

2016년 한반도 장마 강수 특성 분석

김진용¹⁾ · 서경환^{1)*} · 예상욱²⁾ · 김현경³⁾ · 임소영³⁾ · 이현수³⁾ · 권민호⁴⁾ · 함유근⁵⁾

¹⁾부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학과, ²⁾한양대학교 해양융합과학과,
³⁾기상청, ⁴⁾한국해양과학기술원, ⁵⁾전남대학교 해양학과

(접수일: 2017년 4월 26일, 수정일: 2017년 7월 25일, 게재확정일: 2017년 9월 1일)

Analysis of Characteristics for 2016 Changma Rainfall

Jin-Yong Kim¹⁾, Kyong-Hwan Seo^{1)*}, Sang-Wook Yeh²⁾, Hyun-Kyung Kim³⁾,
So-Young Yim³⁾, Hyun-Soo Lee³⁾, MinHo Kown⁴⁾, and Yoo-Geun Ham⁵⁾

¹⁾Department of Atmospheric Sciences, Division of Earth Environmental System,
Pusan National University, Busan, Korea

²⁾Department of Marine Sciences and Convergence Technology, Hanyang University, Ansan, Korea

³⁾Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

⁴⁾Ocean Circulation and Climate Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Korea

⁵⁾Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, Korea

(Manuscript received 26 April 2017; revised 25 July 2017; accepted 1 September 2017)

Abstract Characteristics of precipitation in South Korea during the 2016 Changma period (6/18~7/30) are analyzed in great details. El Niño-induced tropical Indian Ocean (IO) basin-wide warming lasts from spring to early summer and induces the western North Pacific subtropical high (WNPSH) circulation anomaly through an equatorial Kelvin wave during the 2016 Changma period. Along the northern edge of the WNPSH, strong precipitation occurred, in particular, over eastern China and southern Japan. During the Changma period, South Korea had the near-normal mean precipitation amount (~332 mm). However, about 226 mm of rain fell in South Korea during 1 July to 6 July, which amounts to 67% of total Changma precipitation in that year. Upper-level synoptic migratory lows and low-level moisture transport played an essential role, especially from 1 July to 3 July, in triggering an abrupt development of fronts over the Korean Peninsula and the eastern continent China. The front over the eastern China migrates progressively eastward, which results in heavy rainfall over the Korean peninsula from 1 to 3 July. In contrast, from 4 to 6 July, the typhoon (NEPARTAK) affected an abrupt northward advance of the North Pacific subtropical high (NPSH). The northward extension of the NPSH strengthens the Changma front and induces the southerly flows toward the Korean peninsula, giving rise to an increase in heavy rainfall. The NEPARTAK is generated due to interaction of the Madden-Julian Oscillation (MJO), equatorial Rossby wave and Kelvin waves.

Key words: Changma, precipitation, heavy rainfall, Changma front, NEPARTAK

*Corresponding Author: Kyong-Hwan Seo, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University, Busandaehak-ro, 63 beon-gil 2, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea.
Phone: +82-51-512-9946, Fax: +82-51-515-1689
E-mail: khseo@pusan.ac.kr

1. 서 론

2016년의 열대 태평양은 1982/83 및 1997/98 수준에 버금가는 강한 엘니뇨가 겨울철 동안 발달하였고 이에 영향을 받아 2016년 전 지구 평균기온(1~12월)은 20세기(1910~2000년)의 평균기온(14.0°C)보다 0.94°C 높아 관측이 시작된 1880년 이래 가장 높은 온도를 기록했으며 전 세계적으로 많은 사회·경제적인 손실이 발생했을 것으로 추정하고 있다. 특히, 여름철의 전 지구 평균기온은 20세기 평균기온(15.6°C)보다 약 0.6°C 높아 관측이래 여름철 기간 중 가장 높은 기온을 나타냈고, 2016년 봄철부터 여름철까지 인도, 태국, 일본, 중국, 이라크, 미국 등의 세계 각지에서 발생한 폭염과 가뭄으로 인해 많은 인명 및 재산 피해가 발생하였다(NOAA, 2017). 한편, 2016년 6월 미국 버지니아, 웨스트버지니아주에서는 100년 만의 최악의 홍수로 24명이 사망하였고, 루이지애나 주에서는 2일간 약 600 mm의 누적 강수를 기록하여 13명이 사망하고 2만여 명의 이재민이 발생했다. 일본의 바이우(Baiu) 기간 내 10일(6/21~6/30) 동안 구마모토현에서 시간당 최고 150 mm, 누적 강수량 920 mm로 평년대비 3배 이상에 달하는 강수가 내렸고, 중국 북부의 메이유(Meiyu) 기간 내 3일(7/19~7/21) 간 내린 692 mm의 강수로 인해 최소 203명의 사상자와 1천만여 명의 이재민이 생기는 등 단기간 집중 호우 및 폭우로 인한 피해도 전 지구 많은 지역에 걸쳐 나타났다(KMA, 2017).

2016년 우리나라 연평균기온은 13.6°C로 평년(12.5°C)보다 약 1.1°C 높아 1973년 관측이래 최고 1위를 기록하였으며 한 해 동안의 누적 전국 강수량은 평년(1307.7 mm) 수준에 해당하는 1272.5 mm (평년대비 97.3%)로 나타났다. 2016년 여름철 강수량(446.2 mm)은 평년(723.2 mm) 대비 약 61.7%로 적었으며, 특히 8월 강수량이 76 mm (평년대비 28%)로 45개 지점의 관측값이 존재하는 1973년 이래 역대 최저치를 기록하였다. 한편, 장마기간(6/18~7/30) 동안의 전국평균 강수량은 332.1 mm로 평년(356.1 mm) 대비 약 93.2%로 평년과 비슷한 수준이었지만 약 226 mm (67.0%)의 강수가 7월 1일~7월 6일 동안에 집중되어 나타나는 특징을 보였다.

우리나라 연 총 강수량 중 약 50~60%에 해당하는 강수가 여름철 동안 내리며, 특히 장마기간에 내리는 강수는 연 강수량 대비 약 26~32%를 차지한다(Seo et al., 2011; KMA, 2011). 많은 양의 강수가 동반되는 장마기간 동안 한반도는 주변에 위치한 서로 다른 성질을 가진 기단들의 영향을 받아 강수의 형태가 매우 복잡한 형태로 나타날 수 있다(Seo et al., 2011, 2015). Lee and Kim (2007)에서는 2000~2006년의 장마기간

을 포함한 여름철에 나타난 집중호우 사례를 토대로 한반도 호우 시스템을 독립 뇌우(isolated thunderstorm), 대류 밴드(convection band), 구름 무리(cloud cluster), 스콜선(squall line)으로 분류하였다. Park and Lee (2008)에서는 2004년 장마기간 내에 발생한 호우 사례에 대한 분석과 수치 모형실험을 통해 장마전선의 부근에서의 수분 수렴과 상승기류가 강해짐에 따라 대류의 호조조건이 유지되고 대류선 방향으로 지속적으로 공급되는 호우 세포의 유입선상에서 강한 호우가 나타날 수 있음을 밝혔다. Kim and Lee (2016)에서 2011년 6월 29일 서울 및 경기지역에 발생한 집중호우는 강한 하층 제트 발달, 하층 제트 북쪽에서의 기압골과 수렴 구역 발달, 그리고 지형 효과 등이 중요한 인자였음을 밝혔다. KMA (2012)에서는 1998년부터 2011년까지 있었던 집중호우 10개 사례를 중심으로 강수 특성, 피해 상황, 3차원 기상분석을 통해 다양한 유형의 집중호우에 대한 이해를 증진 시켰다.

국내 국가기관 및 연구소에서 매해 장마 강수 특성에 대한 분석을 하고 있지만 이는 단순 통계나 전반적인 특성의 이해에 중점을 두고 있어 2016년 7월 초와 같이 단기간에 집중하여 많은 강수가 내린 사례에 대한 상세 분석은 이루어지지 않았다. 장마기간에 발생하는 집중호우는 많은 인명과 재산피해를 야기할 수 있고 물수지에도 지대한 영향을 미치기 때문에 집중호우 발생의 원인을 찾아 피해를 예방하는 것은 중요한 과제이다. 또한, 2016년 7월의 집중 호우는 기존의 한반도 집중 호우 사례 분석들에서 밝힌 메커니즘으로는 설명되지 않는 부분이 있어 2016년 7월에 발생한 집중 호우 사례는 한반도 집중 호우 메커니즘을 이해하는데 있어 중요한 과제이다.

따라서 본 연구에서는 2016년 우리나라 여름철 장마 강수와 관련된 대기 및 해양 변수들을 바탕으로 장마의 전반적인 특성을 분석하고, 7월 1일부터 7월 6일까지의 집중호우에 영향을 준 인자와 그 발생 원인을 상세 분석할 것이다.

