

GPS망조정에 의한 2등측지기준점의 세계측지계 성과산정 GPS Network Adjustment for Determining KGD2002 Coordinates of the 2nd Order Geodetic Control Points

이영진¹⁾ · 이흥규²⁾ · 정광호³⁾ · 이준혁⁴⁾

Lee, Young-Jin · Lee, Hung-Kyu · Jeong, Gwang-Ho · Lee, Jun-Hyuk

Abstract

This paper describes issues of GPS network adjustment to determine coordinate sets of the 2nd order national geodetic control points based on the Korean Geodetic Datum (KGD2002) which has been newly adopted in 2003. After outlining theoretical background of the GPS network processing, the adjustment procedure applied for this project is detailed. Throughout performing a series of minimally constrained adjustments, some outliers have been removed and magnitude of absolute and relative error for a stochastic modeling has been determined as 4 mm + 0.4 ppm and 8 mm + 0.8 ppm in the horizontal and vertical component, respectively. The over constrained adjustment by fixing the 1st order control points was performed to derive final solution, indicating that the accuracy of the estimated coordinates was 2 cm and 4 cm in the horizontal and vertical component.

Keywords : World geocentric datum, geodetic network adjustment, GPS network, 2nd order point, official coordinate

초 록

우리나라에 세계측지계 기반의 한국측지계(KGD2002)가 도입됨에 따라 국가 측지기준점에 대한 새로운 성과의 산정이 필요하다. 본 연구에서는 국가 2등측지기준점의 세계측지계 성과 산정을 위하여 GPS관측데이터의 처리를 통해 얻어진 3차원 기선벡터를 이용한 측지망조정을 실시하였다. 3단계에 걸친 최소제약조정을 통하여 기선벡터에 포함된 과대오차를 체계적으로 검출소거하고 경험적 통계모델링 기법을 적용하여 기선벡터의 수평 및 수직방향의 오차 크기를 4mm+0.4ppm와 8mm+0.8ppm으로 각각 결정하였다. 국가 1등측지기준점 성과의 다점조정에 의한 망조정을 실시하여 수평과 수직방향에 2cm와 4cm 정확도로 최종성과를 산정하였다.

핵심어 : 세계측지계, 측지망조정, GPS망, 2등측지기준점, 성과

1. 서 론

측지계(측지기준계)는 지구상의 절대위치 표현을 위해 사용되는 기준을 의미하며 측지측량에서는 수평측지계(horizontal geodetic datum)와 수직측지계(vertical geodetic datum)로 나누어진다. 측지계의 구현은 수평계의 경우 2차원 기준면(기준타원체) 및 원점의 위치와 좌표축 방향결정에 의해, 수직계는 국가수준면인 평균해면의 결정에 의해

이루어지며, 이들은 삼각점과 수준점 같은 국가측지기준점의 설치를 통하여 국토의 전역에 걸쳐 확대가 이루어진다.

우리나라의 수평측지계의 경우 1910년대 조선총독부 임시토지조사국에 의해 독자적인 측지계의 구현 없이 일본의 1등대삼각본점망에서 거제도과 절영도(영도)를 연결하는 삼각측량을 실시한 후에 대삼각망을 결합하는 방식으로 채용하였다. 이러한 이유로 동경측지계가 한국전쟁 이후 삼각점 복구작업과 1987년의 부분갱신을 통하여

- 1) 연결저자 · 정회원 · 경일대학교 건설정보공학과 교수(E-mail:yjlee@kiu.ac.kr)
- 2) 정회원 · 창원대학교 토목공학과 조교수(E-mail:hkyulee@changwon.ac.kr)
- 3) 정회원 · 경일대학교 대학원 박사과정(E-mail:51tk9301@hanmail.net)
- 4) 정회원 · 경일대학교 대학원 박사과정(geo8487@hanmail.net)

지난 100년간 우리나라에서 사용되어 왔다(이영진, 1993). 그러나 2000년대에 들어서면서 정확한 국가측지기준의 확립을 통한 위치정보 제공의 필요성이 점차 증가함에 따라 측량법령의 개정을 통하여 세계기준으로서 지구중심 측지계인 한국측지계2002(Korean Geodetic Datum 2002: KGD2002)를 2003년 1월 1일부터 도입하였으며, 2009년 까지의 유예 기간을 거쳐 2010년 1월 1일부터 전면 시행 예정에 있다.

새로운 우리나라 측지계인 KGD2002의 구현은 1995년 10월~11월에 실시된 VLBI(Very Long Baseline Interferometry)관측에 근거하여 이루어졌다. VLBI관측데이터는 미국의 NASA에서 처리하여 ITRF(International Terrestrial Reference Frame) 2000에 대한 성과를 산출하고, IERS(International Earth Rotation and Reference System Service)에 의해 공표되었다. 이 결과에 지각변동 벡터를 고려하여 ITRF2000의 특정시점(Epoch) 2002.0에 대한 좌표로 재계산한 후 VLBI와 대한민국 경위도 원점, 그리고 1등측지기준점인 14개의 GPS상시관측점과의 연결 관측을 통하여 성과를 산정하는 것으로 KGD2002가 구현되어 2002년 12월에 고시되었다(국토지리정보원, 2002). 새로운 측지계가 채택하고 있는 ITRF2002는 GPS가 사용하고 있는 WGS84(G1150)와 Galileo시스템에 사용될 GTRF(Galileo Terrestrial Reference Frame)에 수 센티미터 이내로 일치하기 때문에 별도의 변환작업 없이 사용할 수 있어 위성측위 기술의 활성화를 통하여 그 정확성과 효율성의 향상이 기대된다.

세계측지계가 도입됨에 따라 그 동안 동경측지계에 의해 구축된 모든 지형공간정보 데이터의 측지계 변환과 함께 국가 측지기준점에 대한 성과가 새롭게 산정되어야 한다. 따라서 2002년 12월에 고시된 국가 1등측지기준점인 14개의 GPS상시관측점 성과를 바탕으로 측지망 조정을 통하여 하위 등급인 2, 3등기준점의 성과가 산정되어야 한다. 본 연구에서는 1996년~2000년 국토지리정보원에서 실시한 GPS2등기준점 관측데이터의 기선해석을 통해 얻어진 기선벡터와 분산-공분산행렬을 사용하여 3차원 벡터망조정을 수행하고 세계측지계 성과를 산정하는데 목적이 있다. GPS3차원벡터망조정이론과 성과산정 절차와 방법을 살펴보고, 과대오차 검출과 통계모델링을 위해 실시한 최소제약조정, 그리고 최종성과산정을 위한 다점 고정조정의 결과를 요약하고, 점검을 통해 그 적절성이 논의되어 있다.

