

# 정밀 중력측정을 위한 조석 및 계기 보정 모델 분석

## The analysis of the tide and drift correction models for precise gravity surveying

이지선<sup>1)</sup> · 권재현<sup>2)</sup>

Lee, Jisun · Kwon, Jay Hyoun

### Abstract

Recently more gravity data is being obtained due to the increased demands from the fields of geodesy, geophysics, and military. In general, the observed gravity values are corrected for the effect of tide, instrument drift, and instrument height to generate the absolute gravity values at a point. Until yet, the models for tide and drift corrections and those procedures are not determined in Korea which led to the inconsistent data processing for different data sets. Therefore, in this study, the models for tide and drift are analyzed to select the appropriate models. Based on the analysis, it was found that there is not much difference between Longman and Tamura tide models for celestial objects. Earth tide, however, should be considered in tide correction procedure. In drift corrections, the difference between the model considering only the common points and that considering all points appears significantly large up to 0.04mGal. In this case, the model with all points should be used as it the correct one according to the adjustment theory and it generates estimates with better precision.

Keywords : Tide Correction, Earth Tide, Drift Correction

### 초 록

측지, 지구물리, 국방 등의 다양한 연구분야에서 기초자료로 활용되는 중력자료의 중요성이 높아짐에 따라 최근 많은 중력자료가 획득되고 있다. 일반적으로 획득한 중력자료로부터 절대중력값 및 중력이상값을 산출하기 위해서는 조석보정, 기체고보정, 계기보정 등의 단계를 거친다. 이때, 여러 조석보정과 계기보정 모델 중 어떤 모델을 사용하여 처리해야 하는지에 대한 기준이 결정되어 있지 않아 중력자료 처리에 있어 일관성이 유지되지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 현재 적용되고 있는 조석보정 및 계기보정 모델들이 중력값에 미치는 영향을 분석함으로써 가장 적절한 모델을 선정하고자 하였다. 그 결과 Longman과 Tamura가 제안한 천체에 의한 조석보정 모델은 약 0.0001mGal의 차이를 나타내어 사용자의 편의에 따라 모델을 선정하여도 무방하였다. 그러나 지구조석에 의한 영향을 고려하였을 때와 하지 않았을 때 차이가 존재하므로 이에 대한 보정이 필요함을 명시하여야 한다. 또한, 계기 보정은 공통점에서의 측정중력값 차이만을 이용하는 경우와 모든 측정점을 이용하여 계기보정값을 결정하는 두 모델을 적용하였을 때 보정 후 잔차의 값이 최대 0.04mGal 까지 발생하여, 이론적으로 정확한 모든 점을 이용하는 모델로 선정하여 적용하는 것이 필요하다.

핵심어 : 조석보정, 지구조석, 계기보정

## 1. 서 론

중력자료는 지오이드 모델을 구축하기 위한 기본 자료이며, 동시에 지구물리, 국방 등의 분야에서 지질의 분석, 지형탐사 및 항체의 경로 계산을 위하여 활용되는

기초자료이다. 우리나라에서는 1970년대 국토지리정보원에서 처음으로 지상중력측정을 통하여 자료를 획득하였으며, 이후 2000년대 초반까지 서울대학교, 부산대학교 등의 대학교와 한국지질자원연구원, 국토지리정보원, 국립해양조사원 등의 연구소 및 기관에 의하여 지상

1) 정회원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정(leejs@uos.ac.kr)

2) 교신저자 · 정회원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 부교수(jkwon@uos.ac.kr)

중력자료가 획득 및 처리되어왔다. 최근에는 수직기준 체계 정립 및 지오이드 구축을 위하여 국토지리정보원의 통합기준점 및 수준점에서의 중력측량 사업에서 많은 중력자료를 획득하고 있다 (국토해양부, 2010).

획득된 중력자료를 다양한 연구에 활용하기 위해서는 절대중력값 또는 프리에어이상값과 같은 형태의 중력값이 필요하므로, 일련의 자료처리 과정이 필요하다. 자료처리 과정을 살펴보면, 일반적으로 상대중력계를 통하여 현장에서 측정되는 지상중력자료로부터 절대중력값, 중력이상값을 계산하기 위해서는 조석 보정, 기계고 보정, 계기(drift) 보정 등의 과정을 거치게 된다. 그러나 중력값이 높이 1m 당 약 0.3086mGal이 달라지는 이론에 따른 기계고 보정을 제외하고 조석 보정 및 계기 보정에는 다양한 방법 및 모델이 존재한다. 현재 각 기관별로 획득한 지상중력자료를 처리할 때 다양한 조석 보정 및 계기 보정 모델을 이용하고 있기 때문에 동일한 자료임에도 최종 결과값인 절대중력값 및 중력이상값이 달라질 수 있다. 위와 같이 모델에 기인한 중력값의 차이는 과거에 획득한 자료와 최신 획득한 자료까지 통합하여 우리나라 전역에서의 단일 중력망을 구축할 때 자료들 간의 오차로 작용할 수 있으며, 최종 산출된 중력값은 실제의 중력값(참값)과 비교하였을 때 편의(bias) 값을 갖거나 망이 틀어지는 현상을 초래할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 현재 각 기관별로 이용되고 있는 조석 및 계기 보정 방법 및 모델을 적용하여 계산되는 중력값을 분석하고, 가장 정확한 방법을 선정하여 향후 보다 일관성있는 중력자료를 구축하는데 기여하고자 한다.

