

매든-줄리안 진동의 위상에 따른 동아시아 지역의 강수와 순환의 변동성

한상대 · 서경환*

부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30

East Asian Precipitation and Circulation Response to the Madden-Julian Oscillation

Sang-Dae Han and Kyong-Hwan Seo*

Division of Earth Environmental System, Atmospheric Science Major, Pusan National University,
Busan 609-735, Korea

Abstract: This study examines the effects of the Madden-Julian oscillation (MJO) or the Intraseasonal Oscillation (ISO) on precipitation, temperature and circulation anomalies over East Asia according to the eight different MJO phases during the winter and summer seasons. A nonlinear response appears the wintertime precipitation pattern during the phase of 3 (where the MJO center is located over the Eastern Indian Ocean) and 8 (where the MJO center is located over the Western Hemisphere) over the Korean Peninsula. That is, for these phases, the positive precipitation anomalies appear for the MJO intensity less than 2 standard deviations while the negative precipitation anomalies appear in the case of the MJO intensity greater than 2 standard deviations. The negative precipitation anomaly in the latter case is duandard d stronger anomalous anticyclone formed over the Korean Peninsula and cold and dry advection by northerly winds. The response of precipitation and circulation to the boreal summer ISO is also investigated.

Keywords: Madden-Julian oscillation, intraseasonal oscillation, nonlinear response, cold advection, precipitation anomaly

요약: 본 연구는 겨울철과 여름철에 8개의 다른 MJO 전파 위상에 따라 동아시아 지역에서 강수와 기온, 순환 아노말리에 대하여 매든-줄리안 진동(MJO)/계절내 진동(ISO)의 영향에 대하여 고찰하였다. MJO의 중심이 동인도양에 위치한 3번 위상과 MJO의 중심이 서반구에 위치한 8번 위상에서 한반도의 겨울철 강수 패턴이 비선형적으로 나타난다. 이 두 위상에서 MJO의 강도가 2보다 작은 경우 양의 아노말리가 나타나는 반면에 2보다 큰 경우 음의 강수 아노말리가 나타났다. MJO 강도가 클 때 나타나는 이러한 음의 강수 아노말리는 한반도가 고기압성 아노말리 영역에 놓이고 북풍계열의 바람에 의한 한랭 건조한 바람의 이류에 의해 형성된다. 또한 본 연구에서는 여름철 ISO의 동진 및 북진 전파 위상에 따른 강수와 순환의 반응을 연구하였다.

주요어: 매든-줄리안 진동, 계절내 진동, 비선형 반응, 한랭이류, 강수 아노말리

서론

매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation, MJO)은 적도 지역에서 10년간의 바람자료를 분석하여 처음 발견한 인도양의 적도 부근에서 발생하는 강한 구름을 동반한 대규모 파동을 일컫는다(Madden and

Julian, 1971, 1972). 발견자의 이름을 따 매든-줄리안 진동이라고 하며, 계절내 진동(intraseasonal oscillation, ISO)으로도 부른다. 일반적으로 MJO는 인도양 서부 적도지역에서부터 동태평양 지역으로 동진하면서, 30-70일 정도의 주기를 가지며 열대 지역의 계절내 변동에 가장 지배적인 역할을 하는 진동으로 알려져 있다(Madden and Julian, 1971, 1972, 1994).

MJO에 대한 연구는 처음 발견된 지역인 적도 지역을 중심으로 출발하였다(Madden and Julian 1972). 그러나 MJO와 관련된 대기 순환이 적도 지역뿐만

*Corresponding author: khseo@pusan.ac.kr
Tel: 82-51-510-2181
Fax: 82-51-515-1689

아니라 중위도 지역에서도 관측된다는 연구가 발표되고(Knutson and Weickmann, 1987), 원격강관(teleconnection)을 통해 MJO가 전 지구의 날씨와 기후에 영향을 주고 있다는 연구 결과도 발표되면서(Trenberth et al., 1998), 최근에는 MJO가 아열대 지역과 온대 지역의 기후에 어떠한 영향을 끼치는지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(Lau and Lau, 1986; Vecchi and Bond, 2003, 2004; Jeong et al., 2005; Donald et al., 2006).

MJO는 아시아, 호주 그리고 아메리카 몬순 시스템과 상호작용을 하며 그 시작과 끝을 결정하는 가장 중요한 역할을 하고, 태풍과 같은 열대 저기압에 MJO가 배경장으로 작용하여 열대 저기압의 발달과 소멸, 이동방향 등에도 영향을 준다(Lau and Chan, 1986; Wheeler and Hendon, 2004). 그러므로 MJO가 동진 할 때 동아시아 지역의 대기 순환이 변동될 수 있다. MJO는 해양에 대해서도 대류 중심의 하층에서 발생하는 강한 바람이 해수면에 강제력으로 작용되어 켈빈파를 발생시켜 엘니뇨와 라니냐의 시작과 소멸에 영향을 미치기도 한다(e.g., Seo and Xue, 2005).

MJO에 대한 연구가 적도뿐만 아니라, 그 영향을 받는 전 지구를 대상으로 많은 연구가 이루어지고 있지만, 동아시아 지역에 초점을 두고 진행된 연구는 아직 많이 부족하다. 발표된 연구들도 대부분 여름철에 비해 강한 MJO가 나타나는 겨울철에 대한 연구가 중심을 이루고 있다. 그래서 본 연구에서는 MJO에 대해서 겨울철뿐만 아니라, 여름철에 대해서도 분석하여 동아시아 지역과의 관계도 알아 볼 것이다.

본 연구는 Jeong et al.(2008)과 유사한 과정으로 분석하였다. 그들은 동아시아 지역에서 MJO와 관련된 겨울철 강수의 변화와 대규모 순환의 특성에 대해 연구하였다. Wheeler and Hendon(2004)에서 정의한 RMM index(Real-time Multivariate MJO Index)를 이용하여, MJO의 위상(Phase)을 8가지로 구분하고, MJO의 강도가 1보다 크게 나타나는 날들을 뽑아 평균하여 분석하였다. 본 연구에서는 MJO의 강도를 다르게 하여 그 위상에 따라 동아시아 지역, 특히, 한반도 지역이 어떻게 반응하는가에 대하여 살펴보았다.

자료소개와 분석방법

자료

MJO에 대한 구조를 이해하기 위하여 많이 사용되

는 방법은 EOF(Empirical Orthogonal Function) 분석이다. 분석을 통해 나오는 PC(Principal Component)를 이용하여 MJO의 생애주기를 파악하는데, Matthew(2000, 2004)에서는 성장, 발달, 쇠퇴의 한 주기내 과정을 48개로 나누어 분석했고, EOF 분석을 통해 나온 MJO의 주 모드 2개를 이용하여 그 주기를 8개로 구분하여 분석한 연구도 있다(Wheeler and Hendon, 2004; Jeong et al., 2005, 2008; Donald et al., 2006). 본 연구에서는 후자의 방법을 이용하여 분석할 것이다.

