

우주측지 VLBI를 이용한 한반도 지각판 운동 예비 연구

곽영희^{1,2†}, Tetsuo Sasao^{1,2}, 조정호²

¹아주대학교

²한국천문연구원

PRELIMINARY STUDY ON THE PLATE MOTION IN KOREAN PENINSULA WITH NEW KOREAN VLBI ARRAY

Younghee Kwak^{1,2†}, Tetsuo Sasao^{1,2}, and Jungho Cho¹

¹Ajou University, Suwon 442-749, Korea

²Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: bgirl02@kasi.re.kr

(Received September 18, 2006; Accepted October 23, 2006)

요 약

지난 20여년간 우주 측지 기술 발달에 힘입어 한반도지역이 유라시아판과는 독립적인 아무르(Amur)라고 하는 작은 지각판에 속해있다는 가설이 논의되어 오고 있다. 지금까지 아무르판의 운동을 추정하기 위해 GPS 데이터를 바탕으로 한 연구들이 몇몇 있었으나 이 논문에서 보이고 있듯이 그 GPS 결과들이 서로 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. 국내 GPS 관측국 데이터를 이용한 판 운동 파라미터의 추정결과 또한 여러 연구결과들과 차이를 보이고 있다. 이러한 GPS 해석결과를 판별하기 위해서는 GPS와는 독립적인 우주 측지 관측이 필요하다. 앞으로 몇 년 이내에 국내에 4개의 VLBI 관측국이 설치될 것이다. 국내 VLBI 관측국 사이의 기선이 일반적인 VLBI 관측 기선보다 짧다고 여겨질 수 있겠지만 이 논문의 복미판상의 기선이 짧은 작은 VLBI 어레이를 이용한 시뮬레이션에서 보이고 있듯이 작은 크기의 어레이도 지각판 운동 파라미터를 충분히 결정할 수가 있음을 알 수 있다. 이 논문에서는 일반적인 VLBI 관측오차를 가정하여 아무르판 운동 파라미터 결정의 정확도를 추산하였다. 관측국 이동속도의 관측 정밀도가 0.2mm-0.5mm/y 정도에 이를 경우 그 결과는 GPS를 이용하였던 이전의 아무르판 운동연구 결과를 판별할 수 있을 것이고 아무르 플레이트의 존재여부도 확인할 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

Korean Peninsula has been postulated to be on the Eurasian plate(EU). On the other hand, recent seismological works and GPS researches suggest that it is on a separate plate called the Amurian plate (AM). However, the GPS results are inconsistent with each other beyond the estimated statistical errors. Moreover, the estimated plate motion parameter, which we obtained from the velocity data of six Korean GPS stations, was not well agreeing with any existing results. Therefore, independent measurements are required to distinguish those results. In near future, we will have 4 VLBI stations in Korea. This compact Korean VLBI array is capable of achieving good determination of the plate motion parameters if it is located on stable sites. We

†corresponding author

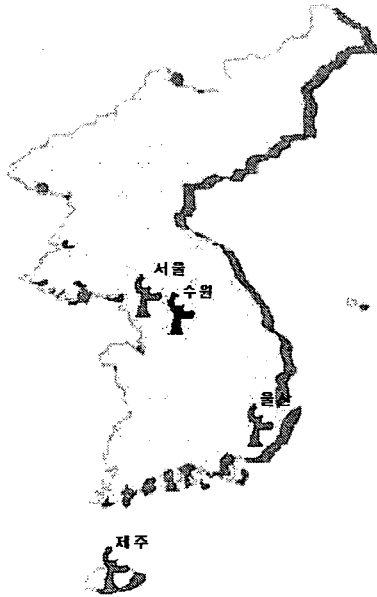


그림 1. 건설중인 KVN 관측국과 향후 국토지리정보원의 측지 VLBI 관측국 위치.

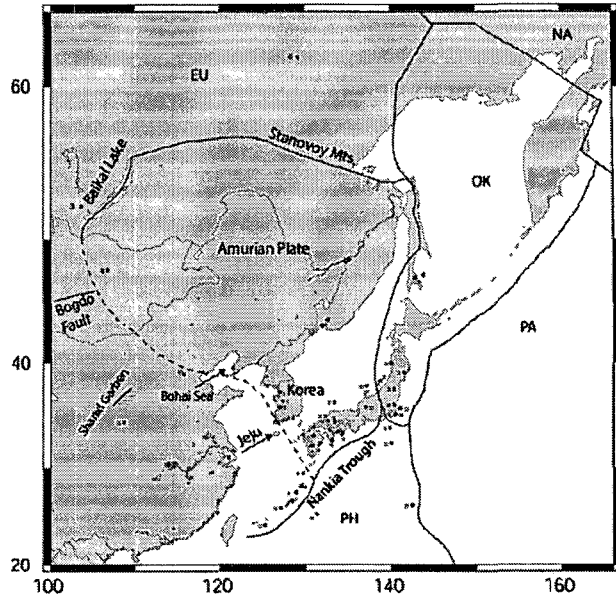


그림 2. 아무르판(Hamdy et al. 2004).

