

GPS 신호의 대류층 지연 예측을 위한 보정모델의 비교

A Comparison of Correction Models for the Prediction of Tropospheric Propagation Delay of GPS Signals

이용창*

Lee, Yong Chang

요 旨

GPS의 SA 해제 이후, 상대적으로 비중이 작았던 대기층지연, 다중경로(Multipath) 등 모델링 연구를 통하여 측위 정확도를 보다 향상시킬 수 있는 오차요인의 보정에 관심이 모아지고 있다. 본 연구는 Goad&Goodman, A&K, Hopfield 및 Sasstamoinen 보정모델에 의한 대류층 지연량의 예측은 물론 천정방향의 지연량에 Niell, Chao 및 Marini 맵핑 함수를 적용한 조합 프로그램을 작성하여 기상센서가 운용되는 특정 관측소의 기상자료를 적용하고 GPS 위성의 고도 변화에 따른 대류층 신호 지연량의 변화와 보정모델 및 맵핑 함수의 조합에 따른 지연량의 변화 양상을 비교·고찰한 것으로 특히, 고도각이 10° 이하인 저고도 GPS 관측자료의 대류층 지연보정 시, 천정방향 보정모델과 맵핑 함수의 조합 및 맵핑 함수의 특성 등을 고려하여 보정합이 타당할 것으로 사료되었다.

ABSTRACT

Since GPS's SA cancellation, the interest is converged in correction of errors such as atmospheric delay and multipath that weight had been small relatively, which can improve the accuracy of positioning through modelling research. The aim of this study have an extensive comparison of the various tropospheric delay models (Goad&Goodman, A&K, Hopfield and Sasstamoinen) and mapping functions(Niell, Chao, and Marini). Expecially, the tropospheric delay amounts by change of the GPS satellite elevations, and the delay by various combination between zenith delay models and mapping functions, compared and examined. For this, programmed the total delay models and the combined models which can be described as a product of the delay at the zenith and a mapping function. The result of study, especially, as the minimum elevation of included data is reduced under 10° , it was considered to be reasonable that the prediction of tropospheric delay considering combination and mapping character of functions about the transition of the zenith delay to a delay with arbitrary zenith angle.

1. 서 론

2000년 5월 2일 오후 4시(UTC)을 기하여 그동안 미국 방성의 전략적 정확도 비하 정책이었던 SA가 해제되었고 위성 궤도력의 산출, 각종 오차보정 및 실시간 모호정수(Ambiguity)해석 등의 분야에서 신속 정확한 기술향상을 통하여 한 차원 높은 지형공간정보구축시스템으로서 기반을 다져가고 있는 GPS는 구체적 현대화 계획의 추진, RTK(Real Time Kinematic) 및 VRS(Virtual Reference System)등 자료처리기술의 향상과 함께 항법, 지구물리, 자

연자원 분야는 물론 일상생활에까지 점차 실용화 추세에 있으며 향후, GIS/RS(Geographical Information System/Remote Sensing)와 연계하여 인간·지능지향형 3차원 가상현실을 실현할 수 있게 되었다.^{1,2)} 최근에는 SA에 비해 상대적으로 작은 영향을 주었던 대기층지연, 다중경로(Multipath) 등 모델링 연구를 통하여 거리정확도를 향상시킬 수 있는 오차요인에 대한 보정법의 연구에 관심이 모아지고 있다.³⁾ 특히 전리층 지연의 경우는 2주파 신호와 관련 알고리즘을 통하여 해소되며 다중경로도 특수안테나 설계 및 코드/반송파(Code/Carrier) 평활화(Smoothing)처리 기술 등으로 그 영향을 최소화하기 위한 노력이 하드웨어 및 소프트웨어 양면에서 진행되고 있다.⁴⁾ 대류층의 영향은 비 산란(non-dispersive)특성으로 반송파(Carrier)와

*시립 인천전문대학 토목과 부교수·공학박사

는 무관하여 2주파 관측으로는 소거되지 않으므로 고가의 센서(Radiosonde, Water vapor radiometer, 기타 기상관측용 센서)로부터 대기 중의 온도, 압력 및 수증기량(water vapor)을 측정하거나 GPS 관측자료(정밀 궤도력 활용)로부터 수증기량을 산정하여 상대적으로 경제적이며 신뢰성이 향상된 보정 모델링 연구를 추진하고 있다. 지구대기는 그림 1과 같이 몇 개의 층으로 구성되는데 지구에 가장 가까운 대류층(Troposphere)은 지표면에서 시작되어 9~16km 까지 분포하며 대류층과 다음층인 성층권(Stratosphere, 16~50km)사이에는 7km 정도의 범위를 차지하며 대류층 및 성층권 이층 특성을 갖는 권계면(Tropopause)이 있다.^{4),5)}