분석에 필요한 자료는 동아시아 4개국(한국, 중국, 일본, 대만) 기상청에서 제공된 기상관측소 자료(precipitation, temperature)와 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)/NCAR(National Center for Atmospheric Research) 재분석 자료(zonal wind, meridional wind, temperature (2m above ground))와 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 OLR(outgoing longwave radiation) 자료, 한국 기상청 지역모델인 RDAPS(Regional Data Assimilation and Prediction System)의 분석장을 이용하였다.

기상관측소(Weather Station) 자료

동아시아 지역의 강수와 온도를 분석하기 위해서 동아시아 4개국 기상청에서 제공된 기상관측소(Weather Station) 자료를 이용하였다. 기상관측소 강수 자료는 일 총 강수량이며, 분석 자료에서 기상관측소 선정 기준은 1979년부터 2005년까지 27년간 자료의 끊어짐이 없는 것이다. 이 기준으로 한국 60개, 중국 611개, 일본 132개, 대만 30개를 선정해 총 833개의 기상관측소에서 26개의 겨울철과 27개의 여름철 자료로 구분하여 사용하였다. 기상관측소 온도 자료는 일 평균 기온이며, 강수와 같은 기준으로 한국 60개, 중국 183개, 일본 141개를 선정해 총 342개의 기상관측소에서 27년간의 자료를 사용하였다. 일본의 온도 자료는 자료 기간이 짧아 1996년까지의 자료만을 사용하였고, 대만의 온도 자료는 확보되지 않아 분석에서 제외하였다.

OLR 자료 및 NCEP/NCAR 재분석 자료

OLR 자료는 NOAA의 극궤도 위성에 탑재되어 있는 고해상도 라디오미터로 구해지며(Liebmann and Smith, 1996), 위도와 경도가 2.5° 간격인 144×73 격자의 일평균 자료이다. 1979년부터 2006년 까지 28

년간 27(1979/1980-2005/2006)개의 겨울철(DJF; 12월, 1월, 2월)과 28(1979-2006)개의 여름철(JJA; 6월, 7월, 8월) 자료를 사용하였다.

NCEP/NCAR 재분석 자료도 OLR과 마찬가지로 위·경도 격자가 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 인 일평균 자료로 1979년부터 2006년까지 28년간의 자료를 사용했으며, 유선햘수(PSI, streamfunction)는 Zonal wind와 Meridional wind를 이용하여 구하였다.

RDAPS 자료

한반도 지역에 대하여 분석하는데 NCEP/NCAR의 자료는 해상도가 낮기 때문에, 기상장들을 보다 더 자세히 분석하기 위해서는 다른 고해상도 자료가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기상청의 지역모델인 RDAPS의 분석장을 이용하였다. RDAPS 분석장 자료는 수평해상도가 30 km(171×191)이며, 1,000 hPa부터 50 hPa까지 24개의 층과 surface 층의 자료이다. 12시간 간격(00 UTC, 12 UTC)으로 만들어진 자료로, 본 연구에서는 2000년 1월부터 2004년 12월까지의 지위고도, Zonal wind, Meridional wind를 사용하였다.

EOF 분석

많은 선행 연구들에서 MJO는 주로 OLR과 850 hPa, 200 hPa의 유선햘수 또는 수평바람 그리고 대류권 상층부의 속도 포텐셜(Velocity Potential) 자료를 이용한 EOF(Empirical Orthogonal Function) 분석을 통해 정의되었다(e.g., Matthews, 2000; Wheeler and Hendon, 2004; Seo and Kim, 2003). 본 논문에서는 OLR의 EOF 분석을 통하여 구한 PC(Principal Component) 시계열의 모드 100개를 아래의 식을 이용해 구했다.

$$OLR(x, y, t) = \sum_k EOF_k(i, j) PC_k(t) \quad (1)$$

이렇게 구한 PC 시계열의 상위 두 EOF 모드의 공간 구조는 이전의 연구(e.g., Seo et al., 2005)에서 보이는 전형적인 형태와 같으므로 여기서는 생략한다. 이 두 모드를 이용하여 동아시아 지역의 각 기상장들을 분석하였다.

합성(Composite) 분석

최근 연구에서는 MJO와 관련된 기상현상을 분석하기 위해 PC 시계열을 8개의 위상으로 구분하여

MJO의 강도가 큰 날들의 기상자료들을 평균하는 방법을 사용하고 있다(Wheeler and Hendon, 2004; Donald et al., 2006; Jeong et al., 2005, 2008).

본 연구에서도 EOF 분석을 통해 만들어진 PC 시계열을 8개의 위상으로 구분하여 하층(850 hPa 또는 950 hPa)의 유선햘수와 지상 2 m 온도, 기상관측소 강수와 온도 자료를 분석하였다. PC1과 PC2는 1 standard deviation에 대해 normalization된 값이며, 이 두 PC를 이용하여 MJO의 강도를 Matthews(2004)에서 사용된 것처럼 다음의 식을 이용하여 계산하였다. 여기서 $amp(t)$ 은 시간 t 에 따른 MJO의 강도를 말한다.

$$amp(t) = \sqrt{PC1(t)^2 + PC2(t)^2} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 MJO의 강도가 2보다 큰 값을 나타내는 날들에 대해서 평균하여 합성(composite) 분석을 하였다. 겨울철 MJO의 강도가 1인 경우 각 위상에서의 발달 과정을 나타내 보면, Fig. 1에 나타난 것처럼 강한 대류가 위상 1, 8은 아프리카와 중앙태평양; 위상 2, 3은 인도양; 위상 4, 5는 해양대륙; 위상 6, 7은 서태평양에서 나타난다. 강한 대류가 인도양에서 발생되고 이 후 동진하며 태평양의 날짜 변경선 부근에서 약화되는 모습이 뚜렷하게 나타난다. 다른 기상장들도 같은 방법으로 합성을 하였다.

겨울철 MJO와 동아시아 지역의 강수와 순환

기상관측소 강수 자료의 아노말리를 사용하여, MJO가 인도양에서 태평양으로 동진하는 동안 동아시아 지역의 강수 변화가 어떻게 나타나는지 알아보기 위해 MJO의 각 위상에 해당하는 한반도 지역 강수 자료의 합성도를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에 표시된 각 기상관측소의 값은 Monte Carlo 검증을 통과한 것들이다. 이 방법은 EOF 분석으로 산출된 평균화된 PC 시계열을 무작위(random) 추출로 같은 길이의 새로운 PC 시계열을 500 세트 생성한 뒤 본 연구에서의 방법처럼 각 지점에서 합성분석을 통해 귀무가설(null hypothesis)에 해당하는 구간을 t-test를 통해 5% 유의 수준에서 구한 후 이것을 기각하는 구간으로 신뢰수준을 결정하는 것이다.

