

AIRS를 이용한 대기 수증기 관측

하지현[†], 김두식, 박관동, 원지혜
인하대학교 사회기반시스템공학부 지리정보공학과

Observation of Atmospheric Water Vapors Using AIRS

Jihyun Ha[†], Dusik Kim, Kwan-Dong Park, and Jihye Won
Department of Geoinformatic Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea
E-mail: gnsskorea@gmail.com

(Received October 23, 2009; Accepted November 2, 2009)

요 약

AIRS는 미국 NASA의 지구관측위성인 Aqua에 탑재되어 있으며, 적외선 채널을 이용하여 지구 대기의 수증기량을 관측한다. 이 논문에서는 AIRS 적외선 관측데이터를 이용하여 인천에 소재한 GPS 상시관측소 상공에 분포하는 가강수량을 추출하고, 이를 GPS 추정치와 비교하였다. 그 결과 AIRS에서 관측된 가강수량과 GPS 가강수량은 거의 비슷한 경향을 보였으며, GPS 가강수량을 기준으로 편향 0.3cm, RMSE 0.7cm의 정확도를 달성하였다. GPS 가강수량과 AIRS 가강수량의 상관관계 분석 결과 0.89의 높은 상관계수를 보여 AIRS 가강수량이 지역적 특성을 비교적 잘 반영함을 알 수 있었다.

Abstract

The Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) aboard the Aqua satellite, which is one of the Earth Observing System satellites managed by National Aeronautics and Space Administration, provides global measurements of the water vapor in the atmosphere using infrared (IR) channels. In this paper, we restored precipitable water vapor (PWV) over a permanent GPS station in Incheon using the IR measurements of AIRS and compared the result with GPS-based PWV estimates. As a result, AIRS PWV had similar trends with GPS PWV; the bias of AIRS PWV against GPS PWV is 0.3 cm and root mean square error (RMSE) 0.7 cm. In addition, the correlation coefficient between AIRS PWV and GPS PWV was 0.89. Thus we conclude that the AIRS PWV reflects local characteristics of the water vapor content.

Keywords: AIRS, GPS, precipitable water vapor, Aqua

1. 서 론

전 지구적으로 발생하는 기후 변화는 이미 세계적인 이슈가 되고 있으며, 이로 인한 영향을 분석하고 예측하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 수치 예보(Numerical Weather Prediction) 모델의 성능 개선, 통신해양기상위성(Communication, Ocean, and Meteorological Satellite)

[†]corresponding author

활용 등 기후 변화와 예보 능력 향상을 위해 노력하고 있다. 수증기는 지구 기후시스템에 영향을 미치는 대표적인 온실 기체 중 하나이며, 동시에 구름과 에어로졸의 형성, 대기 하층부의 화학조성에도 영향을 미친다. 또한 대기 순환 및 에너지 전달에 핵심적인 역할을 하여 장/단기 기후 변화 연구 및 일기 예보에 있어 매우 중요한 요소로 여겨지고 있다.

대기 중 수증기의 분포 파악을 위하여 라디오존데, MWR(microwave radiometer), 원격탐사 위성, 그리고 GPS(Global Positioning System) 등이 활용되고 있다. 이 중 GPS를 이용한 대기 관측은 GPS 위성에서 송신된 신호가 수신기에 도달하기 전 지구의 대기층을 통과하면서 신호가 지연되는 현상을 역이용하는 것으로, 대기 중에 존재하는 수증기에 의해 지연된 량을 분리하여 습윤지연량을 결정한다. GPS를 이용한 대기 관측 방법은 1980년대 후반 Davis et al.(1985)에 의해 개념이 정립된 후, 국내외에서 다양한 연구가 진행되고 있으며 미국, 일본 등 관련 기술 선진국에서는 이미 기상 현업에 활용하고 있다. 국내에서도 기상 현업 적용을 위하여 라디오존데와 MWR, 그리고 GPS의 상호 비교를 위한 기술 검증 연구(조정호 등 2001, 하지현 등 2007)가 진행되었다.