## 2. 조석 보정

### 2.1 조석효과

조석효과란 시간에 따라 달, 태양 및 천체 등의 기하학적인 위치가 변하여 시간과 장소에 따라 지구의 중력값이 달라지는 현상을 의미한다. 이러한 조석효과에 의한 중력값의 영향은 최대 약 0.3mGal까지 나타나는 것으로 알려져 있으므로, 측정 위치에서의 정밀한 중력값을 산출하기 위해서는 조석에 의한 효과를 제거하는 조석 보정을 수행하여야 한다 (Pariiskii 등, 1982).

조석효과는 계산 방법에 따라 달과 태양의 궤도정보로부터 위치를 계산하여 조석효과를 직접적으로 계산하거나 조화함수로 풀어내는 두 방법으로 나눌 수 있으며,

우리나라에서는 조석 보정을 위하여 Longman (1959)과 Tamura(1982)가 제안한 직접적인 계산 방법과 1987년 Tamura가 제안한 조화함수를 이용하는 방법이 혼용되고 있다. 그러나 상기 모델들을 통하여 산출된 보정량의 차이가 얼마나 발생하는지, 방법론에 따라 장·단점은 무엇인지에 대한 분석이 미비하므로, 적절한 모델을 선정하기 위한 분석을 수행하였다.

### 2.2 조석 보정 모델

#### 2.2.1 달과 태양의 궤도에 기반한 모델

본 방법은 달과 태양의 궤도로부터 조석효과를 계산하는 방법이다. 달과 태양의 위치에 기반으로 하므로, 높은 정밀도의 궤도를 활용하여 신뢰도 높은 위치를 산출할 수 있다면 계산되는 조석효과와 정밀도도 동일한 수준으로 확보할 수 있다는 장점이 있다 (Agnew, 2007).

이러한 직접적인 계산 방법은 Longman에 의하여 1959년에 제안되었으며, 현재까지 널리 이용되고 있다. 이후에도 직접적인 조석효과를 계산하는 방법이 지속적으로 연구 및 발표되었는데, Harrison, Broucke, Tamura, Merriam 등은 Brown의 달 이론<sup>1)</sup>에 기반하여 보다 정밀한 궤도 정보를 계산, 조석효과를 산출한 바 있으며 (Agnew, 2007), Tamura에 의하여 1982년에 제안된 수식은 우리나라에서도 널리 활용되고 있다.

달과 태양의 위치로부터 직접적으로 조석효과를 계산하는 수식은 달에 의한 영향의 수직 및 북쪽(north) 방향의 성분을  $g_m$ (식 3)과  $g_n$ (식 5), 태양에 의한 영향의 수직 및 북쪽 방향의 성분을  $g_s$ (식 4)과  $g_{sm}$ (식 6)이라 할 때, 식 1과 2에서와 같이 달과 태양에 의한 영향의 조합으로 표현할 수 있다. 식 1과 2는 각각 Longman과 Tamura에 의하여 제안된 보정 모델식으로, Longman은 달과 태양의 수직성분만을 고려하는 반면 Tamura는 북쪽방향 성분을 함께 고려하며, Longman은 달에 의한 영향의 수직성분에서 2차항까지만을 이용한다는 점에서 차이가 있다.

$$g_0 = g_m + g_s \quad (1)$$

$$g_0 = (g_m + g_s) + (g_n + g_{sm}) \times \gamma \quad (2)$$

1) Brown's Lunar Theory : 달의 다양한 움직임과 관련된 내용을 다루고 있는 이론으로, 실제 달은 불규칙한 운동들이 많이 일어나므로 달의 움직임을 분석하고, 이를 예측하기 위하여 수학적, 물리적으로 풀어낸 이론.

$$g_m = \frac{\mu Mr}{d^3} (3 \cos^2 \theta - 1) + \frac{3}{2} \frac{\mu Mr^2}{d^4} (5 \cos^3 \theta - 3 \cos \theta) + \frac{1}{2} \frac{\mu Mr^3}{d^5} (35 \cos^4 \theta - 30 \cos^2 \theta + 3) \quad (3)$$

$$g_s = \frac{\mu Sr}{D^3} (3 \cos^2 \phi - 1) \quad (4)$$

$$g_n = \left( \frac{\mu Mr}{d^3} 3 \cos \theta + \frac{1}{2} \frac{\mu Mr^2}{d^4} (15 \cos^2 \theta - 3) \right) (\cos \psi \sin \delta - \sin \psi \cos \delta \cos H) \quad (5)$$

$$g_{sn} = \frac{\mu Sr}{D^3} 3 \cos \phi (\cos \psi \sin \eta - \sin \psi \cos \delta \cos T) \quad (6)$$

