



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

산악지역에서 상대중력측량에
의한 정표고 산정



2010년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

정 영 화

공 학 석 사 학 위 논 문

산악지역에서 상대중력측량에 의한 정표고 산정

지도교수 이 종 출

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2010년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

토 목 공 학 과

정 영 화

정영화의 공학석사 학위논문을 인준함

2010년 2월 25일



주 심 공 학 박 사 김 명 식 (인)

위 원 공 학 박 사 정 두 회 (인)

위 원 공 학 박 사 이 종 출 (인)

목 차

List of Tables	vii
List of Figures	x
Abstract	xii
1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구범위 및 방법	6
2. 이론적 배경	8
2.1 중력	8
2.1.1 상대중력 자료와 기본보정	8
2.1.2 망조정	11
2.1.3 정규중력	12
2.1.4 절대중력 보정, 중력이상	18
2.2 높이 체계	23
2.2.1 타원체고	23
2.2.2 Geopotential number와 역표고(Dynamic height)	25
2.2.3 정표고(Orthometric height)	27

2.3 정사보정량	29
2.3.1 Nassar, M.M.의 정사보정량	30
2.3.2 Hofman, W.B. and Moritz, H.의 정사보정량	32
2.3.3 Hwang, C. and Hsiao, Y.S.의 정사보정량	34
2.3.4 Van, H. and Strang, G.L.의 정사보정량	36
 3. 상대중력의 측량 및 처리	 38
3.1 상대중력의 측량	38
3.1.1 경상북도 지역	40
3.1.2 전라남도 지역	41
3.2 상대중력의 기본보정	41
3.3 절대중력 및 중력이상 계산	43
3.4 정규중력 계산	44
 4. 정사보정량 및 정표고 산정	 46
4.1 정사보정량 계산	46
4.2 정표고 산정	47
4.3 결과 분석	49
4.3.1 정사보정량 계산결과 상관도 분석	49
4.3.2 수준점간 표고차와 정사보정량 비교	51
4.3.3 대상지역에 적합한 정사보정량 선정	51
 5. 결 론	 53

참 고 문 헌	55
---------------	----



List of Tables

Table 2.1 Physical and geometrical constants required to compute normal gravity using Somigliana's closed formula(Featherstone, 1998)	17
Table 2.2 Physical and geometrical constants required to compute normal gravity using second-order Chebyshev approximate formula(Featherstone, 1998)	17
Table 2.3 Physical and geometrical constants required to compute normal gravity using eighth-order Chebyshev approximate formula(Featherstone, 1998)	18
Table 2.4 Parameters of the GRS80	24
Table 2.5 Parameters of the WGS84	25
Table 3.1 Specification of G-899 and CG-5	39
Table 3.2 Absolute gravity stations	40
Table 3.3 Relative gravity in benchmarks(Gyeongbuk)	40
Table 3.4 Relative gravity in benchmarks(Jeonnam)	41
Table 3.5 Relative gravity correction(Gyeongbuk)	42
Table 3.6 Relative gravity correction(Jeonnam)	42
Table 3.7 Drift parameter and Bias parameter	43
Table 3.8 Absolute gravity and gravity anomaly(Gyeongbuk)	43
Table 3.9 Absolute gravity and gravity anomaly(Jeonnam)	44

Table 3.10 Normal gravity in benchmarks(Gyeongbuk)	44
Table 3.11 Normal gravity in benchmarks(Jeonnam)	45
Table 4.1 Orthometric correction(Gyeongbuk)(mm)	46
Table 4.2 Orthometric correction(Jeonnam)(mm)	46
Table 4.3 Orthometric height(Gyeongbuk)(m)	47
Table 4.4 Orthometric height(Jeonnam)(m)	48
Table 4.5 Pearson correlation analysis of among each orthometric cor- rection(Gyeongbuk)	49
Table 4.6 Pearson correlation analysis of among each orthometric cor- rection(Jeonnam)	50
Table 4.7 Pearson correlation analysis of between orthometric correction and height(Gyeongbuk)	51
Table 4.8 Pearson correlation analysis of between orthometric correction and height(Jeonnam)	51
Table 4.9 The sum of orthomertic correction(Gyeongbuk)(mm)	52
Table 4.10 The sum of orthomertic correction(Jeonnam)(mm)	52

List of Figures

Fig. 1.1 Flow chart of thesis	7
Fig. 2.1 Star method	9
Fig. 2.2 Ladder method	10
Fig. 2.3 Modified ladder method	10
Fig. 2.4 Ellipsoidal latitude ϕ , geocentric latitude $\bar{\phi}$, reduced(ellipsoidal harmonic) latitude β for a point P on the ellipsoid(Hofmann et al., 2005)	16
Fig. 2.5 Geocentric distance to geoid and surface on a spherical earth	20
Fig. 2.6 An isolated circular conical mountain(Tsuboi, 1983)	21
Fig. 2.7 Bouguer plate($z \rightarrow H, a \rightarrow \infty$)	22
Fig. 2.8 Leveling and orthometric height on points A, B(Hofmann et al., 2005)	27
Fig. 2.9 Spirit leveling(Moritz, 2005)	30
Fig. 2.10 Orthometric height and dynamic height(Hofmann et al., 2005)	32
Fig. 2.11 Difference height from the geoid on the same equipotential surface	33

Fig. 3.1 G-899 relative gravimeter(LaCoste & Romberg, 2004)	38
Fig. 3.2 CG-5 relative gravimeter(Scintrex, 2006)	38
Fig. 3.3 Relative gravity measurement using CG-5 in a benchmark ...	39



Calculation of Orthometric Height Based on Relative Gravity in Mountainous Areas

Yeong - Hwa, Jeong

*Department of Civil Engineering, Graduate School of industry
Pukyong National University*

ABSTRACT

In Korea, orthometric height is adopted as standard height. However normal orthometric height based on normal gravity is used because the gravity survey is not completed on the whole country. To solve this height system difference, we need to calculate orthometric correction, which is the difference between leveling height as geometric height and orthometric height as physical height. Thus, gravity surveying combined with leveling furnishes orthometric height.

In this study, used the relative gravimeter from mountainous area which is calculated orthometric correction relatively greater than flat area, gravity was surveyed. Existing six formulas are used to calculate the orthometric correction for one network and proposed the optimum calculation of orthometric correction. Based on the result of optimum calculation is computed about orthometric height.

Among the existing formulas, Nassar's formula and Hwang's formula are made a optimum estimation.

Therefore Korean geography consists mainly of mountainous area,

computation of orthometric height is required by using orthometric correction. Recently utilizability about location information increased in actual life, this study has contributed that accurate geodetic standard can be made.



1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

우리가 살아가는 공간에서는 무수히 많은 힘들이 작용하고 그 힘은 또 다른 무수히 많은 현상을 발생시킨다. 이러한 힘을 물리학에서는 강한 핵력, 약한 핵력, 전자기력 그리고 중력으로 나눈다(Feynman et al., 1963; Tipler, 1991).

4종류의 힘 중에서 가장 작은 힘이지만 우리의 일상에서 가장 쉽게 느낄 수 있는 중력은 학문적으로는 측지학분야에서 지구의 형상을 연구하는데 이용되고, 지구물리학분야에서는 지구내부의 비 균질성에 관한 연구 및 물리·화학적 상수의 표준치를 결정하고 지구의 탄성을 평가하는데 사용되어진다. 이는 지구상에서 위도에 따른 원심력의 차이와 지구내부 밀도의 비 균질 분포에 따른 만류인력의 차이, 표고 차에 의한 원심력과 만류인력 두 힘 각각의 차이에 의한 영향 그리고 그 외 무수히 많은 요인으로 지구상의 여러 지역에서 다른 중력이 측량됨으로서 학문적 활용성이 크다(이영철, 2008).

특히 측지학에서는 중력으로 지구의 형상을 연구하여 지표상의 수준측량을 위한 기준면인 평균해수면을 정의하는데 활용된다. 이론적으로 평균해수면은 규칙적인 조석관측에 의하여 결정되어질 수 있으나 거리가 먼 곳 간에는 평균해수면의 차이가 커질 수밖에 없으므로 조석관측으로 얻어진 평균해수면은 일정하지 않다. 결국 이런 문제를 해결할 수 있는 가상의 평균해수면을 정의하기 위하여 중력을 측량한 자료를 바탕으로 계산된 등포텐셜면 중 각 지역의 평균해수면과 가장 유사한 면을 지오이드로 정의하여 수준측량을 위한 기준면으로 활용한다(Tsuboi, 1983; Li et al., 2001).

우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 지오이드에서부터 지표까지의 높이인 정표고를 높이에 대한 기준표고로 채택하고 있으나, 현재 우리나라는 전 국토에 대한 중력측량이 시행중이기에 정규중력을 사용한 정규정표고를 사용하고 있다(송창현, 2007).

이러한 높이체계에 대한 혼란은 우리나라의 측지계를 전 세계적인 측지계로 완전히 정형화하고 이용하기 위해 해결해야만 한다. 혼란을 해결한다면 우리는 지오이드를 산정할 수 있고, 최근 널리 활용되고 있는 GPS에서 전송되는 타원체고로 정확한 수준측량이 가능해질 것이다. 특히 산악지역에서는 지표면의 기복 변화 및 지구내부의 비균질성과 같은 물리적인 다양한 영향으로 중력의 변화가 평탄한 지역에 비해 크기 때문에 실측중력을 고려한 정표고를 산정하는 것이 필요하다(최광선 등, 1997; Meyer et al., 2006).

따라서 우리나라의 대표적인 산악지역인 경상북도, 전라남도(지리산) 지역에 대하여 상대중력을 측량하여, 수준점간 포텐셜 차이에 의해 발생하는 수준면의 비평형을 고려한 수준점간 고저차의 증가량, 즉 정사보정량을 계산하여 정확한 정표고를 산정하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 기존에 제안된 6가지 정사보정량을 각 대상지역에 대하여 계산하고, 비교·분석함으로써 우리나라의 산악지역에서 적합한 정사보정량 및 정표고를 결정하였다. 추후 연구를 통해 전국의 수준점에서 중력측량을 실시하여 실측에 의한 중력자료가 획득된다면 수준원점을 기준으로 정사보정량을 계산하고 정표고를 산정하여 국가수준망의 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

1.2 연구동향

본 연구는 중력측량에 의하여 획득된 중력으로 정사보정량 계산하고, 계산된 정사보정량으로 정표고를 산정함을 목표로 하고 있고, 이는 중력측량 방법, 정사보정량, 그리고 높이체계에 대한 사전 연구를 필요로 한다.

중력에 대한 연구는 흔히 알고 있는 G. Galilei와 I. Newton의 일반적인 운동에 대한 물리학적 해석을 위한 목적에서 시작된 것이 아니라 고대에 행성의 움직임을 관측하는 천문학에서부터 시작되었다. 15세기에 J. Kepler는 행성운동에 대한 관측 자료를 분석하여 3개의 소위 말하는 ‘Kepler의 법칙’을 알아내었다. 첫 번째는 ‘행성들의 궤적이 타원형이며, 타원의 내부에 있는 두 개의 초점 중 한곳에 태양이 위치한다.’, 두 번째는 ‘태양과 행성을 잇는 반경 벡터는 같은 시간동안 같은 면적을 쓸고 지나간다.’, 마지막으로 ‘행성의 공전주기는 궤도의 장축의 $3/2$ 승에 비례한다.’이다. 이와 같은 시대에 Galilei는 일반적인 운동에서 Kepler의 법칙을 이해하는데 유용한 ‘관성법칙’을 발견한다. 이후 Newton은 Galilei의 ‘관성법칙’을 더 확장하여 ‘물체의 운동 상태를 바꾸는 유일한 방법은 그 물체에 힘을 가하는 것이다’라고 표현했다. 이것으로 Newton은 지표근처에서 물체가 지구로 낙하하는 현상으로 달의 운동에 대하여 예측할 수 있었으며, 지구상에서 물체의 낙하와 달의 주기운동이 중력에 의하여 나타난다는 것을 발견할 수 있었다(Feynman et al., 1963).

지금까지는 행성의 움직임에 대한 중력의 작용을 정의하였으나 결국 중력이란 두 물체 사이에 작용하는 힘으로, 행성에 아닌 적당한 두 물체가 서로 끌려가는 현상을 관측함으로써 중력을 측량할 수 있다. 비록 중력이 너무 작은 힘이고, 눈으로 확인하기 위해서는 진공상태 유지 및 다른 여러 사항을 통제하여야하는 어려움이 따르나 H. Vacendish가 최초로 여러 사항을 통제하여 중력을 측량하였다. Vacendish는 비틀림 섬유에 의해 매달

린 가느다란 막대기 양쪽에 크기가 다른 납으로 만든 공을 설치하여 섬유의 비틀림 정도로서 중력을 측량하였다. 그 후 중력측량법으로는 Borda의 진자법, Kater의 역 진자법 등이 있으며, Newton의 자유낙하법 그리고 탄성스프링법이 개발되었다. 현재 사용되는 중력계는 상대중력계 및 절대중력계로 구분되며 그 중 대부분의 상대중력계는 탄성스프링법을, 그리고 절대중력계는 진자법과 자유낙하법을 사용한다(Tsuboi, 1983).

상대중력계로 얻어진 중력에 대하여, 황학 등(2009)은 국내에서는 중력측량 자료로 자유망조정과 무게제한망조정의 결과를 비교하는 연구가 시행되었으며, 국외에서는 Merlet et al.(2008)이 본 연구에서 사용된 CG-5 상대중력계의 실내 측량을 통해 물질의 정밀한 중력을 측량하기 위한 연구가 시행되었으며, Parseliunas et al.(2008)은 4대의 CG-5를 사용하여 리투아니아 전 지역에 대한 중력측량을 시행하기도 하였다.

정사보정량을 계산하기 위해서는 수준측량으로 수준점에 대한 정확한 표고를 결정하는 것이 필요하다. 이창경 등(2008)은 국토지리정보원에서 2001년부터 2006년까지 실시한, 1등 수준점에 대한 직접수준측량 자료를 평가하였다.

