

## 위험기상 분야의 지난 연구를 되돌아보며: 태풍, 집중호우, 가뭄, 폭염, 한파, 강설, 강풍을 중심으로

허창회<sup>1)\*</sup> · 김병곤<sup>2)</sup> · 김백민<sup>3)</sup> · 박두선<sup>4)</sup> · 박창균<sup>5)</sup> · 손석우<sup>1)</sup> · 정지훈<sup>6)</sup> · 차동현<sup>7)</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 지구환경과학부, <sup>2)</sup>강릉원주대학교 대기환경과학과, <sup>3)</sup>부경대학교 환경대기과학과,  
<sup>4)</sup>경북대학교 지구과학교육과, <sup>5)</sup>포항공과대학교 환경공학부,  
<sup>6)</sup>전남대학교 지구환경과학부, <sup>7)</sup>울산과학기술대학교

(접수일: 2022년 11월 6일, 수정일: 2022년 12월 14일, 게재확정일: 2023년 1월 3일)

### Review of the Weather Hazard Research: Focused on Typhoon, Heavy Rain, Drought, Heat Wave, Cold Surge, Heavy Snow, and Strong Gust

Chang-Hoi Ho<sup>1)\*</sup>, Byung-Gon Kim<sup>2)</sup>, Baek-Min Kim<sup>3)</sup>, Doo-Sun R. Park<sup>4)</sup>,  
Chang-Kyun Park<sup>5)</sup>, Seok-Woo Son<sup>1)</sup>, Jee-Hoon Jeong<sup>6)</sup>, and Dong-Hyun Cha<sup>7)</sup>

<sup>1)</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

<sup>3)</sup>Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Korea

<sup>4)</sup>Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu, Korea

<sup>5)</sup>Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science  
and Technology (POSTECH), Pohang, Korea

<sup>6)</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University, Gwangju, Korea

<sup>7)</sup>Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan, Korea

(Manuscript received 6 November 2022; revised 14 December 2022; accepted 3 January 2023)

**Abstract** This paper summarized the research papers on weather extremes that occurred in the Republic of Korea, which were published in the domestic and foreign journals during 1963~2022. Weather extreme is defined as a weather phenomenon that causes serious casualty and property loss; here, it includes typhoon, heavy rain, drought, heat wave, cold surge, heavy snow, and strong gust. Based on the 2011~2020 statistics in Korea, above 80% of property loss due to all natural disasters were caused by typhoons and heavy rainfalls. However, the impact of the other weather extremes can be underestimated rather than we have actually experienced; the property loss caused by the other extremes is hard to be quantitatively counted. Particularly, as global warming becomes serious, the influence of drought and heat wave has been increasing. The damages caused by cold surges, heavy snow, and strong gust occurred over relatively local areas on short-term time scales compared to other weather hazards. In particularly, strong gust accompanied with drought may result in severe forest fires over mountainous regions. We hope that the present review paper may remind us of the importance of weather extremes that directly affect our lives.

**Key words:** KMS, weather extremes, typhoon, heavy rain, drought, heat wave, cold surge, heavy snow, strong gust

\*Corresponding Author: Chang-Hoi Ho, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.  
Phone: +82-2-880-8861, Fax: +82-2-876-6795  
E-mail: hoch@snu.ac.kr

## 1. 서 론

대기과학은 대기의 구성 성분을 파악하고 그 안에서 일어나고 있는 운동과 현상을 관측, 실험, 분석함으로써 이들의 현황과 변화를 이해하고, 나아가 예측하고 응용하는 자연과학 학문이다. 분류하는 목적이나 방법에 따라 다소 차이가 있겠지만, 대체로 대기 물리, 대기역학, 대기분석, 대기화학, 대기모델링, 그리고 응용 및 산업 기상학의 여섯 개의 분야로 나누고 있다. 현행 우리 학회의 학술 분과도 이렇게 나누어져 있다. 그런데 이들 여섯 개 분야에 일정부분 포함되어서 어느 한 분야에 국한시킬 수 없는 현상도 있는데, 대표적으로 ‘위험기상’을 예로 들 수 있다. 우리나라에 영향을 끼치는 위험기상 현상으로는 태풍, 집중호우, 가뭄, 폭염, 한파, 강설 그리고 강풍이 포함된다. 우리나라에서 발생하고 있는 자연재해의 거의 대부분이 이들 위험기상 현상에 의해서 이루어지고 있다.

