

GPS 가강수량 결정을 위한 한국형 평균온도식 비교

하지현[†], 박관동

인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과

Comparison of Local Mean Temperature Equations for GPS-based Precipitable Water Vapor Determination

Jihyun Ha[†] and Kwan-Dong Park

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

E-mail: hajh@inhaian.net

(Received October 10, 2008; Accepted October 20, 2008)

요 약

평균온도식은 GPS 기상정보 산출에 핵심요소로서, GPS 기반 가강수량의 정확도 향상을 위해서는 지역형 평균온도식을 사용해야 한다. 이 연구에서는 Ha & Park(2008)에서 제안된 4가지 한국형 평균온도식인 HP , HP_M , HP_{t_Y} , 그리고 HP_{t_M} 을 이용하여 각 모델이 GPS 가강수량 결정에 미치는 영향을 분석하였다. 정확도 검증에 위해 속초기상대의 라디오존데에서 관측된 가강수량과 비교하였다. 그 결과 GPS와 라디오존데의 가강수량은 4개 한국형 평균온도식 모두 유사한 경향을 보였으며, 대략 3mm 수준의 편향과 3.6mm 수준의 편향 제거 RMS가 산출되었다. 특히 지상기온 관측자료 없이 사용 가능한 HP_{t_Y} 과 HP_{t_M} 을 이용하여도 HP 나 HP_M 와 동일한 수준의 정확한 가강수량 산출이 가능하였다. 한편, 라디오존데 관측치에 존재하는 건조편향을 분석하기 위하여 속초기상대 라디오존데의 장비특성 및 관측시기에 따른 분석을 수행하였다. 그 결과 라디오존데 장비가 RS80-15L에서 GRS DFM-06으로 교체된 후 건조편향이 낮(KST 09시)과 밤(KST 21시)에 각각 18.2%와 16.1% 감소한 것으로 나타났다.

Abstract

The mean temperature equation is a key factor in calculating GPS meteorological information. A local mean temperature equation should be used to improve accuracy of GPS PWV (Precipitable Water Vapor). In this paper, four local mean temperature equations, HP , HP_M , HP_{t_Y} , and HP_{t_M} from Ha & Park (2008) were used to analyze the effects of local models in determining GPS PWV. Four different sets of GPS PWVs were compared with radiosonde PWV to validate the accuracies of local models. GPS PWVs of four local models have similar trends compared against radiosonde PWV. The bias and RMS error were the same level: the bias is ~ 3 mm and the RMS is ~ 3.6 mm after the bias was removed. Especially, with HP_{t_Y} and HP_{t_M} models one can obtain accurate PWVs even without surface temperature measurements. And we investigated dry bias of radiosonde measurements depending on sensor types and observation time at Sokcho weather station. After the radiosonde sensor equipment

[†]corresponding author

was changed from RS80-15L to GRS DFM-06, dry bias of radiosonde PWV decreased about 18.2 % during daytime (KST 09:00), and 16.1 % during nighttime (KST 21:00).

Keywords: GPS, local mean temperature equation, precipitable water vapor, radiosonde, dry bias

1. 서 론

GPS 기상학(GPS Meteorology)은 GPS 측위 오차요인 중 하나인 대류층 신호 지연량을 역으로 분석하여 다양한 기상현상에 대한 정보를 획득하는 것으로서, 수치일기예보(Numerical Weather Prediction)에 자료동화 되어 수치모델의 성능개선에 활용될 수 있다. GPS를 이용한 기상응용 기술은 전세계적으로 실용화 가능성이 입증되어 미국, 일본, 유럽 등에서 이미 기상현업에 활용하고 있으며, 자국의 기상조건에 최적화된 지역 모델을 정립하기 위한 연구를 수행하고 있다(하지현 외 2006).

GPS 기상학에서 사용되는 지역 모델로는 굴절상수(refractivity constants)와 평균온도식(Mean Temperature Equation)이 있다. 이 중 평균온도식은 GPS 기상정보 산출에 있어 핵심요소로서(Wang et al. 2005), 기상관측장비인 라디오존데(radiosonde)와 AWS(Automatic Weather Station)의 관측 자료를 기반으로 한다. Bevis et al.(1992)은 위도 27 ~ 65°N, 고도 0 ~ 1.6km 범위에 위치한 미국 13개소 라디오존데 관측자료를 이용하여 Bevis 모델을 개발하였으며, 현재 GPS 기상학에서 가장 널리 이용되고 있다. 그러나 평균온도식은 기상 관측이 실시된 지역의 기후조건이 반영된 기상관측자료를 기반으로 결정되기 때문에 기후조건이 상이한 지역에 적용할 경우 오차요인으로 작용할 수 있다. Emardson & Derks(2000)은 유럽의 12만개 라디오존데 관측자료를 이용하여 유럽의 기후조건에 부합하는 지역 모델을 개발하였으며, Liou et al.(2000)은 대만의 기상관측자료를 바탕으로 지역 모델과 월별 지역 모델을 개발하였다. 또한 Wang et al.(2005)은 전세계 라디오존데 관측자료와 수치 일기예보 모델을 이용하여 전구 모델을 개발하였다.

