

좌표변환 공통점의 지역측지계 조정좌표 산출

- 삼변망조정계산의 활용 -

Calculation of Local Coordinate of Common Points for Coordinate Transformation by Trilateral Adjustment

양철수* · 강상구** · 송원호*** · 이원희****

Yang, Chul Soo · Kang, Sang-gu · Song, Wonho · Lee, Won Hui

Abstract

Trilateral adjustment can complement the problem of transforming cadastral maps into World Geodetic Coordinate system. First, it is possible to determine adjusted coordinate of common points that match each other over a wide area. Second, calculations that focus on specific points can be performed. Third, a solution that maintains the shape of the regional network can be obtained through constraints. Thus, the point coordinates can be determined appropriately for the survey system. In addition, heterogeneous survey results that span regions with different coordinate origins can be calculated on a single origin coordinate. This improves the efficiency of the workflow in transforming cadastral maps into World Geodetic Coordinate System.

Keywords: Trilateral adjustment, Transform cadastral Map, Common point, Adjusted coordinate

1. 서 론

측량에 의한 측점의 위치는 위치측정의 기준이 되는 측지계 및 점의 위치를 표시하는 좌표계에 기초하여 좌표가 결정된다. 물리적 위치가 같은 점이라 해도 도면에 표시된 점의 좌표는 기준이 되는 측지계 및 좌표계에 따라 달리 표시된다. 이 때문에 세계측지계 기반의 GNSS 측위결과를 곧바로 지역측지계 기반의 측

량에 활용할 수 없고, 지역측지계 기반의 측위결과를 곧바로 세계측지계 기반의 측량에 활용할 수 없다.

특정 측지계에 기초하여 관측한 자료를 이용하여 다른 측지계에서의 위치좌표를 결정하는 방법에는, 직접적 수단으로서 관측 자료를 목표하는 다른 측지계의 관측량으로 변환하여 점의 좌표를 구하거나, 간접적 수단으로서 측지계 간의 좌표변환계산에 의할 수 있다.

* 랜드맵스 대표(ceosyang@landmaps.net)

** 한국국토정보공사 공간정보연구원 Korea Land and Geospatial Infomatix Corporation (Research Fellow: sgukang@lx.or.kr)

*** 한국국토정보공사 공간정보연구원 Korea Land and Geospatial Infomatix Corporation (General Director: whsong@lx.or.kr)

**** 한국국토정보공사 공간정보연구원 Korea Land and Geospatial Infomatix Corporation (Team Leader: leewh@lx.or.kr)

간접적 수단인 좌표변환계산은 양쪽 측지계의 위치 좌표를 가진 공통점들을 이용하여 두 측지계 간의 관계를 구하여 적용하거나, 미리 정해놓은 좌표변환관계를 새로이 관측되는 점들에 적용하게 된다. 이 계산은 좌표의 차이를 최소로 하는 방법이므로 변환결과가 실제 관측치에 맞도록 정해지는 것이 아니다. 목표로 하는 좌표계의 특성에 맞게 측량망의 축소·확대 또는 회전이 이루어진다. 이 때문에 좌표변환계산의 결과는 현실과 다른 결과를 초래할 수 있다.

세계측지계 기준의 GNSS 측위의 결과는 점간거리 오차가 1ppm 이하로서 매우 정확할 뿐만 아니라 작업 효율이 매우 높으므로 이를 지역측지계 기준의 측량 및 도면관리에도 활용할 수 있다. 좌표변환 방법은 유효한 수단이지만 변환계산에 들어가는 해당 지역 측량망의 계통적 경향을 추출하여 보정하는 것에 그친다. 개별 측량점 간의 관측거리 등 수량적 합치를 도모하지 않는다. 이 때문에 좌표변환방법을 보완할 수 있는 기술이 필요하다. 지역의 측량체계에 따라 특징의 점을 중요시하는 처리가 가능해야 하며 측량성과의 검사에도 적합해야 한다. GNSS 측위결과를 이용하는 세계측지계와 지역측지계의 양쪽 영역에서 활용 가능한 계산 알고리즘은 지적도면의 세계측지계 변환작업의 문제점을 보완할 수 있다.

김창환외(2016)는 좌표변환계산에 있어 공통점의 국지적 편차량 확인이 필요하다고 하였다. 공통점의 국지적 경향은 지구계간의 경계 불일치를 초래하므로, 기준점을 정비하는 개념으로 조정좌표를 산출하여 이를 기준으로 정비 가능한 지역과 불가능한 지역을 구분하여 적용해야 함을 제시하였다. 국지적 편차량이란 그 보다 상위의 지역 범위에 속하는 공통점의 경향과 벗어나는 정도이다. 홍성연(2011)은 GPS 관측 데이터를 이용하여 창원시의 도시기준점에 대한 지적 좌표 성과를 산출·분석하고, 실무에서 안정적인 활용 위해 현행 도시기준점 고시 성과를 직접 지적측량에 이용하기 보다는 새로이 지적성과를 산출해서 활용하

는 방안을 제안하였다. 또한 지역 삼각점에 대한 사전 정밀한 성과점검이 필요하고, 계산 S/W는 삼변망조정계산이 적합한 것으로 평가하였다

본 연구는 직접적 수단으로서 GNSS 관측결과를 이용하여 지역측지계 기반의 측량작업에 활용하기 위한 기술을 구현한다. 측량작업의 특성 및 지역 범위에 맞도록 지역측지계 좌표를 계산하는 방법으로서 삼변망조정계산을 활용하는 방안을 제시한다. 삼변망조정계산에 의해 관측거리와 좌표가 조화하는 계산 결과, 즉 지역측지계 기반의 조정좌표를 도출할 수 있다. 좌표변환의 공통점에 대하여 조정좌표를 구하게 되면, 세계측지계의 측량성과를 지역측지계의 측량계산에 활용하는 작업, 지역측지계 도면을 세계측지계 도면으로 변환하는 작업 등을 안정적으로 수행할 수 있게 한다.

