

GPS 상시관측소 동적 좌표추정을 위한 중기선해석 정확도의 실험적 분석

Experimental Assessment on Accuracy of Kinematic Coordinate Estimation for CORS by GPS Medium-range Baseline Processing Technique

조인수¹⁾ · 이흥규²⁾

Cho, Insoo · Lee, Hungkyu

Abstract

The study has purposed in evaluating experiences for achievable accuracy and precision of time series at 3-D coordinates. It has been estimated from the kinematic medium-range baseline processing of Continuously Operating Reference Stations (CORS) for the potential application of crustal displacement analysis during an earthquake event. To derive the absolute coordinates of local CORS, it is highly recommended to include some of oversea country references, since it should be compromised of an observation network of the medium-range baselines within the length range from tens of kilometers to about 1,000 kilometers. A data processing procedure has reflected the dynamics of target stations as the parameter estimation stages, which have been applied to a series of experimental analysis in this research at the end. From the analysis of results, we could be concluded in that the subcentimeters-level of positioning accuracy and precision can be achievable. Furthermore, the paper summarizes impacts of satellite ephemeris, data lengths and levels of initial coordinate constraint into the positioning performance.

Keywords : GPS, Medium-range Baseline, Baseline Processing, Kinematic Coordinate Estimation, CORS

초 록

본 논문에서는 지진 등으로 인해 발생하는 절대 지각변위 추정에 GPS 상시관측망의 동적기선해석 기법의 적용 가능성을 실험을 통해 정확도와 정밀도 측면에서 분석하였다. 국내 관측소의 절대좌표 추정을 위해 국외 관측소가 데이터처리에 포함 할 필요가 있어 실험 네트워크는 관측점 사이 거리가 수 백 ~ 약 1,000km에 달하는 중기선으로 구성하였다. 따라서 대상 관측점의 동적 거동특성을 매개변수 추정단계에 반영하는 일련의 절차를 적용하여 GPS 동적 중기선해석 실험을 수행하였다. 이를 통하여 GPS 동적 중기선해석을 통해 센티미터 수준의 정확도와 그 이상의 정밀도로 GPS 상시관측소의 절대좌표를 동적모드로 추정할 수 있음을 확인하였다. 또한 본 논문은 위성궤도력, 관측데이터양 그리고 동적좌표 추정의 초기좌표 구속범위와 같은 기선해석 조건들이 동적좌표 추정 정확도와 정밀도에 미치는 영향을 분석하고 그 결과를 요약하고 있다.

핵심어 : GPS, 중기선, 기선해석, 동적좌표추정, 상시관측소

Received 2016. 01. 23, Revised 2016. 02. 05, Accepted 2016. 02. 24

1) Member, Dept. of Echo-friendly Offshore FEED Engineering, Changwon National University (E-mail: jiu1989@naver.com)

2) Corresponding Author, Member, School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Changwon National University (E-mail: hkyulee@changwon.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 인도네시아, 중국, 일본, 네팔 등에서 발생한 지진은 유례 없는 심각한 인명과 재산 피해를 야기한 바 있다. 지진은 예방이 불가능한 자연재해로 2차 피해의 최소화를 위해 규모와 특징 그리고 피해 대상지역을 신속히 분석하여 대처해야 한다. 지진파의 측정은 수진기(seismometer)와 가속도계(accelerometer)를 사용하는 것이 보편적이나 이들 센서는 속도와 가속도를 취득에 기반하기 때문에 지각의 절대변위 측정이 불가능하다. 또한 수진기와 가속계만을 이용해서는 진도 7이상의 대규모 지진이 발생하는 경우 그 규모(magnitude), 진원(epicenter) 및 피해대상지역에 대한 신속한 분석에 한계가 있다(Segall and Davis, 1997). 이와 같은 지진으로 인한 지각변동 연구에서 지진센서의 한계를 극복을 위해 GPS(Global Positioning System)를 활용하기 위한 연구가 1990년대부터 꾸준히 이루어지고 있다. 지구동력학(geodynamics) 연구에서 GPS는 광범위한 지역에서 장기간에 걸쳐 지속적인 지각변위 측정이 가능함은 물론 지진이 발생하는 경우 coseismic, postseismic 그리고 inter-seismic의 지진 전주기(full cycle)에 대한 변위특성 해석에 사용할 수 있다. 이러한 GPS의 장점들로 인하여 최근 우리나라에서도 지각변동과 전리층 모니터링을 통한 지진 예지와 지진발생으로 인한 이상 지각변위를 측정하여 분석하기 위한 다양한 연구들이 수행되었다(Kim and Park, 2012; Seo, 2013; Jung *et al.*, 2014; Jeong, 2015).

전통적으로 GPS에 의한 지각경계부의 지각변동 모니터링 및 지진발생에 의한 지각변위의 측정과 같은 지구동역학 연구에서는 30초 저장간격의 24시간 단위 데이터를 처리하는 정적 기선해석 방식을 주로 활용해 왔다. 목적에 따라 차이가 있을 수 있으나 상시관측소의 경우는 주로 데이터 서버 용량 등과 같은 인프라 제약에 기인하였다. 그러나 최근 IGS(International GNSS Service)는 Ntrip(Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)을 통해 1Hz 데이터를 인터넷을 통해 실시간적으로 송출함을 물론 동일한 샘플링 간격의 15분 단위 데이터를 데이터센터를 통해 제공하고 있다. 뿐만 아니라 우리나라에서도 국토지리정보원의 경우 1시간 단위의 1Hz 데이터와 Ntrip을 통해 Network-RTK 보정 신호와 함께 관측데이터를 제공한다. 이와 같은 GPS 상시관측 환경개선은 지진과 같은 급격한 지각변동이 발생하는 경우 신속한 데이터처리로부터 3차원 절대좌표 시계열 확보를 가능하게 하였다. Park and Yun (2011)과 Seo (2013)은 1Hz GPS 데이터를 정밀절대측위(PPP: Precise Point Positioning)

기법으로 처리하여 2011년 일본 동북대지진으로 인한 지각변위 해석에 관한 연구를 수행한 바 있다. 우리나라도 유라시아, 북아메리카 그리고 필리핀 판에 인접하여 판 운동에 따른 대규모 지진 발생 가능성이 항상 존재하기 때문에 이를 대비하여 관측데이터 처리기법을 포함하여 GPS 상시관측망 활용을 위한 보다 활발한 연구의 필요성이 인지되었다.

본 논문에서는 지진발생 초기에 지진파의 전파특성, 지각변위 및 피해지역 분석의 기초자료에 해당하는 GPS 상시관측소 3차원 동적 절대좌표 추정에 상대측위 기법의 활용가능성을 실험을 통해 정량적으로 분석하였다. 이를 위하여 국내·외에 위치한 IGS(International GNSS Services) 및 국토지리정보원의 상시관측소 8점을 이용하여 데이터처리 네트워크를 관측점사이 기하거리 82.9~1,182.5km로 하는 중기선(medium-range baseline)으로 구성하였다. GPS 1Hz(저장간격 1초) 관측데이터를 BPE(Bernese Processing Engine)을 이용하여 자동화 방식으로 각기 다른 위성궤도력과 관측데이터의 사용 그리고 초기좌표 구속범위를 적용하여 동적모드로 처리하고 그 결과를 정확도와 정밀도의 측면에서 분석하여 본 논문에 요약하였다.

