

## 위성 자료가 재분석자료의 대규모 대기 순환장에 미치는 영향: JRA-55와 JRA-55C 비교 연구

박민규 · 최유성 · 손석우\*

서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2016년 6월 13일, 수정일: 2016년 11월 17일, 게재확정일: 2016년 12월 15일)

### The Impact of Satellite Observations on Large-Scale Atmospheric Circulation in the Reanalysis Data: A Comparison Between JRA-55 and JRA-55C

Mingyu Park, Yooseong Choi, and Seok-Woo Son\*

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 13 June 2016; revised 17 November 2016; accepted 15 December 2016)

**Abstract** The effects of satellite observations on large-scale atmospheric circulations in the reanalysis data are investigated by comparing the latest Japanese Meteorological Association's reanalysis data (JRA-55) and its family data, JRA-55 Conventional (JRA-55C). The latter is identical to the former except that satellite observations are excluded during the data assimilation process. Only conventional datasets are assimilated in JRA-55C. A simple comparison revealed a considerable difference in temperature and zonal wind fields in both the stratosphere and troposphere. Such differences are particularly large in the Southern Hemisphere and whole stratosphere where conventional ground-based measurements are limited. The effects of satellite observations on the zonal-mean tropospheric circulations are further examined in terms of the Hadley cell, eddy-driven jet, and mid-latitude storm tracks. In both hemispheres, JRA-55C exhibits slightly weaker and narrower Hadley cell than JRA-55. This is consistent with a weaker diabatic heating in JRA-55C. The eddy-driven jet shows a small difference in its latitudinal location only in the Southern Hemisphere. Likewise, while the Northern-Hemisphere storm tracks are quantitatively similar in the two datasets, Southern-Hemisphere storm tracks are relatively weaker in JRA-55C than in JRA-55. Their difference is comparable to the uncertainty between reanalysis datasets, indicating that satellite data assimilation could yield significant corrections in the zonal-mean circulation in the Southern Hemisphere.

**Key words:** JRA-55, JRA-55C, general circulation

## 1. 서 론

재분석자료란 지상 관측 기기, 라디오존데, 해상 부표, 비행기, 위성 등 다양한 관측 수단을 이용해 수십 년간 축적시킨 관측 자료를 자료동화 시스템과 수치

모델로 다시 가공한 자료를 의미한다. 재분석자료는 흔히 실제에 가장 가까운 자료로 여겨지며 바람, 온도, 습도, 운량, 수증기 분포 등 대기 변수들의 특성을 파악하는 데에 최적화되어 있다. 현재 ECMWF Atmospheric Reanalysis Interim (ERA-Interim; Dee et al., 2011), the Japanese 25-year Reanalysis (JRA-25; Onogi et al., 2007), the Japanese 55-year Reanalysis (JRA-55; Kobayashi et al., 2015), NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA; Rienecker et al., 2011), NCEP Climate

\*Corresponding Author: Seok-Woo Son, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.  
Phone: +82-2-880-8147, Fax: +82-2-883-4972  
E-mail: seokwooson@snu.ac.kr

Forecast System Reanalysis (CFSR; Saha et al., 2010), The Twentieth Century Reanalysis (20CR; Compo et al., 2011) 등과 같은 다양한 재분석자료들이 광범위한 분야에서 사용되고 있다.

한편 관측 기술이 점차 발달하면서 자료동화에 사용되는 관측 자료의 종류와 양, 품질도 증가하였으나 그로 인한 관측 자료 내에서의 시공간적 불균등(temporal and spatial inhomogeneity) 문제가 대두하였다. 많은 선행 연구들이 재분석자료가 기후 변화나 장주기 변동성 분석에 있어 신빙성 있게 산출되지 않음을 지적하였고(Bengtsson et al., 2004; Chen et al., 2008; Trenberth et al., 2008), 관측과 비교해서도 Dolinar et al. (2016)은 운량, 강수량, 그리고 대기 상단과 지표에서의 복사 수지의 경우 재분석자료가 위성 관측 결과와 큰 차이가 있음을 보였으며 Martineau and Son (2010)은 재분석자료와 관측에서의 성층권 돌연 승온(Sudden Stratospheric Warming) 발생 시점 모의 차이로 인하여 극지 평균 온도 아노말리가 상이함을 제시하였다.

이러한 문제의식을 반영하여 2015년 일본 기상청과 일본 기상 연구소는 기존에 제공하던 재분석자료 JRA-55와 동일한 4차원 변분 자료동화 시스템(4D-Var)을 사용하면서 입력 자료에서 위성 자료만을 배제한 재분석자료 Japanese 55-year Reanalysis Conventional (JRA-55C)를 새로이 제작하였다. 두 재분석자료의 경계 조건, 해수면 온도, 오존과 온실 기체의 농도 등의 조건은 모두 동일하다. JRA-55C는 재래적 관측 자료만이 일관되게 투입되어 기존 재분석자료들이 갖는 시간적 불균등 문제를 해소하였다. 이는 동시에 위성 자료의 유무가 재분석자료의 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 기회를 제공하였음을 의미한다. JRA-55와 JRA-55C에 자료동화된 라디오존데 숫자를 살펴보면, 북반구 중위도는 1979년 이래 일 1000회 이상의 라디오존데 관측이 꾸준히 유지된 반면 남반구 중위도는 일 100회에서 200회 사이의 관측이 유지되어 10배 이상의 관측 횟수 차이를 보였다. 성층권으로 한정 지을 경우, 10 hPa를 기준으로 북반구는 1980년부터 1989년까지 일 300회 내외의 관측이 이루어졌으나 남반구에서는 일 100회 미만의 관측이 이루어져 극명한 차이를 보임을 알 수 있다(Kobayashi et al., 2014).

JRA-55C를 활용한 선행 연구들은 JRA-55의 성능을 검증하기 위하여 재분석자료 비교군 중 하나로 JRA-55C를 포함하였다. Kobayashi et al. (2014)은 JRA-55C 소개를 위하여 발표된 논문으로 500 hPa 지위고도, 강수량, 온도와 동서바람 등 주요 변수들을 JRA-55와 단순 비교하였다. Kobayashi and Iwasaki (2016)는 JRA-55의 성층권 Brewer-Dobson circulation 모의 능력을 검증하기 위하여 JRA-55C를 비교 대상

으로 포함하였고, Kanno et al. (2016)은 겨울철 한랭기단의 장기간 양적 변화(long-term trend of cold air mass amount)를 확인하기 위한 재분석자료 중 하나로 사용하였다.

본 연구는 JRA-55의 성능 검증이 아닌, 위성자료 유무 자체가 남·북반구 대류권 순환에 어떠한 정량적 차이를 만들어냈는가를 분석하고자 한다. 순환장의 수평분포와 계절내 변동성 등 다양한 분석을 수행할 수 있으나 일차적으로 동서방향 평균 순환장의 기후값 및 경년 변동성을 중심으로 분석을 수행하였다. 그외 분석은 차후 수행할 계획이다. 구체적으로 중위도 기상 및 기후에 중요한 영향을 미치는 다음의 두 축 (1) 해들리 순환 강도와 경계, (2) 하층 제트와 스톱 트랙을 중심으로 연구를 수행하였다. 미래 기후에서의 해들리 순환 확장 경향(e.g., Seo et al., 2014)과 하층 제트 및 스톱 트랙의 이동에 관한 선행 연구(e.g., Yin, 2005; Barnes and Polvani, 2013)가 활발한 가운데, 본 연구는 위 현상들을 분석하는 재분석자료 품질에 위성 자료가 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

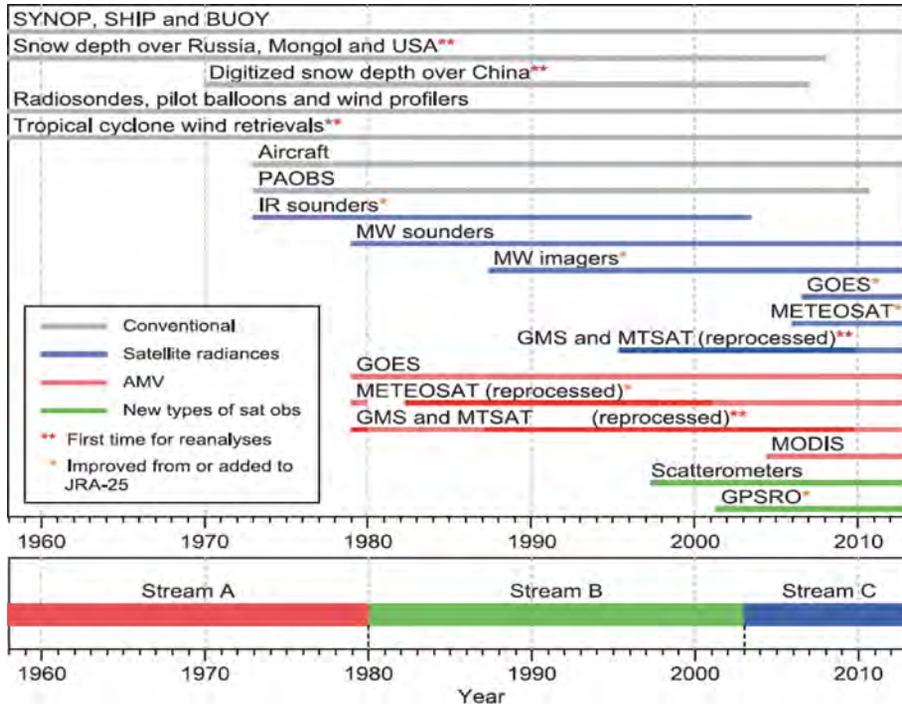
본 논문의 구성은 다음과 같다. 자료와 연구 방법을 2장에 기술한 다음 3장에서는 전지구적 기후값과 경년 변동성을 성층권 중심으로 간략히 개괄하였다. 4장은 대류권 저위도 동서방향 평균순환인 해들리 순환의 분석 결과를 반구 별로 기술하였다. 5장에서는 중위도 기상 및 기후에 중요한 영향을 미치는 하층 제트와 스톱 트랙 변동성을 분석하였다. 추가적으로 ERA-Interim 재분석자료의 결과를 함께 나타내어 재분석자료 간 편차와 JRA-55C와 JRA-55의 편차를 비교하였다. 이를 정리하여 6장에서 위성 자료의 유무가 재분석자료를 활용한 대규모 대기 순환장 분석에 어떠한 효과를 가져왔는지 종합적으로 요약하였다.

## 2. 자료와 연구 방법

### 2.1 자료

본 연구에서는 일본 기상청에서 제공하는 두 재분석자료 JRA-55와 JRA-55C를 사용하였다. 2010년부터 개발되기 시작하여 2013년에 공개된 JRA-55는 기존 일본 기상청의 재분석자료였던 JRA-25를 개량한 재분석자료이다. 기존 수치모델에 새로운 대기 복사 과정이 도입되었고 고해상도와 4차원 변분 자료동화 및 변분 편이보정(Variational Bias Correction; VarBC) 등이 새로이 반영되었다. 선행 연구에 의하면 주요 업데이트를 거치면서 기존 재분석자료에 비해 위성의 복사 자료 처리가 향상되었고 분석장에서의 오차가 감소했으며 성층권 온도 분석에서의 단점들을 극복하였다고 평가된다(Ebita et al., 2011).

JRA-55가 자료동화에 사용한 모든 관측 자료는 Fig.



**Fig. 1.** List of observations assimilated into JRA-55 with their period (top) and JRA-55 production streams (bottom). The production streams are separated into three periods depending on the availability of satellite measurement type [Taken from Ebata et al., (2011) with permission].

