

## 지진에 의한 측지학적 지각변동 분석을 위한 GNSS 자료 전처리 연구

# A Study on GNSS Data Pre-processing for Analyzing Geodetic Effects on Crustal Deformation due to the Earthquake

손동효\* · 김두식\*\* · 박관동\*\*\*

Sohn, Dong Hyo · Kim, Du Sik · Park, Kwan Dong

### 요 旨

이 논문에서는 지진에 의한 지각변동 분석에서 측지학적 요소만을 구분하고자 하는 목적으로 GNSS 자료를 전처리하는 전략을 연구하였다. 이를 위해 GNSS 자료처리 결과의 해석에 앞서 GNSS 좌표 시계열에서 나타나는 위신호들을 검출하고 제거하였다. GNSS 관측소는 한반도가 포함된 큰 지각판 위에 위치하므로 판의 운동으로 인한 속도가 좌표 시계열에 포함된다. 그리고 일부 관측소 주변에 위치한 나무들은 계절에 따라 성장변화가 일어나기 때문에 계절적 신호특성이 GNSS 좌표 시계열에 반영된다. 따라서 오일러축에 의한 지각판 운동효과를 정확히 제거하기 위해 축의 위치와 각속도를 한반도 지각판에 맞게 새롭게 추정하였고 이에 대한 검증을 수행하였다. 그리고 1년 주기로 나타나는 계절변동 신호를 추정해 각 관측소의 좌표시계열에 반영하였다. 두 효과를 제거함으로써 지진에 의한 영향을 측지학적으로 분석할 수 있다. 이를 이용해 2011년 동일본 대지진에 의한 지각변위 예비 분석을 수행하였다.

핵심용어 : GNSS, 지진, 지각변동, 오일러축, 계절변동신호, 전처리

### Abstract

In this study, we developed strategies for pre-processing GNSS data for the purpose of separating geodetic factors from crustal deformation due to the earthquakes. Before interpreting GNSS data analysis results, we removed false signals from GNSS coordinate time series. Because permanent GNSS stations are located on a large tectonic plate, GNSS position estimates should be affected by the tectonic velocity of the plate. Also, stations with surrounding trees have seasonal signals in their three-dimensional coordinate estimates. Thus, we have estimated the location of an Euler pole and angular velocities to deduce the plate tectonic velocity and verified with geological models. Also, annual amplitudes and initial phases were estimated to get rid of those false annual signals showing up in the time series. By considering the two effects, truly geodetic analysis was possible and the result was used as preliminary data for analyzing post-seismic deformation of the Korean peninsula due to the Tohoku-oki earthquake.

Keywords : GNSS, Earthquake, Crustal Deformation, Euler Pole, Annual Signal, Pre-processing

### 1. 서 론

우리나라는 여러 기관에서 적게는 수 곳, 많게는 수십 곳의 GNSS 기준국들을 운영하고 있다. 상당수의 기준국들은 10년 이상의 장기 관측자료를 보유하고 있어 지각변동 연구, 대기 수증기량 변화경향 연구 등에

이들 자료들이 이용되고 있다(NGII, 2007; Sohn and Cho, 2010). 그러나 일부 기준국들은 주변의 장애물로 인하여 신호 수신환경이 양호하지 않아 관측자료를 이용하는 데 제약이 있다.

미국의 국가측지측량국(National Geodetic Survey, NGS), 위성항법시스템의 과학분야 활용을 지원하는 국제

Received: 2015.01.26, revised: 2015.02.23, accepted: 2015.03.09

\* 교신저자 · 정회원 · 인하대학교 공간정보공학과 박사과정(Corresponding author, Member, Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, dhsohn5@gmail.com)

\*\* 인하대학교 공간정보공학과 박사과정(Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, dskim26@gmail.com)

\*\*\* 정회원 · 인하대학교 공간정보공학과 교수(Member, Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, kdpark@inha.ac.kr)

기구 국제위성항법서비스(International GNSS Service, IGS) 등은 GNSS 관측소를 설치함에 있어 관측장비의 설치, 운영, 유지보수 등에 관한 가이드라인을 제시하고 있다. IGS(2013)에 의하면 GNSS 관측자료의 품질 평가를 통해 데이터수신율이 95%를 초과하고, 다중경로오차가 0.3m보다 작으며, 사이클슬립이 1000회 관측당 1회 미만으로 발생하는 관측환경에 기준국 설치를 권장하고 있다.

안테나 주변에 건물, 나무 등의 장애물이 존재하여 관측환경이 좋지 않은 관측소들은 위성신호의 차단, 반사, 일시적 끊김 현상 등이 발생한다. Sohn et al.(2011)은 평창 기준국을 대상으로 관측자료 품질평가를 수행한 결과, 서쪽에 위치한 야산으로 인하여 평균 데이터 수신율이 90% 정도 밖에 되지 않음을 보였다. 또한 Park and Won(2010)은 관측소 주변에 존재하는 식생들의 계절별 성장변화에 따라 관측 데이터의 수신율, 다중경로오차, 그리고 높이 오차의 불확실성이 변하는 것을 확인하였다. Cho et al.(2008)는 휴대용 GPS 장비를 이용하여 RTK 측량시 수목에 의해 상공의 시계가 차폐되는 산지에서 데이터취득률이 70% 미만인 결과를 보인 바 있다.

