

여름철 계절내 진동의 기후학적 특성 분석 및 동아시아 여름 강수와 대기 순환장에 미치는 영향에 관한 연구

Understanding BSISO events and their Impact on the Characteristics of Rainfall
and Atmospheric Circulation over East Asia

오지현

여름철 계절내 진동의 기후학적 특성 분석 및 동아시아 여름 강수와 대기 순환장에 미치는 영향에 관한 연구

Understanding BSISO events and their Impact on the Characteristics of Rainfall
and Atmospheric Circulation over East Asia

오지현

발간사

짧은 시간 규모의 날씨 예측과 긴 시간 규모의 계절 예측 사이에는 2주에서 2달의 시간 규모에 해당하는 계절내 예측이 존재합니다. 최근 계절내 시간 규모에 대한 중요성이 각광을 받게 되면서 해당 시간규모의 예측력을 높이고자 하는 다양한 노력이 전 세계적으로 이루어지고 있습니다. 이에 발맞추어 APEC 기후센터는 세계 최초로 2013년 7월부터 계절내 시간 규모의 예측성을 결정하는 주요한 기상 현상 중의 하나인 여름철 계절내 진동 (Boreal Summer Intraseasonal Oscillation, BSISO) 예측 정보를 제공해오고 있습니다. 호주, 미국, 영국, 대만 등의 여섯 개의 현업 기관으로부터 실시간으로 예측자료를 제공받아 가공하여 표출되는 BSISO 예측정보는 극한 강우 현상이나 폭염 등과 같은 이상 기후 현상을 예측하는데 활용되어 기상재해로부터 아시아-태평양 지역의 인명 및 재산 피해를 줄이는데 이바지할 수 있습니다.

본 연구는 BSISO 예측 정보 사용자의 이해를 돕고, APEC 기후센터에서 제공하는 예측 정보의 활용성을 증진시키고자 수행되었습니다. 이를 위하여 BSISO의 기후학적인 특성을 분석하고 BSISO가 한반도를 포함한 동아시아 여름철 강수 및 대기 순환에 미치는 영향과 그 메커니즘을 규명하였습니다. 또한 BSISO 지수를 바탕으로 한 장마 시작일 예측 가능성을 제안하였습니다. 본 연구 결과가 상대적으로 예측력이 낮은 여름철 동아시아 몬순 시스템에 대한 이해도를 높이고, 많은 인구가 밀집된 동아시아 국가의 효율적인 물 관리에 기여할 수 있기를 바랍니다.

본 연구를 맡아 수행한 APEC 기후센터의 오지현 박사의 노고에 감사를 드립니다. 아울러 연구수행에 자문과 조언을 해 주신 부산대학교 이준이 교수님에게도 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 본 연구 결과를 토대로 향후 관련 연구들이 확장되고 심화되어 아시아-태평양 지역의 이상기후 감시에 유용하게 쓰일 수 있기를 기대합니다.

2017년 1월
APEC 기후센터
원장 정 홍 상

ABSTRACT

The East Asian Summer Monsoon (EASM) is characterized by a distinct rainy spell that lasts for several weeks. A zonally elongated rain band during the rainy period migrates northward from the Yangtze River valley in China to Korea. The rainy season, called “Changma” in Korea, “Meiyu” in China, and “Baiu” in Japan, is vital to water management in populous East Asian countries. In particular, the rainfall amount during Changma accounts for 30% of the total annual precipitation in Korea. Therefore, it is critical to predict the onset of the rainy season for the effective planning regarding water storage and supply over the East Asian region.

The Boreal Summer Intraseasonal Oscillation (BSISO) is one of important sources of EASM variability, and affects the onset of summer monsoon precipitation. In order to support the protection of lives and property in the APEC countries from natural atmospheric hazards, the APEC Climate Center (APCC) has disseminated BSISO forecast based on BSISO indices since 2013. This study aims to advance our understanding of BSISO and facilitate the application of BSISO forecast by investigating climatological aspects of BSISO and its features, which modulate the rainfall and atmospheric circulation over East Asia. Commonality and dissimilarity between BSISO1 and BSISO2 are mainly discussed.

Phase 4 of BSISO1 and phase 6 of BSISO2 are closely related to an increase in rainfall amounts over East Asia based on observed precipitation data, spanning from 1981 to 2010. During these two phases, both BSISO1 and BSISO2 accompany low-level anticyclonic circulation over the Philippine Sea, supplying moisture to East Asia. It is shown that the Philippine Sea anticyclone during phase 4 of BSISO1

is associated with a teleconnection pattern extending from the western tropical Pacific to North America, which is revealed in the composite of the geopotential height at 500hPa. However, the Philippine Sea anticyclone for phase 6 of BSISO2, is only pronounced over the East Asia region as a part of the meridional tripole pattern. The difference in the large-scale spatial pattern between phase 4 of BSISO1 and phase 6 of BSISO2, is attributed to the different horizontal distribution of convective heating anomalies.

In addition, dissimilarity in vertical circulation is remarkable between phase 4 of BSISO1 and phase 6 of BSISO2. While the zonal vertical circulation is dominant for phase 4 of BSISO1, the meridional vertical circulation is salient for phase 6 of BSISO2.

The relationship between Changma onset and the occurrence of phase 4 (6) of BSISO1 (2) from 1981 to 2016 is further investigated. 5 out of 36 cases of Changma onset occur in phase 4 of BSISO1, whereas 8 out 36 cases of Changma onset concur with phase 6 of BSISO2. Intriguingly, the Changma onset is concurrent with phase 4 of BSISO1 in the ensuing summer of El Nino. Based on analysis of 30 years of BSISO indices, it is found that a monthly variation of BSISO phase exists. The amplitude of BSISO2 phase 6 is at its maximum in June, in conjunction with an onset of rainy season in East Asia.

BSISO events for the last 30 years are categorized into propagating cases and non-propagating cases in this study by applying objective criteria based on previous studies. As a result, the average duration of each event is approximately 10 days, and each event tends to propagate through 3 successive phases on average, maintaining its amplitude greater than unity. Also BSISO2 has the most propagating events in June, which could be related to the development of EASM rainfall.

목 차

1. 서론	1
2. 연구 자료 및 방법	3
3. 연구내용	4
3.1 BSISO 두 모드에 의한 동아시아 강수의 영향	4
3.2 BSISO 두 모드와 관련한 대기순환장의 특징	9
3.2.1 하층 대기순환장 패턴	9
3.2.2 남북 순환장의 연직 패턴	12
3.2.3 중층 지위고도 편차 패턴	14
3.2.4 BSISO 두 모드의 열원과 대기 순환	18
3.3 BSISO 사례의 기후학적 분석	22
3.3.1 BSISO 지수를 바탕으로 한 기후학적 특성	22
3.3.2 이동특성에 따른 BSISO 사례 구분	29
3.4 장마와 BSISO와의 관련성	32
4. 결론 및 토론	36
Ⅰ REFERENCE	39

1. 서론

북반구 여름철의 많은 강수 현상은 동아시아 여름 몬순의 주요한 특징 중의 하나로, 많은 인구가 밀집된 동아시아 (북위 22.5° - 44° , 동경 110° - 135°) 국가의 물 관리에 중요한 역할을 한다. 여름 몬순 기간 동안 중국의 메이유 (Meiyu), 한국의 장마, 그리고 일본의 바이우(Baiu)는 수평으로 늘어진 강수대를 형성하며 2-3주간에 걸쳐 많은 양의 강수를 동반한다. 특히 장마 기간에 내리는 강수량은 남한 연강수량의 30%를 차지하는 만큼, 여름 몬순 기간 내의 이러한 강수 시기의 시종을 예측하는 것은 사회·경제적으로 매우 중요한 일이라 할 수 있다. 동아시아는 지리적으로 육지와 해양이, 그리고 아열대와 중위도가 접하는 곳에 위치함으로 인하여 기상학적으로 아주 복잡한 특징을 갖는다. 게다가 대기권 상층 제트 기류의 남북 방향으로의 움직임이 여름 몬순의 예측의 복잡성을 가중시킨다. 또한 다양한 시공간 규모의 기상 현상의 영향을 받는 까닭에 (Lau et al., 1998), 현재까지 동아시아 여름 몬순에 대한 많은 연구가 진행되어 왔음에도 불구하고, 여전히 동아시아 여름 몬순의 강수 현상에 대한 예측력을 떨어지는 실정이다 (Yim et al., 2016).

여름철 계절내 진동(Boreal Summer Intraseasonal Oscillation: 이하 BSISO)은 여름 몬순의 변동성에 영향을 미치는 중요한 기상 현상 중의 하나로 알려져 있다 (Lau et al., 1988; Annamalai and Slingo 2001; Goswami et al., 2006). 북쪽으로 진행되는 특징과 함께 동쪽 혹은 서쪽으로 움직이는 특징을 모두 가지고 있는 BSISO는 30-60일 또는 10-25일의 주기성을 가지며 (Annamalai and Slingo 2001; Krishnamurthy and Achuthavarier, 2012), 동아시아 여름 몬순 기간 동안 동아시아 지역의 강수의 시종에 영향을 미친다 (Fukutomi and Yasunari, 1999). Lau et al. (1987)은 20일과 40일 주기의 모드가 연주기 성분과 강하게 연결되어 동아시아 지역의 강수의 시작과 종료를 결정한다고 강조한 바 있다.

BSISO현상을 효과적으로 탐지하기 위해, Lee et al. (2013)은 일평균 상향장파복사량 (Outgoing Longwave radiation) 과 850hPa의 동서바람 자료의 다변량 경험적 직교함수의 처음 네 개의 주성분 모드를 이용하여 여름철 계절내 진동 지수를 정의하였다. 5월부터 10월에 해당하는 기간 동안 아시아 몬순 지역(10° S- 40° N, 40° - 160° E)을 바탕으로 한 이 지수는 BSISO 두 모드의 실시간 모니터링과 예측을 가능하게 한

다. 본 연구에서는 30-60일 주기 성분을 제 1 여름철 계절내 진동 지수 (BSISO1), 10-25일 주기 성분을 제 2 여름철 계절내 진동 지수 (BSISO2)로 지칭하도록 하겠다. BSISO1 지수는 앞서 언급한 다변량 경험적 직교함수 분석 결과 도출되는 첫 번째, 두번째 모드의 주성분 시계열을 바탕으로 정의되며, BSISO2 지수는 세 번째, 네 번째 주성분 시계열을 바탕으로 정의 된다. 보다 자세한 BSISO 지수에 대한 설명은 Lee et al. (2013)을 참고하기 바란다.

2013년부터 에이펙 (Asia-Pacific Economic Cooperation; APEC) 기후 센터는 BSISO지수를 바탕으로 한 계절내 진동 예측 정보를 제공함으로써 기상 재해로부터의 에이펙 지역 내 개발 도상국의 인명 및 재산 피해를 줄이고자 하였다. 그러나 BSISO 지수의 복잡성으로 인해 현재까지 사용자의 이해도가 낮고 이로 인해 예측정보의 활용 또한 미미한 실정이다. 본 연구는 동아시아 여름철 강수와 대기 순환에 영향을 주는 BSISO1, BSISO2 두 개 모드의 특징을 차이점과 유사점을 중심으로 밝히고, 과거 30년에 대한 여름철 계절내 진동 사례의 통계 기후학적인 특징, 그리고 우리나라 장마 시작과의 연관성에 대해 기술함으로써 사용자의 이해도를 높이고 예측정보의 활용성을 증대시키고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

본 연구를 위해 1981년부터 2010년의 5월부터 9월 동안의 여름철 계절내 진동 지수가 사용되었다 (<http://www.apcc21.org/ser/moni.do?lang=en>). 동아시아 여름 몬순 기간의 강수 현상에 대한 BSISO의 영향력을 알아보기 위해 미국 국립 해양 대기청 (National Oceanic and Atmospheric Administration: NOAA)의 일평균 상향 장파복사 자료가 사용되었다. $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 의 수평 해상도를 갖는 이 자료는 1981년부터 2010년에 해당하는 기간 동안 BSISO와 관련 한 깊은 적운 대류 활동을 탐지하기 위해 활용되었다. $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 고해상도 격자 자료인 관측 APHRODITE (Asian Precipitation—Highly Resolved Observational Data Integration Towards Evaluation of Water Resources) 강수 자료가 1981년부터 2007년에 해당하는 기간에 대하여 사용되었다 (Yatagai et al., 2012). 미국 국립환경예보센터 (National Centers for Environmental Prediction: NCEP)의 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 수평 해상도를 갖는 기후 예측 시스템 재분석 자료 (Climate Forecast System Reanalysis: CFSR)를 바탕으로 BSISO와 관련한 대기 순환장의 특징을 살펴보았다.

계절내 진동 두 모드의 특성을 분석하기 위해 주로 합성 분석 (composite analysis)을 주로 수행하였으며 이를 위해 모든 자료는 1981년부터 2010년 (APHRODITE는 1981-2007년)의 조화분석으로 구한 기후학적 연주기의 처음 세 개 조화성분을 제거한 후 사용하였다.

3. 연구내용

3.1 BSISO 두 모드에 의한 동아시아 강수의 영향

계절 내 진동 두 모드가 동아시아 강수에 미치는 영향을 알아보기 위해 BSISO 지수의 강도가 1.5를 초과하는 날들만을 선택하여 합성 분석에 사용하였다 (Figs 1,2). 지수 강도에 따른 합성장 분석 결과를 비교한 결과 BSISO 지수의 강도가 1.0 이상인 날들을 선택한 합성 분석의 결과 (Figs. 3, 4)와 크게 다르지 않았고, 실제 현업에서도 BSISO 현상을 정의하기 위해 강도가 1.0 이상인 경우를 선택한다. 그러나 보다 특징이 두드러진 현상만을 추출해 내기 위해 본 연구의 합성 분석 방법에는 1.5의 기준 값을 사용하기로 결정하였다. 다만 BSISO 지수의 강도가 1.0 미만인 경우 (Figs. 5,6) 그 공간 특성이 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 각 위상 별 BSISO 지수의 강도가 1.5를 초과하는 날들의 수는 Figs 1, 2의 좌측 상단에 각각 나타내어져 있으며 평균 190일에 이른다. Lee et al. (2013)에 자세히 기술되어 있는 것과 같이, BSISO1과 관련한 상향장파복사 아노말리 합성장 분석 그림의 위상 1 시기에 인도양에서 발달한 대류대가 남동-북서 방향으로 기울어진 채 동진하다가 아라비아해, 벥골만, Maritime Continent에 이르는 위상 3부터 북진하는 특징을 보인다. 이는 Lau and Chan (1986), Anamalai and Slingo (2001)에서 밝힌 40일 주기의 계절내 진동 모드의 발달 패턴과 일치한다. 그림 1의 위상 3-5의 경우 동아시아 지역에 활발한 대류활동이 나타난다.

반면에 인도양과 서태평양에 걸쳐 남서-북동 방향으로 기울어진 대류대가 역시 북진하는 경향을 BSISO2 합성 분석장에서 보이고 있다. 활발한 대류대의 후면에 대류활동이 억제된 지역이 뒤따르는 것을 확인할 수 있으며 이러한 공간적인 발달 과정은 Chen and Sui (2010), Jia and Yang (2013)의 결과와 유사한 경향을 보인다. 그림 2의 경우 활발한 대류대를 나타내는 상향 장파 복사의 음의 아노말리가 동아시아 지역에 주로 위치하는 위상은 5에서 7에 해당한다.

