

# GNSS 가강수량 추정시 건조 지연 모델에 의한 복원 정밀도 해석 Retrieval Biases Analysis on Estimation of GNSS Precipitable Water Vapor by Tropospheric Zenith Hydrostatic Models

남진용<sup>1)</sup> · 송동섭<sup>2)</sup>  
Nam, JinYong · Song, DongSeob

## Abstract

ZHD (Zenith Hydrostatic Delay) model is important parameter in estimating of GNSS (Global Navigation Satellite System) PWV (Precipitable Water Vapor) along with weighted mean temperature. The ZWD (Zenith Wet Delay) is tend to accumulate the ZHD error, so that biases from ZHD will be affected on the precision of GNSS PWV. In this paper, we compared the accuracy of GNSS PWV with radiosonde PWV using three ZHD models, such as Saastamoinen, Hopfield, and Black. Also, we adopted the KWMT (Korean Weighted Mean Temperature) model and the mean temperature which was observed by radiosonde on the retrieval processing of GNSS PWV. To this end, GNSS observation data during one year were processed to produce PWVs from a total of 5 GNSS permanent stations in Korea, and the GNSS PWVs were compared with radiosonde PWVs for the evaluating of biases. The PWV biases using mean temperature estimated by the KWMT model are smaller than radiosonde mean temperature. Also, we could confirm the result that the Saastamoinen ZHD which is most used in the GNSS meteorology is not valid in South Korea, because it cannot be exclude the possibility of biases by latitude or height of GNSS station.

Keywords : GNSS, Precipitable Water Vapor, Radiosonde, Zenith Hydrostatic Model, Bias

## 초 록

GNSS를 이용한 가강수량 복원에 있어서 가중 평균 기온과 더불어 천정 건조 지연 모델은 가강수량의 정확도에 중요한 매개변수 중 하나이다. 천정 습윤 지연은 천정 건조 지연 모델의 오차가 축적되는 경향을 가지고 있으므로, 천정 건조 지연의 편의량은 GNSS 가강수량의 정확도에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 Saastamoinen, Hopfield 및 Black의 세 가지 천정 건조 지연 모델을 이용하여 GNSS 가강수량을 산출하고 라디오존데 가강수량과의 정확도를 비교하였다. 그리고 이 과정에서 가강수량 산출에 필요한 가중 평균 기온을 한국형 가중 평균 기온 모델과 라디오존데로부터 실제로 관측한 가중 평균 기온을 각각 적용하여 다르게 평가하였다. 이를 위해 국내 상시관측소 5개소의 1년 분량의 GNSS 관측데이터를 취득한 후 천정 건조 지연 모델별로 가강수량을 산출하고 정밀도를 분석하였다. 분석 결과, 한국형 가중 평균 기온 모델에 기반하여 복원한 GNSS 가강수량이 라디오존데의 가중 평균 기온을 적용한 것보다 편의량이 작은 것으로 확인되었다. 또한, GNSS 기상에서 널리 적용하고 있는 Saastamoinen 모델은 우리나라 관측소의 위도나 고도에 의한 편의량이 발생하여 가장 유효한 모델이 아닐 가능성이 있음을 확인하였다.

핵심어 : 범지구항법위성시스템, 가강수량, 라디오존데, 천정 건조 지연 모델, 편의량

Received 2019. 07. 28, Revised 2019. 08. 14, Accepted 2019. 08. 21

1) Member, MetaGIS Consulting Co., Ltd. (E-mail: skawlsfyd@nate.com)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Earth and Environmental Engineering, Kangwon National University (E-mail: sds@kangwon.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

대기의 종관 기상변화와 전 지구적 기후 변화를 예측하기 위해서 활발한 관측이 이뤄지고 있는 기상요소 중 하나는 대기에 포함된 수증기이다. 수증기는 액화 또는 기화 등의 상변화 과정을 통해서 지배적인 에너지의 전환 과정을 담당하고 있으며, 열에너지의 발원과 흡열을 위한 역할도 함께 하고 있다. 수증기는 장마, 태풍, 폭설 등 여러 자연재해의 에너지 공급을 담당하는 원인이다. 또한, 태양열로 입사된 복사 에너지의 평형 관계의 변화를 조절하는 중요한 인자 중 하나이다. 따라서 기후 변화의 원인을 이해하고 자연적 혹은 인위적인 요소로 생성된 온난화 가스 등에 의한 기후 변화를 신뢰성 있도록 추정하기 위해 기후시스템의 각 구성요소에서 물 순환 과정에 대한 정확한 이해가 필요하다(Labraga *et al.*, 2000). 이러한 수증기를 관측할 수 있는 시스템은 전통적으로 라디오존데(radiosonde), 능동 수증기 탐측 장비인 라이다(LiDAR : Light Detection And Ranging)와 수증기 복사계(WVR : Water Vapor Radiometer), 도플러 효과를 이용한 레이더와 기상위성, 초장기선 간섭계(VLBI : Very Long Baseline Interferometry), 마이크로파 라디오미터(MWR : MicroWave Radiometer) 등이 있다(Guiraud *et al.*, 1979; Niell *et al.*, 2001).

20세기 말에 이르러 GNSS (Global Navigation Satellite System) 위성 신호의 대류권 지연 오차를 모델링하여 수증기 성분 중 하나인 가강수량으로 환산하는 방법이 제시된다. Bevis *et al.*(1992)에 의해 GPS 기상 연구가 시작된 이후로 GNSS 대류권 연구 분야는 가강수량 추정, 위치결정 향상을 위한 오차 모델링, 태풍과 같은 악천후의 모니터링 등 여러 분야에 활용되고 있다. 우리나라에서 건조 지연 혹은 습윤 지연 모델별 비교 연구는 Lee(2002)가 Hopfield 모델과 Saastamoinen 모델을 이용하여 매핑함수의 조합에 따른 고도별 지연량의 편차에 대하여 분석하였다. Song(2012)는 짧은 기간에 관측한 GPS (Global Positioning System) 데이터를 기반으로 Saastamoinen, Ifradis, Hopfield와 같이 경험적 대류권 습윤 지연 모델 3가지를 비교 분석한 결과, GPS ZWD (Zenith Wet Delay) 와 기상 관측값을 이용하여 구한 각 모델별 ZWD와의 차이에서 평균과 표준편차 모두 Ifradis 모델에서 작은 값을 나타내고 있다는 점을 확인하였다. Park *et al.*(2012)은 1년 동안 춘천, 인제 지역에서 GPS 측정값 정보를 이용한 대류층 지연오차 모델 성능 분석을 실시하였고, 그 결과 Saastamoinen 모델이 다른 모델보다 적합하다는 것을 확인하였다. 또한, GPS PWV (Precipitable Water Vapor)