이 논문에서는 학회 여섯 개 주요 분과의 과거 연구 결과를 정리하는 작업과 동일한 방법으로 우리나라에서 발생한 위험기상 현상을 연구한 논문을 정리하였다. 태풍 연구는 경북대학교 박두선 교수, 집중호우는 서울대학교 손석우 교수, 가뭄은 포항공과대학 박창균 박사, 폭염은 부경대학교 김백민 교수, 한파는 전남대학교 정지훈 교수, 강설은 강릉원주대학교 김병곤 교수, 그리고 강풍은 울산과학기술원 차동현 교수가 맡아서 정리하였다. 현재까지 이루어진 위험기상 연구의 품질과 양뿐 아니라 이것을 정리하는 사람이 다르고, 각 현상에 의한 우리나라의 피해 상황이나 범위가 다르기 때문에 동일한 형식으로 작성하기는 어려웠다. 어떤 위험기상 연구분야에서는 우리 학술지에 출판된 논문에 국한시킨 경우도 있고, 다른 분야에서는 국내, 외 학술지에 출판된 논문을 정리한 경우도 있다.

지난 수십 년간 국내에서 위험기상의 강도와 빈도, 그리고 지속 기간이 달라지면서 국가의 전반적인 경제, 사회 활동이 큰 변화를 겪고 있다. 어떤 해에는 이들 현상으로 인해 발생하는 인적 그리고 물적 피해가 상당해서 국가 재정에 악영향을 끼치기도 한다. 향후 지구온난화와 기후변화가 심각해질수록 위험기상의 영향은 더 커질 것으로 전망된다. 이 논문에서 정리한 국내에서 발생한 위험기상의 연구 현황이 위험기상 현상의 중요성을 일깨우는 계기가 될 것이다.

## 2. 태 풍

태풍에 관련된 과거 연구를 정리하기에 앞서, 이 논문에서 사용하는 태풍 용어를 명확하게 정의할 필요가

있다. 세계기상기구(World Meteorological Organization)에서는 열대저기압(tropical cyclone)을 최대 풍속( $V_{max}$ )의 크기에 기준해서 네 가지 상세등급으로 구분한다: 열대저압부(tropical depression;  $V_{max} < 17 \text{ m s}^{-1}$ ), 열대폭풍(tropical storm;  $17 \text{ m s}^{-1} \leq V_{max} < 25 \text{ m s}^{-1}$ ), 강한 열대폭풍(severe tropical storm;  $25 \text{ m s}^{-1} \leq V_{max} < 33 \text{ m s}^{-1}$ ), 태풍(typhoon;  $33 \text{ m s}^{-1} \leq V_{max}$ ). 그런데 우리나라와 일본에서는 일반적으로 최대 풍속이  $17 \text{ m s}^{-1}$  이상인 열대저기압을 모두 태풍이라 지칭한다. 여기에서는 우리나라와 일본에서 일반적으로 사용하는 태풍 개념(네 개 상세 등급을 모두 포함하는 광역의 개념)을 사용한다.

태풍은 국내에서 발생하는 여러 위험기상 중에서 가장 큰 인명과 재산 피해를 일으키는 현상으로, 현재까지 한국기상학회에서 출판하는 학술지에만 100여 편이 넘는 논문을 찾을 수가 있다. 우리 학회원들이 외국 학술지에 출판한 논문까지 포함하면 수백 편 이상에 달할 것이다. 모든 학회원이 수행한 연구 내용을 전부 정리하기 어려워, 여기서는 우리 학회 학술지에 출판된 논문을 중심으로 지난 수십 년간에 걸쳐서 이루어진 전반적인 연구 흐름을 살펴보았다. 이런 방식으로 과거 연구를 요약함으로써 다루지 못하는 부분도 많을 것이다. 그동안 출판된 100여 편의 논문을 크게 1) 태풍 관측, 2) 단기 및 장기 예측, 태풍 역학의 이해, 3) 기후 분석의 세가지 카테고리로 분류하였다.

