

GPS/Leveling과 지오폠펜셜 모델 지오이드 고찰

A study on the Geoid of the GPS/Leveling and Geopotential Model

고인세 · 조진동
Ko In-Se · Cho Jin-Dong

요 旨

GPS를 이용한 측지측량 방법의 실용화를 위해서는 정밀한 지오이드 결정의 필요성을 사용자가 인식하고 있을 뿐만 아니라, 많은 연구자들은 지오폠펜셜 모델 개발 및 성능 향상에 노력을 하고 있다. 본 연구자들은 축척 1:25만 안동도엽에서 개략 16 km 정도간격으로 23개의 수준점과 3개의 삼각점을 이용한 총 26개 지점에서 GPS 관측한 자료를 사용하여 국내에서 이용중인 지오폠펜셜 모델과 GPS/Leveling 방법에 의한 지오이드를 분석하였다. 그 결과 EGM96은 ± 0.299 m, OSU91A는 ± 0.152 m 및 KGEOID는 ± 0.113 m의 RMS 차이를, 지오이드는 NW-SE 방향을 가지면서 증가하는 경향을 나타내고 있다. 한편 지오이드와 지형고의 상관관계에 있어서 일률적인 관계를 보여주지 못하고 있음을 알 수 있었다.

ABSTRACT

To utilize the survey method using the geodetic satellite GPS, we tried to analysis the GPS/Leveling and the geopotential model of the 26 GPS observation points including 23 BM and 3 triangulation points with approximately 16-km interval selected from the Andong geographic map with a scale of 1:250,000. The average deviations of the geopotential model calculated from the results of analysis to the GPS/Leveling and the previously developed geopotential models(EGM96, OSU91A, and KGEOID), are 0.493 m, 0.277 m, and 0.195 m, respectively and RMS errors are ± 0.299 m, ± 0.152 m, and ± 0.133 m. The general trend of geoid undulations, however, shows an increasing pattern to the NW-SE direction. It has been also reported that the geoid undulation related with topographic-highs and geoid-highs although very poor relationship is shown in this area.

1. 서 론

최근 들어 지구주위를 돌고 있는 측지 위성 NAVSTAR를 이용한 GPS측량방법이 일반화되면서 GPS 시스템의 활용도가 날로 증가되고 있다. 그러나 GPS에 의한 표고의 결정은 지오이드가 결정되지 않은 지역에서는 적용할 수 없으므로 GPS측량기법의 실용화를 위해서는 정밀한 지오이드의 결정이 필요하다. 지오이드계산은 ① 위성자료에 의한 방법, ② 중력자료에 의한 방법, ③ 천문측량에 의한 방법 및 ④ 조합 해석법 등이 있다.

국내에서 지오이드형상 및 지오폠펜셜 모델에 대한 연구는 백은기 등¹⁾, 조규전²⁾, 최광선^{3,15)}, 최재화 등⁴⁾이 연구들, 중력자료에 의한 지오이드연구는 최광선 등^{5,7)}, 권병두⁸⁾, 이석배 등¹¹⁾, 이석용¹²⁾, 정애영¹⁰⁾, 문홍근⁹⁾, Kim,

S.K⁶⁾이 있다. 윤홍식¹³⁾은 해상고도자료를 이용하여 지오이드면을 계산하였다. 본 연구는 그림 1에서 보는 바와 같이, 축척 1:25만 안동도엽 지역 내에서 국립지리원이 고시한 수준점(고시성고가 정확하다는 전제하에)에 대한 GPS/Leveling과 지오폠펜셜 모델(EGM96, OSU91A) 및 KGEOID98 지오이드를 분석함으로써 한반도 지오이드고정밀도 평가 및 GPS 측지측량의 실용화를 앞당기고자 한다. 본 연구에 사용된 자료는 23지점의 수준점과 3점의 삼각점에 대한 GPS 관측자료이다.

