

고정확도 가강수량 획득을 위한 알제리 가중평균기온 모델 개발

Development of Algerian Weighted Mean Temperature Model for High Accurate Precipitable Water Vapor

심승혜¹⁾ · 송동섭²⁾

Sim, SeungHye · Song, DongSeob

Abstract

The water vapor including latent heat is the important component in an atmospheric circulation and in a monitoring of the Earth's climate changes, as well as in the weather forecast improvement. In this study, to establish the Algerian weighted mean temperature model, a linear regression method had been developed under 5 radiosonde observations for a total 24,694 profiles from 2004 to 2013. An weighted mean temperature is a key parameter in the processing of PWV from GNSS tropospheric delays. The result from the study has expected to provide an useful model to demonstrate the realization and utility of using the ground-based GNSS meteorology technique that will bring improvements in weather forecasting, climate monitoring in Algeria.

Keywords : Algeria, Radiosonde, Precipitable Water Vapor, GNSS, Weighted Mean Temperature Model

초 록

잠열이 포함되어 있는 수증기는 대기 순환 과정과 지구의 기후 변화 모니터링에 있어서 중요한 역할을 담당하고 있으며, 기상 예보 능력 향상에 이용되곤 한다. 본 연구에서는 알제리 국가를 대상으로 2004년부터 2013년 동안 5 개소의 라디오존데로 관측한 24,694개의 대기 프로파일 자료를 이용하여 선형 회귀 방법에 의한 알제리 가중평균기온 모델을 개발하였다. 가중평균기온은 GNSS의 대류권 지연으로부터 가강수량의 복원에 있어서 중요한 파라미터이다. 본 연구를 통해 개발된 모델은 향후 알제리 국가에서 향상된 기상 예보와 기후 모니터링을 위하여 지상 기반 GNSS 기상 기술의 구현과 효용성을 증명하는데 있어 유용한 모델로 제공될 수 있다고 본다.

핵심어 : 알제리, 라디오존데, 가강수량, 범지구위치결정시스템, 가중평균기온모델

1. 서론

수증기는 대기 방사와 수문학적 순환과정에 있어 중요한 역할을 담당한다. 대기 수증기 관측은 전통적으로 풍선을 기반으로 한 라디오존데 시스템을 이용하여 이뤄지고 있

다. 전 지구적으로 라디오존데는 육지 영역에 드문드문하게 위치하여 보통 하루에 2번 정도만 관측을 실시한다. 라디오존데는 종종 계통적 편의량과 위조된 측정값을 포함하고 있다(Wang *et al.*, 2002; Gaffen *et al.*, 1991). 지난 수십 년간 기상위성을 이용한 수증기 관측이 광활한 대양을 대상으로 수

Received 2015. 02. 04, Revised 2015. 02. 24, Accepted 2015. 02. 25

1) Member, Dept. of Environmental Disaster Prevention Engineering, Kangwon National University (E-mail: vntlf1201@kangwon.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Ocean Construction 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.

증기의 공간적 관측 한계성을 극복하기 위하여 시작되었다(Randel *et al.*, 1996). 그러나 기상위성에 의한 수증기 관측은 시간 해상도 측면에서 여전히 약점을 가지고 있다. GNSS 기술이 활발하게 운영이 시작된 1994년 이후, 매우 높은 시간 해상도를 가진 GNSS 기상 기술을 활용하여 가강수량 추정 정확도의 향상을 위한 많은 연구들이 진행되었다(Bevis *et al.*, 1992; Rocken *et al.*, 1993). GNSS 오차 요인 중 하나인 대류권 신호 지연으로부터 유도한 가강수량과 라디오존데 및 재해석 데이터(NCEP/NCAR reanalysis data)와의 검증(Bock *et al.*, 2005; Guerova *et al.*, 2003; Hagemann *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2003; Vey *et al.*, 2004), 수치 기상 예보의 개선 가능성 평가(Gendt *et al.*, 2004; Gutman *et al.*, 2003; Kuo *et al.*, 1993), 가강수량의 일주 변화 연구(Dai *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2003) 및 기후 변화 모니터링(Gradinarsky *et al.*, 2002) 등 다양한 분야로의 적용이 지속적으로 진행되었다.

현재 전 세계적으로 인류의 생존과 밀접한 관계를 갖는 기후 변화에 대한 연구도 지속적으로 증가하고 있다. 북아프리카에 위치하고 있는 알제리는 약 2,381,741km²의 광활한 면적을 가지고 있으며, 내륙의 사막기후와 외륙의 지중해성 기후를 지닌 복합적인 기후 환경을 가지고 있다. 알제리 국토 대부분 지역에서는 사막화 진행이 급속하게 이뤄지고 있기 때문에 기후 변화에 대한 원인 분석을 위하여 기상학적 관점에 입각한 요인과의 상관 분석이 필요하다. 이러한 사막화의 전개 과정과 큰 연관성을 지니고 있는 대기 수증기의 장기적 변화에 대한 추적과 모니터링 기술은 기후 변화의 특징을 밝히는데 큰 역할을 담당할 수 있다. 왜냐하면 대기 수증기의 순환 과정과 대기의 물리적 운동은 여러 규모의 기상변화에서 중요한 역할을 담당하고 있기 때문이다(Turner *et al.*, 2003). 수증기 추적 기술은 기상 기술개발 연구에서 중요한 역할을 지니며, 수증기의 시공간적 변화 분석을 이용하여 다양한 자연 재난 유형별로 대응 방안 마련에 큰 도움을 줄 수 있다. 수증기 정보 취득에 이용하고 있는 여러 기술 중 하나로서 GNSS 기상 기술은 24시간 거의 실시간적으로 적용이 가능한 장점을 지니고 있음은 이미 많은 연구 결과의 검증으로부터 확인되고 있다.

