

GPS 신호 감시체계 구축

문 준 철

국립전파연구원 우주전파센터

I. 배 경

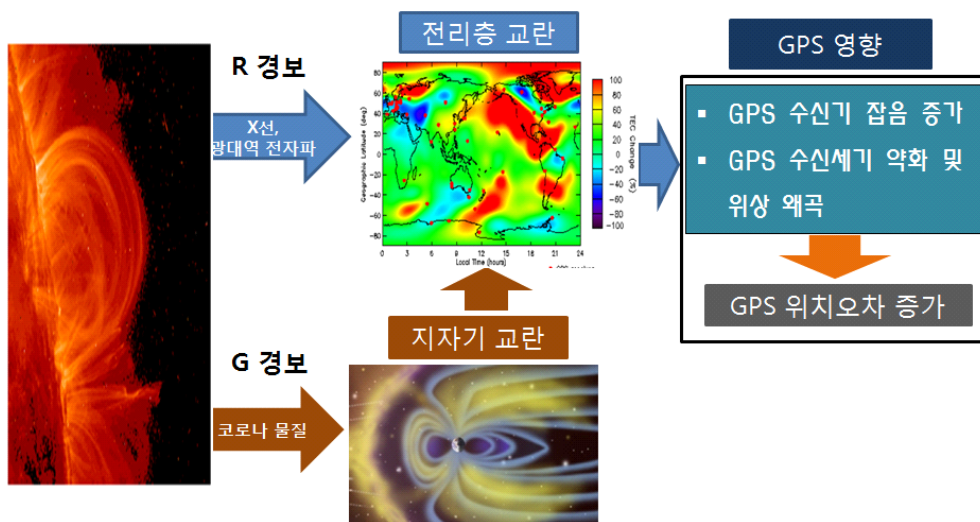
GPS 신호를 이용한 항법서비스 활용범위는 점차 증가하고 있는 추세이나, 국내에서는 GPS 서비스 사용자를 위한 신호 감시 체계가 미미한 상태이다. 특히 태양흑점 폭발에 의한 전리층 교란은 GPS 위치 오차에 가장 큰 영향을 미치므로 GPS 신호에 대한 실시간 감시 체계 구축이 요구된다. 따라서 국립전파연구원 우주전파센터에서는 태양흑점 폭발에 의한 GPS 신호 영향을 분석하고, 실시간 GPS 신호 감시 체계를 구축하였다.

본 논문에서는 전파 두절 경보 및 지자기 교란 경보에 따른 국내 GPS 신호 영향을 분석하고, GPS 신호 상시 감시를 위해 GPS 기준국의 신호 수신품질 평가기준을 마련하였으며, 태양활동에 따른 GPS 수신 신호에 대해 정상 유무를 상시 감시할 수 있도록 GPS 신호 감시체계 개발에 대해 서술하였다.

2-1 개요

태양흑점 폭발은 X선 등 광대역 전자파 및 코로나 물질 등이 태양으로부터 방출되어 전리층에 영향을 미치게 된다. 태양흑점 폭발로 인해 발생된 X선 등 광대역 전자파는 지구에 8분 만에 도착하여 전리층을 교란시킨다. X선 유입은 전리층 이온화를 가중시켜 전리층 전자밀도가 높아짐으로써 GPS 신호 왜곡을 발생시키게 되며, 광대역 전자파는 GPS 대역인 1.2 GHz 및 1.5 GHz 대역의 잡음 유입으로 GPS 수신기의 잡음비를 높임으로써 GPS 신호대 잡음비를 악화시켜 위치오차 증가 및 GPS 수신기 성능 저하를 일으키게 된다. 또한 코로나 물질은 태양폭발 후 1~3일 만에 지구에 도착하며, 수 일간 지속하며 전리층에 영향을 미친다. 코로나 물질은 극지방으로 유입되어 지구 자기력선을 따라 이동하는데, 이때 전리층 플라즈마를 동반하여 이동함으로써 지역적으로 전리층을 교란시키게 된다. 따라서 태양흑점 폭발에 의한 전파 두절 및 지자기 교란 경보 상황이 되면 전리층이 교란되어 GPS 위치오차 증가 등의 피해가 발생하게 된다.