원격탐사 위성은 위성에 탑재된 적외선 센서나 마이크로파 센서를 이용하여 밝기온도를 측정함으로써 대기 중에 분포한 수증기를 관측한다. 이는 관측소 상공에 대한 국지적 관측을 기반으로 하는 라디오존데, MWR, 그리고 GPS에 비해 관측소 유무에 상관없이 보다 광범위한 지역에 대한 관측이 가능하여 전지구적인 규모의 수증기량 관측에 적합하다. 그러나 적외선 센서는 구름 하층에 대한 복원이 불가능하며, 마이크로파 센서의 경우 구름에는 무관하지만 해양에서만 자료를 얻을 수 있고 정확도가 비교적 낮다는 단점이 있다. 따라서 원격탐사 위성만 이용할 경우 정밀한 대기 관측이 어려우므로 라디오존데, MWR, 그리고 GPS와의 상호 보완을 통한 대기 관측이 필요하다.

이 연구에서는 원격탐사 위성 중 미국의 지구관측 위성인 Aqua에 탑재된 AIRS(Atmospheric Infrared Sounder)를 이용하여 한반도 상공의 대기 수증기량 관측을 시도하였다. Aqua 위성 발사 이후, 현재까지 AIRS를 이용한 다양한 대기 관측 연구가 보고 되고 있다. Hagan et al.(2004)는 AIRS 기반 대기 수증기 복원 결과 검증을 위하여 NASA WB57 항공기와 NASA Pre-AVE 기구(balloon)에서 측정된 결과와 비교하였으며, 그 결과 세 장비가 약 25% 범위 내에서 일치함을 보였다. Pierce et al.(2006)은 최신 기후 모델과 AIRS에서 관측된 비습(specific humidity)을 비교하였으며, 800hPa 이하에서 기후 모델이 10-25%가량 건조하며 300-600hPa 범위에서 기후 모델이 비교적 습윤함을 보고하였다. Ye et al.(2007)은 AIRS 관측데이터와 ECMWF(European Center for Medium-range Weather Forecasts), 그리고 라디오존데의 수증기량 관측 결과를 비교하였으며, 라디오존데에 비해 AIRS가 약 9% 건조하며, ECMWF가 약 14% 습윤함을 보였다. McMillin et al.(2005)는 Aqua에서 관측된 대기 수증기량과 GPS를 이용한 대기 수증기량을 비교하였으며, 그 결과 가강수량(PWV, precipitable water vapor)을 기준으로 0.4-0.5cm의 정확도를 달성하였다. McMillin et al.(2007)은 AIRS와 라디오존데의 상대습도를 비교하였으며, 이 때 GPS를 이용하여 고도에 따른 라디오존데의 편향(dry and wet bias)을 보정하고 그에 따른 영향을 분석하였다. 그 결과 라디오존데의 편향을 보정한 후 AIRS와 더욱 잘 일치함을 보였다. Lamquin et al.(2009)는 ECMWF의 예측 결과와 AIRS의 상대습도를 비교하였으며, 구름이 있는 상황에 비해 맑은 날에 더욱 잘 일치하며, 구름이 있을 경우 편향이 발생함을 확인하였다.

국내에서는 Kim et al.(2003)과 Lee et al.(2005)에 의해 AIRS 원시 데이터 처리 시스템 개발

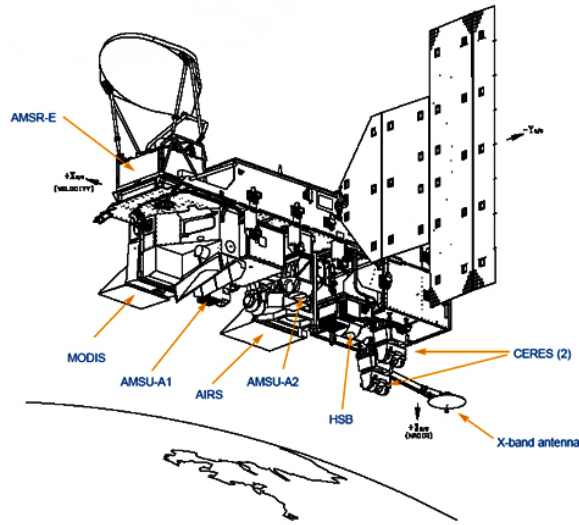


그림 1. Aqua 위성과 탑재체 모식도(<http://airs.jpl.nasa.gov>).