50km 이상의 대기층은 전자적으로 충전되어 있는데 전리층(Ionosphere)으로 불린다. 대류층, 권계면 및 성층권은 전자적으로 중성이므로 중성대기를 형성하게 되며 보통 건조(Dry)부분과 습윤(Wet)부분으로 나누어 지는데 건조부의 대부분이 건조가스로 구성되는 반면 습윤부는 수증기로 구성된다. 비교적 저층에 분포하는 중성대기는 진공상태가 아니며 굴절률이 변화됨에 따라 신호의 전파를 느리게 하고 굴곡시켜 GPS 신호를 직선대신 곡선경로로 진행케 하므로서 GPS 안테나와 위성간의 거리가 실제거리보다 길어지게 된다. 전체 대류층 지연량의 90%~95%는 건조지연(Dry delay)이 차지하는데 대류층 내에서 발생하는 대기의 기상 특성에 거의 종속되는 반면 습윤지연(Wet delay)은 변화가 심한 대기중의 수증기량(water vapor)에 기인된다. 따라서,

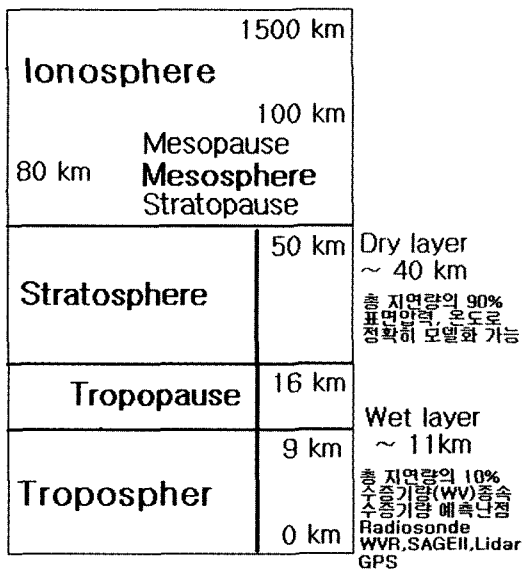


그림 1. 지구 대기층 구성

대기의 온도와 압력을 측정하면 건조지연은 쉽게 보정되나 습윤지연은 대류층 내 수증기량을 정확히 측정해야 하는 어려움이 있는데 이런 점들이 여러 가지의 대류층 지연 보정모델이 연구된 배경이기도 하다. 간편한 대류층 지연 보정모델을 사용하면 20cm의 정확도로 보정할 수 있지만, 정밀 고도측정이 요구되는 응용분야에서는 GPS관측 당시의 기상상태와 특히, 대기 중 수증기량에 대한 신뢰성 있는 자료가 있어야만 한다. 대류층 지연의 영향은 측지측량은 물론, GPS, VLBI, DORIS, Satellite Altimetry 및 SLR과 같은 우주 측지 기술에서 주요 오차요인으로 취급되고 있다.^{3),6),7)} 그동안 전파신호에 대한 대류층 지연의 영향을 보정하기 위한 다양한 연구 및 실험을 통하여 여러 가지 보정모델과 천정 방향의 지연량을 임의 고도각 방향의 대류층 지연량으로 변환시키는 맵핑(화성)함수(Mapping function)들이 발표되었으며 (전체지연모델 : Saastamoinen, A&K, Hopfield, Goad& Goodman, Black and Eisner 등, 변환함수모델 : Niell, Marini, Davis, Chao, Lanyi, Herring, Ifadis 등) 각종 상업용 GPS 자료처리 프로그램에 적용되고 있다.⁸⁾⁻¹⁴⁾ 본 연구에서는 Goad&Goodman, A&K, 및 Hopfield 보정모델에 의한 대류층 지연량의 예측은 물론 Hopfield 및 Saastamoinen 천정방향의 대류층지연량 모델(ZTDM : Zenith Tropospheric Delay Model)에 Niell, Chao 및 Marini 화성함수를 적용한 조합 프로그램을 작성하여 기상센서를 운용하고 있는 특정 관측소에서 GPS 위성 고도의 변화에 따른 대류층 신호 지연량의 변화 및 보정모델·화성함수의 조합에 따른 지연량의 변화양상을 비교·고찰하고자 한다.

2. 대류층 지연 보정모델과 맵핑 함수

중성대기는 신호전파속도를 지연시키거나 작게는 굴곡시켜 GPS 신호의 전파에 영향을 주고 있다.

초과 경로거리는 신호경로의 굴절지수(n)에 종속되나 편이상 굴절률 [$N^{Trop} = (n-1) \cdot 10^6$]을 도입하고 Dry 및 Wet 성분의 고려하면 천정방향의 위성신호에 대한 대류층 지연량 (T_{trop}^z)을 식 (2-1)과 같이 산정할 수 있다. 수증기를 포함하는 중성대기의 굴절률을 계산할 때 사용되는 일반식은 식 (2-2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 T_{trop}^z &= 10^{-6} \int_{path} N^{Trop} ds \\
 &= 10^{-6} \int_{path} N_d^{Trop} ds + 10^{-6} \int_{path} N_w^{Trop} ds \quad (2-1)
 \end{aligned}$$

$$N = k_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + k_2 \left(\frac{e}{T} \right) Z_w^{-1} + k_3 \left(\frac{e}{T^2} \right) Z_w^{-1} \quad (2-2)$$

여기서, P_d 및 e 는 건조공기 및 수증기의 부분압력(mb), T 는 절대온도($^{\circ} Kelvin$)이고 Z_d 와 Z_w 은 각각 건조공기 및 수증기의 압축률로 이상적인 기스와 수증기를 포함한 기스간의 보정을 위해 사용한다. 식(2-2)의 첫째항은 건조 성분, 둘째 및 셋째 항은 습윤성분의 굴절률을 나타낸다.

