

재분석자료들을 활용한 아시아-북태평양 상층제트의 강도(풍속) 및 3차원적 위치 변화 경향

소은미 · 서명석*
공주대학교 대기과학과

(접수일: 2016년 8월 19일, 수정일: 2016년 12월 9일, 게재확정일: 2017년 1월 17일)

Trends of Upper Jet Streams Characteristics (Intensity, Altitude, Latitude and Longitude) Over the Asia-North Pacific Region Based on Four Reanalysis Datasets

Eun-Mi So and Myoung-Seok Suh*

Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

(Manuscript received 19 August 2016; revised 9 December 2016; accepted 17 January 2017)

Abstract In this study, trends of upper jet stream characteristics (intensity, altitude, latitude, and longitude) over the Asia-North Pacific region during the recent 30 (1979~2008) years were analyzed by using four reanalysis datasets (CFSR, ERA-Int., JRA-55, MERRA). We defined the characteristics of upper jet stream as the averages of mass weighted wind speed, mass-flux weighted altitude, latitude and longitude between 400 and 100 hPa. Due to the vertical averaging of jet stream characteristics, our results reveal a weaker spatial variabilities and trends than previous studies. In general, the four reanalysis datasets show similar jet stream properties (intensity, altitude, latitude and longitude) although the magnitude and trends are slightly different among the reanalysis datasets. The altitude of MERRA is slightly higher than that of others for all seasons. The domain averaged intensity shows a weakening trend except for winter and the altitude of jet stream shows an increasing trend for all seasons. Also, the meridional trend of jet core shows a poleward trend for all seasons but it shows a contrasting trend, poleward trend in the continental area but equatorward trend in the Western Pacific region during summer. The zonal trend of jet core is very weak but a relatively strong westward trend in jet core except for spring and winter. The trends of jet stream characteristics found in this study are thermodynamically consistent with the global warming trends observed in the Asia-Pacific region.

Key words: Jet stream, reanalysis data, Asia-North Pacific region, weakening trend, poleward trend

1. 서 론

상층제트는 대류권계면 근처에서 전 지구를 사행하며 빠른 속도로 동진하는 대상의 좁은 공기 흐름으로,

대류권에서 가장 중요한 현상 중 하나이며, 대류권-성층권 교환에서도 중요한 역할을 한다(Holton, 2004). 또한 최근 지구온난화와 관련된 제트기류의 시-공간적 변화에 대해 많은 관심이 집중되고 있으며, 제트기류 특성들의 변화 경향은 기후변화의 잠재적 지표로 간주되고 있다(e.g., Pena-Ortiz et al., 2013). 그 결과, 상층 제트기류의 특성 변화에 대해 재분석 및 고층관측자료들을 이용한 많은 연구들이 수행되었다.

Archer and Caldeira (2008)는 23 (1979~2001)년간

*Corresponding Author: Myoung-Seok Suh, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56, Gongjudachak-ro, Gongju 32588, Korea.
Phone: +82-41-850-8533, Fax: +82-41-856-8527
E-mail: sms416@kongju.ac.kr

의 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 45-year reanalysis (Uppala et al., 2005, 이하 ERA-40)와 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research) Reanalysis Project (Kalnay et al., 1996, 이하 NCEP-R1) 재분석자료들을 사용하여 연평균, 여름 그리고 겨울로 나누어 제트의 풍속 변화 경향을 분석하였다. 두 재분석자료들에서 풍속의 패턴은 거의 동일하며, 여름에는 북반구 대부분 지역에서 유의한 변화 경향이 나타나지 않았지만, 연평균과 겨울에서는 위도 10~70°N 지역에서 풍속의 감소가 유의하게 나타남을 밝혔다. 하지만, Strong and Davis (2007)는 50 (1958~2007)년간의 NCEP-R1 자료를 이용하여 겨울철 제트에 대해 분석한 결과, 제트의 중심영역에 해당되는 한반도와 일본지역에서 약 $+0.13 \text{ m s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 로 풍속이 증가되고 있음을 보였다. 또한 Barton and Ellis (2009)는 NCEP-R1의 겨울철 자료를 사용하여 북태평양지역(110°E~110°W)에서 풍속의 변화 경향을 분석한 결과, 140°E~152.5°W 영역에서 57 (1949~2005)년 동안에는 약 $+0.10 \text{ m s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ 이상으로 풍속이 증가되는 경향이 나타났지만, 최근 (1979~2005)에는 전 분석영역에서 통계적으로 유의하지 않은 감소 경향을 보였다. 북반구에서의 겨울철 풍속의 변화 경향에 대한 연구들에서 나타나는 상이한 결과들은 주로 분석자료와 분석영역 및 기간의 차이 때문으로 판단된다.

Santer et al. (2003)은 ECMWF 15-year Reanalysis Project (Gibson et al., 1997, 이하 ERA-15)의 15 (1979~1993)년 자료와 22 (1979~2000)년 NCEP-R1 재분석 자료들을 분석한 결과, 대류권계면 고도가 각각 -0.11 , $-0.22 \text{ hPa yr}^{-1}$ 상승하고 있음을 보였으며, 이러한 대류권계면 높이 변화가 인위적 기후변화의 중요한 지표가 될 수 있음을 시사했다. 또한 ERA-40의 23 (1979~2001)년 자료를 이용하여, 대류권의 온난화로 인해 200 hPa 부근에서의 대류권계면 고도가 약 $-0.20 \text{ hPa yr}^{-1}$ 로 상승하고 있음을 밝혔다(Santer et al., 2004). Seidel and Randel (2006)은 1980년부터 2004년까지의 전세계 모든 관측소의 고층관측자료를 분석하여 전지구적으로 대류권계면 고도가 평균 $-0.17 \pm 0.06 \text{ hPa yr}^{-1}$ 로 상승하고 있음을 보였다. 대류권의 온난화로 인해 대류권계면 고도가 상승하고 있다는 이러한 연구 결과들은 대류권계면 근처에 존재하는 상층제트의 고도 변화에도 영향을 줄 수 있음을 의미한다.

최근 20~30년 동안 해들리세포의 확장으로 상층제트가 극 쪽으로 이동하고 있음이 많은 연구에서 밝혀지고 있지만, 사용자료 및 분석기간에 따라 그 이동의 정도가 상이하게 나타나고 있다. Hu and Fu (2007)는 3종의 재분석자료[NCEP-R1, NCEP/DOE (National

Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project)-II Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002, 이하 NCEP-R2), ERA-40]들을 분석한 결과, 1979년부터 북반구에서 여름과 가을에 해들리세포가 약 2~4.5° 극 쪽으로 확장되고 있음을 보였다. Seidel and Randel (2007)은 라디오존데 자료와 NCEP-R1, ERA-40의 일평균 자료를 사용하여 북반구 아열대지역에서 대류권계면 고도가 15 km 이상 되는 빈도를 계산하고, 연간 발생일이 가장 많은 위도대가 지난 27 (1979~2005)년 동안 극 쪽으로 ($+0.15^\circ \text{ yr}^{-1}$) 이동되고 있음을 보고했다. 또한 Archer and Caldeira (2008)도 23 (1979~2001)년간의 ERA-40를 분석하여 북반구 상층제트 위치가 $+0.02^\circ \text{ yr}^{-1}$ 로 극향 이동되고 있음을 밝혔다.

이와 같이 상층제트의 남북방향의 위치 변화에 대해서는 많은 연구들이 이루어진 반면, 동서방향의 변화 특성에 대해서는 상대적으로 관심이 적었다. Zhang et al. (2006)은 동아시아지역에서 상층제트의 남북 계절변동폭이 약 10° 미만인 반면, 여름 몬순 기간 동안에는 제트 중심위치가 50° 이상 큰 동서변동을 하고 있음을 보였다. 또한 그들은 비단열가열의 변화에 의해 제트 중심의 강도와 위치가 결정됨을 밝혔다. So and Suh (2015)는 최근 35 (1979~2013)년에 대해 4종 [ECMWF ERA-Interim Project (Dee et al., 2011, 이하, ERA-Int.), JMA (Japan Meteorological Agency) Japanese 55-year Reanalysis Project (Kobayashi et al., 2015, 이하 JRA-55), NCEP-R2, NASA (National Aeronautics and Space Administration) Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications (Rienecker et al., 2011, 이하 MERRA)]의 재분석자료들을 분석하여 봄과 겨울에 상층제트의 중심이 서쪽으로 이동되고 있음을 밝혔다. 하지만 제트 중심의 서쪽 이동 경향은 재분석자료에 따라 작지 않은 차이가 있어 추가적인 연구가 필요함을 제시하였다.

상층제트의 고도가 높아지고 제트의 중심이 극 쪽으로 이동하는 등의 일부 연구결과들에서는 일관성을 보이고 있으나, 분석자료의 특성(분석기간, 재분석자료의 종류 등), 분석영역 및 상층제트의 정의 방법에 따라 상당히 다른 결과를 보였다. 앞서 So and Suh (2015)가 상층제트를 분석하는데 사용한 200 hPa 등압면에서 제트 중심을 정의하는 방법의 경우, 실제 제트 중심이 200 hPa에 존재하지 않을 수 있으며, 고정 등압면을 사용하기 때문에 실제 제트 중심의 고도 변화에 대한 분석에 한계가 있었다. 또한, ERA-Int., MERRA, NCEP Climate Forecast System Reanalysis (Saha et al., 2010, 이하 CFSR)와 같이 최신의 자료 동화기법을 적용한 다수의 고해상도 재분석자료들의 활용이 가능해지고 있다.

Table 1. Characteristics of the four atmospheric reanalysis datasets.

Name	Source	Period of record	Horizontal resolution	Vertical levels
CFSR	NCEP/NCAR	1979/01~2009/12	0.5° × 0.5°	37
ERA-Int.	ECMWF	1979/01~present	0.5° × 0.5°	37
JRA-55	JMA	1958/01~present	1.25° × 1.25°	37
MERRA	NASA	1979/01~2016/02	0.5° × 2/3°	42

따라서 본 연구에서는 상층제트의 특성들을 Archer and Caldeira (2008)의 방법을 따라 상층대기에서의 질량 가중 평균 풍속과 질량속 가중 평균 고도, 위도, 그리고 경도를 정의한다. 현재 활용 가능한 재분석자료들 중 자료동화 수준 및 해상도 등을 고려하여 자료의 품질이 우수한 4종의 재분석자료들을 사용하여 아시아-북태평양지역에서 최근 30 (1979~2008)년 동안 상층제트의 강도(풍속)와 3차원적 위치(고도, 위도, 경도)의 변화 특성을 분석하고자 한다. 2절에서는 본 연구에서 사용된 4종의 재분석자료들과 상층제트의 특성들을 정의한 질량 및 질량속 가중평균 방법에 대해 소개한다. 3절에서는 아시아-북태평양지역의 상층제트의 기후학적 특성과 강도 및 3차원적 위치 변화 경향에 대해 설명한다. 끝으로, 본 연구에서 도출된 결과들을 4절에 정리한다.

