

(해 설)

지구측지관측시스템(GGOS) 연구동향

신영홍^{1,*} · 박종욱¹ · 서기원²

¹한국천문연구원, 305-348, 대전광역시 유성구 화암동 61-1

²극지연구소, 406-840, 인천광역시 연수구 송도동 7-50

Introduction of the Global Geodetic Observing System

Young Hong Shin^{1,*}, Jong Uk Park¹, and Ki-Weon Seo²

¹Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

Abstract: The Modern Geodesy monitors physical and geometrical shape and motion of the Earth and, more importantly, its temporal variations with unprecedented precision. It provides accurate and stable reference frames for Earth observations in the Space era. Furthermore, with an aid of interdisciplinary approaches, it also traces the causes of the variations in shape and motion of the Earth and eventually contributes to a better understanding of the Earth system. The International Association of Geodesy (IAG) has established the Global Geodetic Observing System (GGOS) to integrate the multitude of geodetic tools and tried to contribute to the management of global environmental changes as a partner of the Global Earth Observation System of Systems (GEOSS). Here we introduce the contribution of geodesy to the various fields of Earth Science by focusing on GGOS and encourage interdisciplinary researches.

Keywords: Geodesy, Earth Science, GGOS, GEOSS

요약: 현대 측지학은 전례 없는 정밀도로 지구의 물리·기하학적 형상과 운동, 특히 이의 변화를 감시하고 있다. 이는 우주시대의 지구관측을 위한 정확하고 통일된 기준좌표계를 제공할 뿐만 아니라, 학제적 연구를 통해 지구형상과 운동의 변화를 일으키는 원인을 규명함으로써 궁극적으로는 지구시스템의 정확한 이해에 기여하고 있다. 국제측지연맹에서는 다양한 측지학적 도구들을 통합하고자 지구측지관측시스템(GGOS)을 구축하고, 전지구관측시스템(GEOSS)의 주요 파트너로서 지구환경변화에 대응하려는 인류의 노력에 기여하고 있다. 여기서는 지구측지관측시스템을 중심으로 측지학이 전지구관측시스템 및 지구과학의 여러 영역과 어떤 관계를 가지는지를 살펴보고, 학제적 연구의 동기 부여를 촉진하고자 한다.

주요어: 측지학, 지구과학, 지구측지관측시스템, 전지구관측시스템

서 론

일반인들에게 있어서 측지학은 단순히 지구의 형상과 토목을 위한 기초 측량 정도로 가볍게 인식되고 있지만, 현대 측지학은 전례 없는 정밀도로 지구의 물리·기하학적 형상과 운동, 특히 이의 변화를 감시하고 원인을 규명하는 학문으로서 지구환경시스템을 이해하기 위한 주요 요소 중의 하나이다. 또한 위성

항법시스템의 등장으로 측지학은 차량·선박·항공기 항법과 위치추적, 긴급구난, 여가생활 등에 이르기까지 우리 생활과 불가분의 관계를 맺고 있다.

한편, 금세기 들어 규모나 빈도 면에서 커져가는 자연재해, 특히 지구온난화와 이로 인한 각종 재해가 빠르게 증가함에 따라 지구환경변화에 대응하려는 인류의 노력도 가속화되고 있다. 이들 중 가장 대표적인 것이 지구관측그룹(GEO, Group on Earth Observations)에 의해 수행되고 있는 전지구관측시스템(GEOSS, Global Earth Observation System of Systems)이다. 지구관측그룹은 2009년 3월 현재 우리나라를 비롯해서 76개의 정부와 유럽위원회(European Commission)

*Corresponding author: yhshin@kasi.re.kr

Tel: 82-42-865-3240

Fax: 82-42-861-5610

가 참여하고 있으며, 56개의 정부간 기구들과 국제적 혹은 지역적인 기구들이 파트너로 참여하고 있다(www.earthobservations.org, www.kgeo.go.kr). 이는 인류가 살고 있는 지구환경을 구성하고 있는 시스템이 단지 우리가 접하고 있는 지표나 대기의 문제에 국한된 것이 아니라, 지구의 중심에 있는 핵에서부터 지구의 대기와 상층의 전리층/열권 및 태양/달/행성 시스템까지 지구환경을 구성하는 모든 시스템들이 긴밀히 상호관계를 맺고 있다는 점에서 출발한 것으로, 이들 시스템들의 상호작용에 대해 종합적으로 이해하여야만 당면한 환경변화에 적절히 대응할 수 있게 되는 것이다. 전지구관측시스템을 통해 얻게 될 이점은 자연재해의 감소를 비롯하여 종합적인 수자원 관리, 해양/해저 자원의 관리, 기상과 공기의 질에 대한 감시/예보, 생물다양성 보존, 지속가능한 토지의 이용과 관리, 인간의 건강과 삶에 영향을 미치는 환경적 요인들에 대한 대중적 이해, 에너지 자원 개발의 향상, 기후 변화와 변동에 대한 적응 등이 될 것이다.

여기서는 현대측지학의 주요 연구동향을 지구측지관측시스템(GGOS, Global Geodetic Observing System)을 중심으로 살펴봄으로써, 이것이 전지구관측시스템 및 지구과학의 여러 학문 영역과 실생활에 미치는 영향, 나아가 학제적 연구의 가능성을 보여주고 동기부여를 촉진하는 유익한 정보를 제공하고자 한다. 측지학에서 사용하는 도구와 방법 및 영역이 매우 방대하기 때문에 여기에서 모두 다루는 것은 아니며, 핵심이 되는 측지학적 도구와 주요 이슈를 중심으로 소개하고자 한다.

지구측지관측시스템(GGOS)

측지학의 발달

측지학은 지구의 기하학적/역학적 형상과 이의 변화를 추적하는 기술로서 지구시스템 관측을 위한 기준프레임을 제공해 주는 역할을 한다. 흔히 측지학의 세 기둥이라 불리는 것으로서 1) 지구의 기하학적 형상과 2) 물리적 형상(중력장) 및 3) 지구자전이 있는데, 이들과 이들의 시간변화를 정확하게 측정하는 것이 측지학의 기본 임무라 할 수 있다(Fig. 1). 이들 각각에 대해 예를 들어보면, 1) 삼각측량을 통해 경위도를 결정하는 것(지금은 삼각측량이 우주측지기술로 대체되었음), 어떤 특정 지역 혹은 지구전체에 가장 적합한 타원체를 결정하는 것, 2) 지구상의 중력을 측정하여 상대 혹은 절대 지오이드를 결정하거나 역학적 편평도와 이의 변화량을 추적하는 것, 3) 지구자전축의 방향과 이의 변화를 추적하거나, 극운동을 고려한 세계시(UT1)와 하루의 길이 변화(LOD, Length of Day)를 결정하는 것 등이 있다.

인공위성의 궤도 추적으로부터 시작된 현대 우주측지학의 등장 이전에는 이것들을 결정하는데 많은 한계를 가지고 있었는데, 단지 정확도의 문제뿐만 아니라 전체 지구를 하나로 묶을 수 있는 기준좌표계를 결정할 수 없었기 때문에 국가별 혹은 지역별로 정의된 기준좌표계를 가지고 있었다. 초장기선전파간섭계(VLBI, Very Long Baseline Interferometry), 인공위성레이저추적시스템(SLR, Satellite Laser Ranging), DORIS(Doppler Orbitography and Radio

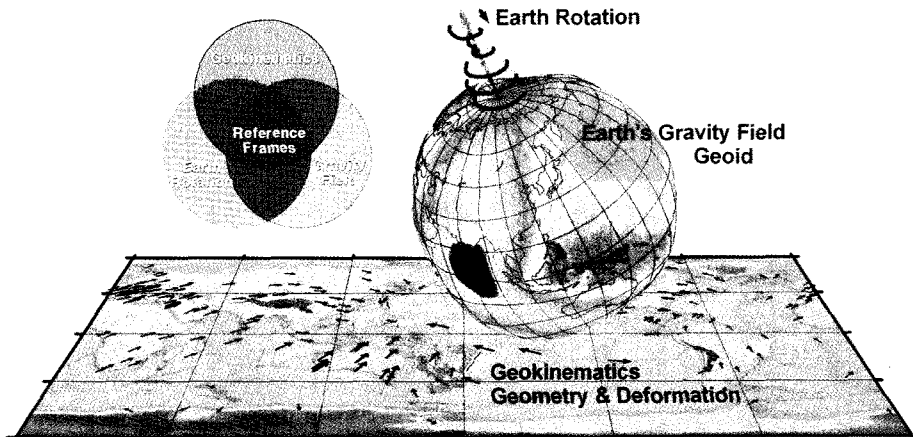


Fig. 1. The three Pillars of Geodesy. The spiral motion representing earth rotation was estimated with GPS observation data from 2002 to 2007. The geoid model was calculated from the EIGEN-GL04C model up to degree 360. The black arrows showing movement of geodetic stations and tectonic plates referred to ITRF2005.

Positioning Integrated by Satellite), 특히 최근의 위성항법시스템(GNSS, Global Navigation Satellite System)으로 대표되는 우주측지학적 도구의 등장과 발달은 지구 전체를 하나로 아우를 수 있는 지구기준좌표계의 실현을 가능케 하였다. 이로 말미암아 이전에는 통일적으로 기술하지 못하였고, 따라서 정확하게 기술하기 어려웠던 다양한 지구의 관측 자료들을 하나의 통일된 기준좌표계로 표현함으로써 우주시대의 지구관측 임무를 정확하고 효율적으로 진행할 수 있게 되었다.

