

GPS 가강수량 결정을 위한 한국형 평균온도식 개발

하지현^{1†}, 박관동¹, 허복행²

¹국민대학교 산림과학대학

²기상청 고층해양기상팀

DEVELOPMENT OF A LOCAL MEAN TEMPERATURE EQUATION FOR GPS-BASED PRECIPITABLE WATER VAPOR OVER THE KOREAN PENINSULA

Jihyun Ha^{1†}, Kwan-Dong Park¹, and Bok-Haeng Heo²

¹College of Forest Science, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²Upper-air and Marine Meteorology Team, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Korea

E-mail: hajh@kookmin.ac.kr

(Received October 10, 2006; Accepted November 3, 2006)

요 약

현재 GPS 가강수량 관련 연구에는 대부분 Bevis 평균온도식을 사용하고 있다. 그러나 Bevis 평균온도식은 북미대륙의 기상관측 자료를 이용하여 개발된 것이므로 기후조건이 다른 우리나라에 적용할 경우 가강수량 산출이 부정확할 수 있다. 이 연구에서는 우리나라 기상관측 자료를 이용하여 한반도 기상조건에 적합한 평균온도식을 개발하고, 이 개발된 평균온도식을 적용하여 가강수량을 산출한 후 Bevis 평균온도식과 기존 국내 연구에서 개발된 평균온도식을 이용한 가강수량과 비교하였다. 그 결과 각 평균온도식에 따른 가강수량은 이 연구에서 개발한 평균온도식을 기준으로 했을 때 지상기온이 높을 경우에 차이가 증가하며, 최대 1 ~ 3mm의 RMS 차이가 발생함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

The Bevis' mean temperature equation (MTE) is generally used in estimating Precipitable Water Vapor (PWV) based on GPS measurements. Because the equation was derived from North American meteorological data, however, it may induce errors in PWV if the equation is applied to Korea which has different climate conditions. In this study, we developed a new MTE using local meteorological data. We compared PWVs from the new equation with those from the Bevis and two other local equations. The PWV differences from the four equations increase as a function of surface temperatures at the observation site, reaching up to 1 ~ 3 mm.

Keywords: mean temperature equation, precipitable water vapor, GPS

[†]corresponding author

1. 서 론

대류층 내에 존재하는 수증기는 다양한 기상현상을 일으키는 주요 원인이다. 따라서 기상예보, 기후연구 등과 기상연구 분야에서 수증기의 분포를 보다 정확하게 예측하기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. GPS(Global Positioning System)를 활용한 기상 연구는 Davis et al.(1985)에 의해 그 개념이 처음으로 정립되었다. GPS 위성 신호는 GPS 수신기에 도달하기 전까지 지구 대기권을 통과하면서 신호 경로가 굴절되어 지연된다. 이온층과 대류층에 의한 지연현상이 대표적이다. 이온층 신호지연의 경우 이온층 내에 존재하는 입자들의 전자기적 성질에 의해 발생하며 대류층 신호지연의 경우 대류층 내에 존재하는 질소 등의 건조기체와 수증기에 의해 발생한다.

GPS를 활용한 정밀측지에는 대부분 이중주파수 수신기를 사용한다. 이중주파수 수신기를 통하여 수집된 GPS 자료는 차분 등의 방법을 통하여 이온층의 지연효과를 대부분 제거할 수 있다. 또한 대류층 건조기체에 의한 신호지연은 지상기상관측을 통하여 정밀한 보정이 가능하다. 일반적으로 0.3hPa 미만의 오차를 가지는 기압계를 사용하면 1mm 정도의 오차로 대류층 건조기체에 의한 지연량을 결정할 수 있다(Bevis et al. 1992). 반면 시공간적인 변화가 큰 대류층 수증기에 의한 지연은 지상기상관측만으로는 보정이 어려워 GPS를 이용한 정밀측지의 가장 큰 오차요인으로 작용한다(박관동 외 2003). 그러나 대류층 수증기에 의한 신호지연을 역으로 분석하면 대류층 내에 존재하는 수증기에 대한 정보를 획득할 수 있으며, 대기 중 단위체적에 존재하는 수증기량을 강우로 환산한 양인 가습수량(PWV, Precipitable Water Vapor)을 결정할 수 있다.

Davis et al.(1985)에 의해 GPS 기상 활용 가능성이 제기된 후, 현재 국내외에서는 다양한 연구를 통해 PWV의 정확도를 향상시키고, 자국의 실정에 최적화된 결과 산출을 위해 노력하고 있다. 미국의 경우 전세계 100여 개 이상의 대학에서 참여하고 있는 SuomiNet을 구축하여 대기운동과 강수특성 연구를 하고 있으며, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)의 GSD(Global System Division)가 주축이 되어 GPS 관측을 통한 일기예보 및 기후감시능력 향상을 도모하고 있다. 유럽은 1996년부터 3년간 국가간 공동연구인 WAVEFRONT(Water Vapor Estimation for Regional Operational Network Trials)를 진행하였으며 1999년부터 WAVEFRONT에 이은 MAGIC(Meteorological Applications of GPS Integrated Column)을 수행 중이다(하지현 외 2005). WAVEFRONT는 스페인, 스웨덴, 스위스 그리고 영국이 참여한 프로젝트로 대기 중 수증기량 측정을 통한 기상학 및 기후학 연구를 진행하였다. MAGIC은 프랑스, 이탈리아, 그리고 스페인이 참여하고 있으며 지중해 연안 주변의 44개 GPS 상시관측소를 활용하여 국가별 지역적 관측망을 구성하였다. MAGIC은 GPS PWV를 수치일기예보 모델에 적용하여 일기예보의 정확성의 향상을 도모하고 국가간 정보공유를 통하여 지중해 연안의 HIRLAM(High Resolution Limited-Area Model)을 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 일본은 1000여 개 이상의 GPS 상시관측소를 보유한 세계 최다 GPS 상시관측소 운영국가로서, 1997년부터 국가적 지원아래 GPS를 이용한 기상학 연구를 활발히 진행하고 있다(하지현 외 2005).