정확도 분석에서는 역 해면 경정과 크리깅 보간 방법을 통해 GPS PWV 산출 정확도를 분석하여 역해면경정을 통한 가강수량 산출이 더 정확한 것을 확인하였다(Kim *et al.*, 2010). Ha *et al.*(2005)은 캐나다의 GPS 상시관측소 데이터를 이용하여 대류권의 사선방향 습윤 지연량을 산출하였다. 이 연구에서는 GPS 상시관측소 데이터를 이용한 습윤 지연량과 수증기 복사계 간의 오차가 1mm 내로 나타나는 것을 확인하였다. Lee(2018)는 7일 분량의 관측데이터로 Hopfield, 수정 Hopfield 그리고 Saastamoinen과 같은 경험식과 이중 차분 및 정밀 절대측위 대류권 오차 추정기법을 적용해 GNSS 높이측량에서 기선장과 표고차에 적합한 대류권 오차 모형화 기법 선정을 위한 방안을 고려했다. Schüler(2001)는 IGS (International GNSS Service)에서 제공되고 있는 GPS 상시관측소의 천정 지연량을 이용하여 Hopfield, Mendes 그리고 MOPS 습윤 지연량을 비교하였고, 대류권 건조 지연 모델의 정확도를 추정하였다. Emardson과 Derks(2000)은 8년간 유럽의 38개의 지역에서 120,000개가 넘는 라디오존데 데이터를 사용하여 위도, 계절, 지면온도에 근거한 가강수량의 변환식을 구하고자 하였다. 이 연구에서는 물리모델, 다항식모델, 연중모델, 혼합모델 등 4개의 모델을 제시하였으며 각 지역마다 모델의 정확도가 상이하다는 결과를 나타내었다. Xu *et al.*(2012)는 티베트 고원에서 GPS PWV 추정 시 건조 지연 모델 중에서 고산지대에서 어떠한 건조 지연 모델이 더 적합한지에 대한 연구를 진행하였다.

본 논문에서는 GNSS 해석 소프트웨어를 통해 산출한 대류권의 총 지연으로부터 선형적 연구결과로 도출된 건조 지연 모델들로 계산한 건조 지연량을 통해 산출한 GNSS 가강수량이 갖는 천정 방향에 대한 편차량을 해석하고자 하였다. 다시 말해 건조 지연 모델별로 GNSS 가강수량을 복원하는 경우와 실제 대기의 가강수량을 비교하여 편차의 발생 정도를 검토함으로써 우리나라에 유효한 건조 지연 모델을 확인하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 대류권 지연

GNSS 대류권 오차는 우주 공간상의 위성에서 송출된 L 밴드 신호가 지표에서 가장 가까운 대기층인 대류권에서 비산란(non-dispersive) 매질에 해당하는 중립 대기층의 구성 물질에 의해 신호가 굴절함으로써 위성과 수신기 간의 거리가 실제에 비해 길어지는 것을 의미한다(Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001). 대류권의 수증기 성분은 전파신호의 속도를 늦

추고 이러한 지연을 역추정을 통해 천정 총 지연량(ZTD : Zenith Total Delay)을 결정할 수 있다(Bevis *et al.*, 1992). 대류권에서 천정 방향에 대한 GPS 위성 신호 지연은 대기 중에 존재하는 이산화탄소와 같은 건조가스에 의한 천정 건조 지연량과 수증기와 같은 습윤가스에 의해 발생하는 천정 습윤 지연량으로 나누어진다(Davis *et al.*, 1985). 천정 건조 지연은 대류권에서 총 지연량의 약 90%를 차지하고 있으며 나머지 10%인 천정 습윤 지연량은 대류권에서 시공간적인 변화가 큰 수증기에 의한 지연이다. 따라서 습윤 지연량은 수증기 측정을 위한 중요한 요소 중 하나이다. 이렇게 획득한 천정 습윤 지연량을 역으로 이용하여 대기 중에 분포하고 있는 수증기 정보 중 하나인 가강수량을 획득할 수 있다. 시공간적인 변화가 불연속적인 수증기의 특성으로 인하여 천정 습윤 지연을 모델링하는 것은 어려우므로 일반적으로 GNSS 자료 처리를 통해 추정된 천정 총 지연량에서 기상 실측 자료에 기반하여 경험적 건조 지연 모델에서 구한 천정 건조 지연을 빼어 천정 습윤 지연을 얻는다. 따라서 천정 건조 지연 모델링의 오차는 천정 습윤 지연에 축적되는 경향을 갖게 되며, 천정 건조 지연 모델은 GNSS PWV의 정확도에 영향을 미치게 된다(Xu *et al.*, 2012).

$$ZWD \pm \Delta ZWD \approx ZTD_{estimated} - (ZHD_{calculated} \pm \Delta ZHD) \quad (1)$$

where  $\Delta ZWD$  is the zenith wet delay estimation error, and  $\Delta ZHD$  is the zenith hydrostatic error which is calculated by a hydrostatic model.