2. 자료 및 연구 방법

상층 제트기류의 강도(풍속) 및 3차원적 위치 변화 경향을 연구하기 위해 현재 제공되고 있는 9종의 재분석자료들 중에서, 자료기간이 30년이 되지 않는 JRA-25 (Japanese 25-year Reanalysis, Onogi et al., 2007), 저해상도인 NCEP-R1/R2, 대류권 자료동화가 포함되어 있지 않은 ERA-20C (ECMWF Atmospheric Reanalysis of the 20th Century Project, Stickler et al., 2014)와 20CR (NOAA-CIRES Twentieth Century Global Reanalysis Version 2c, Compo et al., 2011)을 제외한 4종의 재분석자료들에 대한 월평균 바람 성분 (u, v)을 사용하였다. 4종의 재분석자료들의 간략한 특징들을 Table 1에 제시했다. 분석기간은 4종의 재분석자료들 모두 공통적으로 사용 가능한 1979년부터 2008년까지 30년으로 하였으며, 계절별 변화 경향을 살펴 보기 위해 봄(3, 4, 5월, MAM), 여름(6, 7, 8월, JJA), 가을(9, 10, 11월, SON), 그리고 겨울(12, 다음해 1, 2월, DJF)로 나누어 분석하였다. Figure 1은 본 연구의 분석영역을 나타낸 것으로, 아시아-북태평양지역에서 상층제트의 계절변동을 고려하여 15~60°N, 60~180°E로 정하였다. 또한 재분석자료들이 갖는 고유의 특성을 유지하기 위해 각 자료들의 해상도를 그대로 이용하였으며, 해상도의 선택이 가능한 자료들에서는

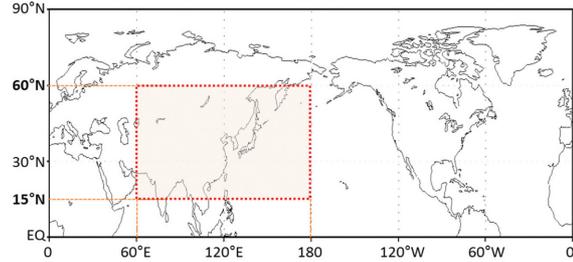


Fig. 1. The analysis region (red dotted box) used in this study.

0.5° × 0.5° 자료를 선택하였다. 재분석자료들의 산출과정 및 자료동화 방법이 상이하기 때문에 이들 자료간 편차가 존재하므로 통합적인 변화 경향을 분석하기 위해 앙상블 평균(ensemble mean)을 산출하였다. 앙상블자료는 선형 보간법을 이용하여 4종의 재분석자료들 중 가장 저해상도인 1.25° × 1.25°로 생산하였다.

본 연구에서는 상층제트의 특성과 변화 경향을 분석하기 위해 특정 고도나 위치를 사용하지 않고, Archer and Caldeira (2008)의 방법을 따라 질량 가중 평균 풍속과 질량속 가중 평균 고도(기압), 위도, 그리고 경도를 사용하였다. 이 방법은 상층에서 최대풍속이 존재하는 지역 또는 지점의 최대값을 선택하여 제트를 정의하는 방법보다 수치적으로 더 안정적이며, 연직 해상도에 대한 의존도를 감소시키는 장점이 있다. 각 격자점 별 질량 가중 평균 풍속(Mass Weighted Wind Speed) $WS_{i,j}$ 는 식 (1)로 계산된다. 여기서 질량 가중을 위한 연직 고도 범위는 Archer and Caldeira (2008)에서와 같이 일반적으로 상층제트가 존재하는 400~100 hPa로 하였으며, 식에 사용된 $u_{i,j,k}$ 와 $v_{i,j,k}$ 는 각 격자점(i, j)에서 k 층에서의 동서 및 남북 바람 성분이고, m_k 는 각 기층의 질량을 나타낸다.

식 (1)과 같은 방법으로 질량속 가중 평균 기압고도(mass-flux weighted pressure) $P_{i,j}$ 는 식 (2)로 계산되는데, 여기서 p_k 는 각 층의 기압이다. $P_{i,j}$ 는 제트기류의 고도를 대신할 수 있으며, 표준대기에서 고도 10 km는 약 265 hPa이므로 이 고도에서 1 hPa의 기압 변화는 약 26 m의 고도 변화에 해당한다. 식 (2)와 유사하게 질량속 가중 평균 위도(mass-flux weighted latitude)

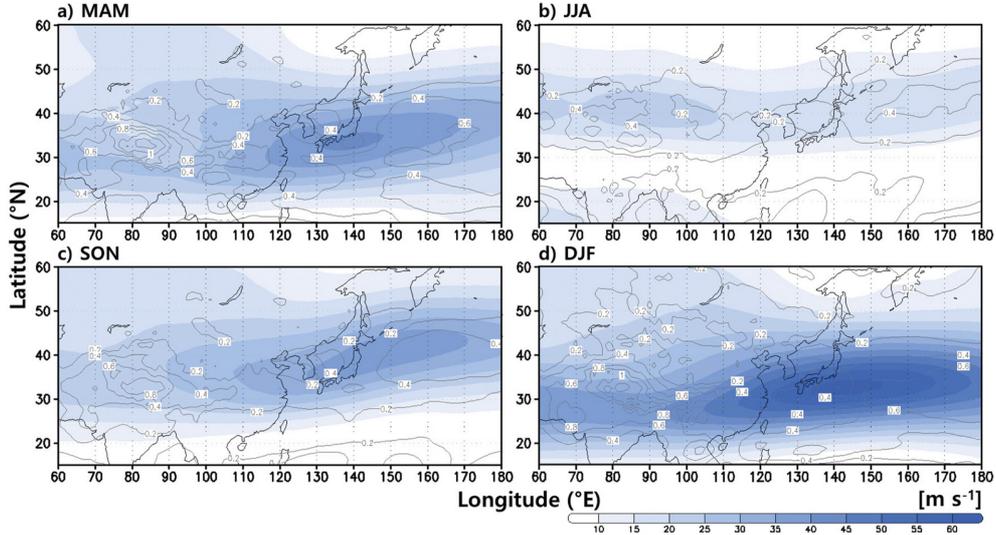


Fig. 2. Spatial distributions of 30 years (1979~2008) seasonal averages (shaded) and ensemble spread (contour) of mass weighted wind speed (m s^{-1}) from the ensemble data.

Lat_i 와 질량속 가중 평균 경도(mass-flux weighted longitude) Lon_j 는 각각 식 (3)과 (4)로 계산되는데, 여기서 $\phi_{i,j}$ 와 $\lambda_{i,j}$ 는 각 격자점의 위도와 경도이다. 위도와 경도 범위는 $15\sim 60^\circ\text{N}$, $60\sim 180^\circ\text{E}$ 로서 Archer and Caldeira (2008)를 참고하여 이 연구의 분석영역에 맞게 조정하였다.

$$WS_{i,j} = \frac{\sum_{k=100hPa}^{k=400hPa} m_k \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}}{\sum_{k=100hPa}^{k=400hPa} m_k} \quad (1)$$

$$P_{i,j} = \frac{\sum_{k=100hPa}^{k=400hPa} (m_k \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}) \times P_k}{\sum_{k=100hPa}^{k=400hPa} m_k \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}} \quad (2)$$

$$Lat_i = \frac{\sum_{k=15N}^{k=60N} [\sum_{k=100hPa}^{k=400hPa} (m_k \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2})] \times \phi_{i,j}}{\sum_{k=15N}^{k=60N} \sum_{k=100hPa}^{k=400hPa} m_k \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}} \quad (3)$$

$$Lon_j = \frac{\sum_{i=60}^{i=180} [\sum_{k=100hPa}^{k=400hPa} (m_k \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2})] \times \lambda_{i,j}}{\sum_{i=60}^{i=180} \sum_{k=100hPa}^{k=400hPa} m_k \times \sqrt{u_{i,j,k}^2 + v_{i,j,k}^2}} \quad (4)$$

3. 연구결과

3.1 기후학적 특성

Figure 2는 식 (1)을 4종의 재분석자료들에 적용하여 아시아-북태평양지역에 대해 지난 30 (1979~2008)년 기간 평균 $WS_{i,j}$ 를 구한 후, 앙상블 평균과 앙상블 스프레드의 공간분포를 계절별로 표현한 것이다. 앙

상블 스프레드는 4종의 재분석자료들의 평균에 대한 표준편차로서, 스프레드가 크(작은)면, 재분석자료들 간의 차이가 큰(작은) 것을 의미한다. 봄에는 제트의 중심이 일본 남동해상에(약 35°N , 140°E)에 위치하며, 최대풍속은 약 45 m s^{-1} 이며, 봄철 앙상블 스프레드는 제트 중심에서 평균 풍속 대비 약 1.93% 정도이며, 계절별 앙상블평균은 값은 Table 2에 나타났다(Fig. 2a). 여름철에는 다른 계절과 달리 제트 중심이 중국 내륙(40°N , 90°E)에 위치하고, 제트 중심에서의 풍속이 4계절 중 가장 약하다(약 25 m s^{-1}). 풍속의 동서 방향의 변화가 비교적 작아 최대풍속대가 북태평양을 가로질러 대상으로 길게 분포한다. 또한 앙상블 스프레드의 크기는 계절에 상관없이 비슷한 크기를 갖지만, 풍속이 상대적으로 약한 여름에는 제트 중심에서 평균 풍속 대비 약 3.42%로 가장 크게 나타난다(Fig. 2b). 가을의 경우 제트의 중심이 봄에 비해 조금 북동쪽에 위치(약 40°N , 150°E)하고 최대풍속이 조금 약하지만, 전체적으로 제트 중심위치와 강도 그리고 앙상블 스프레드 모두 봄과 유사하게 나타나고 있다(Fig. 2c). 남북방향의 기온경도가 가장 큰 겨울에는 제트풍속이 가장 강할(65 m s^{-1}) 뿐만 아니라 중심위치도 가장 남쪽(약 30°N , 145°E)에 위치하며, 겨울철 앙상블 스프레드는 제트 중심에서 평균 풍속 대비 1.47% 정도로 다른 계절에 비해 가장 작다(Fig. 2d). 특이한 것은 티벳 고원 지역에서 여름을 제외한 전 계절에서 자료들간 스프레드가 제트중심에 비해 2배 이상으로 매우 크게 나타나는 점이다. 즉, 이 지역에서는 각 자료 사이에 차이가 적지 않음을 제시하므로 사용시 주

Table 2. Statistical summary of the mass weighted wind speed and mass-flux weighted altitude, latitude and longitude averaged over the analysis domain and its linear trend and significance level (asterisk: $p \leq 0.05$) by reanalysis dataset and season.

