

## 일본 Tohoku-Oki 대지진으로 인한 한국 및 아시아 지역 상시관측소의 위치변동량 분석\*

황진상<sup>1</sup> · 윤홍식<sup>2</sup> · 이동하<sup>1</sup> · 정태준<sup>1</sup> · 서용철<sup>3\*</sup>

## Seismic Displacement Analysis of GPS Permanent Stations in Korean and Asian Area Due to the Tohoku-Oki Mega-Thrust Earthquake\*

Jin-Sang HWANG<sup>1</sup> · Hong-Sic YUN<sup>2</sup> · Dong-Ha LEE<sup>1</sup>  
Tae-Jun JUNG<sup>1</sup> · Yong-Cheol SUH<sup>3\*</sup>

### 요 약

284개의 IGS GPS 관측소와 한반도 및 인근 섬들에 위치한 22개 GPS 관측소의 관측 데이터를 이용하여 2011년 3월 11일에 발생한 진도 9.0Mw의 Tohoku-Oki 지진이 아시아 및 한국의 GPS 상시관측소에 미친 위치변동량을 분석하였다. GPS 관측데이터는 지진발생일을 기준으로 전후 7일씩 총 15일간 수신자료를 이용하였으며, GAMIT/GLOBK 소프트웨어를 이용하여 등진역 변위와 지진 후 변위를 해석하였다. 연구 결과, Tohoku-Oki 지진의 영향이 광범위 하여 진앙 중심으로부터 2,702km 떨어진 GPS 상시관측소에서도 등진역 변위가 발생한 것으로 나타났으며, 일본과 가까운 한국, 중국, 대만, 러시아 등 여러 국가에서도 지진의 영향이 확인되었다. 또한, Tohoku-Oki 지진은 한국의 GPS 상시관측소에 최소 14.9mm에서 최대 58.3mm에 이르는 위치변동량을 발생시켜 측지기준망의 성과를 새롭게 정비하지 않고 GPS 측량을 수행하는 경우 최대 20mm에 이르는 위치오차가 발생할 수 있을 것으로 판단되었다.

주요어 : Tohoku-Oki 대지진, GPS 상시관측소, 위치변동량, GAMIT/GLOBK

2011년 10월 11일 접수 Received on October 11, 2011 / 2011년 11월 17일 수정 Revised on November 17, 2011 / 2011년 12월 13일 심사완료 Accepted on December 13, 2011

1 성균관대학교 건설환경시스템공학과 Department of Architectural and Environmental System Engineering, SungKyunKwan University

2 성균관대학교 사회환경시스템공학과 Department of Civil and Environmental Engineering, SungKyunKwan University

3 부경대학교 공간정보시스템공학과 Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University

\* 연락처 E-mail : suh@pknu.ac.kr

## ABSTRACT

In this study, we analyzed the effects of seismic displacements due to the mega thrust earthquake occurred near Tohoku-Oki area on Mar. 11, 2011 with Mw 9.0 magnitude in the context of evaluation of position change by the earthquake on the Korean and Asian GPS permanent stations. For this, two weeks GPS data observed around the event of Tohoku-Oki earthquake (Mar. 4 ~ Mar. 18, 2011) were obtained from 22 GPS permanent stations in the vicinity of epicenter (Korea, Japan, Russia, China and Taiwan) and 284 IGS global stations. All available GPS data were processed and adjusted by GAMIT/GLOBK software to estimate the co-seismic horizontal displacements at each station. As the results of GPS analysis, the co-seismic displacements due to Tohoku-Oki earthquake were clearly revealed in the GPS stations of Asian region, Japan and its neighboring countries, and even to affect the horizontal position of GPS station (WUHN in China) which are located about 2,702km away from the epicenter. In conclusion, it was found that the Tohoku-Oki earthquake had resulted in the horizontal displacements ranging from 14.9 mm to 58.3 mm in Korea. So, these displacements can cause the position error of GPS geodetic survey up to 20 mm without updating the coordinates of Korean geodetic network.

**KEYWORDS :** *Tohoku-Oki Earthquake, GPS Permanent Station, Seismic Displacement, GAMIT/GLOBK*

## 서 론

2011년 3월 11에 발생한 Tohoku-Oki 대 지진은 진도 9.0Mw의 강진으로 도호쿠 지방의 오슈카 반도(Oshika peninsula)로부터 약 70km 떨어진 동쪽 해상에서 발생하였다. 기록된 지진 중에서 역대 5번째로 강한 지진으로 쓰나미를 동반하였으며, 인접한 일본 지역에 심각한 피해를 발생시켰다(Ammon *et al.*, 2011). 이렇게 강한 지진은 진앙으로부터 수 천 km 이상 떨어진 지각에도 영향을 미쳐서 지각의 순간적인 변동을 유발하는 경우가 많으며(Johnson *et al.*, 2001; Vigny *et al.*, 2005), 정밀하게 구축한 국가 측지 기준망에 심각한 영향을 미치는 사례가 많은 것으로 보고되고 있다(Yu *et al.*, 2001; Satirapod *et al.*, 2008). 따라서 Tohoku-Oki 지진이 아시아 지역의 지각과 지각에 위치한 국가들의

측지기준망에 영향을 미쳤을 가능성이 다분하다고 할 수 있다.

지진의 영향으로 인한 위치변동량(또는 지각변동량)의 정밀한 계산은 지구물리 분야와 측지학 분야에서 중요한 연구대상이었다. 지진과 함께 단시간 내에 발생하는 등진역 변위(co-seismic displacement)와 지진 후 점차적으로 발생하는 지진 후 변위(post-seismic displacement)를 분석함으로써 지진의 원인과 지각판의 이동 경향 및 지각 경계 부분에서 발생하는 단층의 양상을 파악할 수 있기 때문이다(Johnson *et al.*, 2001; Vigny *et al.*, 2005; Subarya *et al.*, 2006). 또한, 이러한 변위량들은 진앙지 주변 국가들의 측지 기준망에 직접적인 영향을 미치기 때문에 측지기준망에 기준하여 구축되는 각종 지리정보들의 정밀한 유지·관리를 위해서는 지진이 측지기준망에 미친 영향을 분석하고, 분석 결과에 근거하여 기준망을 재정비하거나 지리정보

데이터들을 보완하는 것이 필요하다.

