

ISSN 0435-4036 (Print) ISSN 2288-7377 (Online)

GNSS PPP 기법을 이용한 제주도 지표 변형 감시

이승우^{1,2,‡} · 윤성효^{2,3} · 이덕기⁴ ¹부산대학교 환경연구원 ²부산대학교 화산특화연구센터 ³부산대학교 지구과학교육과 ⁴기상청 지진화산국 지진화산연구과

요 약

본 연구에서는 제주도 내 공공 기관에서 운영 중인 GNSS 기준국 네트워크를 통해 수집한 GNSS 데이터를 분석하여 제주도 지표 변형을 산출하고 기선 분석을 수행하였다. GNSS 데이터 처리를 위해 다중 PPP 측위 필 터를 개발하고 IGS 네트워크 데이터를 이용하여 IGS 제공 좌표와 비교하는 방식으로 성능 검증을 수행하였다. 다음으로 제주도 GNSS 네트워크에서 2014년 12월부터 2019년 5월까지 수집된 GNSS 데이터를 처리하여 각 기준국들의 3차원 좌표와 타원 고도를 산출하고 제주 남서부, 중부 및 북동부 지역 방향의 기선을 구성하여 기 선 해석을 수행하였다. 처리 결과 제주시와 서귀포시에 위치한 GNSS 기준국들은 연 평균 약 0.2 - 0.4 cm로 침 강하는 것으로 판단되며 마라도 기준국은 비교적 현재 고도를 유지하나, 성산일출봉 기준국은 타 기준국에 비 해 3배 이상 빨리 침강하는 경향을 보였다. 성산 일출봉 지역이 지표 변화 속도가 빠른 이유가 화산 활동과 관련 이 있는지 후속 연구를 통해 원인 규명이 필요한 것으로 보인다.

주요어: 제주화산도, 지표 변형, 전지구 위성항법 시스템, 화산 활동

Seung-Woo Lee, Sung-Hyo Yun and Dukkee Lee, 2020, Monitoring ground deformation at Jeju volcanic island using GNSS PPP technique. Journal of the Geological Society of Korea. v. 56, no. 1, p. 31-45

ABSTRACT: We process GNSS data recorded by a network of receivers that are operated by several domestic institutions in the Jeju volcanic island in order to monitor possible volcanic precursory activities. A GNSS data processor is formulated to compute the position of the individual stations using multi-constellation PPP technique and the performance of the PPP filter is validated by comparing against reference solutions provided by IGS. Finally the three-dimensional coordinates as well as ellipoidal height of the receivers are computed from the GNSS measurements that span from Dec. 2014 through May 2019 and subsequently three baselines are formed for baseline analysis which extend to the north-eastern, down south and south-western directions of Jeju volcanic island, respectively. Results show that the ellipsoidal heights of the GNSS stations located in Jeju-shi and Seoguipo-shi are gradually decreased at the rate of 0.2 - 0.4 cm per year while the station near Sungsan-ilchulbong located in north-eastern region of Jeju volcanic island sinks down at the rate of more than three times greater than the other stations. Further research is needed to investigate the relevance of the elevated subsidence in the north-eastern area to volcanic activities of Jeju volcanic island.

Key words: Jeju volcanic island, ground deformation, GNSS, volcanism

(Seung-Woo Lee, Institute of Environmental Study, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Sung-Hyo Yun, Department of Earth Science Education, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Seung-Woo Lee and Sung-Hyo Yun, Volcano Specialized Research Center, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea; Dukkee Lee, Earthquake and Volcano Research Division, Earthquake and Volcano Bureau, Korea Meteorological Administration, Seoul 07062, Republic of Korea)

^{*} Corresponding author: +82-51-510-1874, E-mail: leeseungwoo@hotmail.com

1. 서 언

제주도는 대륙지각 내의 화산활동(intraplate volcanism)에 의해 형성된 면적 약 1,845 km²를 가진 화산섬으로서 그동안 제주도의 형성 과정에 대해 다 양한 지질학, 암석학적 연구들이 진행되어 왔다(Won *et al.*, 1998; Oh *et al.*, 2000; Koh, J.S. *et al.*, 2003, 2005; Yun, 2004; Hwang *et al.*, 2005; Koh, G.W. *et al.*, 2008, 2013, 2019). 제주도 기원에 대한 지질학적 연구에 비해 제주도의 화산 분화 가능성에 대한 연 구 및 감시 활동은 상대적으로 저조한 편인데 그 이 유 중의 하나는 화산성 지진 또는 분연 등과 같이 한 라산에서 관측 가능한 화산 분화 전조 현상들이 나 타나지 않기 때문으로 사료된다. 그러나 복수의 단 성화산체로 구성된 제주도의 특성상 한라산 외의 지 역에서 산발적으로 분화할 가능성도 있는 것(Ko and Yun, 2016)이 사실이다.

본 연구에서는 전지구 위성항법시스템(Global Navigation Satellite System, GNSS)을 이용한 제주도의 지표 변형을 관측하고 약 5년에 걸친 지표 변형 시계열 데 이터에 대해 분석하고자 한다. 화산성 지표 변형은 대표적인 화산 전조 현상 중의 하나로서 마그마의 상승 및 하강과 같은 현상 등에 의해 야기될 수 있는 데 특히 화산성 지진이나 분연에 앞서 지표 변형이 나타나는 경우도 있으므로 현업 화산 분화 감시에서 GNSS 및 지진계를 포함한 다양한 센서들을 널리 사 용되고 있다(Segall and Davis, 1997; Elósegui et al., 2006). 이런 측면에서 GNSS는 현재 지표 변형 관측 에 가장 널리 사용되고 있는 센서 플랫폼 중의 하나 로서 날씨에 관계 없이 3차원의 지표 변형을 cm 수 준의 정확도로 계산할 수 있는 장점이 있으며(Shimada et al., 1990; Dzurisin et al., 2005; Cervelli et al., 2006; Larson et al., 2010) 이에 관련한 문헌 역시 다 수 존재한다(Owen et al., 2000; Pauk et al., 2001; Segall et al., 2001; Miklius et al., 2005; Poland et al., 2008; Montgomery-Brown et al., 2010). 위에 열거된 대다수 연구들은 하루동안 수집된 자료를 이 용하여 batch estimation 기법을 통해 산출한 절대 좌표를 활용하였는데 이것은 후처리 기법에만 적용 가능한 방법이다. 게다가 GNSS를 통해 산출한 좌표 는 통상적인 RINEX (Receiver INdependent EXchange format) 의 30초 샘플링 간격에 비해 GNSS solution 의 산출 빈도가 매우 낮았는데 이것은 정밀한 GNSS solution의 산출을 위해 임의로 설정한 구간에 대한 일종의 평균 좌표를 구함으로써 오차와 잡음을 줄였 음을 암시한다. 일반적으로 solution의 산출 빈도는 해당 기법의 시간 분해능을 의미함으로 화산 분화와 같이 급속하게 변화하는 지구과학적 현상들은 산출 빈도가 높은 측정 기법을 통해 보다 더 세밀하게 감 시될 수 있다. 이러한 이유로 1시간의 산출 빈도를 가지는 GNSS solution을 이용한 화산 감시 연구가 수행된 바 있는데(Cervelli et al., 2006) 경우에 따라 선 1 시간의 산출 빈도도 화산 내 동역학적 변화를 감 시하는데 부족할 수 있다. 따라서 1시간 이하의 산출 빈도를 가진 GNSS solution을 활용하는 연구가 발 표되었는데(Mattia et al., 2008; Larson et al., 2010) 해당 연구에는 RINEX의 샘플링 빈도와 같은 30초 또는 그 이하의 산출 빈도를 제공할 수 있는 기법을 포함하고 있다. RINEX 샘플링 빈도 또는 그 이하의 산출 빈도를 solution 생성 기법은 순간 측위 또는 고속 이중차분 기법 이라고도 불리우는데 이것은 널 리 알려진 RTK (Real-Time Kinematic) 기법과 여 러모로 유사하다. 현재 고속 이중차분 기법의 경우 산출 빈도가 1초가 통상적인데 최근 GNSS 수신기 의 경우 샘플링 빈도를 수십 Hz까지 지원하며 또한 IMU (Inertial Measurement Unit)와 융합하여 샘 플링 빈도를 수백 Hz 이상 향상하는 것도 가능한데 이론상 RTK 기법을 100 Hz 샘플링 빈도의 수신기 와 결합할 경우 최대 50 Hz의 고주파 성분을 가지는 지구과학적 변화 관측에 대해 활용이 가능하다.

