

# 항공중력기반 지오이드 모델 구축 및 검증

## Construction of the Airborne Gravity Based Geoid and its Evaluation

이지선<sup>1)</sup> · 권재현<sup>2)</sup> · 이보미<sup>3)</sup> · 홍창기<sup>4)</sup>

Lee, Jisun · Kwon, Jay Hyoun · Lee, Bo Mi · Hong, Chang-Ki

### Abstract

To obtain the gravity data with consistent quality and good distribution over Korea, to overcome the difficulties in constructing precision geoid from biased distribution of ground data, to resolve the discrepancy between the ground and ocean gravity data, an airborne gravity survey was conducted from Dec. 2008 to Jan. 2009. The data was measured at the average flying height of 3,000m and the data with cross-over error of 2.21mGal is obtained. The geoid constructed using this airborne gravity data shows the range of 9.34 ~ 33.88m. Comparing the geoid with respect to the GPS/levelling data, a precision of 0.145m is obtained. After fitting, the degree of fit to GPS/levelling data was calculated about 5 cm. It was found that there exists large biases in the area of south-western and northern part of the peninsular which is considered to be the effect of distorted vertical datum in Korea. Thus, more investigation on vertical datum would be needed in near future.

Keywords : Airborne gravity based geoid, Downward Continuation, GPS/Levelling

### 초 록

지역적 편향성을 보이는 지상중력자료의 분포와 육상 및 해상에서의 중력측정치의 불부합등의 문제를 해결하고 우리나라 전역에 걸쳐 고른 분포와 정밀도를 지닌 자료를 획득하기 위하여 항공중력측정을 수행하였다. 비행고도 3,000m 상공에서 획득된 항공중력자료는 교차오차 2.21mGal의 정밀도로 확보되었고, 이를 지상의 값으로 하향연속하여 약 9.34m부터 33.88m의 분포를 보이는 항공중력지오이드 모델을 구축하였다. 항공중력 기반의 중력지오이드는 GPS/Levelling 자료와 비교시 약 0.145m의 정밀도를 가지며, GPS/Levelling 자료와 융합 시 부합도는 약 5cm로 산출되었다. 항공중력기반의 지오이드는 지상중력기반의 지오이드와 비교할 때 충청이남의 서부지역 및 강원도 지역에서 큰 편이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 지상중력기반의 지오이드는 우리나라 수준망의 성과를 반영하여 산출되는 것에 기인한 것으로 판단되며, 이에 따른 추가적인 수준망 분석이 필요하다.

핵심어 : 항공중력기반 지오이드, 하향연속, GPS/Levelling

## 1. 서 론

우리나라 전역에 걸쳐서 균질한 분포와 정확도를 지닌 중력자료를 획득하기 위하여 2008년 12월부터 2009년 1월까지 약 두 달 동안 항공중력측정을 수행하여 교차오차 2.21mGal, 노선별 정밀도 1.6mGal의 중력이상값

을 획득하였다. 항공중력 측정은 항공기에 중력계를 탑재하여 항공기의 공간적 가속도와 중력계에서 측정되는 반작용에 의한 가속도의 차이를 통하여 중력을 결정하는 것으로, 이미 지난 10여년간 북극지역, 대만, 미국, 몽고 등 세계 각국에서 수행되어온 검증된 기술로 약 2mGal 내외의 정밀도를 가진 중력자료를 획득하는 가장

1) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail:leejs@uos.ac.kr)  
2) 교신저자 · 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 부교수(E-mail:jkwon@uos.ac.kr)  
3) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail:bmlee@uos.ac.kr)  
4) 정희원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 연구교수(E-mail:ckhong@uos.ac.kr)

효율적인 방법이다 (Hwang 등, 2006; Olsen, 2002). 특히 지상중력측정이 어려운 산악지역에서의 중력자료 획득이나, 육상과 해양에서 측정된 중력자료의 융합 등에는 항공중력측정이 가장 명백한 해법으로 산악이 70%이며, 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라의 지형적 특성이 바로 항공중력측정의 최적지에 부합된다.

사실 그동안 우리나라에서 측정되어온 지상중력자료는 충청이남지역과 경상도 일부지역에 심하게 편중되어 있어, 이를 이용한 지오이드 산출에 있어 aliasing 과 같은 오차로 인한 정밀도 저하의 문제점이 존재하여 왔다 (이보미 등, 2008). 뿐만 아니라, 우리나라의 지상중력자료는 몇몇 기관으로부터 측정되고 처리되어 그 측정방법과 정밀도의 일관성 확보에 문제가 있었다. 이러한 문제점들은 기존의 지오이드 구축 연구에 있어 정밀도의 향상을 저해하는 가장 큰 요소가 되었으며, 최신 연구기술을 적용하였음에도 불구하고 약 15~20cm 수준의 지오이드 정밀도를 확보하는 단계에 머물러 온 가장 큰 원인이었다 (이석배, 2000; 해양수산부, 2005).

