

재분석자료들을 이용한 최근 35년(1979~2013) 동북아시아 상층제트의 변동특성

소은미 · 서명석*

공주대학교 대기과학과

(접수일: 2015년 2월 16일, 수정일: 2015년 4월 10일, 게재확정일: 2015년 5월 20일)

Characteristic Variations of Upper Jet Stream over North-East Asian Region during the Recent 35 Years (1979~2013) Based on Four Reanalysis Datasets

Eun-Mi So and Myoung-Seok Suh*

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

(Manuscript received 16 February 2015; revised 10 April 2015; accepted 20 May 2015)

Abstract In this study, we analyzed the three dimensional variations (latitude, longitude, and height of Jet core) and wind speed of upper Jet stream in the East Asian region using recent 35 years (1979~2013) of four reanalysis data (NCEP-R2, MERRA, ERA-Interim, and JRA-55). Most of Jet core is located in 30.0~37.5°N and 130.0~157.5°E although there are slight differences among the four reanalysis data. The wind speed differences among reanalysis are about 3 m s⁻¹ regardless of seasons, the weakest in NCEP-R2 and the strongest in JRA-55. Although significance level is not high, most of reanalysis showed that the Jet core has a tendency of southward moving during spring and winter, but moving northward during summer and fall. This amplified seasonal variation of Jet core suggests that seasonal variations of weather/climate can be increased in the East Asian region. The longitude of Jet core has a tendency of systematically westward moving and decreasing of zonal variations regardless of averaging methods and reanalysis data. In general, the Jet core shows a tendency of moving south-westward and upward, getting intensified during spring and winter regardless of the reanalysis data. However, the Jet core shows a tendency of moving westward and downward, and getting weakened during summer. In fall, there were no distinctive trends not only in wind speed but also three dimensional locations compared to other seasons. Although the significance levels are not high and variation patterns are slightly different according to the reanalysis data, our findings are more or less different from the previous results. So, more works are needed to clarify the three dimensional variation patterns of Jet core over the East Asian region as a result of global warming.

Key words: Jet core, reanalysis data, three dimensional variations, intensity, East Asian region

*Corresponding Author: Myoung-Seok Suh, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56, Gongjudachak-ro, Gongju-si, Chungcheongnam-do 314-701, Korea.
Phone : +82-41-850-8533, Fax : +82-41-856-8527
E-mail : sms416@kongju.ac.kr

1. 서 론

상층 제트기류는 남북방향의 기온경도에 의한 기압차와 지구자전으로 인한 전향력의 합에 의해 형성되는데 주로 양쪽 반구의 대류권계면 부근에서 전 지구적으로 사행하며 동진하는 풍속이 30 m s^{-1} 이상인 강풍대를 의미한다(Koch et al., 2006). 이러한 제트기류는 남북방향의 차등가열과 지구자전의 영향으로 발생하는 3개의 평균자오면순환 세포 사이에서 발달한다. 해들리 세포의 중위도 쪽 상층에 고위도와 저위도에서 수송된 각운동량이 쌓여 아열대제트를 형성하고, 한대 세포와 페렐 세포 사이에 한대전선제트기류가 발달한다. 지구자전축이 공전면에 대해 23.5° 기울어진 관계로 남북방향의 기온경도 및 최대 발생위치가 계절변동을 함에 따라 제트의 위치와 강도도 계절에 따라 남북으로 진동한다(Krishnamurti, 1961). 이러한 제트기류는 강도가 최대인 지역에서 종관 규모의 요란을 형성하고, 제트 축과 연계된 폭풍경로를 따라 풍하 쪽으로 전파하는 경향이 있다(Holton, 1992). 또한 지상의 순환계들과 상호작용을 통해 이들의 생성/이동/발달/소멸에 영향을 준다(Nakamura, 1992; McCabe et al., 2001; Lee et al., 2009). Yang et al. (2002)는 제트기류가 ENSO (El Nino-Southern Oscillation)보다 아시아-태평양 기후에 더 강한 영향을 미칠 수 있음을 제시하였다.

제트기류의 특성 연구에 필요한 초기의 고층기상관측은 주로 연, 항공기, 측풍기구들로 시작되었다(Lewis, 2003). Krishnamurti (1961)는 1955년 12월부터 1956년 2월까지의 전 세계의 고층관측소 자료를 이용하여 북반구 200 hPa에서의 겨울철 아열대 제트의 특성을 분석하였다. 최근에는 라디오존데, 윈드프로파일러 등의 고층관측장비를 사용하여 신뢰할 만한 관측자료가 제공되고 있다. Seidel and Randel (2006)은 라디오존데 자료를 사용하여 대류권계면기압이 $-1.7 \pm 0.6 \text{ hPa decade}^{-1}$ 로 낮아진다고 보고했다. 하지만 고층관측자료들은 관측역사가 짧고, 관측지역도 접근이 용이한 지역으로 국한되어 있다. 따라서 이런 한계를 극복하고자 다양한 대기관측자료와 수치모델결과를 융합하여 3차원으로 재현된 재분석자료들이 제트기류 특성 분석에 활용되고 있다.

재분석자료와 모델을 이용한 많은 연구들에서 북반구의 제트는 지구온난화의 영향으로 강도가 약화되면서 중심이 극 쪽으로 이동되는 것으로 보고되고 있다(Fu et al., 2006; Koch et al., 2006; Zhang et al., 2006; Hu and Fu, 2007; Archer and Caldeira, 2008; Chang et al., 2012; Davis and Rosenlof, 2012; Manney et al., 2014). Fu et al. (2006), Hu and Fu (2007)는 위성과 재분석자료를 이용하여 지구온난화

로 인한 해들리 순환의 확장이 제트를 극 쪽으로 이동시킴을 밝혔다. Strong and Davis (2007)은 기후변화의 영향으로 강화된 해들리 세포와 관련하여 북반구에서 겨울철 아열대 제트 중심의 속도가 $1.75 \text{ m s}^{-1} \text{ decade}^{-1}$ 만큼 증가되었으나, 제트 중심의 위치는 비교적 일정하게 유지됨을 보였다. Archer and Caldeira (2008)는 북반구에서 겨울철 제트가 $0.17\sim 0.19^\circ \text{ decade}^{-1}$ 극 쪽으로 이동되었고, 북반구와 남반구의 아열대 제트는 약화된 반면 남반구의 한대 제트가 강화되었으며, 제트의 강도변화와 고도변화 사이에 강한 양의 상관성이 있음을 확인했다. 하지만 이러한 관계는 지리적 위치 및 계절에 따라 상이할 수 있음을 밝혔다. 제트의 남북과 연직 방향의 변동 특성에 대한 연구는 많이 행해진 반면, 동서방향의 변동 특성에 대한 연구는 상대적으로 적었다. Zhang et al. (2006)은 동아시아 지역에서 제트의 경도변화에 대해 연구한 결과, 동아시아 제트 중심의 동서방향 계절변화는 50° 이상이며, 특히 6월과 7월 사이에 빠른 동서 변위가 일어나는데 이러한 변화는 동아시아 여름 몬순의 시종일과 유의한 관계가 있음을 확인했다.

최근까지 관측과 재분석자료들을 이용한 상층 제트의 특성 변화에 대한 연구는 분석 기간이 짧거나, 특정 시기의 매우 강한 제트에 국한되어 있다(Lewis, 2003; Archer and Caldeira, 2008). 또한 특정 고도면에서 제트의 공간 분포 특징을 분석하거나, 북반구 전체에서 제트 중심의 고도에 따른 변동성에 대한 연구가 주로 진행되어 왔다. 특히, 특정의 재분석자료만을 이용한 연구들이 많았는데 재분석자료의 경우 자료 산출에 사용되는 모델 특성(수평 및 연직의 해상도, 물리과정 모수화) 그리고 자료동화 수준에 따라 큰 차이가 나기 때문에 연구결과에서도 많은 차이가 발생한다(Dell' Aquila et al., 2005).