	Dataset	Wind Speed		Altitude		Latitude		Longitude	
		Mean (m s ⁻¹)	Trend (m s ⁻¹ yr ⁻¹)	Mean (hPa)	Trend (hPa yr ⁻¹)	Mean (°N)	Trend (° yr ⁻¹)	Mean (°E)	Trend (° yr ⁻¹)
MAM	CFSR	20.59	+0.01	245.30	-0.04	36.97	+0.01	119.14	0.00
	ERA-Int.	20.94	-0.01	243.80	-0.02	36.81	+0.02	119.87	+0.01
	JRA-55	20.82	-0.01	244.51	-0.02	36.88	+0.01	119.92	+0.01
	MERRA	20.64	0.00	241.94	-0.03	36.95	+0.01	119.41	+0.02
	Ensemble	20.75	-0.02	244.14	-0.03	36.90	+0.01	119.59	+0.01
JJA	CFSR	11.69	-0.03*	235.78	-0.06*	39.05	+0.02	116.31	-0.04
	ERA-Int.	11.69	-0.03*	235.38	-0.03	39.23	0.00	116.33	-0.05*
	JRA-55	11.75	-0.03*	235.52	-0.03	39.16	+0.01	116.33	-0.05*
	MERRA	11.57	-0.03*	231.97	-0.01	39.04	0.00	116.04	-0.03
	Ensemble	11.69	-0.03*	234.66	-0.04	39.12	+0.01	116.25	-0.04*
SON	CFSR	18.69	0.00	241.78	-0.06*	39.83	+0.02	119.54	-0.01
	ERA-Int.	18.83	-0.01*	241.85	-0.05*	39.84	+0.02	119.09	-0.01
	JRA-55	18.76	-0.01*	241.86	-0.05*	39.89	+0.02	119.03	-0.03
	MERRA	18.65	0.00	238.41	-0.04*	39.87	+0.02	118.98	-0.01
	Ensemble	18.73	0.00	240.97	-0.05*	39.86	+0.02	119.16	-0.02
DJF	CFSR	27.13	+0.03	243.85	-0.05	35.50	+0.02	119.46	+0.01
	ERA-Int.	27.45	+0.01	243.42	-0.02	35.37	+0.02	119.14	+0.01
	JRA-55	27.25	+0.01	243.13	-0.02	35.45	+0.02	119.05	+0.01
	MERRA	27.16	+0.02	240.03	-0.02	35.59	+0.02	118.81	+0.02
	Ensemble	27.25	+0.02	242.61	-0.03	35.48	+0.02	119.11	+0.01

의가 요구된다.

아시아-북태평양지역에서 상층제트의 중심은 여름을 제외하고 대부분 동아시아 대륙의 동쪽인 일본 근처에 위치해 있으며, 제트의 위치와 강도 모두 강한 계절변동을 보이고 있다. 각 재분석자료들 간의 앙상블 스프레드는 모든 계절에서 제트 중심에서 작고, 상대적으로 주변에서 크게 나타나고 있으며, 다른 계절에 비해 상대적으로 풍속이 가장 약한 여름철에 더 큰 앙상블 스프레드를 보인다. 그림으로 제시되지는 않았지만, 4종의 재분석자료들 모두 선행 연구들과서와 같이 계절 변화에 따른 남북 기온경도의 변동에 따라 상층제트의 위치와 강도 계절변동을 잘 나타냈다. 이는 기후학적 측면에서 재분석자료들을 활용하여 상층제트를 분석한 이전의 연구들과도 같은 결과이다(Yang et al., 2002; Koch et al., 2006; Kuang et al., 2014; Manney et al., 2014).

식 (2)를 사용하여 산출된 각 재분석자료들의 고도 ($P_{i,j}$)에 대한 앙상블 평균과 스프레드를 Fig. 3에 제시하였다. 아시아-북태평양지역에서 상층제트의 고도는 사계절 모두 풍상측에서 높고 풍하측에서 낮게 나타나는데, 이는 Archer and Caldeira (2008)와 같은 결과이다. 봄과 가을의 고도는 비슷한 분포를 가지며,

앙상블 스프레드는 제트 중심에서 평균 고도 대비 0.61% 정도이고, 고도가 낮은 풍하측에 비해 상대적으로 고도가 높은 풍상측에서 가장 크게 나타난다 (Figs. 3a, c). 여름에는 풍속의 분포와 비슷하게 제트 중심에서 상대적으로 높은 고도대가 대상으로 길게 분포하며, 앙상블 스프레드도 다른 계절에 비해 작게 나타난다. 또한, 흥미로운 점은 30°N 이남 지역에서는 제트 중심보다 고도가 높을 뿐만 아니라 앙상블 스프레드도 크게 나타나는 것이다(Fig. 3b). 여름철에 대류활동이 활발한 30°N 이남 저위도 지역에서 평균 고도에 대한 앙상블 스프레드가 큰 점은 각 자료를 산출하는 과정에서 사용한 적운대류 모수화 및 자료 동화 기법의 차이에 의한 것으로 보인다. 하지만, 겨울에는 여름과 상이하게 제트 중심지역에서 상대적으로 고도가 낮으며, 분석영역에서 고도가 가장 높은 북쪽 해역을 제외하고 앙상블 스프레드의 크기는 평균 0.62%로 다른 계절과 비슷한 크기를 보인다(Fig. 3d).

3.2 아시아-북태평양 상층제트의 경년변동

2절에서 정의된 질량 또는 질량속 가중 평균 양들을 분석영역에 대해 평균을 취하면, 최근 30년 동안 아시아-북태평양지역 전체에 대한 상층제트 특성 변

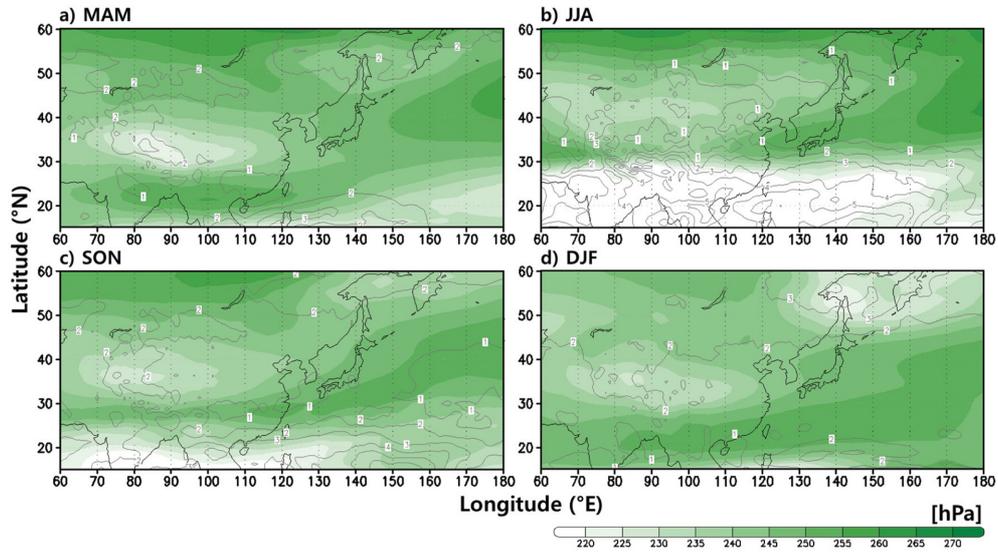


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for the mass-flux weighted pressure (hPa).

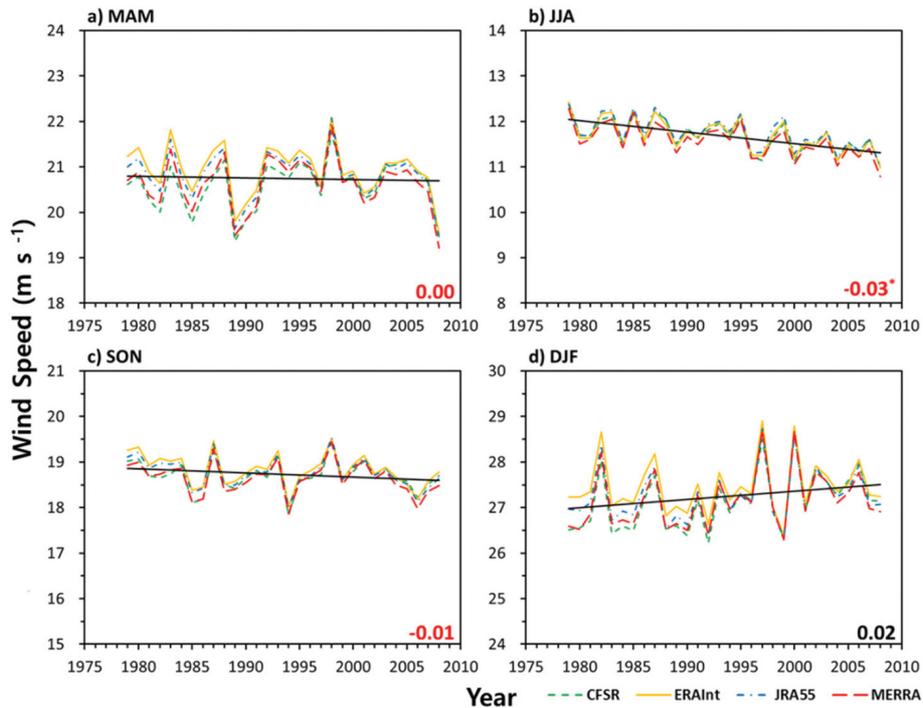


Fig. 4. Interannual variations and trends of domain averaged mass weighted wind speed (m s^{-1}) of the eight reanalysis data. The numbers and asterisks show linear trends ($\text{m s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) and significance levels ($p \leq 0.05$), respectively.

