



Short Note

남한의 판운동과 지각변형에 대한 소고

나성호^{1,*}, 조정호²

¹충남대학교 자연과학연구소

²한국천문연구원 우주측지그룹

A study of plate motion and deformation of South Korea

Sung-Ho Na^{1,*}, Jungho Cho²

¹Research Institute of Natural Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34314, Republic of Korea

²Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Republic of Korea

Received: July 6, 2024 / Revised: July 29, 2024 / Accepted: August 9, 2024

*Corresponding author: +82-42-821-7151 / E-mail: sunghona@cnu.ac.kr

요약: 남한의 44개 GPS 관측지점에서 2017년부터 5년간의 관측자료로부터 얻어진 지각속도를 분석하여 남한의 지역지각판의 움직임과 내부의 지각변형을 조사하였다. 기존 연구들과 결과를 비교할 때, 남한의 판운동과 판내부변형이 시기적으로 약간씩 달라져 온 것으로 생각된다. 또한 ITRF2020 GNSS 자료를 가지고 한반도와 유라시아판 및 아무르판의 관계를 조사하였다. 그렇지만 자료의 부족으로, 특히 북한과 만주 지역, 판의 구분 및 귀속 여부를 결정하기 어려웠다.

주요어: 판운동, 지각변형, GPS 관측, 변형률 분석, 남한

ABSTRACT: Using an accurate plate velocity data set of South Korea, which has been deduced from 5-year GPS measurement at 44 sites, the crustal movement and deformation of South Korea have been investigated. After comparison with former studies, it is presumed that the plate motion and deformation of Korea varied in time. A part of ITRF2020 GNSS data set has been analyzed to study the relationship between South Korea and the Eurasian plate as well as the Amur plate. Due to the shortage of data, particularly in North Korea and Manchuria, it was not possible to deduce a strong constraint on this relationship.

Key words: plate motion, crustal deformation, GPS measurement, deformation analysis, South Korea

1. 서론

한반도 지각은 대략 동남동 방향으로 서서히 움직이고 있는데, 일 년간의 이동 거리는 약 3~4 cm로서 지역에 따라 다소 차이가 있으며, 최근 자료에 의한 여러 지역에서의 평균값은 3.4 cm 정도이다. 한편 한반도 지각판 내부의 변형은 그다지 크지 않으며 비교적 안정한 편이다. 이와 같은 한반도의 판운동 및 지각 내부 변형에 대하여 몇 차례 기존 연구 들이 있었다(예, Heki *et al.*, 1999; Park *et al.*, 2001; Hamdy *et al.*, 2005; Jin *et al.*, 2007; Park, 2007, 2017; Kim *et al.*, 2018; Ansari and Bae, 2020; Li *et al.*, 2020). 그런데 최근 남한 지역에서 수집된 수년간의 GPS 관측으로부터 한국천문연구원이 분석하여 얻은 평균속도 자료는 그 정밀도가 이전보다 약간 향상되어(각 관측지점에서 지각속도의 표준편차가 0.06 mm/yr (동서방향)과 0.05 mm/yr (남북방향)), 본 연구에서는 그에 따라 남한지역의 판운동과 지각 내의 변형률을 다시금 산정한다. 또한 한반도가 유라시아판에 속하는가 아니면 아무르판에 속하는가의 여부가 계속 논의가 되어 왔기에, 이에 대하여 ITRF2020의 동북아시아 지역 지각속도 자료를 추가하여 얼마간 검토하고

자 한다. 본 연구의 초고는 한국천문연구원의 위탁과제로 수행된 내용으로서(Na, 2023), 여기에 해당 주요 부분을 간추리고 일부 오류를 수정하며 정련하였다.

2. 남한의 GPS 속도자료와 판운동모델

2017년 1월부터 2021년 12월까지의 5년 동안 남한의 44개의 관측지점에서 연속적으로 기록된 GPS 관측자료를 한국천문연구원 우주측지그룹에서 분석하여 남한의 지각속도를 산정하였는바, 관측된 지각속도들의 평균값은 34.03 mm/yr 이고 평균적 방향은 동남동으로서 동쪽 기준 방위각 -30.96° 에 해당한다.

남한 지역의 지각의 움직임을 지역적 판운동모델로 나타내고자 위 자료로부터 최소제곱법으로 구한 오일러극의 위도와 경도는 $64.081^\circ N$ 과 $218.140^\circ E$ 이며 각속도는 $0.35980^\circ/Myr$ 이었다(Na and Cho, 2023). 다음의 표는 관측속도와 모델속도를 비교한 것이다(표 1).

아래 표에 주어진 한반도 지각의 관측속도를 그림으로 나타내었다(그림 1). 그림에서 보이는 각 화살표들은 모두 동남동 방향으로 전체적으로 비슷하지만, 각 관측소별로

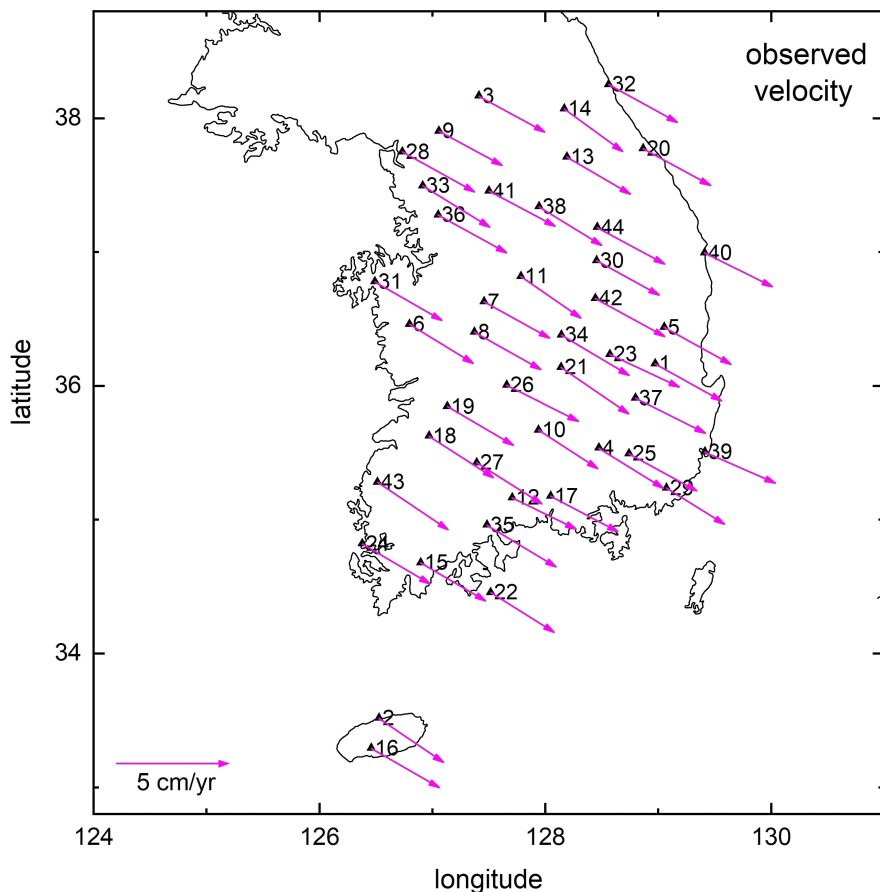


Fig. 1. Observed plate velocity of South Korea at 44 stations during 5 years from January 2017 to December 2021.

Table 1. The locations of 44 GPS stations in this study with their observed velocities and plate model velocities. The difference between observed and model velocities are shown together. Each two directional components (east and north) are given. Unit of velocity: [mm/yr].