2. GPS 상시관측소 동적 좌표추정

GPS 상대측위 방식을 적용하여 국내 관측점의 절대좌표를 추정하기 위해서는 국외 IGS 기준점을 사용해야 한다. 이 경우 국내의 상시관측소 사이 기하거리는 수백 km에서 최대 1,000km 내외가 된다. Bock *et al.* (1998)는 이 경우를 GPS 기선종속오차(baseline-dependent errors) 합이 관측지점종속오차(site-dependent errors)의 합을 초과하기 때문에 중기선(medium-range baseline)으로 구분하였다. GPS 중기선의 최대범위는 관측오차에 비해 위성궤도와 측지계의 영향이 급증하는 약 1,000km 이내이다.

GPS 중기선해석을 통해 센티미터 이상 수준의 정확도로 측지학적 좌표추정을 위해서는 정확한 미지정수 결정뿐만 아니라 대기권오차(전리층 및 대류권)의 최소화가 필요가 있다. 특히 중기선에서 미지정수는 광폭선형결합(wide-lane linear combination) 데이터를 사용할 지라도 기선장이 500km 이상인 경우 전리층 영향이 급격히 증가해 이를 축소하기 위한 방안을 적용해야 한다. 예를 들어 전리층효과를 실수형 미지정수(float-ambiguity)와 동시에 추정하거나 결정모델(deterministic model)을 사용 할 수 있다. 정확한 미지정수 결정여부와 전리층영향은 수평좌표 추정 정확도에 영향을 미치는 반면, 수직성분은 상대대류권지연(relative tropospheric

delay)과 상관성이 매우 높아 정적기선해석(static baseline analysis)에서는 잉여(redundant) 관측데이터를 사용하여 추정하여 해결한다(Lee *et al.*, 2008). 그러나 이와 같은 GPS 중기선해석 방식을 동적기선해석(kinematic baseline analysis)에 직접 적용 할 수 없다는 사실에 주목할 필요가 있다. 여기서 동적기선해석은 GPS 관측데이터 취득이 이루어진 매 순간에 대해 3차원 좌표를 추정하는 수학적 절차와 방법을 의미한다. 따라서 동적기선해석에서는 일반적으로 하나의 에폭크에 해당하는 데이터를 사용해 좌표를 추정하기 때문에 중기선에서는 관측데이터 부족으로 미지정수와 대류권지연 문제를 동시에 해결 할 수 없다. 그러나 이와 같은 방식은 차량과 선박과 같이 무한히 이동하는 물체의 동적좌표 추정에 적용하는 것으로 대형 건설구조물 혹은 지각의 변위를 측정하고자 한다면 GPS 수신기의 동적(dynamics) 거동 범위를 기선해석 절차에 충분히 반영하여 센티미터 수준의 정확도로 동적좌표의 추정이 가능하다(Lee, 2014).

본 연구에서 국내·외 GPS 상시관측소를 이용하여 지진 등과 같이 급격한 지각변동이 발생하는 경우 그 특정해석에 필요한 3차원 좌표시계열을 BPE를 이용하여 절대좌표를 자동화 추정하는 Fig. 1과 같은 절차를 적용하였다. 이와 같은 절차는 Bernese Version 5.0이 제공하는 일간단위 관측데이터를 상대측위방식으로 처리하는 PCF(Processing Control File)인 "RNX2SNX.PCF"를 수정한 것이다. 해당 PCF를 이용한 동적기선해석을 위해 필요한 수정사항을 Dach *et al.* (2007)가 제시하고 있으나 이는 상시관측소와 같이 그 동적거동에 제약이 없는 일반적인 측위환경을 고려한 것으로 PPP 동적측위를 통해 얻어진 시계열좌표를 초기값으로 하는 절차이다. 이에 반해 본 연구에서는 지진 등으로 인한 상시관측소의 동적좌표를 추정만을 목적으로 Fig. 1과 같이 PPP 절차를 생략하고 IGS와 국토지리정보원 상시관측소의 1Hz 관측데이터와 IGS 해석결과물(정밀궤도력 등)을 사용하여 정적해석과 동적해석의 2단계로 단순화 하였다. 정적해석의 목적은 모든 가용데이터를 사용하여 미지정수를 결정하고 3차원 좌표와 대류권지연을 추정하는 것으로 결과물은 모두는 동적해석에 사용된다. 이후 정적해석 결과와 고시좌표를 Helmert 변환을 통해 변환·비교하여 이상 지각변동이 없는 국외 IGS 기준점 1 점 동적좌표 계산을 위한 기준점으로 선택한다. 최종 단계는 정적기선해석 결과물과 이중차분데이터를 이용하여 관측점들의 동적 좌표를 추정하는 것으로 이 단계에서 정적해석 결과를 구속(weighted constraint)하여 동적 추정 정밀도를 향상 시키도록 하였다(Lee *et al.*, 2014). 동적해석 초기좌표의 구속의 범위는 지진 등에 의한 GPS 안테나의 동적(dynamics)

거동의 범위에 따라 결정되어야 하며, 이를 위한 연구가 추후에 있어야 할 것으로 판단된다.

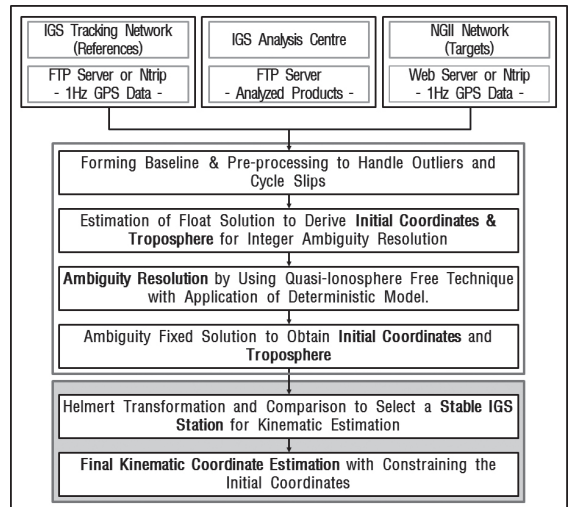


Fig. 1. A procedure of midium-range kinematic baseline analysis in this research

3. 동적 좌표추정 정확도 분석실험

3.1 개요

3.1.1 데이터 처리망 구성

GPS 상시관측소의 동적 좌표추정 결과의 정확도와 관련한 분석실험을 수행하기 위해 Fig. 2과 같이 국내·외에 위치한 IGS 및 국토지리정보원의 8점으로 데이터처리 네트워크를 구성하였다. 여기서 사각형(즉, CHAN, DAEJ, JFNG, USUD)은 IGS 그리고 삼각형(CHJU, KANR, SEOS, PUSN)은 국토지리정보원 관측점을 나타낸다. 이와 같은 네트워크 구성은 국외 IGS 기준점을 기준으로 국내 관측소의 동적 절대좌표를 추정하기 위해서였다. 특히 본 연구에서 사용한 IGS 등록 관측소는 15분 간격으로 1Hz 데이터를 FTP(File Transfer Protocol)를 통해 제공하는 active high rate LEO stations들이다(IGS, 2016a). GPS 차분(differenced) 관측데이터 형성을 위해 Table 1과 같이 관측점 사이의 거리가 최소가 되도록 7개의 독립기선(independent baseline)을 정의하였다. 여기서 관측점 사이의 기하거리는 최소 82.9km (DASE 기선)에서 최대 1,182.5km (CJFF 기선) 범위로 모두 GPS 중기선(medium-baseline)에 해당한다. Table 1과 같은 기선의 정의는 실험에서 모든 GPS 관측데이터 처리에 동일하게 적용하였다.

