IRI 모델을 이용한 저궤도 전리층 지연값 배율 결정

김정래[†] · 김민규

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Determination of Ionospheric Delay Scale Factor for Low Earth Orbit using the International Reference Ionosphere Model

Jeongrae Kim[†] and Mingyu Kim

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract : Determination of an ionospheric delay scale factor, which converts ground-based ionospheric delay into low Earth orbit ionospheric delay, using the international reference ionosphere model is proposed. Ionospheric delay from international GNSS service model combined with IRI-derived scale factor is evaluated with NASA GRACE satellite data. At approximately 480km altitude, mean and standard deviation of the scale factor are 0.25 and 0.01 in 2004. The scale factor reaches high in night time and Spring and Fall seasons. Ionospheric delay error by the proposed method has a mean of 3.50 TECU in 2004.

Key Words : Low Earth orbit, Ionosphere, ionospheric delay scale factor

요약 : 지상기반 전리층모델로 계산한 전리층 지연값을 저궤도에서의 전리층 지연값으로 변환하기 위해서는 전리층 변환 배율 적용해야 하는데, 이러한 배율을 IRI 전리층모델을 사용하여 결정하는 기법을 제안하였다. IGS 전리층모델에 전리층 배율을 적용하여 계산한 전리층 지연값을 NASA GRACE 위성의 관측값과 비교하였다. 약 480 km 고도에서 2004년 평균 배율은 0.25이며, 표준편차는 0.01이다. 전리층 배율은 주간에 비해 야간에 상대적으로 증가하며, 계절적으로는 봄, 가을에 높은 값을 가진다. IGS모델에 전리층배율을 결합해서 추정한 저궤도 전리층 지연값 추정 오차 평균은 3.50 TECU이다.

1. 서론

저궤도위성의 궤도결정을 위해 Global Navigation Satellite System(GNSS) 수신기가 주로 사용되고 있는데,

많이 탑재되는 L1 단주파 수신기는 전리층에 의한 신호 지연 보정이 필요하다. 이를 위해서는 GNSS 항법메시지나 International GNSS Services(IGS) 등 전지구 전리층 지도에서 제공하는 Total Electron Content(TEC) 모델을

접수일(2014년 3월 14일), 수정일(1차 : 2014년 4월 28일), 게재확정일(2014년 4월 28일).

[†] 교신저자: 김정래(jrkim@kau.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사용해야 한다. 그런데, 대부분의 전리층모델에서 제공하는 TEC은 지표면에 위치한 사용자를 대상으로 생성하기 때문에, 지상보다 항법신호가 통과하는 전리층구간이 짧은 저궤도위성에는 그대로 적용할 수 없다. 지상에서 수신하는 신호에 포함된 TEC에 대한 저궤도위성에서 수신하는 신호의 TEC 비율을 나타내는 배율인수(scale factor)를 사용하면 지상을 기준으로 한 TEC을 저궤도위성에 대한 TEC으로 변환하는 것이 가능하다. 전리층 배율은 고도에 따른 전리층분포의 함수인데, 시간과 장소에 따라 변하기 때문에 단일한 상수값을 사용할 수 없다. 전리층 배율의 다른 응용 분야는 단주파 레이더 고도계를 들 수 있다. 초단파신호를 이용한 단주파 고도계는 모델을 사용하여 전리층오차를 제거해야 하는데, 저궤도위성과 반대로 위성고도 이하에 분포한 전리층 정보가 필요하다. 전체 TEC에서 상층부 TEC을 빼면 하층부 TEC을 계산할 수 있고, 전리층오차 보정이 가능하다.

3차원 전리층분포를 나타내는 전리층모델을 사용하면 전리층 지연값 배율을 계산할 수 있는데, International Reference Ionosphere(IRI)가 대표적인 3차원 모델이다(Bilitza 2001). 위도, 경도, 고도, 시간 및 환경변수를 입력으로 전자수 및 TEC에 대한 정보를 제공하는 IRI 모델을 사용하면 특정 고도이상에 분포한 TEC을 계산할 수 있고, GNSS 위성부터 지상까지의 전체 TEC에 대한 상층부 TEC의 비율을 계산할 수 있다. 특정한 위도, 경도에서 고도를 변화시켜 가면서 고도별 전자수를 계산한 뒤 이를 수치적분하면 전체 TEC 및 전리층 배율을 계산할 수 있다.

