

## 지구 곡률을 고려한 중력의 정밀 지형보정

최광선<sup>1</sup> · 이영철<sup>1,\*</sup> · 임무택<sup>2</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구과학교육과, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30

<sup>2</sup>한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, 305-350 대전광역시 유성구 가정동 30

### Precise Terrain Torrection for Gravity Measurement Considering the Earth's Curvature

Kwang-Sun Choi<sup>1</sup>, Young-Cheol Lee<sup>1,\*</sup>, and Mutaek Lim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Science Education, Busan National University, Busan 609-735, Korea

<sup>2</sup>Geology & Geoinformation Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Deajeon 305-350, Korea

**Abstract:** The researchers compiled two sets of digital terrain data released by NORI (National Oceanographic Research Institute, Korea) and NIMA (National Imagery and Mapping Agency, USA) respectively and analyzed a new set of 3" × 3" gridded terrain data in order to calculate terrain correction value in gravity in and around the Korean Peninsula. Using this new set of terrain data, the researchers developed an effective algorithm to calculate precise terrain correction value in gravity considering Earth's curvature and coded a fortran program to evaluate terrain correction value covering the surface of which the radius reaches up to 166.735 km. The researchers also calculated terrain correction value over the southern part of Korea. According to the statistics of terrain correction value calculated in and around the Korean Peninsula up to 166.735 km of surface radius, the maximum value soars to 56.508 mGal and the mean value is 4.539 mGal.

**Keywords:** digital terrain data, terrain correction, gravity, algorithm

**요약:** 한국 국립해양조사원의 수심자료와 미국 NIMA(National Imagery and Mapping Agency)의 수치지형자료를 바탕으로 우리나라 일원에서 측정된 중력의 지형보정을 위한 위도 및 경도 간격이 각각 3" × 3" 인 지형자료를 재편집하였다. 이 자료를 바탕으로 지구 곡률을 고려한 정밀 지형보정값을 계산하기 위한 알고리즘을 개발하였고, 중력측정점으로부터 반지름 166.735 km인 원 내부에 대한 지형보정값을 계산하는 Fortran 프로그램을 작성하였다. 이 알고리즘 및 프로그램을 이용하여 남한 전역에 대한 지형보정값을 계산하였다. 그 결과 최대값은 56.508 mGal 이고 평균값은 4.539 mGal이다.

**주요어:** 수치지형자료, 지형보정, 중력, 알고리즘

## 서론

지형보정은 관측중력에 대기질량보정, 고도보정, 부계보정을 한 후 지형의 기복에 의한 인력을 보정하는 것이다. 부계보정에는 지구의 곡률을 고려하지 않은 부계보정(Bullard A), 지구의 곡률을 고려한 부계보정(Bullard B) 및 지구의 곡률과 지형보정을 포함

한 부계보정(Bullard C)이 있다(Bullard, 1936; LaFehr, 1991). Bullard A 보정은 기준면으로부터 측정점의 높이를 두께로 하는 무한 평판이라 가정하여 계산하는 것이며, Bullard B 보정은 무한 평판이 아닌 타원체인 지구의 곡률을 가진 슬래브(spherical cap)로 계산하는 것이고, 마지막으로 Bullard C 보정은 Bullard B 보정과 지형보정을 포함한 보정이다.

일반적으로 부계보정 시 중력 측정점과 보정기준면 사이를 무한평판이라 가정하여 부계보정을 하여 왔으나, 실제 지구는 구형으로 지구 곡률을 고려한 부계보정의 필요성이 여러 학자들에 의해 제기되어 왔다

\*Corresponding author: smile\_salsa@hanmail.net

Tel: 82-51-510-3253

Fax: 82-51-513-7495

(Hayford and Bowie, 1912; Bullard, 1936; LaFehr, 1991). 부계이상을 계산하는 단계로서의 Bullard B 보정의 목적은 무한평판으로 가정하는 부계보정을 구면 캡의 기하학적 형상으로 변환하는 것이며, 여기서 부계이상을 계산하는 두께는 측정점의 높이이고 구면 캡의 반경은 166.735 km이다. LaFehr(1991)에 의하여 곡률반경 166.735 km를 가지는 지구 곡률을 고려한 부계보정의 완전식이 유도됨에 따라 더욱 정밀한 부계보정을 할 수 있게 되었고, 이에 따라 지형보정도 이에 걸맞는 보정이 필요하게 되었다.

정밀기기의 발달에 따라 정밀한 중력 측정 및 중력 정밀한 보정요소의 획득이 가능하게 되었으며 이로써 정밀한 중력 이상의 계산도 가능하게 되었다. 캐나다의 Scintrex 사와 미국의 ZLS 사는 1  $\mu$ Gal 또는 0.1  $\mu$ Gal의 분해능을 가지는 중력계를 제작하고 있으며, GPS를 이용한 측위 시스템의 발달, EGM96 범지구 중력모델 개발(Lemoine et. al. 1998), GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 위성에 의한 범지구 중력모델 및 우리나라 일원의 정밀 지오이드 계산(Choi et. al, 1997; 원지훈, 2004) 등으로 중력 측정점의 좌표를 수 cm 이내의 정확도로 측정할 수 있게 되었다. 또한 미국 국방부 산하 NIMA (National Imagery and Mapping Agency)는 전 세계의 지형자료를 제공하고 있다. 이 자료는 WGS84 지구타원체를 기준으로 0.3333"  $\times$  0.3333", 1"  $\times$  1", 3"  $\times$  3", 30"  $\times$  30" 격자의 평균자료로 되어 있다. 또한, 해양수산부 산하 국립해양조사원은 2,500톤급의 탐사선인 '해양2000'호와 700톤급의 '바다로1'호를 이용하여 1996년부터 한반도 인근해역의 해저지형, 중력, 자력, 탄성파탐사 등을 수행하고 있으며 이에 따라 더욱 정밀한 해저 지형의 정보를 얻을 수 있게 되었다. 한편 컴퓨터의 발달로 대용량의 자료처리와 빠른 자료처리가 가능하게 됨으로써 과거의 간이식을 이용하여 지형보정을 하는 것에 비해 더욱 엄밀한 식을 사용할 수 있게 되었다.

중력측정점을 지나는 평판에 대한 기복의 인력 보정에 관한 필요성은 Hayford and Bowie(1912)가 처음으로 제안하였다. 이후 Hammer(1939)는 지형도를 이용한 방법을 발표하였으며, 이는 근대적 지형보정의 시초라 할 수 있다. 한편 Kane(1962)은 수치지형과 컴퓨터를 이용한 지형보정 알고리즘을 개발하였으며, 이때부터 컴퓨터를 이용한 지형보정이 시작되었다. 우리나라의 경우 최광선(1986)은 중력의 지형보

정을 위하여 남한 일원의 1 km  $\times$  1 km 평균고도 수치지형 자료를 제작하고 이를 이용하여 지형보정을 하였으며, 권병두 외(1990)는 이차곡면 방정식을 이용한 지형보정에 대하여, 그리고 김성균 외(1992)는 개인용 컴퓨터를 이용한 지형보정에 대하여 연구하였다. 또한 최광선과 이영철(2001)은 3"  $\times$  3" 수치지형 자료를 제작하고 이를 이용하여 한반도 일원의 지형보정에 대하여 연구하였다.

본 연구에서는 정밀한 중력 이상을 계산하기 위하여 지구곡률을 고려한 부계 보정인 Bullard B 보정을 수행함과 동시에 이에 따른 반경 166.735 km에 이르는 지형보정을 할 수 있는 지형자료를 제작하였고 이를 계산하는 Fortran 프로그램을 작성하였다.