여러 GNSS 측위 기법 중 PPP (Precise Point Positioning) 기법은 화산성 지표변형 등을 포함하 여 다양한 원인으로 인한 지표 변화를 산출하는데 유용한 방법인데 RTK와 달리 단일 수신기로 적용 가능하며 지표 변형 스펙트럼이 저주파 대역에 집중 되어 있고 후처리 방식으로 처리가 가능할 경우 특 히 유용하다. 앞서 소개한 문헌들은 GPS 데이터로 주로 의존하여 결과를 산출하였는데 현재 미국 GPS 외에도 러시아 GLONASS 등 다양한 constellation 들이 추가되었으면 향후 한국형 위성항법 시스템인 KPS도 운용 예정 중에 있어 GPS 외에 타 신호도 함 께 활용하는 다중 GNSS 방식을 적용함으로써 위성 의 가시성을 높이고 처리 결과의 정확도를 향상하는 것이 바람직할것으로 예상된다. 본 연구에서는 먼저 다중 GNSS 데이터를 이용한 PPP 기반 지표 변형 산출 필터의 구현 방안에 대해 기술하고, 개발된 필터를 IGS (International GNSS Service) 데이터를 이용하여 성능 검증을 수행한 결 과와 제주도 내에 설치된 GNSS 기준국 네트워크에 서 산출된 데이터를 처리하여 지표 변형 3차원 시계 열 및 기선 거리 분석 결과를 제시한다.

2. 연구지역

앞서 언급한 대로 본 연구는 제주도 지역을 대상 으로 하는데 제주도는 지질학적으로 선캠브리아시 대의 변성암, 쥐라기 화강암류, 백악기 화산암 및 화 강암의 기반암 위에, 신생대 말에 화산활동을 통해 분화된 물질이 대륙붕 해저에 쌓여서 해수면 위로 나온 화산섬이다. 기반암의 지질은 한반도 동남부 강진, 해남, 장흥지역의 지질과 매우 유사하다. 제주 도 화산활동 시작 시기와 일치하는 서귀포층의 형성 시기는 고지자기 및 고생물학 연구를 통해 하부 경 계는 최고 1.88 Ma (Kim and Lee, 2000)에서 1.66 Ma (Yi et al., 1998) 로부터, 노두 표식지에서 이 층을 피복하고 있는 용암류의 K-Ar 연대 자료에 의해 0.4 Ma의 상부 경계를 가지고 있음이 알려져 있으나(Lee et al., 1988), 동부 지역 시추공에서 획득된 결과는 0.3 Ma까지도 퇴적이 진행되었음을 지시한다(Koh et al., 2008). 지난 백 만년 동안 빙하기/간빙기 동안 전 세계 해수준면의 변화(Bintanja et al., 2005)와 제주 도 주변의 해저 심도를 고려하면, 서귀포층이 퇴적 되는 기간 동안 여러 차례의 해침과 해퇴에 의한 수 심 및 퇴적 환경의 변화가 있었음을 알 수 있다. 따라 서 서귀포층의 퇴적상과 형성 기간은 응회환 및 응 회구를 형성시키는 수성화산활동과 연안 및 천해 환 경에서의 퇴적작용이 오랜 기간에 걸쳐 제주도 형성 과정과 연관되어 지속되어 왔음을 지시한다(Sohn, 2004; Sohn and Park, 2004; Yoon and Chough, 2006; Sohn et al., 2008; Sohn and Yoon, 2010).

최근에는 제주도의 화산활동을 "서귀포층"을 기 준으로 크게 퇴적 동시대 화산활동기(stage of syndepositional volcanic activities)와 퇴적 이후 화산 활동기(stage of post-depositional volcanic activities)로 구분하는 것이 제안되었다. 서귀포층 퇴적 동시대 화산활동기(약 1.88~0.5 Ma)는 서귀포층의 석회질 초미화석 연대와 연계한 고지자기 분석으로 얻어진 최고 연대(약 1.88 Ma; Kim and Lee, 2000) 로부터 그 이후 수성화산활동으로 분화한 응회암이 나 일부 용암이 화산쇄설성 퇴적층인 서귀포층에 협 재하거나 지표에 용암돔(lava dome)상으로 산출하 며, 최종적으로 서귀포층을 피복하기 이전까지의 화 산활동기에 해당한다. 이때 서귀포층내에서 다양한 수성화산활동 및 해침과 해퇴에 의한 해수면 변동의 증거를 가지며, 육상으로 용암류의 분출은 매우 국 지적이고 간헐적인 화산활동이 있었고, 그 전후 다 시 해침에 의해 해양성 퇴적층의 퇴적작용도 진행되 었음을 암시한다. 서귀포층 퇴적 이후 화산활동기(0.5 Ma~홀로세)는 해퇴 등에 의해 제주도 지형이 섬으 로 육상에 노출되기 시작하여, 이후 활발히 재개된 육 성화산활동으로 육상에서 분출한 용암이 서귀포층 을 피복하고 현재의 제주도 지형을 이루는 시기에 해당한다. 비록 드물지만 해안가 시추공내에서 파쇄 된 베개용암 각력이나 유리쇄설성 각력(hyaloclastite breccias)의 산출은 이 기간 제주도 주변 해수면 의 변동이 여러 번 있었다는 증거를 제시한다. 서귀 포층의 노두 표식지에서 서귀포층을 피복하고 있는 직상부의 현무암질 조면안산암 조성의 용암은 K-Ar 연대 자료에 의해 0.41±0.01 Ma임이 알려져 있으나 (Lee et al., 1988), 여래동 및 강정동 해안가에 분포 하는 조면현무암과 현무암질 조면안산암 조성의 용 암은 각각 485±19 Ka, 403±9 Ka이다. 이 기간 서귀 포층을 직접 피복하는 용암류가 시추공에서 전 지역 에 골고루 분포하는 것으로 미루어, 제주도 전역에 걸쳐 본격적인 육성화산활동이 활발이 진행되었음 을 지시한다. 해안가 지역과 얕은 해안에서는 수성 화산활동이 계속되었다(예, 성산 일출봉 5천 년 전).

전체적으로 제주도의 기원 및 화산활동에 의한 마그마 기전 등 암석학적 분석은 일정 부분 연구 성 과가 도출되었으나 여전히 데이터 부족 등의 이유로 연구를 필요로 하는 분야이며 이와 더불어 현재 제 주도의 화산활동 재개 가능성에 대한 연구도 병행되 는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3. 연구 방법

앞서 기술한 대로 본 연구에서는 GNSS PPP 기법 을 사용하여 3차원 지표 변형을 산출하는데 PPP 기 법의 구현 방식에 대해 기술한다.

