

# 우리나라 지상중력자료의 일관된 전처리를 통한 프리에어이상값 Free-air Anomaly from a Consistent Preprocessing of Land Gravity Data in South Korea

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

Lee, Ji Sun · Lee, Bo Mi · Kwon, Jay Hyoun · Lee, Yong Wook

## Abstract

To determine the precise geoid, the quality land gravity data as well as the accurate position information of the observation points are required. Here, the land gravity data should be processed in a consistent way from the raw data level producing the quality free-air anomaly being used in the geoid determination. In this study, we processed land gravity data of KIGAM(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources) and Pusan national university which has precise position information acquired from GPS and raw gravity data. The conversion from readings of gravimeter to the gravity value, corrections of instrumental height and tide were carried out from the raw gravity data for each surveying session. Then, a cross-over adjustment was applied to generate a free-air anomaly for whole data with precision of 0.48 mGal. It is expected that the data processed through this study shall be a foundation on the determination of the precise geoid model in Korea.

Keywords : Land gravity data, Preprocessing, Cross-over adjustment

## 초 록

정확한 지오이드 결정을 위해서는 중력원시자료로부터 통일된 전처리를 수행하여 일관된 품질의 중력자료를 확보하여야 하며 또한 정확한 위치 정보를 이용하여 다양한 보정을 수행하여야 한다. 본 연구에서는 현재 우리나라에서 중력원시자료와 GPS 측량을 통한 정밀한 관측위치를 보유하고 있는 한국지질자원연구원과 부산대학교의 지상중력원시자료를 통합하고, 일관성 있는 품질검증을 수행하여 정밀 지오이드 구축의 기본 자료인 프리에어이상값을 최종 결과물로 산출하였다. 전처리 과정에서 기계값 환산, 기계고 보정, 조석보정 등을 수행하고, 이상치 검증을 작업별로 처리하였다. 이후, 모든 자료를 이용한 교차점조정계산을 수행하여 정밀도 0.488mGal의 프리에어이상값이 구축되었다. 본 연구에서 구축된 중력자료는 5cm급 정밀지오이드 개발의 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : 지상중력자료, 전처리, 교차점조정계산

## 1. 서 론

다양한 우주측지 기술의 발달과 지구 동역학적 현상 규명 등의 요구에 의하여 정확한 측지 위치에 의한 공간정보를 제공할 수 있는 기반이 증가하였다. 특히 위성측지 기술의 발달로 측지위치, 즉 위도·경도·타원체고는 정

밀하게 결정될 수 있는 반면 높이는 평균 해수면을 기준으로 한 표고를 사용함에 따라 GPS와 같은 위성 측지기술을 높이에 적용하기 위해선 정밀한 지오이드가 구축되어야 한다. GPS/Leveling 기법으로 알려진 이 기술은 GPS 측량에 의한 타원체고와 지오이드고의 차로부터 표고를 손쉽게 획득하는 방법으로, 고정밀도를 요구하지 않

- 1) 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail:leejs@uos.ac.kr)
- 2) 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(E-mail:bmlee@uos.ac.kr)
- 3) 연결저자·정희원·서울시립대학교 공간정보공학과 부교수(E-mail:jkwon@uos.ac.kr)
- 4) 정희원·대한측량협회 책임연구원(E-mail:ywlee@kasm.or.kr)

은 경우, 수준측량 과정이 불필요 하게 됨으로써 비용, 작업의 효율성 및 효율적 측면에서의 개선을 기대 할 수 있다. 이와 같은 이유로 최근 정밀한 지오이드 구축의 필요성 증가하고 있으며, 고정밀 지오이드 구축의 기본 자료가 되는 다량의 정확한 지상중력자료의 필요성이 증가하고 있다.

국내의 지오이드 구축과 관련된 연구는 1990년대 중반부터 일부 대학교와 연구소 등에서 꾸준히 진행하여 왔다 (Yun, 1999; 이석배, 2004; 해양수산부, 2005). Remove-Restore 과정, FFT 산출식의 적용 등 활발한 최신 이론 연구를 토대로 구축된 우리나라의 지오이드의 정확도는 현재 15cm 내외로 알려지고 있다. 이러한 기존의 연구들에서 많은 노력을 경주하여 왔음에도 불구하고 우리나라의 지오이드의 정밀도가 선진국 수준에 도달하지 못하는 가장 큰 이유가 바로 지상중력자료의 분포와 정밀도 때문이다. 기존의 지오이드구축 연구에서는 과거 1970년대부터 다양한 기관에서 보유하고 있던 자료들과 각 기관에서 직접 중력측량을 실시하여 획득한 자료들을 혼합하여 사용하여 왔다. 이들 자료는 원시자료의 유무에 따라 분류할 수 있는데, 즉 중력계로 부터의 원시자료인 기계값이 보존되어 있는 경우와 원시자료가 아닌 일련의 전처리 과정을 거친 프리에어이상값(Free-air Anomaly)만이 보존되어 있는 경우이다. 여기서 원시자료가 보존되어있지 않은 경우, 프리에어이상값을 산출하기위한 전처리 과정에 있어 그 일관성과 정확성이 검증되지 않으므로 이로부터 발생한 상당량의 오차가 구축되는 지오이드에 전파되었을 것으로 판단된다. 또한 과거에는 중력측점의 위치를 지도에서 독취하거나 간단한 고도계를 사용한 경우 등이 많았으며, 수준측량을 실시하였다더라도 과거 수준점의 오차가 그대로 전파되어 측점위치와 높이에 상당한 오차가 포함되어 있었다.

