

Aqua 위성 AMSU-A 고도별 온도자료를 이용한 열적 대류권계면 고도 산출 및 활용

조영준^{1),2)} · 신동빈^{2),*} · 권태영³⁾ · 하종철¹⁾ · 조천호¹⁾

¹⁾국립기상연구소 예보연구과, ²⁾연세대학교 대기과학과, ³⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2014년 11월 5일, 게재확정일: 2014년 12월 11일)

Retrieval of Thermal Tropopause Height using Temperature Profile Derived from AMSU-A of Aqua Satellite and its Application

Young-Jun Cho^{1),2)}, Dong-Bin Shin^{2),*}, Tae-Yong Kwon³⁾, Jong-Chul Ha¹⁾, and Chun-Ho Cho¹⁾

¹⁾Forecast Research Laboratory, National Institute of Meteorological Research, KMA, Seoqwipo, Korea

²⁾Dept. of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

³⁾Dept. of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 5 November 2014; accepted 11 December 2014)

Abstract In this study, thermal tropopause height defined from WMO (World Meteorological Organization) using temperature profile derived from Advance Microwave Sounding Unit-A (AMSU-A; hereafter named AMSU) onboard EOS (Earth Observing System) Aqua satellite is retrieved. The temperature profile of AMSU was validated by comparison with the radiosonde data observed at Osan weather station. The validation in the upper atmosphere from 500 to 100 hPa pressure level showed that correlation coefficients were in the range of 0.85~0.97 and the bias was less than 1 K with Root Mean Square Error (RMSE) of ~3 K. Thermal tropopause height was retrieved by using AMSU temperature profile. The bias and RMSE were found to be -5~-37 hPa and 45~67 hPa, respectively. Correlation coefficients were in the range of 0.5 to 0.7. We also analyzed the change of tropopause height and temperature in middle troposphere in the extreme heavy rain event (23 October, 2003) associated with tropopause folding. As a result, the distinct descent of tropopause height and temperature decrease of ~8 K at 500 hPa altitude were observed at the hour that maximum precipitation and maximum wind speed occurred. These results were consistent with ERA (ECMWF Reanalysis)-Interim data (potential vorticity, temperature) in time and space.

Key words: AMSU-A, thermal tropopause height, Stratospheric-Tropospheric Exchange (STE)

1. 서 론

대류권계면은 성층권과 대류권을 구분하는 경계로 성층권의 오존이 대류권으로 유입되고 대류권의 수증

기 및 화학물질들이 성층권으로 유입되는 통로이다. 이러한 성층권-대류권 상호작용은 전 지구 기후에 상당한 변화를 야기할 것으로 추측되고 있어 대류권계면 고도가 기후변화에 중요한 “fingerprint(지문)”로 강조되고 있다(Holton et al., 1995; Santer et al., 2003; Son et al., 2009). 현재 대류권계면은 성층권의 오존 감소로 인한 기온 감소와 대류권에서의 이산화탄소 증가로 인한 기온 증가로 그 고도가 증가하고 있다고 보고되고 있다(Santer et al., 2003). 기상학적 측면에

*Corresponding Author: Dong-Bin Shin, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, 50 Yonsei-ro, Seodeamun-gu, Seoul 120-749, Korea.
Phone : +82-2-2123-5685, Fax : +82-2-365-5163
E-mail : dbshin@yonsei.ac.kr

서도 대류권계면 접힘(tropopause folding) 현상이 종종 발생하여 지상저기압의 급격한 발달과 함께 난류, 집중호우, 대설 등 위험기상을 유발시킨다(Lee et al., 2001; Kim and Chun, 2010; Kim et al., 2012). 따라서 대류권계면 고도의 시·공간적 변화를 이해하고 상세히 관찰하는 것은 기후학적 측면뿐만 아니라 예보적인 측면에서도 무엇보다 중요한 부분일 것이다.

대류권계면은 열적, 역학적, 그리고 화학적(오존) 대류권계면으로 정의되고 있다. 열적 대류권계면(thermal tropopause)은 연직 기온감률이 2 K km^{-1} 가 되는 고도로 이 고도에서부터 2 km 이내에서 기온감률이 2 K km^{-1} 이하로 유지되는 고도이다(WMO, 1957). 역학적 대류권계면(dynamical tropopause)은 특정 값의 위치 소용돌이도(Potential Vorticity, PV)를 이용하여 결정된다(Reed, 1955). WMO (1986)에서는 1.6 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ K m}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)를 대류권계면으로 정의하고 있다. 화학적 대류권계면(chemical tropopause)은 오존 혼합비의 연직 경도가 60 ppbv km^{-1} 를 초과하고 오존혼합비가 80 ppbv 이상일 때 결정된다. 또한 이 고도 위 500~2,000 m 층에서 오존혼합비가 110 ppbv 를 초과해야 한다(Bethan et al., 1996).

대류권계면 고도를 추정하는 연구에는 주로 라디오존데, 오존존데, VHF (Very High Frequency) 레이더, Global Positioning System (GPS), 그리고 ECMWF (European Center for Medium Range Weather Forecasts) 와 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료를 통해 수행되어져 왔다(Gage and Green, 1982; Nastrom et al., 1989; Hoerling et al., 1991; Hoinka, 1998; Schmidt et al., 2004, 2005; Tomikawa et al., 2009; Choi and Kim, 2010). 라디오존데와 오존존데를 이용한 대류권계면 고도는 관측된 온도와 오존을 통해 직접적으로 추정되지만 육상의 특정 지점에서만 관측을 수행하기 때문에 해양을 포함한 전 지구적 대류권계면 고도의 분포를 파악하기에는 어려움이 있다. 특히 하루 2번(0000, 1200 UTC) 혹은 4번(0000, 0600, 1200, 1800 UTC)만 관측을 수행하기 때문에 대류권계면 고도의 시간적 변화를 이해하는 데 한계가 있다. 또한 북반구 중위도 지역에서는 편서풍에 의해 관측지점에서 동쪽으로 이동하며 관측되는 특징이 있다(Kim et al., 2011).

