

제주도의 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드

최광선* · 박재희** · 홍순헌***

*부산대학교 지구과학 교육과 · **마산상업고등학교 · ***밀양산업대학교 토목공학과

요 약

제주도 내의 13개의 수준점에서 GPS를 측정하였으며, 이에 의한 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드를 비교, 분석하여 보았다. GPS의 측정결과 각 수준점의 타원체 높이를 ± 3 cm 이내의 정밀도로 측정하였다. 계산된 GPS/Levelling 지오이드는 제주도의 지형 변화를 잘 나타내고 있으며, 제주도에서 지오이드와 지형의 상관식은 다음과 같다.

$$N = 0.001082 \times h + 25.458 \pm 0.227 \text{ s.d.}$$

계산된 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드는 잘 일치하고 있으며 두 지오이드의 RMS 차이는 0.14 m이다.

주요어: 지오이드, GPS, GPS/Levelling 지오이드, 제주도, 지구 중력 모델

Choi, KwangSun, Park, JeHui, and Hong, SunHun, 2000, Comparison of GPS/Levelling Geoid with PNU95 Geoid in Cheju Island. Journal of the Korean Geophysical Society, v. 3, n. 1, p. 13-24.

ABSTRACT: In this study, GPS surveying at bench marks in Cheju Island and with these data, calculate GPS/Levelling geoid in Cheju area. And compare this geoid with PNU95 Geoid.

The results are as follows :

1. The ellipsoidal height of each bench mark was measured ± 3 cm with accuracy in GPS surveying.
2. Calculated GPS/Levelling Geoid well represents the variations of Cheju terrain. The correlation formula between the geoid and elevation above sea level in Cheju area is as follow :

$$N = 0.001082 \times h + 25.458 \pm 0.227 \text{ s.d.}$$

3. Calculated GPS/Levelling Geoid and PNU95 Geoid are well fitted and the RMS difference between the two Geoids is 0.14 m.

Key words: Geoid, GPS, GPS/Levelling geoid, Cheju Island, Geopotential model

(Choi, KwangSun, Department of Earth Science Education, Collage of Education, Pusan National University, Jangjun-dong, Kumjung-Gu, Pusan 609-735, Korea; Park, JeHui, Masan Commercial High School, Masan Kyongsangnam-Do, Korea; Hong, SunHun, Civil Engineering, Miryang National University, Miryang Kyongsangnam-Do, Korea. email:ksunchoi@hyowon.pusan.ac.kr)

1. 서 론

지구의 형상과 관련된 측지학의 연구는 주로 중력 자료의 해석이 이용되어 왔으나(Heiskanen Moritz, 1987), 최근의 인공위성을 이용한 측위기술의 발달

로 이를 이용한 측지학적 연구가 가능하게 되었다 (Moritz, 1980; Rapp · Kadir, 1988; Rapp, 1986). 이중 GPS (Global Positioning System)는 과거에 직접 측정이 거의 불가능하였던 지오이드 등에 관련되는 물리량을 수집할 수 있으며, 이는 중력 이상으로 지

오이드의 기복 등을 연구하는 물리 측지학의 전통적인 방법에 비해 획기적인 발전이라고 하겠다 (Teunissen · Kleusberg, 1998). 그러나 GPS의 관측에 의한 높이는 WGS84 (World Geodetic System 84) 타원체를 기준으로 하는 타원체 높이인 반면 표고는 지오이드를 기준으로 하고 있으므로 GPS를 측지·측량에 이용하기 위해서는 지오이드와 지구 타원체 간의 차이인 지오이드 높이를 정확하게 알아야 한다. 한편 해발고도를 정확히 알고 있는 수준점 등에서 GPS를 측정하면 지오이드 높이를 계산할 수 있으며, 이를 이용하여 중력 자료로부터 계산한 지오이드를 검증할 수 있다(Seeber, 1993; Wellenhof *et al.*, 1994).

우리나라에서의 지오이드에 대한 연구는 최근에

서야 시작되었다. 초기의 연구는 중력 자료의 부족 등으로 광역 지오이드를 고려하지 않은 상대 지오이드에 대한 연구이다(Kim, 1979; 최광선, 1986; 권병두·김현수, 1987). 이후 최광선(1991)은 OSU89B 중력 모델을 분석하여 우리나라 일원의 광역 지오이드에 대하여 연구하였으며, 최광선·김진후(1993)는 제주도 일원에서 OSU89B 중력 모델과 제주도 일원의 중력 자료를 이용하여 이 지역의 정밀 지오이드에 대하여 연구하였다. 또한 최광선 외(1994, 1995)와 Yun (1995)은 OSU91A 중력 모델(Rapp *et al.*, 1991)과 한반도 일원의 각종 중력 관련 자료를 이용하여 한반도 일원의 정밀 지오이드 등에 대하여 연구하였다.