2. GPS망조정 이론

2.1 관측방정식

GPS망조정에서 사용되는 관측값은 기선해석으로부터 얻어진 기선벡터로 구성된 하나의 기선에 대한 좌표차 Δx , Δy , Δz 사이의 관계식은 측점 i 와 측점 j 사이에서 다음과 같이 나타낼 수 있다(Leick, 2004; Rizos, 1996; 이영진, 1998).

$$\begin{aligned} x_j - x_i &= \Delta x_{ij} + v_{x_{ij}} \\ y_j - y_i &= \Delta y_{ij} + v_{y_{ij}} \\ z_j - z_i &= \Delta z_{ij} + v_{z_{ij}} \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)을 행렬로 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_j - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{ij} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_i \quad (2)$$

또한 식 (2)는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$[-I_3 \quad I_3] \begin{bmatrix} X_i \\ X_j \end{bmatrix} = \Delta X_{ij} + V_{ij} \quad (3)$$

여기서,

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}, \quad V = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$$

식 (3)은 하나의 기선벡터에 대해 나타낸 것이며 관측값의 수가 많아지는 경우 식 (4)와 같이 간단히 나타낼 수 있다(백은기 외, 1991).

$$AX = L + V \quad (4)$$

2.2 통계모델 및 추정기법

GPS기선해석에 의해 얻어지는 기선벡터의 통계모델인 분산-공분산행렬은 식 (5)와 같이 대칭행렬의 형태를 가진다(Hofmann-Wellenhof et al., 1997; Leick, 2004; Rizos, 1996).

$$Q_{XYZ} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta X}^2 & \sigma_{\Delta X \Delta Y} & \sigma_{\Delta X \Delta Z} \\ \sigma_{\Delta Y}^2 & \sigma_{\Delta Y \Delta Z} \\ \sigma_{\Delta Z}^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

기선해석 소프트웨어에 의해 제공되는 분산-공분산행

렬은 망조정에서 관측값으로 사용되는 기선벡터의 실제 정밀도에 비해 극히 양호하기 때문에 망조정을 통해 추정된 좌표의 정확도가 실제보다 상당히 높게 평가될 수 있다(Rizos, 1996; Wang, 2000). 이러한 문제의 해결은 조정에 사용되는 기선벡터의 실제 정밀도를 나타낼 수 있도록 기선해석 소프트웨어가 제공하는 분산-공분산행렬을 수정하는 것으로 해결할 수 있다.

가장 대표적인 방법은 최소제곱법을 사용하여 최소구속조정을 실시하고 조정에 사용되는 기선벡터의 과대 오차를 검출/소거한 후 계산되는 사후분산인자(posterior variance)를 최초의 분산-공분산행렬에 곱하여 스케일링(scaling)하는 방법이 대부분 사용된다. 이 경우, 기선벡터의 우연오차 성분은 수정된 분산-공분산행렬에서 고려될 수 있으나, 기선해석 소프트웨어에서 충분히 모델링 되지 않은 대기권의 영향과 안테나고 측정에 포함되어 있는 오차들은 통계모델에 고려할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 식 (6)을 기본으로 하여 분산-공분산행렬의 대각선 요소인 분산값을 재계산하여 수정하는 경험적 모델링방법을 사용한다(Rizos, 1996).

$$s^2 = (a + b \cdot L)^2 \quad (6)$$

여기서, s 는 기선벡터의 표준편차, a 는 관측지점에 따른 절대적 오차, b 는 기선장에 비례하여 증가하는 ppm (Part per million)단위의 오차, 그리고 L 은 기선장이다. 식 (6)을 지구중심 3차원직교좌표계의 각 성분에 대해 나타내면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} s_x^2 &= (a_x + b \cdot B_x)^2 \\ s_y^2 &= (a_y + b \cdot B_y)^2 \\ s_z^2 &= (a_z + b \cdot B_z)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

GPS측량의 경우 수평에 비하여 수직위치 정확도가 약 2~3배 정도 오차가 크다는 사실과 안테나고 측정시 포함된 오차를 추가적으로 고려하기 위하여 식 (7)을 수평과 수직을 분리하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_E^2 &= (a_E + b_E \cdot L)^2 \\ S_N^2 &= (a_N + b_N \cdot L)^2 \\ S_H^2 &= (a_H + b_H \cdot L)^2 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)을 사용하여 분산-공분산행렬을 수정하기 위해서는 지구중심 3차원 직교좌표계로 주어진 식 (5)의 공분산행

렬은 회전행렬을 사용하여 다음과 같이 변환되어야 한다.

$$Q_{i_{ENH}} = F^T Q_{i_{NIZ}} F = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta E}^2 \sigma_{\Delta E \Delta N} \sigma_{\Delta E \Delta H} \\ \sigma_{\Delta N}^2 \sigma_{\Delta N \Delta H} \\ \sigma_{\Delta H}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (8)에 의해 얻어진 각 성분에 대한 분산값을 식 (9)의 대각선 성분에 대입한 후 기선벡터 성분사이의 상관성을 고려하기 위하여 비대각 요소인 공분산값을 사용하여 다음과 같이 상관계수(correlation coefficient)를 계산할 필요가 있다.

$$r_{\Delta E \Delta N} = \frac{\sigma_{\Delta E \Delta N}}{\sigma_{\Delta E} \sigma_{\Delta N}}, r_{\Delta E \Delta H} = \frac{\sigma_{\Delta E \Delta H}}{\sigma_{\Delta E} \sigma_{\Delta H}}, r_{\Delta N \Delta H} = \frac{\sigma_{\Delta N \Delta H}}{\sigma_{\Delta N} \sigma_{\Delta H}} \quad (10)$$

식 (8)과 식 (9) 그리고 식 (10)에 의해 계산된 결과로부터 수정된 분산-공분산행렬은 다음 식 (11)과 같이 구성될 수 있다.

$$Q_{i_{ENH}} = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta E}^2 r_{\Delta E \Delta N} & r_{\Delta E \Delta N} \sigma_{\Delta E} \sigma_{\Delta N} & r_{\Delta E \Delta H} \sigma_{\Delta E} \sigma_{\Delta H} \\ & \sigma_{\Delta N}^2 & r_{\Delta N \Delta H} \sigma_{\Delta N} \sigma_{\Delta H} \\ & & \sigma_{\Delta H}^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)에 의해 얻어진 분산-공분산행렬이 최종 GPS망 조정에 의한 성과 산정시 사용될 것이다. 여기서 고려되어야 할 문제는 어떠한 방법을 통하여 식 (8)에 사용되는 a 와 b 의 크기를 결정하느냐 하는 것이다. 본 연구에서는 기선해석 소프트웨어에 의해 얻어지는 분산-공분산행렬을 사용하여 예비 조정을 실시하여 과대오차를 검출/축소한 이후 모델의 충실도 검사인 χ^2 검정을 통과할 때까지 식 (8)의 a 와 b 를 변경해 나가는 경험적방법을 사용하였다.

2.3 최소제곱해법

식 (4)의 함수적 모델과 식 (11)의 통계적 모델을 사용하여 조정 좌표추정을 위한 정규방정식은 잘 알려진 바와 같이 식 (12)과 같이 구성할 수 있다(Paul et.al., 1997).

$$(A^T Q_i^{-1} A) \hat{X} = A^T Q_i^{-1} L \quad (12)$$

추정좌표와 분산-공분산행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$\hat{X} = (A^T Q_i^{-1} A)^{-1} A^T Q_i^{-1} L \quad (13)$$

$$Q_{\hat{X}} = (A^T Q_i^{-1} A)^{-1} \quad (14)$$

추정에 사용된 함수·통계적 모델의 적합성의 점검과 과대오차의 검출과 축소에 필요한 정보인 추정값의 잔차, 그 분산·공분산행렬, 사후분산값(a posteriori variance)는 각각 아래의 식 (15), 식 (16) 그리고 식 (17)에 의해 얻어진다.

$$\hat{V} = L - A\hat{X} \quad (15)$$

$$Q_{\hat{V}} = Q_i - A(A^T Q_i^{-1} A)^{-1} A^T \quad (16)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{\hat{V}^T Q_i^{-1} \hat{V}}{m-n} \quad (17)$$

여기서 m 은 기선요소벡터의 수(즉, 기선벡터×3) 그리고 n 은 미지수의 개수(즉, 추정좌표의 개수×3)이다.

