

GNSS 시뮬레이터 오차생성을 위한 대류층 신호지연량 산출 모델 비교

김혜인^{1†}, 하지현¹, 박관동¹, 이상욱², 김재훈²

¹인하대학교 공과대학 지리정보공학과

²한국전자통신연구원 위성관제·항법연구팀

Comparison of Tropospheric Signal Delay Models for GNSS Error Simulation

Hye-In Kim^{1†}, Jihyun Ha¹, Kwan-Dong Park¹, Sanguk Lee², and Jaehoon Kim²

¹Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

²Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 305-350, Korea

E-mail: hikim0619@inha.edu

(Received April 9, 2009; Accepted May 17, 2009)

요 약

이 연구에서는 GNSS 시뮬레이터 오차생성을 위하여 Hopfield 모델, 수정 Hopfield 모델, Saastamoinen 모델, 그리고 단순모델에 기상 기본값을 적용함으로써 대류층 신호지연량을 산출하였다. 그리고 GIPSY로 산출한 신호지연량을 참값으로 가정한 후 각 모델을 이용하여 산출한 신호지연량과 비교하였다. 그 결과 단순모델에 Marini 사상함수를 적용하였을 때 RMS가 31.0cm로 가장 컸으며, 다른 모델의 경우 평균 5.2cm로 나타났다. 또한 기상 기본값이 대류층 신호지연량 산출에 미치는 영향을 파악하기 위하여, 기상관측값에 따른 신호지연량을 분석하였다. 그 결과, 이 연구에서 사용한 모든 모델들이 대기압의 변화에 큰 영향을 받지 않았으며, 수정 Hopfield 모델을 제외한 모델들은 온도에도 민감하지 않은 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

As one of the GNSS error simulation case studies, we computed tropospheric signal delays based on three well-known models (Hopfield, Modified Hopfield and Saastamoinen) and a simple model. In the computation, default meteorological values were used. The result was compared with the GIPSY result, which we assumed as truth. The RMS of a simple model with Marini mapping function was the largest, 31.0 cm. For the other models, the average RMS is 5.2 cm. In addition, to quantify the influence of the accuracy of meteorological information on the signal delay, we did sensitivity analysis of pressure and temperature. As a result, all models used this study were not very sensitive to pressure variations. Also all models, except for the modified Hopfield model, were not sensitive to temperature variations.

Keywords: GNSS, troposphere, signal delay, tropospheric model, mapping function

[†]corresponding author

1. 서 론

GNSS(Global Navigation Satellite System) 위성신호는 수신장비에 도달하기 전 지구 대기를 통과하면서 대류층의 건조가스 및 수증기에 의해 굴절되며, 이로 인하여 신호전달거리가 증가하게 된다. 대류층 내에서 발생하는 GNSS 신호지연은 이산화탄소, 질소, 산소 등의 건조가스에 의해 발생하는 건조지연(Hydrostatic Delay 또는 Dry Delay)과 수증기에 의해 발생하는 습윤지연(Wet Delay)으로 구분할 수 있다(Davis et al. 1985). 즉 대류층 지연은 식 (1)과 같이 건조지연량 δT_d 와 습윤지연량 δT_w 의 합으로 나타낼 수 있으며, 이는 지상의 수신기와 위성의 시선방향 신호경로 상에 존재하는 대류층 신호지연량을 의미한다. 일반적으로 δT 는 시선방향의 총 지연량(STD, Slant Total Delay), δT_d 는 시선방향 건조지연량(SHD, Slant Hydrostatic Delay), δT_w 는 시선방향 습윤지연량(SWD, Slant Wet Delay)을 의미한다.

$$\delta T = \delta T_d + \delta T_w \quad (1)$$

이 중 건조지연은 90%로 대류층 총 지연량의 대부분을 차지하지만 건조가스가 정역학적 평형상태에 있기 때문에 지상관측만으로도 정밀한 결정이 가능하다(Bevis et al. 1992). 반면, 습윤지연은 수증기의 시공간적 변화가 크기 때문에 지상관측만으로는 정확한 결정이 어렵다. 그러나 습윤지연량은 대류층 총 지연량의 10% 정도로 건조지연량에 비해 매우 작은 편이다.

