

지자기 폭풍 영향에 의한 GPS 위치 변화량 연구 The influence of Geomagnetic Storms on GPS Positioning

황 학¹⁾ · 이동하²⁾ · 윤홍식³⁾

Huang, He · Yun, Hong Sic · Lee, Dong Ha

¹⁾성균관대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail:duejihh@skku.edu)

²⁾성균관대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail:dhlee@geo.skku.ac.kr)

³⁾성균관대학교 토목환경공학과 교수(E-mail:yhs@geo.skku.ac.kr)

Abstract

In this study, we analyzed that the geomagnetic storms in the end of October 2003 influenced a positioning of GPS permanent stations. The data that observed in total 23 permanent GPS stations are used, and did a precisely analysis every hour with GIPSY-OASIS II software to produced ITRF2000 coordinates of each stations. After that we analyzed and compared the ITRF2000 coordinates calculated every hour with public ITRF2000 results of each stations. As a result of this study, the increases of positioning errors showed well when geomagnetic storms happened and the maximum error reached about 0.80m.

1. 서 론

지난 2003년 10월 28일, 미국국립해양대기청(NOAA) 우주환경센터(Space Environment Center)에서는 X급의 대규모 태양 플레어(Solar Flare)가 폭발했다고 보도되었다(미국 우주환경센터, 2003). 한국시간으로 10월 28일 오후 6시 51분에 발생한 플레어는 오후 8시 10분 최고조에 이르러 X18이라는 수치를 기록하였다. 이러한 주기적이고 강력한 태양활동은 지구 자기장에 연속적으로 충격을 줌으로써 지자기 폭풍(Geomagnetic Storm)을 야기시키며, 지상통신시스템, 항법시스템, 위성 운용, 송전 시스템 등에 광범위한 영향을 미치게 된다. 또한, 약 22,000Km 고도에 위치하고 있는 GPS 위성도 태양 플레어에 의한 지자기 폭풍의 영향을 받게 되어 GPS를 이용한 측지측량 및 항법 등에 오차를 발생하게 된다.

본 연구에서는 2003년 10월 28일에 발생한 태양 플레어와 이에 따른 지자기 폭풍의 영향 하에서 운영된 국토지리정보원과 천문연구원의 GPS상시관측소 데이터를 처리하여 분석함으로써 지자기 폭풍이 GPS 위치결정에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 자료분석 및 처리

2.1 태양 플레어 및 지자기폭풍

태양 플레어는 태양의 흑점 둘레에서 갑자기 일어나는 폭발현상으로 방대한 양의 태양물질이 방출되며 전파, X선, γ선 등도 발생된다. 이러한 플레어에 의하여 지구의 상층대기와 지구 자기장이 교란되어 오로라나 지자기 폭풍이 일어난다.

그림 1과 그림 2에서는 2003년 10월 26일부터 11월 4일 동안의 태양 플레어 발생 상황과 지자기 폭풍의 예보를 나타낸다. 지구 정지궤도에 운행 중인 미국의 관측위성 GOES에 의한 태양 X선 관측자료에 의하면 10월 28일 10시(UTC) 및 10월 29일 21시(UTC)전후에 두 차례의 연이은 X급 태양 플레어가

발생한 사실을 그림 1을 통해 알 수 있다. 또한, 이러한 X급 태양 플레어가 발생하기 전과 후에는 M급에 달하는 태양 플레어들이 빈번히 발생하였음을 볼 수 있다.