2. 조정계산 알고리즘

세계측지계 관측치로서 지역측지계 좌표를 구하는 계산은 GNSS 측위의 결과를 이용한다. GNSS 측위의 결과인 세계측지계 좌표로부터 구한 지역측지계 기준의 점간거리를 이용하는 것이므로 이로부터 구해지는 지역측지계 좌표는 세계측지계 좌표에 상응하는 정확도를 가질 수 있다.

점간거리를 이용하는 삼변망조정계산은 3점 이상으로 구성되는 관측점을 대상으로 점간평면거리에 맞도록 각 점의 평면직각좌표(x, y)를 한꺼번에 결정하는 계산방법이다. 관측점의 좌표와 점간거리의 관계는 Eq.(1)과 같다.

$$l_{ij} = l_{ij}'$$

$$l_{ij} = [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, (x_i, y_i) 는 공통점의 지역측지계 평면직

각좌표이고, l_{ij} 는 평면좌표로부터 계산되는 점간 좌표거리이다. 점간 좌표거리 l_{ij} 가 관측거리 l_{ij}' 에 맞도록 계산에 들어가는 모든 점의 좌표 (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , ... 를 구하는 계산이다. Figure 1은 삼변망 조정계산의 개념도이다.

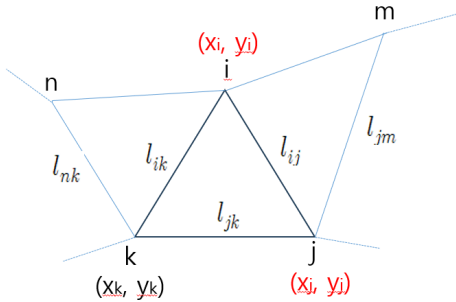


Figure 1. Trilateral adjustment

관측거리 l_{ij}' 은 지상측량의 경우라면 EDM 등에 의할 수 있다. 그런데, 지적도면의 세계측지계변환과 관련된 문제라면 공통점의 세계측지계 좌표를 이용하는 것이 효율적이다. 세계측지계좌표로부터 계산되는 점간 경사거리를 지역측지계 기준의 점간 관측거리로 환산하여 활용할 수 있기 때문이다.

Figure 2는 삼변망조정계산의 알고리즘 개념도이다. 삼변망조정계산은 공통점의 지역측지계 조정좌표를 구하는 것으로, 첫째, 조정계산좌표계를 설정하는 단계, 둘째, 관측점간 평면투영거리를 구하는 단계, 셋째, 관측방정식 작성 및 조정계산을 실시하는 단계로 구성된다. 조정계산의 결과는 실용의 평면직각좌표계의 좌표로 변환하여 출력한다.

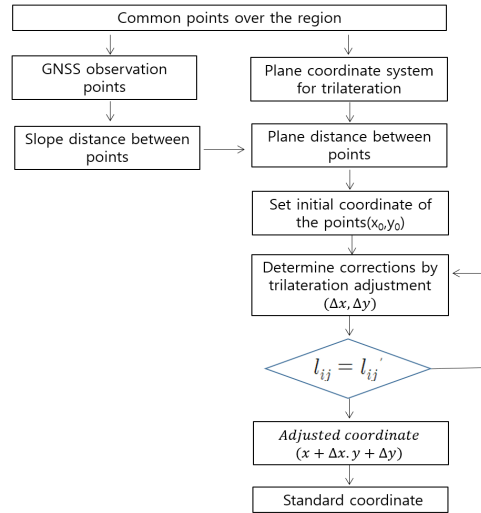


Figure 2. Process of trilateral adjustment

조정계산은 관측거리로부터 구한 평면거리와 계산 거리와의 차이가 최소가 되도록 관측점의 좌표를 결정하게 된다. 모든 계산점에다 초기좌표를 부여하고, 점간거리에 부합하도록 초기좌표를 보정해나가는 계산이다. 즉, 각 점의 좌표보정치 $(\Delta x_i, \Delta y_i)$, $(\Delta x_j, \Delta y_j)$,...를 구해 새로운 좌표 값 $x_i = x_i + \Delta x_i$, $y_i = y_i + \Delta y_j$ 등으로 갱신하고, 이로써 구한 점간 계산거리 l_{ij} 가 관측거리 l_{ij}' 에 수렴도록 하는 계산이다. 따라서 실제 계산은 “초기좌표 설정=> 좌표보정=> 좌표거리계산=> 좌표거리와 관측거리와의 수렴 판정” 과정을 반복하며, 계산이 수렴하는 것으로 최종 좌표를 구하게 된다. 이 계산은 최소 제곱법에 의한다. 최소제곱법의 관측방정식은 Eq.(2)로 표현할 수 있다.

$$l_{ij}' - l_{ij} + v_{ij} = -a_{ij}\Delta x_i - b_{ij}\Delta y_i + a_{ij}\Delta x_j + b_{ij}\Delta y_j \quad (2)$$

$$a_{ij} = \frac{x_j - x_i}{l_{ij}}$$

$$b_{ij} = \frac{y_j - y_i}{l_{ij}}$$

여기서, a_{ij} 는 점간 좌표거리 l_{ij} 의 x방향 편미분 계수, b_{ij} 는 점간 좌표거리 l_{ij} 의 y방향 편미분 계수, v_{ij} 는 관측거리의 오차를 나타낸다.

