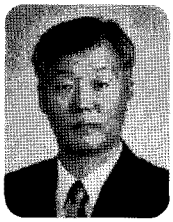
새로운 국가 측지기준계의 도입과 문제점

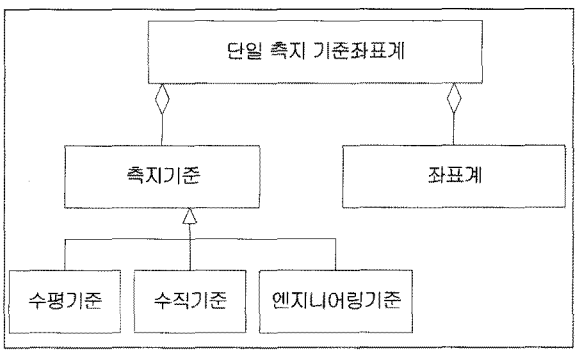


윤홍식
성균관대학교 사회환경시스템공학과 부교수
yhs@geo.skku.ac.kr

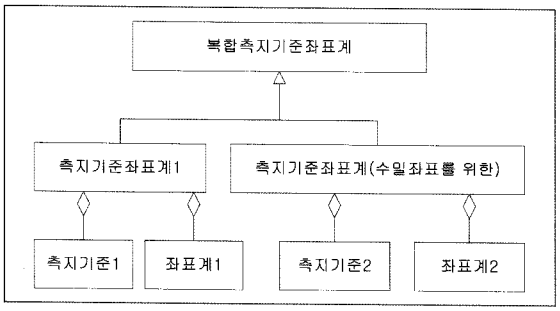
1. 서 론

지구는 그 표면이 산과 바다로 구성되어 있는 매우 복잡한 형상으로서 그 지리적인 특성을 지도화하기 위해서는 지형적인 불규칙성을 기록할 수 있는 공간적인 기준계가 필요하다. 이러한 공간적인 기준계는 사용하기 쉽고 간단하여야 하며, 지물들의 위치를 명확하게 표시할 수 있는 측지학적인 기준과 좌표계 등이 포함되어야 하며, 직관적으로 사용할 수 있도록 물리적인 세계와 관련되어야 한다. 즉, 측지기준 좌표계(Geodetic Reference Coordinate System)는 지구상의 諸点의 위치를 결정하기 위한 측지기준(Geodetic Datum), 좌표에 대한 해설, 좌표계 (Coordinate System), 데이터의 처리방법과 국제적으로 채택된 상수값 및 투영법을 포함하는 "완전한 기준계"이다.

측지기준 좌표계는 일련의 좌표값들로써 구현되며, 이와 같이 구현된 기준좌표계를 기준골격 (Reference Frame)이라고 한다. 이 측지기준 좌표계는 단일 기준좌표계와 복합 기준 좌표계로 나뉘며, 단일 측지기준 좌표계는 〈그림 1〉에 표시한 바와 같이 하나의 측지기준과 하나의 좌표계로써 정의되며, 복합 측지기준 좌표계는 〈그림 2〉에 표시한 바와 같이 2개 이상의 측지기준과 좌표계로써 정의된다.



〈그림 1〉 단일 측지기준 좌표계

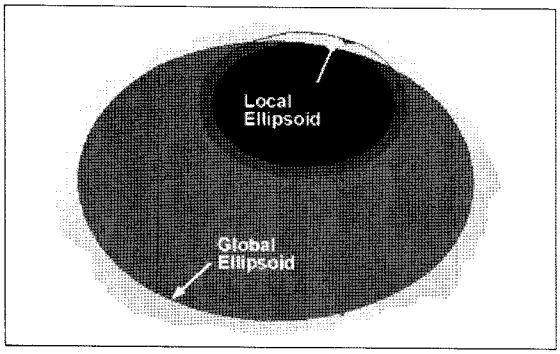


〈그림 2〉 복합 측지기준 좌표계

2. 수평측지기준(Horizontal Geodetic Datum)

지구표면을 지도화하기 위하여 필요한 기준모델을 일반적으로 측지기준이라고 하는데 측지기준은 "지도상에 지표면상의 위치를 표현하거나 계산하기 위하여 필요한 파라미터들 즉, 지구의 형상으로 표현되는 수학적인 지구모델인 기준타원체의 크기와 좌표계의 원점과 방향을 표시하는 파라미터들"로 정의할 수 있다.

측지기준은 수학적인 개념이므로 어떤 지역을 포괄하는 무한한 수의 기준면들을 정의하는 것이 이론적으로 가능하다. 이상적으로는 모든 데이터가 공통된 좌표계를 기준하도록 한 국가나 지역에서 1개의 측지기준을 사용하여야 하나 실질적으로는 기술적 또는 정치적인 이유로 2개 이상의 측지기준을 사용하는 경우가 있다. 예로써 기존의 지도제작을 위해 사용되고 있는 지역적인 측지기준(〈그림 3〉의 청색)과 최근들어 위성항법을 위해 도입되는 새로운 지심 측지기준 (〈그림 3〉의 적색)을 들 수 있다. 따라서 2개의 측지기준 상에서 각각 정의된 측점의 위도, 경도 및 표고좌표는 분명히 다르며, 이러한 차이가 발생하는 원인으로는 타원체의 형상이 다양하고, 타원체의 중심이 수 백 미터 정도로 차이가 나며, 두 기준면의 3차원 직각좌표축들이 평행하지 않거나 축척이 다르기 때문이다.



〈그림 3〉 지역적인 측지기준과 지심 측지기준

이러한 측지기준은 지구의 물리학적인 특성에 따라서 2가지 형태로 고려할 수 있는데 모든 위치들이 고정되어 있거나 시간에 따라서 변화하지 않는다고 가정한 "정적인 측지기준 (Static Datum)"과 위치들의 좌표가 시간의 함수로서 변화는 것을 표현하기 위하여 도입된 "동적인 측지기준" (Dynamic Datum)이다. 정적인 측지기준은 지구의 표면이 지각운동으로 인하여 지속적으로 변하고 있기 때문에 부정확한 가정이다.

사용목적에 따라서는 수평, 수직 및 엔지니어링 기준으로 분류되며, 수평기준 (Horizontal Datum)은 좌표계와 지구와의 관계를 설정하기 위하여 타원체로서 2차원 또는 3차원 좌표계를 위한 기준으로서 사용되며, 수직기준(Vertical Datum)은 지오이드(Geoid: 평균해수면에 가장 부합하는 면)라고 하는 면과 중력학적인 관계가 있는 표고와의 관계를 설정하기 위하여 사용된다. ISO/DIS 19111 국제표준에 의하면 수평기준이나 수직기준이외의 기준들을 엔지니어링기준이라고 정의하고 있다.

또한, 지역에 따라서는 지역적인 측지기준(Local Geodetic Datum)과 지심측지기준(Geocentric Datum)으로 분류되는데 지역적인 측지기준은 평균해수면의 특정 부분의 크기와 형상에 최적합하게 부합시킨 타원체와 그 위치 및 방향에 의하여 정의되는 것으로서 타원체의 중심이 지구의 질량중심과는 일치하지 않는다. 최근까지도 대부분의 국가에서는 공간정보시스템을 이 지역적인 측지기준에 기준하고 있다.

지심측지 기준은 전반적으로 지구의 크기와 형상에 최적합하게 부합하도록 설정한 기준으로서 타원체의 중심이 지구의 질량중심과 일치하며, 지구상의 특정부분과 부합되도록 설정한 것은 아니다.

