

정밀 지오이드 구축을 위한 자료처리의 최적 변수 결정

이 지 선* · 권 재 현**

Determination of the Optimal Parameters in Data Processing for the Precision Geoid Construction

Lee, Jisun* · Kwon, Jay Hyoun**

요 약

기존의 우리나라 지상중력자료는 자료의 분포 및 정밀도에 있어서 문제점을 가지고 있었고 이러한 문제를 해결하기 위하여 2008년 항공중력측정을 통하여 정밀도 1.56mGal의 항공중력자료를 확보한 바 있다. 그러나 항공중력자료는 비행고도 상에서 획득된 값으로 기존의 지상중력자료 및 해상중력자료와 병합하기 위해서는 지표면 상의 값으로 환산되어야 한다. 또한 다양한 자료를 융합하여 정밀한 지오이드를 계산하기 위해서는 Stokes' 적분반경, Stokes' kernel 및 지형 효과 계산 반경 등의 많은 변수들을 최적으로 고려하여야 한다. 본 연구에서는 지상 및 항공중력자료의 분포 및 특성을 고려하여 보다 정밀한 지오이드 결정을 위한 최적의 매개변수들을 결정하고자 하였다. 선정된 최적 변수들을 적용하여 지오이드를 계산한 결과, 항공중력 및 지상중력 기반의 두 지오이드는 평균 -16.95cm, 표준편차 ± 8.50 cm의 차이를 나타내었는데, 이는 지상 및 항공중력자료의 분포와 지상중력자료에 포함된 오차에 기인한 것으로 판단된다. 향후 본 연구에서 고려한 매개변수 외에도 다양한 하향연속 방법, 지형효과 계산 방법이 지오이드에 미치는 효과와 추가적으로 확보한 중력 및 GPS/Leveling 자료, 해상중력자료를 포함하였을 때의 효과에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

주요어 : 정밀지오이드, 하향연속, 최적변수

ABSTRACT : To solve the problems of distribution and quality on land gravity data, airborne gravity survey was performed in 2008 obtaining the airborne gravity data with accuracy of 1.56mGal. Since airborne gravity data is the obtained at the flight height, it is necessary to convert the airborne gravity data to the surface to combine various gravity data and compute precision geoid. In addition, Stokes' integral radius, Stokes' kernel and the radius of terrain effect computation should be optimally determined to calculate precision geoid. In this study, we made an effort to decide the optimal parameters based on the distribution and the characteristic of gravity data. Then, two geoid models were calculated using the selected parameters and the difference of geoid was calculated with mean of -16.95cm and the standard deviation of ± 8.50 cm. We consider that this difference is due to the distribution and errors on the gravity data. For future work, the study on the effect of geoid with newly obtained land gravity data ship-borne gravity data and GPS/Leveling data should be conducted. Furthermore, the study on the downward continuation and terrain effect calculation should be studied in detail for better precision geoid construction.

Keywords : Precision Geoid, Downward continuation, Optimal parameter

*서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정(leejs@uos.ac.kr)

**교신저자, 서울시립대학교 공간정보공학과 부교수(jkwon@uos.ac.kr)

1. 서 론

한 나라의 수직기준면이 되는 지오이드는 대상 지역 전반에 걸쳐서 고른 분포와 일관된 정밀도를 보유한 중력, 지형자료가 바탕이 되었을 때 구축할 수 있는 가상의 면이다. 국내에서도 지오이드 모델을 구축하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔지만(이석배, 2004; 해양수산부, 2005), 이러한 연구들에서는 지상중력자료가 지역적으로 편향되어 분포하고 지상과 해상중력자료 사이에 공백이 존재하며, 지상중력자료의 정밀도가 고르지 못하다는 문제점 때문에 정밀도를 향상시키는데 한계가 있다는 공통점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 우리나라에서는 항공중력측정을 수행하여 국토 전반에 걸쳐 정밀도 1.56mGal의 항공중력자료를 획득한 바 있다(이지선 등, 2009a).

그러나 항공중력측정을 통하여 획득한 자료는 지상중력자료와 비교하였을 때 상대적으로 완만한 중파장 대역의 신호로 실제 지형의 세세한 영향까지 반영하는 데는 한계가 있다. 따라서 보다 정밀한 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 항공, 지상중력자료 및 해상중력자료를 최적으로 융합하여 이용하여야 한다.