본 연구에서는 알제리 지역의 GNSS 기상 기술 적용에 필요한 가중평균기온 모델을 개발하고자 하였다. 기존의 알제리 국가에 대한 가중평균기온 모델은 2005년부터 2007년의 총 3년간의 자료를 바탕으로 발표된 바가 있다(Boutiouta and Lahcene, 2009). 본 연구에서는 기존 모델보다 최신의 자료를 포함시키고 방대한 자료를 바탕으로 통계적 필터링을 통해 더욱 신뢰성을 갖는 모델을 개발하고자 하였다. 이

를 위하여 2004년부터 2013년까지 총 10년 간 관측한 장기간의 데이터를 수집하여 가중평균기온 모델 개발에 이용하였다. 알제리에서 운용하고 있는 라디오존데 관측소의 평균기온과 기상관측소의 지상기온 자료를 수집하여 모델 개발에 이용하였다. 또한, 가강수량과 기온에 대한 상관성 분석을 통해 알제리의 가강수량 발현에 대한 지역적 특성을 파악하도록 하였다.

2. 이론적 고찰 및 자료 수집

GNSS 위성으로부터 송출된 라디오 신호는 지상에 도달하면서 부분적으로 대기의 수증기에 의하여 지연이 발생된다. 천정 경로에 걸친 총 지연은 천정 경로 지연(Zenith Path Delay; ZPD)이라 불린다. ZPD는 두 개의 부분으로 나뉘는데 지상 기압(Ps)에만 의존하는 천정 건조 지연(Zenith Hydrostatic Delay; ZHD)와 대기 수증기 프로파일의 함수로 구성되는 천정 습윤 지연(Zenith Wet Delay; ZWD)이다(Elgered *et al.*, 1991). ZWD는 ZPD로부터 ZHD를 빼어서 유도할 수 있다. ZWD가 대기의 수증기와 기온의 함수로 구성되어 있기 때문에 수증기 가중평균기온을 추정할 수 있다면 가강수량을 계산할 수 있게 된다(Bevis *et al.*, 1992; Elgered *et al.*, 1991).

지상에 위치한 GNSS 관측소를 이용하여 GNSS 기상 기술 적용 사례가 다양하게 제시되어 있지만 아프리카와 같은 지역의 특수성을 고려하여 정확도를 확보하는 노력은 부족한 실정이다. GNSS 신호 경로의 지연 자료로부터 정확한 가강수량(Precipitable Water Vapor; PWV)을 유도하기 위한 방법 중 하나는 지역적인 특성을 고려하여 평균기온(T_m)을 추정하는 것이다. T_m 의 정확한 계산을 위해서는 대기 기온과 수증기 프로파일이 요구되나 항상 자료 이용이 수월한 것은 아니다. 이를 대신하여 T_m 은 보통 지상기온(T_s)과 평균기온과의 경험적 선형식이나 좀 더 복잡한 관계(T_m-T_s 관계)에 의한 해석 결과를 이용하여 추정한다. T_m-T_s 관계는 지역적 의존성을 보이고 계절적이나 일주적으로 다양하다. 이러한 요소들은 T_m 추정에 있어서 약 2~5K의 RMSE(Root Mean Square Error)를 가지게 한다.

특이한 기후 양상을 나타내는 알제리는 사막 지역이 대부분을 차지하고 있어 강수량 발생에 대한 사전 예측 기술이 시급히 필요하다. 준 실시간으로 하드웨어의 추가적인 운영이 없이 고정밀 GNSS 기상 기술 구현을 위해서 중요한 단계 중 하나가 가강수량의 정확도를 향상하는 것이며, 지역적 또는 국가적인 T_m 추정 모델이 이러한 부분을 지원할 수 있다.

대기 평균기온(굴절률 N 의 정도로 표현함) T_m 은 다음과 같이 정의된다(Davis *et al.*, 1985).

$$T_m = \frac{\int \frac{P_v}{T} dz}{\int \frac{P_v}{T^2} dz} \approx \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_{vi}}{T_i} \Delta Z_i}{\sum_{i=1}^N \frac{P_{vi}}{T_i^2} \Delta Z_i} \quad (1)$$

여기서, P_v 는 수증기 부분압(hPa), T 는 대기 온도(K)이다.

T_m 은 대기기온과 습도 연직 프로파일의 함수이다. GNSS로 추정된 가강수량은 다음 Eq. (2)에서와 같이 무차원 파라미터인 Π 와 ZWD의 곱으로 구해진다. 파라미터 Π 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$PWV = \Pi \times ZWD \quad (2)$$

$$\Pi^{-1} = 10^{-6} \rho R_v [(k_3/T_m) + k_2'] \quad (3)$$

여기서, ρ 는 액상 물의 밀도, R_v 는 수증기 기체 상수, k_3 와 k_2' 은 Bevis *et al.*(1994)이 제시한 물리 상수이다. Eq. (2)와 Eq. (3)을 이용하여 T_m 의 오차로부터 기인한 PWV 의 상대적인 오차는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\Delta PWV}{PWV} = \frac{\Delta \Pi}{\Pi} = \frac{1}{1 + \frac{k_2'}{k_3 T_m}} \times \frac{\Delta T_m}{T_m} \approx \frac{\Delta T_m}{T_m} \quad (4)$$