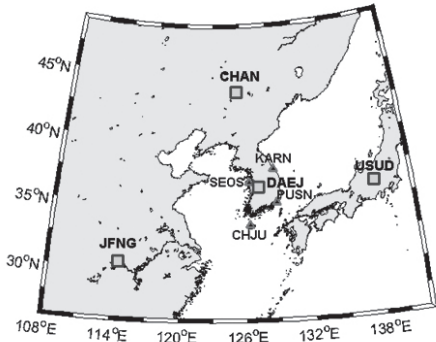


Fig. 2. A GPS test network for kinematic coordinate estimations

Table 1. Definition of baseline for relative portioning

Baseline ID	Station 1	Station 2	Length(km)
CHKA	CHAN	KANR	727.7
CJFJ	CHJU	JFNG	1,182.5
CJPU	CHJU	PUSN	302.0
DAKA	DAEJ	KANR	202.0
DAPU	DAEJ	PUSN	200.8
DASE	DAEJ	SEOS	89.2
PUUD	PUSN	USUD	845.8

3.1.2 데이터 처리 및 분석방법

실험을 위한 IGS 데이터는 한국천문연구원 데이터센터 (<ftp://nfs.kasi.re.kr>) 그리고 국토지정보원 GNSS 웹페이지 (<http://gnss.ngii.go.kr>)를 통해 확보하였다. 관측데이터는 2015년 10월 4일 ~ 10일 (7일) 저장간격 30초 일간단위와 2015년 10월 7일(DoY: 280)의 저장간격 1초(1Hz)인 15분(IGS)과 1시간(국토지리정보원) 단위 Rinx(Receiver Independent Exchange) 파일이었다. 이후 1Hz 데이터 파일은 GNSS 데이터 전처리 Teqc S/W(UNAVCO, 2016)를 이용해 GLONASS 및 Galileo 위성데이터를 제외하고 해당 일자에 대해 하나의 파일로 결합하였으며, 관측소 1개소에 대한 Rinx 파일 크기는 80Mb 내외였다.

GPS 관측데이터는 BERNESE Version 5.0의 BPE(Bernese Processing Engine)을 사용하여 자동화 처리하였다. 7일간의 30초 저장간격 데이터를 이용하여 동적 추정좌표 정확도 평가를 위한 기준좌표를 우선 계산하였다. 이를 위해 Jung and Lee (2011)의 절차와 방법을 적용해 일간해(daily solutions)를 산정한 후 7개의 일간해 정규방정식(normal equations)

를 누적하여 기준시점 10월 7일 12시에 대한 주간해(weekly solution)을 산정하였다(이하 기준좌표). Fig. 3는 7개의 일간해의 반복재현성을 분석하기 위해 표준편차를 도시한 것이다. 이러한 결과로부터 동적좌표 정확도 분석 기준인 주간해 정확도는 수평 ±2~3mm 그리고 수직 ±4~5mm 수준 이상임을 알 수 있다.

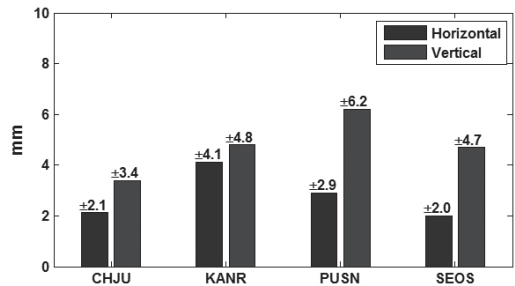


Fig. 3. Repeatability of the daily solutions

DoY 280일의 1Hz GPS 데이터는 Fig. 1의 절차에 따라 BPE에 의해 자동화 처리하고 1개의 IGS 기준점에 대해 국토지리정보원 관측점(4점)의 동적좌표를 추정하였다. 본 연구를 통해 제안한 절차를 통한 좌표추정의 정확도와 정밀도와 상관성을 가지는 요소에 해당하는 위성궤도력, 데이터 양, 초기좌표 구속범위를 각기 다르게 적용하여 GPS 처리를 수행하고 그 영향을 분석하고자 하였다. 지심직각좌표(ECEF: Earth-Centered and Earth-Fixed)로 추정된 관측점의 동적좌표 시계열은 기준좌표와 차이를 계산하여 지역수준좌표계(local-level coordinate system)에 대한 남북(N), 동서(E) 및 법선방향(h) 성분으로 정밀도와 정확도 분석을 수행하였다. 실험대상 일자에 지진 등에 의한 급격한 지각변동이 없었기 때문에 추정 좌표의 표준편차(standard deviation)를 정밀도 지표로 사용하였다. 이에 반해 정확도(accuracy)는 Eqs. (1) and (2)를 이용하여 수평과 수직방향의 RMSE(Root-Mean-Squares-Error)를 계산하여 분석하였다(FGDC, 1998).

$$RMSE_h = \sqrt{\frac{(N_i - N_{ref})^2 + (E_i - E_{ref})^2}{n}} \tag{1}$$

$$RMSE_v = \sqrt{\frac{(h_i - h_{ref})^2}{n}} \tag{2}$$

where $RMSE_h$ and $RMSE_v$ is in the horizontal and the vertical component, N_i , E_i and h_i is the northing, the easting and ellipsoidal coordinate of the estimated kinematic coordinate, N_{ref} , E_{ref} and h_{ref} is the northing, the easting and ellipsoidal coordinate of the reference coordinate respectively, n is the number of sample to be evaluated.

3.2 위성궤도력 영향

3.2.1 IGS 정밀궤도력(IGS, 2016b)

GPS 상대 기선처리에서 위성궤도는 기선종속오차 (baseline-dependent errors) 중의 하나로 중기선 해석에서는 정밀궤도력(precise ephemeris)을 사용해야한다 현재 IGS에서는 전세계에 분포하는 약 300여개의 상시관측점 데이터를 13개의 해석센터에서 독립적으로 처리한 결과를 가중평균 방식으로 결합하여 FTP를 통해 제공하고 있다. Table 2는 2016년 1월 현재 IGS가 제공하고 있는 3가지 궤도력의 종류와 정확도 그리고 지연시간을 요약한 것이다. 표에서 위성궤도 정확도는 예측한(expected) 경우를 제외하고는 독립적인 레이저측량(laser ranging) 결과에 대해 계산한 1차원 좌표성분의 RMSE 이다.

IGS 정밀궤도력 중 ultra-rapid 파일은 이전 처리결과로부터 예측한 부분과 데이터처리를 통해 추정된 부분으로 구성되어

있다. 전자는 지연 없이 취득이 가능하나 후자의 경우 3~9시간 이후에 제공받을 수 있다. 이러한 이유로 두 궤도 정확도에는 약 2배 차이가 있다. 예측 ultra-rapid 궤도력 이외의 나머지 3가지는 정확도는 큰 차이가 없으나 시간오차 정보에는 ultra-rapid와 rapid와 final 사이 큰 폭의 차이를 보인다. 이와 같은 이유로 PPP 처리에서는 최소한 rapid 이상의 궤도력을 사용해야 한다. 이에 반해 상대측위 방식에서는 차분을 통해 위성시간 오차를 소거 가능하여 지진과 같은 급격한 지각변동 영향의 신속한 분석 혹은 GPS 기상학에서 준실시간적 가장수량 추정에는 실시간적 이용이 가능한 예측 ultra-rapid 궤도력 활용성이 상대적으로 크다.