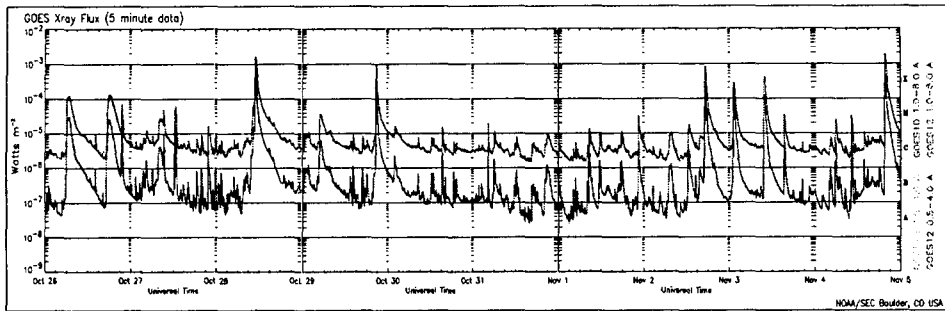


그림 1. 2003년 10월 26일~11월 04일 사이의 태양 X선 플럭스

지자기의 활동 및 변화 양상을 나타내는 K지수는 태양 플레어와 같은 태양활동에 동반되어 방출되는 하전 입자에 의한 영향을 연속적으로 모니터링 하기 위해 도입되었으며, 매 3시간씩 처리한 결과를 0~9 사이의 값으로 표현한다. 또한 위도 44~60도 사이에 분포하는 13개 지자기 관측소에서 얻어진 K지수 값의 평균치로 지구 자기장의 변동정도를 Kp 지수로 표시하는데 Kp 값이 5이상이면 강한 지자기 교란이 발생함을 의미한다. 그림 2에서 보는바와 같이 10월 28일과 10월 29에 발생한 태양 플레어에 의해 유도된 지자기 폭풍은 그 세기가 각각 10월 29일과 10월 31일에 K지수의 극값인 9에 달하였으며, 일정한 지속시간을 유지하였다.

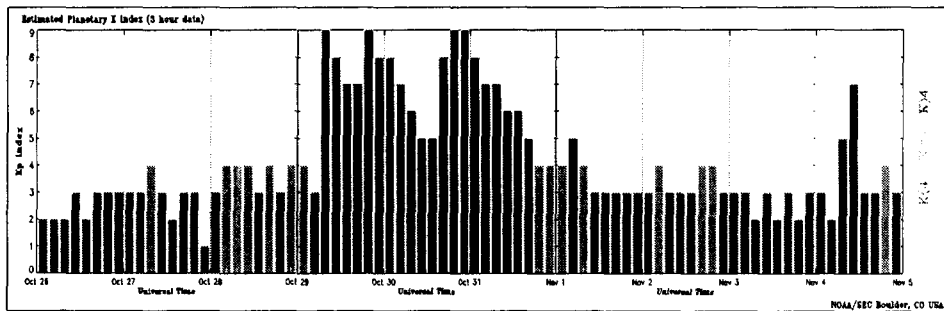


그림 2. 2003년 10월 26일~11월04일 사이의 Kp지수 변화

2.2 GPS데이터 처리

본 연구에서는 2003년 10월 28일과 29일에 발생한 X급 태양 플레어에 의한 지자기 폭풍의 영향이 국내 GPS 상시관측소의 위치 결정에 미치는 영향을 분석하기 위하여 국토지리정보원(14개소)과 한국천문연구소(9개소)에서 운영하고 있는 총 23개소의 GPS 상시관측소 관측데이터를 획득하여 처리하였다. GPS 관측자료의 시간범위는 2003년 10월 26일부터 11월 4일까지 총 10일간이며, 데이터를 처리하기 전에 자동편집기능을 사용하여 수신상태가 좋지 않은 데이터를 제거하고, 사이클 슬립 검사 및 보정 등을 실시하였다. 그림 3은 본 연구를 위하여 선정한 GPS 상시관측소의 위치를 표시한 것이다.

