으나 초보적인 단계이며 체계적인 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 GPS의 OTF(Kinematic On The Fly) 기법을 이용하여 교량의 거동을 측정하는데 그 목적이 있다. GPS의 실시간 동적 측위기법에 의하여 마포대교를 관측한 결과 수 센티미터 정도 발생하는 구조물의 거동을 3차원적으로 쉽고 편리하게 정밀 관측할 수 있으며 실시간으로 모니터링 할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 본 연구에서는 OTF 측위기법을 적용, 초기화가 동적인 상태에서도 가능하도록 함으로써 신호의 단절시에도 연속적으로 교량의 거동을 관측할 수 있었다.

ABSTRACT

Recently, it has been partly attempted to measure behavior of large-sized bridge using GPS, but it is accomplished at the first step and unsystemically. The purpose of this research is to measure bridge behavior by Kinematic On The Fly (OTF) technique of GPS. The results of this study show that bridge behavior can be measured easily and conveniently in three dimension, monitored at the real time, and measured continuously without a break by OTF Technique of GPS.

1. 서 론

인공위성을 이용한 범 지구 위치결정시스템인 GPS는 수 밀리미터의 정밀도로 정적, 동적 위치측정이 가능한 시스템으로 교량, 건축물, 댐 등 각종 구조물의 거동 및 변위를 측정하는데 이용되고 있다. 최근 국내에서도 GPS 동적 측위기법을 이용하여 수십 센티미터 정도로 발생하는 남해대교의 거동을 측정함으로써 대형구조물의 거동 측정에 그 적용성을 입증한 바가 있다.¹⁾ 그러나 아직 대형구조물의 거동 측정에 GPS를 이용하는 기술은 초보적인 단계이며 체계적인 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

만약 구조물의 변위 측정분야에 GPS가 응용된다면 구조물을 장기간 관측하여 수 밀리미터의 정확도로 기초 침하와 크리프(Creep), 릴렉세이션(Relaxation) 등에 의한

구조물의 미세한 변위를 관측할 수 있으며 단시간 관측을 할 경우 외력에 의하여 순간적으로 발생하는 구조물의 거동을 측정할 수 있을 것으로 기대된다. 구조물의 거동을 측정하기 위한 GPS의 동적 측위기법 중 키네메틱(Kinematic) 기법은 관측을 시작하기 전에 기지점에서 1~2분의 초기화에 의하여 미지정수를 결정한 후 실시간 원격 측정이 가능하다.^{13,14)} 이러한 GPS의 키네메틱 기법은 대규모 지역의 지형측량에 주로 이용되었지만 최근에는 해양측량, 도로 및 지하매설물의 보수공사 그리고 차량위치 및 목적지의 경로를 파악할 수 있는 차량항법시스템 등 여러 분야에 응용되고 있다. 그러나 측정시 신호단절이 발생할 경우 다시 초기화를 해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결한 OTF 측위기법은 이동 중 자동적으로 미지정수를 결정할 수 있으며 신호단절이 발생하더라도 연속적인 측정이 가능한 새로운 측위기법이다.^{8,13)} 따라서 GPS의 OTF 측위기법을 이용하여 교량 및 각종 대형 시설물의 거동을 높은 정밀도로 측정하고 실시간 원격 모니터링 할 수 있는 시스템을 개발한다면 대형구조물을 효과적으로 유지관리하고 사고를 사전에

*인천대학교 토목공학과 부교수

**조선대학교 토목공학과 박사과정

***인천대학교 토목공학과 석사과정

예방할 수 있을 것으로 기대된다.

2. GPS의 OTF 측위기법을 이용한 구조물의 거동 측정

2.1 OTF 측위기법

GPS의 신호 체계상 반송파에 의한 위치결정 방법이 코드에 의한 위치결정 방법보다 정밀도 측면에서 큰 이득을 주지만, 반송파에 의한 단독측위 역시 후처리 상대측위 기법보다는 정밀도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 광범위한 관측점의 정밀 좌표들을 빠른 시간내에 획득하기 위해서는 이동측량을 수행하는 동시에 후처리 자료처리 기법이 갖는 정밀도에 근접한 결과를 산출할 수 있는 방법이 요구된다.

이러한 목적을 위해 개발된 것이 고정밀 동적 측량기법인 실시간 동적 측위기법(Real Time Kinematic)으로써, 기본개념은 정밀한 위치를 확보한 기준점의 반송파 오차 보정치를 이용하여 사용자가 실시간으로 수 센티미터의 정밀도를 유지하는 관측치를 얻을 수 있게 하는 것이다. 실시간 동적 측위기법의 기본 개념은 오차보정을 위해 기준국에서 전송되는 데이터가 반송파 수신자료라는 것을 제외하고는 DGPS(Differential GPS), 즉 GPS의 상대측위 개념과 거의 유사하다. 다만 실시간 동적 측위기법은 각 위성에 대한 반송파 측정치를 지속적으로 제공하여야 하고, 정보의 전송 장애로 발생할 수 있는 오차의 한계가 DGPS보다 상대적으로 크기 때문에 보다 안정적이고도 신속한 정보 전달 통신 시스템이 요구된다.