다양한 자료를 융합하여 지오이드 모델을 구축하기 위해서는 전지구적인 영향 및 지형의 영향을 제거 및 복원하고, Stokes' 적분을 수행하는 일련의 지오이드 계산 과정에 있어서 최적의 변수들을 결정하여야 한다. 동시에 항공중력측정 자료는 측정의 특성 상 비행고도 상에서의 측정값이기 때문에 지상을 기준으로 한 값으로 환산하는 하향연속이 동반되어야 한다.

이 때, 지오이드 계산에 있어서의 최적의 변수의 결정은 자료의 특성에 따라 바뀔 수 있다. 따라서 본 연구에서는 향후 중력자료의 최적 융합 및 지오이드 구축을 위한 연구의 기초연구로서 항공 및 지상중력자료 각각에 대하여 자료의 특성을 고려하여 최적의 변수를 결정하고자 하였다.

$$\xi = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint (\Delta g + g_1) S(\psi) \cos\phi d\phi d\lambda \tag{1}$$

$$S(\psi) = \frac{1}{\sin(\psi/2)} - 6\sin\frac{\psi}{2} + 1 - 5\cos\psi - 3\cos\psi \ln\left(\sin\frac{\psi}{2} + \sin^2\frac{\psi}{2}\right)$$

- ξ : 의사지오이드고
- ϕ, λ : 경위도좌표
- Δg : 중력이상값
- g_1 : Molodensky 첫 번째 항
- R : 지구반경
- ψ : 섭동포텐셜 계산지점과 표면요소 사이의 구면거리
- σ : 면적분 요소

그러나 현실적으로 지역적으로 국한된 자료를 이용하여 지역적인 지오이드 모델을 구축하기 때문에 이러한 지역적인 지오이드는 전지구적인 중력과 지형에 의한 효과를 반영하지 못한다는 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제에 기인한 오차를 최소화하기 위하여 지역적인 지오이드는 지구 전체에 대한 장파장 효과와 지형에 대한 단파장 효과를 제거한 후 복원하는 제거 및 복원(Remove & Restore) 기법을 적용한다. 이 때 오차를 줄이고, 정밀한 지오이드를 계산하기 위해서는 Stokes' 적분반경, Stokes' kernel 및 전지구중력의 영향과 지형 효과의 제거 및 복원 반경을 적절하게 결정하여야 하며, 동시에 항공중력자료의 경우는 비행고도 상의 값이므로 이를 지표면 상의 값으로 환산하는 하향연속이 수행되어야 한다.

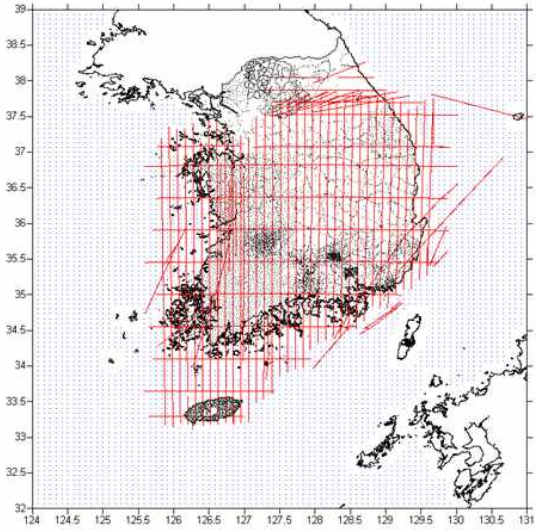
본 연구에서는 앞서 언급한 요소들 중에서 Stokes' 적분반경, Stokes' kernel과 지형효과 복원반경을 적절히 결정하고, 이를 적용하여 지오이드 모델을 구축하고자 하였다. 지오이드 계산은 GRAVSOFT를 이용하였으며(Forsberg 등, 2003), 일련의 연구 흐름은 [그림 1]과 같다.

2. 연구방법

이론적으로 지표면에 위치하는 중력이상값 Δg 를 이용하여 지오이드를 계산하기 위해서는 Molodensky 적분식을 이용하는데(식 1; Heiskanen and Moritz, 1967, 식에서 알 수 있듯이 지오이드를 계산하기 위해서는 전 지구에 연속적인 중력자료가 존재하여야 한다.