위상 1에서는 동중국해 인근을 제외한 중국지역과 한국, 일본의 남서부, 대만의 일부지역에서 강수의

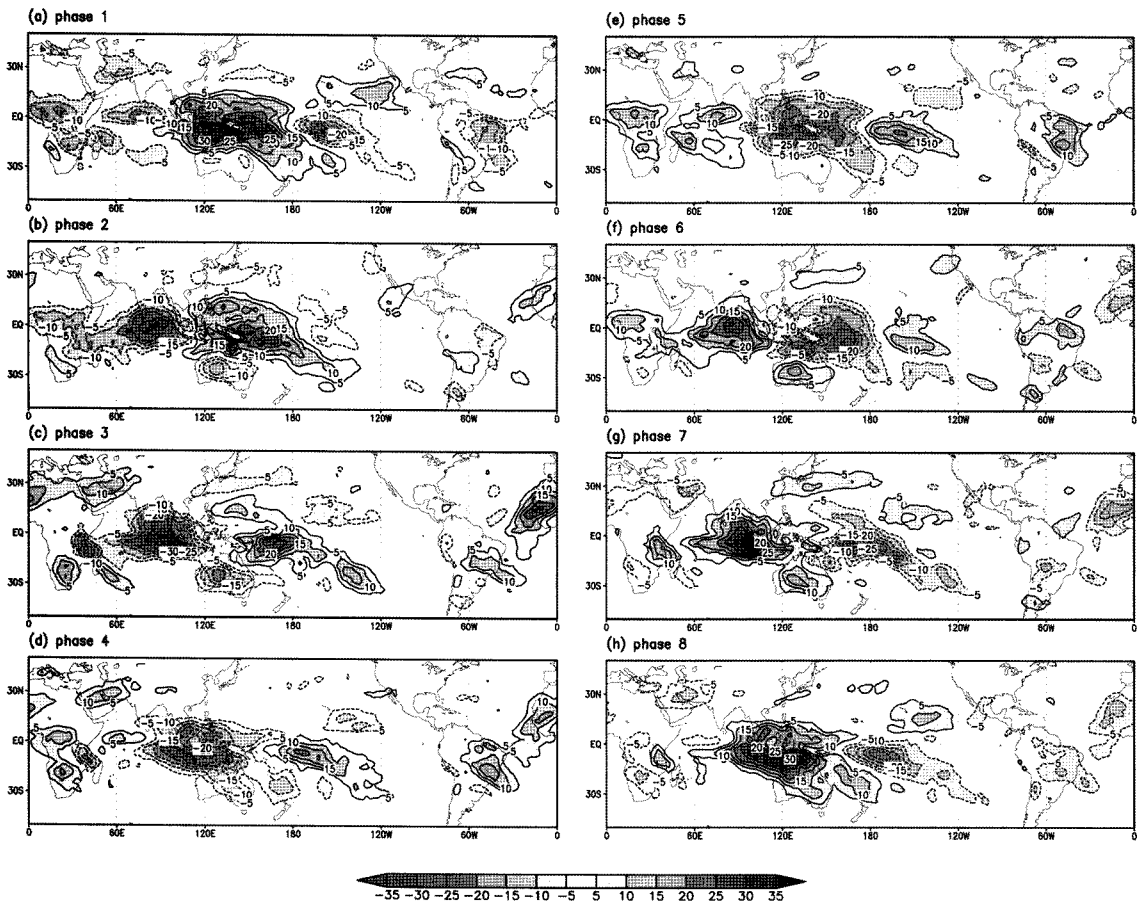


Fig. 1. DJF composite OLR anomalies for each phase. Contour interval is 5 Wm^{-2} .

양의 아노말리가 약하게 나타난다. 위상 2에서는 일본의 북동쪽에 위치한 몇 개의 기상관측소를 제외한 나머지 지역에서 강수의 양의 아노말리가 강하게 나타나는 것이 보인다. 위상 3과 5에서는 한반도, 일본 그리고 중국 화남 지역, 위상 4에서는 중국 화남 지역만 강수의 양의 아노말리가 나타난다. 위상 6과 7, 8에서는 위상 7의 한반도 중부지역, 위상 8의 화북지역과 한반도를 제외한 모든 지역에 음의 아노말리가 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. MJO가 발생하고 소멸해가는 과정동안 대체로 북동쪽과 남서쪽으로 연결된 양의 강수 아노말리 영역이 남쪽으로 이동하고 다시 음의 아노말리가 북쪽에서 형성되어 남쪽으로 이동해가는 형태를 보이고 있다.

특히 위의 강수 아노말리 패턴이 MJO의 강도에 따라 선형적인 반응이 나타나는지를 살펴보기 위하여 MJO 강도가 2인 경우의 각 위상에 대하여 강수 아노말리 합성장을 만들어 비교 하였다(Fig. 3). Fig. 2

와 3을 비교해 보면 각 위상에서 대부분의 지역이 유사한 시그널을 나타내지만 위상 3과 위상 8에서 한반도 지역의 아노말리 값이 서로 반대로 나타나는 것을 볼 수 있다. 이렇게 위상 3과 8에서 MJO 강도에 따라 비선형적인 강수의 반응이 나타남을 알 수 있다. Jeong et al.(2008)에서와 같이 각 위상을 2-3, 4-5, 6-7, 8-1으로 두 위상씩 평균하여 나타낼 경우 MJO의 강도가 2보다 큰 경우에 나타나는 위상 3과 8에서의 음의 강수 아노말리가 나타나지 않는다. 이것은 한반도 지역에서 두 위상씩 평균할 때 음의 아노말리 절대값이 양의 아노말리보다 작은 값을 나타내기 때문이다(Fig. 3).

MJO의 강도에 따라 아노말리가 다르게 나타나는 이유에 대해서 살펴보기 위해 한반도 주변의 고해상도 자료를 제공하는 RDAPS의 유선도와 지위고도 자료를 분석해 보았다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 위상 3에서의 유선도와 지위 고도를 나타낸 것이고, (a)는