1에 정리되어 있으며, 사용된 위성 관측 자료의 종류와 자료동화 시스템의 개량 시기에 의거하여 3개의 스트림(stream)으로 구분한다. JRA-55C는 Fig. 1에서 회색으로 처리된 재래 관측(conventional) 자료만을 사용하였는데, 중간에 추가된 자료들인 위성 자료와 비행 관측 자료, 수동 지상 기압 자료(Pseudo Surface Pressure Observations produced by Australia; PAOBS)를 배제하였다(Kobayashi et al., 2014). 따라서 위성 자료뿐만 아니라 비행 관측 자료와 수동 지상 기압 자료의 영향도 기압이나 동서바람과 같은 기본 변수에 일부 포함되어 있을 것으로 추정된다. 다만 비행 관측 자료의 경우, 온도 자료의 신뢰도가 떨어진다는 이유로 JRA-55에서도 자료동화에 포함되지 않았고 PAOBS의 경우, 수치예보를 위해 개발된 자료로써(Saha et al., 2010) 자료동화에 투입된 개수가 하루 100~1000개 미만으로 다른 지상 기압 관측 자료에 비해 그 수가 수백 배 작다는 점(Kobayashi et al., 2015)을 고려하면 위성자료에 비하여 그 중요도가 상대적으로 떨어진다는 점이다. JRA-55는 1958년 1월 1일부터 2016년 4월 30일까지의 자료를 제공하고 JRA-55C는 위성 자료가 추가된 직후인 1972년 11월 1일부터 2012년 12월 31일까지의 자료를 제공한다.

본 연구에서는 Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES), Meteorological Satellite (METEOSAT), Geostationary Meteorological Satellite (GMS), Multifunctional Transport Satellite (MTSAT) 등의 위성을 통해 모든 위도에 걸쳐 대기 운동 벡터 (Atmospheric Motion Vector; AMV) 자료를 수집하기 시작한 1979년을 기점으로 하여(Kobayashi et al., 2015) JRA-55C 자료가 끝나는 2012년 12월 31일까지를 분석 기간으로 정하였다. 여러 변수 중 동서바람( $u$ ), 남북바람( $v$ ), 지위고도( $\Phi$ ), 기온( $T$ ), 대규모 응결 가열 속도(large scale condensation heating rate;  $Q_{lrght}$ ), 대류 가열 속도(convective heating rate;  $Q_{cnvht}$ ), 에디 연직 확산 가열 속도(vertical diffusion heating rate;  $Q_{vdfht}$ )를 이용하여 분석을 진행하였다. 세 비단열 가열 속도향(diabatic heating rate)을 합하여 비복사 가열 속도(non-radiative heating rate;  $Q_{nradi}$ )로 정의할 수 있다(Wright and Fueglistaler, 2013). 비단열 가열 속도를 제외한 모든 변수는  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 의 수평해상도와 37층(1000~1 hPa)의 연직해상도를 가지고 있으며 월별 평균 자료와 6시간 자료의 두 가지로 제공된다. 비단열 가열 속도의 경우 약  $0.562^\circ \times 0.562^\circ$ 의 수평해상도, 60층의 복합좌표계(hybrid coordinate) 연직해상도로 이

루어져 있다.

재분석자료는 그 자체로 불확실성을 가지고 있다 (Martineau et al., 2016). 이와 같은 불확실성은 ERA-Interim과 JRA-55를 비교함으로써 정량화하였다. 특히 500-hPa 질량 유선 함수와 하층 제트, 스톱 트랙 분석 시에는 ERA-Interim의 남북바람, 동서바람, 지위고도를 추가적으로 사용하였으며,  $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 의 수평해상도와 37층(1000~1 hPa)의 연직해상도를 갖는다.

## 2.2 연구 방법

전지구적 분석에서는 두 재분석자료 간의 전반적인 차이를 살펴보기 위하여 1979년부터 2012년까지 34년의 평균 기온과 동서바람의 연직구조를 분석하였다. 다음으로 기온과 동서바람의 34년 평균 표준편차를 분석하여 경년 변동성에서의 차이를 간략히 살펴보았다. 대류권 분석에 포함되는 해들리 순환의 연구방법을 살펴보면, 기존 연구에서 해들리 순환의 경계를 정의하는 방법으로 대류권계면의 높이(e.g., Lucas et al., 2012), 질량 유선 함수(e.g., Mitas and Clement, 2005), 대류권 상층 제트류(e.g., Allen et al., 2012), 총 오존 농도(e.g., Hudson et al., 2006), 해면기압(e.g., Choi et al., 2014) 등이 제안되었는데 본 연구에서는 500-hPa 질량 유선 함수로 정의하는 방법을 사용하였다. 이는 질량 유선 함수가 재분석자료에서 제공되는 남북바람의 동서방향 평균값( $\bar{v}$ )을 변수로 정의하여 재분석자료 간의 비지균풍의 차이와 이로 인한 대기 대순환의 차이를 정량적으로 확인할 수 있기 때문이다(Oort and Yienger, 1996). 또한 질량 유선 함수 이외의 방법들은 해들리 순환의 경계를 정의하는 데에 있어서 임의적으로 기준을 결정해야 하는 단점이 있다(Choi et al., 2014). 500-hPa 질량 유선 함수는 식(1)로 정의되며, 각 반구 아열대 500-hPa에서의 질량 유선 함수 값이 0이 되는 위도( $y_{500 \text{ hPa}} = 0$ )를 해들리 순환의 경계로 정의하였다(Mitas and Clement, 2005; Lu et al., 2007; Frierson et al., 2007; Son et al., 2010; Liu et al., 2012; Choi et al., 2014; Seo et al., 2014). 해들리 순환의 남북반구 경계의 거리를 너비로 정의하고, 각 반구별 해들리 순환의 경계 내에서 갖는 질량 유선 함수의 최대값(북반구) 및 최소값(남반구)을 강도로 정의하였다.

$$\Psi_{500 \text{ hPa}} = \int_0^{500} \frac{2\pi a \cos \phi}{g} \bar{v} dp \quad (1)$$

여기서,  $a$ 는 지구 반지름,  $g$ 는 중력가속도,  $\phi$ 는 위도,  $p$ 는 기압을 의미한다. 하층 제트는 중위도의 대류권 하층에서 남북방향의 온도 차이에 의해 발생하는 강한 바람을 의미한다. 온난이류를 통해 많은 양의 수증기를 스톱 내부의 상승기류에 공급하여 중위도 저

기압을 발달시킬 때 중요한 역할을 한다. 본 연구에서 하층 제트는 850 hPa에서의 최대 동서바람으로 정의된다(e.g., Woollings et al., 2010). 또한 동서방향 평균 시 하층 제트의 위치는 해당 고도에서 동서바람이 가장 강한 위도를 의미하며 흔히 에디에 의해 발생하는 제트의 위치로 불린다(Son and Lee, 2005).

스톱 트랙은 온대 지역의 일일 날씨 통계를 보여주는 지표가 된다(Compo and Sardeshmukh, 2004). 스톱 트랙은 온대 저기압이 우세하게 발생하여 지나가는 중위도에서 정의되는데, 발생 정도를 정량화한 스톱 트랙 활동성을 정의하기 위하여 평균 해면 기압, 지위고도, 남북바람 변동성 등이 다양하게 사용되고 있다(Harnik and Chang, 2003). 본 연구에서는 선행 연구와의 비교를 통해 분석 결과를 검증하기 위하여 지위고도로 스톱 트랙을 정의하였다. 스톱 트랙 활동성은 스톱에 의해 발생하는 변수의 변동성으로 표현될 수 있다.

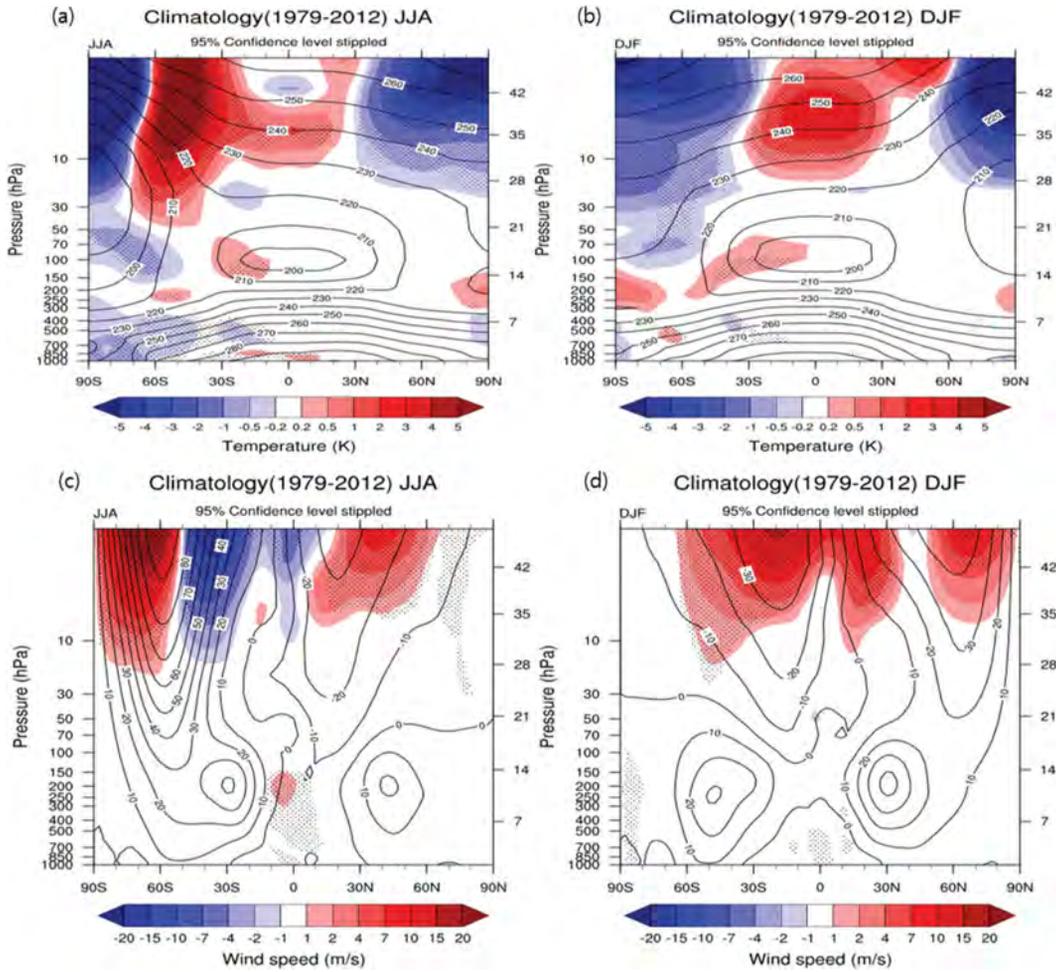
$$ZZ = \overline{z^2} = \overline{[z(t + 24hr) - z(t)]^2} \quad (2)$$

여기서,  $ZZ$ 는 스톱 트랙 활동성,  $z$ 는 지위고도의 일간 편차,  $z$ 는 지위고도,  $[\dots]$ 는 한달 이상의 시간 평균을 의미한다. 선행 연구에서는 24시간 간격으로 연속되는 관측 자료의 차이를 24시간 차이 필터로 명명하고 있는데, 이것이 저주파의 변동성을 제거하고 경압성 파동의 활동성에 집중하기 위한 하이패스 필터와 동일한 기능을 하기 때문이다(Wallace et al., 1988; Guo et al., 2009). 아울러 계산식이 간단하며 재분석자료와 관측 자료를 내삽 없이 바로 비교할 수 있다는 장점이 있다(Chang and Fu, 2002).

## 3. 성층권

Figure 2는 기온과 동서바람의 34년 동서방향 기후값을 계절별로 보여준다. JRA-55와 JRA-55C간의 편차는 음영으로 나타내었으며 통계적으로 유의한 값은 검은 점으로 표기하였다. 기온과 동서바람 모두 대류권보다는 성층권에서 큰 편차를 보인다. 특히 대류권과 상호 작용이 활발한 겨울 반구의 성층권에서 여름 반구보다 더 강한 편차가 발생하였다. 정량적으로 기온은 1 K 이상, 동서바람은  $2 \text{ m s}^{-1}$  이상의 편차를 보이며 이는 95% 유의 수준에서 유의하다. 남반구 대류권에서도 일부 유의한 편차가 발견되었으나 성층권 편차보다는 상대적으로 작다. 이는 근본적으로 성층권을 대상으로 삼은 재래 관측 자료의 수가 대류권보다 10배 이상 작기 때문이다.