최근 Choi *et al.* (1997)은 OSU91A 중력 모델과

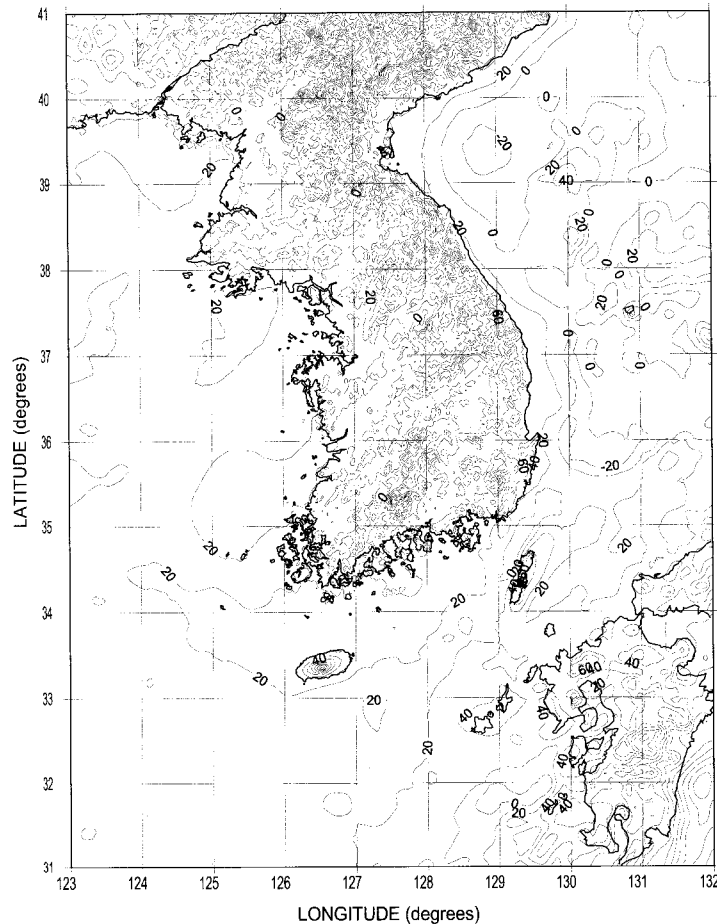


Fig. 1. Free-air anomaly map in and around the Korean peninsula (Choi *et al.*, 1983). Contour interval is in 20 mGals.

한반도 일원의 중력 자료 및 수준점에서의 GPS 관측 자료를 이용하여 계산한 우리나라의 정밀 지오이드(PNU95 지오이드)를 발표하였다. PNU95 지오이드는 우리나라 내의 71지점의 수준점에서 측정된 GPS 자료를 이용하여 중력 자료에 의해 계산한 지오이드를 검증하고 있으나 이에는 제주도 지역의 자료가 포함되어 있지 않다. 또한 PNU95 지오이드는 제주도 지역의 중력 자료로 Lee *et al.* (1983)에 의한 290여 측정점의 자료를 이용하고 있지만 이중 200여 측정점의 자료가 고도계를 이용하여 표고를 측정한 것으로 중력 이상의 오차가 크다. 이 때문에 제주도 지역의 PNU95 지오이드는 타 지역에 비해 오차가 클 것으로 예상된다. 그러므로 본 연구에서는 제주도의 수준점에서 GPS를

측정하여 이에 의한 GPS/Levelling 지오이드를 계산하고, 이와 PNU95 지오이드를 비교하여 보았다.

2. PNU95 지오이드

PNU95 지오이드 계산에 이용한 중력 자료는 1995년까지 측정된 4,500여 측정점의 남한지역 육상 중력 자료(최광선 외, 1995)와 일본 동경대학 해양연구소의 중력 자료(Fukuda, 1990), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 Global marine gravity 자료(Sandwell · McAdoo, 1990) 등이다. 중력 자료가 없는 북한 및 중국 일원은 OSU91A 중력 모델과 지형 자료를 이용하여 해당 지역의 고도 이상을 계산하였다(최광선 외, 1993). Fig. 1은 이상의 중력 자

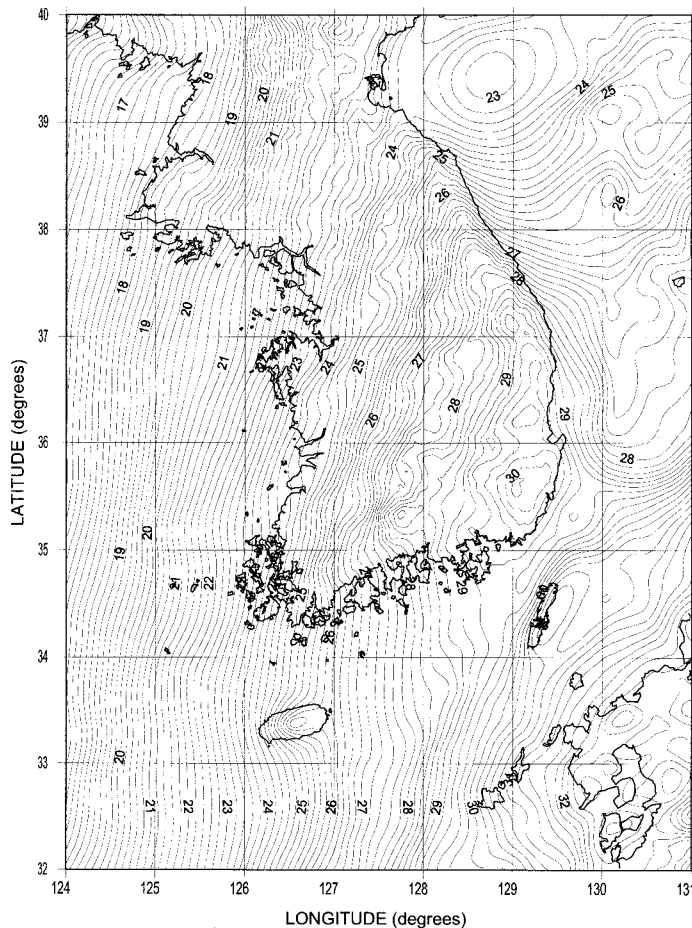


Fig. 2. PNU95 geoid (Choi *et al.*, 1997) referred to WGS84 ellipsoid. Contour interval is in 0.2 m.

료에 의한 우리나라 일원의 고도 이상도이다. 고도 이상도는 지형도와 매우 유사하며, 지형에 민감한 고도 이상의 특성을 잘 나타내 주고 있다.

Fig. 1의 고도 이상의 계산에 이용한 제주도 육상 지역의 중력 자료는 Lee *et al.* (1983)의 측정에 의한 290여 점의 자료이다. Lee *et al.* (1983)은 Worden 중력계를 이용하여 제주도의 중력을 측정하였으며, 수 준점에서 측정한 일부의 자료를 제외하고 나머지 200여 측정점의 표고측량에 Paulin Precision Altimeter를 이용하였다. 이 기기는 Aneroid 고도계의 일종으로 기압과 온도 변화에 민감하다. 그러나 온도 보정만 하였으므로 중복 측정에서의 표고의 오차는 10 m를 상회하고 있으며, 이에 의한 제주도 지역의 중력 이상의 정밀도는 3 mGal 이상으로 남한의 육상

지역의 절대 오차보다는 클 것으로 사료된다.