화의 정보를 도출할 수가 있다. Figures 4~7은 4종의 재분석자료들을 아시아-북태평양지역에 대해 영역 평균한 계절별 상층제트 특성들(풍속, 고도, 위도, 경도)

의 경년변동을 나타낸 것으로, 재분석자료들의 앙상블 평균에 대한 회귀직선은 굵은 실선으로, 경향은 $p \leq 0.05$ 의 경우 값에 *를 표시했다. 또한, 각 재분석

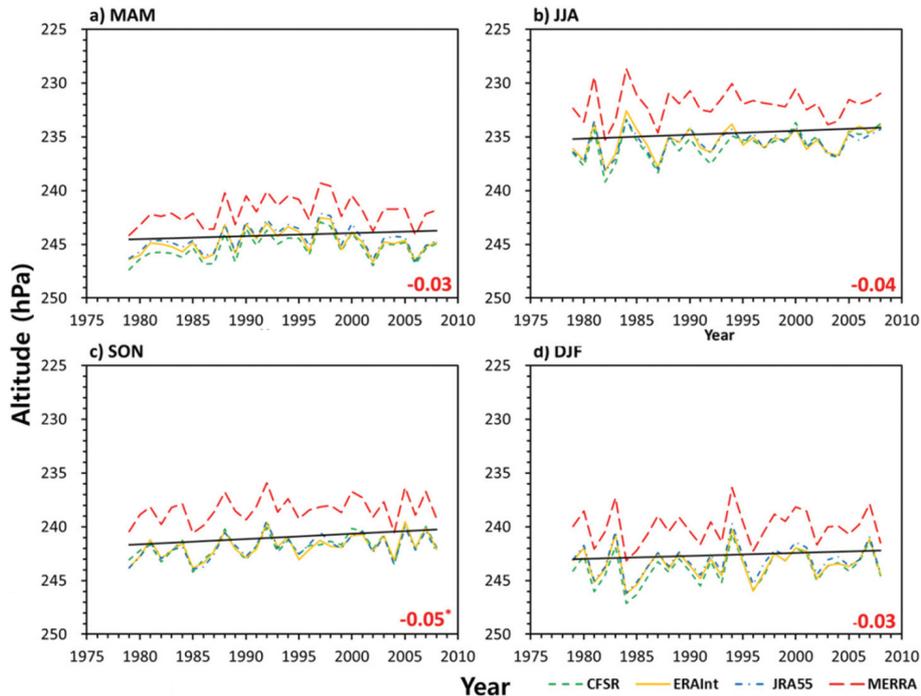


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for the mass-flux weighted altitude (hPa) and linear trends (hPa yr⁻¹).

자료들의 통계(평균 및 경향)를 Table 2에 나타냈다. Figure 4에 따르면, 풍속은 분석영역 전체에 대해 영역 평균을 취했음에도 강한 계절변동을 보이며, 사용된 재분석자료들에 관계없이 경년변동 패턴은 매우 유사하게 나타나고 있다. 전 계절에서 ERA-Int가 가장 강한 풍속을 보이는 반면, CFSR이 가장 약한 풍속을 보이고 있지만, 재분석자료들 간에 차이는 약 ±0.2 m s⁻¹ 정도로 작게 나타나고 있다. 봄과 가을에는 Figs. 2a, c와 같이 제트 중심의 위치가 비슷하지만, 상대적으로 봄철에 평균 풍속의 경년변동이 강하게 나타나며, 봄철의 CFSR을 제외한 모든 재분석자료에서 풍속의 감소 경향을 보이지만, 가을철에는 JRA-55와 MERRA에서만 유의한 감소 경향이 나타난다. 여름에는 다른 계절에 비해 재분석자료들 간의 차이가 작고 경년변동이 가장 약하며, 모든 재분석자료들에서 강한 풍속의 감소 경향을 보이고 있다. 반면, 겨울에는 다른 계절들에 비해 경년변동이 가장 강하고, 모든 자료들에서 풍속의 증가 경향을 보이지만, 유의수준은 낮게 나타나고 있다. 유의수준이 높지는 않지만 아시아-북태평양지역에서 영역 평균한 풍속은 겨울철을 제외하고 세 계절에서 모두 감소하는 경향이 나타나며, 특히 여름(-0.03 m s⁻¹ yr⁻¹)에 현저한 감소 경향을 보이고 있다(Table 2). 이는 제트 중심에서 풍속이 여름에 감소(-0.04 m

s⁻¹ yr⁻¹)하는 경향을 보인 So and Suh (2015)와는 같은 결과이지만, 낮은 유의수준의 봄과 겨울철의 경향들과는 다른 결과를 보인다. 또한, 다른 계절에 비해 풍속과 경년변동이 가장 강한 겨울철에는 통계적으로 유의하지는 않지만 풍속의 증가 경향을 보인 Pena-Ortiz et al. (2013)의 결과와 일치하는 반면, Archer and Caldeira (2008), Barton and Ellis (2009)와는 다른 결과이다. 제트 중심의 평균 고도는 풍속과는 다르게 전 계절에서 MERRA를 제외한 3종은 자료들 간의 차이가 작지만, MERRA만이 다른 자료들에 비해 3.6 hPa 정도 높으며, CFSR이 가장 낮게 나타나는 특징을 보이고 있다(Fig. 5). MERRA의 평균 고도의 차이는 CFSR, ERA-Int., 그리고 JRA-55는 400~100 hPa 사이에 연직 해상도가 10개의 층인데 반해, MERRA는 오직 7개의 층만 존재하기 때문이다. 계절에 따른 평균 고도의 차이가 9.5 hPa 정도이며, 경년변동은 큰 차이를 보이지 않지만, 봄과 가을에 비해 여름과 겨울에서 조금 크게 나타난다. 아시아-북태평양지역에서 상층제트의 고도는 모든 계절에서 재분석자료들에 관계없이 상승하는 경향이 나타나는데, 특히 CFSR이 가장 강한 고도 상승 경향을 보인다. 또한 다른 계절에 비해 가을(-0.05 hPa yr⁻¹)에서 높은 유의수준의 상승 경향이 나타난다(Table 2). 이러한 결과는 북반구 겨울에서 상

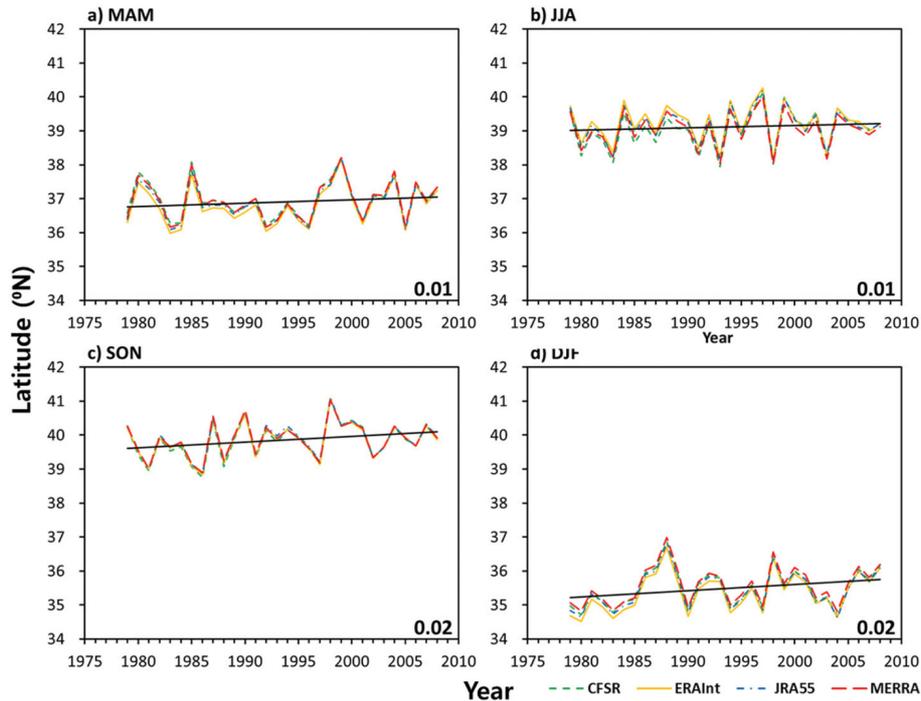


Fig. 6. Same as Fig. 5 except for the latitude ($^{\circ}$) and linear trends ($^{\circ} \text{ yr}^{-1}$).

층제트 고도의 증가를 보여준 Santer et al. (2004), Seidel and Randel (2006), 그리고 Archer and Caldeira (2008) 등의 연구결과들과 일치한다.

해들리세포와 페르세포 사이의 상층에 형성되는 중위도 아열대 제트는 강화된 중위도 대류권의 온난화로 인해 해들리세포의 확장과 더불어 제트 중심이 극쪽으로 이동되고 있음이 최근 많은 연구에서 확인됐다(Hu and Fu, 2007; Seidel and Randel, 2007; Archer and Caldeira, 2008). 상층제트 중심의 평균 위도는 4종의 재분석자료들에서 계절에 관계없이 유사한 패턴을 보이며, 재분석자료들 간의 차이가 다른 특성들에 비해 가장 작게 나타난다(Table 2). 또한, 경년변동도 계절에 따라 큰 차이가 없다(Fig. 6). 200 hPa 고정 등압면에서 제트 중심을 정의한 So and Suh (2015)의 연구결과에서 여름과 겨울 사이에 약 10° 정도의 남북 진동을 보였지만, 본 연구에서는 영역 평균으로 인해 계절에 따른 남북 진동폭이 3.6° 정도로 작게 나타난다. 아시아-북태평양지역의 제트 중심 위도는 모든 계절에서 북쪽으로 이동하는 경향을 보이지만, 유의수준은 높지 않다. 다만, 가을($+0.02^{\circ} \text{ yr}^{-1}$)과 겨울($+0.02^{\circ} \text{ yr}^{-1}$)에서 신뢰수준이 90% 이상에서 북향 이동 경향이 나타난다. 특히, 겨울철에서 북향 이동 경향은 이전의 다른 연구들(Hu and Fu, 2007; Seidel and Randel, 2007; Archer and Caldeira, 2008; Pena-Ortiz

et al., 2013)과 같은 결과이다. 하지만, So and Suh (2015)에서는 재분석자료들에 따라 겨울철 제트 중심의 남북 변화 경향이 다른 결과를 보였다.

제트 중심의 평균 경도는 재분석자료들 간에 1° 정도의 작지 않은 차이를 보이고, 경년변동과 변동 경향 모두 다른 계절에 비해 여름에 상대적으로 크게 나타나고 있다(Fig. 7). 봄철의 CFSR를 제외하고 봄과 겨울에는 모든 재분석자료들이 동쪽으로 이동하는 경향이 나타나지만, 두 계절 모두 유의성은 높지 않다(Table 2). 반면, 여름과 가을에는 모든 재분석자료들에서 서쪽으로 이동하고 있지만, 오직 여름($-0.04^{\circ} \text{ yr}^{-1}$)에만 ERA-Int., JRA-55에서 유의한 서쪽 이동 경향이 나타난다. 이 결과, 유의성이 높지 않은 겨울철 동쪽 이동 경향을 고려하더라도, 여름에 대륙 쪽으로 이동하는 경향으로 인해 제트의 동서 계절 변동폭이 커지고 있음을 제시한다. 하지만 최근 35 (1979~2015)년 동안 제트 중심의 동서 진폭이 작아진다는 So and Suh (2015)와는 상반된 결과를 보여, 자료의 사용 기간, 분석방법에 따라 차이가 있음을 보이고 있다.