앞서 언급한 자료의 불균질한 분포와 정밀도의 문제점을 가장 효율적으로 극복할 수 있는 방법으로 우리나라 전역을 고르게 포괄할 수 있도록 항공중력측정을 수행하였다. 항공중력측정은 동서간격 약 10km 의 남북방향의 노선 35개, 남북간격 약 50km 의 동서방향 노선 11개, 그리고 지상중력자료가 부족한 강원도 동북부 산간 지역에 5개 노선을 포함하여 총 51개 측정노선에 대하여 평균고도 3,000m 상공에서 수행되었다.

본 연구에서는 항공중력측정을 통하여 확보한 항공중력이상값, EGM2008 (Earth Geopotential Model 2008)모델, 그리고 SRTM 지형자료를 이용하여 항공중력자료 기반의 지오이드 모델을 산출하고, 산출된 지오이드의 정밀도를 평가하는데 주요한 목적이 있다. 항공중력이상값은 비행고도 3,000m 상공에서 획득한 값이므로 지오이드 모델을 계산하기 위하여 지표면 상의 값으로 환산하는 별도의 하향연속 과정을 필요로 하며, 지오이드 모델을 구축하기 위한 일련의 과정은 GRAVSOF를 이용하였다. 본 연구를 통하여 산출된 항공중력기반의 지오이드는 향후 지상중력자료와의 최적 융합을 통하여 정밀지오이드를 산출하는 기반이 될 것으로 기대된다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 중력이상값과 지오이드

일반적으로 지오이드고는 섭동포텐셜과 정규중력에 관한 Brun's 수식으로 표현된다(식 (1)). 이 때, 섭동포텐셜은 식 (2)와 같이 표현되므로, 지오이드고는 식 (3)에서와 같이 Stokes' 적분식으로 주어진다 (Heiskanen 등, 1967).

$$N = \frac{T}{\gamma} \tag{1}$$

$$T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma \tag{2}$$

여기서,

$$S(\psi) = \frac{1}{\sin(\psi/2)} - 6\sin\frac{\psi}{2} + 1 - 5\cos\psi - 3\cos\psi \ln\left(\sin\frac{\psi}{2} + \sin^2\frac{\psi}{2}\right)$$

: Stokes' 함수

$N$  : 지오이드고

$T$  : 섭동포텐셜

$\gamma$  : 정규중력

$R$  : 지구반경

$\Delta g$  : 중력이상값

$\psi$  : 섭동포텐셜 계산지점과 표면요소 사이의 구면거리

$\sigma$  : 면적분 요소

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) d\sigma \tag{3}$$

만약 중력이상  $\Delta g$ 가 지표면을 기준으로 한 값이라면 전통적인 Stokes' 적분식 대신에 Molodensky 적분식(식 (4))을 이용하여 의사지오이드고를 산출하고 이를 보정하여 지오이드를 계산하여야 한다.

$$\xi = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint (\Delta g + g_1) S(\psi) \cos\phi d\phi d\lambda \tag{4}$$

여기서,  $\phi, \lambda$  : 경위도좌표

$\gamma$  : 정규중력

$g_1$  : Molodensky 첫 번째 항

### 2.2 Remove-Restore 기법

식 (4)에서 알 수 있듯이, 지오이드고를 계산하기 위해서는 전 지구를 대상으로 하는 연속적인 중력자료를 필요로 하는데, 이러한 전 지구의 중력자료를 이용하여 지오이드를 계산하는 것은 불가능한 일이다. 따라서 실제

계산에 있어서는 대상지역에 대한 지역적인 중력자료를 기반으로 지오이드를 산출하게 되는데, 일부 지역에 국한되어 있는 중력값을 이용하여 전 지구적인 중력의 흐름을 표현하거나 각 지형의 영향을 반영하는데 있어서 한계가 있다. 따라서 전 지구적인 효과, 즉 중력신호의 장파장과 지형에 의한 단파장의 효과를 제거한 (Remove) 잔여중력이상값을 이용하여 잔여지오이드고를 계산한 뒤 제거된 효과를 지오이드고의 형태로 복원 (Restore)하는 Remove-Restore 기법을 이용한다.

일반적으로 장파장 효과는 식 (5)에서 나타내는 바와 같이 지구 전반에 대한 중력 값의 영향을 나타내는 전지구중력장 모델로부터 도출되며(Heiskanen 등, 1967), 지형의 상세한 효과를 반영하는 단파장 효과는 수치지형 자료로부터 계산된다(식 (6)). 따라서, 중력이상값으로부터 장파장과 단파장 효과를 제거한 뒤 남은 잔여중력이상값은 식 (7)과 같다(Forsberg 등, 2003).

$$\Delta g_{EGM} = \frac{GM}{R^2} \sum_{n=2}^{N_{max}} (n-1) \sum_{m=0}^n (\overline{C_{nm}} \cos m\lambda + \overline{S_{nm}} \sin m\lambda) \overline{P_{nm}}(\sin\phi) \quad (5)$$

$$\Delta g_{DEM} = A - A_{ref} = \delta A_{RTM} = 2\pi G\rho(h - h_{ref}) - c_P \quad (6)$$