estimated the precision of the AM motion parameters with the Korean VLBI array. The results showed that the Korean VLBI array would verify the existence of the AM, as far as the observation precision of 0.2 - 0.5 mm/yr for station velocities is achieved. Therefore, new Korean geodetic VLBI array can contribute to crustal deformation studies in East Asia.

Keywords: VLBI, GPS, Amurian plate, plate motion, KVN

1. 서 론

최근 한국천문연구원 주도로 3개의 측지/천문용 VLBI 전파망원경(KVN: Korean VLBI Network)을 서울의 연세대학교와 울산의 울산대학교, 제주의 탐라대학교에 건설 중이다(Minh et al. 2003). 또한 국토지리정보연구원 구내에 측지 전용 VLBI 전파망원경 건설을 위한 실시 설계 중에 있다(그림 1). 이 4개의 전파망원경은 국제 측지관측에서 쓰이고 있는 측지용 주파수 밴드 수신기를 갖출 것이기 때문에 향후 이 4개의 안테나를 이용한 측지 연구가 기대된다.

지각판의 운동은 구형의 지구 위에서 일련의 회전운동 형태로 나타나게 되는데 이때의 강체 지각판의 움직임을 기술하는 가장 일반적인 방법은 지구중심을 지나는 회전 벡터로 표현하는 것이다.

지각판의 이러한 각속도 벡터를 통상 동역학적으로 표현하여 강제 지각판의 오일러 벡터라고 부른다. 그리고 지구 표면과 오일러 벡터가 만나는 부분을 오일러 극이라고 한다. 물론 여기에서 말하는 극은 지리적인 남극, 북극과는 완전히 다른 개념이다. 한 지각판의 오일러 극은 종종 다른 판에 위치하기도 한다.

Zonenshain & Savostin(1981)는 바이칼 주변의 지진 데이터 분석을 통해서 바이칼 주변부터 일본의 난카이 해구에 이르는 지역을 아무르판이라는 새로운 강제 지각판으로 분류시켜 놓았다. 또한 최근의 우주측지기술의 정밀도 향상에 힘입어 NNR-NUVEL-1A(Argus & Gordon 1990, DeMets et al. 1994)에서 가정하고 있는 12개의 지각판만으로는 지구상에서 관측되고 있는 지각구조적인 운동을 모두 설명할 수 없다는 의견이 제기되고 있다. 이에 따라 Sella et al.(2002)와 Prawirodirdjo & Bock(2004)는 현재 알려진 주요 판들을 여러 개의 작은 판으로 나누어 분류시켜 놓았고 그 중에는 동아시아 지역의 아무르판도 포함되어 있다(그림 2). 이 아무르판에는 주변의 다른 지역보다 지진활동이 적은 한반도 전체가 포함이 되어 있어 강제 지각판으로서 아무르판의 정확한 움직임을 측정하는데 한반도에서의 관측이 중요한 역할을 하게 될 것이다. 한반도 내에서의 정확한 관측을 통해 아무르판이 실제로 독립적인 강제 지각판인지 아니면 NNR-NUVEL-1A에서 가정한 것처럼 유라시아판의 일부분인지를 밝혀 낼 수 있을 것이다. 또한 최근 들어 동아시아 지역에서 많은 지진 재해가 발생하고 있고 특히 아무르판의 동쪽 경계를 따라서 있는 동해와 일본 열도에서 큰 지진이 여러번 발생하고 있다. 따라서 이 지역 지진의 메커니즘과 재발 가능성을 밝히기 위해서는 지금보다 훨씬 정확한 판 운동 모델이 필요한 시점이다.