2. 자료 및 분석방법

본 연구에서는 한반도 장마기간 일 누적 강수를 구하기 위한 관측 값으로 기상청 45개 기상관측소의 강수 자료를 평균하여 사용하였다. 또한 전 지구 해양 및 대기 순환의 변동을 분석하기 위해 0.25° × 0.25° 격자 간격의 NOAA OISST (National Oceanic and Atmospheric Administration Optimum Interpolation SST version 2) 해수면 온도 자료를 1° × 1°로 보간하여 사용하였고 2.5° × 2.5° 격자 간격의 NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy) R2 재분석 자료를 사용하였다(Kanamitsu et

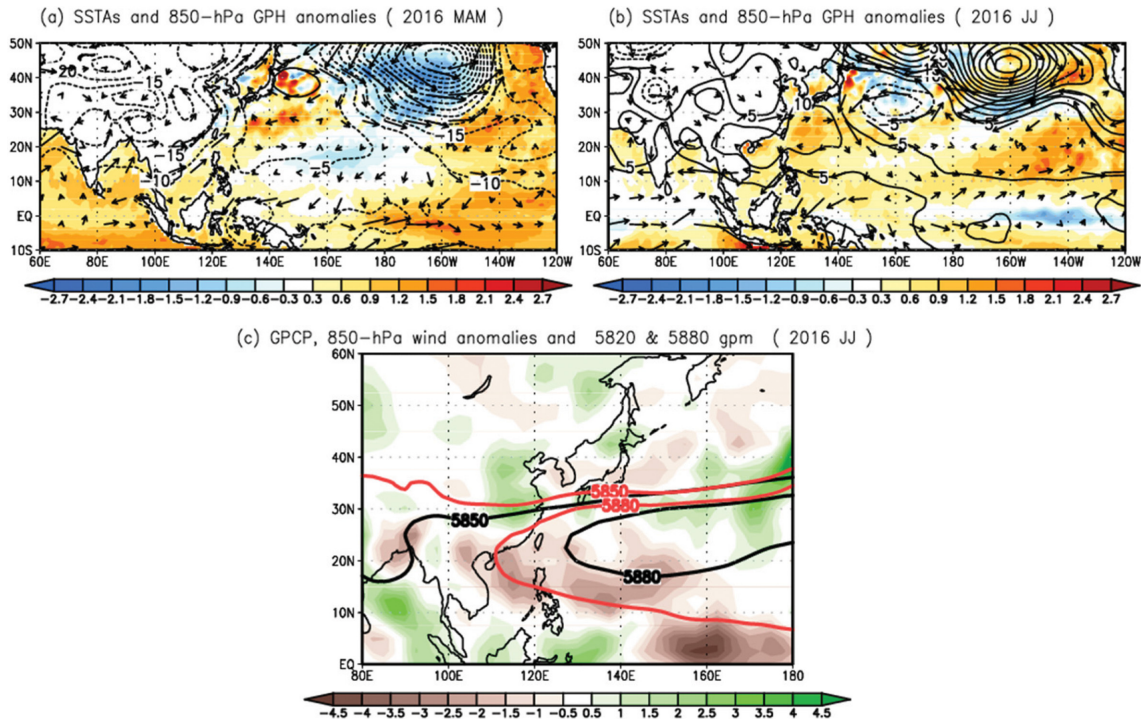


Fig. 1. (a) SSTAs (shading, intervals of 0.3 K), 850-hPa geopotential height anomalies (contour, intervals of 5 m), 850-hPa wind anomalies (vector, Unit: $m s^{-1}$) anomaly during spring time in 2016. (b) SSTAs and 850-hPa geopotential height anomalies during early summer (June~July) in 2016. (c) GPCP anomalies (shading, intervals of 0.5 $mm day^{-1}$) and 500-hPa geopotential height at 5850 gpm and 5880 gpm (contour, black for climatological mean, red for 2016, Unit: m) during early summer (June~July) in 2016.

al., 2002). 또한, 한반도와 그 주변의 강수 패턴을 분석하기 위해 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 간격의 GPCP (Global Precipitation Climatology Project) 1일, 5일, 월평균 강수 자료를 사용하였으며 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 간격의 NOAA OLR (NOAA Daily Outgoing Longwave Radiation) 상향 장파 복사 자료를 사용하였다(Huffman et al., 1997). 해수면 온도 자료는 2016년 3월부터 7월까지 총 5개월 자료에 대해 분석을 수행하였고 NCEP/DOE 재분석 자료와 GPCP 강수 자료, 상향 장파 복사 자료는 1982년부터 2016년까지 총 35년 자료에 대해 분석을 수행하였다. 여기서 GPCP 강수의 일 평균 강수 자료는 2015년 10월까지만 제공되어 2016년의 강수 분석에는 5일 평균 및 월평균 자료를 사용하고 일 평균 자료는 상향 장파 복사로 대신해서 사용한다.

한편, 열대지역에서 발생하는 여러 종류의 파동은 열대지역의 특성을 가정한 천수 방정식의 해에서 각 파수, 주기 및 전파 방향에 따라 분류할 수 있다. 본 연구에서는 1~5의 파수와 20~90일 주기를 가지고 동진하는 매든-줄리안 진동(Madden-Julian Oscillation; MJO)과 1~10의 파수와 9~72일 주기를 가지고 서진

하는 적도 로스비 파동(Equatorial Rossby (ER) waves) 과 1~14의 파수와 2.5~20일 주기를 가지고 동진하는 켈빈 파동(Kelvin waves) 중심으로 분석한다(Wheeler and Kiladis, 1999; Straub and Kiladis, 2002; Kiladis et al., 2005; Kiladis et al., 2009; Seo et al., 2012). 각 열대 파동 성분은 일평균 상향 장파 복사 아노말리 자료를 기반으로 필터링하여 계산한다.

본 연구에서는 열대 저압부 생성의 빈도와 높은 상관성이 있는 생성 잠재 지수(Genesis Potential Index; GPI)를 활용한다(Emanuel and Nolan, 2004). GPI는 다음 식으로 계산하였다.

$$GPI = |10^5 \eta|^{3/2} \left(\frac{H}{50}\right)^3 \left(\frac{V_{pot}}{70}\right)^3 (1 + 0.1 V_{shear})^{-2} \quad (1)$$

여기서 η 는 절대와도(s^{-1}), H 는 700 hPa 상대 습도(%), V_{pot} 는 잠재 강도($m s^{-1}$) 그리고 V_{shear} 는 대기 상층 200 hPa과 하층 850 hPa의 바람 차이를 나타내는 연직 시어를 의미한다. 그리고 잠재 강도는 열대 저기압이 발생했을 때 최대 나타날 수 있는 지표 풍속을 의미하며 해수면온도, 해면기압, 대기 연직 온도, 혼합비,

대류가용잠재에너지(Convective Available Potential Energy; CAPE)를 이용하여 구할 수 있다(Emanuel, 1995). 연직 자료는 1000 hPa부터 70 hPa까지 총 13개 층 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 2016년 장마기간에 나타난 대기순환 및 해양의 변화

2016년 봄철과 여름철의 대기 순환 및 해양의 변화가 한반도 장마 강수에 미친 영향을 분석하였다. Figure 1은 1981년부터 2010년까지의 기후 평균 값을 통해 구한 2016년 봄철(3~5월)과 이른 여름철(6~7월) 동안의 대기 및 해양의 아노말리 분포와 평균 값을 나타낸 그림으로 2016년 봄철과 이른 여름철 해수면온도 아노말리, 850 hPa 지위고도와 바람 아노말리의 분포를 Figs. 1a, b에 각각 나타내었다. 대기하층 850 hPa 지위고도 아노말리(Fig. 1a 실선)는 대륙과 해양 대부분 지역에서 음의 분포를 보였고, 음영으로 표현한 해수면 온도 아노말리는 중앙 태평양과 인도양에서 평년보다 높은 해수면온도를 보였다. 여기서 봄철 인도양에 전반적으로 높게 나타나는 해수면 온도 아노말리 분포는 엘니뇨 쇠퇴 시기에 나타나는 일반적인 패턴이다(Klein et al., 1999; Yang et al., 2007; Kosaka et al., 2013).

한편, 이른 여름철에는 엘니뇨가 쇠퇴 후 라니냐가 발달하는 시기로 동태평양에서 음의 해수면 온도 아노말리가 나타났고 인도양에서의 해수면 온도 아노말리는 봄철에 비해 다소 약해졌지만 양의 값을 가졌다(Fig. 1b). 그리고 뱅골만, 남중국해, 필리핀해 그리고 북서태평양 일부 지역(0~20°N, 80~140°E)까지 동풍 아노말리가 강하게 나타났고 이를 남쪽 경계로 하여 북서태평양 지역의 대기하층에 고기압성 순환(20~30°N, 100~160°E)이 강하게 발달했다. 이는 엘니뇨 쇠퇴기의 이른 여름철에 나타나는 일반적인 대기 특성과 밀접한 관련이 있다. 과거 많은 선행연구에서 엘니뇨 쇠퇴기에 봄철부터 이른 여름철까지 인도양에 나타나는 양의 해수면 온도 아노말리가 인도양과 북서태평양 지역에 걸쳐 적도 켈빈 파동과 관련된 동풍의 영향으로 무역풍을 강화 시키고, 이는 북서태평양 고기압(Western North Pacific Subtropical High; WNPSH)을 강화 시킬 수 있음을 관측과 수치 모델 실험을 통해 밝혔다(Xie et al., 2009; Ding et al., 2010; Wang et al., 2013).

