

좌표변환의 정확도 향상을 위한 Bessel 지오이드고에 관한 연구

A study on the Bessel geoidal height to improve the accuracy of coordinate transformation

신봉호*	강준목**	김홍진***	최종현***
Shin, Bong-Ho	Kang, Joon-Mook	Kim, Hong-Jin	Choi, Jong-Hyun

要 旨

GPS 측량으로부터 획득되는 성과는 WGS 84 타원체에 기초하므로 이를 우리나라에 적용하기 위해서는 Bessel 타원체상의 경·위도 좌표와 정표고 성과로 변환하여야 한다. 이러한 좌표변환을 수행하기 위해서는 정확한 좌표변환계수의 결정이 먼저 이루어져야하며, 좌표변환계수 결정을 위한 두 타원체간의 변환관계는 각 타원체의 경·위도와 타원체고 상에서 이루어지 때문에 우리나라의 실용성과중 평균해수면상의 정표고 성과를 Bessel 타원체에 근거한 타원체고로 변환하여야 한다. Bessel 타원체고를 획득하기 위해서는 지오이드면에서 Bessel 타원체면까지의 높이인 Bessel 지오이드고를 결정하여야 한다. 본 연구에서는 Bessel 지오이드고 산정기법들을 정리하고, Bessel 지오이드고 산정기법에 따른 좌표변환의 변환정확도를 비교하여 Bessel 지오이드고가 좌표변환에 끼치는 영향을 고찰하고자 한다.

ABSTRACT

3-D coordinates that result form GPS survey are not applied directly in korea, because they are based on WGS 84 ellipsoid. Thus they must be transformed into longitude, latitude on the Bessel ellipsoid and orthometric height. Transformation parameters must be determined in order to perform the coordinate transformation. Also, coordinate transformation be preformed on longitude, latitude and ellipsoidal height. First estimation of Bessel geoidal height must be accomplished to acquire Bessel ellipsoidal height. This paper suggests accuracy of coordinate transformation according to the estimation method of Bessel geoidal height. Also, This paper suggests that Bessel geoidal height have influence on the coordinates transformation.

1. 서 론

인공위성을 이용한 3차원 측위해석에 있어 GPS 측량은 정밀 측지망과 지적망의 구성, 지도제작, GIS의 자료구축 및 자동차, 항공기, 선박 등의 위치추적

에서 그 효용성이 입증되고 있다. 뿐만 아니라 지구 중력장 모델의 결정, 지각변동과 극운동 및 지오이드 연구 등의 지구물리분야에서도 GPS의 활용가치가 증대되고 있다. 그러나 GPS로 부터 획득된 3차원 좌표는 세계측지계인 WGS 84 타원체에 기초하므로 지역

* 충북대학교 공과대학 교수

** 충남대학교 공과대학 교수

*** 충남대학교 토목공학과 박사과정

측지계를 사용하는 우리나라에 GPS 측량결과를 직접 적용하는 데는 다소의 문제점이 수반된다. 이러한 문제점은 세계측지계와 지역측지계간의 좌표변환을 통해 해결될 수 있으며, 이를 위해서는 정확한 좌표변환계수가 결정되어야 한다. 좌표변환계수를 결정하기 위한 두 타원체간의 변환관계는 경·위도와 타원체고 상에서 이루어지기 때문에 우리나라의 실용성과 중 평균 해수면상의 정표고 성과를 Bessel 타원체에 기초한 타원체고로 변환하여야 한다. Bessel 타원체고를 획득하기 위해서는 물리적인 지오이드면과 수학적으로 결정된 월최고 609.8mm의 월간 변화를 보였다. 인구증가된 Bessel 타원체간의 높이 차이를 나타내는 Bessel 지오이드고의 산정이 이루어져야 한다. Bessel 지오이드고 산정방법에는 여러가지 방법이 있지만 해석상의 난점과 경제성이 요망되므로 Bessel 지오이드고 산정방법에 대한 많은 연구가 필요하다.

본 연구에서는 Bessel 지오이드고 산정기법들을 정리하고, 각각의 Bessel 지오이드고 산정기법에 따른 Bessel 지오이드고를 산출하여 분포 양상을 분석하고자 한다. 또한 각각의 산정기법에 따른 Bessel 지오이드고를 좌표변환에 적용하여 변환정확도를 비교함으로써 Bessel 지오이드고가 좌표변환에 미치는 영향을 고찰하고, 양호한 Bessel 지오이드고를 산정하고자 한다.

