

NeQuick G 모델을 이용한 저궤도위성 전리층 지연의 실시간 변환 계수 결정

The Real-Time Determination of Ionospheric Delay Scale Factor for Low Earth Orbiting Satellites by using NeQuick G Model

김민규 · 명재욱 · 김정래*

한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

Mingyu Kim · Jaewook Myung · Jeongrae Kim*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do, 10540, Korea

[요 약]

단일주파수 수신기를 사용하는 저궤도위성의 전리층 보정을 수행하기 위해선 지상기반 전리층 보정 모델에 변환 계수를 적용해야 한다. 전리층 변환 계수는 3차원 전리층 분포를 제공하는 NeQuick 모델을 이용하여 계산할 수 있다. 본 연구에서는 2015년 한 해 NeQuick G 모델을 이용하여 전리층 변환 계수를 계산한 후, 저궤도위성 관측값과 IGS 지상 전리층지도의 비율로 계산된 전리층 변환 계수와 비교하였다. NeQuick G의 전리층 변환 계수를 IGS 전리층 지도에 적용한 후, 저궤도위성에서 관측된 전리층 지연과 비교하여 정확도를 분석하였다. 또한, NeQuick G 변환 계수를 IGS 전리층 지도에 적용하여 계산한 전리층 지연 오차와 NeQuick G 모델만을 이용하여 계산한 전리층 지연 오차를 비교 분석하였다. 추가적으로 위도 및 태양 활동에 따른 전리층 지연 오차를 분석하였다. 2015년 한 해 NeQuick G 모델로 계산된 평균 전리층 변환 계수는 0.269로 나타났으며, IGS 전리층 지도에 NeQuick G 변환 계수를 적용한 전리층 지연 오차는 NeQuick G 모델만으로 계산된 전리층 지연 오차보다 23.7% 더 작았다.

[Abstract]

For ionospheric correction of low earth orbiter (LEO) satellites using single frequency global navigation satellite system (GNSS) receiver, ionospheric scale factor should be applied to the ground-based ionosphere model. The ionospheric scale factor can be calculated by using a NeQuick model, which provides a three-dimensional ionospheric distribution. In this study, the ionospheric scale factor is calculated by using NeQuick G model during 2015, and it is compared with the scale factor computed from the combination of LEO satellite measurements and international GNSS service (IGS) global ionosphere map (GIM). The accuracy of the ionospheric delay calculated by the NeQuick G model and IGS GIM with NeQuick G scale factor is analyzed. In addition, ionospheric delay errors calculated by the NeQuick G model and IGS GIM with the NeQuick G scale factor are compared. The ionospheric delay error variations along to latitude and solar activity are also analyzed. The mean ionospheric scale factor from the NeQuick G model is 0.269 in 2015. The ionospheric delay error of IGS GIM with NeQuick G scale factor is 23.7% less than that of NeQuick G model.

Key word : Low earth orbiting satellite, Ionospheric delay, NeQuick G model, IGS global ionosphere map.

<https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.4.271>



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.

Received 26 July 2018; Revised 6 August 2018

Accepted (Publication) 23 August 2018 (30 August 2018)

*Corresponding Author; Jeongrae Kim

Tel: +82-2-300-0110

E-mail: jrkim@kau.ac.kr

I. 서 론

최근 저궤도위성의 위치 결정은 GNSS (global navigation satellite system)을 이용하는 방법이 많이 사용된다[1]. 저궤도 위성은 GNSS L1 단일주파수 수신기를 많이 사용하는데, 단일 주파수를 이용할 경우 전리층에 의한 신호 지연이 발생하기 때문에 전리층 지연 보정이 필요하다. 전리층 지연에 대한 보정 방법으로는 IGS (international GNSS services)에서 제공되는 GIM (global ionosphere map) 데이터 산출물 또는 SBAS (satellite-based augmentation system) 전리층 보정정보를 사용하는 방법이 있다. 하지만 IGS GIM과 SBAS 보정정보는 지상 기반 모델이기 때문에 저궤도위성에 곧바로 적용할 수 없다. IGS GIM은 전 세계에 분포한 지상 관측소 데이터를 조합하여 후처리를 수행한 데이터로 실시간으로 사용 가능한 데이터는 ultra-rapid인데, 이는 전리층 지연에 대한 예측값이 포함되어 있지만 예측 기준 시점으로부터 시간이 지날수록 오차가 증가하며, 예측 기준 시점 전후로 보정값이 불연속적으로 변화하는 단점이 있다[2].

지상에서 수신된 SBAS 보정정보를 저궤도위성에서도 사용하기 위해서는 변환 계수를 사용하는 방법이 있다. 변환 계수는 지상 환경에서 수신된 신호의 전리층 지연과 저궤도 위성 고도에서 수신된 신호의 전리층 지연의 비율을 나타내는 것으로, 전리층 변환 계수를 계산하기 위해서는 3차원 전리층 분포를 제공하는 모델이 필요하다[3]. 3차원 전리층 분포를 제공하는 모델로 IRI (international reference ionosphere) 모델과 NeQuick 모델이 있다. IRI 모델은 사용자 위도, 경도, 고도, 시간 및 환경 변수를 입력으로 총 전자 수 등을 계산할 수 있는 모델로, 고도 구간에 따라 전자수를 수치 적분하여 TEC (total electron content)을 계산할 수 있다. 다만, IRI 모델은 4-5년 주기로 모델 갱신이 필요하다. NeQuick 모델은 사용자 및 GNSS 위성의 위치, 태양 활동, 그리고 시간에 대한 함수로서 사용자와 GNSS 사이의 경로로부터 적분 점을 계산한 후 각 적분 점의 모델 변수 및 전하 밀도를 계산하고, 전하 밀도를 수치 적분하여 전리층 지연값을 출력한다. NeQuick 모델 중에서 NeQuick G 모델은 후처리된 태양 활동 지표를 모델의 입력값으로 사용하지 않고, Galileo 항법위성에서 제공하는 전리층 변수를 사용하기 때문에 실시간으로 전리층 지연의 변환 계수를 계산할 수 있다.