2. GPS를 이용한 아무르판 연구

2.1 이전까지의 GPS를 이용한 아무르판 연구

지금까지 아무르판에 대한 여러 연구가 이루어져 왔다. 표 1은 이전 연구에서 보이고 있는 유라시아판에 대한 아무르판의 상대적인 추정 오일러 벡터를 나타내고 있다. 그림 3은 그 벡터의 극 위치를 나타내고 있다. 아무르판의 운동을 추정하기 위해서 모든 저자들은 아무르판으로 추정되는 지역의 3~5개 GPS 관측국의 데이터를 사용하였다. 이것은 세계 다른 지역과 비교해 보았을 때 GPS 데이터를 이용한 판 운동 추정으로서는 다소 적은 양의 데이터이다. 표 1과 그림 3에서 볼 수 있듯이 각각의 결과는 같은 관측국의 데이터를 사용하고 있음에도 불구하고 추산된 통계적 오차 범위보다도 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 이 지역에 독립적인 지각판으로서 아무르판이 존재하고 있다는 결론을 내기 어렵게 만들고 있다.

2.2 국내 GPS를 이용한 아무르판 운동결정

앞서 논의했던 GPS를 이용한 아무르판 연구에서는 항상 국내의 여러 GPS 관측국 중 IGS(the International GNSS Service) 관측국인 수원과 대전 관측국의 GPS 데이터만이 포함되어 있었다. 그러나 이 연구에서는 수원과 대전의 GPS 관측국 이외에도 국내의 다른 여러 GPS 관측국들이 정기적으로 제공하고 있는 속도와 위치 데이터들을 추가하여 아무르판의 오일러 벡터를 결정하여 보았다. 데이터의 일관성을 위해서 한국천문연구원에서 처리한 데이터만을 선별 하였고 그중에서 오차가 적고 안정적인 데이터인 제주, 서울, 속초, 목포, 대전, 수원의 데이터를 사용하였다. 선택된 관측

표 1. 이전 연구로부터 얻어진 유라시아판에 상대적인 아무르판의 오일러 벡터 비교.

저 자	위도 °N	경도 °E	각속도 deg/Myr	각속도 오차 deg/Myr	오차타원 (deg)		
					σ_{maj}	σ_{min}	Θ^a
Zonenshain & Savostin(1981)	56.95	117.45	0.100	-	-	-	-
Heki et al.(1999) ^b	22.3	-73.4	0.091	0.016	20.5	3.5	-19.3
Sella et al.(2002)	44.18	158.76	0.107	0.100	33.3	6.6	88
Steblov et al.(2003) ^c	42.04	134.83	0.165	-	-	-	-
Prawirodirdjo & Bock(2004) ^d	45.43	154.75	0.093	0.023	43.0	4.4	-81

^a 북쪽을 기준으로 시계방향으로 측정된 오차타원 장축의 방위각

^b Heki et al.(1999)의 원 데이터 : $-22.3^{\circ}N$ $106.6^{\circ}E$ ($\omega = -0.091^{\circ}/Myr$)

^c Steblov et al.(2003)에서 제공된 관측국들의 유라시아판에 상대적인 속도와 오차를 이용하여 이 연구에서 계산된 값임.

^d 다른 연구에서의 값들과 일관적인 표현형태로 변경했음.