대류층 신호지연량을 정확하게 산출하기 위해서는 관측소 상공의 고도에 따른 압력과 기온 등의 기상관측값이 필요하다. 그러나 일반적인 지상관측만으로는 고도에 따른 기상관측값을 획득하기 어렵다. 따라서 경험적 모델을 사용하거나 선형적 방법을 이용한다. 경험적 모델은 실제 기상관측데이터를 기반으로 개발된 함수이며, 선형적 방법은 건조지연량과 습윤지연량을 선형적 수치로 가정 후 대류층 지연량을 추정하는 방법이다. 경험적 모델에는 Hopfield 모델(Hopfield 1969)과 수정 Hopfield 모델(Goad & Goodman 1974), Saastamoinen 모델(Saastamoinen 1972)이 대표적이다. 일반적인 GNSS 수신기나 시뮬레이터 등에서는 이러한 경험적 모델을 기반으로 대류층 오차를 생성한다. 그러나 경험적 모델을 사용하기 위해서는 관측 지점의 대기압, 온도, 부분 수증기압 등을 입력변수로 사용해야 함으로 별도의 기상장비가 없을 경우 대류층 지연량을 획득하는 것은 어렵다. 따라서 일반적인 시뮬레이터 오차 생성 모듈에서는 기상 기본값(default)을 사용한다.

이 연구에서는 대류층 모델 중에서 Hopfield, 수정 Hopfield, Saastamoinen 모델, 그리고 단순모델(Elgered et al. 1991)에 기상 기본값을 입력변수로 사용하여 대류층 신호지연량을 산출하고, 이를 참값과 비교하였다. 참값은 고정밀 GNSS 데이터처리 프로그램인 GIPSY-OASIS II(GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software II, 이하 GIPSY라 칭함)로 산출한 신호지연량으로 가정하였다. 또한 기상 기본값을 입력변수로 사용할 경우 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해, 온도와 대기압에 대한 민감도를 분석하였다.

2. 대류층 신호지연량 산출 방법

이 장에서는 경험적 모델인 Hopfield 모델, 수정 Hopfield 모델, Saastamoinen 모델, 그리고 단순모델을 이용한 대류층 신호지연량 산출 방법을 설명한다.

2.1 경험적 모델

Hopfield 모델은 지표면의 굴절지수를 이용하여 고도에 따른 굴절을 변화를 나타낸 모델이다. 이 모델은 전세계에서 수집된 기상데이터를 기반으로 만들어졌으며, 식 (2)와 (3)을 통해 시선방향 건조지연량 SHD와 습윤지연량 SWD를 산출한다(Hofmann-Wellenhof et al. 2007).

$$\delta T_d = \frac{10^{-6}}{5} \frac{77.64}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} \frac{P}{T} [40136 + 148.72(T - 273.16)] \quad (2)$$

$$\delta T_w = \frac{10^{-6}}{5} \frac{(-12.96T + 3.718 \times 10^5)}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}} \frac{e}{T^2} 11000 \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서 P 는 대기압[hPa], T 는 온도[°K], e 는 부분 수증기압[hPa], 그리고 E 는 GNSS 위성 고도각(elevation angle)을 나타낸다.

수정 Hopfield 모델은 고도에 대한 함수인 Hopfield 모델을 위치벡터에 대한 함수로 표현한 모델로, 식 (4)와 같다. 식 (4)에서 i 는 건조지연의 경우 d , 습윤지연의 경우 w 로 나타내며, δT_d 와 δT_w 를 산출하여 합하면 대류층 총 지연량, 즉 시선방향 총 지연량 STD를 산출할 수 있다.

$$\delta T_i = 10^{-6} N_i \sum_{k=1}^9 \frac{\alpha_{k,i}}{k} r_i^k \quad (4)$$

식 (4)에서 N_i 는 굴절도를 의미하며, α_i, r_i 는 관측지점 위치에 대한 성분으로서 이에 대한 자세한 사항은 참고문헌으로 대체한다(Goad & Goodman 1974).

Saastamoinen 모델은 고도각에 따른 대류층 굴절을 추정된 최초의 모델로, 이상기체방정식을 기반으로 개발되었다. 수정 Saastamoinen 모델은 Saastamoinen 모델에 관측지점의 고도에 대한 보정항과 고도와 천정각에 대한 보정항을 추가한 모델이다(Hofmann-Wellenhof et al. 2007). 이 연구에서는 Saastamoinen 모델을 사용하였으며, 식 (5)와 같다. 식 (5)에서 Z 는 천정각(zenith angle)을 의미한다.

$$\delta T = \frac{0.002277}{\cos Z} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2 Z \right] \quad (5)$$

식 (2)에서 식 (5)까지의 δT 는 모두 m 단위이다.