BSISO1

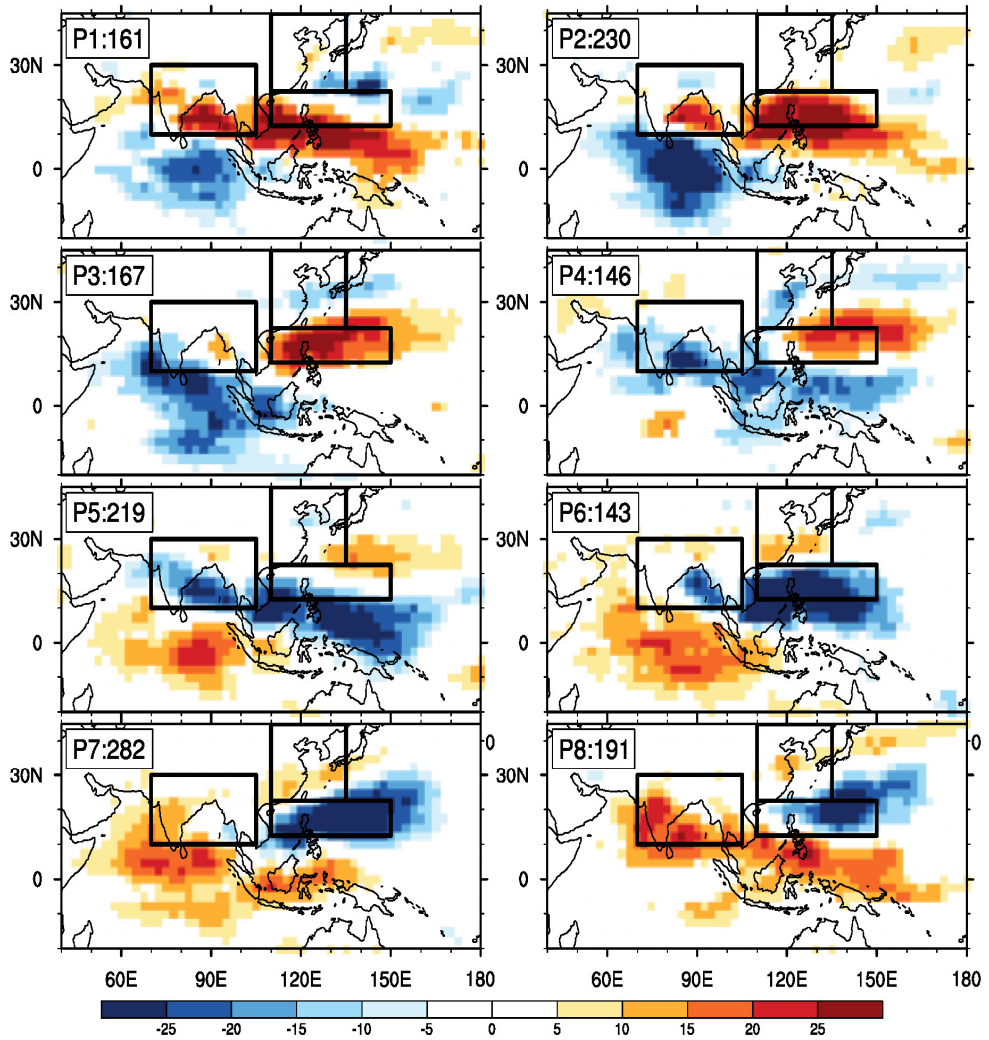


Figure 1 BSISO1 지수의 강도가 1.5를 초과한 날들만을 선택하여 구한 제 1 계절내 진동과 관련한 일평균 상향 장파복사 아노말리 합성장 아노말리 (W/m^2). 각 그림의 사각형은 주요 몬순 지역 (인도, 북서태평양, 동아시아)을 나타낸다.

BSISO2

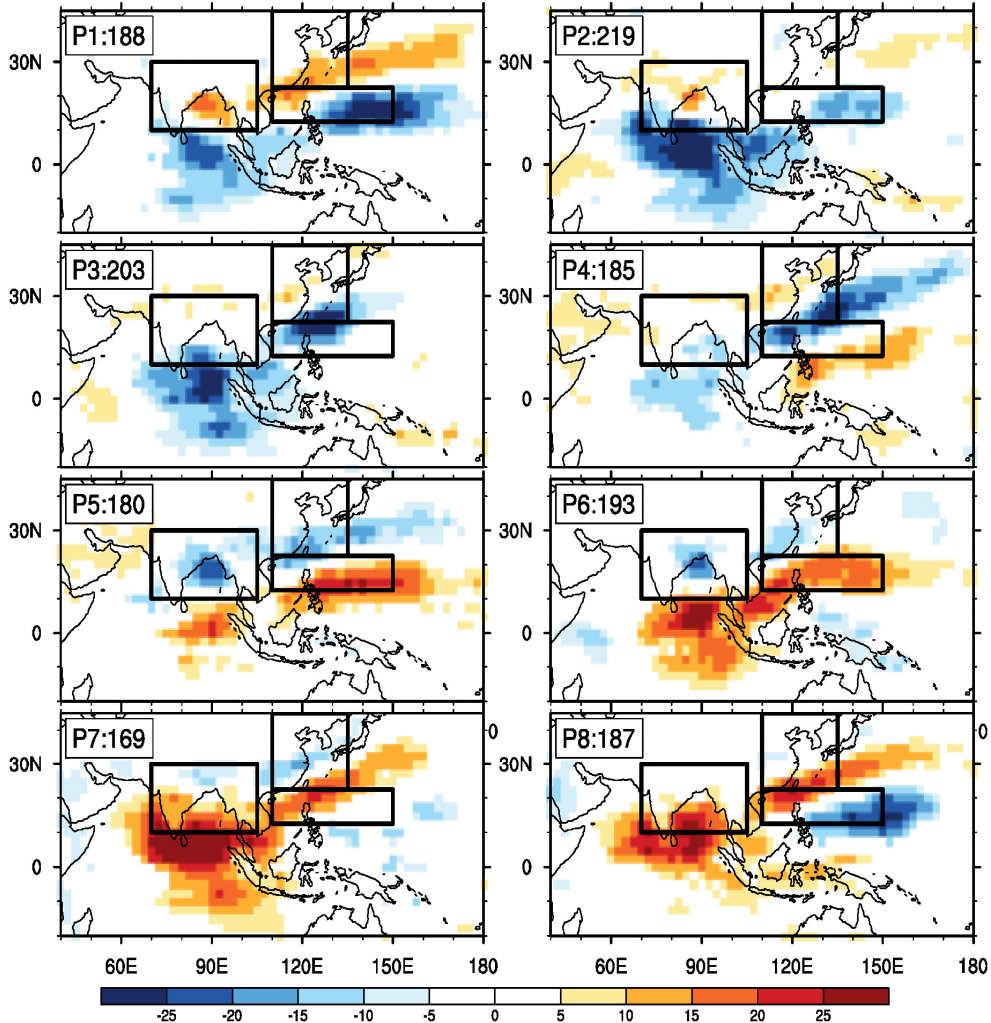


Figure 2 BSISO2 지수의 강도가 1.5를 초과한 날들만을 선택하여 구한 제 2 계절내 진동과 관련한 일평균 상향 장파복사 아노말리 합성장 아노말리 (W/m^2)

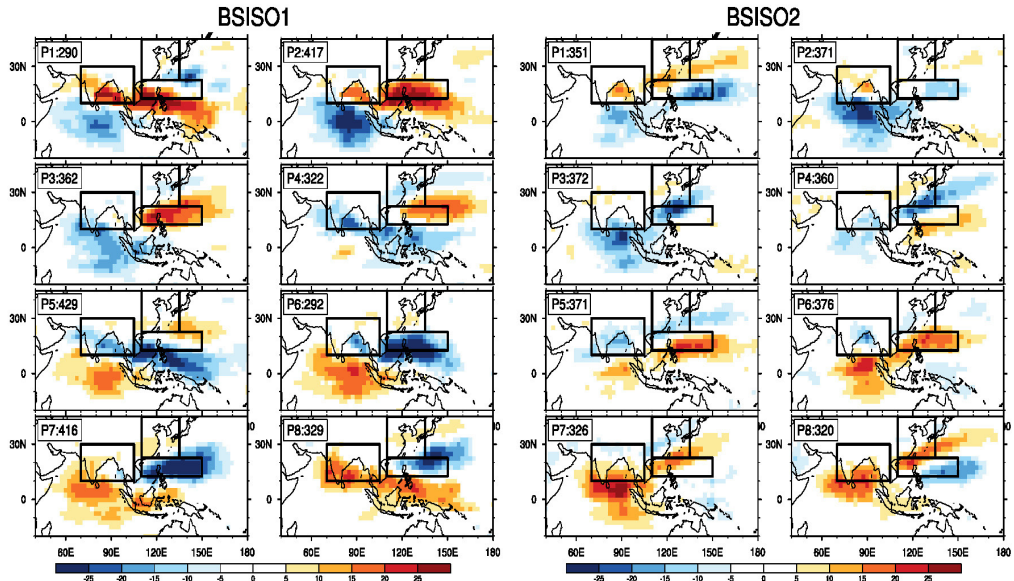


Figure 3 BSISO 지수의 강도가 1 이상인 날들을 바탕으로 한 제 1 계절내 진동과 (좌) 제 2 계절내 진동과 (우) 관련한 일평균 상향 장파복사 아노말리 합성장 아노말리 (W/m^2).

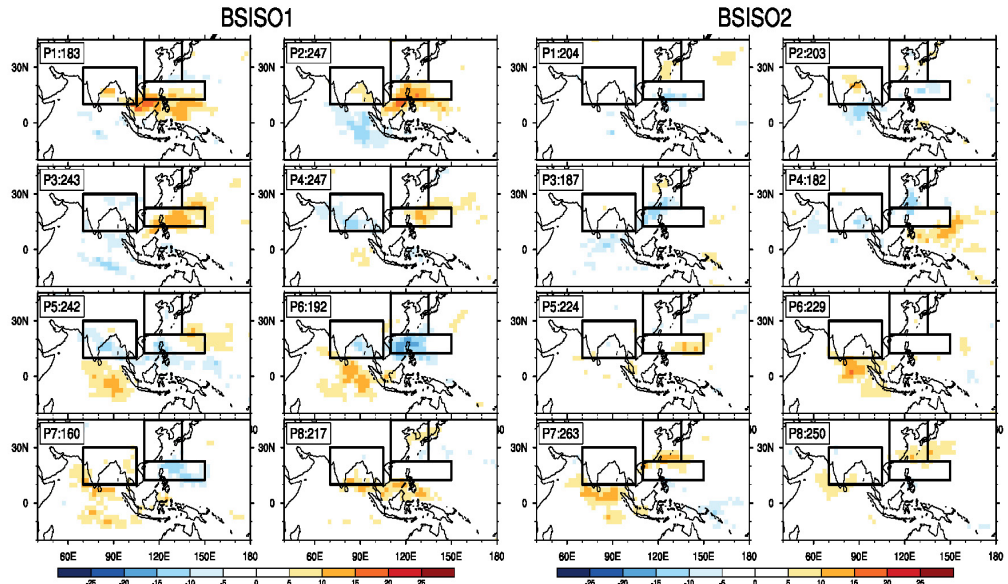


Figure 4 BSISO 지수의 강도가 1 미만 날들을 바탕으로 한 제 1 계절내 진동과 (좌) 제 2 계절내 진동과 (우) 관련한 일평균 상향 장파복사 아노말리 합성장 아노말리 (W/m^2).

같은 방법으로 APHRODITE 강수 자료를 각각의 BSISO 지수에 대해 합성 분석한 후, 동아시아 지역 (북위 22.5°-44°, 동경 110°-135°)에 대해 영역 평균한 결과의 전반적인 통계 값이 Fig. 5의 상자-수염 그림 (Box-whisker plot)을 통해 요약되어 있다. 왼쪽의 BSISO1 지수를 바탕으로 한 강수 자료의 합성장의 통계 값의 경우, 그림 1에서와 같이 위상 3-5의 경우에 평균값을 비롯한 다른 통계 값들이 증가하는 경향을 보인다. BSISO2의 경우, 위상 5-7에서 역시 동아시아 강수의 통계 값들이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로, BSISO1의 경우 동아시아 강수의 합성장 평균이 가장 큰 값을 나타내는 위상 4와, BSISO2의 경우 위상 6에 보다 큰 비중을 두고 연구를 진행하고자 한다.

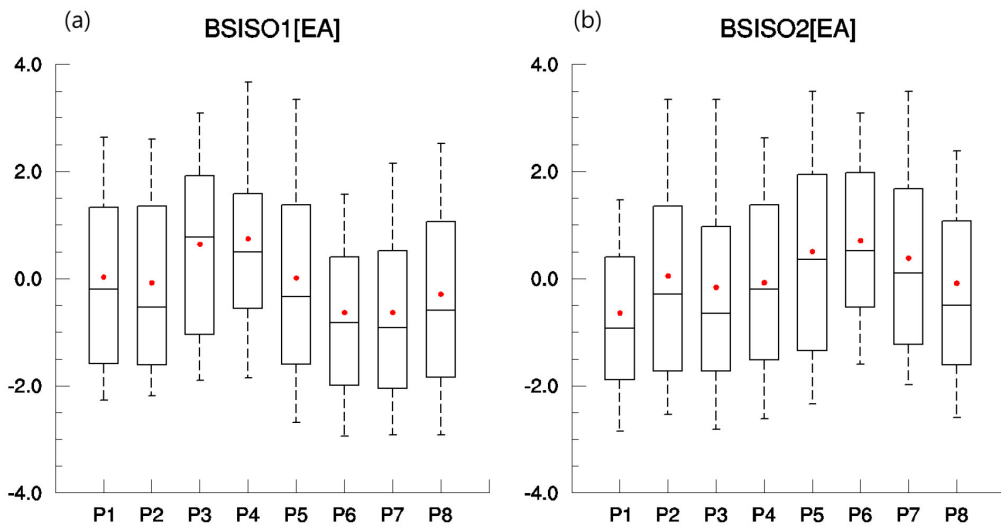


Figure 5 BSISO1 (a), BSISO2 (b) 지수를 바탕으로 한 APHRODITE 강수 자료 합성장의 동아시아 영역 평균의 합성장의 (위로부터) 상위 10퍼센트, 상위 15퍼센트, 중간값, 하위 15퍼센트, 하위 10퍼센트 값을 나타내는 상자-수염 그림. 각 도표의 붉은 점은 평균값을 나타낸다.

3.2 BSISO 두 모드와 관련한 대기순환장의 특징

3.2.1 하층 대기순환장 패턴

Figure 6은 BSISO1 지수를 바탕으로 한 850hPa의 바람장, 수분수렴, 그리고 지위고도 합성장을 보여준다. 하층 대기 순환장의 합성장의 위상에 따른 분포가 Fig. 1에서 보인 상향장과 북서 아노말리의 BSISO1 위상에 따른 합성 분포와 밀접한 관련이 있음을 확인할 수 있다. BSISO1의 위상 1에 인도양 동쪽에 저기압성순환과 함께 수증기의 수렴이 존재한다. 그 북동쪽으로 Figure 1의 위상 1에서 상향장과북서 양의 아노말리가 두드러진 지역에 수증기의 발산과 함께 고기압성 순환이 존재한다. 이러한 패턴은 점점 북동진하여 위상 4에 이르러 벥골만과 인도에는 저기압성 순환과 함께 음의 지위고도가 존재하는 반면, 북서태평양에는 고기압성 순환과 함께 양의 지위고도가 두드러지며 동서방향의 대비가 더욱 두드러지게 된다. Figure 5에서 위상 4 시기에 동아시아 지역에 대하여 영역 평균한 APHRODITE 강수 합성장의 평균값이 가장 큰 값을 보였는데, 이는 이 시기에 북서태평양에 위치한 하층 고기압성 순환에 의한 남쪽으로부터 동아시아 지역으로 수증기의 수송이 활발하게 이루어지는 것과 밀접한 관련이 있다. 이후 BSISO1의 위상 증가와 함께 북서태평양에 위치한 하층 고기압성 순환은 점점 사라지고 이 지역에 저기압성 순환이 우세하게 되면서 동아시아 지역의 강수현상은 억제되게 된다.

