

EGM96 모델을 이용한 Bessel 지오이드고의 계산 Calculation of Geoidal Height refered to Bessel Ellipsoid From EGM96 Model

최경재* · 최윤수**
Choi, Kyung-Jae · Choi, Yun-Soo

要　　旨

정보화 시대를 맞이하여 정확하고 신속한 지형정보의 취득이 점차로 중요해짐에 따라서 현재 GPS를 이용하여 삼차원의 측지정보를 취득하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 현재 실용적으로 사용되고 있는 높이정보의 기준면은 물리적인 특성을 가지는 지오이드면에 기초하기 때문에 기하학적인 특성이 강조되는 GPS로부터 취득되는 높이정보는 그 정확도가 실용적으로 미흡하다는 평가를 받고 있다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 미국 국방부에서 공개한 지오이드 모델인 EGM96 모델로부터 반복계산법에 의하여 베셀 지오이드고를 계산하고 이를 우리나라 1등 삼각점에 대하여 측정이 이루어진 36점의 GPS성과와 실용성과를 사용하여 좌표변환 매개변수를 계산하여 이의 변환정확도를 평가하였으며, 또한 56점의 수준점에 대한 GPS성과를 좌표변환과 GPS/Leveling을 통하여 계산한 정표고를 수준점 성과와 비교하여 EGM96 모델로부터 계산된 Bessel 지오이드고의 실용성을 평가하였다.

ABSTRACT

In order to calculate geoidal height refered to Bessel ellipsoid, methods to translate geoidal heights from a certain coordinate system to an arbitrary system with the corresponding ellipsoid are studied. and geoidal heights refered to Bessel ellipsoid were computed from EGM96 Model refered to GRS80 using iteration method proposed in this paper. Transformation parameters between WGS84 and Bessel were calculated using geoidal heights computed from iteration method. The result of coordinate transformation(standard deviation) were 0.009 second in latitude and 0.006 in longitude and 0.393m in orthometric height.

1. 서　　론

정보화 사회가 진행됨에 따라서 건설공사, 국가기반 시설의 관리 및 GIS의 기초자료 취득 등의 분야에 있어서 정밀하고 신속한 지형정보의 획득의 중요성에 대한 인식이 확산되면서 미국 국방부에 의하여 개발·운용되어온 인공위성을 이용한 3차원 측위시스템인 GPS의 활용에 관심이 고조되고 있다.

지구상 어느 장소에서나 시간과 날씨에 구애받지 않으며 3차원적 위치해석이 가능한 최첨단 측량시스템으로서의 GPS는 기존의 측량방법에 비해 정확성, 경제

성, 신속성이 있어서 그 우수성이 인정되어 전세계적으로 널리 이용되고 있다.

국내에서도 이를 실용화하려는 노력으로서 많은 연구가 이루어지고 있으나 타원체간의 좌표변환의 문제와 정밀 지오이드고의 문제 등으로 인하여 아직 민간부문에서의 활용이 활성화되지 못하고 있다.

타원체간 좌표변환은 두개의 타원체 상에서 공통적으로 알려진 점의 좌표를 지심직교좌표계인 삼차원 좌표로 변환한 후에 두 개의 삼차원 직교좌표계간의 변환 매개변수를 계산하여 그 매개변수를 바탕으로 좌표변환을 수행하는 방법이 일반적이다. 그러나 베셀타원체의 경우에는 삼차원 직교좌표를 얻기 위해서는 베셀 타원체상의 경·위도 좌표와 정표고 성과와는 별도로

*성균관대학교 토폭공학과 박사과정

**한경대학교 토폭공학과 교수

베셀타원체를 바탕으로 하는 베셀 지오이드고가 필요하다.

베셀 지오이드고를 구하는 방법에는 중력이상 자료를 이용하는 방법, 지구 중력장 모델을 이용하는 방법, 천문측지 성과를 이용하는 방법 등의 방법이 있으나 국내에서는 관측데이터의 부족과 해석상의 어려움 등으로 인하여 실용적 이용이 어려운 상태이다.