k_2'/k_3 는 약 $5.9 \times 10^{-5} K^{-1}$ 로 매우 작기 때문에 Bevis *et al.*(1994)이 제시한 것처럼 PWV 의 상대적인 오차는 T_m 의 오차와 거의 같다. T_m 의 분포가 보통 240K에서 300K인 점을 고려하면, Eq. (4)를 바탕으로 계산할 때 PWV 의 1%에서 2%의 정확도를 확보하기 위해서는 평균적으로 T_m 에서 2.74K에서 5.48K의 오차 범위를 만족하여야 한다. 고층 기상 관측으로부터 얻은 기온과 습도 프로파일은 T_m 계산에 이용할 수 있다. 그러나 이러한 대기 연직 프로파일은 보통 높은 시간 해상도를 갖는 ZPD 데이터에 이용할 수가 없으며 GNSS 관측소와 동일한 지역에 관측소가 위치하지 않아 정확한 자료 획득이 어려운 실정이다. T_m 추정을 위해서 보통 사용되는 방법은 T_m 과 T_s 사이의 상관관계를 구하고 이를 이용하는 것이다. 보통 T_s 는 GNSS 관측소에 설치된 기상관측소나 인접한 곳의 종관 관측 결과로부터 얻는다.

본 연구에서는 GNSS 가강수량의 정확도와 관계되는 다양한 파라미터 중에서 가장 비중이 높은 가중평균기온 모델 개발에 초점을 맞추었다. 한 국가나 지역의 독자적인 가중평균기온 모델은 국가나 광활한 지역의 기후와 밀접한 연관성을 지니고 있다. 독자적인 모델 개발을 위해서는 지표에 위치한 기상관측소의 지상기온과 라디오존데로 획득한 고층 프로파일 정보로부터의 평균기온이 필요하다. 두 자료를 이용한 선형 회귀 모델을 개발하기 위하여 알제리의 다양한 도시 중에서 라디오존데 관측이 운용되고 있는 다섯 지역(Alger, Bechar, Tindouf, In-salah, Tamanrasset)을 선정하였다. 해당 지역의 자료 획득은 와이오밍 기상 웹사이트(Larry, 2014)의 대기측정 시스템에서 기록된 평균기온과 세계기상기구(NCDC, 2005)의 자동기상관측소(AWS; Automatic Weather System)의 지상기온의 수집을 통해 진행하였다.

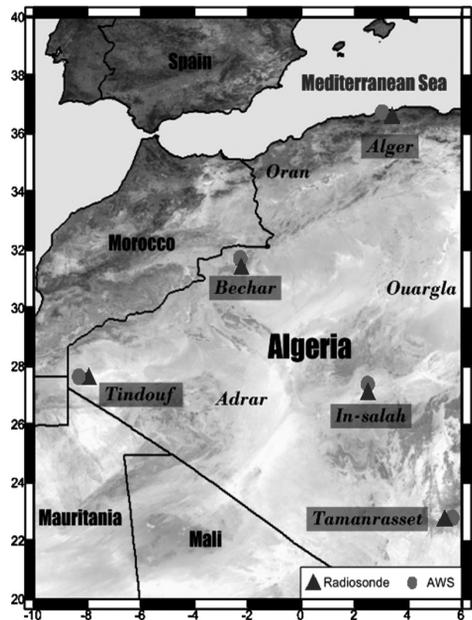


Fig. 1. Location map of radiosonde and AWS

NCDC의 자료에 의하면 알제리에는 11개의 라디오존데 관측소와 156개의 자동기상관측소가 운용된 것으로 파악되었다. 그러나 현재까지 운용 중인 라디오존데 관측소는 5개소에 국한되어 있다. 지상기온은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 라디오존데 관측소와 인접한 지역의 자동 기상 관측소 자료를 수집하였다. Table 1은 라디오존데 관측소와 지상 기상 관측소의 위치 정보를 정리한 것이다.

Table 1. Five location Information of radiosonde and AWS

| Local Name | WMO No.(ID) | | Lat(°) | Lon(°) | Alt(m) |
|--------------------|-------------|------------|--------|--------|--------|
| Alger (DAAG) | 60390 | Radiosonde | 36.68N | 3.21E | 29 |
| | 603690 | AWS | 36.77N | 3.10E | 12 |
| Bechar (DAOR) | 60571 | Radiosonde | 31.50N | 2.25W | 816 |
| | 605710 | AWS | 31.65N | 2.27W | 811 |
| Tindouf (DAOF) | 60656 | Radiosonde | 27.70N | 8.16W | 439 |
| | 606560 | AWS | 27.70N | 8.16W | 443 |
| In-salah (DAUI) | 60630 | Radiosonde | 27.23N | 2.50E | 269 |
| | 606305 | AWS | 27.25N | 2.50E | 273 |
| Tamanrasset (DAAT) | 60680 | Radiosonde | 22.80N | 5.43E | 1,364 |
| | 606805 | AWS | 22.80N | 5.45E | 1,377 |

3. 알제리 가중평균기온 모델 개발

알제리 라디오존데 자료는 IGRA(Integrated Global Radiosonde Archive)를 통해 취득할 수 있다. IGRA는 NOAA의 국립기후데이터센터(NCDC)에서 새롭게 제시한 라디오존데 데이터이다. 모든 자료는 1938년부터 현재까지 전 세계적으로 1,000개 이상의 장소에서 일별(하루에 1~4 번) 라디오존데 관측값으로 구성되어 있다. 관측값은 표면과 권계면, 표준 기압 및 중요 층별로 기압, 기온, 높이, 이슬점 온도, 바람 방향과 바람 속도를 포함하고 있다. 모든 자료는 11 개의 다른 출처로부터 병합된 데이터를 바탕으로 생성하며, 적합한 품질 검사 과정이 자료 전처리 과정에서 적용된다.

