

계절과 날씨에 따른 연간 대류권 지연오차량 변화 Comparative Analysis of Annual Tropospheric Delay by Season and Weather

임수현¹⁾ · 김지원²⁾ · 박정은³⁾ · 배태석⁴⁾ · 홍성욱⁵⁾

Lim, Soo-Hyeon · Kim, Ji-Won · Park, Jeong-Eun · Bae, Tae-Suk · Hong, Sungwook

Abstract

In this study, we estimated the tropospheric delay of GNSS (Global Navigation Satellite System) signals during passing through the atmosphere in relation to weather and seasonal factors. For this purpose, we chose four CORS (Continuously Operating Reference Station) stations from inland (CCHJ and PYCH) and on the coast (GEOM and CHJU). A total of 48 days for each station (one set of data for each week) were downloaded from the NGII (National Geographic Information Institute) and processed it using the scientific GNSS software. The average tropospheric delays in winter are less than 2,400 mm, which is about 200 mm less than those in summer. The estimated tropospheric delay shows a similar pattern from all stations except the absolute bias in magnitude, while a large delay was observed for the station located on the coast. In addition, the delay during the day was relatively stable in winter, and the average tropospheric delay was strongly related to the orthometric height. The inland stations have tropospheric delays by the precipitation rather than humidity due to dry weather and difference in temperature. On the contrary, it was primarily caused by the humidity on the sea. The correlation between temperature and water vapor pressure is 0.9 or larger for all stations, and the tropospheric delay showed a high linear relationship with temperature. It is necessary to analyze the GNSS data with higher temporal resolution (e.g. all RINEX data of the year) to improve the stability and reliability of the correlation results.

Keywords : Zenith Total Delay, Weather and Seasonal Factors, Precise Point Positioning, Humidity, Rainfall

초 록

본 연구에서는 GNSS (Global Navigation Satellite System) 신호가 전송되는 동안 발생하는 오차 중 대류권 지연오차를 추정하고, 이를 날씨 및 계절별 요소와 비교 분석했다. 이를 위해, 내륙지역인 충주와 평창, 해안지역인 제주, 거문도의 총 4개의 상시관측소를 선정하고, 2016년 중 매주 하루씩, 각 상시관측소마다 총 48일의 데이터를 이용하여 과학기술용 자료처리 소프트웨어로 정밀절대측위를 수행했다. 겨울철 대류권 지연오차는 평균 2400mm 미만으로, 2600mm 수준인 여름의 경우와 비교했을 때 약 200mm 가량 차이가 발생했다. 추정한 대류권 지연오차는 절대적인 지연량의 차이를 제외하면 모든 상시관측소에 대해서 변화 양상이 비슷하며, 해안지역의 지연오차가 상대적으로 크게 나타났다. 또한, 겨울에는 24시간 대류권 지연오차의 변화량이 상대적으로 적으며, 평균적인 대류권 지연오차는 상시관측소의 표고와 직접적인 관계가 있는 것으로 나타났다. 건조하고 온도 차이가 큰 내륙지역에서는 습도보다 강수량에 영향을 받은 대류권 지연오차의 변화가 발생하고, 다습한 해안지역에서는 강수보다 바다의 습도로 인한 변화가 큰 것으로 판단된다. 온도와 증기압의 상관계수는 모든 지역에서 0.9 이상을 나타냈으며, 대류권 지연오차는 온도와 높은 선형적 상관성을 보였다. 향후 연간 데이터 전체를 이용하여 시간적 해상도를 높은 연구분석을 수행함으로써 보다 신뢰도 높은 상관성 분석이 이루어질 필요가 있다.

