

연구논문

GPS관측기선의 삼변망조정계산에 의한 우리나라 지적측량기준점의 베셀성과 산출

Computation of Bessel Coordinates of the Cadastral Control Points by Trilateration Adjustment of GPS Baseline Measurements

양철수* · 강상구** · 정래정*** · 김용호**** · 이민석*****

Yang, Chul Soo · Kang, Sang Gu · Jung, Rea Jung · Kim, Yong Ho · Lee, Min Seok

要 旨

GPS 관측에 의해 구한 기선벡터를 이용하여 평면에서의 삼변망조정계산에 의하여 지적측량기준점의 베셀좌표를 산출하는 소프트웨어를 개발하고 우리나라 전역 지적측량기준점의 성과 통일에 활용하였다. GPS 관측점간의 기선 거리를 평면에 전개하는 데에는 PNU95 지오이드모델을 이용하여 지오이드면상의 거리를 산출하고, 다음으로 베셀 타원체상의 좌표에 바탕하여 구한 증대율을 적용하여 평면투영거리를 산출하였다. 우리나라 전역 지적측량기준점의 통일성과를 산출하는 데에는, 우선 자유망조정에 의해 전국 32개소 GPS상시관측소의 베셀좌표를 산출하고, 다음으로 이들 GPS상시관측소마다 지적측량기준점과 결합하는 망조정계산을 실시하였다. 그 결과 GPS 기선벡터를 이용하여 현재의 지적기준점 성과를 정비할 경우 전국 어디에서나 점간거리 1ppm 이내에서 일치하는 베셀좌표의 결정이 가능하였다.

핵심용어 : GPS상시관측소, 삼변망조정계산, 지적측량기준점, 베셀좌표

Abstract

In this study, the software to compute Bessel coordinates by trilateration adjustment was developed, and the software was used to determine coordinates of the cadastral control points over the southern Korean peninsula. The baseline measured by GPS was reduced to the distance on geoid surface by applying PNU95 geoid model, and the distance on geoid surface was reduced to the plane grid distance by applying scale factor of map projection of Bessel coordinates. Using the plane grid distance, Bessel coordinates of 32 CORS (Continuously Operating Reference Station) were computed by free adjustment at first, and then the coordinates of the cadastral control points were computed by joining the control points to adjacent CORS. The result shows a possibility of construction of highly accurate and consistent cadastral survey network with coordinate error less than 1ppm of distance, when newly computing the coordinates of the control points by using distances measured by GPS.

Keywords : Continuously Operating Reference Station, Trilateration adjustment, Cadastral control point, Bessel coordinate

1. 서 론

지적측량기준점이라 함은 삼각점, 지적삼각점, 지적삼각보조점 등으로 구성된다. 지적삼각점 및 지적삼각보조점 등은 토지조사사업 당시에 설치된 삼각점을 기초로 하고 있다. 토지조사사업 당시의 기준점 성과는 동경측

지계의 성과로서 일본 동경을 측지원점(datum origin)으로 삼아 삼각측량에 의해 우리나라의 측지망, 즉 우리나라 전역에 분포하는 삼각점의 위치를 베셀타원체면에 전개한 것이다.

GPS 측량의 성과는 세계측지좌표로 나타내고 있다. 세계측지좌표라 함은 GRS80타원체 기준의 ITRF2000 좌

2007년 7월 16일 접수, 2007년 8월 28일 채택

* 정희원·대한지적공사 지적연구원 연구위원, 지적연수원 교수 (csyang@kcsc.co.kr)

** 대한지적공사 지적연구원 책임연구원 (sgukang@kcsc.co.kr)

*** 대한지적공사 지적연구원 책임연구원 (jrj@kcsc.co.kr)

**** 대한지적공사 지적연구원 책임연구원 (yhhkim@kcsc.co.kr)

***** 대한지적공사 정보지원팀장 (mslee@kcsc.co.kr)

표를 말한다. GPS상시관측소의 세계측지좌표가 정해져 있다면, 어떤 점의 세계측지좌표는 인근에 있는 GPS상시관측소와의 연결 관측 및 자료 처리에 의해 쉽게 산출할 수 있다. 행정자치부에서 운영하고 있는 GPS상시관측소의 세계측지좌표는 2002년 1월 1일을 원기(epoch 2002.0)로 하는 성과가 결정되어 있다(윤홍식, 2005).

그러나, 지금까지의 측량 성과가 모두 기존의 동경측지계에 근거하고 있으므로, 세계측지계로의 전면적 전환이 이루어지기 전에는 신·구 측지계 성과의 병행 활용이 불가피하다. 이 경우 지표상의 같은 점이라 해도 어떤 측지계의 성과를 사용하느냐에 따라 측량하는 점의 위치가 달라진다면 신·구 측지계 성과의 병행활용은 혼란을 일으킨다. 정확한 관측이 이루어진다면, 어떤 점을 기준으로 삼더라도 동일한 측량성과가 산출되어야 한다. 즉, 세계측지계 성과에 상응하는 정확도로서 동경측지계의 성과가 구축되어야 함을 의미한다.

어떤 측지계라 해도 점간 관측치에는 차이가 없다. 측지계에 따라 성과가 다른 것은 측지원점이 다르고 측량 및 측지계산의 기준면이 다르다는 등의 요소에 기인한다. 따라서, 측량 관측치를 해당 측지계의 특성에 맞도록 처리하여 계산에 활용하면 관측치와 동일한 정확도의 측지 성과를 얻을 수 있다. 단, 기존 측지성과의 정확도를 높이는 문제는 이미 사용 중인 기준점 성과와 최대한 부합해

야 한다는 조건을 만족시킬 수 있어야 한다.

이와 관련하여 본 연구에서는 삼변망조정계산 소프트웨어를 개발하고 동경측지계의 지적측량기준점 성과를 산출하는 문제에 적용하였다. 삼변망조정계산은 GPS관측에 의한 점간 거리와, 점간 좌표 차이에 의해 산출되는 계산거리와의 차이가 최소로 되도록 각 점의 좌표를 정하는 방법이다. 즉, 각각의 점의 좌표를 미지수로 하는 조정기법이다. 이 때문에 삼변망조정계산은 계산량이 많다는 단점이 있으나 미지점의 좌표를 높은 정도로 구할 수 있다는 장점이 있다.

