

# 필리핀 지오이드모델의 개발방안 연구

## A Study on Geoid Model Development Method in Philippines

이석배<sup>1)</sup> · Bonifasio Dela Pena<sup>2)</sup>  
Lee, Suk Bae · Bonifasio Dela Pena

### Abstract

If a country has her geoid model, it could be determine accurate orthometric height because the geoid model could provide continuous equi-gravity potential surface. And it is possible to improve the coordinates accuracy of national control points through geodetic network adjustment considering geoidal heights. This study aims to find the best way to develop geoid model in Philippines which have similar topographic conditions as like Malaysia and Indonesia in East-south asia. So, in this study, it is surveyed the general theories of geoid determination and development cases of geoid model in Asia and it is computed that the geoidal heights and gravity anomalies by spherical harmonic analysis using EGM2008, the latest earth geopotential model.

The results show that first, the development of gravimetric geoid model based on airborne gravimetry is needed and second, about 200 GPS surveying data at national benchmark is needed. It is concluded that it is the most reasonable way to develop the hybrid geoid model through fitting geometric geoid by GPS/leveling data to gravimetric geoid. Also, it is proposed that four band spherical Fast fourier transformation(FFT) method for evaluation of Stokes integration and remove and restore technique using EGM2008 and SRTM for calculation of gravimetric geoid model and least square collocation algorithm for calculation of hybrid geoid model.

Keywords : Airborne gravimetry, hybrid geoid, Philippines, EGM2008

### 초 록

한 국가에서 지오이드모델은 그 나라의 일관된 표고기준면을 제공함으로써 정확한 정표고를 결정할 수 있게 하며, 국가기준점의 평면위치 결정시 지오이드고를 고려한 측지망 조정계산을 실시함으로써 좌표결정의 정확도를 높일 수 있다. 본 연구는 말레이시아나 인도네시아와 비슷한 조건의 동남아시아 국가인 필리핀이 자국의 지오이드모델을 어떻게 개발하는 것이 최선인지 그 방법론을 연구한 연구이다. 따라서 본 연구에서는 전반적인 지오이드 결정이론을 살펴보고, 아시아 국가들에서의 지오이드 개발사례를 통하여 필리핀 일원에 가장 적합한 지오이드 모델 개발방안을 제시하고자 하였으며, 필리핀 일원에서 최신의 지구중력장 모델인 EGM2008을 해석하여 지오이드고와 중력이상을 계산하였다. 연구결과 항공중력방법에 기반한 중력 지오이드모델을 개발하고, 200점 내외의 GPS/leveling데이터에 의한 기하학적 지오이드고를 합성하여 하이브리드 지오이드 모델을 개발하는 것이 가장 합리적인 방법으로 연구되었다. 또한 스토크스적분의 수행은 4 밴드 구면 FFT방법이, 중력지오이드모델 개발에는 EGM2008과 SRTM에 의한 remove and restore 기법이, 하이브리드 지오이드모델의 개발에는 Least square collocation 알고리즘이 제안되었다.

핵심어 : 항공중력, 하이브리드 지오이드, 필리핀, EGM2008

## 1. 서 론

지구표면은 그 형상이 매우 불규칙하여 어떤 일정한

규칙에 따른 임의 점의 위치표시가 사실상 불가능하다. 따라서 일정한 규칙에 따라 위치를 표현하기 위해서는 새로운 지구의 수학적 형상을 필요로 하는데, 측지학에

1) 교신저자 · 정회원 · 진주산업대학교 토목공학과 부교수(E-mail:sblee@jinju.ac.kr)  
2) Professor, Department of Civil Engineering at Saint Louis University, Philippines(E-mail:ceadean@slu.edu.ph)

서 각종 작업의 기준이 되는 이 새로운 지구의 수학적 모델이 지오이드이며, 이는 일종의 등중력포텐셜면으로 물리적인 지구의 형상을 표현한다.

지오이드모델은 그 나라의 일관된 표고기준면을 제공함으로써 정확한 정표고를 결정할 수 있게 하며, 삼각점이나 3차원 국가기준점의 평면위치 결정시 지오이드고를 고려한 측지망 조정계산을 실시함으로써 좌표결정의 정확도를 높일 수 있다. 또한 이러한 측지학적 목적뿐 아니라 중력의 분포특성을 고려해야 하는 위성궤도 해석이나 탄도무기의 궤적 계산과 같은 군사적 목적과 지하자원이나 해양자원 탐사를 위한 지질학적 목적 등 여러 분야에서 지오이드 모델이 활용되고 있다. 따라서 어떤 국가에서 그 나라의 지오이드모델을 가졌느냐 하는 것은 그 나라의 측지기술력을 보여주는 하나의 지표가 되고 있으며, 미국이나 호주, 일본, 유럽 등 많은 측지선진국에서는 각 나라의 공식적인 지오이드모델을 개발하고 이를 공표하여 활용해 오고 있다. 그러나 전세계적으로 공식적인 지오이드모델을 개발할 역량을 갖추지 못한 국가가 훨씬 많으며, 최근들어 아시아 국가들을 중심으로 자국의 지오이드모델을 개발하려는 노력이 활발하게 전개되고 있다.

아울러 이러한 개별국가의 노력과 달리 위성의 발사나 우주개발을 위한 목적으로 지구 전체의 형상과 크기를 알 필요가 있었기 때문에, 미국이나 유럽연합을 중심으로 지구 전체의 중력장을 결정하기 위한 노력이 진행되어 왔다. 지구중력포텐셜을 규명하려는 첫 시도는 지상중력데이터를 이용하여 8°까지 구면조화확장을 계산한 Zhongolovich I.D.에 의하여 1956년에 이루어졌으며(Zhongolovich, 1956), 그 이후로 위성의 섭동과 위성 데이터의 분석 및 지상중력자료의 축적에 힘입어 포텐셜의 결정에 있어서 상당한 발전이 이루어져 왔다. 특히 1970년대 이후 인공위성 기술의 발달로 인공위성을 활용한 균질한 전지구적인 중력측정이 가능하게 되었으며, 이로부터 정밀도가 크게 향상된 지오이드와 중력이상을 구할 수 있게 되었다. 특히 미국과 유럽에서 지구중력장 측정 전용 위성의 개발이 진행되어 왔으며, 1980년대 미국의 GRM(Gravity Recovery Mission) 및 1990년대 초 유럽의 ARISTOTELES 등이 대표적인 예이다. 또한 2000년대에 접어들면서 지구중력장을 보다 정밀하게 결정하기 위한 노력들이 전개되었는데, 독일 DLR(German Aerospace Research Establishment)에 의해 발사된 CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload) 위성, 미국

NASA와 독일 DLR의 협력하에 발사된 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment) 쌍둥이 위성, 또 저궤도 위성인 ESA(European Space Agency)의 GOCE(Gravity field steady-state Ocean Circulation Explorer) 위성의 활약이 대표적인 예라고 할 수 있다.

