

대기압하중에 의한 지각변위 보정을 통한 GPS 수직좌표 시계열 정밀도 향상

Precision Improvement of GPS Height Time Series by Correcting for Atmospheric Pressure Loading Displacements

김경희¹⁾ · 박관동²⁾

Kim, Kyeong-Hui · Park, Kwan-Dong

Abstract

Changes of atmospheric pressures cause short- and long-term crustal deformations and thus become error sources in the site positions estimated from space geodesy equipments. In this study, we computed daily displacements due to the atmospheric pressure loading (ATML) at the 14 permanent GPS sites operated by National Geographic Information Institute. And the 10-year GPS data collected at those stations were processed to create a continuous time series of the height estimate. Then, we corrected for the ATML from the GPS height time series to see if the correction changes the site velocity and improves the precision of the time series. While the precision improved by about 4 % on average, the velocity change was not significant at all. We also investigated the overall characteristics of the ATML in the southern Korean peninsula by computing the ATML effects at the inland grid points with a $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ spatial resolution. We found that ATML displacements show annual signals and those signals can be fitted with sinusoidal functions. The amplitudes were in the range of 3-4 mm, and they were higher at higher latitudes and lower at the costal area.

Keywords : atmospheric pressure loading; crustal deformation; GPS; precision

초 록

대기압의 변화는 지각의 단주기 및 장주기 변위를 유발하고 이는 우주측지 장비에 근거한 정밀좌표 결정의 오차요인으로 작용한다. 이 연구에서는 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소를 대상으로 대기압하중에 의한 지각변위를 1일 단위로 계산하였다. 그리고 14개 관측소에서 수집된 약 10년간의 GPS 데이터를 처리하여 연속적인 수직좌표 시계열을 생성한 다음 GPS 수직좌표 시계열에서 대기압하중 지각변위를 보정하여, 대기압하중 보정 여부에 따른 관측소 속도 및 수직좌표 시계열의 정밀도 변화를 분석하였다. 그 결과, 수직좌표 시계열의 정밀도는 평균 약 4% 향상되었다. 그러나 대기압하중 보정여부에 따른 관측소 속도변화는 발생하지 않았다. 또한 남한 지역의 위도와 경도를 각각 0.5° 크기의 격자로 분할하여 대기압하중에 따른 특성을 분석하였다. 그 결과 계절적인 신호가 검출되었고, 그 신호를 사인함수로 곡선적합한 결과 진폭이 3-4mm 수준임을 확인하였다. 그리고 해안에서 내륙지역으로 갈수록, 그리고 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 그 진폭의 크기가 증가하였다.

핵심어 : 대기압하중, 지각변위, GPS, 정밀도

1. 서 론

대기는 중력에 의해 지표면에서부터 수십 km 높이까지 지구 주위를 둘러싸고 있다. 대부분의 공기분자는 지

표면으로부터 약 30km 아래에 존재하며 고도가 높아질수록 중력에 의한 영향이 약해져 공기의 밀도는 희박해진다. 대기압(atmospheric pressure)은 공기의 무게 때문에 발생하는 지구 대기의 압력으로, 대기압의 변화로 인해

1) 인하대학교 공과대학 지리정보공학과 석사과정(E-mail: kyeong-hui@inha.edu)

2) 교신저자 · 정회원 · 인하대학교 공과대학 지리정보공학과 조교수(E-mail: kdpark@inha.ac.kr)

지각의 움직임이 발생하게 되는데 이러한 현상을 대기압하중(atmospheric pressure loading)에 의한 지각변위라고 한다.

