

# GPS를 이용한 한반도 상공 전리층 기울기 변화 분석

정명숙 · 김정래 †

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

## Analysis of Ionospheric Spatial Gradient Over Korea Using GPS Measurements

Myeong-Sook Jeong and Jeong-Rae Kim †

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

**Abstract :** Variations of mean ionospheric spatial gradient over Korea are analyzed in order to support GNSS (Global Navigation Satellite System) augmentation systems and integrity monitoring systems. A software for analyzing the ionospheric spatial gradient is developed using an ionospheric plate model. Daily and annual variations of ionospheric delay and spatial gradient are analyzed using GPS data in 2003 and 2005 respectively. The ionospheric delays and spatial gradients in 2003 were larger than 2005. Also, the south-north gradient, about  $-1.0\text{mm/km}$ , is nearly two times larger than the east-west gradient. The annual ionospheric spatial gradients over Korea is varied within  $2\text{mm/km}$ .

**Key Words :** Ionospheric Delay, Ionospheric Spatial Gradient, Ionospheric Plate Model, South-North Direction, East-West Direction.

**요약 :** 한국형 위성항법보강시스템 및 무결성 감시 시스템 개발을 위한 기초연구로 한국지역의 평균적인 전리층 기울기 변화를 분석하였다. 전리층 판 모델을 이용한 전리층 기울기 분석 프로그램을 개발하였고, 2003년과 2005년 국토지리정보원의 상시관측소 데이터 프로그래하여 일일 및 연간, 전리층 지연값 및 기울기 변화를 분석하였다. 태양활동이 활발했던 2003년의 지연값 및 기울기가 2005년 보다 크게 나타났고, 남북방향 전리층 기울기가 연 평균 약  $-1.0\text{mm/km}$ 로 동서방향 보다 2배 정도 크게 나타났다. 또한 한국지역의 연간 전리층 기울기는 약  $2\text{mm/km}$  이내에서 변하는 것을 확인하였다.

## 1. 서론

GPS (Global Positioning System) 오차를 줄이기 위해서 사용하는 DGPS (Differential GPS)에서는 기지국과 사용자에서 관측되는 전리층 지연값은 동일하다는 가정을 적용하는데, 기지국과의 거리가 멀거나 전리층 활동이 활발할 경우에는 전리층 지연값의 차이에 의

해 상당한 오차가 발생할 수 있다. 전리층 폭풍 발생 시에는 전리층 지연값이 국지적으로 급격히 변화하기 때문에 근거리인 경우에도 일시적으로 상당한 전리층 차이를 유발하게 된다. DGPS에 무결성(Integrity) 정보를 포함하여 항공기 이착륙 시스템에 사용하기 위한 GBAS (Ground Based Augmentation System)의 경우 전리층폭풍에 의한 전리층 지연값의 차이가 가장 큰

접수일(2009년 6월 20일), 게재확정일(2009년 10월 7일).

† 교신저자: 김정래(jrkim@kau.ac.kr)

보정정보 오차 요인이며, GBAS의 실용화를 막는 주요 원인이다. 전리층 지연값 보정정보를 격자 단위로 송신하는 SBAS (Satellite Based Augmentation System) 역시 전리층 폭풍 시 격자점 위치에서의 전리층 지연값과 사용자 전리층 지연값 차이에 따른 무결성 및 가용성 (Availability) 저하가 주요 오차 요인이다.

수신기 위치 차이에 따른 전리층 지연값의 차이는 전리층 기울기 (ionospheric spatial gradient)로 정량화될 수 있는데, 이는 두 지점에서 수신한 GPS 신호에 포함된 전리층 지연값을 두 지점 사이의 거리로 나누어 줌으로써 계산된다. 전리층 기울기 값을 이용하여 기준국과의 거리 증가에 따른 GPS 신호 오차의 크기를 추정할 수 있으며, 전리층 폭풍 발생 시 기울기가 급증하기 때문에 전리층 폭풍 감지를 위한 지표로 활용될 수 있다. 전리층폭풍의 발생 경향 및 세기는 지역별로 차이가 많이 나므로 특정 지역에서 DGPS 응용시스템을 운용하기 위해서는 그 지역의 전리층 활동에 관한 데이터베이스(DB)를 구축할 필요가 있다. SBAS는 전리층 지연값 분포의 불균일성 또는 국지적 전리층 기울기가 급증할 때 전리층 폭풍 경보를 발생하게 되는데, 이를 위해서는 해당 지역의 전리층 기울기 변화에 관한 사전 정보가 필요하다.