이러한 지구중력장 측정위성들의 활동은 전세계적인 지구중력장 모델을 개발하는 데에 크게 기여하였다. 지구중력장모델의 개발은 한동안 주로 오하이오주립대학교의 R.H. Rapp 교수에 의해 주도되었으며, OSU81, OSU86E/F, OSU89A/B, OSU91A 모델 등이 발표되어 1990년대 중반까지 전세계적인 지오이드고를 계산하거나 독자적으로 지오이드모델을 갖지 못한 국가의 지오이드고 계산에 널리 활용되었다(Rapp 등 1986; Rapp 등 1990). 아울러 미국 NASA의 Marsh J.G. 등에 의하여 위성추적데이터로부터 만든 GEM-T1과 GEM-T2 중력장모델이 1988년과 1989년에 각각 발표되었으며(Marsh 등, 1988; Marsh 등, 1989), Texas at Austin 대학의 Tapley와 Shum 등에 의해 TEG-3 지오포텐셜모델의 발표가 있었고(Tapley 등, 1996), 1990년대 중반 이후로는 EGM96과 EGM2008 지구중력장 모델의 개발이 잇따랐다.

EGM96(Earth Geopotential Model 1996)은 미국 DMA(Defense Mapping Agency)와 NASA GSFC(Goddard Space Flight Center)에서 오하이오 주립대학과 U.S. Naval Surface Warfare Centre의 협력하에 만들어졌으며, 전 세계의 지오이드고를 절대정확도  $\pm 0.5m$ 에서  $\pm 1.0m$ 의 범위 안에서 결정하는 것을 목표로 한 최대차수 360의 개선된 GSFC/DMA 지오포텐셜 계수모델이다(Lemoine 등, 1996; Pavlis 등., 1996). 또한 EGM2008은 EGM96을 대체하기 위하여 미국 NGA(National Geospatial-Intelligence Agency)가 개발한 지구중력장모델로서 전세계에서 수집된 지상중력자료와 GRACE 위성자료를 이용하여 구면조화차수를 초고차항(2160차수)까지 해석가능하도록 공간해상도를 획기적으로 개선한 전지구중력장모델이다(Pavlis 등, 2008).

아시아 국가중 지오이드모델 연구는 일본이 단연 앞서가고 있다. 일본은 JGEOID 2004라는 중력지오이드모델과, GSIGEO 2000이라는 하이브리드 지오이드모델을 개발하여 활용하고 있다. 우리나라는 국토지리정보원에 의하여 KGEOD98이라는 공식적인 지오이드모델이 발표된 바 있으며, 지능형국토정보화사업에 의하여 지상중력 및 항공중력에 기반한 5cm 정확도를 갖는 지오이드모델이 개발되고 있다. 그러나 우리나라 및 일본과는

달리 대부분의 아시아 국가들은 측지기술력 및 정책의 부재와 지형적 여건 등으로 인하여 중력측량데이터를 확보하지 못하고 있으며, 따라서 항공중력방식으로 부족한 중력데이터를 확보하고 지오이드모델을 개발하여 오고 있다. 말레이시아와 몽골이 항공중력에 기반한 지오이드모델을 개발하였으며 인도네시아가 항공중력에 기반한 지오이드모델을 개발중이다.

본 연구는 말레이시아나 인도네시아와 비슷한 조건의 동남아시아 국가인 필리핀이 자국의 지오이드모델을 어떻게 개발하는 것이 최선인지 그 방법론을 연구한 연구로서 국내학자와 필리핀 학자와의 공동연구로 이루어졌다. 따라서 본 연구에서는 전반적인 지오이드 결정 이론 및 방법을 살펴보고, 아시아 국가들에서의 지오이드 개발사례를 통하여 필리핀 일원에 가장 적합한 지오이드 모델 개발방안을 제시하고자 한다. 또한 본 연구에서는 최신의 지구중력장모델인 EGM2008을 해석하여 필리핀에 있어서의 지오이드고와 중력이상을 계산하고자 한다.

## 2. 지오이드의 결정이론

측지학의 목적은 지구의 형상과 크기를 결정하기 위한 것으로 측지학적 경계치의 문제 해결을 위하여 지오이드의 결정을 필요로 한다. Torge(1991)는 이러한 측지학의 목적을 달성하기 위하여 사용되는 관측치들로 천문관측, 중력관측, 지상측지관측과 위성관측의 네가지로 나누고 있으며, 지구의 형상 즉, 지오이드를 결정할 수 있는 방법으로 천문측지방법, 중력학적 방법, 위성측지방법과 합성에 의한 방법 등을 제시하고 있다. 그러나 오늘날 측지 기술의 발전과 데이터 처리기술의 발전으로 인하여 여러 가지 측지관측치들을 합성하는 수학적인 방법과 각각의 방법에 의한 결과값들을 다시 합성하는 방법으로 발전해 가고 있다. 지오이드고를 계산하는 이론과 방법은 다음과 같다.

### 2.1 천문측지 방법(Astrogeodetic method)

천문측량이라 함은 임의점에서 천문경위도를 결정하는 작업을 말한다. 일반적으로 지오이드와 타원체는 일치하지 않기 때문에 지오이드면에 대한 연직선과 타원체면에 대한 법선이 이루는 사이각을 연직선 편차라고 한다. 이 연직선 편차는 방향성이 있으므로 자오선방향 성분  $\xi$ 와 묘유선방향 성분  $\eta$ 로 구분할 수 있으며 천문경위도  $(\lambda_a, \varphi_a)$ 와 측지경위도  $(\lambda_g, \varphi_g)$ 를 사용하여 다

음 식과 같이 계산된다.

$$\xi = (\varphi_a - \varphi_g), \quad \eta = (\lambda_a - \lambda_g) \cos \varphi \quad (1)$$

또한 연직선편차를 거리에 대하여 적분하면 임의의 두 점, A와 B사이의 지오이드고의 차이를 식 (2)와 같이 얻게 된다.

$$N_{AB} = \int_A^B (\xi \cos \alpha + \eta \sin \alpha) ds \quad (2)$$

이러한 지오이드를 천문측지 지오이드라 부르며, 지역측지계를 사용하던 시기에 각 나라의 측지원점 (Datum)을 결정하기 위하여 많이 활용되었다. 그러나 GPS의 출현 이후 세계측지계로 통합되면서 천문측량의 역할을 위치결정 위성들이 대신하게 되었다.

### 2.2 중력학적 방법(Gravimetric method)

#### 2.2.1 중력측정방법

중력학적 방법에서는 중력측정값과 정규중력과의 차이를 이용하여 지오이드를 결정한다. 중력은 높이와 관련된 함수이므로 중력의 지리적 변화를 구하기 위해서는 실측된 중력값을 동일 기준면의 값으로 보정하여야 한다. 이때 기준면으로 지오이드가 사용되며 중력보정은 측지학적 목적을 위해서는 주로 프리에어보정 방법이 사용된다.

지구중력장이 이루는 중력포텐셜(W)과 지구타원체가 이루는 정규중력포텐셜(U)과의 차이인 포텐셜이상(disturbing potential or anomalous potential) T를 정규중력( $\Upsilon$ )으로 나누면 다음과 같은 Bruns' equation에 의하여 지오이드고를 계산할 수 있다.

$$N = \frac{T}{\Upsilon} \quad (3)$$

또한 지표면의 중력이상  $\Delta g$ 를 알면 지오이드 외부의 전공간에 있어서 포텐셜이상 T를 구하는 것이 가능하다. 중력이상  $\Delta g$ 의 분포로부터 T를 구하는 문제를 측지학적 경계치의 문제(geodetic boundary-value problem)라고 한다. 지오이드에 대한 측지학적 경계치의 문제를 해결하기 위하여 Stokes는 중력이상  $\Delta g$ 를 이용하여 포텐셜 이상 T를 구하는 식을 유도하였다.

$$T = \frac{R}{4\pi} \int \int_0 S(\Psi) \Delta g d\sigma \quad (4)$$

여기서  $\Psi$ 는 포텐셜이상 계산지점과 표면요소  $d\sigma$ 사이의 구면거리로, 포텐셜이상 계산지점( $\phi, \lambda$ )과 중력을 측정한 지점의 좌표( $\phi', \lambda'$ )를 이용하여 구할 수 있다. 식 (5)를 Stokes의 적분식이라고 하며,  $S(\Psi)$ 는 Stokes의 함수이다.