평균기온을 획득하기 위해서 IGRA 자료로부터 2004년에서 2013년 동안의 기온과 습도 프로파일을 이용하여 T_m 을 계산하였다. 라디오존데 습도 자료는 추운 상태나 높은 고도 조건에서 종종 적은 값을 나타내거나 정확도가 떨어지는 경우가 있다. 그 이유는 추운 기온에서 습도 센서의 불량 작동과 많은 국가에서 습도 보고를 위해서 기온값을 차단하기 때문이다(Wang *et al.*, 2003). 또한, 라디오존데 관측지점과 지상 기상 관측소 지점의 이격에 의한 두 기온의 편차가 불규칙한 특징도 지닌다. 이렇듯 다양한 원인으로 인하여 라디오존데로 평균기온과 지상기온과의 선형 회귀 방법을 적용하기 위해서는 가중평균기온 모델의 정밀도를 높여 신뢰성을 갖추기 위한 전처리 작업이 필요하다. 이는 과대편차가 발생한 자료를 제거하는 공정이다. 이와 동시에 라디오존데는 불규칙한 관측 시간과 자동 기상 관측소의 매시간 관측의 시각 차이를 해결하기 위하여 시각을 동기화하는 작업도 함께 요구된다(Schüler, 2001).

과대편차를 갖는 데이터를 제거하기 위하여 필요한 표준편차 계산은 다섯 지점의 관측소 자료를 모두 취합하여 1차 필터링 작업을 시행한 후에 각각의 관측소별로 다시 분석하여 제거하는 2차 필터링 작업을 통해 불명확한 편차를 갖는 자료를 제거하였다. 이러한 일련의 과정을 Fig. 2에 정리하였다.

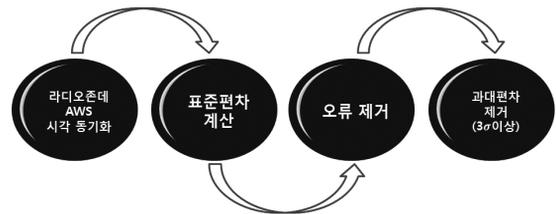


Fig. 2. Process of eliminate gross error data

과대편차를 제거하고 난 후, 전반적으로 평균기온과 지상기온 사이의 상관성은 증가하였으며 편차는 감소하였다. 과대편차를 제거하기 전, 두 기온의 상관성은 In-salah에서 최대 상관성인 97.65%, 다섯 지역 중에서 Tamanrasset에서는 최소 상관성인 59.39%로 나타났다. 제거 후에는 Tindouf(98.85%)에서 최대 상관성이 나타났으며, 최소 상관성은 Tamanrasset에서 82.66%로 분석되었다. 특이점으로 사막지대에 위치한 Tamanrasset는 과대편차 제거 전, 후 최소 상관성을 나타내었다(Table 2(a)). 3σ이상의 과대편차를 제거하기 전 최대 편차는 ±9.25K(In-salah), 최소 편차 ±2.22K(Tindouf)이다. 3σ이상의 과대편차를 가진 데이터를 제거한 후에는 최대 ±4.45K(Tamanrasset), 최소 ±1.29K(Tindouf)로 감소하여 전체적으로 더욱 정밀한 표본 데이터가 구축된 것으로 나타났다. 전반적으로 과대편차를

Table 2. Statistical result and local weighted mean temperature model

| (a) Eliminating gross error | | | (b) Local weighted mean temperature model(WMTM) | |
|-----------------------------|----------|----------|---|-----------------------------|
| Local Name | Corr.(%) | Std dev. | Local Name | WMTM |
| Alger | 92.64 | 2.46K | Alger | $T_m = 0.0989 T_s - 29.438$ |
| Bechar | 88.16 | 4.63K | Bechar | $T_m = 0.8811 T_s + 42.166$ |
| Tindouf | 96.67 | 2.22K | Tindouf | $T_m = 0.9796 T_s + 6.4471$ |
| In-salah | 97.65 | 9.25K | In-salah | $T_m = 0.9999 T_s - 0.9803$ |
| Tamanrasset | 59.39 | 8.34K | Tamanrasset | $T_m = 0.6888 T_s + 105.7$ |
| ↓ | | | | |
| Local Name | Corr.(%) | Std dev. | | |
| Alger | 93.46 | 2.25K | | |
| Bechar | 91.59 | 3.85K | | |
| Tindouf | 98.85 | 1.29K | | |
| In-salah | 97.92 | 1.89K | | |
| Tamanrasset | 82.66 | 4.45K | | |

