한국측량학회지, 제 28권 제 4호, 2010. 8 : pp. 413~420

단일주파수 GNSS 수신기용 실시간 전리층 지연 보정 모델 비교 : Klobuchar 모델과 NeQuick 모델

Comparison of Real-Time Ionospheric Delay Correction Models for Single-Frequency GNSS Receivers : Klobuchar Model and NeQuick Model

이창문[1] · 박관동[2] · 이상욱[3]
Lee, Chang-Moon · Park, Kwan-Dong · Lee, Sanguk

Abstract

The ionospheric delay is currently one of the most significant error sources in precise GNSS surveys. The users of single-frequency receivers should apply some kind of ionospheric correction algorithms to remove or model the ionospheric delay. For real-time correction of the ionospheric delay, one can use Klobuchar or NeQuick model provided by navigation messages of GPS and Galileo, respectively. We evaluated the performance of those models by comparing their effectiveness at different seasons and latitudes. For the first test, we computed the vertical total electron content (VTEC) at the permanent GPS site SUWN for four different seasons. As the second test, we picked three sites in Korea (CHLW, SUWN, JEJU) with high, medium, and low latitudes and evaluated the dependency of VTEC on the site latitude. Computed VTEC values were compared with those from the IRI model and Global Ionosphere Maps (GIM). The root-mean-square (RMS) differences of Klobuchar and NeQuick with respect to IRI and GIM were analyzed. As a result, without regard to season and latitude, the RMS differences of NeQuick model was smaller than that of Klobuchar by about 0.01~3.50 TECU.

Keywords : Ionosphere, Klobuchar model, NeQuick model, GPS, Galileo

초 록

현재 전리층 지연은 GNSS 측량의 가장 큰 오차이다. 단일 주파수 수신기 사용자는 전리층 지연을 모델링하거나 보정하기 위하여 전리층 지연 보정 알고리즘을 적용해야 한다. 실시간 보정이 가능한 전리층 모델로는 항법메시지로 제공되는 GPS의 Klobuchar 모델과 Galileo의 NeQuick 모델이 있다. 이 연구에서는 두 모델의 효용성을 계절과 위도에 따라 평가하였다. 첫 번째 검증으로, 각 계절별로 수원 GPS 상시관측소 상공의 연직방향 총전자수(VTEC)를 산출하였다. 두 번째 검증으로 위도가 서로 다른 3개 상시관측소(철원, 수원, 제주)에서의 VTEC을 계산하여 관측소 위도와의 상관성을 분석하였다. 산출된 총전자수는 전지구 전리층 모델인 GIM 모델과 IRI 모델에서 제공하는 총전자수와 비교하였다. 그리고 GIM 모델과 IRI 모델을 기준으로 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델의 RMS 차이를 각각 산출하였다. 그 결과, 계절과 관측소의 위도와 무관하게 NeQuick 모델의 RMS 차이가 Klobuchar 모델의 RMS 차이보다 약 0.01 ~ 3.50 TECU 작게 나타났다.

핵심어 : 전리층, Klobuchar 모델, NeQuick 모델, GPS, Galileo

1. 서 론

현대 정보화 시대에서 GIS(Geographic Information System), 유비쿼터스 기술, LBS(Location Based Service) 등의 지리정보관련 산업이 발전함에 따라 위치정보의 중요성이 증대되고 있다. GNSS(Global Navigation

1) 교신저자 · 정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 석사과정(E-mail:cm_lee@inha.edu)
2) 정회원 · 인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과 부교수(E-mail:kdpark@inha.ac.kr)
3) 한국전자통신연구원 위성항법연구팀 팀장(E-mail:slee@etri.re.kr)

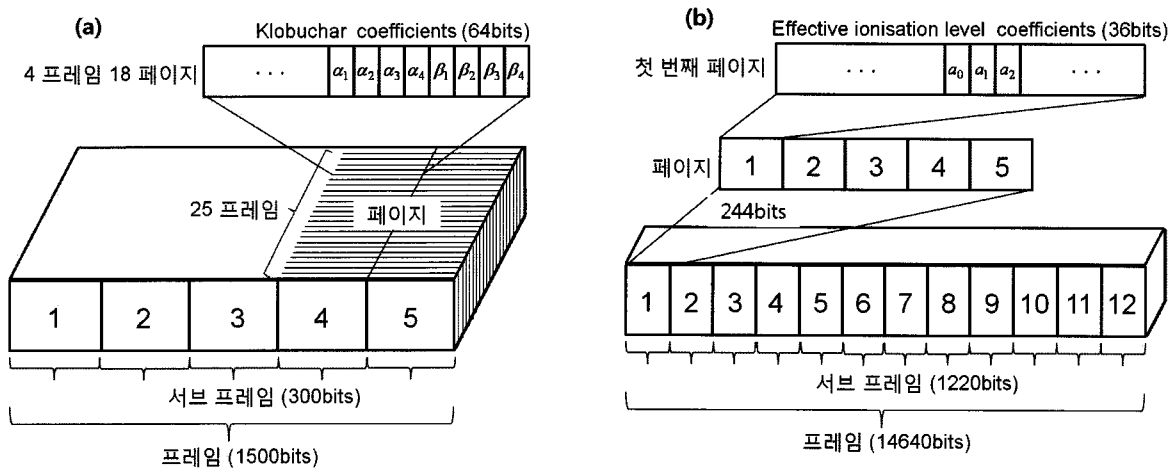
Satellite System) 측량은 위치정보를 얻을 수 있는 다양한 방법 중 하나이며 GNSS의 대표적인 예로 미국의 GPS(Global Positioning System)와 유럽의 Galileo가 있다. 이러한 GNSS를 이용하여 신뢰도 높은 3차원 좌표를 얻기 위해서는 측량 결과에 영향을 미치는 오차 환경들을 고려해야 한다.