2.2.2 항공중력방법(Airborne gravimetry)

항공중력방법은 항공기에 중력계를 탑재하고 한 국가 또는 매우 넓은 지역의 중력을 일정한 간격으로 측정하여 Downward continuation 방법에 의하여 지상중력을 계산하는 방법이다. 최근들어 지오이드모델을 갖지 못한 국가에서 단기간에 지오이드모델을 구축하기 위하여 많이 활용되고 있으며, 항공중력의 개념도는 Fig 1과 같고, 그 기본식은 식 (5)와 같다.(Forsberg, 2006)

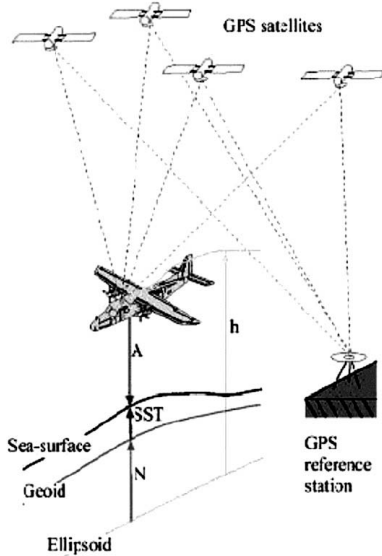


Fig. 1 Airborne gravimetry

$$\Delta g = y - \ddot{h} - \delta g_{ctovos} - \delta g_{tilt} - y_0 + g_0 - \gamma_0 + 0.3086(h - N) \quad (5)$$

여기서,  $y$ 는 중력계와 INS로부터 측정된 가속도를,  $\ddot{h}$ 는 GPS로부터 측정된 가속도를,  $y_0$ 는 공항 base 읽음값을,  $g_0$ 는 공항 기준 중력값을,  $h$ 는 GPS 타원체를 의미하며,  $\delta g_{ctovos}$ 는 에토비스 보정을,  $\delta g_{tilt}$ 는 중력

계 보정을 의미한다.

또한 Forsberg(2006)는 항공중력측정방법은 절대정확도 1.5~2mgal의 범위에서 지오이드고의 정확도는 측정 간격(해상도)에 따라 3~10cm의 정확도를 확보할 수 있는 신뢰할 만하고 효율적인 방법이라고 주장하였다.

2.3 위성측지 방법(Methods of Satellite Geodesy)

위성측지방법은 인공위성으로부터 또는 인공위성까지의 관측을 통하여 수행되며(Schneider, 1988), 위성관측은 지구표면의 한 지점에서 위성까지의 방향과 거리, 그리고 거리차를 제공하며 다음과 같은 식을 통하여 해를 구하게 된다.(Torge, 1991)

$$r_p + s - r = 0 \quad (6)$$

여기서,  $S$ 는 지상점 P에서 위성까지의 거리벡터이며,  $r$ 은 지구중심에서 위성까지의 거리벡터,  $r_p$ 는 지구중심에서 P점까지의 거리벡터를 의미한다.

2.3.1 기하학적 방법(Geometric method)과 동적방법(Dynamic method)

기하학적 방법에서 위성은 높이 날고 있고, 멀리 떨어진 채 보이는 목표물이며 위성궤도정보를 필요로 한다. 위성까지의 관측은 두 개 또는 그 이상의 관측지점에서 동시에 수행되며, 관측방정식을 풀어서 위성의 미지위치를 구하게 된다. 위성측지의 동적방법에서의 위성은 지구중력장내에서 움직이는 센서로 취급되며 역시 관측방정식을 통하여 미지수를 풀어내게 된다. 아울러 위성궤도요소와 구면조화확장에 있어서의 주요 항(principal terms)을 결정하게 된다.

2.3.2 위성궤도방법(Orbit method)

연속적인 궤도결정을 통하여 위성궤도를 안다면 관측자의 지심좌표는 그 지점에서의 관측치 하나로 결정될 수 있다. 오늘날 위성궤도방법은 도플러(Doppler) 거리 측정뿐 아니라 위성레이저 거리측정(satellite laser ranging)에도 이용되고 있으며, 절대위치결정이나 상대위치 결정에 사용될 수 있다. 절대위치 결정에 있어서 관측지점의 좌표는 위성궤도력으로부터 얻어지므로 위성궤도 오차 등에 따라 좌표 정확도가 달라지게 된다. 상대위치 결정은 같은 위성들에 대한 둘 또는 그 이상의 관측지점에서 수행되는 동시관측에 의하여 이루어지게 되며, 궤



도오차는 중력장모델의 오차와 반사효과 등을 포함하며 수백 km에서 수천 km까지의 거리에 걸쳐서 상관성을 갖게 된다. NAVSTAR/GPS를 포함한 GNSS는 위성궤도방법을 활용하는 대표적인 시스템들이다.

### 2.3.3 위성고도방법(Satellite altimetry)

위성고도방법에서는 바다에서 위성고도 순간적인 해수면 사이의 직각거리  $h_a$ 를 제공하며, 이 데이터의 분석을 통하여 자세한 중력장을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 해수면(sea surface topography, SST)과 지오이드의 기하학적 결정을 이룰 수 있다.

해수면의 관측은 궤도상에서 인공위성에 탑재한 고도계(radar altimeter)로부터 해면에 수직한 방향으로 radar pulse를 발사하여 해면으로부터의 반사시간을 측정함으로써 해면으로부터 인공위성까지의 거리를 구한다. 해수면(SST) 관측을 위한 위성으로 GEOS3와 SEASAT, TOPEX-POSEIDON, GRACE 위성 등이 활용되었다.

## 2.4 합성에 의한 방법(Combined methods of evaluation)

### 2.4.1 Remove-Restore Methods

지오이드를 구하기 위하여 기본적으로 그 지역의 중력데이터가 사용되며, 이러한 중력데이터는 지구중력장모델과 합성되어 사용될 수 있다. 또한 고해상도 계산을 위하여 수치지형모델을 이용한 지형의 중력효과를 계산할 수 있다. remove-restore 기술이란 지구중력장모델과 지형과 중력데이터의 중력이상값에 기초하여 개발된 방법으로(Denker 등, 1987), 이 방법은 정밀지오이드의 구성요소를 지구중력장모델에 의한 장파장효과와 중력자료에 의한 중파장효과, 그리고 지형에 따른 단파장효과로 나누고, 다음 식과 같이 remove방법에 의하여 중력이상( $\Delta g_{Red}$ )을 계산하고 restore방법에 의하여 지오이드고( $N$ )를 계산하는 방법이다.

$$\Delta g_{Red} = \Delta g_{FA} - \Delta g_{GGM} - \Delta g_{Top}, \quad N = N_{GGM} + N_{Red} + N_{Top} \quad (7)$$

여기서,  $\Delta g_{GGM}$  과  $N_{GGM}$ 은 지구중력장모델(global geopotential model)에 의한 중력이상과 지오이드고를 의미하며,  $\Delta g_{Top}$ 와  $N_{Top}$ 는 지형모델에 의한 중력이상과 지오이드고를 의미한다. 또  $\Delta g_{FA}$ 는 중력데이터에 의한 중력이상값을  $\Delta g_{Red}$ 는 잔여중력이상값을 의미하고,  $N_{Red}$ 는 잔여지오이드고를 의미한다.