정사보정량의 계산에 대한 연구는 Heiskanen et al.(1967)과 Hofmann et al.(2005)이 두 측점간의 포텐셜 변화량과 정표고 및 역표고의 개념으로부터 실측중력과 수준측량성고를 이용한 정사보정량 계산식을 유도하였고, Nassar(1977)과 Hwang et al.(2003)은 기존의 정사보정식을 재 공식화하여 정규중력 및 실측중력을 변수로 가지는 식이 발표되었으며, Strang van Hees(1992)는 실측중력으로 계산된 Bouguer 중력이상을 변수로 하는 경험식을 제안하였다. 국내에서는 위의 연구에서 제안한 방법을 활용하여 윤홍식 등(2004)은 부산 동래에서 경주까지의 수준노선에서 측량된 중력자료를 활용하여 정사보정량을 계산하고 정표고를 산정하였다.

정표고, 지오이드고, 타원체고와의 관계에 대한 연구로는 이석배 등

(2009)에서 GPS/leveling자료와 수준점의 정표고로부터 기하학적 지오이드고를 산출하고, EGM2008과 교차분석하여 정확도를 평가하는 연구를 시행하였다. El-Mowafy et al.(2006)은 두바이 지역에 대하여 센티미터 급의 정표고를 실시간으로 산정하기 위해 단일 GPS수신기를 사용하여 타원체고를 획득하고, 이렇게 얻어진 타원체고와 Leveling자료, 그리고 DEM자료를 이용하여 지오이드모델을 결정하여 정표고를 획득하는 연구도 진행되었다.



1.3 연구범위 및 방법

본 논문에서는 상대중력을 이용하여 산악지역(경상북도, 전라남도) 수준점에 대한 정사보정량 계산 및 계산된 정사보정량으로 정표고를 계산하여 산악지역에서의 정사보정량의 특징을 파악하는 것을 목표로 하고 있으므로 본 연구의 순서는 다음과 같고 연구 흐름도는 Fig. 1.1이다.

경상북도지역은 경북대학교에 있는 중력보조점을 절대중력 기점으로 하여 58개의 수준점으로 단일 수준망을 선택하여 상대중력을 측량하였다. 그리고 전라남도지역에서는 한국표준과학연구원내에 설치된 중력보조점을 절대중력 기점으로 하여 22개의 수준점으로 단일 수준망을 선택하여 측량하였다. 이렇게 얻어진 상대중력을 두 측점간의 중력차만을 보여주므로 절대중력으로 사용하기 위해서 상대중력에 대하여 기본적인 보정(조석보정, 기계고보정, drift보정)을 실시하고, Gravsoft의 프로그램을 이용하여 망조정을 실시하여 절대중력으로 계산하였다. 이렇게 계산된 절대중력은 측점의 다양한 물리적인 영향에 의하여 측점에 대한 중력으로 채택하기에는 무리가 있으므로 이를 해결하기 위하여 절대중력에 대한 보정을 실시하였으며, 그에 따른 중력이상을 계산하였다. 정사보정량을 계산하기 위해 기존에 존재하는 기준타원체에 대한 정규중력을 계산하는 것이 필요하다. 측량에 의해 얻어진 상대중력으로부터 계산된 절대중력, 중력이상, 그리고 정규중력으로 정사보정량 계산을 실시하였다.

정사보정량에 수준점 조서에 고시된 수준측량으로 얻어진 표고자료를 더하여 각 수준점에 대하여 물리적 높이 즉, 정표고를 계산하였으며, 계산된 정사보정량을 각 대상지역에 대하여 평가·분석하였으며 공통적으로 적합한 정사보정량 계산법을 선정하였다.

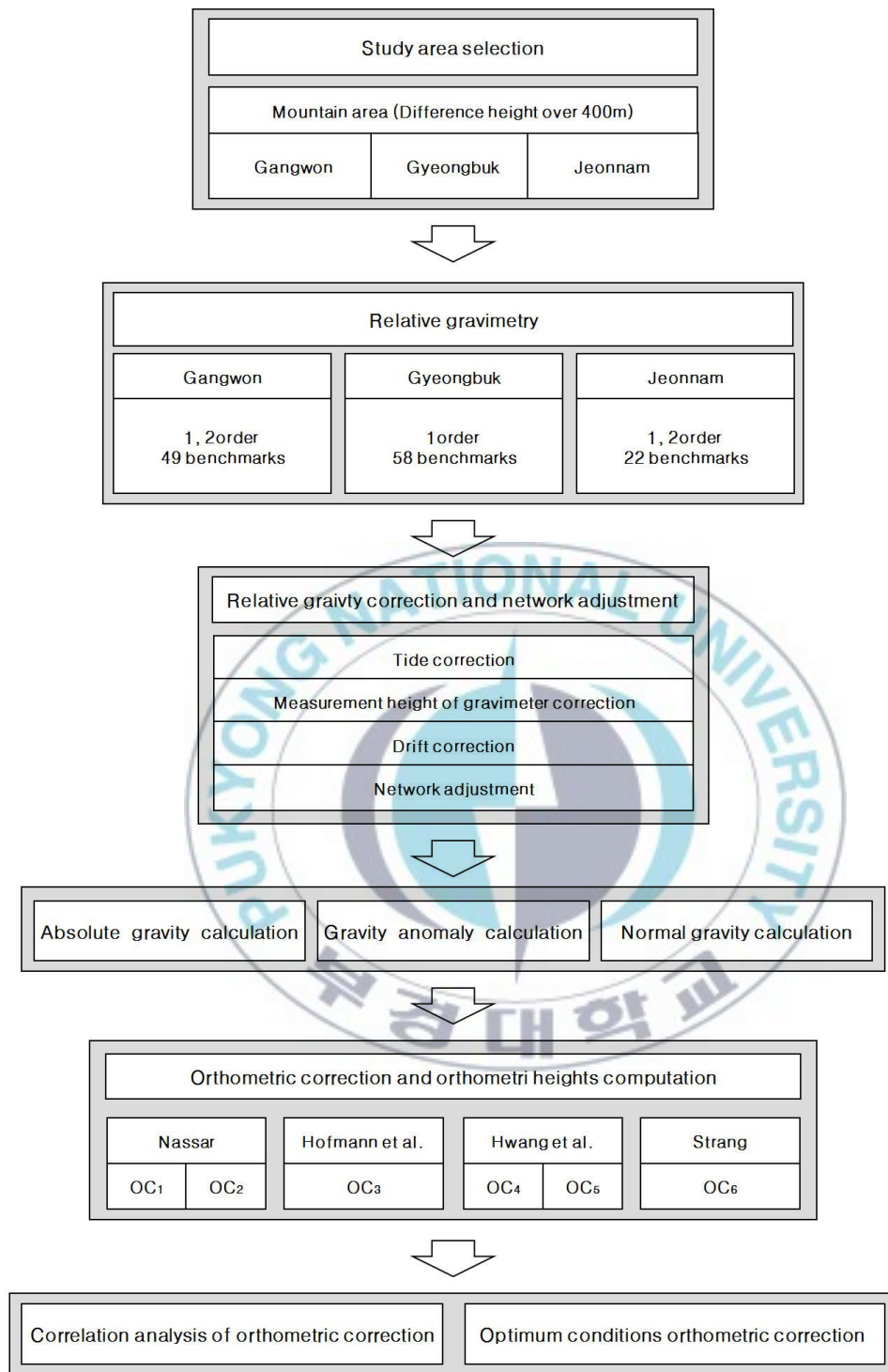


Fig. 1.1 Flow chart of thesis

2. 이론적 배경

2.1 중력

2.1.1 상대중력 자료와 기본보정

상대중력이란 상대중력계를 이용하여 측량된 중력을 말하며 일반적으로 우리가 고등학교 이전의 교과과정에서 배우는 중력 $9.81m/sec^2$ 와 같은 점에서의 고유한 절대중력이 아닌 두 점간의 중력의 차를 의미한다.

상대중력계는 탄성스프링의 중력에 의한 길이변화를 측량함으로써 두 지점간의 상대적인 중력차이를 측량하는 것이다. 그러나 측량된 기계값은 중력이 아닌 스프링의 변화량이므로, 먼저 변화량을 중력으로 변환하고 그 후 조석보정, 기계고 보정, 스프링의 Drift 보정(변이보정), 그리고 폐합오차를 보정하기 위한 망조정을 시행하여 절대중력과 동일한 값으로 사용하기 위한 기본보정을 시행한다(국토지리정보원, 2009).

조석보정은 태양과 달의 인력에 의한 기조력의 변화에 따른 중력의 변화에 대한 보정이다. 기조력의 변화는 1959년 I. M. Longman에 의하여 임의의 고정지점 $P(\phi, \lambda, H)$ 에서 시간변화에 따른 달과 태양의 궤도자료를 사용하여 계산되었다. 본 연구에서는 Longman의 연구를 바탕으로 R. Forsberg(1992)의 Fortran 알고리즘을 사용하는 Gravsoft의 조석보정 프로그램인 Grredu를 사용하여 조석보정을 실시하였다.

실측을 함에 있어서 장비를 원하는 지점에 정확하게 설치할 수 없다는 맹점 때문에 기계고 보정이 필요하다. 기계고에 대한 보정을 위해서는 중력의 수직변화가 필요하고, 대부분의 경우에 대기에서 실질적인 중력경사 $\partial g / \partial H$ 는 이론적인 정규 중력경사 $\partial \gamma / \partial h$ 로 대체되어 사용되고 이 값은

0.3086mGal/m(Hofmann et al., 2005)이다. 본 연구에서는 측량하고자하는 지점과 기계에서 실제 측량이 이루어지는 점간 차이가 비교적 작기 때문에 중력경사가 거의 선형적일 것으로 가정하였고, 계산시 이론적인 정규 중력경사 값을 사용하였다. 만일 측량하고자하는 지점과 기계에서 실제 측량이 이루어지는 점간 차이 0.5m인 경우, 일반적으로 측량하고자 하는 지점이 기계보다 아래에 있으므로 보정된 값은 (+)값을 가지고, 이때 기계고 보정량은 +0.1543mGal(=0.5m×0.3086mGal)이다.

스프링을 이용한 상대중력계는 스프링에 작용하는 지속 하중, 온도변화 등과 같이 수많은 요인에 의하여 시간에 따라 스프링의 길이가 일정하지 않게 된다. 이러한 변화를 보정하기 위하여 상대중력계를 이용한 중력측량은 각 지점에 대한 중력을 반복 측량하여 중력의 차이를 시간변화에 따른 선형적인 변화로 가정하여 기울기를 구하여 보정하고, 차이가 급변하는 중력은 제거되어진다. 중력의 반복측량 방법은 Star method(Fig. 2.1), Ladder method(Fig. 2.2), 그리고 Modified ladder method(Fig. 2.3)등 여러 방법이 있으나 본 연구에서는 Modified ladder method을 사용하여 중력측량을 실시하였고, 식 (2.1)(중력측량 작업규정 제정(안), 2009)으로 시간변화에 따른 선형적인 변화량인 Drift 보정계수 $d_1, d_2, \dots, d_i$ 을 구하고 식 (2.2)으로 두 점간의 Drift 보정량 $D(t_i)$ 을 계산한다.

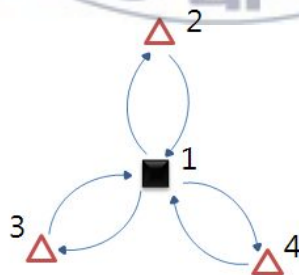


Fig. 2.1 Star method

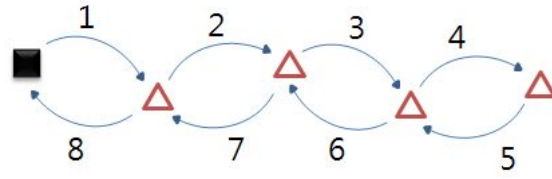


Fig. 2.2 Ladder method

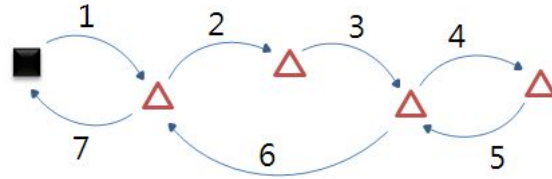


Fig. 2.3 Modified ladder method

$$d_i = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta g_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i^2} \quad (2.1)$$

여기서, $\Delta g_i = g'_i - g_i$

$$\Delta t_i = t'_i - t_i$$

g_i, g'_i : 측정점 i 에서 왕복측량 중력

t_i, t'_i : 측정점 i 에서 왕복측량 시각

n : 왕복측량 대회

$$D(t_i) = d_1(t_i - t_0) + d_2(t_i - t_0)^2 \cdots \approx d_1(t_i - t_0) \quad (2.2)$$

여기서, t_0 : 출발점에서의 측량 시각

$d_1, d_2, \cdots, d_i$: Drift 보정 계수

2.1.2 망조정

상대중력 측량에 의한 측량값은 연속된 측점사이의 중력차이지만 계통 오차(폐합차가 0이 되지 않음으로 발생하는 오차)를 가지므로 오차를 최소화하기 위해 노선측량과 마찬가지로 망조정이 필요하다. 일반적으로 망조정을 위해서 2개 이상(부득이한 경우 1개)의 절대중력점을 필요로 하고, 최소제곱법에 의하여 망조정을 실시하였다. 식 (2.3)은 한 점에서의 관측방정식이고, 두 점간의 관측방정식은 다음 식 (2.4)과 같다.

$$g_i + v_i = \bar{g}_i + N_0 + D(t_i) \quad (2.3)$$

여기서, $\bar{g}_i$: 측점 i 에서 보정된 상대중력

N_0 : 편위

$D(t_i)$: 측점 i 에서 drift 보정량

g_i : 측점 i 에서 측량된 상대중력

v_i : 측점 i 의 잔차

$$\begin{aligned} \Delta g_{i,j} + v_{i,j} &= \Delta \bar{g}_{i,j} + (N_0 - N_0) + [D(t_j) - D(t_i)] \\ \Delta \bar{g}_{i,j} &= \Delta g_{i,j} + [D(t_i) - D(t_j)] + v_{i,j} \\ &= \Delta g_{i,j} + d_1(t_i - t_j) + v_{i,j} \end{aligned} \quad (2.4)$$

여기서, t_i : 측점 i 에서 측량시간

t_j : 측점 j 에서 측량시간

$\Delta \bar{g}_{i,j}$: 측점 i, j 에서 보정된 중력

$\Delta g_{i,j}$: 측점 i, j 에서 측량된 중력

따라서 관측으로 얻어진 중력을 측지학에서 널리 이용되고 있는 최소

제곱법을 통하여 계산되어진다. 여기서 정규방정식 식 (2.5)으로부터 유도되는 행렬 X 의 최소제곱 추정량은 식 (2.6)이고, 여기에 선형적인 오차에 대한 무게 공분산행렬 W_{ϵ} 을 적용한 최소제곱 추정량은 식 (2.7)이다.