핵심어 : 대류권 지연오차, 날씨·계절 변화, 정밀절대측위, 습도, 강수량

Received 2018. 12. 07, Revised 2018. 12. 12, Accepted 2018. 12. 17

1) Dept. Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University (E-mail: lsooh0612@gmail.com)

2) Dept. Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University (E-mail: 9733519@naver.com)

3) Dept. Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University (E-mail: qkrwj9703@naver.com)

4) Corresponding Author, Member, Dept. Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University (E-mail: baezae@sejong.ac.kr)

5) Dept. Environment, Energy & Geoinformatics, Sejong University (E-mail: sesttiya@sejong.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

GNSS (Global Navigation Satellite System)를 이용한 위치 결정에 영향을 주는 요소는 위성 궤도와 시계 오차, 전리층/대류권 지연오차, 멀티패스 오차, 수신기 오차 등으로 구분할 수 있다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1997). 이 중 대류권 지연 오차는 대기 중에 존재하는 수증기의 영향으로 위성 신호가 굴절되어 발생하는 것으로서 대기압, 온도, 습도 등에 영향을 받는다. 또한, 전리층 지연오차와 달리 주파수에 독립적이므로 이중 주파수에 의한 제거가 불가능하여 대부분 경험적 모델을 이용하여 보정한다(Kim and Bae, 2012).

대류권 지연오차 관련해서 국내에서는 GNSS 기선해석 기반 보정신호 생성을 위한 대류권 지연오차 추정 연구(Hong, 2012), 높이차가 큰 기선의 경우 이중차분에서 제거되지 않은 대류권 지연 효과를 제거함으로써 측위정확도를 향상하기 위한 연구(Hong, 2013; Lee, 2018) 등이 수행되었다. Lee (2003)은 다양한 대류권 지연 보정모델을 통해 대류권 지연오차를 분석하였고, GNSS 대류권 지연오차 추정을 통한 가강수량을 분석으로 강수량 전조현상 예측에 적용가능성 연구가 수행된 바 있다(Kim and Bae, 2015). Song (2018)은 GNSS 대류권 지연오차를 가강수량으로 변환하기 위해 지역별 온도 데이터를 모델링했으며, 계절별 변화를 별도로 모델링함으로써 변환 정확도 향상을 위한 연구와 이를 폭설 기간 동안 가강수량의 변화와 비교 분석함으로써 상관관계를 분석한 연구(Nam and Song, 2015) 등 대류권 지연오차 자체의 날씨와 계절의 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다.

정확한 대류권 지연오차를 추정하는 것은 위성 기반 데이터 처리에 매우 중요하며, 특히 대류권 지연오차는 계절적인 요소가 있다고 알려져 있다(Kim and Bae, 2012). 날씨와 계절의 변화는 온도, 수증기압의 변화에 영향을 미치므로, 본 연구에서는 대류권 지연오차와 날씨, 계절 간의 상관관계를 분석하였다. 이를 위해 내륙과 해안지역에 위치한 상시관측소를 선정하고, 과학기술용 자료처리 소프트웨어를 이용하여 연간 변화를 추정하고 이를 비교 분석하였다.

2. 연구방법

일반적으로 내륙과 해안은 지역적인 기후 차이가 존재한다. 해안지역은 내륙기후와 해양기후의 중간적인 성향을 띠는데, 기온의 일변화와 연변화가 적고 특히 겨울은 바람이 강한 경우를 제외하면 대체적으로 온화하다. 또한 바다를 접하고 있어 내륙에 비해 수증기가 많고 습도가 높은 것이 특징이

다. 반면, 내륙 기후는 기온의 일간, 연간 변화가 크고 수증기량이 적기 때문에 맑은 날씨를 보이는 날이 많으며 강수량이 여름에 집중되어 있다. 따라서, 내륙과 해안 지역의 뚜렷한 기후 차이가 대류권 지연오차 추정과 직접적인 영향이 있을 것으로 판단되며, GNSS 자료처리량을 감안하여 내륙과 해안에 두 군데씩 상시관측소를 선정하였다.