2. 이론적 배경

2.1 지오폠펜셜/지오이드

지구주위에는 지구의 중력장에 의해서 무수히 많은 등중력포텐셜이 형성되며, 이 중에서 지구형상에 가장 적합한 등중력포텐셜면을 지오이드라고 정의하며, GRS1980

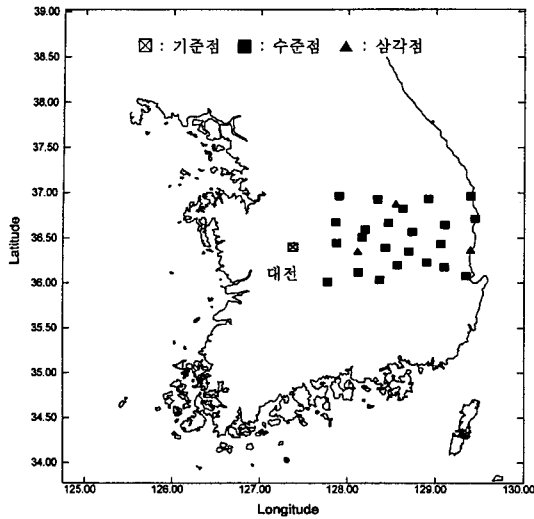


Fig. 1. Index map of GPS network

(Geodetic Reference System 1980)에서 지오이드의 포텐셜 W_0 값을 $W_0 = (6,236,686 \pm 2) \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 으로 정의하고 있다.

그러나 지역에 따라 실제 지오이드면상의 포텐셜 W 와 W_0 사이에는 미소한 차 δW 가 있으므로

$$W_0 = W + \delta W \quad (1)$$

지오이드의 기복에 의한 지구 타원체면상의 포텐셜 (normal gravity potential) U 와 지오이드면상의 중력 포텐셜 W 사이에는 포텐셜 이상(anomalous potential) T 가 나타나며, 이들 관계식은 다음과 같다.

$$W(x, y, z) = U(x, y, z) + T(x, y, z) \quad (2)$$

지구타원체와 지오이드의 고도차 N 을 지오이드고라고 한다. 따라서 포텐셜 이상 T 와 지오이드고 N 사이의 관계는 식 (3)과 같으며

$$T = \gamma N \quad (3)$$

또한, 지오이드고 N 은 포텐셜 이상 T/γ 로 표현할 수 있으며, 지오이드고 N 과 포텐셜 이상 T 의 관계는

$$N = T/\gamma \quad (4)$$

로 표시하여 Bruns의 식이라고 한다. 식 (4)에서 지오이드고 N 을 산출하기 위해서는 포텐셜 이상 T 를 알아야 한다는 것을 보여 준다. 따라서, 중력이상 Δg 를 포텐셜

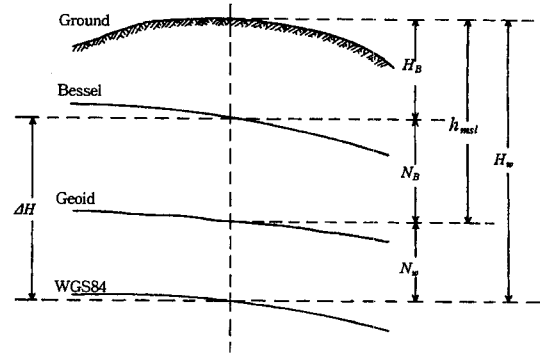


Fig. 2. The conceptual map of geoid undulation

이상 T 로 표현하면 식 (5)와 같이 표시한다.

$$\Delta g = -\frac{\partial T}{\partial \gamma} - \frac{2}{\gamma} T \quad (5)$$

중력이상 Δg 와 지오이드 기복 N 의 관계에 있어서 중력 이상 값이 크면 지오이드고가 크며, 반대로 중력 이상 값이 작으면 또한 지오이드고도 작음을 의미한다. 그러나 실제적인 지오이드면의 기복은 지형의 기복과 지구 내부 물질의 밀도 및 구조의 불균일 때문에 야기되고 있기 때문에 지구형상은 불균일하고 서로 다른 매질에 의한 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

2.2 지오이드고의 계산

2.2.1 GPS/Leveling에 의한 지오이드고

그림 2에서 보는 바와 같이 GPS/Leveling에 의한 지오이드 기복면은 사전에 표고가 정확히 결정된 측점을 GPS기준점으로 하고 상대위치 결정을 실시하여 조정 산출된 WGS84 타원체고(H_w)에서 해당 측점의 정표고 성과(h_{msl})를 감하여 WGS84 타원체면에서 지오이드 면까지의 높이를 의미한다.

