장기간 조위관측자료 분석과 GPS 수준측량 방법에 의한 수준원점 성과 재정의

Redefinition of the Original Benchmark Height using Long-term Tide Observations Analysis and GPS Levelling Methods

정태준¹⁾ · 윤홍식²⁾ · 황진상³⁾ · 이동하⁴⁾

Jung, TaeJun · Yoon, HongSic · Hwang, JinSang · Lee, DongHa

Abstract

In this study, we suggested the period of tide observations is proper to calculate the mean sea level(MSL) precisely on Incheon tide station using wavelet analysis, and newly determined then the vertical reference surface of Korea using the calculated MSL. In order to calculate the height difference between the calculated MSL and specific ground station (ICGP) near the Incheon tide stations, we performed the laser measurements directly to the sea surface where located below ICGP. The orthometric-height of ICGP was determined that corrected the height difference to the calculated MSL using linear interpolation method. Finally, we connected the orthometric-height of ICGP with the original benchmark (ORBM) using GPS leveling methods for determining the new orthometric-height of ORBM. As the results, there is a variation amount of 0.026m between the new MSL was calculated in this study and old MSL was calculated in 1910's. Also, there is a difference of 0.035m between the new and old orthometric-heights of ORBM. The connection (or leveling) error of 0.009m was revealed in new orthometric height of ORBM with consideration of MSL variation which may caused by the error of GPS ellipsoid height and/or geoid model. In this study, we could be determined precisely the orthometric-height of ORBM based on the new MSL of Incheon Bay using only GPS leveling method, not a spirit leveling method. Therefore, it is necessary to determine the vertical datum strictly using long-term and continuously tide observations more than 19 years and to use the GPS leveling method widely in the height leveling work for the effective changeover from the orthonormal to the orthometric in national height system.

Keywords : Vertical Datum, Mean Sea level, Original Benchmark, Wavelet Analysis, Precise GPS Positioning, Geoid Model

초 록

본 연구에서는 인천만의 장기간 조위관측자료를 웨이블릿 방법을 통해 분석하여 평균해수면 결정을 위한 최적의 기간을 제시하고, 적정기간에 대한 우리나라의 수직기준을 새롭게 결정하였다. 그 후 결정된 평균해수면과 연안의 지상기준점(ICGP) 간의 정밀한 높이차를 결정하기 위하여 해수면에 대한 직접적인 레이저 관측을 수행하였으며, 결정된 높이차를 전체 조위관측자료에 대해 선형보간법으로 보정하여 ICGP의 정표고를 계산하였다. 최종적으로는 계산된 ICGP의 정표고를 정밀 GPS 관측과 중력지오이드모델을 이용한 GPS 수준측량 방법을 통해 수준원점(ORBM)과 연결하고, 새로운 평균해수면 기준의 수준원점 정표고를 결정하였다. 그 결과, 본 연구에서 결정된 인천만의 평균해수면은 1910년대의 평균해수면에 비해 약 0.026m가 변동된 것으로 분석되었으며, 새로운 평균해수면을 기준으로 GPS 수준측량에 의해 재정의된 ORBM 성과는 기존 성과와 약 0.035m의 차이를 나타내었다. 새로운 ORBM 성과에서 나타난 0.009m의 연결오차는 GPS 수준측량 시 GPS 타원체고 결정오차와 지오이드모델링 오차 등에 기인한 것으로 판단된다. 본 연구를 통해서 정밀한 GPS 수준측량만으로 새로운 평균해수면에 기준한 ORBM 정표고 성과를 정밀하게 결정할 수 있었으며, 향후 정표고 체계로의 효율적인 전환을 위해서는 장기간의 조위관측자료를 이용한 수직기준 결정과 함께 GPS 수준측량을 통한 수준성과의 연결을 적극적으로 고려할 필요가 있다.

핵심어 : 수직기준, 평균해수면, 수준원점, 웨이블릿 분석, 정밀 GPS 관측, 지오이드모델

1) 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정(E-mail:tjun97@skku.edu)

2) 정회원 · 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수(E-mail:yoonhs@skku.edu)

3) 정회원 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정(E-mail:gpsboy@skku.edu)

4) 교신저자 · 정회원 · 성균관대학교 공과대학 겸임교수(E-mail:dhlee.skku@gmail.com)

1. 서론

수직기준(Vertical Datum)이란 높이의 기준이 되는 기준면(Reference Surface)을 말한다. 수직기준은 육지의 지형이나 구조물 등의 표고를 결정하는 기준이 되며, 해상에서는 해안선이나 수심 등을 결정하는 기준으로 측지학·해양학적으로 중요한 의미를 가지고 있다. 수직기준이라는 개념은 과거 일제시대에 최초로 도입이 되어 당초에는 인천·청진·원산·목포·진남포에 설치된 5개소의 조위관측소에서 1년 이상 조위를 관측하여 각각의 평균해수면을 계산하고, 이것을 높이의 기준면으로 정하였다는 기록이 있으나, 당시의 측량기록이 남아 있지 않아 현재로서는 보다 상세한 내용을 확인할 수 없는 실정이다(국립지리원, 2003). 우리나라의 수직기준은 현재 인천만 평균해수면으로 규정되어 있으며, 그 동안의 관련 연구나 기록을 살펴보면 우리나라의 수직기준은 현재까지도 1914년부터 1916년까지 인천만에서 관측된 조위관측자료에 대한 평균해수면인 것으로 알려져 있다(국립지리원, 1983; 최병호, 1994).

