

천문경위도와 중력지오이드 모델로부터 구한 연직선 편차의 비교에 관한 연구

A Study on the Comparison among Deflections of the Vertical Computed from Astronomical Coordinates and Geoid Models

김용일* · 송창현** · 어양담*** · 김형태****

Kim, Yong-il · Song, Chang-Hyoun · Eo, Yang-Dam · Kim, Hyung-Tae

요 旨

본 연구에서는 연직선편차를 구하는 방법들을 고찰하고 천문측량성과와 GPS 성과를 이용해 구한 WGS84 타원체에 대한 연직선 편차와 PNU95, EGM96 지오이드 모델로부터 구한 연직선 편차들을 비교하여, 각 방법간의 차이 및 지오이드 모델간의 차이를 살펴보았다. 각 방법으로 구한 연직선 편차를 비교함으로써 다음과 같은 사실을 알 수 있었다. 첫째, 천문경위도를 이용해 구한 연직선 편차와 중력지오이드 모델로부터 구한 연직선 편차는 대부분 비슷한 경향을 보인다. 둘째, 규칙적인 보조점을 사용하여 지오이드 모델로부터 연직선 편차를 구하는 경우 PNU95와 EGM96 간의 연직선 편차 차이가 천문측량성과에 의한 연직선 편차와 지오이드 모델로부터 구한 연직선 편차간의 차이보다 전반적으로 더 작음을 알 수 있었다. 셋째, 동일한 지오이드 모델을 사용할 때, 보조점의 분포모양에 따른 연직선 편차의 차이는 사용데이터에 의한 차이보다 작았으며 향후 본 방법으로 지오이드모델의 정확도 평가가 가능할 것으로 생각된다.

ABSTRACT

In this study, we investigated the methods of computing deflection of the vertical and compared the results of deflections of the vertical computed from astronomical coordinates and GPS observations, and computed from PNU95, EGM96 geoid model. By comparing the results of the deflections of the vertical, we found out the followings; 1) The deflections of the vertical computed from astronomical coordinates and geoid models are similar to each other. 2) The difference between the deflections of the vertical computed from each geoid models was smaller than the difference of those computed from astronomic coordinates and geoid models. 3) The effects of distribution of the points on the results are less than those of the data used in the computation. If there exists reference data about the deflection of the vertical, it would be possible to evaluate the accuracy of the geoid model using this method.

1. 서 론

지형의 기복과 지구내부 물질의 밀도 및 구조의 불균일로 인해 지오이드 면의 기복이 발생되며, 이에 의해 지오이드면과 지구타원체면의 높이 차이인 지오이드고와, 지구타원체면에 대한 법선과 지오이드면에 대한 법

선의 사이각인 연직선 편차가 나타난다.

지오이드 모델은 지구표면의 중력값으로부터 유도되거나 천문측량 성과에 의해 구할 수 있다. 지오이드 모델의 정밀도는 중력측정의 점밀도나 천문측량 성과의 수에 의존하며 그 정확도는 각 성과의 측량정확도를 따른다.

하나의 천문측량 성과를 얻는데는 장시간이 소요되며 이에 따라 비용이 많이 드는 작업이다. 천문측량으로부터 지오이드 모델을 구축하는 방법은 관측 성과수의 한계로 인하여 실용적인 방법이 아니며 전세계 중력

*서울대학교 공과대학 도시공학과 조교수
**서울대학교 대학원 도시공학과 석사과정
***서울대학교 대학원 도시공학과 박사과정
****서울대학교 대학원 도시공학과 박사과정

망이 구축되기 이전, 중력 성과가 부족했던 과거에 대략의 지오이드 모델을 유추하기 위해서 사용되었다.¹⁰⁾

현재 지오이드 모델은 주로 중력측량 성과와 해면고도 자료를 이용하여 구축되고 있으며, 이용지역과 목적에 따라 다양한 지오이드 모델이 존재하고 있다.

PNU95 모델은 GPS의 실용화를 목적으로 WGS84 기준타원체를 채용한 남한 일원에 적합한 지오이드 모델이다. 이것은 중력자료를 이용하여 남한 일원의 1'×1' 평균 고도이상 자료를 작성하여 만들어졌으며 RMS 오차가 약 0.15m로 알려져 있다.¹¹⁾

EGM96 모델은 미국의 NIMA를 중심으로 전 세계 유수의 측지학 연구기관들이 협력하여 1996년 10월에 공개한 전세계를 대상으로 하는 지구 중력모델로서 GPS 결과로 검증한 결과 절대오차가 ± 1 m 이내라고 알려져 있다.¹²⁾

본 연구에서는 (a) PNU95 모델 및 EGM96모델로부터 구한 연직선 편차와 (b) 천문측량성과와 GPS 측량 성과로부터 구한 연직선 편차를 비교하였다. 각 지오이드 모델로부터 연직선 편차값을 구하고 이들 간의 차를 구하여 각각을 비교하였다. 또한, 현재 국립지리원이 가지고 있는 40여 개의 삼각점에 대한 천문측량 성과 중 16개의 삼각점에 대한 성과를 사용하여 연직선 편차를 구하고 이를 지오이드 모델로부터 구한 결과와 비교하였다.

