

GPS에 의한 지오이드高 決定에 關한 研究

A Study on the Geoid Height Determination by GPS

姜準默* · 金弘珍** · 宋承鎬***

Kang, Joon Mook · Kim, Hong Jin · Song, Seung Ho

Abstract

Determining accurate geoid height is very important because it is the basis of the 3-D coordinate transformation and determination of the orthometric height. In this study, for determining the geoid height, bi-linear method grounded on the interpolation method, GPS leveling and OSU91A was applied to the 5 km×5 km area and 60 km×60 km area in the latitude N 36°~37° and the longitude E 127°~128°. The results obtained by these methods were compared with conventional leveling data. In case of bi-linear method, it was dependent upon the shape of interpolation network and undulation of ground. If leveling data are satisfactory, GPS leveling is more proper than any other method. Also, it is 62 cm that an average difference of GPS leveling and OSU91A. As a result, in order to determine more precise geoid height, the development of local geoid model is a pressing problem to be solved. The result of the research will provide reference data for settling the 3-D coordinate transformation, and it is expected that it will also be applied to determination of 3-D position.

요 지

정확한 지오이드高의 결정은 측위위성에 의한 위치해석시 3차원 측지좌표변환과 정표고 결정에 기본이 되므로 그 중요성이 강조되고 있다. 본 연구는 GPS에 의한 지오이드高 결정에 관한 것으로 경도 127°~128°, 위도 36°~37°내 5 km×5 km 지역과 60 km×60 km 지역의 실측성과를 토대로 Bi-linear 방법과 GPS leveling 방법 및 OSU91A 방법으로 결과를 도출, 수준측량 성과와 비교하여 그 특성을 고찰한 것이다. 그 결과 Bi-linear 방법은 보간망의 형태와 크기 및 지형의 기복에 좌우되며 GPS leveling 방법은 수준측량의 성과가 양호하다면 이상적인 방법임을 알 수 있었다. 또한 OSU91A 방법의 경우 GPS leveling 방법과 평균 62 cm의 차를 나타내므로 보다 정밀한 지오이드高 결정을 위해서는 우리나라 지형에 적합한 지역적 지오이드 모델의 개발이 요망된다. 본 결과는 지오이드高의 모델개발과 3차원 좌표변환체계의 연구에 한 참고 자료가 될 것이며 각종 건설공사의 3차원 위치결정에도 응용될 것으로 기대된다.

* 정희원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

*** 정희원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

1. 서 론

지구 표면의 형상과 관련하여 대다수의 공학적 설계에서는 표고가 중요한 설계자료가 된다. 이것은 비록 지오이드가 모든 위치에서 평균 해수면과 꼭 일치하지는 않지만 일반적으로 지오이드와 평균 해수면이 일치하는 것으로 간주하고 평균해수면을 기준으로 한 높이의 차로부터 구하게 된다.^(5,6) 우리나라에서는 현재 Bessel 타원체에 근거하여 경, 위도 성과를 규정하고 평균 해수면을 표고 기준으로 하는 측지계를 사용하고 있지만 GPS의 경우는 WGS84 기준계를 사용하므로 국내의 측점들을 GPS 수신기로 측정한다 하더라도 국내의 실용성파에 곧바로 적용시킬 수 없다. 이 문제는 우리나라에만 국한된 문제가 아니며 WGS84 기준계를 채택하고 있지 않은 대부분의 나라에서 GPS를 실용화할 경우 타원체간 변환문제는 반드시 선결해야 할 문제인 것이다.⁽²⁾ 경, 위도 성과의 변환에는 변환식에 두 기준계간의 변화량을 고려하여 보정량을 구하지만 정표고의 결정과 변환문제는 단순히 기하학적 이론만으로는 해결되지 않으며 필히 지오이드高를 구하여야 정밀 3차원 위치를 결정할 수 있으므로 지구 중력장에 기본을 두고 있는 지오이드의 해석이 필수적이라 하겠다.^(3,4)

따라서 본 연구에서는 종래의 측량방법으로 3차원 위치를 정밀하게 결정한 다음 GPS 관측을 실시하여 수준측량의 성과를 이용한 GPS leveling 방법과 전세계의 광역적 모델인 OSU91A(Ohio State Univ. 91A)방법, 보간법에 기초한 Bi-linear방법의 세가지로 지오이드高를 결정하여 각 방법별 특성을 고찰하고자 한다.

