

국가기준점 망조정 성과를 활용한 최적 국가 좌표계 변환 모델 결정

Optimal National Coordinate System Transform Model using National Control Point Network Adjustment Results

송동섭¹⁾ · 윤홍식²⁾ · 장은석³⁾ · 김태우⁴⁾

Song, Dong Seob · Yun, Hong Sic · Jang, Eun Seok · Kim, Tae Woo

Abstract

The main purpose of this study is to investigate the coordinate transformation based on two different systems between local geodetic datum(tokyo datum) and international geocentric datum(new Korea geodetic datum). For this purpose, three methods were used to determine seven parameters as follows: Bursa-Wolf model, Molodensky-Badekas model, and Veis model. Also, we adopted multiple regression equation method to convert from Tokyo datum to KTRF. We used 935 control points as a common points and applied gross error analysis for detecting the outlier among those control points. The coordinate transformation was carried out using similarity transformation applied the obtained seven parameters and the precision of transformed coordinate was evaluated about 9,917 third or forth order control points. From these results, it was found that Bursa-Wolf model and Molodensky-Badekas model are more suitable than other for the determination of transformation parameters in Korea. And, transforming accuracy using MRE is lower than other similarity transformation model.

Keywords : Coordinate transformation parameter, National control point, Common point, Multiple regression equation

초 록

본 연구의 주요 목적은 서로 다른 측지기준계인 동경측지계와 세계측지계간의 좌표 변환을 위한 연구이다. 이를 위하여 Bursa-Wolf 모델, Molodensky-Badekas 모델 및 Veis 모델을 이용하여 7변환 계수를 결정하였다. 또한 동경데이텀으로부터 세계측지계로 변환하기 위한 다중회귀식 방법도 적용하였다. 공통점 중에서 비상사성인 과대 오차인 점을 분석하고 제거하여 935점의 국가기준점 성과를 변환 계수 결정을 위한 공통점으로 이용하였다. 각 모델별로 결정한 변환 계수를 적용하여 상사 변환에 의한 3, 4등 삼각점 9,917점에 대한 좌표변환을 수행하였으며 변환 정확도를 평가하였다. 그 결과, Bursa-Wolf 모델과 Molodensky-Badekas 모델을 이용하여 결정한 변환 계수가 Veis 모델에 비하여 더 적합하다는 것을 알 수 있었다. 다중회귀식에 의한 변환 정확도는 상사 변환 모델보다는 다소 저하되는 경향을 보였다. 변환 계수의 추정 정밀도와 변환 정확도 및 변환 잔차의 패턴을 분석한 결과, 최적의 국가 좌표변환 모델은 Molodensky-Badekas 모델이라고 판단된다.

핵심어 : 좌표 변환 계수, 국가기준점, 공통점, 다중회귀식

1. 서 론

우리나라는 GPS측위의 효율성을 높이고, 21C 정보화 시

대를 대비한 고정밀도위치정보를 제공하기 위하여 새로운 측지기준 좌표계를 도입하여야 할 필요성에 따라 측지기준으로서 GRS80타원체를, 좌표계로서 ITRF2000을 채용하는

1) 정회원 · 성균관대학교 과학기술연구소 책임연구원, 공학박사(E-mail:frydom@skku.edu)
2) 연결저자 · 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 부교수, 공학박사(E-mail:yoons@skku.edu)
3) 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, 공학사(E-mail:stjune@hanmail.net)
4) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, 공학사(E-mail:kanka2@hanmail.net)

측지기준좌표계의 전환을 추진하였다. 이러한 정책의 일환으로 기존의 국가 측지계인 동경측지계를 세계측지계로 전환하기 위한 측지계 변환식과 변환 계수를 2003년 12월 24일자로 고시하였다. 이 국가좌표변환계수는 7-변환 계수 모델 중에서 Molodensky-Badekas 모델에 기초한 것으로 총 107점의 공통점을 바탕으로 3개의 7-변환 계수 모델과 2개의 10-변환 계수 모델을 적용하여 결정한 것이다(국토지리정보원, 2003). 그러나 최적 변환 계수의 결정에 있어서 정확도 검증에 이용한 기준점의 수가 83점에 국한되어 있어 신뢰성이 다소 떨어진다고 볼 수 있다.

측량법령의 개정에 따라 국가측지기준계가 세계측지계로 전면 시행을 앞두고 기 시행한 국가기준점 측량자료(EDM 및 GPS관측성과)를 종합적으로 전면조정을 실시하여 국제적 수준의 대한민국 신 국가기준좌표체계로 구축하고 유비쿼터스 시대에 걸맞게 국민들에게 고정밀 국가위치정보의 기반을 주도적으로 제공하고 국민생활의 편익을 도모하기 위하여 건설교통부에서는 국가기준점 망조정에 대한 연구 사업을 실시하여 그 결과를 제시하였다(국토지리정보원, 2006). 이 연구의 산물로 우리나라의 평면 위치 기준점의 92% 이상에 해당하는 삼각점 성과가 두 측지계(동경측지계, 세계측지계)에 기준하여 확보가 가능하게 되었다. 이는 현재 고시된 변환 계수의 검증에 있어서 충분한 표본 데이터의 확보가 이루어졌음을 의미한다.

본 연구에서는 국가기준점 망조정 연구 성과 중에서 GPS 관측 성과와 EDM 관측 성과를 토대로 다양한 좌표 변환 모델들을 이용한 국가좌표계 변환계수를 결정하였다. 두 측지계 기준의 성과 중에서 과대 오차를 소거한 1, 2등 삼각점을 대상으로 Bursa-Wolf 모델, Molodensky-Badekas 모델, Veis 모델에 의한 변환 계수를 계산하였다. 또한 국내 최초로 다중회귀식 방법에 의한 동경측지계에서 세계측지계로의 변환 보정식을 함께 결정하였다. 최종적으로 과대 오차를 소거한 공통점 중에서 좌표 변환 계수 결정에 이용한 삼각점을 제외한 3, 4등 삼각점에 대하여 각 모델별로 결정한 변환 계수를 적용하여 변환 정확도를 평가하고, 변환 모델별 특성을 분석하였다. 이 결과를 바탕으로 우리나라의 측지계 전환에 있어서 최적합한 모델을 제시하고자 하였으며, 부가적으로 현재 고시된 변환 계수의 타당성을 검토하였다.

