Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 33, No. 6: 2601-2610/ November, 2013
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2013.33.6.2601

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Surveying and Geo-Spatial Information Engineering | **측량 및 지형공간정보공학**

GNSS에 의한 절대측위의 정확도 해석

이용창*
Lee, Yong Chang*

Accuracy Analysis of Absolute Positioning by GNSS

ABSTRACT

The main limiting factors of Precise Point Positioning(PPP) accuracy are errors in broadcast satellite orbits, clock errors, and the others, which are receiver-dependent errors(ionospheric, tropospheric refraction, multipath, and tides, etc.). Therefore, to facilitate high precision PPP, precise orbits/clocks corrections, the receiver-dependent errors corrections have to apply to multi frequency GNSS measurements for an ionosphere free combination and integer ambiguity resolution in real-time. Currently, there are many Analysis Centers, which offer the precise corrections stream computed in real-time using the global or regional GNSS tracking network. The goles of this research considered performances of the real-time static PPP with using RTCM corrections from NTRIP casters. For this, the corrections streams of Analysis Centers received via NTRIP does apply to GNSS data of check points individually, as well as jointly, in accordance with various session lengths. After that, have compared the PPP results from the corrections streams with each other, and with Standard Point Positioning(SPP) results.

Key words : PPP, Integer ambiguity, The precise corrections streams, RTCM, NTRIP

초 록

정밀단독측위(PPP)의 정확도에 영향을 주는 주요변수는 위성궤도력의 정확도, 위성시계오차, 관측자 환경에 종속된 오차(전리층 및 대기층 지연, multipath, tides 등) 및 이들과 관련한 모호정수의 해석 문제 등이다. 따라서 정밀단독측위의 정확도를 향상시키기 위해서는 여러 주파수의 GNSS 관측 자료에 정밀한 위성궤도 및 시계 보정정보와 관측자에 종속된 보정정보를 적용하여 전리층지연 및 모호정수를 실시간 해석해야 한다. 현재, 지역 및 광역 실시간 GNSS 관측망으로 부터 정밀 보정정보를 제공하는 여러 해석센터가 있다. 본 연구는 지역 또는 광역 GNSS 관측망의 해석센터들로부터 산출된 RTCM 보정정보를 NTRIP으로 수신하여 실시간으로 검사점에 개별 및 조합 적용하고 표준단독측위(SPP) 및 다양한 보정정보의 적용에 따른 정밀단독측위의 정확도를 시간대별로 비교·분석하여 GNSS위성에 의한 실시간 절대측위의 정확도를 검토하였다.

검색어 : 정밀단독측위, 모호정수, 보정정보, RTCM, NTRIP

1. 연구배경 및 목적

정밀단독측위(PPP ; Precise Point Positioning) 용어는 Anderle (1976)의 Doppler 위성 관측자료와 정밀궤도력을 사용한 Doppler 측위연구에서 처음 도입되었다. '정밀'이란 정밀한 보정정보를 사용하기 때문에 붙여졌다. 일반적인 위성신호정보를 활용하는 표준단독측위(SPP ; Simple-, Single-, or Standard-Point Positioning)와는 달리 PPP는 정밀한 위성 궤도력 정보와 위성시계의 보정정보, 대기층 및 지각변동 보정모델 등을 적용하여 측위정확도를 향상시킬 수 있는 측위 기술이다. PPP는 Zumberg et al.(1997)에 의한 정적(Static) PPP 연구에서 이론적으로 정립되었고 Kouba et al.(2001)에 의해 동적(Kinematic) PPP기술이 제시되었다. 정밀단독측위 기술이 발표된

* 정회원·인천대학교 도시과학대학 도시환경공학부 교수 (**Corresponding Author**·Incheon National University·yclee@incheon.ac.kr)
Received May 8, 2013/ **revised** June 26, 2013/ **accepted** August 13, 2013

Copyright ⓒ 2013 by the Korean Society of Civil Engineers
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.

1997년경에는 관측 가능한 위성 대수 및 위성 궤도력의 품질제한, 모호정수의 해석(Ambiguity Resolution)을 위한 소요시간 문제 등으로 대부분 2주파 수신기를 사용한 사후처리 중심의 정적 PPP 기술이었다. 특히, PPP 해석이 가능한 과학기술용 소프트웨어도 개발되었는데 JPL(Jet Propulsion Laboratory)의 JIPSY-OASIS Ⅱ(GOAⅡ), Berne대학교 천문연구소(AIUB)에서 개발한 Bernese GPS, SIO(Scripps Institution of Oceanography)의 GAMIT/GLOBK 등이 대표적이다. 또한, 캐나다 NRCan의 CSRS-PPP, New Brunswick 대학의 GAPS, JPL의 APPS, GMV의 magicGNSS, SOPAC(Scripps Orbit and Permanent Array Center)의 SCOUT 등과 같은 온라인 PPP 해석 서비스도 발표되었는데 대부분 사후처리 방식에 의한 정적 및 동적 측위 기능을 제공한다.

GPS와 GLONASS 위성의 현대화, GALILEO 및 COMPASS 위성의 약진, PPP 해석 알고리즘의 향상 등에 따라 절대측위의 정확도 향상과 관련한 연구가 여러 응용분야에서 활발히 발표되고 있다. Zhang et al.(2006)은 PPP 기술로 방하의 유속과 방향을 결정하고 극지 연구에서 PPP 기술의 효용성을 입증한 바 있다. 2007년대 중반까지도 PPP해석은 대부분 GPS 위성만으로 수행되었지만, GLONASS 위성의 정밀궤도력과 위성시계의 보정값이 서비스되면서 GNSS 위성들의 조합에 의한 PPP 해석법이 제시되었다. 또한, Cao(2010)는 Galileo의 시험위성인 GIOVE와 GPS의 조합 PPP 해석법을 발표한바 있다. 최근에는 전 지구 GNSS 상시관측망을 운영하는 해석센터(AC ; Analysis Center)에서 산출한 보정정보(correction streams)를 NTRIP(Networked Transport of RTCM via Internet Protocol)방식으로 전송하여 실시간 정밀절대측위의 정확도 향상을 위한 연구와 BKG(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)의 BNC(BKG Ntrip Client, http://igs.bkg.bund.de/root_ftp//NTRIP/software) 및 RTKLib (http://gpspp.sakura.ne.jp) 등과 같은 운용 프로그램의 향상연구가 활발히 진행되고 있다. PPP는 매우 신속하고 활용도에 따라 효율적인 측위 기술이나, 정확도 면에서 전송파 신호의 실시간 모호정수 해석문제로 인해 측지측량 수준의 응용분야에는 활용되지 못하고 있지만 이를 위한 지속적인 연구가 진행되고 있다. PPP의 측위정확도에 영향을 주는 주요변수로는 위성 궤도력의 정확도, 위성시계오차 및 관측자 환경에 종속된 오차 및 이들과 관련한 모호정수의 해석 문제 등이다. 따라서, 실시간 절대측위의 정확도 향상을 위해서는 다종 및 다수의 위성신호와 관측자 환경에 종속된 여러 오차요인의 실시간 상태공간(SSR ; State Space Representation) 모니터링과 관련 정밀 보정값의 실시간 전송이 필요하다. IGS(International GNSS Service)에서는 전 세계 GNSS 상시관측망 자료를 종합 해석하여 전 지구를 대상으로 정밀 위성 궤도력, 위성시계의 보정값, 전리층 보정모델 등의 품질 향상과 산출 주기 단축 등 지속적인 서비스를 하고 있다. 또한, 국가나 대륙 차원의 GNSS 상시관측망을 운영하고 있는 다수의 해석센터에서도 개별적인 보정정보를 표준통신규약(RTCM)으로 변환하여 NTRIP으로 실시간 제공하고 있어 실시간 정밀절대측위의 전망은 매우 밝다. 측지측량에서는 전리층 지연 보정 및 모호정수 해석을 위해 일반적으로 2주파 관측 자료에 의한 이중차분법(DD ; Double Differencing)을 적용하고 있지만, 수신기 1대 만을 사용하는 PPP의 경우는 차분법을 사용할 수 없으므로 위성의 궤도력 및 시계 보정 정보 외에도 전리층 신호지연의 영향을 보정하면서 모호정수의 해석을 도모할 수 있도록 L_3 신호조합(L_3 ; ionospheric-free combination)을 알고리즘에 채택하고 있다. 1주파 수신기를 사용할 경우는 별도의 기법이 필요한데 그동안 여러 연구자(Le, 2004; Chen et al., 2005; Choy et al., 2008)들에 의해 다양한 해법이 발표된바 있다. 또한 Gaber et al.(2002)과 Trimble RTX(2011)에서는 위성-위성 간 단일차분법(SD ; Single Difference)을 활용하여 PPP를 위한 모호정수 해석을 수행한 바 있다. 특히, 모호정수의 실시간 해석을 도모하며 PPP의 측위정확도를 향상 시킬 수 있는 상태공간보정계수를 비차분방정식과 칼만 필터링으로 산출할 수 있는 방법이 CNES(Center National d'Etudes Spatiales, France)의 Laurichesse et al.(2008; 2009; 2010; 2011; 2012), Juan et al.(2012), Collins et al.(2008) 및 Geng et al.(2008)에 의해 수행되었다.