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta g_{i,j} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ 0 \cdots 0 -1 \ 1 \ 0 \cdots 0 \ (t_i - t_j) \ 1 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_i \\ g_j \\ \vdots \\ g_n \\ d_1 \\ v_{i,j} \end{bmatrix}$$

$$Y = AX$$

$$(A^T A)X = A^T Y \quad (2.5)$$

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (2.6)$$

$$X = (A^T W_{\epsilon} A)^{-1} A^T W_{\epsilon} Y \quad (2.7)$$

2.1.3 정규중력

정규중력(γ)이란 실측에 의해 얻어진 중력(g)이 아닌 모든 지점에서 동일한 포텐셜을 가지는 지구형상에 대한 수학적 모델인 기준타원체(GRS67, GRS80, WGS84)면에서 위도변화에 따른 이론적인 중력으로, 주로 International Association of Geodesy (IAG)에서 기준타원체를 기반으로 하는 International Gravity Formula (IGF)로 계산되어진다(Nassar, 1977) (Tosuboi, 1965).

정규중력에 대해서는 이미 1907년에 USC & GS(United States Coast

and Geodetic Survey)에서 정규중력에 대한 식 (2.8)을 채택하였고, 이후 GSC(Geodetic Survey of Canada)에서도 정규중력에 대한 식으로 USC & GS formula를 채택하였다(Nassar, 1977).

$$\gamma_A = \gamma_{45^\circ} (1 - c_1 \cos 2\phi_A + c_2 \cos^2 2\phi_A) \quad (2.8)$$

여기서, γ_A : 타원체면상의 위도 ϕ_A 에 대한 계산된 정규중력

γ_{45° : 위도 45° 일때 정규중력($=980624mGal$)

ϕ_A : 기원타원체상의 A점 위도

c_1 : 계수 ($=0.002644$)

c_2 : 계수 ($=0.000007$)

정규중력에 대한 1967년에 채택된 International formula는 식 (2.9)이고, USC & GS formula 식 (2.8)과의 차이는 다음 식 (2.10)에서 볼 수 있다.

$$\gamma_A' = \gamma_E (1 + c_1' \sin^2 \phi_A - c_2' \sin^2 2\phi_A) \quad (2.9)$$

여기서, γ_A' : 기원타원체면상의 위도 ϕ_A 에 대한 계산된 정규중력

γ_E : 기원타원체상의 적도에서 정규중력($=978031.8mGal$)

ϕ_A : 기원타원체상의 A점 위도

c_1' : 계수 ($=0.0053024$)

c_2' : 계수 ($=0.0000059$)

$$\gamma_A = \gamma_{45^\circ} (1 - c_1 \cos 2\phi + c_2 \cos^2 2\phi) \text{ (USC \& GS formula)}$$

$$\gamma_A = \gamma_{45^\circ} [(1 - c_1 + c_2) + 2c_1 \sin^2 \phi - c_2 \sin^2 2\phi]$$

$\phi = 0^\circ$ 대입

$$\gamma_{Eq} = \gamma_{45^\circ} (1 - c_1 + c_2)$$

$$\gamma_A = \gamma_{Eq} \left[1 + \left(\frac{2c_1}{1 - c_1 + c_2} \right) \sin^2 \phi - \left(\frac{c_2}{1 - c_1 + c_2} \right) \sin^2 2\phi \right]$$

$$\gamma_A = 978038.095 (1 + 0.005302 \sin^2 \phi_A - 0.000007 \sin^2 2\phi_A) (mGal)$$

$$\delta\gamma_A = \gamma_A' - \gamma_A = (-6.295 + 0.358 \sin^2 \phi_A + 1.076 \sin^2 2\phi_A) (mGal) \quad (2.10)$$

식 (2.10)으로 한국(약 $33^\circ \sim 38^\circ$)에 대하여 계산하여 보면, 위도에 따라 $-5.102 \sim -5.919 mGal$ 의 차이를 보인다.

GRS80 타원체면에 대한 Moritz의 간편식(1980)은 다음 식 (2.11)과 같고, 식 (2.11)에 $\gamma_E = 978032.7 (mGal)$ 과 $f_4 = 0.0000232$ 를 적용한 식 (2.12)이 1980 International formula 이다(Moritz, 2000).

$$\gamma_A = \gamma_E \left(1 + f^* \sin^2 \phi_A - \frac{1}{4} f_4 \sin^2 2\phi_A \right) \quad (2.11)$$

$$\text{여기서, } f_4 = \frac{1}{2} f^2 + \frac{5}{2} f m$$

f : flattening(=0.00335281068118)

ω : 각속도(=7292115 $\times 10^{-11} rad/s$)

a : GRS80의 장축(=6378137m)

b : GRS80의 단축(=6356752.3141m)

GM : 지심인력 상수(=3986005 $\times 10^8 m^3/s^2$)

$$m = \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} = 0.00344978600308$$

$$f^* = \frac{\gamma_P - \gamma_E}{\gamma_E} = \frac{g_P - g_E}{g_E} = 0.005302440112$$

γ_P : 극에서의 정규중력(=983218.63685mGal)

$$\gamma_A = 9780.327(1 + 0.0053024 \sin^2 \phi_A - 0.0000058 \sin^2 2\phi_A) (mGal) \quad (2.12)$$

Hofmann et al.(2005)에서 정의된 타원체에 대한 중력은 식 (2.13)이다.

$$\gamma = |\gamma_{u,0}| = \frac{GM}{a \sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \cdot \left[1 + \frac{\omega^2 a^2 E}{GM} \frac{q'_0}{q_0} \left(\frac{1}{2} \sin^2 \beta - \frac{1}{6} \right) - \frac{\omega^2 a^2 b}{GM} \cos^2 \beta \right] \quad (2.13)$$

여기서, $E = \sqrt{a^2 - b^2}$

$$q = \frac{1}{2} \left[\left(1 + 3 \frac{u^2}{E^2} \right) \tan^{-1} \frac{E}{u} - 3 \frac{u}{E} \right]$$

$$q_0 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + 3 \frac{b^2}{E^2} \right) \tan^{-1} \frac{E}{b} - 3 \frac{b}{E} \right]$$

u : 타원 조화 좌표 ($= z / \cos \theta$)

따라서, 식 (2.13)에 $\sqrt{u^2 + E^2} = \sqrt{b^2 + E^2} = a$, $e' = \frac{E}{b} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{b}$ 을 대입하면, 식 (2.14)이 되고, 적도($\beta = 0^\circ$)와 극($\beta = \pm 90^\circ$)에서는 식(2.15)과 식 (2.16)이 된다.

$$\gamma_A = \frac{GM_A}{a \sqrt{a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta}} \cdot \left[\left(1 + \frac{m}{3} \frac{e' q'_0}{q_0} \right) \sin^2 \beta + \left(1 - m - \frac{m}{6} \frac{e' q'_0}{q_0} \right) \cos^2 \beta \right] \quad (2.14)$$

$$\gamma_E = \frac{GM}{ab} \cdot \left(1 - m - \frac{m}{6} \frac{e' q'_0}{q_0} \right) \quad (2.15)$$

$$\gamma_P = \frac{GM}{a^2} \cdot \left(1 + \frac{m}{3} \frac{e' q'_0}{q_0} \right) \quad (2.16)$$

따라서 식 (2.15), 식 (2.16)에 의해 식 (2.14)은 식 (2.17)이 되고, Fig. 2.4에서 β 와 ϕ 관계는 $\tan \beta = \frac{b}{a} \tan \phi$ 임을 알 수 있다.

$$\gamma_A = \frac{a\gamma_P \sin^2 \beta_A + b\gamma_E \cos^2 \beta_A}{\sqrt{a^2 \sin^2 \beta_A + b^2 \cos^2 \beta_A}} = \frac{a\gamma_E \cos^2 \phi_A + b\gamma_P \sin^2 \phi_A}{\sqrt{a^2 \cos^2 \phi_A + b^2 \sin^2 \phi_A}} = \gamma_E \frac{1 + k \sin^2 \phi_A}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi_A}} \quad (2.17)$$

여기서, k : 정규중력 상수 $(= \frac{b\gamma_P}{a\gamma_E} - 1)$

γ_E : 적도에서의 중력

e : First numerical eccentricity $(= \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}})$

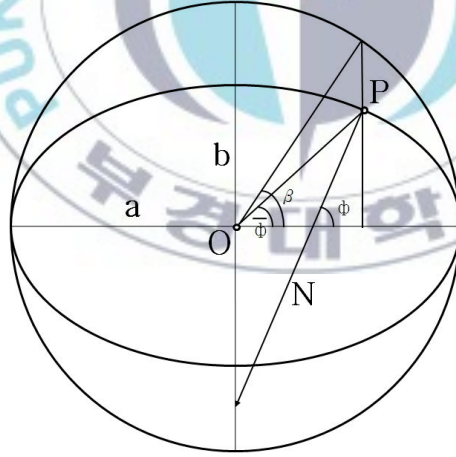


Fig. 2.4 Ellipsoidal latitude ϕ , geocentric latitude $\bar{\phi}$, reduced (ellipsoidal harmonic) latitude β for a point P on the ellipsoid (Hofmann et al., 2005)

Hofmann et al.(2005)에서는 앞의 변수들을 다음 Table 2.1과 같이 제안하였다.

Table 2.1 Physical and geometrical constants required to compute normal gravity using Somigliana's closed formula(Featherstone, 1998)

	GRS67	GRS80	WGS84
$\gamma_E(mGal)$	978031.84558	978032.67715	978032.53359
k	0.001931663383	0.001931851353	0.00193185138639
e^2	0.00669460532856	0.00669438002290	0.00669437999014

정규중력을 계산하는 방법 중에는 식(2.17)보다는 정확도가 낮지만, 일반적인 중력계의 읽음 값 오차의 크기가 정확도보다 더 크기 때문에 지구 물리학적으로 사용하는데 충분한 정확도를 가지는 Chebyshev의 근사식이 있다.

식 (2.18)은 상대정확도가 $1\mu m/sec^2$ 인 Chebyshev의 근사식으로, 이 식의 변수는 다음 Table 2.2이다.

$$\gamma_A = \gamma_E(1 + \beta \sin^2 \phi_A + \beta_1 \sin^2 2\phi_A) \quad (2.18)$$

Table 2.2 Physical and geometrical constants required to compute normal gravity using second-order Chebyshev approximate formula(Featherstone, 1998)

	GRS67/IGF67	GRS80/IGF80
$\gamma_E(mGal)$	978031.8	978032.7
β	0.0053024	0.0053024
β_1	-0.0000059	-0.0000058

식 (2.19)은 상대정확도가 $10^{-3}\mu m/sec^2$ 인 Chebyshev의 근사식으로, 이

식의 변수는 다음 Table 2.3이다.

$$\gamma_A = \gamma_E(1 + \alpha_0 \sin^2 \phi_A + \alpha_1 \sin^4 \phi_A + \alpha_2 \sin^6 \phi_A + \alpha_3 \sin^8 \phi_A) \quad (2.19)$$

Table 2.3 Physical and geometrical constants required to compute normal gravity using eighth-order Chebyshev approximate formula(Featherstone, 1998)

	GRS67	GRS80
$\gamma_E(mGal)$	978031.8459	978032.6772
α_0	0.0052789660	0.0052790414
α_1	0.0000232725	0.0000232718
α_2	0.0000001262	0.0000001262
α_3	0.0000000007	0.0000000007

2.1.4 절대중력 보정, 중력이상

기본보정 및 망조정이 끝난 후의 상대중력은 절대중력으로 변환되어졌으나 아직 완전히 한 지점에 대한 절대중력을 나타내기에는 어려움이 있다. 중력측량을 시행하는 각 지점에서는 지점마다 다양한 물리적인 영향이 존재하므로 각 지점에서의 중력을 동일한 조건으로 만들기 위해서 물리적인 영향을 고려한 보정이 필요하고 본 연구에서는 Free-air 보정, Bouguer 보정을 계산하였다(박영수 등, 2006).

그리고 보정을 통해서 계산되어진 절대중력과 정규중력의 차이가 중력이상이다. 그러나 그 이전에 정규중력은 인공위성에 의한 중력측량에 의한 자료를 이용하여 얻어진 것이므로 지구의 대기질량에 대한 영향을 포함하고 있다. 그러므로 중력보정을 하기 전에 대기질량효과를 제거할 필요성이 있다(이영철, 2008).