2. 연직선 편차 계산방법

연직선 편차는 한 점에서 중력방향과 타원체에 수직인 방향의 차이를 말한다. WGS84 타원체에 대한 연직선 편차를 구하는 방법으로 크게 다음의 방법을 생각할 수 있다.

2.1 천문경위도와 측지경위도를 이용

GPS에 의한 측위의 경우 측량용 장비를 사용하면 수 ppm의 정밀도를 나타내므로 정확한 측지경위도를 결정할 수 있으며, 천문측량성과가 정확하다면 정확한 연직선 편차를 결정할 수 있다. 천문경위도와 측지경위도를 이용하여 구한 연직선 편차는, 천문경위도의 성과가 지오이드로부터 높이를 가지는 지점에서 관측된 값이므로 이를 지오이드면의 값으로 보정해 주어야 한다. 천문경위도와 측지경위도의 차를 이용해 연직선 편차

성분을 표현한 식은 다음과 같다.

$$\xi = \Phi - \phi$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda) \times \cos \phi$$

여기서, Φ : 천문위도

Λ : 천문경도

ϕ : 측지위도

λ : 측지경도

즉, 천문경위도와 측지경위도의 차에서 연직선 편차 성분을 바로 구할 수 있다.

2.2 GPS/leveling에 의한 방법

연직선 편차를 구하려는 점과 그 주변 점들에 대해서 GPS/leveling¹²⁾을 하여 지오이드 고를 구한 후 GPS 측위에 의한 방위각 및 거리를 이용해 연직선 편차성분, ξ 과 η 를 구하는 방법이다. GPS/levelling에 의해서 두 점간의 지오이드 고를 구한 후, 연직선 편차를 구하려는 점의 지오이드고와 주변점에서의 지오이드고의 차를 구하고 이를 두 점간의 거리로 나누어 지오이드 경사를 구한다. 그 다음 GPS에 의해 결정된 방위각을 이용하면 연직선 편차 성분을 구할 수 있다.

두 지점을 연결하는 방향의 연직선 편차성분 ε 은 두 지점의 지오이드 고의 차를 두 지점의 거리로 나눈 값이다. 두 지점간의 방위각 방향의 연직선 편차성분 ε 은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{\Delta H - \Delta h}{\Delta S} = \frac{\Delta N}{\Delta S}$$

여기서, ΔH : 두 지점의 정표고 변화량

Δh : 두 지점의 타원체고 변화량

ΔN : 두 지점간의 지오이드고 변화량($N_1 - N_2$)

위에서 구한 방위각 방향의 연직선 편차와 두 지점의 방위각 α 를 이용해 다음의 식에서 연직선 편차의 남북방향 성분 ξ 와 동서방향 성분 η 의 관계식을 세울 수 있다.

$$\varepsilon = (\cos \alpha) \xi + (\sin \alpha) \eta$$

연직선 편차를 구하려는 점에서 두 개 이상의 점을 관측하면 위 식을 이용해 ξ 와 η 를 구할 수 있다.

2.3 중력데이터를 이용하는 방법(Vening Meinesz 공식)

Stoke's formula를 이용하면 중력이상으로부터 지오이드를 계산할 수 있다. 이를 이용한 유사한 공식으로서 중력이상으로부터 연직선 편차를 구하는 공식이 Vening Meinesz(1928)에 의해 제안되었다.¹⁵⁾

ϵ 이 임의 방향의 수직면 상의 연직선 편차 성분이라면,

$$dN = -\epsilon ds \text{ 또는, } \epsilon = -\frac{dN}{ds}$$

여기서, $dN : N_2 - N_1$

s : 두 지점간의 거리

이다. 여기서 음(-)의 부호는 약속으로서 정의해 놓은 것이다. 위 식에서 지오이드고를 미분하면 연직선 편차를 구할 수 있으므로 Stoke's formula를 미분한 아래의 식(Vening Meinesz 공식)에서 연직선 편차를 구할 수 있다.

$$\xi(\phi, \lambda) = \frac{1}{4\pi G} \int_{\lambda'=0}^{2\pi} \int_{\phi'=-\pi/2}^{\pi/2} \Delta g(\phi', \lambda') \frac{dS(\psi)}{d\psi} \cos \alpha \cos \phi' d\phi' d\lambda'$$

$$\eta(\phi, \lambda) = \frac{1}{4\pi G} \int_{\lambda'=0}^{2\pi} \int_{\phi'=-\pi/2}^{\pi/2} \Delta g(\phi', \lambda') \frac{dS(\psi)}{d\psi} \cos \alpha \cos \phi' d\phi' d\lambda'$$

Vening Meinesz 공식을 이용하면 중력이상 데이터에서 계산에 의해 직접 연직선 편차를 구할 수 있다.

