

GPS를 이용한 토호쿠 대지진 이후 한반도 지각변동 속도 분석

Analysis of Korea's Crustal Movement Velocity After the Great Tohoku-Oki Earthquake by Using GPS

하지현*, 이명근*, 조영식**

Ji-Hyun Ha*, Myong-Kun Lee*, and Young-Sik Cho**

요 약

2011년 3월 11일에 일본 토호쿠 지역에서는 Mw 9 규모의 대지진이 발생하였다. 이 지진으로 인하여 일본 지각은 최대 5m 이상의 지각변동이 관측되었으며, 한반도 역시 연간 지각변동량이 순간적으로 이동하는 등 지진의 영향권에 있었다. 이 논문에서는 토호쿠 지진이 발생한지 2.5년가량 지난 현재의 시점에서 지진 이후의 한반도 지각변동 속도를 분석하고 과거의 한반도 지각변동 속도와 비교함으로써 변화된 지각변동 경향을 분석하였다. 이를 위하여 국토지리정보원의 GPS 관측데이터를 이용하여 2003년부터 2008년까지 6년간의 관측데이터와 지진 이후 6개월 후부터 2013년 6월 말일까지 관측데이터를 이용하여 정밀 좌표를 결정하고 시계열 분석을 통해 남북, 동서, 수직 방향의 절대 속도를 산출하였다. 그 결과 한반도의 지각변동 속도는 토호쿠 지진 발생 이전에 비해 남북 방향으로 평균 3.9mm/yr, 동서 방향으로 평균 7.5mm/yr의 속도 증가가 발생한 것을 알 수 있었다.

Abstract

The great Tohoku-oki earthquake which occurred on March 11, 2011, caused crustal movements in both Korea and Japan. This study attempts to analyze velocity changes of crustal movement of Korea Peninsula due to the Tohoku-oki earthquake and to compare the calculation with precious crustal movements of Korea Peninsula. We found that the crustal movement velocity of South Korea increased 3.9 mm/yr northward and 7.5 mm/yr eastward on average as a result of the Tohoku-oki earthquake; when this figure is compared with the past crustal movement velocities of the Korea Peninsula.

Key words : GPS, Crustal Movement Velocity, Tohoku-oki earthquake

I. 서 론

2011년 3월 11일 05시 46분경(UTC, Universal Time Coordinated) 일본 북동쪽 토호쿠(Tohoku-Oki)지역 해상에서 Mw 9 규모의 강진이 발생하였다. 이 지진으로 인하여 토호쿠 지역은 물론 인근 지역인 산리쿠

(Sanriku)와 이바라키(Ibaraki) 해안지역에 이르기까지 대형 지진과 쓰나미가 발생하였다. 이로 인하여 2만 6천여 명의 사상자가 발생하였으며 건물이 붕괴되고 1천여 개의 기업이 파산하는 등 막대한 사회, 경제적 피해가 발생하였다. 또한 후쿠시마 원전시설이 붕괴되어 태평양 연안으로 물질이 확산되고 있는 실정이

* 대한지적공사 공간정보연구원(Spatial Information Research Institute, Korea Cadastral Survey Corporation)

** 한국항공대학교 (Korea Aerospace University)

· 제1저자 (First Author) : 하지현(Ji-Hyun Ha, tel : +82-10-3171-6740, email : hajh@lx.or.kr)

· 접수일자 : 2013년 10월 13일 · 심사(수정)일자 : 2013년 10월 15일 (수정일자 : 2013년 12월 24일) · 게재일자 : 2013년 12월 30일

http://dx.doi.org/10.12673/jkoni.2013.17.6.600

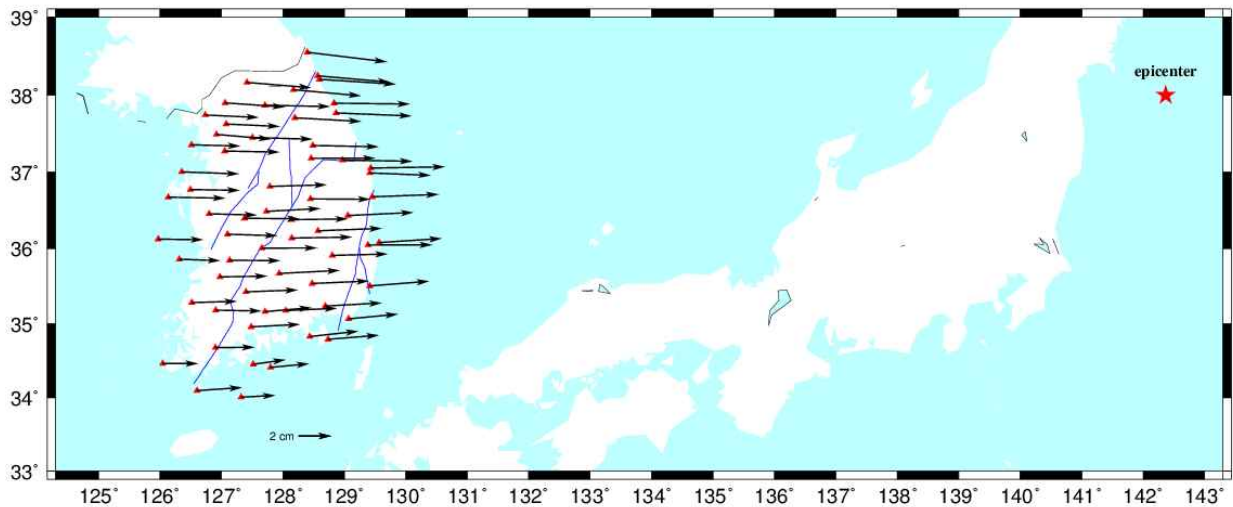


그림 1. 토호쿠 지진 진앙지와 지진에 의한 국내 62개 GPS 상시관측소 수평방향 좌표이동량
 Fig. 1. Epicenter of the Tohoku-oki earthquake and coordinate shifts of 62 permanent GPS observations stations in South Korea in the horizontal direction due to the earthquake.