II. 태양흑점폭발에 의한 GPS 영향



[그림 1] 태양흑점 폭발에 의한 GPS 영향 개요

2-1-1 전파두절 경보에 의한 GPS 위치오차 변화 분석

2012년 및 2013년 전파경보 3단계 상황에 대해 GPS 위치 오차 변화를 분석하였다. 분석방법으로 제주지역 GPS 관측 자료를 이용하여 전파경보 발생일과 전일을 비교하여 위치 오차(X축, Y축, Z축) 변화를 비교 분석하였다.

2012년 3월 7일(9시 10분) R3 상황에 대해 위치오차를 전 일과 비교 분석한 결과, 전일에 비해 X축은 3.8 m, Y축은 8.1 m, Z축은 14.7 m가 크게 발생하였다. 또한 2013년 11월 10일(14시 14분) R3 상황에 대해 위치오차를 전일과 비교 분석한 결과, 전일에 비해 X축은 23.5 m, Y축은 18.1 m, Z축

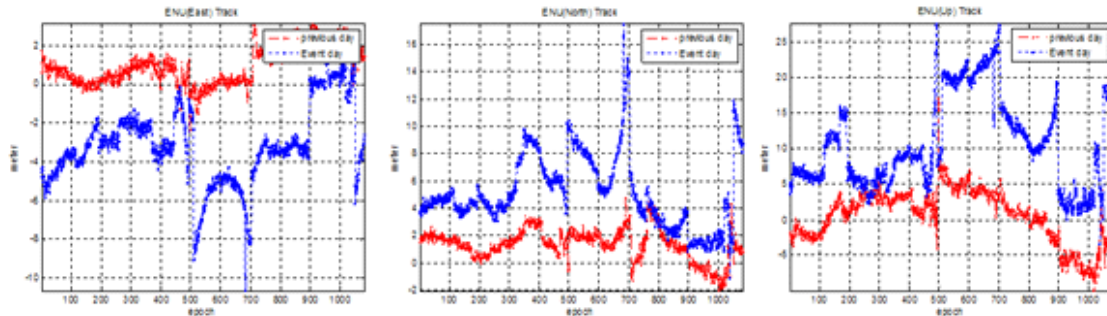
은 30.2 m가 크게 발생하였다.

2-1-2 지자기 교란에 의한 GPS 위치오차 변화 분석

과거 지자기 교란 경보 단계(G4, G5)가 크게 발생하였던 기간에 제주 GPS 관측자료를 이용하여 위치오차 변화를 분석하였다. 먼저 2004년 11월 08일 00:00~09:00에 발생한 G4 단계의 지자기 교란 경보 상황을 분석한 결과, 발생 전일에 비해 수평오차 9.4 m, 수직오차 17.3 m가 증가하였다.

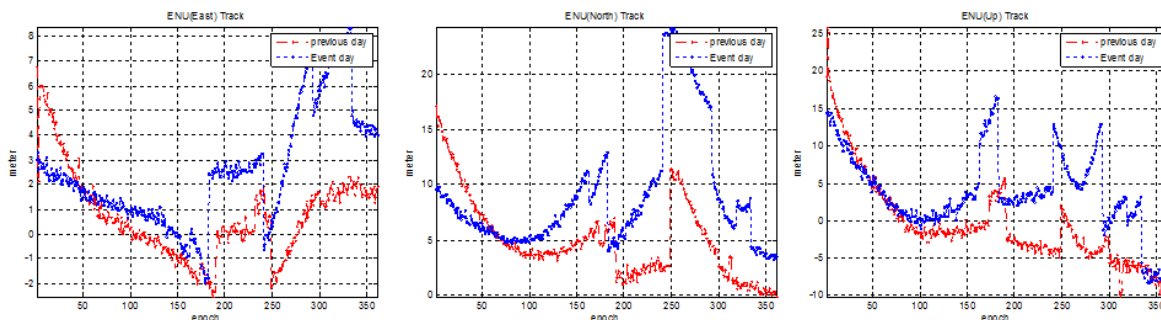
또한 2003년 10월 29일 06:00~09:00에 발생한 G5단계 지 자기 교란 경보 상황을 분석한 결과, 발생 전일에 비해 수평 오차 8.6 m, 수직오차 1 m가 증가하였다.