여러 종류의 상수(k)값이 발표되었는데 Thayer는 다음 값을 추천하였다.

$$k_1 = 77.604 \pm 0.014 (^{\circ} K/mb),$$

$$k_2 = 64.79 \pm 0.08 (^{\circ} K/mb),$$

$$k_3 = (3.776 \pm 0.004) \cdot 10^5 (^{\circ} K/mb)$$

맵핑함수는 천정 방향의 지연량을 임의 고도각 방향의 대류층 지연량으로 변환시키는 역할을 하므로 건조부·습윤부에 맵핑함수를 적용하면 일반적인 대류층 지연량의 보정모델은 식(2-3)과 같다.⁴⁾

$$T_{trop} = d_h^z \cdot m_h(\epsilon) + d_w^z \cdot m_w(\epsilon) \quad (2-3)$$

여기서, d_h^z 및 d_w^z 는 건조대기 및 수증기에 따른 천정방향의 지연량, m_h 및 m_w 는 건조 및 습윤성분의 맵핑함수이며 ϵ 는 지상 관측점의 고도각(90° -천정각)이다. 따라서, 대류층 지연량을 해석하기 위해서는 고도별 대류층의 굴절률을 조사해야하고 10° 이하의 고도에서도 안정한 맵핑함수를 개발해야 한다.⁸⁾⁻¹⁴⁾

2.1 Hopfield 모델

Hopfield는 지표면으로부터 11km 까지를 습윤층, 40km 까지를 건조층으로 나누어 대기압력, 절대온도, 수증기부분압력 및 고도각을 입력하여 지연량을 산정할 수 있는 다음의 식을 제안하였다.

$$T_{trop} = \frac{10^{-6}}{5} [N_{d,0}^{trop} h_d m_d(\epsilon) + N_{w,0}^{trop} h_w m_w(\epsilon)] \quad (2-4)$$

여기서, $h_d = 40, 136 + 148.72(T - 273.16)m$, $h_w = 11, 000$ (평균값)이고 N 는 식(2-2)와 같고 $m_d(\epsilon) = (\sin \sqrt{\epsilon^2 + 6.25})^{-1}$, $m_w(\epsilon) = (\sin \sqrt{\epsilon^2 + 2.25})^{-1}$ 이다.

2.2 Saastamoinen 모델

Saastamoinen은 건조대기를 지표면부터 11~12km까지의 다변성권역(polytropic) 및 다변성권역에서 50km까지의 등온성권역(isothermal stratosphere)으로 양분하고 수증기는 다변성권역에만 한정하여 고도 10° 이상의 범위에 적용 가능한 표준 모델식을 아래와 같이 제안하였다.

$$T_{trop} = \frac{0.002277}{\cos \epsilon} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \cdot e - B \tan^2 \epsilon \right] + \delta R \quad (2-5)$$

여기서, B 및 δR 은 고도 및 표고와 천정각 간의 상관관계로부터 구해지는 상수이다.

2.3 맵핑 함수

맵핑(Mapping)함수는 그림 2와 같이 천정방향의 대류층 지연값에 곱해져 임의 시준선 방향의 지연량을 산정할 수 있도록 하므로 여러 지연모델들과 연계하여 사용할 수 있다. 최근에는 저고도의 관측자료도 유용하게 사용되므로 시준고도(Mask angle) 10° 이하의 고도각에서도 양호한 결과를 제공하는 맵핑함수들이 개발되고 있고 상호간 비교·검토되고 있다.^{15),16)}

고도각이 낮아지면 보정항이 추가되어 단순식(천정방향 부근의 경우 $1/\sin \epsilon$)에서 보다 복잡한 함수식으로 전개되는데 다음 식은 1972년 Marini가 제안한 함수식에 1992년 Herring이 수정·보완한 것으로 3개의 상수로 제한되었고 천정방향의 함수값은 1이 되도록 하였다. Chao, Davis 및