지역적인 측지기준을 설정하기 위해서는 해당 지역에 측지원점 (Origin Point)이라고 하는 특정한 한 점을 결정하여 기준타원체를 고정하고, 타원체의 장반경(a), 편평률(f), 위도(ϕ_0), 경도(λ_0), 방위각(A_0), 타원체고(h_0) 및 천문측량에 의해 결정되는 연직선편차의 수평성분(ξ_0)과 수직성분(η_0)의 8가지 측지기준 파라미터들에 의하여 설정된다. 그러나 지심측지기준은 측정지역에 적합한 타원체가 아닌 전 지구에 적합하도록 정의되었기 때문에 지역적인 측지원점에서 필요로 하는 8개의 파라미터가 필요치 않고, 장반경(a)과 편평률(f)만으로 설정된다. 이러한 측지기준들의 특성을 요약하면 다음과 같다.

(1) 측지기준은 지구의 크기와 형상을 단순화한 수학적인 표현이다.

(2) 일반적으로 단 반경축을 타원체가 회전한 구체를 취한다.

(3) 측지기준은 공간데이터를 포함하는 모든 활동분야에서 중요하다. 구체는 광범 위한 지역에서 측량을 수행하거나 항법계산을 수행하기 위한 수학적으로 간단한 면을 제공하며, 지도제작과 GIS의 기준이 되는 기준면을 제공한다.

(4) 구체의 표면은 지구의 해수면 (즉, 지오이드면)에 가장 잘 부합하도록 위치시켜야 하지만 해수면에 정확하게 부합시키는 것은 지구중력장의 이상으로 인하여 불가능하다. 해수면은 지구내부의 질량의 밀도와 분포변화로 인하여 발생하는 중력이상으로 인하여 불규칙하므로 지도제작을 위한 수평기준면으로는 부적합하다.

(5) 해면은 표고측정을 위한 기준면으로 광범위하게 사용되는데 지도상의 등고선은 보통 해수면상의 표고를 표시된다. 현재 세계적으로 활용되고 있는 대표적인 기준타원체와 파라미터는 표 1에 표시한 바와 같다.

지도를 제작하고자 하는 지역이 작은 경우에는 적절한 기준모델을 그림 4에 표시한 바와 같이 간단한

〈표 1〉 기준타원체의 파라미터

명칭	발표년도	장반경(a)	단반경(b)	채택한 국가
Everest	1831	6,377.276	6,356.075	인도, 스리랑카
Bessel	1841	6,377.397	6,356.079	한국, 일본, 독일
Clarke	1866	6,378.206	6,356.538	미국, 캐나다
Clarke(modified)	1880	6,378.249	6,356.515	프랑스
Hayford	1909	6,378.388	6,356.912	라틴계열국가
Krasovski	1944	6,378.245	6,356.863	러시아, 동구
IUGG	1967	6,378.160	6,356.775	호주
IUGG	1975	6,378.140	6,356.755	-
GRS80	1980	6,378.137	6,356.752	전 세계
WGS84[1)]	1984	6,378.137	6,356.752	전 세계

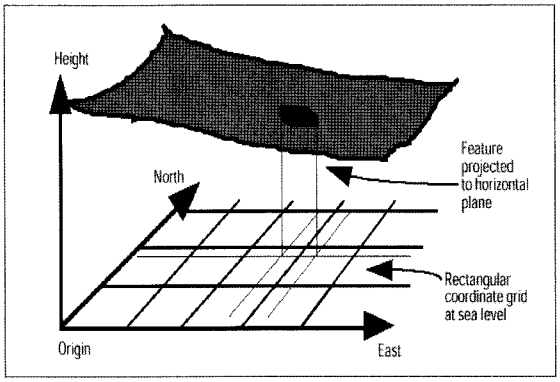
1) WGS84타원체는 GRS80타원체와 동일하나 미 국방성에서 GPS좌표계의 기준면으로 채용하면서 편평률 $f=a/(a-b)$의 계산에서 0.00001462의 차이를 두어 차별한 것이다.

3차원 좌표계로 제공할 수 있다. 이 때에 좌표계의 축들은 다음과 같이 정의된다.

- 수평축 (N과 E)의 방향은 북향과 동향으로 설정한다.
- 수평면은 물리적으로 동일한 면인 해수면과 일치하도록 정의한다.
- 표고(H)의 축은 수평면에 연직이고, 중력방향과 일치하도록 한다.

반면, 전 지구적인 지도제작이나 측지/지구물리학적인 연구 또는 정밀한 전 지구 위치결정 시스템을 개발하기 위해서 전 지구적인 최적타원체와 지구중심을 기준으로 하는 전 지구적인 측지기준계의 결정이 필요하다. 이를 위해 미국의 National Imagery and Mapping Agency (NIMA)에서는 World Geodetic System 1960 (WGS60)을 시초로 범 지구적인 측지기준계를 개발해 왔으며, WGS84 좌표계부터는 GPS위성의 운용과 함께 전 지구적인 위치결정 좌표계로서 사용하기 시작하였다 (AUSLIG, 1998).

GPS 측량을 위한 지구 기준좌표계로 채택된 WGS84[2] 는 1980년대 초에 개발된 것으로서 Transit위성을 이용한 Doppler측정방법에 의해 관측된 데이터들을 이용하여 좌표계를 설정하여 지구중심에 위치하는 좌표계의 지심에 1~2m의 지심오차가 존재하고 있는 좌표계이다. 이로 인하여 WGS84는 지각변동 조사연구, 정밀 측지측량 및 인공위성의 정밀궤도 계산을 위한 좌표계로는 부적합하여 IERS는 1990년부터 우주측지 기술인 SLR 이나 VLBI 기술을 이용하여 매년 지축의 회전을 계산하고, 이를 준거한 정밀한 지구좌표계를 계산하여 발표하고 있는데 이를 ITRF(IERS International Terrestrial Reference Frame)라고 한다(Boucher 등, 1996).



〈그림 4〉 지역적인 3차원 좌표계의 표현

2) WGS84는 미국의 DMA가 Dopple방식에 의한 위치결정을 위하여 개발한 것이나 GPS의 개발과 함께 GPS에 의한 위치결정에 사용되고 있다. 이 좌표계는 기존의 미 해군의 위성시스템인 NSWC9Z-2와 BIH 지상기준계를 수정하여 실현한 관용 지구좌표계로서 1994년과 1997년에 개량되어 현재는 IERS에서 개발한 ITRF와 거의 일치하고 있다. 이 관용 지구기준계는 최근에 DoD에서 수행하는 모든 지도와 해도제작 및 항법과 측지학 연구를 위한 토대를 형성하는 전 지구적인 모델과 정의들을 제공하고 있다.
WGS84는 당초에 지구 전역에 분포되어 있는 추적국들에서 관측한 정밀한 TRANSIT Doppler 관측치들을 사용하여 개발한 것으로서 추정 정확도가 1~2m인 전 지구적인 기준좌표계로 제공되었으며, Molodensky이론에 의한 기존의 측지기준면들과 WGS84간의 좌표변환 파라미터들이 5m의 정확도로 결정되어 제공되었다(DMA, 1987).
WGS84는 2회에 걸쳐서 개량되었는데 첫 번째는 DoD의 GPS 추적망을 구성하고 있는 관측점들의 수정된 좌표들을 사용하여 개량한 것으로서 WGS84(G730; GPS week number를 의미)라고 명명되었으며, 1994년 1월 2일부로 DMA의 GPS위성의 궤도계산에 적용되었다(Malys 등, 1994). Swift(1994)는 개량된 WGS84(G730)가 ITRF91과 10cm내에서 일치하는 것으로 추정하였다. 이처럼 개량된 WGS84 (G730)은 1994년 7월 29일부터 GPS 주 제어국(Master Control Station)에서 적용되었으며, 대부분의 GPS사용자들이 이러한 변화를 인식하지 못한 이유는 개략적인 항법위치를 필요로 하거나 Differential기법을 사용하여 변화량을 인식하지 못하였기 때문이다.
WGS84의 2차 개량은 IERS표준에 따라서 보다 정밀한 지심상수들과 GPS 운영제어국의 수정된 좌표값들을 이용하여 이루어졌으며, WGS84(G873)이라고 명명되어 1997년 1월 29일자로 적용되었다. 궤도력의 비교를 통하여 알 수 있는 것은 WGS84(G873)와 ITRF가 수십 센티미터 정도의 범위내에서 일치한다는 것이며, 17개 측지기준점들의 WGS84(G873)와 ITRF94좌표들을 비교한 결과 정확도 10cm (1σ) 범위내에서 일치하고, ITRF96과는 5cm (1σ)내에서 일치하는 것으로 나타났다 (Malys 등, 1997).