VHF 레이더는 연속적인 관측을 통해 시간에 따른 대류권계면 고도의 변화를 상세히 볼 수 있다. 그러나 라디오존데와 마찬가지로 육상의 몇몇 지점에서만 관측을 수행하고 있고 국내에서는 아직까지 이러한 관측이 이루어지고 있지 않다. GPS를 이용한 대류권계면 고도 추정은 GPS 전파염폐(Radio Occultation; RO)기법을 이용해 산출된 연직 온도 프로파일을 이

용하여 열적 대류권계면 고도를 산출한다. 전파염폐 기법은 GPS 신호가 대기에 의해 굴절 및 지연되는 특성을 이용한 것이다. GPS RO로 추정된 온도 프로파일은 1 km 이하의 높은 해상도로 관측되기 때문에 좀 더 정확한 열적 대류권계면 고도 추정이 가능하다. 그러나 연직 습도 분포, 초굴절(superrefraction), 궤도 추적 오류, 전리층 오차(ionospheric error) 등으로 인해 관측 오차가 유발될 수 있다(Kuo et al., 2004). 모델 재분석 자료는 온도 및 PV를 이용하여 전 지구적인 열적, 역학적 대류권계면 고도를 추정할 수 있다. 또한 수렴, 발산, 온도변화경향, Q-벡터 등 여러 진단변수를 통해 역학적인 특징을 이해할 수 있다. 그러나 6시간 그리고 1.5° 혹은 2.5° 간격의 낮은 시·공간 분해능을 갖고 있어 중규모 이하의 변화를 이해하는 데 어려움이 있다.

위성을 통한 전 지구 온도 프로파일 관측은 주로 저궤도 위성을 통해서만 이루어지고 있다. 저궤도 위성은 전 지구 관측이 가능하지만 동일 지역에 대해 2~3회 정도의 낮은 관측 주기를 갖는 단점이 있다. 그러나 3시간 간격 이하의 강수 산출을 목표로 하는 GPM (Global Precipitation Measurement) 프로젝트와 같이 다수의 저궤도 위성을 이용하면 이러한 단점을 해결할 수 있다(Hou et al., 2014). 또한 위에서 설명된 모델, 존데, VHF 자료와 통합하여 사용한다면 성층권-대류권 상호작용 연구에 있어 더 큰 효과를 기대할 수 있을 것이다. 현재까지 위성자료를 이용하여 대류권과 성층권의 온도 경향에 대한 연구는 수행된 바 있으나 국내외적으로 대류권계면 고도를 추정하는 연구는 거의 전무한 상황이다(Yoo et al., 2011). 따라서 대류권계면 고도의 추정을 위하여 한반도 상공을 관측한 위성 온도 프로파일의 검증과 활용 가능성 여부, 그리고 위성의 온도 프로파일 자료를 이용한 열적 대류권계면 고도의 산출이 시급하다.

AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)/AMSU 검증 계획은 Aqua 위성 발사 2년 전부터 준비되었다(Fetzer et al., 2000). AIRS/AMSU는 1 km 층 평균온도가 1 K 정확도(RMS error; Root Mean Square)로 제공되기 위해 설계되었다(Fetzer et al., 2003). Aqua 위성 발사 후 AIRS/AMSU 관측 자료에 대한 다양한 검증 연구가 수행되었다. Tobin et al. (2006)은 적도 해양지역에서 맑은 날에 대해 위성 관측 온도 프로파일이 매우 좋은 정확도를 갖고 있다고 보고하였고, Divakarla et al. (2006)은 또한 라디오존데 관측자료와 비교한 결과 잘 일치하고 있다고 보고하였다. Gettelman et al. (2004)은 2004년 1월 16일에서 2월 2일까지 $5^\circ\text{S} \sim 40^\circ\text{N}$ 지역에서의 항공기 관측 자료를 통하여 중·상부 대류권(500~30 hPa)에서 관측된 Aqua 위성의 온도를 검증하였다. 이 결과, 하부 성층권(100~50 hPa)에서 일

부 큰 변동성을 제외하고는 위성에서 관측된 온도는 일반적으로 ± 1.5 K으로 항공기 관측과 잘 일치한다고 보고하였다. 일반적으로 중위도 지역의 대류권계면 고도는 250~200 hPa로 알려져 있다(Hoinka, 1998).

이 연구의 주된 목적은 위성 온도 프로파일을 이용하여 성층권-대류권 상호작용 연구의 주된 지표로 활용되는 열적 대류권계면 고도를 추정하는 데 있다. 이것은 위성 온도 프로파일을 이용하면 WMO에서 정의된 열적 대류권계면 고도를 추정할 수 있고, 기존 검증연구를 근거로 AMSU 온도 프로파일 자료를 이용하여 열적 대류권계면 고도 추정이 가능하다고 판단되기 때문이다. 또한 AMSU 센서와 함께 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS), MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer), HSB (Humidity Sounder for Brazil), 그리고 CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy System) 등 다양한 센서를 탑재한 Aqua 위성은 오존, 일산화탄소, 수증기량, 복사수지, 구름특성, 강수량, 에어로졸, 습도 프로파일 등 여러 관측 요소들이 있어 향후 AMSU에서 관측된 대류권계면 고도 변화와 관련된 다양한 성층권-대류권 상호작용 연구를 수행할 수 있다. 또한 AMSU와 같은 위성자료는 지상관측에 제한이 있을 경우와 광범위한 관측이 요구될 때 그 활용도가 높을 수 있다. 2장에서는 연구에 사용된 자료와 연구 방법에 대해 설명하였고, 3장에서는 위성 온도 프로파일의 정확도 검증과 열적 대류권계면 고도를 추정하였다. 또한 라디오존데에서 추정된 열적 대류권계면 고도와 상호 비교하였다. 4장에서는 대류권계면 접합현상이 발생한 사례를 선정하여 대류권계면 고도 변화 및 중간 대류권의 온도 변화를 분석하였다. 마지막으로 5장에서는 결과를 요약, 정리하였다. 이렇게 분석된 결과는 성층권-대류권 상호작용 연구뿐만 아니라 위험기상 예보 측면에서 대류권계면 접합 현상을 유추하는 자료로 활용될 것으로 기대된다. 또한 향후 발사될 대한민국의 성층권 장기채공무인기와 저궤도 위성은 온도 프로파일을 관측할 계획에 있어 이러한 관측의 사전연구 자료로 활용하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

WMO에서 정의한 열적 대류권계면 고도를 산출하기 위하여 Aqua 위성의 AIRS/AMSU Version 6 (V6) 알고리즘으로부터 산출된 Level 2 고도별 온도 자료를 활용하였다. AMSU에서 산출된 고도별 온도 (AIRX2RET)는 1100~0.1 hPa까지 총 28개 등압면 고도에 대한 자료이고, 수평 공간해상도는 약 50×50 km이다(Olsen, 2013). AMSU는 50~60 GHz에 위치한 12개의 O_2 흡수채널을 이용하여 연직 고도별 온도를 산