3.2.2 위성궤도력 영향분석

위성궤도력 영향을 분석에 앞서 동적 좌표추정에서 IGS 기준점 선택의 영향을 Fig. 4를 통해 살펴보고자 한다. 해당 결과는 3시간 GPS 데이터에 대한 정적기선해석 이후 그 결과 좌표에 수평과 수직방향 각각 3cm와 1cm를 구속하여 각기 다른 4가지 IGS 관측점을 기준으로 동적좌표를 추정하여 계산한 RMSE와 표준편차이다. 그래프에서 결과는 동적 좌표추정에서 기준점 선택의 영향이 없음을 나타내고 있다. 이것은 정적해석을 통한 좌표추정 단계에서 IGS 관측점을 최소화(minimum constraint)하는 망조정이 이루어졌기 때문이다.

Table 2. Summary of IGS precise ephemerides

Types		Accuracy	Latency	Update	Sample Interval	File Names	
						Description	Format
Ultra-rapid (predicted half)	Orbit	~5cm	Real Time	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min.	Precise orbits & clocks	iguwwwd_hh.sp3
	Clock	~3ns RMS ~1.5ns SDev					
Ultra-rapid (observed half)	Orbit	~3cm	3~9 hours	at 03, 09, 15, 21 UTC	15 min.	Earth rotation parameters	iguwwwd_hh.erp
	Clock	~150ps RMS ~50ps SDev					
Rapid	Orbit	~2.5cm	17~41 hours	at 17 UTC	15 min.	Precise orbits & clocks	igrwwwd.sp3
	Clock	~75ps RMS ~25ps SDev			5 min.	Earth rotation parameters	igrwwwd.erp
Final	Orbit	~2.5cm	12~18 days	every Thursday	15 min.	Precise orbits & clocks	igswwwd.sp3
	Clock	~75ps RMS ~20ps SDev			30 sec.	Earth rotation parameters	igswww7.sp3

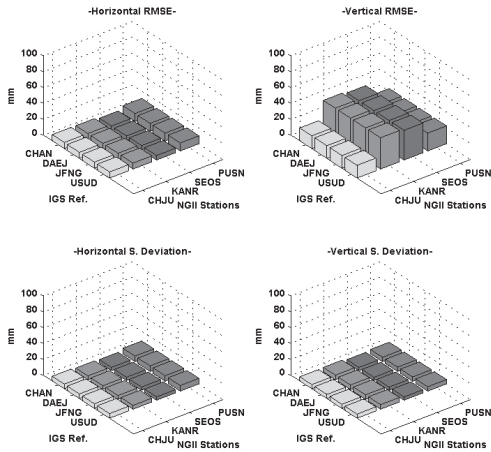


Fig. 4. RMSE and standard deviation of the estimated kinematic coordinates with respect to IGS references used for final computation

GPS 동적 증기선해석에 사용하는 IGS 궤도력이 좌표추정 정확도에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 24h, 12h 및 3h GPS 데이터에 대해 ultra-rapid, rapid 및 final 위성궤도력 적용하여 9가지 경우로 나누어 데이터처리를 수행하였다. 여기서 동적 좌표추정을 위한 초기좌표 구축은 수평과 수직에 대해 각각 $\pm 3\text{cm}$ 와 $\pm 1\text{cm}$ 수준이었다. Table 3은 GPS 동적 기선해석을 통해 얻어진 국내 관측점들의 정확도와 정밀도를 계산하여 나타낸 것이다. Fig. 5는 궤도력과 데이터양에 높은

상관성을 갖는 수직방향의 정확도를 3차원 막대그래프로 도시한 것이다. 이 결과에 따르면 24시간 데이터를 사용하는 경우는 궤도력 종류에 영향 없이 수평은 5~8mm 그리고 수직 방향은 10mm 내외의 균질한 정확도를 동적 좌표를 결정할 수 있었다. 그러나 GPS 데이터양이 12시간과 3시간으로 줄어들수록 ultra-rapid 궤도력을 사용하는 결과에서 수직성분 정확도에 CHJU를 제외하고는 크게 감소하는 것을 관찰 할 수 있다. Final과 rapid 궤도력을 사용할 때 GPS 관측데이터양은 측위 정확도에 거의 영향을 주지 않으며, ultra-rapid를 사용하는 경우도 수평성분 정확도에 미치는 효과는 제한적이다. Fig. 6은 3시간 GPS 데이터와 각기 다른 위성궤도력을 사용하여 추정된 동적좌표의 전형적인 예를 관측점 CHJU에 대해 도시한 것이다. Final과 rapid 궤도력의 경우 수평과 수직방향에서 동등한 결과를 보여주나 ultra-rapid의 경우 수직방향에 바이어스(bias)가 발생하여 RMSE 값을 증가시켰다. 이에 반해 정밀도는 사용하는 큰 궤도력에 영향을 받지 않으며, 오히려 GPS 데이터양이 줄어들수록 증가하는 경향을 보였다. 이것은 부정확한 미지정수 사용과 관련된 것으로 이후 보다 자세히 논의할 것이다.

앞서 살펴본 내용을 고려할 때 본 연구의 증기선 동적 기선 해석 절차를 통해 지진 등과 같은 급격한 지각변동이 발생하는 경우 3시간 내외의 GPS 관측데이터와 IGS ultra-rapid 사용하여 $\pm 1\text{cm}$ 수준의 정확도로 수평방향 시계열을 신속하게 확보 가능할 것으로 판단된다. 그러나 이 경우 수직방향 정확

Table 3. Statistical summary of kinematic coordinate estimation with respect to IGS orbit type and processing period (unit: \pm mm)

Station	Orbit Type	24 Hours				12 Hours				3 Hours			
		RMSE		S. Deviation		RMSE		S. Deviation		RMSE		S. Deviation	
		Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.
CHJU	Final	8.1	9.8	7.1	6.8	7.1	11.1	6.9	6.8	7.3	12.9	6.9	6.8
	Rapid	8.1	9.9	7.1	5.6	7.1	11.4	7.0	6.8	7.3	12.9	6.9	6.0
	U-rapid	8.7	10.1	7.1	7.2	7.6	13.5	6.9	6.9	8.0	15.1	6.6	5.8
KANR	Final	7.7	8.1	7.1	5.6	7.6	7.4	7.1	6.0	6.9	10.1	6.3	4.9
	Rapid	7.6	8.0	7.1	5.6	7.6	7.3	7.1	6.0	6.9	10.1	6.3	4.9
	U-rapid	7.5	9.9	7.1	7.1	8.8	13.4	7.4	5.5	8.5	39.8	6.8	5.1
SEOS	Final	5.3	13.6	5.2	5.6	5.7	16.7	5.4	5.6	5.2	14.0	5.1	4.3
	Rapid	5.3	13.7	5.3	5.6	5.7	16.7	5.6	5.6	5.2	14.0	5.1	4.3
	U-rapid	5.1	14.9	5.1	5.6	6.5	21.4	5.5	5.6	7.1	35.9	5.1	4.2
PUSN	Final	8.1	7.7	7.2	7.1	7.4	7.8	7.3	6.8	7.3	6.1	7.3	5.8
	Rapid	8.1	7.6	7.2	7.1	7.5	7.7	7.3	6.8	7.4	6.2	7.3	5.8
	U-rapid	8.4	7.1	7.4	7.1	7.2	12.0	7.1	6.7	8.1	22.6	7.1	5.7