경보상황	이벤트 기간(2004/11/08 00:00- 09:00)			
G4	수평오차	수직오차	AVG. TEC	MAX. TEC
전일	4.411211	7.5977	64.1199	98.49369
발생일	13.8047	24.81523	102.8693	165.044785



[그림 2] 지자기 교란에 따른 위치오차 변화(2004. 11. 8) 분석

경보상황	이벤트 기간(2003/10/29 06:00-09:00)			
G5	수평오차	수직오차	AVG. TEC	MAX. TEC
전일	11.649	11.9717	91.67059	158.525
발생일	20.255	12.907	101.4179	176.0061



[그림 3] 지자기 교란에 따른 위치오차 변화(2003. 10. 29) 분석

III. GPS 신호 감시체계 구축

3-1 GPS 신호품질 평가 알고리즘 개발 및 검증

GPS 신호는 위성궤도력 오차, 위성과 수신기 시계 오차, 전리층 지연 오차, 대류층 지연 오차, 수신기 잡음, 다중경로 오차 등 다양한 오차가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 오차들 중 주변 환경에 영향을 받는 관측데이터 수(Observation Number), 다중경로 오차(multi-path), 사이클 슬립(cycle-slip)에 대한 평가 알고리즘을 개발하고 GPS 데이터 품질 산출 소프트웨어 모듈을 개발하였다. 또한 개발된 소프트웨어를 검증하기 위해 UNAVACO사에서 개발되어 GPS 신호분석에 널리 사용되고 있는 TEQC 프로그램과 비교 분석하였다.

3-1-1 GPS 데이터 품질 평가 산출 알고리즘 개발

3-1-1-1 Observation Number

관측치의 개수는 하루 동안 관측한 GNSS 데이터 수를 의미하는데, GPS 기준으로 30초 간격의 epoch일 때 보통 2만~2만 5천 개의 관측 데이터 수를 보인다. RINEX obs, nav 파일을 입력으로 예측데이터 수, 전체 관측데이터 수, 완전한 관측데이터 수, 삭제 데이터 수, mask angle 적용 데이터 수 등을 출력한다.

$$N_{obs} = \sum_{t=0}^n \sum_{k=1}^m Obs_{tk} \quad (1)$$

여기서, N_{obs} 는 관측데이터의 개수이고, n 는 Epoch, m 는 관측 위성 수, Obs_{tk} 는 관측데이터이다. 식 (1)은 실제 관측 데이터 수를 계산하는 공식이다. 위에서 언급한 바와 같이, 예측된 데이터 개수도 산출하여야 하는데, 위성의 Ephemeris 데이터를 이용하여 각 epoch별 위성의 위치를 계산하고, 이를 이용하여 관측 가능한 위성의 수를 예측한다. 또한 mask angle을 지정하여 정해진 Elevation 이상의 데이터 수도 계산할 수 있다.