2.2 단순 모델

관측지점의 천정방향 총 지연량(ZTD, Zenith Total Delay)은 천정방향의 건조지연량(ZHD, Zenith Hydrostatic Delay)와 습윤지연량(ZWD, Zenith Wet Delay)의 합으로 표현할 수 있다.

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (6)$$

ZHD의 경우 0.3hPa 미만의 오차를 가지는 기압계를 사용하면 지상관측자료만으로 1mm 오차 수준으로 보정이 가능하다(Bevis et al. 1992). 지상기압과 관측소의 고도를 이용한 ZHD 산출방법은 식 (7)과 같다(Elgered et al. 1991). 이 논문에서는 식 (7)을 단순모델이라고 명명한다.

$$ZHD = \frac{(2.2779 \pm 0.0024) P_s}{1 - 0.00266 \cos 2\phi - 0.00028h} \quad (7)$$

식 (7)의 ϕ 는 관측지점의 위도, 그리고 h 는 관측지점의 고도[km]이며, 산출되는 ZHD의 단위는 mm이다. 대류층 천정방향 건조지연량과 습윤지연량은 식 (8), (9)와 같이 고도각에 대한 사상

함수(mapping function)를 적용하여 SHD와 SWD로 변환할 수 있다. 여기서 m_d 는 건조사상함수, m_w 는 습윤사상함수를 의미한다.

$$SHD = m_d(E) \times ZHD \quad (8)$$

$$SWD = m_w(E) \times ZWD \quad (9)$$

이 연구에서는 사상함수 중에서 가장 대표적인 Marini 사상함수(Marini 1972)와 Niell 사상함수(Niell 1996)를 이용하여 시선방향 신호지연량을 산출하였다. Marini 사상함수는 식 (10)과 같이 고도에 따른 연분수 형태로, Niell 사상함수의 기본이 되는 모델이다.

$$m_i(E) = \frac{1}{\sin E + \frac{a}{\sin E + \frac{b}{\sin E + \frac{c}{\sin E + d}}} \quad (10)$$

여기서 i 는 건조지연의 경우 d , 습윤지연의 경우 w 로 나타낸다. 계수 a, b, c, d 는 지상 관측지점의 고도와 지상기온, 지상압력, 그리고 기온감률에 대한 선형함수이며, 각 계수에 대한 관계식은 Marini(1972)에서 참고할 수 있다.

Niell 사상함수는 현재 GNSS 기상학 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 모델로 식 (11)에 나타낸 Herring 사상함수(Herring 1992)의 연분수 형태 $f(E, a_i, b_i, c_i)$ 를 사용한다. Niell 습윤사상함수와 건조사상함수는 식 (12)와 같다(Niell 1996).

$$m_i(E) = \frac{1 + \frac{a_i}{1 + \frac{b_i}{1 + c_i}}}{\sin E + \frac{a_i}{\sin E + \frac{b_i}{\sin E + c_i}}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} m_d(E) &= f(E, a_d, b_d, c_d) + \Delta m_d(E) \\ m_w(E) &= f(E, a_w, b_w, c_w) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $\Delta m_d(E)$ 는 건조사상함수의 고도보정항으로 식 (13)과 같다.

$$\Delta m_d(E) = \left[\frac{1}{\sin E} - f(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right] h \quad (13)$$

여기서 h 는 관측지점의 고도[km]를 의미한다. 식 (12)의 계수 a_d, b_d, c_d 는 관측지점의 위도 ϕ 와 관측 시간 t 의 함수로 식 (14)와 같다.

$$a(\phi, t) = a_{avg}(\phi) - a_{amp}(\phi) \cos \left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25} \right) \quad (14)$$

여기서 시간 t 는 UT를 기준으로 하는 DOY(Day of Year)이며, T_0 는 28이다. 식 (14)에서 a_{avg} 와 a_{amp} 의 값은 위도의 함수로 주어지는데, 해당 관측지점의 위도에 대한 선형 보간법으로 계산할 수 있다. 계수 b, c 도 계수 a 와 동일한 방법으로 결정할 수 있으며, 식 (13)의 a_{ht}, b_{ht}, c_{ht} 는 고도보정 계수이다. a_{ht}, b_{ht} 그리고 c_{ht} 는 참고문헌으로 대체한다(Niell 1996).