도는 수평방향의 그것에 비해 크게 낮아져 ultra-rapid 궤도력을 사용하여 $\pm 1\text{cm}$ 수준의 정확도 확보하기 위해서 24시간 관측데이터가 필요하였다. Rapid 및 final 궤도력은 수일에서 수주일 이후 제공되기 때문에 필요에 따라 최고 수준 정확도로 지각변위 분석에 활용 가능 할 것이다. 만약 필요에 따라 상대변위의 해석이 목적이려면 사용하는 궤도력에 따른 영향이 거의 없기 때문에 ultra-rapid 궤도력과 단기간 GPS 데이터를 이용하여 신속하게 동적좌표를 추정할 수 있다. 그러나 Table 3과 Fig. 5와 6의 결과는 동적 좌표추정을 위해 초기좌표를 수평과 수직에서 3cm와 1cm를 구속한 경우로 다른 조건을 사용하는 경우 차이가 발생할 수 있을 것이다.

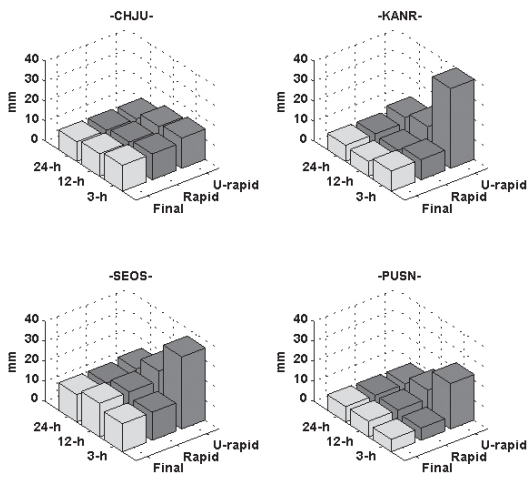


Fig. 5. RMSE of vertical component with respect to IGS orbit types and GPS data lengths used

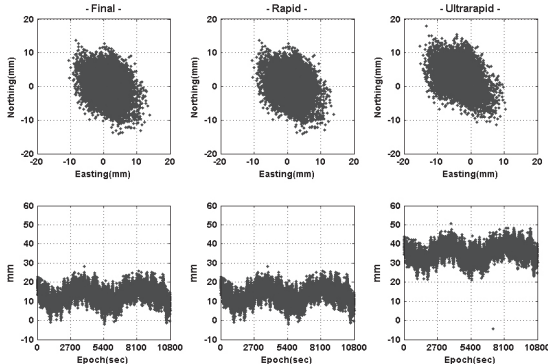


Fig. 6. Differences between reference and estimated coordinates at CHJU station processed for 3 hours using IGS final, rapid and ultrarapid orbit with coordinate uncertainties of 3cm and 1cm in horizontal and vertical component

3.3 관측데이터양의 영향

본 연구의 GPS 중기선해석에서는 정적처리를 통해 미지정수, 대류권지연 그리고 초기좌표를 확정된 후 이들을 적용하여 좌표를 동적으로 추정한다. 이러한 이유로 정적해석 단계에서 정확한 미지정수 결정여부와 대류권지연 추정결과는 동적 좌표결정 정확도에 밀접한 상관성을 가진다. GPS 중기선해석에서 대류권지연의 중요성을 살펴보기 위해서 IGS final 정밀궤도력과 3시간 관측데이터를 사용하여 동적좌표 추정 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 정적해석에 의한 초기좌표 구속을 3방향에 대해 동일하게 $\pm 30\text{cm}$ 를 적용하였으며, 모든 좌표추정 단계에서 관측점에 대한 대류권지연 오차를 추정하는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분하여 데이터처리를 수행하였다. Fig. 7은 대류권지연 추정여부와 정확도 사이의 관계를 살펴보기 위해 관측점에서의 RMSE와 CHJU의 추정좌표 잔차를 나타낸 것이다. 대류권지연 추정하는 경우의 수평과 수직방향 RMSE는 모든 관측점에서 큰 차이 없이 각각 약 $\pm 8\text{mm}$ 와 약 $\pm 15\text{mm}$ 수준이었다. 그러나 해당 오차를 추정하지 않았을 때는 수평방향은 $\pm 35\sim 62\text{mm}$ 그리고 수직에서는 $\pm 74\sim 178\text{mm}$ 로 RMSE가 기선장에 따라 급격히 증가하였다. 이와 같은 결과는 CHJU에 대한 잔차 그래프에도 잘 나타나 있으며, 특히 GPS 상대측위에서 수직좌표성분 추정과 대류권지연(특히 상대지연)의 높은 상관성과 중요성을 확인할 수 있다.

동일한 처리조건을 적용한다면 정적 중기선해석 성능은 사용하는 GPS 데이터양(혹은 길이)에 큰 영향을 받을 수 있다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 GPS 데이터양에 따라 대류권지연 추정정확도와 미지정수결정 성능이 좌우되기 때문이다. 따라서 정적처리 결과물을 사용하는 동적 좌표추정 정확도는 해당 처리조건에 따라 차이를 보일 수 있다. 이와 같은 영향을 분석하기 위해 0.75~24시간으로 이루어진 총 7개 관측데이터 세트에 대해 ultra-rapid 궤도력과 정적측위 초기좌표 구속범위 수평과 수직방향에 각각 $\pm 3\text{cm}$ 와 $\pm 1\text{cm}$ 를 적용하여 데이터들을 처리하였다. Table 4는 동적 처리 결과 7회에 대한 정확도와 정밀도를 사용 데이터양과 대상 관측점에 대해 정리한 것이다. Fig. 8은 이들 결과를 보다 명확하게 나타내기 위해 3차원 막대그래프를 통해 도시한 것이다. 결과를 살펴보면 수평방향 정확도는 24시간에서 3시간 관측데이터 까지는 큰 차이가 없으나 그 양이 1시간 30분으로 줄어들면서 큰 폭으로 감소하는 경향을 보인다. 이에 반해 수직방향 정확도는 3.2절에서 살펴본 바와 같이 3시간 관측데이터 사용 하면서부터 크게 감소하였다. 특히 GPS 45분 관측데이터를 사용하는 경우 수직방향 정확

도가 10cm 이상으로 크게 낮아진 것에 주목할 필요가 있다. Fig. 9은 GPS 관측데이터 사용 양이 3시간 이하에서 수평과 수직방향 모두에 바이어스 발생을 보여준다. 이러한 결과로부터 ultra-rapid 궤도력을 이용하여 수평과 수직에 3cm와 1cm를 구속하는 경우 자연재해 발생 후 신속한 변위해석의 수평정확도를 ±1cm 이상을 확보하기 위해서는 3시간 내의 그리고 동등한 수준의 수직방향 정확도를 얻기 위해서는 9시간 내외에 해당하는 데이터처리의 필요성을 확인할 수 있다.

