

# 동아시아지역의 GNSS CORS 지구관측 네트워크(EAREF) 구성에 관한 연구

## Configuration of GNSS CORS Network(EAREF) for Earth Observations in the East-Asia Region

이영진<sup>1)</sup> · 정광호<sup>2)</sup> · 이명준<sup>3)</sup>

Lee, Young-Jin · Jung, Kwang-Ho · Lee, Myeong-Jun

### Abstract

This paper is designed to put forth a proposal for configuration of an optimized observation network based on GNSS CORS with a view to continued monitoring of crustal deformation in the East-Asian region. For this purpose, a comprehensive analysis of the results of the testing of various forms of GNSS CORS observation network tentatively constructed based on the Asia-Pacific IGS station has confirmed that geometrically arranged minimum five and ten or more reference points and an EAREF, constructed with a baseline length no longer than 2,500km, can produce an optimum outcome. And an EAREF-applied analysis on the effects of the Great Eastern Japan Earthquake of March 2011 shows that there were conspicuous positional movements in Japan and Korea while there was no significant movement in other regions.

Keywords : East-Asia Region, GNSS CORS, Crustal Movement, Observation Network, Reference Point

### 초 록

본 연구에서는 동아시아지역의 지각변동 경향을 지속적으로 모니터링하기 위하여 GNSS CORS 기반의 최적 관측네트워크 구성방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 아시아-태평양지역 IGS점을 기초로 다양한 형태의 GNSS CORS관측망을 시험적으로 구성하고 테스트한 결과를 종합적으로 분석한 바, 최소 5점 또는 10점 이상의 기지점을 사용하여 기하학적으로 균등하게 배치하고 2,500km 이내의 기선장으로 구성하는 동아시아지역 관측네트워크(EAREF)가 최적의 결과를 도출할 수 있었다. 그리고, 제시된 동아시아지역 관측네트워크를 적용하여 2011년 3월 동일본 대지진의 발생에 따른 위치변동을 해석한 결과 일본과 한국에서는 명백한 좌표이동이 발생한 것으로 나타났으나, 그 외 지역에서는 명백한 이동은 없다는 것을 보여주고 있다.

핵심어 : 동아시아지역, GNSS CORS, 지각변동, 관측네트워크, 기지점

## 1. 서 론

자연재해 중에서 지진은 지구 내부의 지각변동이 생겨 그 충격으로 생긴 지진파가 지표면까지 전해져 지반을 진동시키는 것으로 탄성에너지원으로부터 지진파가 전파되면서 일으키는 지구의 진동이라 정의될 수 있다. 지진

의 직접적인 원인이 되는 암석권은 유라시아판, 태평양판, 북미판 등 10여 개로 이루어져 있으며, 이 암석권들이 서로 부딪히거나 밀거나 포개지면서 매년 수 cm 정도의 속도로 점성이 있는 맨틀 위를 제각기 이동하고 있다.

동아시아지역은 다수의 거대 지각판들의 경계부에 위치하여 지구 전체에서 가장 왕성한 지각판 활동이 발생하

1) 정회원 · 경일대학교 건설공학부 교수(E-mail:yjlee@kiu.ac.kr)  
2) 교신저자 · 정회원 · 경일대학교 건설공학부 초빙교수(E-mail:khjeong@kiu.ac.kr)  
3) 경일대학교 건설공학부 석사과정(E-mail:wmsl2558@nate.com)

는 유라시아판에 속하거나 영향권에 있으며, 실제로 최근에도 지진, 화산, 쓰나미 등 재해가 빈번히 발생하고 있는 상황이다. 따라서 동아시아지역에서 발생하는 피해를 줄이기 위한 대책으로서 동아시아 지역의 지각변동 경향을 모니터링할 필요가 있다.

지구관측시스템(GEOSS, Global Earth Observation System of Systems)은 대기, 해양, 육지, 생태계 등 모든 지구시스템에 대한 현장관측, 항공관측, 우주기반관측을 망라하는 통합시스템으로서 지구정상회의(GEO)의 결의에 따라 운영하고 있으며, 유럽연합(EU)에서는 지구환경을 모니터링하고 안전을 지원하는 프로그램으로서 육지, 해양, 대기, 비상사태, 안보분야의 서비스를 위해 GMES(Global Monitoring for Environment and Security)를 운영하고 있다. 이들은 모두 우주기반의 지구관측위성 데이터를 기반으로 하고 있으나 국제측지학회(IG)에서는 지구시스템을 모니터링하기 위한 통합측지기반의 지구관측시스템인 GGEOSS(the Global Geodetic Earth Observing System)를 추진하고 있다.

동아시아 지역의 지각변동 경향을 모니터링 하기 위해서는 국제기구인 IGS(International GNSS Services) 상시관측점과 독자적인 GNSS상시관측망의 위치변위량 산출을 통해 지각판의 움직임을 지속적으로 모니터링 하는 방법이 권고될 수 있다. 이를 위해서는 위성기준점 데이터처리를 통해 정확한 지각변동량을 산출할 수 있도록 최적의 GNSS CORS관측망(GNSS Continuously Operating Reference System Network)을 구축하고, 그 관리기법과 초고정밀 데이터처리의 경험적 기법을 개발하고, 지각변동 및 공간위치의 관측기반을 확보하여 장기적으로 동아시아지역의 대륙 공간 정보 기반(RSDI, Regional Spatial Data Infrastructure)의 구축을 위한 토대를 마련할 필요가 있다.

국제측지학회(International Association of Geodesy)의 IGS에서는 현재 세계 각국에 약 360여 점의 IGS관측점을 설치하여 운영하고 있으며 정밀한 위치정보 계산, 위성궤도력의 계산 및 제공 등을 서비스하고 있다(Park et al., 2004; 박준규 등, 2010; IGS, 2011).

GNSS CORS 네트워크를 이용하여 광범위한 대륙의 지각판 모니터링 시스템을 구축한 대표적인 예는 EUREF(European Reference Frame), PCGIAP(Permanent Committee on GIS Infrastructure for the Asia and Pacific Region), APREF(Asia-Pacific Reference Frame) 등이 있다.

국제측지학회의 측지계분과회의 산하에 유럽측지계를 담당하는 EUREF가 세부분과위원회로 구성되어 있으며,

EUREF는 3차원 및 4차원 위치결정, 지구역학, 정밀항법과 공간정보의 구축에 필요로 하는 유럽의 다양한 국가들의 핵심 측지인프라인 유럽측지계(EUREF)의 정의, 구현 및 유지와 관련된 연구를 수행 중에 있다. EUREF는 GNSS CORS로 이루어진 EPN(European Permanent Tracking Network)은 지각 및 해수면 변동, 우주기상 및 수치기상에 보 등 광범위한 과학기술 연구에 활용되고 있다(EUREF, 2011).

아시아-태평양의 대륙측지계 구현을 위하여 1994년 5월 중국 북경에서 개최된 UNRCC-AP(United Nations Regional Cartographic Conference for Asia and the Pacific)에서 각국이 측량 및 지도제작 기관으로 구성된 PCGIAP의 설립을 결의한 후, 1996년 호주 시드니에서 개최된 PCGIAP의 제2차 총회에서 WG3에 APRGP(Asia Pacific Regional Geodetic Project)를 설치하고 1997년부터 우주측지기술 통합에 의한 아시아-태평양지역 고정밀 측지계 구현과 ITRF(International Terrestrial Reference Frame)의 고밀도화를 추진하였다. 2009년 10월 태국 방콕에서 개최된 UNRCC-AP에서 아시아-태평양지역 대륙측지계(APREF)의 구현을 결의하였다.