BSISO1

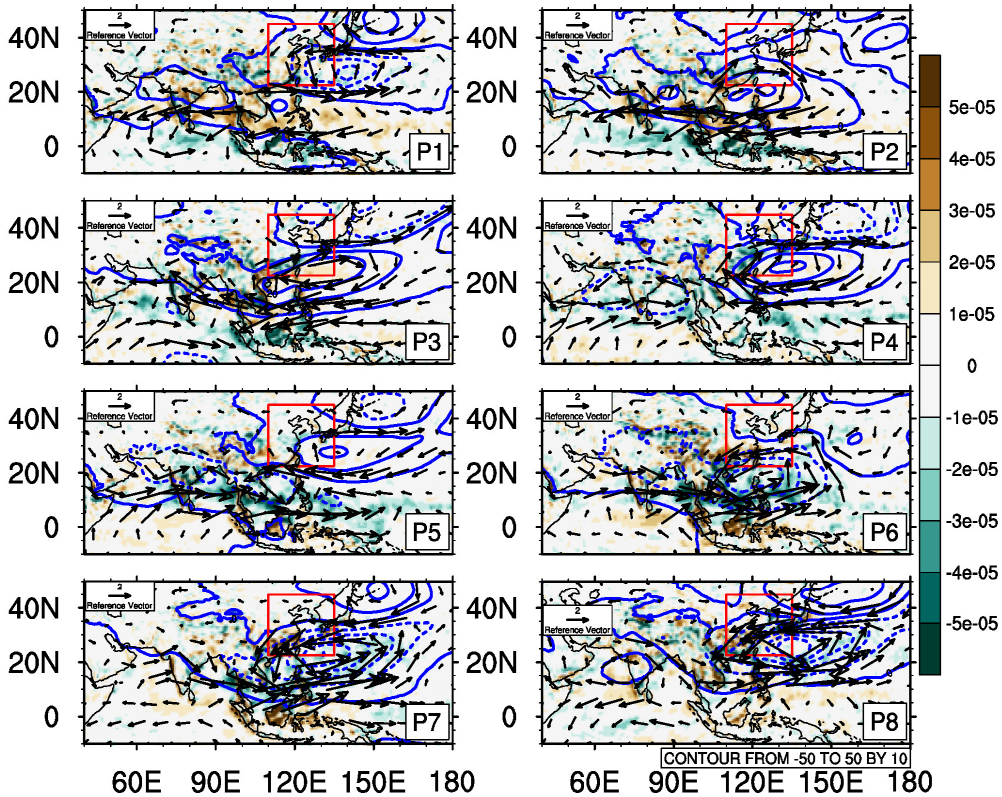


Figure 6 BSISO1 지수를 바탕으로 한 850hPa의 바람장 (vectors, $m \text{ sec}^{-1}$), 수분수렴 (shading, $Kg \text{ Kg}^{-1} \text{ sec}^{-1}$), 지위고도 (contour, m) 합성 분포도. 빨간색 사각형은 본 연구의 관심 영역인 동아시아 지역을 나타낸다.

Figure 7은 Figure 6와 비슷하나 BSISO2 지수를 바탕으로 한 합성도이다. Figure 7도 앞서 Figure 2에서 보인 상향장파복사 아노말리 발달 패턴과 일맥상통하는 하층 순환장과 수증기 수렴의 발달 패턴을 보이고 있다. Figure 5에서 BSISO2의 경우 위상 6에서 강수 합성장의 동아시아 지역 평균값이 가장 최대값을 나타내었는데, 이때 Figure 7의 850-hPa 순환장에서도 이를 설명하는 패턴이 잘 나타나고 있다. Figure 7의 위상 6의 경우 동아시아 주변에 강한 저기압성 순환과 함께 음의 지위고도가 두드러지며 남쪽으로 남중국 해와 필리핀 해에 걸쳐 고기압성 순환이 존재함을 확인할 수 있다. 이 고기압성 순환은 이후 시기에 점점 북진하면서 위상 8에는 동아시아 지역예까지 이르게 된다. 흥미로운 점은 BSISO1과 BSISO2에서 동아시아 강수량의 증가를 나타내는 각각의 위상에 (BSISO1의 위상4, BSISO2의 위상 6) 필리

핀 해를 포함한 아열대 서태평양 지역에 고기압성 순환이 위치하는 공통점을 보이고 있다는 것이다. 하지만 이러한 아열대 서태평양 지역의 고기압성 순환은 BSISO1 위상 4의 경우 동서방향의 대비에서 두드러지는 반면, BSISO2 위상 6의 경우는 남북방향의 대비에서 두드러진다는 차이점을 가지고 있다. 즉, BSISO1의 위상 4의 경우 인도양 동쪽에 저기압성 순환이, 아열대 서태평양에는 고기압성 순환이 존재하지만, BSISO2의 위상 6의 경우 아열대 서태평양 북쪽에는 저기압성 순환이, 아라비아 해에서부터 필리핀 해를 포함하는 서태평양에는 고기압성 순환이 넓게 존재한다. 필리핀 해를 포함하는 아열대 서태평양은 기후학적으로 북반구 여름철 대규모 상승운동이 우세한 지역인 만큼 (Lau et al., 1988; Wang and Zhang 2002) 계절내 진동에 의한 이 지역의 고기압 아노말리는 주의를 기울일 필요가 있다.

BSISO2

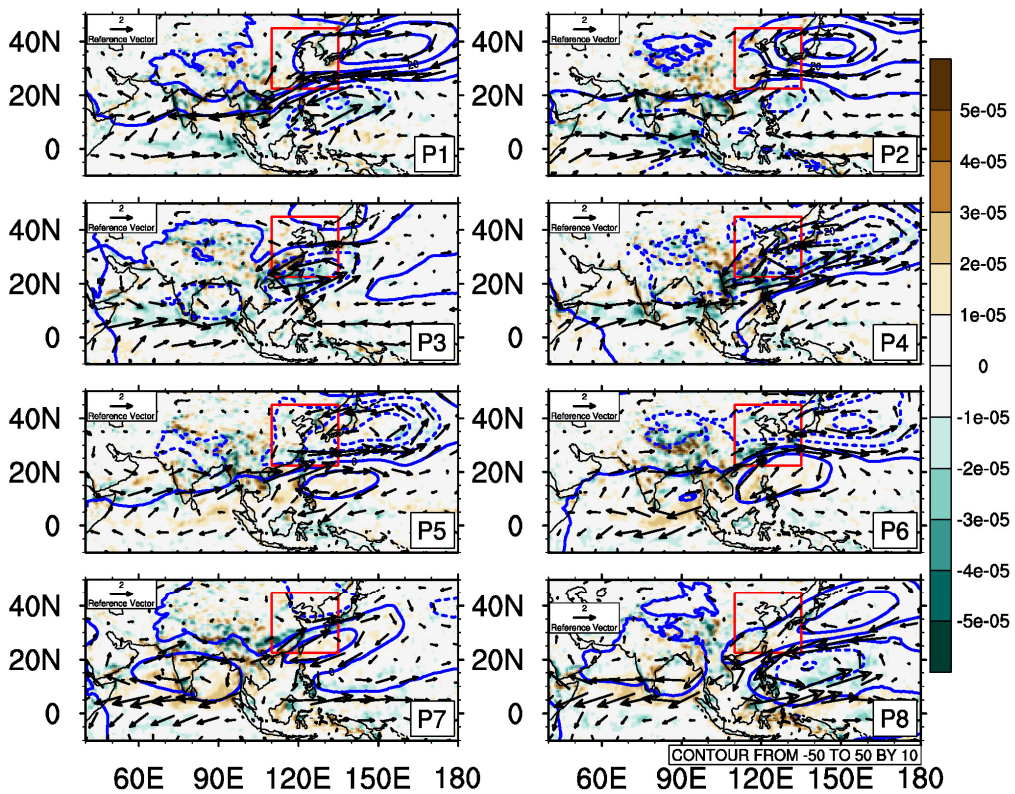


Figure 7 BSISO2 자수를 바탕으로 한 850hPa의 바람장 (vectors, $m \text{ sec}^{-1}$), 수분수렴(shading, $Kg/Kg \text{ sec}^{-1}$), 지위고도(contour, m) 합성 분포도

3.2.2 남북 순환장의 연직 패턴

Figure 8은 BSISO1 지수를 바탕으로 한 동서바람, 남북바람, 그리고 연직속도의 합성장을 동아시아 경도대 (110° - 135° E)에 대하여 평균한 기압-위도 분포도이다. 위상 1에 대기권 하층부터 상층부까지 확장된 강한 하강운동이 위도 약 12° N에 존재한다. 이는 앞서 보인 아열대 서태평양의 고기압성 순환 아노말리에 해당한다. 이는 곧 북진하여 위상 8에는 30° N에 위치하게 된다. 이 하강운동은 고도가 증가함에 따라 북쪽으로 휘어진 동풍 아노말리를 동반하며 이의 북쪽에는 강수대와 관련한 연직속도 음의 아노말리가 존재한다. 위상 3과 4에 이르러 강한 하강운동 북쪽 하층의 강한 남풍이 상승운동 구역에 강한 수렴대를 형성하게 되고 연직속도의 음의 아노말리는 더욱 증가하게 된다. 이때 고도가 증가함에 따라 북쪽으로 치우친 서풍의 아노말리가 두드러지게 되는데, 이는 동아시아 강수 아노말리와 관련한 비단열적 가열과 밀접한 관련이 있다고 선행연구에서 밝힌 바 있다 (Lu 2004; Sampe and Xie 2010). 동아시아의 서풍 제트는 중위도 동아시아 지역 대류권 상층부의 주요한 특징 중의 하나로서 이의 남북방향의 움직임이 이 지역 강수 변동성에 영향을 미친다고 알려져 있다. Figure 8에서도 위상 3-4 동안 30° N에 위치한 강한 상승운동의 북쪽 상층에 강한 서풍 아노말리가 존재함을 확인할 수 있다. Li and Zhang (2014)은 35° - 40° N, 100° - 140° E에 위치한 동아시아 서풍 제트가 강화될 때 중국의 메이유가 북쪽으로 이동하면서 강우강도도 증가하는 것을 보였다. 이러한 동아시아 서풍 제트는 다양한 시간규모에서 변화하며 동아시아 여름몬순의 강수 시기의 시종을 조절한다. Figure 8의 위상 5-8은 위상 1-4의 패턴은 비슷하나 부호가 반대임을 보이고 있다.

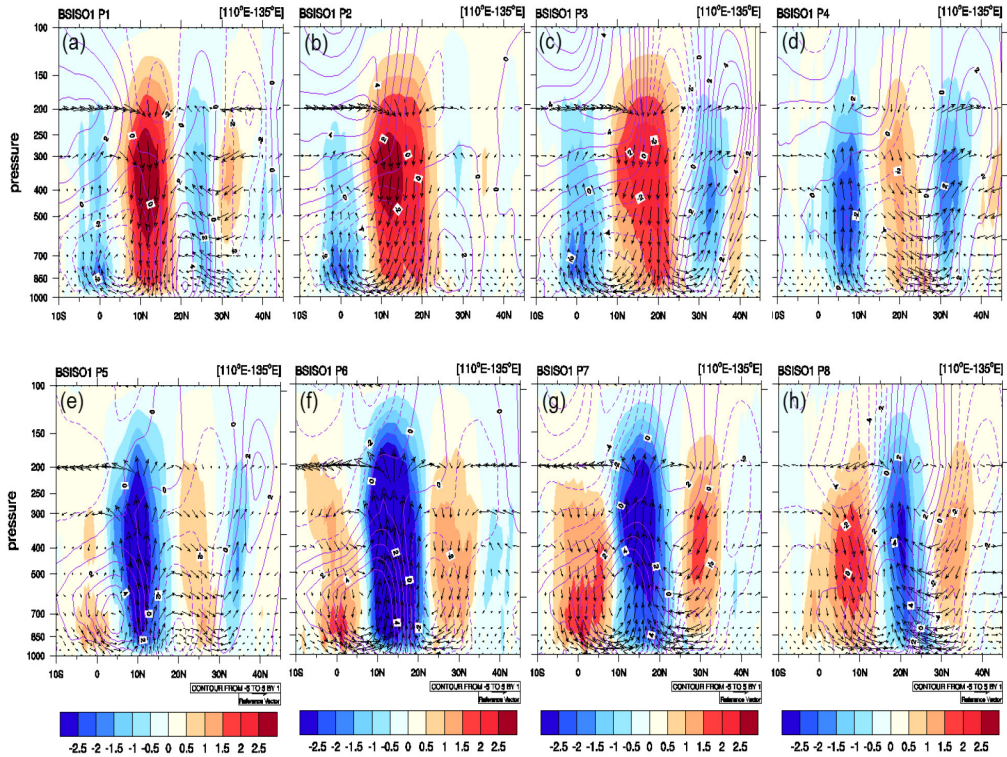


Figure 8 BSISO1 지수를 바탕으로 한 동서 바람 (contour), 연직속도 (shading, Pa/sec), 위도 합성장을 동아시아 경도대 (110°-135°E)에 대하여 평균한 기압-위도 분포도. 벡터는 남북연직순환을 나타낸다.

BSISO2의 남북 연직단면도는 Figure 9에 나타나 있는데, 역시 위상 1-4의 패턴과 위상 5-8의 패턴은 유사하나 부호가 반대임을 확인할 수 있다. 위상 1에 10°N와 20°N 사이에 위치한 상승운동은 점점 북쪽으로 이동하여 위상 3에 그 강도가 눈에 띄게 증가하는 경향을 보인다. 상승운동 남쪽의 하층에 위치한 하강운동 지역에서부터 비롯된 남풍이 강해지면서 그 수렴대에 위치한 상승운동의 강도를 증가시키는 것으로 분석된다. 이 상승운동은 점점 북쪽으로 더 이동하여 위상 6에 동아시아 위도대에 도달하며 이 지역 강수 증가를 유발하게 된다. 이 상승운동 구역은 Figure 8에서와 같이 고도의 증가에 따라 북쪽으로 치우친 서풍 아노말리를 동반하며 이는 위상 8에 이르기까지 유지된다. 비록 강도의 차이는 있지만 Figure 8의 위상 4와 Figure 9의 위상 6의 전반적인 패턴이 유사함을 확인할 수 있다.

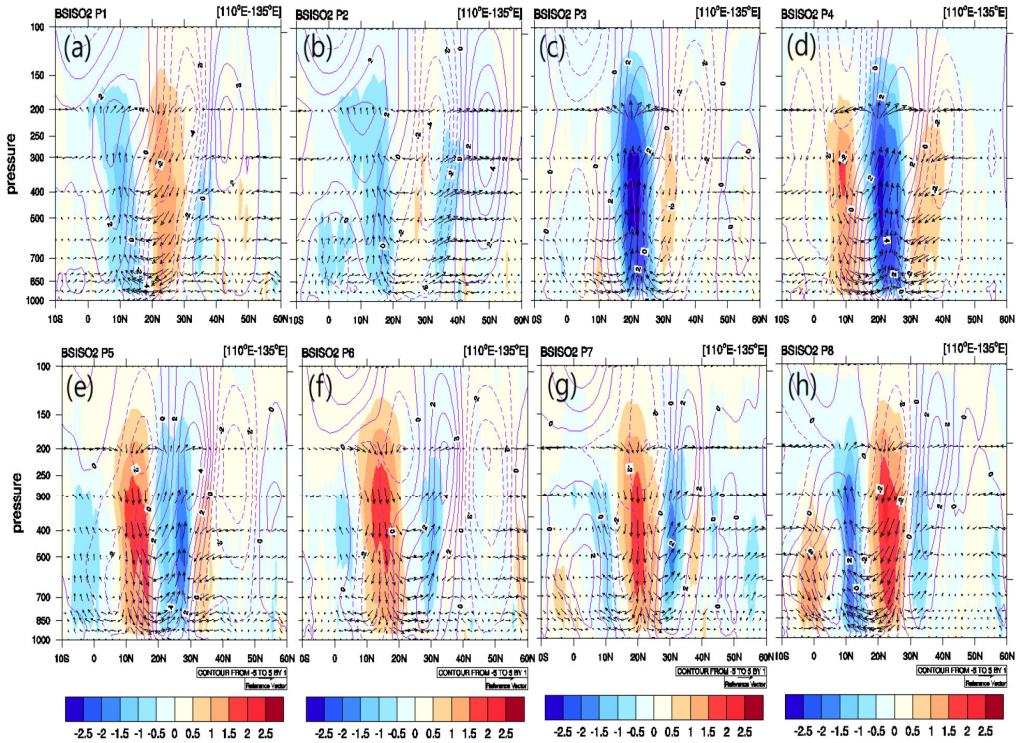


Figure 9 Figure 8과 유사하나 BSISO2 지수에 대한 합성분포도

3.2.3 중층 지위고도 편차 패턴

앞 절에서 합성분석을 통하여 동아시아 강수에 영향을 주는 BSISO1의 위상 4와 BSISO2의 위상 6의 경우 하층 순환장과 관련하여 아열대 서태평양에 위치한 고기압성 순환이 공통적으로 위치함을 보였다. 이러한 고기압성 순환은 열대지역의 수증기를 동아시아 지역에 공급하는 역할을 함으로써 동아시아 지역의 강수 증가에 기여하게 된다. 하지만 각각의 고기압성 흐름을 구성하는 더 넓은 공간 규모의 순환장의 패턴의 차이가 존재함을 확인하였다. BSISO1의 경우는 동서방향의 대조가, BSISO2의 경우는 남북방향의 대조가 두드러짐이 나타났다. 한편 동아시아 강수가 증가하는 위상과 관련한 연직단면도를 통하여 이 시기 해당지역에 강한 상승운동과 함께 고도가 증가함에 따라 북쪽으로 치우친 서풍 편차가 동아시아 지역에 위치함을 확인할 수 있었다.