2. 국가좌표변환계수 결정

2.1 좌표변환모델

(1) Bursa-Wolf 모델

Bursa와 Wolf에 의해 제시된 7-변환 계수 모델은 식 (1)과 같으며 일반적인 형태는 그림 1에 표시한 바와 같다(Bursa, 1962; Wolf, 1963).

$$X_G = (1 + \Delta s) R_z(\kappa) R_y(\phi) R_x(\omega) X_B + T \quad (1)$$

식 (1)에서 X_G 는 세계측지계상의 3차원 지심직각좌표, X_B 는 동경측지계상의 3차원 직각좌표이고, T 는 원점 이동량 벡터($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)이며, Δs 는 축척계수이다. $R_x(k)R_y(\phi)R_z(\omega)$ 는 두 측지계 사이의 회전량을 나타내는 행렬식으로서 다음의 식 (2)와 같다.

$$R_z R_y R_x = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\kappa & \cos\omega\sin\kappa & \sin\omega\sin\kappa \\ \cos\omega\cos\kappa & +\sin\omega\sin\phi\cos\kappa & -\cos\omega\sin\phi\cos\kappa \\ -\cos\phi\sin\kappa & -\sin\omega\sin\phi\sin\kappa & +\cos\omega\sin\phi\cos\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega\cos\phi & \cos\omega\cos\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 ω, ϕ, κ 는 각각 x, y, z 축에서의 회전각을 의미하며, 회전각이 미소하다고 가정하면 식 (2)는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$R_z R_y R_x = \begin{bmatrix} 1 & \kappa & -\phi \\ -\kappa & 1 & \omega \\ \phi & -\omega & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

7-변환 계수를 구하기 위하여 식 (1)을 조정을 위한 수학적 모델로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = (1 + \Delta s) \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (4)$$

식 (4)를 최소제곱조정을 위하여 선형화하면 식 (5)와 같은 관측방정식으로 구성할 수 있으며, 최소제곱조정을 통해 7개 매개 변환 계수를 구할 수 있다.

$$BV + Ax^* + W = 0 \quad (5)$$

여기서, V 는 관측값의 잔차, x^* 는 7개의 매개변수를 나타낸다.

Bursa-Wolf 모델은 측지망에 계통적 오차들이 비교적

작을 때에 적합한 모델로 측지망들 중의 한쪽에 계통오차가 포함되면 이러한 미지 오차량이 변환 계수에 큰 영향을 주므로 변환 계수를 결정하기에 적합하지 않다. 또한, 변환 계수들을 결정하기 위해서 사용한 측지망이 전 지구적으로 볼 때에 일부 지역으로 한정된 경우에는 사용된 기준점과 변환 계수들 간의 상관관계가 매우 높아 적용에 한계가 있다(윤홍식 등, 2004).

(2) Molodensky-Badekas 모델

Molodensky-Badekas 모델은 측지기준간의 3차원 직각 좌표를 변환하기 위한 7 변환계수 상사변환모델로서 지역 좌표계와 위성측지좌표계간의 변환에 가장 적합한 모델이며, 식(6)과 같이 표현한다(Badekas, 1969).

$$X_G = X_0 + (1 + \Delta s)R_z(\kappa)R_y(\phi)R_x(\omega)[X_B - X_0] + T \quad (6)$$

Bursa-Wolf 모델과 비교하여 새로이 도입된 벡터 X_0 는 두번째 측지망의 “초기점(기준원점)”의 벡터이다. 식 (6)을 전개하여 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + (1 + \Delta s) \begin{bmatrix} 1 & R_z & -R_y \\ -R_z & 1 & R_x \\ R_y & -R_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B - X_0 \\ Y_B - Y_0 \\ Z_B - Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 모델은 최소제곱법을 사용하여 해를 얻을 수 있으며, 해의 벡터는 그림 2에 표시한 바와 같이 3개의 원점 이동량, 3개의 회전량 및 축척의 차이량과 관측된 좌표와 좌표차이에 대한 보정량들인 잔차 벡터들이다. Molodensky-Badekas 모델은 두번째 측지망에서 초기점의 위치벡터와 최소 3개의 공통점들에 대한 좌표값이 필요하다. 이 모델

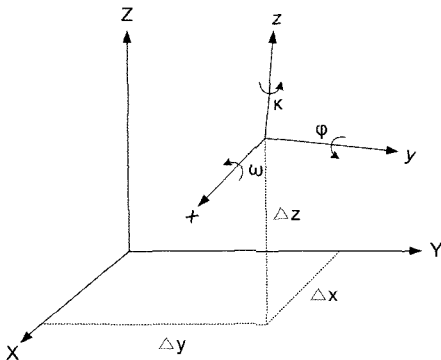


그림 1. Bursa-Wolf 변환모델

은 측지망의 중심에 변환계수를 연관시킴으로써 기준점들과 변환계수들간의 높은 상관관계를 제거할 수 있는 장점이 있다. 모델에 의해서 계산된 조정 좌표, 기선길이, 축척계수, 회전각, 분산-공분산 매트릭스 및 사후 분산계수는 대응하는 Bursa-Wolf 모델의 결과로부터 얻은 값과 동일하다. 하지만 원점 이동량이 다르고, 일반적으로 정밀도도 적게 나타난다(Harvey, 1986). Bursa-Wolf 모델과 Molodensky-Badekas 모델의 원점 이동량간의 차이는 측지망에서 중심부의 회전과 축척이 다르기 때문에 발생한다.

(3) Veis 모델

Veis 모델은 측지기준의 원점이 정의되어 있는 경우에 기준 원점에서의 회전과 다른 과정이 결합된 모델로서 수학적으로 Molodensky-Badekas 모델과 동일하다(Veis, 1960; Badekas, 1969). Veis 모델은 다음과 같이 표현한다.

$$X_G = X_0 + (1 + \Delta s)R_0[X_B - X_0] + T \quad (8)$$

식 (8)에서 R_0 는

$$R_0 = R_3(180 - \lambda_0)R_2(90 - \phi_0)P_2R_1(dv)R_2(d\mu)R_3(dA)P_2R_2(\phi_0 - 90)R_3(\lambda_0 - 180) \quad (9)$$

로 표시되는 회전 매트릭스이고, 식 (9)에서 (ϕ_0, λ_0) 는 원점의 측지좌표, P_2 는 다음과 같이 표시된 반향 행렬이다.

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

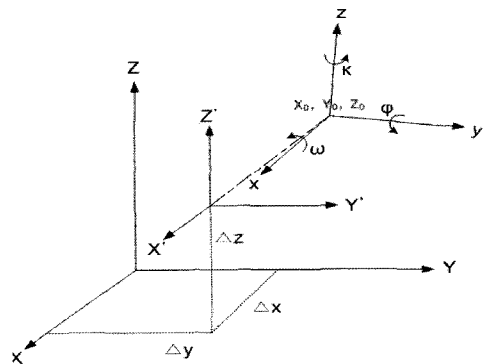


그림 2. Molodensky-Badekas 변환모델

그림 3으로부터 dA , $d\mu$, dv 로 표시된 회전량은 원점 o 에서 지역측지계를 기준한다. 여기서 dA 는 z_{LG} 축에 관한 회전량으로 방위각에서의 회전량에 대응하며, $d\mu$ 는 y_{LG} 축에 관한 회전량으로 자오선에서의 경사량이고, dv 는 x_{LG} 축에 관한 회전량으로 수직재면에서의 경사량이다.