Fig. 1c에서 음영으로 된 곳은 이른 여름철 동안의 GPCP 강수 아노말리를 나타내고 실선은 500 hPa에서의 5850 gpm과 5880 gpm을 나타낸 것이다. 여기서 진한 검은색 실선은 6~7월까지의 기후 평균된 값이고

진한 빨간색 실선은 2016년 6~7월 평균된 값이다. 여기서 5880 gpm은 WNPSH의 중심을 의미하고 5850 gpm은 WNPSH 세력의 범위를 의미한다. 2016년 이른 여름철 동안 WNPSH는 평년에 비해 뚜렷한 강화가 나타났는데, 5880 gpm을 기준으로 고기압의 중심이 중국 남동부 내륙까지 발달했고 5850 gpm을 기준으로 한반도의 남쪽(32°N)까지 세력이 확장되었다. 또한, 강하게 발달한 WNPSH가 대류 발생을 억제하여 북서태평양의 10~28°N 지역을 중심으로 강한 음의 강수 아노말리를 보였고 고기압 주변에서의 기층 불안정으로 인해 한반도 남쪽 32°N 부근에서 전선이 활성화되어 중국 동부와 북동부 내륙과 일본 남쪽에 평년보다 많은 양의 강수가 발생했으며 상대적으로 고위도에 위치한 한반도에는 약한 음의 강수 아노말리가 나타났다. 이는 Kim et al. (2017)에서 제시한 한반도 장마기간 강수 강도의 경년변동 통계 예측 모델 구축에 사용한 예측인자인 봄철 북인도양 지역의 해수면온도 아노말리가 양의 값을 가질 때 나타나는 대기 순환 및 강수 패턴과 유사하다. 정리하면, 2016년 이른 여름철에는 엘니뇨 쇠퇴와 관련된 인도양의 따뜻한 해수면 온도의 영향으로 WNPSH가 확장하여 한반도 보다 남쪽으로 전선을 활성화시켜 우리나라는 평년보다 적은 강수가 나타났다.

2016년 한반도 장마기간(6/18~7/30) 동안의 일 별 강수 특성을 파악하기 위해 우리나라 45개 지점 기상 관측소의 값을 평균한 일 누적 강수량의 기후값과 2016년 여름철 일 누적 강수량의 시계열을 Fig. 2에 나타냈다. 가로축은 날짜, 세로축은 일 누적 강수량을 나타낸다. 2016년 장마 기간 내의 강수량은 평년에 비해 대체로 적었지만 7월 1일부터 7월 6일까지 총 6일 동안 강수가 집중되어 나타났다. 이 기간에 내린 전국 평균 강수량은 222.6 mm로 2016년 장마기간에 내린 총 강수량의 약 67.0%에 해당한다. 특히, 7월 1일에 50 mm 이상의 많은 강수가 발생했고 이후 7월 2일과 7월 3일의 강수는 다소 감소하는 추세를 보이다 7월 4일에 다시 50 mm 이상의 강한 강수가 나타난 후 5일과 6일에는 다소 감소하는 특징을 보였다. 따라서 7월 1일부터 3일까지 발생한 강수와 7월 4일부터 6일까지 집중된 강수를 분리하여 분석할 필요가 있다.

3.2 2016년 7월 1일~7월 3일에 나타난 집중 호우 특성 분석

2016년 7월 1일부터 3일까지 집중된 강수에 영향을 준 인자들에 대한 분석을 위해 6월 29일부터 7월 3일까지의 1일 간격 평균과 7월 1일~7월 3일 평균한 기간에 대한 대기 변수의 아노말리 분포를 Fig. 3에 나타냈다. 그림에서 음영은 대기 최상층에서의 상향

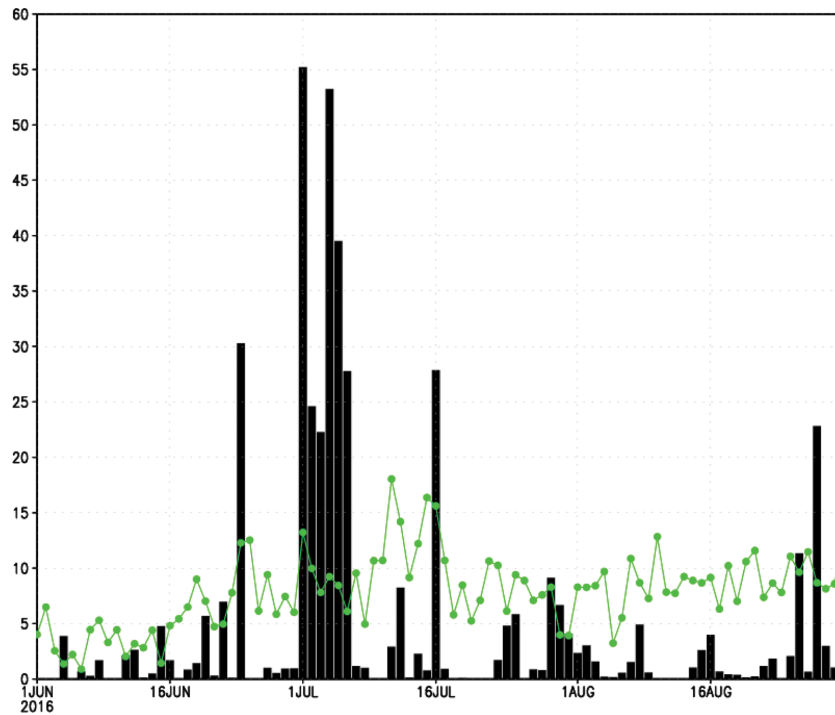


Fig. 2. Daily precipitation climatology (green line) and daily precipitation amounts in 2016 summer (JJA) (black bar) averaged at 45 meteorological stations in South Korea.

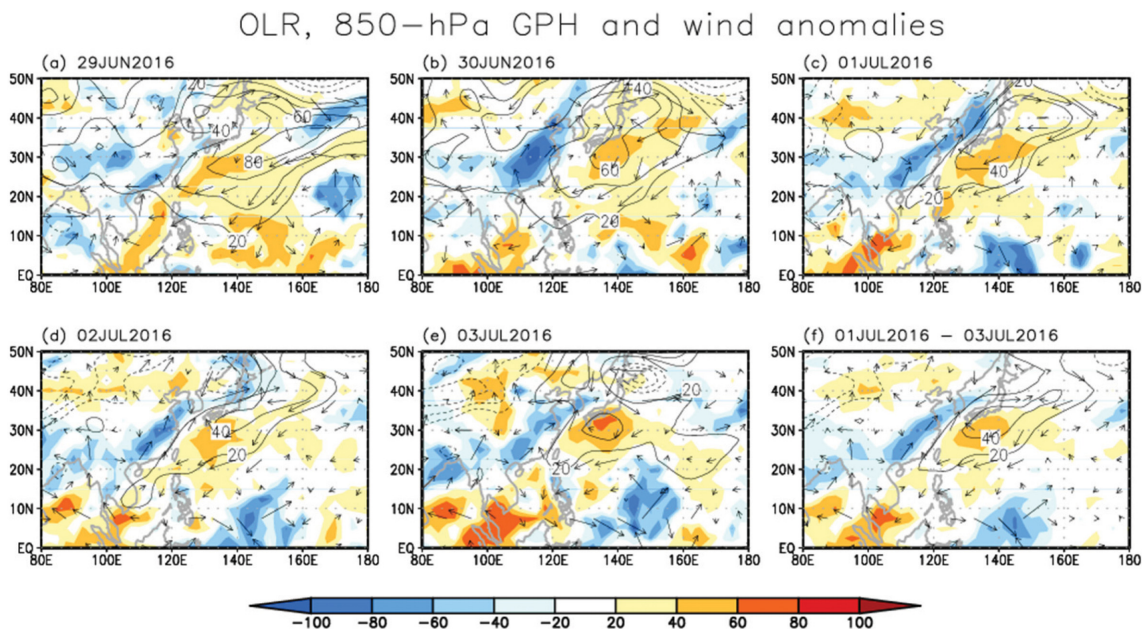


Fig. 3. (a)-(e) Temporal evolution of OLR anomalies (shading, intervals of 10 W m^{-2}), 850-hPa geopotential height anomalies (blue contour, intervals of 10 m) and 850-hPa wind anomalies (vector, Unit: m s^{-1}) from 29 June to 3 July for 2016. (f) OLR, 850-hPa geopotential height anomalies and 850-hPa wind anomalies from 1 July to 3 July for 2016.