동서바람의 경우, 대류권에서는 양극보다는 적도를 중심으로 유의한 풍속 차이가 발생했다. 10 hPa에서



**Fig. 2.** Latitude-pressure cross section of time mean (1979–2012) zonally-averaged (a, b) temperature, and (c, d) zonal wind for JJA (left) and DJF (right). Climatology from JRA-55C is denoted with contour lines while the difference to JRA-55 (JRA-55C minus JRA-55) is shaded. The differences, which are statistically significant at the 95% confidence level (two-tailed Student-t test), are stippled.

1 hPa까지의 상부 성층권에서는 편차가 증가하는 경향이 뚜렷하여 최대  $20 \text{ m s}^{-1}$  이상의 큰 편차를 나타냈다. 온도의 경우, 모든 위도에 걸쳐 5 K 이상의 매우 큰 기온차가 여름철(June-July-August; JJA)과 겨울철(December-January-February; DJF) 모두에서 확인되었으며 이는 동서바람 편차의 강도와 부호에 따른 온도풍 균형에 잘 부합하는 결과이다. JRA-55와 JRA-55C 모두 동서바람과 온도의 동서평균 기후값 개형이 거의 일치하여 위의 편차는 변수값의 크기 차이에 의해 발생하였음을 알 수 있다. 즉 위성 자료가 성층권 평균장의 형태에는 큰 영향을 미치지 않지만 강도에는 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 재래 관측 기기를 활용한 100~1000 hPa 온도 자료의 경우, 1995년

한해 약 1064만 회의 관측이 자료동화에 사용되었고 동서바람의 경우에는 약 890만 회의 관측이 자료동화되었다. 반면 위성 자료의 경우, 온도 복원에 사용되는 복사 관측 자료만 1995년 한해 1억 회 이상, 동서바람 복원에 사용되는 AMV와 JRA-55C에서 제외된 항공 관측 자료를 합쳐 1995년 한해 1천만 회 이상 자료동화에 추가되었다(Kobayashi et al., 2015).

Figure 3은 동서방향 평균 기온과 동서바람의 34년간 표준편차를 계절별로 보여준다. 기온과 동서바람의 경년 변동성을 확인해보면, 대류권의 대부분 지역이  $0.5 \text{ K}$ ,  $2 \text{ m s}^{-1}$  이하의 표준편차를 보인 데에 반해 성층권은  $3 \text{ K}$ ,  $16 \text{ m s}^{-1}$  이상의 높은 표준편차를 기록하였다. 두 재분석자료 간의 차이도 성층권에서 두드

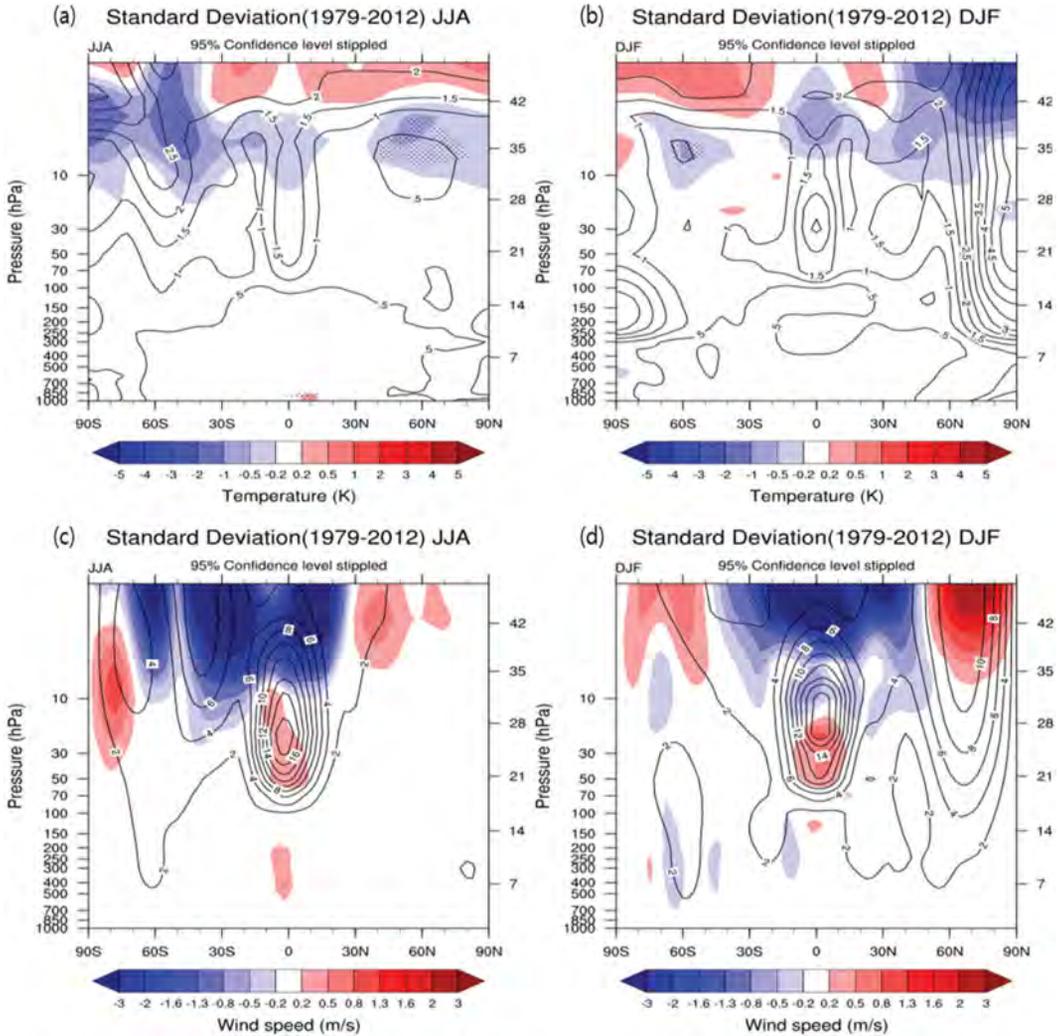


Fig. 3. Same as Fig. 2, but for zonally-averaged (a, b) temperature, and (c, d) zonal wind standard deviation.

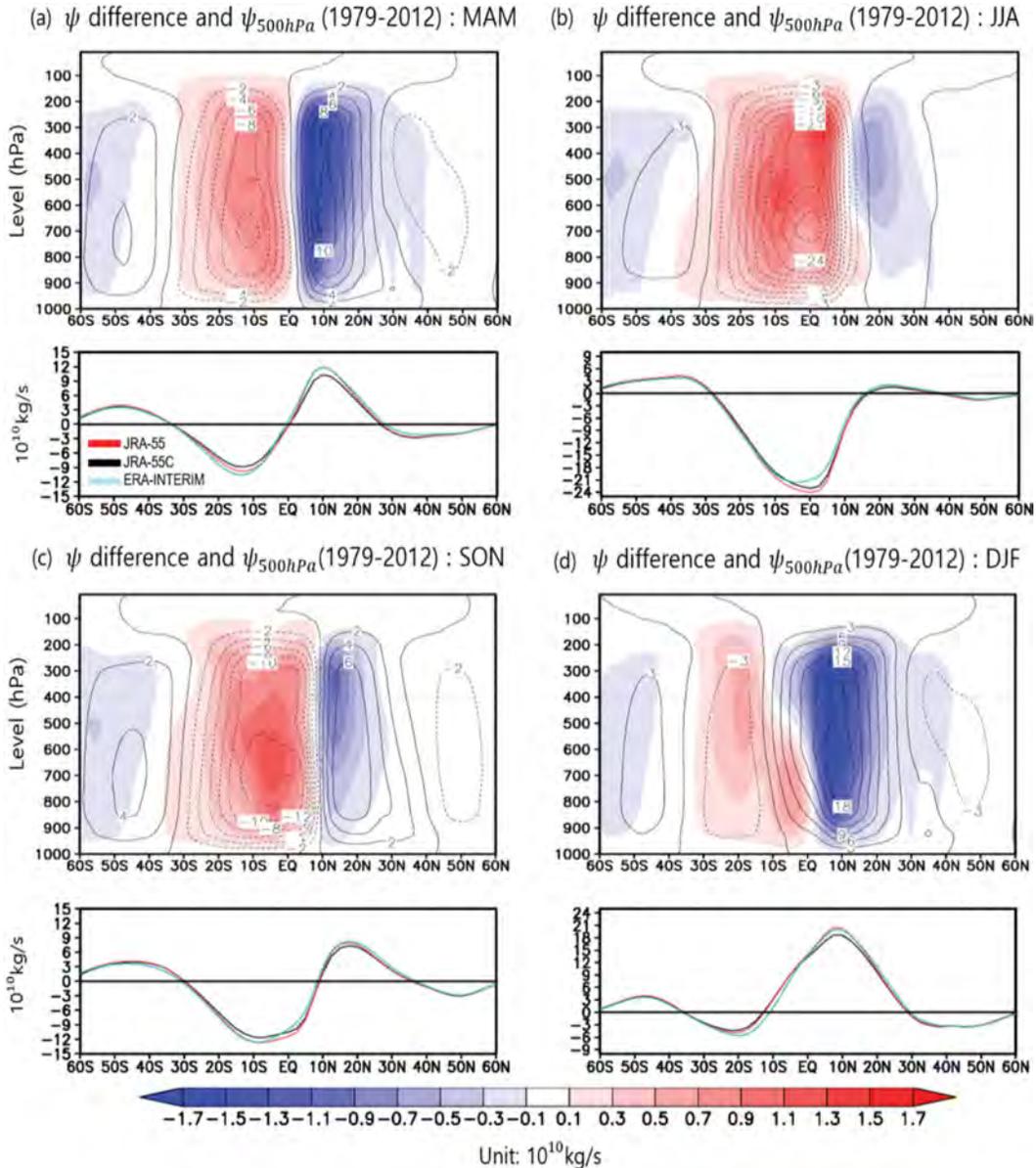
러졌는데 기온의 경우 최대 1 K 이상, 동서바람의 경우  $3 \text{ m s}^{-1}$  이상의 편차를 보였고 극지방에서는 양의 편차, 중위도와 적도에서는 음의 편차가 뚜렷하였다. 남반구 대류권에서 두 재분석자료의 기후값 차이가 뚜렷했던 것에 비해 표준편차 차이는 상대적으로 미미하였다. 또한 앞선 분석과 일관되게 여름철보다 겨울철에 그 편차가 강해지는 경향을 보였다.

적도 상공 20 hPa를 중심으로 나타나는 강한 경년 변동성은 성층권의 준2년주기운동(Quasi-Biennial Oscillation; QBO)에 의해 나타난 결과이다. 재래 관측 자료가 매우 희박한 지역임에도 불구하고 JRA-55C는 준2년주기운동에 의한 변동성을 반영하고 있으며 선행 연구의 시계열 분석에도 준2년주기운동이 뚜렷하게 나타난다(Kobayashi et al., 2014; Fig. 7. 참조).

상부 성층권에서 음의 편차, 하부 성층권에서 양의 편차가 나타난다는 사실에서 위성 자료가 더 높은 고도에서 더 큰 변동성이 나타나도록 보정함을 알 수 있다.  $5^{\circ}\text{S}$ 부터  $5^{\circ}\text{N}$ 까지 동서평균한 동서바람을 시계열 분석한 결과, 50 hPa 이상 고도에서 음의 편차와 양의 편차가 지속적으로 번갈아 나타남을 확인할 수 있었으며 편차 크기는 10 hPa 이상에서 가장 강하였다(그림 미제시). 결과적으로 위성 자료가 기후값과 경년 변동성 모두에서 성층권에 가장 큰 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다.