한반도의 지각변위 속도를 산출하기 위해 GNSS 관측자료를 많이 활용한다. Hamdy et al.(2005)와 Jin and Park(2006)은 각각 3년, 4년간의 GPS 자료를 이용하여 한반도 지각이 남동쪽으로 1년에 20~30mm 이동하고 있음을 보였고, NGII(2007)은 1999년 말부터 2005년 말까지 6년간의 수평 GPS 관측자료를 이용하여 관측소가 남쪽으로 14mm/year, 동쪽으로 25mm/year 이동함을 보였다. 또한 Ha et al.(2014)는 2011년 3월 11일에 동일본 도호쿠(Tohoku) 지역에서 발생한 9.0 규모의 지진으로 인하여 한반도가 동쪽으로 평균 28mm 이동되었음을 GNSS 자료처리 결과를 통해 확인하였다.

그러나 GNSS 관측자료에는 주변 환경의 영향으로 인한 효과가 내포되어 있기 때문에 이를 최소화하여 사용하거나 속도 산출시 이들 자료를 배제해야 보다 명확한 변위 속도를 산출할 수 있다. 이 논문은 지진에 의한 측지학적 영향만을 고려하기 위해 불필요하게 작용하는 위(偽, false)신호의 종류와 영향, 그리고 제거 전후의 결과를 비교분석하는 GNSS 자료 전처리 연구이다.

## 2. 연구범위

이 연구에서는 국토지리정보원(National Geographic Information Institute, NGII)과 한국천문연구원(Korea

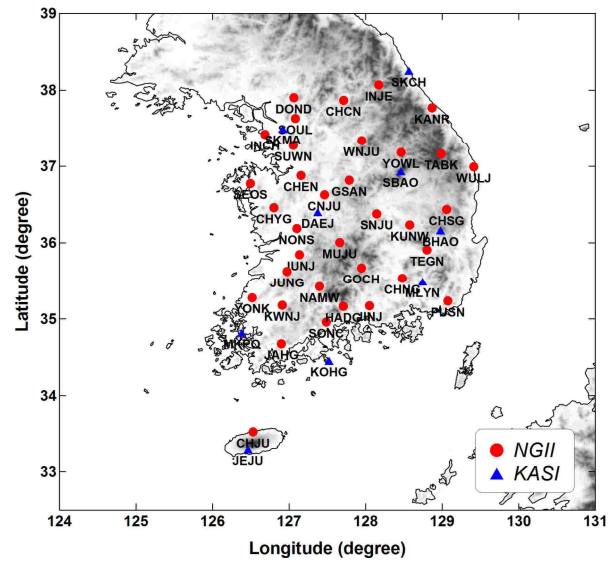


Figure 1. Location of GNSS permanent stations

Astronomy and Space Science Institute, KASI)이 운영 및 관리하는 GNSS 상시관측소를 대상으로 각 지점의 좌표시계열을 이용하였다(Fig. 1).

대상기간은 2008년부터 2013년까지이고, 2011년 3월 일본에서 발생한 도호쿠 지진에 의한 한반도의 지각변위를 연구하기 위해 지진 전후의 약 3년간 자료이다. 도호쿠 지진은 1900년 이래 세계에서 4번째로 큰 규모이고(USGS, 2015), 한반도의 지각변위에 가장 큰 영향을 주었다.

GNSS 관측소 좌표는 30초 간격의 1일 자료와 GIPSY-OASIS 소프트웨어를 이용하여 1일 단위의 절대측위 값으로 계산하였다(Webb and Zumberge, 1993). 이때 IGS08 좌표계를 기반으로 IGS 정밀케도력, 안테나 위상중심변동 절대보정모델(Wübbena, 2000), FES2004 해양조석하중 모델(Lyard et al., 2006) 등을 적용하였고 임계각 고도는 10°로 설정하였다. 산출된 정밀좌표는 지진에 의한 수평방향 변위만을 고려하기 위해 동서 및 남북 방향 좌표계로 변환한 후 선형회귀 방정식을 이용하여 각 성분별 속도변위를 계산하였다.

## 3. 위신호

GNSS의 좌표시계열에는 지각변형에 의한 움직임뿐만 아니라 주변 환경의 영향으로 인한 효과가 내포된 유색잡음(colored noise)이 포함되어 있다. 유색잡음으로 대표되는 위신호에는 해양, 대기 등의 조석하중, 지시대 움직임, 장비교체, 지각관 운동, 계절변동 신호 등이 있다(Booker, 2012; Calais, 2009). 이 연구에서는

지각판 운동 모델과 계절변동 신호에 대해 중점적으로 기술한다.

