Journal of the KIMST, Vol. 19, No. 2, pp. 163-170, 2016
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2016.19.2.163

Research Paper 센서 · 신호처리 부문

한반도 기상데이터를 이용한 지상항법 대류권 지연 오차 보상기법

소형민*,1) · 이기훈1) · 박준표1)

1) 국방과학연구소 제3기술연구본부

Compensation Method of Tropospheric Delay Model Error for Ground Navigation using Meteorological Data in Korea

Hyoungmin So*,1) · Kihoon Lee1) · Junpyo Park1)

1) *The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 5 October 2015 / Revised 11 January 2016 / Accepted 25 March 2016)

ABSTRACT

Tropospheric delay is one of the largest error source in pseudolite navigation system. Because a pseudolite is installed on the ground and transmits its signal to a user in the air or on the ground, the conventional tropospheric delay model developed for a satellite navigation doesn't work properly. In this paper, performance analysis of several pseudolite tropospheric delay models has been done using meteorological data. Based on the result, a new compensation method for Hopfield model has been proposed.

Key Words : GNSS(위성항법), Pseudolite(의사위성), Tropospheric Delay(대류권 지연), Hopfield Model(홉필드 모델), Meteorologial Data(기상데이터)

1. 서 론

의사위성은 항법위성과 유사한 신호를 송출하는 항법 신호원으로써, 지상이나 항공기에 설치하여 항법 시스템을 구축할 수 있는 장비를 말한다[1]. 의사위성 항법시스템은 위성항법 시스템과 달리 항법 신호원을 용이하게 설치할 수 있는 장점으로 인해 다양한 응용 분야에서 활용 가능하다. 위성항법 신호의 수신이 불가한 실내 지역이나 도심의 빌딩 숲과 같이 위성항법 음영지역에 의사위성을 설치하여 항법 가용성을 향상시킬 수 있다[2]. 또는 공항에서의 항공기 정밀 이착륙을 위해 추가적인 항법 신호원으로 사용되기도 한다[3].

일반적인 위성항법시스템에서 고려되는 주된 오차 요인으로는 위성시계 오차, 위성궤도 오차, 전리층 지연 오차, 대류층 지연 오차 등이 있다[3]. 의사위성 항법시스템의 경우, 의사위성이 고정된 위치에 설치되어 위성 궤도 오차는 손쉽게 측정이 가능하다. 그리고 의사위성 신호는 전리층을 통과하지 않기 때문에 전리층에 의한 지연 오차도 무시할 수 있다. 전리층 지연

* Corresponding author, E-mail: hyoungmin.so@gmail.com
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

오차는 위성항법 시스템에서는 가장 큰 오차 요소로 고려되고 있기 때문에 의사위성은 이 부분에서 장점을 갖는다고 할 수 있다.

이와 달리 대류층 지연의 경우, 위성항법시스템에서는 큰 비중을 차지하지 않지만 의사위성 항법시스템에서는 주된 오차 요인 중의 하나로 부각된다. 이것은 의사위성 신호의 전달 경로가 위성신호에 비해 낮은 고도의 대기에서 수평으로 형성되기 때문이다. 저층 대기는 공간이격에 의한 불균일 특성으로 인해 모델링이 어렵고, 이로 인해 기존의 위성항법에서 사용되는 대류층 지연 모델 역시 저앙각의 위성에 대해서는 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다[4].

의사위성 항법시스템에서의 대류권 지연 오차 추정의 환경 특성을 Fig. 1에 도시하였다. 첫째로 사용자와 의사위성간의 고도차이가 크지 않기 때문에 저앙각의 상대적인 기하특성을 갖는다. 둘째로 차분항법을 위한 기준국을 설치하는 경우에도 지상에 설치되는 의사위성에 대해 사용자와 기준국 간의 공간이격에 따른 영향이 크게 나타난다. 셋째로 사용자가 수신하는 개별 의사위성 신호 간의 상대적인 경로 차이가 크게 나타나기 때문에 항법해 계산 시 공통오차 성분 제거를 통한 이득을 기대할 수 없다.

