

항공중력측정에 의한 프리에어 이상 산출

Free-air anomaly from Airborne Gravity Surveying

이지선¹⁾ · 권재현²⁾ · 이보미³⁾ · 홍창기⁴⁾

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

Abstract

The gravity data collected and reserved in Korea is seriously biased in its distribution. That is, only the west-southern part of the peninsula including Chungcheong and Jeonla area has dense distribution while only a part is covered in Gyoungsang area. Especially, the low density of the gravity data in mountainous area basically limits the accuracy of the gravimetric geoid in Korea. As one of the solution to overcome the problem, an airborne gravity survey were conducted from Dec. 2008 ~ Jan. 2009. In this study, free-air gravity anomaly derived from the airborne gravity data which has consistent quality are presented. The data processing for the airborne gravity is composed of several corrections of errors such as errors from gravity measurement, errors from flight dynamics, errors from GPS, and errors from time synchronization. We presented detailed explanations on the data processing with the final cross-over results. The free-air anomaly from airborne gravity finally shows the cross-over accuracy of 2.21mGal which reflects the precision of each track is 1.56mGal. It is expected that the result from this study will play a role as input data in precision geoid determination with ground and ship-borne gravity data after appropriate fusion process.

Keywords : Airborne gravity, Free-air anomaly, Upward continuation, Geoid

초 록

우리나라에서 현재까지 관측된 지상중력자료는 충청이남을 포함한 전라도 지역과 경상도 일부 지역 등에 편중되어 있으며 특히, 산악지역의 분포가 현저히 낮아 지오이드의 정밀도를 높이는데 한계가 있다. 이러한 문제점을 직접적으로 극복할 수 있는 방법으로 2008년 12월부터 2009년 1월까지 약 2달간 항공중력측정을 수행하였다. 본 연구에서는 우리나라 전역에 대해 일관된 정밀도를 지닌 항공중력측정 자료를 처리하여 결과로 중력이상값을 산출하였다. 본 연구에서 수행한 항공중력자료의 처리는 상대중력측정과 관련된 오차, 비행에서의 동적운동에 의해 발생하는 오차, GPS와 관련된 오차 및 자료 기록에 있어서 발생하는 시간 차이 등을 보정하는 과정으로 이루어지며, 산출된 프리에어이상의 최종 교차오차는 2.21mGal 그리고 노선별 정확도는 1.56mGal이다. 항공중력측정 기반의 중력이상은 향후 지상중력이상 및 선상중력이상과 합성되어 정밀 지오이드 모델 개발의 기본자료로 이용된다.

핵심어 : 항공중력, 프리에어 이상, 상향연속, 지오이드

1. 서 론

정밀한 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 우리나라 전반에 걸쳐 균일한 분포 및 정확도의 중력자료와 지형 자료, 지구중력장 자료 등이 필요하다. 특히, 국토의 70%가 산악지역으로 구성된 우리나라의 경우는 보다 높

은 정확도의 지오이드 모델을 구축하기 위하여 상대적으로 더 많은 산악지역의 중력자료를 필요로 한다. 우리나라의 지상중력 자료의 경우 지능형 국토사업의 정밀 지오이드 모델 개발 연구에서 원시중력자료로부터 일관된 재처리를 수행하여 우리나라 전반에 걸쳐 교차오차 0.5mGal의 자료를 확보하였으나, 대부분의 자료가 평지

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)

지역과 도로에서 측정이 되었기 때문에 그 분포가 충청도 남부 및 전라도 지역과 제주도, 경상도 일부 지역으로 한정되어 있다는 한계가 존재하였다(이지선 등, 2008). 사실, 이러한 지역적 편향성은 그동안 우리나라에서 수행되어왔던 중력이상, 또는 지오이드 결정에 대한 연구의 정확도가 약 15 cm 수준에 이르는 이유이기도 하다 (김광배 등, 1995; 이석배 등, 2000; 해양수산부, 2005). 또한, 해상중력자료의 경우 해양조사원에 의하여 지속적으로 측정되어 왔으나 지상중력자료와의 연계가 되지 않아 지오이드 모델 구축에 최적으로 활용되지 못하는 제약이 있었다. 이러한 문제점을 보완 및 해결하기 위하여 정밀 지오이드 개발 연구진은 현재 2006년까지 확보한 해상중력자료에 대해 일관된 재처리를 수행하고 있으며, 경상도와 강원도 일부 산악지역에서의 지상중력자료를 추가적으로 확보하고 있다.

그러나 본질적으로 우리나라의 중력자료가 편향적으로 분포되고 있으며, 해상중력자료의 일관된 재처리만으로는 지상중력자료와의 병합에 있어서 난점이 존재하므로 이를 해결하기 위한 직접적 방안으로 항공중력측정을 수행하게 되었다.

본 연구에서는 2008년 12월부터 2009년 1월까지 우리나라에서 최초로 수행된 항공중력측정 자료에 대하여 일관된 처리를 수행하고, 항공중력 기반의 Free-air 이상값을 산출하였다. 또한, 획득한 항공중력자료의 교차오차 분석을 수행하여 자료 전반에 대한 조정을 수행하였으며, 상향연속(Upward Continuation)을 통하여 기 확보된 지상중력자료와 그 차이를 비교, 분석함으로써 항공중력측정 자료의 품질을 검증하였다.

