Accuracy Analysis of Ionospheric Delay of Low Earth Orbit Satellites by using NeQuick G Model

Serim Bak, Mingyu Kim, Jeongrae Kim[†]

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

ABSTRACT

Since the Global Navigation Satellite System (GNSS) signal received from the low Earth orbit (LEO) satellite is only affected by the upper ionosphere, the magnitude of the ionospheric delay of Global Positioning System (GPS) signal received from ground user is different. Therefore, the ground-based two-dimensional ionospheric model cannot be applied to LEO satellites. The NeQuick model used in Galileo provides the ionospheric delay according to the user's altitude, so it can be used in the ionospheric model of the LEO satellites. However, the NeQuick model is not suitable for space receivers because of the high computational cost. A simplified NeQuick model with reduced computing time was recently presented. In this study, the computing time of the NeQuick model and the simplified NeQuick model was analyzed based on the GPS Klobuchar model. The NeQuick and simplified NeQuick model were applied to the GNSS data from GRACE-B, Swarm-C, and GOCE satellites to analyze the performance of the ionospheric correction and positioning. The difference in computing time between the NeQuick and simplified NeQuick model was up to 90%, but the difference in ionospheric accuracy was not as large as within 4.5%.

Keywords: ionospheric delay, low earth orbit satellite, NeQuick G, simplified NeQuick

1. INTRODUCTION

현재 Global Navigation Satellite System (GNSS) 수신기를 이 용한 위치 결정 방법이 저궤도위성에 많이 사용된다 (Kim & Lee 2015). 일반적으로 저궤도위성은 전리층 최대 전자 밀도 고도 근 처 혹은 그 이상에 위치하여 수신되는 신호는 전리층에 의한 영 향을 받는다. 단주파 수신기를 탑재한 저궤도위성은 의사 거리에 포함된 전리층 지연을 제거하여 위치 추정 정확도를 높일 수 있 다. 그러나 대부분의 실시간 전리층 모델은 지상 사용자를 위한 것으로 고도를 고려하지 않은 2차원 모델이다. Global Positioning System (GPS)의 Klobuchar 모델은 Single Layer Model로 전리 층을 고도 350 km에 위치한 얇은 층으로 가정하는데, 대부분 저 궤도위성은 그 이상 고도에서 비행하기 때문에 저궤도위성 수신 기에 적용할 수 없다. 또한, 최대 전자 밀도 고도 이상에서는 전자

Received Nov 16, 2021 Revised Nov 22, 2021 Accepted Nov 23, 2021 [†]Corresponding Author

E-mail: jrkim@kau.ac.kr Tel: +82-2-300-0110

Serim Bak https://orcid.org/0000-0003-4532-5426 Mingyu Kim https://orcid.org/0000-0002-5065-0197 Jeongrae Kim https://orcid.org/0000-0001-5070-7336 밀도가 기하급수적으로 감소하여 전리층을 얇은 막으로 가정하 는 것은 의미가 없어진다 (Montenbruck & Rodriguez 2020).

반면 Galileo의 NeQuick 모델은 3차원 모델로 고도에 따른 전 자 밀도 분포를 제공하여 저궤도 환경에 적용할 수 있다. 그 중 NeQuick G 모델은 사용자 및 GNSS 위성의 위도, 경도, 고도, 시 간, 전리층 보정 계수를 이용하여 전자 밀도를 표현한다. 이전 버 전인 NeQuick 1, 2 모델과 NeQuick G가 가장 차별화되는 점은 실시간 사용 여부인데, 후처리 데이터를 이용해 태양 활동을 표 현한 이전 모델과 달리 NeQuick G는 Galileo 항법메시지로 방 송되는 전리층 보정 계수를 활용하여 태양 활동 지표를 생성하 기 때문에 실시간 사용이 가능하다. 따라서 Galileo 항법메시지 를 수신할 수 있는 수신기가 탑재되어 있으면 저궤도위성에서도 NeQuick G 모델을 실시간으로 적용할 수 있다. NeQuick 모델은 사용자와 GNSS 위성 사이의 신호 경로에서 적분점을 계산하고, 각 적분점의 전자 밀도를 수치 적분하여 전체 경사 전리층 지연 을 산출하기 때문에 고도에 대한 제약이 없다. 그러나 적분점 수 가 많고, 수치 적분을 이용하므로 2차원 모델에 비하여 연산량이 매우 많은 단점이 있다.