Montenbruck과 Gill(2002)은 전리층 배율을 사용하여 IGS 전리층 정보를 저궤도위성용으로 변환하는 방법을 제안하였다. Chapman 전리층 프로파일을 사용한 간단한 해석식을 사용하여, 시간과 위치에 대한 프로파일 변화를 반영하지는 못하였다. Hwang(2005)은 GPS 코드와 도플러 적분값의 차이를 이용하여 전리층오차를 추정하는 방법을 제안하였다. 단주파 GPS 수신기에 많이 적용되는 방법으로는 GPS 코드와 반송파를 결합하여 전리층오차를 추정하는 Group And Phase Ionospheric Combination(GRAPHIC) 방법이 있는데 Yunck(1996), Berthias(2001), Yoon(2002) 및 Montenbruck(2003) 등이 이를 적용하여 위치정밀도를 향상시켰다. 이 방법은 반송

파 관측값이 필요하고, 반송파 미지정수 결정이 필요하다는 단점이 있다. 최근 저궤도위성용 전리층연구는 편대비행하는 저궤도 위성의 상대거리를 차분방법(Differencing method)으로 추정할 때 필요한 전리층차이를 추정하는데 많이 적용되고 있다(Yang *et al.*, 2013, Tancredi *et al.*, 2011).

본 연구에서는 IGS 등의 지상기반 전리층모델을 저궤도위성에 가해지는 전리층오차로 변환하기 위한 전리층 배율을 IRI 전리층모델을 사용하여 계산하는 기법을 제안하였다. 이를 이용하여 IGS 전리층 지연값을 변환한 뒤 저궤도위성에서 관측한 전리층 지연값과 비교하여 제안된 방법의 정확성을 분석하였다. 1년간의 장기 데이터틀 사용하여 배율 변화 경향 및 정확도를 분석하였다.

2. IRI 모델 및 전리층 배율결정 기법

1) IRI 모델

IRI 모델은 Committee on Space Research(COSPAR)와 International Union of Radio Science(URSI)에 의해 개발된 경험적 전리층 모델(Bilitza 1990, 2001)로 전세계 연구기관으로 구성된 연구그룹에 의해 계속 개정되고 있다. 간단한 모델식 대신 조건에 따른 다양한 식과 관측데이터로부터 생성된 데이터베이스로 구성되어 있기 때문에, 모델 수식 대신 포트란 소스코드를 통해 제공된다. 이 코드를 활용하여 인터넷을 통해 IRI 모델로부터의 전리층 관련값을 계산할 수 있는 기능도 제공한다. IRI 모델은 입력한 위치, 시간에 따라 전리층 관련 정보의 통계값을 제공하는 방식이다. 최근 IRI 모델은 IRI-2001, IRI-2007 및 IRI-2012년 등이 있다(NASA 2014). 입력변수는 위도/경도/고도와 날짜/시간의 기본 정보 이외에 태양흑점 수 등 전리층 환경 변수가 있다. 주요 출력값은 전자밀도이며, 총전자량, F1/F2 고도 및 밀도, 각종 성분구성비 등이다. 고도 50 km에서 2000 km까지 계산 가능한데 특정한 위도/경도와 시간에서 고도 별로 전자밀도를 계산한 뒤, 저궤도 위성 상부와 하부로 나누어 수치적분을 수행하면 전리층 배율을 계산할 수 있다.

IRI모델은 위도, 경도, 고도, 시간, 날짜 등 기본적인

입력 변수 이외에 태양 흑점수, F10.7, F2 최대 밀도, 고도, 주파수 등 다양한 환경 변수 설정이 가능하다. 하지만 대기과학 연구가 아닌 일반적인 활용에서는 세밀한 입력변수 제어가 어려우므로, 본 연구에서는 포트란 코드에 설정된 기본 입력 변수를 사용하였다. 기본 설정의 예를 들면 foF2 모델로는 URSI를 사용하고, TTS_{Te} 모델을 사용하며, 상층부모델 보정에 NeQuick 모델을 사용하는 것 등이다. IRI 모델에서는 고도별 전자밀도를 계산한 뒤 이를 수치적분하여 TEC값도 계산하는데, 적분 해상도에 따라 3가지 설정이 가능하다. 본 연구에서는 가장 정밀한 설정을 사용하였는데, 이는 F2 근처에서 0.5 km, 이외 지역에서 1.0 km 간격으로 적분을 수행하는 것이다.