PPP는 IGS 정밀 궤도력과 같이 GNSS 위성들의 위치 및 시각 오차들에 대한 정밀한 정보를 이용하 여 GNSS 데이터를 통해 수신기의 좌표를 cm 수준 의 정확도로 산출하는 방식인데 또다른 GNSS 정밀 측위 방식인 RTK (Real-Time Kinematic) 기법에 비해 수신기 1대 만으로 가능하다(Lee *et al.*, 2013). 따라서 비교적 간단하게 정밀 측위를 수행할 수 있 는 장점이 있으며 통상 후처리 기법으로 수행되나 최근 실시간 기법도 개발되었다. 반면 RTK의 경우 수신기 2대 이상을 필요로 하는 대신 관측값 간의 차 분을 이용하므로 대기 오차 등을 쉽게 제거할 수 있 어 실시간 구현에 매우 용이한 방식이다(Hofman-Wellenhof *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2015).

PPP 기법은 GNSS 신호가 대기 중으로 전파하면 서 전리층에 의해 발생하는 신호 지연을 제거하기 위해 이중 주파수 GNSS 신호를 선형 조합하여 생성 한 L3 신호를 이용한다. 이것은 전리층 지연이 주파 수 의존성이 있기 때문에 두개 이상의 주파수 신호 를 이용할 경우 전리층 지연을 상쇄할 수 있기 때문 이다. 이를 수식으로 표현하기 위해 이중 주파수 GNSS 관측 데이터를 아래와 같이 정의할 수 있는데 GNSS 데이터 처리 및 필터 구현과 관련한 정의 및 수식 관 련 부분은 Lee *et al.* (2015)을 참고하여 기술한다.

$$P_{A,i}^{s} = \rho_{A}^{s} + c\left(\delta^{s} - \delta_{A}\right) + I_{A,i}^{s} + T_{A}^{s} + b_{A,i} + b_{i}^{s} + e_{A,i}$$

$$\Phi_{A,i}^{s} = \rho_{A}^{s} + c\left(\delta^{s} - \delta_{A}\right) - I_{A,i}^{s} + T_{A}^{s} + N_{A,i}^{s} \lambda_{i} + B_{A,i} + B_{i}^{s} + \varepsilon_{A,i}$$
(1)

식(1)에서 윗첨자 S는 GNSS 위성을 의미하며 아 래 첨자 중 첫번째인 A는 수신기를 나타내고 두번째 인 *i*는 반송파 주파수를 의미하는데 1의 경우 1.5 GHz인 L1, 2의 경우 1.2 GHz인 L2 관측 데이터를 나타낸다. *P* 와 Φ는 GNSS 관측 데이터인 의사 거 리와 반송파 데이터를 의미하는데 의사거리는 사용 하기 쉬운 대신에 잡음 수준이 약 1-3 m 수준이며 반 송파 데이터는 잡음 수준이 약 1-3 m 수준이며 반 송파 데이터는 잡음 수준이 의사거리에 비해 1/100 이하로 보다 정밀한 관측 데이터인 반면 미지 정수 *N* 이 포함되어 있어 이를 제거하기 위해 추가적인 과정이 필요한 단점이 있다. 참고로 PPP와 RTK를 포함한 GNSS 정밀 측위 기법은 두 관측 데이터를 모두 사용한다. 식(1)에서 보는 대로 의사거리와 반 송파 데이터는 여러가지 항들로 구성되어 있고 각 항들은 순서대로 ρ는 S와 A간의 기하학적 거리, 위 성 시계 오차 δ^s와 수신기 시계 오차 δ₄를 차분한 후 광속 c를 곱한 값, 전리층 지연 *I*, 대류층 지연 *T*, 의 사거리 잡음 *e* 및 반송파 잡음 *ε*을 나타낸다. 추가 로 *B*와 *b*는 각각 의사거리와 반송파 관측값 내에 포함된 하드웨어 편차를 의미한다.

상기의 이중 주파수 의사거리 및 반송파 데이터 를 이용하여 L3 데이터를 포현하면 다음과 같다.

$$P_{3} = \alpha \cdot P_{1} - \beta \cdot P_{2} = \rho + c \left(\delta^{s} - \delta_{A} \right) + T + e_{3}$$

$$\Phi_{3} = \alpha \cdot \Phi_{1} - \beta \cdot \Phi_{2} = \rho + c \left(\delta^{s} - \delta_{A} \right) + T + C_{3} + \varepsilon_{3} \quad (2)$$

식(2)는 차분하지 않은 L3 의사거리와 반송파 데 이터를 나타내는데 여기서 상수 α 와 β 는 각각 $f_2^2/(f_1^2 - f_2^2)$ 와 $f_1^2/(f_1^2 - f_2^2)$ 를 의마하고 f_i 는 앞서 기술한 i 번째 반송파 주파수인데 L1 및 L2 주파수 를 넣어 계산할 경우 α 와 β 는 각각 약 2.546, 1.546 이 되며 α 와 β 의 합은 1이므로 주파수 의존성이 없 는 항들은 L3 조합을 적용하더라도 차이가 없음을 알 수 있다. 식(2)에서 C_3 로 표현한 항은 L1과 L2 반 송파 데이터의 미지 정수를 조합한 항으로서 L3 조 합에 의해 실수 형태의 값을 가지게 되고 통상 L3 phase ambiguity로 명칭한다. B과 b는 L3 조합에 의해 제거되지 않으나 계산 과정에서 시계 오차와 구분이 불가능하므로 통상적으로 L3 관측 데이터에 서 0으로 간주한다.

본 연구에서 활용하는 관측 데이터는 식(2)에 주 어진 L3 데이터이며 이를 처리하기 위해 전처리 단 계에서 cycle slip 등의 이상 데이터를 제거하는 과 정을 거친다. GNSS 위성의 좌표와 시계오차는 IGS Final ephmeris에서 제공하는 값을 대입하여 사용 하는데 최적 추정 과정을 통해 산출하는 값은 핵심 값인 수신기의 좌표값과 더불어 수신기 시계 오차, 대류층 지연 중 수증기로 인한 습윤 지연값, 그리고 실수 형태로 주어진 L3 phase ambiguity를 계산 방 식은 주로 Weighted Least Squares 또는 Extended Kalamn Filter (EKF) 등을 주로 활용하는데 본 연구 에서는 EKF를 적용하였다. EKF는 널리 사용되는 최적 추정 필터인 Kalman Filter를 비선형 문제에 적용하 기 위해 수정한 형태이다. 일례로 k번째 데이터를 이 용하여 산출할 state vector **x**(*k*)와 covariance **P**(*k*) 는 다음 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{split} \widetilde{\mathbf{x}}(k) &= \mathbf{\Phi}(k) \widehat{\mathbf{x}}(k-1) \\ \widetilde{\mathbf{P}}(k) &= \mathbf{\Phi}(k) \widehat{\mathbf{P}}(k-1) \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}(k) + \mathbf{Q}(k) \\ \mathbf{K}(k) &= \widetilde{\mathbf{P}}(k) \mathbf{H}^{\mathrm{T}}(\widetilde{\mathbf{x}}(k)) [\mathbf{H}(\widetilde{\mathbf{x}}(k)) \widetilde{\mathbf{P}}(k) \mathbf{H}^{\mathrm{T}}(\widetilde{\mathbf{x}}(k)) + \mathbf{R}]^{-1} \\ \widehat{\mathbf{x}}(k) &= \widetilde{\mathbf{x}}(k) + \mathbf{K}(k) (\mathbf{z}(k) - \mathbf{h}(k) (\widetilde{\mathbf{x}}(k))) \\ \widehat{\mathbf{P}}(k) &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \mathbf{H}(\widetilde{\mathbf{x}}(k))) \widetilde{\mathbf{P}}(k) . \end{split}$$
(3)