본 연구의 목적은 전 지구에 분포한 GNSS 해석센터들로부터 산출된 정밀단독측위용 보정정보를 NTRIP를 통해 수신하여 실시간으로 검사점에 개별 및 조합 적용하고 각 경우별 PPP와 SPP의 시간대별 정적측위 정확도를 종합적으로 비교·분석하여 GNSS 위성에 의한 실시간 정적 정밀절대측위의 정확도를 고찰하고자 한다.

2. 기본이론 및 연구방법

GNSS 전송파의 실시간 모호정수 해석은 정밀 측위분야에서 매우 중요한 과제이다. 특히, PPP에서는 이중 차분방정식을 구성할 수 없으므로 전리층 영향을 무시할 경우라도 모호정수는 실수값으로 남아있게 된다. 최근 들어, 지역 또는 광역 GNSS 상시관측망을 활용한 응용연구에서 비차분방정식에 의한 모호정수 결정기술 분야의 다양한 발전이 있었다. 즉, 위성신호의 코드 및 위상 정보를 조합하여 기상보정과 관련한 모델 없이도 비차분방식(zero-difference)에 의해 모호정수의 실시간 결정이 가능하게 되었다. CNES의 Laurichesse et al.(2008)은 비 차분 모호정수 해법을 활용한 E(Enhanced)-PPP 측위기술을 개발·발전시켜 오고 있다. E-PPP의 핵심은 위상자료에 대한 실수 및 정수 2종의 모호정수를 실시간 처리하는 칼만 필터링에 있다. 칼만 필터링을 통해 지역망 또는 광역망에 대한 위성시계

관련 정보와 위성궤도력을 산출하여 모호정수를 결정하고 실시간 PPP 측위를 수행하게 된다. Eqs. (1)~(3)은 측지용 수신기의 코드 및 위상에 대한 의사거리 방정식(1대 수신기와 1대 위성 기준)을 구성하여 E-PPP의 핵심이론을 정리한 것이다. 여기서, ρ, c는 ionosphere free 기하거리와 광속, f_1, f_2는 GPS 위성의 L_1, L_2 신호 주파수, T, I는 대류층 및 전리층 지연, dt^r, dt^s는 수신기시계 및 위성시계 보정량, b^r_*, b^s_*는 위성신호(*)에 대한 수신기(r) 및 위성(s)의 bias, N_1, N_2는 2가지 전송파 위상의 모호정수이다.

$$
\begin{aligned}
&P_1 = \rho + T + I + c(dt^r - dt^s) + b^r_{P_1} - b^s_{P_2} + \epsilon_{P_1}, \\
&P_2 = \rho + T + \gamma I + c(dt^r - dt^s) + b^r_{P_2} - b^s_{P_1} + \epsilon_{P_2} \\
&\lambda_1(\Phi_1 + N_1) = \rho + T - I + c(dt^r - dt^s) + b^r_{L_1} - b^s_{L_1} + \epsilon_{L_1}, \\
&\lambda_2(\Phi_2 + N_2) = \rho + T - \gamma I + c(dt^r - dt^s) + b^r_{L_2} - b^s_{L_2} + \epsilon_{L_2} \\
&\gamma = (f_1/f_2)^2, \quad \lambda_1 = c/f_1, \quad \lambda_2 = c/f_2
\end{aligned}
\tag{1}
$$

비차분방식에 의한 모호정수의 정수화를 위해서는 Eq. (2), Eq. (3)과 같은 두 가지 종류의 선형조합(MWWL ; Melboune-Wübbena Wide Lane Lc 및 NL ; Narrow Lane Ionosphere-free Lc)방정식을 구성해야한다. GNSS 상시관측망 자료를 활용하여 MWWL방정식을 구성·해석하여 N_w를 결정한 후, 칼만 필터링을 통해 NL Ionosphere-free 방정식에서 N_1 및 '정수 위상 시계보정값(integer phase clocks)'을 계산한 후, 수신기의 좌표를 결정한다.

$$
\text{MWWL Lc} : f(L_2 - L_1, P_1, P_2) = -N_w + \mu_r - \mu^s \tag{2}
$$

NL Ionosphere-free Lc :

$$
\begin{aligned}
&P_c = \rho + T + c\left(dt^r_{P_c} - dt^s_{P_c}\right) \\
&Q_c = L_c + \lambda_w{}' N_w = \rho + T + c\left(dt^r_{L_c} - dt^s_{L_c}\right) - \lambda_c N_1
\end{aligned}
\tag{3}
$$

여기서, μ_r, μ^s는 각각 수신기 r과 위성 s의 Wide Lane bias 이다.