전리층 지연 변환 계수를 이용한 저궤도위성의 전리층 지연 계산 방법 연구로, 후처리 용도로 IGS 전리층 정보를 저궤도 위성용으로 변환하고자 한 연구가 수행되었다[4]. 변환 계수는 Chapman 전리층 분포를 사용하여 계산하였으며, 위치와 고도만의 함수로 모델링을 수행하였다. IRI를 이용한 저궤도위성의 전리층 변환 계수를 수행한 연구도 보고되었다[1, 3]. IGS GIM에 IRI로 계산된 전리층 변환 계수를 적용한 저궤도 위성 전리층 지연이 IRI 모델로 계산된 저궤도위성의 전리층 지연보다 정확하였다[3]. 또한, SBAS 전리층 보정정보에 IRI로 계산된 변환 계수를 적용한 사례도 존재하였는데, 통계적으로 IGS

GIM 및 GPS Klobuchar 모델에 변환 계수를 적용한 전리층 지연보다 정확도가 높았다[1]. 동역학 모델과 운동학 모델을 사용하여 전리층 변환 계수를 추정된 후 5개의 저궤도 위성별 변환 계수를 제시한 연구도 보고되었다[5]. 또한, 지상 환경에서 사용되는 전리층 유효 고도 (IEH; ionospheric effective height)로부터 저궤도위성에 대한 전리층 유효 고도를 계산하는 방법에 관한 연구도 보고되었으며[6], Mannucci (1998)가 제안한 slab mapping function [7]을 연장하여 전리층 변환 계수를 계산하는 방안도 제시되었다[8]. GPS에서 사용되는 Klobuchar 모델에서 고도와 관련된 변수들을 수정하여 저궤도위성에 적용하는 방안도 보고되었다[9].

본 연구에서는 지상에서 수신된 SBAS 전리층 보정정보를 저궤도위성에 적용하기 위해 NeQuick G 모델을 사용하여 전리층 변환 계수를 계산하는 방법을 제안하였다. 저궤도위성에서 관측된 전리층 지연과 IGS GIM의 조합을 통해 계산된 변환 계수를 기준으로 하여 NeQuick G 모델로부터 계산된 변환 계수를 비교하였다. 또한 NeQuick G 모델의 변환 계수를 IGS GIM에 적용하여 계산한 전리층 지연값을 저궤도위성에서 관측된 전리층 지연값과 비교하여 정확도를 분석하였고, 이를 NeQuick G 모델만으로 계산된 전리층 지연값과도 비교하였다. 추가적으로 2015년 한 해 NeQuick G 모델의 전리층 변환 계수 및 전리층 지연 오차의 변화와 위도 및 태양활동에 따른 전리층 지연 오차를 분석하였다.

II. 전리층 변환계수 결정 기법

2-1 NeQuick G 모델

NeQuick 모델은 Di Giovanni와 Radicella가 1990년대에 제안한 프로파일 기반의 3차원 전리층 모델이다[10]. NeQuick 모델은 전리층 구성 요소인 E, F1, F2 층의 두께, 임계주파수, 그리고 최대 전자밀도를 계산하고, 입력된 사용자의 고도에 따라 상층부와 하층부 모델을 이용하여 총 전자밀도를 계산한다[11]. 사용자 입력이 F2 층의 최대 전자밀도 고도보다 낮으면 하층부 모델만을 이용하여 총 전자밀도를 계산한다. 입력된 2개 지점의 위도, 경도, 고도로부터 경로를 획득하여 경로 내 적분 점을 계산하고, 적분 점에서 계산된 전자밀도의 적분을 통해 최종적으로 총 전자밀도를 계산한다. 사용자 입력인 태양활동 관련 변수는 F10.7 또는 R12를 사용할 수 있다. 이들은 상층부와 하층부의 형상 상수 계산에 사용된다. 사용자 입력 조건에 따라 사용되는 모델 식이 존재하며, 관측데이터를 이용하여 생성된 모델 데이터를 기반으로 하기 때문에 NeQuick 모델을 사용하기 위해선 모델 식뿐만 아니라 MODIP (modified dip latitude) 등의 모델 데이터도 필요하다.

NeQuick 모델은 총 3가지 버전이 존재하는데, NeQuick 1 모델은 2000년에 ITU-R (international telecommunication union - radiocommunication sector)에서 채택된 전리층 지연 모델이다

