

論文

GNSS를 이용한 전리층 기울기 추정 방법 비교

김정래*, 정명숙

Comparison of Ionospheric Spatial Gradient Estimation Methods
using GNSS

Jeongrae Kim*, MyeongSook Jeong

ABSTRACT

The high ionospheric spatial gradient during ionospheric storm is the most concern when applying GNSS(Global Navigation Satellite System) augmentation systems for aircraft precision approach. Since the ionospheric gradient level depends on geographical location as well as the storm, understanding the ionospheric gradient statistics over a specific regional area is necessary for operating the augmentation systems. This paper compares three ionosphere gradient computation methods, direct differentiation between two receivers' ionospheric delay signal for a common satellite, derivation from a grid ionosphere map, and derivation from a plate ionosphere map. The plate map method provides a good indication on the gradient variation behavior over a regional area with limited number of GNSS receivers. The residual analysis for the ionosphere storm detection is discussed as well.

Key Words : GNSS(위성항법시스템), Ionosphere(전리층), Ionosphere gradient (전리층 기울기), Ionosphere storm (전리층 폭풍)

1. 서 론

단시간 내에 전리층 지연값이 국지적으로 급격히 변화하는 전리층 폭풍은 GBAS (Ground Based Augmentation System) 지상국에서 받는 GNSS (Global Navigation Satellite System) 신호에 포함된 전리층 지연값과 접근절차 중인 항공기에서 받는 GNSS 신호에 포함된 전리층 지연값 위치 사이에 급격한 차이를 유발하여, 항공기에서 보정 신호를 사용하더라도 상당한 신호 지연 오차를 유발하게 된다. 현재 GNSS를 이용한 항공기 이착륙용 위성항법 시스템의 가장 큰 문

제점은 전리층 폭풍에 의한 무결성(integrity) 및 가용성(availability) 저하로써 이를 해결하기 위해 미국 등에서는 많은 연구가 진행되고 있다. 전리층 지연값 차이의 세기는 전리층 기울기로 나타낼 수 있는데, 이는 두 지점에서 수신한 GNSS 신호에 포함된 전리층 지연값을 두 지점 사이의 거리로 나누어 준 것이다. 전리층 기울기는 전리층 폭풍 발생 시 급증하게 되며, 전리층 폭풍의 세기를 나타내는 척도로도 사용될 수 있다.

전리층 폭풍의 발생 경향 및 세기는 지역별로 차이가 많으므로 특정 지역에서 GBAS를 운용하려면 그 지역의 전리층 활동에 관한 데이터베이스를 구축할 필요가 있다. GBAS에는 실시간 전리층 기울기 정보를 GNSS 보정정보에 포함시켜 전송하게 되는데, 이를 위해서는 GBAS 설치 지역의 전리층 기울기 경향을 파악할 필요가 있다. 전리층 폭풍 발생 빈도 및 세기 등은 지역마다

† 2007년 6월 15일 접수 ~ 2007년 6월 21일 심사완료

* 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처자, E-mail : jrkim@kau.ac.kr
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1

편차가 심하므로 특정 지역의 전리층 변화를 장기간에 걸쳐 분석하여 그 지역의 전리층 변화 경향 통계치인 threat space를 구성해야 한다.

미국에서는 스탠포드 대학을 중심으로 2000년 이후 WMS (WAAS Monitor Station) 및 CORS (Continuously Operating Reference Stations) GPS 데이터를 분석하여 북미 지역의 threat space를 보완하고 GBAS 및 SBAS (Satellite Based Augmentation System)에 대한 다양한 영향 평가를 수행해오고 있다[1]. 전리층폭풍 시 최대 기율기를 계산하여 데이터베이스를 구축하고 있는데, 최대값 및 분포 계산 등 통계적인 측면에서 접근하고 있다. 노이즈에 의한 전리층 지연값 급증을 실제 전리층폭풍에 의한 것과 구별하기 힘들기 때문에, 분석 방법에 따라 최대 전리층기율기가 바뀌고 있다. 정상상태일 때 기율기는 5 mm/km 이내이지만 폭풍 시에는 80 mm/km까지 증가하며, 최근 연구로는 수 백 mm/km에 이르는 것으로도 나타나고 있다. 스탠포드 대학에서는 시뮬레이션을 통해 전리층 기율기와 GBAS 무결성 및 가용성에 미치는 영향도 분석하고 있는데, 기율기가 10 mm/km 정도만 되어도 가용성을 상실하는 것으로 파악되었다 [2].