APREF는 GNSS 관측데이터의 통합 관리와 처리를 통해 균질하고 접근성이 높은 고정밀 광역측지계를 구현하고 이를 유지·관리해 나가는 것을 목적으로 하고 있다. APREF는 아시아-태평양지역 GNSS 상시관측망 데이터의 공유와 측지기준점에 대한 공신력 있는 좌표 및 속도 벡터 계산을 위한 기술적 기반을 확보하는 것을 단기목표로 설정하고, 향후 EUREF와 같이 IGS와 연계하여 관측망을 운영하여 ITRF 구축과 갱신에 그 역할을 확대하고 지각변동 속도벡터 모델 개발과 이 지역에서 대륙측지계를 유지·관리해 나가는 것을 장기목표로 하고 있다(APREF, 2011).

국내에서는 동북아시아 및 한반도 주변의 국부적인 지역에 대한 지각변동량 추정(박필호 등, 2000; 박준규 등, 2010), GPS데이터의 처리결과와 정확도 향상을 위한 데이터처리 개선방향에 대한 연구(이영진, 1993; 윤홍식, 2000; 최운수 등, 2003; 한덕희 등, 2009)는 다수 발표된 바 있었으나, 동아시아지역을 대상으로 지각판 모니터링 및 공간정보 기반 구축방안을 제시하기 위해 다양한 형태의 측지망 구성 및 데이터처리 실험을 통한 GNSS CORS네트워크의 구성방안의 도출이 필요한 실정이다. 이는 IAG 또는 PCGIAP와의 협력과 장기적인 학술 연구를 위해서도 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 동아시아지역 지각변동 경향의 지속적인 모니터링과 공간정보기반 구축을 위한 기초단계로서 GNSS CORS를 활용한 최적 관측네트워크 구성방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 다양한 형태의 GNSS CORS망 데이터셋을 구축하여 데이터처리를 실시하고 산출된 결과를 종합적으로 분석하였다. 또한, 본 연구에서 도출된 동아시아지역의 GNSS CORS망(EAREF)을 2011년 3월 동일본 대지진에 시험적용하였다.

## 2. 동아시아지역 지각변동 관측망 구성방안

### 2.1 동아시아지역 IGS 데이터

IGS관측점은 IGS망의 구성과 성과산출의 기반이 되는 약 120여 개의 골격 IGS관측점(Reference Frame Site)와 나머지 일반 IGS관측점 등 총 360여개로 전 세계에 분포되어 있다. IGS는 IAG가 주도하고 세계 각국의 200 여개의 측지 및 지구물리를 담당하고 있는 국가기관이 참여하고 있는 비영리 국제기구로 GPS를 활용한 초고정밀 측지측량 및 지구물리 연구를 위한 다양한 서비스와 지원을 담당하고 있다.

본 연구에서는 최적의 동아시아지역 GNSS CORS 네트워크 구축을 위한 다양한 실험과 분석, 관측범위에 따른 정확도 분석을 위해 전체 360여개 IGS관측점 중에서 중국, 몽골, 한반도, 일본 등 동아시아 지역과 오세아니아 지역의 IGS관측점을 사용하였다(<http://www.igs.org>).

또한, 관측점 사이의 거리는 수백 km에서 수천 km 이상의 초장기선으로 위성궤도와 전리층 영향에 의한 오차를 최소화하기 위해서는 관측데이터 뿐만 아니라 CODE와 IGS에서 제공하는 관련 부가(보정) 데이터를 사용해야 한다.

광역적(세계)전리층모델(Global Ionospheric Model)은 QIF(Quasi Ionosphere-Free)기법에 의한 초장기선의 미지정수 결정에서 전리층 영향을 최소화하기 위해 사용되며, 의사거리 코드변위(Code Bias)는 이중차분에 의해 완벽히 소거되지 않은 수신기의 시간오차를 축소하기 위해서 필요한 SPP(Single Point Positioning)에 의한 전처리 단계에 사용된다.

정밀궤도력은 GPS 위성에 대한 좌표로 이루어진 정밀 궤도력에 의해 위성궤도 요소를 계산하고, 궤도방정식을 통해 신호의 관측순간의 고정밀 위치의 재계산에 필요하다. 또한 위성의 시간오차 계산과 SPP에 의한 전처리에 사용된다. 지구 회전요소(Earth Rotation Parameter)는 지구좌표계에 대한 위성의 위치인 정밀궤도력을 관성좌표계에

대해 나타내기 위한 좌표변환에 사용된다. 그리고 추가적으로 초장기선의 데이터를 처리할 경우 조석부하에 의한 영향을 최소화하기 위해 각 위성기준점의 조석부하 데이터를 확보하였다(<http://oso.chalmers.se/~loading>).

### 2.2 데이터 처리절차와 방법

본 연구에서는 GNSS 데이터처리를 위해 스위스 베른 대학에서 개발한 초고정밀 학술용 데이터처리 소프트웨어인 BERNESE V5.0을 사용하였으며, BPE(Bernese Processing Engine)로 펄스크립트(perl script)에 의해 모든 데이터 처리과정의 자동화가 가능하다. 본 연구에서는 지각변동 속도벡터에 의한 관측일의 초기좌표 계산, IGS 정밀 궤도력에 의한 위성의 좌표 재계산 및 위성 시계 오차 계산, 단독절대측위에 의한 수신기 시각 동기화, 미지정수 결정을 위한 안테나 초기좌표 추정 및 대류권 지연량 추정, QIF 알고리즘에 의한 반송파 미지정수 결정, IGS reference 관측점에 대한 헬머트 변환 계수 제약, 최종 조정계산을 통한 관측점좌표 추정 및 정규방정식 저장 등의 절차로일일 관측데이터를 처리하였다(Dach et al., 2007; 정광호 등, 2011).

일간해 데이터를 처리한 이후 각각의 관측데이터를 독립적으로 고려하여 우선 해를 구한 후 모든 정규방정식을 하나로 결합하여 공통의 미지벡터를 추정하는 방식의 순차적 최소제곱법(sequential least squares)을 통해 정규방정식의 누적에 의한 누적해를 추정하는 방안을 사용하였다(국토지리정보원, 2010; 이영진 등, 2011b; Lee, 2012; 정광호 등, 2010).

GPS 정지 상대측량에서 수신기 위치의 추정을 위하여 관측데이터와 미지벡터 사이의 관계인 식(1)의 함수모형과 관측데이터의 불확실성(정밀도)을 나타내는 VCV행렬( $Q$ )인 통계모형을 구성한 후에 최소제곱법을 적용한다(백은기 등, 1991; Cross, 1984; Rizos, 1996).

$$L + V = AX \tag{1}$$

여기서,  $L$ 은 관측벡터,  $A$ 는 계수행렬,  $X$ 는 미지벡터,  $V$ 는 잔차벡터이다.