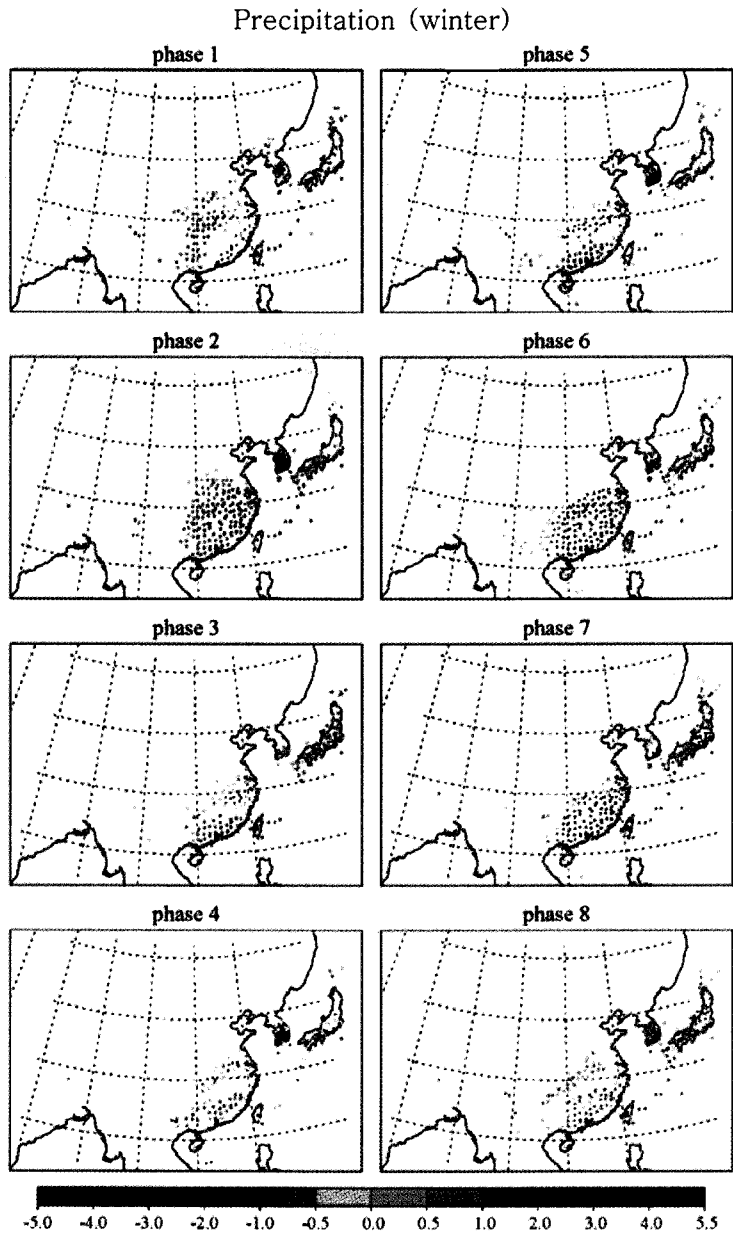


Fig. 2. DJF composite precipitation for MJO amplitude greater than 1 in Korea, China, Japan, and Taiwan. Colored regions represent the stations where the composite values are significant at the 95% confidence level.

계절내 진동의 크기가 1보다 큰 경우이며, (b)는 2보다 큰 경우를 나타낸 것이다. Fig. 4a와 Fig. 4b 모두 북풍계열 바람의 영향을 받고 있으나 강도가 2보다 큰 경우가 북풍이 더 강함을 알 수 있다. 또한 Fig. 5a와 Fig. 5b에서 보이는 것과 같이 한반도가 MJO의 강도가 2보다 큰 경우가 1보다 큰 경우보다 강한 고기압의 영향을 받고 있고 북풍계열의 바람이

세계 불고 있음을 유추할 수 있다. 즉 이렇게 한반도가 고기압의 영향에 놓이고 이 고기압의 오른쪽 연변에서 북풍에 의한 한랭 이류에 의해 음의 강수 아노말리가 형성되는 것이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 위상 8에 대해 각각 950 hPa의 유선도와 지위고도를 Fig. 4와 Fig. 5를 나타낸 것과 같은 방법으로 도식한 것이다. Fig 6a와 Fig. 7a에서

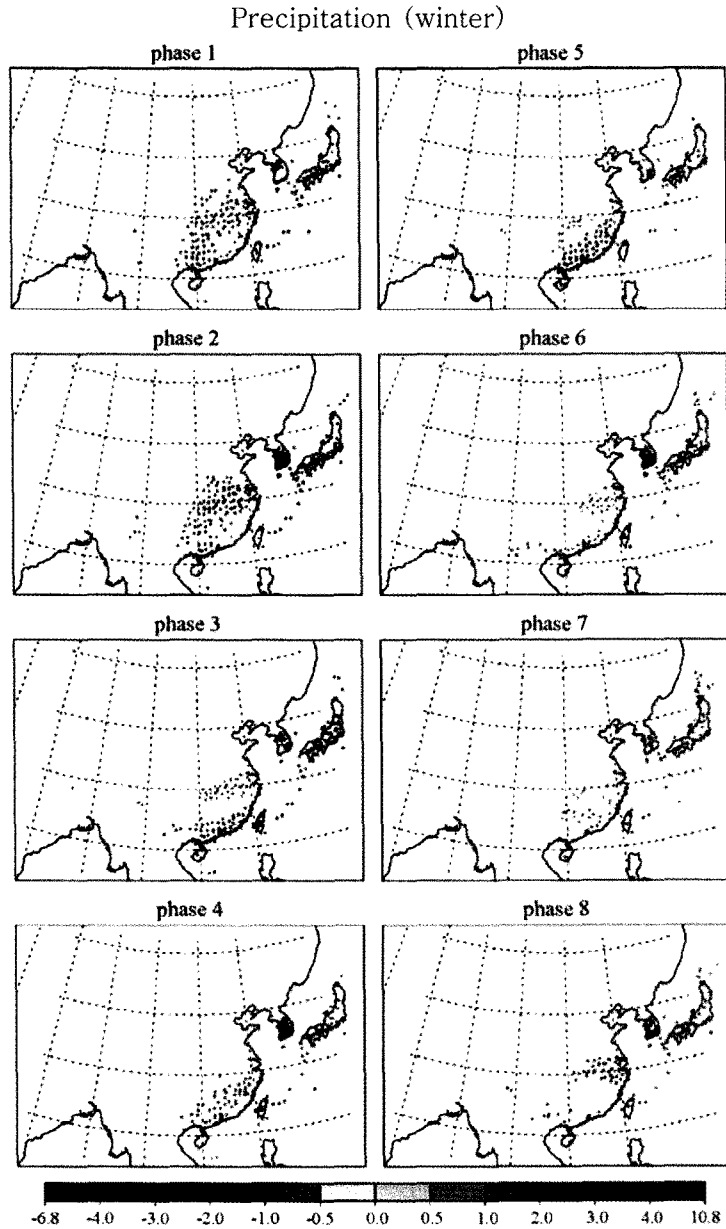


Fig. 3. Same as Fig. 2 except for MJO amplitude greater than 2.

한반도 지역은 동쪽과 남쪽 해양에서 불어오는 바람의 합류(confluence)가 이루어지고 있어 온난 습윤 이류에 의하여 양의 강수 아노말리가 형성되었다(Fig. 2). 하지만 강도가 2보다 큰 경우인 Fig. 6b와 Fig 7b에서는 위상 3처럼 고기압의 중심에 가까이 위치하고 있고 중국 지역에서 불어오는 북풍과 북동풍의 영향을 받고 있어 한랭 건조 이류가 있음을 알 수 있다. 이로써 음의 강수 아노말리가 만들어졌다. Fig.