[12]. NeQuick 2 모델은 Radicella와 Leitinger가 NeQuick 1 모델을 개선한 모델로, NeQuick 1에서 형상 상수와 임계주파수 계산 식 등이 변경되었다. NeQuick G는 Galileo 항법시스템에서 사용하고 있는 전리층 지연 모델로, 실시간으로 사용 가능하다. NeQuick 2 모델에서는 후처리된 태양 활동 지수가 입력값으로 사용되지만, NeQuick G에서는 Galileo 항법시스템에서 제공하는 전리층 변수를 사용한다. Galileo 항법시스템에서 제공하는 변수는 현재 a_0, a_1, a_2 가 있으며, 전리층 폭풍 상수 5개는 미래에 추가적으로 제공될 예정이다. 전리층 변수 a_0, a_1, a_2 는 전송되는 값이 매일 변화하는데, a_0 는 MODIP이 0°일 때 유효 전리화 수준 (Az)을, a_1 과 a_2 는 Az 값의 1차, 2차 계수를 나타낸다. 즉, Galileo 항법 메시지에서 전송되는 전리층 변수 3개와 계산된 MODIP 값의 조합으로 유효 전리화 지수를 계산한다. 유효 전리화 수준은 태양활동과 지자기활동과 연관되어 있는데, 태양활동이 활발한 날에는 큰 a_0 값이 전송되며, 또한 극지방에서 지자기활동이 활발하기 때문에 유효 전리화 수준도 증가한다. Az 값은 NeQuick 1, 2 모델에서 사용되는 F10.7과 동일하다. NeQuick 1과 2 모델에서는 F10.7을 이용하여 유효 태양흑점 개수를 모델 식을 통해 계산하는 반면, NeQuick G 모델은 Az 값을 이용하여 유효 태양흑점 개수를 계산한다는 차이점이 있다. NeQuick 2와 G 모델의 또 다른 차이점으로 는 각 전리층의 두께 등을 나타내는 형상 상수 모델 식의 차이인데, G 모델에서는 입력된 시간(월)에 따라 다른 형상 상수 모델을 사용한다. 즉, 4-9월의 형상 상수와 1~3월 및 10~12월의 형상 상수가 다르다. NeQuick 1과 2 모델은 ITU-R 홈페이지에서 포트란 소스코드로 제공되며, NeQuick G의 경우에는 공식적으로 제공되는 소스코드는 현재 없으며, 알고리즘이 [13]에서 제공된다.

2-2 저궤도위성의 전리층 지연 및 변환 계수

단일 주파수 수신기를 이용하는 저궤도위성의 경우에는 전리층 변환 계수와 지상기반 전리층 모델을 이용하여 전리층 지연을 계산할 수 있다. 따라서 저궤도위성의 전리층 지연 I^{LEO} 는 다음 식과 같이 계산할 수 있다[1].

$$I^{LEO} = \alpha I_{slant}^G \tag{1}$$

위 식에서 I_{slant}^G 는 지상기반 전리층 모델로 계산된 시선방향 전리층 지연이며, α 는 전리층 변환 계수($0 < \alpha < 1$)이다.

한편, 이중주파수 수신기에서 수신된 항법 신호의 전리층 지연은 GF (geometry-free) 선형조합을 이용하여 전리층 지연을 계산할 수 있다. GNSS 위성의 group delay와 저궤도위성 수신기의 DCB (differential code bias)가 모두 0이라 가정했을 때, GF 선형조합을 사용한 저궤도위성의 전리층 지연 I_{true}^{LEO} 은 다음과 같다.

$$I_{true}^{LEO} = \frac{P_1 - P_2}{1 - \gamma} \tag{2}$$

위 식에서 γ 는 L1과 L2 주파수의 비의 제곱인 f_1^2/f_2^2 이며 P_1 과 P_2 는 L1 및 L2 주파수 영역에서의 의사거리이다. 실제 환경에서는 GNSS 위성 수신기의 group delay와 저궤도위성 수신기의 DCB가 존재하기 때문에 이들을 적용한 저궤도위성의 전리층 지연 I^{LEO} 는 다음과 같다.

$$I^{LEO} = I_{true}^{LEO} + \frac{R}{1 - \gamma} - T_{GD} + \epsilon \tag{3}$$

위 식에서 R 은 저궤도위성 수신기의 DCB, T_{GD} 는 GNSS 수신기의 group delay로 GNSS transmitter의 DCB이며, ϵ 은 관측값임이다.

식 (1)에서 경사 전리층 지연 I_{slant}^G 을 수직 전리층 지연 I_{vert}^G 와 경사함수 M 으로 나타낸 후 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$I_{true}^{LEO} = \alpha M I_{vert}^G - \frac{R}{1 - \gamma} + T_{GD} + \epsilon \tag{4}$$

위 식에서 경사 함수 M 은 여러 종류가 있는데, 지상 환경에서는 Leick (1994)이 제안한 경사 함수[14]이 많이 사용되지만, 저궤도 GNSS 환경에서는 Lear (1987)가 제안한 경사 함수를 많이 사용한다[15]. Lear (1987)가 제안한 경사 함수는 낮은 경사각에서 큰 값을 갖는데, 이는 낮은 경사각에서 지상 환경에 비해 저궤도위성 환경에서는 전리층에 의한 신호 지연이 상대적으로 작음을 의미한다[3].

식 (4)에서 추정해야 할 변수 α 와 $R/(1 - \gamma)$ 는 최소자승법을 통해 계산할 수 있다[1]. 관측 데이터를 이용하여 전리층 변환 계수를 계산하려면 이중주파수 수신기를 사용해야 하지만, NeQuick G 모델을 사용한다면 모델로부터 전리층 변환 계수를 계산할 수 있고, 이를 지상 전리층 모델 적용하여 저궤도위성에 적용 가능한 전리층 보정값을 생성할 수 있다.

III. 데이터 처리

저궤도위성의 관측 데이터는 미국 NASA 및 독일 DLR에서 개발된 GRACE (gravity recovery and climate experiment) 위성의 관측 데이터를 이용하였다. GRACE 위성은 지구 저궤도를 공전하면서 지구 중력장을 측정하기 위해 개발되었으며, 2002년 3월에 동일한 위성 2대가 발사되었다. GRACE 위성은 약 16년간 중력장 측정 임무를 수행하였으며, 2017년에 배터리 문제로 인해 과학 임무 수행이 종료되었다. 초기 고도는 480 km이지만, 대기 저항에 의한 영향으로 고도가 350 ~ 500 km

사이에서 변화한다.

GRACE 위성에 탑재된 GPS 수신기는 이중주파수를 사용하는 BlackJack 수신기이다. BlackJack 수신기는 JPL (jet propulsion laboratory)에서 개발된 수신기로 C/A, P1, P2, L1, L2 관측값 수신이 가능하다. GRACE 위성의 관측값은 시계 오차가 보정된 값으로, JPL에서 현재 2016년까지 수신된 데이터를 제공한다.