2. 기본 이론

GPS leveling방법은 GPS관측을 통하여 얻어진 타원체고(h)에서 수준측량의 성과인 정표고(H)를 감하여 지오이드高를 결정할 수 있는 방법으로 수준측량의 성과와 GPS 관측이 양호하다면 지오이드高를 손쉽게 결정할 수 있는 이상적인 방법이다.⁽¹³⁾

타원체면을 기준면으로 할 때 지표면상의 임의한점에 대해서 결정할 수 있는 높이인 정표고(H)와

$$N = h - H$$

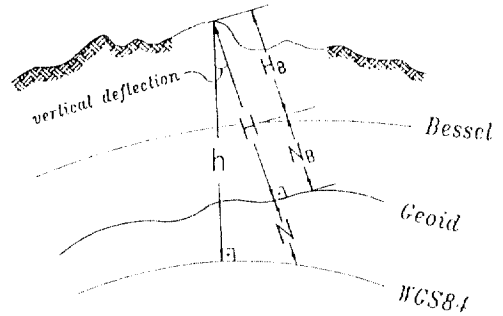


그림 1. 정표고, 기준타원체고, 지오이드高의 관계

기준 타원체高(h), 지오이드高(N)의 관계는 그림 1과 같다.⁽⁷⁾

정표고는 지오이드면의 법선을 따라 측정된 거리로 타원체 면의 법선인 타원체고와는 연직선 편차로 인하여 두 법선의 크기는 실제로 일치하지 않는다. 그러나, 이 편차값은 대개가 弧度 1분 미만이며 만일 10,000 m의 정표고에 대하여 弧度 1분의 연직선 편차에 의한 두 법선의 차를 구하면 수 mm 정도에 지나지 않으므로 두 법선의 크기가 서로 같다고 할 수 있을 것이다. 따라서 그림 1로부터 식 (2.1)이 성립 한다고 가정할 수 있으며 임의의 측점에 수준측량의 성과가 있다면 GPS관측을 통하여 지오이드高를 바로 결정할 수 있다.^(7,8,13)

$$N = h - H \quad (2.1)$$

Bi-linear 방법은 사용자가 관측구역을 다수의 격자형으로 나누고 사각형 4개 모서리의 지오이드高를 기본 자료로 구역내 임의의 측점의 지오이드高를 보간하여 결정할 수 있는 방법으로서 사용자가 인위적으로 격자를 형성해야 한다는 점과 격자의 한변이 10 km 이상인 경우는 지형의 분포와 기준성과의 특성에 주의하여 적용해야 하는 단점이 있다. 지오이드高 보간식은 다음과 같다.^(7,8)

$$N_P(\phi, \lambda) = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY \quad (2.2)$$

$$a_0 = N_1$$

$$a_1 = N_2 - N_1$$

$$a_2 = N_4 - N_1$$

$$a_3 = N_1 + N_3 - N_2 - N_4$$

$$X = (\lambda - \lambda_1) / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$Y = (\varphi - \varphi_1) / (\varphi_2 - \varphi_1)$$

φ : 보간되어질 임의 측정점의 위도

λ : 보간되어질 임의 측정점의 경도

N_1, N_2, N_3, N_4 : 보간에 사용될 격자점들의 지오이드高

$N_P(\varphi, \lambda)$: 보간되어질 임의 측정점의 지오이드高

OSU91A 방법은 지표면에서 실측된 중력자료와 위성측고의 자료를 추가하여 구면조화급수로 구성된 전 지구의 광역적 중력장모델로 국부적인 지오이드의 표현에는 어려운 점이 있지만 수준측량의 성과가 없더라도 GPS 관측만으로 지오이드高를 바로 결정할 수 있다.