실제 문제로서, 본 연구에서는 행정자치부 지적팀과 대한지적공사에서 운영하고 있는 32개소의 GPS 상시관측소와 우리나라 전역에 분포하는 약 730 점의 지적측량기준점을 대상으로 동경측지계의 성과를 산출하고 결과를 분석하였다. 지적측량기준점에서의 GPS관측자료는 2003-2004년도에 걸쳐 약 8차례의 전국동시관측에 의해 수집한 것이다. 기선거리의 정확도는 기선해석의 폐합차 점검, 다른 세션간의 중복 관측점 점검 등에 의해 0.5ppm 보다 높게 평가되었다(강상구, 김준식, 2005). 그림 1은 GPS관측을 실시한 1·2등 삼각점의 분포를 나타낸다.

2. 삼변망조정계산

2.1 관측방정식

삼변망조정계산은 점간 관측거리와 좌표에 의한 계산거리와의 차이가 최소가 되도록 표본분산치의 총합을 최소로 하는 조건을 적용하여 관측점 좌표의 최확치를 계산하는 방법이다.

거리를 선형화하여 관측방정식으로 나타내기 위하여, 평면상의 두 점 $P_i(x_i, y_i)$, $P_j(x_j, y_j)$ 간의 관측거리를 S_{ij} 라 하고, 1차항까지의 Taylor 전개를 취하면(Wolf and Ghilani, 1997),

$$S_{ij} = S_{0ij} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x} dx_i + \frac{\partial S_{ij}}{\partial y} dy_i + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x} dx_j + \frac{\partial S_{ij}}{\partial y} dy_j$$

$$= S_{0ij} - a_{ij} dx_i - b_{ij} dy_i + a_{ij} dx_j + b_{ij} dy_j \quad (1)$$

단, $S_{0ij}^2 = (x_{0j} - x_{0i})^2 + (y_{0j} - y_{0i})^2$, $a_{ij} = (x_{0j} - x_{0i})/S_{0ij}$, $b_{ij} = (y_{0j} - y_{0i})/S_{0ij}$ 이다. 여기서 (x_{0i}, y_{0i}) 등은 추정좌표이고 S_{0ij} 는 이로부터 계산한 두 점간의 계산거리이다. 이로부터, 관측거리와 계산거리의 잔차를 v 로 표시하면 다음과 같다.

$$v_{ij} = -a_{ij} dx_i - b_{ij} dy_i + a_{ij} dx_j + b_{ij} dy_j - (S_{ij} - S_{0ij}) \quad (2)$$

잔차 벡터를 V , 계획행렬(design matrix)을 A , 미지수

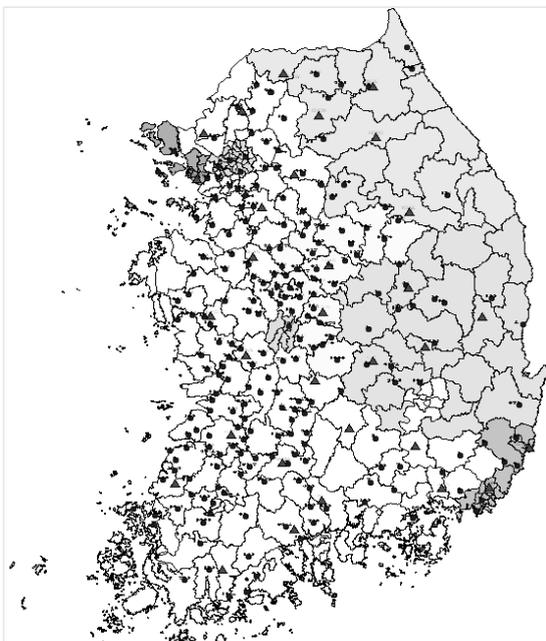


그림 1. GPS관측을 실시한 1·2등 삼각점 분포. ▲은 GPS 상시관측소를 나타냄.

벡터를 X , 관측치 벡터를 L 이라 할 경우, 관측방정식은 다음 식으로 표시된다.

$$AX = L + V \quad (3)$$

이 방정식에 대하여 $V^T P V = m$ 이라는 조건을 만족하는 정규방정식의 해, 즉 미지수 벡터는 다음의 연산에 의해 결정된다.

$$X = N^{-1} U = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (4)$$

여기서, $N = (A^T P A)$, $U = (A^T P L)$, P 는 중량(weight)이다. 행렬의 크기는 n 을 관측기선의 개수라 하고 m 을 미지수의 개수라 할 경우, V, A, X, L, P 의 순번으로 $(n \times 1)$, $(n \times m)$, $(m \times 1)$, $(n \times 1)$, $(n \times n)$ 이다. 미지수 개수 m 은 계산에 들어가는 미지점 개수의 2배이다.

앞 식의 $Q = N^{-1} = (A^T P A)^{-1}$ 에서 (x_i, y_i) 에 해당하는 행렬의 요소를 각각 q_x, q_y 라 하면, 삼변망조정계산에 의해 구한 각 점의 좌표의 표준편차는 다음과 같다.

$$\sigma_x = \sigma_0 \sqrt{q_x} \quad (5)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 \sqrt{q_y} \quad (6)$$

여기서 σ_0 는 삼변망조정계산 결과 관측치의 단위중량당 표준편차로서 다음과 같다.

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{(n-m)}} \quad (7)$$

삼변망조정계산은 관측방정식이 비선형이므로, 미지점의 좌표를 단변에 정하는 것이 아니라 수차례의 수정 갱신에 의해 최확치를 결정하게 된다. 즉, 식 (1)-(4)에서 미지점의 추정좌표 (x_0, y_0) 에다 수정치 (dx, dy) 를 가하여 새로운 추정좌표로 채용하고, 반복계산에 의해 추정좌표의 수정치 $(dx, dy) = (0, 0)$ 에 수렴하는 좌표를 결과로 채용하게 된다.

2.2 거리 계산

GPS 측량의 결과인 점간 경사거리를 삼변망조정계산이 수행되는 좌표계 즉 베셀평면직각좌표계상에서의 값으로 전환하는 데에는 먼저 경사거리를 기준면상의 거리로 전개하고, 다음으로 기준면상의 거리에다 평면투영에 수반하는 증대율을 가하여 평면거리를 산출하였다.