2) 저궤도 전리층 배율

대부분의 지상기반 전리층 지도는 수직 전리층지연값으로 표현되는데, 수직지연값 $VTEC$ 은 경사함수(*slant factor*) m 을 사용하여 다음과 같이 경사지연값 $STEC$ 으로 변환할 수 있다.

$$STEC = m \cdot VTEC \quad (1)$$

저궤도 GNSS 환경에서 사용하는 경사함수는 지상에서 사용하는 경사함수와 약간 다른데, 주로 사용하는 것은 Lear(1987)가 제안한 경사함수이다.

$$m(E) = \frac{2.037}{\sin^2 E + 0.076 + \sin E} \quad (2)$$

여기서 E 는 GNSS 신호의 경사각을 의미한다. 이 함수는 전리층분포를 등방성으로 가정한 뒤 전리층밀집 영역의 길이를 경험적으로 조정한 것으로, 지상에서 일반적으로 사용하는 경사함수(Leick 1994)에 비해서 낮은 경사각에서 훨씬 큰 배율을 가진다. 예를 들어 고도 450 km인 경우 경사각 40도 정도까지는 큰 차이가 없지만, 20도에서는 24.9%, 10도에서는 59.9%정도 큰 값을 가진다. 이는 전리층에 의한 신호지연이 지상에 비해 상대적으로 작은 저궤도에서 저경사각 신호의 경우에는 이러한 신호감소가 상대적으로 덜하다는 것을 의미한다. 함수에 태양입사각 변화에 의한 영향을 추가한 함수 등도 있는데, 위도 및 특정한 상황에 대한 정확도 변화가 상대적으로 큰 단점이 있어서(Tancredi *et al.*, 2011), 본 연구에서는 Lear함수를 사용하였다.

동일한 신호 경로를 가지는 지상수신 GNSS 신호에 포

함된 전리층 지연값 $STEC_{Ground}$ 와 저궤도에서 수신한 전리층 지연값 $STEC_{LEO}$ 사이의 전리층 배율 α 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$STEC_{LEO} = \alpha \cdot STEC_{Ground} \quad (3)$$

정리하면 IGS 등의 전리층지도로부터 얻은 특정한 위도/경도에서의 $VTEC_{Ground}$ 을 경사함수 m 을 사용하여 $STEC_{Ground}$ 로 변환한 뒤, 전리층 배율 α 를 곱해서 저궤도에서의 $STEC_{LEO}$ 을 계산할 수 있다. 이 값은 저궤도 GNSS 수신기에서 관측한 STEC과 비교 가능하다.

3. 전리층 배율 변화 경향

IRI-2007 모델을 사용하여 전리층 변화 경향을 살펴 보았다. IRI-2012가 가장 최신 모델이기는 하지만, 2014년 1월에 공개된 포트란으로 작성된 프로그램을 사용한 결과 간헐적인 동작 오류가 발생하였다. 이는 IRI-2012 프로그램 안정화에 시간이 필요한 것으로 판단되는데, 장기간 다량의 데이터를 자동화로 처리하는데 장애 요인이 되었다. 이러한 이유로 본 연구에서는 안정적인 IRI-2007 모델을 사용하였다. IRI-2007 포트란 프로그램을 수정하여 입력으로 주어진 위치와 시간에서 저궤도 위성 상단부와 하단부에서의 TEC값을 계산한 뒤, 전체 TEC에 대한 상단부 TEC의 비율을 계산하였다. IRI-2007 모델에 잘 반영된 시점을 찾기 위해 2007년 발표 이전 중 태양 및 전리층 활동이 중간에 해당되는 기간인 2004년을 선택하였다.

Fig. 1은 IRI-2007 모델로 계산한 고도에 따른 표준전

Fig. 1. IRI normalized electron profile on October 31, 2004.

