

## Kinematic GPS 측량기법에 의한 구조물의 변형 모니터링 Deformation Monitoring of a Structure Using Kinematic GPS Surveying Technology

이진덕\*  
Lee, Jin-Duk

### 요 旨

본 논문은 구조물의 변형과 거동의 모니터링에 GPS 측위기술의 적용가능성을 제시한다. 첫번째 부분은 GPS 관측의 반복재현성(repeatability)에 대한 정량적 연구로서 기준망내 기준점들간의 기선벡터를 반복적으로 측정함에 있어서 동일한 결과가 얻어질 수 있는가를 구명하고자 하였으며, 두번째 부분은 한 점당 몇 분이내의 관측시간이 소요되는 kinematic GPS 측량의 변형 모니터링 수행성을 평가하고자 하였다. 흙댐을 대상으로 계절 및 수위정도에 따라 총 4차에 걸쳐 모니터링 시험망에 대한 관측을 수행하였다. 기준망은 static 방식으로 관측하였고, 모니터링 점들에 대해서는 kinematic 방식은 물론 static 및 rapid-static 방식으로 각각 관측을 행하여 종래의 측량기법으로 얻어진 결과와 비교하였다. 기준점들간의 기선벡터 관측에서 평균 7 mm 이내의 3차원 기선벡터의 반복재현성을 성취할 수 있었으며, 기준망들의 폐합오차는 4~27 ppm를 나타내었다. kinematic 접근법은 종래의 측량기법에 비하여 기준점들과 모니터링점들간의 경사거리에서 3~4 mm의 차를 나타내었고, 높이에서는 4~8 mm의 차를 나타내었다. kinematic GPS 측량기법은 5 mm 정도의 측정능력을 지닌 종래의 측량기법에 의한 변형 모니터링의 효율적인 대안이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

### ABSTRACT

This paper addresses the suitability of GPS positioning technology to monitoring deformation and movement of structures. The first part of the study is an empirical quantitative study of the repeatability of GPS observations and the second part is a performance evaluation of kinematic GPS, which requires only a few minutes per a point, for monitoring deformation of an engineering structure. On the test network for monitoring of a earth dam, four observations have been conducted repeatedly on different seasons and water levels. The reference network was observed in static mode, and monitoring points were observed respectively in rapid-static mode as well as in kinematic mode in each epoch and then the results were compared with those obtained by conventional surveying techniques. The repeatability of baseline vectors to better than average 7 mm in three dimensions was achieved in base line observations between reference points and also the unclosure of reference networks showed the range of 4 ppm to 27 ppm. Compared with conventional surveying techniques, the kinematic approach showed the differences of 3~4 mm in slope distances which were observed from reference points to monitoring points, and showed the differences of 4~8 mm in height. It was ascertained that the kinematic GPS technology provides an efficient alternative to deformation monitoring by conventional means which are capable of detecting movements in the order of 5 mm.

### 1. 서 론

GPS는 지형공간정보의 수집 등 측량과 지도제작 분야에 가히 혁명적인 응용잠재성을 지니고 있으며 이제

\*금오공과대학교 토목·환경시스템공학부 부교수

필수적인 측량기법으로서 과거와 현재의 다양한 문제들에 대한 효과적이고도 효율적인 해를 제공해 주고 있다. GPS에 의한 위치결정의 잠재성에 따른 많은 응용 기회들 중의 하나가 변형 모니터링 분야로서 GPS는 관측지점간의 상호시통이 불필요하고 단시간내 대상지역내 다량의 점들에 대한 3차원 동시 측위가 가능한

전천후 측위시스템이므로 종래의 광학적 측정기법들에 비하여 효율적으로 변형발생의 성향과 범위를 결정할 수 있을 것이다.<sup>1)</sup>

변형 모니터링은 측량기술자가 수행하는 작업의 총합적인 부분으로서 공학적 구조물 및 대규모 지각에 이르기까지 다양한 대상물에 대하여 다양한 목적의 모니터링이 요구되고 있다. 유럽의 많은 국가들은 이미 공학적 구조물들에 대한 모니터링을 요구하는 공식법률이 갖추어져 있다.<sup>2)</sup> 이제까지는 주로 광학적 방법을 통한 주기적인 반복관측에 의하여 변형측량이 이루어져 왔으나 이러한 종래의 기법들에 의하여 높은 수준의 정밀도로 모니터링하는데는 많은 시간과 노력, 비용이 소요된다.

최근 변형모니터링에 GPS기법을 이용하기 위한 연구들이 꾸준히 진행되어왔다. Cannon(1995) 등은 kinematic 기법을 이용하여 Calgary 타워의 풍속에 따른 변형을 감지하였고,<sup>3)</sup> Hazak과 Leach(1995)는 Luling 및 Louisiana 교량에 대하여 동시에 10개의 GPS수신기를 사용하여 모니터링을 시도한 바 있다.<sup>4)</sup> Xin Chen(1994)은 캐나다의 지진예상구역에 대하여 기준망을 형성하고 GPS 연속관측을 통해 반복재현 성과를 도출한 결과, 수평 및 수직성분에서 수 mm의 정확도를 성취하였다.<sup>5)</sup> Stewart 등(1996)은 오스트레일리아의 오픈핏(open pit) 광산지역에서 rapid GPS방법에 의하여 수 cm의 정확도로 지반침하를 도출하였다.<sup>6)</sup> 미육군 공병대(1991)에서는 아이다호주의 Dworshak 댐을 대상으로 댐 주변에 두 개의 기준점으로부터 댐에 설치된 점들에 대하여 DGPS 방법으로 연속관측하여 mm 단위의 정확도로 모니터링하였다.<sup>7)</sup> Yehuda Bock(1986)은 GPS를 이용한 변형 모니터링에서 여러가지 오차들을 구명하고 단기선에 대하여 수 mm의 정확도, 중·장기선에서는 위성의 정밀궤도력을 사용하여 0.1 ppm보다 양호한 결과를 얻을 수 있었다.<sup>8)</sup> Collier(1994, 1995) 등은 kinematic GPS를 댐의 변형측량에 적용하여  $\pm 5$  mm의 정확도로 모니터링함으로써 GPS기법이 종래의 광학적 기법들에 대한 효과적인 대안이 될 수 있음을 제시하였다.<sup>9,10)</sup> Mizuno(1990)는 8년 주기로 관측된 정밀 측지망에 있어서 1,383개의 기선 변화량을 이용한 통계적 방법으로 지각변동 감지를 위한 측지학적 응용 가능성을 제시하였다.<sup>11)</sup> 화산활동이 활발한 일본이나 이탈리아에서는 GPS를 지진감시에 이용하고 있으며, 특히 일본의 경우에 전국에 900여개소의 GPS 관측소

를 설치하여 지층의 움직임을 mm단위까지 감시하고 있으며 100~200개소를 추가로 설치할 예정이다. 이와 같이 GPS측량은 댐, 교량의 주기적인 변형 모니터링을 통한 위험도 예측, 지하수 고갈 또는 상승으로 인한 지반의 변위, 평균해수면 변동, 광산 등지에서 채굴에 의한 표면침하, 측정간의 시통을 확보하기 곤란한 활동지역이나 경사면에서의 변위 검출 등을 위하여 중요한 기법으로 인식되고 있다.<sup>12,13)</sup>

본 연구에서는 흙댐(earth dam)을 대상으로 하여 공학적 측면에서 변형 및 거동에 대한 모니터링을 위한 GPS의 응용가능성을 입증하고자 하였다. 첫째, GPS관측의 반복재현성(repeatability)에 대한 정량적 평가를 위하여 안정된 두 점간의 상대 위치벡터를 GPS에 의하여 반복관측할 경우 항상 동일한 결과가 얻어질 수 있는지 여부와 그의 정확도 수준을 구명한다. 둘째, static, rapid-static, kinematic 기법 등의 GPS 관측방법에 따른 모니터링 관측의 정확도를 비교 평가하고, 셋째로 특히 효율적인 면에서 kinematic 접근법에 의한 주기적인 모니터링 관측을 통하여 GPS 변형 모니터링의 효율성 및 이에 수반되는 문제들을 검토하고자 한다.

