

대한민국 측지 VLBI 안테나 위치좌표 산출 연구

Analysis on Geodetic Very Long Baseline Interferometer Antenna Coordinates of Republic of Korea

이상오¹⁾ · 고영창²⁾

Yi, Sang Oh · Koh, Young Chang

Abstract

This study is for coordinates analysis(geocentric and rectangular coordinate) of Korean geodetic VLBI which has been operated by NGII (National Geographic Information Institute) in Republic of Korea since 2014. The purpose of this study is a fundamental research to determine the Korean geodetic datum. The VLBI data recorded from September 29th 2014 to July 31th 2017, total approximately a hundred of VLBI databases, is used to calculate daily positions and position rates. The VLBI coordinates are based on ITRF(2000,2005,2008,2014) with epochs of the first Korean VLBI observation date(September 29th 2014) and Korean Geodetic Datum(January 1st 2002). And as a results of VLBI observation, Korean VLBI coordinate movement velocity of 3.1cm/yr in the direction of 112.4°.

Keywords : Very Long Baseline Interferometer, Korean Geodetic Datum, Space Geodesy, International Terrestrial Reference Frame

초 록

본 연구는 2014년부터 국토지리정보원에서 운영하는 측지 VLBI 데이터를 이용하여 위치좌표(지구중심좌표, 평면직각좌표)를 산출한 연구이다. 본 연구의 목적은 우리나라 최초로 도입한 우주측지(VLBI) 기술을 이용하여 독자적인 정밀위치 좌표를 결정하여, 국가 측지원점의 갱신과 유지관리에 활용하기 위한 기초연구이다. 본 연구에 사용한 VLBI 관측데이터는 2014년 9월 29일부터 2017년 9월 30일까지, 총 약 100회의 국제 VLBI 관측 데이터를 사용하였으며, 관측 당일에 대한 위치좌표와 좌표 변화율을 분석하였다. 위치좌표 산출에 활용한 세계측지계는 ITRF(2000,2005,2008,2014)이며, 기준시점은 최초 VLBI 관측일(2014년 9월 29일)과 우리나라 측지기준계에 적용한 기준시점(2002년 1월 1일)상에서의 좌표를 각각 산출하였다. 약 3년간의 VLBI 좌표 이동량을 분석한 결과 우리나라 VLBI는 방향각 112.4° 방향으로 연간 약 3.1cm의 좌표 이동속도를 보이고 있음을 연구 결과로 확인하였다.

핵심어 : 초장거리전파간섭계, 측지원점, 상관처리, 우주측지, 세계측지계

Received 2017. 12. 01, Revised 2017. 12. 18, Accepted 2017. 12. 30

1) Corresponding Author, Member, National Geographic Information Institute(E-mail: sangoh.yi@korea.kr)

2) Member, National Geographic Information Institute (E-mail: shark@korea.kr)

1. 서론

국토지리정보원은 세계측지계 도입 제도화(측량법 제5조 측량의 기준 개정 2001.12.19 및 동법 시행령 제2조 세계측지계 개정 2002.6.29)를 통하여 우리나라 국가기준점 체계를 동경측지계(1910년부터 1918년 구축, 조선임시토지조사국 시행)에서 세계측지계로 전환하였다(Lee *et al.*, 2008). 도입한 세계측지계 상에서의 국가기준점 체계의 확립 및 독자적인 국가측지기준체계의 유지관리·갱신과 지구물리 연구 등을 목적으로 측지 VLBI 장비를 2012년 6월(장소: 우주측지관측센터) 도입하여 운영 중에 있다.

본 연구의 목적은 우리나라 최초로 건설된 VLBI 장비를 이용하여 그 간(2014년 9월 29일부터 2017년 9월 20일)수행한 관측결과를 이용하여 세계측지계(ITRF) 상에서의 VLBI 위치를 산출하고자 함이다. 이를 통하여 우리나라 VLBI 관측 안정성을 확인하는 한편, 당초 VLBI 도입 목적 중 mm급의 국가기준점(측지원점) 결정 가능성에 대한 점검이 가능할 것으로 사료된다.