$$\Delta g_{res} = \Delta g - \Delta g_{EGM} - \Delta g_{DEM} \quad (7)$$

여기서,  $\overline{C_{nm}}, \overline{S_{nm}}$  : 구면조화계수

$\overline{P_{nm}}(\sin\phi)$  : 르장드르함수

$G$  : 중력상수

$\rho$  : 지구 질량의 밀도

$h$  : 측정지점의 표고

$h_{ref}$  : 기준면의 표고

$c_P$  : 지형보정량

$\Delta g_{res}$  : 잔여중력이상값

$\Delta g$  : 중력이상값

$\Delta g_{EGM}$  : 지구중력장 모델에서 계산한 기준 중력이상값

$\Delta g_{DEM}$  : 중력값 상에서의 지형의 직접효과

항공중력측정에서는 비행 고도 상에서 측정된 중력값에서 장파장과 단파장 효과를 제거하게 되며, 이는 향후 지표면 상의 값으로 변환한 후 의사지오이드고(Quasigeoid)를 산출한다. 즉 식 (7)로부터 잔여지오이드에 의한 표고이상을 계산한 후, 식 (8)에서 나타내는 바와 같이 장파장과 단파장에 의한 효과를 복원하여야 한다.

$$\xi = \xi_{res} + \xi_{EGM} + \xi_{RTM} \quad (8)$$

여기서,  $\xi$  : 고도이상값, 의사지오이드

$\xi_{res}$  : 잔여고도이상값

$\xi_{EGM}$  : EGM08로부터 계산된 고도이상값

$\xi_{RTM}$  : 지형 환산방법을 통하여 계산된 고도 이상값

### 2.3 하향 연속 (Downward Continuation)

항공중력측정은 대상 지역에 대하여 노선별로 일관된 정확도의 자료를 획득할 수 있다는 장점이 있으나 비행 고도 상에서 측정된 값이므로 지오이드 모델을 구축하고, 지상중력자료와의 합성 등의 연구를 위하여 지표면 상의 값으로 환산하는 과정이 필요하다.

일반적으로 하향연속은 지상중력자료의 상향연속과 같이 공간 주파수 대역에서 FFT 방법을 통하여 계산하거나(식 (9)), 중력자료를 등방성과 균질성을 가진 통계학적인 모델로 가정하고 최소제곱콜로케이션 (Least-square Collocation, 식 (10))에 의하여 계산한다 (Forsberg, 2002).

$$F(\Delta g^0) = e^{-2\pi hk} F(\Delta g^h), \quad k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (9)$$

여기서,  $k_x, k_y$  : 공간 주파수 (Spatial frequency)

$h$  : 비행 고도

$$\hat{s} = C_{sx} [C_{xx} + D]^{-1} \quad (6)$$

여기서,  $s$  : 지상 격자에서의 중력이상값 신호

$x$  : 중력자료

$D$  : 대각 잡음 행렬

$C_{sx}, C_{xx}$  : 공분산 모델

항공중력자료의 경우 노선별 비행고도가 상이하며, 또한 지상중력자료와의 합성 과정에서 자료의 간격이 균일하지 않은 등의 문제 등으로 FFT 기법 보다는 최소 제곱콜로케이션 방법을 일반적으로 이용한다. 단, 콜로케이션에 의하여 하향연속을 수행할 때 실제 계산에 적용되는 중력값이 지역에 한정되어 있기 때문에 절단 오차가 발생하는데 이는 Remove-Restore 과정을 통하여 충분히 제거될 수 있다 (Hwang 등, 2006)

## 3. 항공중력지오이드 구축

### 3.1 자료

정밀 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 전 지구적

인 중력신호의 경향을 나타내는 지구중력장 모델과 지형의 효과를 계산하기 위한 지형자료, 그리고 우리나라 각 지점에서 측정된 중력이상값을 필요로 한다. 본 연구에서는 EGM2008 지구중력장 모델, SRTM 지형자료, 항공중력이상값을 기반으로 하여 지오이드 모델을 구축하였다.

### 3.1.1 EGM2008

EGM2008 지구중력장 모델은 EGM96 모델을 대체할 목적으로 NGA, ArcGP에서 제공한 지상중력자료와 GRACE를 통하여 측정된 중력자료 및 NOAA, DNSC에서 측정된 위성고도계자료를 기반으로 하여 최대 차수 2160까지 계산된 구면조화계수 모델로 공간 해상도는 EGM96에 비하여 약 6배 정밀하며, 정확도 역시 3배~6배 정밀한 모델이다 (Pavlis, 2008). 새로운 EGM2008 모델은 기존 지구중력장 모델과 다르게 아시아 지역에 대하여 15' 해상도의 중력자료뿐 아니라 SRTM 지형자료를 포함하고 있으며, 지상중력자료를 기반으로 EGM2008 모델의 정확도를 검증한 결과 차이값의 정밀도가 중력이상값에서 11.112mGal, 지오이드고에서 0.183m로 EGM96 모델에 비하여 중력이상값과 지오이드고에서 약 5mGal, 9cm 정도 향상된 것으로 분석되었다 (이지선 등, 2008b). 본 연구에서는 EGM2008에서 Grace 위성에 의하여 구축된 최대차수 720의 구면조화모델을 지오이드 모델 구축에 적용하였다.