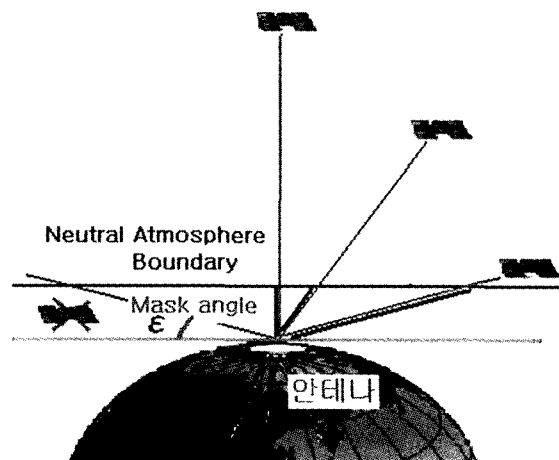


그림 2. 위성의 최소 고도각

표 1. Dry NMF 맵핑 함수의 계수

계수	위도(φ _i)				
	15°	30°	45°	60°	75°
평균값					
a	1.2769934e-3	1.2683230e-3	1.2465397e-3	1.2196049e-3	1.2045996e-3
b	2.9153695e-3	2.9152299e-3	2.9288445e-3	2.9022565e-3	2.9024912e-3
c	62.610505e-3	62.837393e-3	63.721774e-3	63.824265e-3	64.258455e-3
변동폭					
a	0.0	1.2709626e-5	2.6523662e-5	3.4000452e-5	4.1202191e-5
b	0.0	2.1414979e-5	3.0160779e-5	7.2562722e-5	11.723375e-5
c	0.0	9.0128400e-5	4.3497037e-5	84.795348e-5	170.37206e-5
고도 보정값					
aht	2.53e-5				
bht	5.49e-3				
cht	1.14e-3				

표 2. Wetc NMF 맵핑 함수의 계수

계수	위도(φ _i)				
	15°	30°	45°	60°	75°
aw	5.8021897e-4	5.6794847e-4	5.8118019e-4	5.9727542e-4	6.1641693e-4
bw	1.4275268e-3	1.5138625e-3	1.4572752e-3	1.5007428e-3	1.7599082e-3
cw	4.3472961e-2	4.6729510e-2	4.3908931e-2	4.4626982e-2	5.4736038e-2

Niell도 위와 유사한 화성함수식을 전개하였는데 1996년 제안된 Niell의 맵핑함수는 일일 및 계절적으로 변동하는 지표면의 온도에 종속된 이전 모델들과는 달리 지형학적 위치와 일시적인 변동 등을 고려한 새로운 화성함수(NMF)을 제안하였는데

$$m(\epsilon) = \left(1 + \frac{a_d}{1 + \frac{b_d}{1 + c_d}} \right) \cdot \left(\sin \epsilon + \frac{a_d}{\sin \epsilon + \frac{b_d}{\sin \epsilon + c_d}} \right)^{-1} \quad (2-6)$$

건조부 상수는 DOY와 위도 및 고도에 종속되는 반면 습윤부 상수는 위도에만 종속된다. 본 연구에서 적용된 Niell 맵핑함수의 계수는 1996년 발표된 값으로 건조·습윤 상수는 각각 표 1 및 표 2와 같다.¹⁰⁾

본 연구에서는 대류층 지연모델로서 GoadGoodman, A&K, Hopfield 및 Saastamoinen 모델을 맵핑함수로는 Niell, Chao

및 Marini 함수를 선정하여 조합 모델식을 구성하였다.

3. 기상자료의 획득

전 세계적으로 운용되고 있는 IGS(the International GPS Service) 상시관측소 중 기상센서를 운용하고 있는 관측소가 제한적인 관계로 본 연구를 위해 사용된 GPS 관측자료는

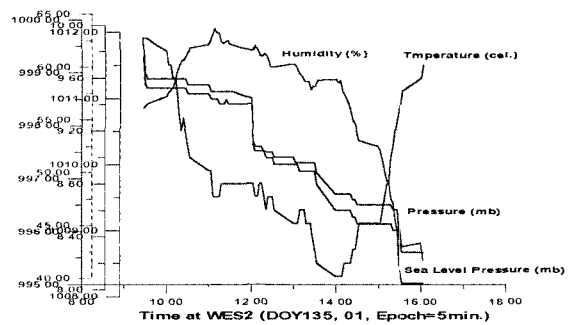


그림 3. WES2 관측소의 시간대 별 기상변화

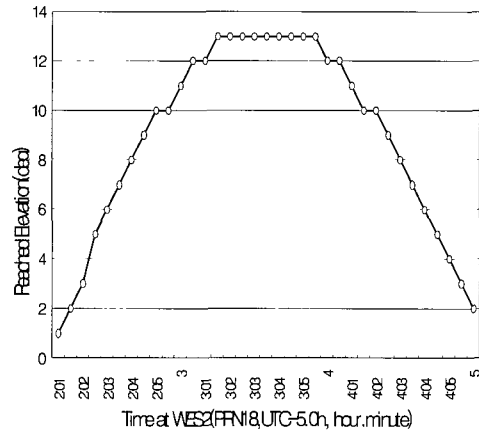
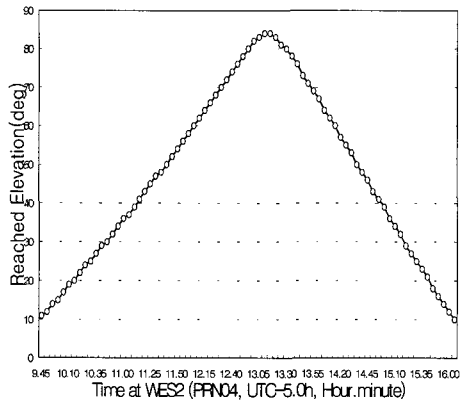