2.1. GPS 자료와 PNU95 지오이드

정밀 지오이드는 지구 중력 모델에 의한 광역 지오이드와 연구지역 일원의 중력 자료를 적분하여 계산한 상대지오이드의 합으로 계산된다. 여기서, 정밀 지오이드 계산에 가장 적합한 지구 중력 모델의 이용 차수와 중력 자료의 적절한 적분 반경이 문제가 되며, 이들은 지역에 따라 각기 다르게 나타나고 있다(Rapp · Kadir, 1988).

한편 GPS 관측에 의한 높이는 WGS84타원체를 기준으로 한 타원체 높이(ellipsoidal height)로써, 이는 기하학적인 높이이다. 그러나 우리가 일반적으로 사용하고 있는 높이는 물리적인 높이로서 지

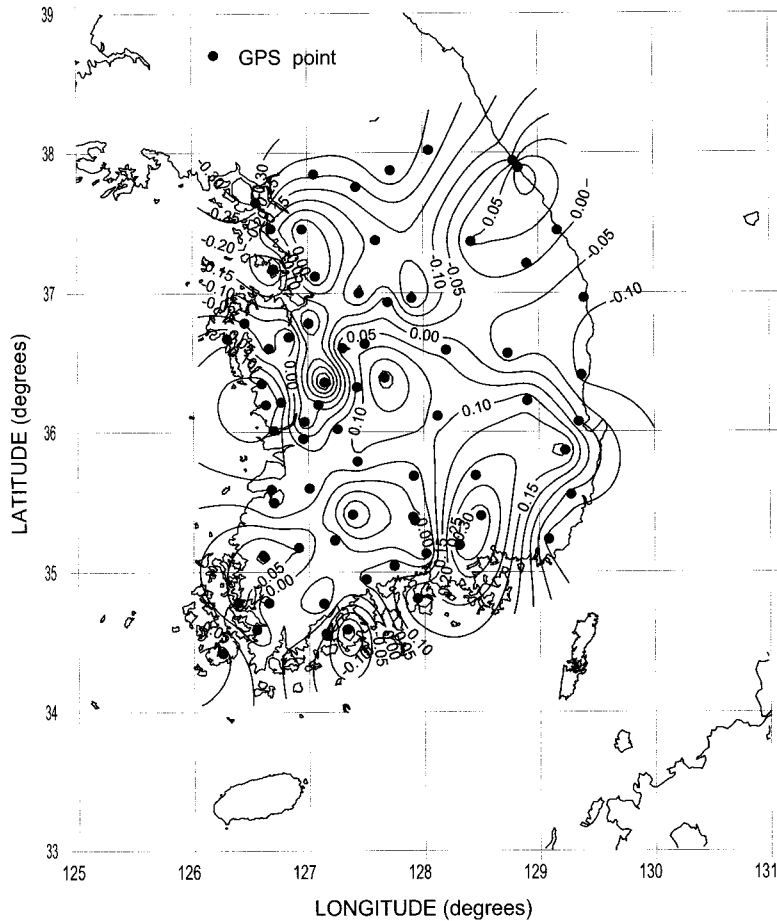


Fig. 3. Difference between PNU95 geoid and GPS/Levelling geoid (Choi *et al.*, 1997). Solid circles denote bench marks which GPS measurement. Contour interval is in 0.05 m.

오이드 면을 기준으로 하는 표고이다. 그러므로 GPS를 이용하여 표고 측량을 하는 경우 측량 지점의 지오이드 높이를 알고 있어야 하며, 이것이 GPS 측량에 가장 큰 문제점이다. 반면에 정확한 표고를 알고 있는 수준점 등에서 GPS를 측정하면 GPS 관측에 의한 높이와 표고의 높이 차가 그 지점의 지오이드가 된다.

$$N = H - h \quad (1)$$

여기서, N = 지오이드 높이, H = 타원체 높이, h = 수준점 표고

이러한 GPS 관측에 의한 지오이드를 GPS/Levelling 지오이드라 하며, 이는 중력 자료의 계산에 의한 지오이드의 검증 수단이 되는 것이다.

PNU95 지오이드는 국립지리원이 매설한 71개 지점의 1등 및 2등 수준점에서 GPS를 관측한 자료를 이용하여 중력 자료에 의한 지오이드와 GPS/Levelling 지오이드의 차이가 최소가 되도록 계산한 우리나라 일원의 지오이드이다. Choi *et al.* (1997)에 의하면 OSU91A에서 최대 차수 167 degree and

order까지의 광역지오이드와 지오이드 계산지점의 중력 자료를 27 km까지 적분한 상대 지오이드를 합성한 경우의 지오이드가 GPS/Levelling 지오이드와 가장 잘 일치하고 있으며, 이 경우 두 지오이드의 RMS (Root Mean Square) 차이는 0.149 m이다.

PNU95 지오이드는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 우리나라의 지오이드는 서북 단의 14.5 m에서 남동 단의 33.3 m 범위에서 변화하고 있으며, 남한 내륙에서는 강화도의 최저 21.8 m에서 경주 일원의 최고 30.2 m까지의 범위에서 변화하고 있다.

Fig. 3은 GPS를 측정한 71개의 수준점의 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드의 차이를 나타낸 것이다. 두 지오이드의 최대 차이는 0.35 m이며 이들의 RMS 차이는 0.149 m이다. 이는 수준점 표고의 오차와 GPS 관측 시의 오차를 고려하지 않은 경우로써, 이를 고려할 경우 PNU95 지오이드의 정밀도는 더 향상될 것이다. 또한 71개 수준점 간의 기선거리에 따른 PNU95 지오이드의 상대오차는 1.14 ppm (part per million)으로 기선거리 10 km에 약 1.1 cm의 표고오차를 나타내고 있다.