그렇다면 본 장에서는 BSISO 두 모드에서 나타난 아열대 서태평양에 위치한 고기압성 흐름에 대해 살펴보도록 하겠다. Figure 10은 BSISO1 지수를 바탕으로 한

500hPa 지위고도 아노말리 북반구 전체의 합성장을 나타낸다. 본 연구에서 관심을 가지고 살펴보고 있는 위상 4의 경우 서태평양에서 북아메리카에 이르는 환 구조의 형태로 파동이 형성됨을 확인할 수 있다. 200-hPa 지위고도 아노말리 합성장 분석 결과 상층에도 동일한 패턴이 보여짐에 따라 (not shown) 대류활동에 인한 강제력에 대한 대기반응의 일환으로 생성된 것으로 보인다.

한편, Figure 11의 경우는 BSISO2 지수를 바탕으로 한 500hPa 지위고도 아노말리의 합성장을 나타내는데, 동아시아 강수 증가와 밀접한 관련이 있는 위상 6의 경우 BSISO1의 위상 4와 다른 패턴을 보이고 있다. 지위고도의 양의 아노말리가 필리핀 해와 오토츠크 해 서쪽에, 그리고 동아시아 지역을 포함한 그 중간에는 음의 아노말리가 자리하고 있다. 아열대 서태평양 약 20°N와 일본과 대한민국을 포함한 중위도 지역에 위치한 남북방향의 진동 패턴은 음의 태평양-일본 (Pacific-Japan) 패턴과 유사하다. 음의 태평양-일본 패턴이 나타나는 경우 북서태평양 지역의 대류활동이 억제됨에 따라 고기압성 흐름이 발달하게 되고 이에 대한 보상하강운동으로 그 북부에 위치한 동아시아 지역에 저기압성 순환을 형성하게 된다.

Nitta (1976)에 따르면 계절 내 시간 규모에서 변동하는 서태평양의 대류활동이 태평양-일본 패턴과 밀접한 연관이 있다. 적도 지역의 대류활동에 의한 비단열 가열은 대기 반응을 유발하게 되고 로스비 파동의 형태로 중위도 지역의 대기 흐름에 영향을 미치게 된다 (Ding and Wang, 2007).

BSIS01

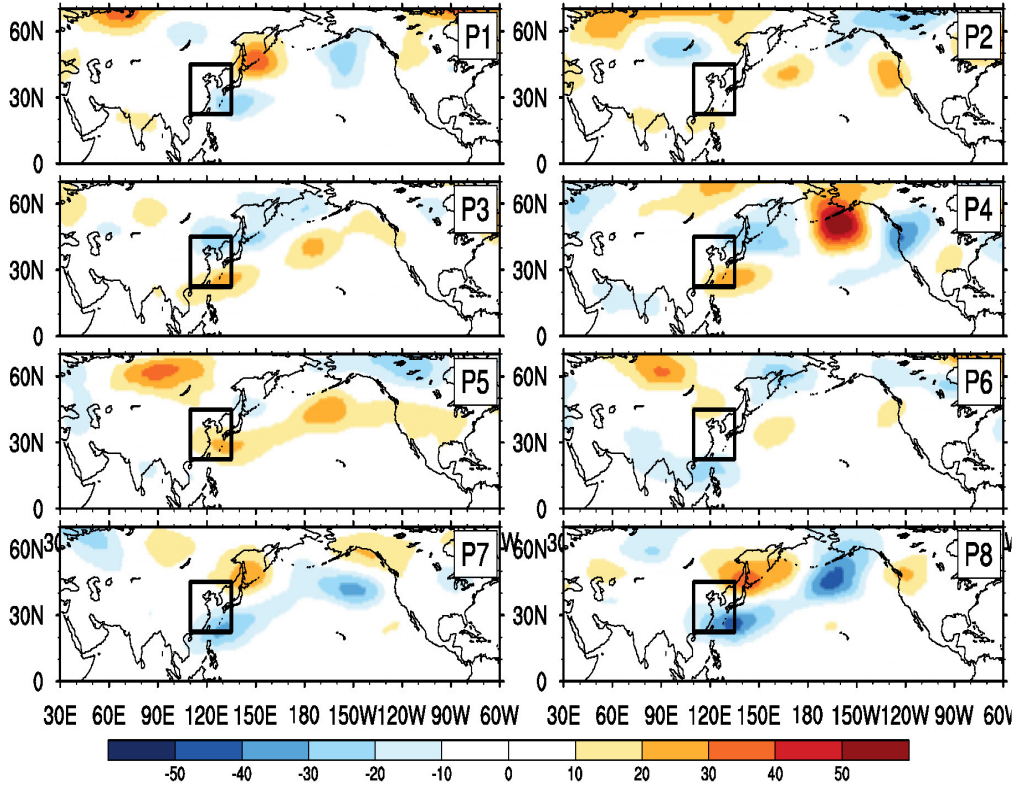


Figure 10 BSIS01 지수를 바탕으로 한 500-hPa 지위고도 아노말리 합성장 (m). 각 그림의 사각형은 동아시아 몬순 지역을 나타낸다.

BSISO2

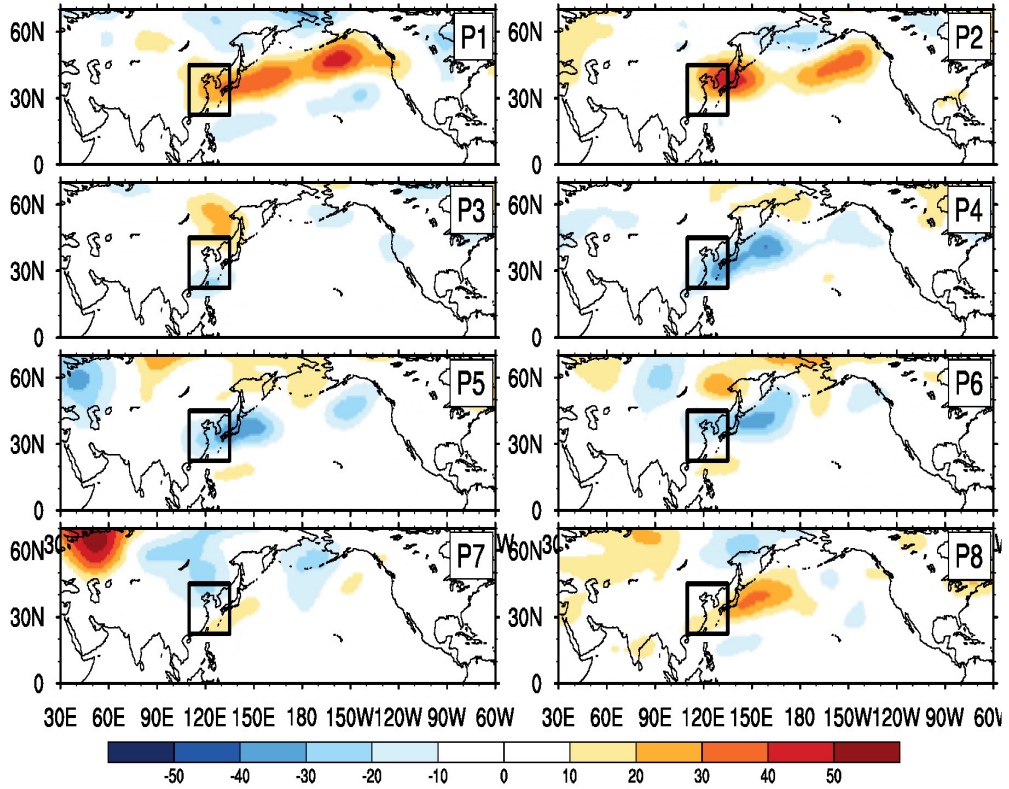


Figure 11 Figure 10과 유사하나 BSISO2 지수에 대한 합성분포도

3.2.4 BSISO 두 모드의 열원과 대기 순환

Nitta (1976)는 대류활동에 의한 로스비 파동 반응은 대류 현상이 일어나는 경도 (longitude)에 의존한다고 밝힌 바 있다. Ding and Wang (2005)도 전지구적인 원격상관 패턴을 유발하는 특정 경도대가 있다고 주장하였다. 이러한 선행연구를 바탕으로 본 연구에서는 Figure 10과 Figure 11에서 보인 BSISO 두 모드간 중층 지위고도 패턴의 차이가 왜 생기는지를 알아보기 위해 각 모드와 관련한 대류활동의 근원지를 알아보고자 한다. 상향장파복사 아노말리에 10-60일 밴드패스 필터를 적용한 후 각 BSISO 지수에 대하여 합성 분석을 수행한 후, BSISO1과 BSISO2의 각 위상 별 상향장파복사 아노말리의 합성장이 최대값과 최소값을 갖는 위치를 Figs 12-13과 같이 도식화하였다.

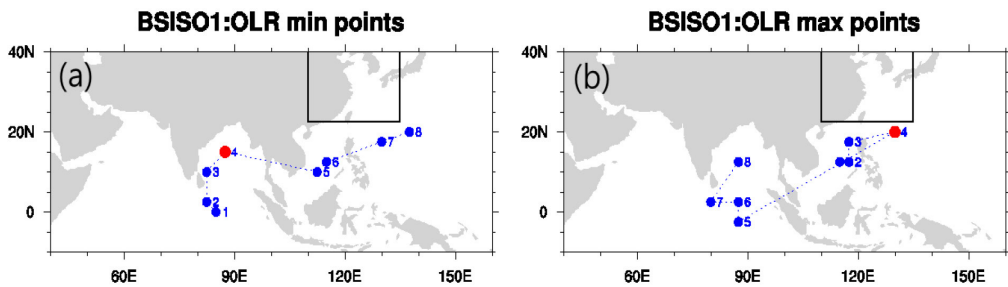


Figure 12 10-60일 시간 필터링한 상향 장파복사 편차를 BSISO1지수를 바탕으로 한 합성분석 결과 각 위상별 최소 (a), 최대 (b) 지점.

Figure 12와 Figure 13에서 붉은 점이 각 모드 별 본 연구에서 관심을 갖는 위상과 관련한 위치 정보를 나타낸다. BSISO1의 위상 4의 경우 벵골 만(15°N , 87.5°E)에서 가장 활발한 대류활동이 일어나는 반면, 억제된 대류활동은 필리핀 동쪽 태평양 (20°N , 130°E)에서 발생하는 것으로 Figure 12에 나타나 있다. BSISO2의 위상 6의 경우 역시 벵골 만 북쪽에서(20°N , 90°E) 가장 활발한 대류활동이 일어나는 반면, 억제된 대류활동은 Maritime Continent 서쪽 인도양 동쪽에(5°N , 90°E) 위치하는 것으로 Figure 13에 나타나 있다. 벵골만은 기후학적으로 여름 몬순 기간 강수가 강하게 발생하는 지역이기도 하다. Sardeshmukh and Hoskins (1988)은 벵골만과 주변 지역에 위치한 깊은 대류 활동과 이로 인해 발생한 상층 발산장이 로스비 파동의 근원지로 작용한다고 주장하였다.

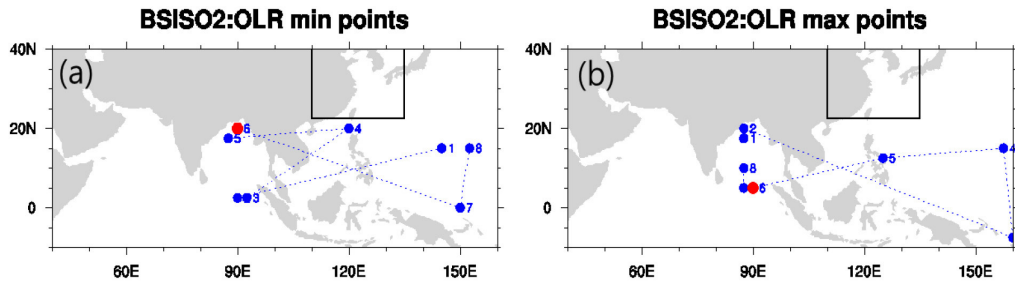


Figure 13 Figure 12와 유사하나 BSISO2의 경우

앞서 Figures 6과 7에서 하층 대기 순환 패턴이 BSISO1의 경우 동서방향의 대조가 두드러지고 BSISO2의 경우 남북방향의 대조가 두드러짐을 보인 바 있다. 이와 비슷하게 Figure 12에서 보인 BSISO1의 위상 4의 경우 상향장파복사 음의 아노말리 최소값은 벵골만에, 최대값은 필리핀 인근 서태평양에 위치함으로써 동서방향의 대조가 두드러진다. Figure 13에서도 BSISO2의 위상 6에서 최소값은 벵골만 북부에, 최대값은 벵골만 남부 인도양 동쪽에 위치함으로써 남북방향의 대조가 두드러진다.

Figure 14는 500-hPa 지위고도 편차의 각 지점과 Figures 12-13에서 보인 계절 내 시간 규모로 필터링 된 상향장파 복사의 최대·최소 지점의 상향장파복사와의 상관관계를 나타낸 것이다. Figure 14 (a), (b)는 상향장파복사 아노말리에 BSISO1의 주기에 해당하는 30-60일 시간 필터링을, Figure 14(c), (d)는 BSISO2 주기에 해당하는 10-25일 시간 필터링을 수행하였다 (Lee et al., 2013). 최소값과의 지점 상관관계 계수에는 -1을 곱하여 보다 직관적인 해석을 용이하게 하고자 하였다. 전반적으로 30-60일 주기 필터링 한 상향장파복사 아노말리와 상관관계가 10-25일 주기 필터링한 상향장파복사 아노말리와 상관관계보다 더 큰 값을 갖는 것을 보인다.