2.4 지오이드 경사를 이용하는 방법

연직선 편차를 구하려는 점을 중심으로 하여 주변에 점을 선정하여 방위각과 거리를 구하고 지오이드 모델을 이용하여 각 지점의 지오이드고를 구한다. 그 후 앞의 2.2와 동일한 방법으로 연직선 편차 성분을 구한다. 이 방법은 GPS 관측을 통하지 않고 선정된 점간의 거리와 방위각을 계산에 의해 구하는 점에서 2.2와 다르다.

2.5 천문천정각과 측지천정각을 이용하는 방법

천문천정각(astronomical zenith angle)과 측지천정각(ellipsoidal zenith angle)을 이용해 임의 방향으로의 연직선 편차성분을 구하고, 이를 이용해 남북방향, 동서방향의 연직선 편차성분을 구하는 방법이다.¹³⁾ 천문천정각, 측지천정각, 두 지점간의 방위각을 알고 있을 때 사용 가능하다. 천문천정각은 데오들라이트에 의해 측정가능하고 측지천정각은 기존성파로 알고 있거나 GPS에 의해 측정 가능하다.

특정 방향으로 측정된 천문천정각과 타원체천정각의 차를 계산하여 연직선 편차성분 ϵ 을 구한다. ϵ 이 구해

지면 역시 2.2와 동일한 방법으로 동서방향, 남북방향의 연직선 편차성분을 구할 수가 있다.

3. 사용데이터에 관한 고찰

3.1 천문측량성과

천문측량은 태양이나 별을 이용하여 미지점의 경도, 위도 및 방위각을 구하는 것으로 국가의 경위도 원점의 위치를 결정하거나 연직선 편차의 결정, 측지측량망의 방위각 조정 등에 이용된다.⁹⁾

1971년부터 국립지리원에서는 WILD T-4를 사용하여 천문측량을 실시하였는데, 그 성과는 천문경위도 결정시 굴절, 관측점의 표고, 極變化(polar motion), 日周光行差(diurnal aberration), 章動(nutation), 時報, 傳播도달시간에 대한 보정 등이 이루어진 성과이다.⁷⁾

본 연구에서는 천문측량이 수행된 삼각점 중에 GPS 성과를 구할 수 있는 16개의 삼각점의 천문측량성과를 사용하였으며 그 관측시기는 1973년부터 1994년까지만 이르러 다양하다.

3.2 PNU95 지오이드모델

PNU95는 1995년 최광선¹¹⁾이 남한 일원에서 효과적 인 GPS 사용을 목적으로 개발된 지오이드모델로서 기준 타원체는 WGS84타원체이다. PNU95의 개발에 사용된 자료는 OSU91A 지구중력모델, 약 4,500 지점에 대한 남한지역의 중력자료, 일본 동경대학 해양연구소 자료, NOAA의 Global Marine Gravity자료 등이며 이를 이용하여 남한 일원의 1'×1'의 평균고도이상자료를 작성하였다.

차수 360인 OSU91A 지구중력모델에서 광역지오이드를 먼저 계산하고, 남한 일원의 고도이상자료를 이용해 남한의 상대지오이드를 구하여 이를 광역지오이드에 대입하였다.

71개의 수준점에서 관측한 GPS 측위결과를 PNU95 지오이드모델을 이용해 보정한 결과, 수준점 표고와의 최대차이는 0.35 m이고 RMS 오차는 0.149 m라고 알려져 있다.

3.3 EGM96

NASA의 Goddard Space Flight Center(GSFC), NIMA, 그리고 Ohio State University가 3년간에 걸쳐 차수 360의

지구중력모델인 EGM96(Earth Gravity Model 96)을 개발하여 1996년 10월에 공개하였다.

이 모델에 사용된 자료는, 20여 개의 위성에 대한 위성추적자료, NIMA에서 제공한 30'×30'의 지상중력자료, GEOSAT Geodetic Mission의 해면고도자료 및 ERS-1으로부터 계산된 30'×30' 중력이상자료 등이다.¹⁴⁾

전세계 각 지역에 대한 GPS/levelling 성과와 비교한 결과 EGM96 모델의 절대오차는 ±1미터 이내로 알려져 있다.¹¹⁾

3.4 GPS 관측성과

GPS 측위 모드는 크게 절대측위와 상대측위로 나누어지며 상대측위를 이용하면 측위에 미치는 여러 오차를 감소 또는 소거시킬 수 있어 기선벡터를 비교적 정확하게 결정할 수 있다. 측량용 GPS 수신기는 대부분 반송파 위상관측에 의한 상대측위를 이용하며 반송파 위상관측의 경우는 이론적으로 위성과의 거리를 2 mm정확도로까지 측정가능하다.

GPS 관측은 관측시기, 관측지속시간, 위성배치상태, 관측방법 등에 따라 그 정밀도가 달라지지만 반송파위상을 이용한 정지상대측위의 경우는 일반적으로 ±1 ppm의 평면위치 정확도를 보인다고 알려져 있다.¹²⁾ 기선거리가 100 km라도 수평위치 오차는 10 cm로서 이는 측지경위도의 결정에는 크게 영향을 미치지 않는다. 따라서, 천문측량성과가 정확하다면 정확한 연직선 편차 결정을 할 수 있다.

