

## 벡셀타원체 기준의 남한지역 지오이드 모델(KGM95) Geoid Models Referred to the Bessel Ellipsoid of South Korea

李 榮 鎮\*  
Lee, Young-Jin

### 요 旨

지오이드고는 천문측지자료, 중력자료, 위성자료 등으로 부터 계산될 수 있다. 이 논문에서는 연직선편차와 지오이드고 제약조건을 사용하여 곡면다항식법에 따라 동경원점계인 벡셀지오이드 모델(KGM95-A)을 산정하고 지심계인 중력지오이드 모델 KGM 93-C로 부터 동경원점 변환요소에 의해 변환된 벡셀지오이드(KGM95-D)와 비교하였으며 우리나라 측지망에서의 적용에 대한 토의가 제시되었다.

### ABSTRACT

The geoidal heights of a country may be computed from astrogeodetic, gravimetric or satellite data. In this paper, the geoid models to the Bessel ellipsoid(KGM95-A) have been determined by the astrogeodetic method, which is surface fitting techniques using deflections of the vertical and geoid height constraints.

Transformation equations and the gravimetric geocentric geoid(KGM93-C) were applied to obtain the geoid height referred to the Tokyo Datum of the Korean geodetic network, the comparison of the astrogeodetic results and discussions of the geoid information were added.

### 1. 서 론

지오이드는 지구중력장과 평균해면이 일치되는 등포텐셜면으로서 하나의 물리적인 면을 나타내며 특별하게 정의된 기준타원체면으로 부터 지오이드까지의 높이를 지오이드고라고 한다. 이는 측지학 분야와 지구물리학 분야에서 중요하게 취급되어 왔으나 실용적인 목적의 측량에서는 지표면에서의 측정거리를 엄밀하게 보정하여 기준면상의 거리로 환산하거나 3차원 위치결정에서 항상 고려되어야 할 사항이다.

측정거리(경사거리)를 기준면으로 보정하고자 할 때 측정점의 표고에서 6.4 m의 오차는 거리에서 1ppm의 오차를 유발한다는 사실은 잘 알려져 있다.<sup>1)</sup> 여기서 지표면상의 한 점에 대한 타원체고는 직접수준측량에 의한 표고와 지오이드고의 합으로 나타내므로 표고오차는 직접수준측량의 영향이기 때문에 미소하여 지오이드고의 영향이 주요한 오차요인이 된다.

측정거리에 대한 오차는 측정오차보다 5~10배 낮은 크기여야 하므로 지오이드고는 0.1ppm의 거리오차에 대응되도록 0.64 m의 정확도를 가져야 한다.<sup>10,12)</sup> GPS 측량에서 기선측정의 경우에서 초기좌표는 20 m의 정확도가 필요하므로 이에 적합되는 좌표계 변환요소의 결정에 필요한 지오이드고의 정확도는 수 m이내면 가능하다.

한편 과학적인 목적의 지구형상 결정에서는 지오이드의 실제 형상을 구해야 하기 때문에 가능한 한 높은 정확도의 지오이드고가 결정되어야 할 것이다.

현재까지 국내에서는 중력지오이드, 위성지오이드 등에 관한 연구가 발표된 바 있으며 GRS80 지오이드가 대부분이다.<sup>4,5,6,7)</sup> 벡셀지오이드는 천문측지 지오이드로서 상대지오이드가 연구되었고 동경원점계 기준의 절대지오이드가 제시되지 않아서 위성측량의 보편화에 따르는 좌표계변환과 투영법에 의한 측지망 설정에 큰 문제점으로 대두되어 있다.<sup>1,2)</sup>

따라서 본 연구에서는 남한지역의 벡셀기준계 지오이드 모델을 결정코자 하였으며 한반도 남부와 일본 전

\*경북산업대학교 공대 측지공학과

역의 천문측지자료인 연직선편차로부터 지오이드 모델을 구하고 KGM93-C의 GRS80 중력지오이드를 동경원점계로 변환하여 비교분석하였다.

## 2. 연직선편차와 지오이드고에 의한 지오이드 모델링

### 2.1 연직선편차에 의한 모델

이 방법은 Vanicek and Merry(1973)에서 제안된 방법으로서 지오이드를 2차원 n차 다항식으로 표현하게 되며 다항식면의 경사와 지오이드의 경사(연직선편차)의 차이에 대한 제곱의 합이 최소가 되도록 최소제곱해법에 따라 다항식의 계수를 구하는 방법이다.<sup>3,9,13,14)</sup>

어느 점의 지오이드고 N은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N(x, y) = \sum_{i,j=0}^n c_{ij} x^i y^j \quad (1)$$

x, y의 좌표는 임의의 원점 ( $\varphi_0, \lambda_0$ )에 대응되는 측지좌표 ( $\varphi, \lambda$ )로부터 평면좌표로 투영될 수 있다.