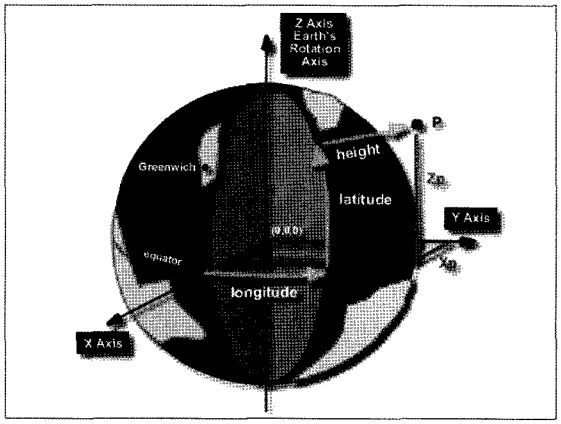
ITRF는 VLBI, LLR, SLR, GPS 및 DORIS와 같은 우주측지 기술의 관측결과로부터 구한 측점좌표들과 측점속도들을 결합하여 결정되며, 연간 결과는 IERS 연보와 기술보고서로 간행되고 있다. 최근의 전 지구적인 결과는 ITRF88, 89, 90, 91, 93, 94, 96 및 97이고, 2001년 3월에 ITRF2000이 발표되었다.

이 지구중심좌표계는 〈그림 5〉에 표시한 바와 같이 지구의 질량중심을 원점으로 하는 3차원 직각좌표계를 설정하게 되는데 이 좌표계는 좌표축의 명칭과 단위, 방향 및 결과로써 정의된다.

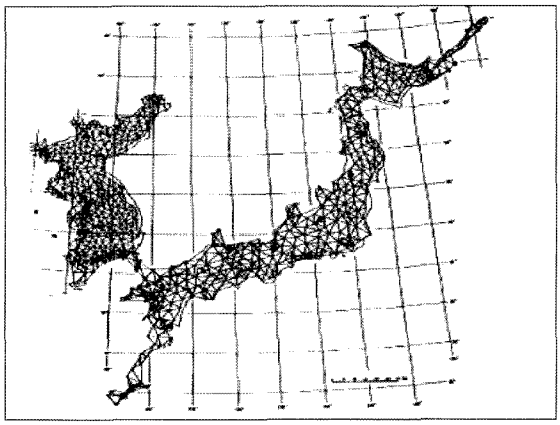
2.1 우리나라의 수평측지기준

우리나라에서 채택한 수평측지기준은 일본에 의하여 채택된 Bessel 1841 (장반경 a=6377397m, 단반경 b=6356079m)로써 좌표계의 원점 (Origin Point)은 동경의 구 동경 천문대내에 설치되어 있으며, 방향은 천문측량에 의하여 鹿野山 1등 삼각점의 방위각(156°25′28″.442)으로 고정하였다. 이 동경원점(Origin of Tokyo Datum)은 1881~1882년 기간에 미국의 해군장교 C. H. Davis와 J. A. Norris가 인도의 Madras-Singapore-St. James-상해-나가사끼-요코하마의 경도측량을 실시하여 요코하마의 경도차를 계산하였으며, 이 후 Norris는 이를 이용하여 나가사끼-동경에 대한 일련의 경도차를 계산하였다. 위도는 1876년 해군 관상대에서 천문위도 관측을 실시하여 1885년 일본 경위도 원점을 완성하여 1886년 2월에 공시하였다. 이 기준에 의하여 우리나라의 삼각측량 및 측지원점이 설정되었는데 일본은 1918년 9월에 그리니지-시베리아-우라지보스톡-동경의 경도차와 뉴욕-센프란시스코-하와이-괌도의 경도차의 평균치를 채택한 경도값을 발표함으로써 기 삼각점 성과표의 경도에 +10″.405를 가산할 것을 공시하였다. 1931년에는 기존 지형도의 도곽(Net line, boder)을 개정하는데 10″.405의 끝자리가 첨가된 것이 존재한다(국립지리원, 2003).

현재의 국립지리원에서 유지 · 관리하고 있는 우리나라의 기준점 성과는 1910년대에 일제에 의해 토지 및 조세제도의 확립을 기한다는 명목으로 실시된 "조선토지조사사업"의 성과를 근간으로 하고 있다. 그러나 현재의 실용성과들은 80여 년의 기간을 지나오면서 6 · 25동란과 지형의 변화로 약 85% 이상이 파손(전혀 손상을 입지 않은 정상점은 175점)되었다. 1960년대 경제개발계획의 추진에 따른 국토개발사업의 확장으로 대축척 지형도의 제작과



〈그림 5〉 기준타원체 상에 정의된 지심 3차원 직각좌표계

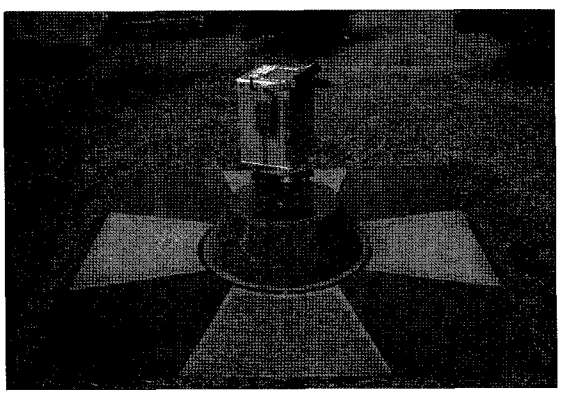

〈그림 6〉 일제시대에 구성된 한-일 삼각망

건설공사를 위한 기준점의 수요가 급증하게 되어 급속한 기준점의 복구사업이 실시되었으나 정확도 측면에서 많은 문제점을 발생시키고 있다. 이에 따라 국립지리원에서는 우리나라 삼각점 실용성과의 불균등과 모순을 제거하고, 보다 정확한 기준점성과를 확립, 제공하기 위하여 1975년부터 기존의 1, 2등 삼각점을 기초로 정밀1차 기준점 측량사업을, 1986년부터 3, 4등 삼각점을 기초로 하여 정밀2차 기준점 측량 사업을 실시하였다. 정밀 1차 측지망 사업은 전국에 걸쳐서 약 1,200여 점의 삼각점을 EDM장비와 GPS를 사용, 삼변측량을 실시하여 1994년에 완료하고, 최초로 정밀 1차 기준점망의 동시망 조정에 의한 동질성을 가진 국토의 기본 골격을 확보하게 되어 우주개발, 지구환경조사, 대축척 수치지도 제작, 지적재조사사업 및 공공측량의 새로운 정확도 기준을 제공하게 되었다(국립지리원, 2003).