일본의 경우 1200여 개의 측지용 GPS 수신기를 통합한 GEONET을 운영하고 있는데, 이를 분석하여 ENRI (Electrical Navigation Research Institute) 등에서는 계절별 전리층 기율기 특성을 분석하는 연구를 수행하고 있다. 일본의 전리층 분포는 우리나라와 가장 유사하므로 좋은 참고 자료가 될 수 있다. 일본의 경우 전리층 기율기 분포와 Gauss 정규 분포와의 차이를 분석하였는데, 정규 분포와 많은 차이를 보이는 연구 결과를 얻었으며, 계절별로도 또한 많은 차이가 발생한다는 사실을 확인하였다[3,4,5].

이와 같이 국내에 위성항법 시스템 구축을 위해서는 한반도 전리층 분포 및 전리층 기율기에 대한 연구 및 threat space를 구축하는 것이 필요하다. 이를 위해 우선 전리층 기율기를 분석할 수 있는 도구 개발 및 이를 이용한 전리층 기율기 변화에 대한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 GBAS 및 무결성 감시시스템(integrity monitoring system)에 전리층 관련 기능을 적용하기 위한 기본 단계로 한반도 전리층 기율기 경향을 분석하였다. 이를 위해 전리층 기율기 계산 방식들을 연구하였으며, 3가지 방법에 대한 전리층 기율기 분석 프로그램을 개발하였다. 2003년 국토지리정보원 상시관측소 데이터를

분석하여, 전리층폭풍이 일어난 시기의 전리층 기율기 변화를 주로 분석하였으며, 전리층폭풍 감지 기능에 관한 연구도 수행하였다.

II. 전리층 기율기 추정 방법

전리층 지연값 기율기를 계산하는 방법은 몇 가지가 있는데, (1)동일한 위성에 대해 두 개의 수신기에서 관측된 전리층 지연값의 차이를 계산하는 방법 (2) 한 개의 수신기에서 관측시간차이를 이용한 차분 방법 및 (3)전리층 지도를 생성한 후에 gradient를 계산하는 방법 등을 들 수 있다.

첫 번째 방법은 공간차분 방법으로 부를 수 있는데, 특정 시간에서 동일한 위성(k)으로부터 관측된 두 개 수신기(i, j)의 전리층 지연값을 수직 지연값(VTEC- Vertical TEC)으로 변환한 뒤 이를 차분하고 수신기 사이의 거리(d_{ij})로 나누어 주는 방법이다.

$$g_{ij}^k = \frac{VTEC_i^k - VTEC_j^k}{d_{ij}} \quad (1)$$

이 경우 수신기마다 L1-L2 바이어스 값이 상이하므로 이로 인한 전리층 지연 오차는 미리 보정해 주어야 한다. 남북방향 및 동서방향 기율기를 구하기 위해서는 기율기값에 방위각(Azimuth)의 삼각함수를 취하면 된다.

두 번째 방법은 시간차분 (time differentiation) 방법으로 부를 수 있는데, GPS 위성의 위치가 시간에 따라 변화하고 GPS 신호가 통과하는 전리층 영역도 변화하는 것을 이용하는 것으로, 시간 차이가 나는 두 개의 신호를 수직 지연값(VTEC)으로 변환한 뒤 이를 차분하고 전리층 통과지점(IPP- Ionospheric Pierce Point) 사이의 거리에 해당하는 지상거리로 나누어준 것이다[6].

$$g_i^k = \frac{VTEC_i^k(t_{m+1}) - VTEC_i^k(t_m)}{d_{t_{m+1}-t_m}} \quad (2)$$

Fig. 1은 공간차분과 시간차분에 의한 전리층기율기 계산 방법을 비교한 것이다.