한반도 지역에 최적화된 한국형 평균온도식 개발 연구는 우성호(2003), 송동섭과 윤홍식(2004), 하지현 외(2006), 그리고 Ha & Park(2008)에 의해 진행되었다. 우성호(2003)는 흑산도 관측소를 제외한 6개 라디오존데 관측소(광주, 백령도, 속초, 오산, 제주, 포항)에서 1998년부터 2001년까지 수집된 자료를 이용하였으며, 송동섭과 윤홍식(2004) 역시 흑산도 관측소를 제외한 6개 관측소에 대하여 2003년 자료를 이용하여 평균온도식을 개발하였다. 하지현 외(2006)는 백령도를 제외한 6개 관측소에 대하여 1998년부터 2005년까지 8년간 자료를 이용하여 평균온도식을 개발하였다. 이 논문에서는 하지현 외(2006)에서 개발한 평균온도식을 HP06으로 칭한다. Ha & Park(2008)은 HP06을 갱신한 HP 모델과 월별 모델인 HP_M , 그리고 관측시간에 대한 모델로 HP_{t_Y} 과 HP_{t_M} 을 개발하였다. HP_{t_Y} 과 HP_{t_M} 의 모델 개발 방법을 포함한 HP 및 HP_M 평균온도식은 모두 특허출원 되어 있다(특허출원 10-2008-0084318).

이 논문에서는 Ha & Park(2008)에서 제시된 네 가지 평균온도식(HP 계열 평균온도식이라 칭함)를 소개하고, 각 모델을 이용한 GPS 가강수량(PWV, Precipitable Water Vapor)과 라디오존데 가강수량을 비교하였다. 또한 속초기상대의 라디오존데 가강수량 관측치에 존재하는 건조편향(dry bias)에 대해 분석하였다.

표 1. HP_M 모델의 평균온도와 지상기온의 월별 상관관계 분석 결과($T_m = aT_s + b$).

	a	b	상관계수	RMS [K]
Jan	0.81	43.01	0.83	2.81
Feb	0.87	27.97	0.79	2.97
Mar	0.90	19.12	0.75	3.30
Apr	0.81	45.13	0.65	3.54
May	0.52	128.51	0.50	2.91
Jun	0.59	110.89	0.52	2.60
Jul	0.63	99.58	0.62	2.32
Aug	0.67	88.31	0.64	2.10
Sep	0.71	75.22	0.62	2.54
Oct	0.68	83.82	0.64	3.15
Nov	0.81	45.21	0.77	3.23
Dec	0.79	50.11	0.79	3.12

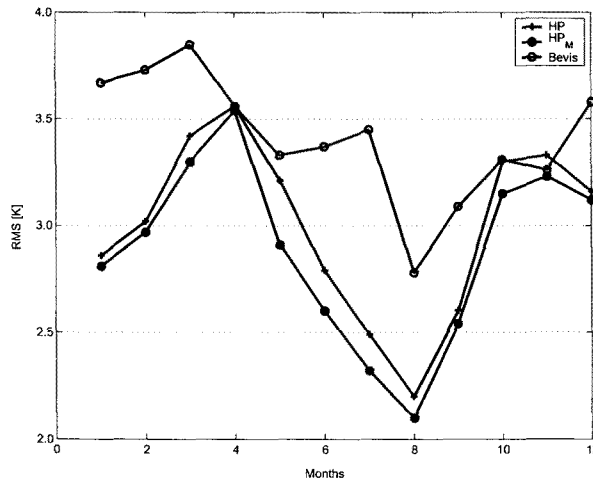


그림 1. HP , HP_M , 그리고 Bevis 모델의 월별 RMS 비교.