최근 들어 인공위성을 이용한 GPS측량, 수치지도 제작, GIS기술 등 측량기술의 급속한 발전 및 정보통신망의 정비에 따라 일반사용자들이 언제, 어디서나, 고정밀도의 측량성과를 얻을 수 있는 동시에 종이지도로부터 수치지도의 시대를 맞이하여 측량성과의 고도화, 다양화가 급속하게 진전되고 있다. GPS(Global Positioning System)은 1973년 미 육군, 해군 및 공군의 협력사업으로 개발이 시작되어 1992년에 완료된 전천후 위치결정 시스템이다. GPS는 사용자에게 3차원의 위치와 속도, 정밀한 시각정보를 제공하여 주므로 많은 분야에서 사용되고 있는데 특히, 자동차, 선박 및 항공기의 항법과 측량분야에서 주로 사용되고 있다. GPS측위시스템은 WGS84타원체를 수평측지기준으로 채용하고 있는데 이 WGS84타원체는 Geodetic Reference Surface 1980(GRS80)을 근거로 하여 미 국방성 (DMA)에서 고안한 지구의 질량 중심을 원점으로 하는 지심좌표계이다. WGS84는 GPS측위를 위하여 고안되어 널리 사용되고 있으나 잠정적인 측지기준으로서 전 세계 모든 국가에서 채택하여 사용하고 있지는 않다.

우리나라에서도 여러 분야에서 GPS를 도입하고 있는데 자동차나 선박의 항법장치, 측지 및 공공측량에서 많이 사용되고 있고, 지각변동 연구나 해양측위 (Ocean/Offshore Positioning) 등에 많이 사용되고 있다. 특히, 해양측위에서는 국제수역에서의 해양활동 (수중계류 및 회수, 해저천공, 해양주권경계)에서 중요한 사항인 우리나라 주변 해역의 해상위치를 정확하게 측위하는 데에 있어서 GPS가 필수적으로 사용되고 있다.

이처럼 GPS기반의 새로운 측량기술이 발전함에 따라서 국토지리정보원은 사용자의 편이와 보다 정확하고 다양한 정보를 제공할 수 있는 새로운 개념의 통합기준점망을 개발하여 설치하고 있다. 통합기준점은 접근성이 편리하도록 주로 평지에 설치하도록 계획되었으며, 경위도(수평위치), 높이(수직위치) 및 중력 등 다양한 측량성과를 통합하여 관리하는 다차원/다기능 기준점으로 계획되었다. 전국에 약 10km×10km간격으로 1,200점을 설치하도록 계획되었고. 표석의 규격은 1.5m×1.5m 정사각형의 형상〈그림 7〉으로 설계되었다. 2008년부터 서울시,



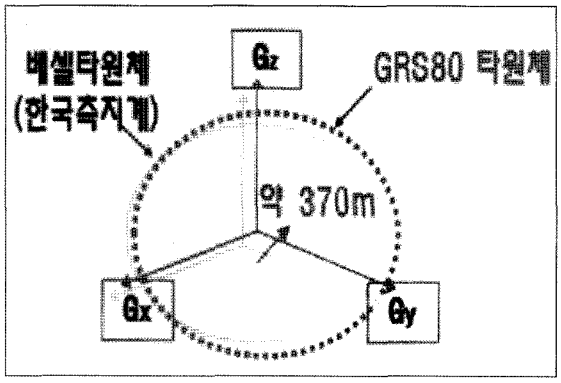
〈그림 7〉 새로운 개념의 통합기준점

경기도, 강원도, 충청남도, 충청북도 일원에서 총 275점을 설치하여 관측을 수행하고, 2009년에는 서해지구(114점), 무주지구(138점), 광주지구(129점), 대구지구(119점) 및 부산지구(114점)을 설치하여 관측이 진행 중이다.

2.2 측지기준계의 변환

높은 정확도의 측지좌표를 필요로 하는 사용자들이나 공간데이터에 막대한 투자를 하려고 하는 사용자들은 기존의 측지기준을 요구조건에 맞는 측지기준으로 변경하기를 원하지만 반면에 이미 막대한 투자를 한 사용자들이나 높은 절대 정확도가 필요하지 않는 사용자들은 측지기준을 변경하게 될 경우에 공간데이터 시장에 혼란을 발생시킬 수 있으므로 기존의 측지기준을 장기적으로 유지시키기를 원할 것이다.

측지기준을 변경하는 것은 고정된 좌표의 혼란을 일으킬 수 있으므로 단기적인 관점에서 보면 지구의 동적인 운동을 무시할 수 있으나, 장기적인 관점에서 본다면 Step함수에 의하여 동적인 문제가 모델링되어야 한다. 따라서, 측지기준을 변경하기 위한 적절한 시기를 결정하는 것은 매우 중요한 문제이다.



〈그림 8〉 Bessel타원체와 GRS80타원체간의 차이

새로운 측지기준을 도입하는 데에 필요한 주된 요인들은 측지기준점들의 실질적이고, 분명한 운동(지각변동의 결과), 새로운 측지측량으로부터 얻어지는 좌표갱신 및 국제적인 기준계로의 변경 등을 들 수 있다.

우리나라는 일제시대에 채택한 측지기준면인 Bessel타원체는 지형의 경사가 심한 일본 지형에 맞게 적합한 작은 타원체(Bessel타원체는 GRS80타원체보다 반경이 739.84m, 단반경이 673.35m 작다)이며, 타원체를 고정한 측지원점도 멀리 떨어진 동경에 위치하고 있고, 완만한 경사를 이루고 있는 우리나라의 지형에 부적합하여 우리나라 측지기준의 왜곡이 존재한다. 이러한 문제로 인하여 현재의 요구 정확도에 맞는 측량을 실시할 수 없고, 고 정밀 측량장비 및 기술발전에 부합하지 않다. 뿐만 아니라 지역기준점이 많아 관리나 사용이 어렵고, GIS데이터베이스 등의 효율적인 구축 및 유지관리에 어려움이 있으며, GPS와 같은 위성측위시스템의 사용에 부적합하다.

따라서 세계화에 대응할 수 있는 과학적이고, 합리적인 측지기준계 도입의 필요성과 전 세계적으로 측지/지구물리학, 항공, 선박, 국방분야의 새로운 측지기준계 채택에 따른 대처 등을 고려하여 새로운 측지기준계를 채택하는 것을 결정하였다. 이에 따라서 국토지리정보원은 1996년부터 연구를 실시하여 1999년 11월에 측량심의회의를 거쳐 2000년 4월에 장관방침 결정 2001년 12월 19일 측량법 개정 및 제도정비 추진과 2002년 6월 29일자로 측량법 시행령을 개정하였다. 측량법 개정은 법률 제6532호(2001.12.19)의 제5조(측량의 기준)에 위치표시를 평면: 지리학적 경위도, 높이: 평균해면, 지도제작은 각좌표, 극좌표, 지구중심직각좌표로 표시하고, 지리학적 경위도는 지구중심측지기준계, 거리 및 면적은 회전타원체면상의 값, 측량의 원점은 대한민