일반적으로 측지학적 측면에서는 평균해수면을 육상 표고의 기준면으로 이용하고 있으며, 평균해수면을 결정하기 위한 조위관측자료의 적정 기간은 달이 조위에 영향을 주며 그 위상을 되풀이하는 주기(Metonic cycle)인 18.6년으로 지정하고 있다(NGS, 1986; Smith A, 1999). 우리나라의 조위관측소는 과거 일제시대에 설치되기 시작한 이후 36개소(2008년 기준)로 확장되었으며, 그 동안 최대 52년에서 최소 1년까지 평균 24.6년의 조위관측자료가 축적되어 있어 관측기간 측면에서는 평균해수면 결정을 위한 적정 기간인 18.6년의 요구를 충족하고 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 이러한 축적된 조위관측자료를 이용하여 새로운 수직기준의 정립이 필요하며, 장기간의 조위관측자료에 대한 연속성과 연결성을 고려하여 지속적인 기준면의 물리적 변동과 현상을 반영할 수 있는 새로운 수준원점(Original Bench Mark : ORBM)의 표고를 정표고 기반으로 결정하여야 한다.

이를 위해 본 연구에서는 1) 1961년부터 2009년까지 축적된 인천만의 장기간 조위관측자료를 웨이블릿 방법을 통해 분석하여 평균해수면 결정을 위한 최적의 기간을 설정하고, 2) 설정된 기간에서 결정된 평균해수면과 지상기준점(ICGP) 간의 정밀한 높이차를 결정하기 위하여 해수면에 대한 레이저 관측을 수행하고 선형보간법을 적용하였으며, 정밀수준측량에 따른 지상기준점의 정표고를 계

산하였으며, 3) 최종적으로는 계산된 지상기준점의 정표고를 정밀 GPS 관측과 지오이드 모델을 이용한 GPS 수준측량 방법으로 수준원점(ORBM)과 연결하고, 새로운 평균해수면 기준의 수준원점 정표고를 결정하고자 한다.

2. 인천만 조위관측자료의 분석

우리나라의 수직기준과 관련하여 인천만의 조위관측 연혁은 매우 중요한 의미를 가지고 있다. 이것은 우리나라 육상부분의 수준원점이 인천만의 평균해수면을 기준으로 결정되었고, 이를 연결측량하여 전국에 대한 육상부분의 수준망을 구성하였기 때문이다. 국립지리원(1983)에 따르면 우리나라의 수직기준을 설정하기 위한 조위관측은 1911년 7월부터 조선총독부 임시토지조사국이 청진·원산·목포·진남포·인천의 순으로 3년간에 걸쳐서 일본 육군측지부의 지원을 받아 수행되었으며, 각 항만의 평균해수면을 산출하여 전 국토의 수준측량을 위한 표고 기준을 설정하였다고 한다.

인천만 조위관측의 이력을 살펴보면 1913년에 임시토지조사국에서는 표고의 기준을 설정하기 위한 목적으로 인천 영국 영사관 서측 해안도로 끝의 수준기점(Original Bench Mark)에서 서방 90m의 해수면 아래에 검조소를 설치하였다. 인천 검조소는 항내에 설치되어 있었기 때문에 선박의 잣은 충돌로 인한 구조물의 파괴와 도수관 매몰로 1927년에 이전을 계획하여 구 선거(船渠)의 갑문의측에 자형 순도양천교의 육지 쪽에 설치하였는데, 1943년에 1/50 아레스 검조기로 교환하여 관측하였다고 한다. 구 선거에 설치된 TBM No.1은 1973~1974년 인천항 개발에 따라 망실되었고 검조소를 월미도로 이전하였으며, 1999년에 현재의 인천 조위관측소로 위치로 옮겨졌다. 이러한 인천만 조위관측의 위치 연혁과 현재 국립해양조사원에서 제공하고 있는 인천만 조위관측자료의 연평균해수면 을 나타내면 그림 1과 같다.

그림 1. 인천만 조위관측 연혁과 연평균해수면 자료

그림 1에 표시한 바와 같이 인천만의 조위관측자료는 그 위치에 따라서 큰 변동이 있음을 확인할 수 있으며, 관측 결과에 있어서도 신뢰성이 떨어지는 부분(회색 선 부분)이 있는 것으로 분석되었다. 인천만의 조위관측자료는 관측소의 이설로 인해 그 경향이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 관측 위치의 이전과 검조장비의 교체 그리고 조위관측자료의 품질, 결측 등과 관련되어 발생한 것으로 판단된다. 이러한 인천 조위관측자료의 문제점은 측지학적 측면에서 볼 때 육상표고의 기준면인 인천만의 평균해수면 결정을 위한 장기간의 조위관측자료의 사용 기간에 대한 문제점을 가져다주고 있다.

인천만 조위관측자료의 연속성과 연결성을 분석하기 위하여 그 동안 조위관측소의 위치변동이 없었던 부산의 조위관측자료와 비교분석 하였다. 그림 2는 국립해양조사원에서 제공하는 인천과 부산 조위관측소의 월 평균해수면(1961년부터 2009년까지) 자료를 나타낸 것이다.

그림 2. 인천과 부산 조위관측자료의 월 평균해수면

해양에서 발생하는 물리적인 변동의 대부분은 시간 경과에 따라서 나타나는 관측값의 변화로 표현될 수 있으며, 조위관측자료 또한 시간 경과에 따라서 변동되는 시계열 자료라고 할 수 있다. 시계열 분석은 시간에 따른 변량 $x(t)$ 의 변동 특성을 이해하기 위해 사용되며, 본 연구에서는 그 동안 조위관측소의 위치변동이 없이 장기간의 조위관측자료를 축적한 부산의 조위관측자료를 이용하여 동일 기간의 인천 조위관측자료에 대한 시계열 분석을 수행하였고 웨이블릿 변환(wavelet transform) 분석을 적용하여 인천과 부산의 조위관측자료 사이의 상관관계를 분석하였다.