### 3.1.2 SRTM 지형자료

SRTM DTM은 InSAR 기술 측정방법에 의하여 측정된 수치표고모델로 미국 본토에서는 1"의 공간해상도로 제공되며, 현재 우리나라에 대해서는 공간해상도 3"의 자료로 제공되고 있다. 기존의 연구에 의하면 SRTM 지형자료는 정밀지오이드 계산에 충분한 해상도와 정밀도를 가지는 것으로 분석되었으며 (이보미 등, 2008), 본 연구에서는 위도 33-39°, 경도 124-132° 범위의 자료를 9", 1', 15'의 간격으로 재 격자화 하여 RTM (Residual Terrain Model) 기법 적용에 사용하였다.

### 3.1.3 중력자료

본 연구에서는 2008년 12월부터 2009년 1월부터 약 2개월간 항공중력측정을 통하여 측정된 자료의 처리 결과인 항공중력 프리에어이상값을 이용하였으며, 교차오차와 정밀도는 각각 2.21mGal, 1.6mGal 이다. 지상중력

자료를 기반으로 지오이드를 계산한 경우는 지상중력자료가 충청 이남을 포함한 전라도 지역과 경상도 지역 및 제주도에 국한되어 있고, 해상중력자료로 사용하였던 위성고도계 자료 역시 연안지역에는 분포하지 않으므로 자료가 없는 지역에 대하여 aliasing 효과가 발생하였으나(이보미 등, 2008), 항공중력자료는 지상과 해상의 경계 없이 연속적으로 존재하며, 우리나라 전역에 대하여 격자 형태로 분포하고 있기 때문에 자료의 분포에 있어 큰 장점이 있다. 그림 1은 측정된 항공중력관측값을 처리하여 산출한 항공중력이상값으로 평균은 27.33mGal이고, -21.61mGal ~ 118.49mGal의 분포를 보이고 있으며, 상세한 자료처리 과정은 기존의 연구결과를 참조하기 바란다 (이지선 등, 2009).

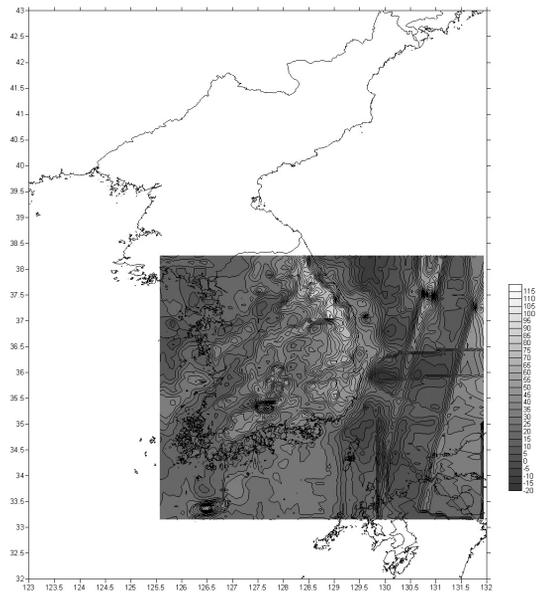


그림 1. 항공중력이상값 (mGal)

## 3.2 자료 처리

### 3.2.1 장파장 및 단파장 효과의 제거

앞서 언급한 바와 같이, Stokes' 또는 Molodensky 적분식에는 잔여중력이상값을 이용하게 된다. 본 연구에서는 지구 전반에 대한 장파장 효과를 최신 지구중력장 모델인 EGM2008로부터 계산하였으며, 지형에 의한 효과는 SRTM 지형 자료를 기반으로 RTM 방법에 의하여 산출되었다. RTM에 의한 지형효과는 지형의 밀도를 2.67g/cm<sup>3</sup>으로 가정하고 프리즘 적분을 수행하였으며,

표 8. 잔여중력이상치의 통계치

(단위 : mGal)

	Max	Mean	STD
항공중력이상값	118.49	27.75	17.19
EGM2008(장파장 효과)	82.47	25.91	15.46
항공중력이상값 - EGM2008	83.02	1.32	6.96
RTM	61.04	-0.02	4.96
항공중력이상값 - EGM2008 - RTM	68.50	1.33	5.95

항공중력자료에 비하여 지형이 고주파 자료이므로 항공 중력자료의 시간 간격인 10"를 필터 길이로 하여 Butterworth 필터를 통한 스무딩을 적용하였다. (Forsberg 등, 1997)

항공중력측정에 의한 총 26614점의 중력이상값을 대상으로 평균 25.91mGal의 장파장 효과와 -0.02mGal의 단파장 효과를 제거한 후 잔여중력이상값은 그림 2와 같으며, 평균 1.33mGal, 표준편차 5.95mGal의 통계값을 보인다(표 1).

일반적으로 장파장 및 단파장 효과를 제거한 후 잔여 중력이상값은 0에 가까운 값이지만, 본 연구에서는 1.33mGal의 값을 나타내는데 이는 EGM2008 지구중력장 모델의 기본 자료 중 지상중력자료가 아시아 지역에 대하여 드물게 분포하기 때문에 우리나라 지역에 대해서 약 2mGal의 차이를 나타내기 때문으로 분석된다.