이러한 이유들로 인하여 강력한 지진이 발생할 때마다 지진의 영향을 분석하기 위한 연구가 다수 수행되어 왔다. 1999년에 대만에 발생한 진도 7.5Mw 규모의 Chi-Chi 지진 (Chi-Chi earthquake)에 대한 연구사례로는 Yu *et al.*(2001)과 Johnson *et al.*(2001)의 연구가 있다. 이 연구들에서는 150개 지점에서 수집한 GPS 캠페인 자료와 45개 상시관측소에서 수신한 자료를 이용하여 지진 전 변위와 등진역 변위 및 지진 후 변위를 계산하였고 이를 이용하여 지하 단층의 기하구조를 모델링하였다. 2004년에 발생한 강도 9.0Mw 이상의 Sumatra-Andaman 지진에 대하여서는 Vigny *et al.*(2005)과 Subarya *et al.*(2006)이 연구한 사례가 있으며, 이 연구들에서는 등진역 변위에 대한 계산 및 탄성모델링 (elastic modeling of co-seismic deformation)에 의하여 Rupture plane의 분포와 종합적인 지진 모멘트 (total seismic moment), 이로 인한 모멘텀 (momentum) 의 크기 (magnitude) 등을 추정하고, 지각판 경계에서 발생한 변위량을 계산하였다.

본 연구에서는 GPS 상시관측자료를 이용하여 Tohoku-OkI 대지진이 아시아 지역의 지각과 대한민국의 측지기준망에 미친 영향을 분석하였다. 지진의 영향을 받아서 순간적인 변위가 발생한 지역의 범위를 분석하였으며, 영향권 내의 지각에 발생한 등진역 변위와 지진 후 변위를 계산하였다. 또한 계산된 등진역 변위에 근거하여 한국의 측지기준망을 구성하는 기준점들의 좌표에 발생한 변위량을 계산함으로써 Tohoku-OkI 지진이 한국의 측지기준망에 미친 영향 및 이로 인한 측지기준망 정비의 필요성을 평가하였다.

본 연구를 위해 284개의 IGS GPS 상시관측소, 한반도 및 주변 섬들에 위치한 22개 GPS 상시관측소에서 15일 동안 (지진발생 전 7일, 지진발생 당일 및 지진발생 후 7일) 수신된 GPS 자료를 GAMIT/GLOBK 소프트웨어 (Nikolaidis, 2002)로 처리하여 등진역 변

위와 지진 후 변위를 계산하였으며, 계산된 변위량을 이용하여 최종적으로 한국의 측지기준망에 대한 지진의 영향을 분석하였다. 본 연구가 다른 연구들과 구별될 수 있는 이유는 첫째, 전체 IGS GPS 관측소를 대상으로 하여 지진의 영향을 분석함으로써 지진이 영향을 미친 범위를 분석하였다는 점이며, 둘째, 진앙 중심으로부터 약 1,300km 거리에 있는 한반도와 인근 섬들에 조밀하게 배치된 GPS 관측소들의 자료를 모두 이용함으로써 진앙 중심과 지진 영향권 경계의 중간 부분에 있는 지각에 발생한 등진역 변위량의 크기와 분포를 상세하게 분석하였다는 점이다.

## GPS 상시관측소 자료처리 및 처리정확도 평가

GPS 측위법을 이용하여 지진으로 인하여 발생한 등진역 변위와 지진 후 변위를 해석하는 작업에는 다양한 GPS 소프트웨어들과 측위법들이 사용되어왔다.

Yu *et al.*(2001)은 1999년 발생한 Chi-Chi 지진으로 인해 발생한 등진역 변위 분석에 Bernese 4.0 소프트웨어를 사용하여 24시간 관측데이터를 일별로 해석하고, 동 소프트웨어의 ADDNEQ 모듈로 일별 해석 자료를 조합하였다. 이 연구에서는 GPS 캠페인 자료의 해석에 있어서 지진의 영향을 받지 않은 1개 지점을 고정점으로 하여 나머지 지점들의 이동량을 계산하고, 계산 결과에서 연간 지각 이동의 영향과 지진 후 변위량을 차등하는 방법을 사용하였다. Vigny *et al.*(2005)은 2004년 발생한 수마트라 아덴만 지진의 영향으로 인한 변위량을 해석함에 있어서 GIPSY-OASIS II 소프트웨어를 이용한 정적측위 (static) 방식의 PPP (precise point positioning) 측위법을 적용하였으며, 지진과 도달 시간의 계산에는 이동측량 (kinematic) 방식의 PPP 측위법을 적용하였다. PPP 측위법은 별도의 고정점을 사용하지 않고서도 정밀한 측위가 가능하기 때문에 이 연구에서는 고정점에 대한 고려가 이

루어지지 않았다. Subarya *et al.*(2006)은 수마트라 아덴만 지진의 영향 분석에 GAMIT/GLOBK 소프트웨어를 이용하였다. 이 소프트웨어는 IGS GPS 상시관측소들과 같이 전 지구적으로 분포된 관측소들로부터 수신한 자료를 처리하여 생성한 기선해석 자료를 SOPAC과 같은 사이트에서 취득하고(Jamason *et al.*, 2004), 이를 이용하여 전 지구 망조정을 수행할 수 있는 모듈들을 제공하고 있다. 따라서 이러한 측위법을 지진변위 해석에 적용하는 경우 지진발생 지역 인근의 지점을 고정점으로 사용하지 않고서도 전 지구상의 안정된 지각에 위치한 지점들을 고정점으로 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 선행 연구 결과들은 이러한 GPS 데이터 해석 방법들은 모두 지진으로 인하여 발생한 등진역 변위와 지진 후 변위를 정확하게 분석할 수 있는 방법들이임을 명확하게 나타내고 있다.

본 연구에서는 지진으로 인한 변동량 분석을 위하여 GAMIT/GLOBK 소프트웨어를 이용하였다. 정확한 위치변동량 계산을 위해 먼저 GAMIT 모듈로 해석한 일별 기선해석 결과를 계산하고, 그 후 GLOBK 모듈을 통해 전 지구 망조정을 수행하여 등진역 변위와 지진 후 변위를 계산하는 방법을 사용하였다. 연구에 사용한 GPS 상시관측소는 총 306개로서 이 중 IGS 전 지구 관측망을 구성하는 관측소가 284개, 국토지리정보원에서 운영하는 상시관측소는 13개로 구성되었다. 각 사이트에서 수신한 데이터들은 모두 15일간 수신한 자료들로 지진발생 전 7일, 지진발생 당일, 및 지진발생 후 7일에 해당하는 자료들이다.

자료처리는 상기에 언급한 것과 같이 기선해석과 전 지구 망조정으로 구분하여 수행하였다. 기선해석 단계에서는 일본과 한국, 중국에 위치한 22개 상시관측소 자료들은 GAMIT 10.4를 이용하여 일별로 해석하였다. 이러한 일별 결과와 SOPAC(Jamason *et al.*, 2004)에서 제공하는 IGS 전체 상시관측소에 대한 기선해석 결과를 모두 사용하여 GLOBK로 전 지구 망조정을 실시하였으며,

망조정의 기준으로는 전 세계의 안정된 지각에 위치한 20여개의 상시관측소의 좌표와 연간 이동속도를 사용하였다.