경사거리를 기준면상의 거리로 전개하기 위해서는 각각의 관측점에서의 표고에 대한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 타원체고도에다 PNU95 지오이드모델에 의한 지오이드고를 보정하여 산출한 표고를 기준면상의 거리

로 전개하는 데에 이용하였다. 지오이드고가 기준면상의 거리 계산에 미치는 영향은, 남한 지역에서 GRS80타원체 기준의 평균 지오이드고(ζ)가 25m 이고 타원체반경(R)이 6370km 이므로 $\zeta/R \approx 4 \times 10^{-6}$, 즉 4ppm으로서 100km 당 40cm에 이르는 비율로 길어지는 만큼 결코 무시할 수 없다. PNU95 지오이드고는 RMS 오차가 ± 15 cm 이다 (양철수 외 2001).

기준면상의 거리 S_ζ 는 두 점의 GRS80 타원체고도를 각각 h_1, h_2 라 하고, 이 두 지점의 평균지오이드고를 $\zeta_m = (\zeta_1 + \zeta_2)/2$ 라 하면,

$$S_\zeta = 2(R_\alpha + \zeta_m) \sin^{-1} \left(\frac{c}{2R_\alpha} \right) \quad (8)$$

$$c = \sqrt{\frac{d^2 - (h_1 - h_2)^2}{(1 + h_1/R_\alpha)(1 + h_2/R_\alpha)}} \quad (9)$$

여기서, c 는 GRS80타원체면상의 두 점을 잇는 직선거리(chord distance), d 는 GPS 관측에 의해 구한 점간 경사거리, R_α 는 두 점의 평균위도 φ 및 방위각 α 를 함수로 하는 GRS80타원체의 곡률반경이다. 방위각 α 는 전방방위각(α_1)과 후방방위각($\alpha_2 \pm \pi$)의 평균치이다(Torge, 2001).

식 (9)의 c 의 계산값은 타원체 기하학에 의한 보다 엄밀한 계산식(Rapp, 1989)을 적용한 결과와 큰 차이가 없다. 또, 두 점간의 평균 지오이드 높이를 채용하여 산출하는 식 (8)의 기준면상 거리 S_ζ 는 장거리 기선이라 해도 문제가 없다. 우리나라의 경우 지오이드 기복이 비교적 완만하기 때문이다. 실제로, 400km에 이르는 장거리 기선에 대하여, 식 (8)에 의한 결과와 지오이드면에 충실히 접하도록 여러 구간으로 나누어 합산해서 구한 결과는 2cm 이내에서 일치하였다.

한편, 삼변망조정계산의 최초 단계에서 기준면상의 거리를 평면거리로 산출하는 데에 필요한 투영증대율은 다음 절의 ITRF2000/Bessel 간의 좌표변환에 의한 베셀좌표를 이용하였다.

2.3 초기좌표의 설정

본 연구의 삼변망조정계산은 베셀좌표를 구하기 위한 것이므로 추정좌표는 동경측지계상의 성과이어야 하고, 최초 단계에서는 사용자가 지정해 주어야 한다. 최초 단계에서 추정좌표를 적절히 설정하면 다음 단계에서 기 설정한 추정좌표의 수정 갱신 작업이 수월하게 진행된다. 이와 관련하여 우리나라 전역을 대상으로 하여 구한 7-parameter 변환계수를 이용하여, ITRF2000의 성과를 현행의 Bessel 좌표로 변환한 결과를 미지점의 초기 추정좌표로 이용하였다.

본 연구에서 채용한 좌표변환식은 Bursa-Wolf 모델에 의한 7-파라미터 방법으로 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + (1 + \Delta S) \begin{pmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (10)에서 (X, Y, Z) 는 베셀타원체상의 3차원직교좌표를, (X', Y', Z') 는 ITRF2000에서 채용하고 있는 GRS80 타원체상의 3차원직교좌표를 나타낸다. 또, $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 는 (X, Y, Z) 좌표계와 (X', Y', Z') 좌표계간의 원점이동량, ΔS 는 스케일보정, R_x, R_y, R_z 는 X', Y', Z' 축의 미소회전 각이다.

좌표변환파라미터와 이의 추정오차 등은 변환파라미터의 계산에 채용하는 점의 상호 부합도 및 점의 지역 분포에 따라 달라진다. 이 때문에 양철수(2005)는 우리나라 전역 730 여점에 대한 관측자료 중에서, 등록성과와 변환성과의 차이가 작아서, 성과가 비교적 양호한 것으로 추정되는 1등삼각점 19점, 2등삼각점 124점, 3등삼각점 20점 등 합계 163점을 7-변환파라미터의 계산에 채용함으로써 우리나라 전역의 특성이 잘 반영되도록 하였다. 표 1은 우리나라 전역 163개 삼각점으로부터 구한 7-변환파라미터를 나타낸다. 계산에 채용한 공통점 163점의 좌표차이 즉 등록성과와 변환성과와의 차이에 대한 RMS 는 24cm이다.

2.4 평면직각좌표계의 설정

망조정계산은 서부·중부·동부 등 단일의 평면직각좌표계에 속하는 점들로 제한되지 않는다. 평면직각좌표 (x, y) 와 경위도좌표 (B, L) 간의 변환관계를 이용하면 임의의 점을 투영원점으로 하는 평면직각좌표 (x', y') 를 산출할 수 있으므로 서로 다른 평면직각좌표계에 속하는 점들을 혼합 처리할 수 있다. 이 때문에 본 연구에서는 망조정에 들어가는 점들의 평균위치를 투영원점으로 하는 평면직각좌표계상에서의 삼변망조정계산을 수행하였다.

