

위성항법시스템 적용을 위한 전리층 지연값 기울기 연구

Analysis of Ionospheric Spatial Gradient for Satellite Navigation Systems

김정래*, 양태형, 이은성, 전향식

(Jeongrae Kim, Tae Hyoung Yang, Eun Sung Lee, and Hyang Sig Jun)

Abstract : Ionospheric storms, caused by the interaction between Solar and geomagnetic activities, may degrade the differential GNSS(Global Navigation Satellite Systems) performance significantly, and the importance of the ionospheric storm research is growing for the GBAS(Ground-Based Augmentation System) and SBAS(Satellite-Based Augmentation System) development. In order to support Korean GNSS augmentation system development, a software tool for analyzing the regional ionosphere is being developed and its preliminary results are discussed. After brief description of the ionosphere and ionospheric storm, the research topics on the GBAS applications are discussed. The need for ionospheric spatial gradient analysis is described and some results on the ionospheric spatial gradient during recent storm periods are discussed.

Keywords : ionosphere, ionospheric storm, ionospheric spatial gradient, ionospheric map, GBAS, SBAS

I. 서론

GNSS(Global Navigation Satellite System) 신호에 지상국에서 계산된 보정 신호를 결합하여 항공기 이착륙에 사용되는 GBAS(Ground-Based Augmentation System)의 구현에 가장 큰 문제는 전리층폭풍에 의한 무결성 감소 및 가용성 감소이다. 태양활동과 지자기활동의 상호 작용으로 발생하는 전리층 폭풍은 단시간 내에 전리층 지연값을 국지적으로 급격히 변화시키는 현상으로 GBAS 지상국 위치와 항공기 위치 사이에 급격한 전리층 지연 차이를 유발하여, 항공기에서 보정 신호를 사용 하더라도 상당한 거리 신호 오차를 유발하게 된다. SBAS(Space-Based Augmentation System)도 유사한 문제점을 가지고 있으며, 현재 위성항법 보정 시스템 적용에서 전리층 폭풍에 의한 성능 저하는 가장 중요한 문제점이다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 연구 기관에서 전리층폭풍의 특성 규명 및 이의 GBAS/SBAS 적용을 위한 연구를 수행하고 있다. 위성항법시스템의 적용에 앞서 전리층 변화 경향 및 영향에 대한 분석이 선행되어야 하는데, 현재 국지적인 전리층 지연값 차이 분석이 주요 연구 대상이다.

본 논문에서는 한국형 GBAS 시스템 개발의 일환으로 수행되고 있는 전리층폭풍 연구 및 이의 GBAS 적용에 대해 다루고 있다. 최근 전리층폭풍 연구동향에 대해 살펴보고, 지역적인 전리층 기울기 분석이 필요한 근거에 대해 설명하였다. 전리층 지연값 분석을 위해 GPS 데이터를 처리하여 전리층 지연값 분포를 추정하는 프로그램을 개발하였으며, 이를 바탕으로 전리층 기울기를 계산하여 한반도 상공 전리층 분석 기본 결과를 제시하였다.

II. 전리층 폭풍

전리층 분포는 지리 위도가 아닌 지자기 위도에 따라 다른 경향을 나타내는데, 적도, 중위도, 천이 및 오로라 영역으로 구분할 수 있다[1]. 지자기 적도에서 $\pm 20^\circ$ 이내인 적도 영역은 가장 높은 TEC(Total Electron Content) 값을 가지며, 변화 크기 또한 활발하다. 이는 적도 변이(equatorial anomaly) 영역이라고도 불리며, 전리층 폭풍이 없는 평상시에도 전리층 지연값의 급격한 변화가 관측되는 곳으로, GNSS 활용에 많은 문제가 되는 지역이다. 고위도의 오로라 영역 및 천이 영역은 평상시에는 낮은 TEC값을 가지지만 전리층 폭풍 발생 시 북쪽의 오로라 영역 팽창에 의해 가장 직접적인 영향을 받게 된다. 한국이 속한 중위도 지역은 상대적으로 전리층 폭풍이나 적도 변이 등에 의한 영향이 작은 지역이다. 하지만, 적도 변이 영역 바로 위에 위치하므로, 지자기폭풍 시 적도 변이 영역이 확대되어 이에 의한 영향을 받을 수 있다. 한편, 전리층 폭풍 발생 시 직접적인 영향은 급속한 전리층 지연값 변화이지만, 이외에도 산란(scintillation) 현상으로 인해 반송파 신호 손실 등도 무시할 수 없다.

전리층 폭풍의 발생은 지자기장 세기가 클수록 많이 발생하는 경향이 있는데, 지자기장 세기를 나타내는 것에는 Kp나

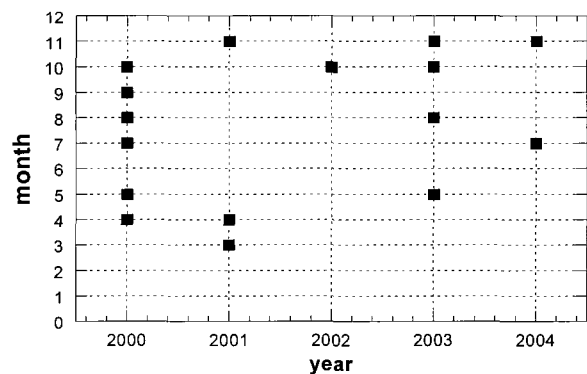


그림 1. 전리층폭풍 발생시기 (2000년~2004년).
Fig. 1. Ionospheric storm history (2000~2004).

