

Atmospheric Pressure Loading Effects on Multi-GNSS Kinematic PPP

Byung-Kyu Choi^{1*}, Sang Jeong Lee²

¹Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

²Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

ABSTRACT

Recently, many studies have considered the effect of atmospheric pressure loading (APL) on precise global navigation satellite system (GNSS) data processing. The APL deforms the Earth's crust. It can often exceed 10 mm in radial displacement. In this study, we analyze the APL effect on Multi-GNSS kinematic precise point positioning (PPP). In addition, observations received at two GNSS reference stations (DAEJ and SUWN) in South Korea were processed. The absolute position changes for the two stations were compared to before and after applying the APL effects from January 1 to February 29, 2020. The crust of South Korea was most affected by the APL in the up direction. With the APL model, the difference in daily position changes was mostly within 4 mm in the radial direction. On the other hand, the horizontal components (east-west and north-south) were relatively less affected than the radial component.

Keywords: atmospheric pressure loading, Multi-GNSS, PPP, radial component

1. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite System (GNSS) 자료분석 소프트웨어는 점점 더 정밀해지고 있고, 오차모델의 진화는 지상 기준국과 사용자의 위치정확도를 향상시키고 있다. GNSS 신호에 직접 또는 간접으로 영향을 주는 다양한 오차 요소들이 있다. 이 오차요소들은 항법신호에 수십 미터에서 작게는 수 밀리미터까지 영향을 준다 (Li & Geng 2019).

상대측위 기법인 real-time kinematic (RTK)은 공통되는 오차항을 제거하여 높은 수준의 위치정확도를 얻을 수 있다. 그러나 정밀단독 측위기법인 precise point positioning (PPP)는 RTK에 비해 고려해야하는 오차모델들이 많다. 지구조석(Earth tide), 해양조석(Ocean tide), 극조석(Pole tide), 그리고 대류층(Troposphere) 습윤 지연, 위상말림효과 (Phase wind-up), 2차항 이상의 전리권(Ionosphere) 오차 모델들이 정밀 GNSS 자료처리

오차보정에 사용되고 있다. 이외에도 지구대기압력에 의한 영향도 정밀자료처리에 고려되고 있다 (Dach et al. 2011).

대기하중(atmospheric pressure loading, APL)이 지표 변형의 원인이라는 것은 오래전부터 인지되었다(Darwin 1882). APL에 의한 지표의 변형은 Global Positioning System (GPS) 위치 시계열에서도 검출된 바 있다(van Dam et al. 1994, Dong et al. 2002). 대기하중에 의한 지표의 변위는 매일 10mm 이상 초과할 수 있다 (Petrov & Boy 2004). 또한 24시간 주기내에서 최대 수직변위는 20mm에 도달하기도 한다. 그러므로 대기하중은 GPS 정밀위치오차에 영향을 줄 수 있다 (Steigenberger et al. 2009). 대기하중이 증가하면 GPS의 하향변위(downward displacement)가 일어나고, 이와는 반대로 대기하중이 감소하면 상향변위(upward displacement)가 일어난다. Wijaya et al. (2013)은 대기압력에 10 hPa 차이의 발생은 지각에 약 3 mm의 수직변위와 같다고 보고한 바 있다. 또한 Urquhart (2009)은 PPP에서 대기하중의 효과를 분석했고, 위치오차에 대한 root mean square (RMS)가 작아졌다고 보고했다. Dach et al. (2011)은 정밀 GNSS 자료처리에서 APL 보정으로 10~20%의 위치정확도가 향상됨을 보였다. 그리고 Yue et al. (2020)은 APL 보정 후에 중국 내륙에 있는 GNSS 기준국들의 수직변위 시계열이 주기와 진폭의 변화에서 작아진 것을 보였다. 그들은 또한 기준국들의 정밀 자료처리에서 APL에 의한 수직변위값은 최대 약 15 mm에 이르고, 수평변위는 1.5~3 mm 수준이

Received Feb 09, 2021 Revised Feb 17, 2021 Accepted Feb 18, 2021

*Corresponding Author

E-mail: bkchoi@kasi.re.kr

Tel: +82-42-865-3237 Fax: +82-42-861-5610

Byung-Kyu Choi <https://orcid.org/0000-0003-2560-6714>

Sang Jeong Lee <https://orcid.org/0000-0002-9400-5157>

라고 보고했다. 대기하층은 수평방향 보다는 수직방향 변위에 큰 영향을 준다. 따라서 APL을 GNSS 정밀자료처리에 적용함으로써 그 변화 특성을 고려할 필요가 있다.

