

자연재난 관리를 위한 GPS 기반의 지진재해 분석

Analysis about Seismic Displacements Based on GPS for Management of Natural Disaster

박준규¹⁾ · 윤희천²⁾

Park, Joon Kyu · Yun, Hee Cheon

Abstract

On March 11, 2011, an 9.0-magnitude earthquake occurred near the northeastern coast Japanese. It was the largest earthquake that hit Japan since the beginning of modern seismometry. The earthquake occurred 179km east of the Sendai, Miyagi Prefecture, leaving about 27,000 of people confirmed dead, injured or missing due to the earthquake and tsunami. In this study, crustal Deformation in Mizusawa, Tsukuba and Usuda station were calculated based on GPS data in IGS station of Japan. The observation data were processed by precise point positioning and relative-positioning method using on-line GPS data processing services and a high precision scientific GPS/GLONASS data processing software. The coseismic displacements in IGS stations before and after the earthquake were analyzed using kinematic precise point positioning method, and the crustal deformation of the areas before and after the earthquake were precisely calculated using the relative-positioning method. The results of the study calculated precise coordination that the RMSE is maximum $\pm 0.003m$, respectively and showed that Mizusawa station moved 2.6m southeast by the earthquake.

Keywords : GPS, Precise Point Positioning, Relative Positioning, Coseismic Displacement

초 록

2011년 3월 11일 일본 동북부 해양에서 규모 9.0의 강진이 발생했다. 이 지진은 근대적인 지진관측이 시작된 이래 일본 최대 규모로 미야기 현 센다이 동쪽 179km 지점에서 발생했으며, 지진과 해일로 인해 2만 7천여 명에 이르는 사상자가 발생하였다. 본 연구에서는 일본 IGS 상시관측소의 GPS 관측자료를 기반으로 Mizusawa, Tsukuba 및 Usuda 상시관측소의 지진변위량을 산출하였다. 관측자료의 처리는 온라인 GPS 자료처리 서비스와 정밀과학 기술용 소프트웨어를 이용하였으며 정밀절대측위 및 상대측위 방법으로 처리하였다. 온라인 GPS 자료처리 서비스를 이용한 Kinematic 정밀절대측위를 통해 지진 전·후 IGS 상시관측소의 위치변화를 모니터링하고, 정밀과학 기술용 소프트웨어를 이용한 상대측위 방법으로 지진 전·후의 정밀한 지진변위량을 산출하였다. 연구결과 각 성분별로 최대 $\pm 0.003m$ 의 RMSE를 가지는 정밀한 좌표성적을 산출할 수 있었으며, 지진으로 인해 Mizusawa 상시관측소가 남동쪽으로 약 2.6m 이동하였음을 알 수 있었다.

핵심어 : GPS, 정밀절대측위, 상대측위, 지진변위

1. 서 론

2011년 3월 11일 발생한 일본 동북부지역의 지진은 수 많은 인명 피해를 야기하였으며 대규모 지진과 해일로 막대한 재산 피해를 입혔다.

지진은 지각판의 움직임으로 인해 발생된다. 지구표층인 리소스피어는 수십 km 혹은 그 이상의 두께를 지니고 있으며 판을 구별하는 기준이 된다(이진덕 등, 1998). 지각판은 전 세계적으로 유라시아 판, 태평양 판, 북아메리카 판, 필리핀 판, 남아메리카 판, 아프리카 판, 호주 판, 남극

1) 정희원 · 서일대학 공업계열 토목과 전임강사(E-mail:surveyp@empal.com)

2) 교신저자 · 정희원 · 충남대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail:hcyoon@cnu.ac.kr)

판 등 10여 개의 판으로 나누어진다(Drewes et al., 2001).

각각의 판들은 매년 수 cm 정도의 속도로 절대·상대적 움직임을 보이며 이런 지각이동은 판들이 접하는 부근에서 대규모 지진 발생의 원인이 된다(Komaki, 1993). 지구적인 힘에 의해 땅속의 거대한 암반이 갑자기 갈라지면서 지진이 발생하고 그 충격으로 지진파가 생기면서 지반을 진동시키게 되는 것이다. 지구상 대부분의 지진은 북미대륙의 서해안, 일본, 필리핀, 뉴질랜드로 연결되는 환태평양지진대와 같은 판의 경계에서 발생한다(Smalley et al., 2005).

