

15-60일 아태지역 극한 기후 진단 및 예측 기술 개발

Development of Diagnosis and Prediction Methods for Extreme Events
over Asia-Pacific Region for Lead-Times of 15-60 Days

오지현, 문자연, 오상명 예측기술팀

신선희, 양유빈 예측운영팀

발간사

2005년 설립 이후, APCC는 신뢰도 높은 기후예측정보를 아·태지역 국가들에게 제공해 옴으로써, 기후 관련 재해로 인한 인명과 재산 손실을 최소화하는데 이바지하고자 노력해 왔습니다. 특히 다중모델앙상블 기법을 활용하여 향후 6개월간의 전 세계 기후상태를 예측하는 계절예측은 APCC가 설립 초기부터 꾸준히 생산하고 개선해 온 주요 기후정보에 해당합니다. APCC에서 생산된 기후정보는 아·태지역 내 많은 국가들에 의해 다양하게 활용되고 있습니다. 한편, 기후변화와 함께 폭염, 한파, 호우 등 이상기후의 발생이 빈번해짐에 따라 계절예측 정보보다 더 짧은 시간 규모에 중점을 둔 기후예측정보에 대한 중요성도 증대되고 있는 실정입니다. 따라서 15-60일의 시간규모를 갖는 계절내 예측 기술 개발은 APCC가 계절예측과 더불어 앞으로 발전시켜 나가고자 하는 분야입니다.

계절내 예측은 이상기후로 인해 발생한 재난 대응을 위한 의사결정을 지원하는 유용한 시간규모의 예측 정보로 알려져 있으며, 최근 전세계적으로 이 시간 규모의 예측기술 개발에 대한 많은 투자와 관심이 집중되고 있습니다. 그러나 현재까지 계절내 예측기술의 발전은 미미할 뿐 아니라 계절내 예측에 대한 이해도 아직 초기 단계에 불과한 실정입니다. APCC는 기상청으로부터 위탁 받아 운영하고 있는 WMO 장기예보 선도센터를 통해 WMO S2S 프로젝트에서 제공하고 있는 다중모델 계절내 예측 데이터 베이스를 구축하고 있습니다. 그리고 계절내 예측성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 여름철 계절내 진동의 예측정보도 다중모델에 기반하여 실시간으로 제공하는 등 세계 어느 기관과 견주어도 뒤지지 않을 기술력과 경험을 쌓아오고 있습니다.

이 연구는 아·태지역에서 발생하는 이상기후 현상을 15~60일 이전에 예측하기 위한 기술을 개발하기 위해 수행되었습니다. 계절내 시간규모에서 이상기후 현상을 진단하고 예측하기 위한 방법을 정립하는 것을 목표로 하고 있습니다. 계절내 시간규모에 특화된 이상기후의 진단 방법을 개발하기 위해 시도되었던 다양한 평가의 결과들이 이 연구보고서에 수록되어 있습니다. 참여 연구진들이 그동안 축적해온 노하우를 바탕으로 진단 및 예측에 활용이 손쉬운 이상기후 지수를 개발하였으며 이를 바탕으로 아·태지역 이상 기후의 발생 특성을 계절내 시간 규모에서 규명하였습니다. 또한 우리나라에서 발생한 폭염, 한파, 장마, 태풍 등의 사례 적용을 통해 이 연구에서 개발된 이상기후 지수의 활용방안을 제시하였습니다.

이 연구를 맡아 수행한 APEC 기후센터의 오지현, 신선희, 문자연, 양유빈 선임연구원, 오상명 연구원의 노고에 감사를 표합니다. 많은 분들의 도움으로 본 연구보고서가 발간될 수 있었습니다. 자문을 해주신 건국대학교 최영은 교수에게 감사의 뜻을 전합니다. 또한 보고서의 수준을 높일 수 있도록 세심한 논평을 해주신 전남대학교의 정지훈 교수와 이화여자대학교의 유창현 교수께도 감사드립니다. 이 과제의 성과를 토대로 계절내 예측 분야에 대한 지속적인 연구가 이어져 아·태지역의 이상기후 발생 감시와 예측에 유용하게 쓰이길 바랍니다.

2019년 3월
APEC 기후센터
원장 권 원 태

ABSTRACT

This study aims to develop a method of defining extreme events in order to apply for subseasonal forecast. The subseasonal forecast targeting 15–60 days in advance has received much attention to bridge the gap between short-range forecast and long-range forecast. Furthermore, it is vital to monitor and predict extreme events occurring globally and more frequently than before, so that we can promptly cope with disaster caused by extreme events such as heatwaves, cold surges, and floods.

After conducting various sensitivity tests on percentile-based criteria, periods of climatology, we developed Extreme Index which can be used for subseasonal forecast of extreme events. The Index takes frequency, magnitude, and extent of extreme events into account for easy application regardless of area and climate feature of domain of interest. We showed that the increase in warm extreme and decrease in cold extreme over the globe are well represented by the Extreme Index. Also, the recent increase in heavy rainfall over the East Asia is well detected by the Extreme Index.

On the basis of Extreme Index, in particular, the cold extreme from week 1 through week 6 over the Central Asia tends to increase despite the global warming trend. We investigated extreme events such as heatwaves, cold surges, heavy rainfall related to Typhoon and Changma in South Korea by using Extreme Event. We further examined subseasonal prediction skill of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for 2016 heatwave case in South Korea based on Extreme Index.

Since the Extreme Index is designed to focus on extreme events regarding subseasonal time range, it has some limitations in representing day-to-day change of the extreme events. However, the extreme events which persist for several days can be identified and predicted by the Extreme Index.

목 차

1. 서론	1
2. 자료	5
3. 계절내 이상 기온의 특성 및 지수 정의	6
3.1 계절내 이상 기온의 변동성	6
3.2 이상 기온 정의에 따른 민감도	13
3.3 계절내 이상 기온 지수의 정의	15
4. 계절내 이상 기온의 지역적 특징	18
4.1 아시아 지역에서의 이상 기온 변동성	18
4.2 한반도에서의 이상 기온 변동성	25
4.3 이상 기온 지수의 활용	27
4.3.1 폭염과 계절내 이상 기온 지수	27
4.3.2 한파와 계절내 이상 기온 지수	30
5. 계절내 이상 강수의 지역적 특징	36
5.1 아시아 지역에서의 이상 강수 변동성	36

5.2 한반도에서의 이상 강수 변동성-----	43
5.3 이상 강수 지수의 활용-----	49
5.3.1 태풍과 계절내 이상 강수 지수-----	49
5.3.2 장마와 계절내 이상 강수 지수-----	54
6. 계절내 예측에의 활용-----	57
6.1 2016년 8월 폭염사례-----	57
6.2 이상 기후 지수의 예측-----	59
7. 결론-----	63
Ⅱ REFERENCES-----	67

1. 서론

기후변화로 인해 열파, 열대야, 홍수, 태풍 등과 같은 극한 기후의 발생이 빈번해지고 있다(Karl and Easterling 1999). 2009년은 아시아 지역의 곳곳에 기록적인 폭우가 발생한 해였고, 2010년 아시아에서는 파키스탄 홍수라는 4일간 내린 폭우에 의해 1929년 이래 최악의 집중호우가 발생하였으며, 2011년은 6월부터 7월까지 연속적인 많은 비와 폭우로 중국 및 우리나라에 많은 양의 강수가 기록되었다. 2012년과 2013년 우리나라에서는 북태평양 고기압의 이른 발달로 폭염과 가뭄이 지속적으로 발생하였다(Moon et al. 2014). 이상 기후의 발생이 빈번해짐에 따라 이상 기후를 규명하고 예측하고자 하는 학문적인 노력이 활발하게 이루어지고 있으며, 이는 매우 도전적인 과제로 인식되고 있다(Herring et al. 2014).

현재로부터 약 2주 후까지의 예측을 아우르는 중기예보와 약 3-6개월 후까지의 예측을 일컫는 장기 혹은 계절 예측 사이의 시간규모, 즉 15-60일에 대한 예측의 중요성이 대두됨에 따라 전세계적으로 이 시간규모에 대한 많은 투자와 관심이 집중되고 있다. 또한 15-60일 이전 극한 기후의 예측은 재난 대비에 충분한 시간을 확보하는 것을 가능하게 하는 만큼 경제적 손실을 최소화하고 인명피해를 방지하는데 크게 기여할 것으로 받아들여지고 있다. 하지만 예측에 있어서 15-60일 선행시간은 소위 “예측성의 불모지”라 일컬어지며 오랫동안 크게 주목 받지 못하였던 터라, 이 시간 규모에 대한 예측 시스템은 아직 초기단계라고 할 수 있겠다. 따라서 이 시간규모에 초점을 맞춘 극한 기후의 예측 기술은 물론 정의 방법 또한 정립되지 않은 실정이다.

극한 기후를 정의하는 방식은 크게 두 가지로 나누어질 수 있다. 첫째는 지역 기후로부터 상대적인 강도를 초과하거나 도달하지 못하는 경우이고, 둘째는 특정 임계값을 넘어서는 경우로 극한 기후를 정의하게 된다. 상대적인 크기를 기준으로 극한값을 정의할 때 Table 1과 같이 그 기준이 매우 다양한 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Definitions for climate extreme.

출처	극한 기후의 정의
IPCC	Rare events within the statistical REFERENCES distribution of particular weather elements: definitions of “rare” vary, but an extreme weather event would normally be as rare or rarer than the 10th or 90th percentile
WMO	Extreme value theory complements the descriptive indices in order to evaluate the intensity and frequency of rare events that lie far in the tails of the probability distribution of weather variables, say event that occur once in 20 years
영국 기상청	지역별, 월별로 최고기온이나 최저기온, RX1day, RX2day, RX3day, RX4day 등의 요소 별 최대값 및 최소값
일본 기상청	기온은 1.83℃를 벗어났을 때가 극한고온 또는 극한 저온이고, 강수는 월 강수량이 기준기간 (30년) 동안 발생한 최대, 최소값을 벗어났을 때가 극한 강수임
호주 기상청	최저기온의 1, 3 percentile, 최고기온의 97, 99 percentile, 강수의 1, 3, 97, 99 percentile 에 해당하거나 값이 초과 또는 미만일 때 극한 기후임
프랑스 기상청	20-80 percentile을 벗어난 것을 극한으로 정의함
Karl et al. (1996)	Climate Extreme Index (CEI): an index for the United States that is composed of percent area with extremes in maximum and minimum temperature, the Palmer Drought Severity Index, extreme precipitation , and the number of days with precipitation
Jones et al. (1996)	A two standard deviation thresholds or annual counts of days above 90 th percentile and days below the 10 th percentile
Eastering et al. (2000)	Since climate extremes can be defined as large area experiencing unusual climate values over longer periods of time , one way to investigate trends in climate extreme over time is to develop indices that combine the number of these types of measure
Zhang et al. (2010)	Indices of abnormal climate conditions were defined as areas of Canada for 1980-1998, or southern Canada for 1900-1998, with temperature or precipitation anomalies above the 66th or below the 34th percentiles in their relevant time series.

이 외에도 극한 기후를 모니터링하고 기후변화에 따른 극한 기후 발생 경향을 파악하기 위해 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)에서 제안한 극한 지수 (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)가 주로 활용되고 있다(Zhang et al. 2011). Table 2에서 확인할 수 있다시피, ETCCDI의 일부는 특정 임계값을 넘어서는 경우에 기반하여 극한 기후를 정의한다. 그러나 이러한 경우, 지역적으로 상이한 표본이 추출될 수 있다. ETCCDI의 경우 미래의 극한 기후 발생을 예측하기 위해 기후변화 시나리오에 기반한 연구에서 주로 활용되고 있다(Sillmann et al. 2013; Zhou et al. 2014; Lelieveld et al. 2016).

Table 2. List of the 27 core ETCCDI (Brown et al. 2010).

ID	Indicator name	Definitions	Units
SU25	Summer days	Annual count when TX (daily maximum) > 25°C	Days
ID0	Ice days	Annual count when TX (daily maximum) < 0°C	Days
TR20	Tropical nights	Annual count when TN (daily minimum) > 20°C	Days
FD0	Frost days	Annual count when TN (daily minimum) < 0°C	Days
TXx	Max Tmax	Annual maximum value of daily maximum temp	°C
TXn	Min Tmax	Annual minimum value of daily maximum temp	°C
TNx	Max Tmin	Annual maximum value of daily minimum temp	°C
TNn	Min Tmin	Annual minimum value of daily minimum temp	°C
TX90p	Warm days	Percentage of days when TX > 90th percentile	%
TX10p	Cool days	Percentage of days when TX < 10th percentile	%
TN10p	Cool nights	Percentage of days when TN < 10th percentile	%
TN90p	Warm nights	Percentage of days when TN > 90th percentile	%
GSL	Growing season length	Annual (1 Jan–31 Dec in NH) count between first span of at least 6 days with TG > 5°C and first span after 1 July of 6 days with TG < 5°C	Days
DTR	Diurnal temperature range	Annual mean difference between TX and TN	°C
WSDI	Warm spell duration indicator	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX > 90th percentile	Days
CSDI	Cold spell duration indicator	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN < 10th percentile	Days
RX1day	Max 1-day precipitation amount	Annual maximum 1-day precipitation	mm
RX5day	Max 5-day precipitation amount	Annual maximum consecutive 5-day precipitation	mm
SDII	Simple daily intensity index	Annual total precipitation divided by the number of wet days (defined as PRCP ≥ 1.0 mm) in the year	mm day ⁻¹
R10	Number of heavy precipitation days	Annual count of days when PRCP ≥ 10 mm	Days
R20	Number of very heavy precipitation days	Annual count of days when PRCP ≥ 20 mm	Days
R25	Number of days above 25 mm	Annual count of days when PRCP ≥ 25 mm, 25 is user-defined threshold	Days
CDD	Consecutive dry days	Maximum number of consecutive days with RR < 1 mm	Days
CWD	Consecutive wet days	Maximum number of consecutive days with RR ≥ 1 mm	Days
R95p	Very wet days	Annual total PRCP when RR > 95th percentile	mm

Accumulated Cyclone Energy (ACE) 지수는 태풍의 계절예측을 위해 고안된 지수로서, 매 6시간 마다 관측된 모든 열대 태풍의 최대 풍속의 제곱 값의 합으로 계산된다(Bell et al. 2000). ACE 지수는 관심 해상에서의 전반적인 태풍의 활동을 정량화할 수 있으며, 현재 NOAA에서 태풍의 계절 예측을 위해 사용하고 있다. ACE 지수가 1981-2010년 ACE 지수 중간값의 120%에 해당하면 태풍의 Above-normal season, 1981-2010년 ACE 지수 중간값의 71.4%에 미치지 못하면 Below-normal season으로 분류한다. 이밖에 중기 예보를 위한 TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 참여모델을 바탕으로 TIGGE Museum (<http://gpv.jma.ccs.hpcc.jp/TIGGE/>)을 통해 호우, 강풍, 폭염, 한파 등의 극한 기후 현상에 대한 예측정보를 접할 수 있다(Matsueda and Nakazawa 2015). 이 경우 극한 기후 현상은 모델 예측 기후값과 모델 예측값의 비교를 통해 탐지되며, 기후값의 90, 95, 99 백분위에 해당하는 값을 극한값으로 정하였다.

현재 계절내 규모에서의 이상 기후는 보편적인 합의가 이루어지지 않은 상황이지만, 한국 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)를 비롯한 여러 예측 기관

에서 주별 평균한 예측 자료를 바탕으로 평년 대비 아노말리를 이용하여 예측 정보를 제공하고 있다. 본 연구의 목표는 계절내(15-60일) 이전 예측에 적합한 이상 기후 정의방법을 정립하는 것이다. 본 과제에서는 강수와 기온의 이상치를 계절 및 지역적인 특성을 고려하여 정의하는 방법을 다각적으로 제시하여 예측성과 활용성 증대를 도모하고자 한다. 현재 APCC는 계절예측 정보 서비스를 통해 아태지역의 사회·경제적인 번영에 이바지 하고 있지만, 계절 예측 정보만으로는 이상 기후 예측에서 한계를 지닐 수 밖에 없다. 따라서 계절내 규모에서의 이상 기후 예측은 센터의 계절 예측의 한계점을 보완하는데 요긴하게 사용될 수 있을 것이다. 또한 15-60일 예측기술 개발은 전세계적으로도 시작단계인 분야이자 관심도가 높은 영역으로서 이에 대한 과제 수행은 매우 시의적절하며, 과제 수행을 통한 의미 있는 예측 기술의 개발은 APCC의 전문 영역을 확대하며 세계적인 기후센터로 발돋움하는데 기여할 수 있다.

2. 자료

이 연구에서는 관측 데이터와 재분석 자료를 사용하여 분석을 진행하였다(Table 3). 재분석 자료는 전지구 관측 시스템의 시간에 따른 시스템적 변화로 인해 발생하는 비균질성의 영향을 받지만, 지점 관측 데이터와 비교할 때, 일/월 평균 온도는 신뢰할 만 하며 (Simmons et al. 2010; Mesinger et al. 2006), 관측 데이터가 희소하거나 신뢰할 수 없는 지역에서 이상 기후 현상을 모니터링 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 다만, 재분석 자료의 강수는 일반적으로 강수 편향을 가지고 있다고 알려져 있으므로 강수량에 대해서는 주의를 기울여 사용해야 한다.

Table 3. Description of data used in this study.

Name	Variables	Temporal Coverage	Spatial Coverage
ERA Interim	2 meter temperature, Maximum temperature, Minimum temperature, 850 hPa zonal wind	Daily 1979/01/01 to present	0.75-degree latitude x 0.75 - degree longitude grid (480x241).
CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Daily Precipitation	Daily total precipitation	Daily 1979/01/01 to present	0.50 - degree latitude x 0.50 - degree longitude grid (720x360).
KMA Observation	Daily mean precipitation and surface air temperature	Daily 1979/01/01 to 2015/12/31	45 stations in South Korea

이상 기후의 계절내 예측가능성을 테스트해보기 위해, 유럽중기예보센터(ECMWF)의 계절내 예측자료를 사용하였다(Vitart et al. 2016). 모델의 수평 및 연직 해상도는 Tco639/319 L91이며, 매주 월요일, 목요일에 향후 46일에 대한 51개의 앙상블 예측값을 생산한다. 이 때 과거 20년에 대한 11개의 앙상블 멤버로 구성된 hindcast를 매회 같이 생산하여 제공한다.

3. 계절내 이상 기온의 특성 및 지수 정의

3.1 계절내 이상 기온의 변동성

이 장에서는 지난 36년(1981-2016)의 재분석 자료를 이용하여 기온 및 강수에 대한 계절내 이상 기후 발생의 특성을 살펴보고자 하였다. 일평균 온도, 강수 자료를 주단위로 평균하여 사용하였으며, 일반적으로 이상 기후 발생 연구에 널리 사용되는 백분위 수 기반(상·하위 10퍼센타일) 지수를 이용하여 이상 기후 발생의 연변화와 계절 변화를 먼저 살펴보았다. Figure 1은 각 격자 별 기후학적 분포(1981-2010)에서 주평균 온도의 상/하위 10%를 초과하는 이상 기온이 발생한 빈도수의 연 변화 경향을 나타낸 것이다. IPCC 제 5차 보고서에 따르면(IPCC 2013), 전지구 평균 기온은 1880년에서 2013년까지 약 0.85도 상승하였으며, 지구 온난화로 인해 평균적인 기후 요소의 변동뿐만 아니라 이상 기후 현상 또한 증가할 것이라 전망하였다. 지구 온난화로 인해 전지구적으로 이상 고온의 발생 수는 증가하고 있는 반면, 이상 저온의 발생 수는 감소한다. 이러한 이상 기온의 발생은 저위도 대륙, 중앙 아프리카와 아라비아반도, 태평양 도서국을 포함하는 남아시아와 남미 중부에서 더욱 뚜렷하게 나타나며, 전구 평균 이상 고온(저온) 발생 수는 36년간 약 6주 정도 증가(감소)하였다. 특히 이상 저온의 경우 2000년 이후로 평년 대비 지속적으로 감소하는 양상을 나타낸다.

이러한 트렌드는 계절적으로 나누어 살펴보았을 때도 동일하게 나타난다(Figure 2). 온난화로 인해 전지구 연평균 기온이 증가하면서 이상 고온(저온)의 발생 빈도가 전반적으로 증가(감소)하였으며, 이는 북반구 겨울(DJF)을 제외한 모든 계절에서 뚜렷하게 나타난다. Figure 2와 Figure 3은 이상 고온과 이상 저온 현상의 계절적 발생 경향을 나타낸 것으로, Figure 1에서 제시하였듯이 이상 고온 현상의 뚜렷한 증가와 이상 저온 현상의 감소가 2000년대를 중심으로 확연히 나타남을 확인 할 수 있다. 특히 가을철(SON) 이상 고온(저온)의 증가(감소)가 뚜렷하게 나타난다. 이상 기온의 계절적 발생 경향은 전구 평균 기온의 변화에도 영향을 미침을 확인 하였다. 다른 계절과 달리, 북반구 겨울철(DJF)은 이상 기온의 발생 경향이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 통계적으로 유의하지는 않지만, 지구 온난화 현상에도 불구하고 중앙 아시아를 비롯한 아시아 대륙과 북미 내륙, 호주와

아프리카 남부에서 이상 저온 현상이 오히려 증가하며, 이상 고온 현상이 감소하는 경향이 나타났다. 평년 대비 이상 기후 발생 횟수의 연변화에서도 다른 계절과는 다소 다른 양상을 나타낸다. 이는 인간활동과 같은 인위적인 배출량에 의한 지구 온난화로 전지구 기온변화 경향을 계절별로 다르게 예측한 Cohen(2012)의 연구와 유사한 결과라 할 수 있다.

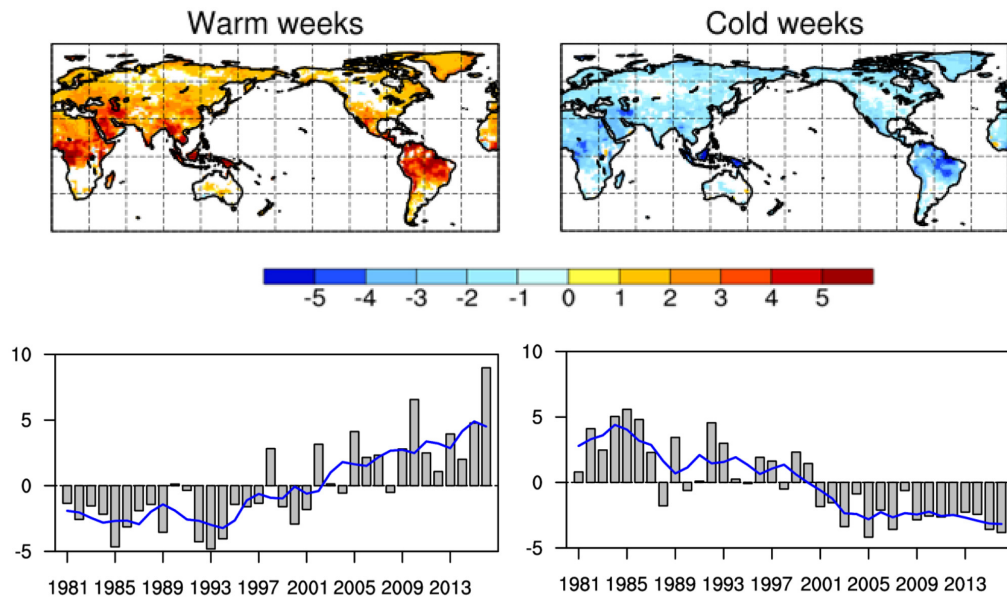


Figure 1. (Top) Spatial distribution of trends (week/decade) and (bottom) annual time series anomalies relative to 1981–2016 mean values for annual series of percentile temperature indices for warm weeks and cold weeks. For the spatial distribution, only values exceeding the 90 % confidence level are shown.

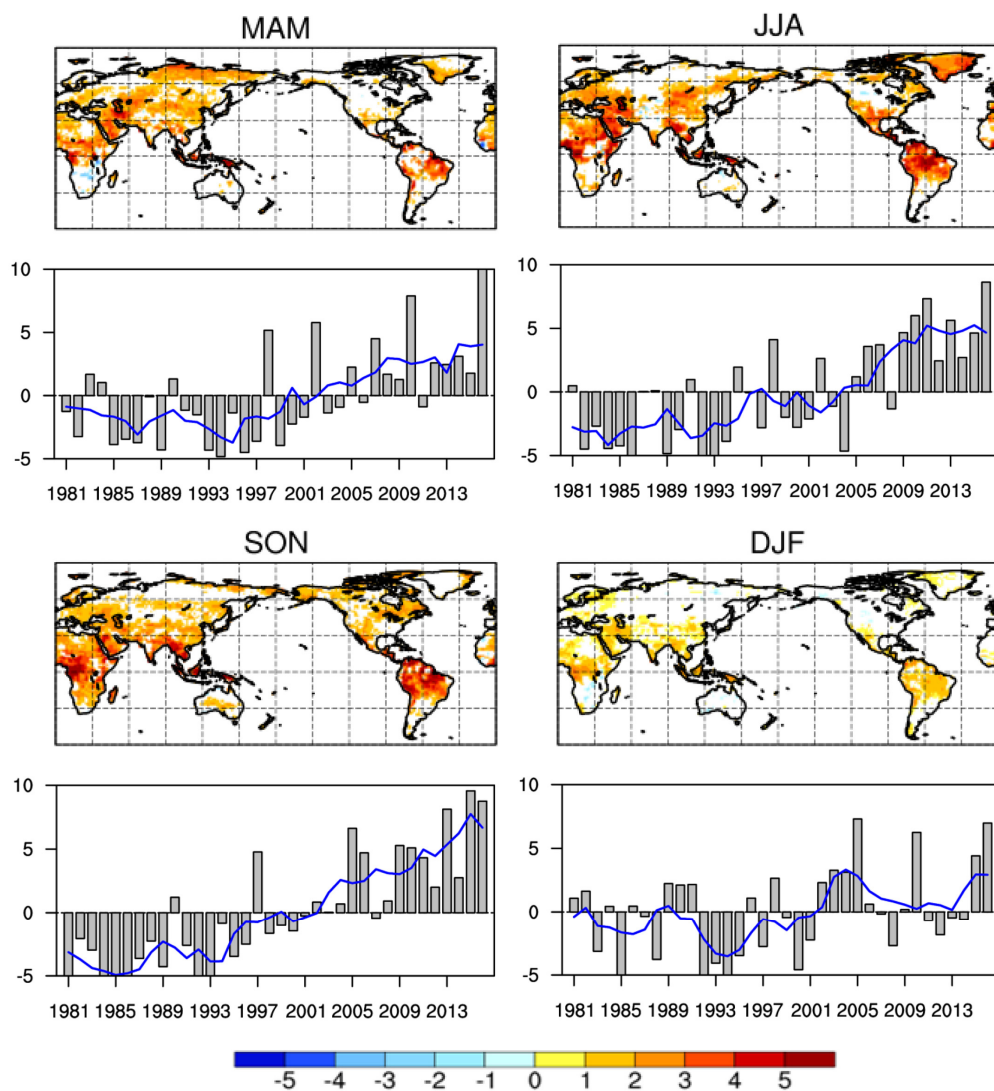


Figure 2. Same as Figure 1 but for the seasonal occurrence of warm extreme weeks for March-May (MAM), June-August (JJA), September-November (SON), and December-February (DJF). For the spatial distribution, only values exceeding the 90% confidence level are shown.

