

DGPS 자료를 이용한 남한지역의 지각변위 분석 Analysis of South Korean Crust Deformation Using DGPS Data

박준구*, 조진동**, 임삼성***

* : 한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, g2041478@inhavision.inha.ac.kr

** : 한국지질자원연구원 지질기반정보연구부, jdc@kigam.re.kr

*** : 인하대학교 공과대학 환경토목공학부 지리정보공학과, slim@inha.ac.kr

Abstract

According to the Korea Tectonic Map, the Korean Peninsula can be divided into seven tectonic units and each of them shows a peculiar deformation pattern. In order to estimate an amount of crustal deformation in the Korean peninsula, we obtained the velocity vector fields of South Korea by dealing with the data set of the years 2001 and 2002, measured from the permanent GPS stations across the country. To obtain a relatively precise coordinate of each station, we used GAMIT that is a comprehensive GPS analysis package developed at MIT. Then, a Kalman filter called GLOBK is used to combine the results from GAMIT and to estimate the relative velocity vector for the crustal deformations. The crustal movement of South Korea is turned out to be about 1mm per year westward and about 0.6mm per year southward. In case of Suwon and Seosan(Gyeonggi Massif), the movement occurs slightly to the north-east direction. The movement of a relative velocity field in the tectonic unit is unidirectional, yet the magnitude of the velocity is very small.

1. 서론

우리가 살고 있는 지구상에는 자연적 혹은 인위적으로 많은 재앙이 발생되고 있다. 따라서 이러한 재앙으로부터 지구를 효과적으로 보호하기 위하여 많은 방법을 동원하는데 노력을 아끼지 않고 있으며, 최근에는 우주 측지 기술의 향상으로 GPS를 더 살기 좋은 지구를

보전하는 도구로 활용하고 있다[12].

지구의 운동현상으로 발생하는 지각변형 중 비연속적으로 발생하는 지진은 지각의 급격한 변화를 일으키게 되며, 그 변화를 예측할 수 없어 항상 지각변위를 측정할 수 있는 모니터링이 필요하다.

유라시아 대륙의 연변부에 속하는 한반도는 비교적 안정적인 지대에 위치하고 있어, 대규모 지진으로 인한 영향은 적다고 할 수 있다. 그러나 현재 세계 각국에서 지각의 큰 변위가 감지되고 있으며, 여러 선행 연구에 의하면 유라시아 대륙뿐만 아니라 한반도의 지각 역시 미세하지만 꾸준히 움직이고 있음이 밝혀지고 있다. 또한 최근 활성단층 등 지반의 안정성이 의심되는 지층들이 나타나면서, 지각의 변위량을 모니터링해야 할 필요성이 대두되고 있다.

그 예로 Karasawa et al.(1996)은 일본 Tsukuba를 기준으로 GPS 관측자료를 분석한 결과, 한반도가 속하고 있는 Amurian Block은 상대적으로 수평적 속도장 3.6cm/yr을 가지고 동남동 방향으로 일본 열도를 향하여 접근하고 있다고 하였고, Zhu, Wenyao et al.(1998)은 1995~1997년까지 3년간의 상해-대전 관측소의 GPS 자료를 처리/분석한 결과 2.86cm/yr의 속도장을 가지고 북동방향으로 움직이고 있음을 언급하였다. 이외에도 Kato, Teruyki et al.(1998) 및 Ziqing Wei(2001) 등도 한반도의 지각변형에 관한 내용을 언급하였다 [13].

한반도는 지질학적 측면에서 볼 때 크게 7개 블록으로 나눌 수 있으며, 각각 그 고유의 변위 특성을 가지고 있다. 그러나 지금까지의 지질학적 분류에 따른 지각구조변형에 대한 연구는 중국, 인도 등 일부 큰 대륙 국가들과 일본이 전 국토에 약 900여개의 GPS 네트워크를 지진 다발 지역을 중심으로 구성하여 연구를 하고 있다[10]. 또한 우리나라의 경우 충분한 자료의 획득이 불가능하여 미국, 일본 등 이웃 국가들의 연구 결과를 토대로 연구를 진행하여 왔다.