미지의 회전 매개변수 dA , $d\mu$, dv 의 회전 매개변수 R_0 은 다음과 같은 표시된다.

$$R_0 = \begin{bmatrix} 1 & dA - d\mu \\ -dA & 1 & dv \\ d\mu & -dv & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Veis 모델의 해는 Molodensky-Badekas 모델의 해와 유사하며, 회전 성분에서 차이를 가지게 된다. 지역 측지망과 위성 측지망의 결합을 위해 Veis 모델을 사용할 때에 접하게 되는 문제는 Molodensky-Badekas 모델의 문제와 동일하며, 위성 측지망 끼리의 결합에는 적합하지 않다고 알려져 있다(Moritz, 1972).

(4) 다중회귀식

다중회귀식(Multiple Regression Equation; MRE) 방법은 Bursa-Wolf 모델과 Molodensky-Badekas 모델을 통해 측지망에서 비선형으로 존재하는 왜곡량을 설명할 수 있는 장점을 가지고 있다(LINZ, 1997). 다중회귀식 방법의 주요 단점은 MRE를 결정하기 위해 사용한 기준점이 위치한 지역 외에서는 극단적으로 신뢰할 수 없는 결과를 가져온다는 것이다. 따라서 MRE를 결정하기 위해서는 데이터 변환에 요구되는 경계 부분까지의 공통점 확보가 필요하다.

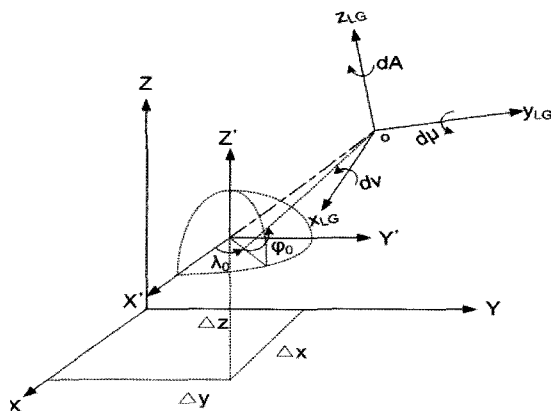


그림 3. Veis 변환모델

각 국가의 데이터와 WGS84 타원체간의 변환과 관련한 MRE의 다양한 형태는 미국 DMA(Defence Mapping Agency)의 기술 보고서에 일부 소개되어 있으나 불행하게도 우리나라에서 기준하고 있는 동경데이터에 대한 MRE는 제공되고 있지 않고 있다(DMA, 1987). MRE를 통해 결정된 데이터간의 측지좌표의 방향별 차이를 $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh 라고 하면 동경데이터에 기준한 좌표에 이 보정량을 더하여 미지 데이터인 세계측지계에 기준한 좌표를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi_{ITRF} &= \phi_{Tokyo} + \Delta\phi \\ \lambda_{ITRF} &= \lambda_{Tokyo} + \Delta\lambda \\ h_{ITRF} &= h_{Tokyo} + \Delta h \end{aligned} \quad (12)$$

MRE 방법을 사용하여 위도 방향에 대한 데이터 간의 변환 보정량의 일반적인 형태는 다음과 같다(DMA, 1987).

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= A_0 + A_1 U + A_2 V + A_3 U^2 + A_4 UV + A_5 V^2 + \dots \\ &\quad + A_{54} V^9 + A_{55} U^9 V + A_{56} U^8 V^2 + \dots \\ &\quad + A_{64} U^9 V^2 + A_{65} U^8 V^3 + \dots \\ &\quad + A_{72} U^9 V^3 + A_{73} U^8 V^4 + \dots + A_{99} U^9 V^9 \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, A_0, A_1, \dots, A_{99} : 단계별 회귀 과정에 의해 결정된 계수

$U = K(\phi - \phi_m)$: 측정점의 정규화한 측지 위도

$V = K(\lambda - \lambda_m)$: 측정점의 정규화한 측지 경도

K : 축척계수

ϕ, λ : 지역 측지 기준의 위·경도(도단위)

ϕ_m, λ_m : 지역 측지계 지역의 중앙 위·경도(도단위)

$\Delta\lambda$ 와 Δh 에 대한 보정식의 형태는 식 (13)의 좌항인 $\Delta\phi$ 를 각각 $\Delta\lambda$ 와 Δh 로 변경하면 된다. DMA에서 제시하고 있는 MRE의 계수 결정 방법은 다음과 같다(DMA, 1987). 계수 결정을 위한 다중 회귀 방법을 적용하기에 앞서 공통점에 대한 두 측지계 기준의 좌표간의 차이인 $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh 를 계산한다. 다음은 종속변수인 $\Delta\phi$, $\Delta\lambda$, Δh 에 일치시키기 위한 각 독립 변수별로 Appelbaum(1982)의 다중 회귀 과정을 적용하도록 한다. 첫 번째 단계로 상수인 A_0 와 위도와 경도의 함수로 구성된 독립 변수(U 와 V)에 대응하는 계수를 결정한다. 이러한 과정을 통해 독립 변수항을 증대시키면서 통계적으로 아무런 관계가

없는 독립 변수를 제거하면서 반복적인 연산을 수행하면 최종적인 MRE가 결정된다.

2.2 변환 계수의 결정

국가좌표변환계수를 결정하기 위해서는 동경측지계와 세계측지계에 기준한 성과를 가지고 있는 공통점이 필요하다. 공통점의 획득은 건설교통부 국토지리정보원의 연구 결과인 『국가기준점 망조정에 관한 연구』에서 계산한 GPS와 EDM 조정 성과를 이용하였다(국토지리정보원, 2006). 이 연구 결과에서 GPS를 이용하여 정비한 삼각점에 대한 조정 계산 성과는 총 10,256점이고 EDM 관측 데이터를 조정하여 계산한 성과는 총 5,351점이다. 이 중에서 GPS와 EDM이 중복된 삼각점의 수는 총 737점이다. 따라서 공통점으로 이용이 가능한 삼각점의 수는 14,870점으로 분석되었다.

