

KVN (Korean VLBI Network)의 우주측지학적 기여도 분석

조정호[†], 박종욱, 박필호
한국천문연구원

ANALYSIS ON IMPACTS OF KVN TO GEODETIC VLBI NETWORK

Jung-Ho Cho[†], Jong-Uk Park, and Pil-Ho Park
Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea
E-mail: jogh@kasi.re.kr

(Received October 2, 2006; Accepted October 25, 2006)

요 약

전파천문학과 우주측지학적 활용을 목적으로 3기의 전파망원경으로 국내에 구축되고 있는 초장거리간섭계(VLBI; Very Long Baseline Interferometry)인 KVN의 우주측지학적 기여도를 분석하기 위한 모의실험을 수행하였다. KVN의 우주측지학적 기여도를 두 가지 서로 다른 규모의 관측망에 대해 분석하기 위해 동아시아 지역의 local 관측망(KVN-Asia)과 태평양 주변 지역의 global 관측망(KVN-Pacific)을 구성하였다. KVN이 이들 두 관측망에 포함되기 전·후에 대한 정량적 기여도 분석이 이 연구를 통해 수행된 모의실험의 주목적이다. 이를 위해 관측소 좌표와 지구회전계수(EOPs; Earth Orientation Parameters)를 정량적 기여도 분석의 기준 파라미터로 선택하였다. 이들 파라미터는 모의실험을 통해 추정되는 대상인 동시에 KVN 포함 전·후의 추정 정밀도 향상에 대한 기준 비교인자이기도 하다. 관측소 좌표는 KVN-Asia에 대한 기준 비교인자로 사용되었고, EOP는 KVN-Pacific에 대한 기준 비교인자로 사용되었다. 모의실험 결과 KVN-Asia와 KVN-Pacific의 기준 비교인자 추정정밀도 개선에 대한 KVN의 기여도는 최대 50%, 20% 수준이 될 것으로 예상되었다. 또한 연구결과를 토대로 제안된 KVN의 우주측지학적 유망연구 분야들은 향후 KVN 우주측지학적 활용의 핵심분야가 될 것으로 기대한다.

ABSTRACT

KVN simulation, which is focused on evaluating the impacts of KVN to geodetic VLBI network, was performed. The KVN is under construction with three radio telescopes VLBI system for radio astronomy and space geodesy. To distinguish the impacts of KVN on global and local scale networks, we designed two different sizes of VLBI networks, namely, KVN-Asia and KVN-Pacific. While the former consisted of Far East Asia region VLBI stations, the latter consisted of pacific region VLBI stations. The primary purpose of our simulation is quantitative evaluation of KVN impacts before and after the participation of KVN in the previous two virtual networks. We selected two different sets of parameters to be estimated in the simulation as indices of evaluating estimation precision: station coordinates and EOPs. The station coordinates are evaluating index for KVN-Asia and the EOPs are another evaluating index for

[†]corresponding author

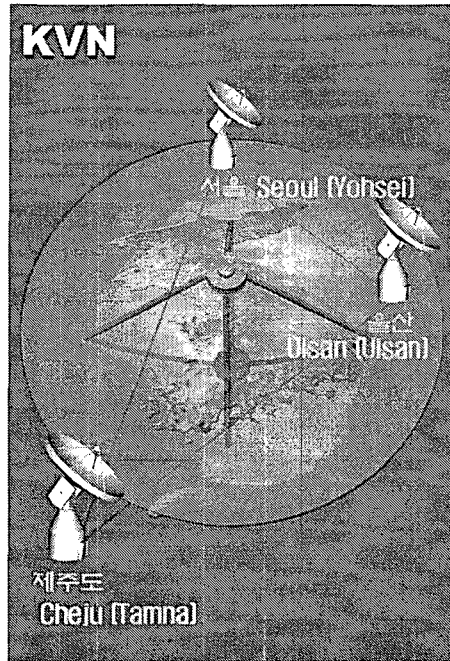


그림 1. KVN 관측망.

KVN-Pacific. From the simulation results of comparisons between evaluating indexes, 50% and 20% of maximum improvements for KVN-Asia and KVN-Pacific were anticipated respectively. We expect that the space geodetic use of KVN will be focused on the several promising research fields which are proposed through the simulation results.