4. 연구방법 및 적용

본 연구에서는 천문경위도와 측지경위도를 이용해 천문측량이 수행된 삼각점 중 GPS성과를 구할 수 있는 16개의 삼각점에 대해 WGS84 타원체에 대한 연직선 편차를 구하고, 이를 PNU95, EGM96 지오이드 모델로부터 지오이드 경사를 구해 계산한 연직선 편차와 비교함과 동시에 각 지오이드 모델간의 결과와 방법간의 결과도 비교해 보았다.

지오이드 모델로부터 지오이드 경사를 구할 때, 주변의 1분 간격과 30분 간격으로 각각 동서남북의 4점을 규칙적으로 선정하여 각각에 대해 방위각과 거리를 계산하여 지오이드 경사를 구하였으며, 비슷한 거리로 각 방향에 분포된 지점에 대한 GPS 기선해석 결과로 나온

방위각과 거리를 이용해서 연직선 편차를 구하는 방법은 GPS 성과를 구할 수 있는 용인21, 전주21, 한산11, 아산26의 4점에 대해서만 적용하였다.

(a) 국립지리원의 천문측량성과와 GPS에 의한 측지경위도를 이용해 연직선 편차를 구하는 방법(16점에 대해 적용)

(b) 천문측량성과가 있는 삼각점을 중심으로 동서남북방향으로 1분 간격의 점을 규칙적으로 선정해 방위각과 거리를 구하고 이를 이용해 지오이드 모델로부터 연직선 편차를 구하는 방법(16점에 대해 적용)

표 1. (a) 방법에 의한 연직선 편차

삼각점명	천문측량성과(도-분-초)	GPS 관측성과(WGS84)(도-분-초)	연직선편차(ξ, η)
용인 21	경도 127-03-47.642	경도 127-03-57.720870	1.25
	위도 37-12-58.945	위도 37-12-57.693815	-8.03
전주 21	경도 127-06-59.607	경도 127-07-10.679467	-0.16
	위도 35-56-59.434	위도 35-56-59.596289	-8.96
한산 11	경도 126-52-46.233	경도 126-52-53.799266	1.02
	위도 36-11-43.259	위도 36-11-42.241946	-6.11
아산 26	경도 126-55-26.292	경도 126-55-35.449250	3.77
	위도 36-46-54.428	위도 36-46-50.658108	-7.34
이원 24	경도 127-33-26.634	경도 127-33-36.37928	2.12
	위도 36-06-13.814	위도 36-06-11.69278	-7.87
상주 23	경도 128-06-30.332	경도 128-06-37.72206	-0.26
	위도 36-21-18.779	위도 36-21-19.03692	-5.95
영덕 23	경도 129-23-34.640	경도 129-23-29.93880	-0.36
	위도 36-22-18.302	위도 36-22-18.65970	3.79
염정 25	경도 127-53-52.204	경도 127-54-05.58028	1.56
	위도 37-03-06.256	위도 37-03-04.69393	-10.68
당진	경도 126-29-41.783	경도 126-29-52.218282	0.92
	위도 36-45-26.845	위도 36-45-25.927303	-8.36
부안 11	경도 126-38-14.007	경도 126-38-19.92097	-1.39
	위도 35-44-00.900	위도 35-44-02.28692	-4.80
청주 11	경도 127-24-59.475	경도 127-25-09.522325	-0.27
	위도 36-34-57.530	위도 36-34-57.795059	-8.07
마산 21	경도 128-36-36.102	경도 128-36-40.11140	1.49
	위도 35-13-26.592	위도 35-13-25.10581	-3.28
수원	경도 127-03-05.1451	경도 127-03-14.88140	-1.46
	위도 37-16-31.9034	위도 37-16-33.36443	-7.75
영암 11	경도 126-43-37.736	경도 126-43-39.80533	0.90
	위도 34-58-15.190	위도 34-58-14.28805	-1.70
고흥 21	경도 127-15-02.8050	경도 127-15-07.80101	-1.66
	위도 34-41-13.9648	위도 34-41-15.62137	-4.11
울진 22	경도 129-25-05.529	경도 129-24-57.75491	2.71
	위도 36-57-14.262	위도 36-57-11.55085	6.21

(c) 천문측량성차가 있는 삼각점을 중심으로 동서남북방향으로 30분 간격의 점을 규칙적으로 선정해 방위각과 거리를 구하고 이를 이용해 지오이드 모델로부터 연직선 편차를 구하는 방법(16점에 대해 적용)

(d) 비슷한 거리로 각 방향으로 분포된 지점에 대한 GPS 기선해석 결과인 거리와 방위각을 이용해 지오이드 모델로부터 연직선 편차를 구하는 방법(4점에 대해 적용)

위의 각 방법을 아래에서부터는 (a), (b), (c), (d)로 부르기로 한다.

(a), (b), (c), (d)방법에 의한 각각의 결과는 표 1-4와 같다.

