

論文

외삽기법을 이용한 전리층 보정정보 영역 확장

김정래*, 김민규*

Extending Ionospheric Correction Coverage Area
by using Extrapolation Methods

Jeongrae Kim* and Mingyu Kim*

ABSTRACT

The coverage area of GNSS regional ionospheric correction model is mainly determined by the distribution of GNSS ground monitoring stations. Outside the coverage area, GNSS users may receive ionospheric correction signals but the correction does not contain valid correction information. Extrapolation of the correction information can extend the coverage area to some extent. Three interpolation methods, Kriging, biharmonic spline and cubic spline, are tested to evaluate the extrapolation accuracy of the ionospheric delay corrections outside the correction coverage area. IGS (International GNSS Service) ionosphere map data is used to simulate the corrections and to compute the extrapolation error statistics. Among the three methods, biharmonic method yields the best accuracy. The estimation error has a high value during Spring and Fall. The error has a high value in South and East sides and has a low value in North side.

Key Words : GNSS (위성항법시스템), ionospheric delay (전리층지연), spatial extrapolation (공간외삽), Kriging, Biharmonic spline

1. 서 론

단주파 위성항법 수신기의 경우 전리층에 의한 신호지연이 주요 오차 요인으로 항법메시지에 포함된 전리층 모델을 이용하여 오차 크기를 감소시키는 방법을 사용한다. International GNSS service (IGS)에서 제공하는 전지구 전리층지도 (ionosphere map)나 국지적으로 생성하는 전리층지도를 이용하면 항법메시지보다 훨씬 정확한 전리층 보정정보를 얻을 수 있다. 현재 IGS 전

리층지도는 후처리로 제공되고 있으므로, 실시간으로 사용하기 위해서는 국지적 전리층지도를 생성하여 사용해야 한다. 국지적인 실시간 전리층지도의 예로는 satellite-based augmentation system (SBAS)의 전리층 보정정보가 있다.

국지적 전리층모델의 적용영역은 위성항법 신호를 수신하는 지상감시국의 분포에 의해 결정된다. 미국과 같이 넓은 지역에 지상감시국이 분포한 경우에는 미국전역을 포함하는 넓은 영역의 전리층모델이 가능하지만, 한국과 같이 좁은 지역에 지상감시국이 분포한 경우에는 좁은 지역을 나타내는 전리층모델의 생성만 가능하다. 좁은 영역에 대한 전리층모델 제한 조건을 극복하기 방법으로 보정정보 영역 외곽에서 외삽 (extrapolation)을 사용한 전리층 보정정보 영역 확장을 고려할 수 있다. 보정정보 영역 내에서의 데이터를 외삽하여 외곽에서의 값을 추정하면 어

2014년 08월 14일 접수 ~ 2014년 09월 20일 심사완료
논문심사일 (2014.08.29, 1차), (2014.09.15, 2차)

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail : jrkim@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

는 정도의 전리층오차 감소가 가능하다.

대부분의 외삽기법은 내삽(interpolation)기법을 확장하는 방법을 사용하는데, 데이터 특성에 따라 적합한 내삽기법도 다르게 된다. 본 연구에서는 3가지 외삽기법을 이용하여 한반도 전리층지도 확장 가능성을 분석하였다. 적용한 기법은 최근 전리층지도 내삽에 많이 사용되는 Kriging 방법과 biharmonic spline 방법 및 일반적인 cubic spline 방법이다. IGS에서 제공하는 한반도지역 실제 전리층지도를 사용하여 각 외삽 방법에 따른 추정오차를 분석하였다.

국지적 전리층모델에 해당하는 SBAS의 경우 위치정확도 향상을 위한 보정정보 이외에 보정정보의 신뢰성을 나타내는 무결성정보를 제공하는데, 외삽방법을 사용할 경우 보정정보의 오차가 증가하므로 무결성 성능이 저하된다. 본 연구에서는 정확도 측면에 주안점을 두어 분석을 수행하였다. 실시간 적용 시 단주파 global positioning system (GPS) 수신기에서는 방송메시지에 포함된 Klobuchar 모델을 사용하는데, 외삽에 의한 보정정보 오차와 Klobuchar 모델의 오차를 비교하여, 외삽기법의 효용성을 분석하였다.

2. 데이터 내삽기법

공간내삽(spatial interpolation) 기법을 적용하여 외삽을 수행하였는데, 일반적인 cubic spline [1] 방법을 제외한 Kriging과 biharmonic spline 알고리즘에 대해 정리하였다.