Station	Latitude	Longitude	Ve (obs)	Vn (obs)	Ve (model)	Vn (model)	dVe	dVn	
1	BHAO	36.164	128.976	29.27	-17.02	28.969	-17.485	0.301	0.465
2	CHJU	33.514	126.530	28.42	-20.23	30.336	-17.483	-1.916	-2.747
3	CHLW	38.164	127.415	29.06	-16.49	28.496	-17.484	0.564	0.994
4	CHNG	35.533	128.478	28.44	-18.37	29.290	-17.487	-0.850	-0.883
5	CHSG	36.436	129.056	29.46	-16.91	28.852	-17.485	0.608	0.575
6	CHYG	36.459	126.802	28.09	-17.90	29.250	-17.482	-1.160	-0.418
7	CNJU	36.627	127.461	28.88	-16.71	29.069	-17.485	-0.189	0.775
8	DAEJ	36.399	127.375	29.29	-17.08	29.168	-17.485	0.122	0.405
9	DOND	37.902	127.061	27.90	-15.72	28.663	-17.482	-0.763	1.762
10	GOCH	35.668	127.943	26.09	-17.69	29.335	-17.488	-3.245	-0.203
11	GSAN	36.816	127.787	26.43	-19.12	28.939	-17.486	-2.509	-1.634
12	HADG	35.162	127.709	28.21	-14.28	29.559	-17.488	-1.349	3.208
13	HONC	37.709	128.194	28.00	-16.99	28.526	-17.486	-0.526	0.496
14	INJE	38.069	128.171	25.77	-19.62	28.391	-17.485	-2.621	-2.135
15	JAHG	34.675	126.900	28.66	-17.37	29.873	-17.484	-1.213	0.114
16	JEJU	33.288	126.462	29.98	-18.00	30.424	-17.482	-0.444	-0.518
17	JINJ	35.173	128.050	29.70	-16.16	29.496	-17.488	0.204	1.328
18	JUNG	35.623	126.974	28.32	-19.04	29.523	-17.484	-1.203	-1.556
19	JUNJ	35.843	127.135	29.12	-17.65	29.415	-17.485	-0.295	-0.165
20	KANR	37.771	128.868	29.81	-16.88	28.376	-17.484	1.434	0.604
21	KIMC	36.137	128.142	29.84	-21.45	29.127	-17.487	0.712	-3.963
22	KOHG	34.454	127.519	27.92	-18.18	29.844	-17.488	-1.924	-0.692
23	KUNW	36.233	128.574	30.70	-14.93	29.014	-17.487	1.686	2.557
24	MKPO	34.817	126.381	29.83	-18.25	29.913	-17.480	-0.083	-0.770
25	MLYN	35.491	128.744	29.92	-16.97	29.258	-17.487	0.662	0.517
26	MUJU	36.003	127.661	31.59	-16.60	29.263	-17.487	2.328	0.887
27	NAMW	35.423	127.396	28.62	-18.76	29.520	-17.486	-0.900	-1.274
28	PAJU	37.746	126.738	31.78	-18.27	28.782	-17.480	2.998	-0.790
29	PUSN	35.234	129.075	25.65	-16.53	29.294	-17.486	-3.644	0.956
30	SBAO	36.934	128.457	27.57	-15.72	28.772	-17.486	-1.202	1.766
31	SEOS	36.776	126.494	29.46	-17.72	29.189	-17.479	0.271	-0.241
32	SKCH	38.251	128.565	30.26	-17.36	28.247	-17.485	2.013	0.125
33	SKMA	37.494	126.918	29.54	-18.92	28.844	-17.482	0.696	-1.438
34	SNJU	36.379	128.145	29.88	-18.57	29.037	-17.487	0.843	-1.083
35	SONC	34.957	127.486	30.51	-19.17	29.671	-17.487	0.839	-1.683
36	SUWN	37.276	127.054	30.22	-17.32	28.901	-17.483	1.319	0.163
37	TEGN	35.906	128.802	30.83	-16.01	29.095	-17.486	1.735	1.476
38	WNJU	37.337	127.947	27.68	-17.70	28.713	-17.486	-1.033	-0.214
39	WOLS	35.504	129.416	31.14	-14.29	29.135	-17.483	2.005	3.193
40	WULJ	36.992	129.413	29.99	-15.50	28.576	-17.482	1.414	1.982
41	YANP	37.454	127.506	29.11	-16.12	28.750	-17.485	0.360	1.365
42	YECH	36.651	128.446	30.56	-17.38	28.881	-17.486	1.679	0.106
43	YONK	35.279	126.517	31.13	-21.75	29.727	-17.481	1.403	-4.269
44	YOWL	37.183	128.462	29.83	-16.72	28.677	-17.486	1.153	0.766

크기와 방향에서 차이가 약간씩 엇보인다. 반면에 판운동 모델에 의하여 계산된 속도들은 매우 균일하다(표 1).

3. 남한반도의 지각변형률 산정

한반도의 지각은 그 움직임이 균일한 편으로서 내부의 변형률은 크지 않으나, 약간의 변형이 조금씩 계속 일어나고 있다. 앞에서 기술된 관측자료 - 5년 동안의 남한의 GPS 관측자료에 의거한 속도로부터, 남한의 지각 내의 변형률 - 팽창률과 회전을 그리고 변형률의 주축성분 - 이같이 세 가지의 비율들을 조사하였다. 계산방식은 변형을 분석하는 구조역학의 기본적 방법으로서, 얻어지는 변형률의 기본단위는 각각 $[m/yr]$, $[1/yr]$, $[rad/yr]$ - 즉 연평균 비율들이다. 아래에 먼저 지각변형률을 산정하는 알고리즘을 기술하고, 이를 차등속도($\vec{v}_{diff} = \vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal}$), 즉 앞 절에서 구한 한반도 지각 움직임의 관측 속도와 모델 속도의 차이에 대하여 적용함으로써 순수한 지각변형률을 구하고자 하였다. 그와 같이하여 얻어진 결과를 보이고 검토하며 기존 연구와 비교하였다.

3.1. 수평 방향 지각변형률의 분석 방법

지각의 이동속도로부터 지각 내의 2차원적 변형률을 조사하는 데에, 인접한 세 관측지점으로써 관측 삼각망을 구성하여 산정하는 방식을 사용하였다(Na *et al.*, 2013). 이를 간단히 기술하면 다음과 같다. 주어진 세 지점의 위치좌표 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 그리고 각 지점의 이동속도 (u_1, v_1) , (u_2, v_2) , (u_3, v_3) 들로부터 지역 내의 이동속도장 (u, v) 을 4개의 편미분계수 $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial y}$ 로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i = \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_i,$$

$$v_i = \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y_i \quad (i=1,2,3)$$
(1)

세 지점에서의 이동속도 자료로써 관측방정식이 다음과 같이 구성된다((x_c, y_c) 는 삼각망의 중심 좌표. 중심에 대한 관측지점의 상대적위치좌표는 $\Delta x_i = x_i - x_c$ 와 $\Delta y_i = y_i - y_c$).

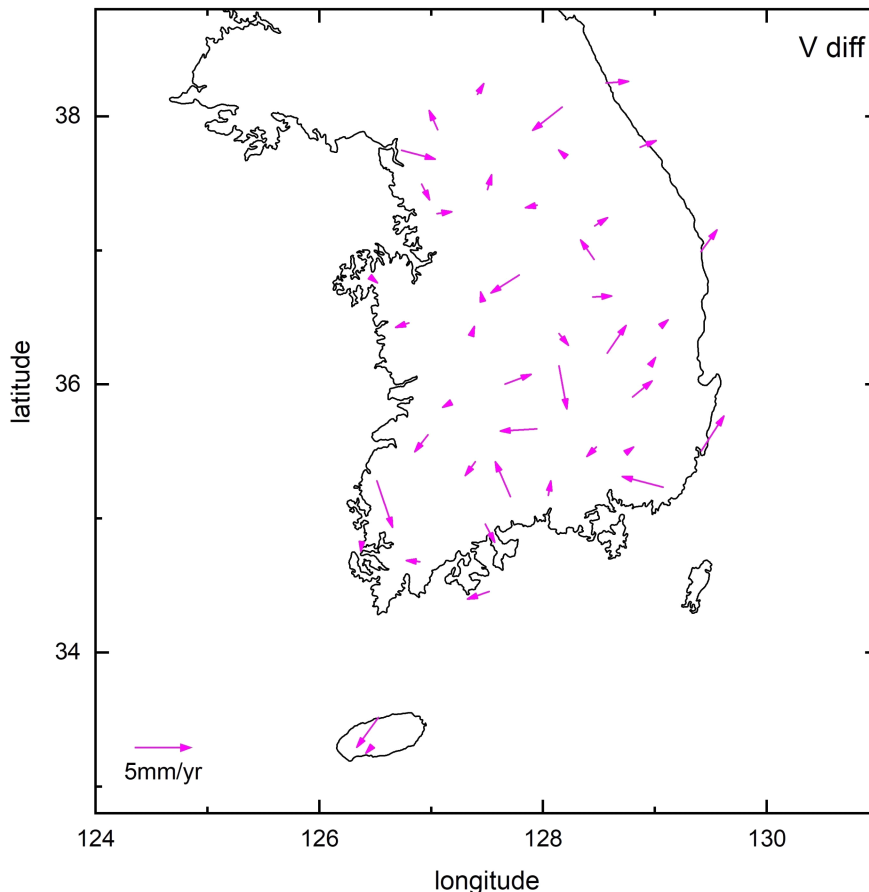


Fig. 2. Difference between the observed velocity and the model velocity of South Korean plate motion.

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 & \Delta y_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta x_1 & \Delta y_1 \\ \Delta x_2 & \Delta y_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta x_2 & \Delta y_2 \\ \Delta x_3 & \Delta y_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta x_3 & \Delta y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial u / \partial x \\ \partial u / \partial y \\ \partial v / \partial x \\ \partial v / \partial y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식을 $Y=AX+E$ 라고 할 때, 편미분계수 $\frac{\partial u}{\partial x}$, $\frac{\partial u}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial x}$, $\frac{\partial v}{\partial y}$ 의 최소제곱해는 $\hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T Y$ 로 얻어진다. 관측속도의 값들에 대한 오차를 알고 있다면 이 계수들의 추정치의 오차도 곧바로 얻어지며, 이는 $\Sigma_x = (A^T A)^{-1} A^T \Sigma_y A (A^T A)^{-1}$ 로서 주어진다. 얻어진 편미분계수들로부터 변형률텐서(strain tensor)(E_{ij})와 주축변형(principal strain)을 구한다. 변형률의 주축방향과 주변형률은 다음의 조건식(특성방정식)에서 결정된다.

$$\begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} \\ E_{21} & E_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

3.2. 남한반도의 지각변형률

2017년 1월부터 5년 동안 남한의 44개의 관측지점에서의 지각속도 평균값은 34.03 mm/yr 이며, 그 방향은 동쪽 기준 방위각 -30.96° 이다. 앞 절에서 이 자료에 의거한 한반도의 판운동모델을 산정하여, 그에 따른 판이동의 예측 속도를 구하여 나타내었으며, 그에 따라 차등속도, 즉 관측 속도와 모델속도의 차이($\vec{v}_{diff} = \vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal}$)를 지각변형률 산정의 기본 입력자료로 사용하는데, 이는 관측된 지각속도를 곧바로 변형률계산에 적용하는 경우와 큰 차이는 없겠으나, 균일한 판운동에서 벗어난 만큼 - 즉 순수한 지각변위에 따른 변형을 고려한다는 점에서 더욱 합리적이다. 표의 dVe와 dVn는 차등속도 $\vec{v}_{diff} = \vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal}$ 의 각각 동쪽방향과 북쪽방향의 속도성분이다. 44개의 관측지점에서의 이 차등속도의 크기($|\vec{v}_{diff}|$)의 평균값은 1.89 mm/yr 이다. 44개의 관측지점 중에서 차등속도($\vec{v}_{diff} = \vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal}$)가 가장 큰 10개의 관측지점은 다음과 같다.