### 2.1 태풍 관측

태풍 관측과 관련된 연구는 태풍의 중심, 최대 풍속, 최저 기압, 최대 풍속 반경, 이동 속도 등 태풍의 상황을 정확하게 탐지하고자 하는 노력에 초점이 맞춰져 있었다. 연대별로 1990년대에 들어서면서 기상 위성을 활용한 태풍 중심 위치 결정 방법, 최대 풍속 반경 추정을 위한 연구가 수행되기 시작하였다(Suh et al., 1992; Ha et al., 1997). 여러 태풍 연구에서 관측 기준값으로 활용되는 일본 동경에 위치한 지역특이 기상센터(Regional Specialized Meteorological Center, RSMC)의 태풍 베스트트랙 자료에 대한 오차 분석도 1990년대부터 이루어지기 시작하였다(Kwon, 1998). 2000년대에도 위성자료를 활용한 태풍의 중심 위치, 최대 풍속, 최대풍속반경 정보를 산출하기 위한 연구가 꾸준히 수행되었으며(Ahn et al., 2002; Park et al., 2003; Won et al., 2008), 북서태평양에서 태풍 베스트트랙 자료를 생산하는 또 다른 기관인 합동태풍경보센터(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)의 자료와 RSMC 베스트트랙 자료의 비교 평가를 통한 베스트트랙 자료의 신뢰성에 대한 분석도 지속되었다(Kwon et al., 2006). 2010년대에는 기상청에서 운영하는 천

리안 위성을 활용한 태풍 탐지 기법 개발을 위한 연구가 수행되기 시작하였으며(Kwon, 2012; Lee and Kwon, 2015), 이어도 종합해양과학기지 관측자료의 태풍 연구에의 활용에 관한 연구가 진행되기도 하였다(Moon et al., 2010). 2020년대에 들어서도 더 정확한 태풍 탐지를 위한 방법, 여러 베스트트랙 자료 간 비교 및 신뢰도 평가, 이어도 종합해양과학기지 자료 활용 등의 측면에서 계속 연구가 진행되고 있다(Bae et al., 2022; Kim et al., 2022; Kim and Moon, 2022). 이러한 노력은 궁극적으로 태풍의 단기 및 장기 예측 정확도 향상, 태풍 단·장기 변동성 메커니즘에 관한 이해 향상 등에 기여할 것이다.

한편, 위성자료, 레이더자료 등의 관측자료가 아닌 재분석자료로부터 태풍을 탐지하기 위한 연구도 진행되었다(Lee et al., 2011; Kim H. et al., 2021). 기후모형에서 태풍을 탐지하기 위해서는 열대 요란을 찾고 이를 추적하는 객관적인 기법이 필요한데, 이를 재분석자료에 적용한 연구로 고해상도 재분석 자료에서 태풍이 잘 묘사되는지 확인하고, 평가하기 위한 연구이다. 이는 궁극적으로는 기후모형의 태풍 모의 능력 향상에 기여할 수 있을 것이다.

## 2.2 단기 및 장기 예측, 태풍 역학의 이해

단기 예측에 관한 첫 번째 논문은 1965년에 출판되었는데, 한반도와 인근 지역에 영향을 끼칠 수 있는 태풍 중심의 이동 및 지면기압을 통계적으로 예측하고자 한 연구였다(Cook, 1965). 1990년대에는 태풍 단기 예측성 향상을 위해 수치모형과 통계모형을 활용한 연구가 병행되어 수행되기 시작하였다. 통계모형은 기후적 요소(climatology)와 지속성(persistence) 요소를 고려한 CLIPER 모델을 활용한 연구가 주를 이루었다(Yoon and Park, 1990; Kwon, 1991; Kwon and Lee, 1993). 수치모형을 활용한 연구에서는 보거싱, 자료동화기법 등을 통한 태풍 예측성 개선과 함께 적응격자모델의 도입 등을 통한 수치모형의 적분시간 단축을 위한 노력도 함께 이루어졌다(Kim and Yoon, 1992; Kim and Yoon, 1994; Song et al., 1997; Moon et al., 1998). 2000~2010년대에도 이동격자(moving nest), 앙상블 칼만 필터, 슈퍼 앙상블, 새로운 보거싱 기법의 적용 등 수치모형의 태풍 예측성 개선 연구가 이어졌다(Kim et al., 2007; Park and Kim, 2010; Cheong et al., 2011; Jun et al., 2015). 2010년대에는 THORPEX-Pacific Asian Regional Campaign (T-PARC)의 드롭존데 자료를 활용한 태풍 예측성 향상 관련 연구가 진행되었다(Park et al., 2008; Kim et al., 2010a, b).