지표상에서 실측에 의해 중력을 얻을 때는 위성에 의한 중력측량과는

달리 지상의 대기에 대한 영향이 상쇄되어진 값을 얻게 된다. 그러므로 중력이상을 계산하기 위해서는 정규중력에 포함된 대기질량효과를 제거함으로서 중력이상은 대기질량효과의 크기만큼 작게 계산된다. 박영수 등 (2006)에서 IUGG의 제공한 간편식을 비교해본 결과, 고도 2000m이내에서 잘 맞는 식 (2.20)가 국내에서는 적합하지만, 국제적인 표준 데이터베이스를 위해 10km까지 무난한 식 (2.21)을 추천하였다.

$$g_a = 0.87 - 0.0000965h \text{ (mGal)} \quad (2.20)$$

$$g_a = 0.874 - 9.9 \times 10^{-5}h + 3.56 \times 10^{-9}h^2 \text{ (mGal)} \quad (2.21)$$

Free-air 보정이란 중력에 큰 영향을 주는 요소 중 하나인 높이에 대한 보정으로, 지표상의 한 점에서의 인력은 지구중심에서부터 거리 제곱의 역수에 대한 거리에 따라 감소된다는 개념(Tsuboi, 1983)을 사용하여 실측 중력 자료에 각 수준점의 표고에 대한 영향을 제거하고, 일정한 기준면에 대한 중력으로 계산하는 것이 필요하다. Fig. 2.5과 같이 지구를 구라고 가정하였을 때, 식 (2.22)은 지오이드에서의 중력과 임의의 한 점에서의 중력 간의 관계를 보여주고(Tsuboi, 1983), 식 (2.23)은 식 (2.22)을 테일러 전개 식으로 나타내고 우변의 3항부터 생략한 것이다(Hofmann et al., 2005).

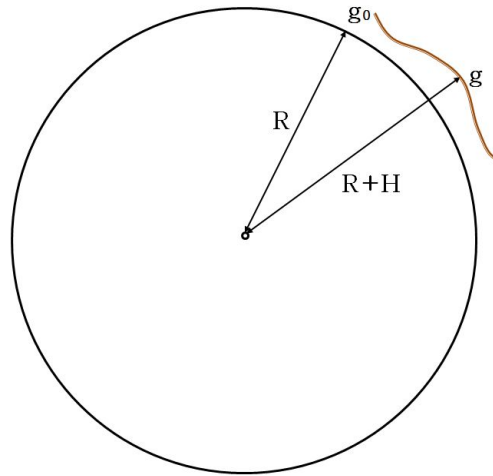


Fig. 2.5 Geocentric distance to geoid and surface on a spherical earth

$$g_0 = g \frac{(R+H)^2}{R^2} = g \left(1 + \frac{H}{R} \right)^2 \approx g + \frac{2g}{R} H \quad (2.22)$$

여기서, H : g 가 작용하는 점의 정표고(m)

g_0 : 지오이드에서의 중력

g : 지표상 한 점의 중력

$$g_0 = g - \frac{\partial g}{\partial H} H + \frac{\partial^2 g}{\partial H^2} H^2 \dots \approx g - \frac{\partial g}{\partial H} H \quad (2.23)$$

실질적인 중력경사 $\partial g / \partial H$ 는 타원체고 h 에 대한 이론적인 정규 중력경사 $\partial \gamma / \partial h$ 로 대체되면 식 (2.23)은 식(2.24)이 된다.

$$g_0 \approx g - \frac{\partial \gamma}{\partial h} H \quad (2.24)$$

결국 식 (2.22)에서 $\frac{2g}{R}H$ 과 식 (2.24)에서 $-\frac{\partial\gamma}{\partial h}H$ 는 $0.3086H(mGal)$ 이고, 이 값은 지오이드면 위의 지각이 수학적으로 이미 제거되어 질량의 영향이 없는 상태에서 Free-air 보정량 g_f 이다.

중력 측량점 근처의 지각은 지오이드면 위에 존재하고, 이 지각에 의한 인력이 발생하므로 인력에 대한 영향을 보정하는 것이 Bouguer 보정이다. Fig. 2.6의 지점 P 에서 작용하는 인력은 식 (2.25)으로 계산되고(Tsuboi, 1983), 이때, Fig. 2.7과 같이 $z \rightarrow H$ 이고 $a \rightarrow \infty$ 인 경우 지점 P 에서 작용하는 인력은 식 (2.26)이다.

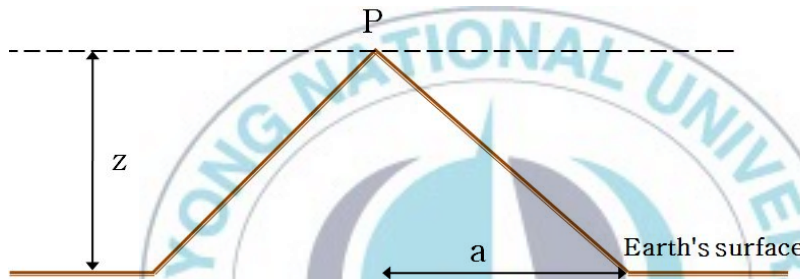


Fig. 2.6 An isolated circular conical mountain(Tsuboi, 1983)

$$\begin{aligned}
 g_b &= 2\pi G \rho \int_0^a \frac{rz}{(r^2 + z^2)^{3/2}} dr \\
 &= 2\pi G \rho z \left[1 - \frac{z}{\sqrt{(a^2 + z^2)}} \right] \quad (2.25)
 \end{aligned}$$

여기서, z : 일정 기준면에서부터 지점 P 까지 높이(m)

ρ : 지각의 밀도

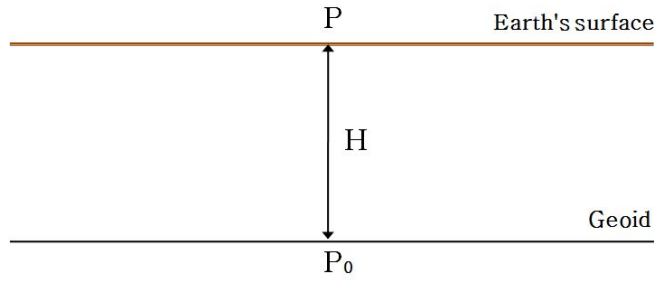


Fig. 2.7 Bouguer plate($z \rightarrow H$, $a \rightarrow \infty$)

$$g_b = 2\pi G \rho H \quad (2.26)$$

식 (2.26)에 정규밀도 $\rho = 2.67 \text{ g cm}^{-3}$ 을 대입하면, Bouguer 보정량 Δg_b 는 식 (2.27)이다.

$$g_b = 0.1119 H (\text{mGal}) \quad (2.27)$$

따라서 중력이상이란 측량된 중력에 보정을 한 후 정규중력과의 차를 의미한다. Free-air 이상 Δg_f 은 측량된 중력 g , 대기질량 보정 g_a , 그리고 Free-air 보정 g_f 과는 다음 식 (2.28)과 같은 관계를 가진다.

$$\Delta g_f = (g + g_a + g_f) - \gamma \quad (2.28)$$

여기서, γ : 정규중력

Bouguer 이상 Δg_b 은 측량된 중력 g , 대기질량 보정 g_a , Free-air 보정 g_f , 그리고 Bouguer 보정 g_b 과는 다음 식 (2.29)과 같은 관계를 가진다.

$$\Delta g_b = (g + g_a + g_f + g_b) - \gamma \quad (2.29)$$

2.2 높이체계

2.2.1 타원체고

끊임없이 변화하고 있는 지구의 형상을 결정하기 위해서는 지속적인 관측을 통하여 지구의 형상과 가장 유사한 기준타원체를 정의하는 것이 필요하다. ITRS(International Terrestrial Reference System)에서 기준타원체는 4개의 상수(a, f, γ, ω)를 결정함으로서 완전히 결정되어 질 수 있다. ITRS는 공간상에서 자전하는 지구에 대한 전 세계적인 공간 기준계이고, a 는 타원체의 장축, f 는 편평율, γ_E 는 적도지역에서 정규중력, 그리고 ω 는 각속도이다.

그러므로 타원체에서부터 높이인 타원체고란 중력과는 독립적인 기하학적인 값이고, 다음 식 (2.30)과 같은 정표고와의 관계를 가진다. 식 (2.30)을 보면, 수직편차에 대하여 무시하였기 때문에 정표고는 타원체고와 지오이드고 차와 정확히 같지 않다. 그럼에도 불구하고 실질적으로는 거의 유사한 값을 가진다.

$$H \approx h - N \quad (2.30)$$

여기서, H : 정표고

h : 타원체고

N : 지오이드고

위성에 의한 GPS의 활용이전에는, 실질적으로 타원체고를 획득하는 것이 측지학을 연구하는 사람이외에는 거의 불가능하였다. 그러나 현재 GPS 수신기는 측량된 측지학적 위도, 경도, 그리고 타원체고를 제공한다. 그리하여 오늘날에는 타원체고가 손쉽게 얻어질 수 있게 되었다.

이와 같은 타원체고는 일반적으로 타원체가 아닌 지오이드에서 높이인 정표고를 대신하여 사용되어질 수 없고, 미국지역에서 지오이드와 타원체 모델인 GRS80의 차이는 약 2m정도이다(Meyer et al., 2006).

오늘날 많이 사용되고 있는 타원체모델 중 하나인 GRS80은 1979년 Canberra에서 개최된 제 17차 IUGG(International Union of Geodesy and Geophysics)총회에서 채택된 기준타원체로 제 14차 총회에서 채택된 GRS67가 지구의 크기, 형상, 그리고 중력장에 대하여 더 이상 충분한 정확도를 가지지 못함에 따라 수많은 측지·지구물리·천문학 자료를 통해 등포텐셜 타원체 이론을 기반으로 한 GRS80이 제안되었다. Table 2.4은 GRS80의 매개변수이다.

Table 2.4 Parameters of the GRS80

Parameter	Description	Value
a	semimajor axis of the ellipsoid	6378137 m
J_2	dynamical form factor	108263×10^{-8}
GM	geocentric gravitational constant, including mass of the atmosphere	$3986005 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$
ω	angular velocity	$7292115 \times 10^{-11} \text{ rad/s}$

WGS84는 GRS80를 기반으로 한 것이나 매개변수 값이 조금 차이가 있다. Table 2.5은 WGS84의 매개변수를 보여준다.

Table 2.5 Parameters of the WGS84

Parameter	Description	Value
a	semimajor axis of the ellipsoid	6378137 m
$\overline{C}_{20}$	normalized second degree zonal harmonic coefficient of the gravitational potential	$-484.16685 \times 10^{-6}$
GM	geocentric gravitational constant, including mass of the atmosphere	$3986004.418 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$
ω	angular velocity	$7292115 \times 10^{-11} \text{ rad/s}$

2.2.2 Geopotential number와 역표고(Dynamic height)

높이에 대한 개념 중 역표고는 기하학적으로는 아무런 의미를 가지지 않지만 정표고를 정의하기 위한 중요한 개념으로, 역표고를 정의하기 위해서는 먼저 포텐셜의 변화량(δW)에 대한 이해가 필요하다. 포텐셜의 변화량은 수준측량에 의한 표고차(δn)와 중력측량 값(g)의 곱으로 식 (2.31)과 같이 정의된다.

$$-\delta W = g \delta n = g' \delta H_B \quad (2.31)$$

여기서, g' : 측점 B 에서의 중력

수준측량에 의한 표고(기하학적 높이)차는 포텐셜 변화량으로 표현이 가능하고 식 (2.32)으로 나타내어진다.

$$W_B - W_A = - \sum_A^B \delta n \cdot g = - \int_A^B g \, dn \quad (2.32)$$

여기서, W_A : 지점 A 에서의 포텐셜

W_B : 지점 B 에서의 포텐셜

임의 두 지점간의 포텐셜 변화량에 대한 식 (2.32)을 사용하여 지점 A에서 Geopotential number(C_A)는 식 (2.33)이고, Geopotential number에 대한 지점 A의 역표고(H_A^d)는 식 (2.34)이다.

$$\int_{A_0}^A g \, dn = W_{A_0} - W_A = C_A \quad (2.33)$$

$$H_A^d = \frac{C_A}{\gamma_A} \quad (2.34)$$

여기서, W_{A_0} : 지점 A_0 에서의 포텐셜

C_A : 지점 A에서의 Geopotential number

지점 A, B간의 역표고차를 수준측량에 의한 표고로 계산하기 위해서는 역표고 보정이 요구되고 식 (2.34)에 의하여 역표고 보정은 식 (2.35)로 유도된다.

$$\begin{aligned} \Delta H_{AB}^d &= H_B^d - H_A^d = \frac{1}{\gamma} (C_B - C_A) \\ &= \frac{1}{\gamma} \int_A^B (g - \gamma + \gamma) \, dn = \int_A^B dn + \int_A^B \frac{g - \gamma}{\gamma} \, dn \\ &= \Delta n_{AB} + DC_{AB} \end{aligned} \quad (2.35)$$

여기서, Δn_{AB} : 지점 A, B간의 수준측량 표고차

$$DC_{AB} : \text{지점 A, B간의 역표고 보정} (= \int_A^B \frac{g - \gamma}{\gamma} \, dn)$$

2.2.3 정표고(Orthometric height)

Heiskanen et al.(1967)에서 정표고란 “해수면 다시 말하자면, 지오이드에서부터 높이”로 정의하고 있으며, National Resources Canada(2008)에서는 “지오이드에 대한 연직선상의 지표 한 지점과 지오이드간의 거리”라고 정의한다. 여기서 연직선(plumb line)이란 “지구중력장에 의한 모든 등포텐셜면에 수직으로 교차하는 선”이다.

Fig. 2.8을 보면, 지구표면의 지점 A에서 지오이드상의 지점 A_0 까지 이어진 연직선분의 길이를 지점 A의 정표고라 하고, 그 지점의 Geopotential number에 대하여 식 (2.36)과 같은 관계를 보인다.

