

물리탐사 실무자를 위한 측지 좌표계와 지도 투영의 이해

이성곤*

한국지질자원연구원 전략기술연구본부
과학기술연합대학원대학교 물리탐사공학과

Summarized Reviews on Geodetic Coordinate System and Map Projection for Practitioners in Exploration Geophysics

Seong Kon Lee*

Climate Change Mitigation & Sustainability Division, KIGAM
Dept. of Geophysical Exploration, UST

요약: 이 해설에서는 물리탐사 및 지구물리 분야 실무자들의 측지 좌표계와 지도 투영에 관한 이해를 높이기 위해 이를 구성하는 요소들의 개념을 상세히 설명하였다. 지구 타원체, 지오이드, 지심 위도, 측지 위도, 경도, 항정선, 대원 등의 기본 개념을 자세히 설명하였다. 또한 현재 대표적으로 널리 사용되고 있는 지심 직각 좌표계, 경위도 좌표계에 대한 설명과 함께 좌표계 간의 좌표 변환에 대해서도 자세히 설명하였다. 이와 더불어 지역 측지 데이텀 변환 및 직각 좌표 투영에 대한 설명을 추가하고 우리나라 측지 좌표계에 대하여 요약하여 물리탐사 실무에서 좌표 체계를 더 잘 이해하고 사용할 수 있도록 하였다.

주요어: 물리탐사, 측지 좌표계, 지도 투영, 한국 측지계

Abstract: In this review, the basic concepts of geodetic coordinate system and map projection are explained to practitioners in exploration geophysicists to enhance the understanding of geographic and projected coordinate system. The fundamental elements such as earth ellipsoid, geoid, geocentric and geodetic latitudes, rhumb line, and great circle are dealt with in detail. The geocentric and geodetic coordinate systems are also summarized neatly, together with coordinate conversion formulae. In addition, the concept and technique for datum transforms between local and world datum are presented, with special emphasis on Korean Geodetic System.

Keywords: exploration geophysics, geodetic system, map projection, Korean Geodetic System

서론

물리탐사는 지표 혹은 시추공에서 물리적 측정을 통하여 지하 물성 정보를 획득함으로써 지하 자원을 탐사하고 지하 구조에 대한 정보를 획득하는 기술이다. 따라서 측정 자료의 공간 위치 정보와 해석된 이상대 위치 및 깊이를 정확히 제공하는 것은 물리탐사 자료와 기타 지구과학적 자료와의 연관성

분석을 위하여 매우 중요하다(Lim *et al.*, 2016). 위치 정보 이용은 물리탐사, 지구물리를 비롯하여 해양, 천문, 우주, 지리, 기상, 토목, 항공 등의 과학 기술 분야뿐 아니라 GPS가 내장된 스마트폰의 대중화와 함께 우리 생활의 많은 부분에서 보편화되었다. 한편, 측지학은 지구의 형상을 수학적으로 표현하고 위치 측정에 관한 체계적인 지식을 연구하는 학문으로 요약할 수 있는데 이에 3차원 위치 결정, 위성 측지, 지도 제작 등의 기하학적 측지학과 지구의 형상 해석, 자전, 중력과 지오이드 결정, 조석, 극 운동, 지각 운동 등을 포함한 물리학적 측지학을 포함하는 등 그 범위는 매우 넓으며(Torge, 1993), 물리탐사와 인접 학문으로서 매우 밀접한 관계를 가진다.

측지 기준계(Geodetic Reference System)란 공간 위치를 일관성 있게 결정하기 위하여 필요한 좌표계, 투영, 데이텀 등 모든 요소를 포함하는 기준 체계를 의미하는 것으로 그 적용 범위는 한 국가 혹은 지역을 대상으로 하거나 국제적 협력을 통하여 전 지구를 대상으로 하는 것까지 다양하다(Torge, 1993).

Received: 26 October 2016; Revised: 5 November 2016;

Accepted: 6 November 2016

*Corresponding author

E-mail: seongkon@kigam.re.kr

Address: Climate Change Mitigation & Sustainability Division, KIGAM
124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Korea

©2016, Korean Society of Earth and Exploration Geophysicists

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.

과거에는 천문 관측에 기초하여 결정된 경위도 원점으로부터 측지망을 전개하여 각 국가별로 독자적인 측지 기준계를 사용하는 경우가 많았다. 그러나, GPS, GLONASS, Galileo 등 GNSS (Global Navigation Satellite System)와 같이 위성을 이용한 측지 기술의 발전(Hoffman-Wellenhof *et al.*, 2008; Lim *et al.*, 2016)으로 전 지구 규모의 측지 기준계가 개발되어 사용되기 시작하였으며, 독자적인 지역 측지 기준계도 세계 측지계와 호환성을 갖도록 발전되고 있다(Kwon *et al.*, 2005). 우리나라의 경우도 1910년대 이래로 사용했던 한국 측지계를 2000년대 초반까지 사용하였으나, 2006년 세계 측지계의 도입을 반영한 개정 측량법이 발효되고 세계 측지계와 한국 측지계의 병행 사용 기간을 거친 후 2010년부터는 세계 측지계 사용이 의무화되었다(Oh, 2015). 따라서, 과거의 측지 기준계에 의해 작성되었던 지질도, 지적도 등도 개정된 한국 측지계 변화에 따라 지속적으로 변환 작업이 진행되고 있으며(Yang, 2014; Oh, 2015), 신규로 제작되는 지도는 의무적으로 세계 측지계를 사용하고 있다.

물리탐사 현장에서는 GPS를 이용하여 획득된 측점의 경위도 좌표를 대부분 국가 기본도의 평면 직각 지역 좌표계로 변환하여 자료 해석에 사용하거나 현장 간이 측량에 대한 상대적인 기준점으로 사용하게 되는데 이는 경위도 좌표보다는 미터법에 기반한 평면 직각 좌표계가 자료 처리 및 해석 등에 더 직관적이고 효율적이기 때문이다. 또한 새로 취득된 자료를 과거 자료와 함께 융합 해석하거나 여러 분야의 자료들과 비교 해석하려는 경우에도 서로 다른 좌표계를 통일하기 위하여 좌표 변환이 필요한 경우도 발생한다. 그 밖에 국제 공동 연구 등에 의해 외국에서 취득된 물리탐사 자료를 해석하려는 경우 해당 지역의 좌표계로 변환하는 경우도 있다(Lee *et al.*, 2013). 그런데, 좌표 변환 과정을 통하여 좌표 체계를 통일하고자 할 때 변환 좌표가 실제와 달라 물리탐사 자료를 비롯한 많은 귀중한 자료들이 적절히 활용되지 못하는 경우도 발생하기도 하는데 이는 주로 지역 측지 기준계를 이루고 있는 여러 요소에 대한 명확한 이해 부족으로 올바른 변환에 적합한 매개 변수 설정이 잘못되었기 때문이다. 그런데, 이러한 개념을 명확히 이해하기 위해서는 측지학이나 지도 투영에 관한 이론(Grafarend and Krumm, 2014; Torge, 1993)에 대한 이해가 필수적이거나 물리탐사 실무에 시급히 적용하기에는 그 내용과 범위가 매우 방대하여 어려움이 따르는 것도 사실이다.

따라서, 본 해설에서는 물리탐사 및 지구물리 분야에 종사하는 실무자들이 많이 접하는 좌표 체계 및 지도 투영의 이해에 필요한 지식을 요약, 제공하고자 하였다. 지구 좌표계를 구성하는 여러 요소에 대한 기본 개념을 소개하고 좌표계 간의 좌표 변환, 수치 지도나 수치 지질도 등에 이용되는 직각 좌표 투영에 대한 설명을 추가하여 우리나라뿐만 아니라 다른 여러 지역에서 수행하는 물리탐사 실무에서 좌표 체계를 더 잘 이해하고 사용할 수 있도록 하였다.

지구 좌표계 이해를 위한 기초

지구 타원체(Earth Ellipsoid)

지구 위의 한 지점의 정확한 위치 혹은 두 지점 간의 거리, 방향 등에 대한 정보를 알기 위해서는 지구를 대상으로 일관성 있는 좌표계를 설정하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 가장 먼저 지구의 모양이나 크기와 같은 기하학적 정보가 필요하게 된다. 만약 지구가 완전한 구이고, 표면도 매끈하고, 자전도 하지 않고, 매질도 균질 하다면 지구에서의 좌표계는 매우 간단한 문제가 되었을 것이다. 왜냐하면, 이러한 불가능한 가정이 성립된다면 지구를 대상으로 수학적으로 간단한 구 좌표계(spherical coordinate)를 사용하면 되었을 것이고, 지구 중력도 균일하게 작용하고 지표면에 수직인 방향은 항상 지구 중심을 향했을 것이기 때문이다. 그러나, 우리가 살고 있는 지구는 매끈한 표면으로 이루어진 것이 아니라, 표면에는 바다도 있고 산도 있으며 지구는 자전을 하면서 태양 주위로 공전하고 있는 운동체이다. 또한 지구는 자전에 의해 적도 반지름이 극 반지름보다 약간 큰, 완전한 구가 아닌 타원체이며 무게 중심은 내부 매질의 비균질성 때문에 기하학적인 중심과 차이가 있다. 위에서의 ‘만약에’라는 전제하에 설정한 가설들은 전혀 성립하지 않게 되며, 기하학적이고 물리학적인 지구 형상에 관한 연구들이 측지학 분야에서 많은 이루어져 왔다(Torge, 1993).

따라서, 완전한 구가 아닌 지구를 가장 잘 표현할 수 있는 수학적, 기하학적, 물리학적으로 타당한 이상적인 모델이 필요하게 되는데, 지구의 형체를 수학적인 모델로 형상화한 것을 지구 타원체(Earth Ellipsoid) 혹은 기준 타원체(Reference Ellipsoid) 또는 준거 타원체라 한다.