그림 4. PRN4(좌) 및 PRN18(우) 위성의 시간대별 고도변화

미국 상시관측망(CORS : Continuously Operating Reference Station)의 일원이며 GODC(GRD/NOAA Operational Data Center)에서 운영하고 있는 측점 중 WES2 관측소에서 2001년 5월 15일(Day of year 135), ROGUE SNR-8000수신기 및 AOAD/M_T 안테나로부터 취득된 Epoch 30초간격의 GPS RINEX 관측자료(WES21350.01m, *.01n, *.01o, *.01s)를 활용하였다.¹⁷⁾ 기상자료 파일은 PTB220, PT 100 RTD 1/s DIN 43760B, HUMICA H-sensor 등으로부터 취득된 4종류의 기상정보(압력-PR mbar, DRY온도-TD °C, 상대습도-HR % 및 평균해면압력 -SP mbar)로서 5분 간격으로 갱신되고 있다. WES2의 ITRF97 공인좌표는 $\varphi=42^{\circ} 36' 48.00648''$ N, $\lambda=71^{\circ} 29' 35.97128''$ W, H=85.013m이다.

그림 3은 WES2 관측소의 시간대별 PR, TD, HR 및 SP 변동 상태를 도시한 것이다. 고도각 15° 이상 및 이하의 대표적인 기준위성 2개를 선정하기 위하여 26대의 위성 중 그림 4와 같이 비교적 지속시간이 길면서 최 고도 및 최 저도를 유지하는 PRN4번 및 PRN18번 위성을 선정하여 연구에 활용하였다.

4. 비교분석

기상센서를 운용하고 있는 GPS 상시관측소가 국내에 없는 관계로 불가불 미국 WES2 관측소의 기상자료를 활용하여 연구를 수행한 아쉬움은 있으나 그동안 GPS의 SA 영향에 비해 상대적으로 관심의 비중이 작았고 상업용 소프트웨어에 의존한 대류층 보정 추세에 반하여 대류층의

영향이 조명되는 시점에 위성의 시준 고도별 보정모델과 맵핑 함수의 특성에 본 연구의 초점을 맞추어 다음과 같이 비교·고찰하였다.

4.1 시준 고도별 대류층 지연 보정량의 변화양상

그림 5는 Hopfield의 천정방향 지연량에 Niell 맵핑 함수를 적용하여 산출한 위성의 시준고도 별 건조부 및 습윤부의 지연량을 나타낸 것이다. 시준고도 11°~84°의 범위에서 건조부 지연량 및 습윤부 지연량의 분포비는 거의 일률적으로 97% : 3%의 비율을 나타내었다. 다른 모델에서도

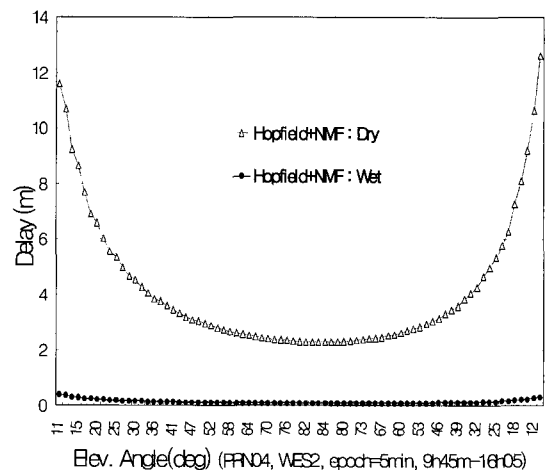


그림 5. 시준 고도별 Dry 및 Wet 지연량 분포 (Hopfield Zenith model + Neill 회성함수)

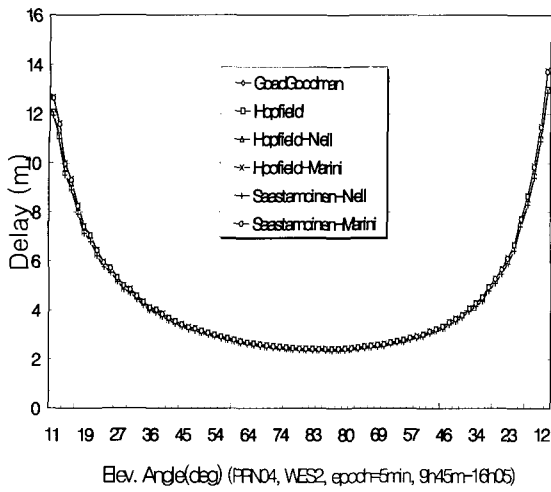


그림 6. 보정모델의 시준고도 별 대류층 지연량 분포 (위성의 시준 고도 11°~84°)

이와 동일한 분포를 나타내었는데 건조부와 습윤부의 고도분포비가 약 4 : 1인 점을 감안하면 대류층 지연량은 고도의 크기보다는 각 층의 구성 성분에 중속됨을 확인할 수 있었다.