Rabbel 등(1985, 1986), van Dam 등(1987), 그리고 Manabe 등(1991)에 의한 선행 연구들은 한반도가 위치한 중위도 지역에서 대기압하중에 의해 최대 25mm 정도의 수직방향 지각변위가 발생할 수 있음을 증명하였다. 아시아 대부분 지역에서 대기압하중에 의한 지각변동의 연주기(annual) 진폭이 대략 1-2mm 정도의 크기이지만, 3mm보다 더 큰 진폭을 가지는 지역도 존재하는 것으로 알려져 있다(van Dam 등, 2003). van Dam 등(1994)은 GPS(Global Positioning System)로 계산한 수직좌표 값에서 대기압하중 지각변동 신호를 발견하였으며, 이를 보정하여 수직좌표 시계열의 정밀도를 향상시켰다. 대기압하중에 관련된 선행연구들을 조사한 결과, GPS 수직좌표 추정치에서 대기압하중에 의한 지각변위를 보정하지 않을 경우 주기적인 오차가 발생하게 됨을 알 수 있다.

대기압하중에 의한 지각변위를 산출하는 방법은 지구물리 모델(geophysical model)을 사용하는 방법과 경험적 모델(empirical model)을 사용하는 방법 두 가지가 있다(van Dam 등, 2003). 지구물리 모델을 이용한 방법에서는 그린함수(Green function)를 전지구 표면대기압(surface pressure)과 콘볼루션(convolution)하여 3차원 지각변위와 중력 등을 추정하게 된다. 경험적 모델이란 다양한 측지 관측을 통해 결정된 지각변동을 해당지역의 대기압 데이터와 곡선적합(curve fitting)하여 만든 모델을 의미한다.

우주측지 기술로 추정된 관측소 좌표에서 대기압하중 효과를 보정하기 위해 일반적으로 지구물리 모델에 근거한 대기압하중 지각변위를 사용한다(van Dam 등, 2003). 이 때 지각변위 값은 6시간 간격으로 산출된다. 6시간 간격으로 주어지는 값을 GPS 데이터 처리에 적용하는 방법은 두 가지가 있다(Tregoning 등, 2005). 첫 번째 방법은 GPS 데이터를 처리하는 각 시각(epoch)에 해당되는 지각변위 값을 6시간 간격으로 주어지는 수치로부터 선형보간(linear interpolation)하는 것이다. 두 번째 방법은 6시간 간격의 대기압하중 지각변동 값을 일평균으로 변환한 뒤 1일 단위의 GPS 좌표 추정치에서 빼주는 방법이다.

이 논문에서는 국토지리정보원 14개 GPS 상시관측소와 경위도 0.5° 간격의 격자점을 대상으로 대기압하중 지

각변위를 산출하여, 한반도 전역의 대기압하중 특성을 파악하였다. 또한 고정밀 GPS 데이터처리를 통해 산출한 10년간의 GPS 상시관측소 수직좌표 시계열에서 대기압하중 지각변동을 보정하고, 보정 여부에 따른 관측소 속도 변화 및 정밀도 향상 정도를 파악하였다.

2. 대기압하중 지각변위 계산

이 연구에서는 대기압하중 지각변위 산출을 위해 APLO(Atmospheric Pressure LOading) 프로그램을 사용하였다. APLO는 Petrov 등(2004)에 의해 개발되었으며, 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration) GSFC(Goddard Space Flight Center)의 VLBI(Very Long Baseline Interferometry) 그룹에서 주로 사용하고 있다. APLO를 이용한 지각변위 산출에는 표면대기압의 전지구적 분포와 대기압에 의한 해양반응(oceanic response) 데이터가 필요하다. APLO는 NCEP/NCAR(National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 수치기후모델에 의한 6시간 간격, 2.5° × 2.5° 공간해상도의 표면대기압 데이터와 PREM(Preliminary Earth Model)을 기초로 하는 Farrell(1972) 그린함수의 콘볼루션에 의해 3차원 변위를 산출한다. APLO 프로그램에서 사용하는 NCEP/NCAR 재분석 수치기후모델은 1980-2002년 기간에 걸친 NCEP 재분석 표면대기압에서 평균 표면대기압과 표면대기압의 일주조 및 반일주조 성분의 변동이 제거된 것이다(Petrov 등, 2004). 그리고 해양반응은 역기압설(IB, Inverted Barometer)과 0.25° × 0.25° 공간해상도의 FES99(Lefèvre 등, 2002) 해양조석모델을 근거로 모델링되었다.