세 번째 방법은 전리층 지도를 이용하는 것인데, 전리층 지연값으로부터 전리층지도를 생성한 후, 이의 공간 기율기(spatial gradient)를 계산하는 것이다. 계산방법에는 SBAS와 같은 격자점

(grid) 전리층지도를 이용하는 방법과 함수 모델(functional) 전리층 모델을 이용하는 방법이 있다. 격자 모델을 사용하는 경우 남북 방향 및 동서 방향으로 인접 격자점의 수직전리층 지연값 차이를 격자점 간격으로 나눠 주게 된다. 함수모델을 사용하는 경우에는 함수 계수로부터 해석적으로 기울기를 계산하게 된다.

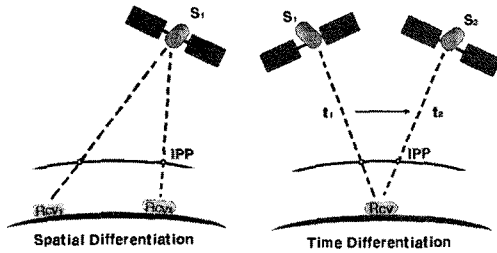


Fig. 1 차분에 의한 전리층 기울기 계산방법 비교 (좌- 공간차분, 우-시간 차분)

전리층 지연값 차이는 실제 전리층 지연값 차이에 의한 것 이외에도 수신기 오차나 노이즈 등에 의해서도 관측되는데, 공간 및 시간 차분 방법은 직접적인 관측값 비교이므로 노이즈 등에 매우 취약한 특성이 있다. 이에 비해서 전리층지도 차분 방법은 어느 정도 평균화된 값을 이용하므로 노이즈에 덜 영향을 받게 되지만, 최대 기울기 등을 파악하는 데는 불리하다.

현재, 가장 많이 사용되는 방법은 공간 차분 방법인데, 수신기 수와 관측값 수가 많을 경우 노이즈의 평균 효과 (Noise averaging)가 있기 때문에, 전리층 기울기 분포 및 최대 기울기 등 통계 정보를 계산하는데 유용하다. 하지만, 데이터 수가 적을 경우 노이즈 효과에 의해 의미 있는 통계 정보를 얻을 수 없다. 수 백개의 수신기 데이터를 이용하는 외국에 비해, 10여개의 국내 상시관측소 데이터를 분석할 경우에는 데이터가 충분하지 않기 때문에 노이즈에 의한 영향이 너무 커서 공간 차분 방법은 적합하지 않다.

본 연구에서는 공간차분 방법과 지도차분 방법을 이용하여 전리층 기울기를 계산하고, 이에 대한 비교 분석을 수행하였으며, 지도차분 방법의 경우 격자모델지도와 함수모델지도를 각각 사용하였다. 함수모델지도의 경우 전리층 분포를 다음과 같은 판 모델로 가정하였다.

$$\alpha x + \beta y + z = \gamma \quad (3)$$

여기서 x 는 IPP (Ionosphere Piercing Point) 경도, y 는 IPP 위도, z 는 VTEC값이다. VTEC 관측값을 이용하여 판모델 계수를 추정하게 되는데, α 는 동서방향 기울기를 의미하고, β 는 남북방향 기울기를 의미한다. Fig. 2는 판모델 전리층 지도를 나타내고 있다.

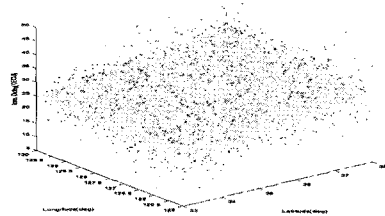


Fig. 2 전리층 판 모델

한편, 시간 차분 방법은 위성 진행 경로상의 기울기만 알 수 있고, GBAS의 단독 수신기 시스템에서 실시간으로 전리층 기울기 변화를 파악하는데 유리한 방법이므로, 본 연구에서는 사용하지 않았다.