2. HP 계열 평균온도식

GPS 신호는 지구의 대류층을 통과하면서 지연된다. 대류층에서 발생하는 신호지연은 대기를 구성하고 있는 구성물질에 따라 건조지연과 습윤지연으로 나눌 수 있다(Davis et al. 1985). 건조지연은 질소, 산소, 그리고 이산화탄소 등에 의해 발생하며, 습윤지연은 수증기에 의해 발생한다. GPS 가 강수량은 식 (1)과 같이 천정방향 습윤지연량인 ZWD(Zenith Wet Delay)을 이용하여 산출할 수 있다(Bevis et al. 1994).

$$PWV = \Pi \cdot ZWD \tag{1}$$

여기서 Π 은 굴절 상수와 평균온도식에 의해 결정되는 항으로서(Davis et al. 1985, Askne & Nordius 1987, Bevis et al. 1994), 이 연구에서는 Davis et al.(1985)에서 제시한 굴절상수와 HP 계열 평균온도식을 사용하였다.

평균온도식은 라디오존데에서 관측된 대기 연직분포자료와 AWS의 지상기온 및 기압 관측자료를 이용하여 결정한다. 라디오존데는 기구(balloon)에 기상센서를 장착하여 대기 중에 띄워 관측소 상공의 연직대기상태를 관측하는 장비로써, 바람장(wind field)에 의해 해당 관측소 연직 상공이 아닌, 수평방향으로 수 km에서 수십 km까지 벗어난 지역의 정보를 수집할 수 있다. 따라서 해당 관측소의 AWS 관측지점과의 수평방향 이격이 증가할 경우 평균온도식 결정에 오차요인으로 작용할 수 있다. 그러므로 일정수준의 고도와 압력을 한계치를 정하여 라디오존데 관측치를 선별하여야 한다. 현재 한계치 수준은 명확하게 정의되어 있지 않으며 관측소 환경에 따라 유동적으로 적용되고 있다. 우성호(2003)는 압력 250hPa를 한계치로 정하였으며, Mendes et al.(2000)은 압력 300hPa과 고도 10km를 한계치로 정하였다. Ha & Park(2008)은 HP 계열 평균온도식 개발을 위하여 Mendes et al.(2000)에서 사용된 한계치를 적용하였으며, HP06 모델 개발 시 사용되지 않았던 백령도 관측자료를 추가하였다. HP06을 갱신한 형태인 HP 모델은 식 (2)와 같다(Ha & Park 2008).

$$T_m = 0.884T_s + 23.4 \quad (2)$$

여기서 T_m 은 평균온도이며 T_s 는 지상기온이다. HP는 HP06 모델과 동일한 수준의 상관계수(0.94)가 나타났으며, RMS 3.08K로 나타났다. HP와 HP06의 평균온도 차이는 지상기온(250K~320K 범위)이 증가함에 따라 선형 감소하며, 최대 1.4K, 최소 0.1K의 차이를 보였다. 또한 8년간 관측데이터를 월별로 분류하여 월별 모델 HP_M 을 결정하였다(표 1). 표 1의 a는 기울기이며, b는 절편으로 $T_m = aT_s + b$ 의 형식을 따른다.

Bevis 모델과 HP, 그리고 HP_M 모델의 월별 평균온도 RMS를 그림 1에 나타내었다. 그림 1을 보면 월별 모델인 HP_M 의 RMS가 가장 낮으며, Bevis 모델의 경우 한국형 모델 보다 정확도가 비교적 낮게 나타났다. 즉, 북미대륙 기상관측자료 기반의 Bevis 모델 보다는 한국의 기후조건이 반영된 지역 모델이 한반도 상공의 평균온도 산출에 보다 적합한 것으로 나타났다.

한편, 지상기온은 매년 비슷한 경향의 분포로 관측되므로, Ha & Park(2008)은 지상기온 관측 없이도 사용 가능한, 관측시간에 대한 함수로서 새로운 형태의 평균온도식을 제안하였다(식 (3, 4)).

$$T_m = 0.176t_Y - 76.486 - 11.2315 \cos(6.2821t_Y + 32.5527) \quad (3)$$

$$T_m = 0.014968t_M^4 - 0.48131t_M^3 + 4.5796t_M^2 - 11.82t_M + 273.62 \quad (4)$$

식 (3)은 HPt_Y 모델로서, 8년간의 기상관측자료 시계열을 이용하여 개발한 것이다. 식 (3)의 t_Y 는 년도로 환산된 관측시간으로, 예를 들어, 2008년 10월 11일 0시 정각의 t_Y 는 약 2008.8634이다. 식 (4)는 HPt_M 모델로서 기상관측자료를 년도와 상관없이 월별로 오버레이(overlay) 시킨 후 월로 환산된 관측시간(t_M)에 대한 4차 다항식으로 나타낸 것이다. 즉, 2008년 10월 11일 0시 정각의 t_M 은 약 10.3548이다. HPt_Y 모델의 RMS는 4.21K, HPt_M 모델의 RMS는 4.07K으로 지상기온에 대한 평균온도식인 HP나 HP_M 모델에 비해 정확도가 1K 가량 낮은 것으로 나타났다(Ha & Park 2008).

