

공간정보의 측지기준체계 변환 기법 도출에 관한 연구

Studies on Derivation of Appropriate Geodetic System Transformation Schemes for Spatial Data

윤성현¹⁾ · 이흥규²⁾ · 송진훈³⁾
Yun, Seonghyeon · Lee, Hungkyu · Song, Jinhun

Abstract

Seven techniques widely used in the geodetic transformations have been reviewed and compared to figure out their theoretical characteristics. A series of numerical tests were performed about four data sets. This was followed by result analyses in terms of transformation residuals and accuracies together with some hypothesis testings based on the student-t distribution to confirm the statistical significance of the techniques. In the case of the transformation between the geodetic frames implemented in the same system, no statistical significance was revealed in the results of the 3D transformation techniques, even if the testing area becomes large as the Asia-Oceania continent. Among the 2D transformations, it was possible for the NTV2 grid modeling technique to deliver improved transformation accuracy. Finally, it was possible from the results analyzed in this study to propose the Helmert transformation to geodetic control points and the NTV2 technique to the 2D spatial data transformation of the geodetic systems.

Keywords : Geodetic Reference System, Geodetic Reference Frame, 3-dimensional Transformation, 2-dimensional Transformation

초 록

본 연구에서는 공간정보의 측지기준체계 변환에 사용하는 3차원 변환기법 Helmert, Molodensky-Badekas, Standard Molodensky 그리고 2차원 변환기법 Abridged Molodensky, Conformal, Affine, NTV2 (National Transformation version 2)의 적용 가능 좌표 형식, 변환계수 등 이론적 특징을 조사·비교하였다. 이들 기법을 4가지 각기 다른 특징을 갖는 공간정보 좌표 집단에 적용하는 변환 실험을 실시해 잔차 분포, 정확도, Student-T 분포에 대한 가설검정 결과를 분석하였다. 동일 측지기준체계를 달리 구현한 측지기준프레임 사이 변환 시 지각변동을 고려한다면, 그 범위가 아시아-오세아니아로 넓어지더라도 3차원 변환기법들의 적용 결과에 통계적 차이가 나타나지 않았다. 반면, 2차원 변환기법 중에서는 NTV2 기법이 지역적으로 불균질한 공통점의 상대정확도를 반영할 수 있어 가장 높은 변환 정확도를 나타냈다. 본 연구에서의 공간정보의 측지기준체계 변환 이론과 실험적 고찰을 통해 향후 신규 측지기준프레임 도입에 따른 통합기준점 등 측량기준점 변환은 Helmert 기법 그리고 수치지형도·지적공부 등 2차원 공간정보 변환에는 NTV2 변환기법을 적용하는 방안을 제안하고자 하였다.

핵심어 : 측지기준체계, 측지기준프레임, 3차원 변환, 2차원 변환

Received 2020. 11. 13, Revised 2020. 12. 03, Accepted 2020. 12. 14

1) Member, Department of Eco-Friendly Offshore Plant FEED Engineering, Ph.D. student, Graduate School of Changwon National University (E-mail: shyun92@changwon.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Professor, Changwon National University (E-mail: hkyulee@changwon.ac.kr)

3) Department of Civil Engineering, Ph.D. student, Graduate School of Changwon National University (E-mail: sjhy05@lx.or.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

지구상 절대위치 표현 기준에 해당하는 측지기준체계 (geodetic reference system, 이하 기준체계)는 좌표계 원점, 축 방향, 기준타원체 제원, 그리고 중력 상수와 같은 측지 변수를 이론적으로 정의한 것이다. 기준체계를 관측데이터 취득·처리·조정으로 물리적 표지(측량표지)의 측지좌표와 속도벡터를 추정해 현실 세계에 구현한 것을 측지기준프레임(geodetic reference frame, 이하 기준프레임)이라 한다 (Seeber, 2003).

현재 우리나라 기준프레임에 해당하는 「공간정보 구축 및 관리 등에 관한 법률」 제6조의 '세계측지계'는 1995년 한일 VLBI 관측사업으로 취득한 데이터에 기반해 ITRF2000 (International Terrestrial Reference Frame)을 한반도에 구현한 것으로 그 원점 성과의 기준시점(reference epoch)은 2002년 1월 1일이다. 현행 기준체계 도입으로 과거 동경측지계에 기초한 국가 위치 기준의 문제점을 극복하고 측량기준 통일과 GNSS (Global Navigation Satellite System), 수치사진측량 등 최신 측량기술 활용 제약 해소를 통해 측지기준점의 신뢰도를 높일 수 있었다. 이에 따라 국가 GIS (Geographic Information System) 구축 기반 마련, 스마트폰을 비롯한 GNSS 관련 산업 활성화 등 현행 기준체계는 위치 기반 기술 발전에 큰 역할을 해왔으나 기준프레임 구현과 유지·관리 방법, 그리고 공간정보 활용 분야를 고려할 때 몇 가지 문제점이 있다(NGII, 2017). 첫 번째는 세계측지계(KDG2002: Korean Geodetic Datum 2002) 도입 이후 여러 차례 발생한 지진이 우리나라 기준프레임에 미친 영향을 적절히 반영하지 못하고 있는 것이고, 두 번째는 시간이 지남에 따라 지각이동 누적으로 ITRF와 일치도가 낮아지는 것, 마지막으로 ITRF와 세계측지계 사이 변환 방법이 제공되지 않아 실시간 정밀절대측위 (PPP: Precise Point Positioning) 기술 활용에 제약이 따른다는 것이다. 이러한 문제를 해결하고자 국토지리정보원은 주기적인 ITRF 갱신에 따라 원점 성과와 시점을 모두 갱신하는 새로운 기준프레임 도입 방안을 연구하였다(NGII, 2019). 해당 방안이 따르면 현행 기준프레임의 한계점을 모두 해결할 수 있을 뿐만 아니라 기준프레임의 정확도와 최신성을 극대화할 수 있을 것으로 기대되나, 새로운 ITRF가 구현될 때마다 기존의 것을 보존한 채 새로운 것을 도입하게 되어 여러 기준프레임이 동시에 존재하는 상황을 야기한다. 따라서 성과의 적절한 계산·표현·활용을 위해 기존·신규 기준프레임 사이 변환에 대한 연구가 필요하다.