다양한 GNSS 측위 오차 요인중에서 전리층에 의한 신호지연은 다른 오차 요인들에 비해 상대적으로 크게 발생하기 때문에 측위 정밀도 향상을 위하여 반드시 제거해야 한다. 이중주파수 수신기 사용자는 무전리층 조합(ionosphere-free combination)을 이용하여 전리층 지연효과를 대부분 제거할 수 있다(Hofmann-Wellenhof 등, 2007). 그러나 이중주파수 수신기는 비교적 가격이 비싸다는 단점이 있기 때문에 고정밀 측위 결과를 요구하지 않는 분야에서는 주로 단일주파수 수신기를 이용한다. 단일주파수 GNSS 수신기 사용자는 전리층 지연을 제거하기 위하여 전리층 모델을 이용한다. 단일주파수 GNSS 수신기 사용자가 실시간으로 사용할 수 있는 전리층 모델로 GPS의 Klobuchar 모델과 Galileo의 NeQuick 모델이 있다. 여기서 실시간이란 수신기를 통해 GPS나 Galileo의 항법 메시지를 획득함으로써 전리층 지연효과를 곧바로 제거할 수 있음을 의미한다.

Klobuchar 모델과 NeQuick 모델을 이용하기 위해서는 각각 GPS와 Galileo의 항법 메시지에 포함된 전리층 지연 보정 계수가 필요하다. 그림 1은 GPS와 Galileo 항법 메시지의 프레임 구조를 나타낸 것이다. 그림 1(a)에서 보면 GPS 항법 메시지는 총 25개의 프레임으로 구성되며 각각의 프레임은 5개의 서브 프레임으로 나뉜다. 최초 3개의 서브 프레임에 포함된 내용은 25개의 프레임에서 모두 동일하지만 4번째와 5번째는 프레임마다 내용이 변경된다. 이것을 페이지라 부르며 Klobuchar 모델에 필요한 Klobuchar 계수 α_n, β_n (n=1~4)은 18번째 페이지에 포함되어 있다. 그림 1(b)에 나타낸 Galileo 항법 메시지는 단일 프레임으로 구성되며 이것은 다시 12개의 서브 프레임으로 나뉜다. 각각의 서브 프레임은 5개의 페이지로 구성되어 있으며 NeQuick 모델에 필요한 전리층 지연 보정 계수 a_n (n=0~2)은 각 서브 프레임의 첫 번째 페이지에 포함되어 있다.

최근 연구 개발되고 있는 GNSS수신기는 GPS와 Galileo의 항법 메시지를 모두 수신할 수 있도록 설계되고 있기 때문에 하나의 수신기에서 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델을 선택적으로 이용할 수 있다. 그러므로 GNSS 신호 수신지점과 관측시기에 따라 보다 효율적으로 전리층 지연을 제거할 수 있는 전리층 모델을 파악하는 것이 중요하다.

Farah(2008)는 GNSS 신호 수신지점이 중위도 또는 고위도일 경우, Klobuchar 모델과 비교하여 NeQuick 모델의 전리층 지연 보정 정확도가 더 높다고 나타냈다. Farah (2008)의 연구에서는 저위도, 중위고, 고위도에 위치한 상시관측소를 대상으로 1998년 1월, 1999년 4월 그리고 2001년 9월의 연직방향 총전자수(VTEC, Vertical Total Electron Content)를 관측소별로 산출한 후, 그 결과



(a) GPS 항법 메시지 (b) Galileo 항법 메시지

그림 1. 항법 메시지의 프레임 구조

를 비교하였다. 이 연구방법을 이용하면 동일한 기간을 기준으로 위도의 차이에 따른 두 모델의 총전자수를 비교할 수 있다. 그러나 Farah(2008)의 연구는 해당 관측소의 동일한 년도에 대한 계절별 총전자수를 비교하지 않았다는 단점이 있다. 총전자수는 태양활동의 영향을 받기 때문에 계절에 따라 다르게 산출되는 특징을 가지고 있다. 태양활동은 11년 주기로 변하므로 계절별 총전자수의 차이를 분석하기 위해서는 동일한 년도의 자료를 이용해야 한다.