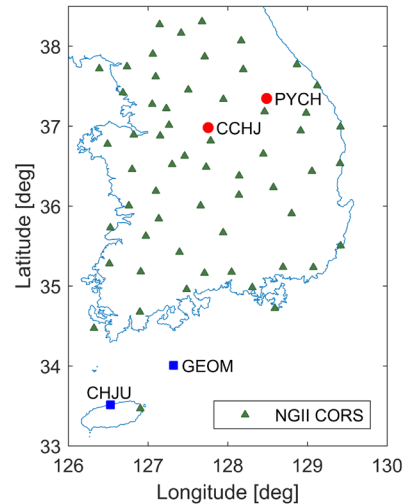


Fig. 1. Location map of CORS used in this study

Fig. 1에서 보는 것처럼 본 연구에서는 내륙 지역에 평창(PYCH)과 충주(CCHJ) 상시관측소를 선정하였다. 충주는 한반도 남쪽의 내륙 중앙부에 위치하고 있으며, 연교차가 큰 전형적인 내륙성 기후를 보인다. 또한 주변이 산으로 둘러싸인 분지를 이루고 있으며, 동쪽으로는 충주호, 남쪽으로는 달천강이 위치한다. 내륙 분지에 위치하기 때문에 우리나라의 지역 중 가장 무더운 곳 중 하나이다. 연평균 강수량은 타 지역에 비해 적은 편이고, 강수량은 대부분 여름에 집중된다. 대류권 지연오차는 신호가 통과하는 경로를 따라 적분하므로 일반적으로 고도의 함수로 나타난다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 1997). 충주 상시관측소의 표고는 151.3m로서 우리나라 상시관측소의 평균 표고(152m)에 가장 가까우며, 따라서 대류권 지연오차의 평균적인 변화를 나타낼 것으로 기대된다. 평창(PYCH)은 전체 면적의 약 60%가 해발고도 700m 이상인 태백산맥에 위치하고 있으며, 내륙성 기후를 띄며 기온이 낮은 특성이 있다. 평창 상시관측소의 타원체고는 393.2m이며, 본 연구에 사용한 4개 상시관측소 중에서 고도가 가장 높으므로 대류권 지연오차의 차이를 가장 잘 확인할 수 있다. 제주(CHJU)는 한반도의 최남단에 위치하는데, 일년 내내 남서쪽에서 흐르는 쿠로시아 난류의 영향을 받고 있으며, 한

류의 영향은 직접적으로 받지 않는다. 주로 난기단인 해양성 열대 기단과 대륙성 열대 기단의 영향을 받고, 동시에 장마와 북상하는 태풍의 길목에 있어 그에 영향을 크게 받는다. 한반도 내륙지방에 비해 기온이 높고 강수량이 많으며 강한 바람이 자주 부는 특징을 갖고 있다. 거문도(GEOM)는 여수와 제주도 중간 지점에 위치한 다도해의 최남단 섬으로서, 동쪽으로 산지가 형성되어 있고 서쪽으로 만입되어 있다. 제주와 거문도의 타원체고는 각각 25m, 69m 이며, 낮은 표고로 인해 내륙에 위치한 상시관측소에 비해 대류권 지연오차량이 가장 클 것으로 예상된다. 본 연구에서 선정된 상시관측소에 대한 타원체고와 표고에 대한 정보는 Table 1에 정리되어 있다.

Table 1. Height information for all stations used in the study. The orthometric heights refer to the ARP (Antenna Reference Point)

	CCHJ	PYCH	GEOM	CHJU
Ellipsoidal height [m]	125.5	393.2	68.6	25.0
Orthometric height [m]	151.3	421.2	95.4	50.3

본 연구에서는 날씨와 대류권 지연오차의 상관성을 분석하기 위해 상시관측소 가까이 위치한 기상관측소에서 측정된 정보를 이용하였다. 그러나 평창과 거문도의 경우 인근 관측소가 없으므로 가장 가까운 관측소인 영월, 여수 데이터를 이용하였다. 영월의 연평균 기온은 10.8도이며, 내륙 분지 지형으로서 일교차 및 연교차가 크게 발생한다. 연강수량의 60~80%가 하절기에 집중되어 있고 집중 호우가 많이 발생한다. 반면, 여수는 남부해안 지방형 기후구에 속하여 온난 다습한 해양성 기후를 띤다. 여름철에 북태평양 고기압의 영향을 주로 받아 무더운 날씨가 지속되며 장마와 태풍의 영향으로 강수량이 집중되는데 여름철 강수량이 전체의 60% 이상을 차지한다.