삼각점의 WGS84 좌표의 경우, 용인21, 전주21, 한산11, 아산26은 한국지형공간정보학회지 3권 2호³⁾에서, 이원24는 측지학회지 10권 1호⁶⁾에서, 업정25, 상주23, 영덕23, 울진22는 측지학회지 11권 1호⁵⁾에서, 청주11, 당진, 부안11, 수원, 고흥21은 측지학회지 13권 2호⁴⁾에서, 마산21, 영암11은 '98 GPS Workshop 논문집⁸⁾에서 각각 인용하였다.

이원24는 Trimble 4000SDT 수신기로 관측하였으며 TRIMVEC-PLUS의 MBP(MultiBaseline Processing) 방식에 의하여 천문대 GPS관측소를 기준점으로 하여 처

리하였다. 그 후 TRIMNET을 이용해 천문대 GPS관측소를 고정점으로 망조정을 하였다.

업정25, 상주23, 영덕23, 울진22는 Trimble 4000SST 수신기를 이용하여 관측하였으며, TRIMVEC-PLUS의 MBP-Single(MultiBaseline Processing Single)방식을 이용해 천문대 GPS관측소를 기준점으로 하여 처리하였다.

청주11, 당진, 부안11은 Trimble 4000SST와 SSE 수신기를 이용하였으며 역시 천문대 GPS관측소를 기준점으로 하여 GPSurvey의 autobatch processing 방법을 이용하여 처리하였다. 그 후 Trimnet을 이용하여 삼차원 망조정을 하여 WGS84좌표를 ± 2 cm의 정밀도로 결정하였다.

천문측량성차에 의한 (a)방법과 지오이드 모델로부터 구하는 (b) 방법에 의한 연직선 편차를 그림으로 표현한 결과 그림 1과 같았다.

방법(d)에 사용된 삼각점과 주변의 보조점간의 GPS 기선해석 결과는 한국지형공간정보학회지 3권 2호³⁾에서 인용하였으며 이 관측은 Trimble 4000SE 일주파 수신기 3대를 사용하여 관측하였으며 TRIMVEC-PLUS의 MBP(MultiBaseline Processing) 방식에 의해 처리하였으며 여기서 결정된 최적의 자료를 기본으로 내부 구속조건에 의해 조정을 하였다.

표 2. (b)방법에 의한 연직선 편차

삼각점	PNU95		EGM96	
	ξ (")	η (")	ξ (")	η (")
용인21	1.56	-6.83	1.39	-5.16
전주21	1.39	-9.60	2.12	-7.54
한산11	1.34	-3.99	1.73	-5.44
아산26	4.35	-7.28	1.78	-5.75
이원24	4.13	-6.94	2.40	-6.60
상주23	1.84	-3.17	1.73	-4.27
영덕23	1.06	6.00	2.45	3.86
업정25	2.84	-8.07	2.84	-6.61
당진	1.51	-5.96	2.73	-5.89
부안11	-0.06	-2.60	0.50	-5.88
청주11	2.12	-8.71	2.29	-7.40
마산21	1.28	-0.20	-0.95	-2.24
수원	1.00	-7.54	1.28	-5.02
영암	3.01	-8.67	2.34	-7.25
고흥21	-0.95	-4.66	-0.17	-6.01
울진22	4.85	7.02	3.29	5.21

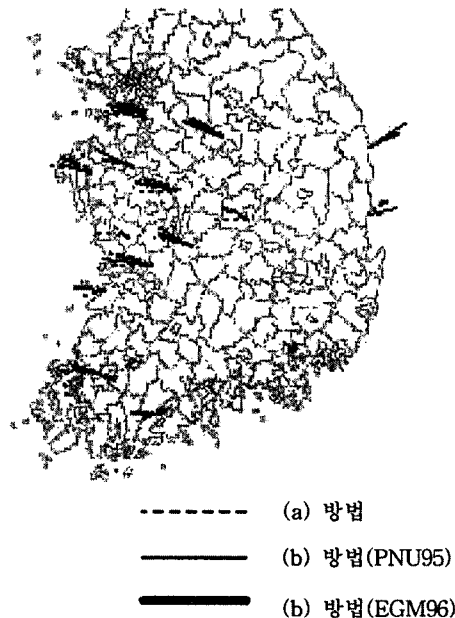


그림 1. (a)방법 및 (b)방법에 의한 연직선 편차

표 3. (c) 방법에 의한 연직선 편차

삼각점	PNU95		EGM96	
	$\xi(^{\circ})$	$\eta(^{\circ})$	$\xi(^{\circ})$	$\eta(^{\circ})$
용인21	1.90	-5.22	1.31	-5.66
전주21	1.97	-6.87	2.14	-6.83
한산11	1.35	-6.18	1.66	-6.03
아산26	1.46	-6.45	1.70	-6.11
이원24	2.53	-6.90	2.65	-6.15
상주23	2.11	-5.17	2.19	-5.26
영덕23	1.65	2.37	1.83	2.65
업정25	2.77	-6.30	2.07	-6.80
당진	1.82	-6.08	2.24	-6.04
부안11	1.10	-5.72	1.07	-6.57
청주11	2.53	-6.83	2.45	-6.48
마산21	-0.40	-2.70	-0.29	-2.05
수원	1.66	-5.26	1.20	-5.59
영암	1.26	-7.59	1.84	-7.21
고흥21	0.06	-5.53	0.44	-5.95
울진22	3.24	3.25	3.03	3.48