Eq.(2)의 계산에 들어가는 관측점의 지역측지계 초기좌표 (x_i, y_i) 는 등록좌표로 한다. 공통점의 경우라면 등록좌표가 있으므로 문제가 없다. 등록좌표가 없는 경우, GNSS 관측이 이루어진 새로운 관측점이라면 지역의 좌표변환관계를 이용하여 초기좌표를 도출할 수 있다. 예를 들어, 양철수의(2007)은 우리나라 전역을 대상으로 구한 7-parameter 변환계수를 이용하여, ITRF2000의 성과를 지역측지계 좌표로 변환한 결과를 미지점의 초기좌표로 이용하였다.

3. 조정계산의 좌표계 설정

점간거리 및 각도를 계산에 이용하는 방법은 이들 관측 자료를 목표하는 좌표계의 관측량으로 가공 할

용하여 점의 좌표를 구하게 된다. 여기서 목표 좌표계라 함은 실용의 평면직각좌표계를 말한다. 지역측지계의 경우 베셀타원체 기준의 평면좌표계로서 서부·중부·동부 원점의 좌표계가 있고, 그 외 망산·계양·구암 등의 기타원점의 좌표계가 있다. 삼변망조정계산 방법을 이용하면, 원점이 다른 여러 도면을 하나의 단일 원점 기준의 좌표로 통일하여 처리할 수 있다.

TM투영에 의한 관측점간 평면거리는 기준자오선으로부터 멀어질수록 왜곡이 커지므로 정확한 좌표산출에 장애가 된다. 이 때문에 계산 지역의 중심위치를 원점(0,0)으로 하는 조정좌표계를 채용한다. 평면직각좌표계가 다른 여러 지역의 관측점을 처리할 경우에는 경위도좌표 (B, L) 와 평면직각좌표 (x, y) 의 변환관계를 이용하여 단일 평면직각좌표계로 통일되 그 중심위치를 원점으로 채용한다. Figure 3는 조정계산의 좌표계를 설정하는 방법을 설명한다.

이 과정에 필요한 조정계산의 평면직각좌표계, 평면거리증대율, $(B,L) \leftrightarrow (x,y)$ 투영변환에 따른 계

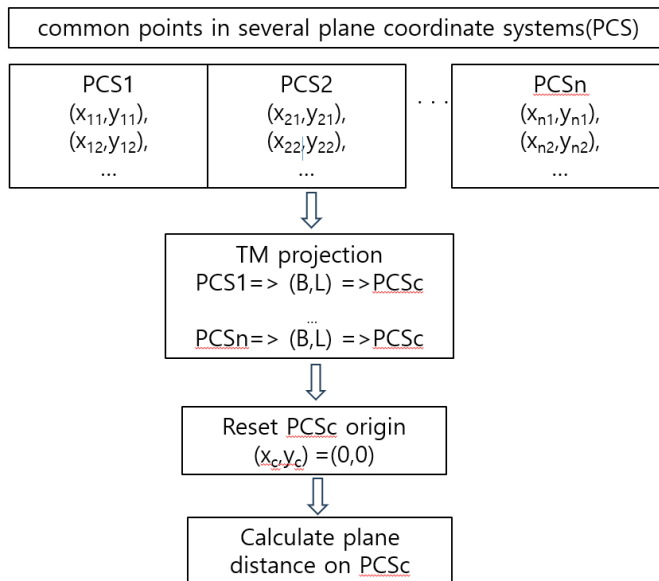


Figure 3. Reset the coordinate system for trilateral adjustment

산은 TM(Transverse Mercator) 투영의 경우 가우스 크뤼거 투영공식에 의한다. 지역측량의 근간이 되어 온 기준점의 평면직각좌표 계산이 가우스상사이중투영에 의한 것이어서 TM투영계산과 다르다라는 문제를 제기하기도 한다. 그러나, 가우스상사이중투영과 가우스크뤼거투영 계산은 수치계산 방법에 차이가 있을 뿐 동일하게 취급해도 문제가 없다. 일례로 투영원점을 (38oN, 127oE) 로 하여 위도 34oN~북위 42oN, 경도 126oE~128oE 범위에 대하여 계산한 결과를 보면 양 끝단에서 최대 6cm 정도의 차이가 있을 뿐이다 (양철수, 2009). 당시의 기준점 측량의 오차와 비교하면 무시할 수 있는 크기이다. 삼변망조정계산의 최대 공간적 범위를 광역시도 규모로 잡는다면 이 차이는 전혀 문제가 되지 않는다.

조정좌표계가 설정되면, 이후의 모든 계산은 조정좌표계에서 이루어진다. 평면거리를 구하고, 이로써 조정계산을 실시한다. 조정계산의 결과는 서부, 중부, 동부, 또는 기타원점계열의 좌표계 등 실용의 평면좌

표계로 변환 출력하는 것으로 정리하면 된다.

4. 평면거리의 산출

삼변망조정계산에 들어가는 지역측지계에서의 평면거리는 점간 경사거리를 베셀 타원체면상의 거리로 환산한 값에다 평면투영에 따른 평면거리증대율을 곱한 값으로 계산된다. 넓은 지역에 걸쳐 정확한 조정계산을 위하여 다음 두 가지 요소를 고려하였다.