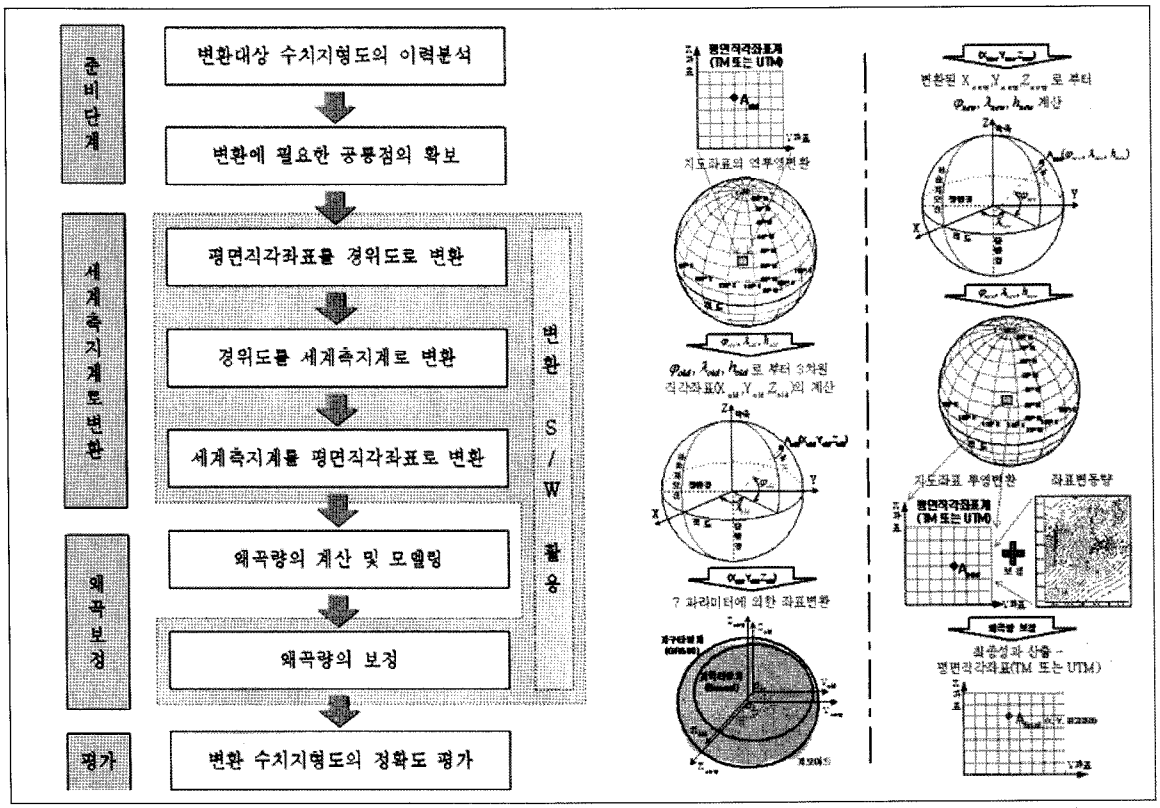
국경위도원점(수준원점) 그리고 회전타원체 등은 측량법시행령에서 정하였다.

그러나 새로운 국가 측지기준계의 도입에 따른 혼란을 방지하기 위하여 개정된 측량법의 시행을 2006년 12월 31일까지 유예하고, 2007년 1월 1일부터 전면적으로 시행하고 하였으나 기존의 막대한 지도 및 공간정보의 좌표변환 사업이 원활하게 추진되지 않아 2009년 12월 30일까지 재차 유예하여 2010년 1월 1일부로 전면적으로 시행토록 하였다.

좌표의 변환과정은 〈그림 9〉에 표시한 바와 같이 준비단계와 새로운 측지좌표계로의 변환 그리고 왜곡량 보정을 수행하도록 하고 있다. 왜곡량 보정은 기존의 측지기준점인 삼각점들에 존재하는 오차를 최소화하여 변환하기 위하여 x, y방향의 오차를 왜곡량으로 하고, 오차모델링을 통하여 변환된 공간좌표에 보정함으로써 정확한 좌표변환을 할 수 있도록 한 것이다.

3. 수직측지기준(Vertical Geodetic Datum)

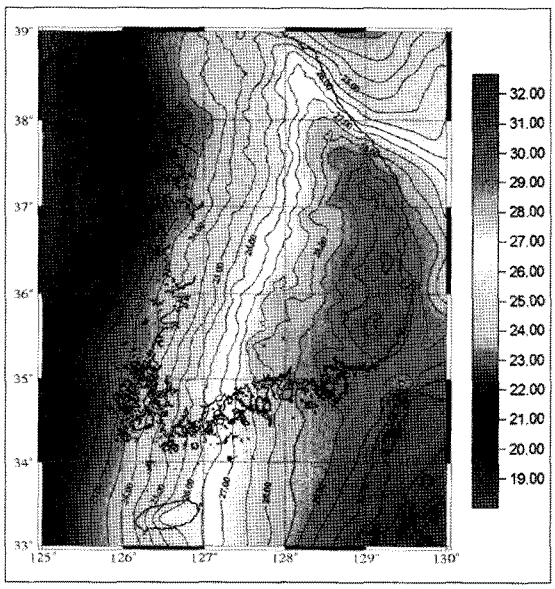
해수면은 해양에서 지구의 실제적인 표면을 표현하는 것으로 고려할 수 있다. 순간적인 해수면은 조석, 파랑 및 대기변화 등과 같은 많은 영향으로 인하여 일시적으로나 공간적으로 영향을 받는다. 시간에 따른 순간적인 해수면의 변화로 인하여 장기간



〈그림 9〉 지역측지기준계에 기준한 좌표를 새로운 측지기준인 지구중심기준계 변환하기 위한 절차

동안 조석관측소에서 해수면을 관측하여 얻을 수 있는 평균해수면을 도입하는 것이 필요하다. 순간적인 해수면 관측치로부터 평균해수면이 파랑운동으로 인하여 하루 동안에 수십 미터까지 변하지만 월 평균을 구하면 수십 decimeter정도로 변하고, 연평균을 하면 수십 년 주기내에서 수십 센티 정도로 안정된 값을 얻을 수 있다.

이처럼 장기간의 관측치를 평균한 해수면은 전 지구적으로 거의 정지된 해수면으로 고려할 수 있으며, 이 정지된 해수면은 해수 전량의 증감이 없으면 지구의 형태를 대표할 수 있는 하나의 정상적인 면을 이룰 것이라고 생각하여 이것을 지오이드라고 하고, 지구의 형상으로 채용하고 있다. 이 지오이드의 형상은 (가) 수학적으로 등 중력포텐셜면들 중에서 평균해수면에 일치하는 것, (나) 해양, 대륙 등의 복잡한 지형과 지각의 내부구조로 인하여 요철이 있는 복잡한 형상, (다) 평균적으로 단반경 b가 장반경 a보다 약간 짧은 타원을 단축둘레에 회전시킬 때



〈그림 10〉 한국의 정밀지오이드 모델(KGEOID05)

에 만들어지는 회전타원체에 극히 가까운 형상 등으로 정의하고 있다.

이 지오이드는 천문측량에 의하여 결정되는 연직선 편차(Deflection of Vertical)를 이용하여 결정하는 천문측지학적 지오이드(Astro-Geodetic Geoid) 결정방법과 중력측정데이터를 사용하는 중력학적 지오이드(Gravimetric Geoid) 결정방법 및 중력데이터로부터 구한 연직선편차를 사용하는 천문중력 지오이드(Astro-Gravimetric Geoid) 결정방법 및 GPS측량에 의하여 결정되는 타원체고와 수준측량 결과를 사용하는 GPS/Leveling에 의한 방법 등이 있다. 일반적으로 정밀한 지오이드를 결정하기 위해서는 중력학적인 방법을 이용한다.

이러한 정밀지오이드는 위치결정 시스템인 GPS가 운영되기 시작하면서 위성의 정밀궤도 결정이나 GPS/Leveling에 의한 수준측량 및 군사적인 목적으로 활용되었고, 이를 위해 전 세계적으로 많은 연구를 진행하여 오고 있다. 전 지구를 대표하는 전 지구 중력장모델들이 1980년대부터 개발되어 왔으며, 최근에는 EGM08과 같이 약 ±50cm의 정밀도를 갖는 중력장 모델들이 개발되어 제공되고 있다. 그러나 이러한 전 지구중력장 모델들은 정밀 수준측량에 사용하기에는 그 정밀도가 다소 떨어져, 지역적으로 측정한 중력데이터와 조밀한 격자의 수치표고모델을 사용하여 보정함으로써 1~5cm 정밀도까지 지오이드모델을 개발할 수 있다.