### 3.1 오일러 운동 모델

GNSS를 활용한 지각운동 및 변형을 추정을 위해서는 지각판에 의한 움직임은 고려하여 오일러축(Euler Pole) 위치를 추정하고 판의 이동속도를 계산하여 제거해야 한다. 2000년 이전의 지각판 운동에 대한 지구물리학적 연구에서는 전 지구 지각판에 대한 지각운동 모델인 NUVEL-1, NUVEL-1A, NNR-NUVEL1A 등이 개발되었고(DeMets et al., 1990; Argus and Gordon, 1991), 한반도는 유럽과 아시아 지역에 걸쳐 분포한 유라시아 판(Eurasian Plate)의 영역으로 분류되었다. 이후 중국 북동부와 한반도에 걸쳐 분포한 아무르 판(Amurian Plate)의 존재에 대한 연구들이 발표되었고, 2010년 이후의 연구에서 발표된 MORVEL, NNR-MORVEL56 등의 지각판 운동 모델에서는 한반도 지역을 아무르 판의 영역으로 분류하였다(DeMets et al., 2010; Argus et al., 2011). 그러나 한반도는 유라시아, 아무르 판과는 지각 운동의 특성이 다소 상이하므로 이 연구에서는 한반도의 지각운동 특성을 결정하기 위해 남한 지역의 GNSS 자료처리 결과를 이용하여 오일러축 위치를 새롭게 추정하였다.

먼저 IGS(2013)에서 기준국 설치시 권장하는 관측자료의 품질평가 기준과 현장조사를 통해 관측환경이 양호한 GNSS 관측소들을 선정하였다. 이때 주변의 환경으로 인하여 관측자료의 품질이 저조한 태백, 영광 등 7곳 관측소를 배제하였다. 선정된 관측소들의 장기간 좌표시계열을 이용하여 이동속도를 계산하고, 식 (1)을 이용해 대상 관측소들의 각속도 성분( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ )을 추정하였다(NGII, 2007). 여기서  $(x, y, z)$ 와  $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ 은 IGS08 좌표계를 기반으로 산출한 관측소의 평균좌표와 이동속도이다. 각속도 성분은 각각의 GNSS 관측소 좌표 결과와 이동속도를 기반으로 최소자승법을 적용하여 결정하였다. 한반도 지각판의 오일러축 위치 및 각속도는 2000년 1월 1일부터 도호쿠 지진 발생 전까지 37개 GNSS 관측소의 자료처리 결과를 기반으로 산출하였다. 상세한 계산과정은 지면 관계상 참고문헌으로 대체한다(NGII, 2007). Table 1은 최종적으로 산출한 판의 오일러축 위치와 각속도벡터 성분 값을 나타낸다. 여기서 My 단위는 백만년(Million years)을 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

Table 1. Euler pole position and angular velocity

| Lat.(°N)        | 66.613  | $\omega_x$ (rad/My) | -0.00282075 |
|-----------------|---------|---------------------|-------------|
| Lon.(°E)        | 172.123 | $\omega_y$ (rad/My) | 0.00039024  |
| $\omega$ (°/My) | 0.411   | $\omega_z$ (rad/My) | 0.00658441  |

### 3.2 계절변동 신호

국내 일부 GNSS 관측소들은 주변에 나무가 위치해 있고, 이로 인해 관측자료가 누락되거나 사이클슬립 현상이 발생한다. Park et al.(2013)은 관측소 인근의 나무들로 인해 여름철이 겨울철에 비해 데이터 누락률이 2배 이상 크게 나타나고, 사이클슬립 발생빈도도 2배에서 5배 정도 높게 나타나고 있음을 보였다.

나무들은 계절에 따라 성장변화가 일어나기 때문에 계절적 신호 특성이 GNSS 좌표 시계열에 반영되어 나타난다. Fig. 2는 춘천(좌)과 강릉(우) 기준국의 주변 관측점경과 GNSS 결과의 동서 및 남북방향 좌표시계열을 나타낸 것으로 초기값을 0으로 설정하였다. 춘천의 경우 계절변동 신호가 뚜렷하게 나타난 반면 관측소 주변에 나무가 없는 강릉 좌표시계열에서는 계절에 따른 변동신호가 보이지 않는다. 그림을 통해 계절변화에 따라 두 관측소간의 변위가 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다.

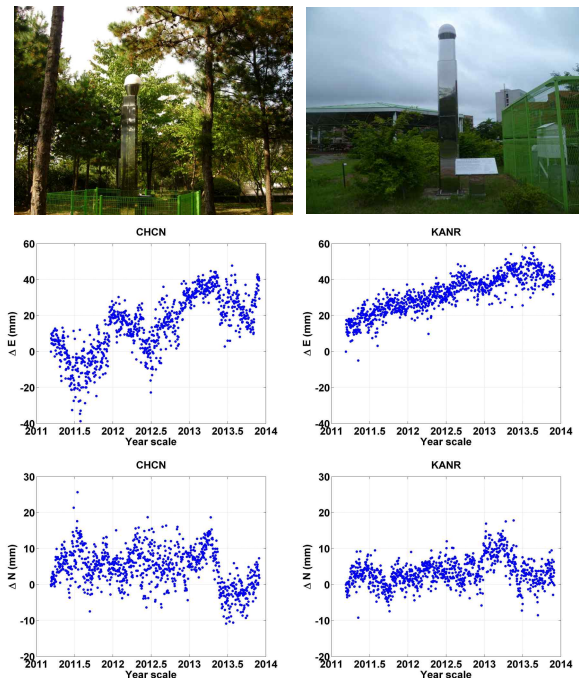


Figure 2. Surrounding scene(top), east(middle) and north(bottom) displacement at Chuncheon(left column) and Gangneung(right column) sites