이와 같은 지진재해의 피해를 줄이고 관리하기 위해서 대륙간의 연속관측과 판 경계에서의 주기적인 관측을 통해 기선변화량을 분석함으로써 지진을 예측하고자 한 연구가 있었으며(Dermanis et al., 1993), 관측점들의 기선거리 변화율로부터 지각변동 요소들을 결정하여 지각변동을 감지한 연구도 이루어졌다(Hai 등, 2000). 또한 일본, 중국 및 시베리아를 포함하는 동아시아 지역, 중앙유럽 지역, 카리브해와 북아메리카 지역 등 전 지구를 대상으로 GPS를 이용한 지각운동 및 지진변위 관련 연구들이 이루어지고 있다(박준규, 2010; Zonenshain et al., 1981; Caporali et al., 2008; Demets et al., 2000). 인공위성기반의 측위항법 시스템인 GPS는 2000년 SA(Selective Availability)의 해제 이후 측위정확도 향상과 위성 신호 수신기술의 발달, 새로운 관측데이터 처리 알고리즘의 개발 등을 통해 전통적인 위치결정은 물론 지각운동의 추출을 비롯한 지구물리 분야에도 응용되고 있다(강준묵 등, 2010). 각종 지구물리자료와 GPS를 통한 지각의 변형에 대한 정보들이 축적되면서, 지각의 움직임을 결정하는 응력의 분포와 지반운동의 특성을 설명하려는 연구들이 다수 발표되었다(Fujill, 1993; Choi et al., 1997; 강준묵 등, 1999).

2010년 2월에 발생한 칠레 콘셉시온 지방의 지진은 환태평양 화산대(ring of fire)라고 불리는 남아메리카 지역으로 환태평양 화산대를 따라 대륙의 지각판(tectonic plate)들이 단층대(fault zone)에서 서로 밀어내며 남아메리카 지각판 아래에서 압력이 가해진 나스카 지각판(Nazca tectonic plate)에서 발생했다. 이러한 지진의 감시를 위해서는 지진 발생 가능성이 있는 지역에 대한 지각의 움직임을 감지하는 것과 그 동안 발생하였던 지진변위의 발생 양상을 파악하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 일본의 IGS 상시관측소에서 수신된 지진 전·후의 GPS 자료를 온라인 정밀절대측위를 사용하여 지진으로 인한 변위를 모니터링 하였다. 또한 정밀과

학기술용 소프트웨어를 이용한 상대측위를 통해 지진으로 인한 변위량을 정밀하게 산출하고자 하였다. 그림 1에 본 연구의 흐름도를 나타낸다.

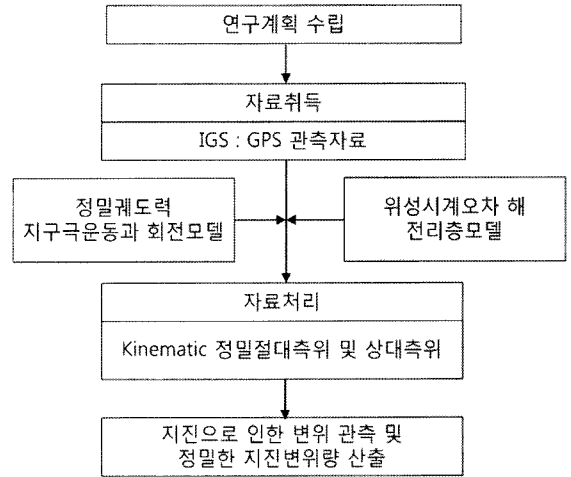


그림 1. 연구 흐름도

2. 관측자료 취득 및 처리

지진으로 인한 변위를 모니터링하고 변위량을 산출하기 위해 진앙지 주변의 IGS 상시관측소 중 Mizusawa, Tsukuba 및 Usuda의 GPS 관측자료를 취득하였다.

관측자료는 지진이 발생한 2011년 3월 11일과 발생 전·후의 자료를 이용하였다. 그림 2에 지진의 진앙지와 Mizusawa, Tsukuba 및 Usuda 상시관측소의 위치를 나타낸다.

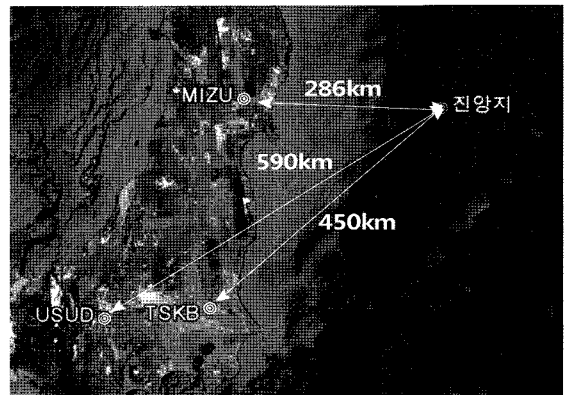


그림 2. 진앙지와 상시관측소 위치

2.1 정밀절대측위

지진으로 인한 변위 모니터링을 위해 Kinematic 정밀절

대측위로 지진 발생일인 2011년 3월 11일의 GPS 관측자료를 처리하였다. 관측자료의 처리에는 MAGICGNSS를 사용하였다.