본 연구에서는 WGS84 타원체와 베셀타원체간의 좌표변환의 과정에서 필수적으로 요구되는 한반도 일원에서의 베셀 지오이드고를 산출하기 위해서 반복계산법에 의하여 EGM96 모델로부터 베셀 지오이드를 계산하고, 계산된 베셀 지오이드고와 우리나라 1등 삼각점에 대하여 측정이 이루어진 36점의 GPS성과와 실용성과를 사용하여 WGS84 타원체와 베셀타원체간의 좌표변환 매개변수를 계산하였다. 또한, 계산된 매개변수를 사용하여 삼각점에서 얻어진 GPS 성과를 좌표변환을 수행하여 좌표변환의 정확도를 평가하였으며, 수준점에 대한 GPS 측량성과의 좌표변환과 GPS/Leveling 을 통하여 계산한 정표고를 수준점 성과와 비교하여 EGM96 모델로부터 계산된 베셀 지오이드고의 실용성을 평가하였다.

2. 베셀 지오이드고의 계산 및 좌표변환 모델

2.1 EGM96 모델

EGM96(Earth Geopotential Model 1996)은 미국 Defense Mapping Agency(DMA)와 NASA 산하의 Goddard Space Flight(GSFC)에서 수많은 연구진이 동원되어 Ohio 주립대학과 U.S. Naval Surface Warfare Centre의 도움하에 GSFC/DMA 프로젝트에 의하여 만들어 1996년 동경 IAG 심포지움에서 발표한 최대차수 360의 개선된 GSFC/DMA 지오포텐셜 계수모델이다. 각각 65,338개의 sine 및 cosine 계수로 이루어져 있으며, 전 세계의 지오이드를 절대정확도 ± 0.5 m에서 ± 1 m의 범위안에서 결정하는 것을 목표로 하고 있다. 이 모델은 유럽, 구소련, 중국, 남아메리카, 아프리카, 그린랜드 지역의 새로운 중력 측정값들을 포함하여 DMA에서 계산한 $30' \times 30'$ 지상중력이상값을 사용하였으며, Geosat 위성의 Geodetic Mission에 의한 해면고도자료로부터 계산된 $30' \times 30'$ 중력이상값과, ERS-

표 1. EGM96모델에 적용된 인자

a(m)	f	GM(m^3/s^2)	ω
6378137.0	1.0/298.	0.3986004418	7292115×10^{-11} $\times 10^8$

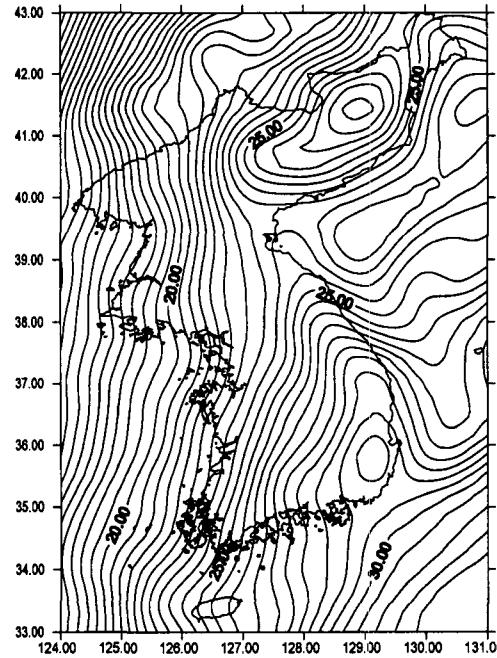


그림 1. EGM96 모델로부터 계산된 지오이드고의 분포

1, Topex, Seasat 위성의 해면고도자료뿐만 아니라, SLR, DORIS, TDRSS, Tranet과 GPS 위성자료가 포함되었다. 또한 지형보정과 아이소스타시보정을 계산하기 위하여 DMA의 DTED $5' \times 5'$ DEM 파일이 사용되었으며 전세계에 분포하고 있는 298개의 GPS/Leveling 데이터로 정확도를 평가하였다. 데이터의 양이나 정확도면에 있어서 상당한 진전을 이룬 것으로 보고되고 있다.²⁾

