

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(9), 689-699(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.9.689>

## 종합적 품질평가 기법을 이용한 국내 GPS 상시관측소의 데이터 품질 분석

김민찬, 이지윤\*

## Data Quality Analysis of Korean GPS Reference Stations Using Comprehensive Quality Check Algorithm

Minchan Kim and Jiyun Lee\*

Korea Advanced Institute of Science and Technology, Division of Aerospace Engineering\*

## ABSTRACT

During extreme ionospheric storms, anomalous ionospheric delays and gradients could cause potential integrity threats to users of GNSS (Global Navigation Satellite System) augmentation systems. GNSS augmentation ground facilities must monitor these ionospheric anomalies defined by a threat model and alarm the users of safely-of-life applications within time-to-alerts. Because the ionospheric anomaly threat model is developed using data collected from GNSS reference stations, the use of poor-quality data can degrade the performance of the threat model. As the total number of stations increases, the number of station with poor GNSS data quality also increases. This paper analyzes the quality of data collected from Korean GPS reference stations using comprehensive GNSS data quality check algorithms. The results show that the range of good and poor qualities varies noticeably for each quality parameter. Especially erroneous ionospheric delay and gradients estimates are produced due to poor quality data. The results obtained in this study should be a basis for determining GPS data quality criteria in the development of ionospheric threat models.

## 초 록

전리층 폭풍 시 발생할 수 있는 극심한 전리층 이상현상은 GNSS 보강시스템 사용자의 안전을 위협하는 대표적인 요인이므로 전리층 위협모델을 기반으로 한 지상 모니터링을 통해 적시에 감지 및 경보가 이루어 져야한다. GNSS 관측 데이터를 기반으로 전리층 분석을 수행하고 그 결과로 위협모델을 개발하기 때문에 각 관측소의 데이터 품질은 시스템 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 전 세계적으로 GNSS 상시관측소 수가 많이 증가함에 따라 품질이 떨어지는 데이터를 산출하는 관측소 또한 증가하였다. 본 연구에서는 GNSS 데이터 품질평가 기법 이용하여 국내 GPS 상시관측소 데이터의 품질을 비교하고 품질이 떨어지는 데이터가 전리층 지연오차 및 기울기 추정치에 미치는 영향을 분석하였다. 품질평가 결과 국내 상시관측소간 데이터 품질에 큰 차이를 보였고 이 품질은 일정기간 유지된다는 것을 확인하였다. 본 연구에서 분석한 결과를 바탕으로 전리층 위협모델 개발을 위한 GNSS 데이터 품질 기준을 제시할 수 있다.

**Key Words** : Data Quality Check(데이터 품질평가), GNSS Augmentation System(GNSS 보강 시스템), Ionospheric Threat Model(전리층 위협 모델)

† Received: June 17, 2013 Accepted: August 14, 2013

\* Corresponding author, E-mail : [jiyunlee@kaist.ac.kr](mailto:jiyunlee@kaist.ac.kr)<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

## I. 서론

GNSS(Global Navigation Satellite Systems) 보강시스템인 SBAS(Satellite Based Augmentation System)와 GBAS(Ground Based Augmentation System)는 기준국에서 GNSS 신호를 수신하여 산출한 오차 보정정보와 무결성 정보를 사용자에게 제공함으로써 항공기의 정밀 접근 및 자동 착륙을 가능하게 하는 시스템이다. 항공기 사용자는 차분 보정정보를 이용하여 기준국과 사용자간에 존재하는 공통된 GNSS 신호 오차를 제거함으로써 위치 추정치의 정확도를 높일 수 있다. 차분 보정 이후에 남아있는 위성의 궤도력 오차, 전리층 오차 및 대류층 지연오차 등의 확률적 정보와 무결성 정보가 기준국에서 사용자에게 제공되며, 사용자는 이를 이용하여 자신이 높은 확률( $1-10^{-7} \sim 1-10^{-9}$ )로 보호 수준 내에 존재함을 보장할 수 있고 그로인해 실시간 정밀 접근 및 착륙 시 안정성을 보장할 수 있다<sup>(1)</sup>.

GNSS 보강시스템은 정확성, 무결성, 연속성, 가용성 요구조건을 만족하도록 설계되어야 하며, 특히 무결성 요구 조건을 만족시키기 위해서는 사용자를 위협에 처하게 하는 시스템 오류 및 위협 요인들이 지상국에서 감시되어야 한다. 보강시스템의 측위 오차 원인들 중 사용자에게 가장 큰 위협을 줄 수 있는 요소 중의 하나는 전리층 폭풍 시 발생할 수 있는 전리층 경사도이다. 전리층 폭풍이 발생하면 전리층 지연 값이 급변하게 되고 보강시스템 사용자가 이러한 전리층 이상현상이 발생했을 때의 보정정보를 사용할 경우, 사용자의 위치 추정치 정확도는 크게 저하된다. 지난 태양 극대기(2000년~2005년)인 2003년 11월 20일 미국본토에 발생한 전리층 폭풍에서 412 mm/km에 달하는 극심한 전리층 기울기가 발생하였다<sup>(2)</sup>. 이 기울기는 CAT(category)-I 결정 고도(DH, Decision Height) 즉, 지상국과 6 km 떨어진 GBAS 사용자에게 0.412 m/km  $\times$  20 km = 8.2 m의 거리 오차를 발생시킬 수 있다. 여기서 20 km는 지상국과 사용자와의 실제 거리인 6 km와 코드-반송파 평활화(smoothing) 필터의 기록(memory)으로 인해 생성된 가상의 거리 14 km의 합이다<sup>(3)</sup>. 전리층 위협모델의 범주에 속하는 이러한 이상현상이 지상 모니터링을 통해 적시에 감지 및 경보되지 못한다면 사용자는 큰 위협에 처할 수 있다. 앞으로 다음 태양극대기(2013년 - 2015년)가 다가옴에 따라 지속적인 전리층 분석을 통해 현재 개발된 위협모델의 검증

이 필요하며, 전 세계의 안전한 GNSS 보강시스템 운용을 위해 전 지구적, 지역적 전리층 위협 모델을 개발해야 한다.