10 GOCH, 11 GSAN, 12 HADG, 14 INJE, 21 KIMC
23 KUNW, 28 PAJU, 29 PUSN, 39 WOLS, 43 YONK

즉 거창, 괴산, 하동, 인제, 김천, 군위, 파주, 부산, 월성, 영광이며, 이 10개 지점에서는 차등속도가 3 mm/yr 혹은 그 이상으로 최대는 영광에서 4.5 mm/yr 이다.

지각변형률을 구하기 위하여 총 83개의 삼각망들을 구성

하였다(표 2). 표의 원편으로부터 각 삼각망의 세 꼭지점(관측소)의 번호와 삼각망의 중심의 위치(위도와 경도)를 보였으며, 그 다음에 얻어진 팽창률(dilatation), 회전률(rotation), 주변형률과 주축방향, 그리고 오차(std)를 보였다. 이들의 단위는 각각 $[\text{nanostain/yr}]$, $[10^{-7} \text{ rad/yr}]$, $[\text{nanostain/yr}]$, $[\text{deg}]$, $[\text{nanostain/yr}]$ 이다. 주변형률과 주축은 각 삼각망에 한 쌍씩 있으며, 주변형률이 양(+)이면 팽창, 음(-)이면 수축을 나타낸다. 회전률의 경우에서 양(+)의 값이 반시계 방향의 회전에 해당한다.

남한의 각 지역들(83개 삼각망)에서의 팽창률과 회전율의 단순산술평균값은 각각 $11.0 \text{ nanostain/yr}$ 와 $0.0164 \times 10^{-7} \text{ rad/yr}$ 로서, 전체적으로 매우 작으나 약간의 팽창률과 미미한 반시계 방향의 회전율을 나타내고 있다. 여기에서 팽창률의 평균적 방향은 대체로 북북동-남남서 방향으로 동쪽 기준 방위각 81° 에 해당한다. 팽창률은 SNJU(상주)-KIMC(김천)-KUNW(군위)-TEGN(대구)의 지역에서 120 정도로써 우세하며, 그중에서도 최대값은 CHNG(창원)-PUSN(부산)-MLYN(밀양)에서 173 이다. 음의 팽창률은 MUJU(무주)-KIMC(김천)-GOCH(거창)-NAMW(남원)의 지역에서 -100 에서 -120 으로 우세하며, 최대는 삼각망 CHLW(철원)-HONC(홍천)-INJE(인제)에서 -124 이다. 각 삼각망에 대하여 계산된 주변형률의 크기와 방위각을 그림으로 나타내었다(그림 3). 얻어진 주변형률들은 최대인장률 259.5 에서 최대압축률 -137.5 사이의 값을 가지는데(단위: $[\text{nanostain/yr}]$), 이들은 각각 삼각망 4-29-25(위도 35.42 , 경도 128.77)와 삼각망 9-28-33(위도 37.71 , 126.91)에서 그러하며, 이들은 각각 CHNG(창원)-PUSN(부산)-MLYN(밀양)과 DOND(동두천)-PAJU(파주)-SKMA(서울)의 두 지역이다. 다음으로서는 회전율을 역시 등고선과 같이 남한지역에 대하여 그림으로 나타내었다(그림 4). NAMW(남원)-SONC(순천)-HADG(하동)의 삼각망 27-35-12(위도 35.18 , 경도 127.53)에서 반시계방향의 회전률이 $1.21 \times 10^{-7} \text{ rad/yr}$ 으로 가장 우세하다. 시계방향의 회전률은 상주(SNJU)-김천(KIMC)-무주(MUJU)-거창(GOCH)의 비교적 넓은 지역에서 $-1.00 \times 10^{-7} \text{ rad/yr}$ 등으로 매우 뚜렷한데, 시계방향 최대값은 CHNG(창원)-PUSN(부산)-MLYN(밀양) 삼각망 4-29-25(위도 35.42 , 경도 128.77)에 $-1.01 \times 10^{-7} \text{ rad/yr}$ 이다. 남한 전체로는 $0.0164 \times 10^{-7} \text{ rad/yr}$ 로 미미한 반시계방향의 회전율을 나타내고 있다.

3.3. 한반도 지각변형 기준 연구와의 비교 및 검토

각 지역 차등 속도 $\vec{v}_{diff} = \vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal}$ 를 볼 때(그림 2), 한반도 지각변형의 어떤 뚜렷한 특징적인 움직임을 찾기 어렵다. 물론 이로부터 분석한 팽창률, 회전률, 변형률 주축방

Table 2. Array of 83 triangular networks and rate of dilatation, rate of rotation, principal strain rate and axis, and error estimate. Each units are [nanostrain/yr], [10^{-7} rad/yr], [nanostrain/yr], [deg], and [10^{-12} /yr]. Triangles are specified by three stations at vertices. Each latitude and longitude are of the centers of triangle.

Triangle	Latitude	Longitude	Dilatation	Rotation	P.strn.1	Azimuth1	P.strn.2	Azimuth2	Error
32-13-20	37.910	128.542	21.7570	-0.1162	34.2476	18.820	-12.4906	-71.179	0.0285
32-14-13	38.010	128.310	95.4027	0.7113	15.9202	7.022	-63.7995	-82.978	0.1246
32-14-20	38.031	128.535	114.7787	-0.0344	126.3197	27.724	-11.5410	-62.276	0.0560
14-13-20	37.850	128.411	-27.1539	0.2974	41.9621	169.135	-69.1161	-100.865	0.0588
03-13-14	37.981	127.927	-124.094	-0.0073	-5.6910	138.364	-118.403	-131.636	0.0678
03-09-13	37.925	127.557	-0.7085	-0.2475	13.9089	22.677	-14.6174	-67.323	0.0563
09-41-13	37.689	127.587	-5.3105	0.0597	16.2486	134.624	-21.5591	-135.377	0.0392
03-09-41	37.840	127.327	29.3000	-0.1219	36.6688	172.215	-7.3688	-97.786	0.0486
03-41-13	37.776	127.705	-20.6397	-0.0620	-3.5177	114.547	-17.1220	-155.454	0.0199
09-28-33	37.714	126.906	-77.8543	0.2489	59.6270	81.050	-137.481	-8.950	0.1069
09-33-41	37.617	127.162	45.3866	0.4357	57.1457	78.064	-11.7591	-11.936	0.0443
33-36-41	37.408	127.159	-49.8092	0.3991	-6.1414	15.609	-43.6678	-74.391	0.1318
13-38-20	37.606	128.337	50.1802	0.0264	33.4171	170.178	16.7631	-99.822	0.1031
20-38-44	37.430	128.426	28.5746	0.1753	40.4261	179.164	-11.8515	-90.836	0.0441
13-38-44	37.410	128.201	47.9662	0.1694	44.0703	8.708	3.8959	-81.292	0.0466
13-44-20	37.554	128.508	30.2750	0.0845	34.9889	170.835	-4.7139	-99.165	0.0269
20-44-40	37.315	128.914	-5.5285	0.0484	6.7904	24.038	-12.3188	-65.962	0.0165
13-41-38	37.500	127.882	6.3658	-0.2775	32.7947	91.235	-26.4289	-178.765	0.0786
41-36-11	37.182	127.449	8.0106	-0.0983	48.5249	78.480	-40.5143	-11.520	0.0408
41-11-38	37.203	127.747	7.0922	-0.3048	31.8298	88.844	-24.7376	-1.156	0.0533
36-11-38	37.143	127.596	-5.9147	-0.2020	29.1046	77.777	-35.0193	-12.223	0.0252
36-31-07	36.893	127.003	-4.2664	-0.0452	13.5411	43.710	-17.8075	-46.290	0.0180
36-31-06	36.837	126.783	-6.7413	-0.1459	15.1338	60.326	-21.8751	-29.674	0.0473
36-06-07	36.787	127.106	9.9171	-0.0277	27.6420	40.587	-17.7249	-49.413	0.0219
31-06-07	36.621	126.919	19.5547	-0.1397	39.4191	51.712	-19.8645	-38.288	0.0751
36-07-11	36.906	127.434	-105.880	-0.2084	-14.4261	122.631	-91.4543	-147.369	0.0603
38-11-30	37.029	128.064	28.1180	0.1638	51.7847	42.726	-23.6666	-47.274	0.0293
38-30-44	37.151	128.289	42.0781	-0.3820	94.5002	19.313	-52.4221	-70.687	0.1586
38-11-44	37.112	128.065	69.4827	0.0757	61.1763	24.801	8.3064	-65.199	0.0404
44-11-30	36.978	128.235	-34.1487	-0.1037	60.4787	37.458	-94.6275	-52.542	0.1349
40-44-30	37.036	128.777	-12.2280	-0.3985	48.1371	28.088	-60.3651	-61.912	0.1120
40-30-42	36.859	128.772	90.1782	0.4567	92.8251	130.335	-2.6469	-139.665	0.0928
40-42-05	36.693	128.972	3.6756	-0.0190	23.2721	63.836	-19.5965	-26.164	0.0333
40-44-05	36.870	128.977	19.1966	0.0372	24.0355	53.105	-4.8388	-36.895	0.0186
30-11-42	36.801	128.230	93.3242	0.6906	70.9876	129.366	22.3366	-140.634	0.0870
11-34-42	36.616	128.126	72.1264	0.3021	62.0591	2.493	10.0674	-87.507	0.0527
11-07-34	36.607	127.798	-64.6872	0.1603	35.0334	140.237	-99.7206	-129.763	0.0699
07-08-34	36.469	127.660	30.9675	-0.0274	34.3860	126.433	-3.4185	-143.568	0.1216
07-06-08	36.495	127.212	31.7368	0.1817	22.4784	175.633	9.2583	-94.367	0.1484
08-06-19	36.234	127.104	28.1354	0.0913	26.8970	17.310	1.2384	-72.690	0.0318
08-06-26	36.287	127.279	18.2312	0.2708	24.7789	156.844	-6.5478	-113.156	0.1179
08-19-26	36.082	127.390	62.5492	0.1802	61.0519	3.438	1.4973	-86.562	0.0409
06-19-26	36.102	127.199	56.8496	0.0513	56.1494	16.551	0.7002	-73.449	0.0386

Table 2. continued.