국내에서는 문용진(1998)에 의해 GPS를 이용한 대류권의 수증기량 측정 연구가 진행된 이후, 현재 PWV 정밀도 검증 및 정확도 향상 연구가 진행되고 있다. 조정호 외(2001)은 GPS PWV와 라디오존데(radiosonde) 관측자료의 비교를 통하여 GPS PWV 측정 정밀도 검증에 관한 연구를 수행하였으며, 박관동 외(2003)에 의해 준실시간 PWV 측정 기초 연구가 진행되었다. 또한 하지현 외(2005)에

의해 시선방향 대류층 지연량 계산 및 오차요인 분석 연구가 진행되었다.

현재 GPS PWV 연구에는 일반적으로 Bevis 평균온도식(Bevis et al. 1992)을 사용한다. 그러나 Bevis 평균온도식은 북미대륙의 라디오존데 관측자료와 AWS(Automated Weather Station) 관측자료를 이용하여 만든 것으로 우리나라 기상조건에 적합하지 않기 때문에 한반도 지역에 최적화된 평균온도식 개발이 더욱 절실한 실정이라 할 수 있다. 최근 국내에서도 한반도 지역에 최적화된 PWV 결정하기 위한 지역적 평균온도식 개발의 필요성이 제기되기 시작하였다. 우성호(2003)는 1998년부터 2001년까지 4년간 국내 4개소(광주, 오산, 고산, 포항) 라디오존데 관측자료와 종관기상관측자료를 이용하여 한국형 평균온도식을 개발하였으며, 송동섭과 윤홍식(2004)은 2003년 1년간의 국내 6개소(광주, 백령도, 속초, 오산, 고산, 포항) 라디오존데 관측자료와 AWS 관측자료를 이용하여 평균온도식을 개발하였다. 이 논문에서는 우성호(2003)에 의해 개발된 평균온도식과 송동섭과 윤홍식(2004)에 의해 개발된 평균온도식을 각각 WSH와 SDS로 칭한다.

이 연구에서는 기존 국내 평균온도식 개발 연구에 비해 방대한 양의 기상관측자료를 이용하여 한국의 기상조건에 보다 적합한 한국형 평균온도식을 개발하였다. 연구에 사용된 자료는 국내 6개소(고산, 광주, 속초, 오산, 포항, 흑산도) 고층기상관측소에서 1998년부터 2005년까지 8년간 수집된 라디오존데 관측자료와 AWS 관측자료이다. 그리고 Bevis 평균온도식과 SDS, WSH, 그리고 이 연구를 통하여 개발된 평균온도식을 적용하여 PWV를 산출하여 평균온도식이 PWV 결정에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 지역적 평균온도식 개발 전략

2.1 PWV 산출

대류층 내에서 발생하는 GPS 신호지연 현상은 지연을 일으키는 원인에 따라 건조지연(Hydrostatic Delay 또는 Dry Delay)과 습윤지연(Wet Delay)으로 나눌 수 있다(Davis et al. 1985). 건조지연은 산소, 질소, 산화탄소 등의 정역학적 평행 상태에 있는 건조기체에 의해 발생하는 신호지연 현상이고 습윤지연은 수증기에 의해 발생하는 신호지연 현상을 의미한다. GPS 자료 처리를 통해 산출되는 대류층 지연량은 정밀좌표 결정시 GPS 위성과 수신장비간 시선방향의 신호 경로에 사상함수(mapping function)가 적용되어 수신장비의 천정방향으로 변환된다(Niell 1996). 대류층에서 발생하는 총 지연량은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{trop} &= d_h + d_w \\ \text{TZD} &= m_h(\varepsilon)d_h + m_w(\varepsilon)d_w \\ &= \text{ZHD} + \text{ZWD} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 d_{trop} 은 대류층 총 지연량이며 d_h 는 건조지연, d_w 는 습윤지연을 의미한다. 또한 TZD(Total Zenith Delay)는 천정방향의 대류층 총 지연량, $m_h(\varepsilon)$ 와 $m_w(\varepsilon)$ 은 고도각(ε , elevation angle)에 따른 사상함수, ZHD(Zenith Hydrostatic Delay)는 천정방향 건조지연량, 그리고 ZWD(Zenith Wet Delay)는 천정방향 습윤지연량을 의미한다. ZHD는 크기가 2 ~ 3m로 비교적 큰 편이지만 지상관측지점에서 측정한 기상관측 자료를 이용하면 2 ~ 3mm 수준의 정밀한 결정이 가능하다(Bevis et

al. 1992). 기상관측 자료를 이용한 ZHD 계산방법은 식 (2)와 같다(Elgered et al. 1991).

$$\text{ZHD} = \frac{(2.2779 \pm 0.0024)P_s}{1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028h} \quad (2)$$

여기서, P_s 는 지상관측지점의 기압[hPa], φ 는 지상관측지점의 위도[rad], 그리고 h 는 지상관측지점의 고도[km]를 의미한다.