2.1 Kriging 기법

Kriging 기법은 1960년대 Krige에 의해 지질자원 추정을 목적으로 개발된 기법을 발전시킨 것인데, 현재는 다양한 분야에서 사용되고 있다. Kriging 추정값 \hat{z} 는 다음과 같이 n 개 데이터 z_i 의 가중치 합으로 구성된다[2].

$$\hat{z} = \sum_{i=1}^N w_i z_i \quad (1)$$

여기서 w_i 는 가중치를 의미한다. 가중치 행렬은 BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) 조건을 이용하여 계산할 수 있는데, 기대 평균값 모델링 방법에 따라 simple, ordinary 및 universal Kriging 방법으로 나누어진다. 많이 쓰이는

ordinary Kriging은 기대 평균값으로 정적인 1차 모멘트를 가정하는데, 가중치 행렬 w_i 를 계산하는 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & 0 & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & 0 & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 λ 는 가중치의 합이 1이라는 제한조건을 적용하기 위한 Lagrange multiplier이다. Semivariance γ 는 일정한 거리만큼 떨어진 모든 샘플 데이터 사이의 분산의 1/2로 정의된다.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} (z_i - z_{i+h})^2 \quad (3)$$

h 는 관측값과 추정값 사이의 거리를 의미하며, N_h 는 h 거리만큼 떨어져있는 데이터 조합의 개수를 의미한다. γ 는 데이터 위치 사이의 거리에 따른 관측값 차이에 대한 통계값을 제시한다. 관측데이터를 이용하여 각각의 h 에 대한 $\gamma(h)$ 를 계산한 뒤, 이를 최적으로 묘사하는 근사치모델을 결정하는데, 이를 variogram이라고 한다. Variogram 모델은 관측데이터 특성에 따라 선택하면 되는데, Gaussian, spherical, exponential 및 circular 함수 모델 등을 사용한다[2]. Gaussian 함수 모델의 경우 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \left(1 - e^{-(h/\alpha)^2}\right) \quad (4)$$

여기서 근사치 계수 c_0 , c_1 및 α 는 관측데이터의 variogram을 계산한 뒤 최소자승법으로 결정할 수 있다.

2.2 Biharmonic spline 기법

Biharmonic spline 기법은 Green 함수를 기저 함수(basis function)로 사용하여 관측데이터를 모두 통과하는 최소곡률(curvature) 함수를 구성하는 내삽방법이다 [3,4]. N 개의 데이터 x_j 에 대해 내삽함수 $w(x)$ 는 다음 방정식을 만족하도록 설정한다.

$$\begin{aligned} \nabla^4 w(x) &= \sum_{j=1}^N \alpha_j \delta(x - x_j) \\ w(x_j) &= w_j \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 ∇^4 는 biharmonic 연산자이며, δ 는

dirac delta 함수이다. x 는 위치벡터이며, $w(x)$ 는 Green 함수 $\phi(x)$ 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \phi(x - x_j) \quad (6)$$

2차원 Green 기저함수 $\phi(x)$ 는 다음과 같다.

$$\phi(x) = |x|^2 (\ln|x| - 1) \quad (7)$$

위 식에서 각 데이터에 대한 가중치 계수 α_j 를 계산하면, 내삽함수 $w(x)$ 를 계산할 수 있다. α_j 는 각 방향의 기울기 s_i 를 최소화하는 조건으로부터 얻을 수 있는데, 이에 관한 식은 다음과 같다.

$$s_i = (\nabla w \cdot n)_i = \sum_{j=1}^N \alpha_j \nabla \phi(x - x_j) \cdot n_i \quad (8)$$

기울기 s_i 는 n_i 의 방향의 단위벡터를 의미한다.

Biharmonic 방법은 데이터 개수가 많을 때 수치적으로 불안정해지는 경향이 있으며, 데이터가 밀집해 있을 때 기울기 차이가 급격해지면 overshoot하는 경향이 있다[4]. 그래서 밀집된 데이터보다는 넓게 분포되어 있는 데이터의 내삽에 적합한 방법이다. Biharmonic 방법은 cubic spline 방법과 함께 MATLAB의 기본 함수로 제공되고 있다.