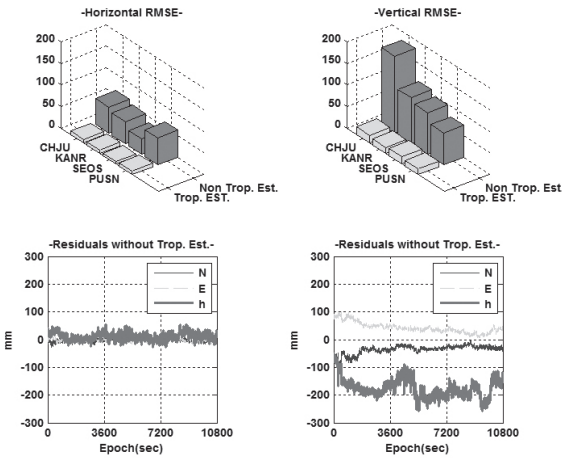


Fig. 7. RMSE and residuals of the estimated kinematic coordinates with and without tropospheric estimation

Table 4와 Fig. 8에 나타난 결과는 동적 좌표추정 정밀도는 GPS 관측데이터양과 상관성이 낮음을 보여준다. 특히 SEOS는 사용 관측데이터양이 작아지면서 정밀도가 미소하게 증가하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 단기 GPS 데이터 사용으로 인한 정밀도 증가는 정적기선해석에서 실수형미지정수(float-ambiguity) 추정 정확도 저하로 인해 부정확한 미지정수가 결정되었기 때문인 것으로 판단된다. 이를 보다 자세하게 살펴보기 위해 각각의 기선에 대해 BERNESE 소프트웨어가 제공한 미지정수 결정 성공률을 Table 5에 나타내었다. 주목해야 할 것은 예상과 달리 관측데이터 양이 90분과 45분인 경우에도 3시간 이상인 경우와 비교하여 미지정수 결정 성공률에 차이가 보이지 않는다는 것이다. 특히 45분 관측데이터의 경우는 89.1%로 매우 높은 수준을 유지하고 있을 뿐만 아니라 미지정수 결정 성공률이 100%에 달하는 기선 4개를 발견할 수 있다. 이와 같은 성공률에도 불구하고 Fig. 9에 나타난 바이어스는 부정확한 미지정수 결정이 하나의 요인이 될 수 있다. 즉 미지정수 타당성검정(ambiguity validation test)의 제2종 오류(type II-error)로 인해 부정확한 미지정수를 정확한 것으로 판단했을 수도 있다는 것이다(Lee and Lee, 2004). 이와 같은 오류의 발생은 단기간의 GPS 데이터 사용으로 대류권오차 추정 정확도의 저하로 실수형-미지정수 추정에 바이어스가 발생했기 때문인 것으로 판단된다. 단기 관측데이터의 미소한 정밀도 향상은 미지정수 결정을 100%와 관련 있으며, 정수형-미지정수를 적용하는 관측데이터를 사용하여 좌표를 추정하는 것이 실수형-미지정수를 사용하는 것에 비해 정밀도는 높아지는 것은 당연한 사실이다.

Table 4. Statistical summary of kinematic coordinate estimation with respect to data lengths used (unit: ± mm)

Station	CHJU				KANR				SEOS				PUSN			
	RMSE		S. Dev.		RMSE		S. Dev.		RMSE		S. Dev.		RMSE		S. Dev.	
	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.
24	6.5	11.9	6.3	5.6	6.6	10.2	5.1	5.8	4.6	15.6	4.4	4.9	9.2	5.3	7.3	5.1
18	7.5	18.0	7.0	5.7	6.3	12.9	4.9	5.9	5.4	19.6	4.6	4.0	9.0	5.6	7.1	5.0
12	8.5	15.8	6.1	5.9	9.5	12.5	5.0	5.6	8.2	21.1	4.3	4.9	7.6	11.9	7.3	5.1
9	8.3	11.5	6.9	5.8	6.0	8.9	4.9	5.7	5.4	24.5	4.5	4.0	7.8	8.9	7.1	5.3
3	7.7	16.0	5.8	5.2	7.5	39.3	4.8	5.7	5.7	37.4	4.1	4.0	10.0	22.4	7.0	5.4
1.5	25.3	70.1	6.1	4.8	17.5	33.1	4.7	4.8	23.6	24.8	4.1	3.8	17.8	90.6	7.1	5.8
0.75	43.3	159.2	6.4	5.3	18.3	92.0	4.5	4.8	20.5	88.5	3.9	3.7	35.8	156.3	6.2	6.0

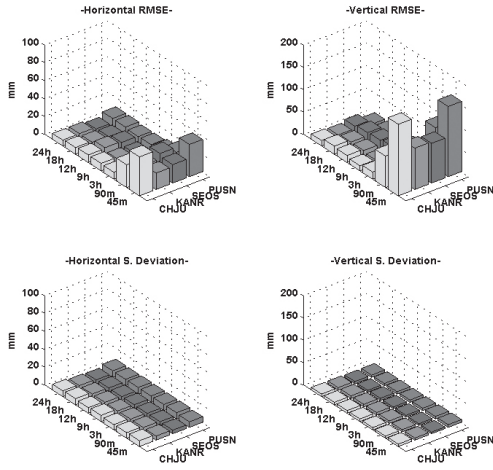


Fig. 8. RMSE and standard deviation of the estimated kinematic coordinates with respect to data lengths processed

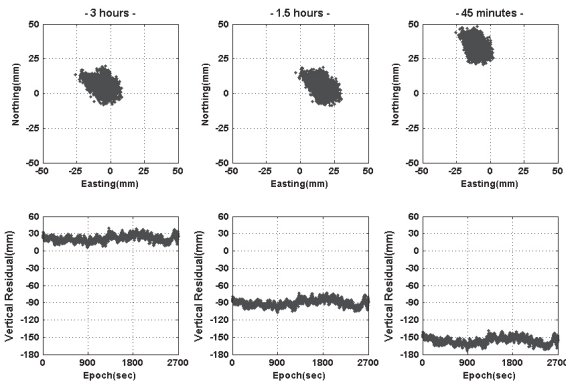


Fig. 9. Differences between reference and estimated coordinates at PUSN using the three different data lengths with coordinate uncertainties of 3cm and 1cm

3.4 초기좌표 구속범위 영향

최소제곱추정에서 초기좌표를 구속하는 것은 이 정보를 부가적인 관측데이터로 사용하는 것과 수학적으로 상응하는 의미를 갖기 때문에 추정 정밀도는 항상 높아질 수밖에 없다(Lee et al., 2005; Lee, 2014). GPS 상시관측소는 지진과 같은 급격한 지각변동이 발생하지 않는 한 정적상태로 고려할 수 있으며, 변위가 발생하는 경우에도 그 범위는 매우 제한적이다. 이와 같은 GPS 관측점의 동적 거동특성을 초기좌표의 불확실성(σ^2)으로 동적 좌표추정에서 구속할 수 있다. 이와 같은 초기좌표 구속범위는 대상지역의 지각변동 특성과 예상 가능한 지진 규모 등을 고려하여 결정할 수 있으나 이것은 본 연구 범위에 벗어나며 여기서는 구속범위가 동적좌표 추정 정확도와 정밀도에 미치는 영향을 실제 관측데이터 처리를 통해 분석하였다.

