

GPS의 변위 검출 능력에 대한 실험 A test on deformation detection ability of GPS

박필호 · 박종욱 · 조정호* · 전경수** · 조성호***

Park, Pil-Ho · Park, Jong-Uk · Joh, Jeong-Ho · Jeon, Kyung-Soo · Cho, Sung-Ho

요 旨

3축 방향의 이동이 가능한 GPS 시험대의 실제 이동량을 GPS가 어느 정도 정확하게 검출해 내는가를 분석하여 GPS의 변위검출 능력을 실험적으로 검증하였다. 그 결과 약 16km의 단기선에 대해 GPS의 변위 검출 능력은 수평성분에서 약 2mm, 수직성분에서 약 8mm에 이르는 것을 알 수 있었다. 이 결과를 토대로 구조물의 변위 측정에 대한 GPS의 활용 가능성에 대해 고찰하였다.

ABSTRACT

The GPS ability for detecting the deformation is experimentally tested by analyzing how precisely GPS can detect the true movement value of the GPS test bed with three axis. As the result, we found that GPS can detect the deformation with the precision of 2 mm in horizontal componts and 8 mm in vertical component for the short baseline of 16 km. The applicable possibilities of GPS for measuring the structure deformation are discussed on the base of this result.

1. 서 론

인공위성을 이용한 범지구 위치 결정 시스템인 GPS(Global Positioning System)가 개발되어 자동차, 비행기, 선박 등 이동체의 항법은 물론 측지 및 측량분야, 지각 및 구조물의 변위 감시, 우주, 통신, 여가, 국방, 기초과학 분야 등 매우 광범위한 분야에 활용되고 있으며, 그 이용도는 급속히 증가하는 추세에 있다. 특히 GPS를 이용하면 수 mm의 정밀도로 위치 및 변위 측정이 가능한 것으로 알려져 있어 지각, 단층 등의 자연물은 물론 가스시설, 교량, 건축물, 댐 등 각종 구조물의 미세 변위를 관측 및 감시하여 재해를 사전에 예방하고자 하는 방재분야에서 GPS의 응용이 국내외적으로 큰 주목을 받고 있다.^{1,4,6,7)}

GPS를 구조물의 안전계측 및 방재분야에 이용하기 위해서는 그에 앞서 GPS의 변위측정 능력을 검증하는 일

이 우선되어야 한다. 일반적으로 구조물의 변위는 단기 간에 일어나지 않고, 그 양도 매우 작기 때문에 계측기의 측정 능력에 대한 검증 과정을 거치지 않고 곧바로 현장에 적용하여 변위량을 측정하는 것은 무모한 일이다. 왜냐하면 측정된 변위량을 얼마나 신뢰할 것인가를 판단할 기준이 없기 때문이다. 이 연구의 목적은 GPS를 이용하여 변위를 어느 정도까지 정밀하게 검출해 낼 수 있는가를 실험을 통해 정량적으로 검증함으로써 구조물의 변위측정 및 감시 분야에 GPS의 적용 가능성을 타진하는 것이다. 이를 위하여 3축 방향의 이동량을 정확하게 기록할 수 있는 GPS 시험대를 제작하였고, 시험대와 기준점에서 동시에 관측된 GPS 데이터의 고정밀 자료처리를 통해 시험대의 실제 이동량을 GPS가 어느 정도 정확하게 측정해 내는가를 비교·분석하는 방법으로 GPS의 변위측정 능력을 실험적으로 검증하고자 한다. 이 분석 결과를 토대로 구조물의 변위 측정에 대한 GPS의 활용 가능성과 문제점을 검토하였다.