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 4. 30., 채택확정 : 2006. 6. 10.

김정래, 양태형 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

(jrkim@hau.ac.kr/poohyth@hau.ac.kr)

이은성 : U. of California at Los Angeles(koreagnss@koreagnss.com)

전향식 : 한국항공우주연구원(hschun@kari.re.kr)

※ 본 연구 본 연구는 건설교통부 국가교통 핵심기술 개발사업의 지원에 의해 수행되었으며, GPS 자료를 제공한 국토지리정보원에 감사 드립니다.

Dst(Disturbance storm time) 값이 있다. 최근 연구 결과[2]로는 SBAS 위성항법 시스템에의 영향 측면에서 Kp 보다는 Dst가 더욱 상관 관계가 큰 것으로 나타나고 있다. 그림 1은 Dst값을 근거로 최근 전리층폭풍 발생 시기를 표시한 것이다. 11년 주기를 가지는 태양활동이 2001~2002년에 최대값을 나타내었는데, 전리층폭풍은 태양활동 최대인 기간보다는 그 전후에 많이 발생하는 경향을 보이고 있다. 하지만 이에 대한 연구는 좀 더 많은 데이터 분석이 필요하다. 현재는 상대적으로 전리층 폭풍의 빈도나 세기가 약한 상태이며, 다음 전리층 폭풍은 2010년경부터 활발해 질 것으로 예상된다. 전리층 폭풍 발생이 활발해지기 전에 전리층폭풍 및 보정항법에 관한 연구를 수행해야 실제 폭풍 발생 시에 적절한 성능평가를 수행할 수 있다.

III. GBAS 관련 전리층 연구

1. 전리층에 의한 신호 지연 효과

GBAS의 경우 지상국에서 GNSS 거리 관측값 보정 신호를 생성하고, 각종 오차 유발 요인의 분산 추정값을 계산한 뒤 이를 항공기로 전송하게 된다. 항공기에서는 이를 근거로 거리 관측값을 보정하고, 보정된 거리 관측값의 오차를 추정하게 된다. 이로부터 보정 정보를 적용했을 때 항공기 위치 추정값의 PL(Protection Level)을 계산한다. PL은 항공기 위치 추정값의 존재 범위를 지정해 주는 것으로 오차 범위를 나타내기도 한다. PL값이 미리 설정된 AL(Alert Limit)을 초과하게 되면 경보를 발생하고 GBAS 시스템을 일시적으로 사용하지 않게 된다. 이 경우 가용성(availability)이 저하 된다고 표현하는데, 예를 들어 항공기 이착륙 기준 중의 하나인 CATI의 VAL (Vertical Alert Limit)은 10m 정도로 설정되어 있다. PL의 범위를 증가 시키면 무결성(integrity)은 증가하지만, 가용성은 감소하는 문제가 있으며, 반대로 PL을 너무 작게 설정하면 무결성이 감소하는 문제가 있다. 실제 오차 범위를 포함하면서 실제 오차에 가장 근접한 PL값을 찾아내는 것이 당연한 과제이며, 전리층폭풍에 의한 PL 증가 정도를 파악하는 것이 현재 중요한 연구 주제이다.

전리층 폭풍은 시간에 따른 급격한 전리층 지연값 변화와 더불어 국지적으로 상당한 지연값 차이를 유발한다. SBAS는 전리층 지연값을 설정된 격자점(grid)에서 일정 시간 간격으로 제공하기 때문에 시간에 따른 전리층 변화에 많은 영향을 받지만, GBAS의 경우 거의 연속적으로 보정 신호가 제공되므로 시간에 따른 급격한 전리층 변화는 상대적으로 무시할 수 있다. 반면에 지역별 전리층 차이 또는 위치에 따른 전리층 기울기는 항공기 위치추정에 상당한 오차를 유발할 수 있다.

지상국 주위에 급격한 전리층 기울기가 존재할 경우 이로 인한 영향을 항공기에 통보하기 위해서 지상국의 전리층 기울기 추정값을 보정 신호에 포함시켜 전송하게 되는데, 이를 근거로 항공기는 거리신호 오차 및 이를 이용한 위치 추정 오차 범위를 증가시켜, 보정 신호 및 GBAS 항법 사용 여부를 결정하게 된다.

그림 2는 항공기와 지상국이 수신하는 전리층 지연값이 다른 경우이다. 전리층 기울기에 의한 항공기의 거리측정값 오차 추정값 σ_{iono} 를 계산하는 방법은 GBAS 규격에 다음과 같이 정의되어 있다[3].

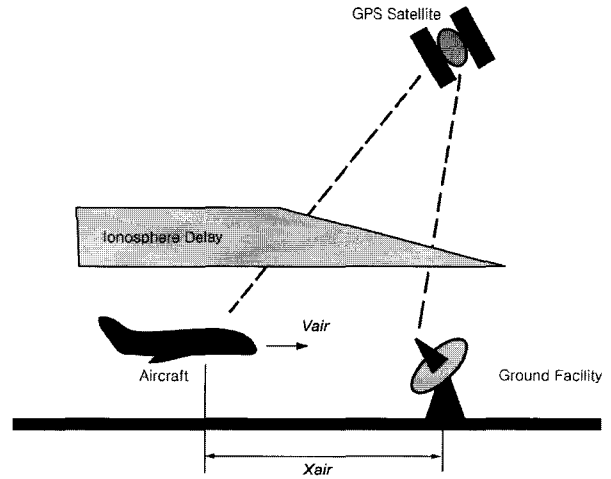


그림 2. 항공기와 지상국 사이의 전리층 지연값 기울기.