우리나라에서는 윤홍식 등(2005)이 GRS80타원체를 기준으로 EIGEN-CG03C 기준중력장과 육상 및 해상 중력측정데이터 그리고 고해상도의 지형데이터를 사용하여 한국 일원의 정밀지오이드모델 KGEOID05〈그림 10〉를 개발하였는데, 이 모델은 총 503점의 GPS/Leveling데이터를 사용하여 우리나라 수직기준에 최적합하게 fitting을 수행한 것으로 절대 정밀도는 약 7cm, 상대 정밀도는 약 2cm까

지 얻을 수 있다.

3.1 우리나라의 표고기준

Oxford English Dictionary에는 표고(Height)에 대하여 "Measure from Base to Top", 즉, 하단에서 상단까지의 척도로 정의하고 있다. 보다 구체적인 정의는 1966년에 Muller와 Rockie가 수직기준과 한 점간에 힘의 선 또는 접선을 따라서 측정한 면의 거리로 정의하였다. 한 점의 표고에 대하여 이야기 할 때에는 표고가 특정한 표고체계를 준거하고 있다는 것을 암시하는 그림으로써 설명할 수 있다. 측정방법이나 개념이 다른 많은 표고체계가 있지만 이들 중에서 "Natural"로서 고려하는 표고체계는 물리학적인 측정의 기준이 되므로 Natural한 표고체계는 중력측정과 관련되며, 지오이드에 준거하게 된다.

표고체계간의 표고의 차이는 수치적으로는 크지는 않지만 지오이드에 가장 잘 일치하는 타원체의 경우에 0.03% 범위내에서 지구표면과 일치하고 있으나 이들은 개념적으로 매우 다르다. 우리는 표고체계의 특성을 알기 위하여 다양한 표고체계에 대하여 이해를 하여야 한다. 이것은 최근 들어 위성측위 시스템의 출현으로 인하여 중력추정표고에서 지구고정 지심 표고로 변경하도록 하는 제안이 많이 제시되고 있어 중요한 문제가 되고 있다.

우리나라의 수직기준은 전국 각지에서 다년간 관측한 조석측정 결과를 평균조정한 평균해수면(Mean Sea Level: MSL)을 사용한 것으로 알려져 있으나 실질적으로는 인천만의 中等潮位面을 결정하여 수직기준을 정하였다. 평균해수면은 일종의 가상면으로서 고저차 측량에 직접 사용할 수는 없으므로 그 위치를 지상에 영구표석으로 설치하여 Oiginal Banch Mark(OBM)로 삼고, 이것으로부터 전국에 걸쳐 수준측량망을 형성하였다. 또한, 해저수심은 평균최저간조면(Mean Lowest Low Water Level: MLLW)을, 해안선은 평균최고만조면(Mean Highest High Water Level: MHHW)을 기준으로 하고 있다.

우리나라에서 조석을 처음 관측하기 시작한 것은 1911년 7월부터 조선총독부 임시토지조사국이 일본 육군측지부의 지원을 받아 인천, 익산, 진남포, 목포, 군산, 원산의 6개 항만에서 3년에 걸쳐 관측을 하였는데, 당시 인천에서는 양육잔교에서 목측하였으며, 철도건설국에서는 마산과 기타 개소에서 동일한 형식으로 검조를 시작하였다. 조석관측결과를 사용하여 각 항만의 평균해면을 계산하고, 전국의 수준측량을 위한 표고기준으로 정하였다(조선토지조사사업보고서, 1918).

1등수준측량은 익산-목포, 원산-진남포선으로 북부 수준망과 남부 수준망으로 나누어 수행되었는데, 익산 수준기점에서 출발하여 목포 수준기점에서 폐합시키고, 원산 수준기점에서 출발하여 진남포 수준기점에서 폐합시키는 두 선의 일등수준측량을 실시하였다. 오차의 제한은 측정거리 Skm에 대해 1.5 $\sqrt{S}$ mm 이내로 하였다. 이 사업은 1912년 착수하여 4년간의 관측 결과, 매 4km 마다 1931개의 표석 및 총 노선 5657km의 왕복측량을 수행하였다.

이후 일본은 중국대륙으로 진출하기 위하여 만주지역의 측량을 긴급하게 실시하였으며, 이 때 일본 육군측지부는 중국의 장춘원점에 연결하기 위해 원산 수준원점[3]을 1933년 영여만 요새사령부내에 설치하여 연결작업을 수행하였다. 그러나 기존의 1등수준측량 표석들의 70%가 망실되고, 수준노선변경도 있어 새로운 1등수준망을 형성하는 한편, 망실되지 않은 완전점은 결합측량으로 연결하였다. 1943

3) 원점보다 기점에 해당

년 이후는 작업이 중지되었다는 데, 자세한 수준망 조정결과는 남아있지 않고, 사업목적이 만주와의 연결측량이었으므로 남한 전역의 수준측량을 다시 수행한 기록은 없다.

광복 이후 내무부 토목부에서 조선총독부에서 사용하던 "조선삼각점 및 수준점"을 사용하여 파괴된 수준점을 복구하여 사용하여 왔으나 일제시대의 측량 원 자료를 처리한 과학적, 실용적 조정에 관한 문헌이 전혀 남아있지 않아 각종 항만개발사업에는 독자적인 항만의 공사기준면이 이용되어 왔으며, 간척사업 등의 연안개발사업에서 배수설계 등 큰 애로가 있어 왔다. 또한, 전국 주요 하천의 양수표의 영점표고 역시 1910년대의 평균해면 자료를 기초로 제시되어 수문자료의 신뢰성까지 문제되고 있다. 건설부 국립지리원(현재 국토지리정보원)은 1974년부터 남한 전역의 1등수준측량을 시작하여 1980년대 중반에 완료되었으며, 주요 검조소(인천, 군산, 목포, 여수, 익산, 울산, 묵호)와의 연결측량은 수행되었다. 이 사업은 광복 이후 처음으로 실시하는 측지학적 수준측량이었으며, 사업목적은 수준망 확장, 파손된 수준망의 복구 및 지각변동여부의 조사에 있어 정확한 표고기준면이 갖는 의미는 지도제작 뿐만이 아닌 과학과 공학 전반에 기여하는 바가 크다.

그러나 한국의 수직기준은 기록에 의하면 1910년대의 5개항(청진, 원산, 목포, 진남포, 인천)의 검조활동에 의해 인천항의 수준원점이 정의된 바 없고, 각 항의 수준기점만을 정의하였고, 5개항이 서로 연결되는 전국적 수준망의 형성 및 망조정은 이루어진 바 없으며, 일부구간에서만 수준기점간의 연결수준측량(익산-목포 및 원산-진남포 선)이 수행되었다.