3-1-1-2 Multi-path

다중경로 오차는 반사되어 수신기에 도달한 신호와 위성으로부터 직접 도달한 신호가 수신 기내부의 신호 추적부에

상호 작용하여 발생하는 오차로서, 도심지역에서 가장 큰 오차요인으로 작용한다. 다중경로 오차는 이중주파수 의사거리 및 반송파 관측치를 이용하여 검출한다. 이중주파 의사거리와 반송파 관측치는 식 (2), (3)과 같이 표시할 수 있는데, 코드 의사거리는 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$\rho_i = P + c(dT_{sv} - dT_{rcv}) + dIon + dTrop + MP_{p_i} \quad (2)$$

그리고 반송파 관측치는 식 (3)과 같다.

$$\Phi_i = P + c(dT_{sv} - dT_{rcv}) + \lambda_i N_i - dIon + dTrop + MP_{\Phi_i} \quad (3)$$

여기서, i 는 L1과 L2 주파수, P 는 실제거리, $dIon$ 은 전리층지연, $dTrop$ 는 대류층지연, N 은 모호정수, MP 는 다중경로 오차이다. 이중주파수 관측치 관계와 전리층 지연 계산식에 의하여 다중경로 오차는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$MP_1 \equiv \rho_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)\Phi_1 + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)\Phi_2 \quad (4)$$

$$MP_2 \equiv \rho_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right)\Phi_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right)\Phi_2 \quad (5)$$

여기에서 $\alpha = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2$ 이다.

3-1-1-3 Cycle-slip

이중주파수 전리층 지연 오차를 이용하면 반송파 관측치의 사이클 슬립을 검출할 수 있고, 이것을 IOD(derivative of ionospheric delay) 사이클 슬립이라고 한다. 식 (2), (3)을 이용하여 다음 식 (6)과 같이 전리층 지연오차와 IOD를 계산할 수 있고, IOD가 일정한 임계값을 넘으면 사이클 슬립이라고 판정한다.

$$I = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\alpha - 1}, \quad IOD_{slip} = I_{\phi}(k) - I_{\phi}(k-1) \quad (6)$$