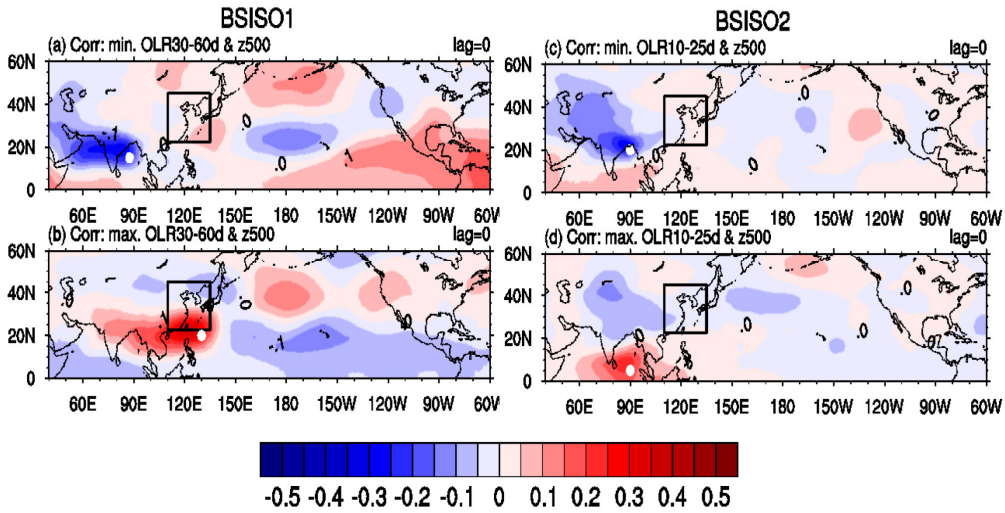


Figure 14 BSISO1 위상 4의 상향장파복사 (a) 최소값에 해당하는 지점에서 30-60일 시간 필터링 된 상향장파복사 아노말리와 500-hPa 지위고도간의 지점 상관 계수 (b) 최대값 지점과의 상관계수. BSISO2 위상 6의 상향장파복사 (c) 최소값에 해당하는 지점에서 10-25일 시간 필터링 된 상향장파복사 아노말리와 500-hPa 지위고도간의 지점 상관 계수 (d) 최대값 지점과의 상관계수

Figure 14 (a)의 경우 Figure 11의 지위고도 아노말리 합성장의 위상 4에서 나타났던 북태평양부터 미국 남동부에 이르는 파동 패턴이 나타나는 반면, Figure 14 (b)에는 서태평양 부근의 태평양-일본 패턴의 남북방향 이중구조가 우세하게 나타난다. 반면 Figure 14 (c), (d)의 경우 어떠한 파동형태의 분포보다는 열대 지역과 아열대/중위도 간의 남북방향의 대비가 주로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

BSISO1의 위상 4와 BSISO2의 위상 6의 주요 열원을 중심으로 한 대기 순환장의 특징을 살펴보면, BSISO1의 위상 4의 경우 하층에 강한 동풍을 동반한 동서방향의 지역적인 위커 순환 (regional Walker circulation)이 두드러지는 반면 (Figure 15 a, b) BSISO2의 위상 6의 경우 하층에 강한 남풍을 동반한 남북방향의 지역적인 해들리 순환 (regional Hadley circulation)이 두드러지는 것을 확인할 수 있다 (Figure 15 c, d).

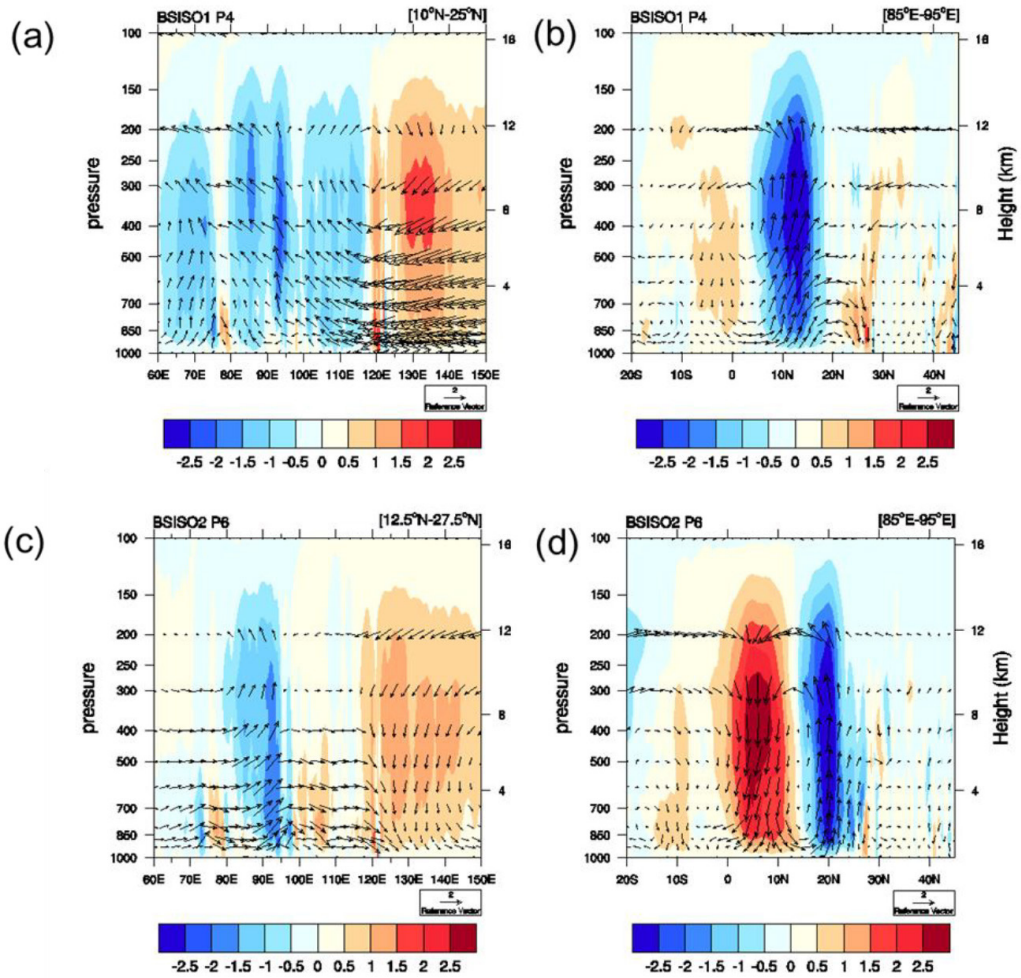


Figure 15 열원을 중심으로 한 연직단면도. 색이 칠해진 부분은 연직속도 (Pa/sec)를, 화살표는 위/경도 방향의 연직순환을 나타낸다. (a) 10°-25°N에 대해 위도 평균한 BSISO1 위상 4 합성장의 기압-경도 연직단면도 (b) 85°-95°E 경도 평균한 BSISO1 위상 4 합성장의 기압-위도 연직단면도 (c) 12.5°N-27.5°N 위도 평균한 BSISO2 위상 6 합성장의 기압-경도 단면도 (d) 85°-95°E 경도 평균한 BSISO2 위상 6 합성장의 기압-위도 단면도

3.3 BSISO 사례의 기후학적 분석

지금까지 동아시아 여름철 강수에 영향을 주는 BSISO 두 모드의 공간적인 특징에 대해 알아보았다. 이번 장에서는 BSISO 지수를 바탕으로 1981-2010년의 5월부터 9월에 해당하는 기간에 대한 통계적인 분석 결과를 토대로 알 수 있는 BSISO 사례의 특징에 대해 기술하고자 한다.

3.3.1 BSISO 지수를 바탕으로 한 기후학적 특성

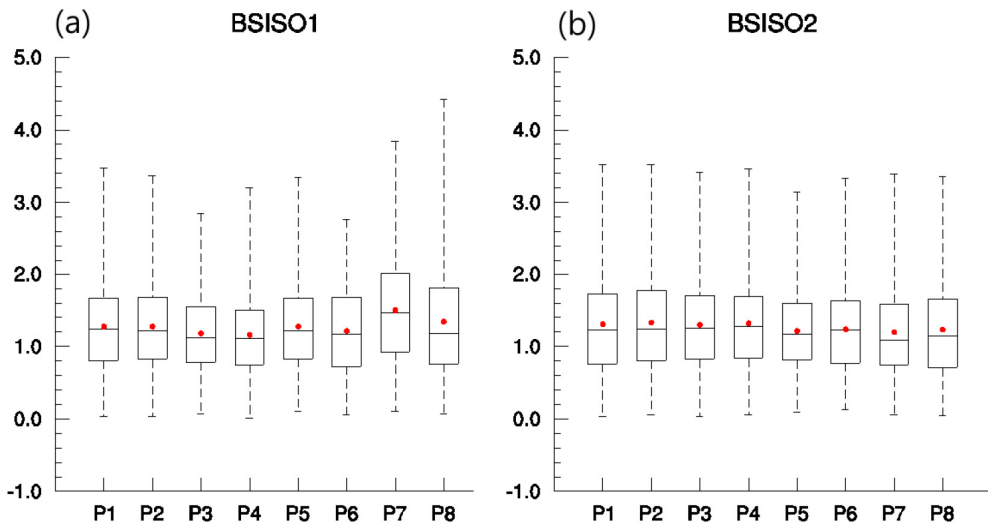


Figure 16 1981년부터 2010년까지 5월에서부터 9월동안 BSISO 지수 각 위상 별 강도(amplitude)의 통계치를 나타낸 상자-수염 그림. (위에서부터) 최대값, 상위 15퍼센트, 중간값, 하위 15퍼센트, 최소값을 나타낸다. 붉은 점은 각 위상별 지수 강도의 평균값을 나타냄.

Figure 16은 분석기간 동안 BSISO1, BSISO2 지수의 각 위상 별 강도 (amplitude)의 통계치를 나타낸 그림이다. BSISO 사례 특성 분석을 위해 앞선 장에서 주로 합성 분석 방법을 사용하고 이를 위한 기준 값으로 1.5를 사용하였는데, Figure 16의 결과에 따르면 각 지수의 위상 별 강도가 최대 3.0이 넘는 경우도 발생하는 사례가 있는 것을 확인할 수 있다. 주로 강도의 평균은 약 1.2 정도이고 BSISO1에 비해 BSISO2의 위상 별 평균값의 변동성이 크지 않다. BSISO1의 경우 위상 7의 평균 강도는 약 1.6정도 가장 크고 위상 8은 최대 4.4의 강도를 기록하였다.

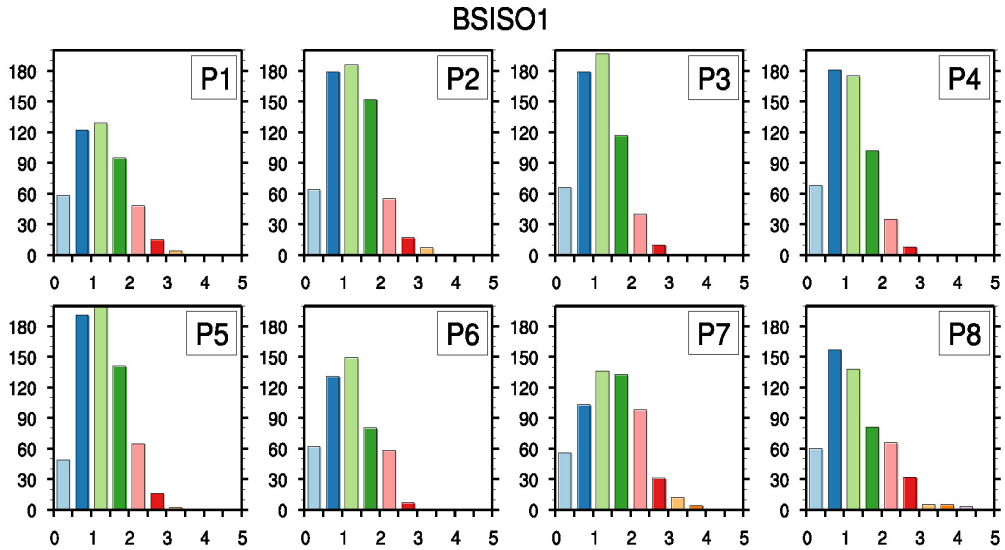


Figure 17 과거 30년 여름철 BSISO1 지수 강도 크기 별 발생 빈도

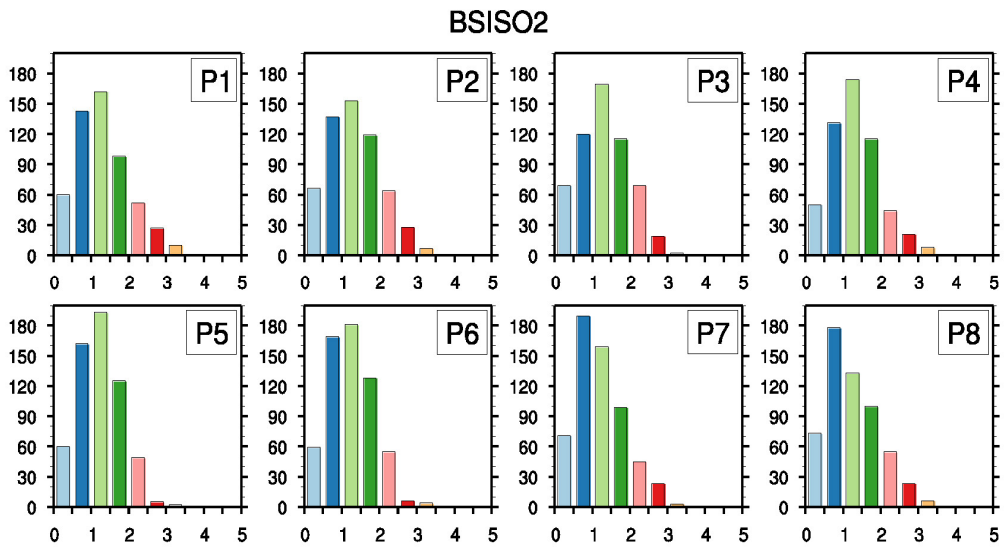


Figure 18 과거 30년 여름철 BSISO2 지수 강도 크기 별 발생 빈도

Figure 17-18은 분석 기간 동안 (1981-2010년 5월부터 9월) BSISO 지수 강도의 히스토그램을 나타낸다. 일부 몇몇 위상을 제외하고 대부분 1.0 이상 1.5 미만의 구간에 가장 큰 빈도수를 나타낸다. 이 경우 두 번째로 가장 큰 빈도수를 나타내는 구간

은 0.5 이상 1.0 미만인 구간으로 BSISO가 비활성 상태인 경우에 해당한다. 앞서 Figure 16에서 BSSIO1 위상 7의 평균이 다른 위상에 비해 큰 값을 보였는데, Figure 17의 히스토그램에서도 다른 위상들에 비해 지수의 강도가 1.5이상 구간의 발생빈도가 빈번하게 일어남을 확인할 수 있다. 이는 북반구 여름철 서태평양과 필리핀 해에 대류활동이 활발하게 발생하는 것과 관련이 있는 것으로 추정된다. 한편, 3.2와 3.3장에서 주요하게 살펴본 BSISO1의 위상 4의 경우, 비활성 구간인 0.5이상 1.0미만의 발생 빈도가 가장 높은 것으로 나타났다.

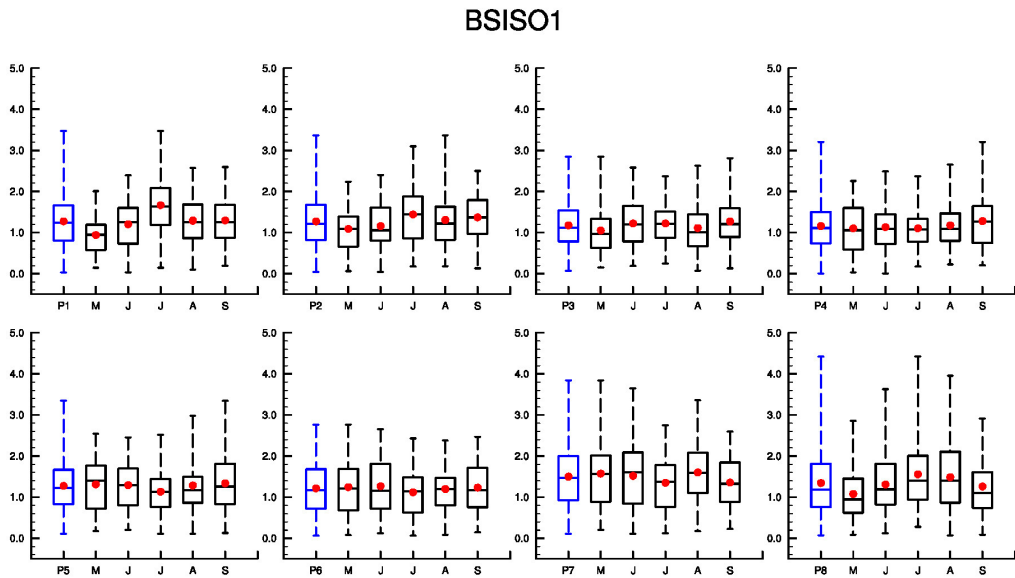


Figure 19 Figure 16과 비슷하나 BSISO1의 각 위상 별 월별 통계치. 각 그림의 파란 상자 그림은 총 여름(5월-9월)에 대한 값을 나타냄.

Figure 19-20은 북반구 여름철 어느 시기에 BSISO의 활동이 활발한 지 알아보기 위해 BSISO 지수의 위상에 따른 각 월별 통계치를 나타낸다. 여름철 각 월 BSISO의 위상 별 강도에 변화가 존재한다. 특히 BSISO1의 위상 4의 경우 (Figure 19), 9월에 강도의 평균값이 증가한다. 한편 BSISO2의 위상 6의 경우, 6월에 그 강도가 두드러지게 증가하는데 이 시기는 중국의 메이유, 일본의 바이우, 그리고 우리나라의 장마가 시작되는 시기이기도 하다.