지구 중력장은 회전타원체에 의한 정규중력포텐셜(U)과 회전타원체에서 벗어난 지표 근처 부근의 질량에 의한 포텐셜異常(T)으로 나눌 수 있고 지오이드면 상의 실제포텐셜(W)은 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_p(x, y, z) = U_p(x, y, z) + T_p(x, y, z) \quad (2.3)$$

$$= U_q(x, y, z) - \gamma N + T_p(x, y, z)$$

$W_p(x, y, z) = U_q(x, y, z)$ 이므로 첨자를 생략하면

$$T = \gamma N \quad (2.4)$$

γ : 타원체 상의 정규중력

식 (2.4)는 지오이드高(N)와 포텐셜 이상 T의 관계를 나타내는 Bruns식이다.

지구의 중력 포텐셜 W를 구면조화급수(spherical harmonic series)로 표현하면 다음과 같다.

$$W(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right] \quad (2.5)$$

여기서, r, θ, λ : 구면 극좌표

GM : 지심인력상수

a : 타원체의 적도반경

C_{nm}, S_{nm} : 중력포텐셜 계수

$P_{nm}(\cos \theta)$: Associated Legendre 함수

식 (2.5)의 우변 첫째항은 정규중력포텐셜(U)과

같으므로

$$U = \frac{GM}{r} \quad (2.6)$$

식 (2.3)에 의해 포텐셜이상(T)는 다음과 같다.

$$T(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right] \quad (2.7)$$

지오이드高 N은 식 (2.4)의 Bruns 정리에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$N = \frac{GM}{\gamma r} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=0}^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos \theta) \right] \quad (2.7)$$

따라서, 중력포텐셜계수 C_{nm}, S_{nm} 를 산정하면 지오이드高를 구할 수 있다.

3. 관측

본 연구에서는 GPS leveling방법과 OSU91A방법

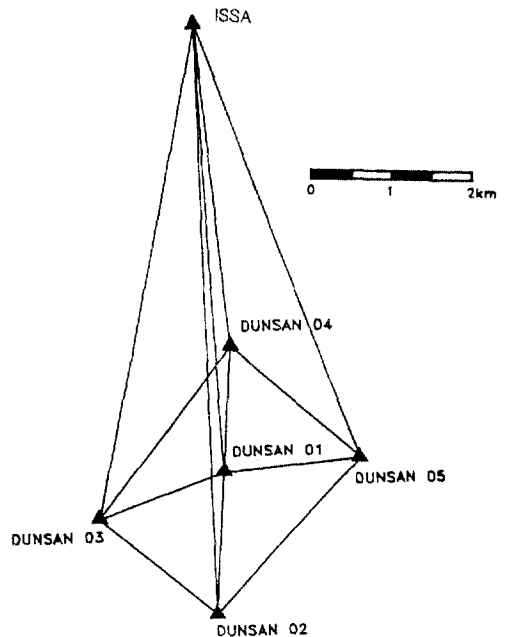


그림 2. GPS 관측망도

으로 지오이드高를 결정하고 이를 비교 고찰하기 위하여 대전 둔산지구내 5 km×5 km 지역에 5개의 측점을 관측망의 기하학적 조건과 관측시계가 양호한 지점으로 그림 2와 같이 선정하였다. 그런 다음 인접한 국가기준점들로부터 종래의 일반측량방법으로 3차원 위치를 표 1과 같이 결정하고 GPS측량을 실시하였다.

pre-planning 자료를 이용하여 관측시간은 GPS 위성의 기하학적 분포(PDOP)가 7 이하로 비교적 양호하며 4개 이상의 위성을 볼 수 있는 시간대로 선택하였다. 관측지점의 위성시계는 그림 3과 같으며 시간대별 위성수와 PDOP은 그림 4와 같다.