3.2.2 하향연속(Downward Continuation)

하향연속은 항공중력측정을 수행한 위도 32°N~39°N, 경도 125°E~132°E의 범위에 대하여 1°간격으로 블록(block)을 나누고, 0.5°씩 중복되게 하여 블록단위로 collocation을 적용하였으며, Collocation 수식 내에서 분산은 9.6mGal, Bjerhammar 구의 반경은 4km, attenuation factor의 값은 20km로 각각 적용되었다. 블록 단위로 계산된 결과를 하나의 격자로 생성하는 과정에서 대상 지역에 대하여 자료가 없는 지역인 경우는 내삽을 통하여 값을 계산하였다. 하향연속 후 중력자료는 -38.29mGal부터 107.16mGal의 범위를 나타내며(그림 3), 지상중력자료 값과 비교하였을 때 차이는 최대 89.38mGal, 평균 0.15mGal, 표준편차 7.09mGal로 계산되었다.

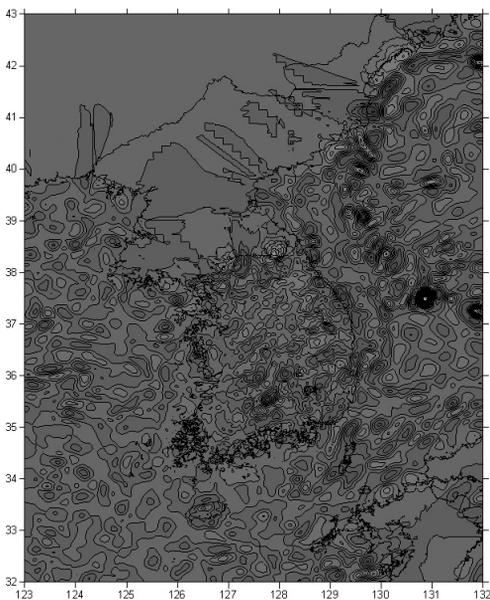


그림 2. 잔여중력이상값 (mGal)

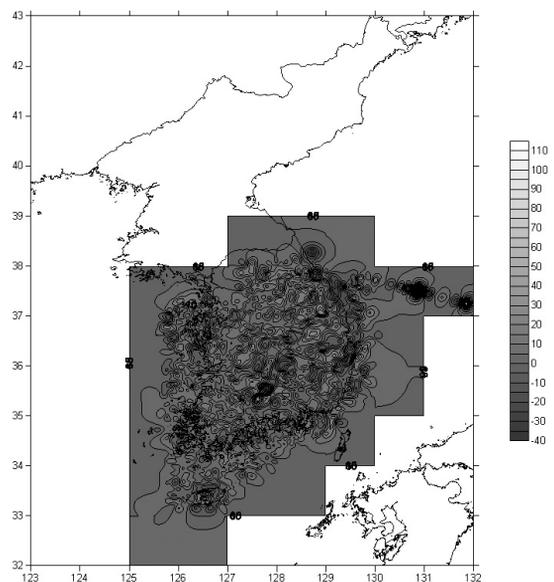


그림 3. 하향연속 후 잔여중력이상값 (mGal)

3.2.3 잔여지오이드 계산과 복원

하향연속을 수행한 잔여중력이상값에 Molodensky 적분식을 적용하여 잔여의사지오이드고를 계산하고, 이전에 제거되었던 장파장과 단파장 효과를 고도이상값으로 복원하여 의사지오이드를 구한다. 잔여의사지오이드고는 FFT 기법을 적용하여 계산하는데, 이때 Molodensky 적분식은 식 (11)과 같이 convolution의 형태로 다시 표현된다.

$$\xi = \frac{R\Delta\phi\Delta\lambda}{4\pi\gamma} \sum_{\phi} \sum_{\lambda} F^{-1}[F(\Delta g)F(S(\psi))] \quad (11)$$

잔여의사지오이드는 위도 32°~43°, 경도 123°~132°의 영역에 대하여 약 900m 간격의 격자로 계산되었으며, 장파장 성분에 의한 오차를 제거하기 위하여 Wong&Gore Stokes' kernel은 80-90으로 적용되었다. 장파장과 단파장에 의한 의사지오이드 효과는 동일한 간격의 격자상에서 EGM2008 모델과 SRTM 을 이용한 RTM 방법으로 계산된 값으로 산출된 후 잔여의사 지오이드고에 더해지게 된다. 최종 지오이드는 9.34m부터 33.88m의 분포를 나타내며, 평균 23.56m이다(그림 4).

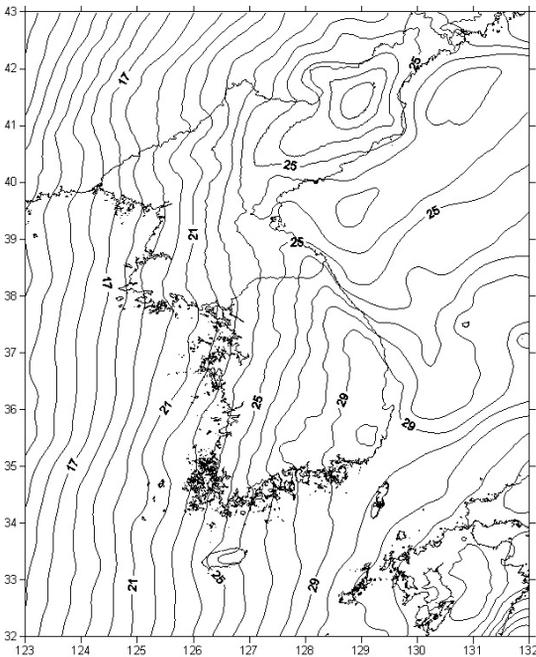


그림 4. 항공중력지오이드 (단위: m)