여기서,  $\gamma = \phi - \psi = \left( f + \frac{f^2}{2} \right) \sin 2\phi - \frac{f^2}{2} \sin 4\phi$

$\mu$  : 만유인력상수

$M$  : 달의 질량

$S$  : 태양의 질량

$r$  : 지구중심으로부터 측정지점 P까지의 거리

$d$  : 지구와 달 중심간 거리

$D$  : 지구와 태양 중심간 거리

$\theta$  : 달의 천정각

$\phi$  : 태양의 천정각

$\delta$  : 달의 적위

$H$  : 달의 시간

$\eta$  : 태양의 적위

$T$  : 태양의 시간

$f$  : 편평률

### 2.2.2 조화함수를 활용하는 방법

조석효과를 계산하기 위한 다른 방법은 조화함수로 풀어내는 방법으로, 주파수와 러브수(Love number)<sup>2)</sup>에 대한 조화함수 테이블을 생성해두고 이로부터 조석효과를 계산하는 방법이다. 이 방법은 주파수에 대한 러브수에 의존하는 값으로 테이블을 한 번 생성하게 되면 오랜 기간 동안 활용할 수 있으며 계산이 쉽다는 장점이 있으나 달과 태양의 위치를 계산하여 직접적으로 조석효과를 계산하는 첫 번째 방법만큼의 정밀도를 얻기 위해서는 삼각함수에 대한 항을 더 고려하여야 하므로 계산에 있어 시간적인 노력이 더 필요하다 (Agnew, 2007).

Tamura에 의하여 1987년에 제안된 조화함수에 의한

보정 수식은 식 7과 같으며, 이 때 FACTX와 TMX는 주파수와 러브수의 값을 담고 있는 테이블로부터의 값과 상수의 조합으로 산출되는 값이다. TMX는 포텐셜을 10<sup>4</sup>의 수준까지 계산하기 위하여 고려되는 부분으로 이를 산출하기 위해서는 달의 평균이상값, 태양의 평균이상값, 목성의 충 등과 관련된  $f_1$ 부터  $f_8$ 까지의 8개 요소들을 함께 고려하여야 한다. 본 논문에서는 Tamura에 의하여 제안된 조화함수를 활용하는 모델에서 대표적인 항만을 서술하였으며, 실제 ZZ 행렬, DOOD 행렬의 각 요소와 관련된 값은 Tamura(1987) 논문을 참고하기 바란다.

$$g_{Tide} = FACTX \times \cos(TM X) \quad (7)$$

$$FACTX = (AMPL + AMPL2 \times TMID) \times ZZ(KO, KS) \times FCT(KK) \quad (8)$$

$$TMX = f_1 \times DOOD(1) + f_2 \times DOOD(2) + f_3 \times DOOD(3) + f_4 \times DOOD(4) + f_5 \times DOOD(5) + f_6 \times DOOD(6) + f_7 \times DOOD(7) + f_8 \times DOOD(8) + PHASE1 \quad (9)$$

여기서, AMPL, AMPL2 : 조화함수 크기

KO : 차수

KS : 계수

TMID : 시간

FCT : amplitude factor 테이블

ZZ : 입력받은 위, 경도, 높이로부터 Z 좌표로 변환하기 위한 행렬

DOOD : 테이블의 세 번째부터 여덟 번째 열의 값

PHASE1 : KO+KS를 2로 나누었을 때 나머지가 0이면 0, 0이 아니면  $\pi/2$

### 2.3 조석 보정 모델의 보정량 비교

현재 우리나라에서는 직접적인 계산 방법과 조화함수에 의한 계산 방법이 혼용되고 있으므로, 본 논문에서는 위의 두 가지 조석보정량 계산 방법론이 조석효과를 보정하는데 있어 중력값에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위하여 위도 32°~40°, 경도 123°~132°, 간격 1'의 격자를 생성하여 각 위치에서 두 모델(1 : Longman / 2 : Tamura(1982, 1987))을 적용하여 보정량을 계산하였다(표 1). 이 때, Longman 모델과 Tamura의 조화함수 모델만을 비교함은 Tamura에 의하여 제안된 직접적인 계산 방법과 조화함수에 의한 방법을 적용하여 산출된 보정

2) 러브수(Love number) : 태양과 달에 의한 기조력 포텐셜을 표현하는데 있어, 지구 내부의 밀도와 강성률에 따라 정해지는 상수

량이 10<sup>-6</sup>mGal의 수준에서 차이가 발생하므로 동일하다고 판단할 수 있다. 이는 조화함수에 의한 방법론에서 활용되는 주파수와 러브수에 대한 테이블이 경험을 바탕으로 생성되는 것으로, 조화함수 전개를 위하여 테이블을 생성할 때 1982년의 결과를 활용하였기 때문으로 판단된다.