III. 전리층 기울기 추정 및 분석

3.1 GPS 데이터 처리

국토지리정보원 상시관측소에서 측정된 데이터를 사용하여 전리층 기울기 변화를 분석하였다. 14개 상시관측소의 위치는 Fig. 3에 표시되어 있는데, 전국적으로 골고루 분포되어 있다. 본 논문에서는 2003년 데이터를 사용하였는데, 이는 2003년이 다른 해에 비해 상대적으로 전리층폭풍이 많이 발생했던 해이기 때문이다. GPS 수신기는 Trimble 4000SSI 이중주파수 측지용 수신기이며, 30초 간격의 의사거리와 반송파 데이터를 RINEX 형식의 파일로 제공한다.

이중주파수 의사거리 관측값을 반송파를 이용하여 smoothing 한 후 전리층에 의한 지연값을 계산하였다. Cycle slip 등을 검사하여 품질이 좋지 않은 데이터는 제거하는 전처리 과정을 수행한 후, 다항함수를 이용하여 수신기와 GPS 위성 간의 바이어스 (SATBIAS)를 추정하였다. SATBIAS는 GPS 송수신회로에서 P1과 P2 신호 차이에 의해 발생하는 것으로, 이에 의한 오차가 수 십 TECU (Total Electron Contents Unit)에 이

르기 때문에 전리층 지연값 추정 시 반드시 보정을 해 주어야 한다. 단, 이중주파수 조합에 의한 전리층 지연값 제거 시에는 상쇄되므로 고려할 필요가 없다[7].

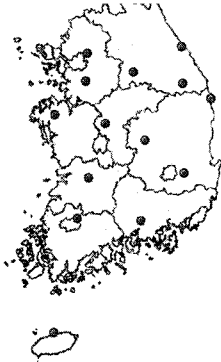


Fig. 3 국토지리정보원 상시관측소 분포

공간차분 방법은 SATBIAS가 보정된 전리층 지연값을 차분하여 전리층 기율기를 계산하고, 지도 차분 방법은 우선 전리층 지도를 생성한 후 격자점 지도를 차분하거나, 판 모델 지도의 계수를 이용하여 기율기를 계산하게 된다. 전리층 지도의 격자모델은 1°x1° 간격을 사용하였고, 판 모델은 5°x5° 크기의 단일 판을 사용하였다.

3.2 전리층폭풍 발생 경향

전리층폭풍 발생 시 전리층 기율기 변화 분석이 주목적이므로 전리층폭풍 발생 시기를 파악할 필요가 있는데, 전리층폭풍의 세기는 지자기장계수와 밀접한 상관관계가 있다. 지자기장 세기는 주로 고위도지방에 위치한 지상 관측소로부터 수집한 정보를 이용하여 나타내는데, Kp를 사용할 경우 0에서 9까지의 범위를 가지며 6이상일 경우 강한 지자기 폭풍의 발생을 의미한다. 이외에 적도지역 ring current 활동과 관련 있는 Dst (disturbance storm time) 지수도 지자기장 세기를 나타내는데, 최근 연구 결과로는 Kp 보다 전리층폭풍 발생과의 상관관계가 더욱 큰 것으로 나타나고 있다.

미국 NOAA 및 NASA 등에서는 지자기장 계수 Kp나 Dst를 기준으로 하여 전리층폭풍 발생 시기 등을 제공하고 있는데, Fig. 4는 2003년 전리층폭풍 발생 시 Kp와 Dst값을 나타내고 있다 [8]. Dst를 기준으로 할 때 최근 가장 강력한 전리층폭풍이 발생한 것은 2003년 10월30일과 11월 20일로 이때의 Dst는 -401과 -472에 이르렀다[9]. 당시 미국 WAAS(Wide Area Augmentation

System)은 몇 일간 가용성을 상실하기도 하였다.