2. Bessel 지오이드고 산정 이론

2.1 천문측지방법에 의한 Bessel 지오이드고

천문측지방법에 의한 Bessel 지오이드고 산정에는 곡면다항식의 최소제곱해법을 이용할 수 있다. 즉 지오이드면을 경·위도 함수인 n차의 곡면다항식으로 표시하여 Bessel 지오이드고를 산출하는 방법을 말한다.

임의의 한점 P에 대한 Bessel 지오이드고는 (1) 식과 같은 곡면다항식으로 표시될 수 있다.

$$N_P(X, Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i+1} C_{ij} X^{i-j+1} Y^{j-1} \quad (1)$$

(1)식의 X, Y는 경·위도의 함수로 (2) 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} X &= R(\varphi + \varphi_0) \\ Y &= R(\lambda - \lambda_0) \cos \varphi \end{aligned} \quad (2)$$

R: 지구의 평균곡률반경

φ_0, λ_0 : 원점의 경·위도

(1) 식의 계수 C_{ij} 는 관측에 의한 연직선편차 성분과 (1) 식을 각각 X, Y에 대해 1차 미분한 수학적 연직선편차 성분의 차가 최소가 되도록 하는 최소제곱조정을 통해 산출된다. (1) 식을 각각 X, Y에 대해 1차 미분한 연직선편차 성분은 (3) 식과 같다.

$$\xi_P(X, Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i+1} (i-j+1) C_{ij} X^{i-j} Y^{j-1} \quad (3)$$

$$\eta_P(X, Y) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i+1} (j-1) C_{ij} X^{i-j+1} Y^{j-2}$$

2.2 두 타원체간의 높이차와 WGS 84 지오이드고의 조합에 의한 방법

Bessel 지오이드고를 산정하는 또 다른 방법으로 WGS 84 타원체에 기준한 지오이드고와 Bessel 타원체와 WGS 84 타원체간의 높이차(ΔH)를 조합하여 Bessel 타원체에 기준한 지오이드고를 산정하는 방법이 있다. 이때 두 타원체간의 높이차(ΔH)는 표준 Molodensky 식을 활용하는 방법과 두 타원체 각각에 대한 연직선편차를 이용하는 방법을 통해 산정할 수 있다.

2.2.1 표준 Molodensky 식에 의한 ΔH

Bessel 타원체와 WGS 84 타원체간의 높이차는 (4) 식과 같은 표준 Molodensky 식을 활용하여 산출할 수 있다.

$$\Delta H = \Delta X \cos \varphi_w \cos \lambda_w + \Delta Y \cos \varphi_w \sin \lambda_w \quad (4)$$

$$+ \Delta Z \sin \varphi_w - \Delta a \left(\frac{a_B}{R_N} \right) + \Delta f \left(\frac{b_B}{a_B} \right) R_N \sin^2 \varphi_w$$

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$: Bessel 타원체와 WGS84 타원체 간의 평균지심편차량

Δa : 장반경의 차 (Bessel 타원체의 장반경 - WGS84 타원체의 장반경)

Δf : 편평률의 차 (Bessel 타원체의 편평률 - WGS84 타원체의 편평률)

$\varphi_w \lambda_w$: WGS 84 측지좌표

a_B, b_B : Bessel 타원체의 장반경과 단반경

그러나 두 타원체간의 높이차 ΔH 를 구하는데 표준 Molodensky 식을 이용하기 위해서는 두 타원체간의 평균지심편차량($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)을 알고 있어야 하며, 이러한 평균지심편차량은 (5) 식과 같이 경·위도 및 타원체고로부터 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_B - X_W \\ \Delta Y &= Y_B - Y_W \\ \Delta Z &= Z_B - Z_W \end{aligned} \quad (5)$$

각 타원체에 대한 X_B, Y_B, Z_B 와 X_W, Y_W, Z_W 는 (6) 식과 같으며, H_B 는 Bessel 타원체고이므로 Bessel 타원체에 근거한 지오이드고를 알고 있어야만 X_B, Y_B, Z_B 와 X_W, Y_W, Z_W 를 정확히 구할 수 있다. 따라서 표준 Molodensky식의 ΔH 를 이용하여 정확한 두 타원체간의 높이차를 구하기 위해서는 Bessel 지오이드고와 연계되어야 한다.