2.4 과대오차의 검출

최소제곱법에 의한 망조정에서 관측값에 포함된 과대오차의 검출을 위해서는 식 (15)에 의해 계산되는 추정값의 잔차와 식 (16)에 의해 얻어지는 잔차의 분산·공분산을 이용한 통계검정을 사용한다. 측지망의 조정에서 과대오차 검출을 위한 대표적인 통계검정은 다음과 같은 두 가지 방법이 주로 사용된다. 첫 번째는 관측값의 분산·공분산행렬이 기지라는 가정 하에 추정잔차를 그 잔차에 대응하는 표준편차로 나누어 구한 정규화잔차(normalized residual)가 정규분포를 따른다고 보고 통계검정을 실시하는 data snooping기법이 있고(Baarda, 1968), 두 번째는 관측값의 분산·공분산행렬을 알 수 없다는 가정 하에 식 (6)에 의해 표준화잔차(standardized residual) τ_i 를 계산하고, 이를 t 분포를 따른다는 가정으로 신뢰수준 α 와 자유도 $n-m$ 에 의해 결정되는 임계값과 비교하여 식 (18)과 같이 과대오차를 검출하는 Tau검정이다. 본 연구에서는 후자의 방법이 사용되었다.

$$\tau_i = \frac{1}{\sigma_0} \frac{v_i}{\sigma_{v_i} \sqrt{(m-n)/m}} \quad (18)$$

여기서, v_i 는 검정하고자 하는 관측값의 잔차이며 σ_{v_i} 는 잔차의 표준편차이다.

$$|\tau_i| \geq t_{\alpha/2, m-n} \quad (19)$$

여기서, $\alpha_0 = 1 - (1 - \alpha)^{1/n}$ 이며 신뢰수준 α 는 95%를 사용한다.

3. 성과산정의 절차

측지망의 조정은 최소제약조정(minimally constrained adjustment)과 다점고정조정(over-constrained adjustment)으로 나누어 실시된다. 최소제약조정에서는 관측값에 포함된 과대오차의 검출, 축소뿐만 아니라 망 내부의 정밀도 평가를 목적으로 한다. 다점고정은 상위 등급의 측지망에 속하는 3점 이상의 지구중심 3차원직교좌표를 고정하여 조정이 이루어지는 등급의 측지망에 상위등급의 망에 대하여 원점과 회전 그리고 스케일이 고정되게 조정하여 최종적인 성과를 산출하는 것을 목적으로 한다.

GPS기선해석 결과인 기선벡터를 사용하여 망조정을 실시하는 본 연구에서는 기선해석 과정에서 검출되지 않은 과대오차를 보다 엄밀하게 검토하여 검출하고 다점고정을 통해 최종성과 산출에 사용될 통계적모델을 결정하기 위하여 3단계에 걸친 최소제약조정을 그림 1과 같이 실시하였다.

단계별로 조정절차와 내용은 다음과 같다.

① 2등기준망을 1997년부터 2000년까지 8개의 사업지구로 나눈 후 한점의 GPS상시관측점을 고정하여 최소제약조정을 실시하고, 과대오차 검정을 실시하여 문제가 있는 기선은 입력파일에서 삭제하였다. 그러나 2000년에 관측사업이 실시된 남해와 서해지구는 상시관측점과 연결 관측이 이루어지지 않아 망 중앙의 한점을 고정하여 실시하였다.

② 지구별 최소제약조정의 결과를 바탕으로 사업지구를 모두 포함하는 전국을 하나로 통합하여 조정을 실시하고, 사업지구별 망이 연결되어 중첩되는 중복측점들의 불일치를 야기하는 기선들을 과대오차 검출절차를 거쳐 제거하였다(이석찬 등, 1987).

③ 최소제약조정에서는 최종 성과산정을 위하여 실시될 다점고정조정에 사용할 경험적 통계모델결정을 위하여 모델 적합성 테스트인 χ^2 검정을 만족시킬 수 있는 절대오차와 상대오차의 크기를 결정하기 위해 수차례의 반복조정을 실시하였다.

④ 최소제약조정을 실시한 이후에 망의 정확도를 평가하기 위하여 세 번째 단계에서 결정된 통계모델을 사용하여 첫 번째 단계인 사업지구별 조정을 실시하여 사업지구들 사이 중복점에 대한 추정 좌표의 비교와 두 번째 단계인 전국 통합망조정 이후 고시된 상시관측점 좌표들과의 비교가 이루어졌다.

⑤ 최소제약조정의 결과인 과대오차가 제거된 입력파일

과 경험적 통계모델을 사용하여 문제의 여지가 있는 한 점의 상시관측점(TABK)를 제외한 나머지 13개의 상시관측점의 지구중심 3차원직교좌표를 모두 고정한 다점고정을 실시하여 국가 2등측지기준점의 최종 성과를 산정하였다.

4. 망조정 계산 및 점검

4.1 최소제약조정 및 결과

최소제약조정의 중요한 목적은 기선해석 이후에 실시된 망폐합차 점검에서 검출되지 않은 과대오차를 찾아서 소거하는 것과 최종조정에 사용될 통계적 모델을 결정하

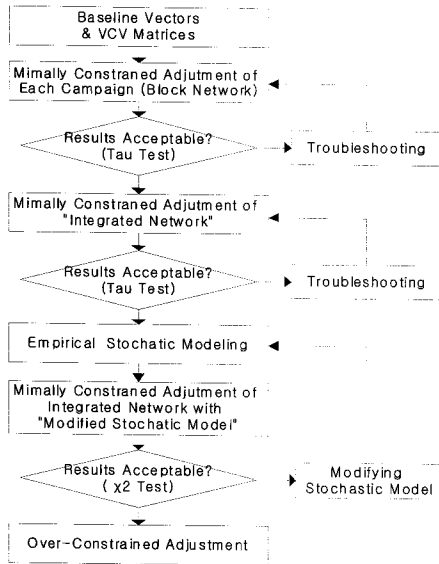


그림 1. 2등기준점 망조정 순서도

는 것이다. 과대오차의 점검을 위하여 아래 표 1과 같이 8개의 지구로 나누어 각각 최소제약조정을 실시하였다.

사업지구별조정에서는 2000년 남해와 서해지구를 제외한 지구에서 국토지리정보원에서 운영하고 있는 상시관측점 한 곳을 고정하여 조정을 실시하였다. 이를 통하여 표 1과 같이 총 19개의 기선벡터가 과대오차로 판명되어 제거하였다. 사업지구별 조정에 이어서 전국을 통합하는 하나의 망을 형성한 이후에 국토지리정보원 구내에 위치한 상시관측점(SUWN)을 고정하여 조정을 실시하였으며, 표 1에서와 같이 총 4개의 기선벡터가 과대오차로 검출되어 제거하였다. 최소제약조정에 사용된 통계모델은 GPS자료처리 소프트웨어가 처리의 결과로 제공하는 분산-공분산행렬이었다.