투영원점을 달리하면 증대율이 달라져서 평면직각좌표 뿐만 아니라 점간 평면거리에서 차이가 난다. 식 (1)의 a_{ij}, b_{ij} 가 달라지고 따라서 수정치 dx_i, dy_i, dx_j, dy_j 가 달라 산출되어 최종 조정좌표가 달라질 수 있다. 투영원점에서 가까운 점들 보다 동서로 멀리 떨어진 지역에 있는

점들 간에 더 큰 증대율이 작용하고 이에 비례하여 점간 거리가 더 커진다. 관측거리에 오차가 있다면 외곽으로 갈수록 증폭되므로 외곽점이 망조정계산에 미치는 영향이 커진다. 이 때문에 조정좌표가 달라질 수 있고, 남북 보다 동서 좌표의 차이가 크다. 여기서 조정좌표라 함은 망조정계산에서 구한 평면직각좌표 (x, y) 를 경위도좌표 (B, L) 로 환산한 것을 말한다.

그런데, 투영원점이 다르다는 데에서 오는 차이는 망조정계산의 오차와는 다르다. 평면상에서의 점간거리는 (x, y) 좌표에 의한 것이나 GPS관측에 의한 것이나 동일한 증대율이 작용하므로 이들 간에는 차이가 없다. 망조정좌표는 점간 관측거리에 맞게끔 결정된다. 점간 관측거리의 오차가 없다면 투영원점을 달리해도 망조정좌표는 동일하게 산출된다. 평면망조정계산의 범위에 제약을 두는 것은 점간 거리오차가 외곽으로 갈수록 증폭되어 외곽점이 미치는 영향이 큰 데에 기인한다.

GPS 관측거리의 오차는 0.5ppm 이내로 종래의 지상 관측에 의한 것과 비교하면 매우 작다. 또 방향에 무관하다. 만일 투영원점을 망의 중앙부에 잡게 되면 평면투영에 기인하는 거리오차의 증폭이 반대편의 점들에게도 동일하게 작용한다. 여기에서 GPS 관측의 거리오차가 작다는 것을 전제하면 평면직각좌표계에서의 망조정계산의 범위가 크게 늘어날 수 있다. 이를 알아보기 위해 다음의 두 가지 수치실험을 실시하였다.

첫째, 경기 북서부 지역의 10점에 대하여 이들 점의 평균위치와 중부 및 동부 원점의 평면직각좌표계상에서 자유망조정계산을 실시하였다. 두 계산에 의한 조정좌표(위도 및 경도)의 차이는 거의 없었다.

둘째, 제주도를 제외한 전국의 GPS상시관측소를 대상으로 전국 동시의 자유망조정계산을 실시하였다. 표 1의 좌표 변환파라미터를 적용하여 GPS상시관측소의 초기좌표로 삼고 망조정계산의 투영원점을 북서부의 점 $(B, L) = (38^\circ, 125^\circ)$ 및 남동부의 점 $(B, L) = (35^\circ, 129^\circ)$ 으로 하였다. 두 계산에 의한 차이는 위도에서 0.001", 경도에서 최대 0.005"(약 12cm)로 나타났다. 경도에서 0.005"의 차이가 생긴 점은 부산, 울산 등 투영 원점으로부터 동서간의 이격이 큰 곳이다.

평면직각좌표계에서의 망조정계산은 타원체면상의 관측치를 평면상의 값으로 환산하는 과정에서 점간거리의

표 1. 우리나라 전역 163개 삼각점으로부터 구한 좌표변환파라미터

	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$	$\Delta S(ppm)$	$R_x(sec)$	$R_y(sec)$	$R_z(sec)$
파라미터 값	126.810	-481.630	-657.801	-6.342	1.731	-1.959	8.547
추정오차	1.508	1.224	1.084		0.043	0.045	0.051

증대율이 달라 왜곡이 생기기 때문에 적용 범위에 제한이 있다. 飯村友三郎외(1998)에 의하면 100km×100km 정도라고 하지만 적용 범위를 정하는 기준이 불명확하다. 적용 범위의 문제는 망조정계산 결과의 정확도에 관계한다고 보아야 한다. 앞의 수치 실험 결과는 평면직각좌표계상에서 전국동시의 삼변망조정계산을 실시할 경우 예상되는 최대 왜곡량이다. 이 차이는 현재의 기준점 성과의 오차를 고려하면 무시할만하다.

3. GPS상시관측소의 베셀좌표계산

3.1 자유망조정계산

망조정계산의 결과는 계산에 채용하는 고정점에 큰 영향을 받는다. 고정점이라 함은 망조정계산에서 좌표의

변동이 없는 점을 말한다. 즉, 초기 추정좌표의 수정이 가해지지 않는 점이다. 고정점은 종래의 우리나라 측지망 구축의 기본이 된 점을 선정하는 것이 이상적이지만, 이들 점의 성과가 상호 부합한다는 보장이 없다. 고정점 좌표에 오차가 있으면 이 오차가 미지점에 전파된다. 이 때문에 본 연구에서는 특정의 점을 선택 고정하지 않고, 전국동시의 자유망조정계산 결과에 기초하여 구한 GPS상시관측소를 후속의 망조정계산의 고정점으로 삼는 방법을 채택하였다.

망내의 어떠한 점도 고정하지 않는 자유망조정계산에서는 유일해가 구해지지 않는다. 망 전체의 평행이동, 회전, 축소 또는 확대의 우려가 있다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 초기 추정좌표에 대한 X축 및 Y축 방향으로의 수정치(변동벡터)의 합이 0 라는 조건을 추가하는 처리를