표 1. 조석보정 모델별 보정량

단위 : 100mGal

모델	범위	평균	표준편차
1 : Longman	-4.1966~-2.2903	-3.2629	0.4929
2 : Tamura(1982 / 1987)	-4.2071~-2.2763	-3.2603	0.4986

표 1은 Longman과 Tamura 모델로부터 산출된 보정량의 통계를 나타낸 것이며, 그림 1에서는 보정량의 차이를 표현하였다. 표 1과 그림 1을 살펴보면 두 방법론에 의하여 산출된 보정량은 그 차이가 약 -0.0001~0.0001mGal의 범위로 통계적으로 거의 유사하다고 볼 수 있으며, 이는 직접적인 계산에 있어 달의 영향 중 수직성분에 대하여 2차항 이상의 영향과 북쪽방향으로의 성분을 고려하였을 때의 영향이 0.0001mGal 수준에서 차이를 나타냄을 의미하며, 조화함수를 전개하여 달과 태양 이외의 천체에 의한 영향을 산출하여도 우리나라 내에서는 0.0001mGal 이하의 영향이 나타남을 의미한다. 즉, 조석보정의 경우는 현재 활용되고 있는 세 모델로부터 산출되는 보정량이 매우 작은 차이만을 나타내므로 사용자의 편의에 따라 선택하여도 무방하다고 판단된다.

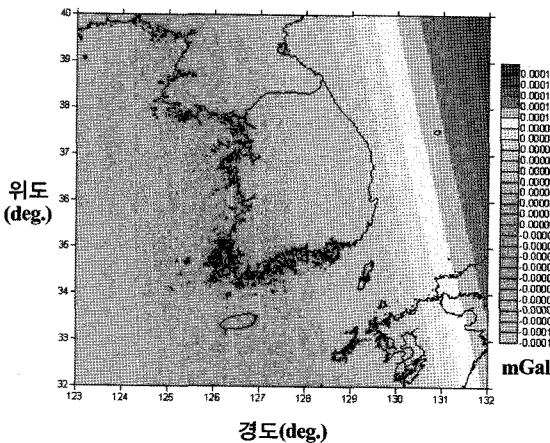


그림 1. Longman과 Tamura 모델의 차이 (단위 : mGal)

## 2.4 지구조석 보정

조석현상에는 달과 태양과 같은 천체의 인력으로 인한 중력장의 변화와 이러한 인력에 의하여 탄성을 지닌 지구가 변형되어 나타나는 지구 조석현상이 있다 (Torge, 2001). 지구조석에 따라 지구 지표면은 약 30cm 크기의 수직변이를 일으킨다. 이러한 수직 변이는 중력 측정값에 2차적인 영향을 미치게 되므로 중력측정 후 지구조석에 의한 영향을 보정하여야만 정확한 계기의 결정이 가능하다.

지구조석에 의한 중력보정은 지구를 구대칭, 비회전, 그리고 바다가 없을 때를 가정하여 산정된 조석포텐셜 모델을 이용하여 수행할 수 있다. 이때 모델은 러브수에 의존하며 밀도와 탄성에 기반하여 결정된다.

이러한 지구조석효과는 천체에 의한 영향의 약 20% 수준까지 발생할 수 있으며, 수치적으로 보았을 때 약 0.06mGal 까지 발생할 수 있으므로 (Torge, 2001) 지구조석보정을 반드시 수행하여 자료처리를 수행하여야 한다. 지구조석보정은 조석현상의 규명에 따라 모델이 조금씩 변화한다. 한 예로 현재 Gravsoft에서는 러브수 1.14를 적용하고 조석조화함수 모델을 2차항 까지 이용한 아래의 식 10을 사용하고 있다.

$$g_{Tidel} = g_{Tide} \times L_{nm} + 0.00483 - 0.01573 \times \cos^2 \varphi \quad (10)$$

여기서,  $g_{Tidel}$  : 지구조석보정 후 조석보정량

$g_{Tide}$  : Longman 또는 Tamura에 의하여 계산된 조석보정량

$L_{nm}$  : 러브수 (= 1.14)

