

연직선편차와 천문좌표 산정을 위한
GPS의 적용연구
A Study on the Application of GPS for Computation
of the Vertical Deflection and Astro-coordinates

이 용 창*
Lee, Yong Chang

이 용 욱**
Lee, Yong Wook

要 旨

전례적인 천문측량방법으로 연직선편차나 천문좌표를 결정하기 위해서는 별을 관측해야 하며 기상조건, 주변환경, 관측시간 및 측정기기 취급의 어려움 등 많은 제약조건이 수반되므로 좀더 효율적인 측정방법이 요구되고 있다. 본 연구에서는 WGS84좌표와 정표고를 이용하여 연직선편차, 천문경도, 천문위도 및 천문방위각을 산정할 수 있는 프로그램을 구성하고 국내에 있는 10개의 천문점과 인접한 측점들에 대한 GPS 관측으로부터 천문성좌표를 산출하고 전통적인 천문측량방식 및 최신의 지구중력장모델(EGM96)에 의한 결과와도 비교 검토함으로써 GPS에 의한 연직선편차와 천문좌표의 산정법을 제시한 것이다.

ABSTRACT

Conventional procedures to determine vertical deflections and astronomical coordinates require the stellar observations which be under restraints of clear night-time weather conditions, surrounding environment, long observation time and the use of instruments, etc. Therefore the more effective observation method subjugating these problems has requested. The objective of this study is to propose method to compute vertical deflections, astronomical coordinates(latitude and longitude), and astronomical azimuth by mixing GPS observation results and orthometric heights. For this study, programmed the program which able to obtain the change in geoid undulation by using the GPS-determined geodetic height difference and the orthometric height difference, and GPS satellite surveying was performed at both ten points of astronomical points and four triangulation points around each astronomical station in South Korea. The Astronomical results determined from GPS observations compared to those determined from both conventional astronomical measurements and the recent earth gravitational Model(EGM96).

* 시립 인천전문대학 토목과 조교수

** 충남대학교 대학원 박사과정

1. 서 론

오래전 태양, 달 및 별과 같은 천체는 시간과 책력을 결정할 수 있는 기준으로 우리생활에 밀접한 관련을 맺어 왔으며 근세에는 특히, 천체에 대한 고도와 방위각을 시간과 조합하여 측정하므로서 천문측량은 지구상의 위치(경도, 위도), 방위는 물론 지구형상의 연구에 중요한 자료를 제공하고 있다. 천문측량은 한 국가의 측량 출발점인 경·위도 원점을 구성하며 관측점의 천문 경·위도를 제공하므로 측지 경·위도와 연관하여 연직선편차를 산정할 수 있고 국가의 지구형상으로 가정한 준거타원체와 실제 지구형상인 지오이드와의 관련성을 규명하거나 천문방위각을 측정하여 국가 측지기준망의 왜곡을 보정할 수 있는 Laplace 조건을 형성할 수 있도록 하므로서 높은 정밀도의 3차원 측지측량, 지구 중력장 연구 및 위성측지측량의 근간을 이루어 왔다.¹⁾

현재 우리나라의 천문점 자료는 건설부 국립지리원에서 1970년 서울 남산측점을 관측한 이래 1992년 해남측점까지 23년간에 걸쳐 총 38점이 측정되었고 평균 매년 1개 측점을 관측하고 있다. 특히, 한국 경·위도원점을 1981년 8월 부터 1985년 10월 까지 정밀천문관측을 실시하여 수원 국립지리원 구내에 설치하므로서 국내 정밀측지망정비사업이 촉진되고 활성화된 일은 우리나라 측량사에 일대 전환점을 마련하게 된 계기가 되었다.²⁾ 그러나 천문측량은 별을 관측해야 하므로 맑은날 밤의 기상조건, 도시불빛의 영향에 따른 관측장소의 제약, 장기간의 관측시간 및 Theodolite(T-4), 시보기록계(Chronometer), 시보수신기와 같은 측정기기의 취급이 난해한 점 등 관측상의 많은 제약 조건과 막대한 시간, 경비가 소요되므로 보다 효율적인 측정 및 해석의 대체방안이 요망되고 있다.

최근들어, 국내의 측량분야는 전통적인 측정기기와 측량방식에서 탈피하여 최신의 첨단장비의 도입과 기술혁신을 통한 측지기술의 발전은 물론 이를 국내에 실용화할 수 있는 노력이 가속화 되어 일 차원 높은 지형공간정보의 획득체계를 구축해 나가고 있다. 본 연구에서는 최근 전 세계적으로 많은 관심이 모아지

고 있고 측정간의 시통문제와 기상문제에서 탈피, 정확성, 경제성 면에서 현격한 장점을 제공하는 GPS(Global Positioning Satellite System)³⁾를 활용하여 연직선편차와 천문좌표를 산정할 수 있는 천문측량의 대체방안 검토에 주안점을 두고 다음과 같이 연구를 진행하고자 한다.

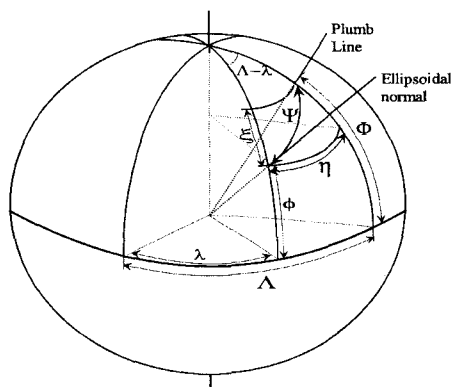
천문점과 인접한 삼각점들의 GPS관측성과와 정표고(Orthometric height)를 조합(GPS/Orh. 조합법)하여 WGS84타원체를 기준으로한 연직선편차의 산정 프로그램을 최소제곱법에 근거하여 구성하였다. 또한, 미국 DMA와 NASA/GSFC에서 발표한 지구중력장모델(EGM96 ; $n = m = 360$)⁴⁾의 구면조화계수(C, S)를 이용하여 연직선편차를 산정할 수 있는 프로그램을 작성하고 GPS/Orh. 조합법으로부터 산정된 연직선편차의 분포와도 비교 고찰하고 상관성을 검토하였다.