#### 4. 대류권 저위도: 해들리 순환

해들리 순환은 적도에서 중위도까지 형성되는 대기



**Fig. 4.** Seasonal difference of time-mean zonal-mean mass stream function between JRA-55C and JRA-55 and time-mean zonal-mean mass stream function at 500 hPa as a function of latitude. Climatology from JRA-55C is denoted with contour lines while the difference to JRA-55(JRA-55C minus JRA-55) is shaded.

대순환으로 경계에서 각각 상승류와 하강류가 발생함에 따라 기후에 상당한 영향을 미친다(Schneider, 2006). Figure 4는 동서평균된 남북바람의 34년(1979~2012) 기후값을 사용하여 계산한 고도별 질량 유선 함수와 500 hPa에서의 질량 유선 함수를 나타낸다. 1000 hPa 부터 10 hPa까지의 계절별 질량 유선 함수를 살펴보면, 앞서 전지구적 기후값 분석 결과와 마찬가지로 두

재분석자료의 개형은 거의 일치하였으나 규모 면에서 상당한 편차를 보였다. 여름철에는 30°S부터 10°N까지 해들리 순환이 형성되어 있고 해들리 순환의 중심인 10°S부터 적도 부근의 상공에서 편차가 뚜렷하게 나타났다. 특히 적도 상공 300 hPa에서 최대  $1.44 \times 10^{10} \text{ kg s}^{-1}$  정도의 양의 편차를 보였는데, 이는 위성 자료를 배제한 JRA-55C가 JRA-55보다 해들리 순환이 약

**Table 1.** Hadley cell strength, edge, and width in JRA-55 and JRA-55C, averaged over 34 years (1979~2012).

	JRA-55		JRA-55C		Difference (JRA-55C minus JRA-55)	
	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF
NH Strength at 500 hPa ( $10^{10}$ kg s <sup>-1</sup> )	1.96	20.51	1.48	18.69	-0.48	-1.82
SH Strength at 500 hPa ( $10^{10}$ kg s <sup>-1</sup> )	24.09	4.92	23.06	4.42	-1.03	-0.50
HC edge at NH (°N)	35.77	30.58	34.89	30.38	-0.88	-0.2
HC edge at SH (°S)	28.23	33.86	27.99	33.73	-0.24	-0.13
HC width (°)	64.01		63.47		-0.54	

함을 의미한다. JRA-55C는 재분석자료의 해들리 순환 분석에 있어서 JRA-55를 기준으로 최대 8% 정도의 편차를 만들었다.

겨울철에서는 10°S부터 30°N까지 해들리 순환이 형성되어 있고 여름철과 마찬가지로 적도 부근 상공 300 hPa에서 최대  $1.69 \times 10^{10}$  kg s<sup>-1</sup> 정도의 음의 차이를 보였는데, 북반구에서는 질량 유선 함수가 양수이기 때문에 이번에도 JRA-55C가 JRA-55보다 해들리 순환의 강도가 약함을 의미한다. 규모 면에서 JRA-55C는 JRA-55를 기준으로 해들리 순환 강도를 최대 15%까지 축소하여 표현하고 있다. 또한 봄철(March-April-May; MAM)과 가을철(September-October-November; SON)에서도 JRA-55C가 JRA-55를 축소 표현하는 경향을 그대로 따르고 있음을 알 수 있다. Liu et al. (2012)은 지상 기압과 월간 해수면 온도만을 자료동화에 투입하여 복원한 재분석자료 20th Century Reanalysis Version 2 (20CR2; Compo et al., 2011)을 사용하여 남반구 해들리 순환의 강도가 1871년부터 2008년까지 10년당  $0.07 \times 10^{10}$  kg s<sup>-1</sup>만큼 증가했고 북반구 겨울철 해들리 순환 강도는 10년당  $0.08 \times 10^{10}$  kg s<sup>-1</sup>만큼의 증가 추이를 확인하였다. 편차  $1.69 \times 10^{10}$  kg s<sup>-1</sup>은 약 140년 간의 해들리 순환 증가 추이의 약 200배에 해당하는 값이다. 위성 자료가 포함된 시기(1979~2003)의 겨울철로 분석을 한정하였을 때, 북반구 해들리 순환 강도가 NCEP-NCAR 재분석자료(Kalnay et al., 1996)에서는 10년당  $1.07 \times 10^{10}$  kg s<sup>-1</sup>, ERA40에서는 10년당  $2.96 \times 10^{10}$  kg s<sup>-1</sup>만큼 증가했다는 선행 연구 결과(Mitas and Clement, 2005)를 기준으로 위성 자료의 유무가 NCEP 트렌드의 약 1.5배, ERA-40 트렌드의 약 0.57배 정도의 편차를 만들 수 있음을 의미한다. 이는 자료동화에서 위성 자료 유무가 해들리 순환의 강도 추정에 지대한 영향을 미침을 시사한다.

500-hPa 질량 유선 함수 기후값의 계절별 분석에서는 ERA-Interim, JRA-55, JRA-55C를 비교하였다(Fig. 4. 하단). 그 결과, 계절과 지역에 따라서 JRA-55C와 JRA-55 간의 차이(녹색 실선)가 ERA-Interim과 JRA-55 간의 차이(청색 실선)보다 큰 경우와 작은 경우로

나뉘었다. 예컨대 북반구에서는 연중 내내 질량 유선 함수의 정점이 나타나는 저위도에 JRA-55C와 JRA-55 간의 차이가 ERA-Interim과 JRA-55 간의 차이보다 크게 나타난 반면, 남반구 중위도에서는 ERA-Interim과 JRA-55 간의 차이가 더 크게 표현되거나 봄철과 가을철의 경우처럼 비슷한 수준의 차이가 나타났다. JRA-55C가 연중 내내 JRA-55보다 해들리 순환의 기후값을 작게 표현한다는 사실은 곧 위성 자료의 유입이 해들리 순환의 강도 및 너비 추정을 상향 조정하는 효과를 낳았음을 의미한다.

Table 1은 두 재분석자료의 해들리 순환 강도와 경계, 너비를 계산한 결과를 정리한 도표이다. 먼저 500-hPa 강도 면에서 JRA-55C는 JRA-55보다 강도를 작게 나타내는데, 북반구와 남반구 모두 여름철보다는 겨울철에 결과를 더욱 축소하였다. 해들리 순환의 경계에 대해서도 JRA-55C가 JRA-55보다 축소 표현하였으나, 편차는 북반구 겨울철에 비해 여름철에 증가하였다. 너비를 계산할 때도 JRA-55C는 JRA-55에 비하여 값을 더 작게 도출하였으며, 종합적으로 JRA-55C가 JRA-55보다 해들리 순환 분석 결과를 축소하여 표현하고 있음을 볼 수 있다.

Figure 5에서는 해들리 순환의 남북 경계를 축소 표현하는 경향성이 매년 일관적으로 나타나는지 확인하기 위하여 JRA-55C와 JRA-55의 결과 차이를 시계열 분석으로 살펴보았다. 그 결과, 북반구에서는 여름철 4년, 겨울철 6년을 제외한 대부분의 연도에서 JRA-55C가 JRA-55보다 해들리 순환 경계를 축소하는 경향이 뚜렷하였다. 남반구의 경우에도 겨울철 4년을 제외한 모든 연도에서 JRA-55C가 해들리 순환을 축소 표현하였고, 여름철에만 축소, 과대 표현이 반복되어 경향이 뚜렷하지 않았다. 요컨대 해들리 순환 경계에 대한 경년 변동성 분석에 있어서도 JRA-55C의 축소 표현 경향성이 좀 더 강한 것으로 나타났다.

위와 같은 결과-즉 위성자료를 제거함으로써 약하게 추정된 해들리 순환-는 저위도 비단열 가열 속도와 밀접한 관계가 있다(Fig. 6). 특히 기온과 수증기 분포, 구름 등 여러 변수에 의해 결정되는 비복사 가

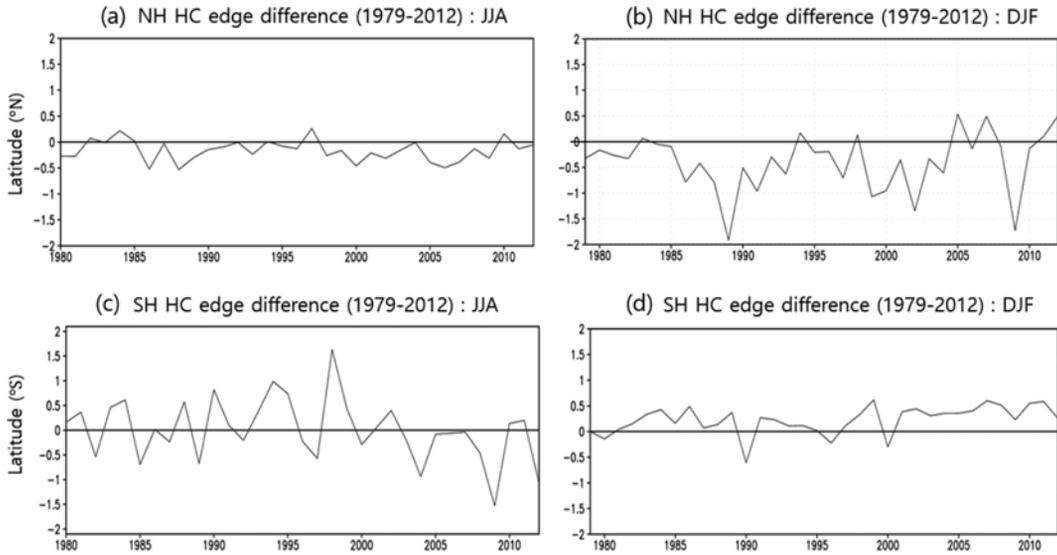


Fig. 5. 34-year time series of seasonal difference (JRA-55C minus JRA-55) of Hadley Cell edge at each hemisphere.

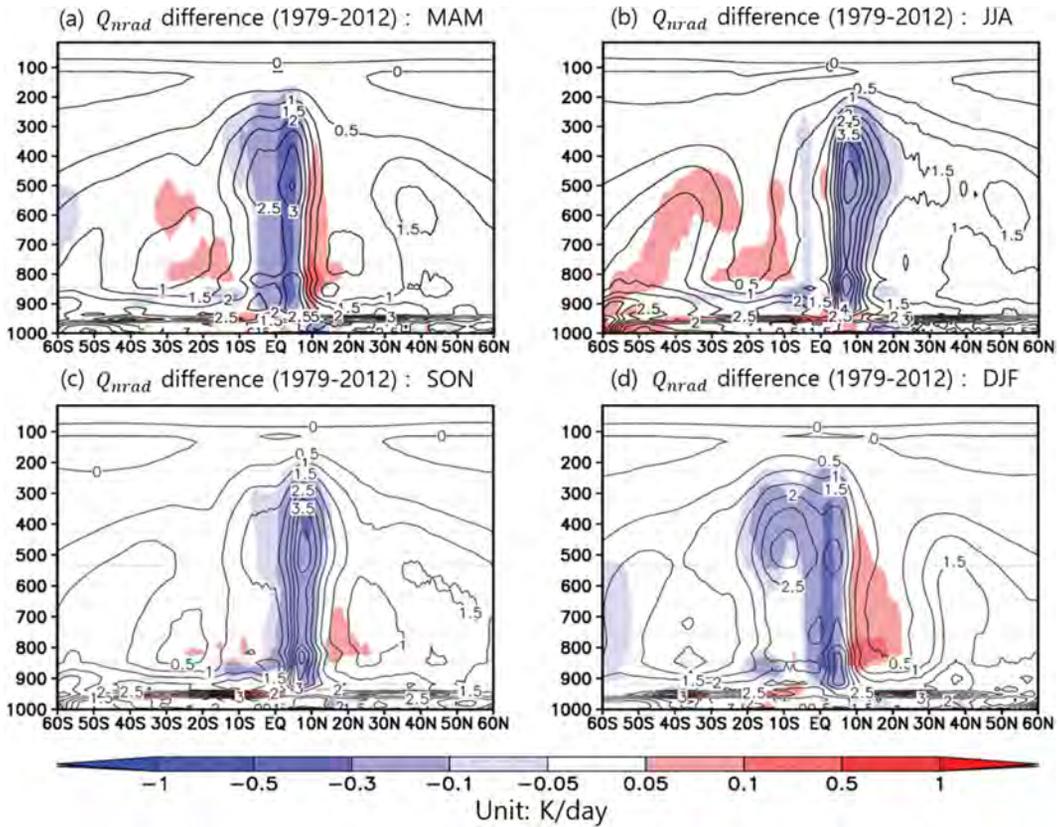


Fig. 6. Seasonal difference (JRA-55C minus JRA-55) of zonal-mean non-radiative diabatic heating rate averaged over 1979-2012. Climatology from JRA-55C is denoted with contour lines while the difference to JRA-55 (JRA-55C minus JRA-55) is shaded.