$$\begin{aligned} X_B &= (n_B + H_B) \cos \varphi_B \cos \lambda_B \\ Y_B &= (n_B + H_B) \cos \varphi_B \sin \lambda_B \\ Z_B &= [(b_B^2/a_B^2)n_B + H_B] \sin \varphi_B \\ X_W &= (n_W + H_W) \cos \varphi_W \cos \lambda_W \\ Y_W &= (n_W + H_W) \cos \varphi_W \sin \lambda_W \\ Z_W &= [(b_W^2/a_W^2)n_W + H_W] \sin \varphi_W \end{aligned} \quad (6)$$

n_B : Bessel 타원체 상수로부터 계산된 묘유선의 곡률반경

n_W : WGS84 타원체 상수로부터 계산된 묘유선의 곡률반경

a_W, b_W : WGS84 타원체의 장반경과 단반경

2.2.2 연직선편차에 의한 두 타원체간의 높이차

Bessel 타원체와 WGS 84 타원체 각각에 대한 연직선편차를 이용한 두 타원체간의 높이차는 (7) 식과 같은 곡면다항식을 구성하여 결정할 수 있다. 곡면다항식을 구성하기 위한 계수는 천문측지방법에서와 같은 방법으로 곡면다항식의 최소제곱해법을 이용해 결정된다. 즉 Bessel 타원체에 대한 X_B, Y_B 직각방향에서의 1차 미분값으로 주어지는 수학적 표면 경사와 WGS84 타원체에 대한 X_W, Y_W 직각방향에서의 1차 미분값으로 주어지는 수학적 표면 경사의 차로 산출된 수학적인 두 타원체간의 높이차와 각 타원체에 대한 연직선편차의 두 성분 ($\xi_{Bob}, \eta_{Bob}, \xi_{Wob}, \eta_{Wob}$)에 의해 산출된 물리적인 두 타원체간의 높이차의 차가 최소가 되도록 곡면다항식의 계수를 결정하고 이 다항식에 의한 곡면을 두 타원체간의 높이차로 취급하는 방법이다.

Bessel 타원체상의 측점 P에 대한 두 타원체간 이격량 $\Delta H(X_B, Y_B)$ 는 다음식과 같이 n차의 곡면다항식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \Delta H(X_B, Y_B) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i+1} (C_{ij}^B X_B^{i-j+1} Y_B^{j-1} - C_{ij}^W X_W^{i-j+1} Y_W^{j-1}) \quad (7) \end{aligned}$$

여기서, 각 타원체에 기준한 P점의 좌표 X_B, Y_B 와 X_W, Y_W 는 천문측지방법의 (2) 식과 같은 경·위도의 함수로 표시된다. 또한 곡면다항식의 계수는 천문측지방법에서와 같은 원리로 Bessel 타원체와 WGS 84 타원체 각각에 적용하여 산출된다.

2.2.3 WGS 84 지오이드고

WGS 84 지오이드고를 산정하는 방법에는 GPS 관측에 의한 GPS/leveling 기법과 중력장모델을 이용하는 방법 및 육상중력자료, 중력장 모델과 GPS 관측 자료를 조합하는 방법이 있으며, 본 연구에서는 GPS/leveling 기법과 중력장 모델을 이용하여 WGS 84 지오이드고를 결정하고자 한다. GPS/leveling 기법에 의한 WGS 84 지오이드고는 (8) 식과 같이 WGS 84 타원체상의 높이에서 그 축점의 정표고성고를 감하여 WGS 84 타원체면에서 지오이드면까지의 높이를 결정하는 방법이다.

$$N_W = H_W - h_{msl} \quad (8)$$

NW : WGS 84 지오이드고

HW : WGS 84 타원체고

hmsl : 정표고

중력장모델에 의한 WGS 84 지오이드고는 (9)식과 같이 중력포텐셜계수 C, S (Zonal, Tesserial & Sectotial harmonic coefficients)를 산정하여 지오이드고를 구하는 방법이다.

$$N = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\overline{C}_{nm} \cos m\lambda + \overline{S}_{nm} \sin m\lambda) \overline{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (9)$$

r, θ, λ : 계산할 지점의 지심좌표

$\overline{C}_{nm}, \overline{S}_{nm}$: Normalized gravitational coefficients

$\overline{P}_{nm}(\cos \theta)$: Normalized associated Legendre function

2.2.4 조합기법에 의한 Bessel 지오이드고

조합기법에 의한 Bessel 지오이드고는 두 타원체간의 높이차와 WGS 84 지오이드고를 조합하여 구성되며, 산출과정은 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