이전의 연구들은 대부분 GPS 위치 시계열 또는 GPS 자료처리 시에 APL의 영향 등을 분석했다. 본 연구에서는 GPS 이외에 추가적으로 GLONASS, Galileo, BeiDou, 그리고 QZSS 관측자료를 처리한다. 또한 Vienna Mapping Functions (VMF) 데이터 센터에서 제공하는 APL 정보를 Multi-GNSS kinematic PPP에 적용하여 측위변화를 분석한다. 그리고 중위도에 위치한 한반도에서 얻어진 GNSS 기준국의 관측자료를 이용하여 APL을 적용하기 전과 후에 기준국의 측위변화를 구체적으로 제시한다.

2. STRATEGY FOR APL MODEL AND MULTI-GNSS PPP

2.1 Atmospheric Pressure Loading Model

본 연구에서는 Multi-GNSS kinematic PPP에서 APL의 효과를 분석하기 위해 VMF 데이터센터(<https://vmf.geo.tuwien.ac.at/>)에서 제공하는 산출물을 이용했다. APL에 의한 효과는 ‘tidal’과 ‘non-tidal’ 성분으로 구분되고, 이러한 효과들은 식 (1)의 지구물리학적인 모델로부터 계산된다 (Farrell 1972).

$$U(\vec{r}, t) = \iint_S G_R(\psi) (P_s(\vec{r}_p, t) - P_{ref}) ds \quad (1)$$

여기서 $G_R(\psi)$ 는 Green’s function이고, $P_s(\vec{r}_p, t)$ 와 P_{ref} 는 각각 표면 기압(Surface pressure)과 기준 압력(reference pressure)이다. 표면 압력은 6시간 간격의 시간해상도와 $1^\circ \times 1^\circ$ 의 공간해상도를 갖는다. 그리고 기준 압력은 European Centre for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) 40 재해석 자료를 이용해서 만들어진 Global Reference Pressure (GRP) 모델로부터 얻는다.

APL은 일일(diurnal)과 반일(semi-diurnal) 주기를 갖고 있으며, 심지어 일년 또는 한달주기를 갖기도 한다. 따라서 APL의 ‘non-tidal’ 성분은 대기조석의 몇몇 주기적인 진폭변화를 제거하여 계산한다 (Ponte & Ray 2002). VMF 데이터센터에서는 APL의 ‘non-tidal’ 정보를 그리드 파일 (https://vmf.geo.tuwien.ac.at/APL_products/GRID/) 또는 GNSS 기준국 별로 (https://vmf.geo.tuwien.ac.at/APL_products/GNSS/) 매 6시간마다 파일로 제공한다. 본 연구에서 사용한 지구질량중심을 (Center of mass of Earth) 기준으로 계산된 GNSS 기준국의 ‘non-tidal’ 자료를 사용했고, 그 형식은 아래와 같다.

- a. Station name
- b. Modified Julian date
- c. Up component (단위: m)
- d. East component (단위: m)
- e. North component (단위: m)

VMF 데이터센터에서 제공하는 APL의 ‘tidal’ 자료는 3개의 주기성분(S1, S2, S3)으로 구성된다. S1, S2, S3 성분은 각각 24시

간 주기(diurnal), 12시간 주기(semidiurnal), 그리고 8시간 주기(terdiurnal)을 의미한다. 그리고 각각의 주기성분들은 sin과 cos 함수의 조합형태를 갖는다. 따라서 ‘tidal’ 주기성분은 항법좌표계 (Up, East, North)에서 적용이 가능하도록 식 (2)와 같은 순서대로 총 18개의 값이 제공된다.

$$\begin{Bmatrix} S1sU, S1cU, S2sU, S2cU, S3sU, S3cU \\ S1sE, S1cE, S2sE, S2cE, S3sE, S3cE \\ S1sN, S1cN, S2sN, S2cN, S3sN, S3cN \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 s 와 c 는 각각 sin과 cos 함수와 관련이 있는 주기성분이다. 따라서 본 연구에서는 ‘tidal’에 의한 위치성분별 보정항을 식 (3~5)를 이용하여 계산하였다.