## 2.2 대류권 건조 지연 모델

본 연구에서 검토한 천정 건조 지연 모델은 매우 높은 정확도로 GNSS 기상 기술 부분에서 가장 많이 사용되는 Saastamoinen 모델과 전 세계 라디오존데 데이터를 이용하여 고도에 따른 굴절률 변화를 표현한 Hopfield 모델, 그리고 Hopfield 모델을 이용하여 좀 더 편리한 방법으로 계산이 가능하며 관측소 기압과 기온 정보만으로 건조 지연량이 산출이 가능한 Black 모델을 이용하였다(Saastamoinen, 1973; Hopfield, 1971; Black, 1978). Hopfield와 Saastamoinen 모델은 건조 대기를 유체 정역학적인 평형상태로 가정하고 높이의 함수로 이뤄진 중력가속도와 공기 밀도를 활용하여 건조 굴절식을 산출하는 과정이 유사하다. 다만 Hopfield는 전 세계 라디오존데로부터 획득한 건조 성분의 유효 높이 추정식을 반영하여 Eq. (2)와 같이 천정 건조 지연 모델을 유도하였다. 반면에 Saastamoinen은 건조 성분이 유효한 중심 높이를

수집한 자료의 선형 관계를 통해 근사치를 찾아 반영하고 지표면에서 지구의 평균 중력가속도가 아닌 평균 중력 관계식을 찾아서 Eq. (3)을 유도한 것이 두 모델의 큰 차이이다. Black은 지표면의 대기압력과 지표 측정 기온을 바탕으로 매우 간소하게 천정 건조 지연을 산출할 수 있도록 Eq. (4)와 같은 건조 지연 모델을 제안하였다. 세 가지의 건조 지연 모델의 지연량 단위는 mm이며, 건조 지연량을 표시하는 ZHD에 각 모델을 제시한 학자 성을 따서 편의상 지연 모델의 이름을 구분하였다.

$$ZHD_H = \left( 0.0023081 \left[ \frac{m}{hPa} \right] - 0.0075562 \left[ \frac{m \cdot K}{hPa} \right] \cdot \frac{1}{T_0} \right) \cdot P_s \quad (2)$$

$$ZHD_S = \frac{0.022275 \left[ \frac{m}{s^2 \cdot hPa} \right] \cdot P_s}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2\varphi - 0.0028 \left[ \frac{1}{km} \right] \cdot h} \quad (3)$$

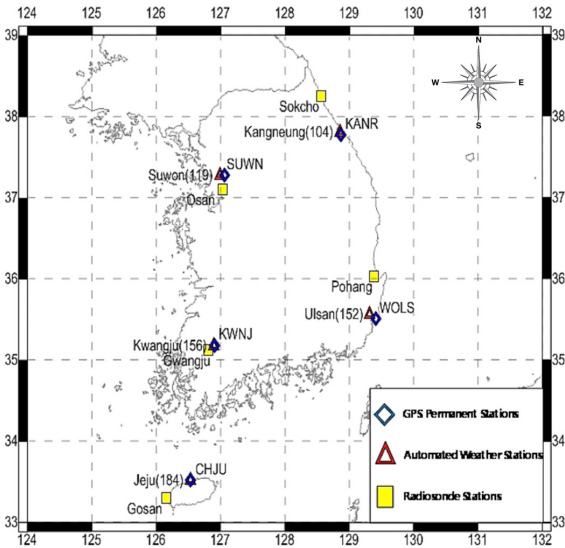
$$ZHD_B = 0.002312 (T_s - 3.96) \frac{P_s}{T_s} \quad (4)$$

where  $\varphi$  is the latitude,  $h$  is the ellipsoidal height,  $P_s$  and  $T_s$  is the surface air-pressure and temperature, respectively.

## 3. 연구 방법

### 3.1 관측데이터

국토지리정보원에서 공통의 목적으로 운영하는 위성 기준점을 포함하여 자료를 제공하고 있는 GNSS 상시관측소는 86개소, 기상청에서 운영하는 자동기상관측소(AWS : Automated Weather Station)는 약 455개소이다. 라디오존데는 기상청 고층 기상 관측 관서 5개 지점(속초, 백령도, 흑산도, 포항, 고산), 특별관측 3개 지점(문산, 해남, 이어도), 대한민공군 2개 지점(오산, 광주) 등 총 10개 지점에서 운용 중이다(Kim *et al.*, 2009). GNSS 관측자료에서 가강수량을 복원을 위해서는 천정 총 지연량에서 경험적 건조 지연 모델로부터 구한 건조 지연을 빼어 습윤 지연량을 추정해야 한다(Davis *et al.*, 1985). 경험적 건조 지연량을 산출하기 위해서 GNSS 상시관측소와 인접한 AWS 기상정보의 취득이 필요하다. 본 연구에서는 전국의 라디오존데 지점 중 5지점(속초, 포항, 오산, 광주, 고산)과 인접하는 지역 중에서 국토지리정보원의 GNSS 상시관측소 5개 지점(관측소명 : KANR, WOLS, SUWN, KWNJ, CHJU), 기상청의 AWS 5개소(지점번호 : 104, 152, 119, 156, 184)를 대상으로 선정하였다. Fig. 1은 GNSS 상시관측소, AWS, 라디오존데 지점을 표시한 것이다.



**Fig. 1. Location of GNSS permanent stations, AWS and Radiosonde stations**

Table 1은 GNSS 상시관측소 및 AWS의 위치정보와 인접 이종 관측소 간의 평면상 이격거리를 나타낸 것이다. GNSS 상시관측소 정보는 국토지리정보원 고시 국토지리정보원 고시 제2017-443호에 의한 좌표성과이다. 기준타원체는 GRS80

(Geodetic Reference System 1980)에 준거한 성과이며, 각 GNSS 상시관측소의 타원체고와 괄호안에 병기한 값은 역海面 精正 기압을 구할 때 필요한 GNSS 안테나 ARP (Antenna Reference Point)의 표고이다. 기상청에서 운영 중인 AWS의 타원체는 WGS84 (World Geodetic System 1984)가 기준이며 표고는 인천만 평균해수면을 기준으로 한 좌표이다. Table 1을 보면 지역마다 GNSS 상시관측소와 AWS 간의 이격거리가 다르다는 것을 알 수 있다. 울산 지역은 약 10km가 넘는 이격거리를 갖고 제일 가까운 지역은 제주지역이며 이격거리는 35cm로 매우 근접하다.