SBAS를 운용 중인 미국, 유럽, 일본 등에서는 전리층 기울기에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 미국의 경우 스탠포드 대학을 중심으로 미국 전역에 위치한 GPS 상시관측소 데이터를 이용하여 전리층 폭풍 발생 시 전리층 기울기 및 변화 속도 등에 관한 분석 및 DB 구축을 수행해오고 있다(Datta-Barua *et al.*, 2005; Luo *et al.*, 2003; Hernandez-Pajares *et al.*, 2005). 전리층 오차에 의한 MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System) 의 가용성 저하 문제를 해결하기 위해 노력하고 있는 일본의 경우 GPS 상시관측소 데이터를 사용하여 연간 전리층 기울기 변화 등을 분석하고 있다(Konno *et al.*, 2005). 이러한 분석 연구를 평상 시 전리층 기울기에 의한 보정정보 오차 범위 설정이나 전리층 폭풍 발생 판단에 필요한 임계값 설정 등에 적용하고 있다. 이러한 DB를 전리층 threat space라고 하며, 특정 지역에 위성항법 보강시스템 구축을 위해서는 반드시 필요한 정보이다.

본 연구에서는 한국형 위성항법보강시스템 및 무결

성 감시시스템에 전리층 관련 기능을 적용하기 위한 기본 단계로 한반도의 전리층 기울기 변화 경향을 분석하였다. 이를 위해 전리층 기울기 분석 프로그램을 개발하여, 2003년과 2005년 국토지리정보원 GPS 상시관측소 데이터를 분석하였다. 일일 및 연간 전리층 지연값 변화와 남북 및 동서 방향 전리층 기울기 변화 경향을 파악하였다. 또한 주 기울기 방향 및 전리층 모델 잔차율 변화 경향에 대해서도 분석하였다.

## 2. 전리층 기울기 계산 방법

전리층 기울기 계산을 위해 주로 이용되고 있는 방법은 공간차분 방법으로 동일한 위성에 대해 두 개의 수신기에서 관측된 GPS 신호에 포함된 전리층 지연값의 차이를 수신기 간 거리로 나누어서 계산하게 된다. 직접적인 관측값 비교를 통해 전리층 기울기를 추정하는 방법으로 국지적인 전리층 기울기 및 최대 기울기 등을 파악하는데 유리한 방법이다. 그러나 GPS 관측값에는 전리층 지연값 이외에 수신기 오차 및 노이즈가 포함되어 있기 때문에 이 방법을 이용할 경우 노이즈로 인해 발생한 기울기와 전리층 폭풍으로 인해 발생한 기울기를 분석해 내는 것이 쉽지 않다는 단점을 가지고 있다. 따라서 공간차분을 이용한 전리층 기울기 계산 시에는 노이즈로 인해 발생한 기울기를 제거할 수 있는 방법에 관한 연구가 수반되어야 하며, 외국에서는 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다(Konno *et al.*, 2005; Ene *et al.*, 2005).

공간차분 방법 사용 시 N개의 수신기를 사용하여 매 시점마다 관측할 수 있는 전리층 기울기의 수는  $N_C$ 로 수신기의 개수가 늘어날수록 관측할 수 있는 기울기의 수는 급증한다. 수신기 수가 많고 데이터 수가 많을 경우에는 노이즈에 의한 전리층 기울기 급증이 전체 데이터에서 차지하는 비율이 높지 않아서 전리층 기울기의 통계정보를 계산하는데 유용하다. 하지만, 데이터 수가 적을 경우 노이즈 효과에 의해 의미 있는 정보를 얻기가 어렵다. Konno(2005)와 Ene(2005)의 연구에서는 공간차분 방법을 이용하여 기울기를 분석하였는데, 각각의 연구는 수신국의 수가 400개 이상인 미국의 CORS (Continuously Operating Reference Stations) 상시관측소 망과 수신국의 수가 1200여개인 일본의

GEONET (GPS Earth Observation Network) 상시 관측소 망의 데이터를 이용하였기 때문에 매 순간마다 관측되는 기울기의 수가 7만에서 70만개 정도로 통계적인 분석이 가능하였다. 그러나 국내의 경우 국토지리정보원의 상시관측소가 14개로 30초마다 관측되는 기울기가 91개에 불과하다. 이는 앞의 연구들과 달리 데이터가 충분하지 않기 때문에 공간차분을 통한 기울기의 통계적 분석이 어렵다.