8은 zonal wind(또는 meridional wind)를 MJO 강도가 2보다 큰 값에 대해 합성 분석한 것과 1보다 큰 값들을 합성 분석한 것의 차이가 통계적으로 유의한지를 t-test를 사용하여 80%의 신뢰구간에 대해 shading하여 wind vector와 함께 나타낸 것이다. Fig. 8a와 Fig. 8b에서 한반도지역이 북쪽에서 내려오는 바람의 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 95% 신뢰도를 만족시키지 않는 것은 Fig. 4에서 7까지에

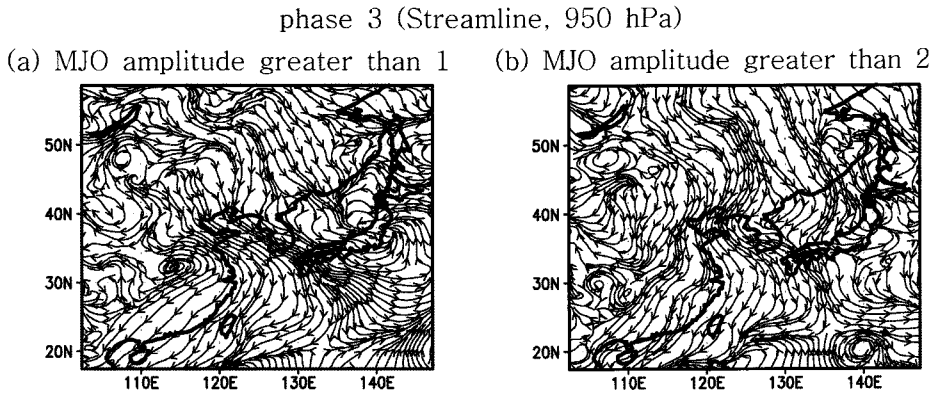


Fig. 4. 950 hPa streamline in phase 3 when MJO amplitude is greater than (a) 1 and (b) 2.

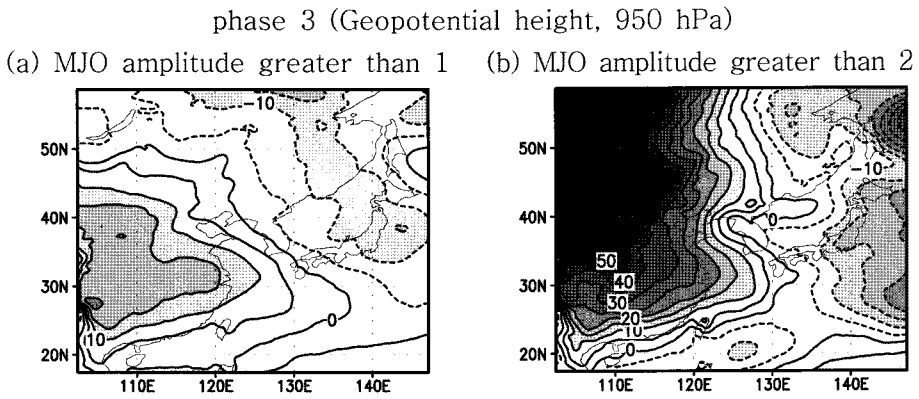


Fig. 5. Same as Fig. 4 except for 950 hPa geopotential height.

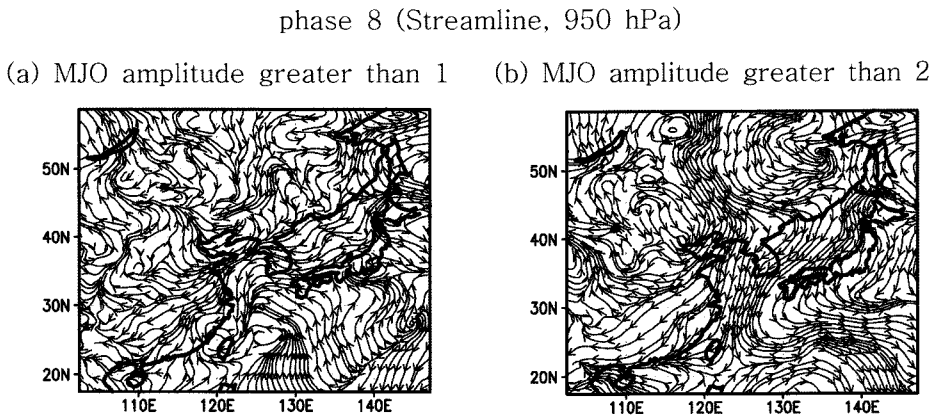


Fig. 6. Same as Fig. 4 except for phase 8.

서 보이는 패턴 이외의 형태가 있음을 암시하며 중 위도 자체의 대기 역학적 요소가 존재하는 등 MJO의 반응이 실제 대기 순환에서는 복잡함을 의미한다.

Fig. 9는 앞서 나타낸 기상관측소 자료와 NCEP/NCAR 자료를 이용하여 한국 주변 지역(위도 34°N-

41°N, 경도 123°E-131°E)의 영역에 대해 각 기상장들의 평균을 구하여 지연상관 관계를 나타낸 것이다. 위상 1에서 4까지 기온의 최고점과 최저점이 먼저 나타난 후 강수의 최고점과 최저점이 나타나며, 위상 5에서 8까지는 두 값이 함께 나타나는 것을 알 수

phase 8 (Geopotential height, 950 hPa)

(a) MJO amplitude greater than 1 (b) MJO amplitude greater than 2

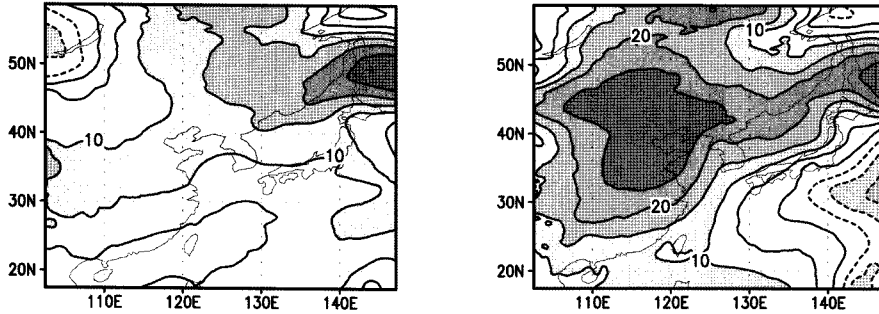


Fig. 7. Same as Fig. 5 except for phase 8.