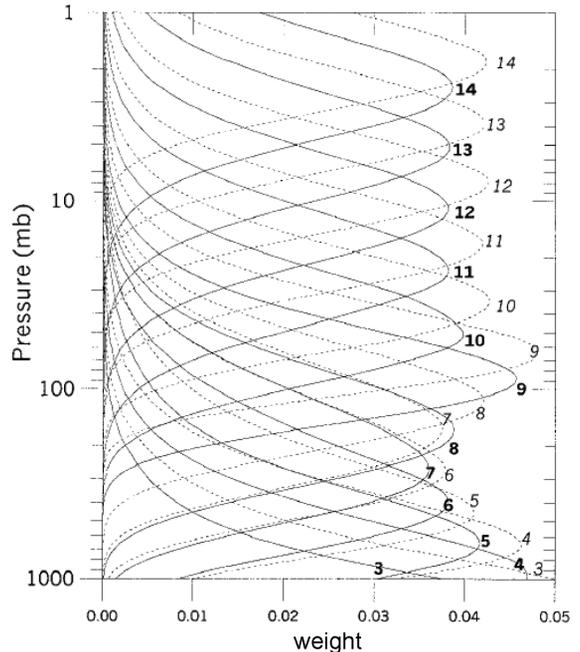


Fig. 1. Weighting function of AMSU (Goldberg et al., 2001).

출한다(Goldberg et al., 2001; Fig. 1). 일반적으로 AIRS/AMSU와 AMSU로부터 산출된 온도는 각각 지표 그리고 500~50 hPa 등압면 고도(중간 대류권과 하부 성층권)를 분석하는 데 사용되어져 왔다(Olsen, 2013). 따라서 본 연구에서는 열적 대류권계면 고도 산출 및 중간 대류권(500~400 hPa)에서의 온도변화에 초점을 맞추고 있기 때문에 AMSU 온도 프로파일 자료를 활용하였다.

AMSU에서 산출된 고도별 온도의 정확도 검증을 위하여 라디오존데 관측 자료와 비교하였다. 사용된 자료는 매일 4번 관측(0000, 0600, 1200, 1800 UTC)을 수행하는 오산 라디오존데(지점번호: 47122)의 2011~2013년(3년) 동안의 관측 자료이다. 이 연구에서는 Aqua 위성의 적도통과 시각(Local Equatorial Crossing Time; LECT)이 1:30 am (descending)과 1:30 pm (ascending)이기 때문에 한반도 통과 시각을 고려하여 0600과 1800 UTC에 관측된 라디오존데 자료를 이용하였다. 북반구 중위도 지역에서의 라디오존데는 편서풍의 영향으로 관측을 수행할 때 동쪽으로 이동하는 특징을 갖는다. 이러한 이동은 계절별로 큰 변동성을 가지지만 약 400 hPa 고도에서 평균적으로 30 km 이동하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2011). 따라서 두 자료간의 관측 시각의 차이와 공간적 차이를 최소화하기 위하여 오산 관측지점을 기준으로 시간적

으로는 ± 1 시간 이내 그리고 공간적으로는 50 km 이내에서 가장 가까운 위성관측 값을 비교하였다.

AMSU 고도별 온도 프로파일 자료를 이용하여 WMO에서 정의된 열적 대류권계면 고도를 산출하였다. 즉, 연직 기온감률이 2 K km^{-1} 가 되는 고도로 이 고도에서부터 2 km 이내에 기온감률이 2 K km^{-1} 이하로 유지되는 고도를 열적 대류권계면으로 정의하였다(WMO, 1957; Zäng and Hoinka, 2001). 이렇게 산출된 열적 대류권계면 고도는 오산 라디오존데에서 추정된 열적 대류권계면 고도와 상호 비교하였다. 여기서 라디오존데의 열적 대류권계면 고도는 위성과 동일한 등압면 고도의 온도를 이용하여 계산되었다. 또한 위험기상이 발생한 사례를 선정하여 대류권계면 고도의 하강 그리고 중간 대류권에서의 온도변화 등 위성에서 관측된 특징을 분석하였다. 선정된 위험기상 사례는 2006년 10월 23일 영동지역 집중호우 사례로 대류권계면 접힘과 관련되어 있다고 보고되었다(Lee et al., 2010; Kim et al., 2012).

3. AMSU 온도 프로파일 검증 및 열적 대류권계면 고도 산출

한반도에서 AMSU 온도 프로파일의 정확도를 검증하기 위하여 오산 라디오존데 관측자료를 비교하였다. 비교 등압면 고도는 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50 hPa로 총 9개 층이다. 이 연구에서 500~50 hPa 고도에 대해서만 상호 비교한 것은 대류권계면 고도의 추정과 중간 대류권의 기온하강에 초점을 맞추고 있기 때문이다. Figure 2는 2011~2013 동안 고도에 따른 AMSU와 라디오존데에서 관측된 온도의 평균과 표준편차, 상관계수, bias (AMSU-라디오존데), 그리고 RMSE (Root Mean Square Error)를 보여준다. 두 자료에서 관측된 온도의 평균값은 100 hPa 고도까지 감소하다가 다시 증가하는 형태로 전형적인 대류권과 하부 성층권의 온도 분포를 보였다. 표준편차는 500 hPa 고도에서 AMSU와 라디오존데 모두 9.2 K으로 나타났고, 100 hPa 고도에서 4.6 K과 4.9 K으로 고도가 증가함에 따라 작아지는 특징을 보였다. Bias는 고도에 따라 $-0.3\sim-0.8\text{ K}$ 으로 매우 낮게 나타났고, RMSE는 고도에 따라 약 3 K의 수치를 보였다. 상관계수는 500~100 hPa 고도에서 0.85~0.97로 높은 상관성을 보였다. Yoo et al. (2011)은 2002년 9월~2010년 8월 동안 한반도에서 관측된 7개 지점(속초, 백령도, 오산, 포항, 광주, 고산, 흑산도)의 라디오존데 관측자료를 이용하여 Aqua 위성 AMSU의 level 3 월별 온도 프로파일 자료를 검증하였다. 1000, 500, 50 hPa 등압면 고도에 대해 검증을 수행한 결과, 상관계수는 0.65~0.94로 조사된 바 있다.