$\varphi$  : 위도

## 3. 계기 보정

### 3.1 계기보정 효과

지상중력측정에 활용되는 상대중력계는 탄성이 있는 스프링의 길이 변화로부터 상대적인 중력값을 측정하게 된다. 이 때, 중력계 내의 스프링은 시간이 지남에 따라 복원력이 달라지게 되므로 중력값도 영향을 받게 되는데, 이러한 현상을 보정 및 제거하는 과정을 계기 보정이라고 한다 (민경덕 등, 1986) 계기 보정에서는 계기가 존재하지 않을 때 공통점에서 측정하였을 때 값이 동일하여야 한다는 조건 하에 일반적으로 측정의 처음과 마지막을 동일점에서 수행하며 그 값의 차이를 시간 차이

로 나누어 산출하는 단순 보정방법을 적용할 수 있다. 그러나 현재 보편적으로 활용되고 있는 중력계의 민감도가 0.001mGal 수준으로 매우 높아 주변 환경의 영향으로부터도 기계의 안정성이 떨어질 수 있다. 또한, 이러한 방법은 보정량의 계산에 있어 한 점에서의 측정값 차이에 전적으로 의존하므로, 만약 기준점에서의 마지막 측정이 환경적 영향 또는 측정의 실수 등으로 값이 크게 달라지는 경우 다른 측정점들의 보정량이 잘못 계산될 수 있다는 단점이 있다. 따라서 보다 높은 정밀도의 결과를 산출하기 위해서는 많은 공통점을 확보하여 공통점에서는 차이가 없어야 한다는 조건을 적용한다. 공통점이 많은 경우에도 계기의 계산은 공통점만을 사용하는 경우와 모든 측정값을 사용하는 경우로 나눌 수 있으며, 본 논문에서는 이러한 두 방법의 차이에 대하여 분석하였다. 즉, 현재의 중력측정 기술을 고려할 때 단순 보정 방법은 더 이상 적용하지 않아야 할 것으로 판단된다.

### 3.2 계기 보정 모델

#### 3.2.1 공통점 조정법

본 방법은 Rene Forsberg가 개발한 Gravsoft (gradj.for)에 구현되어 있는 방법으로 모든 공통점에서의 측정값의 차이가 0이 되어야 한다는 조건 하에 조정계산을 수행하는 방법이다 (Forsberg, 2003). 이는 그림 2를 통하여 쉽게 이해할 수 있는데, A, B, C 세 점에서 중력측정을 수행하였고 이 때 A와 B 두 점을 왕복 측정하였다고 할 때 단순보정법에서는 식 11에서와 같이 공통점이자 처음 측정인 A의 첫 번째 중력값 A와 두 번째 중력값 A'의 차이를 시간으로 나누어 계기 보정량의 기울기를 계산한다.

$$a = \frac{g_{A_{last}} - g_{A_{first}}}{t_{A_{last}} - t_{A_{first}}} \quad (11)$$

그러나 공통점을 함께 이용하는 경우는 A뿐만 아니라 B도 함께 이용하므로 최종적으로 산출되는 계기 보정량은 A와 A'를 시간 차이로 나눈 기울기와 B와 B'를 시간 차이로 나눈 기울기의 평균값으로 산출된다 (식 12).

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} \left( a_1 = \frac{g_{A_{last}} - g_{A_{first}}}{t_{A_{last}} - t_{A_{first}}}, a_2 = \frac{g_{B_{last}} - g_{B_{first}}}{t_{B_{last}} - t_{B_{first}}} \right) \quad (12)$$

여기서,  $g$  : 측정점의 중력값

$t$  : 측정시간

A, B : 측정점명

first, last : 기준점에서의 측정값으로 first는 첫 번째 측정, last는 마지막 측정

이러한 이유로 만약 A에서의 두 번째 관측값에 오차가 있을 때 단순 보정법을 이용하는 경우 전반적인 망이 큰 계기를 갖게 되지만, 공통점을 함께 이용하는 경우는 보다 안정적인 해를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

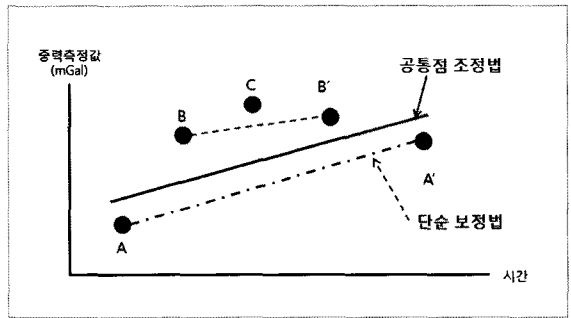


그림 2. 단순보정법과 공통점 조정법

#### 3.2.2 모든 관측값을 이용한 조정법

앞서 정의한 바와 같이 계기는 중력계가 시간이 지남에 따라 복원력이 달라져 측정값이 변하게 되는 현상을 의미한다. 다시 말해서 계기는 공통점에서 차이가 0이 된다는 조건으로도 표현할 수 있지만, 실제 공통점이 아닌 점에서도 기계가 지속적으로 변화하여 측정값이 달라지므로 시간의 차이에 대한 상수 즉, 계기보정 기울기에 대한 관측방정식으로 표현하고 계기 보정량을 추정하는 것이 이론적으로 타당하다 (Hwang, 2002; 식 13).