GPS 기선해석을 통해 얻어진 성과에 전 지구 망조정을 수행하려면 전세계적으로 고르게 분포된 GPS 상시관측소들로부터 수신한 자료 및 위치나 지각변동량 측정대상 지점에서 수신한 자료를 통합하여 처리함으로써 전 지구를 포괄하는 GPS 초장기선들을 해석하는 것이 필요하다. 그 이유는 지역적으로 결정된 기준점을 이용한 망조정 작업으로는 국제지구기준좌표계(International Terrestrial Reference Frame)에 준거한 절대적인 위치결정 및 변동량 해석이 어렵기 때문이다. 또한 지각변동의 양상이 안정적인(움직이지 않거나, 일정한 속도와 방향으로 움직이는) 지역에 위치한 GPS 상시관측소들의 위치와 연간 이동속도 정보를 취득하여 망조정용 고정점으로 사용하여야 한다(조재명, 2006). 본 연구에서 수행한 전 지구 망조정의 절차를 간단하게 설명하면 다음과 같다.

먼저, 고정점으로 사용할 GPS 상시관측소의 정보를 취득하여야 한다. 안정적인 거동을 나타내는 GPS 상시관측소의 항목은 IERS, IGS 등에서 취득할 수 있으며, 관련된 위치정보와 속도 정보는 위치결정의 기준으로 사용할 ITRF의 결정 당시 계산된 정보를 활용할 수 있다. ITRF의 결정 과정에서 GPS 상시관측소의 위치와 연장이동속도, 위치결정 기준시기(epoch) 등이 결정됨으로 이러한 정보를 사용하여 고정점용 성과정보로 활용할 수 있다.

다음으로 전 지구를 포괄하는 GPS 초장기선 해석 정보를 계산해야 하는데, 다음과 같은 방법으로 관련 정보를 취득할 수 있다. SOPAC과 같은 기관에서 IGS GPS 상시관측소들 사이의 초장기선 해석 정보를 매일 계산하여 배포함으로써 이를 활용하되, 직접 취득한 GPS 자료와 인근 IGS GPS 상시관측소 데이터를 함께 처리함으로써 한반도 지역의 GPS 기선정보와 IGS GPS 상시관측소 사이의 기선정보가 서로 연계되도록 하는 것이다.

마지막으로는 취득한 고정점 정보와 GPS

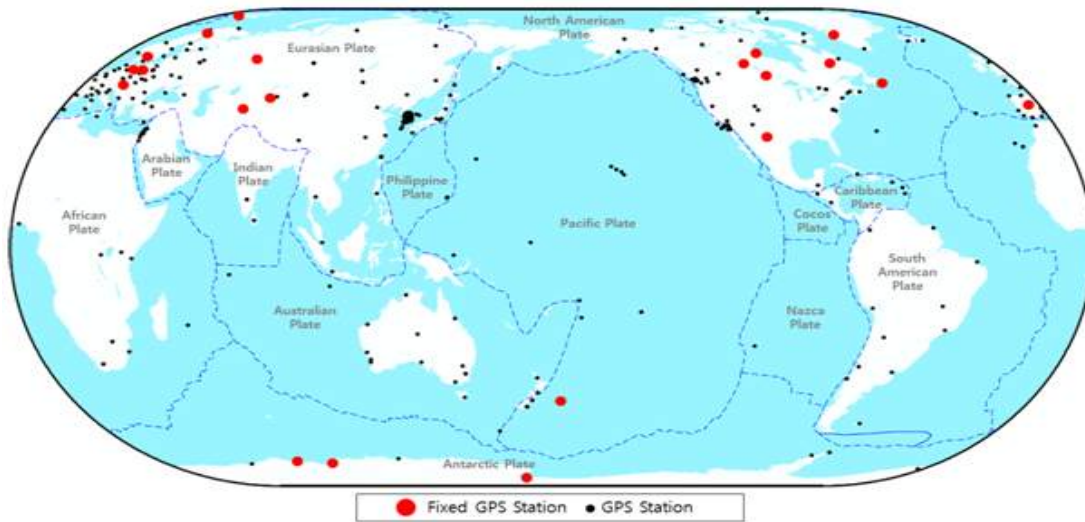


FIGURE 1. 자료처리에 사용한 상시관측소 분포 및 전 지구 망조정 시 활용된 고정점 위치

초장기선 해석정보를 사용하여 전지구 망조정을 수행하는데, 이때 고정점의 좌표결정 기준 시기와 연간이동속도를 고려하여 GPS 자료 수신 당일의 기준시기에 해당하는 고정점의 좌표를 추정해야 한다. 추정된 고정점 성과의 적합성은 지각변동 모델과 Kalman Filter 등을 사용하여 평가할 수 있으며, 평가 결과 안정적인 것으로 결정된 고정점 성과들을 이용하여 망조정을 수행하여야 한다.

그림 1은 이번 연구에 사용한 GPS 상시관측소들의 위치와 지진 후 위치 계산을 위한 망조정의 고정점으로 사용한 관측소들의 위치를 나타낸 것이다. 고정점은 GLOBK의 glorg 모듈이 다수의 후보 사이트들 중에서 자료처리 결과의 안정성을 평가하여 선정하는데 이로 인하여 지진 전과 후의 위치계산에 사용하는 고정점들이 차이를 갖게 되었다. 예로서 지진 발생 지역에서 비교적 가까운 수원(SUWN) 및 대전(DAEJ) 상시관측소는 지진 전에는 고정점으로 사용되었으나 지진 후에는 제외되었다.

본 연구에서 적용된 전 지구 망조정 작업은 상기의 절차를 기반으로 두 가지 방안으로 수행되었다. 먼저, 위치좌표의 시계열(time series) 분석을 위해 15일에 해당하는 일별

망조정 작업을 수행하였으며, 그 후 등진역 변위를 계산하기 위해 지진발생 전 7일에 해당하는 기선해석 결과들을 통합하여 단일한 좌표들을 계산하고, 지진 후 7일에 해당하는 기선해석 결과들에 대하여도 동일한 작업을 수행하였다. 등진역 변위는 지진 후의 통합계산 좌표에서 지진 전의 통합계산 좌표를 차등하되 지진 후 변위가 발생한 지역에 대하여 그 영향을 차등하는 방법을 적용하였다.