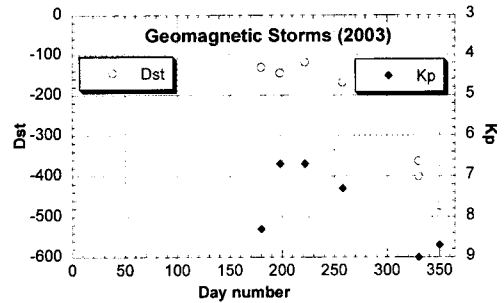


Fig. 4 전리층 폭풍 발생 시 Kp와 Dst- 2003년

3.3 전리층 기율기 분석 결과 비교

본 논문에서는 강력한 전리층폭풍이 발생한 2003년 11월 20일 데이터에 관한 결과를 주로 분석하였다.

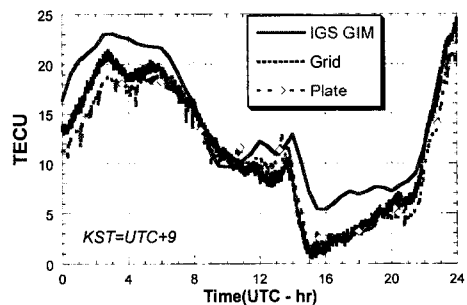


Fig. 5 전리층 지연값 추정치 비교 (2003년 11월 20일)

Fig. 5는 2003년 11월 20일 전리층 지연값 (TEC) 변화량을 나타낸 것인데, 격자모델에 의한 값과 판 모델에 의한 값을 비교하였다. IGS (International GNSS Service)의 GIM (Global Ionosphere Model)값을 기준으로 사용하였는데[10], 격자모델과 판모델은 거의 동일한 경향을 보이며, GIM보다는 약간 낮은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 격자모델과 판모델 모두 동일한 SATBIAS 추정값을 사용하기 때문으로, 200여개의 수신국 데이터를 사용하고 다른 전리층추정 기법을 사용하는 GIM 결과와는 차이가 발생할 수밖에 없다. 격자모델과 판모델의 차이는 매우 작은데, 1도 간격의 높은 해상도를 사용하더라도 크게 차이가 없음을 알 수 있다.

Fig. 6 ~ 9는 2003년 11월 20일 전리층 기율기 변화를 공간차분과 격자모델 및 판모델을 이용하여 계산한 것이다.

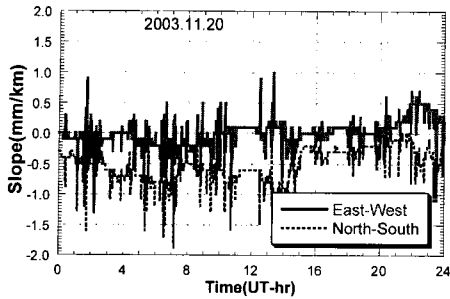


Fig. 6 전리층 기울기 변화
(2003년 11월 20일-공간차분-평균값)

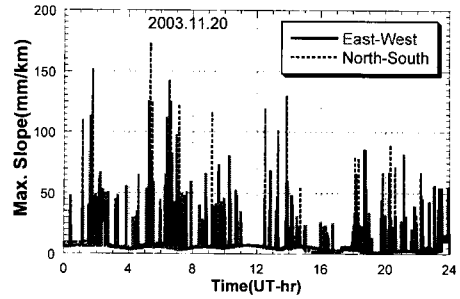


Fig. 9 전리층 기울기 변화
(2003년 11월 20일-공간차분-최대값)

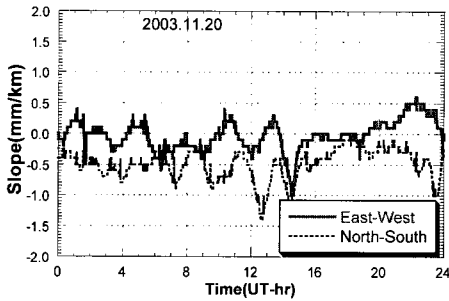


Fig. 7 전리층 기울기 변화
(2003년 11월 20일- 격자모델 방법)