Table 2는 연구에서 사용한 라디오존데 관측소별 위도, 경도 및 고도를 표시한 것이며, Rad-GNSS Differ는 라디오존데와 GNSS 상시관측소간에 평면 이격거리, Rad-AWS Differ는 라디오존데와 AWS간의 평면 이격거리를 정리한 것이다. Table 1과는 다르게 라디오존데와 GNSS 관측소, AWS 간의 이격거리가 상당히 멀다는 것을 알 수 있다. 이것은 라디오존데를 통해 계산된 PWV와 GNSS 상시관측소와 AWS를 기준으로 산출된 PWV 간의 정확도를 평가할 때 기하학적 이격에 따라 불가피한 편이량이 발생할 수밖에 없다는 것을 의미한다. 천정 건조 지연량 계산의 정확도는 GNSS 가강수량의 복원 정확도와 직접적인 연관이 있다. 국내에는 GNSS 상시관측소와 AWS 위치가 동일한 곳에 존재하는 곳은 극히 드물다.

**Table 1. Coordinates of GNSS stations, AWS and their separation distance ( $\phi$  : latitude(dd-mm-ss),  $\lambda$  : longitude(dd-mm-ss), h : ellipsoidal height(m), H : orthometric height(m))**

GNSS station			AWS			Differ. (km)
KANR	$\phi$	37-46-15.3394	Gangneung (104)	$\phi$	37-48-16	3.830
	$\lambda$	128-52-05.6213		$\lambda$	128-51-19	
	h(H)	57.043(29.826)		H	78	
KWNJ	$\phi$	35-10-42.1514	Kwangju (156)	$\phi$	35-10-22	1.835
	$\lambda$	126-54-36.8524		$\lambda$	126-53-29	
	h(H)	71.626(46.484)		H	72	
SUWN	$\phi$	37-16-31.8529	Suwon (119)	$\phi$	37-16-20	6.140
	$\lambda$	127-3-15.2647		$\lambda$	126-59-07	
	h(H)	83.819(60.114)		H	34	
CHJU	$\phi$	33-30-50.1352	Jeju (184)	$\phi$	33-30-50	0.035
	$\lambda$	126-31-47.3521		$\lambda$	126-31-46	
	h(H)	50.337(25.0331)		H	20	
WOLS	$\phi$	35-30-14.2082	Ulsan (152)	$\phi$	35-33-36	10.681
	$\lambda$	129-24-57.6534		$\lambda$	129-19-12	
	h(H)	95.935(66.2167)		H	34	



Table 2. Separation distance among radiosonde, GNSS stations and AWS

Radiosonde station			Rad-GPS Differ. (km)		Rad-AWS Differ. (km)	
47090 (Sokcho)	$\phi$ (dd-mm-ss)	38-15-02.88	47090-KANR	59.534	47090-104	55.699
	$\lambda$ (dd-mm-ss)	128-33-50.4				
	H(m)	17.8				
47158 (Kwangju)	$\phi$ (dd-mm-ss)	35-06-59.76	47158-KWNJ	10.986	47158-158	9.275
	$\lambda$ (dd-mm-ss)	126-48-57.6				
	H	13				
47122 (Osan)	$\phi$ (dd-mm-ss)	37-05-59.64	47122-SUWN	19.580	47122-119	19.589
	$\lambda$ (dd-mm-ss)	127-01-58.8				
	H	52				
47185 (Gosan)	$\phi$ (dd-mm-ss)	33-17-37.68	47185-CHJU	42.032	47185-184	42.002
	$\lambda$ (dd-mm-ss)	126-09-43.2				
	H	71.2				
47138 (Pohang)	$\phi$ (dd-mm-ss)	36-01-57.36	47138-WOLS	52.710	47138-152	58.754
	$\lambda$ (dd-mm-ss)	129-22-44.4				
	H	1.9				

그러므로 정확한 천정 건조 지연량을 계산하기 위해서 GNSS 상시관측소와 AWS의 이격된 거리를 줄이거나, 같은 고도로 환산함으로써 관측소 간의 기압 차이를 줄여 오차량을 줄일 수 있다. 건조 지연량 산출 시 고도차에 의한 기압 오차를 경감할 목적으로 Song(2009)이 Eq. (5)와 같이 GNSS 관측소 고도로의 역해면 경정값을 구하여 적용하였다.

$$P_G = P_M + \Delta P_{GNSS} \quad (5)$$

where  $P_G$  is an air-pressure at GNSS antenna reference point,  $P_M$  is an air-pressure at meas sea level, and  $\Delta P_{GNSS}$  is an reverse reduction air-pressure from mean sea level.

### 3.2 연구 방법

GNSS 가강수량은 강릉, 수원, 포항, 광주, 제주 GNSS 상시관측소의 총 1년간(2014년 1월 1일~12월 31일)의 GNSS RINEX (Receiver Independent Exchange Format) 데이터와 IGS에서 다운로드한 정밀 궤도력을 바탕으로 GNSS 정밀 해석을 통해 천정 총 지연량을 산출하였다. 또한, GNSS 가강수량 복원에 필요한 기온, 기압 등의 정보는 기상청에서 10분 간격의 관측자료를 획득하여 사용하였다. 기상 관측자료를 이용하여 Saastamoinen, Hopfield, Black 세 모델로부터 천정 건조 지연을 산출하고, GNSS 해석을 통해 산출한 총 지연량

으로부터 건조 지연량을 감하여  $ZWD_S$ ,  $ZWD_H$ ,  $ZWD_B$  등 총 3가지의 천정 습윤 지연량을 산출하였다. 이렇게 산출된 천정 습윤 지연량으로부터 가강수량으로의 복원은 Bevis *et al.*(1994)가 제시한 일련의 과정을 따랐으며, 이 과정에서 가강수량 복원에 있어 중요한 평균기온 산출은 Song and Grejner-Brzezinska(2009)가 제시한 한국형 가중 평균 기온(KWMT) 모델을 적용하여 지상 기온을 토대로 평균 기온을 산출하여 적용하였다. 이렇게 산출한 가강수량은 편의상 Eq. (6)에서 Eq. (8)과 같이 정하였다.

