

북반구 겨울철 에디들에 의한 운동량, 열 그리고 수분 수송: 세 가지 재분석 자료 비교

문혜진 · 하경자*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공

(접수일: 2016년 9월 1일, 수정일: 2016년 12월 8일, 게재확정일: 2016년 12월 15일)

Eddy Momentum, Heat, and Moisture Transports During the Boreal Winter: Three Reanalysis Data Comparison

Hyejin Moon and Kyung-Ja Ha*

*Department of Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System,
Pusan National University, Busan, Korea*

(Manuscript received 1 September 2016; revised 8 December 2016; accepted 15 December 2016)

Abstract This study investigates eddy transports in terms of space and time for momentum, heat, and moisture, emphasizing comparison of the results in three reanalysis data sets including ERA-Interim from the European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF), NCEP2 from the National Center for Environmental Prediction and the Department of Energy (NCEP-DOE), and JRA-55 from the Japan Meteorological Agency (JMA) during boreal winter. The magnitudes for eddy transports of momentum in ERA-Interim are represented as the strongest value in comparison of three data sets, which may be mainly come from that both zonal averaged meridional and zonal wind tend to follow the hierarchy of ERA-Interim, NCEP2, and JRA-55. Whereas in relation to heat and moisture eddy transports, those of NCEP2 are the strongest, implying that zonal averaged air temperature (specific humidity) tend to follow the raking of NCEP2, ERA-Interim, and JRA-55 (NCEP2, JRA-55, and ERA-Interim), except that transient eddy transports for heat in ERA-Interim are the strongest involving both meridional wind and air temperature. The stationary and transient eddy transports in the context of space and time correlation, and intensity of standard deviation demonstrate that the correlation (intensity of standard deviation) influence the structure (magnitude) of eddy transports. The similarity between ERA-Interim and NCEP2 (ERA-Interim and JRA-55) of space correlation (time correlation) closely resembles among three data sets. A resemblance among reanalysis data sets of space correlation is larger than that of time correlation.

Key words: Eddy transport, momentum eddy transport, heat eddy transport, moisture eddy transport, reanalysis data, ERA-Interim, NCEP2, JRA-55

*Corresponding Author: Kyung-Ja Ha, Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busandaehak-ro 63 beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-510-2177, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: kjha@pusan.ac.kr

1. 서 론

대기 대순환과 날씨 및 기후의 변화에 밀접한 연관이 있는 에디에 의한 운동량, 열 또는 수분 수송에 대한 연구는 중요하다. 에디의 변동성이 대기 순환에 미치는 영향에 대해 논의한 많은 선행 연구에서는 열대에서 확장된 중위도 에디가 대기 대순환을 강화시킬 뿐만 아니라 대기 대순환의 변동성 역시 중위도에서의 에디 변화에 영향을 준다고 밝혔다(Becker et al., 1997; Kim and Lee, 2001; Walker and Schneider, 2006; Caballero, 2007, 2008). Kuo (1956)는 에디에 의한 운동량 수송은 해들리 순환과 페렐 순환에 영향을 주며, 운동량 수송의 발산이 대기 대순환의 주요한 원인을 보였다. 또한 에디에 의한 열 수송은 해들리 순환에 의해 주로 동반되고, 작은 규모의 대류 시스템에 의해 증가한다고 설명하였다(James, 1995). Hare and James (2001)에서는 에디에 의한 운동량과 열 수송의 결합된 효과가 대기 순환에 중요한 영향을 미친다고 밝혔다. 그리고 에디의 강도에 따라서 제트 기류와 일시 에디 활동의 강도가 달라지며, 중관 에디 피드백이 작용한다고 Kang et al. (2011)에서 모델 결과 분석을 통해 밝혔다. 이와 같이 에디는 대기 순환 및 수송에 영향을 주기 때문에 에디에 관한 연구가 필요하다.

또한 재분석 자료 간의 차이에 관한 선행 연구들이 다양한 기후 현상에 대해 이루어져왔다. 먼저 대기 대순환의 기본이 되는 해들리 순환의 세기에 대한 재분석 자료 간의 결과가 달랐으며, 순환의 변동성 또한 강해지거나 약해지는 등 다르게 분석됨을 설명하였다(Song and Zhang, 2007; Stachnik and Schumacher, 2011). 또한 시간과 동서 평균의 편차 또는 에디 그리고, 기본적인 대기 변수들의 분산과 공분산과 같은 기후 통계를 포함하는 에너지 사이클은 다양한 재분석 자료를 이용하여 분석되었다(Ulbrich and Speth, 1991; Hu et al., 2004; Li et al., 2007; Marques et al., 2009, 2010; Kim and Kim, 2013). 최근에는 NCEP-DOE (National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy)에서 제공하는 NCEP2, ECMWF (European Center for Medium-range Weather Forecasts)에서 제공하는 ERA-40 그리고 JMA (Japan Meteorological Agency)과 CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry)에서 제공하는 JRA-25와 같은 다양한 재분석 자료들이 대기 자료에 대한 필요성을 만족하기 위해서 만들어졌고, 그 이후로 많은 연구들은 대기 에너지 사이클을 분석하기 위해 위의 재분석 자료들이 사용되었다(Li et al., 2007; Marques et al., 2009, 2010). 이 선행 연구들에서는 세 재분석 자료의 에너지 사이클이 대체로 비슷하나, 남반구에서 주목

할 만한 차이가 있음을 보였고, 에너지와 수렴항의 강도는 ERA-40, JRA-25, NCEP2의 순서로 강한 경향이 있다고 밝혔다. 또 다른 선행 논문에서는 NCEP1 (the National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research reanalysis 1), ERA-40과 JRA에서 제공하는 JRA-55를 포함한 세 개의 재분석 자료를 이용하여 아시아 겨울 몬순의 수십년 변화와 ENSO (El Niño-Southern Oscillation)와 AO (Arctic Oscillation)에 대한 관계성을 비교 및 분석하기도 하였다(Yun et al., 2014). 또한 다른 선행 연구에서도 재분석 자료 간의 에디 운동량과 열 플럭스 구조와 강도에 있어서 유사성과 차이가 존재함을 밝혔다(Moon and Ha, 2015).

이와 같이 많은 선행 연구들은 다양한 재분석 자료의 결과에 차이가 있음을 보였기 때문에, 본 연구에서는 전 지구 순환 중에 하나인 평균 자오면 순환의 성분 중에서 정체 에디와 일시 에디에 대한 난류 통계 특성을 이해하고, 본 연구에서 사용된 세 개의 재분석 자료가 가지는 특성을 논의하고자 한다. 각 재분석 자료는 기본 자료에 나타나는 차이 외에도 격자 간격과 비단열 가열항의 취급 등 세부적인 차이가 있으며, 본 연구에서는 기간 평균 내에서의 특성에 대해서 분석하였다. 본 연구의 결과는 앞으로 이러한 재분석 자료의 사용에 있어서 연구자가 조심하여야 할 각 재분석 자료의 특성에 대한 기초를 제공하고자 하며, 전 지구적인 자료의 특성의 이해와 이를 통한 예측에 도움이 될 것으로 본다. 본 연구에서는 정체 에디와 일시 에디에 의한 운동량, 열 그리고 수분 수송에 있어서 전 지구적인 재분석 자료 중에서 널리 사용되는 NCEP/NCAR, ECMWF 그리고 JMA에서 제공하는 각 재분석 자료(NCEP2, ERA-Interim 그리고 JRA-55)간의 구조와 강도를 비교하였다. 또한 기존 연구와 달리 에디 수송을 자세히 설명하기 위해 공간 시간관계와 시간 상관관계에 대한 방정식의 항인 상관계수와 표준편차 항으로 나누어, 각 항들이 에디 수송의 구조와 강도에 어떠한 영향을 끼치는지 분석하고, 이에 대한 재분석 자료 간의 차이에 대해서도 설명하였다. 2장에서는 자료 및 분석 방정식에 대해 설명하고, 3장에서 재분석 자료 간의 평균장을 비교하고, 4장에서는 에디에 의한 운동량 수송, 열 수송과 수분 수송에 대한 분석 결과를 설명하고, 5장에서는 주요 결과를 요약하고 토의하였다.

2. 자료 및 분석 방정식

2.1 재분석 자료의 특징

본 연구에서는 많은 선행 연구들에서 주로 사용되

Table 1. Reanalysis data sets used in this study.

Dataset	Source	Resolution	Analysis output resolution	
			Horizontal	Pressure
ERA-Interim	ECMWF	T255L60	1.5° × 1.5°	37 levels
NCEP2	NCEP/DOE	T62L28	2.5° × 2.5°	17 levels
JRA-55	JMA	T319L60	1.25° × 1.25°	37 levels
Multi-reanalysis mean			1.25° × 1.25°	17 levels

는 재분석 자료를 이용하였다. 분석에 사용한 재분석 자료는 ECMWF에서 제공하는 재분석자료인 ERA-Interim 자료, NCEP-DOE에서 제공하는 NCEP2 자료와 JMA 에서 제공하는 JRA-55 자료에 대한 월 자료와 일 자료를 사용하였다(Kanamitsu et al., 2002; Dee et al., 2011; Ebata et al., 2011). 사용한 세 개의 재분석 자료는 선행 연구에 널리 사용되고 있고 비교적 최근 자료이며, 각각 다른 격자 간격을 가지고 있다. 각 자료들에 대한 상세한 설명은 Table 1에 제시되어 있다. 에디를 계산하는 과정에 있어서 고해상도의 수평 해상도를 사용함에 따라 에디에 의한 운동량, 열, 수분 수송의 더 세밀한 묘사가 가능한 반면, 연직 해상도는 크게 영향을 주지 않는다. 따라서 각각의 재분석 자료들을 필요에 따라 수평적으로 사용된 재분석 자료의 가장 고해상도인, 1.25도 × 1.25도의 격자, 연직적으로 사용된 재분석 자료의 가장 저해상도인 17개의 층으로 내삽하여 분석하였으며, Table 1의 Multi-reanalysis mean(다중-재분석자료 평균)에 제시되어 있다. 분석에 이용된 기간은 1979년부터 2014년까지이며 1979/80~2013/14 35년 동안의 북반구 겨울철(12월~2월)에 대해서 분석하였다.