3. 데이터 분석 방법

최적의 외삽기법 및 추정오차 크기는 데이터 특성에 따라 크게 변하기 때문에 실제 전리층 데이터를 사용하여 오차를 분석하였다. IGS는 전 세계 전리층 지도를 제공하고 있는데 [5], 위도방향으로 2.5° 및 경도방향으로 5°로 나누어진 격자점(grid)에서의 전리층 지연값을 2시간 간격으로 제공하고 있다. SBAS 등 국지적 전리층 보정 정보와 IGS에서 제공하는 전리층 보정 정보의 정확도가 비슷하기 때문에, 한반도 지역의 IGS 전리층 지도를 국내에서 운영하는 국지적 전리층 지도로 설정하였다.

Fig. 1은 5°x5° 간격으로 설정한 전리층 관측값 영역(□)과 주위의 추정 영역(O)을 나타내고 있다. 관측영역은 위도 25~50°, 경도 110~145°의 직사각형으로 구성하였는데, 이는 대전 지역에서 GPS 신호의 최소경사각을 5°로 설정하였을 때 생성 가능한 전리층 지도의 영역과 거의 일치한

다. 국내 지상감시국 구축 시 대전이외에 국내 여러 지점에 감시국을 설치하기 때문에 GPS 감시영역이 대전만 고려했을 때보다는 약간 커지게 된다. 하지만 5°x5° 격자점에서는 큰 차이를 유발하지 않고, 실제 보정정보 생성에 사용되는 최소경사각은 5°보다 크기 때문에 대전에서 5°인 영역을 설정하였다. 국내격자기반 내삽기법 적용을 용이하게 하기 위해서 최소경사각을 고려할 때 생성되는 원형 영역대신 직사각형 영역을 설정하였다.

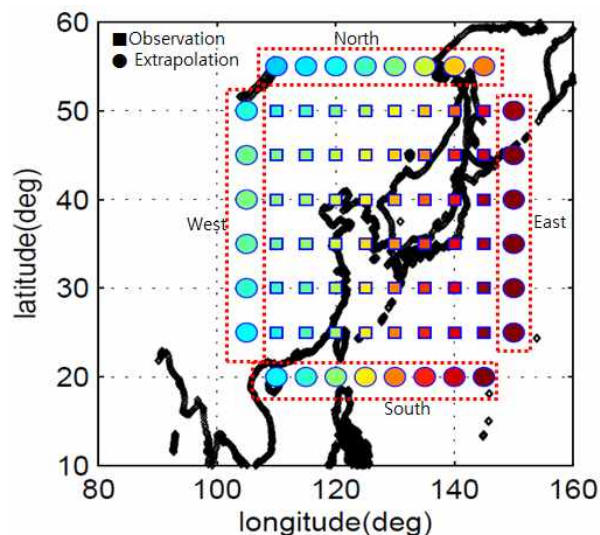


Fig. 1 전리층 데이터 관측영역과 추정영역 (동서남북 방향 5° 확장)

각 격자의 간격은 위도/경도 방향으로 모두 5°이다. IGS 전리층 지도는 위도 방향으로 2.5° 간격의 데이터를 제공하지만 SBAS에 근접한 상황을 구현하기 위해 5° 간격의 데이터만 사용하였다. 외삽에 의한 외곽지역 추정 영역은 동서남북 방향으로 5° 및 10°로 설정하였는데, Fig. 1에는 5° 영역만 제시되어 있다. 5°일 경우 북쪽 추정 영역은 위도 55° (경도 110~145°) 지역이지만, 10°일 경우 추정영역은 위도 60°가 된다.

4. 외삽오차 분석 결과

4.1 Kriging 기법 최적화

Kriging 기법은 variogram 함수값에 크게 영향을 받으므로 처리하려는 전리층 데이터에 가장 적절한 variogram 함수를 설정하는 것이 필요하다. 이를 위해서 4가지 함수를 적용하여 추정오

차를 비교하였다.

Fig. 2는 2011년 10월 25일 6UT (15KST)에 관측데이터의 variogram 분포와 식 (4)에 제시된 Gaussian 함수를 나타낸 것이다. 중간 거리 영역에서 기울기가 증가하다가 거리가 멀어지면 완만한 기울기 증가를 보이는 형태이다. 이론적으로 거리 h 가 0일 때 $\gamma(h)$ 값은 0이 되어야 하지만, 노이즈 등 각종 오차 요인으로 0이 되지 않는 경우가 있는데, 이를 nugget 효과라고 한다. 본 연구결과의 nugget 효과는 크지 않은 것으로 파악되었다. 이러한 variogram은 전리층활동에 따라 달라지기 때문에 가급적 많은 데이터를 이용하여 최적의 variogram 함수를 선정하는 것이 필요하다.