최근 많은 국가에서 GPS를 이용하여 지각변형 연구를 진행하고 있으며, 미세한 지각의 변형을 GPS 자료를 통해 정확히 계산할 수 있는 정밀 소프트웨어도 개발되고 있다. 현재 한반도 남부 지역에는 GPS 상시관측소가 고루 분포되어 운영 중에 있으며, GPS 자료의 품질 및 데이터베이스가 안정적으로 구축되면서 GPS를 이용한 지각변형 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 한반도 남부지역의 지각변위를 분석하고 더 나아가 한반도의 지질학적 블록에 대한 변위의 특성 등을 분석하는 것을 목적으로 한다.

2. 지각변위 분석을 위한 GPS 자료 획득

단층(지각)운동은 지질재해 발생의 원인이 되기 때문에 세계 선진국에서는 지각의 움직임을 감시하기 위해 VLBI, SLR과 같은 우주 측지 기술을 많이 활용하고 있으며, 특히 GPS를 이용한 측지기술은 타 우주 측지 기술보다 저렴하고 효율적으로 지각의 움직임을 정밀하게 측정할 수 있기 때문에 GPS 상시관측소를 통하여 지각의 변형을 감시하는 체계를 구축, 운영하고 있다[10].

현재 국내의 GPS 상시관측소는 측량 기준점, 지도 제작, 항공, 항해 및 지각변형 연구 등을 목적으로 운영하고 있다. 국토지리정보원(14개소), 한국 천문연구원(9개소), 행정자치부(30개소), 해양수산부(13개소), 한국 지질자원연구원(4개소)등 약 75개소가 전 국토에 고루 분포되어 운영되고 있으며, 양질의 GPS 자료를 제공함으로써 지각변위 연구에도 많은 도움을 주고 있다.

한반도는 거시적인 면에서 지질학적 블록을 남립 육괴, 경기 육괴, 영남 육괴, 평남 분지, 경상 분지, 포항 분지, 옥천 대, 제주 화산대 등으로 분류할 수 있다(Fig.1. a).

지각변위 분석을 위한 GPS 관측자료는 국내에서 운영되고 있는 GPS 상시관측소를 대상으로 지질학적 블록 중 경기 육괴, 경상 분지, 옥천 대, 제주 화산대에 속하는 국토지리정보원(NGI) 10개소와 한국 천문연구원(KAO) 1개소, 총 11개소의 GPS 상시관측소를 선정하였다.

연구기간은 2001년 1월 3일부터 2002년 12월 22일까지의 자료를 사용하였으며, 수집 자료의 간격은 년도 당 약 10일 간격으로 구성되어 있다.

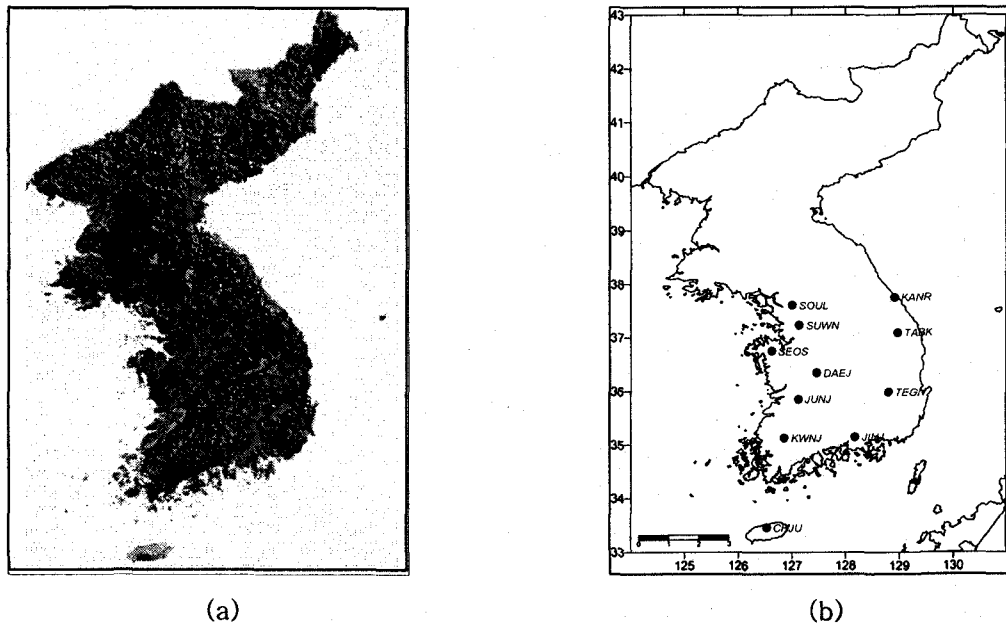


Fig.1. a) Korea tectonic map[14], b) Permanent GPS Station for deformation analysis