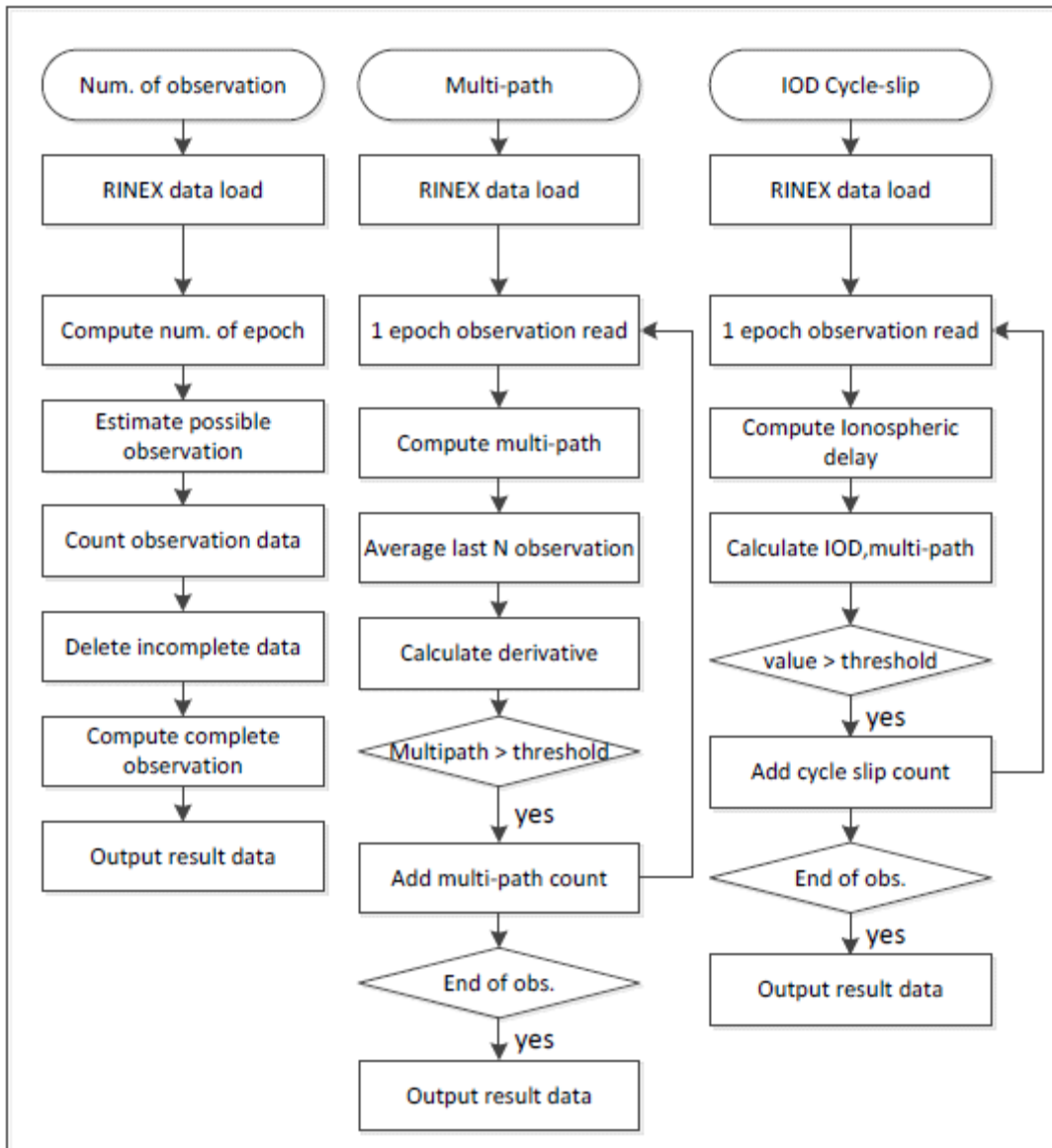
3-1-2 GPS 데이터 품질 평가 소프트웨어 검증

본 연구를 통해 개발된 관측데이터 수, Multi-path, Cycle-slip 등의 신호품질 평가 알고리즘은 TEQC(Translation, Editing, and Quality Check) 소프트웨어를 통해 검증하였다. TEQC는 UNAVCO에서 개발한 소프트웨어로 GPS 데이터 품질평가에 널리 사용되고 있다.

개발된 소프트웨어 모듈의 성능을 검증하기 위해 무작위로 선택한 국토지리정보원의 GPS 상시 관측소 데이터를 사

용하여 품질정보를 산출하고, 그 결과를 UNAVCO TEQC 프로그램으로 산출한 값을 비교 분석하였다. 개발 소프트웨어의 품질정보 산출 결과의 검증 방법은 다음과 같다.

첫째로, 품질정보 산출 알고리즘 소프트웨어로부터 계산된 관측치 수를 TEQC 프로그램 계산 결과와 비교하였다. 둘째로, 각 epoch별 위성의 Multi-path derivative 값을 비교하고, 통계값을 비교하였다. 마지막으로 Cycle-slip 값을 비교하였는데, 각 epoch 별 위성의 Cycle-slip derivative와 그 결과



[그림 4] GPS 데이터 품질 산출 순서도

<표 1> TEQC와 KQC GPS 상시 관측소별 QC 결과

Ref. ID	Obs.>10deg		Delete Obs.		MP1		MP2		MP/IOD slips	
	TEQC	KQC	TEQC	KQC	TEQC(M.avg)	KQC(RMS)	TEQC	KQC	TEQC	KQC
CHJU	23,400	23,400	458	458	0.327636	0.313033	0.411048	0.35527	22	21
INJE	23,236	23,236	517	517	0.348405	0.359438	0.355906	0.346512	12	9
JAHG	24,149	24,147	684	682	0.405093	0.46758	0.45796	0.52121	34	35
JINJ	25,004	25,004	56	56	0.325425	0.302717	0.329550	0.315315	19	19
KANR	23,897	23,863	457	454	0.282216	0.259236	0.323352	0.274668	7	6
MUJU	23,719	23,719	809	809	0.384485	0.406467	0.435384	0.440517	32	24
PAJU	24,835	24,820	19	19	0.367617	0.373436	0.415535	0.385096	4	3
SEOS	24,881	24,877	10	9	0.273008	0.311044	0.259722	0.303627	10	10
TEGN	15,071	25,070	23	23	0.33454	0.315156	0.349007	0.330364	15	15
WNJU	24,824	24,824	135	133	0.365202	0.333283	0.369907	0.34324	27	27
WOLS	23,372	23,371	423	423	0.339859	0.338334	0.382475	0.364932	15	15
WULJ	25,107	25,108	22	22	0.303019	0.278704	0.31228	0.296351	6	6
YONK	22,775	22,772	1,266	1,266	0.427755	0.43659	0.433229	0.43329	39	23