Triangle	Latitude	Longitude	Dilatation	Rotation	P.strn.1	Azimuth1	P.strn.2	Azimuth2	Error
34-08-26	36.261	127.727	-15.0106	0.1128	29.8659	148.066	-44.8764	-121.934	0.0379
34-08-21	36.305	127.887	117.8234	-0.1138	107.7064	93.898	10.1170	-176.102	0.1230
34-26-21	36.173	127.983	69.1456	-0.7723	137.6371	112.198	-68.4915	-157.802	0.1711
08-26-21	36.180	127.726	-80.3677	-0.1513	38.3879	143.702	-118.756	-126.299	0.0678
42-34-23	36.421	128.388	-8.5525	0.3727	47.4382	28.252	-55.9907	-61.748	0.0602
34-21-23	36.250	128.287	129.8736	0.6697	147.5609	59.945	-17.6873	-30.055	0.1231
42-23-05	36.440	128.692	-78.7023	-0.0535	-18.8030	163.927	-59.8994	-106.074	0.0477
23-01-05	36.278	128.869	-17.7953	-0.3629	22.2533	107.630	-40.0486	-162.371	0.1177
40-05-39	36.311	129.295	24.6764	0.3066	45.7955	27.107	-21.1191	-62.893	0.0525
05-37-39	35.949	129.091	-28.9155	0.1511	-8.0114	175.993	-20.9041	-94.007	0.0358
23-37-01	36.101	128.784	-47.0945	-0.1624	23.3486	122.179	-70.4430	-147.821	0.0887
21-37-23	36.092	128.506	129.5324	0.6359	150.7750	59.905	-21.2426	-30.095	0.0989
21-10-04	35.780	128.188	5.603107	-0.4305	67.0963	4.486	-61.4932	-85.514	0.0414
21-10-37	35.904	128.296	-46.4931	-0.0411	64.4347	20.170	-110.928	-69.830	0.0354
21-04-37	35.859	128.474	28.1371	0.2533	80.9099	36.370	-52.7728	-53.630	0.0345
10-04-37	35.703	128.408	111.5987	-0.0976	68.5128	42.797	43.0858	-47.204	0.0715
26-10-21	35.936	127.916	-110.038	-0.9969	-38.0987	88.683	-71.9389	-1.317	0.0499
26-19-27	35.757	127.398	71.8606	-0.1155	59.6277	36.928	12.2329	-53.072	0.0411
26-27-10	35.698	127.667	-62.6725	-0.4046	46.0727	72.438	-108.745	-17.562	0.0376
26-19-10	35.838	127.580	34.7427	-0.7003	98.3831	51.396	-63.6404	-38.604	0.0742
19-27-10	35.645	127.492	-15.7754	0.0768	27.1213	90.745	-42.8967	-179.255	0.0422
19-18-27	35.630	127.168	60.8741	0.0307	58.8044	53.638	2.0696	-36.362	0.1099
18-43-27	35.442	126.962	19.0549	0.3854	39.8355	98.172	-20.7806	-171.829	0.0752
43-24-15	34.924	126.599	-80.6695	-0.1793	-9.8888	13.892	-70.7808	-76.108	0.0492
27-43-15	35.126	126.937	-75.1003	0.1226	-3.2809	41.633	-71.8194	-48.367	0.0149
27-15-35	35.019	127.261	56.2071	-0.0515	67.8777	155.166	-11.6707	-114.834	0.0330
27-43-35	35.220	127.133	-8.2097	0.3605	13.4207	91.503	-21.6304	-178.497	0.0342
43-15-35	34.971	126.967	-51.4465	-0.2075	19.2326	16.454	-70.6791	-73.546	0.0258
35-15-22	34.696	127.302	-9.6362	-0.3632	14.6848	21.892	-24.3210	-68.108	0.0298
27-35-12	35.181	127.531	-21.1227	1.2116	82.0190	61.206	-103.142	-28.794	0.0805
10-27-12	35.418	127.683	-123.365	0.4491	-26.3246	22.352	-97.0408	-67.648	0.0442
10-12-17	35.335	127.901	14.5653	-0.0319	79.9907	154.377	-65.4254	-115.623	0.0802
10-17-04	35.458	128.157	0.0186	0.1651	51.7211	154.126	-51.7025	-115.874	0.0381
04-17-25	35.399	128.424	-44.9741	0.5678	50.7920	173.464	-95.7661	-96.536	0.2616
04-25-37	35.644	128.675	80.1396	0.2272	86.6260	27.879	-6.4865	-62.121	0.1314
04-29-25	35.420	128.766	173.1132	-1.0073	259.4514	40.090	-86.3382	-49.910	0.8337
04-17-29	35.313	128.534	-98.0229	-0.0744	-39.3251	25.140	-58.6978	-64.860	0.0471
25-29-39	35.410	129.078	48.2835	-0.6294	130.8211	46.570	-82.5376	-43.430	0.0766
37-25-39	35.634	128.987	37.5656	0.1155	51.2721	42.392	-13.7065	-47.608	0.0442
37-29-39	35.548	129.098	109.4360	-0.2509	136.1062	33.680	-26.6700	-56.320	0.0439

향 등은 이미 앞 절에 기술한 바와 같으나, 경기지괴, 태백산분지, 옥천계, 영남지괴, 경상분지 등에 걸친 어떤 특징적인 패턴을 찾기가 어렵다. 이는 양산 단층 및 인근의 지진 활동이 뚜렷한 지역에서도 그러하다(울진이나 부산의 차등

속도가 경주지진의 우수향 지진단층해와 잘 부합되지 않음 - 거리도 얼마간 떨어져 있음). 다만 팽창률과 회전률에서는 김성실 등의 분석 결과(도호쿠 지진 이후의 경우)가 본 보고의 내용과 얼마간 유사하다. 공간적으로 더 촘촘하게

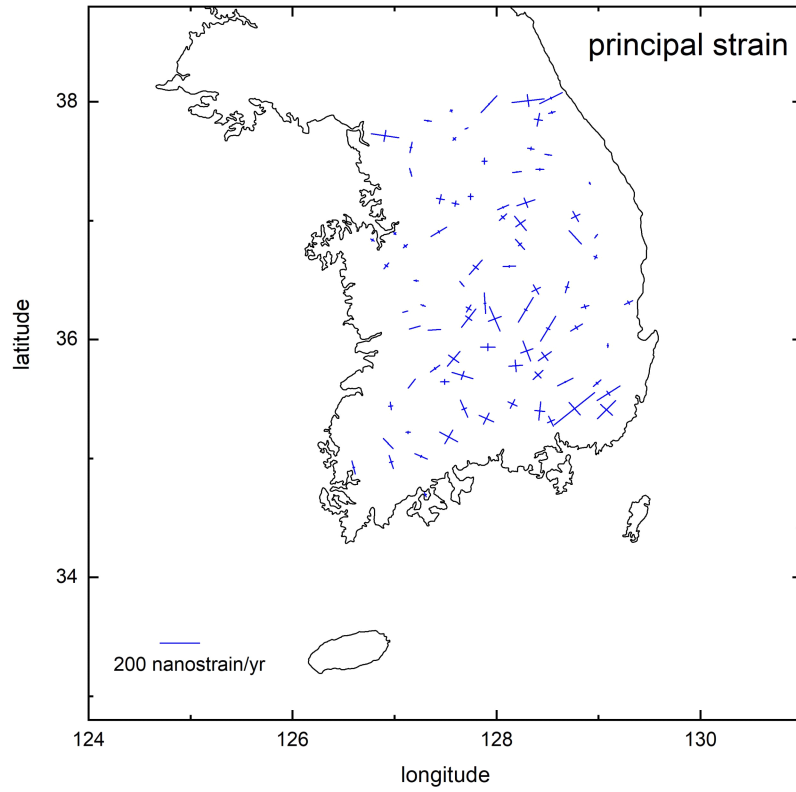


Fig. 3. Principal axes of the strain rates for each triangular areas.