$$CorrU = S1sU * \sin(T) + S1cU * \cos(T) + S2sU * \sin(2T) + S3sU * \sin(3T) + S3cU * \cos(3T) \quad (3)$$

$$CorrE = S1sE * \sin(T) + S1cE * \cos(T) + S2sE * \sin(2T) + S3sE * \sin(3T) + S3cE * \cos(3T) \quad (4)$$

$$CorrE = S1sE * \sin(T) + S1cE * \cos(T) + S2sE * \sin(2T) + S3sE * \sin(3T) + S3cE * \cos(3T) \quad (5)$$

여기서 T 는 $mod(mjd, 1) * 2\pi$ 에 의해 계산되고, mod 함수는 modified julian day (mjd) 값을 숫자 1로 나눈 나머지 값을 반환한다.

2.2 Multi-GNSS PPP 자료처리 방법

Multi-GNSS kinematic PPP 자료처리는 한국천문연구원 (Korea Astronomy and Space Science Institute)에서 개발한 Multi-GNSS Analysis Software를 사용한다. 본 연구에서는 GNSS 기준국에서 수신되는 모든 위성항법시스템의 항법신호를 처리한다. 항법신호에는 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou 그리고 QZSS가 포함된다. 그리고 Multi-GNSS PPP 자료처리를 위해서는 모든 이용가능한 항법위성의 궤도와 위성의 시각 오차 정보가 필요하다 (Zumberge et al. 1997). 현재 Multi-GNSS Experiment (MGEX) 산출물을 제공하는 분석센터는 총 7개의 기관이고, 그 중에서 모든 항법위성에 대한 정보를 제공하는 기관은 독일 지구물리연구소 (GeoForschungsZentrum Potsdam, GFZ)와 중국의 Wuhan대학 뿐이다. 본 연구에서는 독일 GFZ에서 제공하는 신속산출물(Rapid products)을 사용한다. GFZ에서 제공하는 MGEX 위성궤도와 위성시각오차의 산출물은 GFZ 데이터센터 (<ftp://ftp.gfz-potsdam.de/GNSS/products/mgex/>)와 미국 NASA의 데이터센터 (<https://cdsis.nasa.gov/archive/gnss/products/mgex/>)에서 모두 다운로드가 가능하다.

PPP는 이중주파수의 관측자료를 이용하여 전리권의 지연 오차를 제거하는 것이 핵심이며 이를 위해서 GPS는 L1과 L2, GLONASS는 L1과 L2, Galileo는 E1과 E5a, BeiDou는 B1과 B3, 그리고 QZSS는 L1과 L5신호를 사용한다.

모든 항법위성과 수신기 안테나의 위상중심오프셋 (phase

Table 1. Processing strategy for Multi-GNSS PPP.

Item	Models / Methods
Estimator	Extended Kalman filter (EKF)
Observations	Un-differenced ionosphere free linear combination
Signals	GPS L1/L2, GLONASS L1/L2, Galileo E1/E5a, BeiDou B1/B3, QZSS L1/L5
Elevation cutoff	7°
Sampling rate	300 sec
Satellite orbit and clock	GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) rapid products
Satellite/Receiver PCO & PCV	igs14.atx
Satellite differential code biases (DCB)	CODE monthly products
Inter-system biases	Estimated as white noise, GPS as reference
Phase wind-up	Wu et al. (1993) & nominal yaw-steering mode
Solid tide, ocean tide, pole tide	IERS conventions 2010
Receiver clock	Random walk model
Ionospheric error	Eliminated
Tropospheric error	Zenith wet delay estimation with gradient parameters
Mapping function	VMF1/GPT2
APL	VMF data center products
Ambiguity	Float

center offset, PCO)과 위성중심변화 (phase center variation, PCV)는 igs14.atx 파일에서 제공하는 값을 적용한다. GPS와 GLONASS는 L1과 L2 주파수에 대한 PCV 정보가 제공되고 있지만, Galileo, BeiDou, 그리고 QZSS 위성은 아직까지 각각의 주파수에 해당하는 PCV 정보가 제공되고 있지 않아, 본 연구에서는 GPS PCV와 같다고 가정하였다. 위상말림효과(phase wind-up)에 대한 보정은 Wu et al. (1993)이 고안한 방법을 적용한다. 그리고 모든 GNSS 위성체의 자세는 Norminal yaw-steering 모드라 가정하였다. 또한 조석 (지구, 해양, 극) 효과의 보정은 International Earth Rotation Service (IERS) conventions 2010에서 권고하는 모델을 사용한다.