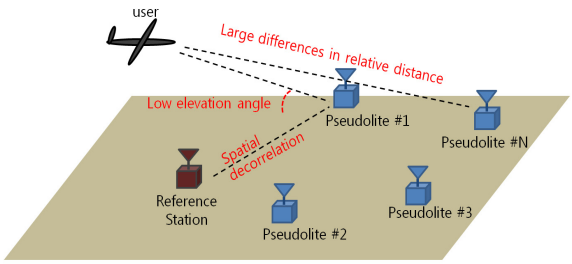

Fig. 1. Characteristics of tropospheric delay estimation in a pseudolite navigation system

의사위성 항법시스템의 대류권 지연 오차 보상을 위해 기존 위성항법에서 사용되는 모델을 기반으로 다수의 모델이 개발되었다[4]. 하지만 대부분 항공기 이착륙을 위한 용도로 개발되어, 사용자와 의사위성 간의 거리가 멀어지는 경우 충분한 성능을 보이지 못한다. 본 논문에서는 기존 의사위성 대류권 지연 모델 중 Hopfield 모델의 잔여 오차를 기상데이터를 이용하여 보정하는 기법을 제안하였다. 한반도의 계절별 Hopfield 모델 잔여 오차 특성을 확인하고, 이를 추정 변수로 반영하는 사용자-의사위성간 거리/고도 보정식을 구성하였다. 도출된 보정식은 모의 실험 데이터를 이용하여 성능을 검증하였다.

2. 의사위성 대류층 지연 모델 개요

의사위성에서 적용 가능한 대류층 지연 모델은 미국의 협역 위성항법 보강시스템(LAAS: Local Area Augmentation System)의 개발 과정에서 항공기 이착륙 시 위성항법 정확도 향상을 위한 공항용 의사위성을 대상으로 개발되었다. 해당 기법은 식 (1)에 나타낸 바와 같이 의사위성과 사용자간의 거리 및 고도 차이에 비례하여 대류층 지연량을 추정하는 방식으로, RTCA (Radio Technical Commission for Aeronautics) 모델이라고 한다[5].

$$\delta R_{Tr} = N_{APL} \times (1 - \triangle h_u / h_0) \times R \times 10^{-6} \tag{1}$$

δR_{Tr} : 대류층 지연량
N_{APL} : 신호전달 경로상의 대기 굴절도(refractivity)
$\triangle h_u$: 의사위성과 사용자간의 고도 차이
h_0 : 대류층 규모 고도(scale height)
R : 의사위성과 사용잔간의 거리

RTCA 모델 이후 기존의 위성항법 대류층지연 모델을 변형한 의사위성 대류층 지연 모델이 제안되었다. 2003년에는 Hopfield 모델 기반의 의사위성 대류층 지연 모델이 제안되었다[6]. Hopfield 모델은 연직방향으로의 습윤/건조 대기의 굴절도를 모델링한 것이다[7]. 위성항법에서는 우주공간의 항법위성과 지상의 사용자 수신기간의 경로 중 규모고도 이하의 부분에 대해 굴절도를 적분한 결과를 대류층 지연량으로 추정한다. 의사위성 항법시스템의 경우 의사위성과 사용자 모두 규모고도 이내에 위치하는 특성을 반영한 굴절도 적분식을 사용한다. 식 (2)에 Hopfield 의사위성 대류층 지연 모델을 나타내었다.

$$\tau_{APL,u^*}(R_u, \triangle h_u) = \frac{N_* \times (h_{*,0} - h_s) \times 10^{-6}}{5 \triangle h_u} \cdot \left[\left(1 - \frac{\triangle h_{APL}}{h_{*,0} - h_s} \right)^5 - \left(1 - \frac{\triangle h_{APL} + \triangle h_u}{h_{*,0} - h_s} \right)^5 \right] \cdot R_u \tag{2}$$

$\tau_{APL,u*}$: 건조/습윤 대류층 지연량
R_u : 의사위성과 사용자간 거리
$\triangle h_u$: 의사위성과 사용자 수신기 고도 차이
$\triangle h_{APL}$: 기준국 수신기와 의사위성고도 차이
h_s : 기준국 수신기 고도
N_* : 건조/습윤 대기 굴절도
$h_{*,0}$: 건조/습윤 대기 규모 고도

이 외에도 위성항법의 저앙각 위성에 대해 우수한 성능을 보이는 Saastamoinen 모델을 의사위성에 적용한 사례도 있다[4]. 식 (3)에 Saastamoinen 모델을 정리하였다.

$$\triangle_{Trop} = \frac{0.002277}{\cos Z} \times \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05\right) \cdot e - B \cdot \tan^2 Z\right] + \delta R \quad (3)$$

$\triangle_{Trop}$: 대류층 지연
Z : 천정각
P : 대기압
T : 기온
e : 천정각
B : 고도 보정항
δR : 고도/천정각 보정항