본 연구에서는 위 세 개의 재분석 자료를 사용하여 각 재분석 자료가 가지는 특성을 논의하고자 한다. 또한 선정된 자료들은 각각 다른 해상도 및 격자 간격을 가지고 있으며 이에 대한 차이를 설명하였다.

2.2 에디 수송 방정식

우리가 흔히 알고 있는 기온과 동서, 남북 그리고 연직 바람, 비습 등과 같은 대기 변수들은 평균장과 에디로 이루어져 있다. 평균은 공간과 시간에 대해서 각각 수행할 수 있으며, 그에 따라 공간과 시간에 대한 에디를 계산할 수 있고, 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$u = [u] + u' \tag{1}$$

$$u = \bar{u} + u' \tag{2}$$

식 (1)의 $[u]$ 는 수평방향의 평균을 의미하고, u' 는 공간 에디를 의미한다. 예를 들어 동서 바람 u 는 수평방향으로 평균된 동서 바람인 $[u]$ 와 동서 바람에

대한 공간 에디인 u' 로 나눌 수 있다. 식 (2)의 \bar{u} 는 시간 평균을 의미하고, u' 는 일시 에디를 의미한다. 예를 들어 동서 바람 u 는 시간 평균된 기후학적인 동서 바람인 \bar{u} 와 시간 평균된 동서 바람에 대한 일시 에디인 u' 로 나눌 수 있다. 이러한 평균장과 에디의 구분은 다른 대기 변수에도 적용이 가능하다.

시간 평균과 공간 평균을 통하여 식 (3)-(5)와 같이 플럭스 형태로 나타낼 수 있다.

$$[\overline{uv}] = [\bar{u}][\bar{v}] + [\overline{u'v'}] + [\overline{u'v}] \tag{3}$$

$$[\overline{Tv}] = [\bar{T}][\bar{v}] + [\overline{T'v'}] + [\overline{T'v}] \tag{4}$$

$$[\overline{qv}] = [\bar{q}][\bar{v}] + [\overline{q'v'}] + [\overline{q'v}] \tag{5}$$

시간-공간 평균 결과, 위와 같이 4개의 항으로 분류되며 각 항들은 다음의 물리적인 의미를 가진다. 오른쪽의 첫번째 항은 고정 셀 수송항 또는 고정 셀 순환항으로 해들리 순환 등과 같은 평균 자오면 순환을 의미한다. 두번째 항은 정체 에디 수송항으로 아열대 고기압이나 알류산 저기압처럼 한자리에서 지속적으로 나타나는 동서 방향의 에디 수송의 기여항이다. 또한 세번째 항은 일시 에디 수송항으로 이동성 고기압이나 저기압과 같이 시간적으로 변하며 이동하는 기압계에 의한 기여항을 의미한다. 왼쪽 항은 오른쪽 세 항의 합으로 세 수송의 총합을 의미한다. 본 연구에서는 오른쪽의 두번째와 세번째 항인 정체 에디와 일시 에디에 의한 수송항에 대해 분석하였다. 식 (3)은 에디 운동량 플럭스, 식 (4)는 에디 열 플럭스 그리고 식 (5)는 에디 수분 플럭스에 대한 식을 의미하며, 각 변수들은 동서 바람(u), 남북 바람(v), 대기 온도(T) 그리고 비습(q)을 의미한다.

정체 에디와 일시 에디의 강도와 구조를 보다 정확하게 분석하기 위해서, 공간 상관관계와 시간 상관관계를 이용하였다. 공간 상관관계를 통해 정체 에디 수송항을 설명할 수 있으며, $\gamma_{\bar{u}\bar{v}}$ 는 \bar{u} 와 \bar{v} 의 상관계수, $\sigma_{\bar{u}}$ ($\sigma_{\bar{v}}$)는 \bar{u} (\bar{v})의 표준편차이다.

$$[\overline{u'v'}] = \gamma_{\bar{u}\bar{v}}\sigma_{\bar{u}}\sigma_{\bar{v}} \tag{6}$$

이와 같은 방법으로, 시간 상관관계를 이용하여 일시 에디 수송항 또한 설명 가능하다. γ_{uv} 는 u 와 v 의

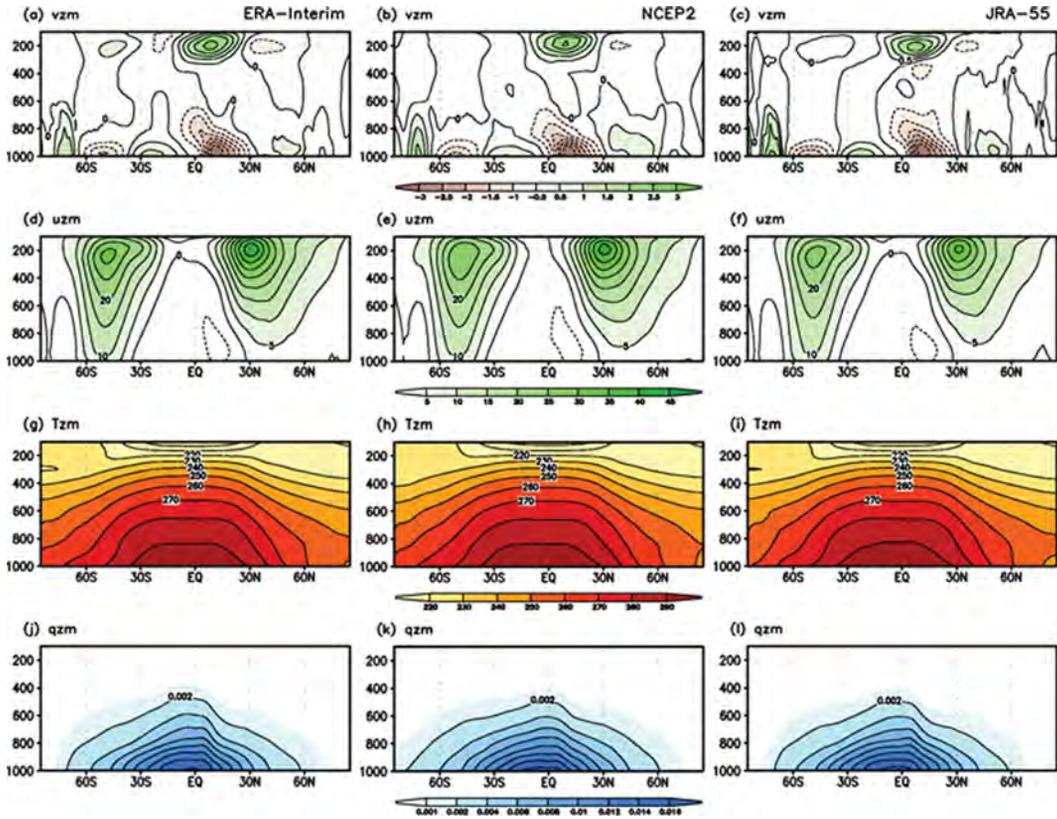


Fig. 1. Zonal mean cross sections of (a-c) the meridional wind [$m s^{-1}$], (d-f) zonal wind [$m s^{-1}$], (g-i) air temperature [K] and (j-l) specific humidity [$g kg^{-1}$] during the 1979–2013 DJF (right panels) for ERA-Interim (left panels), NCEP2 (middle panels), and JRA-55 (right panels).

상관계수, σ_u (σ_v)는 u (v)의 표준편차이며, 세 항의 곱은 일시 에디 수송항이다.

$$[\overline{u'v'}] = \gamma_{uv} \sigma_u \sigma_v \quad (7)$$

식 (6)과 (7)은 운동량에 대한 정체 에디와 일시 에디이고 동서 바람의 위치에 대기 온도와 비습을 각각 대입하여, 열과 수분 수송에 대해서도 같은 방법으로 설명할 수 있다. 또한 식 (3)~(5)에서 계산되는 정체 에디와 일시 에디 값들은 식 (6)과 (7)에서 계산되는 각각의 에디와 같은 값을 가짐을 확인하였다. 그러므로 본 연구에서는 에디를 설명하는 각 항들에 대해서 운동량($[\overline{u'v'}]$, $[\overline{u'v'}]$), 열($[\overline{T'v'}]$, $[\overline{T'v'}]$) 그리고 수분 수송($[\overline{q'v'}]$, $[\overline{q'v'}]$)에 적용하여 세 재분석 자료의 결과를 비교하고자 한다.

3. 재분석 자료간의 평균장 분석

재분석 자료 간의 에디에 의한 수송을 분석하기 전에, 먼저, 각 재분석 자료 간의 기본적인 대기 변수의

차이에 대해서 분석하였다. 운동량, 열 그리고 수분의 남북방향 수송을 설명하기 위한 변수인 남북 바람, 동서 바람, 대기 온도 그리고 비습에 대해서 35년간의 기후값의 동서 평균된 값에 대해서 비교하였다. 이는 북반구 겨울철에 전 지구적인 배경장을 이해하기 위해 분석되었다. 남북방향의 수송에 가장 기본이 되는 남북 바람은 겨울 반구인 북반구에서 뚜렷하며, 하층에선 적도를 향하여, 상층에선 극을 향한 남북 바람이 지배적이었다. 이와 같은 연직 구조는 세 개의 재분석 자료에서 유사하게 나타났다. 남북 바람의 강도에 대한 분석을 위해서 가장 강한 바람에 대한 강도를 비교하였고, 주로 최댓값을 기준으로 비교 및 분석하였다. 그 결과 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55 순서로 강하였다(Figs. 1a-c). 그러나 ERA-Interim의 경우, 여름 반구인 남반구 상층에서 다른 두 데이터와 달리 저위도에서는 북풍이, 고위도에서는 남풍이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이 지역의 남북 바람을 이용한 분석을 진행할 때, 다른 재분석 자료와의 비교를 통해 ERA-Interim 또는 다른 재분석 자료의