3. GPS 자료처리 GAMIT/GLOBK 프로그램

한반도 남부지역의 GPS를 이용한 지각변위 분석을 위하여 고정밀 GPS 자료처리 프로그램인 GAMIT/GLOBK를 사용하였다. GAMIT(GPS analysis package developed at

Table 1. Permanent GPS Stations for crustal deformation analysis

Location	GPS Station ID	Agency for Management
Suwon	SUWN	NGI (IGS)
Daejon	DAEJ	KAO (IGS)
Taebaek	TABK	NGI
Gangneung	KANR	NGI
Daegu	TEGN	NGI
Jinju	JINJ	NGI
Jeonju	JUNJ	NGI
Seoul	SOUL	NGI
Gwangju	KWNJ	NGI
Seosan	SEOS	NGI
Jeju	CHJU	NGI

Massachusetts Institute of Technology)은 MIT에서 개발한 GPS 자료 분석 프로그램으로 위성, 지구, 달과 태양의 관성 매개변수, 복사변수, 궤도변수, 지심, 대기 및 해양 모델 등의 자료들을 가지고 Quasi-Observation을 통하여 GPS 관측소의 정밀위치를 추정하는 프로그램이다. 이것은 각 좌표와 위성 궤도를 정확히 추적하여 관측소의 정밀위치를 추정하게 되며, 이 추정된 위치와 전세계 GPS 네트워크의 조정을 통해 정밀한 기선거리를 결정하여 정밀좌표를 계산하게 된다. GLOBK(Global Kalman filter VLBI and GPS Analysis)는 VLBI, SLR 및 GAMIT 등의 각 세션에서 조정된 측정의 좌표와 비연속적으로 발생하는 지진 등 순간변위 발생요인에 관한 정보들을 결합하고, 칼만 필터링(Kalman filtering)을 통하여 정밀 추정된 다년간의 정밀좌표를 전체 세션에 대한 자유망 조정과 분석을 통해 정밀 절대좌표 및 시계열에 따른 변위속도를 추정한다.

일반적으로 상용화된 GPS 자료처리 프로그램은 기선거리에 대하여 백만분의 일(1ppm)에서 천만분의 일(0.1ppm) 정도의 정밀도를 가지고 있으며, GAMIT의 경우 오천만분의 일(0.0025ppm)의 정밀도를 가지고 있기 때문에 미세하게 발생하는 지각 변위를 측정하는데 가장 알맞은 것으로 알려져 있다[2].

GAMIT/GLOBK 소프트웨어를 이용하여 수 mm의 정밀도로 지각의 움직임을 검출하기 위해 관측 자료모델, 인공위성 궤도모델, 기준 좌표계의 설정 및 추정할 파라미터 등을 설정해야 하는데 적용 모델에 따라 수 mm에서 수 cm의 정밀도의 차이가 발생한다. 본 연구에 사용된 우주, 지구 및 위성 모델은 측지 데이터 및 GPS 위성 매개변수, GPS 안테나 및 수신기 자료, TAI-UT1 및 TAI-UTC 등의 시간에 관한 자료, 지구의 운동현상으로 발생하는

Polar motion과 Nutation, Inertial 기준 좌표계 J2000에서의 달과 태양의 궤도 및 중력의 영향에 관한 모델, 해수의 조석 관측 모델을 사용하였다.

4. 한반도 남부지역의 지각변위 추정

4.1. GAMIT/GLOBK를 이용한 지각변위 분석

한반도 남부지역의 지각 변위량을 추정하기 위해, 11개 GPS 상시관측소의 2년간 자료를 GAMIT을 통해 정밀 기선처리하여 시계열에 따른 지각변위량을 계산하였다. Fig.2는 각 지체 구조별로 수원의 GPS 상시관측소를 기준으로 기선에 따른 시계열 변위량을 나타내었다. 본 변위 결과는 수원의 변위 방향과 변위량의 영향을 포함한 결과이다. 따라서 수원과 변위 방향 및 크기의 차이에 따라 상대적으로 더 크거나 작은 변위가 발생하는 것으로 나타난다.