단기예측 측면에서는 수치예보의 성능 개선을 통한 예측성 향상이 주를 이루었다면 계절예측은 통계적인 기법의 개선을 통한 예측성 향상이 주를 이루었다. 대

부분의 연구가 회귀모형을 기반으로 진행되었다(Lee et al., 2007; Choi et al., 2009; Ho et al., 2009). 초기에는 단순히 통계 자료에만 근거한 모델이 소개되었지만, 2010년 이후 통계-역학 하이브리드 모형도 활용되고 있다(Choi et al., 2014; Jim et al., 2014). 이는 대기-해양장은 역학 모형으로부터 가져오고, 통계모형은 관측자료 및 과거 예측자료로 훈련시키는 형태이다. 한편, 순수하게 역학 모형에만 의존하여 계절예측을 시도한 연구도 수행되었다(Kim and Kwon, 2007).

태풍의 단기 및 장기 예측성 향상 외에도 태풍 자체 역학에 대한 이해를 향상시키기 위한 노력도 지속되었다. 이러한 연구는 즉각적인 예측성 향상을 기대하기 어렵지만, 태풍에 대한 이해도를 향상시켜 장기적으로 태풍에 대한 예측성을 향상시키는 데 기여할 수 있다. 1990년대부터 순압 대기 조건 하에서의 태풍의 이동, 순환, 구조에 관한 다양한 연구가 이루어졌다(Yoon and Lee, 1990; Paek and Baek, 1999). 태풍 발달에 있어 중요한 해양과의 상호작용 측면에서 용승효과에 대한 연구도 다수 이루어졌다(Lee et al., 2006; Jeong et al., 2013; Moon et al., 2016). 2000년대 이후 실제 대기 조건 하에서 태풍의 발달 과정을 살펴보는 연구가 수행되고 있으며(Kwon et al., 2010; Kim et al., 2013), 온대 저기압화에 관한 연구도 진행되고 있다(Kwon and Kim, 2005; Lee et al., 2008).

## 2.3 기후적인 분석

한반도 영향 태풍을 기후적으로 분석하기 위해서는 객관적인 한반도 영향 태풍 정의가 필수적이다. 태풍이 동일한 위경도 상에 있더라도 태풍의 크기, 강도 등에 따라 한반도에 실제 영향을 줄 수도, 혹은 그렇지 않을 수도 있다. 실제 현업에서는 예보관들이 이러한 부분들을 종합적으로 고려하여 한반도 영향 태풍을 정의할 수 있지만, 장기적인 연구에서는 객관적인 기준이 필요하다. 2008년과 2011년에 객관적인 한반도 영향 태풍 정의를 위한 제안이 있었지만(Kwon and Rhyu, 2008; Moon and Choi, 2011), 아직까지 연구자들 간에 서로 다소 다른 정의를 사용하고 있다.

한반도 영향 태풍에 대한 기본적인 통계 연구 역시 활발하게 이루어졌다. 초기에는 한반도 영향 태풍의 전향 특성, 월별 이동속도, 월별 발생 분포, 평균 강도, 전향 유무, 진로 유형 등 다양한 특성에 대해 분석이 진행되었다(Yoon and Park, 1990; Lee et al., 1992; Park and Moon, 1995; Sohn et al., 1998; Choi and Kim, 2007). 한편, 대부분 한반도 전체 혹은 남한을 중심으로 이루어진 한반도 영향 태풍 통계와는 별도로 북한 지역에 상륙한 태풍의 기후학적 특성에 대한 연구가 이루어지기도 하였다(Ahn et al., 2010).

태풍의 경년 및 장기변동성을 조절하는 메커니즘에 대한 연구도 꾸준히 수행되고 있다. 대표적으로 El-Nino Southern Oscillation (ENSO), Arctic Oscillation (AO), Pacific Japan pattern (PJ), Pacific Decadal Oscillation (PDO) 등 다양한 기후지수와의 한반도 및 북서태평양 태풍활동과의 관련성 분석이 이루어졌다(Kang et al., 1995; Choi and Kim, 2010; Choi et al., 2011; Ho and Kim, 2011; Choi et al., 2019). 그 외에 티베트 고원의 눈 덮임 정도, 여름철 가뭄과의 관련성 등에 대한 연구 등도 다양하게 이루어졌다(Choi et al., 2008; Choi and Kang, 2008). 이러한 연구들은 궁극적으로 태풍 활동의 계절 전망 및 미래 태풍 활동 예측 정확도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

### 3. 집중호우

우리나라 기상청에서 호우주의보를 발효하는 기준은 3시간 누적 강우량 60 mm 이상 혹은 12시간 누적 강우량 110 mm 이상이다. 호우경보는 각각 90 mm와 180 mm를 기준으로 삼는다. 집중호우는 이와 같은 호우특보 기준에 의해서 정의되지만, 연구자들에 따라서 시간당 강우량 30 mm 혹은 50 mm가 사용되기도 한다.

