한국측량학회지, 제 30권 제 1호, 2012. 2 : pp. 87~96

한반도 지각의 2011 도호쿠 대지진 영향 분석

Analysis of Crustal Deformation on the Korea Peninsula after the 2011 Tohoku Earthquake

김수경[1] · 배태석[2]
Kim, Su-kyung · Bae, Tae-Suk

Abstract

The U.S. Geological Survey (USGS) announced that an earthquake of 9.0 magnitude had occurred near the east coast of Japan on March 11, 2011, resulting in a displacement of the crust of about 2.4 meters. The Korean peninsula is located on the Eurasian tectonic plate that stretches out to Japan; therefore, there is a high possibility of being affected by an earthquake. The Korean GPS CORS network operated by the National Geographic Information Institute (NGII) was processed for ten days before and after the earthquake. Both static and kinematic baseline processing were tested for the determination of crustal deformation. The static baseline processing was performed in two scenarios: 1) fixing three IGS stations in China, Mongolia and Russia; 2) fixing SUWN, one of the CORS networks in Korea, in order to effectively verify crustal deformation. All data processing was carried out using Bernese V5.0. The test results show that most of the parts of the Korean peninsula have moved to the east, ranging 1.2 to 5.6 cm, compared to the final solution of the day before the earthquake. The stations, such as DOKD and ULLE that are established on the islands closer to the epicenter, have clearly moved the largest amounts. Furthermore, the station CHJU, located on the southwestern part of Korea, presents relatively small changes. The relative positioning between CORS confirms the fact that there were internal distortions of the Korean peninsula to some extent. In addition, the 30-second interval kinematic processing of CORS data gives an indication of earthquake signals with some delays depending on the distance from the epicenter.

Keywords :Baseline processing, Crustal deformation, Earthquake, GPS, Kinematic processing

초 록

2011년 3월 11일 일본 동북부 태평양 연안지역 해저를 진앙으로 하는 규모 9.0의 도호쿠 대지진이 발생하였다. 이 지진은 역사상 4번째 규모의 지진으로 대형 쓰나미를 동반하여 많은 인명 및 재산피해를 유발하였다. 또한 미국 지질조사국에 따르면 지진이후 일본 동북부 지역이 약 2.4m 가량 이동된 것으로 보이며, 이에 따라 한반도 역시 지진의 영향권에 들었을 가능성이 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 국토지리정보원에서 운영중인 상시관측소 관측데이터를 이용하여 일본지진에 의한 우리나라 지각의 변위를 산출하고 결과를 분석하였다. Bernese V5.0을 사용하였으며, 지진 발생 전 · 후의 기선해석과 지진 발생 당시의 이동측위를 수행하였다. 기선해석을 통한 자료처리 시 효과적인 지각변동 확인을 위하여 두 가지 시나리오를 이용하였다. 첫 번째 시나리오로 진앙과 거리가 멀어 비교적 안정적이라고 판단되는 중국, 몽골, 러시아의 IGS 상시관측소를 고정하여 기선해석을 수행하였으며, 두 번째로는 우리나라 국가 기준점인 수원 관측소를 고정하여 기선해석을 실시하였다. 그 결과 일본 지진 이후, 한반도 지각이 대부분 동쪽방향으로 1.2cm에서 5.6cm 수준으로 이동한 것을 확인할 수 있었다. 특히 본 연구에서 대상으로 한 상시관측소 중 지진의 진앙과 가까운 독도, 울릉도 지역에서 가장 큰 변위가 나타났으며, 진앙으로부터 거리가 먼 제주의 지각이동이 가장 적은 것을 확인할 수 있었다. 또한 이동측위 결과 지진 발생으로부터 약간의 시간 경과 후 우리나라 상시관측소에 신호가 감지되었다.

핵심어 : 기선해석, 지각변동, 지진, GPS, 이동측위

1) 세종대학교 지구정보공학과 석사과정(E-mail:kimsu1030@gmail.com)
2) 교신저자 · 정회원 · 세종대학교 지구정보공학과 교수(E-mail:baezae@sejong.ac.kr)

1. 서 론

GPS(Global Positioning System)는 처음 미국 국방성에 의해 군사목적으로 설계되었으나, 1980년대 들어 측지, 측량, 항법, 통신, 기상 등 매우 다양한 분야에서 광범위하게 활용되고 있다. 또한, GPS기술을 이용하면 수 밀리미터의 정밀도로 지각 및 단층 등의 위치 및 변위 측정이 가능한 것으로 알려져 있으므로 현재 세계 각 국에서 지각변동 및 지진에 의한 영향을 모니터링하기 위해 GPS 상시관측소를 이용한 감시 체계를 구축하여 운영하고 있다. 미국의 SCIGN(Southern California Integrated GPS Network), PANGA(Pacific Northwest Geodetic Array), 일본의 GEONET(GPS Earth Observation Network), 독일의 SAPOS(Satellite Positioning Service of the German National Survey) 등이 GPS 상시관측소 네트워크의 대표적인 예라고 할 수 있다(박관동, 2007). 우리나라의 경우에도 2011년 12월 현재 국토지리정보원, 한국지질자원연구원, 한국천문연구원, 국토해양부 위성항법중앙사무소, 국립해양조사원의 5개 기관에서 전국에 약 100개의 GPS 상시관측소를 설치하여 운영하고 있으며, 이를 이용한 각종 측량, 지각이동 및 지진 감지 등의 연구가 활발하게 진행되고 있다.

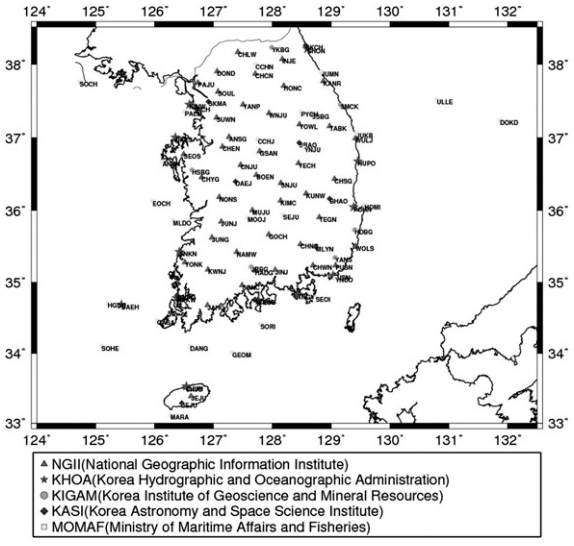


그림 1. 국내 GPS 상시관측소 운영 현황

일본열도는 유라시아, 태평양, 필리핀, 및 북아메리카판이 서로 접해 있는 판의 경계부에 위치하며, 이 4개의 판들은 각각 매년 수 cm 정도의 속도로 절대 · 상대적 움직임을 보인다. 이러한 지각의 이동으로 인해 일본은 크고 작은 지진이 끊임없이 계속되고 있다(지헌철, 2008; Komaki, 1993).