지오이드고 N 은 식 (6)과 같은 방법에 의해 얻을 수 있다.

$$N_w = H_w - h_{msl} \quad (6)$$

여기서 N_w : WGS84 지오이드고, H_w : WGS84 타원체고, h_{msl} : 정표고이다.

2.2.2. 지오폠�텐셜로부터 구한 지오이드고

(1) OSU 지오폠�텐셜 모델

고 분해능의 지구중력모델로서 미국 오하이오 주립대

학의 Prof. Rapp을 중심으로 하는 연구그룹이 개발을 주도하고 있으며, 1978년 미국 항공우주국 산하의 GSFC (Goddard Space and Flight Center)가 발표한 중력 GEM-T2모델을 기본으로 하여 전 세계의 각종 중력자료를 이용하여 구한 지구전체의 위도 및 경도 간격 각각 30'×30' 지역의 평균고도이상자료를 구조화분석하여 fully normalized gravity potential coefficient를 계산한 것이다. 이는 최대차수 360까지 계산된 것으로 분해능이 130,678 개의 코사인함수와 싸인함수 계수로 구성되어 있다. OSU91A 지오폠펀셜 모델에 사용된 자료는 육상중력자료, 선상중력자료, Altimeter satellite에 의한 중력자료, 인공위성 케도관측에 의한 중력자료 및 지구물리학적 해석에 의한 중력자료 등이다. 장파장의 효과만을 나타내는 일종의 광역지오이드이며 이는 분해능이 50 km 정도로서 정밀지오이드를 연구하기에는 미흡하다. 기존의 OSU 모델에 비해 해면고도 관측자료의 처리에 정밀성을 기했으며 정확도는 50 cm 내외로 보고되고 있다.

(2) EGM96 지오폐텐셜 모델

미국의 Ohio State University, NIMA(National Imagery Mapping Agency), NASA Geodard Space Flight Center의 공동연구 중력모델이다. 중력모델의 최저 차수 2, 0부터 최대차수 360, 360까지 총 65,338개의 코사인과 싸인의 함수로 이루어진 지구중력 포텐셜의 구면조화계수 모델로서, 65,338개의 레코드로 구성되어 있으며 전 세계의 지오이드 절대정확도를 ±0.5 m에서 ±1.0 m의 범위 안에서 결정하는 것을 목표로 하고 있다. 우리는 이 계수들만을 이용하여 임의 지역의 지오이드나 고도이상, 수직선편차 등 지구의 중력장과 관계되는 물리량들을 계산 할 수 있다.

(3) KGEOID98 지오이드

최재화등(1996)은 EGM96 지구중력장 모델을 최대차수 360까지 해석하고, 육상의 중력자료와 해상의 위성고도 자료를 합성하여 중파장 효과인 잔여 지오이드고 및 수치지형모델로부터 단파장의 지오이드 효과를 계산하였으며 장, 중, 단파장 지오이드효과를 합성하여 최종 지오이드 KGEOID98 지오이드 모델을 산정 하였다.

3. GPS 자료획득 및 처리

본 연구지역의 GPS관측 계획은 사전에 표고가 결정된 수준점(국립지리원 성과고시)에서 1차 기준점망에 속하

Table 1. The coordinate of the KAO GPS observation site

장 소	천문연구원	과학기술연구원
위 도	36° 23' 57.94627"N	36° 22' 27.914490"N
경 도	127° 22' 28.11647"E	127° 21' 57.878810"E
높 이	116.8486 m	77.607 m

는 1, 2등 수준점을 될 수 있는 한 고르게 분포가 되도록 계획을 세웠으며, 관측 점의 수는 23개 수준점과 3개 삼각점이며 평균 측점 간의 거리는 개략 16 km(최소 12 km, 최대 35 km)로 구성하였다. 13개의 GPS 관측 대상 점들에 대한 관측은 위성관측은 Trimble 4000SSE 수신기 1대를 이용하였으며, 관측시간은 개략적으로 9시간 이상, 고도가 10° 이상인 위성으로부터 송신되는 L1/L2 주파수 신호를 수신하였다. 위성 공간시계가 불량한 수준점들은 최단거리에 레벨측량으로 보점을 설치하여 GPS관측을 시도하였다. 측위 방식은 국제 GPS관측망에 가입되어 있는 천문연구원의 상시관측소 TAEN(1996-1998), DAEN(1999-2000) 측점을 고정점으로 하는 상대 측위방식을 이용하였다.