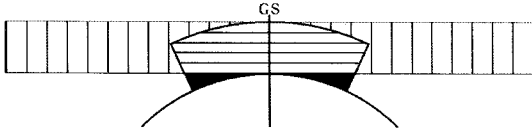
### 부계 보정

Bullard(1936)는 중력측정점에서 지형에 대한 인력 보정을 세 단계로 나누었다. 이는 부계 판(Bouguer slab)이라 부르는, 해수면 또는 다른 기준면으로부터 중력측정점까지의 높이를 두께로 하는 무한 평판으로 가정한 부계 보정(Bullard A)과 무한 부계 평판의 두께는 같고 표면반경 166.735 km( $1\frac{1}{2}R$ )를 가지는 구면 캡(spherical cap)으로 환산하여 지구의 곡률을 고려한 보정(Bullard B), 그리고 Bullard B 보정에 중력측정점의 높이보다 높거나 낮은 지형의 기복에 대한 보정을 더한 지형보정(Terrain correction, Bullard C)이다(Fig. 1).

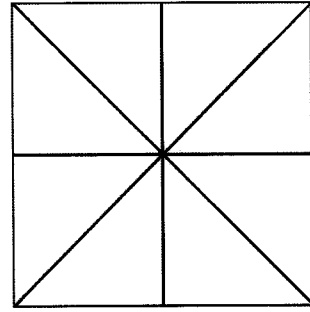
부계 보정은 P. Bouguer가 1740년대 전반에 지형을 무한평판이라 가정하고 무한평판에 의한 인력을 계산하는 식을 유도한 이래, 중력 측정점과 보정기준면 사이의 물질에 의한 인력 효과를 제거하기 위해 이 식을 사용하고 있다. 하지만 지구는 수평판이 아닌 곡률을 가진 구면 캡으로 계산하는 것이 더욱 타당할 것이다. 구면 캡에 의한 중력 효과와 무한 평판에 의한 중력효과를 비교하면 고도 1,000 m에서는 구면 캡에 의한 중력 효과가 무한평판에 의한 중력 효과보다 1.1 mGal 크게 나타나고, 이 차이는 고도 2,100 m에서 가장 커서 1.5 mGal 정도에 이른다. 2,100 m 이상에서는 그 차이가 작아져서 고도 4,150 m에서는 두 경우의 중력 효과가 같아진다.

Fig. 1의 구면 캡에 의한 중력 효과의 완전한 식은 LaFehr(1991)에 의해 다음과 같이 유도되었다.

$$\Delta g_{sc} = 2\pi G\rho\{(1 + \mu)h - \lambda R\} \quad (1)$$



**Fig. 1.** The Bullard B correction for the curvature of the Earth away from a gravity station (GS): black = the section of the spherical cap directly underlying the infinite slab, which pulls downwards increasing the observed value of gravity; vertical stripes = the truncation of the infinite Bouguer slab at 166.735 km, which decreases the observed value of gravity, after LaFehr (1991).



**Fig. 2.** Plan view of Kane's innermost zone.

여기서,

$$\lambda = \frac{1}{3} \{ d + f\delta + \delta^2 \} [ (f - \delta)^2 + \kappa ]^{1/2} + p$$

$$+ m \log_e \frac{n}{f - \delta + [ (f - \delta)^2 + \kappa ]^{1/2}},$$

$$\mu = \left( \frac{1}{3} \eta^2 - \eta \right) \text{이며,}$$

$\eta = h/R$ ,  $p = -6\cos^2\alpha \sin(\alpha/2) + 4\sin^3(\alpha/2)$ ,  $d = 3\cos^2\alpha - 2$ ,  $n = 2[\sin(\alpha/2) - \sin^2(\alpha/2)]$ ,  $f = \cos\alpha$ ,  $\kappa = \sin^2\alpha$ ,  $m = -3\sin^2\cos\alpha$ ,  $R = R_0 + h$ ,  $\alpha = S/R_0$ ,  $\delta = R_0/R$ 이다.  $G$ 는 만유인력상수,  $\rho$ 는 지각의 밀도,  $R_0$ 는 지구의 평균 반지름,  $h$ 는 측정점의 높이이고  $S$ 는 Bullard B 반지름으로 166.735 km이다.

## 지형보정

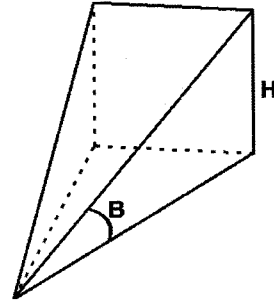
### 최 인접지역의 지형보정

전체 지형보정에서 측정점에 인접한 지역이 가장 큰 영향을 미치며, 이 지역은 경사지형으로 가정하여 보정하는 것이 합리적이다. Kane(1962)은 이 지역을 Fig. 2와 같이 8부분으로 나누어 Fig. 3과 같은 경사지형(octant)으로 표현하고, 이의 보정식을 식 (2)와 같이 제시하였다.

$$\Delta g = \frac{\pi G D}{4} (R - \sqrt{R^2 + H^2} + H \sin B) \quad (2)$$

여기서,  $H$ 는 8분형 지형의 높이,  $B$ 는 측정점에서 8분형 지형을 바라보는 각

Ma and Watts(1994)는 Kane과는 달리 이 지역을 경사면을 갖는 4개의 삼각지형으로 표현하고 이에 대한 엄밀한 식을 유도하였다. 또한 Lyman et al.



**Fig. 3.** Octant terrain.

(1997)은 레이저 거리 측정 시스템을 이용하여 측정점 주위 50~100 m 지역의 높이를 측량하고 이를 이용하여 최 인접 지역에 대한 지형보정을 실시한다(Aiken and Cogbill, 1998). 이 방법과 40 m 지형 격자를 이용한 지형보정 간의 최대 차이는 1.0 mGal 이 된다고 한다(Nowell, 1999).

본 연구에서는 Ma and Watts(1994)의 식을 이용하여 최 인접 부분의 지형보정을 하였다. Ma and Watts(1994)는 Fig. 4와 같은 삼각지형(Fig. 4A의 빗금친 부분에 대한 지형효과( $g$ )를 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$g_1 = G\rho \int_0^1 \int_{k_1 x}^{k_2 x} \int_0^{a_1 x + b_1 y} \frac{z dz}{\sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)^3}} \quad (3)$$

이때  $g$ 는 두 정점(Fig. 4의  $P_1Z_1$ 과  $P_2Z_2$ )의 부호에 따라 달라지므로, Fig. 4에 의한 영향을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g_1 = G\rho x_1 f(m, n, u, v) \Big|_{m=k_1, n=k_2, u=a_1, v=b_1} \quad (4)$$