Yun *et al.* (2004)은 3차원 ECEF (Earth-Centered, and

Earth-Fixed) 좌표에 기반한 Bursa-Wolf, Molodensky-Badekas, Veis, Krakiwsky-Thomson, Affine 변환 기법의 특징을 고찰하고, 정밀 1차 기준점망의 107개 기준점으로 각 기법의 변환계수를 추정해 80개 검사점에 적용하는 수치실험을 수행했다. 각 기법에 대한 RMSE (Root Mean Square Error)와 τ 검정 결과를 비교·분석하여 Affine 변환 기법을 동경측지계와 세계측지계 사이 변환에 가장 적절한 것으로 제시했다. Song *et al.* (2007)은 변환 기법 Bursa-Wolf, Molodensky-Badekas, Veis와 다중회귀식으로 동경측지계 상의 좌표를 세계측지계에 대한 것으로 변환하는 실험을 수행했다. 이때 NGII (2006)의 EDM (Electronic Distance Measurement)과 GPS (Global Positioning System) 조정성과 중 1·2등 삼각점 935점을 공통점, 3·4등 삼각점 9,917점을 검사점으로 선정해 변환 정확도를 비교하였다. 그 결과 연구 대상 변환 기법 중에서 Molodensky-Badekas가 우리나라 전역을 적용 대상으로 할 때 가장 적합하다는 결론을 도출했다. Hong *et al.* (2009)은 동경측지계에서 세계측지계로의 전환 방법과 절차를 분석하고 이를 보완해 효율적이고 유연한 변환 방안을 제시하였다. Affine 변환 기법의 유용성을 검증하고 비상사점 판별 기준을 3cm로 제안했으며 변환에 적절한 공통점 수량을 10점 + 16도엽당 1점으로 국토지리정보원에서 공표한 1/1,000 수치지형도 좌표계 변환 표준작업지침(Ver 1.0)(NGII, 2005a)에서 규정한 수량에 비해 적은 양을 사용하더라도 무방함을 입증했다. Jung and Kang (2014)는 지적공부의 기준체계 변환에 최적 계수를 고정한 2차원 Conformal 변환의 효용성을 제시하고자 서울과 제주시 지적기준점, 그리고 화성시 지적공부 경계점좌표등록지역의 필지 경계점들에 대한 변환 실험을 수행하고 잔차와 면적 변화를 분석했다. 기존 연구 사례들은 동경측지계와 세계측지계 사이 변환을 위한 최적 기법·절차 등을 도출했으나 적용 기법의 종류와 결과에 있어서 세계측지계 사이 변환과 차이점이 존재할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 측량 및 공간정보 분야에서 사용하는 3차원 변환기법 Helmert, Molodensky-Badekas, Standard Molodensky, 그리고 2차원 변환기법 Abridged Molodensky, Conformal, Affine, NTv2의 적용 가능 좌표 형식, 변환계수 등 이론적 특징을 고찰하고, 해당 기법들을 4가지 조건의 좌표 세트에 적용하는 수치 실험을 수행했다. 각 기법 적용 결과를 잔차 분포와 변환 정확도 측면에서 비교하였고 Student-T 검정을 통해 그 결과의 통계적 차이 여부를 분석했으며, 최종적으로 새로운 기준프레임 도입에 대비하기 위한 최적 변환기법을 제안하고자 하였다.

2. 측지기준체계 변환

2.1. 3차원 변환

기준체계 변환기법은 그 활용에 필요한 좌표의 형태에 따라 ECEF와 측지좌표에 기반하는 것으로 구분할 수 있다. 전자에는 Helmert, Bursa-Wolf, Molodensky-Badekas 변환, 후자는 Standard Molodensky 변환기법이 대표적이다.

Helmert 변환은 측량 분야에서 널리 사용되는 상사변환 기법 중 하나로 좌표계 원점이동 3개, 축 회전 3개, 그리고 축척 1개로 총 7개 변환계수를 추정해 Fig. 1과 같이 두 좌표계의 관계를 나타낸다. 그림을 보면 z축 회전이 x와 y축 좌표에 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있으며, 이에 따른 x와 y축 좌표 변화는 각 축의 원점이동으로도 가능하다는 점을 통해 회전과 원점이동 계수 사이 높은 상관성을 도식적으로 이해할 수 있다. 또한 전지구적인 기준체계 사이 변환에 더 적절한 것으로 알려져 있다(Kutoglu *et al.*, 2002; Zinn, 2004; NGII, 2005b; Deakin, 2006). 축 회전각이 미소한 경우 회전행렬을 구성하는 삼각함수를 단순화할 수 있으며, 이처럼 간소화한 Helmert 변환을 Bursa-Wolf 변환이라 한다(Featherstone, 1997; Mahmoud, 2013).

또 다른 ECEF 좌표 기반 변환기법인 Molodensky-Badekas는 Helmert와 유사하나 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 계수 추정을 위한 공통점의 3차원 무게중심 좌표를 추가로 고려해 총 10개의 계수를 활용하는 것이 차이점이다. 그림을 통해 확인할 수 있듯이 축의 회전과 축척 계수를 공통점들의 무게중심 위치에 대해 추정하기 때문에 원점이동량과 이들 사이 상관성을 감소시킬 수 있으며, 이에 따라 지역과 전지구적 기준체계 사이 변환에 보다 적절하다(Featherstone, 1997; Kutoglu *et al.*, 2002; NGII, 2005b; Deakin, 2006).

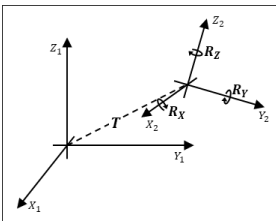


Fig. 1. Geometric representation of Helmert transformation

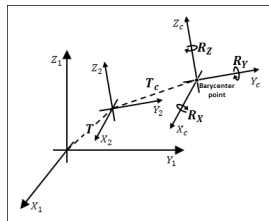


Fig. 2. Geometric representation of Molodensky-Badekas transformation

앞서 소개한 변환기법들은 ECEF 좌표에 기반하는 것으로 측지좌표를 주로 사용하던 과거에는 부가적인 좌표환산 절차

를 요구하였으며, 현대의 컴퓨터와 같은 고급 계산 장치 발달 이전 이는 복잡한 과정을 수반했다. 이와 같은 계산상의 불편함을 피해 기준체계를 변환하고자 Standard Molodensky라는 상사변환 기법이 개발되었다(Evers and Kundsens, 2017). 이는 두 기준체계의 좌표축이 평행하다는 가정에 기반해 유도된 미분방정식 Eq. (1)을 사용하는 기법으로, 식을 통해 알 수 있듯이 지심변동량 3개, 두 기준타원체 제원 차이 2개를 계수로 하며 측지좌표를 직접 활용한 변환이 가능하다. 연산 부담이 작아 수(手)계산을 할 수 있으나, 지역과 전지구적 위치 기준 사이 변환 등 Eq. (1) 유도 시의 가정을 만족하지 않는 경우 변환 정확도가 하락하는 제약이 있다(Deakin, 2004).