(a) phase 3

(b) phase 8

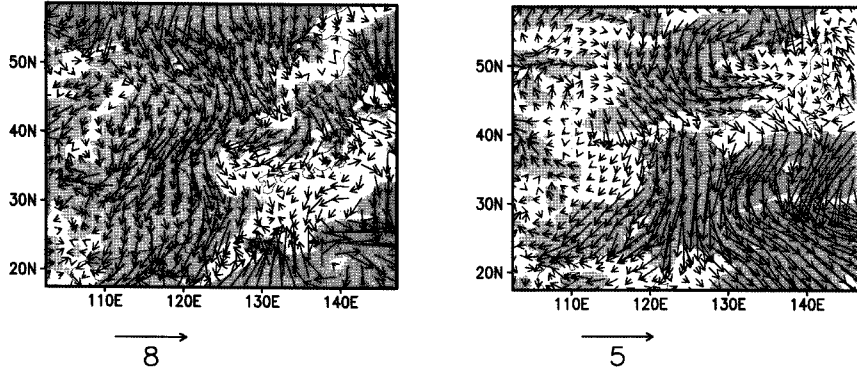


Fig. 8. 950 hPa wind difference between MJO amplitudes greater than 2 and greater than 1 for phases 3 and 8. Shaded regions are significant at the 80% confidence level.

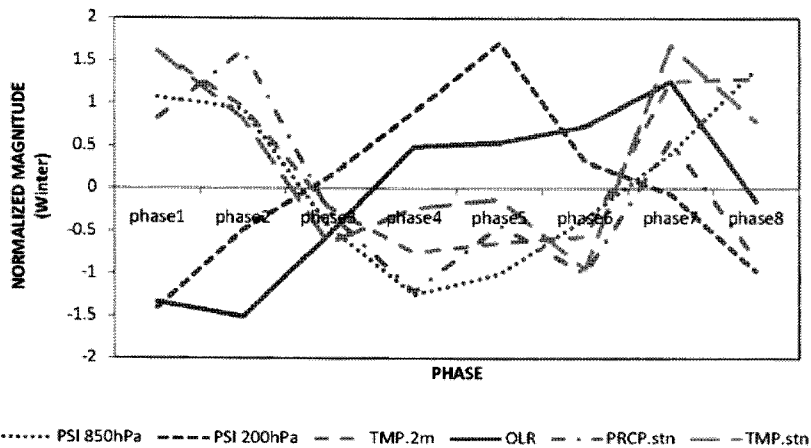


Fig. 9. Lead-lag relationship among each climatological anomalies over Korea (34°N-41°N, 123°E-131°E).

있다. 이것으로 북풍에 의한 한랭 건조 이류가 음의 강수 아노말리를 만드는 중요한 요소임을 알 수 있

으며 위에서 분석한 결과와 일치된다.

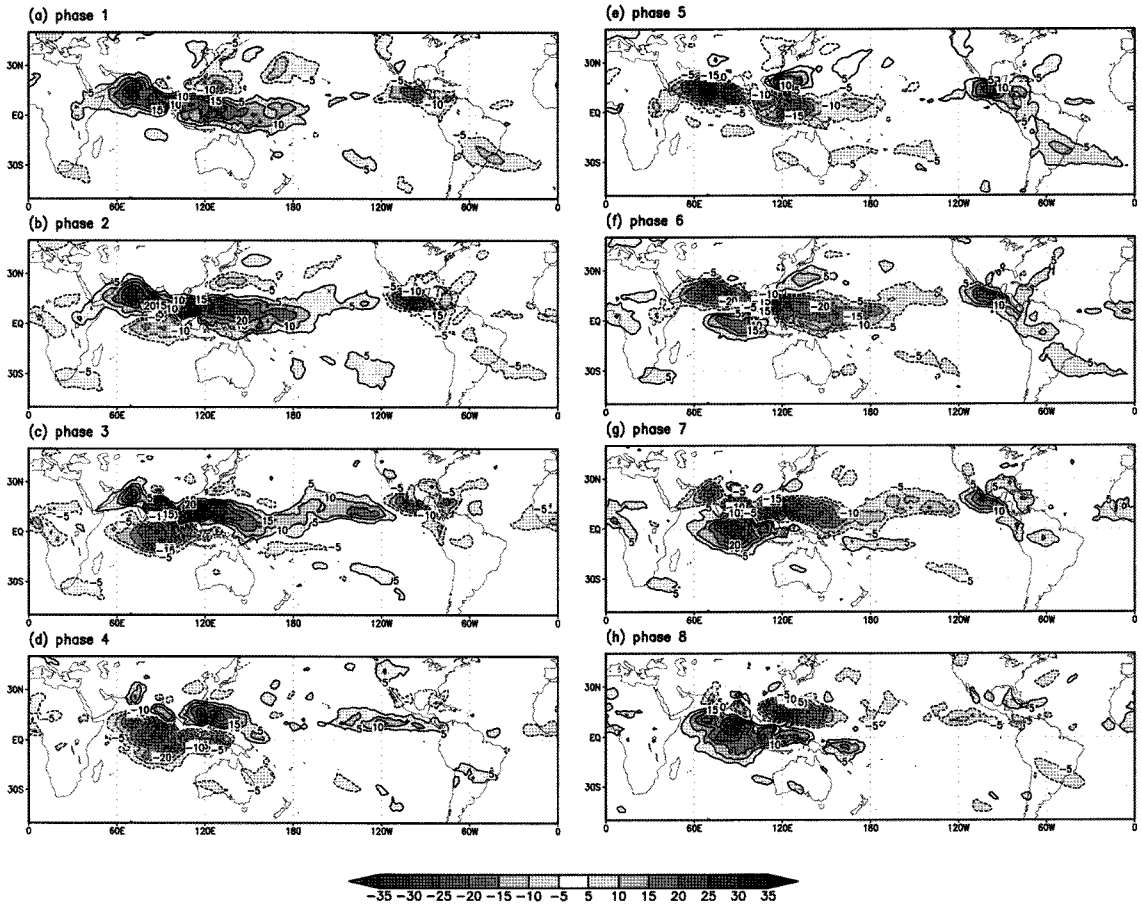


Fig. 10. Same as Fig. 1 except for summer.