2. 실험 시스템과 자료처리

GPS의 변위측정 능력을 실험하기 위해 이 연구에서는

한국천문연구원 선임연구원

*한국천문연구원 연구원

**한국가스공사 연구개발원 책임연구원

***한국가스공사 연구개발원 연구원

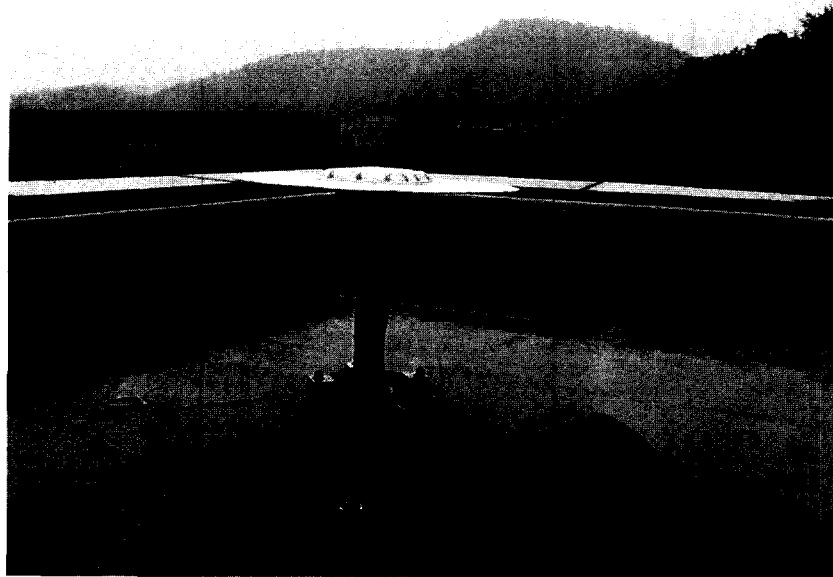


그림 1. 상단에 GPS 안테나가 부착된 GPS 시험대

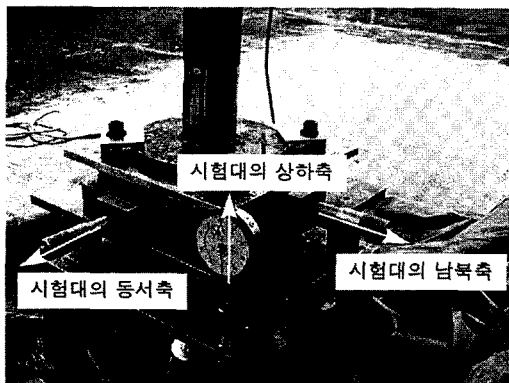


그림 2. 시험대 하단에 부착된 3축 계측기

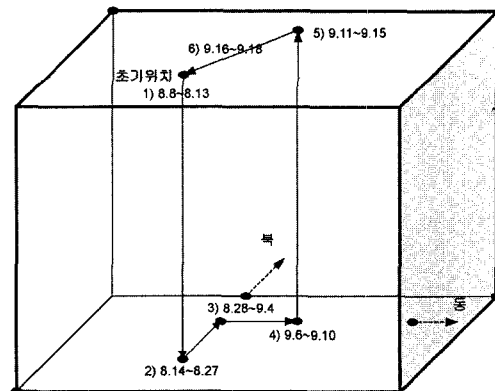


그림 3. 시험대의 3축별 계단식 이동 순서와 방향 및 고정점에서의 관측기간

그림 1과 같은 특별한 장치를 고안하였다. GPS 시험대라고 불리는 이 장치는 GPS 안테나를 올려놓은 상태에서 수직 방향과 평면의 두 방향으로 3축 이동이 가능하도록 만들어졌으며, 이 때 이동한 양을 정확히 측정 및 기록할 수 있도록 0.01 mm 분해능의 정밀 계측기를 각각의 축에 부착하였다(그림 2). 시험대의 3축은 서로 직각을 이루도록 제작되었다.

이 실험을 위해 시험대의 축을 상단 초기위치-하단-북단-동단-상단-원위치의 순으로 그림 3과 같이 계단식으로 이동시키면서 GPS 관측을 실시하였고, 그 이동값을 시험대에 부착된 정밀계측기로 측정하여 기록하였다. 그림

3에는 실제 시험대를 각각의 축별로 이동한 방향 및 순서와 각 지점에서 고정하여 반복적으로 GPS 관측을 수행한 기간이 표시되어 있다. 이 실험은 시험대의 실제 이동량을 GPS가 얼마나 정밀하게 검출해내는가에 초점이 맞추어져 있다.