자수(Normalized electron, Ne) 변화이다. 대전 상공에서 2004년 10월 31일 Local Time(LT) 14시 분포인데, 일반적으로 하루 중 전리층 지연값이 최대가 되는 시점이다. 고도 50 km에서 2000 km까지 계산하였는데, 고도 250 km에서 최대값을 가지는 것을 알 수 있다. 면적을 비교해볼 때 500 km 이하에 훨씬 많은 전자가 분포해 있다.

Fig. 2는 IRI-2007 모델로 계산한 전리층 지연값(TEC)의 1일간 변화를 나타내고 있다. 고도 50 km에서 2000 km 사이의 총전자수로 계산한 TEC와 500 km에서 2000 km 사이의 총전자수로 계산한 TEC를 비교하였다. Fig. 1과 동일한 시점과 장소인데, LT 10시부터 14시 사이에 최대값을 가지며 실제 전리층 변화에 비해 완만한 변화값을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 3은 1일 중 전리층 지연값의 배율 변화를 나타내고 있다. 배율 0.25는 지상의 TEC에 대한 상층부(500 km 이상)의 TEC 비율이 25%라는 것을 의미한다. IGS 등 지상기반 전리층모델로부터 계산한 TEC값을 사용할 경우 0.25를 곱하면 500 km 고도에서의 TEC값을 계산할 수 있다는 것을 의미한다. 전리층 지연값이 최소가 되는 야간에는 전체 TEC값의 감소에 비해 상층부의 감소가 상대적으로 적어서 배율이 증가하게 된다. 주간에는 배율이 LT 12시에 약간 증가하는 경향을 보인다. 전반적으로 TEC값이 증가하면 배율이 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 태양복사압에 의한 전리층 변화가 고고도보다 저고도에서 상대적으로 큰 것을 의미한다. LT 12시 전후로 나타나는 두 개의 극소값은 일일 TEC과 유사한 경향을 보인다. 즉, 일일 TEC은 LT 12시 전후로 극대값을 나타내는데, 전리층 배율은 이와 반대로 변화하므로 LT 12시 전후로 극소값을 나타내게 된다.

전리층 배율 변화 경향의 일반성을 확인하기 위해서 위치와 시간을 바꾸어 가면서 배율을 계산해 보았다. Fig. 4는 남아프리카공화국 요하네스버그의 500 km 상공에서 계산한 전리층 배율이다. 요하네스버그의 위도 및 경도는 각각 26.20°S 및 28.04°E로, 비교적 한반도와 먼 지역을 선택하였다. 1년의 한가운데인 6월 30일 여름 기간을 선택하였으며, 2002년, 2004년 및 2007년에 대해 계산하였다. 대전 상공에서의 변화와 동일하게 야간에 배율이 증가하는 경향을 나타내었으며, LT 13시 경에 부분적으로 증가하는 것도 유사하다. 전체적인 평균값은 연도에 따라 변하고 있는데, 태양흑점수가 많았던 2002

Fig. 2. Total electron content derived from IRI-2007 on October 31, 2004 (above 500km and ground).

Fig. 3. Ionospheric delay scale factor variation on October 31, 2004.

Fig. 4. Ionospheric delay scale factor variation over Johannesburg.

년에 최대값을 기록하다가 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 태양활동과 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다.

위도에 따른 배율변화를 살펴보기 위해 경도를 127.26°로 고정하고, 위도를 변화시켜가면서 배율을 계산하였다. Fig. 5는 위도에 따른 전리층 지연값 배율변화를 나타낸 것이다. 시간대에 따라 배율이 달라지므로 LT 0, 6, 12, 18 시로 나누어 계산하였다. 태양에 의한 전리

Fig. 5. Ionospheric delay scale factor variation along latitude on October 31, 2004.

층 적도변이(Equatorial Anomaly)의 영향이 존재하는 LT 12, 18시에는 적도 부근에서의 배율이 증가하지만, 자정(LT=0)에는 상대적으로 감소하다가 새벽(LT=6)에는 반대가 됨을 알 수 있다.

이와 같이 분석을 통해 전리층 지연값 배율은 시간과 장소에 따라 급격히 변화하는 것을 확인하였다. 단일 상수값만을 사용하는 것보다는 위치와 시간을 함수로 하는 배율을 계산하는 것이 전리층 지연값에 대한 정밀도를 높일 수 있는 것으로 판단된다.