따라서 정확한 지오이드 결정을 위해서는 중력자료의 원자료 형태에서부터 통일된 방법으로 전처리를 수행하여 일관성 있는 자료의 품질을 확보하여야 하며, 이와 더불어 정확한 관측점의 위치를 결정하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 현재 우리나라에서 중력원시자료와 GPS 측량을 통한 정밀한 관측위치를 보유하고 있는 한국 지질자원연구원과 부산대학교의 지상중력원시자료를 통합하고, 품질검증을 위한 일관성 있는 전처리 및 조정계산을 수행하여, 정밀지오이드구축의 기본자료가 되는 프리에어 이상을 산출하였다. 본 연구를 통한 결과물은 가

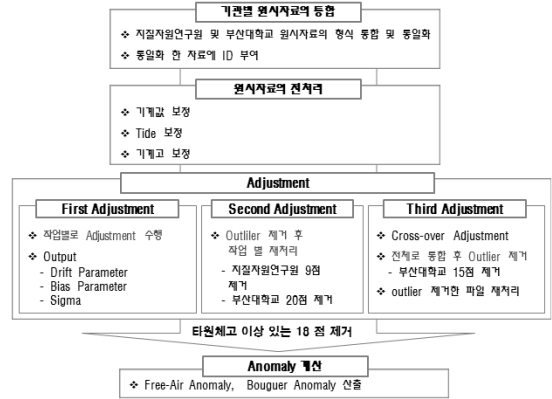


그림 1. 연구흐름도

장 최신의 양질의 중력자료가 일관성 있게 처리되었다는 점에서 우리나라의 지오이드 정밀도를 높일 수 있는 토대를 마련하였다고 판단된다.

## 2. 연구방법

본 연구에서 지오이드 계산의 기본자료가 되는 프리에어이상값을 산출한 자료처리의 흐름도를 그림 1에 나타내었다. 자료처리는 크게 원시자료의 통합, 전처리, 조정계산, 그리고 프리에어이상값 산출로 나누어진다. 원시자료의 통합에서는 기관별 지상중력원시자료의 형식을 통일화하고 고유의 아이디(ID)를 부여하는 등의 통합 작업을 수행한다. 전처리과정에서는 기계값을 중력값으로 환산하고 조석보정을 수행한다. 조정계산에서는 작업별로 조정계산을 수행하여 중력계의 drift와 bias를 제거하는 과정이 수행되며, 과대오차를 검출하고 제거하여 재처리하는 과정을 수행한다. 작업별 조정계산된 결과는 전체적인 하나의 중력망으로 통합하는 과정이 필요하게 되며 이때 교차점 조정계산(Cross-over Adjustment)를 수행하여 절대중력값을 계산한다. 이후 최종 결과로 측점별 절대중력값을 이용하여 프리에어이상값을 산출한다 (그림 1).

## 3. 지상중력자료의 표준화

### 3.1 자료

일반적으로 중력계는 중력의 증감에 의한 스프링(zero-length spring)의 상하 이동시의 신축을 측정하며, 이렇게 측정된 원시 기계독취값을 중력값으로 환산하기 위해서