EGM96으로부터 지오이드고의 계산은식 (1)로 계산할 수 있다.

$$N = \frac{GM}{r^2} \left(\sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r} \right)^l \right. \\ \left. (C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) P_{lm}(\cos \theta) \right) \quad (1)$$

2.2 타원체간 지오이드 모델의 변환

서로 다른 종류의 타원체를 바탕으로 하는 지오이드

모델을 변환하기 위해서는 기본적으로 두 타원체간의 정밀한 좌표변환 매개변수가 필요하다. WGS84 타원체와 베셀타원체간의 좌표변환 매개변수가 주어진 경우를 가정하면 ①~⑦ 절차에 따라 WGS84 타원체를 바탕으로 하는 지오이드 모델을 베셀타원체를 바탕으로 하는 베셀 지오이드 모델로 변환을 할 수 있다.¹⁵⁾

① 베셀 지오이드고를 구하기 위해서 먼저 구하고자 하는 점 A(B1, L1, GH1₀)에서 GH1₀에 0을 대입하여 타원체고를 0으로 놓고 WGS84계로 좌표변환을 수행한다.

② 좌표변환을 통해서 얻어진 WGS84계 좌표 (B2, L2, H2)₀에 대하여 EGM96 모델로부터 WGS84계의 지오이드고 GH2₀를 구한다.(그림에서 \overline{DE})

③ WGS84계의 지오이드고 GH2₀에서 두 타원체간의 이격거리인 H2를 감하여 구하고자 하는 점의 Bessel 지오이드고 GH1을 계산한다.

④ A(B1, L1, GH1₀)점에서 GH1₀에 GH1을 대입하여 WGS84계로 좌표변환을 수행한다.

⑤ 좌표변환을 통해서 얻어진 WGS84계 좌표 (B2, L2, GH2₀)에서 EGM96 모델로부터 WGS84계의 지오이드고 GH2₀를 구한다

⑥ GH1=GH1₀+GH2-GH2₀를 계산한다.

⑦ ④, ⑤, ⑥ 과정을 |GH2-GH2₀|<δ가 미소량이 될 때까지 반복하여 구하는 점의 지오이드고 GH1을 구한다.

2.3 좌표변환 모델

좌표변환 모델은 동일점에 대하여 측정된 두 타원체상의 데이터를 바탕으로 최소제곱조정을 통하여 변환요소를 산출하여 이 변환요소로서 변환방정식을 구성하여 두 직교좌표계간의 좌표변환을 수행하는 방법으로 그 형태는 식 (2)와 같은 식으로 구성된다. 그림 2는 이 변환식의 기하학적인 관계를 보여준다.¹⁰⁾

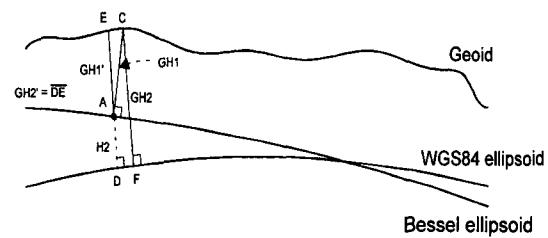


그림 2. WGS84 타원체와 베셀 타원체간의 지오이드고의 변환

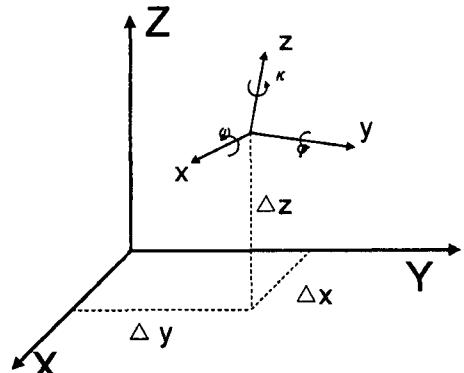


그림 3. 7개 매개변수 변환모델

$$\underline{X}_B = (1 + \Delta s) R_Z(\kappa) R_Y(\phi) R_X(\omega) \underline{X}_W + \underline{T} \quad (2)$$