결과에 대한 신뢰성을 확인할 필요가 있음을 보여준다. 두 번째로 에디에 의한 운동량 수송에 가장 지배적으로 기여하는 평균장인 동서 바람의 북반구 겨울철 동안의 기후값을 보면 동서 바람은 각 반구의 중위도 상층에서 강하며, 이는 제트 기류를 의미한다(Figs. 1d-f). 또한 여름 반구인 남반구보다 겨울 반구인 북반구에서 더 강하며 남반구 겨울철 기간(6월~8월)엔 반대로 겨울 반구인 남반구에서 더 강하게 나타난다(그림 미제시). 각 재분석 자료 간의 동서 바람에 대한 차이를 보면 공간 분포는 비슷하며 강도는 ERA-Interim이 가장 강하고, 그 다음은 NCEP2, JRA-55의 순서로 나타났다. 이는 남북 바람의 강도와 동일한 순서를 가지며, 남북 바람과 동서 바람의 강도는 운동량 수송량에 영향을 주고, 재분석 자료의 결과가 다를 것을 시사한다. 다음은 열 수송에 영향을 주는 대기 온도에 대해서 비교를 하였다. 대기 온도의 연직 구조는 세 자료가 동일하게, 적도 하층의 온도가 가장 높으며 극과 상층으로 갈수록 온도가 감소하였다(Figs. 1g-i). 세 재분석 자료의 강도를 비교해 보면 NCEP2, ERA-Interim, 그리고 JRA-55의 순서로 대기 온도가 높았고, 이 강도는 열 수송에 영향을 줄 것으로 보인다. 또한 NCEP2에는 나타나지 않지만 ERA-Interim과 JRA-55의 남반구 300 hPa 부근에서 온도가 낮아졌기 때문에, 이 지역의 온도 분석을 하는 경우에도 재분석 자료 간의 차이를 확인할 필요성을 제기할 수 있다. 마지막으로, 수분 수송에 영향을 주는 비습에 대해서 분석하였다. 비습은 단위 부피인 공기 중에 함유된 수증기의 질량을 공기의 질량으로 나눈 값이며, 공기 중의 수증기 정도를 나타내는 대기 변수이다. 비습은 적도 지표 근처에서 가장 큰 값을 가지며, 여름 반구인 남반구에 더 큰 값이 나타나며, 이러한 연직 구조는 세 자료에서 동등하게 나타났다(Figs. 1j-l). 세 자료의 세기를 비교하면, NCEP2가 다른 두 자료에 비해 큰 값을 가졌으며, 이는 수분 수송량에 영향을 줄 것이다. 이와 같이 에디 수송에 영향 주는 여러 변수들의 강도가 재분석 자료에 따라 다르게 나타나기 때문에, 재분석 자료 간의 에디에 의한 수송은 재분석 자료마다 차이가 있을 것으로 보인다.

4. 에디 수송항 분석

에디의 영향을 분석하기 위해 2.2절에 언급한 바와 같이 남북 바람과 동서 바람, 온도, 비습에 대한 표준편차와 상관계수를 이용하여 운동량, 열 그리고 수분 수송에 영향을 주는 정체 에디와 일시 에디를 정의하고, 각 항에 대하여 재분석 자료의 차이에 대해서 분석하였다.

4.1 운동량 수송

먼저 공간 상관관계로 계산되는 운동량 수송에 기여하는 정체 에디는 세 재분석 자료에서 유사하게 나타났다며 겨울 반구인 북반구에서 강하며, 특히 북위 30도 부근에서 극으로 향하는 에디 수송이 가장 강하게 나타났고, 여름 반구인 남반구에선 매우 약하게 나타났다(Figs. 2j-l). 이와 유사하게 북반구 여름철 기간에는 반대의 결과가 나타났다(그림 미제시). 이는 남북방향으로 전파하는 에디들이 발생한 지역을 향해 운동량을 수송한다는 결과와 일치하였고(Held, 1975), 전형적인 경압성 에디가 대류권계면에 도달하기 때문에, 에디 운동량 플럭스는 지구의 상층에 집중되어 있음을 최적화된 GCM (general circulation model) 실험을 통한 결과와 동일하였다(Ait-Chaalal and Schneider, 2015). 정체 에디의 경우 한자리에서 지속적으로 나타나는 기압의 영향을 받기 때문에, 북반구 겨울철에 시베리아 고기압과 같은 정체된 기압이 작용된 것이라 볼 수 있다. 정체 에디를 설명하는 세 항에 대해 분석 결과, 시간 평균된 동서 바람과 남북 바람의 상관계수는 정체 에디의 방향을 결정하고, 이는 상관계수의 값과 정체 에디의 부호를 통해서 설명이 가능하다(Figs. 2a-c). 시간 평균된 동서 바람과 남북 바람 각각의 표준편차는 정체 에디의 강도를 설명하며(Figs. 2d-i), 세 항 모두 정체 에디의 구조에 영향을 주었다. 각 재분석 자료 결과를 비교해보면 정체 에디는 ERA-Interim이 가장 강하고, NCEP2, JRA-55의 순서로 강도 차이를 보였으며, 특히 JRA-55의 경우 다른 두 자료에 비해 작게 나타났다. 이는 운동량 수송에 영향을 주는 동서 바람과 남북 바람에 대한 재분석 자료의 강도 순서와 동일하였다. 각 항들에 대해서 비교한 결과, 시간 평균된 두 바람의 상관계수는 저위도와 중위도의 경우 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 큰 값을 가졌고, 고위도의 경우 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서를 보였다(Figs. 2a-c). 시간 평균된 동서 바람의 표준편차는 전 지구적으로 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 변동성이 강하였다(Figs. 2d-i). 남반구의 경우, 북반구 보다 세 항 모두 값이 작기 때문에 정체 에디의 값이 약한 것으로 설명된다. 정체 에디와 이를 구성하는 세 항의 강도는 모두 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 큰 값을 가졌다.

시간 상관관계로 계산되는 에디 운동량에 대한 일시 에디는 정체 에디가 겨울 반구에서만 뚜렷했던 것에 비해, 겨울 반구와 여름 반구의 중위도에서 각 반구의 극으로 향하는 수송이 뚜렷하게 나타난다. 또한 겨울 반구인 북반구보다 여름 반구인 남반구에서 더 강하게 나타나며, 남반구 고위도에서 극으로 향하는 일시 에디 수송 또한 나타났다. 더하며 비교적 하층

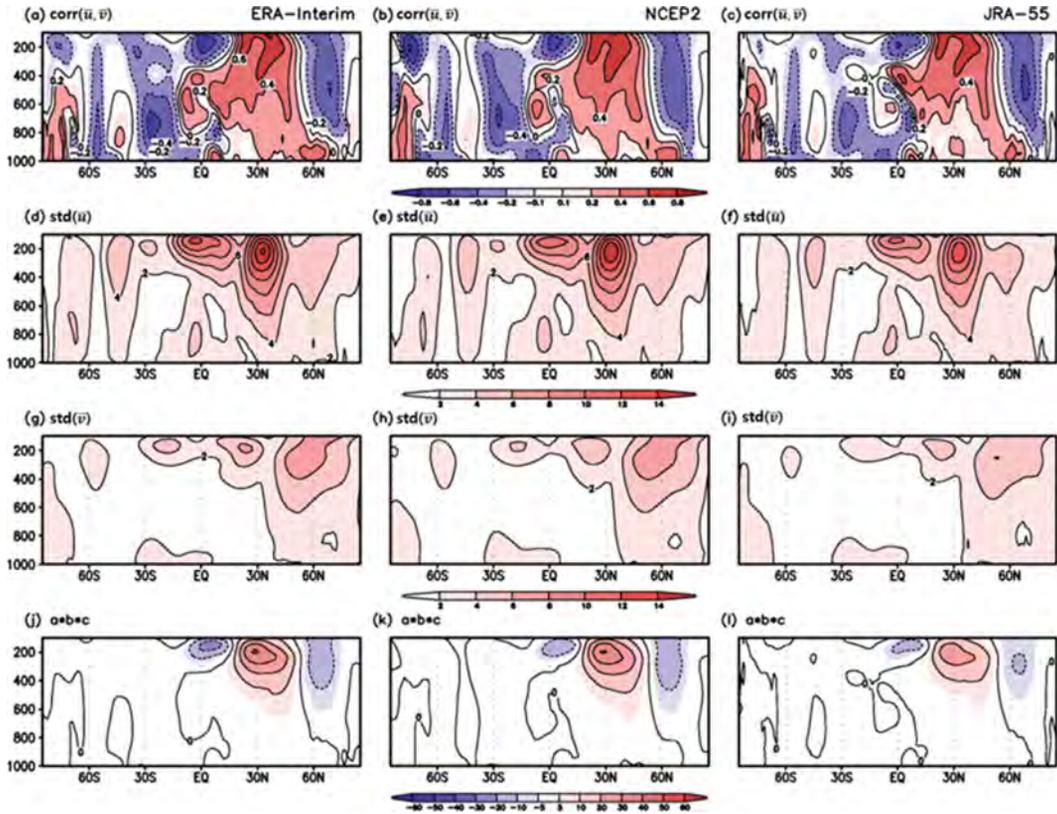


Fig. 2. Zonal mean cross sections of (a-c) correlation between \bar{u} and \bar{v} ($\gamma_{\bar{u}\bar{v}}$), (d-f) standard deviation of \bar{u} ($\sigma_{\bar{u}}$), (g-i) standard deviation of \bar{v} ($\sigma_{\bar{v}}$), and (j-l) space covariance ('a*b*c' means $\gamma_{\bar{u}\bar{v}} \sigma_{\bar{u}} \sigma_{\bar{v}}$) during the 1979~2013 DJF for ERA-Interim (left panels), NCEP2 (middle panels), and JRA-55 (right panels).

까지 영향을 주었다(Figs. 3j-l). 마찬가지로 북반구 여름철 기간에는 반대의 결과가 나타났다(그림 미제시). 일시 에디는 이동성 고기압이나 저기압의 영향을 받으므로 여름 반구에 주로 나타나는 시간적으로 변화하며 이동하는 기압계에 대한 영향으로 생각된다. 일시 에디를 설명하는 세 항에 대해 분석한 결과, 동서 바람과 남북 바람의 상관계수는 정체 에디와 마찬가지로 일시 에디의 방향을 결정하였다(Figs. 3a-c). 동서 바람과 남북 바람에 대한 각각의 표준편차는 일시 에디의 강도를 설명하였고(Figs. 3d-i), 세 항 모두 일시 에디의 구조에 영향을 주었다.

