

GPS 관측데이터 정밀 해석을 통한 가강수량 추정 정확도 향상

Accuracy Improvement of Precipitable Water Vapor Estimation by Precise GPS Analysis

송동섭¹⁾·윤홍식²⁾

Song, Dong Seob·Yun, Hong Sic

¹⁾ 성균관대학교 과학기술연구소 책임연구원 및 건설환경연구소 박사후연구원(E-mail:frydom@skku.edu)

²⁾ 성균관대학교 사회환경시스템공학과 부교수(E-mail:yoons@skku.edu)

Abstract

The objective of this study is to improve an accuracy of PWV estimates using GPS in Korea. We determined a weighted mean temperature equation by a linear regression method based on 6 radiosonde meteorological observations, for a total 17,129 profiles, from 2003 to 2005. Weighted mean temperature, T_m , is a key parameter in the retrieval of atmospheric PWV from ground-based GPS measurements of zenith path delay. The accuracy of the GPS-derived PWV is proportional to the accuracy of T_m . And we applied the reduction of air pressure to GPS station altitude. The reduction value of air pressure from mean sea level to GPS stations altitude is adopted a reverse sea level correction.

1. 서론

GPS의 대류권 신호 지연을 이용한 수증기량 계산의 정확도는 GPS 관측소와 기상관측소간의 기하학적 이격, 실제 습윤 지연량을 수증기량으로 환산할 때 필요한 가중 평균 기온식의 오차, 기상 관측 장비의 측정 정밀도, 건조 지연량 계산에서 요구되는 관측소의 위치 정확도 등으로 구분된다(Feng 등, 2001). 이 중에서도 가중 평균 기온식은 1992년에 Bevis 등이 제안한 가중 평균 기온식이 GPS/MET 기술 연구에서 가장 많이 적용되고 있다. 본 연구에서는 GPS 관측 데이터의 정밀 해석을 이용한 한국의 수증기량 추정 정확도를 향상시키는 방법을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이 목적을 달성하기 위하여 본 논문에서는 한국에서 운용중인 라디오존데 6개 관측소로부터 측정한 각 고도별 관측 기온으로부터 측정한 평균 기온과 지상의 기상 관측소에서 관측한 지상 기온과의 선형 회귀 방법을 이용한 한국형 가중 평균 기온식을 결정하였다.

2. 가중 평균 기온식 결정

본 연구에서는 2003년부터 2005년간 3년 동안 우리나라에서 운용 중인 라디오존데 관측소 6개소의 평균 기온 관측값과 지상의 자동 기상 관측소에서 라디오존데 관측소와 동일한 지역의 지상 기온 관측값을 수집하여 선형 회귀 방법(linear regression method)을 이용한 한국의 가중 평균 기온식을 결정하였다. 2003년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 수집한 라디오존데 관측데이터의 고도별 기온 관측값으로 계산한 평균 기온 관측값은 오산(OSAN) 4,246개, 포항(POHN) 2,180개, 광주(KWNJ) 4,255개, 제주(CHJU) 2,238개, 속초(SKCH) 2,085개, 백령도(BACK) 2,125개 등 총 17,129개의 표본 데이터를 획득하였다. 지역별로 관측데이터의 개수가 다른 이유는 라디오존데를 띄울 때에 하부에 부착하는 센서가 오작동하는 경우와 관측 정보 전송 오류 및 미관측 상황과 악천후의 추가 관측의 차이에 비롯된 것이다(Solbrig 등, 2000).

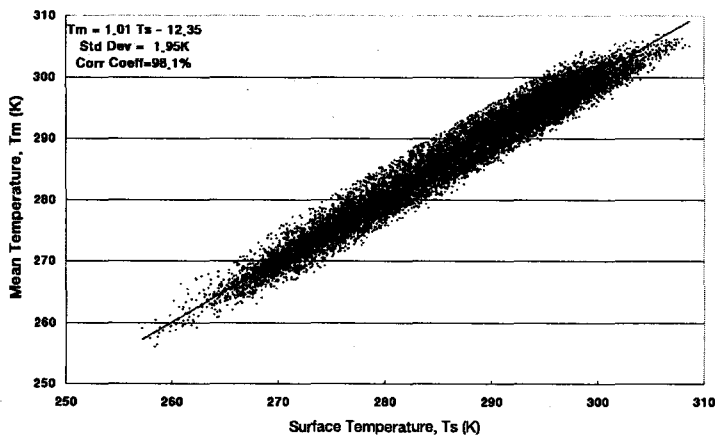
가중 평균 기온식을 결정하기 위하여 이용한 라디오존데와 지상 관측 기온의 차이가 전체 표준편차의