전 지구 망조정 작업의 정밀도는 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)를 보면 지진발생 전 7일간의 자료에 대한 통합 망조정 결과의 WRMS(weighted root mean square)의 분포가 매우 작으며 이로써 조정 작업의 정밀도가 매우 높다는 사실을 알 수 있다. 평면좌표에 대한 WRMS를 보면 대부분 2 ~ 3mm 수준의 조정오차 범위 내에서 좌표가 결정되었음을 알 수 있고 타원체고의 경우 대부분 5 ~ 6mm 수준의 오차가 발생한 것을 알 수 있다. 이러한 수치들은 24시간 단위로 관측자료를 GPS 정적측위 방법으로 해석하는 경우 발생할 수 있는 일반적인 수준으로 매우 정밀한 좌표계산이 이루어졌음을 알 수 있다. 지진 후 7일간의 좌표를 통합조정한 결과의

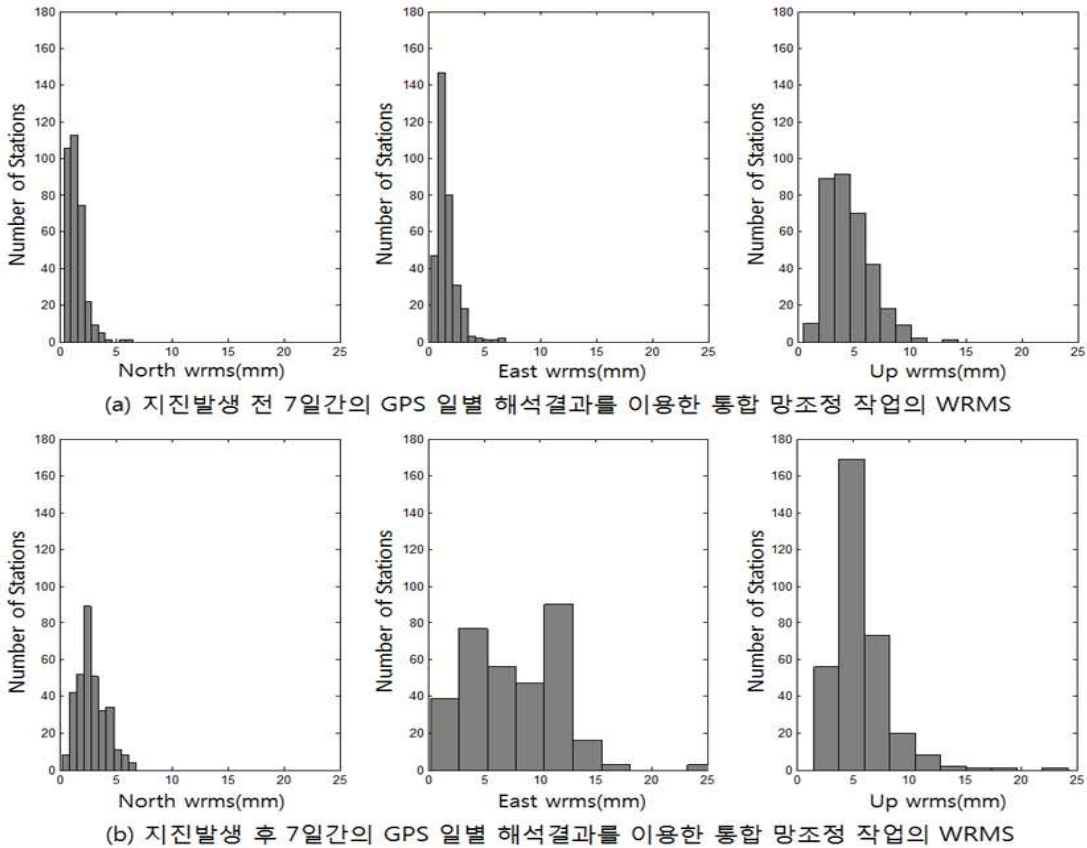


FIGURE 2. 전 지구 망조정 처리결과의 WRMS

WRMS는 그림 2(b)와 같은데 지진 전 좌표에 비하여 경계좌표와 타원체고의 WRMS가 크게 증가된 것을 알 수 있다. 이는 지진발생 지점 인근의 상시관측소들에 발생한 지진 후 변위의 영향으로 인한 것으로 이러한 영향을 등진역 변위를 계산할 때에 소거함으로써 정확한 변위량 계산이 이루어지도록 하였다.

### 아시아 지역의 GPS 상시관측소 위치변동량 분석

Tohoku-Oki 지진은 높은 강도로 인하여 아시아 지역의 지각의 넓은 영역에 영향을 미친 것으로 나타났다. GPS 데이터 해석 결과

를 보면 등진역 변위가 진앙중심으로부터 최대 2,702km 떨어진 지점에서도 발생한 것으로 나타났다. 아시아 지역의 상시관측소에 발생한 등진역 수평변위의 크기와 방향을 나타내면 그림 3과 같다. 그림 3을 보면 다른 지진의 예와 마찬가지로 변위의 방향이 진앙 중심을 향하고 있는 것을 알 수 있다. 일본에서는 진앙과 가장 가까운 이와테(MIZU) 상시관측소에서 최대변위인 2622.8mm의 수평변위가 발생하였고, 한국에서는 DOKD에서 58.3mm의 수평변위가 발생하였다. 진앙지에서 비교적 먼 거리에서는 중국, 대만, 러시아 등에 위치한 상시관측소들에서도 약 5mm 이상의 수평변위가 발생한 것을 알 수 있다.