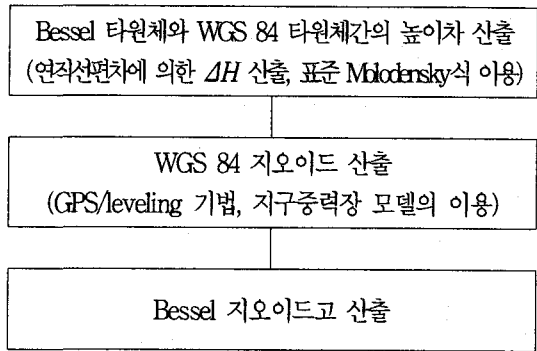


그림 1. Bessel 지오이드고 산출과정

3. 비교 분석

3.1 천문측지방법에 의한 Bessel 지오이드고 분석

천문관측이 실시된 삼각점을 대상으로 Bessel 타원체에 근거한 연직선편차를 이용해 2차에서 8차까지의 곡면다항식을 구성하였으며, 각 차수에 대한 표준오차는 그림 2와 같다. 각 차수별 곡면다항식 중에서 3차 곡면다항식의 경우가 상대지오이드고의 표준오차 ±0.482m와 상관계수 0.9885, 신뢰도 97.72%로 가장 양호한 결과를 나타내었다.

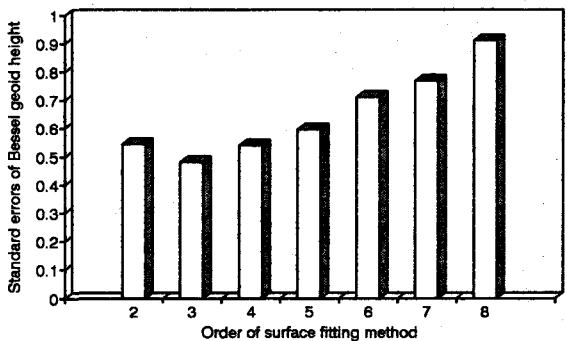


그림 2. 차수에 따른 상대지오이드의 표준오차

표 1은 3차 곡면다항식의 계수를 나타낸 것이며, Bessel 지오이드고 산출을 위한 임의 원점은 수원의 경위도 원점을 사용하였다. 경위도 원점의 Bessel 지오이드고는 일본의 Simosato SLR 측점을 연결해 -64.5745m로 가정하였으며, 이로 부터 상대적인 Bessel 지오이드고를 각 측점별로 산출하였다. 이와 같은 천문측지방법으로 산출된 Bessel 지오이드고는 -65m ~ -43m의 분포로 그림 3과 같이 남동쪽으로 증가하는 경향을 나타내었다.

표 1. 천문측지방법에 의한 Bessel 지오이드고의 3차 곡면 다항식 계수

C_{11} : -6.1246382E-05	C_{12} : 6.6840257E-05
C_{21} : -4.9203858E-11	C_{22} : -2.4871247E-11
C_{23} : -2.3431071E-11	C_{31} : -9.8804115E-17
C_{32} : -2.0067443E-16	C_{33} : -2.0395717E-16
C_{34} : -4.0351758E-16	

3.2 조합기법에 따른 분석

3.2.1 표준 Molodensky 식에 의한 두 타원체간의 높이차 분석

두 타원체간의 높이차를 산정하기 위해 사용되는 표준 Molodensky 변환식의 변수 ΔX , ΔY , ΔZ 는 수원의 경위도 원점에 대한 Bessel 지오이드고를 -64.5745m로 가정해 계산된 지심편차량을 사용하였으며, 표 2에 제시되어있다.

표 2. 경위도 원점에 대한 지심편차량 (ΔX , ΔY , ΔZ)