Multi-GNSS PPP는 대류층의 습윤지연 오차를 하나의 추정변수로서 고려를 하고, 습윤지연오차 추정을 위해 동서와 남북방향의 2개의 gradients 변수와 함께 사상함수로 Vienna Mapping Function1 (VMF1)를 사용한다. 또한 대류층 오차추정에 기본적으로 필요한 평균온도와 대기압력은 Global Pressure and Temperature 2 (GPT2) 모델에서 생성된 정보를 이용한다. 그리고 모호수(ambiguities)는 extended Kalman filter (EKF) 추정기에 의해 계산되는 실수(Float solutions) 값을 사용한다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 Multi-GNSS PPP 자료처리 방법들과 모델들을 자세하게 기술한 것이다.

3. RESULTS AND ANALYSIS

한반도 내에서 APL에 의한 효과를 분석하기 위해 2020년 1월 1일부터 2월 29일까지 두 달 동안 대전(DAEJ)과 수원(SUWN) 국제기준점에서 수신된 관측자료를 이용하여 Multi-GNSS kinematic PPP 자료처리를 수행하였다. 자료처리 해는 매 5분 간격으로 산출되며, 최종 일일해는 95% 신뢰구간내에서 평균값을 적용했다. VMF 데이터센터에서는 DAEJ와 SUWN기준국에 대한 APL의 ‘tidal’과 ‘non-tidal’의 정보를 사용하였다. 또한 ‘non-tidal’정보는 매 6시간 간격으로 제공되기 때문에 관측시간에 따른 ‘non-tidal’ 값을 사용하기 위해서 본 연구에서는 선형보간법을 적용하였다.

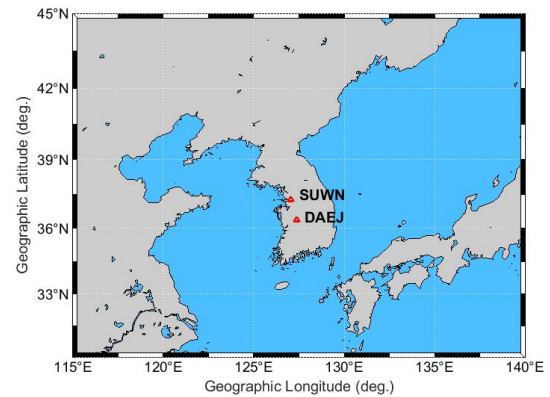
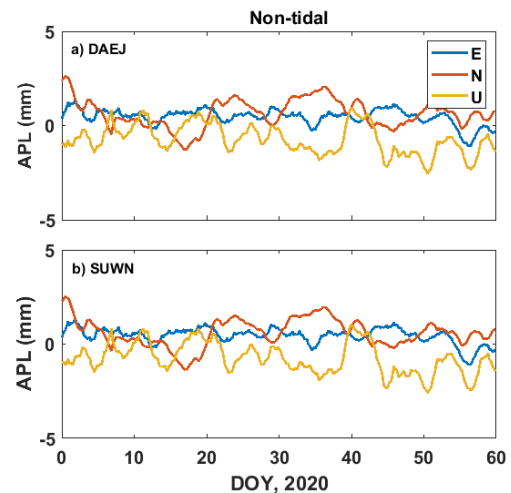
**Fig. 1.** Geographic locations of two GNSS reference stations (DAEJ and SUWN) for testing APL effects, which are marked by the red triangles.**Fig. 2.** The APL non-tidal effects at DAEJ and SUWN stations from January 1 to February 29, 2020.

Fig. 1은 북반구 중위도에 위치하고 있는 한반도에서 APL의 영향을 분석하기 위해 선정한 2개의 기준국, DAEJ와 SUWN의 위

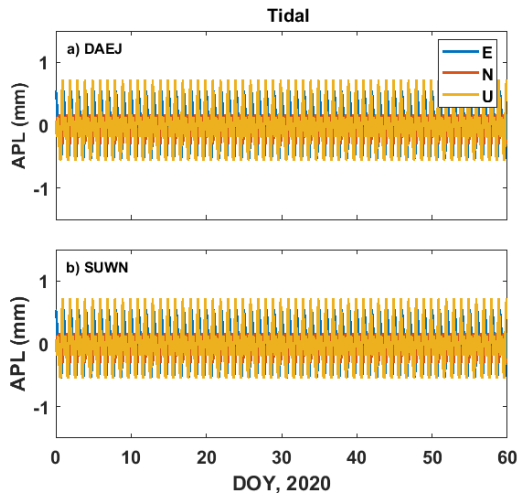


Fig. 3. The APL tidal effects at DAEJ and SUWN stations from January 1 to February 29, 2020.