의사위성에서 주로 활용되고 있는 대류층 지연 모델들은 이외에도 몇몇 기법들이 적용된 바 있다. 본 장에서 설명한 대표적인 모델들을 포함한 각 모델들의 장단점 및 성능에 대해서는 기존의 연구들에서 확인된바 있다[4,8]. 이에 따르면 Hopfield 모델은 사용자의 고도 및 사용자와 의사위성간의 앙각, 거리 변화에 대하여 가장 평균적인 특성을 갖고 있다. 다른 모델들이 일부 환경에서는 우수한 성능을 보이고 또 다른 일부 환경에서는 성능 열화를 겪는 반면 Hopfield 모델은 다양한 환경의 다양한 응용분야에서 안정적인 성능을 갖는다고 할 수 있다. 본 논문에서는 Hopfield 모델을 의사위성 대류층 지연 모델로 적용하고 이에 대한 잔여 오차를 모델링하여 정확도를 향상시키는 것을 목표로 하였다.

3. Hopfield 모델 오차 특성 분석

식 (2)의 의사위성에서 적용 가능한 Hopfield 모델은 연직방향으로의 굴절도 변화를 4차로 모델링하는 Hopfield 모델에 기반한다. 본 장에서는 Hopfield 모델 자체에 대한 오차 특성을 분석하여 최종적으로 의사위성 모델에 반영하고자 한다. 일반적인 Hopfield 모델을 식 (4)에 정리하였다.

$$N_*^{Trop}(h) = N_{*,0}^{Trop} \cdot \left[\frac{h_* - h}{h_*}\right]^4 \quad (4)$$

$N_*^{Trop}(h)$: 고도 h에서의 건조/습윤대기 굴절도
$N_{*,0}^{Trop}$: 지표면에서 관측된 건조/습윤대기 굴절도
h_* : 건조/습윤대기의 규모 고도
h : 고도

한반도에서의 Hopfield 모델 오차 수준을 파악하기 위해서는 비교를 위한 대류층 지연 기준값이 필요하다. 본 논문에서는 라디오존데를 이용하여 기상관측값을 획득하고 이를 기준으로 대류층 지연 기준값을 계산하였다. 라디오존데가 고도별로 관측한 기상데이터로부터 건조대기와 습윤대기에 대한 굴절도를 계산할 수 있다. 계산된 굴절도를 전파 전달 경로상에서 적분하여 얻어진 지연량을 최종 기준값으로 사용했다. 라디오 존데가 관측한 기상값 중 기온(T), 대기압(P), 상대습도(f)를 이용하여 각 관측점에서의 건조대기와 습윤대기에 대한 굴절도를 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$N_{dry} = 77.6\frac{P}{T}$$
$$N_{wet} = 22770\frac{f}{T^2} \cdot 10^{\frac{7.4475(T-273)}{T-38.3}} \quad (5)$$

Fig. 2는 식 (5)를 이용하여 라디오존데 기상관측값으로부터 계산한 고도별 굴절도 관측 결과이다.

본 논문에서는 총 1년의 기간 중 110일의 라디오존데 기상관측값을 이용하여 고도별 굴절도 관측 기준값을 생성하고, 이를 해당 시점의 Hopfield 모델 적용 결과와 비교하였다. Fig. 3은 110일의 라디오존데 관측결과와 Hopfield 모델을 적용 결과를 동시에 도시한 것이다. 좌측의 그림은 건조대기의 굴절도 결과로써, 지

표면에서는 약 300 mm/km의 크기를 갖고 35 km 고도에서 0으로 수렴한다. 건조대기의 경우 라디오존데 관측결과와 Hopfield 모델의 결과가 상당히 유사한 것을 확인할 수 있다. 가운데 그림은 습윤대기 결과로써, 지표면에서 100 mm/km 이내에서 폭넓은 분포를 갖고 있고, 라디오존데 관측결과와 Hopfield 모델간의 차이가 상당한 것을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 라디오존데와 Hopfield 모델간의 굴절도 차이를 도시하였다.

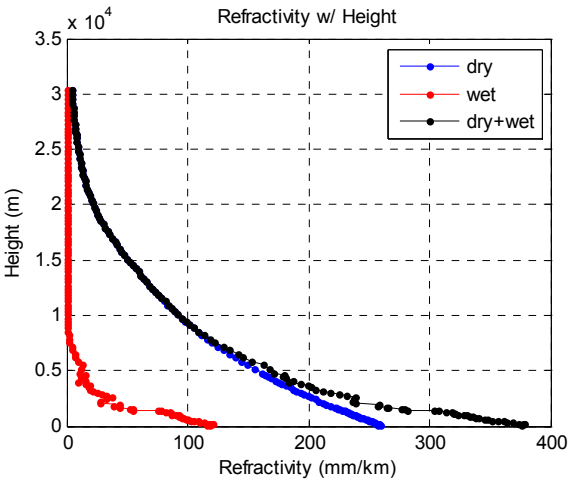

Fig. 2. Profile of dry and wet refractivity calculated from a radiosonde meterological measurement