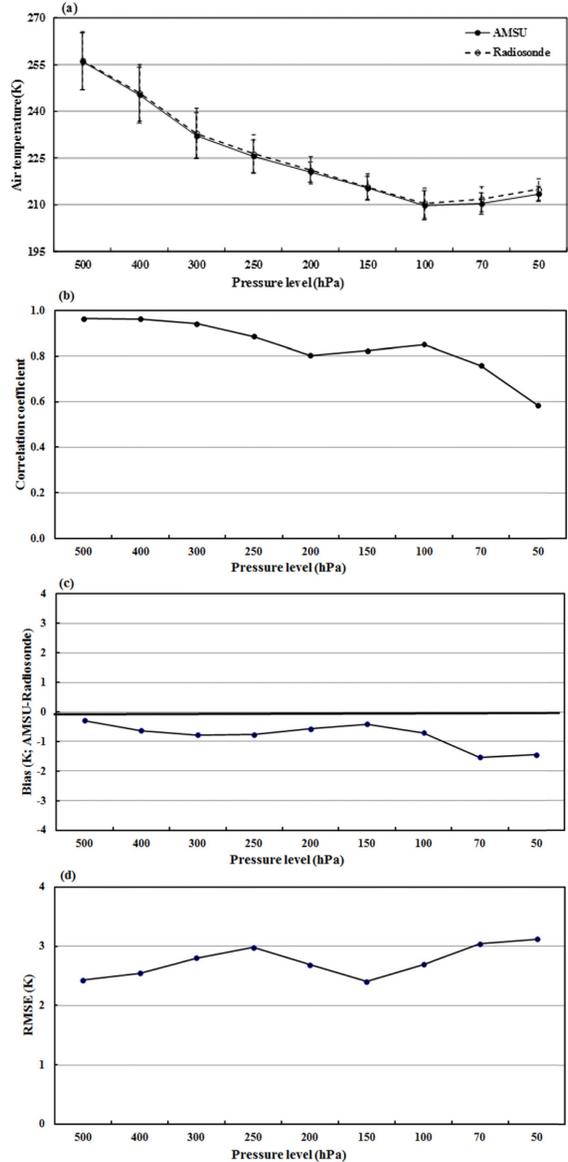


Fig. 2. The profile of (a) mean, standard deviation, (b) correlation coefficient, (c) bias, and (d) RMSE in air temperature between radiosonde and AMSU during the period of 2011~2013.

AMSU-라디오존데 관계성의 계절적 특징을 조사하기 위하여 500, 200, 그리고 100 hPa 등압면 고도에서 계절에 따른 평균, 표준편차, bias, RMSE, 그리고 상관계수를 조사하였다(Table 1). 평균 온도값의 계절적 변동성을 살펴보면 두 관측자료 모두 500 hPa 고도에서 봄철로부터 여름철 그리고 겨울철로 가면서 증가 후 감소하는 형태를 보였고, 100 hPa 고도에서는 여

Table 1. Mean, standard deviation, bias (AMSU minus Radiosonde), RMSE, and correlation coefficient (Cor.) in air temperature between radiosonde and AMSU during the period of 2011~2013.

Time	PL (hPa)	Mean (K)		Standard deviation (K)		Bias (K)	RMSE (K)	Cor.
		AMSU	Radiosonde	AMSU	Radiosonde			
Spring (MAM)	500	253.41	253.80	5.93	6.21	-0.39	1.98	0.95
	200	218.77	219.21	3.70	5.40	-0.45	2.85	0.88
	100	211.91	212.40	3.43	3.76	-0.49	2.11	0.84
Summer (JJA)	500	267.25	267.34	3.33	3.20	-0.09	1.47	0.90
	200	221.62	222.86	1.96	3.01	-1.24	2.61	0.64
	100	205.49	206.19	3.17	3.90	-0.70	2.48	0.79
Fall (SON)	500	257.53	257.62	6.28	6.67	-0.08	3.62	0.84
	200	220.40	220.65	2.81	4.15	-0.25	3.02	0.69
	100	208.39	209.70	4.09	4.83	-1.31	3.76	0.70
Winter (DJF)	500	245.87	246.44	3.61	4.46	-0.57	2.12	0.89
	200	221.30	221.61	3.44	3.99	-0.32	2.18	0.84
	100	213.43	213.70	3.11	3.31	-0.28	2.08	0.80

Table 2. Same as Table 1 except for the tropopause pressure (hPa).

Time	Mean (hPa)		Standard deviation (hPa)		Bias (hPa)	RMSE (hPa)	Cor.
	AMSU	Radiosonde	AMSU	Radiosonde			
Spring (MAM)	226	238	47	58	-12	45	0.7
Summer (JJA)	134	139	22	31	-5	29	0.5
Fall (SON)	169	206	58	64	-37	67	0.6
Winter (DJF)	278	286	40	52	-8	39	0.7

름철에 최소를 기록하고 겨울철로 가면서 다시 증가하는 전형적인 온도 변화를 보였다. 계절에 따른 고도별 Bias의 특징은 여름철 200 hPa 고도와 여름과 가을철 100 hPa 고도를 제외하고 모든 고도에서 -0.1~-0.5 K으로 나타났고, 일부 크게 나타나는 고도를 포함하더라도 Bias는 약 -1 K으로 낮게 나타났다. RMSE 또한 1.5~3.8 K으로 나타났다. 상관계수는 계절과 고도별로 0.65~0.95의 분포를 보였다.

AMSU 온도 프로파일 자료를 이용하여 열적 대류권계면 고도의 기압을 산출하였다. 이렇게 산출된 고도는 오산 라디오존데에서 추정된 대류권계면 고도의 기압과 상호 비교하였다. Table 2는 AMSU와 라디오존데에서 추정된 대류권계면 고도의 결과를 보여준다. 대류권계면 고도의 계절적 특징을 보면 AMSU의 대류권계면 고도는 라디오존데와 마찬가지로 여름철에 높고 겨울철에 낮은 뚜렷한 연변동을 보였다. Bias는 모든 계절에서 -5~-37 hPa로 낮게 나타났고, 라디오존데에서 추정된 대류권계면 고도가 상대적으로 높게 나타났다. RMSE 또한 45~67 hPa로 나타났다. 상관계수는 모든 계절에서 0.5~0.7로 높게 나타났다.