$$\begin{bmatrix} \Delta g_{AB} \\ \Delta g_{BC} \\ \Delta g_{CB} \\ \Delta g_{B'A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \Delta t_{AB} \\ 0 & -1 & 1 & \Delta t_{BC} \\ 0 & 1 & -1 & \Delta t_{CB} \\ 1 & -1 & 0 & \Delta t_{B'A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_A \\ g_B \\ g_C \\ d_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\Leftrightarrow Y = A\xi + e$$

여기서,  $\Delta g_{AB}, \Delta g_{BC}, \Delta g_{CB}, \Delta g_{B'A}$  : 측정점간의 상대적인 관측치 차이

$\Delta t_{AB}, \Delta t_{BC}, \Delta t_{CB}, \Delta t_{B'A}$  : 측정점간의 관측 시간 차이

$g_A, g_B, g_C$  : 측정점 A, B, C에서의 중력값

$d_i$  : 계기보정 기울기

그러나 상대적인 차이를 관측값으로 하는 관측방정식에서는 관측값과 미지수와의 관계를 나타내는 설계행렬(A)의 차원(rank)이 하나 부족하기 때문에 모든 관측점의 중력값과 계기보정량 기울기를 풀기 위해서는 한 점 이상을 고정하는 제약조건을 부여하여야 한다. 만약 정밀도( $\epsilon_0$ )를 알고 있는 한 점을 제약조건( $z_0$ )으로 부여할 수 있다면, 각 측정점의 중력값 및 계기 보정량 기울기는 식 14와 같이 계산된다.

$$\hat{\xi} = (A^T P A + K^T P_0 K)^{-1} (A^T P Y + K^T P_0 z_0) \quad (14)$$

- 여기서,  $\hat{\xi}$  : 측정점의 중력값 및 계기보정량 기울기
- $z_0$  : 제약조건
- $P$  : 관측값의 가중치
- $P_0$  : 제약조건의 정밀도에 의한 가중치

### 3.3 계기 보정 모델의 비교

중력측정에서는 하나의 기준점을 선정하여 폐합이 되도록 작업하는 것이 일반적이며, 중력계 측정을 위한 이동, 중력계 충전(온열 상태 유지) 등의 다양한 환경 요인에 의해서 계기가 변할 수 있으므로 하루 단위의 측정

날짜별로 보정을 한다. 그러나 측정 기간 동안 온열상태가 유지되었고 외부의 충격 등이 없어 계기가 안정적이려면 처리의 효율성을 높이기 위하여 계기 보정량 기울기를 하나의 값으로 결정하여도 무방하다.

본 논문에서는 모델 차이에 따라 계기 보정량이 얼마나 달라지는지 그 영향을 분석하기 위하여 2008년 통합 기준점 자료 중 경기지구의 자료를 대상으로 하여 단일 망에서의 계기 효과와 여러 망을 통합하였을 때의 계기 보정 효과가 두 조정계산 모델에서 어떻게 산출되는지를 비교, 분석하였다.

이 때, 2008년 이후 국토지리정보원 중력측량 작업규정에 의하여 획득된 자료와 기존에 획득된 자료는 측정 방법에 있어 차이가 있으므로 측정방법에 의한 영향을 고려하기 위하여 통합망에서는 측정방법에 따라 망을 두 종류로 생성하였다. 통합망 1은 중력측량 작업규정을 준수하여 왕복측량을 수행한 2008년 통합기준점 자료를 이용한 경우이고, 통합망 2는 기존의 중력 측량 시 시간 및 비용적인 효율성을 높이기 위해 기준점에서만 중복 측정 하거나 하루 작업 중 한, 두 점 만의 중복점을 생성한다는 측정 상의 특징을 반영하여 일부 측정점을 제거하여 망을 재구성하여 분석하였다. 따라서 그림 3에서 나타내는 바와 같이 통합망 2에서는 독립적인 측점이 존재한다).