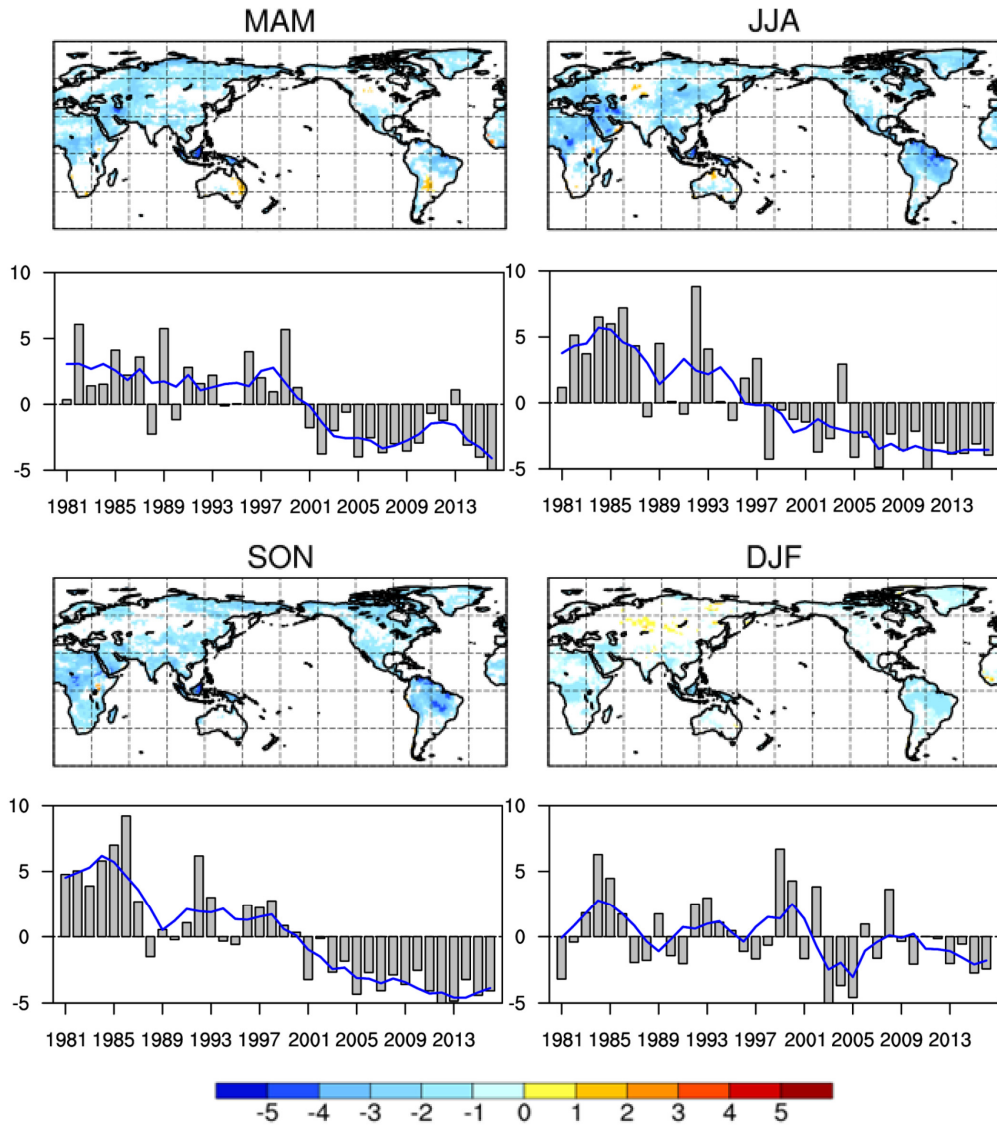


Figure 3. Same as Figure 1 but for the seasonal occurrence of cold extreme weeks for March-May (MAM), June-August (JJA), September-November (SON), and December-February (DJF). For the spatial distribution, only values exceeding the 90% confidence level are shown.

계절내 이상 기온 발생 특성을 구체적으로 살펴보기 위해, 각 주별 이상 기온 발생 수와 전지구 면적에 대한 이상 기온 발생 영역의 상대적 비율의 경년 변동성을 살펴보았다(Figure 4, Figure 5). 본 연구에서 영역은 해당하는 그리드 포인트의 수로 고려되었다. Figure 4는 전구 육지에서 발생한 이상 고온의 총 발생 수와 이상 고온이 발생한 영역의 비율을 나타낸 것으로, 이상 고온 현상은 모든 주에서 뚜렷한 증가 추세가 나타난다. 이상 고온 발생 영역 또한 시간에 따라 증가하는데, 80년대에는 전구 대비 10 %미만 지역에서 발생하였지만, 최근 들어 그 영역이 확대되어 전구 대비 약 30 % 이상인 지역에서 이상 고온이 발생함을 알 수 있다. 이상 고온 발생의 경년 변동성은 ENSO의 발달과 밀접한 상관을 가진다(Ghil and Vautard 1991; Jones 1994). 엘니뇨가 발생하였던 1997년, 2010년, 2015/2016년에 이상 고온의 발생이 뚜렷이 증가하며 더 넓은 영역에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. Figure 4의 하단 그림은 각 주에 해당하는 이상 고온 발생 빈도의 추세(week/year)와 이상 고온 발생 영역비율의 추세(%/year)를 나타낸 것으로, 특히 북반구 한여름철인 29주부터 가을 후반인 48주에 이상 고온의 발생이 더욱 증가함을 볼 수 있다. 이는 온난화로 인한 전지구 연평균 기온 증가와 더불어 북반구 여름철의 기간이 점차적으로 늘어난 것을 의미한다.

Figure 5는 계절내 이상저온의 발생 특성을 나타낸 것으로, 모든 주에서 뚜렷한 감소 추세가 나타난다. 이상저온이 발생하는 영역 또한 시간에 따라 감소하는데 36년동안 약 14 % 정도 감소하였다. 이상저온의 감소 추세에도 불구하고 이례적으로 전지구 면적의 약 30 %에서 저온 현상이 발생한 1992년의 경우는 1991년 필리핀 Pinatubo 화산 활동의 영향으로 인한 cooling 효과가 반영된 것으로, 전지구 연평균 기온 하강과 연관되어 있다(McCormick et al. 1995; Robock 2000). 이상저온 발생의 계절내 특징을 살펴보면, 이상 고온의 발생 변화가 두드러지는 여름철(28주)부터 가을 후반인 46주에 감소 트렌스가 강하게 나타나는데 이는 지구 온난화에 따른 평균 기온의 상승에 의한 것으로 생각된다. 반면 북반구 겨울철인 1~9주와 49~52주에는 이상저온 발생의 감소 경향이 다른 계절에 비해 다소 낮게 나타나는데, 이는 일부 지역에서 이상저온 발생이 증가하기 때문이다. 지구 온난화에도 불구하고 이상저온 발생이 증가하는 지역적 특성에 대해서는 4장에서 구체적으로 논의될 것이다.

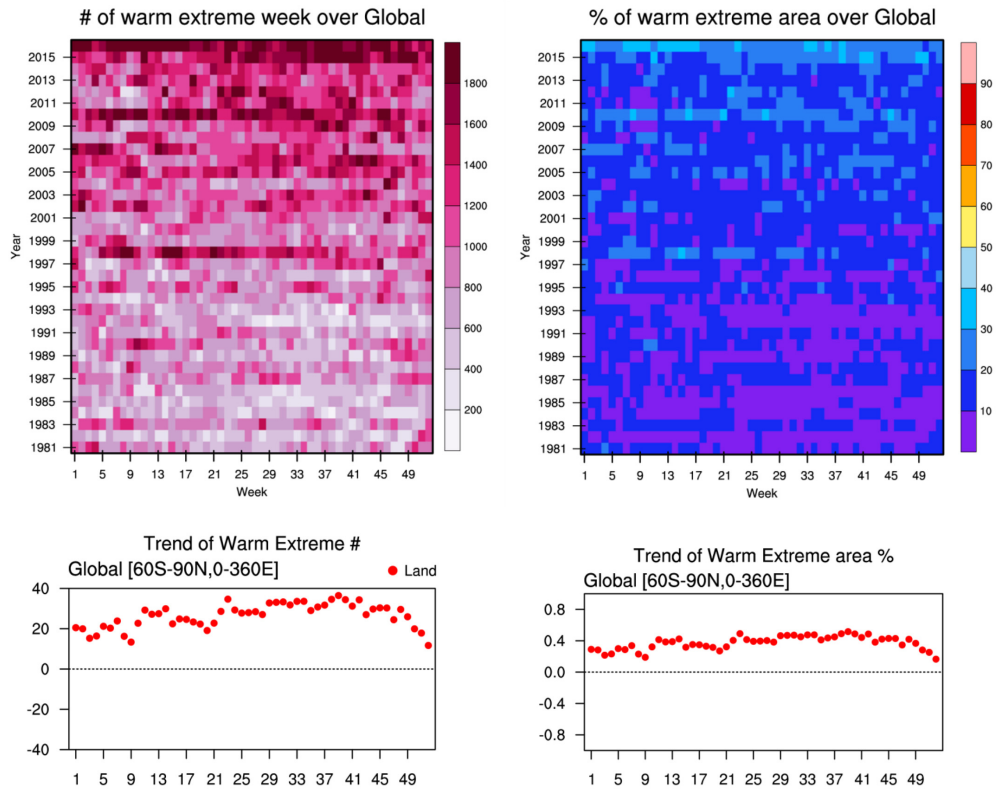


Figure 4. (Top) Interannual variability and (bottom) trend of the total number of extreme warm weeks occurred in global land and the percentage of grid point where extreme warm occurs relative to global grid point for each week.

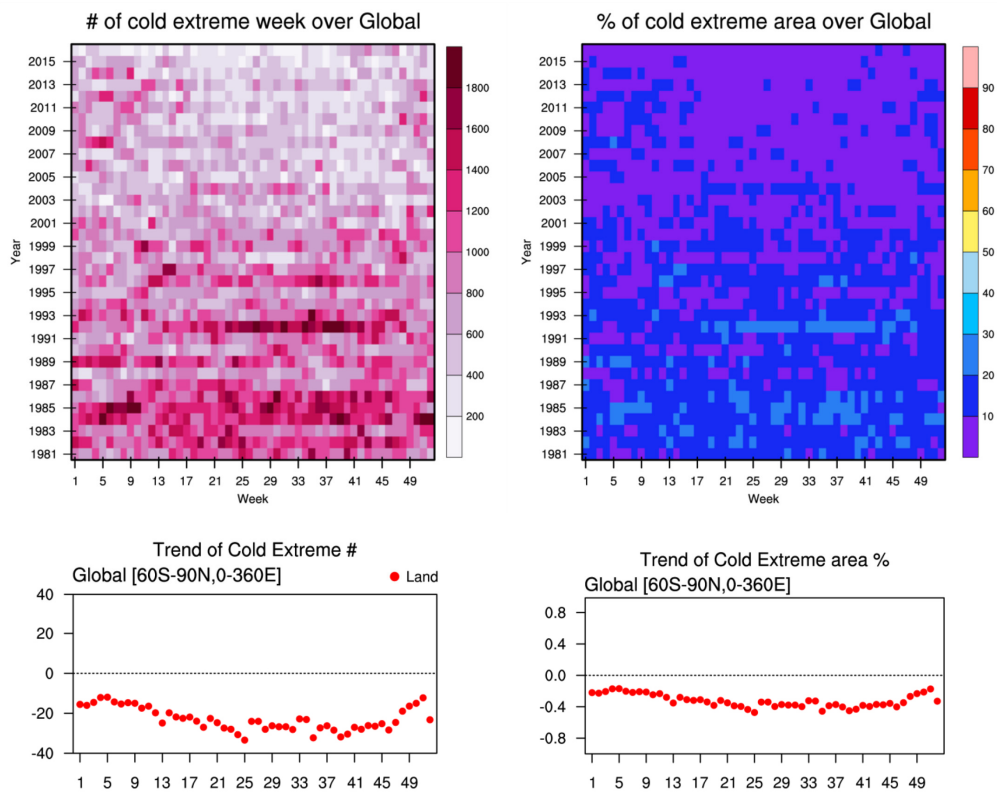


Figure 5. Same as Figure 4 but for extreme cold weeks.

3.2 이상 기온 정의에 따른 민감도

기후학적인 분포에서 이상 기후는 통계적으로 어떠한 임계값을 초과하여 발생하는 현상 또는 특정 장소에서의 통계적 특성 분포에서 거의 발생하지 않는 현상으로 정의한다 (Klein et al 2009; Abatan et al 2016). 따라서 이상 기후는 사용자의 목적과 지역 등에 따라 달리 정의될 수 있으며, 일반적으로 표준화된 정의는 없다. 현재 계절내 규모에서의 이상 기후는 보편적인 합의가 이루어지지 않은 상황이지만, 한국 기상청을 비롯한 여러 예측 기관에서 주별 평균한 예측 자료를 바탕으로 변수별 이상 기후 예측 정보를 제공하고 있다. 이 장에서는 이상 기후 정의에 사용되는 임계값 설정 및 기후값 구성에 따른 민감도 테스트를 통해 이상 기후 정의를 위한 객관적 근거를 제시하고, 나아가 계절내 이상 기후 예측에 적용 가능한 이상 기후 지수를 개발하고자 하였다.

우선 널리 쓰이고 있는 백분위 기반 이상 기후 지수의 정의에 사용되는 임계값에 따른 이상 기후 발생의 민감도를 살펴보았다. Figure 6 상단의 그림은 전지구 육지의 각 격자에서 계산된 주평균 온도의 상/하위 5 %, 10 %, 15 %, 20 %을 초과하는 날의 총 수의 비율을 시계열로 나타낸 것이다. 각 임계값에 따른 이상 기온 발생의 변화는 절대적 크기의 차이는 있지만 변화 형태는 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 각 백분위수에 따른 크기의 차이가 더 높은 임계값을 초과하는 총 관측치의 감소에 기인한 것인지를 확인하기 위해 각 시계열의 표준 편차로 나누어 정규화하여 살펴보았다(Figure 6 하단). 정규화된 시계열을 보면, 각 백분위수에 따른 이상 기온의 발생 변화가 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

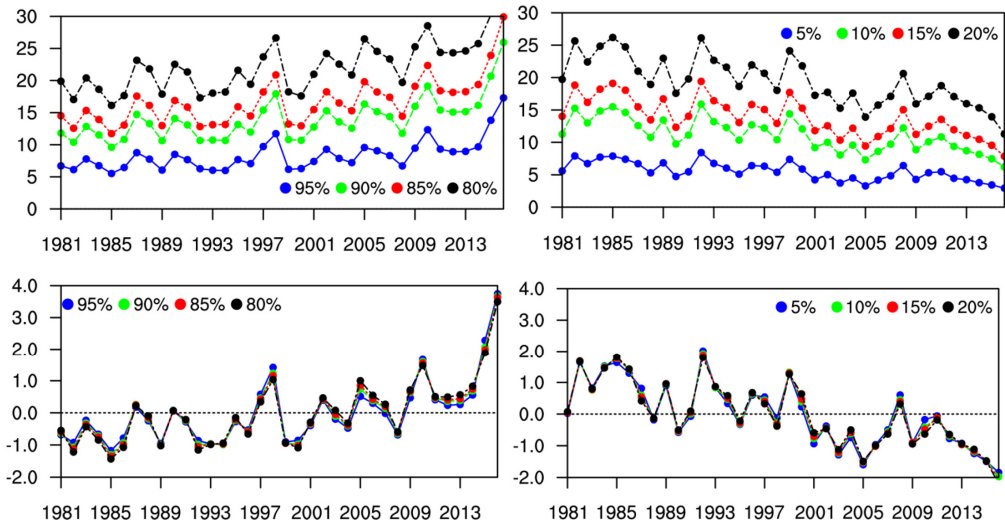


Figure 6. (Top) Percent of total number of weeks exceeding threshold of weekly mean temperature calculated in each global grid and (bottom) standardized anomalies of the time series in the top panel.

계절내 이상 기후 정의에 사용될 변수를 정하기 위해, 온도 변수에 따른 이상 기후 발생의 민감도를 살펴보았다. Figure 7은 일평균, 일최저, 일최대 온도의 주 평균 온도가 각 10퍼센타일과 90퍼센타일을 초과하는 수의 비율을 연변화로 나타낸 것으로, 이상 고온의 발생은 증가하는 추세를 보이며 이상저온의 발생은 감소하는 추세를 보인다. 각 변수에 따른 이상 기후 발생의 연변화는 거의 동일하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림으로 제시하진 않았지만, 각 변수에 대한 이상 기후 발생의 수평 분포 또한 거의 동일하게 나타남을 확인하였다.

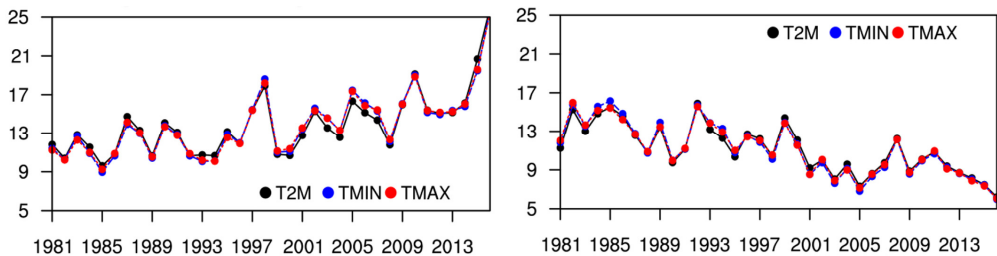


Figure 7. Percent of total number of weeks above the 90th and below the 10th percentiles of daily mean, minimum and maximum temperature calculated in whole global land.

앞서 언급하였듯이, 계절내 규모에서의 이상 기후 예측에 대한 관심이 증대되면서 기상청에서는 주 평균한 예측 자료를 바탕으로 변수별 이상 기후 예측 정보를 생산하고 있다. 따라서 주 단위로 정의된 이상 기후의 발생이 일반적으로 사용되는 일 단위의 이상 기후 발생 변화를 얼마나 잘 반영하는지 살펴보았다(Figure 8). 변수 사용에 따른 민감도와 마찬가지로 주 단위 온도 변수를 사용한 이상 기후 발생의 연변화는 일 단위 이상 기후 발생의 변화와 동일하게 나타나는 것을 확인하였다.

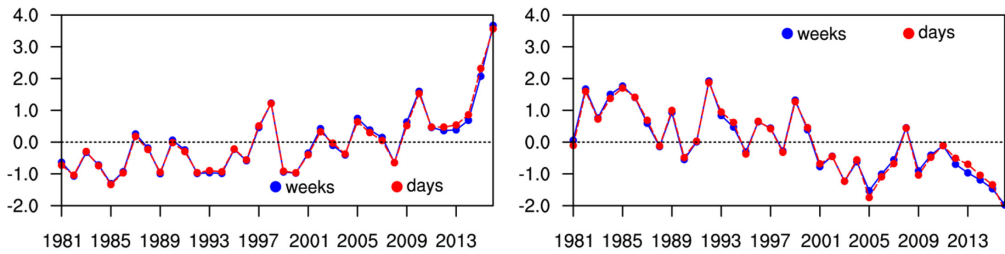


Figure 8. Standardized anomalies of total number of weeks (blue line) and days (red line) above the 90th and below the 10th percentiles of daily mean temperature calculated in whole global land.

3.3 계절내 이상 기온 지수의 정의

3.2장에서 이상 기후 정의에 사용되는 임계값 및 변수 구성 등에 대한 민감도 분석을 통해, 계절내 이상 기후의 정의에 대한 객관적 근거를 마련하였다. 이 결과를 바탕으로 본 연구에서는 주별 평균된 일평균 온도(또는 강수) 자료의 상/하위 10 퍼센타일을 초과하는 값을 계절내 이상 기후로 정의하고, 전구뿐만 아니라 지역별 이상 기후의 감시 및 예측에 활용하기 위해, 관심 지역 내에 발생한 이상 기후의 발생 빈도와 강도, 발생 영역의 비율이 고려된 지역적으로 일반화된 이상 기후지수를 고안하여 아래와 같이 정의하였다.

$$I_{extreme} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (1)$$

$$\alpha_i = \left| \frac{T'_i}{\sigma_i} \right| \quad T'_i = \begin{cases} T_i - \overline{T_c} & T_i - \overline{T_c} \geq 0 \\ 0 & T_i - \overline{T_c} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 i 는 주어진 영역에 속한 각 격자점이며, N 은 주어진 영역에서의 총 격자수, n 은 이상 기후가 발생한 격자수이다. α 는 이상 기후의 강도로, 이상 기후의 정의에 사용된 임계값에서 벗어난 정도를 나타낸다. 이는 각 격자에서의 온도를 기준기간 동안 (1981-2016년)의 표준 편차로 나눈 정규화된 온도(또는 강수)값으로 표현되며, 임계값보다 낮을 경우에는 이상 기후 강도가 0이 되도록 하였다. 따라서 제안된 이상 기후 지수는 관심 지역에서 발생한 이상 기후의 강도가 클수록, 발생한 지점이 많을수록 큰 값을 가진다.

원하는 지역에서 평균된 온도 또는 강수로 그 지역을 대표로 하는 이상 기후 지수를 계산하게 되면, 선택된 지역의 기후 특성이 비균질 할수록 이상 기후지수는 실제와는 다른 크기를 표현할 수 있다. 또한 이상 기후 발생 빈도만으로는 실제적인 이상 기후의 크기를 표현하지 못한다. 그러나, 이 연구에서 제안된 이상 기후지수는 각 지역에서 발생한 이상 기후의 빈도와 강도, 발생 영역의 비율이 모두 고려되어, 전구뿐만 아니라 지역별 이상 기후의 감시 및 예측에 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

새롭게 제안된 이상 기후 지수를 기온에 적용하여 이상 기온의 발생 빈도와 강도, 발생 지역의 비율 등이 고려된 주 단위의 이상 기온 지수를 개발하였다. Figure 9는 남극대륙을 제외한 전지구 육지에 대한 이상 고온 지수와 이상저온 지수를 나타낸 것이다. 이상 기온 지수는 Figure 4와 Figure 5에서 제시한 이상 고온 발생의 증가와 이상저온 발생의 감소 경향을 매우 잘 반영하며, 이상 기온의 실제적 강도가 고려됨으로써 이상 기후의 영향을 좀 더 가시적으로 제시할 수 있음을 보여준다. 또한, 백분위 값을 사용하는 기존 지수들이 지역별 직접적인 비교가 힘들다는 단점을 가지는 반면, 이 연구에서 제안된 이상 기후 지수는 이상 기후의 강도를 정규화된 크기의 지수로 제공함으로써 개별 지역에 적용된 지수의 상대적인 비교가 가능하다는 장점을 가진다.