MAGICGNSS는 GMV INOVATING SOLUTION사에서 제공하는 국제적 온라인 GPS 자료처리 서비스로 RINEX 포맷의 관측자료를 처리하고, 사용자에게 결과를 제공한다. 그림 3은 MAGICGNSS 화면이며, 그림 4는 자료처리 결과 보고서이다.

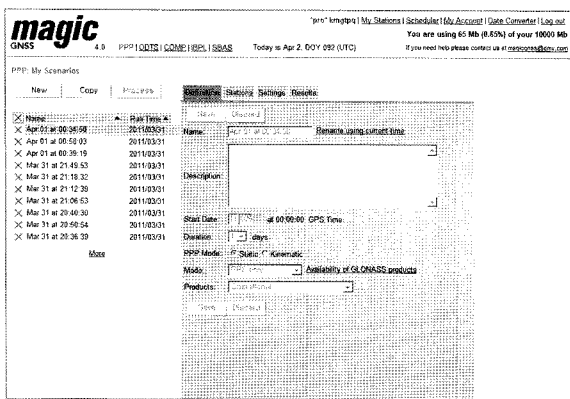


그림 3. MAGICGNSS 화면

1. CONFIGURATION SUMMARY				
1.1. LIST OF STATIONS AND RINEX FILES				
Number of stations: 1				
mizu				
mizu0690.11o				
1.2. LIST OF SATELLITES				
Number of satellites: 31				
G02, G03, G04, G05, G06, G07, G08, G09, G10, G11, G12, G13, G14, G15, G16, G17, G18, G19, G20, G21, G22, G23, G24, G25, G26, G27, G28, G29, G30, G31, G32				
1.3. SETTINGS				
Mode	Kinematic (Terrestrial)			
Data Sampling Rate	30 s			
Minimum Elevation Angle	10 deg			
Number of Iterations	6			
Reference Products	IGS Rapid			
Table 1. Settings				
2. PROCESSING SUMMARY				
2.1. PARAMETER ESTIMATION				
Total Measurements	Clock Parameters	Non Clock Parameters	Ambiguities	
48617	11524	78	53	
Table 2. Parameter estimation				
2.2. CONVERGENCE				
A priori weight of code measurements: 0.500 m				
A priori weight of phase measurements: 0.007 m				
Iteration Number	RMS of Weighted Residuals	Delta RMS of Weighted Residuals	RMS of Code Residuals	RMS of Phase Residuals
0	620403.664	-	6141.034	6141.144
1	2.328	620401.336	0.231	0.023
2	2.304	0.024	0.231	0.023
3	2.301	0.003	0.231	0.023
4	2.300	0.001	0.231	0.023
5	2.300	0.000	0.231	0.023
6	2.300	0.000	0.231	0.023
Table 3. Convergence				

그림 4. 자료처리 결과 보고서

2.2 상대측위

본 연구에서는 Mizusawa, Tsukuba 및 Usuda의 정밀한 지진변위량을 산출하기 위해 Bernese GPS S/W를 이용한 상대측위 방법을 사용하였다.

지진 발생 전인 3월 10일과 지진 발생 후인 3월 16일의 GPS 관측자료를 처리하였으며, 상대측위 시 기준점은 지진의 영향이 없는 우리나라의 수원 상시관측소를 이용하였다. 그림 5에 상시관측소 및 진앙지의 위치를 나타내었으며, 표 1에 자료처리와 관련된 Parameter를 정리하였다.

