

GPS에 의한 댐 변형 모니터링의 변위 분석 Displacement Analysis of Dam Deformation Monitoring with GPS

장상규* · 김진수** · 신상철*** · 박운용****

Jang, Sang-Kyu · Kim, Jin-Soo · Sin, Sang-Chuel · Park, Woon-Yong

요 旨

본 연구에서는 50년된 흙댐을 대상으로 정적 GPS 관측방법을 이용하여 변형 모니터링을 실시하였다. 실험 대상은 모르타르로 응급 복구된 지역으로, 기준망 관측은 2차에 걸쳐 기준점들간의 기선벡터를 관측하였고, 모니터링 점들에 대해서는 4회 걸쳐 관측되었다. 측정된 관측값의 분석은 Data snooping법에 의해 과대오차를 제거하고, 우연오차를 최소제곱법으로 조정하여 좌표를 산출하였고, 분산-공분산행렬로 변위를 계산하였다. 또한 조정된 좌표는 95% 신뢰타원으로 정밀도를 표시하였으며, 계산된 변위의 크기와 방향은 그림으로 나타내었다.

ABSTRACT

On this study, a 50-years-old earth dam was measured by the static method of GPS for deformation monitoring. The reference network was measured by the vector between points in twice times and the monitored points were observed in four times at test field, i.e. an embankment which was restored by mortar. In addition, gross errors in the measurement were estimated and eliminated by data snooping method and random errors were adjusted by least square method. Finally, the amount of displacement was estimated from variance-covariance matrix. Also, precision of points were showed by the confidence ellipse(95%), and the amount of displacement was figured.

1. 서 론

사회가 점진적으로 발전하면서 성수대교나 삼풍백화점의 붕괴 그리고 대구 지하철 가스폭발 등과 같은 대형사고가 빈발함에 따라서 인간의 생명과 구조물 안전이 중요한 관심사로 등장하고 있다. 따라서 구조물의 안전과 변형에 대한 공학적 측면의 구조물 해석이 증가하고 있는 실정에서 위성항법시스템인 GPS에 의한 댐 구조물의 안전성을 검토하고자 하였다. 일반적으로 댐은 치수와 용수를 목적으로 건설되며, 다목적으로 건설된 대형 댐들은 사람들이 상주하면서 상시적으로 안전성을 검사하고 있다. 하지만 농업용수를 주목적으로 하는 소규모 저수

지들은 상시적인 안전성 검사 없이 거의 무방비 상태로 놓여져 있으며, 기상이변에 의해 집중호우와 계절적인 강수 편차가 뚜렷한 우리나라에서는 재해예방과 안전성 확보 차원에서 댐 모니터링이 필요하다.

오늘날 새로운 관측기법과 측량기계의 발달의 발달로 모니터링의 정확도를 상당히 증가시켰을 뿐만 아니라 비측지 기계와 결합한 관측방법도 급속히 발달되고 있다. 그러나 비측지학적 방법은 연속적인 관측과 정확도는 높을지라도 고비용적이며 반영구적이지 못하다는 단점을 가지고 있지만, GPS방법은 연속적 관측과 정확도가 높을 뿐만 아니라 구조물에 설치하면 거의 반영구적으로도 이용할 수 있다. 따라서, 국부지역에서 GPS에 의한 3차원 변형 모니터링으로 사전에 구조물에 대한 정확한 변형량을 관측하고, 변형추이를 예측하여 대형사고를 미연에 방지함으로써, 인간의 생명과 활동을 보호함과 동시에 구조물의 중요 정보를 취득할 수 있으므로 현대사회에서 변형 모니터링은 그 중요성을 이루 말할 수 없다.

*상주대학교 토목공학과 교수

**동아대학교 공과대학 토목·해양공학부 시간강사

***동아대학교 공과대학 토목공학과 대학원 시간강사

****동아대학교 공과대학 토목·해양공학부 교수

2. 분석 이론

2.1 변위 검출

국부적 변형측량에서 3차원 좌표조정은 임의로 선택된 좌표계와 측척, 회전요소에 의해 좌표와 분산-공분산 행렬이 계산됨으로써 좌표조정당시에 선택된 좌표계, 측척, 회전요소에 대해 종속관계를 갖게 된다. 따라서, 변형측량은 동일한 대상물에 대해 일정한 시간간격을 두고 변형되어가고 있는 대상물을 반복관측하여 얻어진 좌표값을 비교·분석함으로써 변형해석을 하게 된다. 그러므로, 각각의 관측 epoch에 선택된 좌표계의 원점, 측척, 회전요소를 통일시켜야 하는데, 이때 가중상사변환식이 이용되고 있다. epoch i에서 좌표계(x_i, y_i, z_i)와 epoch j에서의 좌표계(x_j, y_j, z_j)에 대한 관계를 식 (2-1)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = S_0 \cdot R \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

여기서, S_0 는 측척이고, R 은 회전행렬, x_0, y_0, z_0 는 원점 이동량이다.