GNSS 보강시스템의 전리층 분석 및 위협모델 개발은 GNSS 관측 데이터를 기반으로 하기 때문에 각 관측소의 데이터 품질은 전체 시스템의 성능에 영향을 미친다. 현재 미국의 CORS(Continuously Operating Reference Stations) 네트워크는 2400개 이상의 관측소들로 구성되어 있으며, 일본의 GEONET(GPS Earth Observation Network)의 경우 1200개 이상의 관측소가 운용되고 있다. 국내에는 2000년대 초반 약 40여개에서 현재는 80개 이상의 상시 관측소가 운용되고 있고 이 수는 앞으로 더욱 증가할 것이다. 관측소가 많이 증가한 만큼 품질이 떨어지는 GPS 데이터를 산출하는 관측소 또한 많이 증가하였다. 전리층 분석 과정에서 품질이 떨어지는 데이터를 사용한다면 분석 결과의 신뢰성이 떨어지며 오류검출을 위한 추가적인 시간과 노력이 들어갈 것이다.

국내에서도 CAT-I GBAS 운용을 위한 시스템 인증 및 시범 운영을 계획하고 있으며, 이를 위해서는 국내 환경을 반영한 독립적인 위협모델 구축이 필요하다. 따라서 전리층 분석에 앞서서 국내 상시관측소들의 품질을 평가하여 품질이 떨어지는 데이터를 미리 제거한다면 개발될 위협모델의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

종합적으로 GNSS 데이터 품질을 평가하는 기법은 이미 개발되었으며 이를 이용하여 미국 본토 지역에 있는 CORS 네트워크의 품질을 평가한 연구가 발표되었다<sup>(4)</sup>. 본 연구에서는 국내에서 운용중인 모든 GPS 상시관측소의 데이터 품질을 산출하여 평가하고 각 상시관측소별 비교분석을 통하여 문제점을 제시한다. 전리층 분석성능 향상을 위한 품질평가의 지표로서 각 관측소에서 수집한 GNSS 관측 데이터의 반송파 사이클 슬립(cycle slip)의 개수, 특이점(outlier)의 개수, 수신기 잡음, 다중경로 오차 및 관측된 데이터의 비율을 이용한다.

## II. 본론

### 2.1 GNSS 상시관측소의 신호 환경과 데이터 품질

GPS 측위오차는 위성궤도력 오차, 위성과 수신기 시계오차, 수신기 잡음, 다중경로 오차, 대류권과 전리층 지연 오차 등 다양한 발생 원인에



Fig. 1. Examples of Poorly Sited GNSS Stations in Gwangju and Jeju

기인한다. 특히 다중경로 오차는 각 관측소의 주위 환경에 따라 그 크기와 영향에 큰 차이를 보인다. 위성추적 시에 위상값을 순간적으로 놓침으로써 발생하는 사이클 슬립 또한 신호 환경의 영향을 받으며, 이는 모호정수(integer ambiguity) 재결정이라는 추가적인 문제를 야기한다.

Figure 1은 실제 적합하지 않은 장소에 설치된 국내 국토지리정보원에서 운용하고 있는 GPS 상시관측소이다. 광주관측소의 경우, 관측소 주변에 안테나 보다 높은 나무가 위치하고 있다. 여름철의 무성한 나뭇잎은 다중경로 오차를 유발하는 요인이 되어 겨울철보다 여름철에 다중경로 오차가 더욱 심해지는 계절적 주기를 나타내고 있는 것이 조사되었다<sup>(5)</sup>. 제주관측소 주변에는 금속재질의 주차장 지붕과 동향방향으로 4층 건물이 문제점으로 지적되었으며 이러한 반사성이 강한 표면이나 건물의 영향으로 다중경로 오차가 많이 발생하였다<sup>(6)</sup>. 이렇게 품질이 떨어지는 데이터를 이용할 경우 전리층 지연 오차를 정확하게 추정할 수 없고 결과적으로 실제 이상현상이 아닌 잘못된 전리층 기울기가 산출되며 이는 전리층 분석을 복잡하게 하는 원인이 된다.

## 2.2 데이터 품질평가 알고리즘

GNSS 관측 데이터의 사이클 슬립, 특이점, 다중경로 오차, 관측된 데이터의 비율, 수신기 잡음 등 데이터의 품질을 종합적으로 평가하기 위한 GNSS 데이터의 품질평가 알고리즘이 개발되었다<sup>(4)</sup>. 이 알고리즘의 입력 값으로 각 관측소에서 관측된 RINEX(Receiver Independent Exchange Format) 이중주파수 관측 데이터가 사용되며, 출력 값은 그 관측소의 데이터 품질정보이다. Fig. 2에 나타나 있듯이 이 알고리즘은 크게 3가지 요소로 구성되어 있다.

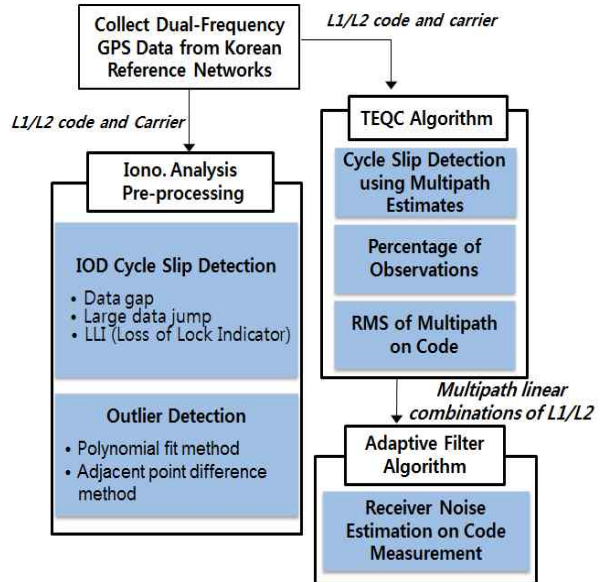


Fig. 2. GNSS Data Quality Determination Algorithms

첫 번째 구성요소로서 전리층 분석 알고리즘의 전처리 과정을 이용한다. 이 과정에서는 이중주파수 반송파 데이터를 이용하여 산출한 전리층 지연오차 추정치에서 사이클 슬립과 특이점을 검출한다. 전리층 지연 오차 추정치를 이용하여 검출한 반송파 데이터의 사이클 슬립을 IOD (derivative of ionospheric delay) 사이클 슬립이라 한다. 이중 주파수 코드( $\rho_1, \rho_2$ )와 반송파( $\phi_1, \phi_2$ ) 관측치는 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho_i &= r + T + I_i + M_i + \epsilon_{\rho_i} \\ \phi_i &= r + T - I_i + N_i + m_i + \epsilon_{\phi_i} \end{aligned} \quad (1)$$