$$x = R(\varphi - \varphi_0) \quad (2a)$$

$$y = R(\lambda - \lambda_0) \cos\varphi \quad (2b)$$

연직선편차의 구면근사법에 의한 정의로부터 지오이드 경사와 연직선편차가 같은 것으로 고려하면 다음이 성립된다.

$$\frac{\partial N}{\partial x} = -\tan \xi \approx -\xi \quad (3a)$$

$$\frac{\partial N}{\partial y} = -\tan \eta \approx -\eta \quad (3b)$$

식 (1)에 대해 식 (3a, b)를 적용하여 미분하면,

$$\sum_{i,j} c_{ij} i x^{i-1} y^j = -\xi \quad (4a)$$

$$\sum_{i,j} c_{ij} j x^i y^{j-1} = -\eta \quad (4b)$$

위 식 (4)에서 우변을 좌변으로 이동하고 두 식을 각각

$\rho_x, \rho_y$ 라 하면

$$\rho_x^2 = \min, \rho_y^2 = \min \quad (5)$$

인 조건이 만족되도록 최소제곱법을 적용하여  $c_{ij}$ 를 구해야 한다.

따라서 관측방정식은

$$AC = L + V_1 \quad (W_1) \quad (6)$$

여기서 중량  $w_i$ 은  $w_i = 1 / \sigma_i^2$ 로 부여된다. 식 (6)의 해와 계수에 대한 공분산은 다음과 같다.

$$\hat{C} = (A^T W_1 A)^{-1} A^T W_1 L \quad (7)$$

$$\sum_C = \sigma_0^2 (A^T W_1 A)^{-1} \quad (8)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{V_1^T W_1 V_1}{df} \quad (9)$$

또한 지오이드고와 이에 대한 정확도는 다음에 의하여 계산할 수 있다. 식 (1)로부터,

$$\hat{N} = \hat{B}\hat{C} \quad (10)$$

$$\sum_N = \hat{B}\hat{C}\hat{B}^T = \sigma_0^2 B (A^T W_1 A)^{-1} B^T \quad (11)$$

### 2.2 지오이드고의 제약조건에 의한 모델

2.1절에서 설명된 곡면다항식법에서는 원점의 지오이드고, 즉  $c_{00}=0$ 이라는 가정조건에서 해가 구해질 수 있다. 그러나 위성측량 또는 적절한 기법으로부터 지오이드고가 구해진다면 이 지오이드고를 제약조건으로 하여 앞의 방법을 확장할 수가 있다.

지오이드고에 대한 제약방정식은 식 (1)을 직접 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다. 중량  $W_2$ 는  $w_i = 1 / \sigma_{N_i}^2$ 일 때,

$$DC = N + V_2 \quad (W_2) \quad (12)$$

따라서 잔차의 제곱합이 최소가 되기 위해서는 정규방정식은

$$(D^T W_2 D) C = D^T W_2 N \quad (13)$$

또한 식 (6)으로 부터의 정규방정식,

$$(A^T W_1 A)C = A^T W_1 L \quad (14)$$

이 때 식 (13)과 식 (14)는 미지수의 수와 행렬의 차원이 같기 때문에 조합시킬 수 있으므로 다음과 같이 된다.<sup>16)</sup>

$$(D^T W_2 D)C + (A^T W_1 A)C = D^T W_2 N + A^T W_1 L \quad (15)$$

따라서 곡면다항식의 계수는,

$$\hat{C} = (D^T W_2 D + A^T W_1 A)^{-1} (D^T W_2 N + A^T W_1 L) \quad (16)$$

또한

$$\sum C = \sigma_0^2 (D^T W_2 D + A^T W_1 A)^{-1} \quad (17)$$

$$\sigma_0^2 = (V_1^T W_1 V_1 + V_2^T W_2 V_2) / df \quad (18)$$

식 (16)으로 부터 계산되는 지오이드고는 식 (10)과 같으며, 식 (17)로부터 계산되는 지오이드고의 공분산은 식 (11)과 동일하게 나타낼 수 있다.

### 3. 지오이드고의 기준계 변환

#### 3.1 3차원좌표에 의한 간접변환

지표면상의 1점의 위치는 측지좌표가 ( $\varphi, \lambda, h$ )일 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>11,18)</sup>

$$\begin{aligned} X &= (R_N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= (R_N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= \{ R_N (1 - e^2) + h \} \sin \varphi \end{aligned} \quad (19)$$

여기서  $R_N$ 은 표유선 곡률반경,  $e$ 는 이심률이다.