$$ZTD - ZHD_S = ZWD_S + KWMT \Rightarrow PWV_S \quad (6)$$

$$ZTD - ZHD_H = ZWD_H + KWNT \Rightarrow PWV_H \quad (7)$$

$$ZTD - ZHD_B = ZWD_B + KWMT \Rightarrow PWV_B \quad (8)$$

다음은 한국형 가중 평균 기온 모델의 선형 관계를 통해 구한 평균 기온도 가강수량 평가에 영향을 미칠 수 있으므로 실제 관측소 주변의 평균 기온을 적용하여 가강수량을 추가로 산출하였다. 총 지연량과 건조 지연량을 계산하는 방법은 전술한 바와 동일하다. 라디오존데 가중 평균 기온(RWMT : Radiosonde Weighted Mean Temperature) 관측값은 해당 지역에서 지상으로부터 일반적으로 500m 높이의 평균 기온

을 나타낸 값이다. 이렇게 라디오존데 가중 평균 기온 값을 적용한 가강수량은 다음과 같이 명명하였다. Fig. 2는 각각의 GNSS 가강수량을 산출하기 위한 절차를 나타낸 것이다.

$$ZTD - ZHD_S = ZWD_S + RWMT \Rightarrow PWV_{Sr} \quad (9)$$

$$ZTD - ZHD_H = ZWD_H + RWMT \Rightarrow PWV_{Hr} \quad (10)$$

$$ZTD - ZHD_B = ZWD_B + RWMT \Rightarrow PWV_{Br} \quad (11)$$

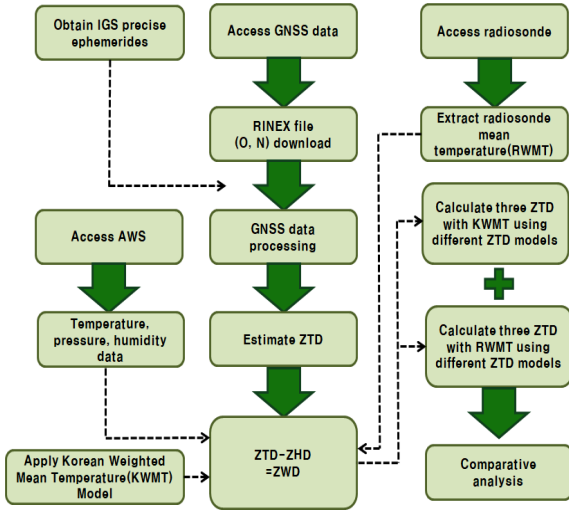


Fig. 2. Flow chart for data processing

## 4. 결과 분석 및 토의

### 4.1 결과 분석

대류권 건조 지연 모델 적용에 따라 GNSS 가강수량의 편倚량을 분석하기 위해서 검정 자료로서는 현실적으로 우리나라에 이용 가능한 고층기상관측기기인 라디오존데의 데이터를 이용하여 계산된 라디오존데 가강수량을 이용하였다. 5개 지역의 GNSS 가강수량 데이터는 261,922개, 라디오존데 가강수량 데이터는 5,253개로 집계되었다. GNSS 가강수량과

라디오존데 가강수량이 동일한 시간에 관측된 데이터는 총 5,216개로 편倚량 해석에 있어 부족하지 않은 자료라고 본다. 각 데이터는 각 지역별로 3장에서 서술한 바와 같이 6종류의 가강수량으로 복원하였다. 지역별로 복원된 6개의 가강수량 ( $PWV_S, PWV_{Sr}, PWV_H, PWV_{Hr}, PWV_B, PWV_{Br}$ ) 과 라디오존데 가강수량( $PWV_R$ )의 차이를 계산하고, 각 관측 차이에 대한 통계 분석을 실시하였다. 이 과정에서 두 관측 값의 통계 분석 신뢰성을 확보하기 위하여 비교 대상 가강수량 차이별로 그 크기가  $3\sigma$  이상 발생하는 과대편차가 발생한 추정값이나 관측값은 제거하였다. 다섯 지역 중 과대편차가 크게 나타난 지역은 광주이며, 과대편차를 제거함으로써 총 데이터(1,438)의 9.18%인 132개의 데이터가 제거되었다. 제주도는 총 데이터(782)의 5.75%인 45개가 제거되었다. 나머지 수원, 울산, 강릉은 각각 40, 19, 25개의 데이터가 제거되었다. 광주에서 다른 지역의 2~3배 가량인 100개 이상의 데이터가 제거되었지만, 하루 2회의 라디오존데 관측이 이뤄지는 타 지역과 비교했을 때, 하루 4회의 라디오존데 관측이 실시되어 확보한 총 데이터 셋이 다른 지역보다 많으므로 통계 분석을 위한 자료 손실은 크지 않다고 판단된다. 종합적으로 다섯 지역에서 과대편차로 제거된 데이터는 총 데이터 수인 5,216에 대비하여 261개이다.

다섯 지역에 대해서 세 종류의 건조 지연 모델을 적용하고, 평균 기온을 달리 적용한 통계 분석을 정리한 것을 Table 3에 나타냈다. 통계 결과에서 우세한 값은 굵은 체(bold)로 표시하였다. 두 평균 기온을 적용하여 구한 GNSS 가강수량과 라디오존데 가강수량의 표준편차는 한국형 가중 평균 기온 모델을 이용하여 복원한 결과에서는 Hopfield와 Black 모델이, 라디오존데 평균 기온을 적용할 경우에는 Black 모델이 다소 좋은 결과를 보였다. RMSE (Root Mean Square Error)에 대한 모든 지역을 통합하여 평가한 결과에서는 Hopfield 건조 지연 모델을 적용한 결과가 가장 정확한 것으로 나타났다. 건조 지연 모델에 대한 추가적인 분석은 지역별로 나눠서 다음에 분석하고자 하였다.