획득한 공통점의 분포는 그림 4와 같다. 두 측지기준계 간의 변환은 상사변환으로서 공통점에 대한 두 측지계 기준의 성과 차이가 상사형을 이루어야 최적의 좌표 변환 계수를 계산할 수 있다. 따라서 이용이 가능한 공통점 중에서 두 측지계 기준의 3차원 좌표 차이에 대한 과대 오차를 분석하여 비상사성인 공통점을 제거하는 작업을 수행하였다. 과대 오차의 분석은 3차원 축별로 차이에 대한 표준편차(1 σ)를 분석하고 표준편차의 3배인 3 σ 초과하는 공통점을 순차적으로 제거하는 방법을 사용하였다. 과대 오차의 기준을 3 σ 로 책정한 이유는 표본의 크기와 과대 오차 신뢰 구간에서의 한계값에 대한 설정에 대한 연구 결과인 Logan(1955)이 제시한 결과에 근거하였다. Logan은 99.9%의 신뢰구간에서 표본의 크기가 20 이상일 때에는 과대 오차의 한계값으로 3.0 σ 가 적절하다고 제안하고 있다. 비상사성으로 제거된 공통점은 총 4,018점으로 획득한 총 공통점 대비 27%에 해당한다.

두 측지계간의 성과가 비상사성을 나타내는 이유는 삼각점의 정비 당시에 망실에 따른 복구나 재설로 인하여 기존 동경측지계 성과표 상의 좌표가 비정확한 것에 기인한 것으로 판단된다. 비상사성인 공통점을 제거한 후의 삼각점의 수는 GPS 조정 성과 7,158점, EDM 조정 성과 3,694점으로 분석되었다. 비상사성을 제거한 10,852점 중에서 변환 계수 결정에 이용한 삼각점은 1등과 2등 삼각점으로 총 935점이다. 이 중에서 EDM 관측에 의한 조정 성과는 207점으로 약 22%에 해당한다. 나머지 3, 4등 삼각점 9,917점은 935점의 1, 2등 삼각점 성과를 이용하여 결정한 좌표 변환 계수의 정확도 평가에 이용하였다(그림

5 참조). 표 1은 비상사점을 제거한 후에 삼각점의 등급별로 두 측지계간의 3차원 성과 차이에 대한 통계 결과를 나타낸 것이다.

본 연구에서 사용한 935점의 공통점으로부터 3개의 변환 모델을 이용하여 결정한 7 변환 계수는 표 2에 표시한 바와 같다. Bursa-Wolf 모델과 같이 자유망에서 변환 계수를 결정하는 방법을 제외하고, 나머지 2개의 모델은 고정점(Fixed point)을 가지며, 고정점은 기준점 망에서 가장 중앙에 위치한 “영동11” 삼각점으로 하였다. “영동 11” 삼각점의 동경측지계 3차원 좌표는 X=-3168678.297m,

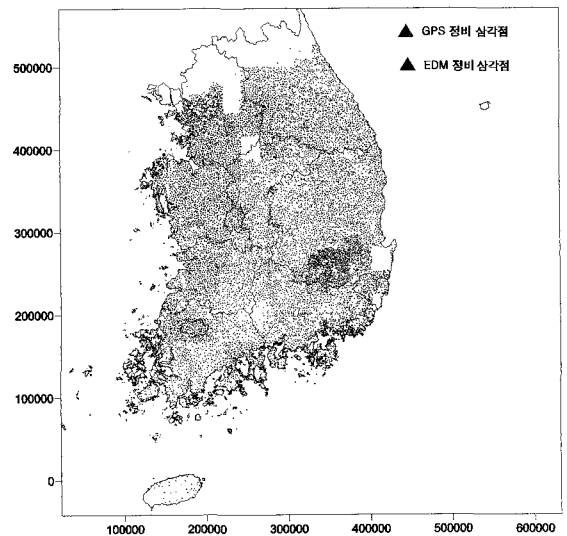


그림 4. 획득한 공통점의 분포도(14,870점)

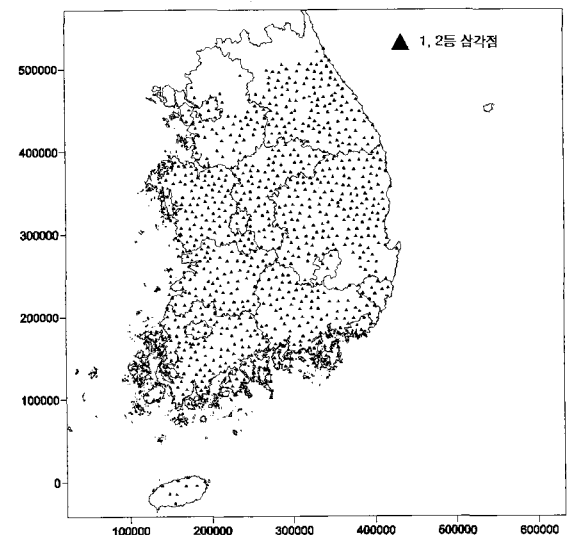


그림 5. 1, 2등 삼각점의 분포도(935점)

Y=4077469.214m, Z=3731823.545m이며 세계측지계 성
 과는 X=3168823.940m, Y=4077974.178m, Z=3732509.155m
 이다.

표 2로부터 Bursa-Wolf 모델의 경우에는 변환 계수 성
 분 중에서 평행 이동량에 대한 표준편차가 다소 크게 나
 타나고 있으나 Molodensky-Badekas 모델과 Veis 모델은
 표준편차가 매우 적게 나타나고 있어, Harvey(1986)의
 연구 결과와 일치하고 있다. 또한 결정된 변환 계수는 각
 모델별 특징을 나타내고 있는데 세 모델의 축척 계수는
 서로 같으며, Bursa-Wolf 모델과 Molodensky-Badekas
 모델은 회전량만 동일하고 Molodensky-Badekas 모델과
 Veis 모델은 회전량만 다르며 3축 평행 이동량은 서로 일
 치함을 보이고 있다. 특히, Bursa-Wolf 모델의 평행 이동
 성분은 표 1에서 1, 2등 삼각점의 3차원 좌표 차이의 평
 균값과는 매우 큰 차이를 보이고 있어 공통점이 가지고
 있는 계통적 오차에 영향을 많이 받아 변환 계수의 유동
 성을 크게 유발하는 모델의 특성을 반영하고 있는 것으로
 나타났다.