식 (2-1)을 다음 식 (2-2)과 같이 유도하여

$$S = I - GG^{-1} \quad (2-2)$$

G 를 구성하는 대상점 중 변위점과 고정점으로 구분하여 표시하면 식 (2-3)와 같다.

$$G = \begin{bmatrix} G_r \\ G_e \end{bmatrix} \\ S = I - G_r(G_r^T W G_r)^{-1} G_r^T W \\ - G_e(G_r^T W G_r)^{-1} G_r^T W \quad (2-3)$$

변위벡터와 분산-공분산 행렬의 가중상사변환식은 식 (2-4)과 같이 된다.

$$DX_{i+1} = SDX_i \\ Q_{dx_{i+1}} = SQ_{dx_i} S^T \quad (2-4)$$

식 (2-4)은 경중률 행렬(W)이 변화되어 반복계산되고, 수렴조건이 만족되면 반복계산을 중단하게 된다.

2.2 최소제곱법

변형 모니터링에 요구되는 정확도가 상당히 높기 때문

에 소거되지 않은 오차로 인하여 점 변위와 같은 크기로 쉽게 오해될 수 있다. 따라서 최소제곱치리로서 비슷한 크기의 오차를 소거해야 하며, 수학적 선형모델은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$L = AX + \varepsilon \quad (2-5)$$

여기서, L = 관측 벡터

ε = 오차 벡터

X = 미지값 벡터

A = 설계 또는 계수 행렬

그리고 조정된 관측값 \bar{L} 은 식 (2-6)과 같다.

$$\bar{L} = A\bar{X} \quad (2-6)$$

3. 실험 및 분석

3.1 실험대상 및 필라 배치도

연구지역에 대한 전체 제방길이는 680 m이고, 형식은 Zone, 구조는 필댐이다. 상부 폭은 5 m이며, 높이는 15 m, 총 저수량은 5212 ton이다. 축조 년대는 1949년으로서 약 50년된 노후구조물이고, 저수지의 최대 깊이는 8 m이며, 유역 면적 및 만수시의 면적은 각각 15,488 ha, 97 ha이다. 그리고 여수로는 슈트식으로 총 연장 42 m이고, 높이는 1.5 m이다.

모니터링을 실시하는 목적은 시설물 안전점검과 적절한 유지관리를 통하여 재해를 사전에 예방하고 시설물

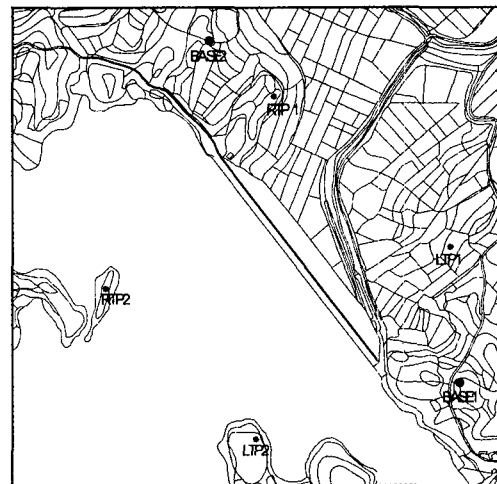


그림 1. 기준망 필라 배치도

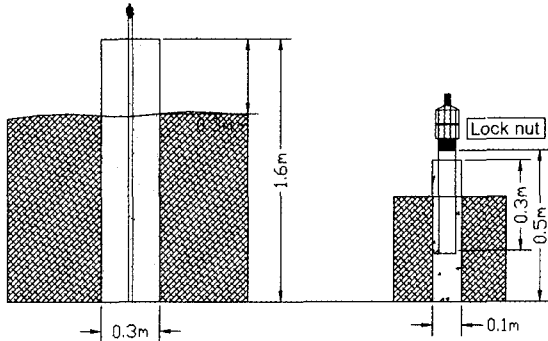


그림 2. 기준망과 모니터링 점의 필라 모형

효율성을 증대함으로써 공공의 안전을 확보하는 것이다. 따라서 본 연구의 실험지역으로 선택한 저수지는 98년 홍수시에 제방 중심의 점토층이 유실되어 시멘트폴로 응급복수를 실시한 곳이며, 응급복구를 실시한 제방길이는 대략 여수로로부터 150 m 정도이다. 필라는 기준점과 보조점을 달리 제작하였으며, 그림 2와 같이 기준점은 1.6 m 높이, 직경 30 cm 콘크리트에 약 1cm가량의 쇠파를 주입하여 제작되었고, 대상점 pillar는 0.6 m 높이, 직경 0.1 m 콘크리트에 기준점과 같이 쇠파를 주입하여 제작하였다. 또한 설치시에는 콘크리트를 주입하여 침하되거나 흔들리지 않도록 설치되었으며, 상부에는 Lock nut을 설치하여 수신기 및 정준기를 설치할 수 있도록 하였다.