[그림 1] 연구흐름도



[그림 2] 중력자료 분포도

본 연구에서는 지오이드를 계산하기 위하여 EGM08 지구중력장 모델과 SRTM 지형자료를 이용하였다. 기존의 연구를 살펴보았을 때, EGM08 지구중력장 모델은 우리나라의 500점의 GPS/Leveling 자료와 비교하였을 때 약 18cm의 정밀도를 가지고 있는 자료이고(Lee 등, 2008), SRTM 지형자료는 수평 및 수직오차가 각각 20m 이내, 16m 이내로 알려져 있는 지형모델이다(Farr 등, 2007). 또한 중력자료로는 정밀도 약 0.5mGal의 지상중력자료와 약 1.56mGal의 항공중력자료를 이용하였고, 바다지역에 대해서는 덴마크 우주측지국(Danish National Space Center)에서 개발한 DNSC08 위성고도계 자료를 동일하게 적용하였다[그림 2]. DNSC08 위성고도계 자료는 전 세계에 걸쳐 1~2km 해상도로 제공하는 자료로서, EGM08 전지구중력장 모델을 적용하여 개선한 것으로 약 3.91mGal의 정밀도를 갖는 것으로 알려져 있다(Andersen 등, 2008).

본 연구에서 이용된 자료의 분포, 특성 및 정밀도와 관련된 상세한 내용은 기존의 연구에서 찾아볼 수 있다(이지선 등, 2009b).

3. 최적 변수 선정

3.1 하향연속 결정

서론에서 언급한 바와 같이 항공중력자료는 비행고도 상의 값이다. 따라서 지오이드를 계산하고 향후 지상중력자료 및 해상중력자료와 융합하여 이용하기 위해

서는 지표면 상의 값으로 변환하여야 하는데, 이 과정을 하향연속이라 한다. 이러한 하향연속은 FFT(Fast Fourier Transform) 또는 최소제곱콜로케이션(LSC; Least Square Collocation)을 이용하여 수행될 수 있는데, 본 연구에서는 최소제곱콜로케이션을 이용하였다.

최소제곱콜로케이션에 의한 하향연속은 식 (2)에서 나타내는 바와 같이 자료의 높이와 하향연속 후 높이에 대하여 Bjerhammar 구의 깊이인 D와 장파장 감쇠 변수인 T의 조합으로 표현된다(Forsberg, 1987).

$$C(\Delta g^{h_1}, \Delta g^{h_2}) = - \sum_i \alpha_i \log(D_i + \sqrt{s^2 + (D_i + h_1 + h_2)^2}) \quad (2)$$

여기서,

$$s = \sqrt{x^2 + y^2}$$

h_1 : 하향연속 후 높이

h_2 : 자료의 높이

α_i : 가중치

$D_i = D + nT$

D : Bjerhammar 구의 깊이

T : 장파장 감쇠 변수

n : 정수

따라서 비행고도 상에서 측정된 자료를 지표면 상의 값으로 환산하기 위해서는 Bjerhammar 구의 깊이와 장파장 감쇠 변수를 적절히 결정해주어야 한다. 이 때, 최적의 두 변수는 하향연속 후 지오이드를 계산하여 GPS/Leveling 자료와의 차이가 최소가 될 때를 기준으로 하였다.

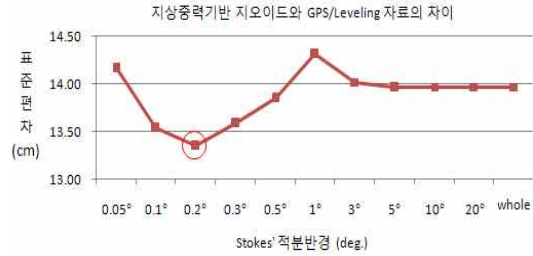
경험적으로 항공중력자료를 하향연속할 때 Bjerhammar 구의 깊이는 10km, 장파장 감쇠 변수는 10~100km의 값을 이용하므로(Forsberg, 2002), 본 연구에서는 Bjerhammar 구의 깊이를 10km, 장파장 감쇠 변수는 10km, 25km, 40km, 50km, 75km, 100km로 나누어 적용하였으며 결과는 다음 <표 1>과 같다. 여기서 자료의 정밀도는 가중치 (α_i)를 부여하기 위함으로, 본 값은 장파장 및 단파장 효과를 제거한 잔여중력이상값의 표준편차이다.

<표 1>을 살펴보면, 우리나라의 항공중력자료는 Bjerhammar 구 깊이를 10km, 장파장 감쇠 변수는 10km 일 때 GPS/Leveling 자료와 차이의 평균이 -17.51cm, 표준편차 14.84cm로 부합도가 가장 높음을 알 수 있다. 또한, 우리나라에서는 동일한 Bjerhammar 구 깊이일 때, 장파장 감쇠 변수가 작을수록 지상중력자료와의 차이가 작게 나타났다. 그러나 장파장 감쇠 변수에 의한 영향에 의한 차이가 최대 2.6mm로 지오이드에 미치는 영향은 크지 않음을 알 수 있었다.