$$g_2 = G\rho x_2 f(m, n, u, v) \Big|_{m=k_3, n=k_2, u=b_2, v=a_2} \quad (5)$$

$$g_3 = G\rho x_3 f(m, n, u, v) \Big|_{m=k_4, n=k_3, u=a_3, v=b_3} \quad (6)$$

$$g_4 = G\rho x_4 f(m, n, u, v) \Big|_{m=k_4, n=k_1, u=b_4, v=a_4} \quad (7)$$

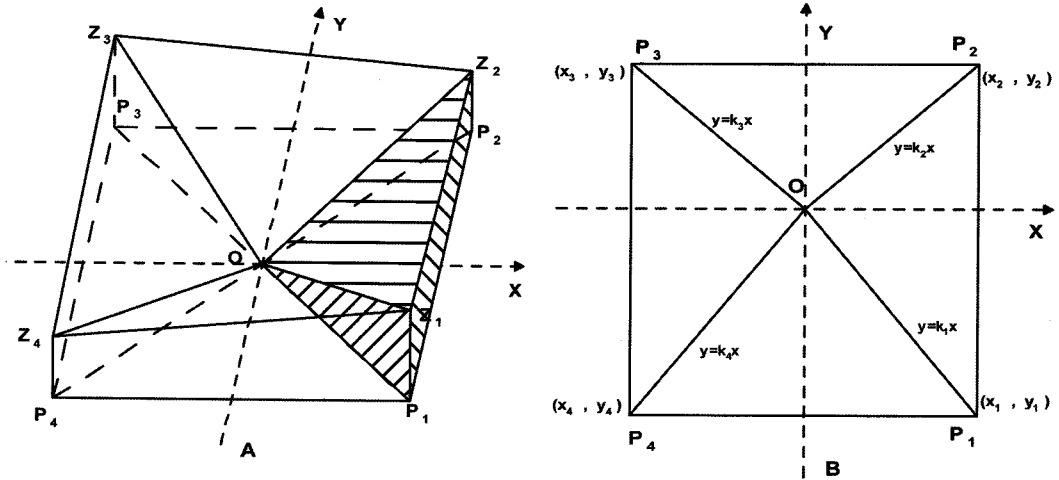


Fig. 4. A: Perspective view of the inner zone with four corners above gravity station level. B: Plan view of the inner zone (Ma and Watts, 1994).

여기서,

$$f(m, n, u, v) = \ln \frac{n + \sqrt{1+n^2}}{m + \sqrt{1+m^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+v^2}}$$

$$\ln \frac{n + \frac{uv}{1+v^2} + \sqrt{\left(n + \frac{uv}{1+v^2}\right)^2 + \frac{1+u^2}{1+v^2} - \frac{u^2v^2}{(1+v^2)^2}}}{m + \frac{uv}{1+v^2} + \sqrt{\left(m + \frac{uv}{1+v^2}\right)^2 + \frac{1+u^2}{1+v^2} - \frac{u^2v^2}{(1+v^2)^2}}}$$

$$a_1 = \frac{z_1y_2 - z_2y_1}{x_1y_2 - x_2y_1}, \quad b_1 = \frac{x_1z_2 - x_2z_1}{x_1y_2 - x_2y_1}, \quad a_2 = \frac{z_1y_2 - z_2y_1}{x_1y_2 - x_2y_1},$$

$$b_2 = \frac{x_2z_3 - x_3z_2}{x_2y_3 - x_3y_2}, \quad a_3 = \frac{z_3y_4 - z_4y_3}{x_3y_4 - x_4y_3}, \quad b_3 = \frac{x_3z_4 - x_4z_3}{x_3y_4 - x_4y_3},$$

$$a_4 = \frac{z_4y_1 - z_1y_4}{x_4y_1 - x_1y_4}, \quad b_4 = \frac{x_4z_1 - x_1z_4}{x_4y_1 - x_1y_4}$$

$$k_1 = \frac{y_1}{x_1}, \quad k_2 = \frac{y_2}{x_1}, \quad k_3 = \frac{y_2}{x_3}, \quad k_4 = \frac{y_4}{x_3},$$

$$k_1 = \frac{1}{k_1}, \quad k_2 = \frac{1}{k_2}, \quad k_3 = \frac{1}{k_3}, \quad k_4 = \frac{1}{k_4}$$

따라서, Fig. 4의 지형에 의한 지형보정(g)은 식 (8)과 같이 g<sub>i</sub>의 합이다.

$$g = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 \tag{8}$$

**사각기둥에 의한 인력**

디지털 지형 모형을 이용하여 계산하는 지형보정값 (Terrain Correction Value, TCV)은 사용하는 지형 모

형이 일반적인 지형을 얼마나 잘 표현하는가에 따라 지형보정의 결과는 달라진다. 또한 컴퓨터를 이용한 지형보정에서 지형 모형이 원래의 지형을 얼마나 잘 표현하는가와 디지털 데이터를 얻기 위한 샘플링 방법에 따라 달라진다. Bott(1959)는 컴퓨터를 이용하여 격자화 지형 자료를 사용하면 빠른 시간(안)에 지형보정을 할 수 있음을 보였고, Jung(1961)과 Nagy(1966)를 포함한 여러 학자들은 사각기둥에 의한 인력(Δg)의 엄밀한 식을 유도하였으며 Nagy의 식은 다음과 같다(Talwani, 1973).

$$\begin{aligned} \Delta g = G\rho & \left[ -z_1 \arctan \frac{x_1y_1}{z_1R_{111}} + z_1 \arctan \frac{x_2y_1}{z_1R_{211}} \right. \\ & + z_1 \arctan \frac{x_1y_2}{z_1R_{121}} + z_1 \arctan \frac{x_2y_2}{z_1R_{221}} + z_2 \arctan \frac{x_1y_1}{z_2R_{112}} \\ & - z_2 \arctan \frac{x_2y_1}{z_2R_{212}} - z_2 \arctan \frac{x_1y_2}{z_2R_{122}} + z_2 \arctan \frac{x_2y_2}{z_2R_{222}} \\ & + x_1 \log \left( \frac{R_{111} + y_1R_{122} + y_2}{R_{112} + y_1R_{211} + y_2} \right) + x_2 \log \left( \frac{R_{212} + y_1R_{221} + y_2}{R_{211} + y_1R_{222} + y_2} \right) \\ & \left. + y_1 \log \left( \frac{R_{111} + x_1R_{212} + x_2}{R_{112} + x_1R_{211} + x_2} \right) + y_2 \log \left( \frac{R_{122} + x_1R_{221} + x_2}{R_{121} + x_1R_{222} + x_2} \right) \right] \tag{9} \end{aligned}$$

여기서,  $R_{abc} = \sqrt{x_a^2 + y_b^2 + z_c^2}$  이며, ρ = 밀도, (x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>)은 P점의 좌표, (x<sub>2</sub>, y<sub>2</sub>, z<sub>2</sub>)은 Q점의 좌표이다(Fig. 5).

Ketelaar(1987)는 일정한 경사를 가진 사각기둥을 가정하여 Nagy의 식을 변형하였다. 옆면의 길이가 D

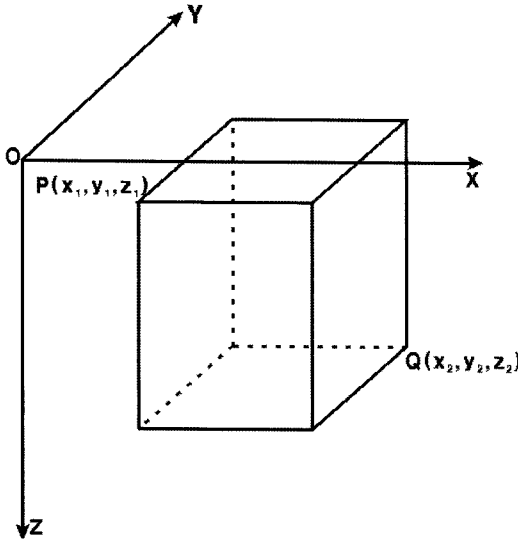


Fig. 5. Terrain prism.