## 2. 변형 모니터링을 위한 GPS 관측

구조물의 변형모니터링을 위한 GPS측량의 적용가능성을 실제관측을 통하여 검토하고자 흙댐(earth dam)의 형식으로 1946년에 축조된 금오산댐을 연구대상모델로서 선정하였다. 댐의 변위, 경사, 왜곡, 공력, 수위, 퇴사면 등에 의한 영향을 관측하여 실제의 댐과 설계상의 댐을 비교 분석하여 장기적인 안전성을 조사해야 하며, 댐의 변형 및 변위 관측은 공사중의 시공관리, 완성 후의 유지관리 및 장래에 필요한 설계자료를 얻을 목적으로 실시한다.

### 2.1 관측망 구성 및 필라 설치

그림 1은 댐의 평면도와 기준점들로 구성된 네트워크의 배치현황을 나타낸 것이다. 댐주변의 변형과 무관한 안정된 지점이라고 사료되는 댐 상류측의 2개소(RP5, RP6)와 하류측의 4개소(RP1, RP2, RP3, RP4)에 기준점(reference points)을 정하여 직경 150 mm, 높이 800 mm의 콘크리트제 필라를 설치하였다. 그리고 모니터링점(monitored points)들은 약 40 m의 등간격으

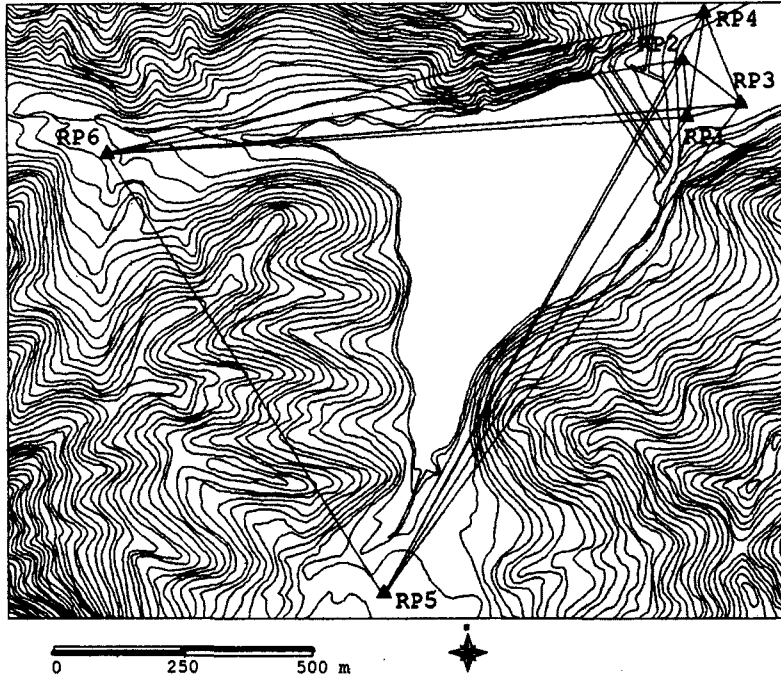


그림 1. The configuration of reference network in Dam area

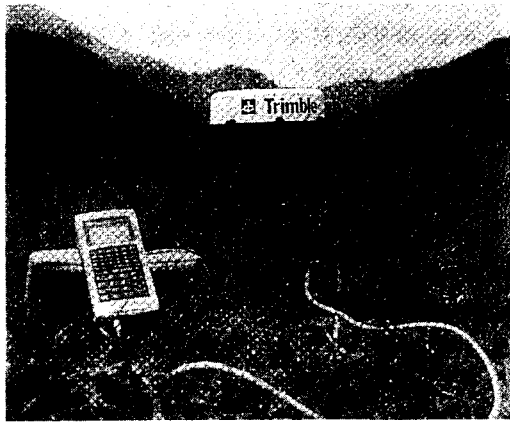


그림 2. Trimble 4600LS GPS receiver mounted on a pillar

로 댐마루에 7점, 하류측 사면 소단부에 4점, 총 11점을 정하여 역시 직경 100 mm, 높이 800 mm의 콘크리트 제 필라를 설치하였다.

필라 상면에는 tribrach adaptor를 장착할 수 있도록 센터링 소켓(centering socket)을 설치함으로써 GPS 수신기안테나는 물론, 토탈스테이션용 프리즘타겟의 마운트로 사용할 수 있도록 제작하였다.

## 2.2 관측

### 2.2.1 GPS 기준점 설치

그림 3에 나타난 바와 같이 기준망 관측을 위하여 금오공대(KNUT)내 기준점(base station) 및 댐 부근에 설치한 한개의 기준점(RP5)에 이중주파수 수신기(Trimble 4000SSE)를 설치하여 static 측량방식으로 각각 2시간 관측을 행하고 육군지도청내 GPS 연속관측점(KAMC)의 관측데이터와 조합처리하여 이 두 기준점들에 대한 WGS84 좌표성적을 얻었다.

### 2.2.2 기준망 관측

RP5를 1차 기준점으로 하여 2대의 단일주파수 수신

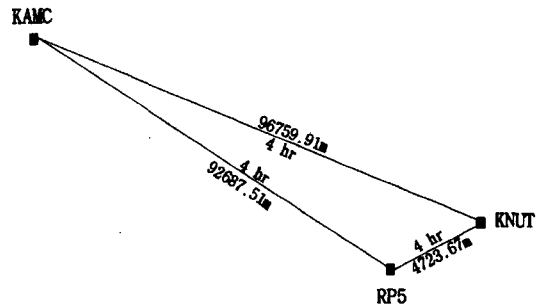


그림 3. Network for observing 1st base stations

기(Trimble 4600LS)를 사용하여 6개의 기준점들로 이루어진 기준망을 관측하였다. static GPS관측으로 각 세션(session)당 1시간씩 총 15세션을 관측하였으며, 모든 관측은 고도 15° 이상의 위성에 대하여 PDOP 6이하의 위성기하학적 상태에서 매 15초 간격으로 데이터를 수신하도록 설정해 주었다.

### 2.2.3 모니터링 관측

그림 4는 각 기준점들로부터 11개의 모니터링점들에 대한 관측망을 나타낸 것이다.

기준점에 수신기(reference receiver)를 설치하고 11개소의 모니터링점에 이동수신기(rovering receiver)를 교대로 설치하여 kinematic GPS관측은 물론, rapid static 및 static GPS에 의한 1차 관측(Epoch I)을 완성한다. 본 연구는 실제 구조물을 대상으로 하는 변형 모니터링의 시뮬레이션 성격이지만, 1차 관측과 동일한 방법으로 저수량과 계절을 달리하여 주기적으로 2차 관측(Epoch II), 3차 관측(Epoch III) 및 4차 관측(Epoch IV)을 각각 실시하였다. 이와 같은 반복관측의 결과로부터 모니터링점들의 변형량을 도출하고자 하였다.

모든 GPS 관측데이터는 단일주파수 수신기(Trimble 4600LS)에 의해 취득하고 방송궤도력(broadcast ephemeris)을 이용하여 후처리하였다. 특히 효율적인 측면에서 kinematic 접근법의 측위특성을 파악하고자 측정당 관측시간을 각각 2분과 10분씩 점유하여 관측하였으며 각 시기별 모니터링 관측결과들로부터 수평 및 수직 위치결정의 정확도를 비교 검토하고자 하였다. kinematic 관측에서는 Stop & Go 방식을 채택하여 기지선법에 의해 초기화한 다음, 각 모니터링점에서 일정한 시간간격으로 데이터를 수집하고 후처리과정에서 기선벡터 관측자료를 취득하였다.