3배인 3σ 를 초과하는 과대 편차를 가진 기온 관측값을 순차적으로 제거하여 기온 차이의 편차를 3σ 이내로 처리한 결과, 기온 차이의 표준편차 ± 1.95 K를 가진 가중 평균 기온식을 결정할 수 있었다. 라디오존데로부터 관측한 평균 기온과 기상 관측소에서 관측한 지상 기온과의 차이의 과대 편차를 제거한 후에 선형 회귀 방법에 의해 결정한 가중 평균 기온식은 다음과 같다.

$$T_m = -12.35 + 1.01 \times T_s \quad (1)$$

그림 1은 식 (1)에 대한 평균 기온과 지상 기온과의 선형 관계를 나타낸다. 본 선형 회귀 방법에 의해 결정된 가중 평균 기온식의 통계 결과는 표준 편차가 1.95 K, 상관 계수는 0.981로 분석되었다. 이는 Bevis 등이 미국 지역에 대한 관측 결과를 이용하여 결정한 가중 평균 기온식의 표준편차 4.7 K보다 더욱 정밀하다는 것을 의미한다. 또한 두 기온 차이의 표준편차가 1.5 K 이내의 범위에 이르도록 임의 조정된 결과를 토대로 SDS_II 식을 결정하였다. 그 식은 다음과 같다.

$$T_m = -12.40 + 1.01 \times T_s \quad (2)$$



과대 편차를 제거한 후에 결정한 SDS 식을 이용한 GPS 가강수량의 정확도를 검증하기 위해 앞서 결정한 가중 평균 기온식의 상대 정확도 비교를 우선 실시하였다. 정확도 비교 방법은 3년간 라디오존데 관측소에서 획득한 관측 자료를 토대로 계산한 평균 기온을 참값으로 가정하고 동일 지역에서 관측한 지상 기온을 본 연구에서 결정한 가중 평균 기온식을 이용하여 평균 기온으로 환산한 후에 그 차이에 대한 통계 비교를 실시하였다. 다음의 표 1은

그림 1. 평균 기온과 지상 기온간의 선형 회귀 관계(SDS식) SDS식, SDS_II식, Bevis 등(1992), Mendes 등(1999), Solbrig 등(2000), Schüller(2000), Liou 등(2001) 및 하지현 등(2006)의 가중 평균 기온식을 이용하여 2003년부터 2005년 동안 지상 관측 기온을 평균 기온으로 환산한 후에 실제 라디오존데로 고도별 관측한 기온을 이용하여 계산한 평균 기온과의 차이의 통계 분석 결과를 표시한 것이다.

표 1. 가중 평균 기온식별 상대 정확도 비교 결과

구분	SDS	SDS_II	Bevis	Mendes	Solbrig	Schüller	Liou	하지현
표준 편차 (mm)	± 2.06	± 2.06	± 3.49	± 2.97	± 3.11	± 4.08	± 2.15	± 2.29
RMSE (mm)	± 10.10	± 10.15	± 11.00	± 10.87	± 12.01	± 15.20	± 12.04	± 10.79

8개의 가중 평균 기온식을 적용하여 구한 평균 기온과 실제 평균 기온과의 차이에 대한 표준편차는 대부분이 ± 4.0 K 이하로 나타났다. 이는 대부분의 가중 평균 기온식이 정밀하게 결정되었다는 것을 객관적으로 보여주는 것이다. 표준편차 비교에서는 Schüller(2000)의 가중 평균 기온식이 ± 4.08 K로 본 연

