

GPS를 이용한 토호쿠 지진 이후 한반도 지각변동 분석

하지현, 김현호, 이재강, 정완석, 강상구

Jihyun Ha, Hyun-Ho Kim, Jae-Kang Lee, Wan-Seok Jung, Sang-Gu Kang

대한지적공사 공간정보연구원 GNSS팀

GNSS Team, Spatial Information Research Institute, KCSC

주소: 150-891 서울 영등포구 국제금융로 8 길 27-8

연락처: 02-3774-2331

이메일: hajh@lx.or.kr

Abstract: 2011년 3월 11일, 일본 북동쪽 토호쿠 지역 해상에서 Mw 9 규모의 강진이 발생하였으며 이로 인하여 산리쿠에서 이바라키에 이르기까지 대형 지진과 쓰나미에 의한 피해가 발생하였다. 토호쿠 지진에 의해 일본 동북부 지역은 평균 2-3m, 최대 6m 이상 동쪽으로 이동하였으며, 우리나라도 평균 2-3cm, 최대 5cm 가량 동쪽으로 이동한 것으로 보고되었다. 또한 한반도 지각내 응력 방향도 순간적으로 바뀌는 현상이 관측되었다. 이 연구에서는 지진이 발생한 이후 최근까지 장기간 GNSS 관측데이터 분석을 통해 순간적인 변동 이후에 한반도 지각이 어떤 변화를 보이는지 분석하였다. 지진 전과 후의 지각변동 경향을 비교하기 위하여 지진 발생 이전인 2003년부터 2008년까지의 6년간 관측데이터와 지진 발생일에서 6개월후부터 2013년 6월까지 약 2년간의 관측데이터를 처리하였다. GIPSY-OASIS와 정밀계도력을 이용하여 정밀 좌표를 산출하였으며, 산출한 좌표를 바탕으로 시계열을 작성하고 이를 이용하여 지각변동 속도 변화를 분석하였다. 그 결과 한반도의 지각변동 속도는 토호쿠 대지진 발생 이전에 비해 3차원 방향에서 모두 속도 변화가 관측되었다. 속도 변화량은 남북 방향으로 평균 3.9mm/yr, 동서 방향 7.5mm/yr의 속도 증가가 나타났다.

Keywords: 토호쿠 지진, 한반도 지각변동, GPS

1. 서론

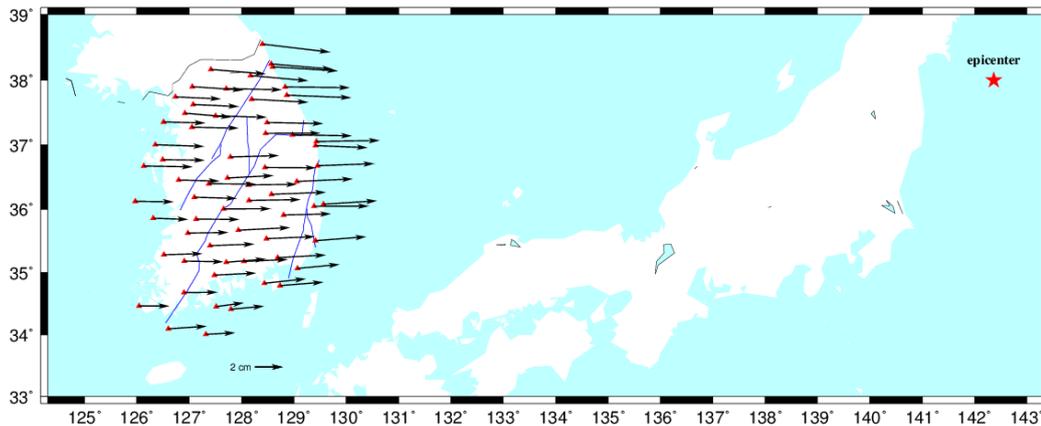
2011년 3월 11일 05시 46분경(UTC, Universal Time Coordinated) 일본 북동쪽 토호쿠(Tohoku-Oki)지역 해상에서 Mw9 규모의 강진이 발생하였다. 이 지진으로 인하여 토호쿠 지역은 물론 인근 지역인 산리쿠(Sanriku)와 이바라키(Ibaraki) 해안지역에 이르기까지 대형 지진과 쓰나미가 발생하였다. 토호쿠 지진으로 인하여 2만 6천여명의 사상자가 발생하였으며 건물 붕괴되고 천여개의 기업이 파산하는 등 경제적 손실이 25조엔(약 350조원) 이상으로 추산되는 막대한 피해를 입었다. 또한 이 지진으로 인하여 원전시설이 붕괴되어 태평양 연안은 물론 지구 전체에 이르기 까지 방사능 물질이 확산되고 있는 실정이다.