11개의 모니터링점들에 대하여 RP1과 RP2를 각각 기준점으로 하는 관측은 kinematic GPS와 토탈스테이션 및 정밀레벨에 의해 각각 실시하였고, RP5와 RP6을 각각 기준점으로 하는 관측은 static, rapid static, kinematic 방법으로 각각 GPS 관측을 수행하고 이 경우 토탈스테이션에 의한 관측은 시동이 불가능한 관계로 제외하였다.

이상의 GPS에 의한 기준망 및 모니터링 관측의 진행 과정을 요약하면 다음과 같다.

- ▶ 현장관측에 앞서 GPSurvey 소프트웨어의 Quick

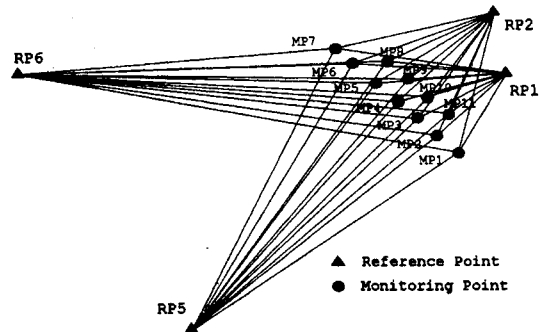


그림 4. Network for deformation monitoring

Plan을 이용하여 위성배치도(skyplot)를 출력하고 현장에서 작성한 가시위성도(visibility diagram)를 중첩시켜 측정에서의 관측 가능여부를 판단하였다.

- ▶ static 측량방식으로 6개의 RP로부터 망을 형성하여 안정된 점들간의 상대위치벡터를 관측하고, 망조정을 통해 고정좌표를 도출하였다.

- ▶ 기준수신기를 RP5에 고정시키고 모니터링점 11개에 대하여 static 측량(각 점당 60분), rapid static 측량(각 점당 20~25분)으로 관측하였고, kinematic 측량(stop & go 방식)은 기지기선법을 이용, MP1에서 초기화하고 나머지 모니터링점들에 대하여 각각 10분, 2분씩 관측하였다.

- ▶ 기준수신기를 RP6에 고정시키고 위의 과정과 동일한 방법으로 관측하였다.

- ▶ 기준수신기를 RP1에 고정시켜 kinematic 측량(stop & go방식)으로 각 모니터링점들에 대하여 10분, 2분씩 각각 관측하였다.

- ▶ 기준수신기를 RP2에 고정시켜 kinematic 측량(stop & go방식)으로 각 모니터링점들에 대하여 10분, 2분씩 각각 관측하였다.

- ▶ 이상과 같은 방법으로 1차 관측(epoch I)을 행하고 저수량과 계절에 따른 2차 관측(epochII), 3차 관측(epoch III) 및 4차 관측(epoch IV)을 실시하였다.

### 2.2.4 토탈스테이션과 정밀레벨에 의한 관측

댐 하류측에 위치한 4개의 기준점(RP1, RP2, RP3, RP4)으로 이루어진 사변형망을 4차에 걸쳐 각 시기별로 토탈스테이션으로 관측하여 기선벡터의 성과를 점검하고 최소제곱조정을 통하여 망폐합의 정확도를 도출하고자 하였다.

또한 모니터링점들의 관측에서 GPS측량과의 정확도

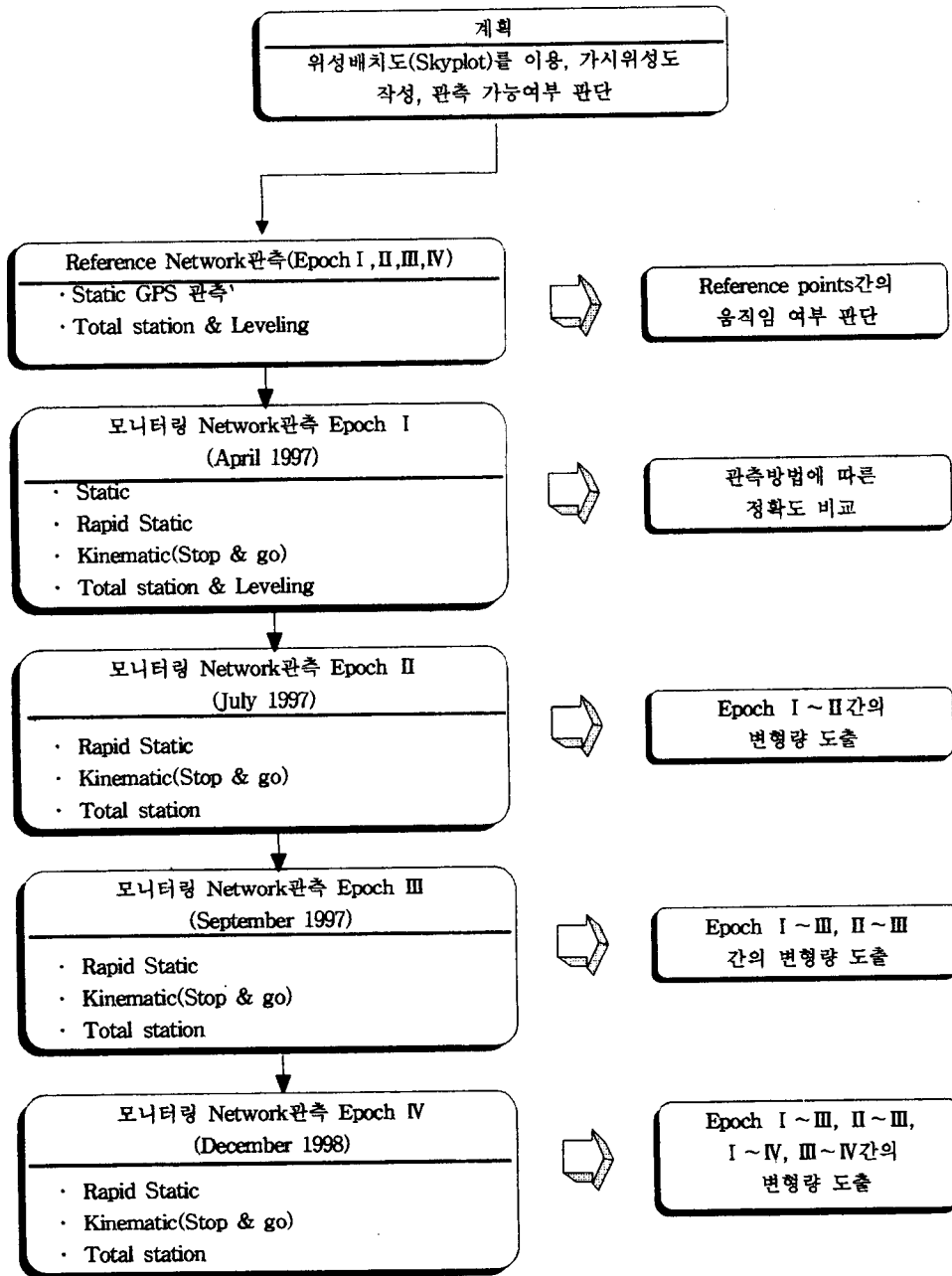


그림 5. Flow diagram of GPS deformation monitoring

를 비교하고자 GPS 관측시기와 동일한 시기에 토달스 테이션을 사용하여 시통이 양호한 두 점 RP1과 RP2점을 기준으로 11개의 모니터링점들까지의 방향과 거리를 각각 관측하고, 정밀레벨을 사용하여 6개의 기준점과 11개의 모니터링점들간의 고저차를 직접 관측하였다.