저궤도위성 전리층 지연과 관련한 선행 연구로는 지상과 저궤 도위성의 전리층 지연 비율을 나타내는 변환 계수를 활용한 보 정 방법이 주로 연구되었다. Chapman 프로파일을 이용하여 변 환 계수를 예측하고 International GNSS Service (IGS) Global Ionosphere Map (GIM)에 적용하여 저궤도위성 전리층 지연 을 계산하는 연구가 수행되었다 (Montenbruck & Gill 2002). International Reference Ionosphere (IRI) 모델을 이용하여 변 환 계수를 결정하고 저궤도위성에 적용한 연구도 있었다 (Kim & Kim 2014, Kim & Lee 2015). SBAS 보정 정보에 NeQuick G 모델 변환 계수를 적용하여 저궤도위성의 전리층 및 위치 추정 정확도 를 분석한 연구도 있었다 (Kim & Kim 2020). 이와 같은 선행 연 구들은 실시간으로 사용할 수 없거나 사용 지역의 제한을 받는 한계점이 있다. Montenbruck & Rodriguez (2020)는 저궤도위성 중 Swarm-C 위성만을 활용하여 NeQuick G 모델 정확도를 분석 하고, 연산량 감축을 위하여 저궤도위성 수직 전리층 지연과 가 시 위성의 경사 함수를 이용하는 Simplified NeQuick G 알고리듬 을 제안하고 위치 추정 성능을 분석하였다.

본 연구에서는 다양한 저궤도위성에서 NeQuick G 모델의 전 리층 보정 성능 및 위치 추정 정확도를 분석하였다. 고도에 따 른 비교를 위해 Swarm-C 뿐만 아니라 Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) 위성 중 GRACE-B, Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer (GOCE) 저궤도위 성 데이터도 사용하였다. 전리층 지연은 관측값을 기준으로 모델 값을 비교하였으며, 태양 활동에 의한 영향을 보기 위하여 2003 년 및 2009년의 모델별 정확도도 분석하였다. 또한, 저궤도위성 에서 NeQuick G 및 Simplified NeQuick G 모델의 연산량을 비교 하고, NeQuick G 모델 대비 Simplified NeQuick G 모델의 전리 층 보정 및 위치 추정 성능을 분석하였다.

2. IONOSPHERE MODELS

2.1 NeQuick G 모델

NeQuick 모델은 전리층 전자 밀도 및 Total Electron Content (TEC) 계산을 위해 고안된 3차원 모델이다 (Hochegger et al. 2000, Radicella & Leitinger 2001). 전리층 E, F1, F2층의 최대 전 자 밀도 고도를 기준점으로 하는 Semi-Epstein 층을 기반으로 전 리층 전자 밀도 분배를 해석적으로 제공한다 (Rawer 1982, Lee et al. 2010). NeQuick 모델은 사용자 및 GNSS 위성의 위치, 시간, 전리층 보정 계수를 입력으로 받아 각 층의 두께, 최대 전자 밀도 등의 상수를 계산하고 신호 경로를 따라 총 전자 밀도를 산출한 다. 전자 밀도 계산 시 사용자 고도에 따라 사용되는 전리층 모델 이 구분된다 (Lee et al. 2010). F2층 최대 전자 밀도 고도 기준으 로 상층부와 하층부 모델로 나뉘며 F2층 최대 전자 밀도 고도 이 상에 위치한 경우 상층부 모델만을 이용하여 전자밀도를 계산한 다 (Kim et al. 2018).

모델은 세 가지 버전이 있으며 모델 간 가장 중요한 차이는 실 시간 사용 여부이다. NeQuick 1, 2 모델은 태양 활동 지표로 후처 리 데이터인 FI0.7 혹은 RI2을 사용하지만, NeQuick G 모델은 유 효 전리화 수준을 도입하여 실시간 사용을 가능하게 하였다. 유 효 전리화 수준은 Modified Dip Latitude (MODIP)와 전리층 보 정 계수로 계산된다.



Fig. 1. Simplified NeQuick G model diagram.

$$Az = a_{i0} + a_{i1}\mu + a_{i2}\mu^2 \tag{1}$$

여기에서 μ 는 MODIP이며, a_{i0} , a_{i3} , a_{i2} 는 Galileo 항법메시지 내의 전리층 보정 계수이다. 전리층 보정 계수가 0이면, NeQuick 모 델이 작동하는 일반적인 조건에서 가장 낮은 태양 플럭스 값으 로 대체되며, a_{i0} 는 63.7, a_{i3} , a_{i2} 는 0이다 (European Commission 2016).

2.2 Simplified NeQuick G 모델

NeQuick 모델은 고도에 따른 전자 밀도 분포를 제공하여 저 궤도위성에서 적용이 가능한 장점이 있지만, 2차원 전리층 모 델과 비교했을 때 연산량이 많은 단점이 있다. Klobuchar 모델 은 10개의 방정식으로 경사 전리층 지연을 계산하지만, NeQuick 모델은 신호 경로 내 1개 적분점 당 200여개 방정식이 필요하 다 (Montenbruck & Rodriguez 2020). 이러한 연산량은 지상 수 신기보다 성능이 좋지 않은 저궤도위성의 GNSS 수신기에서 NeQuick G 모델의 실시간 사용에 제한 요소로 작용한다.