대류권 지연오차를 추정하기 위해 선정된 네 개의 상시관측소에 대한 일일 RINEX (Receiver Independent Exchange Format) 데이터를 국토지리정보원에서 수집하였다(NGII, 2018). 관측 기간은 데이터 처리량을 감안하여 2016년 1월부터 12월 까지 매달 1-4주 금요일을 임의로 선정하여 총 48일의 데이터를 이용하였다. 상시관측소 관측자료와 별도로, 대류권 지연오차를 추정하기 위한 GNSS 자료처리에 필요한 외부 데이터(위성궤도와 시계오차, 지구자전요소, 안테나 위상정보, DCB (Differential Code Biases), 전리층 지연오차)를 인터넷에서 다운로드하였다. 또한, 날씨 분석을 위한 날짜별 평균 온도, 평균 강수량, 습도, 포화수증기압 데이터는 기상청에서 제공받았다.

GNSS 자료처리는 과학기술용 자료처리 소프트웨어인 Bernese GNSS Software V5.2를 이용하여 정밀절대측위(PPP: Precise Point Positioning) 방식으로 수행하였다. GNSS 데이터 처리과정에 대한 상세한 설명은 Kim and Bae (2012 and 2018), Bae (2018) 등을 참고할 수 있다. 일반적으로 대류권 지연오차는 상시관측소에서 측정된 GNSS 신호에 포함되어 있는 대류권 지연오차를 매핑함수를 이용하여 연직방향으로 환산한 값(ZTD: Zenith Total Delay)으로 나타낸다. 대류권 지연오차는 기상정보에 의해 영향을 받으므로 매 epoch마다 미지수를 추정하는 대신 1-2시간마다 하나의 값을 추정하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 대류권 지연오차의 시간 해상도를 1시간으로 설정하여, 하루 24개의 대류권 지연오차를 추정하였다.

3. 결과 및 분석

Figs. 2-3은 각 상시관측소의 계절에 따른 ZTD 변화 그래프로서 값의 변화가 뚜렷한 여름(7월)과 겨울(12월)을 나타낸다. 매월 1-4주에 대해 금요일의 일간 변화를 나타내며, 1시간 단위의 24개 데이터이다. 데이터의 연속성 및 연구의 정확도 향상을 위해서는 일간 데이터를 처리하는 것이 바람직하지만, 자료처리량이 방대하므로 본 연구에서는 자료처리 속도와 전체적인 데이터의 연속성을 고려하여 일주일에 하루 데이터를 처리했다.

기상 데이터는 연속적이며, 일반적으로 연속된 날씨의 대류권 지연오차 추정을 위해서는 일간 추정 결과에 대한 제약 조건을 부여함으로써 연속적인 결과를 얻을 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 일주일 중 하루에 대한 결과만을 나타내고 있으므로 대류권 지연오차가 날짜 경계에서 불연속적으로 나타나는 것을 알 수 있다(Figs. 2-3).

Fig. 2는 7월의 상시관측소별 ZTD를 나타낸 것으로서 일반적으로 대류권 지연오차 모델에서 적용하는 2300mm 보다 높은 값을 나타내고 있다. 평균적으로 내륙지역은 2500mm 정도이고, 해안지역은 2600mm 이상으로 해안지역이 내륙지역보다 더 높은 ZTD를 갖는다. 또한, 상시관측소마다 차이는 있지만, 하루 중 대류권 지연오차가 변하는 경향이 매우 유사한 것을 확인할 수 있다.

반면, 겨울철 ZTD는 평균 2400mm 미만으로, 2600mm 수준인 여름의 경우와 비교했을 때 약 200mm 가량 차이가 발생했다(Fig. 3). 겨울철 ZTD의 또다른 특징은 여름과 달리 하루 중 변화량이 매우 작아서 대부분 평균값에 위치해 있는 형태를 보였다.