ZWD는 건조지연의 10% 정도 크기이지만 신호지연 현상의 원인이 되는 수증기의 시공간적인 변화를 예측하기 어렵기 때문에 정확한 결정이 어렵다. 그러므로 다양한 경험적 모델이나 선형적(a priori) 방법을 이용하여 TZD를 산출한 후 식 (2)를 이용하여 산출한 ZHD를 감소해 주는 방법으로 ZWD를 계산한다. 이 연구에서는 경험적 모델만으로는 달성할 수 있는 정밀도에 한계가 있기 때문에 선형적 방법을 사용하였다. 즉, ZHD와 ZWD를 선형적 수치 AHD(a priori Hydrostatic Delay)와 AWD(a priori Wet Delay)로 놓고, 나머지 보정해야 할 부분을 GPS 자료 처리 과정에서 추정하는 방법으로 결정하였다. TZD는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{TZD} = \text{AHD} + \text{AWD} + \text{ZDC} \quad (3)$$

여기서 ZDC(Zenith Delay Correction)는 선형적인 지연량에 대한 보정항이다. AHD는 식 (4)를 이용하여 산출할 수 있으며, AWD는 일반적으로 0.1m를 사용한다(Webb & Zumberge 1993).

$$\text{AHD} = 2.29951e^{-0.000116h} \quad (4)$$

여기서 h 는 지상관측지점의 고도[km]이다.

식 (1)과 (3)을 이용하여 계산된 ZWD는 식 (5)를 이용하여 IWV(Integrated Water Vapor)로 변환할 수 있다(Bevis et al. 1992).

$$\text{IWV} = k \cdot \text{ZWD} \quad (5)$$

여기서, k 는 평균온도식에 의해 결정되는 대기상수로써 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다(Bevis et al. 1992).

$$k = \frac{10^6}{\left(\frac{k_3}{T_m} + k_2'\right) R_\nu} \quad (6)$$

여기서, k_3 는 $(3.776 \pm 0.004) \times 10^5 \text{K}^2/\text{hPa}$, k_2' 는 $(17 \pm 10)\text{K}/\text{hPa}$, R_ν 은 수증기의 이상기체 상수, 그리고 T_m 은 평균온도를 의미한다.

식 (5)를 이용하여 결정된 IWV는 식 (7)을 이용하여 PWV로 변환할 수 있다(Bevis et al. 1992).

$$\text{PWV} = \frac{\text{IWV}}{\rho} \quad (7)$$

여기서 ρ 는 액체상태 물(liquid water)의 밀도이다.

식 (7)을 이용하여 보다 정확한 PWV를 계산하기 위해서는 대기상수 k 의 산출에 사용되는 평균 온도 결정이 매우 중요하다.

2.2 평균온도식 결정 방법

PWV 결정에 필수적인 평균온도는 PWV를 측정하고자 하는 지역의 수증기압과 지상온도를 이용하여 결정한다. 평균온도식을 결정하는 방법은 식 (8)과 같다(Davis et al. 1985).

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T_s} dh}{\int \frac{e}{T_s^2} dh} \quad (8)$$

여기서, e 는 관측지점의 수증기압이며 T_s 는 지상기온이다. T_s 는 AWS 관측자료에서 추출이 가능하며, 수증기압 e 는 라디오존데 관측자료를 이용하여 산출한다. e 를 계산하는 방법은 식 (9)와 같다.

$$e = e_w \cdot U_w \quad (9)$$

여기서 e_w 는 포화수증기압이며, U_w 는 상대습도이다. e_w 는 식 (10)에 나타낸 Magnus's 방정식을 통해 산출할 수 있으며, U_w 는 식 (11)에 나타낸 Clausis-Clapeyron 방정식을 이용하여 계산한다(문용진 1998).

$$\log e_w = \frac{-2937.4}{T} - 4.9283 \log T + 23.5470 \quad (10)$$

$$T - T_d = 4.25 \times 10^{-4} T \cdot T_d (-\log U_w) \quad (11)$$

여기서 T 는 고도별 온도이며, T_d 는 고도에 따른 이슬점온도이다.

식 (9)를 이용하여 결정된 수증기압을 이용하여 평균온도 T_m 과 지상기온 T_s 에 대한 선형회귀를 통해 평균온도식을 산출한다.