식 (19)의 역변환에 의하면 타원체고  $h$ 를 구할 수 있으므로 직접수준측량에 의한  $H_s$ 와 지오이드와 평균해면과의 차이  $\delta_0$ 을 안다면 다음의 관계로 부터 지오이드고  $N$ 을 계산할 수 있다.

$$h = H + N \quad (20a)$$

$$h = (H_s + \delta_0) + N \quad (20b)$$

이심타원체상의 지오이드고는 식 (20a)의 타원체고 (또는 지오이드고)를 기준계변환을 통하여 구할 수 있다. 이 경우에는 지심타원체(geocentric ellipsoid)와 이심타원체(eccentric ellipsoid)간의 상호 변환요소를 알아야만 한다. 기본식<sup>10,11,17)</sup>,

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \varepsilon_3 & -\varepsilon_2 \\ -\varepsilon_3 & 1 & \varepsilon_1 \\ -\varepsilon_2 & -\varepsilon_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} (1+\delta L) \quad (21)$$

여기서  $\Delta L$ 은 축척변화,  $X', Y', Z'$ 는 이심타원체에서 지상점의 좌표,  $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ 는 지심타원체의 중심으로 부터 이심타원체 중심의 이동량, 오일러 각  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 는 이심타원체의 축을 지심타원체의 축과 나란하도록 하는 회전각,  $X, Y, Z$ 는 변환된 지심타원체상의 좌표이다.

이심타원체 기준의 지표점의 좌표가  $\varphi, \lambda, h=0$  인 경우에 장반경  $a'$ 와 이심률  $e'$ 를 이용하여 식 (19)로 부터  $X', Y', Z'$ 를 계산할 수 있으므로 이를 식 (21)에 대입하면  $X, Y, Z$ 를 구할 수 있다.

그러므로  $X, Y, Z$ 로부터 역변환에 의하여 타원체고  $h_0$ 를 구할 수 있는데  $h_0$ 는 지심타원체면으로부터 이심타원체면까지의 높이를 나타낸다. 결국 이심타원체 기준의 지오이드고  $N'$ 는 지심타원체의 지오이드고  $N$ 으로 부터 다음과 같이 주어진다.

$$N' = N - h_0 \quad (22)$$

#### 3.2 타원체의 직접변환

앞서의 3차원 좌표계의 계산에 의하지 않고  $N, \xi, \eta$  또는  $\delta\varphi, \delta\lambda, \delta h$ 를 계산하는 방법에 의해서 타원체 좌표를 직접 변환할 수 있다.

지오이드고의 변환식은 다음과 같다.<sup>18)</sup>

$$\begin{aligned} N'(\varphi, \lambda) - N(\varphi, \lambda) & \\ &= -\cos \varphi \cos \lambda \Delta X_0 - \cos \varphi \sin \lambda \Delta Y_0 - \sin \varphi \Delta Z_0 \\ &\quad - (a' - a) - a(f' - f) \sin^2 \varphi \end{aligned} \quad (23)$$

여기는  $a, f, N$ 은 지심타원체와 관련되며  $a', f, N'$ 는 이심타원체와 관련된다.

식 (23)에서  $\Delta N = N' - N$ 으로 하고 가상의 측정량

으로 고려한다면 최소제곱해법으로 부터 변화요소  $\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$ 를 계산할 수 있다. 따라서 2.1절로 부터 구한 이십타원체삼의 지오이드고와 중력 또는 위성 측량으로 부터 구한 지오이드고를 알고 있다면 변환요소를 결정할 수 있게 된다.

또한 측지원점에서의 변환요소가 결정되어 있다면 3.1절의 방법대신에 식 (23)에 의하여 이십타원체에서의 지오이드고를 구하는 것이 가능하게 된다.

#### 4. 벡셀 지오이드고의 산정

#### 4.1 천문측지 지오이드고의 계산

벡셀타원체 기준의 지오이드고, 보다 엄밀하게 말하자면 동경원점계의 남한지역의 지오이드고를 산정하기 위하여 천문측량과 측지기준점 측량과의 연직선편차로부터 곡면다항식법에 따라 천문측지 지오이드(astrogeodetic geoid)를 구하였다.

본 연구에서는 2.1절의 기본식을 사용하였으며 동경원점에서의 지오이드고를 0으로 하는 지오이드고 제약 조건을 부여하였다.