2.2 Kinematic과 OTF 측위기법

GPS의 실시간 동적 측위기법을 적용시 미지정수를 구하기 위해서 최소한 5개의 위성이 기준국과 이동국에서 관측되어야 미지정수가 구해지며, 4개의 위성을 관측할 경우 정확도는 미터정도가 된다. 한번 미지정수가 풀리고 나면 1~2cm정도의 정확도가 될 것이며, 이때부터 GPS는 4개의 위성으로 원하는 정도의 기능을 수행하고 만약 위성의 수가 4이하로 떨어지면 코드만으로 해석을 한다. 실시간 측정에 있어 키네매틱 측위기법의 경우 미지정수를 구하기 위하여 기지점에서 초기화가 필요하고, 이동 수신기가 측정들로 이동할 경우 모든 위성의 신호 단절이 없어야만 측정이 가능하다. 그러나 OTF 측위기법은 정지측위에 의한 초기화가 필요하지 않고 관측시작

표 1. Kinematic 측위기법의 위성 가용성

시간대	위성수	고도	GDOP
양 호	5개이상	20° 이상	5 이하
허 용	4개	15° 이상	8 이하
안될 수 있음	4개	----	8 이상
안 됨	3개이하	----	----

표 2. OTF 측위기법의 위성 가용성

시간대	위성수	고도	GDOP
체인 초기화를 위한 처음 200~300 초간 필수시간대	5개이상	20° 이상	5이하
초기화 이후 사용 가능	4개	15° 이상	8이하
안 될 수 있음	4개	----	8이상
안 됨	3개이하	----	----

부터 즉시 이동할 수 있으며 미지정수가 측정 중에 결정된다.

표 1과 표 2는 위성수, 고도, GDOP(Geometric Dilution Of Precision)에 의한 Kinematic과 OTF 측위기법의 위성 가용성을 나타내고 있다

2.3 RTCM 입력 메시지와 NMEA 출력 메시지

GPS의 실시간 동적 측위기법을 이용하여 교량의 거동을 측정하기 위하여 기준국과 이동국 사이에 데이터 전송은 매우 중요하다. GPS의 데이터 전송은 RTCM 입력 메시지와 NMEA 출력메시지로 규정되어 있으며 1초 간격으로 3차원 좌표를 획득할 수 있다.

2.3.1 RTCM 입력메시지

기준국의 수신기와 이동국 수신기 사이의 보정 데이터 전송은 RTCM(Radio Technical Communication Maritime) 특별위원회에 의하여 RTCM, SC-104 포맷으로 표준화되었으며 이 포맷의 2.0 버전은 코드 의사 거리에 대한 보정치를 포함하지만 2.1 버전은 측정된 반송위상에 대한 보정치를 포함하고 있다. 메시지의 형식은 거의 GPS 메시지 형식과 동일하며, 30 bit word의 열로 구성되어 있다. 각 메시지는 2 word 헤더로 시작한다. 첫 번째 word는 고정 머리말과 메시지 형태 그리고 기준국의 명칭을 포함하고 있으며, 두 번째 word는 Z-counter 형식에서 기준시간표, 열번호, 메시지 길이 그리고 기준국 상태 지표 등을 포함한다. 1부터 17까지의 메시지는 두 RTCM 버전에서 이용되어지는 반면 각각 3개의 헤더를 포함하는 18에서 21까지의 메시지는 오직 2.1 버전만 포함한다. 18과 20메시지는 높은 정확도를 가진 위치정보를 포함하고

실시간 동적 측위기법을 지원한다. 마지막으로 메시지21의 형태는 메시지1의 형태와 유사하고 RTCM 메시지의 몇몇은 NMEA형식과 유사하다. 표 3은 RTCM 메시지의 형식을 나타낸다.

2.3.2 NMEA 출력 메시지

NMEA-0813은 National Marine Electronics Association의 위원회 번호이며 이 위원회는 해상 전자 장치의 인터페이스의 표준을 정하는 것을 목적으로 발족되었다. 이 표준은 GPS 수신기의 인터페이스에도 널리 사용된다. NMEA-0813의 ASCII 텍스트로 출력될 수 있으며 데이터는 4800baud의 속도로 전송된다. NMEA 메시지는 사용장비에 따라 여러 가지 있으나, 본 연구에서는 3차원 직각좌표를 얻을 수 있는 LLQ 형식으로 데이터를 획득하였다. 표 4는 NMEA(LLQ) 형식을 나타내고 있다.