2. 측지 VLBI

2.1 VLBI 관측 원리

Fig. 1은 VLBI 관측 원리를 표현하고 있다. 천정으로부터 임의의 위치(θ)에 있는 전파원이 있다고 가정하자. VLBI는 지구 또는 우주공간 상에 서로 다른 위치에 설치되어 있는 안테나를 이용하여 동일한 전파원을 동시에 수신한다. 이 때 위치가 상이한 이유로 각 안테나에 도달하는 전파 신호의 시간 차인 '지연시간(τ_g)'을 약 수 ps(10^{-12})초의 정확도 수준으로 측정할 수 있다. 지연시간에 영향을 미치는 요소는 단순히 기하학적 위치관계 뿐만 아니라 대기지연효과, 원자시계 오차, 지구회전물리량 등이 포함되어 있다. 이러한 요소를 얼마나 정밀·정확하게 보정할 수 있는가에 따라서 VLBI의 위치정확도도 높아진다(Sasao, 2007).

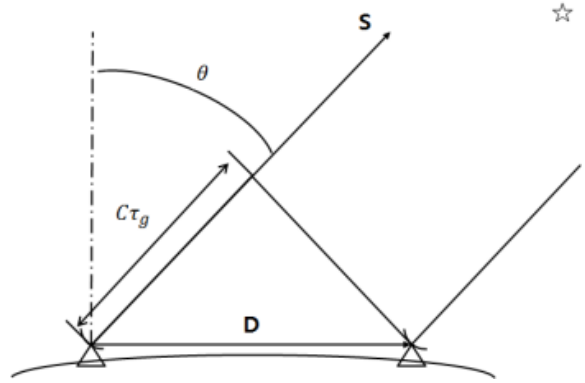


Fig. 1. Concept of geometric delay time (Sasao, 2007)

$$\tau_g = \frac{\vec{D} \cdot \vec{s}}{c} \tag{1}$$

where τ_g : Group delay, \vec{s} : Direction vector, c : Speed of Light

2.2 VLBI 시스템

측지VLBI 관측장비는 안테나, 수신기, 백엔드 시스템으로 대분한다. 안테나는 미약한 전파원(예: 0059+581 전파원 X-Band의 강도는 약 2.87Jy, 단위: $= 10^{-26} \frac{W}{m^2 \cdot Hz}$)을 수신하고, 수신기에서는 미약한 전파원을 디지털화 할 수 있을 정도로 약 40dB 증폭(약 10,300배)시킨다. 증폭비는 이득(Gain, 단위 dB)으로 표현하며 Eq. (2)와 같이 신호의 입력(P_{IN})과 출력(P_{OUT})의 비율로 계산할 수 있다.

$$Gain = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \right) \tag{2}$$

where P_{IN} : Input signal power, P_{OUT} : Output signal power

이 때 상온상태의 잡음신호를 최소화 하여 우주신호만을 증폭시키기 위해서는 극저온(약 20~40K) 상태에서 증폭시켜야 한다. 증폭된 신호는 신호변환장치, 샘플러 등을 통하여 디지털화되어 최종적으로 데이터로 저장된다. 각 시스템은 적게는 수십 개 많게는 수백 개의 소자들로 구성되어 있어, 각 부품이 하나의 시스템으로 동작하기 위해서는 최적화 작업이 필요하다(Kim *et al.*, 2007). 우리나라는 VLBI 장비를 설치한 2012년 6월부터 2014년 9월까지 최적화 작업을 수행 하였다.

2.3 우리나라 VLBI 소개

국토지리정보원에서 운영하고 있는 VLBI 시스템의 주요 제원으로는, 구동속도 5°/sec의 직경 22M 카세그레인 형태의 안테나와 4개 주파수(2·8·22·43대역)를 관측 할 수 있는 수신기와 1Gbps의 데이터 기록기가 설치되어 있다. Table 1은 우리나라 측지 VLBI 시스템 제원을 나타낸다. 측지 VLBI 안테나는 구동속도가 빠를수록 단위 시간 당 많은 전파원 수신이 가능하다. 국외 VLBI 운영기관에서는 20M급 이상의 중대형 안테나의 내구성과 구조적 안정성 확보를 위하여 1°/sec 정도의 구동속도로 운영하고 있다. 최근 기술의 발달로 중대형급 안테나임에도 불구하고 빠른 구동속도가 가능해짐에 따라, 우리나라 VLBI 안테나는 20M급 주변사경에 5°/sec 구동속도로 설계·제작하였다(Kim *et al.*, 2007).

