

GEM9 위성자료와 지상자료의 조합에 의한 남한지역의 GRS80 중력지오이드

The GRS80 Gravimetric Geoid from GEM9 Potential Coefficients and Terrestrial Gravity Anomalies in the South Korea Region

曹圭田* · 李榮鎮** · 曹奉煥***

Cho, Kyu Jon · Lee, Young Jin · Cho, Bong Whan

Abstract

The gravimetric geoid of the South Korea Region was computed on Geodetic Reference System 1980(GRS80) using a combination of satellite-derived potential coefficients and terrestrial gravity data. $10' \times 10'$ mean gravity anomalies were obtained from surface gravity data for the outer zones, $1^\circ \times 1^\circ$ equal area mean anomalies were used for the inner zones, and point gravity anomalies were used for the innermost zones in the Stokes integration. The GRS80 potential coefficients were obtained from modification of GEM9 data and Integration was extended over a spherical cap of 30° from the integration area. The results of a free-air geoid show that the systematic mean difference of approximately 2~3m in comparison of OSU89B model.

요 지

순수한 위성모델의 조화상수와 지상중력을 조합하여 남한지역에서의 측지기준계 1980(GRS80) 중력지오이드가 산정되었다. Stokes적분의 영역으로는 측점중력을 사용한 $20' \times 20'$ 의 인접범위와 $10' \times 10'$ 평균중력을 사용한 $2^\circ \times 2^\circ$ 의 중간범위, 그리고 GEM9 조화상수를 GRS80 기준계로 변환하여 구한 $1^\circ \times 1^\circ$ 평균중력을 외곽범위에 적용하였다. 경계영역을 $\psi_0 = 30^\circ$ 로 한 Stokes적분의 결과에서는 OSU89B 모델과 약 2~3m의 차이가 있으며 이는 1×10^{-6} 인 프리에어 지오이드로서 만족됨을 보여주고 있다.

1. 서 론

지오이드는 모든 점에서 중력방향과 직각으로 교차하는 등중력포텐셜면 (equi-potential surface)으로 정의된다. 이는 육지와 해면의 기록을 나타내는 것으로서 평균해면과의 편차가 최소인 최적의 수준면

(level surface)을 나타낸다.

지오이드의 기록을 지구전체로 고려할때 정규타원체(normal ellipsoid)와 유사하며, 정규타원체의 전 질량은 실제 지구의 전 질량과 같다고 정의되므로 정규타원체면상에서의 정규중력포텐셜값은 지오이드상의 등중력포텐셜값과 같다. 그러므로 실제의 지구중력장이 만드는 등중력포텐셜면 가운데에서 일정한 중력포텐셜 W와 정규중력포텐셜(normal gravity potential) U에 의해 지구내부의 질량불균

* 정회원 · 경기대학교 공과대학 토목공학과 부교수
** 정회원 · 서울시립대, 한양대 공과대학 토목공학과 강사
*** 정회원 · 국방과학연구소 선임연구원

질에 따른 이상중력포텐셜(disturbing potential) T 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(1,15,18)

$$T = W - U \quad (1)$$

중력지오이드(gravimetric geoid)는 기준타원체를 기준으로 하여 지오이드면까지의 높이인 지오이드고(geoidal height)에 의해 그 기복을 나타낼 수 있으며 측정중력을 사용하면 측지학의 경계치문제(the geodetic boundary problem)의 해로부터 지오이드를 구할 수 있다.

그러나 지표면에 측정된 불규칙한 중력을 보정하여 규칙화(regularization)한 후에 대응되는 중력 이상을 사용하여 해를 구하면 실제의 지오이드가 아닌 변형된 보상지오이드(co-geoid or regularized geoid or compensated geoid)가 된다.

중력을 규칙화하기 위한 보정방법으로는 많은 기법이 제시되고 있으나 실용상 가장 적절한 방법은 프리에어 보정(free-air reduction)이며, 이는 Helmer의 제2응축법(Helmert's second method of condensation)의 특수한 경우로서 지오이드 외부에 있는 지형이 지오이드면에 응축된 것으로 고려하는 개념이다.