$$\begin{bmatrix} \delta\phi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\sin\phi\cos\lambda}{\rho+h} & \frac{-\sin\phi\sin\lambda}{\rho+h} & \frac{\cos\phi}{\rho+h} & \frac{vc^2\sin\phi\cos\phi}{a(\rho+h)} & \frac{\sin\phi\cos\phi}{\rho+h} & \left(\frac{\rho}{1-f} + v(1-f)\right) \\ -\sin\lambda & -\cos\lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{(v+h)\cos\phi}{\cos\phi\cos\lambda} & \frac{(v+h)\sin\phi}{\cos\phi\sin\lambda} & \sin\phi & \frac{-a}{v} & v(1-f)\sin^2\phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \\ \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} \quad (1)$$

Where ϕ, λ, h are latitude, longitude, and ellipsoidal height, a, f are semi-major axis, and flattening, ρ, v are radius of curvature in the meridian and the prime vertical plane, respectively. They are about the reference system that's going to be converted.

앞서 소개한 3차원 좌표 기반 4가지 변환기법의 특징을 Table 1에 요약했다. 가장 일반적으로 활용되는 Helmert 변환기법은 ECEF 좌표와 7개 계수에 의해 변환이 이루어지며, 전지구적인 위치 기준 사이 변환에 보다 적합하다. 좌표축의 회전각이 작은 경우 회전행렬의 삼각함수를 간소화할 수 있고, 이를 Bursa-Wolf 기법이라 한다. Molodensky-Badekas는 측지망의 3차원 무게중심 좌표를 추가로 고려해 총 10개의 계수로 변환을 수행하는 기법으로, 지역과 전지구적 기준체계 사이 변환에 더 적절한 것으로 알려져 있다. 변환계수 추정 시 축 회전각이 충분히 미소하고, 공통점이 전지구적으로 분포하고 있어 공통점들의 무게중심이 지구 중심과 같아지는 경우 ECEF 좌표 기반 변환기법인 Helmert, Bursa-Wolf, 그리고 Molodensky-Badekas가 이론적으로 동일하다(Zinn, 2004). Standard Molodensky 변환은 다른 3가지 기법들과 달리 측지좌표에 기반하는 것으로 5개의 계수를 필요로 하고, 수계산을 통한 변환이 가능해 과거 널리 사용되었으나, 두 기준체계의 좌표축이 평행한 경우 적절한 변환 결과를 얻을 수 있다. 변환기법들의 이론적 특징을 고찰한 바에 따르면, NGII (2019)의 방안에 따라 기준프레임을 도입할 때 기존-신규성과 사이 변환에 Helmert 기법을 적용하는 것이 타당할 것이다.

Table 1. A summary of the 3 dimensional transformation schemes

Schemes	Reference coordinate types	Parameters	Remarks
Helmert	ECEF (X, Y, Z)	3 translations + 3 rotations + 1 scale	Suitable between global systems or frames
Bursa-Wolf			Helmert transformation with small rotation angle
Molodensky-Badekas		7 helmert parameters + 3 barycenter coordinates	Suitable between global & local systems or frames
Molodensky	Geodetic (ϕ , λ , h)	3 translations + 2 differences of reference ellipsoidal specifications	Under the assumption of the axes of two reference systems are parallel

2.2. 2차원 변환

2차원 공간정보의 기준체계 변환에는 측지좌표에 의한 곡면변환과 평면직교좌표에 의한 평면변환 기법을 활용할 수 있으며, 전자는 Abridged Molodensky, 후자는 Conformal과 Affine 변환이 대표적이다. 최근 국제적으로 활용성이 높아지고 있는 NTV2 변환은 일반적으로 경·위도 좌표에 기반하는 기법이지만 평면직교좌표에 의한 변환도 가능하다.

Abridged Molodensky 변환기법은 정확한 타원체고 계산이 쉽지 않았던 과거 2차원 측지좌표, 즉 경·위도만으로 기준체계를 변환하고자 Standard Molodensky 변환 식 Eq. (1)을 Eq. (2)와 같이 단순화한 것이다. 여기에는 이항 정리(binomial theorem)에 의한 모유선과 자오선 곡률반경 단순화, 축점의 타원체고가 두 곡률반경에 비해 매우 미소하다는 가정에 따른 생략이 반영되었다(Deakin, 2004).

$$\begin{bmatrix} \delta\phi \\ \delta\lambda \\ \delta h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\phi\cos\lambda & -\sin\phi\sin\lambda & \cos\phi & \frac{f\sin2\phi}{\rho} & \frac{a\sin2\phi}{\rho} \\ -\sin\lambda & -\cos\lambda & \rho & \rho & \rho \\ \frac{\nu\cos\phi}{\cos\phi\cos\lambda} & \frac{\nu\cos\phi}{\cos\phi\sin\lambda} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta X \\ \delta Y \\ \delta Z \\ \delta a \\ \delta f \end{bmatrix} \quad (2)$$

Conformal과 Affine 변환은 가장 널리 알려진 2차원 기준체계 변환기법 중 하나로 이들에 의해 표현되는 두 좌표계 사이 관계는 Fig. 3에 나타난 것과 같다. Conformal 변환은 두 축의 축척 계수 S_a 와 S_b 가 동일한 경우로 4개 변수에 의한 기법이지만 Affine은 축척 계수를 각각 추정하는 6개 변환계수의 비상사 변환이다(Paul and Charles, 2006). 변환계수 추정과 그 적용 대상 점들의 상대정확도가 불균질한 경우 Conformal 변환의 정확도는 하락하게 되나 Affine 변환기법은 서로 다른 축척 계수에 의해 불균질성을 일부 반영할 수 있다(Andrei, 2006).