토호쿠 지진이 발생한 직후 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration) JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서는 토호쿠 지진으로 인하여 일본 지각이 최대 5m 수준으로 변동이 관측되었음을 보고하였으며[1], 이어 일본 국토교통성에서는 미야기현에 위치한 GPS(Global Positioning System) 기준국이 남동쪽으로 5.3m, 수직 - 1.2m의 침하가

발생한 것으로 발표하였다[2]. 또한 토호쿠 지진은 일본뿐만 아니라 우리나라를 포함한 주변국은 물론 미국 서북부 연안에 이르기까지 광범위한 지역에 까지 영향을 미쳐 쓰나미와 지진 경보가 발령되었다.

토호쿠 지진 발생 후 분석된 자료에 따르면 한반도는 일시적으로 최대 5cm, 평균 3cm 수준으로 동쪽으로 이동하였으며[3,4], 응력 방향도 일시적으로 반대로 변한 것으로 나타났다. 토호쿠 지진이 발생하기 전의 한반도는 연간 2-3cm 수준으로 동남쪽 방향으로 이동하는 것으로 알려졌다[5],[6]. 즉, 토호쿠 지진에 의해 연간 이동량을 순간적으로 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 2000년도부터 3년간 남한에서 관측된 GPS 데이터를 활용하여 남한의 지각 이동 속도와 활성단층대의 지각 변동량을 분석하였으며, Jin and Park[6]은



GM2 2013 Oct 04 10:02:46

그림 1. 토호쿠 지진 진앙지와 지진에 의한 국내 62개 GPS 상시관측소 수평방향 좌표 이동량.

2004년 초지의 관측데이터를 추가로 분석하여 남한지역 전반에 대한 지각 변동량과 응력 분석 연구를 진행하였다. Baek et al.[3]과 Ha et al.[4]는 토호쿠 지진 직후 단기간 변화된 한반도 지각변동 경향을 분석하였다. Baek et al.[3]은 토호쿠 지진이 한반도 지각변동에 얼마 동안 한반도 지각 동에 영향을 미칠 것인지 분석하였으며 그 결과 6개월이 지나야 지진에 의한 영향이 50% 이하로 감소하는 것으로 나타났다. Ha et al.[4]은 토호쿠 지진에 의해 순간적으로 변화된 응력변화량을 분석하였으며, 그 결과 지진 이전에는 동서 방향으로 압축, 남북방향으로는 팽창이었으나 지진에 의해 순간적으로 방향이 변하여 동서 방향으로 팽창, 남북방향으로 수축하는 것으로 나타났다. 이후에도 토호쿠 지진이 한반도에 순간적인 변화를 준 후 원 지점으로 복귀하고 있다는 분석과 지속적인 변화가 관측된다는 분석 등 다양한 분석 결과가 보고되었다.

이 논문에서는 토호쿠 지진이 발생한지 2.5년가량 지난 현재시점에서 최근까지 생성된 GPS 관측데이터를 이용하여 한반도의 지각변동 경향이 어떻게 변하고 있는지 점검하고 지진 발생 이전의 지각변동 경향과 비교하였다.

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

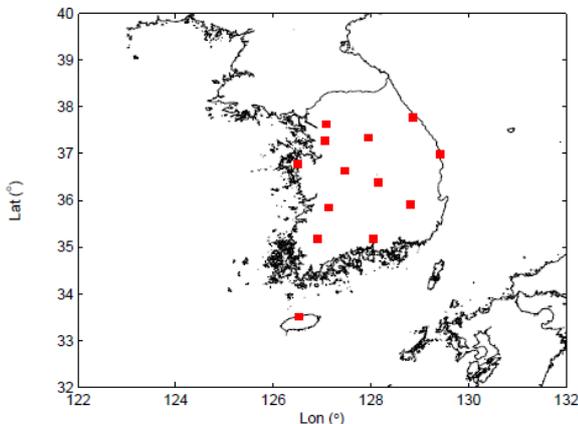


그림 2. 13개 국토지리정보원 GPS 상시관측소.

서론에 기술한 바와 같이 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 말일까지 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)[7]와 JPL정밀계도력(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 해수하중 등에 의한 지각변동량(OTL, Ocean Tidal Loading displacements), 그리고 방위각 방향으로의 대류층 신호지연량(Azimuthal Gradients)을 보정하였다. GPS 위성고도각(Elevation Cutoff Angle)은 10°로 하였다. 대류층 오차는 선형적(a priori) 수치[7]를 이용하여 매 10분 간격으로 random walk process를 통해 추정하였으며, Global Mapping

Function(GMF)을 적용하였다.