동북아시아의 기후변화들은 지역의 대표 기후시스템인 몬순의 변동성과 밀접한 관련성을 가지고 있으며, 동아시아 몬순이 강(약)화되었을 때 상층의 기압골을 강(약)화시켜 상층제트의 강(약)화로 이어진다(Chang et al., 2006; Lee et al., 2009). 따라서, 지구온난화의 영향으로 동북아시아 지역에서 남북방향의 기온경도가 약화되고 있으며(Hansen et al., 2006; Screen and Simmonds, 2010; Kim et al., 2014)에 따른 상층제트의 위치 및 강도의 변화는 동아시아지역에서 발생되고 있는 다양한 극한기후 현상들의 발생빈도와 강도변화에 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, 앞선 북반구 제트변화에 대한 여러 연구들의 결과는 지리적 위치 및 계절에 따라 상이할 수 있음이 시사되었다(Archer and Caldeira, 2008). 이에 따라, 본 연구에서는 최근 널리 이용되고 있는 4종의 다양한 재분석자료들을 사용하여 북반구 아열대 제트 중심의 하나인

Table 1. Characteristics of the four atmospheric reanalysis datasets.

Name	Source	Period of Record	Frequency	Horizontal Resolution	Vertical Levels
NCEP-R2	NCEP/DOE	1979/01~present	Sub-daily, Daily, Monthly	2.5° × 2.5°	17
MERRA	NASA	"	Sub-daily, Daily, Monthly	0.5° × 2/3°	40
ERA-Interim	ECMWF	"	Sub-daily, Monthly	0.5° × 0.5°	37
JRA-55	JMA	1958/01~present	Sub-daily, Monthly	1.25° × 1.25°	37

동북아시아 지역에서의 최근 35년(1979.3~2014.2) 동안 상층제트의 강도와 3차원(남북, 동서 그리고 연직 방향) 변동특성에 대해 분석하고자 한다. 본 논문의 2 절에서는 본 연구에 사용된 4종의 재분석자료들과 연구방법에 대해 소개한다. 3절에서는 계절별 제트의 강도변화와 함께 제트 중심의 위치(위도, 경도, 고도)의 3차원적 변동특성을 알아본다. 4절에서는 본 연구에서 도출된 결과를 정리한다.

2. 자료 및 연구 방법

본 연구에서는 상층 제트의 중심 강도와 3차원적 중심 위치의 변화를 알아보기 위해 4종의 재분석자료들을 이용하였으며, 사용된 기후요소는 일 평균 및 월 평균 동서 풍속(u)과 남북 풍속(v)이다. 4종의 재분석 자료는 1) 미국의 NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy)의 AMIP (Atmospheric Mode Intercomparison Project)-II Reanalysis 2 (이하, NCEP-R2, Kanamitsu et al., 2002), 2) NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 MERRA (Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications, 이하, MERRA, Rienecker et al., 2011), 3) 유럽의 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 ERA-Interim (이하, ERA-Int., Dee et al., 2011), 그리고 4) 일본의 JMA (Japan Meteorological Agency)의 Japanese 55-year Reanalysis project (이하, JRA-55, Ebita et al., 2011)이다. 분석기간은 1979년 3월부터 2014년 2월까지 35년이다. 각 재분석자료들의 수평해상도와 연직 층수는 NCEP-R2가 2.5° × 2.5°와 1000~10 hPa까지 17 층이고, MERRA는 0.5° × 2/3°와 1,000~0.4 hPa까지 40 층이며, ERA-Int.은 0.5° × 0.5°와 1000~1 hPa까지 37 층, 그리고 JRA-55는 1.25° × 1.25°와 1000~0.1 hPa까지 37층이다. 대류권 상층제트의 3차원적 변동특성을 분석하기 위해 자료의 연직 층을 1000~100 hPa로 제한하였으며, 본 연구에 사용된 4종의 재분석자료들의 자세한 특성은 Table 1에 나타내었다.

상층제트는 30 m s⁻¹ 이상인 강풍대를 말하지만, 본 연구에서는 200 hPa 고도에서 제트의 강도가 가장 강한 지점을 제트 중심으로 정의하여 상승제트 중심으로

서의 강도와 3차원적 위치(위도, 경도 및 고도)의 변동특성을 분석했다. 북반구에서 대류권 상층 제트의 강한 풍속의 중심은 동아시아와 북아메리카 동안에 위치하기 때문에 기후변화와 관련하여 동북아시아 지역에서의 상층제트의 변동특성을 상세히 분석하기 위해 분석영역을 90~240°E로 제한하였다. 4종의 재분석 자료에 대해 분석한 결과 최대풍속이 나타나는 고도가 모든 계절에서 월 평균자료에서는 약 93%, 일 평균자료에서는 약 65%가 200 hPa에서 발생하여 제트의 중심 강도와 수평방향 변동특성 분석에는 이 고도의 자료를 이용하였다.

본 연구에서는 동아시아지역에서 전체바람을 계절 평균한 상태에서의 제트 특성변화를 분석하기 위해 월 평균자료를 단순평균하여 계절별 바람장을 산출하였다. 또한 제트기류는 시공간적으로 변동성이 큰 특징이 있지만, 일 자료를 단순 평균한 월 평균자료는 이런 변동성들을 약하게 하거나 제거하여 평활화하는 경향이 있다. 따라서 일별 제트 최대값들의 계절별 변동성을 분석하기 위해 일별 최대값 특성들을 일 평균 자료로부터 추출하여 각 계절별로 평균하여 사용하였다. 즉, 일 평균자료에서 일 최대풍속과 위·경도 값을 찾아 월 평균한 후, 다시 계절평균의 자료로 산출하여 기존 월 평균자료와 비교분석을 실시하였다. 하지만 최대풍속 발생고도가 월 평균자료에서는 약 93% 정도가 200 hPa에 집중되기 때문에, 제트 중심 고도의 변동특성은 일 평균자료만을 사용하여 분석하였다. 재분석자료간의 공간해상도 차와 연직 층수 차를 고 해상도 자료인 ERA_Int.에 통일하기 위해, 수평방향에 대해서는 선형보간법(Linear Interpolation), 그리고 1000~100 hPa의 연직방향에 대해서는 3차 스플라인 보간법(Cubic Spline Interpolation)을 적용하였으며, 보간법의 결과를 향상시키기 위해 대류권 하층자료를 포함하였다(Min, 2010).

3. 연구결과

3.1 북반구 상층 제트의 특성

상층제트의 강도는 남북 기온경도에 가장 큰 영향을 받기 때문에 계절에 따라 제트의 위치와 강도에 차이가 나타난다. Figure 1a는 ERA-Int.의 월 평균자