### 2.4.2 Least Square Collocation

중력지오이드는 지구중력장모델과 지역적인 중력데이터를 기초로 하여 만들어진 것이므로 전지구적 수직기준을 기준으로 개발된 것이라고 할 수 있다. 따라서 이는 지역적인 수직기준을 채용하고 있는 각 나라의 정표고 체계와는 차이가 있으므로, 중력지오이드를 실제 그 나라의 수직기준으로 적합화시키는 작업이 필요하다. 일반적으로 수직기준으로의 적합은 기하학적 지오이드와 중력지오이드간의 적합을 의미하며, GPS/Leveling 자료에서 얻어지는 기하학적 지오이드고와 중력지오이드고 간에 나타나는 차이를 모델링하고 합성하는 과정으로 이루어진다. Least Square Collocation 방법은 이러한 차이를 모델링하고 합성하여 합성지오이드(Hybrid geoid)를 만드는 방법으로, 최소자승조정방법에 기초하고 있으며, Moritz에 의하여 제안된 이래 Tscherning(1994) 등에 의해 LSC를 위한 여러가지 방법이 제안되었으며 Goad와 Iliffe(2003)등에 의하여 공분산함수의 사용방법이 제시되었다.

### 2.4.3 Earth's Gravitational Field Models

측지학자들은 구면조화(spherical harmonic expansion)를 이용하여 지구 지오이드 모델의 추정값을 개발해 왔으며, 지구중력장모델이라고 하는 것은 육상중력자료와 위성고도계자료 및 인공위성 궤도관측에 의한 중력자료 등을 합성하여 구한 지구전체에 대한 평균중력 이상을 구면조화분석을 실시하여 계산한 정규화된 중력포텐셜 계수의 집합으로서 cosine과 sine의 계수들로 이루어져 있다. 따라서 지오폠펙셜의 차수에 따라 이미 만들어진 구면조화계수들을 이용하여 구면조화분석을 실시함으로써 전세계 또는 특정지역의 중력이상( $\Delta g_{GM}$ )과 지오이드고( $N_{GM}$ ) 등을 구할 수 있다(Heiskanen 등, 1967).

## 3. 지오이드 개발사례 분석

### 3.1 일본

아시아국가중에서 지오이드 개발이 가장 앞선 나라는 일본이다. 일본은 2002년 Japanese Geodetic Datum 2000으로 이름붙여진 세계측지계를 도입하면서 높이시스템도 정규 정표고에서 정표고 시스템으로 변경하였다. 따라서 새로운 측지계에 기준하는 새로운 지오이드모델이 필요하였으며, 이러한 배경하에 2km 격자의 고정밀 hybrid 지오이드모델인 GSIGEO 2000이 구축되었다. (Fig. 2)

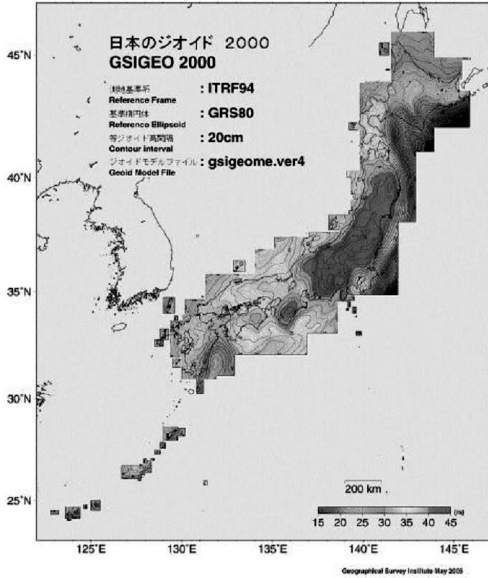


Fig. 2 Japan Hybrid Geoid Map for GSIGEO2000

GSIGEO 2000은 일본 주변의 중력지오이드모델 JGEOID2000을 이용한 동경만 평균해수면에 기준하는 전국에 골고루 분포된 816점의 GPS/Leveling 관측점을 합성하여 구축된  $\pm 4\text{cm}$  정밀도의 하이브리드 지오이드 모델이다. 위도 1' 간격, 경도 1.5' 간격의 격자모델로 개발된 GSIGEO 2000은 EGM96 지구중력장모델을 기본모델로 사용하였으며 244,000점의 육상 중력데이터와 578,000점의 해상 중력데이터 그리고 250m 격자간격의 지형데이터를 사용하였으며, Stokes 적분식에 구조화 1차 FFT 변환을 적용하였다. GSIGEO 2000은 기존의 GSI-

GEO96에 비하여 약 2배의 정밀도 향상을 보였다.

JGEOID2000 중력지오이드모델과 기하학적 지오이드고를 제공한 816점의 GPS/Leveling 관측점의 분포는 Fig. 3 과 같다. 지오이드의 합성은 경험적 공분산에 의한 최소자승 콜로케이션 방법에 의하여 이루어졌으며, GPS/Leveling 데이터와 GSIGEO2000에 의한 지오이드고의 이격량은 Sata-misaki반도에서  $-35.8\text{cm}$ 로, Nemuro 반도에서  $+23.8\text{cm}$ 로 나타났다.(Kuroishi, 2002)

### 3.2 말레이시아

말레이시아는 University of Technology Malaysia의 Vella 교수에 의하여 2003년 말레이시아의 지오이드고가 발표된 적이 있으며, 이는 EGM96 지구중력장모델을 바탕으로 육상중력자료와 해상고도계자료 그리고 DEM 자료의 중력이상값을 FFT방법에 의하여 계산·합성하고 95점의 GPS/leveling 결과를 이용하여 정확도를 평가한 것이다(Vella, 2003). 그러나 말레이시아의 공식적인 지오이드모델인 MyGEOID (Fig. 4)는 항공중력측정을 통하여 만들어지게 되었으며 이는 육상중력측정이 불가능한 정글과 같은 지역을 포함하고 있는 대부분의 아시아 국가에게 귀중한 모델이 되고 있다. 말레이시아의 지오이드 모델 MyGEOID는 말레이시아 반도 지역의 WMGEOID04와 Sabah, Sarawak 지역의 EMGEOID05 두 기본모델로 구성되어 있으며, FFT기법에 의하여 각 파장별 효과를 계산한 중력지오이드에 기하학적지오이드를 합성한 지오이드모델이다. WMGEOID04와 EMGEOID05 지오이드 모델은 지역 평균해수면에서 상대적으로 지오이드와 타원체를 분리시킨 지오이드고(N) 값에 대하여  $1' \times 1'$

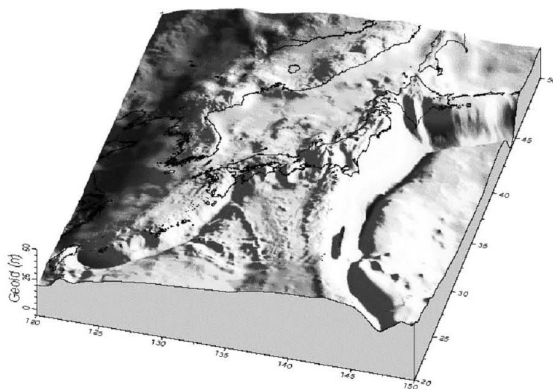


Fig. 3 JGEOID2000 gravimetric geoid model(left) and the GEONET(right)