식 (4)에서 \underline{X}_B 는 우리나라 실용성과에 대한 지심직각좌표를 나타내며, \underline{X}_W 는 WGS84상의 지심직각좌표이다. \underline{T} 는 이동량벡터($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)이며, Δs 는 축척차이다. $R_Z(\kappa) R_Y(\phi) R_X(\omega)$ 는 두 좌표계상의 회전을 나타내는 행렬로서 식 (3)와 같다.

$$R_Z R_Y R_X =$$

$$\begin{vmatrix} \cos\omega\cos\kappa & \cos\omega\sin\kappa & \sin\omega\sin\kappa \\ \sin\omega\sin\phi\cos\kappa & \cos\omega\cos\phi\cos\kappa & -\sin\omega\sin\phi\sin\kappa \\ -\cos\omega\sin\kappa & \cos\omega\cos\kappa & -\sin\omega\sin\phi\sin\kappa \\ \sin\phi & -\sin\omega\cos\phi & \cos\omega\cos\phi \end{vmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 ω, ϕ, κ 는 각각 x, y, z축에서의 회전각을 의미하며, 회전각이 미소량이라고 가정하면 식 (4)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$R_Z R_Y R_X = \begin{vmatrix} 1 & \kappa & -\phi \\ -\kappa & 1 & \omega \\ \phi & -\omega & 1 \end{vmatrix} \quad (4)$$

7개 매개변수를 구하기 위해서 식 (2)를 수학적 모델로 다시쓰면 식 (5)와 같다.

$$F \equiv \begin{vmatrix} \Delta z \\ \Delta y \\ \Delta z \end{vmatrix} + U \begin{vmatrix} \omega \\ \phi \\ \kappa \end{vmatrix} + (1 + \Delta s) \begin{vmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

여기서,

$$U = \begin{vmatrix} 0 & -Z_w(1+\Delta s) & Y_w(1+\Delta s) \\ Z_w(1+\Delta s) & 0 & -X_w(1+\Delta s) \\ -Y_w(1+\Delta s) & X_w(1+\Delta s) & 0 \end{vmatrix}$$

식 (5)을 최소제곱조정하기 위하여 선형화하면 식 (6)과 같은 관측방정식이 되며 이 관측방정식을 최소제곱조정법으로 풀어서 7개 매개변수를 구하게 된다.

$$BV + Ax^* + W = 0 \quad (6)$$

3. 자료처리 및 분석

3.1 데이터의 종류

본 연구에서는 한반도 일원에서의 베셀 지오이드고를 산출하기 위하여 미국 국방부에서 GSFC/DMA 프로젝트에 의하여 만들어진 EGM96모델로부터 반복계산법을 사용하여 베셀 지오이드고를 계산하였다. 좌표변환 매개변수의 계산을 위해서는 천문대에서 36점의 우리나라 1등 삼각점에서 실시한 GPS 관측 데이터와

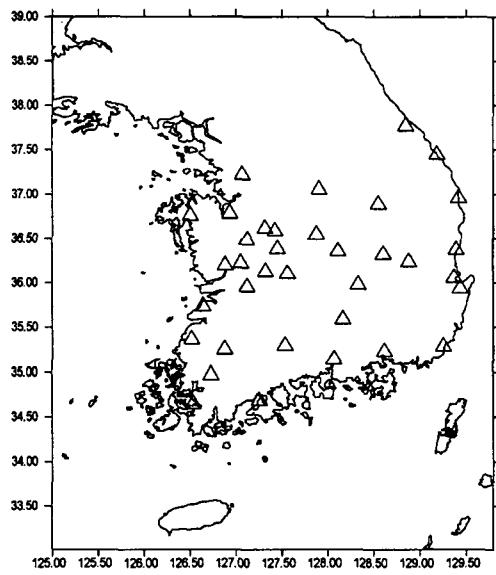


그림 4. GPS관측이 이루어진 삼각점의 분포(36점)