한편 Fig. 3에서 제주도에는 GPS를 측정한 자료가 없음을 알 수 있다. 이와 PNU95 지오이드

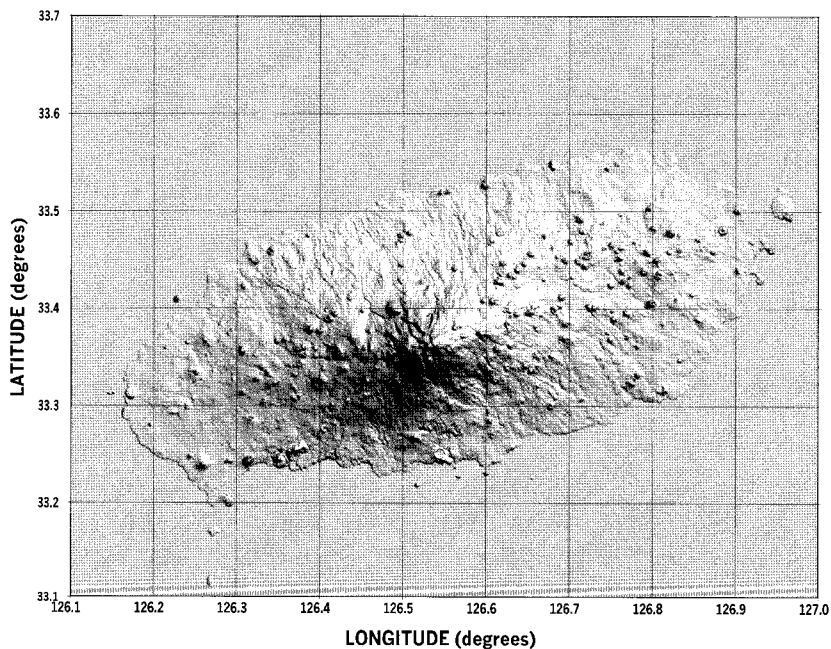


Fig. 4. Topographic relief map of Cheju Island using 3"×3" mean value digital terrain data.

Table 1. Estimated coordinates of the Cheju base by GPS observations.

GPS base	Latitude		Longitude		Ellipsoidal Height	
	d m s	RMS (cm)	d m s	RMS (cm)	m	RMS (cm)
KAO	36 22 27.9145	0.00	127 21 07.8788	0.00	77.607	0.00
Cheju	33 29 22.1659	0.02	126 29 05.1704	0.02	111.249	1.92

KAO : Korea Astronomy Observatory

Table 2. Estimated coordinates of the bench marks.

BM no.	Latitude		Longitude		Ellipsoidal Height		SD (m)
	도 분 초	RMS (cm)	도 분 초	RMS (cm)	m	RMS (cm)	
16-0-1-25	33 15 29.91013	0.004	126 12 36.04951	0.004	41.723	0.515	36393.41
16-0-1-46	33 14 52.82727	0.003	126 34 10.95392	0.003	75.206	0.480	27853.59
Cheju BM	33 30 47.95200	0.003	126 31 18.19657	0.002	35.339	0.417	4132.22
16-0-1-78	33 33 16.34796	0.004	126 45 3.44425	0.005	34.583	0.937	25512.34
16-0-1-63	33 22 53.67108	0.004	126 52 35.12943	0.003	45.649	0.488	38092.01
16-0-4-15	33 24 40.87511	0.007	126 46 2.77945	0.005	232.985	0.849	27429.12
16-0-4-5	33 29 1.88303	0.007	126 36 30.06493	0.006	231.386	0.907	11245.45
16-0-3-4	33 27 23.00171	0.008	126 33 4.93303	0.009	305.794	1.049	6979.51
16-0-3-10	33 23 48.89133	0.008	126 37 1.60379	0.009	752.351	1.098	15843.36
16-0-3-15	33 20 13.37477	0.006	126 36 35.80347	0.006	549.210	1.072	20389.14
16-0-2-13	33 21 54.18575	0.007	126 22 1.11788	0.006	509.012	0.777	17787.92
16-0-2-10	33 24 23.12594	0.006	126 23 12.53205	0.004	453.655	0.645	13142.87
16-0-1-12	33 26 31.97352	0.008	126 17 38.17004	0.007	37.649	0.915	18746.51

BM : Bench Mark

SD : Slant Distance from the GPS Base

계산에 이용한 제주도 지역의 중력 이상의 정밀도를 고려할 때 제주도에서의 PNU95의 오차는 남한 전역의 RMS 오차보다 클 것으로 예상된다.

3. GPS 측정과 자료처리

3.1. GPS 측정

제주도 지역의 GPS/Levelling 지오이드를 계산하기 위하여, 1998년 9월 12일부터 15일 사이의 기간 동안 제주도 내의 수준점에서 GPS를 측정하였다.

GPS 측정 기간동안 제주시의 신 제주에 임시 고정 GPS 기준점을 유지하였으며, 이를 기준으로 13개 수준점에서 GPS의 상대관측을 하였다. 사용한 GPS 수신기는 부산대학교가 소장하고 있는 미

국 Trimble 사의 4000 ST 측지용 수신기와 동아대학교가 소장하고 있는 일본 SOKKIA 사의 GSR 2200 측지용 수신기 각각 1대씩 2대를 이용하였다. 이중 4000 ST의 측정 정밀도는 위도, 경도 및 표고 모두 $1.0 \text{ cm} \pm 1 \text{ ppm}$ 이며, GSR2200의 정밀도는 $0.5 \text{ cm} \pm 1 \text{ ppm}$ 이다. GSR2200은 기준점 관측용으로 이용하였으며, 4000 ST는 수준점에서의 관측에 이용하였다. 모든 수준점에서 최소 30분에서 최대 41분까지 GPS 관측을 하였으며, 신호의 수신 간격은 15초로 하였다. GPS를 측정한 13개의 수준점 중 4개 지점은 수준점에서 직접 관측을 하였으며, 나머지 9개 지점은 편심측정을 하였다. 편심측정을 할 경우 수준점과 관측지점의 거리는 가능하면 최소로 하였으며, 최대거리는 39

Table 3. Differences between GPS/Levelling geoid and PNU95 geoid in Cheju area.