본 연구의 관측 및 진행과정을 흐름도로 나타내면 그림 5와 같다.

### 3. GPS에 의한 기준망 관측의 정확도 및 반복재현성 평가

표 1. The quality of baseline solution results (April 1997; Epoch I)

From station to station	Component			Slope dist. (m)	Ratio	RMS (cycles)
	dx	dy	dz			
RP1-RP2	35.691	- 34.258	63.353	80.392	20.2	0.006
RP1-RP3	- 97.092	- 111.207	36.137	151.986	21.6	0.004
RP1-RP4	32.342	- 127.150	153.588	201.996	30.0	0.005
RP2-RP3	- 132.782	- 76.922	- 27.213	155.848	13.3	0.005
RP2-RP4	- 3.350	- 92.861	90.242	129.530	11.2	0.006
RP3-RP4	- 129.429	15.940	117.449	175.500	6.0	0.006
RP5-RP1	- 152.066	- 869.891	753.126	1160.617	5.1	0.012
RP5-RP2	- 116.368	- 904.175	816.475	1223.808	1.6	0.015
RP5-RP3	- 249.145	- 981.103	789.271	1283.583	5.9	0.010
RP5-RP4	- 119.707	- 997.055	906.714	352.988	10.8	0.010
RP6-RP1	- 862.582	- 792.609	55.266	1172.745	18.1	0.007
RP6-RP2	- 826.886	- 826.892	118.603	1175.397	3.6	0.009
RP6-RP3	- 959.673	- 903.813	91.400	1321.440	2.5	0.014
RP6-RP4	- 830.225	- 919.785	208.838	1256.539	3.2	0.012
RP5-RP6	710.512	- 77.275	697.864	998.906	2.3	0.014

4차에 걸쳐 관측된 기준점들간의 기선해석의 초기값은 상대위치측정방식에서 도출된 WGS84 좌표를 사용하였다. 기선해석의 방법은 세션마다 단일기선으로 해석하였으며 그 결과는 Fix해에 의한 값만으로 사용하였고, 코드측정량과 위상측정량의 조합에 의해 이루어졌다. 또한 대류권보정에는 Hopfield 모델을 적용하고 방송궤도력을 사용하여 궤도좌표를 계산하였다.

3.1 기선관측벡터의 양호도 및 정확도 분석

표 1은 1차 관측에 대하여 기준점들간 GPS 관측데이터의 기선해석의 양호도를 나타낸 것이다.

표 2에서 제시하고 있는 ratio의 기준치에 약간 못 미치는 경우도 있으나 모든 관측결과가 Trimble사에서 제시하고 있는 최소 기준치 1.5 이상이므로 관측데이터의 사용은 가능하다.<sup>14)</sup> 또한 관측데이터의 잡음을 나타내는 RMS는 0.02이하로서 허용기준내에서 양호한 관측이 수행되었음을 확인할 수 있었다. 2, 3, 4차 관측에서도 1차 관측과 마찬가지로 양호한 결과를 보였다.

반복재현성을 평가하기 위하여 기준점들간의 기선벡터에 대한 표준편차를 분석한 결과, 표준편차가 평균 3 mm정도의 양호한 결과를 얻을 수 있었으며 기선이 다소 길어짐에 따라 표준편차가 증가하는 양상을 볼 수 있다(표 3).

표 2. High confidence limits for ratio and RMS criteria

Distance (km)	RMS(d=dist.)	Ratio	RMS range (cycles)
0~10	(0.02+(0.004× d))	>3.0	0.02~0.06
10~20	(0.03+(0.003× d))	>2.8	0.06~0.09
20~30	(0.04+(0.0025× d))	>2.6	0.09~0.115
30~40	(0.04+(0.0025× d))	>2.4	0.115~0.14
40~60	(0.08+(0.0015× d))	>2.2	0.14~0.17
60~100	0.17	>2.2	0.17
>100	0.20	>2.2	0.20

관측망의 조정은 Trimnet Plus로 처리하였으며 이때 내부구속조건에 의한 자유망 조정기법을 이용하여 각 측점에 대한 X, Y, Z 좌표와 그 표준오차를 산정하여 좌표의 기하학적 정밀도를 고찰하였다. 3차원 관측자료의 과대오차는 히스토그램상에서 outlier를 내포한 관측값을 검출한 후 소거하였으며, Tau 검정 채택 영역의 좌·우 한계선 내에 속하는 양질의 자료를 선정하여 재조정하였다. 또한 경중물을 고려한 Chi-square 검정을 통하여 과대오차를 검출하고, WGS84 타원체의 좌표, 측정간 기선거리 및 방위각 등을 산출하였다.

그림 6은 1차 관측의 결과, 조정의 신뢰성을 나타내는 3차원 표준오차 타원으로서 6개의 기준점들 중 RP3과 RP5를 고정점으로 두고 나머지 4개의 기준점들에

표 3. Standard deviation for slope distance at each Epoch

Form station to station	Slope distance (m)				Standard deviation (m)
	Epoch I	Epoch II	Epoch III	Epoch IV	
RP1-RP2	80.392	80.391	80.388	80.390	0.002
RP1-RP3	151.986	151.986	151.985	151.982	0.002
RP1-RP4	201.996	201.995	201.996	202.000	0.002
RP2-RP3	155.848	155.850	155.839	155.848	0.005
RP2-RP4	129.530	129.534	129.531	129.531	0.002
RP3-RP4	175.500	175.502	175.503	175.504	0.002
RP5-RP1	1160.617	1160.620	1160.609	1160.614	0.005
RP5-RP2	1223.808	1223.808	1223.811	1223.810	0.002
RP5-RP3	1283.583	1283.582	1283.575	1283.575	0.004
RP5-RP4	1352.988	1352.978	1352.976	1352.978	0.005
RP6-RP1	1172.745	1172.737	1172.735	-	0.005
RP6-RP2	1175.397	1175.404	1175.404	-	0.004
RP6-RP3	1321.440	1321.441	1321.438	-	0.002
RP6-RP4	1256.539	1256.529	1256.532	-	0.005
RP5-RP6	998.906	998.911	998.913	-	0.003

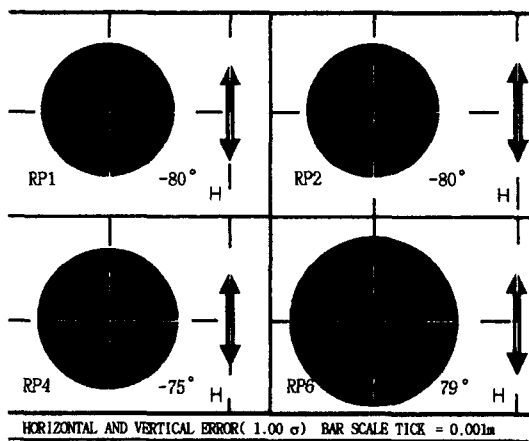


그림 6. Three dimensional error ellipse (Epoch I)

대한 WGS84 타원체상의 조정된 좌표성파이며 경도, 위도 및 고도성분에서  $\pm 3$  mm 이내의 표준오차를 결정할 수 있었다. 또한 2차, 3차, 4차 관측에서도 모두 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

### 3.2 기준망의 환폐합오차 분석

표 4는 GPS 관측망에 대한 기준점들간의 환폐합오차를 점검하기 위하여 각 시기별로 관측한 망에 대해 3차원 위치오차와 상대위치 정확도를 ppm으로 산출한 결과이다. 측점간의 기선벡터는 독립기선처리방식으로 해석되었으며, 각각의 삼각형은 3 세션에 걸쳐 관측된 것이다.

동일 세션으로 구성되는 기선에 의한 환폐합은 0이 되어야 하나 기선해석 모드에 따른 차이와 사이클슬립 제거의 한계 등 여러가지의 우연오차 때문에 그렇지 않을 수가 있으며 이는 단지 내부신뢰도의 평가 근거일 뿐이다.