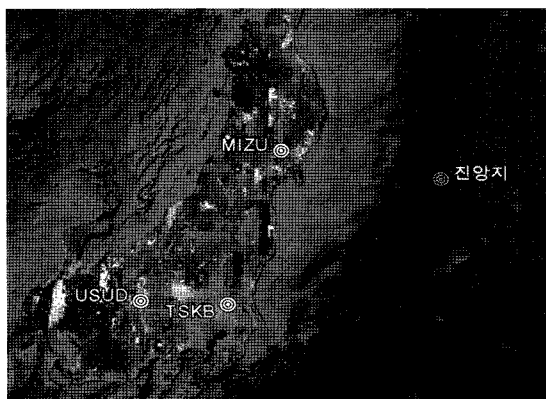


그림 5. 상시관측소 및 진앙지의 위치

표 1. 자료처리 Parameter

Parameters	Description
Data Processing Methods	Relative Positioning
Observation Data	L1, L2 CODE and Phase
Satellite Ephemeris	Precise Ephemeris
Ambiguity Resolution	Quasi Ionosphere Free
Tropospheric Correction	Dry and Wet Niell Model
Earth Gravity Potential	JGM3
Sub-daily Earth rotation parameters	IERS2000
Nutation	IAU2000
Antenna Model	Absolute Model
Solar System Ephemerides	JPL DE200

3. 자료처리 결과 및 분석

3.1 지진변위 모니터링

본 연구에서는 Kinematic 정밀절대측위를 이용하여

Mizusawa, Tsukuba 및 Usuda 상시관측소의 지진변위를 모니터링 하였다. 각 상시관측소 별 자료처리 결과를 그림 6-8에 나타내었다. 그래프의 가로축에는 시간, 세로축에는 변위와 표준편차를 나타내었다.

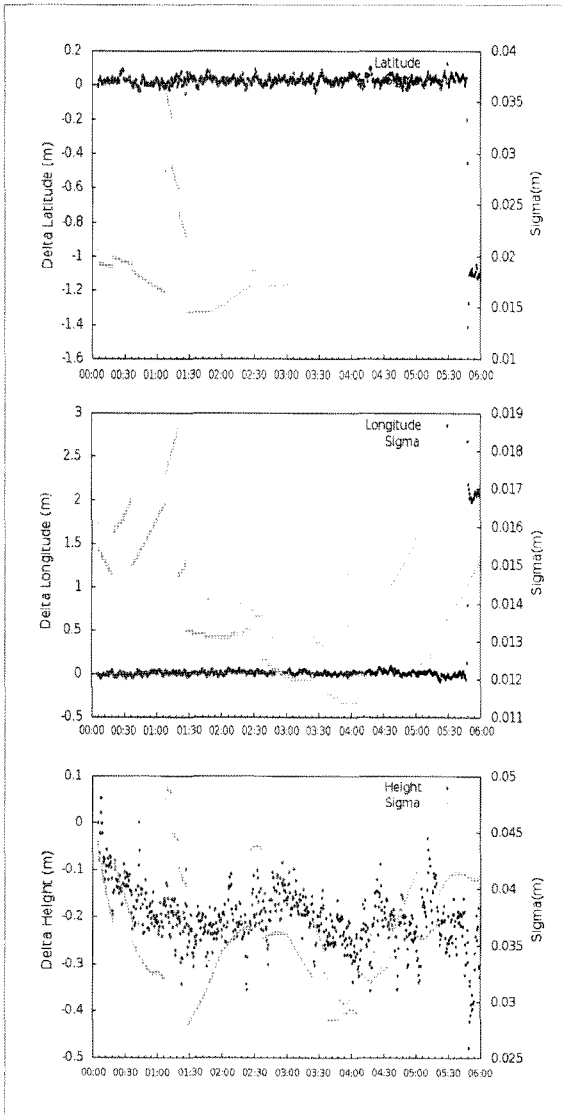


그림 6. Mizusawa 상시관측소 정밀절대측위 결과

그림 6에서 보는 것처럼 Mizusawa 상시관측소는 지진발생 전 특별한 징후가 나타나지는 않았으며, 5시 47분 경 남동쪽 방향으로의 급격한 변위가 관찰되었다. 그림 7은 Tsukuba 상시관측소의 정밀절대측위 결과를 나타낸다.