관측에 사용된 GPS 장비는 Trimble 4000SE 수신기 2대와 Trimble 4000SDT 수신기 1대로 1 session당 3개 측점의 동시관측으로 약 1시간씩 총 8 session으로 진행하였다.

관측은 지평면 고도 15도 이상인 위성들로부터 single frequency방식으로 L₁ 주파수를 수신하도록 하였다. GPS 관측시간과 동시 관측지점들은 표 2와 같다.

또한 본 연구에서는 관측지역내(5 km×5 km)의

표 1. 일반측량에 의한 관측점들의 실용성과

측 점		실 용 성 과
DS01	φ	36-21-25.960
	λ	127-22-38.187
	h	62.173
DS02	φ	36-20-43.229
	λ	127-22-33.255
	h	63.329
DS03	φ	36-21-11.646
	λ	127-21-36.956
	h	43.411
DS04	φ	36-22-05.559
	λ	127-22-43.806
	h	43.573
DS05	φ	36-21-30.026
	λ	127-23-45.826
	h	41.284

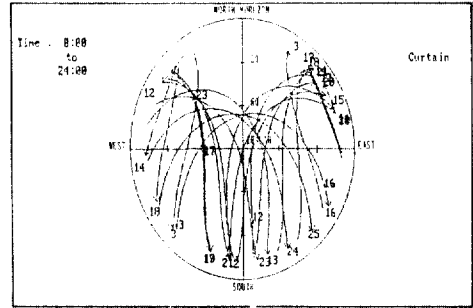


그림 3. 관측지점의 위성 觀界

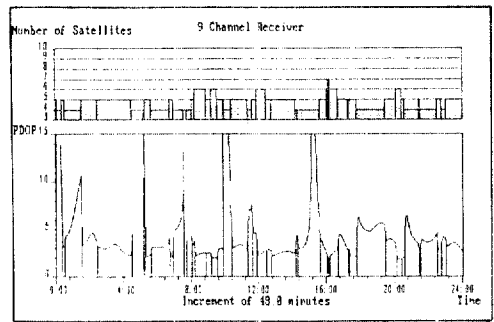


그림 4. 시간대별 위성수와 PDOP

표 2. GPS 관측 시간 및 동시 관측지점

Session	관 측 시 간		동 시 관 측 지 점
	시작	종료	
90-1	22:37	23:40	DS02 - DS01 - ISSA
91-2	00:17	01:10	DS03 - DS01 - ISSA
91-3	01:40	02:40	DS04 - DS01 - ISSA
91-4	03:10	04:10	DS05 - DS01 - ISSA
91-5	04:40	05:40	DS05 - DS04 - ISSA
91-6	06:10	07:10	DS05 - DS02 - ISSA
91-7	07:40	08:40	DS03 - DS02 - ISSA
91-8	09:10	10:10	DS03 - DS04 - ISSA

지오이드高 분포가 큰 기복이 없다는 가정하에 Bi-linear 보간방법을 적용하기 위하여 이미 GPS측량을

표 3. OSU91A방법에 의한 충남·북지역의 지오이드高

측 점	지오이드高
CJ 23	25.370
DJ 12	26.099
IW 24	26.755
KJ 22	24.901
KS 24	25.954
NS 21	24.980
SR 11	27.043

표 4. GPS leveling방법에 의한 충남·북지역의 지오이드高

측 점	지오이드高
CJ 23	25.498
DJ 12	25.288
IW 24	25.391
KJ 22	25.027
KS 24	25.392
NS 21	24.598
SR 11	26.460

실시하여 지오이드高를 결정한 바 있는 충남·북일원 60 km×60 km 지역 7개 측정점의 정보들을 이용하여 각 경우별로 보간망을 구성하고 대전 둔산지구 5개 측정점들의 지오이드高를 결정하여 그 특성을 비교 고찰하였다.