다.

미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration) JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서는 토호쿠 지진이 발생한 직후 일본 지각이 최대 5 m 수준으로 변동되었음을 발표하였다[1]. 또한 일본 국토교통성은 미야기현이 남동쪽으로 5.3 m 이동했을 뿐만 아니라 -1.2 m의 수직 침하도 발생한 것으로 보고하였다[2]. 토호쿠 지진 발생 후 분석된 자료에 따르면 한반도 역시 영향권 내에 위치하였으며, 일시적으로 최대 5 cm, 평균 3 cm 수준으로 동쪽 방향 이동이 관측되었다[3][4]. 토호쿠 지진이 발생하기 전, 한반도 지각변동 속도는 남동쪽으로 연간 2-3 cm 수준이었다[5][6]. 즉, 토호쿠 지진으로 인하여 순간적으로 평균 연간 이동량을 이동한 것이다. 그림 1에 토호쿠 지진의 진앙지와 국내 GPS 상시관측소에서 관측된 좌표이동량을 나타내었다. 그림 1의 GPS 상시관측소의 좌표이동량은 Ha et al.[4]의 분석 결과를 이용하여 도식하였다.

국내에서 GPS를 이용한 지각 변위 연구는 2000년도에 들어 전국망 규모의 GPS 상시관측소가 구축되면서 본격적으로 시작되었다. Hamdy et al.[5]은 국내에서 관측된 GPS 데이터를 활용하여 한반도 지각 이동 속도와 활성단층대의 지각변동량을 분석하였으며, Jin and Park[6]은 남한지역 전반에 대한 지각 변

동량과 응력 분석 연구를 진행하였다. Baek et al.[3]과 Ha et al.[4]는 토호쿠 지진 직후 한반도의 순간적인 지각변동 변화를 분석하였다. Baek et al.[3]은 토호쿠 지진이 한반도 지각변동에 얼마 동안 한반도 지각동에 영향을 미칠 것인지 분석하였으며, Ha et al.[4]은 토호쿠 지진에 의해 순간적으로 변화된 응력 변화량을 분석하였다. 이후에도 토호쿠 지진이 한반도에 순간적인 변화를 준 후 원 지점으로 복귀하고 있다는 분석 결과와 지속적인 변화가 관측된다는 결과 등 다양한 분석 결과가 보고되었다[7],[8],[9].

이 논문에서는 토호쿠 지진이 발생한지 2.5년가량 지난 현재시점에서 최근까지 관측된 GPS 관측데이터를 이용하여 한반도의 지각변동 경향을 분석하여 토호쿠 지진 이후 장기적인 한반도 지각변동 경향을 상세하게 분석하였다.

II. 데이터 및 분석 방법

토호쿠 지진 이후 한반도의 지각변동 속도 분석을 위하여 국토지리정보원에서 운영하고 있는 13개 상시관측소(제주(CHJU), 청주(CNJU), 진주(JINJ), 전주(JUNJ), 강릉(KANR), 광주(KWNJ), 서산(SEOS), 상주(SNJU), 서울(SOUL), 수원(SUWN), 대구(TEGN), 원

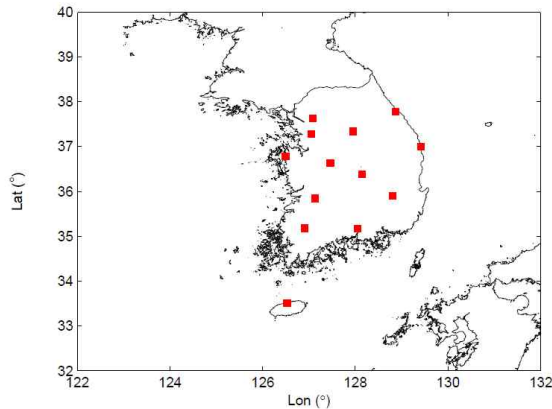


그림 2. 13개 국토지리정보원 GPS 상시관측소
Fig.2. Korea National Geographic Information Institute's 13 permanent GPS observations stations.

주(WNJU), 울진(WULJ))를 이용하였다. 분석 대상이 된 상시관측소 위치를 그림 2에 나타내었다.