ΔX	ΔY	ΔZ
145.69294m	-501.51717m	-686.55885m

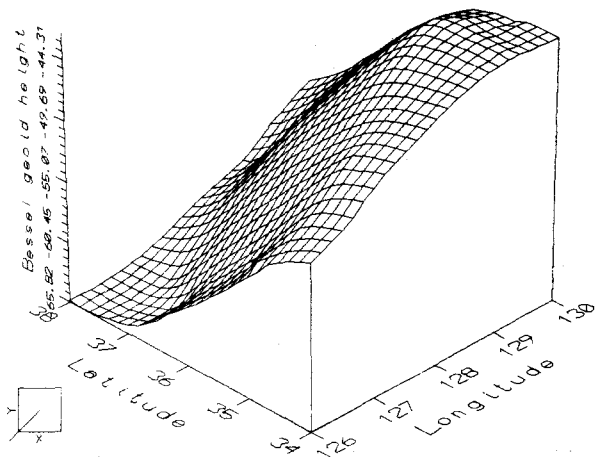
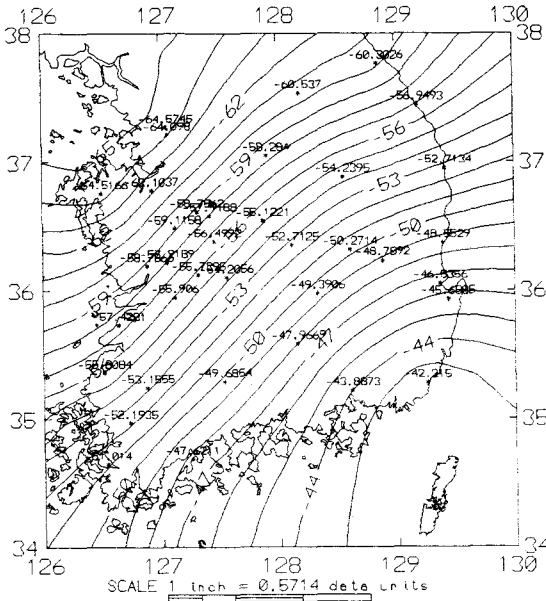


그림 3. 천문측지방법에 의한 Bessel 지오이드고 분포

표준 Molodensky 변환식으로 산출된 두 타원체간의 높이차는 -88m ~ -70m의 분포로 남동쪽으로 증가하는 경향을 나타내었다.

3.2.2 연직선편차에 의한 두 타원체간의 높이차 분석

Bessel 타원체와 WGS 84 타원체 각각에 대한 연직선편차로부터 두 타원체간 이격량을 2차 다항식에서 8차 다항식까지 7개의 다항식으로 구성했으며, 4차 다항식의 경우가 ±0.4395m의 표준오차로 가장 양호한 결과를 나타냈다. 표 3은 4차 다항식의 계수를 나타낸 것이다.

표 3. 연직선편차에 의한 두 타원체간 이격량의 4차 다항식 계수

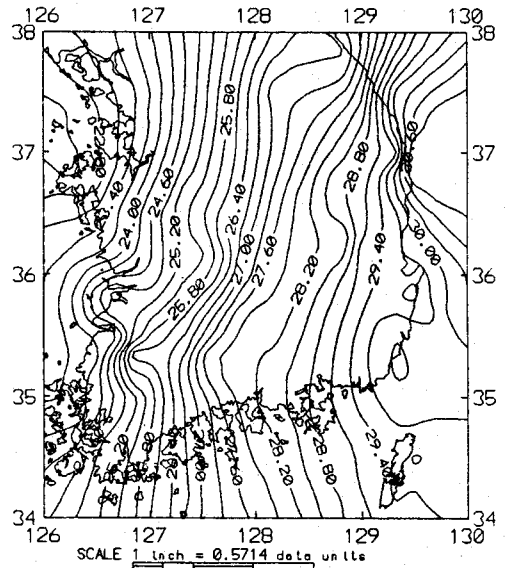
$C_0 : 0.3515894E+02$	$C_1 : 0.3327835E+03$	$C_2 : -0.6816496E+02$
$C_3 : 0.4206399E+03$	$C_4 : -0.6506151E+02$	$C_5 : 0.4178330E+02$
$C_6 : 0.2497292E+03$	$C_7 : -0.4874072E+02$	$C_8 : 0.5186088E+02$
$C_9 : -0.3108148E+02$	$C_{10} : 0.5552704E+02$	$C_{11} : -0.1271842E+02$
$C_{12} : -0.1801628E+02$	$C_{13} : -0.1911102E+02$	$C_{14} : 0.1463345E+02$

연직선편차로부터 산출된 두 타원체간의 높이차 분포는 표준 Molodensky 식에 의한 두 타원체간의 높이차 분포와 유사한 경향으로 ±0.14m의 편차를 보였다.