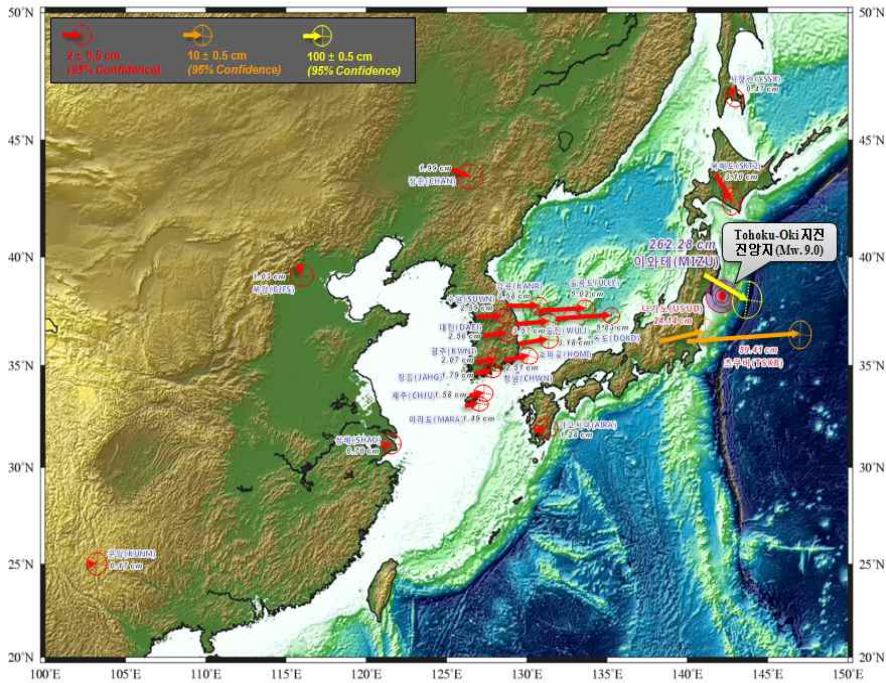


FIGURE 3. GPS 자료처리를 통해 계산된 아시아 지역의 위치변동량 분포도

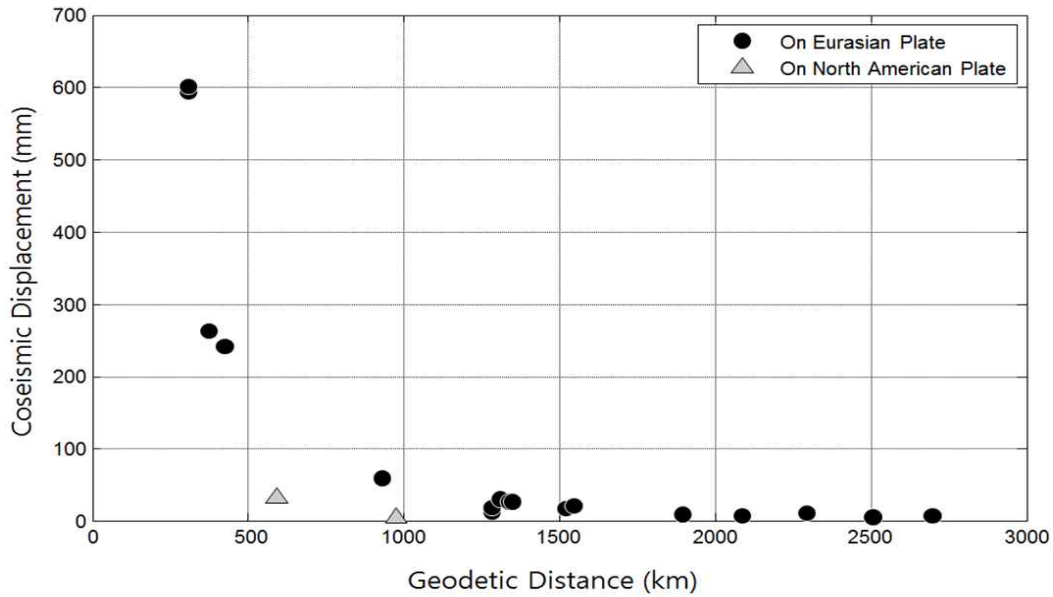


FIGURE 4. 진앙중심으로부터의 거리와 등진역 수평변위 사이의 관계

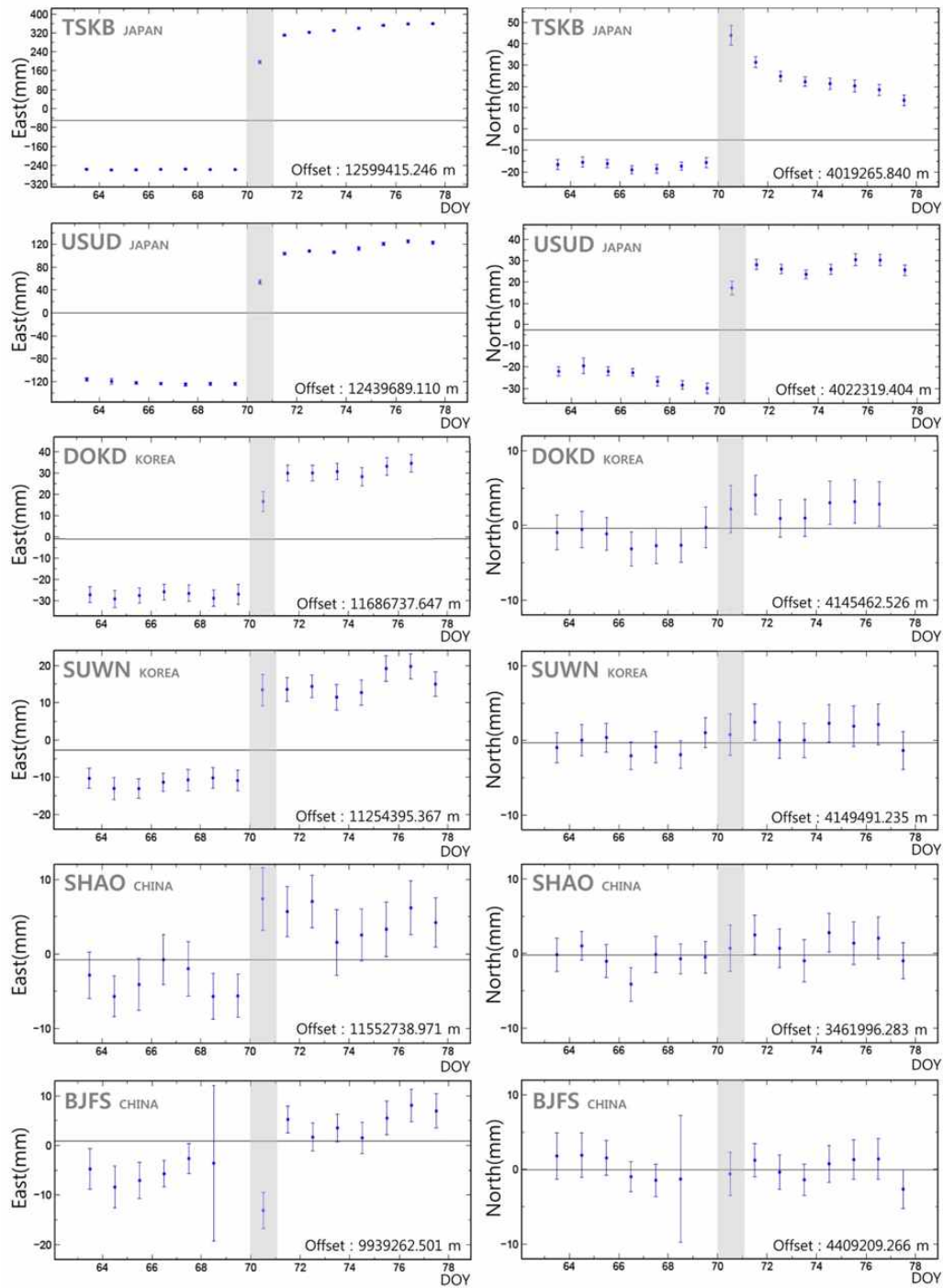


FIGURE 5. 15일 동안의 주요 GPS 상시관측소 수평좌표의 시계열 범위(회색부분은 지진발생일을 의미하며, 세로선은 GPS 위치해석의 일별 정밀도를 나타냄.)