전리층 기울기 계산에는 전리층 지도를 생성한 후에 기울기를 계산하는 지도차분 방법도 사용할 수 있다. 지도차분 방법은 다시 SBAS와 같이 격자점(grid) 전리층 지도를 이용하는 방법(SBAS Ionospheric Working Group, 2003)과 전리층 함수(functional) 모델을 이용하는 방법으로 나뉜다. 격자 모델을 사용하는 경우 남북 방향 및 동서 방향으로 인근 격자점의 수직전리층 지연값 차이를 격자점 간격으로 나눠 주게 된다(김정래 외, 2006a, 2006b). 전리층 지도 생성 시 노이즈 효과는 상당 부분 제거되었기 때문에, 지도 차분 방법을 사용할 경우 노이즈에 의한 영향을 상당 부분 제거할 수 있다. 단, 최대 기울기 값 등은 얻을 수 없고, 평균값 개념의 값만 얻을 수 있다.

본 연구에서는 한반도 상공 전리층 기울기의 통계적 경향을 분석하는 것이 목적이고, 제한된 수의 국내 상시 관측소 데이터를 이용해야 하므로 공간 차분 방법 대신 지도 차분의 함수 방법 전리층 지도를 사용하여 기울기를 계산하였는데, 전리층 분포를 다음과 같은 판 모델로 가정하였다.

$$\alpha x + \beta y + z = \gamma \quad (1)$$

여기서  $x$ 는 IPP (Ionosphere Pierce Point) 경도,  $y$ 는 IPP 위도,  $z$ 는 전리층 수직지연 추정값의 평균을 의미한다. 판모델 계수는 우변의 전리층 수직지연 관측값  $\gamma$ 를 이용하여 추정하게 되는데, 여기서  $\alpha$ 는 동서방향 기울기를 의미하고,  $\beta$ 는 남북방향 기울기를 의미한다(Kim et al, 2006, 2007). 고차 함수를 사용할 경우 정교한 전리층 지연값 분포를 모델링하는 것이 가능하지만 본 연구에서는 한반도 상공의 전리층 지연값 보다는 전리층 기울기를 구하는 것이 목적이므로, 기울기를 바로 얻을 수 있는 1차 함수로 모델링하였다. Fig. 1은 전리층 판모델과 관측값 사이의 관계를 나타내고 있다. 위

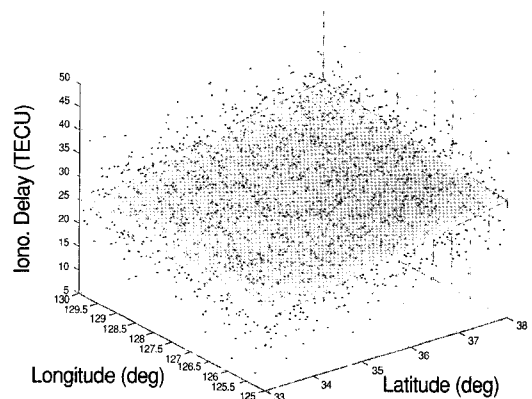


Fig. 1. Ionospheric delay plate model.

성 및 수신기의 Inter Frequency Bias (IFB)는 판모델 적용 전에 별도로 추정하여, 전리층 지연값에 적용하였다. 다항식 함수모델을 사용하여 전리층 지도를 생성한 뒤 수신기-위성 조합 별 IFB를 계산하고, 수신기 및 위성 별 IFB를 일일 단위로 계산하였다.

### 3. 전리층 지연값 변화 경향

전리층 기울기 변화는 전리층 지연값 변화와 밀접한 관련이 있으므로, 전리층 기울기 분석에 앞서 전리층 지연값인 TEC(Total Electron Content)값의 일일 및 연간 변화 경향을 분석해 보았다. 이때 적용된 판 모델은 적용범위는 위도 33도 ~ 38도 및 경도 125도 ~ 130도로 한반도 상공을 포함하며, 전리층 판 모델의 중간지점에서의 값을 평균 TEC값으로 취한 후, 일일 및 연간 전리층 변화를 분석하였다. 2003년과 2005년 데이터를 분석하였는데, 이는 2003년은 전리층 폭풍이 빈번하게 발생했던 시기이고, 2005년은 전리층 활동이 상대적으로 약한 시기이기 때문에 비교 분석이 용이하기 때문이다. GPS 데이터는 전국에 고루 분포하고 있는 국토지리정보원의 14개 상시관측소 데이터를 이용하였으며, 데이터의 시간 간격은 30초이다. GPS 수신기는 2003년까지 모두 Trimble사의 4000SSI를 사용하였고, 2005년 일부 수신기가 Trimble사의 NetRS로 변경되었다.