시간 t 에서의 대기압하중 3차원 지각변위는 육지와 해양 각각에 대한 콘볼루션 적분의 합으로 나타내며 식 (1)과 같다(아래첨자 L은 육지(land), 아래첨자 O는 해양(ocean)을 의미함).

$$u(\vec{r}, t) = u_L(\vec{r}, t) + \Delta \bar{P}_O(t) u_O \quad (1)$$

이 식에서 \vec{r} 은 관측소의 3차원 좌표를 의미한다. 또한 $\Delta \bar{P}_O(t)$ 는 일정한 해저 압력(sea floor pressure)으로 식 (2)를 이용하여 계산하며, 위도 i 와 경도 j 에 대한 $u_L(\vec{r}, t)$ 과 $u_O(\vec{r})$ 은 각각 식 (3)과 (4)로 나타낸다.

$$\Delta \bar{P}_o = \frac{\int_{ocean} \int \Delta(\vec{r}, t) \cos \phi' d\lambda' d\phi'}{\int_{ocean} \int \cos \phi' d\lambda' d\phi'} \quad (2)$$

$$u_L(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \Delta(\vec{r}'_{ij}, t) q(\vec{r}, \vec{r}'_{ij}) \cos \phi_i \int_{cell_{ij}} \int G(\psi(\vec{r}, \vec{r}'_{ij})) ds \quad (3)$$

$$u_o(\vec{r}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m q(\vec{r}, \vec{r}'_{ij}) \cos \phi_i \int_{cell_{ij}} \int G(\psi(\vec{r}, \vec{r}'_{ij})) ds \quad (4)$$

위의 식에서 ϕ' 와 λ' 는 지구중심을 기준으로 한 관측소 위도와 경도이다. $\Delta \bar{P}_o$ 는 육지에서는 0이고 해양에서는 시간에 대한 함수로 표현된다. 식 (3)과 (4)는 수직 및 수평방향 변위의 요소들로 구성되며 작은 셀(cell)에 대한 구면(sphere) 적분식이다.

표면대기압 변동 $\Delta P(\vec{r}', t)$ 로 인한 관측소의 수직 변위 $u_r(\vec{r}, t)$ 은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_r(\vec{r}, t) = \iint \Delta P(\vec{r}', t) G_R(\psi) \cos \phi' d\lambda' d\phi' \quad (5)$$

식 (5)에서 $G_R(\psi)$ 는 수직방향에 대한 그린함수로 식 (6)을 이용하여 계산한다(Petrov 등, 2004).

$$G_R(\psi) = \frac{fa}{2} \sum_{n=0}^{+\infty} h'_n P_n(\cos \psi) \quad (6)$$

여기서 f , a 그리고 g_0 는 각각 PREM(Dziewonski 등, 1981)에서 정의된 만유인력상수, 평균 지구반지름, 평균 표면중력이다. ψ 는 관측소 좌표 \vec{r} 와 압력원(pressure source) 좌표 \vec{r}' 사이의 각거리이다. 그리고 P_n 는 n 차 Legendre 다항식을 의미한다.

수평방향 변위 $u_h(\vec{r}, t)$ 는 식 (7)을 이용하여 계산한다.

$$u_h(\vec{r}, t) = \iint q(\vec{r}, \vec{r}') \Delta P(\vec{r}', t) G_H(\psi) \cos \phi' d\lambda' d\phi' \quad (7)$$

여기서 $q(\vec{r}, \vec{r}')$ 는 관측소의 위치에서 접선 방향으로의 단위벡터이다. 접선방향으로의 그린 함수 G_H 는 식 (8)과 같다.

$$G_H(\psi) = \frac{fa}{g_0^2} \sum_{n=0}^{+\infty} l'_n \frac{\delta P_n(\cos \psi)}{\delta \psi} \quad (8)$$

식 (6)과 (8)에서 h'_n 와 l'_n 은 하중 Love Number이며 수직방향에서 $q = 1$ 이다.