Keywords: KVN, geodetic VLBI, impacts, simulation, analysis

1. 서 론

VLBI 기술의 측지 및 지구물리학적 활용 가능성은 이미 1960년대 후반에 제안된 바 있으며(Shapiro & Knight 1969), 1970년대에 미국과 유럽 VLBI 관측소간 기선을 측정하는 공동관측 캠페인이 이루어져 지각판의 움직임 측정에 VLBI 기술이 이용되기 시작하였고, 1980년대에는 전 세계 VLBI 관측망을 이용한 지구회전계수 측정캠페인이 시작되었다. 1999년에는 측지 목적의 국제 VLBI 관측망(IVS; International VLBI Service)이 조직되었으며 IVS를 중심으로 다양한 측지 및 지구물리학적 VLBI 측정캠페인이 이루어지고 있다. 현재 IVS 주도로 이루어지고 있는 Local/Global 정기 측정캠페인은 11개이며, 대부분이 지각변위측정과 지구회전계수 측정에 초점이 맞추어져 있고 현재 동아시아 지역에서는 일본과 중국이 참여하고 있다.

표 1. KVN 관측소 위치와 기선거리(Kim et al. 2004).

KVN 관측소	경도(도-분-초 N)	위도(도-분-초 N)	기선거리 (km)		
			서울	울산	제주
서울	126 56 35	37 33 44	-	305.2	477.7
울산	129 15 04	35 32 33	305.2	-	358.5
제주	126 27 43	33 17 18	477.7	358.5	-

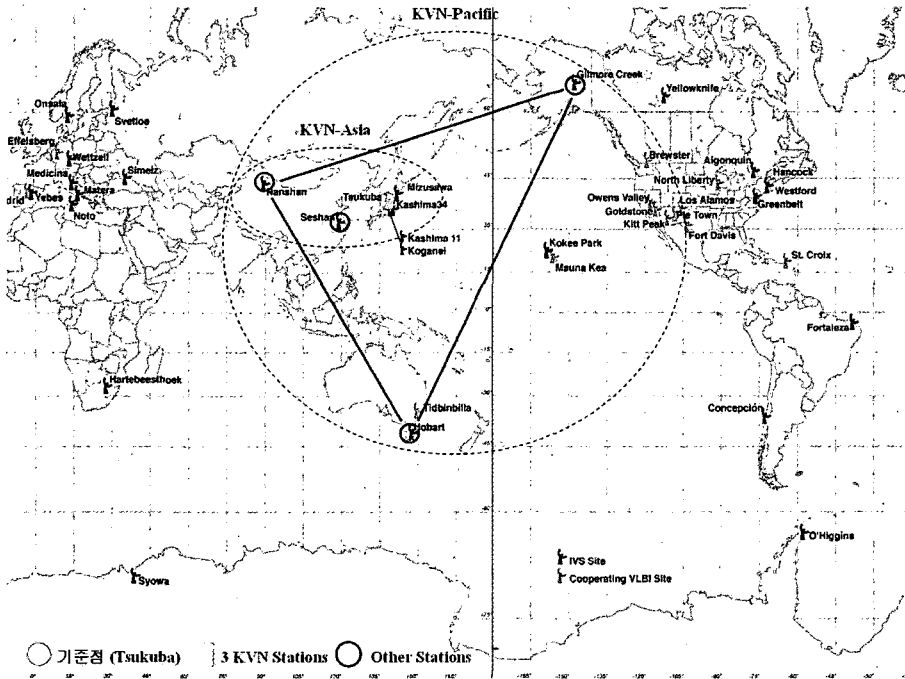


그림 2. KVN의 우주측지학적 기여도 분석 모의실험을 위해 구성된 KVN-Asia와 KVN-Pacific.