이 연구에서는 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델을 이용하여 계절별, 위도별 전리층 지연을 산출하였다. 산출된 결과는 전지구 전리층모델(Global Ionosphere Maps)과 IRI(International Reference Ionosphere)의 총전자수(TEC, Total Electron Content)와 비교하였다. 계절에 따른 전리층 지연 보정 효과를 비교하기 위하여 각 계절별로 4가지 전리층 모델을 이용하여 VTEC을 산출하였다. 또한 GNSS 신호 수신지점의 위도에 따른 각 모델의 전리층 지연 산출량을 비교하기 위하여 철원, 수원 그리고 제주 상시관측소 상공의 VTEC을 산출하였다.

2. 단일주파수 수신기용 전리층 모델

2.1 Klobuchar 모델

Klobuchar 모델은 GPS 위성과 GPS 수신기 사이의 총전자수를 산출하여 전리층 지연을 추정하며, 지역에 따라 총 전리층 지연의 약 50~60%까지 제거할 수 있다(Komjathy, 1997). Klobuchar 모델을 이용하기 위해서는 자유전자가 350km 상공의 두께가 0인 가상의 단일층에 밀집되어 분포하고 있고, 총전자수는 현지시각(local time)으로 오후 2시에 가장 높으며, 22시에서 06시 사이의 총전자수는 9.24 TECU(TEC Unit)로 일정하다고 가정한다(Klobuchar, 1987). 1 TECU는 $1m^2$의 면적에 1×10^{16}개의 자유전자가 존재한다는 것을 의미하며 1 TECU를 거리오차로 환산하면 대략 0.163m로 나타낼 수 있다.

Klobuchar 모델에 필요한 입력 값은 관측 지점과 GPS 위성의 3차원 좌표, 관측 시각, 그리고 Klobuchar 계수 α_n, β_n (n=1~4)이며, Klobuchar 모델식은 지면상 참고문헌으로 대체하였다(Hofmann-Wellenhof 등, 2007).

Klobuchar 계수 α_n과 β_n은 각각 수직방향 지연량과 변동의 주기를 계산하기 위한 방정식의 계수이다. 항법 메시지를 통해 제공되는 Klobuchar 계수는 다음과 같은 두 가지 기준에 의해 선택된다. 첫 번째 기준은 관측 날짜이다. GPS 주제어국(Master Control Station)은 1년을 37개의 시기로 나누었으며, 각각의 시기에 대응되는 Klobuchar 계수 그룹을 정해놓았다. 두 번째 기준은 해당일을 포함한 이전 5일 동안의 태양 속(flux) 평균 값이다. 태양 속은 10가지 등급으로 구분되며, 각각의 등급에 따라 Klobuchar 계수 그룹이 지정되어 있다(서윤경, 1994). GPS 주제어국은 관측일과 태양 속 값을 고려하여 α_n과 β_n을 선정한 후 이를 GPS 위성의 항법 메시지에 실어 제공하고 있다.

2.2 NeQuick 모델

NeQuick 모델은 사용자가 원하는 위치와 시각에서의 전리층내 전자밀도(electron density)를 산출한다. NeQuick 모델은 전리층을 구성하고 있는 E, F1, F2 레이어 각각에서의 최대 전자밀도(peak electron density)와 최대 전자밀도 분포 고도(peak height)를 기본값으로 이용한다. 또한 태양활동지수를 나타내는 값인 10.7cm radio flux를 고려하며 이 값은 태양에서 방출되는 10cm 파장의 전파 강도를 측정한 값으로써 태양 흑점 개수와 비례하여 증가하거나 감소한다.

NeQuick 모델은 F2 레이어의 최대 전자밀도 분포 고도를 기준으로 그 이상의 고도에서는 topside 모델, 미만의 고도에서는 bottomside 모델을 이용하여 전자밀도를 계산한다. 따라서 전자밀도를 산출하고자 하는 고도가 F2 레이어의 최대 전자밀도 분포 고도보다 낮을 경우에는 오직 bottomside 모델만을 이용한다. 식 (1)과 식 (2)은 각각 topside 모델과 bottomside 모델을 나타낸 것이다. h는 전자밀도 산출 고도, i는 E, F1, F2 레이어를 의미한다. N_m^i는 각 레이어의 최대전자밀도, h_m^i은 각 레이어의 최대 전자밀도 분포 고도, B^i는 두께 변수, H_0는 F2레이어의 최대 전자밀도 분포 고도 상층부의 두께를 의미한다. 그리고 이 값들은 10.7cm radio flux를 이용하여 별도의 과정을 거쳐 산출되거나 별도의 자료들로부터 제공되고 있으며, 이와 관련된 내용은 지면상 참고문헌으

$$N_t(h)=4N_m^{F_2}\frac{e^{\frac{h-h_m^{F_2}}{H}}}{\left(1+e^{\frac{h-h_m^{F_2}}{H}}\right)^2},\left(H=H_0\left[1+\frac{12.5(h-h_m^{F_2})}{100H_0+0.125(h-h_m^{F_2})}\right]\right) \quad (1)$$