한편 기 연구자, 최중현¹⁴⁾은 GPS관측 대상점들에 대한 위성관측은 ISSA 측점과 국제공동 GPS 관측망에 가입되어 있는 DAEN 측점을 고정점으로한 상대측위 방식으로 수행되었다. 위성관측은 Trimble 4000 SST 수신기 3대를 이용하여 삼각점 3시간, 수준점 2시간씩 1일 2회 관측으로 고도가 10° 이상인 위성으로부터 L1/L2송신주파수를 수신하였다.

관측된 자료처리는 방송력을 이용하여 천문연구원의 상시 GPS관측소 자료(표 1)를 기준값으로, GPSurvey프로그램(Wave2.35)을 사용하여 관측점들 자료에 대한 후처리(post-processing)방법을 이용하여, 전리층과 이온층 영향을 보정한 Fixed Baseline Solution을 얻었다.

4. GPS/Leveling과 지오폐텐셜로부터 계산된 지오이드고의 평가

국내에서 활용되고 있는 중력장 모델의 효율적인 활용을 위하여 축척 1:25만 안동도엽내에서 해발고도를 정확히 알고 있는 23개 수준점/3개 삼각점등에서 GPS측정하여 산출된 지오이드를 이용하여 국내에서 널리 활용되고 있는 지오폐텐셜 모델 EGM96, OSU91A 및 KGEOID 모델로부터 도출된 지오이드를 고찰하기 위하여 GPS/

Table 2. Comparative Analysis of GPS/Leveling and Geopotential model

번호	WGS84 좌표계			정표고	A	B	C	D	도역
	경도(°)	위도(°)	높이(m)						
1	128.112668	36.352344	119.985	92.550	27.44	-0.55	0.28	0.03	상주 ▲
2	127.898153	36.962357	98.172	71.611	26.56	-0.89	-0.09	-0.35	충주 ○
3	128.119400	36.119557	103.017	75.339	27.68	-0.52	0.27	-0.02	김천 ○
4	128.363356	36.034101	75.411	47.317	28.09	-0.23	0.28	0.47	구미 ○
5	128.462386	36.666394	122.127	94.148	27.98	-0.55	0.34	0.09	예천 ○
6	128.338041	36.927800	177.706	150.129	27.58	-0.50	0.40	-0.04	단양 ○
7	128.16402	36.509777	91.565	64.409	27.16	-0.60	0.27	-0.07	문경 ○
8	128.196591	36.590432	118.598	91.078	27.52	-0.70	0.18	-0.11	문경 ○
9	129.442872	36.713555	38.950	9.984	28.97	-0.46	-0.03	0.12	병곡 ○
10	129.393956	36.368902	179.911	150.160	29.75	-0.75	-0.34	-0.23	영덕 ▲
11	127.770002	36.010604	304.800	277.733	27.07	-0.50	0.37	0.25	영동 ○
12	129.343871	36.076088	54.406	24.833	29.57	-0.16	0.13	0.29	포항 ○
13	129.102894	36.645311	248.272	218.272	29.68	-0.81	-0.22	-0.23	영양 ○
14	129.056983	36.435452	245.086	215.688	29.40	-0.77	0.17	0.09	청송 ○
15	129.394484	36.962564	34.377	5.774	28.60	0.12	-0.30	-0.34	울진 ○
16	128.914934	36.934740	345.849	316.542	29.31	-0.76	-0.07	-0.18	춘양 ○
17	128.897686	36.228295	389.517	360.105	29.41	-0.36	-0.19	0.26	화북 ○
18	128.625919	36.828650	177.184	148.606	28.58	-0.72	0.16	-0.21	영주 ○
19	128.547862	36.882897	404.654	376.720	27.93	-0.32	0.58	0.21	영주 ▲
20	128.695325	36.351173	118.541	89.946	28.60	-0.25	0.47	0.27	의성 ○
21	128.563956	36.198397	115.552	86.972	28.58	-0.49	0.21	0.20	군위 ○
22	128.861758	36.671731	249.044	222.731	26.31	-0.31	0.49	0.26	속리 ○
23	127.873393	36.443507	202.896	176.210	26.69	-0.36	0.46	0.25	관기 ○
24	128.428352	36.393449	93.179	65.288	27.89	-0.25	0.54	0.31	안계 ○
25	128.730907	36.566471	121.775	93.139	28.64	-0.47	0.34	0.13	안동 ○
26	129.095188	36.176338	255.796	225.900	29.90	0.49	0.05	-0.07	기계 ○

A : GPS/Leveling Geoid; B : EGM96 Geoid-A; C : OSU91A-A; D : KGEIOD-A; ○ : 수준점 ; ▲ : 삼각점.