이때 x(k)는 수신기 좌표, 수신기 시계 오차, 대류 권 오차 및 실수형의 위성 모호정수들로 구성되 는데 다중 GNSS의 경우 수신기 시계 오차가 constellation 별로 차이가 있다(Hofman-Wellenhof *et al.*, 2001). 이런 경우 통상적으로 GPS를 기준으로 수신기 시각 오차를 계산하고 GLONASS를 비롯한 다른 constellation과의 오차는 GPS에서 계산한 시 각 오차에 대해 계산하는 방식을 적용하는데 본 연 구에서도 같은 방식으로 GPS 시스템 시각과 수신기 오차, 그리고 GLONASS 시스템 시각과 GPS 시스 템 시각과의 차이를 반영하였는데 이를 수식으로 표 현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{pos} \\ \mathbf{x}_{clk} \\ \mathbf{x}_{rro} \\ \mathbf{x}_{amb} \end{bmatrix}_{k}$$
(4)
where $\mathbf{x}_{pos} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ $\mathbf{x}_{clk} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\alpha}}_{GPS} \\ \hat{\boldsymbol{\sigma}}_{GLO-GPS} \end{bmatrix}$ $\mathbf{x}_{rro} = \begin{bmatrix} zw \\ gn \\ ge \end{bmatrix}$ $\mathbf{x}_{amb} = \begin{bmatrix} b_{1} \\ b_{2} \\ \vdots \\ b_{N_{k}} \end{bmatrix}$

상기의 식(4)에서 **x**_{pos}는 수신기의 지구중심좌표 계의 x, y, z 성분, **x**_{clk}은 GPS 시스템 시각에 대한 시 각 오차와 GLONASS 와 GPS 시스템 시각간의 차 이, **x**_{tro}는 수증기로 인한 수직 습윤 지연량과 북쪽 및 동쪽 방향에 대한 수평 구배, 그리고 **x**_{amb}는 k 번 째에 관측한 위성 개수 N_k에 대해 실수형 위상 모호 정수들의 벡터를 의미한다.

마지막으로 칼만 필터 구동을 위한 process noise tuning이 필요한데 수신기 좌표 산출을 위해 k번째 시점에서 k+1 번째 시점으로 진행할 경우 좌표값에 대한 process noise는 다음 식(5)와 같이 random walk process로 모델링된다.

 $\mathbf{x}_{pos,k+1} = \mathbf{x}_{pos,k} + \mathbf{q}_{k}, \quad E[\mathbf{q}_{k}\mathbf{q}_{k}] = \mathbf{Q}(k) = diag[q_{x}\Delta t \quad q_{y}\Delta t \quad q_{z}\Delta t] \quad (5)$

상기의 식에서 $q_{x'}q_{y'}q_z$ 를 설정함으로서 잡음 강 도를 정할 수 있으며 칼만 필터의 $\mathbf{Q}^{(k)}$ 를 통해 state vector의 covariance에 반영된다.

상기의 식들을 이용하여 다중 GNSS PPP 필터를 구현하고 IGS 정밀궤도력을 통해 GNSS 위성별 궤 도 및 시각 오차 산출 과정을 거친 뒤 RINEX 등의 포맷으로 기록한 GNSS 관측 데이터를 순차적으로 처리하여 해당 데이터 기간에 대한 수신기의 3차원 좌표의 시계열 변화를 산출할 수 있다.

4. 결 과

앞에서 기술한 PPP 필터의 성능 검증을 위해 국 제 GNSS 서비스(IGS)에서 산출하는 정밀 GNSS 수 신기 좌표와 PPP 해를 비교하였다. 이를 위해 IGS 네트워크에 포함된 2개의 GNSS 수신기를 선택하였 는데 각각 미국의 NIST에서 운영 중인 AMC2와 한 국의 국토지리정보원에서 운영 중인 SUWN이다. 해당 기준국들은 IGS 관측 네트워크에 포함되어 있 으며 네트워크의 멤버 기준국들은 IGS 산하의 Analysis Center (AC) 들에 의해 좌표값이 계산되고 각 AC 들 에서 계산한 좌표들에 대해 가중치 평균을 구하여 최 종적인 IGS 좌표 해가 결정되어 주기적으로 공표된 다. 통상 IGS 좌표 해는 mm 수준의 정확도를 가지 는 것으로 알려져 있으므로 본 연구에서 개발한 기 법으로 계산한 좌표 해와 IGS 좌표 해를 비교함으로 서 계산한 좌표 해의 정확도를 검증하고자 한다. 검 증에 사용한 GNSS 데이터는 2014년 12월 1일부터 2018년 3월 31일까지의 RINEX 데이터인데 해당 기 간에 대해 IGS 좌표 해는 누락된 기간이 상당 부분 있고 일부 기간에 대해서만 제공되어 전체 데이터 기간에 대한 비교는 IGS 좌표해가 제공된 기간에 대 해 검증이 가능하였다.

그림 1은 AMC2 기준국에 대한 ECEF (Earth-Centered Earth-Fixed) X, Y, Z 좌표의 시계열을 나타낸 것인 데 그림 1에서 볼수 있듯이 PPP 좌표 해는 process noise intensity를 $q_1 = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s와 } q_2 = 1 \text{ x}$

10⁻¹⁰ m²/s로 변화시키면서 PPP1과 PPP2의 2개의 좌표 해를 산출하였다. 그림 1에서 붉은 색 그래프는 91을 적용하여 계산한 좌표를 나타내며 검은 색 그 래프는 92를 적용한 것인데 예상한 바와 같이 X, Y, Z 좌표 시계열에서 같은 시점에 대해 붉은색 그래프 의 요동이 검은색 그래프의 요동에 비해 더 심한 것 으로 알수 있다. IGS 좌표 해는 푸른색 그래프로 나 타내었으며 앞서 기술한 대로 약 3년 4개월 간의 총 데이터 기간 중 2016년 12월부터 2017년 12월까지 약 1년 1개월 정도에 대해 비교가 가능하였다.

그림 1 (a), (b), (c)에서 볼 수 있듯이 PPP1의 요동 이 PPP2의 요동에 비해 약 5 mm 이상 크게 나타났 는데 전체 데이터 기간 중 초반에 나타난 수직 요동 은 필터 안정화에 따른 현상으로 사료된다. 필터의 안정화가 완료된 이후 PPP1 과 PPP2는 서로 요동의 정도의 차이가 있으나 전체적인 경향은 서로 일치하 는 것을 확인할 수 있다. PPP1과 PPP2는 연간 변화 로 보이는 경향을 X, Y, Z 좌표 시계열에서 뚜렷하 게 보이는데 반해 푸른색으로 표시된 IGS solution 의 경우 연간 변화의 경향은 나타나지 않았다. 연간 변화를 제외하면 PPP solution과 IGS solution은 상승 및 하강 패턴이 서로 일치하는데 X 좌표의 경 우 시간에 따른 상승 패턴을 보이며, Y 좌표의 경우 뚜렷한 중감이 없는 패턴이며 Z 좌표의 경우 약한 하강 패턴을 보였다. 각 패턴에 대한 증가 또는 하강 기울기는 PPP solution과 IGS solution이 대략적으 로 일치하는 것으로 판단된다.