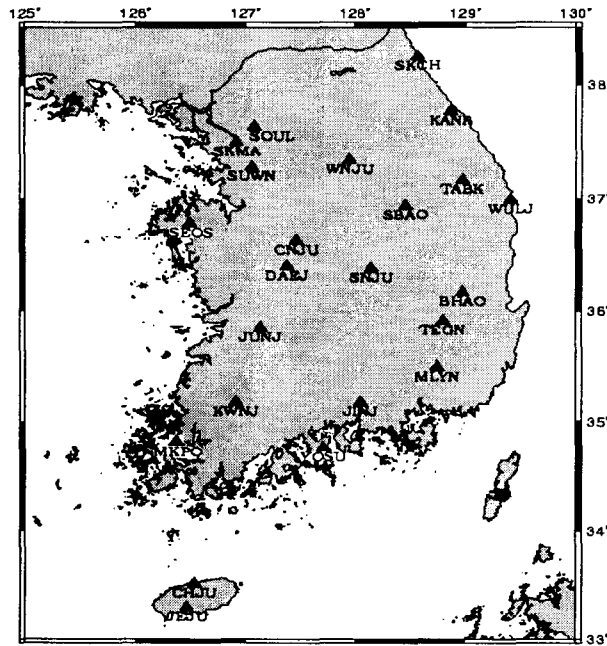


그림 3. GPS 상시관측소 위치

데이터 처리를 위하여 GIPSY/OASIS-II(GOAI) 프로그램을 사용하였으며 상대측위(Relative Positioning)방법을 적용하여 기선해석을 수행하였다. 미국 NASA 제트추진연구소(JPL)에 개발된 GPS 데이터 정밀해석 프로그램인 GOAI는 Lichten과 Border(1987)에 의하면 기선해석을 1×10^{-9} m 정밀도까지 처리할 수 있는 것으로 알려져 있다. 데이터 처리전략은 IGS 표준(McCagty, 1992)에 따랐으며, 반송파(Carrier-Phase)해석을 수행하여 한 시간 단위의 해석결과를 구하였다. 이때, 고체지구조석(Solid Earth Tide)과 극조석(Pole Tide) 및 해양조석(Ocean Tide)보정을 적용하였고, 2중차 L3 phase 해석을 실시하였으며, 미리 결정된 불확정정수(Ambiguity)를 고정하여 사용하였다. 또한, Neill 대류권 모델과 Neill mapping function을 사용하여 대류권 지연량을 보정하였으나, 대기압(Atmospheric Loading)보정은 적용하지 않았다.

각 관측소의 안테나 높이는 표석으로부터 Antenna Phase Center까지의 연직거리로 입력하였으며, 표석에서 Antenna Phase Center까지의 정확한 거리를 산정하기 위해 JPL에서 제안한 다음과 같은 식을 사용하였다(Gregorius, 1996).

$$LC = L_1 \times 2.5457 - L_2 \times 1.5457 \quad (1)$$

여기서, L_1 = 표석으로부터 L_1 phase center까지의 거리

L_2 = 표석으로부터 L_2 phase center까지의 거리

이러한 기선해석의 과정을 통하여 산출된 좌표들을 Helmert 변환법을 이용하여 ITRF2000 좌표계로 변환하였으며, 최종적으로 각 관측소별로 한 시간 단위의 ITRF2000 좌표를 산출하여 국토지리정보원과 한국천문연구원에서 고시된 ITRF2000 성과들과의 차이를 비교하였다. 국토지리정보원의 해석성과는 2002년 1월 1일부터 2002년 1월 5일까지 5일간의 GPS 관측자료를 Bernese ver 4.2 프로그램으로 처리하여 얻은 결과(국토지리정보원 고시 제2002-444호, 2002)이고, 후자의 정밀좌표는 2000년 1월 1일부터 2003년 3월 18일까지의 GPS 관측자료를 GIPSY/OASIS-II 프로그램을 사용하여 처리된 결과 값이다 (한국천문연구원, 2003).

표 1은 국토지리정보원과 천문연구원에서 고시한 각 상시관측소의 ITRF2000 지심직각 좌표이며, 아래 그림 4와 그림 5는 연구기간 동안 수원(SUWN)과 대구(TEGN)의 1시간 단위로 계산된 좌표값과 고시된 좌표값과의 차를 표시한 시계열분포도이다.

표 1. GPS 상시관측소 좌표성과

No.	SITE	ITRF2000 정밀좌표		
		X(m)	Y(m)	Z(m)
1	수원(SUWN)	-3062023.544	4055449.045	3841819.210
2	전주(JUNJ)	-3124886.932	4126580.536	3714170.158
3	광주(KWNJ)	-3134404.492	4173081.828	3654100.968
4	대구(TEGN)	-3241051.556	4030771.756	3719838.486
5	강릉(KANR)	-3167833.726	3930397.144	3885411.916
6	제주(CHJU)	-3168622.322	4277489.600	3501650.056
7	서울(SOUL)	-3049402.747	4035000.351	3873010.167
8	원주(WNJU)	-3122341.161	4004030.665	3847323.755
9	진주(JINJ)	-3217002.759	4110225.654	3653650.430
10	울진(WULJ)	-3238396.150	3940665.402	3816730.567
11	서산(SEOS)	-3042060.369	4111978.757	3797578.729
12	태백(TABK)	-3201453.665	3956909.945	3832097.202
13	상주(SNJU)	-3175473.079	4043362.930	3762213.594
14	청주(CNJU)	-3117076.205	4067949.797	3784300.502
15	대전(DAEJ)	-3120041.850	4084614.937	3764026.961
16	서울(SKMA)	-3043536.458	4050959.069	3861031.799
17	속초(SKCH)	-3126510.829	3921458.268	3927386.216
18	목포(MKPO)	-3109396.060	4220348.752	3621241.308
19	밀양(MLYN)	-3253750.341	4054963.307	3682413.392
20	여수(YOSU)	-3208481.057	4150350.056	3615841.109
21	제주(JEJU)	-3171944.108	4292560.209	3480971.020
22	보현산(BHAO)	-3243254.159	4008470.860	3743543.857
23	소백산(SBAO)	-3175229.523	3997975.818	3812384.491