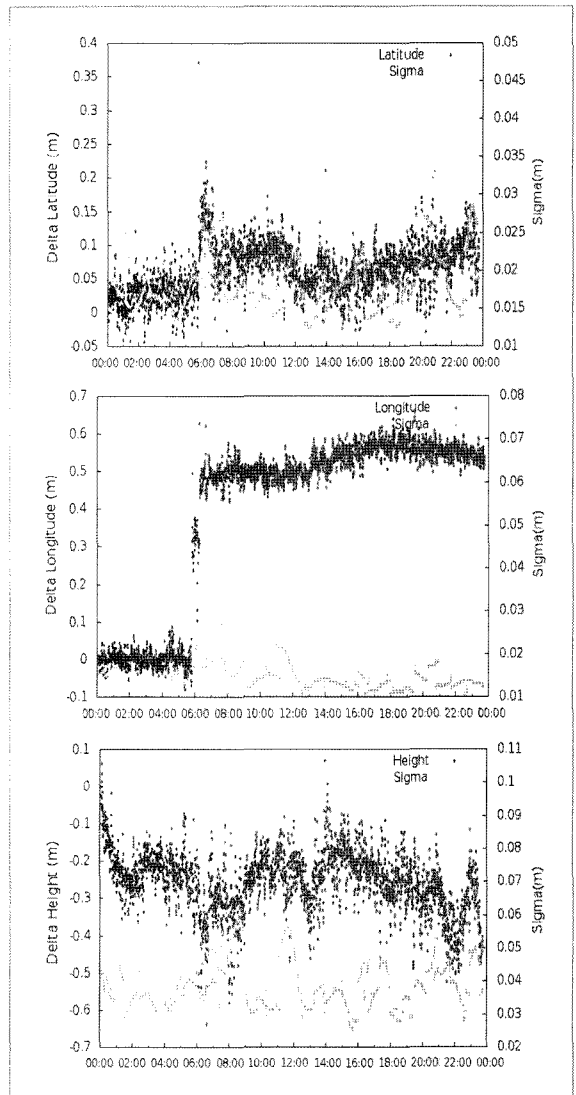


그림 7. Tsukuba 상시관측소 정밀절대측위 결과

Tsukuba 상시관측소의 경우, 지진이 발생한 5시 47분 경 북쪽 방향과 동쪽 방향으로 변위가 관찰되었다. Mizusawa 상시관측소보다 지진의 진앙에서 거리가 멀기 때문에 지진의 영향이 비교적 적었던 것으로 판단된다. 그림 8은 Usuda 상시관측소의 정밀절대측위 결과를 나타낸다.

Usuda 상시관측소의 자료처리 결과에서도 Tsukuba 상시관측소와 같은 북쪽과 동쪽 방향으로의 변위가 관찰되었다. Mizusawa나 Tsukuba 상시관측소에 비해 진앙지에서 가장 먼 거리에 위치하고 있어 지진으로 인한 영향이 세 곳 상시관측소 중 가장 작은 것으로 판단된다.

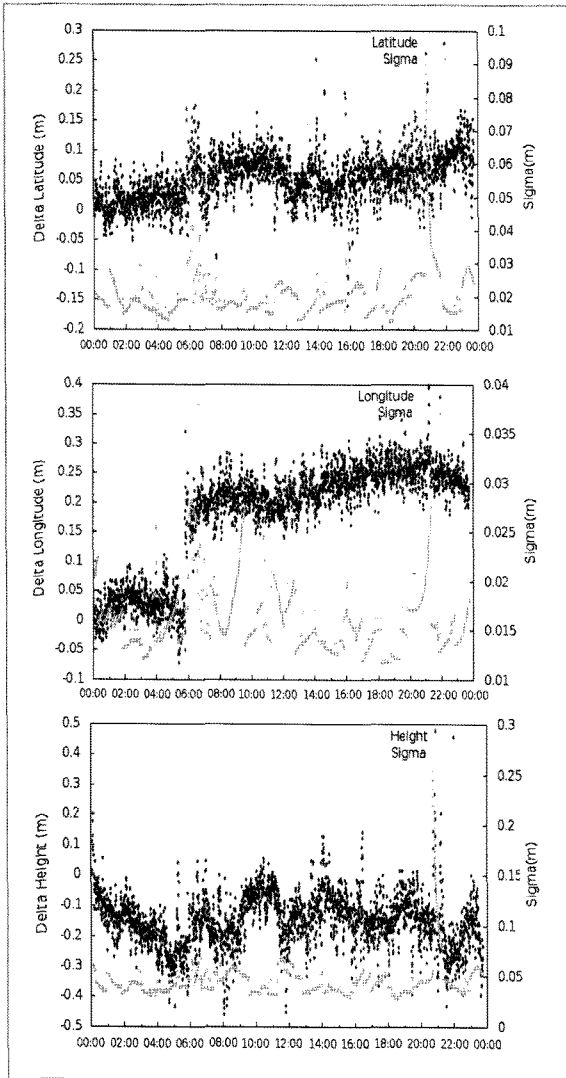


그림 8. Usuda 상시관측소 정밀절대측위 결과

각 상시관측소의 지진변위를 그림 9~11에 나타내었다.