Montenbruck & Rodriguez (2020)가 제안한 Simplified NeQuick G 모델은 NeQuick G 모델의 연산량 감소를 위해 고안 된 모델이다. NeQuick G 모델이 특정 시점에서 모든 관측 위성의 경사 전리층 지연을 계산하는 반면, Simplified NeQuick G 모델 은 Fig. 1과 같이 저궤도위성의 수직 전리층 지연을 계산한 후, 지 연값에 각 GPS 위성의 고도각에 따른 경사 함수를 적용하여 경 사 전리층 지연을 계산하는 방식이다. 이를 식으로 표현하면 Eq. (2)와 같다.

$$STEC_i \approx VTEC \cdot M(El_i)$$
 (2)

여기에서 *STEC*,은 i번째 GNSS 위성의 경사 전리층 지연이며, *VTEC*는 저궤도위성 위치에서 수직 전리층 지연, *M*은 경사 함수 이다. 기존 모델에 비해 Simplified NeQuick G 모델은 시점별로 관측 위성 수만큼 연산 횟수가 감소하는 효과가 있다.

전리층 모델별 연산량을 확인하기 위해 Klobuchar 모델의 연 산량을 기준으로 NeQuick G 및 Simplified NeQuick G 알고리듬 의 연산 시간을 비교하였다. 이때, 연산 시간 측정 프로그램은 C



Fig. 2. F&K mapping function diagram.

Table 1. List of ionospheric models and algorithms.

Abbreviations	Explanation	Algorithm		
NQ	NeQuick G	STEC _{NQ}		
SNQ	Simplified NeQuick G	VTEC _{NQ} ·M(El _i)		

언어로 작성하였다. 한 시점에서 관측된 모든 위성의 전리층 지 연을 계산하는데 소요된 시간을 측정하였으며, 관측 위성은 10개 로 가정하였다. 그 결과 NeQuick G 모델은 Klobuchar보다 312배 의 시간이 소요되었지만, Simplified NeQuick G 모델은 31배 소 요되었다. Simplified NeQuick G 모델을 사용할 경우 기존 모델 보다 연산 시간을 89.9% 단축할 수 있었다. 그러나 연산이 간소화 되는 만큼 정확도도 감소하므로 Simplified NeQuick G 모델 성능 을 분석할 필요가 있다.

Simplified NeQuick G 모델은 경사 함수의 정확도가 중요한 데 우주 공간에서 사용하는 GNSS 신호 경사 함수는 지상에서 사용하는 경사 함수와 다른 특성을 가진다. Eq. (3)은 Foelsche & Kirchengast (2002)가 제안한 경사 함수로 저궤도위성 Differential Code Bias (DCB) 추정에 많이 사용된다 (Noja et al. 2013). 본 연구에서 Eq. (2)의 경사 함수로 Eq. (3)을 사용하였다.

$$M(El) = \frac{2 + \frac{h}{r}}{\sqrt{\sin^2 El + \left(2 + \frac{h}{r}\right)\frac{h}{r} + \sin El}}$$
(3)

여기에서 *EI*은 위성의 고도각, *r*은 지구반지름과 저궤도위성 고 도의 합, *h*는 Fig. 2와 같이 저궤도위성 고도 이상에 위치한 전 리층의 두께이다. *h*는 저궤도위성 고도에 따라 400~1000 km 범위에서 설정하는데, *h*에 따른 경사 함수 차이는 Simplified NeQuick G 알고리듬의 정확도에 영향을 미친다 (Montenbruck & Rodriguez 2020). *h*가 증가할수록 경사 함수는 감소하며 두께 에 따른 경사 함수 감소율은 위성 고도각이 낮을수록 증가한다.

Table 1은 NeQuick G 및 Simplified NeQuick G 모델의 약어와 개념을 정리한 것으로, 이하 각 모델을 NQ, SNQ라고 한다.

3. DATA PROCESSING

본 연구에서는 GRACE-B, Swarm-C, GOCE 저궤도위성 데 이터를 이용하였다. 이들 위성 데이터는 일반 사용자에게도 제공 되며, 측지용 이중주파수 수신기를 탑재하여 전리층 지연 관측값 및 정밀 위치값도 제공되므로 성능 분석에 용이하다. 또한, 저궤 도위성별 고도 차이도 존재하여 고도에 따른 NeQuick 모델의 특 성 분석도 가능하다.

NASA/GFZ GRACE 위성은 지구 중력장 측정을 위해 2002년 3월 발사되어 2017년까지 임무를 수행하였다. 2개의 편대 비행 위성으로 구성되었으며 경사각은 89°이다. 초기 고도는 480 km 지만 대기 저항에 의한 영향으로 임무 종료 무렵 고도가 300 km 까지 감소하였다.