본 연구에서 사용된 GRACE 위성은 GRACE B로, 분석 기간에 대해 GRACE A 위성보다 이상 데이터가 더 적기 때문이다[1]. 저궤도위성에서 관측된 전리층 지연은 GPS P1과 P2 관측값의 GF 선형조합을 통해 계산하였다. 코드 관측값은 관측 잡음이 반송파 위상에 비해 상대적으로 크기 때문에 leveling 기법을 통해 관측잡음을 감소시켰으며, 조합 전에 관측값이 짧은 호를 가지거나 사이클 슬립이 발생한 시점을 제거하는 전처리 과정을 수행하였다. 관측된 전리층 지연에는 저궤도위성 수신기 DCB가 포함되어 있는데, 최소자승법을 이용하여 수신기 DCB를 추정하여 제거할 수 있다[1]. GRACE 위성의 DCB는 최소자승법으로 추정하여 제거하는 대신 수신기 DCB를 미리 계산하여 전처리 과정에서 제거하였다. 이 때 본 연구에 사용된 GRACE 위성의 수신기 DCB 값은 9.16 m (30.54 ns)이다. 낮은 경사각에서 다중경로 등의 관측잡음이 증가하기 때문에, 이러한 효과를 감소시키기 위해 경사각 제한을 10°로 설정하였다.

NeQuick G 모델의 입력인 Galileo 전리층 변수는 스페인의 Cebreros 관측소에서 수신된 Galileo 항법 메시지를 이용하였다. NeQuick G로부터 계산된 변환 계수는 GRACE 위성과 GNSS 위치로부터 계산된 IPP (ionospheric pierce point)에서 지상에서의 수직 전리층 지연과 GRACE 위성 고도에서의 수직 지연의 비율로 계산하였다. IPP의 고도 기준은 IGS GIM과 SBAS 전리층 보정 모델이 각각 450 km와 350 km로 다른데, IPP 고도의 차이로 발생하는 효과는 크지 않기 때문에 본 연구에서는 IPP 고도를 350 km로 설정하여 사용하였다.

데이터 처리 기간은 2015년 1월 1일부터 12월 31일까지로 설정하였다. 이는 24번째 태양 주기에서 태양활동 최대치인 2014년과 가까우며, 또한 2015년 3월 17일에 발생한 큰 전리층 폭풍이 발생한 시점에서 전리층 변환 계수의 변화 및 변환 계수 적용 효과를 분석하기 위함이다. IGS에서 Galileo 항법 메시지가 제공되지 않은 4월 9일부터 4월 19일까지의 날짜에 대해서는 분석에서 제외하였다.

IV. 저궤도위성 전리층 지연과 변환 계수 분석

2015년 3월 12일 하루에 대해 저궤도위성의 전리층 지연과 변환 계수를 계산하고 변화를 분석하였다. 저궤도위성에서 관측된 전리층 지연과 IGS GIM으로 계산된 지상 전리층 지연의 비율을 기준으로 하여 NeQuick G 모델로 계산된 변환 계수와

비교하였다. NeQuick G 모델로부터 계산된 변환 계수를 IGS GIM에 적용한 후 GF 선형조합을 통해 계산된 저궤도위성의 전리층 지연 및 NeQuick G 모델로 직접 계산한 저궤도위성 전리층 지연과 비교하였다. 전리층 폭풍이 발생한 시점에서 전리층 변환 계수 및 전리층 지연의 변화를 분석하기 위해 2015년 3월 17일 하루에 대해서도 위의 분석을 실시하였다.

Figure 1은 2015년 3월 12일 UT로 6시부터 10시까지 저궤도 위성 관측값과 IGS GIM의 조합으로 계산된 변환 계수와 NeQuick G 모델로 계산된 변환 계수를 나타낸 것이다. 두 가지 변환 계수는 일정 주기를 가지고 증감을 반복하는데, 이는 저궤도위성이 지자기적도 부근을 비행할 때 증가하며, 고위도 지역에서 감소하는 경향이 있었다. 즉, 6시 30분, 8시 10분, 9시 40분에서 변환 계수 크기가 증가한 원인은 저궤도위성이 지자기적도 부근을 비행하여 전리층 지연 크기가 증가하였기 때문이다. 다른 시간대에 대해서 전리층 변환 계수가 증가한 요인은 유효 전리화 수준의 증가로 확인되었다. 6시 10분, 6시 50분에서 저궤도위성은 극지방에 위치하고 있는데, 유효 전리화 수준은 MODIP이 증가할 때 동시에 증가한다. 이는 극지방에서 지자기 활동에 의해 전리층 지연이 증가하는 것을 의미한다. MODIP은 IPP 위치가 극지방일 때 최대이기 때문에 그림 1과 같이 전리층 변환 계수도 증가하였다. NeQuick G 모델의 변환 계수는 0.15~0.70 사이에서 변화하며, 1일 평균은 0.327이다. 관측값의 변환 계수의 평균은 0.322로, NeQuick G 모델의 변환 계수 평균 크기는 기준값과 유사하였다. 관측잡음에 의한 영향으로 저궤도위성 관측값으로부터 계산된 변환 계수는 해당 기간에서 0.00~0.90 사이의 값을 가졌다.