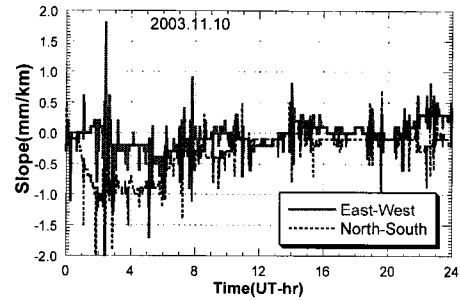


Fig. 10 전리층 기울기 변화
(2003년 11월 10일-공간차분-평균값)

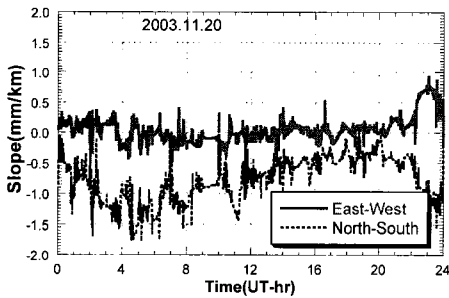


Fig. 8 전리층 기울기 변화
(2003년 11월 20일- 판 모델 방법)

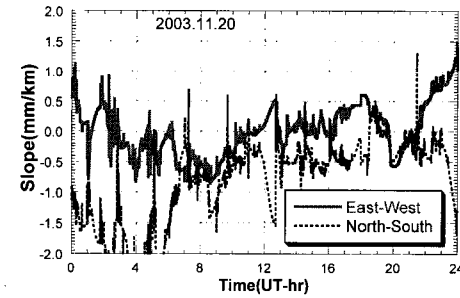


Fig. 11 전리층 기울기 변화
(2003년 11월 10일- 판 모델 방법)

매 30초마다 남북 및 동서 방향 기울기를 계산하였으며, 기울기의 급격한 변화를 분석하기 위해 필터링은 사용하지 않았다. Fig. 6의 공간차분 결과는 매 순간의 기울기의 평균을 표시한 것이며, Fig. 9의 공간차분 결과는 매 순간의 기울기의 최대 절대값을 표시한 것이다. 전리층폭풍 발생 시와 평상시의 비교를 위해 전리층폭풍이 발생하지 않은 2003년 11월 10일의 전리층 기울기도 계산하였는데, 공간차분 결과와 판 모델 결과가 Fig. 10과 11에 도시되어 있다.

우선, 공간차분에 의한 11월 20일과 11월 10일 결과(Fig. 6과 10)를 보면 전리층 기울기가 형태가 불규칙하고, 스파이크도 많이 발생함을 알 수 있다. 두 경우 모두 동서 방향과 남북방향 기울기를 비교하면 대부분 남북방향 기울기가 크게 나타남을 확인할 수 있다. 동서방향의 경우 거의 0에 가까우며 부호가 변화하는데 비해 남북방향은 대부분 음수를 나타내고 있으며 이는 북쪽의 TEC값이 남쪽의 TEC값보다 높다는 것을 의미한다. 남북 방향 기울기는 4 UTC (13 KST) 부근에서 최대값을 가지는데, 이는 태양광이 비치는 낮에 적도 부근에 존재하는 전리층 변이 (Ionosphere anomaly) 가 남북 방향의 급격한 기

울기를 유발한다는 사실과 일치한다. 밤 시간인 18 UTC (3 KST) 근방에서는 양방향 기율기가 모두 0에 가까워 기율기 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

전리층 폭풍 시 3가지 방법사이의 결과 (Fig. 6, 7 및 8)를 비교해보면 공간차분 결과에 비해 판 모델 결과가 좀 더 완만한 변화 경향을 보이며, 스파이크 또한 적음을 알 수 있다. 이에 비해 적자모델 결과는 약간 다른 경향을 나타내고 있는데, 4UTC 대신 12UTC에서 최대값을 가지며, 2시간 주기로 변화하는 특성을 보이고 있다. 이러한 주기성의 원인은 좀 더 연구가 필요하다. 3가지 경우 모두 평상 시 결과(Fig. 10와 11)와는 달리 12 UTC 근방에서 급증하는 경향을 보이는데, 이 때가 전리층폭풍이 한반도에 영향을 준 시간으로 생각된다. 하지만, 전리층 활동이 약한 밤시간(21KST)에 가해졌기 때문에 전리층기율기 변화량은 크지 않았다.