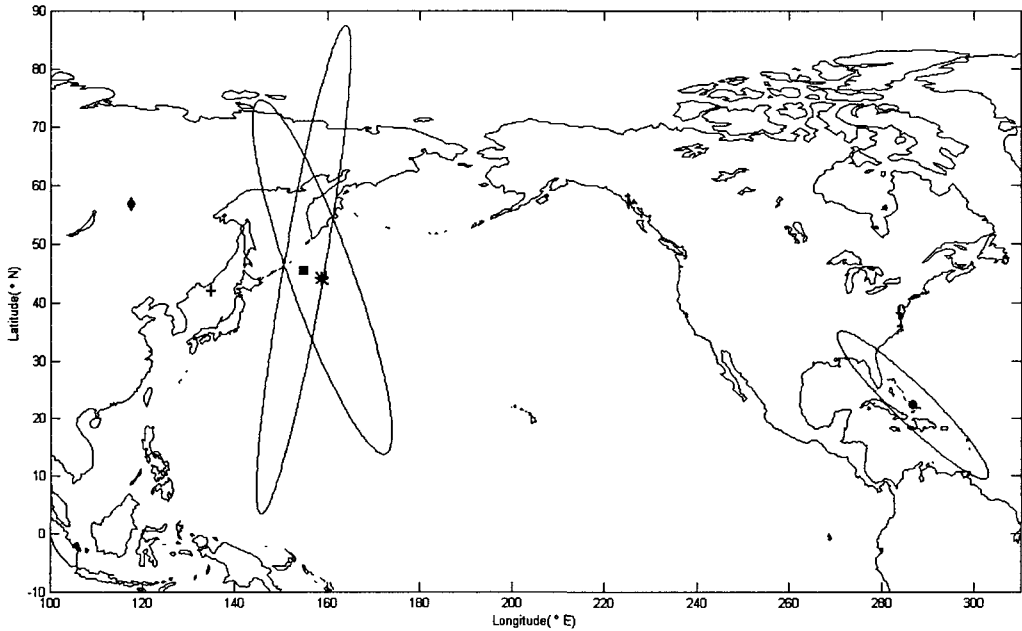


그림 3. 이전 연구에서의 유라시아판에 상대적인 아무르판의 각속도 벡터 극 위치와 오차타원. ◆: Zonenshain & Savostin(1981) 지진데이터, ●: Heki et al.(1999) GPS 데이터, *: Sella et al.(2002) GPS 데이터, +: Steblov et al.(2003) GPS 데이터, ■: Prawirodirdjo & Bock(2004) GPS 데이터. Zonenshain & Savostin(1981)과 Steblov et al.(2003)는 유라시아판에 대한 관측국의 상대속도 오차가 주어지지 않았기 때문에 오차 타원의 생성이 불가능함.

국의 위치와 속도는 그림 4와 같다. 이 데이터들은 대전 GPS 관측국을 기준으로 하여 처리한 데이터이기 때문에 처음에 얻을 수 있었던 속도 데이터는 대전에 상대적인 속도데이터뿐이었다. 따라서 이를 현재 국제적으로 쓰이고 있는 지구기준좌표계(International Terrestrial Reference frame)인

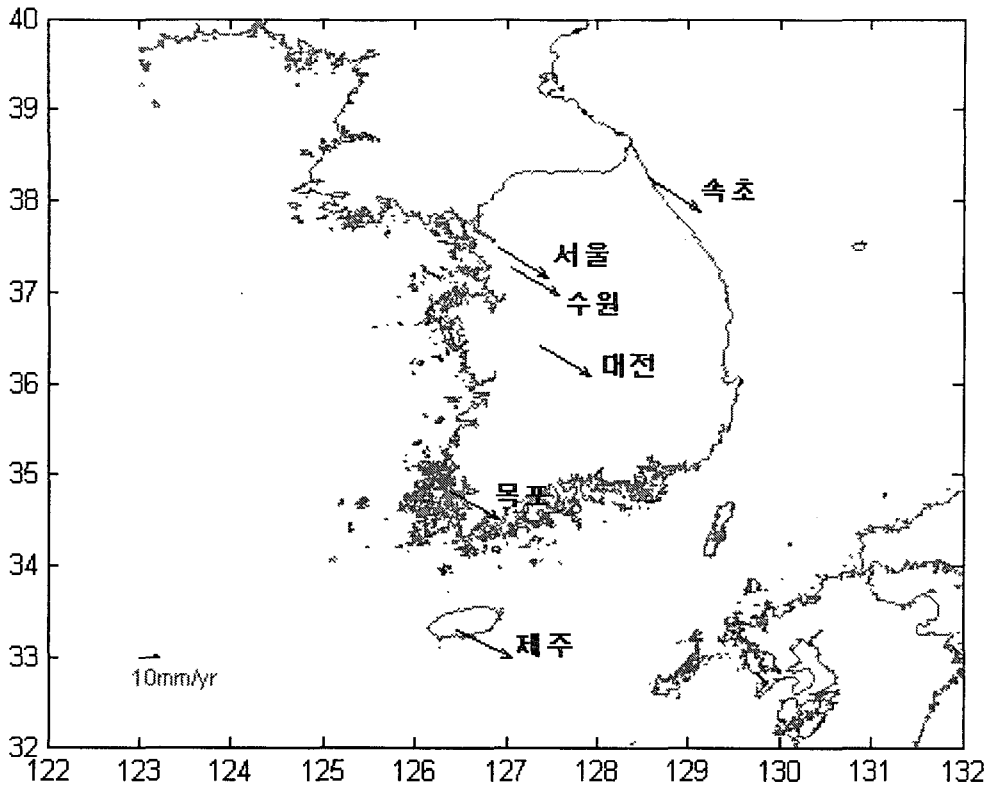


그림 4. 대전, 수원, 서울, 속초, 목포, 제주 GPS 상시 관측국의 위치와 속도(박필호 등 2004).

표 2. ITRF2000에 상대적인 아무르판의 지각판 각속도 벡터.

	위도 °N	경도 °E	각속도 deg/Myr	각속도 오차 deg/Myr	오차타원 (deg)		
					σ_{maj}	σ_{min}	Θ^a
이 연구	50.590	-103.660	0.293	-	-	-	-
SOPAC(Jul., 2003) ^b	63.899	-126.646	0.316	0.021	10.85	0.88	146
SOPAC(Oct., 2005) ^c	61.413	-118.292	0.295	0.010	6.57	0.55	138

^a북쪽을 기준으로 시계방향으로 측정된 오차타원 장축의 방위각

^bPrawirodirdjo & Bock(2004)가 이 데이터를 이용하여 해석함.