미지벡터를 추정하기 위한 정규방정식은 식(2)과 같이 구성되며 수신기 추정 좌표와 그것의 VCV행렬인 식(3)과 식(4)에 의해 계산된다.

$$(A^T P A) \hat{X} = (A^T P L) \tag{2}$$

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (3)$$

$$Q_{\hat{X}} = (A^T P A)^{-1} \quad (4)$$

식(2)의 2개 이상의 정규방정식을 누적하여 통합 추정해를 구하기 위해서는 순차적 최소제곱 추정법을 사용한다. sequential 최소제곱법에 의한 추정 절차는 각각의 관측데이터를 독립적으로 고려하여 우선 해를 구한 후 모든 정규방정식을 하나로 결합하여 공통의 미지벡터를 추정한다. 편이를 위하여 다음과 같은 2개의 함수모델과 이에 대한 통계모델을 고려 할 때 식(5)와 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 식(7)의 정규방정식의 추정해와 VCV행렬을 식(3)과 식(4)에 의해 정규방정식 누적에 의한 GPS 수신기 좌표를 계산 할 수 있다.

$$L_1 + V_1 = A_1 X_1, Q(L_1) = \sigma_1^2 Q_{11} \quad (5)$$

$$L_2 + V_2 = A_2 X_2, Q(L_2) = \sigma_2^2 Q_{12} \quad (6)$$

$$[I^T, I^T] \begin{bmatrix} \Sigma_1^{-1} & 0 \\ 0 & \Sigma_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} \hat{X}_c = [I^T, I^T] \begin{bmatrix} \Sigma_1^{-1} & 0 \\ 0 & \Sigma_2^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{X}_1 \\ \hat{X}_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3. 동아시아지역 GNSS 관측네트워크 최적망 구성시험

#### 3.1 시험방안 및 데이터셋 구축

GNSS 관측네트워크의 구성방안을 도출하기 위하여, 망조정법 또는 데이터 확보방안이 우선적으로 고려되어야 한다. 망조정법으로는 기지점과의 상대측위에 의한 제약(constraints)조정법이 가장 적절한 방법이 될 수 있다. 제약조정방식은 기지점의 정보를 기반으로 미지점의 결과를 산출하는 상대측위방식이며, 상대측위방식으로 미지점의 결과를 산출하기 위해서는 적절한 기지점의 사용여부가 가장 우선적으로 고려되어야 한다. 제약조정법은 기지점의 분산-공분산행렬(variance-covariance(VCV) matrix)을 사용하기 때문에 기지점의 오차가 미지점의 결과에 전파되어 누적될 우려가 적으며, 헬머트 변환이 제공되는 특정 데이터처리 소프트웨어에서는 기지점의 사전 입력된 고시좌표와 데이터처리 후 산출된 좌표에서 지진, 관측소 위치변동 등으로 일정 수치 이상의 차이가 발생하게 되면 자동적으로 기지점의 사용에서 제외된다. 그리고 최적의 GNSS CORS망을 구축하기 위해서는 기지점의 사용점수, 미지점과 기지점간의 기하학적 거리, 그리고 미지점들 주변에 분포되는 기지점의 지리학적 분포형태, 관측

범위 등을 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 다양한 데이터 셋을 구축하여 데이터처리를 실시하고 적절한 분석을 통해 최적의 GNSS 네트워크를 구축하기 위한 방안을 도출하고자 실험분석하였다. 이를 위해 다음과 같이 다양한 경우별 데이터셋을 구축하여 데이터를 처리 및 결과분석을 하였다.

① 기지점의 사용점수에 따른 영향분석을 위해 기지점의 수를 3점, 5점, 10점, 15점으로 구성된 데이터셋을 각각 구축

② 기지점과의 거리에 따른 영향분석을 위해 기지점과의 거리가 1500km이하, 1500km-2500km, 2500km이상의 세 경우로 각각의 데이터셋을 구축

③ 기지점과의 배치에 따른 영향분석을 위해 기지점의 사용을 의도적으로 동쪽과 북쪽(EANO), 남쪽(SOUTH), 서쪽(WEST) 방향에 치우치도록 각각의 데이터셋을 구축

④ 관측범위에 따른 영향분석을 위해 East-North Asia(area A), East-Asia(area B), Asia-Oceania(area C) 등 서로 다른 관측범위에 따라 각각 데이터셋을 구축

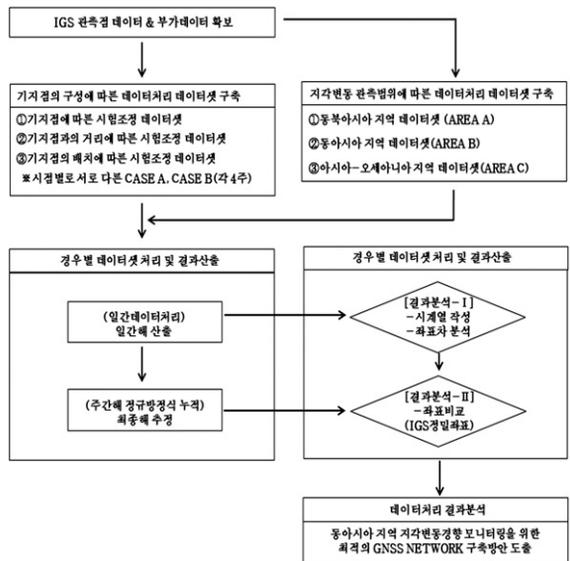


그림 1. 관측네트워크 시험조정 및 분석절차

실험을 위해 사용된 데이터는 동아시아 지역에 위치한 IGS관측점이며, 데이터 사용 기간은 2011년 1월 2일~2011년 1월 29일(4주)과 2011년 1월 30일~2011년 2월 26일(4주)이다. 보다 정확한 분석을 위해 처리시점에 대해 CASE A(2011.1월), CASE B(2011.2월)로 두 종류의 데이터 셋을 구축하고 처리된 결과를 분석하였다.

기지점의 역할을 하는 IGS관측점은 한반도 주변에 위치한 IGS관측점이 사용되었으며, 이 중 실험의 종류와 목적에 따라 선별된 IGS관측점을 기지점으로 사용하여 각각의 데이터셋을 구축하였고, 각각 데이터처리를 통해 결과를 산출하였다. 결과분석에 사용되는 미지점(adjusted points)은 한반도에 위치한 IGS 관측점(DAEJ, SUWN)을 사용하였다.

또한, 장기선에 의한 오차발생, 관측점 간의 기선연결에 의한 오차의 누적 등의 영향을 고려한 관측망의 구축을 위해 관측범위에 따른 정확도 분석을 위해 East-North ASIA(area A), East-ASIA(area B), ASIA-Oceania(area C)와 같이 데이터셋을 구축하고 데이터처리를 실시한 후 그 결과를 검토하였다.

데이터처리 결과로 산출된 ECEF(Earth-Centered Earth-Fixed Frame) 좌표계상의 3차원 직각좌표는 수평(2D, N, E) 좌표로 변환하여 결과를 분석하였으며, 결과분석은 각각의 데이터 셋에서 산출된 결과를 기반으로 좌표차 비교 및 시계열작성에 의한 경향분석, 반복재현성 평가, 그리고 IGS정밀좌표와의 비교 방법 등을 동시에 사용하였다.

좌표차 및 시계열분석은 각각의 경우별로 처리된 결과의 상호비교 및 경향분석을 위한 정확도 검토방법이고, 반복재현성 평가는 정밀도를 평가하기 위해 사용되었다. 그리고, IGS정밀좌표와의 비교는 결과(좌표)산출에 대한 절대정확도 평가를 위해 사용하였다.

### 3.2 기지점수에 따른 정확도 분석

IGS 관측점 연결에 의해 ITRF 좌표 산정을 위해서는 최소 3개 이상의 관측점과 연결이 필요하다(Altamini, 2002). 측지학적 추정 이론에 따르면 가급적 많은 관측점과 연결하는 경우 보다 정확하고 신뢰적인 결과의 확보가 가능하나 너무 많은 기준점을 데이터 처리에 사용하는 경우는 연산 시간에 부담이 있기 때문에 적절한 개수의 관측점의 선정이 중요하다(국토지리정보원, 2010).

