지구물리 제 3권 제 3호, p. 153-160, (2000년 9월)

GPS로 잰 한반도 주변의 지각운동 속도

박필호 · 안용원 · 박종욱 · 조정호 · 임형철
한국천문연구원

요 약

동아시아 지역에 있는 8 개 IGS GPS상시관측소의 관측자료를 이용하여 한반도 주변의 지각운동 속도를 재고 그 결과를 분석하였다. 이를 위해 1995 년 5 월부터 1997 년 12 월까지 약 32 개월간의 7 일 간격 GPS자료를 Bernese 4.0 으로 처리하여 하루에 한번씩 대전을 기준한 각 지점의 좌표를 측정하였다. 측정된 좌표의 시간에 따른 선형회기분석을 통해 각 지점의 성분별 연간 지각운동 속도를 결정하였다. 그 결과, 총 32 개월 데이터를 사용한 4 지점(쓰구바, 우수다, 타이완, 상하이)에 대해서는 1 mm/year 이하의 표준오차로 평면성분의 연간 지각운동 속도를 결정할 수 있었다. 이 연구로 측정된 유라시아판 안쪽에 위치한 5 지점의 속도는 각 지점마다 약간의 차이가 있으나 대전에 대해 1 cm/year 이하의 상대 속도를 보인 반면, 일본의 2 지점의 속도는 유라시아판 내부의 6 지점들과 전혀 다른 경향을 나타냈다. 이것은 두 지점이 태평양판, 유라시아판, 북아메리카판, 필리핀판의 경계부에 놓여 있어 이들 4 판의 상호작용을 받기 때문이라 판단된다. 한국과 일본이 매년 약 3 cm 씩 접근하고 있다는 사실을 이 연구를 통해 확인할 수 있었다.

주요어: 지각운동 속도, 한반도 주변, GPS, IGS, Bernese 4.0

Pil Ho Park, Yong Won Ahn, Jong Uk Park, Jeong Ho Joh and Hyung Chul Lim, 2000, Crustal velocities around the Korean Peninsula estimated with GPS. Journal of the Korean Geoghysical Society, v. 3, n. 3, p. 153-160

ABSTRACT: Crustal velocities around the Korea peninsula are estimated and investigated from eight IGS permanent stations in eastern Asia area. GPS data for the period of May 1995 to December 1997 were analyzed to estimate daily coordinates of each site relative to TAEJ site. The velocity vector of each site is estimated from linear regression analysis with time series of coordinates. As the result, horizontal velocity components for four stations(Tsukuba, Usuda,Taiwan and Shanghai) using thirty-two months data were estimated with the standard error less than 1 mm/year. Our GPS velocity of six sites on the interiors of the Eurasia plate are similar within 1 cm/year with small differences respectively. On the other hand, the velocities of Tsukuba and Usuda showed the great differences from the other six sites. This can be explained by the fact that these two sites are enforced by the surrounding four plates, such as the Pacific, Eurasia, North America and Philipine plate. This study showed that the distance between Korea and Japan is shortened with the rate of 3 cm per year.

Key words: Crustal velocity, Korea peninsula, GPS, IGS, Bernese 4.0

(Pil Ho Park, Yong Won Ahn, Jong Uk Park, Jeong Ho Joh and Hyung Chul Lim, Korea Astronomy Observatory, 61-1, Whaam-Dong, Yusong-Gu, Taejon, Korea, 305-348, phpark@kao.re.kr)

1. 서 론

오늘날 초장거리전파간섭계인 VLBI(Very Long Baseline Interferometer), 위성레이저거리측정시스템인 SLR(Satellite Laser Ranging System), 위성측지시스템인 GPS(Global Positioning System)와 같은 우주측지 기술들이 지각운동을 조사하는데 많이 사용되고 있다(IERS, 1999). 그 중에서도 GPS는 VLBI나 SLR보다 장비의 값이 더 싸고 장비의 설치가 용이하여 조밀한 망을 구축할 수 있

다는 장점과 더불어 타장비와 같이 수 mm의 변위측정 능력을 가지고 있어(박필호 외, 1999) 지각운동 측정 분야에 점점 많이 사용되고 있다.