^c가장 최근 이루어진 아무르판 오일러 벡터 추정값

ITRF2000 좌표계에 상대적인 데이터로 변환을 하였고 이 과정에서 ITRF2000에 등록된 대전 GPS 관측국의 속도를 각 관측국 속도 벡터에 더해주었다. 이 과정을 거친 속도의 오차는 그 값이 불분명하기 때문에 ITRF2000에 대한 상대적인 오일러 벡터의 오차는 추정할 수가 없었다. 따라서 아무런 가중치 없이 운동 방정식의 normal equation을 계산하였고 표 2는 6개의 관측국의 속도 데이터로부터 얻어진 아무르판의 오일러 벡터 결과 값을 보이고 있다.

이러한 결과 값이 최근 국제적으로 이루어지고 있는 관측 결과 값과 어느 정도 일치하는 지를

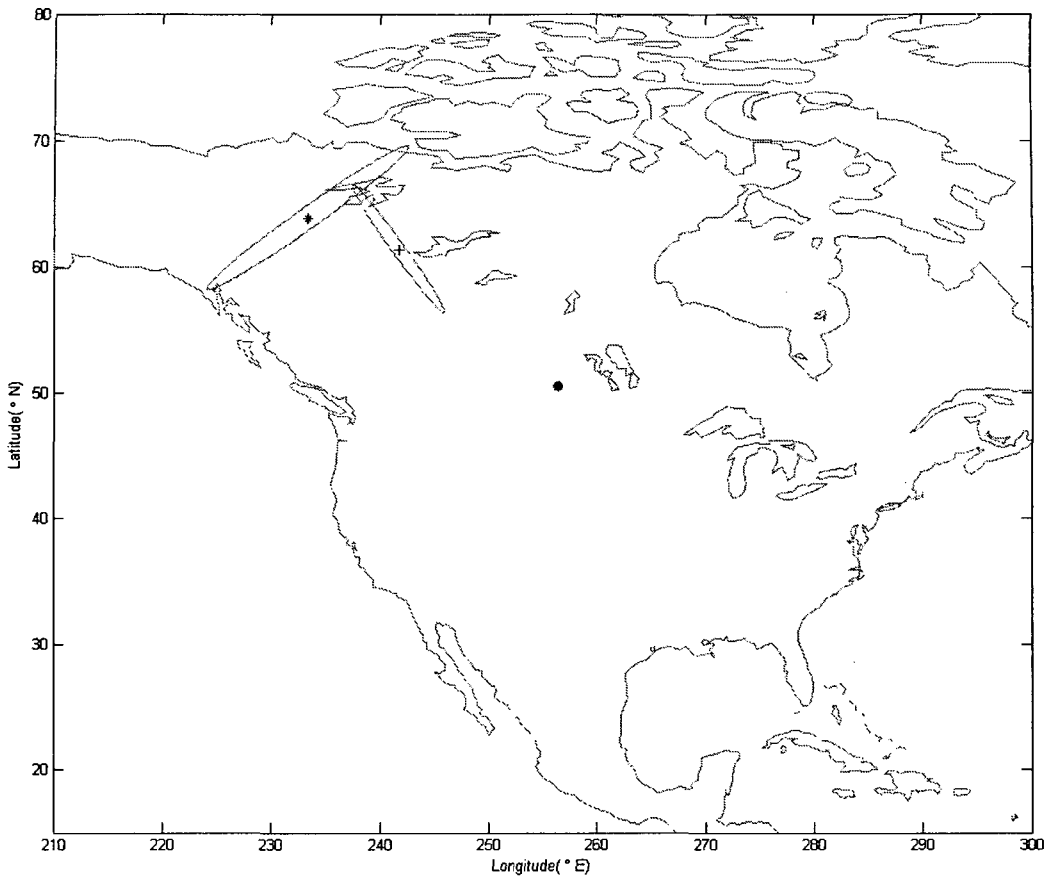


그림 5. 이 연구와 SOPAC의 해석에서 얻어진 ITRF2000에 상대적인 아무르판의 지각판 각속도의 극 위치와 오차타원. ●: 이 연구 결과, +: 2005년 10월까지의 SOPAC의 결과, *: 2003년 7월까지의 SOPAC의 결과. 이 연구에서 ITRF2000에 상대적인 관측국의 상대속도 오차는 구할 수 없었기 때문에 오차타원의 생성이 불가능함.