Chao(2003)은 지난 30년간 우주측지기술이 천배의 수준에 이르는 발전을 이룸으로써 고층대기에서 내핵까지의 지구시스템에서 일어나는 질량이동을 관측함에 있어서 황금기를 준비하였고, 그리하여 지속적으로 발전되는 정밀도와 해상도를 고려할 때, 기후와 지구물리적인 변화를 감시하는 새로운 원격탐사 도구가 되었다고 강조하였다. 현재 측지학의 세 기둥이라 불리는 물리량과 이에 기반을 둔 지구기준좌표계의 정확도는 수 cm 수준이며, 정밀도는 1 cm 이하, 그리고 장기간의 안정도는 1 mm/yr 수준에 이른다(Plag et al., 2009). 판의 이동이나 대기와 해양의 순환과 같은 지구시스템 역동성과 질량이동으로 말미암아 지구의 형상 및 운동에 있어서 변화가 일어나게 되는데, 과거에는 이에 대한 추적기술이 정밀도나 해상도에서 크게 제한되었기 때문에 관련된 대기나 해양, 그리고 지구내부에서 일어나는 지구물리적인 현상들에 대한 연구가 측지학과 크게 관련을 맺지는 못하였다. 그러나 현대 우주측지학의 발달은 이들에 대한 추적이 상당부분 이루어지고 있기 때문에 이들의 원인으로 작용하는 것들, 특히 지구 질량의 변화와 이동에 대한 모델 개발이 중요해지고 있다. 이것은 측지학이 지구시스템을 이루는 대기, 해양, 수권과 빙권, 그리고 지각과 지구내부에 대한 여러 학문 분야와의 공통영역을 점차 확대하여 학제적 연구를 촉진시키는 역할을 하고 있음을 보여준다. 이러한 이유로 측지학은 더 높은 정밀도와 해상도를 제공할 필요성이 커지고 있으며, 따라서 여러 가지 측지기술과 지구물리학적 기술의 통합을 통하여 지구 형상과 질량 변화에 대한 관측 및 해석모델을 개발하고, 역으로 이들 모델을 적용하여 보다 진보된 관측을 이끌어 내고자 하는 것이다. 이것이 기존의 여러 가지 측지학적 도구들을 통합하고자 하는 지구측지관측시스템의 등장을 자연스럽게 이끌어내게 되었다고 볼 수 있겠다.

지구측지관측시스템과 전지구관측시스템

지구측지관측시스템은 국제측지연맹(IAG International Association of Geodesy)의 대표적인 프로젝트로서 전통적인 방법에서부터 현대의 우주측지학적 방법에 이르는 가능한 모든 측지학적 도구들을 통합하려는 시도이며, 대외적으로는 전지구관측시스템을 비롯하여 지구시스템 연구를 위한 모든 국제기구에 대해서 국제측지연맹의 인터페이스의 역할을 수행한다. Plag et al.(2008)은 지구측지관측시스템의 두 가지의 구별되는 측면을 나누어서 이해하는 것이 필요하다고 했는데, 하나는 조직으로서의 지구측지관측시스템(organization GGOS)이고, 다른 하나는 관측시스템으로서의 지구측지관측시스템(observation system GGOS)이다. 지구측지관측시스템은 국제측지연맹의 기존 서비스들(Table 1) 위에서 세워지게 된다. 국제측지연맹의 조레(Drewes, 2008)에서 지구측지관측시스템이라는 용어를 “지구측지관측시스템은 지구시스템을 모니터링하고 지구변화연구를 위하여 필요한 측지학적 전문기술과 인프라를 제공하기 위하여 국제측지연맹의 서비스들과 함께 일한다.”고 정의하고 있는데, 이를 통해서 지구측지관측시스템의 기반으로서의 국제측지연맹 서비스의 중요성과 지구시스템 연구로의 지향점이 잘 드러나고 있다. 다양한 측지학적 도구들과 모델들 및 접근법들이 지구측지관측시스템을 통해 통합되어 하나의 강력한 측지학적 시스템을 이루게 되며, 개별 도구들이 가지는 한계를 극복하고 상호 보완 및 검증을 통해 안정적이고 정확한 측지기준좌표계를 구축하게 된다. 이는 지구관측에 필수적인 정확하고 통일된 위치 정보를 제공하게 되어 전지구관측시스템의 성공적 수행에 기여하게 된다.

지구측지관측시스템을 조직하기 위한 첫 모임은 미국의 Boulder에서 개최된 1995년 국제측지지구물리연합(IUGG, International Union of Geodesy and Geophysics) 총회에서 시작되었고, 1998년에 “지구측지관측시스템을 향하여(Towards a Global Geodetic Observing System)”라는 주제로 국제측지연맹 심포지움이 독일 뮌헨에서 열렸다. 이후 일본 삿포로에서 개최된 2003년 7월의 국제측지연맹과 IUGG 총회에서 IGGOS(Integrated GGOS)란 이름으로 정식으로 설립되고, 이듬해에 프랑스 Nice에서의 첫 공식 모임에서 지구측지관측시스템으로 이름이 바뀌었다. 지구측지관측시스템은 2003년 이후 국제측지연맹의 기함(flagship)으로서 자리매김하였고, 2003년부터 2년간

Table 1. The IAG Services. The IAG Services are the backbone of GGOS, providing the infrastructure for observations, data archiving and processing, and generation of products (modified from Plag et al. (2008) and Drewes (2008)).

Pillar	IAG Service and Year of Establishment		Technique/Function and Address of homepage
Systems, Frames, Rotations	IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service, 1987(1895)	Combination of all geometric techniques http://www.iers.org/
	IGS	International GNSS Service, 1994	Global Navigation Satellite Systems (GNSS): Global Positioning System (GPS), Global Navigation Satellite System (GLONASS), Galileo http://igscb.jpl.nasa.gov/
Geometry Solid Earth	IVS	International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, 1999	Very Long Baseline Interferometry (VLBI) http://ivscc.gsfc.nasa.gov/
	ILRS	International Laser Ranging Service, 1997	Satellite Laser Ranging (SLR) Lunar Laser Ranging (LLR) http://ilrs.gsfc.nasa.gov/
	IDS	International Doris Service, 2003	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellites http://ids.cls.fi/
Geometry Ocean and Ice	PSMSL	Permanent Service of Mean Sea Level, 1933	Tide gauges http://www.pol.ac.uk/psmsl/
	IAS	International altimetry Service, 2008	Satellite Altimetry http://ias.dgfi.badw.de/
Gravimetry	IGFS	International Gravity Field Service, 2003	unifying service for BGI, IGeS, ICET, ICGEM, IDEMS-IGFS Centres http://www.igfs.net/
	BGI	Bureau Gravimetric International, 1951	collection, archiving and distribution of gravity data http://www.geodesie.ird.fr/bgi/
	IGeS	International Geoid Service, 1991	collection and distribution of geoid models http://www.iges.polimi.it/
	ICET	International Center for Earth Tide, 1958	collection and archiving of global earth tide data http://www.astro.oma.be/ICET/
	ICGEM	International Center for Global Earth Models, 2003	distribution of satellite and surface spherical harmonic models http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/
	IDEMS	International DEM Service, 2003	global digital terrain models http://www.cse.dmu.ac.uk/EAPRS/iag/
Standards	BIPM	Bureau International des Poids et Mesures, 1920	metrological standards http://www.bipm.org/
	IBS	IAG Bibliographic Service, 1984	literature database of geodesy, photogrammetry, cartography http://iag.dgfi.badw.de/index.php?id=284

C. Reigber 의장을 중심으로 지구측지관측시스템의 내적 조직구성과 대외적 기구들과의 관계를 정의하는 데 집중한 정의단계(Definition Phase)를 거쳐, 2005년 8월 국제측지연맹 이사회에서 지구측지관측시스템을 지속할 것을 결의하였다. 2005년부터 2007년까지의 실행단계(Implementation Phase)에서는 M. Rothacher 의장 등을 중심으로 운영위원회와 이사회, 학술위원단, 실무그룹 및 웹 페이지가 구축되었으며, 규약이 수정되었다. 2007년 IUGG 총회에서 지구측지관측시스템을 국제측지연맹의 항구적인 관측시스템으로의

확고한 위치로 올려놓게 되는데, 현재의 지구측지관측시스템 조직은 이때 확정된 것이다.

한편 2003년에 제1차 지구관측정상회의(EOS-I, First Earth Observation Summit)에서 지구관측특별그룹(the ad hoc Inter-government Group on Earth Observation)이 설립되고, 2004년에는 제2차 지구관측정상회의(EOS-II)에서 『지구관측을 위한 9개의 사회 편익분야』가 정의된 프레임워크 문서가 채택되었는데, 사회편익분야는 재해(Disaster), 보건(Health), 에너지(Energy resources), 기후(Climate), 물(Water), 기

상(Weather), 생태계(Ecosystems), 농업(Agriculture), 생물다양성(Biodiversity) 이다. 이 시기에 국제측지연맹은 지구관측그룹의 참여기구로 가입하게 되었다. 2005년 2월에 제3차 지구관측정상회의(EOS-III)에서 『전지구관측시스템 10년 이행계획』(Battrick, 2005)이 채택되면서 이를 수행할 임무와 함께 지구관측그룹이 정식으로 설립되었다. 2005년 지구관측그룹에 포함된 지구측지관측시스템과 관련된 물리량들로는 1) 광범위한 지역에 걸친 3차원 변형 모니터링, 2) 침강지도, 3) 응력변형과 크리핑(creeping) 모니터링, 4) 모든 규모의 중력, 자력, 전기장, 5) 중력과 자기 이상 자료, 6) 지하수위와 공극압, 7) 조석, 해안수위, 8) 해수면, 9) 빙하와 아이스캡(ice caps), 10) 눈의 피복(snow cover), 11) 대기의 습도/수증기, 12) 악기상기후 예보, 13) 강수와 토양수분 등이다.

지구측지관측시스템은 2004년 5월 지구관측그룹 참여기구로 승인된 후, 이어서 2006년 5월에 유엔의 IGOS-P(Integrated Global Observing System-Partnership)의 일원으로 가입하고, 각각 기후와 해양 및 지상생태계를 대상으로 하는 GCOS(Global Climate Observing System)와 GOOS(Global Ocean Observing System) 및 GTOS(Global Terrestrial Observing System) 등으로 구성된 G3OS(GCOS, COOS, GTOS)와 함께 네 번째의 지구관측시스템(Global Observing System)이 되었다. IGOS는 지구시스템에 대한 지속적이고 심도 있는 모니터링을 목적으로 하는데, 이를 정의하고 발전 및 수행을 위해 13개의 설립 파트너가 모여 1998년에 시작되었다. 지구측지관측시스템은 국제측지연맹을 대표하여 이러한 국제기구에 대한 인터페이스의 역할을 수행하고 있다.

비전, 임무, 목표

지구측지관측시스템의 비전과 임무 및 목표는 운영 규칙(terms of reference)에 나타나 있는데, 2007년 IUGG 총회에서 국제측지연맹 이사회에 의해 승인된 수정본(Drewes, 2008)을 참조하였다.

먼저 비전은 다음과 같다.