4. 저궤도위성 전리층 지연값 추정

저궤도위성의 GPS 수신기에서 관측된 전리층 지연값을 이용하여 IRI로 추정된 전리층 지연값의 정확도를

분석하였다. 이를 위해서는 L1/L2 이중주파수 수신기가 적용된 저궤도위성이 필요한데, 미국 NASA와 독일 DLR에서 공동으로 개발한 GRACE 위성 데이터를 사용하였다. GRACE는 저궤도위성간 거리변화를 측정하여 지구중력장을 측정하는 쌍둥이 위성으로 2002년에 발사하여 현재까지 운영 중이다. 초기 고도는 490 km이고, 위성간 거리는 약 220 km 정도이다(Kim 2000). 경사각은 89°인데, 이중주파수 수신기를 탑재한 다른 저경사각 지구탐사위성에 비해 극궤도를 가지므로 고위도를 포함하여 지구전역에 대한 성능 분석을 수행하기에 적합하다.

GPS 수신기는 Jet Propulsion Laboratory(JPL)에서 개발한 BlackJack 수신기를 사용하는데, 우주용 수신기로는 최고 성능을 가지는 것으로 평가 받고 있다. GRACE GPS 관측값은 RINEX 파일 형태로 제공되는데, 데이터 간격은 10초이며 P1, P2, L1, L2 및 C/A 관측값을 포함한다(Case *et al.*, 2010). 두 개 GRACE 위성에서 독립적인 GPS 관측값을 제공하는데, 데이터 분석 결과 GRACE-B 위성의 데이터 품질이 더 좋은 것으로 판단되어, 이를 주로 사용하였다. P1/P2 코드신호에 포함된 노이즈에 의한 영향을 줄이기 위해 L1/L2 반송파로 측정된 전리층 지연값을 사용하였다. 모호정수에 의한 편차를 제거하기 위해 P1/P2를 이용한 leveling을 적용하였다(Yue *et al.*, 2011). P1/P2에 포함된 주파수간 편이(Differential Code Bias, DCB)를 추정하기 위해서, P1/P2로 측정된 전리층 지연값을 IGS로 추정된 전리층 지연값과 비교한 뒤 1일

Fig. 6. GRACE-B satellite ground track on October 31, 2004.

Fig. 7. Ionospheric delay scale factor for GRACE-B orbit on October 31, 2004.

평균값으로부터 DCB를 추정하는 방법을 사용하였다 (Montenbruck and Gill 2002). GPS 신호의 차단각(cutoff angle)은 10° 로 설정하였다. 낮은 경사각에서는 경사함수의 오차가 급증하여 전리층오차 분석의 정확도가 감소하는 단점이 있다(Tancredi *et al.*, 2011). 하지만, 실제 저궤도 운영 시 많은 데이터 관측을 위해 10° 정도의 차단각을 사용하므로 이와 유사한 10° 차단각을 사용하였다.

1일간 GPS 데이터를 처리하여 배율 변화 경향 및 TEC 추정오차를 분석 하였다. Fig. 6은 2004년 10월 31일 GRACE-B 위성의 지상궤적을 나타내고 있다. 하루에 지구를 15번 회전하였는데, 이 날짜에는 균일한 지상궤적 간격을 가지는 것을 알 수 있다. GRACE는 지상궤적 유지를 위한 궤도 기동을 수행하지 않기 때문에, 궤도 조건에 따라 지상궤적의 경도 방향 거리가 크게 변화하기도 한다. 균일한 지상궤적 간격이 위치에 따른 성능분석에 적합하다. 이 날 위성고도는 지구적도에서 평균 476 km 정도이다.

시간별로 변화하는 GRACE 위성의 고도와 위치정보를 IRI에 적용하여 전리층 지연값 배율을 계산하였으며 이를 Fig. 7에 제시하였다. 궤도변화와 높은 상관성을 가지며 배율이 변화하는데, 1일 평균값은 0.261, 표준편차는 0.043이다.