Baek et al.[3]의 분석 결과에 의하면 토호쿠 지진은 6개월이 지나야 지진에 의한 영향이 50 % 이하로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 지진 이후의 지각 변동 속도 산출을 위하여 지진이 발생한 날로부터 180일 후인 2011년 9월 7일(DOY 250)부터 2013년 6월 말일(DOY 181)까지 생성된 관측데이터를 처리하였다. 지진 이전의 각 관측소 별 속도 분석에는 2003년부터 2008년까지 6년간 축적된 관측데이터를 이용하였다. 관측데이터는 30초 epoch의 24시간 RINEX를 사용하였으며, 정밀데이터 처리를 위하여 JPL에서 개발한 GIPSY-OASIS(GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software, 이하 GIPSY라 칭함)[10]와 JPL정밀케도력(final products)을 이용하였다.

관측소 좌표는 하루 간격으로 IGS08 frame으로 산출하였으며, GIPSY를 이용한 고정밀 데이터 처리 시 주요오차요인인 안테나 위상중심 변동량(PCV, Phase Center Variations)과 해수하중에 의한 지각변동량(OTL, Ocean Tidal Loading displacements), 그리고 방위각 방향으로의 대류층 신호지연량(Azimuthal Gradients)을 보정하였다. GPS 위성과 지상 안테나의 PCV 보정을 위하여 절대보정(Absolute Calibration) 모델[11]을 적용하였으며, OTL 보정을 위하여 FES2004 모델을 적용하였다. 데이터 처리 시 임계고도각(Elevation Cutoff Angle)은 10°로 하였다. 대류층 오차

는 선형적(a priori) 수치[10]를 이용하여 매 10분 간격으로 random walk process를 통해 추정하였으며, GMF(Global Mapping Function)을 적용하였다.

III. 분석 결과

3-1 절대 속도 산출

관측소의 절대속도를 산출하기 위하여 GIPSY를 이용하여 하루단위로 정밀좌표를 산출하였으며, 2003년 1월 1일을 기준으로 남북, 동서, 수직 방향의 좌표 변동량으로 변환하여 시계열을 작성한 후 선형회귀방식을 적용하여 상시관측소의 절대 속도를 계산하였다. 토호쿠 지진 전후의 절대속도를 비교하기 위하여 지진 발생 이전과 이후의 시계열을 각각 분리하여 속도를 산출하였으며, 이전의 관측데이터 분석을 통해 추정된 현시점의 속도와 최근 관측데이터를 이용하여 산출된 속도를 비교하였다. 그림 3에 수원(SUWN) 상시관측소 좌표 시계열과 속도를 나타내었다. 그림 3의 가로축은 년도이며, 세로축은 각각 남북(N, North-South), 동서(E, East-West), 그리고 수직(U, Up) 방향의 좌표 변동량이다. 시계열의 상단에 있는 수치는 관측소명과 속도, 속도값에 대한 불확정성(Uncertainty), 그리고 제곱평균(RMS, Root Mean Square) 오차를 나타낸다.

수원(SUWN) 상시관측소의 2003년 1월 1일 좌표는 X -3062023.558 m, Y 4055449.047 m, Z 3841819.246 m이며, 2003년부터 2008년까지의 시계열 분석을 통해 토호쿠 지진 이전의 속도를 산출하고, 산출된 속도를 이용하여 2013년 6월까지의 속도를 추정하였다. 지진 이후의 2011년 9월 7일부터 2013년 6월까지의 시계열 분석을 통해 지진 이후의 속도를 산출하였다. 그림 3의 실선은 선형회귀를 통해 산출한 속도이며, 점선은 과거(2003~2008년)의 시계열 분석을 통해 2013년 6월까지 추정한 속도이다. 관측소 속도가 음수인 경우는 남북 방향의 경우 남쪽으로, 동서 방향의 경우 서쪽으로의 방향성을 가지는 것을 의미한다.