및 밝기 온도 생성을 위한 연구가 진행되었으며, 구자용과 손병주(2005)에 의해 Aqua 위성에 함께 탑재된 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS)와 HBS(Humidity Sounder for Brazil)를 활용한 대기 수증기 추정 연구가 진행되었다. 이 중 Lee et al.(2005)는 개발한 원시데이터 처리 시스템을 통하여 복원된 결과를 국내 라디오존데 관측 데이터와 비교하였으며, 혼합비(mixing ratio)를 기준으로 0.3-0.8g/kg의 정확도를 달성함을 보였다.

대기 수증기는 단일 장비에 의한 관측만으로는 한계가 있으며, 따라서 기술의 다양화를 통한 대기 관측 능력 배양, 그리고 기술 검증을 통한 신뢰성 확보가 중요하다. 그러므로 AIRS를 이용하여 대기 수증기를 관측하고, 그 결과를 국내 대기 관측 분야에 활용하기 위해서는 한반도 내에서 관측된 타 관측장비와의 비교·검증이 선행되어야 한다. 이 논문에서는 AIRS를 이용하여 대기 수증기량을 추출하고, 산출된 결과의 특성과 정확도 분석을 위하여 GPS로 관측한 수증기량과 비교하였다. 이는 인천 지역에 위치한 IHU1 상시관측소 상공을 대상으로 이루어졌으며, 이를 통하여 AIRS의 수증기량 관측 결과가 해당 지역의 대기 상태를 잘 반영하는 지 살펴보았다. 수증기량 비교에 이용된 요소는 PWV이다. 이 논문에서는 먼저 AIRS에 대해 소개한 후, GPS와 AIRS를 이용한 수증기 관측 결과를 기술한다.

2. AIRS

AIRS는 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration) 지구관측위성인 Aqua의 탑재체 중 하나로 기후 변화 연구와 일기 예보 향상 연구를 위해 개발되었다(<http://airs.jpl.nasa.gov>). 2002년 5월 4일 발사된 Aqua는 AIRS를 포함하여 AMSU(Advanced Microwave Sounding Unit), MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), CERES(Clouds and the Earth's Radiant Energy System), AMSR-E, 그리고 HSB의 6개 탑재체를 장착하고 있으며(그림 1), 이를 이용하여

표 1. AIRS 관측데이터 종류.

Level	Category	Contents
L1	L1A	DN
	L1B	Infrared geolocated radiances
		Visible/Near Infrared geolocated radiances
	AMSU/HSB calibrated brightness temperature	
L2	without-HSB	standard retrieval product
	IR-only	cloud-cleared radiances using AIRS IR and AMSU, without-HSB
	with-HSB	support product using AIRS IR and AMSU, without-HSB
L3	without-HSB	gridded standard retrieval product (Daily, 8 days, Monthly)
	IR-only	quantized cluster analysis product (5 days, Monthly)
	with-HSB	

육지, 해양, 대기 등에 대한 장주기 관측을 수행하고 있다. Aqua 위성은 태양동기 저궤도 위성(sun-synchronous satellites in LEO)으로 705.3km 상공에서 궤도 경사각(inclination) $98.2 \pm 1^\circ$ 로 비행하며 궤도주기 98.9분, 승교점(ascending node)은 지역 시간(local time)으로 오후 1시 30분 \pm 15분이다.

AIRS는 파장 $0.4\mu\text{m} - 1.0\mu\text{m}$ 범위의 가시광/근적외선 4개 채널과 $3.74\mu\text{m} - 15.4\mu\text{m}$ 범위의 적외선 2,378개 채널을 이용하여 빙하, 육지, 그리고 해양의 표면 온도와 표면 방출(emissivity), 구름 상층 높이, 오존량 등을 관측하며, 이로부터 대기와 육지에 대한 3차원 온도 분포도, 그리고 대기 수증기와 구름의 3차원 분포도를 생성한다. 구름에 의한 영향을 보완하기 위하여 마이크로파 영역의 복사계인 AMSU(50-90GHz), HSB(150-190GHz)와의 결합을 통해 지구 관측을 수행하며, 에너지 순환 및 기후 변화, 그리고 온실가스 증가에 따른 기후 시스템의 변화에 대한 연구를 수행한다. AIRS 관측데이터는 L(level) 1, 2, 3으로 구분되어 있으며(표 1), NASA GES DISC(Goddard Earth Sciences Data and Information Service Center)에서 제공하고 있다.