위 결과들은 상층에 강한 온도 변화가 나타날 때

연속적인 AMSU 온도 자료로부터 중간 대류권의 온도 변화를 탐지할 수 있음을 시사한다. 또한 중간 대류권에서 기온하강의 탐지가 가능하다는 것을 반영한다. 기온의 연직감률로 결정되는 열적 대류권계면 고도의 경우 기온의 연직 분포에 따라 그 고도의 변동 폭이 크게 나타난다. 현재 AMSU의 고도별 온도관측은 대류권계면 고도가 위치해 있는 상부 대류권 부근에서 연직 해상도가 50~100 hPa 간격으로 낮은 상태이다. 이러한 낮은 해상도는 정확한 대류권계면 고도를 추정하는데 한계를 가져다 주기 때문에 향후 관측에 있어 개선되어야 할 부분으로 고려된다.

4. 위험기상 발생 시 대류권계면 고도의 특징

Bell and Bosart (1993)와 Danielsen (1968) 연구에 따르면 중위도 지역에서 일부 지상 저기압의 발달은 상부 대류권 혹은 하부 성층권의 온도이류와 관련이 있다고 하였다. 따라서 지상 저기압의 급격한 발달과 관련하여 대류권 상부의 영향을 조사할 필요가 있다. 이 연구에서는 위험기상 사례를 선정하여 위성에서 관측된 열적 대류권계면 고도의 변화와 중간 대류권

에서의 기온변화의 특징을 조사하였다. 이러한 특징은 ERA (ECMWF Reanalysis)-Interim의 PV 그리고 온도 등과 함께 비교 분석하였다.

선정된 위험기상 사례는 2006년 10월 23일 영동지역 집중호우 사례로 대류권계면 접합과 관련되어 있다고 보고되었다. 요약하면 대류권계면이 하강하여 성층권 대기가 지상 저기압 발달에 영향을 주었다고 하였다(Lee et al., 2010). 이 사례는 23일 하루 동안 강릉에 304 mm의 폭우와 속초에서 63.7 m s^{-1} 의 순간최대풍속을 기록하였다. 이러한 극한값은 두 지역에서 기상관측을 수행한 이후로 10월 극값을 갱신한 수치이다(Kim et al., 2012). 영동지역에 극한 위험기상을 유발시킨 저기압은 2006년 10월 23일 0000 UTC 지상일기도에서 동해상에 위치해 있고 중심기압은 1006 hPa로 22일 0000 UTC와 비교하면 24시간 동안 약 6 hPa 하강하였다(Fig. 3). 이 저기압은 동해상으로 고기압의 지속적인 확장으로 인하여 이동속도가 느렸다(Kim et al., 2012).

Aqua 위성에서 관측된 AMSU 추정 대류권계면 고도와 500 hPa 등압면 고도에서의 온도변화를 분석하였다. 이것은 위험기상 발생 시 대류권계면 고도 하강으로 인한 상부 대류권 및 하부 성층권의 영향을

조사하고, 중간 대류권의 기온하강을 조사함으로써 불안정한 대기를 확인하기 위해서이다. Figure 4는 10월 22일 0500 UTC와 23일 0400 UTC에 관측된 한반도 주변의 열적 대류권계면 고도이다. 23일 0400 UTC에 한반도 중남부 지역을 중심으로 대류권계면 고도가 최대 약 300 hPa로 분포하고 있다. 이러한 수치는 22일 0500 UTC와 비교하였을 때, 약 100 hPa 하강한 수치이다. 특히 23일 0400 UTC 시각에는 강릉지역에서 시간당 20 mm 이상의 강수가 관측된 23일 0100~0330 UTC 시간대와 일치한다(Kim et al., 2012). 대기의 불안정도를 조사하기 위하여 AMSU에서 관측된 500 hPa 등압면 고도의 온도의 분포를 조사하였다(Fig. 5). 23일 0400 UTC에 약 -18°C (255 K)의 온도가 한반도 중남부 지역까지 분포하고 있고, 22일 0500 UTC와 비교하였을 때, 한반도 중남부지역으로 약 8 K의 기온하강이 나타났다. Kim et al. (2012)은 500 hPa 일기도 분석을 통해 동한만 남쪽에 있던 -15°C 등온선이 남하하여 23일 0000 UTC에 한반도 남부와 동해 남부 지역에 위치한다고 하였다.

ERA-interim 500 hPa 고도의 위치소용돌이도장(PV field)에서도 23일 0000 UTC에 2.0 PVU 이상의 강한 위치소용돌이도가 위성관측 대류권계면 고도와 일치

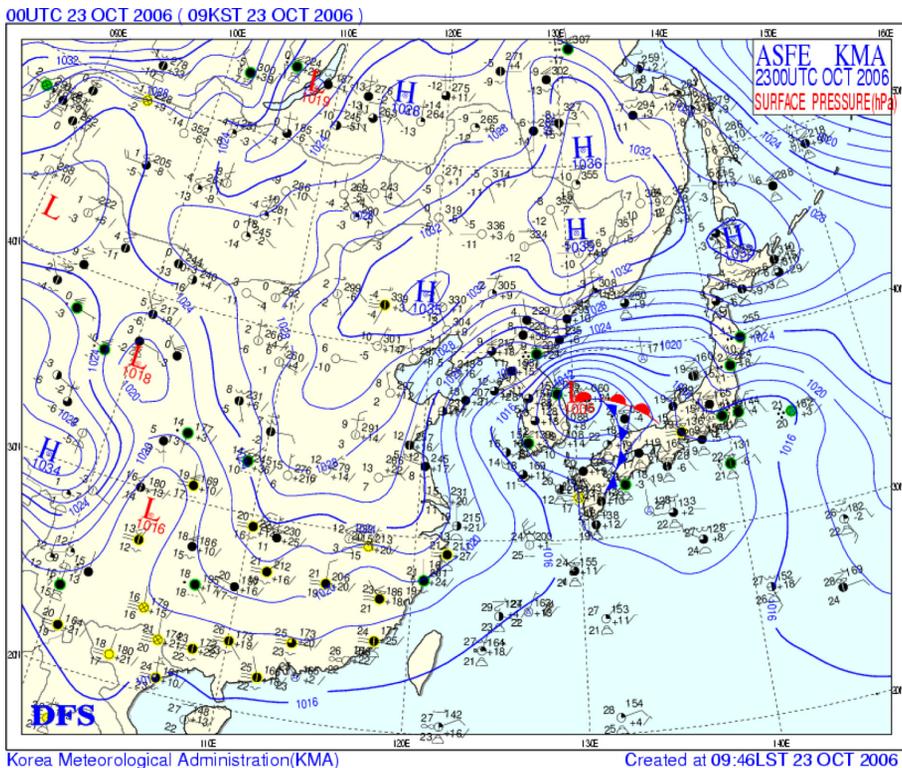


Fig. 3. Surface weather chart at 0000 UTC 23 Oct. 2006.