표 2. GPS상시관측소의 베셀좌표. 보은(BOEN)^{*}점은 2005년 4월7일 이전의 위치임

점명	위도	경도	원점	x(m)	y(m)	σ_x (m)	σ_y (m)
철원(CHLW)	38° 9' 42".2756	127° 24' 52".1767	중부	518032.43	236321.61	0.01	0.07
동두천(DOND)	37° 53' 57".4282	127° 3' 35".8444	중부	488824.05	205272.71	0.02	0.06
양평(YANP)	37° 27' 4".9322	127° 30' 17".5497	중부	439233.05	244667.53	0.01	0.04
파주(PAJU)	37° 44' 37".0450	126° 44' 13".5096	중부	471579.34	176830.21	0.03	0.05
인천(INCH)	37° 25' 1".3400	126° 41' 8".2320	중부	435349.90	172173.38	0.03	0.04
용인(YOIN)	37° 13' 5".0319	127° 13' 48".9467	중부	413247.81	220434.98	0.01	0.03
홍천(HONC)	37° 42' 22".9216	128° 11' 37".0968	동부	467718.10	128901.69	0.01	0.05
춘천(CHCN)	37° 52' 0".0451	127° 42' 36".1472	중부	485441.22	262470.29	0.00	0.06
인제(INJE)	38° 4' 0".1565	128° 10' 12".3893	동부	507729.01	127182.74	0.01	0.07
영월(YOWL)	37° 10' 46".7913	128° 27' 40".1235	동부	409097.69	152154.27	0.02	0.03
보은(BOEN) [*]	36° 29' 0".9767	127° 43' 47".6667	중부	331972.79	265399.70	0.00	0.01
괴산(GSAN)	36° 48' 47".7864	127° 47' 9".8190	중부	368593.24	270131.55	0.00	0.02
천안(CHAN)	36° 52' 30".4601	127° 9' 16".0907	중부	375179.57	213770.41	0.02	0.02
청양(CHYG)	36° 27' 21".5137	126° 48' 2".4430	중부	328678.00	182134.60	0.03	0.00
논산(NONS)	36° 11' 0".2871	127° 5' 53".9929	중부	298422.30	208844.29	0.02	0.01
김천(KIMC)	36° 8' 3".9461	128° 8' 29".7180	동부	293324.38	122742.35	0.01	0.01
군위(KUNW)	36° 13' 49".8681	128° 34' 24".8656	동부	303728.57	161668.52	0.03	0.00
예천(YECH)	36° 38' 54".7646	128° 26' 44".3909	동부	350169.70	150437.17	0.02	0.01
청송(CHSG)	36° 25' 57".6763	129° 3' 20".6053	동부	326077.03	204996.07	0.04	0.00
무주(MUJU)	36° 00' 1".1048	127° 39' 37".5420	중부	278304.10	259539.72	0.00	0.01
남원(NAMW)	35° 25' 12".0092	127° 23' 43".4394	중부	213794.14	235905.73	0.01	0.03
정읍(JUNG)	35° 37' 11".0891	126° 58' 23".5924	중부	235881.99	197574.18	0.02	0.03
순천(SONC)	34° 57' 15".7909	127° 29' 8".0696	중부	162178.13	244346.73	0.01	0.05
장흥(JAHG)	34° 40' 20".0120	126° 53' 55".4939	중부	130776.30	190721.31	0.03	0.06
영광(YONK)	35° 16' 31".9039	126° 30' 56".2343	중부	197802.68	155935.70	0.04	0.04
제주(CHJU)	33° 22' 53".3020	126° 37' 5".5244	중부	37677.70	164478.10	0.03	0.11
창녕(CHNG)	35° 31' 48".9842	128° 28' 38".5692	동부	226081.13	152606.27	0.02	0.03
하동(HADG)	35° 9' 33".6313	127° 42' 30".5472	중부	185035.98	264543.57	0.00	0.04
거창(GOCH)	35° 39' 53".5726	127° 56' 33".3825	중부	241298.19	285338.03	0.01	0.03
울산(WOLS)	35° 30' 9".5399	129° 25' 0".1007	동부	222970.85	237800.81	0.05	0.03
부산(PUSN)	35° 13' 51".1081	129° 4' 27".1687	동부	192742.73	206754.93	0.04	0.04
창원(CWON)	35° 13' 58".9762	128° 41' 32".3899	동부	193026.04	171996.57	0.03	0.04

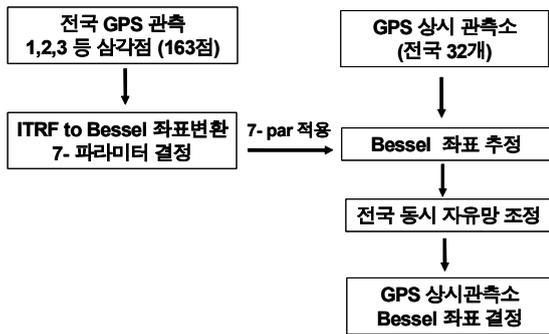


그림 2. GPS 상시관측소의 Bessel 좌표 산출 과정

실시하였다. 즉, $\sum \Delta x_i = 0, \sum \Delta y_i = 0$ 라는 조건을 추가하였다. 이 조건에 의해 삼변망조정계산의 성과는 측지망 전체의 중심이 고정되는 해가 된다. 또, 삼변망조정계산에서는 거리관측치를 사용하므로 망의 축소 또는 확대의 우려는 없다(中根勝見, 1994).

초기 추정좌표에 대한 수정치의 합을 최소로 하는 조건은 현재 측지망의 성과를 보존하는 처리이므로, 점의 초기 좌표는 우리나라 전역의 측지망 특성을 잘 반영하면서 가능한 한 상호 부합해야 한다. 그래서 본 연구에서는 우리나라 전역의 1·2·3등 삼각점 163점으로부터 구한 표 1의 좌표변환파라미터를 적용하여 GPS상시관측소의 초기좌표를 추정하고, 고정점을 두지 않는 전국동시의 삼변망조정계산에 의해 이들 32개소 상시관측소의 베셀좌표를 산출하였다. 그림 2는 GPS상시관측소의 베셀좌표 계산 과정을 나타낸다.

표 2는 이러한 과정을 거쳐서 구한 GPS상시관측소의 베셀좌표를 나타낸다. 표 2에서 $x(m), y(m)$ 는 지적측량에서 채용하고 평면직각좌표이고 $\sigma_x(m), \sigma_y(m)$ 는 (x,y) 평면직각좌표의 추정오차이다. 추정오차는 철원, 동두천, 인제, 장흥, 제주 등 우리나라 외곽의 점을 제외하면 5cm 이내이다. 지적분야에서 채용하고 있는 베셀좌표는 토지조사당시의 성과로서 경도마다 10.405"를 더해주는 처리를 하지 않은 것이다. 평면직각좌표의 경우도 마찬가지이다.

3.2 점검계산

앞에서 구한 GPS 상시관측소 좌표의 정합성을 몇 가지 측면에서 점검하였다. 고정점과 미지점의 개수, 조정계산의 지역 크기 및 점의 분포에 따라 차이가 생길 수 있다. 이 때문에 다음의 점검계산을 실시하였다.