그림 3의 수원 상시관측소의 속도를 보면, 2009년

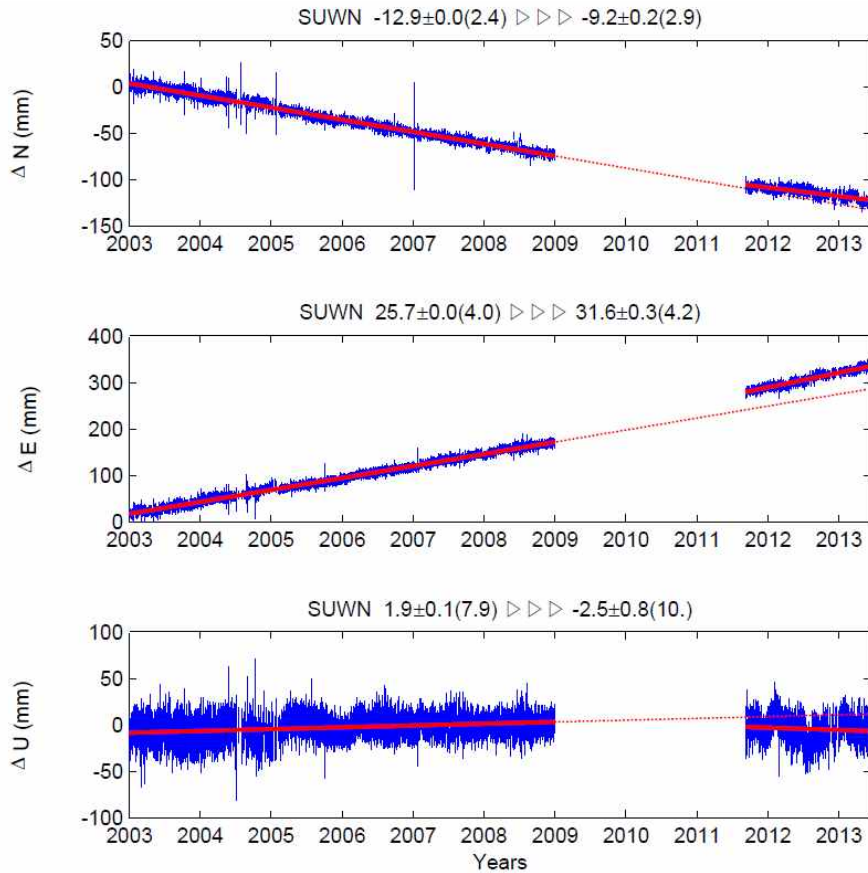


그림 3. 수원(SUWN) 상시관측소의 좌표 시계열
 Fig. 3. Time Series of the SUWN permanent station.

이전에는 남북 방향으로 -12.9 ± 0.0 mm/yr, 동서 방향으로 25.7 ± 0.0 mm/yr, 그리고 수직방향으로 1.9 ± 0.1 mm/yr의 관측소 속도가 관측되었으나, 토호쿠 지진 이후에는 과거(2003~2008년)의 관측데이터를 이용하여 추정된 속도(점선)와는 다소 다른 결과가 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 3차원 방향에서 모두 관측되었으며, 특히 동쪽 방향의 경우 지진에 의해 시계열에 점프(Jump)가 있는 후 일정한 속도로 지속적인 이동을 볼 수 있다. 지진 이후 수원(SUWN) 관측소의 속도는 남북 방향으로 -9.2 ± 0.2 mm/yr, 동서 방향으로 31.6 ± 0.3 mm/yr, 그리고 수직 방향으로 -2.5 ± 0.8 mm/yr로 지진 발생 이전에 비해 수평 방향 속도는 증가하였으며, 수직 방향 속도는 감소하는 경향을 보인다. 지진 이전과 이후의 속도 차이는 남북 방향 3.8 mm/yr, 동서 방향 5.9 mm/yr, 그리고 수직 방향 -4.4 mm/yr로 나타났다.

13개 관측소에 대한 토호쿠 지진 이전의 속도를

표 1. 13개 GPS 상시관측소의 절대 속도, 불확정성, 그리고 RMS 오차

Table 1. Velocities, Uncertainties, and RMS errors of 13 permanent GPS observations stations.

| 관측소 | 절대속도 (mm/yr) | | | 불확정성 (mm/yr) | | | RMS (mm/yr) | | |
|------|--------------|------|------|--------------|-----|-----|-------------|-----|-----|
| | N | E | U | N | E | U | N | E | U |
| CHJU | -16.7 | 27.1 | -1.2 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 3.0 | 4.9 | 9.5 |
| CNJU | -13.5 | 25 | -1.5 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 2.4 | 4.6 | 8.2 |
| JINJ | -12.7 | 26.6 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | 4.6 | 7.8 |
| JUNJ | -13.9 | 26.7 | -0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | 4.2 | 7.7 |
| KANR | -12.2 | 25 | -0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 2.7 | 4.7 | 9.4 |
| KWNJ | -12.8 | 25.5 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 2.7 | 5.1 | 8.9 |
| SEOS | -12.9 | 26.3 | 1.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.4 | 3.9 | 7.2 |
| SNJU | -13.0 | 25.1 | 0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 2.5 | 4.3 | 8.4 |
| SOUL | -11.4 | 24.1 | -0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.4 | 4.3 | 7.5 |
| SUWN | -12.9 | 25.7 | 1.9 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 2.4 | 4.0 | 7.9 |
| TEGN | -12.3 | 24.8 | -0.6 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 2.4 | 4.7 | 8.0 |
| WNJU | -12.6 | 26.1 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.5 | 4.5 | 7.8 |
| WULJ | -12.3 | 25.1 | 1.8 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 2.3 | 4.2 | 7.5 |

표 1에 정리하였다. 표 1을 보면 남북 방향 속도가 모두 음수, 동서방향 속도는 모두 양수로 나타난 것을 알 수 있다. 평균 속도는 남북 방향으로 -13.0 mm/yr, 동서 방향으로 25.6 mm/yr, 그리고 수직방향으로 0.2 mm/yr 이었다. 이는 한반도가 남동쪽 방향으로 평균 28.7 mm/yr 크기로 이동하고 있으며, 수직방향으로는 변동이 거의 나타나지 않는 것을 의미한다. 분석 대상이 된 전체 관측소에 대한 지진 전후의 상세한 속도 비교는 다음 절에서 기술하였다.

3-2 속도 변화 분석

이 논문에서는 토호쿠 지진 이후의 GPS 상시관측소 별 속도 변화를 분석하기 위하여 지진 전후의

관측데이터를 분석하여 절대속도를 산출하였다. 13개 관측소의 지진 전후의 평균 속도 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 가로축은 관측소이며, 세로축은 위에서 부터 남북(N), 동서(E), 수직(U) 방향의 속도 변화량이다. 그림 4의 속도 변화량은 mm/yr 단위로 나타내었다.