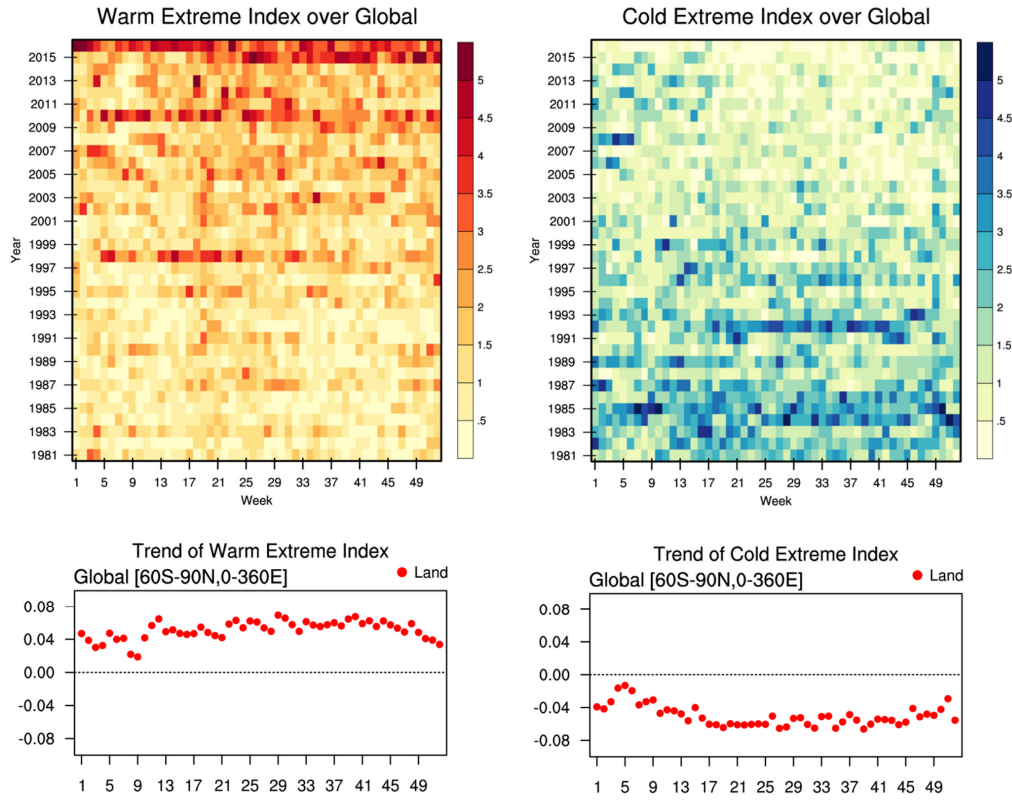


Figure 9. (Top) Interannual variability and (bottom) trend of warm and cold extreme index for global land.

4. 계절내 이상 기온의 지역적 특징

4.1 아시아 지역에서의 이상 기온 변동성

위에서 개발된 이상 기후 지수를 이용하여, 아시아 지역[10°S-60°N, 60°-150°E]을 중심으로 계절내 이상 기온의 특징을 살펴보았다. Figure 10은 아시아 지역에 발생한 이상 고온과 이상저온 지수를 나타낸 것으로, 이상 기온의 계절내 변화와 36년(1981~2016) 동안의 장기변화 경향을 보여준다.

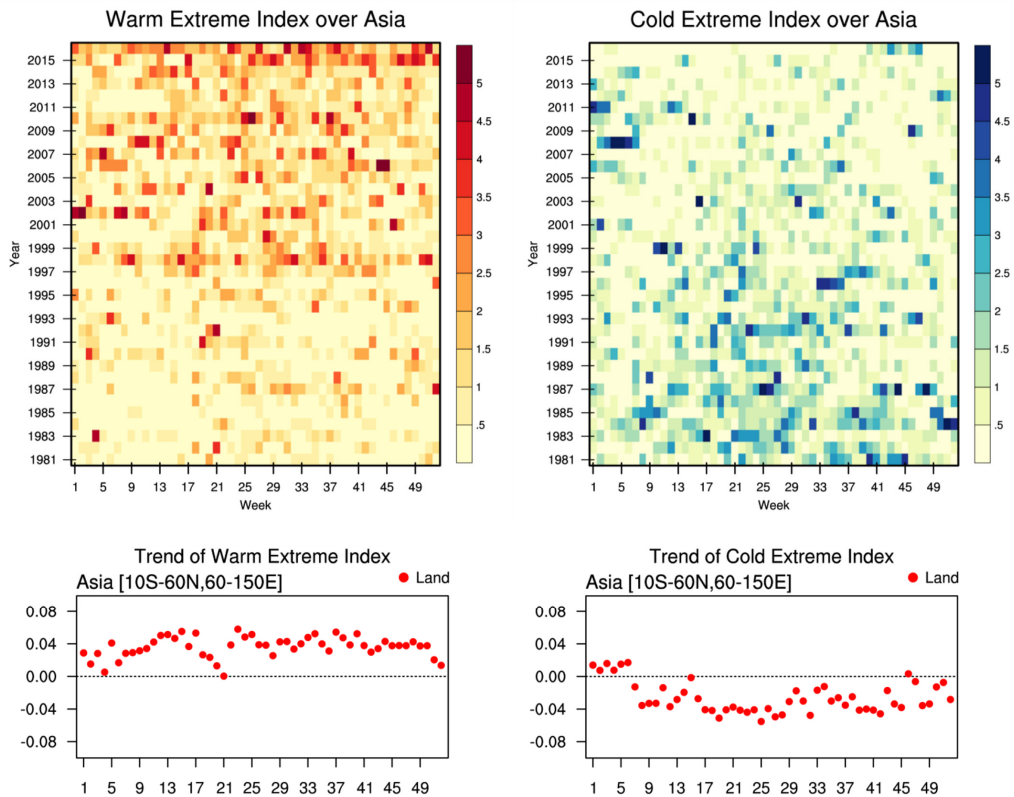


Figure 10. (Top) Interannual variability and (bottom) trend of warm and cold extreme index over Asia.

전지구 육지에서 나타난 이상 기온 강도(Figure 9)와 마찬가지로, 아시아대륙에서도 대체적으로 이상 고온이 증가하고 이상저온이 감소하는 온난화 경향을 보이며 겨울철에

온난화 경향이 다소 낮게 나타남을 알 수 있다. 반면, 전지구 변화 경향과는 달리 아시아에서의 이상 기온 장기변화는 모든 주에서 일정한 경향을 나타내지는 않는다. 특히 북반구 겨울철인 1~6주에 이상저온 지수가 약하지만 증가하는 경향을 보이는데, 이는 2000년 이후 이상저온 지수가 뚜렷하게 강화되기 때문이다.

이상 기온이 평균기온에 미치는 영향에 대해 살펴보기 위해, 이상 기온 지수 계산시 사용된 이상 고온과 이상저온의 강도(α)와 평균 기온의 장기변화 경향의 공간적 분포를 살펴보았다(Figure 11-Figure 13). 겨울철(M1, M2, M13)을 제외한 대부분의 계절에서 전 지역에 걸쳐 온난화 경향이 두드러지게 나타나는데, 이는 이상저온의 감소와 이상 고온 증가 경향 때문이며, 특히 이상 고온의 증가 추세는 평균 기온 변동에 더 큰 영향을 미친다. 온난화 현상이 강하게 나타나는 지역은 계절에 따라 다소 다르게 나타나며, 봄철에는 카자흐스탄과 중국 북동부, 여름철에는 몽골, 가을철에는 중국 남동부에서 온난화 현상이 강하게 보인다. 여름철 강화지역은 주로 반건조지역으로 사막화의 영향이 큰 지역이며, 가을-겨울철에는 티벳지역의 눈덮임의 영향이 큰 지역으로 데이터의 신뢰도가 떨어지긴 하지만, 재분석 자료에서 통계적으로 유의한 경향을 보여준다. 월 평균 온도 변화 경향은 이상 고온의 뚜렷한 증가 때문이며, 과거의 연구들과 일치하는 결과로써(Qian and Lin 2010; Xu et al 2011, You et al 2010), 그 중 상당 부분은 인위적 강제력에 의해 기인됨이 밝혀진 바 있다(Wen et al 2013).

전지구 온난화 현상에도 불구하고 일부 지역, 일부 계절에서는 이상저온 현상이 뚜렷하게 증가하는데, 특히 북반구 겨울철 중양 아시아에서는 전반적인 온도 상승과는 반대로 음의 온도 경향이 두드러진다(Figure 12). 음의 온도 경향은 최근 따뜻한 북극과 차가운 대륙 현상과 관련되며, 온난화 환경하에서 이러한 이상저온 증가와 평균온도 감소는 체감되는 효과를 더욱 증대시킬 것이다. 더욱이 중양아시아 봄철에는 이상 고온 발생의 증가로 온난화 경향이 강화되는 것을 볼 수 있다. 아시아 지역에서도 중양아시아는 계절내 기후변화의 변동성이 가장 큰 지역이며, 특히 겨울철 이상저온 발생이 증가하는 위험지역으로 한파와 같은 겨울철 이상 기후에 대해 많은 관심을 가져야 할 것이다. 또한, 동남아시아의 경우 일관적으로 온난화 현상을 보이며, 특히 이상 고온 현상의 증가하는 경향이 명확히 나타난다.

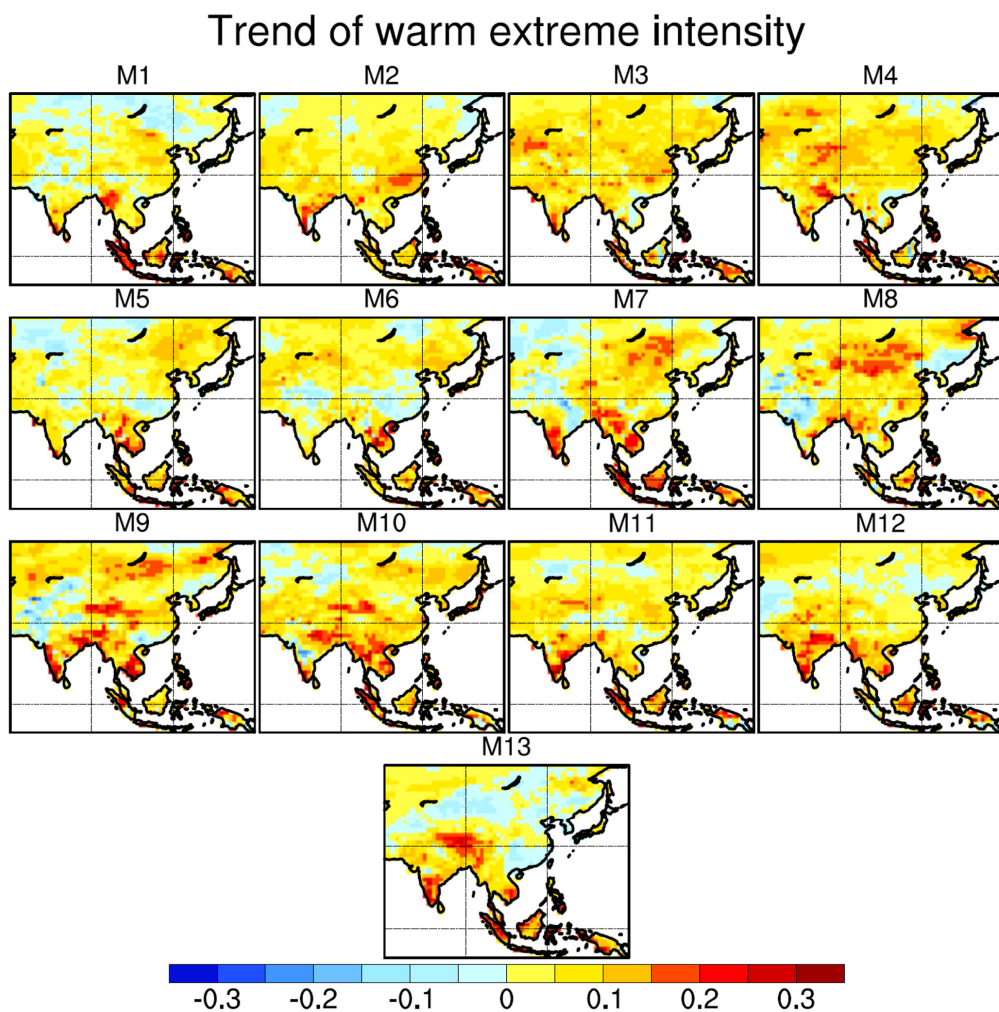


Figure 11. Spatial distributions of the trend of extreme warm intensity by 4-weeks mean over Asia.

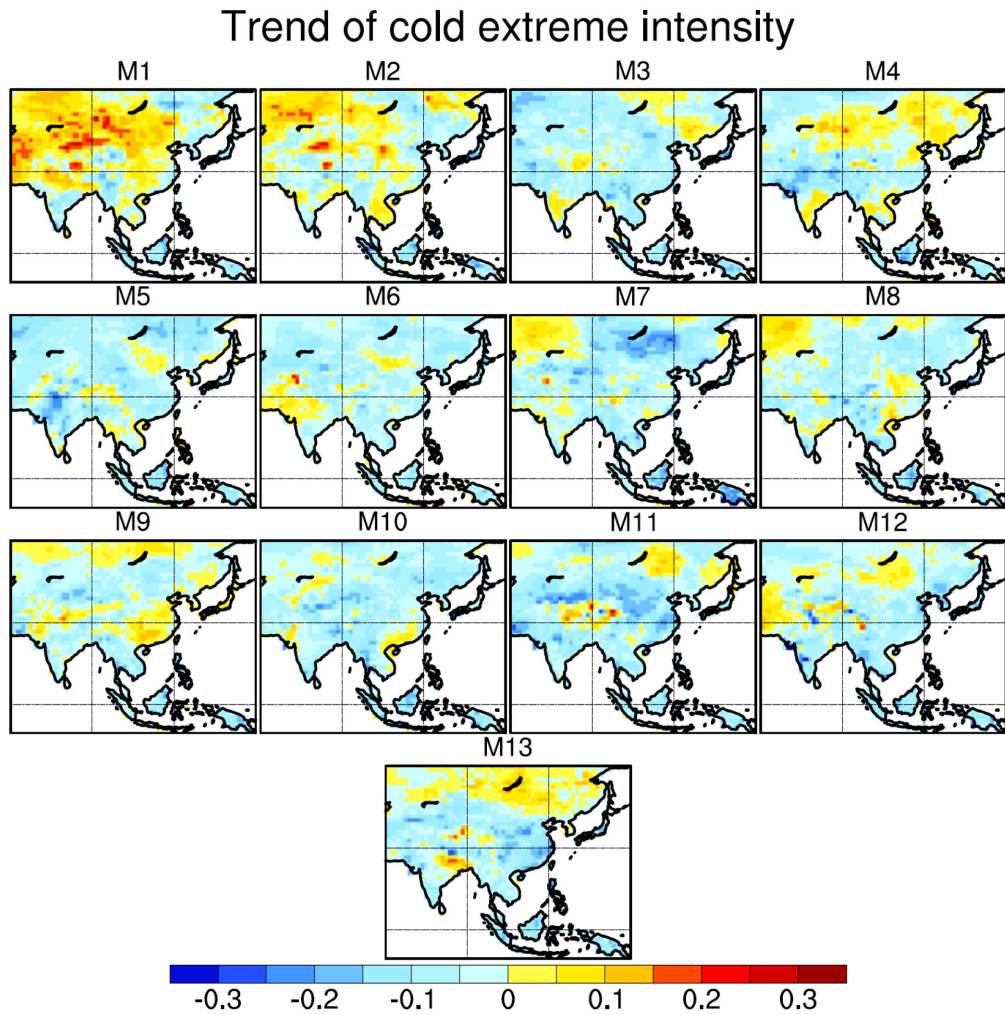


Figure 12. Same as Figure 11 but for the extreme cold intensity.

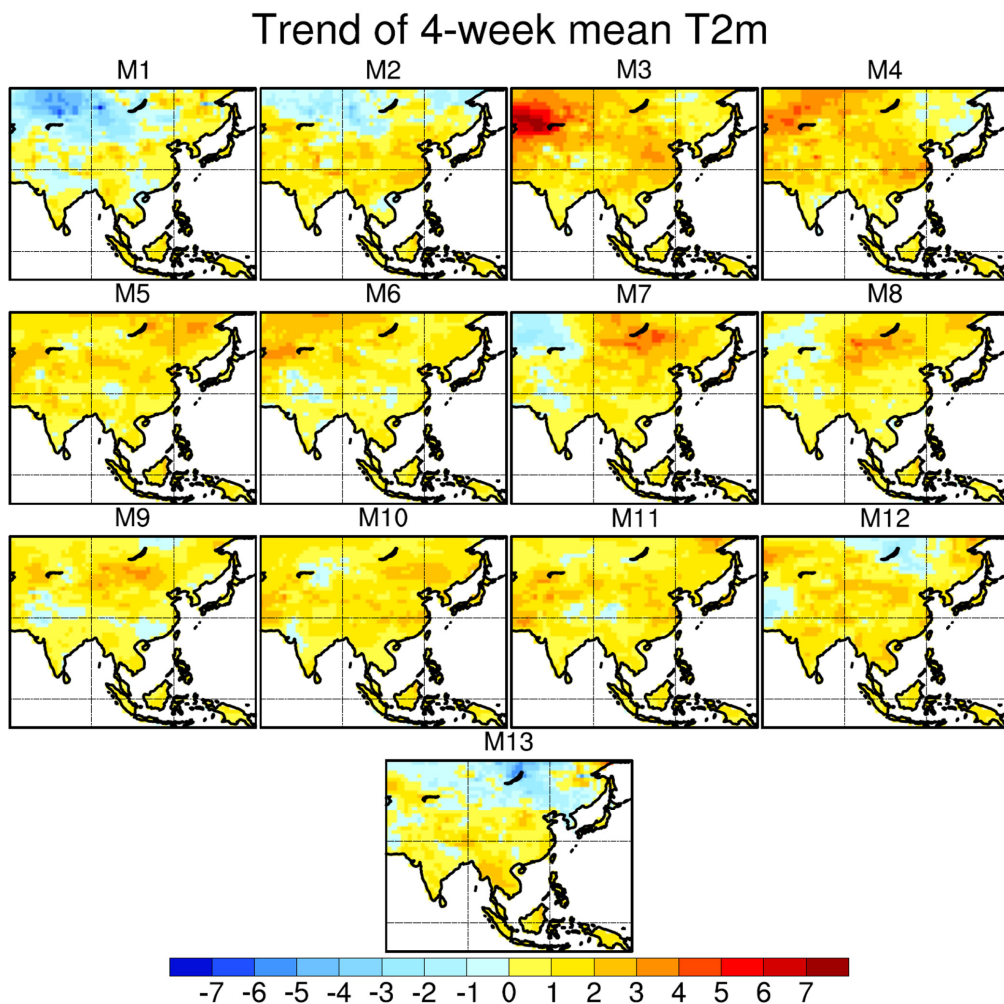


Figure 13. Same as Figure 11 but for the 4-week mean temperature.

앞서 아시아 지역을 중심으로 이상 고온과 이상저온 현상의 장기변화 경향을 살펴보았으며, 평균 기온에 미치는 영향에 대해 제시하였다. 이러한 이상 기후 변동의 지역적 특징을 새롭게 개발된 이상 기후 지수가 얼마나 잘 모의하는지를 확인하기 위해, 중앙아시아 [30°-60°N, 60°-120°E]와 남아시아 [10°S-10°N, 90°-150°E]에 대한 이상 기온 지수의 계절내 및 경년 변화와 장기변화 경향을 나타내었다(Figure 14, Figure 15). 일관적으로 온난화 현상이 뚜렷이 나타나는 다른 지역에 비해 중앙아시아는 온난화 경향이 다소 약하게 나타나며 이상 기온의 계절내 변화가 강하게 나타난다. 반면 남아시아에서의 이상

고온 현상은 ENSO 변동과 밀접한 상관을 보이는 지역으로, 엘니뇨가 발생하였던 해에 강한 이상 고온 지수를 확인할 수 있다. 이상 고온 지수의 양의 경향은 2015/16년에 나타난 강한 이상 고온 지수의 영향이 과하게 반응된 결과라 할 수 있다.

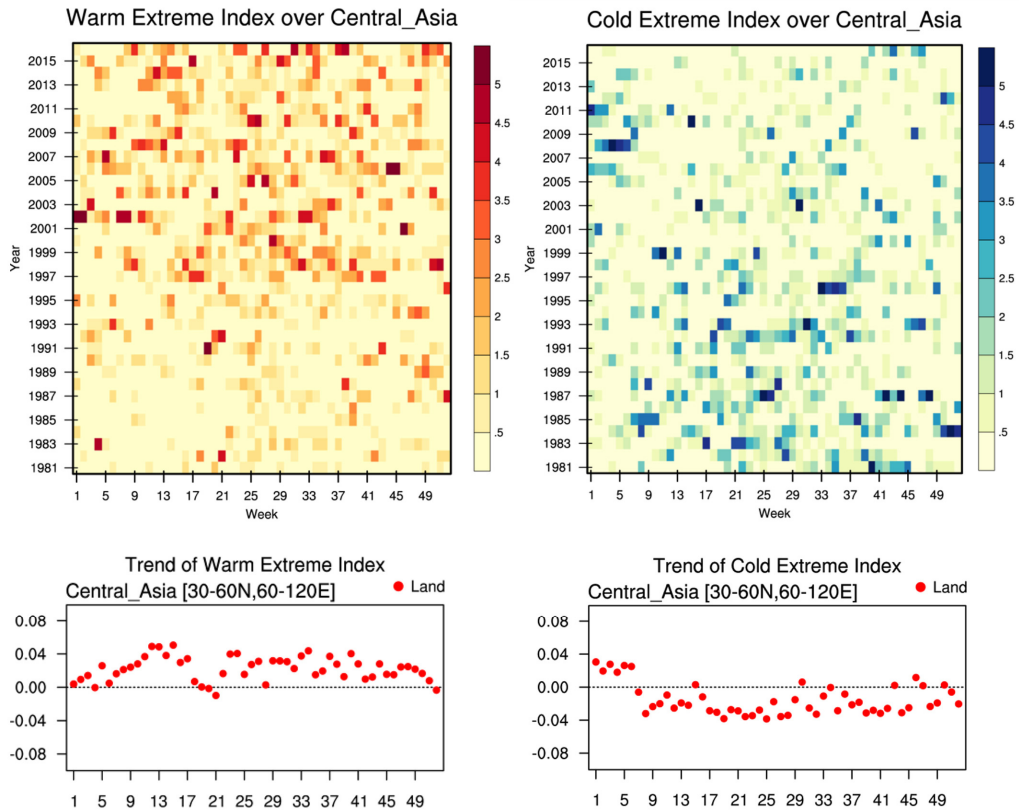


Figure 14. (Top) Interannual variability and (bottom) trend of extreme warm and cold index over Central Asia.

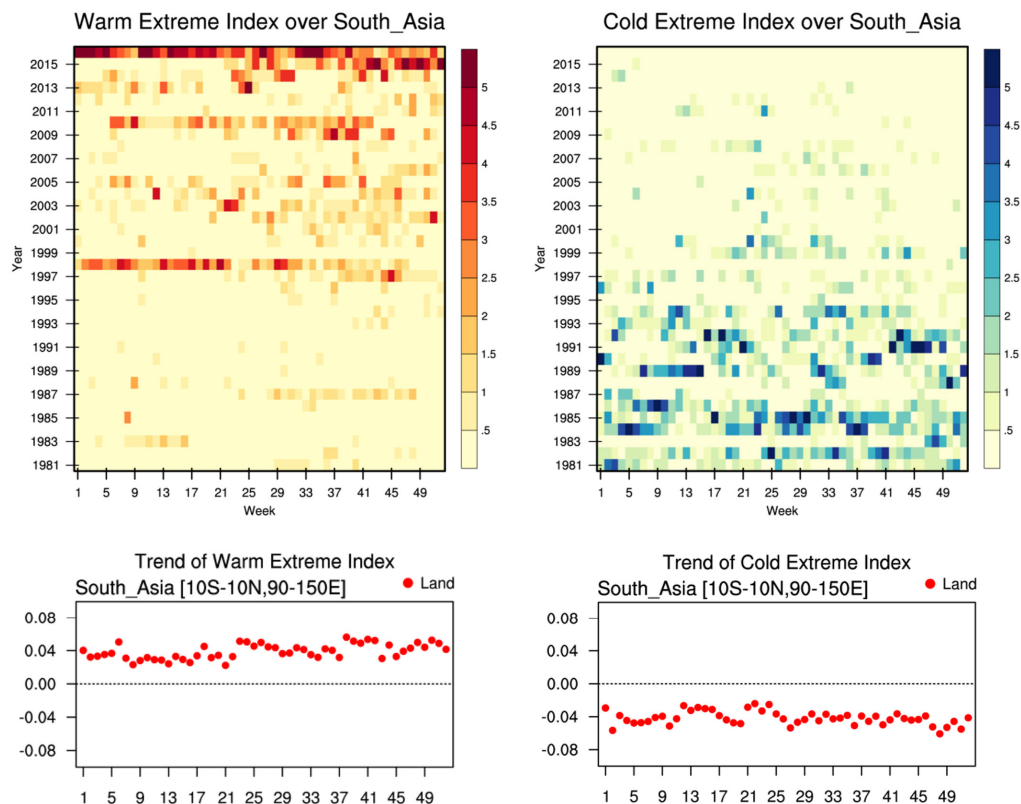


Figure 15. Same as Figure 14 but for South Asia.

온도 변화 특징이 상반되는 지역이 공존하는 영역에서 이상 기온 지수를 정의할 경우, 지역 평균 기온을 사용하여 퍼센타일 기반의 이상 기온 지수를 계산한다면 실제적으로 지역 내에 일어나는 이상 기온 현상들이 지수에 잘 반영되지 않을 것이다. Figure 10에서 제시한 아시아 지역에서의 이상저온 지수는 겨울철 중앙 아시아에서 이례적인 이상저온 증가 경향과 남아시아에서의 뚜렷한 이상저온 감소 경향 모두를 잘 반영하며, 이상 고온 지수는 아시아 전반적으로 발생하는 이상 고온의 증가 경향과 특히 남아시아에서 뚜렷한 증가 추세를 매우 잘 반영한다. 이러한 결과는 본 연구에서 개발된 이상 기후 지수가 지역적으로 이상 기온의 지역적 발생 특징을 잘 나타내며, 관심 있는 모든 지역에 일반적인 원리로 편리하게 활용할 수 있다는 장점을 제시한다 하겠다. 이를 통해 계절내 이상 기후 예측을 위한 활용도 가능하리라 기대한다.

