

Variogram Estimation of Tropospheric Delay by Using Meteorological Data

Bu-Gyeom Kim¹, Jong-Heon Kim¹, Changdon Kee^{1†}, Donguk Kim²

¹Department of Aerospace Engineering and SNU-IAMD, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

²Agency for Defense Development, Daejeon, 34186, Korea

ABSTRACT

In this paper, a tropospheric delay error was calculated by using meteorological data collect from weather station and Saastamoinen model, and an empirical variogram of the tropospheric delay in the Korean peninsula was estimated. In order to estimate the empirical variogram of the tropospheric delay according to weather condition, sunny day, rainy day, and typhoon day were selected as analysis days. Analysis results show that a maximum correlation range of the empirical variogram on sunny day was about 560 km because there is overall trend of the tropospheric delay. On the other hand, the maximum correlation range of the empirical variogram on rainy was about 150 km because the regional variation was large. Although there is regional variation when the typhoon exists, there is a trend of the tropospheric delay due to a movement of the typhoon. Therefore, the maximum correlation range of the empirical variogram on typhoon day was about 280 km which is between sunny and rainy day.

Keywords: tropospheric delay, meteorological data, Saastamoinen model, variogram

1. INTRODUCTION

정밀 항법 알고리즘 중 하나인 network Real Time Kinematics (RTK)는 보정정보를 통해 사용자 측정치의 오차를 제거하는데, 보정정보 제공 방식에 따라 Virtual Reference Station (VRS)와 Flachen-Korrektur-Parameter (FKP), Master Auxiliary Correction (MAC)으로 분류된다. 그 중 MAC 방식은 주기준국의 보정정보와 부기준국의 보정정보에 가중치를 적용한 결합을 통해 최종적인 사용자의 보정정보를 제공한다. 이때 사용하는 가중치 모델에 따라 사용자 측정치의 오차 제거 정도가 달라지기 때문에 적합한 모델을 선정할 필요가 있다.

보정정보의 가중치 모델에는 전통적으로 Distance-based

Interpolation Method (DIM)과 Linear Interpolation Method (LIM), Linear Combination Model (LCM), 그리고 Low-order Surface Model (LSM)이 있다. 선행 연구에 따르면 DIM 모델에 비해 다른 세 모델의 성능이 우수하며, 세 모델 사이 성능 차이는 크지 않다 (Dai et al. 2003). 그러나 전통적인 모델들은 기준국과 사용자의 위치에 따라 가중치가 고정되기 때문에, 오차 요소의 지역적 변화 불확실성을 반영하지 못한다는 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 현재는 kriging을 이용하여 가중치를 계산하는 시도가 이뤄지고 있다 (Al-Shaery et al. 2010, Kim et al. 2017).

Kriging은 위성항법 분야에서 전리층 지연 오차나 대류층 지연 오차의 공간 분포를 산출하기 위해 사용되고 있다. 대류층 지연 오차를 예를 들면, Kriging은 다른 보간법들과 동일하게 관측된 지점들의 대류층 지연 오차를 이용하여 분석하고자 하는 지점의 대류층 지연 오차 보간을 위한 가중치를 제공한다. Kriging의 가중치는 관측 지점과 분석 지점의 거리에 따라 결정되기 때문에 앞서 언급한 DIM과 유사하다. 그러나 DIM의 경우 가중치를 단순히 두 점 사이 거리로 결정되는 반면, kriging은 오차의 공간 분포 특성을 반영한다. 만일 대류층 지연 오차가 지역적인 변화 없이 전체적인 경향성을 보이면, 분석하는 지점의 오차가 주변의 지점들의 오차와 유사한 크기를 가져 완만한 변화를 유지하도록 가중

Received Nov 21, 2021 Revised Nov 26, 2021 Accepted Dec 01, 2021

†Corresponding Author

E-mail: kee@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-7395 Fax: +82-2-878-0559

Bu-Gyeom Kim <https://orcid.org/0000-0001-7769-1493>

Jong-Heon Kim <https://orcid.org/0000-0002-7093-7267>

Changdon Kee <https://orcid.org/0000-0002-8691-7068>

Donguk Kim <https://orcid.org/0000-0001-9151-4434>

치가 결정된다. 이와 같이 오차의 공간 분포 특성에 따라 가중치가 결정되기 때문에 kriging을 사용하기 위해선 오차의 공간 분포 특성에 대한 사전 정보가 필요하며, 이는 variogram을 통해서 획득할 수 있다. Kriging과 동일하게 network RTK에서 kriging을 이용한 가중치 모델을 사용하기 위해선 전리층 지연 오차와 대류층 지연 오차의 variogram이 필수적으로 요구된다. 그중 전리층 지연 오차의 경우 선행 연구를 통해 variogram이 잘 알려져 있으며, 지역적인 변화가 작기 때문에 한반도 지역에서도 알려진 variogram을 사용할 수 있을 것이라 판단된다 (Blanch 2002). 따라서 본 논문에서는 한반도 지역 대류층 지연 오차의 variogram을 산출하고자 한다.