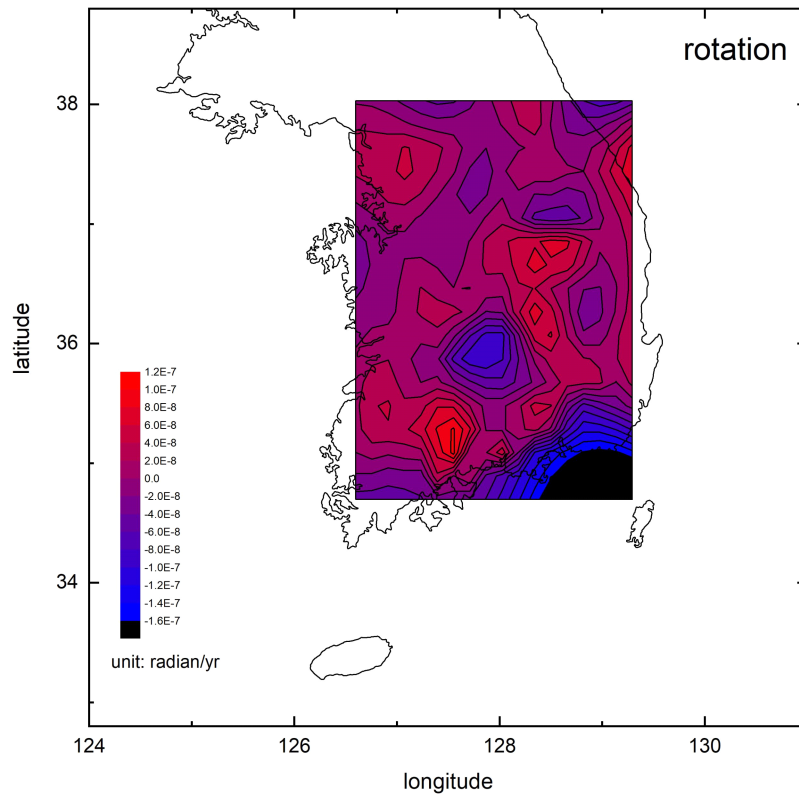


Fig. 4. Representation of the calculated rotation rate with contours.

얻어진 GPS 자료가 있다면, 같은 기간의 지진 활동과 일치하는 움직임들이 확인될 수 있을 것으로 생각된다. 한편 자료의 신뢰도에 있어, 본 보고에서 사용한 천문연구원의 자료에 의한 앞 절의 계산 결과, 즉 변형률과 회전률의 오차는 $[10^{-11}/yr] \sim [10^{-10}/yr]$ 정도이다.

기존의 몇몇 연구들에서 한반도 지각 내의 변형의 분석 결과를 제시하였다. 그런데 먼저 본 연구의 차등 속도 $\vec{v}_{diff} = \vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal}$ 가 Hamdy가 제시한 것과 다르다(Hamdy *et al.*, 2005). Jin and Park (2006a)의 연구에서도 차등 속도와 변형률 추산 결과가 모두 본 연구의 것과 다르다. Park *et al.* (2001)의 보고 및 Hamdy *et al.* (2004)의 또 다른 보고에서 간략히 표현된 3~4개 관측지점의 차등 속도와도 다르며, Park (2007, 2017)의 연구나 Kim *et al.* (2018)의 연구 그리고 Ansari and Bae (2020)의 연구들과도 다르다. 게다가 이들 기존 연구 결과들 사이의 유사성이나 연관성도 뚜렷하지 않다.

위와 같은 사실은 한반도의 지각의 움직임은 대체로 같은 방향과 이동량으로써 계속 일어나고 있으나, 각 관측지점에서 전체적 움직임에 대한 상대적 움직임의 시계열들에

는 상이점들이 존재한다는 것을 알 수 있다. 변위의 크기는 작으나 규칙성이 결핍된 이와 같은 상대적 움직임은 시간이 감에 따라 그 양상이 바뀌는 복잡-다변한 지각변형을 의미한다. 따라서 한반도 내의 지각변형들을 명확히 알 수 있기 위하여 일관된 자료획득과 분석을 수년 간격(1~3년)으로 계속해가는 것이 바람직하며, 또한 지진의 영향 등으로 어떤 지점을 전후하여 지각움직임과 변형의 양상이 달라졌다면 그에 따라 분석 시기를 구분할 필요가 있다.

4. ITRF 자료에 의한 동북아 지각판운동 분석

한반도의 판운동을 주변의 주요 광역지각판과의 관계로써 조사하고자 하였으나, 중국 등지로부터 자료획득이 최근 더욱 어려워져서, ITRF 자료에만 의존하여 약간의 분석을 시도하였다.

4.1. ITRF2020 GNSS 자료

IGS에서는 ITRF 주요 기점들의 움직임에 대하여 자료를 제시하고 있다(해당 인터넷 사이트: <https://itrf.ign.fr/ftp/>)

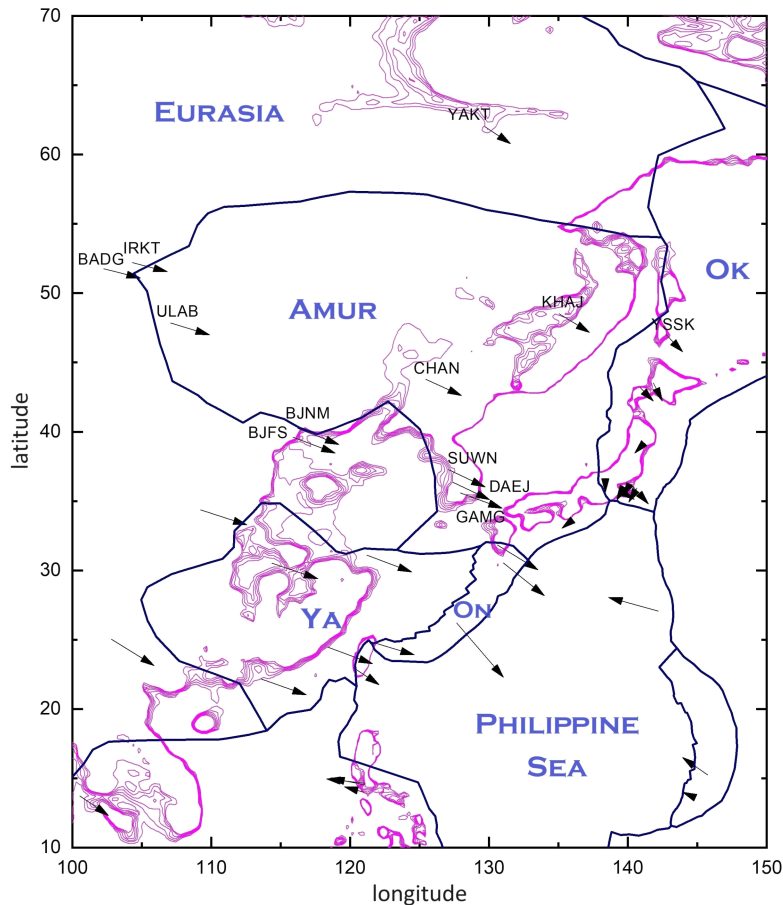


Fig. 5. ITRF2020 GNSS plate velocity for East Asia. The plate boundary is drawn after Bird (2003).

Table 3. Eleven ITRF2020 stations in the East Asia selected for this study. Their locations and velocities. Unit of velocity: [m/yr].

Station	Latitude	Longitude	Ve	Vn
YAKT	62.0310	129.6803	0.0188	-0.0125
IRKT	52.2190	104.3162	0.0252	-0.0068
BADG	51.7697	102.2350	0.0265	-0.0068
BIFS	39.6086	115.8925	0.0303	-0.0115
BJNM	40.2453	116.2241	0.0298	-0.0117
KHAJ	48.5215	135.0462	0.0220	-0.0136
CHAN	43.7907	125.4442	0.0258	-0.0119
DAEJ	36.3744	127.3661	0.0268	-0.0128
SUWN	37.2755	127.0542	0.0267	-0.0127
GAMG	35.5901	127.9197	0.0302	-0.0111
ULAB	47.8651	107.0523	0.0283	-0.0087

pub/itrf/itrf2020/ITRF2020_GNSS.SSC.txt). 아래 그림은 ITRF2020 GNSS 자료 중 경도 100~150°, 위도 10~70°의 지역에 있는 관측기점들의 속도자료를 Bird의 판경계와 함께 개략적 지형 등고선 위에 나타낸 것이다(그림 5).

그림에 한반도 내의 GPS 속도자료는 세 지점만을 나타내었으며(몇 기점의 자료가 더 있으나 지역 전체적으로 균일한 분포를 피하였음), 나머지는 선택된 경위도 범위 안의 ITRF 기점 자료를 모두 보였다. 한반도를 포함하여 유라시아판과 아무르판의 판운동에 대한 사항을 합리적으로 고려하려면 더 많은 자료가 필요하지만, 그림에 표시한 것처럼 11개의 관측기점만을 택하였다(북한과 중국의 보다 상세한 GPS 자료의 획득은 불가능하였음). 이들 11개 지점의 위치와 판운동속도는 표 3에 나타내었다.

이 11개의 기점들이 동일한 판 위에 있다고 가정하는 경우, 판운동의 오일러극의 위치와 판의 각속도는 다음과 같이 얻어진다.

$$(\text{위도: } 65.125, \text{ 경도: } 243.333, \omega = 0.29463^\circ / \text{Myr})$$

얻어진 오일러벡터로부터 관측기점들의 속도를 계산하면 관측 속도와 약간씩의 차이를 보이는데, 그 차이의 평균값은 $\Delta v_{r.m.s.} = 1.663 \text{ mm/yr}$ 이다.

4.2. ITRF 자료에 의한 판운동모델 구분비교

ITRF2020 GNSS 자료에 의하여 유라시아판과 아무르판을 구분 없이 하나의 동일한 판으로 취급하는 경우와 이들을 분리하여 따로 취급하는 경우의 타당성을 비교하였다. 또한 아무르판에서 한반도지역을 다시 분리하는 경우도 가정해보았다.

Table 4a. Comparison of observed velocity and model velocity of ITRF2020 stations. Each Chi-square value is given. One-plate model. Unit of velocity: [cm/yr].