3.2 기준망 관측

대전 천문대와 수원 국립지리원내에 있는 GPS 상시관측점을 이용하여 GPS관측을 실시하였다. WGS84 좌표는 IGS(International GPS Service)에서 ftp(file transfer protocol)를 이용하여 대전과 수원의 데이터를 획득하였고, 수원을 고정점으로 대전과 연구지역의 좌표를 구하였으며, 대전점에 대한 차이값을 보면, 위도에서는 0.000004", 경도에서는 0.000013"의 차이를 보이고 있으며, 높이에서는 1.0668 m의 차이를 나타내었다. 그림 3은 대전과 수원 그리고 연구대상지역의 기준점을 연결하는 GPS 관측망을 도시하였으며, 그림 4는 연구대상지역의 기준망을 나타내는 것으로 ± 3 mm의 표준편차를 보였다.

3.3 관측값 분석

GPS에 의해 관측된 조정값들은 WGS84 좌표계의 지리좌표나 지심좌표로 나타내기 때문에 측지망 조정 등의

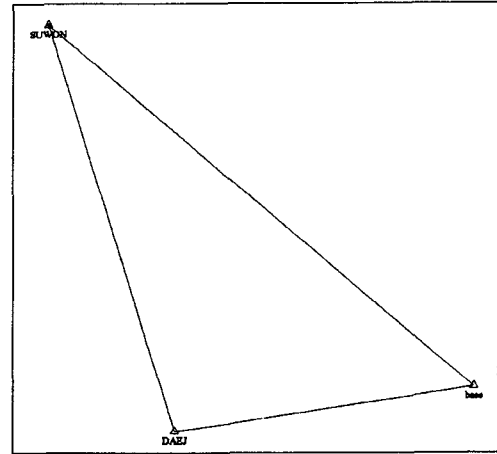


그림 3. 기준점 관측

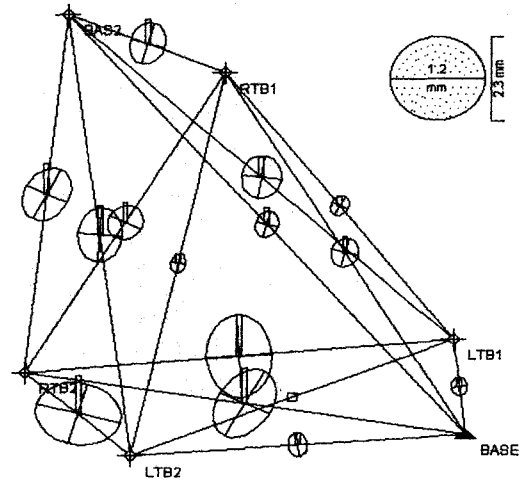


그림 4. GPS 기준망 관측

광역적 분석에서는 주로 지리좌표를 사용하지만 국부적 변형 등에서는 지심좌표의 좌표차 또는 벡터로서 분석한다. 이러한 지심좌표에 의해 과대오차를 Data snooping 방법에 의해 추출한 후 어떠한 점도 고정하지 않은 자유망 조정을 통해서 조정좌표를 epoch별 S-변환과 비교하였다. 또한 S-변환을 통해 산출된 각각의 X, Y, Z 축에 대한 변형량과 변형량의 크기 그리고 변형이 되었는지를 일치성 검사를 통해서 표 1에 나타내었다.