첫째, 세계측지계 기준의 타원체거리와 지역측지계 기준의 타원체거리 간에는 지오이드고에 따른 차이를 보정한다. 지오이드고는 국토지리정보원이 공표한 KNGeoid18 에 의한다. 두 점간의 평균 지오이드고를 N 이라하고, 중점에서의 타원체평균곡률반경을 R_{GRS} 타원체의 경우 R_{GRS} , Bessel타원체의 경우 R_{BES} 라 하면, 두 점 간의 타원체면 거리는 Eq.(3)으로 나타낼 수 있다.

$$Bessel\ 타원\ 체\ 면\ 거리 = GRS80\ 타원\ 체\ 면\ 거리 \cdot \left(1 + \frac{N}{R_{GRS}}\right) \quad (3)$$

$$GRS80\ 타원\ 체\ 면\ 거리 = Bessel\ 타원\ 체\ 면\ 거리 \cdot \left(1 - \frac{N}{R_{BES}}\right) \quad (4)$$

우리나라에서의 지오이드고는 22m~30m 정도이고 동고서저의 경향을 가진다. Eq.(3)의 2항에 의하면 지오이드고에 의한 영향이 4ppm 정도이므로 결코 무시할 수 없다. GRS80타원체면거리가 베셀타원체면거리보다 작은 것은 두 지점을 잇는 기준면의 차이에 기인한다. 세계측지계의 기준면은 GRS80타원체면이고 지역측지계의 기준면은 지오이드이다. 지역측지계의 기준이 된 베셀타원체면은 지오이드와 접하지만 GRS80 타원체면은 지오이드 보다 낮은 곳에 위치하기 때문이다(양철수·양근우, 2012).

둘째, 타원체면상의 거리를 평면투영거리로 환산함에 있어 점간거리의 왜곡을 최소로 되게 한다. TM 투영에서는 타원체면상의 거리가 같더라도 두 점의 도면상 위치, 즉 평면직각좌표계상의 좌표에 따라 점간 평면거리가 달리 산출된다. 점간거리증대율 m 은 Eq.(5)로 계산된다.

$$m = 1 + \frac{1}{2} \frac{y_m^2}{R^2} + \frac{1}{24} \frac{y_m^4}{R^4} \quad (5)$$

여기서, y_m 은 두 점의 중점에서의 y 좌표이고, R 은 두 점의 중점에서의 타원체의 평균곡률반경이다.

점간거리증대율의 변동은 점간평면거리의 이질성을 초래한다. Eq.(4)에 의하면 y 좌표의 범위를 작게 할수록 증대율의 변동폭이 작아진다. 조정계산의 좌표계로서 평면직각좌표계의 기준자오선을 계산지역의 중앙으로 삼는 것으로써, 보다 넓은 지역에 걸쳐 평면거리의 균질성을 확보할 수 있다.

Eq.(3)의 세계측지계타원체면거리는 GNSS 측위결과를 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 두 점의 삼차원좌표를 이용하여 구한 경사거리를 s 라 하고, 이들 두 점이 타원체를 가로지르는 거리(chord distance)를 c 라 하면, GRS80 타원체면에 접하는 타원체면거리 S_{GRS} 는 다음과 같다(Torge, 1991).

$$S_{GRS} = 2 R_{GRS} \sin^{-1} \left(\frac{c}{2R_{GRS}} \right) \quad (6)$$

$$c = \sqrt{\frac{s^2 - (h_1 - h_2)^2}{(1 + h_1/R_{GRS})(1 + h_2/R_{GRS})}} \quad (7)$$

여기서, h_1, h_2 는 GRS80타원체 기준의 두 점의 높이로서 타원체고이고, R_{GRS} 는 두 점의 중점에서의 GRS80 타원체의 평균곡률반경이다. 이 식에서는 두 점이 동일한 반경의 원호상에 있음을 가정하고 있다.

두 점을 잇는 방위각에 따라 곡률반경이 다르고 타원체거리가 달리 계산되지만 문제가 되지 않는다. 우리나라 남반부를 대상으로 할 경우 최대 1cm를 이내의 차이에 지나지 않기 때문이다.

5. 삼변망조정계산의 유형

세계측지계성과로서 지역측지계 좌표를 구하기 위한 삼변망조정계산은 다음의 3가지 유형으로 실시할 수 있다. 첫째, 기준점 상호간에 정합하는 좌표를 결정하거나 오차 점검을 위한 작업은 자유조정계산에 의한다. 둘째, 특정의 기준점에 부합하도록 기준점좌표를 점검 결정하는 작업은 고정조정계산에 의한다. 셋째, 지역이 넓고 관측점이 많은 경우 계산량을 줄이면서 모든 계산점의 좌표가 정합하는 결과를 얻기 위한 작업은 자유조정과 고정조정을 병행 실시하는 계산에 의한다. Figure 4는 자유조정과 고정조정을 나타낸다.

공통점의 세계측지계 좌표가 모두 정합한다면, 이로써 구한 평면거리를 이용하여 자유조정을 실시한 구한 지역측지계 계산 좌표 역시 모든 점이 정합하는 결과를 낳는다. 자유조정을 실시하고 이어서 고정조정을 실시한 경우에도 모든 점이 정합하는 결과를 낳는다. 정합한다는 것은 모든 공통점들에 있어 이들 간의 좌표로부터 계산되는 좌표거리가 GNSS로부터 구한 평면거리에 일치하도록 좌표가 정해진다는 것을 말한다.

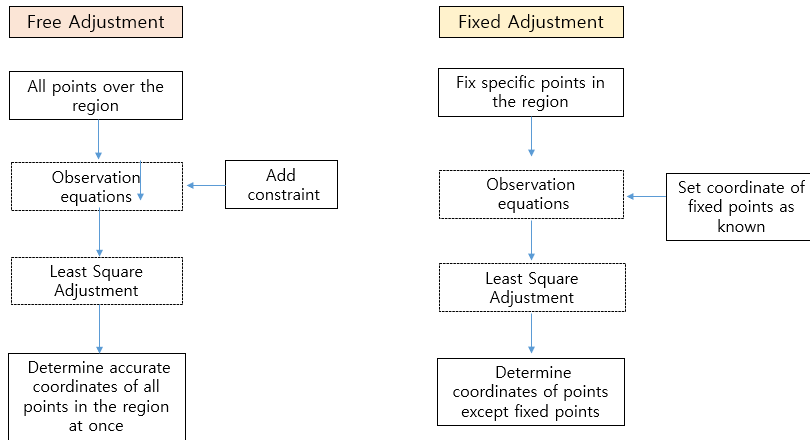


Figure 4. Free adjustment(left) and fixed adjustment(right)

5.1 자유조정계산

자유조정계산은 모든 계산점의 좌표를 미지변수로 하는 처리이다. 이 때문에 망 전체의 이동 및 형상의 변화가 생길 수 있다. 그래서 다음의 구속조건을 가한다. ① 망 전체의 평행이동이 없다. ② 망 전체의 회전이 없다. ③ 망 전체의 축소·확대가 없다. 구속조건은 지역측지망의 형상을 보존하며 해의 안정성을 제고한다. 단, 조정계산의 안정적 수렴을 위해 일부 구속조건을 적용을 제외할 수 있다.