Zhang et al. (2006)은 상층제트의 중심에 대한 계절 변화는 동서 방향의 변동폭이 50° 이상이며, 이는 동아시아 여름 몬순의 시종일과 관련된 6~7월 사이에 빠른 변위 때문임을 밝혔다. 하지만, 본 연구는 계절 평균으로 인해 계절내 변동의 표현이 어려우며, 제트

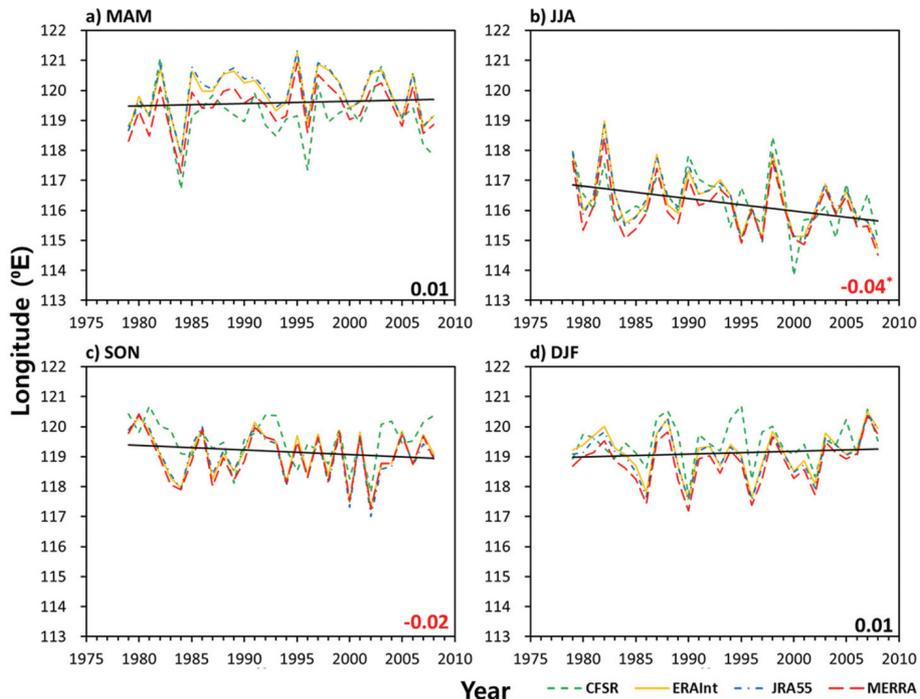


Fig. 7. Same as Fig. 5 except for the longitude (°) and linear trends (° yr⁻¹).

중심 경도들을 영역 평균하여 동서 변동폭이 3° 정도로 작게 나타났다. 상층제트 중심의 이동 경향을 분석한 Pena-Ortiz et al. (2013)도 제트의 위도(경도) 차이가 중요하기 때문에 영역 평균을 이용하면 변동폭의 크기가 줄어들어, 동서 및 남북 위치 변화 경향에 대한 분석에 한계가 있음을 지적했다.

3.3 상층제트 변화 경향의 공간분포

이미 잘 알려진 바와 같이 상층제트 특성들은 계절뿐만 아니라 지리적으로도 많은 차이를 보이고 있기 때문에, 본 연구 영역인 아시아-북태평양지역에서 제트 특성이 공간적으로 어떻게 분포하는지를 상세하게 분석하고자 한다. Figures 8~11은 최근 30년 동안 아시아-북태평양지역에서 제트의 강도(풍속) 및 3차원적 위치 변화 경향에 대해 4종의 재분석자료들의 앙상블 평균과 앙상블 스프레드를 계절별로 나타낸 것이다. 변화 경향의 유의성은 신뢰수준이 95% ($p \leq 0.05$) 이상인 격자에 점으로 표시하였다.

3.3.1 풍속의 변화 경향

Figure 8은 분석영역에 대해 4종의 재분석자료들을 앙상블 평균하여 산출한 풍속의 변화 경향과 앙상블 스프레드를 계절별로 나타낸 것으로, 전 계절에서 변화 경향 및 스프레드 모두가 공간적으로 불균일하게

분포하고 있다. 유의성이 높지는 않지만 봄에는 상층제트의 중심 지역의 위도(약 35°N)를 기준으로 우리나라를 포함한 북쪽 지역에서는 감소 경향이 나타나고, 남쪽 지역에서는 증가 경향이 나타나고 있다. 또한 중국 남쪽과 인도 지역에서는 유의한 풍속의 감소 경향이 보인다. 앙상블 스프레드는 제트 중심에서 가장 작게, 중심 이남의 감소 지역에서 가장 크게 나타난다. 여름에는 아시아-북태평양지역 대부분에서 풍속의 감소 경향을 보이고 있으며, 특히 제트 중심(약 40°N, 90~120°E)지역에서 -0.2 m s⁻¹ yr⁻¹로 가장 큰 감소 경향을 보인 반면, 50°N 이상에서는 유의한 풍속의 증가 경향이 나타나, 지난 30년 동안 여름철에 제트 중심은 약화되고 있으며, 풍속이 강한 지역이 북쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 하지만 몽고, 중국 남부 등 일부 지역에서는 국지적으로 풍속이 증가하는 경향도 유의하게 나타나고 있다. 앙상블 스프레드는 최대 풍속대를 중심으로 가장 약하게 나타나며, 풍속의 감소가 가장 강한 지역의 이북과 중국 남쪽 지역에서 크게 나타난다. 가을에는 봄과 반대로 우리나라를 포함한 제트 중심지역(약 40°N, 150°E)를 기준으로 남쪽에서는 최대 -0.2 m s⁻¹ yr⁻¹의 유의한 감소 경향을 보이는 반면, 북쪽에서는 평균 +0.1 m s⁻¹ yr⁻¹로 약한 증가 경향이 나타난다. 하지만, 경도 85°E의 서쪽에서는 티베트 고원을 중심으로 남(북)

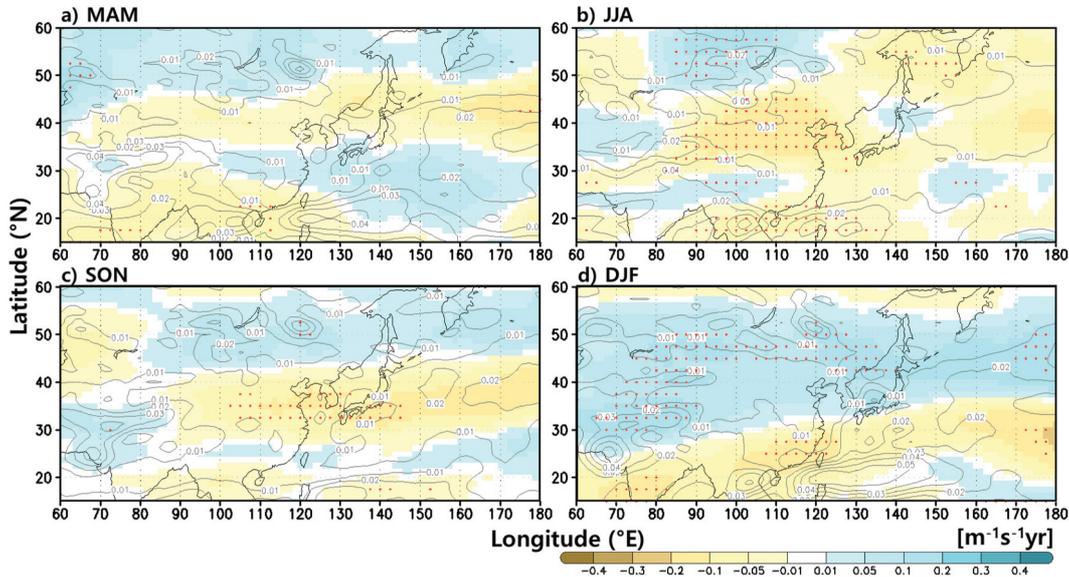


Fig. 8. Spatial distribution of linear trends ($\text{m s}^{-1} \text{yr}^{-1}$) of mass weighted wind speed for the ensemble reanalysis data (1979~2008). Dots and contours indicate statistically significant ($p \leq 0.05$) trends and ensemble spread, respectively.

쪽에는 풍속의 증가(감소) 경향을 보이고 있다. 또한 앙상블 스프레드는 주로 제트의 중심에서 작고, 풍하측과 티베트 고원의 남쪽 지역에서 크게 나타나고 있다. 겨울철 풍속의 변화 경향은 가을과 유사한 패턴을 보이지만, 감소 경향 영역이 남쪽으로 이동되어 우리나라를 중심으로 분석영역의 중북부 지역에서는 대부분 풍속이 증가되는 경향을 보이고 있으며, 이는 Strong and Davis (2007)와 같은 결과이다. 이러한 변화 패턴은 겨울철에 풍속이 강한 지역이 북쪽으로 이동되고 있음을 의미하며, 경계 지역에 위치한 우리나라의 경우 제트 중심 강도의 변화로 인한 영향이 클 것으로 예상된다. 또한 겨울철 제트 중심(약 30°N , 140°E)을 기준으로 풍속의 변동성이 가장 큰 풍하측에서 감소($-0.3 \text{ m s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)와 증가($+0.2 \text{ m s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) 경향이 가장 강하며, 앙상블 스프레드가 제트 중심에서 가장 작은 반면, 풍속이 감소하는 제트 중심 이남 지역에서 가장 크게 나타나고 있다. 즉, 북위 30°N 이북지역에서의 풍속 증가 경향은 신뢰수준이 높은 반면 30°N 이남 지역에서의 풍속 증가 경향은 특히 남중국해에서의 증가 경향은 신뢰수준이 낮을 것으로 추정된다.