Table 1. Korean geodetic VLBI specification

Antenna Diameter		22M	Receiver	2,8,22,43GHz
Antenna Height		28M	Pointing Accuracy	8.0" (0.0022°)
Operation range	El.	0°~90°	Total number of panels	200
	Az	±270°		
Operation speed		5°/sec	Main dish mechanical accuracy	Less than 0.3mm

2.4 국제VLBI(IVS) 관측 수행

IVS (International VLBI Services for Geodesy and Astrometry)는 VLBI 관측, 데이터 처리와 해석 등 VLBI 관련된 모든 일련의 활동을 관장하는 범국가적인 VLBI 협력체이다. IVS에서는 약 15개의 측지 및 천문 관련 프로그램을 운영 중에 있다.

국토지리정보원은 2014년부터 2017년 3월까지 총 4개의 IVS 관측 프로그램에 참여하고 있으며, 관측 횟수는 Table 2에 정리하였다. 우리나라는 연간 약 50여회의 국제관측에 참여 중에 있으며 현재(2017년 11월)까지 약 157회 국제관측과 63회의 국내관측을 수행하고 있다.

Table 2. Korean geodetic VLBI observations (2012~2017)

Year	IVS Obs.	Test Obs.	#of Obs.
2012	-	9	9
2013	-	16	16
2014	5	15	20
2015	49	7	56
2016	50	6	56
2017	53	10	63
Total	157	63	220

3. 우리나라 VLBI 좌표분석

3.1 관측 데이터 선정

우리나라는 총 4개의 관측 프로그램(지구회전물리량 결정 R1, 세계측지계 유지관리 T2, 아시아오세아니아 지역 AOV, 아시아태평양 지각변동 APSG)에 참여하고 있다. Table 3에 연간 관측 횟수를 정리하였다. 위 4개의 프로그램 중 관측빈도가 가장 높고, 관측데이터의 축적량이 많아 시계열 지구중심위좌표 산출 시 정밀한 결과를 얻을 수 있는 IVS-R1(지구회전물리량 관측, 13개국 23개 안테나 참여)관측 데이터를 사용하였다. 관측 기간은 2014년 9월 29일부터 2017년 9월 30일까지 수행한 총 100여개의 관측 데이터를 사용하였다.

Table 3. Korean geodetic VLBI annual observation program

Obs. Period	Program	Obs.	Obs. SKED	Correlation center
2014.9.29. ~ 2017.9.30	IVS-R1	1/week	NASA(US)	BKG(DE)
	IVS-T2	6/yr	NASA(US)	BKG(DE)
	AOV	6/yr	SHAO(CH) · GSI(JP) · GA(AU)	SAHO(CH) · GSI(JP)
	APSG	2/yr	SHAO(CH)	SHAO(CH)

3.2 상관처리

IVS 주관의 VLBI 관측데이터는 지정된 상관처리 센터로 전송한다. 상관처리는 서로 다른 안테나 간의 기선(Baseline) 정보를 분석하는 과정이다. 즉, 지구상에 설치된 서로 다른 2개의 VLBI 안테나가 같은 천체를 관측하는 VLBI 망을 가질 때, 각 안테나가 수신하는 우주전파의 전압을 $v_1(t)$ 과 $v_2(t)$ 라 하면 그 경로 차는 $b \sin(\theta)$ 가 된다(b 는 기선, θ 는 천정각). 우주전파의 진동수를 ν 라 하면 $v_1(t) = v_1 \cos(2\pi\nu t)$ 로 정의할 수 있고, 경로차를 지나면서 발생하는 지연시간은 앞서 정의한 경로차로부터 $b \sin\theta/c$ 로 얻어지며 이를 τ_g 라 하면 두 번째 안테나에서 수신한 전파는 $v_2(t) = v_2 \cos(2\pi\nu(t - \tau_g))$ 가 된다. 상관처리는 두 안테나에서 얻은 우주전파를 서로 간섭시키는 것이며, 그 결과 $\gamma(\tau_g)$ 는 Eq. (3)과 같은 수식으로 얻어진다(Chengalur *et al.*, 2003).