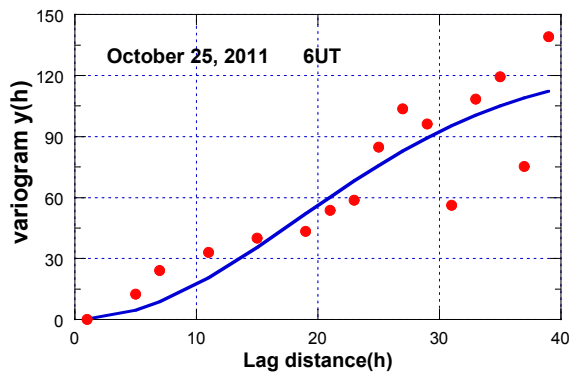


Fig. 2 Kriging variogram 및 Gaussian 근사함수 (2011년 10월 25일 6UT)

Fig. 3은 Kriging 사용 시 4가지 variogram 함수 종류에 따른 추정오차 변화를 나타내고 있다. Gaussian 함수 이외에 spherical, exponential 및 circular 함수를 시험하였다. 2011년 10월 22일 (294일)부터 27일(300일)까지 6일간 데이터를 이용하여 5° 외부 영역에서의 외삽 추정오차를 계산하였다. 이 기간을 선택한 이유는 10월 25일과 26일 전세계적으로 전리층폭풍이 발생하여 전리층 급변에 따른 영향을 분석하기에 적합하기 때문이다. 추정오차는 전리층에 의한 신호지연 크기를 나타내는 TECU (Total Electron Content Unit)으로 표시되었는데, 1 TECU는 GPS L1 주파수 신호지연의 0.16m에 해당된다. 식 (4)에서 제시한 Gaussian 방법이 다른 3가지 방법에 비해 오차평균이 2.60 TECU로 다른 함수에 비해 45~50% 정도 적은 값을 나타냈다. 이러한 이유로 Gaussian variogram 함수를 선택하였다.

Kriging 기법을 사용할 때 필요한 것이 원 데이터에 포함된 경향성을 제거하는 detrending 작

업인데, 일반적으로 간단함 함수를 적용하여 수행한다. 본 연구에서는 전리층 데이터에 1차 평면함수 및 2차 곡면함수를 적용하여 detrending을 수행하였으나, 추정오차 변화가 없거나 오히려 증가하기도 하였다. 이는 Kriging이 많이 쓰이는 내삽에서는 detrending이 효과적이지만 본 연구의 외삽에서 효과가 크지 않은 것으로 생각된다. 이러한 특성은 한반도 전리층 분포 특성과 관련 있는 것으로 생각되며, 향후 추가 연구가 필요한 부분이다.

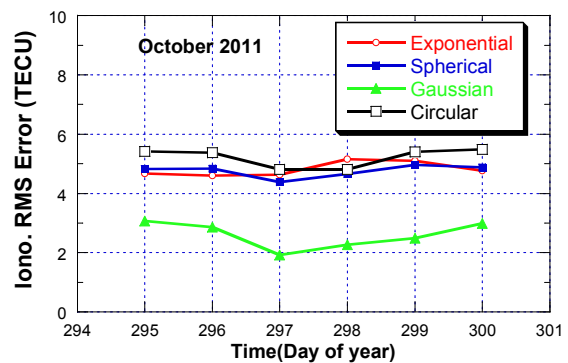


Fig. 3 Kriging 사용 시 Variogram함수에 따른 추정오차 변화 (2011년 10월 22일~27일)

4.2 시간별 추정오차 변화 경향

제시한 3가지 추정방법 중 전리층 데이터 처리에 가장 적합한 방법을 찾기 위해서 비교 분석을 수행하였다. 1일간 전리층 데이터에 3가지 추정방법을 적용하여 추정오차를 비교하고, 동서남북 방향에 따른 오차변화도 분석하였다.