웨이블릿 변환은 신호분석에서 흔히 사용되는 푸리에 변환(fourier transform)과는 다르게 시간영역의 데이터를 주파수 영역으로 변환하며, 그와 함께 시간 정보도 보유

하는 장점을 가지고 있다. 또한, 넓은 영역을 가지는 신호의 지역적인 특성을 추출하고, 방향성이나 기울기 변화의 불연속성 및 자기상관 등을 나타냄으로써 다른 시계열 분석 기법들 보다 타월하다(황학 등, 2008). 식 1은 시계열 데이터 d 와 관련된 웨이블릿 ψ 의 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform, CWT)을 나타낸 것이다.

$$W_{d,\psi}(s, t) = (d(t) * \psi_s(t)) \quad (1)$$

여기서, t 는 시간을 나타내고 ψ_s 는 척도(scale) s 에서의 웨이블릿 함수를 의미하며, 웨이블릿 분석을 위한 모함수(mother function)는 Morlet 함수($\pi^{-1/4} e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2}$)를 사용하였다(Torrence 등, 1998).

시계열 자료인 X 와 Y 에 대한 웨이블릿 변환을 각각 W_x , W_y 라고 하면 직교 웨이블릿 변환(cross wavelet transform, XWT) $W_{xy}(s, t)$ 는 식 2와 같이 표시할 수 있다(Torrence 등, 1999).

$$W_{xy}(s, t) = W_x(s, t) W_y^*(s, t) \quad (2)$$

식 2에서 $W_y^*(s, t)$ 는 $W_y(s, t)$ 의 복소공액(complex conjugate)을 의미하고 W_{xy} 의 위상각(phase angle)은 시간-주파수 공간에서 시계열 자료인 X 와 Y 사이의 위상관계를 보여준다. 이러한 직교 웨이블릿 변환은 일반적으로 두 시계열 자료 간의 공통 출력(common power)이 높은 시간 주파수 공간과 상대위상각(relative phase)을 나타낸다.

웨이블릿 일관성 분석(wavelet coherence, WTC)의 경우에는 두 시계열 자료 사이의 시간 주파수에 대한 일관성과 신호 간의 공변(co-vary)관계를 나타내며, 식 3과 같이 표시할 수 있다.

$$R^2(s, t) = \frac{|S(s^{-1} W_{xy}(s, t))|^2}{S(s^{-1} |W_x(s, t)|^2) \cdot S(s^{-1} |W_y(s, t)|^2)} \quad (3)$$

여기서, S 는 평활화 연산자를 의미하며, 식 4와 같이 표시할 수 있다. 식 4의 S_{scale} 은 웨이블릿 척도 축에서의 평활화를 나타내며, S_{time} 은 시간 영역에서의 평활화를 의미한다.

$$S(W) = S_{scale} (S_{time} (W(s, t))) \quad (4)$$

본 연구에서는 인천과 부산 조위관측소의 월 평균해수면 자료를 이용하여 인천만 조위관측자료의 연속성과 연결성 분석을 수행하였으며, 이를 위하여 위에서 제시한

웨이블릿 분석 방법을 사용하였다. 그림 3~5는 두 시계열 자료인 인천과 부산 조위관측자료에 대한 웨이블릿 분석에 따른 결과를 나타낸 것이다. 그림 3~5에 표시한 웨이블릿 분석 결과의 원추모양 경계선은 영향추(cone of influence)를 나타내는 것이며, 굵은 흑색 선은 5% 유의수준(신뢰구간 95%)을 나타낸다. 그림 4와 그림 5에서는 상대위상각을 화살표 벡터로 표시하고 있으며, 화살표가 오른쪽을 향하면 위상이 일치함을 의미하고, 왼쪽을 향하는 경우에는 두 시계열 자료의 위상이 서로 상반됨을 나타낸다. 그리고 화살표가 수직으로 위를 향하는 경우, 즉 상대위상각이 270° 이면 Y의 위상이 X에 비하여 90° 가 지연됨을 의미한다.

그림 3. 인천과 부산 조위관측자료의 월 평균해수면 연속 웨이블릿 변환

그림 4. 인천과 부산 조위관측자료의 월 평균해수면에 대한 직교 웨이블릿 스펙트럼

그림 5. 인천과 부산 조위관측자료의 월 평균해수면에 대한 웨이블릿 상관관계 및 위상

그림 3에서는 인천과 부산 조위관측소의 월 평균해수면 값에 대한 연속 웨이블릿 변환 결과를 표시한 것이다. 그림 3 (a)의 인천 조위관측자료의 경우에는 12개월에 대한 약간의 주기를 보여주고 있으나 전체적으로 명확한 주기가 나타나지 않았으며, 그림 3 (b)의 부산 조위관측자료의 경우에는 시간영역에서 12개월의 명확한 주기를 보여주고 있다. 그리고 그림 4와 그림 5를 살펴보면 일정한 기간을 제외한 나머지 부분에서는 12개월 주기에서 높은 강도의 직교 웨이블릿 스펙트럼과 상관관계를 보여주고 있다. 이러한 결과는 그림 1에서 표시한 인천 조위관측소의 위치변동과 자료의 품질 등에 관련 된 것으로 분석되며, 그림 3 (b)의 경우와 같이 조위관측자료의 특성 상 12개월의 일정한 주기가 명확하게 나타나야 하는데 인천 조위관측자료의 경우에는 그 주기를 보여주지 않는 것으로 나타나 그 동안 축적된 조위관측자료가 지속적으로 연속된 자료가 아닌 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 5에서 확인할 수 있는 것처럼 시계열 자료 간의 일관성에 있어서도 세 가지의 경우로 구분할 수 있다. 결국, 그동안 축적된 인천만의 조위관측자료는 하나의 연속된 자료라고 할 수 없으므로 조위관측소의 위치변동과 자료의 품질을 고려한 세 경우의 독립된 관측 자료로 판단해야하며, 새로운 수직기준의 결정에 있어서는 이러한 관측 자료의 구분을 통한 새로운 평균해수면의 결정이 필요할 것으로 판단된다. 표 1은 분석된 결과를 바탕으로 한 인천만 조위관측자료의 관측 기간에 따른 구분을 표시한 것이다.