L1은 DN(digital number)이 기록된 L1A, 그리고 L1A를 이용하여 생성된 복사휘도(radiances)가 기록된 L1B로 나누어지며, L1B는 적외선 영역의 복사휘도 데이터, 가시광/근적외선 영역의 복사휘도 데이터, AMSU/HSB와의 조합을 통하여 보정된 밝기 온도 데이터로 구분되어 있다. L2는 L1B를 이용하여 대기와 지표의 속성을 추정된 것으로, AIRS 적외선 데이터와 AMSU의 조합으로 이루어진 without-HSB 데이터, AIRS 적외선 데이터로만 이루어진 AIRS IR-only 데이터, 그리고 AIRS 적외선 데이터와 AMSU/HSB의 조합으로 이루어진 with-HSB 데이터로 구분된다. 이들 데이터는 각각 일반 사용자를 위한 표준 복원 데이터(standard retrieval product)와 구름에 의한 효과가 보정된 데이터(cloud-cleared product), 그리고 1000-0hPa까지의 수직 프로파일이 기록된 데이터(support product)로 다시 구분된다. L1B와 L2는 HDF-EOS swath 형식(<http://hdfeos.org>)으로 기록되어 있으며, 각각의 데이터를 기준으로 6분 동안 관측된 데이터로 이루어진 1개 granule로 구성되어 있다. L3는 L2 표준 복원 데이터를 이용하여 생성되며, L2와 마찬가지로 without-HSB, AIRS IR-only, 그리고 with-HSB로 구분된다. 또한 이들은 표준 복원 평균(standard retrieval means)과 표준편차 정보가 기록된 격자 데이터(gridded product)와 quantized cluster analysis 데이터로 나누어진다. 격자 데이터는 하루, 8일, 한달 단위로 구분되며, quantized cluster analysis 데이터는 5일과 한달 단위로 구분된다.

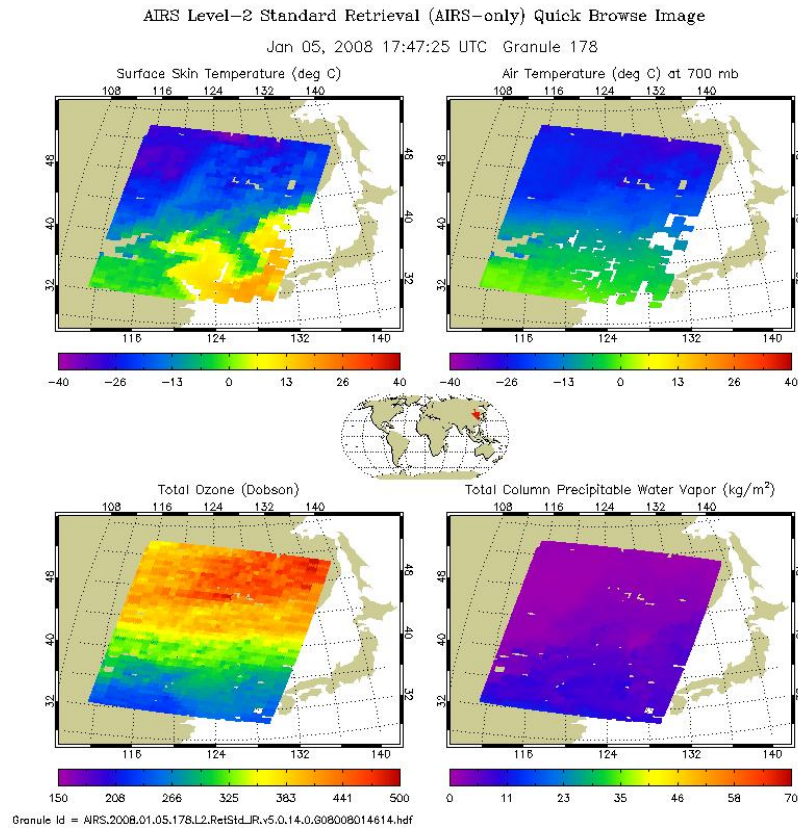


그림 2. AIRS2RET를 이용한 한반도 상공의 관측치 예시.