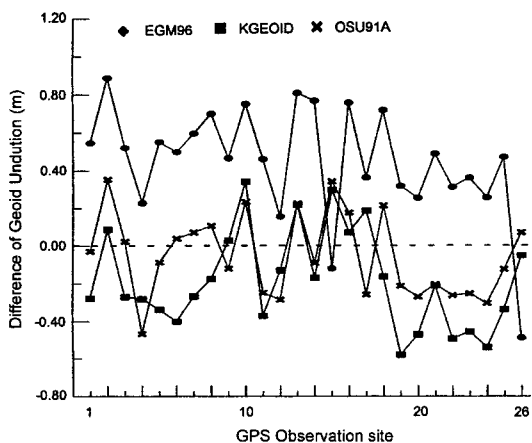


Fig. 3. WGS84 Geoid difference between GPS/Leveling and Geo-Potential models, GPS/Leveling and KGEIOD98 model

Leveling 지오이드를 기준으로 각 모델의 지오이드의 차를 계산한 결과는 표 2와 그림 3과 같다. 또한, 각 모델들에 대한 RMS차, 평균차를 구한 결과, RMS차는 각각 ± 0.299 m, ± 0.152 m, ± 0.133 m이며, EGM96의 평균차는 0.493 m, OSU91A의 평균차는 0.277 m이며 KGEIOD의 평균차는 0.195 m를 보여주고 있다.

중력이상과 지오이드 기복면 사이 관계에 대한 이론적 관계를 G.C.Stokes(1849)가 처음 논의를 시작하였다. 고도 중력이상은 지형과 필연적인 관계를 가지고 있으며, 지오이드는 이러한 특성을 갖는 고도이상의 적분에 의해서 계산된다. 우리 나라 일원의 지오이드를 볼 때, 서에서 동으로 가면서 전반적으로 증가하는 경향을 볼 수 있다. 우리 나라 지오이드는 서해안에서 약 15 m에서 동해안에서는 30 m까지 증가하고 있다. 이는 전 지구형상의 차원에서 우리 나라 일원에서의 거시적인 지형 변화

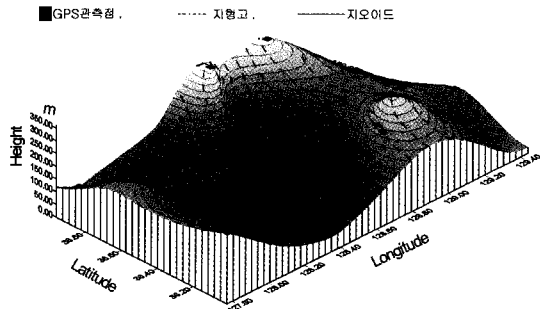


Fig. 4. 3D map of geoid undulation and topographic height

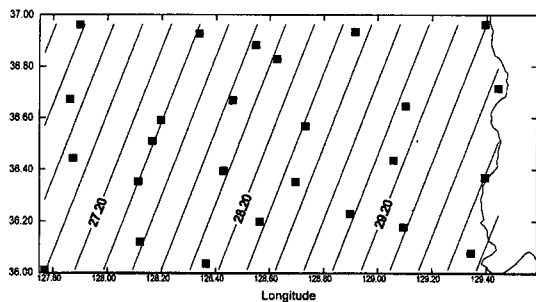


Fig. 5. Trend analysis of the geoid undulation in the Andong area

경향을 나타내주고 있다. 또한 지오이드는 태백산맥과 개마고원지역에서는 주위에 비해 수 m 높게 나타나는 반면, 동해지역에서는 주위에 비해 수 m 낮게 나타나고 있어 지형의 상대적 변화경향을 잘 표현해주고 있다(최광선¹⁵⁾).