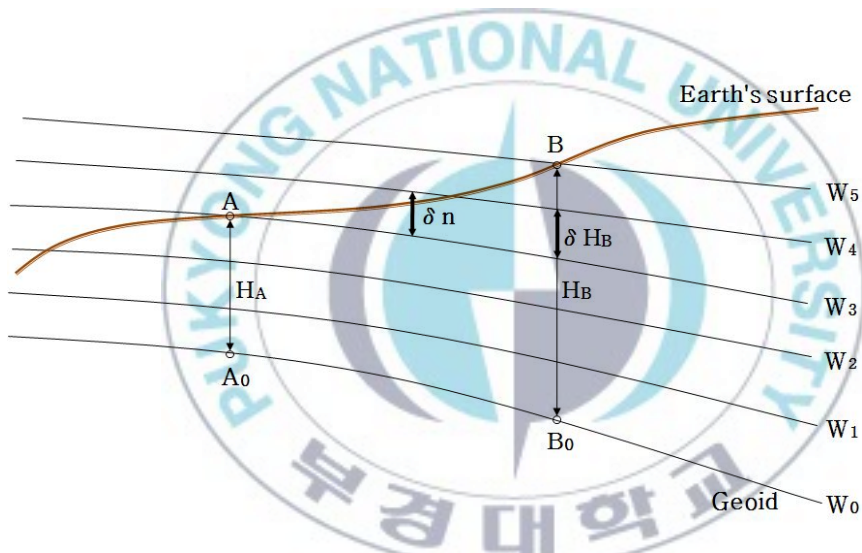


Fig. 2.8 Leveling and orthometric height
on points A, B(Hofmann et al., 2005)

$$C_A = \int_0^{H_A} g dH \quad (2.36)$$

식 (2.36)에 지점 A의 연직선분상의 평균중력 식 (2.37)을 적용하면 식

(2.38)으로 Geopotential number와 정표고간의 관계가 정의되며, 정표고차 (ΔH_{AB})는 식 (2.39)이다.

$$\bar{g}_A = \frac{1}{H_A} \int_0^{H_A} g dH \quad (2.37)$$

$$\bar{g}_A = \frac{C_A}{H_A} \quad (2.38)$$

$$\Delta H_{AB} = H_B - H_A = \frac{C_B}{\bar{g}_B} - \frac{C_A}{\bar{g}_A} \quad (2.39)$$

이로서 정표고를 얻기 위해서는 연직선분상의 평균중력으로부터 계산이 된다는 것을 알 수 있으나, 생각보다 정표고와 평균중력은 독립적이다. 왜냐하면 여러 가지 요인에 의하여 평균중력은 정표고의 영향을 벗어난다. 즉, 지점 A에서 지중 분포를 알기 어려울뿐더러 그에 따른 밀도의 변화에 의한 연직선분상의 지중 중력을 직접 측량하기는 거의 불가능하기 때문이다. 그리하여 식 (2.37)보다 더 실질적인 수식은 식 (2.40)이다.

$$\bar{g}_A = \frac{1}{H_A} \int_0^{H_A} g(z) dz \quad (2.40)$$

근사적으로 평균 밀도를 알면 이론적으로 연직선분상의 평균중력을 식 (2.41)으로 계산할 수 있으며, 정규중력 γ 의 구배($\frac{\partial \gamma}{\partial h}$)와 평균밀도(ρ)를 각각 $0.3086 mGal$ 과 $2.67 g/cm^3$ 으로 가정하면 식 (2.42)을 얻을 수 있고, 평균중력은 식 (2.43)으로 표현된다.

$$\frac{\partial g}{\partial h} = \frac{\partial \gamma}{\partial h} + 4\pi G\rho \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial g}{\partial h} = -0.3086 + 0.2238 = -0.0848 (Gal/km) \quad (2.42)$$

$$\bar{g}_A = \frac{1}{H_A} \int_0^{H_A} [g_A + 0.0848(H_A - z)] dz = g_A + 0.0424 H_A \quad (2.43)$$

2.3 정사보정량

수준점의 표고를 측량하기 위해서, 일반적으로 수준측량에 의해 얻어진 표고를 주로 사용하나, 실제적으로는 대상지역의 다양한 조건에 의한 중력의 변화로 포텐셜 차이를 기준으로 하는 높이 즉, 정표고가 대상지역에서 각 수준점마다 다양하게 변화하므로 수준측량에 의한 표고차가 동일하더라도 정표고차는 다양하게 변할 수 있게 된다. 특히, 산악지역에서는 지형의 높낮이변화가 심하고 그에 따른 포텐셜 차이가 발생하므로 정표고 결정을 위한 정사보정량(Orthometric Correction) 계산이 꼭 필요하며, 다음 식 (2.44)과 같이 나타낼 수 있다.

$$OC_{AB} + \Delta n_{AB} = (H_B - H_A) = \Delta H_{AB} \quad (2.44)$$

식 (2.44)을 보면, 측지학적 높이인 수준측량에 의한 표고차(Δn_{AB})를 물리적인 높이차인 정표고차($H_B - H_A = \Delta H_{AB}$)로 나타내기 위한 보정량으로 정의가 가능하다. 그리고 Fig. 2.8과 Fig. 2.9에서 식 (2.44)의 변수인 정표고와 수준측량에 의한 표고차에 대한 개념을 볼 수 있다.

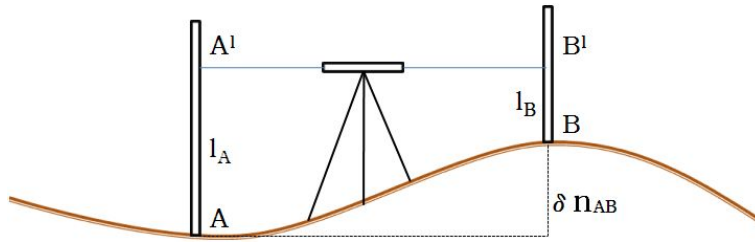


Fig. 2.9 Spirit leveling(Hofmann et al., 2005)

2.3.1 Nassar, M.M.의 정사보정량

1977년 UNB Technical Report에 실린 Gravity Field and Levelled Heights in Canada에서 제안된 정규중력을 기본변수로 한 정사보정량 계산법으로 기존의 USC & GS의 정사보정량 식(2.45)을 재 공식화한 것이며 식(2.46)과 같다.

$$OC_{AB} = -2\bar{n}_{AB} c_1' \sin 2\bar{\phi}_{AB} \left[1 + \left(c_1' - \frac{2c_2'}{c_1'} \right) \cos 2\bar{\phi}_{AB} \right] \Delta\phi_{AB} \quad (2.45)$$

여기서, $\bar{n}_{AB}$: 수준측량에 의해 얻어진 표고의 평균 $(= \frac{1}{2}(n_A + n_B))$

$\bar{\phi}_{AB}$: 평균 측지위도 $(= \frac{1}{2}(\phi_A + \phi_B))$

$\Delta\phi_{AB}$: 측지위도 차 $(= \phi_B - \phi_A)$

c_1 : 계수 $(=0.002644, \text{USC \& GS formulas})$

c_2 : 계수 $(=0.000007, \text{USC \& GS formulas})$

$$OC_{AB} = -\frac{\bar{n}_{AB}}{\gamma_{AB}} \Delta\gamma_{AB} - \bar{n}_{AB} \Delta\phi_{AB} c_1^2 \sin 4\bar{\phi}_{AB} \quad (2.46)$$

여기서, $\bar{\gamma}_{AB}$: A, B 두 점의 평균 정규중력 $(= \frac{1}{2}(\gamma_A + \gamma_B))$

$\Delta\gamma_{AB}$: 정규중력 차 ($=\gamma_B-\gamma_A$)

실질적으로 두 번째 항은 극단적인 경우의 조건 식(2.47)을 적용하면 $-0.0041mm$ 로 계산되고 이 값은 무시하기 충분히 작으므로 다음 식 (2.48)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\bar{\phi}_{AB} &= 67^\circ 30' \\ \Delta\phi_{AB} &= 1 \text{ arc min (거리 } 2km \text{에 대한)} \\ \bar{n}_{AB} &= 2km\end{aligned}\tag{2.47}$$

$$OC_{AB} = -\frac{\bar{n}_{AB}}{\gamma_{45^\circ} \Delta\phi_{AB}} \Delta\gamma_{AB}\tag{2.48}$$

최종적으로, 식 (2.48)에 대하여 $\bar{n}_{AB} = \frac{1}{2}(n_A + n_B) = n_A + \frac{1}{2} \Delta n_{AB}$, $\Delta\gamma_{AB} = \gamma_B - \gamma_A$ 를 적용하여 정리하면 다음 식 (2.49)이 된다.

$$OC_{AB,1} = \frac{1}{\gamma_{AB}} [n_A(\gamma_A - \gamma_B) + \Delta n_{AB}(\bar{\gamma}_{AB} - \gamma_B)]\tag{2.49}$$

그리고, Nassar의 실측 중력에 의한 정규보정량 제안식은 식 (2.50)과 같다.

$$OC_{AB,2} = \frac{1}{\gamma_{AB}} [n_A(\bar{g}_A - \bar{g}_B) + \Delta n_{AB}(\bar{g}_{AB} - \bar{g}_B)]\tag{2.50}$$

여기서, $\bar{g}_A$: 수준점 A의 연직선 평균중력($=g_A + 0.0424 H_A$)

$\bar{g}_B$: 수준점 B의 연직선 평균중력($= g_B + 0.0424 H_B$)

$\bar{g}_A = g_A + 0.0424 H_A$: 지각의 밀도가 $2.67g/cm^3$ 라고 가정

g_A, g_B : 각 수준점(A, B)에서 실측중력

$\bar{g}_{AB}$: A, B두 점의 평균 실측중력($= \frac{1}{2}(g_A + g_B)$)

2.3.2 Hofmann, B.W. and Moritz, H.의 정사보정량

정표고 산정을 위한 정사보정량 계산중 기본적인 수식으로 앞 절 2.2.2의 역표고와 앞 절 2.2.3의 정표고 개념에서 유도되어진다.

Fig. 2.10의 두 지점 A, B간의 정표고 차 ΔH_{AB} 는 다른 기타 오차가 없다고 하면, 식 (2.51)과 같이 전개된다.

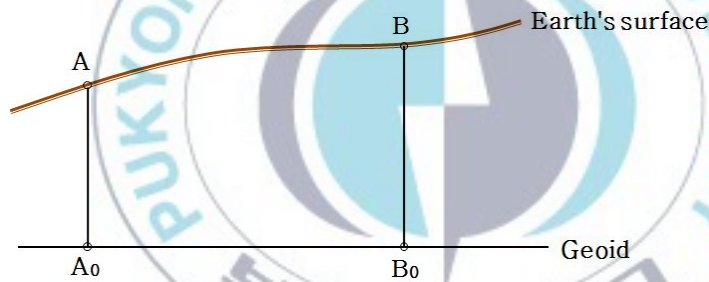


Fig. 2.10 Orthometric height and dynamic height(Hofmann et al., 2005)

$$\begin{aligned}\Delta H_{AB} &= H_B - H_A = H_B - H_A - H_B^d + H_A^d + H_B^d - H_A^d \\ &= \Delta H_{AB}^d + (H_B - H_B^d) - (H_A - H_A^d)\end{aligned}\quad (2.51)$$

식 (2.35)에서 $\Delta H_{AB}^d = \Delta n_{AB} + DC_{AB}$ 로 정의하였으므로 정표고 차 ΔH_{AB} 는 각 지점의 정표고와 역표고간의 차이를 구한다면 계산할 수 있

다.

Fig. 2.11에서 볼 수 있는 동일 연직선상의 두 지점 A, A_0 간의 수준측량에 의한 표고차 Δn_{A_0A} 는 정표고 H_A 와 동일하므로, 다음 식 (2.52)과 같이 나타내어지고 지점 B, B_0 에서도 동일하다.

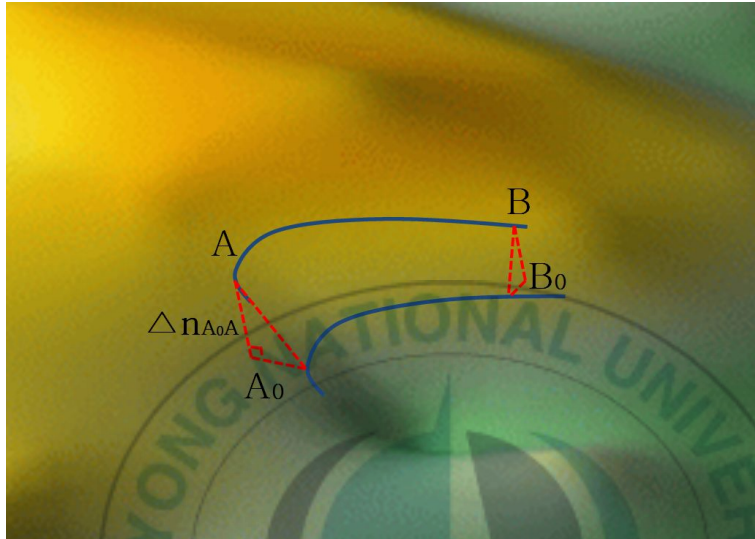


Fig. 2.11 Difference height from the geoid on the same equipotential surface

$$H_A = \Delta n_{A_0A} \quad (2.52)$$

여기서, Δn_{A_0A} : 수준측량으로 얻어진 표고차

결국 정표고와 역표고의 차는 식 (2.53)과 같이 Dynamic correction (DC)으로 표현되고, ΔH_{AB} 는 식 (2.54)으로 다시 쓰여 질 수 있다.

$$H_A - H_A^d = -DC_{A_0A} \quad (2.53)$$

$$\Delta H_{AB} = \Delta H_{AB}^d + DC_{A_0A} - DC_{B_0B} = \Delta n_{AB} + DC_{AB} + DC_{A_0A} - DC_{B_0B} \quad (2.54)$$

결국 정사보정량 OC_{AB} 는 식 (2.55), 식 (2.56)이다.

$$OC_{AB} = DC_{AB} + DC_{A_0A} + DC_{B_0B} = DC_{AB} + DC_{B_0B} + DC_{B_0A_0} + DC_{A_0A} = DC_{ABB_0A_0A} \quad (2.55)$$