본 실험에서는 데이터처리를 통해 신뢰성 있는 결과를 산출하기 위해서는 최소 몇 점의 기지점을 사용해야 하는지 결정하기 위해 기지점의 수를 3점, 5점, 10점, 15점으로 구성된 데이터셋을 각각 구축하여 처리하고, 각각의 경우에 대한 정확도를 검토하였다. 기지점의 수에 의한 영향만이 정확도 평가에 반영되도록 하기 위해 기지점의 사용점수가 감소하더라도 미지점과 기지점 간의 거리가 먼 지점을 배제하였고, 기지점의 배치도 모든 방향에 위치하도록 데이터 셋을 구축하였다.

기지점에 따른 처리결과 정확도 분석은 기지점이 많을수록 정확도가 높아진다는 가정을 적용하여 기지점 15점이상을 사용하였을 경우 가장 정확하다고 가정하고 이 결과를 기준으로 기지점 10점, 5점, 3점을 사용한 처리결과와 비교하였다.

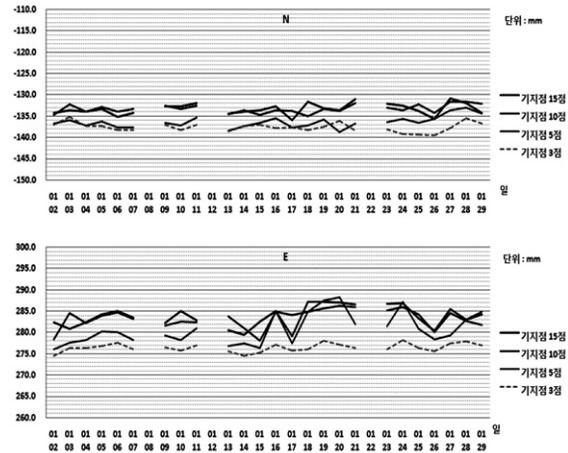


그림 2. 기지점의 수에 따른 일간해 시계열 분석

결과를 살펴보면, 그림 2와 같이 10점의 기지점을 사용하였을 경우 N방향과 E방향 모두에서 기지점 15점을 사용하였을 때와 일간해좌표차와 산출좌표의 경향에서 5mm 이내로 유사한 결과가 계산되었다. 반면, 기지점의 수를 5점, 3점을 사용하였을 경우 15점의 기지점을 사용하였을 경우와 비교할 때 5mm 이상의 차이가 발생하였고, E 방향의 경우 더욱 큰 편차가 발생하는 것을 알 수 있었다.

그리고, 일간해의 정밀도 및 산출된 좌표의 균질성을 평가하기 위해 일간해 추정좌표에 대한 반복재현성의 계산을 실시한 결과 그림 3과 같이 15점, 10점, 5점의 기지점을 사용하여 산출된 좌표의 반복재현성은 N방향과 E방향에서 모두 2mm 이내 수준으로 모두 비슷하게 계산되었으

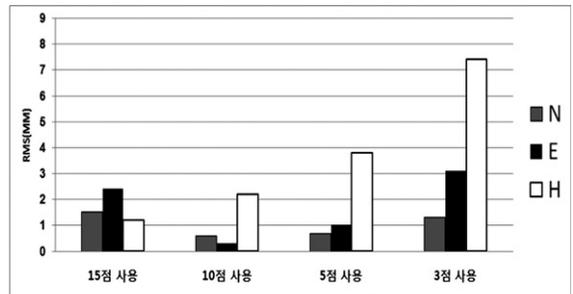


그림 3. 기지점의 수에 따른 일간해 좌표 반복재현성

나, 3점의 기지점을 사용한 경우에는 약 2배 이상의 크기로 계산되었다.

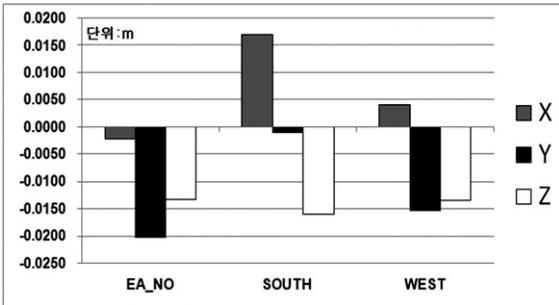


그림 4. 기지점의 수에 따른 누적해와 IGS 정밀좌표차

또한, 정규방정식 누적에 의해 추정된 누적해 좌표를 IGS분석센터에서 제공하는 IGS관측점의 정밀좌표와 비교한 결과를 살펴보면 그림 4와 같이 15점과 10점, 5점을 기지점으로 사용하여 산출된 누적해는 IGS정밀좌표와 약 1cm 수준의 좌표차가 발생하였지만, 3점의 기지점을 사용하여 산출된 누적해는 15점과 10점을 기지점으로 사용하여 산출된 누적해에 비해 상대적으로 IGS정밀좌표와 Y좌표 부분에서 20mm 이상의 큰 차이가 발생하였다.

그림 2와 그림 3은 각각 CASE A DAEJ의 산출된 일간해 좌표의 시계열 분석과 반복재현성을 나타내고 있고, 그림 4는 추정된 누적해와 IGS 정밀좌표(주간해)의 좌표차를 도시화 하고 있으며, CASE A SUWN, CASE B의 DAEJ, SUWN의 경우에도 CASE A DAEJ과 유사한 결과로 분석되었다.

따라서, 기지점의 사용점수는 5점 이상을 사용할 경우에 신뢰성 있는 미지점의 추정위치를 산출할 수 있는 것으로 판단되었다. 그러나, 기지점으로 사용되는 IGS관측점의 데이터누락 또는 관측점의 운영중단, 헬머트 변환 결과에 의해 사용된 기지점이 실제 데이터처리에서 제외되는 경우 등을 대비하여 최소 10점 이상의 기지점을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

### 3.3 기지점과의 거리에 따른 정확도 분석

두 지점간의 기선연결을 위한 관측데이터 처리에서는 기선장이 길어질수록 전리층오차, 대류권 오차, 위성궤도력 오차 등 기선장에 따른 오차의 영향이 증가하여 추정 결과의 정확도가 저하될 우려가 있다. 고정밀 학술용 초장기선 데이터 처리 소프트웨어와 전리층모델, 정밀궤도력 등 정밀도 향상을 위한 부가데이터를 사용하여 수 천

km의 기선장에서도 mm 수준으로 추정위치를 결정할 수 있는 것으로 알려져 있지만 수천 km 이상의 기선장은 정확도 저하를 유발할 수 있는 것을 의심할 필요가 있다(이영진, 1993).

국내 DAEJ 관측점을 기준으로 기지점과의 거리가 1500km이하, 1500km-2500km, 2500km이상의 세 종류로 데이터셋을 구축하여 처리하고 산출된 일간해를 기지점 15점을 사용하였을 경우 산출된 일간해 결과와 비교하였다. 기지점 15점을 사용하였을 경우 산출된 일간해 결과는 가장 양호한 결과를 산출할 수 있는 조건을 갖추었기 때문에 참값의 개념으로 사용하였다.

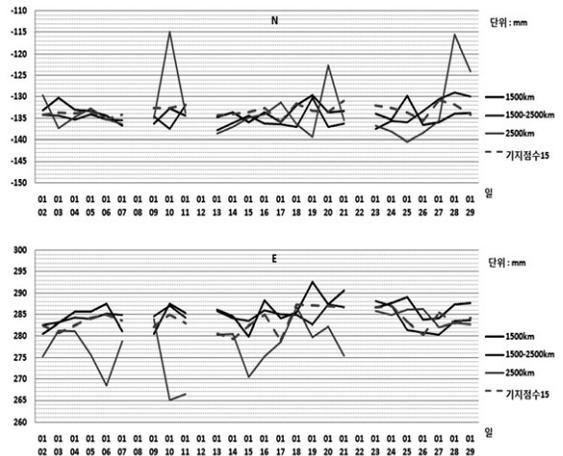


그림 5. 기지점과의 거리에 따른 일간해 시계열 분석

결과를 살펴보면 그림 5와 같이 기지점과의 거리가 가까운 1500km 이하와 1500km~2500km 경우에 비해 기지점과의 거리가 2500km 이상인 곳의 기지점을 사용하였을 경우에는 시계열의 차이가 10mm 이상으로 다소 크게 달라지는 경향으로 보아 기선장이 일정거리 이상으로 증가하면 정확도가 저하되는 것을 알 수 있었다.