로 대체하였다(Nava 등, 2008). 각 모델식의 산출결과는 전자밀도로써 $10^{11} m^{-3}$ 단위로 나타나며, 사용자가 원하는 총전자수는 수신기와 위성사이의 고도 변화에 따라 산출된 전자밀도를 모두 합한 값이다.

$$N_b(h) = \sum_{i=E,F_1,F_2} \left(\frac{4N_m^i \dfrac{e^{\frac{h-h_m^i}{B^i} e^{\left(\frac{10}{1+|h-h_m^i|}\right)}}}{\left(1+e^{\frac{h-h_m^i}{B^i} e^{\left(\frac{10}{1+|h-h_m^i|}\right)}}\right)^2} \right) \quad (2)$$

NeQuick 모델을 실시간으로 이용하기 위해서는 Az(effective ionization level)가 필요하다. Az는 태양활동지수를 추정한 값으로써 NeQuick 모델의 입력값인 태양활동지수에 관한 정보를 직접 얻기 힘든 사용자들을 위하여 만들어졌다. Az는 식 (3)을 통해 산출되며 $a_n(n=0\sim2)$은 Galileo의 항법 메시지를 통해 제공되는 NeQuick 모델 계수이고 μ는 전리층내 전자밀도 산출지점에서의 복각을 이용하여 역으로 계산한 지표면의 위도이다. 복각은 지구 상의 한 지점에 작용하는 전자기력의 방향과 그 지점의 지표면이 이루는 각을 의미한다. 산출된 Az는 앞서 모델식 부분에서 설명한 것과 같이 topside 모델과 bottomside 모델에 대입되는 인자들을 산출하는데 이용된다. 현재 Galileo의 항법 메시지는 획득하는데 어려움이 있기 때문에 이 연구에서는 태양활동지수를 직접 대입하여 NeQuick 모델을 이용하였다.

$$Az = a_0 + a_1 \cdot \mu + a_2 \cdot \mu^2 \quad (3)$$

3. Klobuchar 모델과 Nequick 모델을 이용한 전리층 지연 산출

이 연구에서는 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델을 비교하기 위해 2009년을 대상으로 동일한 시각과 장소에서의 VTEC을 산출하였다. 이를 위하여 이용한 자료는 IGS(International GNSS Service)의 항법 메시지인 BRDC (BRoaDCast ephemeris)와 NOAA(National Ocean Atmosphere Administration)의 우주기상예측센터(SWPC, Space Weather Prediction Center)에서 제공하는 DSD(Daily Solar Data)이다. BRDC는 현재 운용중인 모든 GPS 위성의 방송궤도력을 제공하며 헤더부분에 전리층 지연 보정 계수 α_n, β_n $(n=1\sim4)$을 포함하고 있다. DSD는 1년 단위로 생성되며 하루 간격의 태양활동 관련 파라미터들을 제공한다. 이 연구에서는 태양활동과 관련된 다양한 파라미터 중에서 10.7cm radio flux값을 이용하였다.

3.1 계절별 전리층 지연 산출량 비교

전리층내의 총전자수는 태양활동의 영향을 받기 때문에 계절에 따라 상이한 분포 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 계절에 따라 태양의 고도, 낮과 밤의 길이, 전자 이동량 등이 변하기 때문에 발생하며, 결과적으로 전리층을 구성하고 있는 E, F1, F2 레이어의 높이를 변화시킨다(민경덕, 1992). 각 레이어의 높이 변화는 특히 NeQuick 모델식의 결과에 영향을 미치기 때문에 사계절이 뚜렷한 우리나라의 경우 각 계절의 특성이 전리층 모델에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 분석이 필요하다.

이 연구에서는 계절에 따른 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델의 전리층 지연 보정 효과를 비교하기 위하여 2009년 3월(봄), 6월(여름), 9월(가을), 그리고 12월(겨울)을 대상으로 수원(SUWN) 상시관측소 상공의 VTEC을 산출하였다. 또한 관측시각에 따른 VTEC의 크기를 분석하기 위하여 연구대상 기간에 속한 모든 날짜에서의 VTEC을 2시간 간격으로 산출하였다. 산출된 VTEC은 전지구 전리층 모델인 GIM 모델과 IRI 모델의 VTEC과 비교하였다. 비교에 사용된 GIM 모델은 국제전리층 분석 센터에서 전세계 상공의 위도와 경도를 2.5°×5° 격자로 분할하여 추정된 총전자수를 제공한다(Leonovich 등, 2000). IRI 모델은 과거의 데이터를 수집하여 전리층의 변화 특성을 분석하는 경험적 모델로써 총전자수를 추정하기 위해 100여개 이상의 변수를 사용한다. GIM 모델과 IRI 모델은 일반적으로 단일주파수 수신기에서 사용하는 전리층 모델보다 높은 정확도를 나타낸다. 두 모델의 정확도를 비교하면 GIM 모델의 정확도가 더 높으며 IRI 모델의 경우 총전리층 지연량의 75%까지 보정할 수 있다(최병규, 2009).