공간차분과 판모델 결과(Fig. 6과 8 및 Fig. 10과 11)를 비교해보면, 판 모델이 좀 더 완만한 변화를 보여주고 있음을 알 수 있다. 전리층 기율기 최대값 변화 등을 파악하는 데는 공간차분 방식이 적합하지만 노이즈에 의한 성분도 포함되어 있으므로, 이를 구분하는 것이 힘들며, 기율기 경향성을 파악하는 데는 판모델 방법이 유용하다는 것을 확인할 수 있다.

3.4 관측값 잔차율 분석

전리층폭풍 발생 여부를 확인하기 위해 판모델 사용 시 잔차값(post-fit residual)을 계산해 보았으며, 각 순간의 잔차값 RMS를 계산한 후 동일 시점의 평균 TEC에 대한 비율을 계산하였다.

Fig. 12과 13은 2003년 11월 10일과 11월 20일의 잔차값을 나타낸 것으로, 전리층폭풍 발생 시 (Fig. 13) 잔차율 증가가 두드러짐을 확인할 수 있다. 저녁 시간(UTC 12~20)에 잔차율이 증가하는 것은 이 때 평균 TEC값이 낮아서 이에 대한 잔차값의 비율이 증가하기 때문이다. 추가 분석을 위해 2년 후인 2005년 11월 20일의 잔차율을 계산하여 Fig. 14에 도시하였다. 이때는 전리층폭풍이 없을 때이며, 2005년은 2003년에 비해 전리층 활동이 약할 때이다. 2003년 데이터에 비해 훨씬 완만한 변화를 나타냄을 알 수 있다. 전리층폭풍 시 이러한 잔차율 증가는 다른 날짜 데이터에서도 관측되는 현상으로 측정값 잔차율이 전리층폭풍 감지에 사용될 수 있음을 알 수 있다. 하지만, 이를 정량적으로 접근하기 위해서는 가설검증 및 정규분포 검사 등에 관한 훨씬

복잡한 알고리즘이 필요하며, 추가 연구가 필요하다. 실제로 이러한 잔차를 이용한 전리층폭풍 감지는 SBAS에서 사용하고 있다.

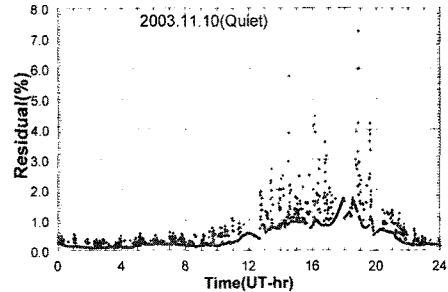


Fig. 12 판 모델 잔차율 변화 (2003년 11월 10일-정상 상태)

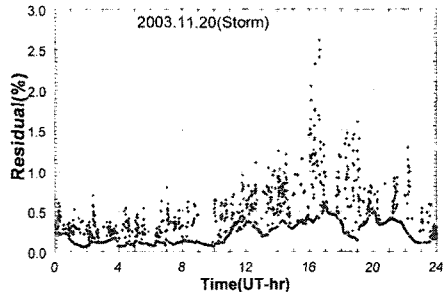


Fig. 13 판 모델 잔차율 변화 (2003년 11월 20일-전리층폭풍)

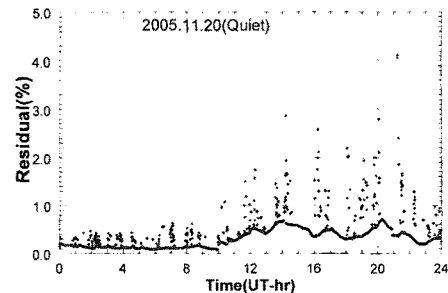


Fig. 14 판 모델 잔차율 변화 (2005년 11월 20일-정상 상태)