WGS84 좌표성과는 국내의 천문관측점들중 10개의 천문점과 각 천문점마다 5km 이내의 범위에서 인접한 4개의 삼각점을 선점하여 천문점은 3시간, 인접한 삼각점은 2시간씩 GPS관측을 수행하여 산정하였다. 천문점의 WGS84 측지경·위도좌표를 GPS/Orh.조합법 및 EGM96에서 구한 연직선편차와 조합하여 천문경도, 천문위도 및 천문방위각을 계산하고 기존의 천문측량성과와 비교 검토한다. 아울러 산출된 천문경·위도좌표에 벡셀 측지경·위도 좌표를 조합하여 벡셀 타원체에 기준한 연직선편차를 산정하고 천문관측에 의한 연직선편차와도 비교 검토하였다. 천문점과 인접한 삼각점들간의 천문방위각의 비교를 위해 본 연구에서는 벡셀 측지 경·위도를 측지학적 제2문제에 적용하여 산출한 측지방위각과 천문측량에 의한 연직선편차의 묘유선방향성분을 조합하여 천문방위각을 계산하고 기준방위각으로 가정하였다. 각 측선의 천문방위각은 GPS/Orh. 조합법 및 EGM96모델에서 구한 벡셀타원체의 연직선편차로부터 산정하고 기준방위각과 비교 검토하였다.

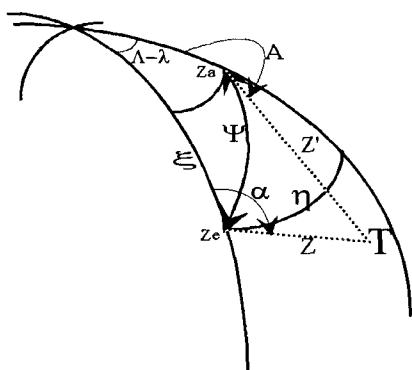
2. 해석 이론

2.1 연직선편차와 천문성과

연직선편차는 준거타원체의 법선에 대한 Geoid의 연직선방향 경사로서 자오선방향성분(ξ)과 묘유선방향성분(η)으로 구성되며 천문 및 측지경·위도좌표와의 기하학적 관계를 도시하면 그림 2.1(a)와 같고 식 (2.1)은 이들의 관계를 수식으로 정리한 것이다.^{5,6)}



(a)



Z, Z' : Ze 및 Za 로 부터의 천정거리
 Ze : 타원체 천정, Za : 천문학적 천정

(b)

그림 2.1. 연직선편차와 천문 및 측지 경·위도

$$\xi = \Phi - \phi, \quad \eta = (\Lambda - \lambda) \cos \phi$$

----- (2.1)

여기서, ϕ 와 λ 는 측지위도 및 측지경도, Φ 와 Λ 는 천문위도 및 천문경도이다. 또한, 그림 2.1(b)로부터 연직선편차의 묘유선방향성분과 측지방위각(α) 및 천문방위각(A)과의 관계를 수식으로 나타내면 식 2.2와 같다.

$$A = \eta \tan \phi + \alpha$$

----- (2.2)

따라서, 관측점에서 벡셀타원체 및 WGS84 타원체에 대한 연직선편차와 측지경·위도, 측지방위각을 알고 있다면 식 2.1, 2.2로부터 천문경도, 천문위도 및 천문방위각을 산정할 수 있게 된다.

본 연구에서는 천문점 및 인접측점에 대한 GPS 관측으로부터 WGS84 타원체상의 경·위도좌표와 타원체를 구하고 다음의 두가지 방법으로부터 연직선편차를 해석하여 천문성과를 산정하는 방안을 검토하였다.

2.1.1 WGS84 좌표와 정표고(GPS/Orth.) 조합법

연직선편차를 얻기 위해서는 그림 2.2와 같이 천문점과 주변 측점간의 지오이드 변화량(ΔN)을 결정해야 한다. ΔN 는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.^{7,8)}

$$\Delta N = N_2 - N_1 = \Delta h - \Delta H$$

----- (2.3)

여기서, $\Delta h = h_2 - h_1$;

천문점과 인접점간 타원체고의 차

$$\Delta H = H_2 - H_1 ;$$

천문점과 인접점간 정표고의 차이다.

타원체고의 차는 GPS 관측, 정표고의 차는 노선을 따라 직접 수준측량을 하거나 기존의 정표고 성과로부터 산출한다. 연직선편차를 GPS와 정표고의 조합으로부터 결정하기 위해 본 연구에서는 식 2.4와 같은 Goad의 제안 식을 활용하여 알고리즘을 구성하였다.⁹⁾

$$\psi = - \frac{\Delta \xi}{\Delta S}$$

----- (2.4)

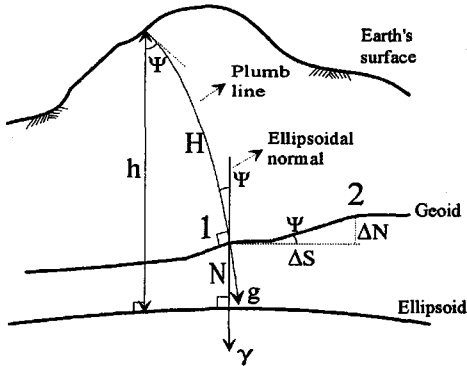


그림 22 연직선편차 및 지오이드고의 변화량

여기서, ψ 는 연직선편차, $\Delta\zeta$ 는 고도이상의 변화량, ΔS 는 GPS로 부터 측정된 기선거리이다.

Carlson은 중력의 효과가 고도이상에 미치는 영향에 관한 연구에서 고도이상의 변화량을 식 25로 제시하고 모의실험을 통하여 산악지형의 경우, $g/\gamma \approx 1$ 임을 입증한 바 있다.¹⁰⁾

$$\Delta\zeta = \Delta h - (g/\gamma)\Delta H \quad \text{----- (25)}$$

여기서, g 는 지표면상 실제 중력 Vector 이며 γ 는 지표면상의 정규중력 Vector 이다.