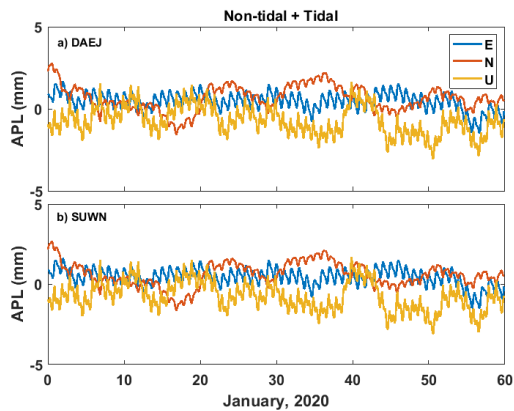


Fig. 4. The APL non-tidal and tidal effects at DAEJ and SUWN stations from January 1 to February 29, 2020.

치를 나타낸 것이다. 두 GNSS 기준국의 직선거리는 약 101 km이다.

Fig. 2는 2020년 1월 1일부터 2월 29일까지 DAEJ와 SUWN 기준국에서 APL에 의한 ‘non-tidal’ 성분을 시계열로 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 2a는 APL의 ‘non-tidal’ 성분에 의해 DAEJ 기준국의 성분별 변화특성을 나타낸다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 ‘non-tidal’ 성분은 자료처리 기간동안 수 mm 수준에서 위치변화에 영향을 준 것을 알 수 있다. APL의 ‘non-tidal’ 성분은 고도방향(U)과 남북방향(N) 성분에 큰 영향을 주는 반면에 동서방향(E) 성분은 DAEJ와 SUWN 모두에서 1 mm 이내의 작은 변화가 관측이 되었다. 또한 Fig. 2b는 SUWN의 APL ‘non-tidal’ 영향을 나타내고 있다. SUWN과 DAEJ에서의 ‘non-tidal’ 영향은 매우 유사한 특징을 보인다. 이것은 두 기준국간의 거리가 상대적으로 가깝기 때문일 것으로 판단된다.

Fig. 3은 앞서 기술한 식 (3~5)에 의해 계산된 APL의 ‘tidal’ 성분을 시계열로 나타낸 것이다. Figs. 3a,b는 각각 DAEJ와 SUWN 기준국에서의 ‘tidal’ 영향을 의미한다. APL의 ‘tidal’ 성분에 의한 영향은 뚜렷한 주기성을 보이고 있고, 진폭은 모든 방향성분에서 1 mm 이내의 값을 갖고 있다. 또한 ‘tidal’ 성분은 고도방향(U)에 가장 큰 영향을 주고, 다음으로 동서방향(E) 그리고 남북방향(N)

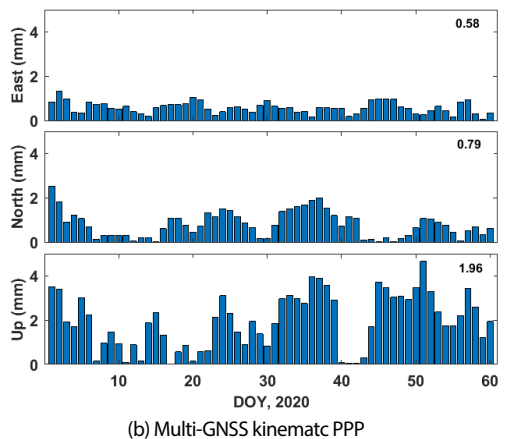
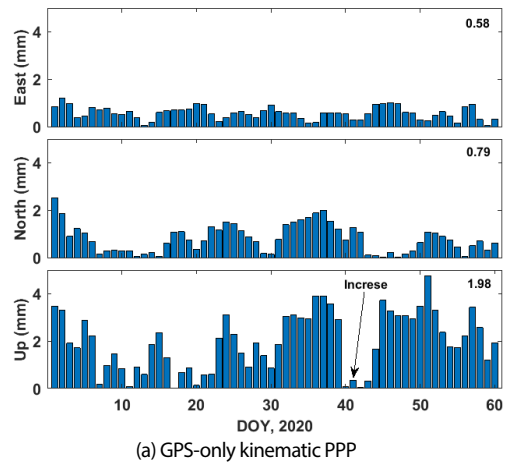