이 연구에서는 L2의 표준 복원 데이터 중 AMSU와 HSB가 반영되지 않은 AIRS IR-only 데이터 AIRS2RET를 이용하였다. AIRS2RET는 “AIRS.년.월.일.granule.L2.RetStd.v5.0.14.0.ID.hdf” 형태의 파일명으로 이루어져 있다. Granule은 6분 간격으로 구분되므로, 하루에 001-240번까지 생성된다. 예를 들어 그림 2의 AIRS2RET는 “AIRS.2008.01.05.178.L2.RetStd-IR.v5.0.14.0.G08008014614.hdf”로 2008년 1월 5일의 granule 178 파일을 나타낸다. 또한 AIRS2RET는 그림 2와 같이 운량분율(cloud fraction, %), TPW(total precipitable water vapor, kg/m²), 표면 온도(surface temperature, K), 대기 온도(air temperature, K), 오존(Dobson)의 분포도 등에 대한 정보가 실려있다. AIRS2RET의 전체 데이터 필드(full swath data field)는 0-133까지 있으며, 각 필드에 대한 정보는 지면상 참고문헌으로 대체한다(JPL 2007).

AIRS의 TPW는 GPS IWV(integrated water vapor)와 동일한 개념으로 단위 면적당 분포한 수증기량을 의미한다. 이 연구에서는 AIRS2RET에 실린 TPW 정보를 이용하여 PWV로 환산하였으며, 이를 GPS로 추정된 PWV와 비교하였다. IWV는 식 (1)을 이용하여 PWV로 변환할 수 있다(Bevis et al. 1992).

$$PWV = IWV/\rho \quad (1)$$

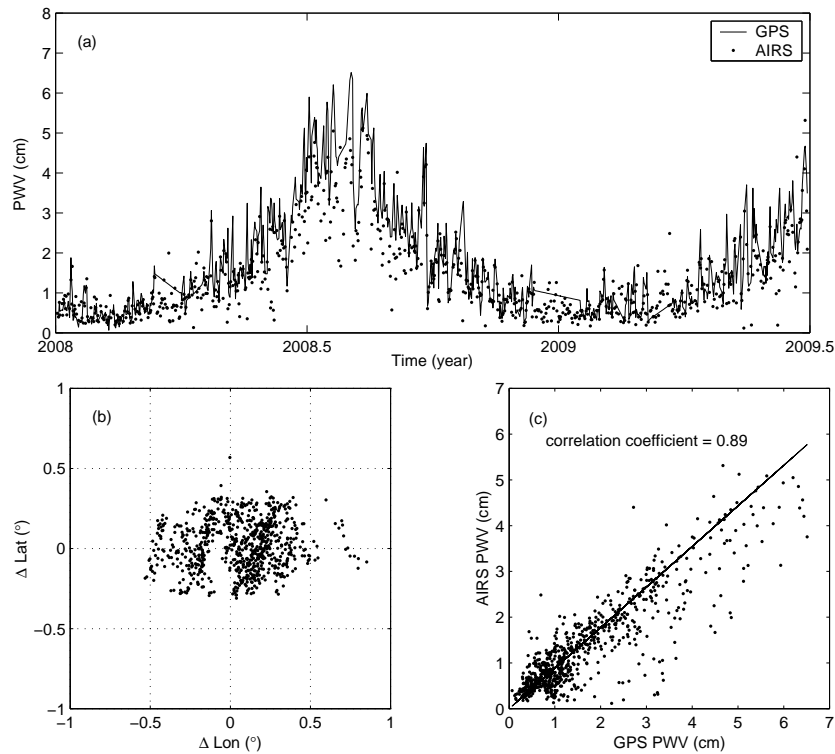


그림 3. 2008년부터 2009년 6월까지 IHU1 상시관측소 상공의 (a) AIRS와 GPS PWV 추정 결과, (b) 원점으로 설정한 IHU1 관측소 위치를 기준으로 한 AIRS 관측데이터 중심점의 경위도 차이, (c) AIRS PWV와 GPS PWV의 상관관계.

여기서 ρ 는 액체상태 물 밀도(density of liquid water)이다.

3. 가강수량 비교

이 논문에서는 AIRS2RET에서 TPW를 추출하기 위하여 MATLAB toolbox의 HDF를 이용하였으며, GPS 데이터는 GIPSY-OASIS II(GPS Inferred Positioning System-Orbit Analysis and Simulation Software II; Webb & Zumberge 1993)와 정밀궤도력(precise orbits)을 이용하여 10분 간격으로 습윤지연량을 추정하였다. GPS 데이터 처리시 습윤지연량의 주요 오차요인인 PCV(phase center variation), OTL(ocean tidal loading displacements), 그리고 GRD(azimuthal gradients)를 보정하였다. 그림 3에 AIRS와 GPS의 PWV 산출 결과를 나타내었다.