계절변화에 의한 영향을 고려하여 1년 주기로 진동하는 위신호를 최소자승(least squares)법으로 추정하여 신호의 진폭크기 및 주기를 파악한다. 식 (2)는 정현파 신호 방정식을 이용한 모델이다.

$$Y = A \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

여기서  $Y$ 는 좌표변위,  $A$ 는 진폭,  $\omega$ 는 진동수,  $t$ 는 관측시간,  $\phi$ 는 위상을 각각 나타낸다. 여기서  $\omega$ 는 1년마다 반복되는 계절신호를 고려하여  $2\pi$ 로 고정하였다.

#### 4. 결과 및 분석

##### 4.1 오일러 운동 모델 추정

이 연구에서 개발한 지각판 운동 모델이 한반도의 지각운동을 잘 반영하는지 확인하기 위해 기존에 개발된 NNR-NUVEL1A 모델과 NNR-MORVEL 56 모델을 적용한 결과와 GNSS 좌표시계열을 통해 산출한 수평방향 속도를 비교하였다(Fig. 3). Fig. 3에서 파란 화살표는 GNSS 좌표시계열을 통해 산출한 수평방향 속도를 나타내고, 녹색과 노랑색 화살표는 각각 NNR-NUVEL1A, NNR-MORVEL56 모델의 결과를 나타낸다. 두 NNR 모델의 경우 GNSS에 비해 더욱 남쪽으로

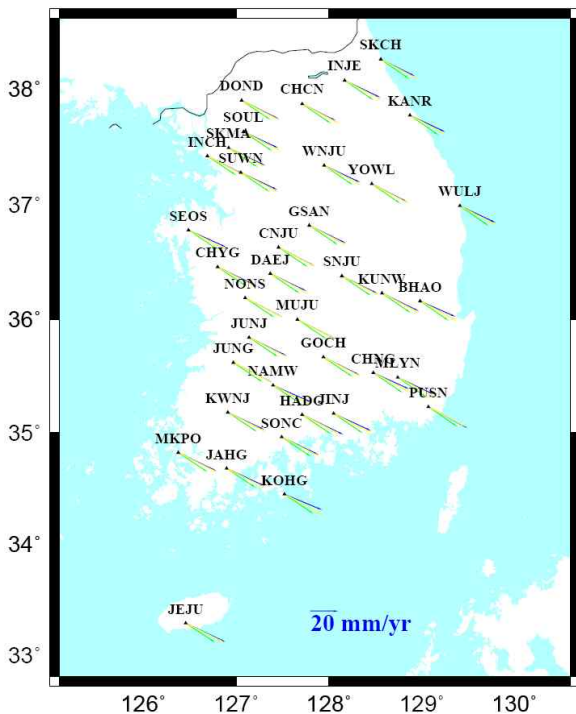


Figure 3. Horizontal velocity of GNSS(blue), NNR-NUVEL1A(green), and NNR-MORVEL56 model(yellow)

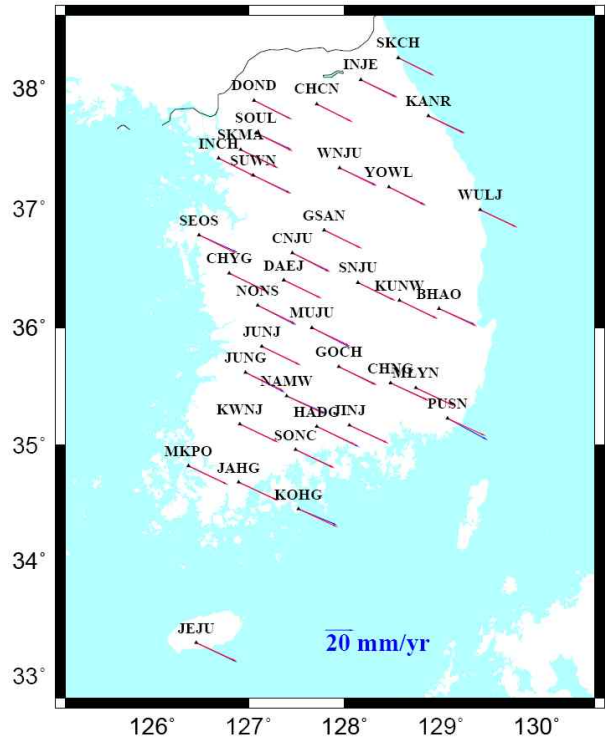


Figure 4. Horizontal velocity of GNSS(blue) and developed Euler pole(red)