<표 1> 하향연속 변수 결정

단위 : cm

정밀도	D	T	Mean	STD
8.27	10	10	-17.51	14.84
8.27	10	25	-17.63	14.96
8.27	10	40	-17.69	15.03
8.27	10	50	-17.72	15.06
8.27	10	75	-17.77	15.10
8.27	10	100	-17.79	15.11



[그림 3] 지상중력자료의 Stokes' 적분반경 결정

<표 2> 지상중력자료의 Stokes' 적분반경 결정

단위 : cm

	0.05°	0.1°	0.2°	0.5°	1°	5°	10°	20°	전영역
Mean	-18.42	-18.42	-18.45	-17.47	-18.12	-17.78	-17.76	-17.76	-17.76
STD	14.16	13.54	13.35	13.85	14.31	13.96	13.97	13.97	13.97

3.2 Stokes' 적분 반경 결정

식 1에 의하여 지역적인 지오이드를 계산할 경우, 기반이 되는 중력자료가 대상지역에 국한되어 있기 때문에 장파장 및 단파장 신호에 의한 영향 때문에 발생하는 오차를 제거하기 위해서는 자료의 정밀도와 분포를 고려하여 최적의 Stokes' 적분 반경을 결정하여야 한다 (Forsberg 등, 1998).

특히, 우리나라의 지상중력자료의 경우는 지역적으로 편향되어 분포할 뿐 아니라, 산악지역의 경우 도로에서 측정되어 실제 지형에 의한 영향을 반영하는데 한계가 있다. 또한 일부 자료의 경우는 자료의 측정 시기, 정밀도 등을 알 수 없기 때문에 넓은 적분 반경을 이용할 경우 오히려 자료에 존재하는 오차가 지오이드에 있어서 오차로 작용할 수 있다. 따라서 지상중력자료의 경우 적절한 Stokes' 적분반경의 결정이 필수적이다.

반대로 항공중력자료는 약 2개월 동안 연속적으로 측정된 자료이며, 우리나라 전역에서 고른 분포로 존재하고 정밀도 역시 일관된다는 특성에 따라 전 영역을 적분반경으로 하였다.

본 연구에서는 지상중력자료를 기반으로 지오이드를 구축함에 있어 0.05°부터 전 영역까지 다양한 Stokes' 적분반경을 적용하여 장파장 및 단파장 신호에 의한 오차를 최소화하고자 하였다. 이 때 최적의 변수는 구축된 지오이드와 GPS/Leveling 자료에 의한 기하학적 지오이드와의 차이가 최소가 될 때를 기준으로 하였다. 그 결과 [그림 3]과 <표 2>에서 나타내는 바와 같이 적분반경을 0.2°로 하였을 때, 평균 -18.45cm, 표준편차 13.35cm로 최적임을 알 수 있었다.

3.3 Stokes' kernel 결정

앞서 적절한 Stokes' 적분반경을 결정함으로써 장파장 신호와 단파장 신호로부터 유입되는 오차 요인들을 최소화하고자 하였다. 그러나 적절한 적분 반경을 결정하였더라도, 이론적으로 지오이드고를 계산하기 위한 Stokes' 적분이 최소 차수부터 전지구중력장 모델을 적용하고자 하는 차수를 최대차수로 하여 적용되므로 장파장 및 단파장 신호가 적절히 제거되지 않았다면 정확한 지오이드고를 계산할 수 없다. 다시 말해서 장파장 효과를 제거하기 위한 전지구중력장 모델에 오차가 존재한다면 이는 지오이드 모델에 오차로 작용할 수 있다.

특히, 우리나라의 경우는 EGM08을 비롯하여 EIGEN02 모델 등 다양한 전지구중력장 모델을 계산함에 있어 중력자료가 포함되어 있지 않기 때문에 우리나라에서 전 지구중력장 모델을 적용하는데 있어서 오차가 최소가 되도록 신뢰할 수 있는 최적의 차수를 결정하여야 한다.

본 연구에서는 적절한 차수를 결정하기 위하여 식 3에서와 같이 Wong 등이 제안한 Modified Stokes' kernel (또는 Wong-gore modification)을 이용하였다 (Wong 등, 1969). Modified Stokes' kernel은 기존의 Stokes 함수로부터 N_2 까지의 구면조화함수를 제외한 것으로, 이렇게 계산된 Modified Stokes' kernel은 전지구중력장 모델에서 N_2 차수 이상의 신호에 대한 필터링 효과로 나타난다. 다시 말해서 N_2 이하의 차수에 대해서는 전지구중력장 모델을 신뢰하고 이용하지만, 이상의 차수에 대해서는 상대적으로 신뢰도가 떨어지기 때문에 필터링 하여 완만한 신호로 적용하는 것이다.