프리에어 보정에서 수반되는 indirect effect는 수 m정도로 작기 때문에 1×10^{-6} 측지학에서는 Stokes방정식에 의해 구한 co-geoid와 실제의 지오이드를 근사적으로 같다고 말할 수 있으며 이를 프리에어 지오이드(free-air geoid)라고 한다.

이 논문에서는 우리나라 남한지역에 대한 GRS80 프리에어 중력지오이드를 산정하여 제시하고 있다.

2. Stokes문제

1849년에 발표된 논문에서 Stokes는 포텐셜론의 새로운 문제로서 지표면에서 측정된 중력으로부터 지오이드 기복을 구할 수 있는 실용적인 방법을 제안하였는데, 이 방법은 Stokes정리와 Dirichlet의 원리를 기초로 하고 있다.^(15,19)

지오이드의 외부에 질량이 전혀 없다고 가정한다면 식(1)의 이상중력포텐셜 T 는 조화함수로서 다음의 Laplace방정식을 만족한다.

$$\nabla^2 T = 0 \quad (2)$$

지금 지오이드면상의 점을 P , 대응되는 타원체면상의 점을 P_0 라 하고 γ 를 정규중력이라고 할때, 기준타원체상의 정규중력포텐셜 U_0 와 지오이드상의 일정한 중력포텐셜 W_0 를 상수로 선택하면 지오이드고는 Brun의 방정식에 의해 다음과 같이 된다.

$$N = \frac{T_P}{\gamma_{P_0}} \quad (3)$$

이 식은 물리량 T 와 기하량 N 의 관계를 보여준다. 또한 H 가 정표고(orthometric height)이고 타원체의 수직방향이라면 지오이드를 근사적인 구(sphere)로 고려하여 반경이 R 이고 방향이 r 일때 다음이 성립한다.

$$\Delta g = -\frac{\partial T}{\partial r} - \frac{2}{r}T \quad (4)$$

여기서 Δg 는 오직 지표면에서만 측정이 가능하므로 식(4)는 T 를 구하기 위한 경계조건식임을 알 수 있다. 그러므로 지구의 포텐셜과 타원체의 포텐셜을 등식으로 놓으면 조화함수 T 는 Laplace 미분방정식에 의해 정의될 수 있다.

식 (4)로 부터 미분방정식의 해를 구하는 것이 중력을 해석하는 기본적인 문제이며 이 식을 물리 측지학의 기본방정식(fundamental equation of physical geodesy)이라고 말한다. Stokes문제는 결국 제 3경계치 문제에 해당된다.

지오이드의 외부에 있는 물질(질량)을 중력보정에 의해 제거시킬 수 있다면 이상중력포텐셜 T 는 구면조화함수의 급수로 나타낼 수 있으며 이때 T 는 다음과 같이 표현된다.^(14,15)

$$T(r, \theta, \lambda) = \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} T_n(\theta, \lambda) \quad (5)$$

이를 r 에 대하여 미분하고 이를 식 (4)에 대입하면 중력이상에 대한 구면조화함수식이 된다.

$$\Delta g(r, \theta, \lambda) = \frac{1}{r} \sum_{n=2}^{\infty} (n-1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} T_n(\theta, \lambda) \quad (6)$$

다시 구면근사에 대하여 지오이드상에서 $r=R$ 이므로 중력 이상을 구면함수로 확장시키면,

$$\Delta g(\theta, \lambda) = \sum_{n=2}^{\infty} \Delta g_n(\theta, \lambda) \quad (7)$$

가 되며 식 (6)을 고려한다면 T_n 과 Δg_n 의 관계가 성립한다.

$$T_n = \frac{R}{n-1} \Delta g_n \quad (8)$$

Laplace구면함수에 의하면,

$$\Delta g_n = \frac{2n+1}{4\pi} \iint \Delta g P_n(\cos\psi) d\sigma \quad (9)$$

여기서, $P_n(\cos\psi)$ 는 Legendre polynomials(zonal harmonics)이다. 결과적으로 식 (9)를 식 (8)에, 다시 식 (5)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$T = \frac{R}{4\pi} \iint_{\sigma} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \frac{2n+1}{n-1} P_n(\cos\psi) \right] \Delta g d\sigma \quad (10)$$

다시 Brun의 방정식을 적용하면 다음의 유명한 Stokes적분식 (Stokes' integral formula)가 된다.