다음의 식 (14)는 Appelbaum(1982)에 기초하여 상사
 변환 모델에서 이용한 1, 2등 공통점 성과를 바탕으로 다
 중회귀분석을 적용하여 결정된 측지계 변환 보정을 위한
 다중회귀식이다.

$$\Delta\phi = 0.00287 - 0.00212U + 0.00136UV + 0.00388V^2 \\ + 0.07136U^2V + 0.11455U^3 + 0.80098UV^3$$

$$- 0.45866V^4 - 1.97180U^4V - 0.83522U^3V^2 \\ + 4.94467U^2V^3 - 11.94799UV^4 - 5.24155U^6 \\ + 21.62488U^5V + 4.99656U^4V^2 - 17.38909U^3V^3 \\ - 15.07877U^2V^4 + 33.63405UV^5 + 26.07530V^6 \\ + 10.34370U^7 + 13.91507U^6V - 42.21567U^5V^2 \\ - 60.10465U^4V^3 - 50.55985UV^6 - 39.44851V^7 \\ - 41.78634U^8 + 62.61133U^7V - 183.39713V^8$$

$$\Delta\lambda = -0.00214 - 0.00093U + 0.01504UV - 0.01886V^2 \\ - 0.14717U^2V - 0.71355U^4 - 1.34112UV^3 \\ + 0.82894V^4 + 11.35258U^4V + 2.24863U^3V^2 \\ - 3.88865U^2V^3 + 6.78430UV^4 + 42.43157U^6 \\ - 27.62364U^5V - 26.73082U^4V^2 + 51.01272U^3V^3 \\ + 42.94409U^2V^4 - 20.95106UV^5 - 28.90653V^6 \\ + 30.19652U^7 - 70.92864U^6V - 94.43312U^5V^2 \\ + 137.91086U^4V^3 + 65.46165UV^6 + 47.08796V^7 \\ + 4.76435U^8 - 75.00771U^7V + 206.41420V^8$$

$$\Delta h = 90.438 + 135.110U - 60.545V \quad (14)$$

여기서, $U = K(\phi - 37)$, $V = K(\lambda - 127)$, $K = 0.05235988$

예를 들어, 동경측지계 상의 성과가 위도(ϕ_{Tokyo}) =
 35.7111168598°, 경도(λ_{Tokyo}) = 127.019569334°라면 식 (14)
 에 의해 위도 보정량($\Delta\phi$)은 0.0030150382°, 경도 보정량($\Delta\lambda$)
 은 -0.0020896933°로 계산되며, 변환에 의한 세계측지계 상
 의 위도(ϕ_{ITRF}) = 35.7141318980°, 경도(λ_{ITRF}) = 127.0174796407°
 를 얻게 된다. 식 (14)는 최소제곱법으로 반복 조정하여
 회귀 계수를 결정하고 가설 검정에 입각한 분산 분석
 (ANALYSIS OF VARIANCES; ANOVA)을 통한 F값, 적합도
 및 상관성과 유의확률을 계산을 통해 모델링하여 결정된

표 1. 비상사점 제거 후 공통점의 통계 분석 결과

구분	총 공통점(10,852점)			1, 2등 삼각점(935점)			3, 4등 삼각점(9,917점)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
Average(m)	-145.766	504.368	685.621	-145.492	504.755	685.762	-145.787	504.375	685.623
STD.(m)	1.460	1.465	1.081	1.571	0.526	0.476	1.445	1.483	1.087
Max Differ.(m)	-141.457	508.725	688.838	-142.869	505.772	688.085	-141.457	508.725	688.838
Min Differ.(m)	-150.117	499.989	682.384	-148.444	503.013	684.128	-150.117	499.989	682.384

표 2. 모델별 변환 계수 계산 결과

구분	Bursa-Wolf		Molodensky-Badekas		Veis	
	계산값	표준편차	계산값	표준편차	계산값	표준편차
Tx(m)	-71.780	30.237	-145.574	0.087	-145.574	0.087
Ty(m)	459.956	7.224	504.755	0.087	504.755	0.087
Tz(m)	720.388	20.588	685.573	0.087	685.573	0.087
Rx(second)	0.180	0.365	0.180	0.365	1.005	0.875
Ry(second)	3.750	0.901	3.750	0.901	2.443	0.814
Rz(second)	0.831	0.717	0.831	0.717	-2.794	0.173
lamda(ppm)	7.060	0.836	7.060	0.836	7.060	0.836

식이다. 여기서, F 검정은 회귀식 전체가 유의하느냐 여부를 검토하는 것으로 다음의 귀무가설에 따라 검정하게 된다(강준목 등, 1994). 귀무가설(H_0)은 “모든 회귀계수가 0이다. 즉, 회귀성이 없다”라는 귀무가설이 기각되느냐 여부를 검정하는 것으로 이러한 귀무가설이 기각되지 않고 채택된다면 해당 회귀식은 그 자체가 의미가 없어지게 된다. 즉, F값이 한계값(F_c)보다 크면 가설은 기각되고 대립가설(H_1)이 채택되게 된다. 식 (14)는 95%의 신뢰도를 가정하여 유의 수준(0.05) 보다 유의한 F값이 작아 귀무가설이 기각되어 회귀식이 의미가 있다고 판단될 때까지 처리하여 결정된 식이다.

3. 변환 모델별 정확도 평가

각 변환 모델별로 계산한 변환 계수로부터 최적의 변환 계수를 결정하기 위하여 통계 분석에 의한 정확도 평가를 수행하였다. 정확도 평가에 이용한 공통점은 3, 4등 삼각점 9,917점으로 EDM 관측에 의한 조정 성과는 3,487점으로 전체 검사점의 35%를 차지하고 있다. 삼각점 9,917점을 이용하여 3개의 변환 모델로부터 계산된 변환 계수를 이용하여 3차원 좌표 변환을 수행한 후, 각 변환 모델별로 통계적 분석을 수행하였다. 각 변환 모델별 변환 정확도는 정확도 평가 대상점에 대한 잔차의 최대, 최소, 평균, 표준편차, RMSE 및 95% 신뢰구간을 가지고 평가하

였다.

표 3은 3개의 변환 모델 및 MRE를 이용하여 3, 4등 삼각점의 동경측지계 기준의 성과를 변환한 후 각 모델별 통계 결과를 나타낸 것이다. 표 3에서 보는 바와 같이 3차원 지심직각좌표의 각 축별 잔차(ΔX , ΔY , ΔZ)의 통계 비교 결과에서는 Bursa-Wolf 모델과 Molodensky-Badekas 모델이 거의 유사하게 분석되었다. Veis 모델의 결과는 통계 분석 항목 전체에 대하여 다른 7-변환 계수 모델에 비하여 저하된 결과를 보이고 있다. 변환 정확도를 나타내는 RMSE의 비교에서는 ΔZ 에서 Veis 모델이 미소하나마 가장 정확한 변환 정확도를 보였으며 ΔY 에서는 Molodensky-Badekas 모델이 Bursa-Wolf 모델보다 $\pm 0.002m$ 의 매우 작은 향상을 나타냈다. 95%의 신뢰도 구간에서도 Veis 모델에 비하여 다른 두 7-변환 계수 모델이 ΔX 방향으로는 $\pm 0.013m$, ΔY 는 $\pm 0.021m$ 정도 줄어드는 결과를 나타내었다.