각 재분석 자료에 대한 결과를 비교하였을 때, 일시 에디는 ERA-Interim이 가장 강하고, 그 뒤로 NCEP2와 JRA-55의 순서로 강하였고, 이는 정체 에디에 대한 강도의 순서와 같았으며, 마찬가지로 JRA-55가 현저하게 작은 값을 가졌다. 운동량 수송에 포함된 일시 에디 또한 전체 운동량 수송에 영향을 주는 바람의 강도에 영향을 받은 것으로 보인다. 각 항들에 대한 결과를 비교하면, 두 바람의 상관계수는 북반구의

경우, ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로 컸고, 남반구 중위도의 경우 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로, 고위도의 경우 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로 큰 값을 가졌다. 동서 바람의 표준편차의 강도는 북반구의 경우, ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 강하였고, 남반구는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로 강하였다(Figs. 3a-c). 북반구와 남반구의 강도에 있어서 NCEP2와 JRA-55의 강도가 반대로 나타났다. 또한 구조에 있어서 북반구 상층에 나타나는 두 개의 극 값에 대한 간격이 JRA-55가 다른 두 자료에 비해 가까웠고, 남반구 하층의 경우, 저위도에서 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로 하층까지 변동성이 크게 나타나는 차이가 있었다(Figs. 3d-f). 남북 바람의 표준편차는 전 지구적으로 ERA-Interim이 가장 강하였고, NCEP2 그리고 JRA-55의 순서를 보였고, 구조에 있어서는 적도 하층에서 NCEP2의 변동성이 다른 두 자료에 비해 크게 나타났다(Figs. 3g-i). 일시 에디에 대한 세 재분석 자료의 강도를 비교한 결과, 북반구에서는 두 바람의 변동성이 주로 영

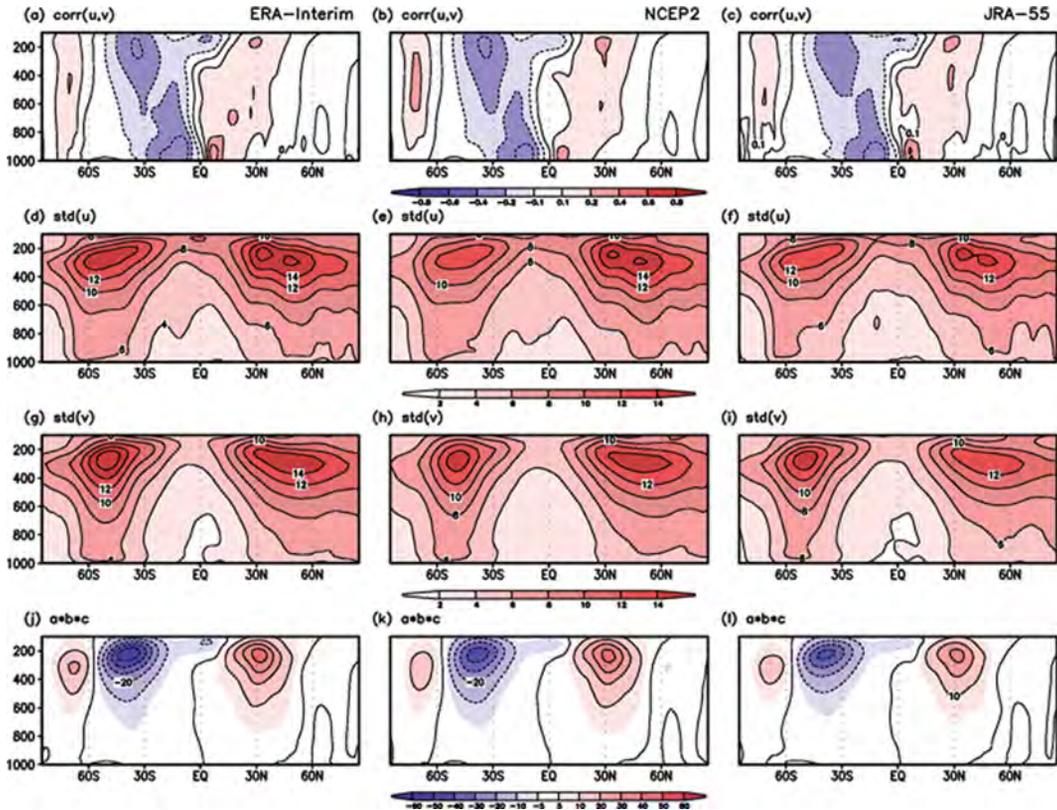


Fig. 3. Zonal mean cross sections of (a-c) correlation between u and v (γ_{uv}), (d-f) standard deviation of u (σ_u), (g-i) standard deviation of v (σ_v), and (j-l) time covariance ('a*b*c' means $\gamma_{uv}\sigma_u\sigma_v$) during the 1979–2013 DJF for ERA-Interim (left panels), NCEP2 (middle panels), and JRA-55 (right panels).

향을 주었고, 남반구에서는 두 바람의 상관계수와 남북 바람의 변동성이 주로 영향을 준 것을 알 수 있었다. 일시 에디를 설명하는데 있어서 재분석 자료의 결과에 차이가 있는 것은 각 재분석 자료의 일 별 로스비 파동 및 경압 파동의 구조와 에디 구조가 다를 수 있음을 설명하며 이는 Dima et al. (2005)에서 기후학적인 정체 파동은 로스비 파동의 반응에 의해 지배된다고 설명했다. 또한 정체 에디와 일시 에디를 통한 운동량 수송의 구조와 강도는 남북 방향의 운동량 수송에 영향을 주는 동서 바람과 남북 바람의 구조와 강도 차이에서 기인함을 보여준다.

4.2 열 수송

열 수송은 고정 셀 순환항에 의해 대부분 지배되지만, 선행 연구에 따르면 정체 에디와 일시 에디의 변화가 열 수송 및 순환에 적지 않은 영향을 끼친다고 밝혀져 있다(Kang et al., 2011). 그러므로 열 수송에 기여하는 에디에 대한 분석이 매우 중요하다. 이번 절에서는 두 에디항, 정체 에디와 일시 에디에 대하여

분석하였다. 에디에 의한 열 수송은 제트 기류 파동에 의해 상층에서 열이 수송되며 경압과 구조로 하층의 열을 수송하게 된다(Grotjahn, 1993). 또한 성층권에서도 에디에 의한 강한 열 수송이 존재하는데, 이는 겨울철에 성층권 극야제트류가 강하기 때문에, 이로 인해 강한 열 수송이 형성되었기 때문이다(Kuroda and Kodera, 2004). 공간 상관관계로 설명되는 정체 에디는 운동량 수송과 마찬가지로 겨울 반구인 북반구 중위도 지역에서 북극을 향하는 정체 에디 수송이 뚜렷하게 나타나며, 여름 반구인 남반구에서는 저위도와 고위도 하층에 약하게 남극으로 수송된다(Figs. 4j-l). 정체 에디에 기여하는 세 항에 대한 분석 결과, 시간 평균된 대기 온도와 남북 바람의 상관계수는 정체 에디의 방향을 결정하고, 이는 상관계수와 정체 에디의 부호를 통해서 설명이 가능하다(Figs. 4a-c). 시간 평균된 대기 온도의 표준편차는 겨울 반구인 북반구에서 뚜렷하며, 남반구의 경우 하층에서 약한 변동성을 보였으며, 하층에 나타나는 정체 에디의 강도에 영향을 준다(Figs. 4d-i). 시간 평균된 남북 바람의 표

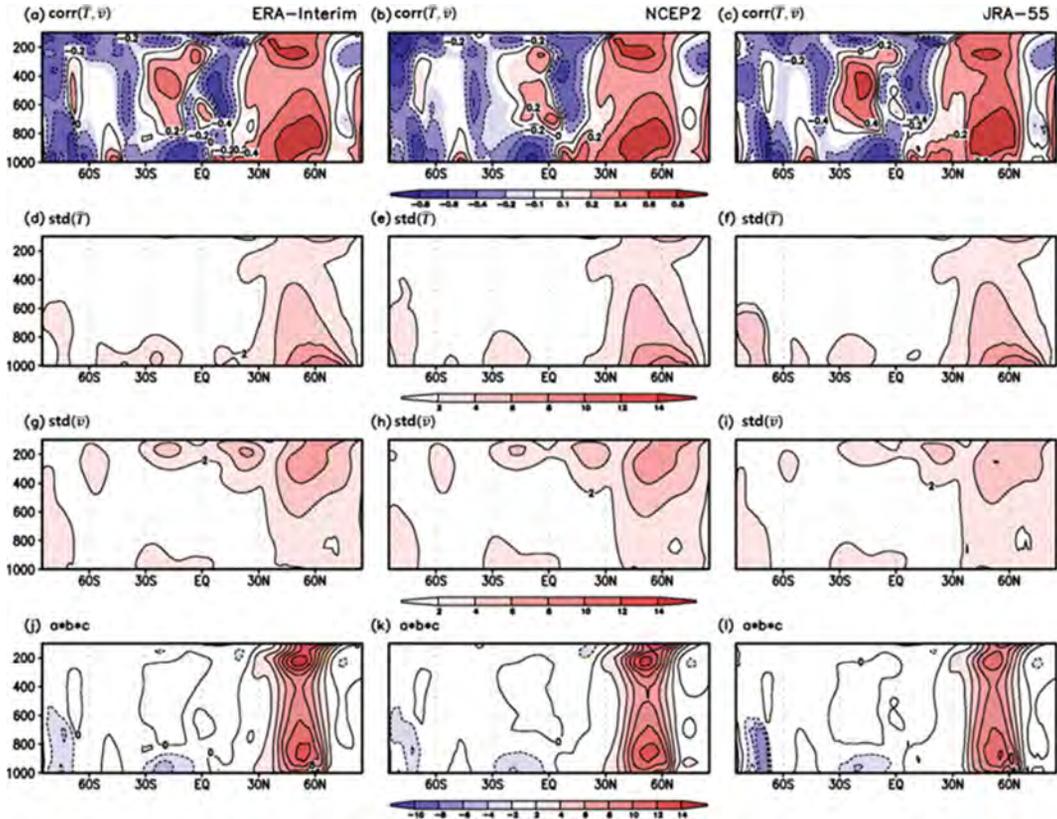


Fig. 4. Zonal mean cross sections of (a-c) correlation between \bar{T} and \bar{v} ($\gamma_{\bar{T}\bar{v}}$), (d-f) standard deviation of \bar{T} ($\sigma_{\bar{T}}$), (g-i) standard deviation of \bar{v} ($\sigma_{\bar{v}}$), and (j-l) space covariance ($\alpha*b*c$ means $\gamma_{\bar{T}\bar{v}} \sigma_{\bar{T}} \sigma_{\bar{v}}$) during the 1979–2013 DJF for ERA-Interim (left panels), NCEP2 (middle panels), and JRA-55 (right panels).