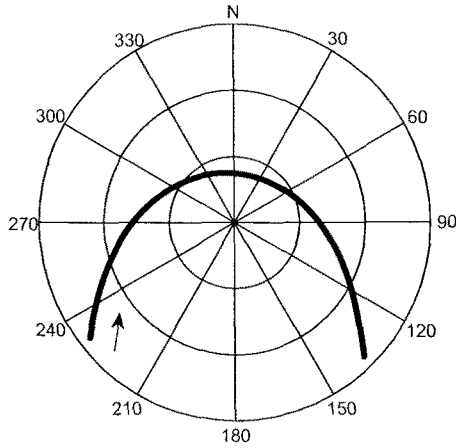


그림 1. 2008년 2월 8일 0시부터 7시까지 PRN 4번 위성의 궤적(skyplot).

3. 대류층 모델별 신호지연량 비교

2장에서 설명한 다섯 가지 모델을 이용하여 대류층 시선방향 신호지연량을 산출하고 그 정확도를 비교하였다. 관측지점은 인하대학교 4호관 옥상에 위치한 상시관측소 IHU2를 대상으로 하였으며, 2009년 2월 8일 협정세계시(UTC, Universal Time Coordinated) 기준 0시부터 7시까지 PRN 4번 위성의 고도각 변화에 따라 대류층 신호지연량을 산출하였다. 그림 1은 실험기간 동안 관측된 PRN 4번 위성의 궤적을 나타낸 것이다. 그림을 보면 PRN 4번 위성은 방위각/고도각 약 230°/10° 위치에서 이동하기 시작하여 0°/70°를 거쳐 135°/10°로 이동하였다. 이는 관측 가능한 고도각의 범위를 대부분 포함하는 궤적으로, 고도각의 경우 대류층 신호지연량 산출에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 계산과정 중 사용된 기상기본값은 온도 273.16°K(0°C), 대기압 1013.25hPa, 그리고 부분 수증기압 0hPa이다. 또한 단순모델에 Marini 사상함수와 Niell 사상함수를 적용한 경우에는 대류층 총 지연량을 건조지연량으로 간략화하였다.

다섯 가지 모델로 산출한 신호지연량과 비교하기 위한 참값은 GIPSY를 이용한 선형적 방법으로 산출하였다. 선형적 방법에 의한 천정방향 총 지연량 ZTD는 선형적 건조지연량인 AHD(a priori Hydrostatic Delay)와 선형적 습윤지연량 AWD(a priori Wet Delay), 그리고 보정항 ZDC(Zenith Delay Correction)를 이용하여 결정할 수 있다(식 15). GIPSY를 이용한 데이터 처리시 AWD는 0.1m, AHD는 식 (16)을 이용하여 산출하였다(Webb & Zumberge 1993). 식 (16)의 h 는 관측지점의 고도[km]를 의미한다. 식 (15)에서 보정항 ZDC는 GIPSY를 이용한 데이터처리 과정에서 추정한다.

$$ZTD = AHD + AWD + ZDC \tag{15}$$

$$AHD = 2.29951e^{-0.000116h} \tag{16}$$

식 (15)을 통해 산출한 ZTD는 식 (6)과 같이 ZHD와 ZWD로 다시 구분할 수 있으며, ZHD는 앞서 언급한 바와 같이 식 (7)을 이용하여 산출할 수 있다. 이 때 대기압은 정성욱 외(2008)가 구현한

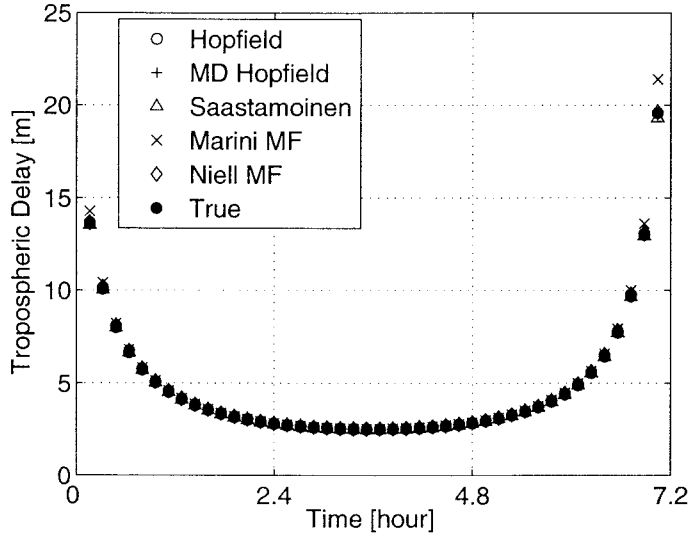


그림 2. 시간에 따른 모델별 대류층 신호지연량 비교.