그림 4는 진앙 중심으로부터의 거리와 등진역 수평변위 사이의 관계를 나타낸 것이다. 거리와 등진역 변위가 반비례 관계를 나타내는 것을 확인할 수 있으며 비교적 일정한 경향을 나타내고 있다는 것을 확인할 수 있다. 북해도(STK2)와 사할린(YSSK)에서의 변위량(그래프에서 삼각형 표시)이 진앙 중심과의 거리에 비해 작게 나왔는데 이는 이들 두 사이트가 다른 영향권 내의 사이트들과 달리 북아메리카판(North-American plate)에 위치하고 있기 때문이라고 판단된다.

주요 GPS 상시관측소의 좌표(easting, northing)에 대한 15일간의 시계열을 정리하면 그림 5와 같다. 이는 일본과 한국 및 중국에 위치한 GPS 상시관측소 중 각각 2개의 상시관측소에 대한 좌표의 시계열을 정리한 것으로 등진역 변위가 분명하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 한국과 중국에 위치한 GPS

상시관측소들의 경우 주로 동서방향(easting) 좌표값의 시계열 상에 분명한 변위들이 나타나고 있으며 회색으로 표시한 지진 발생일 이후에 발생하는 지진 후 변위량은 미미한 것을 알 수 있다.

일본에 위치한 츠쿠바(TSKB)와 나가노(USUD) 상시관측소의 경우에는 동서방향(easting) 좌표와 남북방향(northing) 좌표 모두에서 등진역 변위가 분명하게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며, 지진 발생일 이후에도 비교적 큰 크기의 지진 후 변위가 발생하였다는 것을 알 수 있다. 일본 내의 7개 GPS 관측소들 중에서는 츠쿠바(TSKB) 상시관측소에서 가장 큰 크기의 지진 후 변위가 발생하였으며, 최대 등진역 변위가 발생한 이와테(MIZU) 상시관측소에서는 비교적 작은 크기의 지진 후 변위가 발생하였다.

IGS 국제관측망을 구성하는 GPS 상시관측

TABLE 1. 아시아 지역 주요 GPS 상시관측소에서 발생한 등진역 수평변위 해석 결과

| Station | D <sub>N</sub> (mm)   | D <sub>E</sub> (mm) | D <sub>H</sub> (mm) | S (mm) | AziS (°) |
|---------|-----------------------|---------------------|---------------------|--------|----------|
| AIRA    | 3.7 ± 1.4             | 12.1 ± 1.5          | 2.8 ± 5.9           | 12.7   | 73       |
| STK2    | -23.4 ± 1.2 (-4.9)    | 19.9 ± 1.1 (-1.3)   | 4.3 ± 3.4 (14.6)    | 30.7   | 140      |
| USUD    | 49.1 ± 1.1 (0.1)      | 222.7 ± 1.1 (23.5)  | 6.2 ± 4.0 (24.0)    | 228.0  | 78       |
| MTKA    | 56.5 ± 1.4 (2.4)      | 248.7 ± 1.3 (26.0)  | -18.7 ± 4.8 (17.9)  | 255.0  | 77       |
| TSKB    | 60.9 ± 1.1 (-31.1)    | 565.2 ± 1.1 (53.5)  | -86.7 ± 3.3 (10.3)  | 568.5  | 84       |
| TSK2    | 72.3 ± 1.3 (-42.1)    | 567.0 ± 1.2 (53.4)  | -89.5 ± 4.0 (15.8)  | 571.6  | 83       |
| MIZU    | -1213.9 ± 1.5 (-33.4) | 2262.6 ± 1.4 (61.7) | -30.8 ± 3.8 (-66.8) | 2622.8 | 118      |
| DAEJ    | 2.8 ± 1.1             | 25.9 ± 1.0          | 0.7 ± 3.4           | 25.6   | 84       |
| SUWN    | 1.4 ± 1.3             | 25.7 ± 1.4          | 1.8 ± 4.4           | 25.9   | 87       |
| BJFS    | 0.9 ± 1.0             | 10.4 ± 1.1          | 0.0 ± 3.4           | 10.4   | 85       |
| CHAN    | -7.1 ± 1.0            | 19.1 ± 1.0          | 2.3 ± 3.1           | 20.4   | 110      |
| SHAO    | 2.2 ± 1.0             | 6.7 ± 1.1           | 5.9 ± 3.6           | 7.0    | 72       |
| WUHN    | 0.6 ± 1.3             | 7.5 ± 1.5           | -0.6 ± 4.9          | 7.5    | 85       |
| KHAJ    | -12.7 ± 1.2           | 11.8 ± 1.1          | 4.3 ± 3.4           | 17.3   | 137      |
| YSSK    | -4.7 ± 1.1            | 2.3 ± 1.0           | -2.5 ± 3.2          | 5.2    | 153      |
| TCMS    | -0.6 ± 1.4            | 5.5 ± 1.4           | -0.6 ± 4.9          | 5.5    | 96       |
| TNML    | -1.0 ± 1.5            | 5.4 ± 1.5           | -2.2 ± 4.9          | 5.5    | 101      |
| MCIL    | 7.7 ± 1.3             | -4.0 ± 1.3          | 4.5 ± 4.6           | 8.6    | 333      |

\* DN, DE, DH는 등진역 변위의 북방향, 동방향, 수직방향 요소임. 각 변위값 옆에 표시된 정밀도는 95% 확률오차를 의미함. ( )안의 수치는 지진 후 7일간 발생한 지진 후 변위임. S는 수평변위의 크기이고 AziS는 수평변위의 방위각임