준편차는 4.1절에서 설명한 바와 동일하며, 정체 에디에 의한 열 수송에 있어서 상층에 나타나는 수송에 영향을 준다(Figs. 4g-i). 또한 정체 에디는 위 세 항의 곱과 동일하므로, 세 항 모두 정체 에디의 구조에 기여한다.

각 항에 대한 재분석 자료의 결과를 비교하면 정체 에디는 북반구 상층에서는 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로, 하층에서는 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로 강하였다. 또한 남반구 하층에 대해서는, 저위도에서는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로, 고위도에서는 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서로 강하였다(Figs. 4j-l). 열 수송에 대한 결과도 JRA-55가 다른 두 자료와 다름을 보였는데, 북반구에서는 작은 값이 나타나며 남반구 고위도에서는 큰 값을 보였다. 이와 같은 강도와 구조 차이는 대기 온도와 남북 바람에 영향을 받은 결과일 것이다. 각 항들에 대해서 비교해보면, 시간 평균된 대기 온도와 남북 바람의 상관계수는 정체 에디가 나타나는 북반구 중위도 지역에선 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로

큰 값이 나타났고, 남반구 고위도 하층에선 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서로 큰 값이 나타났다(Figs. 4a-c). 시간 평균된 대기 온도의 표준편차는 북반구 하층에서는 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로, 남반구 저위도 하층에서는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로, 고위도 하층에서는 JRA-55, NCEP2, ERA-Interim 순서로 변동성이 컸다(Figs. 4d-i). 시간 평균된 남북 바람의 표준편차는 4.1절에서 설명한 바와 동일하였다(Figs. 4g-i). 세 항과 정체 에디를 비교하였을 때, 정체 에디의 북반구 상층의 수송량은 시간 평균된 남북 바람의 영향을 주로 받았고, 하층에서는 대기 온도의 영향을 받았다. 또한 남반구 하층의 경우 대기 온도의 공간에 대한 변동성의 영향을 주로 받았다.

또한 일시 에디에 대해 이해하기 위해 시간 상관관계를 통해 세 항으로 나누어 분석을 진행하였다. 열 수송의 일시 에디는 겨울 반구와 여름 반구의 상층과 하층에서 각 극으로 향하는 수송이 뚜렷하게 나타나며, 정체 에디에 비해 남북 방향으로 더 넓은 지역에서 강하게 수송된다(Figs. 5j-l). 일시 에디를 구성하는

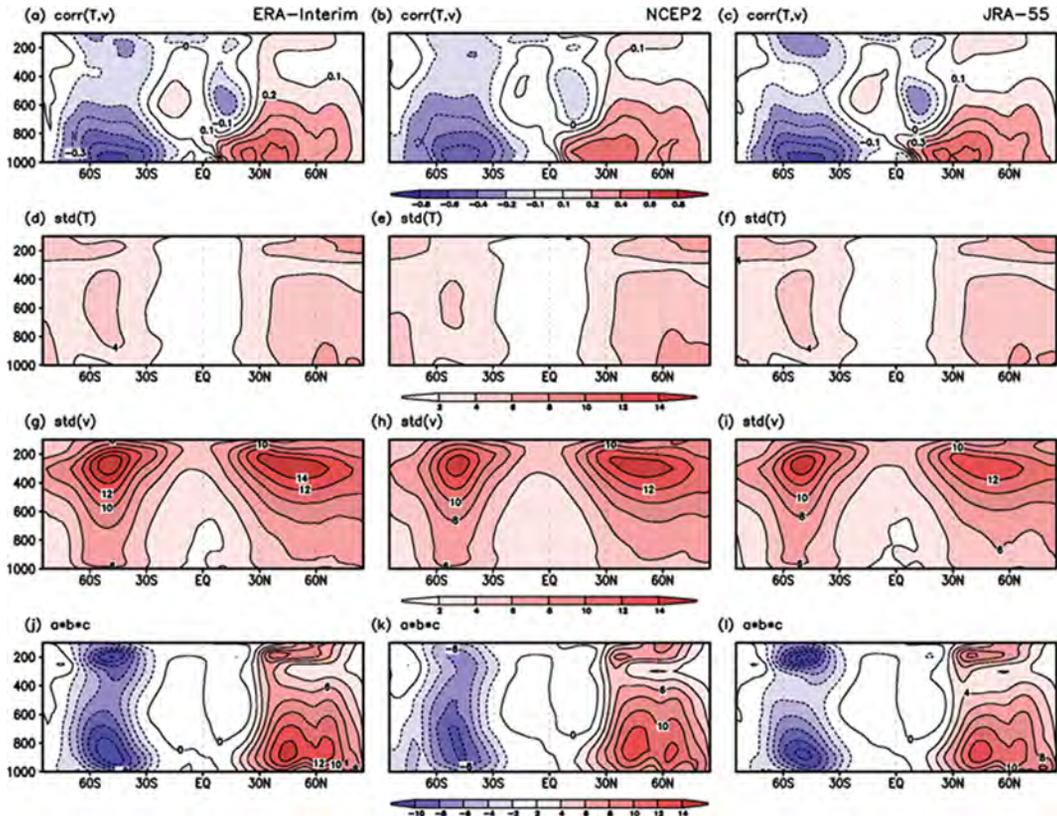


Fig. 5. Zonal mean cross sections of (a-c) correlation between T and v (γ_{Tv}), (d-f) standard deviation of T (σ_T), (g-i) standard deviation of v (σ_v), and (j-l) time covariance ('a*b*c' means $\gamma_{Tv}\sigma_T\sigma_v$) during the 1979–2013 DJF for ERA-Interim (left panels), NCEP2 (middle panels), and JRA-55 (right panels).

세 항에 대해 분석하면, 대기 온도와 남북 바람의 상관계수는 북반구에서는 북극을 향하도록(양의 값), 남반구에서는 남극을 향하도록(음의 값) 하여, 일시 에디의 방향에 영향을 주었다(Figs. 5a-c). 대기 온도의 표준편차는 북반구의 경우 고위도의 상층과 하층에서, 남반구의 경우 저위도 중층과 고위도의 상층과 하층에서 큰 변동성을 보였다(Figs. 5d-f). 남북 바람의 표준편차는 4.1절에서 설명한 바와 동일하며(Figs. 5g-i), 대기 온도와 남북 바람의 표준편차는 일시 에디의 강도에 영향을 주었으며, 일시 에디의 최댓값의 위치를 보았을 때, 열 수송은 운동량 수송에 비해서 대기 온도와 남북 바람의 상관계수가 일시 에디의 강도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

또한 각 재분석의 결과를 비교하면 일시 에디는 북반구의 경우 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 강하였고, 남반구의 경우 하층에서는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로, 상층에서는 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서로 강하였다(Figs. 5j-l). 각 항들의 결과를 비교하였을 때, 대기 온도와 남북 바람

의 상관계수는 북반구에서는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로, 남반구에서는 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서로 큰 값을 가졌다(Figs. 5a-c). 대기 온도의 표준편차는 북반구에서는 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로 남반구에서는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로 변동성이 강하였다(Figs. 5d-f). 남북 바람의 표준편차는 4.1절에서 설명한 바와 같다(Figs. 5g-i). 일시 에디의 강도는 북반구의 경우 남북 바람의 변동성 그리고 대기 온도와 남북 바람의 상관계수가 주로 영향을 주었고, 남반구의 경우, 상층에서는 두 변수의 상관계수와 하층에서는 온도의 변동성이 주로 영향을 준 것으로 분석된다. 세 개의 재분석 자료에서 나타내는 정체 에디와 일시 에디에 의한 열 수송의 연직 분포를 보았을 때, 운동량 수송에 대한 결과보다 지역적으로 구조와 강도에 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 에디에 의한 열 수송은 대륙의 형태에 영향을 받는다고 알려져 있는데, 선행연구 결과에 따르면 산맥은 강한 정체된 바람을 형성하기 때문에 산맥에 인한 정체 파동은 극량수송하는 열

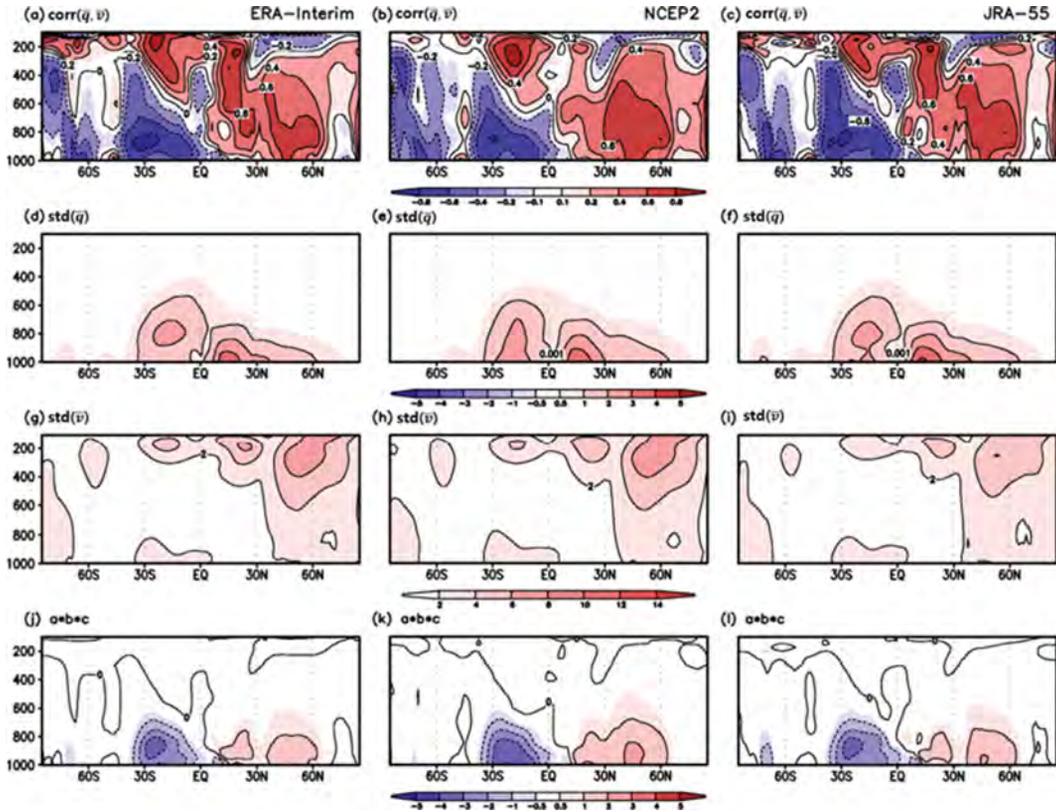


Fig. 6. Zonal mean cross sections of (a-c) correlation between \bar{q} and \bar{v} ($\gamma_{\bar{q}\bar{v}}$), (d-f) standard deviation of \bar{q} ($\sigma_{\bar{q}}$), (g-i) standard deviation of \bar{v} ($\sigma_{\bar{v}}$), and (j-k) space covariance ('a*b*c' means $\gamma_{\bar{q}\bar{v}}\sigma_{\bar{q}}\sigma_{\bar{v}}$) during the 1979~2013 DJF for ERA-Interim (left panels), NCEP2 (middle panels), and JRA-55 (right panels). Unit of color bars (d-f and j-l) indicates 10^{-3} .