그림 3a는 2008년 1월부터 2009년 6월까지의 인하대학교 IHU1 GPS 상시관측소(위도 37.45°N, 경도 126.65°E, 고도 62.02m) 상공의 PWV를 나타낸 것이다. AIRS PWV는 IHU1 상시관측소 상공에 가장 근접한 지점의 관측치를 이용하였으며, 3σ 이상은 이상점(outlier)로 간주하여 제거하였다. 연구에 사용된 AIRS PWV 관측치는 총 806점이며, 이 중 33점을 이상점으로 제거하였다. 전체 관측치 중 4% 가량을 차지하는 이상점은 주로 여름에 발생하였다. 이는 수도권 열섬(thermal island) 현

상에 의해 실제 대기 밝기 온도보다 높은 수치로 관측 되거나, 구름에 의해 차폐되어 실제보다 낮게 관측되기 때문이다(박민호 2001). GPS PWV와 AIRS PWV의 시간 간격을 맞추기 위하여 선형 보간(linear interpolation)하였다. 그림 3b는 IHU1 관측소 위치를 원점으로 설정하고, IHU1 관측소 지점과 연구에 사용된 AIRS 관측데이터 중심점의 경위도 차이를 나타낸 것이다. 그림 3c는 GPS PWV와 AIRS PWV의 상관관계를 보여준다.

그림 3a를 보면, AIRS PWV와 GPS PWV는 서로 비슷한 경향을 보이며, 여름에 7cm에 가까이 증가하고 겨울에 1cm 이하로 감소하는 한반도의 전형적인 PWV 계절 신호를 보인다. 그림 3a에 나타낸 AIRS PWV는 IHU1 상시관측소를 기준으로 위도 $\pm 0.3^\circ$, 경도 $\pm 0.5^\circ$ 범위에서 관측된 값이다(그림 3b). 이는 AIRS의 적외선 센서 IFOV(instrument field of view)에 해당하는 값으로, 해당 범위 내에서는 동일한 화소(pixel) 값을 가짐을 의미한다. AIRS 적외선 센서의 IFOV는 $1.1^\circ \times 0.6^\circ$ 이다. 즉, GPS로 관측한 PWV는 관측소가 위치한 지점의 연직 방향으로의 1점 관측치인 반면, AIRS PWV는 IHU1 상시관측소가 포함된 $1.1^\circ \times 0.6^\circ$ 지역의 대표값이라 할 수 있다. 따라서 그림 3a의 PWV 값은 그림 3b와 같이 위성의 궤적에 따라 다소간의 위치 변동은 있지만, IFOV 범위에 포함되므로 IHU1 상시관측소 지역 상공에 대한 AIRS 관측값임을 의미한다.

AIRS PWV는 GPS PWV를 기준으로 편향 0.3cm, RMSE(root-mean-square error) 0.7cm로 나타났다. 이와 같은 결과는 McMillin et al.(2005)이 달성한 편향 0.1-0.2cm, RMSE 0.4-0.5cm에 비해 높은 수치이다. 그러나 McMillin et al.(2005)은 AMSU와 조합된 AIRS 데이터, 즉 without-HSB를 사용하였으나 이 연구에서는 마이크로파 관측데이터와의 조합에 의한 대기 보정이 되지 않은 AIRS-only를 이용하였기 때문이다. 즉, 연구에 사용된 AIRS 관측데이터의 종류가 다르기 때문에 대기 효과가 보정되지 않아 정확도가 비교적 낮게 나타난 것으로 판단된다.