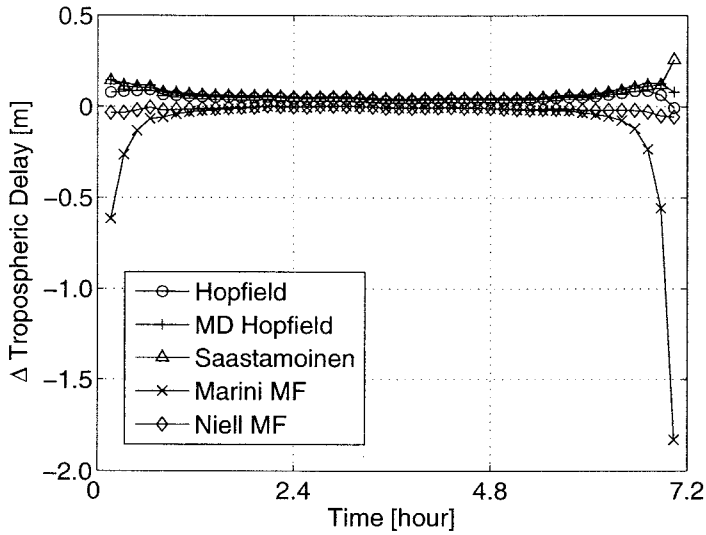


그림 3. 시간에 따른 모델별 오차 비교.

한국형 압력 모델을 이용하였으며, 시선방향으로 변환하기 위하여 Niell 사상함수를 적용하였다. 한국형 압력 모델을 이용하여 산출한 2009년 2월 8일 0시부터 7시까지 IHU2 관측소 위치의 대기압은 1020.71hPa이다.

그림 2는 각각의 대류층 모델을 이용하여 산출한 신호지연량을 나타낸 것이다. 그림 2의 가로축은 시간을 의미하며, 세로축은 신호지연량을 m 단위로 나타낸 것이다. 그림 1과 2에서 확인할 수 있

표 1. 시간에 따른 모델별 오차 통계.

	평균 [cm]	표준편차 [cm]	RMS [cm]
Hopfield	5.1	1.9	5.5
MD Hopfield	5.4	2.1	5.7
Saastamoinen	6.8	3.9	7.8
Marini MF	-10.0	29.6	31.0
Niell MF	-1.2	1.3	1.8

듯이, 0시경 위성의 고도각이 낮을 때에는 약 15m의 신호지연이 발생하다가 고도각이 상승함에 따라 5m 이하로 신호지연량이 감소하였다. 또한 5시경부터 7시경까지 고도각이 다시 낮아지자, 신호지연량이 20m 이상까지 증가하였다. 즉, 그림 2는 위성의 고도각이 낮아짐에 따라 GNSS 신호의 대류층 통과 거리가 길어져 신호지연량도 증가하게 되는 일반적인 이론에 부합하는 결과이다. 그림 2의 참값을 기준으로 산출한 모델별 오차를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 오차평균, 표준편차, 그리고 RMS를 표 1에 cm 단위로 나타내었다.

그림 3을 보면 고도각이 높은 경우, 참값과 큰 차이를 나타내지 않았으나 고도각이 낮아질수록 참값과의 차이가 증가함을 확인할 수 있다. 특히 0시경과 7시경에는 위성의 고도각이 20° 이하였으며, 이 때 오차가 증가하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 표 1을 보면, 단순모델에 Marini 사상함수를 적용한 경우 RMS가 31.0cm로 참값과 가장 큰 차이를 나타냈으며, Hopfield 모델과 수정 Hopfield 모델, Saastamoinen 모델, 그리고 단순모델에 Niell 사상함수를 적용한 경우에는 RMS가 8cm 이하로 나타났다. 다섯 개 모델의 평균오차와 표준편차, RMS를 비교해보면 단순모델에 Niell 사상함수를 적용한 경우가 표준편차와 RMS가 가장 낮은 것으로 나타났다.