표 2는 Epoch I과 II에 대한 신뢰타원을 나타내는 것으로 다른 신뢰타원들은 제외하였다. 그리고 A, B, C는 각각의 X, Y, Z 축 방향에 대한 신뢰타원값이고, BoA

표 1. Epoch별 S-변환 분석값

Point	Coordinate difference(e1&e2)				Coordinate difference(e1&e3)				Coordinate difference(e1&e4)				Remarks
	dx	dy	dz	Dis	dx	dy	dz	Dis	dx	dy	dz	Dis	
RTB1	0.13	-0.19	-0.08	0.24	-0.37	0.26	0.02	0.45	0.37	-0.44	-0.25	0.63	Reference Point
LTB1	-0.70	0.92	0.43	1.23	0.90	-0.79	-0.51	1.30	-0.32	0.16	0.41	0.54	
FP01	0.57	-0.73	-0.34	0.99	0.47	-0.47	-0.51	0.84	-0.06	0.29	0.85	0.90	Object Point
FP02	-0.37	0.09	-0.02	0.39	-0.56	0.40	-0.13	0.73	1.10	-1.85	-1.43	2.59	
FP03	-1.35	0.97	0.49	1.73	-0.32	0.49	-0.63	0.86	-0.48	0.38	0.68	0.91	
FP04	-2.33	2.90	1.99	4.22	-0.11	0.97	-1.48	1.77	-0.95	1.32	0.71	1.78	
FP05	-	-	-	-	-2.07	1.67	3.14	4.11	-0.83	0.49	0.57	1.12	
FP06	-	-	-	-	0.90	-0.84	-0.70	1.42	-1.38	1.27	0.73	2.01	
FP07	-	-	-	-	-0.01	0.12	-0.14	0.18	0.28	0.00	0.65	0.71	
FP08	-	-	-	-	-2.60	-1.65	-1.97	3.65	-0.05	0.70	0.30	0.77	
FP09	-	-	-	-	-0.34	-0.83	0.17	0.92	0.12	-0.06	-0.02	0.13	
FP10	-	-	-	-	0.76	-1.27	-0.97	1.77	-0.29	0.78	0.74	1.11	
FP11	-	-	-	-	1.23	-1.12	-0.95	1.92	-0.60	0.03	0.99	1.16	
BP01	-	-	-	-	-0.30	0.41	1.07	1.18	-0.33	0.74	0.82	1.15	
BP02	-	-	-	-	-0.47	0.63	-0.36	0.87	-0.42	0.22	1.15	1.24	
BP03	-	-	-	-	0.33	-0.56	-0.32	0.73	-0.42	1.35	0.55	1.52	
BP04	-	-	-	-	-0.86	1.31	0.65	1.69	0.06	-0.23	-0.43	0.50	

표 2. Epoch I & II에 대한 95% 신뢰타원

No	Point	Confidence = 95%								
		A [mm]	BoA [DEG]	ZoA [DEG]	B [mm]	BoB [DEG]	ZoB [DEG]	C [mm]	BoC [DEG]	ZoC [DEG]
1	LTB1	0.90	131.82	57.41	0.36	337.79	35.42	0.28	49.87	102.35
2	RTB1	0.90	133.82	59.06	0.35	337.94	33.34	0.27	50.41	101.21
3	FP01	1.17	314.54	120.97	0.50	348.53	35.90	0.35	54.66	106.33
4	FP02	1.99	124.58	47.72	0.99	336.43	46.95	0.70	50.29	106.58
5	FP03	2.03	128.55	56.29	0.97	346.51	40.24	0.66	52.06	109.30
6	FP04	3.83	121.69	65.43	1.48	318.67	25.55	1.24	34.72	96.57