관중응이 1943~1944년 2개년의 검조결과를 이용하여 제시한 인천항의 조위기준면은 1914년의 수준기점(영국영사관 남서단 관로측 세관부지)하 5.477m를 평균해면으로 동일하게 사용하고, 이 평균해수면하 4.5576m(1943년 4.5767m, 1944년 4.5384m의 평균)에 인천항의 수직기준(0.0)을 정의하였다. 이 수직기준은 원 수준기점(Original Bench Mark)하 10.035m에 위치한다. 광복 이후 1960년대부터 검조활동을 재개함에 있어서 새로운 수직기준을 원 수준기점하 10.112m에 위치시키고, 장기검조(1962~1977년)를 한 결과 평균해면이 4.58m로서 초기에 정의된 원 수준기점하 5.477m보다 5.5cm가 더 낮은 5.532m가 된다. 이후, 원 수준기점을 1963월 12월 인하공업전문대학내로 이전하고, 수준원점(Fundamental Bench Mark)으로 삼아 장기간의 1등수준측량을 수행하였다.[4)]

그러나 이 과정에서 초기의 단기 검조결과를 그대로 채택하였기 때문에 과학적으로 더 신뢰성있는 결과를 사용하여 현 수준원점의 표고를 26.6871m가 아니라 26.7421m로 재 정의할 필요가 있다는 문제점이 제기된 바 있다(국립지리원, 1983; 최병호, 1994).

또한 우리나라는 동해, 서해, 남해의 지리적 특성상 해저지형 및 수심 분포, 해안선의 굴곡, 도서의 개수 등 지리학적 형태가 서로 다르며, 해수의 성질, 해류 및 조석 등 해양학적 요소도 각각의 특징을 갖

4) 1978년 12월 건설부 국립지리원은 우리나라의 수준원점은 "표고의 기준이 되는 점으로서 이 점을 설정하기 위하여 1914~1916년까지 인천항에서 조위를 측정하여 평균해수면을 산정하고 이를 기준으로 하여 수준기점을 1917년에 인천시 중구 항동 1가 2번지에 설정하여 국토의 표고기준치로 이용하였으나 그 후 이 원점을 1963년 12월에 본 대학 현 위치에 이설한 수준원점의 진고를 26.6871m로 결정하였다. 이는 국토높이의 기준점으로 전국의 수준점 및 삼각점의 표고도 이 원점을 기준으로 하였으며 측지학 및 지구물리학 연구의 기준으로도 이용되는 것이다" 라고 정의 하였다(국립지리원, 1978)

고 있기 때문에 현재 인천만의 평균해수면을 기준으로 하는 수직기준의 결정은 서해의 물리적 해면을 표현했을 뿐 동해와 남해의 해수면 특징을 반영하지 못하고 있으며, 이러한 수직기준에서 높이값을 결정한 수준원점과 이를 기점으로 수준측량을 수행하여 결정한 동해안 또는 남해안의 수준점 성과는 그 지역의 평균해수면과 일치하지 않는 결과를 초래하고 있다.

이러한 원인으로 인하여 간접수준측량 또는 독자적인 평균해수면 관측에 의해 표고가 결정된 도서지역의 경우 육지와의 수직 편이량(Vertical Offset)이 발생하고 있는데 거제도와 가덕도를 연결하는 거가대교 설계에서 발생된 수직편차(약 37cm) 문제가 대표적인 예라 할 수 있다. 한편, 앞으로 '연안권 특별법' 및 '제3차 도서종합개발 10개년 계획'의 국가정책과 함께 '갈럭시 아일랜드 프로젝트'(전라남도), '남해안시대 프로젝트'(경상남도)의 추진에 따른 연육·연도교 등의 기반시설 조성사업이 계획되어 있어 향후 수직기준에 따른 여러 문제들이 계속해서 발생할 것으로 예상된다.

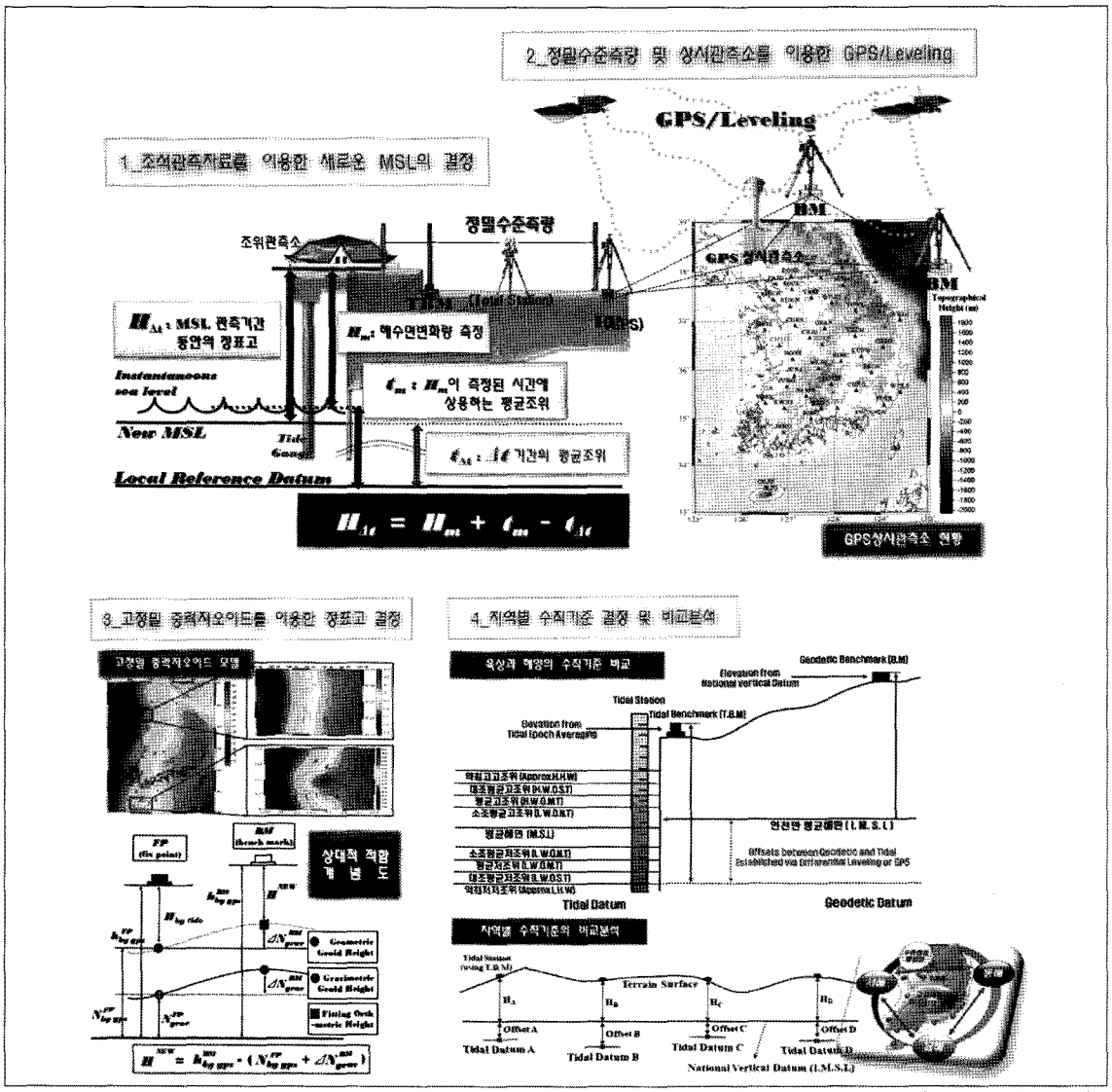
3.2 새로운 수직기준의 재정립 - Global Vertical Datum

최근 들어 정밀지오이드의 개발과 GPS측위기술의 발전으로 국제측지연맹(IAG; International Association of Geodesy)에서는 전 지구적으로 통일된 수직기준(Global Vertical Datum, 전 지구 수직기준)을 설정하기 위하여 국제적 공동관측을 수행하고 있다. 전 지구 수직기준은 세계측지계와 더불어 전 지구 통일 좌표계를 구축하는 기본이 되며,

〈그림 11〉 우리나라 수직기준의 현황 및 문제점

조석관측 데이터, 해양 관측 데이터 및 각종 위치관측 데이터에 대한 통일된 기준을 제공함으로써 전 세계 데이터의 공동 활용이 가능하다.