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g s(\psi) d\sigma \quad (11)$$

지오이드고 N 은 계산점(ϕ, λ)에서 구해지며 $d\sigma$ 는 중력점(ϕ', λ')에 대응되며 Stokes함수 $S(\psi)$ 는 다음과 같다.

$$S(\psi) = \operatorname{cosec} \frac{\psi}{2} + 1 - 5\cos\psi - 6\sin\frac{\psi}{2} - \cos\psi \cdot \ln\left(\sin\frac{\psi}{2} + \sin^2\frac{\psi}{2}\right) \quad (12)$$

식 (11)의 Stokes 적분에 의해 중력이상 자료로부터 지오이드고를 계산할 경우 전지구에 걸친 중력이상의 자료가 필요하므로 수치적분에서 어려움이 뒤따른다. 따라서 미측정된 지역이나 해양의 자료는 인공위성의 궤도해석으로부터 구한 중력이상 자료를 이용하는 것이 효과적이다.

이 경우에 있어 구면조화함수의 상수에 의한 이상중력 포텐셜 T 로부터 중력이상 Δg_s 는 다음과 같이 구해질 수 있다.^(2,7,10,13)

$$\Delta g_s = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^n (n-1) \left(\frac{R}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^* \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos\theta) \quad (13)$$

이 때 Δg_s 는 대기밀도에 대한 영향이 없는 값이다. 또한 \bar{C}_{nm}^* 는 위성 해석된 실제의 상수와 채택된 기준타원체 상수(\bar{C}_{20} 와 \bar{C}_{40})의 차이를 의미한다. 그러므로 Δg_s 를 지표면의 중력이상과 조합시키면 전 지구에 걸친 Stokes 적분해를 구할 수 있다.

3. 위성모델의 변환

본 연구에서는 순수한 위성모델인 GEM-1,3,5,7,9와 GEM-T₁,T₂중에서 GEM9의 조화상수를 지구모델로 선택하였다.^(6,8,11,13) 이 모델은 $n'=20$ 차로서 180/20=9° 또는 1000km의 장파장 주기를 갖고 있으며 장파장에서 약 1.75m의 지오이드 정확도를 갖는다.

GEM9모델은 GRS80 타원체로의 변환을 실시하여 지오이드고 또는 중력이상을 산정할 필요가 있으며 이를 위해서 조화상수값을 수정하는 방법을 사용하였다. 원심력 포텐셜을 Z 라고 할때 GRS80 정규포텐셜의 중력 포텐셜은 다음과 같이 주어진다.

$$U-Z = \frac{GM^*}{r} \left\{ 1 - \sum_{n=2,4,6,8} \left(\frac{a^*}{r}\right)^n (C_{nm}^* \cos m\lambda + P_{nm}(\cos\theta)) \right\} \quad (14)$$

여기서, GRS80의 값에는 *표시를 하였다. 또한 식 (14)을 식 (1)에 적용하면 다음과 같다.

$$T = W - U = V - (U - Z) \quad (15)$$

$$T(r, \theta, \lambda) = \left(\frac{GM}{r} - \frac{GM^*}{r}\right) + \frac{GM}{a} \sum_{n=2}^{20} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n-1} (C_{nm}^* \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos\theta) \quad (16)$$

C_{nm}^* 는 단지 $m=0$ 과 $n=2,4,6,8$ 에서만 C_{nm} 과 다른 값이다. 새로운 값을 계산하기 위하여 먼저 정규중력포텐셜을 정규화하고 식 (16)을 비교하면 다음의 관계가 성립한다.

$$C_{no}^* = C_{no} + \frac{GM^*}{GM} \left(\frac{a^*}{a}\right) C_{no}^* \quad (17)$$

식 (16)에서 첫 항은 GRS80과 GEM9간의 기준 포텐셜에서 일정한 변환인 $U_0 = T_0$ 를 나타내므로,

$n=2,4,6$ 에 대해서만 C'_{n0} 를 사용하고 $n \approx 2,4,6$ 에 대해서 $C'_{nm} = C_{nm}$ 을 사용하면 다음의 최종식이 된다.