3. 분석 결과

3.1 절대 속도 산출

관측소의 절대속도를 산출하기 위하여 GIPSY를 이용하여 하루단위로 정밀좌표를 산출하였으며, IGS08로 표현된 정밀좌표는 2003년 1월 1일을 기준으로 좌표 변동량을 남북, 동서, 수직 방향의 좌표 좌표계로 변환하여 시계열을 작성한 후 선형회귀방식을 적용하여 상시관측소의 절대 속도를 계산하였다. 토호쿠 지진에 의해 절대속도의 변화를 비교하기 위하여 지진 발생 이전과 이후를 분리하여 각각 시계열 분석을 실시하였다. 그림 3에 수원(SUWN) 상시관측소 좌표 시계열과 속도를 나타내었다. 그림 3의 가로축은 년도이며, 세로축은 각각 남북(N), 동서(E), 그리고 수직(U) 방향의 좌표 변동량이다. 시계열의 상단에 있는 수치는 관측소명과 속도, 속도값에 대한 불확정성(Uncertainty), 그리고 제곱평균(RMS, Root Mean Square) 오차를 나타낸다.

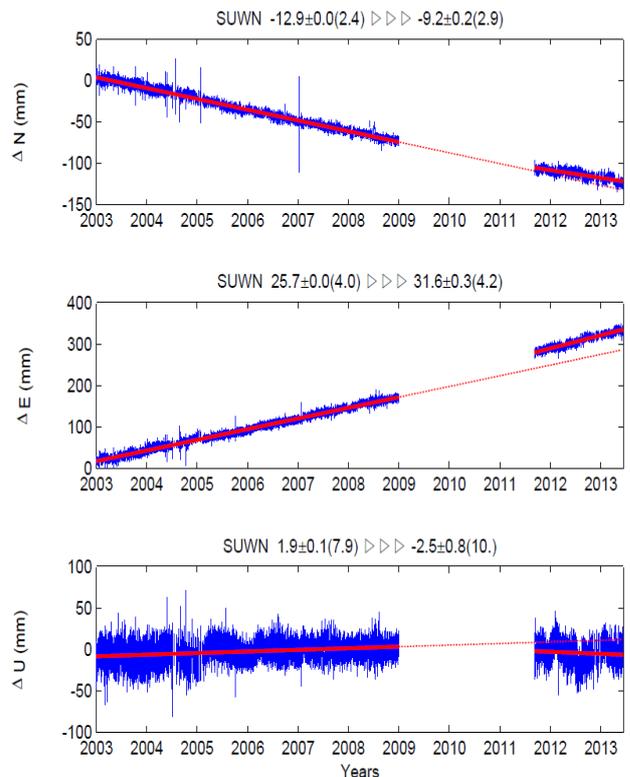


그림 3. 수원(SUWN) 상시관측소의 좌표시계열.

수원(SUWN) 상시관측소의 2003년 1월 1일 좌표는 X - 3062023.558m, Y 4055449.047m, Z 3841819.246m 이며, 2003년부터 2008년까지의 시계열 분석을 통해 지진 이전의 속도를 산출하고, 산출된 속도를 이용하여 2013년 6월까지의 속도를 추정하였다. 또한 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 추정된 속도이다. 관측소 속도가 음수인 경우는 남북 방향의 경우 남쪽으로, 동서 방향의 경우 서쪽으로의 방향성을 가지는 것을 의미한다.

그림 3의 수원 상시관측소의 속도를 보면, 2009년 이전에는 남북 방향으로 $-12.9 \pm 0.0 \text{ mm/yr}$, 동서 방향으로 $25.7 \pm 0.0 \text{ mm/yr}$, 그리고 수직방향으로 $1.9 \pm 0.1 \text{ mm/yr}$ 의 관측소 속도가 관측되었다. 한편 최근 관측데이터를 처리한 결과를 보면, 과거(2003~2008년)의 관측데이터를 이용하여 추정된 2013년 6월까지의 속도(점선)와 지진 이후의 관측데이터를 이용하여 산출한 속도와 다소 다른 결과가 나타남을 볼 수 있다. 이는 모든 방향에서 모두 나타났으며, 특히 동쪽 방향의 경우 지진에

의해 좌표 이동이 있는 후 복귀하지 않고 일정한 속도로 지속적으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 지진 이후 수원(SUWN) 관측소의 속도는 남북 방향으로 $-9.2 \pm 0.2 \text{mm/yr}$, 동서 방향으로 $31.6 \pm 0.3 \text{mm/yr}$, 그리고 수직방향으로 $-2.5 \pm 0.8 \text{mm/yr}$ 로 지진 발생 이전에 비해 수평방향 속도는 증가, 수직방향 속도는 감소하는 경향을 보인다. 지진 이전과 이후의 속도차이는 남북 방향 3.8mm/yr , 동서 방향 5.9mm/yr , 그리고 수직방향 -4.4mm/yr 로 나타났다. 따라서 13개 관측소에 대한 지진 이전의 속도를 표 1에 정리하였다.