BM no.	BM height (m)	Ellipsoidal height (m)	GPS/Levelling geoid (m)	PNU95 geoid (m)	Diff (m)
16-0-1-25	17.178	41.880	24.702	24.428	-0.274
16-0-1-46	50.626	76.340	25.714	25.616	-0.097
Cheju BM	11.132	36.549	25.417	25.596	0.179
16-0-1-78	8.448	34.349	25.901	25.861	-0.040
16-0-1-63	19.135	45.262	26.127	26.061	-0.066
16-0-4-15	207.226	233.322	26.096	26.127	0.031
16-0-4-5	205.627	231.387	25.760	25.955	0.196
16-0-3-4	280.599	306.500	25.901	25.962	0.060
16-0-3-10	725.972	752.455	26.483	26.302	-0.182
16-0-3-15	522.846	549.211	26.365	26.126	-0.239
16-0-2-13	483.600	509.012	25.412	25.382	-0.030
16-0-2-10	428.261	453.656	25.395	25.458	0.064
16-0-1-12	12.894	37.784	24.890	24.880	-0.010

m 이다. 편심측정의 경우 수준점과 GPS 측정점 사이를 수준측량과 트레버스 측량을 하여 두 지점의 표고와 좌표차이를 보정하였다.

3.2. GPS 자료처리

관측한 모든 자료는 방송력의 관측 후 2~3주 후에 IGS (International GPS Service for Geodynamics)에서 공개하고 있는 정밀케도력을 이용하여 후처리하였다. SOKKIA의 GSR2200을 이용하여 관측한 자료는 RINEX 자료로 변환하였으며, 이와 4000 ST를 이용하여 관측한 자료를 Trimble사의 GPSurvey (ver. 2.3)를 이용하여 후처리하였다. 자료처리 과정은 먼저 IGS에 등록되어 있는 천문대의 GPS 관측소의 자료를 이용하여 제주 기준점의 좌표를 결정하였으며, 계산된 제주 기준점의 좌표를 이용하여 각 수준점의 관측 자료를 처리하였다.

3.2.1. 제주도 기준점의 좌표 결정

제주도 기준점에서 GPS를 관측한 시간은 총 26시간 23분이다. 이 자료를 이용하여 천문대(KAO)의 GPS 좌표를 기준으로 제주도 기준점의 좌표를 계산하였다(Table 1).

제주 기준점의 위도와 경도의 RMS 오차는 0.02 cm로 매우 정확하게 계산되고 있으나 타원체 높이의 오차는 1.92 cm로 비교적 크게 나타나고 있다.

3.2.2. 수준점의 좌표 결정

계산된 제주도 기준점의 좌표를 기준으로 GPS를 측정한 각 수준점의 좌표를 계산하였다(Table 2).

각 수준점의 위도와 경도의 RMS 오차는 모두 0.01 cm 미만으로 기선거리 수 10 km 이내에서는 30분간의 관측으로 x, y 좌표를 매우 정밀하게 측정할 수 있음을 알 수 있다. 한편 타원체 높이의 RMS 오차는 최대 1 cm로 비교적 크게 나타나고 있다. 기선거리와 오차를 비교하면 상관이 작게 나타나고 있으며, 1시간 이하의 짧은 시간의 관측에서의 오차는 주로 관측 가능한 위성의 수와 분포 그리고 관측 환경에 따라 좌우됨을 알 수 있다 (Leick, 1989). 제주도 기준점의 오차를 고려할 때 각 수준점의 타원체 높이의 오차는 최대 ±3 cm 이내임을 알 수 있다.

4. GPS/Levelling 지오이드와 고찰

수준점에서의 GPS 관측 결과를 이용하여 제주도 의 GPS/Levelling 지오이드를 계산하였다(Table 3). Table 3 의하면 GPS 관측에 의한 지오이드는 수준점 16-0-1-25의 최저 24.70 m에서 수준점 16-0-3-10의 최고 26.48 m 사이에 분포하며, 1.78 m의 기복 차이가 있다. 여기에는 거의 2 m에 달하는 광역 지오이드의 영향이 포함되어 있음에도(Fig. 2) GPS/

Levelling 지오이드와 표고와의 사이에 정상관의 관계가 비교적 잘 나타나고 있다(Fig. 5).

Fig. 5에서 GPS/Levelling 지오이드와 표고의 상관식은

$$N = 0.001082 \times h + 25.458 \pm 0.227 \text{ s.d.} \quad (2)$$

여기서, N = 지오이드 높이(m), h = 표고(m)로 계산된다. 식 (2)에서 지오이드의 기복은 지형 기복의 약 1000분의 1 정도로 나타남을 알 수 있다. 이는 지표면의 요철에 의한 질량 이상이 지구 전체의 질량에 비해 매우 작기 때문이다.

Fig. 6은 GPS 측정에 의한 GPS/Levelling 지오이드이다. GPS의 측정 지점이 13개 지점뿐인데도 지오이드와 지형도(Fig. 4)가 잘 일치하는 것은 제주도의 지형과 지질이 단순하여 지오이드의 변화 경향이 단순하고 또한 GPS 측정점의 분포가 적절한 영향으로 해석된다. 여기서 지형 자료에 비해 지오이드의 변화 경향이 동쪽으로 치우쳐 나타나고 있음은 제주도 지역의 광역 지오이드가 서단의 24 m에서 동단의 26 m까지 변화하는 영향에 의한 것이다.

Fig. 7은 제주도 지역의 PNU95 지오이드이다. 이 와 Fig. 6의 GPS/Levelling 지오이드와 비교하면 GPS 측정수가 작은데도 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. GPS 측정점에서 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드의 차이를 계산하였으며(Table 3), Fig. 8은 이의 분포를 나타낸 것이다. 두 지오이드의 차이는 -0.27 m에서 +0.20 m 사이에 분포하며, 이들의 RMS 차이는 0.14 m이다. 이 결과는 Fig. 2의 PNU95 지오이드의 RMS 차이와 거의 같

은 값으로, PNU95 지오이드 계산에 제주도 지역의 GPS 관측 자료가 포함되지 않은 점과 제주도 지역의 중력 이상의 정밀도가 좋지 않은 점을 고려할 때 두 지오이드가 예상과는 달리 잘 일치함을 나타내고 있다. 이는 제주도의 지형과 지질구조가 단순한 반면, 고도차이가 크기 때문에 중력 변화와 상대 지오이드의 변화 폭이 크게 나타나므로 고도 이상의 오차의 영향이나 지오이드의 차이가 상대적으로 작게 나타나는 영향으로 해석된다.