$$T(r, \phi, \lambda) = T_0 + \frac{GM}{r} \sum_{n=2}^{20} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C'_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \quad (18)$$

그러므로 전산프로그램에 의해 중력산란(gravity disturbance) δg_p 를 계산해 낼 수 있으므로 중력 이상은 다음에 의해 구할 수 있다.

$$\Delta g = \delta g_p - \frac{2}{R} T_p \quad (19)$$

4. 중력자료의 D/B구축

식 (4)의 경계조건을 만족시키기 위해서는 지구구의 표면에 대한 중력자료가 있어야 하나 이는 현실적으로 대단히 어려운 문제이므로 지상중력이 없는 지역은 위성자료로 대체될 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 순수한 위성모델인 GEM9 으로부터 MGA60 자료파일을 구성하였으며 지상중력으로부터 PGA 자료파일과 MGA10 자료파일을 구축하였다.

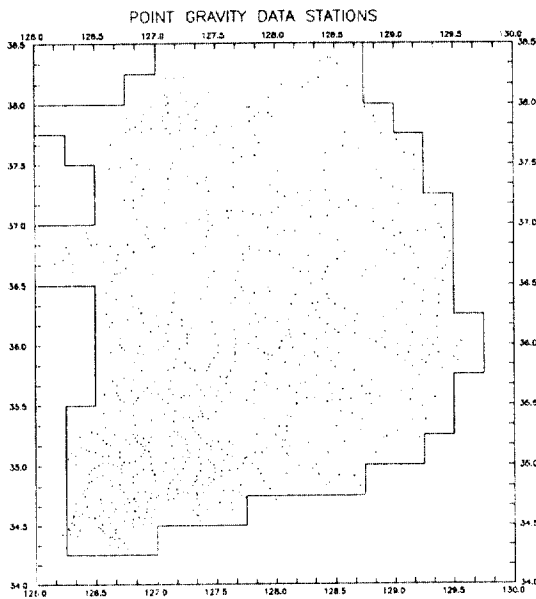


그림 1. 중력측정점의 분포(PGA)

지표면으로 부터 측정된 중력의 프리에어 이상은 실측중력 g 와 정규중력 γ_0 , 그리고 측정점의 표고 H 로부터 계산되며 대기보정이 추가되었다.

$$\Delta g_r = g + 0.3086H - \gamma_0 \quad (20)$$

PGA(point gravity anomaly)자료파일은 국립지리원에서 1977년부터 1990년까지 관측한 약1200점의 자료로부터 구성되었으며 이는 남한지역의 육지에서 Lacoste중력계에 의해 중력측량 작업규정에 따라 측정된 것이다. 이 PGA파일자료는 지오이드고의 계산에서 인접범위의 영향을 계산하는데 직접 이용되었다(그림 1 참조).

MGA10($10' \times 10'$ mean gravity anomaly)자료파일은 PGA자료파일로부터 산술적으로 직접 계산하였다. $10' \times 10'$ 격자내의 PGA값을 산술평균하였으나 PGA가 없는 격자점은 인접된 격자를 포함시켜 $30' \times 30'$ 격자내 PGA자료의 산술평균을 취하였다. 즉,

$$\bar{g} = (\sum \Delta g_i) / n \quad (21)$$

$$\bar{h} = (\sum h_i) / n \quad (22)$$

$$\bar{\sigma}_g = \text{SQRT}((\sum \sigma_i^2) / n) \quad (23)$$

이 MGA10자료파일은 경도 4° , 위도 5° 의 남한 지역에 적용되었으며 그영역은 $34^\circ\text{N} \sim 39^\circ\text{N}$, $126^\circ\text{E} \sim 130^\circ\text{E}$ 이다. 각 레코드는 위도, 경도가 증가되는 순서로 저장되었다. 레코드가 없는 격자에 대해서는 중력이상과 표준편차를 9999mgal , 표고를 0.0m 로 지정하였으며 이 MGA10파일은 중간범위의 영향에 따른 지오이드고를 계산하는데 이용되었다.