사용한 천문경위도 데이터는 1947년부터 1979년까지

표 1. 지오이드고 다항식의 계수

$c_j$	coeff.	$c_j$	coeff.	$c_j$	coeff.
00	0.13795413E-50	(same as 0.0E+00)			
01	-0.13292627E-04	34	0.27622937E+01	67	-0.15370153E+02
02	-0.26287961E-03	35	0.55399930E+01	68	-0.32004012E+01
03	0.53136718E-03	36	0.54138678E+01	70	-0.35196738E-00
04	0.50768374E-02	37	0.26157149E+01	71	-0.34026946E-00
05	0.12136366E-01	38	0.49983495E+00	72	0.92293239E-01
06	0.13755805E-01	40	0.15347100E-01	73	0.22586361E+01
07	0.76220194E-02	41	0.14499781E+00	74	0.92349442E+01
08	0.16581047E-02	42	0.25399511E-01	75	0.16846886E+02
10	-0.50278599E-06	43	-0.26769431E+01	76	0.15319327E+02
11	0.31199730E-03	44	-0.97888262E+01	77	0.64821757E+01
12	-0.19664924E-02	45	-0.16794479E+02	78	0.90951994E+00
13	-0.24916412E-01	46	-0.16137813E+02	80	0.96986865E-02
14	-0.98356337E-01	47	-0.83977977E+01	81	-0.12936283E-00
15	-0.18557602E+00	48	-0.18372618E+01	82	0.40016289E-01
16	-0.18161480E+00	50	-0.38081867E-00	83	-0.35711580E+00
17	-0.88996341E-01	51	-0.25118760E+00	84	-0.25342800E+01
18	-0.17282401E-01	52	-0.36407614E+00	85	-0.39137733E+01
20	0.13947855E-04	53	0.51633678E+01	86	-0.24129415E+01
21	0.40367497E-02	54	0.16629412E+02	87	-0.77109956E+00
22	0.34544009E-01	55	0.28752225E+02	88	-0.18112259E+00
23	0.82277187E-01	56	0.28863229E+02		
24	-0.59342084E-01	57	0.15763301E+02		
25	-0.46640866E+00	58	0.36127723E+01		
26	-0.65586023E+00	60	0.50988908E+00		
27	-0.38236388E+00	61	0.18995369E+00		
28	-0.81846311E-01	62	-0.45905810E+00		
30	-0.28865439E-02	63	-0.47994518E+01		
31	-0.39497793E-01	64	-0.16342875E+02		
32	-0.11279918E+00	65	-0.29778827E+02		
33	0.44446474E+00	66	-0.29816077E+02		

scale factor=1.0E-06

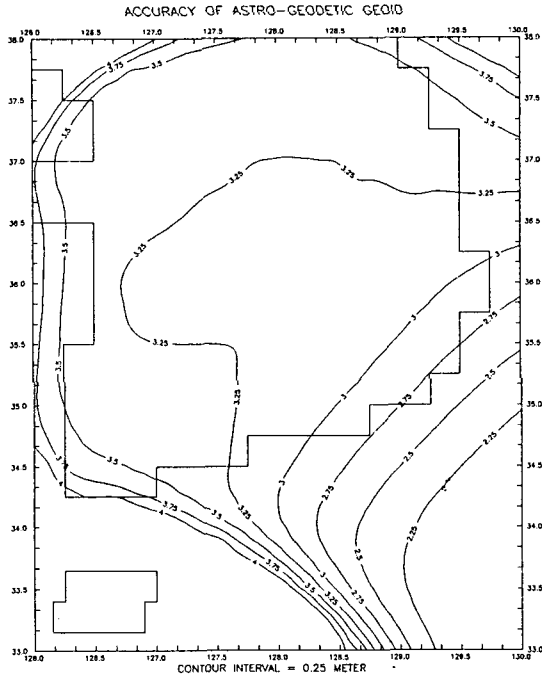


그림 1. 천문측지 지오이드의 정확도

지 관측된 일본 국토지리원의 354점과 1973년 부터 현재까지 국립지리원에서 관측된 40점이며 측지좌표의 오차가 크거나 국지적인 편차가 큰 데이터를 소거한 다음에 적용하였다.

중량의 적용에 있어서는 천문경위도의 오차  $\sigma_a$ 와 측지경위도의 오차  $\sigma_b$ 로 부터 연직선편차의 오차가 조합되어 나타나므로 각각의 오차 크기를 추정하고 중량은 이의 역수를 사용하였다.  $\sigma$ 는 일본의 경우와 각국에서 발표된  $\sigma_a$ 와  $\sigma_b$ 의 실험식을 검토한 후에 0.4"를 취하였다.<sup>9,15)</sup> 따라서,

$$\sigma^2 = \sigma_a^2 + \sigma_b^2$$

평균곡률반경 R은 동경원점에서의 수치를 채택하였다.

최소제곱해법에 의하여 계산된 8차식 다항식의 계수  $c_{ij}$ 로 부터 지오이드의 계산은 경위도 격자점 15'마다 실시하여 SURFER에 의해 등지오이드 지도를 출력하였다. 표 1에서는 지오이드를 다항식으로 나타내었을때 계수값 81개를 보여준다.

그림 2은 벡셀타원체의 천문측지지오이드를 보여주고 있는데 일본지역을 제외한 남한지역을 나타내고 있

다. 그림에서 경기도, 강원도의 북부지역과 제주도 부근의 남서쪽에서는 천문측량점이 1점 밖에 없기 때문에 불규칙한 형상을 보여주고 있다.