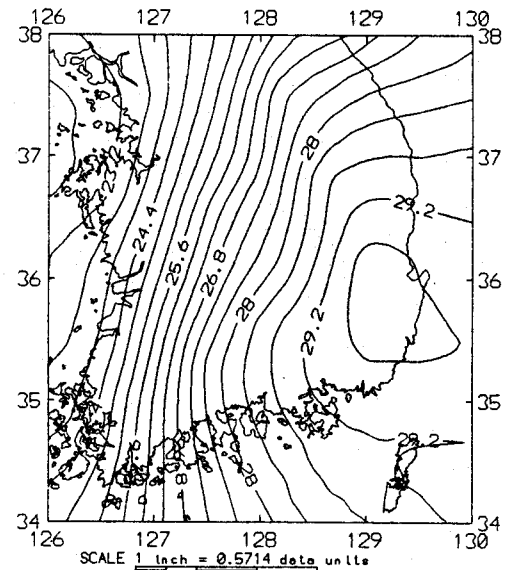
3.2.3 WGS 84 지오이드고 분석

WGS 84 지오이드고는 GPS /leveling 기법과 중력장 모델을 이용해 계산되었으며, 사용된 중력장 모델은 OSU91a와 DMA에서 제시한 n=m=180 계수를 사용하였다. GPS/leveling 기법과 중력장 모델로부터 산정된 WGS 84 지오이드고는 모두 +22m ~ +32m의 분포로 동쪽으로 증가하는 경향을 나타냈으며, 중력장 모델(OSU91a)로부터 산출된 WGS 84 지오이드고는

그림 4와 같이 장파장의 분포를 보였다. 반면에 GPS/leveling 기법에 의한 WGS 84 지오이드고는 중력장 모델을 사용한 WGS 84 지오이드고 보다 불규칙한 분포를 나타냈다.