MGA60($60' \times 60'$ mean gravity anomaly) 자료파일은 모두 식 (18)을 이용하여 GEM9모델을 GRS80 모델로 변환하였으며, 식 (17)과 식 (18)의 해법에는 부프로그램 POT(Tscherning, 1983)을 수정하여 이용하였다. $1^\circ \times 1^\circ$ 격자점의 수치는 경도 100° , 위도 70° 영역에 대하여 구했으며, $1^\circ\text{N} \sim 71^\circ\text{N}$, $78^\circ\text{E} \sim 178^\circ\text{E}$ 의 범위에 상당하고MGA60은 외곽범위의 영향을 계산하는데 이용되었다.

이들 파일자료는 모두 측정값이 IGSN71(the International Gravity Standardization Net 1971)에 근거하고 있으며 기준타원체1980(GRS1980)을 기준으로 하여 프리에어 중력이상 (free-air gravity anomaly)을 계산하였다.⁽⁹⁾

5. 지오이드고의 수치계산

5.1 적분영역과 수치적분

앞서의 Stokes방정식, 식 (11)은 수치적분으로 대체될 수 있으며 적분요소는 계산점에서 극좌표에 의한 Templates 또는 측지좌표에 의한 grid line을 사용할 수 있다. 본 연구에서는 전산처리를 효과적으로 수행할 수 있도록 격자선 방식을 채택하였다.

수치적분의 정확도를 높이기 위하여 적분의 영향이 큰부분은 작은 격자를 사용하고 영향이 작은 부분은 크게 설정할 수 있다. 또한 식 (12)의 Stokes함수의 크기가 계산점에서 무한대가 되므로 이의 해결을 위하여 부분적으로는 직접 적분하는 기법을 병행하였다.

따라서 식 (11)의 Stokes적분식은 적분영역별로 그 영향을 분리할 수 있으므로 계산점 P에서의 지오이드고는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(1,19)

$$N_p = N_{im} + N_i + N_o \quad (24)$$

여기서 N_{im} 은 인접범위의 적분에 대한 영향, N_i 는 중간범위의 적분에 대한 영향, N_o 는 외곽범위의 적분에 대한 영향을 나타낸다. 식 (24)에 대응되는 적분영역을 구분하면 다음과 같다.

(a) 인접범위 (innermost zone) ; 계산점에 직접 접하고 있는 영역으로서 20'×20'의 크기이며 10' 격자선과 경계가 일치된다. 이 범위에서는 PGA 자료파일을 이용한다.

(b) 중간범위(inner zone); 인접범위를 제외한 바깥쪽의 2°×2°의 크기를 갖는 영역이며 외곽선이 1°의 격자선과 경계를 이룬다. 이 범위에서는 MGA 10 자료파일을 이용한다.

(c) 외곽범위(outer zone); 중간범위의 외곽부 경계와 전체의 적분영역에 대한 경계 ψ_0 까지의 영역을 나타내며, 이 범위에서는 MGA60파일을 이용한다.

식 (11)의 적분식은 중간범위에 대하여 10'×10' 격자의 합의 개념으로 영역의 면적을 대치시킬 수 있으므로 σ 를 중간범위의 면적, L을 중간범위의 격자요소 수라고 하면 다음이 성립된다.^(4,11)

$$N_i = \frac{R}{4\pi\gamma} \sum_{i=0}^L \iint_{\sigma} \Delta g S(\psi) \cdot d\sigma \quad (25)$$

그러므로 중간범위에 대하여 10'×10'격자의 평균

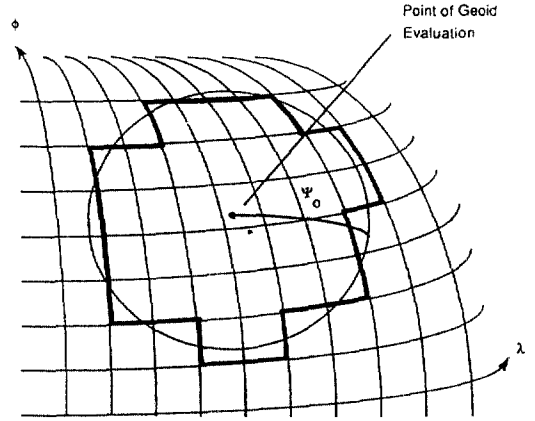


그림 2. 경계영역 ψ_0

중력이상을 적용하면 간단한 합의 연산이 된다. 여기서, $d\sigma = \cos\psi_i \cdot a^2$ 요소, a는 격자크기, ψ_i 는 계산점과 격자중심간의 지심각거리를 나타낸다.