표 5는 미국 NGS(National Geodetic Survey)에서 변형측량을 위해 제시한 기하학의 상대 위치 정밀도의 표준을 나타낸 것이다. 본 실측을 통하여 개개 삼각형에서 산출된 상대위치 정확도는 평균 4~27 ppm 정도이었으며, 이는 NGS에서 제시한 기준과 비교할 때 1등급 수준에 가깝다. 따라서 위성의 수 및 기하학과 관측시간을 고려한다면 1등급 이상의 양호한 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다.

## 4. GPS 관측에 의한 모니터링 관측성과의 분석

### 4.1 Kinematic GPS와 토탈스테이션에 의한 관측 기선벡터의 비교

그림 7은 kinematic GPS(이하 k-GPS)에 의해 얻어진 RP1으로부터 11개의 모니터링점들까지의 경사거리와 토탈스테이션(이하 TS)에 의해 구한 경사거리와의 차를 나타낸 것이다. 모니터링점에 따라 경사거리의 차가 1~2 mm에서 8~9 mm까지 약간씩 다르게 나타났으나 TS에 비하여 k-GPS 10분과 k-GPS 2분 관측의 차는 평균 4.2 mm와 3.4 mm의 값을 나타내었다.

표 4. The relative accuracy estimation of the loop closure

Loop (triangle)	Epoch	ΣS(m)	Closure(m)			Total(ppm)	Mean(ppm)
			Δx	Δy	Δz		
RP1-RP5-RP6	I	3332.2685	-0.0040	0.0058	0.0049	2.5780	4.6721
	II	3332.2690	-0.0154	0.0157	0.0067	6.9047	
	III	3332.2567	0.0007	-0.0078	0.0129	4.5335	
RP2-RP5-RP6	I	3398.1241	0.0050	0.0035	-0.0127	5.1624	7.2421
	II	3398.1232	-0.0205	0.0215	0.0302	12.4566	
	III	3398.1275	-0.0015	-0.0125	0.0060	4.1074	
RP3-RP5-RP6	I	3603.9287	-0.0157	0.0146	-0.0061	6.1942	4.2680
	II	3603.9343	-0.0116	0.0083	-0.0031	4.0446	
	III	3603.9259	-0.0057	0.0031	0.0066	2.5651	
RP4-RP5-RP6	I	3608.4336	-0.0058	-0.0048	-0.0110	3.6962	4.2179
	II	3608.4190	-0.0132	0.0101	0.0095	5.3139	
	III	3608.4204	-0.0055	-0.0119	0.0010	3.6435	
RP1-RP2-RP3	I	388.2255	-0.0001	0.0000	0.0031	7.8684	23.2116
	II	388.2261	-0.0016	0.0010	0.0021	7.1997	
	III	388.2124	-0.0029	0.0137	0.0159	54.5667	
RP1-RP2-RP4	I	411.9176	-0.0017	0.0043	0.0063	19.0843	12.6054
	II	411.9194	0.0038	-0.0032	0.0040	15.5030	
	III	411.9157	0.0013	0.0004	0.0001	3.2290	
RP1-RP4-RP3	I	529.4817	0.0043	-0.0032	0.0016	10.5377	7.2385
	II	529.4821	-0.0001	0.0008	0.0004	1.7300	
	III	529.4845	-0.0015	-0.0028	-0.0039	9.4479	
RP2-RP4-RP3	I	460.8778	0.0028	0.0011	0.0049	12.4394	27.4843
	II	460.8852	0.0053	-0.0034	0.0023	14.5566	
	III	460.8731	0.0027	-0.0161	-0.0197	55.4568	

표 5. Geometric relative positioning accuracy standards for deformation measurements

Survey categories	Order	(95% confidence level) Minimum geometric accuracy standard	
		P(ppm)	a(1:a)
		Global deformation measurement monitoring	AA
Regional and local deformation measurement monitoring surveys	A	0.1	1:10,000,000
Local deformation measurement monitoring; high-precision engineering surveys	B	1	1:1,000,000
Local precise engineering and geodetic surveys; short baselines of less than 1000 m	1	10	1:100,000

그림 8은 RP2를 기준으로 한 모니터링점들까지의 경사 거리에 대하여 TS와 k-GPS의 차를 비교하여 나타낸

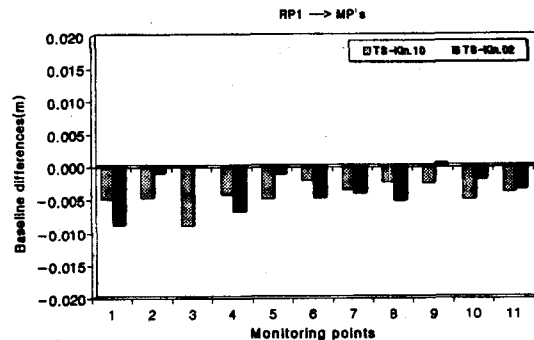


그림 7. Comparison of RP1-to-MP's slope distances measured by TS and kinematic GPS

것으로서 TS를 기준으로 한 k-GPS 10분 및 2분과의 차가 평균 4.5 mm, 4.7 mm의 값을 나타내었다.

#### 4.2 Kinematic GPS와 정밀레벨에 의한 고저차 비교

고저차는 정밀레벨로 관측한 결과를 기준으로 하여



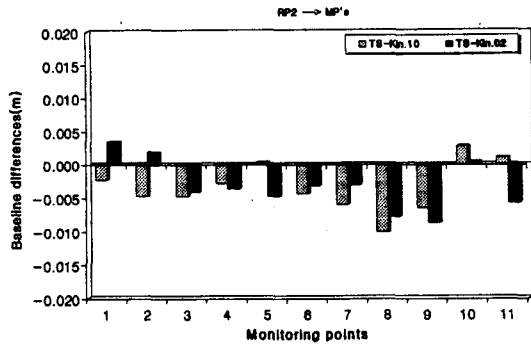


그림 8. Comparison of RP2-to-MP's slope distances measured by TS and kinematic GPS

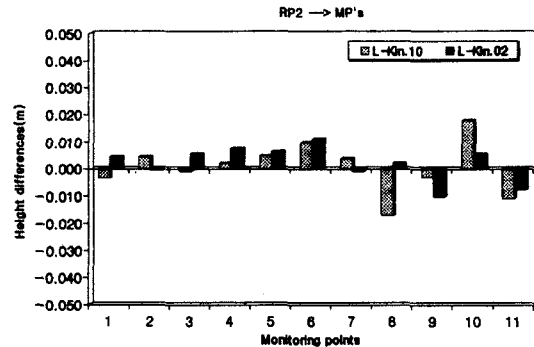


그림 10. Comparison of elevation differences by leveling with ellipsoidal height differences by kinematic GPS (from RP2 to MP's)

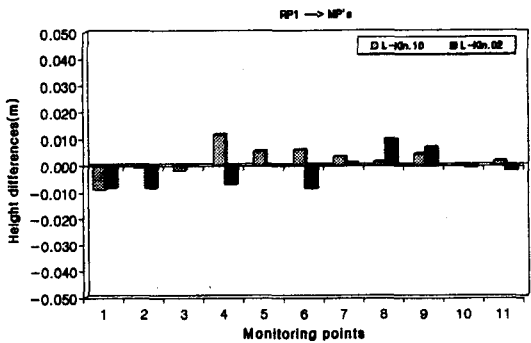


그림 9. Comparison of elevation differences by leveling with ellipsoidal height differences by kinematic GPS (from RP1 to MP's)

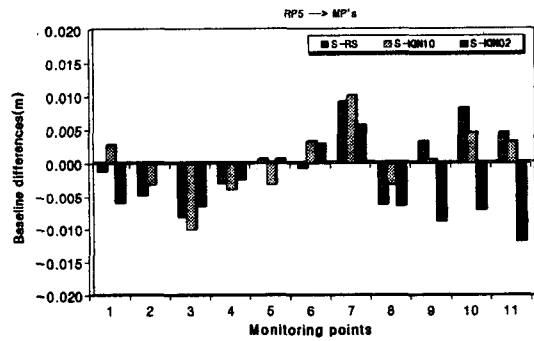


그림 11. Comparison of RP5-to-MP's slope distances measured by static, rapid static and kinematic GPS

GPS측량으로 얻은 타원체면으로부터의 높이성과와 비교하였다.