NASA GSFC의 VLBI 그룹에서는 수백 개소의 VLBI

및 GPS 관측소에서 발생하는 대기압하중에 의한 지각변위 값을 계산하고, 이를 인터넷으로 제공하고 있다. 국내 GPS 상시관측소 중 IGS(International GNSS Service)에 가입되어 있는 국토지리정보원 수원(SUWN)과 천문연구원 대전(DAEJ) 상시관측소의 경우 해당 시계열 데이터를 웹에서 내려 받을 수 있게 되어있다. 그림 1은 해당 웹사이트에서 제공하는 수원관측소의 대기압하중 수직 지각변위를 2000년 1월 1일부터 2008년 12월 31일까지 6시간 단위로 나타낸 것이다. 그림을 보면 계절에 따라 그 크기가 달라지고, 6개월 주기로 대략 1.4-1.6cm 정도의 변동이 관측된다. 이 연구에서는 직접 APLO 프로그램을 리눅스 서버에 설치한 다음, NASA 웹에서 제공하는 결과와 동일한 결과를 산출하는지 확인하였다. 그림 1과 동일한 기간의 수원 관측소의 수직방향 지각변위를 비교한 결과 제공근오차(RMSE, Root-Mean-Square Error)가 0.0mm로 나타나, APLO 프로그램이 제대로 설치되었음을 확인할 수 있었다.

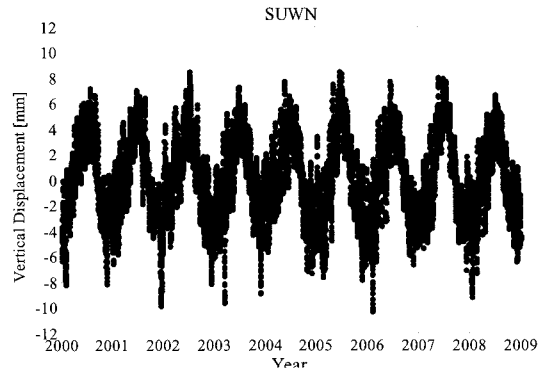


그림 1. NASA GSFC의 VLBI 그룹에서 제공하는 IGS 수원 상시관측소의 대기압하중 수직 지각변위 시계열

3. 한반도의 대기압하중 지각변위 특성

한반도의 대기압하중 지각변위 분석을 위하여 국토해양부 국토지리정보원의 14개소 GPS 상시관측소를 대상으로 6시간 간격의 수직 지각변위를 산출하였으며 분석 기간은 2000년 1월 1일부터 2009년 6월 30일까지이다. 또한 위도 34.5°-38°, 경도 126.5°-129.5°에 해당되는 내륙 지역을 0.5°×0.5° 간격의 격자로 분할하고 각 격자점에 대한 수직 지각변위 시계열을 산출하였다. 산출된 대기압하중에 의한 수직 지각변위 시계열은 대기압 변동에 따른 계절적 신호를 보이므로 사인함수로 곡선적합하여

진폭을 계산하고, 그 진폭 값을 해당지점의 대기압하중 지각변동 특성으로 규정하였다. 분석 결과는 표 1과 2에 각 관측소와 격자점의 진폭 값으로 나타내었다. 14개 관

표 1. GPS 관측소에서의 대기압하중 수직방향 지각변위 진폭

관측소	진폭(mm)	관측소	진폭(mm)
제주(CHJU)	2.7	상주(SNJU)	3.8
청주(CNJU)	3.9	서울(SOUL)	4.0
진주(JINJ)	3.5	수원(SUWN)	3.8
전주(JUNJ)	3.8	태백(TABK)	3.2
강릉(KANR)	3.3	대구(TEGN)	3.1
광주(KWNJ)	3.6	원주(WNJU)	4.0
서산(SEOS)	3.4	울진(WULJ)	3.0