2. 항공중력측정의 개요

항공중력측정은 항공기에 중력계 및 GPS 등의 측정자료를 탑재하고 중력을 측정하는 기술로 측정 단위로 중력자료를 측정하는 지상중력측정과 달리 빠른 시간에 경제적, 효율적으로 중력을 측정할 수 있기 때문에 많은 나라에서 도입하여 연구하고 있는 측정 방법이다. 대표적인 항공중력측정의 연구들을 살펴보면 우선, 덴마크 측지국은 1998년에 북극에서 수행한 중력측정의 결과로 69개의 교차점의 교차오차 2.6mGal의 항공중력자료를 확보한 바 있으며(Olsen, 2000), 이후 2003년까지 지속적으로 진행된 북극중력탐사를 통하여 총 795개의 교차점에 대한 정확도 2.3mGal의 항공중력자료를 구축하였다(Olsen, 2007a). 또한, 2002년부터 2003년까지 말레이시아의 중력측정에서는 2.6mGal 정확도의 중력자료를 획득하였다(Olsen, 2007b).

이번에 수행된 항공중력측정은 2008년 12월부터 2009년 1월까지 약 2달에 걸쳐 수행되었으며, 덴마크우주센터의 연구진과 함께 Cessna 208기에 S-99 중력계와 3대의 GPS 수신기를 장착하여 중력값을 측정하였다(그림 1).

중력의 측정은 고도 3,000m 상공에서 남북 방향 35개 노선, 교차오차 조정을 위하여 동서방향 11개 노선, 그리고 지상중력자료의 분포가 현저히 낮은 강원도 지역의 비행제한 구역인 P518 일부 지역에서 추가된 5개 노선을 포함하여 총 51개 노선에 대해 진행되었다. 남북 방향의 노선 간 간격은 10km 그리고 동서방향의 노선 간 간격은 50km 로 구성되었으며, 비행제한 구역인 서울, 경기 북부 및 휴전선 전술지역은 제외되었다. 항공중력측정의 노선은 다음 그림 2와 같다.



그림 1. 항공중력측정 항공기 및 장비

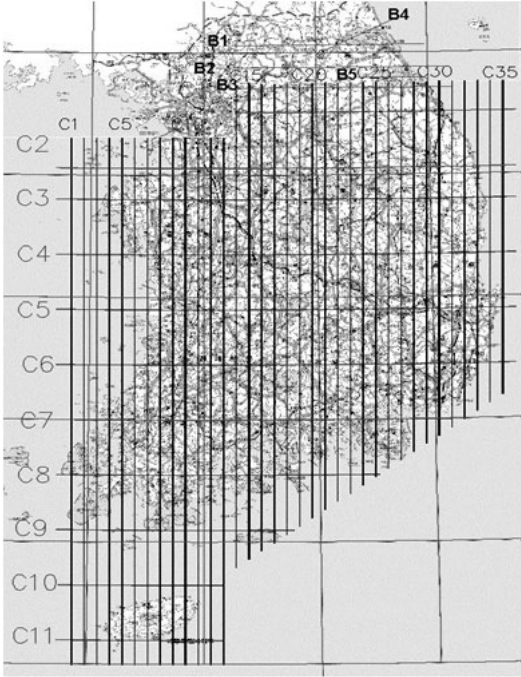


그림 2. 항공중력측정 노선도

항공중력측정의 경우 바람, 비, 눈 등의 환경적 영향으로 인하여 비행기 진행방향 또는 크로스방향으로 속도가 급하게 변하여 중력계가 연직방향에 유지되지 못하거나 에트보스 효과(Eötvös effect)가 급격하게 증감하여 중력값이 실제값에 비하여 작게 측정되는 경우가 발생하게 된다. 따라서, 항공중력측정 기간에는 각 노선에 대하여 일별처리를 수행하여 프리에어 이상값을 도출하고 품질을 검증하게 된다. 이때, 많은 오차를 내포한 경우는 재비행을 수행하게 되는데, 본 연구에는 5개의 노선에 대해 재측정을 수행하였다.

3. 항공중력 이론 및 전처리

3.1 항공중력 관측방정식

지상중력측정과 마찬가지로 항공중력측정 역시 상대적인 중력값의 차이를 측정하게 된다. 항공중력계에서 측정되는 상대중력측정값은 식 (1)과 같이 스프링의 탄성과 빔의 속도에 관한 식으로 표현된다.

$$y = sT + k\dot{B} + C \quad (1)$$

여기서, y : 상대중력 독취값

T : spring tension

s : scale factor

\dot{B} : beam velocity

k : k-factor

C : Cross-coupling

따라서, 중력계 읽음값으로부터 프리에어이상값(Free-air anomaly)을 계산하기 위해서는 중력계 독취값 내에 포함되어 있는 k-factor와 Cross-coupling에 대한 보정이 필요하다.