그림 2. 도호쿠 지진 발생 위치

2011년 3월 11일 14시 46분 경(현지시간), 일본 동북부 태평양 연안지역 해저를 진원으로 하는 리히터 규모 9.0의 대형 지진이 발생하였다. 이 도호쿠 대지진은 칠레지진(1960년), 미국 알래스카지진(1964년), 인도네시아 수마트라지진(2004년)에 이어 역사상 4번째 규모의 강진으로 기록되었으며, 대형 쓰나미를 동반하여 많은 인명 및 재산피해 뿐만 아니라 후쿠시마 원전 폭발로 인한 방사능 공포를 유발시켰다. 또한 미국 지질조사국에 따르면 이번 지진은 일본의 동북부지역을 약 2.4m 가량 동쪽으로 이동시킨 것으로 나타났으며, Freymueller(2011)가 미국지질조사국의 FFM(Finte Fault Model)을 이용하여 예상한 일본 및 주변국가의 변위에 따르면 일본뿐만 아니라 한반도와 중국 역시 이번 지진의 영향권에 들어간 것으로 보인다. 한반도 역시 이번 지진의 영향권에 있을 가능성이 제기됨에 따라 국내 학계 전문가들에 의해 다각도로 분석이 이루어지고 있다. 한국천문연구원(2011)은 한국천문연구원과 위성항법중앙사무소의 GPS 관측소 자료를 처리하여 도호쿠 대지진의 한반도 영향을 분석하였다. 분석결과에 따르면 지진 발생 직후 한반도 지각이 1cm에서 5cm까지 동쪽으로 이동하였으며 특히 진원지와 가까운 독도와 울릉도의 경우 상대적으로 영향을 더 많이 받은 것으로 나타났다. 이 외에 도호쿠 지진과 관련하여 박준규 등(2011)은 지진재해 관리를 위해 GPS를 기반으로 2011 도호쿠 대지진에 의한 일본 상시관측소의 변위를 모니터링하고, 지진 변위량을 산출하였으며, 황진상 등(2011)은 전 세계 IGS 관측소와 한반도 및 인근 섬들에 위치한 GPS 관측소의 데이터를 이용하여 2011 도호쿠 지진이 GPS 상시관측소에 미친 위치변동량을 분석하였다. 그러나 국가 측지 기준계의 좌표변화와 관련하여 지각의 상

대적 위치 변화는 각종 문제를 야기할 수 있음에도 기존의 연구들은 도호쿠 지진으로 인한 한반도 내부 지각의 왜곡 현상(뒤틀림)에 대한 분석이 미비한 실정이다.

본 연구에서는 새로운 국가 측지 기준계 확립을 위한 기초 연구로서 국토지리정보원의 GPS 상시관측소와 우리나라 주변국의 IGS 상시관측소 데이터를 이용한 지진 발생 전 · 후의 정밀 데이터 처리를 수행하고 다양한 분석을 시도하였다. 이를 통해 국가 측지기준계의 갱신을 위한 한반도 지각의 왜곡현상을 확인하였으며, 정밀 데이터 처리의 결과로 계산된 지각 이동량에 대하여 다양한 수치적 분석을 시도하였다.

2. 연구 방법

2.1 자료수집

본 논문에서는 도호쿠 대지진에 의한 우리나라 지각의 영향을 다양한 시나리오를 통하여 분석하였다. 이를 위해서 지진 발생일(2011년 3월 11일)을 기준으로 발생 3일 전부터 이후 7일 동안(3월 8일~18일) 수집된 데이터를 이용하였다. 국내 상시관측소로는 국토지리정보원에서 운영하고 있는 GPS 상시관측소를 대상으로 14개를 선정하였으며, 국토해양부의 위성항법중앙사무소에서 관리하는 독도와 울릉도 관측소를 포함하였다. 국외의 상시관측소의 경우에는 IGS에 등록된 일본, 중국, 러시아, 몽골의 6개 상시관측소를 선정하였다. 상시관측소 선정에는 관측소의 기하학적 위치와 데이터의 안정성이 고려되었으며, 선정된 관측소는 본 논문의 대상기간(3월 8일~18일) 동안 모든 날짜의 데이터가 존재한다. 관측 데이터는 RINEX 포맷으로 30초 간격의 24시간 관측된 자료를 사용하였다. 아래 표 1은 본 논문에 사용된 GPS 상시관측소를 정리한 내용이며, 그림 3에 자료처리를 위해 선정된 16개의 국내 GPS 상시관측소의 위치를 나타내었다.

표 1. 사용된 GPS 관측데이터

관측기간		2011.03.08 ~ 2011.03.18
자료 형식		30초 간격으로 24시간 관측된 RINEX 포맷
상시관측소	국내 (16)	CHJU, CHWN, DOKD, DOND, GSAN, HONC, JUNJ, KANR, KIMC, KWNJ, SEOS, SONC, SUWN, ULLE, WOLS, WULJ
	국외 (6)	TSKB, TSK2, USUD, KUNM, ULAB, YAKT

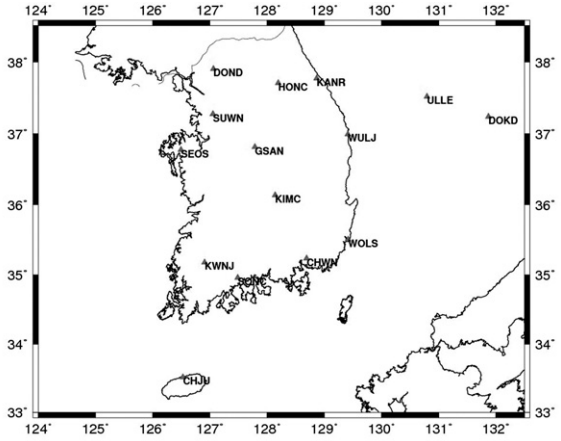


그림 3. 선정된 국내 GPS 상시관측소(16개)

한편, GPS 자료처리를 위해 IGS, AIUB(Astronomical Institute, University of Bern), CODE(Centre for Orbit Determination in Europe)에서 정밀 궤도력 및 위성의 시계 정보, 지구 자전축의 움직임, 전 지구 전리층 모델 등의 파일을 제공받았다.