지구별과 전국 단일망조정을 통해 관측값에 포함된 과대오차를 제거한 이후 최종조정에 사용할 식 (8)의 절대오차 a 와 상대오차 b 의 결정을 위하여 경험적 통계모델링 절차에 따라 최소제약조정을 반복적으로 χ^2 검정을 통과할 때까지 실시하였다(이영진 외, 2006 ; Lee et al., 2006). 이러한 절차를 효율적으로 수행하기 위하여 GPS 기선해석 소프트웨어가 기선벡터와 함께 제공하는 분산-공분산행렬을 수정하기 위한 소프트웨어를 개발하였다. 이러한 절차를 통하여 최종 결정된 절대적 오차와 상대적 오차의 크기는 표 2와 같이 수평과 수직방향을 분리하여 GPS측량의 특성을 고려하여 수직성분을 수평에 비하여 두 배 크게 고려하였다.

표 2의 값들을 사용하여 조정에 사용될 모든 기선벡터의 분산-공분산행렬을 식 (11)을 사용하여 수정한 이후 사업지구별 최소제약조정을 실시하고 인접하는 지구사이의 중복점에 대한 좌표를 표 3과 같이 비교하였다. 이를

표 1. 최소제약조정에 검출된 과대오차의 수

사업지구	측점	기선벡터	사업지구 조정에서 검출된 과대오차	통합조정에서 검출된 과대오차
1997년	49	165	6	0
1998년	42	131	4	0
1999년	22	69	2	3
2000년 1지구	41	130	2	0
2000년 2지구	49	172	0	0
2000년 남해지구	10	20	1	0
2000년 서해지구	29	70	2	1
2000년 제주연결	15	38	2	0
합계	257	795	19	4

표 2. 경험적 통계모델링을 위한 오차의 크기

절대오차의 크기(a)		상대오차의 크기(b)	
수평방향	수직방향	수평방향	수직방향
4mm($a_E = a_N = 2.8\text{mm}$)	8mm	0.4ppm($b_E = b_N = 0.28\text{ppm}$)	0.8ppm

표 3. 인접사업 지구와의 중복점의 좌표 비교

1997년과 1998년의 비교									
년도	1997년			1998년			차이		
측점명	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
CM04	0.22011	0.67933	637.545	0.22038	0.67949	637.484	0.00027	0.00016	0.061
UD04	0.55034	0.76966	86.065	0.55069	0.77004	86.012	0.00035	0.00038	0.053
YO05	0.83946	0.28660	404.731	0.83965	0.28646	404.687	0.00019	0.00014	0.044
1997과 1999년의 비교									
년도	1997년			1999년			차이		
측점명	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
NF06	0.98358	0.05645	509.024	0.98350	0.05671	508.994	0.00008	0.00026	0.030
1997년과 2000(1)년의 비교									
년도	1997년			2000(1)년			차이		
측점명	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
HG05	0.57392	0.53423	258.975	0.57306	0.53455	258.961	0.00086	0.00032	0.014
NF06	0.98358	0.05645	509.024	0.98261	0.05671	508.963	0.00097	0.00026	0.061
SC07	0.83655	0.67676	194.256	0.83560	0.67698	194.293	0.00095	0.00022	0.037
SE05	0.03867	0.73201	119.889	0.03813	0.73084	119.954	0.00054	0.00117	0.065
WD03	0.85922	0.81215	496.107	0.85866	0.81262	496.071	0.00056	0.00047	0.036
1997년과 2000(2)년의 비교									
년도	1997년			2000(2)년			두 결과의 차이		
측점명	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
SE05	0.03867	0.73201	119.889	0.03842	0.73220	119.927	0.00025	0.00019	0.038
YO05	0.83946	0.28660	404.731	0.83936	0.28684	404.699	0.00010	0.00024	0.032
YT06	0.31297	0.98090	317.914	0.31276	0.98109	317.937	0.00021	0.00019	0.023
1998년과 2000(2)년의 비교									
년도	1998년			2000(2)년			차이		
측점명	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
IF04	0.99981	0.95203	1274.755	0.99967	0.95267	1274.830	0.00014	0.00064	0.075
YV03	0.70498	0.79842	652.206	0.70491	0.79901	652.202	0.00007	0.00059	0.004
WF03	0.66314	0.89028	512.156	0.66302	0.89092	512.140	0.00012	0.00064	0.016
JC04	0.14403	0.80485	243.621	0.14403	0.80539	243.597	0.00000	0.00054	0.024
ED07	0.69519	0.59239	131.745	0.69520	0.59273	131.727	0.00001	0.00034	0.018
DA01	0.88845	0.23448	1042.116	0.88819	0.23463	1042.150	0.00026	0.00015	0.034
YO05	0.83965	0.28646	404.687	0.83936	0.28684	404.699	0.00029	0.00038	0.012
1999과 2000(1)년의 비교									
년도	1999년			2000(1)년			차이		
측점명	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
NF06	0.98350	0.05671	508.994	0.98261	0.05671	508.963	0.00089	0.00000	0.031
GR01	0.41132	0.70096	386.184	0.41043	0.70108	386.178	0.00089	0.00012	0.006
GX03	0.16830	0.07935	87.729	0.16726	0.07925	87.766	0.00104	0.00010	0.037
YL01	0.28791	0.81508	106.703	0.28699	0.81525	106.769	0.00092	0.00017	0.066
WA07	0.05764	0.29967	124.243	0.05643	0.29977	124.303	0.00121	1E-04	0.060
1999년과 2000(J)년의 비교									
년도	1999년			2000(J)년			차이		
측점명	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
SW03	0.29993	0.24937	163.057	0.30046	0.25010	163.074	0.00053	0.00073	0.017
CL01	0.62309	0.05651	145.798	0.62323	0.05704	145.810	0.00014	0.00053	0.012
2000(1)과 2000(2)년의 비교									
년도	2000(1)년			2000(2)년			차이		
측점명	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
SE05	0.03813	0.73084	119.954	0.03842	0.73220	119.927	0.00029	0.00136	0.027
YK03	0.27362	0.87249	394.106	0.27388	0.87234	394.127	0.00026	0.00015	0.021
BH05	0.29632	0.10977	604.839	0.29640	0.10972	604.833	0.00008	5E-05	0.006
GS06	0.20180	0.91035	380.853	0.20206	0.91025	380.875	0.00026	1E-04	0.022
BG06	0.35895	0.99440	137.648	0.35879	0.99415	137.667	0.00016	0.00025	0.019

* 위도(P)와 경도(L)의 단위는 초(")이며, 타원체고(h)의 단위는 m임.

** 좌표비교는 위도와 경도에서 도(°)단위와 분(')단위를 제외함

통해 독립적으로 조정된 망들 사이의 일치 정도를 파악하여 조정좌표들의 정확도를 평가해 볼 수 있다.