표 4. (d) 방법에 의한 연직선 편차

삼각점명	PNU95		EGM96	
	$\xi(^{\circ})$	$\eta(^{\circ})$	$\xi(^{\circ})$	$\eta(^{\circ})$
용인21	1.80	-6.80	1.59	-5.30
전주21	1.27	-9.76	1.84	-7.70
한산11	1.45	-4.39	1.75	-5.41
아산26	4.47	-7.28	1.80	-5.77

5. 비 교

방법간의 비교를 위해서 동일한 지오이드 모델로부터 각기 다른 방법으로 구한 연직선 편차의 차이를 살펴보았다.

표 5는 주위의 보조점을 동서남북 방향으로 1분 간격으로 설정해 계산한 방법(b)와 30분 간격으로 설정해 계산한 방법(c)에 의한 결과의 차이를 각각 PNU95, EGM96에 대해서 나타내고 있다.

표 6, 7은 동일한 지오이드 모델에 대해 1분 간격으로 규칙적으로 주변의 점을 선정한 방법(b)와 비슷한 거리로 각 방향으로 분포해 있는 점에 대한 GPS 기선해석 결과를 이용한 방법(d)를 이용해 구한 연직선 편차의 차이를 PNU95와 EGM96에 대해서 나타내고 있다.

연직선 편차의 차이값들을 평가하기 위해서 그 절대

표 5. (b)방법과 (c)방법에 의한 결과의 차이

삼각점	PNU95		EGM96	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	-0.34	-1.61	0.08	0.50
전주21	-0.58	-2.73	-0.02	-0.71
한산11	-0.01	2.19	0.07	0.59
아산26	2.89	-0.83	0.08	0.36
이원24	1.60	-0.04	-0.25	-0.45
상주23	-0.27	2.00	-0.46	0.99
영덕23	-0.59	3.63	0.62	1.21
업정25	0.07	-1.77	0.77	0.19
당진	-0.31	0.12	0.49	0.15
부안11	-1.16	3.12	-0.57	0.69
청주11	-0.41	-1.88	-0.16	-0.92
마산21	1.68	2.50	-0.66	-0.19
수원	-0.66	-2.28	0.08	0.57
영암	1.75	-1.08	0.50	-0.04
고흥21	-1.01	0.87	-0.61	-0.06
울진22	1.61	3.77	0.26	1.73
절대값의 평균	0.93	1.90	0.36	0.58

표 6. (b)방법과 (d)방법에 의한 결과의 차이(PNU95)

삼각점	PNU95(b)-PNU95(d)	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	-0.24	-0.03
전주21	0.12	0.16
한산11	-0.11	0.40
아산26	-0.12	0.00
절대값의 평균	0.15	0.15

표 7. (b)방법과 (d)방법에 의한 결과의 차이(EGM96)

삼각점	EGM96(b)-EGM96(d)	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	-0.20	-0.14
전주21	0.28	0.16
한산11	-0.02	-0.03
아산26	-0.02	0.02
절대값의 평균	0.13	0.09

값의 평균을 계산하였다.

1분 간격으로 보조점을 선정한 (b)방법과 30분 간격으로 보조점을 선정한 (c)방법에 의한 연직선 편차의 차이는, PNU95의 경우 평균적인 차이가 ξ 는 0.93", η

는 1.90", EGM96의 경우는 각각 0.36", 0.58"로서, 이는 1'×1'으로 된 PNU95가 30'×30' 자료를 기초로 만들어진 EGM96보다 지오이드의 변화를 더 잘 반영하고 있음을 보여준다.

지오이드 모델로부터 연직선 편차를 구할 때, 동서남북으로 1분 간격으로 규칙적으로 보조점을 정하여 구하는 (b)방법과 각 방향으로 비슷한 거리로 분포해있는 GPS 성과를 이용하는 (d)방법간의 차이는, PNU95의 경우 연직선 편차성분 차이의 평균이 ξ 와 η 모두 0.15"이었으며, EGM96은 ξ 와 η 가 각각 0.13", 0.09"로서 동일한 지오이드 모델이라도 보조점의 선정 방법에 따라 이와 같은 차이를 보였다.

지오이드 모델간의 결과 비교를 위해서 (b)방법, (c)방법, 그리고 (d)방법에 대해 각각 EGM96과 PNU95에 의한 결과의 차이를 구해본 결과 표 8-10과 같았다.