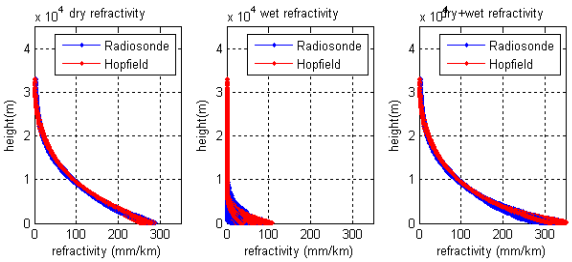

Fig. 3. Comparison of measured radiosonde data and Hopfield model(dry part(left), wet part(middle), dry+wet(right))

Fig. 3에서 설명한 바와 같이 Fig. 4의 좌측 그림에서 Hopfield 모델의 건조대기 굴절도 추정오차가 지표면에서 규모 고도까지 비교적 균일하게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 4의 가운데 그림에서 보인 습윤대기에 대해서는 10 km 고도 이하에서 상당한 수준의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 기존의 연구결과에서 알려진 바와 같이 대류층 지연의 90 %는 건조대기에 의해 발생하지만 대부분 모델에 의해 제거 가능하고, 습윤대기에 의한 대류층 지연량은 전체의 10 %에 불과하지만 모델링의 어려움으로 인해 잔여오차가 크게 남는 것이다. Fig. 4의 우측에서 보인 건조대기와 습윤대기의 굴절도 오차를 모두 더한 결과는 습윤대기에 대한 Hopfield 모델의 오차에서 기인한 것임을 알 수 있다.

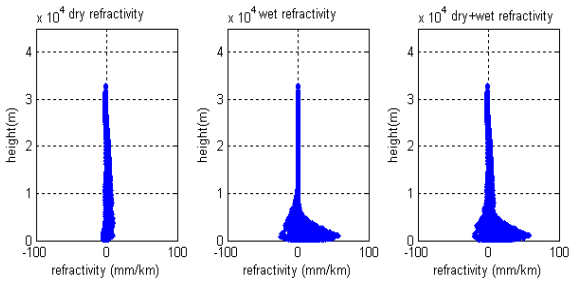

Fig. 4. The error of Hopfield model for dry refractivity (left), wet refractivity(middle), and dry+wet refractivity(right)

Fig. 5는 1년 중 110일의 라디오존데 관측결과와 Hopfield 모델의 차이를 월별로 분류한 그림이다. 대부분의 경우에서 Fig. 4와 같이 5 km 고도 이하에서 Hopfield 모델이 실제보다 습윤대기의 굴절도 추정을 과다하게 하고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 전지구 기상 관측 데이터를 기반으로 만들어진 경험적 모델인 Hopfield 모델의 한반도 적용 한계라고 볼 수 있다.

4. 대류층 지연 모델 잔여 오차 보상 기법

본 장에서는 한반도에서의 Hopfield 모델 오차 특성을 기반으로 이를 보상하기 위한 기법을 제안한다. Fig. 4와 5의 결과는 Hopfield 모델 오차가 고도 5 km 이하에서 대부분 발생하고, 오차의 크기는 지면에서 고도가 올라갈수록 줄어드는 특성을 보인다. 이것은 오차의 원인이 되는 습윤 대기량이 고도가 올라갈수록 줄어들기 때문이다.

본 논문에서는 Hopfield 모델의 굴절도 추정 오차를 Fig. 6의 형태로 가정하여 식 (7)의 모델식을 정의하였다. 이 때, 지표면에서의 굴절도 오차 k를 추정 변수로 추가하였다.