그림 6은 Goad&Goodman, Hopfield 및 Saastamoinen 모델과 Niell 및 Marini 맵핑함수로 구성된 6가지 대류층 지연보정모델에 WES2관측소의 Epoch 별 기상변동을 적용하여 위성의 고도변화에 따른 총 지연량을 나타낸 것이다. 위성의 고도가 높아지면서 지연량은 감소하여 천정 방향에 이르러 최소를 나타내었고 84°에서 11°로 점차 위성

의 고도가 낮아질수록 지연량의 크기가 감소됨은 물론 감소폭도 점차 크게 나타남을 6가지 모델에서 확인할 수 있었다.

4.2 시준고도 15° 이상에서 모델·함수의 조합 별 특성

15° 이상의 고도에서는 그동안 발표된 모델과 함수들이 상호간 큰 편차없이 유사한 보정값을 제시하는 것으로 연구·발표되었으므로 본 연구에서는 일반적으로 사용하는 보정모델과 맵핑 함수들의 조합모델을 구성하여 위성고도별로 대류층 지연량의 변동을 비교·고찰하였다.

그림 7은 Hopfield 및 Saastamoinen 천정방향 지연모델(ZTDM)과 Niell 및 Marini 맵핑 함수의 조합에 따른 고도별 지연량의 편차를 도시한 것이다. Niell 및 Marini 맵핑 함수는 Hopfield 및 Saastamoinen ZTDM에서 평균편차 1~2cm로서 두 모델에서 유사한 경향을 보인 반면, 동일한 ZTDM에 Niell 및 Marini 함수를 적용한 결과의 편차는 평균 15~16cm 였으며 특히, 11°~14°의 고도에서는 각각 평균 60cm의 편차를 나타내어 각각 3~4cm의 앞선 경우와는 크게 다른 양상을 나타내었다.

그림 8은 각 시준고도에 대한 6가지 모델별 지연량의 표준편차를 도시한 것으로 고도각이 45° 이상인 경우 ± 5 cm, 15°에서는 ± 20 cm의 모델간 지연량에서의 편차를 나타내었고 저위도로 갈수록 모델간 편차가 현격히 증가됨을 확인할 수 있었다.

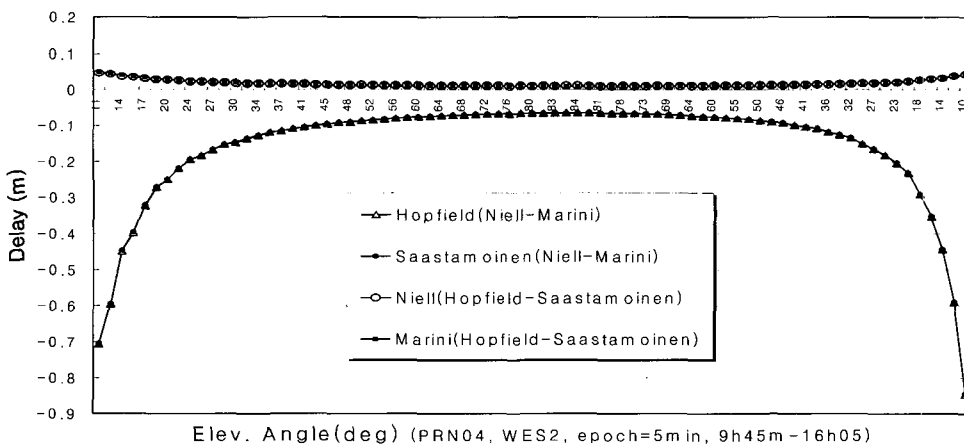


그림 7. 시준고도 15° 이상에서 대류층 보정모델 및 Mapping함수의 고도별 특성

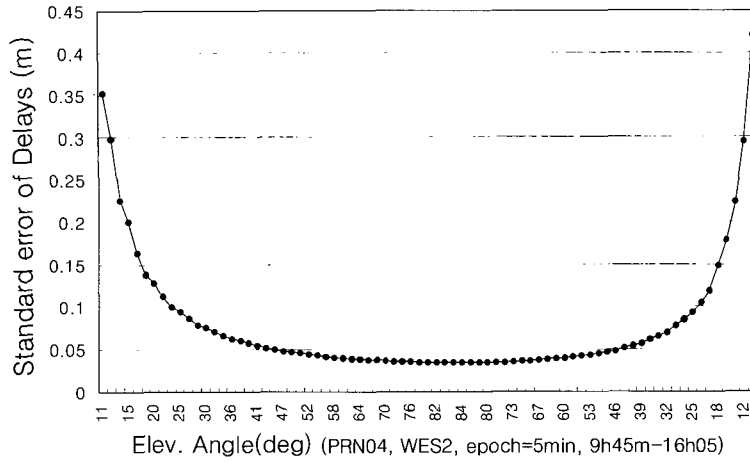


그림 8. 6가지 모델의 시준고도 별 대류층 지연량의 표준편차 분포

4.3 시준고도 15° 이하에서 모델·함수의 조합 별 특성

일반적으로 천정 방향모델과 mapping 함수의 조합모델에 대한 맵핑(화성)능력은 저고도 위성자료에 대한 보정능력으로 평가된다. 본 연구의 4.2절에서 사용된 모델 외에 A&K 모델과 Chao 맵핑 함수를 추가하여 9가지 경우에 대한 지연량의 변동을 비교·고찰하였다.