수송을 더 효과적으로 강화시킬 것이라 알려졌고 (Rodwell and Hoskins, 2001), 예를 들어 티벳 고원이 존재하면 강화된 정체 에디에 의한 열 수송이 일시 에디에 의한 열 수송의 감소와 상쇄된다고 밝혀졌다 (Park et al., 2013). 지역적인 에디에 의한 열 수송에 대해 분석을 진행한다면, 대륙의 형태나 대륙과 해양의 분포에 따라 다르게 나타나는 에디 열 수송을 이해할 수 있을 것이다.

4.3 수분 수송

대기의 수분 수송은 전 지구적인 물 순환에 한 부분으로 강수 현상과 가뭄 등에 중요하게 작용하기 때문에 이에 대한 분석을 매우 중요하다. 앞 절에서 분석한 방법과 동일하게 적용하여, 과 남북 바람을 이용하여 수분의 남북 방향에 대한 수송에 영향을 주는 두 에디항에 대해서 분석하였다. 먼저 정체 에디에 의한 수분 수송은 여름 반구인 남반구 하층에서 남극 방향으로 뚜렷하며, 겨울 반구인 북반구 하층에서는 북극 방향의 수송이 나타난다(Figs. 6g-i). 정체 에디

를 설명하는 세 항에 대해서 분석하면 시간 평균된 비습과 남북 바람의 상관계수의 부호를 통해서 정체 에디의 방향을 결정한다(Figs. 6a-c). 시간 평균된 비습의 표준편차는 저위도 하층에서 뚜렷하고, 반구 별로 비교하면 겨울 반구인 북반구에서 강한 변동성을 갖는다(Figs. 6d-f). 이는 북반구가 남반구에 비해 육지와 해양의 분포가 복잡하기 때문에 더 강한 변동성을 보인다. 겨울 시간 평균된 남북 바람의 표준편차는 4.1절에서 설명한 바와 동일하며, 여름 반구인 남반구에 나타나는 하층의 변동성이 중요하다(Figs. 6g-i). 그러므로 정체 에디의 수송 방향은 상관계수에 영향을 받고, 강도에 있어서는 북반구에서의 수송은 시간 평균된 비습과 남반구에서는 시간 평균된 남북 바람의 변동성에 영향을 받는다.

각 항에 대해서 재분석 자료의 결과를 비교한 결과, 정체 에디는 북반구에서 NCEP2, JRA-55, ERA-Interim 순서로, 남반구에서는 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로 강하였다(Figs. 6j-i). 북반구의 경우 비습의 평균장과 남반구의 경우 남북 바람의 평균장과 동일

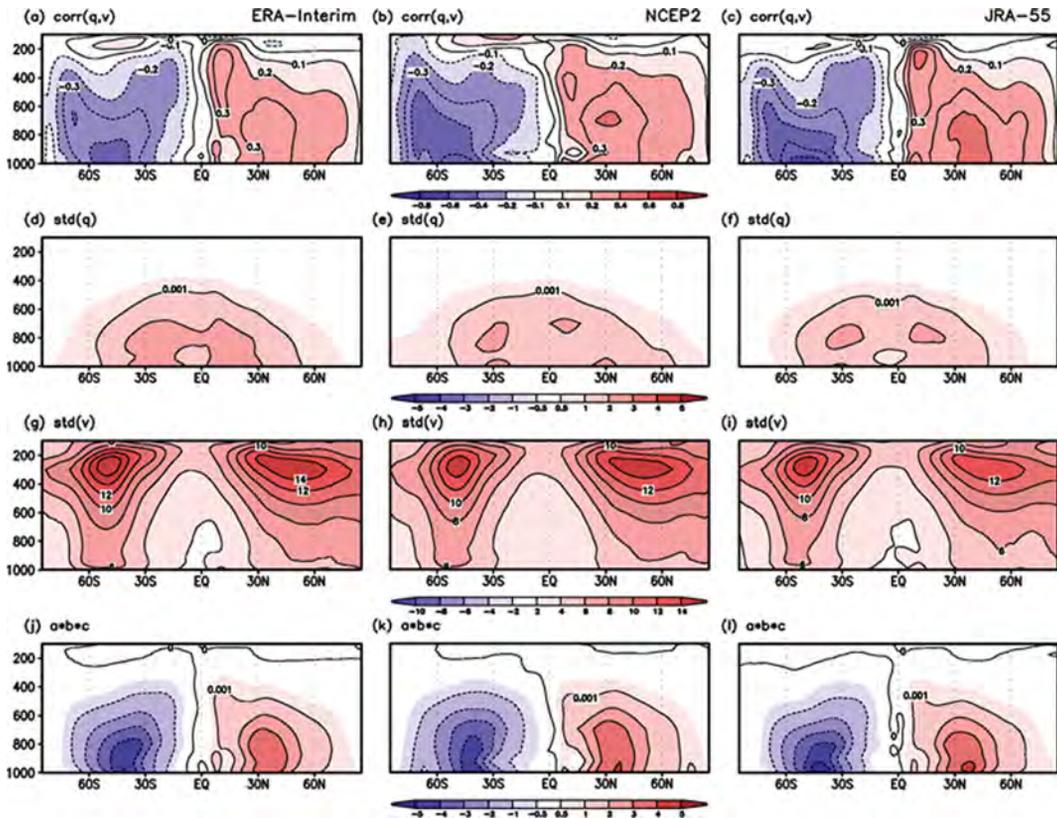


Fig. 7. Zonal mean cross sections of (a-c) correlation between q and v (γ_{qv}), (d-f) standard deviation of q (σ_q), (g-i) standard deviation of v (σ_v), and (j-l) time covariance ($a*b*c$ means $\gamma_{qv}\sigma_q\sigma_v$) during the 1979–2013 DJF for ERA-Interim (left panels), NCEP2 (middle panels), and JRA-55 (right panels). Unit of color bars (d-f and j-l) indicates 10^{-3} .

한 강도 순서를 보였다. 각 항들에 대해서 비교하면, 시간 평균된 비습과 남북 바람의 상관계수는 북반구에서는 NCEP2, JRA-55, ERA-Interim의 순서로, 남반구에서는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로 큰 값을 가졌다(Figs. 6a-c). 시간 평균된 비습의 표준편차는 북반구의 경우, JRA-55, NCEP2, ERA-Interim의 순서로, 남반구의 경우 NCEP2, JRA-55, ERA-Interim의 순서로 강한 변동성을 가졌다(Figs. 6d-f). 시간 평균된 남북 바람의 표준편차는 남반구 하층의 경우, NCEP2, JRA-55, ERA-Interim의 순서로 변동성이 강하였다(Figs. 6g-i). 세 항과 정체 에디를 비교하면, 북반구에서 나타나는 정체 에디에 의한 수분 수송은 시간 평균된 비습과 남북 바람의 상관계수와 시간 평균된 남북 바람의 변동성에 영향을 받으며, 남반구에서 나타나는 수송은 세 항 모두의 영향을 받았다. 또한 온도와 비습이 밀접한 관계가 있으므로 정체 에디에 의한 열 수송과 수분 수송의 공간 분포를 분석한 결과, 열 수송이 북반구 중위도 상층과 하층에서 북극으로 향하는 수송과 남반구 저위도 하층에서 남극으로

로 향하는 수송이 강하였고, 마찬가지로 수분 수송 또한 북반구 중위도와 남반구 저위도에서 극으로 향하는 수송이 강하였다.

시간 상관관계로 설명할 수 있는 일시 에디에 대해서도 같은 방법으로 분석하였다. 일시 에디에 의한 수분 수송은 정체 에디에 의한 수송과 마찬가지로 여름 반구인 남반구에서 뚜렷하게 나타났다(Figs. 7j-l). 일시 에디를 설명하는 세 항에 대해 분석한 결과, 비습과 남북 바람의 상관계수는 각 반구에서 극으로 수송되는 일시 에디의 수송 방향에 영향을 주었다(Figs. 7a-c). 비습의 표준편차는 각 반구의 적도를 제외한 저위도에서 가장 변동성이 강하였다(Figs. 7d-f). 남북 바람의 표준편차는 각 반구의 중위도 상층에서 강하게 나타났고, 하층에서는 변동성이 약하였다(Figs. 7g-i). 일시 에디에 의한 수분 수송은 두 변수의 상관계수와 가장 유사한 구조를 보였고, 강도에도 뚜렷한 영향을 줄 것이다. 또한 상층에서 강한 남북 바람의 표준편차 보다는 하층에서 뚜렷한 비습의 표준편차의 영향을 더 받을 것으로 설명된다.