충남·북 일원의 7개측점은 우리나라의 정밀 1차 기준망에 포함되어 있는 1, 2등 삼각점들로 이 측정점들의 지오이드高를 OSU91A방법과 GPS leveling방법으로 표 3, 표 4와 같이 결정하였다. 이들을 CASE I(KJ22, CJ23, DJ12, KS24), CASE II(KS24, CJ23, SR11, IW24), CASE III(DJ12, KS24, NS21, KJ22)의 세가지 경우로 나누어 Bi-linear방법으로 둔산지역 측정점들의 지오이드高를 결정하기 위한 보

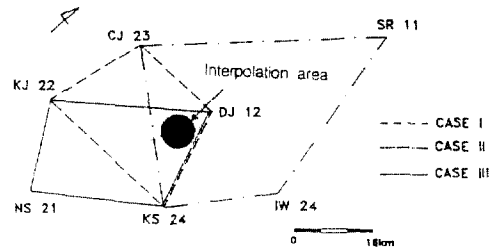


그림 5. Bi-linear method의 각 경우별 보간방법

간망도를 그림 5와 같이 구성하였다.

4. 결과 분석

관측자료는 Trimble의 자료처리 소프트웨어인 TRIMVEC-PLUS의 MBP(Multi Baseline Processing)방식에 의하여 double difference 기법으로 single frequency data만 처리하였다. 자료처리시 사용한 기준점은 1991년 국제공동관측을 통하여 결정된 천문대내 측정점(ISSA)의 세계측지계 좌표이며 이 지점의 좌표를 고정하여 대전 둔산지구내 5 km×5 km 지역 5개 지점의 세계측지계 좌표와 상대위치를 결정하였다. 이와 같이 처리된 결과를 Trimble의 망조정 소프트웨어인 TRIMNET로 처리하여 관측 지점들의 조정된 WGS84좌표를 표 5와 같이 결정하였다.

측지망 조정을 통하여 결정된 둔산지역의 5개 측정점의 WGS84 좌표성공에 내포된 68% 우연오차를 3차원 오차타원으로 도시하면 그림 6과 같으며 타 원형은 경위도의 표준오차, 우측의 Bar는 표고의 표준오차를 나타낸다. 한 눈금의 크기는 1 mm로 관측지점의 WGS84좌표성공의 표준오차가 평균 3 mm 이내로 비교적 정밀하게 결정되었음을 알 수 있다.

GPS leveling방법으로 결정된 각 측정점의 지오이드高는 표 6과 같다. TRIMVEC-PLUS 소프트웨어를 이용하여 OSU91A로 결정된 지오이드高는 표 7과 같으며 GPS leveling과는 평균 62 cm의 차를 나타내므로 OSU91A는 국소한 지역에서는 타당하지 않다. 따라서 우리나라 지역에 적합한 지역적 모델의 개발이 시급하다 하겠다.

OSU91A로 결정된 충남·북지역 7개 측정점의 지오

표 5. MBP Multi 방식으로 망조정된 WGS84 좌표

측 점		WGS84 좌표
DS01	ϕ	36- 21- 36.542299
	λ	127- 22- 40.939779
	h	87.5522 m
DS02	ϕ	36- 20- 53.814882
	λ	127- 22- 36.003948
	h	88.6589 m
DS03	ϕ	36- 21- 22.233660
	λ	127- 21- 39.714148
	h	68.5157 m
DS04	ϕ	36- 22- 16.138956
	λ	127- 22- 46.555034
	h	68.8504 m
DS05	ϕ	36- 21- 40.605480
	λ	127- 23- 48.575815
	h	66.4737 m