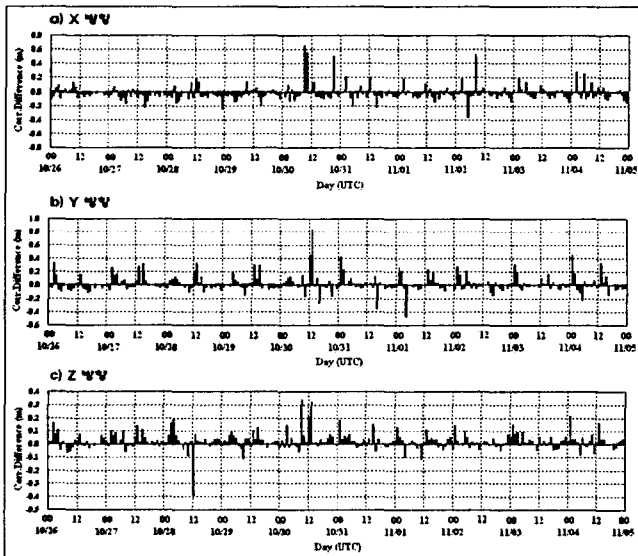


그림 4. 수원(SUWN)점 좌표 차이값 시계열분포도

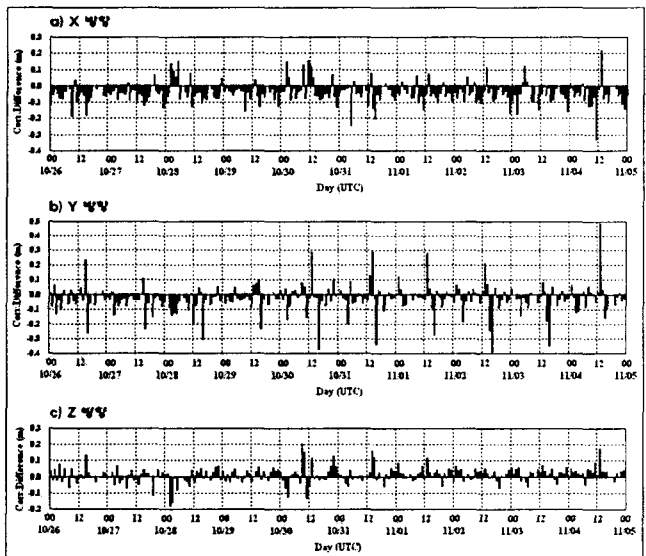


그림 5. 대구(DEGN)점 좌표 차이값 시계열분포도

3. 비교 및 분석

지자기 폭풍이 GPS 위치결정에 주는 영향을 분석하기 위하여 데이터 처리를 통하여 얻은 각 상시관측소의 좌표 차이값 시계열분포도를 태양 X-Ray Flux 및 Kp_Index와 함께 결합하여 통합시계열분포도를 작성하였다. 그림 6과 그림 7에서와 같이 10월 28일과 29일에 폭발한 X급 태양 플레어가 약 24시간 전후에 대규모(Kp지수 9)의 지자기 폭풍을 야기시킨 것을 볼 수 있으며, 이러한 지자기 폭풍이 발생한 후 GPS 위치결정의 오차도 상용하게 커지는 것을 볼 수 있다.

