

# 정밀절대측위에 의한 지진 전·후 동아시아 지역 지각변동 모니터링 - 도호쿠 대지진을 중심으로 -

## Monitoring the Crustal Movement Before and After the Earthquake By Precise Point Positioning - Focused on 2011 Tohoku Earthquake -

김민규<sup>1)</sup> · 박준규<sup>2)</sup>

Kim, Min Gyu · Park, Joon Kyu

### Abstract

Recently, as earthquake is more frequently taking place around the world due to diastrophism, the importance of diastrophism and disaster detection is becoming more important. In this study, to analyze the interpretation of seismic displacement by the Japanese earthquake in March, 2011, and monitor the diastrophism of plates in Japan and surrounding Eurasia, Pacific, and Philippines before and after the earthquake, the observational data from IGS observatories in Japan and Asian regions were processed by precise point positioning. The displacement was biggest in MIZU, which was the closest to the epicenter, and the earthquake-affected region was in inverse proportion to the distance from the epicenter. The result of calculating the diastrophism speed before and after the earthquake, based on precise point positioning of IGS observatories located in the 4 plates around Japan, showed that the displacement speed changed and different plates showed different results. The comparison with the plate fate model allowed to analyze the change in diastrophism by earthquake, and to understand the characteristics of the displacement of the plates around Japan. Later, a continuous diastrophism monitoring based on GPS is needed for earthquake prediction and diastrophism research, and the data gained by continuous GPS-based monitoring of diastrophism will be fully used as basic data for relevant research and earthquake disaster management.

Keywords : GPS, IGS CORS, Precise Point Positioning, Crustal Movement Monitoring, Plate Motion Model

### 초 록

최근 전세계적으로 지진의 발생빈도가 증가하면서 지각변동과 재해탐지에 대한 중요성이 증대되고 있다. 본 연구에서는 2011년 3월 발생한 도호쿠 지진에 의한 변위 해석과 지진 전·후 일본 지역 및 주변 유라시아, 태평양, 북아메리카 및 필리핀 지각판에 위치한 IGS 상시관측소의 GPS 관측자료를 정밀절대측위로 처리하여 상시관측소의 정밀위치해석을 통해 지진으로 인한 변위 및 지진 전·후 지각변동 특성을 파악하고자 한다. 일본 및 아시아 지역의 IGS 상시관측소를 대상으로 지진 발생 전·후의 관측자료를 정밀절대측위로 처리하여 일본 지역의 지진변위를 분석함으로써 진앙지 가장 가까운 MIZU에서 최대의 변위가 발생하였고, 진앙지와 거리에 반비례하는 지진 영향권을 파악할 수 있었다. 또한 일본지역 주변 4개 지각판에 위치한 IGS 상시관측소의 정밀위치해석을 통해 지진 전·후 지각변동 속도의 변화를 산출하였다. 지각판 거동모델과의 비교를 통해 지진으로 인한 지각변동 변화를 분석하여 일본지역 주변의 지각변동 특성을 파악할 수 있었다. 향후, 지진예측 및 지각변동 연구를 위해 GPS를 이용한 지속적인 지각변동 모니터링이 필요하며, GPS를 이용한 지속적인 지각변동 모니터링을 통해 축적된 자료는 지각변동 및 지진예측 등 관련분야 연구와 함께 지진재해관리에 기여할 것이다.

핵심어 : GPS, IGS 상시관측소, 정밀절대측위, 지각변동 모니터링, 지각변동 모델

1) 정희원 · 충남대학교 측량및지형정보연구실(E-mail:kmgtpq@paran.com)

2) 교신저자 · 정희원 · 서일대학 토목과 전임강사(E-mail:surveyep@empal.com)

## 1. 서 론

지각은 구성하는 판의 움직임에 따라 계속적으로 움직이고 있다. 지각판을 움직이는 힘의 근원은 맨틀 내에서 일어나는 대류현상이며, 이로 인해 판의 확장 및 수렴이 발생하고, 지각판의 경계부에서는 판의 충돌에 의한 습곡, 지진 및 화산 등의 복잡한 지질현상이 나타난다.

전 지구적으로 볼 때 일 년에 50만 번 씩 크고 작은 지진이 일어나고 있다. 대부분의 지진은 판구조론(plate tectonics)으로 설명되는 지각의 움직임으로 인해 오랜 세월이 걸쳐 축적된 스트레스가 균형을 잃으면서 지각이 튕겨나거나 서로 어긋나면서 균열을 일으킬 때 발생한다. 지구 전체에서 발생하는 지진의 90% 이상은 불의 고리(Ring of fire)라고도 불리는 환태평양 조산대에서 발생한다(Smalley R. Jr. 등, 2005). 이러한 지진의 감시를 위해서는 지진 발생 가능성이 있는 지역에 대한 지각의 움직임을 파악하는 것이 필수적이며, 최근 VLBI, SLR, GPS와 같은 우주측지 기술의 발달로 지각변동에 대한 측지학적 접근이 다양하게 이루어지고 있다. 특히, GPS를 이용한 정밀위치해석은 우주측지 분야에서 그 역할과 비중이 점점 증가하는 추세이며, 저가의 구축비용과 고정확도의 위치 결정이 가능하기 때문에 고가의 VLBI나 SLR을 대신해 지각운동의 검출 및 지각변동 감시 등과 같은 지구과학 분야에 다양하게 활용되고 있다(송동섭 등, 2006).