이상의 통계적 분석으로부터 각 모델별로 표준편차와 신뢰구간 및 RMSE에 대한 상대적 차이의 통계값은 거의 동일하다고 판단된다. MRE를 이용한 변환 RMSE는 각 3차원 축별로 $\pm 2m$ 전후의 결과를 보였으며, 측지좌표(경위도 좌표)를 기준으로 하였을 경우에는 위도 방향으로 $\pm 0.08''$ 및 경도 방향으로 $\pm 0.11''$ 이내의 변환 정확도를 보이는 것으로 분석되었다.

그림 6은 각 모델별로 계산한 변환 계수를 적용하여 정확도 평가에 이용한 공통점을 변환한 후에 망조정 성과와

표 3. 변환 모델별 통계 비교

구분	Bursa-Wolf			Molodensky-Badekas		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
Max Differ.(m)	5.792	4.165	4.164	5.797	4.175	4.158
Min Differ.(m)	-6.665	-4.561	-5.336	-6.661	-4.550	-5.341
Average(m)	0.130	-0.267	-0.323	0.134	-0.257	-0.328
STD.(m)	0.879	1.219	1.121	0.879	1.219	1.121
RMSE(m)	0.889	1.248	1.166	0.889	1.246	1.168
Confidence Interval(95%)	± 0.017	± 0.024	± 0.022	± 0.017	± 0.024	± 0.022

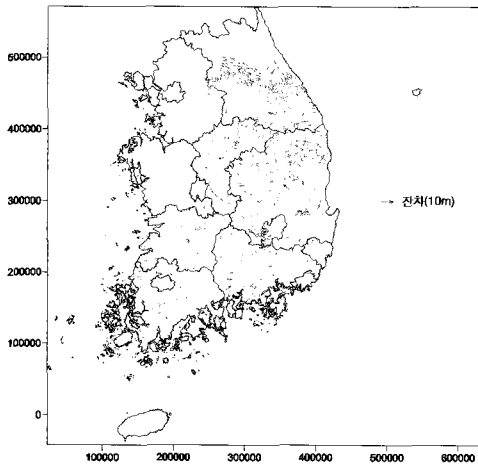
구분	Veis			Multiple Regression Equation		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
Max Differ.(m)	4.210	5.190	3.978	5.429	6.015	2.756
Min Differ.(m)	-4.858	-6.665	-5.424	-13.477	-8.470	-12.459
Average(m)	-0.229	-0.552	-0.304	-2.445	-0.926	-1.901
STD.(m)	1.548	2.295	1.120	2.718	2.021	1.904
RMSE(m)	1.565	2.360	1.161	3.656	2.223	2.691
Confidence Interval(95%)	± 0.030	± 0.045	± 0.022	± 0.053	± 0.040	± 0.037

의 차이인 잔차에 대한 패턴을 나타낸 것이다. 정확도 분석 결과인 표 3에서와 같이 사상형 변환 모델인 7-변환 계수 모델 중에서는 Veis 모델의 잔차 크기와 방향이 다른 두 모델에 비하여 전체적으로 크게 발생된 것을 확인할 수 있다.

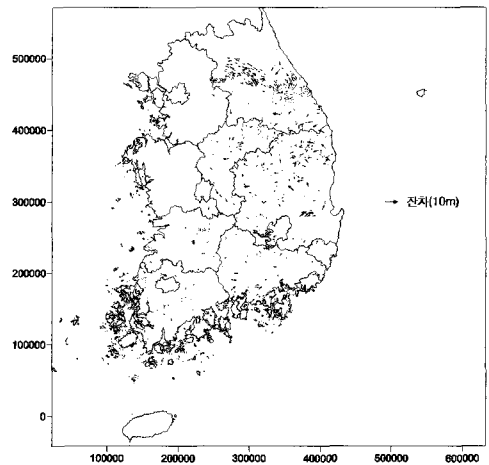
MRE를 적용한 잔차는 북서쪽과 남동쪽 부근에서 외부 방향으로 잔차가 증가하는 것을 나타내고 있다. 지역측지계와 지구의 질량 중심을 원점으로 하는 세계측지계 기준의 좌표 변환에 있어 7-변환 계수 모델은 미지 계수의 결정을 위해 최소제곱법을 이용한다. 이때에 이용하는 공통점의 성과에 계통적 오차(정오차)가 비교적 전무한 경우에는 변환 계수 결정에 유효한 모델이 Bursa-Wolf 모델이나 실제 공통점으로 사용하는 기준점에는 계통적 오차

가 필연적으로 포함되게 되어 있다. 따라서 지역측지계와 지심측지계의 변환 관계에 있는 우리나라의 측지계 전환에는 Bursa-Wolf 모델이 적합하지는 않다.

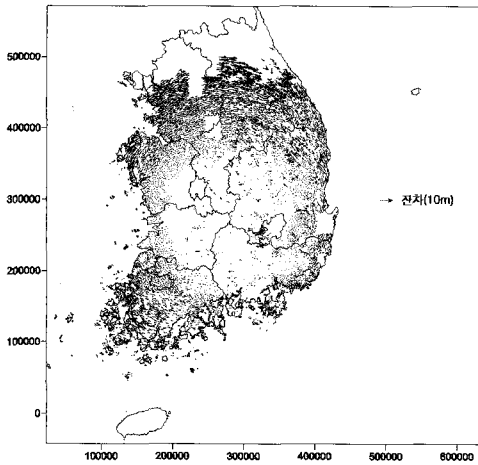
Molodensky-Badekas 모델은 Bursa-Wolf 모델의 단점을 해결하기 위하여 초기점으로서 중앙점의 좌표를 이용하며, 지심측지계와 다른 지심측지계간의 변환 보다는 지역측지계와 지심측지계간의 기준계 변환에 적합하다고 알려져 있다. 그러나 본 연구 결과를 볼 때 방대한 공통점이 이용되면 변환에 따른 소요 정확도가 거의 일치하는 경향을 보임을 알 수 있다. 하지만 앞서 변환 계수 결정 부분에서도 언급하였듯이 Bursa-Wolf 모델에 의한 평행 이동량의 추정 정밀도가 현저히 떨어짐을 볼 때 동경측지계에서 세계측지계로의 전환에 있어서는 Molodensky-Badekas



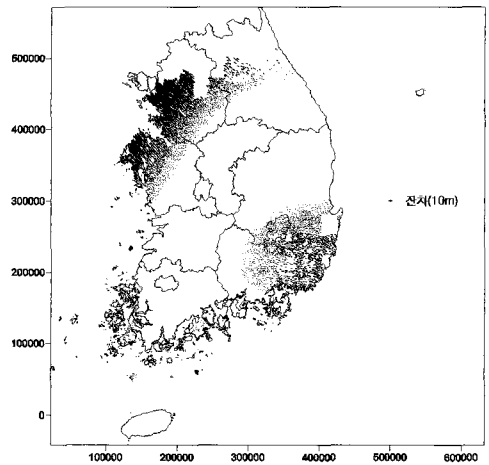
(a) Bursa-Wolf 모델



(b) Molodensky-Badekas 모델



(c) Veis 모델



(d) MRE

그림 6. 변환 모델별 잔차 벡터도

모델이 적합하다고 본다. 또한 Molodensky-Badekas 모델에서의 축척 변화량은 좌표 차이에만 적용되는 반면에 Bursa-Wolf 모델에서는 모든 위치 벡터에 적용이 되기 때문에 지심측지계와 지심측지계 변환에 있어서만 Bursa-Wolf 모델이 유효하다고 판단된다.