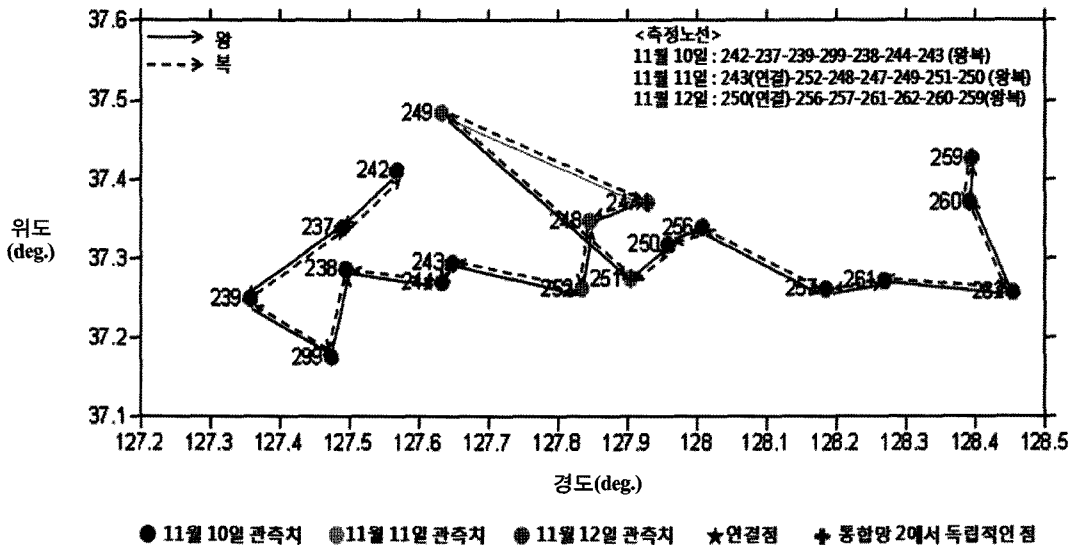


그림 3. 대상 자료 (2008년 통합기준점 경기지구 중)

3.3.1 단일망에서의 조정계산

단일망에서의 조정계산을 위한 대상자료는 경기지구의 11월 10일 자료를 이용하였으며, 모든 관측점은 왕/복으로 중복측정된 관측값을 활용하였다. 조정계산을 위한 제약조건은 첫 점의 중력값을 참이라고 가정, 242번 측정에서의 값인 5184.149로 고정하였다. 그 결과 측정점간의 상대관측값의 잔차는 단일의 망에서 표 2에서와 같이 최대 0.03mGal까지 발생하며, 추정된 관측값의 정밀도는 공통점 조정법일 때, 0.021mGal, 모든 관측점을 이용하였을 때 0.016mGal로 상대적으로 높은 값을 나타냈다.

표 2. 계기 보정 후의 상대 중력값  
(1 : 공통점 조정법 / 2 : 모든 관측값 조정법), \* 는 측정값

		단위 : mGal					
측정 노선	242-237	237-239	239-299	299-238	238-244	244-243	
(*) 왕	-12.712	-3.694	-15.209	13.836	-9.521	14.395	
복	12.743	3.698	15.212	-13.813	9.533	-14.368	
1 왕	0.029	-0.004	-0.004	0.011	0.008	0.013	
복	0.002	0.008	0.007	0.012	0.001	0.017	
2 왕	0.016	0.003	0.002	0.011	0.007	0.014	
복	0.015	0.001	0.00	10.012	0.005	0.013	

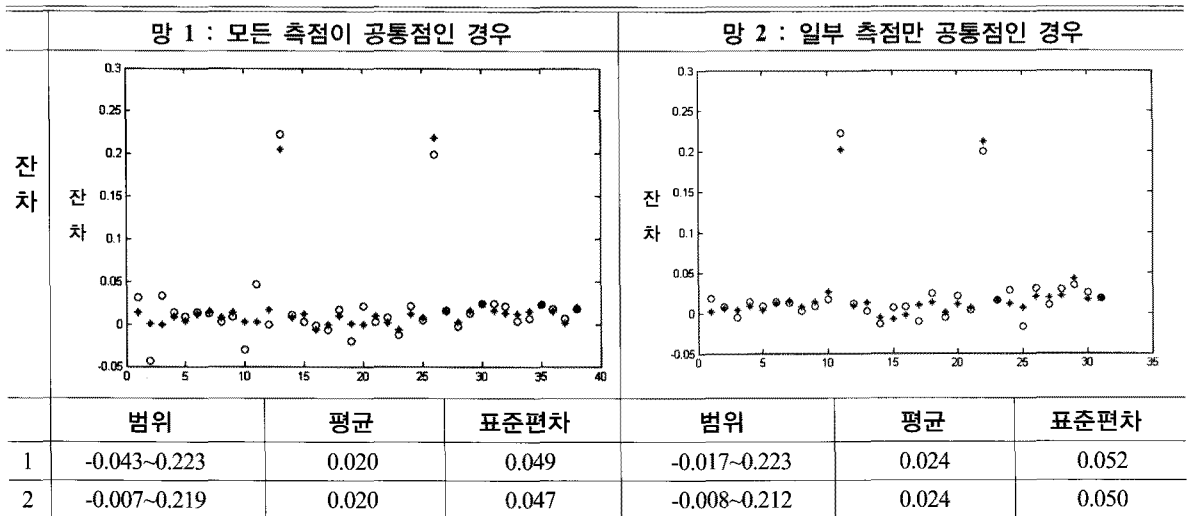
3.3.2 통합망에서의 조정계산

앞서 언급한 바와 같이 통합망은 모든 점이 중복적인 경우(망 1)와 그렇지 않은 경우(망 2)로 나누어 구성하였으며, 기본 자료는 2008년 통합기준점 경기지구의 11월 10일부터 11월 12일까지 총 3일간 측정된 자료이다. 망 2의 경우 총 19점의 측정중 9점이 공통점으로 구성되어 있다.