본 연구에서는 국내지형특성과 부합된다는 가정 하에 식(25)을 $\Delta\zeta \approx \Delta N$ 로 하여 아래와 같이 재 구성하였다.

$$\psi \approx - \frac{\Delta N}{\Delta S} \quad \text{----- (26)}$$

연직선편차는 자오선방향성분(남북, ξ)과 묘유선방향성분(동서, η)으로 나뉘며 이들의 기하학적 관계를 그림 22로부터 구성하면 식 (2.7)과 같다. 여기서 α 는 GPS에 의해 산정된 측지방위각이다.

$$\psi = (\cos \alpha)\xi + (\sin \alpha)\eta \quad \text{또는}$$

$$\begin{aligned} \Delta h - \Delta H + \Delta S (\cos \alpha) \xi \\ + \Delta S (\sin \alpha) \eta = 0 \quad \text{----- (27)} \end{aligned}$$

따라서, 천문점에 인접한 GPS 관측점을 n 개 선정한 경우, 식 (2.7)과 같은 n 개의 선형관측방정식을 구성하고 이를 Matrix로 나타내면 식 (2.8)과 같다.

$$A X = L + V \quad \text{----- (28)}$$

여기서

$$X = \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \end{bmatrix} \quad V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_1 \\ \vdots \\ V_1 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \\ \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} (\Delta H_1 - \Delta h_1) / \Delta S_1 \\ (\Delta H_2 - \Delta h_2) / \Delta S_2 \\ \vdots \\ (\Delta H_n - \Delta h_n) / \Delta S_n \end{bmatrix}$$

식 (2.8)을 최소제곱법으로 해석하면 연직선편차의 두 성분을 다음 식으로 산출할 수 있다.

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad \text{----- (29)}$$

2.1.2 지구중력장모델의 계수 활용

중력포텐셜이상(T)은 식 (2.10)과 같이 구면조화급수로 표현되는 지오이드면상의 중력포텐셜(V)에서 준거타원체면상의 정규 포텐셜(U)을 감하여 산출하며, 연직선편차의 두 성분은 식 (2.11)과 같이 나타낼 수 있다.^{11,12)}

$$T(r, \phi, \lambda) = V(r, \phi, \lambda) - U(r, \phi, \lambda) \quad \text{----- (2.10)}$$

여기서,

$$V(r, \phi, \lambda) = \frac{kM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \right. \\ \times \sum_{m=0}^n \{ C_n^m \cos(m\lambda) + S_n^m \sin(m\lambda) \} \\ \left. \times P_{nm}(\cos \phi) \right]$$

r, ϕ, λ : 계산할 측정의 극중심좌표

M : 만유인력 상수, C_{nm}, S_{nm} : 중력포텐셜 계수

a : 계수에 관련된 축척계수

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

γ : 정규중력

$$\xi = -\frac{1}{\gamma r} \frac{\partial T}{\partial \phi}, \\ \eta = -\frac{1}{\gamma r \cos \phi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} \quad \text{----- (2.11)}$$

식 (2.11)로부터 임의 측정의 연직선편차성분 ξ, η 는 EGM96의 중력포텐셜계수 C 와 S 를 이용하여 식 (2.12), (2.13)으로 부터 산정할 수 있다.^{11,12)}

$$\xi = \frac{kM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \right. \\ \times \sum_{m=0}^n \{ C_n^m \cos(m\lambda) + S_n^m \sin(m\lambda) \} \\ \left. \times \frac{\Delta P_n^m(\cos \phi)}{\Delta \theta} \right] \quad \text{----- (2.12)}$$

$$\eta = -\frac{1}{\gamma r \cos \phi} \frac{kM}{r^2} \left[\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n \right. \\ \times \sum_{m=0}^n m \{ -C_n^m \cos(m\lambda) \\ \left. + S_n^m \sin(m\lambda) \} P_n^m \right] \quad \text{----- (2.13)}$$

2.2 측지학적 제2문제

준거타원체상에서 두 측정의 측지위도와 측지경도를 이용하여 두 점간의 거리와 방위각을 구하는 문제를 측지학적 제2문제의 해석이라고 한다. 해석방법은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 측정간 거리가 150 km이하에 적용될 수 있는 GAUSS의 평균위도공식을 적용하여 프로그램을 구성하였다.⁶⁾

3. 위성관측 및 자료처리

국내의 천문관측이 수행된 1, 2등 삼각점들중 그림 3과 같이 10개의 천문점을 선점하고 각 천문점마다 5km의 범위내에 인접한 4개의 삼각점을 선점, 총 50개의 측점에 대하여 1, 2차로 나누어 GPS 관측을 수행하였다. 1차는 천문점에 대해 대덕관측소의 DAEN¹³⁾ 측점을 고정점으로 L1/L2 Trimble 4000SST 수신기를 사용하여 3시간씩, 2차는 천문점에 인접한 반경 5km이내의 3, 4등 삼각점에 대한 것으로 각 천문점을 고정점으로 Trimble 4000SE L1 수신기를 사용하여 2시간씩, 각각 10° 이상인 위성만으로 부터 GPS위성 관측을 수행하였다. 관측자료는 Trimvec 및 Trimnet-Plus S/W와 GPSurvey S/W를 활용하여 기선, 고도 및 방위각을 결정하고 χ^2 및 τ 검정으로 부터 과대오차를 검출하므로써 측지학적인 위도, 경도 및 고도(ϕ, λ, h)성분에서 천문점의 경우 각각 ± 5 cm 이내, 인접한 삼각점에 대하여는 ± 1 mm 이내의 표준편차로 WGS84 타원체상의 3차원 좌표를 획득하였다.