첫째, 전국동시의 자유망조정계산에서 구한 보은, 김천, 무주 관측소를 고정점으로 채용하여 지역 크기와 미지점 개수를 달리하는 망조정계산을 실시하였다. 이 계

산은 그림 3에서 보는 것처럼, ① 고정점 3점과 가까운 경기남부·충남북·경북권에 소재하는 용인, 영월, 논산, 군위 등 7개 관측소로 구성되는 지역망, ② 고정점 3점 보다 북쪽에 분포하는 경기도 및 강원도권에 소재하는 파주, 인천, 홍천, 영월 등 10개 관측소로 구성되는 지역망, 그리고 ③ 고정점 3점 보다 남쪽에 분포하는 충청·전라·경상도권에 소재하는 19개 관측소 등 3개 블록으로 구성하고 블록별로 조정계산을 실시하였다.

즉, 동일한 고정점을 채용하여 우리나라 전역의 점에 적용한 조정성과, 중앙부의 점에만 적용한 조정성과, 남한 북부의 점에만 적용한 조정성과, 남한 남부의 점에만 적용한 조정성과 간의 차이를 점검하는 계산이다. 결과는 1cm의 차이가 있었다.

둘째, 역계산 점검을 실시하였다. 고정점으로 채용한 보은, 김천, 무주 3점을 미지점으로 두고 전국동시망조정 계산에 의해 산출된 우리나라 동남부의 울산, 부산, 창원 3점의 좌표를 고정하여 보은, 무주, 김천의 좌표를 산출하였다. 역계산 결과의 최대 차이는 1cm 로 나타났다. 이 결과는 우리나라 동북부의 인제, 홍천, 춘천 3점을 이용한 계산에서도 마찬가지로 나타났다. 한편, 인제, 홍천, 춘천 3점의 조정성과를 이용하여 우리나라 남서부의 남원, 하동, 순천, 영광, 장흥 등 4점의 좌표를 산출해 본 결과, 보은, 김천, 무주 3점 고정에 의한 성과와 비교하여, 하동의 경우에는 1cm, 순천, 영광의 경우 2cm, 장흥 점에서 최대 3cm 의 차이가 검출되었다.

셋째, 상용의 TGO(Trimble Geomatics Office) 소프트웨어를 이용한 계산 결과와 비교하였다. 본 연구에서 사용한 데이터와 별도로 2007년 6월 8일 관측된 15개 상시관측소 데이터를 다운로드 받아 기선해석을 실시하고, 지역좌표계(Bessel)에서 망조정계산을 실시하였다. 표 3

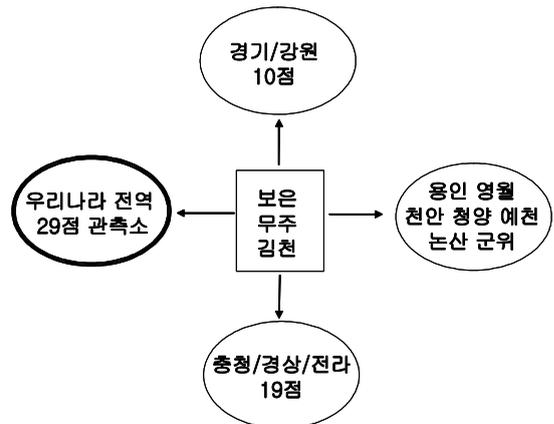


그림 3. 전국동시망조정계산과 블록별 망조정계산 비교

은 TGO에 의한 망조정계산의 출력물로서, 표 2의 천안, 괴산, 무주 3점의 좌표를 고정하여 나머지 12개 GPS상시 관측소의 베셀좌표를 산출한 것이다. 표 2와 표 3을 비교하면 부산, 영광 등 동서 최외곽부의 점이라 해도 위도·경도의 차이가 0.003"를 넘지 않는다. 해당 원점계열의 평면직각좌표의 차이로 환산하면 최대 8cm 이다.

본 연구의 성과와 TGO에 의한 결과와의 차이는 2.4절에서 기술한 평면망조정계산의 전국 적용에 따른 왜곡에 기인할 수 있다. 여기에도 또 한 가지 큰 차이로서 본 연구에서의 망조정계산은 종래의 지오이드면 기준의 측량성과를 이용하지만, TGO에서의 망조정계산은 베셀타원체 기준의 3차원직교좌표계상의 성과를 이용한다는 것이다. 우리나라의 경우 북서쪽으로 가면서 베셀타원체면과 지오이드면의 이격이 크다. 베셀타원체 기준의 지오이드높이는 우리나라 동남부에서 -43.43m, 중서부에서 -67.92m로서 25m에 달하는 큰 차이가 있다(이석배, 2007). 이러한 이격은 망조정계산 성과의 계통적 차이를 발생시킨다.

점검계산 결과를 종합하면, 본 연구에서 결정한 GPS상시관측소의 베셀좌표는 우리나라 전역을 통하여 부합한다. 자체 점검계산 및 TGO에 의한 망조정계산방법의 차이, 그리고 평면좌표계상에서의 전국동시망조정계산에 기인하는 왜곡량 등을 포함하더라도 우리나라 중앙부에 위치하는 3점을 이용하면 어디에서나 10cm 이내에서 일치하는 베셀좌표를 얻을 수 있다.

4. 기준점성과의 통일 계산

우리나라 전역의 약 730점의 삼각점에 대한 GPS 관측의 결과는 GPS 상시관측소와 연계하는 기선해석처리에 의해 모든 점들이 서로 연결되는 망이 된다. 그런데, 망조정계산은 각 점의 좌표를 미지수로 두고 처리하므로 계산점수가 많아지면 계산에 필요한 메모리와 계산소요 시간이 기하급수적으로 늘어난다. 이 때문에 약 730 점에 달하는 점의 동시조정이 쉬운 일이 아니다.

이에 따라 시·도 별로 이 구역에 속하는 모든 삼각점에 대하여 이 지역 내부 및 주변 지역의 GPS 상시관측소와 연결하는 지역별 망조정계산을 실시하였다. 이것은 앞의 점검계산에서 3점 고정 망조정계산 결과는 미지점의 분포 및 조정계산 지역의 크기에 무관하게 동일한 성과가 산출된다는 데에 바탕한다. 그래서, 서울·인천·경기도에 소재하는 152개 삼각점의 조정계산은 파주, 동두천, 철원, 인천, 용인, 양평 등 6점의 상시관측소를 고정점으로 채용하는 등의 계산을 실시하였다. 표 4는 망조정계산에 들어간 삼각점의 개수와 고정점으로 채용한 GPS상시관측소의 지역별 분포를 나타낸다.