여기서, $DC_{B_0A_0} = 0$ (동일 등포텐셜면상의 DC)

$$DC_{AB} = \int_A^B \frac{g - \gamma}{\gamma} dn = \sum_{i=A}^B \frac{g - \gamma_i}{\gamma_i} dn$$

$$DC_{A_0A} = \int_{A_0}^A \frac{g - \gamma_A}{\gamma_A} dH = \frac{\bar{g}_A - \gamma_A}{\gamma_A} H_A$$

$$DC_{B_0B} = \int_{B_0}^B \frac{g - \gamma}{\gamma} dH = \frac{\bar{g}_B - \gamma}{\gamma} H_B$$

$\bar{g}_A$: 지점 A, A_0 사이의 평균중력

dn : 표고차

$$OC_{AB,3} = \sum_A^B \frac{g - \gamma}{\gamma} \delta n + \frac{\bar{g}_A - \gamma}{\gamma} H_A - \frac{\bar{g}_B - \gamma}{\gamma} H_B \quad (2.56)$$

2.3.3 Hwang, C. and Hsiao, Y.S.의 정사보정량

식 (2.39)에서 유도된 정사보정량으로 전개과정은 다음 식 (2.57)과 같다.

$$\begin{aligned}
\Delta H_{AB} &= H_B - H_A = \frac{C_B}{\bar{g}_B} - \frac{C_A}{\bar{g}_A} = \frac{1}{\bar{g}_B} (C_B - C_A) + \frac{C_A}{\bar{g}_B} - \frac{C_A}{\bar{g}_A} \\
&= \frac{1}{\bar{g}_B} \int_A^B g dn + \frac{C_A}{\bar{g}_B} - \frac{C_A}{\bar{g}_A}
\end{aligned} \tag{2.57}$$

여기서, g : 지면에서의 실측중력

식 (2.57)의 우변을 나누면 다음 식 (2.58)과 식 (2.59)이 된다.

$$\frac{C_A}{\bar{g}_B} - \frac{C_A}{\bar{g}_A} = H_A \left(\frac{\bar{g}_A}{\bar{g}_B} - 1 \right) \tag{2.58}$$

$$\begin{aligned}
\frac{1}{\bar{g}_B} \int_A^B g dn &= \frac{1}{\bar{g}_B} \int_A^B (g - \bar{g}_B + \bar{g}_B) dn \\
&= \int_A^B dn + \frac{1}{\bar{g}_B} \int_A^B (g - \bar{g}_B) dn \\
&\approx \sum_{i=1}^k \delta n_i + \frac{1}{\bar{g}_B} \sum_{i=1}^k (g_i - \bar{g}_B) \delta n_i \\
&= \Delta n_{AB} + \frac{1}{\bar{g}_B} \sum_{i=1}^k (g_i - \bar{g}_B) \delta n_i
\end{aligned} \tag{2.59}$$

여기서, i : 측점 A, B 사이에 수준측량 점

k : 측점 A, B 사이에 수준측량 횟수

식 (2.58)과 식 (2.59)을 식 (2.57)에 대입하면 식 (2.60)이 유도되고, 식 (2.60)에서 Δn_{AB} 을 제외한 항이 정사보정량 식 (2.61)으로 얻어진다.

$$\Delta H_{AB} = \Delta n_{AB} + \frac{1}{g_B} \sum_{i=1}^k (g_i - \bar{g}_B) \delta n_i + H_A \left(\frac{\bar{g}_A}{\bar{g}_B} - 1 \right) \quad (2.60)$$

$$OC_{AB,4} = \frac{1}{\bar{g}_B} \sum_{i=1}^k (g_i - \bar{g}_B) \delta n_i + H_A \left(\frac{\bar{g}_A}{\bar{g}_B} - 1 \right) \quad (2.61)$$

측점간의 거리가 비교적 짧은 거리(2km 이내)이고 더욱이 평지에서라면, 중력은 높이에 대한 선형적인 함수로 존재한다고 가정하면 식 (2.62)으로 식 (2.59)을 유도할 수 있다. 따라서 2km이내 측점간의 정사보정량은 식 (2.63)이다.

$$\frac{1}{g_B} \int_B^A (g - \bar{g}_B) dn = \frac{1}{g_B} \left(\frac{g_A + g_B}{2} - \bar{g}_B \right) \Delta n_{AB} \quad (2.62)$$

$$OC_{AB,5} = \frac{1}{\bar{g}_B} \left(\frac{g_A + g_B}{2} - \bar{g}_B \right) \Delta n_{AB} + H_A \left(\frac{\bar{g}_A}{\bar{g}_B} - 1 \right) \quad (2.63)$$

2.3.4 Strang, H.의 정사보정량

1992년 ‘Practical Formulas for The Computation of The Orthometric, Dynamic and Normal Heights’ 논문에서 발표된 경험식으로 Bouguer 중력 이상을 변수로 활용한다.

$$OC_{AB,6} = 0.114 \times 10^{-3} \bar{n}_{AB} \Delta n_{AB} - 1.02 \times 10^{-3} (\Delta g_B^B - \Delta g_A^B) \bar{n}_{AB}$$

$$-0.83 \times 10^{-3} \sin 2\bar{\phi}_{AB} S \bar{n}_{AB} \quad (2.64)$$

여기서, S : 두 수준점(A, B)간의 동서거리

Δg_A^B : 수준점 A 에서의 Bouguer 중력이상

Δg_B^B : 수준점 B 에서의 Bouguer 중력이상



3. 상대중력의 측량 및 처리

3.1 상대중력의 측량

본 연구에서는 LaCoste & Romberg사의 G형 중 G-899(경상북도) 육상 상대중력계와 Scintrex사의 CG-5(강원도, 전라남도) 육상 상대중력계를 이용하여 상대중력을 측량하였고 G-899와 CG-5의 형태는 Fig. 3.1과 Fig. 3.2이고 재원은 Table 3.1이다. Fig. 3.3은 수준점에서 CG-5로 상대중력을 측량하는 모습이다.



Fig. 3.1 G-899 relative gravimeter(LaCoste & Romberg, 2004)



Fig. 3.2 CG-5 relative gravimeter(Scintrex, 2006)

Table 3.1 Specification of G-899 and CG-5

Gravimeter	G-899	CG-5
Sensor type	Metal spring	Metal spring
Reading resolution(μGal)	5	1
Range without resetting($mGal$)	7000	8000
Residual long term drift($mGal/day$)	<0.033	<0.02
Weight(kg)	3.2 (7lbs)	8 (17.5lbs)
Dimensions(cm)	19.7×17.8×25.1	30(H)×22×21
Operating temperature($^{\circ}C$)	0 to +45	-40 to +45



Fig. 3.3 Relative gravity measurement using CG-5 in a benchmark

상대중력을 측량하여 절대중력으로 계산하기 위해서는 절대중력값을 알고 있는 곳을 중력기점으로 하여 상대중력을 측량하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 사용한 중력기점은 다음 Table 3.2와 같다.

Table 3.2 Absolute gravity stations

Location	Kyung-Pook National University	Korea Research Institute of Standards and Science
Longitude	35° 53 ' 12 "	36° 23 ' 06 "
Latitude	128° 36 ' 54 "	127° 22 ' 24 "
Height(<i>m</i>)	43	76.54
Gravity (<i>mGal</i>)	979815.957	979832.444

3.1.1 경상북도 지역

경상북도지역의 58개 1등 수준점에 대한 상대중력 측량결과는 다음 Table 3.3이고, 경북대학교 내에 있는 절대중력 점(ID:900010)을 중력기점으로 하여 G-899로 상대중력을 측량하였다.

Table 3.3 Relative gravity in benchmarks(Gyeongbuk)

ID	Date (yymmdd)	Time	Instrument height(<i>cm</i>)	Relative gravity(<i>mGal</i>)
900010	090128	13:36	36.0	3363.367
BM07	090128	14:04	4.0	3363.529
14-00-00	090128	14:21	21.0	3365.276
14-02-02	090128	14:41	41.0	3365.753
14-02-01	090128	14:51	51.0	3366.291
⋮				
19-21-00	090131	13:28	28.0	3417.418
19-11-00	090131	14:27	27.0	3391.773
BM10	090131	15:39	39.0	3402.707
14-35-00	090131	16:00	0.0	3408.423
900010	090131	17:31	31.0	3363.377

3.1.2 전라남도 지역

전라남도지역의 22개 1, 2등 수준점에 대한 상대중력 측량결과는 다음 Table 3.4이고, 한국표준연구소에 있는 절대중력 점(ID:900020)을 중력기점으로 하여 CG-5로 상대중력을 측량하였다.

Table 3.4 Relative gravity in benchmarks(Jeonnam)

ID	Date (yymmdd)	Time	Instrument height(cm)	Relative gravity($mGal$)
900020	090824	9:52	63.8	3875.840
01-10-22-28	090828	9:53	53.5	3771.982
01-10-22-28	090828	11:55	53.4	3772.079
04-22-00	090828	12:30	50.0	3709.134
04-21-01	090828	12:54	56.5	3737.123
:				
01-00-30-03	090829	13:21	52.0	3742.459
01-00-30-07	090829	13:47	52.9	3702.387
04-21-00	090829	14:42	54.2	3760.999
04-20-01	090829	15:08	55.2	3763.193
900020	090829	18:27	63.8	3879.975

3.2 상대중력의 기본보정

상대중력의 기본보정 계산은 각 대상지역 별로 다음 Table 3.5와 Table 3.6이다. Drift보정을 위한 각 대상지역별 Drift 보정계수 및 편의는 다음 Table 3.7이다.

Table 3.5 Relative gravity correction(Gyeongbuk)

ID	Tide correction (<i>mGal</i>)	Instrument height correction (<i>mGal</i>)	Drift correction (<i>mGal</i>)
900010	0.004	0.111	0.042
BM07	0.016	0.012	-0.099
14-00-00	0.013	0.065	-0.006
14-02-02	0.008	0.127	-0.027
14-02-01	0.005	0.157	0.057
⋮			
19-21-00	0.019	0.086	0.059
19-11-00	0.043	0.083	0.033
BM10	0.055	0.120	-0.053
14-35-00	0.054	0.000	-0.044
900010	0.025	0.096	-0.042

Table 3.6 Relative gravity correction(Jeonnam)

ID	Tide correction (<i>mGal</i>)	Instrument height correction (<i>mGal</i>)	Drift correction (<i>mGal</i>)
900020	-0.056	0.197	0.011
01-10-22-28	0.046	0.165	-0.020
01-10-22-28	0.006	0.165	-0.013
04-22-00	-0.005	0.154	-0.002
04-21-01	-0.012	0.174	0.029
⋮			
01-00-30-03	-0.007	0.160	-0.018
01-00-30-07	-0.018	0.163	0.018
04-21-00	-0.037	0.167	0.040
04-20-01	-0.044	0.170	-0.017
900020	-0.059	0.197	-0.011

Table 3.7 Drift parameter and Bias parameter

	Gyeongbuk	Jeonnam
Drift parameter ($mGal/day$)	0.032	0.775
Bias parameter ($mGal$)	4547.483	5043.526

3.3 절대중력 및 중력이상 계산

상대중력으로부터 기본보정 및 망조정을 통해 얻어진 강원도, 경상북도, 전라남도 지역의 절대중력과 GRS80에 대한 중력이상 값은 다음 Table 3.8과 Table 3.9이다.

Table 3.8 Absolute gravity and gravity anomaly(Gyeongbuk)

No.	ID	Latitude	Longitude	Height (m)	Absolute gravity ($mGal$)	Free-air anomaly ($mGal$)	Bouguer anomaly ($mGal$)
1	BM07	35.89131	128.5993	72.5200	979816.170	28.690	20.580
2	14-00-00	35.88555	128.5822	60.7390	979817.880	27.260	20.460
3	14-01-00	35.89381	128.5523	57.0800	979818.400	25.940	19.560
4	14-01-01	35.90355	128.545	57.1240	979818.970	25.690	19.300
5	14-02-00	35.92129	128.5489	59.5400	979820.080	26.020	19.360
⋮							
54	19-20-00	36.90624	128.0144	183.4390	979862.390	21.510	0.980
55	19-21-00	36.90513	127.9644	153.1800	979870.000	19.880	2.740
56	19-22-00	36.92838	127.9317	106.1990	979879.810	13.160	1.280
57	19-23-00	36.96024	127.9259	118.9530	979881.750	16.280	2.970
58	BM12	36.98989	127.9268	115.1240	979887.900	18.670	5.790

Table 3.9 Absolute gravity and gravity anomaly(Jeonnam)

No.	ID	Latitude	Longitude	Height (<i>m</i>)	Absolute gravity (<i>mGal</i>)	Free-air anomaly (<i>mGal</i>)	Bouguer anomaly (<i>mGal</i>)
1	01-10-22-28	35.39717	127.3706	91.3120	979725.560	-13.820	-24.040
2	01-00-04-31	35.38733	127.396	109.3790	979719.920	-13.050	-25.290
3	01-00-04-29	35.36878	127.4369	272.0920	979686.900	5.730	-24.720
4	01-00-04-28	35.35489	127.4372	335.1000	979675.240	14.700	-22.800
5	01-00-04-26	35.31408	127.4384	120.2810	979721.890	-1.460	-14.920
⋮							
18	04-22-00	35.44678	127.4888	406.1179	979662.430	15.960	-29.480
19	04-21-01	35.44906	127.4758	268.8594	979690.560	1.540	-28.540
20	04-21-00	35.45839	127.4505	148.8882	979713.530	-13.310	-29.970
21	04-20-01	35.45664	127.4345	138.8768	979715.760	-14.010	-29.550
22	04-20-00	35.43647	127.419	124.2642	979718.770	-13.800	-27.700

3.4 정규중력 계산

정규중력은 위도에 따른 중력값으로 GRS80에 대하여 1980 International formula 식 (2.12), Somigliana's closed formula 식 (2.17), Chebyshey의 2차 근사식 식(2.18), 그리고 Chebyshey의 8차 근사식 식 (2.19)으로 계산하였고 그 결과는 대상지역에 대하여 Table 3.10과 Table 3.11로 계산된다.