Station	Ve (obs)	Vn (obs)	Ve (model)	Vn (model)	χ_i^2
YAKT	1.88	-1.25	1.936	-1.234	0.3357
IRKT	2.52	-0.68	2.677	-0.855	5.5432
BADG	2.65	-0.68	2.714	-0.815	2.2455
BJFS	3.03	-1.15	2.858	-1.055	3.8533
BJNM	2.98	-1.17	2.841	-1.060	3.1503
KHAJ	2.20	-1.36	2.341	-1.287	2.5287
CHAN	2.58	-1.19	2.633	-1.187	0.2839
DAEJ	2.68	-1.28	2.788	-1.210	1.6419
SUWN	2.67	-1.27	2.772	-1.207	1.4380
GAMG	3.02	-1.11	2.797	-1.217	6.0967
ULAB	2.83	-0.87	2.767	-0.906	0.5279

4.2.1. 단일지각판으로 가정하는 경우

앞에서와 같이 11개의 기점이 모두 동일한 지각판 위에 있다고 가정하여 오일러벡터를 구한 다음, 모델에서 얻어지는 속도와 관측값을 비교하면 대체로 부합된다. 그런데 여기에서 $\sigma = 1 \text{ mm/yr}$ 로 설정하고 관측속도와 계산되는 모델속도의 차이 즉 차등속도에 의한 카이제곱값을 구하면 다음과 같다.

$$\chi^2 = \sum_{\text{model1}} \chi_i^2 = \sum_{\text{model1}} \frac{(\vec{v}_{\text{obs}} - \vec{v}_{\text{cal}})^2}{\sigma^2} = 27.645$$

이 모델의 자유도(degree of freedom)는 10이며 ($d.f. = (2-1) \times (11-1) = 10$), 해당 p-값 즉 확률 $P(\chi^2 > 27.645) = 0.206\%$ 로서 작다. 다음의 표는 11개 각 기점의 관측속도와 모델속도 및 카이제곱 기여값들이다(표 4a; 속도의 단위는 [$cm/year$], $\sigma = 1 \text{ mm/yr}$).

4.2.2. 판을 두 개의 구역으로 구분하는 경우

11개의 기점 중 YAKT, IRKT, BADG, BJFS, BJNM의 5개 기점이 같은 판 위에 있고 KHAJ, CHAN, DAEJ, SUWN, GAMG, ULAB의 6개 기점이 또 다른 판 위에 있는 것으로 가정하는 경우, 각 두 판의 오일러극과 각속도는 다음과 같이 얻어진다.

$$(\text{위도: } 67.434, \text{ 경도: } 243.333, \omega = 0.30342^\circ / \text{Myr})$$

$$(\text{위도: } 64.968, \text{ 경도: } 244.977, \omega = 0.29417^\circ / \text{Myr})$$

또한 이에 해당하는 두 판 위의 기점들의 관측속도와 모델속도의 차이의 평균값은 각각 $\Delta v_{r.m.s.} = 1.888 \text{ mm/yr}$ 과

$\Delta v_{r.m.s.} = 1.560 \text{ mm/yr}$ 이며, 여기에서 $\sigma = 1 \text{ mm/yr}$ 로 하면 카이제곱값은 각각 $\chi_a^2 = 14.256$ 와 $\chi_b^2 = 12.175$ 로 얻어진다.

$$\chi_a^2 = \sum_{\text{model}2a} \frac{(\vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal})^2}{\sigma^2} = 14.256,$$

$$\chi_b^2 = \sum_{\text{model}2b} \frac{(\vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal})^2}{\sigma^2} = 12.175$$

따라서 합은 $\chi^2 = \chi_a^2 + \chi_b^2 = 26.431$ 이 되어, 카이제곱값 자체는 한 개의 지각판으로 보는 경우보다 약간 작다. 그런데 모델의 자유도가 1만큼 감소하여 $d.f. = 9$ 이 되므로, 해당 p-값 즉 확률 $P(\chi^2 > 26.431) = 0.174\%$ 은 오히려 약간 더 작다. YAKT, IRKT, BADG, BJFS, BJNM의 5개 기점과 KHAJ, CHAN, DAEJ, SUWN, GAMG, ULAB의 6개 기점이 분리된 2개의 판 위에 있다고 보는 것이 11개 지점 모두가 동일한 한 개의 판 위에 있다고 가정하는 경우와 비교하여 더 타당한지는 확실하지 않다(뒤에서 이에 대한 F 테스트를 추가로 고려하는데, 이는 σ 값에 상관없이 통계학적 의미를 지님). 여기에서의 두 구역은 Bird의 경계구분으로서 각각 유라시아판과 아무르판에 속한다. 다음에는 두 판으로 나누었을 경우, 각 기점의 관측속도와 모델속도 및 카이제곱 기여값 χ_i^2 을 나타내었다(표 4b).

4.2.3. 한반도지역을 다시 분리하여 3개의 구역으로 구성하는 경우

앞 절의 두 번째 판의 관측기점 6개를 다시 나누어 DAEJ, SUWN, GAMG를 포함하는 판을 독립적으로 가정하게 되면, 관측속도와 모델속도의 차이의 평균값은 각각 $\Delta v_{r.m.s.} = 1.888 \text{ mm/yr}$, 1.033 mm/yr , 그리고 1.128 mm/yr 로 약간 감소하며, 카이제곱값 $\chi^2 = 18.934$ 로 약간 더 감소한다. 한편 모델의 자유도는 다시 1 만큼 더 감소하여 $d.f. = 8$ 인데, 해당 p-값 즉 $P(\chi^2 > 18.934) = 1.52\%$ 으로 증가하므로, 얼핏 세 구역의 모델이 관측자료에 더 잘 부합된다고 할 수 있으나, 판운동 관점에서 보면 그러한 추론은 옳지 않음을 알 수 있다. 3개의 판으로 구성된 모델은 분리된 판들의 오일러극과 각속도가 적절하지 않은데, 이는 특히 한반도의 관측기점들이 구성하는 면적이 좁고 DAEJ, SUWN, GAMG 세 기점만을 포함하여 계산되는 오일러벡터가 매우 비합리적이기 때문이다(극이 기점들에 매우 가깝고 각속도가 지나치게 빠르게 얻어짐).

- (위도: 67.434, 경도: 243.333, $\omega = 0.30342^\circ / Myr$)
- (위도: 60.593, 경도: 251.294, $\omega = 0.29749^\circ / Myr$)
- (위도: 48.398, 경도: 135.576, $\omega = 1.16860^\circ / Myr$)

Table 4b. Comparison of observed velocity and model velocity of ITRF2020 stations. Each Chi-square value is given. Two-plate model. Unit of velocity: [cm/yr].

Station	Ve (obs)	Vn (obs)	Ve (model)	Vn (model)	χ_i^2
YAKT	1.88	-1.25	1.924	-1.184	0.6275
IRKT	2.52	-0.68	2.685	-0.848	5.5448
BADG	2.65	-0.68	2.723	-0.812	2.2813
BJFS	3.03	-1.15	2.906	-1.028	3.0329
BJNM	2.98	-1.17	2.887	-1.032	2.7693
KHAJ	2.20	-1.36	2.321	-1.300	1.8251
CHAN	2.58	-1.19	2.616	-1.204	0.1452
DAEJ	2.68	-1.28	2.771	-1.226	1.1083
SUWN	2.67	-1.27	2.755	-1.223	0.9417
GAMG	3.02	-1.11	2.780	-1.233	7.2428
ULAB	2.83	-0.87	2.753	-0.927	0.9116

Table 4c. Comparison of observed velocity and model velocity of ITRF2020 stations. Each Chi-square value is given. Three-plate model. Unit of velocity: [cm/yr].

Station	Ve (obs)	Vn (obs)	Ve (model)	Vn (model)	χ_i^2
YAKT	1.88	-1.25	1.924	-1.184	0.6275
IRKT	2.52	-0.68	2.685	-0.848	5.5448
BADG	2.65	-0.68	2.723	-0.812	2.2813
BJFS	3.03	-1.15	2.906	-1.028	3.0329
BJNM	2.98	-1.17	2.887	-1.032	2.7693
KHAJ	2.20	-1.36	2.303	-1.352	1.0682
CHAN	2.58	-1.19	2.576	-1.222	0.1073
ULAB	2.83	-0.87	2.733	-0.881	0.9574
DAEJ	2.68	-1.28	2.800	-1.232	1.6598
SUWN	2.67	-1.27	2.605	-1.278	0.4298
GAMG	3.02	-1.11	2.965	-1.149	0.4556

해당하는 각 판의 카이제곱값들은 각각 다음과 같다.

$$\chi_a^2 = \sum_{\text{model}3a} \frac{(\vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal})^2}{\sigma^2} = 14.256,$$

$$\chi_b^2 = \sum_{\text{model}3b} \frac{(\vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal})^2}{\sigma^2} = 2.133,$$

$$\chi_c^2 = \sum_{\text{model}3c} \frac{(\vec{v}_{obs} - \vec{v}_{cal})^2}{\sigma^2} = 2.545$$

다음의 표는 위 세 구역으로 구분하는 경우 각 기점들의 관측속도와 모델속도 및 카이제곱 기여값들이다(표 4c).

4.2.4. 판구분에 대한 통계학적 검증

단일판의 경우에 비하여 한반도가 아무르판에 속하며 유라시아판과 아무르판을 구분되는 경우가 더 타당한지에 대한 F 테스트를 하게 되면(Stein and Gordon, 1984), 결과는 다음과 같다.

$$F = \frac{x_1^2 - x_2^2}{x_2^2} \times \frac{8}{3} = \frac{27.645 - 26.431}{26.431} \times \frac{8}{3} = 0.12248$$

$$P(F < 0.12248, 3, 8) = 0.0558$$

따라서 앞 절에서 살펴본 것처럼 차등속도의 평균값이 단일판모델에 비하여 두 개로 구분한 경우가 약간 작았지만, F 테스트에 따르면 두 개의 판으로 구성된 모델이 보다 더 합리적이라고 보기 어렵다(두 개의 판으로 보는 경우에서의 카이제곱값의 감소가 우연적이었을 확률이 94.4%).