이렇게 구한 성과가 부합하는지에 대한 점검은 다음의 방법에 의하였다. 첫째, 계산에 들어가는 점의 개수와 계산 범위를 달리하면서 성과의 재현성을 점검하였다. 예를 들어, 보은, 무주, 김천 3점을 고정점으로 삼아 인제26,

표 3. TGO에 의한 천안(CHAN), 괴산(GSAN), 무주(MUJU) 3점 고정의 망조정계산 결과

포인트 이름	위도	N 오차	경도	E 오차	타원체고	타원체고 오차	고정
CHAN	36°52'30.46010"N	0.000m	127°09'16.09070"E	0.000m	-15.942m	0.162m	위도 경도
DOND	37°53'57.43020"N	0.032m	127°03'35.84546"E	0.028m	54.927m	0.137m	
GSAN	36°48'47.78640"N	0.000m	127°47'09.81900"E	0.000m	97.659m	0.000m	위도 경도 h
CHCN	37°52'00.04574"N	0.034m	127°42'36.14844"E	0.029m	55.322m	0.162m	
INCH	37°25'01.34163"N	0.030m	126°41'08.23149"E	0.027m	2.919m	0.164m	
YANP	37°27'04.93297"N	0.024m	127°30'17.54988"E	0.021m	-13.985m	0.127m	
YONK	35°16'31.90107"N	0.036m	126°30'56.23228"E	0.034m	14.569m	0.177m	
MUJU	36°00'01.10480"N	0.000m	127°39'37.54200"E	0.000m	144.704m	0.141m	위도 경도
NAMW	35°25'12.00879"N	0.029m	127°23'43.43998"E	0.026m	94.391m	0.168m	
CHYG	36°27'21.51410"N	0.020m	126°48'02.44237"E	0.019m	50.968m	0.134m	
JUNG	35°37'11.08802"N	0.028m	126°58'23.59216"E	0.025m	55.917m	0.159m	
PUSN	35°13'51.10749"N	0.041m	129°04'27.17151"E	0.038m	73.175m	0.194m	
CHSG	36°25'57.67629"N	0.028m	129°03'20.60468"E	0.028m	164.585m	0.141m	
YOWL	37°10'46.79093"N	0.025m	128°27'40.12347"E	0.023m	168.088m	0.138m	
INJE	38°04'00.15703"N	0.041m	128°10'12.39132"E	0.036m	171.962m	0.191m	

간성14, 임계23, 홍천11 등 전국의 일부 삼각점을 대상으로 산출한 결과는 해당 점이 속하는 지역의 블록별 계산 성과와 일치하였다.

다음으로 역계산 좌표가 일치하는가를 점검하였다. 기조정된 삼각점 중에서 일부 점을 고정점으로 삼고 나머지 점들을 미지점으로 삼아 삼변망조정계산을 실시하였다. 예를 들어, 경기 북서부의 일동11, 철원25, 포천24,

성동22 등의 점을 고정하여 구한 파주, 동두천, 인천 등 인근의 상시관측소 좌표는 원래의 고정좌표와 일치하였다. 이러한 점검 계산의 결과는 경남 지역 등 다른 지역에서도 동일하게 나타났다.

표 5는 본 연구에서 구한 경기 북서부 지역 일부 삼각점의 삼변망조정성적을 나타낸다. 이 지역의 삼각점성과는 망실·재설 등에 의해 점간 불부합이 크다. 강화군의

표 4. 망조정계산에 들어간 삼각점 개수와 고정점의 시·도별 분포

지역	삼각점 개수	상시관측소(고정점)
서울·인천·경기	152	파주, 동두천, 철원, 인천, 용인, 양평
부산·경남	131	창녕, 하동, 거창, 부산, 울산, 창원
강원	71	영월, 춘천, 홍천, 인제
충북	62	보은, 괴산, 천안, 김천, 무주
대전·충남	78	천안, 청양, 논산
대구·경북	66	김천, 군위, 예천, 청송, 창녕, 거창
전북	77	무주, 남원, 정읍, 논산
전남, 제주	96	순천, 장흥, 영광, 하동, 제주
합계	733	

표 5. 경기 북서부 지역 일부 삼각점의 망조정성과. dX, dY는 망조정(X,Y) 좌표와 등록 (X,Y)좌표의 차이임

점명	망조정좌표		등록성과 X(m) / Y(m)	dX / dY (m)
	위도 / 경도	X(m) / Y(m)		
일동11	37° 52' 33".2789	486277.07	486277.20	-0.12
	127° 19' 19".7746	228340.33	228338.45	1.87
안양25	37° 17' 06".4843	420677.80	420677.98	-0.18
	126° 50' 23".2128	185793.79	185793.43	0.36
포천24	37° 49' 29".4176	480560.21	480560.28	-1.07
	127° 01' 09".0275	201687.92	201686.59	1.33
대부11	37° 08' 25".5638	404654.25	404654.25	-0.01
	126° 41' 13".7118	172206.59	172206.12	0.47
길상	37° 36' 27".4596	456576.68	456577.92	-1.24
	126° 29' 22".4510	154935.08	154935.19	-0.11
당산	37° 33' 34".4622	451148.58	451146.69	1.89
	126° 45' 31".1654	178678.65	178679.05	-0.40
계양산	37° 33' 01".4552	450142.22	450141.54	0.68
	126° 42' 49".4257	174706.42	174706.23	0.19
허미	37° 34' 28".1740	452821.16	452821.00	0.16
	126° 41' 36".1505	172916.73	172918.04	-1.31
김포416	37° 40' 43".9314	464402.85	464402.54	0.31
	126° 41' 59".5830	173528.69	173527.76	0.93