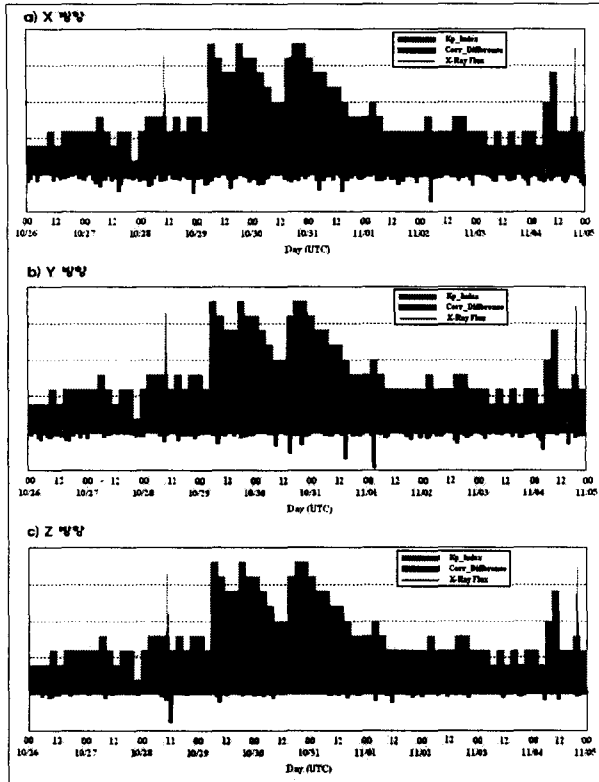


그림 6. 수원(SUWN)점 통합시계열분포도

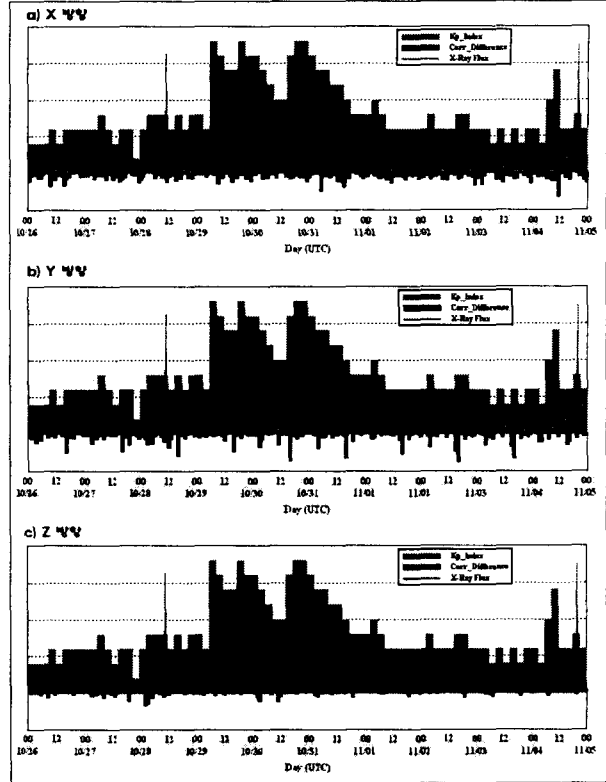


그림 7. 대구(DEGN)점 통합시계열분포도

표 2와 표 3에서는 수원(SUWN)점과 대구(DEGN)점에 대한 처리결과에 대하여 각 날짜별 평균오차, RMSE, 최대값 등을 비교분석하였다. 수원(SUWN) 상시관측소의 경우, 10월 30일 10시경(UTC)에 좌표값 차이의 크기가 최대에 달하여 X, Y, Z방향에서 각각 0.649m, 0.843m, 0.343m의 차이를 보였다. 또한 10월 30일의 RMSE값이 X, Y, Z방향에서 각각 0.214m, 0.214m, 0.113m으로 지자기 폭풍의 영향을 가장 많이 받은 것으로 나타났다. 같은 시각인 10월 30일 10시경(UTC)에 대구(DEGN)상시관측소의 좌표값 차이는 X, Y, Z방향에서 각각 0.148m, -0.373m, 0.204m로 큰 차이값을 보이진 않았으나 전후와 비교하여 보았을 때 그 차이가 선명하게 커지는 경향을 나타내었다.

강력한 지자기 폭풍이 발생하기 전후의 X, Y, Z 각 방향에서 0.02m~0.06사이의 평균오차가 발생한 것을 볼 수 있는데 이는 X급 태양 플레어가 발생하기 전후에 M급의 태양 플레어가 계속 지속된 결과로 분석된다.