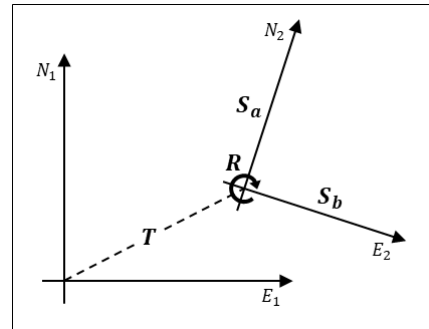


Fig. 3. Geometric representation of conformal and affine transformation

NTV2는 캐나다 측지측량국에서 NAD27과 NAD83 사이 변환을 위해 고안한 격자 변환 기법이다(NRCAN, 2020). 변환 대상지역에 고루 분포하고 있는 공통점의 두 기준체계에 대한 좌표 차이에 2차원 보간법을 적용해 Fig. 4와 같이 격자의 절점에 대한 좌표차를 결정한다. 이후 격자 내부 임의의 점을 입력하면 Fig. 4의 격자를 확대한 부분에서 보여주는 것과 같이 각 격자 절점의 좌표 차이를 변환하고자 하는 점에 대해 다시 2차원 보간·적용하여 변환을 수행한다. 이 절차는 수학적으로 단순·효율적일 뿐만 아니라 지역적으로 불균질한 변환 대상 공통점의 상대정확도를 고려할 수 있고, 격자의 밀도에 따라 다양한 수준의 변환 정확도를 확보할 수 있다(Garnero, 2013). 이러한 장점 때문에 캐나다를 비롯해 영국, 프랑스, 독일 등 많은 나라에서 해당 기법을 채택해 활용 중이며, 여러 GIS 소프트웨어도 이 기법에 의한 위치 기준 변환 기능을 지원한다(Autodesk, 2020; Cadcorp, 2020; ESRI, 2020). 반면, NTV2는 모든 절점에 대해 기준체계에 따른 좌표 성분 차이를 모형화해야 하기 때문에 계수에 의한 변환에 비해 데이터 양이 많으나, 이는 현대 컴퓨터 성능을 고려할 때 그 사용을 제한할 정도는 아닌 것으로 알려져 있다. NGII (2005a)는 1/1,000 수치지형도 기준체계 변환 시 변환기법과 왜곡량 모형 적용 두 단계를 거치도록 규정하고 있으나, NTV2는 자체적으로 왜곡량을 반영하므로 변환 절차를 하나의 단계로 간소화할 수 있다.

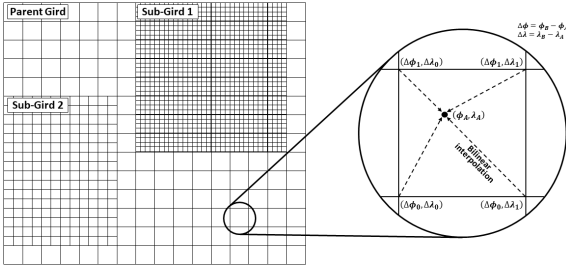


Fig. 4. NTV2 grid and geometric representation of its application

소개한 2차원 변환기법 적용에 필요한 좌표 형태, 변환계수, 그리고 특징을 Table 2에 정리하였다. Abridged Molodensky 변환은 경위도에 기반하는 곡면변환 기법으로 해당 변환 식을 유도하기 위해 몇 가지 가정을 도입했기 때문에 이를 만족하지 않는 경우 사용에 어려움이 있다. 반면 Conformal과 Affine 변환은 평면직교좌표에 의한 평면변환 기법으로, 전자는 단일 축척의 사상 변환, 후자는 2개의 축척 계수를 추정하는 비상사 변환이며, 적용 좌표의 투영 구역을 고려해야 한다. NTV2는 변환계수를 추정해 활용하는 함수 기반 기법들과 달리 격자에 의해 변환을 수행하는 독특한 기법으로 단순·효율적이며 경위도, 평면직교좌표 모두를 이용해 변환이 가능하다. 변환 기법의 이론적 특징을 살펴본 바에 따르면 공간적으로 불균질한 변환 대상 점들의 상대정확도를 반영할 수 있으며 왜곡량 모형을 추가로 고려할 필요가 없어 그 절차의 간소화가 가능한 NTV2를 수치지형도, 지적공부 등 2차원 공간정보의 기준체계 변환에 적용하는 것이 바람직할 것이다.

3. 수치실험 및 결과

3.1. 절차 및 방법

앞서 이론적 특징을 조사한 7가지 기준체계 변환 기법의 특징을 실험적으로 비교·분석하고자 4가지 좌표 세트를 활

용해 세계측지계 사이, 동경측지계와 세계측지계 사이, 그리고 IGS (International GNSS Service) 기준프레임 사이 변환 실험을 수행했다. 이를 통해 동일한 기준체계를 구현한 기준프레임 사이 변환, 서로 다른 기준체계 사이 변환, 그리고 변환 대상 범위가 아시아-오세아니아 수준으로 넓어졌을 때 각 기법 적용 결과의 차이를 분석하고자 하였다. 변환에는 뮌헨 공과대학 측지과에서 Matlab 스크립트를 기반으로 작성한 Geodetic Transformation Toolbox(Wasmeier, 2018)를 활용했으며, NTV2 변환에 필요한 격자 데이터를 생성하기 위해 공통점의 좌표차를 격자의 각 절점으로 보간하는 스크립트를 작성했다. 각 기법 적용 결과는 변환 잔차의 분포와 RMSE 측면에서 비교하였고, Student-T 검정을 통해 그 결과의 통계적 차이 여부를 분석했다. 본 연구에서 통계검정의 귀무가설과 대립가설은 Eq. (3)로 설정하고, 양쪽꼬리에 대한 유의수준 5%로 신뢰구간을 결정했으며, Eq. (4)에 의해 계산된 검정통계량이 신뢰구간을 벗어나는 경우 귀무가설을 기각했다 (Kim et al., 2009).

$$\begin{aligned}
 H_0 &: \text{The mean of the transformation residuals of each technique is statistically equal} \\
 H_a &: \text{The mean of the transformation residuals of each technique is not statistically equal}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$T = (\bar{a} - \bar{b}) / \sqrt{\frac{n_a + n_b}{n_a n_b} \cdot \frac{(n_a - 1) \cdot s_a^2 + (n_b - 1) \cdot s_b^2}{n_a + n_b - 2}}
 \tag{4}$$

Where H_0 and H_a are null and alternative hypothesis, T is the test statistic of the Student-T, \bar{a} , \bar{b} are the mean of each sample, n_i , s_i^2 are the number of samples and their variance.