길상, 인천광역시 의 당산·계양산·허미, 경기도의 김포 416 등의 지적삼각점은 망산원점, 계양원점, 가리원점 등의 구소삼각지역에 속하여 통일원점 성과의 관리가 소홀한 편이다. 삼변망조정성과와 등록성과간에 1m를 넘는 차이가 있으나 특별한 경향이 없는 것은 이 지역 기준점 성과의 불균질성을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 우리나라 전역의 주요 기준점 성과를 점검하고 새로운 지적좌표를 산출하기 위한 삼변망조정계산SW를 개발하고 실제 문제에 적용하였다. 현재 사용하고 있는 기준점에서의 GPS 관측자료를 바탕으로 32개소 GPS상시관측소의 지적좌표를 산출하였으며, 이 중에서 3점만을 지적측량기준점으로 활용하더라도 정확한 기준점성과(지적좌표)의 산출이 가능하게 되었다. 또, GPS 관측이 이루어진 1·2·3·4 등 삼각점 약 730점을 대상으로 하는 점점 계산 결과, 부정오차를 제외하면, 전국 어디에서나 1ppm 이내의 차이로서 지적(베셀)기준점의 성과 결정이 가능하였다.

본 연구는 기존 삼각점 중에서 고정점을 선정·활용하지 않는다. 고정점 성과에 오차가 있으면 점간 관측치가 정확하다 해도 고정점 오차에 의한 영향이 모든 미지점에 파급되고, 그래서 후속 계산 성과의 정확도가 저하된다. 따라서, 우리나라 전역 주요 삼각점에서의 GPS 관측에 의한 좌표변환의 성과 및 자유망조정의 구속조건에 의해 현재의 측지망과 부합하도록 GPS상시관측소의 좌표를 결정하고 이들 점을 후속의 망조정계산의 고정점으로 활용하였다. 이렇게 산출된 GPS상시관측소 성과는 서로 부합한다. 또, 부합하는 고정점(GPS상시관측소)에 의한 후속의 망조정성과는 역시 부합하므로 우리나라 전역을 통하여 통일된 좌표의 계산이 가능하였다.

삼변망조정계산에서는 점간 관측거리에 맞게끔 점의 좌표를 구하는 계산이므로 초기 단계에서 각 점의 추정좌표를 필요로 한다. 자유망조정계산의 $\sum \Delta x_i = 0$, $\sum \Delta y_i = 0$ 라는 조건은 측지망 전체의 평행이동을 구속하는 것이므로 초기 추정좌표는 우리나라 전체 측지망의 특성을 잘 반영해야 한다. 본 연구의 성과통일은 GPS상시관측소의 베셀좌표를 구하는 것에서 출발하였고, 그래서 최초 단계에서 추정된 좌표는 우리나라 전역을 대상으로 결정된 좌표변환파라미터에 의한 결과를 이용하였다.

앞의 자유망조정계산의 조건은 초기좌표가 달라지면 최종의 결과가 달라짐을 시사한다. 이 때문에 좌표변환에 의한 결과를 이용하기 보다는 좌표변환에 이용한 점의 등록좌표를 초기좌표로 채용하는 자유망조정계산을 실시해 보았다. 계산은 GPS상시관측소의 베셀좌표를 산출하는

것으로 하되 다음의 과정에 의하였다. 우선, 163점 중에서 과대오차가 있는 것으로 판단되는 7점을 제외한 156점에 대하여 자유망조정계산을 실시하여 이들 156점의 좌표를 결정하였다. 다음으로 이들 156점과 GPS상시관측소를 연결하는 GPS관측치에 의하여 GPS 상시관측소의 좌표를 결정하였다. 단, 이 과정에서는 자유망조정계산에서 구한 삼각점의 좌표를 고정하였다. 이렇게 해서 구한 GPS상시관측소의 베셀좌표는 표 2의 결과와 비교하여 남북 및 동서 성분의 평행이동량 $\Delta X(N) = 3cm$, $\Delta Y(E) = 6cm$ 을 제거하면 3cm 이내에서 일치하였다. 즉, 점간 상대좌표가 3cm 이내의 차이에 한정되는 만큼 본 연구에서 구한 망조정계산 성과는 안정적인다.

감사의 글

이 연구는 대한지적공사 지적연구원의 2005년도 연구사업의 후속 성과물이다. 우리나라 전역의 900 여점에 달하는 삼각점에서 GPS 관측을 수행한 대한지적공사 각 본부 및 지사의 GPS 담당자에게 감사드린다. 특히 지적연구원의 김준식 과장은 GPS관측에 기여한 바가 크다. 또, 본 논문을 심사하신 위원들의 많은 조언에 깊이 감사드린다.

참고문헌

1. 강상구, 김준식, 2005, *전국 기준점 성과정비 및 새로운 지적기준망 구축(세계측지기준계에 의한 ITRF 산출)*, 지적연구원, 연구2005-12, 270pp.
2. 양철수, 최광선, 김정희, 한옥, 이민부, 2001, "GPS/PNU95 지오이드를 이용한 우리나라 삼각점의 표고 정확도 분석", *지질학회지*, 대한지질학회, 제37권 제2호, pp. 193-202.
3. 양철수, 2005, *지적재조사사업의 기준점 활용방안 연구(우리나라 전역의 지적기준점 성과 통일)*, 지적연구원, 연구2005-11, 175pp.
4. 윤홍식, 2005, *GPS를 이용한 지적측량 기술개발 등에 관한 연구(제2과제 : GPS 상시관측소 성과관리시스템 분석 연구)*, 행정자치부 11-1310000-000452-01, pp. 49-76.
5. 이석배, 2007, "세계측지계상에서 천문측량데이터를 이용한 연직선편차 계산에 관한 연구", *한국지형공간정보학회지*, 제15권 제1호, pp. 47-53.
6. Rapp, R.H., 1989, *Geometric Geodesy Part1*, The Ohio State University, pp. 64-66.
7. Torge W., 2001, *Geodesy*, 3rd Ed., de Gruyter, pp. 244-245.
8. Wolf and Ghilani, 1997, *Adjustment Computations*, Wiley Interscience, pp. 229-248.
9. 飯村友三郎, 中根勝見, 箱岩英一, 1998, *TS·GPS에 의한 기준점측량*, 東洋書店, p. 148.
10. 中根勝見, 1994, *測量데이터의 3次元處理*, 東洋書店, pp. 66-67.