표 6. GPS leveling에 의한 지오이드高

측점	h(m)	H(m)	N(m)
DS01	87.552	62.173	25.379
DS02	88.659	63.329	25.330
DS03	68.516	43.411	25.105
DS04	68.850	43.573	25.277
DS05	66.474	41.284	25.190

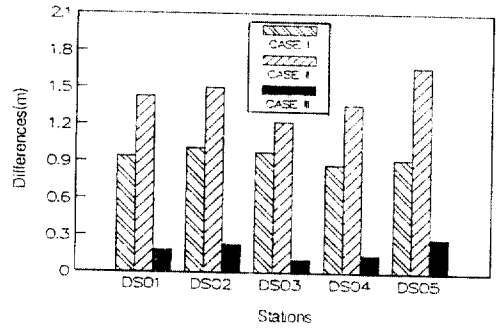


그림 7. OSU91A와 Bi-linear로 보간 결정한 지오이드高의 차

이드高를 이용하여 Bi-linear방법으로 둔산지역 5개 측점들의 지오이드高를 보간 결정해 표 7의 OSU91 A값과 차를 도시하면 그림 7과 같다.

비교적 보간망의 형태가 사각형에 가까우며 지형의 기복이 심하지 않은 Case III은 본래의 OSU91A 결과와 평균 18 cm의 차로 상관성이 높게 나타난 반면 보간구역의 표고차가 심한 Case II 경우는 1.4 m로 큰 차를 나타내고 있으며 지형의 표고가 거의 같으나 보간망의 형태가 마름모꼴인 Case I은 94 cm의 차를 보이고 있다. 따라서 Bi-linear 기법에 의한 보간은 보간자료의 지형기복과 보간망의 형태에 따라 좌우됨을 확인할 수 있었다.

충남·북지역 7개 측점의 OSU91A에 의한 지오이드高를 이용하여 Bi-linear방법으로 둔산지구 5개 측점들의 보간 결과(Case III)를 TM 투영에 의한 각 측점의 좌표값에 따라 등고선으로 도시하면 그림 8과 같으며 동남방향으로 지오이드高가 점차 증대되는 경향을 나타내며 이는 DMA에서 제시한 우리

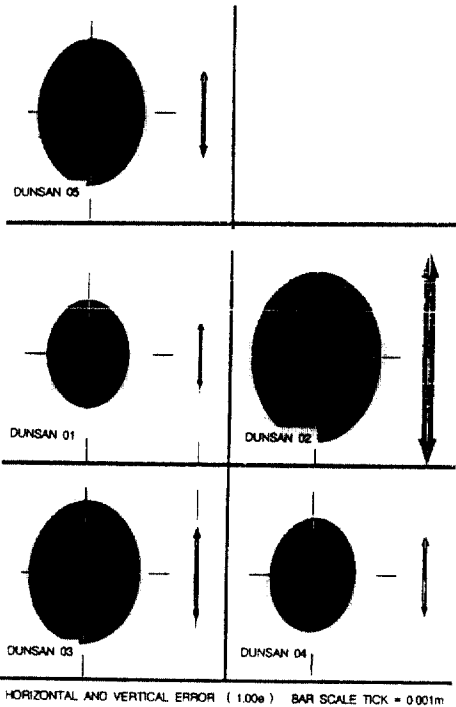


그림 6. WGS84 성과의 3차원 오차타원

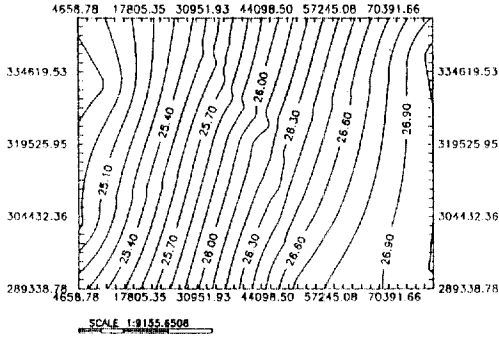


그림 8. Bi-linear로 보간된 지오이드高의 등고선도 (OSU91A : CASE III)