$$N_i = \frac{R}{4\pi\gamma} \sum_{i=0}^L \Delta g_i S(\psi_i) d\sigma_i \quad (26)$$

같은 방법으로 외곽범위에 대하여 1°×1°격자요소를 적용하면 M을 격자의 수라 할때 그 크기가 다른 $d\sigma_i$ 가 되며 경계영역 ψ_0 (그림 2 참조)를 선택하면 다음의 연산이 된다.

$$N_o = \frac{R}{4\pi\gamma} \sum_{i=0}^M \Delta g_i S(\psi_i) d\sigma_i \quad (27)$$

위 식 (26)과 식 (27)이 수치적분에 직접 적용되는 식이며 ψ_i 는 격자점마다 계산되어야 하고 격자는 정사각형으로 가정되지만 위도에 따라 서로 다른 크기가 된다.

계산점에 인접한 범위에 대해서 적분할 때에는 Stokes함수가 무한대에 접근하여 적분하기가 곤란하므로 별도의 해법이 필요하다. 지금 측지좌표계 ϕ, λ 를 사용하면 Stokes방정식 식 (11)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$N_{im} = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} \Delta g(\phi, \lambda) S(\psi) \cos\phi \, d\phi \, d\lambda \quad (28)$$

지오이드를 계산하려는 계산점을 ϕ_0, λ_0 라 할때 $\cos\phi$ 대신에 $\cos\phi_0$ 를 사용하고 평면에 투영변환할 수 있

다.⁽¹⁷⁾

$$x = \cos\phi_0 \cdot (\lambda - \lambda_0) \quad (29a)$$

$$y = \phi - \phi_0 \quad (29b)$$

그러므로 식 (28)을 다시쓰면 다음과 같다.

$$N_{im} = \frac{R}{4\pi\gamma} \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \Delta g(x, y) S(\psi) dx dy \quad (30)$$

$$\text{단, } \psi = \psi(x, y) = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (31)$$

여기서 식 (30)을 정밀하게 풀려면 해석적인 기법을 사용해야 한다. 그러므로 식 (12)로부터 삼각함수에 의해 근사시키면, 인접범위가 20'×20'로서 ψ 의 크기가 협소하기 때문에 다음을 이용할 수 있다.

$$S(\psi) = \frac{2}{\psi} - 3In\left(\frac{\psi}{2}\right) = \frac{2}{\psi} \quad (32)$$

인접범위에 있는 PGA자료는 다음과 같은 2차 다항식으로 나타내어 그 계수인 i 를 구할 수 있다 (경우에 따라 항이 소거됨).

$$\Delta g(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (33)$$

식 (33)과 식 (32)를 식 (28)에 대입하면 다음과 같다.

$$N_{im} = \sum_{i=1}^8 N_i \quad (34)$$

만일, 인접범위 내부에 PGA자료가 없는 경우라면 4개의 10'×10'격자의 평균중력이상을 사용한다.

5.2 전산프로그램

Stokes적분에 의해 지오이드고를 산정하기 위한 프로그램 GEOINT(GEOid INTEgration)가 본 연구에서 구성되었다. 이 프로그램은 LAHEY FORTRAN에 의해 작성되었으며 약 1500개의 문으로서 1개의 주프로그램과 26개의 부프로그램으로 편성되었다.

프로그램 GEOINT는 인접범위, 중간범위, 외곽범위의 3개 구역으로 분할시켜 누적하는 방식을 택하였으며 1개의 계산점마다 적분을 실시하는 과정을 반복토록 하고 있다. 이밖에 프리에어 중력이상을 계산하는 전산프로그램과 격자크기에 따른 평균중력이상을 계산하는 전산프로그램이 별도로 작성되