전세계 170여개의 GPS상시관측소가 현재 참여하고 있는 국제GPS관측망(IGS: International GPS Service)가 1994년에 국제기구로 설립되어 그 동안 지각운동을 측정하는데 많은 기여를 해왔다(IGS, 1999b). 대부분의 IGS관측소들이 주로 유럽과 북아메리카 지역에 치우쳐 있으나 한국, 중국, 일본, 대만, 시베리아 동부를 포함한 동아시아 지역에도 현재 11개의 IGS관측소들이 활동하고 있다(IGS, 1999a). GPS를 이용한 지각운동 연구에서 동아시아 지역이 다른 지역에 비해 그 동안 소홀히 다루어져 왔다. 예를 들면 GPS를 이용한 유라시아판의 회전축과 회전속도를 구하는 연구에서도 동아시아 지역의 한 두개 지점의 자료만 포함되거나 유럽지역의 자료만 사용한 경우가 많았다(Argus · Gordon, 1991; Argus · Heflin, 1995; Demet *et al.*, 1990; Demet *et al.*, 1994; Larson *et al.*, 1997). 또한 이 지역에 아무르판(Zonenshain · Savostin, 1981)이나 오호츠크판(Seno *et al.*, 1996)과 같은 작은 규모의 지각판은 물론 한국과 중국 등에도 작은 규모의 활성단층이 존재하는 것으로 추측되고 있어 이 지역의 GPS를 이용한 지각운동 연구가 최근에 활발히 진행되고 있다(Kato *et al.*, 1998; Wei · Seno, 1998; Heki *et al.*, 1999).

한편, 한국은 지정학적으로 동아시아 지역의 중심부에 해당하며 유라시아판 내부의 비교적 안정된 지반위에 놓여 있으므로 동아시아 지역의 지각운동을 측정할 때 기준점으로 사용하기에 적당하다고 본다. 따라서 이 연구에서는 대전을 기준하여 한반도 주변에 있는 IGS 관측소들의 GPS 데이터를 처리하였고, 이로부터 이 지역의 지각운동을 측정하여 측지학적인 측면에서 분석하였다.

2. 자료처리

이 연구를 위해 동아시아 지역에 분포한 8개 IGS관측소들의 약 32개월간(1995. 5 ~ 1997. 12) 데이터를 수집하여 약 7일 간격으로 처리하였다(Table. 1, Fig. 3). 하지만 이르크츠크(IRKT), 시안(XIAN), 우한(WUHN)은 32개월에 못 미치는 데이터를 사용하였다. 각 지점에서 30초 간격으로 하루 24시간 동안 수신한 RINEX(Receiver INdependent EXchange) 형식의 데이터를 스위스 베른대학 천문연구소에서 개발한 고정밀 자료처리 프로그램인 Bernese 4.0(Rothacher · Mervart, 1996)으로 처리하였다.

Table 1. Estimated velocity vectors of seven IGS stations relative to TAEJ.

Site IGS name	Lat.	Lon.	V_{NS} (error[a])	V_{EW} (error[a])	Velocity[b] (Azimuth[c])	Period used for analysis
	°N	°E	mm/yr	mm/yr	mm/yr(°)	
TAEJ	36.37	127.37	0.0(0.0)	0.0(0.0)	0.0	95.05-97.12
TSKB	36.11	140.10	8.8(0.4)	-28.7(0.5)	30.0(287)	95.05-97.12
USUD	36.13	138.36	11.3(0.4)	-25.8(0.5)	28.2(294)	95.05-97.12
TAIW	25.02	121.54	1.1(0.8)	8.9(0.9)	9.0(83)	95.05-97.12
SHAO	31.10	121.20	-2.4(0.4)	4.9(0.8)	5.5(116)	95.05-97.12
WUHN	30.53	114.36	-5.9(1.0)	4.2(1.0)	7.2(145)	96.03-97.12
XIAN	34.37	109.22	1.4(1.2)	0.1(1.6)	1.4(4)	96.07-97.12
IRKT	55.22	104.32	-8.5(0.8)	-5.3(1.3)	10.0(212)	95.10-97.12

[a] Standard error
[b] $(V_{NS}^2 + V_{EW}^2)^{1/2}$
[c] Clockwise angle from north