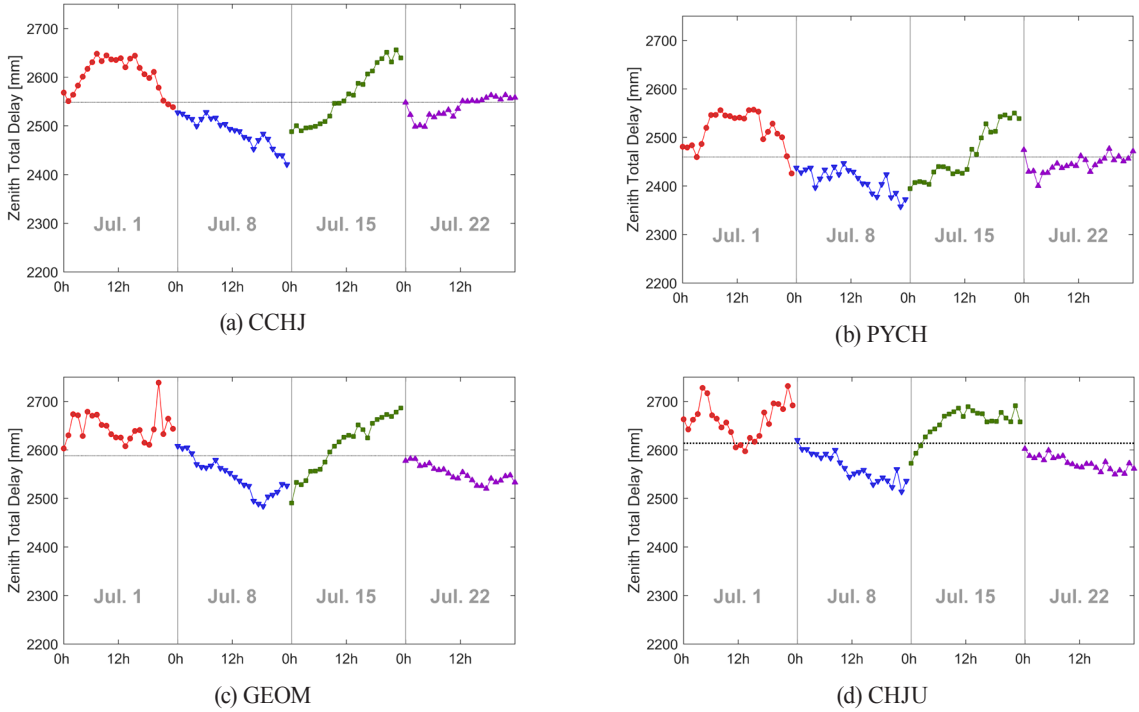


Fig. 2. Zenith Total Delay in summer (July)