확인하기 위하여 SOPAC(The Scripps Orbit and Permanent Array Center)의 결과와 비교해 보았다. SOPAC은 2005년 10월 까지 정기적으로 아무르판을 포함한 16개 지각판의 각속도를 제공 하였다(<http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/poleRotationValues.cgi>). 그림 5는 SOPAC의 결과와 이 연구에서 얻어진 아무르판의 오일러 벡터의 극 위치를 나타내고 있다.

이 연구의 결과 값과 SOPAC의 결과 값의 차이는 오차 범위를 다소 벗어나고 있다. 이러한 비일 관성의 원인은 두 가지로 해석될 수 있다. 하나는 한국 GPS 관측국의 공간적인 범위가 아무르판의 각속도를 정밀하게 결정하기에는 여전히 부족하다는 것이고 다른 하나는 SOPAC에서 아무르판 운동 결정에 사용한 관측국이 대전, 수원, 베이징인데 베이징 관측국의 경우 각 연구마다 구분되는 지각판이 다르기 때문에 이 또한 여전히 논란의 여지가 남아있다.

지금까지 살펴본 바와 같이 이 연구에서 계산한 결과 값을 포함하여 GPS를 이용한 지각판 각속

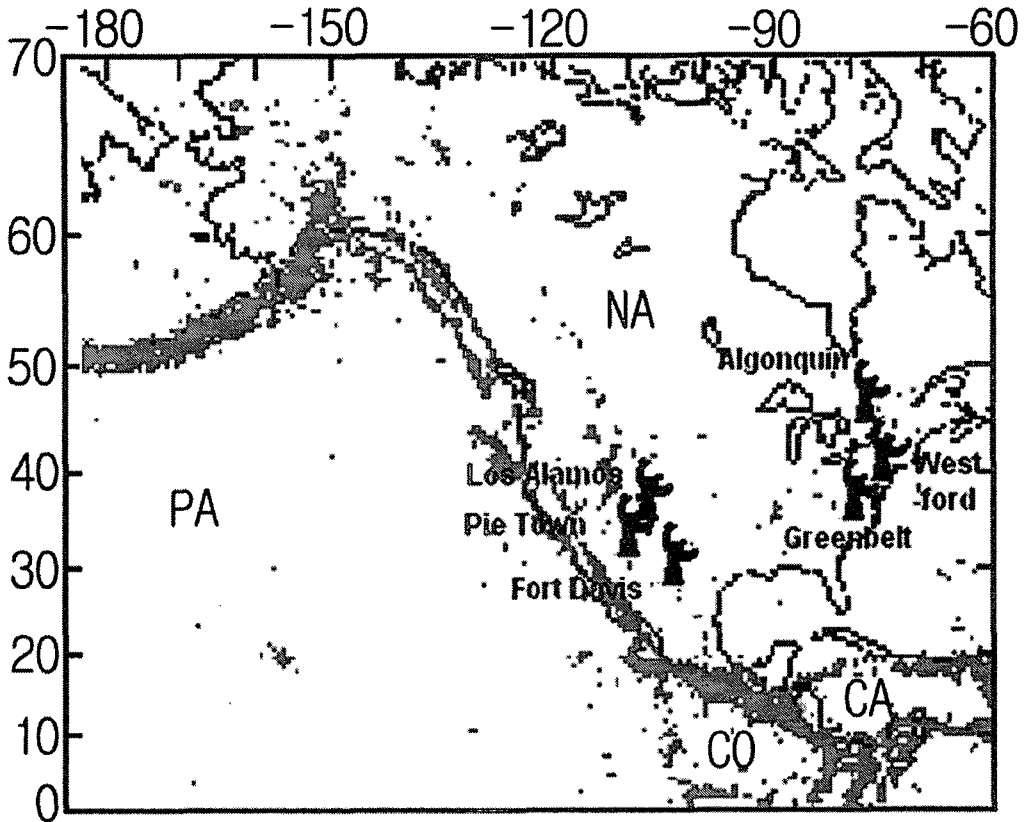


그림 6. 지각판 운동 파라미터의 결정을 위해 사용한 북미판 상의 VLBI 관측국과 북미판(NA), 태평양판(PA), 코코스판(CO), 캐리비안판(CA) 사이의 경계를 나타내는 지진대(NAOJ 2005).

도결정 결과는 서로 일치 하지 않음을 알 수 있다. 이러한 상황에서 현존하고 있는 GPS 결과들을 판 별해 내기 위해서 GPS 이외의 독립적이고 안정적인 우주 측지 기술을 통한 관측이 요구된다. 이 러한 요구조건을 만족시킬 수 있는 기술로 장기적인 데이터 안정성이 높은 측지 VLBI를 활용할 수 있 다(Altamimi et al. 2002).