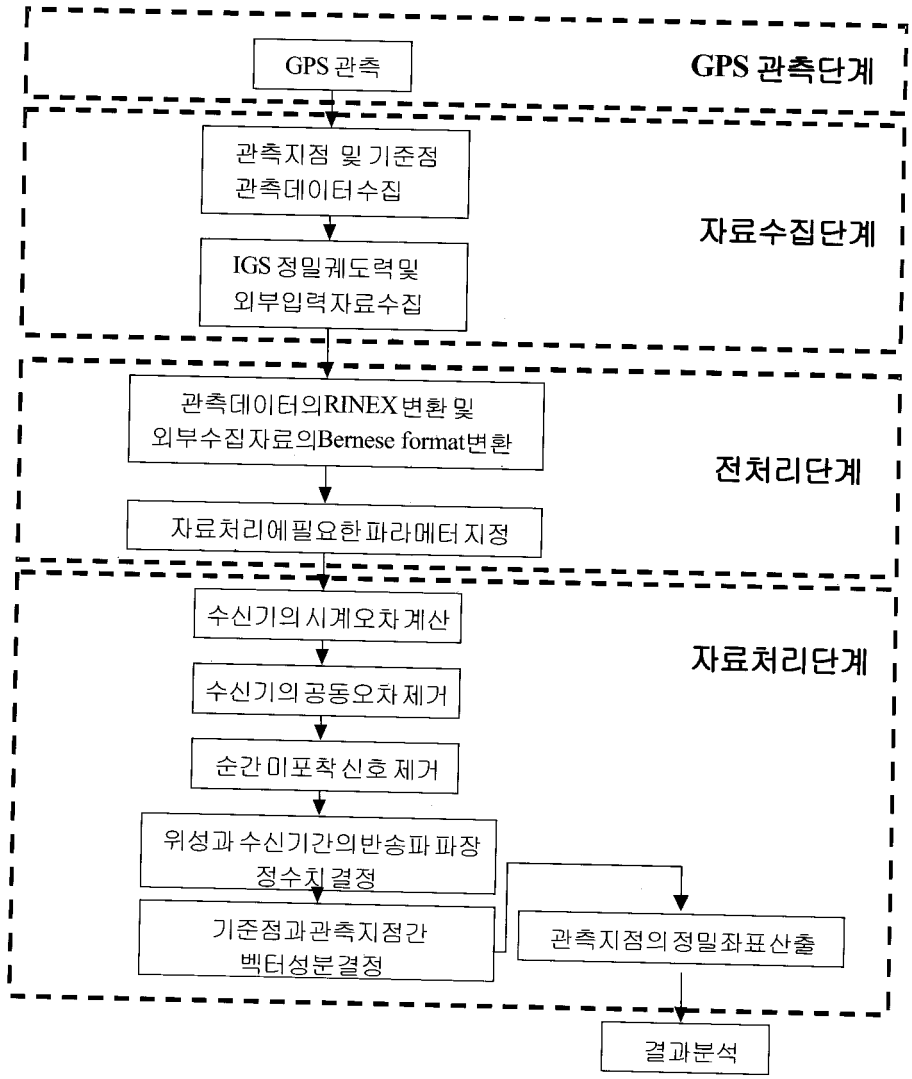

Fig. 1. Data processing scheme of Bernese 4.0 software.

Bernese 4.0으로 자료를 처리할 때 준-이온층 무관(QIF: quasi-ionosphere free) 방법을 이용하여 L1(1575.42 MHz), L2(1227.6 MHz)의 모호정수(ambiguity)를 추정하였다. 매 6시간마다 각 관측소의 대류층에 의한 신호지연을 계산하였고, 이온층 무관선형조합(ionosphere-free linear combination)인 L3를 이용 최종적인 변수를 추정하였다. 이 선형조합은 이온층에 의한 신호의 지연효과를 완전히 없애 주기 때문에 대부분의 자료처리에서 이용된다. 관측자료를 처리할 때 필요한 GPS위성의 궤도자료는 IGS에서 산출한 최종 정밀궤도력(final precise ephemerides)을 이용하였다(박필호 외, 1996). Bernese 4.0의 GPSEST 프로그램에서 각 기선의 일차차분(single difference)의 RMS 오차가 4 mm 이상인 것은 제외시켜 기선 측정의 신뢰도를 높였다. 최종적으로 Bernese 4.0의 ADDNEQ 프로그램으로 정규방정식(normal equation)을 종합하여 대전을 기준한 각 지점의 상대적 지각운동 속도를 산출하였다. 이때 기준점인 대전(TAEJ)의 좌표는 스위스 베른대학에서 산출한