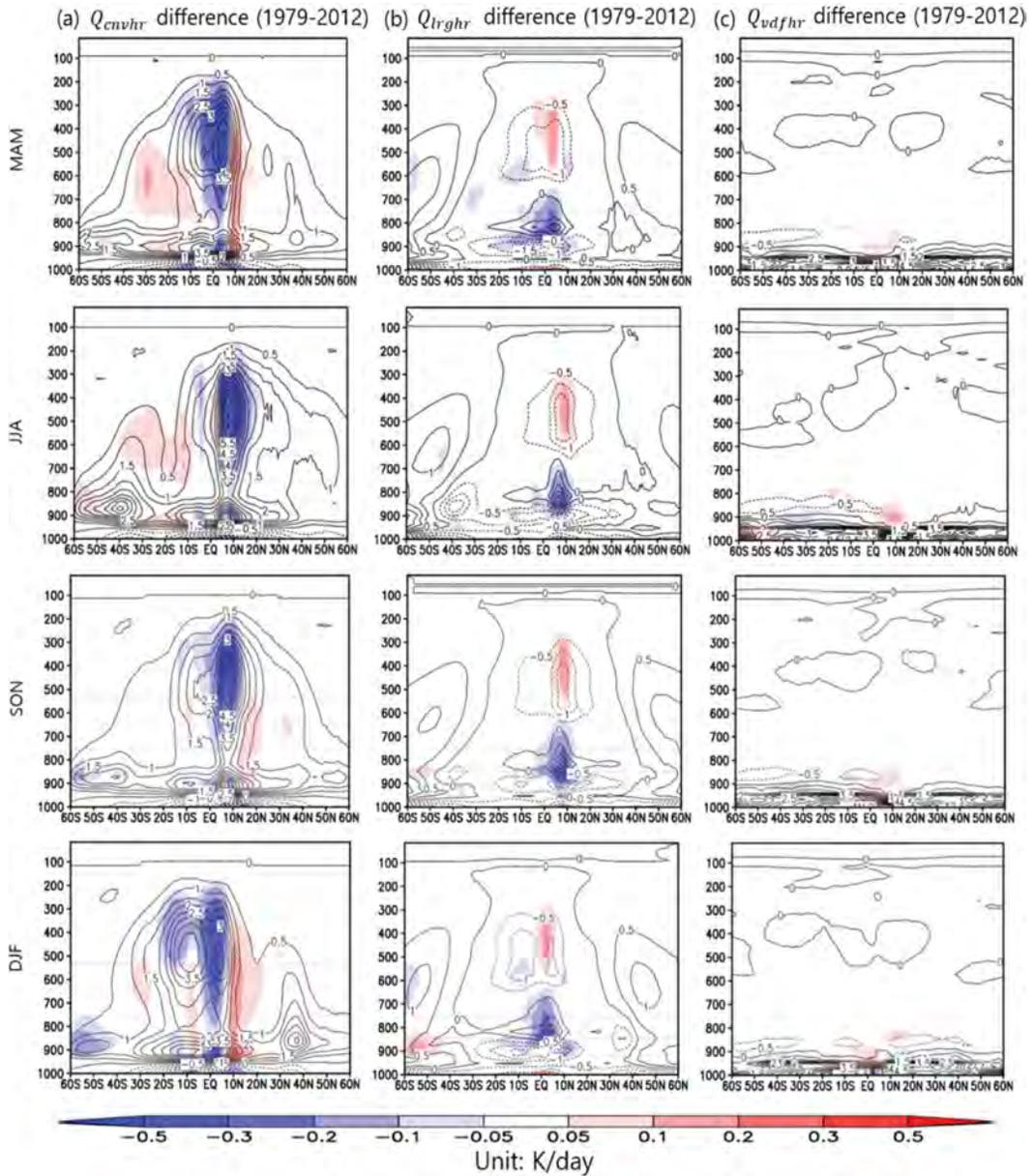


Fig. 7. Same as Fig. 6, but for convective heating rate ( $Q_{cnvhr}$ ), large scale condensation heating rate ( $Q_{lrghr}$ ), and vertical diffusion heating rate ( $Q_{vdfhr}$ ), respectively.

열속도( $Q_{rad}$ )에서 차이가 크게 나타난다. 해들리 순환 지역은 양의 비복사 가열 속도값이 나타나는 지역이며, 가장 큰 값을 가진 지역이 해들리 순환의 상승류 지역과 상응한다(Wright and Fueglistaler, 2013). Figure 4에서 나타나는 계절별 해들리 순환의 상승류 지역과 Fig. 6의 계절별로 음의 편차가 나타나는 지역을 비교하면 상호 일치함을 볼 수 있다. 구체적으로 북반구

여름철의 경우, 최대 편차는 400 hPa 부근의  $-0.38 \text{ K day}^{-1}$ 이며 JRA-55의 최대값 기준 약 8%에 해당한다. 북반구 겨울철의 경우에는 최대 편차가 850 hPa에서  $-0.46 \text{ K day}^{-1}$ 이며 JRA-55의 최대값 기준 약 12%에 해당한다. 곧 JRA-55C가 상승 기류에 의한 단열 가열(adiabatic heating)을 상대적으로 작게 나타냄을 의미하며, 이는 과소 표현된 비단열 가열, 특히 비복사

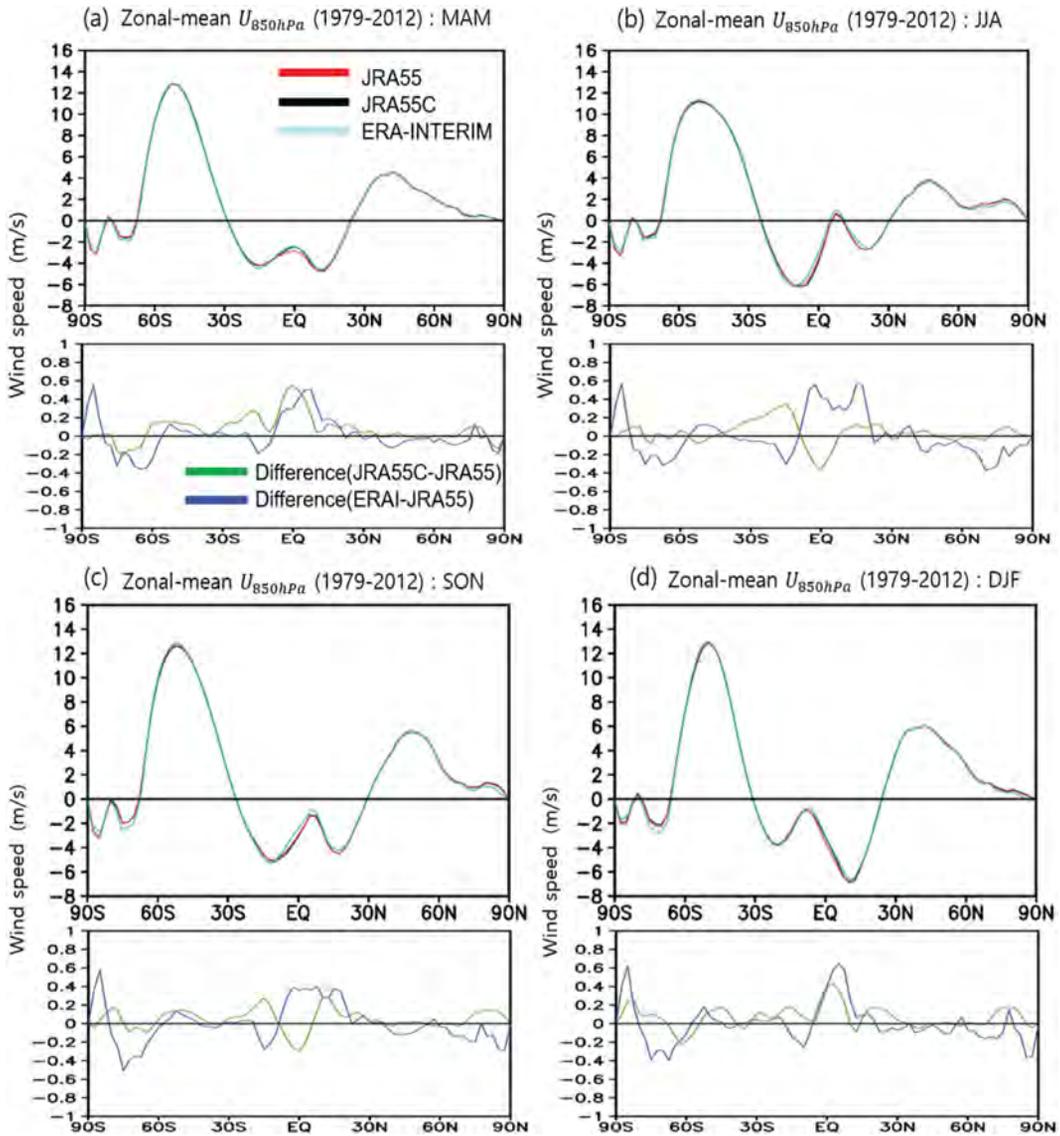


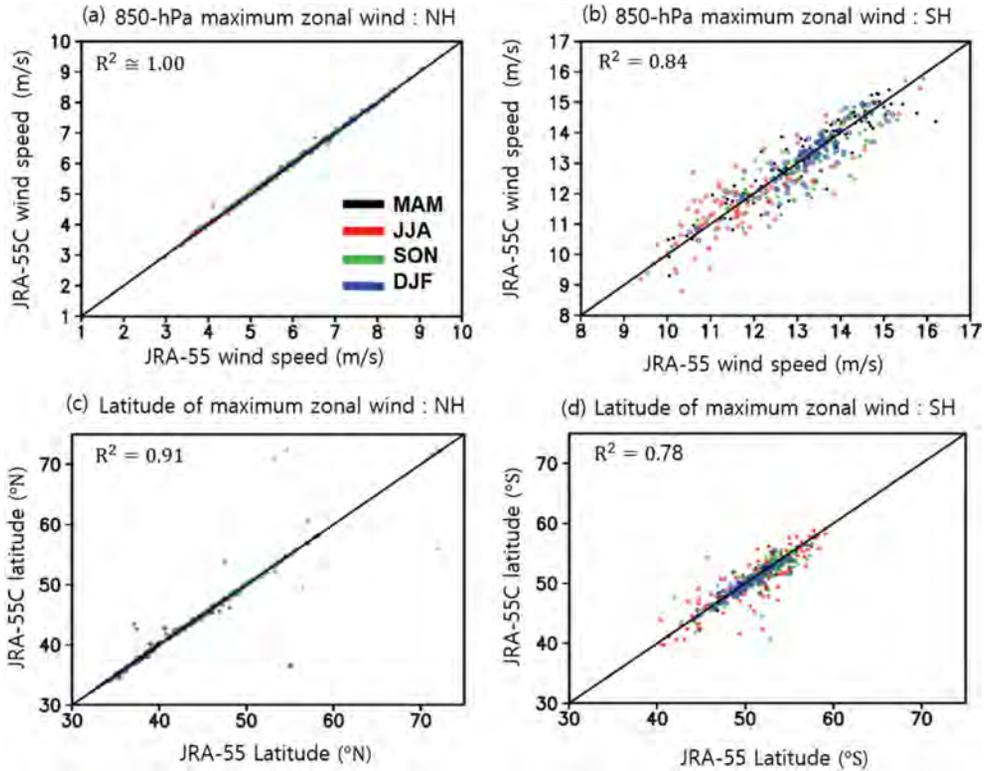
Fig. 8. Climatological 850-hPa zonal-mean zonal wind and its difference between reanalysis datasets as a function of latitude.