표 3. RTCM 메시지의 형식

형식	내용
1	C/A 코드의 Differential 보정
2	전송된 항법메시지에서 궤도정보의 보정
3	기준국의 매개변수
6	여백
10	P 코드의 Differential 보정
16	표기하기 위한 ASCII 코드화된 메시지
18	원반송위상 측정치
19	원코드거리 측정치
20	반송위상 보정
21	코드거리 보정

표 4. NMEA(LLQ) 메시지 형식

형식	내용
1 \$-LLQ	\$: 문장의 시작 기호 -: TalkerID(RT for BRTDGPS) LLQ: 메시지 형식
2 hhmms.s	UTC(세계표준시) hh: 시간, mm: 분, ss: 초
3 mmddy	mm:달, dd:일, yy:년
4 eeeee.cee,m	동거(meter)
5 nnnnn.nnn,m	북거(meter)
6 q	GPS 데이터 상태 표시자 0: 모호정수 비고정, 데이터 사용불가 1: 실시간 위치추적불능, 항법고정 2: 실시간 위치추적가능, 모호상수 비고정 3: 실시간 위치추적가능, 모호상수 고정
7 uu	사용되고 있는 위성의 수
8 dd.dd	현 위치에 대한 좌표 상태 정도
9 eht.xxx,m	안테나의 고도
10 *hh	문장의 끝

2.4 OTF 측위기법에 의한 구조물의 거동 측정

구조물의 거동 측정방법에는 기초침하와 크리프, 릴레세이션 등에 의한 구조물의 미세한 변위를 측정하는 방법과 외력에 의하여 순간적으로 발생하는 구조물의 거동을 측정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 대형구조물에서 발생하는 순간거동을 관측한다.

먼저 우리나라 TM(Transverse Mercator) 좌표계로 데이터를 실시간 획득하기 위하여 기준점 측량에 의한 좌표변환을 실시한다. 예비실험을 통하여 GPS의 OTF 측위기법을 적용하였을 때 하드웨어 및 안테나의 성능을 점검하고 기준국과 이동국의 거리에 의한 데이터 및 모뎀 수신율의 정밀도를 분석한 후 현장에서 구조물의 거동을 측정한다.

3. 결과 및 분석

3.1 이동국의 정밀도 분석

GPS의 OTF 측위기법 적용시 이동국의 정밀도를 측정 한 결과는 다음과 같다.

3.1.1 동일 안테나 이동국의 정밀도 분석

GPS의 OTF 측위기법을 적용, 하드웨어의 정밀도를 분석하기 위하여 기준국으로부터 100m 떨어진 동적인 변화가 없는 지점에 동일 안테나로 연결된 두 이동국을 설치하고 1초 간격으로 데이터를 측정하였다. 그림 1, 그림 2, 그림 3은 각각 이동국1과 이동국2에서 실시간으로 측정된 X축, Y축, Z축의 좌표를 나타낸다.

표 5와 같이 두 이동국에서 측정된 좌표의 표준편차는 각각 X축 0.0018 m, 0.0018 m, Y축 0.0023 m, 0.0025 m, Z축 0.0045 m, 0.0045 m이며, 최대편차는 X축 0.011 m, 0.01 m, Y축 0.01 m, 0.012 m, Z축 0.019 m,