Fig. 5. The absolute position changes for the DAEJ reference station before and after applying the APL model from January 1 to February 29, 2020: (a) GPS-only kinematic PPP, (b) Multi-GNSS kinematic PPP. The numbers in each panel represent the average value.

순서대로 영향을 주는 것을 알 수 있다.

APL의 ‘non-tidal’과 ‘tidal’ 성분은 공통적으로 고도방향(U)에 큰 영향을 준다. 주목할 만한 것은 APL의 ‘non-tidal’ 성분이 동서방향(E)에 가장 작은 영향을 주지만, ‘tidal’ 성분은 남북방향(N)에서 가장 작은 진폭을 가지고 있다. Li et al. (2018)의 연구결과에 따르면, 이러한 성분별 차이는 서로 다른 위도에 따라 다르게 나타날 수 있다. 또한 APL의 ‘non-tidal’ 성분이 ‘tidal’ 성분에 비해 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 2020년 1월 1일부터 2월 29일까지 60일 동안 ‘non-tidal’ 성분과 ‘tidal’ 성분을 결합하여 계산한 APL의 영향을 시계열로 나타낸 것이다. Figs. 4a,b는 각각 DAEJ와 SUWN 기준국에서의 APL 영향을 의미한다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 APL의 전체적인 변화특성은 Fig. 2의 ‘non-tidal’ 변화에 Fig. 3의 작은 ‘tidal’ 주기성분이 결합된 형태를 띈다.

Multi-GNSS kinematic PPP에서의 APL 영향을 분석하기 위해 DAEJ와 SUWN 기준국에서 수신된 관측자료를 각각 처리하였다. 그리고 APL 모델을 Multi-GNSS kinematic PPP 자료처리에 적용하기 전과 후에 위치변화를 일일단위로 계산했다. DAEJ는 PPP 자료처리에 GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS 관측자료를 사용용

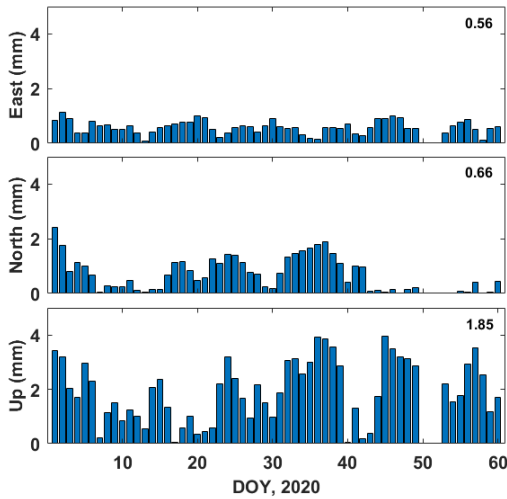


Fig. 6. The absolute position changes for the SUWN reference station before and after applying the APL effects from January 1 to February 29, 2020. The numbers in each panel represent the average value.

했고, SUWN은 GPS, GLONASS, Galileo 관측자료를 사용했다.

Fig. 5는 APL 모델 적용 전과 후에 DAEJ 기준국의 일일단위의 절대 위치변화를 막대 그래프로 나타낸 것이다. 위치변화 값들은 동서(East), 남북(North), 그리고 고도(Up) 방향 성분으로 나누어 산출되었다. Figs. 5a,b는 각각 GPS 단독 PPP와 Multi-GNSS PPP에 의한 결과를 의미한다. GPS 단독이나 Multi-GNSS 자료처리에서 APL 적용 전과 후의 위치변화는 매우 유사하다. Fig. 5a에서 화살표로 표시한 것처럼 Fig. 5b와 비교해서 일부 구간에서는 작은 차이가 있는 것을 알 수 있다. Fig. 5에서 동서와 남북방향의 위치성분은 APL 모델 적용 전과 후와 비교하여 대부분 2 mm 이내의 차이를 보였다. 반면 고도방향은 최대 약 4.6 mm에 도달하기도 한다. 또한 이기간 동안 DAEJ는 동서, 남북, 고도방향의 평균값이 각각 0.58, 0.79, 1.96 mm로 산출되었다. 결과적으로 APL이 DAEJ의 고도방향 성분에 가장 큰 영향을 주었다는 것을 알 수 있다. 반면에 동서방향 성분은 APL의 영향을 가장 작게 받았다. 그리고 고도방향 성분의 변화가 동서방향 성분에 비해 약 3배 이상 큰 것으로 나타났다. Tregoning & van Dam (2005)의 연구결과에 의하면, 중위도와 고위도 지역의 GPS 기준국에서는 APL에 의해서 지각의 고도 성분이 일일 최대 10 mm 영향을 받고, 저위도 지역에서는 4 mm의 지각변위가 발생한다.