대류층 지연 오차의 variogram을 산출하기 위해선 위성 항법 시스템의 측정치에 포함된 대류층 지연 오차를 계산할 수 있어야 한다. GPS 측정치와 Precise Point Positioning (PPP) 기법을 사용하면 특정 기준국 위치에서의 정밀한 대류층 지연 오차를 추정할 수 있다고 알려져 있지만, variogram을 산출하기 위해선 다수의 밀집된 기준국이 필요하다 (Guo 2015). 대류층 지연 오차를 계산하는 다른 방법으로는 기상정보를 활용한 모델을 통한 방법이 존재한다. 이 경우 PPP에 비해 정확도는 떨어질 수 있지만 기상 정보만 있으면 대류층 지연 오차를 계산할 수 있다. 그리고 다수의 기상 관측소가 운영 중이기 때문에 광역에서 기상 정보 수집을 통해 대류층 지연 오차의 분포를 분석할 수 있다고 판단하였다. 이러한 이유로 본 논문에서는 한반도에 분포하는 기상 관측소에서 수집된 기상 정보와 Saastamoinen 모델을 통해 관측소 위치에서의 대류층 지연 오차를 계산한다 (Saastamoinen 1972). 그리고 계산한 대류층 지연 오차를 통해 variogram을 산출하고 이를 제시한다.

2장에서는 기상청 관측소를 통해 기상 정보를 수집하고 가공하는 과정을 기술하였고, 대류층 지연 오차를 계산하는 모델과 variogram 산출 과정 대해 설명하였다. 3장에서는 각 기상 환경에 따른 대류층 지연 오차의 계산 결과를 제시하였고, 이를 이용하여 variogram을 산출하여 제시하였다.

2. TROPOSPHERIC DELAY CALCULATION AND VARIOGRAM

2.1 Weather Station

기상청에서 운영하는 지상 기상관측은 종관기상관측, 방재기상관측, 농업기상관측 3 종류로 분류된다. 종관기상관측 Automated Synoptic Observing System (ASOS)는 고기압이나 저기압의 분포와 같이 일기도에 표현되는 매일의 날씨 현상을 파악하기 위해 실시하는 지상 관측을 의미하며 102개의 관측소로 구성되어 있다. 방재기상관측 Automatic Weather Station (AWS)는 태풍이나 가뭄과 같은 자연 재해를 막기 위해 실시하는 지상관측으로 510개의 관측소로 구성되어 있다. 농업기상관측 Automated Agriculture Observing System (AAOS)는 농업에 필요한 기상 정보와 기상 현상을 관측하는 것으로 11개의 관측소로 구성되어 있다. 본 논문에서는 다수의 관측소에서 수집된 기상

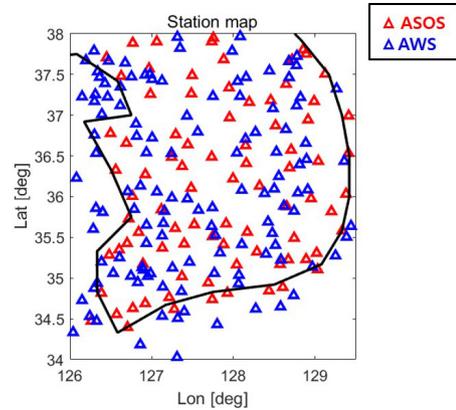


Fig. 1. Station map of weather station.

정보를 사용하기 위해 ASOS와 AWS의 관측소 데이터를 사용하였다. Fig. 1은 관측소의 위치를 나타낸 지도이다.

2.2 Preprocessing of Weather Data

ASOS와 AWS의 관측소에서는 공통적으로 분 단위의 기상 정보를 제공한다. 기상 정보에는 기압, 기온, 습도를 포함하여 다양한 요소가 포함되어 있다. 서론에서 언급했듯이 본 논문에서는 Saastamoinen 모델을 통해 대류층 지연 오차를 계산한다. 그런데 기상 관측소에서 제공하는 기상 정보와 모델의 입력 값과는 차이가 있기 때문에 기상 정보를 가공할 필요가 있다.

기상 정보에 포함된 기온의 경우 섭씨 온도로 제공되기 때문에 절대 온도로 변환할 필요가 있다.

$$T_{s,k} = T_{s,c} + 273.15 \tag{1}$$

여기서 $T_{s,k}$ 은 관측소 위치에서 기온의 절대 온도(K)를 의미하며, $T_{s,c}$ 은 관측소 위치에서 기온의 섭씨 온도(°C)를 의미한다. 습윤 지연 오차를 계산하기 위해선 수증기압 정보가 필요하다. 그러나 기상 관측소에서는 상대 습도만을 제공하기 때문에 상대 습도를 통해 수증기압을 산출할 필요가 있다. 또한 정확한 수증기압 계산을 위해선 이슬점 온도 계산이 선행되어야 하는데, 이슬점 온도는 Magnus 식에 의해 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\gamma = \ln\left(\frac{Rh}{100}\right) + \frac{b \cdot T_{s,c}}{c + T_{s,c}}$$

$$T_{s,dew} = \frac{c \cdot \gamma}{b - \gamma} + 273.15 \tag{2}$$

여기서 Rh 는 상대 습도(%)를 의미하며, b 와 c 는 각각 $b=18.678$, $c=257.14^{\circ}C$ 이고, $T_{s,dew}$ 은 관측소 위치에서의 이슬점 온도(K)를 의미한다 (Bolton 1980).