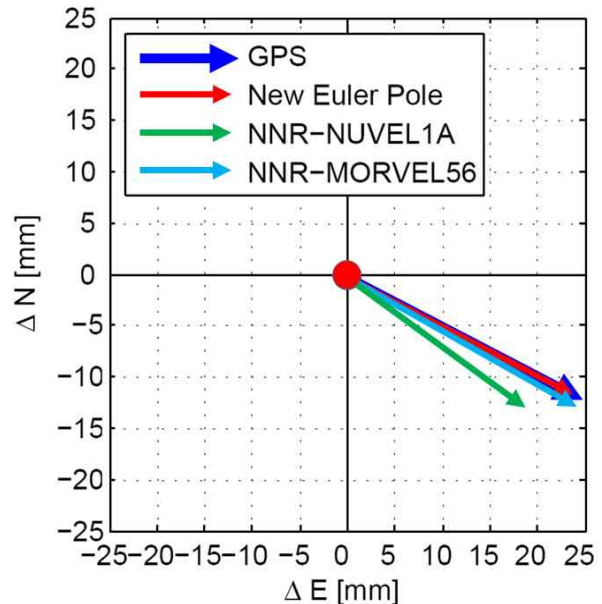


Figure 5. Comparison of the average horizontal velocity for all model

치우쳐 있고, 속도의 크기는 GNSS에 비해 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 GNSS로 추정된 수평속도(파랑)와 새로 개

발한 오일러 운동 모델을 이용하여 계산한 수평속도(빨강)를 나타낸 결과이다. 그림에서는 화살표가 겹쳐 거의 하나로 보일 정도로 두 수평속도가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

모델별 평균 수평속도가 GNSS 관측결과와 얼마나 일치하는지 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 각각의 평균 속도를 산출하여 화살표로 나타내었다. NNR-NUVEL1A 모델은 다른 모델들에 비해 GNSS 관측결과와 잘 일치하지 않는 결과를 보였다. 반면 NNR-MORVEL56 모델은 비교적 GNSS 관측결과와 일치하였고, 이 연구에서 추정된 오일러축을 이용하여 계산한 수평속도는 GNSS 관측결과와 거의 완벽하게 일치함을 알 수 있었다. 비록 이 연구에서 추정된 오일러축이 GNSS 관측 결과를 기반으로 산출하였기 때문에 이러한 결과가 나타나는 것으로 판단되나 실질적으로 이 모델이 한반도의 지각운동 특성을 가장 잘 반영한다고 볼 수 있다. 따라서 산출된 오일러축 값에 근거하여 GNSS 좌표시계열에서 지각판에 의한 영향을 제거하여 나머지 분석을 수행하였다.

장기간의 GNSS 좌표시계열로 산출한 오일러축의 각 속도 벡터를 이용하여 모든 관측소에 대해 속도를 계산하고 이를 제거하였다. Fig. 6은 진양지와 상대적으로 가까워 지진에 의한 영향을 가장 크게 받은 강릉 관측소의 수평방향 변위를 지진 전과 후로 나누어 나타낸 것이다. 그림에서 상단은 GNSS 자료처리 좌표시계열

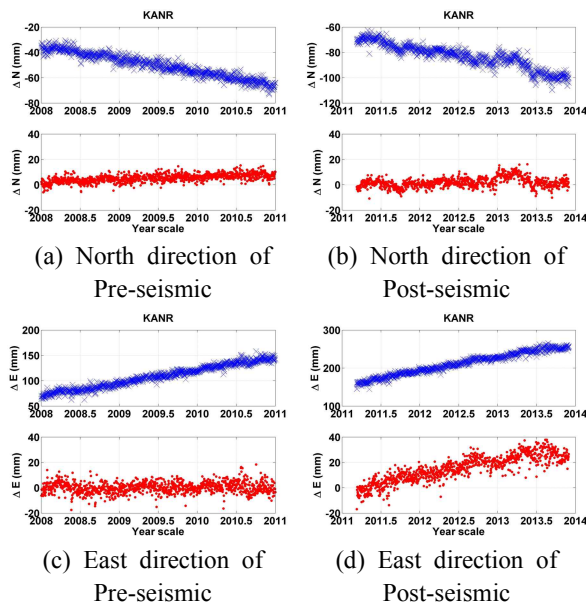


Figure 6. Horizontal displacement of pre-seismic(left column) and post-seismic(right column) at Gangneung site

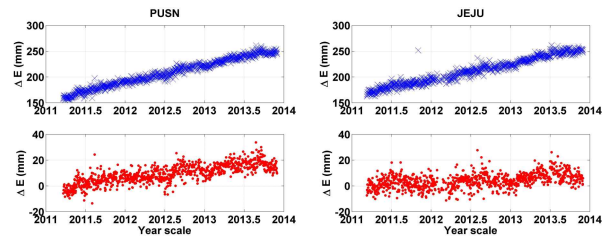


Figure 7. East direction displacement of post-seismic at Pusan(left) and Jeju(right) site

(파란색 ×)을 보여주고, 하단에서는 오일러축에 의한 지각판 운동효과를 제거한 결과(붉은색 •)를 나타낸 것으로서 초기값을 0으로 설정하였다.