3. 향후 한국 VLBI 어레이

3.1 콤팩트 VLBI 어레이를 이용한 지각판 운동 파라미터의 결정

VLBI 관측국들은 국토 내에 위치하기 때문에 공간적인 범위가 작은 콤팩트한 어레이를 형성할 수밖에 없다. 이러한 콤팩트한 어레이가 지각판 운동 파라미터를 결정하는데 기여할 수 있을지를 시 험하기 위하여 북미판 위에 위치한 현존하는 VLBI 관측국들을 이용하여 모의실험 하였다. 북미판 상에서 가깝게 위치한 관측국인 북미 동쪽 지역에 Westford, Washington, Algonquin과 서쪽 지역 에 Fort Davis, Pietown, Los Alamos 각각 3개씩 2개의 어레이를 만들어 실시하였다. 각 관측국들

표 3. 북미판 상의 작은 VLBI 어레이를 이용하여 얻은 ITRF2000에 상대적인 지각판 각속도 벡터의 비교.

	위도 °N	경도 °E	각속도 deg/Myr	각속도 오차 deg/Myr	오차 타원 (deg)		
					σ_{maj}	σ_{min}	Θ^a
Altamimi et al.(2002)	-83.144	-5.036	0.194	0.003	-	-	-
Prawirdirdjo & Bock(2004)	-84.702	-3.583	0.200	0.003	0.87	0.25	101
동쪽 어레이	-83.452	-4.606	0.192	0.010	3.46	0.44	81
서쪽 어레이	-88.642	1.981	0.236	0.016	2.68	0.39	27

^a북쪽을 기준으로 시계방향으로 측정된 오차타원 장축의 방위각

표 4. 향후 한국 측지 VLBI 관측국(서울, 울산, 제주, 수원)을 이용한 ITRF에 상대적인 아무르판의 지각판 각속도 벡터의 오차추정.

속도오차 (mm/yr)	각속도 오차 (deg/Myr)	오차타원 (deg)		
		σ_{maj}	σ_{min}	Θ^a
0.5 ^b	0.0240	12.21	0.44	-52.17
0.2 ^c	0.0096	4.88	0.17	-52.17

^a북쪽을 기준으로 시계방향으로 측정된 오차타원 장축의 방위각

^b최근 측지 VLBI 관측국의 일반적인 동서, 남북 속도성분 오차에 기초하여 가정함.

^c측지 VLBI 정기 관측이 몇 년간 이루어진 뒤에 기대되는 오차를 가정함.

의 위치는 그림 6과 같고 위치와 속도 데이터는 IERS 기술 노트 31권에 수록되어 있다(Boucher et al. 2004). 이 연구에서는 가중치 최소 제곱법을 사용하여 ITRF2000에 상대적인 북미판의 오일러 벡터를 추정하였다. 그 결과는 표 3에 나타나 있다. Altamimi et al.(2002)에 수록되어 있는 오일러 벡터 값은 IERS에 등록되어 있는 북미판상의 여러 우주 측지 관측국 데이터에 근거한 결과 값이기 때문에 신뢰할 만한 수준의 오차 범위를 보이고 있는데, 표 3에서 볼 수 있듯이 동쪽에 위치한 어레이들의 오일러 벡터가 Altamimi et al.(2002)의 오일러 벡터와 오차 범위 내에서 비슷한 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이 결과는 북미판 상의 22개 GPS 관측국으로부터 얻어진 Prawirodirdjo & Bock(2004)의 결과와도 가까운 것을 볼 수 있다. 추정된 값들 간의 차이는 이 연구의 계산에서 얻어진 통계 오차보다 작기 때문에 타당하다. 서쪽 관측국 어레이의 경우 동쪽 관측국 어레이보다는 못하지만 비교 기준값들과 큰 위치는 큰 차이를 보이지 않고 있고 각속도는 20% 정도의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이는 서쪽 관측국 어레이들이 지각적으로 다소 불안정한 위치에 있기 때문인 것으로 판단된다.

이상의 결과에서 볼 때 관측국이 지각판의 안정적인 내부에 위치하고 있다면 작은 수의 관측국을 이용해서도 오일러 벡터를 정확히 결정할 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로 한반도는 지각적으로 안정된 부분에 위치에 있는 것으로 알려져 있기 때문에 한반도 내에 위치한 VLBI 관측국의 데이터를 이용하여 오일러 벡터를 추정해 봄으로써 아무르판의 존재 여부를 규명할 수 있을 것이 기대된다.