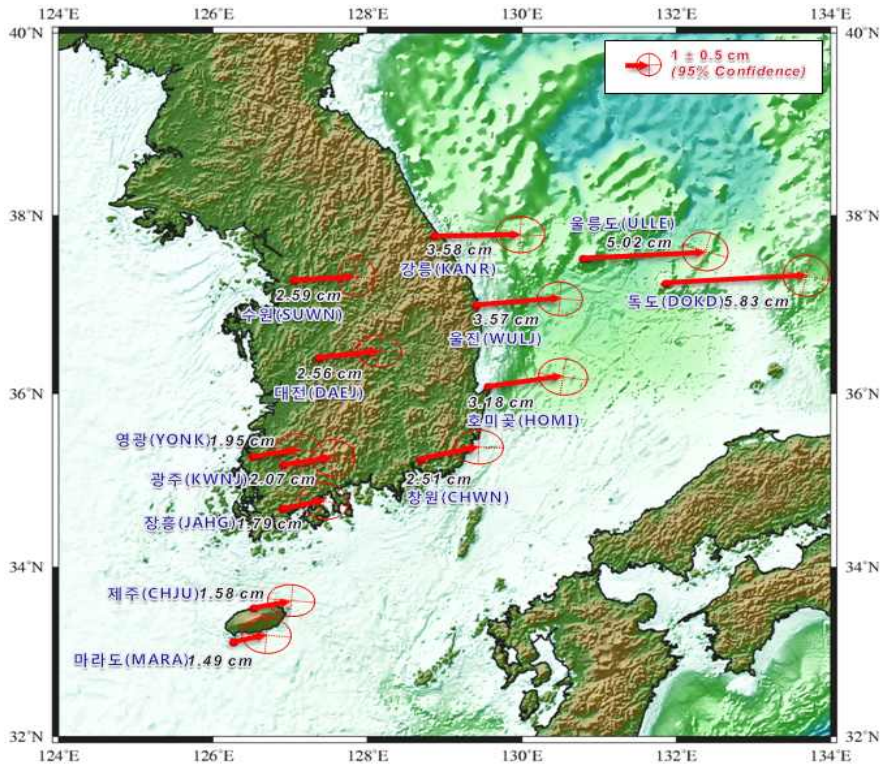


FIGURE 6. GPS 자료처리를 통해 계산된 한국 지역의 위치변동량 분포도

소들 중 지진의 영향을 받은 상시관측소에 발생한 등진역 수평변위는 표 1에 정리한 것과 같다. 진앙 중심에 가장 근접하여 있는 일본 내의 GPS 관측소들에서 가장 큰 변위가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 한국, 중국, 러시아, 대만 순으로 영향을 받은 것을 알 수 있다. 수직변위는 주로 일본에서만 발생한 것을 알 수 있다. 지진발생 이후 7일간 발생한 지진 후 변위의 영향은 가고시마(AIRA) 상시관측소를 제외한 일본 내의 GPS 상시관측소들에 적용하였다. 7일 동안 최대 66.7mm의 지진 후 변위가 발생하였으며, 가고시마(AIRA) 상시관측소의 경우는 발생량이 GPS 측위 결과의 오차범위 이내이기 때문에 적용하지 않았다.

### 한국 GPS 상시관측소의 위치변동량 분석

Tohoku-Oki 지진은 한국의 전 지역에 영향을 미쳐서 국토지리정보원에서 운영하는 GPS 상시관측소의 위치변동을 발생시켰다. 최대 변위는 진앙 중심과 가장 가까운 독도(DOKD) 상시관측소에서 발생하였으며 그 크기는 58.3mm로 계산되었다. 최소 변위는 14.9mm로 진앙 중심과 가장 먼 위치에 있는 마라도(MARA) 상시관측소에서 발생하였다. 그림 6은 국토지리정보원에서 운영하는 13개의 GPS 상시관측소에서 발생한 등진역 수평변위의 크기와 방향을 나타낸 것이다. 그림 6을 보면 등진역 변위들의 방향이 진앙 중심을 향하고 있는 것을 확인할 수 있다. 전체 변위의 방위각은 77° ~ 89° 으로 변위의 크기는 진앙의 중심으로 근접할수록 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

자료수집 기간인 지진발생 후 7일 이내의 자

TABLE 2. 한국 지역 주요 GPS 상시관측소에서 발생한 등진역 수평변위 해석 결과

| Station ID | D <sub>N</sub> (mm) | D <sub>E</sub> (mm) | D <sub>H</sub> (mm) | S (mm) | AziS (°) |
|------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|----------|
| DOKD       | 3.4 ±± 2.1          | 57.6 ±± 3.7         | 3.0 ±± 7.4          | 58.3   | 87       |
| ULLE       | 2.3 ±± 2.6          | 49.2 ±± 4.3         | 1.1 ±± 8.7          | 50.2   | 87       |
| KANR       | 0.5 ±± 2.5          | 36.5 ±± 4.2         | 3.9 ±± 8.5          | 35.8   | 89       |
| WULJ       | 3.0 ±± 1.7          | 35.3 ±± 3.0         | 3.0 ±± 5.9          | 35.7   | 85       |
| HOMI       | 4.8 ±± 2.4          | 30.7 ±± 4.4         | 4.0 ±± 8.5          | 31.8   | 81       |
| CHWN       | 4.9 ±± 2.2          | 24.7 ±± 4.0         | 2.1 ±± 7.8          | 25.1   | 79       |
| SUWN       | 1.4 ± 1.3           | 25.7 ± 1.4          | 1.8 ± 4.4           | 25.9   | 87       |
| DAEJ       | 2.8 ± 1.1           | 25.9 ± 1.0          | 0.7 ± 3.4           | 25.6   | 84       |
| KWNJ       | 2.9 ±± 3.1          | 20.8 ±± 5.5         | 6.2 ±± 11.7         | 20.7   | 82       |
| YONK       | 3.0 ±± 2.9          | 19.5 ±± 5.3         | 3.2 ±± 10.6         | 19.5   | 81       |
| JAHG       | 3.7 ±± 2.9          | 16.4 ±± 5.4         | 6.5 ±± 10.6         | 17.9   | 77       |
| CHJU       | 3.0 ±± 2.4          | 15.2 ±± 4.5         | 4.4 ±± 9.4          | 15.8   | 79       |
| MARA       | 3.2 ±± 2.5          | 14.2 ±± 4.8         | 4.1 ±± 9.2          | 14.9   | 77       |

\* DN, DE, DH는 등진역 변위의 북방향, 동방향, 수직방향 요소임. 각 변위값 옆에 표시된 정밀도는 95% 확률오차를 의미함. S는 수평변위의 크기이고 AziS는 수평변위의 방위각임

료처리 결과에서는 한국 지역에 지진 후 변위가 발생하지 않은 것으로 나타났기 때문에, 지진 발생 전, 후 7일간의 GPS 처리 결과를 각각 통합망조정된 좌표를 이용하여 등진역 변위량을 계산하였다. 표 2는 국내 각 상시관측소에서 계산된 등진역 변위량을 표시한 것이다.

한국의 지각에 발생한 등진역 변위량을 고려할 때에 지각의 변형으로 인하여 측지기준점간의 상대적인 위치가 변화하였고, 이것은 한국의 측지기준망의 정확도를 저하시키는 요인으로 작용하였을 가능성이 클 것으로 예상된다. 지각이 동일한 방향과 크기로 움직였다면 기준에 사용하던 측지기준점의 좌표를 사용하는 것에 문제가 없으나 측지 기준점간의 상대적인 위치 변화는 기준점을 이용한 측량과 지도제작 등에 오차로 작용하기 때문이다.