$$\begin{aligned} \gamma &= v_1 v_2 \cos[2\pi\nu t] \cos[2\pi\nu(t - \tau_g)] \\ &= v_1 v_2 [\cos(2\pi\nu t) \sin(2\pi\nu t) \sin(2\pi\nu\tau_g) + \cos^2(2\pi\nu t) \cos(2\pi\nu\tau_g)] \\ &= \frac{1}{2} v_1 v_2 \cos(2\pi\nu\tau_g) \end{aligned} \quad (3)$$

where γ : Delay time, v_1 and v_2 : Signal power levels

국제적으로 가장 범용으로 사용되고 있는 상관처리 소프트웨어는 미국 MIT에서 개발한 DiFX 이다. 본 연구에 사용된 IVS-R1관측 데이터는 독일 연방지리청(Federal Agency for Cartography and Geodesy, BKG) 'BONN correlation center'에서 DiFX를 이용하여 상관처리를 수행한 결과를 사용하였다.

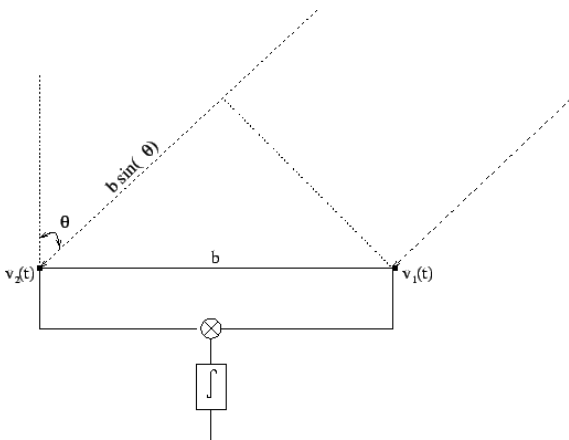


Fig. 2. A basic two element interferometer (Chengalur *et al.*, 2003)

3.3 수치해석

측지 VLBI 관측을 통하여 실제로 얻을 수 있는 물리량은 군지연시간(Group delay) 이다. 군지연(τ_g) 시간에 영향을 미치는 요소로는 전파원 위치(s), 극운동(W), 세차운동(P), 장운동(N), 관측국 간의 기선(D), 대기에 의한 전파 지연(τ_A), 관측국 간의 시계 동기오차(τ_C) 등이 있으며, Eq.(4)와 같이 표현할 수 있다. 이 식은 VLBI 해석의 기본이 되는 관측 방정식 (τ_{obs})이다(Sasao, 2007).

$$\tau_{obs} \approx \tau_g \approx \frac{1}{c} s^T P N S W D + \tau_A + \tau_C \quad (4)$$

where, τ_{obs} : Observation equation, τ_g : Group delay time, c : Speed of light, P : Precision matrix, N : Nutation matrix, S : UT1 matrix, W : Polar motion matrix, D : Baseline matrix

VLBI 해석 단계에서는 관측 결과로 얻은 군지연 시간을 이용하여 위에 기술한 여러 요소 파라미터 추정을 위하여 최소 제곱법을 사용한다(Petrov, 1997).