3. 한국형 평균온도식 결정

새로운 한국형 평균온도식을 개발하기 위하여 국내에서 관측중인 라디오존데 관측자료와 AWS 관측자료를 이용하였다. 우리나라 라디오존데 관측소는 총 7개소(속초, 오산, 광주, 고산, 포항, 흑산도, 백령도)가 운영 중이며 하루에 두 번(UTC 00시, 12시) 자동관측을 실시하고 있다. 국내 라디오존데 관측자료는 미국 와이오밍 대학의 홈페이지(<http://weather.uwyo.edu/>)를 통해 사용자에게 공개되고 있다. 와이오밍 대학은 전세계에 분포한 라디오존데 관측소에서 생성된 원시 관측자료를 수집한 후 상대습도를 포함한 다양한 기상정보를 계산하여 와이오밍 대학 홈페이지를 통해 제공하고 있다.

이 연구에서는 국내 라디오존데 관측소 중 연속적인 관측이 이루어지지 않은 날이 많은 백령도를 제외한 6개 관측소를 대상으로 와이오밍 대학에서 제공하고 있는 라디오존데 관측자료와 각 라디오존데 관측소와 인접한 위치에 있는 AWS 관측자료를 이용하였다.

연구에 사용된 자료는 1998년부터 2005년까지 총 8년간 관측자료다. 평균온도와 지상기온의 선형회귀결과를 그림 1에 나타내었다. 그림 1의 가로축 T_s 는 지상기온이며 세로축의 T_m 은 평균온도이다. 세로축과 가로축은 절대온도 단위로 나타내었다. 그림 1의 원(o)은 라디오존데 관측자료를 나타낸 것이며, 실선(-)은 선형회귀 결과 산출된 평균온도식을 도식화한 것이다.

그림 1을 보면, 라디오존데 관측자료가 T_s 1K 간격으로 세로줄 모양이 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 연구에 사용된 라디오존데 장비의 기계적인 특성으로, 관측자료의 소수점 아래 관측치들이 주로 .16 혹은 .86으로 기록되기 때문이다. 이와 같은 현상은 Bevis 평균온도식에 사용된 라디오존데

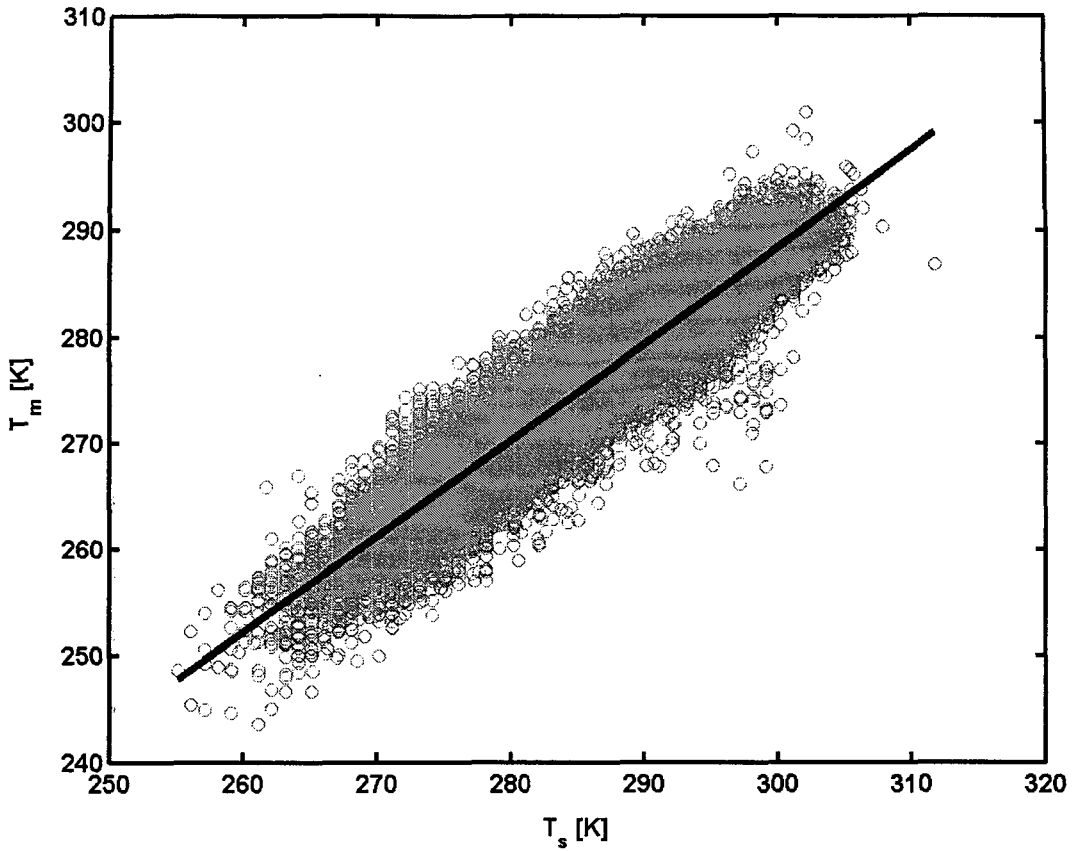


그림 1. 라디오존데 관측자료와 AWS 관측자료를 이용한 평균온도와 지상기온과의 선형회귀 분석.