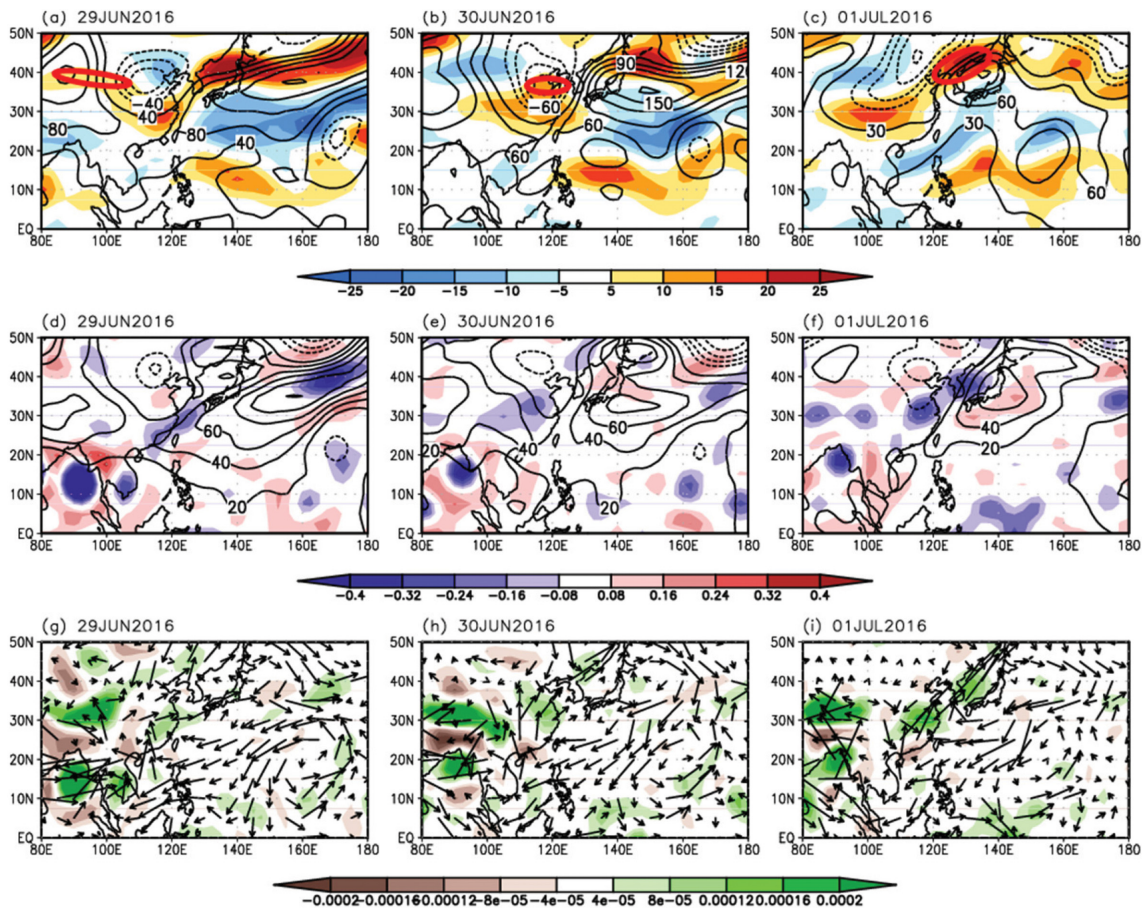


Fig. 4. (a)-(c) Temporal evolution of 200-hPa zonal wind anomalies (shading, intervals of 5 m s^{-1}) and 200-hPa geopotential height anomalies (black contour, intervals of 40 m) and 200-hPa zonal wind of 30 m s^{-1} (red contour) from 29 June to 1 July for 2016. (d)-(f) same as (a)-(c) but for 500-hPa omega anomalies (shading, intervals of 0.08 Pa s^{-1}) and 500-hPa geopotential height anomalies (contour, intervals of 20 m). (g)-(i) same as (a)-(c) but for 850-hPa moisture convergence anomalies (shading, intervals of $4 \times 10^{-4} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and 850-hPa moisture flux anomalies (vector, Unit: m s^{-1}).

장파 복사(Outgoing Longwave Radiation) 아노말리, 점선은 850 hPa 지위고도 아노말리 그리고 벡터는 850 hPa 바람 아노말리 분포를 나타낸다. 상향 장파 복사 아노말리는 강수 아노말리와 유사한 강도와 시공간적 특징을 나타내므로 강수로 간주하여 해석한다. 2016년 6월 29일에 일본 동남쪽(32°N , 155°E)을 중심으로 발달한 고기압성 순환의 가장자리(40 gpm)를 따라 남중국 내륙과 연안과 한반도 남쪽에 걸쳐 강수대가 나타났다(Fig. 3a). 6월 30일에는 일본 남쪽(30°N , 140°E)으로 고기압성 순환의 중심이 남서쪽으로 이동해 남중국해에서의 남풍 기류를 강화 시켜 중국 동부 내륙에 수분 수송이 증가했고 메이유 전선이 활성화되었다(Fig. 3b). 이후 중국 동부 내륙에서 활성화된 메이유 전선대가 점차 한반도 쪽으로 동진하며 7월 1일부

터 3일까지 우리나라에 강한 강수가 나타났다(Figs. 3c, d, e, f).

여기서 우리나라에 7월 1일부터 3일까지 강한 강수가 나타난 주요한 요인은 중국 북동부 지역에서 발달한 대기 상층 경압파의 영향으로 활성화된 장마 전선과 메이유 전선의 영향으로 분석된다. 이에 대한 상세 분석을 위해 대기 상층, 중층, 하층의 관련 변수에 대한 6월 29일과 7월 1일의 1일 간격 평균에 대한 아노말리 분포를 Fig. 4에 나타냈다. Figures 4a, b, c에서 음영으로 표현한 곳은 200 hPa 동서 바람 아노말리이고 검은색 실선은 200 hPa 지위고도 아노말리이고 빨간색 실선은 30 m s^{-1} 이상인 200 hPa 동서 바람 지역을 나타낸다. Figures 4d, e, f에서 음영으로 나타낸 곳은 500 hPa 오메가 아노말리이고 실선은 500

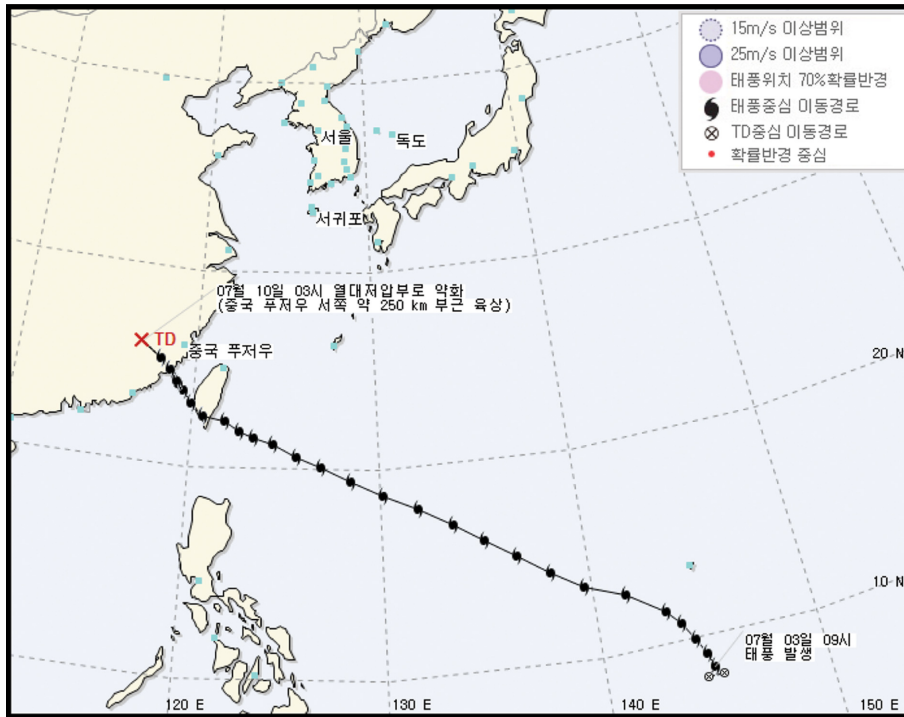


Fig. 5. Typhoon track of NEPARTAK the 1st typhoon of 2016. Adopted from Korea Meteorological Administration (<http://www.kma.go.kr/>).

hPa 지위고도 아노말리 분포이다. Figures 4g, h, i에서 음영으로 나타낸 곳은 850 hPa 수분 수렴 아노말리고 벡터는 850 hPa 수분 플럭스 아노말리를 나타낸다.