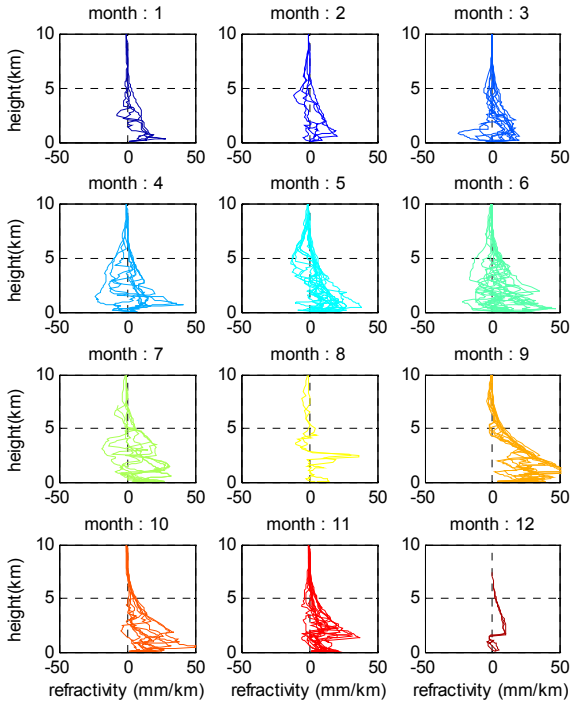

Fig. 5. Monthly distribution of the refractivity estimation error of Hopfield model

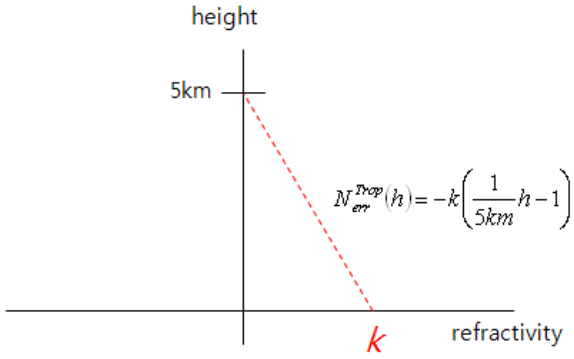

Fig. 6. The residual error model of refractivity estimation from Hopfield model

$$N_{error}^{Trop}(h)=k\left(1-\frac{h}{5km}\right) \tag{7}$$

$N_{error}^{Trop}(h)$: 고도 h에서의 굴절도 오차
k : 지표면에서의 초기 굴절도 오차
h : 사용자 고도

식 (7)의 굴절도 오차 모델을 적분하여 대류권 지연 수직 지연 오차 모델을 최종적으로 식 (8)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned}\triangle_{error}^{Trop} &= 10^{-6}\cdot\int_{h_{PL}}^{h_u} N_{error}^{Trop}(h)dh \\ &= 10^{-6}\cdot k\cdot\left\{(h_u-h_{PL})-\frac{h_u^2-h_{PL}^2}{10km}\right\}\end{aligned} \tag{8}$$

$\triangle_{error}^{Trop}$: 대류권 지연 잔여 오차
h_u : 사용자 고도
h_{PL} : 의사위성 고도

식 (8)은 Hopfield 모델에 추가되어 적용되며, 지표면에서의 초기 굴절도 오차 k값은 항법해 추정 시 상태변수로 포함되어 추정된다. 이와 같이 제안된 오차 모델의 성능은 k값의 추정 정확도와 식 (7)에서 가정한 단순화 모델의 정확도에 따라 달라진다. 우선 k값은 매 epoch 항법해와 함께 추정되므로, 추정 정확도 항법해와 마찬가지로 사용자 기준의 의사위성 배치 특성을 의미하는 DOP(Dilution of Precision)에 따라 결정된다[3,6]. 따라서 항법이 정상적으로 이루어지는 의사위성 배치에 대해 k값 추정도 항법해와 같은 수준으로 추정될 수 있다. 다음으로 식 (7)의 단순화 모델의 정확성은 의사위성과 사용자간의 거리에 상관된다. Fig. 5의 결과에 보이듯이 전체적인 오차의 분포는 식 (7)로 단순화할 수 있으므로 사용자와 의사위성의 거리가 충분히 먼 경우 우수한 성능을 기대할 수 있다. 하지만 거리 또는 고도 차이가 크지 않은 경우 식 (7) 단순화 한계로 인해 모델링 오차가 발생할 수 있다. 사용자와 의사위성의 거리가 매우 가까운 경우에는 식 (8)의 보정량 자체가 매우 작은 값을 갖게 되어 기존의 Hopfield 모델 성능을 추종할 수 있다. 이에 관해서는 5장의 실험 결과에서 추가 분석을 하였다.

3장에서 언급한 바와 같이 Hopfield 모델은 전지구 평균 기상데이터를 이용한 전지구 경험모델이다. 따라서 적용 지역의 기상환경에 따라 편차가 발생할 수 있다. 식 (8)은 한반도에서의 편차 특성을 반영한 지역적 수정모델이다. 하지만 본 논문의 결과는 한반도 특정 지역에서 관측된 1년간의 데이터로 분석된 결과라는 한계를 갖는다. 따라서 본 수정모델을 일반화하여 적용하기 위해서는 지역적인 특성을 고려해야 하

며, 모델의 안정성 확보를 위해서는 추가적으로 장기간의 성능 검증이 요구된다.