3.2 항공중력자료의 처리

항공기 내에 중력계를 탑재하고 중력 측정을 수행하는 항공중력의 경우 기계값 독취에 포함되는 k-factor와 Cross-coupling 오차 뿐 아니라 대기의 변화나 지형의 영향에 의하여 발생하는 항공기의 움직임에 의한 오차, GPS와 관련된 오차 등이 추가로 포함되며, 또한 GPS와 중력계에서 자료를 기록하는 시간차이로 인한 오차가 발생하므로 각 비행 노선에 대하여 아래와 같은 자료처리가 필요하다.

3.2.1 시간 동기화

중력계와 GPS 모두 1Hz를 기준으로 자료를 저장하지만, 컴퓨터의 시간을 기본 시간으로 사용하는 중력계의 시간보다 GPS 시간의 정확도가 더 높다. 특히, 이동하면서 측정하는 항공중력측정의 경우에는 속도에 의한 영향이 발생하므로 보다 정확한 시간을 필요로 한다. 따라서 GPS 시간을 기준으로 중력계의 시간을 일치시켜주는 시간 동기화가 필요하며, 이를 위하여 GPS와 중력계 사이의 교차 상관관계 함수를 계산하고 GPS와 중력계의 신호 기록의 시간이 일치하도록 GPS 시작시간을 0으로 하여 그림 3과 같이 두 시간이 일치되도록 중력계의 시간을 보정한다.

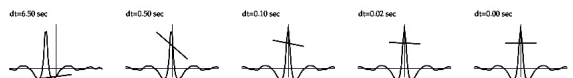


그림 3. 시간 동기화

3.2.2 K-factor 보정

중력계는 스프링에 작용하는 힘이 스프링 전체 길이에 비례 하는 zero-length spring을 이용하는데, 이는 외부의 힘을 모두 제거하였을 때 스프링 길이가 0이 된다는 특징을 갖는다. 그러나 스프링 자체의 무게와 굽기에 의하여 복원 시 스프링 길이가 실제로 0이 되지 못하므로

힘의 균형 상태에서 복원되는 값이 0이 되도록 하는 스프링 상수 k에 대한 보정이 필요하다. 특히 k-factor는 중력계에서 drift가 발생하도록 하는 요소 중 하나로 이를 보완하기 위하여 그 값은 반복적으로 조정되어야 하며 보정량의 일반 수식은 식 (2)과 같다. (민정덕 등, 1986)

$$f_z = k \times \dot{B} + S \quad (2)$$

- 여기서,
- f_z : unbalanced force
- k : k-factor
- \dot{B} : Beam velocity
- S : Spring tension

본 연구에서는 식 (2)을 기반으로 다양한 실험에 의하여 기 구축되어 있는 경험적인 K-factor 모델 상의 값을 이용, 30.2의 상수의 값으로 보정하였으며 좀 더 정밀한 K-factor 영향의 분석은 향후에 진행할 예정이다.

3.2.3 에트뵈스 보정(Eötvös effect Correction)

항공중력은 속도가 빠른 항공기 내에 기기를 탑재하고 측정을 수행하므로 매 시각 변화하는 속도의 영향을 받는다. 이 때, 속도의 동서방향에 대한 성분은 자전축에 대하여 지구 자전 각속도의 상대적인 증감효과를 발생시키며, 이에 따라 지구 자체의 원심가속도가 변하게 된다. 일반적으로 항공기의 경우 고도를 유지하여 비행하므로 원심 가속도가 지구 중심으로부터 바깥 방향으로 발생하게 되고, 이에 따라 중력 값을 감소시키는 효과가 발생하므로 식 (3)를 이용하여 중력값에 대한 보정을 수행하여야 한다. (Harlan, 1968)

$$\Delta g_{\text{eötvös}} = 2\omega V \cos\phi \sin\alpha + \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

- 여기서,
- ω : 지구 자전 각속도
- V : 속도
- ϕ : 위도
- α : 진행방향으로의 방위각
- R : 지구의 반경

본 연구에서는 수행한 비행노선의 방향에 따른 에트뵈스 효과를 알아보기 위하여 남북방향과 동서방향에서의 에트뵈스 효과로 나누어 계산한 결과, 각각의 효과가 평균적으로 105.44mGal, 342.79mGal로 남북방향의 노선에 비하여 동서방향의 노선에서 에트뵈스 효과의 영향

이 큰 것으로 나타났다. 이는 에트뵈스 효과가 진행방향으로의 방위각에 sin함수로 표현되기 때문이며, 우리나라의 경우는 편서풍에 의한 영향으로 동서방향의 비행에 있어서 크게 발생하는 속도의 변화가 크다는 점도 하나의 원인이라 판단된다.