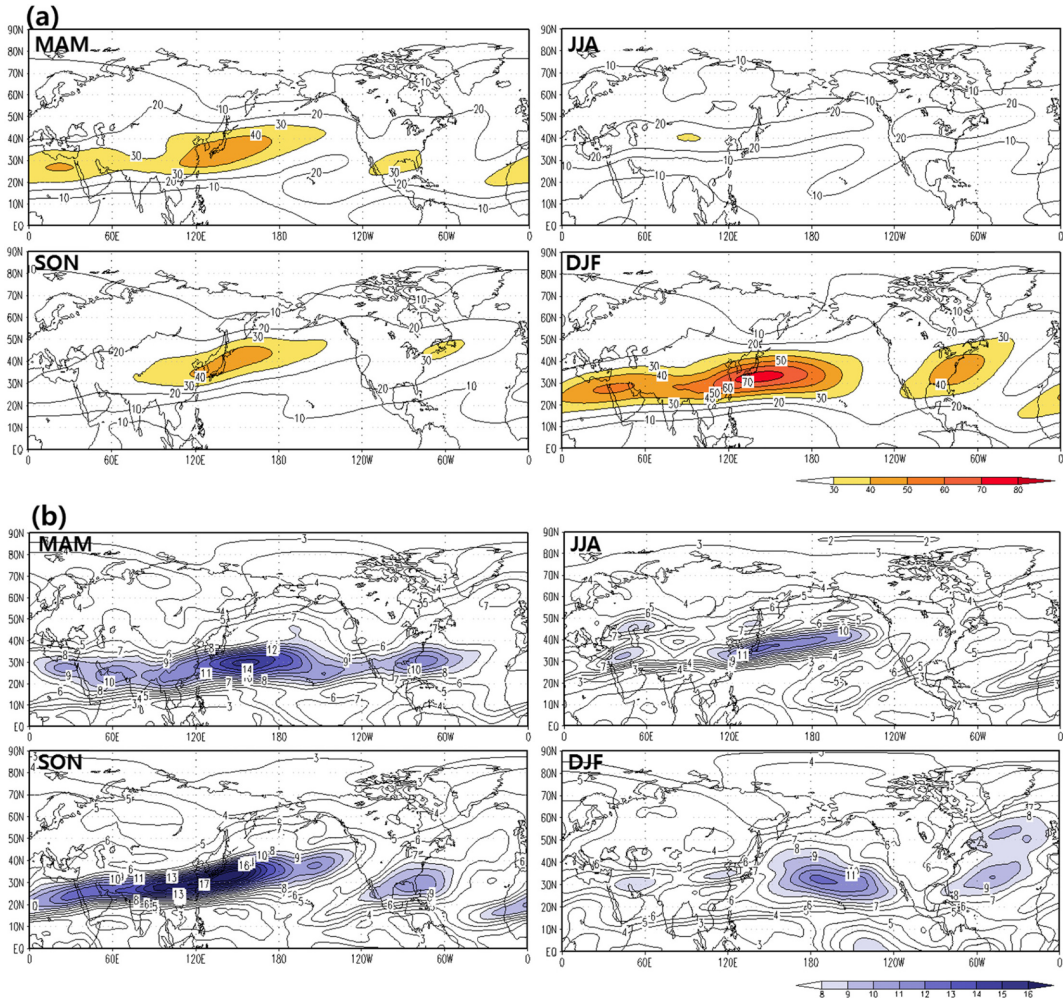


Fig. 1. Spatial distribution of 35 years averaged wind speed (m s^{-1}), (a) and their standard deviation (m s^{-1}), (b) at 200 hPa calculated from the seasonal mean ERA-Interim data.

료를 사용하여 북반구 지역에서 최근 35년 평균 풍속으로 200 hPa 상층제트의 분포를 계절별로 나타낸 것이다. 동북아시아에서 상층제트의 중심은 평균적으로 여름에 북위 약 40°N , 경도 90°E 에 위치하며, 겨울에는 북위 약 30°N , 경도 140°E 에 위치한다. 제트 중심의 평균 강도는 여름에 약 35 m s^{-1} 이고, 겨울에는 약 75 m s^{-1} 로 여름과 겨울 사이에 제트의 위치와 강도에서 큰 계절 변동을 보이고 있다. 또한, 봄, 가을, 그리고 겨울에는 여름과 달리 제트의 중심이 우리나라 동남쪽에 위치해 있다. Figure 1b는 200 hPa에서 풍속의 계절별 시간 표준편차를 보인 것이다. 제트의 위치와 강도의 변화가 큰 봄과 가을에는 경년변동성이 큰 지역이 동서로 길게 분포하며, 상대적으로 제트의 강도가 약하거나 강한 여름과 겨울에는 경년변동성이

약하게 나타나고 있다. 또한 다른 계절과 다르게 겨울에는 경년변동성이 작을 뿐만 아니라, 표준편차가 최대인 지역과 제트 중심이 일치하지 않는다. 이는 겨울철에 제트 중심의 위치와 강도가 매우 안정적임을 제시하며, 제트의 풍하쪽에서 가장 강한 변동성이 나타나고 있다.

Figure 2는 4종의 재분석자료에서 제트의 강도가 가장 강한 겨울철에 동아시아 지역에서의 제트 중심의 주요 발생위치의 빈도수를 함께 나타내었다. 격자의 크기는 4종의 재분석자료가 갖는 해상도 중 가장 저해상도인 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 로 하였으며, 격자 내 숫자는 빈도수와 재분석자료들 간의 평균일치율(%: 괄호 안)을 의미하며 다음과 같은 식(1)로 표현될 수 있다.

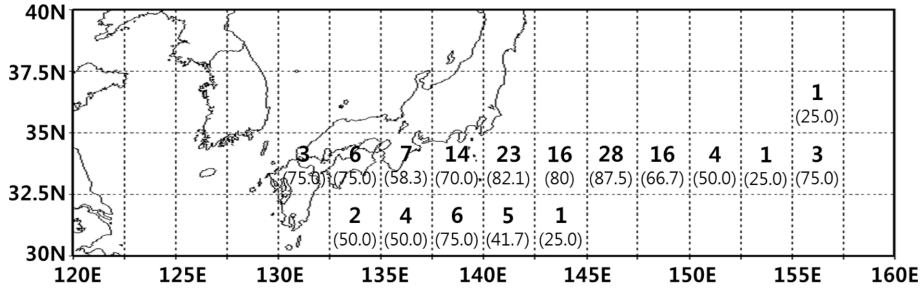


Fig. 2. Spatial distribution of the total number of Jet core for winter and the average rate of concordance (%) at 200 hPa derived from 35 years of the four reanalysis datasets.

Table 2. Statistical summary for the interannual variations of seasonally averaged wind speed ($m s^{-1}$) of Jet core according to the averaging methods and reanalysis data.

Dataset	Mean ($m s^{-1}$)		SD ($m s^{-1}$)		Reg.Coeff. ($m s^{-1} yr^{-1}$)		
	Mon.	Day.	Mon.	Day.	Mon.	Day.	
MAM	NCEP-R2	54.29	69.66	3.22	2.42	0.081*	0.054*
	MERRA	55.36	73.56	3.40	2.51	0.080*	0.050
	ERA-Int.	55.69	73.68	3.23	2.63	0.075*	0.029
	JRA-55	57.58	73.22	3.15	2.49	0.081*	0.036
JJA	NCEP-R2	37.94	54.56	2.02	1.36	-0.041	-0.030*
	MERRA	38.52	59.09	2.07	1.58	-0.046*	-0.049*
	ERA-Int.	38.88	59.06	2.04	1.52	-0.046*	-0.055**
	JRA-55	41.49	58.76	1.90	1.54	-0.041	-0.054**
SON	NCEP-R2	53.26	69.01	2.30	1.90	-0.030	0.014
	MERRA	53.53	72.89	2.31	1.99	-0.030	0.006
	ERA-Int.	54.41	72.67	2.37	1.87	-0.039	0.011
	JRA-55	56.29	72.58	2.38	1.92	-0.019	0.000
DJF	NCEP-R2	76.31	85.82	3.32	2.77	-0.041	0.006
	MERRA	77.79	89.83	3.39	2.67	-0.067	-0.009
	ERA-Int.	78.02	88.31	3.58	4.53	-0.072	0.076
	JRA-55	78.41	88.97	3.32	2.87	-0.032	0.004

SD: Standard Deviation, Reg.Coeff.: Regression Coefficient. Significance level: *** 1%, ** 5%, * 10%.

Rate of Concordance (%)

$$= \frac{1}{\text{Max}(F_i)} \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n F_i \times 100. \quad (1)$$

대부분의 제트 중심은 30.0~37.5°N, 130.0~157.5°E에 분포되어 있지만 재분석자료에 따라 제트 중심의 위치에 많은 차이를 보이고 있다. 겨울철 제트의 중심은 남북방향의 변동성이 작아서 주로 위도 32.5~35°N에 가장 빈번하게 위치하며, 전체의 86.4%를 차지한다. 동서방향으로는 변동이 커서 130~157.5°E 사이에 넓게 분포하고 있으며, 경도적으로 145°E를 기준으로 $\pm 5^\circ$ 내에 63.6%의 겨울철 제트 중심이 존재한다.

3.2 제트 중심강도의 계절평균과 장기변화추세

최근 35년의 재분석자료 종류 및 평균방법에 따른 계절별 제트 강도의 변동특성을 Fig. 3에, 그에 따른 통계적인 값은 Table 2에 나타내었다. 월 평균자료를 사용하였을 경우 제트 중심의 계절 내 변동에 대한 평활화의 영향으로 일 평균자료를 사용하였을 때보다 계절에 관계없이 약 $15 m s^{-1}$ 이상 약하게 나타나고 있으나, 경년변동은 월 평균자료를 사용하였을 때 오히려 크게 나타나고 있다(Table 2). 재분석자료간의 강도 차이는 계절 및 분석 방법에 관계없이 약 $3 m s^{-1}$ 정도 발생하고 있으며 분석방법 및 계절에 관계없이 NCEP-R2에서 강도가 가장 약한 반면, JRA-55에서 가장 강하게 나타나고 있다. 특히 일 평균자료에서는 계