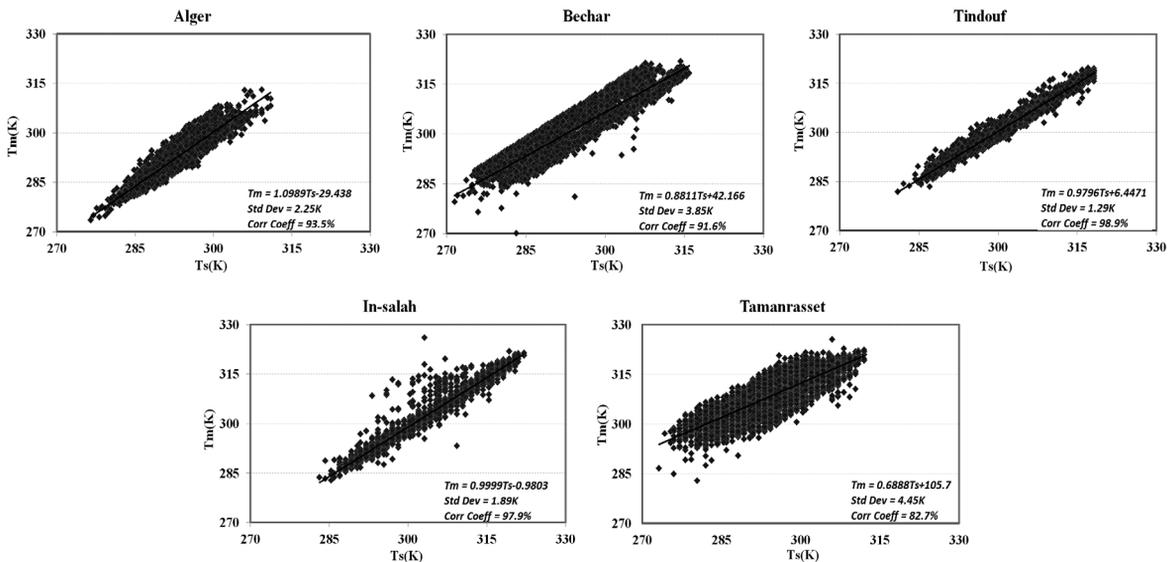


Fig. 3. Local weighted mean temperature model

제거함에 따라 Tindouf는 최대 상관성과 높은 정밀도를 나타내었으며, Tamanrasset은 최저 상관성과 가장 낮은 정밀도를 나타냈다(Table 2). 과대편차를 제거한 후에 각 지역별 가중평균기온식은 Table 2(b)와 Fig. 3에 표시하였다.

다음은 다섯 지역의 자료를 통합하여 알제리 가중평균기온 모델을 개발하였다(Fig. 4(a)). 전 지역의 자료를 통합하고 과대편차를 제거한 결과, 두 기온 차이에 대한 표준편차는 $\pm 7.76K$ 에서 $\pm 6.79K$ 로 정밀해졌으며, 상관성의 경우 70.38%에서 74.98%로 증가하였다. 과대편차를 제거한 가중평균기온 모델은 2009년 발표한 식 (5)의 Boutiouta and

Lahcene의 모델이 갖는 표준편차인 $\pm 4.89K$ 에 비해서 정밀도가 다소 낮은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 기존의 연구에서는 과대편차 제거 후에도 이상 편차를 나타내는 Tamanrasset(DAAT) 지역의 자료 중 편차가 큰 자료를 추가적으로 제거하였기 때문인 것으로 사료된다. 기존 연구에서는 Tamanrasset의 3년간 취득 자료 총 2,400여개 중에서 이상 편차를 갖는 자료를 1,000여개를 임의로 제거하였다. 본 연구에서도 사막 기후 지대에 있는 Tamanrasset의 경우 이상 편차를 갖는 자료가 다량 포함되어 있음을 확인하였다. 그러나 본 연구에서는 Tamanrasset 지역에 대한 이상 편차의 제

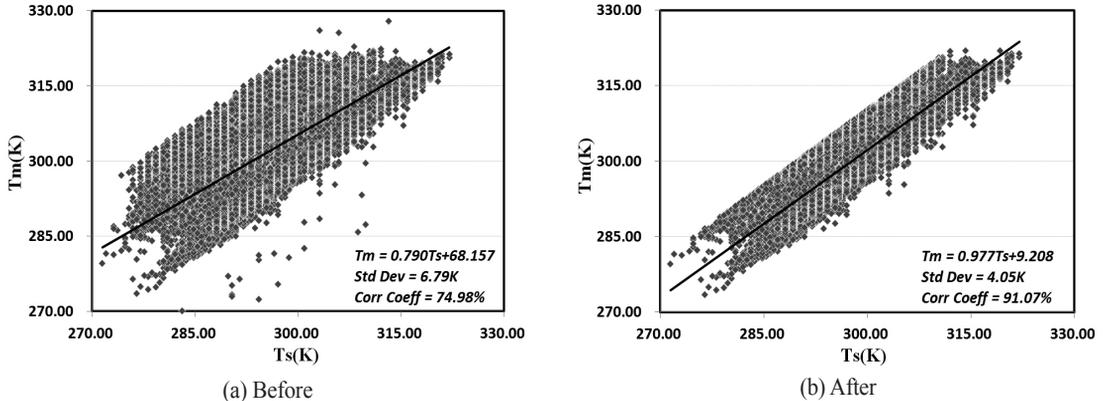


Fig. 4. Algerian weighted mean temperature model

거를 실시하지 않았으므로 기존의 발표 모델보다는 정밀도가 다소 낮게 평가된 것으로 판단된다.

$$T_m = 0.9658 T_s + 14.793 \quad (5)$$

Fig. 4(a)에서 3σ 이상의 과대편차를 제거하였음에도 10년간의 장기간 자료에 의한 편차가 큰 자료가 포함되는 것을 확인할 수 있다. 라디오존데 관측소에서는 지역별, 일별 다른 횡수로 고층 프로파일의 관측된다. 라디오존데를 띄울 때 하부에 부착하는 센서가 오작동을 하는 경우와 관측 정보 전송 오류 및 미 관측 상황과 약천후시 추가 관측의 차이에서 과대 차이가 발생하는 것으로 밝혀진 바 있다(Solbrig, 2000). 또한 Tamanrasset(DAAT)의 두 자료 사이의 차이가 다른 지역에 비하여 이상 편차를 갖는 것이 확인되었다. 따라서 라디오존데 관측 자료의 알제리의 통합 가중평균기온 모델의 정확도를 높이고 향후 알제리 GNSS 기상 기술의 정확도 평가에서 가중평균기온 모델의 정밀도의 영향을 함께 평가하기 위하여 평균기온과 지상기온 차이의 표준편차를 Song(2007)이 제시한 바와 같이 $\pm 1.5K$ 이내로 조정하는 작업을 수행하였다. 표준편차를 조정할 후, 상관성은 16.09%가 증가한 91.07%로 나타났으며, 표준편차도 4.05K로 기존 모델보다 더 정밀해진 결과를 나타내었다(Fig. 4(b)). 부가적으로 표준편차 조정률을 $\pm 2K$ 로 설정하였을 경우에는 모델의 정밀도가 $\pm 5K$, $\pm 2.3K$ 에서는 $\pm 5.43K$, $\pm 2.5K$ 의 경우에는 $\pm 5.43K$ 로 분석되었다.