Table 3. Statistical analysis of PWV biases with different mean temperatures

Item	KWMT			RWMT		
	Saastamoinen	Hopfield	Black	Saastamoinen	Hopfield	Black
Bias (mm)	-3.61	-3.22	-3.49	-4.35	-3.95	-4.23
STD (mm)	2.59	<b>2.55</b>	<b>2.55</b>	2.81	2.75	<b>2.74</b>
RMSE (mm)	4.49	<b>4.17</b>	4.37	5.21	<b>4.86</b>	5.08

라디오존데의 고층 기상 관측 자료를 토대로 구한 실제 대기 가중 평균 기온을 적용한  $PWV_{Sr}$ ,  $PWV_{Hr}$ ,  $PWV_{Br}$  보다 한국형 가중 평균 기온 모델을 적용한  $PWV_S$ ,  $PWV_H$ ,  $PWV_B$ 가 표준편차 및 RMSE 항목에서 더욱 정확한 것으로 나타났다. 실제 대기 가중 평균 기온 관측값을 적용한 3가지 모델의 편의량은 세 건조 지연 모델의 평균 -4.18mm이었으며, 한국형 가중 평균 기온식을 적용하면 이보다 낮은 -3.61mm를 보였다. 표준편차와 RMSE에 대한 평균도 각각  $\pm 2.77\text{mm}$ 와  $\pm 5.05\text{mm}$ 로서, 한국형 가중 평균 기온식을 적용한  $\pm 2.56\text{mm}$ 와  $\pm 4.34\text{mm}$  보다 낮은 정확도를 보였다. 가강수량 복원과정에 있어서 가중 평균 기온값을 적용할 때, 실제 대기의 관측값을 적용하는 것보다 장기간 관측 자료를 바탕으로 선형 모델링한 가중 평균 기온식을 적용하는 것이 더욱 정밀한 가강수량 산출에 유의미하다고 본다. GNSS 기상 기술과 연관된 대부분의 연구에서도 전 지구적인 가중 평균 기온 모델이나 별도의 모델을 계산하여 적용하고 있는 경향이 있다. 이는 라디오존데 관측 센서의 정밀도에 의한 평균 기온의 산출 불확실성을 극복하기 위하여 장기간 기상 관측 자료를 이용하는 것이 적합한 것임을 의미한다고 본다. 따라서 GNSS를 이용하여 가강수량 복원 시에는 국지적으로 모

델링된 가중 평균 기온 모델의 적용이 필요하며, 보다 정밀한 GNSS 가강수량 추정을 위해서는 가중 평균 기온 모델의 정확성을 높이는 것이 중요한 것으로 판단된다.

각 지역별로 3가지 천정 건조 지연모델과 이종의 가중 평균 기온을 통하여 구해진  $PWV_S$ ,  $PWV_H$ ,  $PWV_B$ ,  $PWV_{Sr}$ ,  $PWV_{Hr}$ ,  $PWV_{Br}$ 과 편의량( $\Delta PWV$ ) 비교를 위해 라디오존데 데이터를 통해 계산한  $PWV_R$  간에 차이를 계산하였다. Table 4는 각각의 편의량에 대한 표준편차 및 RMSE에 대해 계산 결과를 요약한 것이며, Fig. 3은 한국형 가중 평균 기온 모델로 획득한 평균 기온을 적용하여 구한 건조 지연 모델별 RMSE를 비교한 그래프이다.

지역별로 분석한 결과, 표준편차는 5개 지역 모두에서 Black 모델이 다소 정밀하다는 결과를 확인할 수 있었다. 그러나 GNSS 가강수량 정확도 평가와 밀접한 관계가 있는 RMSE는 지역마다 다른 차이가 있는 것으로 도출되었다. 광주, 제주, 그리고 울산 지역에서는 Hopfield 모델이 RMSE가 작은 결과를 보였으며, 수원과 강릉 지역에서는 Saastamoinen 모델이 타 모델과 비교하면 좀 더 정밀한 결과를 나타냈다. 이러한 이종의 분석 결과가 발생한 이유는 GNSS 상시관측소와 라디오존데 관측소 간의 높이 차이가 원인인 것으로 사료된다. Table

**Table 4. Statistical analysis of PWV biases by regions**

Gangneung (KANR)	$PWV_S$	$PWV_H$	$PWV_B$	$PWV_{Sr}$	$PWV_{Hr}$	$PWV_{Br}$
Bias (mm)	-3.66	-4.02	-4.29	-4.33	-4.70	-4.98
STD (mm)	2.75	<b>2.69</b>	<b>2.69</b>	3.08	3.01	3.00
RMSE (mm)	<b>4.58</b>	4.85	5.07	5.31	5.59	5.82
Kwangju (KWNJ)	$PWV_S$	$PWV_H$	$PWV_B$	$PWV_{Sr}$	$PWV_{Hr}$	$PWV_{Br}$
Bias (mm)	-4.26	-3.97	-4.24	-5.06	-4.76	-5.04
STD (mm)	2.13	2.08	<b>2.07</b>	2.35	2.28	2.27
RMSE (mm)	4.77	4.48	<b>4.72</b>	5.58	5.28	5.53
Suwon (SUWN)	$PWV_S$	$PWV_H$	$PWV_B$	$PWV_{Sr}$	$PWV_{Hr}$	$PWV_{Br}$
Bias (mm)	-2.60	-2.64	-2.91	-3.35	-3.39	-3.67
STD (mm)	2.55	<b>2.53</b>	<b>2.53</b>	2.57	<b>2.53</b>	<b>2.53</b>
RMSE (mm)	<b>3.64</b>	3.66	3.86	4.22	4.23	4.46
Jeju (CHJU)	$PWV_S$	$PWV_H$	$PWV_B$	$PWV_{Sr}$	$PWV_{Hr}$	$PWV_{Br}$
Bias (mm)	-4.80	-3.67	-3.94	-5.64	-4.48	-4.75
STD (mm)	2.65	2.60	<b>2.59</b>	2.94	2.87	2.86
RMSE (mm)	5.49	<b>4.50</b>	4.72	6.36	5.32	5.55
Wulsan (WOLS)	$PWV_S$	$PWV_H$	$PWV_B$	$PWV_{Sr}$	$PWV_{Hr}$	$PWV_{Br}$
Bias (mm)	-2.72	-1.79	-2.06	-3.37	-2.42	-2.69
STD (mm)	2.88	2.85	<b>2.84</b>	3.10	3.05	3.04
RMSE (mm)	3.96	<b>3.37</b>	3.51	4.58	3.89	4.06

5는 GNSS 상시관측소와 라디오존데 관측소의 표고와 그 차이를 나타낸 표이다. GNSS 상시관측소와 라디오존데 관측소 간의 고도차가 크게 나타난 지역이 광주, 수원, 울산 지역이다. 이 세 지역에서는 Saastamoinen 모델보다 Hopfield 모델이 더 정확하다는 결과를 보였다. 이에 반해 고도차가 적은 강릉과 수원은 Hopfield 모델보다 Saastamoinen 모델이 더 정확하다는 결과가 나왔다.