국내의 경우, 지진예지 및 지각변동 감지와 같이 정밀기선험석이 요구되는 분야에 GPS의 활용가능성을 입증하기 위하여 GPS 관측자료 해석을 통해 지각변동 속도를 산출한 연구가 이루어졌으며(조재명, 2006), 지진 발생 가능성이 높은 양산 단층을 대상으로 GPS를 이용한 지각변동 모니터링이 수행되었다(박준규, 2010). 또한 Kinematic 정밀절대측위를 이용해 지진으로 인한 변위를 파악하고자 한 연구도 수행되었다(강준목, 2010).

국외의 경우, 동아시아, 유럽, 북아메리카 등 전 지구를 대상으로 GPS를 이용한 지각운동 및 지진변위 관련 연구들이 이루어지고 있다(Argus et al., 2010; Altamimi et al., 2002; DeMets et al., 2011; Drewes et al., 2009; Prawirodirdjo et al., 2004).

2011년 3월 일본 동북부 태평양 연안지역 해저를 진원으로 하는 리히터 규모 9.0의 대형 지진이 발생하였다. 이 도호쿠 지진과 관련하여 많은 연구들이 수행되었으며(박준규, 2011; Freymueller, J., 2011), 지진에 의한 우리나라 지각의 변위를 산출하고, 결과 분석을 통해 지진이 우리나라에 미친 영향을 제시한 연구들이 이루어졌다(김수경 등, 2012; 임상규, 2011). 그러나 일본 및 주변지역에 대한 지각변동

변화와 이에 대한 분석은 미미한 실정이다.

본 연구에서는 IGS 상시관측소에서 취득된 GPS 관측자료를 이용하여 도호쿠 지진 전과 지진 후 최근까지 일본 및 주변 지역의 지각변동을 모니터링 하였다. 상시관측소의 정밀위치해석을 통해 지진 전과 후의 지각변동 속도를 산출하고, 지각변동 모델과 비교·분석을 통해 지진이 지각변동에 미친 영향을 파악하고 유라시아, 북아메리카, 필리핀 및 태평양지각판의 지각변동 특성을 제시하고자 하였다. 그림 1은 연구 흐름도를 나타낸다.

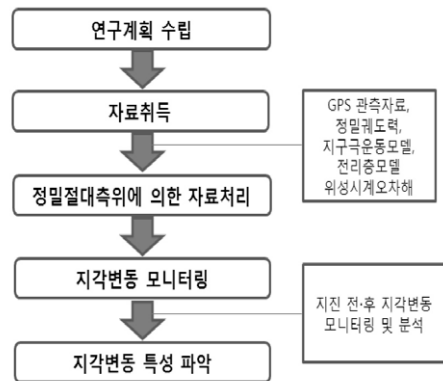


그림 1. 연구 흐름도

## 2. 관측자료 취득 및 처리

### 2.1 관측자료 취득

지진 전·후 지각변동 모니터링을 위해 일본 지역 및 주변 유라시아, 북아메리카, 필리핀 및 태평양지각판에 위치한 IGS 상시관측소의 관측자료를 취득하였다. 관측자료는 2010년 1월에서 2012년 2월까지의 관측자료를 사용하였다. 그림 2는 IGS 상시관측소의 위치를 나타낸다.

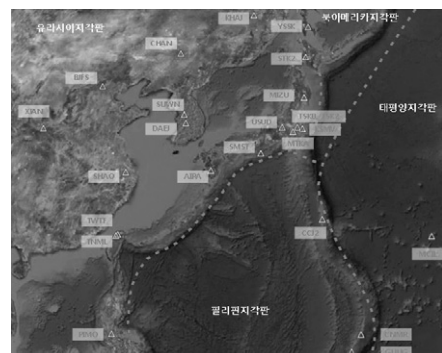


그림 2. IGS 상시관측소 위치

## 2.2 자료처리

자료처리는 Bernese GPS S/W를 이용하였으며, 기준점의 변위를 고려하여 고정점을 이용한 상대측위 대신 정밀절대측위 방법으로 처리하였다. 지진 발생 전 2010년 1월에서 지진 발생 후인 2012년 2월까지의 24시간 관측자료를 지진 전과 후로 분리하여 일주일 간격으로 처리하였다. 그림 3은 자료처리 흐름도를 나타낸다.