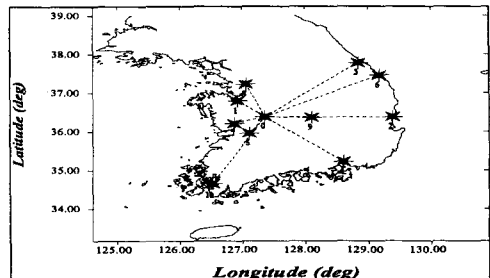


그림 3.1 GPS 관측이 수행된 천문점의 분포도

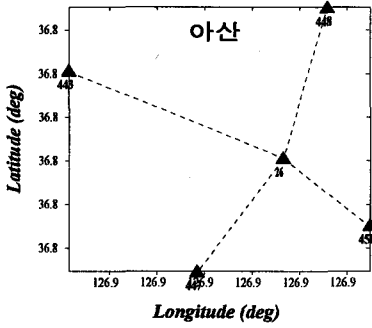


그림 3.2 아산지역 GPS 관측망

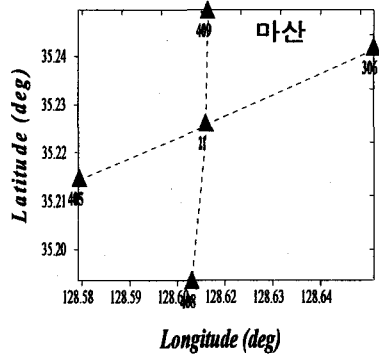


그림 3.5 마산지역 GPS 관측망

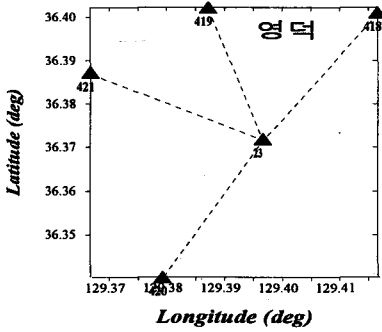


그림 3.3 영덕지역 GPS 관측망

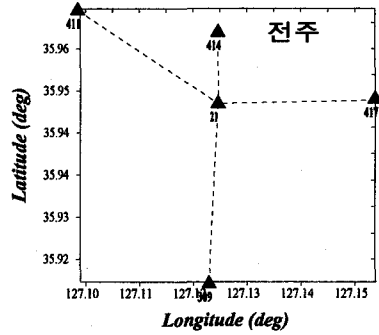


그림 3.6 전주지역 GPS 관측망

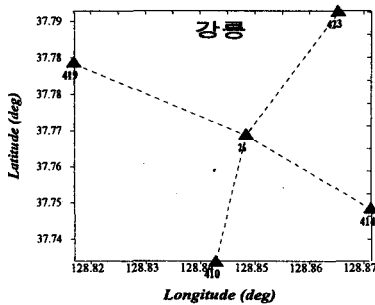


그림 3.4 강릉지역 GPS 관측망

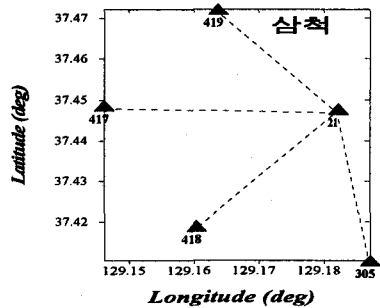


그림 3.7 삼척지역 GPS 관측망

그림 3.2 ~ 그림 3.11은 각 천문점에 인접한 삼각점들의 기하학적 분포를 나타낸 것으로 첨자는 측점의 색인번호(DAEN 측점 : 0번)이다.

표 3.1은 GPS 관측 및 조정계산결과로서 WGS84 타

원체를 기준으로한 각 천문점의 경·위도좌표, 천문점과 삼각점간의 거리, 타원체고의 차(Δh) 및 정표고의 차 (ΔH)를 나타낸 것이다. ΔH 는 편의상 간접수준측량 성과를 적용하여 산정하였다.

연직선편차와 천문좌표산정을 위한 GPS의 적용연구

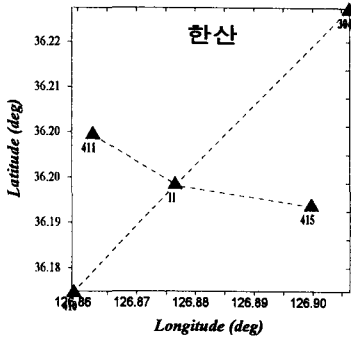


그림 3.8 한산지역 GPS 관측망

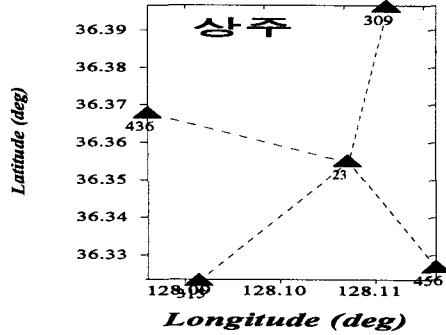


그림 3.10 상주지역 GPS 관측망

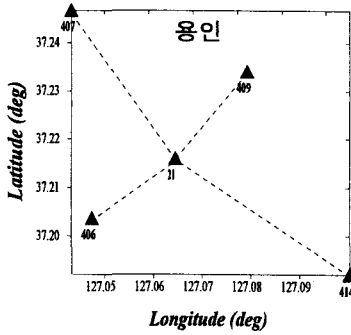


그림 3.9 용인지역 GPS 관측망

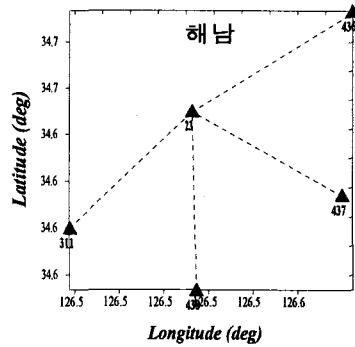


그림 3.11 해남지역 GPS 관측망

표 3.1 천문점과 인접점간 WGS84 타원체상의 위도, 경도, 거리, 타원체고차 및 정표고차

아산	위도 (° ' ")	경도 (° ' ")	거리 (m)	△h (m)	△H (m)
443	36 48 03.179	126 52 53.354	4598.763	163.802	163.940
447	36 45 17.086	126 54 30.257	3306.670	96.984	97.010
448	36 48 55.000	126 56 09.028	3922.325	109.016	109.020
450	36 45 55.087	126 56 41.540	2370.801	79.802	79.740

영덕	위도 (° ' ")	경도 (° ' ")	거리 (m)	△h (m)	△H (m)
411	36 24 03.978	129 24 41.797	3707.535	12.848	12.910
415	36 24 08.192	129 22 55.867	3481.366	-56.920	-56.910
420	36 20 24.209	129 22 27.228	3858.767	54.680	54.620
421	36 23 14.274	129 21 42.361	3182.527	-00.770	-00.810

이용창 · 이용욱

강릉	위도 (° ' ")		경도 (° ' ")		거리 (m)	Δh (m)	ΔH (m)
26	37 46 05.698	128 50 54.462					
410	37 44 24.775	128 50 34.139	3151.070	-111.901	-112.020		
414	37 45 06.631	128 52 16.980	2719.563	57.396	57.360		
419	37 47 02.525	128 49 00.864	3285.991	-112.043	-112.020		
423	37 47 43.045	128 51 55.203	3349.203	29.751	29.880		