지구 타원체는 일반적으로 타원체의 긴 축 길이와 짧은 축 길이, 편평도 상수(flattening: f)나 이의 역수(Inverse Flattening), 그리고 이심률(eccentricity: e)로 표현된다. Fig. 1에서와 같이 긴 축 길이(적도 반지름) a 와 짧은 축 길이(극 반지름) b

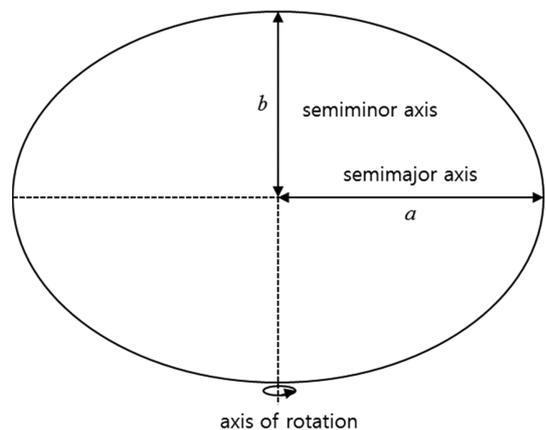


Fig. 1. Earth ellipsoid with semi-major axis of length a , and semi-minor axis of length b .

를 갖는 타원체에 대하여 yz 평면에서의 단면은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있으며

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \tag{1}$$

지구 타원체는 이 평면 타원을 짧은 축인 z 축을 중심으로 회전하여 얻은 것과 같다(Torge, 1993).

$$\frac{x^2+y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \tag{2}$$

이때 편평도(flattening) 상수란

$$f = \frac{a-b}{a} \tag{3}$$

로 정의되며 1차 이심률(first eccentricity)은 다음과 같이 정의된다.

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \tag{4}$$

식 (3), (4)와 같이 긴 축과 짧은 축이 같은 완전한 구의 경우 편평도 상수(f)와 이심률(e)은 0이 됨을 알 수 있다. 또한 이심률(e), 편평도 상수(f), 긴 축(a)과 짧은 축(b)은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$e^2 = 2f - f^2 \tag{5}$$

$$b = a(1-f) \tag{6}$$

이러한 타원체는 오랜 연구에 걸쳐 측지학적으로 또는 지구 물리학적 면에서 다양한 목적과 방법으로 여러 모델들이 제안되었으며 Table 1과 같이 여러 타원체가 제안되었다(Li and Götze, 2001). Table 1에는 측지학에서 많이 사용되는 대표적인 지구 타원체의 적도 반지름 및 극 반지름, 편평도 상수의 역수를 나타낸 표이다. 이 표의 값들은 MATLAB® Mapping Toolbox의 referenceEllipsoid 함수(Mathworks, 2016)를 이용하거나 공개된 지리 정보 소프트웨어 라이브러리인 GeographicLib

(Karney, 2016)를 이용하면 쉽게 알 수 있으며 지구 타원체의 다른 매개 변수도 알 수 있다. 여기서 중요한 것은 경도나 위도도 지구 타원체의 종류에 따라 달라지므로 위도와 경도를 말할 때는 반드시 기준되는 지구 타원체가 설정되어 있어야 한다는 점이다.

대원, 자오선, 평행권, 항정선

대원(great circle) 혹은 대권이란 일반적으로 구면 위 두 점과 구의 중심을 지나는 평면이 구면과 만나서 생기는 선으로 정의된다(Torge, 1993). 지구의 북극과 남극의 두 점을 잇는 대원을 생각할 수 있는데 이 대원의 반을 자오선(meridian)이라 한다. 이 정의에 의하면 자오선은 무수히 많게 되는데 이 중 그리니치(Greenwich) 천문대를 지나는 자오선을 본초 자오선(Prime Meridian)이라고 한다. 대원은 항상 지구 타원체를 반으로 나누게 되며 대원에는 모든 자오선 뿐만 아니라 적도도 포함된다. 평행권(Parallels)이란 적도면과 평행한 면들이 지구 타원체와 만나는 선으로 정의되며 모든 자오선과 평행권은 서로 직교하게 된다. 적도를 제외한 평행권은 대원은 아니며, 자오선은 경도, 평행권은 위도를 정의하는 데에 이용된다(Torge, 1993).

대원과 평행권은 다음과 같은 성질은 갖는다. 평면 위에서의 직선은 두 가지 중요한 특징을 갖는데 첫째는 평면 상의 직선은 두 점을 잇는 최단 거리이며, 둘째는 두 평행선과 이 두 점을 잇는 직선의 경사는 항상 일정하다는 것이다. 그러나, 구면 혹은 타원체면 상에서 두 점을 잇는 선은 두 가지 특징 중 한 가지만을 만족하게 되는데, 즉 최단 거리가 되기 위해서는 평행한 두 선과 동일한 각으로 만나지 않거나, 동일한 각으로 만나면 이 선은 최단 거리가 될 수 없다는 것이다(Mathworks, 2016). 대원(혹은 대권)은 지구 표면 상의 두 지점 사이의 최단 거리가 되는 것으로 항공기 대권 항로(Great Circle Route)

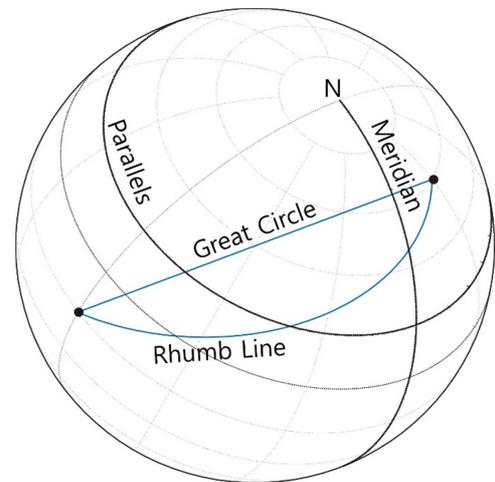


Fig. 2. Diagram representing meridian, parallels, great circle, and rhumb line, which are essential for understanding 3D geodetic coordinate system.

Table 1. List of some Earth ellipsoids and their geometric parameters.

Name	Semi-major Axis (a) Equatorial axis (m)	Semi-minor Axis (b) Polar axis (m)	Inverse Flattening (1/f)
Airy 1830	6377563.396	6356256.909	299.325
Bessel 1841	6377397.155	6356078.963	299.153
Clarke 1880	6378249.145	6356514.869	293.465
International 1924	6378388.000	6356911.946	297.000
Krasovsky 1940	6378245.000	6356863.019	298.300
GRS 1980	6378137.000	6356752.314	298.257
WGS 1984	6378137.000	6356752.314	298.257
Sphere (6371 km)	6371000.000	6371000.000	(Infinity)

라는 용어로 이미 익숙한 용어가 되었다. 또한 자오선에 일정한 각도로 만나는 직선의 의미인 항정선(rhumb lines)은 방향 설정의 용이성 때문에 예로부터 자오선에 일정한 각도로 운항 하도록 배의 항해에 이용되었지만 이는 가장 짧은 거리는 아닌 특징이 있다(Bennett, 1996). 자주 접하는 Mercator 도법으로 그려진 세계 지도에서 두 지점 사이를 운행하는 비행기의 가장 짧은 항로가 직선이 아니라 곡선으로 표시되는 것을 보면 쉽게 이해가 갈 것이다(Fig. 2).

지오이드와 높이

지오이드(Geoid)란 평균 해수면 높이(MSL: Mean Sea Level)에 가장 가깝게 근사하는 중력 등포텐셜면(gravitational equipotential surface)으로 정의된다(Li and Götze, 2001; Torge, 1993). 즉, 지구 주위로 중력에 의한 위치에너지, 즉 중력 포텐셜 값이 같은 점들을 연결한 가상의 면들을 상정할 수 있는데, 그 중에 지구 표면의 평균적인 해수면과 가장 유사하게 표현되는 면이 지오이드라는 것이다. 따라서 정의에 의해 지오이드면을 따라서는 중력 포텐셜이 모두 같은 값을 갖기 때문에 같은 높이를 갖는 “수평 방향”이 정해지고 이 지오이드 표면과 직교하는 방향인 “수직 방향”은 물체가 아래로 떨어지는 방향인 중력 방향이 되는 것이다. 따라서 지오이드는 해양에서는 평균 해수면과 대체적으로 일치하게 될 것이며, 육지에서는 정밀한 중력 측정과 계산을 통해서 해수면을 기준점으로 중력 등포텐셜면을 내륙으로 연장하여 구하게 된다(Torge, 1993). 다만, 이 정의에는 회전하는 지구에 대하여 해수와 대기가 평형 상태로서 해수면이 정지되어 있거나 또는 바람, 조류, 파도 등도 없이 오직 지구는 공전 및 자전 운동을 하는 회전체라는 가정이 숨겨져 있다. 여기서 또 하나 주의할 점은 지오이드란 실제 지구가 갖고 있는 불규칙한 지표의 높이를 형상화한다는 의미가 아니라 광범위한 중력 측정 및 이론적인 계산을 통하여 구할 수 있는 가상의 중력 포텐셜 등가면이라는 점이다.