그림 4의 토호쿠 지진 이후의 속도 변화를 보면, 13개 관측소 모두 속도가 변한 것을 알 수 있다. 특히 수평방향의 속도 변화가 크게 나타난 것을 볼 수 있는데, 남북 방향의 경우 평균 3.9 mm/yr 수준의 속도 증가가 있었으며, 동서 방향의 경우 7.5 mm/yr의 가장 큰 속도 증가가 관측되었다. 남북 방향의 속도가 증가했다는 것은 기존의 속도에 비해 남쪽으로의 이동 속도가 감소했다는 것을 의미하며, 동서 방향의

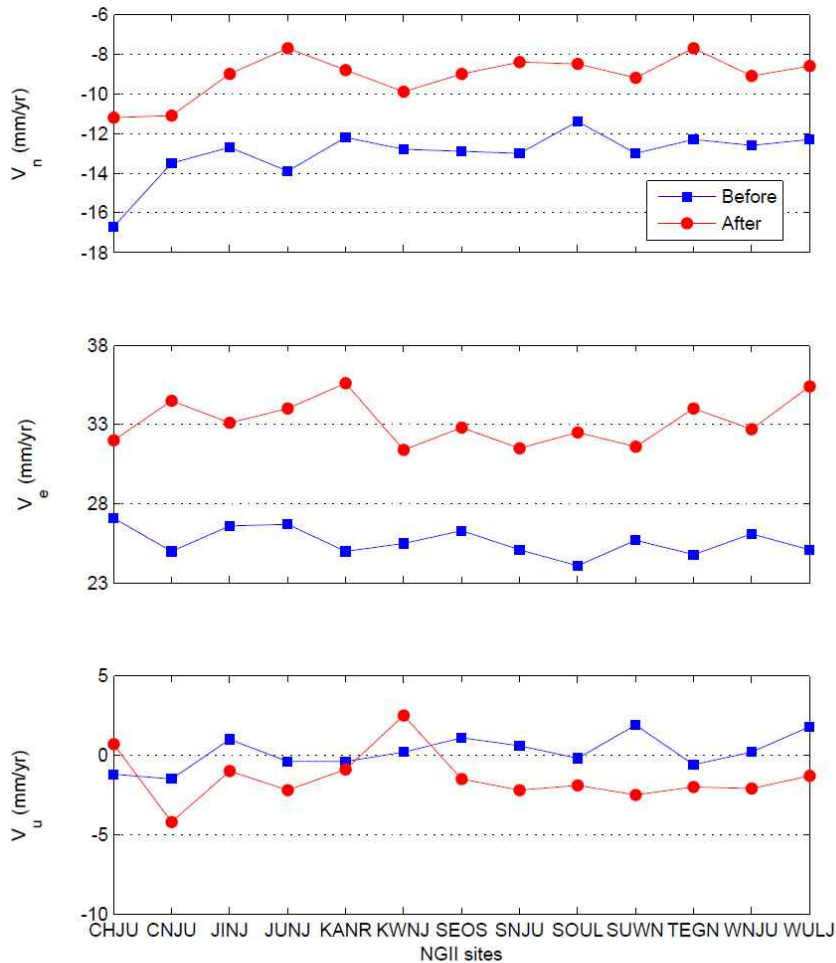


그림 4. 13개 GPS 상시관측소의 토호쿠 지진 전후의 남북, 동서, 수직 방향 속도 변화

Fig. 4. Velocity changes of 13 permanent GPS observation stations in North-South, East-West, and Up directions due to the Tohoku-oki earthquake.

표 2. 토호쿠 지진 이후의 13개 GPS 상시관측소의 절대 속도, 불확정성, 그리고 RMS 오차

Table 2. Velocities, Uncertainties, and RMS errors of 13 permanent GPS observations stations after the Tohoku-oki earthquake.

| 관측소 | 절대속도 (mm/yr) | | | 불확정성 (mm/yr) | | | RMS (mm/yr) | | |
|------|-----------------|------|------|-----------------|-----|-----|----------------|-----|------|
| | N | E | U | N | E | U | N | E | U |
| CHJU | -11.2 | 32 | 0.7 | 0.2 | 0.3 | 0.9 | 2.8 | 4.2 | 11.0 |
| CNJU | -11.1 | 34.5 | -4.2 | 0.2 | 0.3 | 0.8 | 3.0 | 4.4 | 10.0 |
| JINJ | -9.0 | 33.1 | -1.0 | 0.2 | 0.3 | 0.8 | 2.8 | 4.0 | 10.0 |
| JUNJ | -7.7 | 34 | -2.2 | 0.2 | 0.3 | 0.7 | 2.8 | 4.0 | 8.7 |
| KANR | -8.8 | 35.6 | -0.9 | 0.2 | 0.3 | 0.9 | 3.0 | 4.4 | 11.0 |
| KWNJ | -9.9 | 31.4 | 2.5 | 0.2 | 0.4 | 1.1 | 3.1 | 5.7 | 13.0 |
| SEOS | -9.0 | 32.8 | -1.5 | 0.2 | 0.3 | 0.7 | 2.6 | 3.7 | 8.8 |
| SNJU | -8.4 | 31.5 | -2.2 | 0.2 | 0.3 | 0.9 | 3.0 | 4.1 | 11.0 |
| SOUL | -8.5 | 32.5 | -1.9 | 0.2 | 0.3 | 0.8 | 2.6 | 4.0 | 10.0 |
| SUWN | -9.2 | 31.6 | -2.5 | 0.2 | 0.3 | 0.8 | 2.9 | 4.2 | 10.0 |
| TEGN | -7.7 | 34 | -2 | 0.2 | 0.3 | 0.7 | 2.6 | 4.1 | 9.1 |
| WNJU | -9.1 | 32.7 | -2.1 | 0.2 | 0.3 | 0.7 | 2.8 | 4.2 | 9.5 |
| WULJ | -8.6 | 35.4 | -1.3 | 0.2 | 0.3 | 0.7 | 2.6 | 3.8 | 9.5 |

속도가 증가했다는 것은 지진 발생 이전에 비해 동쪽으로의 이동 속도가 증가했다는 것을 의미한다.