3.3.2 고도의 변화 경향

Figure 9는 앙상블자료를 이용하여 고도의 변화 경향과 앙상블 스프레드를 나타낸 것으로 계절에 관계없이 제트 풍속이 가장 강한 지역들에서 고도가 상승하는 경향을 보이고 있다. 봄에는 풍속의 변화 경향

과 유사한 패턴으로 제트 중심의 이남에서 고도의 하강($+0.25 \text{ hPa yr}^{-1}$, 기압 상승) 경향이 나타나는 반면, 이북에서는 상승($-0.25 \text{ hPa yr}^{-1}$, 기압 하강) 경향을 보인다. 또한 고도가 상승하는 지역을 중심으로 재분석 자료들 간의 일치율이 가장 크게 나타난다. 여름에는 경도 125°E 를 기준으로 서쪽 지역에 고도 상승 경향이 보이는 반면, 동쪽에 하강 경향이 나타난다. 분석 영역의 북쪽 해역(-0.5 hPa yr^{-1})을 포함하여 제트 중심지역의 남쪽 지역들에 유의한 고도 상승 경향이 나타나지만, 풍하측인 일본 동부의 서태평양 해역에서는 낮은 유의수준의 하강 경향을 보인다. 풍속의 경향과 유사하게 특정 패턴이 보이지 않고 있으며, 고도의 변화 경향은 약하지만, 앙상블 스프레드는 제트 중심지역에서 가장 작게 나타난다. 가을의 고도 경향은 봄과 반대의 남북 패턴을 보이며 제트 중심의 북쪽에서 약한 하강 경향($+0.25 \text{ hPa yr}^{-1}$)을 보이지만 유의한 지역은 거의 없다. 풍속이 강한 지역을 포함하여 이남의 대부분 지역에서 강한 고도 상승 경향($-0.75 \text{ hPa yr}^{-1}$)이 나타나고 있지만, 상승 경향이 가장 강한 지역에서 앙상블 스프레드 역시 크게 나타난다. 겨울에는 가을과 유사한 패턴으로 제트 중심을 포함한 남쪽 지역에서 유의한 고도의 상승 경향과 북쪽지역에 상대적으로 약한 하강 경향을 보여준다. 특히 제트 중심의 풍하측에서 최대 $-0.50 \text{ hPa yr}^{-1}$ 의 큰 상승 경향이 나타난다. 또한 앙상블 스프레드가 다른 계절에 비해 가장 작게 나타나는 겨울철 고도의 변화는 신뢰수준이 높은 것으로 보인다. 최근 30년 동안 제트 중심

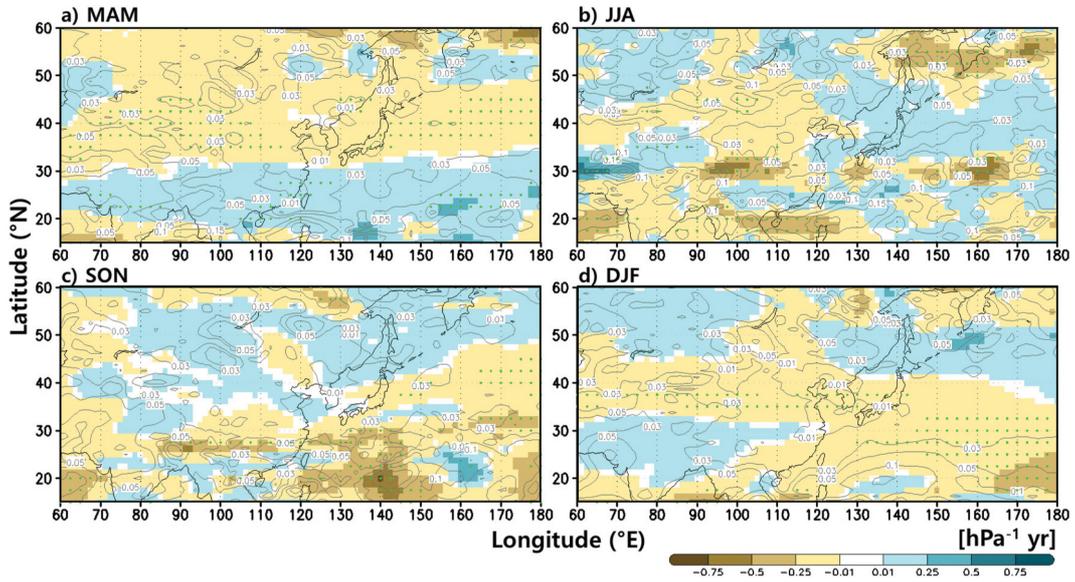


Fig. 9. Same as Fig. 8 except for the mass-flux weighted pressure (hPa yr^{-1}).

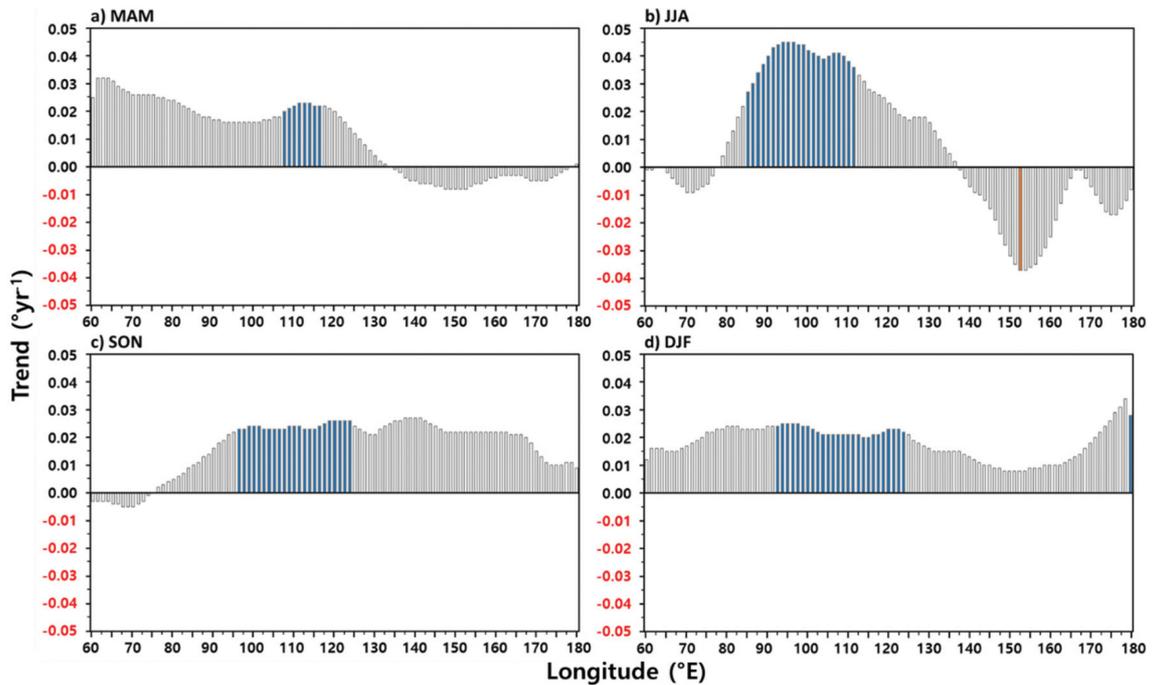


Fig. 10. Linear trends ($^{\circ} \text{yr}^{-1}$) of mass-flux weighted latitude meridionally averaged for analysis domain ($15\sim 60^{\circ}\text{N}$) from the ensemble reanalysis data during 1979–2008, the color bars represent statistically significant trends ($p \leq 0.05$).

지역에서 고도 변화는 전 계절에서 상승 경향을 보인 반면, 그 이북에서는 봄에, 그 이남에서는 가을과 겨울에 유의한 상승 경향이 나타난다.

3.3.3 위도의 변화 경향

Figure 10은 $15\sim 60^{\circ}\text{N}$ 사이를 남북 평균하여 각 경도 별 상층제트의 위도 변화 경향을 계절별로 나타낸

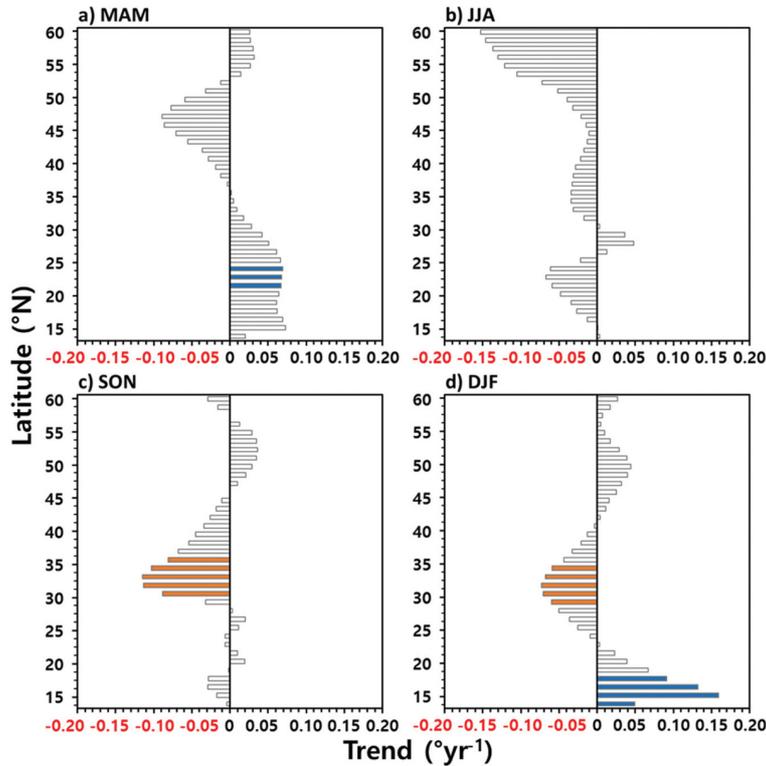


Fig. 11. Linear trends ($^{\circ} \text{yr}^{-1}$) of mass-flux weighted latitude zonally averaged for analysis domain ($60\sim 180^{\circ}\text{E}$) from the ensemble reanalysis data during 1979~2008, the color bars represent statistically significant trends ($p \leq 0.05$).