- 보다 나은 일관성, 장기적인 신뢰성 및 측지학적, 지구동역학적, 지구적 변화 과정에 대한 이해를 성취하기 위하여 서로 다른 측지학적 기법들과 모델들 및 접근법들은 통합함
- 지구과학에 있어서 지구적 변화 연구에 대해 중

요한 측지학적 기여로서의 인프라와 과학적인 기초를 제공함

- 고체지구뿐만 아니라 유체 요소들도 포함하고, 정적·동적인 중력장을 포함함으로써 지구시스템을 하나의 전체로서 봄
- 지구과학계통 학문들과 여타의 학술 혹은 응용분야에 대해 측지학적 기여를 제공함을 통해 지구과학 영역에서 측지학의 위치를 확고히 함
- 국제측지연맹의 활동을 통합하며, 측지학적 연구와 응용분야의 광범위한 스펙트럼의 상호 보완성을 강조함

또한 지구측지관측시스템의 임무는 다음과 같이 정의할 수 있다.

- 국제측지연맹을 위한 의사수렴 및 대변인 역할을 함
- 국제측지연맹의 서비스들의 데이터와 산출물을 향상시킴
- 측지학의 세 가지 기본 영역이라 할 수 있는 1) 기하학적 형상과 운동학, 2) 지구 방향과 자전, 및 3) 지구중력장과 변화에 대한 안정적 모니터링
- 측지학적 관측과 산출물 및 모델들을 획득하고 수집하기 위해서, 그리고 신뢰성, 일관성, 유용성을 담보하기 위해서 국제측지연맹의 서비스들과 위원회 그리고 참여 기구들을 통해 업무 수행
- 일관된 측지학적 산출물을 확인하고, 산출물의 정확도와 시간해상도 및 일관성에 관련된 요구조건을 설정
- 국제측지연맹 서비스 간의 격차를 식별하고, 그것을 좁힐 수 있는 전략을 개발
- 기존 및 신규 국제측지연맹 서비스들 사이의 긴밀한 협력을 촉진함
- 측지학 연구의 가시성을 향상 및 증진시킴
- 과학과 사회 일반을 위한 최대한의 유익을 달성

이러한 임무를 성취하기 위한 핵심 요소들은 국제측지연맹 서비스들과 위원회들인데, 서비스들은 인프라와 산출물을 제공하고, 위원회는 지문을 제공하고 과학적 개발을 지원할 것이다. 요약하면, 지구측지관측시스템은 과학과 사회 일반에 대한 측지학의 중심 인터페이스가 된다.

이러한 임무를 이루기 위한 지구측지관측시스템의 목표는 다음과 같다.

- 세 가지 측지학의 기본 영역에 관련하여 연속된 첨단 관측 자료를 생산함으로써, 기하학적/중력학적인 기준프레임과 이들 데이터와 산출물의 시간변화에 대한 안정성을 유지하고 열린 접근을 제공함.
- 첫 단계에서는 인공위성과 지상에서의 관측을 포함하여 기하학적/중력학적인 산출물의 일관성을 확고히 하는데 관련된 사항들에 집중
- 지구측지관측시스템 산출물의 전체적인 정확도와 정합성을 10^{-9} 이상의 수준¹⁾을 목표로 함
- 국제 협력체들의 동의로 국제측지연맹 서비스들과 지구과학 사회에서 사용되는 서로 다른 측지학적 표준들 사이에서의 일치성을 확보하기 위해 활동함
- 측지학적 모델들을 관측에서 요구되는 수준으로 향상시킴

과학적 주제와 관측시스템 및 지구시스템 모델링

지구측지관측시스템의 운영규칙(Drewes, 2008)을 통해 제시되는 지구측지관측시스템의 과학적 주제는 『지구시스템의 동역학(Earth System Dynamics)』으로서 지구 시스템에서의 지구규모의 변형과 질량의 상호교환과정에 초점을 맞춘다. 이러한 주제는 지구측지관측시스템의 우산이라 할 수 있는 기하학적 형상과 지구자전 및 중력장 아래에서 측지학의 모든 측면과 가상적으로 대응된다. 이것은 실질적이고 개별적인 부주제들과 다양한 서비스 산출물을 통해서 쉽게 이해되는데, 지구측지관측시스템은 아래와 같은 과학적 의문과 집중 연구 영역을 접합할 것이다.

- 지체구조적인 변형: 지역적인 규모에서의 고밀도화 및 지구적 규모의 지체구조 변형 양상, 판과 판 사이, 그리고 판 내부의 변형
- 지구규모의 높이 변화: 육상과 빙하를 포함하는 피빙지역(ice cover) 및 해면의 높이 변화. 하나의 데이터만을 사용하고 모든 시간 규모에 대해서, 그리고 지구동역학적 기원뿐만 아니라 인위적인 원인에 의한 것을 포함
- 대기와 얼음을 포함하는 수권 및 고체지구 사이의 질량전달에 의한 부하 혹은 팽창 변형
- 지구운동과 열적 팽창으로부터 질량변화에 의한 효과의 분리

- 고체지구의 효과로부터 해양의 효과 분리(예, 해수면 평가)
- 각운동량 교환과 질량 전달의 정량화
- 지구시스템 모델에서 각운동량과 질량수지에 대한 평가
- 지구시스템의 각각의 요소들 간의 질량 교환의 정량화

지구측지관측시스템은 위의 연구주제들을 성취하기 위하여 무엇을 관측하고, 또 어떤 도구와 방법을 사용할까? 먼저 관측대상은 위에서 언급한 측지학의 세 가지 기본영역, 흔히들 지구측지관측시스템의 세 기둥 혹은 측지학의 세 기둥이라고도 하는 것이다. 이것들은 측지학과 관련된 모든 영역을 잠정적으로 포함하고 있다. 예를 들어 지구의 표면은 여러 개의 판으로 나뉘어져 이동하고 있는데, 공인된 지구기준좌표계인 ITRF(International Terrestrial Reference Frame)는 이러한 판의 운동과 이에 의한 지각의 변화를 첨단 우주측지기술로 정확하게 기술하여 구현하게 된다. 또 지구의 중력장의 변화를 정확히 결정함으로써 지구의 물리학적 형상이라고 할 수 있는 지오이드를 결정하고, 지구시스템 간의 여러 가지 형태의 질량의 이동과 해수면 변동 연구 등에 활용할 수 있게 된다. 지구측지관측시스템의 관측대상은 단지 21세기 측지학과 지구운동학에 관련된 과학적 이슈뿐만 아니라 유관된 사회적 이슈들, 즉 지구규모의 위기관리, 지질재해, 천연자원, 기후변화, 악기상 예보, 해수면 평가와 해양 예보, 우주기상 등등에도 대응할 것이다. 현대 측지학, 특히 우주측지학의 경이적인 발전으로 말미암아 이러한 이슈들에 대한 측지학적 접근이 가능하게 되었다.

지구측지관측시스템의 관측도구는 우주측지기술에서 초장기선전파간섭계, 인공위성레이저추적시스템, 달레이저추적시스템(LLR, Lunar Laser Ranging), 위성항법시스템, DORIS, 고도계위성, InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar), 중력측정 위성(Gravity Missions) 등과 지상측지기술인 수준측량, 절대/상대중력측정, 해양조석측정, 항공/선상중력측정 등이 있다. 초장기선전파간섭계는 매우 멀리 떨어진 외부우하의 퀘이사에서 오는 전파를 수신하는 것이며, 나머지들은 인공위성을 이용한 방법이다. 초장기선전파간섭계는 우주측지기술 중 기선거리에 대

1) 10^{-9} 수준: 1 ppb. 측지 기선에 대한 오차의 비율로서 1,000 km 당 오차가 1 mm 이내

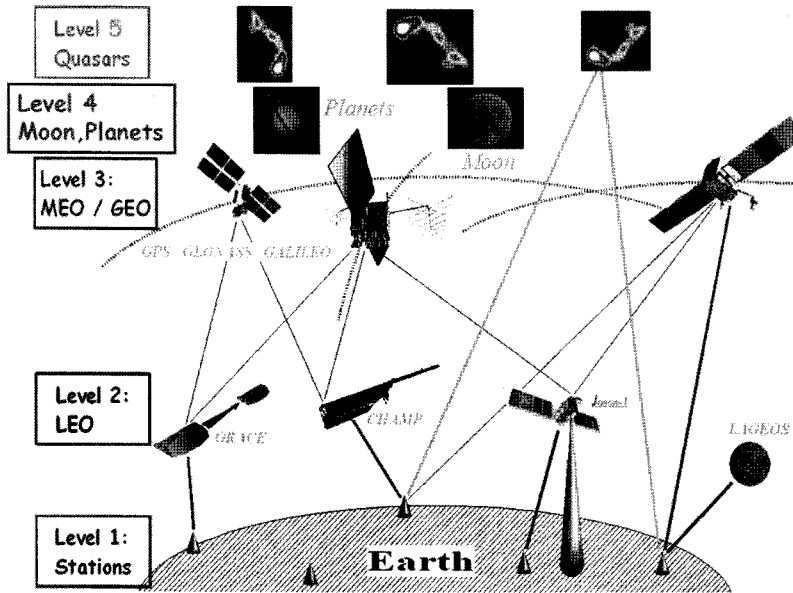


Fig. 2. Integration of five levels into a GGOS(from Rothacher, 2007). Each level represents 1) the terrestrial geodetic infrastructure, 2) the low Earth orbit satellite missions, 3) the GNSS and LAGEOS-type SLR satellites, 4) the planetary missions and geodetic infrastructure on planets, 5) the extragalactic objects, respectively.