4.2 한반도에서의 이상 기온 변동성

이번 절에서는 계절내 이상 기후지수를 남한 기온에 적용하여 이상 기온의 전반적인 특징을 살펴보았다. Figure 16은 1981년부터 2016년까지 주별 평균된 이상 고온지수와 이상저온지수의 값을 나타낸 막대그래프이다. 이상 고온지수와 이상저온지수 모두 평균 기온에서 나타나는 계절성과는 무관한 연분포를 보인다. 즉, 평균 기온이 높은 여름에 이상 고온지수의 평균값이 다른 계절에 비해 높은 것은 아니며, 여름에 해당하는 week27-week30 동안 연평균된 이상 기후지수는 오히려 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 이 기간 동안의 이상 기후지수의 최대값은 매우 높아 특정 해에 이상 고온현상이 나타난 것을 알 수 있다. 이상저온지수의 분포에서도 마찬가지로 겨울에 이상저온지수의 평균이 높은 것은 아니며, 최대값 역시 계절과 무관하게 분포하는 것으로 나타나 이상 기후현상은 계절을 막론하고 발생하는 것을 알 수 있다.

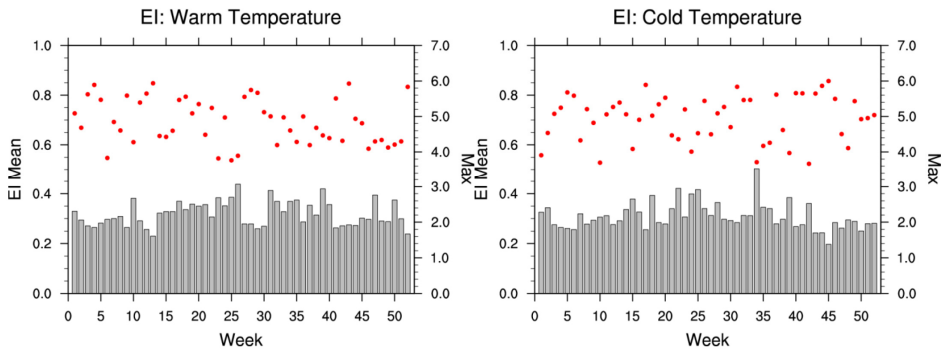


Figure 16. Climatological (1981-2016) extreme warm (left) and cold (right) indices (bar) and maximum index (red dot).

이상 기후 지수로 나타낸 값들이 실제 기온과 일치하는지를 확인하기 위해 이상 고온 지수와 이상저온 지수의 최대값이 나타난 주의 이상 기후 지수와 남한 평균 기온 관측값의 분포를 비교하였다(Figure 17). 관측값은 기상청 지점관측자료를 사용하였으며, 이상저온 지수의 경우 음의 아노말리와의 용이한 비교를 위해 지수값을 역으로 나타냈었다. 겨울철과 여름철의 이상 기온 지수는 이상저온과 이상 고온 현상에서 모두 관측과 유사한 연변동을 보이는 것을 알 수 있다.

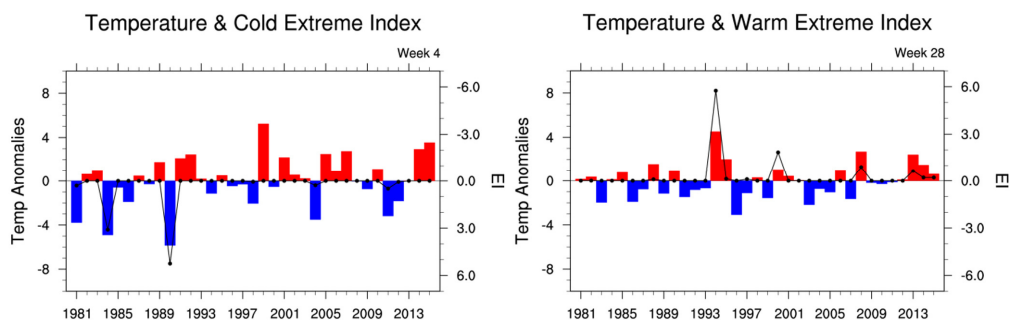


Figure 17. Observed temperature anomalies (bar) and extreme indices (contour) for week4 (left) and week28 (right).

Figure 18에서는 이상 고온 지수와 이상저온 지수의 변동성을 살펴보기 위해 36년동안의 연평균 이상 기온 지수의 추이를 살펴보았다. 이상 고온 지수는 남한에 기록적인 폭염이 발생하였던 1994년과 엘니뇨 발생해인 1998년에 가장 큰 값을 보였으며, 전반적으로 과거에 비해 현재에 이상 기후 지수가 높아지는 양상을 보이고 있다. 이상저온 지수의 경우 이상 고온 지수와는 반대로 과거에 더 큰 값을 보였으나 현재로 올수록 지수값이 낮아지는 트렌드를 보였으며, 이는 계절내 이상 기후 지수가 기후변화에 따른 온난화를 잘 반영하고 있음을 나타낸다.

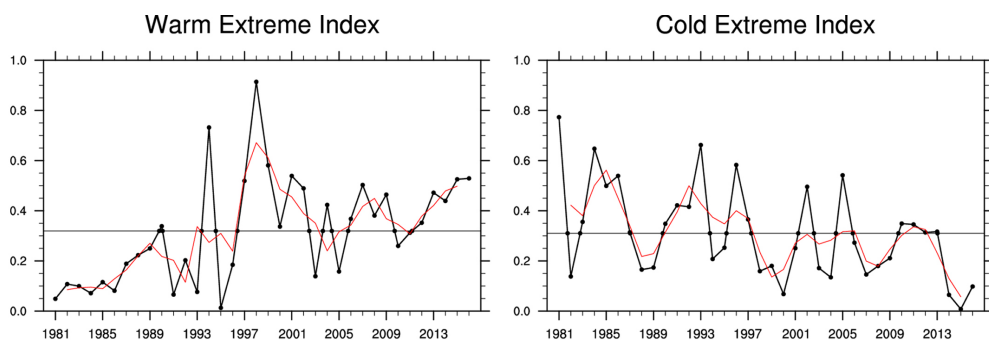


Figure 18. Annual mean (black) of warm (left) and cold (right) extreme indices and 3-year running mean (red).

4.3 이상 기온 지수의 활용

4.3.1 폭염과 계절내 이상 기온 지수

이번 절에서는 본 과제에서 개발한 이상 기후 지수를 여름철에 나타낼 수 있는 대표적인 이상기상 현상인 폭염에 적용하여 이상 고온 지수가 폭염을 표현하는지를 살펴보고 폭염 예보 활용가능성을 짚어보고자 하였다.

Figure 19는 여름철(week23-week35) 평균된 이상 고온 지수의 연변동을 나타낸 것으로, 최근 36년간 여름철 이상 고온 지수의 값은 다소 증가하는 추세를 보인다. 이상 고온지수는 1994년과 1997년, 2000년, 2013년에 높은 값을 보이며, 1994년과 2013년은 폭염발생일수 또한 역대 1, 2위를 기록했던 여름인 것을 확인할 수 있다(Figure 20). 2000년의 경우 폭염이 발생한 날의 총 일수는 높지 않았으나(Figure 20), 발생지속일수가 길어(Figure 21) 주단위를 기준으로 하는 이상 고온지수가 높게 나타났을 것이라 추측할 수 있다. 반면, 1990년과 1996년의 경우는 폭염발생일수가 높지만 이상 고온 지수가 낮아 이상 고온 지수로는 폭염을 재현하지 못하였다.

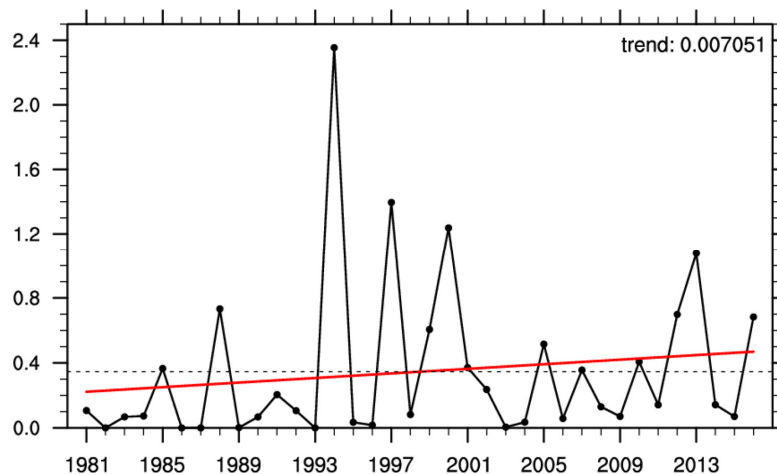


Figure 19. Summer (June-August) mean extreme warm indices (black) and regression (red). Dashed line is average of indices from 1981 to 2016.

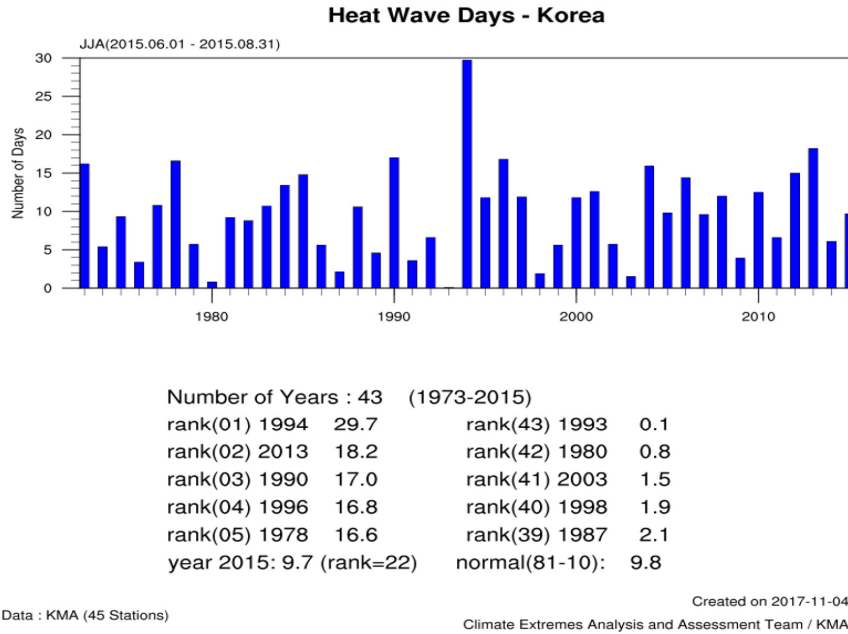


Figure 20. Heat wave days during summer from 1983 to 2015 (기상청 이상 기후 합동분석시스템).

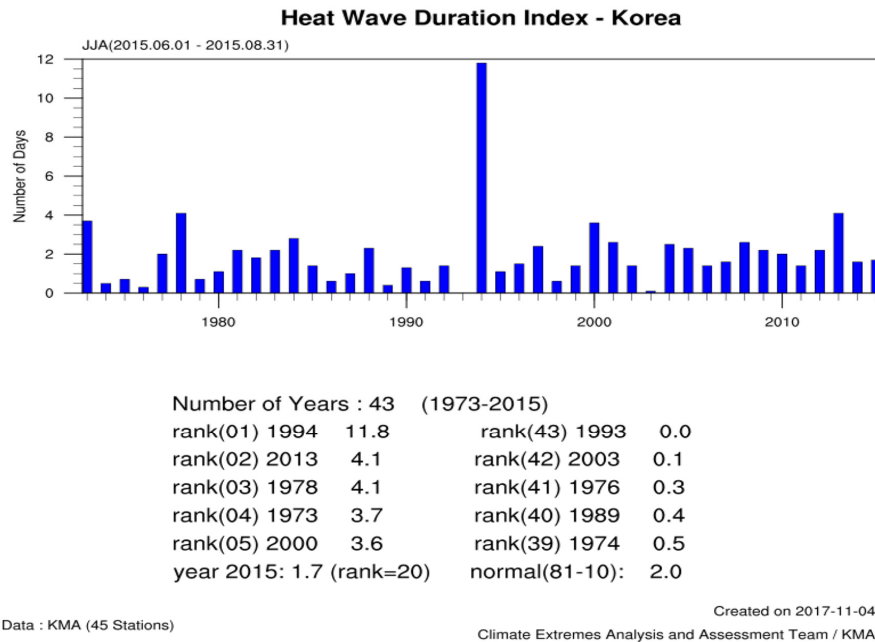


Figure 21. Consecutive heat wave duration days during summer from 1973 to 2015 (기상청 이상 기후 합동분석시스템).

이러한 차이점이 나타나는 이유를 살펴보기 위해 이상 고온 지수가 폭염의 발생을 나타내었던 경우와 폭염이 발생하였으나 이상 고온 지수로 표현이 되지 않았던 경우의 합성장을 비교해보았다(Figure 22). 이를 위해 주별 평균된 기상청 관측 아노말리 값의 상위 10% 이상인 온도가 나타난 주를 폭염이 발생한 주라 하고, 이 때 이상 고온 지수가 3 이상인 경우 폭염을 재현한 경우라 간주하였다. 반면, 폭염이 관측되었으나 이상 고온 지수가 1 이하인 경우를 이상 고온 지수가 폭염을 표현하지 못한 해라 간주하였다. 폭염이 발생한 44개의 주 중 이 두 경우에 해당되는 주는 각각 13주, 23주인 것으로 나타났다. 폭염의 발생 원인 중 첫번째는 북태평양 고기압의 발달이라 할 수 있으며, 이상 고온 지수가 폭염을 재현했던 경우와 재현하지 못한 경우에서 모두 북태평양 고기압의 강화를 볼 수 있다. 또한, 동쪽 베링해에서 캄차카반도까지 이어지는 블로킹 고기압이 자리 잡아 뜨거운 공기가 빠져나가지 못하면서 폭염이 발생하였다(Lee and Lee 2016). 이상 고온 지수가 높았던 주의 경우에는 이와 더불어 몽골 고원의 고온건조한 상층 대기가 북태평양 고기압을 정체시킬 수 있는 조건을 보여 이상 고온 지수를 이용한 폭염의 재현을 용이하게 하는 것으로 보인다. 반면, 이상 고온 지수가 폭염을 나타내지 못했던 경우에는 이러한 기압계가 나타나지 않았다.

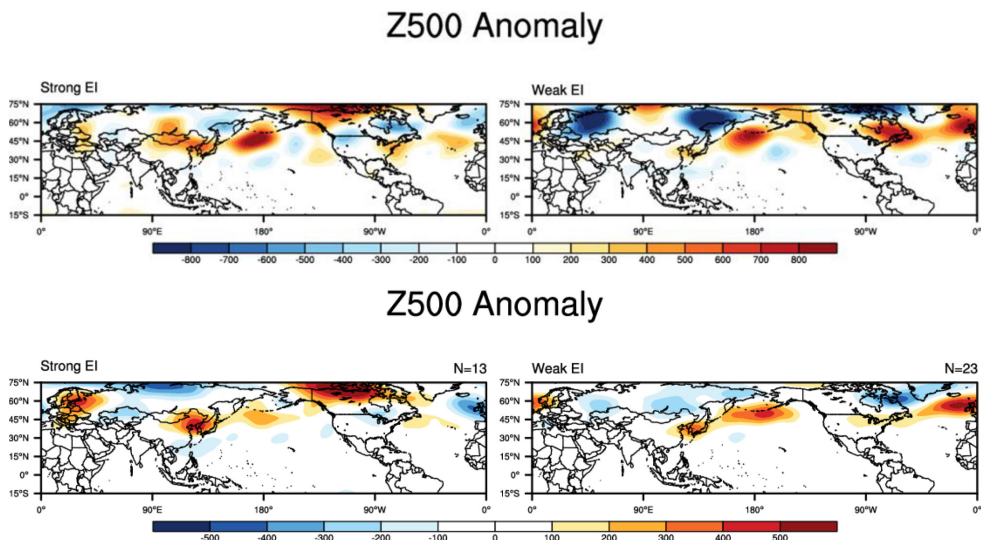


Figure 22. Composite anomalies of 500 hPa height during weeks with (left) strong extreme index, and (right) weak extreme index.

Figure 23은 이상 고온 지수가 높게 나타난 해의 여름 동안 이상 기후지수와 대규모 순환장의 상호 상관을 나타낸 것이다. 2주 전의 대규모 순환장과의 상관관계를 살펴보면 한반도를 중심으로 동, 서쪽의 기압장과는 음의 상관관계를 보이는 반면, 한반도 남, 북쪽에 위치한 기압장과는 양의 관계를 보이는 것으로 나타났다. 1주 전에는 한반도 주변 기압장과의 양의 상관관계가 강해지는 모습을 보여 북태평양 고기압이 강해지며 남쪽의 따뜻한 공기를 한반도로 유입시킬 수 있는 환경을 조성하는 것으로 보인다. 또한, 폭염의 원인 중 하나로 알려져 있는 티벳 고기압과의 양의 상관관계를 보여 이상 고온지수를 활용한 폭염 예측의 가능성을 볼 수 있다.

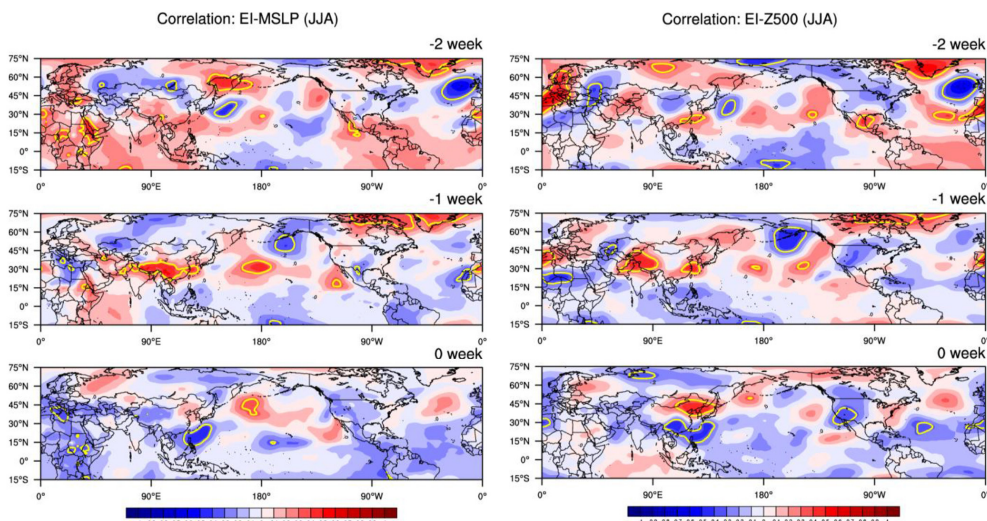


Figure 23. Correlation between warm extreme index and MSLP, and Z500 during summer. Yellow contour indicates significant correlation with 90 % confidence level.

4.3.2 한파와 계절내 이상 기온 지수

한파에 대해서도 폭염과 같은 방법으로 이상저온 지수가 한파를 잘 표현하는지를 살펴 보았다. Figure 24는 겨울철(week29 - 다음해 week9) 평균한 이상저온 지수의 연변동을 나타낸 것이다. 이상저온 지수는 1980년대에 높은 값을 보이다가 겨울몬순이 약해졌던 1990년대에는 매우 낮은 값을 보였으나, 2000년대에는 연변동성이 큰 특징을 보이고

있다. 1983년 가장 큰 값을 나타내었으며, 1985년, 2012년, 1984년, 2005년의 순으로 높은 값을 보였다.

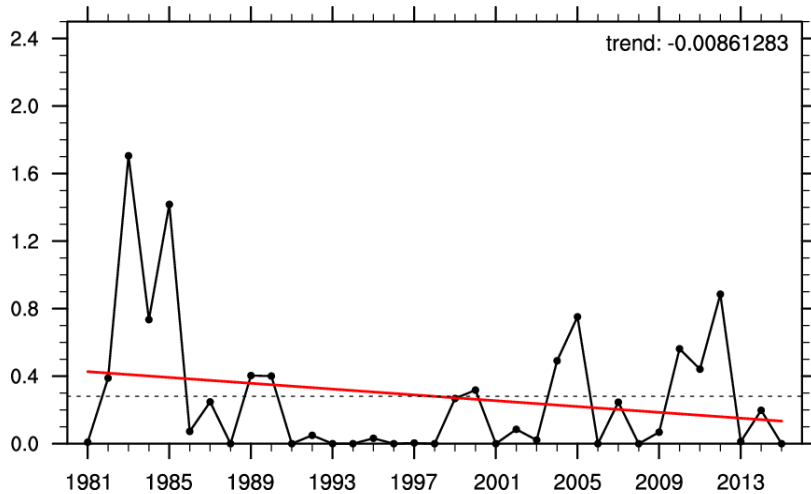


Figure 24. Winter mean cold extreme indices (black) and regression (red). Dashed line is average of indices from 1981 to 2015.

기상청에서 제공하는 한파 일수 기록에 따르면, 2001년부터 2016년까지 16년 동안 한파일수가 가장 많았던 해는 2013년으로 10.4일을 기록하였다(Figure 25). 그러나, 2013년 발생한 한파의 경우 발생빈도는 높았던 반면 지속일수가 매우 짧아(Figure 26) 이상저온 지수값은 낮았다(Figure 24). 2006년 또한 이러한 경우로, 이상저온 지수는 0에 가까우나, 한파발생일은 역대 4번째로 기록된 해였다. 반면, 1983년, 1985년, 2005년은 한파일수와 한파지속일수가 길고(Figure 25, Figure 26), 이상저온 지수 역시 높아(Figure 24) 이상저온 지수로 한파의 표현이 가능했던 경우에 해당된다.

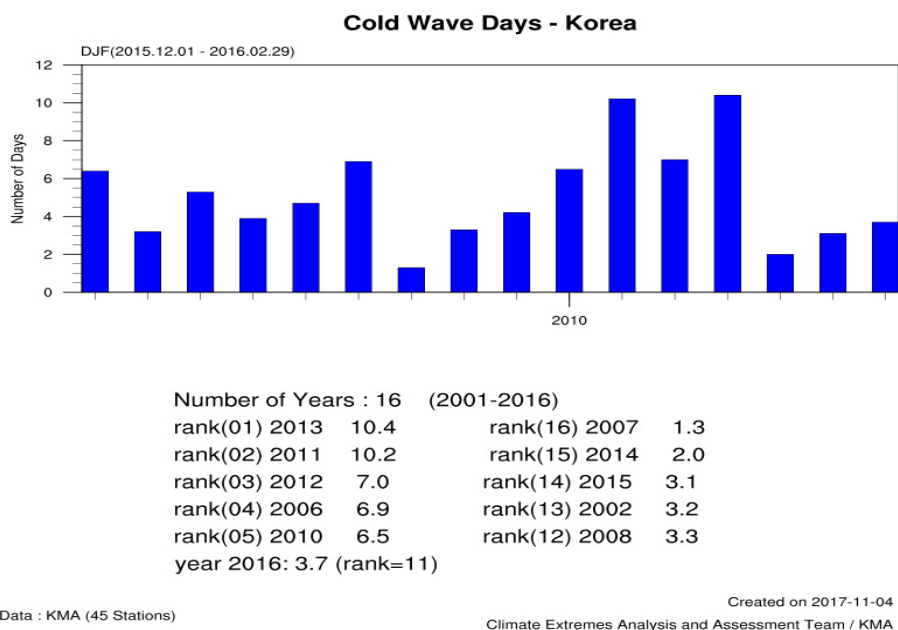


Figure 25. Cold wave days during winter (DJF) from 2001 to 2016 (기상청 이상 기후 합동분석시스템).

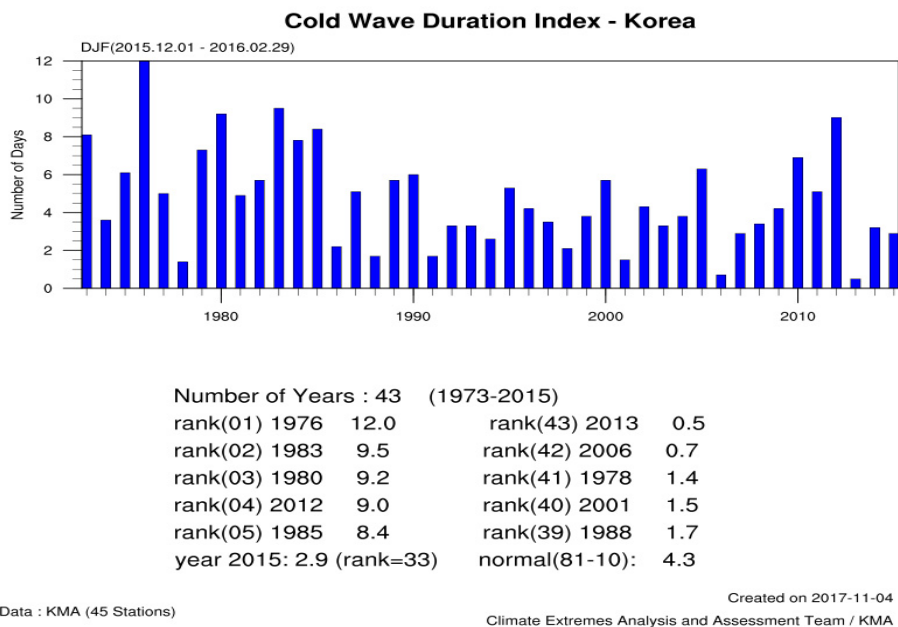


Figure 26. Cold wave duration days during winter from 1973 to 2015 (기상청 이상 기후 합동분석시스템).