수직 방향을 보면 지진 발생 이전에는 대부분의 관측소에서 속도 0 mm/yr에 가까운 경향을 보였으나 지진 발생 이후에는 제주(CHJU)와 광주(KWNJ) 관측소를 제외한 대부분의 관측소에서 음의 방향으로 속도가 증가한 것을 알 수 있다. 수직 방향으로의 속도 변화는 평균 -1.6 mm/yr로 나타났다. 수직 방향의 경우 수평방향에 비해 GPS 측위 오차가 크기 때문에 향후 보다 상세한 분석이 필요할 것으로 판단된다. 지진 이후의 13개 관측소의 변화된 속도를 표 2에 나타내었다.

표 2과 표 1을 비교해 보면, 속도의 변화 이외에도 불확정성은 남북, 동서, 수직 방향에서 모두 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 지진 이후 관측소 시계열이 이전에 비해 다소 불안정한 경향이 나타났기 때문이며 특히 그림 3에서와 같이 수직방향에서 시계열의 변동폭이 크게 관측되었기 때문이다. RMS는 수직 방향에서 다소 증가가 있으나 수평 방향은 유사한 수준을 보여 산출된 속도의 정확도

는 유사한 수준임을 알 수 있다.

3-3 상관성 분석

그림 4와 표 2를 통해 토호쿠 지진 이후에 모든 관측소에서 지각변동 속도에 변화가 나타난 것을 알 수 있었다. 이 절에서는 관측소 위치에 따른 속도 변화량과의 상관성을 분석하여 토호쿠 지진의 지역적인 영향을 분석하였다.

속도 변화량과 지역적 특성의 상관성을 분석하기 위하여 관측소의 위치를 위도와 경도 방향으로 정렬한 후 남북, 동서, 수직 방향의 속도 변화량과의 상관계수(Correlation Coefficient)를 산출하였다. 그림 5에 위, 경도 방향에 따른 지진 전과 후의 속도를, 그림 6에 위, 경도 방향에 따른 속도 변화량과의 상관성을 나타내었다. 그림 5(a)-(c)와 그림 6(a)-(c)는 각각 위도에 따른 남북, 동서, 수직 방향의 속도와 속도 변화량이며, 그림 5(d)-(f)와 그림 6(d)-(f)는 각각 경도에 따른 남북, 동서, 수직 방향의 속도와 속도 변화량이다. 그림 6의 r은 상관계수를 의미한다.

그림 5(a)와 그림 5(d)의 남북방향 속도를 보면 지진 전 후에 경, 위도에 따른 크기 변화는 다소 있지만 경향은 유사한 것을 알 수 있다. 그러나 그림 5(b)와 그림 5(e)의 동서방향 속도를 보면 경, 위도에 따라 지진 전과 후에 속도 분포가 달라진 것을 볼 수 있다. 그림 5(b)를 보면 토호쿠 지진 전에는 위도가 높은 지역에서 동쪽 방향의 속도가 다소 작았으나 지진이 발생한 후에는 반대로 위도가 높은 지역에서 동쪽방향으로의 속도가 증가한 것으로 나타났다. 그림 5(e)의 경도 방향 속도는 지진 전후의 변화가 보다 뚜렷하게 나타나는데, 지진 전에는 동쪽에 위치한 관측소 일수록 동쪽으로 이동 속도가 다소 작았으나 지진이 발생한 후에는 동쪽에 위치한 관측소에서 뚜렷하게 속도가 증가한 현상이 나타났다.

속도 변화량과의 상관성을 보면 그림 6(c)와 그림 6(e)에서 상관계수 r이 각각 -0.64와 0.72로 비교적 큰 상관성이 보이는 것을 알 수 있다. 이는 위도가 높은 지역에서 수직 방향으로 하강하는 속도 변화량이 증가했다는 것을 의미하며, 동쪽에