표 1. 인천만 조위관측자료의 관측 기간에 따른 구분

구분	1 그룹	2 그룹	3 그룹
관측소 위치	구 선거	월미도	인천 조위관측소
(기간)	(1960 ~ 1972)	(1976 ~ 1989)	(1999 ~ 현재)

표 2. 인천 조위관측소 지상기준점(ICGP)의 정표고 계산결과

구 분	$d(=H_m+t_m)$	MSL($=t_{\Delta t}$)	$H(=H_{\Delta t})$ (수측기점)	$H_{leveling}$ (정밀수준측량)	H_{ICGP} (지상기준점)	비고
지상기준점 (ICGP)	12.469m	4.609m	7.860m	-2.429m	5.431m	조위관측자료 (1999~2009)

3. 장기 조위관측자료를 사용한 지상기준점의 정표고 결정

인천 조위관측소의 장기 조위관측자료와 GPS 관측을 실시한 지상기준점(ICGP) 간의 시각동기화를 위하여 약 8시간의 GPS 관측을 실시하였고 동일시간대의 조석자료를 1분간격으로 획득하였으며, GPS 관측 동안 인천 조위관측소의 수측기점과 해수면간의 차이인 해수면 변화량을 레이저측정기를 사용하여 1초 간격으로 측정하였다. 획득된 자료들은 MJD(Modified Julian Day)로 변환하여 시각동기화하고, 식 6에 의하여 수측기점의 정표고를 결정하였으며, 지상기준점과의 정밀수준측량을 실시하여 지상기준점의 정표고를 계산하였다.

$$H_{\Delta t} = H_m + t_m - t_{\Delta t} \quad (6)$$

여기서, $H_{\Delta t}$ 는 Δt 라는 기간의 조위관측자료를 사용하여 결정된 평균해수면 기준의 정표고, H_m 은 그림 6(a)의 GPS 관측을 실시한 지상기준점으로부터 해수면까지의 높이 변화량을 측정하여 결정된 해수면 변화량을 말하며, t_m 은 그림 6(b)의 H_m 이 측정된 시간에 상응하는 평균해수면, $t_{\Delta t}$ 는 그림 6(c)의 Δt 라는 기간의 평균해수면이다. 그러므로 $H_{\Delta t}$ 의 결과는 장기간의 조위관측자료에 의한 영향을 받기 때문에 $H_{\Delta t}$ 는 조위관측 기간 내에서 결정된 평균해수면 기준의 정표고라는 것을 알 수 있다(정태준 등, 2009). 즉, $\Delta t(=t_2-t_1)$ 시간 동안의 평균해수면을 이용한 지상기준점의 정표고(H_{ICGP})는 식 6과 정밀수준측량 결과($H_{leveling}$)를 사용하여 계산할 수 있으며, 그 개념도는 그림 6에 표시한 것과 같다.

표 2는 그림 6에 따라 결정된 지상기준점의 정표고 결과를 나타낸 것이며, 1999년부터 2009년까지 관측한 인천만 조위관측자료를 사용하여 결정된 평균해수면은 4.609m이고, 이 평균해수면을 기준으로 결정된 지상기준점의 정표고는 5.431m임을 알 수 있다.

그림 6. 새로운 수직기준에 의한 정표고 결정의 개념도

4. GPS 관측데이터의 처리

본 연구에서는 새롭게 정표고를 결정한 지상기준점(ICGP)과 수준원점 그리고 주변의 통합기준점(32점)에 대하여 약 8시간 이상의 GPS 관측을 수행하였으며, GPS 관측데이터 처리를 위하여 학술용 정밀해석 소프트웨어인 GAMIT/GLOBK를 사용하였다. GAMIT/GLOBK는 일반 상업용 소프트웨어들과는 다르게 전 지구에 배치되어 있는 GPS 상시관측소 자료를 정밀하게 해석하기 위하여 정밀력, 지구자전 파라미터, 장동(nutation) 계산 파일 및 세계 표준시와 GPS 시간의 차이량 계산 파일 등과 같은 다양한 측지·지구물리학적 자료를 사용한다.

그림 7(a)는 GAMIT/GLOBK를 사용하여 GPS 관측점의 좌표를 계산하는 과정을 나타낸 것으로 크게 3 단계로 구분된다. GAMIT은 초기 좌표가 가지는 오차의 1/1,000에 해당하는 오차범위로 자료를 해석할 수 있다. 따라서 기선해석 전에 유틸리티를 이용하여 개략적인 기선해석을 실시하여 초기 좌표값을 추정하여 이를 활용한다. 이러한 초기좌표 계산은 관측점에 근접한 GPS 위성기준점의 관측 자료와 방송력 자료, 그리고 고시좌표를 사용하여 개략적인 기선해석을 실시하고, 지심지각좌표계상의 3차원 좌표를 계산하였다. GAMIT에서 사용하는 초기좌표 파일은 초기좌표 외에 연간 이동속도와 좌표결정시기 정보를 포함하고 있으며, 연간 이동속도와 좌표결정시기 정보가 포함되어 있는 이유는 지각을 정적인 대상으로 보지 않고 동적인 대상으로 설정하여 시간의 경과에 따른 좌표 변화량을 적용하기 위한 것이다. 따라서 과거에 정밀하게 결정된 초기좌표를 사용하는 경우, 좌표추정 결과에 연간 이동량을 적용하여 처리시기에 맞는 좌표를 계산하게 된다. 본 연구에서는 정확한 좌표 계산을 위하여 3축 방향의 연간 이동속도를 모두 0으로 설정함으로써 epoch 2002.00년을 기준으로 하여 결정된 우리나라 국가측지기준계와의 차이가 발생하지 않도록 하였다.