Fig. 9는 좌단의 경도 126.10°E, 위도 33.25°N 지점에서 우단의 경도 127.00°E, 위도 33.48°N 지점까지 지형과 고도 이상 그리고 PNU95 지오이드의 변화를 나타낸 것이다. 아래 그림은 지형의 단면으로 해안의 0 m에서 한라산 정상 부의 1882 m까지 변화하고 있다. 아래에서 두 번째 그림은 고도 이상의 단면으로 동쪽 해안의 22.5 mGal에서 한라산의 187.7 mGal까지 변화하고 있다. 지형의 영향 때문에 제주도의 고도 이상의 변화 폭은 165 mGal 이상 매우 크게 나타나고 있으며, 고도 이상이 지형의 변화에 민감하게 변화하고 있음을 잘 나타내 주고 있다. 위 그림은 PNU95 지오이드의 단면으로 서쪽의 24.08 m에서 한라산의 26.36 m 그리고 동쪽의 26.25 m까지 변화하고 있다. 여기에서 장파장의 광역 지오이드가 동단의 24.08 m에서 서단의 26.25 m까지 1차적으로 변화한다는 가정 하에 계산한 상대 지오이드가 위에서 두 번째 그림이다. 그림에서 상대 지오이드는 0.00 m에서 1.17 m까지 변화하며, 중력 이상과 지형의 단면과도 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

제주도 지역에서 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95

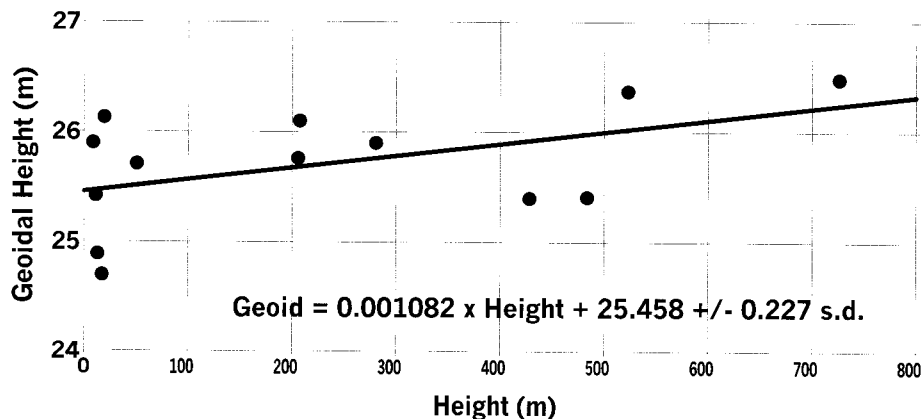


Fig. 5. Relationship between GPS/Levelling geoid and topography in Cheju island.

지오이드의 RMS 차이는 0.14 m로 비교적 작게 계산되지만 제주도의 면적이 작으므로 상대오차는 클 것으로 예상된다. 특히 Fig. 8에서 지오이드의 차이는 수 10 km의 거리에 수 10 cm의 차이가 나고 있어 기선거리에 따른 지오이드의 차이는 10 ppm 단

위가 됨을 알 수 있다. Table 3의 자료를 이용하여 제주도 지역의 평균 상대오차를 계산하였다. 계산 결과의 평균 상대오차는 11.12 ppm이다. 이로써 제주도 지역에서의 PNU95 지오이드는 GPS/Levelling 지오이드에 비해 기선거리 10 km에 약 11.1 cm의

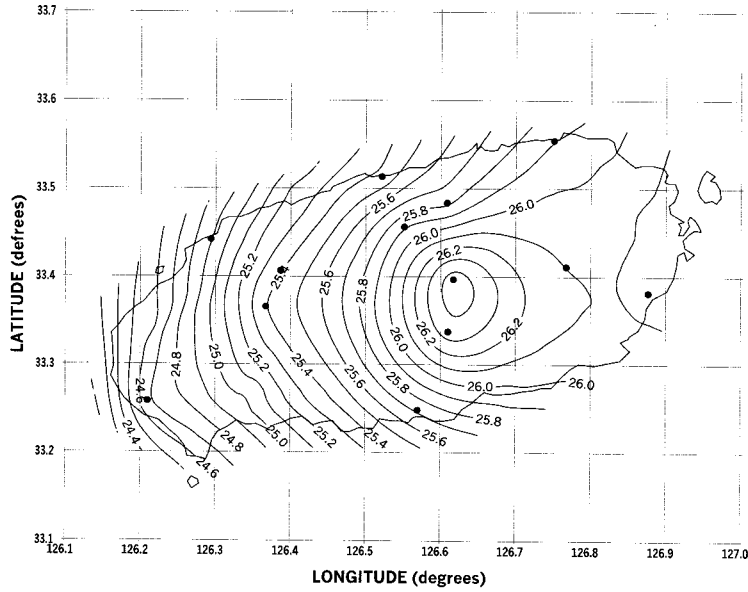


Fig. 6. GPS/Levelling geoid in Cheju area. Contour interval is in 0.1 m.