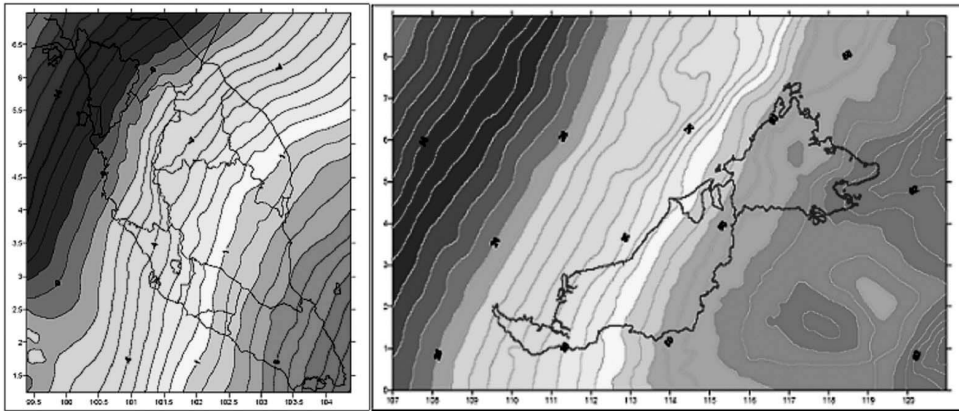


Fig. 4 Malaysian geoid model (MyGEOID)

간격(약 1.8km)으로 구성하였으며, MyGEOID 지오이드 모델을 이용하면 추가적인 변환없이 GPS 측량을 통해 평균해수면상에서의 높이를 직접 구할 수 있다.

MyGeoid는 구면 FFT기법에 의하여 프리에어 중력이상값을 산출하고 SRTM 수치지형모델을 이용하여 RTM 지형효과를 계산하였으며, 계산을 위하여 말레이시아 반도 지역의 960×1080점과 Sabah, Sarawak 지역에서의 1080×1680점에 대한 지형 및 항공중력 데이터를 사용하였다.

항공중력측정은 “The Malaysian airborne geoid project 2002-2003”을 통하여 덴마크 DNSC(Danish National Space Center)의 Forsberg R.에 의하여 수행되었으며, S-93 및 S-99 중력계와 Honeywell H764G INS장비, 그리고 Trimble 4000SSL 등 다수의 GPS수신기를 이용하여 5km 간격으로 측정되었다. 말레이시아의 항공중력측정을 위해 동쪽과 서쪽지역으로 나누고, 또 지역에 따라 고도를

다르게 하여 측정을 수행하였다. 말레이시아 지역의 비행노선은 Fig. 5와 같고, 항공중력측정에 직접 사용된 장비와 비행기는 다음 그림과 같다. 중력계는 미국 NRL의 S-93중력계 및 스위스 Bergen 대학교의 S-99중력계가 사용되었고, Honeywell사의 H764G INS 장비와 Trimble 4000 SSI, Javad Legacy와 Ashtech Z-surveyor의 GPS 장비가 사용되었다.(Forsberg, 2005)

최종적으로 말레이시아 지오이드모델의 정확도를 평가한 결과는 Table 1.과 같다. 항공중력데이터에 의한 중력지오이드고를 145점의 GPS 지오이드와 비교한 결과 편차의 평균은 72cm, 표준편차는 12cm로 나타났으며, GPS 지오이드를 합성하여 비교한 결과 표준편차가 5cm 이내에 들어오는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 동남아시아 국가에서 항공중력자료를 기반으로 GPS/leveling 자료에 의한 기하학적 지오이드를 합성한다면 정확도 5cm

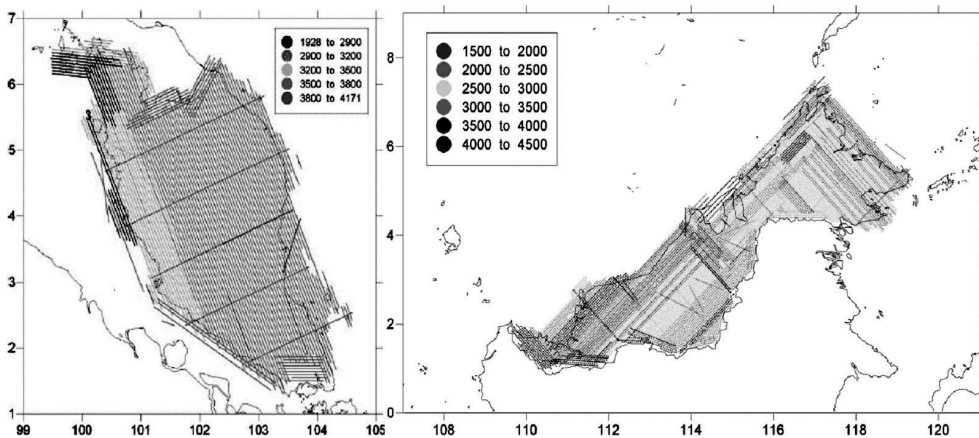


Fig. 5 Flight lines in West and East Malaysia



내외의 지오이드모델을 개발할 수 있는 것으로 확인되었다.

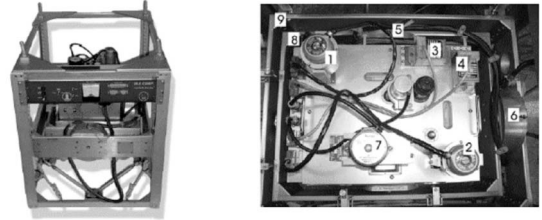
**Table 1. Difference statistics compared to GPS/leveling geoid (Unit: m)**

Peninsula GPS-leveling	mean	Std dev.
Gravimetric geoid	0.72	0.12
GPS geoid, fitted to 145 points	0.00	0.05
GRACE model GGM01C alone	0.62	0.26
EGM96	0.47	0.35

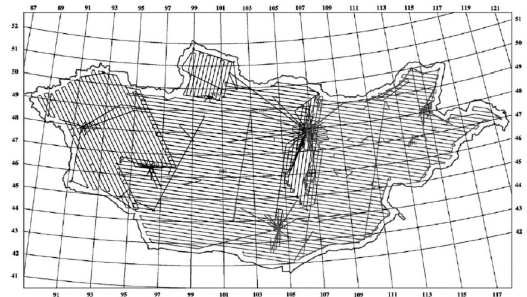
### 3.3 몽골

몽골의 지도제작을 위한 측지기준계는 Kronstadt지역에서부터 Russia에 이르기까지 Pulkovo 42에 기초하고 있으며 수준측량을 통한 표고시스템을 포함하고 있다. 그러나 몽골의 지도제작과 측지기준계를 현대화하기 위하여는 국가의 새로운 지오이드모델을 개발하여 표고기준을 정립할 필요가 있다. 따라서 몽골 정부에서는 NGA와 DNSC와의 협력하에 지난 5년간 지오이드모델을 개발하여 왔다. 2004년과 2005년에 항공중력 캠페인을 통하여 몽골 전역에 항공중력측량을 실시하였으며, 최신의 NGA 지구중력장모델인 EGM2008과 합성하였고, 또한 SRTM 수치표고모델을 이용하여 지형보정량을 계산하였다. 아울러 중력자료가 여전히 부족한 지역에 지상중력측량이 실시되고 있으며, 중력지오이드모델을 평가할 GPS/leveling 자료획득이 이루어지고 있다. (Saandar, 2008)