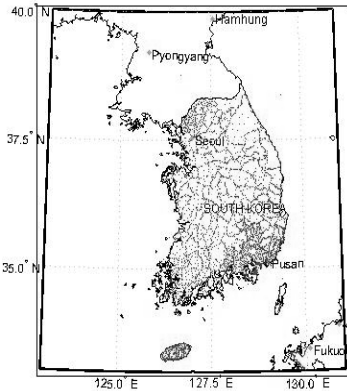


그림 2. 기존 지오이드관련 연구에 사용된 자료

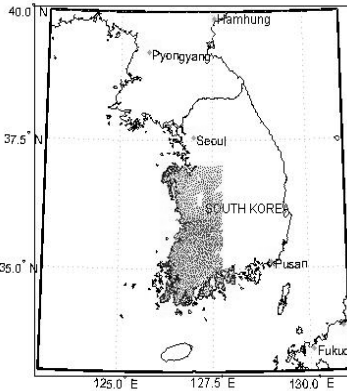


그림 3. 한국지질자원연구원

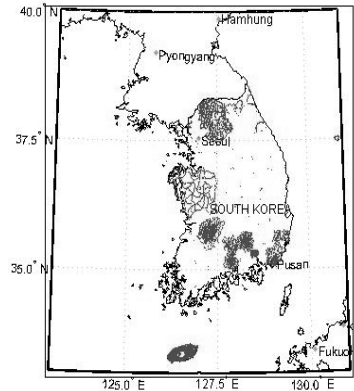


그림 4. 부산대학교

표 1. 한국지질자원연구원 자료 통계

	G200	CG3	G866	ZLS	CG5	합계
2000	249					249
2001	318					318
2002	301					301
2003	149					149
2004	207	214	147			568
2005	215	219	130			564
2006	67	68		59		194
2007	183		65	108	170	526
합계	1689	501	342	167	170	2869

표 2. 부산대학교 자료 통계

	G899	SG03	G866	EG	합계
1997	133				133
1998	712				712
1999	1240	1294			2534
2000	334	387			721
2001	648	428	109		1185
2002	545	1201			1746
2004	329			382	711
	3941	3310	109	382	7742

는 측정의 위치, 측정시기, 중력측정기기의 종류, 원시 기계독취값 등의 정보가 필요하다.

앞서 언급한 기존의 지오이드 관련 연구에 사용되어왔던 자료는 국내 국토지리정보원, 한국자원연구원, 프랑스의 BGI(Bureau Gravimetric International) 그리고 Leeds 대학에서 측정한 자료로 구성된다(그림 2). 위의 모든 자

료들은 프리에어이상값으로 보유되어 있으며 원시자료는 없는 상태이다. 또한 BGI와 Leeds 대학의 자료는 측정시기 및 측정기기에 대한 정보가 누락되어 있고, 지리원 자료는 좌표값의 취득 방법이 불분명하여 많은 오차요인을 지니고 있는 문제점이 있다. 물론 지구중력장파 및 지형과의 상관관계 분석 등의 과정을 통하여 프리에어 이상의 품질 검증을 수행하여 명백한 과대오차 등은 검출할 수 있으나, 이것이 위치 및 측정의 불확실성을 근본적으로 해결하지는 못한다. 따라서 정밀한 지오이드 구축을 위해서는 원자료가 보존되고 측정의 위치가 정확한 자료를 사용하여야 한다는 것이 기본적인 전제조건이며, 필요시 보완측량을 통하여 요구되는 측정점을 확보하여야 한다.

우리나라의 중력자료 중 중력원시자료와 함께 정밀한 측정의 위치가 보존된 자료는 한국지질자원연구원과 부산대학교의 중력 자료이다. 한국지질자원연구원의 자료는 2000년부터 2007년까지 측정된 2869점으로 충청도와 전라도 지역에 주로 분포하고 있으며(그림 3), 부산대학교의 자료는 1997년부터 2004년까지 측정된 총 7742점으로 경기도, 충청도, 전라도 및 경상도 일부 지역과 제주도에도 분포하며, 총 8종류의 중력계를 사용하여 관측하였다(그림 4).

한국지질자원연구원과 부산대학교의 측정 연도별, 중력계 별 측정점 수는 표 1 및 표 2와 같다.

### 3.2 중력자료 통합 및 형식의 통일화

각 지상중력측점에 대한 시간, 위치, 높이 및 상대중력값에 대한 정보는 지오이드 구축에 있어서 필수적인 요소이다. 중력측정을 통하여 취득한 중력원시자료는 각 담당

표 3. 기관별 중력원시자료 형식

한국지질 자원연구원	날짜(년, 월, 일), 측정지점, 측정시, 분, 기계 값(mGal), 기계고, 위도, 경도, 타원체고
부산대학교	날짜(년, 월, 일), 자료수, 측정지점, 측정시, 분, 기계값(CU), 기계고, 경도, 위도, 표고, 타원체고, 지오이드고, 기계명

기관의 고유 형식으로 관리되고 있어, 표 3과 같이 형식이 상이하였다. 이에 기관별 자료의 정보를 누락시키지 않고, 향후 지오이드 구축에 필요한 정보들을 포괄하기 위하여 관측지점, 시간, 기계값, 위치, 높이의 정보를 포함하는 새로운 형식으로 자료를 표준화하여 통합 및 정리하였으며, 정리된 중력원시자료의 표준안은 표 4와 같다.