아래 첨자  $i(=1,2)$ 는 L1과 L2 주파수를 나타내며,  $r$ 은 위성과 수신기의 실제 거리,  $T$ 는 대류층 지연 오차,  $I$ 는 전리층 지연 오차,  $M$ 은 코드의 다중경로 오차,  $m$ 은 반송파의 다중경로 오차를 나타낸다. 반송파 측정치는 모호 정수  $N$ 을 포함하고 있으나, 코드 측정치보다 작은 잡음을 가지고 있다( $\epsilon_{\phi} \ll \epsilon_{\rho}$ ). 이중 주파수 반송파 관측치를 이용하여 다음 식(2)와 같이 전리층 지연 오차( $I_{\phi}$ )와 IOD를 산출할 수 있으며, IOD가 슬립 한계값을 넘거나 RINEX 데이터에 포함된 LLI(Loss of Lock Indicator)정보에 신호 놓침이 표시되거나 코드와 반송파 관측치 모두에서 데이터 공백이 존재하면 사이클 슬립으로 판단한다.

$$I_\phi = \frac{\phi_2 - \phi_1}{\gamma - 1} \tag{2}$$

$$IOD = I_\phi(k) - I_\phi(k-1)$$

$\gamma$ 는 L1과 L2의 주파수 비로써  $\gamma = (77/60)^2$ 이며  $k$ 는 시점을 나타낸다.

전리층 지연오차 추정치에 발생된 특이점 또한 전리층을 분석하는 과정에서 분석 성능을 저하시키는 중요한 요인이므로 관측 데이터의 품질을 평가하는 지표로 사용된다. 특이점 검출을 위해 먼저 다항식 적합을 이용하여 적합된 다항식 값과 데이터들의 잔차를 구하고 인접한 점들의 잔차 차이를 산출한다. 잔차 차이가 가장 큰 값이 특이점 한계값보다 클 경우, 이 데이터를 특이점으로 판단하여 기록 후 제거한다. 특이점이 존재 하지 않을 때까지 적합과 제거를 반복하여 모든 특이점을 검출해 낸다.

전처리 과정에서 추가적으로 짧은 호(short arc)에 대한 정보도 산출한다. 전리층 지연오차 추정치 데이터에서 사이클 슬립으로 인한 모호정수의 변화가 있기 전까지의 연속된 데이터 즉, 같은 크기의 모호정수를 가지고 있는 연속된 데

이터 구간을 호(arc)로 정의한다. 호의 데이터 개수가 10개 이하(300초 이하)인 짧은 데이터 구간의 경우 짧은 호라고 정의하고 알고리즘에서는 이를 검출한다. 반송파 데이터의 수준화(Leveling)과정은 각 호마다 시행되므로 데이터 수가 적은 짧은 호의 경우 큰 수준화 오차를 야기할 수 있다. 사이클 슬립이 빈번하게 발생할수록 짧은 호가 발생할 확률도 높아지므로 짧은 호의 개수와 사이클 슬립의 개수는 서로 큰 상관관계를 갖는다.

두 번째로 TEQC(Translation, Editing, and Quality Check) 품질평가 소프트웨어의 알고리즘을 이용한다. TEQC는 UNAVCO에서 개발한 소프트웨어로써 GPS 데이터의 품질평가를 위해 널리 사용되고 있다. TEQC 소프트웨어의 기법을 구현하여 MP(multipath) 사이클 슬립의 개수, 관측된 데이터의 비율, 다중경로 오차를 추정한다. 관측된 데이터의 비율은 관측한 시간을 고려하여 관측이 가능한 데이터의 개수와 L1/L2 코드와 반송파 데이터가 실제로 관측된 데이터 개수의 비율이며, MP 사이클 슬립은 L1과 L2 주파수의 다중경로 오차를 이용하여 검출한 추가적인 사이클 슬립으로 IOD 사이클 슬립과 MP 사이클 슬

Table 1. Data Quality Information for Station DANG on 19 June 2004

품질정보	예	설명
Date	19 June 2004	데이터가 수집된 날짜
Station ID	DANG	
Receiver type	TRIMBLE 4000SSI	
Antenna type	Unknown External	
Possible observations (> 10 deg)	22951	관측한 시간을 고려해서 관측 가능한 데이터 개수
Complete observations (> 10 deg)	22387	L1/L2 코드와 반송파 데이터가 실제로 관측된 데이터 개수
Percentage of observations	98 (%)	(Complete observation / possible observation) x 100
Mean of SNR on L1 (> 10 deg)	N/A	L1 코드의 SNR(Signal to Noise) 평균값
Mean of SNR on L2 (> 10 deg)	N/A	L2 코드의 SNR(Signal to Noise) 평균값
# of IOD slips (> 10.0 deg)	46	관측한 시간동안 모든 위성에서 발생한 총 IOD 사이클 슬립의 개수
# of MP slips (> 10.0 deg)	16	관측한 시간동안 모든 위성에서 발생한 총 MP 사이클 슬립의 개수
# of outliers (> 10.0 deg)	8	관측한 시간동안 모든 위성에서 발생한 총 특이점의 개수
# of short arcs (> 10.0 deg)	22	관측한 시간동안 모든 위성에서 발생한 총 짧은 호의 개수
Mean of multipath on L1 code (> 10 deg)	0.0962 (m)	L1 코드 다중경로 오차의 평균값
Mean of multipath on L2 code (> 10 deg)	0.4624 (m)	L2 코드 다중경로 오차의 평균값
Receiver noise on L1 code (>10 deg)	0.0486 (m)	L1 코드 수신기 잡음의 평균값
Receiver noise on L2 code (>10 deg)	N/A	L2 코드 수신기 잡음의 평균값

립의 합계로 반송파 데이터에 발생한 총 사이클 슬립의 개수를 산출한다.

마지막 구성요소는 수신기 잡음을 추정하기 위한 적응형 필터(adaptive filter) 알고리즘이다. 코드와 반송파 관측치의 선형결합을 통해 다중경로 오차와 수신기잡음만으로 구성된 값을 쉽게 추정할 수 있다. 적응형 필터의 입력 값으로 연속된 두 날의 코드와 반송파 관측치의 선형결합 값을 사용한다. 다중경로 오차의 경우 관측소 주변 환경의 영향을 받으므로 연속된 두 날의 다중경로 오차는 큰 상관관계를 갖는 반면 두 날의 수신기 잡음은 상관관계가 적다. 따라서 적응형 필터를 통해 연속된 두 날에서 상관관계가 큰 다중경로 오차와 상관관계가 없는 수신기 잡음을 구별해낼 수 있다<sup>(7)</sup>. 하지만 관측소 주변 환경과 수신기/안테나 종류에 따라 다중경로 오차의 상관관계가 잘 드러나지 않는 경우가 존재한다. 이러한 경우에는 수신기 잡음을 구별해낼 수 없으므로 수신기 잡음에 대한 품질정보는 N/A(not available)로 표시된다.