해 가장 안정적인 해를 제공하고 있으며, 인공위성 레이저추적시스템과 함께 ITRF를 위한 스케일을 결정할 때 사용된다. 이 기술은 천구기준좌표계(ICRF, International Celestial Reference Frame)를 결정하고, 이것과 ITRF와의 변환 계수를 결정할 수 있는 유일한 기술이다. 인공위성레이저추적시스템은 인공위성의 궤도를 가장 정밀하게 측정할 수 있는 기술로서 지상에서 레이저를 발사하여 인공위성의 반사경(달 레이저추적시스템의 경우는 달 표면에 장치된 반사경)에 부딪혀 돌아오는 시간을 측정하여 거리를 결정하는 방법이다. 두 번째 인공위성레이저추적시스템 전용위성인 LAGEOS(LASer GEOdynamics Satellite)가 발사되어 수십 년간의 데이터를 제공함에 따라 현재 까지도 정밀측지연구 및 중력장 연구에 매우 유용하게 사용되고 있다. 우주측지기술 중에 가장 빠르게 발전한 것은 GPS로 대표되는 위성항법시스템 기술이며, 그 응용범위가 가장 광범위하고 사용자의 입장에서 가장 적은 비용으로도 고비용의 다른 측지기술에 버금갈 정도의 매우 정확한 측위를 가능하게 하고 있다. 지상측지기술들은 비교적 오래된 역사를 가지고 있는 방법들인데, 인공위성을 활용한 측지 및 지구관측기술과 결합하여 매우 중요한 역할을 수행하고 있다. 인공위성은 관측 범위가 전지구적이고 고른 분

포의 자료를 획득할 수 있지만, 높은 고도에 위치하고 매우 빠르게 이동하기 때문에 해상도나 정확도에 있어서 지상의 측정 방법에 비해 떨어질 수밖에 없다. 따라서 인공위성의 관측자료는 지상의 관측 자료와 비교하여 보정되거나 검증되기도 하고, 두 자료가 결합하여 더 높은 해상도의 통합자료를 만들어 내기도 한다. 또 기상과 기후, 지하수, 설빙, 고체지구 등에 대한 지상관측자료의 동화를 통해 지구의 질량 이동과 지표변화의 역할 등에 대한 이해를 증진시키게 된다.

지구측지관측시스템의 관측시스템은 그림 2에서 보는 것과 같이, (신호를 송수신 하는) 능동적이거나 (신호를 수신만 하는) 수동적인 혹은 둘 다에 해당하는 관측도구나 대상으로 되어 있으며, 다음과 같이 다섯 단계로 나누어진다(Plag et al., 2008, Rothacher et al., 2007).

- 레벨 1: 지상의 측지 인프라
- 레벨 2: 저궤도 위성들(LEO, Low Earth Orbiters)
- 레벨 3: 중궤도/정지궤도위성들(MEO, Medium Earth Orbiters/GEO, Geostationary Earth Orbiters)
- 레벨 4: 달과 행성탐사 미션, 행성에서의 측지 인프라
- 레벨 5: 우주 전파원

레벨 1은 지표에 있는 측지 관측망과 우주측지 추적 관측소, 그리고 데이터 센터와 분석센터 등으로 구성된다. 이는 초장기선전파간섭계, 인공위성레이저추적시스템, 달레이저추적시스템, 위성항법시스템, DORIS, 초전도/절대중력, 해양조석 관측망 등인데, 대부분의 관측소는 기상센서나 WVR(Water Vapor Radiometer) 등의 보조적인 장비나 센서들을 갖추고 있으며, 많은 관측소는 하나 이상의 측지 관측을 동시에 수행하고 있다. 주된 측지관측 도구들이 한 장소에 모여 있는 관측소를 통합관측소(core station)라고 하는데, 이것을 통해 개별 측지 기술들을 ITRF와 같은 단일 프레임으로 통합할 수 있을 뿐만 아니라 관측의 품질과 정확도, 그리고 상호 검증을 가능하게 해 주는 매우 중요한 역할을 한다. 또한 지구기준좌표계를 1mm 이하의 정확도로 유지하는데 필수적이다.

레벨 2는 저궤도 위성들인데, 레벨 1뿐만 아니라 레벨 3의 도움으로 매우 정확한 궤도를 결정할 수 있다. 따라서 지상 관측망과 위성항법시스템은 측위에 있어서 필수적이다. 레벨 2를 위한 위성들은 10년 이상의 연속관측데이터를 제공한다. 고도계, 중력, InSAR 등과 같은 일련의 인공위성 미션들, COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)이나 SWARM과 같은 위성 군집(constellations of satellites), 마이크로 및 나노 위성들, 여러 위성이 하나의 거대한 관측도구를 형성하는 편대비행(formation flying) 위성, 새로운 센서와 기술들의 개발(예, 위성항법시스템 반사계와 산란계, 위성간 레이저 간섭계, 우주공간에서의 초안정 발진기) 등이 이에 해당된다. 위성항법시스템 수신기나 인공위성레이저추적시스템 되반사경, 초장기선전파간섭계 방출계, 중력경사계 등을 동시에 탑재한 위성이나, 위성항법시스템 위성들에 대한 인공위성레이저추적시스템 관측, 우주공간에서의 초장기선전파간섭계 등은 우주측지기술의 통합관측을 우주공간에서 가능하게 한다.

레벨 3은 중궤도/정지궤도위성들이다. 미국의 GPS를 위시하여 러시아의 GLONASS, 유럽의 GALILEO 등과 같은 위성항법시스템을 위한 위성들과 LAGEOS 형의 인공위성레이저추적시스템 위성들이 여기에 해당된다. 위성항법시스템 역시 기준프레임을 구현하는 것과 지구 관측의 많은 응용분야에서 필수적인데, 2011년까지 약 100개의 위성항법시스템 위성들이 갖추어질 계획이어서 새로운 수준의 품질과 정확도가

얻어질 것이다. 위성항법시스템과 인공위성레이저추적시스템을 연결하기 위해서는 위성체에 레이저 되반사경을 설치해야 하는데 모든 GLONASS와 GALILEO 위성들이 이를 장착할 예정이다. 인공위성레이저추적시스템망은 기준프레임의 유지와 중력의 시간변화를 측정하기 위해 LAGEOS 1, 2나 Etalon 1, 2, 그리고 Starlette and Stella 등과 같은 구형(球形)의 측지용 위성을 지속적으로 추적할 것이다. 또한 GPS-35와 36, GALILEO 위성들, 그리고 GLONASS 위성의 일부에 대해서 지속적인 인공위성레이저추적시스템 측정이 이루어질 것인데, 이러한 위성항법시스템 위성들에 대한 인공위성레이저추적시스템 추적은 측위의 품질과, 장기간의 안정도, 궤도와 시간의 정확도 검증, 그리고 ITRF와 다른 기준프레임을 맞추는데 필수적이다.

레벨 4는 달과 행성으로 구성되는데, 동역학적 기준프레임을 위해 특히 중요하다. 레벨 5는 안정적인 케이사로서 우주공간에 대해 고정된 관성기준프레임을 제공해 준다. ICRF는 지구자전매개변수(EOP, Earth Orientation Parameter)를 측정하고 위성의 궤도를 위한 궁극적인 프레임이기 때문에 측지학에서 매우 중요하다. 이것을 구현하는 유일한 기술이 초장기선전파간섭계이다.

전체 시스템의 개개 부분(관측 유형)은 지구상의 같은 장소, 혹은 동일한 위성이나 대상체에서 서로 다른 기구에 의한 동시 통합관측에 의해 연결되어진다. 여러 관측 장비들과 센서들을 이용해서 한 장소에서 동시에 관측하는 것은 시스템의 일관성과 정확도를 위해 매우 중요하며, 또한 하나의 거대한 관측 장비처럼 작동할 수 있는 시스템의 통합을 위해서도 매우 중요하다. 개개의 관측기술은 나름대로의 강점과 약점을 가지고 있는데, 통합관측을 통해서 강점을 높이고 약점을 최소화하여 가장 강력한 시스템을 만들려는 것이다.

지구측지관측시스템의 관측시스템을 통해 지구의 형상과 변화를 측정하고 매개변수를 결정하며, 이어서 이들과 영향을 미치는 지구시스템 연구로 심화된다(Fig. 3). 먼저 그림의 왼쪽 옆에 주요한 측지학적 관측도구들이 나열되었다. 이들에서 얻어진 관측 자료들을 이용하여 측지학적인 매개변수들을 결정하게 될 것인데, 각각 지구의 기하학적 형상과 운동학, 지구자전 및 지구중력장 등에 관련된 것들로서 측지학의 세 기둥을 세우는 것이 된다. 나아가 이런 관측결과들의 도입과 자료동화 및 통합을 통해 오른쪽에

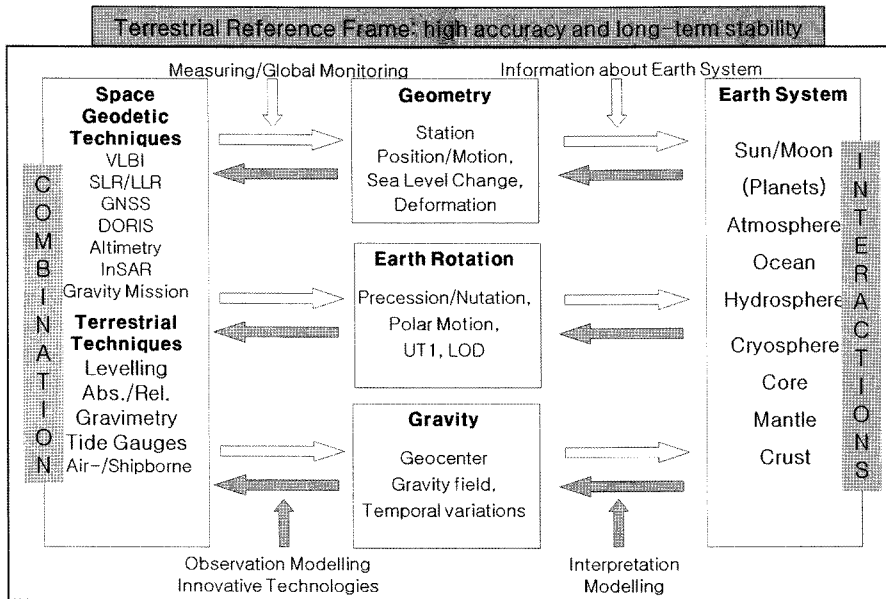


Fig. 3. Measuring and Modeling the Earth's System (from Rothacher et al., 2007 and Rothacher, 2007).