$$e_s = 6.108 \cdot \exp\left(\frac{17.1485 \cdot T_{s,dew} - 4684.1}{T_{s,dew} - 38.45}\right) \tag{3}$$

여기서 e_s 은 관측소 위치에서의 수증기압(hPa)을 의미한다 (Younes 2016). 기상 정보에 포함된 기압의 경우 해면기압으로 변환되어 제공된다. 이러한 변환 기법을 해면 경정이라고 하며, 국제 기구에서 표준으로 정한 해면 경정의 식은 Eq. (4)와 같다.

$$P_0 = P_s \cdot \exp \left(\frac{\frac{G_n \cdot H_s}{R}}{T_{s,k} + \frac{a \cdot H_s}{2} + e_s \cdot C_h} \right) \quad (4)$$

여기서 P_0 는 해면기압(hPa)을 의미하며, P_s 는 관측소 위치에서의 기압(hPa)을 의미한다. G_n 은 중력가속도를 의미하여 $G_n = 9.806 \text{ m/s}^2$ 이고, R 은 건조 공기상수를 의미하여 $R = 287.05 \text{ J/kg/K}$ 이다. 또한 H_s 는 관측소 해발고도(m)를 의미하고, a 와 C_h 는 각각 $a = 0.0065 \text{ K}$, $C_h = 0.12 \text{ K}$ 이다. 관측소 고도에서의 기압이 필요한 경우 해면 경정을 역으로 수행하여 변환한다.

위와 같이 전처리 작업을 수행하면 각 관측소 위치에서 대류층 지연 오차를 계산하기 위한 기상 정보를 획득할 수 있다. 그런데 Eq. (4)에서 통해 확인할 수 있듯이 기상 정보는 기상 환경과 동시에 관측소의 고도에 영향을 받는다. 본 논문에서는 기상 환경에 의한 공간 분포 특성을 분석하는 것이 목적이기 때문에 고도에 의한 영향을 제거하고자 각 관측소에서 수집된 기상 정보를 하나의 고도로 통일하는 작업을 추가로 수행하였다. 통일하는 고도는 해면기압 정보를 그대로 사용하기 위해 해발고도 0 m로 통일하였으며, 기온과 수증기압의 고도 변환식은 식 (5)와 같다 (Askne & Nordius 1987, Mendes 1999).

$$T_{0,k} = T_{s,k} - \beta \cdot (0 - H_s)$$

$$e_0 = e_s \cdot \frac{T_0^{\frac{(\lambda+1)G_n}{R\beta}}}{T_s} \quad (5)$$

여기서 $T_{0,k}$ 은 해발고도 0 m에서의 기온의 절대 온도(K)를 의미하며, e_0 은 해발고도 0 m에서의 수증기압(hPa)을 의미한다. β 와 λ 는 각각 기온 감률과 수증기압의 감률을 의미하는데, 이들은 Wide Area Augmentation System (WAAS)의 UNB3 모델에서 획득할 수 있다 (Leandro et al. 2006).

2.3 Calculation of Zenith Tropospheric Delay

위성의 움직임과 무관한 대류층 지연 오차의 variogram을 산출하기 위해 Saastamoinen 모델 통해 대류층 수직 지연 오차를 산출하였다.

$$ZHD = \frac{0.002277 \cdot s_{ell}}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2 \cdot s_{ell}) - 0.00028 \cdot s_{ell}}$$

$$ZWD = \frac{0.002277 \cdot \left(\frac{1255}{s_K} + 0.05 \right) \cdot s_{ell}}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2 \cdot s_{ell}) - 0.00028 \cdot s_{ell}}$$

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

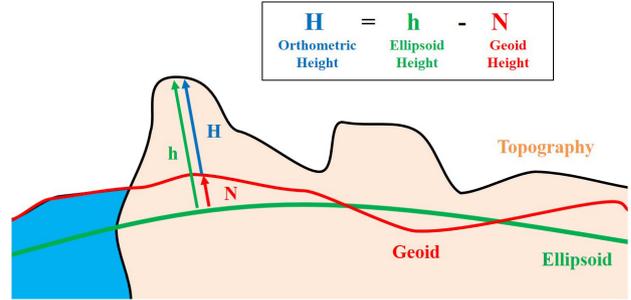


Fig. 2. Relationship between ellipsoid height and geoid height.

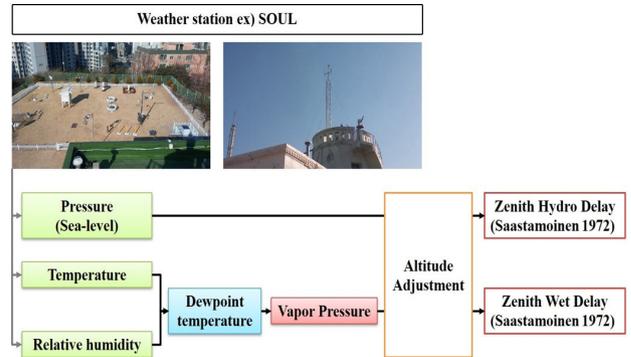


Fig. 3. Process of calculating tropospheric delay by using meteorological data.