가열과 연결됨을 알 수 있다. Figure 7에서 비복사 가열 속도항을 개별적으로 분석해보면, 대류 가열 속도 ( $Q_{cm}$ )의 차이가 지배적임을 알 수 있다. 대류 가열 속도는 대류권에서의 잠열 방출과 관련된 항이며 자료 동화에 사용된 수치 모델의 수분 물리 과정(moist physics)에 의해 결정되는 값이다(Wright and Fueglistaler, 2013). 해들리 순환의 상승류 지역에서 JRA-55C가 JRA-55보다 평균 아노말리 연직 속도항을 축소 표현 한다는 결과(Kobayashi and Iwasaki, 2016)를 고려했을 때, 약화된 연직 속도항이 잠열 방출에 의한 대류 가열 속도항까지 축소하였을 가능성을 제기할 수 있

다. 이러한 가능성은 연직 속도장에서의 오차가 모델 내에서 존재하지 않는 열 플럭스를 발생시켜 모델의 열적 수지에 오차를 발생시킬 수 있다는 선행 연구에 의해서도 뒷받침된다(Fueglistaler et al., 2009). 그러므로 위성자료에 의해 보정된 순환장이 두 재분석자료의 해들리 순환의 편차에 기여함을 확인할 수 있다.

### 5. 대류권 중위도: 하층 제트 및 스톱 트랙

Figure 8은 동서평균한 850-hPa 동서바람의 기후값에 대한 ERA-Interim, JRA-55, JRA-55C의 결과를 비



**Fig. 9.** Scatter plot of monthly 850-hPa maximum zonal-mean wind from January of 1979 to December of 2012 in (a) Northern Hemisphere and (b) Southern Hemisphere. (c, d) are the same as in (a, b), respectively, but for the latitude of maximum zonal-mean zonal wind. Black, red, green, blue dots denote four different seasons.

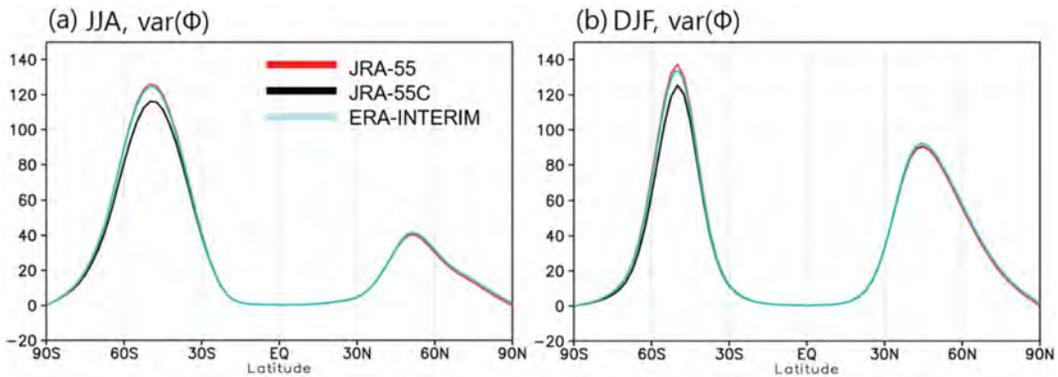
교한 그림이다. 본 연구의 관심 지역인 남·북반구 중위도에서는 세 재분석자료가 산출한 하층 제트의 풍속과 위치가 모든 계절에서 매우 유사함을 볼 수 있다. 또한 적도와 남극 부근에서 JRA-55C와 JRA-55 간의 편차(녹색 실선)가 ERA-Interim 간의 편차(청색 실선)보다 작음이 주목할 만하다. 남극은 지상 관측 자료가 부족하여 위성자료에 대한 의존도가 매우 높는데, 재분석자료 중에서도 JRA-55와 ERA-Interim은 온도와 동서바람에 대한 Bias와 RMSE가 타 재분석 자료와 비교하여 가장 유사한 것으로 나타난다(Nygård et al., 2016). JRA 재분석자료 간의 편차가 ERA-Interim과의 편차보다 작다는 결과는 대류권 하층의 동서바람 기후값 분석에 있어서 자료동화에 사용된 수치 모델의 자체 오차가 완전히 제거되지 않았을 가능성을 제시한다. Kobayashi and Iwasaki (2016)는 재래 관측 자료의 자료동화 과정까지 배제한 재분석 자료인 JRA-55 Atmospheric Model Intercomparison Project (JRA-55 AMIP; Kobayashi et al., 2014)와 JRA-55의 동서평균 동서바람 기후값을 비교하여 대류권 하층에서 북반구 제트 부근과 남반구 전반에 걸

쳐  $2 \text{ m s}^{-1}$  이하의 유의미한 모델 오차가 발생함을 보였다. Figure 8은 재래 관측 자료 투입만으로도 모델 오차의 경향성이 위성자료를 포함하여 투입했을 때와 유사하게 제거됨을 의미한다. 그러나 기후값 분석과 달리, 자료를 월별로 분석하면 위성 자료에 의한 재분석장의 보정 효과가 두드러진다.

Figure 9는 JRA-55C와 JRA-55가 산출한 하층 제트의 풍속과 계절별 위치에 대한 산포도다. 관계가 직선형에 가까울수록 두 재분석자료 간의 차이가 작음을 의미한다. 먼저 계절별 풍속의 경우(Figs. 9a, b), 북반구에서는 두 재분석자료 간의 차이가 매우 근소한,  $R^2 \approx 1.00$ 의 직선형 관계를 보여준 반면, 남반구에서는 JRA-55C가 JRA-55보다 축소 혹은 과대 표현하는 경향이 강하여  $R^2 = 0.84$ 의 퍼진 선형 관계를 보였다. 계절별 제트 위치의 경우(Figs. 9c, d), 북반구에서는 여름철 4개월, 봄철 1개월의 특이점을 포함하여도  $R^2 = 0.91$ 의 직선형 관계를 보여주었으나, 남반구에서는 모든 계절에서 제트 위치가 고르게 퍼져 있었으며 북반구보다 상대적으로 낮은  $R^2 = 0.78$ 을 기록하였다. 한편 계절별 제트 위치에 대한 두 재분석자

**Table 2.** Time-mean (1979–2012) 850-hPa low level jet maximum zonal wind and its position in JRA-55C and JRA-55.

	JRA-55		JRA-55C		Difference (JRA-55C minus JRA-55)	
	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF
NH u850 maximum (m s <sup>-1</sup> )	4.24	6.64	4.26	6.65	0.02	0.01
SH u850 maximum (m s <sup>-1</sup> )	11.84	13.23	11.76	13.16	-0.08	-0.07
NH u850 latitude (°N)	47.55	41.53	47.56	41.56	0.01	0.03
SH u850 latitude (°S)	51.03	50.07	50.55	49.82	-0.48	-0.25



**Fig. 10.** Same as Fig. 8 but with respect to 24 h-filtered geopotential height variance at 300 hPa [Units: 100 m<sup>2</sup>].

료의 시간적 상관 관계(temporal correlation) 분석에서는 모든 계절에서 0.98 이상의 높은 상관 관계가 나타났다. 이는 두 재분석자료의 제트 위치의 개형이 매우 유사함을 의미하며, 앞선 전지구적 기후값 분석과 일관되게 변수값의 크기에 대한 편차가 주요함을 알 수 있었다.

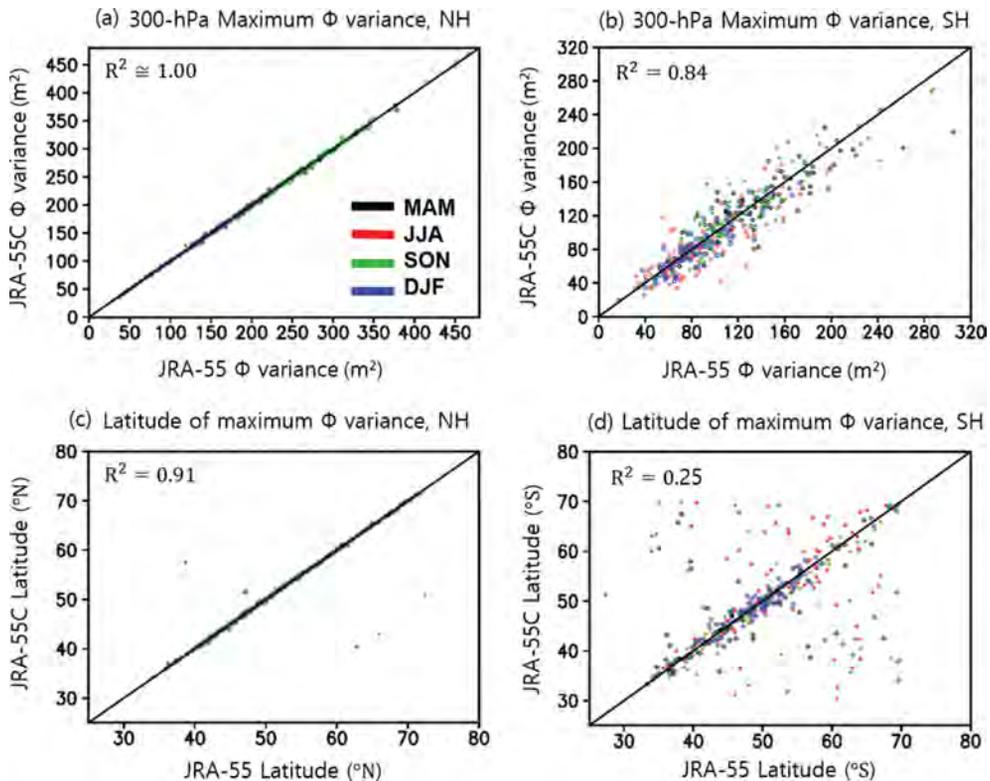
Table 2를 통해 하층 제트의 풍속과 위치 분석의 기후값을 비교하여도 두 재분석자료 간 편차가 북반구보다 남반구에서 훨씬 큼을 확인할 수 있다. 하층 제트의 위치에 대한 34년간의 기후값을 비교해보면, 북반구에서는 여름철과 겨울철 모두 JRA-55C와 JRA-55 간의 편차가 0.03° 이하로 미미한 반면, 남반구에서는 북반구 여름철에 JRA-55가 51.03°S, JRA-55C가 50.55°S로 제트 위치를 0.48° 만큼 적도 방향으로 상향 표현하였고 북반구 겨울철에는 0.25° 상향 표현하였다. 전반적으로 남반구에서 JRA-55C가 JRA-55보다 제트 위치를 적도 방향으로 이동시켜 상향하는 경향성을 보인 반면 북반구에서는 거의 차이가 없었다. 이는 위성자료의 도입이 재분석장에 나타나는 남반구의 제트 위치 추정을 극방향으로 이동시키는 효과를 낳았음을 의미한다.

한편 스톱 트랙 분석에서도 유사한 결과가 나타났다. Figure 10은 24시간 필터를 거친 일 동서평균 지위고도의 변동성을 34년간 평균하여 나타낸 그림이다.