2009년부터 CNES/CLS IGS해석센터에서는 전 세계에 분포한 약 50여개의 GNSS 상시관측소 자료를 상기 이론에 따라 해석하고 실시간 모호정수 해석(IAR ; Integer Ambiguity Resolution)을 위한 보정정보(N_w, N_1 및 '정수 위상 시계보정값')을 NTRIP를 통해 제공하고 있다. 사용자는 CNES에서 NTRIP으로 실시간 서비스하는 보정정보를 다양한 해석 툴(예, BNC, RTKLib 등)에 적용하여 PPP에 활용할 수 있다. BNC 툴은 국가 또는 대륙 차원의 해석센터에서 자국 및 전 지구 GNSS 상시관측소 자료를 선별조합해석한 후 산출한 RTCM형식의 OSR(Observation space Representation) 및 SSR 보정값(버전3)을 해독, 변환 및 모니터링하며 개별 및 Kalman Filtering으로 조합 적용하여 실시간 PPP 측위 기능을 수행한다. 본 연구에서는 해석센터로부터의 '다양한 보정정보(이하 "보정류"라 함)' 및 검사점의 관측값을 Ntrip를 매개로 BNC 툴에서 실시간 수신하고 자료 처리하였다. 본 연구의 수행 방법으로 우선, 국내에는 PPP용 보정값의 제공처가 없는 관계로 우리나라를 포함한 전 지구를 대상으로 관측망을 운영하면서 GNSS 위성의 PPP용 보정정보를 NTRIP를 통해 서비스하는 해석센터를 선정한 후, PPP의 측위정확도를 검토할 수 있도록 국내 및 국외에 '검사용 기준점(이하 "검사점"이라 함)'을 선점한다. 각 검사점에 대한 실시간 SPP와 해석센터의 보정정보를 활용한 PPP를 수행한다. 특히, PPP에서는 각 해석센터들로부터 전송된 보정정보를 검사점에 개별 및 조합 적용한다. 검사점의 고시성과를 기준으로 시간대별 SPP에 의한 좌표성과, 각 해석센터 보정류의 적용 방식에 의한 PPP 좌표성과들 간의 정적측위 정확도를 종합적으로 비교·분석하여 GNSS위성에 의한 실시간 절대측위의 정확도를 고찰한다.

3. 관측 및 자료처리

국내의 검사점은 인천 상시관측소(INCH ; 위성기준점 고시성과 X= -3,030,123.316m, Y=4,067,231.024m, Z=3,854,557.431m, ITRF2000, Epoch : 2002-01-01 자정), 국외는 NTRIP를 통해 PPP용 보정정보를 제공하는 해석센터의 대부분이 현재, 유럽에 편중되어 운용 중임으로 프랑스 CNES의 GRAS(-4581690.7960m, Y=556114.9883m, Z=4389360.8851m, ITRF08, Epoch : 2012-11-17 자정) 관측소를 선정하였다. 해석센터와 보정정보는 우리나라에 가장 근접한 중국 Wuhan의 CLK16, 프랑스 CNES의 CLK91 및 CLK9B, 독일의 IGS03을 선정하였다. 현재, CLK16은 GPS의 보정값만 제공하며 CNES의 CLK9B는 실시간 모호정수의 해석이 가능한 보정정보(IAR ; Integer Ambiguity Resolution)를 RTCM MT1059로 잠정·제공하고 있다. 특히, CNES의 실시간 관측망에는 우리나라 수원관측소가 포함되어있다. 검사점에 대해 실시간으로 산출한 각 경우별 절대측위성과와 고시성과 간의 좌표편차(N, E, U)는 관측소 중심의 3축 방향 좌표계(Topocentric Coordinates System)로 계산하였다.

Table 1 및 Fig. 1은 각각 본 연구에서 선정한 검사점 2개소와 해석센터 4개소의 보정정보 색인, 활용된 위성의 종류, 보정값의 RTCM 메시지 형식, 관측망, 운용 프로그램, 국가(해석센터)명 등의 제원과 위치분포를 나타낸다. 각 해석센터는 전 지구의 상시관측소를 선별하여 구성한 독립적인 GNSS 상시관측망을 운용하고 있다. 특히, 실시간 관측 중 사용자 컴퓨터, 해석센터 및 검사점 운영센터 간의 통신 및 동시접속자수의 제약 등 다양한 인터페이스

Table 1. Attributes of the four Correction Streams, and the Two Check Points

Mount Point	GNSS	RTCM MT	Network	SW	Nation (AC)
INCH	GPS GLO	RTCM 3.0 1004,1005,1007	NGII	Trimble GPSNet	KOR (NGII)
GRAS	GPS GLO	RTCM 3.0 1004,1012	IGS	Trimble NetR5·	FRA (CNES)
CLK16	GPS	RTCM 3.0 1059,1060	WUHAN	PANDA BNS	CHN (WUHAN)
CLK91	GPS GLO	RTCM 3.0 1059,1060,1065,1066	CNES	PPP-Wizard BNS	FRA (CNES)
CLK9B	GPS GLO	RTCM 3.1+IAR 1059,1060,1065,1066	CNES	PPP-Wizard BNS	FRA (CNES)
IGS03	GPS GLO	RTCM 3.0 1057,1058,1059,1063	IGS Combination	KF-Combination BNC	DEU

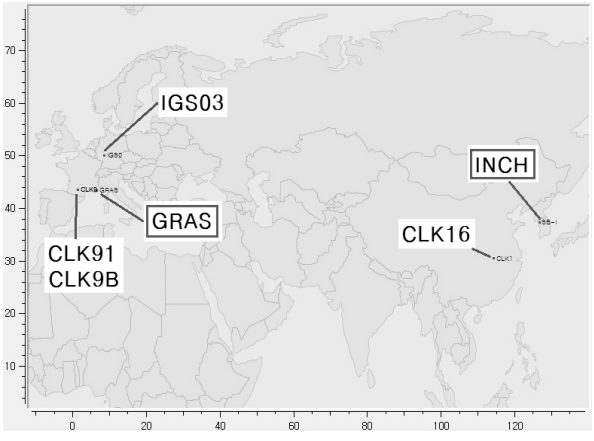

Fig. 1. Distribution of Stations Are Chosen as Streams Mount-Point, and Check Points ('Box')

문제로 동일한 시간대의 '동일한 관측조건'의 설정에 난점이 있었다. 따라서, 본 연구에서는 2시간의 관측(epoch 1초)을 1개 세션으로 하고 각 검사점에 대해 해석센터의 보정류 별로 각각 10개 세션의 관측 및 보정정보를 적용하지 않는 5개 세션의 SPP를 수행한 후, 좌표편차를 통계 처리하여 측위정확도 비교에 활용하였다.

Table 2는 SPP 및 해석센터의 보정류를 검사점에 개별 적용 및 조합 적용한 PPP 용 관측시간대를 정리한 것이다.

4. 비교 분석

각 검사점(INCH, GRAS)별로 SPP 5개 세션과 4종(CLK16, CLK91, CLK9B, IGS03)의 개별 보정정보 및 보정정보의 조합(CLK16+CLK9B+IGS03)에 의한 PPP 50개 세션, 총 55개 세션의 절대측위좌표와 고시좌표간의 좌표성분 편차를 Epoch 1초마다 관측소 중심의 3축 방향 좌표성분(N, E, U)으로 산출하고 비교분석하였다. 특히, 세션 별 시간에 따른 좌표성분의 편차 경향을 고찰하기 위해 각 세션을 7개의 시간대(2시간×1구간, 10분×3구간, 30분×3구간)로 구분하고 시간대 별 좌표성분의 편차 평균과 실시간 측위에 활용된 GNSS 위성대수(Ns)의 변동을 도시하고 실시간 좌표편차의 경향과 절대측위의 정확도를 고찰하였다.