3.2.4 Cross-coupling 보정

수평가속도의 추가적인 토크에 의해 중력계가 lever arm 편위를 발생시키며 이에 따라 수직 가속도가 변하기 때문에 발생하는 Cross-coupling은 수평가속도에 대하여 중력계의 민감도를 언급할 때 이용된다. 이 값은 수평가속도의 크기와 위상에 의존하는 값으로 중력계 제조사에서 계산한 교차상관(cross correlation) 기술을 이용하여 각 계수에 대하여 식 (4)과 같이 속도와 가속도의 선형조합의 형태로 표현된다. (Valiant, 1991)

$$CC = VE \times C_{VE} + VCC \times C_{VCC} + AX \times C_{AX} + AL \times C_{AL} + AX^2 \times C_{AX^2} \quad (4)$$

- 여기서,
 - $C_{VE}, C_{VCC}, C_{AX}, C_{AL}, C_{AX^2}$: 중력계 제조사에서 제공하는 계수값
 - VE : 속도
 - VCC : 진행방향으로의 가속도
 - AX : 비행기 좌우 방향으로의 가속도
 - AL : 진행방향으로의 가속도와 속도의 곱
 - AX^2 : 비행기 좌우 방향으로의 가속도제곱과 속도의 곱
- Cross-coupling 효과는 모든 노선에 대하여 평균 0.200mGal, 표준편차 0.56mGal로 나타났으며 최대 2.42mGal까지 영향을 미친다.

3.2.5 기울기 효과(Tilt effect) 및 편위(Bias) 보정

수평 또는 수직으로의 가속도 변화에 의하여 플랫폼이 기울어지기 때문에 발생하는 효과로, 지형, 난기류 등으로 인하여 실시간으로 발생한다. 이를 보정하기 위하여 GPS 관측치와 중력관측치를 결합하여 경사각(그림 4)을 추정하고, 세 축에 대한 가속도의 선형결합의 형태로 기울기 보정량을 산출한다(식 (5)). 이 때, 보정량은 편위가 발생하지 않고 전파된다고 가정한다. (Olsen, 2002)

$$\Delta g_{\text{tilt}} = (1 - \cos\phi_x \times \cos\phi_y) \times f_z + \sin\phi_x \times f_x + \sin\phi_y \times \cos\phi_x \times f_y \quad (5)$$

여기서, f_x, f_y, f_z : 세 축에 대한 가속도
 ϕ_x : 경사각

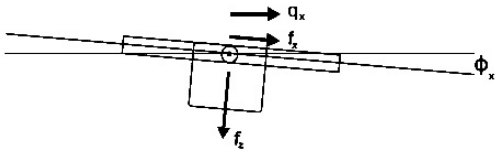


그림 4. 플랫폼의 경사각

본 연구에서의 결과로 플랫폼의 기울어짐에 의한 효과는 최대 4.84mGal까지 나타났으며, 전체 노선의 평균 보정량은 0.89mGal로 산출되었다.

3.2.6 GPS 관련 오차 보정

GPS로부터 정확한 가속도를 추정하는 것은 항공중력에 있어서 필수요소이다. 필터링 이후 mGal 수준의 가속도 정확도를 얻기 위해서는 cm 수준의 상대적인 위치 정확도가 필요하다. 실제로 GPS와 관련하여 가속도가 크게 변하는 원인은 사이클슬립(cycle slip)으로 이는 전리층에서 신호의 세기가 변하거나 관측지에 새로운 위성이 포함될 경우 신호를 잃어버리게 됨으로서 모호정수가 결정되지 않거나 또는 잘못 결정되는 경우에 해당된다 (Olsen, 2002). 일반적으로 GPS와 중력계에서 추정된 가속도의 값 차이는 0.4~0.5mGal의 RMS 값을 보이지만 만약 GPS가 이러한 오차를 내포한다면 그 값의 차이는 몇 만 mGal까지 발생할 수 있다. 이러한 사이클슬립에 기인한 오차는 위성정밀력을 이용하여 GPS 위치를 산출할 경우 제거되지만, 정밀력을 이용한 후에도 그 효과가 남아있다면 편위의 형태로 나타나는 값을 획득한 신호에 대하여 그 값을 빼거나 더해줌으로서 보정하여야 한다.

3.2.7 Lever arm effect

항공기에 탑재된 중력계와 항공기 외부에 위치하는 GPS 안테나의 수평적인 위치가 다를 때, 항공기의 자세가 변화하게 되면 GPS 안테나에 의해 계산된 수직가속도와 중력계에 의해 계산된 수직가속도가 다르게 계산됨으로 인하여 발생하는 효과이다. 이러한 효과는 항공기의 자세 정보가 충분하다면 모델링을 통하여 보정할 수 있으며, 항공중력계를 사용하여 중력의 수직성분만을 측정할 경우에는 그 크기가 매우 작다면 무시하여도 무방하며, 본 연구에서도 별도의 보정을 수행하지 않았다.

3.2.8 필터링(Filtering)

필터링을 수행하는 주요한 목적은 항공중력측정 자료 내에 포함되어 있는 잡음을 제거하기 위함이다. 일반적으로 항공기의 수직 가속도는 50,000mGal까지 RMS값을 나타낼 수 있는데, 다양한 비행 조건에 의하여 획득한 자료 내에 많은 잡음이 포함되게 된다. 따라서 이러한 효과를 줄이고 보다 완만한 품질의 자료를 확보하기 위하여 저역통과필터링(Lowpass filtering)을 수행하여야 하며, 본 연구에서는 (초속×해상도)²의 계산에 의해 150"를 필터 길이로 하여 필터링을 적용하였다.