지진 전후의 남북방향 성분을 나타낸 Fig. 6(a),(b)에서 오일러 운동 모델의 효과를 제거한 결과와 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 동서방향 성분을 나타낸 Fig. 6(c),(d)는 지진 전후로 결과가 다르게 나타났다. 지진 전을 보여주는 Fig. 6(c)의 상단에서는 GNSS 좌표 결과가 동쪽으로 이동하는 것으로 나타났으나, 오일러 운동 모델에 의한 효과를 제거한 하단그림에서는 큰 변화 없이 미세한 변화추세만 보였다. 이에 반해 지진 후를 나타내는 Fig. 6(d)에서는 오일러 운동 모델의 영향을 제거하더라도 동쪽방향으로 큰 이동이 계속해서 나타나고 있음을 명확히 확인할 수 있다. 이는 지진에 의한 여파로 강릉 관측소가 지진 전의 움직임보다 더 크게 동쪽방향으로 치우쳐 이동하고 있음을 보여준다.

진양지와 상대적으로 거리가 먼 부산과 제주 관측소의 지진 후 동서방향 변위(Fig. 7, 붉은색 •)는 강릉(Fig. 6(d))에 비해 작게 나타났다. 이는 지진에 의한 여파가 진양지와 멀어질수록 작아져 기존의 지각변위에 큰 영향을 미치지 않기 때문이라 판단된다.

#### 4.2 계절변동신호 제거

관측소 주변에 나무들이 많이 존재하는 일부 관측소들은 계절에 따른 식생변화의 영향으로 관측자료에 계절변동 신호가 나타난다. 이로 인해 좌표 시계열을 이용하여 지각변위 속도 산출시 적용하는 선형적합(linear fitting)의 RMS(Root Mean Square) 오차가 증가한다. 그래서 이 절에서는 계절변동으로 인해 생긴 신호를 제거한 내용과 결과에 대해 기술하였다.

GNSS 좌표시계열을 기반으로 식 (2)를 이용하여 관측소의 계절변동 신호 진폭과 위상 값을 계산하였다. 이 연구에서는 수평방향 시계열에 반영된 신호 특성만을 고려하였다. 이는 지진에 의해 발생한 지각운동의 수평성분 변위만을 분석하기 위해서이다.

Table 2는 기준국 주변에 나무들이 많이 분포하여

Table 2. Annual signal RMS by removing and amplitude

| Station            | Amp. (mm) | RMS (mm) |       |
|--------------------|-----------|----------|-------|
|                    |           | Before   | After |
| CHCN (Chuncheon)   | 10.34     | 10.9     | 8.2   |
| CHNG (Changnyeong) | 7.11      | 8.4      | 7.0   |
| YONK (Yeonggwang)  | 6.96      | 7.0      | 5.3   |
| INJE (Inje)        | 4.72      | 6.9      | 6.5   |
| JUNG (Jeongeup)    | 3.68      | 5.2      | 4.6   |



(a) Changnyeong (b) Yeonggwang  
Figure 8. GNSS station surrounding scene

계절적 변동신호의 진폭변위 값이 3.5mm보다 크게 나타나는 5 곳을 정리한 것이다. 대상 관측소 중에서 60%가 2mm미만의 진폭변위를 보였고, 76%가 3mm 미만이었다.

춘천 관측소의 경우 1년 주기로 가장 큰 진폭변위를 보여 10mm를 초과하였고, 창녕과 영광의 경우에는 약 7mm까지 진폭 변화가 나타났다. 계절변동 신호를 제거함으로써 춘천과 영광 관측소는 25%정도 RMS가 감소하였고 창녕과 정읍은 10%이상 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 2와 Fig. 8에서 보는 바와 같이 현장사진을 통해 관측소들이 공통적으로 안테나 주변 가까이 나무들이 위치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 관측자료의 동서방향 변위값을 이용하여 계절 변동신호를 모델링하고, 제거하기 전후의 결과를 나타낸 것이다. 각 그림에서 상단은 GNSS 좌표시계열에서 오일러축 영향을 제거하고 계절변동 신호에 대한 점합선(녹색 점선)과 관측자료 선형적합선(검은 실선)을 나타낸 결과이다. 하단은 오일러축 영향과 계절변동 신호를 제거한 결과의 선형 적합 실선을 보여준다. Fig. 9(a)는 춘천 관측자료에서 계절변동 신호의 제거 전후를 각각 나타낸 것이다. 제거 전 결과에서 여름철에는 서쪽방향으로, 겨울철에는 동쪽방향으로 치우치는 현상이 확연히 나타났다. 그러나 제거 후에는 치우침 현상이 제거된 것을 확인할 수 있다. 영광 관측소의 좌표시계열을 나타낸 Fig. 9(b)에서도 계절변동 신호 제거효과가 나타나고 있음을 알 수 있다.