2.2 데이터 처리

본 연구의 GPS 데이터 처리에는 2000km 내외의 초장기선장에 대해서도 정확한 미지정수 결정이 가능한 것으로 알려진 Bernese GPS Software V5.0을 사용하였다(이하 Bernese로 칭함). 기본적으로 Bernese는 상대측위와 정밀절대측위(PPP: Precise Point Positioning)가 모두 가능하지만 PPP의 경우 수 센티미터의 정확도 확보만 가능하므로 센티미터 이하의 정확도 확보를 위해서는 상대측위를 수행해야 한다. 또한 Bernese는 BPE(Bernese Processing Engine)를 이용하면 일련의 데이터 처리과정을 자동적으로 수행할 수 있으므로 본 연구에서도 BPE를 이용하여 지진 발생 전후 데이터의 상대측위를 수행하였다. 또한 이동측위방법을 사용하여 30초마다 지각의 움직임을 계산하였다. 이때 사용한 관측소의 좌표는 각 성분별로 0.001m의 정밀도를 제약조건으로 설정하였다.

GPS 데이터 처리를 위해 사용한 옵션은 아래 표 2와 같으며, 이중 대류권에 의한 GPS 관측값 지연은 Saastamoinen 모델과 Niell 매핑함수를 적용하였다. Saastamoinen 모델은 기체법칙(gas law)을 통해서 유도된 굴절지수를 이용하며, Niell 매핑함수는 입력 값으로 관측소의 위치와 연중시간(time of year)만 필요로 하고 지상 기상학에 독립적이고 정확하여 지상 기상학에 널리 사용된다(전재한 등, 2008;

Hofmann-Wellenhof et al, 2001). 이 외에 유럽의 CODE에서 제공하는 전지구 전리층 모델, 위성과 수신기의 코드 바이어스 오차에 해당하는 DCB(Differential Code Bias)를 사용하였으며, IGS에서 제공하는 GPS 위성의 궤도력 및 위성의 시계정보, 지구 자전축의 움직임과 관련된 모델을 사용하였다. 이중 GPS 위성 궤도력은 위성의 위치정보를 나타내는 것으로 정밀궤도력(precise orbit), 신속궤도력(rapid orbit), 초신속궤도력(ultra-rapid orbit), 방송궤도력(broadcast ephemerides)이 있으며, 본 논문에서는 가장 정확도가 높은 정밀궤도력을 사용하였다. 조석에 따른 해수하중 변동으로 인한 지각변동 현상을 나타내는 해양조석모델로는 FES2004를 사용하였으며, IAU2000 장동모델과 JGM-3 중력모델을 이용하였다.

표 2. 자료처리에 사용된 옵션

구 분	내 용
자료처리방법	상대측위
위성궤도력	정밀궤도력
대류권지연	Saastamoinen model/ Niell mapping function
중력모델	JGM-3
장동모델	IAU2000
천체궤도력	JPL DE200
해양조석모델	FES2004
임계 고도각	10°
기준점좌표 정밀도	0.001m

3. 결과 및 분석

3.1 기선해석

본 연구에서는 도호쿠 지진에 의한 한반도 지각의 변화를 확인하기 위하여 3월 8일부터 10일까지 총 3일간 수집된 관측데이터를 이용하여 지진발생 이전 GPS 상시관측소의 정밀좌표를 산출하였으며, 3월 12일부터 18일까지의 데이터를 이용하여 지진발생 이후 상시관측소의 정밀좌표를 계산하였다.

기선해석을 통한 우리나라 지각변동 분석을 효과적으로 수행하기 위하여 두 가지 시나리오를 이용하여 분석을 수행하였다. 첫 번째 시나리오로 우리나라 지각의 절대적인 움직임을 확인하기 위하여 진앙과 거리가 멀어 비교적 안정적이라고 판단되는 중국, 몽골, 러시아의 IGS 상시관측소를 기준점으로 사용하여 기선해석을 수행하였으며, 두 번째 시나리오는 한반도 내의 상대적인 변화 즉, 지각의 내부적인 뒤틀림을 확인하고자 우리나라 국가 기준점인 수원 관측소를 고정하여 기선해석을 실시하였다. 기선해석에서 기준국으로 사용된 국내외의 IGS 상시관측소 위치를 그림4에 나타내었다.

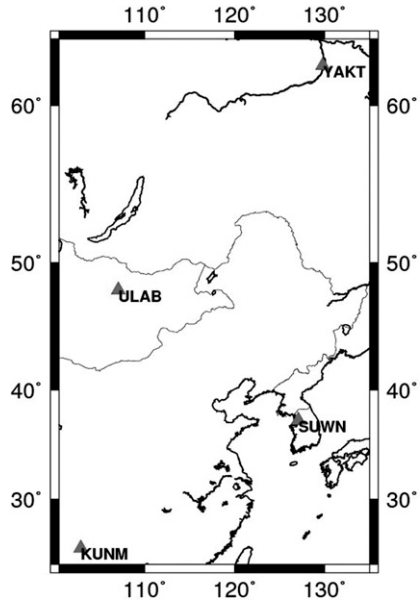


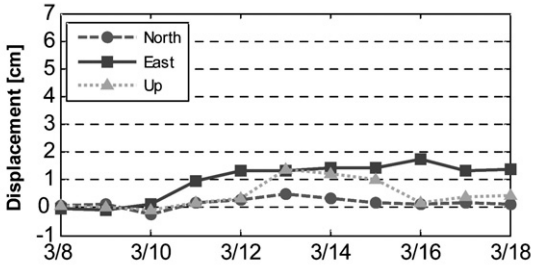
그림 4. 사용된 IGS 상시관측소(4개)