Fig. 2. Ionospheric spatial gradient between aircraft and ground facility.

$$\sigma_{iono} = F_{pp} \times \sigma_{vig} \times (x_{air} + 2\tau v_{air}) \quad (1)$$

여기서 σ_{vig} 는 수직 전리층 지연값의 공간기울기(vertical ionospheric gradient)이며, 지상국에서 GBAS 신호에 포함해 송신한다. F_{pp} 는 수직지연값을 경사지연값으로 변환하는 경사함수로 신호 경사각(elevation angle)의 함수이다. x_{air} 는 지상국과 항공기 사이의 거리이고, v_{air} 는 항공기 속도이다. τ 는 smoothing 시간상수이다. GBAS에서는 코드신호에 반송파신호를 결합한 smoothing 기법을 사용하는데, 전리층에 의한 지연 효과가 코드와 반송파 신호에 반대로 작용하기 때문에 신호 지연의 문제를 일으킨다. (1)에 smoothing 상수 τ 가 포함된 것은 이와 같은 이유이다.

전리층 폭풍 시에는 지상국에서 전리층 기울기 σ_{vig} 값을 적절히 증가시켜서 항공기에 알려 주게 된다. σ_{vig} 는 전리층 지도 분석 등을 통해 얻어지는 값으로 GBAS 수신국에서는 계산할 수 없는 값이며, 미국의 경우 SBAS 시스템에서 얻는 것을 설정하고 있다. 만약 GBAS 수신국에서 일정한 거리만큼 떨어진 곳에서 별도의 관측을 수행할 경우에는 이를 이용하여 σ_{vig} 를 계산하는 것이 가능할 수도 있다. SBAS 시스템과 연동하지 않을 경우 σ_{vig} 는 미리 설정된 상수값을 사용하는 것을 가정하기도 한다. 전리층 기울기는 지역마다 다른 분포를 보이므로 특정 지역에 대한 장기간의 데이터 분석을 통해 그 지역의 σ_{vig} 범위를 파악하는 것이 필요하다.

한편, GBAS에 대한 전리층폭풍의 영향을 완화하는 방법으로 제시된 것 중의 하나는 가시위성을 경사각을 기준으로 고경사각과 저경사각으로 구분하여 전리층 변화를 감지하는 것을 들 수 있다. 저경사각 위성이 더 원거리에 위치한 위성이므로, 만약 특정 방향의 저 경사각 위성 신호에서 전리층 지연값의 급격한 변화가 감지되었을 때 그쪽 방향의 위성들을 모두 사용하지 않는 것을 들 수 있다. 하지만 이 방법은 가시 위성의 수가 충분하지 않은 경우에 문제가 있다. 이 외

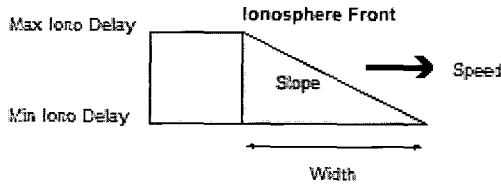


그림 3. 전리층폭풍 wave front 모델.
Fig. 3. Ionospheric storm wave front model.

에 활주로 방향으로 지상국과 떨어진 곳에 별도의 원격수신기를 설치하여 전리층 지연값 차이 증가를 감지하는 방법이 있는데, 특정 방향의 전리층 변화만 파악할 수 있다는 단점이 있으며, 지상국과의 통신망을 별도로 구축해야 한다. 최적화된 원격수신기 설치 위치는 전리층폭풍에 의한 영향 평가를 시뮬레이션을 수행하여 계산한다.

2. GBAS 영향 평가용 전리층 폭풍 모델

현재 GBAS 관련 전리층 주요 연구는 (1) 전리층 폭풍이 무결성과 가용성에 미치는 영향 분석 및 (2) 전리층 폭풍 감지를 위한 GBAS 지상국 및 항공기 수신기 내부 필터의 감지 기법 성능 향상 등이다. 한편, SBAS는 전리층 보정 신호를 직접 송신하기 때문에 지상국에서의 전리층 모델 생성 및 전리층 폭풍 감지 기법 등도 포함된다.

첫 번째 언급한 전리층 폭풍에 의한 GBAS 영향 분석을 위해서는 주로 시뮬레이션 모델을 이용해서 분석한다. 설정된 GPS 위성 궤도 조건 등을 이용하여 지상국 및 항공기 위치에서의 GPS 신호를 생성한 뒤 인위적인 전리층오차를 적용하여 잡음이 포함된 GPS 신호를 시뮬레이션 하게 된다. 실제 GBAS 지상국의 보정 알고리즘을 적용한 프로그램을 사용하여 GPS 보정 신호를 생성하면 이를 이용하여 항공기의 위치를 추정하게 된다. 추정된 위치를 초기에 설정한 항공기 위치와 비교하면 위치 오차를 추정할 수 있고, 계산된 PL 등이 적합하지 파악할 수 있다.

시뮬레이션 시 전리층 폭풍의 모델링을 위해서, Luo[4] 등은 wave front 모델을 제안하였는데, 이는 그림 3에 나타난 바와 같이 전리층 폭풍을 기울기(slope), 폭(width) 및 속도(speed)의 3가지 변수로 나타낸 것이다. Wave front의 방향과 시작 위치 등을 변경하면서 GBAS 시뮬레이션을 수행하여 항공기 위치 오차 및 전리층폭풍 검출 성능에 관한 연구를 수행하게 된다. 이러한 연구에서 가장 위험한 경우는 항공기 배후에서 전리층폭풍이 느린 속도로 접근하는 것으로, 상당 시간 동안 지상국에서는 이를 감지하지 못하므로 큰 위험이 된다.