Fig. 2는 2005년 전리층의 계절별 변화 경향 분석을 위해 춘분(3/20일), 하지(6/22일), 추분(9/23일), 동지(12/22일)를 선택하여 일간 변화를 나타낸 것으로, 전체

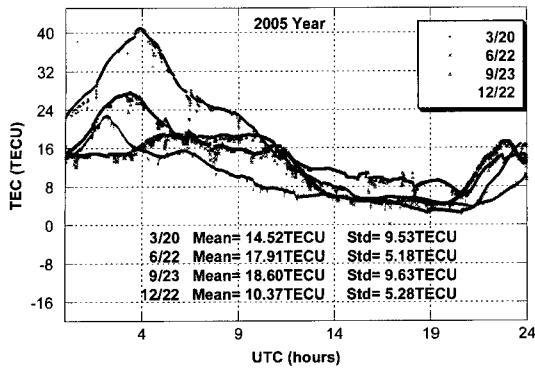


Fig. 2. Daily TEC variations on the day of the vernal equinox, the summer solstice, the autumnal equinox, the winter solstice in 2005.

계절 중 겨울철인 동지 기간에 TEC값이 가장 낮음을 알 수 있다. 동일한 분석을 2003년에 대해서도 분석해 보았는데 약간 편차가 있지만 비슷한 경향을 나타내며, 2005년이 비해 TEC값이 약간 높음을 확인 할 수 있었다. 이는 태양활동이 2001년에 최고조에 이른 후 점차 약해지는 것과 관련이 있다. 일일 중 UTC 4시 경에 TEC값이 최대값을 나타내는데 이는 한국시간(KST)으로 13시에 해당하는 시점으로 태양 입사량이 최대일 때 TEC값도 최대가 됨을 알 수 있다. 한편, TEC 최소값은 UTC 16시 경에 발생한다.

한편, 몇 몇 경우에는 UTC 8~10시(KST 17~19) 부근에서 TEC값이 다시 약간 상승하는 경향을 보이는데, 이는 전리층 적도변이(Equatorial Anomaly)와 연관된 것으로 분석된다. 적도변이는 중력에 의해 플라즈마가 자기력선을 따라 내려오면서 지자기 적도 15도 내에서 플라즈마 밀도가 최대가 되는 점을 생성하는 현상을 말한다. 적도변이는 지자기 적도를 따라 지구자전 반대방향인 동에서 서로 이동하며 이들이 지나가는 주변 지역의 전리층에 영향을 미치게 되는데, UTC 3~10시경 한반도 아래 상공을 지나가며 전리층에 영향을 미쳐 TEC 값을 증가 시킨다(정명숙, 김정래, 2008). 한국은 미국이나 유럽에 비해 위도는 비슷하지만 지자기 위도는 낮기 때문에 적도 변이에 의한 영향이 상대적으로 크며, 일본 MSAS도 적도 변이에 의한 가용성 저하가 문제되고 있다.

Fig. 3은 일일 평균 TEC값의 연간 변화를 2003년과 2005년에 대해 나타낸 것이다. 2003년은 평균 TEC값이 약 15 TECU 인데 비해 2005년은 평균 약 13 TECU

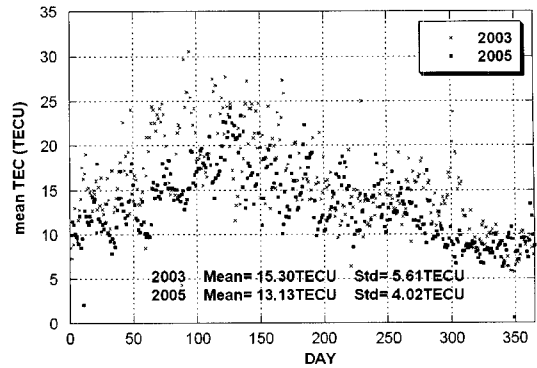


Fig. 3. Annual variations of mean TEC in 2003 and 2005.

로 전체적인 세기가 약간 낮아졌음을 알 수 있다. 1년 중 최대값을 가지는 것은 100~150일 근방으로 4~5월에 해당되며, 최소값은 350일 근방의 12월에 해당된다. 봄철에 비해 겨울철은 20 TECU(2003년) 및 10 TECU(2005년) 정도 낮은 값을 나타낸다. 2003년 TEC값의 표준편차가 5.6 TECU로 2005년의 4.0 TECU보다 높는데 이는 2003년의 태양활동이 2005년에 비해 좀 더 활발하였고, 전리층 폭풍이 또한 많이 일어났기 때문으로 설명할 수 있다. 한편, 2003년은 모두 4000SSI 수신기를 사용하였고, 수신기 데이터 상태가 2005년보다 약간 불안정한 점도 고려될 수 있을 것이다.