이 두 경우의 차이점을 살펴보기 위해 한파가 발생했던 주의 상층 고기압 아노말리를 비교해 보았다(Figure 27). 폭염의 경우와 마찬가지로 주별 평균된 기상청 관측 아노말리 값의 하위 10 % 이하인 온도가 나타난 주를 한파 발생 주라 하고, 이 때 이상저온 지수가 3 이상인 경우 한파를 재현할 경우라 간주하였다. 반면, 한파가 관측되었으나 이상저온 지수가 1 이하인 경우를 이상저온 지수가 한파를 표현하지 못한 해로 간주하였다. 한파가 발생했던 38개의 주 중 이 두 경우에 해당되는 주는 각각 22주, 9주인 것으로 나타났다. 이상저온 지수가 크게 나타났던 경우 공통적으로 한반도 북쪽 고위도 지역에 고기압이 넓게 위치하고 있으며, 한파 발생 시에도 이상저온 지수가 낮았던 경우에는 한반도 주변으로 저기압과 고기압이 번갈아 가며 위치한 것을 알 수 있다. 이는 각각 블로킹(blocking) 타입의 한파와 웨이브 트레인(wave-train) 타입의 한파를 나타내는 것으로 보인다. 동아시아 한파는 그 발생과정의 역학적 특징으로부터 크게 유라시아 대륙 북서쪽, 우랄산맥 부근에서부터 남동진하는 대륙권 상층 파동에 의해 유도되는 웨이브 트레인 타입의 한파와 유라시아 대륙 북동부에서 남진하는 고압계와 관련해 발생하는 블로킹 타입 한파로 나눌 수 있다(Takaya and Nakamura 2005; Park et al. 2015). 웨이브 트레인 타입은 상층 고기압과 저기압이 번갈아 지나가며 추운 날과 따뜻한 날이 반복되므로 주단위 기온을 기준으로 만들어진 이상 기온지수로는 표현하기 힘든 현상이라 판단된다. 반면, 북극해 근처의 고위도에 형성된 저지고기압(블로킹)이 정체하거나 천천히 서진하면서 시베리아고기압을 강화시켜 한반도에 한파를 발생시키는 블로킹 타입 한파는 짧게는 열흘, 길게는 한달 넘게 지속되는 특징을 가지고 있으므로, 15-60일 사이의 극한현상을 모의하기 위한 이상 기후지수로 재현 및 예측이 가능한 현상이 될 수 있다.

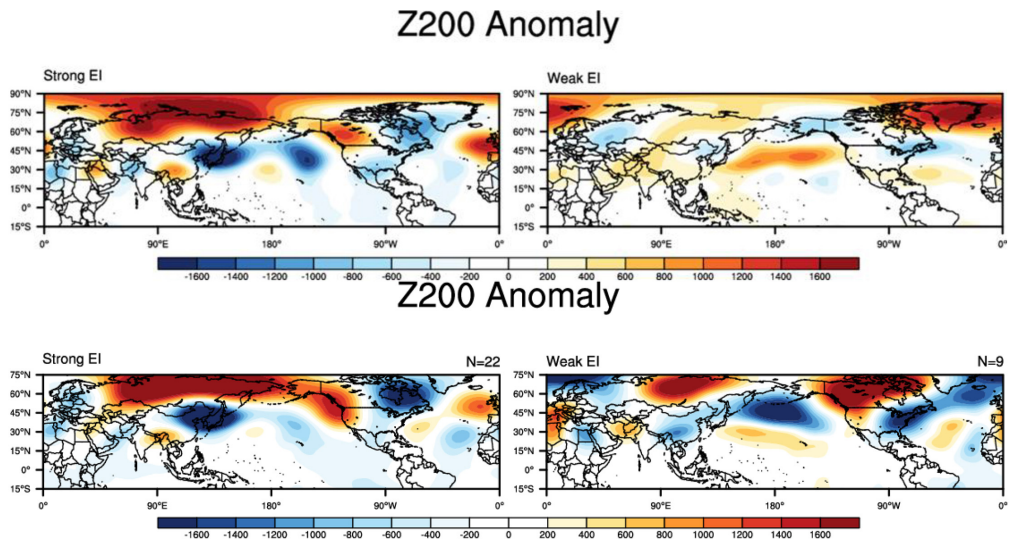


Figure 27. Composite anomalies of 200 hPa height during weeks with (left) strong extreme index, and (right) weak extreme index.

이상저온지수와 대기 상하층 기압계와의 상관관계를 살펴보면(Figure 28), 이상저온지수는 고위도에서 형성된 기압계와 양의 상관관계를 보이며, 그보다 남쪽에 위치한 기압계와는 음의 상관관계를 보인다. 이러한 관계는 1주일 전의 지연상관부터 유의미하게 나타나며, 동시상관에서는 더욱 뚜렷해짐으로써 이 연구에서 개발된 이상저온지수가 블로킹 타입의 한파 예측에 유용하게 쓰일 수 있는 가능성을 보여주는 것이라 생각된다.

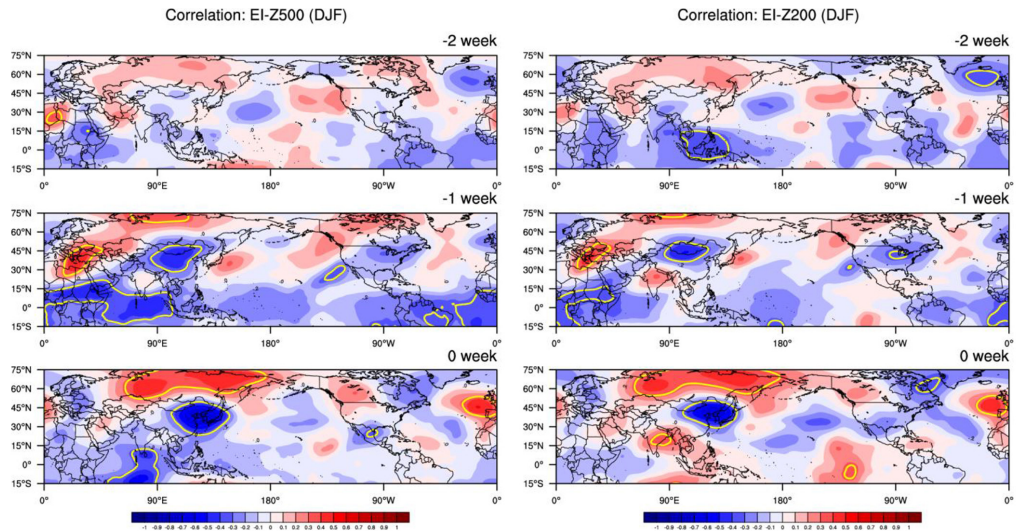


Figure 28. Lag-correlation between cold extreme index and (left) 500 hPa height, and (right) 200 hPa height during winter. Yellow contour indicates significant correlation with 90 % confidence level.

5. 계절내 이상 강수의 지역적 특징

5.1 아시아 지역에서의 이상 강수 변동성

강수는 기온보다 지역적인 특성 및 변화가 다양하므로 한반도의 기후변동 및 변화에 지배적인 영향을 미치는 동아시아 지역 위주의 분석에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다. 강수는 지구 물 순환 및 에너지 순환의 주요 요소이자 대기 순환의 중요한 원동력이며, 강수현상의 변화는 우리나라의 농업, 에너지, 경제, 사회 분야에 상당히 큰 영향을 미친다. 특히 기후변화에 따른 강수형태의 변화로 인해 홍수, 가뭄, 태풍, 한파, 열파 등의 이상 기상 현상이 최근 들어 더 자주, 강하게 발생하여 수많은 인명 및 재산 피해를 기록하고 있다(IPCC, 2013). 이상 강수 현상은 다양한 공간 및 시간규모에서 발생하여 이를 예측하기 상당히 어렵다. 이상 강수의 변동을 보기에 앞서 일반적인 강수 변동 특성을 먼저 살펴보고자 한다. Figure 29와 Figure 30은 각 주별 누적 일평균 강수량의 기후학적 분포(1981-2010) 및 경년 변동의 분포를 동아시아(75° - 150° E, 15° - 60° N) 지역에 대해 나타낸 것이다. 동아시아의 기후학적인 강수 패턴의 주별 연변화는 지역별로 차이가 뚜렷하고 계절에 따른 강수량의 차이 또한 크게 나타난다. 남아시아 몬순이 시작될 무렵인 5월초(W18)부터 해당지역에 강수량이 증가하며 강수구역이 점차 북상하는 패턴이 나타나며 북동아시아의 몬순 기간인 6-8월(W23~W35)에 가장 높이 북상하였다가 점차 쇠퇴/남하하며 강수량이 감소하는 특징을 보인다. 이에 대한 각 주별 강수의 경년 변동의 분포를 살펴보면 강수의 평년기후 패턴과 유사하게 강수량이 많이 발생하는 지역에 변동성이 강하게 나타나고 계절의 변화에 따라 변동 구역이 남북으로 확장/감소하는 특징을 보인다.

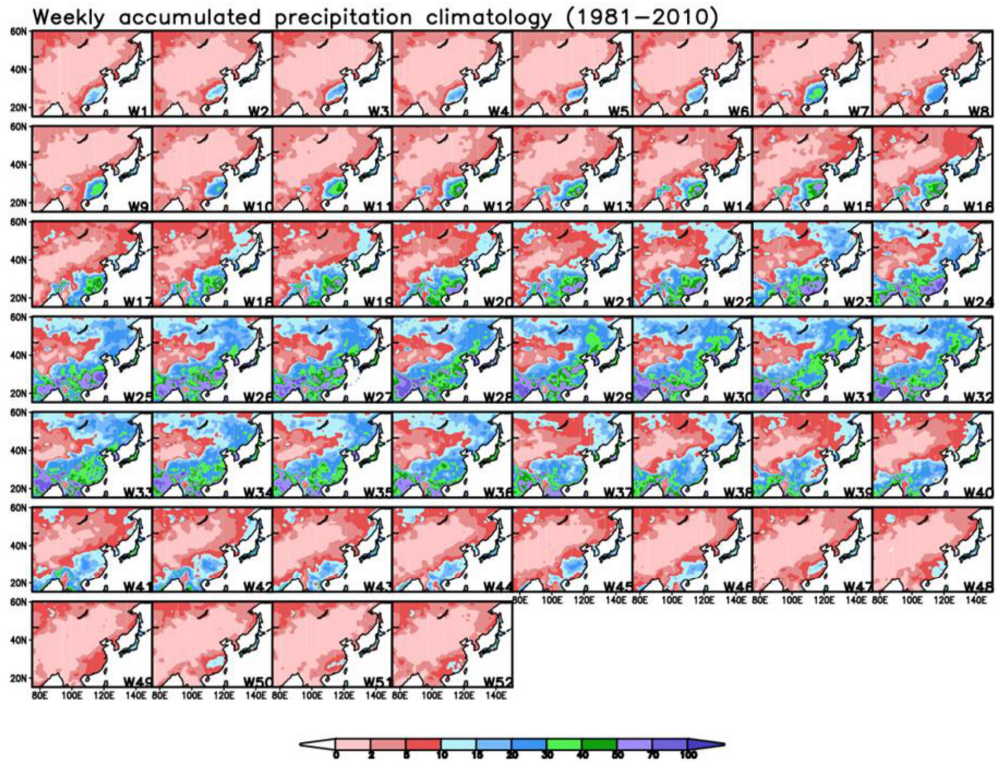


Figure 29. Climatological (1981–2010) distributions of weekly accumulated precipitation over East Asia (15–60N, 75–150E). W1~W52 indicates the week from January 1~7 (W1) through December 25~31 (W52).

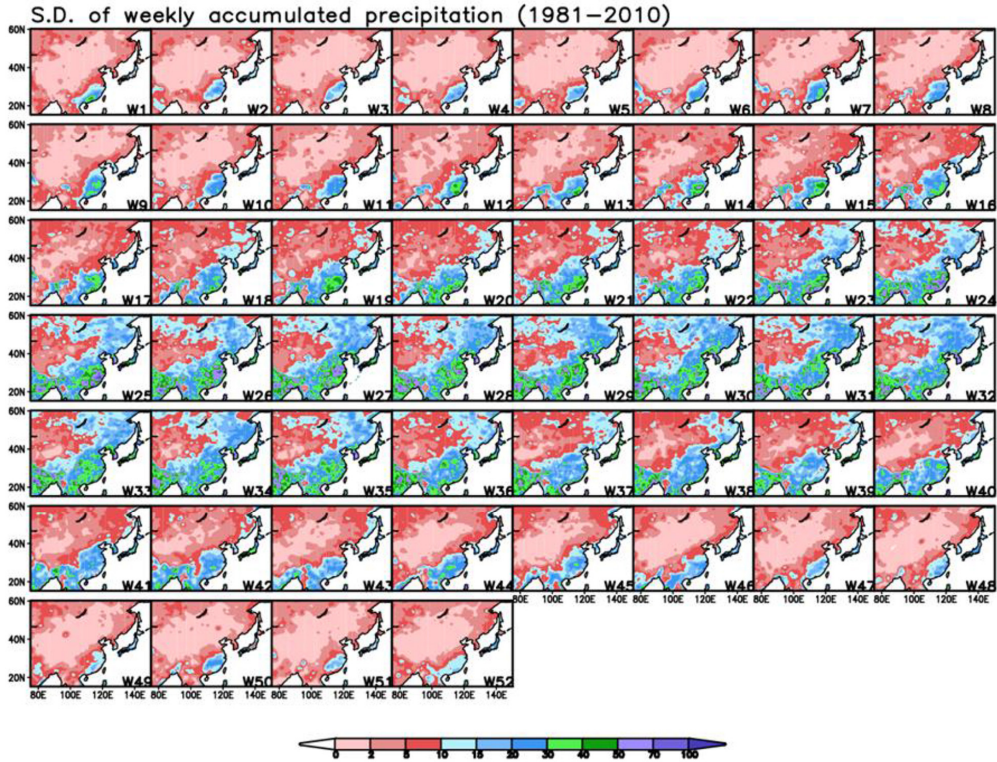


Figure 30. Standard deviation of weekly accumulated precipitation over East Asia (15-60N, 75-150E) during 1981-2010.

이상 강수의 패턴이 위에서 제시한 일반적인 주 별 강수 패턴과 어떠한 공간적인 분포 및 특성의 차이로 나타나는지 보기 위해 1981-2010년 기준 90퍼센타일(R90p) 이상의 강수가 나타나는 해만을 선택하여 각 격자 별로 합성한 강수량 분포를 Figure 31에 제시 하였다. 이상 강수는 각 격자별 그리고 각 주별로 구해지는 결과이므로 강수의 평년 분포와는 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 먼저 남동아시아에 비해 강수량이 적은 동아시아의 중부와 북부 지역을 살펴보면 특히 북부 지역에서 남부 지역과 유사한(다소 약한) 이상 강수 구역이 W1에서부터 나타나는 것을 알 수 있다. 이상 강수의 연 변화를 보게 되면 겨울-봄에 남동쪽 이외에도 북부에서 많은 강수량이 분포되어 있으며, 여름철로 갈수록 그 영역이 확대되어 몽골-카자흐스탄 지역을 제외한 대부분의 구역으로 확장되는 양상을 보이고, 가을로 이동할수록 다시 감소하는 패턴을 보인다. 단순히 강수량의 연변화를 비교하였을 때는 기후학적인 강수 분포의 특성과 유사하게 나타나지만, 기후학적인 강수량

대비 이상 강수량의 증가/감소를 비교해 보았을 때는 러시아 일부가 포함되는 북부에서의 이상 강수 구역은 계절에 무관하게 남부지역과 비교해도 적지 않은 강수량 분포를 보이는 것을 알 수 있다.

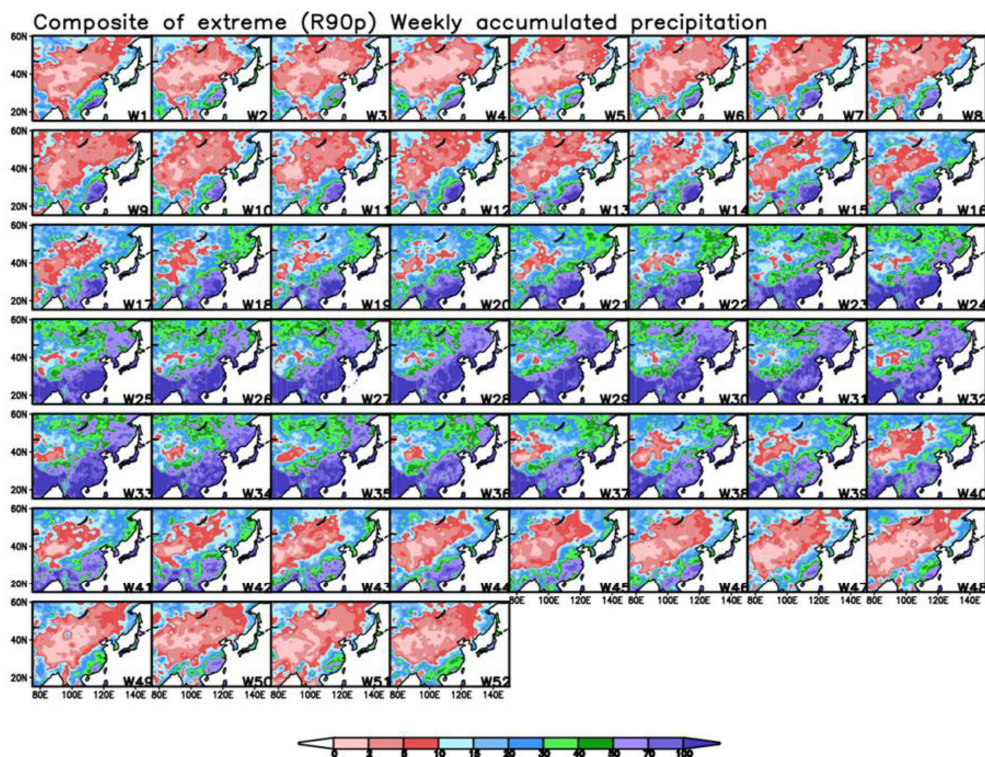


Figure 31. Composite of weekly extreme (90p) precipitation over East Asia during 1981-2016 based on 1981-2010.

관측 자료가 충분한 대륙지역에서의 일평균 강수량의 연중 최고치인 이상 강수는 전구 평균기온이 1도 상승할 경우 7 % 정도 증가하는 것으로 분석되었다(Westra et al. 2013). Figure 32는 동아시아에 발생하는 이상 강수의 변화 특성을 나타낸 것으로 1981년부터 2016년까지의 이상 강수의 변화 추세를 나타낸다. 상단은 각 격자별 변화 추세를 수평 분포로 나타낸 것이고 하단은 동아시아 평균 각 연도별 이상 강수 주별 발생 수를 평년대비 편차 시계열로 나타낸 것이다. 동아시아 전체 구역이 전반적으로 이상 강수 발생이 증가하는 추세를 보이고 있으며 지역별로는 발생 수의 차이가 보인다. 특히, 미얀마,

중국과 인도의 경계, 중국 중부, 카자흐스탄 부근, 한반도 북부(선양-길림) 지역이 다른 지역에 비해 그 증가가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Figure 32 하단의 시계열을 보면 1981년을 제외한 나머지 해에서는 1980년대 초반부터 후반으로 최근까지 이상 강수 발생 수의 점차적인 증가가 뚜렷하게 나타난다. 특히, 2002년을 기준으로 평년대비 증가가 발생하며 이는 동아시아 전체의 전반적인 경향임을 알 수 있다.

이상 강수 발생 수의 변화 특성을 계절적으로 구분하여 Figure 33에 제시하였다. 이상 강수 발생 구역으로 비교하면 겨울철이 가장 적은 증가 경향이 나타나고 봄철이 가장 많은 증가가 나타난다. 가장 강한 이상 강수의 증가는 모든 계절에 대해 공통적으로 네팔과 미얀마 근처의 소규모 지역에서 발생하며 여름철에 가장 크게 발생한다. 우리나라의 경우 전 계절에 걸쳐 이상 강수 발생 수의 증가는 뚜렷하지 않은 것으로 보인다.

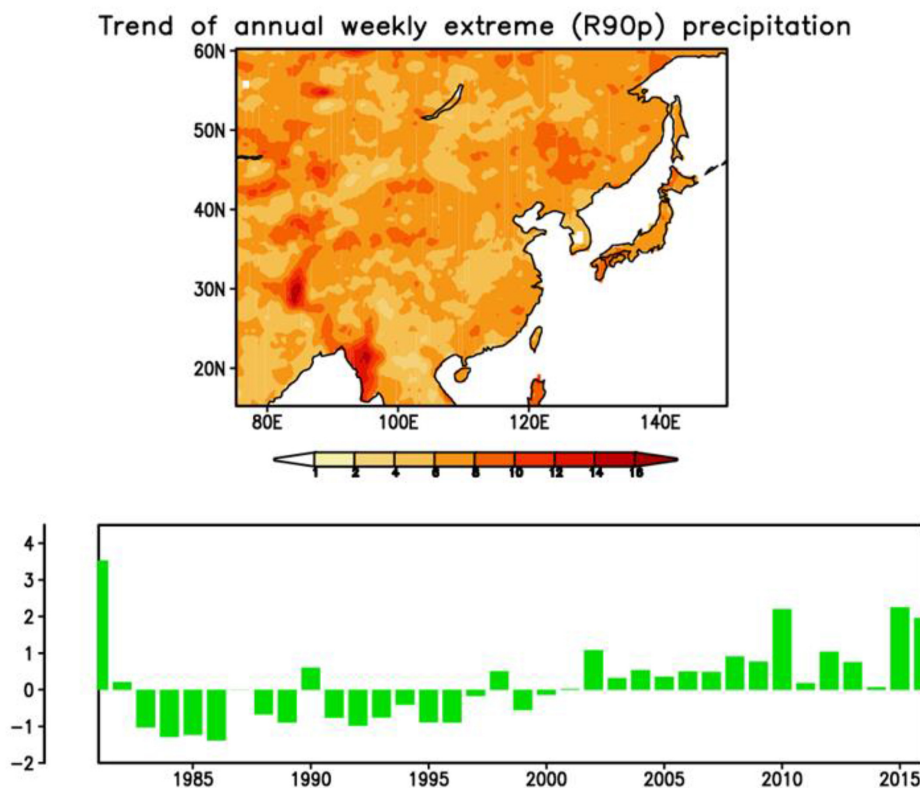


Figure 32. (Top) Spatial distribution of trends (week/decade) and (bottom) annual time series of extreme (90p) precipitation occurrences (in week) relative to 1981-2010 mean over East Asia.

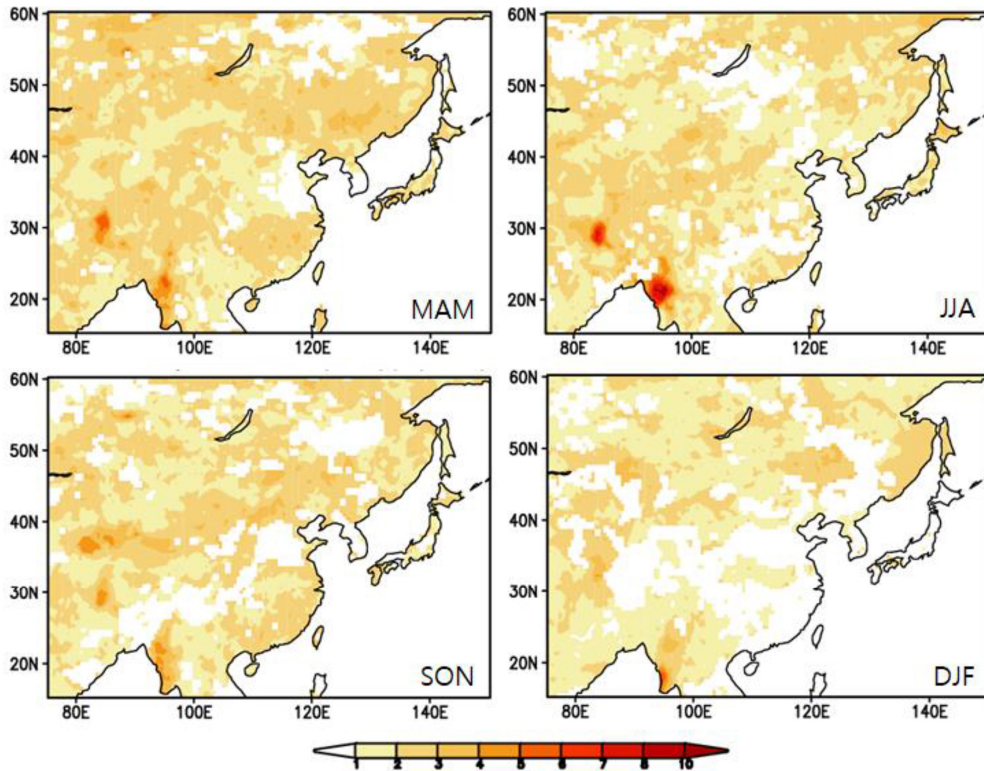


Figure 33. Same as in Figure 32 (top), but for the seasonal occurrence of extreme precipitation weeks for March-May (MAM), June-August (JJA), September-November (SON), and December-February (DJF).

이상 강수 발생 특성을 구체적으로 살펴보기 위해, 각 주별 동아시아 및 남한 지역에서 발생하는 이상 강수 발생 격자 수와 이들이 동아시아 및 남한 전체 격자에 차지하는 상대적 비율을 주별-연도별 분포로 제시하였다. Figure 34는 동아시아에서 발생한 이상 강수의 총 발생 수와 이상 강수가 발생한 영역의 비율을 나타낸 것으로, 이상 강수 현상이 2000년대 이후로 이전에 비해 증가하는 경향이 보이고, 발생 영역 또한 증가된 것을 확인할 수 있다.