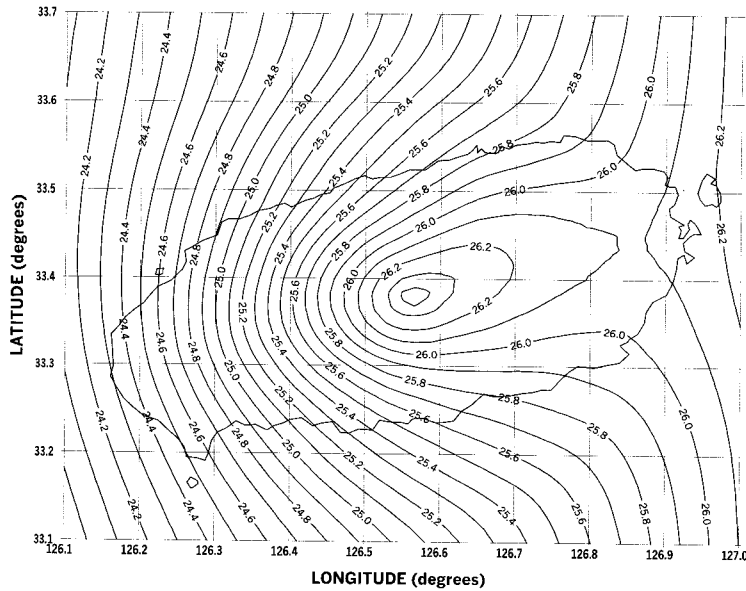


Fig. 7. PNU95 geoid in Cheju area. Contour interval is in 0.1 m.

높이 차이가 나타남을 알 수 있으며, 육상 지역의 상대오차 1.14 ppm에 비해 거의 10배가 되는 값이다.

이는 PNU95 지오이드 계산에 제주도 지역의

GPS 관측 자료가 포함되지 않은 것과 제주도 지역의 중력 이상의 정밀도가 좋지 않은 것에 의한 영향으로 해석되며, 제주도의 지오이드의 변화 폭이 커서 절대오차에서는 이의 영향이 잘 나타나지

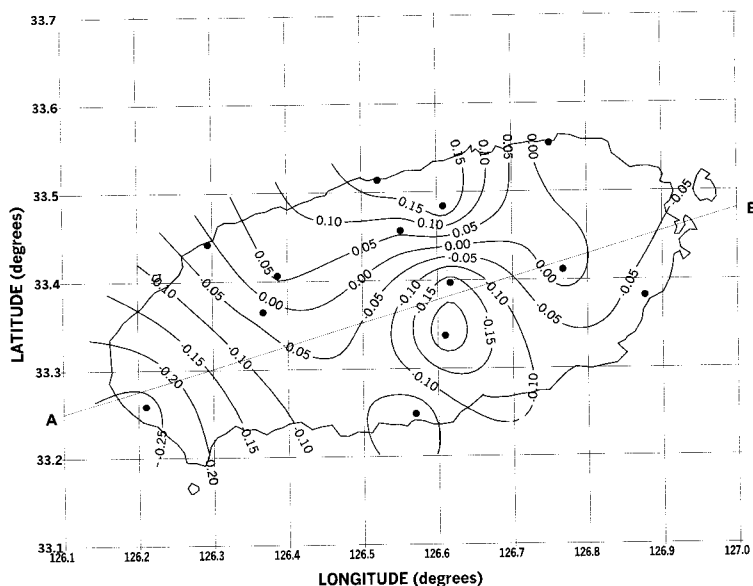


Fig. 8. Difference between GPS/ Lvelling geoid and PNU95 geoid in Cheju area. Solid circles denote bench marks which GPS measurement. Contour interval is in 0.05 m.

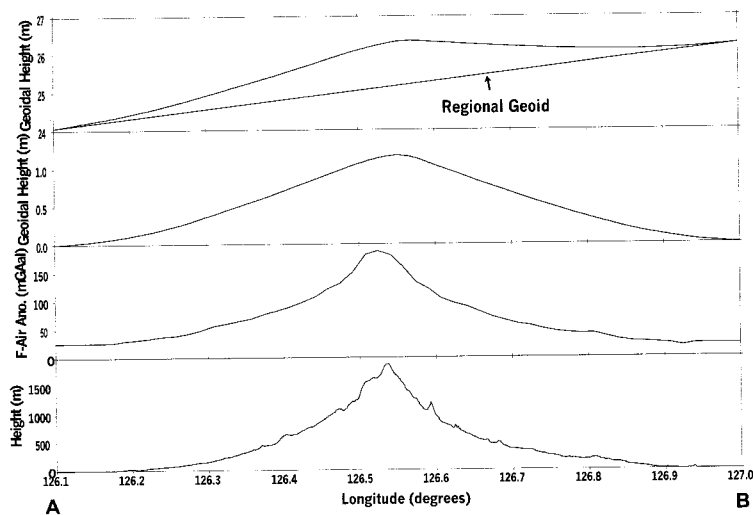


Fig. 9. Cross sectional variations of topography (bottom), free-air anomaly (lower middle), relative geoid (upper middle) and Geoid (upper) along the line from A to B in Figure 8.

않았지만 상대오차에서는 이의 영향이 확연하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이상에서 제주도의 GPS/Levelling 지오이드는 측정수가 작아도 제주도의 지오이드의 변화 경향을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 PNU95 지오이드에 제주도의 GPS 측정 자료가 포함되지 않았고, 이의 계산에 이용한 제주도의 중력 이상의 정밀도가 좋지 않음에도 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드의 RMS 차이는 0.14 m로 비교적 잘 일치하고 있으나 상대오차는 11.1 ppm으로 이들에 의한 영향이 크게 나타나고 있다. 그러므로 새로운 지오이드 계산에는 제주도 지역의 GPS/Levelling 지오이드가 포함되어야 할 것이며, 제주도 지역의 정밀한 중력측정이 요구된다.

최근 발표된 EGM96 의 중력 모델에는 OSU91A 중력 모델보다는 다양한 자료 원의 새로운 중력관련 자료가 포함되었으며, GPS 측정에 의한 검증의 결과로 이의 정밀도가 획기적으로 향상되어, 지오이드의 경우 절대오차가 ± 1 m 이내라고 한다 (Lemoine *et al.*, 1996). 이러한 중력 모델의 정밀도의 향상으로 외국에서는 수 cm의 오차를 갖는 정밀 지오이드를 계산하고 있으며, 나아가 기조력 등에 의한 지오이드의 시간 변화의 보정을 추구하고 있다. 우리나라도 육상 지역의 중력 측정수가 점차 많아지고 있으며, GPS 측정수도 점차 많아지고 있다. 특히 1994년 이후 선상중력계를 탑재한 3척의 탐사선의 도입과 이들의 활동으로 그 동안 전무하였던 우리나라의 영해 지역의 중력 자료가 축적되고 있다. 이러한 지구 중력 모델의 정밀도의 향상과 우리나라 일원의 중력 자료의 축적으로 조만간 우리나라 지오이드의 정밀도도 크게 향상될 것으로 기대한다.