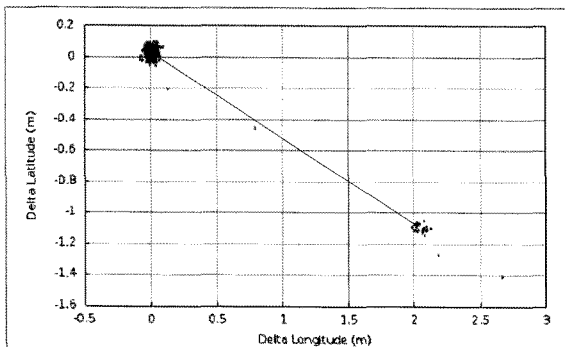


그림 9. Mizusawa 상시관측소 지진변위

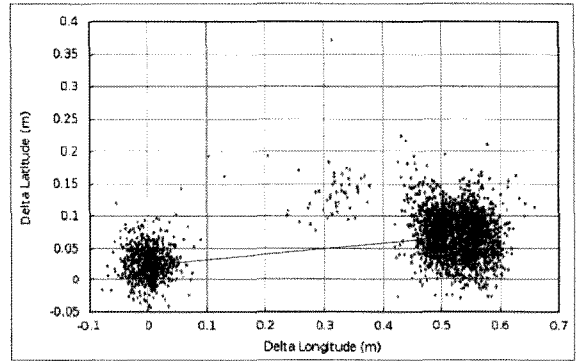


그림 10. Tsukuba 상시관측소 지진변위

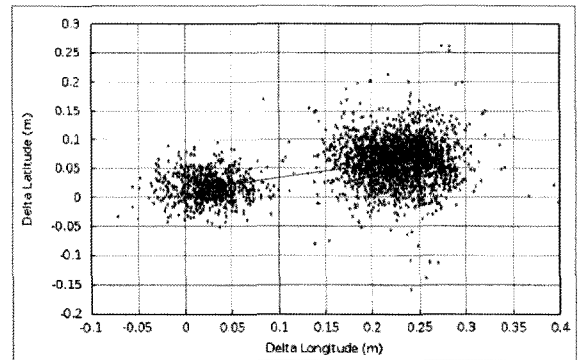


그림 11. Usuda 상시관측소 지진변위

그림 9~11에서 보는 것처럼 진앙지로부터 거리가 멀어짐에 따라 변위량이 작아지는 것을 알 수 있다. 진앙지에서 가장 가까운 Mizusawa 상시관측소가 남쪽으로 1m, 동쪽으로 2m 정도의 가장 큰 변위가 발생하였음을 확인할 수 있다.

3.2 지진변위량 산출

미국지질조사국(USGS: United States Geological Survey)의 자료에 따르면 일본 동북부 지진으로 인해 일본이 약 2.6m 움직였다는 분석이 발표된 바 있다. 그림 12는 미국 지질조사국에서 발표한 일본 지진변위를 나타낸다.

본 연구에서는 2011년 3월 11일 발생한 일본 동북부 지진변위를 각 상시관측소 별로 정밀하게 산출하였다. Mizusawa, Tsukuba 및 Usuda 상시관측소의 3월 11일과 3월 16일의 관측자료를 사용하였으며, 우리나라의 수원 상시관측소를 고정점으로 사용하였다. 각 상시관측소별 지진변위량을 표 2~표 4에 나타내었다.

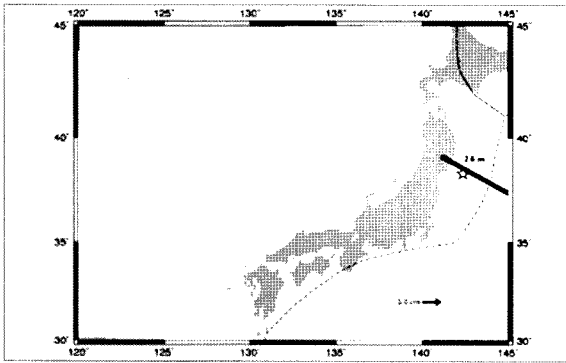


그림 12. USGS에서 발표한 일본 지진변위

표 2. 상대측위 성과 및 지진변위량 - Mizusawa

날 짜	좌표성과		
	위도(RMSE)	경도(RMSE)	타원체고(RMSE)
03.10	39° 8' 6.6166" (±0.0006)m	141° 7' 58.1593" (±0.0008m)	116.9184m (±0.0029m)
03.16	39° 8' 6.5769" (±0.00067m)	141° 7' 58.2538" (±0.0008m)	116.8325m (±0.0030m)
변위량	-1.223m	2.325m	-0.0859m

Mizusawa 상시관측소의 변위량은 남쪽으로 1.223m, 동쪽으로 2.325m였으며, 타원체고 방향으로는 0.0859m의 침하가 발생하였다. 표 3에 Tsukuba 상시관측소의 지진변위량을 나타내었다.