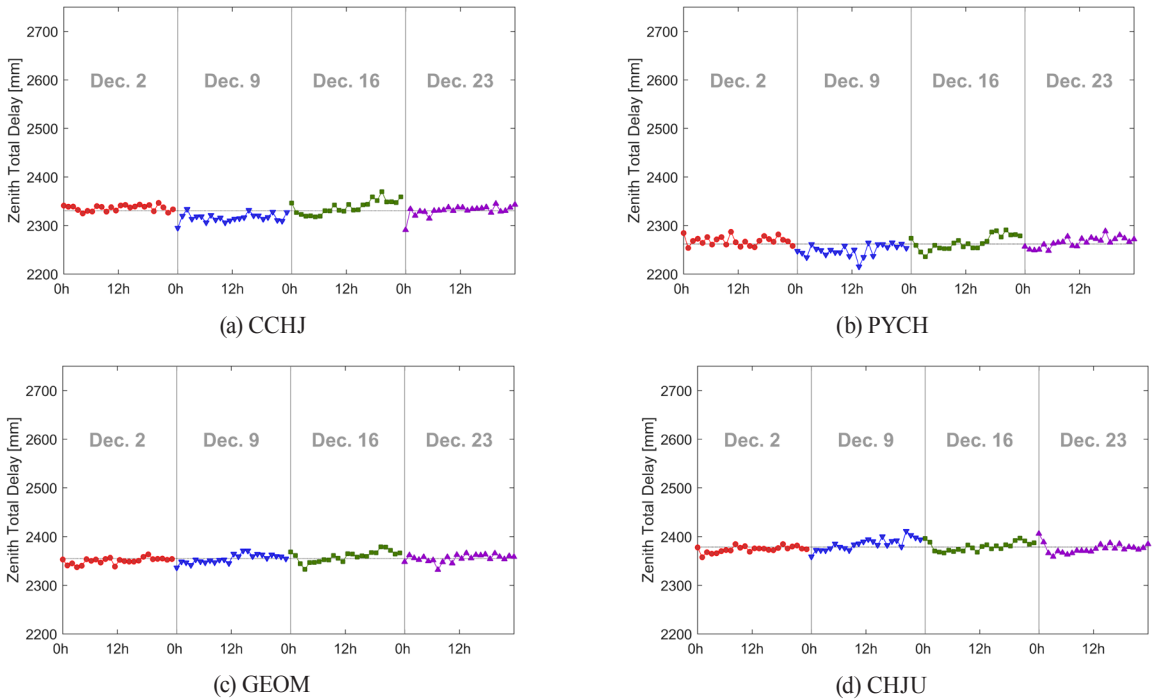


Fig. 3. Zenith Total Delay in winter (December)

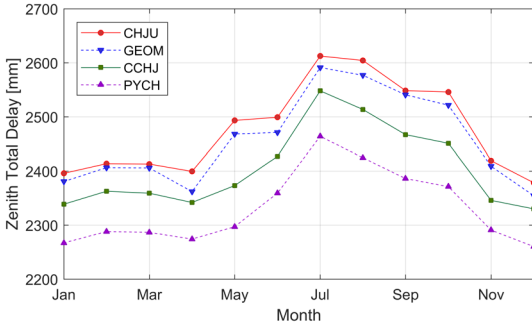


Fig. 4. Annual variation of ZTD (Year 2016)

Fig. 4는 월평균 ZTD를 2016년 전체에 대해 나타낸 그래프이다. 절대적인 지연량의 차이를 제외하면 내륙과 해안 상시 관측소 모두 비슷한 형태의 변화 양상을 보여준다. 7월에 최대 지연량을 보이는 반면 겨울에는 지연량의 감소가 확연히 나타나고 있다. 해안(CHJU, GEOM)과 내륙(CCHJ, PYCH) 모두 연간 ZTD량에서 일정량의 바이어스가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 상시관측소의 표고와 반비례함을 알 수 있다. 또한 여름과 겨울 등 계절과 관계없이 비슷한 양의 바이어스가 나타남을 확인할 수 있다.

Table 2. Correlation between ZTD and weather components

		CCHJ	PYCH	GEOM	CHJU
Temperature	Humidity	0.47	0.19	0.54	0.26
	Press.	0.93	0.98	0.94	0.93
	Humid.	0.04	0.83	0.26	0.87
Precipitation	Humid.	0.23	0.46	0.31	0.47
	Press.	0.59	0.14	0.66	0.22
ZTD	Temp.	0.82	0.94	0.83	0.87
	Preci.	0.68	0.25	0.75	0.25
	Humid.	0.44	0.79	0.65	0.83
	Press.	0.95	0.95	0.95	0.91

Table 2는 날씨에 따른 ZTD 변화를 확인하기 위해 수집한 날씨 요소 데이터와 ZTD 간 상관계수를 나타내며, 온도, 습도, 강수량, 증기압은 기상청에서 제공받았다. 날씨 요소와 ZTD의 상관성 분석을 위해 선형적 관계를 분석하는데 보편적으로 사용되는 피어슨 상관계수를 이용하였다. 포화수증기압은 온도의 함수이며, Eq. (1)으로 계산할 수 있다(Jackson, 2012).

$$p^*(H_2O) = e^{\frac{20.386 - 5132}{T}} \quad (1)$$

where T is a temperature and $p^*(H_2O)$ represents the saturated water vapor pressure.

온도와 증기압의 상관계수는 모든 지역에서 0.9 이상으로 나타났는데, 이는 Eq. (1)의 관계에서 확인할 수 있다. 강수량과 습도는 높은 상관관계가 예상되지만 내륙지역에서 낮았고, 해안지역에서는 약간의 상관성은 나타나지만 높은 값을 나타내지는 않았다. 이는 강수량보다 해안이라는 지역적 요소가 습도에 좀 더 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 모든 지역에서 여름에 높고 겨울에 낮은 ZTD를 통해 짐작할 수 있듯이 ZTD와 온도는 높은 선형적 상관성을 보였다.