가장 범용으로 사용되고 있는 VLBI 수치 해석 프로그램은 미국 NASA/GSFC에서 개발한 calc/solve이다. calc/solve는 위의 관측방정식을 선형화시켜 최적 파라미터를 구하는 방법을 사용하고 있다. Fig. 3은 calc/solve의 VLBI 데이터 처리 흐름을 보여 주고 있다. 관측 데이터의 상관처리가 종료 되면, calc/solve의 서브 프로그램인 DBEDIT를 통하여 천체력, 지구회전물리모델, 상관처리 결과 등을 취합하여 MK3 데이터 베이스 형태로 파일을 만든다. 그 후 calc를 이용해 관측방정식을 계산 후 solve를 통하여 안테나 좌표 및 지구회전물리 파라미터를 추정하는 방식이다. 이번 연구에는 수치해석 프로그램 'calc/solve_2017.01.03' 버전을 사용하였으며, 국토지리정보원 우주측지관측센터에서 자체 처리 및 분석 작업을 수행 하였다.

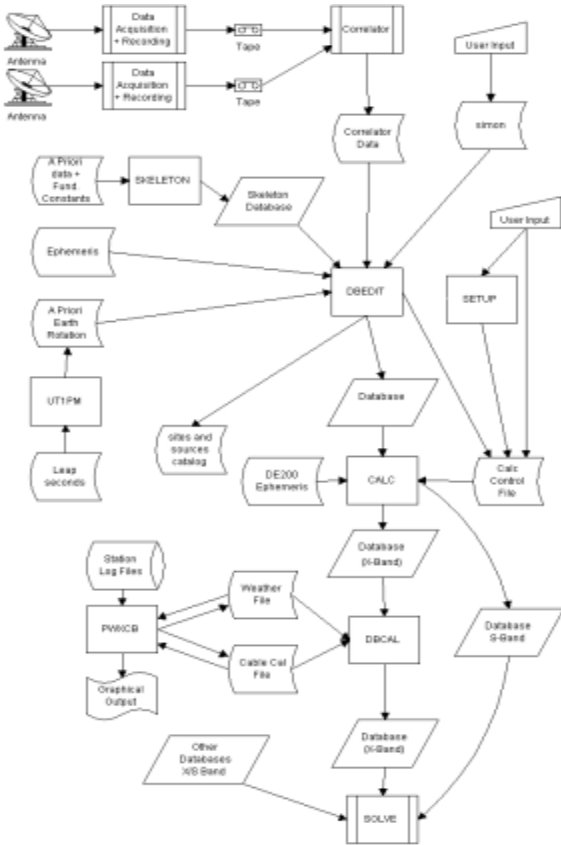
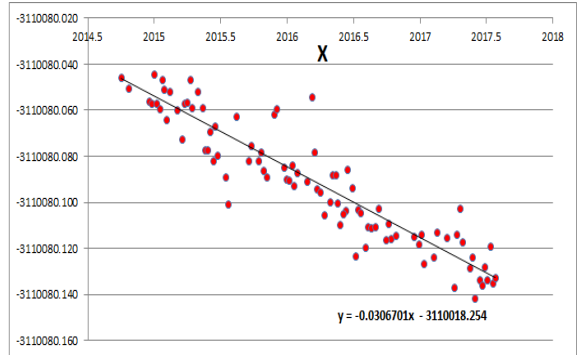


Fig. 3. A diagram of VLBI data analysis using calc/solve(NASA)