Mendes(1999)의 연구에서는 대류층 모델로 산출한 신호지연량을 라디오존데(radiosonde) 관측 결과와 비교하였다. 그 결과 Hopfield 모델과 Saastamoinen 모델의 ZTD 오차가 약 3.0cm로 나타났으며, Niell 사상함수를 이용하여 계산한 건조지연량 오차가 고도각 6°와 30°에서 각각 2cm와 1cm로 나타났다. 이 연구에서는 고도각이 약 70°일 때 Hopfield 모델과 Saastamoinen 모델의 ZTD 오차가 각각 약 3.4cm, 3.9cm로 나타났으며, Niell 사상함수를 이용했을 때의 오차가 고도각 10°와 30°에서 각각 3.2cm, 1.4cm로 나타났다. 이를 통해 이 연구의 결과가 Mendes(1999)의 결과와 유사하게 나타난 것을 알 수 있다.

4. 기상관측값에 따른 신호지연량 비교

기상 기본값이 대류층 지연량 산출에 미치는 영향을 파악하기 위해 온도와 대기압에 대한 민감도를 분석하였다. 그림 4와 5는 온도와 대기압에 따른 대류층 신호지연량의 변화를 나타낸 것이다. 온도와 대기압이 입력변수로 사용되는 대류층 모델을 대상으로, 고도각 5°, 30°, 60°, 90° 네 가지 경우로 구분하여 분석하였다. 한반도의 관측 가능한 온도변화 범위인 -20°C에서 40°C까지를 1°C 간격으로 변화시켜가며 신호지연량을 산출하였으며, 그 결과를 그림 4에 나타내었다. Niell 사상함수를 이용한 방법의 경우는 온도가 필요하지 않기 때문에 그림 4에는 나타내지 않았다. 대기압도 온도의 경우와 마찬가지로 고도각 5°, 30°, 60°, 90°일 경우로 구분하였으며, 한반도의 관측 가능한 압력변화

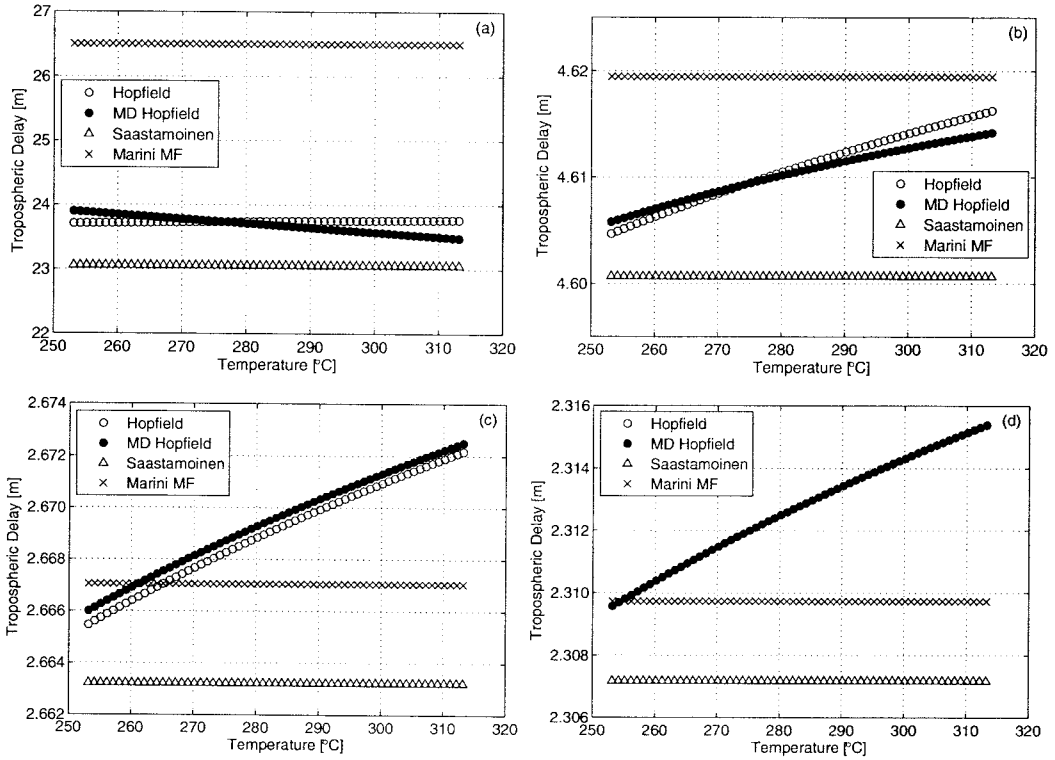


그림 4. 온도 변화에 따른 모델별 신호지연량 변동. (a) 고도각 5°, (b) 고도각 30°, (c) 고도각 60°, (d) 고도각 90°

표 2. 온도와 대기압 변화에 따른 모델별 신호지연량 최대 변동량 [cm].