그림 9는 k-GPS와 정밀레벨에 의한 RP1으로부터 11개의 모니터링 점까지의 고저차를 비교하여 나타낸 것이다. k-GPS 10분 및 2분 관측에서는 정밀레벨에 의한 성과에 비하여 각각 평균 4.2 mm, 4.8 mm의 차를 나타내었다. 그림 10의 RP2를 기준국으로 한 경우에는 정밀레벨에 의한 성과에 비하여 k-GPS 10분 및 2분 관측에서 각각 평균 7 mm, 5.1 mm의 차를 나타내었다.

#### 4.3 GPS 관측방법들간의 모니터링 기선벡터의 비교

2.2.3절에서 전술한 바와 같이 댐 상류측에 위치한 RP5 및 RP6으로부터 모니터링점들까지는 시통이 불가능하여 TS에 의한 관측은 제외하였으며, 그 대신 static

ic GPS 관측결과를 기준으로 하여 rapid static, kinematic 10분 및 2분의 관측결과와 비교하였다.

그림 11은 RP5를 기준국으로 하여 얻은 11개의 모니터링점들까지의 경사거리를 static GPS 성과를 기준으로 하여 rapid static 및 kinematic GPS성과와의 차를 비교 도기한 것이다. Static 관측에 비하여 rapid static에서 평균 4.6 mm, kinematic 10분과 2분에서 각각 평균 4.4 mm, 5.4 mm의 차를 나타냈으며, static 관측을 제외한 이들 세 가지 관측방법이 1 mm이내에서 거의 대등한 정밀도를 나타내었다. 그림 12는 RP6을 기준국으로 한 경우로서 static 관측에 비하여 rapid static에서 평균 2.2 mm, kinematic 10분 및 2분에서 각각 평균 4.2 mm, 8 mm의 차를 나타내었다.

고저차는 정밀레벨로 관측한 것을 기준으로 하여 비교한 결과, RP5를 기준점으로한 static, rapid static, kinematic

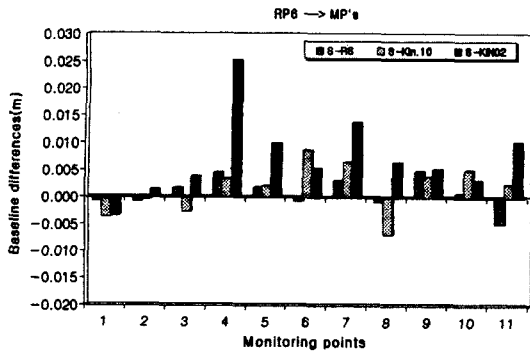


그림 12. Comparison of RP6-to-MP's slope distances measured by static, rapid static and kinematic GPS

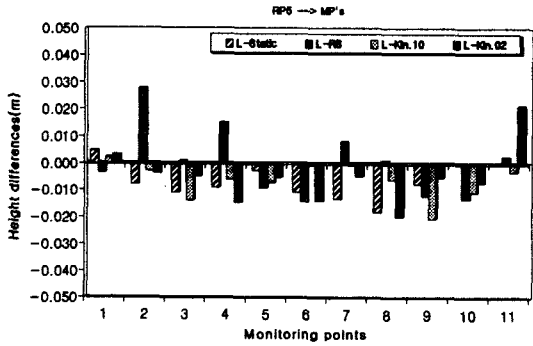


그림 13. Comparison of elevation differences by leveling with ellipsoidal height differences by static, rapid static and kinematic GPS (from RP5 to MP's)

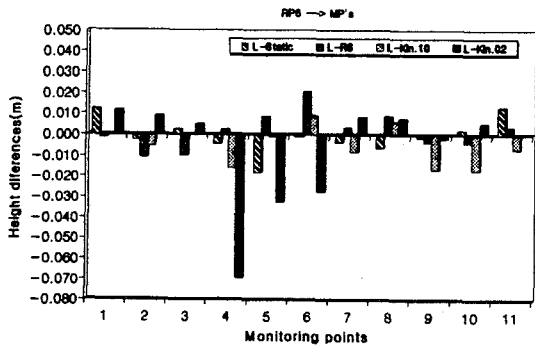


그림 14. Comparison of elevation differences by leveling with ellipsoidal height differences by static, rapid static and kinematic GPS (from RP6 to MP's)

10분 및 2분 각각의 관측에서 평균 7.8 mm, 9.8 mm, 6.7 mm, 9.4 mm로 나타났다(그림 13). 또한 RP6을 기준

으로 하였을 때는 6.5 mm, 6.9 mm, 7.7 mm, 16.5 mm로 나타났으며, 기선이 다소 길어짐에 따라 수평성분에 서보다 수직성분에서 편차가 커지는 양상을 보였다(그림 14).

## 5. 변형량 검출

### 5.1 관측시기에 따른 기선벡터의 변화

댐 하류 및 상류측에 배치한 기준점들을 기준으로 하여 4차에 걸쳐 11개의 모니터링점들에 대한 관측결과로부터 댐의 변형을 도출하고자 실제관측에서는 RP1과 RP2로부터 각 모니터링점에 대하여 kinematic 방법으로 측정당 10분과 2분씩의 점유시간을 취하여 관측하였고, RP5와 RP6으로부터 각 모니터링점에 대하여 rapid static과 kinematic 10분 및 2분 관측을 각각 행하였으나 여기서는 rapid static과 kinematic 2분 관측 결과만을 제시한다. k-GPS의 초기화 방법으로서 1대의 수신기를 기준점에 고정하고 다른 1대의 수신기를 모니터링점들 중 하나인 MP1에 세워 rapid static으로 20분간 관측을 행한 후 미지점의 좌표를 결정하는 기지기선법을 사용하였으며, 사후처리된 기선벡터는 고정(Fix) 해에 의해 얻어진 값으로 비교하였다.

그림 15는 RP1으로부터 각 모니터링점에 대하여 k-GPS 2분 관측으로 얻어진 경사거리, 즉 기선벡터의 결과이다. E1(Epoch I)에 비해 E2(Epoch II), E3(Epoch III)에서 각각 3.7 mm, 3.2 mm의 변화량을 보였으며 이것은 k-GPS 10분 관측에서 얻은 변화량상과 거의 비슷하다. 그림 16은 RP2를 기준점으로 하여 얻은 k-GPS 2분 관측결과이다.

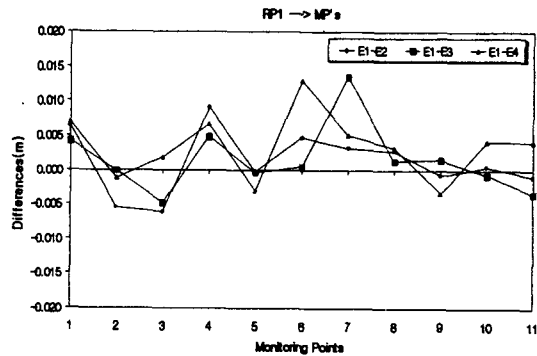


그림 15. Comparison of RP1-to-MP's slope distances measured at each Epoch (by k-GPS 2 min)

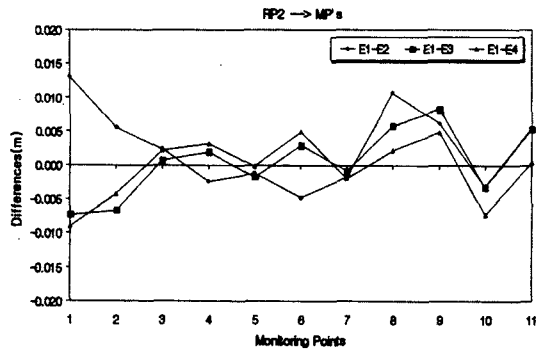


그림 16. Comparison of RP2-to-MP's slope distances measured at each Epoch (by k-GPS 2 min)

RP5와 RP6를 기준국으로 한 변형데이터는 지면관계로 생각한다.