4. 항공 지오이드의 정확도 검증

4.1 GPS/Levelling 자료를 기반으로 한 항공합성지오이드의 정확도 검증

중력 지오이드는 전 지구의 중력장에 기반한 우리나라 지역의 지오이드 모델을 계산한 것으로 이는 실제 우리나라에서 사용하는 수직기준면과는 편위 형태의 차이가 존재한다. 이를 보정하기 위하여 우리나라의 각 지점으로부터 측정된 GPS/Levelling 자료를 기준으로 중력 지오이드를 조정하는 과정이 필요하며, 이렇게 계산된 지오이드 모델을 합성지오이드(Hybrid Geoid)라 한다.

이론적으로 지오이드고란 식 (12)에서와 같이 타원체에 대하여 수직으로 측정된 높이로부터 지오이드에 대한 법선인 표고를 빼 준 값으로 만약 수준점에서 GPS 측정한 것과 같이 한 지점에서 타원체고와 표고를 안다면 이들을 서로 빼줌으로서 지오이드고를 계산할 수 있다.

$$N^{GPS} = h^{GPS} - H \quad (12)$$

GPS/Levelling에 의하여 계산된 지오이드고( $N^{GPS}$ )와 중력지오이드 모델의 값( $N$ )을 비교하면 차이( $\epsilon$ )가 발생하는데 (식 (13)), Hybrid Geoid는 이 차이값이 0이 되도록 제약조건을 가하여 구하게 된다.

$$\epsilon = N^{GPS} - N \quad (13)$$

앞서 구한 항공중력기반의 지오이드를 총 828개의 GPS/Levelling 자료를 대상으로 비교한 결과, 최대 0.42m, 평균 -0.15m, 표준편차 0.145m의 차이를 나타내었다. 이 때, GPS/Levelling 자료는 총 점 중에서 항공중력지오이드 모델과의 차이가 2 이상인 점들을 이상점으로 하여 제거하는 과정을 거쳐 남은 828점을 사용하였다. 최종 합성지오이드고는 총 828점에 대한 GPS/Levelling 지오이드고와 항공중력지오이드고의 차이를 최소제곱콜로케이션을 통하여 계산하고, 이를 항공중력지오이드고에 보정하여 결정되었다. 합성지오이드 모델을 GPS/Levelling 자료와 비교하면, 최대 0.14m의 차이를 보이며 표준편차 0.487m로 5cm 이하의 부합성(Degree of fit)을 보인다.

4.2 항공 중력지오이드와 지상 중력지오이드의 비교

항공중력지오이드의 정확도를 평가하기 위하여, 기존의 연구에서 사용되었던 지상중력자료를 처리하여 지오이드고를 산출하고 이를 분석하였다. 지상중력자료의 품질, 분포 등에 관해서는 기존의 연구결과를 참조하기 바란다 (이지선 등, 2008a; 이보미 등 2008). 앞서 GPS/Levelling 자료와 항공 중력지오이드의 차이가 표준편차 0.145m, 최대 0.42m인 반면에 동일한 GPS/Levelling 자료에 대하여 지상중력자료를 기반으로 한 중력지오이드는 표준편차 0.152m, 최대 0.56m의 차이를 보인다. 두 중력지오이드 모델의 차이는 최대 0.58m, 표준편차 0.07m이며, 다음 그림과 같다(그림 5).

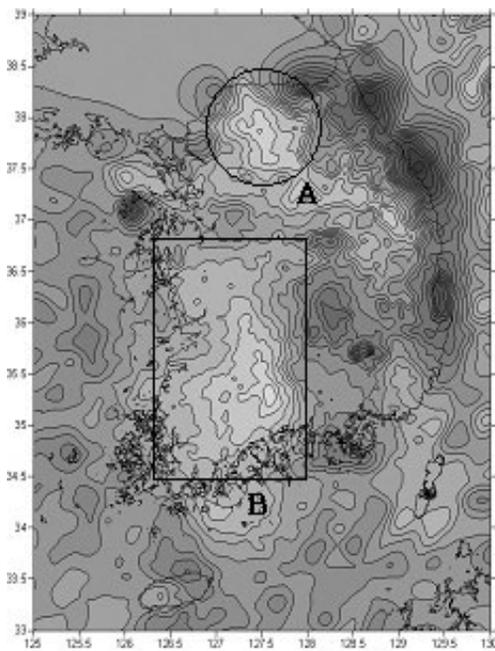


그림 5. 항공중력지오이드와 지상중력지오이드의 차이 (mGal)

두 지오이드 모델의 차이는 크게 두 원인에 기인한 것으로 볼 수 있다.

먼저, 강화도와 동해안 연안지역은 그림 6에서 나타내는 바와 같이 항공중력자료는 존재하지만 지상중력자료가 존재하지 않는 지역으로, 이 지역에서 발생하는 차이는 지상중력자료의 분포밀도가 낮은 것에 기인한 aliasing 효과이다.