계절에 상관없이 ERA-Interim, JRA-55, JRA-55C의 결과가 남반구 중위도를 제외한 모든 위도에서 거의 일치하는 모습을 보여주고 있다. 하지만 여름철에 JRA-55와 ERA-Interim 간의 편차는 남반구 중위도에서도 JRA-55 최대값 기준 약 1%이지만, JRA-55C가 JRA-55보다 약 1004.3 m<sup>2</sup> (JRA-55 최대값 기준 약 8%) 작은 스톱 트랙 활동성을 보였다. 겨울철에는 남북 간 해면온도 경도가 증가함에 따라서 북반구의 지위고도 변동성 크기가 대폭 증가함에도 불구하고 세 재분석자료의 기후값 결과는 일치한다. 이는 지상 관측 자료의 수가 북반구에서 남반구에 비해 10배 이상 많기 때문이다. 남반구 역시 겨울철에 대서양과 서인도양에서 남북 간 해면온도 기울기가 45°S 근처에서 전반적으로 증가함에 따라서 해당 지역의 경압 불안정성이 더욱 커진다(Hoskins and Hodges, 2005). 그에 따라 남반구 중위도의 변동성 폭도 약간 증가하는데, 북반구에서의 결과와 달리 JRA-55C와 JRA-55 사이의 편차는 더욱 커짐을 볼 수 있다. JRA-55와 ERA-Interim 간의 차이는 약 1% 미만인 반면, JRA-55와 JRA-55C에서는 최대 약 1190 m<sup>2</sup> (JRA-55 최대값 기준 약 9%)의 지위고도 변동성 차이가 발생하였다. 편차를 남반구 전체로 확장했을 때 여름철 지위고도 변동성 차이는 약 11962.5 m<sup>2</sup>, 겨울철에는 11833.7 m<sup>2</sup>로, 여름철에 상대적으로 큰 차이를 보였다. 결과적으로 JRA-55C

**Table 3.** Time-mean (1979–2012) monthly 300-hPa maximum geopotential variance and its position in JRA-55C and JRA-55.

	JRA-55		JRA-55C		Difference (JRA-55C minus JRA-55)	
	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF
NH var( $\Phi$ ) maximum ( $m^2$ )	135.02	141.57	134.27	141.23	-0.75	-0.34
SH var( $\Phi$ ) maximum ( $m^2$ )	84.57	89.81	79.55	84.79	-5.02	-5.02
NH var( $\Phi$ ) latitude ( $^{\circ}N$ )	56.21	50.05	55.72	50.04	-0.49	-0.01
SH var( $\Phi$ ) latitude ( $^{\circ}S$ )	51.75	50.99	51.95	49.81	0.20	-1.18

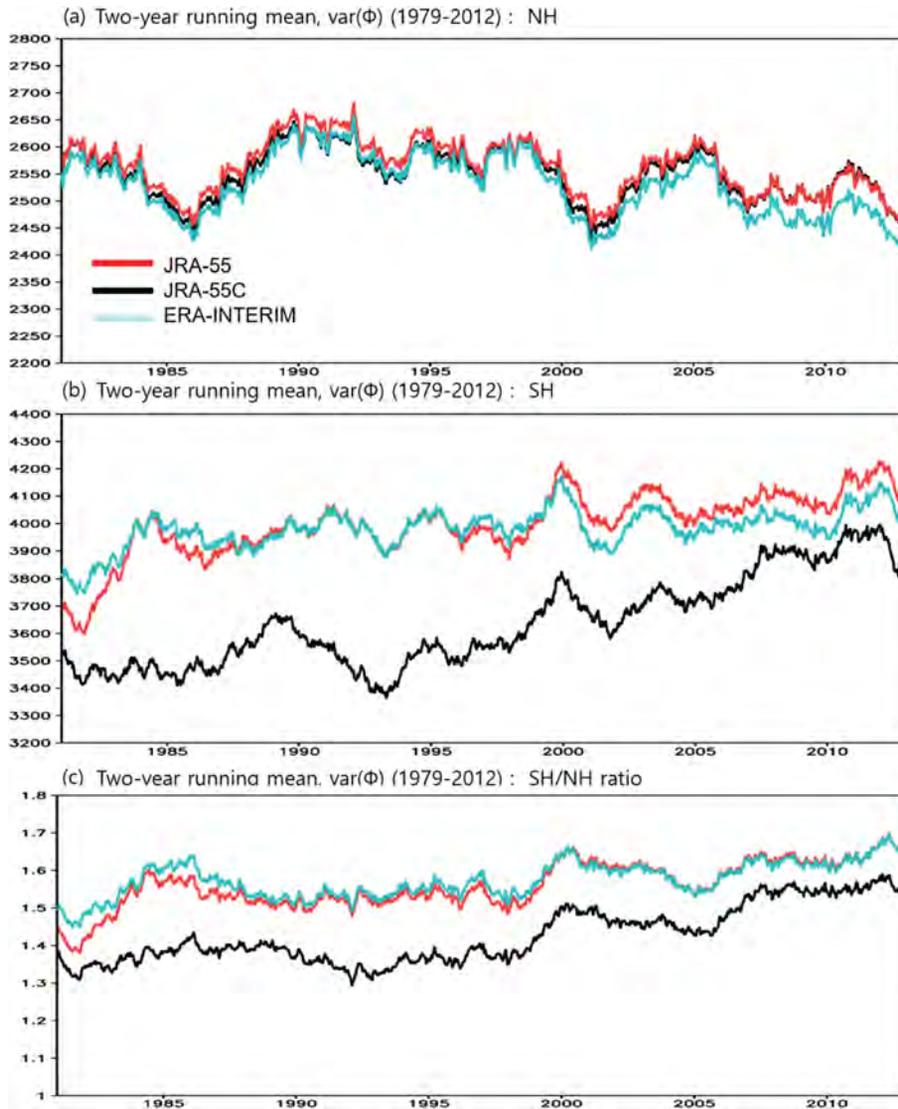


**Fig. 11.** Same as Fig. 9 but for monthly maximum geopotential height variance at 300 hPa.

는 JRA-55보다 스톱 트랙 활동성을 남반구 중위도에서 8~10% 축소 평가하며, 이는 앞서 해들리 순환 강도에서의 축소 평가 정도와 비슷한 수치다. ERA-Interim과 JRA-55 사이의 편차보다도 8~9배 더 큰 편차를 만들어냈다.

Table 3은 월 평균 자료를 사용하여 계산한 300-hPa 지위고도 변동성 최댓값과 최댓값이 나타나는 위도를 정리한 결과다. 여기서 변동성은 동서평균된 지위고도의 금월 최댓값과 전월 최댓값의 차이의 제곱을 합하여 계절별 평균한 값으로 정의하였다. 앞선 결과들과 유사하게, JRA-55C가 JRA-55보다 변동성 최댓값을 작게 표현하였고 위도 또한 축소 표현하는 경향이

강하였다. 북반구에서는 두 재분석자료 간의 변동성 편차가  $1 m^2$  미만이었으나 남반구에서는  $5 m^2$  (JRA-55 최댓값 기준 약 7%)에 달하였다. 변동성 최댓값이 나타나는 위도에 대해서도 JRA-55C는 여름철과 겨울철에 각각  $-0.49^{\circ}$ ,  $1.18^{\circ}$  적도 방향으로 JRA-55보다 하향 표현하였다. Figure 11은 300 hPa에서의 월별 동서평균 지위고도 변동성의 최댓값과 해당 위도를 Fig. 9와 동일한 방법으로 나타낸 반구별 산포도이다. 앞선 하층 제트 분석과 매우 유사하게도, 두 재분석자료의 결과값 관계는 북반구에서 최댓값과 최댓값이 나타나는 위도가 각각  $R^2 \approx 1.00$ ,  $R^2 = 0.91$ 의 강한 선형 관계를 유지하였다. 그러나 남반구에서는 변동성



**Fig. 12.** Averaged geopotential height variance for (a) NH (b) SH (c) inter-hemisphere ratio (SH to NH), from January 1 of 1979 to December 31 of 2012. Two-year running mean is applied. Red, black, cyan contours denote JRA-55, JRA-55C, and ERA-Interim, respectively.

의 최댓값의 경우  $R^2 = 0.84$ 로 상대적으로 약한 선형 관계를 보여주었고, 최댓값이 나타나는 위도는  $R^2 = 0.25$ 를 기록하여 두 재분석자료 간의 편차가 매우 컸다.

Figure 12는 경년 변동성을 확인하기 위하여 반구별 스톰 트랙 활동성과 활동성 비율(남반구 지위고도 변동성에서 북반구 지위고도 변동성을 나눈 값)을 2년 연속 평균치(2-year running mean)로 계산한 결과이다(e.g., Guo et al., 2009). ERA-Interim, JRA-55, JRA-55C를 분석한 결과, 북반구에서는 세 재분석자료의 결과가 유사하면서도 ERA-Interim과 JRA-55 간

의 편차(최대  $150 \text{ m}^2$ )가 JRA-55C와 JRA-55 사이의 편차보다 컸다. 그러나 남반구의 경우, ERA-Interim과 JRA-55 사이의 편차가 JRA-55C와 JRA-55 사이의 편차(최대  $586 \text{ m}^2$ )보다 훨씬 줄어들면서 지상 관측 자료가 상대적으로 부족한 남반구에서의 위성 자료 효과를 입증하였다. 또한 스톰 트랙 활동성의 상대적 비중을 확인하기 위하여 반구별 비율로 JRA-55C와 JRA-55를 분석하였을 때(Fig. 12c), JRA-55C와 JRA-55 간의 편차는 위성 자료가 본격적으로 유입되어 활용된 1979년 0.05에서 1985년 0.2까지 벌어지기 시작하였

다. 이후 지상 관측 기기의 발전으로 JRA-55C의 남반구 스톱 트랙 활동성도 증가 추세를 보였으나 두 재분석자료 간의 반구별 비율 차이는 0.1 이상을 분석 기간 동안 유지하였다. 초기에 발생했던 JRA-55와 ERA-Interim 간의 편차는 1980년대 후반부터 상당히 줄어들어 거의 동일한 개형과 크기를 갖는다. JRA-55C는 재분석자료의 전반적인 증감 추이를 따라가지만 남반구 스톱 트랙 활동성의 크기를 과소 추정한다고 결론 지을 수 있다.

Guo et al. (2009)은 남반구 중위도의 경우, 남반구 스톱 트랙이 활발한 지역에 위치한 재래 관측 자료가 현저히 적기 때문에 재분석자료 간의 차이가 상당히 크다고 밝혔다. 초기 JRA 재분석자료와 ERA-Interim 간 편차가 0.05 이상 발생한 결과 또한 당시 JRA-55와 ERA-Interim에 사용된 위성 자료가 동일함에도 불구하고(Kobayashi et al., 2015) 자료동화 시스템 사양 차이로 발생하였을 가능성이 높음을 알 수 있다. ERA-Interim의 전신인 ERA-40을 동일하게 분석했을 때에는 초기 JRA-55와의 편차가 0.007로 미미하였다(그림 미제시). 위성 관측이 본격화된 이후로 재분석자료 간의 차이보다 JRA-55C와 JRA-55 간의 편차가 크다는 사실은 위성 자료의 중요성을 더욱 부각시킨다. 결과적으로 위성 자료는 남반구의 지위고도의 변동성을 일정 부분 보정함을 확인할 수 있었다.

## 6. 요약 및 결론

본 연구는 일본 기상청이 최근 공개한 재분석자료 JRA-55C와 JRA-55로 해들리 순환과 하층 제트, 스톱 트랙 활동성을 분석하여 자료동화 과정에서의 위성자료 유무가 재분석자료의 대규모 순환 분석에서 어떠한 정량적 차이를 양산하는 지 밝히고자 하였다. 이를 위해 1979년부터 2012년까지의 재분석자료 JRA-55와 JRA-55C를 사용하여 34년 간의 기후값과 표준편차, 해들리 순환의 강도와 경계, 그리고 하층 제트와 스톱 트랙 활동성을 분석하였다. 먼저 두 재분석자료의 34년 평균 기온과 동서바람의 동서평균 기후값과 표준편차를 성층권 중심으로 살펴보았다. 그 결과 위성 자료의 유무는 대류권에서는 주로 남반구에서  $1\text{ K}$  이하,  $0.5\text{ m s}^{-1}$  이하의 편차를 만들어냈다. 성층권 상부로 갈수록 재래 관측 자료의 수가 급격히 희박해져 위성 자료는 최대  $5\text{ K}$ ,  $20\text{ m s}^{-1}$  이상의 차이를 만들어냈다. 경년 변동성의 경우 남반구에서는 상대적으로 미미했던 것에 비하여, 성층권에서는  $3\text{ K}$ ,  $3\text{ m s}^{-1}$  이상의 차이가 발생하였다.