▶ 시나리오1

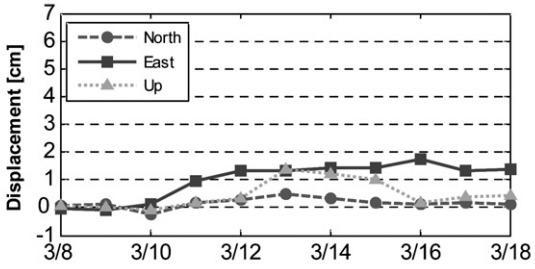
지진에 의한 한반도 지각의 변위를 정확히 파악하기 위해서는 비교적 지진의 영향을 적게 받았을 것으로 예상되는 관측소를 기준으로 하여 기선해석을 수행해야 한다. 이때 진앙으로부터 거리가 멀수록 지진의 영향을 적게 받았을 것으로 예상되지만 기선의 길이가 길어질수록 정확도가 떨어지는 기선해석의 특성을 고려하여 중국, 몽골, 러시아의 IGS 상시관측소를 기준국으로 선정하였다. 이렇게 선정된 관측소를 기준으로 기선해석을 실시하고 도호쿠 지진에 의한 한반도 지각의 절대적인 움직임을 확인하였다.

시나리오1의 결과 중 가장 작은 변위를 보이는 제주 관측소와 가장 변위가 크게 나타난 독도 관측소의 좌표 변동량을 그림 5에 나타내었다. 이 그림은 지진 발생 전인 3월 8일부터 10일까지의 데이터를 이용해 산출된 정밀좌표를 기준으로 한 좌표 변동량으로 그래프의 가로축은 날짜, 세로축은 좌표 변동량을 의미한다. 이때 좌표의 변동량은 지

역평면좌표로 변환하여 센티미터 단위로 나타내었다.



(a)제주(**CHJU**)



(b)독도(**DOKD**)

그림 5. 제주와 독도의 좌표변동(시나리오1)

지진발생 전(3월 8일~10일) 특별한 징후는 나타나지 않았으나 지진 발생 직후 동-서 방향의 좌표의 급격한 변위가 관찰되었다. 지진 발생일인 11일 변위가 관측되었으며, 이후 지진발생 다음날인 12일에도 일부 변위가 관측되었다. 제주 관측소는 11일까지 0.97cm 가량의 좌표변화가 있었으며, 12일까지 포함하면 1.31cm의 좌표 변동이 관측되었다. 또한 독도 관측소의 경우는 11일까지 4.59cm의 변화가 있었으며, 12일까지는 약 1cm 정도의 변위가 추가로 관측되었다. 이러한 현상은 실제로 지각이 12일 추가로 이동된 것이 아니며 11일 05시 46분경(UTC) 지진이 발생하였기 때문이라고 볼 수 있다. 11일 관측데이터에는 4분의 1 가량의 지진발생 전 데이터가 포함되어있다. 따라서 앞서 언급한 11일 관측데이터를 이용한 기선해석 결과 실제보다 작은 변동량이 계산된 것으로 생각된다. 이러한 현상은 05시 46분경(UTC, Universal Time Coordinated) 지진이 발생하여 11일 데이터의 4분의 1이 지진 발생 전 관측된 데이터임에 따라 생기는 현상이며, 따라서 11일 관측데이터를 이용하여 계산한 좌표변동량은 실제 변동량에 못 미치게 된다. 그러므로 지진에 의한 실질적인 지각의 움직임은 12일 좌표 변동량으로 볼 수 있다. 지진 발생 이후 일주일(3월 12일~18일)간의 좌표변동 경향을 살펴보면 대체적으로 지진 발생 이전에 비해 좌표변동 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 이러한 한상은 동-서, 남-북, 수직 방향에서 모두 나타나는데. 지진으로 인하여 지각 변위가 일어난 후 그 여파로 지각이 불안정하여 생기는 현상으로 판단된다. 특히 수직 방향의 경우 일정한 패턴 없이 매일 수 밀리미터 수준으로 증가하거나 감소하는 경향이 보이며, 변동폭 역시 다른 방향에 비해 다소 크게 나타났다.

시나리오1의 기선해석 결과로 계산된 16개 상시관측소의 좌표 변동량을 표 3과 그림 6에 나타내었다. 남-북 방향과 수직방향의 경우 최대 0.7cm의 범위에서 변동이 나타난 반면, 동-서 방향의 경우 1.3~5.6cm 범위에서 비교적 큰 좌표 변동량을 보인다. 또한 동-서 방향의 좌표 변동량이 모두 양(+)의 값으로 나타나 16개 관측소 모두 동쪽으로 이동하였음을 알 수 있다. 각 방향에 대한 16개 관측소의 평균 좌표 변동량은 북향으로 0.21cm, 동향으로 2.75cm, 수직방향으로 0.37cm로 나타났으며, 각 관측소에서의 3차원 절대변위량(3D norm)의 평균은 2.80cm로 계산되었다. 이것은 Freymueller(2011)가 FFM(finte fault model)을 사용하여 예상한 한반도의 변위 3cm와 유사한 결과로 볼 수 있다. 또한 일반적으로 한반도는 약 3cm/yr 수준으로 동남쪽으로 이동한다고 알려져 있으며(이원춘, 2006), 이와 비교할 때 이번 일본 대지진으로 인하여 한반도 지각의 연간 이동량에 해당하는 변위가 단 하루 만에 발생했다고 볼 수 있다.

표 3. 관측소 별 좌표변동(시나리오1)

No.	Station	Displacement [cm]			
		N	E	U	3D
1	CHJU	0.26	1.31	0.34	1.38
2	CHWN	0.32	2.21	0.39	2.27
3	KANR	-0.06	3.38	0.10	3.38
4	KIMC	0.28	2.37	0.10	2.39
5	KWNJ	0.25	1.83	0.52	1.92
6	ULLE	0.24	4.68	0.22	4.69
7	DOKD	0.31	5.57	0.37	5.59
8	DOND	-0.03	2.51	0.75	2.62
9	SEOS	0.09	2.14	0.48	2.20
10	SONC	0.36	1.93	0.42	2.01
11	SUWN	0.14	2.40	0.22	2.42
12	GSAN	0.13	2.59	0.58	2.66
13	HONC	0.05	3.02	0.65	3.09
14	JUNJ	0.26	2.05	0.16	2.08
15	WOLS	0.54	2.77	0.38	2.85
16	WULJ	0.29	3.29	0.31	3.32
Total	Mean	0.21	2.75	0.37	2.80
	Std. Dev.	0.15	1.08	0.19	1.06