ESA Swarm 위성은 지구 중력장 및 대기 연구 목적으로 발사 되었다. 3개 위성으로 구성되었으며 경사각은 87°이다. Swarm-C 위성의 초기 고도는 480 km지만 2014년 발사 이후 해마다 약 10 km씩 감소하고 있다 (Montenbruck & Rodriguez 2020).

ESA GOCE 위성도 지구 중력장 측정을 위한 위성이다. 2009 년 3월 발사되었으며 2013년 11월 임무 수행을 종료하였다. 경사 각은 96.7°인 태양 동기 궤도이며 초기 고도는 283 km로 저궤도 위성 중 고도가 낮아 전리층 지연 분석에 적합하다.

전리층 및 위치 추정 정확도 분석 기간은 위성별 운용 기간 과 태양 주기, Galileo 항법메시지 제공 여부를 고려하여 선정 하였다. GRACE, Swarm, GOCE 위성의 임무 수행 기간은 각 각 2003~2017년, 2014년~현재, 2009~2013년으로 서로 상이하 여, 임무 기간이 유사하고 전리층 활동이 큰 기간을 분석 기간으 로 선정하였다. 먼저 위성별 1개월 분석 기간을 선정하였는데, GRACE-B 및 Swarm-C 위성은 공통 기간인 2014년 11월, GOCE 위성은 2013년 3월로 설정하였다. GOCE 위성은 Galileo 항법메 시지 제공 이전에 임무가 종료되었으며, Swarm-C 위성과 임무 기간이 겹치지 않아 태양 활동만을 고려하여 결정하였다. 1년 분 석용 위성은 GRACE-B 위성을 사용하였으며, 태양 활동에 따른 전리층 정확도 분석을 위해 23번째 태양 주기의 태양 활동 극대 기인 2003년과 24번째 태양 주기의 극소기인 2009년으로 선정 하였다.

저궤도위성의 경사 전리층 지연은 위성의 이중주파수 관측 값을 이용하여 Geometry-free 선형 조합을 통해 계산하였다. Geometry-free 선형조합으로만 계산된 관측값은 GPS 위성 및 저궤도위성 수신기의 DCB를 포함하고 있으므로 DCB 또한 보 정하였다. GPS 위성 DCB는 IGS GIM을 사용하였고, 저궤도위성 수신기 DCB는 관측 및 모델값을 이용하여 직접 추정하였다. 코 드 관측값에 포함된 잡음 크기를 감소시키기 위하여 반송파 측 정치를 코드 측정치에 맞춰주는 레벨링 및 평활화 전처리 과정 을 거쳤다. 전리층 지연 모델은 NQ 모델을 사용하였는데, Galileo 항법메시지가 제공되지 않는 기간인 GOCE 위성 2013년 3월 및 GRACE-B 위성 2003년과 2009년 분석에는 전리층 보정 계수 대 신에 F10.7 값을 입력으로 사용하였다.

4. PERFORMANCE ANALYSIS

4.1 F&K 경사 함수 파라미터 선정

본 연구에서는 SNQ 모델을 사용하기에 앞서 모델 정확도에 영향을 미치는 F&K 경사 함수의 h를 선정하였다. h는 이론적으



Fig. 3. The ionospheric error of Simplified NeQuick G model according to the ionosphere thickness for GRACE-B (November 15, 2014, h = 400, 750 km).



Fig. 4. The ionospheric error of Simplified NeQuick G model according to the ionosphere thickness for each LEO satellite (GRACE-B, Swarm-C: November 15, 2014, GOCE: March 15, 2013).

로 전리층 고도를 나타내지만, 저궤도위성의 고도에 따라 다를 수 있으므로 위성별로 NQ 모델과 차이가 최소가 되는 h를 최적 값으로 결정하였다.

Fig. 3은 GRACE-B 위성의 SNQ 모델 전리층 지연을 NQ 모델 과 비교한 것으로, h가 400 km, 750 km 일 때 SNQ 모델 지연값 을 계산하고 NQ 모델과의 오차를 나타낸 것이다. 그 결과 h에 따 라 SNQ 모델의 추정 성능은 평균적으로 0.25 m 차이 난다. 그러 나 약 90분 간격으로 오차가 증가하는 시점에서 최대 9.7 m까지 차이가 발생하므로 h 최적값 선정이 필요하다. 따라서 h를 매일 선정하는 것이 이상적이지만 저궤도위성에서 사용하기 위해서는 발사 전 미리 h를 결정해야한다.