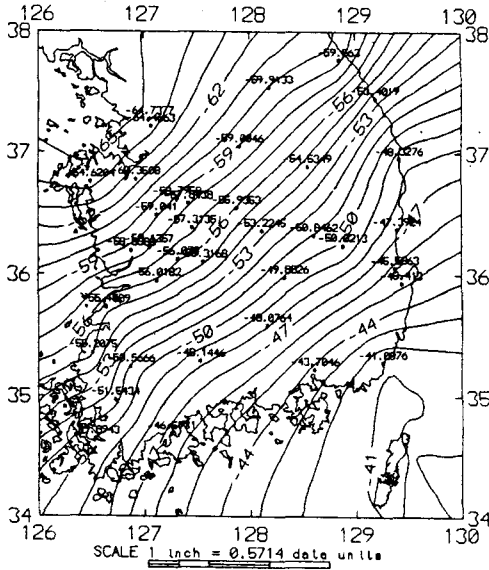


(a) GPS/leveling

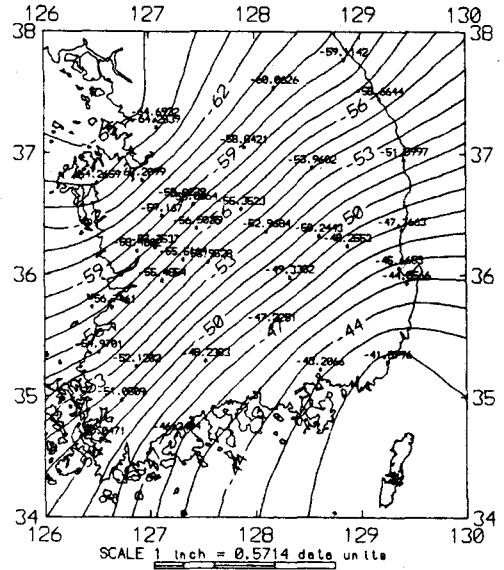


(b) OSU91a

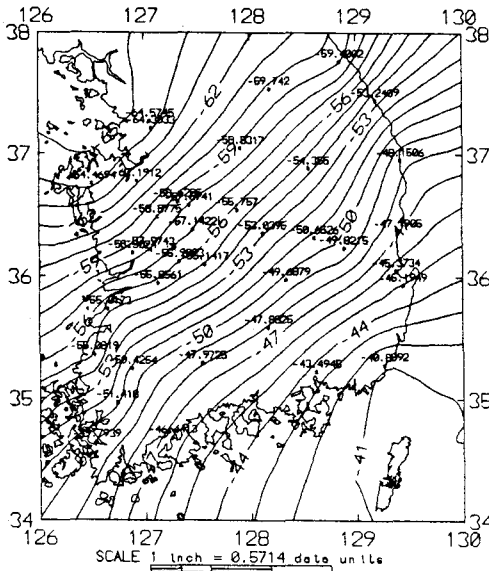
그림 4. WGS 84 지오이드고 분포



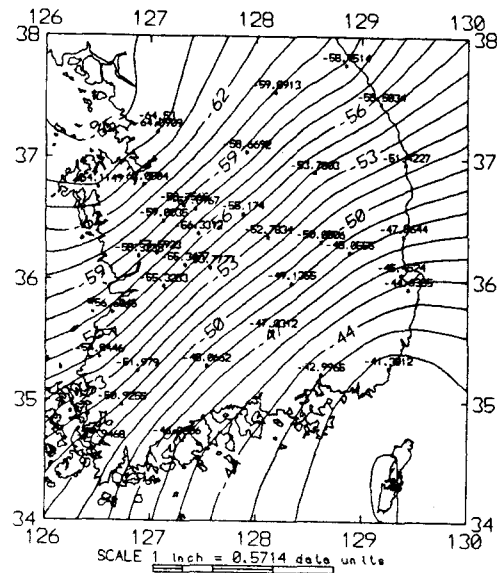
(I) 표준 Molodensky 변환 + GPS/leveling



(II) 표준 Molodensky 변환 + OSU91a



(III) 연직선편차에 의한 ΔH + GPS/leveling



(IV) 연직선편차에 의한 ΔH + OSU91a

그림 5. 조합기법에 의한 Bessel 지오이드고 분포

3.2.4 조합기법에 의한 Bessel 지오이드고 분석

본 연구에서 채택한 두 타원체간의 높이차와 WGS 84 지오이드고를 조합한 Bessel 지오이드고는 표 4와 같이 4종류의 조합방법으로 산출되었다.

표 4 Bessel 지오이드고 산출을 위한 조합방법

Case	Bessel 지오이드고 산정을 위한 조합방법
I방법	표준 Molodensky 식의 ΔH + GPS/leveling 방법에 의한 WGS 84 지오이드고
II방법	표준 Molodensky 식의 ΔH + 중력장 모델에 의한 WGS 84 지오이드고
III방법	연직선편차에 의한 ΔH + GPS/leveling 방법에 의한 WGS 84 지오이드고
IV방법	연직선편차에 의한 ΔH + 중력장 모델에 의한 WGS 84 지오이드고

조합방법에 사용된 중력장 모델의 WGS 84 지오이드고는 GPS/leveling 기법과 편차가 작은 OSU91a 모델로부터 유도되었으며, 각각의 조합방법으로 산정된 Bessel 지오이드고는 그림 5와 같이 -65m ~ -42m의 분포로 남동쪽으로 증가하는 경향을 나타내었다.

3.3 Bessel 지오이드고에 따른 변환정확도 비교

각각의 산정기법으로 결정된 Bessel 지오이드고를 좌표변환에 적용하여 Bessel 지오이드고에 따른 변환정확도를 고찰하였다. 표 5은 천문측지방법과 4가지의 조합방법으로 산정된 각각의 Bessel 지오이드고에 따른 7-매개변수를 나타낸 것이다.

그림 6은 Bessel 지오이드고 산정기법에 따른 각각의 Bessel 지오이드고와 좌표변환계수(7-매개변수)를 적용하여 변환된 성과와 실용성표를 비교한 것으로 5가지 Bessel 지오이드고 산정기법 모두 경·위도에서는 거의 같은 표준오차를 나타낸 반면, 고도성

표 5 Bessel 지오이드고에 따른 7 매개변수

Bessel 지오이드고	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$	$\kappa(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	S
I조합	135488	-4014	-675717	-238	-238	1592	0.999995134
	799	726	760	0.244	0.248	0.247	0.000000923
II조합	125688	-47729	-66662	-229	-249	171	0.999994183
	865	704	738	0.257	0.259	0.23	0.000000917
III조합	125247	-47788	-66464	-210	-235	172	0.999994057
	651	5154	573	0.189	0.201	0.176	0.000000991
IV조합	119752	-40383	-666707	-207	-2614	1810	0.999994072
	930	748	758	0.281	0.274	0.278	0.000000955
천문지오이드(V)	135994	-48134	-634481	-202	-159	245	0.999998075
	769	745	743	0.244	0.235	0.232	0.000000914