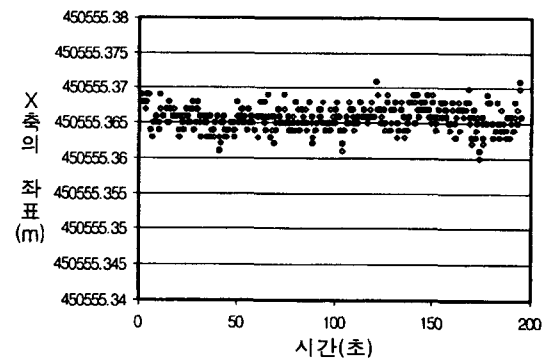


그림 1. 동일안테나의 두 이동국에서 측정된 X축의 좌표

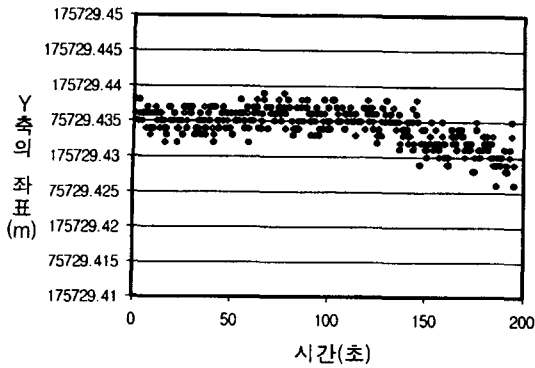


그림 2. 동일안테나의 두 이동국에서 측정된 Y축의 좌표

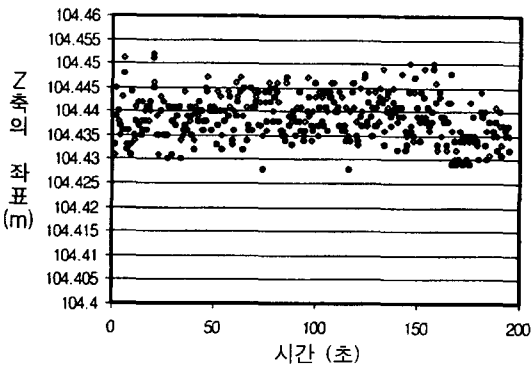


그림 3. 동일안테나의 두 이동국에서 측정된 Z축의 좌표

표 5. 동일 안테나의 두 이동국에서 측정된 좌표(단위:m)

측정값	이동국		
	이동국 1	이동국 2	
X축	평균	450,555.565	450,555.565
	표준편차	0.0018	0.0018
	최대편차	0.011	0.010
Y축	평균	175,729.434	175,729.434
	표준편차	0.0023	0.0025
	최대편차	0.01	0.012
Z축	평균	104.439	104.438
	표준편차	0.0045	0.0045
	최대편차	0.019	0.02

0.02 m로 나타났다. 두 이동국의 좌표값의 평균은 X축과 Y축에서 동일하게 나타났으며, Z축에서는 1 mm차이가 났다. 그리고 표준편차는 X축과 Z축에서 동일하게 나타났고 Y축에서 2 mm의 차를 보였다. 따라서 본 연구에 사용된 GPS 수신기는 매우 정밀하다는 것을 알 수 있었으며 장시간 관측할 경우 더욱 정밀한 데이터를 얻을 수 있을 것이다. 그림 4, 그림 5, 그림 6는 두 이동국의 편

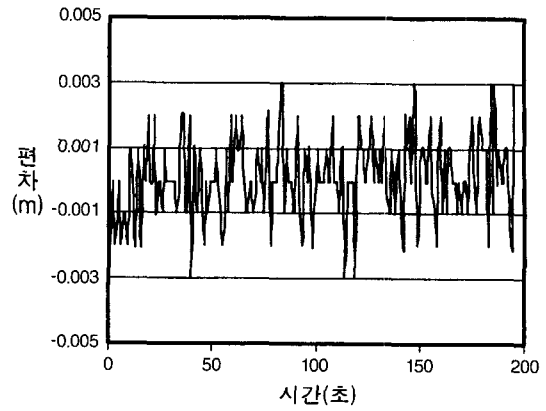


그림 4. 동일안테나에 연결된 두 이동국의 편차(X축)

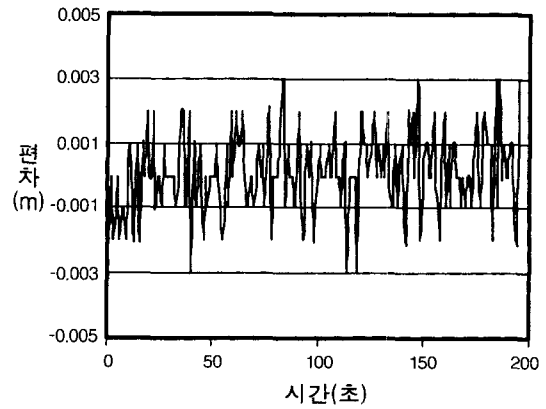


그림 5. 동일안테나에 연결된 두 이동국의 편차(Y축)

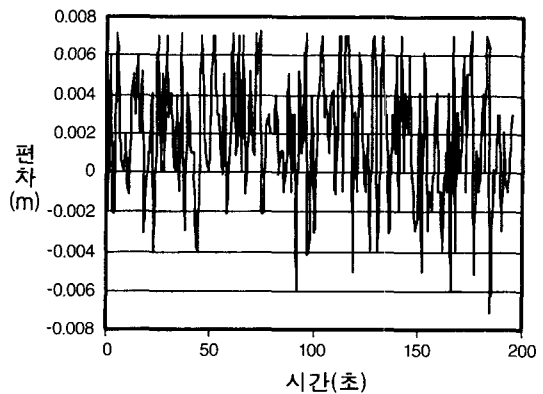


그림 6. 동일안테나에 연결된 두 이동국의 편차(Z축)

차를 나타낸다.

그림 4, 그림 5, 그림 6 및 표 6과 같이 동일 안테나를 사용할 경우 본 연구에서 이용된 OTF 측위기법에 의하여 교량의 거동 측정이 정밀하게 이루어질 수 있음을

나타낸다. 또한 Z축의 편차가 X축보다 41%, Y축의 편차보다 38% 정도 정밀하지 못하다는 것을 볼 수 있는데 이는 GPS가 연직방향축이 평면방향보다 정밀하지 못하다는 것을 나타낸다.