Figure 2는 GF 선형조합을 사용한 저궤도위성의 전리층 지연과 NeQuick G 모델을 이용한 전리층 지연, 그리고 IGS GIM에 NeQuick G 모델로 계산한 변환 계수를 적용한 전리층 지연 (IGS-NeQuick G 모델)을 나타낸 것이다. 전리층 지연의 최대값은 지자기적도 부근을 비행할 때 나타나는데, 저궤도위성이 하루에 총 15번 지구를 공전하기 때문에 최대값도 그림과 같이 1시간 40분 주기로 나타난다. 주기가 50분이 아닌 1시간 40분인 이유는 현지 시간과 관련이 있는데, GRACE 위성이 극궤도를 비행하기 때문에 현지 시간으로 새벽 시간대를 지날 때 전리층 지연값이 작으며, 오후 시간대를 지날 때 전리층 지연값이 최대가 된다. NeQuick G 모델로 계산된 지연은 고위도 지역에서 관측된 전리층 지연에 비해 높게 추정되었지만, IGS-NeQuick G 모델의 전리층 지연은 관측된 전리층 지연과 유사하였다.

저궤도위성에서 관측된 전리층 지연을 기준으로 NeQuick G 모델의 전리층 지연 및 IGS-NeQuick G 모델의 전리층 지연의 오차를 Fig. 3에 나타내었다. NeQuick G 모델의 전리층 지연 오차는 중/고위도 지역에서는 양수값을 가지고, 변환 계수가 적용된 IGS GIM은 0에 가까운 값을 가졌다. 이는 전리층 변화가 크지 않은 지역에 대해서 IGS-NeQuick G 전리층 지연값이 NeQuick G 모델보다 정확한 것을 의미한다. 전리층 변화가 큰 저위도 지역에서는 두 가지 전리층 지연 모두 실제 지연

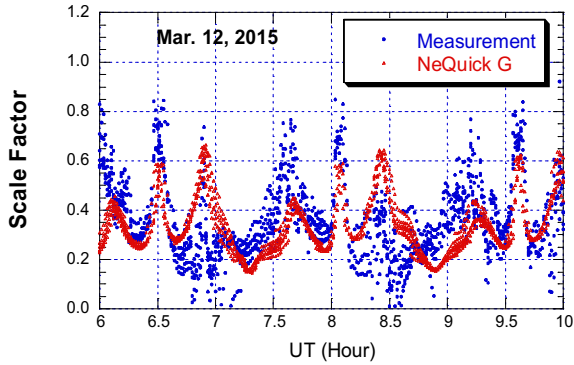


그림 1. GRACE GPS 관측값과 NeQuick G 모델의 전리층 지연 변환 계수 변화 (2015년 3월 12일)

Fig. 1. Variations of ionospheric delay scale factor computed by GRACE GPS measurements and NeQuick G model on March 12, 2015

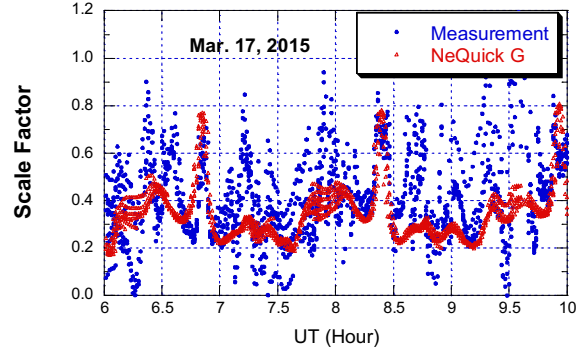


그림 4. GRACE GPS 관측값과 NeQuick G 모델로 계산된 전리층 지연 변환 계수 변화 (2015년 3월 17일)

Fig. 4. Variations of ionospheric delay scale factor computed by GRACE GPS measurements and NeQuick G model on March 17, 2015

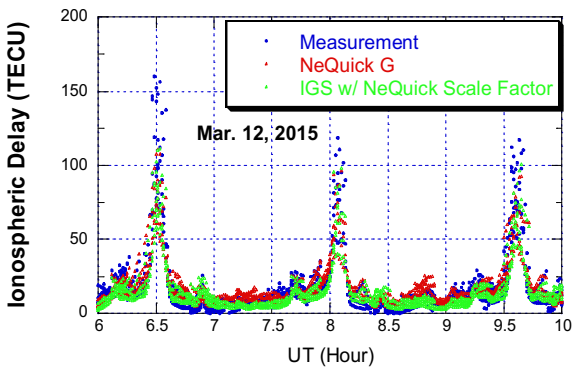


그림 2. GRACE GPS 관측값, NeQuick G 모델, 그리고 IGS-NeQuick의 경사 전리층 지연 변화 (2015년 3월 12일)

Fig. 2. Slant TEC variation of GRACE GPS measurements, NeQuick G model, and IGS-NeQuick G model on March 12, 2015

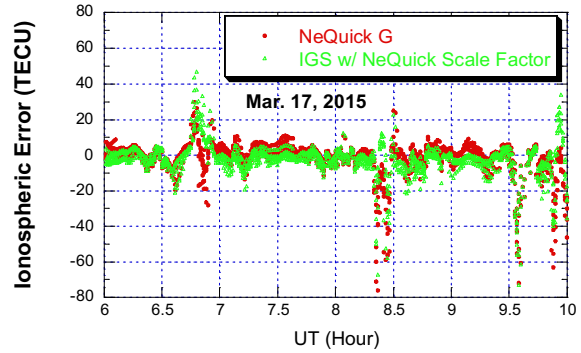


그림 5. NeQuick G 모델과 NeQuick G 변환계수가 적용된 IGS 전리층 모델의 경사 전리층 지연 오차 변화 (2015년 3월 17일)

Fig. 5. Slant TEC error variation of NeQuick G model and IGS model with NeQuick scale factor on March 17, 2015