5. 모의 실험 결과

이상에서 제안된 Hopfield 모델 잔여 오차 보상 기법을 실제 항공기 궤적 데이터와 획득된 의사위성 측정치를 이용하여 후처리 적용하였다. 서로 다른 2가지 항공기 궤적 데이터를 적용하였으며, 각각의 궤적은 의사위성 대류권 지연 오차 크기에 주된 영향을 미치는 사용자의 고도, 사용자와 의사위성 간의 거리 및 앙각 특성이 다른 것을 선택하였다. Fig. 7과 8은 고고도 고앙각 특성을 갖는 궤적에 대한 결과이고, Fig. 9와 10은 저고도 원거리 저앙각 특성을 갖는 궤적에 대한 결과이다.

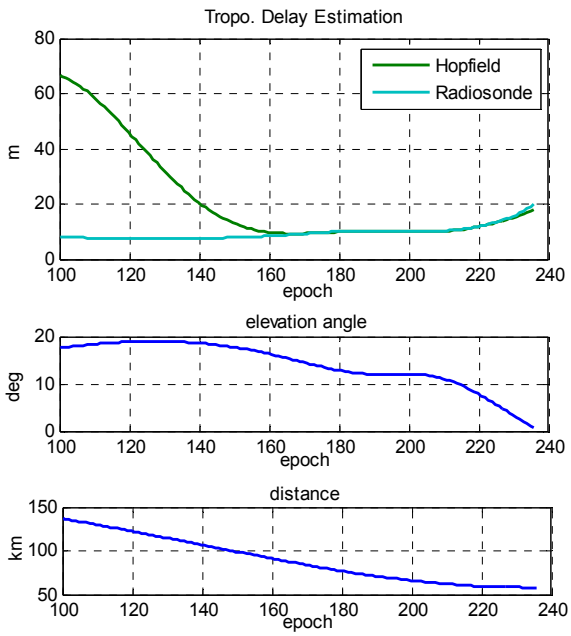

Fig. 7. Experimental test result: Tropospheric delay estimation from Hopfiled model and radiosonde observation(top), user-pseudolite elevation angle(middle), user-pseudolite slant distance (bottom)

분석 방법은 다음과 같다. 우선, 각 궤적에 대하여 라디오존데 기상값을 기준으로 계산된 대류권 지연량을 기준으로 Hopfield 모델의 성능을 비교하였다. Fig. 7과 9는 각 궤적에 대하여 특정 의사위성과 사용자 간의 거리에 따른 대류권 지연량을 비교한 결과이다. 다음으로는 해당 궤적에서 다수의 의사위성을 이용한 항법해를 계산 시 대류권 지연 오차가 미치는 영향을 분석하였다. 의사위성 시스템은 10 km 내외의 간격으로 배치되었다. 대류권 지연에 의한 영향만을 분석하기 위하여, 라디오존데 기상값으로 계산한 대류권 지연을 적용한 항법해 결과를 참값으로 하여, Hopfield 모델과 본 논문에서 제안한 보정식을 적용한 항법해의 수평오차 크기를 계산하여 Fig. 8과 10에 도시하였다.

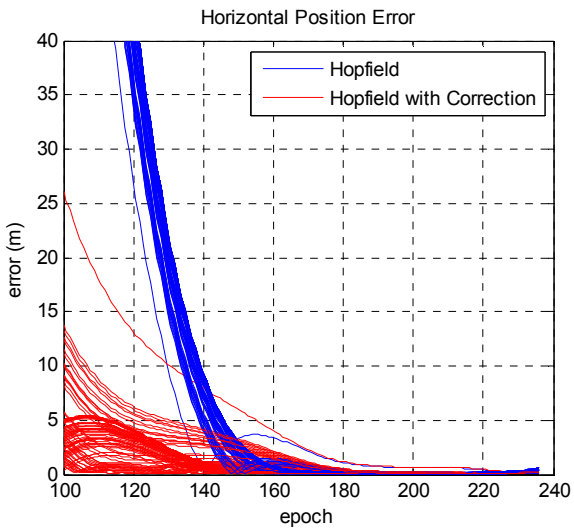

Fig. 8. Horizontal position error of Hopfield model and its compensation method with respect to the radiosonde data

성능 분석을 위한 기준 대류권 지연값은 의사위성의 위치에서 관측된 라디오존데 기상값을 이용하였고, 관측된 결과는 수평으로 100 km 이내의 지역에서는 유사하다고 가정하였다. 위성항법에서 대류층 지연의 공간이격에 따른 오차가 50 km 거리에서 약 1-5 cm이고, 일반적으로 기준국에서 100 km 이내에서 사용자에 대해 코드 기반의 차분위성항법시스템이 적용 가능하다[9]. 따라서 본 논문과 같이 의사위성에서의 코드 기반 항법을 대상으로 하는 경우에는 타당한 가정이라고 할 수 있다.