이러한 시뮬레이션 및 영향 평가에서 실제 데이터를 분석하여 발생 가능한 wave front 종류를 결정하는 것이 중요한데, 특정 지역 및 기간 등에 발생 가능한 전리층폭풍의 속도 및 기울기 등의 범위를 threat space라고 한다. 실제 데이터 분석에 따라 threat space는 영역은 계속 갱신되고 있다. 예를 들어 기울기(=전리층 L1 거리지연값 차이/수신기 거리)의 경우 2000년 이전에는 최대 수십 mm/km정도로 추정되었으나 최근 발생한 전리층폭풍을 분석한 결과 최대 500mm/km에 이르는 것으로 밝혀지면서 threat space의 영역이 급격히 확대되었다. Threat space 영역의 확대는 GBAS의 무결성 감소 또는

가용성 감소를 의미하며, 특정한 threat space 내에서 가능한 모든 경우를 시뮬레이션 함으로써 GBAS 신뢰성 등을 검증해야 한다.

3. 지역별 전리층 및 폭풍 경향 파악

전리층폭풍 발생 빈도 및 세기 등은 지역마다 편차가 심하므로 특정 지역의 전리층 변화를 장기간에 걸쳐 분석하여 그 지역에 적절한 threat space를 구성해야 한다. 미국에서는 스탠포드 대학을 중심으로 2000년 이후 데이터를 분석하여 threat space를 보완하며 GBAS 및 SBAS에 대한 다양한 영향 평가를 수행해오고 있다. 이웃 일본은 1200여 개의 수신기를 통합한 GEONET을 운영하고 있는데, 이를 분석하여 ENRI (Electrical Navigation Research Institute) 등에서는 전리층 기울기 특성을 분석하는 연구를 수행하고 있다[5]. 계절별 특성 등을 분석하고 있으며, 일본의 전리층 분포는 우리나라와 가장 유사하므로 좋은 참고 자료가 될 수 있다. 이와 같이 국내에 위성항법 시스템 구축을 위해서는 한반도 전리층 분포에 대한 연구 및 threat space를 구성이 필요하다. 이를 위해서는 우선 전리층 분포를 분석할 수 있는 도구 개발 및 이를 이용한 전리층 기울기 변화에 대한 분석이 필요하다.

IV. 전리층 모델 및 기울기 계산

1. 전리층 지연 관측방정식

이중주파수 수신기의 P1 및 P2 코드 측정값을 이용하여 전리층 지연값을 계산할 수 있다. 이를 TEC 값으로 변환한 뒤 다음 함수를 사용하여 모델링 할 수 있다[6].

$$TEC_i(\phi, \lambda, t) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a_{lmn} \phi^l \lambda^m t^n + \frac{B_{Rcv}^{Sat}}{F_i} + \epsilon_i \quad (2)$$

여기서, ϕ 및 λ 는 관측값의 IPP (Ionosphere Impact Point) 위도 및 경도인데, 전리층을 특정한 고도에 위치한 막으로 가정하였을 때, GPS 신호가 전리층 막과 교차하는 지점을 IPP라 한다. t 는 관측시간이며, F_i 는 수평지연값을 경사지연값으로 변환하는 경사함수이고, ϵ_i 는 수신기 잡음이다. L, M, N 은 각각 위도차수, 경도차수 및 시간차수를 의미한다. B_{Rcv}^{Sat} 는 수신기와 GPS 위성 송신기 내부에서 L1과 L2 신호 경로 차이에 의해서 유발되는 신호 바이어스로 일반적인 이중주파수 결합으로 전리층 지연값을 상쇄시킬 때는 소멸되므로 고려할 필요가 없지만, 전리층 지연값을 추정할 때는 반드시 계산해 주어야 하는 값이다. 이 값은 관측방정식에는 수신기 바이어스와 송신기 바이어스의 합으로 포함된다.

$$B_{Rcv}^{Sat} = B^{Rcv} + B^{Sat} \quad (3)$$

이러한 바이어스는 각 수신기 및 위성의 고유 특성으로 각각에 대해 추정해 주어야 하지만, 관측방정식에는 두 개 바이어스의 합으로만 표현되므로 가관측성(observability) 문제가 발생한다. 그러므로 개별적인 값 대신 특정 수신기와 위성의 결합된 바이어스만 추정할 수 있다. 예를 들어, 14개의 수신기와 30개의 위성 신호가 있을 경우, 총 420개(=14×30)의 바이어스를 추정해 주어야 한다. 이러한 바이어스는 일반적으로

거의 변동이 없으며, 높은 정밀도를 요구하지 않는 경우 수 일 동안 같은 값을 사용할 수도 있다. 한편, (2)의 위도-경도-시간 함수를 사용하는 대신 다음과 같이 위도-이동경도 함수를 사용할 수도 있다.

$$TEC_i(\phi, \bar{\lambda}) = \sum_{l=0}^L \sum_{m=0}^M a_{lm} \phi^l \bar{\lambda}^m + \frac{B_{Rcv}^{Sat}}{F_i} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$\bar{\lambda}$ 는 IPP의 경도에 지구 자전에 의한 효과를 고려해준 것으로, (2)의 시간항이 경도항과 결합된 것으로 생각할 수 있다. 이외에도 exponential 등 다양한 함수 모델이 존재하며, 3차원 모델도 존재하지만 본 논문에서는 주로 위의 두 가지 함수 모델을 차수를 변경하며 사용하였다.