#### 4. 전리층 기울기 변화 경향

전리층 판 모델 계수 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) 추정값으로부터 한반도 상공의 동서 및 남북 방향 기울기를 계산하고 그 결과를 분석해 보았다. 2003년과 2005년 일일 평균 데이터를 분석하였으며, 특정 날짜에 대한 일일 변화 분석과 특정 시간대에 대한 연간 분석을 수행하였다. 식 (1)로부터 계산된 기울기는 위도 및 경도 방향의 각도에 대한 TECU 값으로 표현되는데, 이를 GBAS나 SBAS에서 사용하는 전리층 기울기인 mm/km 단위로 변환하였다. 전리층 지연값은 TECU값을 L1 전리층 지연값에 해당되는 mm값으로 변환했고, 각도값은 판모델 중심에서의 위도 및 경도에 대한 거리값으로 변환하여 기울기를 계산하였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 각각 2003년과 2005년 하지일의 일일 남북 방향 기울기 변화를 나타낸 것인데, 동서방향

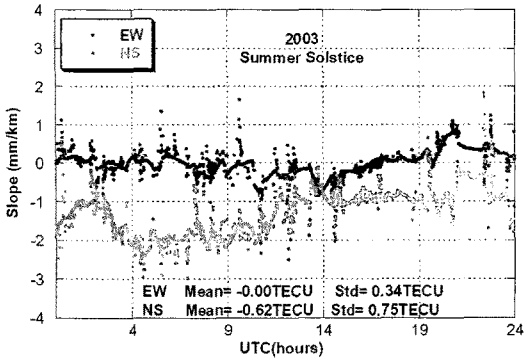


Fig. 4. Daily variations of ionospheric spatial gradients on June 22, 2003.

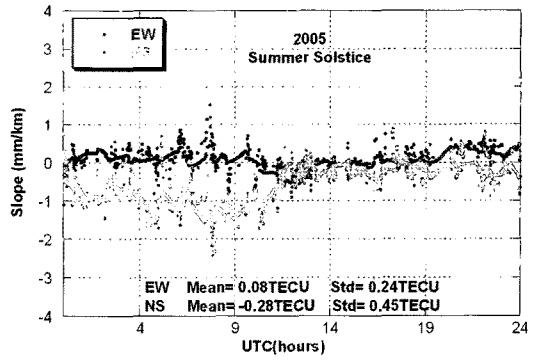


Fig. 5. Daily variations of ionospheric spatial gradients on June 22, 2005.

기울기에 비해 남북방향 기울기의 절대값이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 동서방향의 경우 거의 0에 가까우며 부호가 변화하는데 비해 남북방향은 대부분 음수를 나타내고 있으며, 이는 남쪽의 TEC값이 북쪽의 TEC값보다 높음을 의미한다. 남북 방향 기울기는 태양광이 최대인 UTC 5시(KST 14시) 부근에서 최대값을 가지고, 밤 시간인 UTC 18시 (KST 3시) 근방에서는 양방향 기울기가 모두 0에 가까워지며, 기울기 차이가 거의 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한 2003년과 2005년의 춘분, 추분, 동지 일에 대해서도 일일 기울기 변화를 분석해 보았는데, 변화 경향은 하지일과 마찬가지로 남북 방향 기울기가 동서 방향 기울기보다 크게 나타났다.

Fig. 6과 Fig. 7은 연간 기울기 변화 분석을 위해 각각 2003년과 2005년의 하루 평균 기울기 변화를 나타낸 것이다. 2003년과 2005년의 동서방향 기울기가 0에 근접한 값을 갖는데 반해, 남북방향 기울기는 절대값과

변화량이 큰 것을 알 수 있다. 2003년의 경우 40일에서 190일 사이에 기울기 부호가  $-2\text{mm/km}$ 에서  $+2\text{mm/km}$ 로 크게 변화하는데, 하반기에는  $-1\text{mm/km}$  정도의 일정한 기울기를 가진다. 2005년에는  $-0.6\text{mm/km}$  정도의 기울기를 나타내며, 2003년에 비해 절반 수준의 기울기를 나타냄을 알 수 있다. 두 해 모두 약 50~150일 사이의 봄철기간에 기울기가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 2003년과 2005년에 대해 매일 UTC 4시, 12시 및 18시의 남북 방향 전리층 기울기를 나타낸 것이다. 앞에서 TEC 변화와 마찬가지로 2003년 상반기에 전리층 기울기가 매우 급변하는 양상을 보이고 있다. 2005년 상반기에도 변화 경향이 비교적 큰 것으로 보아 2003년의 활발한 태양활동이외에도 봄철이라는 계절적 요인이 있는 것으로 생각된다. 또한 두 해 모두 낮 시간인 UTC 4시에서 남북방향 기울기가 전반적으로 크게 나타났으며, 밤 시간인 UTC 12시에서 가

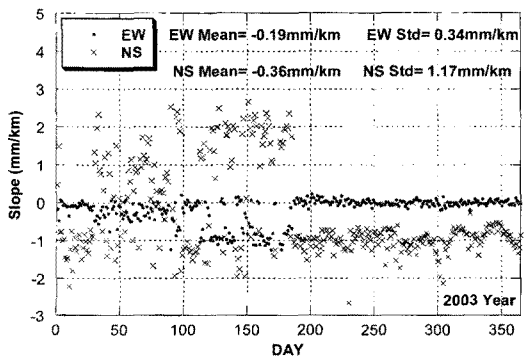


Fig. 6. Annual variation of ionospheric spatial gradients in 2003 - Daily mean values.