관측자료에서도 나타난다(Bevis et al. 1992). 그림 1의 선형회귀결과 산출된 새로운 한국형 평균온도식은 식 (12)와 같다.

$$T_m = 0.907T_s + 16.5 \tag{12}$$

이 연구에서는 식 (12)에 나타낸 평균온도식을 HP라고 칭한다. HP는 라디오존데 및 AWS 관측자료의 3σ를 제거한 후 산출하였으며, 상관계수는 0.942이다. 식 (12)의 기울기는 0.907 ± 0.002 이며, 절편은 16.5 ± 0.623 이다. HP와 비교 대상이 되는 Bevis 평균온도식은 식 (13), SDS는 식(14), 그리고 WSH는 식 (15)에 나타내었다.

$$T_m = 0.72T_s + 70.2 \tag{13}$$

$$T_m = 0.94T_s + 16.70 \tag{14}$$

$$T_m = 0.968T_s + 1.056 \tag{15}$$

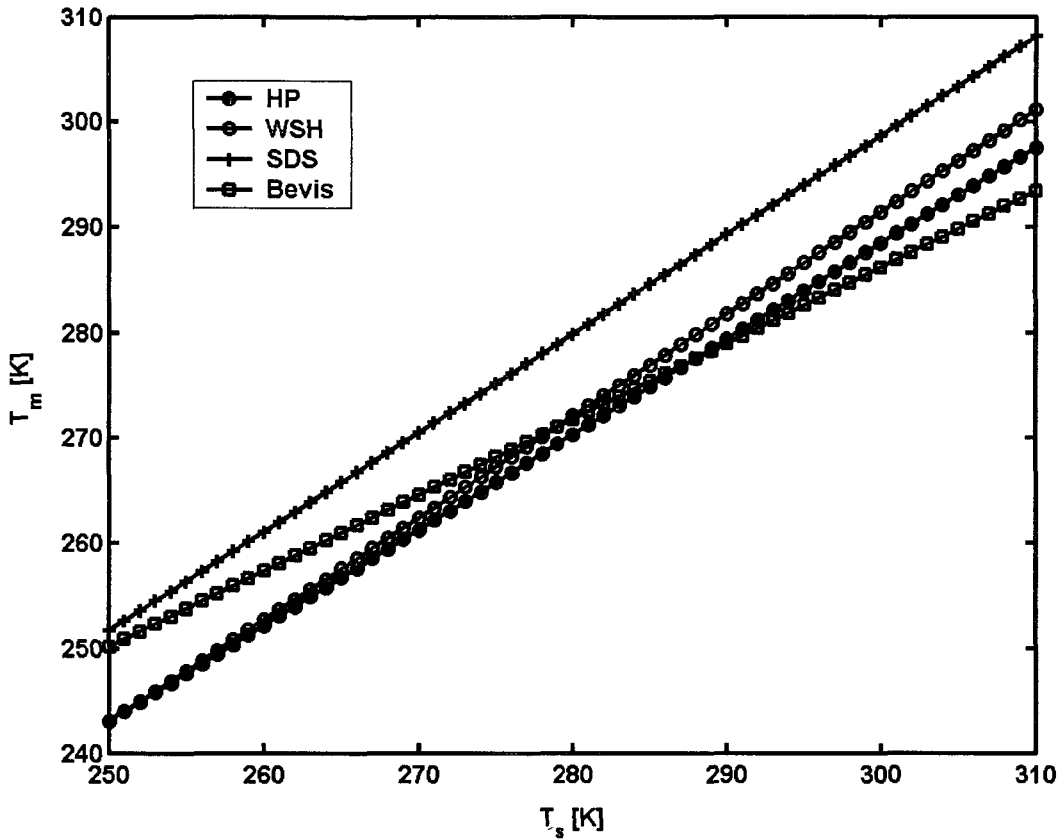


그림 2. 지상기온 250K~310K 범위에서의 평균온도식 비교.

4. 결과

이 연구에서는 HP, WSH, SDS, 그리고 Bevis 평균온도식을 이용하여 PWV를 산출한 후 평균온도식이 PWV 결정에 미치는 영향을 분석하였다. GPS PWV의 정확도를 평가하기 위해서는 정밀기상장비와의 동시관측을 통하여 관측자료를 수집하고, 그 결과를 비교·분석해야 한다. GPS PWV의 결과 비교에 가장 적합한 기상관측장비는 WVR(Water Vapor Radiometer)이다. 국내에서는 1996년 기상청에서 가뭄 해소를 위한 인공강우 연구를 위하여 WVR을 도입하였으며(하지현 외 2005), 현재 대관령 기상대에 설치되어 GPS와 동시관측 시범운영 중에 있다. 그러므로 이 연구에서는 HP를 기준으로 하여 나머지 평균온도식을 비교하고, 그 특성을 분석하여 평균온도식이 PWV 산출에 미치는 영향을 조사하였다.

국내에서 관측 가능한 지상기온 범위를 포함하도록 하여, 250K~310K까지 1K 간격으로 지상기온을 정한 후 4개 평균온도식을 이용하여 평균온도를 산출하였다. 그 결과는 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 가로축은 지상기온이며 세로축은 평균온도식으로부터 계산된 평균온도이다. 세로축과 가로축의 단위는 절대온도[K]이다. 점(●)은 이 연구를 통해 개발된 HP이며, 원(○)은 WSH, 십자(+)는

표 1. HP를 기준으로 산출한 Bevis, WSH, 그리고 SDS의 평균차이와 RMS.