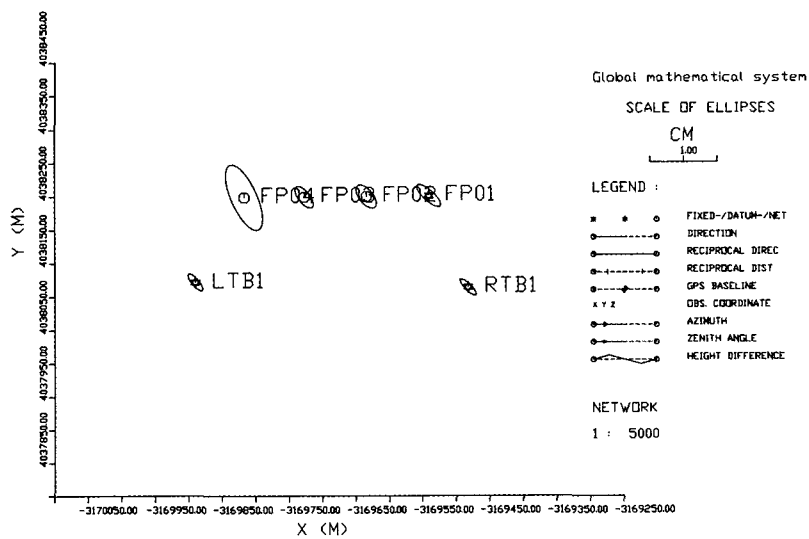


그림 5. Epoch I과 II 범위의 크기와 방향

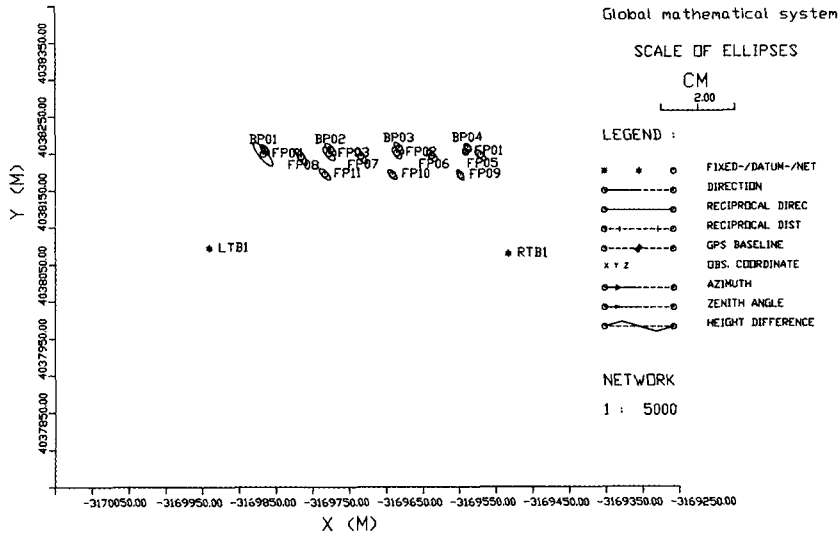


그림 6. Epoch I과 III 범위의 크기와 방향

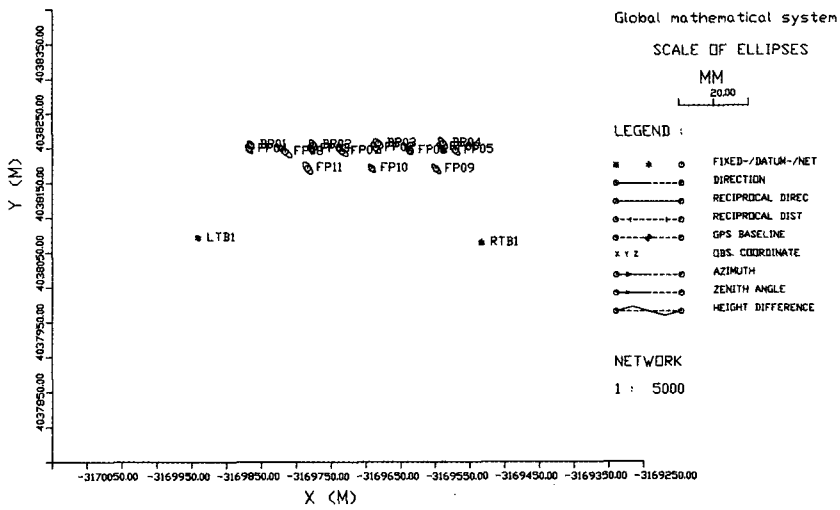


그림 7. Epoch I과 IV 범위의 크기와 방향

등은 X, Y축에 대한 방향을 나타내고 있다.

그림 5~그림 7은 GPS에 의해 관측된 개개의 관측시기(epoch)에 대해 epoch I을 기준으로 S-변환에 의해 산출된 변위의 크기와 방향이다. 여기서, X축과 Y축은 GPS의 WGS 84좌표계에 대한 지심좌표를 나타내고 있으며, 기준점 LTB1과 RTB1은 고정되지 않았고, 자유망으로 조정되었다.

그림 8과 9는 관측된 모니터링 점들의 X축에 대한 변형량의 크기를 나타내는 것으로서, 그림 8은 자유망 조정을 통해 조정된 조정좌표차를 분석한 것이고, 그림 9