몽골의 항공중력측량에 있어서 사용된 중력계와 INS장비는 Fig. 6과 같으며 UIB(University of Bergen)가 소유한 해상중력계를 보완하여 항공중력측량에 활용하였다. 아



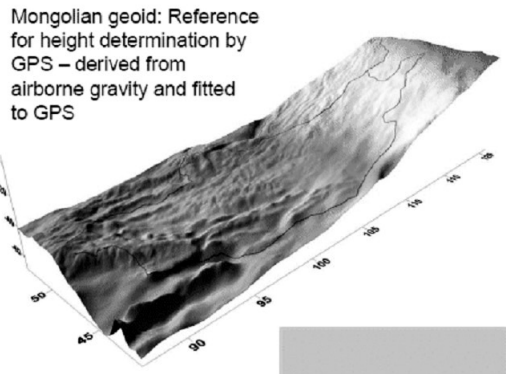
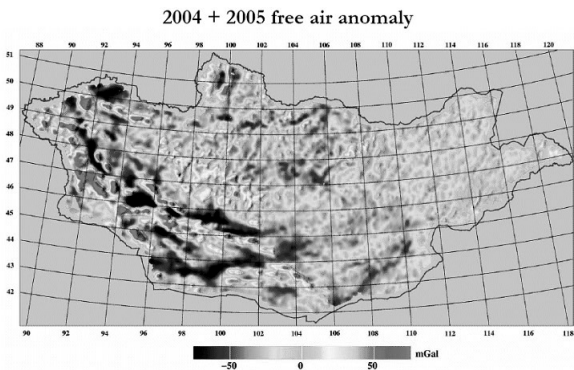
**Fig. 6 The gravimeter and INS used in Mongolian airborne gravity campaign**



**Fig. 7 Flight Lines in Mongolian airborne gravity campaign**

울러 2004년과 2005년의 항공중력측량 캠페인 기간에 있어서는 EGM06 지구중력장모델을 활용하여 중력지오이드를 계산하였으며 SRTM 수치표고모델을 활용하여 지형보정량을 계산하였다. Fig. 7은 몽골에서의 항공중력측량을 실시한 노선을 보여주고 있으며, 항공중력측량을 통하여 계산된 몽골에서의 프리에어이상값과(left) GPS측정데이터에 적합화(fitting)시킨 3차원 지오이드의 분포(right)는 Fig. 8에서 보여주고 있다. (Olsen 등, 2006)

항공중력측정은 2004년에 36일, 2005년에 35일 이루어졌으며, 항공기의 비행시간은 420시간이었고 비행거리는



**Fig. 8 Free air anomaly(left) and geoid(right) in Mongolia**



총 118,000km이었으며, 이중 신뢰할만한 데이터가 얻어진 비행거리는 86,000km로 73%의 데이터 획득비율을 기록하였다. 항공중력측정의 교차점(Cross over)의 편차를 분석한 결과 505점의 교차점에서 최대 10.0mgal, RMS는 3.3mgal의 크기를 보여주었다.

#### 4. 필리핀 지오이드 모델의 개발방안

##### 4.1 필리핀의 측지기준계

필리핀의 측지기구는 DENR(Department of Environment and Natural Resources) 산하의 Land Management Bureau로서 108년의 토지행정 역사를 가지고 있다. 또한 Land Management Bureau는 Geodetic Surveys Division, Land Admin & Utilization Division 등 5개의 부서(division)로 나뉘어져 있고, 국가의 지적측량과 측지측량 부분은 Geodetic Surveys Division에서 담당하고 있다. 아울러 필리핀의 지도제작은 NAMRIA(the Philippines National Mapping and Resource Information Authority)에서 담당하고 있다.

필리핀의 측지기준계는 Table 2와 Fig. 9에서 보는 것과 같이 지역측지계와 세계측지계가 함께 사용되고 있다. 지역측지계로는 Clarke 1866을 준거타원체로 하는 Luzon

1911이 1911년에 만들어져 Luzon섬을 대상으로 적용되었으며 이를 필리핀 전역으로 확장한 것이 PRS92라는 지역측지계이다. PRS92는 1992년 467개의 GPS측정값을 사용하여 Luzon 1911을 확장한 것이며, WGS84와의 좌표변환계수를 포함하고 있다. 좌표계는 UTM 투영법과 PTM 투영법을 병행하고 있으며 UTM투영법에서는 경도 6° 간격으로 Zone 50, 51, 52 North에 걸쳐 적용하고 있으며, PTM 투영법에서는 경도 2° 간격으로 5개의 Zone으로 나누어 평면직각좌표를 적용하고 있다. 필리핀의 공식적인 지오이드모델은 아직 발표된 바 없으며 따라서

Table 2. Spatial reference framework in Philippines

	One	Two	Three
Datum	WGS84	Luzon 1911	PRS92
Ellipsoid	WGS84	Clarke 1866	Clarke 1866
Coordinates System	UTM	UTM/PTM	UTM/PTM

시급하게 이를 필요로 하고 있는 상황이다.

##### 4.2 지구중력장 모델의 구면조화해석

필리핀 지오이드모델을 개발하기 위하여 먼저 필리핀 일원에 대하여 연구대상지역을 설정하고 구면조화해석을 실시하였다. 연구대상지역은 Fig. 9의 필리핀 전역을 포함하는 위도 4°N~21°N 및 경도 116°E~129°E의 지역으로 하였으며, 필리핀 전체의 지오이드고의 분포를 알기 위하여 가장 최신의 지구중력장모델인 EGM2008을 이용하여 장과장 해석을 실시하였다.

장과장 해석은 EGM2008 모델을 최대차수 2,190차수를 적용하여 위도 4°N에서 21°N까지, 경도 116°E에서 129°E까지 위도 및 경도 방향 각각 1' 간격으로 797,401개의 격자점에 대하여 구면조화해석을 실시하여 지오이드고와 중력이상 등을 계산하였다. 구면조화해석 결과를 정리하면 Table 3과 같고, 필리핀 일원에서의 지오이드고와 중

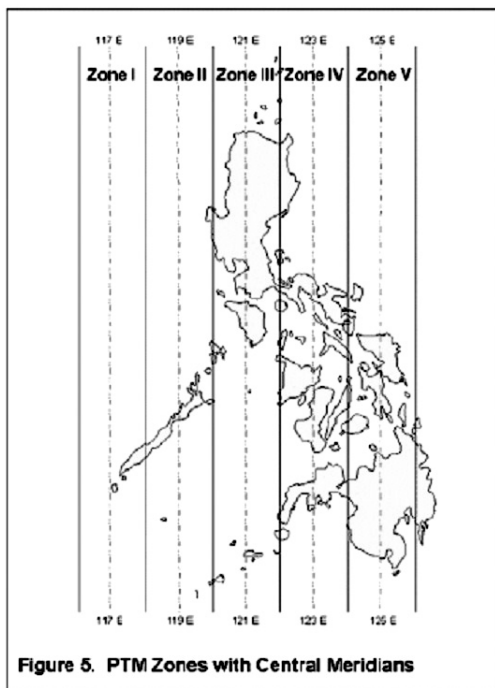


Figure 5. PTM Zones with Central Meridians

Fig. 9 PTM Zones in Philippines

Table 3. The statistics of results on spherical harmonic analysis for EGM2008(degree and order 2190) in Philippines