3.2. 결과 및 분석

3.2.1. 세계측지계 사이 변환

국토지리정보원의 새로운 기준체계 도입 방안과 유사한 상황인 동일한 기준체계를 기반으로 구현한 서로 다른 기준프레임 사이 변환 실험에 사용한 좌표 세트는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 NGII (2017)로부터 취득한 36개 위성기준점의 2002

Table 2. A summary of the 2 dimensional transformation schemes

Schemes	Reference coordinate types	Parameters	Remarks
Abridged Molodensky	Geodetic (ϕ, λ)	3 translations + 2 differences of reference ellipsoidal specifications	Under some assumption & simplification by binomial theorem
Conformal	Plane (N, E)	2 translations + 1 rotation + 1 scale	Need to consider projection zone
Affine		2 translations + 4 affine parameters	
NTv2	Geodetic(ϕ, λ) or Plane(N, E)	Coordinate differences between two reference frames at every node of grid	Simple, effective transformation but heavy data

년, 2015년 연간해와 각 기준점에 대한 속도벡터이다. 전자는 과학기술용 소프트웨어 GIPSY-OASIS 버전 6.4를 이용해 산정한 ECEF 좌표이고 후자는 동일한 소프트웨어로 추정된 17년 분량(2000년 1월 1일 ~ 2016년 12월 31일) 일간해의 선형회귀를 통해 산출한 것이다. 우리나라 위성기준점 2015년 연간해를 2002년에 대한 것으로 변환하기 위해 36개 기준점 중 20점을 공통점으로 선정하여 각 기법에 대한 변환계수 추정, 격자 모형을 생성하고, 나머지 16개 검사점에 이들을 적용했다. 이때 속도벡터를 고려한 것과 그렇지 않은 것으로 실험 경우를 소분류해 지각변동 모형이 변환 결과에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

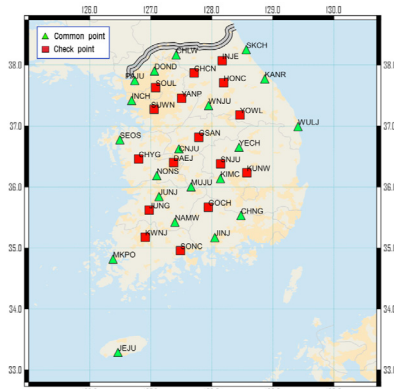


Fig. 5. Layout of GNSS stations used in the transformations between KGD2002 frames

위성기준점 연간해 좌표 세트에 속도벡터를 적용하지 않은 경우의 검사점에 대한 Helmert 변환 수평방향 잔차의 크기를 색으로 구분해 Fig. 6에 예시로 나타냈고, 7가지 기법에 대한 RMSE, 검정통계량, 신뢰구간을 Table 3에 정리했다. 여기서 검

정통계량은 Helmert 기법을 기준으로 나머지를 비교해 계산된 것이다. 변환 정확도를 보면 수평과 수직방향 각각 1.2cm, 1.5cm 내외로 수직방향 정확도가 상대적으로 낮게 계산되었고, 이는 GNSS 측위의 수직방향 정확도가 수평에 비해 낮다는 사실이 반영된 결과로 보인다. Helmert와 Molodensky-Badeka 변환기법의 정확도는 동일하게 계산되어 실무적으로 이득이 차이가 없음을 확인할 수 있으며, 그 이유는 두 기준프레임이 지구적인 기준체계를 기반으로 구현되었기 때문으로 판단된다. Affine과 NTV2 변환기법의 경우 2003년 동일본 대지진에 의해 달라진 우리나라 지각변동 경향(Kim and Bae, 2012; Ha *et al.*, 2013) 등으로 발생한 기준점 사이 상대정확도의 불균질성을 반영할 수 있어 상대적으로 정확도가 높은 것으로 보인다. 하지만 각 기법에 따른 정확도 차이는 mm 수준에 불과할 뿐만 아니라 가설검정에 따르면 각 기법의 변환 결과가 통계적으로 동일할 것으로 나타났다. 이를 통해 동일한 기준체계를 구현한 기준프레임 사이 좌표차가 공간적으로 균질하게 유지된다면 어떤 기법을 적용하더라도 동등한 수준의 변환 정확도 확보가 가능함을 알 수 있다.

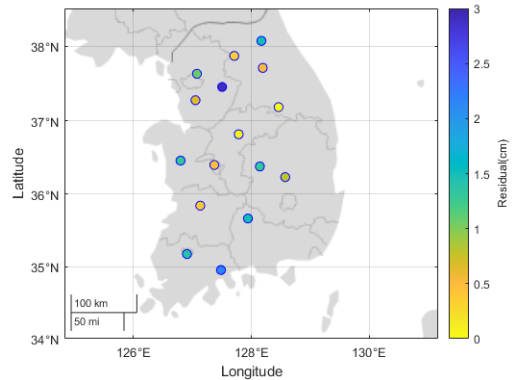


Fig. 6. Horizontal residuals of the Helmert transformation without velocity vectors

Table 3. RMSE and hypothesis test statistics of the global frame transformations without velocity vectors

Schemes	RMSE (cm)		Test statistics		Confidence interval
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	
Helmert	1.268	1.497		-	-2.042 ~ 2.042
Moldensk-Badekas	1.268	1.497	0.000	0.000	
Standard Moldensky	1.204	1.626	0.155	-0.059	
Abridged Molodensky	1.204		0.155		
Conformal	1.267		0.003		
Affine	1.181		0.311		
NTv2	1.216		-0.163		

속도벡터를 고려해 계산된 검사점의 Helmert 변환 수평방향 잔차를 Fig. 7에 도시하였고, 각 기법에 대한 RMSE와 통계 검정 결과를 Table 4에 나타냈다. 수평-수직방향 변환 정확도는 각각 6.3mm, 9.4mm 내외로 속도벡터 미적용 실험에 비해 향상되었으며, Figs. 6 and 7의 비교를 통해서도 이를 확인할 수 있다. 이는 각 기준점 속도를 고려해 2002년과 2015년 사이 발생한 비선형적인 지각 이동에 따른 왜곡을 축소해 균질성을 높일 수 있었기 때문으로 판단된다. Fig. 7에서 검사점 SOUL의 잔차가 다른 기준점에 비해 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있으며, 그 원인은 해당 검사점의 속도벡터 추정 정확도가 낮기 때문으로 의심된다. Table 4의 수평방향 정확도를 살펴보면 상사변환 기법들끼리는 유사하고 Affine 기법이 상대적으로 높지만 NTV2는 예상과 달리 가장 낮은 것을 알 수 있다. 변환에 사용할 NTV2 격자 크기 결정을 위한 사전실험에서 그 크기가 0.1° 보다 작아진다 하더라도 변환 정확도가 동등한 수준으로 계산됨을 확인했고, 모형의 데이터양 증가를 고려해 0.1° 간격의 격자를 본 실험에 사용했다. 따라서 NTV2의 변환 정확도가 다른 기법에 비해 낮은 이유는 격자의 간격이 아니라 격자 생성에 활용한 공통점의 밀도(0.3~1°)가 낮아 정확도 향상에 한계가 있었기 때문으로 판단된다. 앞선 실험 결과와 달리 Standard Molodensky 변환의 높이 정확도가 다른 두 기법에 비해 높게 계산되었는데, 이는 속도벡터 적용으로 두 기준프레임의 관계가 Eq. (1) 유도를 위한 가정에 보다 부합하게 되었기 때문으로 판단된다. 하지만 변환 정확도 차이는 mm 이하로 미미한 수준이며, 가설검정에서도 각 기법의 적용 결과에 통계적으로 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다.