4. 항공중력자료 처리 결과

4.1 보완 지역의 품질 검증

측정된 자료에 대해 비행환경에 따른 Cross-coupling 효과, 에트비스효과, 기울기 효과에 대한 보정과 중력계 특성에 의하여 발생하는 Drift에 대한 보정을 노선별로 수행하였다. 기상, 난기류 등의 영향이 없이 안정적으로 비행할 경우에는 GPS로부터 계산된 수직가속도와 중력계로부터 계산된 가속도가 유사하게 나타나지만, 급작스러운 속도의 변화나 기체의 흔들림이 발생한 경우에는 그 차이가 커지거나 플랫폼이 심하게 기울어져 오차가 증가하게 된다. 이러한 부분에 대한 정성적인 분석을 바탕으로 노선의 일부 또는 전체에 대하여 총 5개의 재비행 노선이 선정되었다. 기존의 비행 노선을 구노선, 재비행을 수행한 노선을 신노선이라고 하였을 때, 재비행 노선에 대하여 EGM2008 지구중력장 모델과 비교를 통하여 성과의 정확도를 검증한 결과 신노선에서의 EGM2008 지구중력장 모델과의 차이값이 구노선에 비하여 감소한 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 플랫폼의 기울어짐에 대한 보정량 역시 신노선에서 작은 값으로 나타났다 (표 1).

4.2 상시관측소 고정 후 성과 분석

일별 전처리의 경우, 김포공항 내의 한 지점을 정하여 GPS 정지 측량을 수행한 결과를 GPS 기준으로 이용하였으며, 절대중력값 역시 EGM08 지구 중력장 모델을 기반으로 한 값을 기준으로 수행하였기 때문에 보다 정밀한 자료를 확보하기 위해서는 GPS 자료 및 절대중력값에 대한 후처리를 필요로 한다. 이를 위하여 국토지리정보원으로부터 각 항공중력 측정 노선에 대하여 반경 100km 이내에 위치하는 GPS 상시관측소의 1" 간격의

표 1. 재비행 노선의 정확도 검증

(단위 : mGal)

	EGM2008				Tilt effect			
	구노선		신노선		구노선		신노선	
	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
C08(NS)	-1.00	3.96	-0.02	4.01	-7.32	13.01	-0.57	2.43
C09(NS)	-3.30	5.13	1.29	3.93	1.24	4.41	0.13	3.20
C15(NS)	-4.06	5.88	-2.12	2.95	-13.62	23.96	0.15	0.78
C34(NS)	1.64	6.64	-1.28	2.86	-6.14	14.27	-1.49	3.38
*C02(EW)	-3.10	7.49	-0.47	4.39	-3.97	12.00	-0.21	3.46

GPS 관측자료를 협조받아 최소 3개에서 최대 6개까지의 상시관측소의 위치를 고정하고 비행기의 위치를 추정하였다. 즉, 상시관측소별로 비행기의 위치를 추정하게 되면 추정되는 위치의 정밀도를 확인할 수 있는데, 그 정밀도가 15cm 이하의 값을 보이는 상시관측소를 고정점으로 선택한다. 일단 고정점들이 선택되면 각 고정점으로부터 추정되는 위치에 대한 가중 평균을 통하여 최적의 위치를 추정하게 된다.

4.2.1 GPS 위치 성과

비행 날짜를 기준으로 하여 초기의 김포공항만을 고정하고 산출한 해와 GPS상시관측소와 김포공항을 함께 고정하고 산출한 해의 두 GPS 성과의 차이를 분석한 결과, 수평위치에서는 최대값, 평균, 표준편차 모두 10-6이하의 값으로 차이가 존재하지 않았고, 수직위치는 평균 0.6mm, 표준편차 7.6cm로 계산되었다. Julian day 별로 두 성과 차이의 평균과 표준편차는 다음 그림 5와 같다.

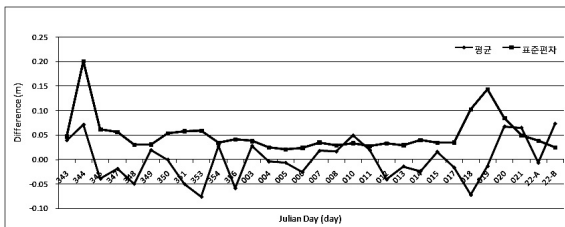


그림 5. GPS 수직위치 차이 (김포공항 vs 김포공항 + 상시관측소)

4.2.2 Free-air 이상 계산의 차이 통계값, 그래프

총 51개 노선에 대하여 새로운 GPS 성과를 이용하여 Free-air 이상값을 산출한 결과, 김포공항의 GPS 성과만

을 이용하여 산출한 성과와의 차이는 평균 산출된 Free-air 이상값은 모든 노선에 대하여 평균 -0.002mGal, 표준편차 0.36mGal로 나타났으며, 최대차이값은 3.20mGal로 계산되었다. 그림 6은 각 노선별 프리에어이상(Free-air anomaly) 차이의 평균과 표준편차를 나타낸 것이다.