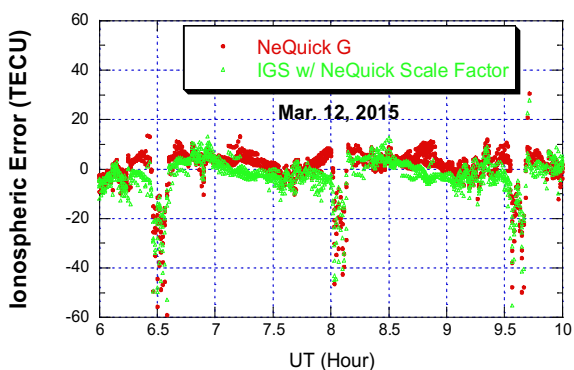


그림 3. NeQuick G 모델과 NeQuick G 변환계수가 적용된 IGS 전리층 모델의 경사 전리층 지연 오차 변화 (2015년 3월 12일)

Fig. 3. Slant TEC error variation of NeQuick G model and IGS-NeQuick G model on March 12, 2015

값보다 낮게 추정됨에 따라 오차의 부호가 마이너스(-)으로 나타났다. 1일 NeQuick G 모델의 평균 오차는 -1.154 TECU이며 변환 계수가 적용된 IGS GIM의 평균 오차는 -0.989 TECU로, 변환 계수를 사용할 때 오차가 평균적으로 0.165 TECU 더 작게 나타났다. 표준편차는 두 모델 각각 9.040 TECU, 9.023 TECU로 차이가 거의 없었다.

전리층 폭풍이 발생하였을 때 변환 계수와 전리층 지연의 변화를 분석하기 위해 2015년 3월 17일 하루에 대해 이들의 변화를 분석하였다. 3월 12일에는 Galileo 전리층 변수 a_0 가 104.25, 17일에는 143.5이 사용되었다. 이는 태양활동에 따라 a_0 값이 변화하며, NeQuick G 모델에 태양 활동을 반영할 수 있음을 의미한다. Figure 4는 해당 기간에서의 변환 계수를 계산한 결과인데, 해당 기간에서 저궤도위성이 저위도를 비행한 6시 50분, 8시 20분, 9시 50분경에는 NeQuick G와 관측값으로 계산한 전리층 변환 계수의 크기가 거의 동일하였다. 다만, 관

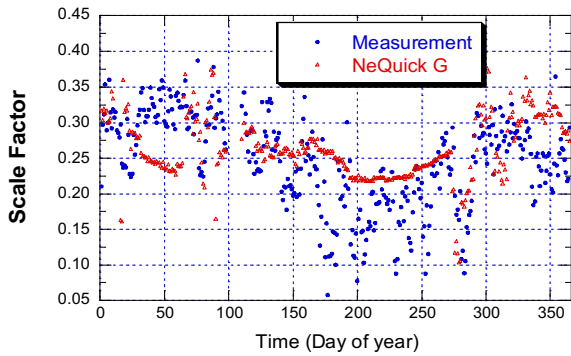


그림 6. 2015년 한 해 GRACE GPS 관측값과 NeQuick G 모델로부터 계산된 전리층 지연 변화 계수의 일일 평균 변화

Fig. 6. Daily mean of ionospheric delay scale factor computed by GRACE GPS measurements and NeQuick G model in 2015

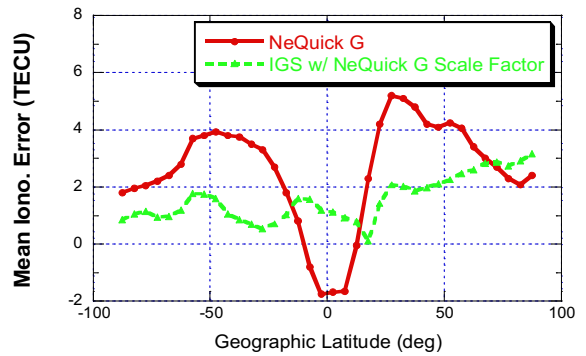


그림 8. IPP 위도에 따른 NeQuick G 모델과 NeQuick G 변환 계수가 적용된 IGS 전리층 모델의 평균 경사 전리층 지연 오차

Fig. 8. Mean slant TEC error of NeQuick G model and IGS model with NeQuick G scale factor along to IPP's geographic latitude

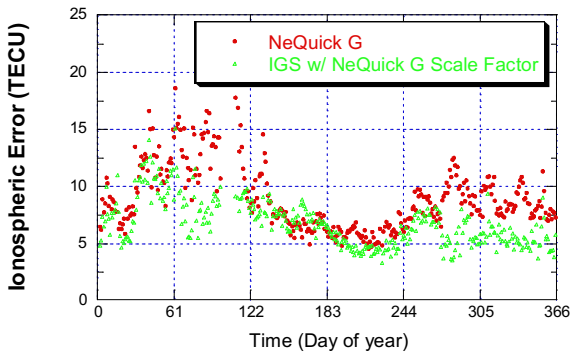


그림 7. NeQuick G 모델과 NeQuick G 변환계수가 적용된 IGS 전리층 모델의 일일 경사 전리층 지연의 RMS 오차 변화

Fig. 7. Daily RMS of slant TEC error variation of NeQuick G model and IGS model with NeQuick G scale factor in 2015

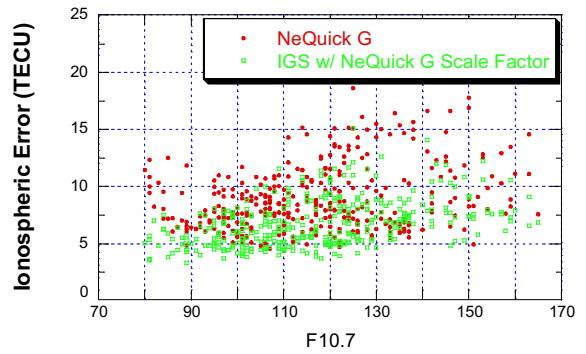


그림 9. 태양 활동에 따른 NeQuick G 모델과 NeQuick G 변환 계수가 적용된 IGS 전리층 모델의 평균 경사 전리층 지연 오차

Fig. 9. Mean slant TEC error of NeQuick G model and IGS model with NeQuick G scale factor along to solar flux

측값의 변환 계수는 중/고위도 지역에 대해서도 저위도에서의 변환 계수 크기만큼 나타남에 따라 평균값이 0.367로 증가하였지만, NeQuick G 모델 평균값은 3월 12일의 평균값과 동일하였다. 이는 NeQuick G 모델의 지상-GPS 고도에서의 전리층 지연 크기와 저궤도위성-GPS 고도에서의 전리층 지연 크기가 거의 동일한 비율로 증가하였기 때문이다.