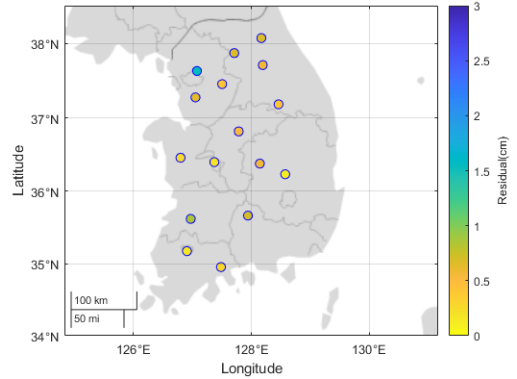


Fig. 7. Horizontal residuals of the Helmert transformation with velocity vectors

3.2.2. 동경측지계와 세계측지계 사이 변환

서로 다른 기준체계 사이 변환 실험을 위해 활용한 좌표 세트는 NGII (2005b)의 세계측지계 변환 시범대상 지역 중 대전의 공통점 119점과 OO지역 지적도근점 2,700점으로 이들은 높이좌표를 포함하고 있지 않다. 대전지역 기준점과 OO지역 지적도근점의 동경측지계 좌표를 세계측지계에 대한 것으로 변환하기 위해 전자는 119점 중 30점, 후자는 2,700점 중 300점을 공통점으로 선정했고 그 분포를 각각 Figs. 8 and 9에 도시하였다. 공통점 선정 시 NTV2 격자 모형이 변환 대상 점 전체를 포함할 뿐만 아니라 공간적으로 불균질한 공통점의 상대 정확도를 반영할 수 있도록 각 지역 내 균질한 밀도로 공통점이 분포하며, 그 수가 전체 점의 30%를 넘지 않도록 했다. 이들 대상 점의 높이좌표 미확보로 ECEF 좌표로의 적절한 변환이 어려워 2차원 Conformal, Affine, 그리고 NTV2 변환기법에 대한 실험만 수행할 수 있었다.

Table 4. RMSE and hypothesis test statistics of the global frame transformations with velocity vectors

Schemes	RMSE (cm)		Test statistics		Confidence interval
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	
Helmert	0.633	0.948		-	
Moldensk-Badekas	0.633	0.948	0.000	0.000	
Standard Moldensky	0.626	0.935	0.032	-0.031	
Abridged Molodensky	0.626		0.032		-2.042
Conformal	0.633		0.002		~
Affine	0.609		0.197		2.042
NTV2	0.654		-0.420		

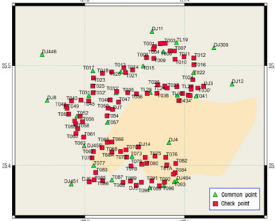


Fig. 8. Layout of common surveying points used in the transformations between Tokyo datum and KGD2002 in Daejeon

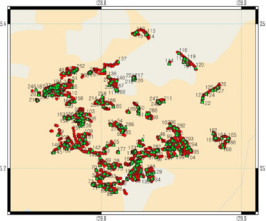


Fig. 9. Layout of cadastral supplementary points used in the transformations between Tokyo datum and KGD2002 in OO city

Figs. 10 and 11은 각각 OO지역 검사점에 Conformal과 NTV2 변환기법을 적용해 계산된 수평성분 잔차 크기를 색으로 구분해 나타낸 것으로 변환 대상의 불균질성을 고려할 수 있는 NTV2 기법의 잔차가 작은 것을 확인할 수 있다. 대전과 OO지역 기준점 좌표 세트에 대한 3가지 변환기법의 RMSE, 통계검정 결과를 각각 Tables 5 and 6에 나타냈다. 대전지역에 대한 각 기법의 변환 정확도는 2.1 ~ 2.6cm 수준이었으며, 변환 대상 점 사이 상대적확도의 불균질성을 고려하지 않는 Conformal 변환이 가장 불량했다. 검정통계량과 신뢰구간을 비교했을 때 Conformal 변환은 다른 기법과 통계적인 차이가 있으나, Affine과 NTV2 사이에는 유의미한 차이가 나타나지 않았다. OO지역의 경우 RMSE가 4.8 ~ 11.5cm 범위로 대전지역에 비해 상대적으로 불량했으며, 그 이유는 EDM 망조정을 통해 산정되어 상대정확도를 확보하고 있는 국토지리정보원의 삼각점을 변환한 대전지역과 달리 망조정 없이 교회법 혹은 다각망도선법으로 성과를 산정해 그 정확도가 불균질한 지적도 근점의 변환이었기 때문이다. 가설검정에서도 마찬가지로 대전

지역과 다른 결과를 보였다. Conformal과 Affine 변환이 통계적으로 동일하고 NTV2 기법에 의한 결과에서는 유의미한 차이가 나타났다. Affine 변환기법은 서로 다른 축척 계수에 의해 2차원 좌표계 각 축방향의 불균질성을 고려할 수 있으나, NTV2는 축의 방향과 상관없이 공간적 불균질성을 고려할 수 있기 때문에 이러한 결과를 얻은 것이라 사료된다. 본 실험에서 계산된 RMSE와 통계검정 결과에 따르면 NTV2가 다른 기법에 비해 높은 정확도로 기준체계 사이 변환이 가능한 것으로 판단된다.