GAMIT으로 계산한 좌표는 수 센티미터의 오차범위를 가지는데, 이러한 오차범위는 정밀 망조정을 수행하기 위하여 고정점의 좌표를 고정하지 않고 해석을 실시하기 때문에 발생한 것이다. 고정점의 성과는 GLOBK에 의한 망조정 계산에서 적용되기 때문에 GLOBK 단계를 거쳐야만 정확한 조정성과를 계산할 수 있다. GLOBK에 의한 망

a) GAMIT/GLOBK의 좌표계산 과정

b) 국토지리정보원의 GPS 위성기준점 관측망

그림 7. GAMIT/GLOBK의 좌표계산 과정과 GPS 위성기준점 관측망

표 3. 지역적인 기준좌표계 계산결과(4회 조정)

조정횟수	구 분	조정량(m)	표준오차(m)
1회	X Translation(m)	-0.15392	± 0.00146
	Y Translation(m)	-0.05146	± 0.00172
	Z Translation(m)	-0.11407	± 0.00163
2회	X Translation(m)	-0.15391	± 0.00130
	Y Translation(m)	-0.05228	± 0.00153
	Z Translation(m)	-0.11366	± 0.00145
3회	X Translation(m)	-0.15415	± 0.00119
	Y Translation(m)	-0.05246	± 0.00140
	Z Translation(m)	-0.11268	± 0.00133
4회	X Translation(m)	-0.15414	± 0.00109
	Y Translation(m)	-0.05324	± 0.00129
	Z Translation(m)	-0.11366	± 0.00122

표 4. 지역적인 기준좌표계 구성 결과의 정밀도

조정횟수	고정점의 수	제외한 고정점의 수	전처리 RMS(m)	최종 RMS(m)
1회	44	3	0.0946	0.0051
2회	41	3	0.0962	0.0044
3회	38	2	0.0960	0.0040
4회	36	0	0.0963	0.0036

조정 계산은 고정점의 좌표와 기선해석 결과를 이용한 단순 조정 계산이 아닌 관측기간 동안의 지구기준좌표계에 대한 모델, 위성궤도 모델 및 지각변동 모델 등을 포함하고, 망조정 계산을 위한 구속값으로 고정점의 좌표와 위성 궤도요소를 사용하는 종합적인 조정이라고 할 수 있다. 이러한 종합적인 조정계산을 실시하기 위해서는 작업 초기에 고정점의 좌표와 연간이동속도 그리고 관측세션별 관측값 등을 사용하여 정밀한 지역적인 기준좌표계를 구성하고, 과대오차를 포함하고 있는 고정점들의 성과를 제거한 후에 미지점들에 대한 조정계산을 수행한다.

본 연구에서는 지역적인 기준좌표계 구성을 위하여 그림 7(b)에 표시한 46개의 위성기준점 중에서 제주지역의 2개소를 제외한 44개의 위성기준점 관측 자료를 사용하였으며, GPS 관측 결과와 관련 공분산 정보 및 위성기준점의 고시성과를 사용하여 지역적인 기준좌표계를 계산하였다. 이 단계에서는 전국 범위의 GPS 관측망에 대한 적합성과 위성기준점 좌표의 적합성이 평가되며, 각 위성기준점 고시좌표에 부여되는 중량이 50% 이하가 되지 않도록 하여 전체 성과가 고르게 사용될 수 있도록 하였다. 고시성과의 적합성 여부는 기준좌표계 구성을 위한 조정계산 결과의 잔차가 표준오차의 4배(4 σ)를 넘지 않도록 설정하였다.

GLOBK에 의한 지역적인 기준좌표계 계산 결과는 표 3과 같이 ITRF와의 원점 이동량에 대한 파라미터들로 표현되는데 최종 조정 결과의 표준오차가 1~2mm 수준으로 매우 정밀하게 계산된 것을 확인할 수 있다. 표 4는 고시성과의 평균제곱근오차(Root Mean Square, RMS)를 나타낸 것으로 최종 조정 작업에서의 평균적인 오차가 4mm 미만으로 계산되었으며, 고정점 항목에서 제거된 위성기준점들은 위치오차와 정규 표준오차가 상대적으로 크기 때문에 고정점 항목에서 제거되었으나, 이것은 고시성과의 문제가 아니라 관측 당일의 자료 품질에 따른 문제인 것으로 분석된다.

5. 수준원점의 재정의

본 연구에서는 새로운 수직기준에 따른 수준원점의 재정의의 위하여 지상기준점과 수준원점 그리고 통합기준점(32점)에 대한 GPS 관측을 수행하였으며, GAMIT/GLOBK를 사용하여 GPS 관측점들의 정밀한 타원체고를 결정하였다. GPS 관측점의 정표고 값은 지상기준점의 경우에는 표 2의 결과를 사용하였고 수준원점과 통합기준점은 국토지리정보원에서 제공하는 표고 성과를 사용하였으며, 그에 따른 기하학적 지오이드고를 계산하였다.