Eq.(8)는 망전체의 평행이동을 구속하며, Eq.(9)은 망전체의 회전을 구속한다. 그리고 Eq.(10)은 망의 스케일을 구속한다.

$$\sum \Delta x_i = 0 \text{ and } \sum \Delta y_i = 0 \quad (8)$$

$$\sum -y_i \Delta x_i + x_i \Delta y_i = 0 \quad (9)$$

$$\sum x_i \Delta x_i + y_i \Delta y_i = 0 \quad (10)$$

여기서 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 는 관측방정식 Eq.(2)의 미지변수로서 좌표보정량이다.

조정계산은 점의 초기좌표를 부여하고, 이로부터

점간거리에 수렴하는 좌표를 구하는 방법이다. 지역측량망의 특성을 고려하면 점의 등급에 따라 초기좌표의 변동 범위를 제어할 필요가 있다. 조정계산은 좌표거리와 관측거리의 차이를 최소로 하는 것이므로 점간 거리의 분산을 부정확한 좌표에 기인하는 부분과 거리에 비례하는 오차가 합성된 것으로 표현하여 Eq.(11)로 한다.

$$v_{ij}^2 = \sigma_0^2 + k^2 \cdot l_{ij}^2 \quad (11)$$

여기서 σ_0 는 우연오차(미터), k 는 거리에 따른 오차 비율이고, l_{ij} 는 점간거리(미터)이다.

가중치를 고려하는 최소제곱법의 정규방정식은 다음의 Eq.(12)로 표현된다.

$$A^t P A X = A^t P L \quad (12)$$

여기서, A 는 계획행렬, X 는 미지수벡터, L 은 좌표거리와 관측거리의 차이, P 는 거리 관측거리에 대한 가중치행렬이다. 이들 수식의 수학적 표현은 다음의 Eq.(13)~ Eq.(16)으로 한다.

$$A = \begin{bmatrix} a_{12} & b_{12} & -a_{12} & -b_{12} & 0 & 0 & \dots \\ a_{13} & b_{13} & 0 & 0 & -a_{13} & -b_{13} & \dots \\ \dots & & & & & & \\ 0 & 0 & a_{23} & b_{23} & -a_{23} & -b_{23} & \dots \\ \dots & & & & & & \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$X = [\Delta x_1 \ \Delta y_1 \ \Delta x_2 \ \Delta y_2 \ \dots \ \Delta x_n \ \Delta y_n]^t \quad (14)$$

$$L = [l_{12} - l'_{12} \ l_{13} - l'_{13} \ \dots \ l_{23} - l'_{23} \ \dots]^t \quad (15)$$

$$P = \begin{bmatrix} v_{12}^{-2} & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & v_{13}^{-2} & \dots & 0 & \dots \\ \dots & & & & \\ 0 & 0 & \dots & v_{23}^{-2} & \dots \\ \dots & & & & \end{bmatrix} \quad (16)$$

거리의 분산에 관한 Eq.(16)의 채용은 지역측량망의 특성 또는 지역의 특정 점을 중시하는 계산처리를 할 수 있게 한다. 예를 들어, 점의 등급에 따라 좌표오차로서 0.10, 0.20, 0.35 미터 등으로 둘 수 있다. 단, 거리의 분산은 두 점 간에 성립하므로 $\sigma_0^2 = \sigma_i^2 + \sigma_j^2$ 으로 두면 된다. 관측거리에 따른 오차 비율 k 는 종래의 기준에서라면 10^{-4} (1km 당 10cm)가 된다. 특정의 점의 위치 변동을 최소화하기 위해서라면 이 점과 관계하는 모든 거리에 대하여 σ_0 및 k 를 0에 가깝게 설정하면 된다.

양철수외(2007)의 연구는 자유망조정에 의해 우리나라 전역의 GPS 상시관측소 및 지역측량기준점에 대한 지역측지계 좌표를 산출하였다. 당시의 기선헌석 소프트웨어인 TGO(Trimble Goematics Office)에 의한 결과와 비교하면 부산·영광 등 동서 최외곽부의 점이라 해도 8cm 이내에서 좌표가 일치하는 결과를 보인다고 하였다.

5.2 고정조정계산

고정조정계산은 특정의 점의 좌표는 변동이 없도록 고정하고 나머지 점들의 좌표를 미지변수로 구하는 계산이다. 이 계산은 Eq.(14)의 미지벡터에서 해당하는 점의 요소 $\Delta x_i, \Delta y_i$ 를 제외하고, 관측방정식 Eq.(13)에서 해당하는 열(column)을 제외하는 것으로 성립한다.

특정의 점을 고정하는 조정계산은 지적측량에서처럼 특정의 기준점을 중시해야하는 계산에 적합하다. 그렇지만 고정점의 좌표가 부정확하거나 고정점 개수가 많아지면 이들 고정점 간의 오차가 개선되지 않은 채로 계산이 이루어지므로 조정계산의 수렴이 나빠져 미지점의 정확한 좌표 산출이 어려워진다. 고정조정계산이 필요하다면 고정점의 정확한 좌표를 알고 있거나 고정점의 개수를 최소로 할 수 있어야 한다.