GPS 기상정보를 산출하기 위해서는 GPS 관측자료와 주변 기상장비를 통해 관측된 지상기온 및 압력 관측치가 필요하다. 그러나 HPt_Y 나 HPt_M 을 이용할 경우 별도의 지상기온 관측치 없이 압력 자료만 이용하여 GPS 가강수량을 산출할 수 있다. 이 연구에서는 HP 계열 평균온도식을 기반으로 GPS 가강수량 산출한 후 라디오존데 관측자료와 비교하여 각 모델의 정확도를 평가하였다.



그림 2. (좌)속초기상대의 GPS 상시관측소 및 (우)라디오존데 GRS DFM-06의 외형(상단)과 내부(하단) 모습으로 원으로 표시한 부분은 온도 및 습도 센서임.

3. 가강수량 비교

속초기상대는 하루에 2회, 즉 00시와 12시(UTC 기준)에 라디오존데 관측을 실시하고 있으며, 한국천문연구원에서 SKCH GPS 상시관측소를 설치·운영하고 있다. 속초기상대의 라디오존데는 2000년 이전까지는 진양공업의 1524-511 모델을 사용하였으며, 2000년부터 Vaisala RS80-15L을 도입하였다. 이후 2007년 5월부터 GPSsonde인 독일 GRAW사의 GRS DFM-06으로 교체하여 현재까지 사용되고 있다. 속초기상대에 설치된 SKCH GPS 상시관측소는 2006년 8월 18일부터 Paroscientific사의 MET-3A 장비가 동시 운영되고 있다. 이 연구에서는 2006년 8월 18일부터 2008년 8월 17일까지, 2년간 속초기상대에서 관측된 GPS 데이터와 라디오존데 관측데이터를 이용하여 가강수량을 산출하였다. 그림 2에 속초기상대의 GPS 상시관측소와 라디오존데 GRS DFM-06을 나타내었다.

GPS 데이터 처리는 JPL에서 개발한 GIPSY-OASIS II(Webb & Zumberge 1993)을 이용하였다. 30초 간격으로 기록된 24시간 GPS 관측데이터와 JPL(Jet Propulsion Laboratory) 정밀궤도력을 사용하였으며, MET-3A에서 관측된 기상데이터를 이용하여 1시간 간격으로 가강수량 평균치를 산출하였다. GPS 데이터 처리시 임계고도각(elevation cutoff angle)은 10° 로 하였으며, 주요 오차요인인 안테나 위상중심 변동량(phase center variations), 해양조석하중에 의한 지각변위(ocean tidal loading displacements), 그리고 방위각 방향으로의 수증기 분포 변화량(azimuthal gradients)을 고려하였다. 각 오차요인이 GPS 습윤지연에 미치는 영향은 하지현 외(2005)에 자세히 기술되어 있다. 라디오존데와 GPS 가강수량 산출 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 가강수량은 UTC 기준 00시와 12시의 결과값이다. 그림 3의 가로축은 시간이며, 세로축은 가강수량을 mm 단위로 나타낸 것이다.