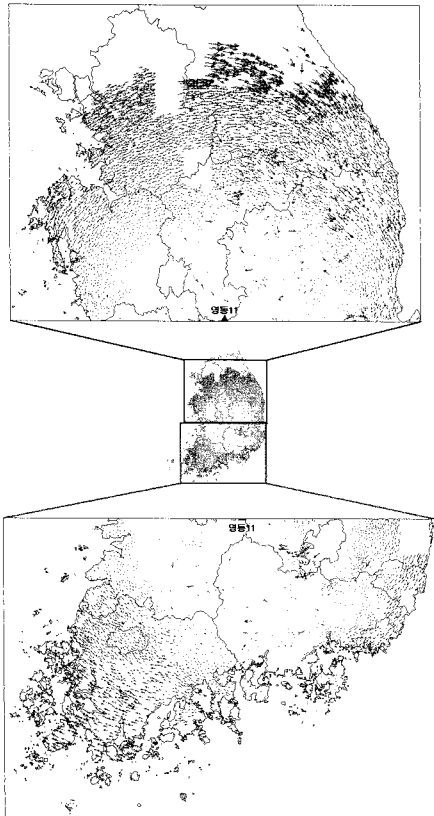
다음은 현재 고시되어 있는 국가좌표변환계수와 변환식을 적용하여 계산한 변환 정확도를 분석하였다. 표 4를 보면 본 연구를 통해 계산한 변환 계수의 적용 결과인 표 3의 결과보다 향상된 정확도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 현재 고시한 변환 계수 결정에 이용한 공통점은 107점으로 본 연구의 공통점 935점의 11.5%에 해당되는 양이다(윤홍식 등, 2004). 일반적으로 더 많은 공통점을 사

용하여 도출한 변환 계수의 적용 정확도가 향상되어야 한다고 생각할 수 있으나 반대로 저하되는 결과를 보이고 있다. 이는 현재 고시된 변환 계수의 모델인 Molodensky-Badekas 모델의 특징에서 그 원인을 찾을 수 있다. Molodensky-Badekas 모델에서는 변환 계수 결정을 위해서 앞서 설명한 바와 같이 기준이 되는 중앙점이 필요하다. 이 중앙점의 성과가 변환 계수 추정에 지배적인 영향을 미치는 것이다. 다시 말해 Molodensky-Badekas 모델을 이용한 국가 측지계 변환 계수 결정에 있어서 중앙점의 선정이 상대적으로 중요하다는 것을 의미한다고 본다. 따라서 현재 고시된 변환 계수와 중앙점의 성과는 우리나라의 측지계 전환에 있어서 매우 적합하다고 판단된다.

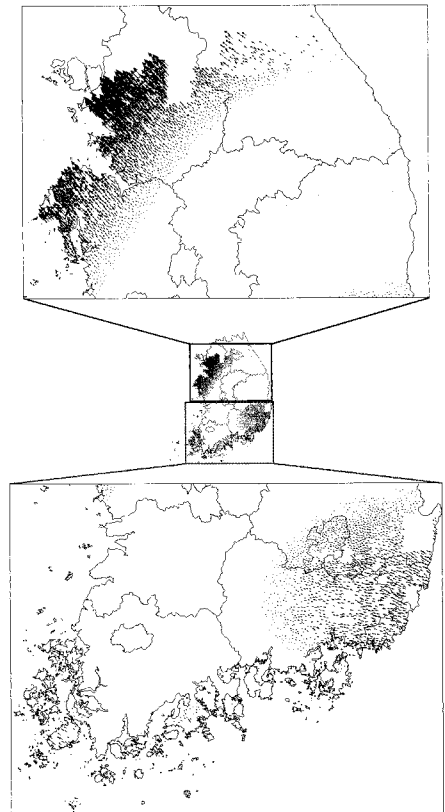
Veis 모델은 Molodensky-Badekas 모델과 회전량을 계산하는 부분에서 차이를 가지게 되는데 이러한 차이로 인하여 변환 잔차가 편향된 패턴을 보이는 것으로 분석되었다. 이러한 사실은 그림 6(c)를 확대한 그림 7(a)에서 잔차 패턴이 중앙점을 중심으로 외곽 방향으로 벗어날수록

표 4. 국가고시 좌표변환계수를 적용한 변환 정확도 결과

구분	ΔX	ΔY	ΔZ
RMSE(m)	0.763	1.068	0.812
Confidence Interval (95%)	0.015	0.018	0.016



(a) Veis 모델



(b) MRE

그림 7. 잔차 벡터의 확대도

잔차 크기가 커지면서 시계방향으로 회전하는 특이한 양상을 나타내는 것으로 확인할 수 있다. 따라서 Veis 모델의 평행 이동량이 Molodensky-Badekas 모델과 같지만 회전량이 달라짐에 의해 중앙점을 벗어날수록 비정상적인 좌표 변환이 이루어져 국가 좌표계 전환에 적용하기에는 부적합하다고 판단된다.

그림 7(b)를 보면 다중회귀분석에 의해 결정한 MRE를 적용한 잔차의 패턴이 매우 특이한 형태를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. MRE를 적용한 잔차는 남한 내륙 지역 중에서 북서쪽 지역과 동남쪽 지역에서 과대 잔차가 발생되고 있으며, 방향성은 북서쪽으로 편향된 결과를 보이고 있다. 이는 MRE의 단점을 잘 설명하고 있는 것으로서 공통점의 분포가 변환 지역을 광범위하게 포괄하고 있지 못하다면 외곽 지역에서의 변환 정확도의 신뢰성이 급격히 떨어진다는 것을 정량적으로 의미하는 것이다. 따라서 고정밀도의 변환이 요구되는 국가 측지계 전환에 MRE의 적용은 무리가 따르는 변환 방법이라고 판단된다.