최적 h를 결정하기 위해 h를 400~1000 km 범위에서 50 km 간 격으로 증가시키면서 SNQ 모델의 전리층 지연을 계산한 후 NQ 모델값과 비교하여 오차를 계산하였다. 본 논문에서는 최적 h를 각 위성의 1개월 데이터 처리 기간 중 중간 날짜인 15일에 대하여 계산하였다. GRACE-B 위성 1개월 데이터의 경우, 날짜별로 최적 h를 계산하면 평균값은 700 km로 이 평균 h와 논문에서 설정한 h값을 사용하였을 때 평균 전리층 지연 차이는 0.05 m 이내로 나 타났다.

Fig. 4는 NQ 모델을 기준으로 전리층 두께 h에 따른 SNQ 모델 의 전리층 RMS 오차를 나타낸 것이다. SNQ 모델의 전리층 RMS 오차가 최소가 되는 h를 분석하였는데, GRACE-B 위성은 750 km, Swarm-C 위성은 850 km, GOCE 위성은 700 km로 나타났 다. 위성별로 최적 h값을 사용하여 F&K 경사 함수를 계산한 후



Fig. 5. The variation of the ionospheric delay of GRACE-B satellite for each ionophseric model (November 1, 2014).

SNQ 모델에 적용하여 전리층 지연값을 계산하였다. GRACE-B 위성의 2003년과 2009년 분석 시에도 2014년 1개월 분석에서 결 정된 *h*를 사용하였다. 이는 1년 간 일별 최적 *h*와 2014년 1개월 분 석으로 결정한 *h*를 사용했을 때의 SNQ 모델값 차이가 2003년과 2009년 모두 최대 0.2 m, 평균 0.02 m 이하로 작기 때문이다.

4.2 전리층 정확도 분석

Swarm-C, GRACE-B, 그리고 GOCE 위성의 데이터를 활용하 여 NQ 및 SNQ 모델의 전리층 정확도를 분석하였다. Swarm-C 및 GRACE-B 위성은 2014년 11월, GOCE 위성은 2013년 3월 1개 월 동안의 전리층 지연을 계산하고 분석하였다. 분석 기간 내 각 위성의 평균 고도는 Swarm-C, GRACE-B, GOCE 순으로 472 km, 420 km, 250 km이다.

Fig. 5는 2014년 11월 1일 1시부터 3시 30분까지 GRACE-B 위 성 전리층 지연을 나타낸 것이다. 전리층 지연은 GRACE-B 위성 의 궤도 주기와 동일한 약 90분을 주기로 최대가 되는데, 이는 위 성이 지자기적도 부근을 통과할 때이다. 저궤도위성이 지구 1바 퀴를 비행하는 동안 지자기적도를 2번 통과하여 하루에 약 16번 공전하는데, 저궤도위성의 Local Time (LT)이 14시와 가까운 시 점에 지자기적도 부근을 비행하면 전리층 지연이 최대가 된다. GRACE-B 위성은 분석 기간에서 지자기적도를 각각 LT 15.8시와 3.8시에 통과하는데, LT 15.8시에서 전리층 지연이 가장 크고 극 지역으로 비행하면서 전리층 지연이 최소가 된다. 다시 지자기적 도로 비행하면서 전리층 지연이 증가하지만 LT 3.8시이므로 전리 층 지연의 증가량이 작다. 저위도 지역에서는 NQ 및 SNQ 모델이 관측값보다 전리층 지연을 더 작게 추정하였다.

전리층 지연 오차는 저궤도위성 관측값을 기준값으로 설정하 여 각 전리층 모델의 오차를 계산하여 비교하였다. 관측값과 모 델값의 크기 차이를 보기 위하여 두 값의 차의 절댓값을 사용하 여 통계를 계산하였다. Fig. 6은 위성별 지자기위도에 따른 전리 층 지연 오차의 표준편차 분석을 수행한 것이다. 전리층 지연을 보정하지 않은 모델도 추가하였다. 그림 상에서 No model은 전 리층 지연 오차를 보정하지 않은 관측값으로 계산한 전리층 지연 의 크기이며, NQ와 SNQ는 전리층 지연을 보정 후의 잔류 오차 를 의미한다. 세 위성 모두 지자기 적도 부근에서 표준편차가 최 대이며, 고위도로 갈수록 미보정값과 보정값의 오차 차이가 작아



Fig. 6. The ionospheric error STD of Swarm-C, GRACE-B and GOCE satellite for each ionosphere model according to the geomagnetic latitude (November 2014).

Table 2. The ionospheric error statistics of Swarm-C, GRACE-B and GOCE satellite for each ionosphere model (unit: m).