한산	위도 (° ' ")		경도 (° ' ")		거리 (m)	Δh (m)	ΔH (m)
11	36 11 42.242	126 52 53.799					
304	36 13 33.492	126 54 40.846	4348.348	46.555	46.500		
410	36 10 33.422	126 51 51.696	2628.233	106.799	106.830		
411	36 12 13.794	126 52 03.417	1590.607	21.197	21.240		
415	36 11 28.492	126 54 17.020	2121.958	-76.504	76.440		

마산	위도 (° ' ")		경도 (° ' ")		거리 (m)	Δh (m)	ΔH (m)
21	35 13 25.106	128 36 40.110					
306	35 14 16.041	128 39 11.843	4145.476	220.180	220.130		
405	35 12 48.031	128 34 45.242	3121.656	214.202	214.240		
408	35 11 39.539	128 36 27.509	3268.935	110.819	110.840		
409	35 14 40.788	128 36 41.693	2332.722	255.373	255.360		

용인	위도 (° ' ")		경도 (° ' ")		거리 (m)	Δh (m)	ΔH (m)
21	37 12 57.694	127 03 57.721					
406	37 12 13.247	127 02 50.135	2157.476	20.553	20.590		
407	37 14 48.349	127 02 33.520	3993.128	97.361	97.440		
409	37 14 02.773	127 04 55.883	2465.971	-15.924	-15.950		
414	37 11 31.772	127 06 19.251	4381.379	50.092	49.980		

전주	위도 (° ' ")		경도 (° ' ")		거리 (m)	Δh (m)	ΔH (m)
21	35 56 59.596	127 07 10.679					
309	35 54 56.191	127 07 04.633	3806.564	104.318	104.290		
411	35 58 03.791	127 05 36.938	3071.275	74.852	74.960		
414	35 57 48.567	127 07 10.889	1509.374	44.647	44.660		
417	35 57 02.754	127 08 55.553	2630.054	73.800	73.700		

상주	위도 (° ' ")		경도 (° ' ")		거리 (m)	Δh (m)	ΔH (m)
23	36 21 19.037	128 06 37.722					
309	36 23 47.445	128 06 55.159	4595.118	-348.912	-348.890		
315	36 19 24.479	128 05 30.166	3912.407	-416.254	-416.240		
436	36 22 04.754	128 05 06.941	2666.102	-126.021	-125.960		
456	36 19 37.710	128 07 17.507	3277.069	13.534	13.490		

삼척	위도 (° ' ")		경도 (° ' ")		거리 (m)	Δh (m)	ΔH (m)
21	37 26 52.044	129 10 56.031					
305	37 24 37.901	129 11 13.556	4157.936	-106.626	-106.760		
417	37 26 55.373	129 08 46.287	3190.704	-38.922	-38.980		
418	37 25 08.507	129 09 37.351	3732.332	-119.883	-120.030		
419	37 28 19.738	129 09 49.653	3157.592	94.908	94.970		

해남	위도 (° ' ")		경도 (° ' ")		거리 (m)	Δh (m)	ΔH (m)
23	34 38 53.017	126 31 52.145					
311	34 37 40.909	126 30 33.164	2997.291	-51.405	-51.350		
436	34 39 55.355	126 33 35.414	3256.467	-25.550	-25.630		
437	34 38 01.488	126 33 28.883	2931.102	-40.531	-40.630		
438	34 37 03.138	126 31 54.726	3386.568	-66.183	-66.210		

4. 비교 분석

분석방향을 WGS84 타원체에 기준한 연직선편차, 천문 경·위도좌표, 벡셀타원체에 기준한 연직선편차 및 천문방위각으로 나누어 전통적인 천문관측성공과를 기준으로 GPS에 의한 천문성과 산정법의 타당성 및 제반 특성을 비교 고찰하였고 또한, EGM96중력장모델에 의한 결과와도 검토하였다.

4.1 WGS84 타원체에 기준한 연직선편차

표4.1는 천문점과 인접측점들간의 GPS관측을 수행하고 WGS84좌표와 정표고의 조합법(GPS/Orh.) 및 EGM96 지구중력장모델의 구면조화계수를 활용하여 WGS84 타원체의 법선방향과 Geoid의 연직선방향간의 경사성분(ξW , ηW)을 산정한 것이다.

GPS/Orh. 조합법 및 EGM96 방법으로 산정된 ξW 와 ηW 성분의 평균값은 각각 +2.408", -2.893" 및 +2.714", -2.617" 로 두 방법으로부터 산정된 측점별 경사성분은 상당히 유사한 분포를 보였으며, 10개의 천문점중 ξW 성분의 최대편차는 강릉26, ηW 성분의 경우는 해남23 측점에서 나타났다. 그림 4.1, 그림 4.2는 각각 GPS/Orh. 조합법 및 EGM96모델에 의한 ξW , ηW 의 분포를 측점별로 도시한 것이다. 두가지 분포로부터 WGS84 타원체의 연직선편차의 편향성을 고찰해보면, 동해안에 위치해 있는 강릉, 삼척, 영덕 측점의 경우 북동편향을 나타낸 반면, 내륙과 남해 및 서해안에 위치한 나머지 측점들은 북서편향의 공통적인 분포경향을 보였고 또한 편차의 크기도 유사한 결과를 보이고 있으므로, GPS/Orh.조합법으로부터 산정한 WGS84 타원체의 연직선편차분포를 EGM96 모델로부터 긍정적으로 검토할 수 있었다.