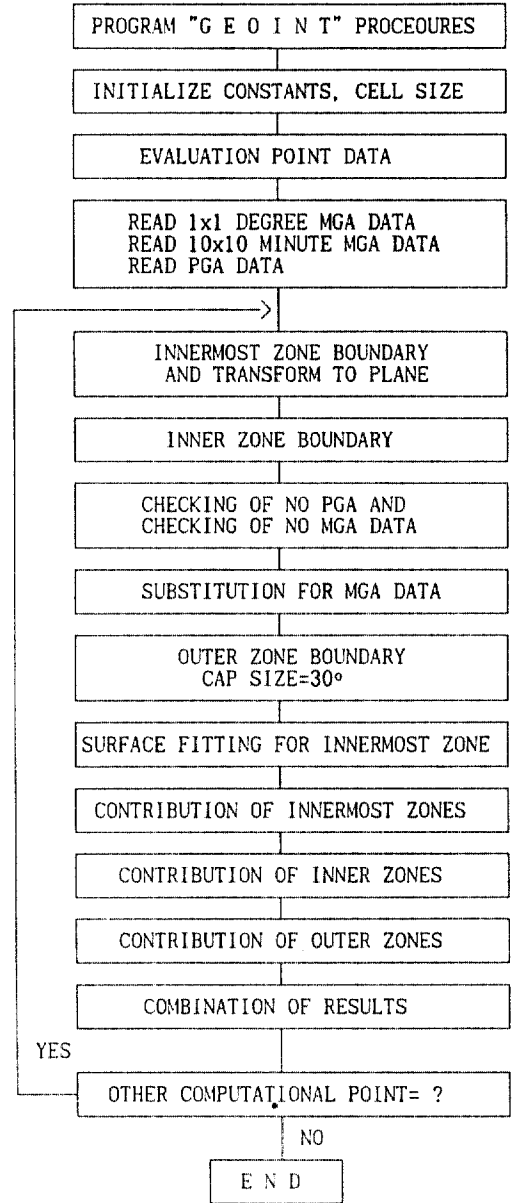


그림 3. GEOINT의 Stokes적분 흐름도

었다.

그림 3은 GEOINT의 계산과정을 개략적으로 보여주고 있다.

5.3 결과 및 고찰

GEOINT에 본 연구에서 구축한 데이터를 적용하여 남한지역의 지오이드가 산정되었다. 그림 4.

수 있는데 이는 GEM9이나 GRS80과 Bessel지역 타원체의 차이에 영향을 받고 있으며 평균해면의 차이와 평균중력이상 또는 적분영역에서 나타난 것으로 생각된다.

또한 일본의 Ganeko의 결과⁽⁹⁾보다는 약 1~2m 낮게 나타나고 있으므로 이 차이는 1×10^{-6} 지오이드로서 타당성을 부여받을 수 있다. 한편 OSU89 B지오이드의 정확도로 제시된 $\pm 59\text{cm}$ 의 수치는 내부적인 결과일 뿐이며 도플러측위와의 비교⁽¹²⁾에서 $\pm 1.60\text{m}$ 절대적인 정확도의 차이로 파악되므로 비교판단에 주의가 필요하다.

본 연구의 결과는 보다 많은 중력측정이나 GPS 측위에 의하여 비교될 수 있으며 MGA자료파일 구축에 평균표고를 사용하는 등의 정확도 향상이 시도되어야 할 것으로 생각되며, 1×10^{-7} 지오이드인 1m정확도의 중력지오이드의 개발과 Bessel지오이드의 개발이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

지상에서 측정된 중력자료와 GEM9 위성자료를 조합하여 Stokes적분에 의해 구한 남한지역의 GRS 80 프리에어 지오이드의 모델이 결정되었다. 이는 $20' \times 20'$ 의 인접범위, $2^\circ \times 2^\circ$ 의 중간범위, $\psi_0 = 30^\circ$ 의 외곽범위의 세 영역으로 나누어 계산점마다의 지오이드고를 산정하여 합하였으며, 위성중력은 GEM9 조화상수를 GRS80으로 변환시켜 구하였고 프리에어 중력이상은 GRS80을 기준으로 하였다.

연구결과를 OSU89B모델등과 비교해 볼때 전체적인 경향이 유사하고 약 2~3m 낮은 수치를 보여주고 있으며, 이는 1×10^{-6} 인 수 m정확도의 프리에어 지오이드로서 합당함을 보여주고 있다.