또한 그림 1는 천문측지 지오이드의 정확도를 나타내며 육지에서 대략 3.5 m의 정확도를 갖고 있고 일본으로부터 멀어짐에 따라 오차가 커지고 있음을 잘 나타내고 있다. 이는 일본의 천문지오이드 정확도가 대마도 부근에서 2.5 m이므로" 오차전파의 측면에서 잘 부합되고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 중력지오이드의 변환

현재까지 한반도의 GRS80 지오이드에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 먼저 조규전, 이영진, 조봉환(1994)에서 제시된 KGM93-C 모델로 부터 벡셀지오이드를 구하였다.

KGM 93-C 모델은 GEM-T2 지구모델과 지상중력을 조합하여 격자방식의 Stokes적분에 의해 구한 것이며<sup>4, 5,16)</sup> 그림 3은 이를 재계산하여 출력한 GRS80 중력지오이드를 보여주고 있다(KGM95-C).

한편 식 (23)을 이용하면 천문측지 지오이드와 중력지오이드의 차이로 부터 타원체간 이동 량  $\Delta X_0$ ,  $\Delta Y_0$ ,  $\Delta Z_0$ 를 최소제곱해에 의해 구할 수 있다. 이는 국내의 천문측량점에서의 지오이드를 이용하여 계산할 수 있는데 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta X_0 &= -206 \text{ m} \pm 9.4 \text{ m} \\ \Delta Y_0 &= +504 \text{ m} \pm 6.6 \text{ m} \\ \Delta Z_0 &= +635 \text{ m} \pm 6.6 \text{ m} \end{aligned}$$

이에 대응되는 벡셀지오이드인 중력지오이드는 그림 4에 나타냈다. 그림 4와 그림 2는 서로 비교될 수 있는 것으로서 천문측량점에서의 지오이드교차에 대한 평균이 0이고 평균제곱근오차가  $\pm 0.75$  m이다. 두 그림을 비교해 보면 지오이드의 차이가 1~2 m 이내이므로 평균제곱근오차의 범위내에 있음을 보여 준다.

GRS80 지오이드를 벡셀지오이드로 변환하고자 할 때 동경원점에서의 변환요소를 사용하면 식 (21)로부터 계산이 가능하다. 그러나 일본 "공공측량 작업규정"에서 채용하고 있는 식에서는 회전요소와 축척변화가 무시되고 타원체의 이동량만이 제공되고 있으므로 식 (23)을 활용할 수 있다. 그 수치는<sup>8)</sup>

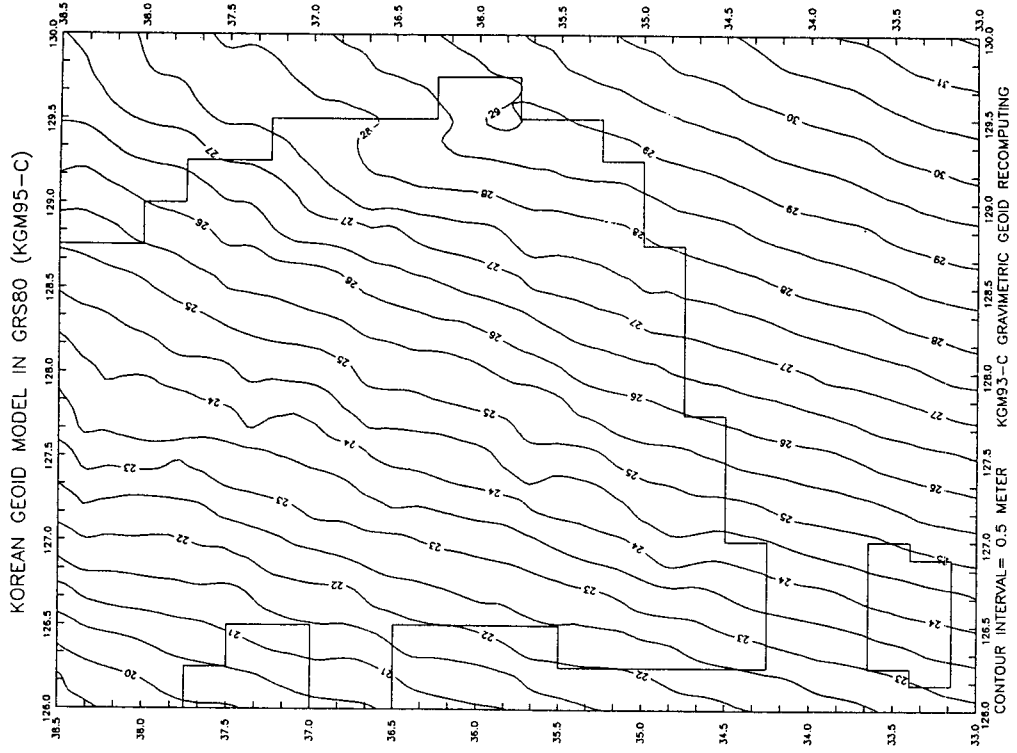


그림 3. KGM93-C를 재계산한 GRS80 중력지오이드(KGM95-C)