한반도 집중호우는 6월에서 9월 사이에 집중적으로 발생한다. 온대저기압, 열대저기압, 정체전선, 국지 불안정 등 다양한 원인으로 발생하며(Park et al., 2021b, c), 대기 순환 이외에 해륙간 열적 차이 및 지형 효과 등 지표 조건의 영향도 중요하다(Hong and Lee, 2009). 이처럼 원인이 다양한 만큼, 집중호우는 사례별로 각기 다른 특성을 보인다. 이 때문에 국내 집중호우 연구는 사례 분석에 치중되어 있다.

한반도 집중호우는 중규모 대류계를 동반한 중관규모 요란에 의해 초래된다고 알려져 있다(Lee et al., 1998). 대규모 순환의 영향을 받기도 한다 (Seo et al., 2012; Park et al., 2021c). 따라서 한반도 집중호우를 이해하기 위해서는 다양한 규모의 대기 운동과 상호작용 특성을 파악해야 한다(Shin and Lee, 2005).

#### 3.1 집중호우의 중규모 특성

Lee and Kim (2007)은 레이더 영상 분석을 통해 집중호우를 초래한 중규모 대류계의 형태를 4가지로 분류하였다. 고립된 뇌우형, 대류 밴드형, 스콜라인형, 그리고 구름성단형이 그것이다. 중규모 대류계는 메조알파규모(meso- $\alpha$ -scale) 중규모 저기압 혹은 한랭공기괴(cold pool)로 조직화되면서 장시간 유지되기도 한다(Shin and Lee, 2015; Jeong et al., 2016).

Jo et al. (2020)은 시간당 30 mm 이상의 국지성 집중호우 사례를 중부형, 남부형, 고립형으로 분류하였

다. 남부형은 야간에 발생빈도가 상대적으로 높으며 중부형보다 조금 더 지속되는 경향이 있다. 전체 국지성 집중호우의 절반을 차지하는 고립형의 경우, 장마철 강우가 소강 상태에 진입하는 8월 초에도 두드러진 빈도수를 보이며, 해안지역에서는 야간에 발생하는 반면 내륙 지역에서는 한낮에 자주 발생한다. 이는 고립형 국지성 집중호우가 대규모-중관규모 순환장보다는 국지적인 특성의 영향을 더욱 크게 받는다는 것을 의미한다.

Hong (2004)는 미국의 집중호우와 달리 한반도 집중호우는 연직으로 중립적인 구조를 가진다고 지적했다. 특히 대류가용잠재에너지(Convective Available Potential Energy, CAPE)가 높지 않음을 강조했다. Kim et al. (2009)는 고해상도 집중관측 자료 분석을 통해, 장마철 호우는 CAPE 보다는 폭풍지수(Storm Relative Helicity, SRH)와 더 밀접한 관계를 가진다는 사실을 확인했다. 참고로 CAPE와 SRH는 중규모 열적 불안정과 역학적 불안정을 평가하는 지수로 중규모 스톱 분석에 광범위하게 활용된다. SRH의 상대적 중요성은 열대저기압 및 정체전선에 의한 집중호우 때 두드러진다(Kim et al., 2012; Jung et al., 2015). 고기압 가장자리에서 집중호우가 발생할 경우, 다량의 수증기 수송으로 인해 CAPE의 역할이 오히려 커진다(Jung et al., 2015).

#### 3.2 집중호우의 중관규모 특성

Hong (2004)는 한반도 집중호우는 미국 중부의 집중호우와 달리 하층은 매우 습윤하지만 연직으로는 중립적인 대기 구조를 가진다고 보고했다. 특히 발생 메커니즘으로 연직 대기불안정보다는 하층제트에 의한 수증기 수송과 중관역확장에 의한 연직운동이 중요함을 강조했다. 이와 같은 특성은 구름 관측에서도 확인된다. 한반도 집중호우는 미국과 달리 키가 낮은 온난구름(warm cloud)에 의해 주로 발생한다(Sohn et al., 2013). 열적으로 불안정한 한랭구름(cold cloud)에 의한 집중호우는 전체 집중호우의 30% 정도 밖에 되지 않는다(Song et al., 2019).