그림 2는 SUWN 기준국에 대한 결과를 도시한 것으로 AMC2 결과와 비슷하게 데이터 시작 시점에 서 수직 방향의 급격한 좌표 변화가 보이며 필터 안 정화가 완료된 뒤로 연 변화 패턴을 나타낸다. 이러 한 경향은 PPP1과 PPP2에서 공통적으로 나타나며 PPP solution 간의 차이점은 AMC2의 경우와 마찬 가지로 PPP2의 process noise intensity가 PPP1에 비해 상대적으로 커서 좌표 시계열 그래프의 요동이 더 많이 발생한 점이다. IGS solution과 비교할 경우





Fig. 1. Results obtained from comparing GNSS PPP solutions with the reference solution provided by IGS for the AMC2 station.

PPP1의 경우 대체적으로 1 cm 이내로 일치하는 것 으로 나타났으며 PPP2의 경우 PPP solution 자체의 요동에 의해 차이값이 2-3 cm 수준으로 증가하는 것 으로 보이는데 이러한 경향은 X, Y, Z 좌표 시계열 에서 모두 관찰된다.

상기의 테스트 결과를 기반으로 개발된 PPP 필터 는 IGS solution의 정확도가 mm 수준임을 감안할 때 위치 정확도가 1 - 2 cm 수준인 것으로 사료되는 데 이것은 통상적인 알려진 PPP 기법의 정확도와 유사한 수준이다. 다만 IGS solution과 달리 PPP solution에서 연 변화 패턴이 관찰되었는데 이러한 패턴이 나타난 이유는 현재로선 뚜렷하지 않으나 IGS solution이 1일 데이터를 개별 분류 처리하여 1일 평 균 좌표를 계산하는 형태임에 반해 PPP solution은 3년 4개월 분량의 데이터를 연속적으로 처리하여 30 초에 한번씩 좌표값을 계산하는 형태이므로 처리 방 식의 차이에 따른 안테나 마운트 또는 대기 관련 연 변화 모델링의 차이로 인한 것으로 추측된다.

상기의 PPP 필터를 이용하여 제주도 지역의 GNSS 기준국들의 데이터를 처리하여 좌표 변화를 살펴보 았다. 그림 3은 제주도 지표 변형 산출을 위해 사용 한 GNSS 기준국들의 위치를 표시한 것으로 총 4개 의 기준국이 사용되었는데 각 기준국들을 열거하면 제주시에 위차한 CHIU 기준국, 제주 북동부인 성산 일출봉 지역에 위치한 JEIU 기준국, 제주도 최남단 마라도에 위치한 MARA 기준국, 그리고 제주도 남 부 서귀포 시에 인접한 SGUI 기준국인데 해당 기준 국들은 국내 공공기관들에 의해 운영되고 있으며 인 터넷을 통해 관측 데이터를 다운로드 받을 수 있다. 연구에 사용한 데이터는 2014년 12월부터 2019년 5 월까지 총 4년 6개월 간의 데이터이며 앞서 수행한 테스트와 마찬가지로 IGS Final ephemeris를 사용 하여 해당 기간 동안의 RINEX 파일을 연속적으로 처리하되 좌표 값의 process noise intensity는 1×10⁻¹⁰ m²/s로 설정하였다. 한편 상기의 기준국들 외에도 비양도와 한라산 부근에 위치한 기준국도 존재하나





Fig. 2. Results obtained from comparing GNSS PPP solutions with the reference solution provided by IGS for the SUWN station.

해당 기준국들은 RINEX 파일를 저장하지 않거나 저장 기간이 2019년 5월을 기준으로 1년 이하로 나



Fig. 3. The GNSS receiver network operated in Jeju island and the station designators used in the study. Three baselines are formed by the four stations with reference of the CHJU station, which extend in the south western (#1), down south (#2) and north eastern directions (#3) of Jeju, respectively. Black arrows show the horizontal components of individual station's velocity.

타나 중장기 분석에 적합하지 않은 것으로 판단되어 위의 4개 기준국의 데이터만을 사용하였다. 추가로 제주도 기선 거리 해석을 위해 CHJU 기준국을 중심 으로 CHJU-MARA, CHJU-SGUI, CHJU-JEJU의 3 개 기선을 구성하였으며 상기의 3개 기선을 그림 3 에 도시하였다.

그림 4, 5, 6, 7은 각각 CHJU, JEJU, MARA, SGUI 기준국들의 ECEF X, Y, Z 좌표 시계열과 타원 고도 시계열 그래프를 나타낸다. 타워 고도의 경우 해당 지점의 수직 방향 융기 또는 침강을 나타내므로 화 산성 지표변형이 발생할 때 DI (Deflation-Inflation) event 판단에 유용하다. 그림 4에서 나타난 대로 CHJU 기준국의 X, Y, Z 좌표 시계열 그래프는 시간에 따 라 감소하는 경향을 보이며 앞서 테스트한 결과와 마찬가지로 연 변화 패턴을 보였는데 X 좌표에 비해 Y와 Z 좌표에서 보다 명확하게 나타났다. 데이터 시 작 시점에서의 수직 방향 요동 현상 역시 X, Y, Z 좌 표 시계열에서 공통적으로 나타났는데 Kalman 필



Fig. 4. Time series of Earth-centered Earth-fixed coordinates and ellipsoidal height of the CHJU station obtained from processing GNSS measurements recorded from Dec. 2014 through May 2019 using the PPP technique.

터의 covariance가 충분히 감소되어 안정화되면서 요동 현상이 사라지는 것을 확인할 수 있다. MID 57500 시점 부근에서 그래프의 불연속 지점이 보이 는데 이것은 해당 기간에 데이터가 그림 4(d)는 CHIU 기준국의 타원 고도 시계열 변화를 나타내는데 전반 적으로 침강하는 패턴을 보여주며 정량적으로 볼 때 4년 6개월에 걸쳐 약 2 cm 가량 침강하였음을 알 수 있고 이는 연간 약 0.4 cm의 속도로 지표 침강이 발 생하는 것으로 해석할 수 있다. 그림 5는 JEJU 기준 국의 좌표 및 타원 고도 시계열 변화를 나타내는데 CHJU 기준국과 마찬가지로 X, Y, Z 좌표 시계열이 모두 주기적인 연 변화를 동반한 하강 패턴을 나타 냈다. 특히 Z 좌표 시계열의 경우 CHIU와 달리 MID 58200 지점을 지나면서 하강 기울기의 절대값이 다 소 증가하여 하강 속도가 이전에 비해 보다 빨라진 것을 알 수 있는데 구체적으로 MID 57000 시점에서 MID 58200까지 비교적 뚜렷한 연 변화 패턴을 보이 다가 MJD 58200 이후 연 변화 패턴이 다소 불명확

해졌는데 이것은 하강 속도의 상승에 의한 것으로 판단된다. 그림 5(d)는 IEIU 기준국의 타원고도 변 화 시계열로서 앞서 Z 좌표 시계열에서 언급한 하강 속도의 증가를 확인할 수 있는데 정량적으로 MJD 57000에서 MJD 58200 이전까지 지표 하강은 평균 약 0.7 cm 이다. 반면 MID 58200에서 MID 58600까 지의 지표 하강은 연 변화를 감안하더라도 2.8 cm 이상인 것으로 판단되며 연 변화를 고려하지 않을 경우 지표 하강 정도는 약 5 cm 정도로 나타나 MJD 57000에서 MJD 58200까지의 지표 변화량에 비해 적어도 4배 이상 증가하였다. 특히 MID58400에서 MID58500 사이에서 지표의 타원고도가 비교적 유 지되다가 MID 58500 이후 다시 하강하는 것으로 나 타났다. JEJU 기준국의 침강 속도는 MJD 58000 이 전까지 연간 약 0.2 cm이며 MID 580000 이후는 3.5 - 6 cm 수준이다.