2. 전리층 모델 계수 및 바이어스 추정

후처리 방법을 사용하여 (2)의 전리층 모델 계수 및 바이어스를 추정하는 경우, 다음과 같이 최소자승법(least square method)을 사용할 수 있다.

$$y = Hx$$

$$\hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} y \quad (5)$$

여기서,

$$y = [TEC_1 \quad TEC_2 \quad \dots \quad TEC_{Nobs}]$$

$$x = [a_{000} \quad a_{100} \quad \dots \quad a_{LMN} \quad B_1^1 \quad \dots \quad B_{Nrcv}^{Nsat}]^T$$

$$H = \begin{bmatrix} \phi_1^0 \lambda_1^0 t_1^0 & \dots & \phi_1^L \lambda_1^M t_1^N & \frac{1}{F_1} & \dots & 0 \\ \dots & \ddots & \dots & 0 & \ddots & 0 \\ \phi_p^0 \lambda_p^0 t_p^0 & \dots & \phi_p^L \lambda_p^M t_p^N & 0 & \dots & \frac{1}{F_p} \end{bmatrix} \quad (6)$$

즉, 전리층 모델 계수 a_{lm} 과 바이어스 B_j^k 를 동시에 추정하게 된다. 오차항 R 은 수신기 종류 및 위성 경사각에 따라 다른 값을 설정할 수도 있다. 이 방법은 관측값이 미지수보다 많아야 하는데, 특정 시점에서의 관측값 수는 항상 미지수 개수보다 적으므로 다중 시점에서의 관측값이 필요하다.

3. 전리층 격자 모델

전리층 바이어스가 추정된 후 특정 IPP 위치에서의 수직전리층 지연값을 계산하기 위해서는 (2)의 함수 모델에 IPP의 위도-경도 및 시간을 대입하게 된다. 이러한 함수 모델 대신 일정 간격의 격자점(grid point)을 설정하여 격자점 주위의 전리층 지연 관측값을 격자점에 적용하여 격자점 모델을 생성하는 방법이 있다. 원하는 IPP 지점에서의 지연값은 주위 격자점의 값으로부터 계산하게 된다. 함수 모델의 경우 전리층 지연값이 전체적으로 완만한 함수 형태를 가지므로 국지적이 특이값을 모델링 하기 어렵지만, 격자 모델은 국지적인 변화를 모델링 하기에 적합하다. 반면에 위성과 수신기와의 기하학적 위치에 의해 일시적으로 IPP가 존재하지 않는 구역이 존재하는데, 격자 모델은 이 구역에 위치한 격자점에서는 정확한 전리층 지연값을 표시할 수 없는 단점이 있다. 한편, 일반적으로 함수 모델이 수신기 잡음 등을 상쇄하는 효과가

더욱 크기 때문에 L1-L2 바이어스 등을 추정하는 경우에는 함수 모델이 유리한 것으로 생각되고 있고, 국지적 시간적인 전리층 변화 양상을 파악하는 경우에는 격자 모델이 유리한 것으로 생각되고 있다. 그러므로, 바이어스 추정에는 함수 모델을 사용하고, 전리층 분포 모델링에는 격자 모델을 사용하는 것도 가능하다.

4. 전리층 기울기 계산

앞에서 언급한대로, 전리층 폭풍 시 국지적으로 급격한 전리층 지연값의 변화가 발생하는데, 이러한 영향 평가를 위해서는 전리층 기울기 변화 경향을 분석하는 것이 필요하다. 특정 시간에서 전리층 지연값 기울기를 계산하는 방법은 두 가지로 나눌 수 있는데, 전리층 지도를 생성한 후에 gradient를 계산하는 방법과 전리층 지도 생성 없이 관측된 전리층 지연값의 차이를 직접 이용하는 방법으로 나눌 수 있다.

첫 번째 방법은 격자 모델을 사용하여 격자점에서의 전리층 지연값을 생성한 뒤 남북 방향 및 동서 방향으로 인근 격자점의 수직전리층 지연값 차이를 격자점 간격으로 나눠 주는 방법이다.

두 번째 방법은 특정 시간에서 어떤 동일한 위성으로부터 관측된 두 개 수신기의 전리층 지연값을 수직 지연값으로 변환한 뒤 이를 차분하고 수신기 사이의 거리로 나누어 주는 방법이다. 이 경우 수신기마다 L1-L2 바이어스 값이 상이하므로 이에 의한 전리층 지연 오차는 미리 보정해 주어야 한다.

전리층 지연값 차이는 실제 전리층 지연값 차이에 의한 것 이외에도 수신기 오차나 노이즈 등에 의해서도 관측되는데, 첫 번째 방법의 경우 격자점에서의 전리층 지연값은 어느 정도 평균화된 값이므로 노이즈 등에 의한 오차가 많이 줄어들어서 전체적인 경향을 파악하는데 유리하다. 두 번째 방법은 직접적인 관측값 비교이므로 국지적인 전리층 차이를 파악하는데 유리한 방법으로 많이 사용되고 있는 방법이다. 하지만 이 경우 노이즈 등에 의한 전리층 지연값 오차에 극히 취약하다는 단점이 있다.