그림 2는 4가지 전리층 모델을 이용하여 3월, 6월, 9월, 그리고 12월의 모든 날짜를 대상으로 2시간 간격의 VTEC을 산출한 후, 해당 시각의 평균 VTEC을 나타낸 것이다. 그림 2에서 세로축은 TECU 단위로 나타낸 VTEC의 크기, 가로축은 지방시(local time) 기준의 시간을 0시부터 22시까지 2시간 간격으로 나타낸 것이다. 그림 2에서 모든 모델의 총전자수는 계절에 관계 없이 밤시간보다 낮 시간에 더 높게 산출되었다. 그리고 낮의 길이가 짧은 겨울보다 낮의 길이가 긴 여름에는 8시부터 18시까지 비교적 높은 총전자수를 나타냈다. Klobuchar 모델의 경우, 14시에 최대값을 나타냈으며 22시부터 06

시에 총전자수가 9.24 TECU로 일정하게 나타났다. 반면 NeQuick 모델은 22시부터 06시의 총전자수가 GIM 모델이나 IRI 모델의 총전자수와 상당 부분 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 22시부터 06시까지는 Klobuchar 모델보다 NeQuick 모델을 사용하여 전리층 지연을 추정하는 것이 적합하다고 판단된다.

표 1은 그림 2의 내용을 정량적으로 정리한 것으로써 각각의 날짜에서의 모델별 평균 TECU를 나타낸 것이다. Klobuchar 모델과 NeQuick 모델은 모두 6월에 12.14 TECU와 11.49 TECU로 가장 높은 평균 TECU를 나타냈다. 특히 NeQuick 모델의 경우 Klobuchar 모델에 비하여 계절별 평균 TECU의 변화가 크게 나타났다. 이러한 현상이 나타난 이유는 Klobuchar 모델은 전리층 지연 보정 계수의 영향만을 받는 반면, NeQuick 모델식은 계절에 따라 상이한 크기로 나타나는 태양활동지수와 전리층 레이어의 높이가 입력값으로 이용되기 때문이다. 각 모델의 평균 TECU는 IRI 모델과 GIM 모델이 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델에 비하여 모든 계절에서 낮게 나타났다. 특히 Klobuchar 모델은 다른 모델들과 달리 가을과 겨울에도 평균 TECU가 높게 나타났는데, 이는 22시~06시에서의 총전자수가 다른 전리층 모델들에 비하여 높기 때문이다.