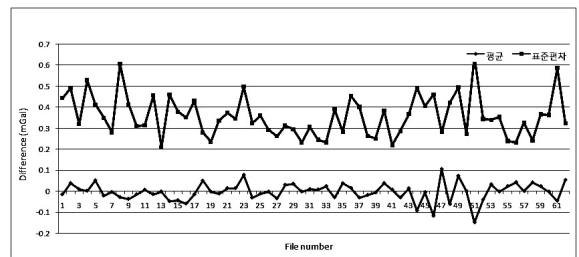


그림 6. 프리에어이상값 차이 (김포공항 vs 김포공항 + 상시관측소)

5. 프리에어이상값 계산

5.1 프리에어이상값

전처리 및 GPS 성과와 절대중력값에 대한 후처리 후 총 63개 노선에 대하여 식 (6)에 따라 프리에어이상값을 결정하였다 (그림 7).

$$F_a = g + \Delta g_h - \gamma \tag{6}$$

여기서, γ : 정규중력값 (GRS80)

g_h : 높이에 따른 보정량

정규중력값은 GRS80 타원체를 기준으로 Somigliana 식에 의하여 산출하였으며(Featherstone 등, 1997), 높이에 따른 보정량은 비행고도로부터 EGM2008 지구중력장 모델의 지오이드고를 빼서 표고를 계산한 후 적용하

었다. 최종 계산된 항공중력 프리에어 이상값은 -19mGal 부터 107mGal까지 분포하고 있으며, 고도가 높은 산악 지역에서는 지형의 영향으로 인하여 프리에어 이상값이 평지지역에 비하여 크게 나타나는 동시에 값의 변화량 역시 약 50mGal로 큰 변화를 보인다.

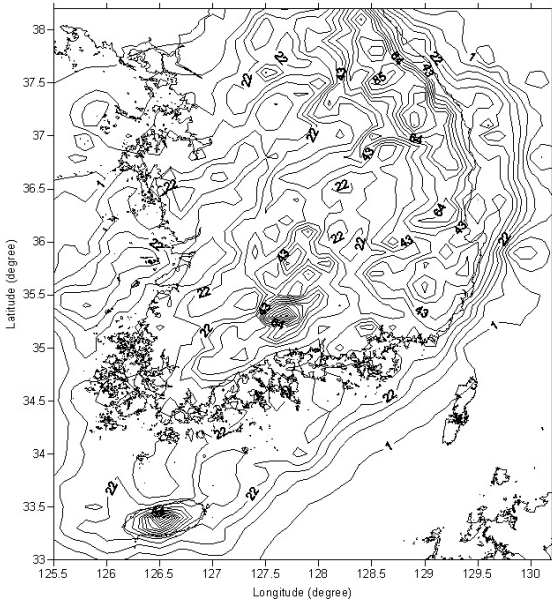


그림 7. 항공중력 프리에어 이상도 (mGal)

5.2 교차오차 분석

그림 2에서 나타난 항공중력의 측정노선은 51개 남북 및 동서방향으로 이루어져 기하학적으로 매우 강한 측정노선의 배치를 보인다. 이러한 측선의 배치는 많은 교차점을 통하여 그 오차를 분석하고 이를 조정하여 보다 나은 결과를 도출할 수 있기 때문이며, 본 연구의 경우 교차점은 총 330점으로 교차오차의 평균은 -0.04mGal, 표준편차 2.21mGal이며, 최대 교차오차값은 6.44mGal로

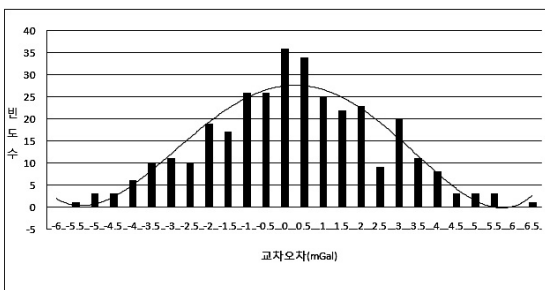


그림 8. 교차오차 분포도

산출되었다. 교차오차의 분포는 다음 그림 8에서와 같이 정규분포와 유사하게 나타난다. 교차오차의 표준편차를 이용, 교차점에서의 정밀도가 2.21mGal이라고 할 때, 각 노선별로의 정밀도는 1.56mGal이다.

교차점들을 이용한 교차조정계산은 비행 시작 전에 김포공항 기점에서의 중력값을 독취 후 비행하여 각 노선에 대하여 drift 보정을 일별로 처리하였으므로, 모든 노선에는 편위의 영향만 존재한다고 가정하고 수행되었다. 교차조정계산에는 최소 한 노선이 고정되어야 하는데, 노선별 분석결과 교차오차의 값이 작으며, 에트비스 효과, 기울기의 영향이 가장 작은 노선인 *C06EW, C03NS, C34SN-2의 총 세 노선에 대한 편위값을 0으로 고정하고 최소 2점 이상 교차점이 존재하는 노선에 대하여 조정계산을 수행하였다.

교차조정계산 수행 결과, 표준편차의 값은 1.61mGal로 0.6mGal 감소하였으나 중력자료의 시뮬레이션 실험의 결과에서 나타내는 바와 같이 0.5mGal의 중력값에서의 오차는 지오이드 모델에 있어서 그 영향이 약 4mm로 미미하다 (이보미 등, 2008). 따라서 별도의 교차조정계산을 수행하지 않아도 적절한 GPS 상시관측소와 정밀력을 이용한 일관된 처리가 이루어졌다면 그 결과값을 지오이드 계산에 사용하여도 무방하다고 판단된다.