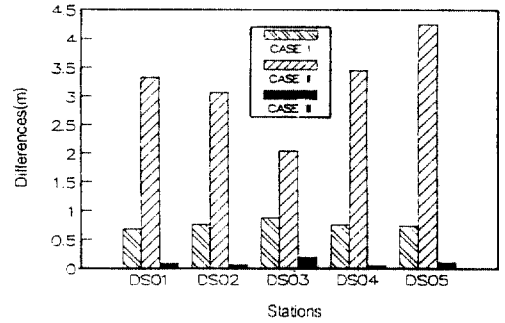


그림 9. GPS leveling과 Bi-linear로 보간 결정된 지오이드高의 차

표 7. GPS leveling과 OSU91A의 차

측점	OSU91A	GPS leveling	차
DS 01	25.875	25.379	0.496
DS 02	25.883	25.330	0.553
DS 03	25.822	25.105	0.717
DS 04	25.869	25.277	0.592
DS 05	25.937	25.190	0.747
Mean			0.621

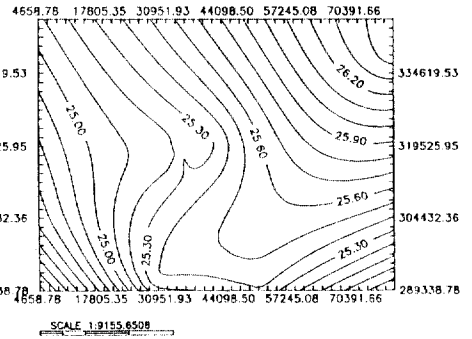


그림 10. Bi-linear 방법으로 보간된 지오이드高의 등고선도 (GPS leveling : CASE III)

나라 지역에 대한 지오이드高의 분포와 매우 밀접한 양상을 보여 주고 있다.

GPS leveling방법으로 결정한 충남·북지역 7개 측정점의 지오이드高를 이용하여 Bi-linear방법으로 보간 결정한 둔산지역 5개 측정점에 대한 지오이드高와 표 7의 GPS leveling과의 차를 도시하면 그림 9와 같다.

이 역시 OSU91A 자료를 이용하여 보간된 그림 7과 유사한 양상을 보이고 있지만 특히, 지형의 기복이 심한 CASE II의 경우는 평균 3m 이상의 차를 보이고 있으며 CASE III, I의 경우는 각각 10cm, 76cm의 차를 나타내고 있다.

GPS leveling방법으로 결정한 충남·북지역 7개 측정점의 지오이드高들을 이용하여 Bi-linear방법으로 보간 결정한 둔산지역 5개 측정점에 대한 지오이드高 보간 결과(CASE III)를 TM 투영에 의한 각

측점의 좌표값에 따라 등고선으로 도시하면 그림 10과 같으며 그림 8의 OSU91A 정보를 이용한 결과와는 다소 다른 양상을 보이고 있다. 이는 보간의 기본자료가 OSU91A의 경우 인공위성 궤도 및 지구중력장 자료를 이용하여 지오이드高를 결정하는 반면에 GPS leveling 성과는 평균해수면에 기준을 둔 수준점을 사용하여야 하는데 충남·북지역 7개 측정점의 표고성과는 간접수준측량에 의한 성과이므로 이에 기인되는 것으로 판단된다. 따라서 GPS leveling 방법은 기존의 수준성과를 활용하여 지역적인 지오이드高를 비교적 정밀하게 결정할 수 있는 방법이기도 하지만 GPS leveling에 의해 도출되는 지오이드高는 해당지역 B.M.의 수준오차를 반영하므로 실적용에 앞서 고시된 수준성과에 대한 특성을 파악한 후 적용하는 것이 바람직할 것이다.