KVN은 전파천문학과 우주측지학적 활용을 목적으로 한국천문연구원이 구축하고 있는 전파 망원경 관측망이다. 총 3개의 21m급 전파망원경으로 구성된 KVN은 그림 1과 같이 2008년 구축이 완료될 예정이다. 각각의 전파망원경 설치 예상위치와 망원경간 기선거리는 표 1에 정리된 바와 같다. 이 연구는 KVN 관측망의 예상위치를 이용하여 가상의 관측망을 구성하고, 이를 이용한 모의실험을 통해 KVN 구축 전·후 국제 VLBI 관측망과 동아시아 지역 VLBI 관측망에 대한 KVN의 측지학적 기여도를 정량적으로 분석하는데 초점이 맞추어져 있다. 이를 위해 그림 2와 같이 규모가 다른 두 개의 VLBI 관측망을 임의로 구성하였고, 각각을 KVN-Asia와 KVN-Pacific으로 명명하였다. 그림에서 보듯이 KVN-Asia는 KVN을 포함한 동아시아 지역의 Local VLBI 관측망이고, KVN-Asia에 태평양 주변의 VLBI 관측소가 추가된 Global VLBI 관측망이 KVN-Pacific이다. 정량적 기여도를 판별할 수 있는 기준 비교인자로는 참여관측소의 좌표와 EOP를 이용하였다. 마지막으로 모의실험 결과를 토대로 향후 KVN의 우주측지학적 활용 유망분야를 예상하였다.

2. 모의실험 개요 및 배경

그림 2에서 보듯이 KVN-Asia는 KVN 외에 중국의 관측소(Nanshan & Seshan)와 일본의 관측소(Tsukuba; 기준점)가 포함되었고, KVN-Pacific은 KVN-Asia에 알라스카의 관측소(Gilcreek; Gilmore Creek)와 호주의 관측소(Hobart)가 포함되었다. 이들 관측소들은 KVN 관측소와 달리 이미 구축되어 국제 VLBI 관측망(IVS; International VLBI Service for geodesy and astrometry)에 참여하고 있으며 mm 정밀도의 ITRF 2000 좌표(http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2000/results/ITRF2000_VLBI.SSC.txt)가 공개되어 있다. 이 가운데 KVN-Pacific은 관측소간 기선거리가 6,000km 이상이기 때문에 범지구적 규모의 움직임 변화, 예를 들면 지구자전축의 변화나 지구 자전을 변화 측정할 수 있다(Nothnagel et al. 1988). 반면에 KVN-Asia는 기선거리가 수백~수천 km에 불과하기 때문에 범지구적 규모의 움직임을 측정하는 데 적합한 규모를 갖추었다고 할 수 없다. 이러한 이유 때문에 KVN의 기여도 분석을 위해 사용된 기준 비교인자가 KVN-Asia와 KVN-Pacific에 대해 다르게 적용되었다. KVN-Asia의 경우 Local 관측망 측정을 통해 정밀 추정이 가능한 관측소의 좌표성분을 KVN 기여도 기준 비교인자로 사용한 반면, KVN-Pacific의 경우 Global 관측망을 통해 측정이 용이한 지구회전관련 계수(EOPs; Earth Orientation Parameter)를 기준 비교인자로 사용하였다.

우주측지 VLBI 기술은 관성좌표계에 가장 가까운 천구기준 절대기준좌표계(ICRF; International Celestial Reference Frame)를 정의하는 유일한 수단일 뿐만 아니라, 장기간에 걸친 지구 자전 변화율과 지구의 자전축 방향 움직임 변화를 측정하는 주요 수단으로 사용되고 있다. 또한 지상 약 20,000km 상공을 선회하는 인공위성 송신 신호를 관측하는 GNSS 기술과는 달리 지상에서 무한히 멀리 떨어진 항성상 전파원인 퀘이사(Quasar)를 관측하기 때문에 관측 지점에 따른 급격한 관측조건의 변화가 없는 장점이 있다. 그러나 우주측지 VLBI 관측망은 현재 전 세계적으로 약 30개의 관측소로 구성되어 있는 반면, GNSS 관측망은 380여개의 관측소로 구성되어 있다(<http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/list.html>, <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/about/org/components/ns-list.html>). 이러한 관측망의 밀도 차이로 인해 우주측지 VLBI 기술은 GNSS 기술에 비해 국부적 지각변형이나 상층대기 감시 연구 등에 활용되지 못하고 있는 실정이다.