안산에 설치된 시험대와 수원과 대전 두 곳의 기준점에서 동시에 관측된 30초 간격의 GPS 데이터는 1일 1세션 즉, 24시간 단위로 처리되었다. 자료처리에 사용된 프로그램은 스위스의 베른대학 천문연구소에서 GPS 연구용으로 개발한 고정밀 자료처리용 프로그램인 Bernese

Ver. 4.0이다.⁹⁾ 자료처리에 필요한 GPS 위성의 궤도력은 IGS(International GPS Service for Geodynamics)에서 관측 후 약 11일 후에 산출하여 공표하는 IGS 최종 정밀궤도력(IGS Final Orbit)을 사용하였고⁵⁾, 대류층에 대해서는 Saastamoinen 모델¹⁰⁾을 사용하였다. 또한 관측 데이터중 자료처리에 사용한 위성의 고도각은 20도 이상으로 조정했다. 자료처리 과정은 1일 단위로 수신기에 저장된 GPS 데이터를 수집하고 자료처리에 필요한 정밀궤도력 등의 외부자료를 수집하는 자료수집 단계와 수집된 관측 데이터를 자료처리 프로그램에 맞도록 변환하거나 자료처리에 필요한 자료를 Bernese 프로그램에 적용할 수 있도록 준비하는 전처리 단계, 최종 결과를 구하는 자료처리단계로 나눌 수 있다. Bernese를 이용한 자료처리 과정을 그림 4에 요약하여 나타내었다.

GPS에 의한 측정 결과는 서로 직각인 동서남북과 수직방향의 성분으로 산출되므로 시험대에 부착된 측 방향이 동서남북 및 수직의 정방향과 정확하게 일치하지 않는다면 GPS의 측정치와 시험대의 실제 이동량을 직접 비교할 수 없다. 따라서 GPS를 이용한 방위각 측정을 통해 시험대의 북쪽방향 측이 진북방향에 대해 어느 정도 틀어져 있는가를 1초각까지 정밀하게 결정하였고, 이 값을 이용하여 시험대의 실제 이동량을 동서남북 및 수직의 정방향으로 환산한 후, GPS 측정치와 비교하는 방법을 사용하였다.

자료처리에 사용된 두 곳의 기준점, 즉 한국천문연구원 운영하고 있는 대전(TAEJ) 기준점과 국립지리원에

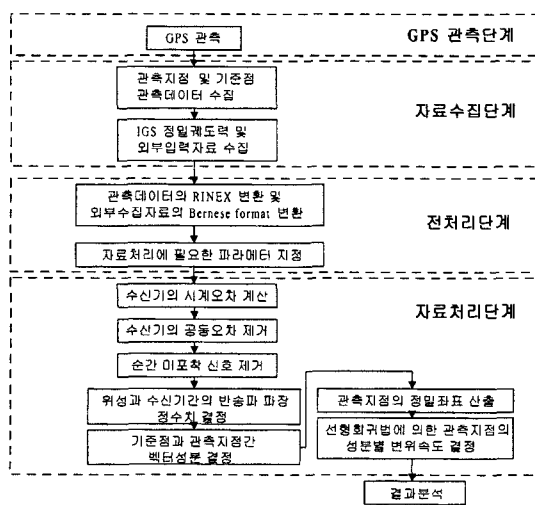


그림 4. Bernese를 이용한 자료처리 과정

서 운영하고 있는 수원(SUWN) 기준점은 모두 IGS station으로 활동중이다. 이들은 각각 1995년 10월과 1997년 12월에 IGS station으로 등록된 바 있다. 기준점인 대전과 수원은 각기 다른 GPS 장비를 사용하고 있는데, 수원의 경우에는 TurboRogue SNR-8000 수신기와 Choke-Ring 형태의 GPS 안테나를, 대전의 경우에는 TRIMBLE 4000SSI 수신기와 Compact L1/L2 with Groundplane 안테나를 사용하였다. GPS 시험대에서 사용한 장비는 대전 기준점의 경우와 동일하다.