Table 3.10 Normal gravity in benchmarks(Gyeongbuk)

ID	1980 International formula	Somigliana's closed formual	Chebyshey's second-order formula	Chebyshey's eighth-order formula
BM07	982931.551	982931.549	982931.551	982931.549
14-00-00	982917.710	982917.707	982917.710	982917.707

14-01-00	982937.463	982937.461	982937.463	982937.461
14-01-01	982959.941	982959.941	982959.941	982959.941
14-02-00	982998.593	982998.595	982998.593	982998.595
⋮				
19-20-00	980658.745	980658.678	980658.745	980658.678
19-21-00	980664.501	980664.434	980664.501	980664.434
19-22-00	980543.945	980543.878	980543.945	980543.878
19-23-00	980379.103	980379.036	980379.103	980379.036
BM12	980226.600	980226.534	980226.600	980226.534

Table 3.11 Normal gravity in benchmarks(Jeonnam)

ID	1980 International formula	Somigliana's closed formul	Chebyshey's second-order formula	Chebyshey's eighth-order formula
01-10-22-28	980900.852	980900.786	980900.852	980900.786
01-00-04-31	980850.050	980849.983	980850.050	980849.984
01-00-04-29	980754.065	980753.998	980754.065	980753.998
01-00-04-28	980682.074	980682.007	980682.074	980682.007
01-00-04-26	980470.541	980470.474	980470.541	980470.474
⋮				
04-22-00	981154.987	981154.923	981154.987	981154.923
04-21-01	981166.562	981166.498	981166.562	981166.498
04-21-00	981213.808	981213.745	981213.808	981213.745
04-20-01	981204.961	981204.898	981204.961	981204.898
04-20-00	981102.515	981102.450	981102.515	981102.450

4. 정사보정량 및 정표고 산정

4.1 정사보정량 계산

대상지역에 대한 정사보정량은 식 (2.49), 식 (2.50), 식(2.56), 식(2.61), 식(2.63), 그리고 식(2.64)으로 계산되었고, 각 대상지역별로 Table 4.1과 Table 4.2이다.

Table 4.1 Orthometric correction(Gyeongbuk)(mm)

No.	Nassar		Hofmann et al.	Hwang et al.		Strang
	$OC_{AB,1}$	$OC_{AB,2}$	$OC_{AB,3}$	$OC_{AB,4}$	$OC_{AB,5}$	$OC_{AB,6}$
1-2	0.094	-0.0482	-0.3626	-0.0071	-0.0483	-0.1297
2-3	-0.118	-0.0126	-0.1274	-0.0026	-0.0126	-0.0451
3-4	-0.131	-0.0333	-0.0113	-0.0336	-0.0334	-0.0017
4-5	-0.229	-0.0780	0.0556	-0.0859	-0.0783	0.0037
5-6	-0.373	0.0484	0.5083	0.0114	0.0486	0.2048
⋮						
54-55	-0.099	-0.8657	-0.2466	-0.5483	-0.8664	-0.1077
55-56	1.594	-0.7705	-0.1823	-0.3200	-0.7711	-0.1112
56-57	1.893	-0.3469	0.2681	-0.4254	-0.3471	0.0299
57-58	1.821	-0.6955	0.1726	-0.6647	-0.6958	-0.3780
58-1	-25.855	7.2015	-3.4017	5.7886	7.2144	1.5282

Table 4.2 Orthometric correction(Jeonnam)(mm)

No.	Nassar		Hofmann et al.	Hwang et al.		Strang
	$OC_{AB,1}$	$OC_{AB,2}$	$OC_{AB,3}$	$OC_{AB,4}$	$OC_{AB,5}$	$OC_{AB,6}$

1-2	0.5197	0.4202	2.5999	0.3872	0.4207	0.1016
2-3	1.8666	3.7381	19.7136	4.5683	3.7423	2.7093
3-4	2.2286	1.9555	8.6917	1.4187	1.9575	1.5786
4-5	4.9118	-6.6022	-13.6564	-0.3754	-6.6079	-7.4313
5-6	3.4444	52.0929	65.5675	88.2130	52.1392	48.5148
⋮						
18-19	-0.3981	-5.6722	-20.5916	-2.1130	-5.6806	-5.9973
19-20	-1.0058	-2.7241	-18.9250	-0.5487	-2.7282	-3.0270
20-21	0.1297	-0.2025	-1.3751	-0.1313	-0.2028	-0.4324
21-22	1.3738	-0.2375	-0.7435	-0.1368	-0.2378	-0.6513
22-1	2.2158	-0.4390	-2.0404	-0.1952	-0.4396	-1.2826

4.2 정표고 산정

각 대상지역에 대한 정표고는 Table 4.1과 Table 4.2에서 계산된 정사보정량을 식 (2.44)에 대입하여 정표고차를 계산하였다. 그리고 계산된 정표고차로부터 각 수준점의 정표고를 산정하였고, 결과는 Table 4.3과 Table 4.4이다.

Table 4.3 Orthometric height(Gyeongbuk)(m)

No.	Nassar		Hofmann et al.	Hwang et al.		Strang
	$OC_{AB,1}$	$OC_{AB,2}$	$OC_{AB,3}$	$OC_{AB,4}$	$OC_{AB,5}$	$OC_{AB,6}$
1	72.5200	72.5200	72.5200	72.5200	72.5200	72.5200
2	60.7391	60.7390	60.7386	60.7390	60.7390	60.7389
3	57.0800	57.0799	57.0795	57.0800	57.0799	57.0798
4	57.1238	57.1239	57.1235	57.1240	57.1239	57.1238
5	59.5396	59.5398	59.5396	59.5399	59.5398	59.5398
⋮						

55	153.2251	153.1700	153.1881	153.1908	153.1700	153.2043
56	106.2457	106.1882	106.2070	106.2094	106.1882	106.2231
57	119.0016	118.9419	118.9612	118.9630	118.9419	118.9772
58	115.1744	115.1122	115.1324	115.1334	115.1122	115.1478
1	72.5446	72.5154	72.5250	72.5351	72.5154	72.5453

Table 4.4 Orthometric height(Jeonnam)(m)

No.	Nassar		Hofmann et al.	Hwang et al.		Strang
	$OC_{AB,1}$	$OC_{AB,2}$	$OC_{AB,3}$	$OC_{AB,4}$	$OC_{AB,5}$	$OC_{AB,6}$
1	91.3120	91.3120	91.3120	91.3120	91.3120	91.3120
2	109.3795	109.3794	109.3816	109.3794	109.3794	109.3791
3	272.0944	272.0962	272.1143	272.0970	272.0962	272.0948
4	335.1046	335.1061	335.1310	335.1064	335.1061	335.1044
5	120.2905	120.2805	120.2984	120.2870	120.2805	120.2780
⋮						
19	268.8289	268.8606	268.8275	268.9390	268.8606	268.8489
20	148.8567	148.8866	148.8374	148.9672	148.8866	148.8746
21	138.8454	138.8750	138.8246	138.9557	138.8750	138.8628
22	124.2342	124.2622	124.2113	124.3430	124.2622	124.2496
1	91.2842	91.3096	91.2570	91.3906	91.3096	91.2961

4.3 결과 분석

4.3.1 정사보정량 계산 결과 상관도 분석

최종적으로 계산된 정사보정량 Table 4.1과 Table 4.2에 대한 상관도 분석결과는 Table 4.5과 Table 4.6이다.

Table 4.5 Pearson correlation analysis of among each orthometric correction(Gyeongbuk)

		$OC_{AB,1}$	$OC_{AB,2}$	$OC_{AB,3}$	$OC_{AB,4}$	$OC_{AB,5}$	$OC_{AB,6}$
$OC_{AB,1}$	Pearson	1	-0.215491244	0.497616496	-0.194880906	-0.215676778	0.059452898
	Sig	.	0.104257095	7.06006×10^{-05}	0.142660075	0.103951978	0.657537306
$OC_{AB,2}$	Pearson	-0.215491244	1	0.478349007	0.896940099	0.99999985	0.955146236
	Sig	0.104257095	.	0.000145931	1.67246×10^{-21}	2.3178×10^{-184}	2.80872×10^{-31}
$OC_{AB,3}$	Pearson	0.497616496	0.478349007	1	0.40776537	0.47848371	0.61706291
	Sig	7.06006×10^{-05}	0.000145931	.	0.001487211	0.000145214	2.48916×10^{-07}
$OC_{AB,4}$	Pearson	-0.194880906	0.896940099	0.40776537	1	0.896982628	0.88611776
	Sig	0.142660075	1.67246×10^{-21}	0.001487211	.	1.65421×10^{-21}	2.36094×10^{-20}
$OC_{AB,5}$	Pearson	-0.215676778	0.99999985	0.47848371	0.896982628	1	0.955097271
	Sig	0.103951978	2.3178×10^{-184}	0.000145214	1.65421×10^{-21}	.	2.89396×10^{-31}
$OC_{AB,6}$	Pearson	0.059452898	0.955146236	0.61706291	0.88611776	0.955097271	1
	Sig	0.657537306	2.80872×10^{-31}	2.48916×10^{-07}	2.36094×10^{-20}	2.89396×10^{-31}	.

경상북도 지역에서 계산된 정사보정량 간의 유의확률에 대하여 유의수준을 10^{-20} 로 설정하면, $OC_{AB,2}$, $OC_{AB,4}$, $OC_{AB,5}$ 과 $OC_{AB,6}$ 이 유의한 차이를 가진다는 것을 알 수 있다. 그러나 강원도 지역에 비하여 $OC_{AB,3}$ 에 대

해서는 유의한 차이를 보이지 않는다.

Table 4.6 Pearson correlation analysis of among each orthometric correction(Jeonnam)

		$OC_{AB,1}$	$OC_{AB,2}$	$OC_{AB,3}$	$OC_{AB,4}$	$OC_{AB,5}$	$OC_{AB,6}$
$OC_{AB,1}$	Pearson	1	0.533306463	0.604577454	0.359136561	0.53332494	0.52381111
	Sig	.	0.010591587	0.002878654	0.100700262	0.010588384	0.012346028
$OC_{AB,2}$	Pearson	0.533306463	1	0.929890904	0.919295743	0.999999994	0.999230235
	Sig	0.010591587	.	3.86898×10^{-10}	1.51138×10^{-09}	5.0785×10^{-81}	1.31374×10^{-29}
$OC_{AB,3}$	Pearson	0.604577454	0.929890904	1	0.849332659	0.929915389	0.927284304
	Sig	0.002878654	3.86898×10^{-10}	.	5.75332×10^{-07}	3.85589×10^{-10}	5.51264×10^{-10}
$OC_{AB,4}$	Pearson	0.359136561	0.919295743	0.849332659	1	0.919284199	0.911151783
	Sig	0.100700262	1.51138×10^{-09}	5.75332×10^{-07}	.	1.51347×10^{-09}	3.81848×10^{-09}
$OC_{AB,5}$	Pearson	0.53332494	0.999999994	0.929915389	0.919284199	1	0.999230994
	Sig	0.010588384	5.0785×10^{-81}	3.85589×10^{-10}	1.51347×10^{-09}	.	1.30086×10^{-29}
$OC_{AB,6}$	Pearson	0.52381111	0.999230235	0.927284304	0.911151783	0.999230994	1
	Sig	0.012346028	1.31374×10^{-29}	5.51264×10^{-10}	3.81848×10^{-09}	1.30086×10^{-29}	.

전라남도 지역에서 계산된 정사보정량 간의 유의확률에 대하여 유의수준을 10^{-20} 로 설정하면, $OC_{AB,2}$, $OC_{AB,5}$ 과 $OC_{AB,6}$ 이 유의한 차이를 가진다는 것을 알 수 있다. 유의수준을 10^{-7} 로 설정하면, $OC_{AB,1}$ 을 제외한 정사보정량이 유의한 차이를 가짐을 알 수 있다.

따라서, 2곳의 대상지역을 대상으로는 $OC_{AB,2}$, $OC_{AB,5}$ 과 $OC_{AB,6}$ 이 공통적으로 유의한 차이를 보였다.

4.3.2 수준점간 표고차와 정사보정량 비교

정사보정량은 정규중력과 실측중력 이외에 표고차를 변수로 가지는 함수이므로 각 수준점의 표고차에 대한 각 대상지역의 상관도 분석이 필요하다. Table 4.7과 Table 4.8에서 표고차에 대한 각 정사보정량의 상관도 분석결과를 볼 수 있다. 상관도 분석결과 전 대상지역에서 Nassar가 제안한 $OC_{AB,1}$ 은 표고차를 반영하지 못하므로 적당하지 못한 정사보정량으로 판단된다.