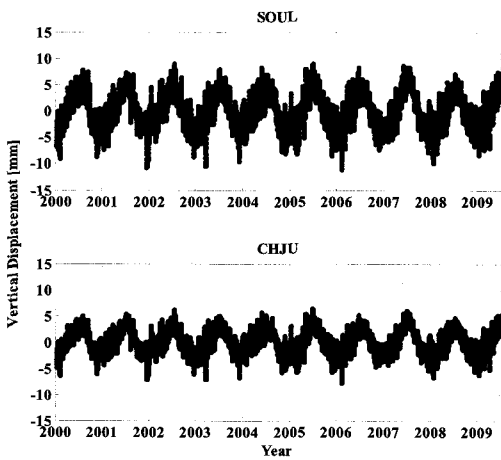


그림 2. 서울과 제주 GPS 상시관측소의 대기압하중 수직 지각변위 시계열 및 곡선적합

측소 중 최댓값은 서울과 원주 관측소에서 4.0mm, 최솟값은 제주 관측소에서 2.7mm로 나타났다. 그리고 격자점의 경우에는 분석대상이 된 격자점 중 위도가 높은 지역에서 상대적으로 큰 진폭을 보이는 것으로 확인되었다. 이와 같이 위도에 따라 진폭의 크기가 달라지는 현상은 표 1의 14개 관측소의 결과에서도 동일하게 나타난다. 진폭의 최대와 최소를 보인 서울과 제주 관측소의 시계열은 그림 2에 나타내었다.

그림 3은 국토해양부 국토지리정보원 14개소 GPS 상시관측소와 한반도 내륙 0.5° × 0.5° 각 격자점에서 산출된 진폭 값을 등고선 지도로 나타낸 것이다. 그림 3을 보면 한반도 내륙에서 진폭이 3-4mm 정도이며 위도가 높아질수록 진폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 아시

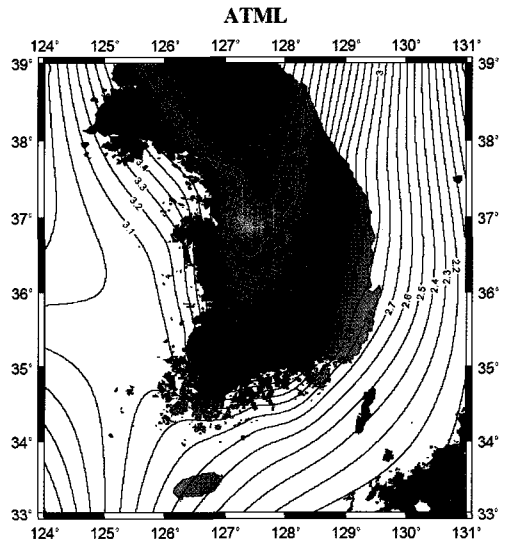


그림 3. 한반도 ATML 진폭 등고선 지도

표 2. 한반도 내륙의 각 격자점에 대한 대기압하중 수직방향 지각변위 진폭

	126.5	127.0	127.5	128.0	128.5	129.0	129.5
38.0	-	4.2	4.2	4.0	3.8	-	-
37.5	3.6	3.8	4.1	4.0	3.7	3.2	-
37.0	3.5	3.9	4.0	3.9	3.7	3.2	-
36.5	3.4	3.8	3.9	3.8	3.6	3.1	-
36.0	-	3.7	3.8	3.7	3.5	3.0	2.8
35.5	3.3	3.7	3.7	3.6	3.4	2.9	-
35.0	3.2	3.5	3.5	3.4	3.0	-	-
34.5	3.0	-	2.9	-	-	-	-

아 대륙에서 3mm 이상의 진폭을 나타낸다는 van Dam 등(2003)과 Tregoning 등(2005)의 연구결과와 일치하는 것이다. 또한 대기압하중 지각변위의 수직방향 진폭이 저위도에서 중·고위도로 갈수록 크게 나타난다는 Tregoning 등(2005)의 연구와도 일치한다.