3. 실험결과와 분석

기준점과 시험대간의 거리가 GPS의 변위측정 능력에 어떠한 영향을 미치는가를 보기 위해 시험대로부터 가까운 지점(수원; SUWN)과 먼 지점(대전; TAEJ)을 GPS 기준점으로 각각 선정하여 같은 조건으로 자료를 처리하고 두 결과를 서로 비교하였다. 그림 5와 6은 각각 수원과 대전을 기준점으로 한 시험대의 자료처리 결과를 관측일에 대하여 성분별 시계열 그래프⁸⁾로 나타낸 것이다. 그림 5에서 보면 수원-안산 시험대간 단기선(약 16 km) 결과에서는 각 성분별로 시험대의 계단식 움직임을 명확히 나타내고 있는 반면, 그림 6의 대전-안산 시

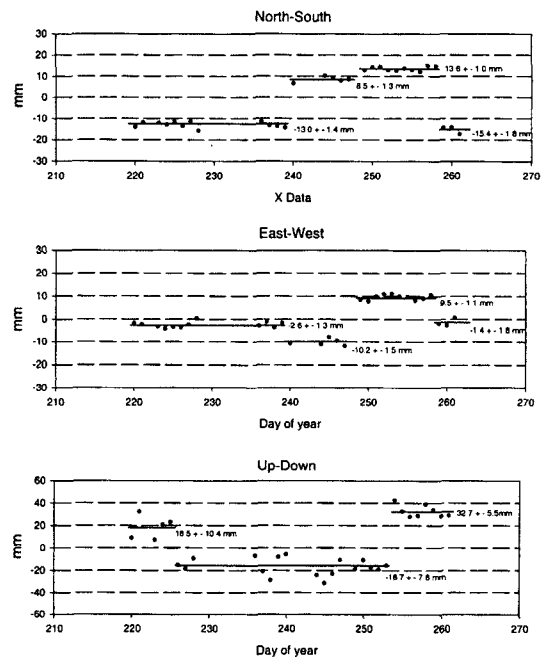


그림 5. GPS로 측정된 수원-안산 시험대간 성분별 움직임

험대간 장기선(약 112 km) 결과에서는 시험대의 계단식 움직임이 잘 나타나지 않고 있다. 이와 같은 결과는 Bernese와 같은 고정밀 자료처리 프로그램을 이용하더라도 장기선의 경우 단기선의 결과에 비해 변위측정 정밀도가 현저하게 떨어진다는 사실을 반증하는 것이다. 즉, GPS를 이용하여 변위량을 측정할 때, 기준점과 측정점간의 거리가 측정 정밀도에 영향을 미치므로 이점을 고려하여 측정지점에서 가까운 기준점을 사용하여 자료처리를 해야 한다는 것을 의미한다.

그림 5에는 시험대의 축을 계단식으로 이동하기 전에 일정기간동안 고정하여 반복 관측한 지점에 대한 GPS 측정치를 성분별로 평균하여 표준편차와 함께 나타내었

고, 그림 5를 근거로 구한 시험대의 각 성분별 측정치의 평균 및 표준편차, 이동량 그리고 이동방향을 표 1에 정리하였다. 표 1에 표시된 성분별 이동량(dN, dE, dU)은 측정기간별 평균에 대해 성분별로 이전 위치의 값을 빼준 것으로 GPS로 측정된 시험대 축의 이동량을 의미하며, 음수인 것은 반대 방향으로의 이동을 의미한다. 표 1에 제시된 결과에 의하면 GPS로 측정된 시험대의 성분별 표준편차는 수평 성분에서는 1.0 mm~1.8 mm, 수직 성분에서는 5.5 mm~10.4 mm의 분포를 보이고 있고 표준편차의 평균은 남북방향 1.4 mm, 동서방향 1.4 mm, 상하방향 7.8 mm의 정밀도로 나타났다. 고정점의 반복 측정에 따른 표준편차는 GPS 측정치의 정밀도를 나타내는 지표로서 사용될 수 있다. 그 이유는 고정점에서는 움직임이 없기 때문에 표준편차의 값이 작으면 작을수록 측정 정밀도는 더 좋다고 볼 수 있기 때문이다. 이 결과에서 보듯이 GPS에 의한 수평성분의 측정 정밀도는 약 2 mm이하인 반면 수직성분의 정밀도는 약 8 mm에 달하여 수직 성분의 정밀도가 수평 성분에 비해 4배 이상 나쁜 것으로 나타났다.