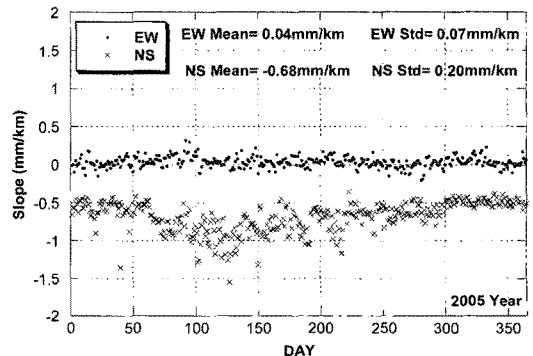


Fig. 7. Annual variation of ionospheric spatial gradients in 2005 - Daily mean values.

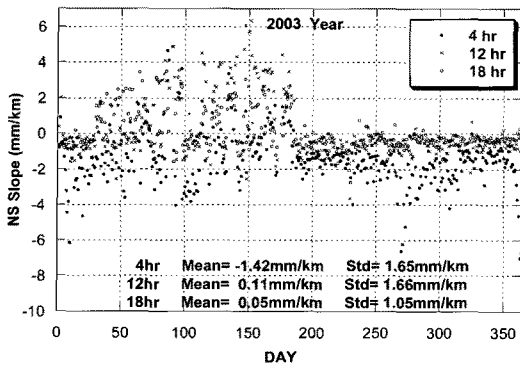


Fig. 8. Annual variations of ionospheric spatial gradient in 2003 - UTC 4, 12, and 18 hours.

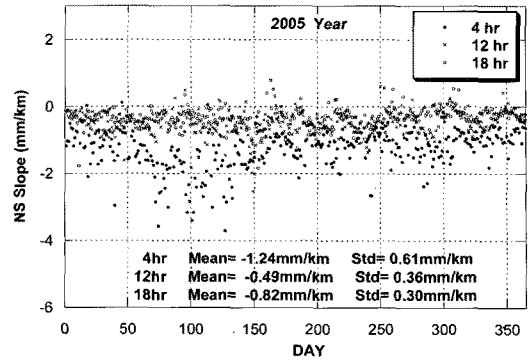


Fig. 9. Annual variations of ionospheric spatial gradient in 2005 - UTC 4, 12, and 18 hours.

장 낮은 기울기 변화를 보이고 있다. 앞의 시간별 TEC 값 변화 분석에서는 UTC 4시 > UTC 12시 > UTC 18시 순으로 UTC 4시에서 가장 TEC값이 높았으나, 전리층 기울기 변화에 있어서는 UTC 4시 > UTC 18시 > UTC 12시 순으로 높게 나타났다. 한편, 2005년의 경우 UTC 18시에서 기울기 변화가 UTC 4시보다 오히려 더 큰 모습을 보였다.

Fig. 10은 동서 및 남북 방향 전리층 기울기의 비에 arctan을 적용하여 각도로 나타내는 것으로 전리층 판 모델의 기울어진 방향을 나타낸다. UTC 4시의 방향에 대해 각각 2003년과 2005년의 연중 변화를 살펴보았다. 여기서 각도는 정동 방향에서의 각도를 의미하며 -90도는 정남 방향으로 기울어진 것(남고북저)을 의미한다. 2005년 방향은 -90도 전후에서 일정한 값을 유지하는데 반해, 2003년 상반기의 방향은 ±90도에서 급격하게 변화함을 알 수 있다. 이는 앞서 TEC 등 다른 데이터 분석 시 2003년 상반기 데이터가 불안정한 것과

연관이 있는 것으로 생각된다. UTC 12시와 18시에 대해서도 동일한 분석을 수행해 보았는데, 2003년과 2005년 모두 낮 시간(4 UTC)의 방향이 더욱 일정한 것으로 나타났다. 이는 낮 시간이 남고북저 현상이 강하게 나타나기 때문이다. 밤 시간에는 전리층 기울기가 크지 않아서 전리층 판모델이 거의 수평을 유지하므로 약간의 기울기 변화만 있어도 전리층 방향이 급변하게 된다.