5.3 지상중력자료의 상향연속

일반적으로 중력자료는 저주파, 중주파, 고주파 신호의 합인 형태로 표현될 수 있다. 전반적인 경향을 나타내는 저주파 신호는 위성의 움직임에 통하여 지구 전체에 대한 중력신호의 경향을 나타내는 지구중력장모델과 유사하며, 고주파 신호는 지형의 각각의 영향을 반영한 것으로 지상에서 측정된 중력자료와 유사하다고 할 수 있다. 상대적으로 고도 3,000m에서 측정된 항공중력의 경우는 지상중력측정에 비교하였을 경우보다는 지형의 영향이 적게 반영되며, 지구중력장모델과 비교하였을 때는 지형의 영향이 더 큰 신호의 형태로 중주파 대역의 신호라고 할 수 있다. 따라서 신호를 주파수 대역에서 고려해 보았을 때, 항공중력측정을 통하여 획득한 중력자료의 정확도를 검증하기 위해서는 저주파 대역의 EGM08과 같은 지구중력장 모델과 비교하거나, 고주파 대역의 지상중력자료와 비교해 볼 수 있다.

그러나 지구중력장 모델을 이용하여 비교하는 경우, 전반적인 경향성만을 나타내므로 지형의 영향에 의하여 변하는 비행 조건을 반영하는 항공중력측정 자료에서의

전반적인 비교는 가능하지만 어느 지역에서 오차를 내포하고 있는지 등의 좀 더 정확한 수치 분석에는 한계가 있다. 따라서 지상중력자료를 기준으로 항공중력자료의 정확도를 검증하는 것이 가장 의미있는 방법이라고 판단하여 일관된 전처리를 통하여 확보한 지상중력자료에 대해 항공중력 비행 고도와 같은 고도 3,000m 상의 중력값으로 상향연속을 수행하였다. 이 때, 지상중력자료와 항공중력자료의 조건을 동일하게 하기 위하여 지구 전반에 대한 저주파 신호와 지형의 영향을 각각 제거하고 남은 결과인 잔여중력에서 그 차이를 분석하였다.

지상중력자료에 대한 상향연속은 식 (7)과 같이 FFT(Fast Fourier Transform)에 의한 Convolution 식으로 계산된다. (Tscherning 등, 1992)

$$F(\Delta g^h) = e^{-2\pi h k} F(\Delta g), \quad k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} \quad (7)$$

여기서, k_x, k_y : 공간 주파수 (Spatial frequency)
 h : 상향연속의 높이

잔여중력값에서 상향연속된 지상중력자료와 항공중력자료를 비교한 결과 그 차이는 그림 9(a)와 같으며, 평균 0.82mGal, 표준편차 5.51mGal로 산출되었다. 지상과 항공중력자료의 차이는 그림 9(a)에서와 같이 강화도지역, 태백산맥, 지리산 등 산악지대 및 동해안 연안을 따라서 큰 값들이 나타나는데 그림 9(b)에서의 항공중력자료와