### 3.3 고유 ID 부여

통합된 자료를 처리하기 위해선 고유의 ID를 부여하고 동일점을 확보하여야 한다. 즉, 한국지질자원연구원은 관측지점을 00-097-Pyojun와 같이 년도\_날짜\_지점 순서로 표기하고 있고, 부산대학교는 PNU같이 관측지점명을 표기하거나 G015같이 작업순서에 따라 일련번호를 부여하는 방법을 혼용하여 사용하고 있어 자료 처리 시 관측지점명이 상이하기 때문에 동일점으로 인식할 수 없다. 따라서, 통합된 자료를 이용하여 처리하기 위하여 한국지질자원연구원의 자료는 100001부터, 부산대학교의 자료는 200001부터 각 점마다 순차적으로 일련번호를 부여하였고, 수치지형도의 독취 오차 및 GPS 상대측위의 오차범위를 고려하여 수평위치의 오차범위를 70cm로 정하여, 경·위도를 기반으로 수평위치의 차이가 70cm 이내이면 동일점으로 판단하여 900001부터 아이디를 재부여하였다. 위 과정을 수행한 결과 산출된 동일점은 한국지질자원연구원 자료 중 457점, 부산대학교 2902점으로 나타났다.

## 4. 중력자료의 전처리

중력계로부터 독취된 기계값은 스프링의 신축에 따른 양이며, 또한 조석의 영향이 포함된 값으로 이들을 지표면의 측정에서의 조석의 영향이 제거된 중력값으로 환산하는 전처리 과정을 수행하여야 한다.

### 4.1 기계값 환산

중력계로 측정하여 읽은 값은 LaCoste & Romberg G-type 기계의 경우는 금속스프링(metal spring)의 변화량, Scintrex

표 4. 중력 원시자료 표준안 (괄호안은 자료의 포맷)

<중력 원시자료 표준안>
관측지점(C12), 관측날짜 및 시간(년(I4), 월(I2), 일(I2), 시(I2), 분(F5.2)), 기계값(CU,F8.3), 기계고(cm, F4.3), 기계값(mgal, F8.3), 관측위치(위도(Deg, F10.6), 경도(Deg, F10.6), 표고(m, F8.3), 타원체고 (m, F8.3), 기계종류(C4)

기계의 경우는 수정스프링(quartz spring)의 변화량을 측정하는 값이다. 이러한 스프링의 변화량은 중력값이 아니며, 이를 중력값으로 환산하기 위해서는 우선 제조회사에서 캘리브레이션 실험을 거쳐 결정된 환산계수를 이용하여야 한다. 즉, 환산표에서 읽은 값을 바탕으로 중력값으로 변환하기 위한 보정량을 결정하여 이를 기계독취값에 더하거나 빼주는 과정이다.

### 4.2 조석보정

중력은 달과 태양의 시간과 위치에 따른 기조력의 수직성분에 따라 변화하며, 기조력에 따른 중력의 변화는 각 수직성분의 합으로 표현된다(Longman, 1959).

$$g_0 = g_m + g_s \tag{1}$$

$$g_m = \frac{\mu M r}{d^3} (3\cos^2\theta - 1) + \frac{3}{2} \frac{\mu M r}{d^4} (5\cos^3\theta - 3\cos\theta) \tag{2}$$

$$g_s = \frac{\mu S r}{D^3} (3\cos^2\varphi - 1) \tag{3}$$

- 여기서, M : 달의 질량,
- S : 태양의 질량,
- r : 지구 중심으로부터 측정지점 P까지의 거리,
- d : 지구와 달 중심 간의 거리,
- D : 지구와 태양 중심 간의 거리,
- θ : 달의 천정각,
- φ : 태양의 천정각

본 연구에서 사용된 9611점에 대한 기계값 환산과 조석 보정에 의한 보정량은 평균 0.027mGal이었으며 최대 0.19mGal에 달한다.

### 4.3 기계고 보정

일반적으로 중력계에서 관측된 중력값은 지표면의 측정에서의 중력값이 아니다. 즉, 지표면과 중력계의 높이 차이에 의하여 중력값에 차이가 발생하게 되므로, 이를

보정하여야 한다. 특히, 측정하고자 하는 지점에 중력계를 설치하기 어려운 경우는 편심측정을 하여야 하며 이때 측정점과 중력계 사이의 높이는 수 미터에 달할 수 있으므로 기계고 보정은 필수적으로 수행하여야 한다. 높이에 따른 중력값의 변화는 일반적으로 0.3086mGal/m이므로 기계고 보정은 아래 수식과 같이 주어진다(Hofmann & Moritz, 2005).

$$\Delta g_{기계고} = 0.3086 \times h \text{ (mGal)} \quad (4)$$

여기서, h는 지표면으로부터 중력계까지의 높이이다. 본 연구에 사용된 자료의 경우 최대 보정량은 0.889mGal에 이르렀으며, 전체 자료의 평균 보정량은 0.094mGal로 산출되었다.