그러나 KVN 관측망이 국내에 설치된다면 동아시아 지역의 관측밀도의 단점이 보완되는 동시에 우주측지 VLBI 기술의 장점을 살리게 되므로 한반도 및 주변지역에 대한 지각변위 감시, 상층대기 연구, 해수·대기 하층 연구 등과 같은 국지적 활용이 가능할 것으로 예상된다. 뿐만 아니라 KVN의 IVS 활동은 범지구적 규모의 지각판 운동 연구나 기후변화 연구, 지구회전관련 계수 산출, ICRF 유지 등에 긍정적인 영향을 줄 것으로 예상된다(Niell et al. 2004). 따라서 이 연구는 동아시아 및 글로벌 VLBI 관측망에 대한 KVN의 기여도 분석에 초점을 맞추었고, 모의실험 결과를 바탕으로 KVN을 활용한 우주측지 관련 유망연구 분야를 예상하였다.

3. 자료처리

두 가지 모의실험 관측망에서 KVN 관측망은 현재 실제 구축되어 운영되고 있지 않기 때문에 미국 NASA GSFC(Goddard Space Flight Center)에서 VLBI 관측일정 조정을 위해 개발한 SKED 프로그램(<ftp://gemini.gsfc.nasa.gov/pub/sked/>)의 초기 입력자료로 표 1의 KVN 예상좌표를 사용하였다. 나머지 IVS 관측소는 ITRF2000(http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2000/results/ITRF2000_VL

표 2. KVN-Asia 모의실험 결과.

구분	좌표 추정정밀도(mm), 개선도(%)					지구회전계수 추정정밀도, 개선도(%)	
	서울	울산	제주	Seshan	Nanshan	극운동(μ as)	UT1-UTC(μ sec)
(i) KVN 미포함	-	-	-	6.1	5.4	479	13.0
(ii) KVN 포함	2.4, -	2.4, -	2.4, -	2.9, 52.2	3.3, 39.1	240, 49.9	7.9, 39.1
(iii) 서울+제주 포함	2.6, -	-	2.7, -	3.1, 49.8	3.6, 33.6	278, 42.0	8.5, 42.0
(iv) 서울+울산 포함	2.7, -	2.7, -	-	3.3, 46.0	3.5, 36.1	284, 40.6	8.3, 36.1
(v) 울산+제주 포함	-	2.8, -	2.8, -	3.4, 44.6	3.6, 33.0	306, 36.1	8.8, 31.9
(vi) 서울 포함	3.0, -	-	-	3.7, 39.0	4.1, 24.1	310, 35.3	9.8, 24.2
(vii) 울산 포함	-	3.4, -	-	3.8, 38.0	4.3, 20.1	311, 35.1	10.0, 22.7
(viii) 제주 포함	-	-	3.1, -	3.6, 40.9	3.9, 28.7	312, 34.7	9.2, 29.0

BI.SSC.txt)을 사용하였고, 전파원의 위치는 ICRF95(Ma et al. 1997; ftp://hpiers.obspm.fr/iers/icrf/iau/icrf_rsc/icrf.rsc)을 사용하였다. 이 가운데 전파원의 경우 점원에 가깝고 전파강도가 우수한 전파원을 다시 선별하여 모의실험에 사용하였다. 초기정보로써 관측소와 전파원의 위치정보를 사용하여 SKED 프로그램에서 관측소와 전파원이 이루는 기하학적 관측모형을 구성할 수 있다. 이러한 내용을 담고 있는 SKED 프로그램 생성 파일을 Superfile이라 한다. Superfile에는 실제 관측 데이터는 포함하고 있지 않지만 관측소의 위치와 전파원의 위치 정보, 극운동 관련 정보, 태양계 내 행성들의 Ephemeris 등의 정보가 포함된다. 이들 정보를 이용하면 자료처리 프로그램에서 관측소별로 이론적인 관측데이터를 계산할 수 있고, 이론적 관측데이터를 이용하여 예측하고자 하는 파라미터의 추정정밀도도 계산할 수 있다.