평균온도식	평균차이[K]	RMS[K]
Bevis	1.46	3.60
WSH	1.75	2.06
SDS	9.56	9.57

SDS, 그리고 사각형(□)은 Bevis 평균온도식을 의미한다.

그림 2를 보면, 지상기온에 따른 평균온도의 변화 경향이 평균온도식에 따라 서로 다름을 알 수 있다. HP와 가장 유사한 평균온도 변화를 보이는 WSH는 T_s 270K 이하에서는 HP와 수 K 정도 차이로 거의 일치하는 것으로 나타났으나 T_s 가 증가할수록 두 평균온도식 간 T_m 차이도 증가하며, T_s 310K에서 최대 3.59K 차이가 나타났다. HP와 Bevis 평균온도식은 T_s 288K에서 T_m 0.038K 차이로 교차하는 것으로 나타났으며, T_s 250K에서 최대 7.06K의 차이를 보였다. 반면, SDS는 WSH나 HP와 기울기는 유사하지만 산출된 평균온도에서 비교적 큰 차이가 나타났으며, T_s 310K에서 최대 10.6K, T_s 250K에서 8.56K의 T_m 차이를 보였다. 이 연구에서 개발한 HP를 기준으로 나머지 세 개 평균온도식에 대한 평균차이와 RMS를 산출하여 표 1에 나타내었다.

표 1을 보면 HP를 기준으로 Bevis 평균온도식은 평균차이가 1.46K로 HP와 가장 작은 차이를 나타내었으며, WSH는 1.75K로 Bevis 평균온도식에 비해 평균차이가 크게 나타났다. 반면 RMS를 보면 오히려 WSH가 2.06K로 Bevis 평균온도식의 3.60K에 비해 다소 낮게 나타나 HP와 더욱 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다. SDS는 평균차이 9.56K, RMS 9.57K로 HP와는 유사성이 다소 낮은 것으로 나타났다.

한편, SDS를 제외한 나머지 두 개의 한국형 평균온도식과 Bevis 평균온도식은 각각 277K과 288K에서 교차하며, 교차점을 기준으로 기상기온이 변함에 따라 평균온도의 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 Bevis 평균온도식이 우리나라의 기상 조건에 적합하지 않으며 특히, 여름철과 겨울철의 PWV 산출에 오차요인으로 작용할 수 있음을 의미한다. 또한 동일한 GPS 자료와 기상관측 자료를 이용하더라도 평균온도식의 차이로 인하여 서로 다른 PWV가 산출될 수 있음을 의미한다.

이 연구에서는 평균온도식에 따른 PWV의 차이를 명확하게 비교하기 위하여 2005년 연중 최저기온과 최고기온을 기록한 날의 PWV를 서로 비교하였다. 기상관측 자료는 기상청의 2005년 서울지역의 기후 통계자료를 이용하였다. 2005년 연중최저기온을 기록한 날은 1월 30일로 지상기온 -11.0°C , 지상기압 1012.0hPa이며, 연중최고기온을 기록한 날은 7월 31일로 지상기온 34.2°C , 지상기압 996.4hPa이다. GPS 자료는 한국천문연구원의 SKMA 상시관측소(위도 37.494° , 경도 126.918° , 고도 62.701m) 자료를 이용하였으며, GIPSY-OASIS II를 이용하여 자료 처리 하였다. GIPSY-OASIS II는 JPL(Jet Propulsion Laboratory)에서 개발한 GPS 고정밀 자료 처리 프로그램이다(Webb & Zumberge 1993). 2005년 1월 30일과 7월 31일의 SKMA 상시관측소의 PWV를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 PWV는 10분 간격으로 추정된 결과이다. 그림 3a에는 1월 30일의 PWV를 나타내었으며, 그림 3b에는 7월 31일의 PWV를 나타내었다. 그림 3의 가로축은 시간이며 세로축은 PWV를 cm 단위로 나타낸 것이다. 그림 3의 실선(-)은 HP, 원(o)은 WSH, 십자(+)는 SDS, 그리고 사각형(□)은