## 5. 조정계산

중력계에 의하여 발생하는 Drift와 Bias 오차를 보정하고 각 측정점에서 최적의 절대중력값을 계산하기 위하여 조정계산을 수행한다. 중력 측정이 일반적으로 환을 구성하여 수행되므로, 작업별로 Drift와 Bias 요소를 추정하며 이때 과대오차를 제거하고 다시 오차요소를 추정하는 과정을 반복한다. 이러한 작업별 조정계산이 끝나면, 이들을 통합하기 위하여 자료 전체를 대상으로 교차점 조정계산을 수행하게 되며, 이를 통하여 각 측정에서는 최적의 절대중력값이 산출된다.

### 5.1 기본 이론

일반적으로 한지점에서의 관측중력값은 식 (5)와 같이 절대중력값과의 차이를 포함한 Bias와 스프링의 신축에 따른 Drift 오차를 포함한다(Hwang, 2002).

$$l(t) + v = g + N_0 + D(t) \quad (5)$$

여기서, t : 측정시간

l(t) : calibration factor를 곱하여 기계값을 보정, 조석 보정을 수행한 관측중력값

v : l(t)의 잔차

g : 측정지점에서의 중력값

N<sub>0</sub> : Bias

D(t) : 중력계의 drift 함수

상대중력측정의 원리에 의하여 두 지점 간의 상대중력값, 즉 i 지점과 j 지점에서의 중력값의 차이는 식 (6)과 같이 표현되며,

$$\Delta l_{i,j} + v_{i,j} = g_j - g_i + (\Delta F(z_j) - \Delta F(z_i)) + (D(t_j) - D(t_i)) \quad (6)$$

여기서, v<sub>i,j</sub> : 관측치 차이인 Δl<sub>i,j</sub>의 잔차

t<sub>i</sub>, t<sub>j</sub> : 측정 시간,

만약 n개의 상대중력 관측치가 있다면, 위의 상대중력 측정에 관한 관측방정식은 식 (7)과 같이 표현된다.

$$L^b + V = AX \quad (7)$$

예를 들어, 첫번째 관측치와 n+1번째 관측치가 같은 경우에는 관측방정식을 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$L^b + V = AX \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \\ \Delta l_4 \\ \vdots \\ \Delta l_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \Delta t_1 \\ 0 & 1-1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \Delta t_2 \\ 0 & 0 & 1-1 & 0 & 0 & \dots & \Delta t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1-1 & 0 & \dots & \Delta t_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \vdots \\ g_n \\ d \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, L<sup>b</sup> : 상대중력측정치 벡터(n×1)

V : 잔차벡터

A : 계수행렬(n×(n+1))

X : 미지수 행렬(중력값 g<sub>i</sub>, Drift 함수, (n+1)×1)

위의 식에서, 관측방정식의 차수가 L<sup>b</sup>는 n×1, X는 (n+1)×1이므로 최소제곱법에 의하여 해를 구할 때 계수행렬인 A행렬의 차수가 하나 부족하다. 따라서 i측점에서의 중력측정값과 절대중력값을 모두 알고 있는 점을 제약조건으로 이용하여 식 (9)와 같이 관측방정식을 세울 수 있다.

$$L^b + V = AX \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta l_1 \\ \Delta l_2 \\ \Delta l_3 \\ \Delta l_4 \\ \vdots \\ \Delta l_n \\ l_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \Delta t_1 \\ 0 & 1-1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \Delta t_2 \\ 0 & 0 & 1-1 & 0 & 0 & \dots & \Delta t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1-1 & 0 & \dots & \Delta t_4 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t_{n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \vdots \\ g_n \\ g_i \\ d \end{bmatrix} \quad (9)$$

즉, 위와 같이 한 점 이상의 절대중력점을 고정하면, 설계행렬이 full rank가 되므로 관측방정식의 해를 구할 수 있다. 최소제곱법에 의한 관측방정식의 해는 식 (10)을 이용하여 산출한다.