3.1.2 동일거리 두 이동국의 정밀도 분석

기준국에서 100 m 떨어진 지점에 두 이동국을 설치하여 데이터를 측정하였다. 그림 7, 그림 8, 그림 9는 두 이동국에서 관측된 데이터의 편차를 나타낸다.

표 6. 동일 안테나에 연결된 두 이동국의 편차(단위:m)

편차	방향		
	X축	Y축	Z축
표준편차	0.0014	0.0013	0.0034
최대편차	(+)	0.004	0.003
	(-)	0.004	0.003

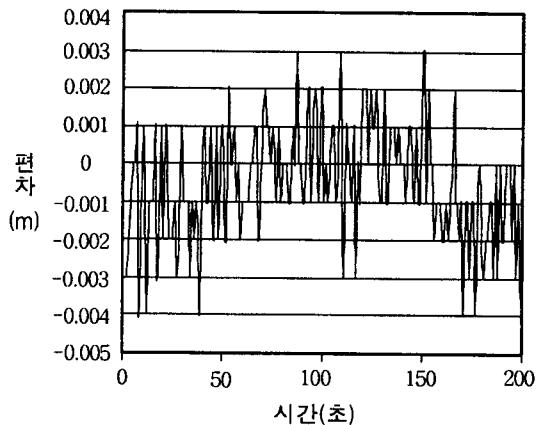


그림 7. 동일거리에 위치한 두 이동국의 편차(X축)

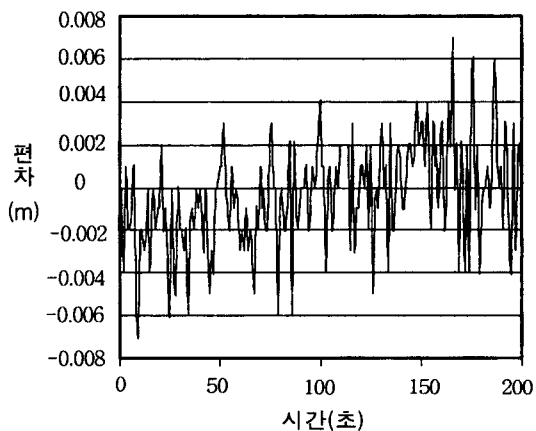


그림 8. 동일거리에 위치한 두 이동국의 편차(Y축)

그림 7, 그림 8, 그림 9 및 표 7과 같이 OTF 측위 기법을 적용하여 동일 거리에 위치한 두 이동국 편차의 표준편차를 계산한 결과 X축 0.0015 m, Y축 0.0025 m, Z축 0.0044 m임을 알 수 있다. 이는 동일 안테나를 사용한 경우(표 6 참조)보다 정밀도가 떨어지는 하나 OTF 측위기법에 의하여 구조물의 거동을 수 mm의 정확도로 측정할 수 있음을 나타낸다. 또한 두 이동국에서 Z축의 편차가 X축보다 34%, Y축보다 57% 정도 정밀하지 못

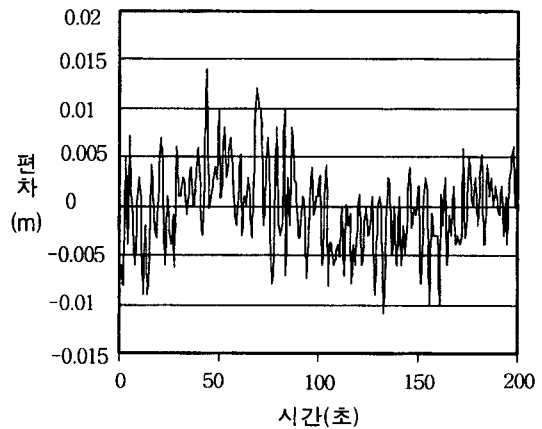


그림 9. 동일거리에 위치한 두 이동국의 편차(Z축)

표 7. 동일 거리에 위치한 두 이동국의 편차(단위:m)

편차	방향		
	X축	Y축	Z축
표준편차	0.0015	0.0025	0.0044
최대편위	(+)	0.003	0.007
	(-)	0.004	0.007

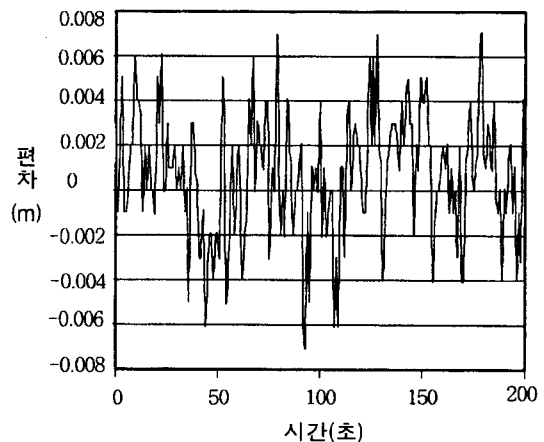


그림 10. 거리에 따른 이동국의 편차(X축)

하다는 것을 볼 수 있다.