표 4.1 GPS/Orh. 조합법 및 EGM96 모델로부터 산정된 WGS84 연직선편차성분(ξW , ηW)

번호	측점명	성분	GPS/Orh.	EGM96
1	아산26	ξ	1.577"	1.791"
		η	-6.180"	-5.818"
2	영덕23	ξ	1.660"	2.512"
		η	4.144"	3.936"
3	강릉26	ξ	7.403"	7.707"
		η	2.972"	3.447"
4	마산21	ξ	-1.111"	-0.912"
		η	-2.247"	-2.274"
5	전주21	ξ	1.824"	2.139"
		η	-7.927"	-7.599"

번호	측점명	성분	GPS/Orh.	EGM96
6	삼척21	ξ	7.104"	7.661"
		η	3.969"	3.972"
7	한산11	ξ	1.381"	1.730"
		η	-6.026"	-5.494"
8	용인21	ξ	1.329"	1.397"
		η	-5.637"	-5.164"
9	상주23	ξ	1.424"	1.781"
		η	-4.676"	-4.235"
10	해남23	ξ	1.486"	1.337"
		η	-7.322"	-6.944"

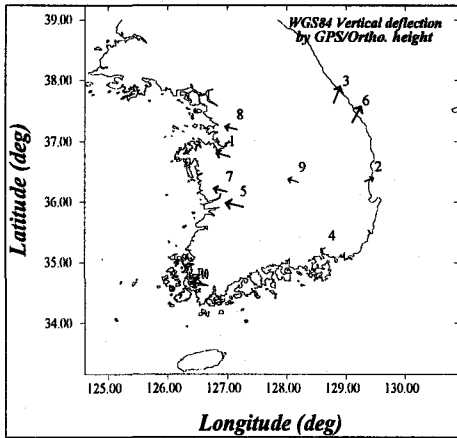


그림 4.1 GPS/Orth.조합법에 의한 ξW , ηW 분포

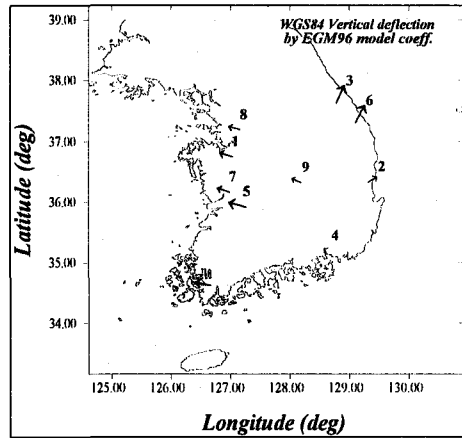


그림 4.2 EGM96 에 의한 ξW , ηW 분포

4.2 천문 경 · 위도좌표

경 · 위도 성과를 산출할 수 있을 것으로 사료된다.

표 4.2은 GPS/Orth. 조합법 및 EGM96 모델로부터 산정된 ξW , ηW 와 천문점의 WGS84 측지 경 · 위도 좌표성과를 식(2.1)에 적용하여 산정한 10개 천문점의 천문위도 및 천문경도를 나타낸 것이다. 여기서, GPS/Orth.조합법 및 EGM96모델의 결과는 천문측량으로부터 산정된 천문위도, 천문경도와 거의 일치한다. GPS/Orth.조합법의 경우, 10개 천문점의 평균편차는 위도 · 경도에서 각각 1.202", 1.071", EGM96 모델의 경우는 1.365" 및 1.264"로 GPS/Orth. 조합법이 천문측량결과에 좀더 근접한 결과를 보였다. 특히, 아산26, 영덕23, 마산21 및 용인21 측점을 제외하면 평균 $\pm 1"$ 내외의 편차를 갖는 천문성과가 기대되지만, 천문측량의 결과에 비해서는 아직은 미흡한 점이 있다. 따라서, 좀더 근접한 결과를 구하기 위해서는 정밀한 연직선편차를 확보해야 하며 이를 위해서는 천문점과 인접한 측점간 지오이드고의 변화량(ΔN)을 높은 정밀도로 산정해야 할 것이다. 향후, GPS 관측 및 수신자료의 처리기술면에서 효율적인 관측방법과 전리층 및 대류층지연에 대한 보정기법을 보완하고 또한, 인접한 측점(삼각점, 수준점 또는 임의점)의 정표고를 간접측량이 아닌 직접수준측량방법으로 산정한다면 GPS/Orth. 조합법으로부터 좀더 향상된 천문

표 4.2 GPS/Orth. 조합법 및 EGM96모델의 ξW , ηW 로부터 산정한 천문 경 · 위도

번호	측점명	성분	천문측량	GPS/Orth.	EGM96	천문출판년도
1	아산26	ϕ	36° 46' 54.428"	2.193"	1.979"	1979
		λ	126° 55' 26.292"	-1.442"	-1.893"	
2	영덕23	ϕ	36° 22' 18.302"	-2.018"	-2.870"	1978
		λ	129° 23' 34.640"	-0.446"	-0.188"	
3	강릉26	ϕ	37° 46' 13.705"	-0.604"	0.300"	1977
		λ	128° 50' 58.382"	0.161"	-0.441"	
4	마산21	ϕ	35° 13' 26.592"	2.597"	2.398"	1975
		λ	128° 36' 36.102"	-1.257"	-1.224"	
5	전주21	ϕ	35° 56' 59.434"	-1.987"	-2.301"	1979
		λ	127° 06' 59.607"	-1.280"	-1.686"	
6	삼척21	ϕ	37° 26' 59.122"	-0.026"	-0.583"	1977
		λ	129° 11' 01.754"	0.724"	0.465"	
7	한산11	ϕ	36° 11' 43.259"	-0.364"	-0.713"	1976
		λ	126° 52' 46.233"	-0.099"	-0.758"	
8	용인21	ϕ	37° 12' 58.945"	-0.078"	-0.146"	1980
		λ	127° 03' 47.642"	-3.001"	-3.595"	
9	삼주23	ϕ	36° 21' 18.779"	-1.681"	-2.039"	1978
		λ	128° 06' 30.332"	-1.585"	-2.132"	
10	해남23	ϕ	34° 38' 54.029"	-0.474"	-0.325"	1992
		λ	126° 31' 43.959"	0.714"	0.255"	

4.3 벡셀타원체에 기준한 연직선편차

표 4.3는 GPS/Orh. 조합법 및 EGM96모델로부터 산정한 천문 경·위도와 벡셀 측지경·위도를 식 (2.1)에 적용하여 산정한 벡셀타원체에 기준한 연직선편차 (ξB , ηB)를 나타낸 것이다. 천문측량으로부터 산정된 연직선편차의 성분은 $\xi B=12.870''$, $\eta B=-9.780''$ 로서 전체적으로 북서편향을 나타내고 있다.

GPS/Orh. 조합법 및 EGM96의 경우는 각각 +12.99

7'', -9.179'' 및 +13.304'', -8.883''로서 GPS/Orh. 조합법이 천문측량결과에 좀더 근접함을 보였다. 그림 4.3, 그림 4.4는 각각 천문측량 및 GPS/Orh. 조합법으로부터 산정된 ξW , ηW 분포를 측정별로 도시한 것이다. 두 분포를 고찰해 보면 연직선편차의 편향성은 물론 크기면에서도 매우 유사한 상관성을 확인할 수 있어 전단계인 GPS/Orh. 조합법으로부터 계산된 천문 경·위도좌표의 신뢰성을 재 확인할 수 있었다.