Fig. 4는 2011년 10월 25일 Kriging, biharmonic 및 cubic spline 방법을 사용한 외곽에서 5° 떨어진 외삽영역에서의 RMS 오차를 나타낸 것이다. 시간 별 평균 전리층크기도 같이 표시하였다. 시간은 universal time coordinated (UTC)로 표시되어 있으며, 0 UT는 9 Korea standard time (KST)에 해당한다. 5° 영역에서 추정오차의 1일 평균값은 Kriging이 3.36 TECU이고 cubic spline이 3.13 TECU인데 비해, biharmonic이 1.84 TECU로 가장 낮은 값을 가진다. GPS 방송메시지에 포함된 Klobuchar 전리층 모델(Broadcast)에 의한 오차도 같이 표시하였는데, 1일 평균값은 11.56 TECU로, 3가지 외삽방법 모두 Klobuchar 모델값보다는 훨씬 정확한 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 외곽 10° 영역에서의 추정오차를 제

시하고 있는데, 3개 방법의 차이가 매우 커진다. Kriging 평균 RMS오차가 17.80 TECU이고 Cubic spline이 13.10 TECU인데 비해, biharmonic은 5.56 TECU 정도이다. Klobuchar의 평균 RMS오차는 13.13 TECU로 Cubic spline과 비슷한수준이다. 외삽에 의한 오차가 Klobuchar 오차보다 큰 경우에는 외삽방법을 사용할 필요가 없으므로, 외곽 10° 영역에서는 Klobuchar 보다 훨씬 적은 오차를 나타낸 biharmonic 방법만이 외삽에 적합한 것으로 판단된다.

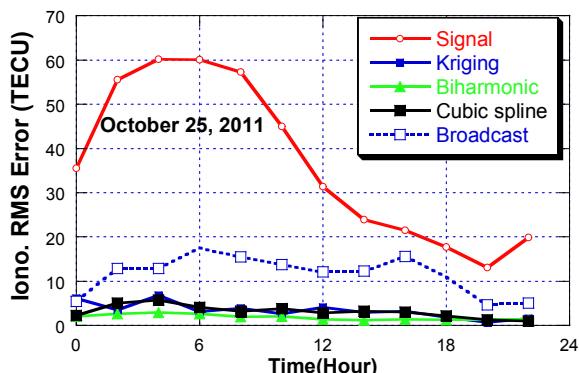


Fig. 4 시간에 따른 추정오차 변화 (2011년 10월 25일, 확장범위=5°)

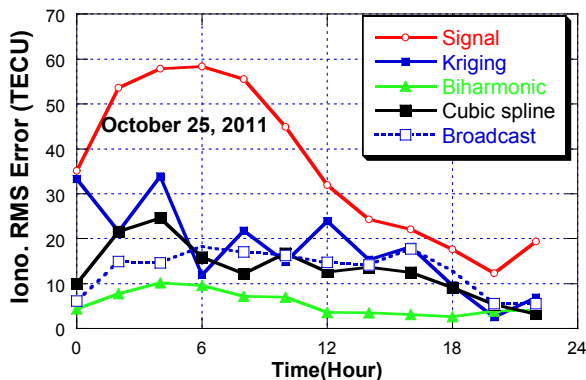


Fig. 5 시간에 따른 추정오차 변화 (2011년 10월 25일, 확장범위=10°)

전리층 보정정보 외삽을 적용하는 경우 일반적으로 동서남북 중 특정한 방향의 외삽만이 필요한 경우가 많다. 외삽 추정오차는 전리층 데이터 특성에 따라 달라지므로 우선 한반도 상공에서의 전리층분포를 살펴볼 필요가 있다. 전리층분포는 일반적으로 지구자기장 적도 방향에서 가장 높고 위도가 높아질수록 낮아지게 된다. 지구자기적도에는 태양입사방향을 따라서 주위보다

높은 밀도의 전리층이 분포를 하는데, 이를 적도변이(equatorial anomaly)라고 한다. 지리위도에 비해 지구자기적도가 낮은 한반도에서는 적도변이에 의한 전리층급증을 고려할 필요가 있다. 적도변이는 한반도 남쪽 지역을 매일 오후 3~4시 경에 통과하는데 이때 남쪽지역의 전리층 신호지연이 급증하게 된다.

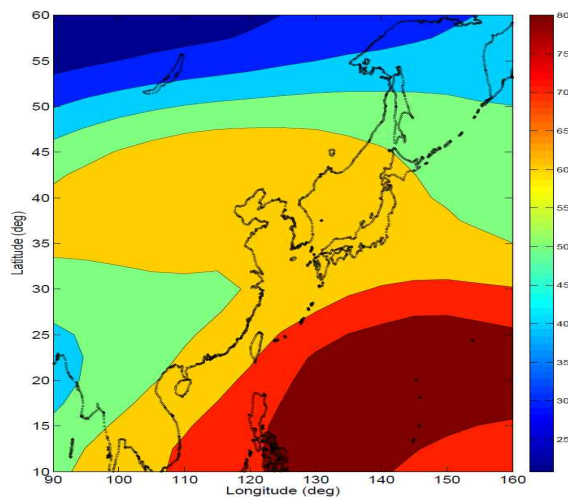


Fig. 6 동아시아 전리층 지연값 분포 (2011년 10월 25일 6UT, 단위=TECU)