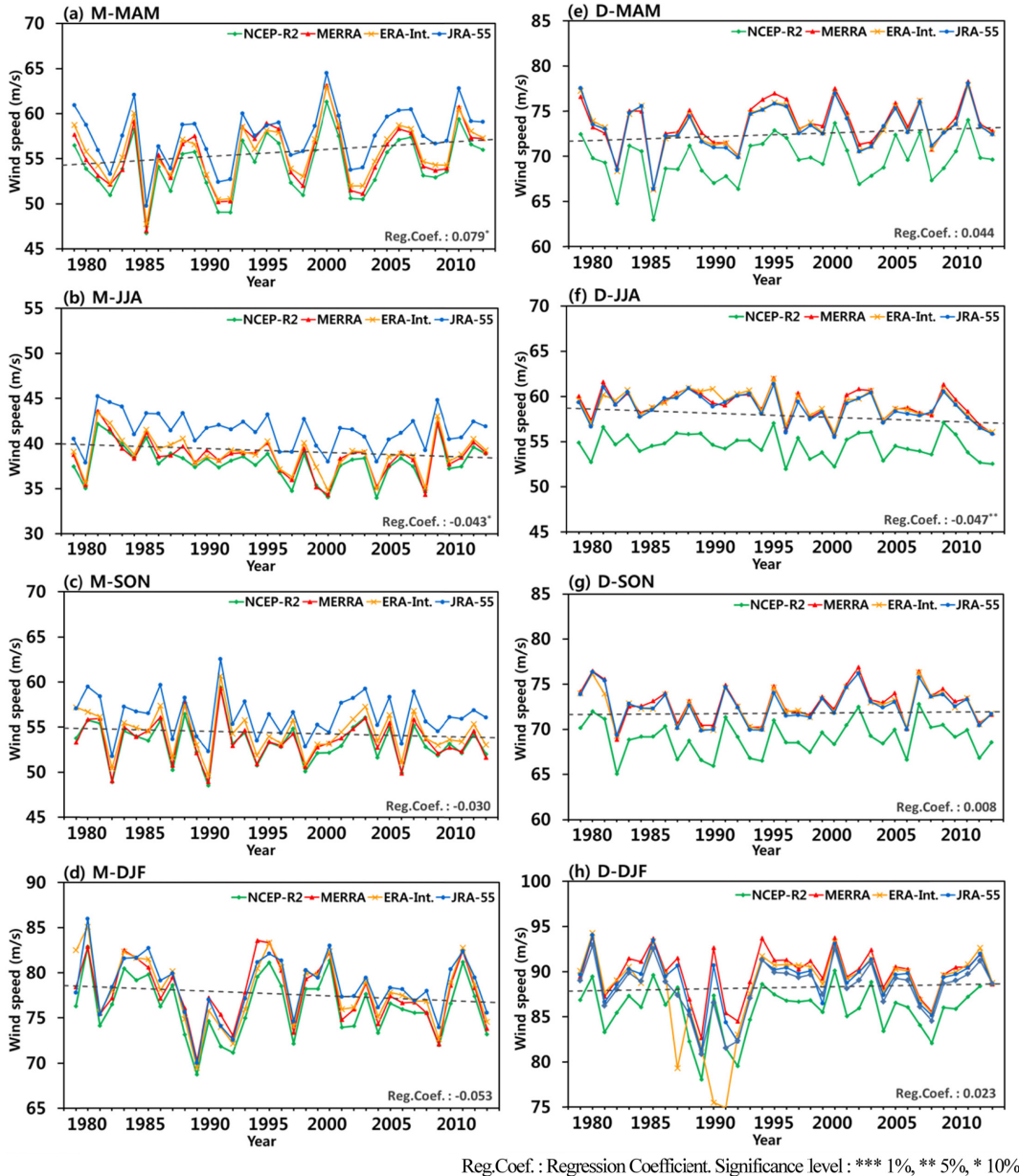


Fig. 3. Interannual variations of seasonally averaged wind speed ($m\ s^{-1}$) of Jet core from monthly (M) and daily (D) mean data from the four reanalysis data.

절에 관계없이 다른 세 자료에 비해 NCEP-R2에서 가장 약하게 나타나고 있다. 사용 자료 및 계절에 관계없이 경년변동 패턴이 매우 유사하게 나타나고 있으나, 겨울에 ERA-Int.의 일 평균자료에서는 1985년부터 1990년 초까지 다른 자료들과 매우 상이한 경년변동을 보이고 있다(Fig. 3h).

제트 중심의 35년 평균 강도는 4종의 재분석자료

모두에서 겨울에는 평균 $80\ m\ s^{-1}$ 로 강하고, 여름에는 $40\ m\ s^{-1}$ 이하로 약하게 나타나고 있으며, 이는 Chun (1981)과 같은 결과이다. 제트 중심의 강도는 분석방법 및 사용자료에 관계없이 봄과 여름에 각각 증가와 감소경향을 보이고 있다. 하지만 가을과 겨울에 월 평균 자료에서는 감소경향이 나타나고 있으나, 일 평균 자료에서는 사용 재분석자료에 따라 변동경향이 다양

Table 3. Statistical summary for the meridional variations of seasonally averaged latitudes of jet cores for 35 years (1979~2013) from the four reanalysis data.

Dataset	Mean (°N)		SD (°)		Reg.Coef. (° yr ⁻¹)		
	Mon.	Day.	Mon.	Day.	Mon.	Day.	
MAM	NCEP-R2	34.29	35.98	2.27	1.32	-0.040	0.001
	MERRA	34.08	35.96	2.06	1.47	-0.030	-0.008
	ERA-Int.	34.53	36.18	1.98	1.25	-0.022	-0.015
	JRA-55	34.99	36.25	1.88	1.32	-0.037	-0.009
JJA	NCEP-R2	41.33	44.19	1.53	1.09	0.014	0.026*
	MERRA	41.63	44.40	1.58	1.06	0.005	0.007
	ERA-Int.	41.69	44.63	1.53	1.00	0.020	-0.001
	JRA-55	42.63	44.62	1.73	1.00	0.009	0.017
SON	NCEP-R2	39.52	42.13	1.68	1.10	-0.001	0.047***
	MERRA	39.76	42.26	1.87	1.10	0.008	0.042***
	ERA-Int.	39.73	42.37	1.54	1.05	0.005	0.029**
	JRA-55	40.05	42.50	1.48	1.02	0.008	0.024*
DJF	NCEP-R2	32.98	34.07	0.76	0.80	0.003	-0.004
	MERRA	33.04	34.06	0.76	0.76	-0.004	0.004
	ERA-Int.	33.18	34.26	0.74	0.91	-0.003	-0.003
	JRA-55	33.18	34.23	0.76	0.74	-0.002	-0.003

SD: Standard Deviation, Reg.Coef.: Regression Coefficient. Significance level: *** 1%, ** 5%, * 10%.

하게 나타나고 있다. 유의수준은 높지 않지만, 월 평균자료에서 제트 중심 강도가 사용 자료에 관계없이 봄을 제외한 3계절에서 감소경향을 보인 점은 지구온난화가 고위도에서 상대적으로 강하게 발생하여 동북아시아 지역에서 남북방향의 기온경도가 약화된 것과 관련이 있는 것으로 보인다(Hansen et al., 2006; Screen and Simmonds, 2010; Kim et al., 2014).