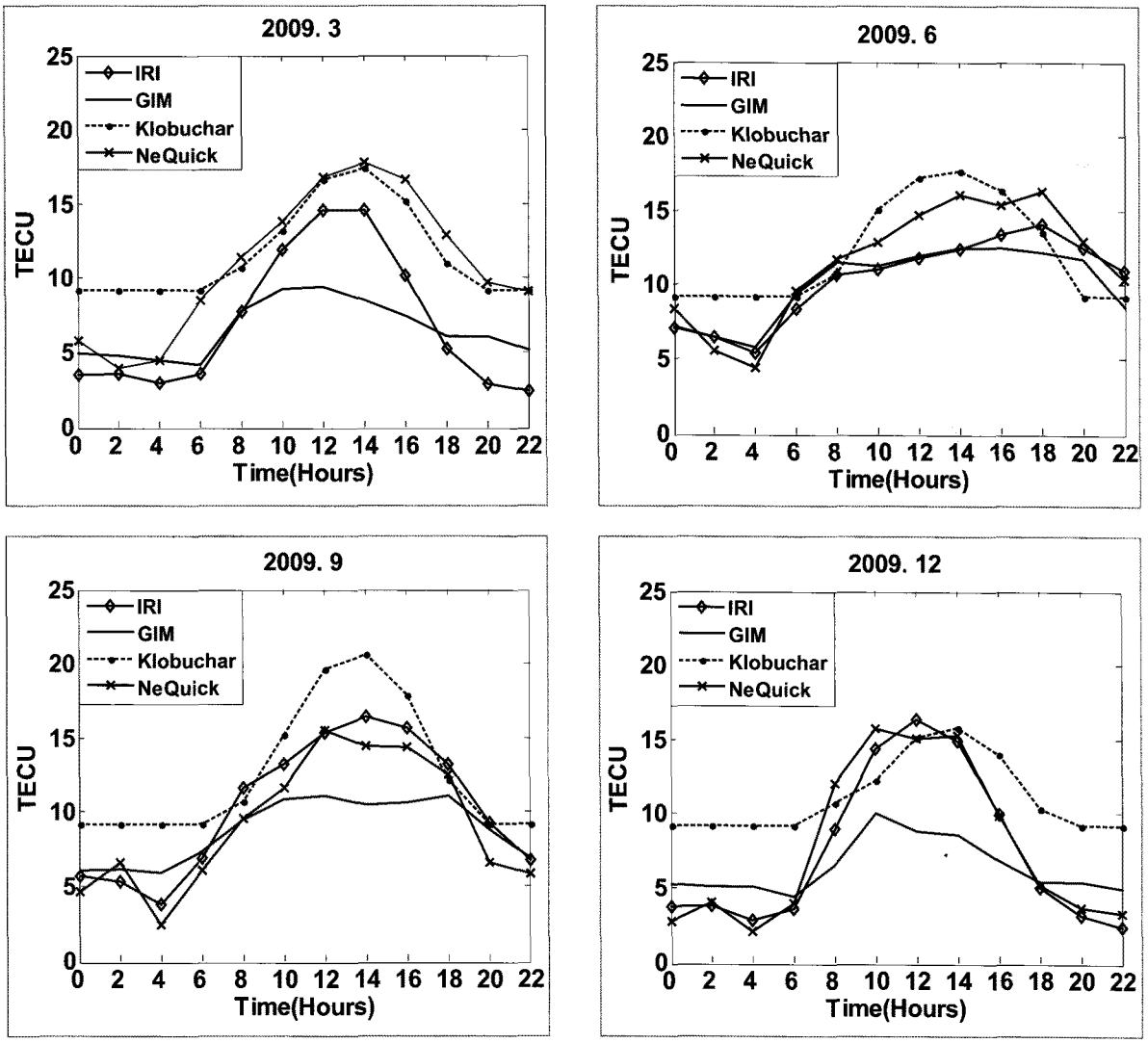


그림 2. 계절별로 산출된 Klobuchar 모델, NeQuick 모델, IRI 모델, GIM 모델의 연직방향 총전자수

표 1. IRI 모델, GIM 모델, Klobuchar 모델, NeQuick 모델의 VTEC 평균 (2009년)

날 짜	평균 TECU			
	IRI	GIM	Klobuchar	NeQuick
2009. 3	6.92	6.50	11.61	10.92
2009. 6	10.32	10.05	12.14	11.49
2009. 9	10.26	8.73	12.60	9.17
2009. 12	7.39	6.34	11.11	7.72

표 2는 IRI 모델과 GIM 모델을 기준으로 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델 각각의 RMS 차이를 나타낸 것이다. IRI 모델과 GIM 모델을 기준으로 산출한 Klobuchar 모델의 RMS 차이는 5.02 TECU와 5.41 TECU로 봄에 가장 높게 나타났다. 또한 IRI 모델과 GIM 모델을 기준으로 산출한 NeQuick 모델의 RMS 차이는 사계절에서 모두 Klobuchar 모델보다 낮게 나타났다. 특히 GIM 모델을 기준으로 산출한 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델의 RMS 차이는 가을에 2.43 TECU로 가장 크게 발생했다. 이는 Klobuchar 모델의 총전자수 산출 결과가 다른 모델들에 비해 크게 나타났기 때문이며, 상대적으로 Klobuchar 모델의 정확도가 높지 않음을 의미한다.

표 2. IRI와 GIM 모델 기준의 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델의 RMS 차이 (2009년)

날 짜	RMS difference (TECU)			
	IRI-Klobuchar	IRI-NeQuick	GIM-Klobuchar	GIM-NeQuick
2009. 3	5.02	4.64	5.41	5.40
2009. 6	3.21	1.83	3.13	2.19
2009. 9	3.11	1.48	4.91	2.48
2009. 12	4.76	1.13	4.97	3.86

3.2 위도별 전리층 지연 산출량 비교

전리층내 총전자수는 계절뿐만 아니라 위도에 따라 다른 분포를 나타낸다. 이 연구에서는 GNSS 신호 수신 지점의 위도에 따른 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델의 전리층 지연 보정 효과를 비교하였다. 이를 위하여 2009년의 BRDC와 DSD자료를 이용하여 철원, 수원, 제주 상시관측소 상공의 VTEC을 산출하였다. Klobuchar 모델과 NeQuick 모델을 이용하여 산출된 결과는 각각의 상시관측소를 대상으로 추출한 IRI 모델과 GIM 모델의 결과와 비교하였다. 철원, 수원 그리고 제주 상시관측소의 위도는 각각 38° 09′ 52.14″, 37° 16′ 31.85″, 33° 30′ 50.14″이다. 따라서 GIM 모델은 철원, 수원 상시관측소에 대하여 위도 37.5°, 그리고 제주 상시관측소에 대하여 위도 32.5°에서의 총전자수를 비교하였다.