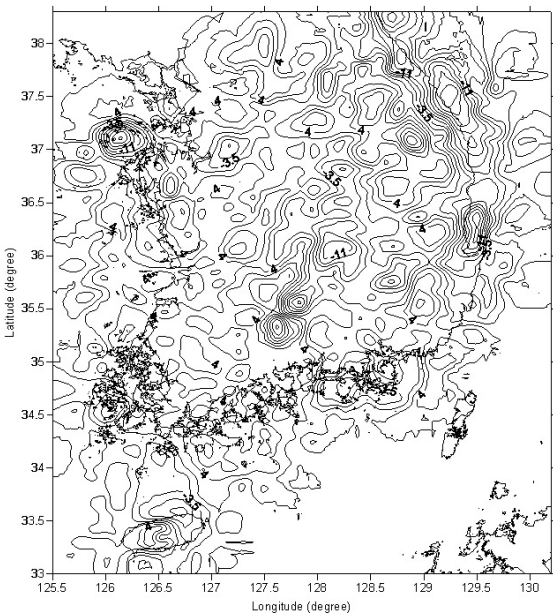


그림 9(a). 지상중력자료와 항공중력자료의 프리에어이상 차이

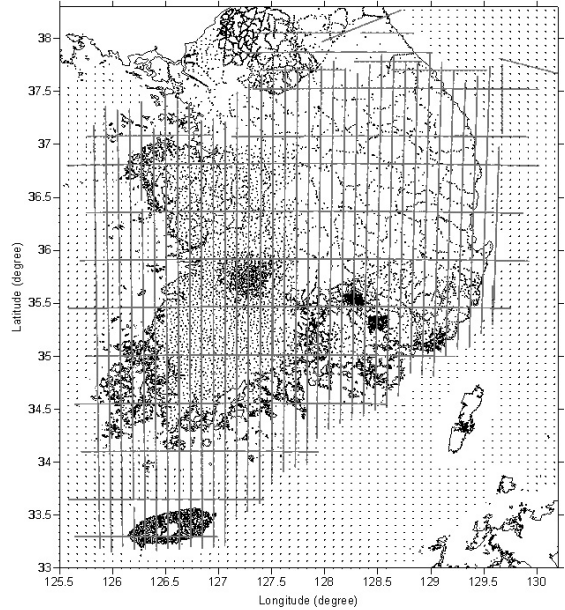


그림 9(b). 지상중력자료 및 항공중력자료 분포도

지상중력자료의 분포를 살펴보면 문제가 되는 지역 모두 항공중력자료는 있지만 주변에 지상중력자료가 존재하지 않거나 그 분포가 현저히 낮은 지역들이다. 따라서 지상중력자료의 편중된 분포로 인하여 오차가 크게 나타나는 지역에 대해서는 상대적으로 일관된 정밀도를 보이는 항공중력자료를 신뢰하고 이용할 수 있다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구의 가장 큰 의의는 최초로 수행된 항공중력측정을 통하여 우리나라 전반에 대하여 일관성 있는 중력자료를 확보하였다는 점이며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 현재까지 일관된 전처리 및 GPS 자료와 절대중력값에 대한 후처리를 통하여 교차오차 2.21mGal, 노선별 정확도 1.56mGal의 중력자료가 확보되었다. 교차조정계산 수행 결과, 표준편차의 값은 1.61mGal로 0.6mGal 감소하였으나 정밀 지오이드 구축을 위한 중력자료의 영향을 분석한 시뮬레이션에서 중력자료에 존재하는 0.5mGal의 오차는 지오이드모델 계산에 있어서 그 영향이 약 4mm에 불과하다는 결과를 근거로 하여 본 연구에서는 교차조정계산 이전의 프리에어값을 성과로 하였

다. 그러나 실제 중력자료에서는 중력계 뿐 아니라 GPS 등 다양한 원인에 의하여 오차가 발생하므로 실제 0.6mGal의 중력자료에서의 오차 차이가 지오이드 모델 구축에 있어서 어느 정도의 영향을 미치는 지는 향후 추가 연구를 진행할 계획이다.

둘째, 이번에 수행된 항공중력측정의 경우 우리나라의 공역의 특성 상 서울과 경기 북부 및 휴전선 전술지역은 공역의 특성에 의한 비행 불가지역으로 항공중력자료가 분포하지 않으므로, 두 지역에 대해서는 향후 지상중력자료 측정을 통한 추가적인 자료의 확보가 필요할 것이다.

셋째, 본 연구의 성과인 항공중력자료를 향후 지상중력자료 및 해상중력자료를 함께 융합하게 되면 우리나라 전 지역에 대하여 지상부터 해상까지 연결된 단일의 중력망을 구축할 수 있으며, 지오이드 모델 연구에 있어서 통합적인 기초 자료로 활용할 수 있을 것이다. 또한, 항공중력자료 뿐 아니라 지상중력자료, 해상중력자료를 융합하여 이용한다면 보다 정밀하게 우리나라의 지형의 물리적 성향을 반영하는 지오이드 모델을 산출할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

참고문헌

김광배, 최재화, 윤홍식, 이석배 (1995), 위성 고도자료를 이용한 한반도 해상지역에서의 중력이상의 결정, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 13권, 제 2호, pp. 177-185.

민경덕, 서정희, 권병두 (1986), 응용지구물리학, 우성문화사, pp. 51-82.

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

이보미, 이지선, 권재현, 이용욱 (2008), 우리나라 정밀

지오이드 구축을 위한 지형자료 및 중력자료 영향 분석, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 26권, 제 5호, pp.519-527.

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

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

Olsen, V. A., Forsberg, R. (2007), Airborne Scalar Gravimetry for Regional Gravity Field Mapping and Geoid Determination, *Gravity Field of the Earth - 1st meeting of the International Gravity Field service*.

Olsen, V. A., Forsberg, R., Keller, K., Gidskehaug, A. (2000), Airborne Gravity Survey of Lincoln Sea and Wandel Sea, North Greenland, *Physicas and Chemistry of the Earth*, Vol. 25, No. 1, pp. 25-29.

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

Olsen, V. A., Forsberg, R. (2007), Regional Airborne Scalar Gravimetry for Geoid Determination, *XXIV IUGG General Assembly*.

Featherstone, W. E., Denitith, M. C. (1997), A geodetic approach to gravity data reduction for geophysics, *Computers and Geosciences*, Vol. 23, pp. 1063-1070.

Harlan, R. B. (1968), Eötvös Corrections for Airborne Gravimetry, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 73, No. 14, pp. 4675-4679.

Tscherning, C. C., Forsberg, R. (1992), Harmonic continuation and gridding effects on geoid height prediction, *Journal of Geodesy*, Vol. 66, No. 1, pp. 41-53.

Valiant, H. (1991), *The LaCoste & Romberg air/sea gravimeter*, CRC Handbook of Geophysical Exploration at Sea, Boca Raton Press.

(접수일 2009. 3. 5, 심사일 2009. 3. 29, 심사완료일 2009. 3. 30)