IV. 결론

전리층폭풍 시 전리층기율기의 급증은 현재 GBAS나 SBAS 등의 항공기접근 절차 적용을 막는 주요한 요인이다. 전리층 분포는 지역별로 편차가 크게 나므로, 전리층 기율기 변화 경향도 지역 별로 많은 편차가 있고, GBAS나 SBAS 등

을 운용할 시에는 특정 지역에 대한 전리층 기율기 분포 및 변화 경향을 파악할 필요가 있다. 본 연구에서는 한 개의 공통 위성에 대한 두 개의 수신기 신호를 차분하는 공간 차분 방법과 격자 모델 전리층 지도와 판모델 전리층 지도로부터 기율기를 계산하는 방법을 사용하여 전리층 기율기 계산 결과를 비교하였다.

판 모델은 공간차분 방법에 비해 완만한 전리층 기율기 변화를 얻을 수 있었으며, 수신기 노이즈 등에 비교적 강한 특성을 보였다. 공간 차분 방법은 순간 최대 기율기를 제공한다는 장점이 있으나, 노이즈와의 구분이 어렵다는 단점이 있다. 한편, 판 모델의 관측값 잔차를 분석하여 전리층폭풍을 감지에 관한 기본 연구결과를 제시하였다. 이러한 비교분석 결과로부터 수신기 수가 제한된 좁은 영역에서 국지적인 전리층 기율기 변화 경향을 파악하는 데는 판 모델 방법이 유용한 방법이 될 수 있음을 확인할 수 있었다. 공간 차분 방법을 이용할 경우에는 수신기 개수 증가가 선행되어야 하고, 수신기 노이즈 감지 기법에 관한 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 건설교통부 항공용 위성항법시스템 기반기술개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, GPS 자료를 제공한 국토지리정보원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Datta-Barua, S., T. Walter, J. Blanch, and P. Enge, "Can WAAS Availability Be Inferred From Geomagnetic Data? An Analysis", Proceedings of the Ionospheric Effects Symposium 2005, Alexandria, Virginia, 2005.5.
[2] Luo, M., et. al., "LAAS Ionosphere Spatial Gradient Threat Model and Impact of LGF and

Airborne Monitoring", Institute of Navigation's GPS/GNSS Meeting, Portland, Oregon, 2003.9.

[3] H. Konno, S. Pullen, M. Luo, and P. Enge, "Analysis of Ionosphere Gradient Using Japan GEONET Data", Institute of Navigation's National Technical Meeting, San Diego, California, USA, Jan. 2005.

[4] T. Yoshihara, Fujii, N., and Saito, A., "A study of the ionospheric effect on GBAS (Ground-Based Augmentation System) using the nation-wide GPS network data in Japan", Institute of Navigation, ION NTM 2004, San Diego, California, USA, Jan.2004

[5] T. Yoshihara, T. Sakai and N. Fujii, and A. Saito, "An Investigation of Local-Scale Spatial Gradient of Ionospheric Delay Using the Nation-Wide GPS Network Data in Japan", Institute of Navigation, ION NTM 2005, San Diego, California, USA, Jan.2005.

[6] J. Lee,, S. Pullen, S. Datta-Barua, and P. Enge, "Assessment of Nominal Ionosphere Spatial Decorrelation for LAAS", IEEE/ION Institute of Electrical Position Location and Navigation Symposium, San Diego, California, USA, April 2006.

[7] 한재호, 임삼성, "GPS 정밀도 향상을 위한 전리층 지연 효과에 관한 연구", 10차 GNSS Workshop, pp. 441-445, 2003.9.

[8] NASA GSFC Geomagnetic Index Web site, http://cdaw.gsfc.nasa.gov/geomag_cdaw/Data_master_table.html

[9] M. Hernandez-Pajares et al., "EGNOS Test Bed Ionospheric Corrections Under the October and November 2003 Storms", IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 43, no.10, October 2005, pp.2283-2293.

[10] CODE GIM Web site <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>