이고,  $x$ 축으로  $x=iD$ ,  $y$ 축으로  $y=jK$ 인 사각 기둥의 인력은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다(Ketelaar, 1976).

$$g = G\rho \int_0^z \int_0^T \int_0^R \frac{dv}{r^3} = G\rho(1 - \cos\alpha)DK(i,j) \quad (10)$$

여기서,  $\alpha$ 는 위쪽으로 보는 각 [ $\alpha = \arctg(h/r)$ ],  $K(i,j)$ 는 인덱스  $i$ 와  $j$ 의 함수인 eight-term 알고리즘이며,  $K(i,j)$ 는 사각기둥의 위치에 따르며, 이는 위치 행렬로 표현된다(Ketelaar, 1976). 그리고 중력측정점과 인접한 지역에서의  $K(i,j)$ 는 거의  $(i^2 + j^2)^{-0.5}$ 와 같다. 따라서 식 (10)은 식 (11)과 같이 간단히 나타낼 수 있다(Ketelaar, 1987). 본 연구에서는 근거리의 지형 보정에는 ketelaar 보다 더 정밀한 Nagy의 식을 계산에 이용하고 원거리에서도 비교적 정밀한 지형보정을 계산하기 위하여 ketelaar의 식(11)을 사용하였다.

$$g = G\rho D^2 \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) \quad (11)$$

여기서,  $r$  = 원점에서 기둥까지 거리,  $h$  = 사각기둥의 높이,  $D$  = 사각기둥 한 변의 길이( $D^2$ 을 단면적  $\Delta A$ 로 나타낼 수 있다)

### 호수 바닥 또는 해저면까지의 지형보정

Bullard(1936)는 해저면 또는 호수 바닥까지의 지형보정이 중요함을 언급하였으며, Reilly(1972)는 해

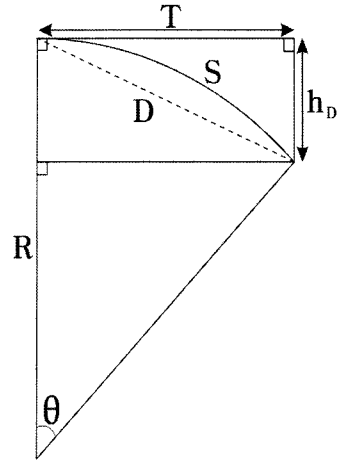


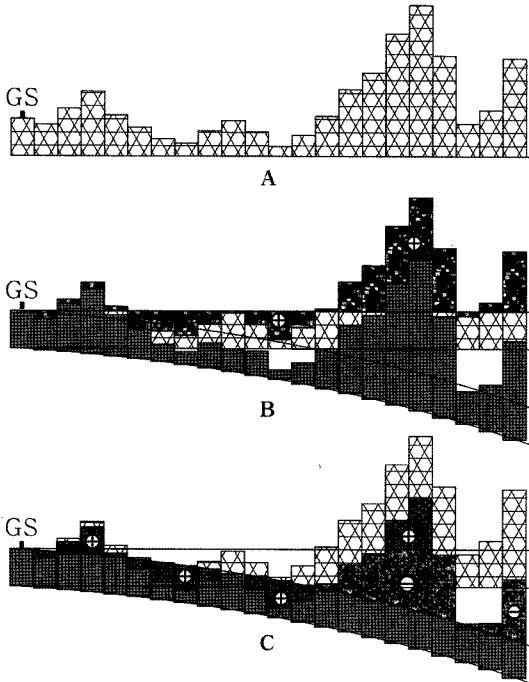
Fig. 6. Height difference due to Earth's curvature.

저면까지 지형보정을 하여 New Zealand의 부계 이상도를 작성하였고, Steinhäuser et al.(1990)는 호수 뿐만 아니라 빙하에 대해서도 밀도  $0.79 \text{ g/cm}^3 \sim 0.88 \text{ g/cm}^3$  사이로 보정해야 함을 지적하였다.

해저면까지의 지형보정은 해수의 밀도(약  $1.03 \text{ g/cm}^3$ )와 지각의 밀도의 차이를 이용하여 이의 인력의 효과를 보정해 주는 것으로, 다시 말해 해수면에서 해저면 사이의 질량 결손을 보정하여 주는 것이며 보정 시에 더해주어야 하는 값이다. 육상중력과 선상중력을 합성하는 경우 선상중력에는 해저면까지의 부계 보정이 필수적이며, 특히 선상중력과 육상중력이 만나는 곳에는 해저면까지의 부계 보정이 이루어져야 한다(Nowell, 1999). 육상 중력과 선상 중력을 합성할 경우 이들 사이의 차이를 최소화하기 위하여 해저면까지의 지형보정이 필요하며 특히 해안에서의 보정은 필수적이다.

### 지구 곡률에 의한 고도차

Fig. 6에서와 같이 중력 측정점에서 멀어질수록 지구 곡률에 의하여 지표면과의 고도차가 발생하게 되며, 중력 측정점에서 수평으로 10 km 떨어진 지점의 지구곡률에 의한 고도차는 약 7.8 m, 50 km 떨어진 지점은 약 196 m가 되고 측정점에서 멀어질수록 곡률에 의한 고도차는 더욱 커지게 된다. 따라서 엄밀한 지형보정에서는 이러한 효과를 고려해 주어야 할 것이다. 임의의 지점에서의 지구 곡률에 의하여 나타나는 높이차를 구하는 정확한 식은 지구의 반경이 위도에 따라 달라지고, 구하고자 하는 거리의 방향에



**Fig. 7.** Schematic diagram to show the difference between infinite slab and spherical shell terrain correction. A: topography model B: infinite slab correction and correction of height due to Earth's curvature. C: Bullard C correction after correcting height difference due to Earth's curvature.

따라 다르기 때문에 이를 정확하게 계산하기가 쉽지 않다. 따라서 이를 구하는 식은 식 (12)과 같이 간단히 나타낼 수 있다. 한편 Parker(1995)는 이를 식 (13)과 같이 더욱 간단하게 나타내었다. 지구 곡률에 의한 보정을 할 경우 측정점으로부터 지형격자까지의 거리는 지표면 호의 길이 S가 되는 것이 아니라 최단 거리 D가 된다(Fig. 6).

$$h_D = R - \cos\theta R \tag{12}$$

여기서 R은 지구반경,  $\theta$ 는 지구중심각이다.

$$b = S^2/2R \tag{13}$$

Fig. 7은 평판지형보정과 지구 곡률을 고려한 지형보정의 차이를 나타낸 그림이다. Fig. 7(A)는 임의의 지형자료를 나타낸 그림이고, Fig. 7(B)는 무한 평판에 의한 지형보정과 지구 곡률에 의한 높이 차이의 보정을 나타낸 그림(회색부분)이다. 무한 평판에 의한 지형보정은 지형이 평면인 것으로 가정하여 보정하기 때문에 Fig 7(B)에 나타낸 (+) 부분과 같이 측정점보

다 위 또는 아래의 지형보정값은 항상 더해지게 된다. 반면에 Fig. 7(C)와 같이 지구 곡률을 고려한 지형보정(Bullard C)의 경우, 지구 곡률에 의한 높이 차이를 보정하여 Bullard B 보정면 아래의 지형보정값은 더해주고, 중력측정점과 수평인 면과 Bullard B 보정면 사이는 빼주고, 중력측정점과 수평인 면의 위쪽은 더해지게 된다(Nowell, 1999).

## 지형자료

### 육상 지형자료

미국의 국방부 산하 NIMA에서는 전 세계의 지형자료를 갱신하고 있으며, DTED(Digital Terrain Elevation Data) 시리즈를 공개하고 있다. 이 자료는 준거타원체 WGS84를 기준으로 하는 1"×1" 격자의 평균고도 지형자료인 DTED Level 2, 3"×3" 격자의 평균고도 지형자료인 DTED Level 1, 30"×30" 격자의 평균고도 지형자료인 DTED Level 0(DMA, 1996)로 구성된다. DTED 자료는 육상지역에만 국한되며, 바다 지역의 고도는 모두 0으로 되어 있다. 본 연구에 사용된 자료는 DTED Level 1과 DTED Level 0의 자료를 이용하였다. NIMA의 DTED 자료는 최대 ±30 m의 오차를 포함하고 있으며, 본 연구에서는 경도 120°에서 135°까지, 위도 28°에서 43°까지 범위의 지형자료를 이용하였다.