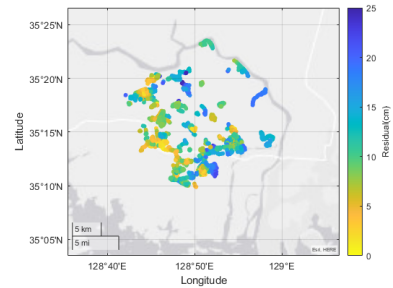


Fig. 10. Residuals of the conformal transformation in OO city

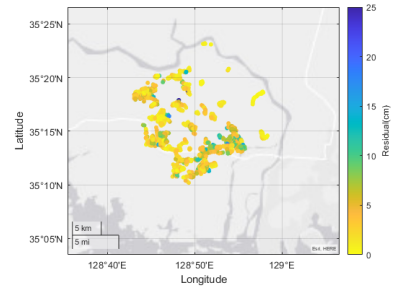


Fig. 11. Residuals of the NTV2 transformation in OO city

Table 5. RMSE and hypothesis test statistics of the geodetic system transformation in Daejeon

Schemes	RMSE (cm)	Test statistics		Confidence interval
		Conf	Affn	
Conformal	2.614		-	
Affine	2.265	2.394	-	-1.970 ~ 1.970
NTv2	2.099	4.081	1.651	

Table 6. RMSE and hypothesis test statistics of the geodetic system transformation tests in OO city

Schemes	RMSE (cm)	Test statistics	Confidence interval
Conformal	11.271	-	
Affine	11.142	1.057	-1.960 ~ 1.960
NTv2	4.796	52.913	

3.2.3. 아시아-오세아니아 지역 IGS 기준프레임 사이 변환

변환 대상 범위가 넓어짐에 따라 각 기법 적용 결과에 차이가 발생하는지 확인하고자 IGS08과 IGS14 기준프레임의 기준점 중 아시아-오세아니아 지역(경도 40°~180°)에 위치한 55점의 ECEF 좌표와 이들의 IGS14에 대한 속도벡터를 활용했다. Fig. 12에 도시한 바와 같이 확보한 55점 중 15점을 공통점, 나머지 40점을 검사점으로 선정하고 속도벡터를 고려해 IGS14 좌표를 IGS08의 기준시점으로 환산한 후 변환계수를 추정했다. 해당 실험은 기준점 좌표를 통일된 투영구역에 대한 평면직교좌표로 변환하기에 어려움과 격자모델 적용의 실효성이 낮음으로 2차원 Conformal, Affine, 그리고 NTV2를 제외한 나머지 기법에 대해 수행했다.

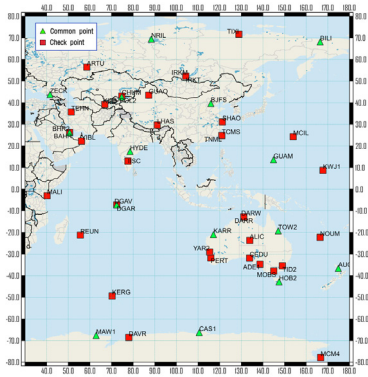


Fig. 12. Layout of GNSS stations in Asia-Oceania region used in the IGS frame transformations

4가지 기법을 이용한 IGS 기준프레임 사이 변환 결과를 Table 7에 요약하였다. RMSE는 수평에 대해 약 5.0mm, 수직에 대해 약 5.7mm로 계산되었다. 속도벡터 고려로 비선형적인 지각이동 등의 영향을 축소해 변환 대상의 균질성을 확보할 수 있어 그 적용 범위가 넓음에도 불구하고 정확도가 높은 것으로 사료된다. 가설검정 결과 모든 기법이 통계적으로 동일하다는 결론을 얻을 수 있었으며, 이를 통해 기준프레임 변환 대상의

범위가 아시아-오세아니아 수준으로 넓어지더라도 변환 대상의 균질성을 확보할 수 있다면, 4가지 기법 중 어떠한 것을 적용하더라도 동등한 수준의 정확도로 변환이 가능함을 확인했다.

4. 결론

우리나라 위치 기준체계는 20세기 초 대한제국에 의한 구소삼각지역 측량원점 설치로부터 시작해 고도화 등을 목적으로 수차례 갱신되었고 2003년 ITRS에 기반한 세계측지계 도입 이후 현재까지 이어지고 있으나, 가장 최근 도입한 현행 기준프레임 역시 한계점을 가지고 있어 국토지리정보원은 신규 기준프레임 도입에 대한 검토를 진행하고 있다. 그 방안에 따르면 다양한 기준프레임이 동시에 존재하는 상황이 발생할 수 있어 이를 대비하기 위한 준비와 검토가 필요한 시점이다. 이에 따라 본 연구에서는 측지측량 분야에서 사용하는 7가지 변환기법의 이론적 고찰과 수치 실험을 수행한 후 각 기법의 변환 정확도 비교와 가설검정 결과로부터 다음의 결론을 도출하였다.

첫째, 세계측지계 사이, 그리고 IGS 기준프레임 사이 변환 정확도와 가설검정 결과를 통해 동일한 전지구적 기준체계를 구현한 기준프레임에 대한 3차원 사상변환 기법들의 적용은 통계적으로 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 이는 변환 대상점들 사이 상대정확도의 공간적인 불균질성이 적거나, 지각변동 모형을 고려해 그 불균질성을 감소시켰기 때문으로 보인다.

둘째, 동경측지계 상의 좌표를 세계측지계에 대한 것으로 변환하는 실험을 통해 2차원 변환기법 중에서는 공간적으로 불균질한 변환 대상 점의 상대정확도를 고려할 수 있는 Affine과 NTV2의 정확도가 Conformal 변환에 비해 높았으며, 상대정확도의 불균질성이 커질수록 NTV2 기법이 더 정확한 변환을 수행할 수 있는 것으로 나타났다.

셋째, 우리나라 위성기준점 2015년 연간해를 2002년에 대한 것으로 변환하는 실험에서 속도벡터 적용이 정확도 향상에 영향을 미쳤다. 이는 각 기준점의 속도를 고려해 13년 동안 누적된 비선형적인 지각이동을 반영할 수 있었기 때문으로, 이를 통해 기준체계 변환 시 정확도 최대화를 위해 지각변동 모형

Table 7. RMSE and hypothesis test statistics of the IGS frame transformations

Schemes	RMSE (cm)		Test statistics		Confidence interval
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	
Helmert	0.502	0.566	-		-1.980 ~ 1.980
Molodensky-Badekas	0.502	0.566	0.000	0.000	
Standard Molodensky	0.496	0.577	-0.086	0.330	
Abridged Molodensky	0.496	-	-0.086	-	

고려의 필요성을 확인할 수 있었다.