Result items(unit)	Min	Max	Mean	Std	
Geoidal heights(m)	8.52	75.82	46.74	14.18	
Free-air anomaly(mgal)	-287.54	356.60	22.54	66.47	
Deflection of the vertical	$\xi$ (xi:")	-62.85	51.77	4.14	7.71
	$\eta$ (eta:")	-50.24	77.03	-3.60	12.05

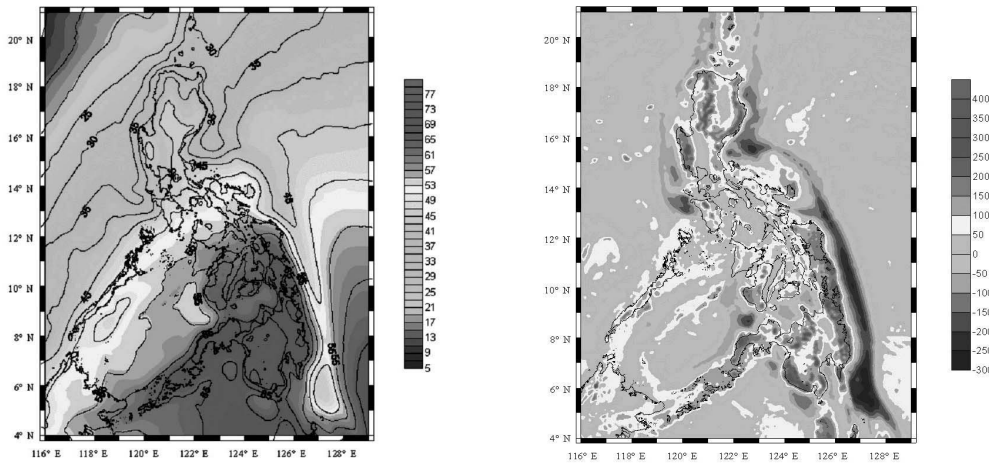


Fig. 10 Geoidal heights map(left) and Free-air anomaly map(right) in Philippines

력이상의 분포는 Fig. 10과 같다.

Table 3과 Fig. 10을 통하여 필리핀 일원에서의 지오이드고는 최소 8.52m에서부터 최대 75.82m의분포를 보이고 있으며, 중력이상값은  $-287.54\text{mgal}$ 에서 최대  $356.60\text{mgal}$ 의 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한 연직선편차는 남북방향( $\xi$ )에서  $-62.85\sim-51.77$ “의 분포를, 동서방향( $\eta$ )에서  $-62.85\sim-51.77$ “의 분포를 보이고 있음을 알 수 있었다.

### 4.3 필리핀 지오이드모델의 개발방안

필리핀 일원에서의 지오이드고를 알고자 EGM2008 지구중력장모델을 구면조화해석을 실시하였다. 그러나 이 결과값은 필리핀 일원에서의 개략적인 지오이드고와 중력이상 등을 알 수 있을 뿐 보다 정밀한 지오이드고를 계산하려면 정밀한 지오이드모델을 필요로 한다. 또한 정밀한 지오이드 모델을 개발하기 위하여는 중력자료(gravity data)의 확보가 필수적이다. 그러나 7,000여개의 섬으로 이루어졌을 뿐만 아니라 사람이 살지 않는 정글지역이 존재하고 또 지상중력자료가 거의 없는 필리핀과 같은 나라에서 균등한 밀도분포를 가지고 지상중력자료를 확보하는 것은 거의 불가능에 가까운 일이다. 따라서 말레이시아의 예와 같이 필리핀 일원에서도 균등한 밀도를 가지며 비슷한 품질의 중력자료를 확보하기 위한 최상의 방법은 항공중력측정밖에 없다고 해도 과언이 아니다.

따라서 본 연구에서는 3. 지오이드 개발사례 분석에서 살펴본 바와 같이 3단계 개발과정에 근거한 필리핀 지오이드모델의 개발방안을 제시하고자 한다. 첫째, 1단계 과

정에서는 필리핀의 중력지오이드를 개발하여야 한다. 따라서 4.1에서 해석된 EGM2008지구중력장모델과 항공중력자료와 SRTM 수치표고모델을 기반으로 하여 remove and restore 기법에 의하여 중력지오이드를 개발해야 한다. 항공중력자료는 5km 해상도와 2mgal의 정확도 내에서 필리핀 항공중력 지오이드 캠페인(Airborne geoid campaign in Philippines)을 통하여 획득되어야 하며, 스토크스 적분의 수행은 FFT(Fast fourier transform)알고리즘이 많이 쓰이므로(Forsberg, 1993), 그 효율성이 높은 것으로 평가된 4 밴드 구면 FFT방법(4 band spherical FFT)을 권장하는 바이다. 둘째, 2단계 과정에서는 필리핀 일원에서의 기하학적 지오이드고를 계산하여야 한다. 이를 위하여 북부 루손섬과 남부 민다나오섬에서의 수준점을 재정립하고 각각 100여점씩 GPS 측량을 실시하여야 한다. 따라서 GPS 측량에 의한 타원체고 정보와 수준점에서의 표고정보를 이용하여 기하학적 지오이드고를 산출한다. 이 기하학적 지오이드는 1단계에서 개발된 중력지오이드를 평가하는 의미를 갖는 것과 동시에 3단계 합성지오이드를 개발하기 위한 자료획득의 중요성을 갖는다고 할 수 있다. 셋째, 3단계 개발과정에서는 필리핀 지오이드모델의 정확도를 높이기 위하여 1단계에서 개발된 중력지오이드와 2단계에서 획득된 기하학적 지오이드를 합성하는 과정을 말한다. 합성의 과정은 중력지오이드를 Least Square Collocation 방법에 의하여 기하학적 지오이드에 적합화(fitting)시킴으로써 최종 지오이드모델의 정밀도를 향상시킬 수 있다. 이러한 3단계 개발과정에 의한 필리핀 지오이드모델의 개발방안을 정리하면 Table 4와 같다.

Table 4. Development method of geoid model by three step in Philippines

Step	Purpose	Algorithm	Data or Method
1st Step	Development of Gravimetric geoid	$N_{Grav} = N_{GGM} + N_{Red} + N_{Top}$	$N_{GGM}$ : EGM2008 $N_{Red}$ : Airborne gravimetry $N_{Top}$ : SRTM
2st Step	Calculation of Geometric geoid	$N_{Gom} = h_{GPS} - H_{Level}$	$h_{GPS}$ : GPS surveying $H_{Level}$ : Leveling at Benchmark
3rd Step	Development of Hybrid geoid	$N_{Hybrid} = N_{Grav} - N_{Gom}$	Fitting by least square collocation

## 5. 결 론

본 연구는 필리핀에서의 지오이드모델 구축 필요성에 따라, 필리핀 일원에서 지오이드모델을 어떻게 개발할 것인가 하는 방법론을 연구한 연구이다. 따라서 본 연구에서는 아시아 국가에서의 지오이드모델 개발 사례를 살펴보고, 필리핀과 비슷한 지형 및 기후조건을 갖는 말레이시아의 지오이드 모델개발사례를 벤치마킹하고자 하였다. 아울러 지오이드모델 개발 알고리즘에 있어서는 전세계적으로 가장 많이 활용되고 검증된 바 있는 알고리즘을 선택하고자 하였다. 또한 필리핀 일원에서의 개략적인 중력이상과 지오이드고를 구하기 위하여 가장 최신의 지구중력장모델인 EGM2008을 2160차수의 최고차항으로 구면조화해석을 실시하였다.