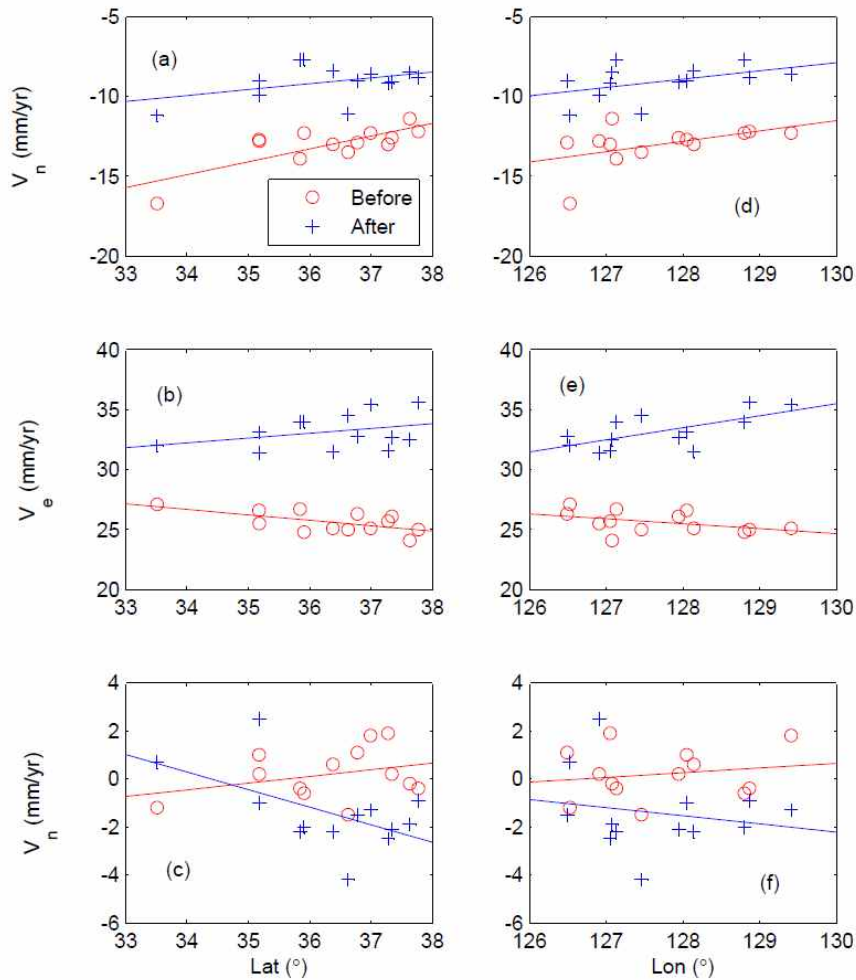


그림 5. 관측소 위치에 따른 속도 분포도

Fig. 5. Velocity changes of 13 permanent GPS observation stations in North-South, East-West, and Up directions due to the Tohoku-oki earthquake.

위치한 지역일수록 동쪽으로 이동하는 속도 변화량이 증가했다는 것을 의미한다. 앞서 기술한 바와 같이 수직 방향의 경우 GPS 측위 오차가 크기 때문에 향후 보다 상세한 분석을 위한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 일반적으로 진앙지에 가까운 지역일수록 지각 변동 영향을 크게 받는다. 토호쿠 지진의 경우 우리나라 북부지역의 동쪽 방향에서 지진이 발생하였으며 따라서 북동쪽에 위치한 지역에서 비교적 큰 속도 변화가 관측되었다. 즉, 진앙지 방향에 위치한 동북쪽 지역일수록 좌표 이동량도 크며 지진 전에 비해 동쪽 방향으로의 이동 속도가 강화된 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

이 논문에서는 토호쿠 지진 이후, 최근까지 관측된 GPS 데이터를 이용하여 장기간의 지각변동 속도 변화를 분석하였다. 이를 위하여 국토지리정보원의 GPS 관측데이터를 이용하여 2003년부터 2008년까지 6년간의 관측데이터와 지진 이후 6개월 후인 2011년 9월 7일부터 2013년 6월 말일까지 관측데이터를 이용하여 정밀 좌표를 결정하고 시계열 분석을 통해 남북, 동서, 수직 방향의 절대 속도를 산출하였다. 그 결과 분석 대상이된 관측소에서 모두 속도에 변화가 관측되었으며, 남북 방향의 경우 평균 3.9 mm/yr,