본 연구에서는 수준원점의 재정의의 위하여 세 가지의 지오이드 모델을 사용하였으며, 각각은 전 지구 중력장모델인 EGM2008 모델과 우리나라의 실제 중력 측정자료를 사용하여 개발된 중력지오이드 모델 그리고 중력지오이드 모델을 우리나라의 지역적인 수직기준에 적합(fitting)시킨 KGEIOD08 모델이다. EGM2008 모델은 가장 널리 사용되었던 전 지구 중력장모델인 EGM96의 후속 모델로써 2008년 미국 국가지형정보국(NGA)에서 발표하였다. EGM2008 모델은 2,160차의 초고차항 구면조화 계수로 이루어져 있으며, degree(n) 2,910과 order(m) 2,910의 추가 전개계수를 포함하고 있다(Pavlis et al., 2008). 중력지오이드 모델은 한국 일원에 대하여 360차의 최대차수로 해석된 EIGEN-CG03C 모델을 기준면으로 4밴드 구면 FFT 방법과 RTM 환산방법을 적용하여 중파장 및 단파장 성분을 계산하고 이를 합성하여 중력지오이드를 결정하였다. 각 환산방법에 적용되는 기본적인 중력관측자료는 국토지리정보원, 프랑스 BGI(Bureau Gravimetricque International) 및 성균관대학교에서 측정한 4,298점의 육상 중력관측자료와 DNSC(Danish National Space Center)에서 TOPEX/Poseidon, ERS 및 GEOSAT 데이터를 처리하여 계산된 1,998점의 해상 중력관측자료가 사용되었다. 그리고 KGEIOD08 모델은 개발된 중력지오이드 모델에 총 503개

의 GPS/Levelling 자료를 이용하여 LSC(Least Square Collocation) 방법에 의한 수직기준의 적합을 수행함으로써 장파장 영역에서의 중력지오이드 모델의 계통오차를 제거하여 최종적인 합성 지오이드 모델을 결정하였다(이동하, 2008).

표 5는 GPS 관측점에 대한 기하학적 지오이드고와 지오이드 모델별 지오이드고를 계산한 것이며, 수준원점의 재정의의 위한 최적의 지오이드 모델을 선정하기 위하여

기하학적 지오이드고와의 적합성과 정확도 분석을 수행하였다. 그림 8은 GPS 관측점의 기하학적 지오이드고와 각각의 중력장모델별 지오이드고 간의 차이를 나타낸 것으로 전 지구 중력장모델인 EGM2008의 경우는 중력지오이드와 KGEIOD08의 결과와 상이한 양상을 보여주고 있는데, 이는 우리나라의 실제 중력관측자료를 사용하여 개발된 중력지오이드 모델과 KGEIOD08의 지역적인 특성에 따른 것으로 판단된다.

표 5. GPS 관측점에 대한 지오이드 모델별 지오이드고 계산 결과

(단위 : m)

구 분	지오이드고				NGPS - NEGM2008	NGPS - NKGEOID08	NGPS - NGRAVIMETRIC
	NGPS	NEGM2008	NKGEOID08	NGRAVIMETRIC			
ICGP	22.394	22.077	22.474	22.485	0.317	-0.080	-0.091
ORBM	22.648	22.292	22.698	22.704	0.356	-0.050	-0.056
U126	22.144	21.812	22.215	22.173	0.332	-0.071	-0.029
U127	21.817	21.507	22.047	21.952	0.310	-0.230	-0.135
U129	22.229	21.823	22.266	22.220	0.406	-0.037	0.009
U130	21.907	21.568	22.122	22.026	0.339	-0.215	-0.119
U134	22.770	22.467	22.743	22.727	0.303	0.027	0.043
U136	22.827	22.518	22.798	22.820	0.309	0.029	0.007
U138	22.244	21.857	22.221	22.253	0.387	0.023	-0.009
U139	22.998	22.637	22.922	22.917	0.361	0.076	0.081
U141	22.919	22.610	22.897	22.894	0.309	0.022	0.025
U145	23.027	22.725	23.073	23.066	0.302	-0.046	-0.039
U148	22.895	22.606	22.937	22.981	0.289	-0.042	-0.086
U207	22.130	21.717	22.138	22.145	0.413	-0.008	-0.015
U208	21.887	21.443	21.931	21.895	0.444	-0.044	-0.008
U211	22.154	21.747	22.403	22.264	0.407	-0.249	-0.110
U212	22.461	22.110	22.477	22.505	0.351	-0.016	-0.044
U213	22.667	22.309	22.718	22.724	0.358	-0.051	-0.057
U214	22.729	22.419	22.905	22.870	0.310	-0.176	-0.141
U215	22.461	22.098	22.661	22.579	0.363	-0.200	-0.118
U216	22.815	22.508	23.011	22.986	0.307	-0.196	-0.171
U218	22.955	22.683	23.090	23.111	0.272	-0.135	-0.156
U222	23.116	22.830	23.277	23.291	0.286	-0.161	-0.175
U224	23.346	23.100	23.538	23.547	0.246	-0.192	-0.201
U284	22.531	22.165	22.775	22.660	0.366	-0.244	-0.129
U285	22.916	22.636	23.146	23.105	0.280	-0.230	-0.189
U286	22.467	22.221	22.729	22.647	0.246	-0.262	-0.180
U287	23.202	22.946	23.406	23.403	0.256	-0.204	-0.201
U290	23.234	22.998	23.430	23.412	0.236	-0.196	-0.178
U353	22.306	22.078	22.478	22.432	0.228	-0.172	-0.126
U361	22.906	22.704	23.136	23.092	0.202	-0.230	-0.186
U362	22.690	22.466	22.903	22.841	0.224	-0.213	-0.151
U363	22.977	22.786	23.080	23.073	0.191	-0.103	-0.096
U368	23.133	22.964	23.307	23.308	0.169	-0.174	-0.175