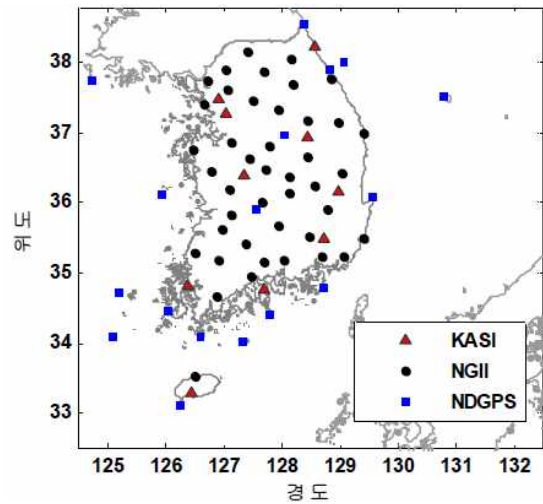
Table 1는 데이터 품질평가 알고리즘 출력 값의 한 예로 2004년 6월 19일 당사도(DANG) 상시관측소에서 수집된 데이터의 품질정보를 보여주고 있다. 수신기 종류와 안테나 종류는 수집된 RIINEX 파일의 헤더 부분에서 확인이 가능하며, SNR(Signal to Noise) 값 또한 RINEX 관측 데이터에 기록이 되어있다. 하지만 RINEX 버전에 따라 SNR기록 방법이 다르며, 일부 관측소에서만 SNR을 기록을 하고 있다. 고도가 낮은 위성의 신호는 세기가 약하고 상대적으로 많은 신호 끌림과 오차를 포함하고 있기 때문에 각 관측소의 서로 다른 품질특성을 반영하기 어렵다. 따라서 데이터의 품질 평가 과정에서 GPS 데이터의 고도 각을 10도로 제한하였다. IOD 사이클 슬립, 짧은 호, 특이점의 개수는 전리층 분석 알고리즘의 전처리 과정을 통해 산출되었고 관측된 데이터의 비율, 코드의 다중경로 오차, MP 사이클 슬립의 개수는 TEQC 기법을 이용하여 산출하였다. 마지막으로 기록이 되어있는 코드의 수신기 잡음은 적응형 필터를 통해 계산 되었다.

**2.3 데이터**

이번 절은 국내 GPS 상시관측소들의 품질평가를 위해 처리된 데이터에 대해 설명한다. 관측 데이터의 사이클 슬립, 특이점, 짧은 호 검출을 위해서 전리층 지연오차 추정치를 사용한다. 하지만 극심한 전리층 이상현상이 발생했을 때 전리층 지연오차 추정치에는 많은 교란이 나타나기 때문에 이상현상이 발생했을 당시 수집된 데이터

**Table 2. Korean GPS Reference Station Network (as of 2004)**

국내 GPS 상시관측소 운용 기관	관측소 개수
국토지리정보원(NGII)	43
위성항법중앙사무소 (NDGPS)	17
천문연구원 (KASI)	10
합계	70



**Fig. 3. GPS Reference Stations in South Korea (as of 2004)**

를 사용하면 관측소의 품질을 정확히 판별해낼 수 없다. 따라서 관측소의 품질평가를 위한 데이터로 2004년 중 전리층 상태가 안정되었다고 판단되는 연속된 7날의 국내 GPS 상시관측소에서 수집한 이중 주파수 GPS 측정치를 이용한다. Fig. 3과 Table 2에 나타나 있듯이, 2004년에 존재한 국내의 GPS 상시관측소는 총 70개로 기관별로 국토지리정보원 43개, 위성항법사무소 17개, 천문연구원 10개이다.

Table 3에는 데이터 분석을 위해 국내 GPS 상시관측소에서 데이터를 수집한 날짜와 각 날의 지자기 활동 지표인 우주기상 인덱스 Kp, Dst가 나타나있다. 적도부근에 위치한 관측소들로부터 측정되는 Kp 지표는 지구자기장의 수평성분에 대한 교란의 정도를 나타내는 지표로써 0부터 9까지의 값을 가지며 높은 Kp 값은 더욱 극심한 교란을 나타낸다. 공식적인 Kp 값은 3시간 간격으로 자기계로부터 측정된 지구자기장의 수평방향성분의 최대 변동 값으로부터 산출되며, 지자기 활동을 관측하는 관측소들의 정보를 가중 평균한 값으로 결정된다<sup>(8)</sup>. Dst 지표는 지자기활동의 지표로서 환전류(ring current)의 세기를 나타낸다. 이 값은 지구의 자기장 폭풍을 측정하기

**Table 3. Dates Analyzed to Investigate Korean GPS Reference Stations Quality**

날짜 (UT mm/dd/yy)	Kp	Dst
06/19/04	1.7	17
06/20/04	1.3	17
06/21/04	1.3	18
06/22/04	0.7	15
06/23/04	1.0	22
06/24/04	2.0	22
06/25/04	1.7	21

위해 사용되며, 지자기 활동이 심할수록 더 낮은 값을 나타낸다<sup>9)</sup>. 전리층 폭풍은 지자기 폭풍과 동반하여 발생하므로 이 두 개의 우주기상 인덱스를 이용하여 잠재적인 전리층 이상현상 발생기간을 선별할 수 있다. Table 3의 Kp와 Dst에 나타나 있듯이 처리된 연속된 7개의 날의 지자기 폭풍 단계는 매우 안정된 상태이다. 따라서 본 논문에서는 전리층 이상현상이 데이터 품질에 미치는 영향을 최소화한 상태에서 국내 GPS 상시 관측소의 관측 데이터 품질을 분석하였다.