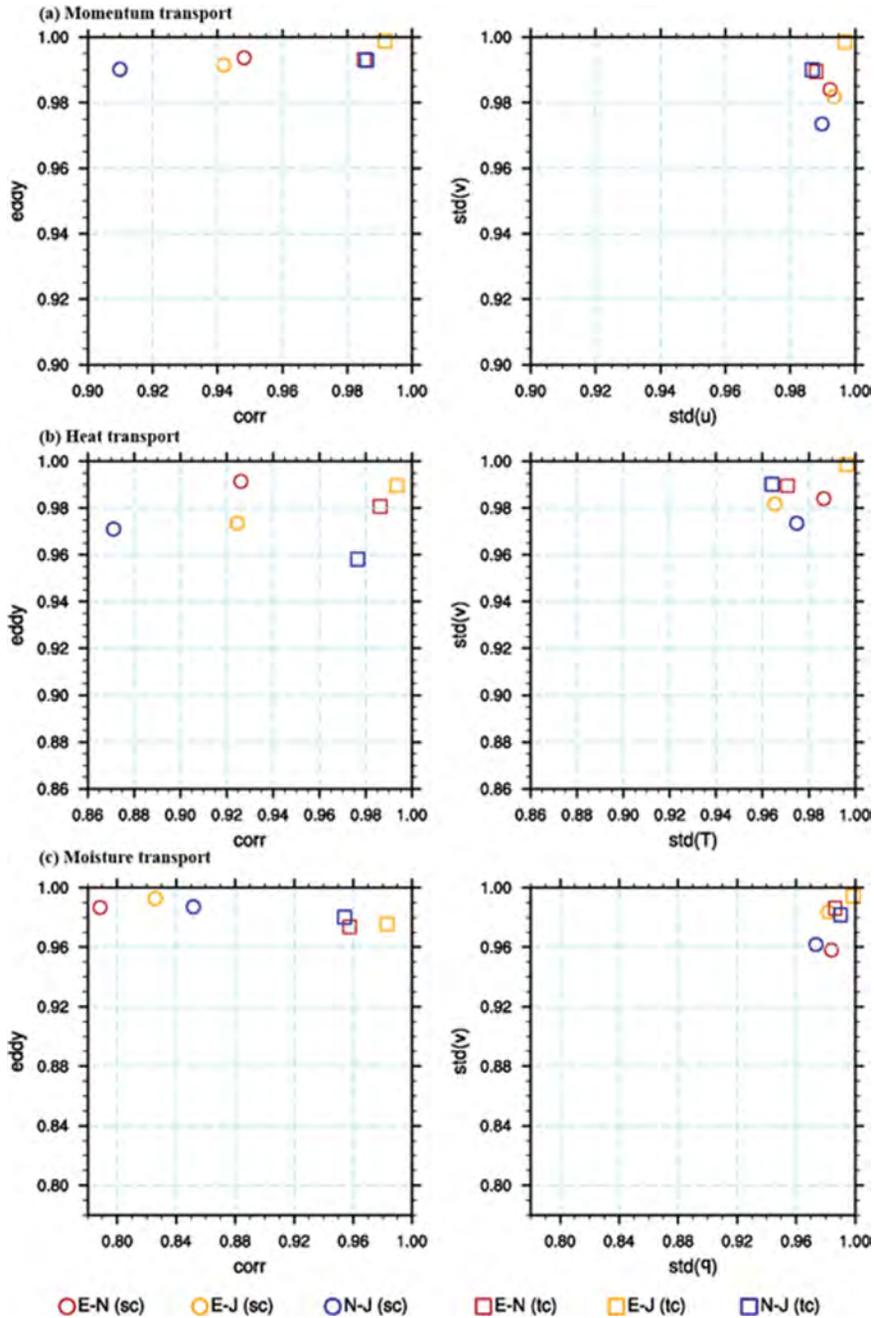


Fig. 8. Pattern correlation coefficient of two reanalysis data about (a) momentum, (b) heat, and (c) moisture transports. x-axis means eddy (left panels) and standard deviation of v (right panels). Y-axis means correlation coefficient (left panels) and standard deviation of (a) u, (b) T and (c) q (right panels). E is ERA-Interim, N is NCEP2, and J is JRA-55. “sc (tc)” means space (time) correlation.

위의 결과에 대해서 각 재분석 자료를 통해 비교분석하면, 일시 에디는 북반구 하층에서 JRA-55, NCEP2, ERA-Interim의 순서로 강하고, 상층까지 강한 수송이

나타나는 순서는 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서였으며, 남반구의 경우 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서로 강하였다(Figs. 7j-l). 각 항들에 대해서 분

석한 결과, 비습과 남북 바람의 상관계수는 북반구에서 JRA-55, NCEP2, ERA-Interim의 순서로, 남반구에서는 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서로 강하였다(Figs. 7a-c). 비습의 표준편차는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로 강한 변동성을 보였다(Figs. 7d-f). 수분 수송은 대기 하층에서의 효과가 중요하기 때문에, 하층에 대한 남북 바람의 표준편차는 NCEP2, JRA-55, ERA-Interim의 순서로 강한 변동성을 가졌다(Figs. 7g-i). 각 재분석 자료의 결과를 토대로 일시에 에디에 의한 수분 수송을 분석한 결과, 일시 에디의 구조와 강도 모두 비습과 남북 바람의 상관계수의 영향을 가장 많이 받음을 확인하였다. 위도에 따른 수분 수송이 대기에 미치는 영향을 분석하기 위해선 국지적인 분석이 추가적으로 필요할 것이라 생각한다. 남반구의 여름 몬순은 호주 지역에서 국지적으로 나타나고, 북반구 겨울 몬순은 강수의 영향이 적게 나타나기 문이다. 만약 이와 같은 분석을 남반구 겨울철(북반구 여름철)에 발생하는 국지적인 수송에 대해 진행된다면, 북반구 여름 몬순 지역에 나타나는 수분 수송의 지역적인 분석이 가능할 것이다. 일시 에디에 의한 열 수송과 수분 수송을 비교 분석한 결과, 열 수송은 두 반구의 중위도에서의 상층과 하층에서 극으로 향하는 수송이 뚜렷하였으며, 수분 수송 또한 열 수송이 활발한 지역 내에서 하층에서의 수송이 강하였다.

마지막으로 남북방향의 수송에 영향을 주는 정체 에디와 일시 에디, 그리고 에디를 구성하는 각 항들이 재분석 자료 간의 얼마나 비슷한 공간장을 가지는지 이해하기 위해서 Fig. 8에서 두 개의 재분석 자료에 대한 공간 상관계수를 통해 분석하였다. 먼저, 운동량 수송에 대해서 분석한 결과, 공간 상관관계에 관한 네 항은 ERA-Interim과 NCEP2의 공간장이 가장 유사하였고, 그 뒤로는 ERA-Interim과 JRA-55, NCEP2와 JRA-55의 순서로 JRA-55가 다른 두 자료의 공간장과 덜 유사하였으며, 시간 상관관계에 관한 네 항은 ERA-Interim과 JRA-55의 결과가 가장 유사하였고, NCEP2와의 공간 상관계수는 대체로 작았다(Fig. 8a). 열 수송의 경우, 공간 상관관계에 관한 네 항은 ERA-Interim과 NCEP2의 공간 상관계수가 가장 컸고, 그 뒤로 대기 온도의 표준편차에 대한 공간 상관계수만 NCEP2와 JRA-55의 유사성이 높았고, 나머지의 세 항은 ERA-Interim과 JRA-55의 유사성이 더 높았다. 시간 상관관계의 네 항은 ERA-Interim과 JRA-55가 가장 유사하였고, 그 다음으로 ERA-Interim과 NCEP2, NCEP2와 JRA-55의 순서로, NCEP2가 다른 두 자료와의 유사성이 작았다(Fig. 8b). 수분 수송에 대해 분석하면, 공간 상관관계의 네 항은 시간 평균된 비습과 남북 바람의 상관계수에 대한 공간 상관계수를 제외한 나머지 세 항은 ERA-Interim과 JRA-55의 값이

가장 컸고, NCEP2와 다른 재분석 자료의 공간 상관계수는 다른 공간 상관계수보다 작아, NCEP2의 유사성이 가장 낮았다. 시간 상관관계에 대한 네 항은 ERA-Interim과 JRA-55의 공간 상관계수가 가장 컸고, 나머지의 경우는 비슷하여 시간 상관관계에 대한 결과 또한 NCEP2와의 공간 유사성이 낮았다(Fig. 8c). 또한 공간 상관관계에 대한 항들이 시간 상관관계에 대한 항들보다 각 재분석 자료 간의 유사성이 높았다. 또한 정체 또는 일시 에디와 각 에디를 구성하는 각 세 항간의 패턴 상관관계 분석을 진행하였을 때, 운동량과 열 수송에 대해선 뚜렷한 상관관계를 보이진 않았지만 수분 수송의 경우 비습과 남북 바람의 상관계수가 에디와의 패턴 상관계수가 정체 에디의 경우 0.60이상, 일시 에디는 0.84이상으로 높게 나타났다(표 미제시).

5. 요약 및 토의

본 연구에서는 전 지구 순환의 기본인 평균 자오면 순환의 성분들, 시간 일시 에디 혹은 일시 파동, 그리고 공간 에디 혹은 정체 파동에 대한 난류 통계 특성을 비교하여 각 재분석 자료가 가지는 특성을 논의하였다. 각 재분석 자료의 기본 특성에 대해서 비교한 결과, 대기 변수들의 연직 분포는 매우 유사하였으며, 강도에 있어서 차이를 보였다. 동서 평균된 남북 바람의 경우 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 강하였고, 동서 바람 또한 동일한 순서의 강도를 보였다. 대기 온도는 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로 높았고, 비습은 NCEP2, JRA-55, ERA-Interim의 순서로 많은 수증기를 가지고 있다고 보였다.

운동량 수송에 기여하는 정체 에디는 시간 평균된 동서 바람과 남북 바람의 상관계수가 정체 에디의 방향을 결정하고, 시간 평균된 동서 바람과 남북 바람 각각의 표준편차는 정체 에디의 강도를 설명하며, 세 항 모두 정체 에디의 구조에 영향을 주었다. 정체 에디와 이를 구성하는 세 항의 강도는 모두 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 큰 값을 가졌다. 운동량 수송에 기여하는 또 다른 에디인 일시 에디는 동서 바람과 남북 바람의 상관계수는 정체 에디와 마찬가지로 일시 에디의 방향을 결정하였다. 또한 두 바람에 대한 각각의 표준편차는 일시 에디의 강도를 설명하였고, 세 항 모두 일시 에디의 구조에 영향을 주었다. 일시 에디는 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 큰 값을 가졌고, 세 재분석 자료 각각의 강도를 비교한 결과, 북반구에서는 두 바람의 변동성이 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 큰 값을 가지며, 두 바람의 상관계수보다 일시 에디에 더 영향을 주었다. 반면에 남반구에서는 두 바람의 상관계수와 남북 바

람의 변동성이 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 큰 값을 가지며, 일시 에디에 주요한 영향을 주었다.