다섯 지역에서 수집한 총 자료의 개수는 총 24,694개이며, 과대편차에 해당하는 51개의 자료가 일차적으로 제거되었다. 가중평균기온 모델의 정밀도를 향상시키기 위하여 표준편차를 조정할 결과, Table 3에 정리한 것과 같이 총 자료의

28%가 넘는 데이터의 손실이 발생하였다(Fig. 5). 전 지구적 가중평균기온 모델로서 사용되고 있는 Bevis *et al.*(1992)의 모델은 10년간 수집한 표본 데이터의 개수가 8,718개이다. 본 연구에 사용한 데이터는 Bevis의 모델에 비하여 과대편차 제거 후에는 자료의 양이 2.8배, 표준편차 조정 후에는 2.03배에 해당하므로 표준편차 조정에 따른 데이터 손실률이 모델의 신뢰성에 크게 영향을 미치지 않는다고 사료된다.

Table 3. Number of data and loss ratio

| Region | # of Data | Sample | Loss ratio |
|----------------|-----------|-----------------------|------------|
| Alger(a) | 3,839 | 3,802 | 0.96% |
| Bechar(b) | 6,910 | 6,359 | 7.97% |
| Tindouf(c) | 3,439 | 3,362 | 2.24% |
| In-salah(d) | 3,467 | 3,466 | 0.03% |
| Tamanrasset(e) | 7,036 | 7,023 | 0.23% |
| All | 24,694 | 24,643 (3σ) | 0.21% |
| | | 17,732 ($\pm 1.5K$) | 28.19% |

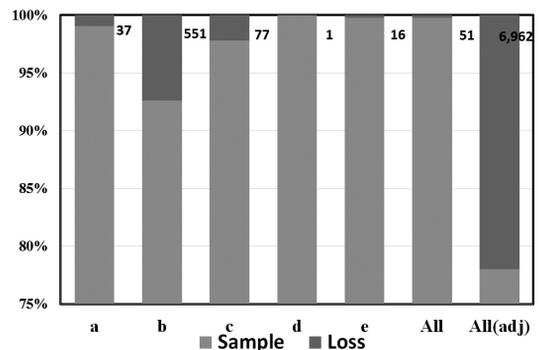


Fig. 5. Data loss ratio

4. 알제리 지역의 가강수량 특징

라디오존데를 통해 획득한 기온과 노점 온도를 이용해 Clausius-Clapeyron 방정식의 적분을 통해 상대습도를 얻을 수 있다(Benge, 1996). 포화 수증기압을 구하기 위하여 Magnus 경험식을 적용하고, 상대습도와 포화 수증기압(P_a) 및 실제 수증기압(e)을 이용하면 식 (6)과 같이 비습도(q)를 구할 수 있다.

$$\bar{q} = 622 \frac{e}{(P_a - 0.378e)} \quad (6)$$

마지막으로 대기층별 상하부에서 비습도(\bar{q})와 기압의 변화량(ΔP_a)을 이용하여 식 (7)과 같이 라디오존데 가강수량 (RAD PWV)를 계산할 수 있다.

$$RAD\ PWV = \sum 0.01 \times \bar{q} \times \Delta P_a \quad (7)$$

상기 과정을 통하여 2012년부터 2013년 2년간의 라디오존데 가강수량을 복원하고 각 지역별 특징을 분석하고자 하였다. Fig. 6는 알제리의 다섯 지역의 라디오존데 가강수량 복원 값을 나타낸 것이다. 라디오존데 가강수량의 최댓값은 주로 7월에서 9월 사이에 많이 발생하였으며 가장 큰 가강수량은 DAAG에서 발생하였다. 다섯 지역의 가강수량 크기는 라디오존데 관측소 위치가 고위도에 위치할수록 가강수량의 크기는 증가하는 경향을 보였다. Lee (2007)의 저서에 따르면 가강수량은 수증기량이 많은 적도지방에 많고 극지방에서는 적다고 밝힌 바가 있다. 알제리의 경우에는 이러한 결과와는 상반된 경향을 나타내고 있다. 다른 관측소에 비하여 상대적으로 적도 쪽으로 가까운 Tamanrasset(DAAT)은 사하

Table 4. Maximum and minimum radiosonde observation PWV in the Algeria

| Station(Local Name) | Year | Max PWV (M/D) | Min PWV (M/D) |
|---------------------|------|-----------------|----------------|
| DAAG(Alger) | 2012 | 44.98mm (07/11) | 1.11mm (05/13) |
| | 2013 | 53.82mm (08/27) | 1.37mm (08/12) |
| DAOR(Bechar) | 2012 | 41.71mm (09/05) | 1.02mm (01/07) |
| | 2013 | 30.52mm (07/01) | 2.09mm (01/29) |
| DAOF(Tindouf) | 2012 | 38.47mm (09/23) | 2.16mm (05/21) |
| | 2013 | 40.55mm (09/08) | 1.11mm (01/31) |
| DAUI(In-Salah) | 2012 | 30.86mm (09/06) | 1.70mm (12/12) |
| | 2013 | 34.87mm (05/18) | 1.45mm (02/06) |
| DAAT(Tamanrasset) | 2012 | 31.14mm (08/30) | 1.03mm (01/25) |
| | 2013 | 31.71mm (09/05) | 1.01mm (12/23) |