5. 결 론

제주도 내의 13개의 수준점에서 GPS를 측정하였으며, 이에 의한 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드를 비교, 분석하여 보았다. 이의 결론은 다음과 같다.

1. GPS의 측정결과 각 수준점의 타원체 높이를 ± 3 cm 이내의 정밀도로 측정하였다.
2. 계산된 GPS/Levelling 지오이드는 제주도의 지형 변화를 잘 나타내고 있으며, 제주도에 서 지오이드와 지형의 상관식은

$$N = 0.001082 \times h + 25.458 \pm 0.227 \text{ s.d.}$$

으로 지오이드와 지형의 진폭 비는 1:1000 이다.

3. 계산된 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드는 잘 일치하고 있으며 두 지오이드의 RMS 차이는 0.14 m이다.
4. 제주도 지역에서 GPS/Levelling 지오이드와 PNU95 지오이드의 상대오차는 11.1 ppm으로 육상지역에 비해 10배가 된다. 이는 PNU95 지오이드 계산에 제주도 지역의 GPS 관측자료가 포함되지 않은 것과 제주도 지역의 중력 이상의 정밀도가 좋지 않은 것에 의한 영향으로 해석된다.
5. 제주도에서 지형과 중력 이상 그리고 지오이드의 변화 경향이 서로 잘 일치하고 있다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-133-002-5) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- 권병두, 김현수, 1987, 한반도 남부 지역의 수직선 편차와 지오이드 높이, 지구과학회지, 8, 43-51.
- 최광선, 1986, 한반도 남부의 중력에 대한 연구. 서울대학교 이학박사학위 논문.
- 최광선, 1991, OSU89B에 의한 한반도 일원의 지오이드에 대한 연구, 측지학회지, 9, 67-72.
- 최광선, 공영세, 이화경, 1993, 중력 자료 해석에 의한 한반도 일원의 지각구조, 지구과학회지, 14, 225-230.
- 최광선, 김진후, 1993, 제주도 일원의 정밀지오이드, 지구과학회지, 14, 219-224.
- 최광선, 김진후, 양철수, 민경욱, 김호영, 1995, 지구 중력장 분포 및 우주환경에 관한 연구(1단계 완료보고서), 국방과학연구소.
- 최광선, 양철수, 박선미, 1994, 중력 자료 해석에 의한 한반도 일원의 지오이드, 측지학회지, 12 131-139.
- Choi, K.S., Kim, J.H., and Yang, C.S., 1997, PNU95 Geoid, Korean Journal of Geophysical Research, 25, 1-14.
- Fukuda, Y., 1990, Precise determination of local gravity field using both the satellite altimeter data and the surface gravity data, Bull. of the Ocean Res. Inst., University of Tokyo.

- Heiskanen, W.A. and Moritz, H., 1987, *Physical Geodesy*, Institute of Physical Geodesy, Technical University, Graz, Austria.
- Kim, S.K., 1979, Geodetic and Geophysical Analysis of Gravity Data in Korea, *Journal of Korea Institute of Mining Geology*, 12, 17-28.
- Teunissen, P.J.G. and Kleusberg, A., 1998, *GPS for Geodesy*, Springer.
- Lee, K., Jeong, B.I., Choi, K.S., and Lee, S.K., 1983, A Study of Gravity and Geomagnetism of Jeju Island, *Journal of the Geological Society of Korea*, 19, 1-10.
- Leick, A., 1989, *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons.
- Lemoine, F.G., Smith, D.E., Kunz, L., Smith, R., Pavlis, E.C., Pavlis, N.K., Klosko, S.M., Chinn, D.S., Torrence, M.H., Williamson, R.G., Cox, C.M., Rachlin, K.E., Wang, Y.M., Kenyon, S.C., Salman, R., Trimmer, R., Rapp, R.H., and Nerem R.S., 1996, The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model: in Segawa, J., Fujimoto, H., Okubo, S., Eds., *Gravity, Geoid and Marine Geodesy*, Springer, 461-469.
- Moritz, H., 1980, *Advanced Physical Geodesy*, Herbert Wichmann Verlag.
- Rapp, R.H., 1986, *Global Geopotential Solutions: in Sunkel, H. Ed., Mathematical and Numerical Techniques in Physical Geodesy*, Lecture Notes in Earth Science, 7, 366-415.
- Rapp, R.H. and Kadir, M., 1988, A Preliminary Geoid for the State of Tennessee, *Surveying and Mapping*, 48, 251-260.
- Rapp, R.H., Wang, Y.M., and Pavlis, N.K., 1991, The Ohio State 1991 Geopotential and sea surface topography harmonic coefficient models, Rep. No. 410, Dept. of Geodetic Sci. and Surveying, The Ohio Univ., Columbus, Ohio.
- Sandwell, D.T. and D.C. McAdoo, 1990, High-accuracy, high-resolution gravity profiles from 2 years of the Geosat Exact Repeat Mission, *Journal of the Geophysical Research*, 95, 3049-3060.
- Seeber, G., 1993, *Satellite Geodesy*, deGruyter.
- Teunissen, P.J.G. and Kleusberg, A., 1998, *GPS for Geodesy*, Springer.
- Wellenhof, B.H., Lichtenegger, H., and Collins, J., 1994, *GPS - Theory and Practice* 3rd ed., Springer-Verlag, Wien.
- Yun, H.S., 1995, Geometric Geoid Determination in South Korea using GPS/Levelling Data, *측지학회지*, 13, 285-290.
-
- 1999년 11월 16일 원고접수
2000년 3월 21일 원고채택