표 4는 중복점 비교의 결과에 대한 통계값들을 수평과 수직성분으로 나누어 계산하여 나타낸 것이다. 수평방향의 경우 평균이 1.4cm 최대 3.4cm의 불일치가 발생함을 볼 수 있다. 주목해야 할 것은 RMS로 68.7%의 확률에 대해 2.0cm 이내에서 일치됨을 알 수 있다. 수직방향의 경우는 중복점 좌표차이의 평균이 3.2cm이고 차이의 편차는 3.5cm이었다. 중복점에서 발생하는 조정좌표의 불일치는 두 좌표의 추정에 포함된 오차를 모두 반영하기 때문에 하나의 좌표 추정의 오차만을 고려한다면 실제정확도는 이보다 높은 것으로 판단된다.

단일의 전국망을 구성하여 국토지리정보원 구내의 GPS상시관측점인 SUWN 점을 고정하여 최소제약조정을 실시하였다. 이 조정에서는 앞선 경우와 동일하게 최종조정에서 사용될 경험적 통계모델을 적용 하였다. 표 5는 경험적 통계모델을 적용한 전국단일망조정을 요약한 것이다.

표 5에 보이는 바와 같이 조정을 통해 추정되어야 할 미지수는 총 639개이며, 사용된 관측값의 수는 2316개로 자유도는 1677이었다. 관측값에 포함된 과대오차는 앞선 단계에서 검출제거되었기 때문에 발견되지 않았으며 이것은 그림 2의 관측값 표준화잔차의 히스토그램을 통해 확인할 수 있다.

조정 후 계산된 사후분산인자는 1.04로 χ^2 검정을 통과 하였으며, 이것은 적절한 통계모델이 조정에 사용되었음을

표 4. 인접사업 지구와의 중복점의 좌표 비교의 통계값

좌표성분	평균	편차(RMS)	최대값	최소값
수평방향(2D)	0.014m	0.020m	0.034m	0.000m
수직방향(1D)	0.032m	0.035m	0.075m	0.004m

표 5. 전국 단일망의 최소제약조정의 요약

고정점(3D)	SUWN
기준점의 수	214
미지수의 수(기준점의 수×3)	639
관측값의 수(기선벡터 수×3)	2316
자유도	1677
통계모델	수평: 4mm + 0.4ppm 수직: 8mm + 0.8ppm
사후분산 인자	1.04
χ^2 검정결과	통과

을 의미한다. 조정을 통해 계산된 각 측정점들의 좌표 중에서 13개의 상시관측점에 대한 결과를 고시한 1등급지구 준점의 성과(국토지리정보원, 2002)와 비교를 하여 GPS2 등측지망의 정확도의 평가가 표 6에 보이는 바와 같이 이루어 졌으며 결과에 대한 통계값들이 계산되어 표 7에 요약되어 있다. 고시성과와의 차이는 RMS로부터 68.7%의 확률에 대해 1.7cm 이내에서 일치됨을 알 수 있다.

이 결과는 앞서 이루어진 사업지구 사이의 중복점 추정 좌표차이에 대해 계산된 결과에 비해 양호한 것으로 이것은 상시관측점 고시성과의 정확도가 앞선 경우에 비해 높기 때문이다. 수직방향의 경우 좌표차이의 평균은 2.4cm 이고 이에 대한 확률 68.7%범위를 나타내는 RMS는 3.4cm정도였다. 상시관측점 고시성과와의 비교에서 주목해야 할 것은 수평방향 최대 좌표 차의 크기가 3.3cm인 TABK 점이다. 이러한 차이의 발생 원인을 규명하기 위하여 연결 기선들에 대한 다양한 검토를 실시하였으며, 이로부터 최종성과 산정을 위한 다점조정 조정에 사용하기에는 적절하지 않다는 결론을 내렸다.

전국 단일망의 최소제약조정에 사용된 통계모델의 적합성과 전체적인 정확도를 평가하기 위하여 측정사이의 상대오차 타원의 장축(2D)과 오차크기(1D)를 95%확률에 대하여 계산하여 그림 3과 그림 4에 나타내었으며 수평 위치의 측정 사이의 95%오차를 기선장에 대하여 ppm (Part per million)단위로 계산하여 그림 5에 기선장과 함께 나타내었다. 두 그림을 살펴 볼 때 정확도는 전체적으로 2cm 이상이며 수직방향의 경우 4cm보다 양호한 것을 볼 수 있다. 또한 ppm단위로 나타낸 상대오차는 1ppm이 상이 됨을 알 수 있다.

그림 4에서 수평위치가 5~10cm 그리고 수직위치가 10cm 이상 돌출하는 경우는 기선장이 약 150~300km 이

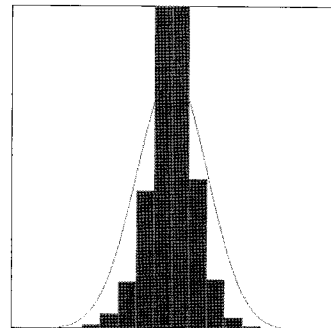


그림 2. 전국 단일망의 최소제약조정 후 계산된 표준화잔차의 히스토그램

표 6. 2등기준점망의 최소제약조정결과와 상시관측점 고시성과와의 비교

상시 관측소	고 시 성 과			최소제약조정 결과			차이		
	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
CHJU	0.1362	0.3512	50.349	0.1352	0.3509	50.362	0.0009	0.0002	0.013
CNJU	0.8207	0.4163	93.503	0.8207	0.4164	93.511	0.0000	0.0001	0.008
JINJ	0.1136	0.8269	122.013	0.1130	0.8271	122.08	0.0006	0.0002	0.070
JUNJ	0.4274	0.4488	77.158	0.4277	0.4489	77.166	0.0003	0.0001	0.008
KANR	0.3390	0.6200	57.053	0.3389	0.6204	57.000	0.0002	0.0004	0.053
KWNJ	0.1514	0.8516	71.616	0.1508	0.8516	71.639	0.0006	0.0000	0.023
SEOS	0.0729	0.1286	52.268	0.0725	0.1281	52.256	0.0004	0.0005	0.012
SNJU	0.9921	0.1171	111.587	0.9918	0.1171	111.637	0.0003	0.0000	0.050
SOUL	0.8973	0.0067	59.109	0.8973	0.0067	59.136	0.0001	0.0000	0.027
SUWN	0.8529	0.2638	83.816	0.8529	0.2638	83.816	0.0000	0.0000	0.000
TABK	0.1277	0.1694	763.237	0.1279	0.1707	763.20	0.0002	0.0013	0.035
TEGN	0.7033	0.0818	106.386	0.7030	0.0822	106.366	0.0003	0.0004	0.020
WNJU	0.9453	0.5177	180.215	0.9452	0.5182	180.208	0.0001	0.0005	0.007
WULJ	0.1150	0.7825	80.742	0.1146	0.7829	80.783	0.0003	0.0004	0.041

* 위도(P)와 경도(L)의 단위는 초(")이며, 타원체고(h)의 단위는 m임.