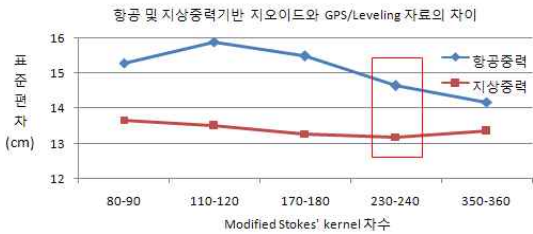
$$S_{\text{mod}}(\psi) = S(\psi) - \sum_{n=2}^{N_2} \alpha(n) \frac{2n+1}{n-1} P_n \cos(\psi) \quad (3)$$

$$\alpha(n) = \begin{cases} 1 & \text{for } 2 \leq n \leq N_1 \\ \frac{N_2 - n}{N_2 - N_1} & \text{for } N_1 \leq n \leq N_2 \\ 0 & \text{for } N > n > N_2 \end{cases}$$

여기서, $S_{\text{mod}}(\psi)$: Modified Stokes' kernel
 $S(\psi)$: Stokes' kernel
 $\alpha(n)$: 계수
 N_1, N_2 : Kernel의 차수

따라서 적절한 최대 차수인 N_2 를 결정하는 것이 중요
 한데, 본 연구에서는 Modified Stokes' kernel을 적용하여
 지오이드를 계산하고 이를 GPS/Leveling 자료와 비교하
 여 차이가 최소가 될 때를 선정하였다. 이 때, N_1 은 N_2
 값에 대하여 10차수 적은 값을 일관되게 적용하였다.

그 결과 항공중력자료를 기반으로 하였을 때는
 350-360일 때 14.18cm, 지상중력자료를 기반으로 하였을
 때는 230-240일 때 표준편차가 13.19cm로 GPS/Leveling
 자료와의 차이가 최소로 나타났다. 그러나 본 연구에서
 는 항공 및 지상중력자료를 기반으로 하는 두 지오이드
 모델 모두에서 최적의 변수를 찾고자 하므로, 공통적으
 로 높은 적합도를 나타내는 차수 230-240일 때를 최적
 으로 선정하였다[그림 4]; <표 3>.

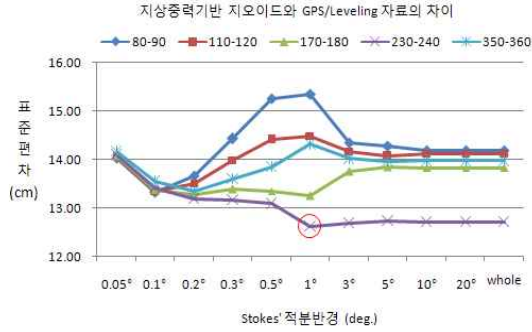


[그림 4] 항공 및 지상중력자료의 Stokes' kernel 결정

<표 3> Wong-gore 차수 선정 및 결과

	단위 : cm				
	80-90	110-120	170-180	230-240	350-360
항공	15.30	15.90	15.49	14.64	14.18
지상	13.67	13.51	13.28	13.19	13.35

그러나 앞서 결정하였던 Stokes' 적분반경과 본 단계
 에서 결정한 Stokes' kernel은 서로 독립적인 요소가 아
 니다. 따라서 두 변수에 의한 영향을 함께 포함하고 있
 는 지상중력자료의 지오이드 모델을 계산할 때는
 GPS/Leveling과 차이가 최소가 되도록 하는 Stokes' 적
 분반경과 Stokes' kernel 두 변수를 동시에 결정하여야



[그림 5] 지상중력자료의 Stokes' 적분반경 및 Stokes' kernel 결정

한다. 따라서 앞서 0.05°부터 전 영역까지 고려하였던
 Stokes' 적분반경과 80부터 350까지 고려하였던 Stokes'
 kernel을 조합 및 적용하여 최적의 변수를 찾고자 하였
 다. 그 결과 다음 [그림 5]에서와 같이 지상중력자료를
 기반으로 한 지오이드는 Stokes' 적분반경이 1°이고,
 Modified Stokes' kernel이 230-240일 때 차이의 표준편
 차가 12.62cm로 최적임을 알 수 있었다.