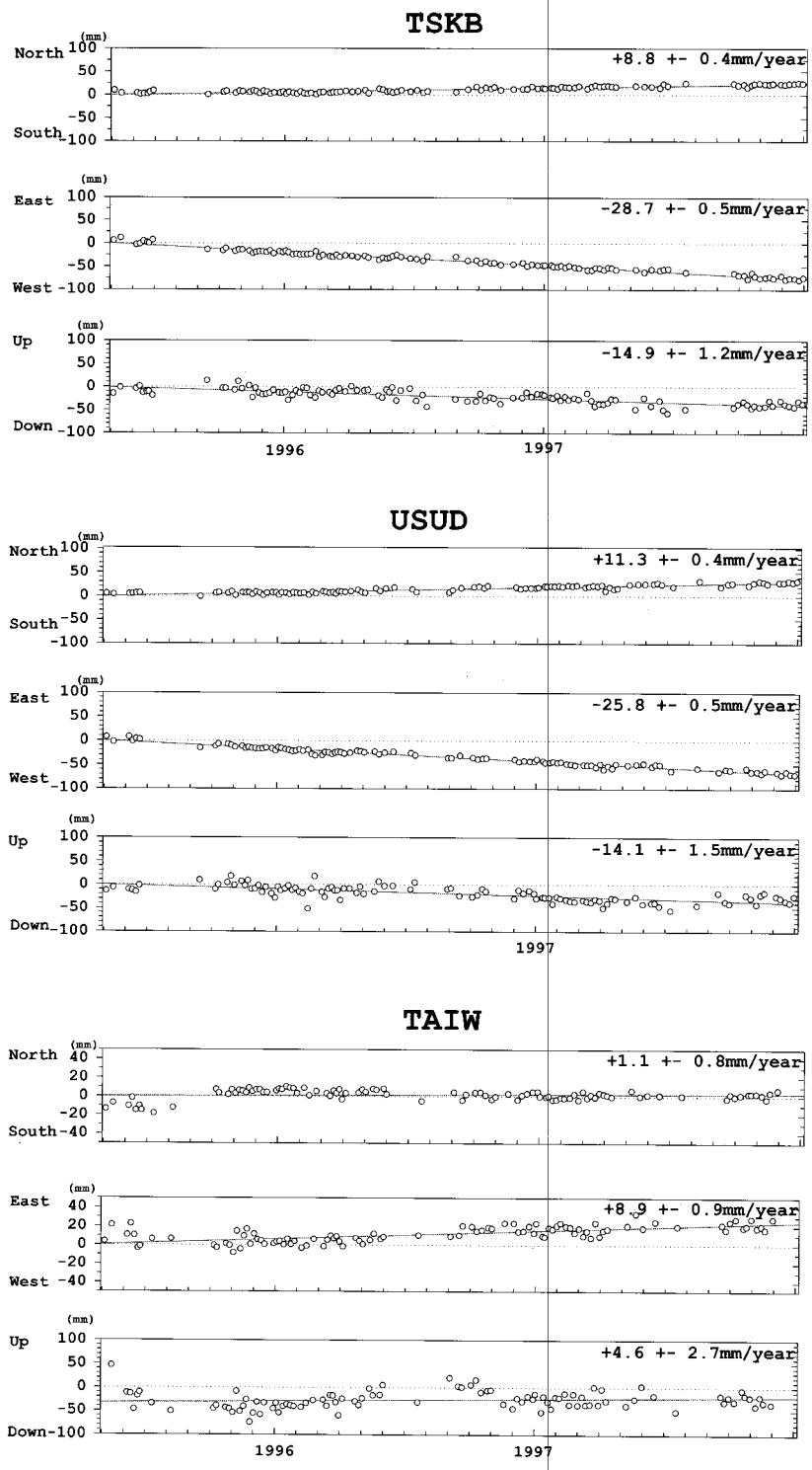

Fig. 2. Time series of coordinates at each IGS station around Korea peninsula. Velocities with standard error are estimated from linear regression of these time series. Plot assume that TAEJ site is fixed.