그림 8. 기하학적 지오이드고와 중력장모델별 지오이드고의 차이

표 6. 기하학적 지오이드고에 대한 중력장모델별 정확도 분석 결과

(단위 : m)

구 분	최 소	최 대	평 균	표준편차	RMS
$N_{GPS} - N_{EGM2008}$	0.169	0.445	0.308	0.067	0.320
$N_{GPS} - N_{Gravimetric}$	-0.201	0.081	-0.094	0.079	0.124
$N_{GPS} - N_{Kgeoid08}$	-0.262	0.076	-0.119	0.100	0.157

그림 9. 기하학적 지오이드고와 중력장모델별 상관관계도

표 6은 기하학적 지오이드고에 대한 지오이드 모델별 정확도 분석결과를 나타낸 것이며, 그림 9는 각 모델별 지오이드고와 기하학적 지오이드고 간의 상관관계를 나타낸 것이다. 표 6과 그림 9의 결과를 살펴보면 대상지역에 있어서 중력지오이드 모델이 평균 $-0.094m$, 표준편차 $\pm 0.079m$ 로 계산되었으며, RMS가 $0.124m$ 로서 다른 모델들

보다 상대적으로 가장 적합한 것으로 분석되었다.

EGM2008 모델은 표준편차가 $\pm 0.067cm$ 로 가장 좋은 결과를 보이고 있으나 RMS가 $0.320m$ 로 계산되었으며, 이는 실질적으로 우리나라의 수직기준과 EGM2008 모델의 기준면 간에 상당한 편위(bias)가 존재하기 때문에 나타난 것으로 판단된다. KGEoid08 모델의 경우에는 중력지오이드 모델에 총 503개의 GPS/Levelling 자료를 이용하여 LSC(least square collocation) 적합을 수행한 합성지오이드(hybrid geoid) 모델이지만 그림 8에서 확인할 수 있듯이 본 연구 대상지역에 있어서는 중력지오이드 모델과 비슷한 경향을 보이고 있으며, 정확도 분석 결과에서도 RMS 값이 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유는 KGEoid08 모델 개발에 있어서 통합기준점에 대한 GPS/Levelling 자료가 고려되지 않았고, 본 연구 대상지역의 GPS/Levelling 자료에 대한 밀도가 부족하였으며, 그 신뢰성에 대한 검증이 어려웠기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구에서는 수준원점의 재정의의 위해서 세 종류의 지오이드 모델 중 연구대상지역에 가장 적합한 것으로 분석된 중력지오이드 모델을 사용하였다. 지상기준점과 수준원점에서의 기하학적 지오이드고와 중력지오이드 모델로부터 구한 지오이드고 간의 차이($N_{GPS} - N_{Gravimetric}$)를 살펴보면 지상기준점은 $-0.091m$, 수준원점의 경우에는

표 7. 상대적인 지오이드고를 이용한 새로운 정표고 산출 결과

구 분	위도 (degree)	경도 (degree)	타원체고 (m)	정표고 (H _{old})	최종 정표고 (H _{new})	편차 (H _{old} -H _{new})	비 고
ICGP	37.452255	126.592094	27.825m	5.431m	5.431m	0.000m	고정점
ORBМ	37.449372	126.657314	47.776m	25.128m	25.163m	-0.035m	보조점(가)

위도/경도/타원체고=GPS 측량 정표고=조위관측자료와 성과표(=H^{old})

-0.056m로 서로 상이한 값을 보이며, 이러한 차이는 수준원점의 경우 과거 1910년대에 결정된 인천만 평균해수면을 기준으로 한 표고 성과를 사용하였으나 지상기준점의 경우에는 인천만의 장기간의 조위관측자료(1999년~2009년)를 사용한 새로운 평균해수면으로부터 결정된 정표고를 사용함으로써 발생한 수직기준 간의 차이에 의한 것으로 분석된다.

일반적으로 GPS 관측에서는 상대측위방법에 의하여 대부분의 정오차들을 최소화함으로써 정확한 표고를 결정하고 있으며, 수직기준도 실질적으로 평균해수면이 지오이드면과 일치하지 않기 때문에 절대표고를 측정하기 보다는 상대적인 표고차를 결정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기하학적 지오이드고와 중력지오이드 모델로부터 구한 지오이드고 간의 상대적인 차이를 구하고, 인천만의 장기간 관측한 조위관측자료를 사용하여 결정한 평균해수면 기준의 정표고를 알고 있는 지상기준점에 대하여 지오이드 간의 상대적 적합(fitting)을 적용함으로써 수준원점의 정표고를 재계산하였다. 그림 10은 수준원점 재정을 위한 상대적 적합의 개념도를 나타낸 것이다.