Tregoning & Herring (2006)은 고정밀 GNSS 자료처리 소프트웨어인 GAMIT/GLOBK에 APL의 'tidal'과 'non-tidal' 성분을 함께 적용하여 기준국의 고도방향 변화를 분석하였다. 그들은 2004년동안 중위도와 고위도에서 일일 최대 수직변위가 18 mm에 도달했고, 적도지역에서는 표면 기압의 작은 변동성으로 인해 일일 수직변위가 중위도와 고위도에 비해 작았다고 제시했다. 또한 Dach et al. (2011)은 GPS 관측에 APL 효과를 고려했을 때 고도방향 해가 향상됨을 보였다. 즉, 관련연구들은 APL이 GNSS 자료처리에서 고도방향 성분에 가장 큰 영향을 준다고 보고했고, 이것은 우리의 결과와 잘 일치한다.

Fig. 6은 APL 모델 적용 전과 후에 SUWN 기준국의 일일 단위의 절대 위치변화를 막대 그래프로 나타낸 것이다. SUWN은 APL

모델 적용 전과 후와 비교하여 일일 위치변화에 대한 차이는 동서방향이 대부분 1 mm 이내, 남북방향은 2 mm 이내, 그리고 고도방향은 4 mm 이내의 값을 보인다. 60일간 위치변화에 대한 평균값은 동서, 남북, 고도방향이 각각 0.56, 0.66, 1.85 mm이다. 일일 단위의 변화와 전 기간의 평균값을 고려했을 때 SUWN 기준국은 DAEJ 기준국과 APL의 효과가 매우 유사한 것을 알 수 있다.

DAEJ과 SUWN 기준국의 자료처리 결과로부터 우리는 해당 기간 동안 한반도의 지각은 APL에 의해 고도방향이 가장 큰 영향을 받았고, 남북방향, 그리고 동서방향 순으로 영향을 받았다는 것을 알 수 있었다. 그리고 한반도내에서 PPP 위치성분에 대한 APL의 영향은 Petrov & Boy (2004)에 의해 제시된 결과와 잘 일치했다.

4. CONCLUSIONS

본 연구에서는 북반구 중위도에 위치하고 있는 한반도에서 Multi-GNSS kinematic PPP 자료처리에 대기하중이 미치는 영향을 분석하였다. 대전(DAEJ)과 수원(SUWN) GNSS기준국에서 2020년 1월 1일부터 2월 29일까지 수신된 관측자료를 처리하였고, 자료처리에 APL의 'tidal'과 'non-tidal' 모델이 함께 고려되었다.

APL 모델을 적용하기 전과 후의 결과를 비교하여 두 곳의 기준국에서 일일 위치변화에 대한 차이와 해당기간의 평균값이 매우 유사하게 산출되었음을 알 수 있었다. 일일 위치변화의 차이는 고도방향이 대부분 4mm 이내의 값을 보였고, 동서와 남북방향 성분은 각각 1mm와 2mm 이내였다. 즉, APL에 의해 한반도 지각의 고도방향 성분이 수평방향 성분에 비해 상대적으로 큰 영향을 받았다. 또한 자료처리 기간동안 위치변화에 대한 평균값도 고도방향이 동서 또는 남북방향에 비해 2배에서 3배이상 큰 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통해서 한반도에서 APL이 Multi-GNSS PPP 측위결과에 주는 영향을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENTS

This study was supported by the 2021 Primary Project of the Korea Astronomy and Space Science Institute.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Methodology, B.K. Choi, and S.J. Lee; software, B.K. Choi; formal analysis, B.K. Choi; investigation, S.J. Lee.