V. 데이터 분석 결과

1. 전리층 지도 생성

2003년 10월과 11월 최근 들어 가장 강력한 전리층 폭풍이 발생하였는데, 이때 한반도 상공의 전리층 분포를 주로 분석해 보았다. 국토지리정보원의 14개 상시 관측소 데이터를 사용했는데, 각 수신기는 Trimble 4000SSI이며 30초 간격의 L1 및 L2 데이터를 RINEX 형식으로 제공한다. 앞에서 언급한 함수 모델과 격자 모델을 모두 사용하여 전리층 지도를 생성하였다.

그림 4는 전리층 폭풍이 발생한 2003년 11월 20일 14UT 경 한반도 상공의 전리층 지연값 분포를 나타낸 것으로 격자 모델을 사용하여 생성하였다. 함수 모델을 사용할 경우 비슷한 경향을 보이지만 좀 더 완만한 형태를 나타낸다. 여러 해외 연구 기관에서 전세계 IGS(International GNSS Service) 수신국 데이터를 처리하여 전지구적 전리층모델(GIM: Global Ionosphere Map)을 생성하고 있는데, 전리층 지도 검증을 위해 이와 비교해 보았다. GIM은 전지구적 함수모델을 사용하여 추정한 것으로 국지적인 측면에서 반드시 정확한 값이라고 할 수는 없지만 참고용으로 충분한 기능을 한다고 할 수 있다.

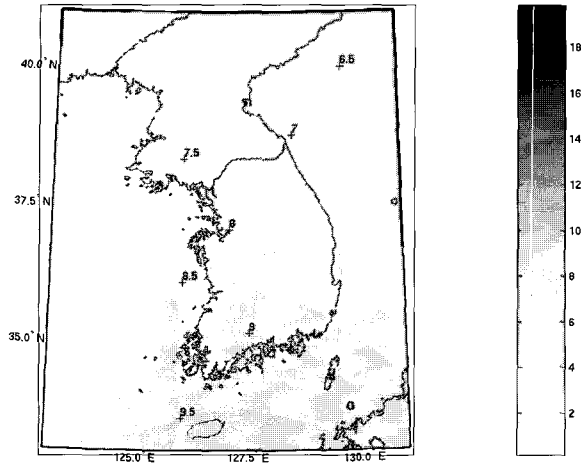


그림 4. 한반도 전리층분포 (2003. 11. 20, 14UT, 단위 = TECU).
Fig. 4. Ionospheric delay distribution (2003. 11. 20, 14UT, unit = TECU).

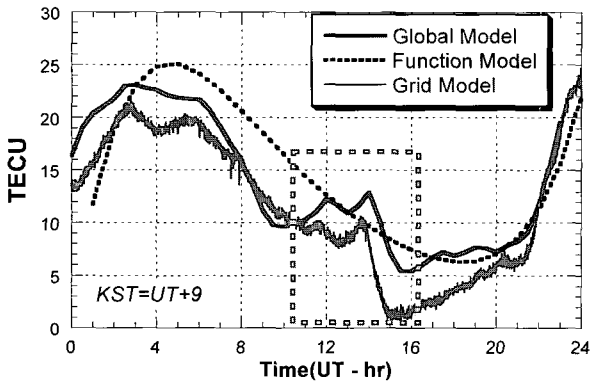


그림 5. 전리층 지연값 변화 (2003. 11. 20-대전 상공).
Fig. 5. Ionospheric delay variation (2003. 11. 20-Daejeon).

그림 5는 2003년 11월 20일 대전 상공에서의 전리층 지연 값 변화를 전지구 모델과 비교한 것이다. 스위스 CODE (Center for Orbit Determination in Europe)에서 생성된 GIM 데이터를 이용하였다. 대략적인 경향은 일치하고 있는데, 함수 모델은 매우 완만한 형태를 보이고 있어서, UT12~16 시경의 급격한 변화를 충분히 표현하지 못하고 있다. 격자 모델은 구간별로 GIM과 약간의 바이어스를 보이고 있으나 세밀한 변화를 잘 나타내고 있다. GIM은 2시간 간격으로 제공되므로 30초 간격으로 생성되는 격자 모델과 비교하기 위해서 이를 보간(interpolation)하였다. 이는 전리층 폭풍 등 급격한 변화를 분석하는 경우에는 GIM 보다는 자체 모델이 적합함을 의미한다.

한편, 12~13UT(Universal Time) (21~22 KST(Korea Standard Time)) 부근은 밤 시간에 해당되므로, 일반적으로 TEC 값이 낮아진다. 그림 5에서는 TEC값이 상당히 증가하다가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 전리층 폭풍에 의한 영향으로 생각 된다. 본 논문에는 도시하지 않았지만 CODE GIM의 전리층 추정 RMS 값을 조사한 결과 11월 20일 12UT 근방에서 높은 값을 나타내는 것으로 파악되었다. 이는 폭풍 발생으로 지역적인 불균일성이 증가하여 오차값이 증가한 것으

로 생각된다.

2. 전리층 기울기 분석 - 격자 모델 사용

한반도 상공 전리층 분포 기울기를 파악하기 위해서 생성된 전리층 격자 모델을 이용하여 남북 및 동서 방향 기울기를 계산하였다.