4. 대기압하중 지각변위 보정

국토해양부 국토지리정보원 14개소 GPS 상시관측소의 1일 단위 GPS 수직좌표 값을 계산하기 위해 GPS 고정밀 데이터처리 프로그램인 GIPSY-OASIS II(GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software II)를 사용하였다(Webb 등, 1993). 데이터처리 방법으로는 일반적인 정밀단독측위(Precise Point Positioning) 기법을 채택하였다(Zumberge 등, 1997). 분석기간은 2000년 1월 1일부터 2009년 6월 30일까지이다. 1일 단위의 GPS 수직좌표 시계열에서 대기압하중 효과를 보정하기 위해 6시간 간격으로 산출된 대기압하중 지각변위 값을 이용하여 일평균을 산출하였다. APLO 프로그램은 하루를 기준으로 0시, 6시, 12시, 18시의 값을 산출하므로 일평균을 계산하기 위해서 그 다음날의 0시

를 포함해 모두 5개(0시, 6시, 12시, 18시, 0시)의 값을 사용하였다. 마지막으로 1일 단위 GPS 수직 좌표 값에서 일평균 대기압하중 지각변위 값을 빼 줌으로써 대기압하중을 보정하였다.

GPS 상시관측소의 수직방향 지각변위 속도는 1차 선형회귀식을 사용하여 계산하였다. 대기압하중이 보정되지 않은 GPS 수직좌표 시계열과 보정 이후의 시계열에서 계산한 지각변동 속도를 표 3에 나타내었다. 관측소 수직방향 지각변동 속도의 경우 음수는 하강, 양수는 상승을 의미하는데 태백 관측소의 경우는 관측환경이 좋지 않아 하강하는 것으로 나타나고 있다(국토지리정보원, 2007).

표 3을 보면 대기압하중의 보정 전후에 각 관측소의 속도에는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 14개소 중 두 곳에서 0.1mm/yr 감소하고, 한 곳에서 0.1mm/yr 증가한 정도만 발견되었다. 반면에 14개소 중 광주를 제외한 13개 관측소 모두에서 정밀도가 향상되었다. 그림 4에 정밀도 향상 정도를 막대그래프로 나타내었다. 특히 전주, 강릉, 수원, 대구, 원주 관측소에서는 5% 이상 정밀도가 향상되었다. 평균적인 향상도는 광주를 제외할 경우 4.2%이고, 광주를 포함할 경우 3.8%이다. 그림 5와 6은

표 3. 14개소 GPS 상시관측소의 대기압하중 보정 전후의 수직 속도 및 정밀도 변화

	속도(mm/yr)			정밀도(mm)		
	보정 전	보정 후	변화	보정 전	보정 후	향상도(%)
제주(CHJU)	1.7	1.7	0.0	10.8	10.7	0.9
청주(CNJU)	1.0	0.9	-0.1	9.0	8.6	4.4
진주(JINJ)	2.7	2.7	0.0	10.2	10.0	2.0
전주(JUNJ)	2.5	2.5	0.0	8.8	8.3	5.7
강릉(KANR)	2.1	2.0	-0.1	9.6	9.0	6.3
광주(KWNJ)	3.4	3.4	0.0	9.6	9.7	-1.0
서산(SEOS)	3.6	3.7	0.1	8.7	8.4	3.4
상주(SNJU)	2.4	2.4	0.0	9.5	9.2	3.2
서울(SOUL)	2.7	2.7	0.0	8.1	7.8	3.7
수원(SUWN)	3.1	3.1	0.0	9.8	9.2	6.1
태백(TABK)	-0.4	-0.4	0.0	11.2	11.0	1.8
대구(TEGN)	2.7	2.7	0.0	9.2	8.7	5.4
원주(WNJU)	2.4	2.4	0.0	9.5	8.7	8.4
울진(WULJ)	4.0	4.0	0.0	9.0	8.7	3.3