### 수심 자료

최광선과 이영철(2001)은 2001년 3"×3" DTED Level 1 지형자료와 수심자료를 합성하여 한반도 일원의 3"×3" 격자의 지형자료를 만들었으나 수심자료의 부족으로 인하여 해저면의 지형을 정밀하게 표현하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 국립해양조사원으로부터 794,373 지점의 수심자료를 입수하고 이와 영국 리드대학의 5'×5' 수심자료 DTM 5(University of Leeds, 1995)를 사용하여 3"×3" 격자의 지형자료를 작성하였다. 이 자료의 범위는 Fig. 8과 같다.

국립해양조사원의 수심자료는 국립해양조사원이 1996년부터 탐사선 '해양2000'호와 '바다로1'호의 운영을 통한 한반도 해역 일원의 수심자료를 포함하고 있으며, 이에 따라 한반도 주위 해역의 해저 지형을 더욱 정확하게 표현할 수 있게 되었다. 반면에 국립해양조사원의 수심자료 기준면은 약최저조조면(ALLWL; approximately lowest low water level)으로 평균해수

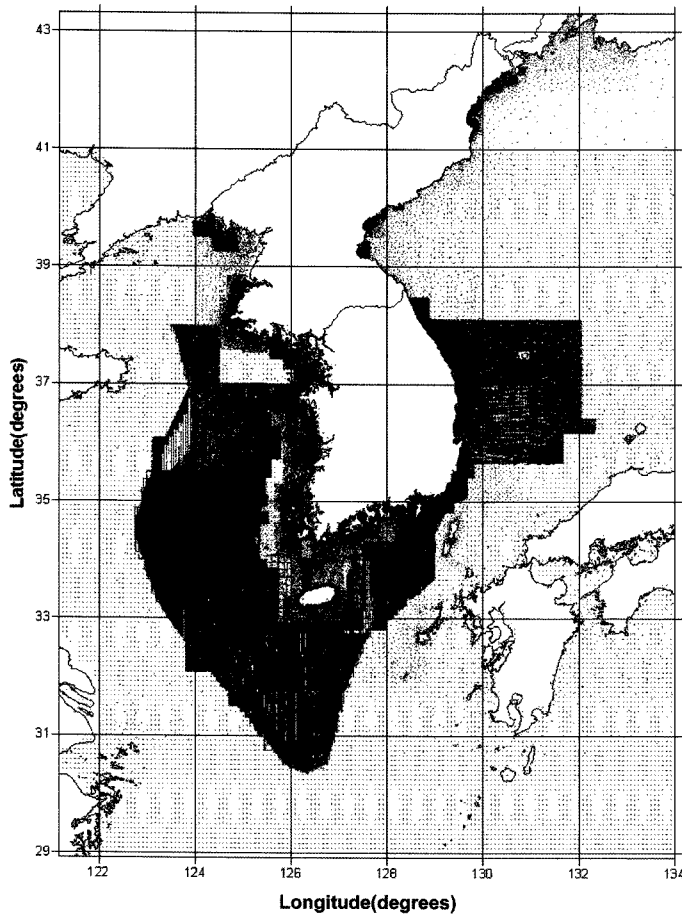


Fig. 8. Bathymetry data around Korean peninsula from NORI (National Oceanographic Research Institute).

면과 비교할 때 최대 10 m의 오차를 포함하고 있으나 NIMA의 DTED 자료 최대 오차가  $\pm 30$  m이므로 기준면을 평균해수면으로 보정하지 않고 바로 사용하였다. 기준면이 약최저조조면인 수심자료를 평균해수면을 기준으로 하는 수심으로 보정하면 더욱 정밀한 해저 지형을 표현할 수 있을 것이다.

### 지형자료

국립해양조사원으로부터 입수한 수심자료는 등간격 자료가 아니기 때문에 Winteracter 6.1(Interactive Software Services Ltd., 2004)의 서브루틴 IPgXYZToGrid와 Surfer(Golden Software Inc., 2002)의 Kriging 방법을 이용하여 위·경도 간격이 3"인 등격자의 지형 자료를 작성하였으며, 이의 음영기복도는 Fig. 9와 같다. 서해와 남해는 최대 -100 m 내외의 수심을 보이며, 동해지역은 Fig. 9의 북동부 지역에서 수심이

-3,400 m 이상 되는 곳도 나타난다. Fig. 9의 지형자료에서 가장 높은 곳은 백두산 부근의 2,609 m이며, 가장 낮은 곳은 일본 남부의 -6,802 m로 나타난다.

모든 지형자료는 2 byte integer로 위·경도 간격 각각 1도 단위로 나누어 저장하였고, 1개의 파일의 크기는 2.88 Mbyte, 총 지형파일의 개수는 225개 블록이며 전체 648 Mbyte이다. 이상의 지형자료를 이용하면 남한 육상 지역의 어느 부분에서도 반경 166.735 km까지 지형보정을 할 수 있다.

### 지형보정

본 연구에서는 앞서 언급한 NIMA Level 1과 국립해양조사원의 수심자료, 리드 대학의 수심자료를 합성하여 작성한 3"×3" 지형자료를 이용하여 지형 보정을 실시하였다. 지형보정은 최근접지역, 근접지

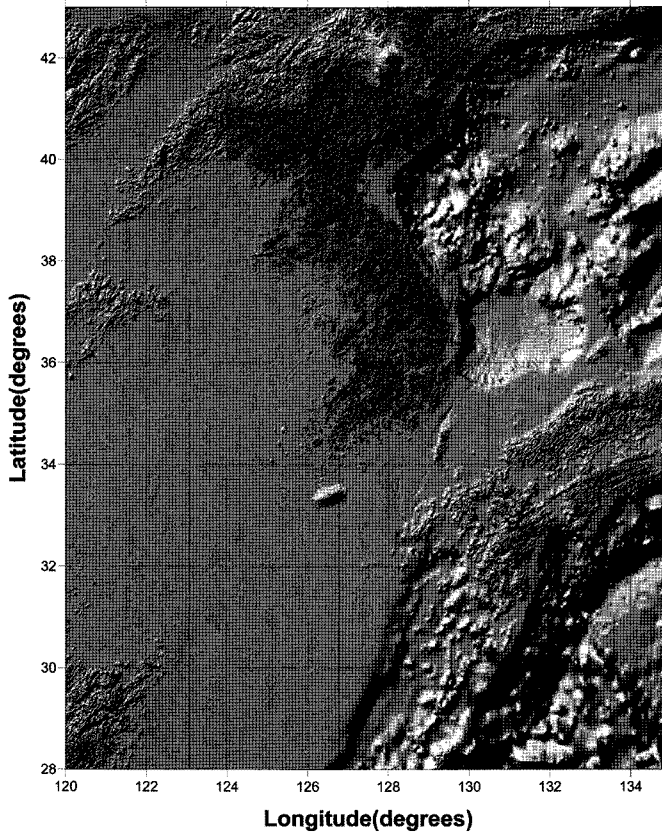


Fig. 9. Combined topographic relief map for terrain correction.

역, 중간지역, 외곽지역으로 나누어 보정하였다. 최근 접지역은 중력측정점을 포함하고 있는 6"×6" 지역, 근접지역은 중력측정점으로부터 20 km까지, 중간지역은 20 km에서 50 km까지, 외곽지역은 50 km에서 166.735 km까지이다.