표 7. 2등기준점망의 최소제약조정결과와 상시관측점 고시성과와의 비교 통계표

좌표성분	평균	편차(RMS)	최대값	최소값
수평방향(2D)	0.013m	0.017m	0.033m	0.000m
수직방향(1D)	0.028m	0.034m	0.070m	0.007m

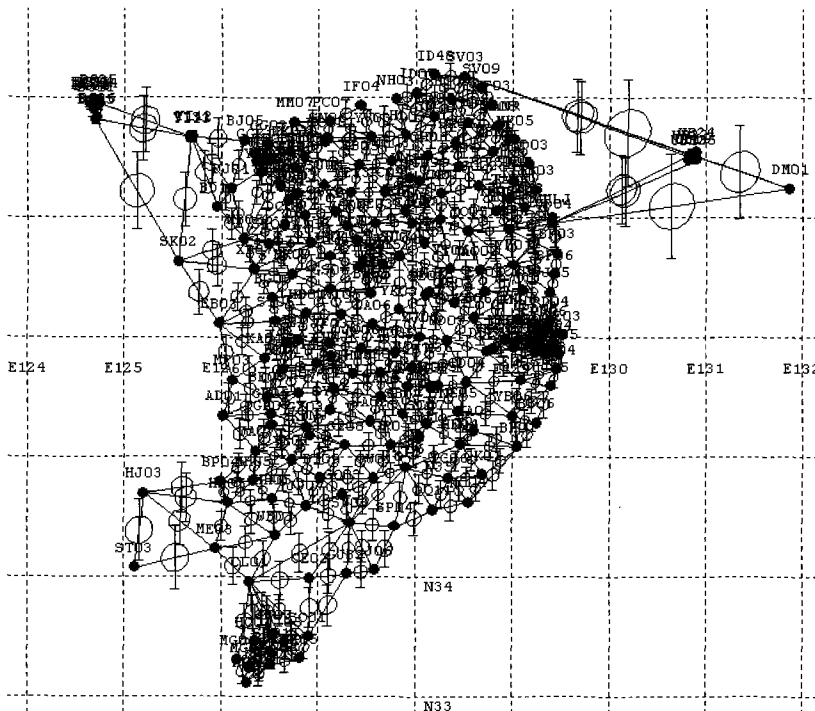


그림 3. 2등기준점망의 최소제약조정 망도 및 상대오차 타원

르는 외곽 도서지역으로 연결된 기선들로, 동해안의 울릉도와 독도 그리고 서해안의 백령도와 홍도 지역이다.

상대오차 타원과 오차의 크기는 추정된 좌표의 표준편차에 의해 전적으로 의존하며, 또한 표준편차는 사용되는 통계모델(즉, 관측값의 분산-공분산)행렬에 의해 좌우된다. 본 연구에서 사용된 통계모델은 그림 5에 보이는 바와 같이 우리나라 2등GPS기준망의 대부분을 이루는 20~40km기선에 대해 적합한 것으로 이 범위를 크게 벗어나는 경우 실제 조정을 통해 얻어진 좌표의 정확도는 추정값의 분산-공분산행렬에 의해 계산된 정확도에 비해 양호할 것으로 판단된다. 그림 6에 보이는 바와 같이 기선장에 대해 상대오차의 크기인 ppm단위로 나타내면 그 크기는 예를 들어 314km, 220km, 100km의 세 기선으로 연결된 독도(DM01)의 경우 각각 0.26ppm, 0.36ppm, 0.73ppm 정도였다. 그림 5의 상대오차(ppm) 그래프에서 급격한 증가는 오차의 크기에 비해 기선장이 10km미만인 것들에 대한 것으로 ppm은 크게 나타나지만 95%오차의 크기는 1~2cm정도였다. 이 경우는 조정에 사용된 평균 기선장에 비해 극히 짧은 기선의 경우이기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

표 8은 앞서 언급된 내용들에 대해 요약 한 것으로 측

점사이의 95%확률에서 수평과 수직위치의 상대오차의 크기(즉, 타원의 장축과 오차의 길이)의 평균이 1.6cm와 3.6cm로 중복점에 대한 지구별 조정 결과 비교 그리고 상시관측점 고시성과와의 비교를 통해 계산된 차이의 평균값 1.4cm와 3.2cm 그리고 1.3cm와 2.8cm와 유사한 결과임을 알 수 있으며 이것을 통해 조정에 사용된 통계모델이 조정을 통해 추정된 좌표의 정확도를 적절하게 나타내어 준다는 것을 알 수 있었다. 좌표차이의 비교에 비해 그 값이 약간 커진 것은 수 백 킬로미터에 달하는 외곽 도서 연결 기선에 의한 것이었다.

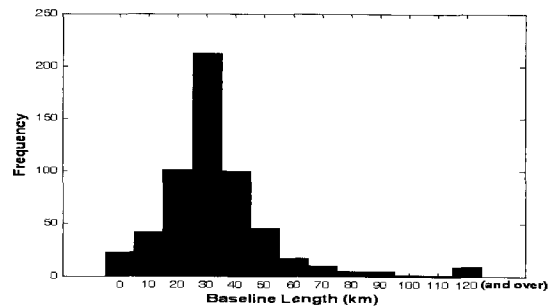


그림 5. 조정에 사용된 기선장의 히스토그램

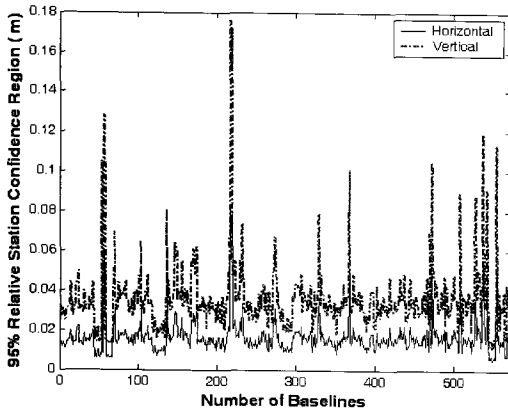


그림 4. 95%확률에서 기선장별 상대오차 타원의 장축(2D)과 오차크기(1D)

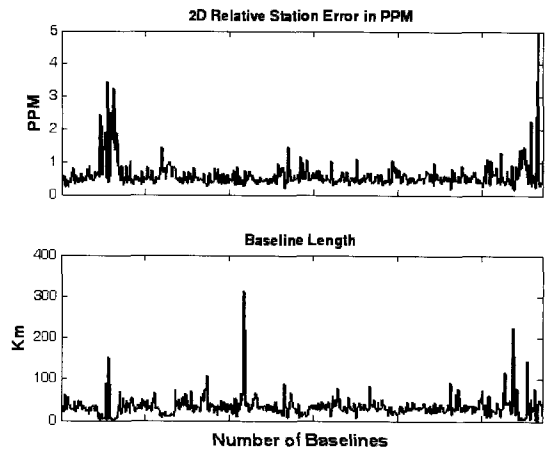


그림 6. ppm단위의 수평방향 측정사이의 상대오차의 크기(95%)와 기선장

표 8. 95% 확률에서 상대오차 타원의 장축과 상대오차 크기의 통계값

성분	평균	표준편차	최대값	최소값
수평방향(2D)	0.016m	0.008m	0.081m	0.005m
수직방향(1D)	0.036m	0.007m	0.176m	0.011m
상대오차(2D)	0.601ppm	0.411ppm	4.990ppm	0.170ppm
기선장	34.3km	26.1km	314.1km	13.7km

4.2 다점고정조정 및 결과

국가 2등측지기준점의 최종성과를 산정하기 위하여 1 등측지기준점인 GPS상시관측점 고시성과 중에서 TABK 점을 제외한 나머지 13점들을 고정하여 전국동시망조정을 실시하였다. 표 9에 나타난 바와 같이 2,316개의 관측값을 사용하여 603개의 미지변수를 조정을 통해 추정하여 2등기준점 200점의 3차원 좌표를 결정하였다. 조정 후 계산된 사후분산인자는 최소제약조정에 추가하여 총 13

점의 좌표를 고정하더라도 χ^2 검정을 통과하였으며 고정 에 사용된 상시관측점의 좌표들의 정확도가 균질하고 사용된 관측값들에 비해 충분히 정확하다는 것을 의미한다.