특히, 그림 4.1, 그림 4.2의 WGS84 타원체에 기준한

표 4.3 GPS/Orh. 조합법 및 EGM96모델의 천문 경·위도로부터 산정한 벡셀타원체의 연직선편차

번호	측점명	성분	천문측량	GPS/Orh.	EGM96
1	아산 26	ξ	14.175	11.982	12.196
		η	-13.339	-12.185	-11.824
2	영덕 23	ξ	10.256	12.274	13.126
		η	-2.900	-2.539	-2.746
3	강릉 26	ξ	17.950	17.346	17.650
		η	-3.331	-3.458	-2.983
4	마산 21	ξ	12.576	9.979	10.178
		η	-9.804	-8.777	-8.804
5	전주 21	ξ	10.590	12.577	12.891
		η	-15.085	-14.049	-13.721

번호	측점명	성분	천문측량	GPS/Orh.	EGM96
6	삼척 21	ξ	17.188	17.268	17.825
		η	-2.020	-2.643	-2.438
7	한산 11	ξ	11.665	12.029	12.378
		η	-12.152	-12.073	-11.540
8	용인 21	ξ	11.487	11.550	11.618
		η	-14.071	-11.655	-11.182
9	상주 23	ξ	10.339	12.019	12.377
		η	-12.301	-11.029	-10.588
10	해남 23	ξ	12.473	12.946	12.797
		η	-12.798	-13.386	-13.008

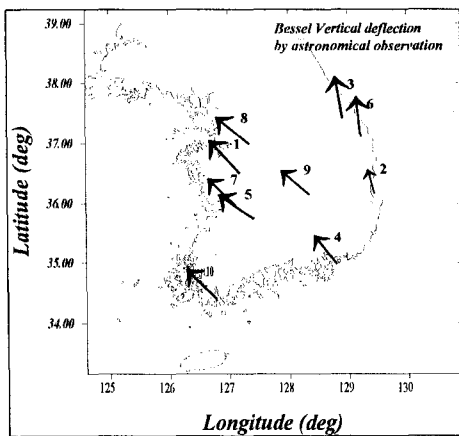


그림 4.3 천문측량에 의한 ξB , ηB 분포

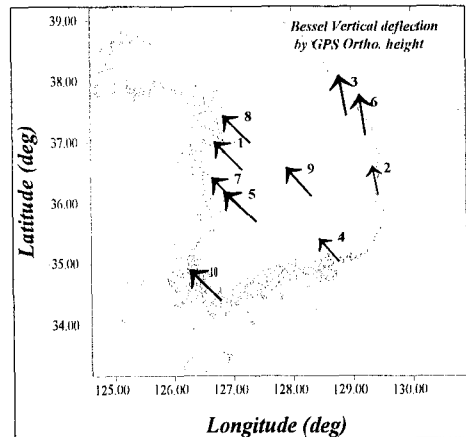


그림 4.4 GPS/Orh. 조합법에 의한 ξB , ηB 분포

연직선편차의 분포와 비교해 보면, WGS84 타원체의 경우, 평균편차가 $\xi W = +2'' \sim +3''$, $\eta W = -2'' \sim -3''$ 인 반면, 벡셀타원체는 $\xi B = +12'' \sim +13''$, $\eta B = -9'' \sim -10''$ 로 훨씬 큰 편차를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한 편향면에서는 강릉, 삼척, 영덕측점의 ηW 성분이 +인 반면, ηB 성분은 (-)값을 나타낸 점이 특징적인데 향후, 측정점의 수를 확대시켜 좀더 상세하게 검토할 사항으로 판단된다.

4.4 천문방위각

천문점과 인접삼각점을 연결하는 측선의 천문방위

각의 비교를 위해 본 연구에서는 벡셀타원체의 측지경·위도를 측지학적 제2문제에 적용하여 산출한 측지방위각(αB)과 천문관측에 의한 ηB 를 식(2.2)에 적용하여 각 측선에 대한 기준방위각으로 하였다.

표 4.4는 GPS/Orh. 조합법 및 EGM96에서 구한 ηB 를 이용하여 각 천문점과 인접한 4개 삼각점간을 연결하는 측선들의 천문방위각을 산정한 다음, 각 측선별로 기준방위각과의 편차를 산정한 결과이다.

GPS/Orh. 조합법 및 EGM96 중력장모델의 계수로부터 산정된 각 측선의 천문방위각을 기준방위각과 비교 검토한 결과, 두 방법에서 평균 $\pm 0.7''$ 의 유사한 편차를 보이므로 비교적 양호한 결과로 산정할 수 있었다.

표 4.4 천문측량, GPS/Orh. 조합법 및 EGM96모델의 ηB 로부터 산정한 천문방위각 비교

아산 26	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96	삼척 21	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96
443	299 6 0.966	6 0.104	6 1.237	305	174 4 45.840	4 46.316	4 45.997
447	209 16 17.326	16 16.464	16 17.596	417	271 51 16.041	51 16.518	51 16.198
448	12 14 53.499	14 52.637	14 53.769	418	211 15 1.496	15 1.973	15 1.653
450	136 15 17.426	15 16.563	15 17.696	419	328 52 0.981	52 1.458	52 1.138
기준방위각과의 편차		0.862''	1.132''	기준방위각과의 편차		-0.477''	-0.320''

영덕 23	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96	한산 11	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96
418	28 52 12.621	52 12.355	52 12.469	304	37 55 51.442	55 51.384	55 51.832
419	345 52 45.545	52 45.279	53 45.392	410	216 11 47.602	11 47.544	11 47.991
420	203 54 55.730	54 55.464	54 55.577	411	307 41 47.717	41 47.659	41 48.107
421	302 36 0.998	35 0.732	36 0.845	415	101 30 24.623	30 24.565	30 25.013
기준방위각과의 편차		0.266''	0.113''	기준방위각과의 편차		0.058''	0.448''