IGS 전리층 지연값에 IRI로 계산한 배율을 곱해서 추정한 STEC과 GRACE GPS 수신기로 측정한 STEC을 Fig. 8에 비교하였다. PRN 10 신호에 대한 결과 중 일부 시간 구간만을 제시하였으며, IRI만 단독으로 사용하여 계산한 STEC도 함께 비교 하였다. IGS에서 제공하는 $VTEC_{Ground}$ 는 식 2의 Lear 경사함수와 Fig. 7의 IRI 배율을

Fig. 8. Slant TEC of GRACE GPS measurements, IGS model with IRI scale factor, and IRI model for PRN 10 on October 31, 2004.

Fig. 9. Slant TEC error of IGS model with IRI scale factor and IRI model on October 31, 2004.

사용하여 $STEC_{LEO}$ 으로 변환하였다. PRN 10 신호의 경사각은 18° 에서 76° 까지 변화하며 낮은 경사각에서 STEC이 급증하게 된다. IGS로부터 계산한 전리층 지연값은 실제 전리층 지연값을 매우 잘 추종하는데, 이로부터 IRI로부터 계산한 배율이 적절함을 알 수 있다. IRI만을 사용하여 계산한 결과는 실제보다 상당히 낮는데, IGS에 적용한 상/하 배율은 적절한 것으로 보아 전체적인 고도에서의 전리층 지연값이 실제보다 낮게 추정되는 것으로 파악된다. IRI-2007 모델에서 계산한 TEC값이 GPS로 계산한 TEC보다 낮은 것은 다른 연구에서도 보고되고 있다(Kenpankho *et al.*, 2011). IRI 계산에 사용되는 전리층환경 관련 변수를 조정하면 이러한 차이를 어느 정도 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다. 하지만, 앞에 언급한대로 기본 설정을 사용한 일반적인 IRI 모델 사용을 가정하였기 때문에, 이에 대한 분석 및 개선은 수행하지 않았다.

Fig. 9는 2004년 10월 31일 모든 PRN에 대한 전리층 지연값 추정오차를 나타낸 것이다. GRACE GPS 수신기

로 측정한 STEC을 참값으로 설정한 뒤 이에 대한 차이로 오차를 계산하였다. IRI 배율을 적용한 IGS 모델의 오차 평균, 표준편차 및 Root Mean Square(RMS)는 각각 0.41, 4.25 및 4.28 TECU 인데, 평균값은 관측값과 잘 일치함을 알 수 있다. IRI만을 사용할 경우 오차 평균은 -3.18 TECU로 평균값에서 큰 차이가 발생하고 있다. 주기적으로 발생하는 -10에서 -40 TECU의 큰 오차는 위성이 적도지역을 통과할 때 발생한다. 적도지역은 전리층 지연값이 급증하기 때문에 이 지역에서의 오차도 급증하게 된다. 태양광이 비치지 않는 밤시간에 적도지역을 통과할 때는 이러한 오차 급증이 거의 발생하지 않는다.

5. 장기간 전리층 추정오차 변화 경향

전리층 지연값 배율 및 추정오차에 관한 의미 있는 통계값을 얻기 위해서 1년간 GRACE 위성데이터를 분석하였다. IRI 2007 모델을 사용하였기 때문에 2007년 이전 중 태양활동이 상대적으로 중간단계에 해당하는 2004년을 선택하였다. 이 기간 중 평균위성고도는 480 km에서 475 km로 변화하였다.

Fig. 10은 2004년 1년간 전리층 지연값 배율의 일일 평균값 변화를 나타낸 것이다. 매일 1시간 단위로 배율을 계산한 뒤 평균값을 계산하였다. 2004년 1월과 2월 사이의 20일간은 GRACE-B GPS 데이터가 공개되지 않아서 배율을 표시하지 않았다. 배율 변화를 보면 5월 및 11월에 가장 높은 값을 가지는데, 최대값은 0.26 정도이다. 8월에는 0.23정도의 낮은 배율을 가진다. 배율은 1월에 높은 값을 가지지만 12월에는 평균값 정도인데, 2003년의 태양활동이 2004년보다 강해서 2003년의 전체적인 배율이 높은 것으로 파악된다. 2004년 1년간 평균 배율은 0.250이며, 표준편차의 평균은 0.010 정도이다.