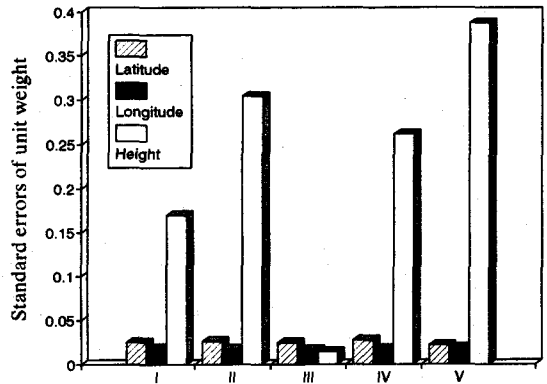


그림 6. Bessel 지오이드고에 따른 변환정확도 비교

분에 있어서는 Bessel 지오이드고 산정기법에 따라 표준오차가 크게 변한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 연직선편차에 의한 두 타원체간의 높이차와 GPS/leveling 기법의 WGS 84 지오이드고를 조합한 Bessel 지오이드고의 경우가 고도에서 $\pm 0.0143m$ 의 변환정확도로 가장 양호한 결과를 나타냈다.

4. 결 론

Bessel 지오이드고 산정기법에 따른 각각의 Bessel 지오이드고를 비교하고, 이와 연계된 좌표변환 계수를 결정하여 변환정확도를 분석한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 천문측지방법과 정표고가 정확하다는 가정하에 조합방법들로 산출된 남한지역의 Bessel 지오이드고는 -65m ~ -42m의 분포로 남동쪽으로 증가하는 경향을 나타내었다.

(2) Bessel 지오이드고 산정기법에 따른 각각의 Bessel 지오이드고와 연계된 좌표변환을 수행한 결과, 본 연구에서 적용된 Bessel 지오이드고의 경우 경·위도에서는 평균 $\pm 0.017''$ 와 $\pm 0.025''$ 의 표준오차로 거의 동일한 좌표변환 정확도를 나타내었다.

(3) 고도성분에 있어서는 연직선편차에 의한 두 타원체간의 높이차와 GPS/leveling 기법의 WGS 84 지오이드고가 조합된 Bessel 지오이드고를 적용한 경우가 $\pm 0.0143\text{m}$ 의 변환정확도로 타 기법의 Bessel 지오이드고를 적용한 경우 보다 매우 향상된 변환결과를 나타냈으며, Bessel 지오이드고의 정확도 향상에 따른 좌표변환 정확도 향상을 입증할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 : 93-08-00-05)결과의 일부로서 연구수행에 도움을 주신 한국과학재단에 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. P. Vanicek, et al., "Determination of the Geoid from Deflections of the Vertical Using a Least-

Squares Surface Fitting Technique", Journal of Bulletin Geodesique, No. 109, 1973, pp. 261-279

2. Soler, T., et al., "Determination of Vertical Deflections Using the Global Positioning System and Geodetic Leveling", Journal of Geophysical Letter, Vol. 16, No. 7, 1989, pp. 695-698

3. Kanazawa, "Transformation Parameters for WGS84, SLR Coordinates and Tokyo Datum", Proceedings of the Japanese symposium on GPS 1989, pp. 122-126

4. B. Hofmann-Wellenhof, "Global Positioning System - Theory and Practice", Springer-Verlag Wien New York, 1992

5. DMA-Technical Report "Department of Defense World Geodetic System 1984 - Its Definition and Relationships with Local Geodetic System", DMA TR 8350.2, 1991

6. C. L. Merry and P. Vanicek, "A Technique for Determining the Geoid from a Combination of Astrogeodetic and Gravimetric Deflections", Journal of Canadian Surveyor, Vol. 28, No. 5, 1974, pp. 549-554

7. Jerome Fiedler, "Orthometric Heights from Global Positioning System", Journal of Surveying and Mapping, Vol. 118, No. 3, 1992, pp. 70-79

8. Takao Tabei, "Geoid Undulation Differences in Shikoku Region, Southwest Japan, Determined by GPS Measurement and Leveling", Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol. 40, No. 1, 1994, pp. 33-44

9. 강준목, "GPS에 의한 Geoid Height 결정에 관한 연구보고서, 한국학술진흥재단, 1991

10. 강준목, 이용창, 박필호, "GPS에 의한 정밀 3차원 지형정보 획득", 한국측지학회지, Vol. 11, No. 2, 1993, pp. 27-34

11. 강준목, "GPS에 의한 지형정보 구축에 관한 연구", 1차년도 중간보고, 한국과학재단, 1994

12. 조규전, 이영진, "우리나라의 천문측지 지오이드에 관한 연구", 한국측지학회지 Vol. 3, No. 2, 1985, pp. 11-17