그림 6은 2003년 11월 20일 남북 및 동서 방향 기울기를 계산한 것이다. 함수모델을 사용하여 주파수간 바이어스를 추정된 뒤, $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 격자 모델을 이용하여 전리층지도를 생성하였다. 동서방향에 비해 남북방향 전리층 기울기가 상대적으로 크며 폭풍이 발생한 것으로 추정되는 12UT 부근에서 그 값이 급격히 증가하는 것을 알 수 가 있다. 24UT 부근에서 값이 증가하는 것은 1일 단위로 데이터를 처리하기 때문에 생기는 것으로 실제 현상과는 관련이 적다. 전체적으로 남북방향 기울기가 동서방향 기울기보다 크다. 한반도는 비교적 저자기 중저위도에 위치했기 때문에 폭풍 발생 시 남북방향 기울기 증가는 오로라 영역의 남하 보다는 적도 변이 영역의 북상에 의한 것으로 생각된다.

3. 전리층 기울기 분석 - 관측값 차분

앞에서 언급한대로 동일한 위성으로부터 관측된 전리층 지연값을 두 개의 수신기 사이의 거리로 나누어서 기울기를 계산한 후 남북방향 및 동서방향으로 투영하였다.

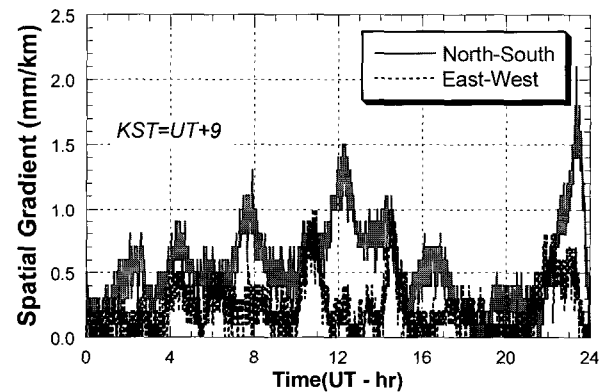


그림 6. 전리층 기울기 변화 (2003. 11. 20-격자 모델).
Fig. 6. Ionosphere slope variation (grid method-2003. 11. 20).

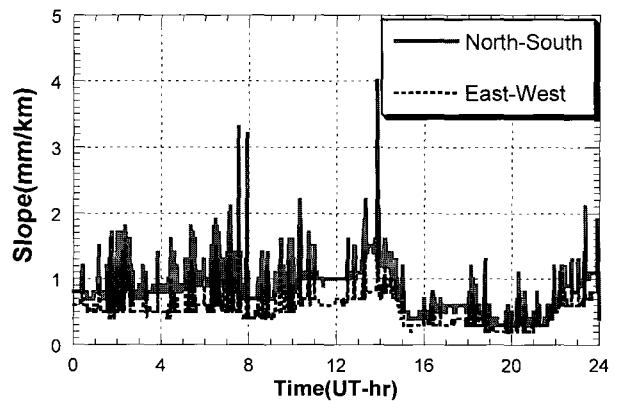


그림 7. 전리층 기울기 변화 (2003. 11. 20-관측데이터 차분).
Fig. 7. Ionosphere slope variation (observation difference method-2003. 11. 20).

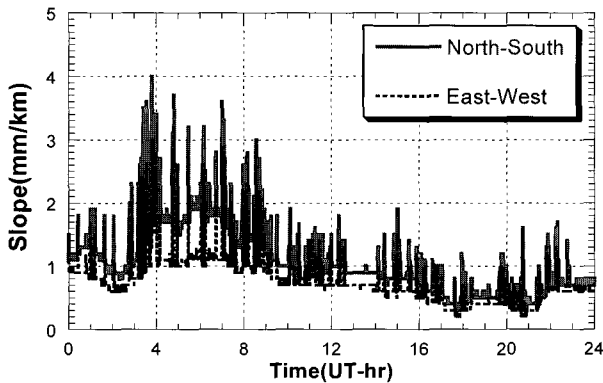


그림 8. 전리층 기울기 변화 (2003. 10. 27-관측데이터 차분).
Fig. 8. Ionosphere slope variation (observation difference method-2003. 10. 27).

그림 7은 2003년 11월 20일 한반도 상공의 전리층 기울기 변화를 관측값 차분 방법을 사용해서 나타낸 것이다. 30초 간격으로 각 수신국 사이의 조합에 대해 기울기를 계산한 후 평균하는 방법을 사용하였는데, 각 시점마다 대략 500개 정도의 위성-수신기1-수신기2 조합이 생성되었다. 관측값을 직접 차분할 경우 노이즈에 의한 영향이 증폭되기 때문에, 코드-반송파 smoothing을 적용하였다. 코드 관측값을 읽어 들여서 cycle slip을 감지하고 수정한 후 반송파 신호를 이용하여 코드 신호를 smoothing 하였다. 그림 6과 비교할 때 물리적인 성질이 상이하므로 다른 형태를 보이고 있지만, UT14시경에 기울기 값이 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 격자점 데이터를 이용한 그림 6의 결과와 유사하다.

시점 별(8UT, 14UT 주위)로 급격한 기울기 변화를 나타내기도 하는데, 각 시점마다 최대 기울기를 계산하면 수 백 mm/km를 나타내기도 한다. 현재로는 실제 전리층 기울기 변화에 의한 값과 노이즈에 의한 값을 완전히 구분하는 기술이 충분하지 않으므로, 이를 전리층 폭풍에 의한 것이라고 단정하기는 힘들다. 특히 전리층폭풍이 발생하면 섬광현상(scintillation)에 의한 신호 특성 불안정성도 증가하기 때문에 노이즈가 매우 증가한다. 노이즈에 의한 기울기 증가를 자동으로 구분하는 알고리즘을 개발하는 것에는 앞으로 상당히 많은 연구가 필요하다.