$$\hat{X} = (A^T A)^{-1} (A^T L^b) \quad (10)$$

### 5.2 작업별 조정계산

중력측정은 기지점을 시점과 종점으로 선정하여 폐합이 될 수 있도록 측정하며, 이를 하나의 작업 단위로 한다. 그러나 다양한 환경적 요인으로 인하여 폐합차가 발생하므로 Bias 보정을 실시한다. 이때 Bias는 측점이 절대값이 아닌 경우는 절대중력값과의 차이를 포함하게 된다. 또한, 날씨, 온도, 기압 및 스프링 자체의 탄성 변화에 의하여 스프링에 의한 측정량은 시간에 따라 그림 5와 같이 변화하게 되며, 이를 보정하기 위하여 동일점을 이용

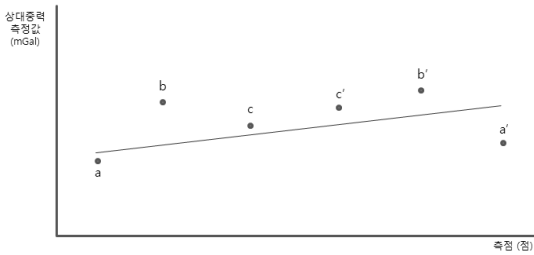


그림 5. Drift 보정

한 최소제곱법에 의한 조정계산을 수행하게 된다.

다수의 관측점에 대하여 Drift와 절대중력값을 미지수로 하는 관측방정식을 수립하고, 기점이 되는 표준연구원, 부산대학교의 절대중력보조점을 고정하여 식 10에 의하여 미지수의 해를 결정하였다. 본 연구에서 사용된 자료는 총 103개의 작업으로 분류되며, 이에 대한 Drift 보정량은 최소 0.6788mGal에서부터 최대 39.275mGal의 분포를 보였으며 평균0.510mGal로 나타났다. 자료의 전반적인 표준오차가 0.3~0.4mGal 정도로 나타났으므로, 3σ(1mGal)를 허용범위로 하여 과대오차를 검출한 결과 총 29점이 검출되었으며, 이들은 이후 처리에서 과대오차로 간주되어 제거되었다.

표 5는 작업 내에서 과대오차 제거 전과 과대오차 제거 후의 추정된 Drift, Bias 그리고 조정계산 후의 잔차의 RMS 오차의 변화를 나타낸다. 각 작업에서 과대오차를 제거한 후 Drift 추정치가 현저히 작아지며, 이에 따라 RMS 오차도 작아짐을 알 수 있다. 이때, 추정된 Bias는 절대중력값과의 차이를 포함하므로 그 크기가 변화하는 것이 조정계산의 성공적 수행 여부를 나타내지는 않는다는 점에 유의해야 한다.

103개 작업에서 총 29점의 과대오차를 제거하였을 때, 작업별 RMS 오차의 평균값은 과대오차 제거전의 1.722mGal에서 0.536mGal로 향상되었다(그림 6, 7).

### 5.3 교차점 조정계산 (Cross-over Adjustment)

표 5. 작업별 과대오차 제거 후 잔차의 RMS 오차 변화

과대오차 점명	과대오차 제거 전			과대오차 제거 후		
	Drift (mGal/day)	Bias	RMS 오차	Drift (mGal/day)	Bias	RMS 오차
BS276	2.526	4508.599	3.588	1.403	4510.437	0.101
Dangjin	0.651	4679.476	24.239	0.013	4682.819	0.046
BS312	0.206	4684.772	7.232	0.03	4685.3	0.051
BS233	2.899	4680.738	73.879	0.01	4688.045	0.026
3420	0.561	4469.515	6.686	-0.071	4470.735	0.684
3092	-0.388	4469.467	2.851	-0.01	4468.619	0.946
3335	-0.048	4467.751	2.005	0.049	4467.532	1.514
900155	0.049	4467.532	1.514	-0.09	4467.844	0.8
3225	0.391	4455.411	1.021	-0.002	4455.472	0.011
3415	-0.023	4455.037	1.176	-0.028	4455.048	0.029
3415	0.133	5535.917	1.703	0.158	5535.883	0.721
4733	0.299	5963.58	1.258	-0.106	5963.642	0.085