실제 지오이드, 즉 평균 해수면과 일치하는 중력 등포텐셜면을 연결하면 어떤 모습이며, 또한 지오이드를 어떻게 표현하는지 Fig. 3에 나타내었다. 지오이드를 표현하는 하나의 방법은 지구 모습의 수학적 모델인 지구 타원체와 비교하여 얼마만큼 차이를 보이는가로 나타내거나, 이론적인 중력 값, 즉 균일한 물질로 이루어져 있는 지구 타원체(ellipsoid)의 위치에 따른 이론적인 중력 값과의 차이로 나타내고 있다(Li and Götze, 2001). 전 지구적으로 지오이드를 구하기 위하여 개발된 지구 중력 모델이 EGM (Earth Gravity Model)이며 EGM96에 이어 EGM2008까지 발표되었다(NGA, 2013). 광역적으로는 지구 타원체와 같이 부드럽지만 국지적으로는 굴곡 있는 모습처럼 보이는데 WGS84 지구 타원체에 대하여 Fig. 3과 같이 +85 m에서 -107 m 정도의 차이를 갖는 불규칙한 면으로 되어 있다. 그러나, 이 지오이드 면의 굴곡도 지구 표면의 높이와 비교하여 보면 가장 높다는 약 8,000 m의 높이의 에베레스트 산

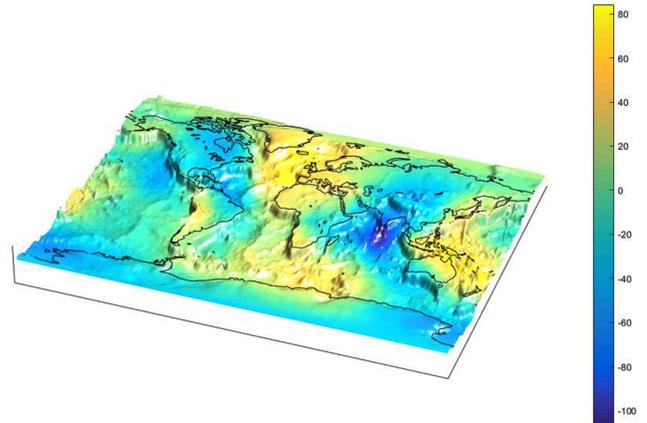


Fig. 3. Plot of Geoid Model, EGM96, on a world map.

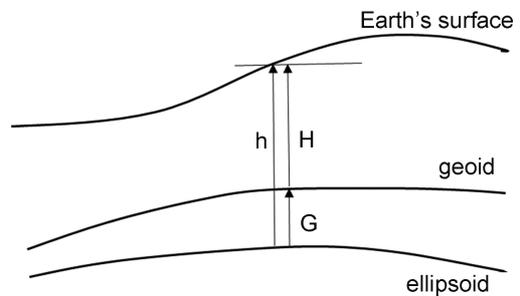


Fig. 4. Relations among topography of earth surface, geoid height, and ellipsoid height. Modified after Li and Götze (2001).

(Mount Everest)이나 11,000 m의 깊이를 갖는 마리아나 해구(Mariana Trench)의 깊이 차이보다는 훨씬 부드러운 면이다(Bezděk and Sebera, 2013).

한편, 높이 H 는 타원체 높이(ellipsoid height) h , 지오이드 높이(geoid height) G 와 식 (7)과 같은 관계를 가지며, Fig. 4와 같이 지역적인 지오이드를 알면 타원체 높이로부터 계산할 수 있다(Li and Götze, 2001). 우리나라에 적용할 수 있는 상세한 지오이드 모델로는 국토지리정보원에서 제공되는 KNGEOID가 있는데, GNSS 정지 측량과 합성 지오이드 모델을 이용한 GNSS 높이 측량을 실시할 경우에는 3 cm 정확도로 결정할 수 있다고 한다(NGII, 2016a). 또한 국립지리정보원에서 각 GPS 수신기에 맞는 포맷으로 제공하고 있으므로(NGII, 2016a) 물리탐사 실무에서도 높이를 정확히 구하기 위해서는 반드시 지오이드를 반영하여야 한다.

$$H = h - G \tag{7}$$

**3차원 지리 좌표계
(3-D geographic coordinate system)**

3차원 평면 직각 좌표계

한 지점의 위치를 유일하게 표시하기 위해서는 합리적으로

설정된 좌표계가 필요한데 가장 먼저 생각할 수 있는 것은 지구 중심을 원점으로 하는 3차원 직각 좌표계다. 이의 하나로 ‘지구 중심 지구 고정 3차원 직각 좌표계’(Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) Cartesian Coordinate System)를 들 수 있는데, 이는 지구 중심을 원점으로 하고 좌표축이 지구에 고정되어 자전하는 지구와 함께 회전한다고 가정한 좌표계이다. 이 중 하나가 국제천문연합(IAU)과 국제측지/지구물리연합(IUGG)에서 공동으로 설립한 IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Services)에서 제시한 지구 중심 좌표계인 국제 지구 기준 좌표계(ITRF: International Terrestrial Reference Frame)로서, 이는 지구 중심의 3차원 직교 좌표계로 자전 속도 및 조석 변위와 같은 지구의 순간 변화까지 고려하여 결정되고 정기적으로 수정, 보완되는 좌표계이다(Vondrák and Richter, 2004).

이 좌표계는 적도면(XY 평면)과 본초 자오선(Prime Meridian)이 만나는 점과 지구 중심을 잇는 직선을 X 축으로 하고, 지구 중심과 북극을 잇는 적도면에 수직인 직선을 Z 축으로 잡는 것이 일반적이다. 현재 우리나라의 지구 중심 좌표계는 ITRF2000을 사용하고 있다. 국립지리원에서 관리하는 GNSS 기준점 중의 하나인 세종 기준점(SEJN)은 경위도(GRS80 타원체 기준 측지 좌표) 및 타원체 높이 좌표가 위도 36°31' 19.9682", 경도 127°18' 11.4836, 타원체 높이 181.196 m로서 ITRF2000 X, Y, Z 좌표는 (-3,110,081.533, 4,082,094.098, 3,775,023.595)이 된다(NGII, 2016b). 그러나, 이 좌표 체계는 숫자의 크기가 너무 크고 북쪽 방향 혹은 중력 방향과는 무관하여 서로 다른 데이터를 사용한 경위도 변환 과정에 이용되거나, 혹은 지구 전체를 다루는 경우가 아니라면 일반적으로 사용하기에는 불편하다.

경도, 위도, 타원체 높이 좌표계

오래 전부터 위치를 표시하는 전통적인 방법은 앞에서 설명한 지심 직각 좌표계보다 경도, 위도로 표현하는 방법을 많이 사용하여 왔다. 측지 좌표계 혹은 지리 좌표계는 지구 타원체를 기준으로 측지점의 위치를 경도, 위도, 타원체 높이로 표현하는 방법이다. 경도와 위도는 이미 우리 생활 속에서 널리 쓰이고 있어 매우 익숙한 용어이지만 보다 엄밀한 정의를 살펴보고자 한다.

경도(longitude; 이하 λ 로 표기)란 특정한 자오선, 일반적으로는 본초 자오선으로부터 어떤 지점을 지나는 자오선까지 지구 타원체의 단축을 중심으로 회전할 때 이루는 동쪽 혹은 서쪽 각으로 정의한다(Torge, 1993). 본초 자오선의 경도를 0°, 이외는 정반대 쪽으로 대체로 낱짜 변경선 근처를 지나는 자오선이 180°가 되는 것이다(실제 낱짜 변경선은 180° 자오선과 완전히 일치하지는 않고 근처 국가들의 편의성에 의해 조정이 있음). 잘 알다시피 우리 나라는 경도 125°E ~ 132°E 사이에 있다.

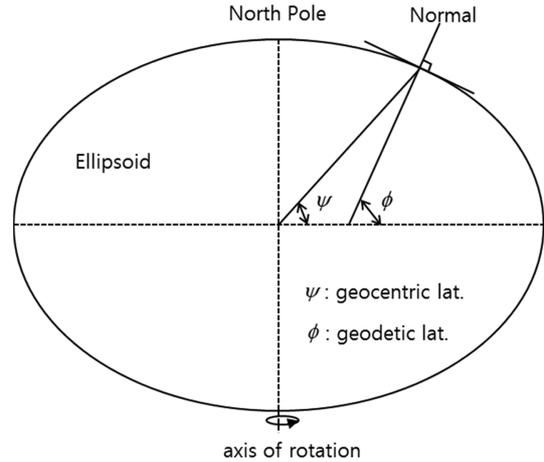


Fig. 5. Definition of geodetic latitude and geocentric latitude.

앞에서와 살펴본 경도의 정의가 비교적 간단한 개념인 반면에 위도의 정의는 전 지구적 측지체계가 도입되기 전후로 달라졌다고 볼 수 있다. Fig. 5와 같이 전통적으로 위도는 한 지점에서 기준 타원체 면과 수직인 직선, 즉 법선이 타원체의 적도면과 이루는 각으로 정의된다. 이 정의에서 추론할 수 있듯이 기준 타원체가 달라지면 각 타원체의 긴 축의 길이, 짧은 축의 길이, 이심률의 차이로 인하여 동일한 지점이라 하여도 위도는 다르게 나타난다. 특히, 여기서 주의할 것은 지구를 완전한 구가 아닌 타원체로 가정하는 경우 그림과 같이 적도와 극 지점을 제외하고는 이 직선은 지구 타원체의 중심을 통과하지 않고 지구 타원체의 중심과 약간 편차를 갖는다는 점이다. 그러나, GPS와 같이 GNSS가 위치 측정에 본격적으로 사용되면서 지구 중심을 기준으로 하는 전 지구적인 위치 체계가 도입되면서 앞의 정의와 다르게 지표면의 한 점과 타원체의 중심을 잇는 선이 적도면과 이루는 각으로 정의되게 된다. 일반적으로 구별을 위하여 전자는 측지 위도(geodetic latitude; 이하 ϕ 로 표기), 후자는 지심 위도(geocentric latitude; 이하 ψ 로 표기)라 하며, 측지 위도를 사용하는 좌표계를 측지 좌표계(Geodetic coordinate system), 지심 위도를 사용하는 좌표계를 지심 좌표계(Geocentric coordinate system)라 한다(Fukushima, 1999).