3.3 제트 중심위도의 계절평균과 장기변화추세

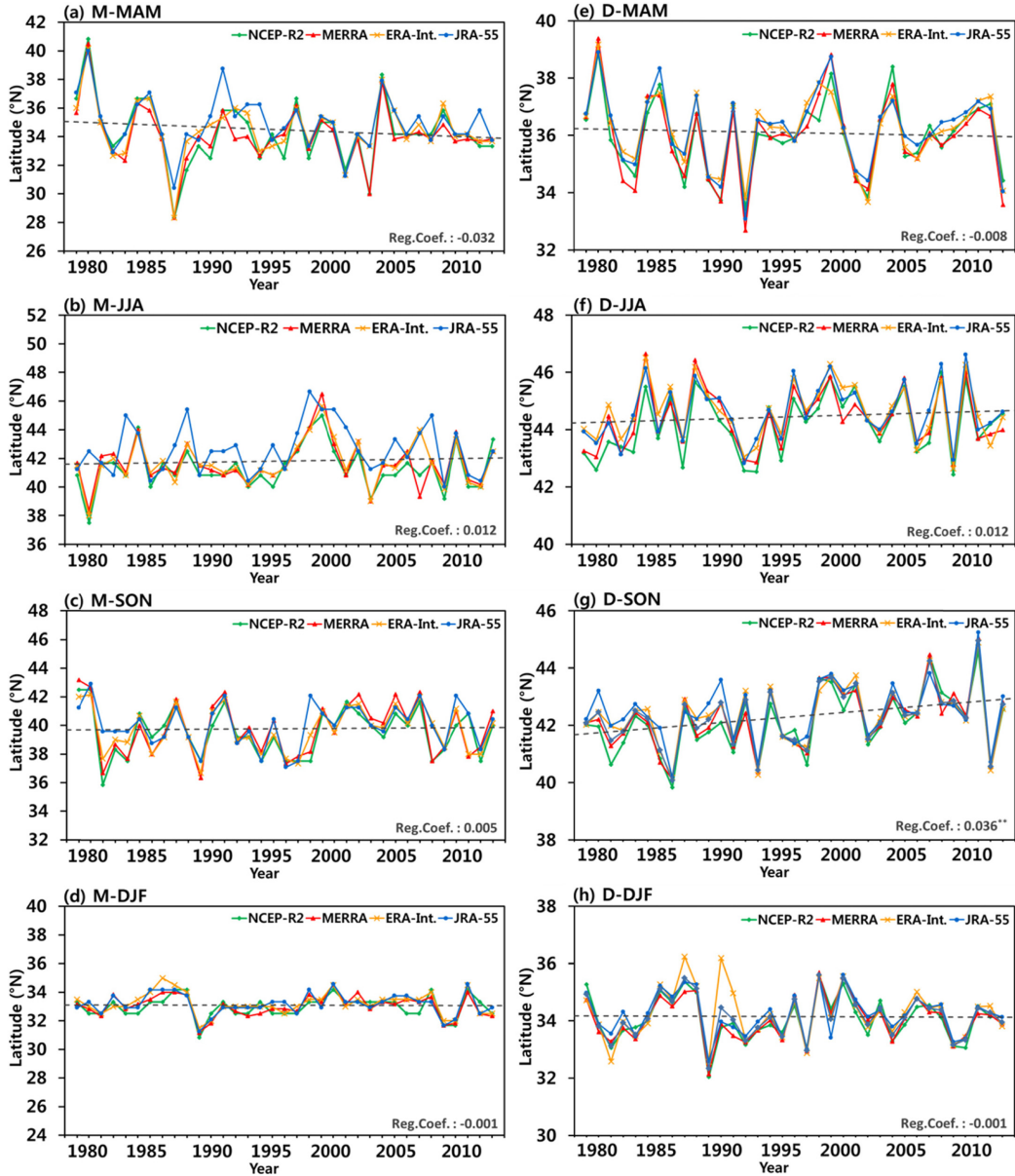
최근 35년간 4종의 재분석자료들을 이용하여 북반구 제트 중심의 남북진동 특성을 자료의 평균방법 및 계절별로 Table 3에 나타내었다. Figure 4는 최근 35년간의 4종의 재분석자료에서 계절별 제트 중심의 남북진동 특성을 자료 평균방법에 따라 나타낸 것으로, 계절별 제트 중심의 위치와 일 평균과 월 평균자료 사이의 변동 크기를 고려하여 y축의 범위를 다르게 나타내었다. 따라서 차이는 있지만 월 평균 및 일 평균자료 모두에서 재분석자료 사이의 차이는 크지 않다.

계절에 북반구에서 제트기류 중심은 Fig. 1에서 보인 바와 같이 여름과 겨울 사이에서 약 10° (33.6~42.9°N) 정도의 남북진동을 보인다. 또한 월 평균자료에서는 여름과 겨울 사이에 약 8.7°의 남북진동을 보이는 반면, 일 평균자료에서는 약 10.3°의 보다 큰 남북진동을 보이고 있다. 특이한 점은 일 평균자료에서 계절에 관계없이 제트의 중심이 월 평균자료보다 약

1~3° 북쪽으로 편이 되어 나타나고 있는데, 이는 일 평균자료에서 제트의 중심이 월 평균자료보다 북쪽에서 자주 발생함을 의미한다.

제트 중심의 경년변동은 겨울을 제외한 다른 계절에서는 재분석자료의 종류에 관계없이 일 평균자료보다 월 평균자료에서 강하게 나타나고 있다. 또한 모든 재분석자료에서 경년변동의 크기가 겨울에 가장 작고 봄에 가장 강하게 나타나고 있다. 흥미로운 점은 월 평균과 일 평균 사이의 경년변동 패턴이 계절 및 재분석자료에 관계없이 상이하게 나타나는 점이다.

대부분의 재분석자료에서 제트의 중심위도가 봄과 겨울에는 남하하는 경향이 나타나고 있으나, 여름과 가을에는 북상하는 경향이 나타나고 있다. 하지만 가을철 일 평균자료에서만 제트 중심의 변동경향이 네 자료 모두에서 유의 수준 10%에서 북상하는 것으로 나타나고 있고, 그 외 계절에서는 변동경향의 유의수준이 매우 낮거나 서로 상반되게 나타나고 있다. 이는 Davis and Rosenlof (2012)와는 같은 결과이지만, 북반구에서 제트 중심의 북향이동이 나타난다는 연구 결과와는 상이하다(Lorenz and DeWeaver, 2007; Chang et al., 2012; Davis and Rosenlof, 2012; Manney et al., 2014). 비록 유의수준이 높지는 않지만 제트 중심위도의 계절별 상반된 변동경향은 향후 제트 중심의 계절변동폭이 증가될 수 있음을 제시하며, 중위도 지역에서의 기후패턴이 제트 중심의 변화와 밀접하게 관



Reg.Coef. : Regression Coefficient. Significance level : *** 1%, ** 5%, * 10%

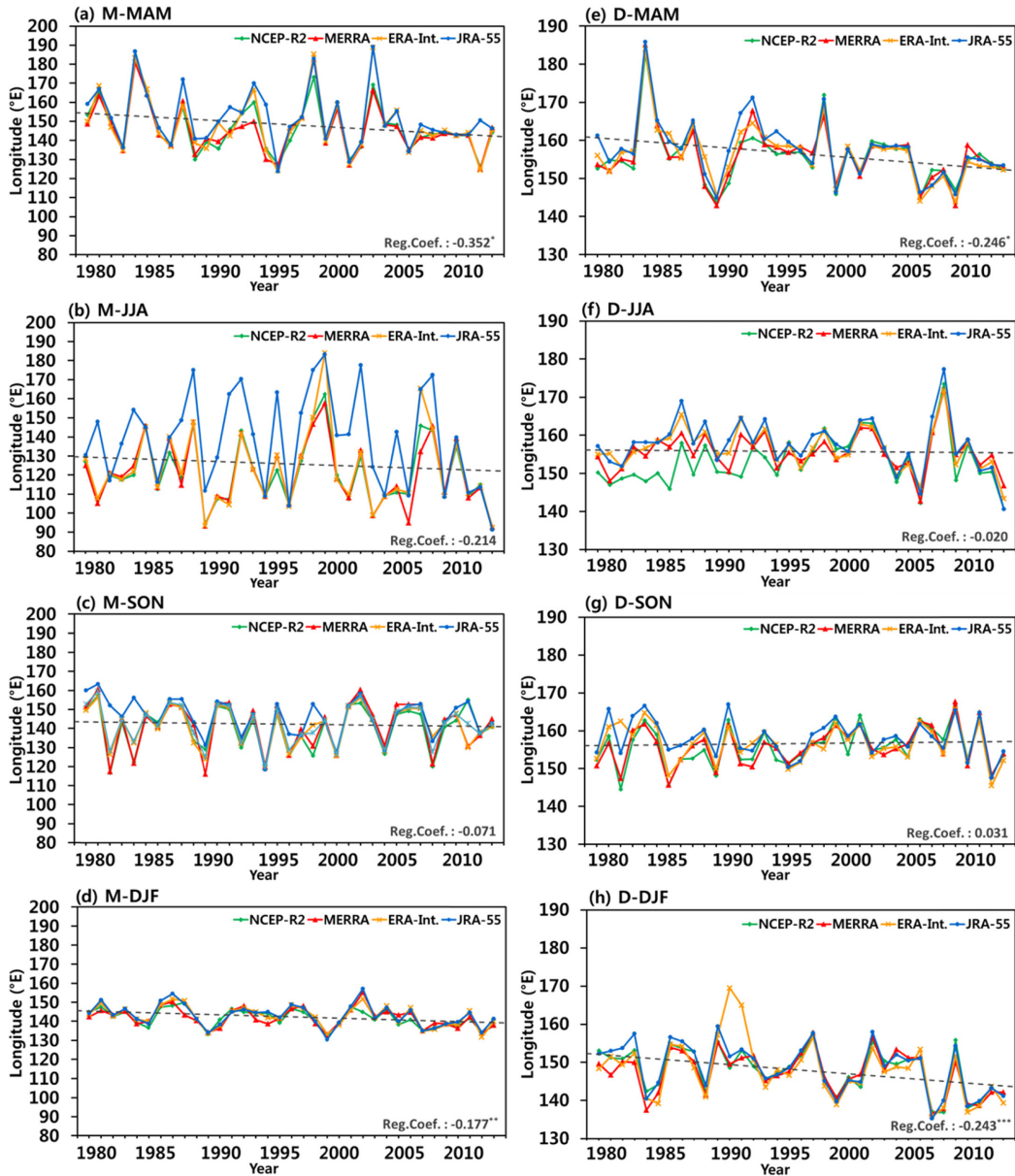
Fig. 4. Interannual variations of seasonally averaged latitudes of Jet core from the monthly (M) and daily (D) mean data of the four reanalysis data.