3.4 지형자료의 복원 반경 결정

제거 및 복원 방법에 의하여 지오이드를 계산함에
 있어 원칙은 제거한 양과 복원한 양이 동일하여야 한다
 는 점이다. 이 때 항공중력자료의 경우는 비행고도 상에
 서 장파장 및 단파장 효과를 뺀 후에 하향연속을 수행하
 므로, 복원하는 양은 지표면 상에서의 값을 기준으로
 하여야 한다.

일반적으로 장파장 효과는 전지구중력장 모델로부
 터 계산되는 값으로 중파장 대역의 신호인 항공중력자
 료에 비하여 완만하므로 비행고도 상의 값과 지표면 상
 에서의 값이 큰 차이를 나타내지는 않는다. 그러나 지형
 에 의한 단파장 효과는 비행고도 상에서의 값보다 지표
 면 상에서의 값이 훨씬 크게 작용할 뿐 아니라, 비행고
 도 상에서 지형의 효과를 제거하기 위하여 약 200km의
 반경을 가정하였더라도 실제 반경 외의 지역에서 미치
 는 영향을 무시할 수 없다.

따라서 단파장 효과를 항공중력자료로부터 복원할
 때 비행고도 상에서 지형에 의한 효과를 제거한 반경과
 상응하는 지표면에서의 반경을 찾아야 한다.

본 연구에서는 지형의 효과를 200km로 제거한 후,
 지표면에서 200km, 300km, 400km, 500km까지 그 효과
 를 복원하여 지오이드를 계산하고 이를 GPS/Leveling
 자료와 비교하여 차이가 최소가 될 경우를 복원 반경으
 로 하였다.



[그림 6] 지형효과 복원반경 결정

<표 4> 지형효과 복원반경 결정

단위 : cm

	200km	300km	400km	500km
Mean	-17.26	-16.20	-15.28	-16.00
STD	14.65	14.64	14.07	14.42

다양한 복원 반경을 적용한 결과 비행고도 상에서 200km의 효과를 제거하고, 지상에서 400km를 복원할 때 표준편차 14.07cm로 최적임을 알 수 있었다[그림 6]; <표 4>.

4. 지오이드 구축 및 비교

앞서 3장의 연구를 통하여 하향연속 변수, Stokes' 적분반경, Stokes' kernel과 지형효과 복원반경에 대한 최적 변수는 [그림 7]과 같이 결정하였다. 본 장에서는 앞서 결정한 최적 변수를 적용하여 항공 및 지상중력자료를 기반으로 중력지오이드 모델을 구축하고, 정밀도 및 지오이드의 차이를 비교, 분석하였다.

4.1 지오이드의 정밀도 및 적합도

먼저 구축된 두 지오이드 모델을 살펴보면, 항공중력기반의 지오이드는 9.33m부터 33.79m 범위의 값을 나타내며, 평균 23.56m, 표준편차 5.24m이고, 지상중력기반 지오이드는 9.36m부터 33.90m까지의 값을 갖으며, 평

균은 23.57m, 표준편차는 5.24m로 계산되었다.

상기 두 지오이드 모델의 정밀도는 총 911점의 GPS/Leveling과 비교함으로써 검증하였는데, 그 결과 GPS/Leveling 자료와의 차이는 항공중력기반의 지오이드에서 평균 -15.28cm, 표준편차 14.07cm로 나타났다. 반면 지상중력기반의 지오이드는 평균 -16.22cm, 표준편차 12.62cm로 지상중력기반의 지오이드가 상대적으로 높은 정밀도를 나타내었다.

그러나 총 911점의 GPS/Leveling 자료 중 455점을 고정하여 합성지오이드를 계산하고, 나머지 455점과 비교하여 계산된 정밀도는 항공중력기반의 합성지오이드에서 5.55cm, 지상중력기반의 합성 지오이드에서는 5.72cm로 항공중력기반의 지오이드에서 더 높게 나타났다.

이는 항공중력자료에서 적용한 높이는 타원체고와 EGM08 전지구중력장 모델의 차이로부터 계산된 것으로 GPS/Leveling 자료와의 일관성이 지상중력자료에 비하여 떨어지기 때문에 발생하는 것이다. 따라서 일관된 분포 및 정밀도를 나타내는 항공중력자료를 GPS/Leveling 자료와 합성하면 적합도가 더 높게 나타난다.

4.2 항공중력 및 지상중력기반 지오이드의 비교

수치적으로 살펴보았을 때 두 지오이드 모델은 유사한 값을 나타내지만, 서로 차이를 살펴보면 [그림 8]과 같은 지역적인 차이를 보이며, 차이의 평균은 -16.95cm, 표준편차 ±8.50cm이다.