여기서 ZHD는 수직 건조 지연 오차(m)를 의미하며, ZWD는 수직 습윤 지연 오차(m)를 의미하고, ZTD는 최종적인 대류층 수직 지연 오차(m)를 의미한다. ϕ 는 관측소의 위도(rad)를 의미하며, $H_{s,ell}$ 는 관측소의 타원체고도(km)를 의미하는데, 타원체고도는 해발고도와 다르기 때문에 변환이 필요하다. Fig. 2는 타원체고도와 해발고도의 관계를 나타낸 그림으로, 본 논문에서는 국토지리정보원에서 제공하는 국가지오이드모델 (KNGeoid18)을 사용하여 지오이드고도를 산출하여 변환을 수행하였다. Fig. 3은 기상정보를 통해 대류층 지연 오차를 산출하는 과정을 정리한 모식도이다.

2.4 Variogram Estimation

서론에서 언급했듯이 network RTK에서 kriging을 이용한 가중치 모델을 사용하기 위해선 variogram이 필수적으로 요구된다. Variogram은 오차 요소의 거리에 따른 상관성을 제공하는 함수로 variogram을 통해 오차 요소의 공간 분포를 예측할 수 있다. 예를 들어, 오차 요소의 공간 분포가 전체적인 경향성을 가지면, 거리가 멀어지더라도 높은 상관성을 유지할 것이다. 반면에 지역적인 변화가 있다면, 거리가 멀어질수록 상관성이 급격하게 떨어질 것이다. 이론적인 variogram은 서로 다른 두 점에서 random variable의 특징을 가지는 오차 요소 간의 correlation을 통해 얻어진다. 그러나 이론적인 variogram을 구하기 위해선 각 지점의 오차 요소의 random variable 특성을 알아야 함으로 실험 데이터를 통해서 empirical variogram을 산출하여 이용한다.

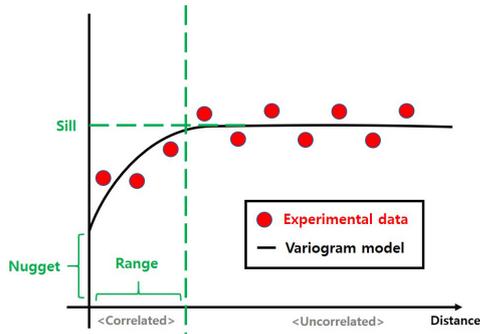


Fig. 4. Variogram parameter.

Empirical variogram을 산출하는 순서는 다음과 같다. 먼저 공간 상 점들의 거리에 따른 variogram 값을 계산한다. Variogram 값은 두 점의 값 차이의 제곱의 절반 값으로 Eq. (7)과 같다.

$$\gamma(h) = \frac{(z(x+h) - z(x))^2}{2}$$

$$\hat{\gamma}(h) \triangleq \frac{1}{N(h)} \cdot \sum_{N(h)} \gamma(h) \tag{7}$$

여기서 γ 는 variogram의 값을 의미하고, z 는 점에서의 데이터 값을, x 는 점의 위치를, h 는 두 점 사이 거리인 lag를 의미한다. 이처럼 구한 variogram 값을 이용하여 일정 lag 구간에서 데이터 개수(N)를 이용하여 평균($\hat{\gamma}$)을 산출하고, 최종적으로 구간별 평균의 fitting을 통해 empirical variogram을 산출한다. Empirical variogram fitting에는 다양한 모델이 있을 수 있는데, 대류층 지연 오차의 경우 exponential fitting을 주로 사용하기 때문에 본 논문에서도 exponential fitting을 사용하였다 (Zheng & Feng 2005).

$$\gamma(h) = v + c \left(1 - e^{-\frac{h}{a}} \right) \tag{8}$$

Eq. (8)은 exponential fitting의 식으로 v 는 nugget을 의미하며, c 는 sill을, a 는 range를 의미한다. Fig. 4는 variogram parameter에 대해 도시한 그래프이다. Variogram parameter 중 nugget은 model에 포함된 측정치 오차를 의미하며, sill은 uncorrelated 되었을 때 variogram의 상태값을 의미한다. Range는 variogram이 sill 값에 도달했을 때의 거리로 데이터 사이 correlation이 존재하는 최대 거리라고 해석할 수 있다.

3. ANALYSIS RESULT

3.1 Data Set

대류층 수직 지연 오차의 공간 분포는 기상 정보의 분포에 영향을 받기 때문에, 기상 환경에 따라 다양한 공간 분포 특성을 보이고 variogram도 각기 다를 것이라 예측할 수 있다. 따라서 본

Table 1. Data set.

	Date	Time (KST)
Sunny	2020.03.19	12:00 ~ 15:00
Rainy	2020.08.03	12:00 ~ 15:00
Typhoon	2020.09.03	1:00 ~ 4:00

논문에서는 서로 다른 기상 환경의 3일을 선정하여 분석하였다. Fig. 5는 분석일과 강수 상황을 나타낸 그림이다. Table 1은 분석일과 분석에 사용된 시간을 정리한 것으로, 기상 환경은 시간에 따라 유동적이기 때문에 최대한 기상 환경이 유지가 되는 시간 간격을 선정하였다.