것이다. 아시아-북태평양지역에서 봄철 상층제트의 위도는 제트 중심(140°E)을 포함한 지역($130\sim 180^{\circ}\text{E}$)에서 약한 남향 경향($-0.01^{\circ} \text{yr}^{-1}$)을 보인다. 이는 Fig. 8a에서와 같이 제트 중심의 남과 북에서 풍속의 상반된 변화 경향(남: 증가, 북: 감소)과 연관되지만, 경향의 크기가 작고 유의수준도 낮다. 하지만 130°E 를 기준으로 서쪽의 모든 경도에서 북향 경향이 나타나고 있으며, 특히 풍상측(112.5°E)에서 가장 크게($+0.03^{\circ} \text{yr}^{-1}$) 북쪽으로 이동한다. 여름에는 일반적으로 다른 계절에 비해 상층제트의 평균 풍속이 가장 약하지만, 그 위도 변화 경향은 137.5°E 를 중심으로 서쪽 지역에서는 강한 북향, 동쪽 지역에서는 강한 남향 경향이 나타나고 있다. 특히 제트 중심의 풍상측($85\sim 112.5^{\circ}\text{E}$)에서 최대 $+0.05^{\circ} \text{yr}^{-1}$ 의 유의한 큰 북향 이동을 보인다. Figure 8b에서 보인 바와 같이 제트 지역을 중심으로 서쪽 지역의 강한 북향 경향은 이남에 감소 경향을 갖는 남북의 상반된 패턴 때문이지만, 강한 남향 경향을 보이는 동쪽 지역은 대부분 감소 경향이 나타난다. 가을에는 Fig. 8c에서 언급했던 것과 같이 유의수준은 낮지만 동서의 상반된 풍속의 변화 경향 때문이다. 경도 75°E 이상의 모든 분석영역에서 북향

경향이 나타나고 있으며, 유의수준은 주로 $95\sim 125^{\circ}\text{E}$ 동북아시아 대륙의 동쪽에서 높게 나타나고 있다. 가을철 아시아-북태평양지역에서 제트 중심의 북향 이동이 나타난 것은 제트 중심위도를 기준으로 남과 북쪽 지역에 각각 풍속의 감소와 증가의 상반된 패턴이 나타난 것과 관련된다. 겨울철 위도 변화 경향은 전 경도에서 모두 북향 경향을 보이고 있다. 제트 중심에서의 북향 경향은 $+0.01^{\circ} \text{yr}^{-1}$ 이고 가을과 마찬가지로 대륙의 동쪽지역($95\sim 125^{\circ}\text{E}$)에서 유의한 북향 이동 경향($+0.03^{\circ} \text{yr}^{-1}$)이 나타나며, 풍하측(177.5°E , $+0.03^{\circ} \text{yr}^{-1}$)에서 가장 큰 경향이 나타난다. 풍하측 지역인 동태평양(160°E 동쪽)에서 이러한 강한 북향 경향은 Fig. 8d에서 보인 바와 같이 35°N 를 중심으로 상반된 풍속의 변화와 관련이 있는 것으로 판단된다. 이는 이미 많은 연구에서 밝힌 바와 같이 지구온난화의 영향으로 남북 기온경도가 가장 큰 지역이 겨울철에 북상하고 있음을 의미한다. 하지만, 300 hPa 등압면에서 각 경도 별 제트 중심의 남북 변화 경향을 분석한 Barton and Ellis (2009)는 57 (1949~2005)년 동안 $110\sim 117.5^{\circ}\text{E}$ 에서 유의한 남향 이동 경향을 보인 반면, 지난 27 (1979~2005)년 동안에는 125°E 에서 유의한 북향 이동

경향을 보였다. 비록, 분석영역에서 차이는 있지만 공통된 지역에 대한 결과들로 비교해 볼 때, 이러한 상반된 연구 결과들은 분석 기간에 따른 차이로 보인다.

3.3.4 경도의 변화 경향

Figure 11은 앙상블자료를 사용하여 동서 평균(60~180°E)한 상층제트 중심의 경도 변화 경향을 계절별로 보여준 것이다. 전 계절에서 동서방향의 경향 크기는 남북 이동 경향의 크기보다 작으며, 위도에 따라 동서 변화 경향이 다르게 나타나고 있다. 이는 Fig. 8에서 보인 바와 같이 풍속의 변화 경향이 위도에 따라 동서방향으로 유사하게 나타나고 있기 때문이다. 봄철의 경우 위도 35°N를 기준으로 이남의 22.5~25°N에서는 유의한 동향 이동 경향이 나타나는 반면, 제트 중심을 포함한 이북에서는 서향 이동 경향이 나타나고 있지만, 유의 수준은 낮다. 여름에는 거의 대부분의 위도에서 서향 이동 경향이 나타나고 있으며, 이는 대부분의 풍속의 상승 경향 지역들이 분석영역의 서쪽에 분포하기 때문이다. 55°N 이상의 강한 서향 이동 경향(최대 $-0.15^{\circ} \text{ yr}^{-1}$)은 Fig. 8b에서 볼 수 있듯이 풍속의 경향에 대해 동서의 상반된 패턴 때문이다. 가을에는 풍속의 감소 지역이 봄에 비해 남쪽에 위치하여 제트 중심의 남쪽(30~37.5°N)지역에서 유의한 서쪽 이동($-0.12^{\circ} \text{ yr}^{-1}$) 경향을 보이는데, 이는 대상으로 긴 감소 지역 내에서 상대적으로 강한 감소 경향이 나타났으며, 제트 중심지역이 서쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 이 지역을 제외하면 다른 위도에서는 유의한 동서 변화 경향이 나타나지 않고 있다. 겨울에는 제트 중심지역에서 유의한 서쪽 이동 경향($+0.07^{\circ} \text{ yr}^{-1}$)이 나타나는 반면, 20°N 이남 지역에서 강한 동쪽 이동 경향($+0.16^{\circ} \text{ yr}^{-1}$)을 보인다. 이는 풍속이 증가하는 제트 중심 이북 지역이 서쪽으로 이동하고 있음을 보이며, 앞서 Fig. 7에서 뚜렷한 겨울철 제트 경도의 변화 경향이 나타나지 않은 이유는 제트 중심지역을 기준으로 상반된 변화 경향이 영역 평균 되었기 때문으로 해석된다. 봄과 여름철의 제트 중심 위도에서 서쪽 이동 경향은 크기가 작을 뿐 아니라 유의수준도 높지 않다. 하지만 가을과 겨울에는 위도에 따라 제트 중심의 이동 경향이 상반되게 나타나지만, 제트 중심에서 높은 유의수준의 서쪽 이동 경향이 나타나고 있다. 즉, 남북방향의 기온 경도가 최대가 되는 지역이 여름과 겨울에 모두 동아시아 대륙 쪽으로 이동하고 있음을 제시한다. 이러한 변화 경향의 원인에 대해서는 남북방향 온도 차의 변화 경향을 중심으로 보다 깊이 있는 분석이 필요하다.

4. 토의 및 결론

본 연구에서는 현재 가용한 4종(CFSR, ERA-Int.,

JRA-55, MERRA)의 재분석자료들을 사용하여 아시아-북태평양지역(15~60°N, 60~180°E)에서 최근 30 (1979~2008)년 동안 상층제트의 강도(풍속)와 3차원적 위치(고도, 위도, 경도) 변화 특성들을 분석하였다. 상층제트의 특성들은 Archer and Caldeira (2008)가 제안한 방법으로 400~100 hPa 사이의 연직 고도범위 내에서 각 격자점의 동서 및 남북의 바람성분을 사용하여 질량 가중 평균 풍속과 질량속 가중 평균 고도(기압), 위도, 경도로 정의되었다. 또한, 질량속 가중 평균 위도는 남북 평균, 경도는 동서 평균하여 각 특성들의 변화 경향을 분석하였다. 재분석자료들의 수평 해상도를 일치시키기 위하여 선형보간법을 사용하였으며, 4종의 재분석자료들 중에 가장 저해상도인 $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ 의 격자 체계로 일치시켰다. 이 일치된 격자 체계로 앙상블 평균 자료를 구축한 후, 분석을 수행하였다.

아시아-북태평양지역에서 영역 평균한 상층제트의 풍속은 재분석자료들 간에 약 $\pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$ 정도로 작은 차이를 보이고 있으며, 풍속의 변화 경향은 겨울철을 제외하고 세 계절에서 모두 감소하는 경향을 보이는데, 봄철 CFSR을 제외한 낮은 유의수준의 풍속의 감소 경향은 제트 중심에서 경향의 반대 패턴 때문이다(북쪽: 증가, 남쪽: 감소). 여름에는 다른 계절에 비해 평균 풍속이 가장 약하지만, 앙상블 스프레드가 가장 크게 나타나고, 모든 재분석자료들에서 풍속의 강한 감소 경향($-0.03 \text{ m s}^{-1} \text{ yr}^{-1}$)이 나타나며, 대부분의 분석영역에서 감소 경향을 보이고 있다. 가을철 역시 모든 재분석자료에서 풍속의 감소 경향이 보이지만, JRA-55와 MERRA만이 유의한 경향이 나타나며, 지역적으로는 풍속의 변화 패턴이 봄과 반대 양상을 보인다. 제트의 풍속이 가장 강한 겨울에는 가을과 비슷한 경향 패턴을 보이지만, 모든 재분석자료들에서 낮은 유의수준의 풍속의 증가 경향을 보이는데, 이는 제트 중심 북쪽에 위치한 증가 경향 지역이 상대적으로 강하고 넓게 분포하기 때문이다.

상층제트의 고도는 전 계절에서 재분석자료들 간에 큰 차이를 보이며 그 중 MERRA가 다른 자료들에 비해 약 3.6 hPa 높게 나타나는 특성을 보인다. 영역 평균한 고도는 계절에 따라 9.5 hPa 정도의 차이가 나지만, 경년변동의 크기는 큰 차이를 보이지 않는다. 고도의 변화 경향은 재분석자료들에 관계없이 전 계절에서 상승하며, 특히 가을에서 높은 유의수준의 고도 상승 경향($-0.05 \text{ hPa yr}^{-1}$)이 나타난다. 고도의 변화 경향에 대한 공간 분포는 풍속과 비슷한 패턴을 보이고, 제트 중심을 기준으로 전 계절에서 상승 경향이 나타난다.

상층제트 위도는 재분석자료들 간의 차이가 다른 특성들에 비해 가장 작으며, 계절에 따른 경년변동도 큰 차이를 보이지 않는다. 영역 평균으로 인한 남북

계절변동폭은 약 3.6° 정도이며, 제트 중심 위도는 유의수준은 높지 않지만 전 계절에서 북향 경향이 나타난다. 경도 별 위도 변화 경향은 봄철에 제트 중심 경도를 기준으로 동쪽에는 낮은 유의수준의 약한 남향 경향이 나타나는 반면, 서쪽 지역은 상대적으로 강한 북향 경향을 보인다. 여름에는 우리나라를 중심으로 서쪽 대륙에서는 강한 북향 경향, 동쪽 해양에서는 강한 남향 경향이 나타나 지리적 위치에 따라 대조되는 변화 특성을 보인다. 또한 가을과 겨울에는 영역 평균시 모든 재분석자료들에서 약한 북향 경향을 보이는 반면, 제트 중심을 포함한 분석영역 전체 경도에 서 북상 경향이 나타난다.