나열된 지구시스템 요소들 중 하나 혹은 그 이상이 결합된 모델을 만들게 된다. 이는 지구상의 한 지점의 운동이라는 현상이 중력장과 지구 자전의 변화까지도 포함하는 내외적인 인과관계의 산물임을 생각할 때, 측지학과 지구시스템의 연결은 매우 당연한 것이 된다. 측지학적 관측이 지구시스템의 연구에 기여하는 이러한 순방향의 역할뿐만 아니라 역으로의 피드백도 발생하는데, 지구시스템에 대한 모델링의 향상은 측지학적 매개변수들에 대한 이해와 정확도 향상과 더불어 보다 균일하고 정확한 데이터 처리 전략과 향상된 관측모델 개발을 이끌어내게 된다. 예를 들면 고도계위성을 이용하여 관측된 해면고도를 통해 해면에 대한 타원체로부터의 높이를 알아 낼 수 있다. 또 중력측정위성으로부터 중력이상과 지오이드를 결정할 수 있다. 이들의 차이에서 해수면의 지형(DOT, Dynamic Ocean Topography)과 걸프해류와 같은 지형류에 대한 모델을 개발 할 수 있는데, 이는 해양에서 온도, 염분, 해류의 유속 등을 측정하여 결정할 수도 있다. 이들에 의해 향상된 모델로 해양변화를 모니터링하거나 역으로 측지관측 및 보정모델을 향상시키는 데 활용될 수도 있는 것이다. 이러한 인과관계 혹은 순환관계를 가지고 있는 측지-지구시스템모델의 향상은 궁극적으로 지구기준좌표계를 보다 정확하게 만들고, 나아가 더 정확한 지구관측을 가능하게 할 것이다. 결국 지구측지관측시스템은 현대 측

지학적 도구를 통합하여 지구시스템을 구성하고 있는 요소들에 대해 보다 정확하게 측정하고 해석할 수 있도록 도움으로써 전지구관측시스템의 실현에 기여하게 된다.

지구질량이동감시와 자연재해방재

지구측지관측시스템의 과학적 주제는 지구의 동역학으로 표현할 수 있으며, 이를 위해 모든 측지학적 도구들과 자료처리 모델 및 지구물리모델의 통합을 통한 정확도의 향상이 선행되어야 한다. 중력장과 이의 변화는 질량의 분포와 이동에 밀접하게 관련되어 있는데, Fig. 4는 중력과 관련된 현상들을 보여준다. Fig. 5는 질량변화를 감시하는 것을 보여주는 한 예로서, 대규모 강을 가진 분지에서의 물저장량의 계절 변화를 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 위성으로 측정한 것과 수문학적모델인 WGHM(Watergap Global Hydrological Model)으로 모의한 것을 비교한 것이다. WGHM은 기후와 토양, 토지이용이나 인구, 수입, 기술수준 등을 고려하여 남극을 제외한 전 지구에 대해서 수자원과 이의 사용을 모의한 것으로서 경위도 30분 간격의 공간해상도를 가지고 있다. 반면 GRACE 모델은 인공위성을 이용하여 중력을 측정하는 것으로서 표층의 물뿐만 아니라 지하심부까지의 총량을 측정하게 되어 측정방법과 시공간 해상도가 다르고, 측정대상의 범위에서도

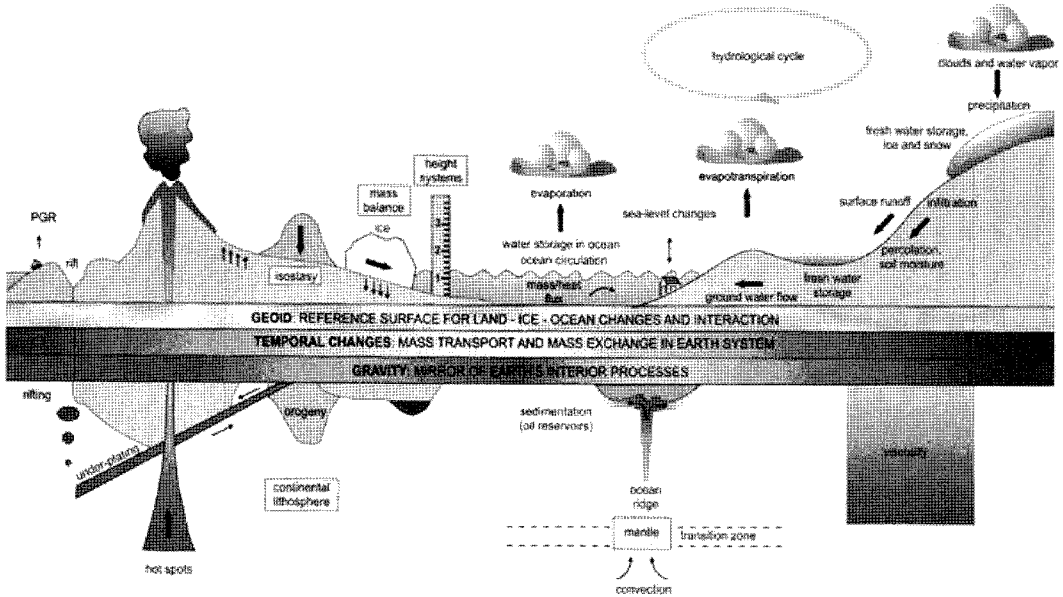


Fig. 4. The interrelation of gravity, gravity variations, mass transport and distribution (from Ilk et al., 2005).

약간의 차이가 있다. 진폭의 차이가 있지만, 전체적으로 인공위성을 이용한 질량변화 측정이 수문학적 모의 결과에 부합하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

Ilk et al.(2005)는 지구시스템모델에서 매우 중요하면서도 빠져있는 것은 지구시스템의 요소들 간의 질량이상과 이동 및 교환, 궁극적으로는 지구적인 질량균형의 확립에 대한 것이라고 지적하고, 질량의 신호를 다음의 세 가지로 구분하고 있다. 첫째는 해양과 대륙의 물저장량(대륙의 경우 지하수, 지표수와 빙설 등을 포함), 대기압의 변화와 지구 내부에서의 질량분포의 변화-계절변화에서 연년변화에 이르는 시간 변화이다. 둘째는 해양 동력학에 의한 것으로 정밀한 고도계와 중력(지오이드)의 결합으로 해류에 의한 질량과 열의 이동량을 결정하도록 하는 것인데, 이는 지구기후변화에 대한 주요 기작이다. 셋째는 맨틀과 지각의 밀도구조에 대한 신호인데, 중력이상과 지오이드는 지구 내부구조를 반영하는 것으로 대류, 판의 침강과 맨틀플룸과 같은 지구내부에 대한 동역학모델링을 위해 여타의 지구물리적인 정보와 보완을 이룬다.

20세기 중후반 이후 위성항법시스템과 인공위성레이저추적시스템을 이용하여 지구 무게중심의 계절적 변화와 지구 평편도(Oblateness)의 연년변화 등등이 관측되고 있다(Blewitt et al., 2001, Cox and Chao,

2002). 위성항법시스템과 인공위성레이저추적시스템으로 관측된 결과는 위에 제시한 3가지 지구시스템에서 발생하는 질량이동의 합으로 각 지구시스템에서의 질량 이동을 평가 하지는 못한다. 21C 들어서 CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload)와 GRACE, 그리고 최근(2009년 3월 17일) 발사에 성공한 GOCE(ESA's Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer) 미션들은 지구중력장 관측에 있어서 괄목할 만한 향상을 가져왔고, 비로소 지구시스템에서의 질량이동에 관한 본격적인 연구가 가능해지게 되었다. 예를 들어, GRACE 위성을 통해 지구질량변화와 관련된 지구시스템에 대한 학제적 연구가 매우 활발히 진행되고 있다(e.g, Tapley et al., 2004). 저명한 학술잡지에 발표되는 것뿐만 아니라 GSTM (GRACE Science Team Meeting)을 통해 매년 수십 편의 최신 연구 논문 발표와 토론이 진행되고 있다. 2003년부터 2008년까지 발표된 자료는 인터넷을 통해 공개되어 연구동향 파악에 매우 유익하게 사용될 수 있다(<http://www.csr.utexas.edu/grace/GSTM/>). 2008년에 발표된 연구주제들의 일부를 살펴보면, 지구의 역학적 편평도의 변화(예, Cheng, 2008), 2004년 수마트라 대지진에 의한 질량변화(예, Biancale, 2008)와 이에 대한 지구물리모델링(예, Han et al., 2008), 그린랜드나 남극의 빙하 질량수지(예, Velicogna et al., 2008)와 후빙기 지각반동(예, Velicogna, 2008),

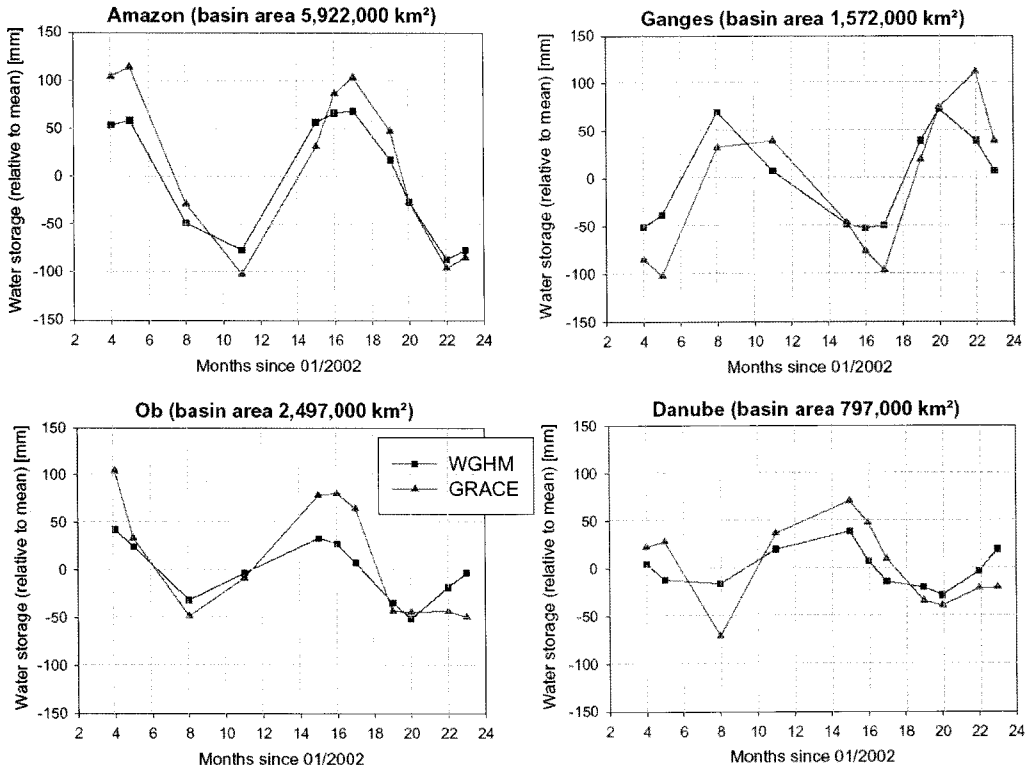


Fig. 5. Time series of water storage for large river basin for 11 monthly GRACE gravity field solutions and for simulations with the global hydrological model WGHM (from Ilk et al., 2005).