한편, 이 연구에서 달성한 정확도는 일반적으로 GPS PWV와 라디오존데 PWV가 서로 0.3-0.5cm, MWR이 0.1-0.2cm의 오차 수준을 가진다는 점과 비교할 때 다소 높은 수치이다(조정호 등 2001, 하지현 등 2007). 그러나 그림 3c의 GPS PWV와 AIRS PWV의 상관관계 분석 결과를 보면, GPS와 AIRS PWV는 상관계수(correlation coefficient) 0.9 정도의 비교적 높은 상관성을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 AIRS에서 관측된 PWV가 관측지역의 PWV를 비교적 잘 반영하고 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 AIRS로 관측한 PWV는 GPS나 라디오존데, 그리고 MWR에 비해 정확도는 낮지만 지역적 특성을 비교적 잘 반영한다. 특히 AIRS는 지상관측소에 상관없이 광범위한 지역에 대한 관측이 가능하므로 라디오존데, MWR, GPS와 상호 보완할 경우 보다 정확한 대기 수증기 모니터링이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

이 논문에서는 AIRS를 이용하여 한반도 상공에 분포한 수증기량을 추출하고, 이를 GPS와 비교함으로써 AIRS의 대기 관측 활용 가능성에 대해 알아보았다. AIRS L2 표준 복원 데이터 중 AMSU와 HSB가 반영되지 않은 AIRS 적외선 관측데이터를 이용하였으며, 관측치 중 TPW 값을 PWV로 변환하였다. GPS 관측데이터는 IHU1 상시관측소에서 수집된 관측치와 정밀궤도력을 이용하여 GIPSY-OASIS로 처리하였다. 그 결과 AIRS에서 관측된 PWV와 GPS PWV는 매우 유사한 경향을 보였으며, GPS PWV와 비교했을 때 AIRS PWV는 편향 0.3cm, RMSE 0.7cm의 정확도를 달성하였

다. 이는 GPS-라디오존데, GPS-MWR의 PWV 비교 결과에 비해 다소 높은 수치이다. 그러나 GPS PWV와의 상관관계 분석 결과 상관계수가 비교적 높게 나타났다. 즉 AIRS를 이용할 경우 정확도는 다소 낮지만 지역적 특성을 비교적 잘 반영함을 알 수 있었다. 또한 향후 마이크로파와 조합된 데이터를 이용할 경우 정확도가 향상될 것으로 기대된다. AIRS는 라디오존데나 MWR, 그리고 GPS와 달리 관측소에 무관하게 광범위한 지역에 대한 관측이 가능하므로 상호 보완할 경우, 보다 정확한 대기 수증기 관측이 가능할 것으로 판단된다.

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

참고문헌

- 구자용, 손병주 2005, 한국기상학회지 41, 625
- 박민호 2001, 대한토목학회지, 21, 861
- 조정호, 박필호, 박종욱, 임형철, 김상조, 조하만, 김명수, 서애숙 2001, 한국기상학회지, 37, 557
- 하지현, 박관동, 장기호, 양하영 2007, 대기, 17, 291
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. 1992, JGR, 97, 15787
- Davis, J. L., Herring, T. A., Shapiro, I. I., Rogers, A. E., & Elgered, G. 1985, Radio Science, 20, 1593
- Hagan, D. E., Webster, C. R., Farmer, C. B., May, R. D., Herman, R. L., Weinstock, E. M., Christensen, L. E., Lait, L. R., & Newman, P. A. 2004, GRL, 31, L21103
- JPL 2007, JPL Technical Report (AIRS Version 5.0 Released Files Description), D-38429
- Kim, S., Park, H., Kim, K., Park, S., Kim, M., & Lee, J. 2003, Atmosphere, 13, 71
- Lamquin, N., Gierens, K., Stubenrauch, C. J., & Chatterjee, R. 2009, Atmos. Chem. Phys., 9, 1779
- Lee, J., Kim, M., Lee, C., Yang, M., Park, J., & Park, J. 2005, Korean Journal of Remote Sensing, 21, 371
- McMillin, L. M., Zhao, J., Rama Varma Raja, M. K., Gutman, S. I., & Yoe, J. G. 2005, in proceedings of 9th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (Washington DC: American Meteorological Society), p.15
- McMillin, L. M., Zhao, J., Rama Varma Raja, M. K., Gutman, S. I., & Yoe, J. G. 2007, JGR, 112, D13S90
- Pierce, D. W., Barnett, T. P., Fetzer, E. J., & Gleckler, P. J. 2006, GRL, 33, L21701
- Webb, F. H. & Zumberge, J. F. 1993, An Introduction to the GIPSY/OASIS-II (California: JPL Publ.)
- Ye, H., Fetzer, E. J., Bromwich, D. H., Fishbein, E. F., & Olsen, E. T. 2007, GRL, 34, L19701