그림 3은 4가지 전리층 모델을 이용하여 산출한 철원과 수원 그리고 제주 상시관측소 상공의 VTEC을 관측소 별로 나타낸 것이다. 그림 3에 나타낸 각 VTEC은 1시간 간격의 VTEC을 산출한 후 이를 하루 단위로 평균한 것이다. 그 결과 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델을 이용하여 산출한 VTEC의 증가 또는 감소하는 경향은 GIM과 IRI 모델의 결과와 유사하게 나타났다. 그러나 산출된 총전자수의 크기는 모델별로 차이가 있었으며 10월의 일부 기간을 제외하면 모든 상시관측소에서 Klobuchar 모델의 총전자수가 가장 높게 나타났다. GIM 모델의 경우 10월에 산출된 총전자수가 다른 모델들과 달리 낮아지는 경향을 나타냈다. 날짜의 흐름에 따른 총전자수의 변동은 GIM 모델이 가장 심하게 나타났으며 IRI 모델의 경우 변동이 거의 없음을 알 수 있다.

표 3은 그림 3에 나타낸 각 모델의 평균 TECU를 관측소별로 정리하여 나타낸 것이다. 그 결과, 모든 전리층 모델의 총전자수 산출량은 GNSS 신호 수신지점의 위도가 낮을수록 증가하는 경향을 나타냈다. 이 결과는 한국천문연구원에서 제공하는 한반도 전리층 맵에 나타난 총전자수의 분포 특성과 일치하는 결과이다. 평균 TECU는 모든 상시관측소에서 Klobuchar 모델이 가장 높게 나타났으며 GIM 모델이 가장 낮게 나타났다. 특히 철원 상시관측소에서 Klobuchar 모델과 GIM 모델의 총전자수 차이가 3.85 TECU로 가장 크게 나타났다.

표 3. 상시관측소 별 각 전리층 모델의 연직방향 총전자수 평균 (2009년)

상시 관측소	평균 TECU			
	IRI	GIM	Klobuchar	NeQuick
철원(CHLW)	8.47	8.14	11.99	9.81
수원(SUWN)	9.08	8.55	12.18	10.38
제주(JEJU)	10.3	49.18	12.50	11.12

표 4는 IRI 모델과 GIM 모델을 기준으로 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델 각각의 RMS 차이를 나타낸 것이다. Klobuchar 모델의 경우 관측지점의 위도가 낮아질수록 IRI 모델과 GIM 모델과의 RMS 차이가 작게 나타났다. NeQuick 모델의 경우 IRI 모델과의 RMS 차이는 위도가

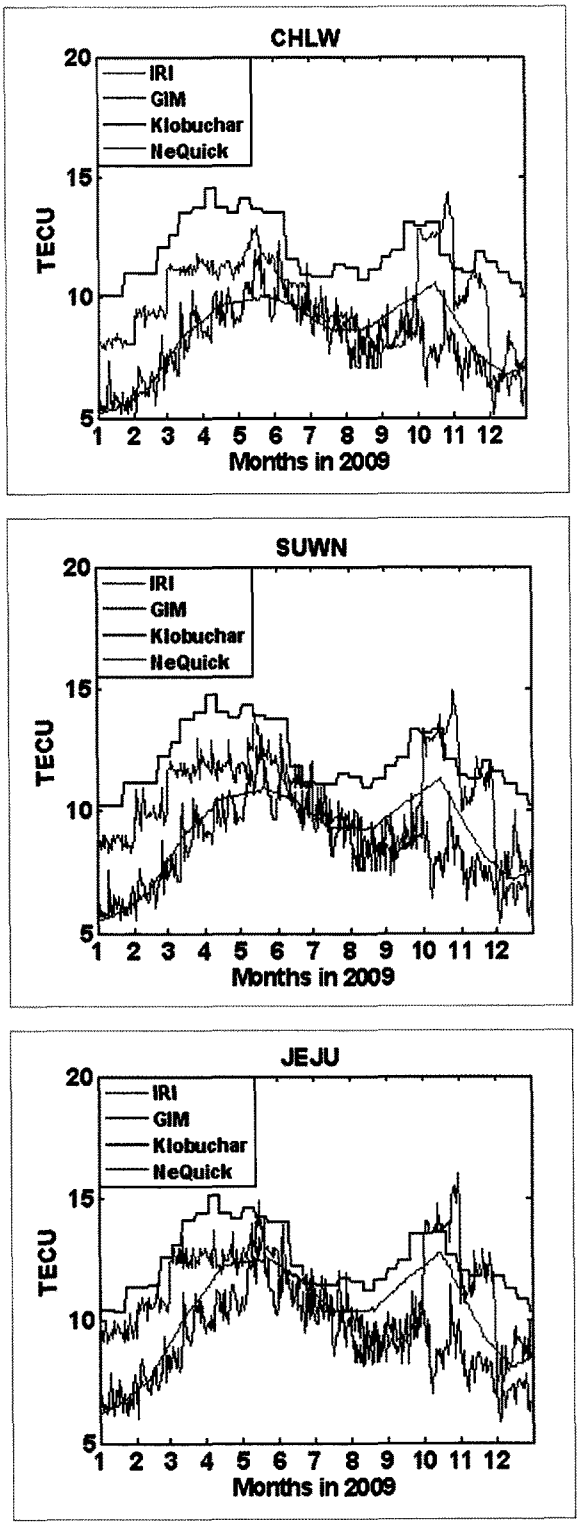


그림 3. 위도에 따른 Klobuchar 모델, NeQuick 모델, IRI 모델, GIM 모델의 하루 간격 연직방향 총전자수

낮아질수록 작게 나타났지만 GIM 모델과의 RMS 차이는 위도가 낮아질수록 크게 나타났다. RMS 차이의 크기는 모든 관측소에서 Klobuchar 모델에 비해 NeQuick 모델이 작게 나타났다.