3.1.3 거리 차이에 의한 이동국의 정밀도 분석

기준국에서 100 m, 400 m 떨어진 지점에 두 이동국을 설치하여 데이터를 측정하였다. 그림 10, 그림 11, 그림 12는 두 이동국에서 관측된 데이터의 편차를 나타낸다.

기준국으로부터 100 m와 400 m 지점에 위치한 두 이

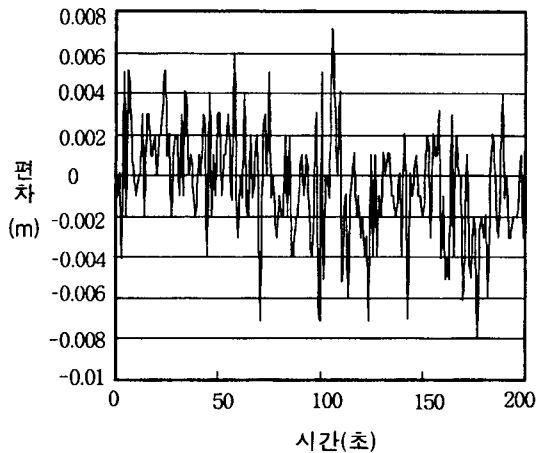


그림 11. 거리에 따른 이동국의 편차 (Y축)

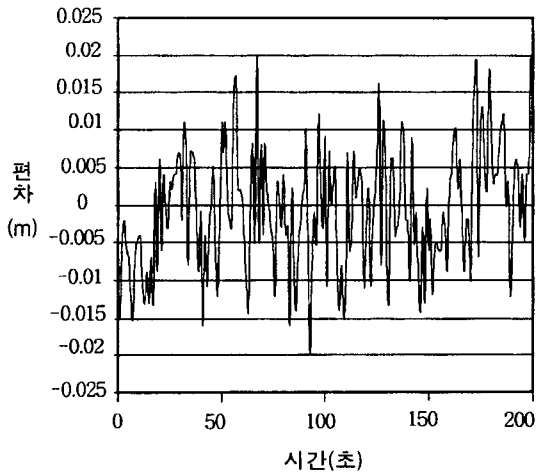


그림 12. 거리에 따른 이동국의 편차 (Z축)

표 8. 거리에 따른 이동국의 편차(단위:m)

편차	방향	X축	Y축	Z축
	표준편차		0.0028	0.0028
최대편차	(+)	0.007	0.007	0.02
	(-)	0.007	0.008	0.02

동국의 편차는 표 8에서와 같이 동일거리에 있는 두 이동국의 편차(표 7참조)와 거의 비슷하게 나타났으며 이는 GPS의 OTF 측위기법 적용시 어느 거리 한도 내에서는 거리에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 나타낸다. 그리고 100 m 지점에 설치된 이동국에서 NMEA 데이터의 중복율이 0.5%, 400 m 지점에 설치된 이동국에서는 5% 정도 발생하였는데, 이는 기준국으로부터 이동국이 멀리 설치될수록 모뎀의 수신율이 떨어진다는 것을 나타낸다. 또한 Z축의 데이터가 X축, Y축보다 65% 정도 정밀도가 떨어진다는 것을 볼 수 있다.

3.2 교량의 거동 측정 결과 및 분석

마포대교 18, 19번 교각 중앙지점에서 두 이동국을 설치하고 지반의 동적인 변화가 없는 지역에 이동국을 한 대 설치하여 실험을 실시하였다. 지반의 동적 변화가 없

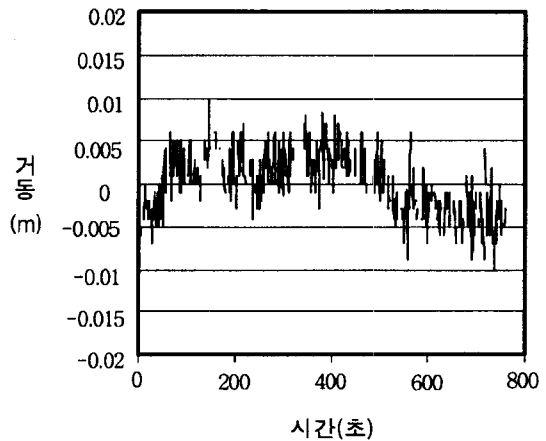


그림 13. 이동국1의 거동(교축방향)