Figure 35는 남한 지역에 대해 더 자세히 살펴본 결과이다. 지역적으로 더 상세히 구분을 지어볼 때 남한의 경우는 동아시아 전반적인 특성에 비해 연도별 이상 강수 발생 수나 영역의 증가가 뚜렷하지 않다. 다만 더 작은 영역으로 구분 지어짐에 따라 이상 강수 발생 영역이 차지하는 비율이 상승하는 특성이 보인다. 아울러 각 주별로 정의되는 이상

강수이기 때문에 평균 강수량이 많고 적음에 따라 구분되지 않으며 남한 내에서도 소규모로 발생하기도 하며 한 주에 국한되기도 하지만 3-4주간 이어져서 나타나는 경우도 있을 수 있다.

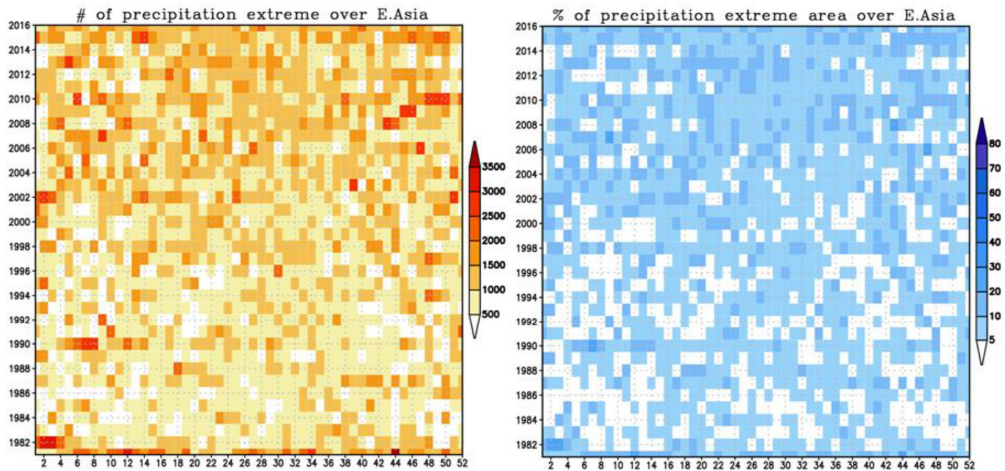


Figure 34. (Left) Interannual variability of the total number of precipitation extreme weeks occurred in East Asia and (right) the percentage of area where precipitation extreme occurs relative to East Asia for each week.

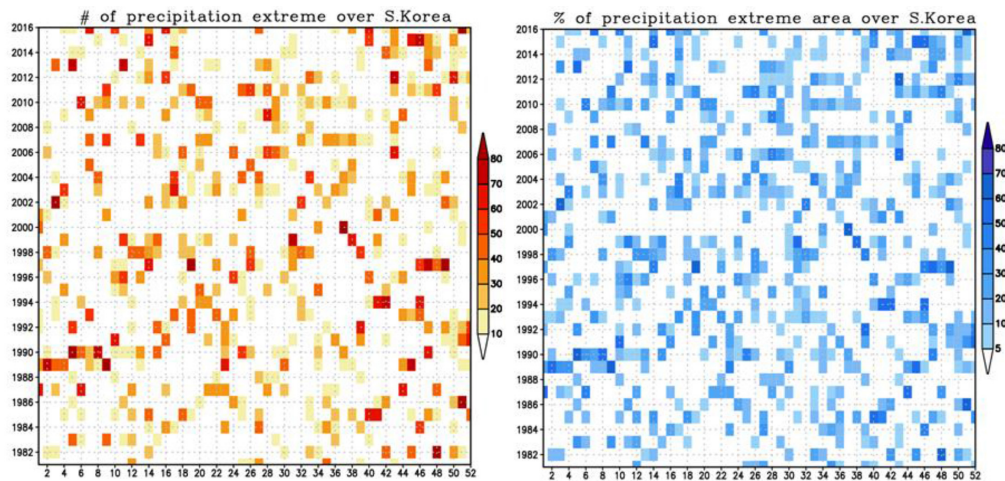


Figure 35. Same as in Figure 34 but for South Korea.

Figure 36은 개발된 이상 기후 지수를 동아시아 및 남한 지역의 강수에 적용하여 이상 강수 지수로 나타낸 결과이다. 앞서 제시한 동아시아 이상 강수의 증가 추세가 이상 강수 지수에 반영되는 것을 알 수 있다. 좌측 동아시아에 대한 경우를 보면 이상 강수 지수의 강도가 최근 10년에 강하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 남한의 경우 증가 경향은 보이지 않고 이상 강수 발생이 많았던 1989년 초, 1997년 11-12월 등 지수 강도가 강한 시기와 이상 강수 발생이 많은 시기가 일치하여 나타난다. 이는 Figure 35와 동일한 결과로, 개발된 이상 기후 지수가 강수의 이러한 특징을 잘 반영해 주는 것을 증명한다.

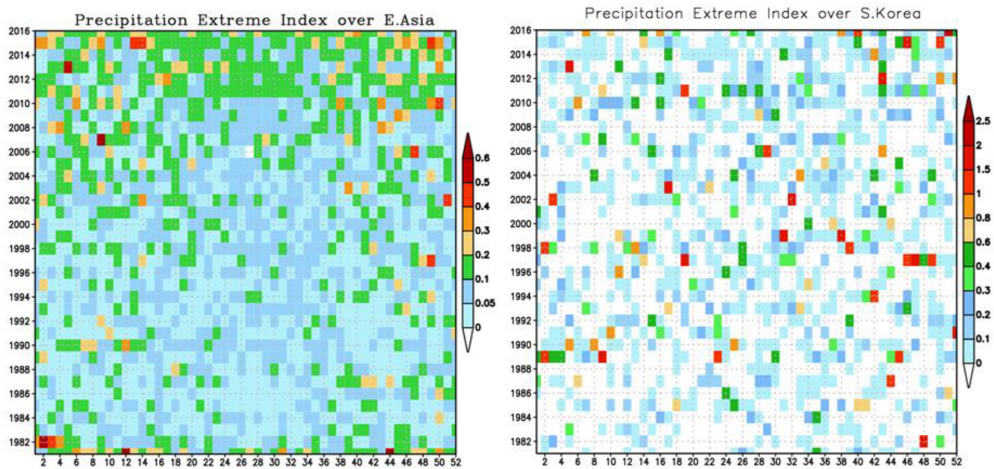


Figure 36. Interannual variability of weekly precipitation extreme over (left) East Asia (75–150E, 15–60N) and (right) South Korea (124–132E, 33–38N).

5.2 한반도에서의 이상 강수 변동성

기온의 증가와 더불어 우리나라의 여름철 강수도 변화하고 있다. 강수량, 강수 강도, 강수 빈도 등의 변화로 인해 이상 강수로 기록되는 경우가 늘어나고 있는 추세이다(Choi 2004). 5.2절에서는 남한지역에 발생하는 이상 강수의 특성을 분석하고 주요 기후 인자와의 관련성을 알아보려고 한다.

구체적인 분석에 앞서 본 연구에서 사용된 관측 및 재분석 강수 자료의 주별-연도별 강수량 분포를 비교해보고자 한다. Figure 37은 기상청 45개 지점자료와 CPC 재분석

자료에서 제시되는 주별 강수량 분포이다. 기상 관측 자료와 재분석 자료의 강수량 값이 다소 차이가 있으나, 연변화 및 연도별 변동의 특징은 아주 유사하게 설명하고 있다. 따라서, 강수 분석에서는 지점자료 대신 재분석 자료를 사용하여 지역적 활용성을 확보하였다.

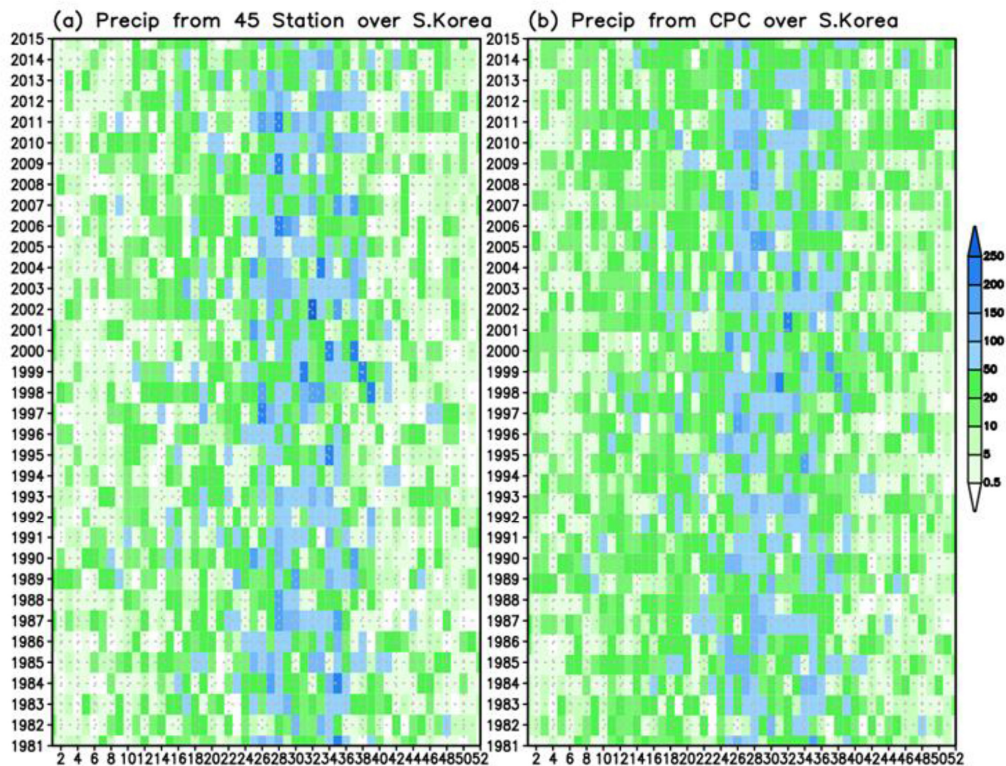


Figure 37. Hovmoller diagram of weekly accumulated precipitation over South Korea from (left) 45 observation station from KMA and (right) CPC reanalysis.

Figure 38은 남한지역 각 주 별 이상 강수 지수의 1981년부터 2016년 평균 값과 이 기간 내 최대값을 나타낸 그래프이다. 남한지역 계절내 이상 강수 지수는 평균적으로 0.2 이하의 값을 갖는 반면, 최대값은 약 3.1로 2016년 W51에 나타났다. Figure 39는 해당 주의 과거 45년간의 주별 누적강수량의 순위를 나타낸 것으로, W51의 1973년에서 2017년 사이에 가장 많은 강수를 기록한 해는 2016년이며 44.3 mm의 강수량을 기록하였다. 이는 본 연구에서 개발한 이상 기후 지수가 남한강수의 극한 사상을 잘 잡아낸다는 것을 보여준다. 이렇게 도출된 남한지역의 계절내 이상 강수 지수의 평균값이나 최대값은

주로 기후학적으로 우기가 아닌 시기에 상대적으로 큰 값을 갖는 경향을 보인다. 한편, 각 주 별 이상 강수 지수의 최대값이 가장 많이 나타났던 해는 1989년과 2016년으로, 각 해의 52주 중 분석기간인 1981-2016년 사이에 최대값을 나타난 주가 각각 5회 나타났다.

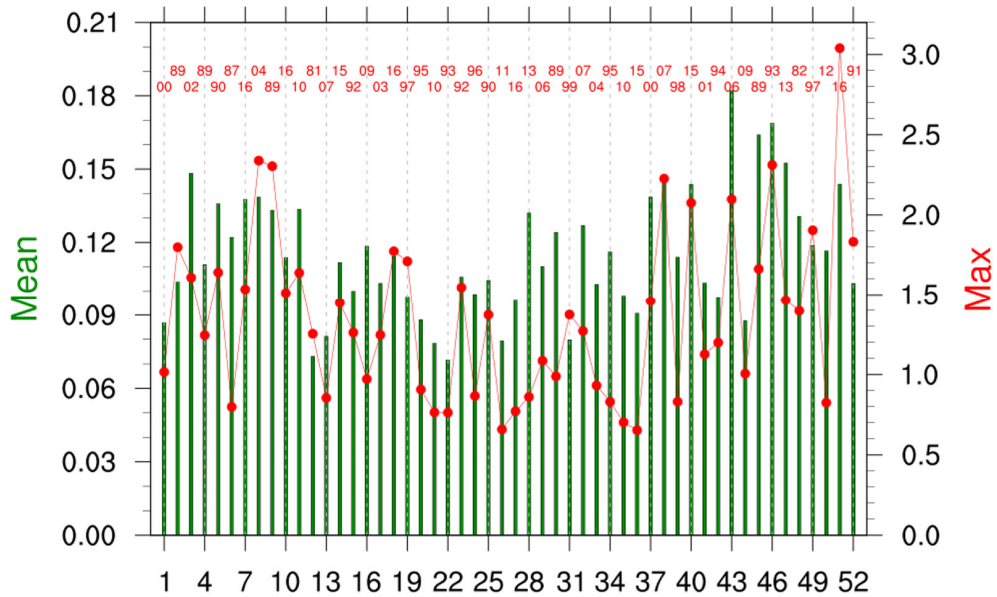


Figure 38. Extreme precipitation index over South Korea. Green bar indicates 1981-2016 mean and red marker indicates the maximum for the period of 1981-2016.

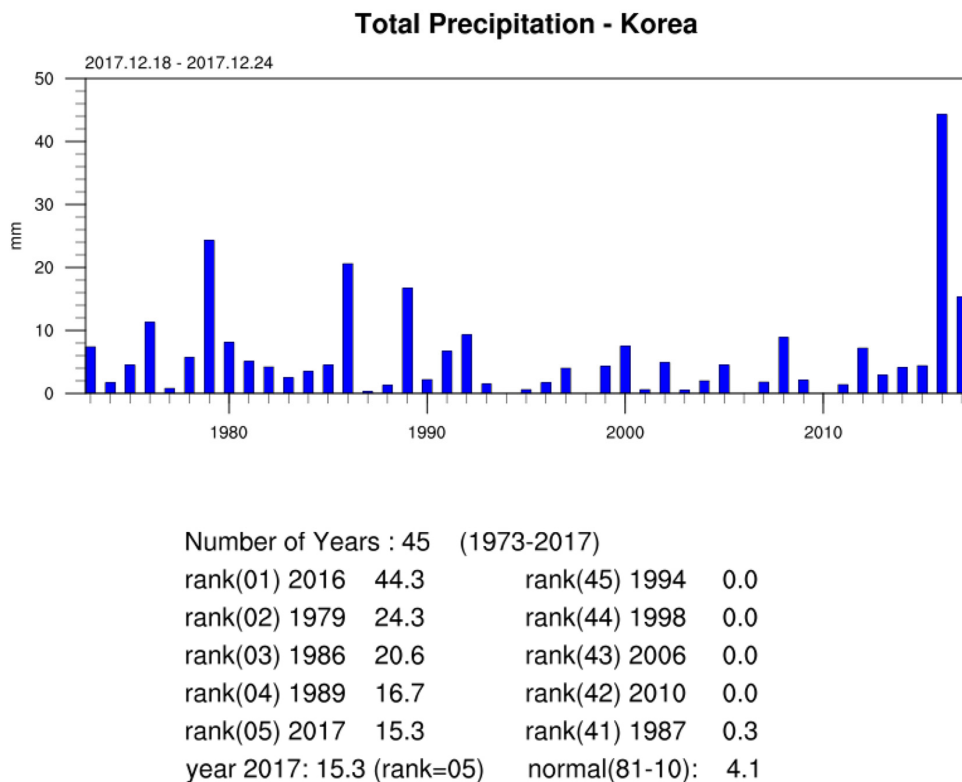


Figure 39. Rank of weekly accumulated precipitation for the 51st week from 1973 to 2017 (adopted from KMA).

남한의 이상 강수 지수는 계절에 따른 변동성의 차이를 보이며, 가을철과 겨울철이 봄철과 여름철에 비해 그 변동성이 큰 것을 확인할 수 있다(Figure 40). Figure 41은 남한지역의 계절내 극한강수 지수의 히스토그램을 나타낸 것이다. 대부분의 값이 0과 0.5 사이에 분포하는 것을 알 수 있으며, 2016년의 W51처럼 3 이상의 값을 나타내는 경우는 극히 드문 것으로 나타났다.

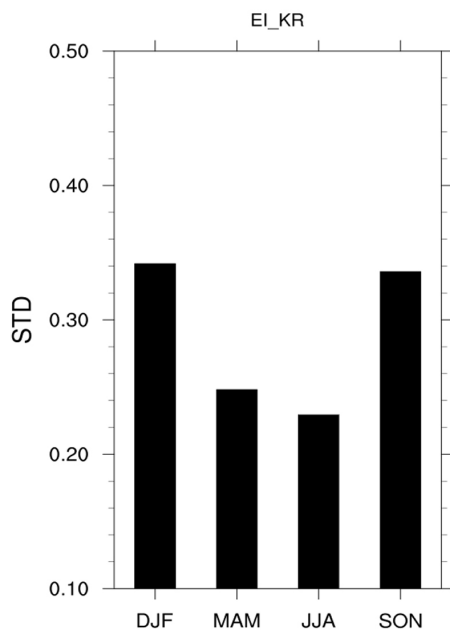


Figure 40. Seasonal standard deviation of extreme precipitation index in South Korea.

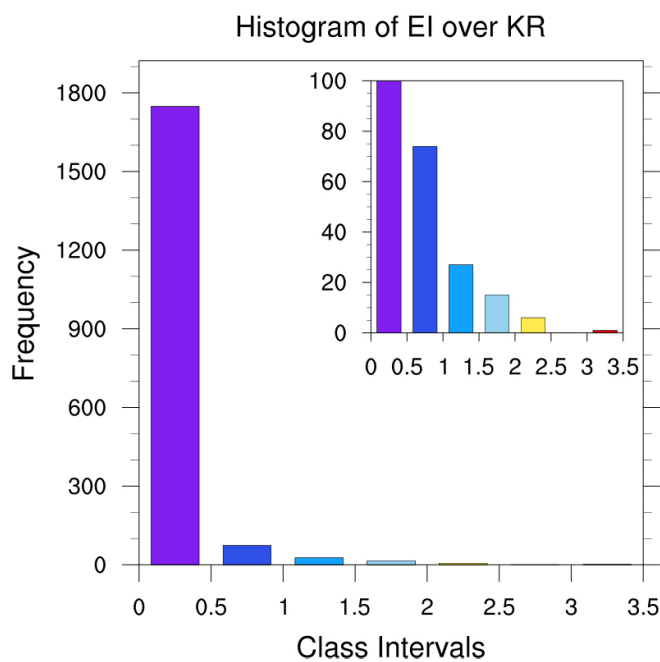


Figure 41. Histogram of Extreme index of precipitation in Korea. Right top is the histogram with educed Y-Axis up to 100.

이상 기후 지수의 경년 변동성을 살펴보면 매년 그 평균값에 차이가 나지만 뚜렷한 추세를 보이지는 않는다(Figure 42). 또한 Figure 41과 같이 주별 최대값이 각각 5회씩 나타난 1989년과 2016년에 이상 강수 지수의 연평균 값이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

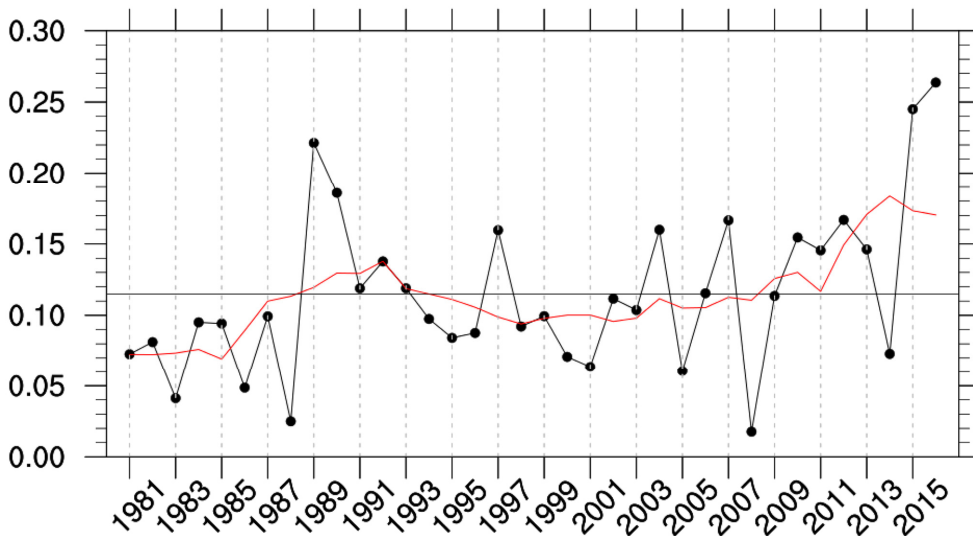


Figure 42. Time series of yearly averaged extreme index of South Korea precipitation. Red line is 7-year running mean.

우리나라 이상 강수 현상이 발생하였을 때의 대기 순환 패턴을 알아보기 위해 각 주별 이상 강수 지수가 최대인 해의 500 hPa 지위고도와 주별 총강수량을 합성 분석하여 계절별로 나타내었다(Figure 43). 여름철(JJA)의 경우 이상 기후 지수의 절대값 자체가 높지는 않지만 이에 해당하는 총 강수량은 가장 많은 것을 확인할 수 있다. 또한 이상 강수가 발생한 경우 한반도는 전 계절 모두 고기압의 가장자리에 위치함에 따라 남풍을 타고 수증기의 유입이 활발해질 수 있는 패턴을 보인다. 그러나 한반도 동쪽에 자리한 고기압의 중심부는 계절별로 차이가 있다.

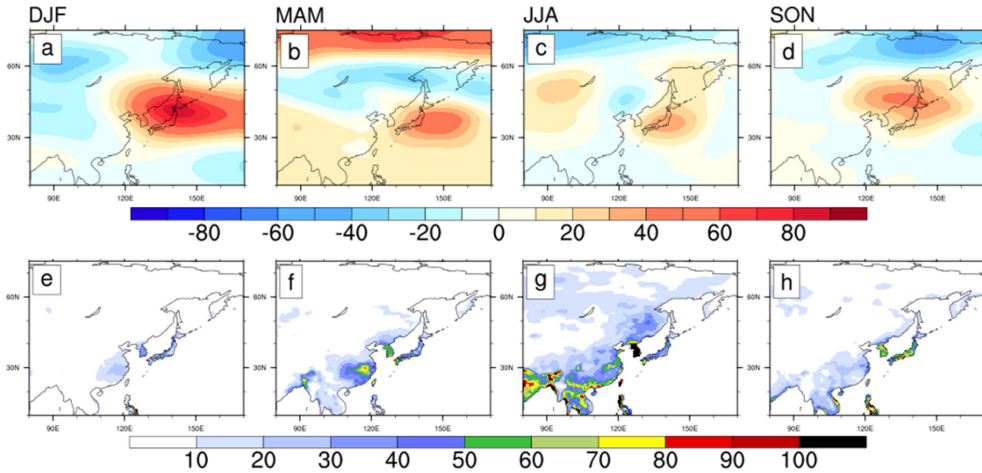


Figure 43. (a-d) Seasonal composite of Z500 anomalies (m) and (e-h) weekly accumulated precipitation (mm) for week of the maximum extreme index from 1981 to 2016.

5.3 이상 강수 지수의 활용

5.3.1 태풍과 계절내 이상 강수 지수

이 절에서는 태풍과 이상 강수 발생의 관련성을 조사하고자 한다. Table 4는 1981년부터 2010년까지 한반도에 영향을 준 태풍(국가태풍센터; http://typ.kma.go.kr/TYP_HOON/index.jsp)의 한반도 영향 시기(주별)와 이때의 이상 강수 지수를 나타낸 것이다.

Table 4. Tropical cyclone affected the Korean Peninsula during 1981–2010 and extreme precipitation index.