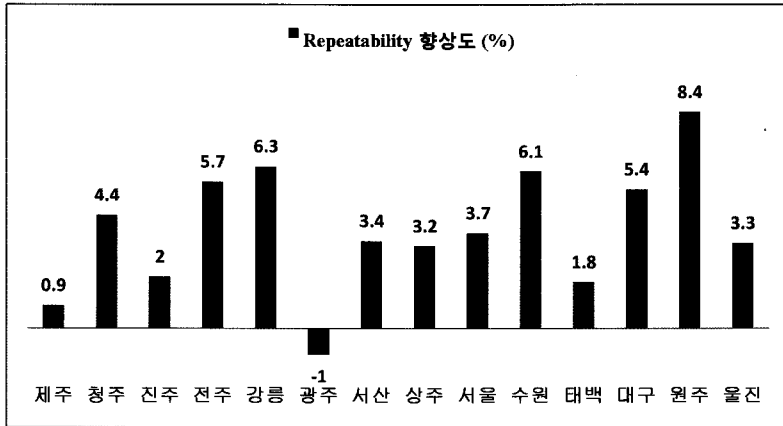


그림 4. 14개소 GPS 관측소의 대기압하중 보정에 따른 시계열 정밀도 향상

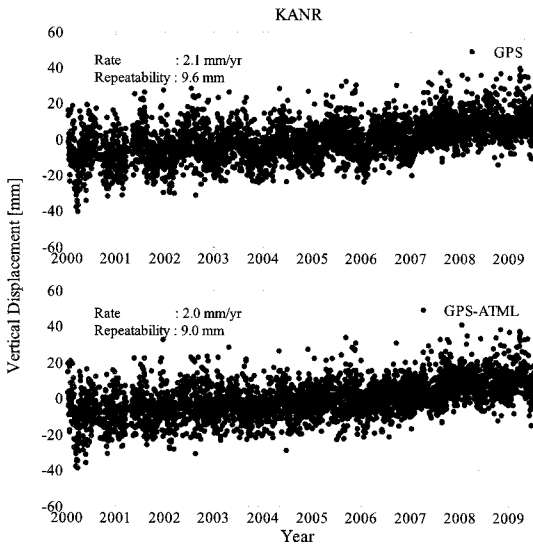


그림 5. 강릉 GPS 상시관측소의 대기압하중 보정 여부에 따른 수직 좌표시계열 및 속도

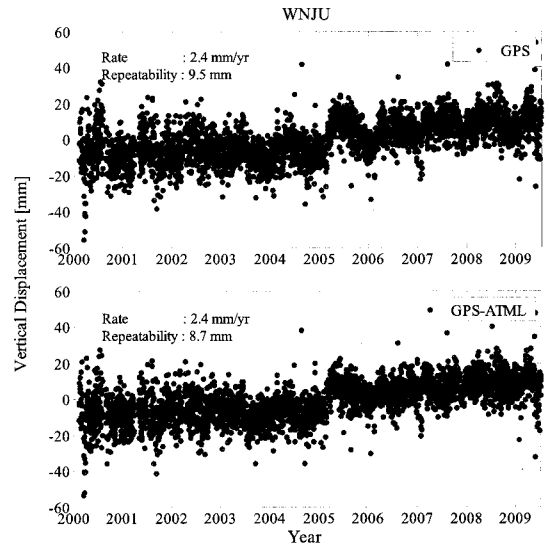


그림 6. 원주 GPS 상시관측소의 대기압하중 보정 여부에 따른 수직 좌표시계열 및 속도

가장 높은 향상도를 보인 강릉과 원주 관측소의 수직좌표 시계열의 보정 전후를 보여준다. 두 그림을 보면 육안으로도 대기압하중 보정 전에는 여름과 겨울철에 시계열이 위쪽과 아래쪽으로 많이 분포되어 있지만, 보정 후에는 그 산포도가 줄어들어 확인할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 국토해양부 국토지리정보원 14개소 GPS 상시관측소에서 2000년 1월 1일부터 2009년 6월 30일까지 수집된 데이터를 고정밀 처리하여 수직좌표 시