SKED 프로그램을 통해 생성된 Superfile은 미국 NASA GSFC에서 개발하여 우주측지 VLBI 자료 처리 및 분석분야에서 가장 널리 이용되고 있는 소프트웨어인 CALC/SOLVE 프로그램(<http://gemini.gsfc.nasa.gov/solve/>)으로 처리되었다. CALC/SOLVE 프로그램은 SKED 프로그램에서 생성한 Superfile을 이용하여 이론적인 관측데이터를 생성하고 자료처리를 수행한다. 이 때 관측소마다 실제 관측이 행해질 때 만들어지는 관측 log 정보는 사용되지 않는다. 이는 실제 관측소마다 서로 다른 관측환경과 관측기기 성능, Clock 오차, 관측자의 숙련도 등에 따른 측정정밀도 차이를 고려하지 않는 것이다. 즉 자료처리 결과는 초기에 선택된 전파원과 관측소로 이루어지는 모의실험 관측망의 기하학적인 조건에 완전히 의존함을 의미한다. 이를 바꾸어 설명하면 모의실험에 참여하는 모든 관측소가 완벽하게 동일한 수준의 측정정밀도를 갖는 관측데이터를 생산하고 있음을 의미하는 것이다. 실제로 이러한 일은 일어날 수 없지만 KVN이 구축되어 운용되고 있지 않은 시점에서 이루어진 모의실험이므로 이러한 가정은 불가피한 것이다. 이러한 이유로 CALC/SOLVE 프로그램을 이용한 자료처리 과정은 추정할 변수의 개수가 매우 적고, 초기 선택된 전파원과 관측소 위치에 의한 기하학적 조건에 의해 변수의 추정정밀도가 전적으로 좌우되었다.

따라서 모의실험을 통해 추정된 기준 비교인자의 정밀도 개선도는 KVN 포함 여부에 의해 직접적인 영향을 받는다. 모의실험에서는 KVN으로 조합 가능한 관측소 조합을 모두 적용하여 KVN-Asia와 KVN-Pacific에 대한 기준 비교인자의 추정 정밀도 개선 정도를 비교하였다.

표 3. KVN-Pacific 모의실험 결과.

구분	좌표 추정정밀도(mm), 개선도(%)						지구회전계수 추정정밀도, 개선도(%)		
	서울	울산	제주	Seshan	Nanshan	Gilcreek	Hobart	극운동(μ s)	UT1-UTC(μ sec)
(i)	-	-	-	3.3	3.9	5.8	6.1	70	2.6
(ii)	2.1, -	2.1, -	2.3, -	2.5, 24.9	3.0, 23.6	4.4, 23.2	4.8, 21.2	53, 23.5	2.2, 17.5
(iii)	2.4, -	-	2.4, -	2.7, 18.3	3.0, 21.8	4.8, 16.9	5.3, 16.9	56, 20.0	2.2, 15.6
(iv)	2.5, -	2.5, -	-	2.9, 10.7	3.3, 15.1	5.1, 11.4	5.1, 15.9	61, 12.2	2.4, 7.2
(v)	-	2.4, -	2.5, -	2.7, 18.3	3.2, 17.2	4.8, 16.4	5.7, 5.7	58, 16.5	2.3, 13.3
(vi)	2.7, -	-	-	3.1, 6.9	3.6, 8.7	5.1, 10.9	4.7, 23.2	58, 16.5	2.4, 8.0
(vii)	-	2.6, -	-	2.9, 12.2	3.6, 8.0	5.1, 12.1	4.4, 27.1	55, 20.4	2.5, 6.5
(viii)	-	-	2.6, -	2.8, 14.0	3.5, 10.5	5.2, 10.0	5.1, 16.1	59, 14.9	2.4, 8.0