1분 간격의 보조점을 사용하는 방법(b), 30분 간격의 보조점을 사용하는 방법(c), 비슷한 거리로 각 방향에 분포해 있는 GPS 성과를 사용하는 방법(d)에 의한 PNU95와 EGM96의 결과의 차이는, (b) 방법의 경우, ξ 는 0.91", η 는 1.60", (c) 방법의 경우, ξ 는 0.29", η 는 0.37", (d)방법의 경우 ξ 는 0.94", η 는 1.52"이며, 1분 간

표 8. (b)방법에 의한 PNU95와 EGM96 결과의 차

삼각점	연직선 편차의 차	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	0.17	-1.67
전주21	-0.73	-2.06
한산11	-0.39	1.45
아산26	2.57	-1.53
이원24	1.73	-0.34
상주23	0.11	1.10
영덕23	-1.39	2.14
엄정25	0.00	-1.46
당진	-1.22	-0.07
부안11	-0.56	3.28
청주11	-0.17	-1.31
마산21	2.23	2.04
수원	-0.28	-2.52
영암	0.67	-1.42
고흥21	-0.78	1.35
울진22	1.56	1.81
절대값의 평균	0.91	1.60

표 9. (c)방법에 의한 PNU95와 EGM96결과와 차

삼각점	연직선 편차의 차	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	0.59	0.44
전주21	-0.17	-0.04
한산11	-0.31	-0.15
아산26	-0.24	-0.34
이원24	-0.12	-0.75
상주23	-0.08	0.09
영덕23	-0.18	-0.28
엄정25	0.70	0.50
당진	-0.42	-0.04
부안11	0.03	0.85
청주11	0.08	-0.35
마산21	-0.11	-0.65
수원	0.46	0.33
영암	-0.58	-0.38
고흥21	-0.38	0.42
울진22	0.21	-0.23
절대값의 평균	0.29	0.37

표 10. (d)방법에 의한 PNU95와 EGM96 결과의 차

삼각점명	지오이드 모델	PNU95(d)-EGM96(d)	
		$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21		0.21	-1.50
전주21		-0.57	-2.06
한산11		-0.30	1.02
아산26		2.67	-1.51
절대값의 평균		0.94	1.52

격의 (b)방법보다 30분 간격의 (c)방법에 의한 두 모델간의 차이가 더 작게 나타났는데, 이는 연직선 편차를 구하기 위한 보조점의 거리를 길게 할수록 1'×1'의 PNU95도 정확도가 떨어져 EGM96과 비슷해지는 결과를 초래했기 때문이다. 따라서, 지오이드 모델로부터 연직선 편차를 구할 때, 보조점의 간격을 지오이드모델의 분해능을 고려하여 설정해야 하며 더 정확한 계산을 위해서는 Vening Meinesz 공식으로 전 영역에 대해 중력이상값을 적분해야 한다.

천문측량성과를 이용한 결과와 지오이드 모델을 이용한 결과를 비교해 보았다. 표 11은 천문측량성과를 이용하는 (a)의 방법에 의한 결과에서 PNU95, EGM96을 이용해 (b)의 방법으로 구한 각각의 결과를 뺀 값

표 11. (a)방법과 (b)방법에 의한 결과의 차(PNU95, EGM96)

삼각점	연직선 편차의 차		연직선 편차의 차	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	-0.31	-1.20	-0.14	-2.87
전주21	-1.55	0.64	-2.28	-1.42
한산11	-0.32	-2.12	-0.71	-0.67
아산26	-0.58	-0.06	1.99	-1.59
이원24	-2.01	-0.93	-0.28	-1.27
상주23	-2.10	-2.78	-1.99	-1.68
영덕23	-1.42	-2.21	-2.81	-0.07
엄정25	-1.28	-2.61	-1.28	-4.07
당진	-0.59	-2.40	-1.81	-2.47
부안11	-1.33	-2.20	-1.89	1.08
청주11	-2.39	0.64	-2.56	-0.67
마산21	0.21	-3.08	2.44	-1.04
수원	-2.46	-0.21	-2.74	-2.73
영암	-2.11	6.97	-1.44	5.55
고흥21	-0.71	0.55	-1.49	1.90
울진22	-2.14	-0.81	-0.58	1.00
절대값의 평균	1.34	1.84	1.65	1.88

표 12. (a)방법과 (c)방법에 의한 결과의 차(PNU95, EGM96)

삼각점	연직선 편차의 차		연직선 편차의 차	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	-0.65	-2.81	-0.06	-2.37
전주21	-2.13	-2.09	-2.30	-2.13
한산11	-0.33	0.07	-0.64	-0.08
아산26	2.31	-0.89	2.07	-1.23
이원24	-0.41	-0.97	-0.53	-1.72
상주23	-2.37	-0.78	-2.45	-0.69
영덕23	-2.01	1.42	-2.19	1.14
엄정25	-1.21	-4.38	-0.51	-3.88
당진	-0.90	-2.28	-1.32	-2.32
부안11	-2.49	0.92	-2.46	1.77
청주11	-2.80	-1.24	-2.72	-1.59
마산21	1.89	-0.58	1.78	-1.23
수원	-3.12	-2.49	-2.66	-2.16
영암	-0.36	5.89	-0.94	5.51
고흥21	-1.72	1.42	-2.10	1.84
울진22	-0.53	2.96	-0.32	2.73
절대값의 평균	1.58	1.95	1.57	2.02

표 13. (a) 방법과 (d) 방법에 의한 결과의 차(PNU95)