최근접지역(Innermost zone, Fig. 10)은 중력측정점 주위 4개의 3"×3" 격자로 이루어진다. 빗금 친 부분 내에 중력 측정점이 위치하면 주위 4개의 지형자료를 불러들여 식 (8)을 이용하여 지형보정을 수행한다. 빗금 친 부분은 3" 격자 네 개를 붙였을 때 안쪽의 3"×3"에 해당하며 빗금 친 부분의 실선은 빗금에 포함되고 점선은 포함되지 않음을 의미한다.

근접지역(Inner zone)은 Fig. 11과 같이 중력측정점으로부터 약 20 km에 해당하는 부분으로, Nagy의 식 (8)을 사용하였다. 지형보정을 수행하는 도중 바다에 해당하는 부분은 해수면 위쪽 부분과 해수면 아래를 분리하여 계산하였으며, 이때 밀도는 해수면 위쪽의 부분은 지각의 평균밀도 2.67 g/cm, 해수면 아래쪽은

지각의 평균밀도와 해수면 밀도 1.03 g/cm와의 차이 1.64 g/cm로 계산하였다.

중간지역(Intermediate zone)과 외곽지역(outer zone)은 각각 중력측정점으로부터 약 20 km에서 50 km, 약 50 km에서 166.735 km에 해당하는 부분으로 중간지역은 6"×6" 평균고도 자료를, 외곽지역은 12"×12" 평균고도 자료를 이용하며, 두 지역 모두 Ketelaar의 식 (11)을 사용하였다. 역시 마찬가지로 바다에 해당하는 부분의 인력 계산에는 해수면 위쪽과 아래 부분을 분리하여 계산하였으며 앞에서 언급한 밀도 처리 방법에 따랐다.

한 지점의 지형보정에 필요한 지형격자수는 경도방향 2192개 × 위도방향 1804개가 필요하며 최소 메모리는 약 25.92 Mbyte가 필요하다. 이는 최근의 어느 컴퓨터에서나 이용할 수 있는 수준이다. 본 연구에 사용된 PC의 CPU는 Intel Core2 2.40 GHz이며 이에 의한 한 지점의 계산 시간은 약 1.0초이다.

앞서 나눈 지형보정 각 구간에 해당하는 지형보정



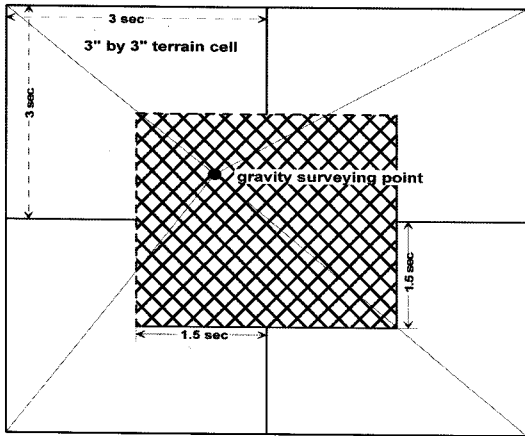


Fig. 10. Innermost area surrounding the gravity surveying point.

값의 비율을 알아보기 위하여 중력측정점의 높이를 0m로 가정하고, 주위 지형을 일정한 높이 100 m, 1000 m로 가정하여 각각에 대한 지형보정값을 계산하고 이들의 퍼센트 비율을 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타낸 바와 같이 주위 지형을 100 m로 가정 하였을 경우 전체 지형보정값에 대한 20 km까지의 누적 비율은 100.2%로 나타난다. 이는 지구의 곡률을 고려한 지형보정에서 더해주는 지형보정값과 빼주는 지형보정값이 나타나는 것에 기인한다. 다시 말해 측정점에서 멀어질수록 지구곡률에 의한 높이차가 발생하는 것에 의하여 Fig. 7C에서와 같이 더해주는 값과 빼주는 값이 공존한다. 약 36 km 떨어진 지점에서 지구곡률에 의한 높이차가 약 100 m 정도 발생하여 중간지역에서 빼주는 값과 더해주는 값이 서로 상쇄되고 결국 빼주어야 하는 지형보정 값이 더해주어야 하는 지형보정값 보다 우세하여 음(-)의 지형보정값을 가지게 된다. 또한 외곽지역으로 멀어질수록 전체지형보정에서 빼주어야 하는 음(-)의 지

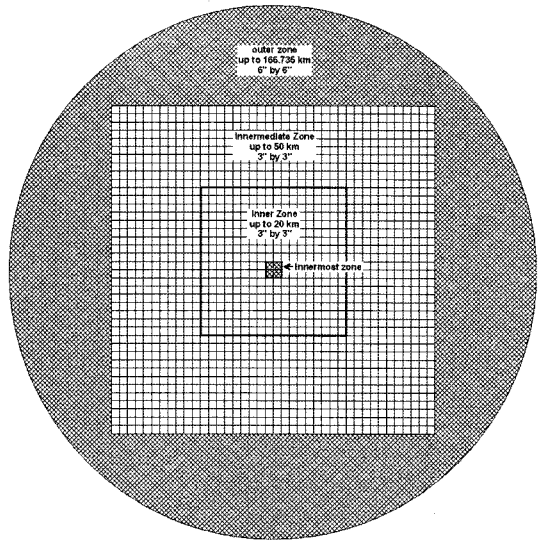


Fig. 11. Zone chart for use in evaluating terrain corrections at gravity stations.

형보정값이 계산되어 외곽지역은 음(-)의 지형보정값을 가지게 된다. 결국 외곽지역까지 지형보정값의 누적 비율은 100 %가 된다. 반면 주위 지형을 1000 m로 가정하였을 경우는 중간지역에서 지구곡률에 의한 높이차가 발생하여 음(-)의 지형보정값과 양의 지형보정값이 상쇄된다 하더라도 Fig. 7C에서와 같이 측정점보다 높은 지역의 양(+)의 값이 음(-)의 값보다 우세하여 중간지역에서의 지형보정값은 양(+)을 가진다. 하지만 측정점으로부터 거리가 멀어질수록 빼주어야 하는 값이 우세하여 외곽지역에서는 음(-)의 지형보정값을 가지게 된다.

본 연구에서 개발한 지형보정 프로그램을 이용하여 남한 육상 지역의 지형보정을 해 보았다. 위도 39도 이남의 지형자료 중 위도 및 경도가 각각 30초 간격의 자료를 추출하여 197,413개 지점을 Bullard B 반

Table 1. Each zone's terrain correction value and their percent rate

	Innermost zone (3" × 3")	Inner zone (-20 km)	Intermediate zone (20 km-50 km)	Outer zone (up to 166.736 km)
100 m	3.2115 mGal 32.111 %	6.8095 mGal 68.089 %	-0.0090 mGal -0.090 %	-0.0110 mGal -0.110 %
Cumulated value	3.2115 mGal 32.111 %	10.0210 mGal 100.200 %	10.012 mGal 100.110 %	10.001 mGal 100.000 %
1000 m	9.2959 mGal 8.185 %	103.6365 mGal 91.251 %	1.0277 mGal 0.905 %	-0.3868 mGal -0.341 %
Cumulated value	9.2959 mGal 8.185 %	112.9324 mGal 99.436 %	113.9601 mGal 100.341 %	113.5733 mGal 100.000 %

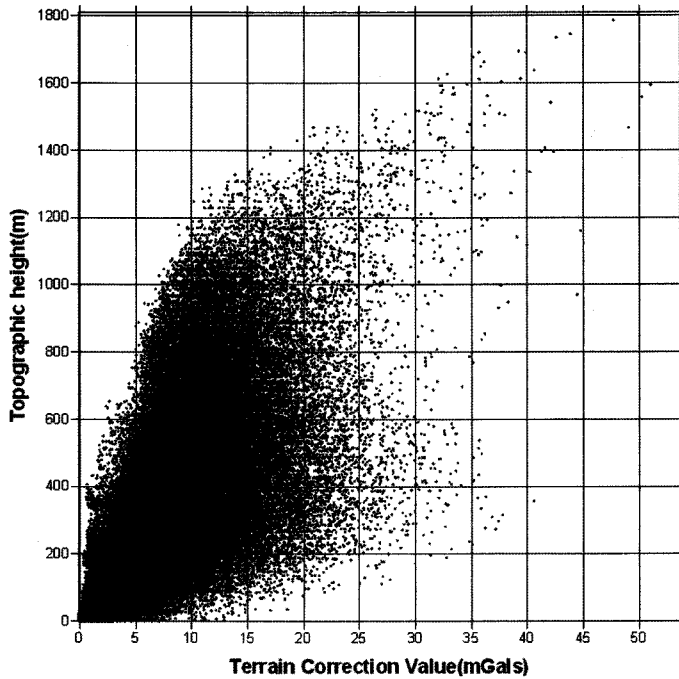


Fig. 12. Distribution diagram of the terrain correction value according to topographic height.