	온도				대기압			
	5°	30°	60°	90°	5°	30°	60°	90°
Hopfield	6.0	1.2	0.7	0.6	140.5	27.3	15.8	13.7
MD Hopfield	41.4	0.8	1.0	0.6	140.7	27.3	15.8	13.7
Saastamoinen	0	0	0	0	156.8	27.3	15.8	13.7
Marini MF	0	0	0	0	156.9	27.4	15.8	13.7
Niell MF	-	-	-	-	138.2	27.3	15.8	13.7

범위인 980hPa부터 1040hPa까지를 1hPa 간격으로 변화시켜가며 신호지연량을 산출하였다. 표 2는 온도와 대기압의 변화 범위 내에서 나타난 모델별 최대 변동량을 cm 단위로 나타낸 것이다.

그림 4와 표 2를 보면, Hopfield 모델과 Saastamoinen 모델, 그리고 단순모델에 Marini 사상함수를 적용한 경우는 온도 변화에 큰 영향을 받지 않았으나, 수정 Hopfield 모델은 고도각 5°에서 최대 41.4cm까지 지연량에 차이가 나타났다. 그러나 고도각이 10°일 때는 5.2cm, 15°에서는 0.5cm로 지연량의 차이가 매우 작게 나타났다. 이를 통해 수정 Hopfield 모델은 고도각이 매우 낮은 경우를 제외하면 온도 변화에 큰 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. Hopfield 모델은 최대 변동량이 6.0cm에

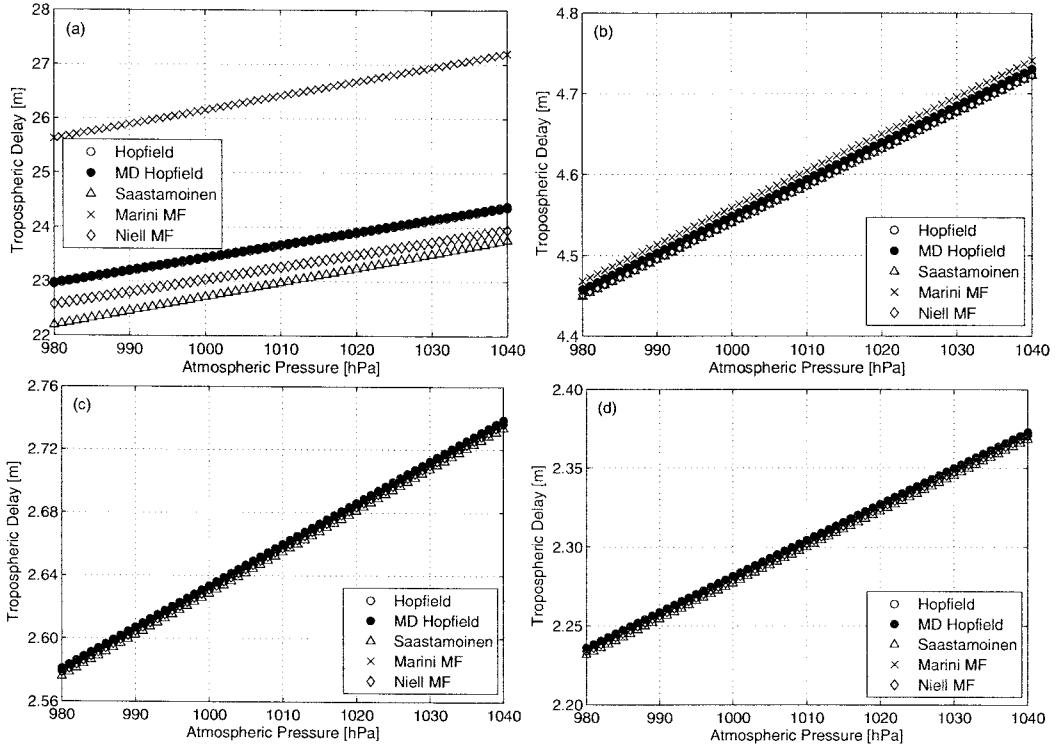


그림 5. 대기압 변화에 따른 모델별 신호지연량 변동((a) 고도각 5°, (b) 고도각 30°, (c) 고도각 60°, (d) 고도각 90°).