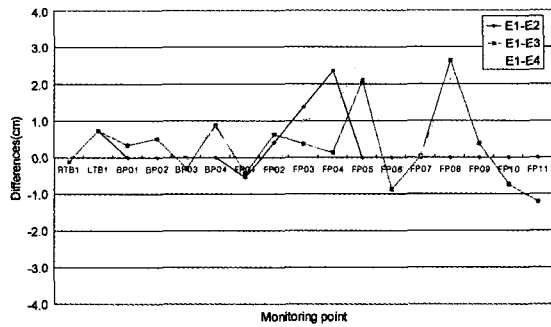


그림 8. X-축 좌표차

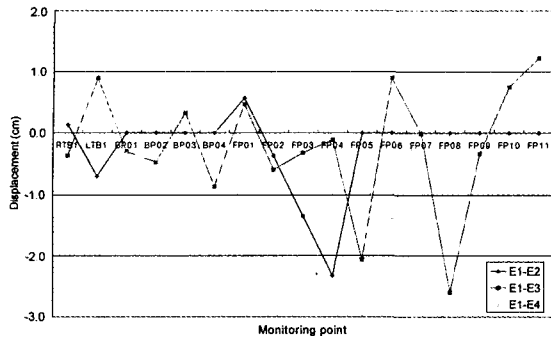


그림 9. S-변환의 X-축 범위

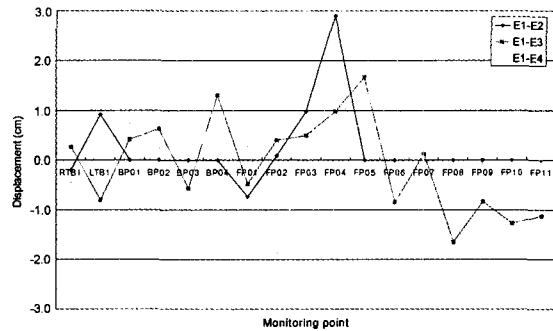


그림 11. S-변환의 Y-축 범위

는 근사좌표의 S-변환에 의한 변형량을 나타낸 것이다. 기준망의 점 RTB1과 LTB1에 대해 살펴보면, 두 그림 모두 최대 1cm의 변화량을 보이고 있으며, 반대쪽 모니터링 점인 BP01과 BP02는 모두 최대 0.5cm의 변화를 보이고 있다. 모니터링 점들에 대해 살펴보면, 상단부 FP04점에서는 두 그림 모두 최대 2.5cm의 변화를 나타내고 있으며, 중단부인 FP05에서도 그림 8에서는 최대 3cm, 그림 9에서는 최대 2cm의 변화를 보이고 있다. 또한 FP08에서는 둘 다 최대 3cm의 변화를 보이고 있고, 하단부에서도 같은 변화량을 나타내고 있다.

그림 10은 Y축에 대해 조정된 좌표의 좌표차를 분석한 것이고, 그림 11은 근사좌표의 S-변환에 의한 Y축 변형량을 나타낸 것이다. 기준망의 점 RTB1과 LTB1에 대해 살펴보면, 두 그림 모두 최대 1cm의 변화량을 보이고 있으며, 반대쪽 모니터링 점인 BP01과 BP02는 모두 비슷한 변화를 보이고 있다. 모니터링 점들에 대해 살펴보면, 상단부 FP04점에서는 두 그림 모두 최대 3.0cm의 변화를 나타내고 있으며, 중단부인 FP08에서는 둘 다 최대 1.5cm의 변화를 보이고 있다. 하단부에서도

같은 변화량을 나타내고 있다. 그러나, 조정좌표의 좌표차와 S-변환의 변형량은 반대 부호로 나타나는 경향이 있으며, 변형량은 비슷한 결과를 나타내고 있다.

그림 12는 Z축에 대해 조정된 좌표의 좌표차를 분석한 것이고, 그림 13은 근사좌표의 S-변환에 의한 Z축 변형량을 나타낸 것이다. 기준망의 점 RTB1과 LTB1에 대해 살펴보면, 두 그림 모두 최대 0.5cm의 변화량을 보이고 있으며, 반대쪽 모니터링 점인 BP01에서 그림 12