삼각점명	지오이드 모델 (a)방법-(d)방법(PNU95)	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	-0.55	-1.23
전주21	-1.43	0.80
한산11	-0.43	-1.72
아산26	-0.70	-0.06
절대값의 평균	0.78	0.95

표 14. (a) 방법과 (d) 방법에 의한 결과의 차(EGM96)

삼각점명	지오이드 모델 (a)방법-(d)방법(EGM96)	
	$\Delta\xi(^{\circ})$	$\Delta\eta(^{\circ})$
용인21	-0.34	-2.73
전주21	-2.00	-1.26
한산11	-0.73	-0.70
아산26	-1.97	-1.57
절대값의 평균	1.26	1.57

을 나타낸다. 표 12는 (a)의 방법과 (c)의 방법에 의한 결과의 차이를 각각 PNU95, EGM96에 대해서 나타내고 있다.

(a)방법과 지오이드 모델로부터 구하는 (b)방법의 차이는, 평균적인 차이가 PNU95의 경우 ξ 는 1.34", η 는 1.84", EGM96의 경우 ξ 는 1.65", η 는 1.88"이다.

표 13, 14는 (a)의 방법과 불규칙적으로 분포된 점에 대한 GPS성과를 이용하는 (d)의 방법간의 차를 각각 PNU95와 EGM96 지오이드 모델에 대해서 나타낸 것이다.

6. 결 론

천문측량성과 및 GPS 성과를 이용해 계산한 연직선 편차와 지오이드 모델로부터 계산한 연직선 편차를 비교한 결과 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1) 천문경위도를 이용해 구한 연직선 편차와 중력지오이드 모델로부터 구한 연직선 편차는 대부분 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

2) 규칙적인 보조점을 사용하여 지오이드 모델로부터 연직선 편차를 구하는 경우 PNU95와 EGM96 간의 연직선 편차 차이가 천문측량성과에 의한 연직선 편차와 지오이드 모델로부터 구한 연직선 편차간의 차이보다 전반적으로 더 작음을 알 수 있었다.

3) 지오이드고를 이용해 연직선 편차를 구할 때 보조점의 분포모양에 의한 영향보다 사용데이터가 결과에 미치는 영향이 더 크며, 향후 연직선 편차의 기준데이터가 구축된다면 본 방법으로 지오이드모델의 정확도를 평가할 수 있을 것이며 중력측정의 점밀도를 높이거나 재측정을 할 지점을 예측할 수 있을 것이다.

參考文獻

1. 강준목, 김홍진, 보간방법에 의한 WGS84 지오이드고 결정에 관한 연구, 한국측지학회지, 제13권, 제2호, 1995, 237-244.
2. 강준목, 박운용, 김홍진, 최종현, GPS/levelling 기법과 연직선 편차를 이용한 Bessel 지오이드고 산정에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제15권, 제4호, 1995, 945-952.
3. 강준목, 오원진, 손홍규, 이용욱, 천문경위도 결정에 있어서 GPS의 응용가능성 검토, 한국지형공간정보학회논문집, 제 3권 2호, 1995년 12월, 75-82.
4. 권대원, 윤홍식, 최재화, 7-매개변수 좌표변환에 의한 우리나라 측지계와 WGS-84의 좌표변환, 한국측지학회지, 제13권, 제2호, 1995, 117-124.
5. 박필호, 박종욱, 강준목, GPS 실용화를 위한 우리나라 측지계와 WGS84의 좌표변환(II), 한국측지학회지, 제 11권, 제1호, 1993, 37-45.
6. 박필호, 한인우, 이영창, 강준목, GPS 실용화를 위한 우리나라 측지계와 WGS84의 좌표변환(I), 한국측지학회지, 제10권, 제1호, 1992, 41-50.
7. 백은기, 목찬상, 이종혁, 우리나라 天文지오이드에 관한 연구, 한국측지학회지, 제3권, 제2호, 1985, 14-15.
8. 양철수, GPS를 이용한 실험측량과 현행좌표계상의 위치 산출, '98 GPS Workshop, 561-574.
9. 유복모, 측량학원론(II), 傳英社, 407-408.
10. 이영진, 베셀타원체 기준의 남한지역 지오이드 모델 (KGM95), 한국측지학회지, 제13권, 제2호, 1995, 125-133.
11. 최광선, 김정희, 양철수, 중력과 GPS자료의 해석에 의한 한반도 남부의 정밀 지오이드(PNU95 지오이드), 박희인 교수 정년퇴임 기념집, 1997, 218-225.
12. B. Hofmann-Wellenhof, etc, Global Positioning System-Theory and Practice, Springer-Verlag Wien NewYork, 134-136.
13. Edward Mogilevsky and Yosef Meizer, Determining deflection of vertical with GPS, ION-GPS 94, 371-374.
14. F. G. Lemoine, R. H. Rapp, etc, The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model, Proceedings paper for the International Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy(GRAGEOMAR 1996).
15. Helmut Moritz, Physical Geodesy, W.H.Freeman and Company San Francisco.