표 3. 상대측위 성과 및 지진변위량 - Tsukuba

날 짜	좌표성과		
	위도(RMSE)	경도(RMSE)	타원체고(RMSE)
03.10	36° 6' 20.4512" (±0.0006)m	140° 5' 14.9766" (±0.0008m)	67.2010m (±0.0028m)
03.16	36° 6' 20.4523" (±0.0006m)	140° 5' 14.9998" (±0.0008m)	67.1034m (±0.0026m)
변위량	0.034m	0.571m	-0.0976m

Tsukuba 상시관측소의 변위량은 북쪽으로 0.034m, 동쪽으로 0.571m로 계산되었으며, 타원체고 방향으로는 0.0976m의 침하가 발생하였다. 표 4에 Usuda 상시관측소

의 지진변위량을 나타내었다.

표 4. 상대측위 성과 및 지진변위량 - Usuda

날 짜	좌표성과		
	위도(RMSE)	경도(RMSE)	타원체고(RMSE)
03.10	36° 7' 59.2010" (±0.0006)m	138° 21' 43.3463" (±0.0008m)	1508.5528m (±0.0029m)
03.16	36° 7' 59.2029" (±0.0006m)	138° 21' 43.3549" (±0.0007m)	1508.5432m (±0.0028m)
변위량	0.059m	0.212m	0.0096m

Usuda 상시관측소의 변위량은 북쪽으로 0.059m, 동쪽으로 0.212m였으며, 타원체고 방향으로 0.0096m의 미소한 융기가 발생하였다. 각 상시관측소 별 변위량을 표 5에 나타내었으며, 그림 13은 그 그래프이다.

표 5. 상시관측소 별 지진변위량

상시관측소	지진변위량		
	위도방향	경도방향	총변위
Mizusawa	-1.223m	2.325m	2.627m
Tsukuba	0.034m	0.571m	0.572m
Usuda	0.059m	0.212m	0.220m

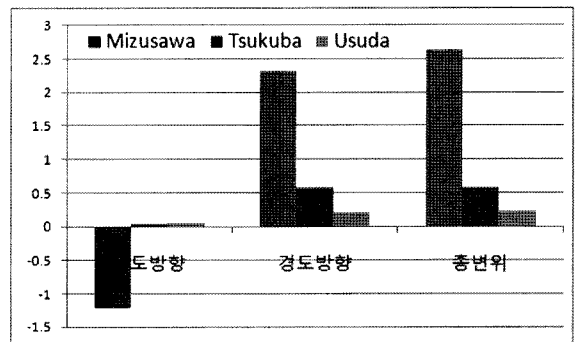


그림 13. 각 상시관측소 별 지진변위량

연구를 통해 Mizusawa, Tsukuba 및 Usuda 상시관측소가 지진으로 인해 각각 남동쪽방향 2.627m, 북동쪽방향 0.572m, 북동쪽방향 0.220m의 변위가 발생하였음을 산출할 수 있었다. 진앙지와 거리가 가장 가까운 Mizusawa 상시관측소의 경우, 가장 큰 지진변위량을 보였으며, 남동쪽 방향의 변위가 나타났다.

가장 큰 변위량을 나타낸 Mizusawa 상시관측소의 경우, 미국지질조사국에서 발표한 변위량과 유사한 값을 나타내었지만, 일본 전체가 2m이상의 큰 변위를 나타내지는 않았으며, 지진변위량이 진앙지와의 거리에 따라 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다. 그림 14는 상시관측소 별 지진변위를 나타낸다

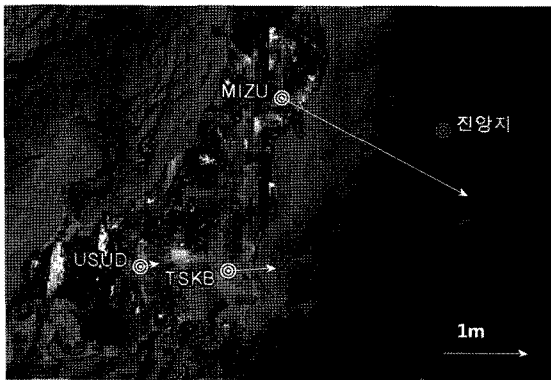


그림 14. 상시관측소 별 지진변위

4. 결론

본 연구에서는 지진재해관리를 위해 GPS를 기반으로 2011년 3월 11일 일본에서 발생한 지진변위를 모니터링하고, 정밀한 지진변위량을 산출하고자 한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 지진 발생일의 GPS 관측자료를 이용한 Kinematic 정밀절대측위를 통해 지진으로 인한 변위를 효과적으로 모니터링 할 수 있었다.