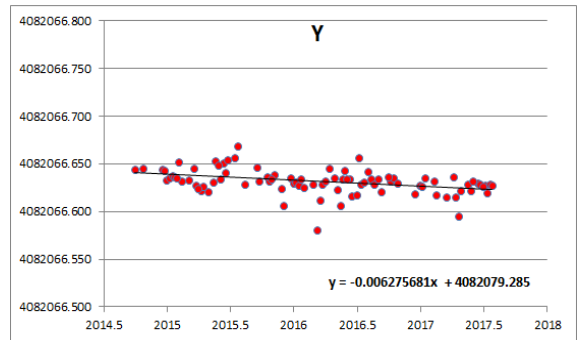
4. VLBI 좌표 분석

4.1 VLBI 좌표 분석

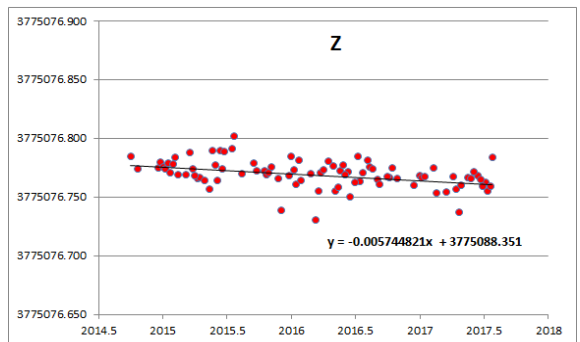
우리나라 VLBI 좌표를 지구중심 원점으로 하는 구면좌표상의 성과로 약 3년 간의 VLBI 안테나 좌표 값을 계산하였다. 계산에 사용한 측지계는 ITRF2014을 사용하였으며 관측 당일의 위치좌표를 산출 하였다. 연간 안테나 이동량을 보면, x 성분은 -0.031m/yr , y성분은 -0.006m/yr , z성분은 -0.006m/yr 으로 분석 되었으며, 3년 간 VLBI 안테나 위치 이동은 x성분은 약 -0.1m , y성분은 약 -0.05m , z성분은 약 -0.05m 인 것으로 분석 되었다. Fig. 4는 x,y,z 각 성분의 좌표 값을 나타내고 있다. x성분의 이동속도는 y,z성분보다 약 5배 큰 것으로 분석 되었다.



(a) X-components



(b) Y-components

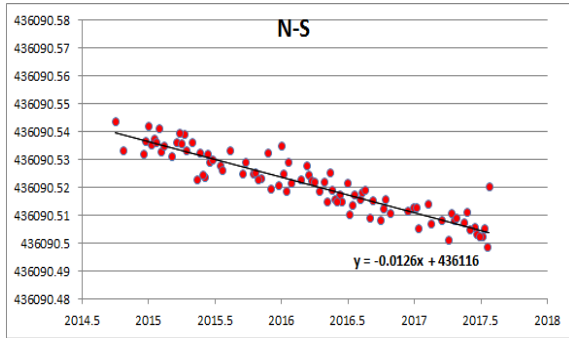


(c) Z-components

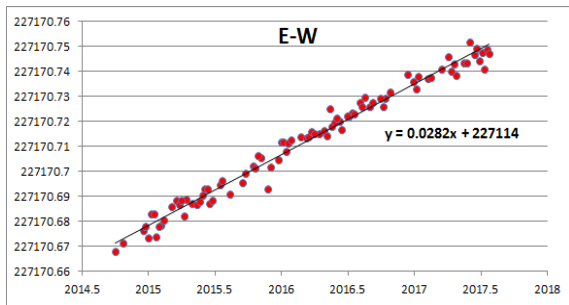
Fig. 4. Korean VLBI coordinates based on ITRF2014

지구중심상에서의 좌표를 평면직각좌표(TM)로 변환하여 평면상에서의 VLBI 위치와 이동속도를 계산하였다. 좌표변환에 사용한 프로그램은 국토지리정보원의 NGI-PRO-Ver.2.54를 사용하였다. Fig. 5는 평면직각좌표 상에서의 VLBI 위치를 나타내고 있다. 평면직각좌표로의 변환은 중부 원점을 기준으로 설정 하여 계산하였으며, 그 결과 우리나라 VLBI 좌표는 3년간 남쪽 방향으로 약 4cm, 동쪽방향으로 약

9cm 이동하고 있는 것으로 파악 되었다. 각 성분을 이용하여 연간 이동속도 벡터(이동량·각도)로 계산 한 결과 우리나라 VLBI는 약 112.4° 방향으로 연간 약 3.1cm/yr 속도로 이동하고 있는 것으로 분석 되었다.