강릉 26	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96	용인 21	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96
410	189 4 25.638	4 25.736	4 26.006	406	230 33 30.717	33 28.882	33 31.076
414	132 4 0.749	4 0.847	4 1.117	407	328 41 27.399	41 25.564	41 27.758
419	302 11 43.516	11 43.614	11 43.884	409	35 33 50.276	33 48.441	33 50.635
423	26 21 44.949	21 45.048	21 45.318	414	127 10 53.605	10 51.770	10 53.964
기준방위각과의 편차		-0.099''	0.270''	기준방위각과의 편차		1.835''	2.194''

마산 21	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96	상주 23	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96
306	67 43 36.837	43 36.112	43 36.818	309	5 25 13.518	25 12.582	25 13.842
405	248 32 58.803	32 58.079	32 58.784	315	205 30 50.091	30 49.155	30 50.415
408	185 35 12.136	35 11.411	35 12.117	436	301 54 45.074	54 44.138	54 45.399
409	0 59 40.257	59 39.532	59 40.238	456	162 22 34.989	22 34.053	22 35.314
기준방위각과의 편차		0.725"	0.706"	기준방위각과의 편차		0.936"	1.260"

전주 21	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96	해남 23	기준방위각	GPS/Orh.	EGM96
309	182 12 9.454	12 8.702	12 9.692	311	222 14 34.897	14 35.303	14 35.158
411	310 6 42.691	6 41.940	6 42.929	436	53 45 02.514	45 02.921	45 2.775
414	216 15 50.568	15 49.817	15 50.806	437	122 42 7.500	42 7.906	42 7.761
417	0 11 10.992	11 10.240	11 11.230	438	178 53 39.574	53 39.980	53 39.835
기준방위각과의 편차		0.751"	0.990"	기준방위각과의 편차		-0.406"	-0.145"

향후, 천문관측점의 수를 확대시켜 좀더 정밀한 GPS 관측을 수행하고, 천문점과 인점 측정간 지오이드고의 변화량을 보다 면밀히 해석한다면, 본 연구에서 검토한 GPS/Orh. 조합법을 이용하여 천문측량성곽에 좀더 근접할 수 있는 결과를 산출할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

GPS 관측성곽을 이용한 천문성곽의 산정 프로그램을 작성, 천문점과 인점측점에 대한 위성관측을 수행하여 GPS/Orh. 조합법 및 EGM96 중력장모델로부터 연직선편차, 천문 경·위도 및 천문방위각을 산정하고 기존 천문측량성곽과 비교 고찰한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. WGS84 타원체에 기준한 연직선편차를 GPS/Orh. 조합법 및 EGM96 모델로부터 산정한 결과, 두 방법에서 평균 $\xi W = +2'' \sim +3''$, $\eta W = -2'' \sim -3''$ 의 유사한 분포를 얻을 수 있었고 연직선편차의 편향성은 동해안지역 측정들(강릉, 삼척, 영덕)의 경우, 북동 편향을 보인 반면, 다른 측정들은 북서 편향성으로 나타났다.

2. EGM96 모델로부터 산정된 ξW , ηW 와 천문점의 WGS84 측지경·위도좌표로부터 천문경·위도를 구하고 천문측량성곽과 비교한 결과, GPS/Orh. 조합법 및 EGM96 모델로부터 평균편차 $\pm 1''$ 내외의 천문경도 및 천문위도를 산정할 수 있었다.

3. GPS/Orh. 조합법 및 EGM96 모델에서 산정한 천문경·위도와 벡셀 측지경·위도좌표를 이용하여 벡셀타원체에 기준한 연직선편차를 산출하고 천문측량에 의한 연직선편차와 비교한 결과, GPS/Orh. 조합법이 $\xi B = 12.997''$, $\eta B = -9.179''$ 로서 천문측량성곽에 근접한 분포를 나타내었다.

4. WGS84 타원체 및 벡셀타원체에 기준한 연직선편차를 고찰하면, WGS84 타원체의 경우, 평균편차가 $\xi W = +2'' \sim +3''$, $\eta W = -2'' \sim -3''$ 인 반면, 벡셀타원체는 $\xi B = +12'' \sim +13''$, $\eta B = -9'' \sim -10''$ 로 큰 편차를 보였으며, 편향성에서는 강릉, 삼척, 영덕측점의 경우, ηW 성분이 +인 반면, ηB 성분은 (-)값을 나타낸 점이 특징적이었다.

5. GPS/Orh. 조합법 및 EGM96 중력장모델로부터 계산한 각 측선의 천문방위각을 기준방위각과 비교 검토한 결과, 평균 $\pm 0.7''$ 의 편차로서 비교적 양호하게 산정할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 한국학술진흥재단 자유공모과제 연구비 지원에 의하여 수행된 연구로서 한국학술진흥재단에 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. 국립지리원, "정밀 천문측량", 1974. 5.
2. 국립지리원, "우리나라 정밀 측지망 설정에 관한 연구 보고서", 1985.
3. 이용창, "GPS에 의한 측지학적 정밀 3차원 좌표결정에 관한 연구", 충남 대학교 박사학위논문, pp. 49 ~ 51, 1994.
4. NASA, "EGM96 - The NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model", January 10, 1997.
5. Alfred Leick, "Adjustments with Examples, Lecture Note No.27, University of Maine", 1980.
6. 일본측량협회, "현대측량학 제 4권 측지측량 ①, ②", 1981.
7. Alan G. Evans, "Vertical Deflections and Astronomic Azimuth Derived from GPA and Leveling : Joint Test Description and Results. Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning", March 13~17, 1989.
8. Alan G. Evans, "Precise Pseudo-Kinematic GPS and Level Surveying to Obtain Gravity Deflections of the Vertical, Proceedings of ION GPS-91 Fourth International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation", September 11~13, 1991.
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", May 1994.
10. Soler, T., Carlson, A. E., Jr. and Ecvans, A. G., "Detwrmination of Deflections of the Vertical Using GPS and Geodetic Leveling, Geophysical Research Letters", 1994.
11. Heiskanen, W. and Moritz, H., "Physical Geodesy", W. H. Freeman and Company, SanFrancisco, California, 1967.
12. 최광선, "한반도 남부의 중력에 관한 연구", 서울 대학교 대학원 박사학위논문, 1986.
13. 박필호, 한인후, 김천휘, 강준묵, "GPS 측지기준점 설정에 관한 연구", 한국측지학회지 제9권 제1호, pp.37~46, 1991.