그리고, 일간해 좌표의 반복재현성 계산 결과를 살펴보면 그림 6과 같이 기지점과의 거리가 1500km이하와 1500-2500km이상인 기지점을 사용하여 산출된 좌표의 반복재현성은 N방향과 E방향에서 모두 2mm 이내 수준으로 모두 비슷하게 계산되었지만, 2500km 사용한 경우에는 1cm 이상의 편차가 계산되었다. 또한, 정규방정식 누적에 의해 추정된 누적해 좌표 결과를 IGS분석센터에서 제공하는 IGS관측점의 정밀좌표와 비교하였다. 이 결과를 살펴보면 그림 7과 같이 기지점과의 거리가 1500km이하인 경우와 1500-2500km의 기지점을 사용하여 산출된 누적해

는 IGS정밀좌표와 약 1cm 수준의 좌표차가 발생하였지만, 2500km이상인 기지점을 사용하여 산출된 누적해는 상대적으로 IGS정밀좌표와 20mm 이상의 큰 차이가 발생하였다.

따라서, 1500km 미만의 기지점을 사용할 경우 가장 정확한 결과를 도출할 수 있는 것으로 나타났으나, 1500km 이내에 사용 가능한 미지점의 수가 부족할 경우 약 2500km 이내의 기지점을 사용하는 것은 가능하다고 판단된다. 그러나 가급적 2500km 이상의 기지점은 사용하지 않는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

그림 5와 그림 6은 각각 CASE A DAEJ의 산출된 일간해 좌표의 시계열 분석과 반복재현성을 나타내고 있으며, 그림 7은 추정된 누적해와 IGS 정밀좌표(주간해)의 좌표차를 도시화 하고 있으며, CASE A SUWN, CASE B의 DAEJ, SUWN의 경우에도 CASE A DAEJ과 유사한 결과로 분석되었다.

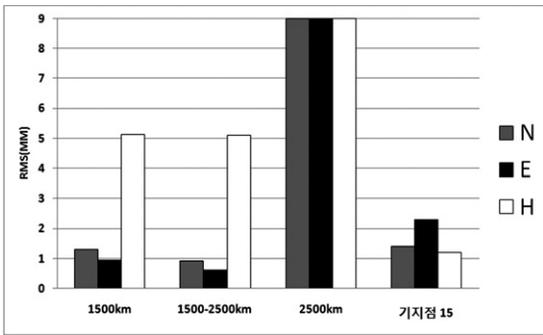


그림 6. 기지점과의 거리에 따른 일간해 좌표 반복재현성

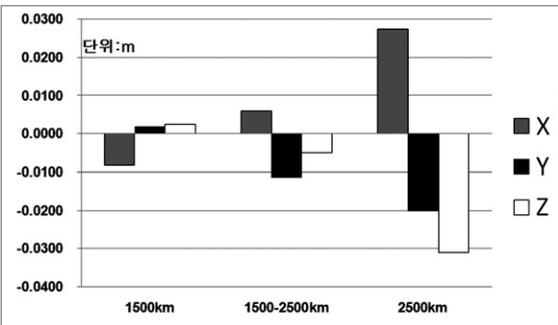


그림 7. 기지점과의 거리에 따른 누적해와 IGS 정밀좌표차

### 3.4 기지점의 기하학적 배치에 따른 정확도 분석

상대측위 방식으로 미지점의 결과를 산출할 때 기지점의 수나 정밀도 등급 등을 동일하게 사용하여도 기지점의

기하학적인 배치에 따라서 처리결과와 정확도가 달라질 수 있다.

국내 SUWN 관측점을 기준으로 IGS점들의 기하학적 배치에 따른 처리결과와 정확도를 검토하기 위하여 동쪽과 북쪽을 EANO, 남쪽을 SOUTH, 서쪽을 WEST로 나누어 처리하였으며, 이 실험에서도 역시 기지점 15점을 사용하였을 경우 산출된 결과와 비교하였다.

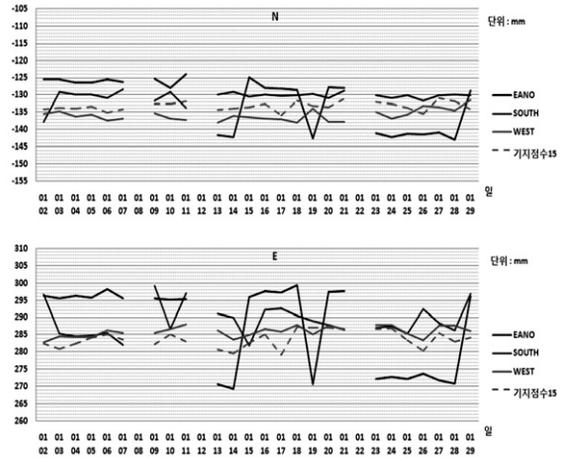


그림 8. 기지점의 배치에 따른 일간해 시계열 분석

일간해 결과를 분석하면 그림 8과 같이 SOUTH, WEST 방향으로 기지점을 배치하여 사용하였을 때와 기지점 15점을 사용하였을 때의 좌표차는 약 1cm이하, EA\_NO 방향으로 기지점을 배치하였을 경우의 좌표차는 약 2cm이상으로 EA\_NO 방향의 경우는 그래프의 기복이 심한 것으로 나타났다. 이 경우에도 기지점 15점을 사용하였을 경우 산출된 일간해 결과는 가장 양호한 결과를 산출할 수 있는 조건을 갖추었기 때문에 참값의 개념으로 사용하였다.

그리고, 일간해 반복재현성 결과를 살펴보면 그림 9와 같이 기지점의 배치에 따른 반복재현성의 경우 기지점을 EA\_NO방향으로 배치할 경우 N, E방향에서 그리고, SOUTH방향으로 배치할 경우 E, H방향에서의 5mm 이상으로 정밀도가 낮게 계산되었다.

또한, 정규방정식 누적이 의해 추정된 누적해 결과를 IGS분석센터에서 제공하는 IGS관측점의 정밀좌표와 비교한 결과를 살펴보면 그림 10과 같이 기지점의 배치에 따른 누적해는 일간해의 반복재현성 처리결과와 같이 CASE별, 그리고 특정 좌표성분에 따라 균질하지 못한 결과가 나타났다.