대류권 분석에서는 저위도 대기 대순환의 주요 인자인 해들리 순환과 중위도에서 중요한 역할을 하는 하층 제트와 스톱 트랙을 분석하였다. 그 결과 위성

자료를 투입하지 않은 JRA-55C는 대류권 순환장을 전반적으로 축소하는 경향성을 보였다. 먼저 해들리 순환 분석에서는 JRA-55C가 JRA-55에 비하여 해들리 순환의 너비, 강도와 남북 경계를 상대적으로 축소하는 경향을 보였다. 특히 JRA-55C가 JRA-55보다 해들리 순환의 너비를  $0.54^\circ$  축소하여 나타냈는데(Table 1), 이는 NCEP 재분석자료에서 10년당  $0.79^\circ$ , ERA40 재분석자료에서 10년당  $0.70^\circ$ 씩 해들리 순환의 너비가 증가한다는 선행 연구(Lu et al., 2009)에 비추어보았을 때 상당한 편차임을 알 수 있다. 이와 같은 편차는 적도 중·상부 대류권 단열·비단열 가열의 편차와 밀접한 관계를 가지고 있으며, JRA-55C에서 과소 평가된 적도 내 연직 순환장이 물리 모델 내에 투입되면서 대류 가열 속도의 약화를 가져와 발생한 것으로 사료된다.

하층 제트를 살펴보면, JRA-55C는 JRA-55 기준으로 남반구 제트의 위치를 저위도로 편향하는 경향이 있었다. 이는 해들리 순환 너비가 JRA-55C에서 다소 작게 나타난 연구결과와 일맥상통한다. 또한 스톱 트랙 활동성 분석에서 지위고도 변동성의 기후값을 비교했을 때 북반구에서는 JRA-55C와 JRA-55의 결과가 거의 일치하였으나, 남반구 중위도에서 계절별로 최대 7~9%의 변동성 편차를 보였다. 특히 500-hPa 질량 유선 함수값 분석에서 북반구 저위도에서 연중 내내 JRA-55C와 JRA-55 간의 편차가 ERA-Interim과 JRA-55 간의 차이보다 크게 나타난 것과 유사하게 스톱 트랙 활동성에서도 JRA-55C가 JRA-55보다 기후값과 2년 연속 평균치에 있어서 축소 표현한 정도가 ERA-Interim과 JRA-55 사이의 편차보다 크게 나타났다.

이를 종합하면 위성 자료는 재분석자료의 대규모 대기 순환장 추정을 전반적으로 상향, 확대 보정하는 효과를 낳았다고 할 수 있으며, 자료동화에서의 위성자료 유무는 대규모 대기 순환장 분석에서 재분석자료 품질에 영향을 줄 수 있는 요소 중 하나로 결론지을 수 있다. 다만 본 연구 결과는 JRA-55의 자료동화에는 포함되었으나 JRA-55C에서는 제외된 비행 관측자료와 PAOBS에 의한 영향까지 일부 포함하고 있으며 두 자료에 의한 개별적 영향에 대한 분석은 추후 과제로 남겨둔다.

위성 자료의 유무는 기후값과 표준편차 분석에서 살펴보았듯이 성층권 순환장에서 더욱 유의미한 영향을 미칠 것으로 예상된다. 이미 선행 연구에서 성층권에서의 재분석자료 간 차이는 열적 수지, 운동량 수지에서 현저하게 나타남을 보였으며(Wright and Fueglistaler, 2013; Martineau et al., 2016), 여기서는 다루지 않았으나 1980년부터 2012년까지 Baldwin and Dunkerton (2001)의 성층권 돌연 승온 정의를 사용한 분석에서도 JRA-55C와 JRA-55의 모의 개수가 각각

24개와 27개로 적잖은 차이가 존재하였다. 차후 본 연구는 적용 범위를 넓히기 위하여 위성 자료가 성층권 역학 현상 분석에 미치는 영향을 정량적으로 연구할 계획이다. 또한 모델 오차를 확인할 수 있는 JRA-55 AMIP과 유럽연합에서 공개한 European Reanalysis of the Global Climate System (ERA-CLIM; Sticker et al., 2014)의 비교 및 분석을 추가로 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 논문의 발전을 위해 귀중한 조언을 아낌없이 해주신 두 심사위원님께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 2015년 서울대학교 학부생 연구지원사업 및 한국기상산업진흥원의 동아시아 이동성 저기압의 종관-기후학적 특성 분석 및 예측성 평가 사업(KMIPA 2015-2100)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사의 말씀을 전합니다.

## REFERENCES

- Allen, R. J., S. C. Sherwood, J. R. Norris, and C. S. Zender, 2012: Recent Northern Hemisphere tropical expansion in primarily driven by black carbon and tropospheric ozone. *Nature*, **485**, 350-354.
- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581-584.
- Barnes, E. A., and L. M. Polvani, 2013: Response of the Midlatitude Jets, and of their variability, to increased greenhouse gases in the CMIP5 models. *J. Climate*, **26**, 7117-7135.
- Bengtsson, L., S. Hagemann, and K. I. Hodges, 2004: Can climate trends be calculated from reanalysis data? *J. Geophys. Res.*, **109**, D11, doi:10.1029/2004JD004536.
- Chang, E. K. M., and Y. Fu, 2002: Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity. *J. Climate*, **15**, 642-658.
- Chen, J., A. D. Del Genio, B. E. Carlson, and M. G. Bosilovich, 2008: The spatiotemporal structure of twentieth-century climate variations in observations and reanalyses. Part I: Long-term trend. *J. Climate*, **21**, 2611-2633.
- Choi, J., S.-W. Son, J. Lu, and S.-K. Min, 2014: Further observational evidence of Hadley cell widening in the Southern Hemisphere. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 2590-2597, doi:10.1002/2014GL059426.
- Compo, G. P., and P. D. Sardeshmukh, 2004: Storm track predictability on seasonal and decadal scales. *J. Climate*, **17**, 3701-3720.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2011: The twentieth century reanalysis project. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1-28.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Dolinar, E. K., X. Dong, and B. Xi, 2016: Evaluation and intercomparison of clouds, precipitation, and radiation budgets in recent reanalyses using satellite-surface observations. *Climate Dyn.*, **46**, 2123-2144.
- Ebita, A., and Coauthors, 2011: The Japanese 55-year Reanalysis "JRA-55": An interim report. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **7**, 149-152, doi:10.2151/sola.2011-038.
- Frierson, D. M. W., J. Lu, and G. Chen, 2007: Width of the Hadley cell in simple and comprehensive general circulation models. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L18804, doi:10.1029/2007GL031115.
- Fueglistaler, S., B. Legras, A. Belijaars, J.-J. Morcrette, A. Simmons, A. M. Tompkins, and S. Uppala, 2009: The diabatic heat budget of the upper troposphere and lower/mid stratosphere in ECMWF reanalyses. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 21-37.
- Guo, Y., E. K. M. Chang, and S. S. Leroy, 2009: How strong are the Southern Hemisphere storm tracks? *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L22806, doi:10.1029/2009GL040733.
- Harnik, N., and E. K. M. Chang, 2003: Storm track variations as seen in radiosonde observations and reanalysis data. *J. Climate*, **16**, 480-495.
- Hoskins, B. J., and K. I. Hodges, 2005: A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *J. Climate*, **14**, 4108-4129.
- Hudson, R. D., M. F. Andrade, M. B. Follette, and A. D. Frolov, 2006: The total ozone field separated into meteorological regimes - Part II: Northern Hemisphere mid-latitude total ozone trends. *Atmos. Chem. Phys.*, **6**, 5183-5191, doi:10.5194/acp-6-5183-2006.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kanno, Y., M. R. Abdillan, and T. Iwasaki, 2016: Long-term trend of cold air mass amount below a designated potential temperature in Northern and Southern Hemispheric winters using reanalysis datasets. *J. Geophys. Res.*, **121**, doi: 10.1002/2015JD024635.
- Kobayashi, C., H. Endo, Y. Ota, S. Kobayashi, H. Onoda, Y. Harada, K. Onogi, and H. Kamahori, 2014: Preliminary results of the JRA-55C, an atmospheric

- reanalysis assimilating conventional observations only. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **10**, 78-82.
- \_\_\_\_\_, and T. Iwasaki, 2016: Brewer-Dobson circulation diagnosed from JRA-55. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 1493-1510, doi:10.1002/2015JD023476.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48.
- Liu, J., M. Song, Y. Hu, and X. Ren, 2012: Changes in the strength and width of the Hadley Circulation since 1871. *Clim. Past*, **8**, 1169-1175, doi:10.5194/cp-8-1169-2012.
- Lu, J., G. A. Vecchi, and T. Reichler, 2007: Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L06805, doi:10.1029/2006GL028443.
- \_\_\_\_\_, C. Deser, and T. Reichler, 2009: Cause of the widening of the tropical belt since 1958. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L03803, doi: 10.1029/2008GL036076.
- Lucas, C., H. Nguyen, and B. Timbal, 2012: An observational analysis of Southern Hemisphere tropical expansion. *J. Geophys. Res.*, **117**, D1717112, doi:10.1029/2011JD01733.
- Martineau, P., and S.-W. Son, 2010: Quality of reanalysis data during stratospheric vortex weakening and intensification events. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L22801, doi:10.1029/2010GL045237.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and M. Taguchi, 2016: Dynamical consistency of reanalysis datasets in the extratropical stratosphere. *J. Climate*, **29**, 3057-3074, doi:10.1185/JCLID-15-0469.1.
- Mitas, C. M., and A. Clement, 2005: Has the Hadley cell been strengthening in recent decades? *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03803, doi: 10.1029/2004GL021765.
- Nygård, T., T. Vihma, G. Birnbaum, J. Hartmann, J. King, T. Lachlan-Cope, R. Ladkin, C. Lüpkes, and A. Weiss, 2016: Validation of eight atmospheric reanalyses in the Antarctic Peninsula region. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 684-692, doi:10.1002/qj.2691.
- Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Oort, A. H., and J. J. Yienger, 1996: Observed interannual variability in the Hadley circulation and its connection to ENSO. *J. Climate*, **9**, 2751-2767.
- Rienecker, M. M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *J. Climate*, **24**, 3624-3648.
- Saha, S., and Coauthors, 2010: The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015-1057.
- Schneider, T., 2006: The general circulation of the Atmosphere. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, **34**, 655-688.
- Seo, K.-H., D. M. W. Frierson, and J.-H. Son, 2014: A mechanism for future changes in Hadley circulation strength in CMIP5 climate change simulations. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 5251-5258, doi:10.1002/2014GL060868.
- Son, S.-W., and S. K. Lee, 2005: The response of westerly jets to thermal driving in a primitive equation model. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 3741-3757.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2010: Impact of stratospheric ozone on Southern Hemisphere circulation change: A multimodel assessment. *J. Geophys. Res.*, **115**, D00M07, doi:10.1029/2010JD014271.
- Sticker, A., and Coauthors, 2014: Description of the ERA-CLIM historical upper-air dataset. *Earth Syst. Sci. Data*, **6**, 29-48, doi:10.5194/essd-6-29-2014.
- Trenberth, K. E., T. Koike, and K. Onogi, 2008: Progress and prospect for reanalysis for weather and climate. *Eos, Trans. Amer. Geophys. Union.*, **89**, 234-235.
- Wallace, J., G. Lim, and M. Blackmon, 1988: Relationship between cyclone tracks, anticyclone tracks and baroclinic waveguides. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 439-462.
- Woolings, T., A. Hannachi, and B. Hoskins, 2010: Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 856-868.
- Wright, J. S., and S. Fueglistaler, 2013: Large differences in reanalyses of diabatic heating in the tropical upper troposphere and lower stratosphere. *Atmos. Chem. Phys.*, **13**, 9565-9576.
- Yin, H. J., 2005: A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L18701, doi:10.1029/2005GL023684.