Table 6은 4가지 구속범위(uncertainty)를 적용하여 각각 다른 3가지 GPS 관측기간의 데이터에 대해 동적 기선처리를 수행하여 정확도와 정밀도를 계산하여 나타낸 것이다. 또한 Fig. 10은 이들 결과를 시각화 하여 보다 명확히 나타내기 위해 12시간 GPS 관측데이터에 대한 정확도와 정밀도를 3차원 막대그래프로 도시한 것이다. 수평방향 구속범위를 1~10cm로 10배 증가 시켰음에도 불구하고 동적좌표 정확도 저하에 미치는 영향은 수 mm 수준이었다. 이에 반해 수직방향 구속범위는 정확도에 보다 민감하게 영향을 미침을 보여준다. 특히 PUSN의 경우 0.5cm와 3cm를 비교할 때 정확도가 약 4.5배 낮아졌다. 예상한 바와 같이 앞서 살펴본 처리조건(위성궤도력 및 데이터양)과는 상이하게 초기좌표 구속범위는 추정좌표의 정밀도에 큰 영향을 미치는 것을 Table 6과 Fig. 10은 보여주고 있다. 이와 같은 초기좌표 구속범위가 동적좌표 추정에 미치는 전형적인 영향을 도시하기 위하여 12시간 GPS 관측데이터 처리의 결과를 주간해의 기준좌표와 차이를 계산하여 Fig. 11에 나타내었다.

Table 5. Successful rates of ambiguity resolutions with respect to data lengths used (unit: %)

Data Length (Hrs.)	Station IDs							Average
	CHKA	CJFF	CJPU	DAKA	DAPU	DASE	PUUD	
24	95.7	78.6	88.7	95.9	90.6	98.0	97.8	90.2
18	93.9	82.8	87.8	97.1	92.3	91.4	93.9	90.5
12	96.2	86.7	87.5	92.9	93.5	96.4	92.3	91.7
9	90.9	82.9	82.1	95.8	96.3	95.8	90.9	89.9
3	83.3	89.5	100.0	92.9	100.0	92.9	91.7	93.0
1.5	50.0	66.7	60.0	100.0	100.0	90.0	77.8	78.8
0.75	57.1	100.0	80.0	100.0	100.0	100.0	77.8	89.1

Table 6. Statistical summary of kinematic coordinate estimation with respect to level of uncertainties of reference coordinates (unit: \pm mm)

Station	Uncertainties		24 Hours				12 Hours				3 Hours			
			RMSE		S. Deviation		RMSE		S. Deviation		RMSE		S. Deviation	
	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.	Hor.	Ver.
CHJU	1cm	0.5cm	7.1	7.8	5.3	2.9	5.8	12.0	5.2	2.7	9.0	13.4	5.0	2.4
	3cm	1cm	8.7	10.1	7.1	7.2	7.6	13.5	6.9	6.9	8.0	15.1	6.6	5.8
	5cm	2cm	8.7	13.9	7.4	12.2	7.9	16.3	7.2	11.5	8.3	17.1	6.9	9.7
	10cm	3cm	8.8	15.6	7.5	14.2	8.1	17.6	7.3	13.3	8.4	18.0	7.1	11.2
KANR	1cm	0.5cm	5.4	8.5	4.9	2.2	6.8	11.5	5.2	2.3	7.2	35.4	4.6	2.1
	3cm	1cm	7.5	9.9	7.1	5.3	8.8	13.4	7.4	5.5	8.5	39.8	6.8	5.1
	5cm	2cm	7.9	12.0	7.6	8.7	9.3	15.8	7.8	8.9	8.9	40.8	7.3	8.4
	10cm	3cm	8.1	12.6	7.8	10.0	9.5	16.9	8.0	10.1	9.1	41.4	7.6	9.6
SEOS	1cm	0.5cm	3.8	13.9	3.8	2.5	5.2	20.3	4.0	2.4	6.4	31.6	3.6	1.7
	3cm	1cm	5.1	14.9	5.1	5.6	6.5	21.4	5.5	5.6	7.1	35.9	5.1	4.2
	5cm	2cm	5.3	16.5	5.3	8.9	6.8	23.0	5.8	8.8	7.2	36.8	5.4	7.0
	10cm	3cm	5.5	17.2	5.4	10.1	6.9	23.8	5.9	9.9	7.3	37.3	5.6	8.0
PUSN	1cm	0.5cm	6.4	2.9	5.3	2.8	5.1	11.2	5.0	2.7	6.8	19.1	5.1	2.3
	3cm	1cm	8.4	7.1	7.4	7.1	7.2	12.0	7.1	6.7	8.1	22.6	7.1	5.7
	5cm	2cm	8.7	12.1	7.9	12.0	7.7	14.3	7.5	11.2	8.4	23.3	7.6	9.6
	10cm	3cm	8.9	14.1	8.1	13.9	7.9	15.6	7.8	12.9	8.6	23.9	7.8	11.1

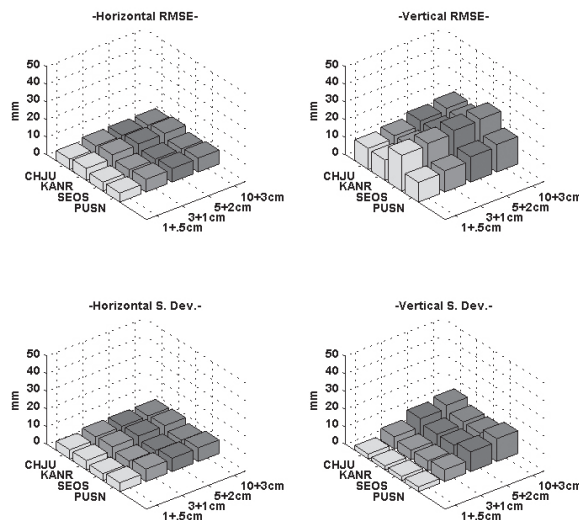


Fig. 10. RMSE and standard deviation of the estimated kinematic coordinates with respect to uncertainty levels of initial coordinates; 12 hours of data was used for the processing

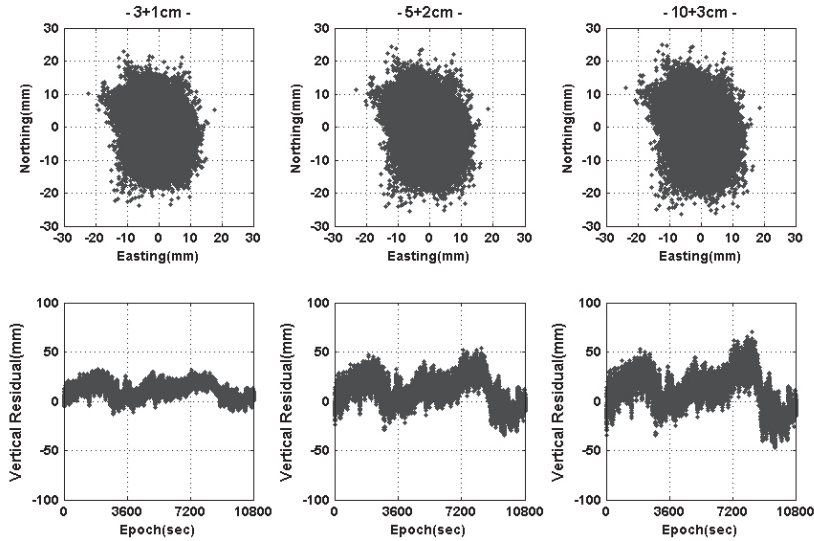


Fig. 11. Differences between reference and estimated coordinates at PUSN using the three different uncertainties of initial coordinates; 12 hours of data was used for the processing

4. 결론

본 논문에서는 지진발생 초기에 지진파의 전파특성, 지각 변위 및 피해지역 분석의 기초자료에 해당하는 GPS 상시관측소 3차원 동적 절대좌표 추정에 상대측위 기법의 활용가능성을 실험을 통해 정량적으로 분석하였다. 이를 위하여 국내의 GPS 상시관측소 8점을 이용하여 중기선으로 이루어진 네트 워크를 구성하여 각기 다른 위성궤도력과 관측데이터양 사용 그리고 초기좌표 구속범위를 적용하여 동적 기선해석을 수행하여 그 결과를 정확도와 정밀도의 측면에서 분석한 결과 다음과 같이 요약 할 수 있다.