Fig. 11은 UTC 4시에서 전리층 측정값 잔차율을 2003년과 2005년에 대해 나타낸 것이다. 측정된 전리층 지연값의 모델값과 측정값 사이의 차가 잔차(residual)인데, 잔차가 작을수록 사용한 모델이 측정값과 잘 부합된다고 할 수 있다. 반대로 잔차가 클 경우 실제 전리층 분포가 모델에서 크게 벗어나는 것을 의미하는데, 전리층 폭풍 시 잔차가 급증하게 된다. 잔차를 이용하여 전리층폭풍 발생 여부를 감지하는 방법은 SBAS 전리층지도에도 사용하고 있는 방법이다. 낮과 밤의 전리층 세기에 많이 차이가 있으므로 단순히 잔차 크기만으로 전

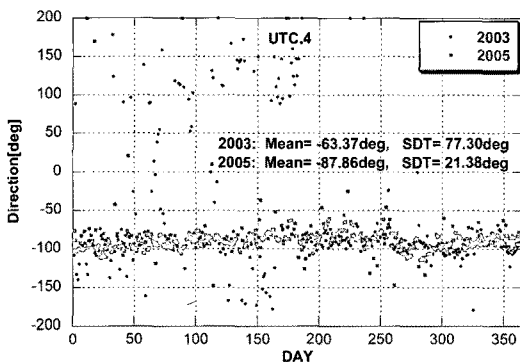


Fig. 10. Annual variation of ionospheric spatial gradient direction at UTC 4 in 2003 and 2005.

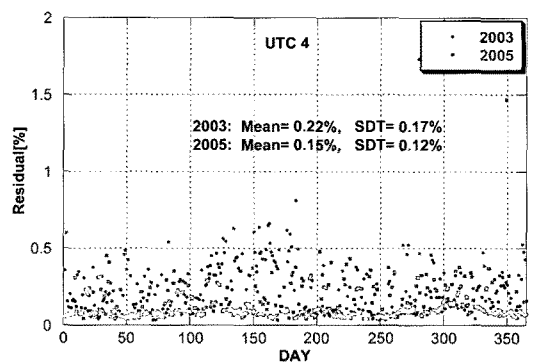


Fig. 11. Annual variation of ionospheric delay residuals at UTC 4 in 2003 and 2005.

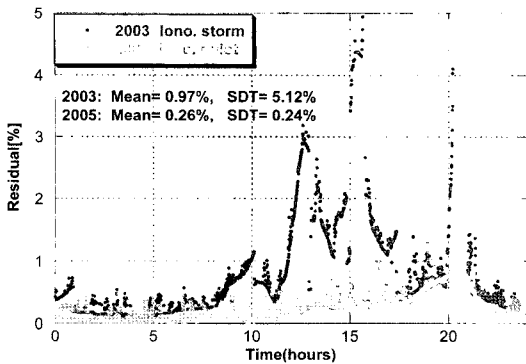


Fig. 12. Daily residual variations on a storm day (March 21, 2003) and a quiet day (March 20, 2005).

리층폭풍 등의 이상 발생 여부를 판단하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 각 시점에서의 잔차 절대값의 평균값을 계산한 뒤 이를 그 시점에서의 평균 전리층 지연값에 대한 비율로 나타내는 방법을 사용하였다. 결과를 살펴보면, 전체적으로 1%이내의 값을 나타내고 있으며, 2005년 잔차율이 2003년보다 낮음을 알 수 있다.

전리층 폭풍 발생 시 잔차율의 변화를 보기 위해 폭풍이 발생한 2003년 3월 21일과 정상상태인 2005년 3월 20일의 잔차율을 Fig. 12에 나타내었다. 2003년 3월 21일의 경우 negative 전리층 폭풍이 있었던 때로, 높은 지자기장 계수  $K_p$ 를 동반하는 일반적인 전리층 폭풍과는 달리  $K_p$  5에서 폭풍이 발생한 특이한 경우이다 (Burns *et al.*, 2001). 2005년 잔차율은 1% 이내에서 완만하게 변화하는데 비해 2003년에는 12 ~ 21 UTC 사이에 급증함을 알 수 있다. 이로부터 잔차율 분석이 전리층 폭풍 발생을 탐지하는데 효과적이라는 것을 알 수 있다. 단, 이러한 분석방법은 정상적인 전리층 지연값이 판모델에 근접할 때 효과적인 것으로, 정상상태 시 잔차 분포 및 변화 경향에 대한 추가 분석이 요구된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 판모델을 이용한 전리층 기울기 분석 프로그램을 개발하고, 2년간 GPS 상시관측소 데이터를 분석하여 한반도 상공의 전리층 기울기를 추정하였다. 2003년과 2005년 데이터를 사용했는데, 태양활동이 활발했던 2003년이 2005년에 비해 전리층 지연값 및 기