경 166.735 km에 대한 지형보정을 실시하였다.

지형보정값 중 가장 큰 값은 경도 127.733958도, 위도 35.342292도, 표고 1811m인 지리산 부근 지점에서 53.641 mGal로 계산되었으며, 평균 지형보정값은 5.482 mGal로 정밀한 중력 이상을 위해서는 지형보정이 필수적임을 나타내고 있다. Fig. 12는 계산된 지형 보정치와 표고와의 관계를 나타낸 것이다. 표고와 지형 보정치가 비교적 큰 정의 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 한반도에 대한 지형보정값 분포도를 Fig. 13에 나타내었으며, 이는 우리나라 지형도와 흡사하여 지형보정값이 지형과 연관이 있음을 시사한다.

바다 지역에 대한 인력의 영향을 알아보기 위하여 해수면에서 해저면까지에 대한 지형보정만을 따로 추출하여 Fig. 14과 Fig. 15에 나타내었다. 해수면에서 해저면까지에 대한 지형보정의 평균치는 0.145 mGal로 계산되었으며, 내륙 쪽으로 갈수록 바다 지역의 영향이 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 특이한 것은 울릉도와 동해 바다 지역의 영향이 서해와 남해에 비해 월등히 크게 나타난다는 점이다. 이는 동해가 서해와 남해보다 수심이 깊고 급격히 변화하는 것에 기인한다. 또한 울릉도 지역은 육지에 가까운 동해지

역에 비해 수심변화량이 더욱 크기 때문에 해저면까지의 지형보정값은 육지에 가까운 동해에 비해 더욱 크게 나타난다. Fig. 14는 울릉도와 독도의 해저면까지의 지형보정값 분포를 나타내었다. 울릉도 지역의 해저면까지의 지형보정 평균치는 5.826 mGal로 육지 지역의 평균치 0.145 mGal에 비해 훨씬 크게 나타난다.

## 결론

1. 해양수산부 산하 국립해양조사원의 794,373개 지점의 수심자료와 영국 리드 대학의 5'×5' 수심자료, 미 국방부 산하 NIMA의 DTED Level 1과 Level 0의 지형자료를 합성하여 한반도 일원의 북위 28도에서 42도, 동경 120도에서 135도까지 범위의 3"×3" 지형자료를 만들었다. 이 자료를 이용하면 우리나라 육상지역의 어느 곳에서나 166.135 km까지 지형보정을 할 수 있다.

2. 부계 보정 시 무한평면에 의한 부계 보정을 하지 않고, LaFehr(1991)가 유도한 Bullard B 보정을 하도록 하였다. 또한 지형보정 시 지구 곡률에 의한 높이차를 보정하도록 하였으며 이에 따라 더욱 정밀한 중력이상값을 구할 수 있도록 하였다.

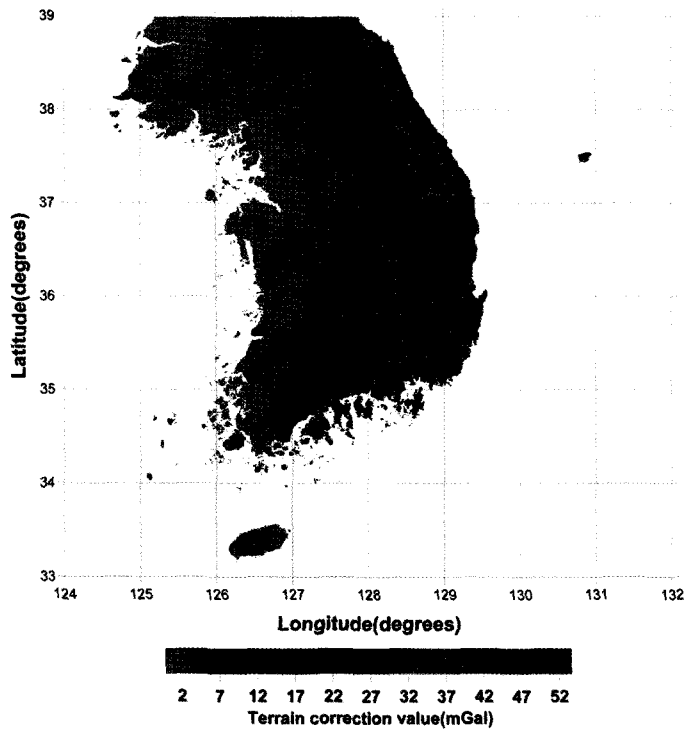


Fig. 13. Distribution map of the terrain correction value.

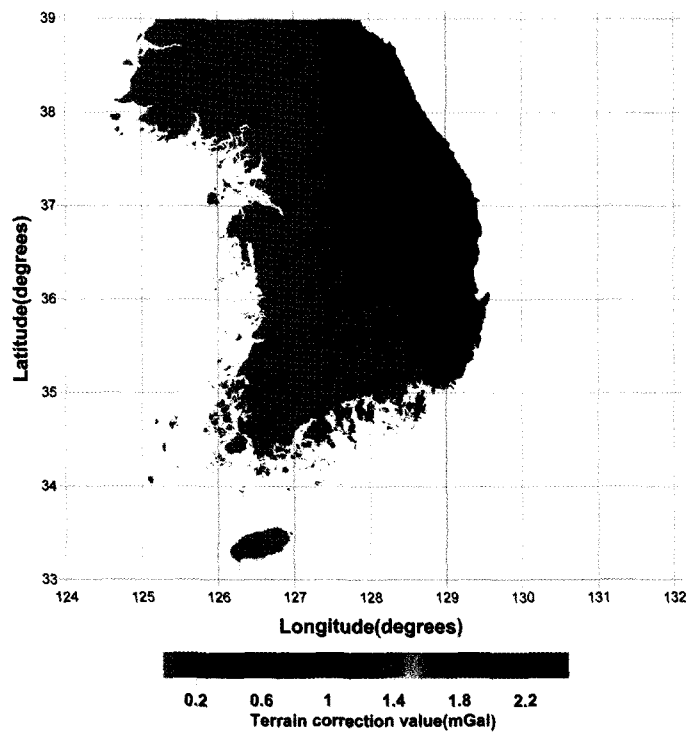


Fig. 14. Distribution map of the terrain correction value down to the sea floor.