6월 29일에는 중국 산둥반도 지역의 대기 중층과 상층에 기압골이 위치해 있고 한반도와 일본의 동쪽에 중심을 둔 대기 중층과 상층에 기압능이 강하게 발달했다(Figs. 4a, d). 여기서 6월 29일의 산둥반도에 위치한 기압골은 6월 27일에 바이칼호 근처에서 발생한 종관규모 경압과 형태의 저기압이 동진하여 발달한 것으로 이때 30 m s^{-1} 이상의 강한 풍속을 가지는 제트(빨간색 실선)는 중국 내륙($35^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)을 중심으로 나타났다(Fig. 4a). 6월 30일에는 일본 동쪽에 중심을 둔 기압능에 막혀 동진하지 못한 상층 기압골이 정체되며 강하게 발달했다(Fig. 4b). 여기서 상층 기압골의 북서쪽 경계로는 동풍 아노말리가 나타났고 남쪽 경계에서는 서풍 아노말리가 강하게 나타나 6월 29일에 중국 내륙을 중심으로 나타난 제트 기류가 기존 위치의 동쪽으로 이동해 산둥반도($33^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$)로 이동했다(Fig. 4b). 그리고 제트의 입구 남쪽($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)에서 간접 순환으로 인한 발산이 나타나 대기 하층에서부터 강한 상승류가 나타났다(Fig. 4e). 또한, 6월 30일에 남중국해에서의 남

풍 기류로 수분 수송이 활발하게 일어나 중국 동부 내륙에 강한 수분 수렴이 발생했고 습윤한 공기가 상승하며 메이유 전선을 활성화 시켰다(Fig. 4h). 이때 발달한 메이유 전선의 강수대는 점차 한반도로 동진하여 7월 1일부터 3일까지 우리나라에 많은 강수를 동반했다.

7월 1일에는 한반도 남쪽의 대기 하층에서 남서풍이 강화되어 우리나라로 유입되는 수분 수송이 증가했고 산둥반도에 위치한 상층 기압골은 계속해서 일본 동쪽의 기압능과 서로 대치하며 한반도 이북 지역에서의 서풍을 강화시켜 제트의 중심(빨간색 실선)이 한반도의 북쪽($35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)으로 이동해 제트의 입구 남쪽에 위치한 한반도와 중국 동부 내륙을 중심으로 대기 하층에서부터 강한 상승류를 유도하여 장마 전선을 활성화시켜 우리나라에 많은 강수가 나타났다(Figs. 4c, f, i). 7월 2일과 3일에도 남서풍에 의한 대기 하층의 수분 수렴과 제트의 입구 남쪽에서의 대기 상층 발산으로 인한 강한 상승류가 동반되어 한반도에 전선이 활성화되며 강수가 지속되었다(보이지 않음).

과거 장마 강수에 대한 많은 선행연구에서는 습윤한 하층 기류 유입, 북태평양 고기압(NPSH)의 북상

OLR, 850-hPa GPH and wind anomalies

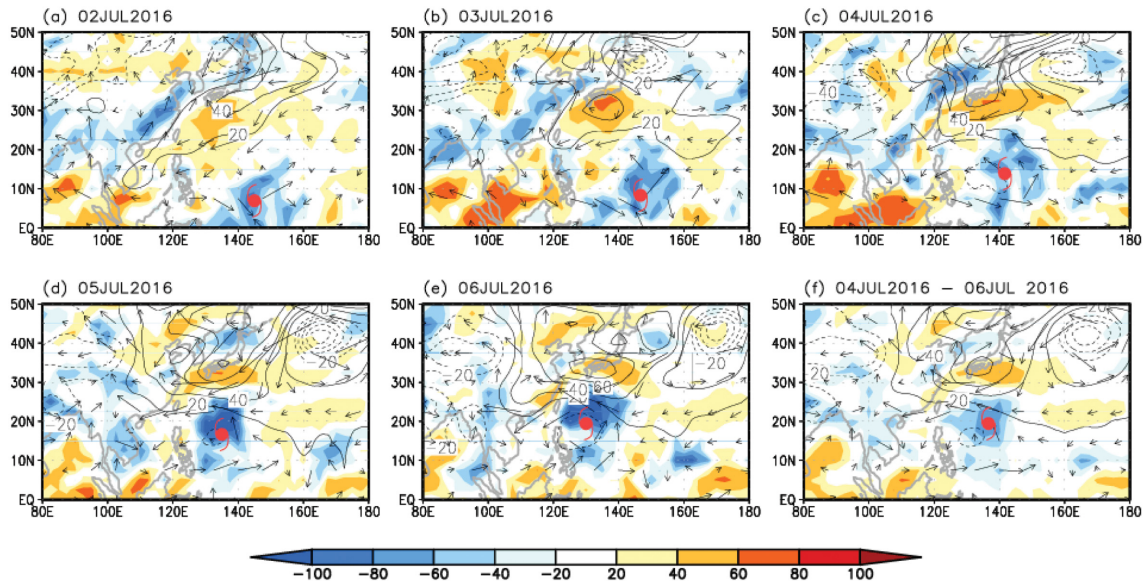


Fig. 6. (a)–(e) Same as Figs. 3a–e but for 2 June to 6 July for 2016. (f) Same as Fig. 3f but for 4 July to 6 July for 2016. The typhoon NEPARTAK temporal center position is marked by the typhoon symbol.

그리고 상층 제트의 위치 및 강화가 장마 전선 활성화에 영향을 주는 주요 대기 순환 요소라고 밝혔다 (Kang et al., 1999; Sun and Lee, 2002; Shin and Lee, 2005; Seo et al., 2011). 2016년 7월 1일부터 3일까지 우리나라에 발생한 강수는 위의 세 조건을 모두 만족하며 나타난 장마 전선의 활성화와 중국 동부 내륙에서 발달한 메이유 전선의 영향을 복합적으로 받은 것으로 분석된다.

3.3 2016년 7월 4일~7월 6일에 나타난 집중 호우 특성 분석

7월 4일부터 6일까지의 집중 호우는 7월 3일 필리핀해 동쪽 해상에서 발달한 제1호 태풍 네파탁 (NEPARTAK)의 간접 영향을 받았다. Figure 5는 네파탁의 생성과 소멸 위치 그리고 경로를 표기한 그림이다. Figure 5에서 7월 2일 필리핀해 동쪽(8°N, 145°E)에서 발생한 열대 저압부(Tropical Depression; TD)가 7월 3일 9시경에 소형 태풍(Tropical Storm; TS) 성장하였고 점차 북서진 하여 7월 5일에는 점차 강해져 강한 태풍(Typhoon)으로 발달하여 중심 기압이 900 hPa 까지 내려갔다. 이후 대만을 지나 7월 10일 3시에 중국 푸저우 서쪽 약 250 km 부근 육상으로 상륙하면서 열대 저압부로 약화되었다.

이에 대한 상세 분석을 위해 7월 2일부터 7월 6일 사이의 1일 간격 평균과 7월 4일~7월 6일 평균한 기

간에 대한 대기 변수의 아노말리 분포와 태풍 네파탁의 중심 위치를 Fig. 6에 나타냈다. 그림에서 음영은 상향 장파 복사 아노말리, 점선은 850 hPa 지위고도 아노말리 그리고 벡터는 850 hPa 바람 아노말리 분포를 나타낸다. 본 연구에서 재분석 자료를 통해 나타난 아노말리 분포에서도 Fig. 5에서 나타난 태풍의 발달 및 전파가 잘 나타난다(Figs. 6a, b, c). 여기서 점차 북서진하는 태풍 네파탁의 영향으로 북서태평양에 자리 잡고 있던 고기압성 순환이 북쪽으로 밀려나 7월 4일에는 일본 남쪽 내륙을 중심으로 발달하여 NPSH의 북쪽 확장이 나타났다(Fig. 6c). 이는 기단의 대치를 강화 시키고 한반도 남쪽에서 남서풍 기류를 유도해 장마 전선을 활성화시키는 요인으로 작용하였고 7월 5일과 7월 6일에도 점차 북서진하는 네파탁의 영향으로 일본 남쪽 내륙을 중심으로 발달한 고기압성 순환에 의해 장마 전선이 유지되며 강수가 지속되었다(Figs. 6d, e). 7월 4일부터 6일까지 평균된 아노말리 분포에서는 일본 남쪽 내륙에 중심(33°N, 135°E)을 둔 고기압 아노말리의 영향으로 기단의 대치가 강해지고 한반도의 남쪽에 남서풍 기류가 유도되며 한반도 중부지방을 중심으로 전선이 활성화된 모습이 뚜렷하게 나타났다(Fig. 6f). 이 시기에 발달한 고기압성 순환은 태풍 네파탁이 강제력으로 작용하여 만들어내는 대기 원격 상관 패턴으로 인한 영향도 함께 받아 강화되는 것으로 보인다.