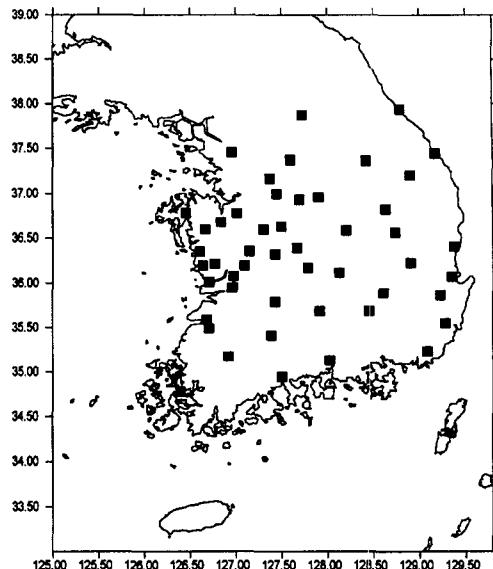


그림 5. GPS 관측이 이루어진 수준점의 분포

동일점에 대한 국립지리원의 실용성과를 사용하였다. 이 실용성과는 1998년 9월 이전까지 사용되었던 구성과 1998년 5월 최윤수에 의하여 계산된 기준점좌표 98(정밀 1차 기준점의 간신탕과)의 두 종류의 데이터를 모두 사용하였다. 또한 정표고 성과를 비교하기 위하여 56점의 수준점에서 이루어진 GPS 관측자료와 수준점성과가 사용되었다.

3.2 베셀 지오이드고의 계산

EGM96 모델로부터 베셀 지오이드고의 계산하기 위해서는 WGS84와 베셀 타원체간의 정밀한 좌표변환 매개변수가 필요하다. 이를 위해서 본 연구에서는 1995년 쇠경재⁷⁾에 의하여 천문측지 지오이드고를 사용하여 Bursa-Wolf 모델을 바탕으로 계산된 7개 매개변수를 사용하였다.

베셀 타원체상의 좌표에 대한 지오이드고의 계산은 지오이드고를 구하고자 하는 베셀 타원체상의 좌표에 대하여 타원체고를 0으로 가정한 후에 좌표변환을 통하여 WGS84 타원체상의 좌표와 WGS84 타원체고를 계

표 2. 좌표변환에 사용된 7개 매개변수

$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta z(m)$	$\alpha(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	$\Delta s(ppm)$
241.648	-452.021	-596.667	2.3126	1.3583	-4.5833	-5.6493

산하였다. 이 때에 얻어지는 WGS84 타원체고는 베셀 타원체와 WGS84 타원체간의 이격거리가 된다. 또한, 좌표변환된 WGS84 타원체상의 좌표를 바탕으로 EGM 96 모델로부터 WGS84 타원체상의 지오이드고를 계산 하였으며 이 WGS84 타원체상의 지오이드고에 타원체 간 이격거리를 더하여 베셀지오이드고를 계산하였다.

이 과정에서 정밀한 베셀 지오이드고를 계산하기 위해서는 정밀한 좌표변환 매개변수가 사용되어야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 최경재에 의하여 계산된 좌표변환 매개변수를 사용하여 초기의 베셀 지오이드고를 계산하였으며 이 때에 계산된 베셀지오이드고를 이용하여 다시 7개 매개변수를 계산하고 이를 다시 베셀 지오이드고를 계산하는 과정에 사용하는 반복과정을 통하여 좌표변환 과정에서 발생하는 오차를 줄이려고 노력하였다.