## 2.4 결과

국내 상시관측소의 품질평가를 위해 Table 3에 해당하는 7일치의 데이터를 처리하였다. 각 날마다 각 상시관측소별로 Table 1에 해당하는 품질정보를 산출한다. Table 4는 7일치의 품질평가 데이터를 이용하여 품질지표인 IOD 사이클 슬립, 짧은 호, MP 사이클 슬립, 특이점, 관측된 데이터의 비율, 다중경로 오차에 따른 국내 상시 관측소의 품질순위를 보여주고 있다. 각 관측소에서 7일간 수집된 데이터의 평균값을 이용하여

순위를 매겼으며, 데이터 품질이 나쁜 순서로 10 번째 까지 나열하였다. 데이터 품질이 좋은 상시 관측소에서 수집한 데이터의 경우 특이점과 같은 품질지표는 0(특이점이 발생하지 않음)으로 표시된다. 이러한 관측소들은 해당지표를 이용하여 비교할 수 없으므로 Table 4에 N/A로 표시하였다. Table 4에서 특히 품질이 많이 떨어지는 상시관측소는 컬러바로 표시하였으며, 같은 상시 관측소는 같은 색으로 표시하였다. 데이터 품질이 나쁜 상시관측소는 여러 품질지표에 대해 공통적으로 품질이 저하되는 경향을 보인다. 따라서 이러한 관측소들은 품질평가를 통해 쉽게 구별해낼 수 있다. GEOM과 SEOI 관측소의 경우 여러 품질지표에서 공통적으로 품질이 나쁘게 측정된 것을 볼 수 있으며, Fig. 4부터 7까지는 이러한 품질이 저하된 데이터가 전리층 추정치에 미치는 영향을 잘 보여주고 있다.

Figure 4는 2004년 6월 21일에 기저선 거리가 58.3 km인 PUSN과 SEOI 관측소에서 관측한 PRN 06번 위성의 전리층 지연 오차를 보여준다. Fig. 4에 파란색 선분으로 표시된 PUSN 관측소의 정상적인 전리층 지연 오차 추정치는 연속되어 있는 반면, 붉은색 선분으로 나타나있는 SEOI 관측소의 전리층 지연은 많은 불연속선들을 갖는다. 이는 SEOI 관측 데이터에 많은 사이클 슬립이 발생하였기 때문이며 이로 인해 전리층 지연 오차 추정 시 많은 오차가 포함되었다. Fig. 5는 PUSN과 SEOI 관측소 사이에서 추정된 공간적 전리층 기울기 값을 나타낸다. SEOI 전리층 지연 추정과정에서의 수준화 오차로 인해 전리층 기울기 추정치에 불연속적인 짧은 호(short arc)들이 생성되었으며, 결과적으로 실제 현상이 아닌 전리층 기울기가 산출된다.

**Table 4. Rank of Korean GNSS Reference Stations in order from Worst to Best for Each Quality Parameter**

순위	IOD 사이클 슬립의 개수		짧은 호의 개수		MP 사이클 슬립의 개수		특이점의 개수		관측된 데이터의 비율		다중경로 오차	
	관측소	개수	관측소	개수	관측소	퍼센트	관측소	미터	관측소	개수	관측소	개수
1	GEOM	416.14	GEOM	365.57	SNJU	76.57	GEOM	67.43	BHAO	15	GEOM	6.6237
2	SEOI	303.29	SEOI	217.71	SEOI	66.71	MARA	2.00	BOEN	79.8	CHEN	0.3428
3	YOSU	101.43	YOSU	69.57	TABK	65.86	YNDO	1.71	KUNW	80.71	SNJU	0.2574
4	KUNW	94	KUNW	60.43	KWNJ	58.29	DANG	1.14	SEOI	81	TABK	0.2507
5	EOCH	47.43	PAJU	18.43	CHJU	57.43	N/A	N/A	TABK	82	KUNW	0.2504
6	DANG	39.57	EOCH	18.29	GEOM	55.43	N/A	N/A	HGDO	82	DAEJ	0.237
7	ULLE	38.86	ULLE	17.71	CNJU	54.25	N/A	N/A	MLDO	82.5	MKPO	0.2303
8	SNJU	38.29	SNJU	16.14	KANR	53.00	N/A	N/A	CNJU	83.5	BOEN	0.2083
9	YNDO	37.14	CHJU	16	WNJU	53.00	N/A	N/A	HONC	84.29	WOLS	0.205
10	CHJU	36.86	YANP	13.29	JINJ	51.00	N/A	N/A	SKCH	85.71	CHSG	0.2039

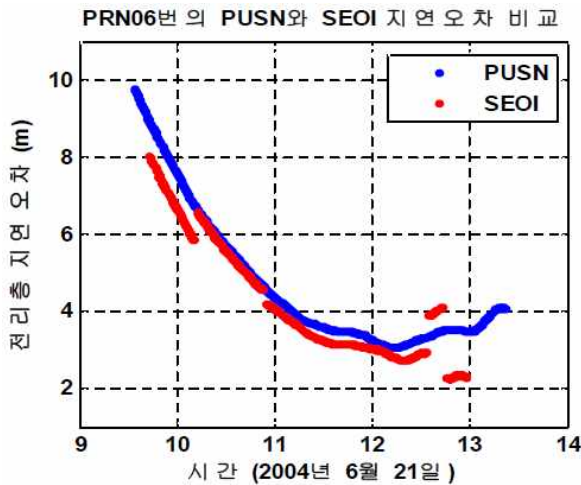


Fig. 4. Dual-frequency Slant Ionospheric Delay Estimates for Station PUSN (Good Quality Data) and SEOI (Poor Quality Data)

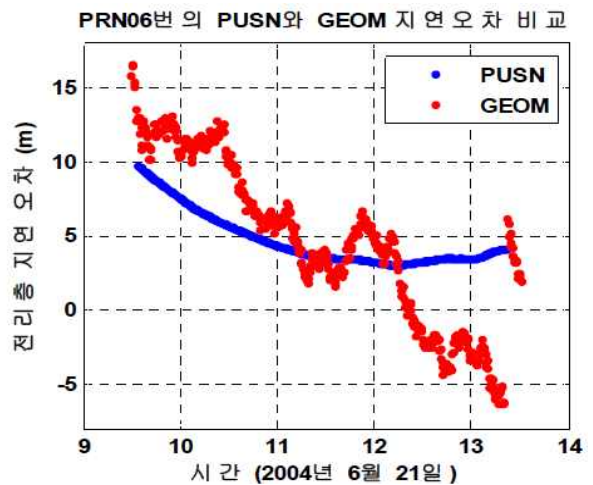


Fig. 6. Dual-frequency Slant Ionospheric Delay Estimates for Station PUSN (Good Quality Data) and GEOM (Poor Quality Data)