그러나 지상중력자료가 충분한 밀도로 존재하고 있는 충청이남 지역과 강원도 지역에서의 차이는 우리나라 수직기준망의 특성에 기인한 것으로 볼 수 있다. 즉, 항

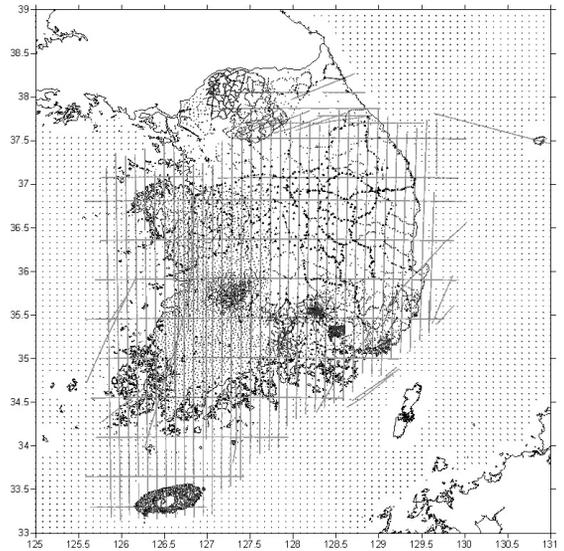


그림 6. 항공중력자료 및 지상중력자료의 분포도

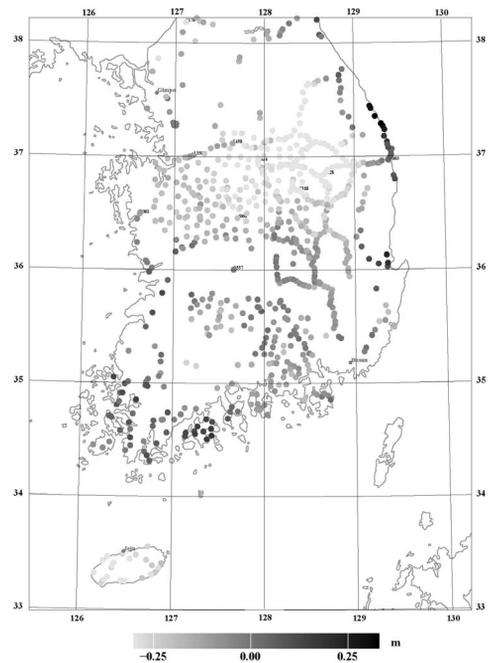


그림 7. 항공중력지오이드와 GPS/Levelling의 차이

공과 지상중력이상값을 지표면을 기준으로 하향연속하여 지오이드 모델 계산에 이용하였더라도, 기본적으로 지상에서 측정된 지상중력 자료는 측정 지점에서의 표고값을 반영하여 계산된 중력이상값인 반면, 항공중력

표 12. 항공 중력지오이드와 지상 중력지오이드의 비교

(단위 : m)

비교지역	points	항공중력 기반			지상중력 기반		
		Max	Mean	STD	Max	Mean	STD
강원도(A)	17	0.29	-0.17	0.07	0.30	-0.06	0.12
충청이남(B)	203	0.56	-0.12	0.13	0.31	-0.01	0.16

프리에어이상값은 타원체고 3,000m 상에서 계산된 값이므로 항공잔여중력이상값에는 우리나라에서 사용하고 있는 표고값의 영향이 반영되지 않는다.

따라서 그림 7에서와 같이 완만한 높이 기준인 지오이드와 GPS/Levelling 자료를 비교하였을 때, 일부 지역에서 차이가 발생하며 이는 우리나라 수준점의 성과에 지역적인 편위가 존재한다는 점으로 해석될 수 있다. 즉, 수준점 성과의 차이에 의하여 지오이드 모델과 GPS/Levelling 차이는 높이에 대한 영향의 반영 여부에 의하여 지역적으로 발생하며, 이미 표고에 의한 영향이 반영된 지상중력 지오이드 모델에서는 항공중력자료에 비하여 차이가 더 작게 나타나게 되는 것이다. 그러나 항공중력측정에 의한 지오이드가 지상중력자료를 기반으로 한 지오이드에 비하여 평균값은 크게 나타나더라도 표준편차는 더 작게 나타나므로 항공중력자료의 일관성이 더 높다 (표 2).

예를 들어, 비교할 수 있는 자료가 충분히 분포하는 충청 이남지역을 대상으로 GPS/Levelling 자료와 두 중력지오이드 모델을 비교하였을 때, 지상중력지오이드에서의 차이는 약 -0.01m, 항공중력자료에서의 차이는 -0.12m로 지상중력지오이드가 약 0.1m 정도 작은 값이지만, 표준편차는 항공중력자료를 기반으로 하였을 때 약 3cm 정도 작은 값으로 이는 항공중력자료가 더 일관성이 있다는 의미이다.

합성지오이드 모델을 GPS/Leveling 자료와 비교하면, 차이의 평균이 각각 0.004m와 0.005m이고 표준편차가 약 0.045m로 정밀도에서 큰 차이가 나타나지 않으므로 이는 항공중력자료가 지상에서 측정된 자료와 유사한 정밀도를 확보하고 있음을 의미한다.