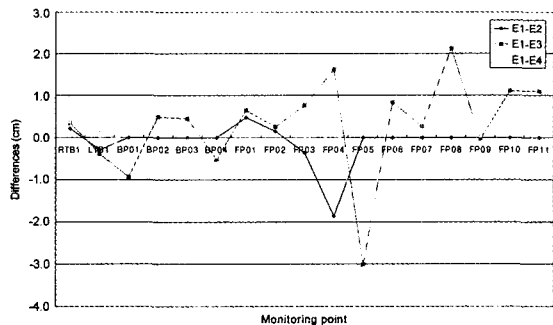


그림 12. Z-축 좌표차

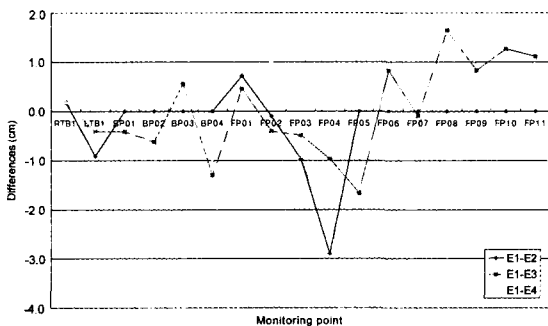


그림 10. Y-축 좌표차

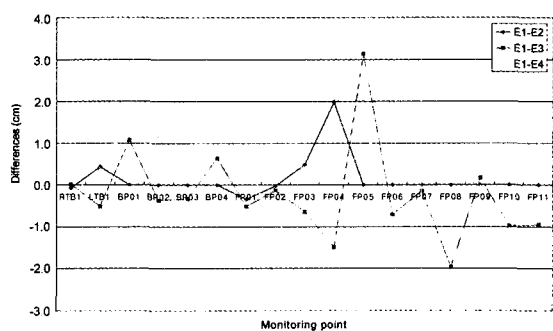


그림 13. S-변환의 Z-축 범위

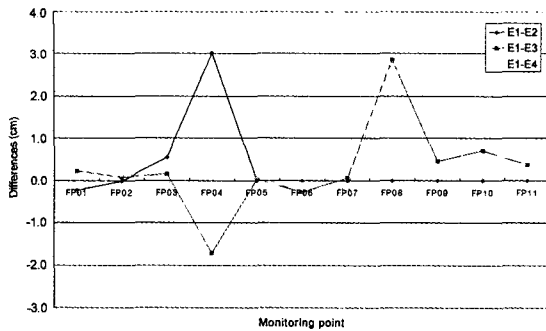


그림 14. LTB1 고정점의 벡터 차

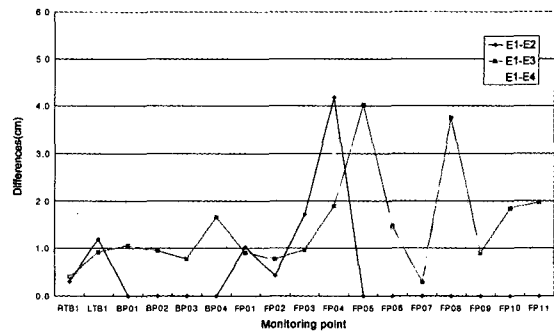


그림 16. 조정좌표의 거리 차이값

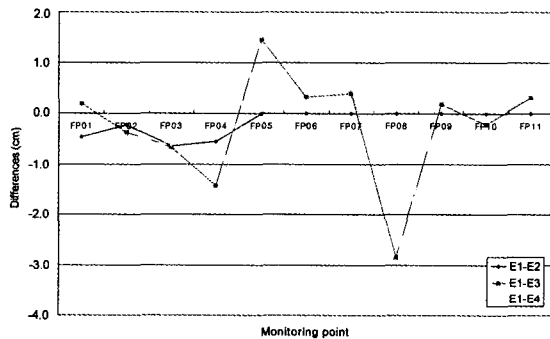


그림 15. RTB1 고정점의 벡터 차

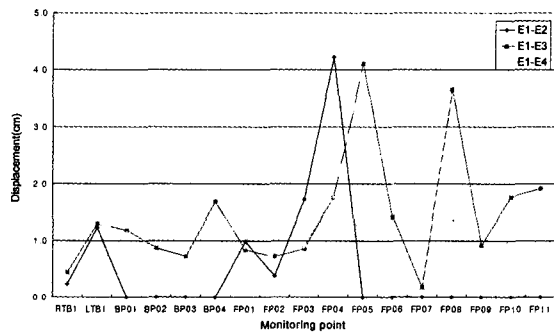


그림 17. S-변환의 거리 차이값

는 1.5 cm, 그림 13은 1 cm의 변화를 보이고 있다. 모니터링 점들에 대해 살펴보면, 상단부 FP04점에서는 두 그림 모두 최대 2.0 cm의 변화를 나타내고 있으며, 중단부 FP08에서는 둘 다 최대 2 cm의 변화를 보이고 있다. 하단부 FP10과 FP11은 두 그림 모두 최대 1 cm의 변화량을 나타내고 있다. 그러나, 두 그림에서의 변형량은 반대 부호로 나타나며, 변형량은 비슷한 결과를 나타내고 있다.

그림 14와 15는 기준망을 고정하여 관측된 모니터링 점들에 대한 3차원 공간거리의 차를 분석한 것으로서, LTB1 측점으로부터 상단부 FP04점은 +3 cm에서 -2 cm 까지 변화가 크게 발생했지만, RTB1 측점으로부터는 최대 -1.5 cm의 변화가 발생했다. 중단부 FP08점은 기준망으로부터 부호만 반대일뿐 3 cm의 변화를 나타내고 있으며, 하단부 모니터링 점들은 전체적으로 1 cm 미만의 변화를 보이고 있다.