두가지 비행 궤적은 모두 사용자가 의사위성에 가까워지는 시나리오를 따르고 있으며, 상대적인 고도와

앙각에 있어서 차이가 있다. 우선 Fig. 7에서는 사용자가 의사위성으로부터 원거리 고앙각으로 접근하는 경우의 특정 위성에 대한 Hopfield 모델의 대류권 지연 추정 결과를 보였다. 이 경우, Hopfield 모델은 지연량을 과다하게 추정하는 것을 확인할 수 있다. 160번째 epoch 이후 사용자가 의사위성에 근접하게 되면 Hopfield 모델과 라디오존데 결과가 거의 유사한 결과를 보이지만 그 이전에는 상당한 차이를 보인다.

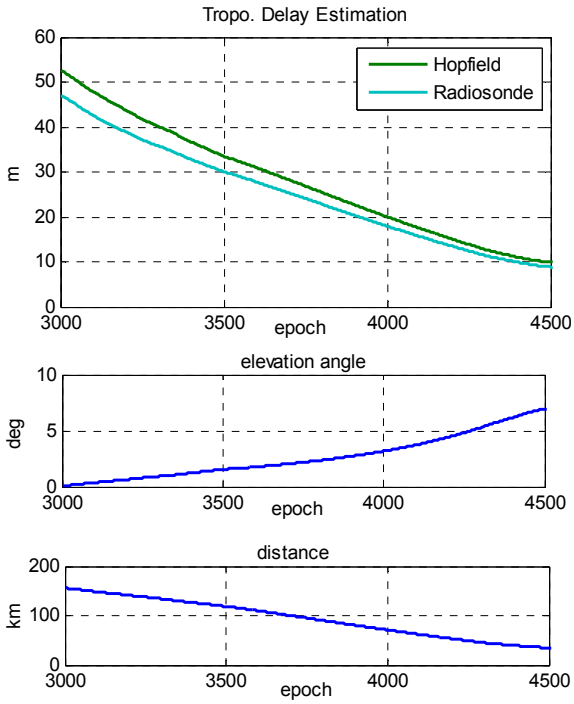

Fig. 9. Experimental test result: Tropospheric delay estimation from Hopfiled model and radiosonde observation(top), user-pseudolite elevation angle(middle), user-pseudolite slant distance (bottom)

Fig. 8은 Fig. 7의 비행궤적에서 대류권 지연 모델 적용에 따른 수평 항법해 오차 크기를 보여준다. 제안된 기법의 성능 확인을 위해 Fig. 3에서 사용된 110일간의 데이터를 적용하여 1년 동안의 결과를 도시하였다. Fig. 8의 100번째 epoch에서 150번째 epoch까지는 사용자가 고고도 원거리에 위치하는 경우이다. 이 때, Hopfield 모델은 상당한 오차를 유발하여 의사위성의 항법 가능 영역이 제한되는 원인이 된다. 이와 달리 제안된 방식은 Hopfield 모델에 비하여 상당한 수준의 성능 향상을 확인할 수 있다.

특이 사항으로는 150번째 epoch 이후에서는 상황에 따라 제안된 방식이 Hopfield 모델에 비해 성능이 열화되는 경우가 발생하였다. 이는 해당 범위에서는 식 (7)의 단순화 모델이 추가적인 오차를 유발한다고 볼 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 분석한 바와 같이 지평면에서 고도 5 km까지의 평균적인 오차 분포는 식 (7)의 모델이 적절하나 일부 구간에 대해서는 실제의 오차 특성을 충분히 반영할 수 없음을 의미한다. 하지만 의사위성과 사용자 간의 거리가 짧아질수록 보정 모델의 크기 또한 줄어들기 때문에 의사위성에 근접할수록 Hopfield 모델과 제안된 모델 간의 성능 차이는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서 제안된 방식은 고고도 원거리 사용자에게 최적화된 방식이라고 할 수 있으며 의사위성의 가용성 확장 측면에서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