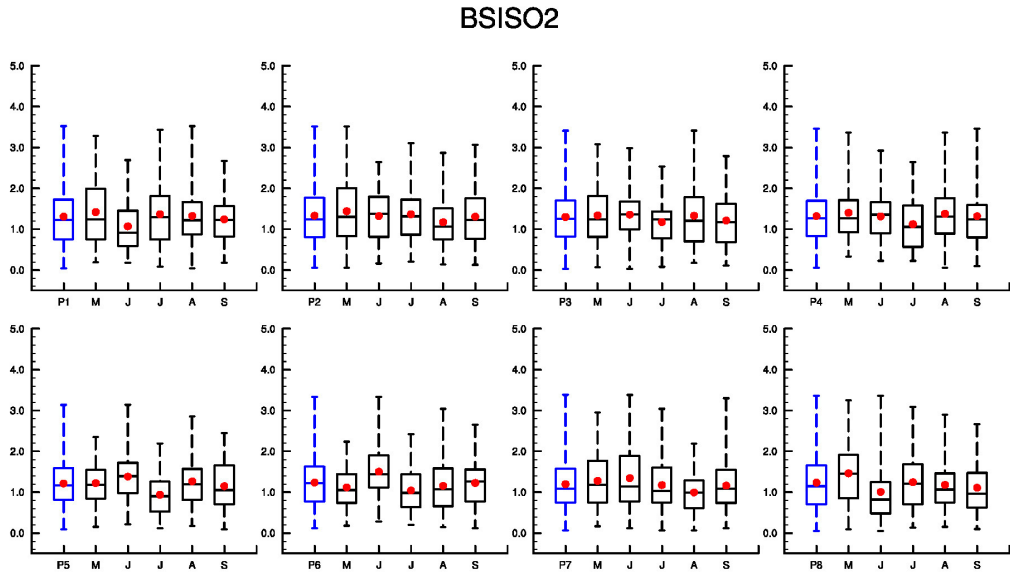


Figure 20 Figure 19와 비슷하나 BSISO2에 대한 위상 별 월별 통계치

지금까지 BSISO 지수의 강도를 바탕으로 한 통계기후학적인 특성에 대해 기술하였다. BSISO 지수는 BSISO1, 2의 강도와 함께 매일 매일의 기상 정보를 전달하는데, 이러한 기상 정보를 통하여 특정 일의 대류활동의 공간적인 분포를 유추할 수 있다. Figure 21-22는 BSSIO1(2)의 강도가 1.0 이상인 날 이후 약 30일에 걸쳐 어떠한 위상이 발생할 확률이 높은지를 보여주고 있다. 예를 들어 BSISO1의 위상 1의 경우, 강도가 1.0 이상을 기록한 날로부터 약 4일까지는 1.0 이상의 강도로 위상 1의 상태를 유지할 확률이 가장 높지만 이후 비활성 상태(강도가 1.0 미만)로 돌아가거나 위상 2로 전이될 확률이 이보다 커지게 된다. 그 후로 10일이 지나면 여전히 비활성 상태의 확률이 가장 크지만 위상 3으로 전이될 확률도 증가하게 된다. 이런 식으로 Figure 21과 22를 통해 BSISO1과 BSISO2가 어떤 위상의 전이 과정을 거치는지를 파악할 수 있다. 하지만 같은 기간에 대해 Wheeler and Hendon (2004)에 의해 정의된 실시간 다변량 매든-줄리안 진동 지수 (Real-time Multivariate MJO index: RMM index)를 바탕으로 한 Figure 23의 결과를 비교하였을 때, BSISO 지수에 의해 정의된 BSISO는 활성화된 위상을 유지하는 기간이 짧고 다음 위상으로 전이되는 연속성이 떨어진다. 이러한 경향은 BSISO2에서 더욱 두드러지는데 이는 BSISO2가 BSISO1에 비해 짧은 주기성을 갖기 때문으로 판단된다.

BSISO1

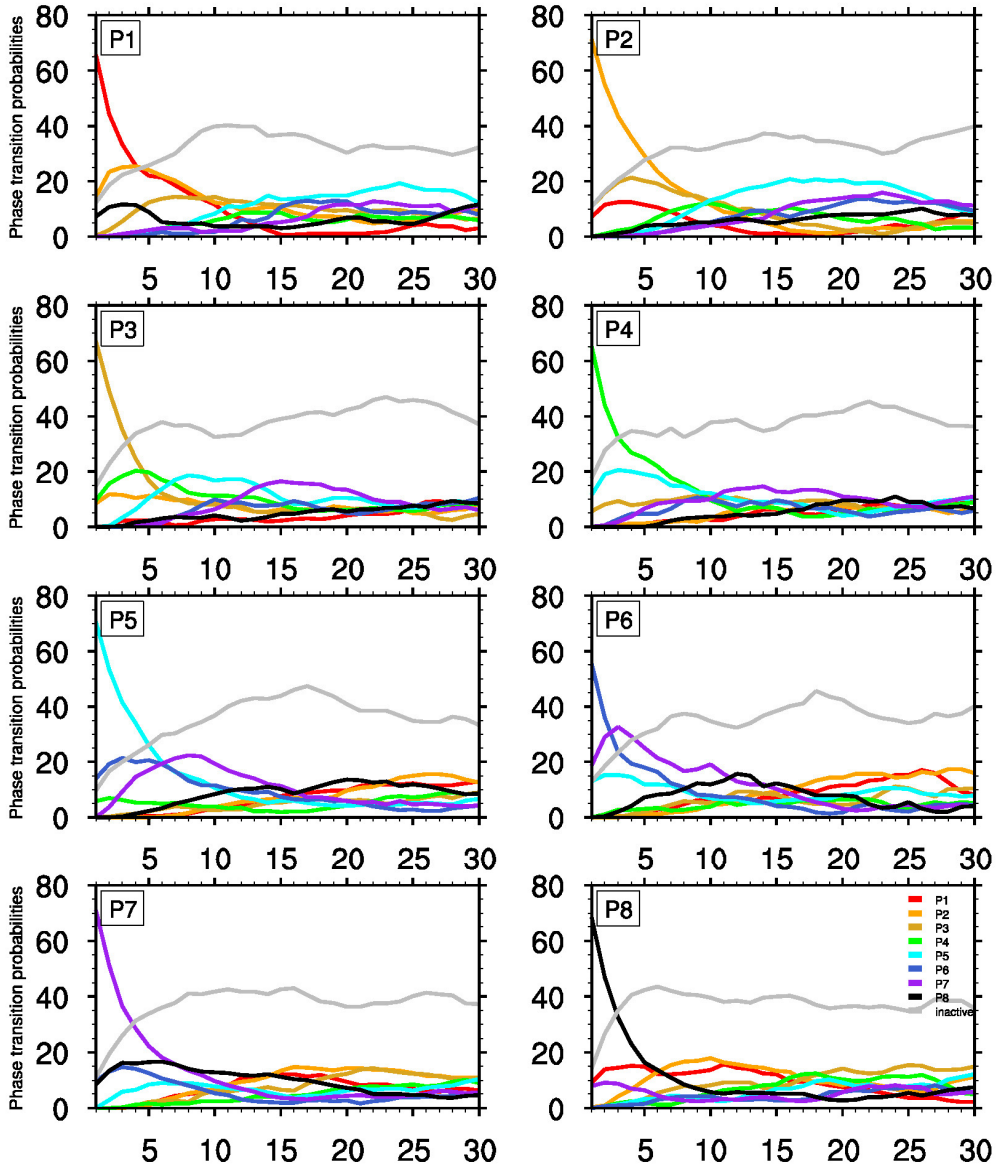


Figure 21 BSISO1 각 위상의 강도가 1.0 이상인 날 이후 다음 위상전이 확률. 가로축 일 (day), 세로축 백분율 (%). 회색 선은 BSISO 지수의 강도가 1.0 미만인 경우에 해당하며 BSISO의 비활성(inactive) 상태를 의미한다.

BSISO2

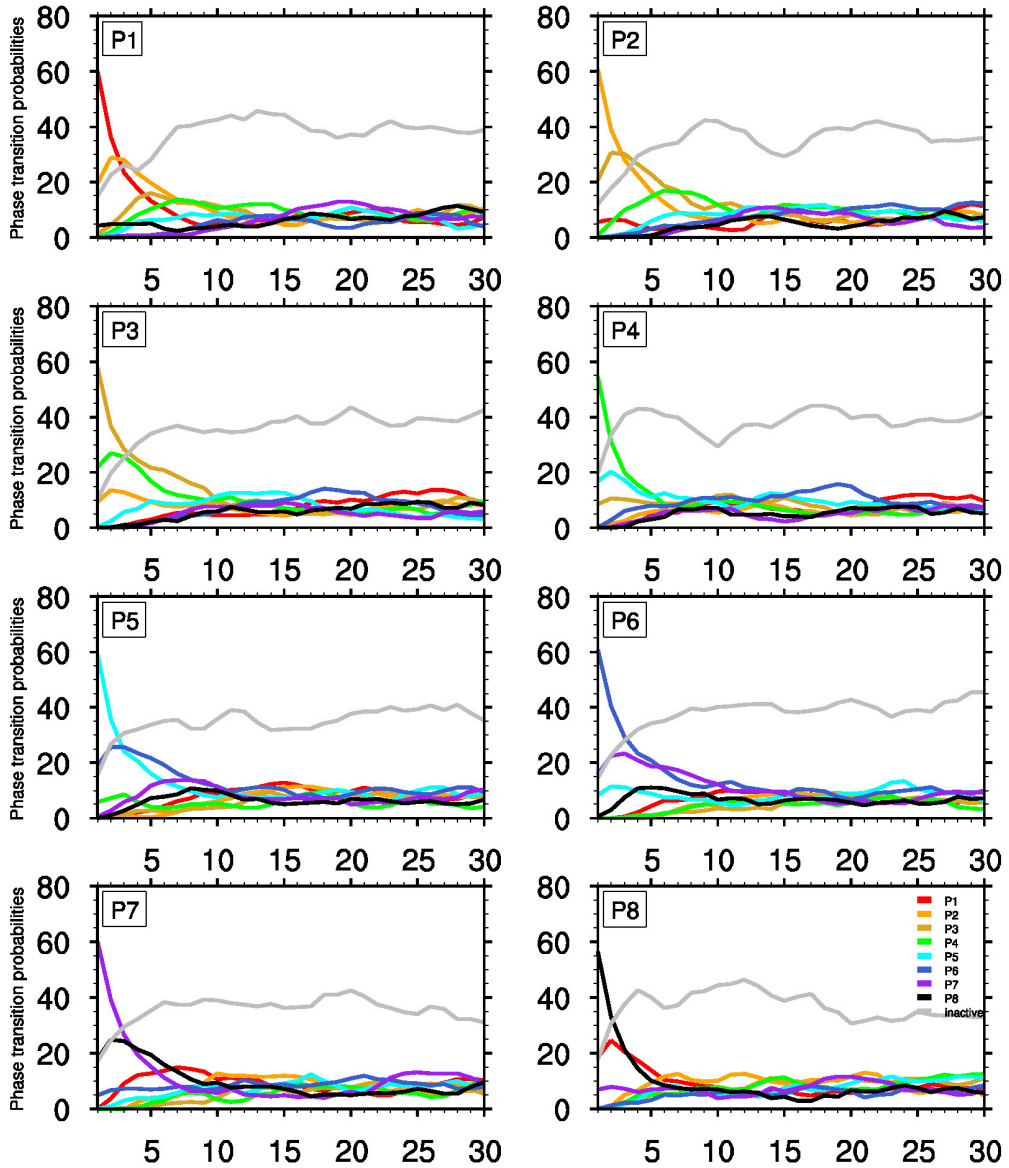


Figure 22 Figure 21과 비슷하지만 BSISO2에 관한 결과

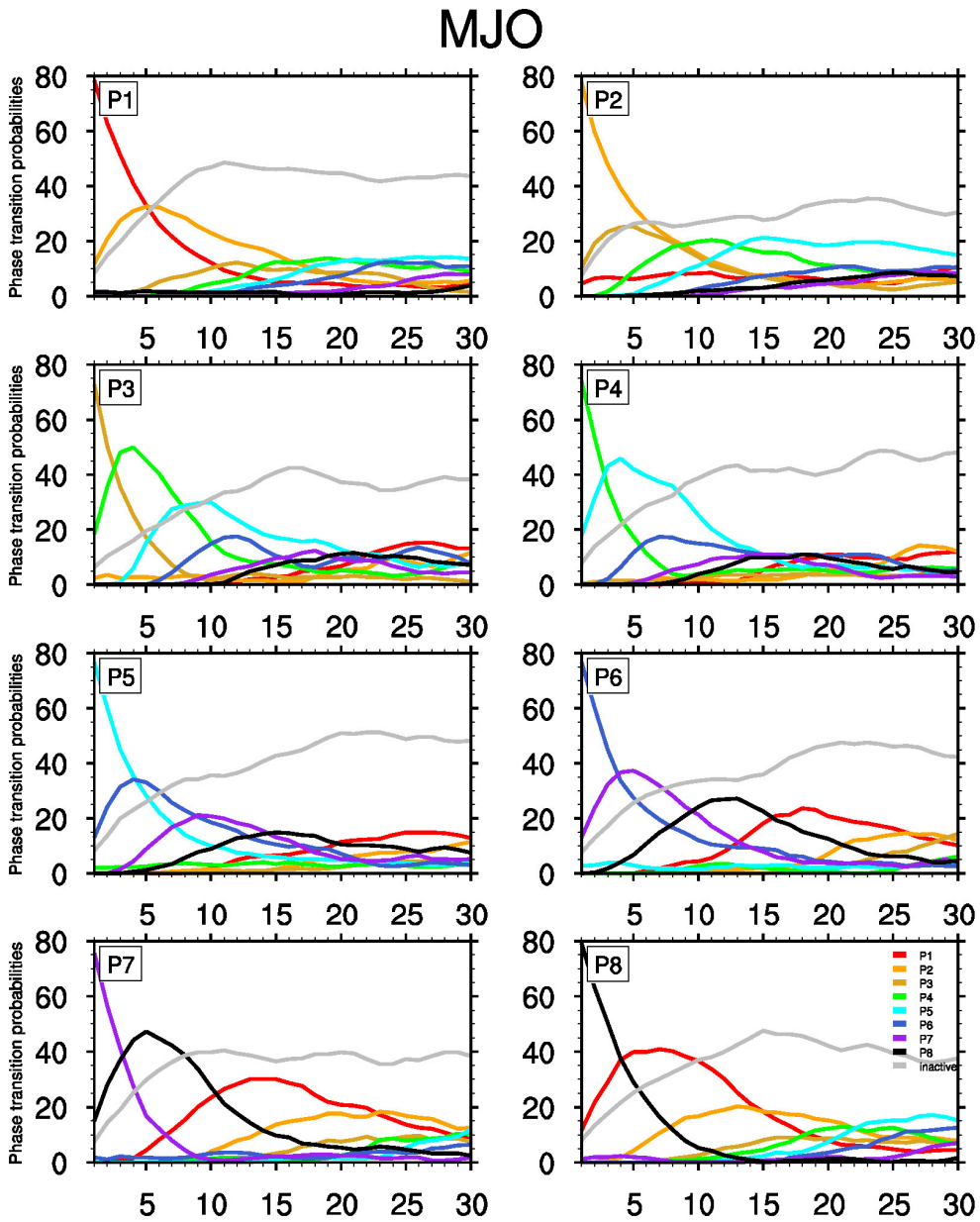


Figure 23 Figure 21과 유사하나 실시간 다변량 매트-줄리안 진동 지수 (Real-time Multivariate MJO index: RMM index)를 바탕으로 한 결과