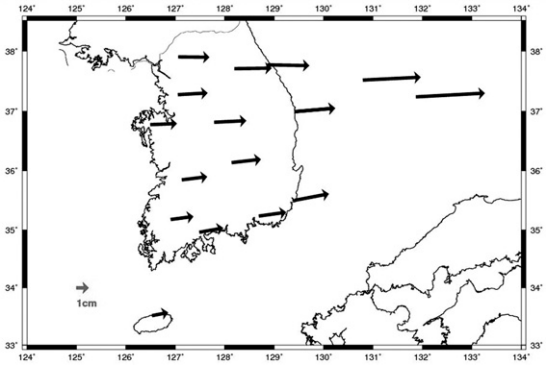


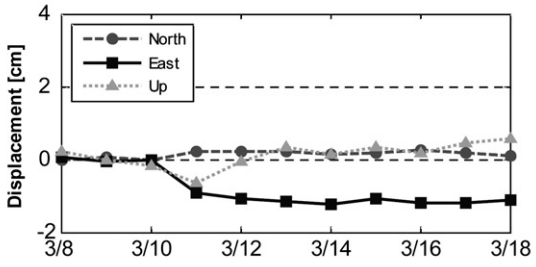
그림 6. 각 관측소별 좌표변화(시나리오1)

▶ 시나리오2

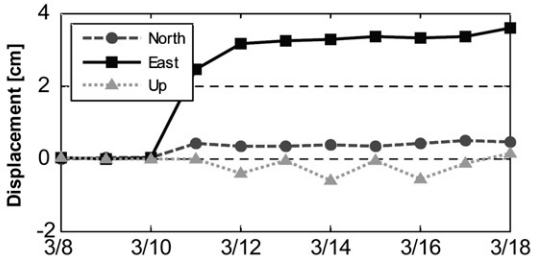
지각의 변위가 모두 동일한 크기와 방향을 갖는다면 한반도 내에 존재하는 GPS 상시관측소 사이의 상대적인 위치 변화가 발생하지 않으므로 한반도 내의 지적측량에 있어서 큰 문제는 발생하지 않는다. 그러나 상대적인 위치에 변화가 생긴다면 이들 상시관측소를 기준으로 하는 각종 측량의 오차를 야기하게 된다. 따라서 2011 도호쿠 대지진에 의한 한반도 내의 상대적인 지각 변동의 유무와 그 변동량 차이를 정확히 파악하고 보정할 필요가 있다. 이를 위하여 국내 IGS 상시관측소 중 하나로 우리나라 국가 기준점으로 사용되는 수원 관측소를 기준으로 하는 기선해석을 실시하였다.

그림 7은 시나리오1의 결과 가장 작은 변위가 나타났던 제주 관측소와 가장 큰 변위를 보인 독도 관측소의 시나리오2 결과이다. 해당 그래프 역시 지진발생 전 수집된 데이터를 이용하여 산출한 정밀좌표를 기준으로 변동량을 계산하고, 이를 지역평면좌표 변환하였다. 수원을 기준으로 하는 변위를 계산하였으므로 시나리오1의 결과에서 동쪽으로의 변위를 보였던 제주관측소는 서쪽으로 1.09cm의 변위가 계산되었으며, 시나리오1에서 동쪽으로 가장 큰 변위가 계산된 독도 관측소의 경우는 시나리오1에서 계산된 변위보다 작은 3.17cm의 변위가 계산되었다.

표 4와 그림 8은 시나리오2의 기선해석으로 계산된 15개 상시관측소의 좌표 변동량이다. 이 그림을 살펴보면 한반도 중앙부 지역으로 수원 관측소와 근접한 관측소는 약 0.3cm 이내로 수원 관측소와 거의 동일한 지각 변동량이 나타났으며, 서쪽 지역은 서쪽 방향으로 약 0.5cm, 동쪽 지역은 동쪽 방향으로 약 0.6~1.0cm 수준으로 수원 관측소를 기준으로 하는 상대 지각변동이 발생하는 것으로 나타났다. 특히 제주의 경우는 서쪽 방향으로 약 1.09cm, 울릉도와 독도는 동쪽 방향으로 각각 2.28cm, 3.17cm의 변동량이 계산되었다. 이와 같이 좌표변동이 지역별로 서로 다른 크기와 방향을 갖게 됨에 따라 도호쿠 대지진의 영향으로 한반도 지각에 내부적 왜곡이 발생하였다고 말할 수 있다.



(a)제주(**CHJU**)



(b)독도(**DOKD**)

그림 7. 제주와 독도의 좌표변동(시나리오2)

표 4. 관측소 별 좌표변동(시나리오2)

No.	Station	Displacement [cm]			
		N	E	U	3D
1	CHJU	0.22	-1.09	-0.07	1.11
2	CHWN	0.26	-0.21	-0.02	0.34
3	KANR	-0.13	0.98	-0.32	1.04
4	KIMC	0.23	0.17	-0.12	0.31
5	KWNJ	0.12	-0.56	0.48	0.75
6	ULLE	0.20	2.28	-0.39	2.33
7	DOKD	0.34	3.17	-0.41	3.21
8	DOND	-0.15	0.10	0.26	0.32
9	SEOS	-0.05	-0.27	0.08	0.28
10	SONC	0.20	-0.48	-0.09	0.53
11	GSAN	-0.01	0.25	0.44	0.51
12	HONC	-0.01	0.60	0.19	0.63
13	JUNJ	0.16	-0.35	-0.13	0.41
14	WOLS	0.52	0.33	-0.11	0.63
15	WULJ	0.20	0.87	-0.09	0.90
Total	Mean	0.14	0.39	-0.02	0.89
	Std. Dev.	0.18	1.11	0.27	0.83