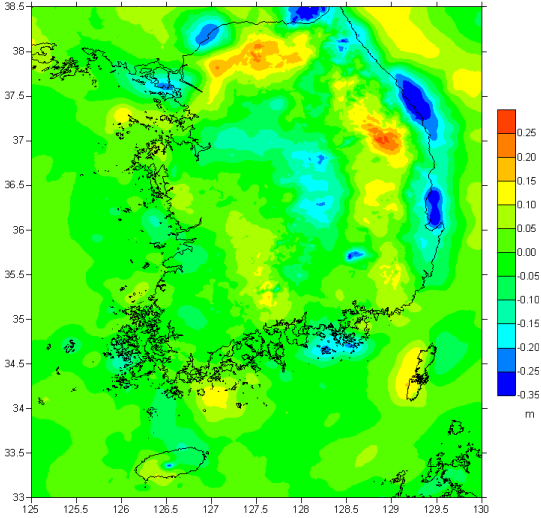
이러한 두 지오이드 모델의 차이는 크게 자료의 분포와 정밀도에 기인한 것으로 판단된다.

먼저 경기도 북부 지역의 경우는 비행제한구역으로 항공중력자료가 분포하지 않아 발생하는 오차이며, 연안지역은 지상중력자료와 위성고도계 자료 간에 공백이 존재하기 없음에 기인한 오차이다. 또한 태백산맥과 지리산 등 고산지역에서는 지상중력자료가 존재하지 않기 때문에 산 정상부에서 차이가 크게 나타난다.

반면에 경상도 일부 지역은 경우는 정밀도를 검증하는데 한계가 있는 자료(이지선 등, 2009b)가 포함되어

장파장 및 단파장 효과 제거	하향연속	잔여지오이드고 계산	장파장 및 단파장 효과 복원
<ul style="list-style-type: none"> 장파장 제거 자수 : 360° 단파장 제거 반경 : 200km 	<ul style="list-style-type: none"> Bjerhammar 구반경 : 10km 장파장 감쇠 변수 : 10km 	<ul style="list-style-type: none"> Stokes' 적분반경 항공 : 전 영역 / 지상 : 1° Stokes' kernel : 230-240° 	<ul style="list-style-type: none"> 장파장 제거 자수 : 360° 단파장 제거 반경 항공 : 400km / 지상 : 200km

[그림 7] 지오이드 계산을 위한 최적 변수



[그림 8] 항공 및 지상중력 기반 지오이드의 차이



[그림 9] 지상중력 및 GPS/Leveling 자료 보완지역

있는 곳으로, 본 지역은 자료에 포함된 오차가 지오이드에 있어서 차이로 나타난 것으로 판단된다. 이러한 오차를 제거하고 지오이드를 검증하기 위하여 [그림 9]에서 같이 지상중력 및 GPS/Leveling 보완측량을 수행하였다. 현재 획득한 자료에 대한 처리가 진행 중이므로 향후 자료를 포함하였을 때의 영향에 대한 분석도 필요할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 다양한 자료를 융합하고, 지오이드 모델을 구축하기 위한 기초연구로서 중력자료의 특성을 기반으로 지오이드 계산을 위한 최적 변수를 결정하고자 하였다. 항공중력자료의 하향연속을 위한 변수와 Stokes' 적분반경, Stokes' kernel 및 단과장 복원 반경을 고려하여 다음과 같은 최적 변수를 도출하였다.

첫째, 항공중력자료를 지표면 상의 값으로 환산하기 위한 하향연속은 Bjerhammar 구의 깊이가 10km, 장과장 감쇠 변수가 10km일 때 기존의 지상중력자료와 가장 잘 부합하도록 환산되었다.

둘째, 지상중력자료를 기반으로 하여 지오이드를 계산할 때, 지상중력자료의 분포 및 정밀도의 일관성의 결여 때문에 Stokes' 적분반경을 0.2°로 할 때 GPS/Leveling 자료와의 부합도가 가장 높게 계산되었다.

셋째, 전지구중력장 모델에 포함되어 있는 오차 때문에 항공 및 지상중력자료를 기반으로 지오이드를 구축할 때는 Stokes' kernel의 차수를 230-240으로 적용하여

야 GPS/Leveling 자료와의 차이가 최소로 나타났다.

그러나 Stokes' 적분반경과 Stokes' kernel의 차수는 종속적인 변수이므로 함께 고려하여야 하는데, 그 결과 지상중력자료를 기반으로 한 지오이드는 Stokes' 적분반경이 1°이고, Stokes' kernel의 차수가 230-240일 때 GPS/Leveling과 가장 부합도가 높게 계산되었다.