표 4. IRI와 GIM 모델 기준의 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델의 RMS 차이 (2009년)

상시 관측소	RMS difference (TECU)			
	IRI-Klobuchar	IRI-NeQuick	GIM-Klobuchar	GIM-NeQuick
철원(CHLW)	3.71	2.08	4.07	2.44
수원(SUWN)	3.31	2.07	3.87	2.59
제주(JEJU)	2.48	1.87	3.56	2.64

4. 결 론

단일주파수 GNSS 수신기에서 이용가능한 전리층 모델로 Klobuchar 모델과 Galileo 모델이 있으며, 두 모델은 각각 GPS와 Galileo 항법 메시지에 포함된 전리층 지연 보정 계수를 이용하여 전리층 지연량을 산출한다. 이 연구에서는 Klobuchar 모델과 Galileo 모델의 전리층 지연을 산출하여 전지구 전리층 모델인 GIM 모델과 IRI 모델이 제공하는 총전자수와 비교하였다. 계절에 따른 Klobuchar 모델과 NeQuick 모델의 전리층 지연 보정 효과를 비교하기 위하여 GIM 모델과 IRI 모델을 기준으로 RMS 차이를 산출하였으며 그 결과, RMS 차이는 모든 계절에서 NeQuick 모델이 Klobuchar 모델보다 더 낮게 나타났다. 또한 GNSS 신호 수신지점의 위도에 따른 두 모델의 총전자수 산출량을 GIM 모델과 IRI 모델의 총전자수와 비교하였으며 그 결과, NeQuick 모델의 RMS 차이가 Klobuchar 모델보다 낮게 나타났다. 이러한 결과가 나타난 가장 큰 이유는 Klobuchar 모델이 22시 ~ 06시에 9.24 TECU로 고정된 크기의 전리층 지연량을 산출하기 때문이다.

이 연구는 소수의 지점을 대상으로 진행되었기 때문에 향후 연구에서는 다양한 지역과 태양 극대기를 포함한 장기간 분석을 통해 한반도에 적합한 전리층 모델을 선정해야 한다. 또한 이 연구에서는 각 모델의 VTEC 크기를 기반으로 전리층 지연량을 비교하였으나, 향후 연구에서는 기지점에서 GPS와 Galileo 신호를 모두 수신할 수 있는 수신기를 이용하여 실제 위치 오차와 VTEC

RMS 간의 상관관계를 분석하는 연구가 진행되어야 한다.

감사의 글

이창문은 위도에 따른 전리층 지연량 비교에 관해서 공간정보 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행하였습니다. 박관동과 이상욱은 계절에 따른 전리층 지연량 비교에 관해서 지식경제부 및 산업기술연구회의 협동연구과제의 일환으로 본 연구를 수행하였습니다. [09AR2210, GPS/Galileo 환경에서의 위성항법신호생성/수신처리 및 측위성능향상 기초연구]

참고문헌

민경덕 (1992), 전리층 및 자기권의 변화가 전파통신에 미치는 영향, 통신학술연구, 연세대학교, pp. 52-88.

서윤경 (1994), GPS의 P코드를 이용한 이온층의 총전자수 측정, 석사학위논문, 경희대학교, p. 39.

최병규 (2009), 중거리 기선 측지 성능 개선을 위한 지역 전리층 모델개발, 박사학위논문, 충남대학교, p. 10.

Farah, A. M. A. (2008), Comparison of GPS/Galileo single frequency ionosphere models with vertical maps, *Artificial Satellites*, Vol. 43, No. 2, pp. 75-90.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Wasle, E. (2007), *GNSS-Global Navigation Satellite System*, Springer Wien New York.

Klobuchar, J. (1987), Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions Aerospace Electronic Systems AES-23*, pp. 325-331.

Komjathy, A., Wilson, B. D., Runge T. F., Boulat, B. M., Mannucci, A. J., Sparks, L., and Reyes, M. (2002), A new ionospheric model for wide area differential GPS : The Multiple Shell Approach, *Presented at the ION National Technical Meeting*, San Diego, CA, January pp. 28-30.

Leonovich, L. A., Palamartchouk, K. S., Perevalova, N. P., Pirog, O.M. (2000), Observation of large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin by global GPS networks, *Earth Planets Space*, Vol. 52, pp. 669-674.

Nava, B., Coisson, P., Radicella, S. M. (2008), A new version of the NeQuick ionosphere electron density model, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 70*, pp. 1856-1862.

(접수일 2010. 04. 20, 심사일 2010. 05. 18, 심사완료일 2010. 08. 03)