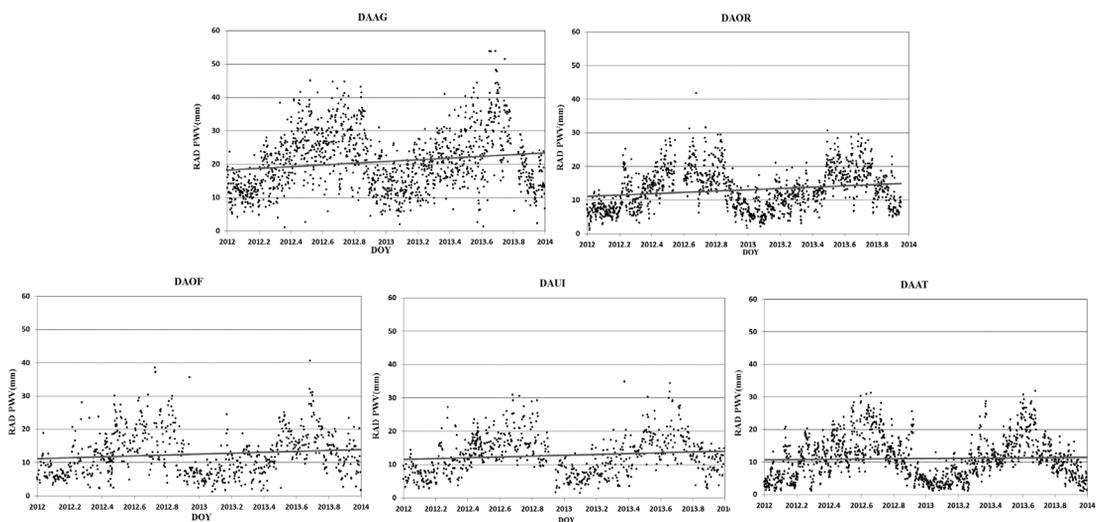


Fig. 6. Radiosonde PWV during two years

라 사막과 인접한 지역으로 반건조 기후지대에 위치한 사헬 지역이다. Tamanrasset은 지구의 전반적인 가강수량의 분포 특징과는 다른 기후 환경에 놓여 있기 때문에 가강수량의 지형학적 분포와는 차이를 나타낸다고 본다. 가강수량의 최소 값은 11월에서 1월 사이에 나타났으며, 2012년에는 DAOR, 2013년 DAAT 지역에서 가장 적었다. Table 4에 지역별 가강수량 최대와 최소 발생 시점을 정리하였다(Sim and Song, 2014). 가장 저위도에 위치하고 있는 Tamanrasset(DAAT)에서는 사막지역에 위치하고 있는 관계로 가강수량의 크기도 다른 네 지역에 비하여 작은 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 알제리 국가의 고정확도 수증기 추정을 위해서 GNSS 기상 기술 적용에 가장 중요한 매개변수 중 하나인 가중평균기온 모델을 개발하였다. 2004년부터 2013년간 10년 동안 라디오존데로 관측한 평균기온과 지상기온의 자료를 수집하고 선형회귀방법을 통하여 알제리의 지역별 가중평균기온 모델을 유도하였다. 또한 Tamanrasset(DAAT)의 이상 편차를 고려하고 개발 모델의 정밀도를 높이기 위하여 두 기온 차의 편차를 $\pm 1.5K$ 로 조정하여 표준편차 $\pm 4.05K$, 상관성 91.07%를 갖는 독자적인 알제리 통합 가중평균기온 모델을 아래와 같이 제시하였다.

$$T_m = 0.977 T_s + 9.208$$

또한 2년간의 라디오존데 관측 자료를 이용하여 가강수량의 복원을 수행하였다. 그 결과, 알제리 국가에서는 위도가 상승할수록 가강수량이 증가하는 지형학적 특징을 가지고 있음을 확인하였다. 이는 기존의 연구 결과에서는 적도로 근접할수록 가강수량이 증가하며 북위가 상승하면서 감소하는 결과와는 상반되는 현상이다. 광활한 면적을 지닌 알제리는 열대, 아열대, 건조지역뿐만 아니라 반건조 기후지대가 동서로 이어지는 사헬지대를 포함하고 있다. 따라서 전 지구적인 가강수량 분포 패턴과는 다른 양상을 가지고 있기 때문에 알제리 GNSS 기상 기술 적용을 위해서 독자적인 가중평균기온 모델이 필요하다는 사실을 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 개발한 알제리 지역의 가중평균기온 모델은 지상 기반 GNSS 기상 기술을 이용하여 공학적/과학적인 방법을 통하여 아프리카 기후 변화 연구 기반 마련에 도움이 될 것으로 판단된다. 특히 사막지역에 대한 대기 수증기 관측 기술개발 및 장기간 모니터링 데이터 복원에 활용이 가능할

것이다. 부가적으로 현재 추진하고 있는 알제리 GNSS 네트워크 설립이 이뤄지면 본 연구의 결과가 지상 기반의 GNSS를 활용하여 알제리 국가의 상세 수증기 추정 능력을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 특히 GNSS를 이용한 고정확도의 원격 수증기 탐측 기술개발과 장기간 수증기 변화 데이터의 확보는 알제리와 인접 국가의 기후 변화 감시와 미래의 기상 이변 예측 분야에 활용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국가간협력기반조성사업임(No.2013K1A3A1A09075973). 본 논문의 일부는 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2010-0024670).