넷째, 항공중력자료는 비행고도에서 지형효과를 제거하고, 지표면 상에서 복원하므로 비행고도에서 200km를 제거하였을 때 지표면 상에서는 단과장 복원 반경을 400km로 하여야 GPS/Leveling과 부합도가 높게 산출되었다.

마지막 과정으로 앞서 선정된 최적 변수들을 적용하여 항공중력 및 지상중력기반의 지오이드 모델을 구축하였다. 항공중력기반의 지오이드는 9.33m부터 33.79m 범위의 값을 갖으며 중력지오이드와 GPS/Leveling 자료는 14.07cm의 정밀도를 나타내었고, 합성지오이드는 5.55cm로 계산되었다. 반면 지상중력기반의 지오이드의 GPS/Leveling과의 차이의 정밀도는 중력지오이드일 때 12.62cm이며, 합성지오이드의 경우는 5.72cm로 나타났다. 항공중력 및 지상중력기반의 지오이드 모델을 비교해본 결과, 두 지오이드 모델은 평균 -16.95cm, 표준편차 ±8.50cm의 차이를 나타내었다. 이러한 차이는 지상 및 항공중력자료의 분포와 지상중력자료에 포함된 오차에 기인한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지오이드를 계산하기 위한 변수 중 하향연속, Stokes' 적분반경, Stokes' kernel과 지형효과 복원 반경의 네 변수에 대하여 최적 값을 결정하였다. 그러나 지오이드를 구축할 때는 이 외에도 하향연속의

방법, 지형효과 계산 방법 등 다양한 변수들이 영향을 미치므로 이에 대한 추가적인 연구도 진행되어야 할 것이다. 더불어 기존 지상중력자료에 포함된 오차를 검증하기 위하여 수행된 중력측정 및 GPS/Leveling를 비롯하여 해상중력자료까지 포함하였을 때의 지오이드 개선에 대한 효과도 함께 분석되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C02)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

이석배, 2000, “중력학적 방법 및 위성측지 방법에 의한 지오이드 모델링에 관한 연구”, 한국측량학회지 제18권 4호, pp.359-367.
 이지선, 권재현, 이보미, 홍창기, 2009a, 항공중력측정에 의한 프리에어 이상 산출, 한국측량학회지 제27권 2호, pp.139-147.
 이지선, 권재현, 이보미, 홍창기, 2009b, 항공중력지오이드 모델 구축 및 검증, 한국측량학회지 제27권 2호, pp.159-167.
 해양수산부, 2005, “정밀 지오이드 모델 구축에 관한 연구”, 해양한국발전프로그램(KSGP) 연구개발사업 연구보고서, 부산대학교 SG연구사업단.
 Andersen, O.B., Knudsen, P., Berry, P., Kenyon, S., 2008, EGU 2008 Meeting.
 Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R.,

Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Burbank, D., Alsdorf, D., 2007, The Shuttle Radar Topography Mission, American Geophysical Union, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
 Forsberg, R., 1987, A new covariance model for inertial gravimetry and gradiometry, Journal of Geophysical Research, 92, pp.1305-1310.
 Forsberg, R., W Featherstone., 1998, Geoids and Cap Sizes. In: Geodesy on the Move - gravity, geoid, geodynamics and Antarctica, Proceedings IAG scientific assembly, Rio de Janeiro, sept 3-9 1997, Forsberg, Feissel and Dietrich (eds.), IAG symposia 119, pp.194-200.
 Forsberg, R., 2002, Downward continuation of airborne gravity data - an Arctic case study, Proc. 3rd Meeting of the International Gravity and Geoid Commission : Gravity and Geoid 2002, pp.51-56.
 Forsberg, R., Tscherning C.C, Kundsen P., 2003, An overview Manual of the GRAVSOF, Kort & Matrikelstyrelse.
 Heiskanen, W.A, Moritz., H, 1967, Physical Geodesy, W.H. Freeman and Co., San Fransisco.
 Lee, jisun, Lee, Bo Mi, Kwon, Jay Hyoun, 2008, Evaluation of EGM08 using Gravity anomaly and GPS/Leveling in Korea, 3D Geoinfo.
 Wong, L., Gore., R, 1969, Accuracy of geoid heights from modified Stokes kernels, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 18, pp.81-91.

접수일	(2009년 10월 30일)
최종수정일	(2009년 11월 27일)
게재확정일	(2009년 11월 27일)