아마존의 물저장량 변동(예, Han, 2008), 2005년 아마존기물(Chen et al., 2008), 해양조석(Ray et al., 2008), 해저압력변화(예, Park et al., 2008), 대륙빙하의 변화(예, Luthcke et al., 2008), 해수면상승(Willis et al., 2008) 등이 있는데, 분과는 측지학과 중력장모델결정, 빙권, 고체지구, 수문, 해양 등으로 나누어져 있다. 또한, GOCE는, 상대적으로 GRACE를 이용한 연구에서 부족했던, 해양 동력학에 의한 질량 이동과 지구내부 밀도분포에 의한 중력관측 연구 발전에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

지구시스템의 질량 현상을 측지학적으로 모니터링 하는 것은 중력측정미션들과 기하학적인 미션들-고도계위성과 보완적인 원격탐사미션이 합쳐져야 한다. Flury and Rummel(2004)은 기하학적 미션을 해양과 얼음 및 지표의 형상과 변화, 그리고 판운동 속도를 제공하는 것들로서 해면과 얼음에 대한 고도계 위성, 얼음과 육지에 대한 SAR 및 위성항법시스템에 의한 측위를 지칭하는데, Fig. 6의 좌측에 표현되었다. 그림에서 세 가지의 주요 인공위성미션들과 그 대표적인 위성들 및 관측하는 물리량을 간단히 살펴볼 수

있고, 이들을 통한 연구분야로 지각과 맨틀의 동역학, 빙권의 질량수지와 해수면 변화, 수문학적 순환, 해양의 질량과 열전달 등이 있다. 지구의 질량이상이나 이동에 대한 신호는 매우 작으면서도, 또 한편으로 기하학적인 센서와 중력학적인 것이 결합되어야 유도될 수 있기 때문에 매우 어려운 일이다. 따라서 모든 위성시스템들이 상대정밀도가 각각(기하학적) 기선거리 혹은 지구전체 평균중력 대비 10억분의 1내이고 계통적인 왜곡이 없으며 수십 년간에 걸쳐 안정적인 하나의 지구기준계로 통합되어야 한다(Flury and Rummel, 2004).

지구질량변화와 관련된 다양한 지구물리적인 현상을 현재의 측지관측기술이 얼마나 감지해 낼 수 있을까? Fig. 7에는 지구시스템의 질량과 관련된 여러 현상들의 시공간적인 규모를 나타내었고, 또한 현재 운용중인 위성(CHAMP, GRACE) 및 최근 궤도에 올려진 위성(GOCE)에 의해 획득되는 중력자료의 시공간 해상도를 표현하고 있다. 노란선은 GRACE에 의한 해상도가 당초 기대했던 것보다 더 뛰어난 결과를 보여주고 있음을 나타낸 것인데, Ilk et al.

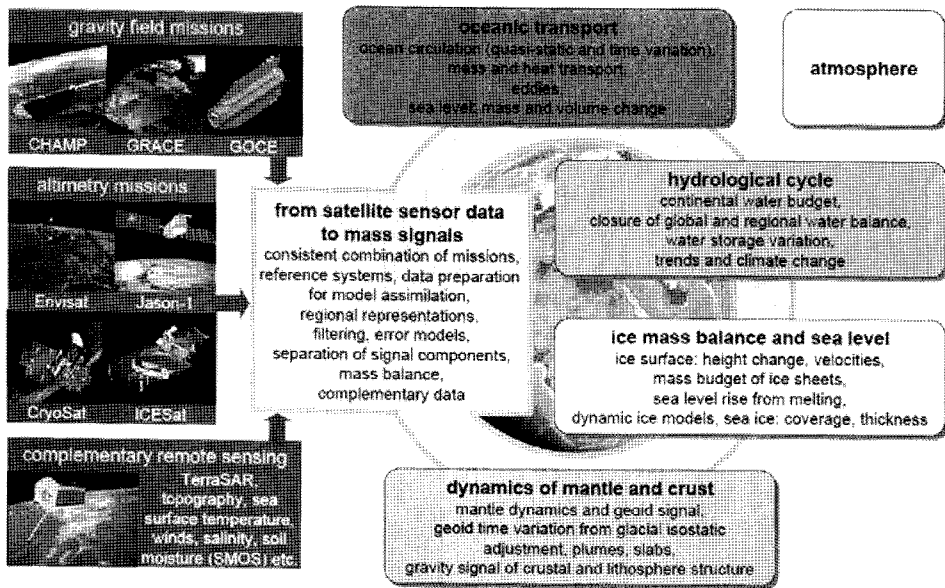


Fig. 6. Multi-disciplinary research themes on mass transport and mass distribution in the Earth system through gravity and geometry missions (from Flury and Rummel, 2004).

(2007)에서 인용한 것이다. 현재 시간해상도 측면에서는 최대차수 30의 구조화계수 주간(weekly) 모델 (Dahle et al., 2008)과, 최대차수 120의 구조화계수 월간(monthly) 모델이 사용되고 있다. 공간해상도 측면에서는 최대차수 180(반과장으로 약 110km)까지의 평균적인 중력장모델이 제시되고 있다(Tapley and Rothacher, 2008). 그림에서는 여러 지구물리적인 현상들에 대해 이미 상당부분은 측지학적인 관측과 모델링이 가능해졌지만, 여전히 많은 부분에 대해서는 한계를 가지고 있음을 보여준다.

Gross(2006)는 기후변화, 얼음질량수지, 해수면변동, 채널러요동과 관련된 대기, 해양, 수권의 요인들, 맨틀의 비탄성 등의 예를 들면서, 동역학적인 지구와 구성시스템들의 상호작용에 대한 더 나은 이해를 위해서는 기준프레임의 정확도와 안정도가 최소한 한자리수 이상의 향상이 필요하며, 또한 지구자전매개변수의 정확도를 향상하는 것은 채널러요동이나 핵의 자유장동 이외에도 추가적인 공명들을 더 관찰할 수 있도록 하여 결과적으로 지구 내부구조에 대해 보다 잘 이해하게 해 줄 것이라고 하였다. 그리고 GRACE 위성은 지구시스템의 질량이동에 대한 우주기반의 중력측정의 유용성을 증명하였지만, 공간 해상도는 최소한 한자리수 이상, 정확도는 두 자리수 이상의 향상이 더 필요하다고 하였다. 측지관측의 정확도의 향

상에 따라서 관련된 지구모델들과 이론들도 같이 향상되어야만 하는데, 지구자전의 해석에 사용되는 방정식이 선형화되어 있기 때문에 관측수준에도 미치지 못하고 있는 것을 일례로 제시하였다. 미국 연구 위원회(National Research Council)는 2010년대 후반에 GRACE의 후속 미션을 제안하고 있다(NRC, 2007). 현재 우주측지를 통한 중력관측의 시공간적인 해상도를 높이는 연구 등이 진행 중이며, 이를 바탕으로 GRACE 후속 미션에서는 한 단계 높은 수준의 지구 질량 이동 관측이 실현될 것으로 기대된다.

한편, GEO가 제시하고 있는 9가지 사회편익분야 중 첫 번째가 “재해”로서 자연적인 혹은 인위적인 재해로부터 생명과 재산의 손실을 줄이는 것이다. “재해”라는 주제는 『국가 R&D 사업 Total Road Map』에서는 “자연재해·재난 예방 및 대응기술”을 특성화 기술 33개 중의 하나로 선정하였고, 『미래국가유망기술 21』에서는 21개 핵심 기술의 하나로 “재해·재난 예측·관리기술”을 선정하기도 하는 등 현대사회의 매우 중요한 이슈가 되고 있다(한국과학기술기획평가원, 2005, 2007). 지구관측은 단지 지구시스템에 대한 향상된 정보와 이해에서 멈추는 것이 아니라, 이를 바탕으로 재해방재를 포함하여, 증가하는 지구사회의 필요에 공헌하는 것으로서 향상된 정보에 바탕을 둔 의사결정을 통해 지속가능한 발전을 이루기 위함이

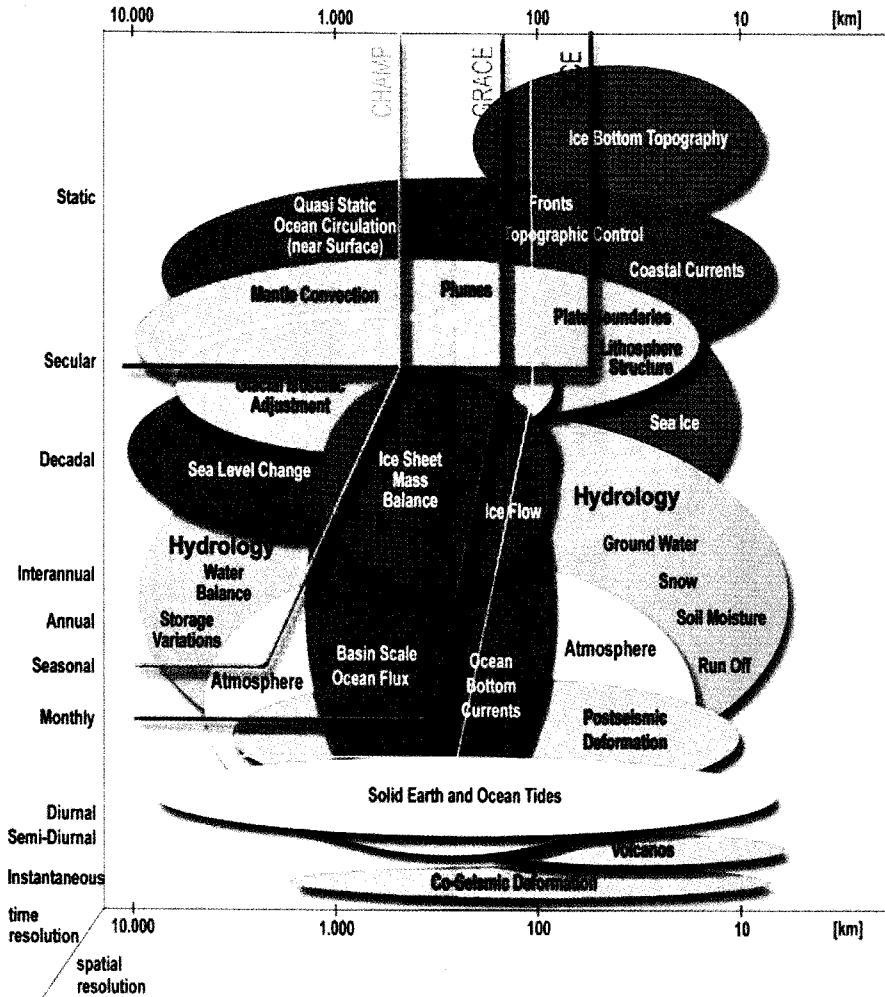


Fig. 7. Temporal and spatial scales of geoid signals associated to solid Earth (orange), ocean (green), ice (dark blue) and continental hydrology (light blue) processes. The red lines show the spatial and temporal resolution limits of the CHAMP, GRACE and GOCE missions, and the yellow line represent the improvement of resolution of the GRACE than before (from Ilk et al., 2007).