그림 10. 수준원점 재정을 위한 상대적 적합의 개념도

표 7은 인천만의 장기 조위관측자료(1999년~2009년)를 사용하여 정표고를 결정한 지상기준점(ICGP)으로부터 수직원점(ORBМ)의 정표고를 계산한 결과를 표시한 것이며, 새로운 수준원점의 정표고는 25.163m로 결정되었고 기 성과와의 차이는 -0.035m로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 인천만의 장기간 조위관측자료를 웨이블릿 방법의 분석을 통하여 평균해수면 결정을 위한 최적의 기간을 제시하고, 그에 따른 인천만의 새로운 평균해수면과 지상기준점(ICGP)의 정표고를 결정하였으며, 지오이드 모델을 이용하여 지상기준점과 수준원점을 연결함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 인천만의 장기간 조위관측자료에 대하여 웨이블릿 방법을 이용한 분석결과 하나의 연속된 자료로 볼 수 없으며, 조위관측소의 위치변동과 자료의 품질 등과 관련하여 세 경우의 독립된 관측자료로 판단된다. 또한, 새로운 수직기준의 결정에 있어서는 이러한 관측자료의 구분을 통한 새로운 평균해수면의 결정이 필요하며, 향후 지속적인 지구물리학적 거동과 해수면 상승에 따른 영향을 분석하기 위해서는 1999년부터 축적된 조위관측자료(3그룹)를 사용하는 것이 가장 적절할 것으로 판단된다.

둘째, 인천만의 평균해수면 결정을 위한 적정기간으로 분석된 3 그룹의 관측자료 중에서 1999년부터 2009년까지의 조위관측자료를 사용한 결과 새로운 인천만의 평균해수면은 4.609m로 계산되었으며, 1910년대에 결정된 기존의 평균해수면과는 약 0.026m의 차이가 발생한 것으로 분석되었다. 또한, 새롭게 결정된 평균해수면과 지상기준점(ICGP) 간의 정밀한 높이차를 결정하였으며, 이를 위해서 해수면에 대한 레이저 관측을 수행하고 선형보간법을 적용하였으며, 정밀수준측량에 의한 연결측량 결과 새로운 평균해수면에 대한 지상기준점의 정표고는 5.431m로 결정되었다.

참고문헌

셋째, 지상기준점과 수준원점 그리고 32점의 통합기준점에 대하여 GPS 측량과 GAMIT/GLOBK를 사용한 정밀 해석을 통하여 정확한 타원체고를 결정하였으며, 기하학적 지오이드고를 계산함으로써 EGM2008, 중력지오이드 모델 그리고 KGEIOD08에 대한 정확도 분석을 수행하였다. 연구대상지역에 대한 최적의 중력장모델은 중력지오이드 모델로 분석되었으며, RMS가 0.124m로 다른 중력장 모델들 보다 상대적으로 가장 적합한 것으로 분석되었다. 그리고 지상기준점과 수준원점에 대하여 기하학적 지오이드고와 중력지오이드 모델로부터 구한 지오이드고 간의 상대적인 차이를 구하고, 지오이드 간의 상대적 적합을 적용함으로써 수준원점의 정표고를 결정하였으며, 그 결과 수준원점의 새로운 정표고는 25.163m로 기존의 성과와는 -0.035m의 차이가 나타났다.

넷째, 본 연구에서 결정한 인천만의 평균해수면은 1910년대의 평균해수면과 약 0.026m의 차이가 있는 것으로 계산되었으며, GPS 수준측량 방법을 이용하여 새로운 평균해수면을 기준으로 한 수준원점은 기존 성과와 약 0.035m의 차이를 나타내었다. 이러한 평균해수면 간의 차이와 수준원점 성과 간의 차이는 서로 동일해야 하지만 약 0.009m의 차이를 보이고 있으며, 이는 GPS 타원체고 결정오차와 지오이드모델링 오차 등에 기인한 것으로 판단된다.

본 연구를 통해서 정밀한 GPS 수준측량만으로 새로운 평균해수면에 기준한 ORBM 정표고 성과를 정밀하게 결정할 수 있었으며, 향후 정표고 체계로의 효율적인 전환을 위해서는 장기간의 조위관측자료를 이용한 수직기준 결정과 함께 GPS 수준측량을 통한 수준성과의 연결을 적극적으로 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 서·남·동해의 지역적인 평균해수면을 고려한 우리나라 수직기준 재정립을 위해서는 장기간의 연속적인 조위관측자료의 분석과 동일 기간에 대한 지역적인 평균해수면의 결정이 필요하며, 통합기준점을 고려한 보다 정밀한 지오이드모델 개발이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단-기초연구사업과제(과제번호 521-2008-1-D00479)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

- 국립지리원 (1983), 우리나라 정밀수준망에 관한 연구, pp. 87-89.
- 국립지리원 (2003), 측량 및 지형공간정보 백서, pp. 186-187.
- 이동하 (2008), 한국의 고정밀 합성지오이드 모델 개발, 박사학위논문, 성균관대학교.
- 정태준, 윤홍식, 이동하, 황학, 김용현 (2009), 조석자료와 EGM2008 중력장모델을 이용한 새로운 수직기준 결정에 관한 연구, 제35회 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 1641-1644.
- 최병호 (1994), 우리나라 국토 높이의 기준, 대한토목학회지, 대한토목학회, Vol. 42, No. 3, pp. 84-89.
- 황학, 윤홍식, 이동하 (2008), GRACE 및 SLR 자료를 이용한 C20DML 시계열 변화 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제26권 제5호, PP. 513-518.
- NGS (1986), *Geodetic Glossary*, Publication of the National Geodetic Survey, NOAA/NOS, National Geodetic Information Center, Rockville, MD.
- Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., and Factor, J.K. (2008), An Earth Gravitational Model to Degree 2160:EGM2008, presented at the 2008 General Assembly of the European Geoscience Union, Vienna, Austria, pp.13-18.
- Smith A (1999), *Application of Satellite Altimetry for Global Ocean Tide Modelling*, Ph.D. Thesis, Delft University Press, The Netherlands.
- Torrence, c., and Compo, G. P. (1988), A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79, No. 1, pp. 61-78.
- Torrence, C., and P. Webster (1999), Interdecadal changes in the ENSO-monsoon system, *J. Climate*, Vol. 12, pp. 2679-2690.