그림 3에 표시한 바와 같이 시험대의 남북방향과 동서방향의 축은 각각 두 번씩 계단식으로 이동하였으나 그림 5의 측정치에서는 각각 세 번씩 계단식 이동을 보이고 있는데, 그 이유는 시험대의 축이 진북방향에 대해 틀어져 있어 수평 방향의 어느 한 축을 움직이면 다른 축에도 영향을 미치기 때문이다. 한편 GPS로 방위각을 측정된 결과 시험대는 그림 7에서와 같이 북쪽 방향의 축이 진북방향에 대하여 북서쪽으로 14.5도 틀어져 설치되어 있었음을 확인할 수 있었고, 이 때문에 GPS로 측정한 변위량을 시험대의 실제 이동량과 직접 비교할 수 없었다. 따라서 표 2에는 시험대 각축의 이동량에 대해 수원-안산 기선의 자료를 처리하여 구한 GPS 측정값, 시험대 축의 실제 이동치, 시험대의 북쪽 방향축이 진북

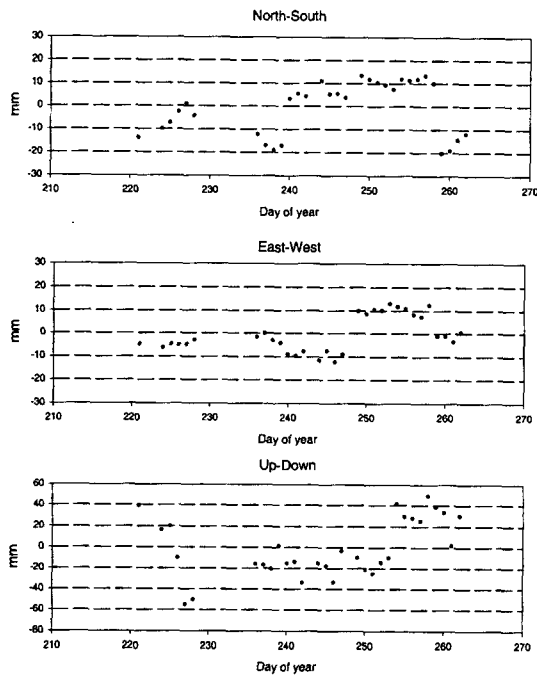


그림 6. GPS로 측정된 대전-안산 시험대간 성분별 움직임

표 1. GPS로 측정된 시험대 좌표의 평균과 표준편차(σ) 및 성분별 이동량(dN,dE,dU)

측정기간	North-South		East-West		측정기간	Up-Down	
	평균 $\pm\sigma$ (mm)	dN	평균 $\pm\sigma$ (mm)	dE		평균 $\pm\sigma$ (mm)	dU
8. 8 - 8.27	-13.0 \pm 1.4		-2.6 \pm 1.3		8. 8 - 8.13	18.5 \pm 10.4	
8.28 - 9. 4	8.5 \pm 1.3	21.5	-10.2 \pm 1.5	-7.6	8.14 - 9.10	-16.7 \pm 7.6	-35.2
9. 6 - 9.15	13.6 \pm 1.0	5.1	9.5 \pm 1.1	19.7	9.11 - 9.19	32.7 \pm 5.5	49.4
9.16 - 9.18	-15.4 \pm 1.8	-29.0	-1.4 \pm 1.8	-10.9			
표준편차(σ)의 평균	1.4		1.4			7.8	