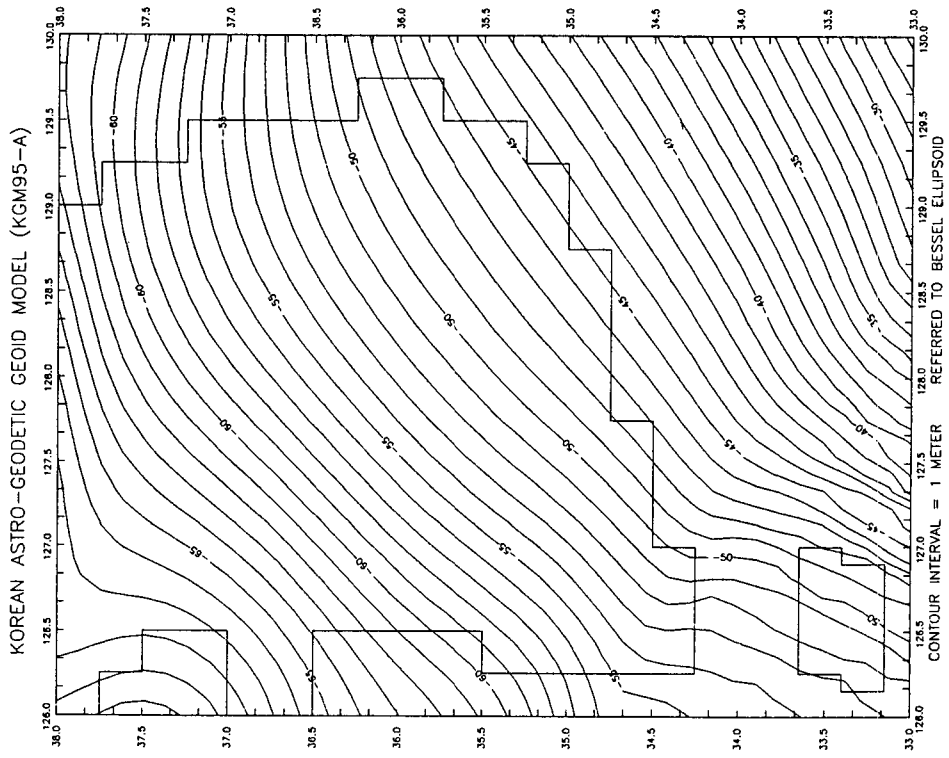


그림 2. 남한지역의 천문측지 지오이드(KGM95-A)