모든 측점이 중복적인 경우 계기 보정 후 상대관측값 잔차의 표준편차는 공통점을 이용한 조정계산의 경우 0.049mGal, 모든 관측점을 기반으로 하는 조정계산의 경우는 0.047mGal로 나타났다. 이 때, 수식 상으로 모든 측점이 중복적인 경우 공통점을 이용한 경우와 모든 관측점을 기반으로 한 조정계산은 동일한 결과를 산출하여야 하나 0.002mGal의 차이를 나타내는데, 이는 Rene Forsberg에 의하여 개발된 GRAVSOFT에서는 조정계산을 반복하여 수행하게 되는데, 관측치의 초기 정밀도를 0.05mGal로 고정하기 때문에 발생하는 영향이다. 또한, 일부 측정만 공통점인 경우의 정밀도도 각각 0.052mGal, 0.050mGal로 정밀도는 모든 관측값을 이용하는 경우가 더 높게 나타났다(표 3).

표 3. 통합망에서의 조정계산 결과 (1 : 공통점 조정법(O) / 2 : 모든 관측점 조정법(\*))

단위 : mGal



#### 4. 결 론

본 논문에서는 지상중력자료의 처리 단계 중 다양한 형태로 적용되고 있는 조석 보정 및 계기 보정의 모델을 비교하고 그 영향을 분석하였다. 그 결과 조석보정의 경우 현재 조석효과 보정을 위하여 적용되고 있는 Longman과 Tamura의 모델은 우리나라에서 최대 0.0001mGal 수준의 차이를 나타내므로 모델의 차이가 중력값에 미치는 영향이 미미하다. 따라서 사용자의 편의에 따라 선택적으로 활용하여도 무방하다고 판단된다. 그러나 우리나라에서 조석보정을 위하여 사용하는 프로그램을 살펴보면 천체에 의한 보정만을 수행하는 경우가 있다. 이 때 지구조석의 효과를 고려하는 경우와 하지 않는 경우 그 영향이 최대 0.06mGal까지 발생하는 것으로 알려져 있기 때문에 향후 중력자료를 획득하여 조석에 의한 영향을 보정하는 경우는 Longman과 Tamura에 의한 수식은 선택적으로 활용할 수 있으나, 지구 조석에 의한 영향은 필히 고려되어야 할 것이다.

계기 보정 모델의 경우는 공통점만을 이용하는 경우와 모든 관측값을 이용하는 경우로 나누어 비교한 결과 보정 후 잔차가 최대 0.04mGal까지 발생하므로 조석모델에 비하여 그 영향이 크게 나타났다. 이러한 모델의 차이를 분석하기 위하여 하루에 측정된 자료를 하나의 망으로 하거나 여러 측정일동안 획득한 자료를 통합하여 통합 망으로 구축하여 그 차이를 분석한 결과 모든 관측점을 이용한 보정방법에서 상대적으로 높은 정밀도를 나타내었다. 따라서 이론적으로 타당하고 높은 정밀도를 나타내는 계기 보정법인 모든 관측점을 이용한 방법을 사용하여야 하는 것이 타당할 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### 참고문헌

국토해양부 (2010), 지능형국토정보기술혁신사업 완료 보고서, 서울시립대학교.

민경덕, 서정희, 권병두 (1986), 응용지구물리학, 우성문화사.

Hwang, C., Wang, C., Lee, L. (2002), Adjustment of relative gravity measurements using weighted and datum-free constraints, *Journal of Computers and Geosciences*, Vol. 28, pp. 1005-1015.

Agnew, D. C. (2007). Earth Tides, *Treatise on Geophysics: Geodesy*, T. A. Herring, ed., Elsevier, New York, pp. 163-195.

Longman, I. M. (1959), Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 64, pp. 235-12355.

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

Pariiskii, N. N., Pertsev, B. P., Kramer, M. V. (1982), The Effect of Variations in the Atmospheric Mass Distribution on the Gravity Acceleration, *Repeated Gravity Observations*, pp. 12-26.

Tamura, Y. (1982), A computer program for calculating the tide-generating force, *Intl. Latitude Ovservatory of Mizusawa*, Vol. 16, pp. 1-20.

Tamura, Y. (1987), A harmonic Development of the Tide-Generating Potential, *Bulletin d'Information des Marees Terrestres*, Vol. 99, pp. 6813-6855.

Torge, W. (2001), *Geodesy*, Walter de Gruyter, Vol. 3, pp. 84-89 ; pp. 362-368.