다. 측지학적 기술은 지질재해나 인위적인 재해를 평가하는데 있어서 필수적이고, 조기경보시스템에서 중추적인 역할을 할 것이다. 지구측지관측시스템은 하나 이상의 측지학적 기술들을 통해 사태, 낙석과 침강, 화산, 지진, 지진해일, 폭풍해일, 홍수, 서서히 진행되는 해수면 상승 등과 같은 자연재해 및 물순환과 기상 같은 유관 분야에 걸쳐 평가와 예·경보를 통한 재난감소에 기여하고자 한다.

지구측지관측시스템에서 활용하는 기술들과 이를 통해 얻게 되는 핵심 측지 산출물 및 자연재해 관련 활용분야는 그림 8에 잘 나타난다. 지상과 우주공간에서의 측지학적 관측자료는 국제측지연맹의 서비스

들과 분석센터에서 분석되어 측지학관련 매개변수들과 시간변화를 모니터링 함으로써 측지학의 세 기둥과 지구기준좌표계가 세워지는데, 향후 지구측지관측시스템 분석센터에서 통합됨으로써 정확도와 장기적 안정도, 기술들 상호간의 일치성 등에서 새로운 진보를 이루게 될 것이다. 이들은 측지학적 원격탐사기술과 함께, 사태나 지진 관련 지표변화 정밀감시를 통한 재해평가, 위성항법시스템 신호지연을 이용한 이온층 총전자량 산출, 대기의 온도, 압력, 수증기량의 분포 산출과 기상수치모델로의 자료동화, 우주측지상시관측소의 변위와 중력변화 감시를 통한 지각변위와 지진감시, 위성항법시스템 부표를 이용한 해일 조기

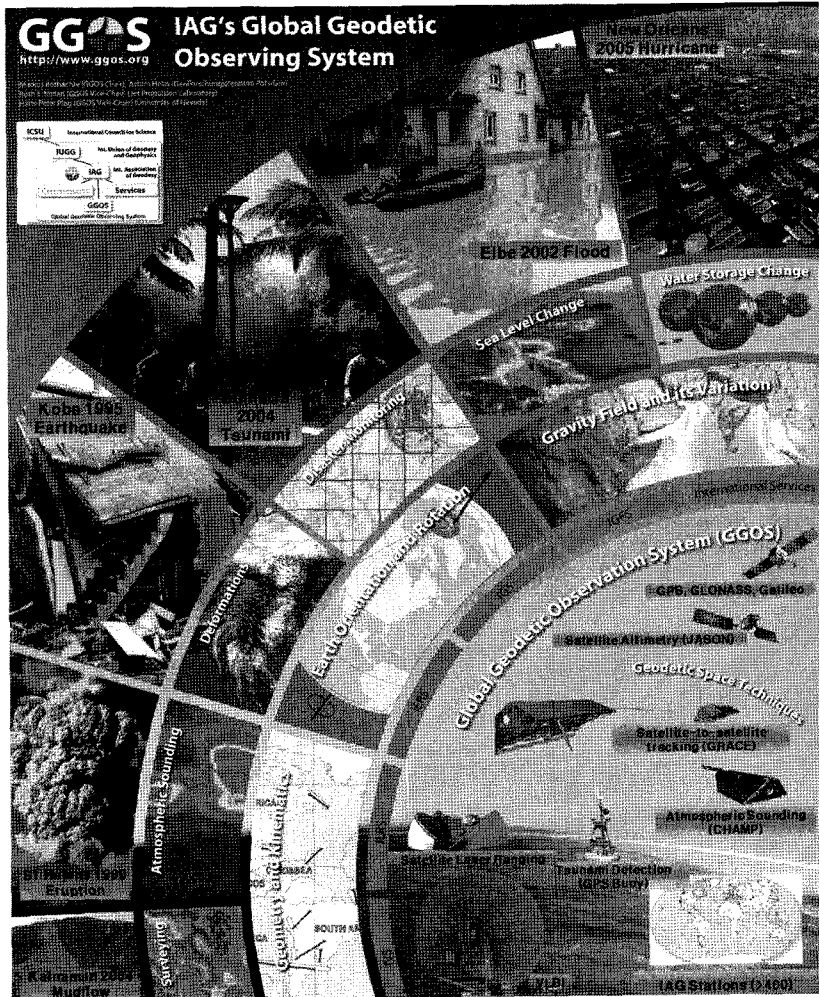


Fig. 8. GGOS Early Warning System (from GGOS Poster at the third International Conference on Early Warning, Bonn, 27-29 Mar. 2006).

경보, 중력과 고도계 인공위성 등을 통한 대륙의 물 저장량과 해수면 변동 및 기후변화 등에 활용되어 자연재해에 대한 조기경보 혹은 재난 감소에 기여하게 된다.

지구측지관측시스템 국내 현황

국내의 측지학 인프라나 전문 인력, 연구 성과 등은 매우 부족한 편이지만, 최근 들어 인프라의 구축이 활발히 진행되고 있으며, 관련하여 연구와 기술개발이 점차 늘어나고 있다. 지구기준좌표계 결정에 핵심이 되는 우주측지기술로는 초장기선전파간섭계, 인공위성레이저추적시스템, 위성항법시스템을 들 수가 있는데, 그 개발의 역사는 짧지만 그 발전과 측지학

및 지구과학에의 기여는 놀라운 속도로 이루어지고 있다. 위성항법시스템은 1978년 최초의 GPS 위성이 궤도에 오르면서 시작되었는데, 우리나라는 1992년 한국천문연구원에서 GPS 상시관측소를 건설하면서 본격적으로 시작하였으며, 현재는 국토지리정보원 등에 의해 전국적으로 약 87개가 운용되고 있다. GPS는 실용적인 응용분야가 일일이 열거하기 어려울 정도로 다양하고 실용적 가치가 뛰어나서 국내에서도 널리 사용되고 있는 도구이긴 하지만, 측지학에서 요구하는 고정밀자료처리기술과 지구과학 연구를 위한 전문인력은 아직까지 소수에 머물고 있다. 초장기선전파간섭계 관측은 1967년 캐나다와 미국에서 처음 실시되었으며, 1979년 미 항공우주국에서 CDP (Crustal Dynamics Project) 관측을 시작하여 범지구

적 규모의 지각판 움직임을 측정하였다. 아직까지 국내 장비로 초장기선전파간섭계의 관측이 실시된 바는 없으며, 한국천문연구원에서 직경 21m의 안테나로 서울-울산-제주를 연결하는 관측망을 구축하고 있는데, 현재는 천문연구용 수신기를 먼저 개발/설치 중이다. 한편 국토지리정보원에서는 측지전용의 직경 22m 안테나를 추진 중에 있다. 1964년 최초의 인공위성 레이저추적시스템 위성이 발사되었고, 70년대 이후 각국에서 인공위성 레이저추적시스템 관측소를 설립하고 인공위성 레이저추적시스템 전용 위성인 LAGEOS가 발사되었는데, 국내에서는 2008년부터 한국천문연구원 이 중심이 되어 이동형 1기와 고정형 1기의 개발이 시작되었다. 이외에도 기하학적인 우주측지기술인 SAR는 한국항공우주연구원의 다목적 5호에 탑재될 예정이며, 달 레이저추적시스템, DORIS, 고도계 위성에 대한 계획은 아직 없다.

한편, 물리적인 측지도구들로서의 중력 측정은 여러 기관에 의해 수행되고 있는데, 육상의 상대중력측정은 부산대학교, 한국지질자원연구원, 서울대학교 등에서 꾸준히 측정을 하고 있으며, 선상중력은 국립해양조사원에서 1996년 이후 지속적으로 우리나라 일원에서 매우 밀도 높은 측정 자료를 확보해오고 있다. 또 국토해양부의 지능형국토정보기술혁신사업단에서는 정밀지오이드구축을 위하여 항공중력측정을 추진하고 있다. 절대중력계는 국토지리정보원에 의해 최근해야 도입되었다. 중력측정을 위한 인공위성미션에 대해서는 아직 계획이 없다. 또한 국립해양조사원에서는 전국 26개 검조장에서 해양조석을 측정하고 있으며, 국토지리정보원에서는 전국의 수준점을 대규모로 재정비하고 재측량하였다.

지구측지관측시스템 관련 국제협력을 위해서 한국천문연구원은 지구측지관측시스템 확대운영위원회 활동을 하고 있으며, 안정적이고 정확한 지구관측 좌표체계 및 시간계 구현을 위해 지구측지관측시스템이 주도하고 있는 지구관측그룹 구조설계 사업, DA-09-02C(구, AR-07-03) 『지구측지기준프레임(global geodetic reference frame)』과 IGCP(The International Geoscience Programme) 565 연구과제, 『지구물순환 모니터링을 위한 지구측지관측시스템 개발(Developing the GGOS into a monitoring system for the global water cycle)』에 기여자 자격으로 참여하고 있다.