CONFLICTS OF INTEREST

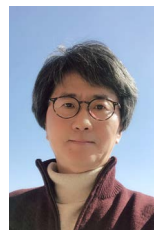
The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Dach, R., Böhm, J., Lutz, S., Steigenberger, P., & Beutler, G. 2011, Evaluation of the impact of atmospheric pressure loading modeling on GNSS data analysis, *J. Geod.*, 85, 75-91. <https://doi.org/10.1007/s00190-010-0417-z>
- Darwin, G. H. 1882, On variations in the vertical due to elasticity of the Earth's surface, *Philos. Mag.*, 14, 409-427. <https://doi.org/10.1080/14786448208628439>
- Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M. K., & Miyazaki, S. 2002, Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series, *J. Geophys. Res.*, 107(B4), 2075. <https://doi.org/10.1029/2001JB000573>
- Farrell, W. E. 1972, Deformation of the Earth by surface loads, *Rev. Geophys.*, 10, 751-797. <https://doi.org/10.1029/RG010i003p00761>
- Li, G. & Geng, J. 2019, Characteristics of raw multi-GNSS measurement error from Google Android smart devices, *GPS Solut.*, 23, 90. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0885-4>
- Li, Z., Chen, W., Jiang, W., Deng, L., & Yang, R. 2018, The Magnitude of Diurnal/Semidiurnal Atmospheric Tides (S1/S2) and Their Impacts on the Continuous GPS Coordinate Time Series, *Remote Sens.*, 10, 1125. <https://doi.org/10.3390/rs10071125>
- Petrov, L. & Boy, J. P. 2004, Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations, *J. Geophys. Res.*, 109, B03405. <https://doi.org/10.1029/2003JB002500>
- Ponte, R. M. & Ray, R. D. 2002, Atmospheric pressure corrections in geodesy and oceanography: A strategy for handling air tides, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 6-1-6-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL016340>
- Steigenberger, P., Boehm, J., & Tesmer, V. 2009, Comparison of GMF/GPT with VMF1/ECMWF and implications for atmospheric loading, *J. Geod.*, 83, 943-951. <https://doi.org/10.1007/s00190-009-0311-8>
- Tregoning, P. & Herring, T. 2006, Impact of a priori zenith hydrostatic delay errors on GPS estimates of station heights and zenith total delays, *Geophys. Res. Lett.*, 33(L23303), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2006GL027706>
- Tregoning, P. & van Dam, T. 2005, Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L22310. <https://doi.org/10.1029/2005GL024104>
- Urquhart, L. 2009, Atmospheric pressure loading and its effects on precise point positioning, in 2009 ION GNSS, Savannah, GA, 22-25 Sep 2009, pp.658-667.
- van Dam, T. M., Blewitt, G., & Heflin, M. B. 1994, Atmospheric pressure loading effects on Global Positioning System coordinate determinations, *J. Geophys. Res.*, 99, 23939-23950. <https://doi.org/10.1029/94JB02122>
- Wijaya, D. D., Böhm, J., Karbon, M., Krásná, H., & Schuh, H. 2013, Atmospheric pressure loading, in *Atmospheric effects in space geodesy*, eds. J. Böhm & H. Schuh (Berlin: Springer), pp.137-157. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36932-2_4
- Wu, J., Wu, S., Hajj, G., Bertiger, W., & Lichten, S. 1993, Effects of antenna orientation on GPS carrier phase, *Manuscripta Geodaetica*, 18, 91-98
- Yue, G., Dang, Y., Xu, C., Gu, S., & Dai, H. 2020, Effects and Correction of Atmospheric Pressure Loading Deformation on GNSS Reference Stations in Mainland China, *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 4013150. <https://doi.org/10.1155/2020/4013150>
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. 1997, Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *J. Geophys. Res.*, 102, 5005-5017. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>



Byung-Kyu Choi received his Ph.D. degree in Electronics in Chungnam National University in 2009. He has been working at the Korea Astronomy and Space Science Institute since 2004. His research interests include multi-GNSS PPP, PPP-RTK, and GNSS TEC & DCB analysis.



Sang Jeong Lee received the Doctor's degree in Control and Measurement in Seoul National University in 1987. His research interests include GNSS and Robust Control.