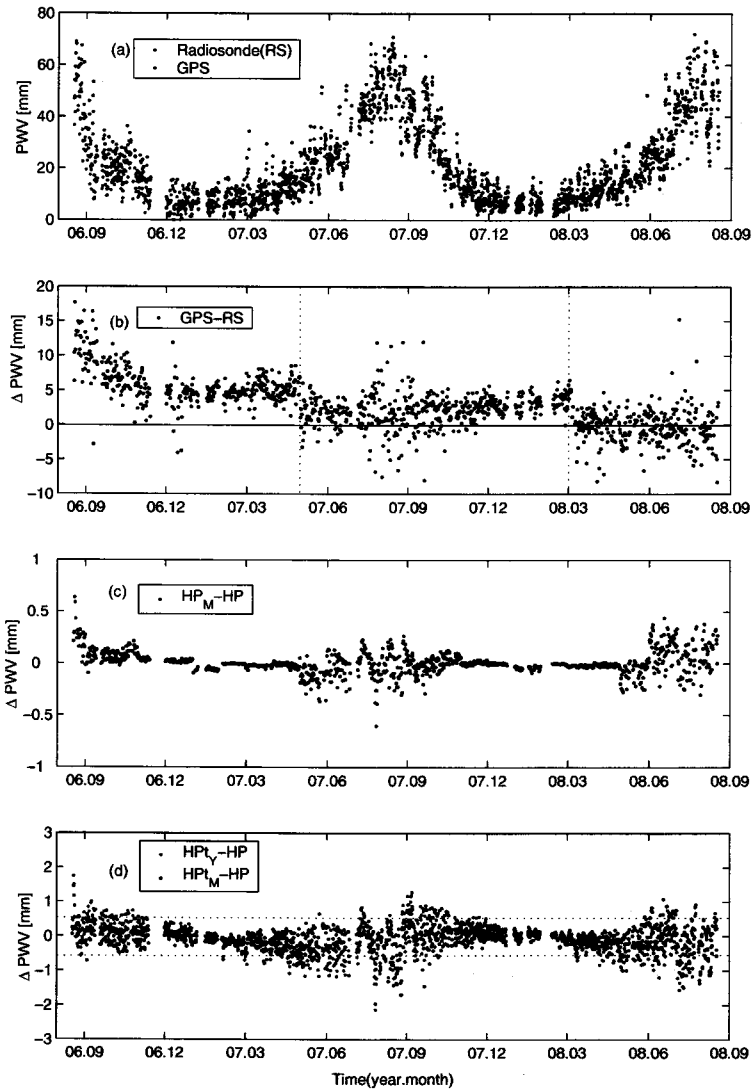


그림 3. (a) 속초기상대의 라디오존데 가강수량 및 HP 모델을 적용한 GPS 가강수량, (b) HP 모델을 적용한 GPS 가강수량과 라디오존데 가강수량 차이, (c) HP_M 과 HP 를 적용한 가강수량 차이, 그리고 (d) HP 를 적용한 가강수량과 HP_{tY} 및 HP_{tM} 을 적용한 가강수량 차이.

그림 3a는 HP 모델을 적용한 GPS 가강수량과 라디오존데 가강수량을 나타낸 것이며, 그림 3b는 두 장비간 가강수량 차이를 나타낸 것이다. 그림 3a를 보면 라디오존데 가강수량(빨간 점)과 GPS 가강수량(파란 점)은 동일한 경향을 보이며, 여름에 강우가 집중되는 한국의 전형적인 강수 경향과 일치하는 것을 볼 수 있다. 그러나 GPS에 비해 라디오존데에서 다소 작은 가강수량이 관측되는 것으로 나타났다. 그림 3b를 보면, GPS 가강수량에서 라디오존데 가강수량을 감산한 ΔPWV 가 2008년 3월 이전까지 대부분이 양의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 라디오존데의 습도 센서의

표 2. 라디오존데 가강수량과 HP 계열 평균온도식을 적용한 GPS 가강수량 비교.

	RMS [mm]				편향 [mm]				편향 제거 후 RMS [mm]			
	A	B	C	평균	A	B	C	평균	A	B	C	평균
HP	6.7	3.4	3.0	4.7	6.0	2.5	-0.1	3.0	3.1	2.3	3.0	3.6
HP _M	6.8	3.5	3.0	4.7	6.1	2.6	-0.1	3.0	3.1	2.3	3.0	3.6
HP _{t_Y}	6.9	3.5	3.0	4.7	6.1	2.6	-0.4	2.9	3.2	2.3	2.9	3.7
HP _{t_M}	6.7	3.4	3.0	4.6	6.0	2.5	-0.1	2.9	3.1	2.3	3.0	3.6

표 3. 라디오존데 가강수량과 한국형 모델을 적용한 GPS 가강수량의 월별 비교.

	편향 [mm]				편향 제거 후 RMS [mm]			
	HP	HP _M	HP _{t_Y}	HP _{t_M}	HP	HP _M	HP _{t_Y}	HP _{t_M}
Jan	3.8	3.7	3.8	3.7	1.3	1.3	1.3	1.3
Feb	4.2	4.2	4.1	4.1	1.6	1.6	1.6	1.6
Mar	3.1	3.1	2.9	3.0	3.2	3.2	3.2	3.2
Apr	2.5	2.5	2.1	2.4	3.3	3.3	3.3	3.3
May	0.8	0.7	0.3	0.8	2.6	2.6	2.6	2.7
Jun	0.6	0.7	0.2	0.7	2.4	2.4	2.4	2.4
Jul	1.7	1.7	1.3	1.7	4.2	4.2	4.1	4.1
Aug	3.3	3.4	3.3	3.1	5.7	5.8	5.9	5.8
Sep	5.4	5.5	5.9	5.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Oct	4.3	4.4	4.7	4.2	2.9	2.9	2.9	2.9
Nov	3.1	3.2	3.4	3.1	1.9	1.9	1.9	1.8
Dec	3.6	3.6	3.8	3.6	2.1	2.1	2.1	2.1

건조편향의 영향에 기인한 것으로, 다음 장에서 자세히 기술하였다.