그림 9는 Hopfield 및 Saastamonien 천정방향 지연모델(ZTDM)과 Chao, Niell 및 Marini 화성함수의 조합에 따른

고도별 지연량의 편차를 도시한 것이다. 9가지 조합 모델 중 특히, Marini 맵핑 함수와 Hopfield 및 Saastamonien ZTDM 조합모델의 경우는 저고도 부분에서 다른 조합모델들에 비해 큰 편차를 보인 반면, 두 모델의 지연량은 유사하게 산정되었는데 이는 4.2절의 검토결과와 같이 대류층 총 지연량을 조합모델로 산정할 경우 ZTDM보다는 맵핑 함수의 영향에 크게 좌우됨을 확인할 수 있었다.

그림 10은 각 시준고도에 대한 9가지 모델 및 선별된

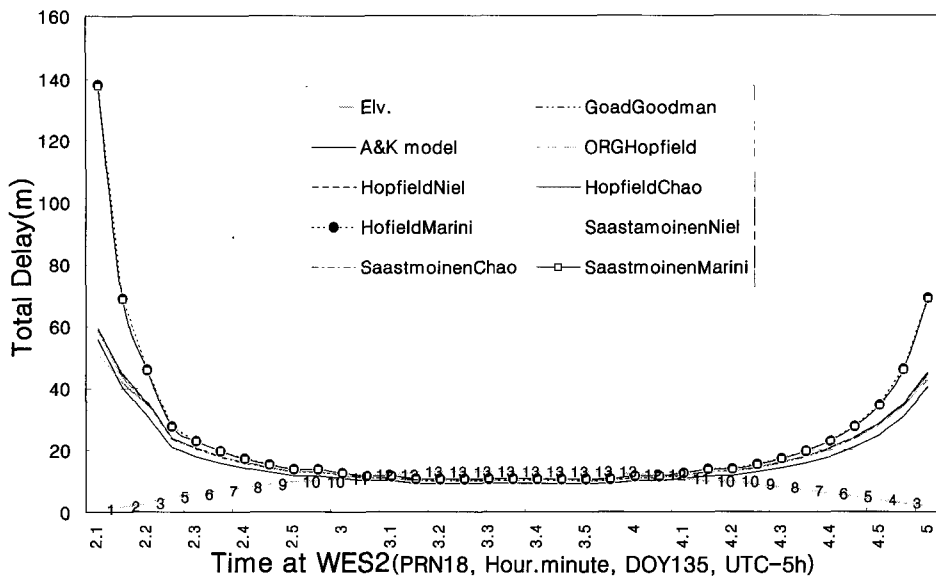


그림 9. 시준고도 15° 이하에서 대류층 보정모델 및 맵핑 함수의 고도별 특성

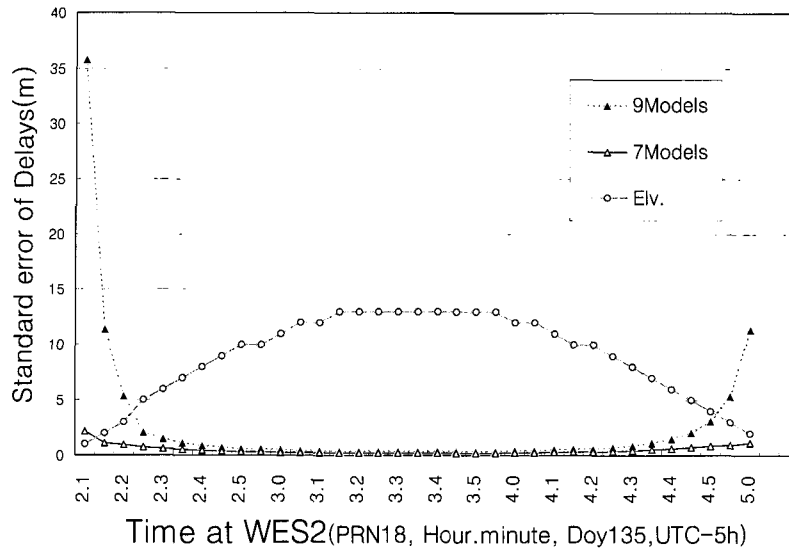


그림 10. 시준고도 15° 이하에서 대류층지연 보정모델 및 맵핑함수의 시간대별 지연량의 표준편차

7가지 모델(Marini 맵핑 함수와 Hopfield 및 Saastamonien ZTDM 조합모델 제외)의 각 경우별 지연량의 표준편차를 도시한 것으로 고도각이 13°~10° 범위까지는 ±30cm~1m의 분포를 보인 반면, 7°에서 1°로 점차 낮아지면서 ±1m에서 ±약 40m로 급격한 편차증가를 나타내었다. 특히 7가지 모델만의 모델간 지연량의 편차는 ±30cm~±3m (평균편차 ±43cm)로서 앞선 고도 15° 이상 환경하의 지연량 편차와는 큰 편차 폭을 보였다.