지심 위도와 측지 위도는 그 값에 있어 매우 다른데 동일한

Table 2. Differences between geodetic and geocentric latitude.

Geodetic Latitude	Geocentric Latitude	Difference
5°	4.9667°	0.0333°
15°	14.9041°	0.0959°
30°	29.8336°	0.1664°
45°	44.8076°	0.1924°
60°	59.8331°	0.1669°
75°	74.9035°	0.0965°
85°	84.9665°	0.0335°

지구 타원체를 사용한다 하여도 지오이드 면에 수직인 법선이 지구 중심을 지나지 않기 때문이다. 이를 알아보기 위하여 다음의 Table 2에 나타내었는데 두 위도 간의 차이는 대체로 45° 중위도 지방에서 가장 크고 극과 적도에서는 두 값이 같다. 이 정도 수치의 차이는 적절한 위도로 표시하지 않으면 대략 6371 km의 반지름을 갖는 완전한 구인 지구라고 가정하면 지표면에서 3 ~ 21 km 정도의 차이를 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어 앞의 예에서 GPS로 측정된 동일한 지점 SEJN의 측지 위도는 36°31' 19.9682"인데 이를 지심 위도로 나타내면 36°20' 18.0056"가 된다. MATLAB® Mapping Toolbox에서는 geocentricLatitude, geocentric2geodeticLat, geodetic2geocentricLat와 같은 함수가 구현되어 있고, GeographicLib에서는 geocent_fwd, geocent_inv 함수가 있어 측지 위도와 지심 위도 좌표를 상호 변환할 수 있다.

3차원 좌표계들 사이의 변환

측지 좌표 체계는 역사적으로 국가 별, 지역 별로 설정되어 사용되었으며, 그 지역 내에서는 큰 불편 없이 사용되어 왔다. 그러나, 위성 측지 기술의 발전으로 전 지구적인 측량이 가능해짐에 따라 각 지역 별로 얻어진 측량 성과를 가능한 한 통일치와 오차 없이 매끄럽게 연결이 되도록 변환하려는 많은 노력이 시도되어 왔다(Oh, 2015). 물리탐사 실무에서도 여러 목적에 따라 좌표 변환이 필요한 경우를 접하게 되는데 가장 많이 쓰이는 좌표 변환 과정의 개념을 소개하고 이에 관련된 식을 제시하고자 한다.

측지 경위도 좌표와 지심 경위도 좌표

일반적인 측지에서 대부분 측지 위도를 사용하는데 필요한 곳에 따라서는 지심 위도를 사용하는 경우도 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 이 둘의 차이는 무시 못할 차이이므로 주의를 기울여야 한다. 측지 좌표계 경위도를 지심 좌표계 경위도로 상호 변환하는 경우 두 좌표계의 지구 타원체의 종류 및 중심이 일치한다면 측지점에서 지구 타원체 면의 법선 방향의 높이인 타원체 높이(h)와 경도(λ)는 동일하고, 측지 위도(ϕ)와 지심 위도(ψ)는 다음과 같은 관계를 가진다(Torge, 1993).

$$\tan \psi = \left(1 - e^2 \frac{N(\phi)}{N(\phi) + h}\right) \tan \phi \quad (8)$$

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}} \quad (9)$$

여기서 N 은 P 지점에서의 묘유선(卯酉線, 동서방향의 의미)의 곡률 반지름(radius of curvature in the prime vertical), e 는 이심률이다. 여기서 묘유선(prime vertical)이란 법선을 포함하면서 자오면(meridian plane)과 수직인 면이 지구 타원체와 만나는 선이다(Torge, 1993). 한편, 자오선(子午線; 남북방향의 의

미)의 곡률 반지름은 다음과 같다.

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \phi)^{3/2}} \quad (10)$$

측지 좌표계(경도, 위도, 타원체 높이)와 지심 직각 좌표계(X, Y, Z)의 상호 변환

앞에서 설명한 바와 같이 지심 평면 직각 좌표계는 ‘지구 중심 지구 고정(ECEF) 좌표계’와 이를 채택한 ITRF 계열의 좌표계인데, 이와 같은 ECEF 좌표계는 서로 다른 측지 경위도 좌표계 간의 상호 변환 과정에서 중간 계산 값으로 이용되기도 한다. 측지 좌표계의 지구 타원체의 중심과 지심 좌표계의 중심이 일치하는 경우 3차원 (X, Y, Z) 좌표를 일정한 지구 타원체를 기준으로 한 경도, 측지 위도, 그리고 타원체 높이로 좌표 변환 관계식은 다음과 같다(Civicioglu, 2012).

지구 위의 한 지점 P의 경도, 측지 위도, 타원체 높이를 $P(\lambda, \phi, h)$ 라 할 때 지심 직각 좌표는

$$X = (N + h) \cos \phi \cos \lambda \quad (11)$$

$$Y = (N + h) \cos \phi \sin \lambda \quad (12)$$

$$Z = (N(1 - e^2) + h) \sin \phi \quad (13)$$

이 되며, 이와 반대로 지구 중심 직각 좌표계로부터 경위도를 구하는 공식은 다음과 같다. 경도는 비교적 간단히

$$\lambda = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (14)$$

가 되며, 위도는 다음과 같은 위도 방정식(latitude equation) (Fukushima, 1999)

$$(\sqrt{X^2 + Y^2}) \sin \phi - Z \cos \phi = e^2 N(\phi) \sin \phi \cos \phi \quad (15)$$

을 풀면 다음과 같이

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \left(1 - e^2 \frac{N(\phi)}{N(\phi) + h} \right)^{-1} \right) \quad (16)$$

이 되고 타원체 높이 h 는

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{\cos \phi} - N \quad (17)$$

이 된다(Fukushima, 1999; Torge, 1993). 식 의 해는 단순하게는 풀리지 않고 수치적인 방법은 측지학에서 많은 연구가 이루어져 있으므로 자세한 사항은 Civicioglu (2012), Fukushima (1999), Fukushima (2006), Jones (2002)을 참조하기 바란다.

3차원 직각 좌표계의 회전 및 이동 변환

3차원 직각 좌표계의 회전 이동에 관한 관계식은 다음과 같이 표시된다. 이 좌표 변환은 좌표계 축의 회전 및 이동에 따

라 동일한 점에 대하여 새로운 좌표계에서의 좌표를 구하는 과정이다.

2차원 평면에서 좌표축의 회전 변환을 3차원 좌표계로 확장하면 X 축, Y 축, Z 축 중심으로 좌표계가 회전하는 행렬은 각각 다음과 같다(Grafarend and Krumm, 2014; Trge, 1993).

$$\mathbf{R}_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega_X & \sin\omega_X \\ 0 & -\sin\omega_X & \cos\omega_X \end{pmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{R}_Y = \begin{pmatrix} \cos\omega_Y & 0 & \sin\omega_Y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\omega_Y & 0 & \cos\omega_Y \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{R}_Z = \begin{pmatrix} \cos\omega_Z & \sin\omega_Z & 0 \\ -\sin\omega_Z & \cos\omega_Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

이때 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 은 각각 X 축, Y 축, Z 축 중심으로 좌표계를 회전한 각을 의미한다. 좌표계 1에서의 점 P의 좌표가 \mathbf{P}_1 일때, 만약 좌표계를 X 축, Y 축, Z 축을 중심으로 순차적으로 회전하고 $\Delta\mathbf{P}$ 만큼 좌표축 이동이 있을 때 새로운 좌표계 2에서의 좌표가 \mathbf{P}_2 라면 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 $\Delta\mathbf{P}$ 는 좌표계 2에서 좌표계 1로 가는 이동량이다.

$$\mathbf{P}_2 = (\mathbf{R}_Z\mathbf{R}_Y\mathbf{R}_X)\mathbf{P}_1 + \Delta\mathbf{P} \quad (21)$$

여기서, $\mathbf{P}_2 = (X_2, Y_2, Z_2)^T$, $\mathbf{P}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)^T$, $\Delta\mathbf{P} = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$ 이다.

회전된 좌표축이 원래 좌표축에 비해 축척 계수 s 의 비율로 변한다면, 식 (21)은

$$\mathbf{P}_2 = s(\mathbf{R}_Z\mathbf{R}_Y\mathbf{R}_X)\mathbf{P}_1 + \Delta\mathbf{P} \quad (22)$$

가 된다.

좌표 변환의 Bursa-Wolf 변환 모델과 Molodensky-Badekas 변환 모델

좌표 변환의 Bursa-Wolf 모델과 Molodensky-Badekas 모델은 식 (22)에 기반을 둔 좌표 변환 방법으로 회전 행렬에서 회전각이 매우 작고 축척 계수의 변화량도 매우 작다는 가정에서 출발한다. 즉 하나의 데이텀에서 다른 데이텀으로 좌표 변환을 좌표축의 회전과 타원체 중심의 평행 이동량 등의 과정으로 설정한 것이다. 식 (18) ~ 식 (20)에서 좌표축의 좌표 변환, 회전량 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 가 매우 작을 때 $\sin\omega \approx \omega, \cos\omega \approx 1, \sin\omega_i\sin\omega_j \approx 0$ 이 성립되어 회전 행렬은 다음과 같다(Deakin, 2006).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_Z\mathbf{R}_Y\mathbf{R}_X = \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix} \quad (23)$$

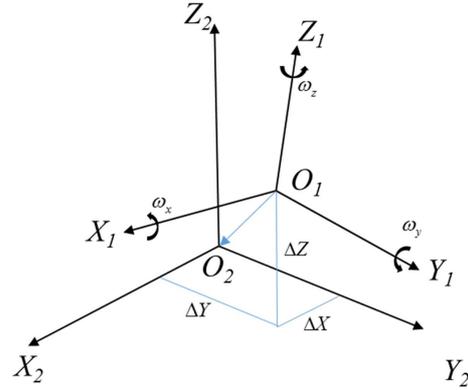


Fig. 6. Geometry of Bursa-Wolf transformation. Redrawn after Deakin (2006).