Figure 5는 같은 기간에서 NeQuick G 모델 및 IGS-NeQuick G 모델의 경사 전리층 지연 오차를 나타낸 것이다. 6시 50분~7시 10분 사이에 전리층 폭풍이 발생한 미국 상공을 저궤도위성이 비행하였는데, NeQuick G 모델은 저궤도위성에서 관측된 전리층 지연보다 낮게 추정됨에 따라 최대 -30 TECU까지 차이가 나타났다. IGS-NeQuick G 모델의 전리층 지연 오차는 같은 기간 내에서 최대 20 TECU까지 증가하였는데, 이는 전리층 폭풍이 발생하였을 때 NeQuick G 모델로 계산된 변환 계

수를 사용하는 것이 전리층 지연 추정 정확도를 더 높일 수 있음을 의미한다. 해당 기간에서 NeQuick G 모델 전리층 지연의 평균 오차는 -1.833 TECU이며, IGS-NeQuick G 모델의 평균 오차는 0.951 TECU로 NeQuick G 모델 오차의 절반 수준으로 나타났다. 오차의 표준편차는 두 모델 모두 3월 12일에서의 값보다 증가하였는데, 각각 11.044 TECU, 10.798 TECU로 차이가 크지 않았다.

Figure 6은 2015년 한 해 저궤도위성의 전리층 변환 계수를 10분 간격으로 계산하고 일일 평균값을 나타낸 것이다. Galileo 전리층 변수가 제공되지 않은 4월 9일부터 19일까지는 분석 기간에서 제외하였다. 저궤도위성 관측값과 IGS GIM으로 계산된 전리층 변환 계수는 봄과 가을에 증가하고, 여름과 겨울에 감소하는 경향을 보였으며, NeQuick G 모델에서도 같은 경향을 보였다. NeQuick G 모델의 전리층 변환 상수는

0.10~0.40 사이에서 변화하였는데, 여름에는 관측값의 변환 계수보다 크게, 봄에서는 작게 추정되었다. 평균값은 0.269로, 관측값으로 계산된 전리층 변환 계수의 평균값인 0.274와 거의 동일하였다. 2015년 10월 7일에는 전리층 폭풍의 영향으로 오히려 변환 계수가 감소하였는데, NeQuick G 모델의 변환 계수도 해당 기간에서 감소한 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 2015년 한 해 관측된 전리층 지연을 기준으로 NeQuick G 모델 및 IGS-NeQuick G 모델의 전리층 지연 오차를 계산한 후 일일 RMS 값을 나타낸 것이다. 여름에 전리층 지연의 크기 자체가 감소하기 때문에 두 모델 모두 전리층 지연 오차가 가장 작았으며, 전리층 지연 크기가 증가하는 봄, 가을에서 오차도 증가하였다. NeQuick G 모델 전리층 지연의 1년 RMS 오차 평균은 8.873 TECU로 나타났으며, IGS-NeQuick G 모델 전리층 지연의 RMS 오차 평균은 6.768 TECU로, NeQuick G 모델만 사용하였을 때보다 오차가 23.7% 감소하였다.

전리층 모델의 위도에 따른 변화를 분석하기 위해 IPP 위도에 따른 경사 전리층 지연을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. NeQuick G 모델의 전리층 지연은 중위도 지역에서 오차가 증가하다가 적도 변이가 존재하는 저위도 지역으로 가면서 오차의 부호가 반대 방향으로 값이 증가하는 형태로, 위도에 따른 오차의 편차가 크게 나타났다. IGS-NeQuick G 모델의 전리층 지연의 오차는 오히려 고위도에서 오차가 가장 컸으며, 중위도와 저위도의 전리층 오차의 차이는 크지 않았다. 이는 저위도 지역의 적도 변이의 영향을 크게 받지 않는 것을 의미한다.

Figure 9는 태양 활동 지수를 나타내는 F10.7과 전리층 지연의 상관관계를 나타낸 것이다. NeQuick G 모델의 상관계수는 0.29, IGS-NeQuick G 모델의 상관계수는 0.39로 오히려 IGS-NeQuick G 모델의 상관계수가 컸는데, 이는 NeQuick G 모델에서 F10.7 값이 작을 때 오차가 큰 날짜가 존재하기 때문이다. 지자기활동을 나타내는 Kp 및 Ap에 대해서도 상관관계를 분석하였는데, 두 모델 모두 상관계수가 0.1 이하로 상관관계가 작았다.

V. 결 론

단일주파수 수신기를 사용하는 저궤도위성은 지상과의 환경 차이로 인해 지상기반 전리층 모델로 보정할 수 없으며, 지상 전리층 지연에 변환 계수를 적용해야 한다. 본 연구에서는 저궤도위성 전리층 지연을 계산하기 위해 저궤도위성 전리층 지연과 지상 전리층 지연의 비율을 나타내는 변환 계수를 NeQuick G 모델로 계산하여 지상 기반 전리층 보정모델에 적용하는 방법을 제안하였다. NeQuick G로 계산된 변환 계수의 정확도를 분석하기 위해 GRACE 위성 관측값과 IGS GIM의 조합을 통해 계산된 변환 계수를 기준으로 하여 비교를 수행

하였다. 그리고 NeQuick G 모델로 계산된 변환 계수를 IGS GIM에 적용하여 저궤도위성의 전리층 지연을 계산한 후, NeQuick G 모델만으로 계산된 저궤도위성 전리층 지연과 비교하였고, 저궤도위성에서 실제 관측된 전리층 지연과도 비교하였다.