3.2 Calculation Result of Zenith Tropospheric Delay

앞절에서 언급했듯이 이번 절에서는 3가지 기상 환경에서 수집된 기상 정보를 이용하여 대류층 수직 지연 오차를 계산하였다. 각 데이터의 첫번째 epoch에서 계산한 대류층 수직 지연 오차의 공간 분포는 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다. 그래프를 통해 확인할 수 있듯이 맑은 날에 비해 호우가 있을 때와 태풍이 있을 때 대류층 지연 오차의 크기가 큰 것을 알 수 있다. 이는 대기 중의 습도가 높기 때문에 대류층 습윤 지연 오차의 크기가 증가하여 전체적으로 대류층 수직 지연 오차의 값이 증가한 결과이다. 단순히 대류층 수직 지연 오차의 크기의 차이 이외에도 기후 환경에 따라 서로 다른 공간 분포 특징을 보인다.

먼저 강수 유무에 따른 특성을 분석하기 위해 맑은 날과 호우가 있는 날의 결과를 비교해 보면, 맑은 날일 때 대류층 수직 지연 오차가 남쪽으로 갈수록 점차 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 호우가 있는 날의 경우 한반도 전체에서 일정한 경향성은 눈에 띄지 않으며, 대신 지역적인 변화가 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 앞서 Fig. 5에서 확인할 수 있는 것처럼 특정 지역에만 비가 오더라도 호우가 있는 날에는 전체적으로 습도가 높고 불안정한 대기 상황으로 인해 한반도 전체에서 지역적인 변화가 크게 발생하는 것으로 추측된다. 그런데, 태풍이 존재할 경우에는 대류층 수직 지연 오차의 공간 분포는 호우가 있을 때와 또 다른 특성을 보인다. 기상도에는 전체적으로 비가 내리고 있는 것을 알 수 있다. 그렇기 때문에 호우가 있을 때와 마찬가지로 지역적 변화가 크게 발생할 것이라 예측하였지만, 오히려 맑은 날일 때와 유사하게 특정 경향성을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 태풍이 있을 때 전체적으로 대기가 불안정하고 습도도 높지만, 기압의 변화가 큰 영향을 준 것으로 추측한다. 태풍의 경우 태풍의 눈으로 갈수록 기압이 급격하게 낮아지는데, 이는 대류층 건조 지연에 영향을 주기 때문에 건조 지연 오차의 큰 경향성이 전체 대류층 수직 지연 오차의 경향성으로 나타나는 것으로 판단된다.

이처럼 기상 환경에 따라 대류층 수직 지연 오차의 공간 분포 특성이 다른데, 전체적으로 경향성이 있을수록 대류층 지연 오차 사이 correlation이 높다고 볼 수 있다. 따라서 맑은 날일 때는 대류층 지연 오차의 correlation이 높아져 variogram 파라미터 중 range의 값이 증가할 것이라 예측할 수 있고, 호우가 있을 때는 range의 값이 맑은 날일 때에 비해 작을 것이라고 예측하였다. 태풍이 있을 때는 비가 내리기는 하지만, 전체적인 경향성을 보이기 때문에 호우가 있을 때와 맑은 날일 때의 중간 정도의 range를

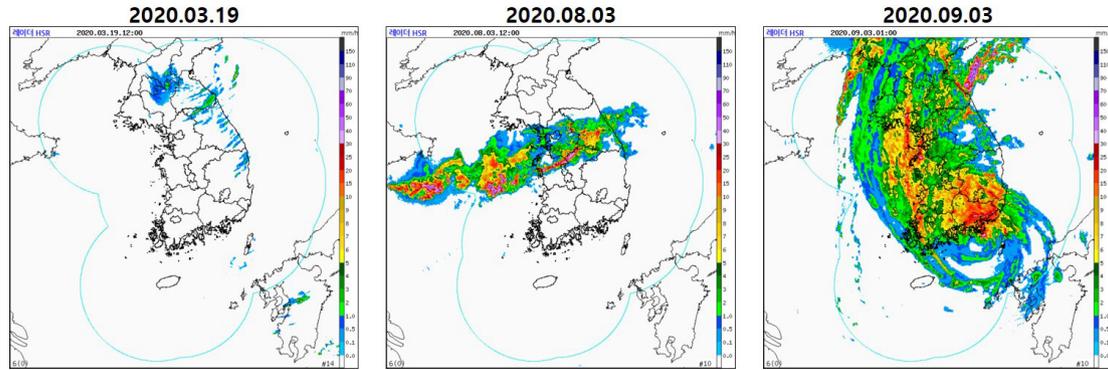


Fig. 5. Analysis date (left) sunny day (middle) rainy day (right) typhoon day.

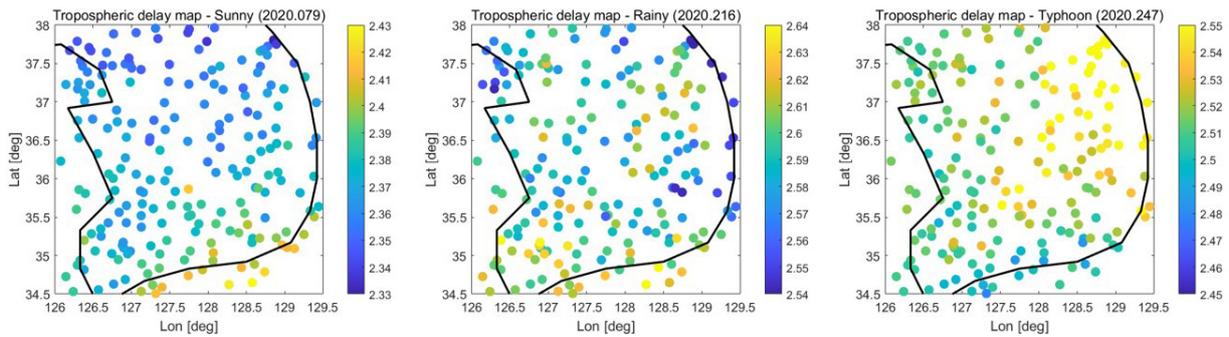


Fig. 6. Spatial distribution of tropospheric delay – (left) sunny day (middle) rainy day (right) typhoon day.