Fig. 6은 IGS 전리층 지도를 이용한 동아시아 전리층분포를 나타내고 있다. 2011년 10월 25일 15 KST로 남쪽에 높은 전리층 지연값을 유발하는 적도변이가 통과하는 것을 알 수 있다. 이에 비해서 북쪽은 상당히 낮은 전리층 지연값을 가진다. 오후 시간의 동서방향은 전리층의 차이가 크지 않은데, 일출이나 일몰 직전에 태양입사 여부에 따라 상대적으로 큰 차이가 나게 된다. 두 지점 사이의 전리층 지연값 차이를 두 지점 사이의 거리로 나눈 것을 전리층 공간기울기라고 하는데, 한반도상공 전리층 기울기 평균값은 남북방향이 0.65mm/km이고, 동서방향이 0.02mm/km이다 [6]. 이값은 동서방향의 경우 일출/일몰 시간에 기울기부호가 바뀌기 때문에 평균값은 0에 가까운 값을 가진다.

Fig. 7은 2011년 10월 25일 동서남북 방향별 시간에 따른 추정오차 변화를 나타내고 있다. Fig. 1의 추정영역(O)을 4 부분으로 나누어서 각 방향에서의 RMS 오차를 계산하였다. 앞의 분석에서 추정정확도가 가장 좋은 biharmonic 방법을 사용하였으며, 외곽 5° 영역까지 추정하였다. 추정오차는 남쪽에서 가장 크게 나타나고 다음으

로 동쪽에서 크게 나타나고 있다. 오차가 가장 낮은 것은 북쪽 방향으로 1일 평균 RMS오차는 2.15 TECU이다. 모든 방향에 대해 전리층활동이 활발한 5~6 UT (14~15 KST)에서 오차도 급증하지만 북쪽방향은 증가정도가 크지 않은 것을 알 수 있다.

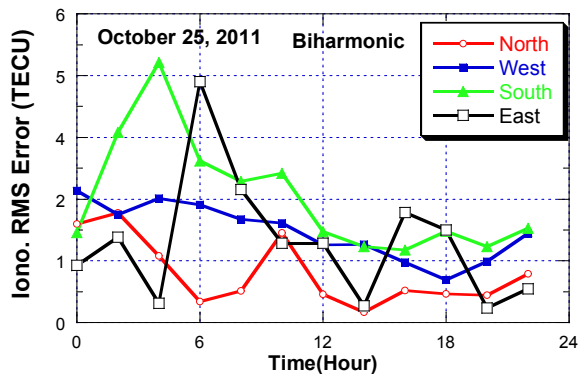


Fig. 7 각 방향별 시간에 따른 추정오차 변화 (Bi-harmonic 방법, 2011년 10월 25일)

Fig. 8은 방송메시지의 Klobuchar 모델을 사용하였을 때, 2011년 10월 25일 동서남북 방향별 시간에 따른 추정오차 변화를 나타내고 있다. Fig. 7의 bi-harmonic 방법과 비교하여 모든 방향에서 훨씬 큰 오차를 나타냄을 알 수 있다. 오차 크기 차이가 상대적으로 적은 북쪽 방향의 경우에도 bi-harmonic 방법에 비해 항상 큰 오차를 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 모든 4방향에 대해 bi-harmonic 외삽방법이 Klobuchar 모델보다 효율적임을 알 수 있다.

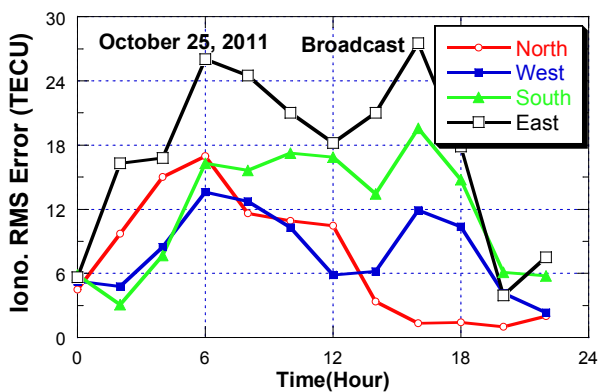


Fig. 8 각 방향별 시간에 따른 추정오차 변화 (GPS 방송메시지, 2011년 10월 25일)

4.3 1년간 추정오차 변화 경향

외삽정확도가 가장 우수한 bi-harmonic 방법을 사용하여 1년간 추정오차 변화를 분석하였다. 전리층세기 및 추정오차는 태양활동과 밀접한 관련이 있으므로, 태양흑점활동 극저기와 극대기인 2007년과 2012년 데이터를 분석하였다. 태양흑점활동은 약 11년 주기로 변하는데 지난 2001년에 극대기였다.