그림 6은 MARA 기준국의 X, Y, Z 좌표 및 타원 고도 시계열 그래프를 도시한 것으로 앞서 기술한



Fig. 5. Time series of Earth-centered Earth-fixed coordinates and ellipsoidal height of the JEJU station obtained from processing GNSS measurements recorded from Dec. 2014 through May 2019 using the PPP technique.

CHJU 및 JEJU 기준국에서 보인 연 변화 패턴 및 필 터 안정화에 따른 수직 요동 현상이 그대로 나타났 는데 데이터 시작 후 얼마되지 않아 데이터 공백 기 간이 발생하였으며 또한 MJD 57350 부근에서 다시 공백이 반복되어 각각의 지점에서 좌표 시계열 그래 프의 불연속점이 나타난 것으로 볼 수 있다. MARA 기준국의 타원 고도 시계열을 통해 지표의 융기/침 강 여부를 볼 수 있는데 그림 6(d)에서 볼 수 있듯이 주기적인 연 변화 패턴을 제외하면 전체적인 거동은 일정 고도를 유지하는 것으로 판단된다.

그림 7은 SGUI 기준국의 좌표 및 타원고도 시계 열인데 이전의 3개 기준국에서 산출한 결과들과 비 교할 때 시계열 그래프에 공백이 상당 부분 존재하 는데 해당 공백은 SGUI 기준국에서 공백 발생 기간 동안 GNSS 데이터가 저장되지 않아 야기된 부분으 로 본 연구에서는 별다른 처리없이 다른 기준국 데 이터들과 같은 방식으로 계산하였다. 특히 MJD 58100 에서 MJD 58250까지 약 150일 가량의 공백으로 인 해 좌표 시계열의 연속성이 유지되지 않아 앞서 도 시한 결과들과 같은 연 변화 패턴 등이 뚜렷하게 나 타나진 않았다. 그림 7(d)에서 나타난 대로 SGUI의 타원 고도 시계열은 전반적으로 약한 하강 패턴을 보였는데 데이터 공백에 따른 좌표 시계열의 불연속 성으로 인해 하강 속도를 정량화하는 것은 쉽지 않 으나 데이터 공백 기간 동안에 발생한 고도 변화를 무시할 경우 4년 6개월 간 약 1 - 2 cm 가량의 침강 이 발생한 것으로 해석할 수 있다.

상기의 결과를 바탕으로 제주도 내 4개 기준국의 수평 방향 이동 속도를 계산하여 그림 3에 도시하였 다. CHJU, JEJU, MARA 및 SGUI 기준국의 수평 방 향 연평균 이동 속도 계산 결과 각각 3.3 cm/year, 3.4 cm/year, 3.3 cm/year, 3.2 cm/year의 값을 가 지며 방향은 북쪽을 기준으로 각각 -25°, -24°, -21°, -17°의 위상각을 가지는데 융기 및 침강를 나타내는 수직 변위와 달리 수평방향 이동 속도는 4개 기준국 간의 차이가 크지 않고 위상각의 경우 SGUI가 다른



Fig. 6. Time series of Earth-centered Earth-fixed coordinates and ellipsoidal height of the MARA station obtained from processing GNSS measurements recorded from Dec. 2014 through May 2019 using the PPP technique.

3개 기준국에 비해 상대적으로 차이가 크게 나타났 다. 다만 SGUI의 경우 데이터 공백으로 인해 다른 기준국 결과들에 비해 오차가 상대적으로 증가했을 것으로 사료된다. 또한 각 GNSS 기준국들의 좌표 시계열 결과를 이용하면 기준국 간의 거리 변화를 계산할 수 있는데 이를 통해 기선 거리 해석이 가능 하다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 CHJU-MAR는 제주 남서부 방향이며 길이는 약 50.3 km이고 CHJU-SGUI 는 제주 중부 지역을 가로질러 위치하여 길이는 약 28.8 km, 그리고 CHJU-JEJU는 제주 북동부 지역에 위치하며 길이는 약 35.2 km 이다.

그림 8은 위의 3개 기선에 대한 거리 시계열 변화 를 나타낸 것이다. 그림 8(a)는 CHJU-MARA 기선 의 거리 변화를 도시한 것으로 앞서 도시한 좌표 시 계열과 비교할 경우 연 변화 패턴이 사라진 것을 볼 수 있다. 기선 거리 변화는 MJD 58250 이전까지 비 교적 일정한 값을 유지하다가 이후 시점에서 다소 감소하기 시작한 것으로 판단되는데 4년 6개월간의 기간 동안 기선 거리의 감소량은 약 1 cm 이내로 나 타났다. 그림 8(b)는 CHIU-SGUI 기선 거리의 시계 열 변화를 나타낸 것으로 앞서 나타난 대로 SGUI 기 준국 좌표 시계열에서의 공백이 거리 변화 시계열에 도 그대로 나타났는데 공백기간 동안의 SGUI 기준 국 좌표 시계열의 영향을 감안하지 않을 경우 기선 거리 변화는 약 0.7 - 0.8 cm 정도 감소한 것으로 볼 수 있다. 마지막으로 그림 8(c)는 CHJU-JEJU 기선 거리 변화인데 CHJU-MARA 기선 거리 변화에 비 해 변동성이 더 증가하고 변화 패턴이 상대적으로 불규칙하게 나타났다. 특히 MID 58200에서 MID 58400 동안 기선 거리가 약 2 cm 증가하였는데 이것 은 IEIU 기준국의 타원고도 시계열이 MID 58200 이후 하강 속도가 빨라진 부분과 연관된 것으로 보 인다. 3개의 기선 간의 변동량을 비교할 경우 북동부 에 위치하는 CHIU-IEIU 기선이 중부 지역의 CHIU-SGUI 나 남서부 지역의 CHIU-MARA에 비해 최대 3배 가량 크게 나타났다.



Fig. 7. Time series of Earth-centered Earth-fixed coordinates and ellipsoidal height of the SGUI station obtained from processing GNSS measurements recorded from Dec. 2014 through May 2019 using the PPP technique.

5. 토 의

PPP 필터의 성능 검증을 위해 IGS 네트워크에 속 한 AMC2와 SUWN 기준국의 데이터를 처리하여 IGS에서 제공한 daily solution과 비교한 결과 그림 1과 2에서 나타난 대로 두 solution 간의 ECEF XYZ 좌표 시계열의 차이는 대개의 경우 1 cm 이하이며 최대 차이값은 약 2 cm 정도인데 특히 X와 Y 좌표에 비해 Z 좌표의 차이값이 상대적으로 크게 나타났다. 상기의 결과를 바탕으로 PPP 필터에서 산출한 좌표 의 정확도는 대략 1-2 cm 수준으로 판단되는데 이것 은 PPP 필터를 통해 산출한 지표 변형이 2 cm 이상 으로 나타난 경우 PPP 필터의 오차에 의한 영향일 가능성은 상대적으로 낮고 실제로 지표 변형이 발생 한 결과로 보는 것이 타당함을 암시한다. 추가적으 로 PPP solution의 경우 주기적인 연 변화 패턴을 보이는데 현재로서는 상기의 패턴이 나타난 주된 이 유를 단정하기엔 어렵다. 일반적으로 GNSS 데이터 를 처리하여 산출한 좌표 시계열에 대해 1년 단위의