### 5.2 토달스테이션 관측에서 관측시기에 따른 기선 벡터의 변화

11개소의 모니터링점들을 대상으로 RP1과 RP2에서 각각 TS에 의한 관측시간의 경사거리 관측값들의 차

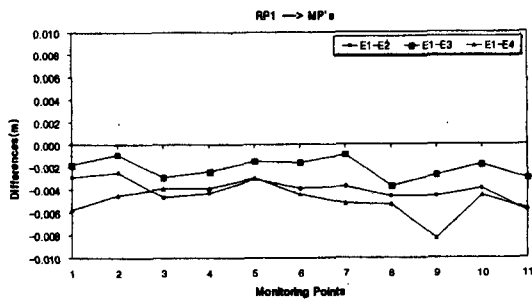


그림 17. Comparison of RP1-to-MP's slope distances measured by TS at each Epoch

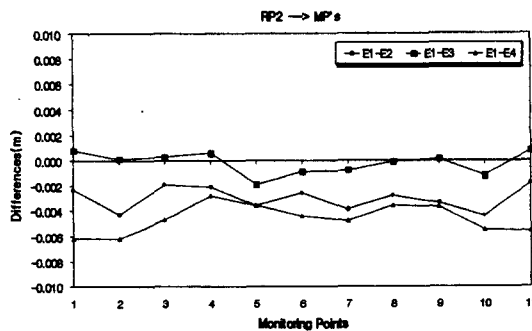


그림 18. Comparison of RP2-to-MP's slope distances measured by TS at each Epoch

를 그림 17, 18에 각각 나타내었다. 200 m이내의 경사 거리를 RP1을 기준국으로 하여 동일한 조건하에서 모니터링한 결과, 갈수위인 E1에 비하여 홍수위인 E2일 때 오히려 상류쪽으로 평균 4 mm 정도 이동하였음을 볼 수 있고, 정상수위인 E3에서는 평균 2 mm 정도 하류쪽으로 이동함으로써 저수량에 따른 댐의 변위양상을 볼 수 있었다. 또한 RP2를 기준국으로 하여 모니터링한 결과, E2일 때 역시 평균 3 mm 정도 상류쪽으로 이동하였고 E3일 때 하류쪽으로 다시 평균 2 mm 정도 이동한 것으로 나타났다.

### 5.3 LGH 좌표에 의한 변형량 비교

WGS84 지심좌표계(X, Y, Z)상에서는 변형발생의 성향을 현실적으로 인식하기 곤란하므로 소규모 지역에서 임의 기준점을 원점으로 하는 국지적 측지수평좌표계(local geodetic horizon coordinate system, 이하 LGH좌표계)를 이용함으로써 변형발생의 방향과 크기를 비교적 용이하게 파악할 수 있을 것으로 기대하였다. 임의 한 점의 기준점(reference point)으로부터 11개의 모니터링 점들까지의 관측된 기선벡터에 대한 WGS84 지심좌표 성분( $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ )을 LGH 좌표성분( $\Delta n, \Delta e, \Delta u$ )으로 변환하여 관측시기에 따른 모니터링 점들의 이동량을 비교하였다.

그림 19에서 원점 P를 기준으로 미지점 P<sub>i</sub>에 대한 상대치벡터를 도출한다. 변형모니터링에 있어서 임의 기준점(reference point)으로부터 모니터링점(monitored point)까지의 북, 동 요소( $\Delta n, \Delta e$ ) 및 높이요소( $\Delta u$ )에 의해 상대적으로 그 차를 측정할 수 있다. 높

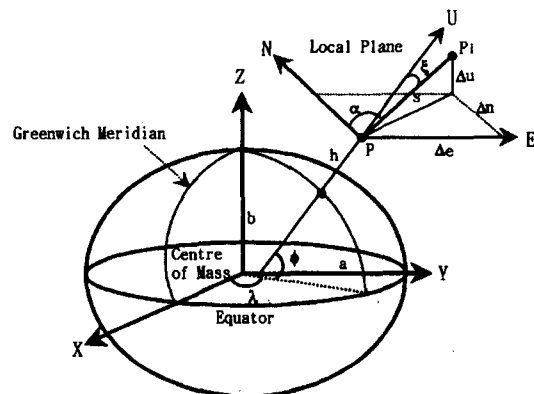


그림 19. Geocentric coordinate system and local geodetic horizon system

이차는 국소평면에서 기준점에 대한 전방측점의 수직 요소이나 타원체의 곡률로 인하여 측점 P로부터 P<sub>i</sub>에 대한 Δh와 Δu간에는 약간의 차이가 생긴다.

LGH 좌표차(Δn, Δe, Δu)와 관측값(α, ξ, s)과의 관계는 다음과 같으며,<sup>1)</sup>

$$\Delta n = s \sin \alpha \cos \alpha \quad (1)$$

$$\Delta e = s \sin \xi \sin \alpha \quad (2)$$

$$\Delta u = s \cos \xi \quad (3)$$

여기서 Δn, Δe, Δu: 측점간의 북, 동 및 타원체법선 방향의 성분

α, ξ, s: 측점간의 방위각, 천정각 및 경사거리

그림 19로부터 지심좌표의 차(ΔX, ΔY, ΔZ)로부터 LGH 좌표(Δn, Δe, Δu)로의 변환식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta n \\ \Delta e \\ \Delta u \end{bmatrix} = R(\phi, \lambda) \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서

$$R = \begin{bmatrix} -\sin \phi \cos \lambda & -\sin \phi \sin \lambda & \cos \phi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \phi \cos \lambda & \cos \phi \sin \lambda & \sin \phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

RP5를 LGH 좌표의 원점으로 취하여 GPS 관측방법에 따른 11개의 모니터링점들에 대한 Δn, Δe, Δu 좌표성분들을 비교한 결과, static 관측결과에 비하여 rapid static, kinematic 10분 및 2분 관측의 경우 Δn에서 각각 평균 6.3 mm, 4.7 mm, 6.9 mm, Δe에서 3.1 mm, 2.4 mm, 2.7 mm, Δu에서 13.7 mm, 7.3 mm, 5.8 mm의 차를 나타내었다. RP6을 좌표원점으로 하여 관측방법에 따른 11개의 모니터링점들에 대한 좌표성분들을 비교한 결과 static 관측결과를 기준으로 rapid static, kinematic 10분 및 2분 관측의 경우 Δn에서 각각 평균 4.1 mm, 5.5 mm, 6.1 mm, Δe에서 2.4 mm, 4.1 mm, 7.7 mm, Δu에서 11.5 mm, 11.4 mm, 14.7 mm의 차를 나타내었다. 변형 모니터링을 위한 GPS의 관측방법에 따른 수평위치(N, E)에서의 차가 최대 7~8 mm를 나타내었고 수직방향(Up)에서는 최대 14~15 mm 정도의 차를 나타내었다. GPS 관측방법별 변형측정에서 수직위치의 정확도는 수평위치에 비해 2배 정도 낮게 나타난다는 것을 시사해 준다.