Table 4.7 Pearson correlation analysis of between orthometric correction and height(Gyeongbuk)

	$OC_{AB,1}$	$OC_{AB,2}$	$OC_{AB,3}$	$OC_{AB,4}$	$OC_{AB,5}$	$OC_{AB,6}$
Pearson	0.145739969	0.870762629	0.794453634	0.746797376	0.870753258	0.916657568
Sig	0.27500814	6.59236×10^{-19}	9.84332×10^{-14}	1.68597×10^{-11}	6.6049×10^{-19}	5.72516×10^{-24}

Table 4.8 Pearson correlation analysis of between orthometric correction and height(Jeonnam)

	$OC_{AB,1}$	$OC_{AB,2}$	$OC_{AB,3}$	$OC_{AB,4}$	$OC_{AB,5}$	$OC_{AB,6}$
Pearson	0.422998655	0.952006123	0.961642225	0.935738603	0.952012534	0.949422067
Sig	0.049829349	9.59422×10^{-12}	1.062×10^{-12}	1.65977×10^{-10}	9.58167×10^{-12}	1.60352×10^{-11}

4.3.3 대상지역에 적합한 정사보정량 선정

식 (2.44)에서는 두 수준점간 정표고차와 수준측량으로 얻어진 표고간의 관계로 정사보정량을 정의하였다. 본 연구에서는 각 대상지역별로 단일 망에 대하여 상대중력을 측량하였기 때문에 최초의 수준점과 마지막 수준점은 같은 수준점이 되며, 식 (2.44)은 식 (4.1)로 다시 쓰여 질 수 있다. 결국 한 수준점에서는 하나의 정표고와 하나의 수준측량으로 얻어진 표고

를 가지므로 식 (4.1)의 Δn_{AA} 항과 $H_A - H_A$ 항은 0이 된다. 이때 이론적으로는 $\sum OC_{AA}$ 항도 0이 되어야 하나, 망의 수준점을 따라 측량된 중력값을 이용하여 계산된 정사보정량의 누적 값이므로 실질적으로는 최대한 0에 가까운 값을 가져야한다. 따라서 단일망의 최초 수준점에 대한 정사보정량의 합은 Table 4.9과 Table 4.10이다.

$$\sum OC_{AA} + \Delta n_{AA} = (H_A - H_A) \quad (4.1)$$

Table 4.9 The sum of orthomertic correction(Gyeongbuk)(mm)

$\sum OC_{AA,1}$	$\sum OC_{AA,2}$	$\sum OC_{AA,3}$	$\sum OC_{AA,4}$	$\sum OC_{AA,5}$	$\sum OC_{AA,6}$
24.5670	-4.6012	4.9977	15.1388	-4.6095	25.3295

Table 4.10 The sum of orthomertic correction(Jeonnam)(mm)

$\sum OC_{AA,1}$	$\sum OC_{AA,2}$	$\sum OC_{AA,3}$	$\sum OC_{AA,4}$	$\sum OC_{AA,5}$	$\sum OC_{AA,6}$
-27.7719	-2.4367	-54.9940	78.5647	-2.4430	-15.9261

따라서, 경상북도 지역과 전라남도지역에서 정사보정량 합이 최소가 되는 Nassar(1977)에서 제안된 $OC_{AA,2}$ (식 (2.50))과 Hwang(2003)에서 제안된 $OC_{AA,5}$ (식 (2.63))이 대상지역에 대하여 가장 적합한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 상대중력계를 이용하여 측량된 실측중력을 사용하여 물리적 높이인 정표고와 기하학적 높이인 수준측량에 의한 표고간의 차이인 정사보정량을 6가지 기준에 제안된 방법에 의해 계산하고, 정표고를 산정하였다. 그리고 계산된 6가지 정사보정량을 비교·분석함으로써 대상지역에 대하여 적합한 정사보정량 계산법을 결정함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 표고차가 큰 산악지역에 대하여 실시된 중력측량은 Modified ladder method에 의해 실시되었으며, 동일 중력기준점을 폐합하는 왕복측량을 실시함으로써 중력측량 작업규정(국토지리정보원, 2009)의 1등 중력측량 기준을 만족할 수 있었다.

둘째, 정사보정량은 표고차에 대한 함수이므로, 정사보정량은 표고차에 대하여 상관성을 가져야한다. 따라서 상관성분석을 시행한 결과 Nassar(1977)에서 제안한 $OC_{AB,1}$ 은 유의 수준을 만족하지 못하므로 우리나라 산악지역에서 적용하기 어려운 정사보정량임을 예상할 수 있었다.

셋째, 본 연구에서 단일망에 대한 정사보정량은 합이 최소가 될 때 가장 적합한 것으로 판단하였고, 6개 정사보정량 계산식 중 Nassar(1977)에서 제안된 $OC_{AA,2}$ (식 (2.50))과 Hwang(2003)에서 제안된 $OC_{AA,5}$ (식 (2.63))이 경상북도와 전라남도 지역에서 가장 적합한 정사보정량으로 결정됨에 따라, Table 4.3과 Table 4.4에서 $OC_{AA,2}$ 과 $OC_{AA,5}$ 로 계산된 정표고가 대상지역에 대하여 가장 적합하다고 판단된다.

넷째, 국토지리정보원에서 제공하는 수준측량에 의한 표고는 수준점에 대한 중력측량 자료를 이용하여 정표고 산정이 가능하다. 따라서 추후 연구를 통해 전국의 수준점에 대한 중력측량을 실시하여 산정된 정표고는 우리나라의 지오이드모델을 평가하는데 사용되어질 수 있을 것으로 기대된다.



참고문헌

국토지리정보원, 2001, "기본측량성과", 고시 제2001-82호.

국토지리정보원, 2003, "측량 및 지형공간정보 백서", pp.394-400.

국토지리정보원, 2005, "지구물리측량 활성화 방안연구", pp.38-41.

국토지리정보원, 2009, "중력측량 작업규정 제정", 고시 제2009-600호.

박영수, 임무택, 임형래, 2006, "중력 보정과 중력 이상에 대한 이해", 한국
지구물리탐사학회지, 제9권 제2호, pp.171-177.

송창현, 2007, "우리나라 1등 수준망의 정확도 평가", 석사학위논문, 군산
대학교 대학원.

윤홍식, 조재명, 2004, "正射補正에 의한 正標高의 情密計算", 한국측량학
회지, 제22권 제2호, pp.117-125.

이석배, 김진수, 김철영, 권재현, 2009, "1,2등 수준노선에서 GPS 측량에
의한 기하학적 지오이드고의 계산", 제27권 제2호, pp.213-223.

이영철, 2008, "제주도 일원의 중력이상과 지오이드", 박사학위논문, 부산
대학교 대학원.

이창경, 서용철, 전부남, 송창현, 2008, "2006년 우리나라 1등 수준망 조정",

한국측량학회지, 제26권 제1호, pp.17-26.

최광선, 이정모, 1997, "강원도 한계령 지역의 정규고 보정에 대한 연구",
한국지구과학학회지, 제18권 제6호, pp.522-528.

황학, 윤홍식, 이동하, 2009, "CG-5 상대중력계를 이용한 중력관측 및 중
력망조정에 관한 연구", 한국측량학회지, 제27권 제1호, pp.713-722.

El-Mowafy, A., Fashir, H., Al Habbai, A., Al Marzooqi, Y., and
Babiker, T., 2006, "Real-Time Determination of Orthometric
Heights Accurate to the Centimeter Level Using a Single GPS
Receiver : Case Study", *Journal of Surveying Engineering*©
ASCE, 132:1(1), pp.1-6.

Featherstone, W.E., and Dentith, M.C., 1998, "A Geodetic Approach to
Gravity Data", *Computers & Geosciences*, Vol.23, No.10,
pp.1063-1070.

Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sands, M., 1963, "The Feynman
Lectures on Physics", *Addison Wesley Longman, a Pearson
Education Company and Shin Won Agency Co.*, Vol.1.

Forsberg, R. and Tscherning, C.C., 2008, "An Overview Manual of the
GRAVSORT", *Technical University of Denmark(DTU)*.

Heiskanen, W.A. and Moritz, H., 1967, "Physical Geodesy", *Freeman*

and Company, pp.160–172.

Hofmann–Wellehof, B., and Moritz, H., 2005, "Physical Geodesy", *SpringerWienNewYork*, pp.156–172.

Hwang, C., and Hsiao Y.S., 2003, "Orthometric Corrections from Leveling, Gravity, Density and Elevation data : a Case Study in Taiwan", *Journal of Geodesy*, No.77, pp.279–291.

Hwang, C., Wang, C.G., and Lee, L.H., 2002, "Adjustment of Relative Gravity Measurements using Weighted and Datum-free Constraints", *Computers & Geosciences*, No.28, pp.1005–1015.

LaCoste & Romberg, 2004, "Instruction Manual Model G & D Gravity Meters", *LaCoste & Romberg*(<http://www.LaCosteRomberg.com>).

Li, X., and Götze, H.J., 2001, "Tutorial : Ellipsoid, Geoid, Gravity, Geodesy, and Geophysics", *Society of Exploration Geophysicists*, Vol.66, No.6, pp.1660–1668.

Longman, I.M., 1959, "Tidal accelerations due to the moon and the sun", *Journal of Geophysical Research*, Vol.64, No.12, pp.2351–2355.

Merlet, S., Kopaev, A., Diamant, M., Geneves, G., Landragin, A., and Santos, F.P.D., 2008, "Micro-gravity Investigations for the LNE Watt Balance Project", *Metrologia, BIPM and IOP Publishing Ltd*

Printed in the UK, pp.265–274.

Meyer, T.H., Roman D.R., and Zilkoski D.B., 2006, "What Does Height Really Mean?", *Surveying and Land Information Science*, Vol.66, No.2, pp.149–160.

Moritz, H., 2000, "Geodetic Reference System 1980", *Journal of Geodesy*, No. 74(1), pp.128–162.

Nassar, M.M., 1977, "Gravity Field and Levelled Heights in Canada", *Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report*, No.41, pp.54–72.

Natural Resources Canada, Height Reference System Modernization Glossary(www.geod.nrcan.gc.ca/hm/gloss_e.php). January 2008.

Parseliunas, E., Petroskevicius, P., and Obuchovski, R., 2008, "Analysis of Gravimetric Observations Made by SCINTREX CG-5", *Environmental Engineering, the 7th International conference*, pp.1422–1428.

Scintrex, 2006, "CG-5 Operation Manual", No.867700, Revision 3.

Strang van Hees, G.L., 1983, "Gravity Survey of the North Sea", *Marine Geodesy*, 6:2, pp.167–182.

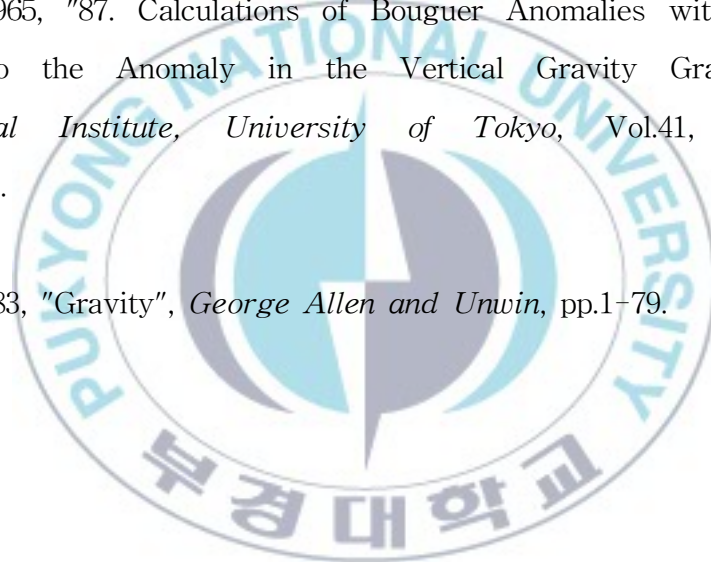
Strang van Hees, G.L., 1992, "Practical Formulas for The Computation of The Orthometric, Dynamic and Normal Heights", *Zeitschrift fur Vermessungswesen*, pp.727-734.

Strykowski, G., "Gravity Adjustment", *DTU Space National Space Institute*(<http://www.space.dtu.dk/English.aspx>).

Tipler, P.A., 1991, "Physics for Scientists and Engineers Third Edition", *Worth Publishers*.

Tsuboi, C., 1965, "87. Calculations of Bouguer Anomalies with Due Regard to the Anomaly in the Vertical Gravity Gradient", *Geophysical Institute, University of Tokyo*, Vol.41, No.5, pp.386-391.

Tsuboi, C., 1983, "Gravity", *George Allen and Unwin*, pp.1-79.



감사의 글

지난 2년간의 대학원 생활을 마무리하며 처음 대학원에 입학하며 했던 목표에 대하여 지금도 처음의 목표를 유지하고 있는지 가끔 의구심이 생깁니다. 하지만 이렇게 의구심이 들 때 마다 저에게 여러 도움과 학문적인 지도로서 목표를 잃지 않게 잡아주신 분들이 있어서 제가 아직 여기에 있는 것 같습니다. 먼저 이렇게 부족한 저를 잡아주신 분들께 감사의 인사를 드립니다.

공무로 인하여 바쁘신 와중에도 인격적으로나 학문적으로 끝은길을 보여주신 이종출 교수님께 깊이 감사드리며, 항상 교수님의 가르침을 명심하고 살겠습니다.

그리고 바쁘신 가운데도 저의 논문이 완성되도록 지도를 아끼지 않으셨던 김명식 교수님, 정두희 교수님께 감사드리며, 대학원과정은 물론이고 학부과정에서도 수많은 가르침을 주신 손인식 교수님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이영대 교수님, 정진호 교수님, 이환우 교수님, 국승규 교수님, 이상호 교수님, 김수용 교수님께도 감사의 인사를 올립니다.

연구실의 발전을 위해 노력하시고 저의 부족한 부분을 일깨워 주시는 서동주 박사님, 꼼꼼하게 신경 써 주시며 앞날에 대해 많은 조언을 해주시는 노태호 박사님, 비록 몸은 멀리 있지만 부족한 시간을 내어 후배들을 돌봐주시는 장호식 박사님, 가장 가까이서 항상 심란한 저에게 연구실 생활 및 여러 고민 해결에 도움을 주신 김진수 박사님께 감사의 마음을 전합니다. 또한 처음 대학원 생활을 시작하며 많은 도움을 받았던 남일현 선배님, 대학원 생활을 같이하며 여러 도움을 준 현우형, 연구실 생활은 오래 같이하지는 못했지만 동아리후배로서 잘 따라와 준 명근이, 회원이, 그리고 선·후배들의 모임인 도우회와 부경토사모 회원분들께도 감사를 드

립니다.

비록 같은 학교는 아니지만 저의 논문을 완성하는데 조언을 아끼지 않았던 부산대학교의 이영철 박사님, 진주산업대의 철영이에게도 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

끝으로 삶의 조언을 아끼지 않으며, 학업의 꿈을 이루어나가는데 변치 않는 믿음을 보내 주신 부모님께 감사를 드리며 마치겠습니다.

정 영 화 올림