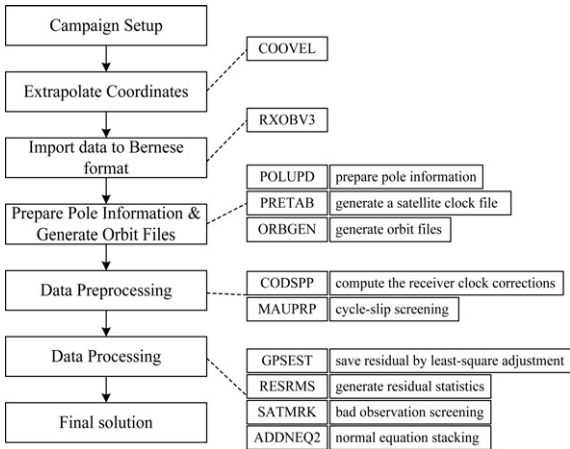


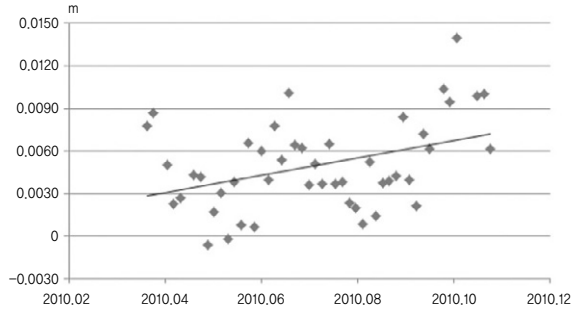
그림 3. 자료처리 흐름도

## 3. 자료처리 결과 및 분석

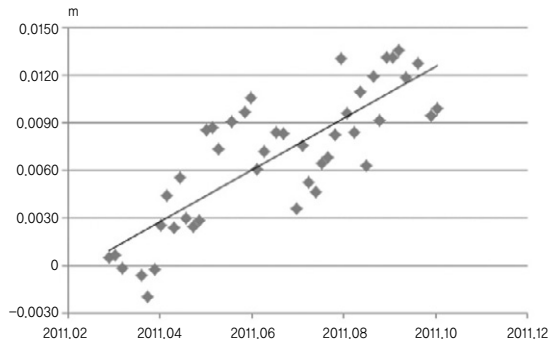
### 3.1 지진 전·후 지각변동 모니터링

본 연구에서는 Bernese의 정밀절대측위를 이용하여 IGS 상시관측소의 지각변동을 모니터링하였다. Bernese의 정밀절대측위 정확도는 수 cm로 알려져 있으나(Rolf Dach et al., 2007), 24시간 관측자료를 사용할 경우 수평방향으로 1cm이내의 정확도로 위치결정이 가능한 것으로 알려져 있다(Metin Soycon et al., 2011). 또한 연구의 목적이 절대적인 좌표의 산출이 아닌 지진 전·후 지각변동의 모니터링이며, 자료처리 결과의 RMSE가  $\pm 0.009m$  이내의 양호한 값을 나타내어 자료처리 결과를 통한 지각변동 모니터링을 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 자료처리 결과 중 일부이며, 그래프의 가로축은 시간, 세로축은 위치변화(m)를 나타낸다.

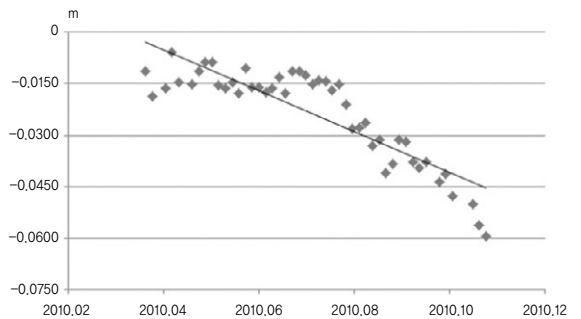
정밀절대측위를 통해 산출한 지진 전 지각변동벡터의 크기는 상시관측소에 따라  $9mm/year \sim 73mm/year$ 로 계산되었다. 유라시아 및 북아메리카지각판은 동남쪽 방향의 지각변동을 나타내었으며, 필리핀 및 태평양지각판은 북서쪽 방향의 지각변동을 나타내었다. 같은 지각판에 위치한



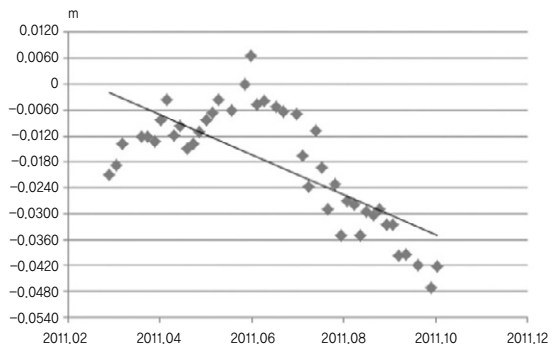
(a) 위도방향(지진 전)