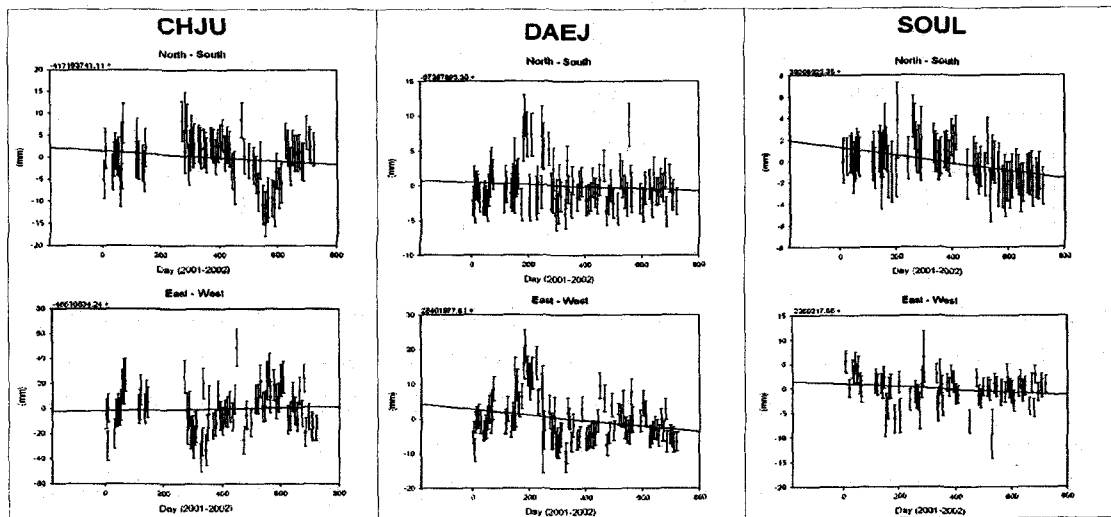


Fig.2. Comparison of deformations between permanent GPS station

Fig.3은 GAMIT을 통해 각 세션에서 조정된 측정점의 좌표를 GLOBK의 필터링을 통해 전체 세션의 조정과 분석을 통해 각 관측소의 시계열에 따른 변위속도를 추정한 결과이다. 본 결과는 한반도 남부지역에서의 지각변위로 외부의 힘은 전혀 없다는 가정으로 계산된 변위량이다.

4.2. 지질학적 블록의 분류에 따른 지각변위의 특성 분석

본 연구는 한반도 남부지역의 지질학적 블록의 분류에 따른 변위의 특성을 분석하는 것으로서 연구대상인 경기 육괴, 경상 분지, 옥천 대, 제주 화산대의 지질학적 블록 별 지각 변위량 및 변위의 특성에 대해 알아보았다.

지질학적으로 동일블록에 속해있는 GPS 상시관측소간의 지각변위를 고찰하기 위하여, 블록내의 GPS 상시관측소 중에서 비교적 안정적인 관측소를 기준으로 GPS 상시관측소간의