ZTD와 강수량은 내륙지역에서는 약 0.7로 높은 반면, 해안지역은 0.25로 낮은 상관계수를 보였다. 이와 반대로 ZTD와 습도는 내륙지역에서는 0.6의 상관성을 나타냈으나, 해안지역에서는 0.8로 상대적으로 높은 값을 보였다. 따라서, 건조하고 온도 차이가 큰 내륙지역에서는 습도보다 강수량에 영향을 받은 ZTD의 변화가 발생하고, 다습한 해안지역에서는 강수보다 바다의 습도로 인한 ZTD의 변화가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 각 상시관측소의 연간 강수량과 습도를 나타낸 것으로서 월 평균값을 이용하였다. 내륙지역에서는 강수량이 여름에 집중되어 있으며, 습도는 계절적인 경향성 없이 여름과 겨울 모두 대략 70% 정도로 나타난 것을 확인할 수 있다. 반면, 해안지역은 강수량이 계절성을 띄지 않으며, 습도는 내륙지역에 비해 겨울에 낮고 여름에 높은 수치를 보인다. ZTD는 여름에 높고 겨울에 낮은 계절성을 보여주므로 그래프를 통해서도 ZTD와 강수량, 습도의 상관성을 파악할 수 있다.

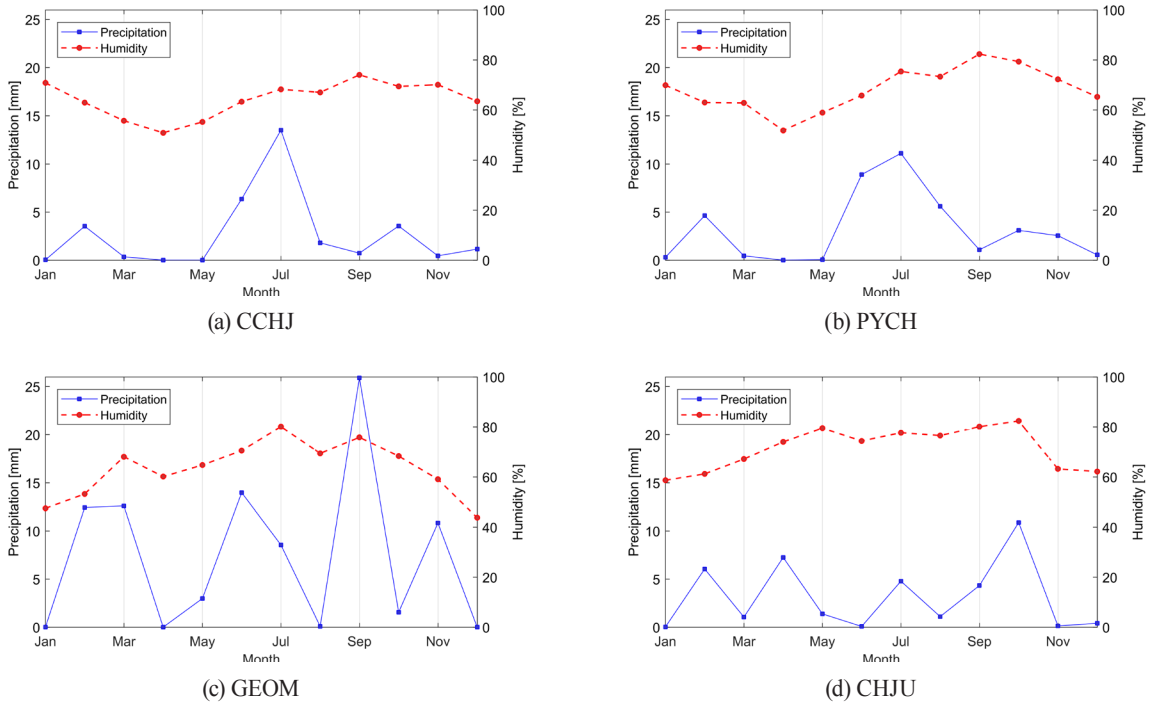


Fig. 5. Relationship between annual precipitation and humidity for each station

4. 결론

본 논문에서는 대류권 지연오차량과 계절, 날씨에 따른 변화를 상관관계수 및 그래프를 통해 분석하였다. 이를 위해 한반도 내 상시관측소 네 개의 2016년 매주 하루의 관측데이터(관측소마다 총 48개)를 다운로드하였고, 이를 과학기술용 자료 처리 소프트웨어를 이용하여 정밀절대측위 방식으로 처리하였다. 모든 지역에서 대류권 지연오차량의 계절적 변화 양상은 연평균 기준 여름에 5~6% 커지고, 겨울에는 3~4% 작아져 연간 10% 정도의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 날씨에 따른 ZTD의 변화는 지역에 따라 조금 다른 양상을 보였는데, 내륙지역의 경우 날씨 요소 중 강수량과 상관성이 높아 강수량이 높은 기간에는 ZTD가 커지는 모습을 보였고, 계절마다 온도 차이로 인한 포화수증기압의 변화로 습도의 변화가 크지 않아 습도와 상관성이 높지 않았다. 해안지역의 경우 날씨 요소 중 비교적 여름에 높고 겨울에 낮은 습도와 상관성이 높았으며, 강우량이 여름에 집중되어 있지 않으므로 강우량 자체보다는 강우나 바다에 의한 습도와 높은 선형 상관성을 갖는 ZTD 변화가 발생한다는 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구는 연간 분석을 매주 하루씩 총 48일의 데이터로만

분석함으로써 데이터간 연속성이 부족하다. 또한, 날씨 데이터를 대체하기 위해 사용한 지역 중 영월은 평창과 21.7km로 비교적 가까운 거리에 해당하지만, 여수는 거문도와 87.3km의 거리 차이가 있으므로 날씨 데이터의 적합성을 판단하여야 한다. 마지막으로 여러 인자들이 복합적으로 얽혀있는 날씨요소들을 선형적인 관계로만 분석하였기에 비선형적이거나 복잡한 관계를 고려하지 못한 한계가 있다. 향후에는 충분한 RINEX 데이터와 다른 기상 요인들을 고려하고, GNSS와 기상 데이터 관측소의 공간적 적합성을 고려하여 추가적인 연구를 진행할 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 기상청 <기상-지진See-At기술개발>(KMI2018-05710)의 지원으로 수행되었습니다.

References

Bae, T.-S. (2018), Accuracy analysis of GNSS-based public surveying and proposal for work processes, *Journal of the*

- Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 6 (in press).