고정계산의 경우에는 구속조건의 적용하지 않아도 된다. 왜냐하면 고정점을 두는 것 자체가 이미 강한 구속을 가했기 때문이다.

5.3 자유조정과 고정조정의 순차 실시

자유조정과 고정조정을 순차 실시하는 방법은 지역을 대표하는 기준점을 선정하여 자유망조정에 의해 조정좌표를 구해놓고, 다음으로 이들 점의 조정좌표를 고정하여 나머지 계산점의 좌표를 구한다. 이에 의해 모든 기준점이 정합하는 결과를 얻을 수 있다. 이러한 방법은 기존의 측량체계를 중시할 수 있다. 또, 단계별로 나누어 계산하는 방식이므로 행렬계산량이 크게 줄어 계산의 효율성을 높일 수 있다.

이 방법은 넓은 지역에서 모든 관측점간 관측거리가 정합하는 측위결과를 이용하는 경우에 해당하는 것으로, 첫째, 지역을 여러 구역으로 나누어 구역별로 최소 3점의 관측점을 선정하고, 이들 선정된 점들을 대상으로 자유조정계산을 실시하여 조정좌표를 구하고, 둘째, 구역범위의 계산으로, 구역별로 자유조정계산의 결과인 최소 3점의 조정좌표를 고정하는 고정조정계산에 의해 구역 내 나머지 모든 관측점의 좌표를 결정한다. 즉, 자유조정과 고정조정을 순차 실시하여 전 지역의 모든 공통점이 정합하는 지역측지계 좌표를 구할 수 있다(Figure 5).

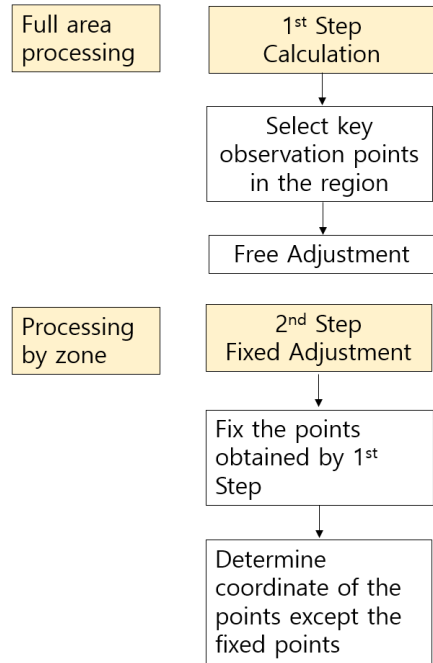


Figure 5. Step-by-step implementation of free adjustment and fixed adjustment

6. 조정계산의 재현성과 좌표변환계산과의 정합성

삼변망조정계산에 의해 모든 공통점이 정합하는 지역측지계 좌표를 구할 수 있다는 결과는 계산 좌표의 재현성과 좌표변환관계로서 검증할 수 있다. 이 검증은 GNSS측위로부터 구한 모든 관측점의 좌표가 정합한다는 전제하에서 다음 두 가지 방법에 의한다.

첫째, 자유조정과 고정조정을 순차 실시하여 계산 결과의 재현성을 점검한다. 지역의 계산점에 대하여 자유조정을 실시하여 1차 계산결과를 구한다. 다음으로, 1차 계산결과 중에서 임의의 3점을 고정하여 다른 계산점의 좌표를 계산한 값이 1차 계산결과와 일치하는지 점검한다. 예를 들어, Figure 1에서 점 i, j, k, m, n 5점을 자유조정하여 조정결과로서 i', j', k', m', n'를

구했다면, 이 중에서 임의의 3점, 예를 들어 i, j, k 3점을 고정하여 나머지 m, n 점의 조정좌표를 구했을 경우 그 결과가 m', n' 과 일치하느냐이다. 지역 전체를 커버하는 외곽의 3점 j, m, n 3점을 자유조정하여 그 결과를 고정하고 나머지 2점 i, k 의 조정좌표를 구한 것이 i', k' 과 일치하느냐라는 것도 점검 방법이 될 수 있다. 수치계산에 의하면 두 가지 방법 모두 일치하는 결과를 낳는다.

둘째, 입력좌표계와 목표좌표계 간의 관계이다. 좌표변환계산은 지역망 전체의 형상이 보존된다면 상사변환모델로서 입력좌표계를 목표좌표계로 옮겨갈 수 있다. 그런데 측지기준계가 다르고 평면좌표계가 달라지면 이방성의 형상 변화를 고려하는 처리가 현실적이다. 이 때문에 Affine 부등각사상변환을 이용하는 것으로 이들 두 측지계 좌표간의 정·역 변환을 관계짓기로 한다. 정·역 변환이란 세계측지계 좌표를 변환하면 조정좌표가 그대로 출력되고, 역으로 조정좌표를 변환하면 세계측지계 좌표가 그대로 출력됨을 말한다.

양철수(2014)에 의하면 서울시 전역의 지적기준점 177점을 조정계산하여 구한 조정좌표와 세계좌표 상호 간에 대하여 모든 점을 일괄 변환한 것, 각 자치구별로 분리하여 해당 지역에 속하는 점을 변환한 것, 그리고 금천·구리·관악·영등포 4개 자치구를 1개 지역으로 묶어 변환한 것이나 세계측지계 변환좌표와 조정좌표의 차이는 모두 1cm 이내에 속하는 결과를 보여주고 있다. Figure 6는 조정계산에 이용한 서울시 전역의 지적기준점 분포를 나타낸다.