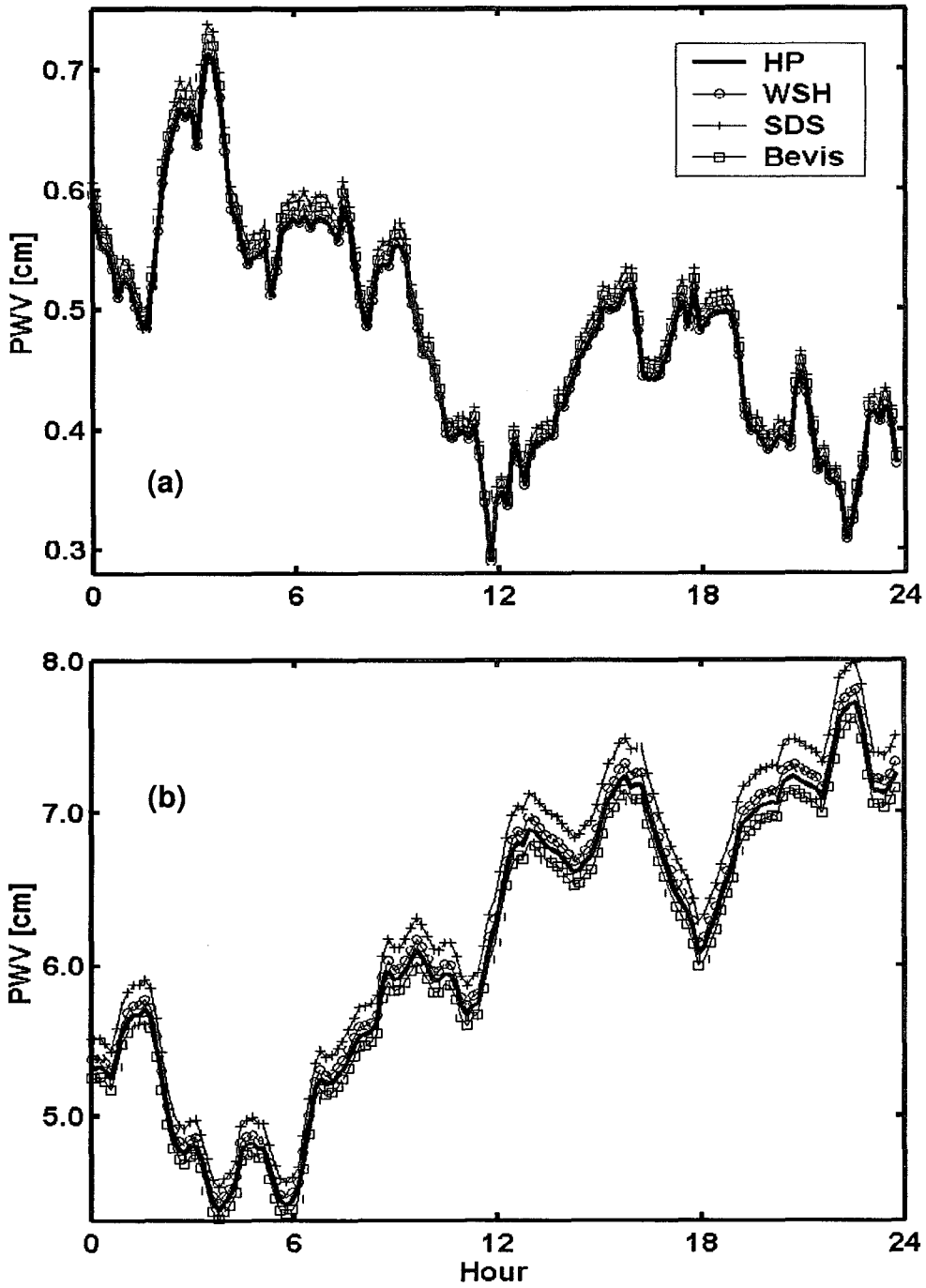


그림 3. SKMA 상시관측소의 PWV. (a)는 2005년 1월 30일의 PWV이며 (b)는 7월31일의 PWV임.

표 2. 2005년 1월 30일의 평균온도식별 PWV 차이와 RMS.

평균온도식	최소차이[mm]	최대차이[mm]	평균차이[mm]	RMS[mm]
Bevis	0.1	0.2	0.1	0.1
WSH	0.0	0.1	0.0	0.0
SDS	0.1	0.3	0.2	0.2

표 3. 2005년 7월 31일의 평균온도식별 PWV 차이와 RMS.

평균온도식	최소차이[mm]	최대차이[mm]	평균차이[mm]	RMS[mm]
Bevis	0.6	1.0	-0.8	0.8
WSH	0.5	0.9	0.7	0.7
SDS	1.6	2.7	2.2	2.2

Bevis 평균온도식을 적용하여 산출한 PWV를 의미한다.

그림 3을 살펴보면, 하룻동안 관측되는 PWV의 변화폭은 지상기온이 낮은 그림 3a에서는 0.5cm 정도임에 비해, 지상기온이 높은 그림 3b에서는 4cm 정도로 비교적 변화폭이 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 한국의 기상조건에 따른 전형적인 현상이다. 한국의 겨울은 한랭건조한 특성을 지닌 시베리아 기단의 영향을 받으며 여름에는 북태평양 기단의 영향을 받아 고온다습한 대기상태가 나타나기 때문이다. 그림 3a와 그림 3b를 보면, 평균온도식에 따라 산출된 PWV의 결과 값이 서로 다르게 나타나, 동일한 자료를 이용하여 PWV를 결정하여도 PWV 결정에 적용되는 평균온도식에 의해 결과가 달라질 수 있음을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 세 개 평균온도식이 지상기온 상승에 따라 평균온도의 차이가 증가했던 바와 같이, 산출된 PWV가 연중최저기온의 경우인 그림 3a보다 그림 3b에서 더 큰 차이를 보였다.