3.2 ITRF에 상대적인 아무르판의 지각판 각속도 오차 추정

이 연구에서는 아직 완성되지 않은 국내 측지 VLBI 관측국을 이용하여 어레이를 구성해보고 남북, 동서방향의 속도 관측 오차가 모두 0.5mm/yr라고 가정을 하여 지각판 운동 파라미터의 오차를

추정해 보았다. 여기서 0.5mm/yr는 현재의 측지 VLBI 관측에서 보이는 일반적인 속도오차 값이다. 표 4는 그 추정결과를 보이고 있다. 또한 관측국 건설 후 향후 몇 년간 관측 데이터가 누적이 되면 0.2mm/yr 정도의 좀더 작은 오차범위를 가질 수 있을 것으로 기대되는데 그 경우에는 오일러 벡터의 정밀도가 훨씬 작아짐을 볼 수 있다. 따라서 0.2-0.5mm/yr 정도의 관측국 속도 데이터의 정밀도가 실현된다면 한국 VLBI 관측국의 일련의 움직임은 독립적인 강체 지각판으로서의 아무르판의 존재여부를 규명하는데 중요한 역할을 하게 될 것이다.

4. 결론

이 연구에서는 이전에 수행되어진 GPS를 이용한 아무르판 연구 결과들을 비교 분석해보았다. 그 결과 각 연구에서 추정된 아무르판의 오일러 벡터 값들이 서로 일치 하지 않음을 볼 수 있었다. 또한 국내 GPS 데이터를 이용한 아무르판 운동 파라미터도 결정해보았는데 그 결과 추정된 오일러 벡터의 극 위치는 가장 최근까지의 관측데이터를 바탕으로 한 SOPAC에서 계산한 결과와 차이가 있음을 볼 수 있었다. 따라서 GPS 데이터의 결과를 판별하기 위해 이 연구에서는 북미판 상의 6개 VLBI 관측국의 관측 속도를 이용하여 지각판 파라미터를 결정하는 시뮬레이션을 해보았다. 그 결과 아주 작은 크기의 VLBI 어레이 일지라도 안정적인 지역(예; Westford, Greenbelt, Algonquin 관측국)에 위치하고 있으면 지각판 운동 파라미터가 정밀하게 결정될 수 있을 것이라는 결론에 도달하였다. 이 결론을 바탕으로 이 연구에서는 한반도 지역을 지각적으로 안정된 지역으로 분류하고 향후 운용될 국내 측지 VLBI 관측국의 속도데이터 정밀도를 가정하여 지각판 운동 파라미터의 오차를 추정하였다. 그 결과 속도오차가 0.2-0.5mm/yr 정도로만 실현된다면 한국 VLBI 어레이는 아무르판의 존재여부를 규명하는데 중요한 역할을 하게 될 것이다.

참고 문헌

- 박필호, 박종욱, 임형철, 조정호, 최병규, 박관동, 김쌍근, 이경숙, 황유라, 백정호 2004, 활성단층 평가기반을 위한 GPS 자료해석연구 보고서 (대전: 한국천문연구원), pp.118-119
- Argus, D. F. & Gordon, R. G. 1990, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 2039
- Altamimi, Z., Sillard, P., & Boucher, C. 2002, *JGR*, 107, 2214
- Boucher, C., Altamimi, Z., Sillard, P., & Feissel-Vernier, M. 2004, *IERS Technical Note*, no.31 (The ITRF2000)
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S. 1994, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191
- Hamdy, M., Park, P., Lim, H., & Park, K. 2004, *Earth Planets and Space*, 56, 927
- Heki, K., Miyazaki, S., Takahashi, H., Kasahara, M., Kimata, F., Miura, S., Vasilenko, N. F., Ivashenko, A., & An, K. D. 1999, *JGR*, 104, 29147
- Minh, Y. C., Roh, D. G., Han, S. T., & Kim, H. G. 2003, in *New technologies in VLBI*, ed. Y. C. Mihn (CA: Astronomical Society of the Pacific), p.373
- NAOJ 2005, Rikanenpyo(CD)
- Prawirodirdjo, L. & Bock, Y. 2004, *JGR*, 109, B08405, doi:10.1029/2003JB002944

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

Steblov, G. M., Kogan, M. G., King, R. W., Scholz, C. H., Burgmann, R., & Frolov, D. I. 2003,
Geophys. Res. Lett., 30, 1924

Zonenshain, L. P. & Savostin, L. S. 1981, *Tectonophysics*, 76, 1