	Swarm-C			GRA	CE-B		GOCE			
	(2014/11, h = 472 km)			(2014/11, h = 420 km)			(2013/03, h = 250 km)			
	No model	NQ	SNQ	No model	NQ	SNQ	No model	NQ	SNQ	
Mean	2.84	2.32	2.33	3.48	1.79	1.85	4.13	2.31	2.26	
STD	2.58	1.98	1.99	4.06	2.09	2.16	2.86	2.10	2.01	

진다. 고위도 지역, 특히 극지역에서는 전리층 지연의 크기가 작 기 때문에 고도가 높은 저궤도위성일수록 전리층 모델을 적용 효과가 미미하다. 세 위성 중 GRACE-B 위성이 지자기적도에서 보정하지 않은 경우와 모델 간의 오차가 가장 컸다. GOCE 위성 은 지자기적도를 통과할 때 저궤도위성의 LT가 각각 7시와 19시 로, 전리층 지연 최대 시점인 LT 14시와 멀기 때문에 지자기적도 부근에서도 전리층 지연 크기가 크지 않았다. Swarm-C 위성은 GRACE-B 위성보다 고도가 높을 뿐만 아니라 지자기적도를 비 행할 때 LT가 각각 6시와 18시이므로 GRACE-B 위성보다 전리 층 지연의 크기가 더 작았다.

1개월 동안 저궤도위성의 NQ 및 SNQ 모델의 평균 및 표준편 차는 Table 2와 같다. NQ 모델 사용 시 오차 평균 및 표준편차 감 소율은 Swarm-C 위성에서 각각 18.3%, 17.9%, GRACE-B 위성 에서 48.6%, 46.8%, GOCE 위성에서 44.1%, 45.3%로 GRACE-B 에서 가장 크게 나타났다. 같은 기간 동안 분석한 GRACE-B와 Swarm-C 위성에서 보정 성능이 다르게 나타났는데 이는 약 50 km의 평균 고도 및 지자기 적도 부근을 통과하는 LT 차이로 인한 것이다. SNQ 모델은 기본 모델과 평균 및 표준편차가 유사하며, 고도가 가장 낮은 GOCE 위성에서 기본 모델보다 더 작은 값을 가진다.

다음으로 GRACE-B 위성의 2003년, 2009년 모델별 전리층 지 연 오차를 분석하였다. 태양 활동 극대기인 2003년에서 모델별 오 차 평균 변화는 Fig. 7과 같은데, 일일 평균 지연값은 최대 16.7 m 까지 나타났으며 이는 2003년 10월 28일부터 11월 5일까지 발생한 할로윈 지자기폭풍의 영향이다. 이때 F10.7 값은 279까지 증가함 에 따라 NQ 모델의 추정값 편차도 큰 폭으로 증가하였다. 2003년 NeQuick G 모델을 사용하는 경우 지자기폭풍 발생 시점을 제외하 면 모든 날짜에서 평균 오차 크기가 2 m 이하로 나타났다.

태양 활동 극소기인 2009년의 모델별 일일 평균 전리층 오차 를 나타낸 것은 Fig. 8과 같다. 극소기에서는 일일 전리층 지연값



Fig. 7. Daily ionospheric error mean of GRACE-B satellite for each ionospheric model (2003).



Fig. 8. Daily ionospheric error mean of GRACE-B satellite for each ionospheric model (2009).

의 크기가 모든 시점에서 2 m보다 작았으며, 봄과 가을에 지연이 증가하며 여름과 겨울에 감소하는 계절 변화가 뚜렷하였다. NQ 모델은 4월과 10월에 불연속적으로 변화하는 지점이 발생하였 는데, 이는 NQ 모델의 전리층 형상 상수 식이 4월과 10월에 변하 기 때문이다. 전리층 지연 크기 및 계절 변화가 작음에 따라 오차 의 편차 값은 보정 전/후의 차이가 크지 않았지만, 오차 평균값은 NQ 모델 사용 시 47.6% 감소하였다.

1년 데이터에서 SNQ 모델은 전체적으로 NQ 모델과 경향성 이 유사하게 나타났다. SNQ 모델을 적용하면 전리층 지연 오차 가 2003년 48.8%, 2009년 40.1% 감소하며, 이는 NQ 모델보다 각 각 3.9%p, 4.5%p 작은 수치이다. NQ 모델보다 정확도는 다소 감



Fig. 9. Daily vertical positioning error mean of GRACE-B satellite for each ionospheric model (November 2014).

소하지만, 태양 활동이 약한 시기에도 전리층 지연을 NQ 모델과 근접하게 보정하므로 연산 시간 감소 측면에서 봤을 때 합리적인 대안으로 고려된다.

4.3 위치 정확도 분석

NQ 및 SNQ 모델을 이용하여 저궤도위성의 위치를 추정하고 정확도를 분석하였다. 위치 추정 시 L1 C/A 코드를 이용한 Single Point Positioning를 수행하였다. Receiver Autonomous Integrity Monitoring을 적용하여 위성별 신호 고장 검출 및 제거를 실시하 여 평균 잔차가 큰 시점은 분석에서 제외하였다. 계산된 위치 해 를 각 위성의 정밀 궤도 데이터와 비교하여 오차를 계산하였다.