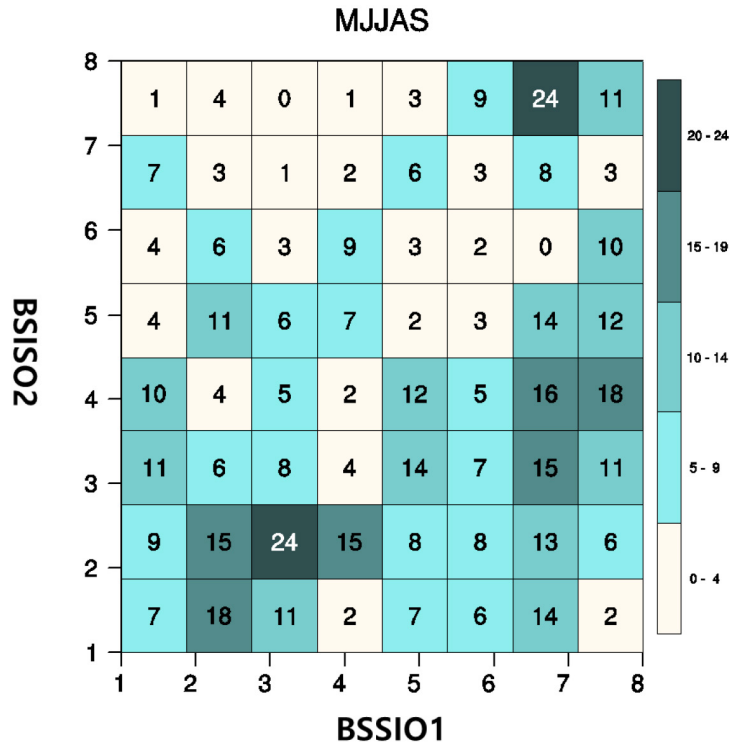


Figure 24 BSISO1과 BSISO2의 동시 발생 빈도. 각 축은 해당 모드의 위상을 나타냄

Figure 24는 BSISO1과 BSISO2가 지난 30년간 동시에 발생한 날의 횟수와 그 때의 각 모드의 위상을 나타내는 그림이다. 그 결과 BSISO1의 위상 3과 BSISO2의 위상 2, 그리고 BSISO1의 위상 7과 BSISO2의 위상 8이 각각 24회로 가장 많은 횟수로 동시 발생하였는데, 이 때의 Figure 1과 2의 상향장파복사 아노말리 합성장을 비교하면 BSISO1의 위상 3과 BSISO2의 위상 2 시기에 공통적으로 인도양 동쪽에 강한 대류활동이 위치하고, BSISO1 위상 7과 BSISO2의 위상8의 합성장의 경우 전반적인 공간 패턴이 비슷하다. 하지만 이 시기 동아시아 지역과 그 주변의 상향복사 아노말리 분포는 상이한 만큼 이러한 상황이 발생했을 때 해석에 각별히 주의를 기울여야 할 것으로 보인다.

3.3.2 이동특성에 따른 BSISO 사례 구분

Straub (2013), Stachnik et al (2015)은 RMM 지수를 바탕으로 매든-줄리안 진

동 사례를 구분하여 그 생성과 소멸 등에 관한 연구를 진행하였다. Kim et al (2014) 도 매든-줄리안 진동의 이동특성에 따라 사례를 구분하여 그와 관련된 메커니즘을 규명하고자 하였다.

앞서 서술한 결과를 비추어 볼 때, BSISO는 매든-줄리안 진동에 비해 한 사이클의 길이가 짧아 예측에 어려움이 따른다. 본 연구에서는 BSISO 지수를 바탕으로 BSISO 사례를 이동하는 (propagating) 사례, 정체되어 있는 (non-propagating) 사례로 구분하여 향후 연구에 활용하고자 한다. 먼저 BSISO1과 2가 강도 1.5 이상을 유지하는 평균 기간이 각각 6일, 5일인 점을 착안하여 BSISO1(2)이 강도 1.5 이상을 연속 6(5)일동안 유지하는 케이스를 중심으로 각 사례들을 선정하였다. 각 사례 전후로 6일 이내에 강도가 1.5 이상인 날짜도 해당 사례에 포함하였다. 이때 BSISO의 이동 특성을 고려하기 위하여 위상이 1-2-3-4-5-6-7-8-1의 순으로 변하는 경우만을 사례 선정에 포함하였다. Figure 25와 26은 이러한 기준을 적용하여 선별해 낸 이동하는 사례(왼쪽)와 정체되어 사례(오른쪽)를 나타낸 것이다. 이 결과 BSISO1의 경우 57개의 이동하는 사례, 23개의 정체되어 있는 사례가, BSISO2의 경우 53개의 이동하는 사례, 16개의 정체되어 있는 사례가 선정되었다.

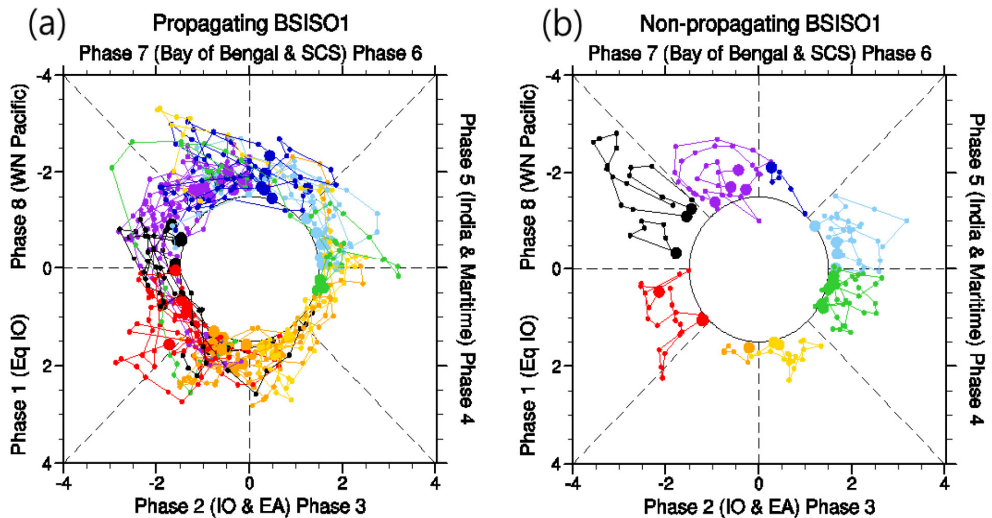


Figure 25 BSISO1의 (a) 이동하는 사례 (b) 정체하는 사례. 위상 1에서 시작하는 사례는 붉은색, 위상 2는 주황색, 위상 3은 노란색, 위상 4는 초록색, 위상 5는 하늘색, 위상 6은 파란색, 위상 7은 보라색, 위상 8은 검정색으로 표현하였다.

각 사례의 지속기간과 한 사례당 포함되어 있는 위상의 개수는 아래 Table 1에 정리되어 있다. 이동하는 사례는 정체되어 있는 사례보다 평균 지속기간이 길고 BSISO1, 2 각각 평균 약 세 개의 위상 전이를 거치는 것으로 나타났다.

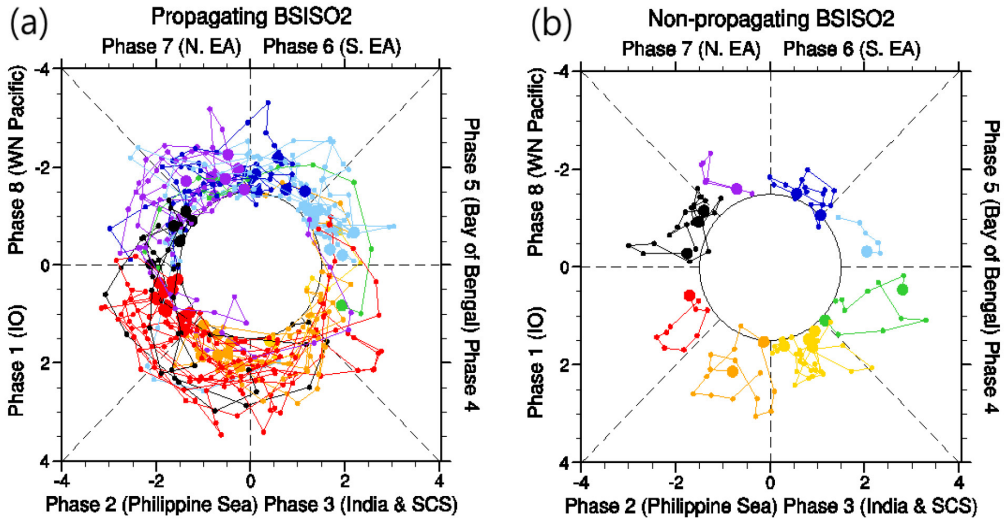


Figure 26 Figure 25와 동일하나 BSISO2에 해당하는 그림임.

Table 1 BSISO1, BSISO2 사례 평균 지속 기간 및 사례당 포함되어 있는 위상의 개수

	BSISO1		BSISO2	
	Propagating (57)	Non-Propagating (23)	Propagating (53)	Non-Propagating (16)
Duration (days)	11.40351	8.043478	10.36538	8
Number of phases	2.631579	1	3.134615	1

BSISO1의 경우 이동하는 전체 57개의 사례 중 15회가 5월에 발생하는데, BSISO2의 경우 전체 53개의 이동하는 사례 중 14회가 6월에 발생하는 것으로 나타났다. 한편 정체하는 사례의 경우 BSISO1은 23개의 사례 중 6회가 9월에 집중되어 있는 반면, BSISO2의 경우 16개의 정체 사례 절반 이상이 5월에 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 각 모드의 이동 특성과 동아시아 여름철에 발생하는 계절내 시간 규모의 기상 현상 간의 관련성에 대해 향후 더 많은 연구가 이루어질 수 있을 것으로 생각한다.

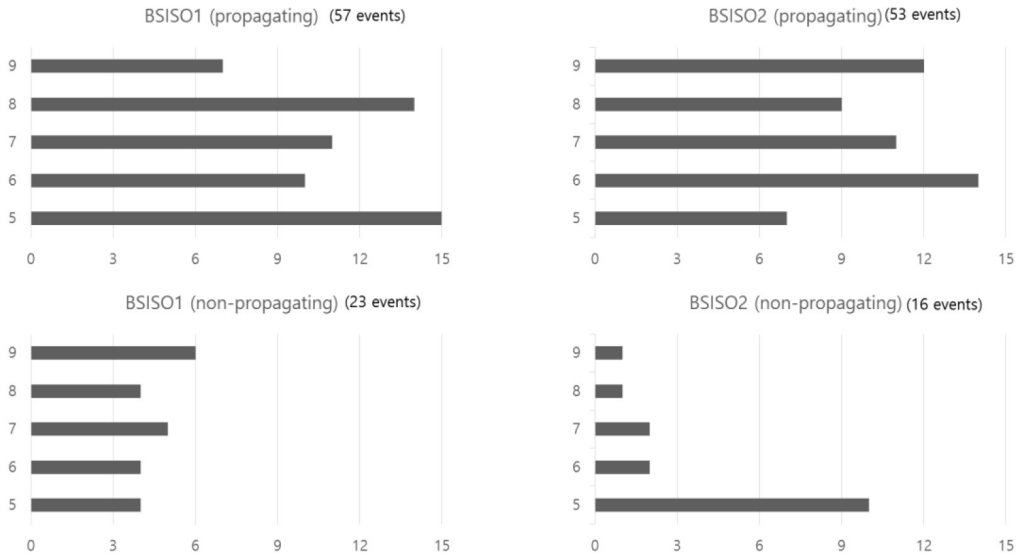


Figure 27 각 사례의 5-9월동안 월별 발생 횟수

3.4 장마와 BSISO와의 관련성

장마는 동아시아 몬순 시스템의 중요한 특징 중에 하나이며 이 시기에 집중적으로 내리는 비는 우리나라 연강수량의 30%를 차지한다 (Seo et al.,2011). 북태평양 고기압의 발달과 함께 하층에서 수증기가 공급되고, 우리나라 상공에는 제트기류가 위치 하면서 장마가 시작한다 (Seo et al.,2011). 이러한 장마전선 형성에 영향을 주는 여러 요소가 존재하는데 이중 계절내 진동은 장마의 시작과 종료를 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

Table 2는 기상청 국가기후데이터센터(sts.kma.go.kr)로부터 수집한 1981년부터 2016년의 전국 45개 지점 평균한 장마의 시작과 종료일, 기간 그리고 해당일의 BSISO1,2의 강도 및 위상을 나타낸 것이다. 우리나라는 남북방향으로 긴 지형적인 특징으로 제주, 남부지역과 중부지역의 장마 발생 시기에 차이가 비록 존재하지만 분석의 편의를 위해 전국 45개 지점 평균 일을 나타내었다. 본 연구에서 동아시아 지역의 강수 증가에 영향을 미치는 BSISO1의 위상 4, BSISO2의 위상 6이 1.0 이상의 강도를 가지고 발생하는 날과 장마 시작일이 겹치는 날은 각각 노란색과 녹색으로 표시하였다. 지난 36년동안 장마 시작일과 BSISO1의 위상 4를 나타내는 날이 겹치는

해는 모두 6회, BSISO2의 위상 6과 겹치는 해는 7회로 각각 평균 1.6, 2.0의 강도로 해당 위상이 나타났다. BSISO1의 위상 4와 장마 시작일이 겹치는 해 중 굵게 표시한 해는 엘니뇨가 쇠퇴하는 해를 나타내는데 2016년을 포함한 지금까지 강한 엘니뇨가 발생한 다음 찾아오는 여름 장마 발생 시기와 BSISO1의 위상 4의 발생일이 겹치는 것에 주목할 만하다.

Figure 28은 1981년부터 2016년까지 장마 시작일의 BSISO 위상 별 발생 빈도를 나타낸 것이다. 장마 시작일에 BSISO1의 위상 5, BSISO2의 위상 7의 발생 빈도가 가장 높았는데 이는 앞의 figure 5의 APHRODITE 강수를 동아시아 영역에 대해 평균한 값을 바탕으로 강조한 BSISO1 위상 4, BSISO2 위상 6에서 한 위상씩 증가한 위상이다. 이러한 위상의 차이는 관심 영역의 차이에서 (동아시아와 한반도) 비롯되거나 남북으로 긴 지형을 갖는 한반도의 남부 지방과 중부 지방의 장마 시작일이 다름에도 불구하고 전체 시작일에 대해 평균을 취함으로써 인해 오는 장마 시작일의 불확실성으로부터 기인하는 것으로 보인다. 그러나 강한 강도의 BSISO의 발생의 경우 적어도 두 개 이상의 위상에 걸쳐 진행되는 경향을 보인 것과 같이 향후 6월 APCC에서 제공되는 BSISO의 예측 결과 위상이 BSISO1의 경우 4 또는 5, BSISO2의 경우 6 또는 7로 나타날 경우 장마 시작일 예측에 참고할 수 있을 것으로 예상된다.

Table 2 1981-2016년 장마 시종일과 해당 일의 BSISO 강도와 위상. 노란색으로 표시한 해는 BSISO1의 위상 4의 발생일과 장마 시작일이 일치하는 해, 녹색으로 표시한 해는 BSISO2의 위상 6의 발생일과 장마 시작일이 일치하는 해를 나타낸다. 굵게 표시된 해는 엘니뇨 이듬 해를 나타낸다.