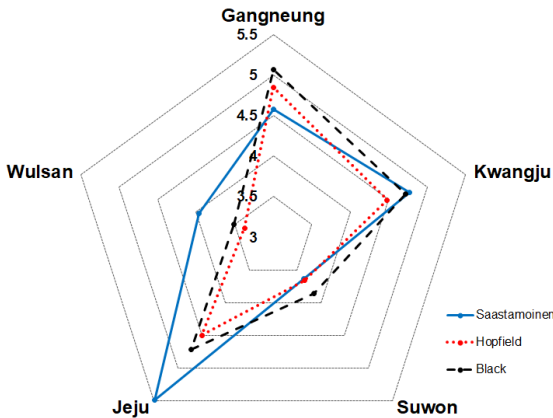


Fig. 3. RMSE (mm) comparison result by three zenith hydrostatic models(line : Saastamoinen, dotted line : Hopfield, broken line : Black)

#### 4.2 토의

Saastamoinen 모델은 Eq. (3)에서 확인할 수 있듯이 관측소의 고도가 필요하다. GNSS와 라디오존데 가강수량 비교 시, 천정 건조 지연 모델로 Saastamoinen을 사용할 경우 GNSS 관측소의 고도와 라디오존데의 고도차이에 따라 가강수량 복원과정에서 편차가 발생할 가능성이 있다고 사료된다. 한편으로는 위도에 대한 영향도 고려해 볼 필요가 있다. Schüler(2001)는 Saastamoinen 모델을 가장 정확한 모델이라

고 가정하여 기준 모델로 삼고, Saastamoinen 모델과 Hopfield 모델을 적용한 결과들을 위도별로 비교를 수행하였다. 위도 30도 이상부터 두 모델의 차이는 2mm 이상으로 벌어졌으며, 위도 80도 이상에서는 9mm 이상의 차이도 나타났다. 본 연구 대상지에서도 Saastamoinen 모델이 정확한 결과를 보이는 지역은 다른 세 지역보다 높은 위도에 있는 강릉과 수원이었다.

Xu *et al.*(2012)는 GNSS 가강수량 복원에서 중국의 중앙평야 지대와는 달리 고도가 높은 지역인 칭하이 티벳 고원에서의 경우에는 Saastamoinen 모델을 적용을 적용한 경우에 가장 적은 편의량을 보였다고 하였다. Ruihua와 Jie(2009)는 Saastamoinen 모델과 Hopfield 모델을 비교하였을 때, 표준편차 차이는 0.2mm 정도임을 제시한 바 있다. 이 두 가지 사례는 Hopfield와 Saastamoinen 모델 간의 정확도 차이가 크지 않다는 것을 의미함과 동시에 어떤 모델이 더욱 정확한 건조지연을 산출하는 것인지 불확실하다는 것을 의미한다. 다섯 지역을 통합한 결과에서 Hopfield 모델의 RMSE가 다른 모델보다 정밀하게 나왔으나, 지역별로 분석한 결과에서는 Black 모델과 Saastamoinen 모델의 정밀도가 서로 다른 분석 결과도 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에서는 GNSS를 이용한 가강수량 추정에 있어서 필수적인 천정 건조 지연 모델에 대해 우리나라에 적용할 경우, 가강수량 추정의 편의량을 해석하기 위하여 세 가지 건조지연 모델을 적용하였다. 그리고 관측소 지역의 라디오존데로 실측한 평균 기온과 장기간 기상 자료를 선형 회귀 분석하여 구한 한국형 가중 평균 기온 모델을 각각 적용하였을 경우, 가강수량 추정의 편의량과 정확도 분석을 수행하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

Table 5. Height difference between GNSS permanent station and AWS

Region (GNSS-Radiosonde)	GNSS station (m)	Radiosonde station (m)	Height differ. (m)
KANR-Sokcho (47090)	29.826	17.8	12.026
KWNJ-Kwangju (47158)	46.484	13.0	33.484
SUWN-Osan (47122)	60.114	52.0	8.114
CHJU-Gosan (47185)	25.031	71.2	-46.169
WOLS-Pohang (47138)	66.110	1.9	64.21



한국형 가중 평균 기온 모델에 기반하여 복원한 GNSS 가강수량이 라디오존데의 가중 평균 기온을 적용한 것보다 편의량이 작은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 GNSS 가강수량 복원 시 가중 평균 기온값 적용에서 선형 회귀 모델에서 구한 가중 평균 기온을 적용하는 것이 편의량이 작은 가강수량 산출이 가능하다는 것을 의미한다고 본다. 또한, 지역별로 복원하여 평가한 GNSS 가강수량 편의량에 대한 RMSE는 지역별로 서로 상이하였으며, GNSS 상시관측소와 라디오존데 관측소 간의 고도차가 작은 지역에서는 Saastamoinen 모델을 적용한 경우가 다소 편의량이 적은 결과를 나타냈다. 부가적으로 위도가 높은 두 지역인 수원과 강릉에서는 Saastamoinen 모델이 다소 정확한 결과를 보였다. 따라서, 우리나라에서는 관측소의 지리학적 위치에 따라 천정 건조 지연 모델별로 GNSS 가강수량 복원 정확도에 영향을 미칠 가능성이 있다고 판단된다.