표 2. 수원(SUWN)점 좌표 차이값 분석결과

날짜	X방향			Y방향			Z방향		
	평균오차	RMSE	최대값	평균오차	RMSE	최대값	평균오차	RMSE	최대값
10월 26일	0.044	0.057	0.130	0.065	0.096	0.336	0.035	0.052	0.164
10월 27일	0.063	0.083	-0.234	0.073	0.111	0.306	0.039	0.056	0.136
10월 28일	0.081	0.100	-0.246	0.067	0.098	0.323	0.055	0.101	-0.390
10월 29일	0.058	0.075	-0.192	0.065	0.104	0.297	0.039	0.053	0.127
10월 30일	0.128	0.214	0.649	0.115	0.214	0.843	0.065	0.113	0.343
10월 31일	0.069	0.097	-0.235	0.071	0.126	0.405	0.035	0.056	0.177
11월 01일	0.059	0.073	0.180	0.078	0.136	-0.471	0.039	0.053	0.125
11월 02일	0.084	0.145	0.525	0.064	0.090	0.267	0.028	0.043	0.139
11월 03일	0.055	0.075	0.195	0.052	0.087	0.304	0.039	0.052	0.157
11월 04일	0.077	0.103	0.279	0.086	0.139	0.455	0.041	0.065	0.217

표 3. 대구(DEGN)점 좌표 차이값 분석결과

날짜	X방향			Y방향			Z방향		
	평균오차	RMSE	최대값	평균오차	RMSE	최대값	평균오차	RMSE	최대값
10월 26일	0.057	0.076	-0.185	0.058	0.087	-0.260	0.027	0.040	0.128
10월 27일	0.053	0.063	-0.134	0.054	0.077	-0.238	0.027	0.039	-0.118
10월 28일	0.069	0.079	0.155	0.067	0.098	-0.306	0.039	0.059	-0.180
10월 29일	0.050	0.063	-0.153	0.047	0.067	-0.237	0.025	0.029	0.056
10월 30일	0.072	0.081	0.148	0.072	0.115	-0.373	0.055	0.078	0.204
10월 31일	0.061	0.086	-0.249	0.067	0.111	-0.339	0.031	0.049	0.162
11월 01일	0.059	0.067	-0.149	0.054	0.091	-0.279	0.028	0.039	0.114
11월 02일	0.061	0.072	-0.176	0.075	0.117	-0.389	0.026	0.031	-0.067
11월 03일	0.063	0.081	-0.175	0.057	0.094	-0.348	0.031	0.036	0.066
11월 04일	0.075	0.106	-0.335	0.063	0.116	0.484	0.033	0.048	0.171

4. 결 론

본 연구에서는 지자기 폭풍이 발생하기 전후 10일간의 국내 23개 GPS 상시관측소 관측데이터를 이용하여 지자기 폭풍이 GPS의 위치결정에 주는 영향과 그 특성에 대하여 분석하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. X급 이상 태양 플레어의 폭발에 따른 지자기 폭풍은 GPS의 정밀위치 결정에 큰 영향을 미치고 있으며, 지자기폭풍과 GPS 정밀위치 결정의 오차사이에는 시간적 분포상 유사한 흐름을 가지고 있다.
2. 지자기 폭풍에 의한 GPS 정밀위치 결정의 오차는 최대값이 0.8m이상에 달하므로 Kp 지수가 5이상인 날짜에 실시한 GPS 측지측량성과의 사용을 자제해야 할 것이며, GPS 측량계획을 수립할 때 태양 플레어 발생여부를 참고하는 것이 유리할 것이다.
3. 지자기 폭풍 시, GPS의 좌표값이 크게 변하는 근본적인 원인은 태양 플레어 및 지자기 폭풍으로 인한 전리층 TEC의 변화임으로 향후 "태양 플레어—지자기 폭풍—TEC—GPS"의 통합연구를 통하여 지자기 폭풍과 GPS 위치결정 오차사이의 상호관계를 분석하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- 윤홍식, 황진상 (2000), ITRF에 준거한 정밀 GPS 측위에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 18권, 제3호, pp. 1-11.
- Gregorius, T. (1996), *GIPSY-OASIS II : How it Works...*, Department of Geomatics, University of Newcastle upon Tyne.
- Lichten, S. M. and Border, J. S. (1987), *Strategies for high precision Global Positioning System orbit determination*, Journal of Geophysical Research, 92., 12751-12766.
- Dennis Odijk (2001), *Instantaneous Precise GPS Positioning under Geomagnetic Storm Conditions*, GPS Solutions, Vol. 5, No. 2, pp. 29-42.
- URL, <http://www.sec.noaa.gov/>, 미국 우주환경센터.
- URL, http://www.gps.re.kr/dataservice/dataservice_7.asp, GPS상시관측소의 정밀좌표(ITRF 2000), 한국 천문연구원.