계열을 생성하였다. 그리고 NASA에서 개발한 APLO 프로그램을 사용해 각 관측소 지점의 6시간 간격의 대기압하중 지각변위 값을 산출하였고 이를 이용한 일평균 값을 계산하였다. 또한 위도 34.5°-38°, 경도 126.5°-129.5° 범위의 한반도 내륙 지역을 0.5°×0.5° 격자로 분할하고 각 격자점에서의 6시간 간격의 대기압하중 지각변위를 산출하였다. 그 결과 남한지역에서는 대기압하중에 의한 수직방향 지각변위의 연주기 신호 진폭이 3-4mm 정도임을 확인하였다. 추가적으로 1일 단위 GPS 수직좌표 시계열에서 대기압하중 효과를 보정하여 보정여부에 따른 수직 지각변동 속도변화를 분석하였다. 대기압하중

효과의 보정 전후에 각 관측소 지각변동 속도의 변화는 거의 관찰되지 않았다. 그러나 14개 관측소 중 광주 관측소를 제외한 13개 관측소에서 시계열 정밀도가 향상되었으며 보정 전과 비교하여 평균 약 4%의 향상도를 보였다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3105)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 국토지리정보원 (2007), 한반도 지각변동 연구.
- Dziewonski, A. M. and Anderson, D. L. (1981), Preliminary Reference Earth Model, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 25, pp. 297-356.
- Farrell, W. E. (1972), Deformation of the Earth by surface loads, *Reviews of Geophysics*, AGU, Vol. 10, pp. 751-797.
- Lefe'vre, F., Lyard, F. H., Le Provost, C. and Schrama, E. J. O. (2002), FES99: A global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, AMS, Vol. 19, pp. 1345-1356.
- Manabe, S., Sato, T., Sakai, S. and Yokoyama, K. (1991), Atmospheric load effect on VLBI observations, in *Chapman Conference on Geodetic VLBI: Monitoring Global Change*, Washington, D. C.; April 22-26, 1991, NOAA Technical Report, NOS 137 NGS 49, U.S. Dep. of Comm., Silver Spring, MD., pp. 111-122.
- Rabbel, W. and Zschau, J. (1985), Static deformation and gravity changes at the Earth' 's surface due to atmosphere loading, *Journal of Geophysics*, Vol. 56, pp. 81-99.
- Rabbel, W. and Schuh, H. (1986), The influence of atmosphere loading on VLBI-experiments, *Journal of Geophysics*, Vol. 59, pp. 164-170.
- Petrov, L. and Boy, J.-P. (2004), Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations, *Journal of Geophysical Research*, AGU, Vol. 109., B03405, doi:10.1029/2003JB002500.
- Tregoning, P. and van Dam, T. (2005), Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level, *Geophysical Research Letters*, AGU, Vol. 32, L22310, doi:10.1029/2005GL024104.
- van Dam, T. M. and Wahr, J. (1987), Displacements of the Earth' 's surface due to atmospheric loading: Effects on gravity and baseline measurements, *Journal of Geophysical Research*, AGU, Vol 92, pp. 1281-1286.
- van Dam, T. M., Blewitt, G. and Heflin, M. B. (1994), Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations, *Journal of Geophysical Research*, AGU, Vol. 99, pp. 23,939-23,950.
- van Dam T. M. and Plag, H.-P. (2003), *IERS Technical Note* No. 32.
- Webb, F. H. and Zumberge, J. F. (1993), *An introduction to the GIPSY/OASIS-II*, JPL Publ., D-11088, Pasadena, CA.
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. and Webb, F. H. (1997), Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, AGU, Vol. 102, No. B3, pp. 5005-5017.

(접수일 2009. 9. 28, 심사일 2009. 10. 16, 심사완료일 2009. 10. 17)