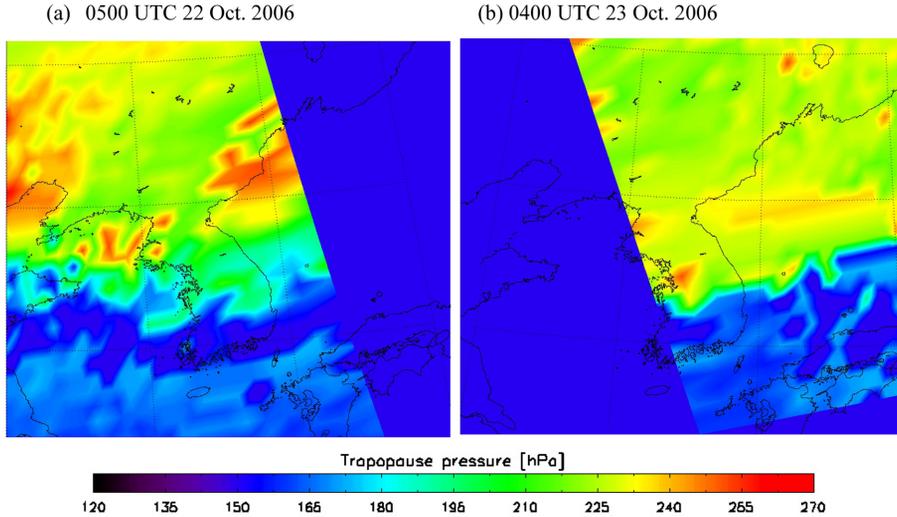


Fig. 4. Distribution of tropopause pressure (hPa) derived from AMSU at (a) 0500 UTC 22 and (b) 0400 UTC 23 Oct. 2006.

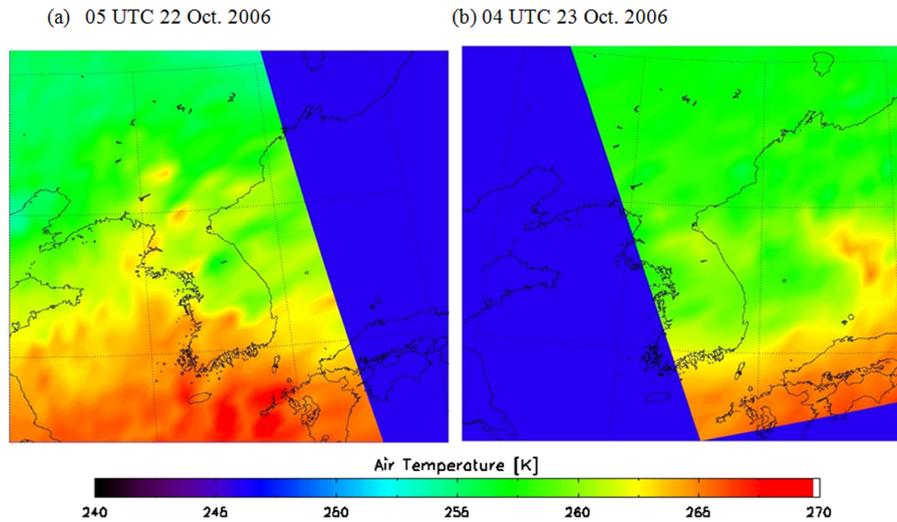


Fig. 5. Same as Fig. 4. except for the air temperature (K) at 500 hPa pressure level.

하게 한반도 중남부지역에 위치한다. 또한 이 지역을 중심으로 온도선이 조밀하게 위치하고 있어 불안정한 지역임을 확인할 수 있다(Fig. 6a). 역학적 대류권계면 고도의 하강과 비교하기 위하여 최대 PV가 나타난 지역(경도 128.5°E)을 기준으로 남북방향(30~45°N)의 PV와 풍속의 단면도를 조사하였다(Fig. 6b). 여기서 3 PVU는 위도 36°N에서 약 400 hPa 고도까지 위치하였고, 이 지역으로부터 남쪽 34.5°N의 200 hPa 고도에서 45 m s⁻¹ 이상의 제트핵(jet core)이 위치하였다. Figure 6c는 500 hPa 등압면 고도에서의 PV와 기온의 Hovmöller 다이어그램을 보여준다. PV는 23일 0000

UTC에 2 PVU 이상의 최대값을 기록하였고, 이 시각을 기준으로 24시간 동안 약 7 K의 기온하강을 보였다. 이러한 특징은 최대 강우량과 최대 풍속이 나타난 시간대(23일 09~12시)와 일치하였다(Kim et al., 2012).

AMSU에서 추정된 열적 대류권계면 고도와 역학적 대류권계면 고도를 나타내는 PV의 비교를 통해 AMSU에서 추정된 열적 대류권계면 고도의 활용이 유의함을 확인하였다. 또한 위성을 통한 대류권계면 고도 추정은 관측과 동시에 산출되기 때문에 직접적인 변화를 탐지할 수 있어 초단시간에 활용이 가능하다. 현