결론

지구측지관측시스템은 국제측지연맹의 핵심프로젝트로서 기존의 측지학적 관측도구들과 자료처리과정 및 관련 지구시스템모델을 하나로 통합하여 “지구시스템의 동역학”이라는 과학적 주제에 부응할 최상의 측지학적 산출물을 생산하여 서비스하고자 하는 것이며, 대외적으로는 지구관측그룹을 비롯한 국제기구나 사용자 일반에 대하여 측지학계의 단일 창구역할을 수행한다. 현대 측지학은 우주측지기술의 등장과 눈부신 발전으로 말미암아 지구의 물리·기하학적 형상의 매우 미세한 변화까지도 모니터링 할 수 있는 수준에 이르렀으며, 이를 바탕으로 지구시스템을 구성하는 요소들의 변화에 영향을 미치는 대내외적인 원인의 규명과 예측에 기여할 수 있는 주요 학문분야로 자리매김하고 있다. 이는 측지학의 관측영역이 지구의 핵, 맨틀, 지각, 해양, 빙권, 대류권, 고층대기까지 포함하게 되었고, 역으로 이들에서 일어나는 현상에 기인한 지구형상의 크고 작은 변화에 대해 측지학이 관측할 수 있는 부분이 상당히 넓혀졌음을 의미한다. 따라서 현대 측지학과 여타의 지구과학 학문분야와의 공통영역이 점차 커져가는 만큼, 지구환경에 대한 향상된 관측과 이해 및 인류를 위한 올바른 의사결정을 위해서는 학제적 연구가 과거 어느 때보다도 더 절실하다는 점이 강조되어야 한다. 이에 지구측지관측시스템은 측지학과 다른 학문분야를 잇는 가교 역할을 수행할 것이며, 현대 측지학과 응용분야의 광범위한 스펙트럼을 널리 알리게 될 것이다.

지구측지관측시스템은 전지구관측시스템을 비롯하여 과학 분야와 일반 사용자들이 활용하기 위해서는 측지관측의 시공간 해상도와 정확도 등에서 사용자의 요구조건들에 부응해야 하는데, 이미 많은 영역에서 성공적인 응용 사례가 있지만, 아직까지 도전해야 할 영역이 크게 남아있다. Plag(2006)는 지구측지관측시스템 관련 응용분야-맨틀 대류와 지체구조론, 후빙기 지각반동, 기후변화, 해수면 상승, 해양순환, 물순환계, 계절변화, 대기순환, 지구조석, 지표부하, 지진지체구조, 화산, 지진, 지진해일 등의 분야에서 요구하는 기하 및 중력 측정 해상도와 정확도를 나열하였고, 그리고 Drinkwater et al.(2003)은 중력미션과 관련하여 지오이드와 중력이상의 측정 요구조건을 나타

내었다. 현재로서는 지구의 형상과 중력장, 자전의 변화 및 지구기준좌표계의 결정 정확도를 2020년까지 0.1 ppb 수준으로 향상시킬 계획이다. Drewes et al.(2006)은 기하학적 관측과 중력학적 관측을 통합하는 지구측지관측시스템에 있어서 근본적인 요구조건은 측정과 자료처리 과정의 일관성이라고 하였다.

지구측지관측시스템에서 현재 중점적으로 추진하고 있는 업무는 향후 지구측지관측시스템이 이행하여야 할 전략들을 수립하는 것이며, 이는 GGOS 2020(The Global Geodetic Observing System: Meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020)이라 불리는 문건에 집약되고 있다. 이는 2009년에 단행본으로 출판될 예정인데, 측지학에 대해 세부적이고 전문적인 지식을 전달하는 목적이 아니라, 측지학 전체적인 동향과 통합을 위한 전략을 제시하는 책이며, 또한 측지학이 인류사회와 지구측지관측시스템에 어떻게 기여할 것인가를 보여주는 책이다. 따라서 전지구측지관측시스템과 지구과학의 학제적 연구에 관심 있는 연구자들이 유용하게 참고할 수 있는 책이 될 것이다. 지구측지관측시스템을 소개한 이 짧은 글을 통해 국내에서도 측지학과 여러 지구과학분야의 협력과 학제적 연구의 필요성과 동기부여에 작은 자극이 되기를 기대한다.

감사의 글

본 해설은 기초기술이사회와 협동과제의 지원을 받았음에 감사를 표합니다. 또한 그림 1의 지구자전축 운동은 한국천문연구원 박정호에 의해 계산된 자료를 사용하였습니다. 원고를 꼼꼼하게 검토해주시고 다듬어 주신 두 분 심사위원께 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 한국과학기술기획평가원, 2005, 「미래국가유망기술분야」 선 정결과와 후속조치계획(안).
- 한국과학기술기획평가원, 2007, 국가 R&D 사업 Total Roadmap (중장기 발전전략).
- Batrick, B. (ed.), 2005, Global Earth Observation System of Systems, GEOS: 10-Year Implementation Plan Reference Document. GEO 1000R/ESA SP-1284, ESA Publications Division, Noordwijk, Netherlands, 209 p.
- Biancale, R., Lemoine, J.-M., Bruinsma, S., Gratton, S., and Bourgogne, S., 2008, An improved 10-day time series of the geoid from GRACE and LAGEOS data. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Blewitt, G., Lavalée, D., Clarke, P. and Nurutdinov, K., 2001, A new global mode of Earth deformation: Seasonal cycle detected. *Science*, 294, 2342-2345.
- Chao, B.F., 2003, Geodesy is not just for static measurements any more. *Eos*, 84, 145-150.
- Chen, J., Wilson, C.R., Tapley, B.D., Yang, Z.L., and Niu, G.Y., 2008, Understanding extreme climate events using GRACE and climate models - A case study in the Amazon Basin. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Cheng, M., 2008, Recent variation in the Earth dynamic oblateness, J2, from SLR and GRACE data. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Cox, C.M. and Chao, B.F., 2002, Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. *Science*, 297, 831-833.
- Dahle, C., Flechtner, F., Kusche, J., and Rietbroek, R., 2008, GFZ EIGEN-GRACE05S (RL04) weekly gravity field time series. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Drewes, H., 2008, Geodesist's handbook 2008. *Journal of Geodesy*, 82, 661-846.
- Drewes, H., Dehant, V., and Lambert, S., 2006, Inconsistencies in geodetic concepts, models and analyses at the 0.1 ppb level. GGOS Workshop 2006, Munich, Germany.
- Drinkwater, M.R., Floberghagen, R., Haagmans, R., Muzi, D., and Popescu, A., 2003, GOCE; ESA's first Earth explorer core mission. In Beutler, G.B., Drinkwater, M.R., Rummel, R., and Steiger, R., 2003, Earth gravity field from space - from Sensor to Earth Sciences. Space Science Series vol. 18 of ISSI, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 419-432.
- Flury, J. and Rummel, R., 2004, Mass transport and mass distribution in the Earth system. 2nd International workshop, ESA Esrin.
- Gross, S.R., 2006, Mass transport and dynamics in the Earth system: The unsolved scientific questions and observational requirements. GGOS Workshop 2006, Munich, Germany.
- Han, S.-C., 2008, Dynamics of surface water in Amazon inferred from GRACE measurements of inter-satellite distance change. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Han, S.-C., Sauber, J., Luthcke, S., Ji, C., and Pollitz, F., 2008, Postseismic gravity change following the great 2004 Sumatra-Andaman earthquake from the regional harmonic analysis of GRACE inter-satellite tracking data. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Ilk, K.H., 2007, Mass transport and mass distribution in the Earth system-Contribution of the new generation of satellite gravity and altimetry missions to Geosciences.

- Joint International GSTM and DFG SPP Symposium, GFZ, Potsdam.
- Ilk, K.H., Flury, J., Rummel, R., Schwintzer, P., Bosch, W., Haas, C., Schroter, J., Stammer, D., Zahel, W., Miller, H., Dietrich, R., Huybrechts, P., Schmeling, H., Wolf, D., Geotze, H.J., Riegger, J., Bardossy, A., Gyunter, A., and Gruber, T., 2005, Mass transport and mass distribution in the Earth system. Technical report, GOCE-Projectburo Deutschland, Technische Universitat M-unchen, Geo-ForschungsZentrum Potsdam.
- Luthcke, S.B., Rowlands, D.D., Arendt, A., McCarthy, J.J., Zwally, H.J., Lomonie, F.G., and Boy, J.P., 2008, GRACE observations of land ice evolution. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- NRC, 2007, Earth science and applications from space: National imperatives for the next decade and beyond. National Academies Press, Washington, DC, USA, 456 p.
- Park, J.-H., Watts, D.R., Donohue, K.A., and Jayne, S.R., 2008, A comparison of in situ bottom pressure array measurements with GRACE estimates in the Kuroshio Extension. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Plag, H.-P., 2006. GGOS and its user requirements, linkage and outreach. In Tregoning, P. and Rizos, C., Dynamic planet - Monitoring and understanding a dynamic planet with geodetic and oceanographic tools. International Association of Geodesy Symposia, vol. 130. Springer Verlag, Berlin, Germany, 711-718.
- Plag, H.-P., Rothacher, M., and Neilan, R., 2009, The global geodetic observing system-Part 1, The Organisation. Geomatics World, January/February 09, 26-28.
- Plag, H.-P., Rothacher, M., Neilan, R., and Ma, C., 2008, The global geodetic observing system. Advances in Geoscience, WSPC-Proceedings, in press.
- Ray, R.D., Luthcke, S.B., and Boy, J.-P., 2008, Qualitative assessment of global ocean tide models by analysis of GRACE ranging data. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Rothacher, M., 2007, The design of GGOS in 2020. GGOS Forum, EGU General Assembly 2007, Vienna, Austria.
- Rothacher, M., Neilan, R., and Plag, H.-P., 2007, The global geodetic observing system (GGOS). GGOS Workshop, Frascati, Italy.
- Tapley, B., Bettadpur, S., Ries, J.C., Thompson, P.F., and Watkins, M.M., 2004, GRACE measurements of mass variability in the Earth system. Science, 305, 503-505.
- Tapley, B. and Rothacher, M., 2008, GRACE Mission Status. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Velicogna, I., Wahr, J., and Rignot, E., 2008. Greenland and Antarctic mass balance from GRACE. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- Willis, J.K., Chambers, D.P., and Nerem, R.S., 2008, Weighing the oceans: Understanding sea level rise in the era of satellite gravity observations. GRACE Science Team Meeting, San Francisco.
- 한국지구관측그룹 홈페이지: www.kgeo.go.kr(검색일: 2009. 5. 1.)
- GEO 홈페이지: www.earthobservations.org (검색일: 2009. 5. 1.)

2009년 4월 27일 접수
2009년 6월 3일 수정원고 접수
2009년 6월 16일 채택