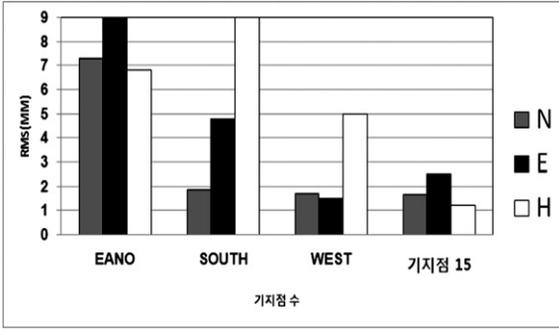


그림 9. 기지점의 배치에 따른 일간해 좌표 반복재현성

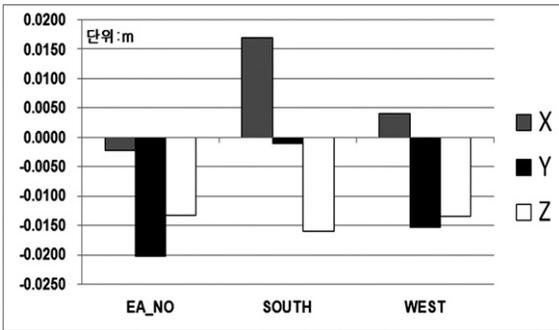


그림 10. 기지점의 배치에 따른 누적해와 IGS 정밀좌표차

그림 8과 그림 9는 각각 CASE A DAEJ의 산출된 일간해 좌표의 시계열 분석과 반복재현성을 나타내고 있으며, 그림 10은 추정된 누적해와 IGS 정밀좌표(주간해)의 좌표차를 도시화 하고 있으며, CASE A SUWN, CASE B의 DAEJ, SUWN의 경우에도 CASE A DAEJ과 유사한 결과로 분석되었다.

따라서, 이는 특정방향에 치중된 기지점을 사용할 경우 특정 좌표 성분(X,Y,Z) 또는 특정 시점에서 서로 다른 결과가 나타나는 등 균질한 정확도의 결과를 산출하는 것에 한계가 있는 것으로 판단되며, 가급적 모든 방향에 위치한 기지점을 사용하는 것이 최적의 결과를 도출할 수 있을 것으로 판단되었다.

### 3.5 관측범위에 따른 관측 네트워크 구성 시험

GNSS CORS망의 구성인 IGS관측점은 대륙의 경우 일정한 비율과 밀도로 설치 운영되지만, 해양이나 섬으로 이루어진 지역의 경우 관측점의 설치조건에 제약으로 인해 일부 지역에서는 다른 관측점과의 거리가 증가하게 된다.

이 경우에 GNSS CORS망의 구축(관측)범위가 증가할수록 관측점간의 기선장이가 증가하게 된다. 그리고, 관측

범위가 광범위할수록 관측점의 수가 증가하게 되며, 이 경우도 관측점간의 기선해석에 의한 연결기선이 증가하게 된다.

이에 따라 장기선에 의한 오차발생, 관측점 간의 기선연결에 의한 오차의 누적 등의 영향을 고려한 관측망의 구축을 위해 관측범위에 따라 산출결과의 정확도에 차이가 발생할 수 있다. 이러한 영향을 분석하기 위해 그림 11과 같이 East-North ASIA(area A), East-ASIA(area B), ASIA-Oceania(area C) 등 서로 다른 관측범위에 따라 각각 데이터셋을 구축하고 데이터처리를 실시한 후 그 결과를 검토하였다.

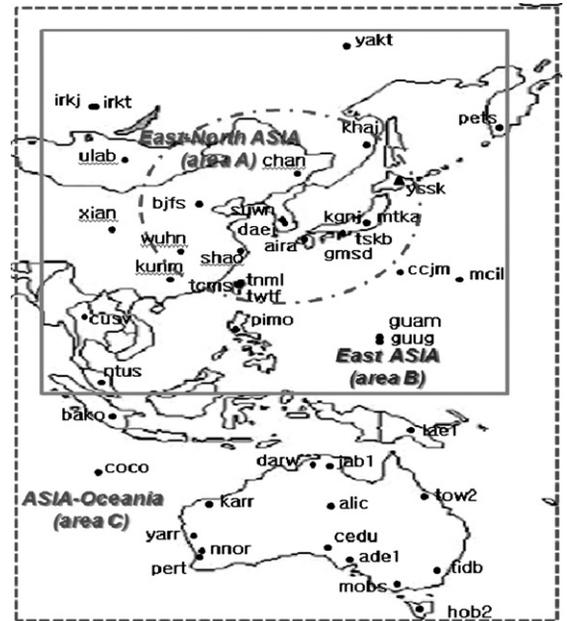


그림 11. 관측범위에 따른 GNSS ORS망의 구성

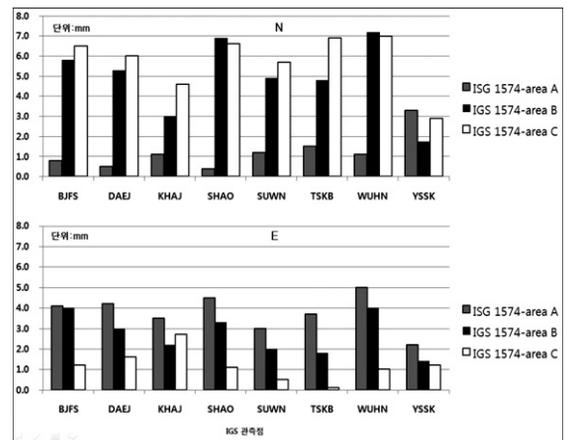


그림 12. 관측범위별 누적해와 IGS 정밀좌표 차이

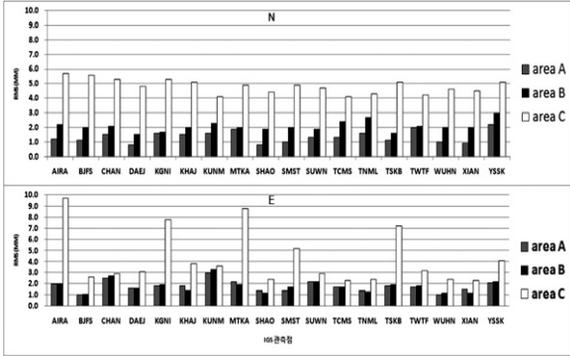


그림 13. 관측범위별 일간해 반복재현성 분석

그림 12와 같이 관측범위에 따라 각각 구축된 데이터 셋에서 산출된 누적해를 IGS정밀좌표와 비교한 결과를 살펴보면 모든 관측범위에서 전체적으로 약 5mm 이내의 좌표차가 발생하였고, IGS정밀좌표에 포함된 오차를 감안한다면 약 수 mm이내의 수준으로 좌표를 결정할 수 있는 것으로 판단되었다. 또한, 일간해의 데이터반복재현성 결과를 살펴보면 그림 13과 같이 관측범위가 가장 좁은 East-North ASIA(area A)가 가장 양호한 것으로 계산되었고, East-ASIA(area B)도 산출결과에 큰 무리는 없는 것으로 판단되었다.

따라서 IGS관측점으로 구성한 동아시아 네트워크의 구성을 통한 해석이 가능함을 보여주고 있다. 본 연구목적에서 구상하고 있는 동아시아지역 네트워크로서 적합할 수 있음을 알 수 있다.

그러나, 관측범위가 가장 광범위한 ASIA-Oceania(area C)는 정확도가 낮게 평가되었다. 특히 area C 관측망에서 AIRA, KGNU, MTKA, TSKB, SMST의 경우 E방향에서 RMS의 수치가 다소 큰 것으로 계산되었다. 따라서 오세아니아를 포함한 네트워크 해석에는 무리가 있음을 알 수 있다. 그러므로 오세아니아를 포함할 경우에는 PCGIAP에서 추진하고 있는 APREF를 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 동일본 대지진에 따른 관측네트워크의 적용

본 연구에서 도출된 동아시아지역 GNSS CORS 네트워크의 구성방안에 따라 구축된 네트워크의 적실성과 향후 활용을 위한 연계성을 점검하기 위해 IGS관측점의 좌표 변동량(위치변동량)을 시범적으로 계산하였다.