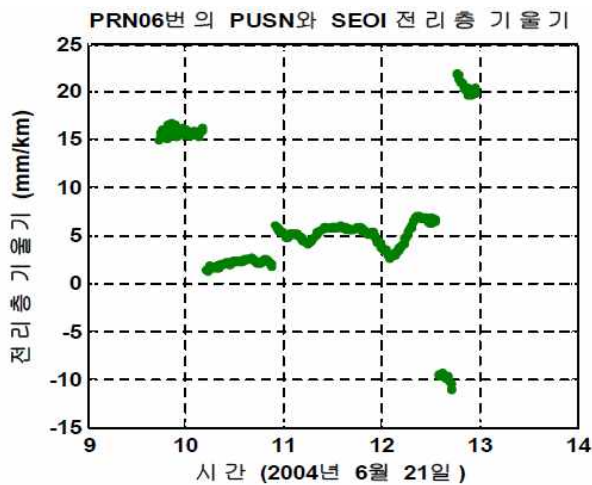


Fig. 5. Ionospheric Gradient Estimates Corrupted by Poor Quality Data from Station SEOI

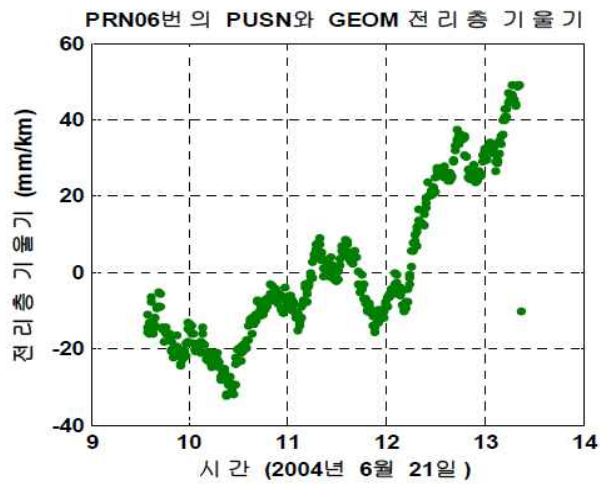


Fig. 7. Ionospheric Gradient Estimates Corrupted by Poor Quality Data from Station GEOM

Figure 6에 보이듯이, GEOM 관측소의 전리층 지연오차 추정치는 많은 교란을 포함하고 있으며, 그로인해 Fig. 7에 잘못된 전리층 기울기가 산출된 것을 볼 수 있다. 이는 품질평가 결과에 잘 반영 되어 GEOM의 다중경로 오차와 특이점의 개수 등이 나쁘게 나타난다. 전리층 분석 및 위험 모델을 구축하는 과정에서 이러한 잘못 추정된 전리층 이상현상 후보는 사람이 직접 눈으로 보고 제거하는 작업을 거쳐야하므로 전리층 분석에 많은 노력과 시간이 들어간다. 따라서 관측소의 품질을 평가하여 품질이 떨어지는 데이터를 갖는 관측소들을 미리 제거한다면 전리층 분석의 효율성을 증대시킬 수 있을 것이다.

국내 GPS 상시관측소들의 품질평가의 결과는 관측소 각각의 성능에 얼마나 큰 차이가 나는지를 보여준다. Fig. 8은 Table 3의 연속된 7일간 국내 상시관측소에서 수집된 데이터의 품질평가 결과를 보여준다. Fig. 8.a의 x축은 관측소의 ID로 총 70개이며, y축은 각 관측소에서 하루 동안 발생한 IOD 사이클 슬립의 개수를 나타낸다. Fig. 8.a에 7일 동안 데이터를 수집한 후 각 날에 발생한 IOD 사이클 슬립의 개수를 나타낸다. Fig. 8.a에 7일 동안 데이터를 수집한 후 각 날에 발생한 사이클 슬립 개수의 7일치 평균값을 관측소마다 파란 막대로 나타내었으며, 각 날의 사이클 슬립의 개수 중에서 7일치 최소값을 빨간 막