Fig. 11은 2004년 1년간 전리층 지연값 배율의 일일 표준편차 변화를 나타낸 것이다. 일일 중 시간별 변화를 나타낸 것인데, 일일 평균값 변화 경향과 유사하지만 15일에서 30일 정도 지연된 형태를 나타낸다. 일일 표준편차의 2004년 평균은 0.034 정도인데, 특이한 점은 표준편차 값이 급격히 변하는 날짜가 있다. 예를 들어 138~139일에는 시간별 표준편차가 0.041에서 0.0356으로 급변

Fig. 10. Daily mean of ionospheric delay scale factor of GRACE-B satellite in 2004.

Fig. 11. Daily standard deviation of ionospheric delay scale factor of GRACE-B satellite in 2004.

Fig. 12. Slant TEC error RMS of IGS model with IRI scale factor and IRI model in 2004.

하는데, 47일, 231일에도 이러한 급격한 변화가 관측된다. 이는 IRI 내부에서 계절별로 약간씩 다른 모델을 사용하는 것으로 추측되며, 다른 연도의 계산결과에서도 비슷한 경향을 나타내었다.

Fig. 12는 2004년 1년간 IGS 전리층 지연값에 IRI로 계산한 배율을 곱해서 계산한 전리층 지연값과 IRI 모델만을 사용하여 계산한 전리층 지연값의 오차를 나타낸 것이다. 앞서서와 마찬가지로 GPS 관측값에 대한 차이를

Fig. 13. Slant TEC error of IGS model with IRI scale factor and IRI model versus Solar flux index.

오차로 정의하고, 1일 간격으로 오차의 RMS를 계산하였다. IGS/IRI와 IRI 오차 경향이 유사하지만, IGS/IRI에 비해 IRI는 오차의 변화 범위가 큰 것을 알 수 있다. IGS/IRI 지연값의 오차 평균은 3.50 TECU인데, IRI 지연값의 오차 평균인 4.43 TECU에 비해 오차가 21% 감소하였다. 오차변화 경향은 배율의 일일 평균변화와 유사하게 봄과 늦은 가을에 크게 증가한다.

태양활동과의 관련성을 살펴보기 위해서 2004년 1년간 TEC 오차를 F10.7의 함수로 Fig. 13에 도시하였다. IRI 모델오차와 F10.7의 상관관계를 잘 나타내고 있는데, IRI 모델오차의 편차가 커서 상관관계는 0.41 정도이다. IGS/IRI 모델오차와 F10.7 역시 약한 상관관계가 존재하는 것을 알 수 있다. 지자기계수(A_p)-모델오차, F10.7-배율 평균값과의 상관관계도 분석하였으나, 모델오차-F10.7에 비해 현저한 상관관계는 발견되지 않았다.

6. 결론

지상기반 전리층모델로 얻은 전리층 지연값을 저궤도 위성에서 관측되는 전리층 지연값으로 변환하기 위해서는 전리층 배율을 결정해야 하는데, IRI 전리층모델을 사용하여 전리층 배율을 계산하는 기법을 제안하였다. 이를 이용하여 IGS 전리층 지연값을 저궤도 전리층 지연값으로 변환한 뒤, NASA GRACE 위성에서 관측한 전리층 지연값과 비교를 통해 전리층오차 추정정확도를 분석하였다. 전리층 배율은 위치와 시간에 따라 변화는 값이므로, 매 시점 및 위치마다 계산해주는 것이 필요

하다. 2004년 GRACE 데이터를 사용하여 배율 변화 경향 및 정확도를 분석하였다. 480 km 고도에서 2004년 평균 배율은 0.25이며, 표준편차는 0.01이다. 전리층 배율은 주간에 비해 야간에 상대적으로 증가하며, 계절적으로는 봄, 가을에 높은 값을 가진다. IGS모델에 전리층배율을 결합해서 추정된 저궤도 전리층 지연값 추정 오차 평균은 3.50 TECU로 IRI만 사용하였을 때보다 21% 정도 오차를 줄일 수 있었다.