본 연구에서는 국내뿐만 아니라 외국사례에서도 가장 많이 적용하는 Saastamoinen 천정 건조 지연 모델이 국내 GNSS 상시관측소의 지형학적 위치별로 GNSS 가강수량 복원과정에서 다른 차이를 가질 수 있음을 확인하였다. 본 연구의 결과로만 국한하면 우리나라에서는 Hopfield 모델과 Black 모델이 Saastamoinen 모델보다 더 유효한 결과를 도출할 수 있다는 예비적 결과도 확인해 볼 수 있다. 70% 이상이 산악지역인 우리나라의 경우 GNSS 상시관측소와 라디오존데 관측소 간의 위치 동기화가 이뤄져 있지 않으므로 불가피하게 고도차가 발생하게 된다. 현재로서 명확하게 판단하기는 어렵지만 천정 건조 지연량을 계산할 때, Saastamoinen 모델을 적용 시 다소 큰 편의량을 유발하는 원인이 두 관측소의 고도차가 될 가능성이 있다. 또는 위도가 다소 낮은 지역에서는 Saastamoinen 모델이 더 낮은 정확성을 보일 가능성도 있다. 그러나 본 연구의 대상 지역이 5개소이며, 가강수량 산출 기간이 1년이라는 기간으로 짧으므로 위의 가능성을 검증하기에는 부족하다고 본다. 우리나라에 적합한 천정 건조 지연 모델을 검증하여 제시하기 위해서는 장기간의 GNSS 가강수량과 라디오존데 가강수량 자료를 기반으로 추가적인 분석이 필요하다. 추후 GNSS 상시관측소와 라디오존데 및 지상 중관 기상관측소의 위치 동기가 결합된 관측 실험이 필요할 것으로 본다.

## 감사의 글

This study was supported by 2016 Research Grant from Kangwon National University (No.20160131). Also, this work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No.NRF-2017R1A2B2012392).

## References

- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T.A., Anthes, R.A., Rocken, C., and Ware, R.H. (1994), GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 33, No. 3, pp. 379-386.
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T.A., Rocken, C., Anthes, R., and Ware, R.H. (1992), GPS meteorology-remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, No. D14, pp. 15787-15801.
- Black, H.D. (1978), An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 83, No. B4, pp. 1825-1828.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E., and Elgered, G. (1985), Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length, *Radio Science*, Vol. 20, No. 6, pp. 1593-1607.
- Emardson, T.R. and Derks, H.J. (2000), On the relation between the wet delay and the integrated precipitable water vapour in the European atmosphere, *Meteorological Applications*, Vol. 7, No. 1, pp. 61-68.
- Guiraud, F.O., Howard, J., and Hogg, D.C. (1979), A dual-channel microwave radiometer for measurement of precipitable water vapor and liquid, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, Vol. 17, No. 4, pp. 129-136.
- Ha, J.H., Park, K.D., Park, P.H., and Park, J.U. (2005), Analysis of error sources in determination of tropospheric slant wet delay using GPS, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 41, No. 3, pp. 337-346. (in Korean with English abstract)
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., and Collins, J.

- (2001), *GPS Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien New York, Wien, Austria.
- Hopfield, H.S. (1971), Tropospheric effect on electromagnetically measured range: prediction from surface weather data, *Radio Science*, Vol. 6, No. 3, pp. 357-367.
- Park, J.G., Ahn, J.S., Jeon, H.S., Kim, D.M, Seong, S.K., and Lee, Y.J. (2012), Performance analysis of tropospheric delay error models using GPS measurement, *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall meeting*, 14-16 November, Jeju, Korea, pp. 654-660. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.S., Won, J.H., Kim, H.I., Kim, K.H., and Park, K.D. (2010), Accuracy analysis of GPS-derived precipitable water vapor according to interpolation methods of meteorological data, *Spatial Information Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 33-41. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.H., Kim, Y.H., and Chang, D.E. (2009), The analysis of changma structure using radiosonde observational data from KEOP-2007: Part I. the assessment of the radiosonde data, *Atmosphere*, Vol. 19, No. 2, pp. 213-226. (in Korean with English abstract)
- Labraga, J.C., Frumento, O., and López, M. (2000), The atmospheric water vapor cycle in South America and the tropospheric circulation, *Journal of Climate*, Vol. 13, No. 11, pp. 1899-1915.
- Lee, H.G. (2018), Impact of tropospheric modeling schemes into accuracy of estimated ellipsoidal heights by GPS baseline processing: experimental analysis and results, *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 4, pp. 245-254. (in Korean with English abstract)
- Lee, Y.C. (2002), A comparison of correction models for the prediction of tropospheric propagation delay of GPS signal, *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 20, No. 3, pp. 283-291. (in Korean with English abstract)
- Niell, A.E., Coster, A.J., Solheim, F.S., Mendes, V.B., Toor, P.C., Langley, R.B., and Upham, C.A. (2001), Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 18, No. 6, pp. 830-850.
- Ruihua, L. and Jie, Y. (2009), Principle, application and development of the ground-based GPS meteorology, *Proceedings of 14th Youth Conference on Communication, Scientific Research*, 24-26 July, Dalian, China, Vol. 1, pp. 784-788.
- Saastamoinen, J. (1973), Contribution to theory of atmospheric refraction, *Bulletin Géodésique*, Vol. 107, pp. 13-34.
- Schüler, T. (2001), *On Ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation*, Ph.D. dissertation, der Bundeswehr München. (Universty FAF Munich), Neubiberg, Germany, 364p.
- Song, D.S. (2009), Improvement of GPS PWV retrieval capability using the reverse sea level corrections of air-pressure, *Journal of Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 27, No. 5, pp. 535-544. (in Korean with English abstract)
- Song, D.S. (2012), Comparison analysis of empirical tropospheric wet delay models, *Proceedings of Annual Conference of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 26-27 April, Gangneung, Korea, pp. 177-182. (in Korean with English abstract)
- Song, D.S. and Grejner-Brzezinska, D.A. (2009), Remote sensing of atmospheric water vapor variation from GPS measurements during a severe weather event, *Earth Planets and Space*, Vol. 61, No. 10, pp. 1117-1125.
- Xu, G., Cui, C., Wan, R., Lai, A., Wan, X., Fu, Z., and Feng, G. (2012), Applicability of methods for estimating GPS precipitable water in the Qinghai-Tibet Plateau, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 89, pp. 76-82.