4.1 INCH 검사점의 절대측위

Fig. 2는 인천관측소(INCH)의 SPP 5개 세션에 대한 시간대별 좌표편차(N, E, U)의 평균과 관측에 활용한 평균 위성대수의 변동

Table 2. All Sessions Time Intervals for Data Sampling at INCH, and GRAS (in April 2013)

Streams	INCH(Day of Year)	GRAS(Day of Year)
CLK16	17(DOY107)～20(DOY110)	19(DOY109)～20(DOY110)
CLK91	21(DOY111)～22(DOY112)	20(DOY110)～21(DOY111)
CLK9B	20(DOY110)～21(DOY111)	20(DOY110)～21(DOY111)
IGS03	16(DOY106)～19(DOY109)	19(DOY109)～20(DOY110)
CombinedPPP	22(DOY112)～24(DOY114)	21(DOY111)
SPP	25(DOY115)～26(DOY116)	25(DOY115)～26(DOY116)

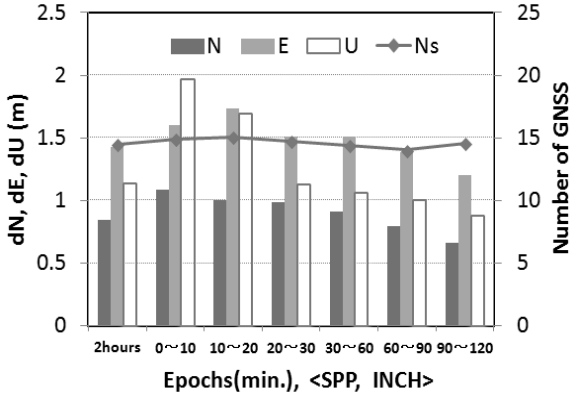

Fig. 2. Positioning Errors of Single Point Positioning Solution, and Number of Satellites at INCH

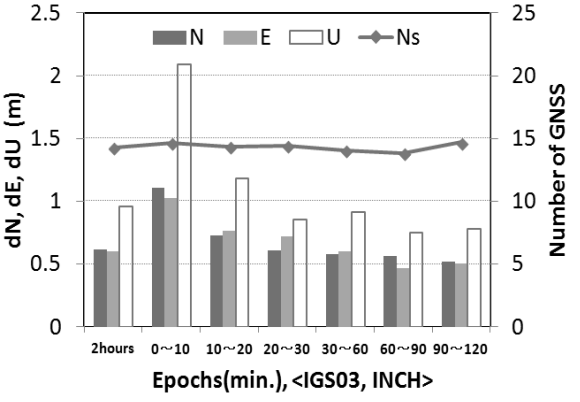

Fig. 3. Real-Time Position Errors with IGS03, and Number of Satellites at INCH

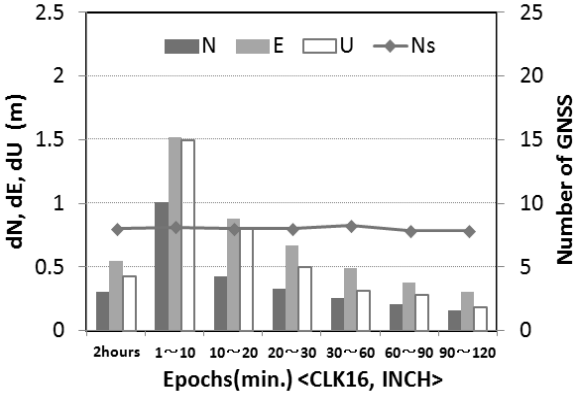

Fig. 4. Real-Time Position Errors with CLK16, and Number of Satellites at INCH

을 도시한 것이다. 그림에서 가로축 '2시간' 항은 개별 2시간 관측에 대한 5개 세션의 평균, '1~10'에서 '20~30'까지는 10분 간격, '30~60'에서 '90~120'까지는 각각 30분 간격으로 시간대별 평균분포를 나타낸다. 시간이 경과됨에 따라 편차가 감소하는 경향을

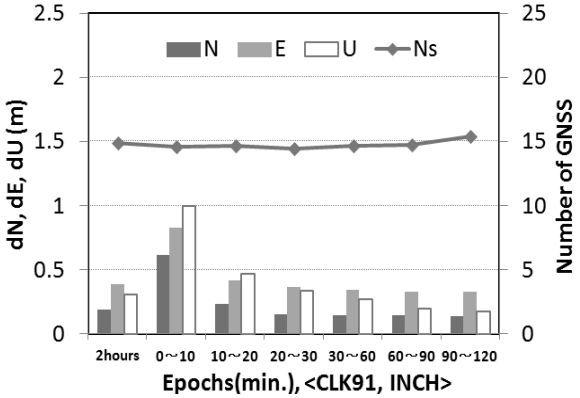

Fig. 5. Real-Time Position Errors with CLK91, and Number of Satellites at INCH

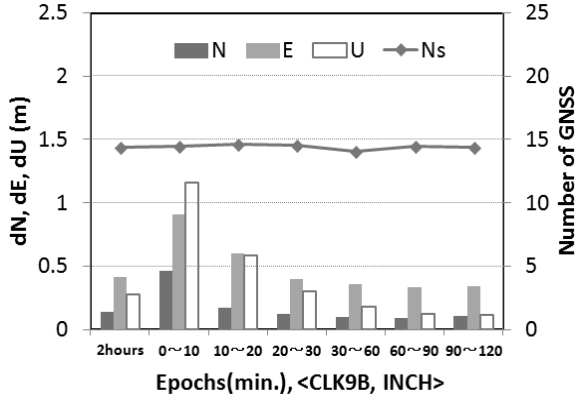

Fig. 6. Real-Time Position Errors with CLK9B, and Number of Satellites at INCH

보였고 각 시간대의 5개 세션 관측 동안, 평균 위성 수는 14.5대, 좌표편차의 평균은 각각 N=0.849m, E=1.431m 및 U=1.135m로 SPP에 의한 좌표의 종합편차($\sqrt{N^2+E^2+U^2}$)는 2.014m로 나타났다. Fig. 3~Fig. 6은 4종의 보정류(IGS03, CLK16, CLK91, CLK9B)를 활용하여 각각 10개 세션의 PPP를 수행하고 SPP와 동일한 방식으로 분석하였다. 4종의 보정류를 적용한 인천관측소의 좌표 편차는 시간경과에 따라 공통적으로 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 3에서 IGS03은 평균 위성 수가 14.3대, 좌표편차의 평균은 각각 N=0.617m, E=0.601m 및 U=0.954m로 좌표의 종합편차는 1.285m로 나타났다. CLK16은 GPS위성만 보정정보를 제공하므로 Fig. 4와 같이 평균 위성 수는 8.0대, 좌표편차의 평균은 각각 N=0.301m, E=0.550m 및 U=0.427m로 좌표의 종합편차는 0.759m로 나타났다. CLK91은 Fig. 5와 같이 평균 위성 수가 14.9대, 좌표편차의 평균은 각각 N=0.189m, E=0.386m 및 U=0.311m로 좌표의 종합편차가 0.531m를 보였다.