구의 결과인 SDS식에 비하여 약 2배 정도 큰 편차를 보이고 있다. 가장 최근에 발표된 Liou 등(2001)의 평균 기온식과 하지현 등(2006)의 평균 기온식의 표준 편차가 ± 2.50 K 이내로서 비교적 가중 평균 기온식의 정밀함이 다른 식에 비하여 높다고 본다. 본 연구에서 제시한 SDS식과 SDS_II식은 표준편차가 동일하게 나타났으며 Bevis 등(1992)보다는 1.7배의 정밀도의 향상을 보였다. 상대 정확도를 비교하기 위하여 분석한 RMSE의 결과는 각각의 가중 평균 기온식별로 큰 차이를 나타내고 있다. 우선 본 연구에서 결정한 SDS식과 SDS_II식의 RMSE는 ± 10.10 K에서 ± 10.15 K로 약 0.49% 정도 SDS 식의 RMSE가 높은 결과를 보여주고 있지만 이 정도는 완전히 동일한 것으로 판단된다. 상대 정확도가 가장 낮은 결과를 보이는 가중 평균 기온식은 표준편차가 가장 크게 나타났던 Scholler식으로 SDS식에 비하여 1.5배나 정확도가 떨어지는 결과를 보였다. GPS 기상에 가장 많이 적용되는 Bevis식은 SDS식보다 1.09배의 정확도가 저하되는 경향을 보이고 있다. 최근의 Liou 등이나 하지현 등 보다 SDS식이 각각 1.19 배와 1.07 배정도 상대 정확도가 향상되는 것으로 분석되었다.

3. 측정기압의 역해면 경정 보정

GPS 상시관측소를 이용한 기상 연구에서 필요한 관측소의 타원체고는 GPS 상시관측소 운영 기관에서 고시하거나 결정한 타원체고를 적용하면 되고, 임의의 관측일 경우에는 GPS 관측데이터의 기선 해석을 실시하여 계산된 타원체고를 이용하면 된다. 한편 기상 정보는 GPS 안테나를 설치한 동일 지점에 기상 센서를 설치하여 그 정보를 이용하면 이상적이나 현실적으로는 GPS 관측소와 기상 관측소가 기하학적으로 이격이 되어 있다. 경험적 건조 지연 모델에서 중요한 기상 변수인 GPS 관측소의 기압과 기온은 관측소 표면상의 측정값이 요구되며 기상 관측값의 정확도에 따라 실제 건조 지연량의 정확도가 달라질 수 있다. 우리나라의 기상청에서 제공하고 있는 기압 정보는 일기도 작성을 위하여 기상 관측소에서 관측한 기압을 일정한 고도상의 기압으로 보정하여 제공하고 있다. 보편적으로는 이 일정한 고도면을 편의상 평균해수면으로 취급하며 각각의 관측소 기압은 이 평균해수면상의 기압으로 환산하게 된다. 각 나라에서는 자국에 적합한 경정식을 사용하여 평균해수면상에 경정된 기압 보정값을 구한 후에 기상 관측소의 측정 기압에 이 기압 보정값을 보정하여 평균해수면상의 기압으로 이용하고 기압골 등의 분석에 적용하고 있다.

4. 가중 평균 기온식별 정확도 평가

본 절에서는 앞서 결정한 한국형 가중 평균 기온식인 SDS 식과 SDS_II 식의 정확도를 평가하였다. 정확도 평가는 천정 방향의 실제 습윤 지연량을 가강수량으로 환산할 때 적용되는 가중 평균 기온식을 본 연구 결과와 다른 연구에서 제시한 기온식을 각각 적용하여 라디오존데 가강수량과 차이를 구하고 이 잔차에 대한 표준 편차 및 평균 제곱근 오차를 구하는 단계를 수행하였다. 또한 잔차의 크기가 3σ 를 초과하는 과대 편차가 포함된 계산 결과를 제외시켜서 GPS 가강수량의 측정 정확도 평가의 신뢰성을 높이도록 하였다. 마지막으로 GPS 가강수량과 라디오존데 가강수량간의 선형 회귀 분석을 통해 편의량을 소거하여 최종 GPS 가강수량의 측정 정확도를 점검하였다. 수원에서는 SDS 식의 RMSE가 하지현 식보다 0.6%, Liou 식보다는 94.5%나 향상된 결과를 보였으며, 울산 지역은 하지현 식보다 0.1%, Liou 식보다는 93%의 정확도 개선을 보였다. 장흥과 제주는 하지현의 기온식을 적용한 결과가 SDS 식의 적용 결과에 비하여 0.6%, 1.8% 정도 정확도가 떨어졌으며 가장 많이 이용되는 Bevis 식과는 SDS 식이 1.2% 및 3.8%의 향상된 정확도를 가지는 것으로 증명되었다. GPS 가강수량의 정확도 평가는 GPS 가강수량과 라디오존데 가강수량의 회귀 관계로부터 도출된 편의(bias)를 제거한 후에 이루어져야 한다. 이상적으로는 GPS 가강수량과 라디오존데 가강수량은 $y=x$ 의 선형 관계를 가져야 한다. 그러나 두 가강수량에는 편의로 인하여 회귀선에는 경사가 발생된다. 또한 선형 회귀의 최적선에서 크게 벗어나는 과대 편차도 포함되어 있다. 이 과대 편차는 라디오존데 관측 환경의 급격한 변화에 기인한 이상 값(anomaly value)으로 보며 비현실적인 관측값으로 취급한다(Takiguchi 등, 2000). 본 연구에서도 단순 회귀 분석을