또한, 축척 계수를 $s = 1 + ds$ 라 할 때 ds 는 매우 작은 값으로 보통 ppm (parts per million) 단위로 나타낸다.

따라서, Fig. 6과 같이 Bursa-Wolf 모델을 이용한 좌표 변환 모델과 그 역 변환 모델은 다음과 같다(Deakin, 2006).

$$\mathbf{P}_2 = \Delta\mathbf{P} + (1+ds) \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix} \mathbf{P}_1 \quad (24)$$

$$\mathbf{P}_1 = \frac{1}{(1+ds)} \begin{pmatrix} 1 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 1 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 1 \end{pmatrix} (\mathbf{P}_1 - \Delta\mathbf{P}) \quad (25)$$

따라서, 위의 모델을 이용하여 측량에서 얻어진 기준점들을 대상으로 최소자승법 등을 이용해 원점 이동량 $\Delta\mathbf{P}$ (좌표계 2에서 좌표계 1로 가는 평행이동이다)의 3성분과 각 회전량 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 과 축척 계수 ds 등 7개의 매개 변수를 구하여 변환에 이용한다.

한편, Molodensky-Badekas 모델은 Fig. 7과 같이 좌표계 1의 무게 중심 좌표 3개를 도입하여 총 10 개의 매개 변수를

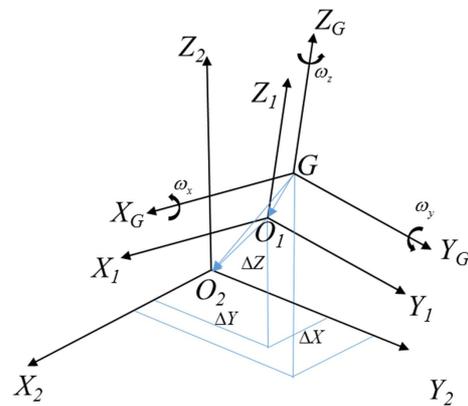


Fig. 7. Geometry of Molodensky-Badekas transformation. Redrawn after Deakin (2006).

변환에 이용한 것이다.

$$(\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_G) = \Delta\mathbf{P} + (1+ds) \begin{pmatrix} 1 & \omega_Z & -\omega_Y \\ -\omega_Z & 1 & \omega_X \\ \omega_Y & -\omega_X & 1 \end{pmatrix} (\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_G) \quad (26)$$

여기서, $\mathbf{P}_G = (X_G, Y_G, Z_G)^T$ 좌표계 1에서 무게 중심의 좌표이다. 흔히, 7 매개변수 방법, 10 매개변수 방법은 위와 같이 두 방법을 각각 지칭한다(Deakin, 2006).

지도 투영과 투영된 좌표계: 3차원에서 2차원으로

지도 투영(map projection)

지도란 지구 상의 위치와 형상을 일정한 축척과 형식으로 평면 상에 표현한 것으로, 지도 투영(map projection)은 곡면인 3차원적 지구를 2차원적 평면에 일정한 방법으로 표현하는 변환 기법을 의미한다(Illiffe, 2000). 많은 과학적인 지도 투영법들은 16 ~ 19 세기에 발표되고 20 세기에 많은 발전이 있었다(Snyder, 1989). 그 중 Gerardus Mercator에 의해 고안된 Mercator

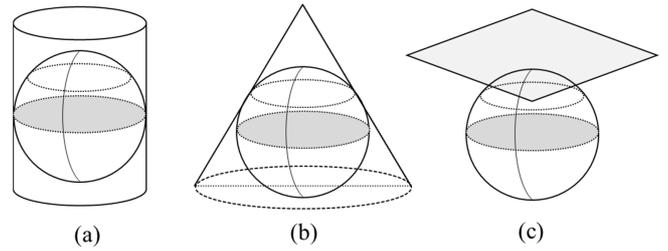


Fig. 8. Projection methods according to the shape of projection plane. (a) Cylindrical Projection, (b) Conic Projection, and (c) Azimuthal Projection.

투영법에 기초한 Transverse Mercator (TM) 투영 기법이 지도 제작에 많이 쓰여 왔으며 우리나라의 지형도, 지질도 등 많은 지도들도 이 투영법에 기반한 것이다. 우리가 흔히 어떤 지도가 TM (Transverse Mercator) 좌표계로 표시되었다고 하는 것도 엄밀하게는 TM 투영 방법을 이용하여 3차원 경위도 좌표를 2차원 평면 직각 좌표계로 투영 변환하여 표시한 지도라는 의미로 생각할 수 있다(Grafarend and Krümm, 2014; Snyder, 1989).

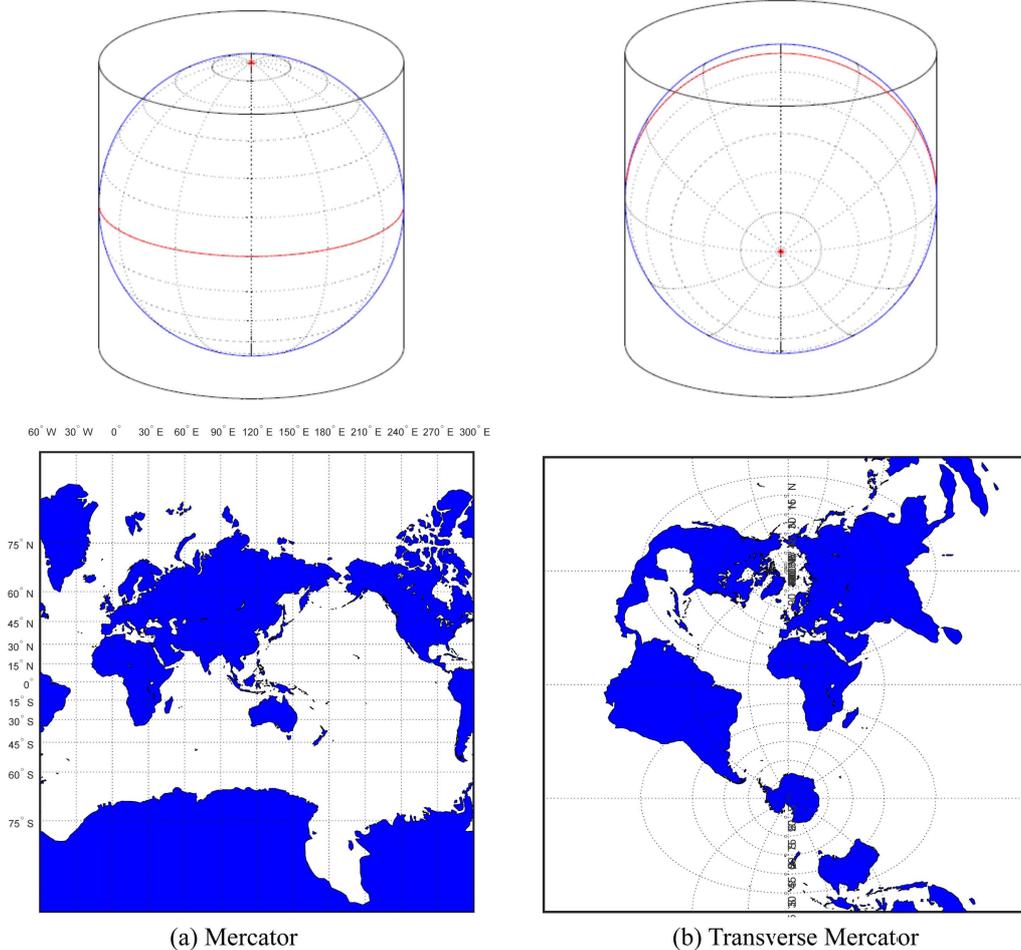


Fig. 9. World map generated using (a) Mercator Projection, and (b) Transverse Mercator Projections.

일반적으로 지도 투영(map projection)에서 기본 요소는 거리, 방향, 그리고 면적이다. 즉, 투영 과정에서 상대적인 거리가 유지되는지, 각도가 유지되는지, 그리고 면적이 제대로 유지되는지가 중요한 관점이 되는데, 각각 등거리 도법, 등각 도법, 등적 도법이라 하며, 목적에 따라 더 적합한 투영법을 선택한다(Snyder, 1989). 또한 3차원 타원체를 투영하는 투영면의 종류에 따라 Fig. 8과 같이 원통 투영(Cylindrical Projection), 원추 투영(Conic Projection), 방위 투영(Azimuthal Projection)으로 나눌 수 있으며, 투영면의 경사에 따라 정축법, 이를 90도 회전한 면에 투영하는 횡축법, 그리고 일반적인 각도의 경사진 투영면을 이용하는 사축법 등이 있다(Grafarend and Krumm, 2014). 그러나 여기서 중요한 것은 모든 요소를 다 만족시키는 투영법은 없다는 점이다. 우리가 잘 알고 있는 Mercator 투영은 정축 등각 원통 도법에 속하며, TM 도법, 그리고 UTM (Universal Transverse Mercator) 도법은 횡축 등각 원통 도법에 속한다. 이름에서 알 수 있듯이 이 지도 투영법에서 두 지점의 직선은 자오선에 대한 각도가 일정한 항정선으로 이러한 지도는 예로부터 항해에 많이 이용되었다.