앞으로 GPS 측정을 통하여 보다 엄밀한 분석과 1×10^{-7} 인 1m 정확도의 세부중력지오이드(detailed gravimetric geoid)의 개발이 수행되어야 하며 한국 지역에서 Bessel 기준타원체에 대응되는 지역지오이드의 개발이 가장 시급한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소 장기기초연구사업(과

제번호 ADD-90-004)의 지원에 의한 것이며 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

1. Bomford, G. *Geodesy* (4th ed.), Oxford University Press, 1980.
2. Chang, R.- G., C.- C. Chang and J.- T. Lee, A Gravimetric Geoid in Taiwan Area, in "Sea Surface Topography and the Geoid (IAG General meeting symposium 105)", Springer-Verlag, 1989, pp. 61-72.
3. Ganeko, Y., A $1' \times 10'$ Detailed Gravimetric Geoid around Japan, *Marine Geodesy*, 7(1~4), 1983, pp. 291-314.
4. Gilliland, J. R., Comparisons of Gravimetric Geoid Result Using Mean Gravity Anomalies and Potential Coefficients in the South Australian Region, *Survey Review*, 28(215), 1985, pp. 41-46.
5. Heiskanen, W. A. and H. Moritz, *Physical Geodesy*, Freeman, 1967.
6. Lerch, F. J., S. M. Klosko, R. E. Laubscher and C. A. Wagner, Gravity Model Improvement Using Geos3(GEM9 and 10), *J. of Geophysical Research*, 84(88), 1979, pp. 3897-3916.
7. Lwangasi, A. S., The Geoid in Kenya, in "Progress in the Determination of the Earth's Gravity Field" (OSU Report No.397, 1989), 1988, pp. 112-116.
8. Marsh, J. G. et al., A Gravitational Model for the Earth from Satellite Tracking Data : GEM-T1, *J. of Geophysical Research*, 93(86), 1988, pp. 6169-6215.
9. Moritz, H., Geodetic Reference System 1980, *Bulletin Geodesique*, 62, 1988, pp. 348-358.
10. Nagy, D., GEOID '88 : A Gravimetric Geoid for Canada, in "Progress in the Determination of the Earth's Gravity Field" (OSU report No.397, 1989), 1988, pp. 117-120.
11. Obenson, G., Geoidal Heights for Africa from GEM9 Potential Coefficients and Degree Gravity Anomalies, *Survey Review*, 28(218), 1985, pp. 207-213.
12. Rapp, R. H. and N. K. Pavlis, OSU89A/B Potential Coefficient Models, in *Determination of the Geoid; present and future*(ed. Rapp and Sanso), international symposium held at Milano, Italy, Springer-Verlag, 1990.

13. Rapp, R. H., Gravitational Potential Coefficient Models Developments and Comparison, *proc. of the IAG symposia in IUGG General Assembly*, Vancouver, IAG, 1987, pp. 167-176.
14. Rapp, R. H., Aspects of Geoid Definition and Determination, *proc. of the General Meeting of IGA*, Tokyo, 1982, pp. 411-423.
15. Torge, W., *Geodesy : An Introduction*, Translated from German by C. Jekeli, Walter de Gruyter, 1980.
16. Vanicek, P., A. Kleusberg, R. G. Chang, H. Fashir, N. Christou, M. Hofman, T. Kling and T. Arsenault, The Canadian Geoid, *Technical Report No. 129*, U. of New Brunswick, 1987.
17. Vanicek, P., C. Zhang and P. Ong, Computation of a File of Geoidal Heights Using Molodensky's Truncation Method, *Technical Report No.147*, U. of New Brunswick, 1990.
18. 大野重保, 測地學の 方法, 東洋書店, 1987.
19. 萩原辛男, 地球重力論, 共立出版, 1978.
20. 조규전, 이영진, 우리나라 천문측지지오이드에 관한 연구, *한국측지학회지*, 9(2), 1991, pp. 1-8.
21. 조규전, 이영진, 남한지역의 프리에어 지오이드 산정, *대한토목학회 학술발표회집*, 1992, pp. 360-363.
22. 최광선, OSU89B에 의한 한반도 일원의 지오이드에 관한 연구, *한국측지학회지*, 9(2), 1991, pp. 67-72.
(接受 : 1992. 12. 28)