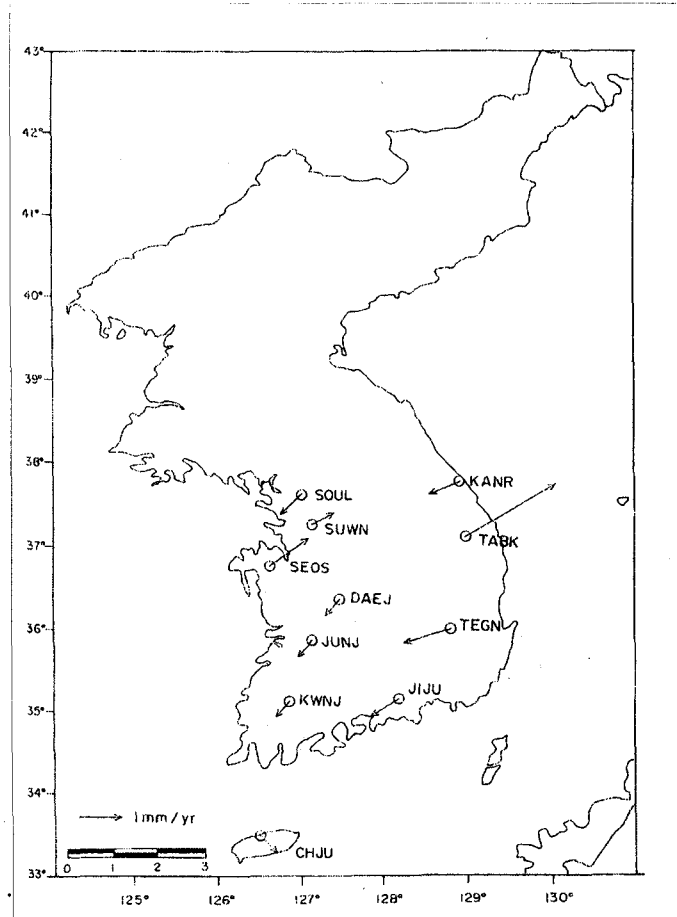


Fig.3. Crustal defoamation velocity vector fields in South Korea

상대적인 지각 변위량을 비교 분석하였다(Table 2).

각각 지질학적 블록에서 안정적인 관측소로 경기 육괴에서는 수원, 경상 분지에서는 진주, 옥천 대에서는 대전 GPS 상시관측소를 기준 관측소로 선정하여 각각의 상대적인 지각 변위량을 계산하였다

경기 육괴에 속하는 수원의 경우 동쪽으로 $0.84 \pm 0.66 \text{ mm/yr}$, 북쪽으로 $0.25 \pm 0.69 \text{ mm/yr}$ 로 북동쪽으로 변위하고 있으며, 서산의 경우 수원과 동일 방향으로 변위가 되고 있으나, 수원보다 상대적인 변위는 작게 발생하는 것으로 나타났다.

옥천 대의 경우 Fig.3에서와 같이 태백을 제외한 지역에서 다른 블록보다 지각의 변위가 작게 나타났으며, 남서쪽으로 발생하는 변위가 모두 일정한 것으로 볼 수 있다. 또한 전주, 광주 지각변위의 크기는 대전에 비해 서쪽으로는 더 작고, 남쪽으로는 더 크게 변위가 발생하는 것으로 나타났다. 강릉의 경우 Fig.3에서와 같이 옥천 대의 변위 방향인 남서쪽으로 변위가 발생하며, 전주와 광주보다도 남서쪽으로 더 큰 변위가 발생하였다. 그러나 대전, 전

Table 2. Variations of deformation velocity vector fields due to the classification of Korea tectonic map.

Tectonic Units	Station	East & North Velocity (mm/yr)		Tectonic Units	Station	East & North Velocity (mm/yr)			
Gyeonggi Massif	SUWN	E	0.00	Ogcheon Belt	DAEJ	E	0.00		
		N	0.00			N	0.00		
	SOUL	E	-1.69 ±0.34		TABK	E	4.43 ±1.13		
		N	-1.04 ±0.46			N	2.60 ±0.93		
	SEOS	E	0.85 ±0.48		JUNJ	E	0.34 ±0.33		
		N	0.76 ±0.58			N	-0.35 ±0.51		
Gyeongsang Basin	JINJ	E	0.00		KWNJ	E	0.33 ±0.44		
		N	0.00			N	-0.19 ±0.91		
	TEGN	E	-1.25 ±0.55		KANR	E	-1.79 ±1.13		
		N	0.26 ±0.62			N	-0.69 ±1.29		
	Volcano	CHJU	E		0.79 ±0.59				
			N		-0.88 ±1.86				

주, 광주보다 남쪽으로의 변위는 더 작게 나타났다.

태백의 경우, 변위가 한반도 남부 지역 중 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 동일 블록 내의 다른 지역들과 변위 속도 및 방향성에서 큰 차이를 보였다. 대전, 전주, 광주와는 동서간의 거리 차가 크다고 하지만 주변의 강릉과 비교하더라도 변위 속도 및 방향성이 크게 다른 것으로 나타났다.