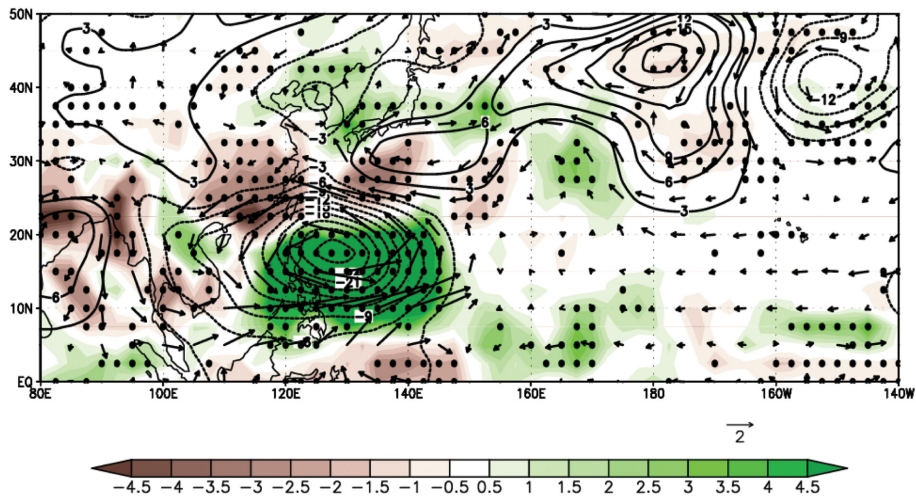


Fig. 7. Composite map (24 TC cases) of GPCP anomaly (shading, intervals of 0.5 mm day^{-1}), 850-hPa geopotential height anomaly (contour, intervals of 3 m), 850-hPa wind anomaly (vector, m s^{-1}) from 1994 to 2015. Black dots indicate the GPCP anomaly region that exceeds the 90% confidence level based on a Student's t test.

여기서 7월 4일은 일본 남쪽에 위치한 고기압성 순환의 영향으로 기단의 대치가 강화되었고 한반도의 남쪽에 남서풍 기류가 활성화되어 7월 4일부터 6일 사이의 집중 호우 기간 중 우리나라에 가장 많은 강수량이 나타났다. 한편, 7월 5일과 6일에는 고기압성 순환의 강화는 뚜렷하게 나타났지만 그 중심이 다소 서쪽으로 이동하여 한반도 남쪽에서의 남풍 기류는 약화되어 4일에 비해 상대적으로 적은 강수가 나타났다(Figs. 6d, e). 과거 많은 선행 연구에서 NPSH의 북쪽 확장이 장마 전선의 활성화에 영향을 줄 수 있고 이에 영향을 주는 요인에 대한 다양한 분석이 이루어졌다. 하지만 2016년 7월 4일에서 6일에 나타난 집중 호우의 요인 중 필리핀해 동쪽에서 남중국해를 지나는 태풍의 간접 영향으로 나타나는 기압계의 변동과 이와 연관된 한반도 강수에 초점을 맞춰 분석한 연구는 없었다.

본 연구에서는 태풍 네파탁과 유사한 경로로 이동한 과거 태풍 사례의 분석을 위해 1994년부터 2015년 사이의 여름철 장마기간 내에 발생한 태풍이 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 를 지나는 날짜에 대해 관련 변수의 아노말리를 더한 합성장(총 24개 사례) 분포를 Fig. 7에 나타냈다. 그림에서 음영으로 된 곳은 강수 아노말리, 실선은 850 hPa 지위고도 아노말리, 벡터는 850 hPa 바람 아노말리를 나타내고 강수 변동이 유의한 영역을 검은색 점으로 나타냈다. 태풍의 중심은 필리핀해($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)에 위치하고 일본 남쪽에 고기압성 순환이 강화되어 나타나 한반도 남쪽에서 남풍 기류가 강화되어 우리나라로 유입되는 수증기

수송을 증가시킨다. 여기서 한반도에서의 강수 증가는 90% 수준에서 유의하게 나타나지 않지만 우리나라에 해당하는 $32.5^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$ 영역을 평균하여 검정한 결과는 90% 수준에서 유의하게 나타났으며 우리나라 45개 지점 기상관측소의 강수 자료를 평균하여 구한 검정에서도 유의하게 나타났다. 이는 사용한 GPCP 자료가 재분석 자료로 온전한 관측값에 비해 다소 스무딩(smoothing) 되는 효과가 반영된 결과로 보인다. 한편, Fig. 7의 합성장 분포에서는 일본 남쪽에 고기압이 위치해 한반도 남쪽에서 남풍이나 남동풍 계열의 바람이 나타나지만 2016년의 경우에는 일본 남쪽 내륙을 중심으로 고기압의 강화되어 한반도 남쪽에서 남서풍 계열의 바람이 주로 나타났다. 이는 한반도 장마기간에 태풍의 발생으로 나타나는 북서태평양 지역에서의 저기압성 순환과 이로 인해 북진한 고기압성 순환의 구조에서 보이는 남풍 계열의 바람이 수증기 수송에 중요한 역할을 한다는 것을 의미한다.

Figure 7의 합성장 분포에서 나타난 대기 순환장 및 바람과 강수의 특징은 Lee and Seo (2013)와 Kim et al. (2017)에서 제시한 한반도 장마 강수를 증가시키는 기압 및 강수 구조와 매우 유사하다. 해당 연구에서는 봄철 중앙태평양 지역의 음의 해수면온도 아노말리가 한반도 장마기간 동안에 북서태평양 대기 하층에 저기압, 일본 동쪽에 고기압성 순환을 형성하고 한반도 남쪽에 남동풍 아노말리를 유도하여 우리나라로 수송되는 수증기 수송을 증가시켜 우리나라 강수를 증가시킬 수 있음을 밝혔다. 이러한 결과는 우리

OLR (Shading), MJO_OLR (Black contour), ER waves (Red contour), Kelvin waves (Blue contour)

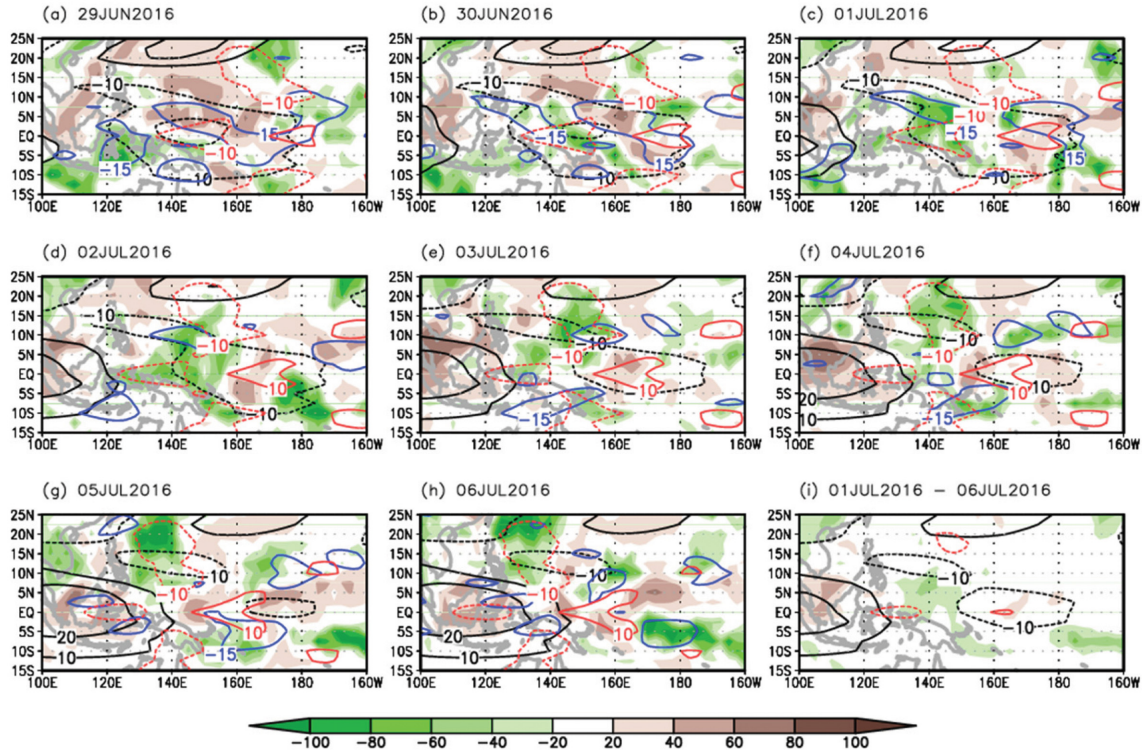


Fig. 8. (a)-(h) Temporal evolution of OLR anomalies (shading, intervals of 20 W m^{-2}), MJO_OLR (black contour, intervals of 10), Equatorial Rossby waves (red contour, intervals of 10) and Kelvin waves (blue contour, intervals of 15) from 29 June to 3 July for 2016. (i) OLR anomalies, 850-hPa geopotential height anomalies and 850-hPa wind anomalies from 1 July to 6 July for 2016.

나라 주변에서 발생하는 고기압성 순환의 위치 즉, NPSH의 북진 양상에 매우 민감하게 영향을 받는다는 것을 시사한다.