인 slip 개수를 비교하였다. 위 <표 1>에서 볼 수 있듯이 관측데이터 수 및 제거된 데이터 수는 거의 대부분의 값들이 동일하거나 비슷한 수준으로 계산되었다. 차이가 발생한 부분들은 elevation mask 값을 적용하는데 있어서 소수점 반올림 문제와 기준좌표 문제 등으로 확인되었다. Multi-path 값의 경우는 derivative 값은 거의 동일하게 계산되었으나, 마지막 평균값에서 차이가 나지만, TEQC 소프트웨어 같은 경우 이동 평균 방식으로 최근 값에 가중치를 주어 평균을 구하고, 개발된 소프트웨어에서는 RMS 값으로 계산했기 때문이다. Cycle-slip 값을 비교하여 보면 derivative 값은 거의 일치하나, MUJU, YONK 경우에 개수의 차이가 크게 나는 것을 볼 수 있다. 이것은 슬립으로 판단하는 임계값과 일정시간 이상 위성의 궤도 발생 시 알고리즘 reset 부분이 서로 다르기 때문인데, 개발 소프트웨어에서는 10분으로 설정했고, TEQC 소프트웨어 같은 경우에는 공개되어 있지 않다.

결과적으로 Epoch별 각 위성의 품질평가 항목별 계산 값들은 거의 동일하나, 소수점 이하 반올림, 평균값 계산 방식 및 reset 판단 시간 등으로 통계 값에 차이가 나는 것으로 확

인되었다.

3-2 GPS 신호품질 및 위치오차 평가기준 마련

GPS 신호품질 평가 기준은 IGS(International GNSS Service) 가이드라인을 적용하였다. IGS는 1994년부터 높은 품질의 GNSS 데이터를 무료로 제공하는 기관으로 전 세계 100여개 이상의 국가에서 데이터를 수집하여 정밀한 위성궤도 정보 및 관측소 관측데이터를 서비스하는 비영리 기관이다.

먼저 관측데이터 개수의 평가기준은 1일 동안 관측 데이

<표 2> GPS 신호품질 평가기준

항목	기준	Reference
관측 데이터 개수	1일 95 % 이상	Recommended Station Guidelines 2.2.24
다중경로	0.3 m 이내	Recommended Station Guidelines 2.2.25
사이클 슬립	관측데이터 1,000개당 1개	Recommended Station Guidelines 2.2.26

터가 95 % 이상이 되어야 한다. 그리고 다중경로 오차에 대해 평가기준은 1일간 관측된 데이터를 평균하여 0.3 m 이상이 되어야 한다. 또한 사이클 슬립 발생에 대한 평가기준은 1,000 관측데이터 기준으로 1개 이하이어야 한다.

또한 GPS 위치오차 평가기준은 미국 GPS 협의회 표준을 적용하였다. GPS 위치오차 평가기준은 통상 운용되는 GPS 위성(20~24개)의 배치상태에 따른 DOP(Dilution of Precision) 값을 적용하는데, 수평오차 기준의 경우, 사용자 GPS 위치오차 × 수평 DOP × 1.73으로 계산하고, 수직오차 기준의 경우

에는 사용자 GPS 위치오차 × 수직 DOP × 1.96으로 계산한다. 따라서 95 % 신뢰도를 가질 때를 가정하면, 수평오차는 13.7 m이고, 수직오차는 27.5 m가 기준이 된다. 이러한 평가기준은 정상, 관심, 주의, 경보 등 4단계로 분류하고, 기준조건으로 가용위성 수, 신호품질, 위치정확도가 적용 된다.