(b) 위도방향(지진 후)

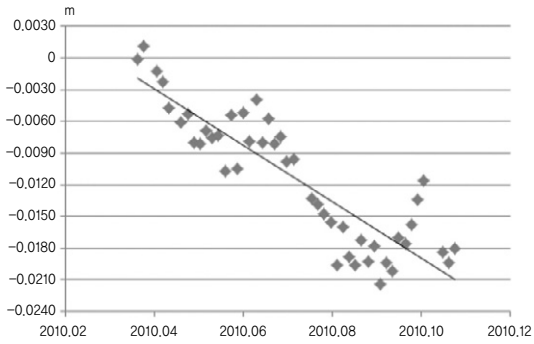


(c) 경도방향(지진 전)

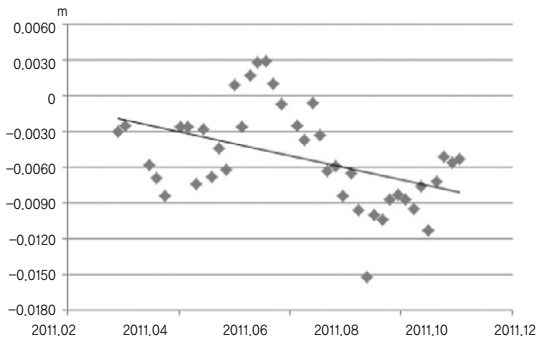


(d) 경도방향(지진 후)

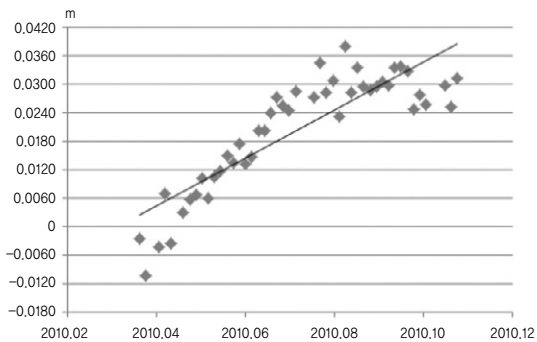
그림 4. CCJ2 상시관측소



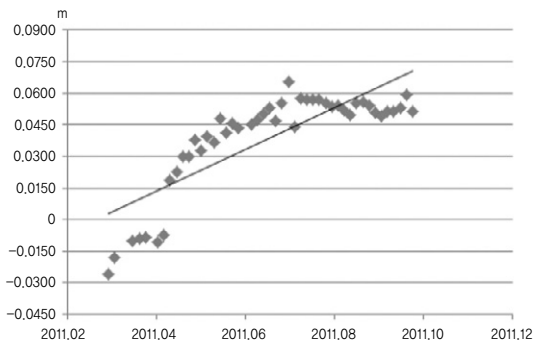
(a) 위도방향(지진 전)



(b) 위도방향(지진 후)



(c) 경도방향(지진 전)



(d) 경도방향(지진 후)

그림 5. SUWN 상시관측소

상시관측소의 경우, 서로 유사한 지각변동방향을 나타낼 수 있었다. 반면, 일본지역에 위치한 MIZU, TSKB, TSK2, KSMV, USUD 및 MTKA 상시관측소는 유라시아지각판의 이동 방향인 동남쪽과 다른 방향을 나타내었으며, 최근에 발표된 지각변동 모델과도 다른 양상을 보인다. 이러한 결과는 지진 전 일본 지역에 지각변동으로 인한 응력이 축적되고 있음을 제시하는 것이다. 그림 6과 그림 7은 각각 연구를 통해 산출된 지진 전 지각변동 벡터와 MOVEL 2010모델의 지각변동 벡터를 나타낸다.

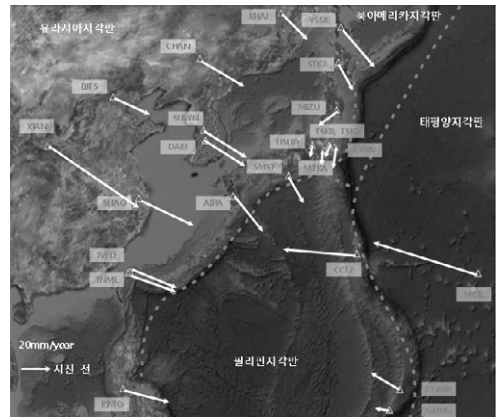


그림 6. 지진 전 지각변동 벡터

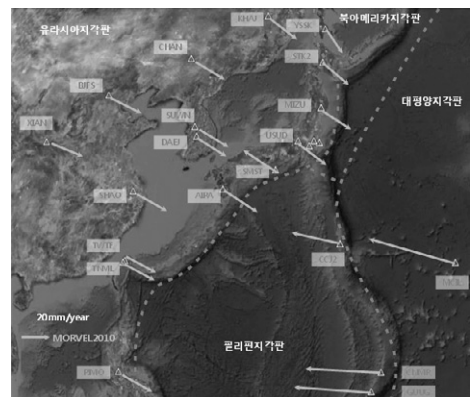


그림 7. MOVEL 2010모델의 지각변동 벡터

지진 후 지각변동은 상시관측소에 따라 8mm/year ~92mm/year로 계산되었으며, 지진이 발생한 일본 지역의 경우 지진 전·후의 지각변동이 크게 변화하였음을 알 수 있다.