런되어 있음을 고려할 때 중위도 지역에서의 기후현상들의 계절 변동폭도 증가될 수 있음을 의미한다.

3.4 제트 중심 경도의 계절평균과 장기변화추세

동아시아 지역에서 최근 35년 동안의 계절별 제트 중심 경도의 편차는 평균방법에 따라 다르지만 변동

경향은 일치하며 계절에 따른 제트 중심의 동서방향 진동도 재분석자료의 종류에 관계없이 크게 나타나고 있다(Fig. 5). 특히 월 평균자료에서 제트의 중심경도가 봄(148.3°E)에는 가장 동쪽에 위치하고 여름(125.8°E)에 가장 서쪽에 위치하여 두 계절 사이에 약 22.5°의 큰 변동성을 보이고 있다. 하지만 일 평균자료에서는



Reg. Coef. : Regression Coefficient. Significance level : *** 1%, ** 5%, * 10%

Fig. 5. Interannual variations of seasonally averaged longitudes of Jet core from the monthly (M) and daily (D) mean data from the four reanalysis data.

가을(156.6°E)과 겨울(148.0°E) 사이에 약 8.6° 정도의 작은 계절 변동을 보이고 있으며, 여름에도 월 평균자료와 다르게 제트 중심의 위치가 평균적으로 155.8°E에 위치한다(Table 4).

제트 중심의 남북방향 변동성과 같이 동서방향의 변동성에서도 월 평균자료에서의 동서방향 변동성이 겨울철을 제외하고 일 평균자료보다 두 배 이상의 큰

변동성을 보이고 있다. 특히, 여름철에는 월 평균자료와 일 평균자료의 평균방법에 따라 제트 중심의 위치뿐만 아니라 경년변동성에서도 최대 4배 이상의 차이가 발생하고 있다. 계절에 따라 제트의 중심이 동서로 이동하는 것은 남북방향의 온도경도가 최대인 지역이 계절에 따라 변화하기 때문이다. 따라서 제트 중심이 서쪽 대륙으로 이동하는 경향을 보인 것은 동아

Table 4. Statistical summary for zonal variations of seasonally averaged longitudes of jet cores for 35 years (1979~2013) from the four reanalysis data.

Dataset		Mean (°E)		SD (°)		Reg.Coeff. (° yr ⁻¹)	
		Mon.	Day.	Mon.	Day.	Mon.	Day.
MAM	NCEP-R2	146.67	155.85	13.58	7.33	-0.384**	-0.162*
	MERRA	146.21	156.11	13.51	7.66	-0.342*	-0.185*
	ERA-Int.	148.44	156.50	15.90	7.48	-0.329	-0.305***
	JRA-55	151.85	157.67	15.22	8.14	-0.355*	-0.333***
JJA	NCEP-R2	120.95	153.28	17.11	6.60	-0.135	0.142
	MERRA	120.69	155.63	17.22	5.16	-0.219	0.003
	ERA-Int.	122.91	156.61	20.19	5.54	-0.088	-0.108
	JRA-55	138.80	157.70	25.06	6.74	-0.413	-0.116
SON	NCEP-R2	140.31	155.87	11.61	5.41	0.012	0.139*
	MERRA	141.40	155.87	12.80	5.14	0.003	0.125*
	ERA-Int.	141.29	156.64	10.30	4.97	-0.041	-0.058
	JRA-55	145.96	158.11	10.28	4.90	-0.258*	-0.084
DJF	NCEP-R2	141.67	148.13	4.73	5.78	-0.202***	-0.228**
	MERRA	141.97	147.37	5.06	5.75	-0.130*	-0.161**
	ERA-Int.	142.72	147.85	5.43	7.67	-0.189**	-0.274***
	JRA-55	143.18	148.71	5.88	6.46	-0.185**	-0.292***

SD: Standard Deviation, Reg.Coeff.: Regression Coefficient. Significance level: *** 1%, ** 5%, * 10%.

Table 5. Statistical summary for variations of seasonally averaged altitudes (hPa) of jet core for 35 years (1979~2013) from the four reanalysis data.

Dataset		Mean (hPa)		SD (hPa)		Reg.Coeff. (hPa yr ⁻¹)	
		Day	Day2	Day	Day2	Day	Day2
MAM	NCEP-R2	234.68	234.41	5.54	5.83	-0.064	-0.074
	MERRA	239.39	239.63	8.25	8.07	-0.024	-0.025
	ERA-Int.	234.68	234.32	7.56	7.27	-0.211**	-0.184*
	JRA-55	235.80	235.39	7.65	7.52	-0.178*	-0.157
JJA	NCEP-R2	229.90	229.90	4.87	4.56	0.187***	0.117*
	MERRA	233.45	234.49	6.58	6.22	0.133	0.151*
	ERA-Int.	230.70	230.60	5.14	5.28	0.053	0.032
	JRA-55	232.58	231.71	4.96	5.35	-0.003	0.021
SON	NCEP-R2	233.97	233.65	4.26	3.95	0.001	-0.015
	MERRA	236.85	237.13	5.21	5.15	0.035	0.078
	ERA-Int.	238.84	234.63	4.33	4.24	-0.166***	-0.132**
	JRA-55	234.97	234.06	4.96	5.03	-0.124*	-0.115**
DJF	NCEP-R2	224.61	224.68	4.95	4.90	-0.115*	-0.165**
	MERRA	223.63	224.58	5.57	5.01	-0.065	-0.066
	ERA-Int.	225.48	224.96	7.14	6.90	-0.311***	-0.315***
	JRA-55	224.22	223.08	5.22	5.27	-0.208***	-0.211***

SD: Standard Deviation, Reg.Coeff.: Regression Coefficient. Significance level: *** 1%, ** 5%, * 10%.

시아 지역에서 남북간의 온도 차가 최대인 지역이 대륙서쪽으로 이동되고 있음을 제시한다고 볼 수 있는데 이 부분에 대해서는 보다 깊이 있는 연구가 필요하다.

지난 35년 동안 제트 중심의 경도는 특히 봄과 겨울의 경우에 재분석자료 및 평균방법에 관계없이 서쪽 대륙 쪽으로 이동하는 경향을 보이고 있으며, 유