Fig. 9는 2014년 11월 GRACE-B 위성의 수직 위치 오차 평균을 나타낸 것이다. 각 모델의 오차 변화는 점점 증가하는 형태인데, 이는 지자기적도를 지나는 시점이 LT 15.8시에서 13.7시로 변화 함에 따라 전리층 지연의 크기 변화가 발생하였기 때문이다. 수 직 방향 위치 오차는 보정하지 않은 결과 대비 NQ 모델은 46.6%, SNQ 모델은 44.3% 감소하였다.

Table 3은 3개 위성의 1개월 모델별 수직 및 수평 위치 오차의 평균 및 표준편차를 산출한 것이다. 수평 오차는 모델별 평균 및 표준편차가 유사하지만 수직 방향으로는 차이가 큰데, 이는 GPS 위성이 저궤도위성보다 높은 고도에 분포하여 수평보다 수직 방 향으로 신호 오차가 더 크게 감소하기 때문이다. 수직 오차 통계 에서 전리층을 보정하지 않았을 때보다 두 모델을 사용한 경우 40% 이상 감소율을 보였는데 GOCE 위성에서 수직 오차 감소율 이 64.3%로 보정 효과가 가장 컸다. 이는 GOCE 위성의 고도가 두 위성보다 200 km 이상 낮기 때문이다. 3개 위성 모두 NQ 모델 이 가장 정확하였으며, SNQ 모델은 모든 위성에서 NQ 모델과 차 이가 4.5%p 이내로 NQ 모델과 근접하였다. 두 모델 간의 차이는 고도가 가장 낮은 GOCE 위성에서 가장 작게 나타났다.

5. CONCLUSIONS

저궤도위성에서 사용할 수 있는 전리층 모델을 분석하기 위해 Galileo의 NeQuick G 모델을 이용하여 저궤도위성과 GNSS 위 성 간에 발생하는 전리층 지연을 보정하였다. 지상에서 사용하는

Table 3. The positioning error statistics of Swarm-C, GRACE-B and GOCE satellite for each ionosphere model (unit: m).

	Swarm-C (2014/11, h = 472 km)			GRACE-B (2014/11, h = 420 km)			GOCE (2013/03, h = 250 km)		
	No model	NQ	SNQ	No model	NQ	SNQ	No model	NQ	SNQ
Vertical mean	4.73	2.65	2.82	5.59	2.98	3.11	6.67	2.38	2.43
Vertical STD	4.14	2.66	2.84	5.13	3.24	3.41	3.78	1.99	2.03
Horizontal mean	1.38	1.36	1.35	1.33	1.29	1.28	1.48	1.68	1.43
Horizontal STD	0.89	0.89	0.87	1.07	0.99	0.99	0.94	0.98	0.89

대부분의 실시간 전리층 모델은 2차원 전리층 정보만 제공하여 저궤도위성 고도에서 바로 적용할 수 없다. 그러나 사용자 위치 및 시간뿐만 아니라 고도까지 고려하는 NeQuick G 모델을 이용 하면 저궤도위성에서도 곧바로 전리층 지연 계산이 가능하다. 다 만 신호 경로 상의 적분점을 생성하고 모든 적분점에서 전자 밀 도를 계산한 후 이를 수치 적분하는 계산 방식으로 인하여 연산 량이 상당히 많다. 본 연구에서는 GRACE-B, Swarm-C, GOCE 위성 관측 데이터를 기준으로 NeQuick G 모델의 경사 전리층 지 연값 및 위치 추정값의 정확도를 분석하였다. 또한 연산 시간을 크게 단축한 Simplified NeQuick G 모델도 적용하여 분석하였다. 먼저 저궤도위성 고도에서의 전리층 모델별 연산량을 분석

하였다. GPS의 Klobuchar 전리층 모델의 연산 시간을 기준으로 NeQuick G 모델은 312배의 연산 시간이 소요된 반면, Simplified NeQuick G 모델은 Klobuchar 모델의 31배로 연산량이 89.9% 감 소하였다.

다음으로 전리층 지연 오차 분석을 실시하였다. NeQuick G 모델은 저위도 지역, 특히 지자기 적도 부근에서 보정 효과가 가 장 컸으며, 고위도 지역에서는 보정을 하지 않은 경우와 차이 가 크지 않았다. NeQuick G 모델 사용 시 Swarm-C, GRACE-B, GOCE 위성의 1개월 전리층 오차의 편차는 각각 23.3%, 48.5%, 26.6% 감소하였다. 1년 분석의 경우, NeQuick G 모델은 2003년 50.7%, 2009년 29.5% 오차 감소율을 보였으며, 태양 활동 극대기 인 2003년 감소율이 더 크게 나타났다.