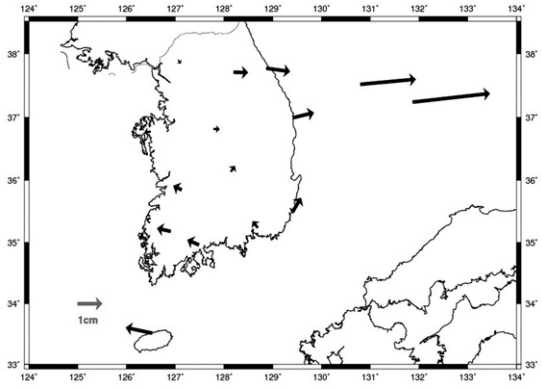
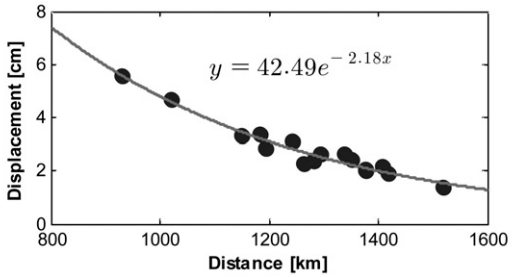
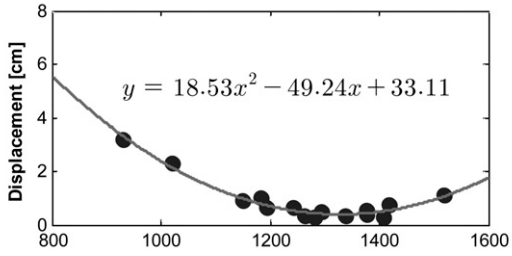


그림 8. 각 관측소별 좌표변화(시나리오2)

도호쿠 지진에 의해 한반도 지각에 뒤틀림이 발생하게 된 것은 진앙으로부터 관측소까지의 거리에 따라 지진의 영향이 다르기 때문으로 생각되며, 이를 확인하기 위하여 진앙으로부터 관측소까지의 거리와 변동량 사이의 관계를 규명하였다.



(a)시나리오**1**

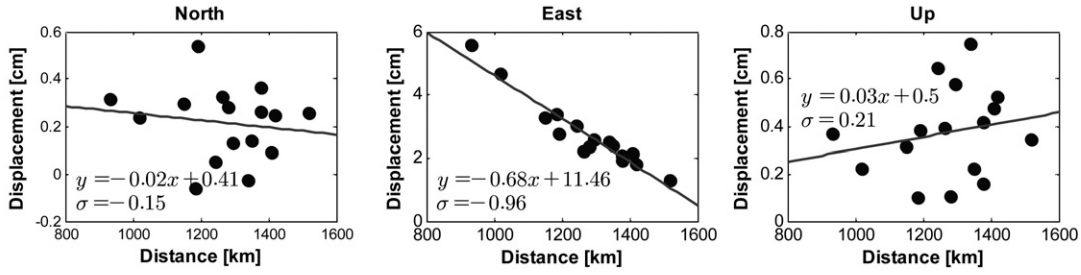


(b)시나리오**2**

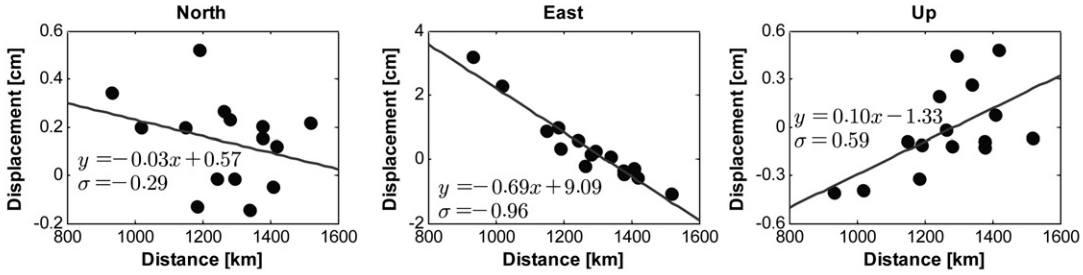
그림 9. 진앙으로부터 거리와 3D 변동량

그림 9는 시나리오1과 시나리오2의 기선해석으로 계산된 3D 변동량을 진앙으로부터 관측소까지의 거리와 비교하여 나타낸 그래프이며, 다음과 같이 시나리오1과 2의 결과는 약간 다른 경향을 보인다. 시나리오1의 경우 거리가 멀어짐에 따라 변위의 크기가 감소하는 경향을 보인다. 기선 거리가 가장 긴 제주 관측소의 변위가 1.38cm로 최소값으로 나타났으며, 가장 가까운 독도에서 5.59cm로 최대값을 갖는다. 반면 시나리오2의 결과는 진앙으로부터 기준점으로 사용한 수원 관측소까지의 거리인 약 1350km를 기준으로 변위의 크기가 감소하다 증가하였다. 이와 같은 두시나리오의 좌표변동 경향을 가장 적절하게 나타내는 방정식을 유도하기 위하여 다양한 형태의 함수에 접합(fitting)을 시도하였다. 접합결과 시나리오1의 경우는 지수함수, 그리고 시나리오2는 2차 함수로 접합을 하였을 때 잔차가 각각 0.17cm, 0.12cm로 가장 작았다. 결과적으로 시나리오1은 $y = 42.49e^{-2.18x}$로 표현가능하며, 시나리오2는 $y = 18.53x^2 - 49.24x + 33.11$으로 나타낼 수 있다.

진앙으로부터의 거리와 변위량 사이의 보다 명확한 상관성 확인을 위하여 각 성분별 좌표변화와 거리 사이의 관계 분석을 수행하였다(그림 10). 두 시나리오 모두 동쪽 방향의 변화량은 진앙으로부터의 거리가 멀어질수록 감소하는 경향을 보였으며, 상관성 역시 -0.96으로 계산되어 이 둘 사이의 연관성이 상당히 높은 것을 알 수 있다. 북쪽 방향의 좌표 변동량을 살펴보면, 두 시나리오 모두 동쪽 방향에 비해 상관성은 각각 -0.15와 -0.29로 낮게 계산되었으나 거리가 증가함에 따라 변위량이 감소하는 음의 상관성을 보인다. 동쪽 방향과 북쪽 방향에서 모두 음의 상관성이 나타난 반면 수직방향의 경우는 특이하게 두 시나리오에서 모두 양의 상관성을 가진다. 이러한 양의 상관성은 특히 시나리오2에서 0.59로 비교적 높게 나타났다. 이것은 기선의 길이가 길 경우 정확도가 떨어지는 기선해석의 단점에 따라 시나리오1에 비해 짧은 기선으로 구성된 시나리오2에서 더 명확한 분석이 수행되었기 때문이라고 볼 수 있다. 박준규 등(2011)이 2011 도호쿠 대지진에 대해 GPS 관측데이터를 이용하여 수원관측소를 고정하여 계산한 일본 관측소의 수직방향 변위량에 따르면 진앙과 가까운 MIZU와 TSKB 관측소는 수직방향으로 각각 -8.59cm, -9.76cm에 이르는 음의 변위를 가지며, 진앙과 비교적 먼 USUD 관측소는 수직방향으로 0.96cm의 양의 변위가 발생하였다. 이 결과를 토대로 분석을 수행한 결과, 2011 도호쿠 대지진은 진앙 근방의 지각을 하향 이동시켰으며, 이러한 지각이 동의 반동으로 진앙으로부터 멀어지는 지각이 상향 이동이 발생하였다. 이에 따라 진앙으로부터 거리가 멀어질수록 수직방향으로의 지각 변위가 증가한 것으로 보인다.