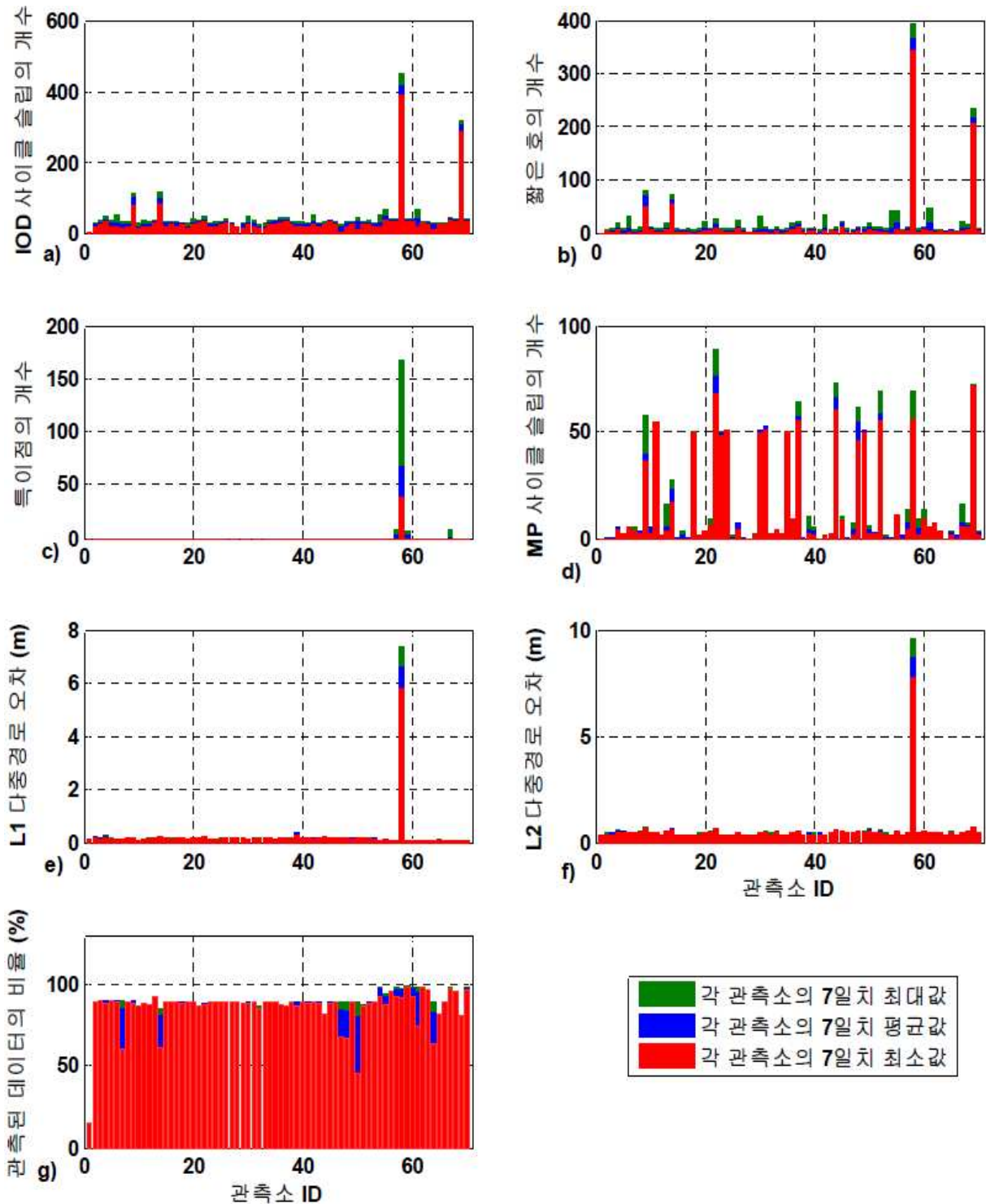


Fig. 8. Quality Parameters Measured at Each Station per Day: a) number of IOD cycle slips (mean value over all 7 days and all station is 40.04); b) number of short arcs (mean value over all 7 days and all stations is 17.21); c) number of outliers (mean value over all 7 days and all stations is 1.08); d) number of MP slips (mean value over all 7 days and all stations is 15.37); e) mean of MP1 (average of mean MP1 over all 7 days and all stations is 0.2612 m); f) mean of MP2 (average of mean MP2 over all 7 days and all stations is 0.5869 m); and g) percentage of observations (mean value over all 7 days and all stations is 89.24%);



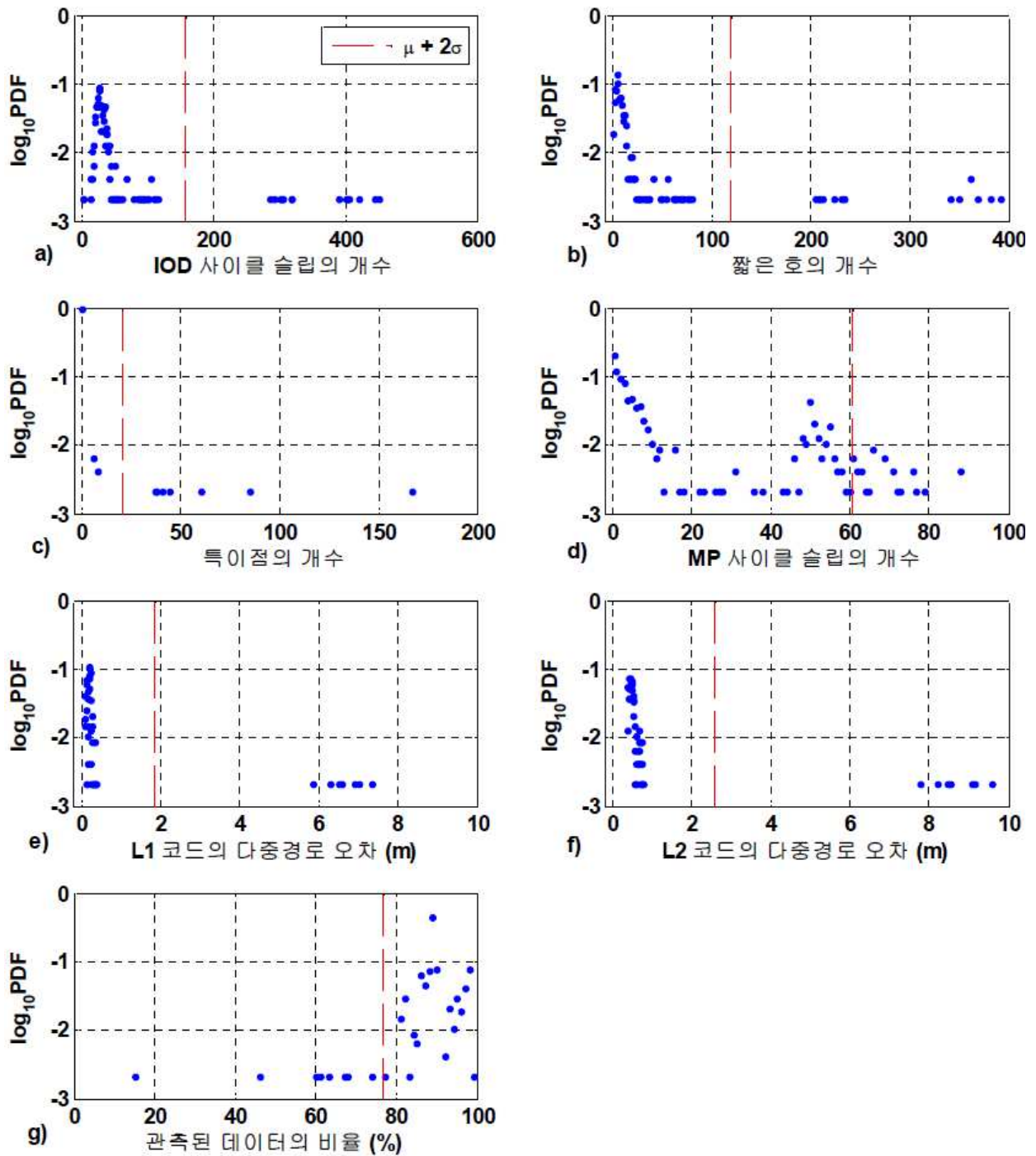


Fig. 9. Probability density function of data-quality parameters for each station per day (data collected for 7 days): a) number of IOD cycle slips; b) number of short arcs; c) number of outliers; d) number of MP slips; e) mean of MP1; f) mean of MP2; and g) percentage of observations;

대, 최대값은 초록막대로 나타내었다. 대부분 정상적인 관측소에서 수집한 데이터는 하루 동안 50개 이하의 사이클 슬립을 가지고 있으나 몇몇의 관측소에서는 50개를 훨씬 넘는 사이클 슬립이 발생했다. 이 결과는 국내 GPS 상시관측소간

에 품질마다 큰 성능 차이가 나고 있다는 것을 나타낸다. 분석된 모든 관측소에서 발생한 사이클 슬립의 평균값이 40개인데 비해, 200개 이상의 사이클 슬립이 검출된 관측소는 전체의 2.9%이며 50개 이상의 사이클 슬립이 발생한 관측소