같은 기간에서 각 위성의 위치 추정을 실시하고, 위치 오차를 분석하였다. NeQuick G 모델을 사용하여 전리층 보정을 한 경우, 수직 오차는 Swarm-C, GRACE-B, GOCE 위성 순으로 미보정 경우 대비 43.9%, 46.7%, 64.3% 감소하였다.

Simplified NeQuick G 모델은 전체 경우에서 NeQuick G 모 델과 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 전리층 지연 오차의 경우 NeQuick G 모델처럼 보정 효과가 지자기 적도 부근에서 최대이 며, NeQuick G 모델과의 1개월 오차 감소율 차이가 8%p 이내이 다. 위치 추정 오차는 모든 위성에서의 오차 감소율이 NeQuick G 모델과의 차이가 4.5%p 이내로 Simplified NeQuick G 모델이 NeQuick G 모델에 근접한 성능을 보였다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재 단의 지원을 받아 수행되었습니다 (NRF-2019R1F1A1062605).

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, J. Kim; software, M. Kim; formal analysis, M. Kim and S. Bak; data curation, S. Bak; writing original draft preparation, S. Bak; writing—review and editing, M. Kim.; project administration, J. Kim.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- European Commission. 2016, European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users, Issue 1.2, European Commission
- Foelsche, U. & Kirchengast, G. 2002, A simple geometric mapping function for the hydrostatic delay at radio frequencies and assessment of its performance, Geophysical Research Letters, 29, 111-1-111-4. https:// doi.org/10.1029/2001GL013744
- Hochegger, G., Nava, B., Radicella, S., & Leitinger, R. 2000, A family of ionospheric models for different uses, Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, 25, 307-310. https://doi.org/10.1016/ S1464-1917(00)00022-2
- Kim, J. & Kim, M. 2014, Determination of ionospheric delay scale factor for low earth orbit using the international reference ionosphere model, Korean Journal of Remote Sensing, 30, 331-339. https://doi.org/10.7780/ kjrs.2014.30.2.14
- Kim, J. & Kim, M. 2020, NeQuick G model based scale factor determination for using SBAS ionosphere corrections at low earth orbit, Advances in Space Research, 65, 1414-1423. https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.11.038
- Kim, J. & Lee, Y. J. 2015, Using ionospheric corrections from the space-based augmentation systems for low earth orbiting satellites, GPS Solutions, 19, 423-431. https:// doi.org/10.1007/s10291-014-0402-8
- Kim, M., Myung, J., & Kim, J. 2018, The real-time determination of ionospheric delay scale factor for low earth orbiting satellites by using NeQuick G model, Journal of Advanced Navigation Technology, 22, 271-278. https://doi.org/10.12673/jant.2018.22.4.271
- Lee, C. M., Park, K. D., & Lee, S. 2010, Comparison of realtime ionospheric delay correction models for singlefrequency GNSS receivers: Klobuchar model and

NeQuick model, Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, 28, 413-420

- Montenbruck, O. & Gill, E. 2002, Ionospheric correction for GPS tracking of LEO satellites, Journal of Navigation, 55, 293-304. https://doi.org/10.1017/S0373463302001789
- Montenbruck, O. & Rodriguez, B. G. 2020, NeQuick-G performance assessment for space applications, GPS Solutions, 24, Article number: 13. https://doi. org/10.1007/s10291-019-0931-2
- Noja, M., Stolle, C., Park, J., & Luhr, H. 2013, Long-term analysis of ionospheric polar patches based on CHAMP TEC data, Radio Science, 48, 289-301. https://doi.org/ 10.1002/rds.20033
- Radicella, S. M. & Leitinger, R. 2001, The evolution of the DGR approach to model electron density profiles, Advances in Space Research, 27, 35-40. https://doi.org/ 10.1016/S0273-1177(00)00138-1
- Rawer, K. 1982, Replacement of the present sub-peak plasma density profile by a unique expression, Advances in Space Research, 2, 183-190. https://doi. org/10.1016/0273-1177(82)90387-8



Serim Bak received the B.S. degree in School of Aerospace and Mechanical Engineering from Korea Aerospace University, Korea, in 2020. She is currently an M.S student in Korea Aerospace University. Her research interests include GNSS applications and navigation.



Mingyu Kim received the Bachelor's degree in School of Aerospace and Mechanical Engineering at Korea Aerospace University, Korea, in 2013. He is currently in the Doctor course in Korea Aerospace University. His research interests include GNSS applications and navigation, and SBAS.



Jeongrae Kim is a professor in the School of Aerospace and Mechanical Engineering at Korea Aerospace University, Korea. He received his Ph.D. in Aerospace Engineering from the University of Texas at Austin in 2000. His research interest includes satellite instrument simulations, orbit determination,

GNSS ionosphere, SBAS, and GNSS applications.