계절변동 신호를 제거한 하단 그림에서 두 위신호 외

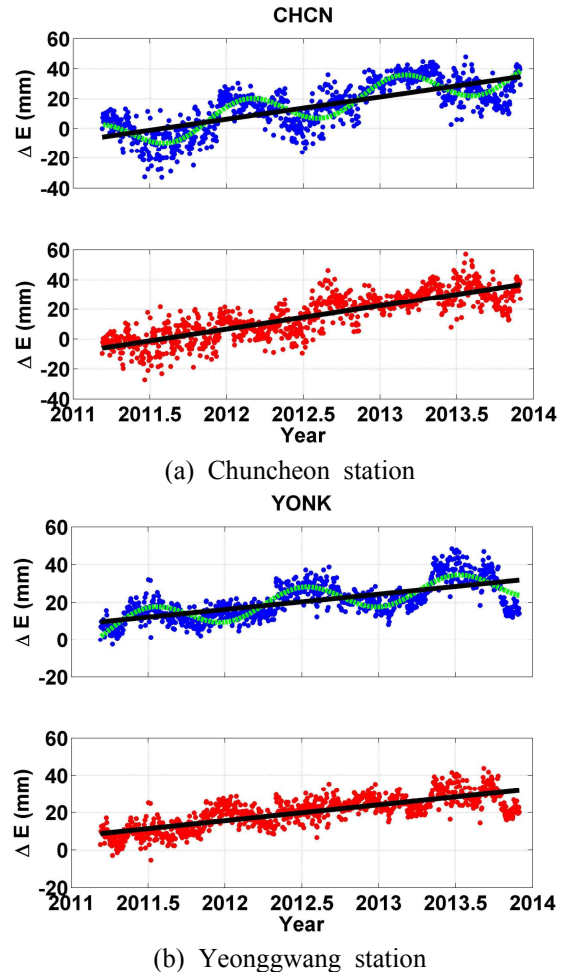


Figure 9. Annual signal of GNSS site. The dot curve fitting line is the annual cycle signals, and the straight line is the linear fitting.

에 다른 위신호가 남아 있을 것으로 추정된다. 향후 다른 분석법을 통해 기타 위신호를 파악하고, 제거하는 연구를 진행할 계획이다.

### 4.3 지진에 의한 지각변위 예비분석

앞서 GNSS 관측자료에 내포되어 있는 위신호를 파악하고 제거하는 과정을 수행하였다. 두 가지 신호를 고려하여 산출한 좌표시계열에서 잡음이 제거되었음을 확인하였다.

지진에 의한 영향만을 분석하기 위해 오일러축 각속도와 계절변동 신호를 제거하여 도호쿠 지진 전후로 나타나는 한반도의 지각변위에 대해 예비분석을 수행하였다.

계절변동 신호가 가장 잘 나타나는 춘천 기준국을 대상으로 지진에 의한 지각변위 예비분석을 수행하였다 (Fig. 10). Fig. 10(a)는 지진 전(×)과 후(•)의 GNSS

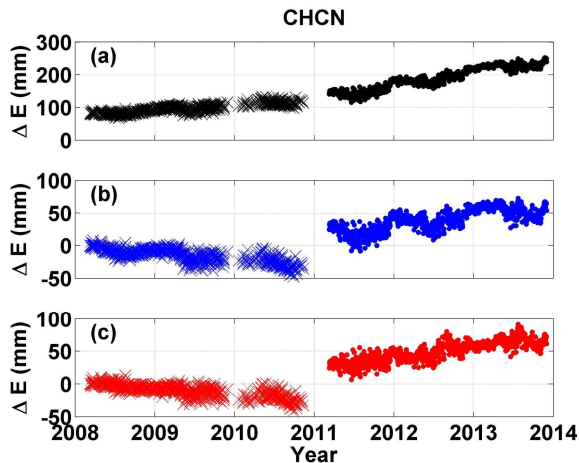


Figure 10. Pre- and post-seismic crustal displacement in the longitudinal direction. (a) GNSS time series, (b) remove Euler pole, (c) remove Euler pole and annual signals.

좌표시계열이고, Fig. 10(b)는 오일러 운동 모델의 계산결과를 제거한 것이며, Fig. 10(c)는 오일러 운동 모델과 계절변동 신호를 같이 제거한 시계열이다. Fig. 10(a)에서는 지진 전후의 지각변위가 유사한 경향을 보이나 두 위신호를 제거한 Fig. 10(c)에서는 지진 전에 서쪽으로 약 9mm/yr 이동하던 움직임이 지진 후에는 동쪽으로 약 16mm/yr 이동하는 것으로 나타났다. 두 위신호 효과를 제거함으로써 지진 전과 후의 지각변위가 확연히 차이남을 알 수 있다.

춘천 기준국을 대상으로 수행한 예비분석을 통해 도호쿠 지진이 한반도 지각변위에 큰 영향을 주었고, 그 이후에도 지진여파로 인해 지속적인 움직임이 나타나고 있음을 알 수 있었다. 이에 대해 Kim et al.(2015)은 다양한 분석방법과 해석을 통해 지진의 영향과 이후 한반도의 지각변위에 대해 상세히 분석하였다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 지진에 의한 측지학적 지각변동 영향을 분석하기 위해 GNSS 자료 전처리 과정에서 반드시 고려해야 하는 위신호의 발생원인을 파악하고, 이를 검출 및 제거하여 전후 결과를 분석하였다. 이 논문에서는 대표적인 위신호인 오일러축에 의한 지각판 운동과 계절변동신호에 대해 중점적으로 분석하였다.