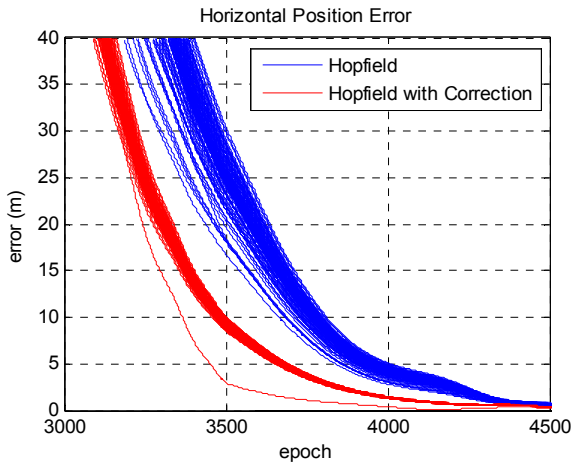

Fig. 10. Horizontal position error of Hopfield model and its compensation method with respect to the radiosonde data

다음으로 Fig. 9의 궤적은 사용자가 원거리 저앙각에 위치하여 의사위성을 향해 비행하는 경우이다. 이 경우에도 사용자가 원거리에 위치하는 경우 Hopfield 모델의 오차가 커지는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 10은 최종 항법해의 수평오차 크기를 도시한 결과이며, Fig. 8과 같이 110일의 데이터를 동시에 그린 것이다. 제안된 기법이 Hopfield 모델 보다 우수한 성능을 보여주고 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 의사위성을 이용하는 지상항법에서 사용 가능한 대류권 지연 모델을 식별하고 그 중 가장 활용도가 높은 방식인 Hopfield 모델의 성능을 분석하고 개선 방안을 제시하였다. Hopfield 모델은 전지구 관측 결과에 기반한 실험 모델이므로 지역적인 성능 차이가 있을 수 있다. 본 논문에서는 라디오존데 기상 데이터를 이용하여 Hopfield 모델의 한반도 오차 특성을 확인하였다. 이를 바탕으로 Hopfield 모델의 잔여 오차를 모델링하고 이를 보상하는 기법을 제안하였다. 제안된 방식을 사용하여 의사위성 대류권 지연 모델의 성능 한계를 보여주는 2가지 운용 환경에 대해 모의 실험을 수행하였다. 실험 결과 제안된 방식은 기존의 Hopfield 모델 대비 성능 향상을 확인할 수 있었다. 특히 원거리에 위치한 고고도/저고도 사용자에 대해서는 성능 향상이 뚜렷하여 제안된 방식을 이용하여 의사위성의 가용범위를 확장하는데 기여할 수 있을 것으로 보인다.

의사위성 항법시스템은 위성항법의 음영지역을 서비스할 수 있고, 위성항법과 통합사용하여 항법 성능을 향상시킬 수 있다. 이 때, 의사위성의 서비스 영역이 확장될수록 일반적으로 위성항법에서 크게 고려되지 않는 대류권 지연에 의한 오차가 상당함을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 의사위성을 광역에서 사용하는 경우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

[1] B. Parkinson and J. Spilker, “Global Positioning System: Theory and Applications,” AIAA, USA, 1996.

[2] H. So, T. Lee, S. Jeon, C. Kim, C. Kee, T. Kim and S. Lee, “Implementation of a Vector-based Tracking Loop Receiver in a Pseudolite Navigation System,” Sensors, Vol. 10, No. 7, pp. 6324-6346, 2010.

[3] E. D. Kaplan, “Understanding GPS: Principles and Applications,” Artech House, USA, 2005.

[4] J. Wang, J. Wang, D. Sinclair, L. Watts and H. Lee, “Tropospheric Delay Estimation for Pseudolite Positioning,” Journal of Global Positioning System, Vol. 4, pp. 106-111, 2005.

[5] Radio Technical Commission for Aeronautics, “GNSS Based Precision Approach Local Area Augmentation System(LAAS)-Signal-in-Space Interface Control Document, RTCA DO-246A,” RTCA, 2000.

[6] J. Bouska and F. Raquet, “Tropospheric Model Error Reduction in Pseudolite-Based Positioning Systems,” Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Portland, OR, USA, 9-12 September, 2003.

[7] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins, “GPS Theory and Practice,” Springer, USA, 2000.

[8] H. So, J. Park and K. Song, “Performance Analysis of Pseudolite Tropospheric Delay Models using Radiosonde Meteorological Data,” Journal of the Korean GNSS Society, Vol. 2, No. 1, pp. 49-57, 2013.

[9] S. Pullen, “Augmented GNSS: Fundamentals and Keys to Integrity and Continuity,” ION GNSS 2011 Tutorial, Protland, OR, USA, 20 September, 2011.