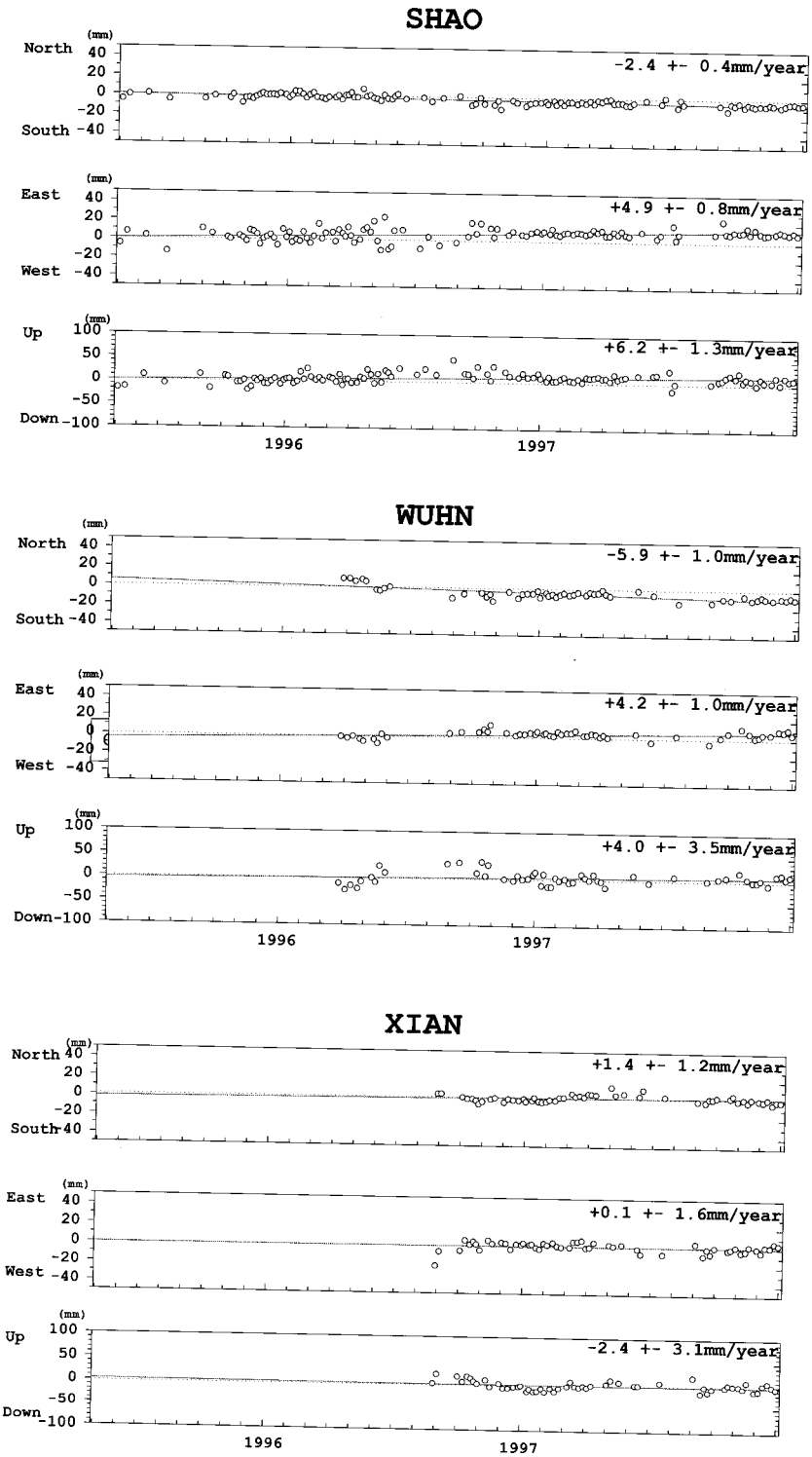

Fig. 2. Continued.