(a)시나리오**1**



(b)시나리오**2**

그림 10. 진앙으로 부터의 거리와 각 방향별 변위와 진앙으로 부터 사이의 상관성 분석

3.2 이동측위

지진 발생 당시의 지각변위 모니터링을 위하여 지진 발생 약 한 시간 전후의 데이터를 이용한 30초 간격의 움직임을 계산하였다. 이때 사용된 기준국은 시나리오1에서 기준국으로 사용된 중국, 몽골, 러시아의 IGS 관측소를 동일하게 사용하였다. 또한 여진과 관련한 변위 확인을 위하여 국내 관측소 외에 일본 관측소의 이동측위도 수행하였다. 이때 일본 관측소의 경우는 연구 대상기간에 모든 데이터가 존재하는 IGS 관측소 중 진앙으로부터 거리가 비교적 가까운 TSK2를 선택하였다(그림 11).

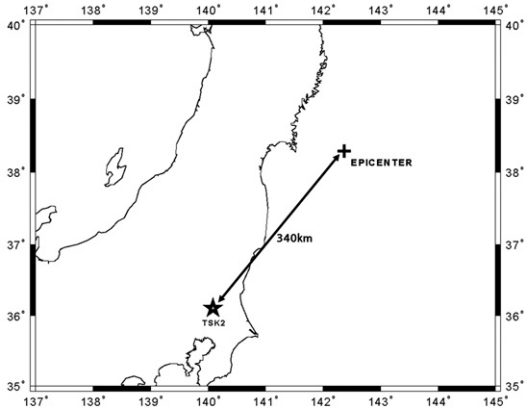
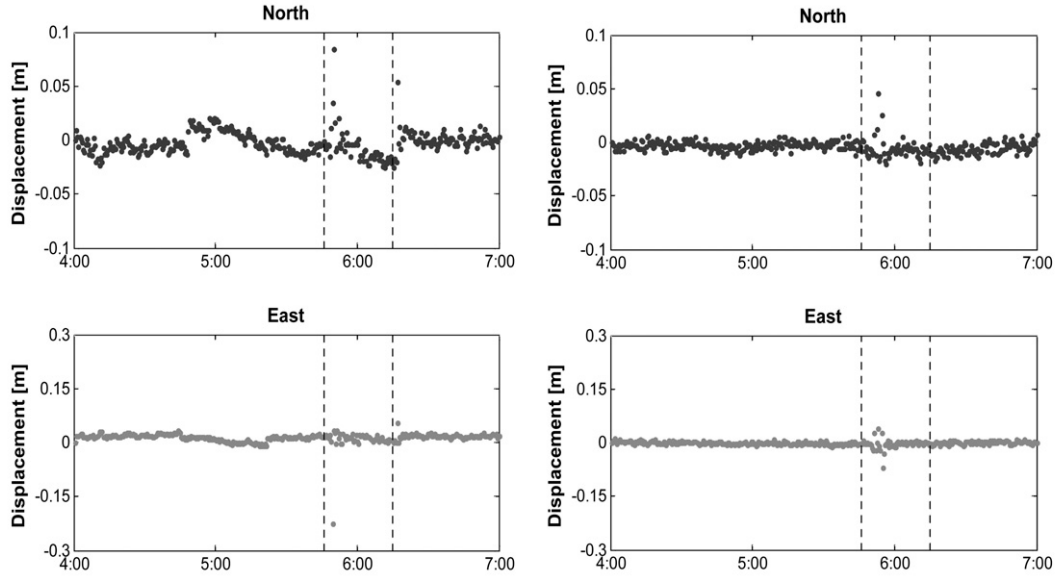


그림 11. TSK2 관측소 위치

그림 12는 TSK2 관측소와 우리나라 국가 기준점으로 사용되는 수원(SUWN) 관측소의 이동측위 결과를 지역평면좌표계로 변환하여 표현한 것이다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 두 관측소의 이동측위 결과 지진 발생시각으로부터 약간의 시간 경과 후 남-북 방향과 동-서 방향의 갑작스러운 변위가 확인된다. 또한 6시 17분 경 TSK2 관측소에서 한 번의 변위가 또 발생 하는데 이것은 6시 15분경 발생한 규모 7.9의 여진에 의한 영향으로 추정된다. 반면 국내 관측소의 결과에서는 해당 변위가 확인되지 않으며, 이것은 여진의 규모가 비교적 작아 한반도까지 영향을 미치지 못한 것으로 생각된다. 한편 지진 발생 전 TSK2 관측소의 이동측위 결과를 살펴보면 일관성 없이 수준에서 좌표가 결정된 것을 확인할 수 있는데 이것은 지진의 전조현상으로 불안정한 지각의 상태가 반영된 보인다. 따라서 GPS 기술을 이용한 지진 모니터링을 통해 지진을 미리 예측하고 피해를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

앞서 언급한 지진발생 시각과 좌표변동 확인 시각 사이에 발생한 시간지연은 진앙으로부터 관측소까지 지진파가 도달하는 시간과 관련이 있을 것으로 예상되었으며, 이를 확인하기 위해 거리에 따른 지연시간 분석을 시도하였다. 지연시간 계산을 위하여 이동측위 결과를 바탕으로 1차 함수 접합(fitting)을 수행하여 이상값(outlier)을 탐지하였으며, 이상값 탐지시각과 지진 발생시각 사이의 시간지



(a)TSK2 관측소 **(b)SUWN** 관측소

그림 12. 이동측위 결과

연을 계산하였다(그림 13). 그래프를 보면 거리가 멀어짐에 따라 지연시간이 증가함을 확인할 수 있으며, 거리와 지연시간사이의 상관계수 역시 0.87로 비교적 높은 양의 상관성을 보였다. 이러한 경향은 그림 13와 같이 1차 방정식으로 표현이 가능하며, 이때 직선의 기울기를 통해 3.4km/s로 지진파의 속도를 추정할 수 있다. 일반적으로 지진파의 속도는 3~4km/s로 알려져 있으므로 이와 비교할 때 직선의 기울기를 통해 추정된 지진파의 속도가 상당히 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 이를 통해 이동측위 결과에서 확인되는 지진 발생 시각과 좌표변동 사이의 시간지연은 진앙으로부터 관측소까지 지진파의 도달시간으로 판단된다.