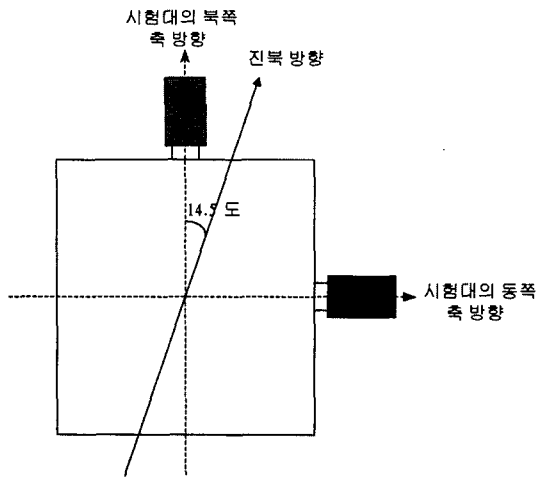


그림 7. 진북 방향에 대한 시험대의 설치상태

방향에 틀어짐만큼을 실제 이동치에 대해 성분별로 보정한 변환치를 함께 나타내어 비교하였다. 표 2에서 dN, dE, dU는 각각 북쪽, 동쪽, 수직방향의 이동량을 나타낸다.

표 2에서 볼 수 있듯이 진북방향으로의 변환 결과와 GPS 결과를 비교할 때, 북쪽과 동쪽 성분에서는 절대값으로 최대 2.7 mm, 최소 0.1 mm의 편차를 보였고, 수직 성분에서는 최대 9.4 mm, 최소 4.8 mm의 편차를 나타냈다. 한편 변환치와 GPS 결과의 차이에 대한 각 성분별 표준편차는 북쪽 성분에서 1.6 mm, 동쪽 성분에서 1.5 mm, 수직 성분에서는 7.5 mm로 나타났다. 이 결과는 고정밀 자료처리 프로그램을 사용하여 단기선에 대해 처리할 경우에 GPS를 이용하여 구조물 등의 변형을 수평 성분에서는 약 2 mm, 수직성분에서는 약 8 mm 정도의 정밀도로 검출할 수 있음을 의미한다. GPS의 변위검출 정밀도 역시 그림 5와 표 1에 나타난 GPS의 측정 정밀

도와 마찬가지로 수직 성분이 수평 성분에 비해 현저히 떨어지는 것으로 나타났다.

4. 검토와 토의

GPS의 변위검출 능력을 검증하기 위한 이 연구에서, GPS의 자료 처리 방법으로 GPSurvey와 같은 상업용 프로그램이 아닌 Bernese 4.0과 같은 고정밀 자료처리 프로그램을 채택하고, 보다 정밀한 결과를 얻기 위하여 IGS의 최종 정밀케도력과 24시간 단위의 관측데이터를 사용한 점 등을 고려하면, 도출된 결과가 GPS의 변위검출에 대한 최대 능력을 평가함으로써 각종 구조물의 변위 측정 및 감시에 GPS의 활용 가능성을 타진하는 기초 자료의 성격을 지니고 있다고 할 수 있다. 이 연구를 통해 다음과 같은 사실들을 확인할 수 있었다.

1. 고정밀 자료처리 프로그램을 사용할 경우, GPS의 변위검출 능력은 약 16 km의 단기선에 대해 수평 성분에서 약 2 mm, 수직 성분에서 약 8 mm에 이른다는 것을 알 수 있었다.
2. 100 km 이상의 장기선의 경우 단기선의 결과에 비해 변위측정 정밀도가 현저하게 떨어지는 것으로 나타났다. 즉, GPS를 이용하여 변위량을 측정할 때 기준점과 측정점간의 거리가 측정 정밀도에 영향을 미치므로 측정 지점에서 가까운 기준점을 사용하여 자료처리를 해야 한다는 것을 의미한다.
3. GPS에 의한 수직 성분의 변위검출 능력이 수평 성분에 비해 약 4배 이상 떨어진다는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 주로 수직성분인 구조물 침하 등의 변위를 수 mm의 정밀도로 검출하는데 있어 GPS가 한계성을 지닌다는 것을 암시하고 있다.