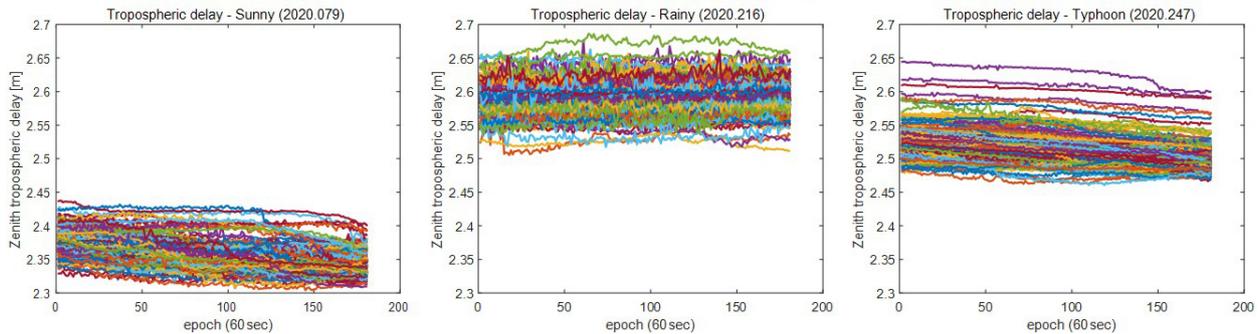


Fig. 7. Temporal change of tropospheric delay – (left) sunny day (middle) rainy day (right) typhoon day.

가질 것이라 예측하였다.

3.3 Variogram Estimation Results

이번 절에는 앞 절에서 산출한 대류층 수직 지연 오차를 통해 각 기상 환경에서의 empirical variogram을 산출하였다. Empirical variogram을 산출하기 위해선 많은 수의 데이터가 필요하다. 앞서 Fig. 6과 같이 한 epoch에서의 데이터만으로는 충분한 수가 아니기 때문에 본 연구에서는 3시간 동안의 데이터를 사용하였다. 기상 환경의 경우 시간에 따라 변화가 있지만, 레이더 영상을 통해 분석한 시간안에서는 기상 환경이 유지되는 것을 확인하였다. Fig. 7은 각 날의 대류층 수직 지연 오차를 시계열적으로 도시한 그래프이다.

기상 관측소에서 분 단위의 데이터를 수집했기 때문에 200여 개의 관측소에서 180 epoch의 데이터를 수집하여 분석에 사용하였다. Empirical variogram을 산출하는 과정은 앞서 언급했듯이 먼저 한 관측소를 선정하여 다른 관측소 까지의 거리와 대류층 수직 지연 오차의 차이 제곱의 절반을 계산한다. 이 과정을 모든 관측소, 모든 epoch에 대해서 수행하고 계산한 결과를 관측소 사이 거리인 lag에 따라 정렬한다. 그 후 특정 lag 구간에서 데이터 수를 이용하여 평균을 산출하면 fitting을 수행하기 전 empirical variogram을 구할 수 있는데, 본 논문에서는 lag의 최대 범위를 300 km로 설정하고 평균을 산출하는 lag의 구간을 20 km로 설정하였다. 이는 평균을 산출할 때 각 구간에 충분한 데이터 수를 만족하기 위해 설정한 것으로 산출한 variogram 값과 empirical variogram은 Fig. 8과 같다.

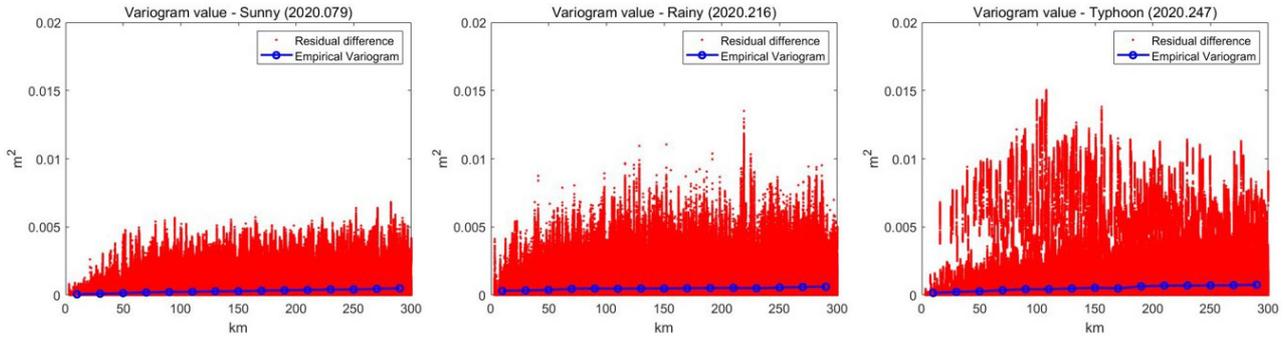


Fig. 8. Variogram value – (left) sunny day (middle) rainy day (right) typhoon day.