중력지오이드에서 발생하는 GPS/Levelling 자료와의 차이는 항공중력측정값에 실제 표고의 영향을 반영되지 않았기 때문에 발생하는 것이다. 또한, 그림 5에서와 같이 두 지오이드 모델이 차이값이 충청이남, 강원도 등 지역적으로 나뉘어 존재하는 것은 우리나라 수준점 성과에 지역적인 편위가 존재할 수 있음을 의미하므로 향

후 수준점 성과에 대한 검증 역시 필요할 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 항공중력이상값, EGM2008 지구 중력장 모델과 SRTM 지형 모델을 기본자료로 하여 Remove-Restore 기법에 의한 항공중력지오이드 모델을 구축하였다. 하향연속 후 잔여중력이상값은 평균 1.33mGal, 표준편차 5.95mGal로 나타났으며, 제거된 장파장 및 단파장 효과를 복원 후 최종 지오이드는 9.34m ~ 33.88m의 범위를 가지며, 평균은 23.56m 이다.

둘째, 항공중력지오이드 모델을 GPS/Levelling과 비교한 결과, 최대 0.42m, 평균 -0.15m, 표준편차 0.145m의 차이가 발생하였다. 중력지오이드 모델을 GPS/Levelling에 fitting하여 구축한 합성지오이드 모델의 부합성은 표준편차 0.487m로 5cm 이하의 부합도 (degree of fit)를 나타낸다.

셋째, 항공중력지오이드 모델의 정확도를 검증하기 위하여 지상중력자료만을 이용하여 구축한 합성지오이드 모델과 비교한 결과, 인천, 강화도 및 동해지역과 강원도, 충청이남 지역에서 차이가 발생하였다. 인천 및 강화도 지역은 지상중력자료의 부재로 인한 aliasing 효과에 기인하지만 강원도 지역과 충청이남 지역은 수준점 성과에 의하여 발생하는 효과로 이는 항공중력자료는 고도 3,000m 상에서 측정 후 하향연속 수행하여 지표면 상의 값으로 환산하여 이용하는 반면 지상중력자료는 지형의 영향을 반영한 표고를 높이로 사용하기 때문에 지역적으로 차이를 보이는 수준점 성과가 기 반영되었기 때문이다.

본 연구에서는 항공중력자료를 기본으로 지오이드 모델을 구축하고 지상중력지오이드와 차이를 비교, 분석하는 단계까지 진행되었으나 향후 항공중력자료와 지상중력자료의 병합을 통한 지오이드 모델 구축 등의 연구

가 필요할 것이다. 또한 본 연구의 결과를 토대로 한 우리나라 수직기준망의 분석과 정립 등에 관한 연구도 필요하다고 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보 C02)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

이보미, 이지선, 권재현, 이용욱 (2008), 우리나라 정밀 지오이드 구축을 위한 지형자료 및 중력자료 영향 분석, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 26권, 제 5호, pp. 519-527.

이석배 (2000), 중력학적 방법 및 위성측지 방법에 의한 지오이드 모델링에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 18권, 제 4호, pp. 359-367.

이지선, 이보미, 권재현, 이용욱 (2008a), 우리나라 지상 중력자료의 일관된 전처리를 통한 프리에어이상값, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 26권, 제 4호, pp. 379-386.

이지선, 이보미, 권재현 (2008b), Evaluation of EGM08 using Gravity Anomaly and GPS/Levelling in Korea, 3D GEOINFO 2008, pp. 197-203.

이지선, 권재현, 이보미, 홍창기 (2009), 항공중력측정에 의한 프리에어 이상 산출, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 27권, 제 4호.

해양수산부(2005), 정밀 지오이드 모델 구축에 관한 연구, 해양한국발전프로그램(KSGP) 연구개발사업 연구보고서, 부산대학교 SG연구사업단.

Forsberg, R., Tscherning C. C. (1997), Topographic effects in gravity field modelling for BVP, *Geodetic Boundary Value Problems in View of the One Centimeter Geoid*, Lecture Notes in Earth Science, Vol. 65, pp. 239-272.

Forsberg, R. (2002), Downward continuation of airborne gravity data - an Arctic case study, *Proc. 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission : Gravity and Geoid 2002*, pp. 51-56.

Forsberg, R., Tscherning C. C., Kundsen P. (2003), *An overview Manual of the GRAVSOFT*, Kort & Matrikelstyrelse.

Heiskanen, W.A, Moritz, H. (1967), *Physical Geodesy*, W.H. Freeman and Co., San Francisco.

Hwang, C., Hsiao, Y., Shi, H. (2006), Data reduction in scalar airborne gravimetry : Theory, software and case study in Taiwan, *Journal of Computers & Geosciences*, Vol 32, pp. 1573-1584.

Olsen, V. A. (2002), *Improved airborne scalar gravimetry for regional gravity field mapping and geoid determination*, Ph.D. thesis, University of Copenhagen.

Pavlis, N. K. (2008), Development, Evaluation, and Use of Global Earth Gravitational Models(EGM), IGeS 2008 Int'l Geoid School : The Determination and Use of the Geoid.

---

(접수일 2009. 3. 16, 심사일 2009. 4. 21, 심사완료일 2009. 4. 22)