경상 분지에 속하고 있는 진주, 대구는 옥천 대와 유사한 지각변위가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 옥천 대의 경우 남쪽으로 좀 더 많은 변위가 발행하는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 3과 같이 지각의 속도 변위량은 경상 분지가 가장 크며, 변위의 방향은 옥천 대보다 서쪽으로 더 크게 발행하면서 옥천 대 방향으로 변위가 일어나고 있는 것으로 나타났다.

제주 화산대의 경우 동남쪽으로 변위가 발생하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

한반도 남부지역의 GPS 상시관측소 자료를 GAMIT/GLOBK를 통하여 지각변위를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

한반도 남부지역의 지각변위량은 수원, 태백, 서산을 제외한 한반도 남부지역에서 평균적으로 서쪽으로 약 1.0mm/yr, 남쪽으로는 약 0.6mm/yr로 남서쪽으로 미세하게 변위하는 것으로 나타났다. 또한 수원, 서산의 경우 북동쪽으로 미세한 변위가 발생하였다.

동일 지질학적 블록에서의 상대속도 벡터장은 거의 동일 방향으로 변위 작용을 하는 것으로 타났으며, 동일 블록 내에서도 지역적으로 약간의 방향과 속도 차를 가지고 변위가 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 가장 변위가 크게 발생하는 옥천 대 내에 있는 태백 GPS 상시관측소 주변에 대한 지각 변위에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이라 생각된다. Fig.3의 결과를 통해 한반도 남부지역의 지각변위는 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 변위의 발생이 각 성분의 표준편차보다 작게 나타나는 것으로 나타났다. 이는 GPS 자료의 정밀도보다 변위가 더 작게 발생한 것으로, 한반도의 지각이 매우 안정하다는 것을 의미한다.

기존의 연구결과에서 한반도 지각변위의 경우, 대륙간 변위를 비교하였기 때문에 한반도의 변위가 크게 발생하였으며, 본 연구를 통해 외부의 힘이 작용하지 않는다면, 한반도 내에서의 지체구조는 매우 안정하다는 결론을 얻을 수 있었다. 또한 표준편차의 크기를 줄이기 위해서는 좀 더 많은 기간의 자료가 필요할 것으로 예상된다.

사사

본 연구는 한국 지질자원연구원의 기본연구과제 '한반도 지구조 진화연구'에서 수행한 연구결과임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] B.Hoffman-Wellenhof, H.Lichtenegger, and J.Collins, 'Global Positioning System Theory and Practice', 4th ed., Springer New-York, 1997.
- [2] Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences MIT, 'Documentation for the GAMIT/GLOBK GPS analysis Software', 2000.
- [3] Elliott D. Kaplan, 'Understanding GPS principles and Applications', 1996.
- [4] James R.SMITH, 'Introduction to Geodesy', 1997.
- [5] NASA/Goddard Space Flight Center, 'Digital Tectonic Activity Map of Earth', 2002.
- [6] Pedro Ramon escobal, 'Methods of Orbit Determination', 1975, pp.197-207.
- [7] P.J.G Tenuissen, Lawrence R. Weill, Angus P. Andrews,'Global Positioning System, Inertial Navigation and Intergration', A John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [8] Y.Gao, J.F.McLellan, 'An Analysis of GPS Positioning Accuracy and Reliability with Dual-Frequency Data', Proceeing of ION GPS-96, Kansas City, Missouri, Sept.17~20, 1996, pp.945-951.

- [9] 박필호, 'GPS를 이용한 한반도 및 동아시아의 지각속도 측정과 해석', 연세대학교 박사학위 논문, 2001.
- [10] 조진동, Teruyuki Kato, 'GPS를 이용한 한국과 일본간의 지각변형연구', 한국지질자원연구소 논문집 제1권 제1호, 1997, pp.43-48.
- [11] 조진동, 강상윤, 조홍묵, 민경덕, 'GPS에 의한 한반도 남부와 큐우슈우섬 사이의 지각변위 연구', The 7th GNSS Workshop, 서울, Nov.30~Dec.2, 2000, pp.171-173.
- [12] 조진동, 고인세, 박준구, 성낙훈, '한반도 지구조 진화연구', 한국지질자원연구원, 2003. pp.207-226.
- [13] 한국지질자원연구원, '한반도 지각변형 연구', 한국지질자원연구원 연차보고서, 1999.
- [14] 한국지질자원연구원 '한국지체구조도', 2001 .