3-3 GPS 신호 감시체계 구축

태양흑점 폭발 등 우주전파환경 변화에 의한 GPS 신호 상태를 실시간 감시하기 위해 GPS 신호 감시체계를 구축하였다. GPS 신호 감시체계 구축을 위해서 GPS 신호품질 분석 모델, 전리층 교란 감시모델, GPS 신호두절 감시모델을 개발하였다.

GPS 신호품질 분석모델은 정상적인 GPS 신호 수신을 위한 기본적인 신호 특성을 분석하는 모델로 GPS 신호품질 평가 인자인 관측데이터 개수, 사이클 슬립, 다중경로에 대해 실시간으로 분석한다.

또한 전리층 교란 감시모델은 태양활동 변화에 의한 전리층 상태를 분석하는 모델로, 전리층 전자밀도 변화, GPS 신호 수신세기, 위성포착 개수를 분석한다.

마지막으로 GPS 신호두절 감시모델은 GPS 사용자 및 서비스 제공자에게 태양활동에 따른 위치오차 변화를 실시간 분석하기 위한 모델로 GPS 신호 위치오차, 지역별 위치오차 등을 실시간으로 분석한다.

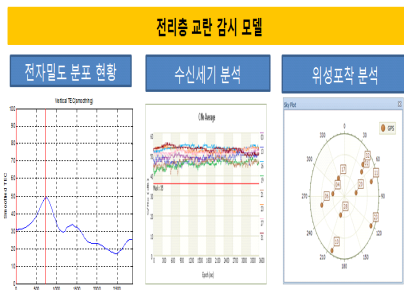
본 연구를 통해 개발된 GPS 신호 감시체계는 GPS 신호를 사용하는 일반사용자, 군, GPS 서비스 기관 등에서 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

<표 3> GPS 위치오차 평가기준

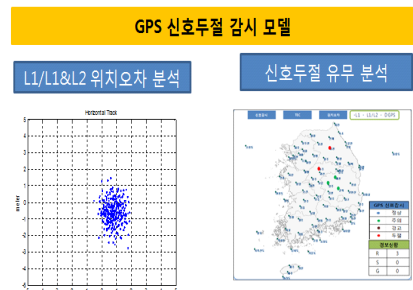
상태	조건
정상	<ul style="list-style-type: none"> · 가용위성 수 > 5 · 품질정보 < IGS 기준값 · 위치정확도 < 기준값
관심	<ul style="list-style-type: none"> · $4 \leq$ 가용위성 수 ≤ 5 · IGS 기준값 < 품질정보 < IGS 기준값*1.2(64 %) · 기준값 \leq 위치정확도 < 기준값*2.4(95 %)
주의	<ul style="list-style-type: none"> · 가용위성 수 = 4 · IGS 기준값*1.2(64 %) < 품질정보 < IGS 기준값*2.4(95 %) · 기준값*2.4(95 %) \leq 위치정확도 < 기준값*3.6(95 %)
경고	<ul style="list-style-type: none"> · 가용위성 수 < 4 · IGS 기준값*2.4(95 %) < 품질정보 < IGS 기준값*3.6(95 %) · 위치정확도 \geq 기준값*3.6(95 %)



(a) GPS 신호품질 분석모델



(b) 전리층 교란 감시모델



(c) GPS 신호두절 감시모델

[그림 5] GPS 신호 감시체계 구축

≡ 필자소개 ≡

문 준 철



2000년 2월: 광운대학교 전기공학과 (공학사)
2003년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 5월: 국립전파연구원 공업연구사
2005년 7월: 충북대학교 정보통신공학 박사수료
2015년 7월 현재: 국립전파연구원 우주전파센터