한편, 그림 3b를 보면 2007년 5월 1일과 2008년 3월 1일에 Δ PWV의 점프현상을 볼 수 있다. 이 중 2007년 5월 1일은 속초기상대의 라디오존데 장비교체가 있었던 시점이며, 2008년 3월 1일은 하드웨어적 변경이 있었던 시기로 추측된다. 두 장비의 가강수량 편향과 RMS 분석결과를 표 2에 나타내었다. 표 2는 점프현상이 발생한 시점을 기준으로 다음과 같이 세 구간으로 나누어 나타내었다. 구간 A는 2006년 8월 18일부터 2007년 4월 31일까지이며, 구간 B는 2007년 5월 1일부터 2008년 2월 29일까지, 그리고 구간 C는 2008년 3월 1일부터 8월 17일까지를 의미한다. 또한 평균은 2006년부터 2008년까지 2년간 전체 평균을 의미한다.

표 2의 HP 모델에 대한 결과를 보면 2년간의 평균 편향과 RMS가 각각 3.0mm, 4.7mm로 산출되었으나, 장비교체 후(구간 B) RMS와 편향이 50% 가량 감소한 것을 알 수 있다. 즉, 2007년 5월 1일을 전후로 하여 편향은 3.5mm, RMS는 3.3mm, 그리고 편향을 제거한 후 산출한 RMS는 0.8mm가 감소하여 장비교체 후 정확도가 증가한 것으로 나타났다. 또한 하드웨어적 변경이 추측되는 구간 C는 구간 A에 비해 RMS 3.7mm, 구간 B에 비해 RMS 0.4mm가 감소하였으며, 특히 편향이 0.1mm 수준으로 거의 사라진 것을 확인할 수 있다. 그러나 편향 제거 후 산출한 RMS는 구간 A와 비슷한 수준인 것으로 나타나 구간 B와 비교했을 때 계통 오차(systematic error)는 감소하였지만 확률 오차(random error)는 증가한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 HP 모델뿐만 아니라 나머지 HP 계열 평균온도식에서도 모두 동일한 수준으로 나타나 모델의 특성이 아닌 하드웨어 교체 및 변동에 따른 특성임을 알 수 있다.

각 모델의 가강수량 산출 정확도를 분석하기 위하여 그림 3c와 그림 3d에 HP 모델을 기준으로 비교한 나머지 세 개의 HP 계열 평균온도식 결과를 나타내었다. 그림 3c를 보면 HP와 HP_M 모델의 ΔPWV가 5월부터 10월까지 1mm 이하(±0.5mm)에서 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 두 모델의 기울기가 11월부터 4월까지의 유사하지만 5월부터 10월까지는 다소 차이가 있기 때문이다. 그러나 표 3의 월별 가강수량 비교 결과를 살펴보면, HP 계열 평균온도식이 월별로 거의 유사한 편향과 RMS를 나타내어 1mm 이하의 변동이 가강수량 정확도에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

그림 3d는 관측시간에 대한 함수인 HP_{t_Y}(빨간 점) 및 HP_{t_M}(파란 점)의 결과로 HP_M과 비슷한 수준인, 대략 ±0.5mm 범위에서 HP 가강수량과 차이가 있는 것으로 나타났다. 그러나 그림 3c의 경우와 마찬가지로, 표 3의 편향과 RMS를 비교해 보면 이러한 ΔPWV 변동은 정확도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 즉 네 개의 한국형 모델은 라디오존데 가강수량과 비교했을 때 모두 비슷한 크기와 편향을 가지며 RMS도 거의 동일한 수준인 것으로 나타났다. 특히 HP_{t_Y}와 HP_{t_M}의 경우 지상기온 관측 없이도 다른 모델과 동일한 수준의 정확한 가강수량을 산출할 수 있음을 의미한다.