주기적 변화 효과를 발생시킬 수 있는 요소로는 대 류층 습윤 지연, 일사량 변화에 따른 안테나 지지대 의 변형, 공전과 관련된 지표 변화 등이 있는데 연변 화 패턴의 진폭이 약 1-2 cm 수준임을 감안하면 대 류층 습윤 지연에 의한 효과일 가능성이 큰 것으로 판단된다. 안테나 지지대의 변형은 IGS solution에 서 관찰되지 않은 점으로 미루어 가능성이 낮으며 공전 관련 효과는 진폭의 크기에 비추어 태양의 만 유인력 변화로 인한 효과로 보기엔 무리가 있다. 식 (4)에서 볼 수 있듯이 PPP 필터 자체적으로 대류층 습윤 지연과 관련한 parameter를 추정하고 있으나 습윤 지연이 수십 cm 수준 이상으로 발생할 수 있는 점을 감안하면 추정 과정을 통해 완벽하게 제거되지 않은 습윤 지연에 의한 영향으로 나타날 수 있을 것 으로 사료된다. 한편 IGS solution과 PPP solution 의 데이터 처리 방식에도 차이점이 존재하는데 본 논문에서 reference로 사용한 IGS daily solution 의 경우 1일 분량의 GNSS 데이터를 IGS 산하의 개별 AC (Analysis Center)가 처리하여 산출한 daily sol-





Fig. 8. Time series of the lengths of the three baselines at Jeju spanning from Dec. 2014 through May 2019.

ution들을 수집하여 가중치 평균을 통해 매일 산출 하는 방식인 반면 본 연구에서는 4년 6개월 분량의 데이터를 PPP 필터로 연속적으로 처리하여 산출한 방식을 택하였다. 이러한 처리 과정의 차이가 좌표 시계열 결과에 영향을 미칠 수 있으며 또한 IGS 데 이터 처리에 사용한 오차 모델과 PPP 필터의 오차 모델이 동일하지 않으므로 사용 모델 간의 차이에 의해 발생할 가능성도 존재한다.

제주도 내에 위치한 4곳의 GNSS 이용 좌표 시계 열을 분석한 결과 제주시 지역의 CHJU 기준국은 연 평균 약 0.4 cm의 속도로 하강하는 것으로 나타났으 며 제주 북동부 성산 일출봉 지역의 IEIU는 연평균 약 2.8 cm 이상의 속도로 침강, 그리고 마라도 지역 의 MARA 기준국은 비교적 일정 고도를 유지하고 서귀포 지역의 SGUI 기준국은 연평균 약 0.2 - 0.4 cm의 속도로 침강하는 것으로 나타났는데 SGUI 기 준국의 경우 데이터 공백으로 인해 좌표 시계열 및 속도 추정의 불확도가 상대적으로 증가하였다. 특히 SGUI 기준국의 경우 데이터 공백 기간 직후인 MID 58250 에서 MJD 58300 구간에서 X, Y, Z 좌표가 급 속하게 하강하는 것을 볼 수 있는데 이것은 SGUI 기 준국의 좌표가 실제로 급격한 변화를 보였다기 보단 데이터 공백 직전 시점의 SGUI 기준국의 X, Y, Z 좌 표가 공백 기간동안 업데이트 되지 않아서 그대로 유지되면서 process noise covariance가 지속적으 로 누적되는 과정을 반복하다가 데이터가 다시 입력 되기 시작하면서 입력 데이터에서 관측한 좌표값으 로 빠르게 수렴한 결과로 판단된다.

제주 GNSS 기준국들의 기선 거리 분석 결과 제 주 남서부와 중부 지역의 기선 거리 변화는 4년 6개 월간 1 cm 이내로 평균 0.2 cm/year 이하의 변화율 을 보였으나 제주시와 성산 일출봉을 연결하는 북동 부 지역 기선의 경우 연 평균 변화율로 환산할 경우 최대 약 3.7 cm/year로 융기하는 현상이 관찰되었 다. 기선 거리 변화의 양상은 남서부와 중부 지역의 미세한 감소 경향과 달리 제주 북동부 지역은 상대 적으로 변화의 요동이 심하고 보다 복잡한 파형으로 나타났다.

하여 제주도 지역의 지표 변형을 산출하기 위해 다 중 GNSS PPP 필터를 개발하고 이를 IGS 자료와 비 교함으로서 성능 평가를 수행하였다. 그 다음으로 제주도 지역 내 공공기관에서 운영 중인 GNSS 기준 국들의 데이터를 처리하여 2014년 12월부터 2019년 5월까지 4년 6개월간의 제주도 지표 변형 정보를 산 출하였으며 제주시를 중심으로 제주 북동부, 중부 및 남서부 방향의 기선을 형성하여 해당 기간 동안 의 기선 거리 변화를 분석하였다. 처리 결과 제주시 와 서귀포시에 위치한 GNSS 기준국들은 연 평균 약 0.2 - 0.4 cm로 침강하는 것으로 판단되며 마라도 기 준국은 비교적 현재 고도를 유지하나, 성산일출봉 기준국은 타 기준국에 비해 3배 이상 빨리 침강하는 경향을 보였으며 기선 거리 분석 결과에서도 제주시 -성산일출봉을 연결하는 제주도 북동 방향의 기선이 제주시-마라도 기선이나 제주시-서귀포 기선에 비 해 연평균 변화 속도가 최대 18배 이상 높게 나타났 다. 향후 이러한 제주 북동부 지역의 지표 변형 경향 이 제주도 내부의 화산 활동과 직접적인 관련이 있 는지에 대한 추가 원인 규명이 필요할 것으로 판단 되며 이와 관련하여 제주 북동부 지역에 우선적으로 보다 조밀한 GNSS 수신기 네트워크를 구성하여 지 표 변형의 공간적 해상도를 향상시키고 GNSS 외에 타 센서를 병행운영하여 보다 세밀한 관측 네트워크 구성 방안이 가능할 것으로 사료된다. 또한 본 연구 에서 이용한 다중 GNSS PPP 필터를 유럽 연합의 Galileo와 중국의 BeiDou 그리고 차후 한국형 위성 항법 시스템인 KPS 데이터까지 사용할 수 있도록 확장할 경우 가용 신호의 개수가 증가함에 따른 좌 표 산출 정확도의 향상에 기여할 수 있을 것으로 사

감사의 글

료된다.

이 연구는 기상청 기상산업지원 및 활용기술 개 발사업(KMI2017-9070 및 KMI2018-02710)의 지원 으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Bintanja, R., van de Wal, R.S.W. and Oerlemans, J., 2005, Modelled atmospheric temperatures and global sea lev-

6. 결 론

본 연구에서는 제주도 화산 활동 가능성과 연관

els over the past million years. Nature, 437, 125-128.