CLK9B의 경우는 Fig. 6과 같이 평균 위성 수, 14.4대, 좌표편차

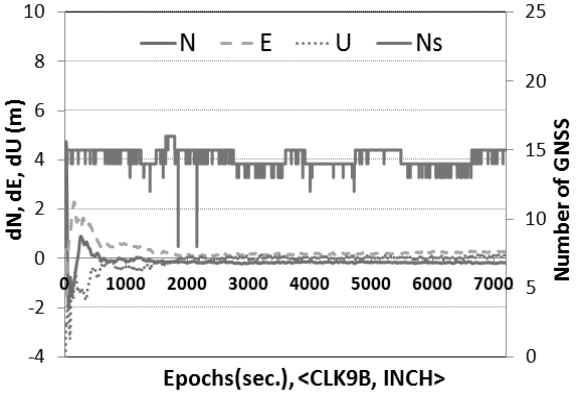

Fig. 7. Time Series of Position Differences of the Real-Time PPP Solution with CLK9B, and Number of Satellites at INCH

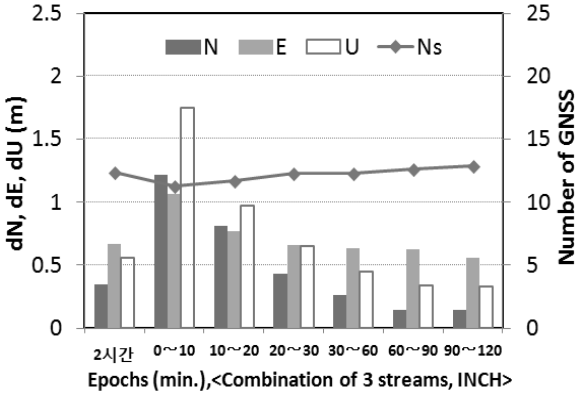

Fig. 8. Position Differences of the Real-Time PPP Solution with a Combination of IGS03, CLK16, and CLK9B, and Number of Satellites at INCH

의 평균이 각각 N=0.138m, E= 0.417m 및 U=0.275m, 좌표의 종합편차는 0.518m로 위 4종의 보정류를 개별적으로 적용한 PPP 해석 중 비교적 균일하고 가장 양호한 측위성과를 제시하였다. CLK9B는 모호정수를 실시간으로 해석할 수 있는 정보를 별도로 포함하고 있지만, CLK91에 비해 월등히 양호한 측위성과는 확인할 수 없었으나 IGS03, CLK16에 비해 우수한 측위결과를 보였다. Fig. 7은 인천관측소에 CLK9B 보정정보를 적용하고 산출한 Epoch 1초 간격의 좌표성분 별 편차분포를 시계열로 도시한 것이다. Figs. 3~6에서 N, E, U 좌표성분의 편차가 특히, 50cm이내에 도달되는 평균 소요시간을 고찰하면 IGS03의 경우, U성분의 편차를 제외한 경우라도 90여분이 소요되었고 CLK16은 30분, CLK91은 10분 직후, CLK9B의 경우 20여분 등으로 나타났다. GPS위성만 사용한 CLK16를 제외할 경우라도 평균 14대 위성을 활용한 다른 3종의 보정류에서 50cm 편차 이내의 도달 소요시간이 다양하게 나타나고 있다. 원인으로 해석센터가 운영하는 관측망에서 검사점 주변의 관측소 밀도, 해석센터의 보정정보 산출 알고리즘, NTRIP를 통한 보정정보의 신호지연, 검사점 환경에 종속된 오차의 보정 수준, 모호정수의 결정수준 등의 차이로 사료되나 이 부분에 대한 좀 더 세부적인 연구가 요망된다. Fig. 8은 3종의 보정류(CLK16, CLK9B, IGS03)를 조합(이하, '3종 조합')하여 인천관측소에 적용하고 10개 세션관측의 시간대별 좌표편차를 도시한 것이다. 아울러, Fig. 9는 5가지 보정류를 별도로 추가하여 6종의 보정류(IGS01, CLK21, CLK22, CLK51, CLK80, CLK91)조합(이하 '6종 조합')을 구성하고 적용한 총 3개 세션(2013년 DOY68~DOY71 기간 중 실시)의 시간대별 좌표편차를 도시한 것이다(Lee, (2013)). 여기서, IGS01, CLK22, CLK51은 GPS위성만의 보정정보이다.

3종 조합의 경우는 Fig. 8과 같이 평균 위성 수, 12.4대, 좌표편차의 평균이 각각 N=0.342m, E=0.664m 및 U=0.560m, 좌표의

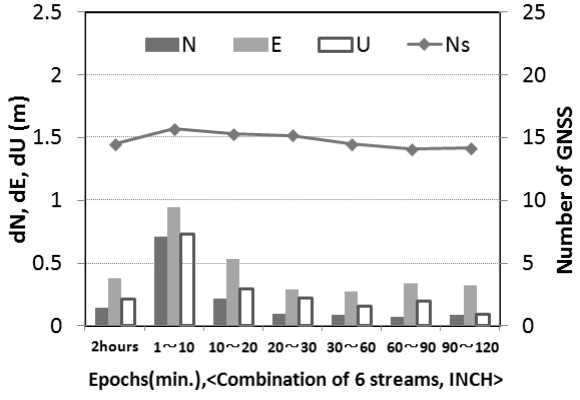

Fig. 9. Position Differences of the Real-Time PPP Solution with a Combination of IGS01, CLK21, CLK22, CLK51, CLK80, and CLK91, and Number of Satellites at INCH

종합편차는 0.934m로서 앞서 IGS03의 측위결과와 유사한 편차를 보였다. 반면, 6종 조합의 경우는 Fig. 9와 같이 평균 위성 수 14.5대, 좌표편차의 평균이 각각 N=0.149m, E=0.383m 및 U=0.217m, 좌표의 종합편차가 0.465m로 3종 조합에 비해 월등히 향상된 결과를 보이면서 인천 관측소에 적용한 절대측위 좌표성과 중 가장 양호한 결과를 제시하였다.

보정류의 3종 조합이 개별 적용에 비해 좌표편차가 크게 나타난 것은 상이한 해석센터의 보정정보를 조합하는 과정에서 보정정보의 노후(over aged), 궤도력 정보의 과대 오차 등에 따른 원인으로 사료되나 향후, 최적의 보정류 조합 선정을 위한 추가 연구가 요망된다.

4.2 GRAS 검사점의 절대측위

Fig. 10은 GRAS관측소의 SPP 5개 세션 대한 시간대별 좌표편차(N, E, U)의 평균과 관측에 활용한 평균 위성대수의 변동을 도시한 것이다. 시간 경과에 따라 편차가 감소하는 경향을 보였고

5개 세션 동안, 평균 위성 수는 14.2대, 좌표편차의 평균은 각각 N=0.626m, E=0.572m 및 U= 1.208m로 SPP에 의한 좌표의 종합편차는 1.476m이다.