- Nam, J.Y. and Song, D. (2015), Remote sensing of GPS precipitable water vapor during 2014 heavy snowfall in Gangwon province, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 33, No. 4, pp. 305-316.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J. (1997), *GPS: Theory and Practice (4th)*, Springer-Verlag, Wien New York.
- Hong, C.-K. (2012), Kalman filter modeling for the estimation of tropospheric and ionospheric delays from the GPS network, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 30, No. 6, pp. 575-581.
- Hong, C.-K. (2013), Impact of tropospheric delays on the GPS positioning with double-difference observables, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 5, pp. 421-427.
- Jackson, S.L. (2012), *Research Methods and Statistics: A Critical Thinking Approach (4th)*, Cengage Learning.
- Kim, S.-K. and Bae, T.-S. (2012), Long-term analysis of tropospheric delay and ambiguity resolution rate of GPS data, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 30, No. 6-2, pp. 673-680.
- Kim, J.S. and Bae, T.-S. (2015), Comparative analysis of GNSS precipitable water vapor and meteorological factors, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 33, No. 4, pp. 317-324.
- Kim, S.-K. and Bae, T.-S. (2018), Long-term GNSS analysis for local geodetic datum after 2011 Tohoku earthquake, *The Journal of Navigation*, Vol. 71, No. 1, pp. 117-133.
- Lee, Y.C. (2003), A comparison of correction models for the prediction of tropospheric propagation delay of GPS signals, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 20, No. 3, pp. 283-291.
- Lee, H. (2018), Impact of tropospheric modeling schemes into accuracy of estimated ellipsoidal heights by GPS baseline processing: experimental analysis and results, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 245-254.
- NGII (2018), National Geographic Information Institute home page, <http://map.ngii.go.kr> (last date accessed: 30 November 2018).
- Song, D. (2018), Regional Ts-Tm relation to improve GPS precipitable water vapor conversions, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 1, pp. 33-39.