둘째, 지진 발생 전인 3월 11일과 지진 발생 후인 3월 16일 GPS 관측자료의 상대측위를 통해 지진으로 인한 변위량을 정밀하게 산출하였으며, Mizusawa, Tsukuba 및 Usuda 상시관측소가 각각 남동쪽방향 2.627m, 북동쪽방향 0.572m 및 북동쪽방향 0.220m로 이동하였음을 산출하였다.

셋째, 향후 지진변위가 지각변동에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 GPS를 이용한 지속적인 지각변위 모니터링이 필요하며, 이를 통해 축적된 자료는 지각변동 연구와 지진재해관리의 기초자료로 활용 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)이 재원으로

한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0087434)

참고문헌

- 강준목, 박준규, 이최구, 이용욱 (2010), 온라인 GPS 자료 처리 서비스의 정확도 분석, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제28권, 제1호, pp. 13-21.
- 강준목, 이진덕, 이용욱 (1999), 지진예지를 위한 지진데이터 분석과 지각 변동 요소 산출, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 323-326.
- 박준규 (2010), 정밀절대측위를 이용한 양산지역의 지각 변위 해석, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 28권, 제 2호, pp. 289-295.
- 이진덕, 이용욱, 이은수, 강준목 (1998), GPS에 의한 지각 변동 요소 결정, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 369-372.
- Hai, V.Q., 이용욱, 강준목 (2000), GPS 반복관측에 따른 캄로 단층의 최근 지각변동 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 18권, 제 1호, pp. 19-23.
- Caporali, A., Aichhorn, C., Becker, M., Fejes, I., Gerhatova, L., Ghitau, D., Grenczy, G., Hefty, J., Krauss, S., Medak, D., Milev, G., Mojzes, M., Mulic, M., Nardo, A., Pesec, P., Rus, T., Simek, J., Sledzinski, J., Solaric, M., Stangl, G., Vespe, F., Virag, G., Vodopivec, F. and Zablotzkyi, F. (2008), Geokinematics of Central Europe: New insights from the CERGOP-2/Environment Project, *Journal of Geodynamics*, Vol. 45, No. 4-5, pp. 246-256.
- Choi, J.H. and Sato, H. (1997), Horizontal Strain of the Crust in Korea inherited from Geodetic Data, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, Vol. 43, No. 3, pp. 159-180.
- Demets, C., Jansma, P.E., Mattioli, G.S., Dixon, T.H., Farina, F., Bilham, R., Calais, E. and Mann, P. (2000), GPS geodetic constraints on Caribbean-North America plate motion, *Geophysical Research Letters*, Vol. 27, No. 3, pp. 437-440.
- Dermanis, A. and Grafarend, E.W. (1993), The finite element approach to the geodetic computation of two- and three-dimensional deformation parameters: a study of frame invariance and parameter estimability, *Proceedings of the 5th International Conference on Cartography-Geodesy*, pp. 1-13.
- Drewes, H. and Angermann, D. (2001), The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model 2000

- (APKIM2000) as a Geodetic Reference System, *AIG 2001 Scientific Assembly, Budapest*, 2-8 Sept.
- Fujii, Y. (1993), Estimation of Crustal Deformation Parameters in GPS Network with the Aid of Four-Dimension Integrated Adjustment, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, Vol. 39, No. 4, pp. 341-352.
- Komaki, K. (1993), Horizontal Crustal Movement by Geodetic Measurements, *Journal of the Geodetic Society of Japan*, Vol. 39, No. 4, pp. 401-407.
- Smalley R. Jr, Ellis M. A., Paul J., and Van Arsdale R. B. (2005), Space geodetic evidence for rapid strain rates in the New Madrid seismic zone of central USA, *Nature*, Vol. 435, pp. 1088-1090.
- Zonenshain, L.P. and Savostin, L.A. (1981), Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia, *Tectonophysics*, Vol. 76, No. 1-2, pp. 1-45.

(접수일 2011. 06. 03, 심사일 2011. 06. 17, 심사완료일 2011. 06. 26)