5. 동북아 판운동 기존 연구들과 비교 및 토론

5.1. 동북아 지각판의 기존 모델의 오일러벡터와의 비교

유라시아판과 아무르판에 대한 기존의 주요 전지구적 판운동 모델을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 지난 15년 이내에 보고된 주요 전지구적 판운동모델 4종류에 의한 유라시아판의 오일러벡터는 다음 표와 같다(표 5a). 표에는 전 지구적 모델은 아니지만 많은 기점에서의 GPS 자료에 의하여 유라시아판과 아무르판을 비롯하여 몇 개의 작은 판구분을 시도한 Jin 등의 모델을 추가하였다. 그리고 아무르판에 대한 위와 같은 5종류 모델의 오일러벡터는 다음과 같다(표 5b). 표 5a-b의 판모델들은 다음의 문헌을 따랐다(Jin *et al.*, 2007; Drewes, 2010; Argus *et al.*, 2011; Altamimi *et al.*, 2012; Kreemer *et al.*, 2014).

한편 본 연구 4장에서 ITRF 자료에 의하여 동북아 단일 판운동으로 보는 경우의 오일러벡터는 다음과 같다(4.2.1.).

$$(위도: 65.125, 경도: 243.333, \omega = 0.29463^\circ / Myr)$$

그리고 두 개의 판으로 나누어 고려할 때, 각 판의 오일러 벡터는 다음과 같다(4.2.2.).

$$(위도: 67.434, 경도: 243.333, \omega = 0.30342^\circ / Myr)$$

$$(위도: 64.968, 경도: 244.977, \omega = 0.29417^\circ / Myr)$$

이들의 값을 위 표와 비교하여 보면, ITRF2020 GNSS 속도자료에 의한 오일러 벡터가 기존의 모델의 어느 판과도 정확히 일치하지는 않으며, 대체로 유라시아판 보다는 아무르판에 더 가까움을 알 수 있다. 한편 ITRF2020 자료

Table 5a. Euler pole and angular velocity of Eurasian plate in four global plate models and one regional model. Unit of angular velocity: [$^\circ / Myr$].

Model	Latitude	Longitude	Angular velocity
GSRM2	55.38	264.59	0.271
ITRF2008	54.23	261.17	0.257
MORVEL56	48.85	253.50	0.223
APKIM2008	55.46	261.18	0.257
Jin 2007	57.00	259.35	0.257

Table 5b. Euler pole and angular velocity of Amur plate in four global plate models and one regional model. Unit of angular velocity: [$^\circ / Myr$].

Model	Latitude	Longitude	Angular velocity
GSRM2	61.64	258.71	0.287
ITRF2008	62.26	246.74	0.287
MORVEL56	63.17	237.18	0.297
APKIM2008	61.04	249.66	0.276
Jin 2007	62.47	244.72	0.291

Table 6. Plate velocity calculated for Korea assuming its existence on Eurasia or Amur plate of each plate model described in Table 5(a-b). For comparison the Korea plate velocity of this study is listed together. Arrow numbers 1-5 and 6-10 refer to the each plate model in Table 5(a-b) sequentially. Unit of velocity: [mm/yr].

Model plate	Ve	Vn
Korea	29.184	-17.495
1 GSRM2 (Eurasia)	27.429	-11.628
2 ITRF2008 (Eurasia)	25.536	-12.057
3 MORVEL56 (Eurasia)	20.747	-13.179
4 APKIM2008 (Eurasia)	25.617	-11.693
5 Jin 2007 (Eurasia)	25.485	-11.570
6 GSRM2 (Amur)	28.571	-11.382
7 ITRF2008 (Amur)	27.090	-12.945
8 MORVEN56 (Amur)	26.759	-14.023
9 APKIM2008 (Amur)	26.352	-12.562
10 Jin 2007 (Amur)	27.208	-13.284

만으로는 유라시아판과 아무르판의 구분 및 한반도 지역을 추가적으로 분리함등을 고려하기 어려웠다(4.2.). 한반도가 유라시아판에 속하였다고 가정하는 경우와 아무르판에 속하였다고 가정하는 경우 그의 판운동속도를 표와 그림으로서 나타내었다(표 6; 그림 6). 비교를 위하여 한반도의 현

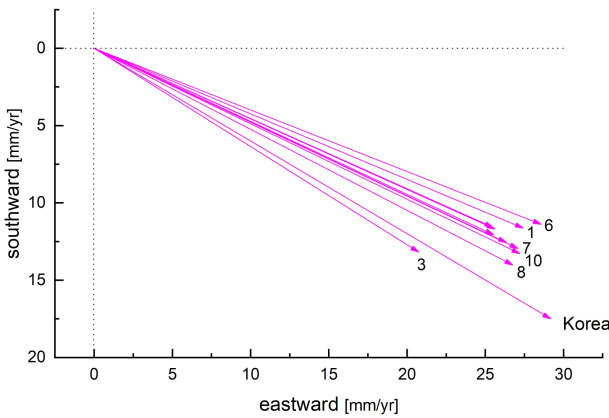


Fig. 6. Calculated plate velocity vector at Daejeon assuming Korea belongs to Eurasian plate or Amurian plate. Four global model and one regional model used. Model velocity vector of Korea determined from observation data (this study) is shown together.

재 판운동을 함께 나타내었다(한반도 판운동모델속도 - 대전지역).

5.2. 한반도와 동북아 지체 구조 기존 연구

한반도 지각판의 움직임에 대한 기존의 연구들의 주요 내용을 여기에 소개한다. Heki *et al.* (1999)은 90년대의 GPS 관측자료에 의거 개략적인 아무르판의 움직임을 산정하였으며, 이들은 아무르판을 유라시아판과 구별하고 한반도가 아무르판에 속하는 것으로 보았다. Hamdy *et al.* (2004)은 한반도와 제주도의 6개 GPS 관측지점의 자료로부터 한반도와 제주도가 동일한 판 위에 있다고 보았으며, 또한 Hamdy *et al.* (2005)은 2000-2003년 기간의 한반도의 GPS 자료로부터 대전을 기준으로 상대적 판운동을 나타내었다. Jin and Park (2006b)은 2003년까지 3년여 기간 동안의 한반도의 GPS 관측자료 및 기타자료로부터 한반도는 아무르판이나 남중국판에 속하지 않는다고 결론지었다. 또한 Jin *et al.* (2007)은 계속 중국과 한반도의 많은 GPS 자료에 의거하여 아무르판 등을 포함한 동북아의 판구조운동을 상세히 서술하였는바 - 한반도와 아무르판이 서서히

갈라지고 있으며 동북아의 여러 작은 판들의 움직임은 유라시아판과는 움직임이 확실히 다르다고 결론지었고, 작은 판들의 상대적 운동을 묘사하였다. Kim *et al.* (2018)은 한반도가 유라시아판 혹은 아무르판에 있다고 기술하였으며, Ansari and Bae (2020)는 한반도는 아무르판에 속하는 것으로 보았다. Li *et al.* (2020)은 동북아시아에 대하여 GPS 관측자료 및 지구물리학적 자료를 바탕으로 아무르블럭의 경계를 조사하였는데, 아무르블럭과 한반도블럭이 서로 연관이 없다고 결론짓고, 이 두 블럭의 경계를 탄루 단층으로 보았다.

이러한 기존 연구들이 사용한 GPS 관측 지각판속도자료들은 모두 한반도에서 거의 동일한 방향(동남동)을 나타내지만, 자료에 차이점들이 있다. 이에 따라 자료해석 즉 판구조운동과 내부의 변형에 대한 해석 결과가 서로 차이점이 많으며 일관성을 보기 어렵다. 한편 Kreemer *et al.* (2014)이 제시한 동북아시아의 판내부변형을 나타낸 그림에서 남한과 북한을 가로지르는 패턴이 보이지만, 이것은 북한 쪽의 자료가 없어서였기 때문임이 확인되었다. 앞서 본 연구에서 ITRF2020 GNSS 자료 중 경도 100~150°, 위도 10~70°의 지역에 있는 관측지점 중 11개의 대표적 관측지점의 속도자료를 분석하였지만, 그로서는 아무르판과 유라시아판의 구분에 대한 판단이 어려웠다.

본 연구에서 얻어진 한반도 지각운동의 오일러극의 경위도와 회전각속도를 이전의 기존 연구의 것들과 비교하면 다음 표와 같다(표 7). 표 중의 KASI 2022(a-b)는 국토지리정보원 보고서(Park, 2007, 2017)의 자료를 선별분석하여 얻은 값들이며, Ansari and Bae (2020)는 기간을 나누어 두 종류로 하였다. 표로부터 한반도 지각의 움직임의 판운동 모델 즉 오일러벡터가 극의 위치나 각속도의 추산치들의 편차가 상당히 크음을 알 수 있다. 이는 특히 오일러극의 경도 및 회전각속도에서 더욱 그러하다. 한편 위 추산치들 모두 실제로 오차의 범위가 넓으며, 그러한 원인은 먼저 한반도의 면적이 지구곡률반경과 비교하여 상당히 작기 때문이다. 2000-2006년의 자료에 의한 오일러극(표 상단의 세 종류)의 경도는 약 170~178°이나, 2007년도 이후의 자료에

Table 7. Euler pole and angular velocity of South Korea determined by different studies. Unit of angular velocity: [$^{\circ}/Myr$].