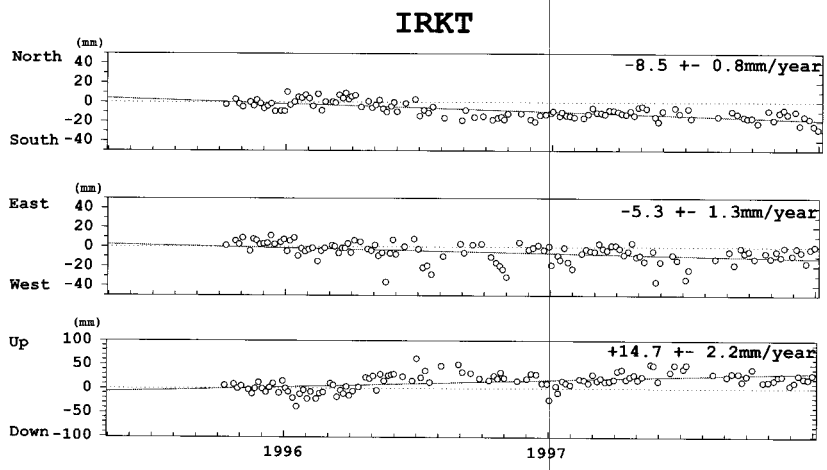

Fig. 2. Continued.

1993.0 기준의 ITRF94(International Terrestrial Reference Frame 1994)를 이용하였고 그 값은 x = -3120422.8008 m, y = 4086355.4907 m, z = 3761769.6184 m 이다(ftp://ftp.unibe.ch/aiub/BSWUSER/STA/itrf94.crd). Fig. 1 은 Bernese 4.0 을 이용한 자료처리 순서를 요약한 것이다.

3. 결과와 분석

Bernese 4.0 으로 측정한 각 지점 좌표의 시간에 따른 선형회기분석(linear regression)을 통해 대전을 기준한 각 지점의 좌표 성분별 연간 지각운동 속도를 결정하였고, 그 결과를 남북방향과 동서방향, 수직방향 성분의 순서로 Fig. 2 에 나타냈다. Fig. 2 에서 우측 상단에 적힌 숫자는 선형회기분석으로 결정된 성분별 연간 변화속도와 그 표준오차(standard error)를 의미한다. 변화속도가 음수이면 남북방향 성분에서는 남쪽으로, 동서방향 성분에서는 서쪽으로, 수직방향 성분에서는 아이와 같은 결과는 GPS위래쪽으로 움직인다는 뜻이다.

Fig. 2 를 보면 3 차원 좌표 성분 중에서 수직 성분의 표준오차는 평면 성분에 비해 3 배정도 나쁜 것으로 나타났다. 성이 지구 자체에 가려 수직 성분의 기하학적 배치가 수평성분에 비해 나쁘기 때문에 일어나는 현상으로 알려져 있다. 이 연구에서는 속도의 수직 성분은 다루지 않고 평면 성분에 대해서만 주로 논하고자 한다. 일반적으로 시계열 선형회기분석의 표준오차는 사용한 데이터의 양과 기간에 의해 좌우되는데(김세헌, 1997) 총 32 개월간 데이터를 사용한 상하이(SHAO), 타이페이(TAIW), 쓰구바(TSKB), 우수다(USUD) 4 지점은 1 mm/year 이하의 표준오차로 평면성분의 연간 속도를 결정할 수 있었다. 그러나 18 개월에서 26 개월간의 비교적 짧은 데이터를 사용한 나머지 3 지점의 표준오차는 2 mm/year 이하로 나타났다. 그 중에서도 가장 짧은 데이터를 사용한 시안(XIAN)이 가장 큰 표준오차를 보였다.

Table. 1 에 대전을 기준한 각 지점의 상대운동 속도와 표준오차, 방위각를 요약하였다. Fig. 3 은 이 연구에서 산출한 각 지점의 속도를 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 3 에서 보듯이 유라시아판 안쪽에 위치한 5 지점들의 속도는 각 지점마다 약간의 차이가 있으나 대전과 1 cm/year 이하의 상대운동 속도를 보인다. 이 5 지점들의 각 지점별 속도 차이는 지역적인 소규모 지각운동과 활성단층 때문이라고 여겨지며(Molnar · Gipson, 1996; Bilham *et al.*, 1997; Kato *et al.*, 1998; Heki *et al.*, 1999), 향후 이에 대한 지각구조학적인 자세한 조사가 더 필요하다고 본다. 한편, 일본의 쓰꾸바와 우수다는 유라시아판 내부에 있는 다른 5