는 5.7%나 존재한다. 대부분의 관측소에서 7일치 평균값과 최소값, 최대값이 비슷하게 나타나므로 각 상시관측소의 데이터 품질이 일정기간 유지된다는 것을 알 수 있다. Fig. 8a부터 8.g까지의 모든 품질지표에서 각 관측소마다 성능 차이가 존재하기 때문에 데이터 활용 목적에 맞는 품질지표를 선택하여 품질이 떨어지는 관측소를 미리 판단 및 제거한다면 데이터 분석 시 분석결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

Figure 9는 7일간 국내 상시관측소에서 수집한 데이터를 가지고 각 관측소에서 하루 동안 측정된 품질지표 값의 확률 밀도 함수를 나타낸다. 그 분포를 Log지수로 보여 주고 있다. 분포에서 보이듯이, 정상적인 관측소들의 데이터와 품질이 저하된 데이터들 간에 확연한 차이가 나타나고 있으며 대부분의 품질지표는 단 방향의 분포를 보인다. 앞서 설명했듯이, 짧은 호의 개수는 IOD 사이클 슬립 발생과 큰 상관관계를 가지므로 두 분포는 비슷한 형상을 갖는다. L1과 L2코드의 다중경로 오차 또한 같은 환경의 영향을 받으므로 두 분포 간에 큰 상관관계가 나타나고 있다. 하지만 각 품질지표마다 분포의 차이가 있으므로 품질이 떨어지는 관측소를 결정할 때 각 품질지표에 따라 서로 다른 기준이 고려되어야 할 것이다. 특히 IOD 사이클 슬립이나 짧은 호의 경우 Fig. 9.a와 9.b에 나타나듯이  $\mu + 2\sigma$  이상의 데이터에 대해서는(즉, 빨간색선의 오른쪽에 위치 할 경우) 극심하게 품질이 저하된 데이터로 분류할 수 있다. 여기서  $\mu$ 는 해당하는 품질지표의 7일간 수집한 데이터 평균값을 나타내며,  $\sigma$ 는 표준편차를 나타낸다. IOD 사이클 슬립 개수의 경우 40.0의 평균값과 58.7의 표준편차를 가진다. 하지만  $\mu + 2\sigma$ 를 넘는 비정상적인 데이터를 제거하게 되면 30.2의 평균값과 14.5의 표준편차를 갖는 분포로 변환된다. 따라서 정상적인 데이터를 갖는 국내 상시관측소에서 하루 동안 발생하는 IOD 사이클 슬립의 개수는 약 30개 정도로 생각할 수 있다.

### III. 결 론

본 연구에서는 GNSS 관측 데이터 품질평가 기법을 이용하여 국내 상시관측소에서 수집된 관측 데이터의 품질을 분석하였다. 각 관측소의 데이터 품질은 전리층 분석 및 전리층 위험모델 개발에 있어서 그 신뢰성에 영향을 미친다. 따라서 품질이 떨어지는 데이터를 전리층 분석 과정에서 미리 제거함으로써 전리층 분석 결과를 필요로

하는 GNSS 보강 시스템의 신뢰성을 높일 수 있다. 국내에서 운용중인 관측소들의 데이터 품질을 분석한 결과, 각 품질지표에서 관측소간 데이터 품질의 차이가 크게 나타나고 있음을 확인하였으며 이 품질은 일정기간 유지 되는 것을 알 수 있었다. 또한 품질결과가 저조하게 나온 관측소의 데이터는 전리층 지연오차 및 기울기 추정치에 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

GNSS 응용분야가 확대되었고 전 세계적으로 GNSS 관측소가 증가함에 따라 정확하고 신뢰성 있는 관측 데이터를 산출하는 관측소를 데이터 활용목적에 맞게 판별할 필요가 있다. RTK(Real-Time Kinematic), GPS 위성의 정밀케도결정, 지구 회전계수(ERP, Earth Rotation Parameter) 추정 등 고정밀 GPS 활용분야에 있어서 데이터의 품질은 자료처리의 성능에 큰 변수로 작용한다. 본 논문의 결과는 국내 GPS 관측 데이터를 이용하는 다양한 분야에서의 성능향상에 도움을 줄 수 있으며, 특히 항공용 GNSS 보강시스템을 위한 전 지구적, 지역적 전리층 위험모델 구축에 응용될 수 있다.

### 후 기

본 연구는 국토해양부 항공용 위성항행 통신 시스템 개발사업(10항공-항행01)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

### References

- 1) Enge, P., "Local Area Augmentation of GPS for the Precision Approach of Aircraft," Proceedings of the IEEE, Vol. 87, No. 1, January 1999, pp. 111~132.
- 2) Datta-Barua, S., Lee, J., Pullen, S., Luo, M., Ene, A., Qiu, D., Zhang, G., and Enge, P., "Ionospheric Threat Parameterization for Local Area Global-Positioning-System-Based Aircraft Landing Systems," AIAA *journal of aircraft*, Vol. 47, No. 4, Jul. 2010, pp. 1141-1151.
- 3) Pullen, S., Park, Y. S., and Enge, P., "Impact and mitigation of ionospheric anomalies on ground-based augmentation of GNSS," *Radio Sci.*, 44, RS0A21, doi:10.1029/2008RS004084.
- 4) Kim, M., Lee, J., Pullen, S., and Gillespie, J., "Data-Quality Improvements and Application

of Long Term Monitoring of ionospheric Anomalies for GBAS," Proceedings of ION GNSS 2012, Nashville, TN, Sept. 17-21, 2012, pp. 2159~2174.

5) Park, K., and Won, J., "The foliage effect on the height time series from permanent GPS stations," *Earth Planets Space*, Vol. 62, Issue 11, 2010, pp. 849-856.

6) Park, K., Kim, H., and Won, J., "Analysis of Site Environment at Permanent GPS Stations Operated by National Geographic Information Institute", *Journal of the Korean Society of*

*Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 25, No. 4, 2007, pp. 337~345.

7) Ge, L., Han, S., and Rizoz, C., "Multipath Mitigation of Continuous GPS Measurements Using an Adaptive Filter", *GPS solutions*, Vol. 4, Issue 2, 2000, pp. 19-30.

8) Menvielle, M., and Berthelier, A., "The  $K$ -derived planetary indices: Description and availability," *Rev. Geophys.*, 29(3), 415-432, doi:10.1020/91RG00994.

9) Sugiura, M., and Kamei, T., "Equatorial Dst index 1957-1986," *IAGA bull.*, 40, pp. 7~14.