오일러 운동 모델을 정확하게 제거하기 한반도 지각판에 맞게 새롭게 추정하였고 추정 결과를 GNSS 시계열 결과와 지구물리학적 모델을 이용한 결과와 상호비교하여 검증하였다. 새로이 추정한 오일러축을 적용한

결과에서 지진발생 전에는 한반도의 지각변동이 장시간동안 작은 변화만 나타나는 경향을 보였으나 지진 이후에는 상대적으로 큰 움직임이 지속적으로 나타나고 있음을 알 수 있었다. 한반도 지각판에 적합한 추정값을 이용함으로써 보다 정확히 지진에 의한 영향을 측지학적으로 분석할 수 있었다.

관측소 주변에 분포한 나무의 성장변화에 의해 생성되는 계절변동 신호를 추정해 좌표시계열에 반영함으로써 지각변위 속도의 RMS 오차를 최소화할 수 있을 뿐만 아니라 관측소별 주변 환경도 역으로 추정 가능하였다.

향후 짧은 주기의 신호, 안테나 교체로 인한 위신호 등 측지학적 분석에 영향을 줄 수 있는 위신호들을 다양한 분석법을 통해 파악하고 제거하는 연구를 진행하여 보다 정확한 지각변위 분석을 수행할 계획이다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 지진기술개발사업(CATER 2013-8090)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. Argus, D. F., Gordon, R. G. and DeMets, C., 2011, Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Vol. 12, No. 11, pp. 1–13.
2. Booker, D. P. A., 2012, Secular changes in earth's shape and surface mass loading, Thesis for Doctor of Philosophy, Newcastle University, pp. 58–63.
3. Calais, E., 2009, GPS noise, noise models and sources, [http://web.ics.purdue.edu/~ecalais/teaching/gps\\_geodesy/GPS\\_noise\\_models.pdf](http://web.ics.purdue.edu/~ecalais/teaching/gps_geodesy/GPS_noise_models.pdf).
4. Cho, H. S., Sohn, H. G., Lim, S. B., Kim, S. S., and Kim, S. M., 2008, Construction of cemetery management system using mobile DGPS, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 16, No. 4, pp. 49–57.
5. DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. and Stein, S., 1990, Current plate motions, *Geophysical Journal International*, Vol. 101, No. 2, pp. 425–478.
6. DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. and Stein, S., 1994, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophysical Research Letters*, Vol. 21, No. 20, pp. 2191–2194.

7. DeMets, C., Gordon, R. G., and Argus, D. F., 2010, Geologically current plate motions, *Geophysical Journal International*, Vol. 181, No. 1, pp. 1–80.
8. Ha, J., Park, K. D., Won, J. and Heo, M. B., 2014, Investigations into co-seismic deformation and strain in South Korea following the 2011 Tohoku-oki earthquake using GPS CORS data, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 18, No. 2, pp. 634–638.
9. Hamdy, A. M., Park, P. H. and Lim, H. C., 2005, Horizontal deformation in South Korea from permanent GPS network data 2000–2003, *Earth Planets Space*, Vol. 57, No. 2, pp. 72–82.
10. IGS, 2013, IGS site guidelines, <http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.html>
11. Jin, S. and Park, P. H., 2006, Strain accumulation in South Korea inferred from GPS measurements, *Earth Planets Space*, Vol. 58, No. 5, pp. 529–534.
12. Kim, D., Park, K. D., Ha, J., Sohn, D. H. and Won, J., 2015, Geodetic analysis of post-seismic crustal deformations occurring in South Korea due to the Tohoku-oki earthquake, *KSCE Journal of Civil Engineering* (Submitted).
13. Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., and Francis, O., 2006, Modelling the global ocean tides: Modern insights from FES2004, *Ocean Dynamics*, Vol. 56, No. 5–6, pp. 394–415.
14. NGII, 2007, A study on the crustal deformation of the Korean peninsula, National Geographic Information Institute Research Report, pp. 79–94.
15. Park, K. D. and Won, J., 2010, The foliage effect on the height time series from permanent GPS stations, *Earth Planets Space*, Vol. 62, pp. 849–856.
16. Park, K. D., Sohn, D. H. and Kim, D., 2013, Analysis on missing GPS observables and the frequency of cycle slips due to surrounding trees at a permanent GPS site, *Journal of Cadastre*, Vol. 43, No. 2, pp. 173–181.
17. Sohn, D. H. and Cho, J., 2010, Trend analysis of GPS precipitable water vapor above South Korea over the last 10 years, *Journal of Astronomy and Space Sciences*, Vol. 27, No. 3, pp. 231–238.
18. Sohn, D. H., Park, K. D., Won, J., Choi, Y. K. and Kee, C., 2011, Analysis of GPS signal environment at DGNS stations, *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 35, No. 8, pp. 625–629.
19. USGS, 2015, Largest earthquakes in the world since 1900, [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10\\_largest\\_world.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/10_largest_world.php)
20. Webb, F. H., and Zumberge, J. F., 1993, An introduction to the GIPSY/OASIS-II, JPL Publ., Pasadena, C.A., USA.
21. Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Böder, V., and Seeber, G., 2000, Automated absolute field calibration of GPS antennas in realtime, *Proceeding of the 13th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation ION GPS 2000*, Salt Lake City, UT, USA, pp. 2512–2522.