TM 투영

경위도 좌표를 TM 투영에 의해 2차원 평면 좌표계로 변환되는 것에 대해 알아보기 위하여 투영 원점이 다른 두 지도를 Fig. 9에 표기하였다. Fig. 9의 (a)와 (b)는 Mercator 도법으로 투영된 세계 지도이며, 자오선과 적도 면이 만나는 경위도 (0, 0) 지점을 중심으로 TM (Transverse Mercator) 도법으로 투영되어 작성된 지도이다. 자세한 투영에 관한 수학적 원리는 Grafarend and Krumm (2014)을 참조하기 바란다.

Fig. 9에서와 같이 자오선과 평행권이 지도상에 어떻게 투영되어 표현되는지 알 수 있는데, Mercator 도법으로 작성된 지도는 적도에서 중위도 부근까지는 모든 경도에 대해 실제 지구 위의 모양과 매우 비슷하게 표현하고 있지만 극지방으로 갈수록 왜곡이 심하여 남극 대륙이 매우 크게 확장 왜곡되어 나타나 있음을 볼 수 있다. 또한, TM 도법에서는 중심 경도인 본초 자오선을 중심으로 일정 구간이 위도에 따라 비교적 왜곡이 적은 구간이 있으나 이를 벗어난 지역에서는 중심 경도에서 멀어질수록 왜곡이 심하게 나타남을 볼 수 있다.

UTM 좌표계

TM 투영 기법을 이용하여 투영 원점의 옮겨서 투영을 한다면 일정 구간 내에 있는 각 지역을 중심으로 비교적 왜곡이 덜한 좌표계를 얻을 수 있는데 이를 기반으로 중심 경도를 바꾸면서 투영한 좌표계가 UTM (Universal Transverse Mercator) 좌표계이다(Janssen, 2009).

UTM 좌표계는 북위 84°에서 남위 80° 정도까지 거의 모든 지구 표면에 걸쳐서 TM 법으로 투영시켜 설정된 좌표계로서 경도에 따라 전 지구 표면을 60개의 구역으로 나누어 설정되

어 있다. 따라서 각 구역은 6° 간격으로 되어 있으며 날짜 변경선에 가장 근접한 경도인 180°W에서 6° 간격으로 1번 (180°W ~ 174°W)부터 60번까지 구역 번호가 붙여져 있다. 한편 위도상으로는 위도 80°S부터 72°N까지 8°간격으로, 나머지 72° ~ 84°N까지는 12° 간격을 갖는 구역으로 되어 있다. 명칭은 남쪽에서 북쪽으로 중간에 I, O를 제외한 C, D, ..., X까지 설정되어 있고 적도부근이 N이다(Janssen, 2009). UTM 좌표계의 각 구역(zone)은 중심 경도와 적도에서 False Easting (FE)은 500,000 m, 북반구에서 False Northing (FN)은 0 m, 남반구에서는 1,000,000 m로 정하고 있다. 위도 84°N 이상부터 북극까지와 위도 80°S부터 남극까지는 UPS (Universal Polar Stereographic) 좌표계를 사용하는데, UPS에서는 FN과 FE 두 개 모두 2,000,000 m이다.

예를 들어 우리나라는 '51S', '51T', '52S', '52T'에 걸쳐 있으며 대부분이 '52S'에 속한다. 이 구역은 위도 32° ~ 40°N, 경도 126° ~ 132°E로 되어 있으며 중앙자오선의 경도는 129°E이다. 이 좌표계에서 경위도 좌표가 (38°, 129°) 지점의 UTM 좌표는 (500,000, 4094,872.4)이 된다. TM 도법은 투영 원점을 옮길 수가 있는데 Fig. 10과 같이 우리나라 내의 경도 127°30'E, 위도 38°N를 중심으로 TM 도법으로 투영하여 나타내면 비교적 우리나라를 중심으로는 왜곡이 적고 우리나라와 상대적으로 멀리 있는 유럽과 아프리카 지역은 왜곡이 큰 지도를 얻게 된다. 참고로 우리나라에서 내에서 UTM 좌표계와의 호환을 위하여 설정한 UTM-K 좌표계는 경도 127°30'E, 위도 38°N를 투영 원점으로 하고 축척 계수 0.9996이며, 이 지점의 X (FN)는 2,000,000 m, Y (FE)는 1,000,000 m로 부여하여 설정된 좌표계이다.

한편 위와 같이 경위도 좌표가 (λ , ϕ)인 지점의 TM 투영에 의해 투영된 직각 좌표는 다음에 설명하는 변환 식에 의해 얻

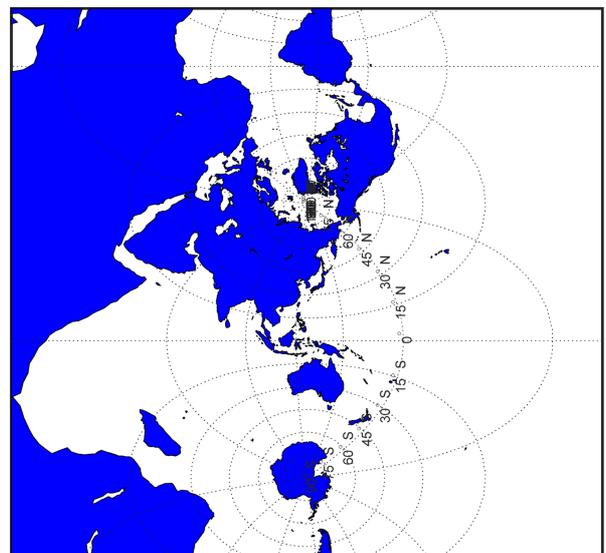


Fig. 10. Korea Map drawn using TM projection with projection origin at (38°N, 127°30'E).

어진다(LINZ, 2016). 보다 엄밀한 수학적 유도 과정은 Grafarend and Krumm (2014)을 참조하기 바람이며 여기서는 결과 식만을 소개한다. λ_0, ϕ_0 는 각각 투영 원점의 경위도이며, X_0, Y_0 는 투영 원점의 가산 값이고 투영 좌표 X 는 북쪽, Y 는 동쪽 방향 좌표이라 할 때 변환 식은 다음과 같다(LINZ, 2016).

$$X = X_0 + k_0(m - m_0 + T_1 + T_2 + T_3 + T_4) \quad (27)$$

$$Y = Y_0 + k_0 N \Delta \lambda \cos \phi (1 + S_1 + S_2 + S_3) \quad (28)$$

여기서 k_0 는 중앙 자오선의 축척 계수(Central meridian scale factor)이며

$$m = a(A_0 \phi - A_2 \sin 2\phi + A_4 \sin 4\phi - A_6 \sin 6\phi) \quad (29)$$

$$m_0 = m(\phi_0) \quad (30)$$

이고 각 계수는

$$A_0 = 1 - \left(\frac{e^2}{4}\right) - \left(\frac{3e^4}{64}\right) - \left(\frac{5e^6}{256}\right) \quad (31)$$

$$A_2 = \frac{3}{8} \left(e^2 + \frac{e^4}{4} + \frac{15e^6}{128}\right) \quad (32)$$

$$A_4 = \frac{15}{256} \left(e^4 + \frac{3e^6}{4}\right) \quad (33)$$

$$A_6 = \frac{35e^6}{3072} \quad (34)$$

이다.

식 (27) 괄호 안의 계수는

$$T_1 = \frac{\Delta \lambda^2}{2} N \sin \phi \cos \phi \quad (35)$$

$$T_2 = \frac{\Delta \lambda^4}{24} N \sin \phi \cos^3 \phi (4\tau^2 + \tau - t^2) \quad (36)$$

$$T_3 = \frac{\Delta \lambda^6}{720} N \sin \phi \cos^5 \phi \left(8\tau^4(11-24t^2) - 28\tau^3(1-6t^2) + \tau^2(1-32t^2) - \tau(2t^2) + t^4 \right) \quad (37)$$

$$T_4 = \frac{\Delta \lambda^8}{40320} N \sin \phi \cos^7 \phi (1385 - 3111t^2 + 543t^4 - t^6) \quad (38)$$

이다.

또한 식 (28) 괄호 안의 계수는

$$S_1 = \frac{\Delta \lambda^2}{6} \cos^2 \phi (\tau - t^2) \quad (39)$$

$$S_2 = \frac{\Delta \lambda^4}{120} \cos^4 \phi (4\tau^3(1-6t^2) + \tau^2(1+8t^2) - \tau^2 t^2 + t^4) \quad (40)$$

$$S_3 = \frac{\Delta \lambda^6}{5040} \cos^6 \phi (61 - 479t^2 + 179t^4 - t^6) \quad (41)$$

로써, $\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0$, $t = \tan \phi$ 이고, τ 는 식 (9), (10)에 있는 묘유

선과 자오선의 곡률 반지름의 비, 즉, $\tau = N/M$ 이다.

TM 좌표로부터 경위도를 계산하는 수식은 다음과 같다(LINZ, 2016).

$$\phi = \phi' - U_1 + U_2 - U_3 + U_4 \quad (42)$$

$$\lambda = \lambda_0 + V_1 - V_2 + V_3 - V_4 \quad (43)$$

$$\begin{aligned} \phi' = \sigma + \left(\frac{3n}{2} - \frac{27n^3}{32}\right) \sin 2\sigma + \left(\frac{21n^2}{16} - \frac{55n^4}{32}\right) \sin 4\sigma \\ + \left(\frac{151n^3}{96}\right) \sin 6\sigma + \left(\frac{1097n^4}{512}\right) \sin 8\sigma \end{aligned} \quad (44)$$

가 되고, 여기서

$$\sigma = \frac{m' \pi}{180G} \quad (45)$$

이다. 또한, $n = (a - b)/(a + b)$, $\Delta X = X - X_0$, $\Delta Y = Y - Y_0$ 일 때

$$G = a(1-n)(1-n^2) \left(1 + \frac{9n^2}{4} + \frac{225n^4}{64}\right) \left(\frac{\pi}{180}\right) \quad (46)$$

$$m' = m_0 + \frac{\Delta X}{k_0} \quad (47)$$

이다.