본 연구에서 제안한 방법은 저궤도위성에 탑재된 단주파 GPS 수신기 데이터에 포함된 전리층오차를 후처리 방법으로 보정하는데 사용할 수 있다. IRI 예측모델의 정확도가 허용 범위 이내이고 IRI 계산 알고리즘을 탑재 컴퓨터에 장착할 수 있으면, 실시간 전리층오차 보정에도 적용할 수 있다. 이 경우 IRI 전리층관련 입력변수를 주기적으로 갱신하는 것이 필요하다. 위성고도에 따라 전리층 지연값의 크기 및 변화 경향이 변화하므로 전리층 지연값 예측성능의 차이가 발생할 수 있는데, 향후 다른 고도의 다양한 저궤도위성 데이터를 이용하여 분석 결과를 보완할 필요가 있다. 전리층 배율은 저궤도위성의 항법 이외에 단주파 레이더 고도계 및 단주파 위성 추적기 등 저궤도환경에서 전리층 정보가 필요한 경우에도 적용 가능하다.

사 사

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(2010-0024050)의 지원을 받아 수행되었음.

References

- Berthias, J.P., P. Broca, A. Comps, S. Gratton, D. Laurichesse, and F. Mercier, 2001. Lessons learned from the use of a GPS receiver in less than optimal conditions. *Proc. of 16th International Symposium on Space Flight Dynamics*, Pasadena, California, USA, 3-7 December.
- Bilitza, D., 1990. *International Reference Ionosphere*

- 1990, NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
- Bilitza, D., 2001, International Reference Ionosphere 2000, *Radio Science*, 36(2): 261-275.
- Case, K., G. Kruizinga, and S. Wu, 2010. *GRACE level 1B data product user handbook*, JPL Publication, D-22027, Pasadena, CA, USA.
- Garcia-Fernandez, M., and O. Montenbruck, 2006. LEO satellite navigation errors and vertical total electron content in single-frequency GPS tracking, *Radio Science*, 41(5): RS5001
- Hwang, Y. and G.H. Born, 2005, Orbit determination strategy using single-frequency global-positioning-system data, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 42(5): 896-901.
- Kenpankho, P., P. Supnithi, T. Tsugawa, and T. Maruyama, 2011. Variation of ionospheric slab thickness observations at chumphon equatorial magnetic location, *Earth Planets Space*, 63(4): 359-364.
- Kim, J., 2000. *Simulation study of a low-low satellite-to-satellite tracking mission*, Report CSR-00-02, Center for Space Research, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA.
- Lear, W.M., 1987, *GPS navigation for low-Earth orbiting vehicles*, NASA 87-FM-2, JSC-32031, rev. 1, Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas.
- Leick, A., 1994, *GPS Satellite Surveying, 2nd edition*, John Wiley & Sons.
- Montenbruck O., and E. Gill, 2002. Ionospheric correction for GPS tracking of LEO satellites, *Journal of Navigation*, 55: 293-304.
- Montenbruck, O., 2003. Kinematic GPS positioning of LEO satellites using ionosphere-free single frequency measurements, *Aerospace Science and Technology*, 7: 396-405.
- NASA, 2014, International Reference Ionosphere, <http://iri.gsfc.nasa.gov/>.
- Tancredi U., A. Renga, and M. Grassi, 2011. Ionospheric path delay models for spaceborne GPS receivers flying in formation with large baselines, *Advances in Space Research*, 48(3): 507-520.
- Yoon, J.C., K.M. Roh, E.S. Park, B.Y. Moon, K.H. Choi, J.S. Lee, B.S. Lee, J. Kim, and Y.K. Chang, 2002. Orbit determination of spacecraft using Global Positioning System single frequency measurements, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 39(5): 796-801.
- Yue, X., W.S. Schreiner, D. C. Hunt, C. Rocken, and Y.H. Kuo, 2011. Quantitative evaluation of the low Earth orbit satellite based slant total electron, *Space Weather*, 9: S09001
- Yunck, T.P., 1996. *Orbit determination, Global positioning system*, Theory and Applications, AIAA Publications, Washington, DC, USA.
- Yang, Y., Y. Li, A.G. Dempster, and C. Rizos, 2013. Ionospheric path delay modelling for spacecraft formation flying, *International Global Navigation Satellite Systems Society Symposium 2013*, Queensland, Australia, July 16-18.