References

- Benge, D.S. (1996), Development of a low-cost GPS-based time-space-positioning information (TSPI) System, *52th Annual Meeting-Institute of Navigation, ION*, 19-21 June, Cambridge, MA, pp. 195-199.
- 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, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 33(3), pp. 379-386.
- Bevis, M., Businger, S., and Herring, A. (1992), GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system, *J. Geophys. Res.*, Vol. 97, pp. 15787-15801.
- Bock, O., Keil, C., Richard, E., Flamant, C., and Bouin, M.N. (2005), Validation of precipitable water from ECMWF model analyses with GPS and radiosonde data during the MAP SOP, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 131, No. 612, pp. 3013-3036.
- Boutiouta, S. and Lahcene, A. (2009), Algerian weighted mean temperature equation (AWMTE) and GNSS meteorology technique application, *Proceeding of 1st International Symposium on Modeling and Implementation of Complex Systems*, Vol. 4, 7p.
- Dai, A., Wang, J., Ware, R.H., and Van Hove, T. (2002),

- Diurnal variation in water vapor over North America and its implications for sampling errors in radiosonde humidity, *J. Geophys. Res.*, Vol. 107, No. D10, 4090p.
- 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.
- Elgered, G., Davis, J.L., Herring, T.A., and Shapiro, I.I. (1991), Geodesy by radio interferometry: water vapor radiometry of estimation of the wet delay, *J. Geophys. Res.*, Vol. 96, pp. 6541-6555.
- Gaffen, D.J., Barnett, T.P., and Elliott, W.P. (1991), Space and time scales of global tropospheric moisture, *J. Clim.*, 4, pp. 989-1008.
- Gendt, G., Dick, G., Reigber, C., Tomassini, M.Y., Liu, M., and Ramatschi, M. (2004), Near real time GPS water vapor monitoring for numerical weather prediction in Germany, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol. 82, pp. 361-370.
- Gradinarsky, L.P., Johansson, J.M., Bouma, H.R., Scherneck, H.G., and Elgered, G. (2002), Climate monitoring using GPS, Vol. 27, pp. 335-340.
- Guerova, G., Brockmann, E., Quiby, J., Schubiger, F., and Matzler, C. (2003), Validation of NWP mesoscale models with Swiss GPS network AGNES, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 42, pp. 141-150.
- Gutman, S.I., Sahn, S., Stewart, J., Benjamin, S., and Smith, T. (2003), A new composite observing strategy for GPS meteorology, *12th Symposium on meteorological observations and instrumentation*, Am. Meteorol. Soc., Long Beach, CA.
- Hagemann, S., Bengtsson, L., and Gendt, G. (2003), On the determination of atmospheric water vapor from GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108 No. D21, 4678p.
- Kuo, Y.H., Guo, Y.R., and Westwater, E.R. (1993), Assimilation of precipitable water measurements into a mesoscale model, *Mon. Weather Rev.*, Vol. 121, pp. 1215-1238.
- Larry, O. (2014), Atmospheric soundings, *Wyoming Weather Web*, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. (last date accessed: 28 December 2014).
- Lee, S.H. (2007), *Climatology, Purungil*, 261p.
- Li, Z., Muller, J.P., and Cross, P. (2003), Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and moderate-resolution imaging spectroradiometer measurements, *J. Geophys. Res.*, Vol. 108, No. D20, 4651p.
- NCDC. (2005), WMO resolution 40 NOAA policy, *NOAA*, <http://cdo.ncdc.noaa.gov/pls/plclimprod/poemain.accessrouter?datasetabv=DS3505> (last date accessed: 15 January 2015).
- Randel, D.L., Vonder Haar, T.H., Ringerud, M.A., Stephens, G.L., Greenwald, T.J., and Combs, C.L. (1996), A new global water vapor dataset, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Vol. 77, pp. 1233-1246.
- Rocken, C., Ware, R.H., Van Hove, T., Solheim, F., Alber, C., and Johnson, J. (1993), Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 20, pp. 2631-2634.
- Schüler, T. (2001), *On Ground-based GPS Tropospheric Delay Estimation*, Ph.D. dissertation, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, University of FAF Munich, Germany, Vol. 73.
- Sim, S.H. and Song, D.S. (2014), Analysis of precipitable water vapor variation in Algeria using radiosonde, *Proceedings of the KSGPC 2014 Spring Symposium*, KSGPC, April, Seoul, Korea, pp. 131-136.
- 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.
- Song, D.S. (2007), *Accuracy Improvement of Precipitable Water Vapor Estimation by Precise GPS Analysis*, Ph.D. dissertation, SungKyunKwan University, Suwon, Korea, pp. 62-65.
- Turner, D.D., Lesht, B.M., Clough, S.A., Liljegren, J.C., Revercomb, H.E., and Tobin, D.C. (2003), Dry bias and variability in Vaisala RS80-H radiosondes, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, Vol. 20, 117p.
- Vey, S., Dietrich, R., Johnsen, K.P., Miao, J., and Heygster, G. (2004), Comparison of tropospheric water vapour over Antarctica derived from AMSU-B data, ground-based

GPS data and the NCEP/NCAR reanalysis, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, Vol. 82, pp. 259–267.

Wang, J., Carlson, D.J., Parsons, D.B., Hock, T.F., Lauritsen, D., Cole, H.L., Beierle, K., and Chamberlain, E. (2003), Performance of operational radiosonde humidity sensors in direct comparison with a chilled mirror dewpoint hygrometer and its climate implication, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 30, No. 16, 1860p.

Wang, J., Cole, H.L., Carlson, D.J., Miller, E.R., Beierle, K., Paukkunen, A., and Laine, T.K. (2002), Corrections of humidity measurement errors from the Vaisala RS80 radiosonde-Application to TOGA COARE data, *J. Atmos. Oceanic Tech.*, Vol. 19, pp. 981–1002.

Wu, P.M., Hamada, J.I., Mori, S., Tauhid, Y.I., Yamanaka, M.D., and Kimura, F. (2003), Diurnal variation of precipitable water over a mountainous area of Sumatra Island, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 42, pp. 1107–1115.