Figs. 11～14는 인천관측소와 동일한 방식으로 4종의 보정류를 GRAS 관측소에 개별 적용하여 각각 10개 세션의 PPP를 수행하고 좌표편차를 도시한 것이다. GRAS관측소의 좌표편차 감소율은 4종 모두 인천관측소에 비해 양호하게 나타났다. Fig. 11과 같이 IGS03은 평균 위성 수가 13.3대, 좌표편차의 평균은 각각 N=0.439m, E=0.464m 및 U=0.907m로 좌표의 종합편차는 1.109m로 나타났다. Fig. 12와 같이 평균 위성 수가 8.2대인 GPS위성만의 보정정보인 CLK16은 좌표편차의 평균이 각각 N=0.266m, E=0.737m 및 U=0.499m로 세 좌표성분의 종합편차는 0.929m를 보였다. CLK91의 경우는 Fig. 13과 같이 평균 위성 수가 14.5대, 좌표편차의 평균은 각각 N=0.099m, E=0.137m 및 U=0.193m로 좌표의 종합편차는 0.257m로 나타났다. CLK9B의 경우는 Fig. 14와 같이 평균 위성 수가 14.5대, 좌표편차의 평균이 각각 N= 0.083m, E=0.143m 및 U=0.218m로 좌표의 종합편차는 0.274m이다. GRAS에서 CLK9B는 IGS03, CLK16에 비해서는 양호한 측위결과를 보였으나 CLK91보다 큰 편차를 보여 인천과는 상반된 결과로 나타났다. 아울러, N, E, U 좌표성분의 편차가 50cm이내로 도달되는 평균 소요시간은 IGS03의 경우 120분 이상, CLK16은 60분, CLK91 및 CLK9B의 경우는 10분 직후 등으로 INCH와

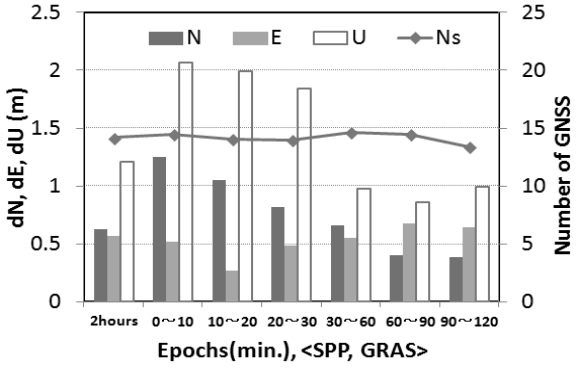

Fig. 10. Positioning Errors of Single Point Positioning Solution, and Number of Satellites at GRAS

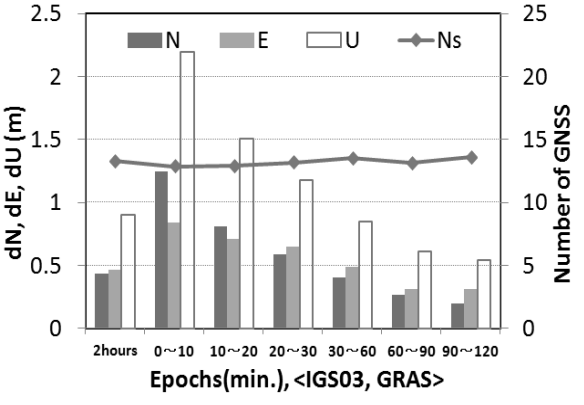

Fig. 11. Real-Time Position Errors with IGS03, and Number of Satellites at GRAS

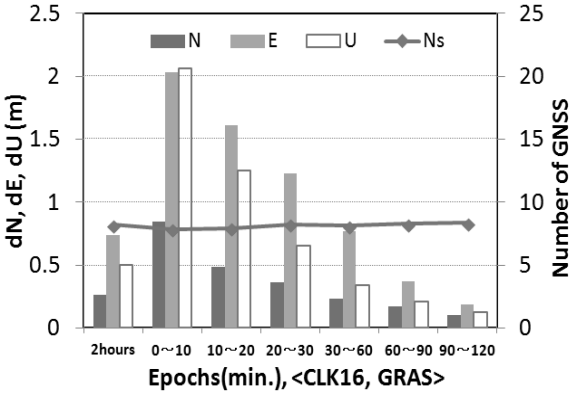

Fig. 12. Real-Time Position Errors with CLK16, and Number of Satellites at GRAS

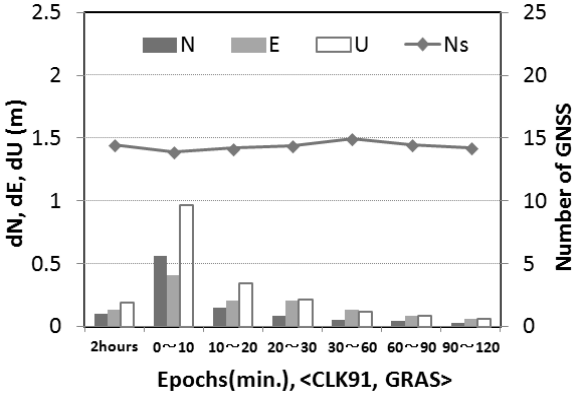

Fig. 13. Real-Time Position Errors with CLK91, and Number of Satellites at GRAS

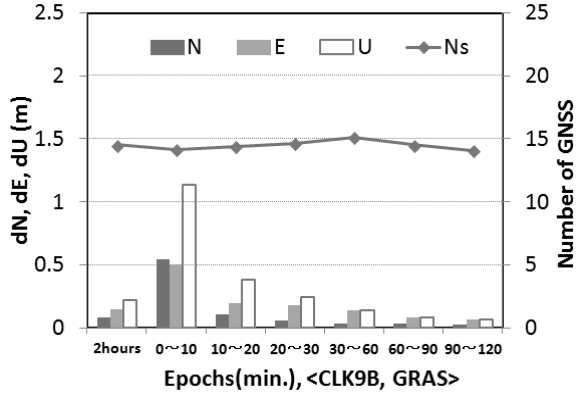

Fig. 14. Real-Time Position Errors with CLK9B, and Number of Satellites at GRAS

같이 다양한 시간분포를 보이는데 그 원인 또한 INCH와 유사한 것으로 사료된다. Fig. 15는 GRAS관측소에 CLK91 보정정보를 적용하고 산출한 Epoch 1초 간격의 좌표성분 별 편차 분포를 시계열로 도시한 것이다.

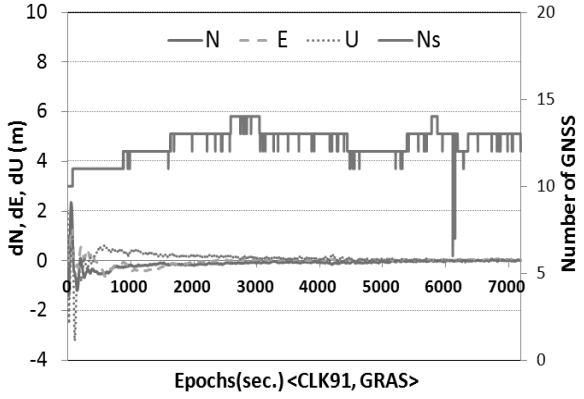

Fig. 15. Time Series of Position Differences of the Real-Time PPP Solution with CLK91, and Number of Satellites at GRAS

Fig. 16은 실시간으로 보정류의 3종 조합을 GRAS관측소에 적용하고 10개 세션별로 산출한 정밀절대측위의 좌표편차를 시간대별로 도시한 것이다. Fig. 17은 6종 조합을 실시간 적용한 총 3개 세션의 시간대별 좌표편차를 나타낸다. 3종 조합의 경우는 Fig. 16과 같이 평균 위성 수 12.6대, 좌표편차의 평균이 각각 N=0.212m, E= 0.277m 및 U=0.530m, 좌표의 종합편차는 0.634m로서 IGS03, CLK16에 비해 양호한 결과로 나타났다. 특히, 6종 조합의 경우는 Fig. 17과 같이 평균 위성 수 14.5대, 좌표편차의 평균이 각각 N=0.102m, E=0.205m 및 U=0.225m, 좌표의 종합편차가 0.321m로 인천관측소와 같이 3종 조합에 비해 월등히 향상된 결과를 보였다.