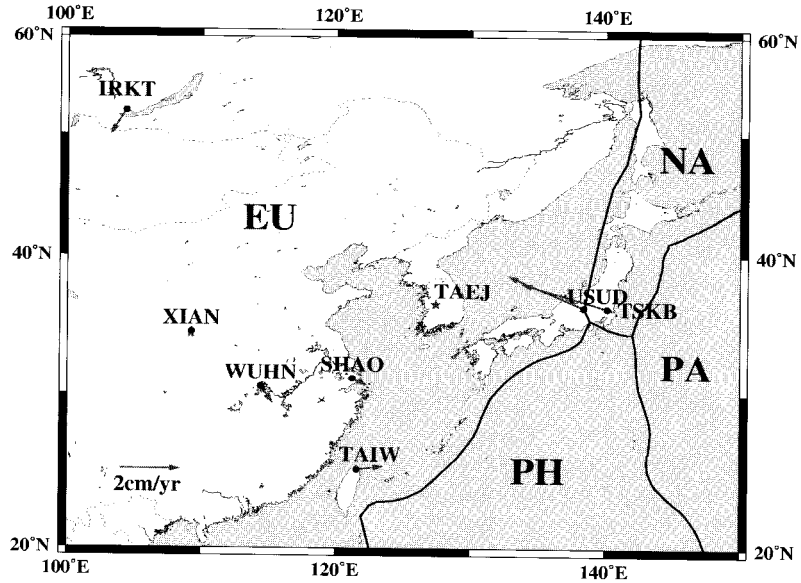

Fig. 3. Horizontal velocity vectors around Korea peninsula relative to TAEJ site. EU: Eurasian plate, PA: Pacific plate, NA: North America plate, PH: Philippine plate.

지점들의 속도 벡터와는 크기와 방향에서 상당히 다른 경향을 나타내고 있다. 그 이유는 이 지점들이 태평양판, 북아메리카판, 유라시아판, 필리핀판의 경계부에 위치하여 이 지각판들의 상호작용을 받기 때문이라 판단된다(DeMets, 1992; Heki *et al.*, 1990; Seno *et al.*, 1993). 이 연구를 통해 한국과 일본이 연간 약 3 cm씩 가까워지고 있음이 측지학적인 측면에서 판명되었다. 이와 같은 한국과 일본의 접근은 주로 동아시아 지역에서 남동쪽으로 작용하는 유라시아판과 북서쪽으로 작용하는 태평양판에 의한 상대적 운동의 결과라고 여겨지며, 이에 대한 역학적 연구가 더 필요하다고 본다.

4. 결 론

국제GPS관측망(IGS)에서 활동하고 있는 동아시아 지역 8개 GPS관측소의 데이터를 Bernese 4.0으로 정밀하게 처리하여 한반도 주변의 지각운동을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 32개월간(1995.5 ~ 1997.12) 데이터를 사용한 시계열 선형회기분석을 통해 1 mm/year 이하의 표준오차로 평면성분의 연간 지각운동 속도를 측정할 수 있었다.

2. 3차원 좌표 성분 중에서 수직 성분의 표준오차는 평면 성분에 비해 3배정도 나쁜 것으로 나타났다. 이 연구에서 직접 확인되지는 않았지만 3년 이상의 장기간 데이터를 이용하면 수직성분의 지각운동도 1 mm/year의 표준오차로 결정할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 유라시아판 안쪽에 위치한 5지점들의 속도는 각 지점마다 약간의 차이가 있으나 대전과 1 cm/year 이하의 상대운동 속도를 보인다. 이 5지점들의 각 지점별 속도 차이는 지역적인 소규모 지각운동과 활성단층 때문이라고 여겨지며, 향후 이에 대한 지각구조학적인 자세한 조사가 더 필요하다고 본다.

4. 이 연구를 통해 한국과 일본이 연간 약 3 cm씩 가까워지고 있음이 측지학적으로 판명되었다.

5. 이와 같은 한국과 일본의 접근은 주로 동아시아 지역에서 남동쪽으로 작용하는 유라시아판과 북서쪽으로 작용하는 태평양판에 의한 상대적 운동의 결과라고 여겨지며, 이에 대한 역학적 연구가 향후 더 필요하다고 본다.