Year	TC	Period	Index season	Index value
1981	8104 (IKE)	6/8–6/17	24 (6/11–6/17)	0
	8105 (JUNE)	6/15–6/26	25 (6/18–6/24)	0.1
	8110 (ORFEN)	7/26–8/01	31 (7/30–8/5)	0
	8118 (AGNES)	8/25–9/6	36 (9/3–9/9)	0.1
	8120 (CLARA)	9/13–10/2	39–40 (9/24–9/30)	0.1–0.3
1982	8210 (BESS)	7/21–8/3	31 (7/30–8/5)	0
	8211 (CECIL)	8/4–8/15	33 (8/13–19)	0.1
	8213 (ELLIS)	8/18–9/4	35 (8/27–9/2)	0
	8219 (KEN)	9/15–9/27	39 (9/24–9/30)–40	0.1

Year	TC	Period	Index season	Index value
1983	8310 (FORREST)	9/19-9/30	39 (9/24-9/30)	0.1
1984	8403 (ALEX)	7/1-7/6	27 (7/2-7/8)	0.3
	8410 (HOLLY)	8/15-8/23	34-35 (8/20-8/26)	0.3-0.6
	8412 (JUNE)	8/26-9/3	36 (9/3-9/9)	0.1
1985	8505 (HAL)	6/19-6/27	26 (6/25-7/1)	0.1
	8508 (KIT)	7/31-8/17	32 (8/6-8/12)	0
	8509 (LEE)	8/9-8/16	33 (8/13-19)	0.1
	8513 (PAT)	8/24-9/2	35-36 (8/27-9/2)	0-0.3
	8520 (BRENDA)	9/30-10/8	40 (10/1-10/7)	0.8
1986	8605 (NANCY)	6/20-6/25	26 (6/25-7/1)	0
	8613 (VERA)	8/13-9/2	35 (8/27-9/2)	0.1
	8616 (ABBY)	9/12-9/24	38 (9/17-9/23)	0
1987	8705 (THELMA)	7/7-7/18	28 (7/9-7/15)	0.3
	8708 (ALEX)	7/21-8/2	30 (7/23-7/29)	0.1
	8712 (DINAH)	8/20-9/3	35 (8/27-9/2)	0.1
1989	8906 (ELLIS)	6/20-6/25	25 (6/18-6/24)	0
	8911 (JUDY)	7/21-7/29	30 (7/23-7/29)	0.6
1990	9005 (OFELIA)	6/16-6/26	26 (6/25-7/1)	0.1
	9007 (ROBYN)	7/4-7/14	28 (7/9-7/15)	0.1
	9015 (ABE)	8/24-9/3	35 (8/27-9/2)	0
	9019 (FLO)	9/12-9/22	38 (9/17-9/23)	0.1
1991	9109 (CAITLIN)	7/21-7/30	30-31 (7/23-7/29)	0-0.1
	9112 (GLADYS)	8/15-8/24	34 (8/20-8/26)	0.2
	9113 (NONAME)	8/26-8/30	35-36 (8/27-9/2)	0-0.2
	9117 (KINNA)	9/10-9/16	37 (9/10-9/16)	0
	9119 (MIREILLE)	9/13-10/1	39 (9/24-9/30)	0.3
1992	9210 (JANIS)	8/3-8/13	32 (8/6-8/12)	0.1
	9219 (TED)	9/17-9/27	39 (9/24-9/30)	0.6
1993	9305 (OFELIA)	7/24-7/29	30 (7/23-7/29)	0.2
	9306 (PERCY)	7/27-8/1	30 (7/23-7/29)	0.2
	9307 (ROBYN)	8/1-8/14	33 (8/13-19)	0.8
	9313 (YANCY)	8/29-9/7	36 (9/3-9/9)	0.1
1994	9407 (WALT)	7/14-7/28	30 (7/23-7/29)	0
	9411 (BRENDAN)	7/25-8/3	31 (7/30-8/5)	0.1
	9413 (DOUG)	8/1-8/13	32 (8/6-8/12)	0.1
	9414 (ELLIE)	8/6-8/19	33 (8/13-19)	0
	9429 (SETH)	10/2-10/16	41-42 (10/8-10/14)	0.4-2.0

Year	TC	Period	Index season	Index value
1995	9503 (FAYE)	7/16-7/25	30 (7/23-7/29)	0.1
	9507 (JANIS)	8/20-8/28	34 (8/20-8/26)	0.8
	9514 (RYAN)	9/15-9/25	38 (9/17-9/23)	0.1
1996	9606 (EVE)	7/13-7/27	29 (7/16-7/22)	0.1
	9612 (KIRK)	8/3-8/18	33 (8/13-19)	0.1
1997	9707 (OPAL)	6/14-6/22	25-26 (6/18-6/24)	0-0.6
	9709 (ROSIE)	7/18-7/31	30-31 (7/23-7/29)	0.1-0.4
	9711 (TINA)	7/29-8/10	32 (8/6-8/12)	0.4
	9713 (WINNIE)	8/6-8/25	33 (8/13-19)	0
	9719 (OLIWA)	9/3-9/19	37 (9/10-9/16)	0
1998	9809 (YANNI)	9/26-10/1	39-40 (10/1-10/7)	2.0-0.1
	9810 (ZED)	10/10-10/20	42 (10/15-10/21)	0.3
1999	9905 (NEIL)	7/22-7/28	30 (7/23-7/29)	0.3
	9907 (OLGA)	7/29-8/5	31 (7/30-8/5)	2
	9908 (PAUL)	8/3-8/9	32 (8/6-8/12)	0
	9917 (ANN)	9/14-9/20	38 (9/17-9/23)	2
	9918 (BART)	9/17-9/29	39 (9/24-9/30)	0
2000	0004 (KAITAK)	7/3-7/12	28 (7/9-7/15)	0.1
	0006 (BOLAVEN)	7/24-8/2	31 (7/30-8/5)	0
	0010 (BILIS)	8/18-8/27	35 (8/27-9/2)	0
	0012 (PRAPIROON)	8/24-9/4	35 (8/27-9/2)	0
	0014 (SAOMAI)	8/31-9/19	37 (9/10-9/16)	0.8
2001	0111 (PABUK)	8/13-8/22	34 (8/20-8/26)	0.1
2002	0205 (RAMMASUN)	6/28-7/18	27 (7/2-7/8)	0.1
	0208 (NAKRI)	7/7-7/13	28 (7/9-7/15)	0
	0209 (FENGSHEN)	7/13-7/28	30 (7/23-7/29)	0
	0215 (RUSA)	8/22-9/3	35 (8/27-9/2)	0.1
2003	0304 (LINFA)	5/25-6/4	22 (5/28-6/3)	0.8
	0306 (SOUDELOR)	6/12-6/24	25 (6/18-6/24)	0.1
	0310 (ETAU)	8/2-8/11	32 (8/6-8/12)	0.3
	0314 (MAEMI)	9/4-9/16	37 (9/10-9/16)	0.2
2004	0407 (MINDULLE)	6/21-7/5	27 (7/2-7/8)	0.3
	0410 (NAMTHEUN)	7/24-8/3	31 (7/30-8/5)	0.1
	0415 (MEGI)	8/14-8/22	33 (8/13-19)	1.0
	0416 (CHABA)	8/18-9/5	35 (8/27-9/2)	0.2
	0418 (SONGDA)	8/26-9/10	36-37 (9/3-9/9)	0.1-0.2
2005	0514 (NABI)	8/29-9/9	36 (9/3-9/9)	0.8

Year	TC	Period	Index season	Index value
2006	0603 (EWINIAR)	6/29-7/12	28-29 (7/9-7/15)	0.6-2.0
	0610 (WUKONG)	8/12-8/21	33 (8/13-19)	0.1
	0613 (SHANSHAN)	9/9-9/19	38 (9/17-9/23)	0.1
2007	0704 (MANYI)	7/7-7/23	28 (7/9-7/15)	0.1
	0705 (USAGI)	7/27-8/4	31-32 (7/30-8/5)	0.2-0.3
	0711 (NARI)	9/11-9/18	37-38 (9/10-9/16)	0.2-0.3
2008	0807 (KALMEGI)	7/13-7/24	29 (7/16-7/22)	0.1
2010	1004 (DIANMU)	8/7-8/13	32-33 (8/6-8/12)	0.1-0.3
	1007 (KOMPASU)	8/28-9/6	35 (8/27-9/2)	0.2
	1009 (MALOU)	9/1-9/10	36 (9/3-9/9)	0.1

Figure 44는 Table 4을 기준으로 태풍의 영향이 있을 때 이상 강수 지수가 0.3 이상 또는 미만인 각 경우에 대한 합성도를 표시한 것으로, 상단은 하층바람과 OLR 그리고 하단은 하층바람과 강수분포를 나타낸 것이다. Figure 45는 태풍의 영향이 없었으나 이상 강수 지수가 0.3 이상인 경우의 합성도이다. 태풍은 강수량뿐만 아니라 바람의 세기에도 영향을 미친다. 태풍 발생시 이상 강수 지수의 높고 낮음에 따른 한반도 및 주변 동아시아 전체의 순환장을 비교하면, 이상 강수 지수가 높은 경우 우리나라 및 필리핀해 부근에서 대류활동이 일어나 많은 강수가 발생하는 것을 볼 수 있다(Figure 44a, 44c). 또한 한반도를 중심으로 서쪽에 저기압성 순환, 동쪽에 고기압성 순환이 존재하는 동서 dipole 구조가 형성되어, 한반도를 관통하는 강한 남/남동풍이 우세한 것을 볼 수 있다. 반면, 이상 강수 지수가 낮은 경우 대류활동이 약해지고, 한반도 남쪽으로 저기압성 순환이 크게 발달하여 일본 남부로 향하는 남서기류가 우세한 것을 알 수 있다(Figure 44b, d). 또한, 동아시아 북부에서 불어오는 북풍이 강해져 남쪽으로부터 올라오는 수증기가 한반도에 도달하기 어려운 상황이 형성된다. 따라서, 강수 발생 가능성이 낮아지고, 이상 강수로의 발달 또한 어려워질 수 있음을 보여준다.

태풍의 영향이 없고 이상 강수의 강도가 강한 경우, 태풍의 영향이 있고 이상 강수의 강도가 높았던 경우와 유사한 패턴을 보이고 있으나(Figure 45), 하층 순환장은 서로 다른 양상을 보인다. 태풍의 영향이 있는 경우 태풍의 발달로 인해 한반도 근처 하층에서 저기압성 순환이 발생하는 반면, 태풍의 영향이 없는 경우에는 필리핀해 부근의 강한 대

류활동과 저기압성 순환으로 인한 2차적 고기압성 순환이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이로 인해 한국-일본 남부에 걸쳐지는 강한 고기압성 순환이 남북방향의 dipole 구조를 이루며 한반도로 다량의 수증기를 유입시키게 된다.

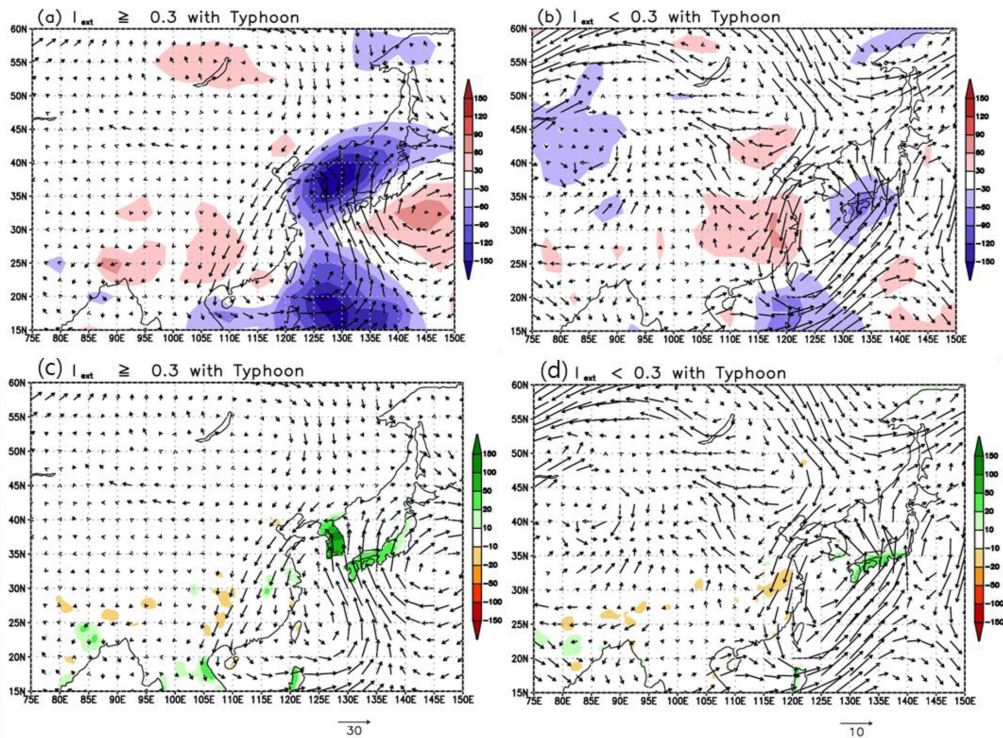


Figure 44. Composite maps of extreme precipitation weeks with Typhoon. Extreme Index (a)(c) over 0.3 and (b)(d) below 0.3. Shading indicates (a)(b) OLR and (c)(d) precipitation and the vector is 850 hPa wind.

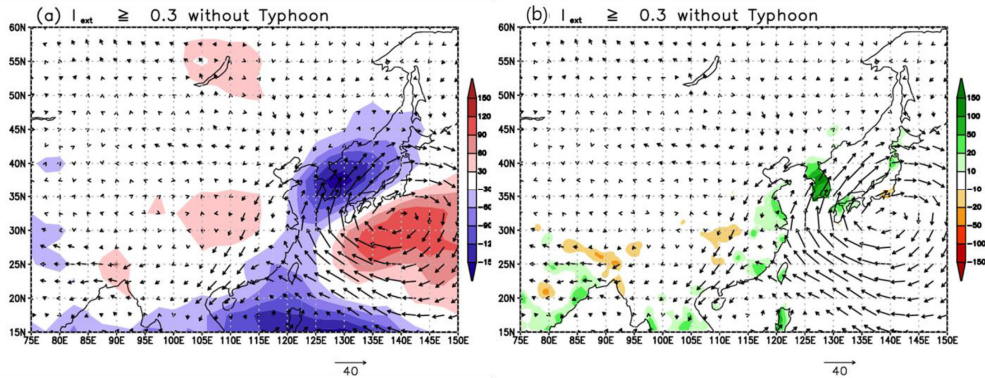


Figure 45. Composite maps of extreme precipitation weeks (index over 0.3) without Typhoon. Shading indicates (a) OLR and (b) precipitation and the vector is 850 hPa wind.

5.3.2 장마와 계절내 이상 강수 지수

동아시아 몬순 시스템의 일부인 장마는 우리나라 연 총 강수량의 약 30 %를 차지하는 주요 강수 현상으로 우리나라 수자원 공급에 있어 중요한 기상현상이다. Figure 46은 장마와 이상 기후 지수간의 관계를 살펴보기 위한 것으로, 이상 강수 지수와 매년 장마의 시작 주 및 종료 주를 표시하였다. 장마는 보통 W25(6월 중하순)에 시작하여 W30에 끝나는 경향을 보인다. 총 연강수의 30퍼센트가 장마기간에 발생하지만, 장마기간 동안 이상 기후 지수가 상대적으로 큰 값을 갖는 것처럼 보이지 않는다. 이는 장마는 우리나라의 전형적인 기후학적 특성으로 매해 발생시기가 일정한 편이고 그 현상 자체가 드물지 않은 까닭으로 생각된다.

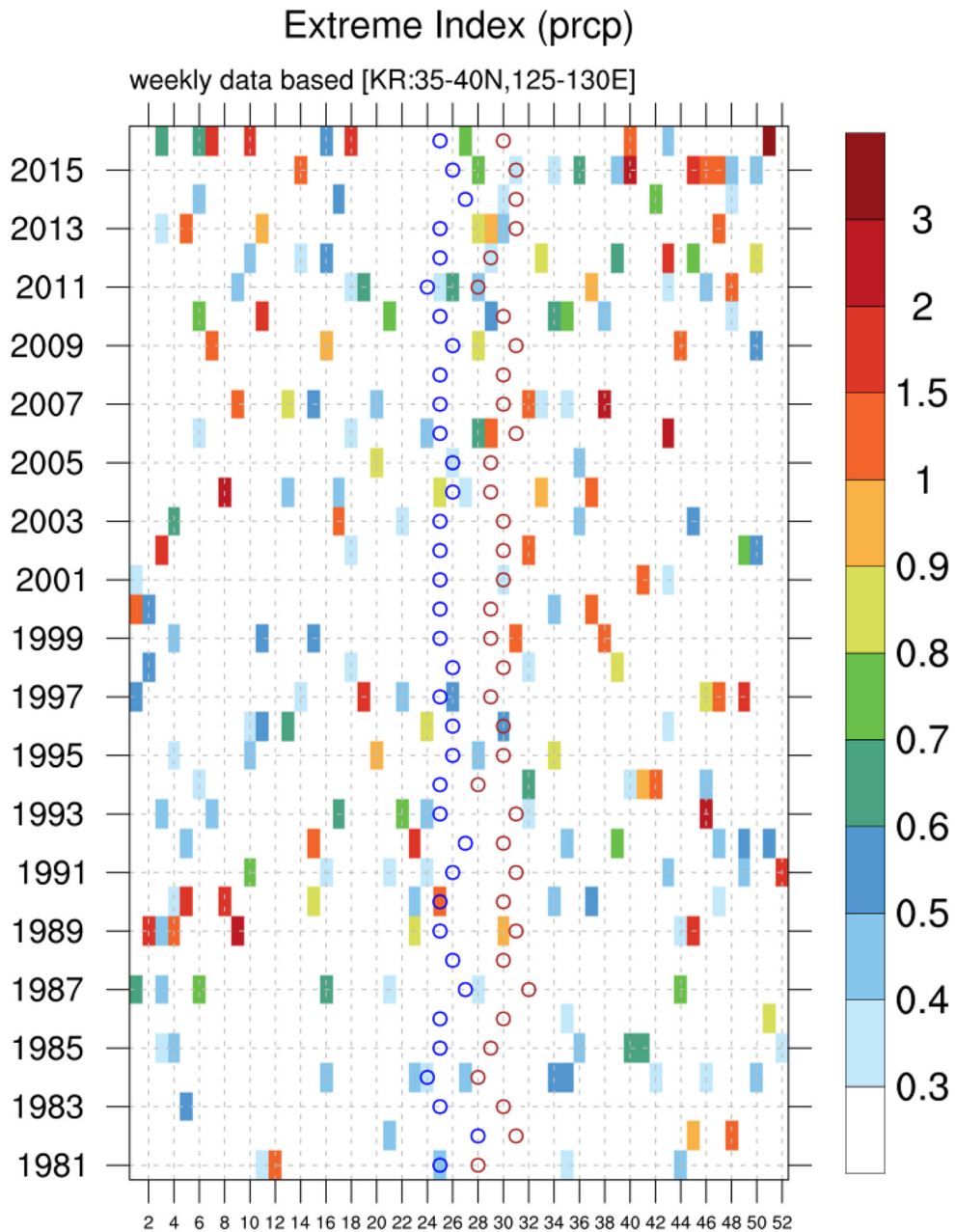


Figure 46. Extreme precipitation index in South Korea (x-axis: week, y-axis: year). Week of Changma onset (blue circle) and week of Changma withdrawal (brown circle).

Figure 47은 매년 장마기간 동안 이상 기후 지수를 평균하여 나타낸 시계열이다. 매년 그 값에 많은 변동성이 있음을 확인할 수 있다. Figure 48에서 약 700 mm의 가장 많은 양의 비가 내리고 강수일수가 25일 이상으로 가장 길었던 2006년의 경우 이상 기후 지수는 평균 0.3으로 높은 편에 속하지만 가장 큰 값을 보이지는 않았다. 가장 높은 이상 강수 지수를 보인 2013년은 24일의 긴 강수일수를 기록하였으나, 강수량은 약 400 mm로 많은 양의 비가 내리지는 않았다. 그러나, 장마기간의 평균 이상 기후 지수와 강수량 사이에는 0.54, 평균 이상 기후 지수와 장마 일수 사이에는 0.47의 상관관계를 보여 전반적으로 이상 강수 지수와 장마의 관련성이 높다고 할 수 있다.

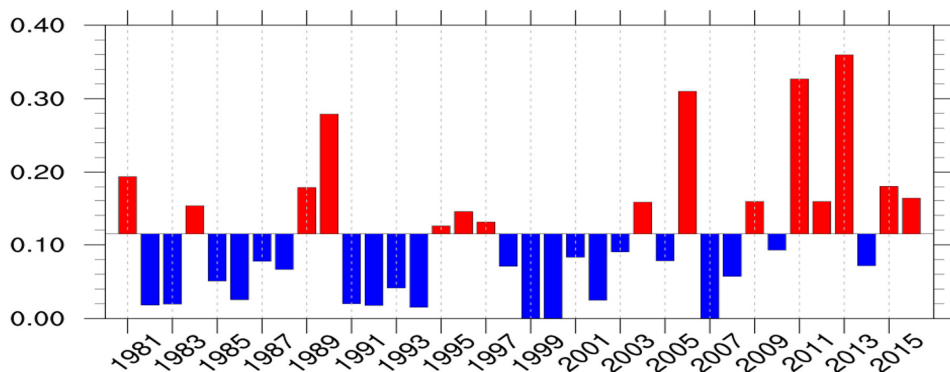


Figure 47. Extreme index averaged over the period of Changma. References line indicates the total mean of extreme precipitation index during Changma period.

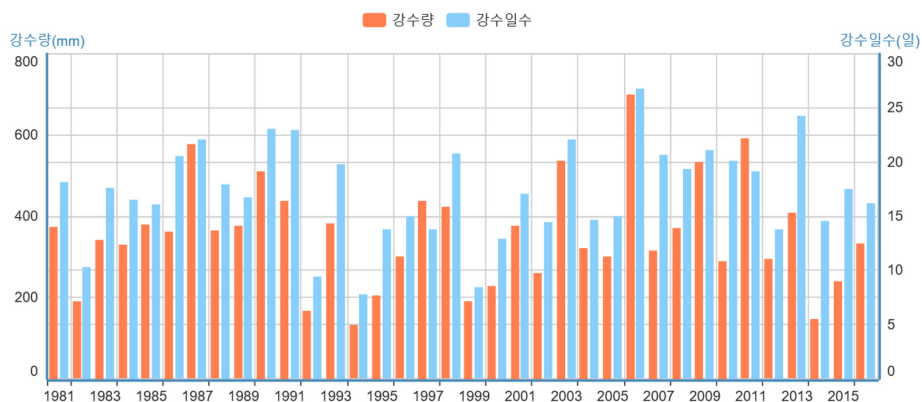


Figure 48. Precipitation amount and rainy days during Changma.

6. 계절내 예측에의 활용

6장에서는 새롭게 개발된 이상 기후 지수를 실제 사례에 적용하여 계절내 예측에의 활용 가능성을 살펴보고자 하였다.

6.1 2016년 8월 폭염사례

2016년 8월 전국 평균기온은 1973년 이래 가장 높은 값을 기록 하였으며, 이로 인한 극심한 피해가 농업, 수산업, 등 여러 분야에서 속출하였다(이상 기후 보고서 2016). Figure 49는 해당시기의 남한지역 45개 관측소 평균 기온값을 나타낸 것으로, 8월 1일부터 25일까지 평년보다 높은 기온이 지속되었음을 알 수 있다. 같은 시기 전국 평균 기온은 평년에 비해 약 2.6°C 높았고, 평균최고기온은 약 3.5°C 높았다. 기상청에 따르면, 일본 동쪽에서 크게 발달한 북태평양 고기압이 기압계의 흐름을 정체시키면서 중국 대륙에 위치한 고기압에 의한 고온 건조한 기류가 한반도로 지속적으로 유입되어 고온현상이 장기간에 걸쳐 지속된 것으로 분석되었다. 8월 26일 이후 중국 대륙에 위치한 고기압이 약화되어 우리나라로 상층의 찬공기가 유입됨에 따라 기온이 급격히 감소하게 되었고 무더위가 누그러지게 되었다.

Figure 50은 2016년 우리나라 이상 고온지수를 나타낸 시계열이며, 붉은색으로 강조된 기간은 8월의 폭염사례에 해당한다. 8월 폭염 시, W31부터 이상 고온 지수가 증가하기 시작하여 W33에 최대값을 기록하였다. 이상 고온 지수에서 8월 폭염 발생을 잘 반영하는 것을 확인할 수 있다.

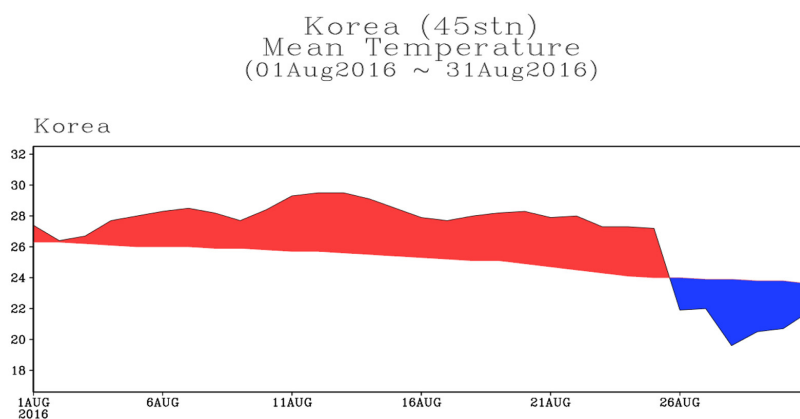


Figure 49. Time series of mean temperature averaged over 45 stations in South Korea (Adopted from KMA).

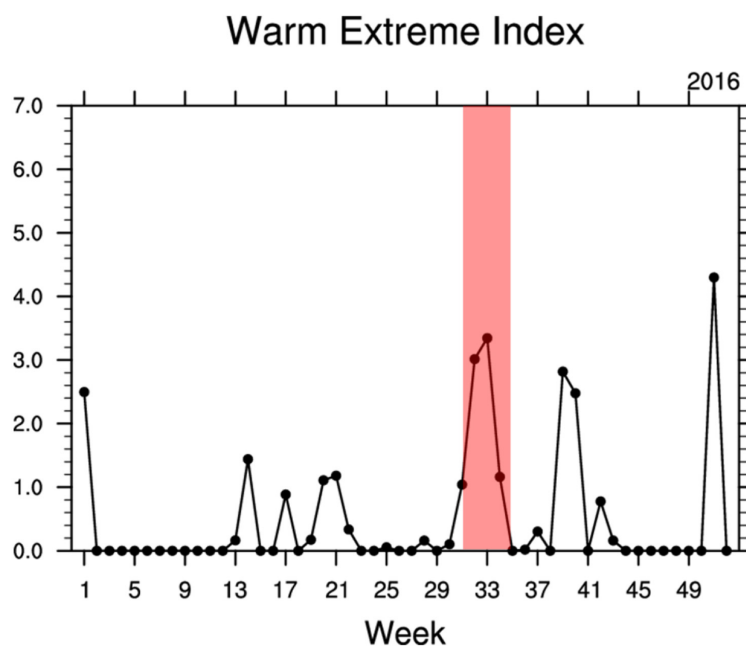


Figure 50. Time series of 2016 extreme index in South Korea.