그림 16은 조정된 좌표의 좌표차에 대한 절대값의 3차원 벡터로 분석한 것이고, 그림 17은 S-변환에 대한 변형량의 절대값 즉, 벡터로 나타낸 것이다. 기준망의 점

RTB1과 LTB1의 이동량을 보면, 조정된 좌표나 S-변환의 값이 1 cm 정도의 변형량을 나타내고 있다. 모니터링 점들에 대해 살펴보면, 먼저 반대쪽 모니터링 점인 BP04 점의 변화가 제일 크게 발생했으며, FP04점의 변형량은 두 그림 모두 5 cm의 변화를 보이고 있으며, FP08점의 변형량은 두 그림 모두 최대 4 cm의 변화를 보이고 있다. 또한 하부점 모니터링 점들에서는 전체적으로 2 cm 미만의 변화를 보이고 있다.

4. 결 론

정적 GPS 관측으로 흙댐에 대해 기준망과 모니터링 관측을 실시하여 고정망과 자유망 조정, S-변환을 통해 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었을 수 있었다.

1. 기준망과 모니터링 망에 대한 자유망조정 좌표값과 S-변환 차이값은 개개의 측과 거리에 대해 비슷한 크기를 나타내고 있지만, 기준망을 고정하여 처리된 거리와는 약 1 cm 정도의 차이를 나타내고 있다.
2. X축 방향에 대해 큰 차이를 나타내는 위치는 앞

면부 4, 5, 8번 등이 크게 발생하고 Y축 방향에 대해서는 4번이 제일 큰 3 cm의 변화를 보이고 있다. 또한 Z축 방향에서는 5번이 3 cm의 변화를 보이고 있다. 댐 단면의 앞뒤에서 설치한 모니터링 점들에 대한 관측 결과는 단면 앞뒤의 변화량이 다르게 나타남을 파악할 수 있었다.

3. 정적 GPS 관측기법으로 관측한 결과, 모니터링 점들 중에서 4번, 8번점은 다른 모니터링 측점에 비해 더 큰 변형량을 나타내기 때문에 차후에도 상시적인 변화를 모니터링 할 필요가 있다고 판단된다.

참고문헌

1. 박운용, 응용측량학, 형설출판사, 1996, pp. 810-818.
2. Y. Q. Chen, "Deformation Surveying in P.R. China", Proceeding of the 5th FIG Symposium on Deformation Measurement and Canadian Symposium on Mining Surveying and Rock Deformation Measurements, New Brunswick, Canada, 1988.
3. W. Niemeier, D. Tengen, "A Menu Driven Software2. Epoch & 95% Package on a PC for Optimization, Adjustment and Deformation Analysis of Engineering Network", Proceeding of the 5th FIG Symposium on Deformation Measurement and Canadian Symposium on Mining Surveying and Rock Deformation Measurements, New Brunswick, Canada, 1988, pp. 374-376.
4. W. Caspary, "A Robust Approach to Estimating Deformation Parameters", Proceedings of the 5th International FIG Symposium on Deformation Measurement and the Canadian Symposium on Mining Surveying and Rock Deformation Measurements, New Brunswick, Canada, 1988.
5. Yehuda Back, "Monitoring of Deformations with GPS", Deformation Measurements Workshop, Proc., 1986, pp. 96-111.
6. Xin Chen, "Analysis of Continuous GPS Data from the Western Canada Deformation Array", Proc. ION GPS-94, 2, 1994, pp. 1339-1348.
7. M. E. Cannon and G. Lachapelle, "Kinematic GPS Trends-Equipment Methodologies and Applications", GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Application, 115, 1995, pp. 161-169.
8. M. D. Hazak and M. P. Leach, "Bridge Monitoring by GPS", Surveying World, 3(3), 1995, pp. 8-11.
9. W. Baarda, "S-Transformations and Criterion Matrices", Netherlands Geodetic Commission, Publication on Geodesy, Vol. 5, No. 1, Delft, Netherlands, 1973.
10. Paul R. Wolf, and Charles D. Ghilani, "Adjustment Computations ; Statistics and Least Squares in Surveying and GIS", Wiley-Interscience publication, 1996.
11. W. Baarda. "Statistical Concepts in Geodesy", Neth. Geod. Com., Publ. on Geodesy, New Series 2, No. 4, Delft, Netherlands, 1967.
12. F. A. Shepherd, "Engineering Surveying: Problems and Solutions", Second Edition, Edward Arnold Ltd, London, U.K, 1983.

(2001년 5월 20일 원고접수)