여름철 ISO와 동아시아 지역의 강수와 순환

여름철 ISO의 시스템은 겨울철과 다르게 상당히 복잡한 패턴을 가진다. 겨울철에는 MJO가 태평양을 향해 동진해가는 것이 뚜렷하게 나타나지만, Fig. 10에서 보는 바와 같이 여름철에는 인도양의 적도 부근에서 발생된 대류가 점차 강해지면서 북쪽으로 이동하고, 일부는 서태평양을 향해 동진하며 길게 늘어진 형태가 만들어진다(Seo et al., 2007). 해양대륙을 지에서서태평양으로 이동하는 동안 남쪽으로 약하게, 북쪽으로 약오르게 양방향으로 퍼지는 것이 보인다. 대류가 동태평양에 도달하는 동안 남쪽으로 향하던 것은 사라지고, 동태평양에서 다소 약한 대류와 남중국해에서 로 이대류가 남게 되며, 이 과정이 반복된다. 이처럼 여름철의 ISO 시스템은 동쪽으로 전파하는 MJO뿐만 아니라 북서쪽 또는 북쪽으로 전파

하는 성분을 포함하고 있다. OLR의 여름철 EOF1과 EOF2는 이러한 두 성분을 모두 잘 반영하고 있으므로 본 연구에서 ISO는 여름철 계절내 진동으로 지칭한다.

Fig. 11은 Fig 3과 같은 방법으로 만들어졌으며 여름철의 강수를 나타내고 있다. 여름철에는 겨울철의 강수 패턴과는 달리 강수의 분포가 복잡한 형태로 나타난다. 가령, 위상 1이나 6에서처럼 한반도는 양의 강수 아노말리와 음의 강수 아노말리가 혼재된 상태를 보인다. 하지만 전체적으로 위상 1에서 중국 남부지역과 대만에서 형성된 양의 강수 아노말리가 점차적으로 북진하여 위상 3에서는 한반도에서 나타나는 형태이다. 한편, 이 때 중국 남부지방에 형성된 음의 아노말리가 시간이 지남에 따라 북쪽으로 이동하여 화중지방 그리고 한반도에 음의 아노말리가 나타나는 생애주기 형태를 보인다.

Fig. 12는 한반도 주변 지역을 영역 평균하여 구한

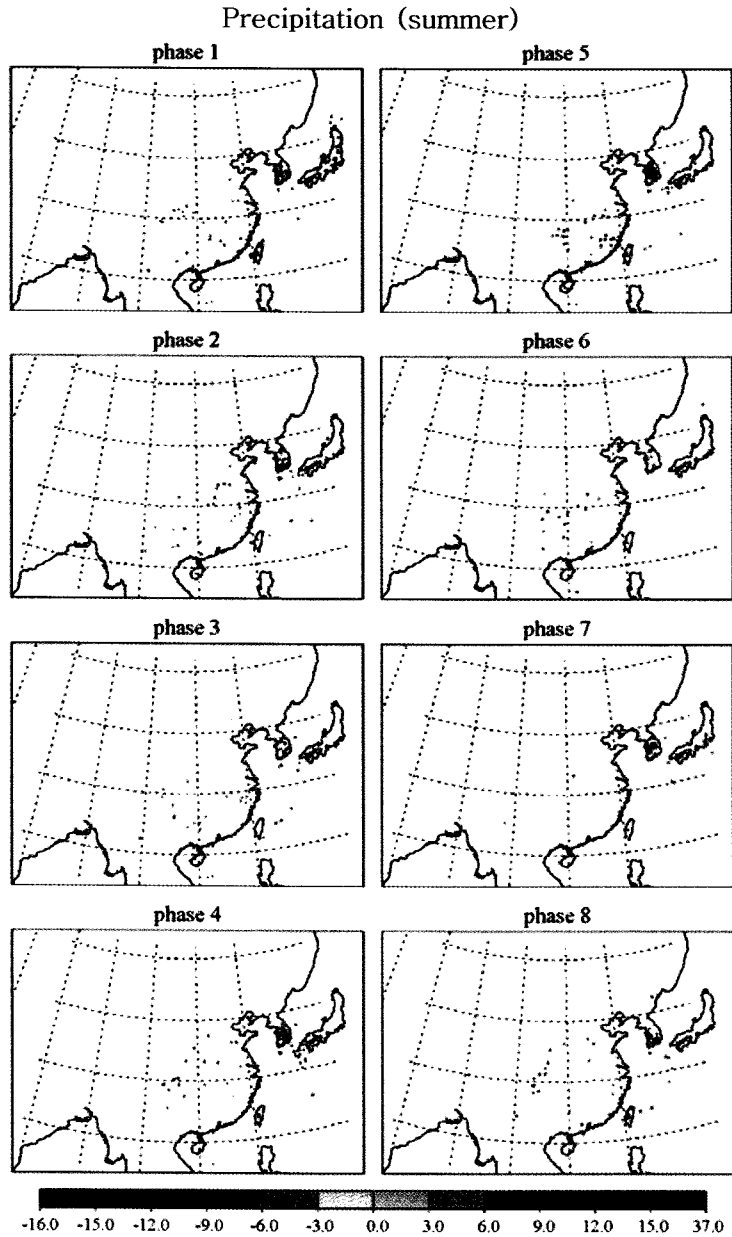


Fig. 11. Same as Fig. 3 except for summer.

값으로 만든 지연상관 관계 그래프로 겨울철에는 기온과, 강수, 850 hPa 유선함수가 유사하게 나타나지만(Fig. 9), 여름철에는 음과 양의 아노말리가 반복되는 복잡한 패턴을 보인다. 위상 1에서 850 hPa 유선함수의 최소값이 나타나고, 위상 5에서 최대값을 나타낸다. 기온은 그 보다 위상이 2단계 지난 후에 최소값과 최대값을 보이고 있으며, 강수는 기온보다 최소값은 2 위상 이후, 최대값은 1 위상 후에 나타난다.

여름철에는 비록 복잡한 형태로 변화 하지만, 전체적인 흐름을 보면 MJO가 인도양 부근에서 강하게 발생하는 위상 3-6까지는 강수의 음의 아노말리가 강하고, 남중국해에서 강하게 나타나는 위상 7, 8, 1에서는 양의 아노말리가 강하게 나타나는 것을 알 수 있다. 겨울철과 달리 여름철 ISO의 발생/소멸 과정이 인도양에서 방사형으로 퍼져나가는 복잡한 구조를 보이는데, 동아시아지역 기상장들의 복잡한 변화가 이

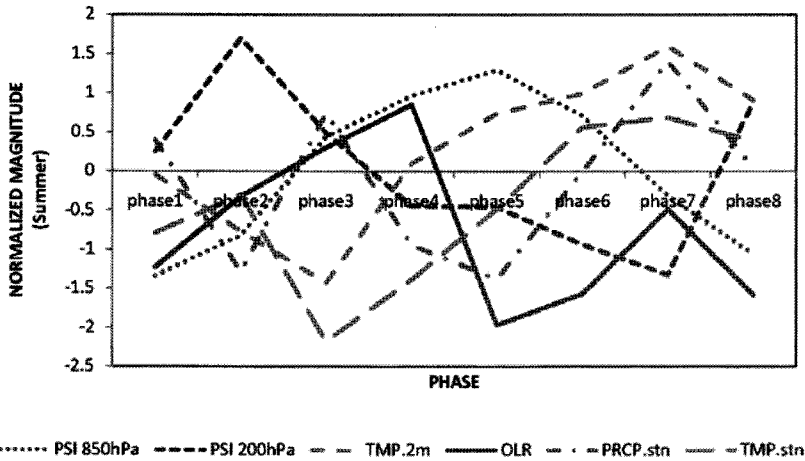


Fig. 12. Same as Fig. 9 except for summer.