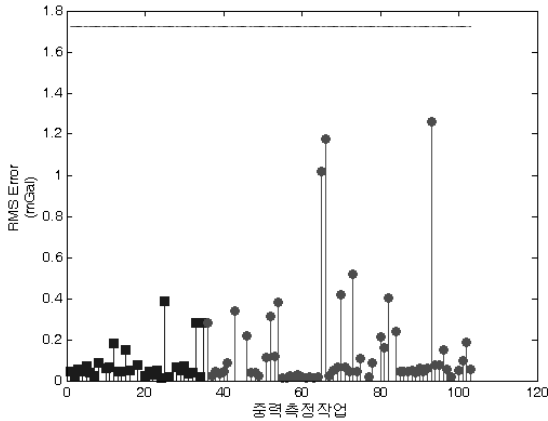


그림 6. 과대오차 제거 전 RMS 오차 분포

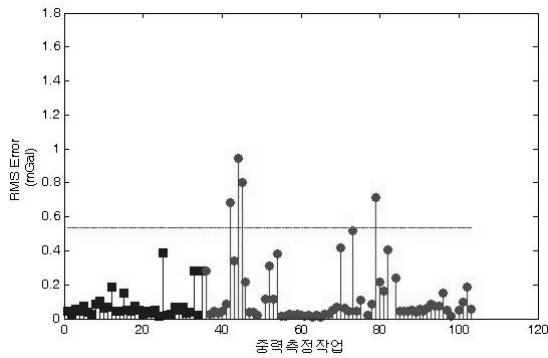


그림 7. 과대오차 제거 후 RMS 오차 분포

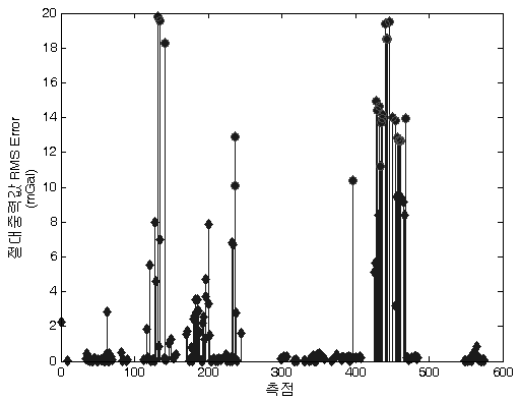


그림 8. 동일점에서의 중력값 차이

앞서 설명한 바와 같이, 작업별로 조정계산을 수행하여도 이들을 모두 통합하는 경우, 동일점에서 상이한 절대 중력값을 갖는다는 문제점이 있다. 본 연구에서의 작업별 조정계산 이후 나타난 동일점에서의 중력값의 차이는 그림 8과 같으며 표준편차는 3.264mGal 이었다.

작업별 조정계산의 경우와 마찬가지로 동일점에 대하여  $3\sigma$  범위를 초과하는 측정점을 이상점으로 간주하여 총 15점을 제거하였으며, 각 측정점의 절대중력값을 미지수로 한 교차점 관측방정식을 통하여 최종 절대중력값을 산출하였다. 최종 계산된 절대중력값은 총 7800점이며 조정 계산이후의 교차점 표준오차는 0.488mGal로 결정되었다.

## 6. 프리에어이상값 계산

전처리 및 조정계산을 수행한 후에도 중력값은 측정 지점의 높이, 그리고 지하물질의 밀도에 따른 효과를 포함하고 있다. 지오이드 구축시 필요한 중력값은 이들의 영향을 제거한 프리에어 이상으로 이에 따른 보정이 필요하다.

프리에어 이상을 결정하기 위한 정규중력값은 식 (11) 과 같이 Somigliana의 식을 이용하여 산출하였으며, 이 때 기준타원체는 GRS80이다(Featherstone & Dentith, 1997).

$$\begin{aligned} \gamma &= \gamma_e \frac{1 + \kappa \sin^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \\ &= 978032.677 \times (1 + 0.00193185135 \times \\ &\quad \sin(\theta)^2) / \sqrt{1.00669438002 \times \sin(\theta)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $\kappa = \frac{b\gamma_{pl}}{a\gamma_{eq}} - 1$ ,  $e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$  이며

$a$  = 타원체의 장축

$b$  = 타원체의 단축

$\gamma_{eq}$  = 적도에서의 이론 중력

$\gamma_{pl}$  = 극에서의 이론 중력

$\phi$  = 측정점의 위도

높이에 따른 보정량은 2차항까지 적용하였고, 최종 프리에어이상값은 식 (12)와 같이 산출된다.

$$\begin{aligned} \Delta g_h &= 0.30877(1 - 0.00142 \times \sin(\theta)^2) \times h - 0.75^{-7} \times h^2 \\ F_a &= g + \Delta g_h - \gamma \end{aligned} \quad (12)$$

본 연구로부터 산출된 프리에어이상값과 기존의 연구에서 사용되어 온 프리에어이상값을 그림 9와 10에 도시하였다.