반복계산법에 의하여 계산된 베셀지오이드고의 분포는 알려진 바와 같이 북서쪽 상단에서 남동쪽 하단으로 증가하는 경향을 나타냈으며 백두산 부근에서 약 -85 m 제주도 부근에서 -45 m를 보였다.

그림 6은 반복계산법에 의하여 계산된 한반도 일원의 지오이드고의 분포를 나타낸 그림이다. 그리고 표 3은 본 연구에서 사용된 36점의 삼각점에 대한 정표고

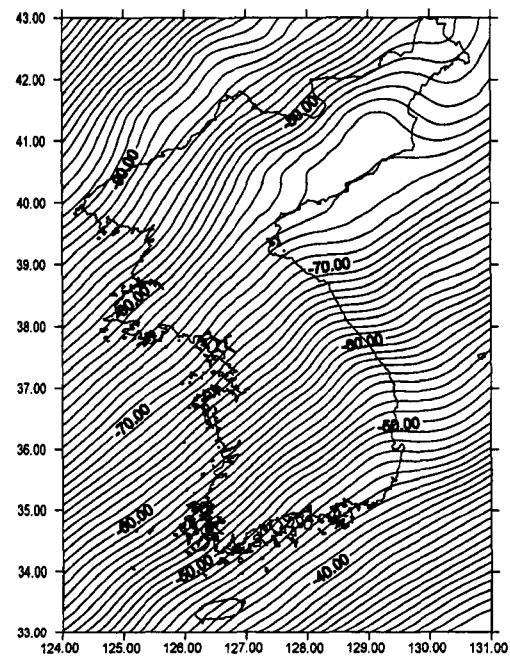


그림 6. 반복계산법에 의하여 계산된 베셀 지오이드고

표 3. 타원체고, 정표고, 지오이드고, 타원체간 이격거리의 비교

점번호	타원체고	지오이드고	정표고	타원체간의 이격거리
청주25	-1.505	-60.917	59.412	85.480
대전12	340.802	-58.661	399.463	83.951
이원24	227.100	-56.293	283.394	82.236
공주22	132.508	-61.150	193.658	85.265
상주23	37.754	-55.346	93.101	82.227
엄정25	45.577	-60.770	106.347	86.307
울진22	4.026	-53.643	57.670	82.044
왜관21	416.502	-51.865	468.368	79.704
영덕23	100.817	-50.109	150.927	79.089
영주23	320.752	-56.264	377.016	83.897
화북21	667.071	-50.671	717.742	79.688
포항24	23.256	-48.055	71.312	77.480
아산26	120.864	-63.926	184.789	87.221
부안11	231.364	-58.995	290.365	82.438
당진27	43.910	-65.793	109.704	88.073
고창24	142.937	-57.419	200.357	80.734
한산11	154.740	-60.499	215.240	84.307
전주21	65.482	-57.749	123.232	82.469
마산21	252.049	-45.919	297.968	74.928
영암11	28.830	-53.668	82.498	78.116
노고12	1452.097	-50.900	1502.997	77.977
강릉26	87.871	-60.767	148.639	87.576
방어24	56.909	-44.265	101.174	73.608
합천25	195.445	-49.899	245.344	78.033
광주21	8.618	-54.717	63.335	79.295
삼척21	82.580	-57.437	140.017	85.148
고흥21	107.923	-49.147	157.071	75.319
진주11	139.011	-47.504	186.515	75.821
해남23	-2.982	-52.642	49.659	76.793
용인21	57.288	-65.815	123.103	89.095
청주11	232.203	-60.113	292.317	85.063
금산24	821.398	-57.751	879.149	82.916
논산21	-11.584	-59.827	48.243	84.049
속리11	1001.107	-57.548	1058.656	83.784
불국22	243.165	-47.278	290.444	76.655
의성23	239.324	-52.695	292.020	80.815

와 반복계산법을 사용하여 계산된 베셀 지오이드고, 베셀 타원체고, 그리고 동일점에서 계산된 베셀 타원체와 WGS84 타원체간의 이격거리를 정리한 것이다.