첫째, 본 연구의 중기선 동적 기선해석 절차에서 정적기선 해석 좌표의 수평과 수직성분에 대해 각각 $\pm 3\text{cm}$ 와 $\pm 1\text{cm}$ 를 구속하는 경우 관측점 사이의 기하거리가 수 백km에서 약 1,000km인 기선을 포함하여도 IGS rapid 정밀궤도력과 3시간 이상 관측데이터를 사용하는 경우 수평 $\pm 1\text{cm}$ 이상 그리고 수직 $\pm 1.5\text{cm}$ 수준의 정확도로 절대좌표를 추정 할 수 있었다.

둘째, GPS 중기선 동적 기선해석에 사용하는 IGS 정밀궤도력은 종류는 정적기선해석 좌표에 대해 동일한 범위로 구속하는 경우 수평에 비하여 수직성분 정확도에 높은 상관성을 가지나 정밀도에 미치는 영향은 제한적인 것으로 분석되었다. 이로 인해 수평방향 동적좌표 추정에는 3시간 관측데이터와 ultra-rapid 궤도력을 사용하여도 초기좌표 구속범위를 수평

과 수직에 대해 각각 $\pm 10\text{cm}$ 와 $\pm 3\text{cm}$ 로 하여도 $\pm 1\text{cm}$ 이상 정확도 확보가 가능하였다. 이것은 구속범위 이내의 지각변위를 야기하는 지진의 경우 발생 3시간 이후부터 센티미터 수준 이상 정확도로 수평방향 동적좌표 추정을 위한 해석이 가능하다는 것을 의미한다.

셋째, 기선해석에 사용하는 데이터양과 정확도를 비교한 결과 9h 이상을 사용하는 경우에서 동등한 수준의 정확도로 동적 좌표를 추정 할 수 있었으나 3h 이하의 데이터는 부정확한 미지정수 추정으로 좌표에 바이어스가 발생하여 그 정확도가 급격히 감소하였다. 그러나 3h 이하의 경우도 해당 처리 기간 내에서 정밀도는 수 mm 수준을 유지하여 상대변위 해석에 높은 활용성이 있을 것으로 판단된다.

넷째, 초기좌표 구속범위는 동적좌표 추정 정밀도와 매우 밀접한 관계를 보였다. 특히 구속범위의 변화에 대하여 수직 방향 정밀도가 상대적으로 높은 민감성을 나타내었으며, 수평에서는 그 범위를 10배 증가하는 경우에도 정확도에 미치는 영향은 수 밀리미터 수준이었다. 따라서 상대적으로 높은 수평방향 지각변위가 발생하는 지진의 경우 해당방향에 대한 구속범위 증가에 대해 추정좌표 정밀도 저하에 큰 영향이 없을 것으로 예상되어 본 연구의 GPS 해석방법 실제문제 해결에 효율적으로 활용 가능할 것으로 사료된다.

본 연구는 중기선 동적 기선해석을 통해 얻을 수 있는 정확도와 정밀도 그리고 이들 성능지표와 상관성이 높은 처리조건의 영향을 실험을 통해 분석한 것으로 향후 실제문제에 적용

하기 위해서는 국외 지진재해 발생 사례에 대한 GPS 데이터처리를 통해 최적화를 위한 연구를 수행 할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 2014년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 이공분야기초연구사업 지원을 받아 수행되었으며(NRF-2014R1A1A2056133), GPS 관측데이터를 제공해준 국토지리정보원 관계자 여러분께 사의를 표합니다.

References

- Bock, Y., Cecil, H., and Ida, M. (1998), Medium distance GPS measurements, In: Teunissen, P. and Kleusberg, A. (eds.), *GPS for Geodesy*, Springer, pp. 483-536.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., and Meindl M. (2007), *Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland.
- FGDC (1998), *Geospatial Positioning Accuracy Standards – Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*, FGDC-STD-007.3-1998, Federal Geographical Data Committee, Virginia, USA, pp. 3-11.
- Jung, K. and Lee, H. (2011), A study on continuous management strategy for published coordinates of national geodetic control points using GPS network adjustment, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 8, pp. 367-380. (in Korean with English abstract)
- Jung, G., Chae, J., and Yue, H. (2014), Study on ionosphere precursor phenomenon of earthquake using GPS data, *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 16-18 April, Wonju, Korea, pp. 855-858. (in Korean with English abstract)
- Jeong, T.J. (2015), *Analysis of Crustal Deformation Using GNSS Measurements after the Tohoku Earthquake*, Ph.D. dissertation, Sungkunkwan University, Suwon, Korea, 127p. (in Korean with English abstract)
- IGS (2016a), IGS tracking network, *International GNSS Services*, <https://igsceb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html> (last date accessed: 10 January 2016).
- IGS (2016b), IGS Products, *International GNSS Services*, <https://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods.html> (last data accessed: 10 January 2016).
- Kim, M.K. and Park, J.K. (2012), Monitoring the crustal movement before and after the earthquake by precise point positioning, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 30, No. 5, pp. 477-484. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.K. and Lee, I.S. (2004), The effect analysis of observation errors and satellite geometry to ambiguity validation test of carrier phase-based GNSS, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No.5D, pp. 805-814. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.K., Wang, J., and Rizos, C. (2005), An integer ambiguity resolution procedure for GPS/pseudolite/INS integration, *Journal of Geodesy*, Vol. 79, No. 4-5, pp. 242-255.
- Lee, Y.J., Lee, H.K., Kwon, C.O., and Cha, S.H. (2008), GPS baseline estimation of the 2nd order geodetic control network, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 26, No. 2, pp. 157-164. (in Korean with English abstract)
- Lee, H. (2014), An instantaneous integer ambiguity resolution for GPS real-time structure monitoring, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No.1, pp. 341-353. (in Korean with English abstract)
- Park, J.K. and Yun, H.C. (2011), Analysis about seismic displacements based on GPS for management of natural disaster, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 6, pp. 311-318. (in Korean with English abstract)
- Segall, P. and Davis, J.L. (1997), GPS application for geodynamics and earthquake studies, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 25, pp. 301-336.
- Seo, D. (2013), *GPS Data Processing per Seconds by Kinematic Precise Point Positioning Method: Case Study of the 2011 Tohoku-oki Earthquake in Japan*, Master's thesis, Inha University, Incheon, Korea, 84p. (in Korean with English abstract)
- UNAVCO (2016), The toolkit for GPS/GLONASS/Galileo/SBAS/QZSS data, *University Navstar Consortium*, <https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html> (last date accessed: 10 January 2016).