적용하여 라디오존데 가강수량의 품질을 검사하고 편의를 제거한 후에 RMSE를 재평가하였다. 또한 편의를 제거하기 전에 두 가강수량의 차이가 표준편차의 3배인 3σ 를 초과하는 관측값을 미리 제외시켜 면밀한 GPS 가강수량의 정확도 평가를 수행하였다. 측정 차이가 3σ 를 벗어나는 경우에는 라디오존데의 관측 기상 정보에 신뢰가 떨어지는 표본이라 판단하였다. 제거된 표본 데이터는 수원 14개, 울산 2개, 장흥 20개, 제주 47개이다. 과대 편차를 제거하기 전에 비하여 평균적으로 수원은 5.6%, 울산 2.6%, 장흥 3.7%, 제주 34.3%의 개선된 RMSE를 보였다. SDS 식을 적용한 GPS 가강수량의 RMSE는 2.1mm에서 3.7mm 범위의 높은 정확도로 결정되었다고 분석되었다. 과대 편차 제거 후의 상관 분석에서 상관도는 수원과 울산이 0.993으로 같았으며 장흥은 0.985, 제주는 0.982의 매우 상관성이 높게 평가되었다. 단순 선형 회귀 분석을 통하여 지역별로 분석한 편의를 소거하여 최종적인 GPS 가강수량의 정확도를 계산하였다. GPS 가강수량의 정확도 향상을 위하여 가중 평균 기온식 결정, 기압의 역해면 결정, 통계학적인 분석을 실시한 결과, 네 지역의 GPS 가강수량의 RMSE가 평균 $\pm 1.4\text{mm}$ 로서 매우 정밀하게 결정이 되었다. 이 결과는 중위도 지역의 다른 연구 결과인 Yang 등(1999)의 2.3mm, Takiguchi 등(2000)의 5.62mm 보다 월등히 높은 정확도를 가지는 결과라고 판단된다.

5. 결론

1. 라디오존데의 평균 기온과 지상 기온간의 단순 선형 회귀 모형 방법을 적용하고 통계적인 편의를 제거 과정을 통해 표준편차가 1.95K, 상관 계수가 0.981로 상관 강도가 매우 높은 가중 평균 기온식을 결정할 수 있었다.

2. 역해면 경정을 통한 보정 기압을 적용한 GPS 가강수량의 정확도는 기압 보정 전에 비하여 수원 47%, 울산 56%, 장흥 78%, 제주 613%의 향상을 보였다. 이러한 결과는 GPS를 이용한 가강수량 추정시 GPS 관측소 지점의 측정 기압을 이용하거나 역해면 경정을 실시한 보정 기압의 적용이 필수적임을 증명한 것이라 본다.

3. 본 연구를 통해 결정한 가중 평균 기온식을 지역별 GPS 가강수량 복원에 적용한 RMSE는 기존의 가중 평균 기온식을 적용한 추정 결과보다 라디오존데 가강수량과 비교한 정확도가 최소 0.1%에서 최대 93%의 향상된 결과를 나타냈으며, 회귀 분석으로 추정한 GPS 가강수량과 라디오존데 가강수량의 편의를 보정한 결과, 최종적으로 RMSE가 $\pm 1.4\text{mm}$ 인 매우 정밀한 GPS 가강수량의 추정이 이루어질 수 있었다.

참고문헌

Feng, Y., Z. Bai (2001), GPS Water Vapour Experimental Results From Observations of the Australian Regional GPS Network (ARGN), A Spatial Odyssey : 42nd Australian Surveyors Congress.

Solbrig, P. (2000), Untersuchungen ber die Nutzung numerischer Wettermodelle zur Wasserdampfbestimmung mit Hilfe des Global Positioning Systems, Diploma Thesis, Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Germany.