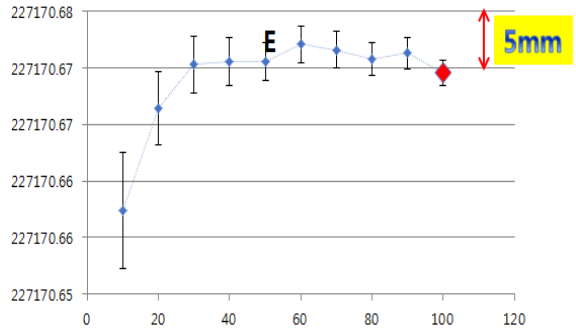
(a) North-South components



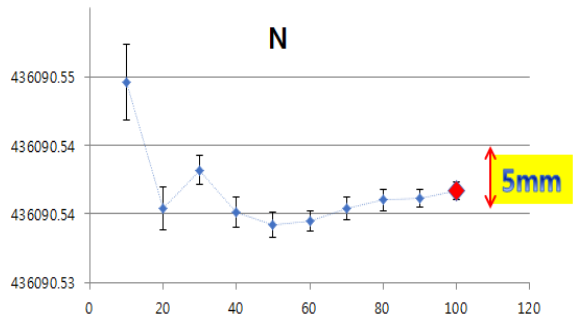
(b) East-West components

Fig. 5. Korean VLBI coordinates based on rectangular coordinates system

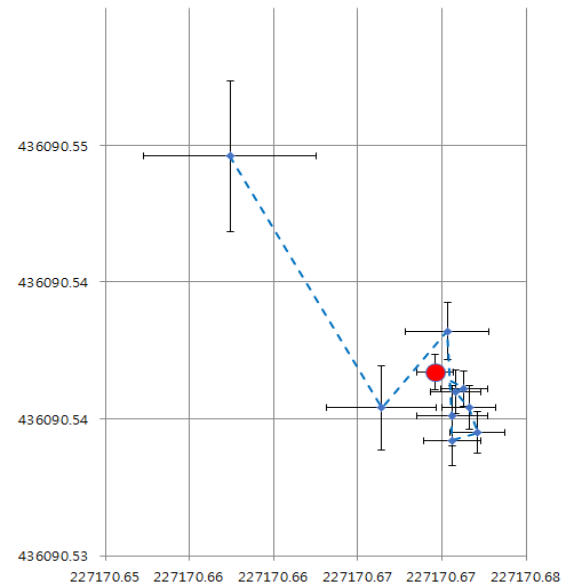
VLBI 1회(24시간 관측) 당 기선(Baseline)정보는 약 1만개 축적된다. 총 100개의 누적 데이터는 약 100만개의 기선정보가 누적된다. Fig. 6은 ITRF2014와 기준시점(epoch)을 우리나라 VLBI 최초 관측 일인 2014년 9월 29일로 설정하여, VLBI 누적 관측량에 따른 좌표 결정 신뢰도를 나타낸다. 분석 결과를 보면 10회 누적 관측데이터 처리시 약 3.75mm 이며 100회 누적 관측데이터 처리시 약 0.84mm를 보여 관측 데이터가 많을수록 높은 위치정확도를 나타냄을 알 수 있다. Table 4에서 알 수 있듯이, VLBI 위치좌표는 ITRF버전 보다는 기준시점(Epoch)의 영향이 큼을 알 수 있다.



(a) EW-components on ITRF2014, epoch 2014.9.29



(b) NS-Components on ITRF2014, epoch 2014.9.29



(c) EW & NS components on ITRF2014, epoch 2014.9.29

Fig. 6. Accumulated VLBI data processing results and its coordinates improvement

Table 4. Korean VLBI coordinates based on different ITRF versions and Epochs

ITRF	Epoch	X	Y	Z	V_x	V_y	V_z
2014	'14.9.29	-3110080.04250	4082066.63710	3775076.77060	-0.0306	-0.0062	-0.0057
2008	'14.9.29	-3110080.04120	4082066.63950	3775076.77290	-0.0306	-0.0060	-0.0056
2005	'14.9.29	-3110080.04170	4082066.64250	3775076.77180	-0.0303	-0.0060	-0.0056
2000	'14.9.29	-3110080.04950	4082066.64960	3775076.74540	-0.0308	-0.0056	-0.0071
2000	'02.1.1	-3110079.65630	4082066.72160	3775076.83700	-0.0308	-0.0056	-0.0071