본 연구에서는 각 시준 고도별 실제의 대류층 지연량을 실측하거나 산출하지 못한 관계로 맵핑 함수의 절대적인 정확도는 논할 수는 없지만 15° 이하의 고도에서 취득한 GPS 관측 자료의 대류층 지연 보정의 경우, 보정 모델과 맵핑 함수의 선정 및 조합이 보정 효과에 큰 영향을 줄 것으로 사료되었다.

5. 결 론

대류층 보정을 위한 천정방향 지연량 및 맵핑(화성)함수의 조합프로그램을 작성하고 기상센서가 운용되는 측정에서 모델 및 맵핑(화성)함수의 조합결과를 비교·고찰한 결과, 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 시준고도 11°~84°의 범위에서 건조부 지연량 및 습윤부 지연량의 분포비는 본 연구에서 검토된 모든 모델에서 평균 97% : 3%의 비율을 나타내었는데 건조부 : 습윤부

의 고도 분포비가 약 4 : 1인 점을 고려할 때 지연량은 고도의 크기보다는 구성 성분에 종속됨을 확인할 수 있었다.

2. 동일한 천정방향 대류층지연모델에 Niell 및 Marini 함수를 적용한 결과의 편차는 평균 15~16cm로서 Niell 및 Marini 맵핑 함수의 유사한 맵핑(화성)특성을 확인하였다.

3. 특히, 10° 이하의 저고도에서 취득한 GPS 관측자료의 대류층 지연보정을 위해서는 천정방향 보정모델과 화성함수간의 조합 특성 및 맵핑 함수의 화성특성 등을 고려하여 보정함수가 타당할 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 연구는 '인천전문대학 연구지원규정에 의한 자체연구비 지원'을 받아 수행된 논문으로 대학에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Interagency GPS Executive Board(<http://www.igeb.gov/>)
2. SAPOS(<http://www.geodaten.bayern.de/sapos.html>)
3. V.B.Mendes and E.B.Langley (1995), Zenith Wet Tropospheric Delay Determination Using Prediction Models : Accuracy Analysis, Cartografia E Cadastro N. 2 Junho.
4. B.W.Parkinson, J.J.Spilker Jr (1996), GPS : Theory and Applications, Vol. 1, pp. 517-546.

5. The Center for Space Research at the University of Texas (1999), The Atmosphere and Its Effect on the GPS Signal, http://www.ae.utexas.edu/courses/ase389p_gps/projects99/whitlock/int.
6. V.B.Mendes and E.B.Langley (1998), Tropospheric Zenith Delay Prediction Accuracy for Airborne GPS High-Precision Positioning, ION98.
7. V.B.Mendes and E.B.Langley (1994), A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modeling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data, Presented at KIS94.
8. Alfred Leick (1995), GPS Satellite Surveying, second edition, pp. 307-316.
9. B.Hoffman-Wellhop, H.Lichtenegger and J.Collins (1992), Global Positioning System, Theory and Practice, pp. 98-113.
10. A.E.Niell (1996), Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, J. of Geophysical Research, Vol. 101, No. B2, pp. 3227-3246.
11. T.A.Herring (1992), Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data, Proc. of the Symposium : The Hague The Netherlands), pp. 157-164.
12. John W.Marini (1972), Correction of Satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile, Radio Science, Vol. 7, No. 2, pp. 223-231.
13. J. Saastamoinen, Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites, Geophysical monograph series Vol. 15, pp. 247-251.
14. H.S.Hopfield (1969), Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data, Journal of Geophysical Research, pp. 4487-4499.
15. H.W.Janes, R.B.Langely, and S.P.Newby (1991), Analysis of tropospheric delay prediction models : comparisons with ray-tracing and implications for GPS relative positioning, Bulletin Geodesique, pp. 151-161.
16. Sunil B. Bisnath, Vigilio B. Mendes, and Richard B. Langley (1997), Effects of Tropospheric Mapping Functions on Space Geodetic Data, Presented at the 1997 IGS Analysis Center Workshop, Pasadena, CA, 12-14 March.
17. GODC GPS Data archive, http://www.grdl.noaa.gov/GRD/GPS/gps_data.html or ftp://gracie.grdl.noaa.gov/dist/cignet/d135a_01/.

(2002년 5월 10일 원고접수)