2011년 3월 11일 5시 46분경(UTC)에 동일본지역에서

규모 9.0의 대지진이 발생하였고, 일본의 일부 지역은 수평방향에서 최대 5m 이상의 지각이동량이 발생하였다고 발표하고 있다(국토지리정보원, 2011; Lee, 2012; 이영진 등, 2011a). 그러나 이 대지진의 영향으로 일본은 물론 한반도, 중국, 대만 등 유라시아판의 영향권에 있는 동아시아지역의 지각의 위치이동도 예상할 수 있는 등 검토가 필요하다.

데이터처리 지역은 그림 11의 area B에 해당하는 지역이며, 데이터 처리의 기간은 2011년 3월 11일 발생한 동일본 대지진 전후 각각 4주(총 8주, 약 56일)이다.

표 1의 결과를 살펴보면 동일본 대지진 전후 동아시아 지역 GNSS CORS망에 포함된 SUWN, DAEJ 등 한반도 지역은 동쪽방향으로 약 2.5cm~3.0cm의 위치변동량이 계산되었다. 일본의 경우 진앙지 인근에 위치한 MIZU는 남쪽방향으로 약 1.3m, 동쪽방향으로 약 2.5m의 지각이동량이 발생하였고, TSKB, USUD, MTKA 등은 남쪽방향으로 약 2.0cm~6.0cm, 동쪽방향으로 약 25cm~60cm의 지각이동량이 발생하는 것으로 계산되었다. 이는 한반도와 일본 지역은 동일본 대지진의 영향으로 좌표변동이 명백히 발생한 것으로 판단되었다.

BJFS, YAKT, CHAN, KHAJ, YSSK, PETS의 경우에는 진앙지 인근에 위치하고 있으나, 데이터처리 결과에서는 지진 전후 좌표변화량이 1cm 내외로 계산되어 유의미한 위치변동은 발생하지는 않은 것으로 판단되었다.

그 외 지역은 지진 전후의 좌표변화량이 거의 발생하지 않은 것으로 계산되어 지진에 의한 영향은 거의 받지 않은 것으로 파악되었다.

그림 14는 표 1의 결과 중 일본의 MIZU, USUD, MTKA와 한국의 SUWN, DAEJ 등 유의미한 변화가 있는 IGS관측점을 선별하여 주간좌표변화량에 대한 표현을 그래프(시계열)로 나타내고 있다.

본 연구에서는 IGS관측점 이외에 국가에서 운영중인 관측점을 포함하지 않았으나 앞으로 국부적인 영향이나 특성을 해석하기 위해서는 보다 많은 연구가 체계적이고 지속적으로 이루어져야 할 것이다. 향후 우리나라를 포함한 동아시아지역의 관측네트워크의 구축과 연구활동에 참여하고, 우리나라 위성기준점망(KORS)의 활용성 확대를 위해서는 국가적으로 APREF 프로젝트에 참여함과 동시에 독자적인 동아시아지역 측지계를 구현하는 전략이 필요하다. 이를 통해 동아시아지역에 대한 ITRF와 APREF의 고밀도화를 통한 고정밀 대륙(지역)측지계의 구축과 공간정보기반 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

표 1. 한반도 주변 IGS관측점의 좌표변화(주간해)

(단위:cm)

IGS점	BJFS		CHAN		GUAM		IRKT		KHAJ		KUNM	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
1623	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1624	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	0.2	-0.3	-0.2	-0.3	0.0	-0.3	-0.3	0.0
1625	0.2	0.1	0.1	0.1	0.3	-0.2	0.7	0.3	0.2	0.1	0.0	0.4
1626	-0.4	0.0	-0.5	0.0	0.4	-0.2	0.7	0.4	-0.3	-0.1	-0.5	0.4
지진발생												
1627	0.0	0.9	-0.8	1.9	0.4	-0.1	0.7	0.9	-1.1	0.9	0.1	0.3
1628	-0.7	1.0	-1.5	1.9	0.7	-0.1	0.7	1.1	-1.8	0.7	-0.6	0.5
1629	-0.8	1.2	-1.7	2.2	0.0	-0.1	0.4	1.2	-2.0	1.0	-0.8	0.5
1630	-0.4	0.9	-1.3	2.0	-0.2	-0.2	0.2	1.2	-1.6	0.7	-0.4	0.2
IGS점	LHAZ		PETS		PIMO		SHAO		TCMS		TNML	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
1623	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1624	-0.1	0.1	0.2	-0.3	0.0	-0.2	0.0	-0.2	0.0	0.0	-0.1	-0.1
1625	0.2	0.0	0.2	0.1	0.1	-0.4	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.2
1626	0.3	0.1	-0.3	-0.1	0.4	-0.3			-0.4	0.1	-0.4	0.1
지진발생												
1627	0.5	0.5	0.3	-0.1	0.3	-0.2			0.0	0.4	0.0	0.4
1628	0.5	0.7	-0.3	-0.6	0.4	-0.2	-0.3	0.6	-0.4	0.5	-0.4	0.4
1629	0.3	0.8	-0.4	-0.4	0.2	-0.2	-0.3	0.6	-0.5	0.6	-0.6	0.5
1630	0.2	1.0	0.0	-0.8	0.0	-0.3	0.1	0.5	-0.1	0.4	-0.1	0.3
IGS점	TWTF		ULAB		WUHN		XIAN		YAKT		YSSK	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
1623	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1624	-0.1	-0.3	0.0	0.1	0.0	-0.2	-0.1	-0.2	-0.2	-0.1	0.1	-0.2
1625	0.2	0.0	-0.4	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	-0.1	-0.2	0.2	0.1
1626	-0.4	-0.2	-0.3	0.0	-0.3	-0.1	-0.4	0.0	-0.1	-0.1	-0.3	0.0
지진발생												
1627	0.0	0.1	-0.6	-0.4	0.3	0.4	0.2	0.6	-0.2	0.2	-0.1	0.3
1628	-0.4	0.2	-0.6	-0.5	-0.4	0.5	-0.6	0.9	-0.3	0.3	-0.7	0.1
1629	-0.6	0.1	-0.4	-0.6	-0.6	0.7	-0.6	0.6	-0.3	0.3	-0.9	0.1
1630	-0.1	-0.3	-0.2	-0.7	-0.1	0.3	-0.3	0.7	-0.7	0.5	-0.5	-0.1
IGS점	DAEJ		SUWN		MIZU		TSKB		USUD		MTKA	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
1623	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1624	-0.2	-0.1	-0.2	-0.1	0.1	0.3	-0.2	-0.1			-0.1	-0.1
1625	0.1	0.0	0.1	0.0	-0.2	0.3	0.1	-0.1	-0.1	0.2	0.1	-0.1
1626	0.1	0.1	0.1	0.0	-0.2	0.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.3	-0.1
지진발생												
1627	0.4	2.7	0.3	2.9	132.8	2552					6.3	26.0
1628	0.4	2.9	0.2	2.8	133.4	2568	3.0	63.7	5.4	25.0	6.4	28.4
1629	0.1	3.0	0.0	3.1	134.2	2581			5.5	25.9	6.1	29.7
1630	-0.2	3.1	-0.2	3.2	134.9	2595	1.7	67.1	5.2	26.4	5.9	30.3