한편 최재화 등⁴⁾은 산악지인 동부지역과 지리산 및 제주도에서는 지형효과로 인한 지오이드의 변화가 뚜렷하게 보이고 있다고 언급하였다. 그러나 본 연구지역에 대한 연구결과 표 2와 그림 4에서 보는 바와 같이 지형고와 지오이드관계는 뚜렷하게 일률적인 변화를 보여주지 않는다. 본 연구지역에서의 지오이드에 대한 방향성을 검토하기 위하여 Polynomial regression방법을 사용하여 계산하여 작성된 그림 5에서 보는 바와 같이 지오이드의 방향성은 북서에서 남동 방향으로 가면서 증가하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 종합적으로 생각할 때 국내의 지오이드 연구에 있어서 지형뿐만 아니라 지하의 서로 다른 매질의 영향을 검토하여야 할 것으로 생각될 뿐만 아니라, 적합한 지오이드 모델개발을 위해서는 앞으로 더 많은 관련자료들이 축적되어야 할 것으로

판단된다.

5. 결 론

축척 1:25만 안동 도엽내의 23개 수준점과 3개 삼각점 상에서의 GPS관측자료에 의한 GPS/Leveling 지오이드와 지오폠펜셜 지오이드를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구 지역에서 결정된 지오이드는 북서방향에서 남동 방향으로 가면서 증가추세를 보여주며, 지오이드고는 충북 충주지역에서 25.70 m, 경북 포항지역에서 27.80 m로서 약 4.10 m의 차이를 나타내고 있으며, 지오이드 고와 지형의 상관관계에 있어서 일률적인 관계를 보여주지 못하고 있음을 알 수 있었다.

2. GPS/Leveling기법에 의한 지오이드와 지오폐텐셜 모델에 의한 지오이드를 상호 비교한 결과, EGM96의 RMS차는 ± 0.299 m, OSU91A의 RMS차는 ± 0.152 m 및 KGEIOD의 RMS차는 ± 0.113 m이다.

감사의 글

본 논문에 관심과 아낌없는 충고를 하여주신 심사위원님들에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 백은기, 목찬상, 이종혁, "우리 나라 천문지오이드에 관한 연구", 천문측지학회 Vol. 3, No. 2, 1985, pp. 11-17.
2. 조규진, 이영진, "우리 나라의 천문측지 지오이드에 관한 연구", 한국측지학회지, 제9권, 제2호, 1991, pp. 1-8.
3. 최광선, "OSU89B에 의한 한반도 일원의 지오이드에 관한 연구", 한국측지학회지, 제9권, 제2호, 1991, pp. 67-72.
4. 최재화, 윤홍식, 이석배, 서용운, 심정민, "GPS/Leveling에 의한 지오이드의 평가에 관한 연구", 건설교통부 국립지리원, 1998년 12월.
5. 최광선, 양철수, 박선미, "중력자료 해석에 의한 한반도 일원의 지오이드", 한국측지학회지, 제12권, 제1호, 1994, pp. 131-139.
6. Kim, S. K, "Geodetic and Geophysical Analysis of Gravity data in Korea", Journal of Korea Institute of Mining geology, 1979, pp. 17-28.

7. 최광선, “한반도 남부 지역의 중력에 대한 연구”, 서울대학교 대학원 박사학위 논문, 1986.
8. 권병두, 김현수, “한반도 남부지역의 수직선편차와 지오이드높이”, 한국지구과학회지, 제8권, 제1호, 1987, pp. 43-51.
9. 문홍근, “제주도 지역의 수직선편차와 지오이드”, 부산대학교 교육대학원 석사학위 논문. 1989.
10. 정애영, “원통자표계를 이용한 한반도 남부의 상대지오이드”, 부산대학교 교육대학원 석사 학위논문, 1989.
11. 이석배, 윤희식, 최재화, “FFT에 의한 한반도 일원에서 중력지오이드결정”, 한국측지학회지, 제14권, 제1호, 1996, pp. 49-58.
12. 이석용, “한반도의 중력이상과 지오이드 결정”, 성균관대학교, 석사학위논문, 1997.
13. 윤희식, “The Altimeter Geoid of the regio of Korean Peninsula”, 1995, 한국측지학회지, 1995, pp. 61-68.
14. 최중현, “GPS에 의한 Bessel 지오이드고 산정에 관한 연구”, 충남대학교 석사학위논문, 1995.
15. 최광선, “한반도 일원의 지구중력장의 정밀화와 GPS에 의한 3차원 측지좌표의 정밀결정”, 한국과학재단, 1998, p. 134.