지각변동 벡터의 정확도는 관측연수(observation year) 및 관측자료의 주기와 밀접한 관련이 있다. 다음 식은 지각변동 속도의 정확도를 나타낸다(Guorong HU, 2010).

$$\sigma \cong \sqrt{\frac{12(0.7WRMS)^2}{gT^3} + \frac{1.78(WRMS)^2}{g^{0.22}T^2} + \frac{(0.5WRMS)^2}{T}}$$

WRMS : the weighted root-mean-square residual position scatter

g : the number of measurements per year

T : the time series length in years.

연구를 통해 산출된 지각변동 벡터는 지진 이후 최근까지 1년 동안의 관측자료를 통해 산출된 것으로 정확도는 ±6mm/year 정도이며, 향후 5년 이상의 관측자료를 이용한다면 현재 제시된 지각변동 벡터보다 2배 이상의 정밀도를 갖는 결과를 산출할 수 있을 것으로 기대된다. 표 1에 상시 관측소 별 지각변동 속도를 정리하였으며, 그림 8에 지진 전·후 지각변동 벡터를 도시하였다.

표 1. 상시관측소 별 지각변동 속도

No.	상시 관측소	지진 전		지진 후	
		속도 (mm/year)	방위각 (°)	속도 (mm/year)	방위각 (°)
1	AIRA	30.3	141.2	18.3	156.5
2	BJFS	26.2	114.3	30.139	112.2
3	CCJ2	48.3	274.9	49.784	280.2
4	CHAN	33.5	121.1	23.067	128.3
5	CNMR	22.7	301.1	36.328	305.7
6	DAEJ	33.4	122.0	23.609	113.2
7	GUUG	9.3	278.7	14.676	347.0
8	KHAJ	24.2	135.0	18.402	158.3
9	KSMV	13.2	188.3	303.2	116.9
10	MCIL	73.3	287.5	92.848	292.9
11	MIZU	16.7	233.7	616.3	111.9
12	MTKA	10.3	183.9	13.0	93.4
13	PIMO	29.7	105.0	44.742	102.4
14	SHAO	38.9	116.2	33.47	113.0
15	SMST	14.2	222.1	6.6	331.9
16	STK2	20.3	150.2	14.2	204.0
17	SUWN	33.3	122.3	25.268	116.6
18	TNML	30.9	109.6	24.346	111.2
19	TSK2	11.3	198.1	232.3	105.1
20	TSKB	11.2	204.7	230.8	105.1
21	TWTF	37.2	112.4	36.554	96.8
22	USUD	8.1	192.1	120.0	80.6
23	XIAN	73.0	124.7	70.709	115.9
24	YSSK	21.4	140.3	8.82	176.1

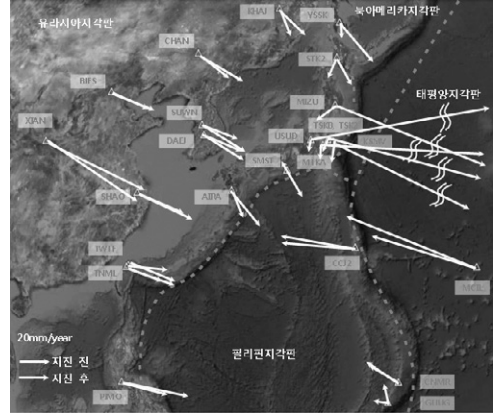


그림 8. 지진 전·후 지각변동 벡터

2011년 3월 11일 발생한 지진으로 인해 지진의 진앙에서 가장 가까운 MIZU 상시관측소는 동남쪽으로 약 2.7m의 변위가 나타났으며, TSKB, TSK2, KSMV, USUD 및 MTKA 상시관측소는 동북쪽으로 약 0.2m-0.8m의 변위를 나타내었다(박준규, 2011). 지진 이후 지각변동에서도 진앙지에서 가까운 이들 상시관측소는 기존 지각변동 방향과 다른 지진변위와 비슷한 방향으로 120mm/year ~610mm/year의 빠른 속도를 나타내었다. 그러나 일본지역의 SMST 상시관측소는 지진 전 유라시아지각판에 위치한 다른 지역과 같은 동남쪽 방향의 지각변동을 나타내었으나 지진 이후 북서쪽으로 지각변동의 방향이 바뀌었다. 또한 진앙지와 거리가 먼 중국의 CHAN, BJFS, XIAN, SHAO 역시 다른 지역에 비해 미소하지만 지진 전·후 지각변동 벡터의 변화가 관찰되어 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