상층제트의 중심 경도는 재분석자료들에 따라 1° 정도의 차이를 보이지만, 경년변동과 변화 경향 모두 다른 계절에 비해 여름에 상대적으로 크게 나타나고 있다. 봄과 겨울에는 낮은 유의수준의 동쪽 이동 경향을 보이는데, 이는 지역에 따라 동서 방향의 이동 경향이 상반되기 때문이다. 여름과 가을에는 모든 재분석자료들에서 서쪽 이동 경향이 나타나지만 여름철의 ERA-Int.와 JRA-55만이 유의한 서향 경향을 보인다. 여름철에 대부분의 위도에서 서향 경향을 보이지만 유의수준은 낮은 반면, 가을철에는 특히 제트 중심 지역에서 유의한 서향 경향이 나타나고 있다. 상층 제트 중심의 위도 별 동서 변화 경향은 모든 계절에서 제트 중심 위도를 기준으로 서향 경향을 보이지만, 봄과 여름철에는 유의수준이 낮은 반면, 가을과 겨울철에는 유의한 서향 이동이 나타난다. 따라서 아시아-북태평양지역에서 남북방향의 기온경도가 최대가 되는 지역이 여름 겨울에 모두 대륙 쪽으로 이동하고 있음을 제시하며, 이런 결과의 원인에 대해서는 남북 온도차의 변화 경향을 중심으로 추후 깊이 있는 연구가 필요하다.

본 연구는 상층 제트 중심을 대상으로 한 이전의 연구들과 달리, 400~100 hPa 사이의 질량을 고려하여 평균한 아시아-북태평양지역에서 상층 전체의 바람장에 대한 통합적인 결과이다. 재분석자료 및 계절, 지리적 위치에 따라 차이는 있지만, 아시아-북태평양지역에서 상층제트는 겨울철을 제외한 모든 계절에서 풍속은 약화되고(특히 여름철), 고도는 높아지고 있으며(전 계절), 중심 위치는 전 계절에서 북상하며, 여름과 가을에 서쪽으로 이동하는 반면, 유의수준은 낮지만 봄과 겨울에 동쪽으로 이동하는 것으로 볼 수 있다. 또한 상이한 연구 결과들은 이전의 연구들과 분석 방법, 영역 그리고 기간에 따른 차이로 판단되기 때문에, 상호 비교 하는데 한계가 있다. 따라서, 공통적인 조건에서 분석방법에 따른 상층제트의 변화 특성에 대한 연구가 필요하다.

더불어, 또한 아시아 대륙 고위도 지역에서 온난화

가 상대적으로 강하게 발생하고 있는 것이 제트기류에서 관측된 의미 있는 변화 경향들의 원인이 될 수 있음을 시사한다(Zhang et al., 2006; Seidel and Randel, 2007; Friedman et al., 2013; IPCC, 2013; Pena-Ortiz et al., 2013; Liang and Frauenfeld, 2014). 여름철 약화된 상층제트는 남-북으로 진동하는 사행성 변동이 강해짐을 의미하며, 또한 이동속도가 느려짐에 따라 편서풍 파동의 진폭이 증가되어 가뭄, 열파, 그리고 홍수 등과 같은 위험기상의 발생 가능성을 증가시킨다(Ha et al., 2003; Kim et al., 2005). Sun (2014)는 동아시아 상층 제트의 약화와 중국의 장화이(Jianghuai)-장난(Jiangnan) 지역의 극한 고온 현상과 밀접한 관련이 있음을 밝혔고, Lee et al. (2010)은 동아시아 겨울 몬순이 강한 해에 중위도 아열대 제트는 더 강해지는 반면, 스톱트랙의 중관 에디 활동은 약해지는 경향을 보였다. 또한 우리나라의 경우, 본 연구 결과에서와 같이 상층제트 특성들의 변화 경향이 상반되는 경계 지역에 위치하기 때문에 상층제트의 위치와 강도의 변화 특성과 밀접하게 관련된 지역기후 패턴에서도 유사한 변화가 발생할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서 사용된 4종의 재분석자료들은 계절에 관계없이 자료들 간의 양상불 표준편차가 제트 중심 지역에서 가장 작게 나타나 재분석자료들로부터 도출된 상층 제트의 속성 및 변동 경향이 유의미함을 알 수 있다. 하지만, 공통적인 분석 기간이 30년으로 짧을 뿐 아니라, 상층제트의 특성들에서 일부 재분석자료들이 다른 자료들과 적지 않은 차이를 보이고 있다. 따라서 양상불자료를 생성할 경우, 최신의 재분석자료들만을 사용하여 분석에 이용하고, 재분석자료들을 사용하여 대기환경의 변화나 모델링 연구를 진행할 경우, 자료 제공기간이 길면서도 분석 특성들에 따라 일치율이 높은 자료들을 이용하면, 보다 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업”의 일환으로 한국기상산업진흥원(KMIPA2015-2084)의 지원으로 수행되었습니다. 또한, ECMWF, JMA, NASA, 그리고 NCEP/NCAR에서 제공한 4종의 재분석자료들을 사용하여 본 연구가 수행되었기에 감사 드립니다.

REFERENCES

Archer, C. L., and K. Caldeira, 2008: Historical trends in the jet streams. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08803,

- doi:10.1029/2008GL033614.
- Barton, N. P., and A. W. Ellis, 2009: Variability in winter-time position and strength of the North Pacific jet stream as represented by re-analysis data. *Int. J. Climatol.*, **29**, 851-862, doi:10.1002/joc.1750.
- Compo, G. P., and Coauthors, 2011: The twentieth century reanalysis project. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1-28, doi:10.1002/qj.776.
- 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, doi:10.1002/qj.828.
- Friedman, A. R., Y. T. Hwang, J. C. H. Ching, and D. M. W. Frierson, 2013: Interhemispheric temperature asymmetry over the twentieth century and on future projections. *J. Climate*, **26**, 5419-5433, doi:10.1175/JCLI-D-12-00525.1.
- Gibson, J. K., P. Kållberg, S. Uppala, A. Hernandez, A. Nomura, and E. Serrano, 1997: ERA description. *ECMWF Re-anal. Proj. Rep. Ser.*, **1**, 66.
- Ha, K.-J., S.-K. Park, and K.-Y. Kim, 2003: Interannual variability in summer precipitation around the Korean Peninsula and its associated East Asian summer circulation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **39**, 575-586.
- Holton, J. R., 2004: *An Introduction to Dynamic Meteorology, Volume 88, International Geophysics Series*. Elsevier Academic Press, 535 pp.
- Hu, Y., and Q. Fu, 2007: Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. *Atmos. Chem. Phys.*, **7**, 9367-9384.
- IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker, T. F. et al. Eds., Cambridge University Press, 1535 pp.
- Kalnay, E., and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-470, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: The NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Kim, S., C.-K. Park, and M.-K. Kim, 2005: The regime shift of the northern hemispheric circulation responsible for the spring drought in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **41**, 571-585.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5-48, doi:10.2151/jmsj.2015-001.
- Koch, P., H. Wernli, and H. C. Davies, 2006: An event-based jet stream climatology and typology. *Int. J. Climatol.*, **26**, 283-301, doi:10.1002/joc.1255.
- Kuang, X., Y. Zhang, Y. Huang, and D. Huang, 2014: Spatial differences in seasonal variation of the upper-tropospheric jet stream in the Northern Hemisphere and its thermal dynamic mechanism. *Theor. Appl. Climatol.*, **117**, 103-112, doi:10.1007/s00704-013-0994-x.
- Lee, Y.-Y., G.-H. Lim, and J.-S. Kug, 2010: Influence of the East Asian winter monsoon on the storm track activity over the north pacific. *J. Geophys. Res.*, **115**, D09102, doi:10.1029/2009JD012813.
- Liang, C., and O. W. Frauenfeld, 2014: Surface air temperature changes over the twentieth and twenty-first centuries in China simulated by 20 CMIP5 models. *J. Climate*, **27**, 3920-3937, doi:10.1175/JCLI-D-13-00465.1.
- Manney, G. L., M. I. Hegglin, W. H. Daffer, M. J. Schwartz, M. L. Santee, and S. Pawson, 2014: Climatology of upper tropospheric-lower stratospheric (UTLS) jets and tropopause in MERRA. *J. Climate*, **27**, 3248-3271, doi:10.1175/JCLI-D-13-00243.1.
- Onogi, K., and Coauthors, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432, doi:10.2151/jmsj.85.369.
- Pena-Ortiz, C., D. Gallego, P. Ribera, P. Ordóñez, and M. D. C. Alvarez-Castro, 2013: Observed trends in the global jet stream characteristics during the second half of the 20th century. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 2702-2713, doi:10.1002/jgrd.50305.
- Rienecker, M. M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for research and applications. *J. Climate*, **24**, 3624-3648, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Saha, S., and Coauthors, 2010: The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **91**, 1015-1057, doi:10.1175/2010BAMS3001.1.
- Santer, B. D., and Coauthors, 2003: Behavior of tropopause height and atmospheric temperature in models, reanalyses, and observations: Decadal changes. *J. Geophys. Res.*, **108**, 4002, doi:10.1029/2002JD002258.
- _____, and Coauthors, 2004: Identification of anthropogenic climate change using a second-generation reanalysis. *J. Geophys. Res.*, **109**, D21104, doi:10.1029/2004JD005075.
- Seidel, D. J., and W. J. Randel, 2006: Variability and trends in the global tropopause estimated from radiosonde

- data. *J. Geophys. Res.*, **111**, D21101, doi:10.1029/2006JD007363.
- _____, and _____, 2007: Recent widening of the tropical belt: Evidence from tropopause observations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D20113, doi:10.1029/2007JD008861.
- So, E.-M., and M.-S. Suh, 2015: Characteristic variations of upper jet stream over North-East Asian region during the recent 35 years (1979~2013) based on four reanalysis datasets. *Atmosphere*, **25**, 249-262, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.235 (in Korean with English abstract).
- Stickler, A., and Coauthors, 2014: ERA-CLIM: Historical surface and upper-air data for future reanalyses. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, 1419-1430, doi:10.1175/BAMS-D-13-00147.1.
- Strong, C., and R. E. Davis, 2007: Winter jet stream trends over the Northern Hemisphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 2109-2115, doi:10.1002/qj.171.
- Sun, J., 2014: Record-breaking SST over mid-North Atlantic and extreme high temperature over the Jianghuai-Jiangnan region of China in 2013. *Chinese Sci. Bull.*, **59**, 3465-3470, doi:10.1007/s11434-014-0425-0.
- Uppala, S. M., and Coauthors, 2005: The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 2961-3012, doi:10.1256/qj.04.176.
- Yang, S., K. M. Lau, and K.-M. Kim, 2002: Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific- American winter climate anomalies. *J. Climate*, **15**, 306-325, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0306:VOTEAJ>2.0.CO;2.
- Zhang, Y., X. Kuang, W. Guo, and T. Zhou, 2006: Seasonal evolution of the upper-tropospheric westerly jet core over East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L11708, doi:10.1029/2006GL026377.