또, 여러 원점 계열의 기준점이 혼재하는 지역으로서 인천광역시 중부원점, 가리원점 및 계양원점 계열의 지역에 대한 처리에서도 같은 결과를 보여주고 있다. 이 지역에 대하여 각 원점별로 조정좌표를 계산한 것과, 세 지역을 묶어 중부원점계열의 조정좌표를 계산한 것을 세계좌표로 변환하면, 어떤 경우에도 변환잔차가 1cm 이내임을 보여준다. 지역 좌표계간의

변환, 즉 계양=>중부, 가리=>중부, 계양=>가리 로의 변환도 같은 결과를 보인다. 조정좌표를 이용하는 변환은, 구역별로 조정된 성과를 세계좌표로 변환하거나, 지역 전체의 조정성과를 곧바로 세계좌표로 변환하거나 같은 결과를 낼 수 있음을 나타낸다. Figure 7는 조정계산에 이용한 인천광역시의 원점 계열이 혼재된 지역의 지적기준점 분포를 나타낸다.

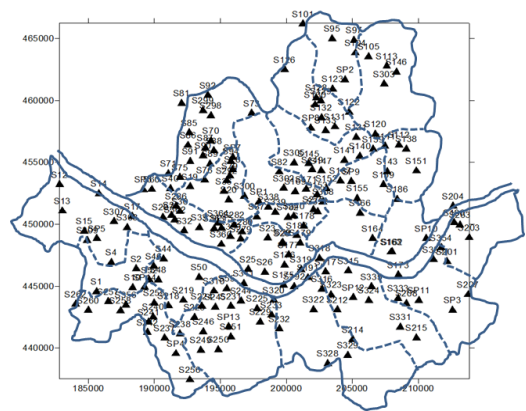


Figure 6. Distribution of cadastral control points throughout Seoul used in trilateral adjustment

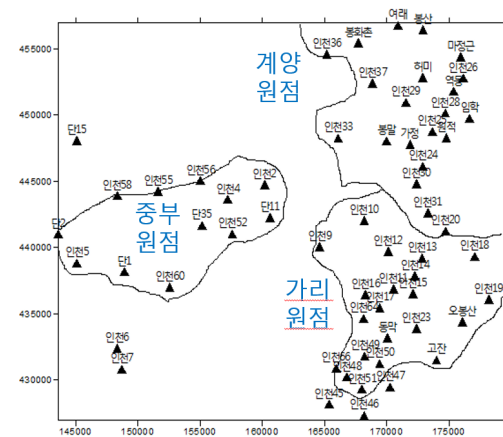


Figure 7. Distribution of cadastral control points used in trilateral adjustment in Incheon where several plane coordinate systems are mixed

조정계산의 지역 크기를 달리하더라도 조정좌표와 세계측지계 좌표와의 변환잔차가 거의 없다 라는 것은 Affine 변환의 6개 매개변수로서 가역적 계산이 가능하다는 것을 나타낸다. 조정좌표를 이용함으로써 세계측지계와 지역측지계의 양쪽 영역의 가역적 계산이 가능한 것은 어느 경우에도 동일한 좌표변환관계를 도출할 수 있다는 것과 같다. 등록좌표를 그대로 이용할 경우 생기는 가변적 요인을 제어할 수 있다는 것으로 좌표변환의 불확실성을 보완할 수 있다.

7. 결론 및 논의

본 연구의 삼변망조정계산은 다음의 기능을 수행한다. 첫째, 광범위한 지역에 걸쳐 상호 정합하는 기준점 좌표를 결정할 수 있다. 둘째, 지역의 특정 점을 중시하는 계산처리를 할 수 있다. 셋째, 구속조건에 의해 지역망 전체의 형상을 유지하는 해를 구할 수 있다.

삼변망조정계산의 단계별 과정은 조정계산의 평면직각좌표계를 설정하는 방법, 점간 평면투영거리를 계산하는 방법, 공통점의 분포 등 지역 특성에 맞게 자유조정, 고정조정, 자유조정과 고정조정을 순차 실시하는 방법, 조정계산 결과의 정합성을 검증하는 방법으로 구성된다.

종래의 정형화되어 있는 방법과 달리, 본 연구의 삼변망조정계산은 조정계산의 좌표계로서 계산 지역의 중심부를 평면직각좌표계의 원점 (0,0)으로 설정한 것에 큰 특징이 있다. 계산에 들어가는 점간 관측거리 및 미지 계산점의 초기 좌표는 조정좌표계에서 환산한 값을 적용한다. 이러한 설정은 점간 관측거리를 평면에 투영 환산함에 있어 두 점 간의 상대 위치에 따라 달라지는 거리의 차이를 최소화한다. 즉, 계산 영역에서 평면투영에 따른 거리의 왜곡을 최소로 하므로 조정계산의 효율이 높다. 삼변망조정계산은 조정좌표계 상에서 실시하며, 계산결과는 조정좌표계 상의 좌표이므로 실용 좌표계의 좌표로 환산 출력한다. 이로써

삼변망조정계산의 정확도 향상 및 좌표계가 다른 지역의 통합처리가 가능하다.

삼변망조정계산은 공통점의 좌표를 지역의 측량체에 알맞게 결정할 수 있는 기술이다. 세계측지계 측위결과를 지역측지계 기준의 측량에 활용하거나 지역측지계 기준의 도면을 세계측지계 도면으로 변환하는 작업을 수행함에 있어, 작업결과의 정확성을 제고하고 작업공정의 일관성을 확립할 수 있다.