유라시아지각판에 위치한 상시관측소 중 일본과 가까운 SUWN, DAEJ, CHAN, KHAJ 상시관측소는 지각변동 속도가 지진 전에 비해 감소하였으며, 북아메리카지각판의 YSSK 상시관측소는 지각변동 크기의 감소는 물론 지각변동이 동남쪽 방향에서 남쪽방향으로 변화하였다. 우리나라 SUWN 및 DAEJ 상시관측소의 경우, 지진 전·후 10mm/year 이상의 변화가 관찰되었으며, 이는 타 연구에서 제시된 바와 같이(김수경 등, 2012) 지진 직후 발생한 큰 변위 때문인 것으로 판단되며, 지진 이후 지각변동은 안정되는 추세임을 알 수 있다.

필리핀지각판의 CCJ2, CNMR 상시관측소는 지진 전·후 지각변동이 비슷한 양상을 나타내고 있으며, GUUG 상시관측소는 서쪽에서 북쪽으로 지각변동의 방향이 변화하였다. 태평양지각판의 MCIL 상시관측소는 지진 이전과

비슷한 방향의 지각변동을 나타내었지만 지각변동 속도가 증가하였다. 이러한 결과는 2011년 3월 11일 발생한 일본 지진이 주변 유라시아, 북아메리카, 필리핀 및 태평양지각판의 지각변동에 영향을 주었음을 제시하는 것이라 할 수 있다.

### 3.2 지각변동 모델과의 비교

본 연구에서는 지진 후 최근까지 정밀절대측위를 통해 산출된 지각변동 벡터의 변화를 비교하기 위해 지진 발생 이전 오랜 기간의 연구를 통해 제시된 유라시아, 북아메리카, 필리핀 및 태평양지각판의 지각변동 속도를 분석하였다. 현대적인 과학기술에 의해 관측된 판 운동량은 지질학 자료와 지구물리학 정보들을 사용하여 여러 가지 모델이 제시되어 있으며, ITRF2000 D&A, APKIM2005, HS3-NUVEL 1A, ITRF2000 AS&B, REVEL 2000, CGPS, GSRM v1.2, GEODVEL, MORVEL 등의 지각판 거동 모델들이 개발되어 서비스 중에 있다(<http://www.unavco.org>).

IGS 상시관측소 24개소에 대한 측지좌표를 기지값으로 지각변동 모델의 지각변동량을 산출하고, 그 결과들을 본 연구에서 결정된 지각변동 속도와 비교하였다. 판 거동 모델들로부터 산출된 지각변동량은 UNAVCO에서 제공되는 웹 계산 모듈을 이용하였다. 그림 9는 UNAVCO의 웹 계산 모듈이며, 표 2~표 4에 지각변동 모델과 본 연구를 통해 산출된 지각변동 속도를 나타내었다.

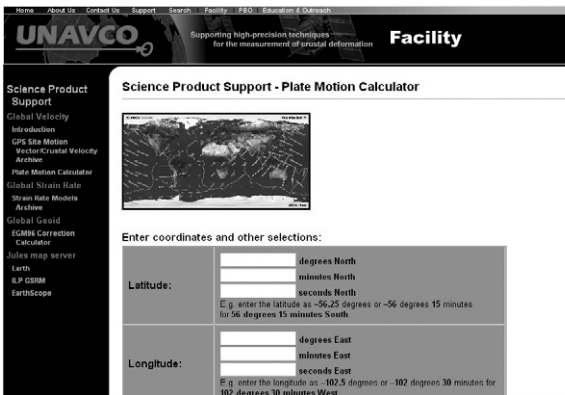


그림 9. UNAVCO의 웹 계산 모듈

지각변동 모델을 통해 산출된 지각변동 속도는 같은 지각판에 위치한 상시관측소의 경우 비슷한 지각변동 방향과 속도를 나타내었으며, 일본과 필리핀지각판 일부 지역을 제외한 지역에서 정밀절대측위를 통해 산출된 지각변

표 2. 모델별 지각변동 속도 - MIZU

Model	지각변동 속도 (mm/yr)	방위각(°)
GEODVEL 2010	26.48	122.66
MORVEL 2010	23.78	129.32
APKIM2005-DGFI	27.59	120.89
APKIM2005-IGN	27.87	121.04
GSRM v1.2	28.68	122.37
CGPS 2004	27.35	119.95
REVEL 2000	26.79	120.13
ITRF2000	27.29	119.28
HS3-NUVEL1A	24.38	130.37
HS2-NUVEL1A	24.03	130.13
NUVEL 1A	24.39	130.38
PPP	616.30	111.92