Model	Latitude	Longitude	Ang. vel.	Stations	Obs. period
1 Jin <i>et al.</i> (2007)	64.64	177.68	0.446	45	2000-2005
2 Park (2007)	65.50	176.91	0.398	46	2000-2006
3 KASI 2022(a)	64.54	168.73	0.432	23	2000-2006
4 KASI 2022(b)	70.84	220.03	0.331	47	2001-2017
5 Ansari and Bae(a)	67.30	215.86	0.312	50	2000-2010
6 Ansari and Bae(b)	70.80	182.97	0.327	50	2011-2018
7 this study	64.08	218.14	0.360	44	2017-2011

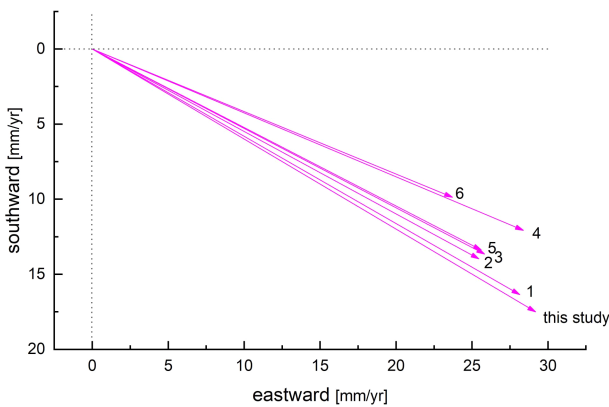


Fig. 7. Calculated plate velocity vector at Daejeon based on different Korea plate models.

의한 값은(표 하단의 네 종류) 약간 증가하거나 220도 부근이다. 또한 초기의 모델(표 상단의 세 종류)에서는 각속도가 $0.4[^\circ/Myr]$ 정도이거나 약간 더 크지만, 후기의 것들에서는 $0.31\sim 0.36$ 정도로 보다 더 작음을 볼 수 있다. 이러한 차이점은 한반도의 판운동의 특성이 그 기간에 달라졌음을 나타내는 것으로 생각된다. 한편 Li *et al.* (2020) 동북아 판구조에 대하여 몇 차례 통계검정을 하였으나, 판운동의 오일러벡터를 상대적 운동에 대해서만(유라시아판/아무르판 기준) 나타내었다. 또한 이들이 제시한 속도장(그림 2)에서 유라시아판과, 아무르판, 그리고 한반도의 차등속도를 묘사하며 남북한을 가로지르는 KP블럭을 설정하고 있으나(그림 4), 그 지역에 대하여는 실제로 자료가 매우 듬성하여 신빙성이 부족하다. 이에 앞서 Jin *et al.* (2007)은 매우 많은 관측지점에서의 자료를 사용하여, 동북아 지역의 판운동이 여러 작은 판들로 구성되어 있다는 관점이 보다 더 합리적이라고 결론지은 바 있다.

다음 그림에는 표 7의 각 판운동모델에 의한 한반도(대전)의 움직임을 나타낸 것이다(그림 7). 즉 한반도가 각 모델 판에 속하였다고 가정하는 경우의 판이동속도를 나타낸 것이다. 그림에서 각 모델에 따라 지각의 움직임의 예측속도가 차이가 있음을 볼 수 있다. 분명하지는 않으나 이러한 차이의 상당 부분이 각 자료 기간에 해당하는 한반도 지각 판 움직임의 변화를 실제로 반영하는 것일 수 있다고 생각된다.

5.3. 동북아 판운동 및 한반도 판내부 변형에 대한 요약적 고찰

위와 같이 본 연구 내용과 기존 연구의 결과들을 함께 보면 다음 사실들을 알 수 있다. 많지 않은 ITRF 자료로 볼 때는 유라시아판과 아무르판의 구분의 타당성이 명확하지 않다. 그리고 유라시아판과 아무르판 그리고 한반도지역 지

각판의 오일러벡터들이 서로 얼마간 다르며, 그 판모델 예측속도가 한반도 지역에서는 약간씩의 차이가 있다. 동북아의 판구조를 연구하기에 현재 일부 지역에서의 지각속도 자료가 특히 부족하며, 한반도 지각판의 유라시아/아무르판 귀속여부를 가리기가 용이하지 않다. 향후 북한과 만주 지역의 GPS 자료가 입수되기 전에는, 한반도의 동북아에서의 지각판 구성을 논하기가 어려운 실정이다. 동북아지역의 판구조적 구성을 보다 세밀하게 이해하고자 하는 것은 유익한 일이라고 할 수 있겠지만, 신뢰성 있는 자료를 가지고 올바른 방법으로 해석되어야 하겠다.

한반도 지각판의 움직임과 지각 내부의 변형에 대하여 고정밀도의 자료를 가급적 폭넓게 계속 추적하며, 장-단기적으로 연구-해석하는 것이 바람직하다. 기존의 연구내용으로 볼 때, 한반도의 판운동과 판내부변형이 시기적으로 달라져 왔음을 알 수 있다. 따라서 판운동과 판내부 변형에 대하여 5년 정도 혹은 그 이상의 기간의 평균적 움직임을 분석하되, 남한지역 등의 특정한 판내부의 변형에 대하여는 1~3년의 간격으로서 단기적인 양상과 그들의 변화를 지속적으로 파악하는 것을 병행함이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2023년 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 추진된 한국천문연구원 기준계 연구와 기반기술 개발사업(2023185005)의 지원을 받아서 수행되었다. 원고의 부족함을 지적해주시고 내용을 다듬어주신 세 분의 심사위원들에게 감사드리며, 또한 친절하게 수고해주신 편집위원과 편집위원장 그리고 편집간사에게도 감사드립니다.

REFERENCES

- Altamimi, Z., Metivier, L. and Collilieux, X., 2012, ITRF2008, plate motion model, *Journal of Geophysical Research*, 117, B07402, <https://doi.org/10.1029/2011JB008930>.
- Ansari, K. and Bae, T.-S., 2020, Contemporary deformation and strain analysis in South Korea based on long-term (2000-2018) GNSS measurements. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 391-405, <https://doi.org/10.1007/s00531-019-01809-4>.
- Argus, D.F., Gordon, R.G. and DeMets, C., 2011, Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 12, Q11001, <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>.
- Bird, P., 2003, An Updated Digital Model of Plate Boundaries. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 4, 1027, <http://doi.org/10.1029/2001GC000252>.
- Drewes, H., 2010, The Actual Plate Kinematics and Crustal Deformation Model 2008 based on the ITRF realisations on DGFI and IGN (APKIM2008), <https://www.researchgate.net/publication/318109644>.

- Hamdy, A., Park, P.H. and Lim, H.C., 2005, Horizontal deformation in South Korea from permanent GPS network data 2000-2003. *Earth Planets and Space*, 57, 77-82.
- Hamdy, A., Park, P.H., Lim, H.C. and Park, K.D., 2004, Present-day relative displacement between Jeju Island and Korean Peninsula as seen from GPS observations. *Earth Planets and Space*, 56, 927-931.
- 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 Geophysical Research*, 104, 29147-29155.
- Jin, S. and Park, P., 2006a, Strain accumulation in South Korea inferred from GPS measurements. *Earth Planets and Space*, 58, 529-534.
- Jin, S., Park, P. and Zhu, W., 2007, Micro-plate tectonics and kinematics in Northeast Asia inferred from a dense set of GPS observations. *Earth and Planetary Science Letters*, 257, 486-496, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.03.011>.
- Jin, S.G. and Park, P.H., 2006b, Does the Southern Korean Peninsula belong to the Amurian Plate?. *GPS Observation. Studia Geophysica et Geodaetica*, 50, 633-644, <https://doi.org/10.1007/s11200-006-0040-x>.
- Kim, S., Ree, J.-H., Yoon, H.S., Choi, B.K. and Park, P.H., 2018, Crustal Deformation of South Korea After the Tohoku-Oki Earthquake: Deformation Heterogeneity and Seismic Activity. *Tectonics*, 37, 2389-2403, <https://doi.org/10.1029/2018TC004967>.
- Kreemer, C., Blewitt, G. and Klein, E.C., 2014, A geodetic plate motion and Global Strain Rate Model. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15, 3849-3889, <https://doi.org/10.1002/2014GC005407>.
- Li, S., Li, C. and Wang, C., 2020, Boundaries of the Amurian Plate identified using multiple geophysical methods. *Geoscience Journal*, 24, 49-59, <https://doi.org/10.1007/s12303-019-0011-1>.
- Na, S., 2023, Determination of Euler Pole and Angular Velocity for Plate Motion. Report to Korea Astronomy and Space Science Institute, 70 p (in Korean with English abstract).
- Na, S. and Cho, J., 2023, Euler Vector determination Algorithm: Regional Plate Motion. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 44, 493-500, <https://doi.org/10.5467/JKESS.2023.44.5.493> (in Korean with English abstract).
- Na, S., Chung, T.W., Choi, B. and Yoo, S., 2013, Reliability of Strain Estimation on Triangular Network and A Case Study; Deformation of Korea due to 2011 Tohoku Earthquake observed by GPS. *Geophysics and Geophysical Exploration*, 16, 284-292, <https://doi.org/10.7582/GGE.2013.16.4.284>.
- Park, K.-D., 2007, A Study of Korean Crustal Disturbances. Korean National Geographic Information Institute, 318 p (in Korean).
- Park, K.-D., 2017, Method of ITRF Application to the Korean Geodetic Reference System Establishment. Korean National Geographic Information Institute, 155 p (in Korean)
- Park, P., Chawe, U., Ahn, Y. and Choi, K., 2001, Preliminary GPS results and a possible neotectonic interpretation for South Korea. *Earth Planets and Space*, 53, 937-941.
- Stein, S. and Gordon, R.G., 1984, Statistical tests of additional plate boundaries from plate motion inversion. *Earth and Planetary Science Letters*, 69, 401-412.