여름철 ISO의 영향으로 인해 복잡한 형태를 나타내는 것으로 생각된다. 이러한 복잡한 패턴을 형성하는 이유에 대한 자세한 분석은 다음의 기회로 미룬다.

요약 및 결론

본 연구에서는 적도 부근에서 발생하여 강한 구름을 동반하는 대규모 파동인 매든-줄리안 진동과 한반도와 그 주변 지역의 강수량, 기온, 바람장과의 관계를 겨울철과 여름철로 구분하여 살펴보았다. OLR을 EOF 분석하여 2가지의 PC 모드를 구하고, 그 시계열을 이용하여 MJO의 생애주기를 8개 위상으로 구분하였으며, MJO의 강도를 다르게 하여 그 값보다 크게 나타나는 날들에 대해 강수량, 기온, 바람장 자료를 합성하여 MJO의 위상에 반응하는 아노말리 패턴을 살펴보았다.

겨울철에는 MJO의 패턴이 뚜렷하게 나타나며, MJO가 발생하고 소멸해가는 과정동안 대체로 북동쪽과 남서쪽으로 연결된 양의 강수 아노말리 영역이 남쪽으로 이동하고 다시 음의 아노말리가 북쪽에서 형성되어 남쪽으로 이동해가는 형태를 보이고 있다. 그러나 MJO의 강도를 달리 하였을 경우 위상 3과 8에서 한반도 지역의 아노말리 값이 서로 반대로 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이러한 비선형적인 강수의 반응은 MJO의 강도가 2보다 큰 경우 고기압성 아노말리의 중심이 한반도의 왼쪽에 놓이면서 북풍계열의 한랭 건조한 바람의 이류에 의해 나타나며, 한반도 지역에 음의 강수 아노말리가 만들어짐을 알 수 있었다.

여름철에는 ISO의 동쪽 전파 성분이 겨울철에 비해 상대적으로 약하게 나타나고 여름철 ISO의 발생에서 소멸 단계까지 이어지는 동안 복잡한 구조로 전파하는 것을 볼 수 있다. 여름철 ISO의 복잡한 전파구조에 따라 한반도 지역의 강수 아노말리 역시 다양한 패턴으로 나타났다. 위상 1과 6에서처럼 한반도에서 강수 아노말리가 양과 음의 값이 혼재되어 나타나지만, 전체적으로는 위상 1에서 중국 남부지역과 대만에서 형성된 양의 강수 아노말리가 북진하면서 위상 3에서는 한반도에 나타나며, 이 때 중국 남부지방에서 형성된 음의 아노말리도 북쪽으로 이동하며 화중지방과 한반도에 음의 아노말리가 나타나는 것을 보았다(Fig. 11).

지금까지의 분석을 토대로 하여 대기대순환 모델과 대기-해양 접합 모델 실험을 더 수행하게 된다면 분석을 통해 알게된 MJO와 동아시아 지역 기상장들과의 관계에 대한 메커니즘도 파악할 수 있을 것이라 생각된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2007-4208)의 지원으로 수행되었습니다. 본 논문이 더욱 좋게 만들어질 수 있도록 조언을 해주신 김백민, 정지훈 박사님과 익명의 심사위원님께 감사를 드립니다.

참고문헌

Donald, A., Meinke, H., Power, B., Maia, A. de H.N.,

- Wheeler, M.C., White, N., Stone, R.C., and Ribbe, J., 2006, Near-global impact of the Madden-Julian Oscillation on rainfall. *Geophysical Research Letters*, 33, L09704, doi:10.1029/2005GL025155.
- Jeong, J.-H., Ho, C.-H., Kim, B.-M., and Kwon, W.-T., 2005, Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia. *Journal of Geophysical Research*, 110, D11104, doi:10.1029/2004JD005408.
- Jeong, J.-H., Kim, B.-M., Ho, C.-H., and Noh, Y.-H., 2008, Systematic variation in wintertime precipitation in East Asia by MJO-induced extratropical vertical motion. *Journal of Climate*, 21, 788-801.
- Kemball-Cook, S. and Weare, B.C., 2001, The onset of convection in the Madden-Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 14, 780-793.
- Knutson, T.R. and Weickmann, K.M., 1987, 30-60 Day Atmospheric oscillations: Composite life cycles of convection and circulation anomalies. *Monthly Weather Review*, 115, 1407-1436.
- Lau, N.-C. and Lau, K.-M., 1986, The structure and propagation of intraseasonal oscillations appearing in a GFDL general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43, 2023-2047.
- Liebmann, B. and Smith, C.A., 1996, Description of a complete (interpolated) outgoing longwave radiation dataset. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1275-1277.
- Madden, R.A. and Julian, P.R., 1971, Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28, 702-708.
- Madden, R.A. and Julian, P.R., 1972, Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29, 1109-1123.
- Madden, R.A. and Julian, P.R., 1994, Observations of the 40-50 day tropical oscillation: A Review. *Monthly Weather Review*, 122, 814-837.
- Matthews, A.J., 2000, Propagation mechanisms for the Madden-Julian Oscillation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 126, 2637-2652.
- Matthews, A.J., 2004, Atmospheric response to observed intraseasonal tropical sea surface temperature anomalies. *Geophysical Research Letters*, 31, L14107, doi:10.1029/2004GL020474
- Seo, K.-H. and Kim, K.-Y., 2003, Propagation and Initiation mechanisms of the Madden-Julian Oscillation. *Journal of Geophysical Research*, 108, 4384, doi:10.1029/2002JD002876
- Seo, K.-H., Schemm, J.-K.E., Jones, C., and Moorthi, S., 2005, Forecast Skill of the tropical intraseasonal oscillation in the NCEP GFS dynamical extended range forecasts. *Climate Dynamics*, 25, 265-284.
- Seo, K.-H., Schemm, J.-K.E., Wang, W., and Kumar, A., 2007, The boreal summer intraseasonal oscillation simulated in the NCEP Climate Forecast System (CFS): The effect of sea surface temperature. *Monthly Weather Review*, 135, 1807-1827.
- Seo, K.-H. and Xue, Y., 2005, MJO-related oceanic Kelvin waves and the ENSO cycle: A study with the NCEP Global Ocean Data Assimilation. *Geophysical Research Letters*, 32, L07712, doi:10.1029/2005GL022511.
- Wheeler, M.C. and Hendon, H.H., 2004, An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review*, 132, 1917-1932.

2009년 2월 27일 접수
2009년 6월 3일 수정원고 접수
2009년 6월 16일 채택