4.2 ITRF 및 기준시점에 따른 VLBI 좌표

이번 연구에서 분석한 VLBI 좌표는 ITRF2014 측지계 및 기준시점 2014.9.29일의 위치성과이다. 현재 우리나라 측량기준체계는 ITRF2000상에서 기준시점일은 2002.1.1일로 정하여 운영 중에 있다. 우리나라 VLBI 관측 데이터는 2014년 이후만 확보 하고 있어, 2002년도 기준시점의 성과를 직접 산출하기는 불가능 하다. 이를 위하여 지구중심좌표의 x,y,z 성분의 이동량을 이용하여 2002년 1월 1일로 회귀는 가능하다. Table 4.는 ITRF 버전 별 우리나라 VLBI 위치좌표와 이동속도를 정리하였으며, 현 국가측량체계인 ITRF2000상에서 2002년 1월 1일 기준시점의 성과도 계산하였다. ITRF 및 기준시점에 대한 좌표변환은 IGN에서 발표한 'ITRF Transformation Parameters'를 이용하였다.

5. 결론 및 시사점

본 연구는 우리나라 최초의 VLBI 관측 데이터를 이용한 위치성과 산출에 관한 연구이다. 연구 결과 VLBI 관측 데이터 분석을 통하여 다양한 ITRF 버전과 여러 기준시점 상에서의 우리나라 VLBI 위치좌표를 산출 할 수 있었다. VLBI 관측 결과 우리나라 VLBI는 방향각 112.4° 방향으로 연간 약 3.1cm의 좌표 이동속도를 확인하였다. 또한, VLBI 관측 데이터가 많을수록 위치정확도에 대한 신뢰구간이 향상 되고 있음도 알 수 있었다. 10회 누적 데이터의 처리 시 위치정확도 신뢰구간은 약 3.75mm를 보이고 있으며, 100회 데이터의 위치정확도 신뢰구간은 0.84mm를 보이고 있다.

본 연구를 통하여 다음과 시사점을 도출 할 수 있었다. 첫째, 우리나라 VLBI 관측장비가 안정적으로 구동되고 있음을 데이터 분석 결과를 통하여 확인할 수 있었다. 둘째, 국내 최초로 도입한 VLBI의 관측기술이 확보 되었으며, 미국 NASA에서 개발한 VLBI 정밀 해석 소프트웨어를 이용한 우리나라 자체적인 분석기술도 확보 되었다. 셋째, 당초 VLBI 도입

목적인 'mm급의 국가위지기준점 결정' 가능성을 확인하였다.

마지막으로 본 연구는 국내 최초로 운영하고 있는 측지 VLBI의 공식 위치성과를 결정하기 위한 학술 연구이다. 국토지리정보원에서는 자체 산출한 VLBI 위치좌표에 대한 검증 을 위하여 국외 기관과의 협력을 추진하는 한편, 우리나라 VLBI 공식성과에 적용될 ITRF버전 및 기준시점에 대하여 검토 중에 있다. 추가적으로 VLBI와 GNSS 기술을 이용한 위치 성과에 대한 비교 연구도 필요한 것으로 사료된다.

References

- LEE, H.J. *et al.*(2008), *Study on ITRF Conversion Activation*, NGII, Suwon, 3p. (In Korean)
- KIM, T.W. *et al.*(2007), *Design for Korean Geodetic VLBI System*, NGII, Suwon, 135p. (In Korean)
- Institute Geographic National France (2016), Transformation Parameters, http://itrf.ensg.ign.fr/trans_para.php (last data accessed: 10 November 2017).
- Sasao, T. (2007), *VLBI Analysis*, Ajou University, pp. 161-176.
- Chengalur, J.N., Gupta, Y., and Dwarakanath, K.S. (2003), Law frequency radio astronomy, http://www.gmrt.ncra.tifr.res.in/gmrt_hpage/Users/doc/WEBLFLFRA/node31.html (last data accessed: 10 November 2017).
- Petrov, L. (1997), *Multigroup LSQ Method and Its Generalization*, NASA/GSFC, pp. 1-13.