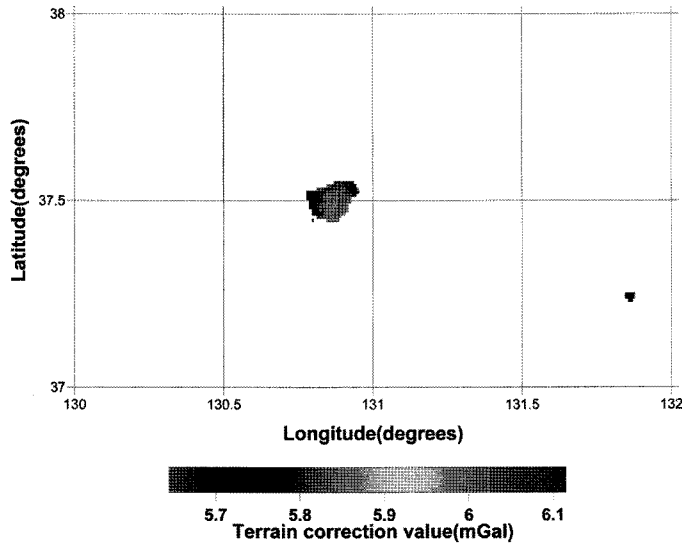


Fig. 15. Distribution map of the terrain correction value down to the sea floor around Ullung-do area.

3. 정밀한 지형보정을 위하여 중력측정점을 포함하는 지형 격자의 지형보정은 Ma and Watts의 식을 이용하였으며, 20 km까지는 Nagy의 식을, 50 km까지는 6" × 6" 지형 격자를 사용한 Ketelaar의 식을 이용하고, 166.735 km까지는 12" × 12" 격자를 이용한 Ketelaar 식으로 지형보정을 하였다.

4. 지형보정을 하는 도중 바다에 해당하는 부분은 해수면 위쪽 부분과 해수면 아래쪽 부분을(틀) 분리하여 계산하였으며, 해저면까지 지형보정을 하도록 하였다. 해저면까지의 지형보정 결과 서해와 남해의 바다쪽의 영향은 대부분 0.01 mGal 정도로 크지 않고, 동해지역은 2.40 mGal 까지 나타나는 곳이 있다. 이는 동해의 수심이 급격히 깊어지는 것이 원인이다. 또한 울릉도 지역의 해저면까지의 지형보정 평균치는 6.10 mGal로 동해지역보다 더 크게 나타난다. 따라서 동해지역의 선상중력과 육상중력의 병합 시 선상중력에 해저면까지의 지형보정이 필수적임을 시사한다.

5. 본 연구에서 작성한 지형보정 프로그램을 운용하기 위한 Computer 최소 메모리는 25.92 Mbyte이고, 지형자료를 저장하기 위해 필요한 하드디스크의 용량은 648 Mbyte이다.

6. 이 프로그램을 이용하여 166.735 km까지 지형보정을 할 경우, 1개 지점의 계산 시간은 Intel Core2 2.40GHz CPU에서 약 1.0초, Pentium4 3.2 GHz에서 약 2.7초가 소요된다.

7. 한반도 일원의 지형보정값 분포도가 지형도와

흡사하게 나타나며 이는 표고와 지형보정값이 정 상관계수에 있음을 시사하고 있다.

8. 지형보정값의 정밀도는 지형자료의 정밀도와 정확도에 따라 달라지며 좀 더 세밀하고 정확한 지형자료를 이용한다면 더욱 정밀한 지형보정값을 계산할 수 있을 것이다.

## 사 사

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

권병두, 권재월, 이희순, 1990, 다중 이차곡면 방정식을 이용한 중력자료의 지형보정. 한국지구과학회지, 11, 156-164.

김성균, 류용규, 김재철, 1992, 개인용 컴퓨터에 의한 효율적인 중력의 지형보정. 한국지구과학회지, 13, 11-20.

원지훈, 2004, 중력과 GPS자료에 의한 한반도 남부 및 인근 해역의 정밀 지오이드 연구. 부산대학교 이학박사 학위 논문, 159 p.

최광선, 1986, 한반도 남부의 중력에 대한 연구. 서울대학교 이학박사 학위 논문, 110 p.

최광선, 이영철, 2001, 수치 지형자료를 이용한 중력의 지형보정. 지질학회지, 37, 133-142.

Aiken, C.L. and Cogbill, A.H., 1998, Recent developments in digital gravity data acquisition on land. The Leading Edge, 17, 93-97.

- Bullard, E.C., 1936, Gravity measurements in East Africa, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 235, 445-534.
- Bott, M.H.P., 1959, The use of electronic digital computers for the evaluation of gravimetric terrain corrections. *Geophysical Prospecting*, 8, 45-54.
- Choi, K.S., Kim, J.H., and Yang, C.S., 1997, PNU95 Geoid. *Korean Journal of Geophysical Research*, 25, 1-13.
- DMA, 1996, Performance specification Digital Terrain Elevation Data (DTED). Defence Mapping Agency, Document Number: MIL-PRF-89020A, 40 p.
- Global digital terrain model (DTM5) CD-ROM., 1995, University of Leeds.
- Golden Software Inc., 2002, Surfer user's guide. 619 p.
- Hammer, S., 1939, Terrain corrections for gravimeter stations. *Geophysics*, 4, 184-194.
- Hayford, J.F. and Bowie, W., 1912, The effect of topography and Isostatic compensation upon the intensity of gravity. *Bulletin of the American Geographical Society*, 44 (6), 464-465.
- Interactive Software Services Ltd., 2005, Winteracter 6.10, On-line Documentation Collection.
- Jung, K., 1961, *Schwerkraftverfahren in der Angewandten Geophysik*, Akad., Verlagsges., Geest and Portig K. G, Germany, 348 p.
- Kane, M.F., 1962, A comprehensive system of terrain corrections using a digital computer. *Geophysics*, 27, 455-462.
- Ketelaar, A.C.R., 1987, Terrain correction for gravity measurements, Using a digital terrain model (DTM). *Geoexploration*, 24, 109-124.
- LaFehr, T.R., 1991, An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction. *Geophysics*, 56, 1179-1184.
- Lemoine, F.G., Kenyon, S.C., Factor, J.K., Trimmer, R.G., Pavlis, N.K., Chin, D.S., Cox, C.M., Klosko, S.M., Luthcke, M.H., Torrence, M.H., Wang, Y.M., Williamson, R.G., Pavlis, E.C., Rapp, R.H., and Olson, T.R., 1998, The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96, NASA/TP-1998-206861, 575 p.
- Lyman, G.D., Aiken, C.L., Cogbill, A., Blade, M., and Lide, C., 1997, Terrain mapping by reflectorless laser rangefinding systems for inner zone gravity terrain corrections. *Expanded Abstracts, 1997 SEG annual meeting*, November 2-7, Dallas, TX.
- Ma, X.Q. and Watts, D.R., 1994, Terrain correction program for regional gravity surveys. *Computers and Geoscience*, 20, 961-972.
- Nagy, D., 1966, The gravitational attraction of a right rectangular prism. *Geophysics*, 31, 362-371.
- Nowell, D.A.G., 1999, Gravity terrain corrections - an overview. *Journal of Applied Geophysics*, 42, 117-134.
- Parker, R.L., 1995, Improved Fourier terrain correction: Part I. *Geophysics*, 60, 1007-1017.
- Reilly, W.I., 1972, New Zealand gravity map series. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 15, 3-15.
- Steinhauser, P., Meurers, B., and Rues, D., 1990, Gravity investigations in Mountainous areas. *Exploration Geophysics*, 21, 161-168.
- Talwani, M., 1973, Computer Usages in the Computation of Gravity Anomalies. In Alder, B., Fernbach, S., and Rotenberg, M., *Methods in Computational Physics*. 13, 343-389.

---

2007년 9월 4일 접수  
2007년 10월 8일 수정원고 접수  
2007년 10월 31일 채택