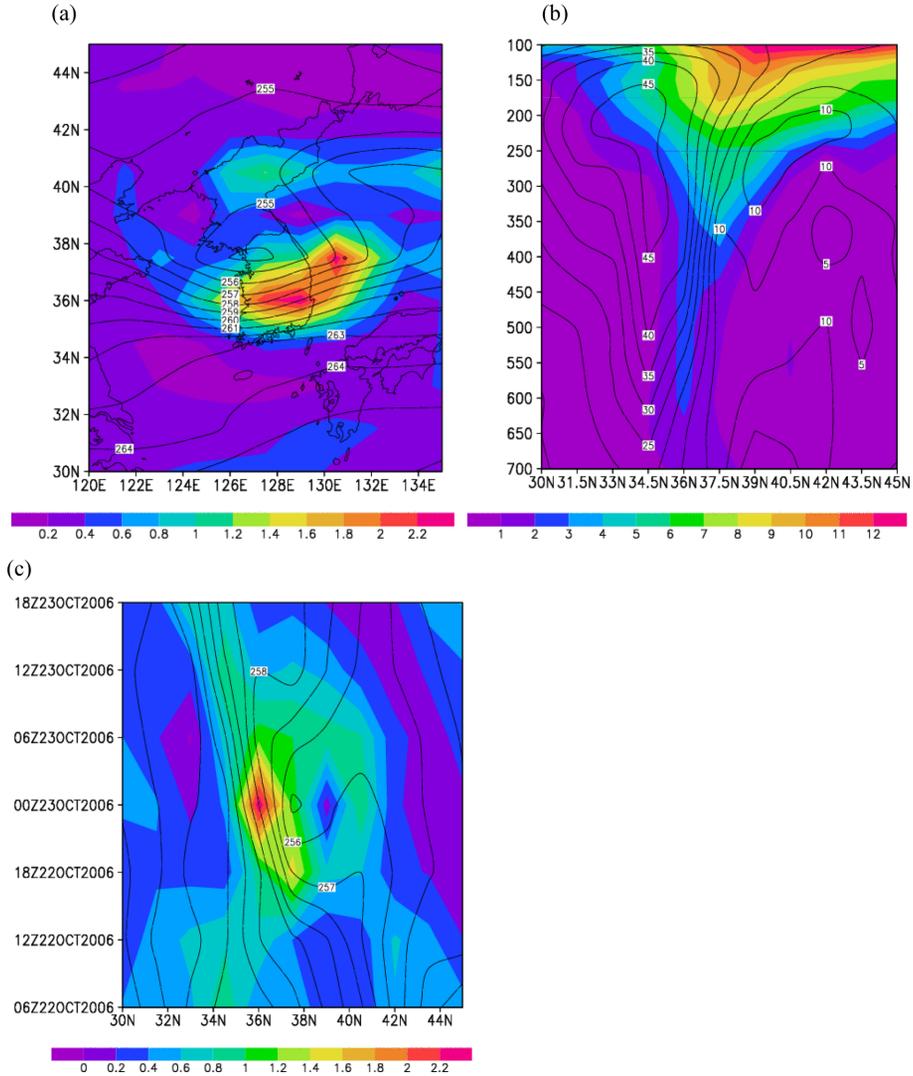


Fig. 6. (a) 500 hPa potential vorticity (shaded; $10^{-6} \text{ Km}^2 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and temperature (K; contour) field and (b) cross section of PV and wind speed (m s^{-1} ; contour) at 0000 UTC 23 Oct. 2006, and (c) Hovmöller diagram of PV and temperature at 500 hPa from ERA-interim.

재 대한민국 기상청의 UM (Unified Model) 전구 및 지역 모델의 분석장은 0000 UTC를 기준으로 6시간 간격으로 자료를 생산하고 있고, 입력자료 수집과 계산수행으로 기준 시간에서 약 3시간 후에 결과 확인이 가능하다. 특히 위 사례에서 분석되었듯이 최대 강수가 나타난 0100~0330 UTC 시간대에는 모델 결과 활용에 어려움이 존재한다. 그러나 위성의 경우 최대 강수 시간대에 관측이 되어 저기압 발달과 관련된 대류권계면 하강, 기온하강을 분석할 수 있었다. 이것은 모델 자료의 시간 분해능을 고려한다면 6시간 사이의 공백시간을 보완해주는 자료로 활용의 가치가 있다.

뿐만 아니라 고도별 온도 관측을 수행하는 다수의 위성을 조합하여 활용한다면 대류권계면 접합현상과 관련된 위험기상에 대한 예보 선행시간 확보에 이익을 가져다 줄 것이다.

5. 요약 및 결론

AMSU의 고도별 온도 자료를 이용하여 WMO에서 정의된 열적 대류권계면 고도를 추정하였다. 추정에 앞서 AMSU 고도별 온도의 검증을 위하여 오산 라디오존데 관측자료와 비교하였다. 두 관측 자료에서의

평균 온도값의 계절적 변동성은 500 hPa 고도에서 봄철로부터 여름철 그리고 겨울철로 가면서 증가 후 감소하는 형태를 보였고, 100 hPa 고도에서는 여름철에 최소를 기록하고 겨울철로 가면서 다시 증가하는 전형적인 온도 변화를 보였다. 상관계수는 500~100 hPa 고도에서 0.85~0.97의 높은 상관성을 보였고, Bias와 RMSE는 각각 1 K 이하 그리고 RMSE는 고도에 따라 약 3 K의 수치를 보였다. AMSU 온도 프로파일을 이용하여 열적 대류권계면 고도를 추정하였다. Bias는 모든 계절에서 -5~37 hPa로 낮게 나타났고, RMSE 또한 45~67 hPa로 나타났다. 상관계수는 모든 계절에서 0.5~0.7로 높게 나타났다. 따라서 이러한 결과를 통하여 상층에 강한 온도 변화가 나타날 때에 AMSU 고도별 온도로부터 중간 대류권의 온도 변화 탐지 및 대류권계면 고도 활용이 가능하다는 것을 보여준다.

실제 대류권계면 접합현상이 발생한 2006년 10월 23일 위험기상 사례를 선정하여 대류권계면 고도 변화와 중간 대류권에서의 온도 변화 등을 분석하였다. 분석 결과, 최대 강우량과 최대 풍속이 나타난 시간대에 뚜렷한 대류권계면 고도의 하강이 관측되었고, 500 hPa 고도의 중간 대류권에서도 약 8 K의 기온하강이 관측되었다. 이러한 결과는 모델 재분석 결과(역학적 대류권계면: PV, 기온)와 시·공간적으로 일치하였다. 따라서 이 연구를 통해 AMSU로부터 추정된 대류권계면 고도의 활용 가능성을 확인하였다. 이렇게 분석된 결과는 성층권-대류권 상호작용 연구뿐만 아니라 위험기상 예보 측면에서 대류권계면 접합 현상을 유추하는 자료로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국립기상연구소 주요사업 ‘고고도 장기체공시범기 기상센서 탑재 및 활용기술 개발’의 일환으로 수행되었다. AIRS/AMSU-A 자료를 제공해 주신 Goddard Earth Sciences Data Information and Services Center (GES DISC)에 감사합니다.