본 연구를 통해 지역적인 측지기준인 동경측지계와 지심측지기준인 세계측지계간의 변환에 있어서는 Molodensky-Badekas 모델이 가장 적합하다고 평가되지만, 7-변환 계수 모델들이 가지고 있는 선행 가정, 즉 두 좌표계의 X, Y, Z 축이 서로 평행하다는 점은 정확한 변환을 위한 문제점으로 간주할 수 있으므로 7-변환 계수 모델의 회전변화량 문제를 개선한 Krakiwsky-Thomson 모델이나 평면상의 왜곡에 대한 축척 변화량에 초점을 두고 개발된 Affine 모델 등의 10개 변환 모델 등의 고려도 필요하다고 본다. 그 밖에도 고려해 보아야 할 변환 방법으로는 Vanicek-well, Hotine, Polynomial fitting 등이 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국가기준점 망조정 연구 사업의 결과로 획득한 국가 삼각점의 세계측지계 성과와 기존 동경측지계 성과를 이용하여 3개의 7-변환 계수 모델을 응용하고, 다중회귀식을 결정하여 동경측지계로부터 세계측지계로의 변환을 위한 최적합한 변환 방안을 연구하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 동경측지계와 세계측지계에 기준한 삼각점의 성과 차이가 비상사형을 이루는 비상사점을 제거한 후에 확보한 1, 2등 삼각점 931점을 토대로 Bursa-Wolf 모델, Molodensky-Badekas 모델, Veis 모델을 이용한 국가 좌표 변환 계수는 Bursa-Wolf 모델의 경우에 변환 계수 성분 중에서 평

행 이동량에 대한 표준편차가 다소 크게 나타나고 있었으며 Molodensky-Badekas 모델과 Veis 모델은 표준편차가 매우 적게 나타났다.

2. 방대한 양의 공통점에 기초하여 우리나라의 기존 측지계인 동경측지계를 세계측지계로 변환할 수 있도록 미국 DMA의 방법에 근거한 다중회귀식(Multiple Regression Equation)을 개발하였으며, 이를 이용하면 고정밀을 요구하지 않는 측지계 변환에 있어서 신속하고 간편한 적용이 가능하다고 사료된다. 또한 본 연구의 MRE를 적용할 경우, 위도 방향 $\pm 0.08''$, 경도 방향 $\pm 0.11''$ 의 변환 정확도를 확보할 수 있다.

3. 각 좌표 변환 모델별로 계산한 국가 좌표 변환 계수를 비상사점을 제거한 3, 4등 삼각점 9,917점에 대하여 좌표 변환을 실시하여 정확도를 분석한 결과에서는 변환 모델별로 큰 차이를 나타내지는 않았다. 이는 세가지 모델이 모두 상사 변환에 기초한 수학적 변환 모델로서 다량의 잉여 공통점에 의한 자유도가 증대되어 최소제곱법의 계산에 의해 그 차이가 줄어든 것으로 보인다. 그러나 Veis 모델의 변환 정확도가 다른 두 모델에 비하여 다소나마 저하된 변환 정확도를 보이는 것으로 분석되었다.

4. 변환 잔차의 패턴을 분석한 결과, 각각의 모델별 특징을 반영한 양상을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 특히, Bursa-Wolf 모델은 공통점의 계통적 오차로 인한 평행 이동량의 추정 정밀도를 저하시켰으며, Veis 모델은 회전 성분의 영향으로 인하여 중앙점의 중심으로부터 벗어날수록 잔차의 크기가 증대되었고, MRE는 계산 영역의 한계로 인한 외부 영역의 잔차가 증가됨을 나타냈다. 따라서 우리나라의 측지계 전환에 있어서 Molodensky-Badekas 모델이 가장 적합한 변환 모델이라고 판단된다.

5. 현재 국가에서 고시한 국가좌표변환계수와 변환식을 적용하여 정확도 평가에 이용한 공통점을 변환하여 평가한 결과, 본 연구에서 계산한 변환 모델별 적용 결과보다 향상된 변환 정확도를 보이는 것으로 나타났으며, 적용 모델 또한 Molodensky-Badekas 모델로 우리나라의 기준 측지계 전환에 있어서 최적의 변환 방안이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구를 위한 기준점 성과 제공에 도움을 주신 건설교통부 국토지리정보원에 감사사를 드립니다.

참고문헌

- 강준목, 박운용, 이용창 (1994), Geoid 기준설정이 타원체간 좌표변환에 미치는 영향, 한국측량학회지, 제12권, 제1호, pp. 69-76.
- 국토지리정보원 (2003), 수치지도 좌표계 전환에 관한 연구 II
- 국토지리정보원 (2006), 국가기준점 망조정에 관한 연구.
- 윤홍식, 김대경, 송동섭 (2004), 최적 좌표변환파라미터 결정을 위한 좌표변환 모델의 비교, 대한토목학회논문집, 제24권, 제3D호, pp. 455-461.
- 윤홍식, 조재명, 송동섭, 김명호, 조홍목 (2004), 수치지도 좌표계 변환 도구 개발, 한국측량학회지, 제22권, 제1호, pp. 29-36.
- Appelbaum, L. T. (1982), Geodetic datum transformation by multiple regression equations, *Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*, New Mexico State University, Physical Science Laboratory, Las Cruces, New Mexico, USA, 8-12 February.
- Badekas, J. (1969), *Investigations related to the establishment of a world geodetic system*. Report 124, Department of Geodetic Science, Ohio State University, Columbus.
- Bursa, M. (1962), The theory for the determination of the non-parallelism of the minor axis of the reference ellipsoid and the inertial polar axis of the Earth, and the planes of the initial astronomic and geodetic meridians from the observation of artificial Earth satellites, *Studia Geophysica et Geodetica* Vol. 6, pp. 209-214.
- DMA (1987), Supplement to Department of Defense World Geodetic System 1984 Technical Report: Part 1 - Methods, Techniques, and Data used in WGS84 development. DMA TR 8350.2-A, first edition, December 1.
- Harvey, B. R. (1986), Transformation of 3D coordinates. *The Australian Surveyor*, Vol. 33, No. 2, pp. 105-125.
- LINZ (1997), Recommended transformation parameters from WGS84 to NZGD49, Geodetic System Technical Report.
- Logan W. R. (1955), The Rejection of Outlying Observations, *Survey Review*, Vol. 97, No. 133
- Moritz, H. (1972), *Advanced Least Squares Methods*, Reports of the Department of Geodetic Science, No.75, The Ohio State University, Columbus.
- Wolf, H. (1963), Geometric connection and re-orientation of three-dimensional triangulation nets, *Bulletin Geodesique* Vol. 68, pp. 165-169.
- Wolfum, O. (1992), Merging terrestrial and satellite networks by a ten-parameter transformation model, *Manuscripta Geodaetica*, Vol. 17, No. 4, pp 210-214.
- Veis, G. (1960), Geodetic uses of artificial Earth satellite, *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, Vol. 3, No. 9, pp. 95-161.

(접수일 2007. 10. 1, 심사일 2007. 11. 8, 심사완료일 2007. 11. 26)