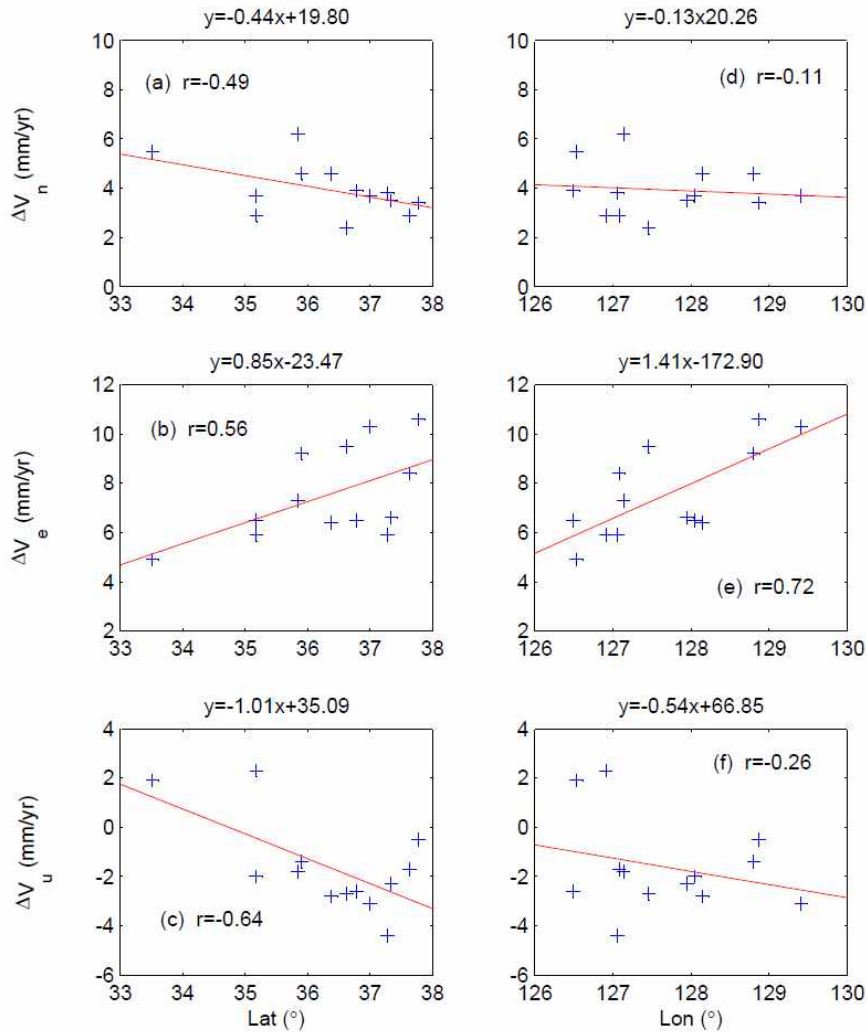


그림 6. 관측소 위치와 속도 변화량 상관성 분석

Fig. 6. Velocity changes of 13 permanent GPS observation stations in North-South, East-West, and Up directions due to the Tohoku-oki earthquake.

동서 방향의 경우 평균 7.5 mm/yr의 속도 증가가 관측되었다. 또한 관측소 위치에 따른 속도 변화량의 상관성을 분석한 결과 동북쪽에 위치한 관측소 일수록 속도 변화량이 큰 것을 알 수 있었다. 수직 방향의 경우 지진 이전에는 거의 0 mm/yr로 변화가 거의 없었으나 지진 이후 -1.6 mm/yr의 변화가 관측되어 향후 상세한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 대한지적공사 공간정보연구원 기본과

제(GPS 정밀측위 정확도 향상을 위한 최신모델 적용 연구)의 일환으로 수행되었습니다. GPS 관측데이터를 제공해 주신 국토지리정보원 관계자님께 감사드립니다.

Reference

- [1] <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>.
- [2] http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_tohoku2.html.
- [3] J. Beak, Y.-H. Shin, S.-H. Na, N. V. Shestakov, P.-H.

- Park, and S. Cho, "Cosmic and postseismic crustal deformations of the Korean Peninsula caused by the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan, from global positioning system data", *Terra Nova*, vol. 24, no. 4, pp. 295-300, March 2012.
- [4] J. Ha, K.-D. Park, J. Won, and M.-B. Heo, "Co-seismic deformation and strain in South Korea following the 2011 Tohoku-oki earthquake from GPS measurements", *Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 5, July 2014, printed.
- [5] A. M. Hamdy, P.-H. Park, and H.-C. Lim, "Horizontal deformation in South Korea from permanent GPS network data 2000-2003", *Earth Planets Space*, vol. 57, pp. 77-82, February 2005.
- [6] S. Jin, and P.-H. Park, "Strain accumulation in South Korea inferred from GPS measurements", *Earth Planets Space*, vol. 58, pp. 529-534, May 2006.
- [7] http://www.mydaily.co.kr/new_yk/html/read.php?newsid=201103212132565586.
- [8] J. Won, and K.-D. Park, "Analysis of crustal deformation associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake in the Korean Peninsula using GPS time series with ARMA", *2011 AGU Fall Meeting*, December 2011.
- [9] J. Won, K.-D. Park, and J.-W. Huh, "Analysis of post-seismic crustal deformation associated with the 2011 Tohoku-oki earthquake in the Korean Peninsula using GPS", *2012 AGU Fall Meeting*, December 2012.
- [10] F. H. Webb, and J. F. Zumberge, An introduction to the GIPSY/OASIS-II, JPL Publ., Pasadena, CA, 1993.
- [11] G. Wübbena, M., Schmitz, F., Menge, V., Boder, and G. Seeber, "Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time", *Proceedings of the 13th. International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation ION GPS 2000, Salt Lake City, UT*, September 2000.

하 지 현 (Ji-Hyun Ha)



2003년 2월 : 충북대학교 천문우주학과 (이학사)

2005년 2월 : 충북대학교/한국천문연구원 천문우주/우주측지전공 (이학석사)

2009년 2월 : 인하대학교 지리정보공학과(공학박사)

2010년 2월~2012년 10월 : 한국항공우주연구원 선임연구원

2012년 10월~현재 : 대한지적공사 공간정보연구원 선임연구원

관심분야 : GNSS, 위성항법, 정밀측위 등

이 명 근 (Myong-Kun Lee)



1987년 2월 : 청주대학교 지적학과 (행정학사)

1991년 2월 : 연세대학교 도시계획전공(공학석사)

2008년 2월 : 한성대학교 경제부동산학전공(부동산학박사)

2013년 3월~현재 : 대한지적공사 공간정보연구원 기술연구실장

관심분야 : 지적측량, GNSS, 기술/시스템 등

조 영 식 (Young-Sik Cho)



1993년 : 충남대학교 수학과 졸업(이학사)

2004년 경기대학교 관광전문대학원 졸업(관광학석사)

2014년 한국항공대학교 항공교통전공 박사수료예정