6.2 이상 기후 지수의 예측

2016년 8월은 폭염으로 인해 전력 사용량이 폭증하면서 전력 수급에도 많은 차질을 빚었다. 또한 많은 온열 질환 환자들이 발생하는 등 이상 고온 현상으로 인한 심각한 피해가 발생하였다. 이러한 피해를 줄이기 위해 이상 고온 현상을 예측하여 사전 방지 대책을 마련하는 것이 중요하다. 이번 장에서는 ECMWF 예측 자료에 본 과제에서 고안된 이상 기후 지수를 적용하여 2016년 8월 우리나라의 폭염사례를 예측해보고, 이를 통해 계절내 시간 규모에서 이상 기후 현상을 예측할 수 있는지를 논의하고자 한다.

예측자료의 경우 각 지점의 REFERENCES 기간은 예측시점 이전 20년으로 1996년부터 2015년에 해당된다. 과거 20년 자료로부터 가중치를 산정하여 2016년 예측장에 적용하여 계산한 이상 기후 지수는 Figure 51과 같다. ECMWF의 경우, 매주 목요일에 예측이 수행되므로 목요일이 주평균의 시작점이 된다. 관측에서 구한 이상 기후 지수와 references period 및 주평균 구성방식이 다르고 모델의 구조적 오차를 제거하지 않았으므로 이상 기후 지수값 자체를 관측과 직접 비교하는 것에는 무리가 따른다. 1주전 예측의 경우 8월 초부터 증가하기 시작한 이상 고온 지수는 8/18-24 주에 최대값을 나타낸 후 급격히 감소하는 관측의 패턴을 잘 따른다. 2주 전 예측의 경우 1주전 예측에 비해 이상 고온 지수의 최대값이 한주 앞당겨져 발생한다. 이후 3주 예측부터는 8월 마지막주에 쇠퇴하는 폭염의 특징을 잘 예측하고 있지 못하다.

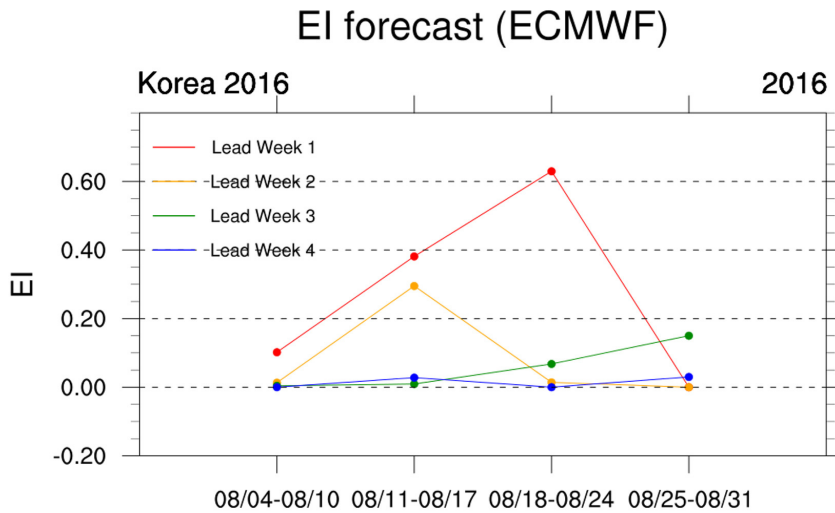


Figure 51. Extreme index forecast for August 2016 from lead week 1 to lead week 4.

2016년 8월 16일-24일의 이상 고온 주간과 8월 25일-31일 이상 고온이 급격히 해소되는 주간으로 나누어 각각의 주에서 4주 전부터의 이상 기후 지수를 바탕으로 한 예측가능성을 살펴보았다(Figure 52). 8월 16-24일과 8월 25-31일 사이의 상대적인 크기 비교를 통해 예측 가능성을 평가하고자 한다. 1주 전 예측의 경우 고온주간이 그 다음주에 비해 상대적으로 큰 이상 기후 지수를 보이는 것을 확인할 수 있으나 예측선행시간이 길어질수록 이러한 차이는 줄어들 뿐 아니라 저온 주간의 값이 고온 주간의 값보다 더 크게 나오는 것을 알 수 있다.

Figure 53은 각 예측 선행시점에서의 기온 아노말리의 공간분포를 나타낸 것이다. 이상 고온 주간 1주전 예측에는 남한지역에 뚜렷한 양의 아노말리가 분포하고, 이후 남한 지역에 음의 아노말리가 우세한 것으로 나타나고 있다. 그러나 선행시간이 증가함에 따라 고온주간의 양의 아노말리와 그 다음주의 음의 아노말리가 점점 약해지고 심지어 저온 주간의 경우 영역평균된 기온 아노말리의 부호가 바뀌게 된다.

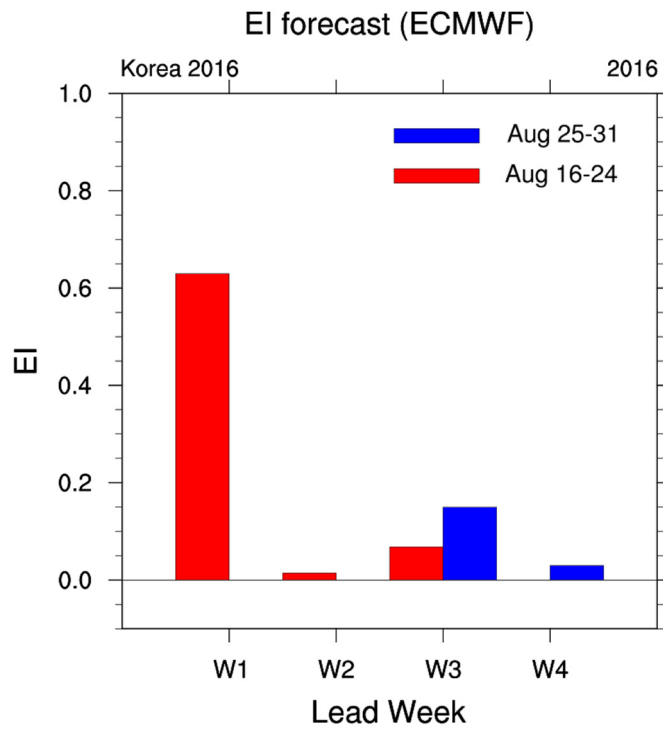


Figure 52. Extreme index forecast for hot week (Aug 16-24) and cold week (Aug 25-31) from lead week 1 to lead week 4.

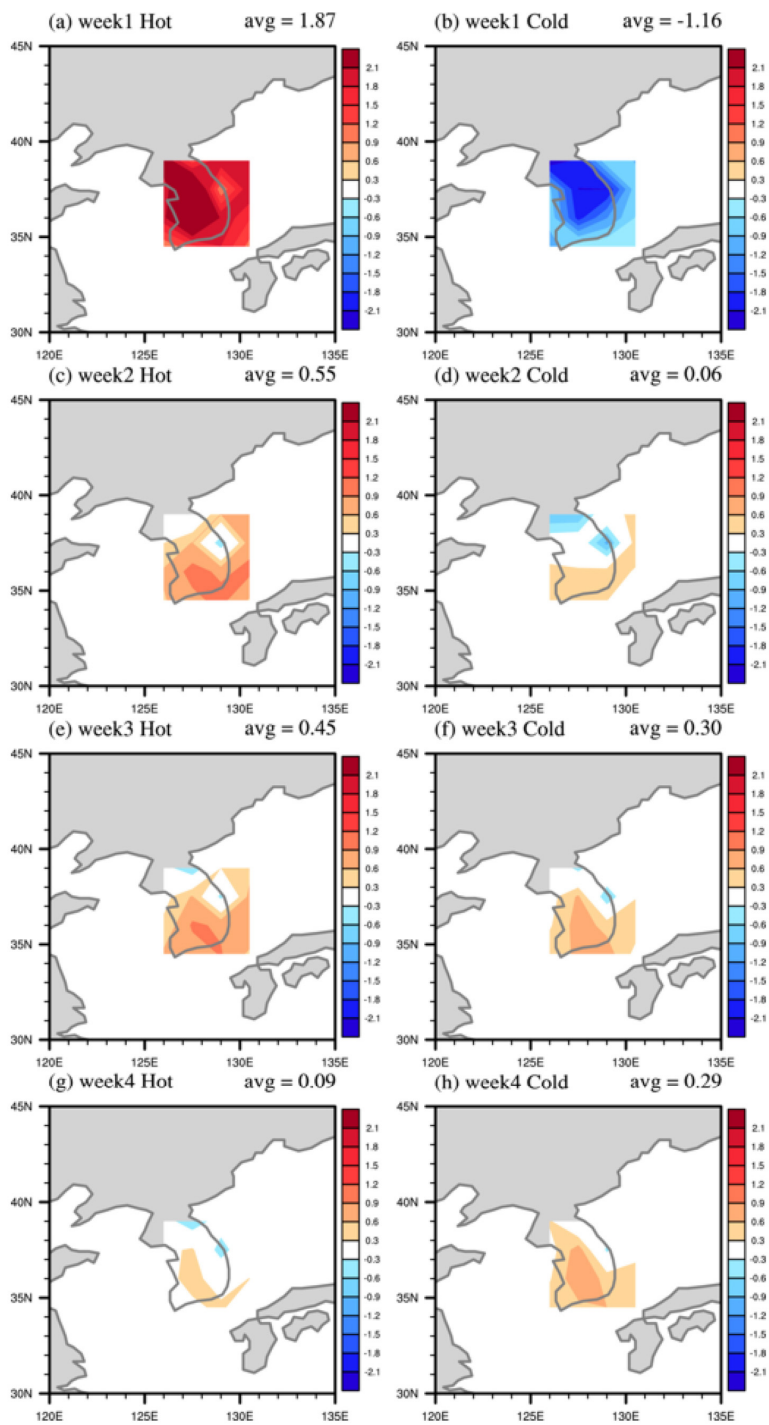


Figure 53. Weekly anomalies of 2m temperature from lead week 1 to lead week 4. Value averaged over South Korea is given right top corner.

7. 결론

15~60일에 걸친 계절내 시간규모에 대한 예보는 현업예측의 미개척 영역으로 알려져 있다. 그럼에도 불구하고, 단기 및 중기 예보와 계절 단위 장기예보 사이의 이음새 없는 예보에 대한 수요가 증가하고, 위험기상 발생시 조기 대응을 위한 계절내 규모 예측의 중요성이 강조되면서 이에 대한 관심은 지속적으로 확대되고 있다. 특히 전 세계적으로 극한 기상·기후 현상이 더욱 빈번하게 발생함에 따라 이로 인한 기상재해를 사전에 예방하고 적극적인 대응책을 마련하기 위한 극한 기후 예측 정보의 중요성이 증대되고 있다. 따라서 본 연구에서는 15-60일 이전 예측에 적합한 이상 기후 정의방법을 제안하고, 개발된 이상 기후 지수를 토대로 동아시아 지역에서의 이상 기온 변동의 지역적 특성을 살펴보았으며, 한반도 기온과 강수에 적용하여 지수의 활용 가능성을 제시하고자 하였다.

이상 기후를 정의하기에 앞서 전지구적인 이상 기온의 특성과 지역적인 특성을 살펴보았다. 지구온난화로 인해 평균적인 기후 요소의 변동뿐만 아니라 이상 기후현상 또한 증가하고 있으며, 특히 뚜렷한 이상 고온의 증가 추세가 나타났다. 이상 고온 현상은 98년을 기점으로 강한 증가 경향을 보이는데, 80년대에 전구 대비 10프로 미만인 지역에서 발생하였지만 최근 30프로 이상인 지역으로 확대되어 발생함을 알 수 있었다. 이상 고온 발생의 연변동은 ENSO 발달과 밀접한 상관을 가지며, 엘니뇨가 강했던 해에 이상 고온 발생이 뚜렷이 증가함을 확인하였다. 지구온난화가 진행됨에 따라 이상저온 현상은 전반적으로 감소하는 추세를 보이지만, 일부 지역, 일부 계절에서는 뚜렷한 증가 현상을 나타낸다. 특히 북반구 겨울철 중앙아시아에서는 이상저온의 증가 추세가 가장 두드러지게 나타나는 반면, 봄철에는 이상 고온 증가 추세가 강화됨으로써 계절내 기후변화의 변동성이 가장 큰 지역으로 나타났다.

현재 계절내 규모에서 이상 기후는 보편적인 합의가 이루어지지 않은 상황에서, KMA를 비롯한 여러 예측 기관에서 주별 평균한 예측 자료를 바탕으로 변수별 이상 기후 예측 정보를 제공하고 있다. 본 연구에서는 이상 기후 정의에 사용되는 임계값 설정 및 기후값 구성에 따른 민감도 테스트를 통해 이상 기후 정의를 위한 객관적 근거를 제시 하였으며, 계절내 이상 기후 예측에 적용 가능한 이상 기후 지수를 개발하였다. 전구뿐만 아니라 지역별 이상 기후의 감시 및 예측에 활용하기 위해, 이상 기후의 발생 빈도와 강도, 발생

지역의 비율을 동시에 고려하여, 적용 지역의 면적과 기후적 특성 등에 관계없이 동일한 기준에서의 비교를 가능하게 하였다. 또한 기온이나 강수를 관심 영역에 대해 평균한 시계열을 토대로 구성되는 극한현상 정의 방법에 비해, 본 연구에서 제안된 이상 기후 지수의 경우 영역 내 단일 격자를 독립적으로 모두 고려함으로써 지역별로 발생한 이상현상의 강도를 고려할 수 있는 이점이 있다. 또한 연속된 값을 갖는 시계열의 형태로 이상현상을 정량화시킬 수 있는 지수를 개발함으로써 이상현상 발생 예측과 관련한 인자 분석 등을 통해 통계적 예측모델 구성과 같은 다양한 활용 범위를 갖는다.

개발된 이상 기후 지수를 기온에 적용하여 아시아 지역과 한반도에서의 이상 기온 변동성을 검증하였고, 그 결과 제안된 이상 기온 지수가 관측에서 나타내는 변동성을 잘 재현하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 이상 기온 지수를 한반도에서 발생한 폭염과 한파에 적용하여 극한사상 예측에서의 활용 가능성과 한계점을 살펴보았다. 이 연구에서 제안된 이상 기후 지수는 계절내 시간규모에 초점을 맞추어 개발된 지수이므로 일 단위의 변화가 동반되는 사상을 표현하는 것에는 한계가 있었다. 그러나, 수일 이상 지속되는 사상에 대해서는 이상 기온 지수를 이용한 재현이 가능하였고, 이는 예측에서의 활용 가능성을 보여주는 것이라 생각된다.

강수의 경우 기온보다 지역적인 특성 및 변화가 더 다양하여 본 연구에서 제안한 이상 기후 지수를 영역에 관계없이 적용하는데 다소 많은 제약이 따르는 것으로 나타났다. 따라서 이상 강수의 경우 한반도의 기후변동에 지배적인 영향을 미치는 동아시아 지역(75°-150°E, 15°-60°N)을 중심으로 연구를 수행하였다. 동아시아 지역에 대한 이상 강수의 변동 특성을 분석한 결과, 2000년대 이후로 이상 강수의 발생수가(주 단위) 증가하며 발생 구역 또한 증가하는 경향이 나타났다. 계절로 구분하면 그 경향은 봄철이 동아시아 전체 지역에 대해 가장 넓은 범위로 확장되었고 겨울철이 가장 적게 확장되었으며 여름철에 동아시아 남부의 일부 지역에 가장 높은 증가 추세를 보였다. 우리나라의 경우 매년 호우로 인한 피해사례가 발생하고 있는데 계절로 구분하면 여름철에 동아시아 다른 지역들에 비해 약한 증가 경향이 나타났고 나머지 계절에서는 뚜렷한 증가 경향은 나타나지 않았다.

개발된 지수를 강수에 적용한 결과, 이상 강수의 발생 수의 시간에 따른 감소/증가

경향 그리고 이상 강수 현상의 강도 등이 동아시아 및 남한 모두에서 적절하게 반영되어 나타나는 것을 알 수 있었다. 예를 들면 남한의 경우 계절별로 구분하였을 때 최근 5년간 (2012~2016) 가을-이른 겨울에 발생한 강한 이상 강수, 2011년 여름 및 가을, 1988 및 1989 겨울, 1997 겨울에 지속적으로 발생한 이상 강수 현상 등이 모두 감지되었으며 이 외에도 한 주에 발생하는 현상들이 감지되었다.

개발된 이상 기후 지수를 바탕으로 남한지역에 발생하는 이상 강수의 특징을 분석하고 주요 기후 인자와의 관련성을 알아보았다. 본 연구에서 개발된 이상 기후 지수를 남한지역에 강수에 적용해본 결과 과거에 실제로 발생한 이상 강수 현상을 잘 잡아내는 것을 확인할 수 있었다. 남한지역 계절내 강수의 이상 기후 지수는 주로 기후학적으로 우기가 아닌 시기에 상대적으로 큰 평균값과 최대값을 갖는 것으로 나타났다. 계절별로 이상 기후 지수가 최대값을 갖는 주의 상층 패턴은 우리나라 동쪽에 위치한 고기압의 가장자리에 한반도가 위치하는 공통적인 패턴을 보였으나 고기압의 중심위치는 계절에 따라 남북방향으로 다소 차이가 존재한다.

태풍과 이상 강수 발생의 관련성을 조사하였다. 1981년부터 2010년에 발생한 한반도에 영향을 준 태풍을 기준으로 태풍의 영향의 유/무에 따라 이상 강수 지수의 강도가 0.3 이상/미만으로 구분하여 각각 합성도를 구해본 결과, 태풍 발생의 유무와 무관하게 우리나라 이상 강수의 강도가 높을 경우 필리핀 해 부근의 대류활동이 강하고 이로 인해 발생하는 하층저기압성 순환과 북쪽으로 유도되는 고기압성 순환에 의해 남쪽의 수증기가 한반도로 유입되는 것이 이상 강수 발달의 호조건으로 작용하는 것으로 나타났다. 이때, 태풍 영향의 유/무에 따라 태풍 저기압성 소용돌이의 영향에 의해 한반도 주변으로 발생하는 저기압성 순환의 크기 및 위치가 강화/약화되는 것이 차이점으로 나타났다. 아울러, 태풍의 영향이 있지만 이상 강수로 이어지지 못한 경우는 동아시아 북부에서의 강한 순환장의 존재가 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 저기압성 순환에 의한 남풍이 고위도로부터의 강한 북풍에 의해 남쪽에서부터 올라오는 수증기가 발달하기 어려운 상황으로 이어지는 결과를 보였다.

우리나라 연강수량의 30%를 차지하는 주요 강수현상인 장마의 경우 이상 기후 지수가 특별히 장마 기간에 큰 값을 보이는 것은 아니다. 이는 장마는 동아시아 몬순 시스템의

일부로서 그 발생과 소멸이 일정함에 따라 이상 기후라고 정의하기에 부적절하기 때문인 것으로 사료된다. 다만 본 연구에서 개발된 이상 기후 지수의 경우 장마의 경년 변동성을 잘 나타내는 것을 확인하였다. 장마기간에 내린 강수량과 이상 기후 지수간의 상관관계가 통계적으로 유의미하다.

끝으로 본 연구에서 개발한 지수를 2016년 8월에 발생하여 전국적으로 극심한 피해를 야기한 폭염사례에 적용하여 계절내 예측 가능성을 테스트 해보았다. 이시기 평년보다 높은 평균 기온이 8월 1일부터 25일까지 지속되다가 26일 이후 평년 이하의 평균기온으로 떨어지면서 폭염이 급격히 종료되었다. ECMWF의 계절내 예측자료를 활용하여 1996년부터 2015년의 hindcast를 바탕으로 상위 10퍼센타일 이상의 값을 결정하였다. 이렇게 결정된 기준값을 2016년 forecast에 적용하여 2016년 8월 우리나라에 발생한 폭염의 계절내 예측성을 살펴보았다. 그 결과 폭염 시기인 8월 16-24일과 폭염이 종료된 8월 25-31일의 2주전 예측에서 이상 기후 지수의 상대적 크기가 폭염시기에 더 크게 나타났으나 예측선행시간 3주 전부터는 폭염이 종료된 시기에 오히려 이상 기후 지수 값이 폭염 시기보다 더 큰 값으로 나타났다. 온도 예측장의 수평분포를 살펴본 결과, 3주 및 4주 전 예측에서 폭염이 종료된 시기임에도 불구하고 남한지역에 평년보다 높은 기온이 예측된 것을 확인할 수 있었다. 이상 기후의 예측성능을 평가하기 위해 추후 더 많은 사례에 대한 평가가 필요할 것으로 보인다.

REFERENCES

- Abatan, A. A., B. J. Abiodun, K. A. Lawal, and W. J. Gutowski, 2016: Trends in extreme temperature over Nigeria from percentile-based threshold indices. *Int. J. Climatol.*, **36**, 2527–2540, doi:<https://doi.org/10.1002/joc.4510>.
- Bell, G.D., Halpert, M.S., Schnell, R.C., Higgins, R.W., Lawrimore, J., Kousky, V.E., Tinker, R., Thiaw, W., Chelliah, M. and Artusa, A., 2000. Climate assessment for 1999. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **81(6)**, pp.S1–S50.
- Charney, J.G., and A. Eliassen, 1964: On the growth of the hurricane depression. *Journal of Atmospheric Sciences*, **21(3)**, 68–75.
- Choi, Y., 2004, Trends on Temperature and Precipitation Extreme Events in Korea, *J. of Korean Geophysical Soc.*, **39(5)**, 711–721.
- Cohen, J. L., J. C. Furtado, M. A. Barlow, V. A. Alexeev, and J. E. Cherry, 2012: Asymmetric seasonal temperature trends. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L04705, doi:10.1029/2011GL050582.
- Ghil, M., and R. Vautard, 1991: Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series. *Nature*, **350**, 324–327.
- Herring, S. C., M. P. Hoerling, T. C. Peterson, and P. A. Stott, Eds., 2014: Explaining Extreme Events of 2013 from a Climate Perspective. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, **95 (9)**, S1–S96.
- IPCC, 2013: Summary for Policy Makers (SPM) Climate Change, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T. F. Stocker et al. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge and New York, 1–30.
- Jones, P. D., 1994: Recent warming in global temperature series. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1149–1152.
- Karl, T. R. and D. R. Easterling, 1999: Climate extremes: Selected review and future research directions. *Clim. Change*, **42**, 309–340.
- Klein Tank, A. M. G., F. W. Zwiers, and X. Zhang, 2009: Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. *Climate data and monitoring WCDMP-No. 72*, WMO-TD No. 1500, 56pp.
- Lee, W.-S. and M.-I. Lee, 2016: Interannual variability of heat waves in South Korea and their connection with large-scale atmospheric circulation patterns. *Int. J. Climatol.*, **36**, 4815–4830.
- Lelieveld, J., Proestos, Y., Hadjinicolaou, P., Tanarhte, M., Tyrlis, E. and Zittis, G., 2016.

- Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century. *Climatic Change*, **137**(1-2), pp.245-260.
- Matsueda, M. and Nakazawa, T., 2015. Early warning products for severe weather events derived from operational medium-range ensemble forecasts. *Meteorological Applications*, **22**(2), pp.213-222.
- McCormick, M. P., L. W. Thomason, and C. H. Trepte, 1995: Atmospheric effects of the Mt Pinatubo eruption. *Nature*, **373**, 399-404.
- Moon, J. Y., Choi, Y., Kwon, Y.-A., Choi, Y., and Park, I.-H., 2014, A study on characteristics of summer rainfall over South Korea in recent 5 years, *Climate Research*, **9**(4), 269-282.
- Park, T.-W., C.-H. Ho, J.-H. Jeong, J.-W. Heo, and Y. Deng, 2015: A new dynamical index for classification of cold surge types over East Asia, *Climate Dyn.*, **45**, 2469-2484.
- Qian, C., Z. Yan, Z. Wu, C. Fu, and K. Tu, 2010: Trends in temperature extremes in association with weather-intraseasonal fluctuations in eastern China. *Adv. Atmos. Sci.*, **28**, 297-309.
- Robock, A., 2000: Volcanic eruptions and climate. *Rev. Geophys.*, **38**, 191-219.
- Sillmann, J., Kharin, V.V., Zhang, X., Zwiers, F.W. and Bronaugh, D., 2013. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **118**(4), pp.1716-1733.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005: Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high, *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4423-4440.
- Wen, Q. H., X. Zhang, Y. Xu, and B. Wang, 2013: Detecting human influence on extreme temperatures in China. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 1171-1176, doi:10.1002/grl.50285.
- Westra, S., L. V. Alexander, and F. W. Zwiers, 2013, Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *J. Climate*, **26**, 3904-3918.
- Xu, X., Y. Du, J. Tang, and Y. Wang, 2011: Variations of temperature and precipitation extremes in recent two decades over China. *Atmos. Res.*, **101**, 143-154.
- You, Q., and Coauthors, 2010: Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961-2003. *Climate Dyn.*, **36**, 2399-2417.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Tank, A.K., Peterson, T.C., Trewin, B. and Zwiers, F.W., 2011: Indices for monitoring changes in extremes based on daily

- temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **2(6)**, pp.851–870.
- Zhou, B., Wen, Q.H., Xu, Y., Song, L. and Zhang, X., 2014. Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles. *Journal of Climate*, **27(17)**, pp.6591–6611.

【연구자】

오지현 선임연구원

신선희 선임연구원

문자연 선임연구원

양유빈 선임연구원

오상명 연구원

연구보고서 2018-09

15-60일 아태지역 극한 기후 진단 및 예측 기술 개발

I S B N 979-11-5698-241-8

발 행 2019년 3월

발 행 인 권 원 태

발 행 처 APEC기후센터
부산시 해운대구 센텀7로 12

제작·인쇄 경성문화사

이 보고서는 APEC기후센터 홈페이지(<http://www.apcc21.org/>)에서 이용하실 수 있습니다.
또한 보고서에 실린 내용은 출처를 명시하면 자유롭게 인용할 수 있습니다. 단, 무단 전재 및
복제를 금합니다.