한편, 7월 4일부터 6일까지 발생한 집중호우의 가장 큰 요인인 태풍 네파탁의 생성 원인은 열대 파동의 분석을 통해 알 수 있다. Maloney and Hartmann (2001)에서는 재분석 자료를 통해 MJO에 의해 발생하는 대기 하층의 서풍에 의해 평균류로부터 순압 에디 운동 에너지가 성장하고, 강한 지표 수렴과 대기 하층의 저기압성 순환 그리고 높은 해수면 온도가 동반될 때 열대 저기압의 형성에 좋은 조건을 만들 수 있다고 밝혔다. Lombardo (2004)에서는 재분석 자료를 통해 적도 로스비 파동과 연관된 대기 하층 서풍이 저기압성 순환을 발달 시킬 수 있는 요인이 될 수 있음을 밝혔다. 본 연구에서는 태풍 네파탁의 생성 과정에서 나타난 열대 파동의 영향을 분석하기 위해 6월 29일부터 7월 6일까지의 1일 간격 평균과 7월 1일~7월 6일 평균한 기간에 대한 대기 변수의 아노말리

리와 열대 파동 성분의 분포를 Fig. 8에 나타냈다. 그림에서 음영은 상향 장파 복사 아노말리, 검은색 실선은 MJO_OLR, 빨간색 실선은 적도 로스비 파동 성분 그리고 파란색 실선은 켈빈 파동 성분을 나타낸다. MJO를 표현한 실선에서 음의 값은 대류가 발달하는 영역이고 양의 값은 대류가 억제되는 영역이다.

Figure 8i에서 7월 1일부터 6일까지 평균한 분포에서는 열대 파동의 뚜렷한 특징이 나타나진 않는다. 한편, 6월 29일에 적도 서태평양 $10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 지역에 중심을 두고 있는 MJO 대류 성분과 북서태평양 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $160^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$ 지역에 위치한 적도 로스비 파동 그리고 6월 30일에 적도 서태평양 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 지역에 위치한 켈빈 파동에 주목할 필요가 있다(Figs. 8a, b). 7월 1일까지 적도 서태평양에 위치한 MJO의 대류 성분 뚜렷한 움직임 없이 정체되어 있었고 북서 태평양에 위치한 적도 로스비 파동은 점차 서진하여 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $145^{\circ}\sim 165^{\circ}\text{E}$ 에 위치했으며 켈빈 파동은 점차 동진하여 $0^{\circ}\sim 12^{\circ}\text{N}$, $125^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$

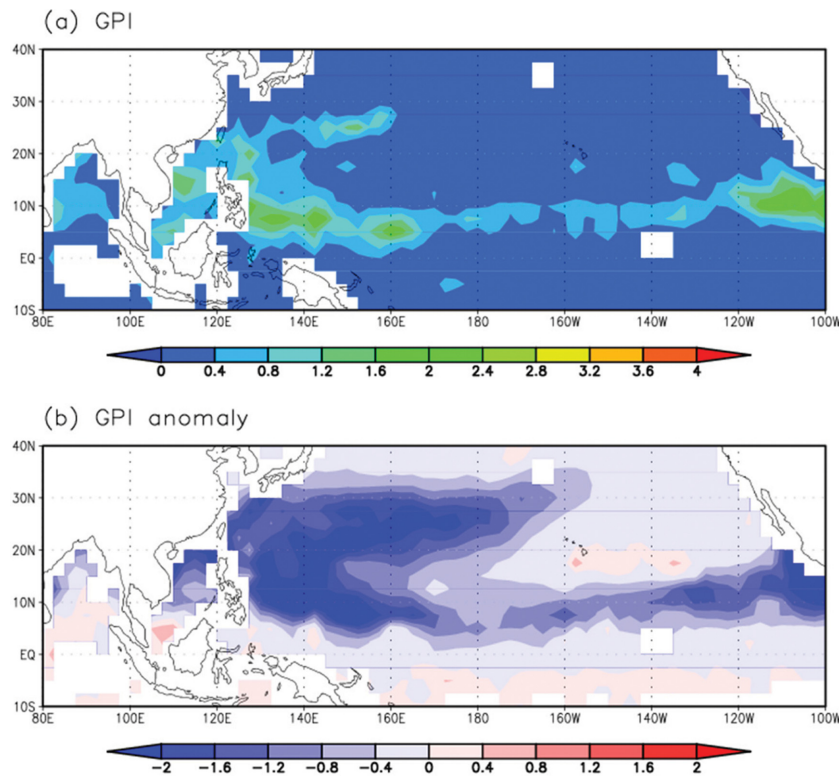


Fig. 9. (a) Mean field of Genesis potential index (intervals of 0.4) and (b) GPI anomalies during Changma period (6/18~7/30) in 2016.

에 위치했다(Figs. 8b, c). 7월 2일에는 MJO의 북서쪽 가장자리와 적도 로스비 파동 그리고 켈빈 파동이 서로 만나면서(5°~15°N, 140°~160°E) 열대 저압부가 생성되었고 7월 3일에는 소형 태풍으로 발달하였다(Figs. 8d, e). 이후 7월 4일부터 6일까지는 적도에 위치한 MJO 성분은 거의 소멸하고 켈빈 파동은 동쪽으로 빠져나갔으며 적도 로스비 파동 성분과 북서쪽 경계에 있었던 MJO 대류 성분만 남아 점차 북서진하였다(Figs. 8f, g, h).

그리고 2016년에 발생한 태풍은 총 26개로 평년(25.6)과 비슷한 수준이었지만 2016년 1월부터 6월까지의 단 하나의 태풍도 발생하지 않았고 이는 1월부터 6월까지 평균 4개의 태풍이 발생한다는 것을 고려하면 매우 이례적인 사례로 꼽힌다. Gray (1968)는 5°N 이상인 지역에서 27°C 이상의 해수면온도와, 약한 연직시어($< 10 \text{ m s}^{-1}$), 대류 불안정, 대기 중층(700 hPa)에서의 높은 상대 습도, 대기 하층에서 양의 상대와도가 강할 때에 열대 저기압이 잘 생성되는 경향이 나타남을 밝혔다. 그리고 Emanuel and Nolan (2004)에서는 열대 저기압 생성에 영향을 줄 수 있는 역학적, 열역학적 변수와 전구에 생성된 열대 저기압의 관

측값을 사용하여 경험적 지수(GPI)를 정의하였다. 이는 열대 저기압 발생의 가능성을 나타내는 일반적인 지표로 활용되고 있다.

본 연구에서는 2016년 장마기간 동안의 열대 저기압 발생 가능성을 확인하기 위해 장마기간에 대한 GPI의 평균과 그 1981년부터 2010년까지의 기후 평균 값을 뺀 아노말리를 Fig. 9에 나타냈다. Figure 9a에서 2016년 장마기간 동안의 평균 GPI의 분포에서는 열대 서태평양과 북서태평양 지역에서 0.8~2.4 사이의 값이 나타났고 Fig. 9b에서 GPI의 편차는 북서태평양 대부분의 지역에서 음의 분포를 보여 평년에 비해 열대 저기압 발생이 억제되는 상황이었다. 이는 대규모 시공간 배경장이 태풍 발생을 억제하는 경향을 가지더라도 계절 내 시간 규모의 열대 파동들에 의한 상호 작용으로 태풍이 발생할 수 있고, 태풍의 경로에 영향을 미칠 수 있음을 암시한다.

4. 요약 및 제언

본 연구에서는 2016년 한반도 장마 기간 동안에 나타난 대기 순환 및 강수의 특징과 7월 1일부터 6일까

지 나타난 집중 호우의 원인을 상세 분석하였다.

2016년 봄철 엘니뇨 쇠퇴기에 나타난 인도양의 해수면온도 아노말리는 이른 여름철 인도양과 북서태평양 전반에 걸쳐 적도 켈빈 파동과 관련된 동풍 아노말리를 강화시켜 북서태평양 지역에 고기압성 순환을 발생시켰다. WNPSH의 확장으로 한반도 남쪽 중국 내륙과 일본 남쪽을 중심으로 강한 강수가 나타났고 한반도는 다소 적은 강수 아노말리가 나타났다. 2016년 장마기간 동안의 전국 평균 강수량은 332.1 mm로 평년 수준이었지만 이 중 226 mm (67.0%)의 강수가 7월 1일~7월 6일 동안에 집중되어 나타나는 특징을 보였다.

7월 1일부터 3일까지 내린 강수의 주요 원인은 경압과 형태의 상층 기압골의 영향으로 이로 인한 한반도 강수 생성 과정은 다음과 같다.

- 6월 27일 바이칼호에서 생성된 경압과 형태의 상층 기압골이 동진하여 일본 동쪽의 기압능과 대치를 이루며 점차 강화되었고 6월 30일에 상층 제트기류와 기압골의 중심이 산둥반도에 나타났다. 상층 제트 입구 남쪽에서 발생한 간접 순환으로 강한 발산이 나타나 대기 하층으로부터의 상승류를 유도했으며 남중국해에서 남풍 기류의 강화로 중국 동부 내륙으로 수분 수송이 증가하여 상승류를 따라 메이유 전선이 활성화되었다. 발달한 전선은 점차 동쪽으로 이동하여 7월 1일부터 3일까지 한반도를 지나며 많은 강수를 동반했다.

- 산둥반도 대기 상층에 위치한 기압골이 일본 동쪽에 중심을 둔 기압능과 대치를 이루며 7월 1일부터 3일까지 한반도와 중국 동부 내륙에서의 상층 발산을 지속적으로 유도하여 장마 전선을 활성화시켜 한반도에 강수가 지속적으로 나타났다.