또한 식 (42)의 나머지 항들은

$$U_1 = \frac{t' \Delta X x}{k_0 M' 2} \quad (48)$$

$$U_2 = \frac{t' \Delta X x^3}{k_0 M' 24} (-4\tau^2 + 9\tau(1-t'^2) + 12t'^2) \quad (49)$$

$$U_3 = \frac{t' \Delta X x^5}{k_0 M' 720} \left(4\tau^4(11-24t'^2) - 12\tau^3(21-71t'^2) + 15\tau^2(15-98t'^2+15t'^4) + 180\tau(5t'^2-4t'^4) + 360t'^4 \right) \quad (50)$$

$$U_4 = \frac{t' \Delta X x^7}{k_0 M' 40320} (1385 + 3633t'^2 + 4095t'^4 + 1575t'^6) \quad (51)$$

이 되는데, M', N', τ, t' 는 $\phi = \phi'$ 일 때 M, N, τ, t 의 값이며, $x = \Delta Y/k_0 N$ 이다.

또한, 식 (43)을 구하기 위한 계수는 다음과 같다(LINZ, 2016).

$$V_1 = x \sec \phi' \quad (52)$$

$$V_2 = \frac{x^3 \sec \phi'}{6} (\tau + 2t'^2) \quad (53)$$

$$V_3 = \frac{x^5 \sec \phi'}{120} (-4\tau^3(1-6t'^2) + \tau^2(9-68t'^2) + 72\tau t'^2 + 24t'^4) \quad (54)$$

$$V_4 = \frac{x^7 \sec \phi'}{5040} (61 + 662t'^2 + 1320t'^4 + 720t'^6) \quad (55)$$

측지 데이텀과 국지적 지역 좌표계

측지 데이텀(geodetic datum)은 좌표계를 이루는 모든 기준 정보의 집합을 뜻한다고 볼 수 있다. 위치를 나타내기 위해서는 좌표계에서 사용되는 지구 타원체의 긴 축 길이와 편평률, 지구 타원체 중심과 지구 무게 중심과의 상대적 위치 등에 대한 정보도 필요하고, 지역적인 좌표계 원점의 위치에 관한 정보도 필요하며, 측량의 시작점이 되는 측지 기준점에 대한 정보도 필요한데 측지 데이텀은 이 모든 것을 통칭하는 것이라 생각할 수 있다. 데이텀은 대체로 수평 측량의 기준이 되는 수평 데이텀과 높이 측량의 기준이 되는 수직 데이텀으로 나누어 볼 수 있다(Dana, 1999).

국지적 지역 측지 좌표계는 그 지역에 가장 잘 맞도록 설정되어 통용되는 좌표계로 지역 측지 좌표계를 설정하기 위해서 지역 측지 데이텀을 설정하여야 한다. 일반적으로 전 지구적 측지 기준계가 도입되기 전 지역 측지 데이텀에서는 Fig. 11과 같이 지역적인 지오이드를 가장 잘 표현하도록 측지 원점을 설정하여 좌표계를 사용하여 왔는데 지역적인 좌표계에서 지구 타원체의 중심은 실제 지구의 무게 중심과 일치되지 않는 경우도 많았고 타원체의 단축과 지구 자전축이 일치되지 않는 경우도 있어 지구물리학적 타당성이 미흡하기도 했다. 또한 같은 지구 타원체를 이용하였어도 어느 지역을 중심으로 지오이드 면에 적합하였는가에 따라 서로 다른 지역 측지 데이텀을 적용한 좌표는 다르게 나타나기도 하였다. 한 측지 데이텀에서 표현한 같은 값의 경위도 좌표도 어떤 측지 데이텀을 사용하느냐에 따라 실제 그 위치와 큰 차이를 나타낼 수 있다. 따라

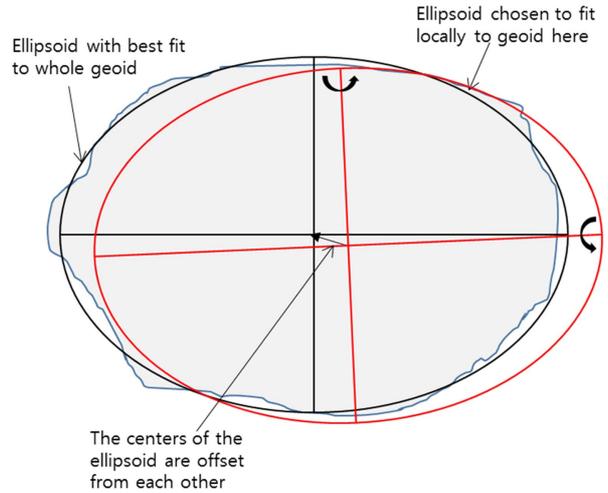


Fig. 11. Schematic diagram of local datum with ellipsoid chosen to fit geoid locally, and world geodetic datum with ellipsoid chosen to fit whole geoid. The center of the ellipsoid are offset from each other. Redrawn based on Janssen (2009).

서, 한 지역에서 하나의 데이텀으로 위치 측정을 하는 경우 인접한 지역에서 다른 데이텀에 의해 계산된 좌표들은 연속적이지 않고 호환되지 않아, 이를 광역적으로 통합하여 더 큰 영역에서 적용될 수 있는 데이텀을 설정하기도 하였다.

그러나, GPS 사용이 본격화되면서 한 지역에서만 유효한 것이 아닌 지구 중심의 지구 전체에 유효한 세계 측지계가 필요해지게 되었다. 따라서 실제 지구의 무게 중심과 타원체의 중심이 일치되고 타원체의 짧은 축이 지구 자전축과 일치하는

Table 3. Summary of Korea Geodetic Systems: Korean 1985 and ITRF 2000 datums.

Geodetic Reference System	Korea Geodetic Systems based on Korea 1985 Datum	Korea Geodetic Systems based on ITRF 2000 Datum
Earth Ellipsoid	Bessel 1841 Rotating Ellipsoid Radius of Major Axis: 6,377,397.155 m Flattening: 1 / 299.152812800	GRS 1980 Rotating Ellipsoid Radius of Major Axis: 6,378,137.000 m Flattening: 1 / 298.257222101
Datum	Korean 1985 Datum (Tokyo D Datum)	ITRF 2000 Datum
Projected Coordinate	TM(Transverse Mercator)	TM(Transverse Mercator)
Projection Origin	Western Zone: 125° 10.405" E, 38° N Central Zone: 127° 10.405" E, 38° N Eastern Zone: 129° 10.405" E, 38° N East Sea: 131° 10.405" E, 38° N * The values of 10.405" are added in the longitude of origin to correct the errors of position of old reference points.	Western Zone: 125° E, 38° N Central Zone: 127° E, 38° N Eastern Zone: 129° E, 38° N East Sea: 131° E, 38° N
False Northing False Easting	False Northing(X): 500,000 m False Easting(Y): 200,000 m (For Jeju Island, False Northing equals 550,000)	False Northing(X): 600,000 m False Easting(Y): 200,000 m (*amended on 2015.6.1) For some land registration map, False Northing(X) could be allowed to be 500,000. (For Jeju Island, False Northing equals 550,000).
Scale Factor of central meridian	1.0000	1.0000

지구 전체를 대상으로 유효한 타원체를 정의하고 이에 기반한 세계 측지 좌표 체계를 사용하게 되었으며, 이에 따라 지역 측지 데이터도 세계 측지계와 호환이 되도록 발전되었다. 우리나라의 측지 체계를 예로 들면 2002년 이전의 측지 좌표의 기준 타원체로 Bessel 1841 기준 타원체를 사용한 한국 적용 동경 데이터를 사용하였으며, 2002년 세계 측지계를 기반으로 한 측지 기준계를 도입하면서 GRS80 타원체에 기반한 ITRF2000 데이터를 사용하는 세계 측지계에 기반한 측지 데이터를 쓰게 된다(Table 3 참조). 그 밖에 호주에서는 AGD66 대신 GDA94 (Geocentric Datum of Australia 1994), 미국도 NAD27 (North American Datum 27) 대신 NAD83으로 전환하였다(Janssen, 2009).

우리나라의 측지 데이터, 측지 좌표계, 좌표 변환

우리나라의 과거 좌표 체계는 Table 3과 같이 Bessel 타원체를 채택하고 천문관측에 의해 결정된 경위도 원점의 경도, 위도, 원방위각을 기준으로 구축되었다. 측량의 원점이 일본의 도쿄를 참조하여 동경(東京) 측지계라고 불리다가 1985년 한국 측지계로 명명하게 되었으며, 1910년대 이래로 거의 100여년간 사용되었다. 그러나, 우리나라도 세계 측지계 도입의 필요성으로 2003년 세계 측지계 사용을 법률로 정하고 이후 기존 한국 측지계와 병행 사용 기간을 거친 후 2010년부터 세계 측지계 사용이 의무화되었다(Oh, 2015).

현재 우리나라의 측지 좌표계는 “공간정보의 구축 및 관리 등에 관한 법률”(NSDI, 2016)에 명시되어 있다. 그 내용을 보면 위치는 세계 측지계에 따라 측정한 지리학적 경위도와 높이로 표시하며, 다만, 지도 제작 등을 위하여 필요한 경우에는 직각 좌표와 높이, 극 좌표와 높이, 지구 중심 직교 좌표 및 그 밖의 다른 좌표로 표시할 수 있다고 명시되어 있다. 또한 같은 법 시행령에 회전 타원체의 긴 축의 반지름은 6,378,137 m이

Table 4. (a) The parameters for converting coordinates between previous and current Korea Geodetic System, and (b) X, Y, Z coordinates of the centroid for Moldensky-Badekas conversion model suggested by NGII (2003).