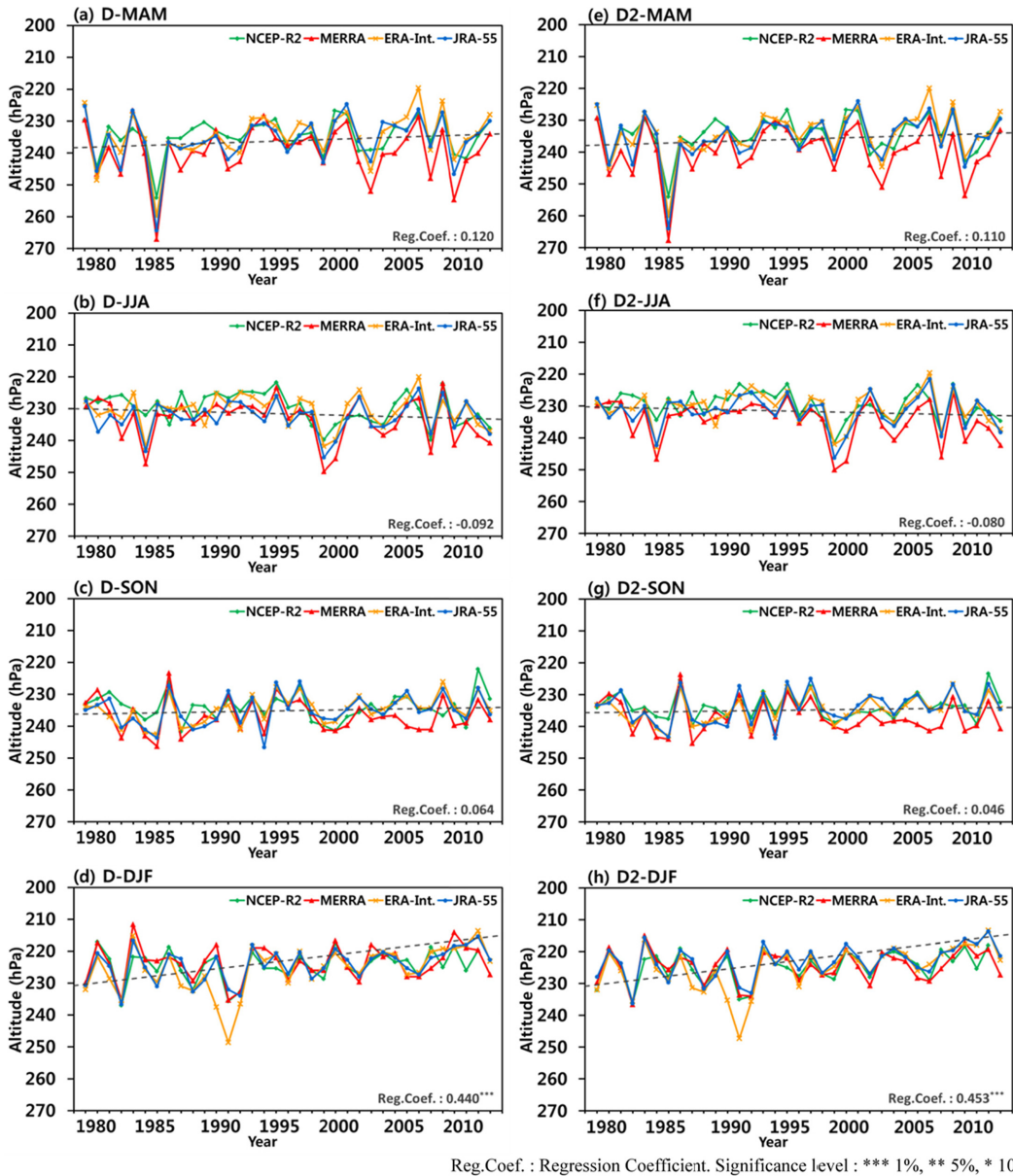


Fig. 6. Interannual variations of seasonally averaged altitude (hPa) of Jet core according to the daily (D) and interpolated-daily (D2) mean data from the four reanalysis data.

의수준도 10% 이내로 높게 나타나고 있다. 하지만 여름과 가을에는 재분석자료 및 평균 방법에 따라 제트 중심의 동서방향 변동경향이 상이하거나 유의수준이 높지 않게 나타나고 있다. 또한 JRA-55 자료는 모든 계절에서 제트 중심의 경도를 16° 이상 동쪽으로 편향되게 하고 있는데 특히 여름에 제트 중심의 경도와 변동성에서 다른 재분석자료들과 매우 상이한 결과가 나타난다. 전체적으로 여름과 가을보다 겨울과 봄에

제트 중심의 경도가 동에서 서쪽으로 이동되는 경향이 강하게 발생하는 것으로 보아 지난 35년 동안 제트 중심의 동서 진동 폭이 작아지고 있음을 알 수 있다.

3.5 제트 중심 고도의 계절평균과 장기변화추세

본 연구에 사용된 4종의 재분석자료들은 1000~100 hPa 사이에 연직으로 12층(NCEP-R2), 25층(MERRA), 그리고 27층(ERA, JRA-55)의 각기 다른 등압면 고도

를 갖는다. 또한 월 평균자료의 제트 중심의 강도가 최대인 고도의 약 93% 정도가 계절에 관계없이 200 hPa에 위치하여 변동경향을 확인하기 어렵다. 따라서 Figs. 6a~d는 일 평균자료에서 제트의 중심 강도가 최대인 고도를 찾아 계절 평균하여 계절별 제트 중심 고도의 변동특성을 분석한 것이다. 또한 각 재분석자료들의 해상도와 연직 층수가 상이한 문제점을 최소화하기 위하여, 일 평균자료에서 제트 중심의 강도가 최대인 지점의 연직 풍속들을 대상으로 3차 스플라인 보간법(Cubic Spline Interpolation)을 이용하여 보간한 후(Day2)에 분석하였다(Figs. 6e~h).

재분석자료 및 계절에 관계없이 보간법을 적용하기 전과 후에 제트 중심 강도가 최대로 발생하는 평균고도, 경년변동성 그리고 변동경향 모두에서 대체적으로 큰 차이는 보이지 않고 있다(Table 5). 하지만 제트 중심의 평균고도는 계절 및 재분석자료에 따라 상이하게 나타나고 있다. 전체적으로 제트의 중심은 겨울에 낮은 고도에서 발생하고 재분석자료간 차이가 거의 없는 반면, 다른 계절에서는 상대적으로 높은 고도에서 발생하고 재분석자료 사이에도 적지 않은 차이를 보이고 있으며, 특히 MERRA 자료에서 더 높은 고도에서 발생하고 있다. 제트 중심 고도의 경년변동성은 재분석자료에 관계없이 가을에 가장 작고 봄에 상대적으로 크게 나타나고 있으며, NCEP-R2와 MERRA 자료에서 각각 작고 큰 변동성을 보이고 있다.

변동경향의 유의성은 높지 않지만 겨울과 봄에는 재분석자료에 관계없이 제트 중심의 고도가 높아지는 경향이 나타나고 있으며, 여름에는 대체적으로 낮아지는 경향이 그리고 가을에는 재분석자료에 따라 상이한 경향을 보이고 있다. 이것은 Table 3에서 보인 바와 같이 봄과 겨울에 제트 중심의 위치가 남하하는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 1979년부터 2013년까지 최근 35년 동안의 NCEP-R2, MERRA, ERA-Int., 그리고 JRA-55 등 4종의 재분석자료들을 사용하여 북반구 동아시아 지역에서 상층제트 중심의 강도 변화와 함께 3차원적 위치 변화 특성에 대해 분석하였다.

동북아시아지역에서의 200 hPa 상층제트의 중심은 기존의 연구결과와 같이 평균적으로 여름에 북위 40°N, 경도 90°E에 위치하며 중심 평균 강도는 약 35 m s⁻¹ 인 반면 겨울에는 북위 30°N, 경도 140°E에 위치하며 약 75 m s⁻¹로 남북 및 동서방향의 진동과 함께 강도도 큰 계절 변동을 한다. 여름을 제외하면 제트의 중심은 주로 우리나라 동쪽, 위도 34.5~35°N, 경도 135~150°E에 위치하며 여름과 겨울에 비해 봄과 가을에

제트의 경년변동이 강하게 발생하고 있다. 월 평균자료에서 제트 중심 강도는 재분석자료에 관계없이 일 평균자료에 비해 상대적으로 약하고 계절변동(~40 m s⁻¹)과 경년변동이 강한 반면, 일 평균자료에서는 월 평균에 비해 계절에 관계없이 약 15 m s⁻¹ 정도 강하나 계절변동(~30 m s⁻¹) 및 경년변동은 약하게 나타나고 있다. 또한 재분석자료들간의 강도의 차이는 분석 방법 및 계절에 관계없이 약 3 m s⁻¹ 정도이며 NCEP-R2가 가장 약하고, JRA-55가 가장 강한 강도를 보인다. 강도변화경향의 유의수준은 높지 않지만, 재분석자료에 관계없이 봄과 여름에 각각 증가와 감소의 경향을 보이거나 가을과 겨울에는 사용자료에 따라 변동 경향이 다양하게 나타나고 있다.