4. 결 론

기선거리 5 km 정도인 측정들을 선정하여 정밀 수준측량과 GPS 관측을 실시하여 GPS leveling 방법과 OSU91A, Bi-linear 방법으로 지오이드高를 결정하고 이를 비교분석한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기선거리 5 km의 측정들에 대해 GPS L₁ 관측으로 각 측정들의 세계측지계 좌표를 표준오차 3 mm 이하로 결정할 수 있었으므로 GPS leveling 방법은 수준측량의 성과가 양호하다면 우리나라에서도 GPS 관측만으로 지오이드高를 손쉽게 결정할 수 있을 것이다.

2) OSU91A 방법을 5 km×5 km 지역에 적용하여 GPS leveling과 비교한 결과 평균 62 cm의 차가 발생하므로 보다 정확한 지오이드高를 결정하기 위해서는 지역적인 지오이드 모델의 개발이 요망된다.

3) Bi-linear 방법에 의한 보간방법은 비교적 망의 형태가 사각형에 가까우며 비교적 지형의 기복이 심하지 않은 지역의 보간자료를 이용함이 타당하다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단 1991년도 자유공모 과제 연구지원에 의하여 수행된 것으로 본 연구를 수행할 수 있도록 지원해 준 한국학술진흥재단에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 박필호, 한인우, 김천휘, 강준목, "GPS 측지기준점 설정에 관한 연구", 한국측지학회지, 제9권 제1호, 1991, pp. 27-35.
2. 박필호, 한인우, 이용창, 강준목, "GPS 실용화를 위한 우리나라 측지계와 WGS84의 좌표변환(I)", 한국측지학회지, 제10권 제1호, 1991, pp. 41-50.
3. 강준목, 김홍진, 송승호, 이형석, "GPS를 이용한 Geoid Height에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표 개요집, 1992, pp. 391-394.
4. 강준목, 이용창, 박필호, 송승호, "GPS를 이용한 Geoid Undulation Model 산정에 관한 연구", 한국측지학회 학술발표 개요집, 1993, pp. 8-17.
5. 최광선, "OSU89B에 의한 한반도 일원의 지오이드에 관한 연구", 한국측지학회지, 제9권 제2호, 1991, pp. 67-72.
6. 권병두, 김현수, "한반도 남부 지역의 수직선 편차와 지오이드 높이", 한국지구과학회지, 제8권 제1호, 1987, pp. 43-51.
7. Supplement to Department of Defense World Geodetic System 1984 DMA Technical Report: Part I-Methods, Techniques, and Data Used in WGS 84 Development, 1987, DMA TR 8350.2-A, Headquarters, Defense Mapping Agency; Washington, D.C.
8. Supplement to Department of Defense World Geodetic System 1984 DMA Technical Report: Part II-Parameters, Formulas, and Graphics for The Practical Application of WGS 84, 1987, DMA TR 8350.2-B, Headquarters, Defense Mapping Agency, Washington, DC; 1 December 1987.
9. Goad, C.C. and Chin, M.M., "The Contribution of Vertical Gravity Gradients and Geoid Height Differences to Geoid Modeling". American Geophysical Union Spring Meeting, Cincinnati, Ohio, May 1984.
10. Rapp, R.H. and Cruz, J.Y., "The Representation of the Earth's Gravitational Potential in a Spherical Harmonic Expansion to Degree 250". *Report No. 373*, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, 64pp. 1986.
11. Lambert, S.R., "MainePac II Geoid Undulation Determination Program". *Report No. 72*, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Maine, Orono, Maine, 1987.
12. Jekeli, C., "Reducing the Error of Geoid Undulation Computations by Modifying Stokes' Function". *Report No. 301*, Dept. of Geodetic Science, Ohio State Univ., Columbus, Ohio. 1980.
13. Schwarz, K.P., et al., "Orthometric Heights without Leveling", *Journal of Survey Engineering*, Vol. 113, No. 1, February, 1987, pp. 28-39. (接受 : 1993. 4. 15)