울기가 두 배 이상 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 일일 중 시간별 변화 경향에선 낮 시간인 UTC 4시에 전리층 지연값 및 기울기가 밤 시간인 UTC 12시와 18시에 비해 크게 나타났으며, 계절적 변화 경향을 보면 봄과 여름의 전리층 지연값이 가장 크고 겨울에 가장 낮음을 알 수 있었다. 전리층 기울기의 경우 남북과 동서로 나누어 기울기 변화를 분석하였는데 동서보다 남북의 기울기가 더 크게 나타났다. 또한 평균적인 한반도 연간 기울기는 약 2mm/km 이내의 값을 갖는 것을 볼 수 있었다. 전리층 기울기는 시간에 따라 계속 변화하는 값이므로 앞으로 지속적인 데이터 수집과 분석이 요구된다. 전리층폭풍 시에 전리층 모델에 대한 관측값의 잔차가 급증하는 것이 관측되었는데, 이러한 잔차 분석은 전리층폭풍 및 이상 현상을 파악하는데 사용될 수 있다. 본 연구에서 제시한 분석 방법을 기반으로 하여, 2012년 전후로 태양활동이 극대화될 때의 전리층 기울기 데이터를 보강하면 한반도 상공 전리층 활동에 관한 좀 더 체계적인 데이터베이스를 구축할 수 있을 것으로 생각된다. 이러한 자료는 향후 국내 DGPS 응용시스템의 전리층 관련 시스템 개발을 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 기초기술연구회 협동연구사업의 지원에 의한 연구 결과이며, GPS 상시관측소 데이터를 제공한 국토지리정보원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김정래, 양태형, 이영재, 전향식, 남기욱, 2006a. 위성항법시스템 적용을 위한 전리층 기본 연구, 한국항공운항학회지, 14(1): 55-62.
- 김정래, 양태형, 이은성, 전향식, 2006b. 위성항법시스템 적용을 위한 전리층 지연값 기울기 연구, 제어·자동화·시스템공학 논문지, 12(9): 898-904.
- 정명숙, 김정래, 2008. MSAS 전리층 보정정보 및 적도

- 변이에 의한 영향 분석, 한국항공우항학회지, 16(2): 12-20.
- Burns, A. G., Wang, W., Killeen, T. L., Roble, R. G., and Morin, P., 2001. The Evolution of the Causes of Negative Storm Effects at Middle Latitudes, Fall Meeting, American Geophysical Union, San Francisco, California, 10-14 Dec.
- Datta-Barua, S., Walter, T., Blanch, J., and Enge, P., 2005. Can WAAS Availability Be Inferred From Geomagnetic Data? An Analysis, Proc. of the Ionospheric Effects Symposium 2005, Alexandria, Virginia, 3-5 May.
- Ene, A., Qiu, D., Luo, M., Pullen, S., and Enge, P., 2005. A Comprehensive Ionosphere Storm Data Analysis Method to Support LAAS Threat Model Development, Proc. of Institute of Navigation's National Technical Meeting, San Diego, CA, 24-26 Jan., pp.110-130.
- Hernandez-Pajares, M., Zornoza, J. M. J., Subirana, J. S., Farnworth, R., and Soley, S., 2005. EGNOS Test Bed Ionospheric Corrections Under the October and November 2003 Storms, *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(10): 2283-2293.
- Kim, J., Yang, T. H., Lee, Y. J., Jun, H. S., and Nam, G. W., 2006. Ionospheric Storm and Spatial Gradient Analysis for GBAS, Proc. of IAIN/GNSS, Oct. 19, pp.361-365.
- Kim, J., Lee, Y. J., Jun, H. S., and Bae, J. W., 2007. Ionospheric Storm and Spatial Gradient Analysis, Proc. of European Navigation Conference, Geneva, Switzerland, May, 29.
- Konno, H., Pullen, S., Luo, M., and Enge, P., 2005. Analysis of Ionosphere Gradient using Japan GEONET Data, Proc. of Institute of Navigation's national Technical Meeting, San Diego, CA, 24-26 Jan., pp.1118-1129.
- Luo, M., Pullen, S., Dennis, J., Honno, K., Xie, G., Walter, T., and Enge, P., 2003. LAAS Ionosphere Spatial Gradient Threat Model and Impact of LGF and Airborne Monitoring, Proc. of Institute of Navigation's GPS/GNSS Meeting, Portland, Oregon, 9-12 Sep., pp.2255-2274.
- SBAS Ionospheric Working Group, 2003. Ionospheric Research Issues for SBAS - A White Paper, ICAD Navigation Systems Panel (NSP) Meeting, Feb.