3.3 좌표변환 매개변수의 계산

베셀타원체상의 3차원 직각좌표를 구하기 위하여 국립지리원의 구성과와 기준점성과 98에 대하여 각각 EGM96 모델로부터 반복계산법에 의하여 베셀지오이

표 4. 7개 매개변수

	$\Delta x(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta z(m)$	$\omega(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$	$\kappa(^{\circ})$	$\Delta s(ppm)$
구성과	156.287	-480.299	-641.577	2.108	-1.219	-2.578	-5.701
기준점성과 98	162.399	-486.702	-623.785	2.320	-0.469	-2.278	-6.205

표 5. 삼각점에 대한 좌표변환 결과의 비교

	위도(^{\circ})		경도(^{\circ})		정표고(m)	
	표준편차	최대편차	표준편차	최대편차	표준편차	최대편차
구성과	0.030	0.108	0.025	0.064	1.054	3.600
기준점성과 98	0.009	0.036	0.006	0.016	0.511	1.065

표 6. 수준점에 대한 좌표변환 결과와 정표고의 비교

	좌표변환 방법		GPS/Levelling	
	표준편차 (m)	최대편차 (m)	표준편차 (m)	최대편차 (m)
구성과	0.609	1.583	0.612	1.586
기준점성과 98	0.393	1.300	0.612	1.586

드고를 계산한 후 타원체고를 계산하였다. 그리고 준비된 GPS 성과와 베셀성과를 바탕으로 Bursa-Wolf 모델에 대한 좌표변환 매개변수를 계산하였다. 계산된 매개변수는 표 4와 같이 계산되었다.

3.4 좌표변환의 수행

36점의 삼각점에 대하여 본 연구에서 계산된 좌표변환 매개변수와 베셀지오이드고를 사용하여 좌표변환을 수행하고 변환된 경위도 좌표와 정표고를 동일점에 대한 실용성과와 비교하였다. 또한 56점의 수준점에 대한 GPS 관측데이터를 본 연구에서 산출된 좌표변환 매개변수를 이용하여 좌표변환을 수행하고 이를 통하여 얻어진 정표고 성과를 수준점 성과와 비교하였다. 표 5와 표 6은 이 결과를 정리한 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 WGS84 타원체와 베셀 타원체간의 좌표변환의 과정에서 요구되는 한반도 일원에서의 베셀지오이드고를 산출하기 위하여 EGM96 모델에 반복계산법을 적용하여 베실지오이드고를 계산하고, 이를 우리나라 1등 삼각점에 대하여 실시된 GPS 관측데이터와

동일점에 대한 국립지리원 실용성과(구성과 및 기준점성과 98)를 이용하여 좌표변환 매개변수를 계산하고 좌표변환을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) EGM96 모델로부터 반복계산법에 의하여 베셀지오이드고를 계산한 결과 한반도 일원에서 북서쪽 상단에서 약 -85 m, 남서쪽 하단에서 약 -40 m의 지오이드 분포를 얻었다.

(2) 계산된 베셀 지오이드고를 바탕으로 좌표변환 매개변수를 계산하여 이를 GPS 관측이 이루어진 삼각점에 대해서 좌표변환을 수행한 결과, 기준점성과 98을 사용하여 좌표변환을 수행하는 경우, 위도에서 표준편차 0.009 $^{\circ}$, 경도에서의 표준편차 0.006 $^{\circ}$ 로 구성과를 사용하는 경우에 비하여 약 1/4로 좌표변환의 정확도가 크게 개선될 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 본 논문에서 계산된 좌표변환 매개변수를 GPS 관측이 이루어진 수준점에 대하여 좌표변환을 수행하여 정표고와 비교한 결과 구성과를 사용하는 경우, 표준편차 0.609 m로 GPS/Leveling 방법으로 계산된 수치와 거의 비슷한 수치를 보였다. 이는 EGM96 모델이 목표하는 절대정확도($\pm 0.5 \text{ m} \sim \pm 1 \text{ m}$) 이내의 범위에 해당되는 것으로 본 논문에서 반복계산법을 사용하여 계산된 베셀 지오이드고가 큰 오차를 전파하지 않고 계산되었음을 알 수 있다.