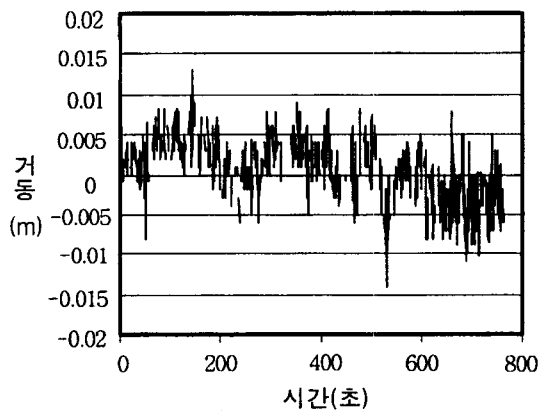


그림 14. 이동국1의 거동(교축직각방향)

는 지점에 설치된 이동국에서 측정된 데이터를 이동국 자체에서 발생된 GPS의 오차로 가정하고 교량의 두 이동국에서 측정된 데이터를 차분함으로써 교량의 실제 거

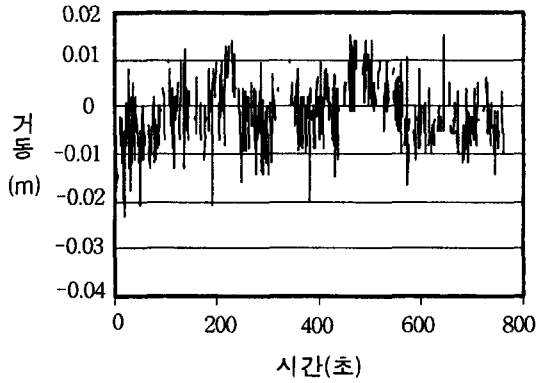


그림 15. 이동국1의 거동(연직방향)

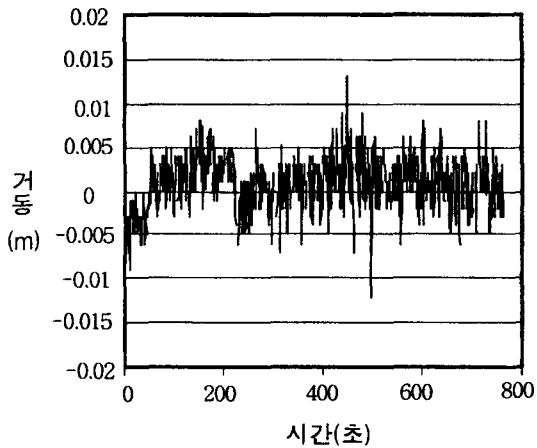


그림 16. 이동국2의 거동(교축방향)

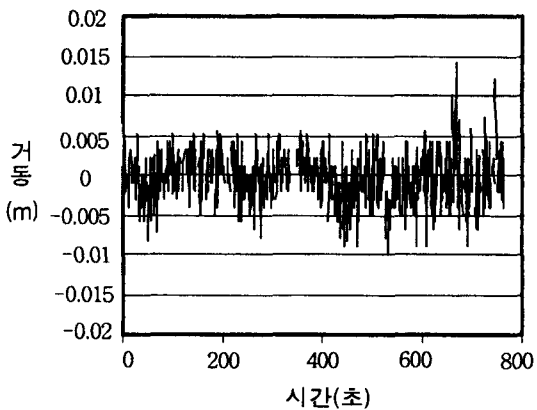


그림 17. 이동국2의 거동(교축직각방향)

동을 계산하였다. 그림 13부터 그림 18은 교량위의 두 이동국에서 계산된 거동을 나타낸다.

그림 13부터 그림 18, 표 9와 표 10에서 보는 바와 같이 GPS의 OTF 측위기법에 의하여 교량의 거동을 실시간 측정하였을 때 수 cm정도로 발생하는 거동을 3차원적으로 쉽고 편리하게 관측할 수 있음을 알 수 있다. 또한 교량의 거동은 연직방향이 교축방향과 교축직각방향보다 크게 발생함을 알 수 있었다. 이는 교통하중에 의하여 평면방향보다 연직방향의 거동이 크게 발생하는 교량의 일반적 특성과 일치한다.

본 실험과정에서 NMEA 데이터의 중복율이 이동국1에서 27%, 이동국2에서 4.3% 발생하였다. 이는 이동국1 주변의 도로시설물 등 장애물에 의하여 모뎀의 데이터 수신율이 떨어진 데 기인한 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서 두 지점의 높이를 가능한 한 동일하게 설치하면 수신율을 높일 수 있다는 것을 알 수 있었다.