본 연구 결과를 바탕으로 우리나라 기준프레임 도입에 따른 공간정보의 변환에 다음과 같은 방법을 제안하고자 한다. 실험에 의해 확인한 바와 같이 본 연구에서 고려한 3차원 변환 결과는 통계적으로 동일하기 때문에 어떠한 기법을 사용해도 무방할 것이다. 하지만 3차원 변환기법 중 Molodensky와 Molodensky-Badekas는 과거 Helmert 변환계수 추정의 불편 해소, 지역과 전지구적 기준체계 사이 변환을 위해 고안된 것으로 현대 컴퓨터 성능 발전과 NGII (2019)의 기준프레임 도입 방안에 따른 기존-신구성과 변환을 고려할 때, 전지구적 기준프레임 사이 변환에 적합한 것으로 알려진 Helmert 변환기법(Zinn, 2004; Deakin, 2006)을 활용하는 것이 타당할 것이다. 이때 정확도 최대화를 위해 변환계수 추정과 적용 시 속도 벡터 등 시간변동 모형 고려할 필요가 있다. 그리고 수치지형도, 지적공부 등 2차원 공간정보 데이터베이스의 경우 수학적 으로 단순·효율적이며 공간적으로 불균질한 변환 대상 점의 상대정확도를 고려할 수 있는 NTV2 기법을 적용하는 것이 바람직할 것이다.

References

- Andrei, C.O. (2006), *3D Affine Coordinate Transformations*, Master's thesis, School of Architecture and the Built Environment Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 63p.
- Autodesk (2020), Geodetic Transformation Definition, Autodesk, <https://knowledge.autodesk.com/support/autocad-map-3d/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ENU/MAP3D-Use/files/GUID-C7A253A0-A08E-4925-BF3F-292C131CC8A7-htm.html> (last date accessed: 4 November 2020)
- Cadcorp (2020), Datum Transformations, *Cadcorp SIS Desktop*, <https://help.cadcorp.com/en/9.0/sis/Coordinates-Datum-Transformations.html> (last date accessed: 4 November 2020).
- Deakin, R.E. (2004), *The Standard and Abridged Molodensky Coordinate Transformation Formulae*, Bulletin, Department of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, April, 22p.
- Deakin, R.E. (2006), *A Note on The Bursa-Wolf and Molodensky-Badekas Transformations*, Bulletin, School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, 21p.
- ESRI (2020), Grid-based methods, *ESRI*, <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/map/projections/grid-based-methods.htm> (last date accessed: 4 November 2020)
- Evers, K. and Kundsén, T. (2017), Transformation pipelines for PROJ.4, *FIG Working Week 2019*, FIG, 29, May – 2, June, Helsinki, Finland.
- Featherstone, W.E. (1997), A comparison of existing coordinate transformation models and parameters in australia, *Cartography*, Vol. 26, No. 1, pp. 13-26.
- Garnero, G. (2013), Use of NTV2 transformation grids in engineering applications, *Earth Science Informatics*, Vol. 7, No. 2, pp. 139-145.
- Ha, J.H., Lee, M.K., and Cho, Y.S. (2013), Analysis of Korea's crustal movement velocity after the great tohoku-oki earthquake by using gps, *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 17, No. 6, pp. 600-608. (in Korean with English abstract)
- Hong, C.K., Kwon, J.H., Lee, H.J., and Lee, W.J. (2009), A study on the coordinates conversion procedures to activate the transformation of local into world geodetic reference system, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 27, No. 1, pp. 33-83. (in Korean with English abstract)
- Jung, W.S., Kang, S.G. (2014), A study on the world geodetic system transformation of cadastral record using by three parameters, *Journal of Cadastre & Land InformatiX*, Vol. 44, No. 2, pp. 139-153. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.D., Kim, W.C., Park, B.W., Park, S.H., Park, T.S., Oh, H.S., Lee, S.Y., Lee, Y.J., Lee, J.Y., Lim, Y.H., Jeon, W.J., Jo, J.S. (2009), *Introduction of the Statistics*, 5th edition, Youngji publishers, Seoul.
- Kim, S.K., Bae, T.S. (2012), Analysis of crustal deformation on the Korea peninsula after the 2011 tohoku earthquake, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 30, No. 1, pp. 87-96. (in Korean with English abstract)
- Kutoglu, H.S., Mekik, C., Akcin, H. (2002), A Comparison of two well known models for 7-parameter transformation, *Australian Surveyor*, Vol. 74, No. 1, pp. 24-30.
- NGII (2005a), *The Guideline of Coordinate System Transformation for 1/1,000 Digital Topographic Map*,

- Report, National Geographic Information Institute, Suwon, 68p.
- NGII (2005b), *A Study on the Coordinate System Transformation of 1/1,000 Digital Topographic Map*, Report, National Geographic Information Institute, Suwon, 369p.
- NGII (2006), *A Study on the Network Adjustment of the National Geodetic Control Points*, Report, National Geographic Information Institute, Suwon, 371p.
- NGII (2017), *A Study on the Establishment of the Application of the National Geodetic Reference Frame (ITRF)*, Report, National Geographic Information Institute, Suwon, 167p.
- NGII (2019), *A Study on the Mid- to Long-Term Basic Strategy of 2025 National Geodetic Reference Frame (Part I)*, Report, National Geographic Information Institute, Suwon, 157p.
- NRCAN (2020), Geodetic Tools and Applications, *National Resources Canada*, <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/maps/tools-applications/10925> (last date accessed: 4 November 2020).
- Paul, R.W. and Charles, D.G. (2006), *Adjustment and Computation: Spatial Data Analysis*, 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., United States, New Jersey.
- Mahmoud, S. (2013), *Determination of Transformation Parameters for Montserrado County, Republic of Liberia*, Master's thesis, Faculty of Civil and Geomatic Engineering, College of Engineering, KNUST, Kumasi, Ghana, 95p.
- Seeber, G. (2003), *Satellite Geodesy*, 2nd edition, Walter de Gruyter Inc., Berlin, Germany.
- Song, D.S., Yun, H.S., Jang, E.S., Kim, T.W. (2007), Optimal national coordinate system transform model using national control point network adjustment results, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography*, Vol. 25, No. 6-2, pp. 613-623. (in Korean with English abstract)
- Wasimeier, P. (2018), Geodetic Transformations, *MATLAB Central File Exchange*, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9696-geodetic-transformations>, (last date accessed: 7 March 2020).
- Yun, H.S., K, D.K., Song, D.S. (2004), Comparison of coordinate transformation model for determining the best fit transformation parameters, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers D*, Vol. 24, No. 3D, pp. 455-461. (in Korean with English abstract)
- Zinn, N. (2004), Molodensky-Badekas: reducing the consequences of parametric correlation in the 7-parameter shift, *APSG Spring 2004 Meeting*, Americas Petroleum Survey Group, 26, February, Houston, Texas.