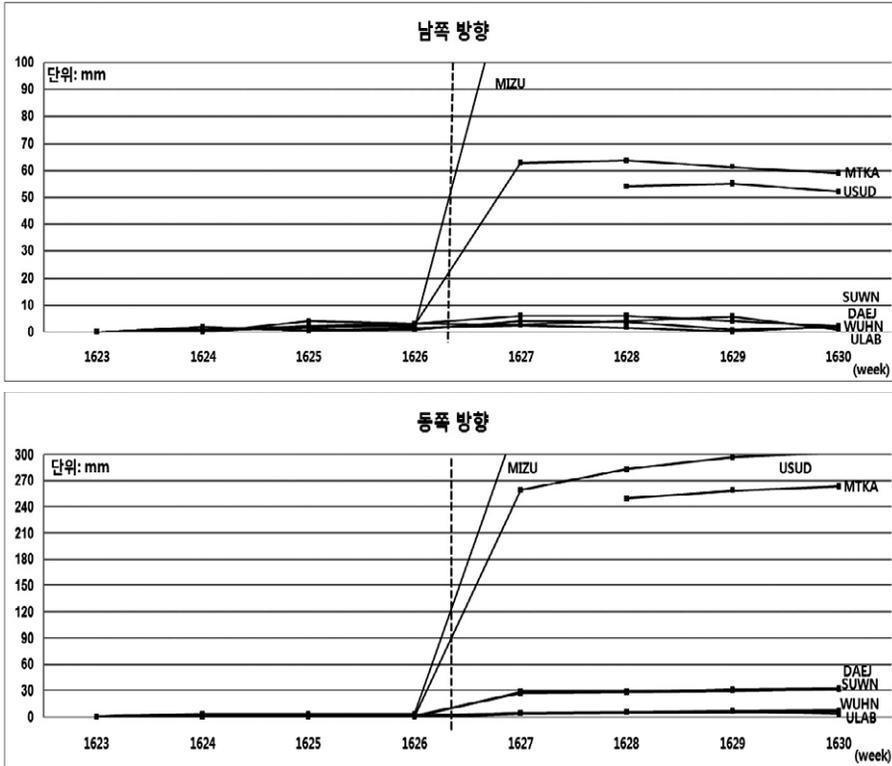


그림 14. 한반도 주변 IGS 관측점의 주간 좌표변화 시계열

## 5. 결론

본 연구에서는 GNSS CORS를 활용하여 동아시아지역의 지각변동 경향을 지속적으로 모니터링 하기 위한 최적의 관측네트워크 구축방안을 제안하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 다양한 형태의 GNSS CORS관측망을 구축하여 데이터처리를 실시하고 산출된 결과를 종합적으로 분석하였다.

연구 결과, 기지점의 구성은 최소 5점 이상을 사용할 경우 신뢰성 있는 미지점의 추정위치를 산출할 수 있는 것으로 판단되었다. 그러나, IGS관측점의 데이터누락, 관측점의 운영중단이나 헬머트 변환 결과에 의해 사용된 기지점이 실제 데이터처리에서 제외되는 경우 등을 대비하여 10점 이상의 기지점을 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.

미지점과 기지점간의 거리는 1,500km 미만의 기지점을 사용할 경우 가장 정확한 결과를 도출할 수 있는 것으로 나타났으나, 사용 가능한 미지점의 수가 부족할 경우 약 2,500km 이내의 기지점을 사용하는 것은 가능할 것으로

판단된다. 그리고, 기하학적으로 균등한 분포의 기지점 배치 등의 조건으로 구축된 관측망이 최적의 결과를 도출할 수 있는 것으로 확인되었다. 이들을 토대로 동아시아 지역 관측네트워크(EAREF)를 제안하였다.

본 연구에서 제안된 동아시아지역의 관측네트워크인 GNSS CORS망(EAREF)을 활용하여 2011년 3월 초대규모 동일본 대지진에 적용한 결과, 일본의 일부 지역은 동쪽 방향으로 약 25cm~ 최대 2.5m, 남한지역은 동쪽방향으로 약 2.5cm~3.0cm의 명백한 좌표변동이 발생한 것으로 나타났다, 그 외 지역에서는 유의미한 좌표변동이 발생하지 않은 것으로 나타났다.

향후 우리나라를 포함한 동아시아지역의 관측네트워크의 구축과 연구활동에 참여하고, 우리나라 위성기준망(KORS)의 활용성 확대를 위해서는 국가적으로 APREF 프로젝트에 참여함과 동시에 독자적인 동아시아 측지계를 구현하는 전략이 필요하다. 이를 통해 동아시아지역에 대한 ITRF와 APREF의 고밀도화를 통한 고정밀 대륙(지역)측지계의 구축과 공간정보기반 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2011-0013071).

## 참고문헌

국토해양부 국토지리정보원 (2010), 위성기준점 활용확대 및 지각변동 연구, 국토지리정보원.

국토해양부 국토지리정보원 (2011), 동일본 대지진에 따른 지각변동관측 해석기법 연구, 국토지리정보원

박필호, 안용원, 박종욱, 조정호, 임형철 (2000), GPS로 잰 한반도 주변의 지각운동 속도, 한국지구물리·물리탐사학회지, 한국지구물리·물리탐사학회, 제3권, 제3호, pp. 153-160.

박준규, 강준목 (2010). IGS자료에 의한 한반도 주변의 지각변동 특성해석, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제28권, 제6호, pp. 645-653.

백은기, 이영진(1991), 가중측점망 조정법의 적용에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제11권, 제4호, pp. 133-141.

이영진 (1993), GPS위성의 P코드/위상측정용 2주파수 수신기에 의한 정밀측위, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제13권, 제2호, pp. 219-228.

이영진, 정광호(2011a), 동일본 대지진에 따른 일본의 기준점 성과갱신 사례, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회.

이영진, 정광호, 이명준 (2011b), 지각변동관측을 위한 동아시아지역 GNSS CORS 네트워크의 구성시험, The 18th GNSS workshop 논문집, GNSS기술협의회, p. 67.

윤홍식 (2000), 지각변동 파라미터의 정밀계산을 위한 2차원 필터링 기법의 적용”, 한국측량학회지, 한국측량학회, Vol.18 No.1, pp. 75-83.

정광호, 이영진, 이흥규, 이명준 (2010), CORS 데이터처리에 의한 지각변동 벡터 산출 방안, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회.

정광호, 이흥규 (2011), GPS 측지망 조정을 통한 국가기준점 성과의 상시산정 체계에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 29권, 제 4호, pp. 367-380.

최윤수, 고준환, 이기도 (2003), GPS장기선 해석에 관한 기초연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제21권, 제2호, pp. 123-129.

한덕희, 윤희학, 박찬식 (2009), GNSS 반송파 위상을 이용한 정밀측위에서 미지정수 전파기, 한국항공우주학회지, 한국항공우주학회, 제37권, 제7호, pp. 678-684.

Altamini, Z. (2002), Discussion on How to Express a Regional GPS Solutions in the ITRF, *Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF)*, Ponta Degada. 5-8 June.

Cross, P.A. (1984), Advanced least squares applied to position fixing, *Working paper*, No.6. Department of Surveying, Polytechnic of East London, 205pp.

Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Mei, M. (2007), *Bernese GPS Software (Version 5.0)*, Astronomical Institute, University of Bern.

Lee, Y.J. (2012), Deformation of South Korea as Estimated by GPS Data Processing Due to the Tohoku Great Earthquake, *The 2012 International GPS/GNSS Showcase*, Bangkok, Thailand, 16-18 January 2012.

Park, K.-D., Nerem, R. S., Schenewerk, M. S, and Davis, J. L. (2004), Site-specific multipath characteristics of global IGS and CORS GPS sites, *Journal of Geodesy*, 77(12), pp. 799-803.

Rizos, C. (1996) *Principles nad Practice of GPS Surveying*. School of Surveying & SIS, University of New South Wales, Sydney, Australia.

APREF 홈페이지 (2011), <http://www.ga.gov.au/earth-monitoring/geodesy/asia-pacific-reference-frame.html>.

EUREF 홈페이지 (2011), <http://epncb.oma.be>.

IGS 홈페이지 (2011), <http://www.igs.org>.