전 지구 수직기준계는 기본적으로 중력학적인 표고를 기준으로 하며, 해수면의 변동과 지각의 변동에 의한 중력의 변동까지 고려한다. 따라서 전 지구 수직기준계의 결정을 위해서는 전 지구적인 중력의 관측과 해수면 변동량 관측 및 지각 변동량의 관측이 이루어져야 하며, 이를 통하여 결정된 전 지구 지오이드 모델과 지역적인 중력 관측에 의한 지오이



〈그림 12〉 새로운 수직 기준의 재정립 방법

드 모델의 결합에 의하여 정밀 지오이드 모델이 수립되어져야 한다. 현재 IAG에서는 TOPEX/POSEIDON과 같은 중력관측 위성에 의해 관측된 전 지구 중력관측값과 IGS(International GNSS Service)를 통해 수집된 지각변동량 및 해양조석데이터를 바탕으로 전 지구 통일 수직기준계의 결정을 위한 연구가 수행 중에 있다.

우리나라는 현재 2010년까지 과거의 지역적인 수평 측지계를 세계 측지계로 전환하는 사업이 진행 중에 있지만 수직 기준계의 재정립에 관한 사항은 2008년부터 국토지리정보원에서 연구가 진행 중에 있는 상태이다. 한편, 수직 기준계와 관련된 연구로서 우리나라의 중력관측과 정밀 지오이드 모델 결정에 관한 연구가 진행되었으며(국토지리정보원, 2007; Yun, 1999; 윤홍식 등, 2007), 해양조사원에서 설치한 조위관측소는 전국 36개소로서 조위관측과 더불어 GPS 관측을 동시에 관측하고 있으며 최대 52년에 걸친 조위관측자료가 축적되어 있고 국토지리정보원에서 관리하고 있는 GPS 상시관측소는 전국 68개소로서 최대 10년에 걸친 관측자료가 축적되어 있는 상황이다. 따라서 이를 바탕으로 당면한 지역적인 표고 불부합의 문제를 해결하기 위한 수직기준의 재정립과 나아가 전 지구 수직기준계와의 연결을 위한 연구가 신속히 이루어져야 할 것이다.

전 지구 수직기준계의 도입은 현재 우리나라의 지역적인 수직기준의 불부합 문제의 해결뿐만 아니라 GPS를 이용한 표고 결정의 실용화에도 많은 기여를 할 것이며 나아가 전 지구 수직기준계에 기준한 수준원점의 성과, 전 지구적인 수준망 구축, 전 지구 지오이드 모델과의 상관관계 분석을 통하여 GPS Levelling에 활용 및 GPS를 이용한 지각변동, Tidal Loading 분석 등에 기여할 것이다.

4. 결 언

아리스토텔레스가 지구 구형설을 제시한지 2400여년, 마젤란이 3년간의 항해를 통하여 이를 최초로 증명한지 500여년, 갈릴레오 갈릴레이가 '그래도 지구는 돌고 있다' 라고 주장한지 380여년이 지난 지금 인류의 비약적인 과학기술의 발전과 미지의 세계를 향한 끊임없는 도전은 지구를 넘어 달과 화성에까지 이르고 있다.

측지기준계는 과거 특정 지역 또는 한 국가에 국한되어 사용되어져 왔지만 현재는 국가와 국가, 대륙과 대륙을 연결하는 기준으로서의 역할 뿐만 아니라 지구 주변에서 활동하고 있는 수 만개의 인공위성의 기준 역할을 함으로써 우주적인 기준이 되어가고 있다.

근대적인 측지기준계를 도입한지 100여년이 된 우리나라는 전 세계적으로 채택하고 있는 보다 정밀하고, 새로운 측지기준을 도입함으로써 정확한 공간정보의 위치를 사용자들에게 제공할 수 있게 되었으며, 측지/지구물리학 분야의 심도 깊은 연구는 물론 나로호 발사와 같은 우주개발의 초석을 마련한 것이라고 할 수 있다. 그러나 새로운 국가 측지기준이 채택된지 6여년이 지난 현재에도 기존의 공간정보에 대한 좌표변환이 원활하게 이루어 지지 않고 있으며, 수직기준의 문제점이 제기된 이후, 문제점을 해결하기 위한 노력이 이루어 지지 않고 있어 정확한 공간정보를 사용자들에게 제공하겠다는 목표가 원활하게 이루어지지 않고 있는 실정이다.

참고문헌

1. 국립지리원 (1983). 우리나라 정밀수준망에 관한 연구.

2. 국립지리원 (2003). 측량 및 지형공간정보 백서.
3. 국토지리정보원 (2007). 중력자료 분석 및 지오이드 구축방안 연구.
4. 윤홍식, 이동하 (2005). Least Square Collocation에 의한 GPS/Levelling의 정확도 개선, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제23권 제4호, pp. 385-392.
5. 윤홍식, 정태준, 황학 (2007). 수직기준 결정을 위한 기초 연구, 춘계학술발표회 논문집, 한국측량학회, pp. 55-58.
6. 조선총독부 (1918). 조선토지조사사업보고서.
7. 최병호 (1994). 우리나라 국토 높이의 기준, 대한토목학회지, Vol. 42, No. 3, pp. 84-89.
8. AUSLIG (1998). Proceedings of the Workshop on Regional Geodetic Network, Working Group 1-Regional Geodetic Networks, Permanent Committee on GIS Infrastructure for Asia and the Pacific, Canberra, Australia, 1-2 July.
9. Boucher, C. and Altamimi, Z. (1996). International Terrestrial Reference Frame, GPS World, 7(9), pp. 71-74.
10. Defense Mapping Agency (1987). Department of Defense World Geodetic System 1984: its definition and relationships with local geodetic systems, DMA Technical report 8350.2.
11. Malys, S. and Slater, J. (1994). Maintenance and Enhancement of the World Geodetic System 1984, Presented at The Institute of Navigation, ION GPS 94, Salt Lake City, Utah, September.
12. Malys, S., Slater, J., Smith, R., Kunz, L. and Kenyon, S. (1997). Refinements to the World Geodetic System 1984, Presented at The Institute of Navigation, ION GPS 97, Kansas City, MO, September.
13. Swift, E. (1994). Improved WGS84 Coordinates for the DMA and Air Force GPS Tracking Sites, Presented at The Institute of Navigation, ION GPS 94, Salt Lake City, Utah, September.
14. Yun H.S. (1999). Precision geoid determination by spherical FFT in and around the Korean peninsula, Earth Planets Space, 51, pp. 13-18.

저자 약력

● 1980-1984, 성균관대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
● 1985-1987, 성균관대학교 대학원 측지학 전공 (공학석사)
● 1990-1992, 성균관대학교 대학원 측지학 전공 박사과정
● 1992-1995, 헝가리 Technical University of Budapest 측지학 전공 (공학박사)
● 2001-2005, 한국도로공사 설계심의위원
● 2002-2005, 대한측량협회 교육위원 및 기술자문위원
● 2002-2005, 건설교통부 국립지리원 측량심의위원
● 2002-2005, 환경부 환경정보화추진위원회 위원
● 2002-2006, 감사원 정책자문위원 및 건설물류국 자문위원
● 1985-현재, 한국측량학회 정회원
● 1996-현재, 한국지진공학회 정회원
● 1999-현재, 대한토목학회 정회원
● 1996-현재, 일본측지학회 정회원
● 2001-현재, 한국측량사연맹 제5분과위원장
● 1993-현재, International Association of Geodesy(IAG) Member
● 1999-현재, 성균관대학교 사회환경시스템공학과 부교수