4. 라디오존데 건조편향

라디오존데는 그림 2에 나타난 것과 같이, 온도 및 습도 센서가 외부로 노출되어 있어 태양열에 의해 건조편향이 발생한다. 특히 태양열이 센서에 직접적으로 영향을 주는 낮 시간대에는 습도 센서가 가열되어 건조편향이 더욱 증가한다(Wang et al. 2002, Turner et al. 2003, Kwon et al. 2007). 이 연구에서는 속초기상대의 라디오존데 가강수량과 GPS 가강수량 차이를 이용하여 낮(UTC 00시; KST 09시)과 밤(UTC 12시; KST 21시)에 대한 라디오존데 가강수량 편향을 조사하였다. 또한 2007년 5월 1일을 기준으로 센서의 변동에 따른 건조편향 변화를 분석하였다. 이를 위해 2006년 8월 18일부터 2007년 4월 30일까지, 그리고 2007년 5월 1일부터 12월 31일까지, 장비교체 전후로 각각 약 8개월 동안의 편향 변화를 분석하였다. 그림 4a와 그림 4b는 낮과 밤으로 분류한 결과이며, 그림 4c와 그림 4d는 라디오존데 장비에 따른 결과이다. 그림 4의 가로축은 GPS 가강수량이며, 세로축은 GPS와 라디오존데 가강수량 차이로 mm 단위로 나타내었다.

그림 4a는 낮 동안 관측된 가강수량 차이로, 두 장비 모두 GPS 가강수량이 증가함에 따라 라디오존데와 GPS의 가강수량 차이도 증가하는 것으로 나타났다. 이 경우 RS80-15L(‘●’과 실선)은 $y = 0.22x + 2.4$, GRS DFM-06(‘+’와 점선)은 $y = 0.043x + 2.0$ 로 나타났다. 즉, RS80-15L이 GRS DFM-06보다 건조편향 증가율이 높은 것으로 나타났다. 그림 4b는 밤 동안 관측된 결과로, GRS DFM-06($y = 0.005x + 1.6$)은 거의 변동이 없는 것으로 나타났으나 RS80-15L($y = 0.15x + 2.9$)은 낮과 비슷하게 GPS 가강수량이 증가함에 따라 가강수량 차이도 증가하는 것으로 나타났다. 그 결과 RS80-15L은 GRS DFM-06에 비해 낮의 경우 18.2%, 밤의 경우 16.1% 정도 편향이 높은 것으로 나타났다. 즉 장비교체에 따라 장비에 장착된 습도 센서의 건조편향 문제가 상당 부분 개선되었으며, 이로 인하여 가강수량의 계통 오차를 감소시킨 것으로 판단된다.

한편, 밤에 비해 낮 동안 발생하는 건조편향을 분석하기 위하여 그림 4a와 그림 4b를 장비 별로 분류하였다. 그림 4c는 RS80-15L, 그림 4d는 GRS DFM-06의 결과이다. 그림 4c와 그림 4d를 보면,