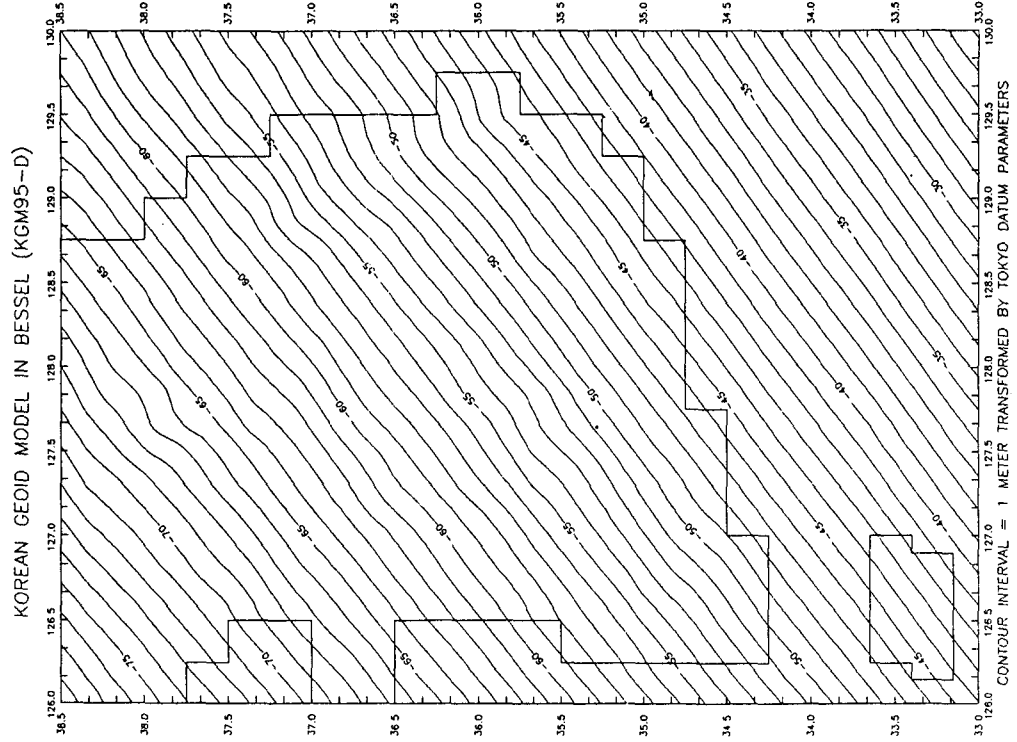


그림 5. 동경원점 요소에 의한 벡셀 중력지오이드(KGM95-D)  
 CONTOUR INTERVAL = 1 METER TRANSFORMED BY TOKYO DATUM PARAMETERS

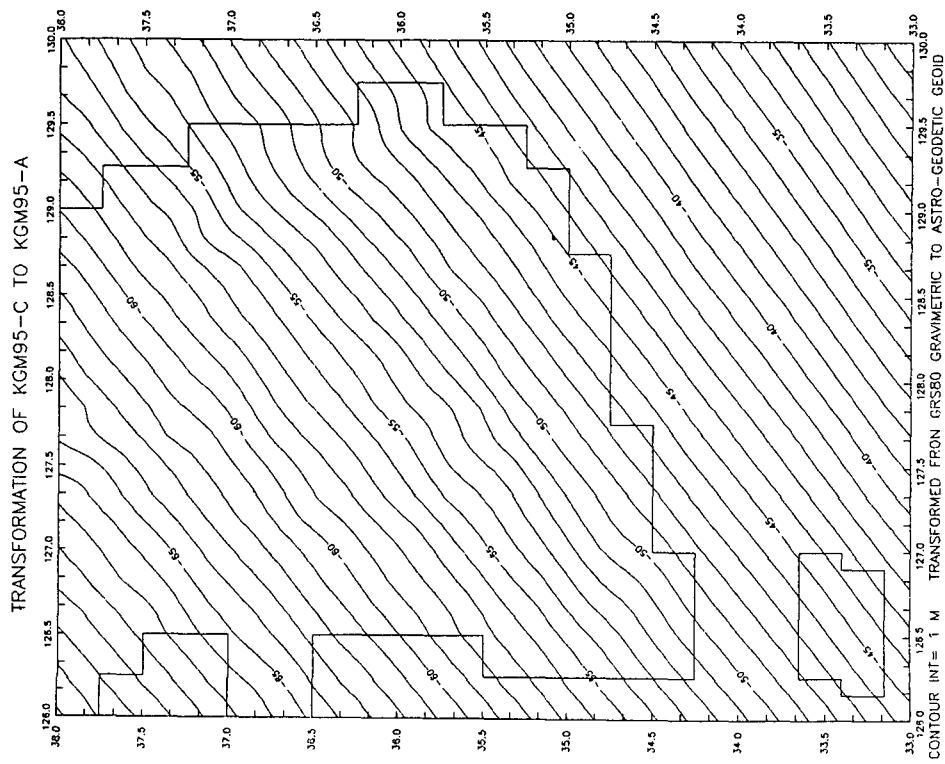


그림 4. KGM95-C로부터 천문측지 지오이드로 적합시킨 벡셀 중력지오이드 (KGM95-B)  
 CONTOUR INT = 1 M TRANSFORMED FROM GRS80 GRAVIMETRIC TO ASTRO-GEOIDIC GEOID

$$\Delta X_0 = -146.43 \text{ m}$$

$$\Delta Y_0 = +507.89 \text{ m}$$

$$\Delta Z_0 = +681.46 \text{ m}$$

이며, 벡셀 지오이드고의 산정은 타원체면간의 높이를 구하여 보정하는 방법을 사용하였다.

그림 5에서는 KGM 93-C로 부터 동경원점 변환요소에 의해 변환된 중력지오이드고를 보여주고 있는데 (KGM95-D), 남한지역에서는 -77 m~-42 m로 분포되고 있다. 지오이드고가 (-)부호를 갖는 것은 지오이드가 타원체면의 아래에 위치하고 있음을 의미하므로 우리나라에서는 서북방향으로 벡셀타원체면이 들려 있다는 개념과 잘 일치되고 있다. 또한 91년도에 구한 상대지오이드가 남한지역에서 +23 m~-10 m로서 약 30 m의 분포를 이루고 있는 것과 근사적으로 적합되고 있다.

그림 5는 그림 2와 비교될 수 있는 것으로서 벡셀 지오이드의 형상은 거의 근접하고 그 크기에 있어서도 약 2 m 정도이므로 원점요소의 이동량에 대한 차이보다는 훨씬 작게 나타나고 있다.