4. 모의실험 결과

KVN-Asia와 KVN-Pacific에 대한 모의실험 결과를 각각 표 2와 표 3에 각각 정리하였다. 앞서 언급한대로 일본의 Tsukuba는 자료처리 시 기준점으로 사용되었고, KVN-Asia와 KVN-Pacific의 기준 비교인자는 각각 관측소 좌표와 지구회전계수의 추정정밀도이다. 표에 나타난 좌표 추정정밀도는 3차원 직교좌표계 각 성분별 추정정밀도의 제곱근에 해당한다. 표 2에서 보듯이 KVN-Asia에 KVN 관측망이 포함된 경우와 그렇지 않은 경우를 비교하면 KVN 관측망이 포함된 경우에 기준 비교인자의 추정정밀도가 개선됨을 알 수 있다. 모의실험에 이용된 KVN 관측소의 조합에 따라 조금씩 다르지만 대개 20~50% 수준의 좌표 추정정밀도 개선 효과를 나타내었다. 그러나 표 2에서 지구회전계수의 경우 추정정밀도의 크기가 극운동과 UT1-UTC에 대해 IVS 기준 정확도인 약 50μ s와 5μ s(Niell et al. 2004) 보다 크기 때문에 개선효과가 있더라도 실제 연구에 활용될 수 없는 수준이다. 일반적으로 지구회전계수를 결정하기 위해 최소한 6,000km의 기선이 필요하다는 사실을 감안한다면(Nothnagel et al. 1988), KVN-Asia의 규모를 고려할 때 어렵지 않게 예상할 수 있는 결과이다. 따라서 KVN이 측지학적으로 동아시아 지역 VLBI망에 가장 크게 기여할 수 있는 분야는 지각변위 측정이나 해수하중 연구와 같은 분야일 것으로 예상된다. KVN의 세 관측소가 모두 측지기능을 갖춘다면 현재 동아시아 측지 VLBI망으로 얻을 수 있는 측위정밀도보다 두 배 정도 향상된 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 또한 세 개의 관측소를 각기 달리 조합하여 예측한 결과들도 큰 차이 없이 약 1.5~2배 수준의 고른 측위정밀도 향상효과를 나타내었다. 단일 관측소를 사용할 경우에도 매우 근소한 차이로 세 관측소 공히 현재 동아시아 측지 VLBI 관측망에 기여할 수 있을 것으로 여겨진다.

KVN-Pacific 모의실험 결과를 표 3에 정리하였다. 앞서 언급했듯이 KVN-Pacific 모의실험의 목적은 KVN-Asia 망에 알라스카(Gilcreek)와 호주(Hobart)를 추가하여 범 지구적 규모의 측지망을 구성함으로써, 이러한 규모의 VLBI 관측망에 적합한 지구회전계수 결정에 대한 KVN의 기여도를 정량적으로 알아보는 것이다. 표에서 보듯이 KVN을 활용함으로써 측지 및 지구회전계수 추정정밀도가 약 10~20% 정도 향상됨을 알 수 있다. KVN-Pacific의 개선도가 KVN-Asia의 개선도에 비해 낮은 이유는 KVN을 포함한 관측망의 규모가 커졌고, 관측망의 기하학적인 배치 상 KVN이 차지하는 비중이 더 낮아졌기 때문이다. 그러나 Global 관측망에 KVN이 추가됨으로써 최대 20% 수준의 측위정밀도 향상을 기대할 수 있음을 알 수 있다. 특히 극운동 계수의 경우 KVN의 한 관측소만 이용하더라도 세 관측소 모두를 이용한 것과 비슷한 향상을 기대할 수 있을 것으로 기대된다. 일반적으로 관측기

선이 주로 남북으로 이루어진 수직기선의 경우 극운동 산출에 효과적인 반면, 관측기선이 주로 동서로 이루어진 수평기선의 경우 UT1-UTC 산출에 효과적이라는 점을 고려할 때 KVN-Pacific을 기준으로 수직기선을 보강하기보다는 비슷한 위도의 유럽이나 북미 관측소를 보강함으로써 국제 VLBI 관측망에 KVN이 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

5. 토의 및 결론

KVN을 포함한 동아시아 및 태평양 지역 측지 VLBI 관측망을 구성하고, 다양한 KVN 조합을 통한 모의실험을 통해 미래에 KVN의 측지 및 지구회전계수 산출 성과 향상에 대한 기여 수준을 정량적으로 예상해보았다. 그 결과 KVN이 동아시아 지역에 추가됨으로써 최대 50% 정도의 측지성과 향상을 기대할 수 있음을 알 수 있었고, 범지구적인 규모의 측지 VLBI망에 대해서도 KVN은 관측망을 좀 더 조밀하게 해 줌으로써 지구회전계수 결정시 최대 20% 수준의 향상에 기여할 수 있을 것으로 예상되었다.