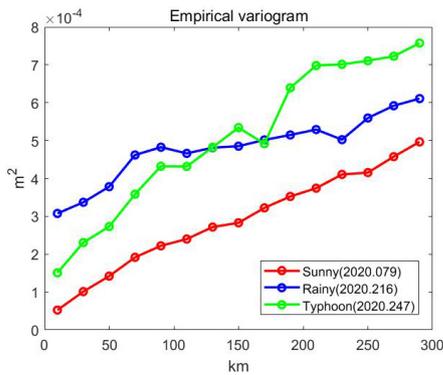


Fig. 9. Empirical variogram (before fitting).

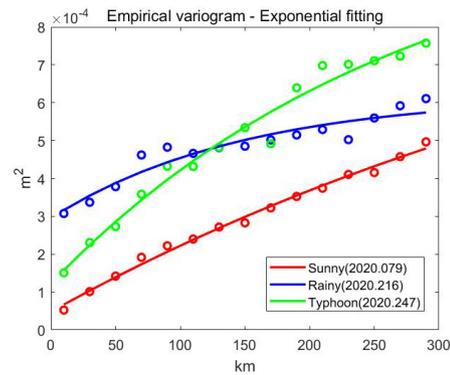


Fig. 10. Empirical variogram – exponential fitting.

Table 2. Variogram parameter.

	Sill (m ²)	Range (km)	Nugget (m ²)
Sunny	10.72e-4	563.92	4.82e-5
Rainy	3.25e-4	148.75	29.53e-5
Typhoon	9.94e-4	279.37	12.30e-5

Fig. 9는 Fig. 8에서 empirical variogram을 따로 분리하여 모든 기상 환경의 결과를 한 그래프에 도시한 것이다. 그래프를 통해 확인할 수 있듯이 맑은 날일 때는 empirical variogram이 거리에 따라 선형적으로 증가하는 반면, 호우가 있을 때는 거리가 멀어 질수록 변화의 폭이 작아지는 것을 알 수 있다. 태풍이 있을 때는 empirical variogram이 거리에 따라 빠르게 증가하긴 하나 호우가 있을 때와 마찬가지로 점차 증가 폭이 줄어든다. 최종적인 empirical variogram 산출을 위해 exponential fitting을 진행하였고, 그 결과는 Fig. 10과 같다. 그리고 fitting에 따른 variogram 파라미터는 Table 2에 정리하였다.

모델링 결과 대류층 수직 지연 오차의 correlation이 유지가 되는 최대 거리인 range는 맑은 날일 때 약 560 km로 가장 크며, 호우가 있을 때 약 150 km로 가장 작다. 그리고 태풍이 있을 때는 약 280 km로 앞선 두 기상 환경의 중간 정도에 해당하는 것을 알 수 있다. 대류층 수직 지연 오차의 상관성이 없어졌을 때의 상태 값인 sill의 경우 range와 비례하게 증가하는 것을 알 수 있는데, 아무래도 상관성이 유지되는 거리가 멀어질수록 두 지점의 대류층 수직 지연 사이 차이가 커지기 때문으로 예상된다. Fitting 모델의 오차인 nugget의 경우에는 지역적 변화가 큰 호우가 있을 때 가

장 크고, 맑은 날일 때 가장 작은 것 또한 확인할 수 있었다. 이처럼 empirical variogram의 형상과 파라미터를 통해 앞선 절에서 대류층 수직 지연 오차의 공간 분포 특성을 통해 예측한 것과 동일한 결과를 확인할 수 있다.

4. CONCLUSIONS

본 논문에서는 한반도 지역의 대류층 지연 오차의 variogram을 산출하기 위해 기상청 관측소에서 수집된 기상정보를 활용하여 대류층 지연 오차를 계산하고 empirical variogram을 산출하여 제시하였다.

분석일로 맑은 날, 호우, 그리고 태풍 있는 3일을 선정하였고 기상 관측소의 기상 정보를 수집하였다. 기상 정보와 Saastamoinen 모델을 통해 각 분석일의 대류층 수직 지연 오차를 계산하였고, 한 지점을 선택하여 공간 분포를 분석한 결과 비가 오지 않는 맑은 날일 때는 지역적인 변화보다는 전체적인 경향성을 띄는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 호우가 있을 때는 지역적인 변화가 심한 것을 확인할 수 있었다. 그리고 태풍이 존재할 때는 비가 내리기는 하나 기상 정보 들이 태풍의 움직임에 영향을 받기 때문에 지역적 변화보다 전체적인 경향성이 우세한 것을 확인하였다.