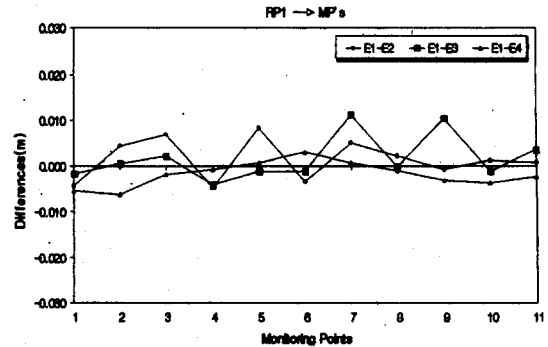


그림 20. Change of Δn components from RP1 to MP's with Epochs in LGH coordinate system (k-GPS 2 min)

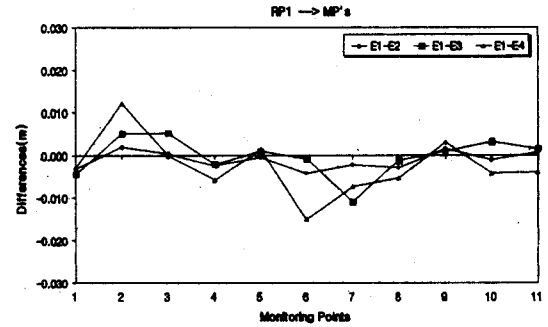


그림 21. Change of Δe components from RP1 to MP's with Epochs in LGH coordinate system (k-GPS 2 min)

갈수위(E1), 홍수위(E2), 정상수위(E3), 동절기(E4) 등 다중시기별 관측에 의하여 각 방향 및 크기에 대한 변형량을 비교하였다. 여기서는 RP1을 기준으로 하여 11개의 모니터링점들에 대한 kinematic 2분 관측의 결과만을 제시한다. N방향으로는 모든 시기에 거의 동등한 차이의 값으로 나타난 반면, E의 직각방향인 E 방향에서 미소한 변화를 발견할 수 있었다(그림 20, 21). 또한 높이(U<sub>p</sub>)에서는 kinematic 관측에서 발생하기 쉬운 우연오차들로 인하여 변형량 도출은 기대에 미치지 못하고 있다(그림 22).

동경원점을 측지기준(datum)으로 하는 기준타원체의 TM 투영 및 지오이드에 근거한 정표고에 의하여 수평 위치 및 높이의 변형량을 산출하는 경우 좌표변환과정에서 정확도가 저하될 우려가 있으므로 여기서 제시한 LGH좌표 뿐 아니라 WGS84 타원체의 TM 투영 및 타원체 기준높이에 의하여 변형을 설명하는 것도 고려할

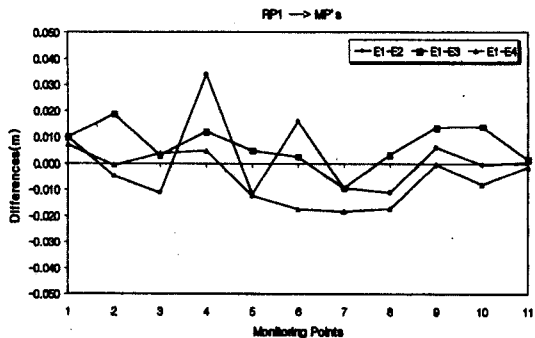


그림 22. Change of  $\Delta u$  components from RP1 to MP's with Epochs in LGH coordinate system (k-GPS 2 min)

수 있을 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

구조물의 변형 모니터링을 위한 GPS 위성측량기법의 응용가능성을 구명하고자 흙댐 구조물에 대하여 계절과 수위를 달리하여 4차에 걸친 GPS 관측을 행하고 그 성과를 비교한 결과, 다음의 결론을 얻었다.

1. 기준망(reference network)에 대한 GPS 반복관측의 결과, 1.5 km이내의 기선에서 평균 3 mm의 표준오차를 나타냈으며, 기준망을 구성하는 삼각형별로 환폐합 오차를 점점한 결과, 평균 4~27 ppm의 상대정밀도를 나타내었다.

2. kinematic 기법으로 모니터링점들을 관측한 결과, 기준점으로부터의 경사거리는 토탈스테이션에 의한 성과에 비하여 평균 3~4 mm의 차를 나타내었고, 높이성분에서는 정밀레벨에 의한 관측성과에 비하여 4~8 mm의 차를 나타내었다. kinematic 접근법은 종래의 광학적 측량기법에 비하여 소요시간 및 인력면에서 최소 2배 이상의 효율성을 확인할 수 있었고 정확도면에서 cm이내의 움직임을 검출해 낼 수 있는 변형 모니터링 기법의 대안이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

3. 소규모 지역에서 임의 기준점을 원점으로 하는 국지적 측지평면좌표계(LGH coordinates)를 이용함으로써 WGS84 지심좌표계에 비하여 변형발생의 방향과 크기를 용이하게 파악할 수 있었다. 동경원점을 측지기준으로 하는 지역타원체에 근거한 TM 투영 및 지오

이드에 근거한 정표고를 이용하여 변형량을 산출할 경우 좌표변환과정에서 정확도가 저하될 우려가 있으므로 WGS84 타원체의 TM 투영 및 타원체 기준높이에 의해 변형을 설명하는 것도 고려할 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 1997년도 핵심전문연구(과제번호 KOSEF 971-1207-026-1) 지원에 의해 이루어졌으므로 동재단에 심심한 사의를 표합니다.

## 참고문헌

1. Günter Seeber, Satellite Geodesy, Walter de Gruyter, 1993, 209-355.
2. P. A. Cross, "Surveillance and monitoring: from millimetres to megametres", 3rd Symposium on Surveillance and Monitoring Surveys, keynote Address, 1995.
3. M. E. Cannon and G. Lachapelle, "Kinematic GPS Trends-Equipment Methodologies and Applications", GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications, 115, 1995, 161-169.
4. M. D. Hazak and M. P. Leach, "Bridge Monitoring by GPS", *Surveying World*, 3(3), 1995, 8-11.
5. Xin Chen, "Analysis of Continuous GPS Data from the Western Canada Deformation Array", Proc. ION GPS-94, 2, 1994, 1339-1348.
6. M. P. Stewart, M. Tsakiri and X. Ding, "GPS Navigation Techniques in Open Pit Deformation Monitoring", Proc. ION GPS-96, 2, 1996, 1225-1231.
7. U.S Army Corps of Engineers(USACE), "NAVSTAR Global Positioning System Surveying", EM 1110-1-1003, Washington, D. C., 1991.
8. Yehuda Bock, "Monitoring of Deformations with GPS" Deformation Measurements Workshop, Proc., 1986, 96-111.
9. P. A. Collier, "Deformation surveys by kinematic GPS", 3rd Symposium on Surveillance and Monitoring Surveys, 1995, 9-19.
10. P. A. Collier, "Static and Kinematic GPS for Deformation Monitoring", Proc. FIG XX Congress Commission V, 1994, 389-401.
11. H. Mizuno, "Comparative results of repeated distance measurements" IAG Symposia 101, Global and Regional Geodynamics, Springer Verlag, 1990, 285-292.

12. USGS, "GPS Monitoring of Pacoima Dam", WWW Pages: <http://www.socal.wr.usgs.gov/hudnut/hudnut/dam.html>.
13. G. W. Hein and B. Riedl, "High Precision Deformation Monitoring Using Differential GPS", Boulder, co, USA, GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications, Symposium No.115, July 3-4, 1995, 180-184.
14. Trimble Navigation Limited, GPSurvey : Software User's Guide, 1996.
15. 이진덕, 이병환, 류재엽, 정한상, "댐 구조물의 변형모니터링을 위한 GPS의 응용", 대한토목학회 학술발표회논문집 III, 1997, 73-76.