불과했으며, Saastamoinen 모델과 Marini 사상함수는 온도변화에 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

대기압의 경우, 그림 5와 표 2에 나타난 바와 같이 다섯 개 모델 모두 대기압의 변화에 비슷한 수준의 영향을 받는 것을 알 수 있다. 고도각 5°일 때는 신호지연량이 크기 때문에 최대 변동량이 약 157cm까지 나타났으며, 30°일 때는 약 27cm, 60°일 때는 약 16cm, 그리고 90°, 천정방향일 경우에는 약 14cm로 나타났다.

5. 결론

이 연구에서는 Hopfield 모델, 수정 Hopfield 모델, Saastamoinen 모델을 이용하여 대류층 신호지연량을 산출하였다. 또한 단순모델에 Marini 사상함수와 Niell 사상함수를 적용하여 대류층 신호지연량을 계산하였다. 총 다섯 가지 모델을 이용하여 산출한 대류층 신호지연량은 GIPSY로 결정된 신호지연량을 참값으로 가정한 후 각각 비교하였다. 계산과정 중 필요한 기상관측값으로는 기본값을 사용하였으며, 단순모델의 경우에는 대류층 총 지연량을 건조지연량으로 간략화하고 정확한 모델링이 어려운 습윤지연량은 고려하지 않았다. 그 결과, 단순모델에 Marini 사상함수를 적용한 경우의 RMS가 31.0cm로 다른 모델들에 비해 크게 나타났으며, Marini 사상함수를 제외한 모델들의 RMS

평균은 5.2cm로 매우 작게 나타났다. 또한 기상 기본값이 대류층 신호지연량 산출에 미치는 영향을 파악하기 위해 온도와 대기압에 대한 민감도를 분석하였다. 그 결과, 수정 Hopfield 모델이 가장 온도 변화에 민감하여 신호지연량의 차이가 최대 41.4cm까지 발생하는 것을 확인하였다. 그러나 이는 고도각 5°일 때의 결과이며, 고도각 15° 이상일 경우에는 그 차이가 1cm 이하로 나타났다. Hopfield 모델은 온도 변화에 따라 6cm 이하의 차이를 나타냈으며, Saastamoinen 모델과 Marini 사상함수의 경우에는 온도변화의 영향을 거의 받지 않았다. 대기압의 경우, 모든 모델들의 신호지연량 차이가 고도각 5°에서 157cm 미만으로 나타났으며, 30° 이상일 경우에는 28cm 미만으로 나타났다. 따라서 고정밀 측위가 아닌 일반적인 측위, GNSS 수신기 및 시뮬레이터 등에서는 기상기본값을 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 또한 대류층 총 지연량을 건조지연량으로 간략화하여 단순모델을 통해 대류층 지연량을 산출하는 방법도 고정밀 측위용이 아닌 일반적인 시뮬레이터 오차생성에는 큰 무리없이 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글: 이 연구는 지식경제부 및 산업기술연구회의 협동연구과제의 일환으로 수행하였음(08AR 2310, GPS/Galileo 환경에서의 위성항법신호생성/수신처리 및 측위성능향상 기초연구).

참고문헌

- 정성욱, 백정호, 조중현, 이재원, 박인관, 조성기, 박종욱 2008, 한국우주과학회지, 25, 267
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. 1992, JGR, 97, 15784
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E., & Elgered, G. 1985, Radio Science, 20, 1593
- Elgered, G., Davis, J. L., Herring, T. A., & Shapiro, I. I. 1991, JGR, 96, 6541
- Goad, C. C. & Goodman, L. 1974, , in AGU Annual Fall Meeting Proceedings, ed. F. D. Bloss (CA: AGU), p.28
- Herring, T. A. 1992, Netherlands Geodetic Commission Serises 36, 157
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2007, GNSS-Global Navigation Satellite Systems (Wien, New York: Springer-Verlag), p.128
- Hopfield, H. S. 1969, JGR, 74, 4487
- Marini, J. A. 1972, Radio Science, 7, 223
- Mendes, V. B. 1999, Geodesy and Geomatics Engineering UNB Technical Report 199
- Niell, A. E. 1996, JGR, 101, 3227
- Saastamoinen, J. 1972, in Geophysical monograph, 15, eds. S. W. Henriksen, A. Mancini, & B. H. Chovitx (Washington, D.C.: AGU), p.247
- Webb, F. H. & Zumberge, J. F. 1993, An Introduction to the GIPSY/OASIS-II (CA: JPL Pub.), D-11088