삼변망조정계산은 좌표변환계산의 문제점을 보완할 수 있다. 기타원점결역 등 원점이 다른 지역 간에 걸쳐 있는 이질적 측량성고를 단일 원점 기준의 성과로 산출할 수 있다. 원점이 다른 공통점의 지역측지계 좌표를 정확하게 구할 수 있으므로, 세계측지계의 측량성고를 지역측지계의 측량계산에 활용하는 작업, 지역측지계 도면을 세계측지계 도면으로 변환하는 작업 등을 안정적으로 수행할 수 있게 한다.

삼변망조정계산 결과의 정합성은 삼변망조정계산의 재현성과 좌표변환관계로서 검증할 수 있다. 세계측지계 좌표를 변환하면 조정좌표가 그대로 출력되고, 역으로 조정좌표를 변환하면 세계측지계 좌표가 그대로 출력되는 것으로 확인할 수 있다. 이방성의 형상 변화를 고려하면 정·역 변환이 일치하는 지역의 크기에는 제약이 있으나, 시·군·구 정도의 크기라면 문제가 되지 않는다. 세계측지계와 지역측지계의 양쪽 영역에서 활용 가능한 계산 알고리즘은 지적도면의 세계측지계 변환작업의 문제점을 보완할 수 있다.

본 연구는 삼변망조정계산을 이용하여 세계측지계 성과를 지역측지계 측량에 활용하는 작업에 대해서만 기술하였으나, 역으로 지역측지계성과를 세계측지계 측량에 활용하는 작업에도 적용된다. 지역측지계 측위결과를 세계측지계의 측량에 활용할 경우에는 점간 관측거리를 세계측지계 기반의 평면직각좌표계상의 값으로 환산 적용하는 것으로 처리하면 된다. 이와 더불어 적용 가능한 지역의 크기, 실제 데이터를 이용한 수치계산 결과의 검증, 개인용 컴퓨터로써 한꺼번에

처리 가능한 계산점 개수 및 계산소요시간 등 계산의 효율성 등은 향후 더 연구되어야 할 사항이다.

참고문헌

References

- 김창환, 이원희, 서민식. 2016. 지적도 세계측지계 좌표변환을 위한 공통점 적용의 문제점 및 개선방안에 관한 연구. 한국지적정보학회지. 18(2):61-71.
- Kim Ch, Lee Wh, Seo MS. 2016. A study on Improvement and Problem of Application Method using Common Points for the World Geodetic Transformation of Cadastral Map. Journal of The Korean Cadastre Information Association. 18(2):61-71.
- 양철수, 강상구, 정래정, 김용호, 이민석. 2007. GPS 관측기선의 삼변망조정계산에 의한 우리나라 지적 측량기준점의 배설성과 산출. 한국지형공간정보학회지. 15(3):41-49.
- Yang CS, Kang SG, Jung RJ, Kim YH, Lee MS. 2007. Computation of Bessel Coordinate of the Cadastral Control Points by Trilateration Adjustment of GPS Baseline Measurements. Journal of Korea Spatial Information Society. 15(3):41-49.
- 양철수. 2009. 가우스크루그 투영계산과 가우스상사 이중계산의 좌표비교. 대한지적공사 학술지 지적 39(1):131-139.
- Yang CS. 2009. Grid coordinate difference between Gauss-Kruger projection and Gauss conformal double projection. Journal of Cadastre of Korea Cadastral Survey Corporation. 39(1): 131-139.
- 양철수, 양근우. 2012. 세계측지계 전환에 따른 지적측량의 거리 및 면적 변화 연구. 한국지적학회지 28(2):81-89.
- Yang CS, Yang GU. 2012. A Study on the distance and land area change in cadastral surveying for World Geodetic System. Journal of Korean Society of Cadastre. 28(2):81-89.
- 양철수. 2014. 지적도면의 세계측지계 좌표변환 프로세스에 대한 연구. 한국측량학회지. 32(4-2):401-412
- Yang CS. 2014. Development of the Process of Coordinate Transformation of Local Datum Cadastral Map to World Geodetic System. Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrametry and Cartography. 32(4-2):401-412
- 홍성연. 2011. 지적기준점과 연계 활용을 위한 도시기준점의 지적좌표 성과산출 분석 - 경상남도 창원시를 중심으로. 한국지형공간정보학회지, 19(4):127-138.
- Hong SE. 2011. An Analysis on the Results of Cadastral Coordinate Computation of Urban Control Point for Connection to Cadastral Control Point -A Case Study of Changwon-si of Kyungnam-do. Journal of Korea Spatial Information Society. 19(4):127-138.
- Torge W. 2001. Geodesy, 3rd Ed. deGruyter. p. 244-245

2024년 05월 19일 원고접수(Received)

2024년 05월 20일 1차심사(1st Reviewed)

2024년 06월 08일 2차심사(2st Reviewed)

2024년 06월 24일 게재확정(Accepted)

초 록

삼변망조정계산은 지적도면을 세계측지계 도면으로 변환함에 있어 좌표변환계산의 문제점을 보완할 수 있다. 첫째, 광범위한 지역에 걸쳐 상호 정합하는 기준점 좌표를 결정할 수 있다. 둘째, 지역의 특정 점을 중시하는 계산처리를 할 수 있다. 셋째, 구속조건에 의해 지역망 전체의 형상을 유지하는 해를 구할 수 있다. 이로써 측량 공통점의 좌표를 지역의 측량체계에 알맞게 결정할 수 있다. 기타원점계열 등 원점이 다른 지역 간에 걸쳐 있는 이질적 측량성과를 단일 원점 기준의 성과로 산출하는 데에도 활용가능하다. 여러 지역에 걸쳐 특성이 다른 공통점의 지역측지계 좌표를 정확하게 구할 수 있으므로, 지역측지계 도면을 세계측지계 도면으로 변환하는 작업을 안정적으로 수행할 수 있게 한다.

주요어 : 삼변망조정계산, 좌표변환계산, 좌표변환 공통점, 조정좌표