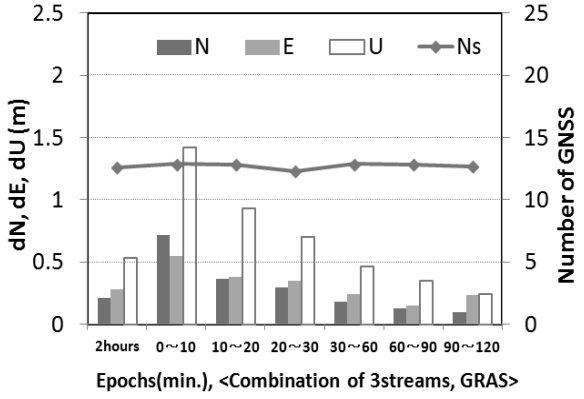

Fig. 16. Position Differences of the Real-Time PPP Solution with a Combination of IGS03, CLK16, and CLK9B, and Number of Satellites at GRAS

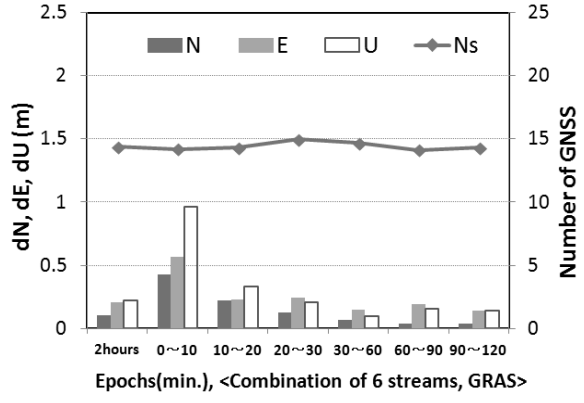

Fig. 17. Position Differences of the Real-Time PPP Solution with a Combination of IGS01, CLK21, CLK22, CLK51, CLK80, and CLK91, and Number of Satellites at GRAS

4.3 보정정보에 따른 시간대별 절대측위

Figs. 18 and 19는 검사점(INCH, GRAS)에 대한 4종의 개별 보정정보, 3종 조합 및 6종 조합에 의한 PPP 측위결과와 SPP

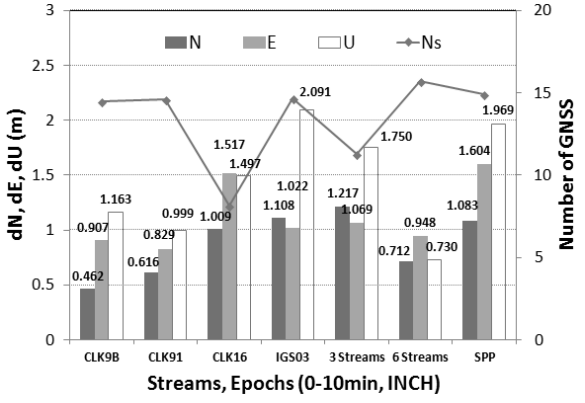

Fig. 18. Comparison of the Average Position Differences Derived From Various Corrections Streams for 0min. to 10min. at INCH.

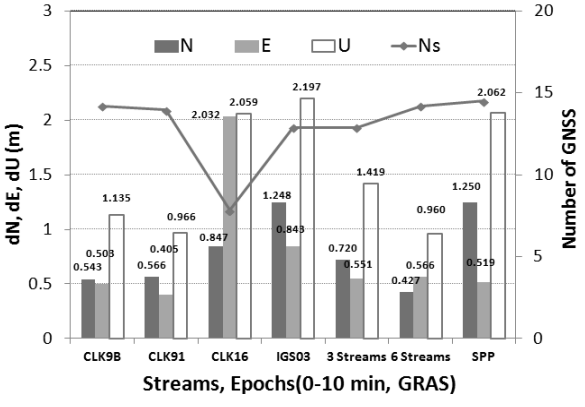

Fig. 19. Comparison of the Average Position Differences Derived From Various Corrections Streams for 0min. to 10min. at GRAS

측위 결과를 1초~10분 시간대, Fig. 20 및 Fig. 21은 10분 1초~20분 시간대로 나누어 보정류 적용방식에 따른 검사점 좌표편차의 성분별 평균을 비교·도시한 것이다.

관측 시작에서 10분 동안, 세 좌표성분(N, E, U)의 좌표편차가 모두 50cm 이내로 수렴되는 시간대는 없었지만, N, E 두 좌표성분만을 고려할 경우, GRAS 관측소의 CLK9B, CLK91 및 6종 조합 해석에서 가능하였다. GRAS관측소의 경우 관측 초반부에 CLK16 및 IGS03 성과에서 좌표편차가 크게 나타났는데 원인으로는 CLK16의 측위결과가 GPS위성만을 사용한 성과로 위성 대수가 상대적으로 작다는 점, 보정정보의 노후(over aged), 궤도력 정보의 과대 오차 등에 따른 것으로 사료된다. N, E 두 좌표성분만을 고려할 경우, 관측 10분 직후부터 20분까지의 시간대에서 SPP를 제외한 대부분의 보정류가 1m 이내의 측위가 가능하였다. CLK9B, CLK91 및 6종 조합의 경우, 두 관측소에서 공통적으로 세 좌표성분(N, E, U)이 모두 50cm로 근접되는 실시간 측위가 가능하였다. 프랑스 CNES에서 제공하고 있는 보정정보(CLK9B, CLK91)는

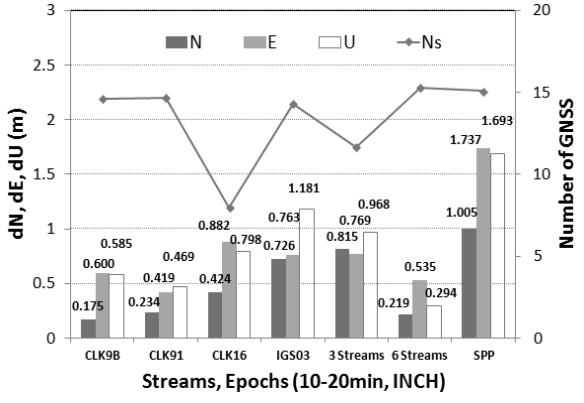

Fig. 20. Comparison of the Average Position Differences Derived From Various Corrections Streams for 10min. to 20min. at INCH.