7월 4일부터 6일까지 내린 강수의 주요 원인은 태풍 네파탁의 간접 영향으로 이로 인한 한반도 강수 발생 과정은 다음과 같다.

- 7월 3일에 발생한 제1호 태풍 네파탁의 영향으로 NPSH의 북쪽 확장이 나타나 기단의 대치를 강화시키고 한반도 남쪽으로 남서풍 기류를 유도해 우리나라로 수분 수송을 증가시켜 장마 전선이 활성화되어 한반도에 많은 강수가 나타났다.

7월 4일부터 6일까지 우리나라에 발생한 집중호우 사례 분석에서 나타난 대기 순환의 특징에서 알 수 있는 사실은 NPSH의 북쪽 확장이 나타날 때 그 위치와 강도에 따라 우리나라의 강수 강도가 많은 영향을 받을 수 있다는 것이다. 본 연구에서는 NPSH의 확장에 영향을 미칠 수 있는 대기 순환 및 기후 요소에 대한 분석을 통해 우리나라 강수 발생 과정에 대한 이해도를 높였다는데 의미가 있다.

그리고 2016년 태풍 네파탁과 유사한 이동 경로를

가지는 태풍 사례는 지난 22년간(1994~2015) 총 24개가 있었다. 여기서 선정된 24개의 태풍이 10°~20°N, 125°~140°E 지역을 지나는 날짜에 대한 관련 변수의 아노말리 합성장 분포에서는 태풍에 의해 NPSH의 북쪽 확장이 유도되어 기단의 대치를 강하게 만들고 한반도로의 수증기 수분 수송을 증가시켜 전선이 활성화되었고 우리나라에 많은 강수가 발생했다. 이는 여름철 장마기간 내에 발생하는 태풍의 영향으로 한반도 주변에서 나타나는 고기압의 위치와 강도가 변하고 이 과정에서 우리나라의 강수가 증가할 수 있다는 것을 시사한다.

한편, 2016년 장마기간 동안 MJO 대류 성분과 적도 로스비 파동 그리고 켈빈 파동이 만나 대규모 시공간 배경장이 태풍 발생을 억제하는 환경에서도 열대 저압부로 발달할 수 있음을 밝혔다. 본 사례와 같이 우연적으로 발생한 태풍의 영향을 예단하기는 매우 힘들기 때문에 주로 대규모 순환장의 변동에 초점을 맞추어 분석하는 우리나라 장마 강수의 장기 예측의 경우엔 불확실성이 증가할 수 있는 하나의 요인으로 작용할 수 있다.

한편, NPSH의 북쪽 확장이 장마 전선의 활성화와 우리나라 강수에 밀접한 관련이 있다는 사실은 많은 연구를 통해 밝혀진 바 있지만, 실제로 NPSH의 확장 모두가 우리나라 장마 강수를 증가시키는 것이 아니다. 즉, 미묘하게 달라지는 NPSH의 북쪽 확장 정도에 따라 전선의 발달 유무 및 생성 위치가 민감하게 반응하여 우리나라의 강수의 강수 양상도 매우 복잡하게 나타날 수 있다. 따라서, 추후 연구에서는 관측 자료와 모델 실험의 결과를 통한 상세 분석으로 NPSH의 북쪽 확장이 한반도 장마 강수에 미치는 영향을 명확히 밝히고자 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발관리단의 기후변화 감시 예측 및 국가정책지원 강화사업(KMIPA 2015-2113)의 지원으로 수행되었습니다. 좋은 제의와 코멘트를 해 주신 두 심사위원께 감사드립니다.

REFERENCES

- Ding, R. Q., K.-J., Ha, and J. P. Li, 2010: Interdecadal shift in the relationship between the East Asian summer monsoon and the tropical Indian Ocean. *Climate Dyn.*, **34**, 1059-1071, doi:10.1007/s00382-009-0555-2.
- Emanuel, K. A., 1995: The behavior of a simple hurricane

- model using a convective scheme based on subcloud-layer entropy equilibrium. *J. Atmos. Sci.*, **52**, 3960-3968.
- _____, and D. S. Nolan, 2004: Tropical cyclone activity and global climate. Preprints, *26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology*, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., 240-241.
- Gray, W. M., 1968: Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 669-700.
- Huffman, G. J., and Coauthors, 1997: The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 5-20.
- 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, doi:10.1175/BAMS-83-11-1631.
- Kang, I.-S., C.-H. Ho, Y.-K. Lim, and K.-M. Lau, 1999: Principal modes of climatological seasonal and intraseasonal variations of the Asian summer monsoon. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 322-340.
- Kiladis, G. N., K. H. Straub, and P. T. Haertel, 2005: Zonal and vertical structure of the Madden-Julian oscillation. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 2790-2809.
- _____, M. C. Wheeler, P. T. Haertel, K. H. Straub, and P. E. Roundy, 2009: Convectively coupled equatorial waves. *Rev. Geophys.*, **47**, RG2003, doi:10.1029/2008RG000266.
- Kim, A.-H., and T.-Y. Lee, 2016: A study of a heavy rainfall event in the middle Korean peninsula in a situation of a synoptic-scale ridge over the Korean peninsula. *Atmosphere*, **26**, 577-598, doi:10.14191/Atmos.2016.26.4.577 (in Korean with English abstract).
- Kim, J.-Y., K.-H. Seo, J.-H. Son, and K.-J. Ha, 2017: Development of statistical prediction models for Changma precipitation: An ensemble approach. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 207-216, doi:10.1007/s13143-017-0027-2.
- Klein, S. A., B. J. Soden, and N.-C. Lau, 1999: Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J. Climate*, **12**, 917-932.
- Korea Meteorological Administration, 2011: *Changma White Paper*. Korea Meteorological Administration, 268 pp.
- _____, 2012: *Learn from Case of the Last 20 Years, Top 10 Heavy Rainfall*. Korea Meteorological Administration, 47 pp.
- _____, 2017: *2016 Abnormal climate Report*. Korea Meteorological Administration, 190 pp.
- Kosaka, Y., S.-P. Xie, N.-C. Lau, and G. A. Vecchi, 2013: Origin of seasonal predictability for summer climate over the Northwestern. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 7574-7579, doi:10.1073/pnas.1215582110.
- Lee, S.-E., and K.-H. Seo, 2013: The development of a statistical forecast model for Changma. *Wea. Forecasting*, **28**, 1304-1321, doi:10.1175/WAF-D-13-00003.1.
- Lee, T.-Y., and Y.-H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean Peninsula their classification. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 367-396.
- Lombardo, K., 2004: Influence of equatorial Rossby waves on tropical cyclogenesis in the western Pacific. M.S. thesis, University at Albany, State University of New York, 135 pp.
- Maloney, E. D., and D. L. Hartmann, 2001: The Madden-Julian oscillation, barotropic dynamics, and north Pacific tropical cyclone formation. Part I: observations. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2545-2558.
- NOAA, 2017: Global Climate Report - Annual 2016, published online January 2017 [Available online at <https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201613>].
- Park, C.-G., and T.-Y. Lee, 2008: Structure of mesoscale heavy precipitation systems originated from the changma front. *Atmosphere*, **18**, 317-338 (in Korean with English abstract).
- Seo, K.-H., J.-H. Son, and J.-Y. Lee, 2011: A New Look at Changma. *Atmosphere*, **21**, 109-121 (in Korean with English abstract).
- _____, J.-H. Choi, and S.-D. Han, 2012: Factors for the simulation of convectively coupled Kelvin waves. *J. Climate*, **25**, 3495-3514, doi:10.1175/JCLI-D-11-00060.1.
- _____, J.-H. Son, J.-Y. Lee, and H.-S. Park, 2015: Northern East Asian monsoon precipitation revealed by air mass variability and its prediction. *J. Climate*, **28**, 6221-6233, doi:10.1175/JCLI-D-14-00526.1.
- Shin, C.-S., and T.-Y. Lee, 2005: Development mechanisms for the heavy rainfalls of 6-7 August 2002 over the middle of the Korean peninsula. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83**, 683-709.
- Straub, K. H., and G. N. Kiladis, 2002: Observations of a convectively coupled Kelvin wave in the eastern Pacific ITCZ. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 30-53.
- Sun, J., and T.-Y. Lee, 2002: A numerical study of an intense quasi-stationary convection band over the Korean Peninsula. *J. Meteor. Soc. Japan*, **80**, 1221-1245.
- Wang, B., B. Xiang, and J.-Y. Lee, 2013: Subtropical high

- predictability establishes a promising way for monsoon and tropical storm predictions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **110**, 2718-2722, doi:10.1073/pnas.1214626110.
- Wheeler, M., and G. N. Kiladis, 1999: Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber-frequency domain. *J. Atmos. Sci.*, **56**, 374-399.
- Xie, S.-P., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang, and T. Sampe, 2009: Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *J. Climate*, **22**, 730-747.
- Yang, J., Q. Liu, S.-P. Xie, Z. Liu, and L. Wu, 2007: Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L02708, doi:10.1029/2007GL030526.