연도	장마			BSISO1		BSISO2	
	시작일	종료일	기간	강도	위상	강도	위상
1981	6월 19일	7월 14일	26	1.417	5	2.368	3
1982	7월 7일	7월 29일	23	0.473	2	0.842	7
1983	6월 19일	7월 25일	37	1.332	4	0.265	2
1984	6월 15일	7월 13일	29	1.652	7	0.826	7
1985	6월 21일	7월 18일	28	2.346	5	1.386	2
1986	6월 23일	7월 26일	34	2.171	5	0.671	5
1987	7월 1일	8월 8일	39	1.22	5	1.312	3
1988	6월 23일	7월 27일	35	1.806	8	1.649	6
1989	6월 23일	7월 29일	37	1.131	7	0.291	3
1990	6월 19일	7월 19일	31	2.151	5	2.013	8
1991	6월 26일	8월 2일	38	0.733	3	0.41	7
1992	7월 9일	7월 23일	15	1.416	3	0.545	6
1993	6월 22일	7월 30일	39	0.701	5	0.775	7
1994	6월 22일	7월 6일	15	1.44	5	1.37	7
1995	6월 30일	7월 27일	28	0.648	3	0.489	3
1996	6월 24일	7월 22일	29	0.203	5	1.547	6
1997	6월 25일	7월 22일	28	1.233	6	0.596	2
1998	6월 24일	7월 28일	35	1.305	4	1.553	3
1999	6월 23일	7월 10일	18	0.305	1	3.328	6
2000	6월 21일	7월 16일	26	0.636	2	0.664	6
2001	6월 22일	7월 21일	30	2.169	5	0.676	8
2002	6월 23일	7월 24일	32	1.164	4	1.79	5
2003	6월 23일	7월 25일	33	1.536	3	1.712	5
2004	6월 24일	7월 17일	24	2.064	7	2.644	7
2005	6월 26일	7월 18일	23	1.286	5	1.083	6
2006	6월 21일	7월 29일	39	1.557	3	2.166	2
2007	6월 21일	7월 24일	34	2.035	4	1.286	2
2008	6월 17일	7월 26일	40	1.044	6	2.224	6
2009	6월 28일	7월 21일	24	1.642	2	1.086	7
2010	6월 18일	7월 28일	41	0.987	4	1.714	7
2011	6월 10일	7월 10일	31	1.106	5	2.149	6
2012	6월 18일	7월 17일	30	1.025	6	0.787	5
2013	6월 18일	8월 2일	46	1.648	5	0.728	1
2014	7월 2일	7월 29일	28	0.448	5	1.558	8
2015	6월 25일	7월 29일	35	1.1816	6	2.716	6
2016	6월 24일	7월 30일	32	2.304	4	0.806	2

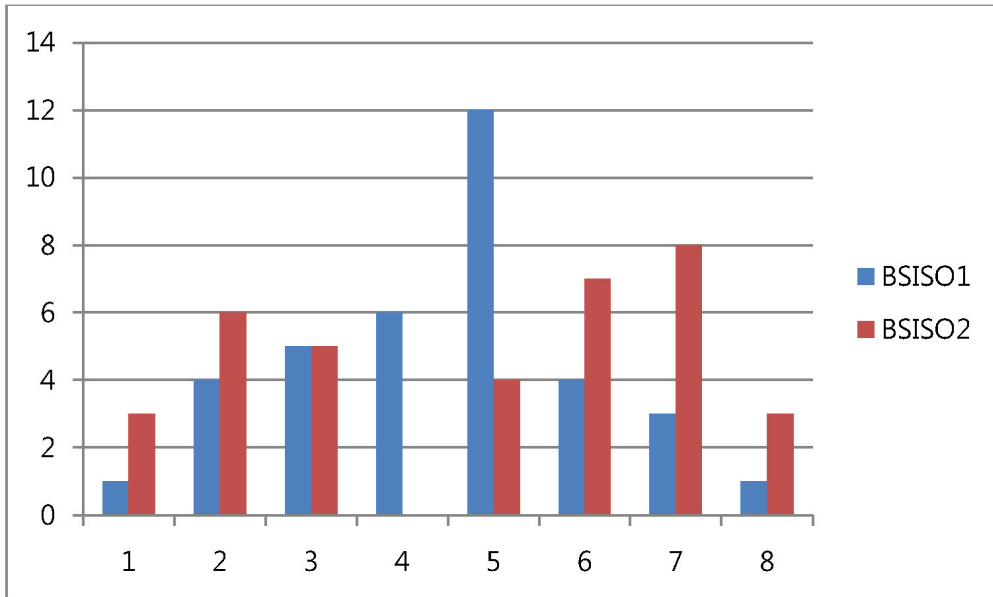


Figure 28 장마시작일 BSISO 위상 별 발생 빈도수 (1981-2016년)

4. 결론 및 토론

본 연구는 동아시아 강수 현상에 영향을 미치는 여름철 계절내 진동의 두 모드에 대한 상세한 연구를 통하여 현재 제공되고 있는 BSISO 예측 정보에 대한 사용자의 이해를 도움으로써, 궁극적으로 예측 정보의 활용도를 증진시키기 위해 수행되었다. 1981년부터 2010년까지의 다양한 관측 자료를 토대로 연구를 진행하였으며, 동아시아 여름철 강수량의 증가는 BSISO1의 위상 4, BSISO2의 위상 6과 밀접한 관련이 있음을 보였다. 이 시기 BSISO1, BSISO2 두 모드는 필리핀 해 대기 하층에 고기압성 순환을 동반하며 이로 인해 많은 수증기가 동아시아 지역에 공급되면서 강수의 증가를 가져오는 공통점을 보인다. 또한 이 시기 두 모드 공통적으로 동아시아 남쪽에는 강한 하강운동과 더불어 동아시아 지역에는 강한 상승 운동이 자리잡게 된다. 이와 함께 고도가 증가할수록 북쪽으로 기울어진 서풍 아노말리가 동아시아 지역에 나타난다.

이 두 시기 500hPa 지위고도 합성장을 북반구 전체에 대하여 살펴보면, BSISO1 위상 4에 나타나는 동아시아 주변의 기압 패턴은 서태평양부터 북아메리카에 이르는 파동의 일부를 이루고 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 BSISO2의 위상 6의 경우, 넓은 지역에 걸친 파동은 나타나지 않고 동아시아를 중심으로만 500hPa 지위고도 아노말리 패턴이 삼극자 (tripole) 형태로 나타난다. 이와 같은 중위도지역의 넓은 규모의 기압장의 차이를 유발하는 요인으로서 BSISO가 동반하는 대류활동에 의한 비단열적 가열을 생각해볼 수 있다. 이를 확인하기 위해 BSISO1의 위상 4와 BSISO2의 위상 6의 대류 활동이 최대로 활발한 지역과 최대로 억제된 지역을 각각 살펴보았다. 그 결과 BSISO1의 위상 4의 경우, 인도양에서 활발한 대류활동이 발생하는 반면에 서태평양에서는 억제된 대류활동이 억제되는 동서방향의 이중구조 (dipole) 형태로 나타남을 보였다. BSISO2의 경우 동인도양 북부 벵골만에 가장 활발한 대류활동이 위치하고 그 남쪽으로 대류활동이 가장 크게 억제되는 형태를 보였다. 이와 관련된 연직 순환장을 살펴본 결과, BSISO1의 위상 4의 경우 동서방향의 순환이 두드러진 지역적인 워커순환 (Walker circulation)의 형태를 띠는 반면에, BSISO2의 위상 6의 경우 남북방향의 순환이 두드러진 지역적인 해들리 순환 (Hadley circulation)의 형태를 띠는 것을 확인할 수 있었다. 즉, BSISO1의 위상4와 BSISO2의 위상 6이 동아

시아 지역의 강수 증가를 유발하는 국지적인 순환장의 형태는 유사하나 이를 구성하는 대규모 순환장의 형태에는 큰 차이가 있고, 이는 두 모드간의 대류활동의 차이에서 기인한다고 요약할 수 있겠다.

향후 이와 같이 서로 다른 두 모드의 발생과 관련된 메커니즘에 대해 보다 자세한 연구를 수행할 계획이다. BSISO 합성 분석에 선택된 날로부터 한달 이전에 해당하는 해수면 온도 합성 분석 결과 BSISO1의 위상 4와 BSISO2의 위상 6과 관련하여 인도양 해수면 온도 분포의 차이를 확인할 수 있었다 (not shown). BSISO1의 위상 4가 발생하기 한 달 전부터, 인도양 전체적으로 해수면 온도의 양의 아노말리가 두드러지는 반면에 BSISO2의 위상 6의 경우 Maritime Continent를 중심으로 해수면 온도의 음의 아노말리가 우세하다. Lin et al (2011)은 여름철 계절내 진동과 관련한 인도양에서의 대기-해양 효과를 규명하기 위해, 모델 실험을 통하여 대기-해양 효과의 경년변동이 여름철 계절내 진동의 강도와 진행 방향에 영향을 줌을 보였다. 한편, 20세기 들어 인도양의 해수면 온도의 두드러진 상승도 (Hoerling et al. 2004; Du and Xie 2008) BSISO의 최근 활동에 영향을 상당 부분 끼쳤을 것으로 짐작된다 (Sabeerali et al, 2014).

또한 본 연구에서 과거 장마 시작 일과 BSISO 발생 일자를 비교한 결과, 흥미롭게도 겨울철 엘니뇨가 최대로 성숙하고 쇠퇴하는 이듬 해 여름에는 BSISO1의 위상 4와 장마 시작일이 일치하는 경향이 있음을 보였는데 이는 Xie et al. (2009)의 연구 결과와 어느 정도 관련이 있을 것으로 추정된다. Xie et al. (2009)는 필리핀 해의 하층 대기권의 고기압성 순환 발생과 관련한 메커니즘을 엘니뇨 이듬 해 여름 인도양과 서태평양 사이의 해수면 온도차가 증가함으로 인해 켈빈파 (Kelvin wave) 의 형성과 연관 지어 설명하였다. 이렇게 발생한 켈빈파는 대기 하층의 동서류를 유발하게 되고 이로 인해 아적도 지역에 발산장을 발생시켜 대류활동이 억제되고 고기압성 순환이 강해지게 된다. BSISO1의 위상 4와 관련한 해수면 온도 분포를 살펴본 결과, 이러한 인도양과 서태평양 사이의 차이가 두드러지는 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구에서 보인 BSISO1의 위상 4의 동서 방향의 두드러진 대류활동의 차이를 미루어 보아 이러한 메커니즘과 일정 부분 관련이 있는 것으로 추정된다.

본 연구에서는 또한 BSISO 지수의 과거 30년 자료를 바탕으로 기후학적인 특성을

살펴보고자 하였다. 위상에 따라 여름철 월별 변동성이 존재함을 확인할 수 있었고 BSISO2의 위상 6의 경우 그 강도가 6월에 두드러지게 증가함을 보였다. 이는 동아시아 지역의 강수 시기와 밀접한 관련이 있음을 시사한다.

BSISO 사례의 특성을 알아보기 위해 선행 연구를 기반으로 조건을 정해 지난 30년간 BSISO 사례를 구분하였다. 그 결과, 각 사례의 지속 기간은 평균 약 10일 정도이며 사례별 지속 위상은 약 3개 정도로 나타났다. 사례 구분을 통하여 BSISO가 이동하는 사례와 이동하지 않는 사례로 나누었는데 향후 이러한 이동특성에 관한 연구를 진행할 계획이다. BSISO2의 경우 6월에 이동하는 사례가 많이 발생하는 것으로 나타났는데 동아시아 강수 시기의 발달과도 관련이 있을 것으로 추측된다.

본 연구는 BSISO 현상에 대한 이해도를 높여 현재 제공되고 있는 APEC 기후 센터의 BSISO 예측 정보의 사용을 활성화 시키기 위한 목적으로 수행되었으며, 연구 결과는 또한 향후 장마 시기를 예측하는 데 뒷받침 될 수 있을 것으로 생각된다. 또한 APEC 기후 센터에서 개발한 전지구 접합 모델인 SCoPS가 계절내 예측 자료를 2018년부터 생산하였을 때 본 연구의 결과를 모델 성능 평가에 활용할 계획이다.

REFERENCE

- Annamalai, H. and Slingo, J.M., 2001. Active/break cycles: diagnosis of the intraseasonal variability of the Asian summer monsoon. *Climate Dynamics*, 18(1-2), pp.85-102.
- Chen, G. and Sui, C.H., 2010. Characteristics and origin of quasi-biweekly oscillation over the western North Pacific during boreal summer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D14).
- Ding, Q. and Wang, B., 2005. Circumglobal teleconnection in the northern hemisphere summer*. *Journal of Climate*, 18(17), pp.3483-3505.
- Fukutomi, Y. and Yasunari, T., 1999. 10-25 day Intraseasonal Variations of Convection and Circulation over East Asia and Western North Pacific during Early Summer. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 77(3), pp.753-769.
- Goswami, B.N., Wu, G. and Yasunari, T., 2006. The annual cycle, intraseasonal oscillations, and roadblock to seasonal predictability of the Asian summer monsoon. *Journal of climate*, 19(20), pp.5078-5099.
- Hoerling, M.P., Hurrell, J.W., Xu, T., Bates, G.T. and Phillips, A.S., 2004. Twentieth century North Atlantic climate change. Part II: Understanding the effect of Indian Ocean warming. *Climate Dynamics*, 23(3-4), pp.391-405.
- Jia, X. and Yang, S., 2013. Impact of the quasi-biweekly oscillation over the western North Pacific on East Asian subtropical monsoon during early summer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(10), pp.4421-4434.
- Kim, D., Kug, J.S. and Sobel, A.H., 2014. Propagating versus nonpropagating Madden-Julian oscillation events. *Journal of Climate*, 27(1), pp.111-125.
- Krishnamurthy, V. and Achuthavari, D., 2012. Intraseasonal oscillations of the monsoon circulation over South Asia. *Climate dynamics*, 38(11-12), pp.2335-2353.
- Lau, K.M. and Chan, P.H., 1986. Aspects of the 40-50 day oscillation during the northern summer as inferred from outgoing longwave radiation. *Monthly Weather Review*, 114(7), pp.1354-1367.
- _____, Yang, G.J. and Shen, S.H., 1988. Seasonal and intraseasonal climatology of summer monsoon rainfall over East Asia. *Monthly Weather Review*, 116(1), pp.18-37.
- Li, L. and Zhang, Y., 2014. Effects of different configurations of the East Asian subtropical and polar front jets on precipitation during the mei-yu season. *Journal of Climate*, 27(17), pp.6660-6672.
- Lee, J.Y., Wang, B., Wheeler, M.C., Fu, X., Waliser, D.E. and Kang, I.S., 2013. Real-time

- multivariate indices for the boreal summer intraseasonal oscillation over the Asian summer monsoon region. *Climate Dynamics*, 40(1-2), pp.493-509.
- Lu, R., 2004. Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(1), pp.155-165.
- Nitta, T., 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 65(3), pp.373-390
- Sabeerali, C.T., Rao, S.A., George, G., Rao, D.N., Mahapatra, S., Kulkarni, A. and Murtugudde, R., 2014. Modulation of monsoon intraseasonal oscillations in the recent warming period. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(9), pp.5185-5203.
- Sampe, T. and Xie, S.P., 2010. Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu Rainband: environmental forcing by the westerly jet*. *Journal of Climate*, 23(1), pp.113-134.
- Seo, K.H., Son, J.H. and Lee, J.Y., 2011. A new look at Changma. *Atmosphere*, 21(1), pp.109-121.
- Stachnik, J.P., Waliser, D.E. and Majda, A.J., 2015. Precursor environmental conditions associated with the termination of Madden-Julian oscillation events. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72(5), pp.1908-1931
- Straub, K.H., 2013. MJO initiation in the real-time multivariate MJO index. *Journal of Climate*, 26(4), pp.1130-1151.
- Terao, T. and Kubota, T., 2005. East-west SST contrast over the tropical oceans and the post El Niño western North Pacific summer monsoon. *Geophysical research letters*, 32(15).
- Wang, B. and Zhang, Q., 2002. Pacific-East Asian teleconnection. Part II: how the Philippine Sea anomalous anticyclone is established during El Niño development*. *Journal of climate*, 15(22), pp.3252-3265.
- Xie, S.P., Hu, K., Hafner, J., Tokinaga, H., Du, Y., Huang, G. and Sampe, T., 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *Journal of Climate*, 22(3), pp.730-747
- Yim, S.Y., Wang, B. and Xing, W., 2015. Peak-summer East Asian rainfall predictability and prediction part II: extratropical East Asia. *Climate Dynamics*, pp.1-16.
- Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N. and Kito, A., 2012. APHRODITE: Constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(9), pp.1401-1415.

연구보고서 2016-07

여름철 계절내 진동의 기후학적 특성 분석 및
동아시아 여름 강수와 대기 순환장에 미치는 영향에
관한 연구

Understanding BSISO events and their Impact on the Characteristics of
Rainfall and Atmospheric Circulation over East Asia

오지현



APEC 기후센터
48058 부산광역시 해운대구 센텀7로12
Tel: 051-745-3900 Fax: 051-745-3949
www.apcc21.org



ISBN 979-11-5698-158-9