- Cervelli, P.F., Fournier, T., Freymueller, J. and Power, J.A., 2006, Ground deformation associated with the precursory unrest and early phases of the January 2006 eruption of Augustine Volcano, Alaska. Geophysical Research Letters, 33, L18304, doi:10.1029/2006GL027219.
- Dzurisin, D., Vallance, J., Gerlach, T., Moran, S. and Malone, S.W., 2005, Mount St. Helens reawakens. Eos, Transactions American Geophysical Union, 86, 25-29.
- Elósegui, P., Davis, J.L., Oberlander, D., Baena, R. and Ekström, G., 2006, Accuracy of high-rate GPS for seismology. Geophysical Research Letters, 33, L11308, doi:10.1029/ 2006GL026065.
- Hofman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J., 2001, GPS: Theory and Practice. 5th Edition, Springer-Verlag, Wien, New York, 382 p.
- Hwang, S.K., Ahn, U.S., Lee, M.W. and Yun, S.H., 2005, Formation and internal structure of the Geomunnorm lava tube system in the northeastern Jeju Isalnd. Journal of Geological Society of Korea, 41, 385-400 (in Korean with English abstract).
- Kim, I.S. and Lee, D., 2000, Magnetostratigraphy and AMS of the Seoguipo Formation and Seoguipo Trachyte of Jeju Island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 36, 163-180 (in Korean with English abstract).
- Ko, B. and Yun, S.H., 2016, A preliminary study on calculating eruptive volumes of monogenic volcanoes and volcanic hazard evaluation in Jeju island. Journal of Petrological Society of Korea, 25, 143-149 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Jeon, Y., Park, J.B., Park, W.B., Moon, S.H. and Moon, D.C., 2019, Understanding of Historical records about volcanic activities in Jeju island, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 55, 165-178 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B., Kang, B.R. and Moon, D.C., 2013, Volcanism in Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 49, 209-230 (in Korean with English abstract).
- Koh, G.W., Park, J.B. and Park, Y.S., 2008, The study on geology and volcanism in Jeju Island (I): Petrochemistry and 40Ar/39Ar absolute ages of the subsurface volcanic rock cores from boreholes in the eastern lowland of Jeju Island. Economic and Environmental Geology, 41, 93-113 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.S., Yun, S.H., Hyeon, G.B., Lee, M.W. and Gil, Y.-W., 2005, Petrology of the basalt in the Udo monogenetic volcano, Jeju Island. Journal of Petrological Society of Korea, 14, 45-60 (in Korean with English abstract).
- Koh, J.S., Yun, S.H. and Kang, S.S., 2003, Petrology of the

volcanic rocks in the Paekrogdam crater area, Mt. Halla, Jeju Island. Journal of Petrological Society of Korea, 12, 1-15 (in Korean with English abstract).

- Larson, K.M., Poland, M. and Miklius, A., 2010, Volcano monitoring using GPS: Developing data analysis strategies based on the June 2007 Kīlauea Volcano intrusion and eruption. Journal of Geophysical Research, 115, B07406, doi:10.1029/2009JB007022.
- Lee, D.Y., Yun, S.K., Kim, J.Y. and Kim, Y.J., 1988, Quaternary geology of the Jeju Island. Korea. Institute Energy & Resources Report, 87, 233-278 (in Korean).
- Lee, S., Kouba, J., Schutz, B., Kim, D.H. and Lee, Y.J., 2013, Monitoring precipitable water vapor in real-time using global navigation satellite systems. Journal of Geodesy, 87, 923-934.
- Lee, S.-W., Yun, S.H. Kim, D.H., Lee, D., Lee, Y.J. and Schutz, B.E., 2015, Real-time volcano monitoring using GNSS single-frequency receivers. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120, 8551-8569, doi:10.1002/ 2014JB011648.
- Mattia, M., Palano, M., Aloisi, M., Bruno, V. and Bock, Y., 2008, High-rate GPS data on active volcanoes: An application to the 2005-2006 Mt. Augustine (Alaska, USA) eruption. Terra Nova, 20, 134-140, doi:10.1111/ j.1365-3121.2008.00798.x.
- Miklius, A., Cervelli, P., Sako, M., Lisowski, M., Owen, S., Segal, P., Foster, J., Kamibayashi, K. and Brooks, B., 2005, Global positioning system measurements on the island of Hawai'i: 1997 through 2004. U.S. Geol. Surv. Open File Rep., 1425, 1-48.
- Montgomery-Brown, E.K., Sinnett, D., Poland, M.P., Segall, P., Orr, T., Zebker, T.H. and Miklius, A., 2010, Geodetic evidence for en echelon dike emplacement and concurrent slow-slip during the June 2007 intrusion and eruption at Kilauea volcano Hawaii. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 115(B7), doi:10. 1029/2009JB006658.
- Oh, J., Yi, S., Yoon, S., Koh, G.W., Yun, H. and Lee, J.D., 2000, Subsurface stratigraphy of Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 36, 181-194 (in Korean with English abstract).
- Owen, S., Segall, P., Lisowski, M., Miklius, A., Denlinger, R. and Sako, M., 2000, Rapid deformation of Kilauea Volcano: Global positioning system measurements between 1990 and 1996. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B8), 18983-18998, doi:10.1029/2000 JB900109.
- Pauk, B.A., Power, J.A., Lisowski, M., Dzurisin, D., Iwatsubo, E.Y. and Melbourne, T., 2001, Global Positioning System (GPS) survey of Augustine Volcano. Alaska, August 3-8, 2000: Data processing, geodetic coordinates and

comparison with prior geodetic surveys. US Geological Survey Open-File Report, 01-0099, 20 pp.

- Poland, M., Miklius, A., Orr, T., Sutton, A.J., Thornber, C. and Wilson, D., 2008, New episodes of volcanism at Kilauea Volcano, Hawaii. Eos, Transactions American Geophysical Union, 89, 37-38, doi:10.1029/2008EO050001.
- Segall, P., Cervelli, P., Owen, S., Lisowski, M. and Miklius, A., 2001, Constraints on dike propagation from continuous GPS measurements. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B9), 19301-19317.
- Segall, P. and Davis, J.L., 1997, GPS application for geodynamics and earthquake studies. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 25, 301-336.
- Shimada, S., Fujinawa, Y., Sekiguchi, S., Ohmi, S., Eguchi, T. and Okada, Y., 1990, Detection of a volcanic fracture in Japan using Global Positioning System measurements. Nature, 343, 631-633.
- Sohn, Y.K., 2004, Hydromagmatism and Quaternary Sedimentation in Jeju Island. Field Trip Guide, Spring Excursion of the Geological Society of Korea, Jeju, 3-15 (in Korean, title translated).
- Sohn, Y.K. and Park, K.H., 2004, Early-stage volcanism and sedimentation of Jeju Island revealed by the Sagye borehole, SW Jeju Island, Korea. Geosciences Journal, 8, 73-84.
- Sohn, Y.K., Park, K.H. and Yoon, S.H., 2008, Primary versus secondary and subaerial versus submarine hydro-

volcanic deposits in the subsurface of Jeju Island, Korea. Sedimentology, 55, 899-924.

- Sohn, Y.K. and Yoon, S.H., 2010, Shallow-marine records of pyroclastic surges and fallouts over water in Jeju Island, Korea, and their stratigraphic implications. Geology, 38, 763-766.
- Won, C.K., Lee, M.W., Yun, S.H. and Ko, B.K., 1998, Geochemical characteristics of the volcanic rocks in Pyoseon area, southeast Cheju, Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 34, 172-191 (in Korean with English abstract).
- Yi, S., Yun, H. and Yoon, S., 1998, Calcareous nannoplankton from the Seoguipo Formation of Cheju Island, Korea and its paleooceanographic implication. Paleontological Research, 2, 253-265.
- Yoon, S.H. and Chough, S.K., 2006, Sedimentary facies and depositional environment of the Seoguipo Formation, Jeju Island. Journal of the Geological Society of Korea, 42, 1-17 (in Korean with English abstract).
- Yun, S.H., 2004, The volcanic sequences of Jeju volcano: General. The Second International Symposium of Jeju volcanological Institute (Abstracts), Jeju, 17-29.

Received	:	December	17,	2019
Revised	:	Janurary	21,	2020
Accepted	:	February	1,	2020