표 3. 모델별 지각변동 속도 - DAEJ

Model	지각변동 속도 (mm/yr)	방위각(°)
GEODVEL 2010	27.43	116.37
MORVEL 2010	24.55	122.42
APKIM2005-DGFI	28.38	114.29
APKIM2005-IGN	28.58	114.22
GSRM v1.2	29.62	115.91
CGPS 2004	28.33	113.84
REVEL 2000	27.87	114.28
ITRF2000	28.28	113.26
HS3-NUVEL1A	25.47	123.95
HS2-NUVEL1A	25.09	123.72
NUVEL 1A	25.47	123.96
PPP	23.61	113.20

동과 비슷한 양상을 보였다. 본 연구의 결과와 각 모델의 결과가 차이를 보이는 것은 지각변동 벡터 산출에 사용된 관측자료의 기간이 다르기 때문으로 판단되며, 향후 지속적인 지각변동 모니터링이 필요하다.

지진 진앙지 주변 MIZU, TSKB, TSK2, KSMV, USUD 및 MTKA 상시관측소는 지각변동 모델과 큰 차이를 나타내었는데 이는 지각변동 모델에서 지진 이후 최근의 관측자료가 반영되지 않았기 때문으로 판단된다.

표 4. 모델별 지각변동 속도 - YSSK

Model	지각변동 속도 (mm/yr)	방위각(°)
GEODVEL 2010	18.76	148.85
MORVEL 2010	19.26	145.48
APKIM2005-DGFI	19.5	144.06
APKIM2005-IGN	18.41	148.54
GSRM v1.2	19.78	143.56
CGPS 2004	19.15	148.53
REVEL 2000	18.63	142.29
ITRF2000	18.16	148.04
HS3-NUVEL1A	20.14	148.85
HS2-NUVEL1A	20.53	148.70
NUVEL 1A	20.14	148.87
PPP	8.82	176.10

일본지역의 경우 지진 이후 지각변동 방향 및 속도가 크게 변화하였으며, 주변 필리핀 및 태평양지각판의 지각변동과 반대방향을 나타내고 있어 대규모 지진이 발생할 위험이 있다. 따라서 지진 예측 및 지각변동 연구를 위해 일본 및 주변 지역에 대한 지속적인 지각변동 모니터링이 필요하다. 그림 10과 ~ 그림 12는 지각변동 모델과 정밀절대

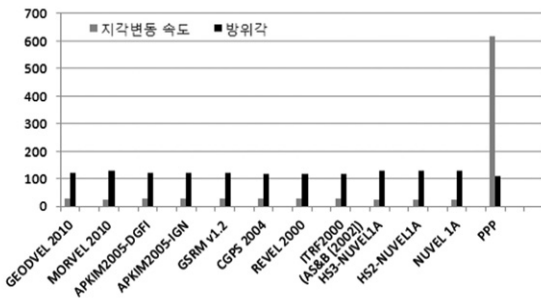


그림 10. 지각변동 속도 비교 - MIZU

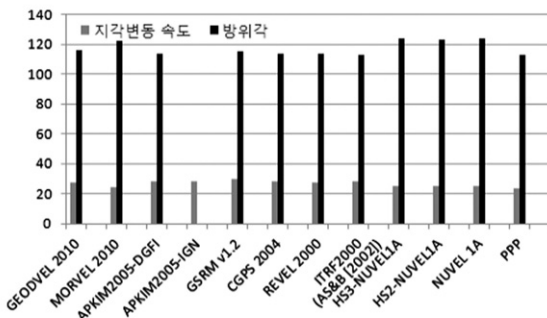


그림 11. 지각변동 속도 비교 - DAEJ

측위를 통해 산출된 지진 이후 지각변동 속도를 비교한 것이며, 그림 13에 지각변동 모델 및 정밀절대측위에 의한 지각변동 벡터를 나타낸다.