2015년 한 해 NeQuick G 모델로 계산된 전리층 변환 계수의 평균은 0.269로, 저궤도위성의 관측값과 IGS GIM 조합으로 계산된 변환 계수의 평균값인 0.274와 거의 동일하였다. 또한 전리층 활동이 조용한 날에 대해서는 관측값과 IGS GIM 조합으로 계산한 변환 계수의 평균값과 차이가 거의 없었다. 전리층 폭풍이 발생한 날에서는 중-고위도 지역의 NeQuick G 변환 계수는 기준 변환 계수와 비교하였을 때 차이가 컸지만, 이를 IGS GIM에 적용한 후 NeQuick G 모델의 전리층 지연과 비교하였을 때 IGS-NeQuick G 전리층 지연 오차는 NeQuick G 모델 전리층 지연 오차의 절반 수준으로 나타났다.

본 연구에서 제안된 변환 계수 결정 방법은 저궤도위성 수신기에 NeQuick G 알고리즘을 탑재하는 것을 통해 실시간으로 구현할 수 있다. IRI 모델도 저궤도위성 수신기에 탑재하여 사용할 수 있지만, 모델을 4-5년마다 갱신해야 하며 특히 연산량이 NeQuick G 모델에 비해 많기 때문에 실시간으로 구현하기 어려운 단점이 있다. 본 논문에서 사용된 NeQuick G 모델과 IRI 모델의 변환 계수 계산 시간을 비교하였을 때 NeQuick G 모델의 계산 시간은 IRI 모델의 1/10 수준으로 나타났다.

Acknowledgement

본 연구는 과학기술정보통신부 우주핵심기술개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다 (NRF-2016M1A3A3A02016943).

References

- [1] J. Kim and Y. J. Lee, "Using ionospheric corrections from the space-based augmentation systems for low earth orbiting satellites," *GPS Solutions*, Vol. 19, No. 3, pp. 423-431, 2015.
- [2] International GNSS Service. IGS Products [Internet]. Available: <http://www.igs.org/products>.
- [3] J. Kim and M. Kim, "Determination of ionospheric delay scale factor for low earth orbit using the international reference ionosphere model," *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, pp. 331-339, 2014.
- [4] O. Montenbruck and E. Gill, "Ionospheric correction for GPS tracking of LEO satellites," *Journal of Navigation*, Vol. 55, No. 2, pp. 293-304, 2002.
- [5] J. Zhong, J. Lei, X. Dou, and X. Yue, "Assessment of vertical TEC mapping functions for space-based GNSS observations," *GPS Solutions*, Vol. 20, No. 3, pp. 353-362, 2016.

- [6] D. Peng and B. Wu, "The application of GIM in precise orbit determination for LEO satellites with single-frequency GPS measurements," *Chinese Astronomy and Astrophysics*, Vol. 36, No. 4, pp. 366-381, 2012.
- [7] A. J. Mannucci, B. D. Wilson, D. N. Yuan, C. H. Ho, U. J. Lindqwister, and T. F. Runge, "A global mapping techniques for GPS-derived ionospheric total electron content measurements," *Radio Science*, Vol. 33, No. 3, pp. 565-582, 1998.
- [8] H. Bock, A. Jaggi, R. Dach, S. Schaer, and G. Beutler, "GPS single-frequency orbit determination for low Earth orbiting satellites," *Advances in Space Research*, Vol. 43, No. 5, pp. 783-791, 2009.
- [9] X. Yang, J. Li, and S. Zhang, "Ionospheric correction for spaceborne single-frequency GPS based on single layer model." *Journal of Earth System Science*, Vol. 123, No. 4, pp. 767-778, 2014.
- [10] B. Bidaine and R. Warnant, "Ionosphere modelling for Galileo single frequency users: Illustration of the combination of the NeQuick model and GNSS data ingestion." *Advances in Space Research*, Vol. 47, No. 2, pp. 312-322, 2011.
- [11] C. M. Lee, K. D. Park, and S. Lee, "Comparison of real-time ionospheric delay correction models for single-frequency GNSS receivers: Klobuchar model and NeQuick model." *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 28, No. 4, pp. 413-420, 2010.
- [12] S. M. Radicella, "The NeQuick model genesis, uses and evolution," *Annals of Geophysics*, Vol. 52, No. 3/4, pp. 417-422, 2009.
- [13] European Union, European GNSS (Galileo) open service - Ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users, issue 1.2.
- [14] A. Leick, *GPS Satellite Surveying*, 2nd ed. New Jersey, NJ: John Wiley & Sons, 1994.
- [15] M. W. Lear, GPS navigation for low-Earth orbiting vehicles, NASA 87-FM-2, JSC-32031, rev. 1, Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas.



김민규 (Mingyu Kim)

2013년 2월 : 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)
2013년 2월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 석박사과정
※관심분야 : GNSS, 위성항법, 위성궤도



명재욱 (Jaewook Myung)

2016년 8월 : 한국항공대학교 항공우주공학과 (공학사)
2016년 8월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원 석사과정
※관심분야 : GNSS, 위성항법



김정래 (Jeongrae Kim)

1991년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학사)
1993년 2월 : 서울대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2000년 : 미국 University of Texas at Austin (공학박사)
2000년 ~ 2002년 : 미국 Center for Space Research 연구원
2002년 ~ 2004년 : 한국항공우주연구원 선임연구원
2004년 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 교수
※관심분야 : GNSS, 위성항법, 위성궤도