따라서 식 (23)을 이용할 때 지오이드고의 변환이나 원점이동량의 산정이 안정적으로 이루어질 수 있으며 이는 Vanicek and Merry(1974)에서 3차원좌표계에 의한 변환방법보다 매우 안정적이라는 결과와 부합된다.<sup>18)</sup>

## 5. 결 론

이 논문에서는 동경원점계인 벡셀타원체 기준의 남한지역 지오이드고를 연직선편차로 부터 곡면 다항식법에 의해 산정하고 천문측지 지오이드 KGM95-A를 제시하였다(그림 2).

이 결과 남한지역의 벡셀지오이드고는 -68 m~-42 m로 분포되고 있으며 전 지역에서 (-)부호이기 때문에 벡셀타원체면이 지오이드보다 위에 존재하고 남동에서 서북방향으로 진행함에 따라 타원체면이 더 들려진 상태를 보여준다. 이 지오이드의 오차크기는 약 3.5 m이다.

또한 지심기준계인 KGM93-C중력지오이드를 천문측지 지오이드 KGM95-A와 비교하여 상호변환을 실시한 결과 평균 0 m이고 평균계급근오차 0.75 m였다.

KGM93-C 중력지오이드를 동경원점의 변환요소를 이용한 결과는 KGM95-D로 제시되었으며 변환요소값

의 차이에도 불구하고 천문측지 지오이드고와의 비교에서는 천문측지 지오이드의 정확도와 유사한 3~4 m의 차이만을 보여준다(그림 5).

본 연구의 결과는 앞으로 남한지역의 원점변환요소의 결정이나 GPS측량에서 초기좌표의 결정에 유용할 것이며, 국가기준점망의 재구성이나 한국원점계의 설정에서 기설 측지망의 경향을 파악하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 연구의 일부는 1995학년도 경북산업대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 수행된 것이며 이에 감사드립니다.

## 參考文獻

1. 이영진, "GPS방식에 의한 정밀기준점측량의 실용화에 대한 연구", 대한토목학회 논문집, 13(5), 1993, pp. 201-208.
2. 이영진, "GPS위성에 의한 정표고의 결정에 관한 실험적 연구", 경북산업대학교 산업기술연구소 논문집, 제5집, 1995, pp. 163-170.
3. 조규전, 이영진, "우리나라 천문측지지오이드에 관한 연구", 한국측지학회지, 9(2), 1991, pp. 1-8.
4. 조규전, 이영진, 조봉환, "GEM9 위성자료의 조합에 의한 남한지역의 GRS80 중력지오이드", 대한토목학회 논문집, 13(1), 1993, pp. 141-149.
5. 조규전, 이영진, 조봉환, "개선된 남한지역의 GRS80 중력지오이드모델 (KGM93)", 한국측지학회지, 12(1), 1994, pp. 61-68.
6. 최광선, 박필호, "중력과 GPS자료 해석에 의한 우리나라의 지오이드", 대한토목학회 1994년도 학술발표회 논문집(II), 1994, pp. 439-442.
7. 강준목, 신봉호, 이용창, 윤철규, "매개변환요소에 따른 WGS84와 Bessel타원체간의 좌표해석", 대한토목학회 논문집, 14(5), 1994, pp. 1209-1217.
8. 國土地理院, "GPSを用いる 公共測量作業 マニュアル(案)", 國土地理院 技術資料 A.1-No.159, 1993, 日本.
9. 西修二郎, "日本の 天文ジオイドについて", 國土地理院 時報, No. 55, 1981, pp. 29-33.
10. Agajelu, S. I., "The Geoidal Heights for Nigeria", *Survey Review*, 30(235), 1990, pp. 229-236.
11. Bomford, G., "Geodesy", 1980, Oxford.
12. Heiskanen, W. A. and H. Moritz, "Physical Geodesy",



- 1967, Freeman.
13. Merry, C. L. and P. Vanicek, "A Method for Astro-Gravimetric Geoid Determination", 1974, *UNB Technical Report* No. 27.
  14. Merry, C. L., "Studies Towards an Astro-gravimetric Geoid for Canada", 1975, *UNB Technical Report* No. 31.
  15. Nishi, S., "On a Best Fitting Ellipsoid Obtained from the Astogeodetic Deflections of Vertical in Japan", *J. of the Geodetic Society of Japan*, vol. 26, No. 4, 1980, pp.250-257. (Japanese)
  16. Marsh, J. G. et.al., "The GEM-T2 Gravitational Model" *J. of Geophysical Research*, 95(B13), 1990, pp. 22,043-22,071.
  17. Olliver, J. G., "Space-Derived Geoid Maps of Great Britain", *Survey Review*, 31(244), 1992, pp. 310-320.
  18. Vanicek, P. and E. Krakiwsky, "Geodesy", 1986, North Holland.