(a) The value of parameters for Moldensky-Badekas suggested by NGII (2003)

parameters	translations(m) ΔP			rotations (")			scale factor (ppm)
	ΔX	ΔY	ΔZ	ω_x	ω_y	ω_z	ds
value	-145.907	505.034	685.756	-1.162	2.347	1.592	6.342

(b) The value of P_G for Moldensky-Badekas suggested by NGII (2003)

parameters	centroid P_G	
	Bessel based => GRS80 based	GRS80 based => Bessel based
X_G	-3,159,521.31	-3,159,666.86
Y_G	4,068,151.32	4,068,655.70
Z_G	3,748,113.85	3,748,799.65

고 편평률은 298.257222101분의 1이며 회전 타원체의 중심이 지구의 질량 중심과 일치하고 회전 타원체의 짧은 축이 지구의 자전축과 일치한다고 명시하여 GRS80 타원체 사용을 공식화하였다. 또한 대한민국 경위도 원점의 위치(동경 127°03' 14.8913", 북위 37°16' 33.3659", 국토지리정보원 내)와 원방위각(3°17' 32.195"), 수준 원점의 위치(인하공업전문대학 내)와 수치(인천만 평균 해수면 상의 높이로부터 26.6871 m)도 규정되어 있다(NSDI, 2016).

한편, 직각 좌표 투영법으로 앞에서 설명한 TM (Transverse Mercator) 투영법을 사용하고 원점의 좌표를(0,0)으로 하며 각 투영 원점의 자오선을 X 축, 이에 따른 동쪽 방향을 Y 축으로 하여 북쪽 및 동쪽으로 증가(+)하도록 되어 있으며, 투영 원점에 가산값을 부여하도록 되어 있는데, 2015년에 개정되어 투영 원점 북쪽 방향 X 가산값은 600,000 m, 동쪽방향(Y) 가산값은 200,000 m로 정하였다(Table 3). 앞에서 예로 든 세종 기준점(SEJN)은 투영 기준은 중부 원점이며 평면 직각 좌표로는 X = 436,034.219 m, Y = 227,155.391 m이 된다(NGII, 2016b).

한국 측지 좌표계에서 세계 좌표계로 변환을 하는 경우 Fig. 12에 나타난 것과 같이 여러 단계의 좌표 변환 과정을 거친다. 이 때 사용되는 식은 앞에서 설명한 경위도 좌표와 지심 직각 좌표 간의 변환식 (식 (11) ~ 식 (17)), TM 투영 관계식(식 (27) ~ 식 (55)), 그리고 두 지심 좌표계 간의 Molodensky-Bakedas 변환식(식 (26))이다. 한국 측지계 좌표계 변환을 위해 Molodensky-Badekas 변환에서의 식 (25)와 식 (26)의 매개 변수 값은 여러 연구에 의해 개발되어 국립지리원에서 고시하였는데 1/5,000 미만의 축척의 지도 변환에 사용되며(Table 4), 국지적으로 가장 적합한 계수는 지속적으로 측지 연구자들에 의해 발표되고 있다(Kwon *et al.*, 2005; Yang, 2014).

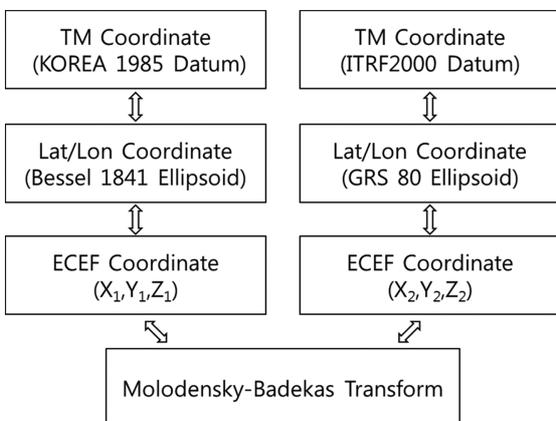


Fig. 12. Flow chart for conversion of coordinates from local geodetic datum to world geodetic datum. Redrawn based on “Geographic coordinate conversion” in Wiki (2016) (https://en.wikipedia.org/wiki/Geographic_coordinate_conversion).

요 약

본 해설에서는 물리탐사 및 지구물리 분야에 종사하는 실무자들을 위하여 지구 좌표계를 구성하는 여러 요소에 대한 개념을 소개하고 좌표계 간의 좌표 변환, 수치 지도나 수치 지질도 등에 이용되는 투영 좌표계에 대하여 설명하였다. 경도, 위도에 대한 개념을 엄밀히 살펴 보았으며, 특히, 지구 좌표계를 이루고 있는 지구 타원체(Earth Ellipsoid), 지오이드와 높이에 대해 구체적으로 설명하였다. 또한, 지심 직각 좌표, 3차원 경위도 좌표계를 설명하고 두 좌표계 간의 변환 관계를 소개하였고 데이터 변환에 필요한 기본 공식들을 소개하였다. 지역 좌표계로 많이 쓰이는 지도 투영인 TM법과 투영 좌표계에 대해 자세히 설명하였다. 마지막으로 우리나라 측지 좌표계에 대하여 요약하여 물리탐사 실무에서 좌표 체계를 더 잘 이해하고 사용할 수 있도록 하여 변환 작업 등의 실무에 도움이 될 수 있도록 하였다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 “고온고압 조건하 심부 지열특성 평가기술 개발(16-3411)” 과제의 일부로 수행되었으며 이에 감사 드립니다. 또한 심사 과정에서 논문의 세세한 부분까지 조언을 주신 익명의 심사위원들께도 감사 드립니다.

References

- Bennett, G. G., 1996, Practical rhumb line calculations on the spheroid, *Journal of Navigation*, **49**, 112-119.
- Bezděk, A. and Sebera, J., 2013, Matlab script for 3D visualizing geodata on a rotating globe, *Computers & Geosciences*, **56**, 127-130.
- Civicioglu, P., 2012, Transforming geocentric cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm, *Computers & Geosciences*, **46**, 229-247.
- Dana, P. H., 1999, Geodetic Datum Overview, http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/datum/datum_f.html (2016.10.23 Accessed).
- Deakin, R., 2006, A Note on the Bursa-Wolf and Molodensky-Badekas Transformations, <https://www.researchgate.net/publication/228757515> (2016.10 Accessed).
- Fukushima, T., 1999, Fast transform from geocentric to geodetic coordinates, *Journal of Geodesy*, **73**, 603-610.
- Fukushima, T., 2006, Transformation from cartesian to geodetic coordinates accelerated by Halley's method, *Journal of Geodesy*, **79**, 689-693.
- Grafarend, E. W. and Krumm, F. W., 2014, *Map projections*, Springer.
- Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Wasle, E., 2008, *GNSS – global navigation satellite systems : GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Wien New York.
- Liffé, J., 2000, *Datums and map projections for remote sensing, GIS, and surveying*, CRC Press.
- Janssen, V., 2009, Understanding coordinate systems, datums and transformations in Australia, *The Surveying & Spatial Sciences Institute Biennial International Conference, Surveying & Spatial Sciences Institute*, 697-715.
- Jones, C. G., 2002, New solutions for the geodetic coordinate transformation, *Journal of Geodesy*, **76**, 437-446.
- Karney, C. F. F., 2016, GeographicLib.
- Kwon, J. H., Bae, T.-S., Choi, Y.-S., Lee, D.-C., and Lee, Y.-W., 2005, Geodetic datum transformation to the global geocentric datum for seas and islands around Korea, *Geosciences Journal*, **9**, 353-361.
- Lee, S. K., Lee, T. J., Uchida, T., Park, I. H., Rawling, T., Cull, J., and Song, Y., 2013, Magnetotelluric measurements along a reflection seismic profile: reprocessing and reinterpretation of MT data for crustal-scale electric resistivity structure in central Victoria, Australia, *Geosciences Journal*, **17**, 289-299.
- Li, X. and Götze, H. J., 2001, Ellipsoid, geoid, gravity, geodesy, and geophysics, *Geophysics*, **66**, 1660-1668.
- Lim, M., Park, Y., Jung, H., Shin, Y., and Rim, H., 2016, The role of position and attitude measurement in geoscience, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineering*, **53**, 293-302.
- LINZ, 2016, *Transverse Mercator Transformation Formulae*, Land Information New Zealand.
- Mathworks, 2016, *MATLAB Mapping Toolbox User's Guide*, Mathworks Inc.
- NGA, 2013, WGS 84 Earth Gravitational Model <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/index.html> (2016.10.23 Accessed).
- NGII Geoid Service, 2016a, <http://map.ngii.go.kr/ms/mesrInfo/geoidIntro.do> (2016.10 Accessed).
- NGII GNSS Data Service, 2016b, http://gnss.ngii.go.kr/gps/basePointInfoPop?rinex_nam=SEJN (2016.10 Accessed).
- NSDI, 2016, Terminology Dictionary of Spatial Information System <http://www.nsd.go.kr/?menu=2755> (2016.10.23 Accessed).
- Oh, H.-J., 2015, The coordinate transformation of digital geological map in accordance with the world geodetic system (A case study of Chungju and Hwanggang-ri sheets using ArcToolbox), *Econ. Environ. Geol.*, **48**, 537-543.
- Snyder, J. P., 1989, *Album of map projections*, United States Geological Survey, 262 p.
- Torge, W., 1993, *Geodesy* 3rd Ed., Walter de Gruyter.
- Vondrák, J. and Richter, B., 2004, International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) web: www.iers.org, *Journal of Geodesy*, **77**, 585-678.
- Yang, C. S., 2014, Development of the process of coordinate transformation of local datum cadastral map to the world geodetic system - using adjusted coordinate, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, **32**, 401-412.