사 사

본 연구는 과학기술부 중점연구사업('97 년도 지진재해대응기술개발사업)인 "지각변위 GPS 감시망 구축 및 운영과제"(과제번호: 97-N2-01-04-A-01)의 일부 연구비와 원자력중장기계획사업인 지진안전성평가기반기술개발("활성단층 평가기반을 위한 GPS 자료해석 연구") 과제의 일부 연구비의 지원에 의해 수행되었고, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

김세헌,1997,현대통계학,무역경영사,서울, pp.369-403.

박필호, 박종욱, 조정호, 1996, GPS 의성의 정밀궤도력에 의한 기선결정의 정밀도 향상에 관한 연구,한국측지학회지, 14, 199-207.

박필호,박종욱,조정호,전경수,조성호,1999, GPS의 변위검출 능력에 대한 실험,한국측지학회지, 17,161-166.

Argus,D.F. and Gordon, R.G., 1991, No-net rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, Geophysical Research Letter, 18, 2039-2042.

Argus,D.F. and Heflin,H.B., 1995, Plate motion and crustal deformation estimated with geodetic data from Global Positioning System,Geophysical Research Letter, 22, 1973-1976.

Bilham,R., Larson,K., and Freymueller,J., 1997, GPS measurements of present-day convergence across the Nepal Himalaya, Nature, 386, 61-64.

DeMets,C., 1992, A test of present-day geometries for northeast Asia and Japan,Journal of Geophysical Research, 97, 17627-17634.

DeMets,C., Gordon,R.G., Argus,D.F., and Stein,S., 1990, Current plate motion, Geophysical Journal International, 101, 425-478.

DeMets,C., Gordon,R.G., Argus,D.F., and Stein,S., 1994, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, Geophysical Research Letter, 21, 2191-2194.

Heki,K., Miyazaki,S., Takahashi,H., Kasahara,M., Kimata,F., Miura,S., Vasilenko,N.F., Ivashchenko,A., and An, K.D., 1999, The Amurian Plate motion and current plate kinematics in eastern Asia, Journal of Geophysical Research, 104, 29147-29155.

Heki,K., Takahashi,Y., and Kondo,T., 1990, Island arcs of southeast Asia: Contraction of northeastern Japan: evidence from horizontal displacement of a Japanese station in global long baseline interferometry networks, Tectonophysics, 181, 113-122.

IERS, 1999, 1998 IERS Annual Report, Observatoire de Paris,Paris.

IGS,1999a,1998 IGS Annual Report, IGS Central Bureau, JPL.

IGS, 1999b, 1998 Technical Report, IGS Central Bureau, JPL.

Kato,T., Kotake,Y., Nakao,S., Beavan,J., Hirahara,K., Okada,M., Hoshiba,M., Kamigaichi,O., Feir,R.B., Park,P.H., Gerasimenko,M.D., and Kasahara M., 1998, Initial results from WING, the continuous GPS network in the western Pacific area, Geophysical Research Letter, 25, 369-372.

Larson,K.M., Freymueller,J.T., and Philipsen,S., 1997, Global plate velocities from the Global Positioning System, Journal of Geophysical Research, 102, 9961-9981.

Molnar,P. and Gipson, J.M., 1996, A bound on the rheology of continental lothosphere using very long baseline interferometry: The velocity of South China with respect to Eurasia,Journal of Geophysical Research, 101, 545-554.

Rothacher,M. and Mervart,L., 1996, Bernese GPS Software Version 4.0, Astronomical Institute in University of Berne,Berne.

Seno,T., Sakurai,T., and Stein,S., 1996, Can the Okhot plate be discriminated from the North American plate?, Journal of Geophysical Research, 101, 11305-11315.

Seno,T., Stein,S., and Gripp,A., 1993, A model for the motion of the Philippine sea consistent with NUVEL-1, Journal of Geophysical Research, 98, 17941-17948.

Wei,D. and Seno,T, 1998, Determination of the Amurian Plate Motion: in Flower, M.F.J., Chung,S.L., Lo,C.H., and Lee,T.Y., Eds., Mantle Dynamics and Plate Interaction in East Asia, American Geophysical Union,Geodynamics Series, 27,337-346.

Zonenshain,L.P. and Savostin,L.A., 1981, Geodynamics of the Baikal rift zone and plate tectonics of Asia, Tectonophysics, 76, 1-45.

2000년 5월 17일 원고접수
2000년 9월 21일 원고채택