북반구 동아시아지역에서 계절에 따른 제트 중심의 남북 진동은 재분석자료 모두 여름과 겨울 사이에 약 10° 정도의 변동폭을 갖는다. 계절 및 재분석자료에 관계없이 일 평균자료에서 제트의 중심이 월 평균자료보다 약 1~3° 북쪽으로 치우쳐 나타나, 실제 제트 중심이 월 평균보다 북쪽에 위치함을 제시하고 있다. 제트의 중심 위도는 가을철을 제외하면 변동경향의 유의수준이 매우 낮을 뿐만 아니라 재분석자료에 따라 변동경향이 상반되게 나타나고 있으나, 대부분의 재분석자료에서 봄과 겨울에는 남하하고, 여름과 가을에는 북상하는 경향이 나타나고 있다. 이런 제트 중심의 계절변동폭 증가는 중위도지역의 기후현상들에 대한 계절변동폭이 증가될 수 있음을 제시한다. 제트 중심의 북향 이동경향이 약하게 나타난 점은 북반구에서 제트 중심의 북향이동이 있다는 이전 연구결과들과는 차이가 있지만, Davis and Rosenlof (2012)의 연구결과와 일치한다. 지구가 온난화되고 있음에도 제트 중심의 변동경향이 이렇게 다양하게 나타나고 유의수준이 낮은 것은 재분석자료들의 공간해상도가 0.5° 이상인 점과 상층 제트의 분석영역이 달랐던 것과 관련이 있는 것으로 보인다. 하지만 이러한 점들을 모두 고려하더라도 가을철을 제외하고 동아시아 지역에서 제트의 중심 위도가 크게 변하지 않고 있음을 제시한다.

제트 중심의 경도는 월 평균자료에서 봄(148.3°E)에 가장 동쪽에 위치하고 여름(125.8°E)에 가장 서쪽에 위치하여 계절변동성이 약 22.5°로 크게 나타난다. 그러나 일 평균자료에서는 특히하게 겨울에 가장 서쪽(약 148°E)에 위치하고 그 외 계절에는 대부분 약 156°E 위치하여 약 8.6°의 계절변동만을 보이는데, 이는 평균방법에 따른 차이 때문이다. JRA-55는 다른 자료들에 비해 약 16° 이상 동쪽에 위치한다. 또한 경년변동성도 월 평균자료에서 일 평균자료보다 겨울을 제외한 전 계절에서 2~3배 정도 크게 나타나고 있으며 특히 여름의 JRA-55에서는 4배 이상으로 크게 나

타나고 있다. 평균방법과 재분석자료에 관계없이 지난 35년 동안 제트의 중심경도는 대륙 쪽으로 이동하는 경향을 보이고 있다. 특히 봄과 겨울에 제트 중심 위치가 동에서 서쪽으로 강하게 이동되는 것으로 보아 최근 35년 동안 제트 중심의 동서 진동 폭이 작아지고 있음을 알 수 있었다.

제트 중심의 강도가 최대인 고도는 재분석자료에 관계없이 겨울철에는 낮은 고도(~224 hPa)에서, 다른 계절에서는 높은 고도(~239 hPa)에서 발생하고 있다. 고도의 경년변동성은 주로 계절에 관계없이 NCEP-R2에서 작고 MERRA와 JRA-55에서 강하게 발생하고 있다. 또한 최근 35년 동안 제트 중심의 고도는 겨울과 봄에는 상승경향이 우세한 반면, 여름에는 하강하는 경향이 나타나고 있다.

동아시아 지역에서 지난 35년 동안 200 hPa의 제트 중심의 강도와 3차원적 변동은 계절 및 재분석자료의 종류에 따라 상이하게 나타나는 경우가 많았다. 일반적으로 봄에 제트의 중심은 남서진하면서 강도는 강해지고 고도도 높아지는 경향을 보이고 있다. 여름에는 제트의 중심이 서진하면서 강도도 약해지고 고도도 낮아지고 있다. 가을에는 다른 계절과 다르게 제트 중심 강도 및 3차원적 변동에 뚜렷한 경향이 나타나지 않고 있으며, 겨울에는 봄과 유사하게 남서진하면서 고도가 높아지고 있는데 강도는 약해지는 경향을 보이고 있다.

기후모델의 공간해상도 향상 및 다양한 위성자료 동화 등으로 재분석자료의 품질이 크게 향상되었음에도 동아시아 지역에서 지난 35년 동안 200 hPa의 제트 중심의 강도와 3차원적 변동은 자료의 평균방법 및 계절에 관계없이 재분석자료의 종류에 따라 상이하게 나타나는 경우가 많았다. 따라서 기후변화와 상층 제트와의 관계 분석 또는 재분석자료를 이용한 지역기후 모델의 모의수준 평가 등을 위해서는 적어도 1개 이상의 재분석자료를 사용하여, 자료들의 특성을 파악하고 수행할 필요가 있음을 제시한다.

감사의 글

본 연구는 “기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업”의 일환으로 한국기상산업진흥원(KMIPA2015-2084)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Archer, C. L., and K. Caldeira, 2008: Historical trends in the jet streams. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L08803.
Chang, C. P., Z. Wang, and H. Hendon, 2006: The Asian

winter monsoon. *Springer*, 89-127.
Chang, E. K. M., Y. Guo, and X. Xia, 2012: CMIP5 multi-model ensemble projection of storm track change under global warming. *J. Geophys. Res.*, **117**, D23118, doi:10.1029/2012JD018578.
Chun, K.-E., 1981: An analysis of influences of Jet Stream over Korea. *J. Sejung Univ.*, **8**, 179-192.
Davis, S. M., and K. H. Rosenlof, 2012: A multidagnostic intercomparison of tropical-width time series using reanalyses and satellite observations. *J. Climate*, **25**, 1061-1078.
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.
Dell'Aquila, A., V. Lucarini, P. M. Ruti, and S. Calmanti, 2005: Hayashi spectra of the northern hemisphere mid-latitude atmospheric variability in the NCEP-NCAR and ECMWF reanalyses. *Clim. Dynam.*, **25**, 639-652.
Ebita, A., and Coauthors, 2011: The Japanese 55-year Reanalysis “JRA-55”: an interim report. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **7**, 149-152.
Fu, Q., C. M. Johanson, J. M. Wallace, and T. Reichler, 2006: Enhanced mid-latitude tropospheric warming in satellite measurements. *Science*, **312**, 1179, doi:10.1126/science.1125566.
Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea, and M. Medina-Elizade, 2006: Global temperature change. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **103**, 14288-14293, doi:10.1073/pnas.0606291103.
Holton, J. R., 1992: An introduction to dynamic meteorology. *Elsevier*, New York, 511 pp.
Hu, Y., and Q. Fu, 2007: Observed poleward expansion of the Hadley circulation since 1979. *Atmos. Chem. Phys. Disc.*, **7**, 9367-9384.
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, B.-M., E.-H. Jung, G.-H. Lim, and H.-K. Kim, 2014: Analysis on winter atmospheric variability related to arctic warming. *Atmosphere*, **24**, 131-140 (in Korean with English abstract).
Koch, P., H. Wernli, and H. C. Davies, 2006: An event-based jet stream climatology and typology. *Int. J. Climatol.*, **26**, 283-301.
Krishnamurti, T. N., 1961: The subtropical jet stream of winter. *J. Atmos. Sci.*, **18**, 172-191.

- Lee, Y.-Y., G.-H. Lim, and J.-S. Kug, 2009: 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.
- Lewis, J. M., 2003: Ooishi's observation viewed in the context of jet stream discovery. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **84**, 357-369.
- Lorenz, D. J., and E. T. DeWeaver, 2007: Tropopause height and zonal wind response to global warming in the IPCC scenario integrations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D10119, doi:10.1029/2006JD008087.
- Manney, G. L., and Coauthors, 2014: Climatology of Upper Tropospheric-Lower Stratospheric (UTLS) Jets and Tropopauses in MERRA. *J. Climate*, **27**, 3248-3271.
- McCabe G. J., M. P. Clark, and M.C. Serreze, 2001: Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity. *J. Climate*, **14**, 2763-2768.
- Min, C.-H., 2010: *Numerical analysis & scientific computing*. Cheong moon gak, 225 pp.
- Nakamura, H., 1992: Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 1629-1642.
- Ramage, C. S., 1952: Relationship of general circulation to normal weather over southern Asia and the western Pacific during the cool season. *J. Meteor.*, **9**, 403-408.
- Rienecker, M. M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, **24**, doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Screen, J. A., and I. Simmonds, 2010: The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, **464**, 1334-1337.
- 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.
- Strong, C., and R. E. Davis, 2007: Winter jet stream trends over the Northern Hemisphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 2109-2115.
- 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.
- 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.