(4) 기준점좌표 98을 사용하여 계산된 좌표변환 매개변수를 사용하여 수준점에 대한 GPS 성과를 좌표변환을 수행하여 정표고와 비교한 결과는 표준편차가 0.393 m로 구성과를 사용하는 경우와 GPS/Levelling을 사용하여 계산된 수치의 약 1/2로 기준점성과 98을 사용하는 경우에는 GPS성과를 좌표변환하여 정표고를 계산

하는 방법이 GPS/Leveling의 경우보다 더 정밀하게 정표고 성과를 산출할 수 있음을 알 수 있었다.

(5) EGM96 모델이 아닌 보다 정밀한 지오이드 모델을 사용하여 타원체간 지오이드 모델 변환을 하여 좌표변환 매개변수의 계산 및 정표고를 산출하는 경우에는 본 연구에서 얻어진 좌표변환의 정밀도보다 더욱 정밀한 변환결과를 얻을 수 있을 것으로 사료되며, 아울러서 본 논문에서 계산된 베셀 지오이드 모델은 기존의 베셀 지오이드고의 정밀도 향상에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

参考文献

1. 안철호, 최재화, “일반측량학”, 문운당, 1995.
2. 이석배, 최재화, “EGM96과 OSU91A 지오포텐셜 모델에 의한 한반도 일원에서의 지오이드 비교분석”, 한국측지학회지, 제15권, 제1호, 1997, pp. 131-139.
3. 이석배, 윤홍식, 최재화, “FFT에 의한 한반도 일원에서의 중력지오이드 결정”, 한국측지학회지, 제14권, 제1호, 1996, pp. 49-58.
4. 최윤수, “정밀 1차 기준점의 실용성과”, 국립지리원, 1998.
5. 이영진, “한국측지좌표계와 지구중심좌표계의 재정립에 관한 연구(I,II)”, 국립지리원, 1996, 1997.
6. 박필호, 박종우, 조정호, “GPS위성의 정밀궤도력에 의한 기선결정의 정밀도 향상에 관한 연구”, 한국측지학회지, 제14권, 제2호, 1996, pp. 199-208.
7. 최경재, “10개 매개변수 변환모델을 이용한 WGS84와 Bessel 타원체간 좌표변환”, 석사학위논문, 성균관대학교 대학원, 1995.
8. 이용창, “GPS에 의한 측지학적 정밀 3차원 좌표결정에 관한 연구”, 박사학위논문, 충남대학교 대학원, 1993.
9. 최종현, “GPS에 의한 Bessel 지오이드고 산정에 관한 연구”, 석사학위논문, 충남대학교 대학원, 1994.
10. 권대원, “우리나라 측지계와 WGS84의 좌표변환”, 석사학위논문, 성균관대학교 대학원, 1995.
11. 이종혁 “우리나라 지오이드고에 관한 연구”, 석사학위논문, 서울시립대 대학원, 1985.
12. Rapp, R.H., “Geometric Geodesy”, Department of Geodetic Science and Surveying, The Ohio State University, Columbus, 1989.
13. Defence Mapping Agency, “Supplement to Department of Defence World Geodetic System 1984 DMA Technical Report : Part II”, DMA TR 8350.2-A, 1987.
14. Leick, A., “GPS Satellite Surveying”, John Wiley & Sons Inc., 1990.
15. 飛田幹男, “任意の座標系・圓體におけるジオイド高の算出”, 日本建設省 國土地理院, 1997.
16. 中根勝見, 黒石裕水, “日本の測地測量における統合處理の考察”, 日本建設省 國土地理院, 1997.