EGM2008을 해석한 결과 필리핀 일원에서의 지오이드고는 최소 8.52m에서부터 최대 75.82m의 분포를, 중력이상값은 -287.54mgal에서 최대 356.60mgal의 분포를 보여 지오이드고와 중력이상값이 비교적 큰 변화를 보여주고 있음을 알 수 있었다. 아울러 지상중력자료가 부족한 현실에서 필리핀 일원에 대하여 균질한 품질과 균등한 밀도분포를 갖는 중력자료를 확보하기 위하여는 항공중력방법이 가장 적절한 방법임을 알 수 있었다. 이는 말레이시아의 사례와 같이 사람이 접근하기 어려운 정글 및 밀림지역을 필리핀도 상당히 포함하고 있으므로 지상중력측정이 불가능한 대안이기도 하다. 따라서 1단계로 항공중력 데이터에 기반한 중력지오이드모델을 개발하여야 한다. 이 때 항공중력 데이터에만 의존해선 수cm 수준의 정확도를 확보하기 어려우므로, EGM2008의 구면조화해석에 다른 단파장결과와 SRTM의 지형보정량 계산에 따른 단파장 결과를 항공중력 데이터에 의한 중파장 결과에 Remove and restore 기법에 의하여 적절히 합성하여

야 한다. 항공중력측정의 해상도는 5km, 정확도는 2mgal 이내이어야 데시미터(decimeter) 수준의 정확도를 확보할 수 있다. 2단계로는 수준점의 정비와 함께 수준점에서의 GPS측량이 필요하다. 이는 GPS/Leveling 데이터에 의한 기하학적 지오이드고를 계산하기 위한 목적으로 하이브리드지오이드모델을 개발하기 위하여는 필수적이다. GPS/Leveling 데이터는 일본(816점)의 경우처럼 많을수록 좋으나 측정에 적지 않은 시간과 예산이 소요되므로 말레이시아(145점)의 사례를 참조하여 필리핀 일원에서는 200점 내외가 되도록 하는 것이 좋을 것으로 사료된다. 지오이드개발의 최종단계인 3단계에서는 중력지오이드모델과 기하학적 지오이드고를 합성하여 하이브리드 지오이드 모델을 개발함으로써 정확도를 향상시킬 수 있다. 합성은 Least Square Collocation 방법에 의하여 중력지오이드를 기하학적 지오이드에 적합화(fitting)시킴으로써 이루어진다. 또한 스토크스적분의 수행은 4밴드 구면(spherical) FFT방법을 권장하는 바이다.

## 감사의 글

본 연구는 2008년도 진주산업대학교의 기성회(자매결연 외국대학 국제공동연구) 연구비 지원사업에 의하여 이루어졌으며 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Denker H. and Wenzel H.-G. (1987) Local geoid determination and comparison with GPS results, *Bulletin Geodesique*, Vol. 61, pp. 349-366.
- Forsberg R. (2005) Towards a cm-geoid for Malaysia, Geodynamics Department Danish National Space Center, Denmark.

- Forsberg R. Olsen A. (2006) Gravity field determination by combination of satellite, airborne and surface gravity data, International Workshop on Height Systems, Geoid and Gravity in the Asia-Pacific Region, June 6-8, 2006, Ulaanbaatar, Mongolia.
- Heiskanen W.A. and Moritz H. (1967), *Physical Geodesy*. W.H. Freeman and Co., San Francisco.
- Kuroishi Y. Ando H. and Fukuda Y. (2002) A new hybrid geoid model for japan, GSIGEO2000, *Journal of Geodesy*, Vol. 76, No. 8, pp. 428-436.
- Marsh J.G. Lerch F.J., Putney B.H., Christodoulidis D.C., Smith D.E., Felsentreger T.L., Sanchez B.V., Klosko S.M., Pavlis E.G., Martin T.V., Robbins J.W., Williamson R.G., Colombo O.L., Rowlands D.D., Eddy W.F., Chandler N.L., Rachlin K.E., Patel G.B., Bhati S. and Chinn D.S. (1988) A new gravitational model for the Earth from satellite tracking data : GEM-T1. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. B6, pp. 6169-6215.
- Marsh J.G. Lerch, F. J. Nerem, R. S. Putney, B. H. Felsentreger, T. L. Sanchez, B. V. Klosko, S. M. Patel, G. B. Williamson, R. G. Chinn, D. S. and Chan, J. C., (1989) The GEM-T2 gravitational model, NASA Technical Memorandum 100746, NASA/GSFC.
- Rapp R. H. and J. Y. Cruz (1986), Spherical Harmonic Expansions of the Earth's Gravitational Potential to Degree 360 Using 30' Mean Anomalies, Report No. 376, Dept of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus.
- Rapp R.H. and N.K. Pavlis (1990), The Development and Analysis of Geopotential Coefficient Models to Spherical Harmonic Degree 360, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95 No. B13, pp. 21885-21911.
- Lemoine F.G., E.C. Pavlis, N.K. Pavlis, R.H. Rapp, (1996) The Development of the NASA GSFC and DMA Joint Geopotential Model, International Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar96), September 30 - October 5, 1996, Tokyo, Japan, p. 146.
- Iliffe, J.C. Ziebart M. Cross P.A. Forsberg R. Strykowski G. and Tscherning C.C. (2003) OSGM02: a new model for converting GPS-derived heights to local height datums in Great Britain and Ireland, *Survey Review*, 37(290), pp. 276-293.
- Olsen A.V. Forsberg R. Keynon S.C. Sandaar M. (2006), Airborne Gravity Survey of Mongolia 2004-2005, Height System, Geoid and Gravity of the Asia-Pacific, *IGFS International Workshop*, Ulaanbaatar, Mongolia, 6 - 8 June, 2006.
- Pavlis, N.K., Rapp, R.H., Lemoine, F.G., and Kenyon, S.C. (1996) High Resolution Global Geopotential Models for the Joint GSFC/DMA Project, *International Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar96)*, September 30 - October 5, p. 147.
- Pavlis, N.K. Holmes S.A., Kenyon S.C., and Factor J.K. (2008), EGM2008: An Overview of its Development and Evaluation, *An IAG International Symposium on Gravity, Geoid and Earth Observation 2008*, 23-27 June, Chania, Crete, Greece.
- Saandar, M. Kenyon, S. Forsberg, R. Enkhbayar, M. (2008), New Advances in Defining the Mongolian Gravimetric Geoid, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2008*, 15-19, December, Sanfrancisco, USA.
- Tapley, B.D, Shum, C.K. Ries J.C. Suter R. (1996), The TEG-3 Earth Geopotential Model, *International Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy 1996(GraGeoMar96)*, September 30 - October 5, p. 145.
- Torge, W. (1991), *Geodesy*, Walter de Gruyter, Berlin.
- Tscherning C.C. Knudsen P. and Forsberg R. (1994) *Description of the GRAVSOFT package*, Technical Report, Geophysical Institute, University of Copenhagen, Denmark.
- Vella M. N. J. P.(2003), A new precise Co-geoid determined by spherical FFT for the Malaysian peninsula, *Earth Planets Space*, 55, pp. 291-299.
- Zhonglovich, I.D. (1956), Determination of the dimensions of the general terrestrial ellipsoid, *Tr. Inst. Teor. Astronomy*, 6, pp. 5-66.