그림 11에서 알 수 있듯이, 강원도 및 대마도 지역과 전라도 일부 지역에서 뚜렷한 프리에어이상값의 차이가 나타난다. 강원도 및 대마도 지역은 기존의 중력자료가

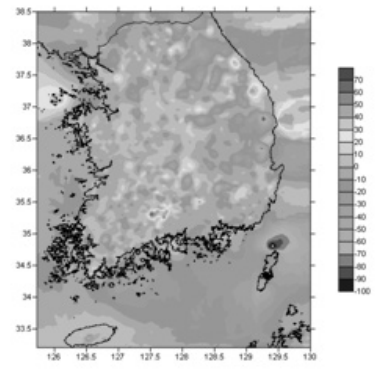
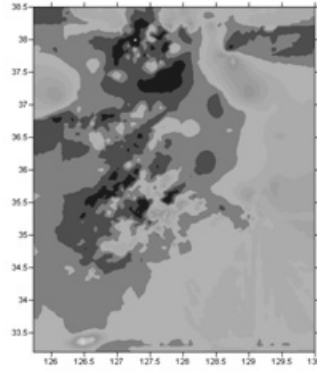
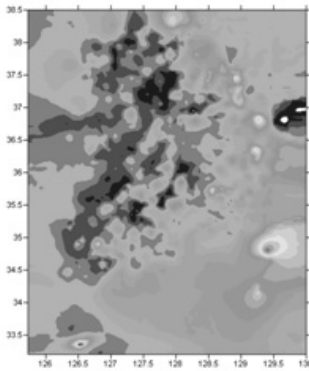


그림 9. 기존 연구에서의 프리에어이상값 그림 10. 본 연구로부터의 프리에어이상값 그림 11. 프리에어이상값의 차이

우리나라 전역에 분포하고 있는 반면 본 연구에서 이용한 중력자료는 경기도, 충청도, 전라도, 경상도 일부 및 제주도도 국한되어있기 때문에 자료의 부재로 인한 차이로 판단되므로 이는 향후 보완 측량 등을 통하여 다시 검증되어야 하는 부분이다. 하지만 충청도와 전라도 지역의 결과는 이전에 사용되어오던 자료와 본 연구에서의 결과가 상이함을 나타내는 것으로 최대 70mGal 까지 나타남을 알 수 있다. 따라서 향후 cm급의 지오이드 구축을 위해서는 본 연구에서 제시한 바와 같이 원시자료로부터 일관되고 철저한 품질검증을 거친 자료를 사용하여야 할 것이다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 우리나라 각 기관별 중력원시자료를 획득하여 자료 형식을 통일하고, 일관된 전처리 및 조정계산을 수행하여 정밀지오이드 구축에 필요한 일관성 있는 프리에어이상값을 구축하였다. 기존의 관련 연구에 있어 원시자료에서부터 시작된 전처리 과정을 수행하지 않았거나 또는 일부 해당 기관에서 측정된 중력값을 처리하고 그 이외의 중력값은 프리에어이상값으로 혼용하여 사용한 반면, 본 연구에서는 원시자료가 보존된 중력자료를 모두 수집 및 통합하고 이들에 대하여 작업별 조정계산과 교차점 조정계산 등을 수행하여 총 7800점, 정밀도 0.488 mGal의 신뢰성 있는 중력값을 산출하였다.

본 연구는 중력원시자료가 존재하는 지역만을 대상으로 수행하였기 때문에 우리나라 전역이 아닌 경기, 충청, 전라도, 경상도 일부 및 제주도에 한정되어 있다는 제약이 있다. 향후 중력원시자료가 확보되지 않은 지역들에

대한 보완측량이 필요할 것이며, 원시자료의 부재로 본 연구에 사용되지 않았던 자료들 중 신뢰성 있는 자료를 추가 확보하기 위하여 기존 자료에 대한 정확도 검증 방안 등의 연구도 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형 국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C02)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 이석배(2000), 중력학적 방법 및 위성측지 방법에 의한 지오이드 모델링에 관한 연구, *한국측량학회지*, Vol. 18, pp. 359-367.
- 해양수산부(2005), 정밀 지오이드 모델 구축에 관한 연구, 해양한국발전프로그램(KSGP) 연구개발사업 연구보고서, 부산대학교 SG연구사업단.
- Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H., (2005), *Physical Geodesy*, 2nd edition, Springer-Verlag Wien.
- Featherstone, W. E., Dentith, M.C., (1997), A geodetic approach to gravity data reduction for geophysics, *Computers and Geosciences*, Vol. 23, pp. 1063-1070.
- Hwang, C., Wang C., Lee Li-Hua, (2002), Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum-free constraints, *Computers Geosciences*, Vol. 28, pp. 1005-1015.
- Longman, I. M., (1959), Formulas for computing the tidal accelerations due to Moon and Sun, *J. Geophys. Res.*, Vol. 64, pp. 2351-2355.
- Yun, H., (1999), Precision geoid determination by spherical FFT in and around the Korean peninsula, *Earth Planets Spaces*, Vol. 51, pp. 13-18.

(접수일 2008. 7. 2, 심사일 2008. 7. 25, 심사완료일 2008. 8. 6)