향후, GPS를 각종 구조물의 변위측정 및 감시 분야에

표 2. 시험대의 실제 변위량과 GPS로 측정된 결과의 비교

그림 3에서의 이동경로	I 이동치(mm)			II 변환치(mm)			II GPS결과(mm)			II - III(mm)		
	dN	dE	dU	dN	dE	dU	dN	dE	dU	dN	dE	dU
1) → 2)	0	0	-40	0	0	-40	0	0	-35.2	0	0	-4.8
2) → 3)	25	0	0	24.2	-6.3	0	21.5	-7.6	0	2.7	1.3	0
3) → 4)	0	20	0	5.0	19.4	0	5.1	19.7	0	-0.1	-0.3	0
4) → 5)	0	0	40	0	0	40	0	0	49.4	0	0	-9.4
5) → 6)	-25	-20	0	-29.2	-13.1	0	-29.0	-10.9	0	-0.2	-2.2	0
표준편차 $\left(\sqrt{\sum(\text{성분별 II-III})^2/n} \right)$										1.6	1.5	7.5

실제로 적용하기 위해서는 이 연구에서 다루지 못한 부분 즉, 변위검출 정밀도에 영향을 주지 않는 최대 기선 거리가 얼마인가에 대한 정량적 확인과 상업용 프로그램과 연구용 프로그램의 변위검출 능력의 차이, 관측 데이터의 양에 따른 정밀도의 차이 및 궤도력의 종류에 따른 정밀도의 차이 등에 관한 연구가 더 필요할 것이다. 특히 IGS의 최종 정밀궤도력은 관측후 약 11일 후에 발표되므로 구조물의 변위를 현장에 적용하여 신속하게 측정 및 감시하기 위해서는 궤도력의 종류에 따른 변위측정 능력의 비교 등에 대한 심도있는 연구와 더불어 GPS를 구조물의 침하 등의 측정에 활용하기 위한 수직 성분의 정밀도를 향상시키는 연구가 더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박필호, 박종욱, 조정호, 지명국, "GPS를 이용한 한반도 주변의 지각운동 측정에 관한 기초연구", 한국자원연구소, 1997.
2. 박필호, 박종욱, 조정호, 지명국, "GPS를 이용한 활성단층의 변위측정에 대한 기초연구", 한국자원연구소, 1997.
3. 박필호, 박종욱, 조정호, "GPS를 이용한 배관침하 감시 기술 현장적용 연구", 한국가스공사 연구개발원, 1998.
4. 이진덕, "Kinematic GPS 측량기법에 의한 구조물의 변형 모니터링", 한국측지학회지, 제16권 제1호, 27~40, 1998.
5. IGS, "IGS 1996 Annual Report", Nov, 59~60, 1997.
6. Kato, T., Y. Kotake, S. Nakao, J. Beavan, K. Hirahara, M. Okada, M. Hoshiba, O. Kamigaichi, R. B. Feir, P. H. Park, M. D. Gerasimenko and M. Kasahara, "Initial results from WING, the continuous GPS network in the western Pacific area", Geophys. Res. Lett., 25, 1998, 369~372.
7. Kotake, Y., T. Kato, S. Nakao, K. Hirahara, M. Okada, O. Kamigaichi, M. Hoshiba, M. Kasahara, J. Beavan, R. B. Feir, M. D. Gerasimenko, and P. H. Park, "On the Data Analysis of the Western Pacific Integrated Network of GPS (Part 1)", Journal of the Geodetic Society of Japan., Vol. 44, No. 1, 1998, 1~19.
8. Montgomery, D. C. and E. A. Peck, "Introduction to linear regression analysis", 1992, John Wiley & Sons, INC.(New York), chap. 2.
9. Rothacher, M. and L. Mervart, (eds), "Bernese GPS Software Version 4.0 Manual", 1996, Astronomical Institute University of Berne.
10. Saastamoinen, I. I., "Contribution to the theory of atmospheric refraction", Bulletin Geodique, 107, 1973, 13~34.