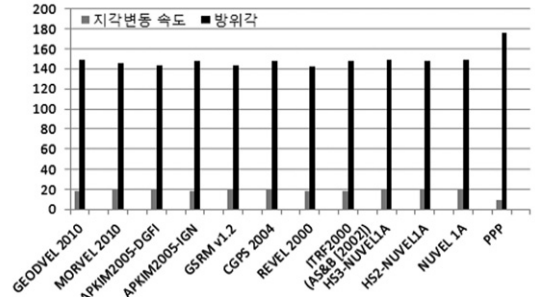


그림 12. 지각변동 속도 비교 - YSSK

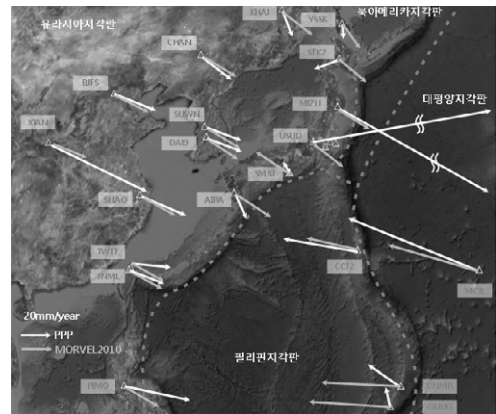


그림 13. 지각변동 모델 및 정밀절대측위에 의한 지각변동 벡터

#### 4. 결론

본 연구에서는 IGS 상시관측소에서 취득된 GPS 관측자료를 이용하여 지진 전·후의 일본 지역 주변 지각판의 지각변동을 모니터링하고, 지각변동 속도를 산출하여 지각변동 모델과 비교·분석한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, IGS 상시관측소의 GPS 관측자료를 정밀절대측위로 처리하여 각 상시관측소 별 지각변동을 효과적으로 모니터링 할 수 있었다.

둘째, IGS 자료해석을 통해 유라시아, 북아메리카, 필리핀 및 태평양 지각판의 지진 전·후 지각변동 변화를 정량적으로 제시하였다.

셋째, 정밀절대측위를 통해 산출된 지각변동 속도와 지각변동 모델에서 계산된 지각변동 속도는 지진 진앙지 주변에서 크게 차이를 나타내었는데 이는 지각변동 모델에서 지진 이후 최근의 관측자료가 반영되지 않았기 때문으로 판단된다.

넷째, 일본지역의 경우 지진 이후 지각변동 방향 및 속도가 크게 변화하였으며, 주변 필리핀 및 태평양지각판의 지각변동과 반대방향을 나타내고 있어 대규모 지진이 발생할 위험이 있다. 따라서 지진 예측 및 지각변동 연구를 위해 일본 및 주변 지역에 대한 지속적인 지각변동 모니터링이 필요하다.

### 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No.2012-004404)

### 참고문헌

강준목, 박준규, 이희구, 이용욱 (2010), 온라인 GPS 자료처리 서비스의 정확도 분석, 한국측량학회지, 제28권, 제1호, 한국측량학회, pp. 13-21.

김민규 (2012), IGS 자료해석에 의한 지진 전·후 지각변동 모니터링, 충남대학교 박사학위 논문.

김수경, 배태석 (2012), 한반도 지각의 2011 년 도호쿠 대지진 영향 분석, 한국측량학회지, 30(1), pp. 87-96

박준규 (2011), IGS 자료해석에 의한 일본 동북부 지진 영향권 분석, 한국지적정보학회지, 제13권, 제2호, 한국지적정보학회, pp. 27-34.

박준규 (2010), 정밀절대측위를 이용한 양산지역의 지각변위 해석, 한국측량학회지, 제28권, 제2호, 한국측량학회, pp. 289-295.

송동섭, 윤홍식 (2006), GPS로 추정된 지각변동 속도 및 판거동 모델과의 비교, 대한토목학회지, 제26권, 제5D호, 대한토목학회, pp. 877-884.

임상규 (2011), 동일본 대지진에 따른 한반도 지각변화 연구, 경북대학교 석사학위 논문.

조재명 (2006), GPS 상시관측소 데이터의 정밀해석 및 한반도 지각변동량 추정, 성균관대학교, 박사학위논문.

Altamimi, Z., P. Sillard, and C. Boucher (2002), ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, No. B10.

Argus, D.F., R.G. Gordon, M.B. Hefflin, C. Ma, R.J. Eanes, P. Willis, W.R. Peltier, and S.E. Owen (2010), The angular velocities of the plates and the velocity of the Earth's centre from space geodesy, *Geophys. J. Int.*, Vol. 18, pp. 1-48.

DeMets, C., R.G. Gordon, and D.F. Argus (2011), Geologically current plate motions, *Geophys. J. Int.*, Vol. 181, pp. 1-80.

Drewes, H. (2009), The Actual Plate Kinematic and Crustal Deformation Model APKIM2005 as basis for a non-rotating ITRF, *Geodetic Reference Frames, IAG Symposia*, Vol. 134, pp. 95-99.

Frey Mueller, J. (2011), Predicted displacements for Japan earthquake, IGS(International GNSS Service), IGSMail-6359.

Guorong HU (2010), AustraliaThe Asia Pacific Regional Geodetic Project (APRGP) GPS Solution (1997-2008)

Metin Soyacan and Ercenk Ata (2011), Precise point positioning versus traditional solution for GNSS networks, *Scientific Research and Essays*, 6(4).

Prawirodirdjo, L., and Y. Bock (2004), Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations, *J. Geophys. Res.*, Vol. 109.

Rolf Dach, Urs Hugentobler, Pierre Fridez, Michael Meinel, Bernese GPS Software Version 5.0 (2007)

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.

<http://www.unavco.org/>

(접수일 2012. 09. 13, 심사일 2012. 10. 19, 심사완료일 2012. 10. 30)