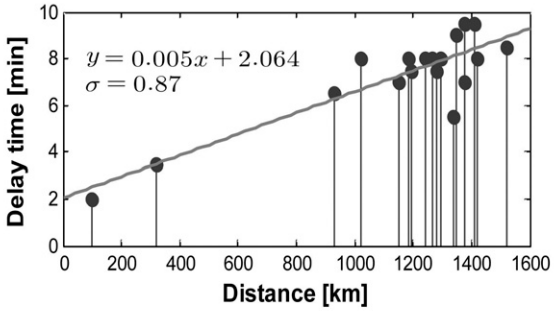


그림 13. 진앙으로부터 거리와 지연시간

4. 결 론

2011년 3월 11일 센다이 일본 동북부 태평양 연안지역에서 규모 9.0의 대형 지진이 발생하였으며, 일본뿐만 아니라 한반도 역시 지진의 영향권에 들었을 가능성이 제기되고 있다. 이에 따라 본 논문에서는 지진 발생 전 · 후 수집된 GPS 관측데이터를 이용하여 한반도 지각의 변화를 확인하였다. Bernese GPS Software V5.0을 사용하여 자료처리한 결과는 다음과 같다.

(1) 도호쿠 지진 이후 최대 5.59cm의 변위가 한반도에서 발생하였으며, 평균적으로 남-북 방향으로 0.21cm, 동-서 방향으로 2.75cm, 그리고 수직 방향으로 0.37cm 이동하였다. 이것은 한반도의 연간 이동량으로 알려진 3cm/yr와 비슷한 수준이며, 따라서 이번 지진으로 인해 한반도의 연간 이동량에 해당하는 변위가 하루 만에 발생하였다고 볼 수 있다.

(2) 각 관측소의 좌표 변동량은 진앙과의 거리와 멀어질수록 감소하는 경향을 보인다. 특히 동-서 방향의 경우 좌표 변동량과 거리의 상관계수가 -0.96으로 다른 성분에 비해 상당히 높은 음의 상관성을 보인다.

(3) 기선해석 결과 중 수직방향의 경우 진앙으로 부터의 거리가 멀어질수록 변동량이 증가하는 경향을 보였

으며, 이러한 경향은 진앙 주변의 하향 이동이 지각의 반발을 초래했기 때문으로 변위의 크기는 진원으로부터 관측소사이의 거리에 비례한다.

(4) 이동측위를 통해 지진발생 당시의 움직임을 확인할 수 있었으며, 지진 이후 발생한 규모 7.9의 여진 역시 확인이 가능하였다. 또한 지진발생 시각과 이동측위의 결과 좌표 변동 확인 시각 사이에 약간의 시간지연이 있었으며, 이것은 지진파의 도달시간으로 볼 수 있다.

이러한 결과로 미루어볼 때 한반도가 도호쿠 지진의 영향권에 들었으며, 지진으로 인하여 평균 2~3cm 수준으로 동쪽으로 이동한 것을 알 수 있다. 또한 각 관측소의 좌표변동은 진앙과의 거리 따라 크기가 다르게 나타났으며, 이로 인해 한반도 지각의 뒤틀림이 발생했다고 볼 수 있다. 따라서 도호쿠 지진 이후 한반도 지각의 좌표변동에 대한 장기적인 연구가 필요할 것으로 생각되며, 향후 지속적인 모니터링을 통해 국내에서 운영 중인 GPS 상시관측소의 정밀 좌표 및 지각의 이동속도를 산출해야 할 것으로 판단된다. 또한 일본열도는 크게 4개의 판이 서로 접해 있는 경계부에 위치하므로, 본 연구의 결과를 바탕으로 2011 도호쿠 대지진에 의한 지각의 영향을 총체적으로 분석하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

박관동 등 (2007), 한반도 지각변동 연구, 건설교통부 국토지리정보원, pp. 20-32.

박준규, 윤희천 (2011), 자연재난 관리를 위한 GPS 기반의 지진재해 분석, **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제 29권, 제 3호, pp. 311-318.

이원춘 (2006), GPS를 이용한 한반도 지역의 지각변동 벡터 추정에 관한 연구, 석사학위 논문, 성균관대학교.

전재한, 권재현, 이지선 (2008), 시뮬레이션을 통한 GPS 오차의 영향 분석, **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제 26권, 제 4호, pp. 397-405.

지헌철 (2008), 한반도 주변 지진발생 원인과 대책, 도시문제, 제 43권, 제 478호, 대한지방행정공제회, pp. 26-36.

한국천문연구원 (2011), 일본 대지진에 의한 한반도 움직임 포착, http://www.kasi.re.kr.

황진상, 윤홍식, 이동하, 정태준, 서용철 (2011), 일본 Tohoku-Oki 대지진으로 인한 한국 및 아시아 지역 상시관측소의 위치변동량 분석, **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제 14권, 제 4호, pp. 137-149.

Freymueller, J. (2011), Predicted displacements for Japan earthquake, IGS(International GNSS Service), IGSMAIL-6359, http://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2011/006351.html.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collines, J. (2001), Global Positioning System: Theory and Practice, Springer-Verlag Wien, New York, pp. 113-115.

Komaki, K. (1993), Horizontal Crustal Movement by Geodetic Measurements, Journal of the Geodetic Society of Japan, Vol. 39, No. 4, pp. 387-410.

(접수일 2012. 02. 01, 심사일 2012. 02. 17, 심사완료일 2012. 02. 26)