또한 모의실험 결과를 바탕으로 앞으로 KVN이 측지연구 분야에 효과적으로 기여할 수 있는 연구 분야를 예상해 보았다. 한반도를 중심으로 한 주변지역은 고전적인 유라시아 판의 주변지역인 동시에 서해안 지역은 매우 큰 조석간만차를 보이는 지역이다. 이러한 이유로 이미 GNSS 기술을 이용한 다양한 연구가 진행되고 있다. 그 가운데 동아시아 지역의 아무리안 판(Amurian plate) 존재 규명 연구(Sella et al. 2002)와 서해 해수하중에 의한 한반도 지각판의 수직변위 연구(박관동 2003)가 대표적인 것이다. 따라서 KVN이 구축되어 좀 더 조밀해진 동아시아 VLBI 관측망을 활용한 이 지역의 지각변위 및 해수하중 연구가 유망할 것으로 예상된다. 또한 KVN의 국제 VLBI 관측망 활용 측면에서는 한반도의 지리적 특성을 고려하여 남북으로 구성되는 수직기선보다 동서로 구성되는 수평기선에 참여하여 지구회전계수 가운데 UT1-UTC 추정정밀도 향상에 기여할 수 있을 것으로 예상된다. 이는 비슷한 위도 상에 존재하는 독일과 하와이, 독일과 일본을 연결하여 매일 UT1을 측정하는 IVS-INT1, IVS-INT2 세선과 유사한 형태의 기여가 가능하다는 의미이다.

마지막으로 모의실험 결과는 실제 측정 데이터를 이용한 것이 아니고 관측소의 위치와 전파원의 위치로 만들어지는 기하학적 효과가 반영되어 계산된 것임을 다시 한번 강조한다. 즉 모든 관측소의 측정 데이터가 비슷한 수준의 품질을 갖고 있는 경우에 실제 데이터를 처리한 결과라고 생각할 수 있다. 이러한 전제조건 하에서 미래에 KVN이 측지학적으로 어떤 기여를 할 수 있는지를 정량적으로 파악하는 것이 이 논문의 초점이었고, 이 연구를 통해 만들어진 KVN 모의실험 결과가 향후 KVN의 측지활용 중점분야 선정과 운용계획 등에 기초 자료로 활용될 수 있기를 기대한다.

참고문헌

박관동 2003, 한국우주과학회보, 12(2), 30

Kim, H.-G., Han, S.-T., Sohn, B.-W., Oh, S.-J., Je, D.-H., Wi, S.-O., & Song, M.-G. 2004, in Proceedings of the 7th European VLBI Network Symposium, eds. R. Bachiller, F. Colomer, J.-F. Desmurs, & P. D. Vicente (Toledo: Observatorio Astronomico Nacional), pp.281-284

Ma, C., Arias, E. F., Eubanks, T. M., Fey, A. L., Gontier, A. M., Jacobs, C. S., Sovers, O. J., Archinal, B. A., & Charlot, P. 1997, in The International Celestial Reference Frame

as realized by VLBI, IERS Technical Note 23, Part II, eds. C. Ma & M. Feissel (Paris: Observatoire de Paris)

Niell, A., Whitney, A., Petrachenko, B., Schlueter, W., Vandenberg, N., Hase, H., Koyama, Y., Ma, C., Schuh, H., & Tuccari, G. 2004, IVS Memorandum 2006-008v01, p.8

Nothnagel, A., Nicolson, G. D., Schuh, H., Campbell, J., Cloppenburg, H., & Kilger, R. 1988, in Proceedings of IAU Symposium 128 on Earth Rotation and Reference Frames for Geodesy and Geodynamics, eds. A. K. Babcock & G. A. Wilkins (Dordrecht: Reidel Publishing Com.), pp.193-198

Sella, G. F., Dixon, T. H., & Mao, A. L. 2002, JGR, 107, 2081

Shapiro, I. I. & Knight, C. A. 1969, Earthquake displacement fields and the rotation of the earth (Dordrecht: Reidel Publishing Com.), pp.284-301