그림 7은 다점고정조정 이후 계산된 관측값의 표준화 잔차로 관측값에 과대오차가 포함되어 있지 않다는 것을 명확하게 보여주며, 그림 8은 조정망도와 확률 95%에 대해 계산된 측점의 좌표추정 절대오차타원(2D)과 절대오차차크기(1D)를 보여주고 있다. 조정의 결과를 보다 명확하

표 9. 전국 단일망의 다점고정 조정의 요약

고정점(3D)	상시관측점 13점
기준점의 수	214
미지수의 수(기준점의 수×3)	603
관측값의 수(기선벡터 수×3)	2316
자유도	1713
통계모델	수평: 4mm + 0.4ppm 수직: 8mm + 0.8ppm
사후분산 인자	1.06
χ^2 검정결과	통과

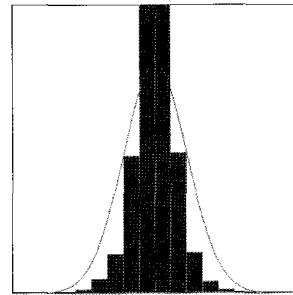


그림 7. 2등기준점망의 다점고정 조정 후 계산된 표준화 잔차의 히스토그램

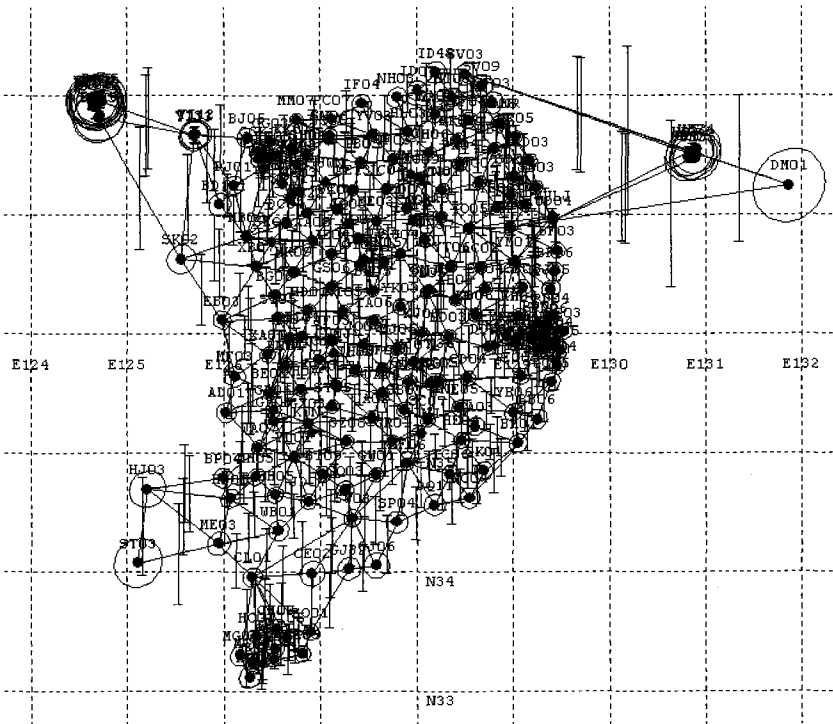


그림 8. 2등기준점망의 다점고정 조정망도 및 측점의 절대오차

게 하기 위하여 95%확률에 대해 계산된 절대오차타원의 장축과 절대오차의 길이를 그림 8과 그림 9에 도시하였다. 전체적인 경향은 수평의 경우 2cm, 수직은 4cm 이상의 정확도를 보여주고 있다. 그러나 그림에 보이는 몇몇의 급격한 오차의 증가는 기선장이 150km 이상이 되는 외곽도서지역의 경우이다. 예를 들어 측점번호 9~18은 백령도 지역이고 측점번호 171~175는 울릉도 지역이다.

앞서 최소제약조정 결과에 검토된 바와 같이 이러한 오차의 증가는 조정에 사용된 통계모델이 GPS2등기준점망의 평균기선장의 범위를 크게 벗어날 경우 오차의 크기를 설명하는데 부족한 부분이 있음을 나타내며 실제 조정을 통해 얻어진 좌표의 정확도는 이보다 높을 것으로 판단된다. 표 10은 95%확률에 대해 계산된 절대오차타원의 장축과 절대오차의 길이에 대한 통계값을 나타내고 있다. 이 표에 의하면 망조정을 통해 평균적으로 수평방향의 경우 2.1cm, 수직방향의 경우 4.6cm 수준의 정확도가 확보되었음을 확인 할 수 있다.

기선장이 150km 이상이 되는 백령도와 울릉도 및 독도와 같은 일부 도서지역을 제외한 이후 절대오차타원의 장축과 절대오차의 길이를 그래프로 나타내면 그림 10과 같으며 그 결과를 요약하여 표 11에 나타내었다. 이 경우 표준편차의 값이 크게 감소되었으며 평균값은 수평과 수직방향에서 1.8cm와 3.9cm로 최소제약조정에서 사업지구 사이의 중복점 조정좌표 비교 및 상시관측점 고시성과의 비교 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있어 외각 도서지역을 제외한 지역의 조정좌표의 정확도를 95%절대오차가 잘 나타내어 주고 있는 것으로 판단된다.