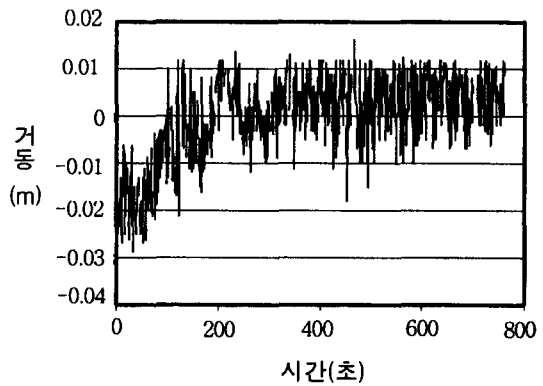


그림 18. 이동국2의 거동(연직방향)

표 9. 이동국1의 거동(단위:m)

거리	방향	교축방향	교축직각방향	연직방향
표준편차		0.0029	0.0029	0.0055
최대거리	(+)	0.01	0.013	0.016
	(-)	0.01	0.014	0.023

표 10. 이동국2의 거동(단위:m)

거리	방향	교축방향	교축직각방향	연직방향
표준편차		0.0029	0.0029	0.0086
최대거리	(+)	0.013	0.014	0.016
	(-)	0.012	0.01	0.029

4. 결 론

GPS 측위기법중 OTF 측위기법을 이용하여 교량의 거동을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

GPS의 OTF 측위기법에 의하여 마포대교를 관측한 결과 수 센티미터 정도 발생하는 교량의 거동을 3차원적으로 쉽고 편리하게 관측할 수 있었으며, 교량의 거동을 실시간으로 모니터링 할 수 있음을 보여 주었다. 또한 OTF 측위기법을 적용할 경우 초기화가 동적인 상태에서 가능함으로써 신호의 단절시에도 연속적으로 교량의 거동을 관측할 수 있었다.

OTF 측위기법을 적용하여 동일 안테나에 연결된 두 이동국에서 좌표값을 연속적으로 측정된 결과 그 평균값 및 표준편차가 거의 동일하게 나타났으며, 동일거리에 위치한 두 이동국에서 측정된 좌표값의 편차를 구한 결과 표준편차가 X축 0.0015 m, Y축 0.0025 m, Z축 0.0044 m로 나타났다. 이는 이동국의 하드웨어와 안테나가 매우 정밀함을 나타내며 구조물의 변위나 거동을 관측하는데 GPS의 OTF 측위 기법이 유용하게 이용될 수 있음을 나타낸다. 또한 기준국으로부터 100 m와 400 m지점에 위치한 두 이동국의 정밀도를 분석한 결과, 동일거리에 있는 두 이동국의 편차와 거의 비슷하게 나타나 어느 거리 한도 내에서는 거리에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

기준국과 이동국을 설치하는 지점의 주변상황에 따라 이동국에서 수신율이 감소 또는 증가하는 것을 볼 수 있었다. 기준국에서 전송되는 데이터의 수신율을 높이기 위해 기준국과 이동국 사이에 장애물을 제거하고 기준국의 높이와 이동국의 높이를 가능한 한 동일하게 설치한다면 수신율이 양호하다는 것을 알 수 있었다.

향후 GPS에 의하여 실시간 3차원 거동측정에 대한 연구가 지속적으로 이루어진다면 더욱 효율적인 원격 모니터링 시스템의 구축이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 인천대학교 중소기업기술개발지원센터의 도움으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 박운용, 장상규, 정성모, 이흥규, 1998, "실시간 동적 GPS측위기법에 의한 교량 거동의 모니터링", 대한토목학회 논문집, pp.377-380.
2. 조규전, "측량학", 보성문화사, 1996, pp. 431-457.
3. 김일선, 1996, "차량항법을 위한 GPS 위치결정기법", 서울대학교 박사학위 논문.
4. 최철용, 1997, "GPS를 이용한 이동 물체 위치 결정 방법에 관한 연구", 서울시립대학교 석사학위 논문.
5. 이용창, "정밀절대측위기법에 의한 GPS 기준점 좌표의 산정", 한국측지학회지, 제17권 2호, 1999, pp. 145-152.
6. 조영원, 이강원, "원효대교 성능 개선 공사를 위한 시설물 변위 측량 보고서", 측량지, 제36호, 1994, pp. 36-43.
7. Borre, K. and Gilbert, S., 1997, "Linear algebra, Geodesy, and GPS", Ellesley-cambridge press.
8. Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., 1997, "GPS Theory and Practice", Springer Wien NewYork.
9. Groten, E. and Straub, R., 1988, "GPS-Techniques Applied to Geodesy and Survey", Springer-Verlag.
10. Alfred, L., 1994, "Satellite Surveying", JohnWiley & Sons INC.
11. Parkinson, B. W. and Spiker, J. J., 1996, "Global Positioning System: Theory and Applications Volume I", Progress in Astronautics and Aeronautics.
12. Parkinson, B. W. and Spiker, J. J., 1996, "Global Positioning System: Theory and Applications Volume II", Progress in Astronautics and Aeronautics.
13. Strang, G., 1997, "Linear Algebra, Geodesy and GPS", Wellesley-cambridge press.