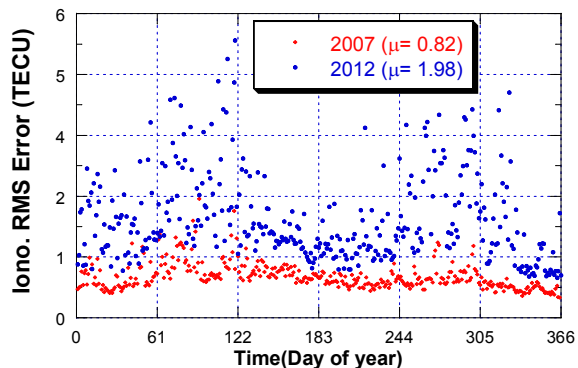


Fig. 9 1년간 추정오차 변화 (Bi-harmonic 방법)

Fig. 9는 2007년과 2012년 bi-harmonic 방법을 사용한 추정오차를 나타내고 있다. 2시간 간격으로 RMS오차를 계산한 뒤 1일 평균을 계산하였으며, 외삽영역은 외곽 5°이다. 전리층활동이 약한 2007년의 일일 RMS 오차 평균은 0.82 TECU이며, 전리층활동이 활발한 2012년의 오차 평균은 1.98 TECU로 2배정도 증가하였다. 2012년의 경우 계절에 따른 큰 변화를 보여주고 있는데, 봄과 가을에 오차가 급증하는 것을 알 수 있다. 이는 전리층 지연값의 계절 변화와 일치하며, 오차크기는 전리층 지연값 세기에 비례하는 것을 알 수 있다. 1일 RMS오차 최대값은 2007년에 2.34 TECU인데 반해 2012년에 5.47 TECU로 비올로는 2배 정도 증가하였다.

Fig. 10은 2007년 각 방향 별 추정오차를 나타낸 것인데, 4방향 모두에서 RMS오차 평균은 1 TECU이하이며, 남쪽과 동쪽 방향에서 봄/가을에 오차 급변이 관측된다. 1 TECU 이하의 오차는 16cm 이하의 오차에 해당되는데, GPS code 의사거리만을 이용한 위치결정에서는 크게 문제되지 않는 수준이다. 특히 북쪽 방향의 0.55 TECU 오차는 9cm 정도의 의사거리 오차로 매우 적은 수준이다.

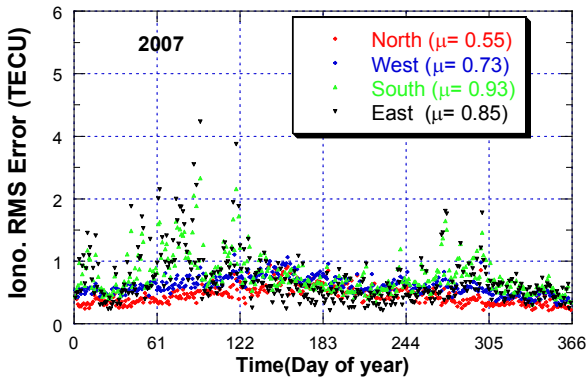


Fig. 10 각 방향별 시간에 따른 추정오차변화 (Biharmonic 방법, 2007년)

Fig. 11은 2012년 각 방향별 추정오차를 나타낸 것인데, 2007년에 비해 오차크기가 2배 이상 증가한 것을 알 수 있다. 북쪽과 서쪽 방향에 비해 남쪽과 동쪽 방향 오차가 대폭 증가하였다. 특히 봄과 가을의 남/동쪽의 오차가 급증하는 것을 알 수 있다. 하지만 북쪽방향의 오차 평균은 0.90 TECU로 전리층활동이 활발한 시기에도 전리층 보정정보 외삽을 이용하여 안정적인 위치결정이 가능한 것을 알 수 있다.