각 기상 환경에서의 대류층 수직 지연 오차를 계산한 결과를 이용하여 empirical variogram을 산출하였다. Empirical variogram을 산출하기 위해 최대 lag 길이를 300 km, 평균을 구하기 위한 lag 구간은 20 km로 설정하였다. 산출된 empirical variogram은

최종적으로 exponential fitting을 통해 모델링 하였고, fitting 결과 각 기상 환경에서의 variogram 파라미터를 제시하였다. 그리고 variogram의 파라미터는 특정 시점에서 분석한 각 기상 환경 별 대류층 수직 지연 오차의 공간 분포 분석 결과와 일치하는 것을 확인하였다. 이렇게 산출한 variogram 파라미터는 각 기상 환경에서 kriging을 통한 가중치 모델에 사용 가능하다. 본 논문에서는 각 기상 환경에 대해 한 분석일의 결과를 제시한 것이기 때문에, 향후 연구에서는 기상 환경 별 다양한 분석일을 선정하고 추가적인 분석하면 신뢰도 있는 variogram을 제시할 수 있을 것이라 기대한다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, contracted through the SNU-IAMD (Grant 21CTAP-C164137-01). This research was supported (in part) by the Institute of Advanced Aerospace Technology at Seoul National University. The Institute of Engineering Research at Seoul National University provided research facilities for this work.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, B.G. and C.D.; methodology, D.U.; software, B.G.; validation, B.G., D.U. and C.D.; formal analysis, B.G.; investigation, J.H.; resources, B.G.; data curation, J.H.; writing—original draft preparation, B.G.; writing—review and editing, D.U.; visualization, B.G.; supervision, C.D.; project administration, C.D.; funding acquisition, C.D.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Al-Shaery, A., Lim, S., & Rizos, C. 2010, Functional Models of Ordinary Kriging for Medium Range Real-Time Kinematic Positioning Based on the Virtual Reference Station Technique, 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2010, Portland, OR, 21-24, Sep 2010, pp.2513-2521
- Askne, J. & Nordius, H. 1987, Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data, *Radio Science*, 22, 379-386. <https://doi.org/10.1029/RS022i003p00379>
- Blanch, J. 2002, An Ionosphere Estimation Algorithm for WAAS Based on Kriging, 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002), Portland, OR, 24-27 Sep 2002
- Bolton, D. 1980, The computation of equivalent potential temperature, *Monthly Weather Review*, 108, 1046-1053. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
- Dai, L., Han, S., Wang, J., & Rizos, C. 2003, Comparison of interpolation algorithms in network based GPS techniques, *Navigation*, 50, 277-293. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2003.tb00335.x>
- Guo, Q. 2015, Precision comparison and analysis of four online free PPP services in static positioning and tropospheric delay estimation, *GPS Solution*, 19, 537-544. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0413-5>
- Saastamoinen, J. 1972, Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites, *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 15. <https://doi.org/10.1029/GM015p0247>
- Kim, D., Song, J., Han, D., Yu, S., Kee, C., et al. 2017, Modified kriging based double-difference tropospheric correction interpolation method for Network RTK user, 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2017), Portland, OR, 25-29, Sep 2017, pp.4090-4102. <https://doi.org/10.33012/2017.15350>
- Leandro, R., Santos, M., & Langley, R. B. 2006, UNB neutral atmosphere models: Development and performance, *Proceedings of the Institute of Navigation, National Technical Meeting*, Monterey, CA, 18-20, 2006, pp.564-573.
- Mendes, V. B. 1999, Modeling the neutral-atmospheric propagation delay in radiometric space techniques, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Technical Report No.199
- Younes, S. A. M. 2016, Modeling investigation of wet tropospheric delay error and precipitable water vapor content in Egypt, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.05.002>
- Zheng, Y. & Feng, Y. 2005, Interpolating Residual Zenith Tropospheric Delays for Improved Regional Area Differential GPS Positioning, *Navigation*, 52, 179-187. <https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2005.tb01744.x>



Bu-Gyeom Kim is a Ph.D. student of the GNSS Laboratory in the Department of Aerospace Engineering at Seoul National University. He received B.S degree in aerospace engineering from the same university. His main research interest is precise navigation and ionospheric disturbances by earthquakes.



Jong-Heon Kim is a M.S. student of the GNSS Laboratory in the Department of Aerospace Engineering at Seoul National University. He received B.S degree in aerospace engineering from Korea Aerospace University. His main research interest is PPP and smartphone navigation.



Changdon Kee is a Professor in Department of Aerospace Engineering at Seoul National University, South Korea and supervises SNU GNSS Laboratory. He received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University and a Ph.D. degree from Stanford University. He served as a Technical Advisor to the Federal Aviation Administration (FAA) on the Wide Area Augmentation System (WAAS) in 1994. Prof. Kee currently serves as a Technical Advisor for Incheon International Airport Corporation and Ministry of Oceans and Fisheries. He served as a President of the Institute of Position, Navigation, and Time (IPNT) and also president of the Korean Navigation Institute (KONI). He has more than 30 years of GNSS and flight control research experiences



Donguk Kim is a senior researcher of Agency for Defense Development (ADD) in the Republic of Korea. He received the bachelor's degree in 2013 and the Ph.D. degree in 2020 from the mechanical and aerospace engineering of Seoul National University (SNU). He worked in the field of centimeter-level GNSS augmentation systems and technology in SNU GNSS laboratory. He has been working for the ADD since Dec. 2019. His research interests include Satellite-Based Augmentation System (SBAS), Real-Time Kinematic (RTK), anti-jamming/anti-spoofing algorithm.