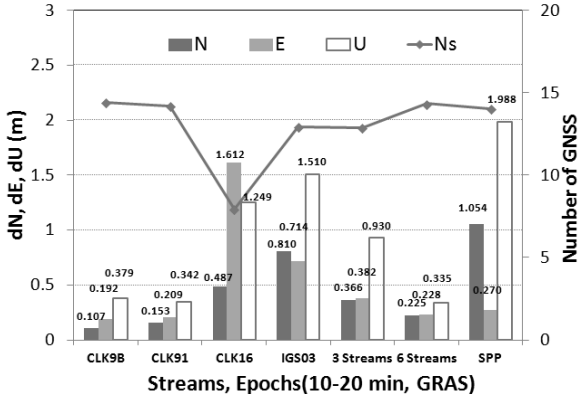

Fig. 21. Comparison of the Average Position Differences Derived From Various Corrections Streams for 10min. to 20min. at GRAS

다른 해석센터의 보정류에 비해 전체 시간대에서 우수한 측위성과를 보였다. 특히, CLK9B는 CLK91 및 다른 해석센터의 보정류와는 달리 실시간 모호정수의 해석이 가능한 보정정보를 RTCM MT1059에 저장하여 별도로 잠정·제공하고 있다. 본 관측에서는 다른 해석센터의 보정정보에 비해서는 양호하나 CLK91 대비 향상된 좌표성과를 확인할 수 없었는데 이는 앞서 고찰한 여러 가지 복합적 원인 등으로 보정정보의 신호지연(노후화)에 기인된 것으로 사료된다. 또한 6종 조합 및 3종 조합성과를 고찰해 보면 관측장소가 해석센터의 관할 영역 외부 또는 소외지역에 위치한 경우, 특정 단일 보정정보를 적용하는 것 보다 해석센터간의 보정류를 조합할 경우 절대측위의 정확도 향상을 도모할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

전 지구를 대상으로 GNSS 상시관측망을 운용하는 해석센터들로부터 다양한 보정정보를 실시간 수신하여 국내·외 검사점에 개별 및 조합 적용한 각 경우별 정밀단독측위(PPP)와 표준단독측위(SPP)의 정적 절대측위의 정확도를 시간대별로 고찰한 결과,

첫째, 해석센터의 보정정보를 NTRIP으로 수신하고 검사점의 GNSS 관측자료에 실시간 적용하여 각 보정류 별로 좌표편차의 경향과 실시간 절대측위의 정확도를 고찰할 수 있었다.

둘째, 특정 해석센터의 관할 영역 외부 또는 소외지역에 위치한 관측점에 여러 해석센터의 보정류를 조합 적용할 경우, 실시간 절대측위 정확도 향상에 기여할 수 있었다.

셋째, CNES의 CLK9B를 INCH 검사점에 적용한 최초 10분까지의 PPP는 SPP 대비 N, E, 및 U성분에서 각각 57.3%, 43.5%, 및 40.9%, CLK91를 GRAS에 적용한 경우는 각각 54.8%, 22.0%, 및 53.2%의 향상된 측위정확도를 나타내어 '비차분 모호정수 해법'에 의한 실시간 정밀절대측위의 정확도 향상 가능성을 확인할 수 있었다.

향후, 국내 및 주변지역의 GNSS 상시관측망을 활용한 정밀절대측위용 NTRIP Caster의 운용이 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2011년 인천대학교 자체연구지원비에 의해 이루어진 연구내용으로 인천대학교의 연구지원에 감사드립니다.

References

Anderle, R. J. (1976). "Point positioning concept using precise ephemeris." *Proceedings of the International Geodetic Symposium on Satellite Doppler positioning*, Las Cruces, N. Mex., October

12-14, 1976, Vol. 1, pp. 47-75.

Cao W., Hauschild, A., Steigenberger, P., Langley, R. B., Urquhart, L., Santos, M. C. and Montenbruck, O. (2010). "Performance evaluation of integrated GPS/GIOVE precise point positioning." *Institute of Navigation International Technical Meeting* 2010, San Diego, California, USA, 25-27 January 2010, pp. 710-722.

Chen, K. and Gao, Y. (2005). "Real-time precise point positioning using single frequency data." *Proceedings of the ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division*, Long Beach, CA, 13-16, September, pp. 1514-1523.

Choy, S., Zhang, K. and Silcock, D. (2008). "An evaluation of various ionospheric error mitigation methods used in single frequency PPP." *Positioning*, Vol. 1, No. 13, 2008, pp. 62-71.

Collins, J. P., Lahaye, F., Heroux, P. and Bisnath, S. (2008). "Precise point positioning with ambiguity resolution using the decoupled clock model." *Proceedings of the Institute of Navigation International Technical Meeting ION GNSS*, 16-19, September 2008, Savannah, Georgia, USA, pp. 1315-1322.

Gabor, M. J. and Nerem, R. S. (2002). "Satellite-satellite single-difference phase bias calibration as applied to ambiguity resolution." *Navigation*, Vol. 49, No. 4, pp. 223-242.

Geng, J., Meng, X., Teferle, N., Dodson, A. H. (2008). "Performance of hourly precise point positioning with ambiguity resolution." *Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation* (ION GNSS 2008), Savannah, GA, September 2008, pp. 1455-1461.

Juan, M., Hernandez-Pajares M., Sanz, J., Ramos-Bosch, P., Aragon-Angel, A., Orus, R., Ochieng, W., Feng, S., Jofre, M., Coutinho, P., Samson, J. and Tossaint, M. (2012). "Enhanced precise point positioning for GNSS users." *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions* on, Vol. 50, No. 10, October 2012, pp. 4213-4222

Kouba, J. and He´roux (2001). "Precise point positioning using IGS orbit and clock products." *GPS Solution* 5:2, pp. 12-28.

Laurichesse, D. (2011). "The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator." *Proceedings of the ION GNSS* 2011, September 2011, Portland, Oregon, pp. 654-662.

Laurichesse, D. (2012). "Phase biases estimation for undifferenced ambiguity resolution." *PPP-RTK & Open Standards Symposium*, 12-13 March 2012, Frankfurt am Main, Germany.

Laurichesse, D., Mercier, F. and Berthias, J. P. (2010). "Real Time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results." *Proceedings of the ION GNSS* 2010, September 2010, Portland, Oregon, pp. 2534-2544.

Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J. P. and Bijac J. (2008). "Real time zero-difference ambiguities blocking and absolute RTK." *ION NTM* 2008, January 2008, San Diego, California, pp. 747-755.

Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J. P., Broca, P. and Cerri, L. (2009). "Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination." *Navigation, Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 56, Issue. 2, pp. 135-149.

Le A. Q. (2004). "Achieving decimeter accuracy with single frequency standalone GPS positioning." *Proceedings of the ION GNSS* 17th International Technical Meeting of the Satellite Division, Long Beach, CA, pp. 1881-1891.

Lee, Y. C. (2013). "Combination analysis of GNSS orbit and clock streams in real-time PPP." *Proceedings of the Korea Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry, and Cartography* 2013, Busan, Korea, pp. 123-128 (in Korean).

Trimble, Germany (2011). "Introducing ambiguity resolution in web-hosted global Multi-GNSS precise point positioning with trimble RTX-PP." *ION GNSS* 2011, pp. 1115-1125.

Zhang, X. H. and Anderson, O. B. (2006). "Surface ice flow velocity and tide retrieval of the amery ice shelf using precise point positioning." *Journal of Geodesy*, Vol. 80, pp. 171-176.

Zumberge, J. F., Heflin, M. B. and Jefferson, D. C. (1997). "Precise point positioning for the efficientand robust analysis of GPS data from large networks." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No. B3, pp. 5005-5018.