REFERENCES

- Bell, G. D., and L. F. Bosart, 1993: A case study diagnosis of the Formation of an upper-Level cutoff cyclonic circulation over the Eastern United States. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1635-1655.
- Bethan, S., G. Vaughan, and S. J. Reid, 1996: A comparison of ozone and thermal tropopause heights and the impact of tropopause definition on quantifying the ozone content of the troposphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **122**, 929-944.
- Choi, W.-K., and H. Kim, 2010: Annual variation and trends of the Arctic tropopause pressure. *Atmosphere*, **20**, 355-366 (in Korean with English abstract).
- Danielsen, E. F., 1968: Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, **25**, 502-518.
- Divakarla, M. G., C. D. Barnett, M. D. Goldberg, L. M. McMillin, E. Maddy, W. Wolf, L. Zhou, and X. Liu, 2006: Validation of atmospheric infrared sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts. *J. Geophys. Res.*, **111**, D09S15, doi:10.1029/2005JD006116.
- Fetzer, E. J., and Coauthors, 2000: AIRS science team validation plan. [Available online at <http://eosps.nasa.gov/sites/default/files/atbd/AIRSValP2doc.pdf>].
- _____, and Coauthors, 2003: AIRS/AMSU/HSB Validation. *IEEE TRANS. on Geosci. & Remote Sens.*, **41**, 418-431.
- Gage, K. S., and J. L. Green, 1982: An objective method for the determination of tropopause height from VHF Radar observation. *J. Appl. Meteorol.*, **21**, 1150-1154.
- Gottelman, A., and Coauthors, 2004: Validation of Aqua satellite data in the upper troposphere and lower stratosphere with in situ aircraft instruments. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L22107, doi:10.1029/2004GL020730.
- Goldberg, M. D., D. S. Crosby, and L. Zhou, 2001: The limb adjustment of AMSU-A observations: Methodology and validation. *J. Appl. Meteorol.*, **40**, 70-83.
- Hoerling, M. P., T. K. Schaack, and A. J. Lenzen, 1991: Global objective tropopause analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 1816-1831.
- Hoinka, K. P., 1998: Statistics of the global tropopause pressure. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 3303-3325.
- Holton, J. R., P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood, and L. Pfister, 1995: Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, **33**, 403-439.
- Hou, A. Y., R. K. Kakar, S. Neeck, A. A. Azarbarzin, C. D. Kummerow, M. Kojima, R. Oki, K. Nakamura, and T. Iguchi, 2014: The Global Precipitation Measurement (GPM) mission. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 701-722.
- Kim, I.-H., T.-Y. Kwon, and D.-R. Kim, 2012: MTSAT satellite image features on the severe storm events in Yeongdong region. *Atmosphere*, **22**, 29-45 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2010: A numerical study of Clear-Air Turbulence (CAT) encounters over South Korea on 2 April 2007. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **49**, 2381-2403.

- Kim, K.-H., Y.-H. Kim, D.-W. Kim, and D.-E. Chang, 2011: The performance assessment of special observation program (ProbeX-2009) and the analysis on the characteristics of precipitation at the Ulleungdo. *Atmosphere*, **21**, 185-196 (in Korean with English abstract).
- Kuo, Y.-H., T.-K. Wee, S. Sokolovskiy, C. Rocken, W. Schreiner, D. Hunt, and R. A. Anthes, 2004: Inversion and error estimation of GPS radio occultation data. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82**, 507-531.
- Lee, H.-R., K.-E. Kim, J.-M. Yoo, and K.-D. Min, 2001: A study on a severe winter weather occurred in the Korean Peninsula by tropopause undulation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 195-224 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-Y., H.-Y. Ko, K.-E. Kim, and I.-H. Yoon, 2010: An analysis of characteristics of heavy rainfall events over Yeondong region associated with tropopause folding. *J. Korean Earth Soc.*, **31**, 354-369 (in Korean with English abstract).
- Nastrom, G. D., J. L. Green, M. R. Peterson, and K. S. Gage, 1989: Tropopause folding and the variability of the tropopause height as seen by the flatland VHF Radar. *J. Appl. Meteorol.*, **28**, 1271-1281.
- Olsen, E. T., 2013: AIRS/AMSU/HSB Version 6 L2 standard pressure level. [Available online at http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/AIRS/documentation/v6_docs/v6releasedoc-1/V6_L2_Standard_Pressure_Levels.pdf].
- Reed, R. J., 1955: A study of a characteristic type of upper-level frontogenesis. *J. Meteor.*, **12**, 226-237.
- Santer, B. D., and Coauthors, 2003: Contribution of anthropogenic and natural forcing to recent tropopause height changes. *Science*, **301**, 479-483.
- Schmidt, T., J. Wickert, G. Beyerle, and C. Reigber, 2004: Tropical tropopause parameters derived from GPS radio occultation measurements with CHAMP. *J. Geophys. Res.*, **109**, D13105, doi:10.1029/2004JD004566.
- _____, S. Heise, J. Wickert, G. Beyerle, and C. Reigber, 2005: GPS radio occultation with CHAMP and SAC-C: global monitoring of thermal tropopause parameters. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 1473-1488.
- Son, S.-W., L. M. Polvani, D. W. Waugh, T. Birner, H. Akiyoshi, R. R. Garcia, A. Gettelman, D. A. Plummer, and E. Rozanov, 2009: The impact of stratospheric ozone recovery on tropopause height trends. *J. Climate*, **22**, 429-445.
- Tobin, D. C., and Coauthors, 2006: Atmospheric radiation measurement site atmospheric state best estimates for Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrieval validation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D09S14, doi:10.1029/2005JD006103.
- Tomikawa, Y., Y. Nishimura, and T. Yamanouchi, 2009: Characteristics of tropopause and tropopause inversion layer in the polar region. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **5**, 141-144.
- Yoo, J.-M., Y.-I. Won, Y.-J. Cho, M.-J. Jeong, D.-B. Shin, S.-J. Lee, Y.-R. Lee, S.-M. Oh, and S.-J. Ban, 2011: Temperature trend in the skin/surface, mid-troposphere and low stratosphere near Korea from satellite and ground measurements. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 439-455.
- WMO, 1957: Meteorology - A three dimensional science. *WMO Bull.*, **6**, 134-138.
- _____, 1986: Atmospheric ozone 1985: Global ozone research and monitoring report. WMO Rep. 16, 392 pp.
- Zänagl, G., and K. P. Hoinka, 2001: The tropopause in the polar region. *J. Climate*, **14**, 3117-3139.