다점고정을 통한 조정 계산을 점검하기 위하여 본 연구에서 가장 장기선에 해당되는 울릉도 및 독도 연결 기선을 그림 11에 보이는 바와 같이 초고정밀 과학기술용 GPS데이터처리 소프트웨어인 Bernese에 의해 기선해석을 실시하고 SV03과 UD04점의 고정을 통해 조정하여 UB32와 DM01에 대한 좌표차이를 비교하여 표 12에 요약하였다. 결과를 살펴보면 수평위치의 경우는 거의 차이

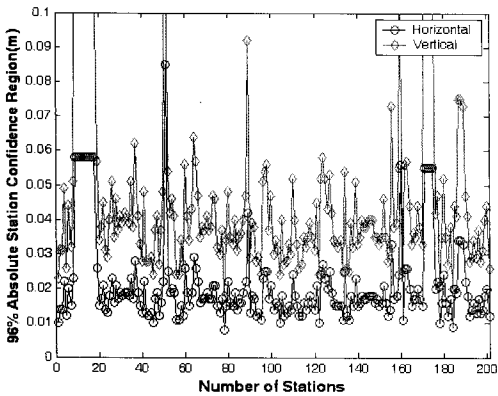


그림 9. 2등기준점망의 다점고정조정의 절대오차 타원의 장축과 절대오차의 크기(95%)

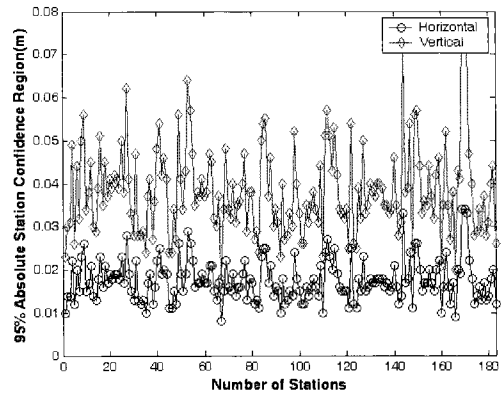


그림 10. 2등기준점망의 다점고정조정 후 일부 도서지역을 제외한 측점의 절대오차 타원의 장축과 절대오차의 크기(95%)

표 10. 95%확률에서 절대오차 타원의 장축과 절대오차 크기의 통계표

성분	평균	편차(RMS)	최대값	최소값
수평방향(2D)	0.021m	0.013m	0.085m	0.008m
수직방향(1D)	0.046m	0.028m	0.183m	0.018m

표 11. 일부 도서지역을 제외한 95%확률에서 절대오차 타원의 통계값 요약

성분	평균	편차	최대값	최소값
수평방향(2D)	0.018m	0.005m	0.034m	0.008m
수직방향(1D)	0.039m	0.011m	0.076m	0.018m

표 12. 다점고정 조정과 Bernese에 의한 결과의 비교(단위 : 경·위도(초), 타원체고(m))

측점	다점고정 조정결과			Bernese 결과			두 결과의 차이		
	P	L	h	P	L	h	dP	dL	dh
UB32	0.1721	0.8409	292.389	0.1720	0.8409	292.404	0.000	0.000	0.016
DM01	0.4519	0.3693	117.032	0.4518	0.3692	117.089	0.003	0.000	0.057

* 위도(P)와 경도(L)의 단위는 초(")이며, 타원체고(h)의 단위는 m임.

** 좌표비교는 위도와 경도에서 도(°)단위와 분(')단위를 제외함

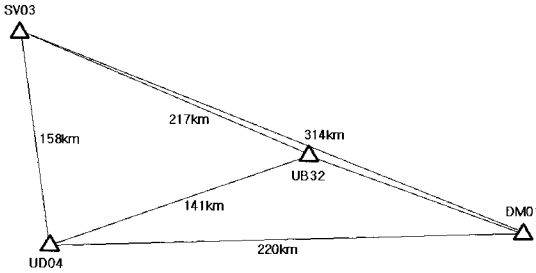


그림 11. 울릉도 및 독도 GPS연결망

가 없음을 알 수 있고 높이의 경우 UB32의 경우는 1.6cm 그리고 DM01의 경우는 5.7cm 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. Bernese가 제공할 수 있는 장기선 해석의 정확도를 고려 할 때 본 연구에서 얻어진 결과의 정확도는 100~300km 이르는 기선에 대해서도 95%확률의 절대 오차에 비해 훨씬 양호한 수 센티미터 수준으로 결정되었음을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 국토지리정보원에서 실시한 GPS기준점측량의 관측데이터의 처리를 통해 얻어진 기선벡터의 3차원 망조정을 통해 국가 2등측지기준점의 세계측지계 성과를 산정한 것으로 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 1점 고정에 의한 최소제약조정을 사업지구와 전국 단일망에 대해 순차적으로 실시하고 기선해석을 통해 얻어진 기선벡터에 포함되어 있는 과대오차를 체계적으로 검출한 후 소거하였다.

둘째, 전국 단일망에 대한 최소제약조정에 경험적 통계 모델링 기법을 적용하여 기선벡터의 절대 및 상대오차의 크기를 수평방향에 대해 4mm+0.4ppm 그리고 수직방향에 대해 8mm+0.8ppm으로 결정하고 기선벡터의 분산-공분산행렬을 수정하였다. 이를 위해 기선해석 결과파일을 입력하여 분산-공분산행렬을 일괄 수정 할 있는 소프트웨어를 개발하였다.

셋째, 과대오차가 소거된 기선벡터와 수정된 분산-공분산행렬을 사용하여 13개의 국가 1등측지기준점의 고시성과를 고정하는 다점고정에 의한 조정을 실시하여 국가 2등측지기준점 200점에 대한 세계측지계 성과를 산정하였다.

넷째, 추정 좌표의 절대정확도를 평가하기 위하여 95% 확률에 대한 측점의 절대오차타원의 장축과 오차의 크기를 계산하였으며 그 결과는 수평 2cm 그리고 수직방향으로 4cm정확도로 최종성과가 산정되었음을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2006년도에 (사)한국측량학회에서 수행한 “국가기준점 망조정에 관한 연구”의 일부이며, 본 연구를 지원해 주신 건설교통부 국토지리정보원 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- 국토지리정보원 (2002), 국립지리원 고시 제2002-444호, 국토지리정보원.
- 백은기, 이영진 (1991), 가중측점망 조정법의 적용에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제 11권 제 4호, pp. 133-141.
- 이석찬, 고영호, 이영진 (1987), 돌출오차의 검출과 측지망의 신뢰도, 대한토목학회 논문집, 제 7권 제 1호, pp. 1-9.
- 이영진 (1993), GPS방식에 의한 정밀기준점측량의 실용화에 대한 연구, 대한토목학회 논문집, 13(5), pp. 201-208.
- 이영진, (1998), 3차원 기선벡터망 조정기법에 의한 국가기본점의 성과산정(KTRF94), 한국측지학회지, 16(1), pp. 85-94.
- 이영진, 이흥구, 정광호 (2006), GPS망조정에 의한 세계측지계의 국가기준점 성과산정, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp. 275-278.
- Baarda, W. (1968), A testing procedure for use in geodetic networks, *Publication on Geodesy, New Series*, 2(5), Netherlands Geodetic commission.
- Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, H., Collins, J. (1997), *GPS theory and practice*, Springer-Berlag/Wien, Austria.
- Lee, Y. J., H. K., Lee, G. H. Jung (2006), Realization of new Korean horizontal geodetic datum: GPS observation and network adjustment, *Proceedings of IAIN/GNSS 2006*, Jeju,

- Korea, 18-20 October, pp. 529-534.
- Leick, A. (2004), *GPS satellite surveying*, John & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 435pp.
- Paul, R. W., Charles, D. G (1997), *Adjustment computation (static and least squares in surveying and GIS)*, John Wiley & Sone, Inc.
- Rizos, C. (1996), *Principle and practice of GPS surveying*, School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 555pp.
- Wang, J. (2000), *Modelling and quality control for precise GPS and GLONASS satellite positioning*, Ph. D. Thesis, School of Spatial Science, Curtine University of Technology, Perth, Australia, 171pp.

(접수일 2007. 10. 2, 심사일 2007. 10. 12, 심사완료일 2007. 10. 22)