전리층폭풍이 발생하지 않은 평상시의 기울기와 비교하기 위하여 2003년 10월 27일의 기울기를 계산하였는데, 그림 8에 도시되어 있다. 낮 시간인 6UT(15KST) 경에 최대 기울기를 나타내는데, 낮 시간에 최대 전리층 지연값을 가지는 일반적인 전리층 변화 경향과 유사함을 알 수 있다. 이와 비교하면 그림 7의 11월 20일 기울기는 전리층 지연값이 낮은 밤 시간인 14UT (23KST) 경에 증가하는 경향을 나타내는 것이 차이점이라 할 수 있다. 두 경우 모두 전체적인 기울기는 2mm/km 이내로 GBAS 보정방법 측면에서 비교적 영향이 적다고 할 것이다. 전리층폭풍이 발생했던 2003년 10월 29일의 데이터도 분석해 보았으나, 큰 차이는 보이지 않았다.

전체적인 경향을 보면 동서방향 보다는 남북방향의 기울기가 크게 나타나고 있는데, 만약 활주로 방향이 남북 방향

일 경우에는 동서 방향인 경우 보다 전리층 폭풍 발생 시 더 많은 영향을 받을 것으로 추정할 수 있다.

VI. 결론

위성항법 시스템 적용을 위한 전리층 연구 관련 문헌 조사 및 기본 모델 개발을 수행하였다. 전리층 및 전리층폭풍 현상은 지역적으로 다른 양상을 보이므로 한반도 주변 현상에 대한 분석이 필요하며, 한반도 상공 데이터를 분석하여 전리층 분포 및 전리층 기울기를 분석하였다. 하지만, 이러한 결과 들은 제한적인 데이터를 이용하여 분석한 것으로 이런 결과만으로 전리층 폭풍에 의한 영향이나 한반도 기울기 분포를 결론 짓는 것은 불충분하다. 전리층 기울기 분석을 위해서는 다년간에 걸친 데이터를 모두 분석해서 전리층 기울기 통계값을 계산하여야 한다. 전리층 기울기 계산 시 노이즈에 의한 급격한 전리층 기울기 변화를 실제 전리층 변화와 구분하는 것이 매우 중요한데, 대량의 데이터를 분석할 경우에는 이를 자동적으로 처리하는 기술이 필요하다. 이는 상당히 정교한 프로그램 및 데이터 처리 기술을 필요로 하는 것으로 많은 연구가 필요하다. 한반도 상공 전리층 기울기 분포에 및 위성항법 시스템에 대한 영향에 관해 좀 더 많은 연구가 필요하며, 전리층 폭풍 시뮬레이션 및 과거 데이터 분석 등을 통해 좀 더 정확한 분석을 수행할 계획이다.

참고문헌

- [1] SBAS Ionospheric Working Group, "Ionospheric research issues for SBAS - A white paper," *ICAO Navigation Systems Panel (NSP) Meeting*, Feb. 2003.
- [2] 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, May, 2005.
- [3] Minimum Aviation System Performance Standards for the Local Area Augmentation System. Washington, D.C.: RTCA DO-245, 1998. 9. 28.
- [4] M. Luo et al., "LAAS ionosphere spatial gradient threat model and impact of LGF and airborne monitoring," *Institute of Navigation's GPS/GNSS Meeting*, Portland, Oregon, Sep. 2003.
- [5] 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 CA, Jan. 2005.
- [6] 한재호, 임삼성, "GPS 정밀도 향상을 위한 전리층 지연 효과에 관한 연구," 10차 GNSS Workshop, pp. 441-445, Sep. 2003.
- [7] C. Kee, Y. Sohn, and J. Park, "Modified tomographic estimation of the ionosphere using fewer coefficients," *Institute of Navigation's GPS/GNSS Meeting*, Portland, Oregon, USA, Sep. 2003.
- [8] 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, pp. 2283-2293, Oct. 2005.
- [9] CODE GIM Web site <http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>



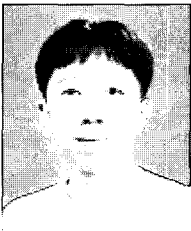
김정래

1991년 서울대학교 항공우주공학과(공학사). 1993년 서울대학교항공우주공학과(공학석사). 2000년 U. of Texas at Austin 항공우주공학과(공학박사). 2000년~2002년 Center for Space Research 연구원. 2002년~2004년 한국항공우주연구원 선임연구원. 2004년~현재 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 조교수. 관심분야는 GBAS, SBAS, 전리층연구, 위성시뮬레이션 및 궤도추정.



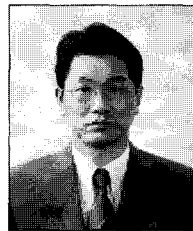
양태형

2005년 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 졸업. 2005년~현재 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 위성항법, 비행제어.



이은성

1996년 건국대학교 항공우주공학과(공학사). 1998년 건국대학교 기계공학과(공학석사). 2005년 건국대학교 항공우주공학과(공학박사). 2006년~현재 University of California, Los Angeles 연구원. 관심분야는 인공위성, GNSS, 고장 검출.



전항식

1988년 부산대학교 전기공학과 학사 졸업. 1992년 동 대학원 석사 졸업. 1999년 동 대학원 박사과정수료 1991년~1999년 대우중공업(주), 항공우주연구소 1999년~2003년 한국항공우주산업(주) 항공기개발센터 선임과장, 2004년~현재 한국항공우주연구원 항공사업단 항행체계그룹 선임연구원. 관심분야는 GNSS, DGPS, 항공항법, Robotics & 지능제어, 비선형 제어.