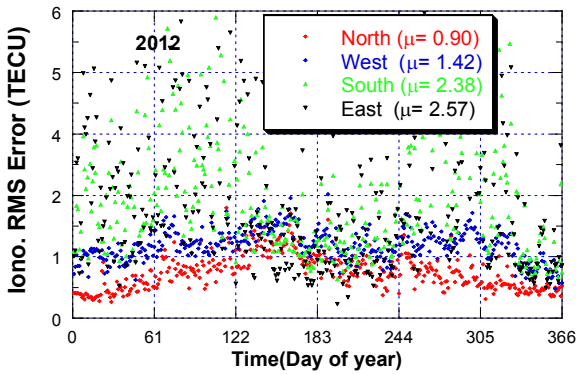


Fig. 11 각 방향별 시간에 따른 추정오차 변화 (Biharmonic 방법, 2012년)

표 1은 각 방향 및 전체 오차의 1년간 RMS 평균을 Klobuchar 모델과 비교한 것이다. Biharmonic 방법을 이용하면 모든 방향에 대해 Klobuchar 모델보다 훨씬 낮은 오차를 나타내며, 2007년에는 83%, 2012년에는 81%의 오차감소를 나타내었다.

Table 1. 각 방향 및 전체 추정오차의 1년 평균 (Biharmonic 방법 및 GPS 방송메시지, 단위=TECU)

| Mean RMS Error | 2007 | | 2012 | |
|----------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | Biharm onic | Broad cast | Biharm onic | Broad cast |
| N | 0.55 | 5.14 | 0.90 | 6.00 |
| W | 0.73 | 4.69 | 1.42 | 8.95 |
| S | 0.93 | 4.71 | 2.38 | 10.89 |
| E | 0.85 | 4.09 | 2.57 | 14.91 |
| Total | 0.82 | 4.87 | 1.98 | 10.63 |

5. 결 론

외삽기법을 사용하여 국지적 전리층 보정정보 영역을 확장하는 방법을 제시하고 보정정보 추정 오차를 분석하였다. Kriging, biharmonic spline 및 cubic spline 방법을 IGS 전리층 보정정보에 적용하여, 외곽 지역의 오차를 분석하였다. 외곽 5° 지역의 경우 3가지 방법 모두 오차평균이 4 TECU 이내로, 방송메시지에서 제공하는 Klobuchar 모델보다 70%이상 향상된 정확한 보정정보를 제공하여 전리층영역 확장에 도움을 주었다. 하지만, 외곽 10° 지역의 경우에는 biharmonic 방법만 적합한 것으로 나타났다. 전리층 내삽에 많이 사용되는 Kriging 방법은 외삽에는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 외삽 추정 오차는 전리층 지연값 변화와 높은 상관 관계를 가지는데, 1일 중 오후 2~3시 부근에 극대값을 가지며, 1년 중 봄과 가을에 극대값을 가진다. 방향별 추정오차는 남쪽과 동쪽에서 가장 크게 나타났으며, 북쪽에서 가장 적게 나타났다. 북쪽방향 외삽의 경우 2012년 전리층 극대기에도 평균 추정오차가 15cm 정도로 외삽방법을 사용하여 안정적인 위치결정이 가능하다.

실제 국지적 전리층모델을 적용할 경우, 보정정보 영역의 중심에서 멀어질수록 보정정보의 정확도가 떨어지게 된다. 반면에 본 연구에서 기준값으로 사용한 IGS 보정정보는 모든 보정정보 영역에서 비슷한 수준의 정확도를 가진다. 이러한 이유로 실제 국지적 전리층 보정정보를 외삽

할 경우 보정정확도는 본 연구결과보다는 낮아질 것으로 예상된다. 하지만, Klobuchar 모델보다 훨씬 높은 정확도를 고려할 때 외삽기법의 효용성은 증명 되었다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) Press, W.H. et al, *Numerical Recipes 3rd Edition: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, 2007.
- 2) Diggle, P.J. and Tawn, J.A. 1998., "Model-based geostatistics", *Applied Statistics*, V.47, P.3, 1998, pp.299-350.
- 3) Foster, M. P. and Evans, A. N., "An Evaluation of Interpolation Techniques for Reconstructing Ionospheric TEC Maps", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 7, 2008, pp.2153-2164.
- 4) Sandwell, D. T., "Biharmonic Spline Interpolation of GEOS-3 and SEASAT Altimeter Data", *Geophysical Research Letters*, No. 2, 1987. pp.139-142.
- 5) IGS home page: <http://www.igs.org>
- 6) Kim, J. et al., "An annual variation analysis of the ionospheric spatial gradient over a regional area for GNSS applications", *Advances in Space Research*, V.54, No.3, 2014, pp.333-341.