Tohoku-Oki 지진이 한국의 측지기준망에 미친 영향을 분석하기 위하여 지진발생 전의 상시관측소 좌표와 지진발생 후 좌표 사이의 3차원 좌표변환 매개변수를 계산하고 변환잔차를 분석하였다. 매개변수 계산을 위해서는 Molodensky-badekas 모델(Kutoglu *et al.*, 2002)을 적용하였다. 다음의 표 3은 계산된

변환잔차에 대한 통계값들을 정리한 것으로 평균적으로 4mm 수준의 변환잔차가 한국의 측지기준망에 발생하였다는 사실을 나타내고 있다.

TABLE 3. 한국 지역 GPS 상시관측소들의 지진 전의 좌표(epoch 2011.188)와 지진 후의 좌표(epoch 2011.210) 간 변환잔차 통계값

| 항목   | R <sub>N</sub> (mm) | R <sub>E</sub> (mm) | R <sub>H</sub> (mm) |
|------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 평균편차 | 3.6                 | 2.6                 | 1.6                 |
| 표준편차 | 4.2                 | 4.6                 | 2.2                 |
| 최대편차 | 8.0                 | 19.1                | 5.4                 |
| 최소편차 | 0.2                 | 0.0                 | 0.0                 |

\* RN, RE, RH는 각각 위거, 경거, 타원체고의 변환잔차를 의미함

표 3에 정리한 수준의 변환잔차들이 발생한 이유는 지진으로 인하여 한국이 위치한 지각에 수축과 팽창이 복합적으로 발생하였기 때문이며, 결과적으로 이로 인해 측지기준점간의 상대적인 거리가 변화한 것으로 판단된다. 따라서 기준에 사용하던 상시관측소의 고시성 과를 그대로 사용할 경우 전국에 걸쳐 최대

20mm(내륙 지역 : 10mm) 수준의 오차가 추가적으로 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 기준점 고시 성과의 정확도 저하가 기준점을 이용한 측량, 지도제작 성과물의 정확도에 미치는 영향은 크지 않으나, 한국 측지 기준망의 정확도를 보다 높은 수준으로 유지하려면, 등진역 변위의 영향으로 인한 상시관측소 성과의 위치변화량을 고시성과에 반영하여야 할 것으로 판단된다.

## 결론

Tohoku-Oki 지진으로 인해 한국 및 아시아 지역의 GPS 상시관측소에 발생한 위치변동량을 분석하기 위하여 284개의 IGS GPS 관측소들과 한반도와 인근 섬들에 위치한 22개소의 GPS 상시관측소들을 이용하여 연구를 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 진앙중심으로부터 최대 2702km 거리에 있는 GPS 상시관측소에서도 등진역 수평변위가 발생하였으며, 이를 통해 Tohoku-Oki 지진으로 인한 지각변동량이 아시아 지역에 광범위하게 발생한 것으로 나타났다. 특히, 진앙지 주변에 위치한 일본, 한국, 중국, 대만 및 러시아의 GPS 상시관측소에 Tohoku-Oki 지진으로 인한 최소 5mm에서 최대 2.6m에 이르는 상당한 위치변동이 발생하였음을 확인하였다.

둘째, 등진역 수평변위의 방향과 크기를 분석한 결과 기존의 연구들과 동일하게 대부분의 변위가 진앙중심을 향하고 있는 것을 확인하였으며, 진앙중심으로부터 가까울수록 변위의 크기가 큰 것을 알 수 있었다. 최대변위는 2622.8mm로 일본에 위치한 이와테(MIZU) 상시관측소에서 발생하였으며, 지진 영향권 경계 부분에 위치한 GPS 상시관측소들에서도 약 5mm 수준의 변위가 발생한 것으로 나타났다.

셋째, Tohoku-Oki 지진이 한국의 측지기준망에 미친 영향을 분석하기 위하여 국내 13

개소의 상시관측소의 등진역 수평변위를 해석하고, 지진발생 전·후 좌표변환 매개변수의 변환잔차를 계산한 결과, 지진으로 인하여 한국의 측지기준망을 구성하는 기준점들 간의 상대거리가 변화된 것으로 확인되었다. 따라서 기존에 고시된 기준점 성과를 사용하는 경우, 전국적으로 최대 20mm(내륙 지역 : 10mm) 수준의 위치오차가 추가될 수 있을 것으로 분석되었다.

상기의 결과들을 통해 한국의 보다 정밀한 측지기준망을 유지하기 위해서는 기준점 성과의 정비가 필요하지만, 발생한 위치변동량의 크기가 기타 지리정보 데이터의 정확도에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 예상되므로 지리정보 데이터에 대한 별도의 정비는 필요하지 않은 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3111)의 지원으로 수행되었습니다. [KAGIS](#)

## 참고 문헌

- 조재명. 2006. GPS 상시관측소 데이터의 정밀 해석 및 한반도 지각변동량 추정. 성균관대학교 박사학위논문.
- Ammon, C.J., T. Lay, H. Kanamori and M. Cleveland. 2011. A rupture model of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. *Earth Planets Space* 63:693-696..
- Jamason, P., Y. Bock, P. Fang, B. Gilmore, D. Malveaux, L. Prawirodirdjo and M. Scharber. 2004. SOPAC Web site (<http://sopac.ucsd.edu>). *GPS Solutions* 8:272-277.
- Johnson, K.M., Y.J. Hsu, P. Segall and S.B.

- Yu. 2001. Fault geometry and slip distribution of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake imaged from inversion of GPS data. *Geophysical Research Letters* 28(11):2285–2288.
- Kutoglu, H.S., C. Mekik and H. Akcin. 2002. A comparison of Two Well Known Models for 7-Parameter Transformation. *The Australian Surveyor* 47(1):24–30.
- Nikolaidis, R. 2002. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. PhD thesis, Univ. of California, San Diego, USA.
- Subarya, C., M. Chlieh, L. Prawirodirdjo, J.P. Avouac, Y. Bock, K. Sieh, A.J. Meltzner, D.H. Natawidjaja and R. McCaffrey. 2006. Plate-boundary deformation associated with the great Sumatra-Andaman earthquake. *Nature* 440:46–51.
- Vigny, C., W.J.F. Simons, S. Abu, R. Bamphenyu, C. Satirapod, N. Choosakul, C. Subarya, A. Socquet, K. Omar, H.Z. Abidin and B.A.C. Ambrosius. 2005. Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia. *Nature* 436:201–206.
- Yu, S.B., L.C. Kuo, Y.J. Hsu, H.H. Su, C.C. Liu, C.S. Hou, J.F. Lee, T.C. Lai, C.C. Liu, C.L. Liu, T.F. Tseng, C.S. Tsai and T.C. Shin. 2001. Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Bulletin of Seismological Society of America* 91:995–1012.
- Satirapod, C., W.J.F. Simons and C. Promthong. 2008. Monitoring Deformation of Thai Geodetic Network due to the 2004 Sumatra-Andaman and 2005 Nias Earthquakes by GPS. *Journal of Surveying Engineering* 134(3):83–88. 