기온이 270K 이하인 경우 평균온도의 차이가 크지 않았던 HP와 WSH는 연중최저기온의 경우를 나타낸 그림 3a에서 PWV가 거의 동일하게 나타났으며, 지상 온도가 높은 그림 3b에서는 PWV 차이가 증가했음을 알 수 있었다. 반면 288K을 기점으로 평균온도의 차이가 증가했던 Bevis 평균온도식의 경우도 지상 기온이 낮을 때 보다 높을 때 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 나머지 평균온도식에 비해 유사성이 다소 낮았던 SDS의 경우 산출된 PWV도 가장 큰 차이를 보였다. HP를 적용하여 산출된 PWV를 기준으로 나머지 평균온도식의 차이와 RMS를 계산하였다. 그 결과를 표 2와 표 3에 나타내었다. 표 2는 2005년 1월 30일의 경우이며, 표 3은 7월 31일의 경우이다.

표 2와 표 3의 최소차이, 최대차이, 그리고 평균차이를 살펴보면, 지상기온이 낮은 1월 30일에는 평균온도식에 따른 PWV 차이의 크기가 다소 작은 편이지만, 지상기온이 높은 7월 31일의 결과를 보면 평균온도식에 따른 PWV의 차이가 증가하여 최대 1~3mm 정도의 차이가 발생함을 알 수 있다. RMS도 지상기온이 낮을 때보다 높을 때에 HP를 적용한 PWV와 나머지 세 개 평균온도식의 결과의 정확도가 낮아지는 것으로 나타났다. WSH는 나머지 평균온도식에 비해, 지상기온에 상관없이 HP를 적용한 PWV와 최소, 최대, 평균차이가 가장 작게 나타났다. Bevis 평균온도식을 적용한 경우에는 WSH를 적용한 경우보다 HP와의 차이가 다소 크게 나타났다.

한편 표 2와 표 3의 평균차이를 살펴보면 WSH와 SDS는 각각 0.0mm와 0.7mm, 그리고 0.2mm와

2.2mm로 나타났으며, Bevis 평균온도식을 적용한 경우는 지상기온에 따라 0.1mm와 -0.8mm로 나타났다. 이러한 결과는 WSH와 SDS가 HP 보다 다소 높은 PWV를 산출하는 경향이 있으며, Bevis 평균온도식은 지상온도가 낮을 때는 HP에 비해 다소 높은 PWV가 산출되고 지상온도가 높을 때는 다소 낮은 PWV가 산출되는 경향이 있음을 의미한다. 이는 앞서 그림 2에서 살펴본 평균온도식에 따른 지상온도와 평균온도의 변화 경향과 일맥상통하는 결과이다.

5. 결론

이 연구에서는 1998년부터 2005년까지 8년간 수집된 국내 6개소 라디오존데 관측자료와 AWS 관측자료를 이용하여 한국형 평균온도식을 개발하였다. 이 연구를 통하여 개발된 HP와 Bevis 평균온도식, 국내 평균온도식인 WSH와 SDS를 비교·분석하여 PWV 결정에 평균온도식이 미치는 영향을 조사하였다. HP를 기준으로 했을 때 나머지 두 개의 한국형 평균온도식은 지상기온이 상승함에 따라 평균온도의 차이가 증가하는 것으로 나타났으며, Bevis 평균온도식은 288K을 기점으로 온도가 증감함에 따라 산출된 평균온도의 차이가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 PWV 산출에도 영향을 미쳤으며, 그 결과 최대 수 mm의 PWV 차이를 확인할 수 있었다. 또한 HP 평균온도식에 비해 나머지 두 개의 한국형 평균온도식을 사용할 경우 비교적 높은 PWV가 산출되는 경향을 발견할 수 있었다. 뿐만 아니라 Bevis 평균온도식은 지상기온이 높고 대기중의 수증기량이 증가하는 우리나라 여름에 PWV 산출의 중요한 오차요인으로 작용할 수 있음을 알 수 있었다. 향후 한반도 상공의 GPS PWV 연구 분야에 이 연구에서 개발된 평균온도식을 이용할 경우 PWV 결정 정확도 향상에 기여할 것으로 기대된다. 또한 이 연구에서 개발된 평균온도식의 정확성을 평가하기 위하여 타 정밀대기관측장비와의 공동관측과 비교·분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글: 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3105)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 문용진 1998, 석사학위논문, 연세대학교
 박관동, 하지현, 조정호, 박필호 2003, 제 10차 GNSS Workshop 발표논문집 (서울: GNSS 기술협회의), p.279
 송동섭, 윤홍식 2004, 한국측량학회지, 22, 323
 우성호 2003, 석사학위논문, 서울대학교
 조정호, 박필호, 박종욱, 임형철, 김상조, 조하만, 김명수, 서애숙 2001, 한국기상학회지, 37, 557
 하지현, 박관동, 박필호, 박종욱 2005, 한국기상학회지, 41, 337
 Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. 1992, JGR, 97, 11787
 Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E., & Elgered, G. 1985, Radio Science, 20, 1593
 Elgered, G., Davis, J. L., Herring, T. A., & Shapiro, I. I. 1991, JGR, 96, 6541
 Niell, A. E. 1996, JGR, 101, 3227

Webb, F. H. & Zumberge, J. F. 1993, An Introduction to the GIPSY/OASIS-II (CA: JPL Publ),
D-11088