표 1을 보면 남북 방향 속도가 모두 음수, 동서방향 속도는 모두 양수로 나타난 것을 알 수 있다. 평균 속도는 남북 방향으로 -13.0mm/yr , 동서 방향으로 25.6mm/yr , 그리고 수직방향으로 0.2mm/yr 이었다. 이는 한반도가 남동쪽 방향으로 평균 28.7mm/yr 크기로 이동하고 있으며, 수직방향으로는 변동이 거의 나타나지 않는 것을 의미한다. 분석 대상이 된 전체 관측소에 대한 지진 전후의 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 속도를 산출하였다. 13개 관측소의 지진 전후의 속도 변화를 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 가로축은 관측소이며, 세로축은 남북, 동서, 수직방향의 속도 변화량이다. 그림 4의 속도 변화량은 mm/yr 단위로 나타내었다.

표 1. 토호쿠 지진 발생 전의 13개 GPS 상시관측소의 절대 속도, 불확정성, 그리고 RMS 오차.

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

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 3.9mm/yr 수준의 속도 증가가 있었으며, 동서 방향의 경우 7.5mm/yr 의 가장 큰 속도 변화가 관측되었다. 남북 방향의 속도가 증가했다는 것은 기존의 속도에 비해 남쪽으로의 이동 속도가 감소했다는 것을 의미하며, 동서방향의 의 경우는 동쪽으로의 이동 속도가 증가했다는 것을 의미한다. 수직 방향을 보면 지진 발생 이전에는 대부분의 관측소에서 속도 0mm/yr 에 가까운 경향을 보였으나 지진 발생 이후에는 제주(CHJU)와 광주(KWNJ) 관측소를 제외한 대부분의 관측소에서 음의 방향으로 속도가 증가한 것을 알 수 있다.

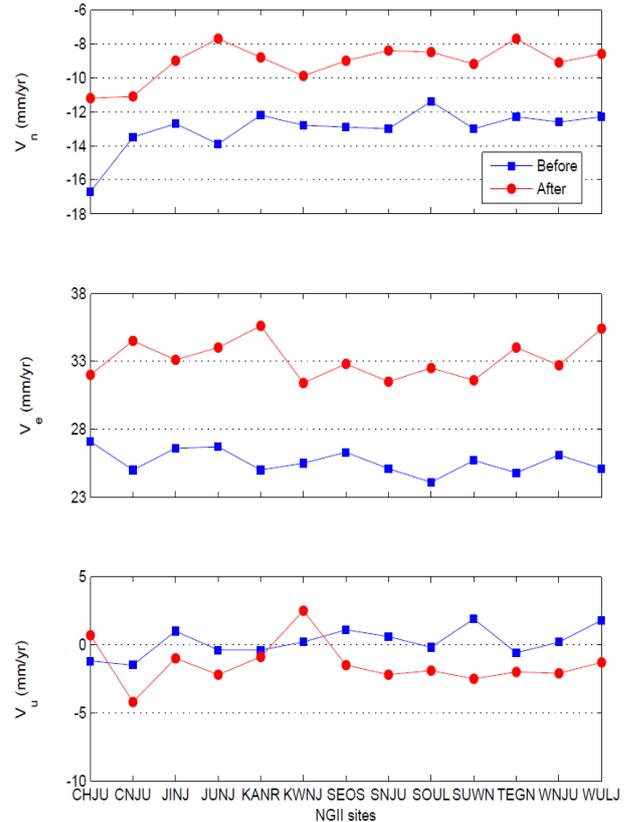


그림 4. 13개 GPS 상시관측소의 토호쿠 지진 전후의 남북, 동서, 수직 방향의 속도 변화.

수직방향으로의 속도 변화는 평균 -1.6mm/yr 로 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 2. 토호쿠 지진 발생 이후의 13개 GPS 상시관측소의 절대 속도, 불확정성, 그리고 RMS 오차.

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

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

참고 문헌

- [1] <http://supersites.earthobservations.org/sendai.php>.
- [2] http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi_tohoku2.html.
- [3] Beak, J., Y.-H. Shin, S.-H. Na, N. V. Shestakov, P.-H. Park, and S. Cho, Cosismic 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, 2012.
- [4] Ha, J., 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, 2014, in printed.
- [5] Hamdy, A. M., 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, 2005.
- [6] Jin, S., and P.-H. Park, Strain accumulation in South Korea inferred from GPS measurements, *Earth Planets Space*, vol. 58, pp. 529-534, 2006.
- [7] Webb, F. H., and J. F. Zumberge, *An introduction to the GIPSY/OASIS-II*, JPL Publ., Pasadena, CA, July 1993.
- [8] Wübbena, G., 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*, 2000.