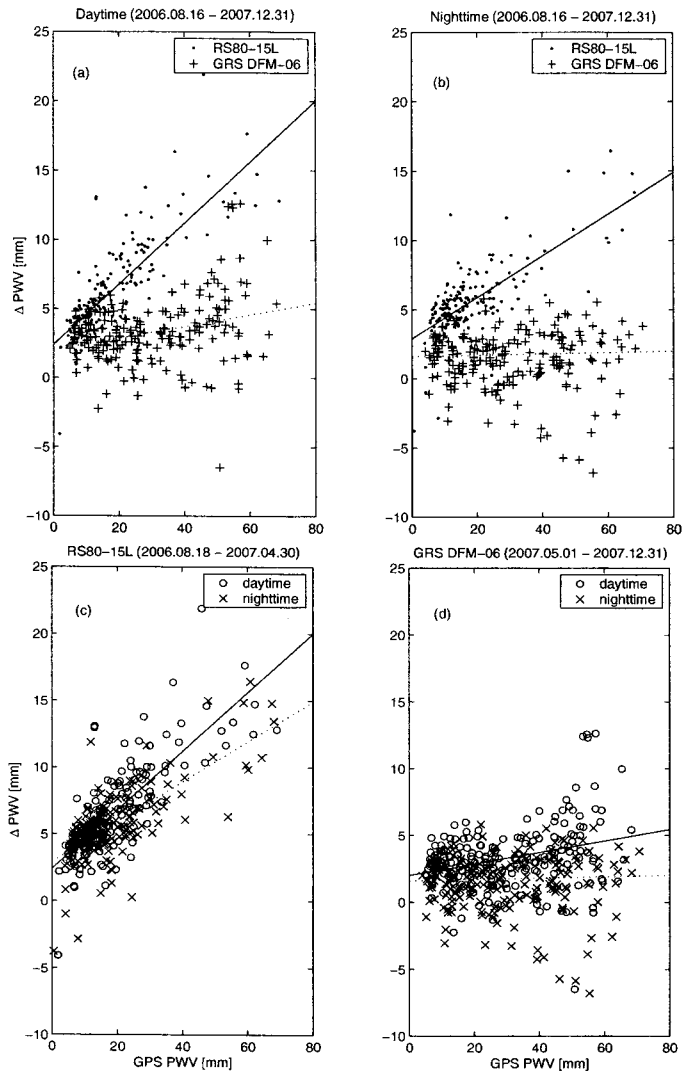


그림 4. 속초기상대의 2006년 8월 18일부터 2007년까지 GPS와 라디오존데 가강수량 차이.

두 장비 모두 밤('x'와 점선)에 비해 낮('o'와 실선)에 건조편향이 높은 것으로 나타났다. RS80-15L은 6.4%, GRS DFM-06은 4.3%의 건조편향이 발생하였다.

5. 결 론

이 연구에서는 Ha & Park(2008)에서 제안한 4개의 한국형 평균운도식(HP , HP_M , HP_{t_Y} , 그리고 HP_{t_M})를 이용하여 GPS 가강수량을 산출하였으며, 라디오존데 가강수량과의 비교를 통하여 평균운도식이 GPS 가강수량 산출에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 4개의 한국형 모델 모두 비슷한 수준의 편향(약 3mm)과 RMS(약 3.6mm)가 관측되었다. 특히 시간에 대한 함수인 HP_{t_Y} 와 HP_{t_M} 의

경우 지상기온에 대한 함수인 HP 및 HP_M 과 동일한 수준의 정확도를 달성하는 것으로 나타나 지상기온 관측 없이도 정확한 가강수량 산출이 가능함을 알 수 있었다. 한편 GPS 가강수량에 비해 라디오존데 가강수량이 다소 낮은 가강수량을 가지는 것으로 나타났다. 이는 라디오존데의 건조편향에 의한 현상으로 속초기상대 라디오존데 장비교체 전후의 건조편향을 분석한 결과, 장비교체 후 건조편향이 낮과 밤에 각각 18.1%와 16.1% 정도 개선되었다. 그러나 두 장비 모두 밤에 비해 낮 동안 건조편향이 다소 높은 것으로 나타나, 태양열에 의한 건조편향 문제는 여전히 남아 있는 것으로 판단된다. 향후 GPS 기반 기상정보의 기상현업 적용에 이 연구에서 제안된 평균온도식을 이용할 경우 한반도 상공의 가강수량 결정 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 라디오존데의 온도 및 습도 센서에 대한 성능 비교 및 향상에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

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

참고문헌

- 송동섭, 윤홍식 2004, 한국측량학회지, 22, 323
- 우성호 2003, 석사학위논문, 서울대학교
- 하지현, 박관동, 박필호, 박종욱 2005, 한국기상학회지, 41, 337
- 하지현, 박관동, 허복행 2006, 한국우주과학회지, 23, 373
- Askne, J. & Nordius, H. 1987, Radio Science, 22, 379
- Bevis, M., Businger, S., Chiswell, S., Herring, T. A., Anthes, R. A., Rocken, C., & Ware, R. H. 1994, J. Appl. Meteorol., 33, 379
- 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
- Emardson, T. R. & Derks, H. J. P. 2000, Meteorol. Appl., 7, 61
- Ha, J. & Park, K.-D. 2008, EPS, submitted
- Kwon, H.-T., Iwabuchi, T., & Lim, G.-H. 2007, J. Meteorol. Soc. Jpn., 85, 733
- Liou, Y.-A., Huang, C.-Y., & Teng, Y.-T. 2000, EPS, 52, 445
- Mendes, V. B., Prates, G., Santos, L., & Langley, R. B. 2000, ION 2000 National Technical Meeting proceedings (Anaheim: Institute of Navigation), p.433
- Turner, D. D., Lesht, B. M., Clough, S. A., Revercomb, H. E., & Tobin, D. C. 2003, J. Atmos. and Oceanic Technol., 20, 117
- Wang, J., Cole, H. L., Carlson, D. J., Miller, E. R., Beierle, K., Paukkunen, A., & Laine, T. K. 2002, J. Atmos. and Oceanic Technol., 19, 981
- Wang, J., Zhang, L., & Dai, A. 2005, JGR, 110, D21101, doi:10.1029/2005JD006215
- Webb, F. H. & Zumberge, J. F. 1993, An Introduction to the GIPSY/OASIS-II (Pasadena: JPL)