열 수송을 하는 정체 에디는 시간 평균된 대기 온도와 남북 바람의 상관계수는 정체 에디의 방향을 결정하고, 시간 평균된 대기 온도의 표준편차는 북반구에서 뚜렷하며, 남반구의 경우 하층에서 약한 변동성을 보였으며, 하층에 나타나는 정체 에디의 강도에 영향을 주었다. 정체 에디는 지역적으로 재분석 자료에 대한 강도의 순서가 달랐고, 세 항과 정체 에디를 비교하였을 때, 정체 에디의 북반구 상층에서는 시간 평균된 남북 바람의 영향을 주로 받았고, 하층에서는 대기 온도의 영향을 주로 받았다. 또한 남반구 하층의 경우 대기 온도의 공간에 대한 변동성의 영향을 주로 받았다. 일시 에디를 구성하는 세 항에 대해 분석하면, 대기 온도와 남북 바람의 상관계수는 일시 에디의 방향에 영향을 주었다. 대기 온도와 남북 바람의 표준편차는 일시 에디의 강도에 영향을 주었으며, 일시 에디의 최댓값의 위치를 보았을 때, 열 수송은 운동량 수송에 비해서 대기 온도와 남북 바람의 상관계수가 일시 에디의 강도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 각 재분석의 결과를 비교하면 일시 에디는 북반구의 경우 ERA-Interim, NCEP2, JRA-55의 순서로 강하였고, 남반구의 경우 하층에서는 ERA-Interim, JRA-55, NCEP2의 순서로, 상층에서는 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서로 강하였다. 세 개의 재분석 자료에서 나타내는 정체 에디와 일시 에디에 의한 열 수송의 연직 분포를 보았을 때, 운동량 수송에 대한 결과보다 지역적으로 구조와 강도에 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 열 수송에 대한 분석을 진행할 때, 재분석 자료 간의 차이에 대해서 신뢰 수준을 만족하는지 확인할 필요성을 제기할 수 있다.

수분 수송에 영향을 주는 정체 에디의 수송 방향은 시간 평균된 비습과 남북 바람의 상관계수에 영향을 받고, 북반구의 강도는 시간 평균된 비습과 남반구는 시간 평균된 남북 바람의 변동성에 영향을 받는다. 재분석 자료의 결과를 비교한 결과, 정체 에디는 북반구에서 NCEP2, JRA-55, ERA-Interim 순서로, 남반구에서는 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서로 강하였다. 세 항과 비교하면, 북반구에서 나타나는 정체 에디에 의한 수분 수송은 시간 평균된 비습과 남북 바람의 상관계수와 시간 평균된 남북 바람의 변동성에 영향을 받으며, 남반구에서 나타나는 수송은 세 항 모두의 영향을 받았다. 일시 에디에 의한 수분 수송은 비습과 남북 바람의 상관계수와 가장 유사한 구조를 보였고, 강도에도 뚜렷한 영향을 주었다. 또한 하층에서 뚜렷한 비습의 표준편차의 영향을 더 받았다. 세 재분석 자료를 통해 본 일시 에디는 북반구 하층에서 JRA-55, NCEP2, ERA-Interim의 순서로 강하고,

상층까지 강한 수송이 나타나는 순서는 NCEP2, ERA-Interim, JRA-55의 순서였으며, 남반구의 경우 JRA-55, ERA-Interim, NCEP2의 순서로 강하였고, 일시 에디의 구조와 강도 모두 비습과 남북 바람의 상관계수의 영향을 가장 많이 받음을 확인하였다.

재분석 자료 간의 공간 상관계수 분석을 통해서 정체 에디를 설명하는 공간 상관관계의 경우 ERA-Interim과 NCEP2의 공간장이 유사하고, 일시 에디를 설명하는 시간 상관관계의 경우 ERA-Interim과 JRA-55의 공간장이 유사함을 알 수 있었다. 또한 일시 에디의 공간장이 정체 에디의 공간장보다 각 재분석 자료 간의 유의성이 높았다.

본 연구에서 진행된 기후값과 같은 기간 평균에 대한 분석 외에도 십년 주기 등, 기간 변화를 고려한 경우에 나타나는 재분석 자료의 차별성에 대한 분석이 필요할 것으로 생각된다. 그리고 지역을 나누어서 운동량, 열 그리고 수분 수송에 대한 분석을 한다면, 육지와 해양의 차이 또는, 저기압과 고기압과 같은 기압계의 지역적인 변화를 분석하는데 도움이 될 것이다. 또한 본 연구에서는 세 개의 재분석 자료에 대해서만 비교분석이 이뤄졌지만 최근에 개발된 MERRA (the Modern Era Retrospective analysis for Research and Applications) 또는 CFSR (the Climate Forecast System Reanalysis)과 같은 다른 재분석 자료와 비교하는 연구도 필요할 것이라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Ait-Chaalal, F., and T. Schneider, 2015: Why eddy momentum fluxes are concentrated in the upper troposphere. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 1585-1604.
- Becker, E., G. Schmitz, and R. Geprags, 1997: The feedback of midlatitude waves onto the Hadley cell in a simple general circulation model. *Tellus*, **49**, 182-199.
- Caballero, R., 2007: Role of eddies in the interannual variability of Hadley cell strength. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22705, doi:10.1029/2007GL030971.
- _____, 2008: Hadley cell bias in climate models linked to extratropical eddy stress. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L18709, doi:10.1029/2008GL035084.
- Dee, D., and Coauthors, 2011: The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.

- Dima, I. M., J. M. Wallace, and I. Kraucunas, 2005: Tropical zonal momentum balance in the NCEP reanalyses. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 2499-2513.
- Ebita, A., and Coauthors, 2011: The Japanese 55-year reanalysis "JRA-55": An interim report. *Soi. Online. Lett. Atmos.*, **7**, 149-152.
- Grotjahn, R., 1993: *Global Atmosphere Circulations: Observations and Theories*. Oxford University Press, 249-264.
- Hare, S. H. E., and I. N. James, 2001: Baroclinic developments in jet entrances and exits. I: linear normal modes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 1293-1303.
- Held, I. M., 1975: Momentum transport by quasi-geostrophic eddies. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 1494-1497.
- Hu, Q., Y. Tawaye, S. Feng, Q. Hu, Y. Tawaye, and S. Feng, 2004: Variations of the northern hemisphere atmospheric energetics: 1948-2000. *J. Climate*, **17**, 1975-1986.
- James, I. N., 1995: *Introduction to Circulating Atmosphere*. Cambridge University Press, 117-125.
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S. K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1631-1643.
- Kang, I.-S., J.-S. Kug, M.-J. Lim, and D.-H. Choi, 2011: Impact of transient eddies on extratropical seasonal-mean predictability in DEMETER models. *Climate Dyn.*, **37**, 509-519.
- Kim, H.-K., and S. Lee, 2001: Hadley cell dynamics in a primitive equation model. part II: Nonaxisymmetric flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2859-2871.
- Kim, Y.-H., and M.-K. Kim, 2013: Examination of the global Lorenz energy cycle using MERRA and NCEP-reanalysis 2. *Climate Dyn.*, **40**, 1499-1513.
- Kuo, H.-L., 1956: Forced and free meridional circulations in the atmosphere. *J. Meteor.*, **13**, 561-568.
- Kuroda, Y., and K. Kodera, 2004: Role of the Polar-night Jet Oscillation on the formation of the Arctic Oscillation in the Northern Hemisphere winter. *J. Geophys. Res.*, **109**, D11112, doi:10.1029/2003JD004123.
- Li, L., A. P. Ingersoll, X. Jiang, D. Feldman, and Y. L. Yung, 2007: Lorenz energy cycle of the global atmosphere based on reanalysis datasets. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L16813, doi:10.1029/2007GL029985.
- Marques, C. A. F., A. Rocha, J. Corte-Real, J. M. Castanheira, J. Ferreira, and P. Melo-Goncalves, 2009: Global atmospheric energetic from NCEP-reanalysis 2 and ECMWF-ERA40 reanalysis. *Int. J. Climatol.*, **29**, 59-174.
- _____, A. Rocha, and J. Corte-Real, 2010: Comparative energetic of ERA-40, JRA-25 and NCEP-R2 reanalysis, in the wave number domain. *Dyn. Atmos. Oceans.*, **50**, 375-399.
- Moon, H., and K.-J. Ha, 2015: Mean meridional circulation-eddy interaction in three reanalysis data sets during the boreal winter. *Atmosphere*, **25**, 543-557 (in Korean with English abstract).
- Park, H.-S., S.-P. Xie, and S.-W. Son, 2013: Poleward stationary eddy heat transport by the Tibetan Plateau and Equatorward Shift of Westerlies during Northern Winter. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 3288-3301.
- Rodwell, M. J., and B. J. Hoskins, 2001: Subtropical anticyclones and summer monsoons. *J. Climate*, **14**, 3192-3211.
- Song, Z., and M. Zhang, 2007: Changes of the Boreal Winter Hadley circulation in the NCEP-NCAR and ECMWF reanalyses: A comparative study. *J. Climate*, **20**, 5191-5200.
- Stachnik, J. P., and C. Schumacher, 2011: A comparison of the Hadley circulation in modern reanalyses. *J. Geophys. Res.*, **116**, D22102, doi:10.1029/2011JD016677.
- Ulbrich, U., and P. Speth, 1991: The global energy cycle of stationary and transient atmospheric waves: result from ECMWF analyses. *Meteor. Atmos. Phys.*, **45**, 125-131.
- Walker, C. C., and T. Schneider, 2006: Eddy influences on Hadley circulations: Simulations with an idealized GCM. *J. Atmos. Sci.*, **63**, 3333-3350.
- Yun, K.-S., Y.-W. Seo, K.-J. Ha, J.-Y. Lee, and Y. Kajikawa, 2014: Interdecadal changes in the Asian winter monsoon variability and its relationship with ENSO and AO. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 531-540.