Lee et al. (1998)는 기존 집중호우 사례 분석을 집대성하고 주요 결과를 1980~1990년 집중호우 사례들에 적용했다. 중관역확장 분석과 수치모델링을 통해, 한반도 집중호우는 3차원 중관 순환에 지배됨을 재차 확인했다. 집중호우는 하층제트를 따라 수송된 다량의 수증기가 북쪽의 한랭 건조한 공기를 만나 수렴하는 지역에 발생한다. 특히 하층제트 전면부가 상층제트 입구의 남쪽에서 위치할 때 수증기 수렴이 두드러지는데, 이는 상층제트 입구에서 발생하는 이차순환으로 설명된다. Lee et al. (2008a)는 Sawyer-Eliassen 방정식을 분석하여 이차순환의 존재를 확인하고 비단

열 강제력의 중요성을 강조했다. 상-하층간 접합은 장기간 발생하는 집중호우에 특히 중요하는데, 1998년 여름철 18일간 지속된 집중호우를 초래한 주요 원인 중 하나로 지적되었다(Lee et al., 2008b).

Park et al. (2021a)는 집중호우 시 종관 순환장은 경압 구조를 가진다는 것을 보고했다. 준지균 오메가 방정식의 Q벡터를 분석하여, 집중호우 발생시 종관 규모 상승운동은 상층제트 입구의 이차순환 뿐만 아니라 발달하는 상층 기압골의 영향을 받는다는 사실을 밝혔다. 보통 이차순환보다 기압골의 영향이 오히려 더 크다. 그리고 집중호우 최성기에는 역학적 강제력 보다는 비단열 강제력에 의한 상승운동이 더 중요함을 보였다. 즉 한반도 집중호우를 초래하는 종관규모 순환은 상층제트 입구의 이차순환, 경압 구조를 가지는 상층 기압골, 하층제트에 의한 다량의 수증기 공급과 이로 인한 비단열가열 등 복합적인 특성을 가진다.

종관 순환장의 다양성은 다수의 연구에서 평가되었다. Lee et al. (1998)은 6월 말~7월 말 집중호우를 장마형으로 8월 중~9월 초 집중호우를 북태평양 고기압형으로 구분했다. Rha et al. (2005)은 주관적 종관분석을 통해 집중호우를 장마형과 저기압형으로 구분하였다. 최근 Park et al. (2021b)는 자기조직화지도를 이용해 보다 객관적으로 집중호우 발생 시 종관 순환장의 특성을 구분하였다. 해면 기압을 기준으로 구분한 네 가지 형태는 한반도 북쪽에 발달한 준정체적인 저기압과 북태평양 고기압 사이 강한 수증기 수송으로 인한 집중호우, 동중국에서 발원해서 동진하는 이동성 저기압에 의한 집중호우, 북태평양 고기압 가장자리에서 발달한 중규모 저기압에 의한 집중호우, 대륙성 고기압과 해양성 고기압 사이에서 발달하는 다양한 호우계에 의한 집중호우로 설명되었다.

### 3.3 집중호우의 장기 변화

최근 한반도 집중호우는 뚜렷한 경향성을 보이고 있다. Kim et al. (2020)은 2010~2019년 동안 발생한 시간당 강수량 50 mm 이상의 집중호우 발생 빈도는 과거 1973~2009년 동안 발생한 사례들에 비해 약 1.5배 증가했음을 보고했다. 지역에 따라서는 최대 6.4배 이상 집중호우 빈도가 증가하기도 했다. 이 경향성은 최근까지 이어지고 있다. 역대 최장 장마로 기록된 2020년 여름, 12시간 강수량 110 mm 이상의 집중호우는 15 차례나 발생했다(Park et al., 2021c). 그리고 2022년 8월에는 서울에 시간당 141 mm의 집중호우가 발생하기도 했다(Lee, 2022).

Kim et al. (2018)은 지역기후모형 실험을 통해 지구온난화로 인해 한반도 집중호우의 강도와 빈도는 지속적으로 증가할 것이라고 보고하였다. 이는 종관 역학적인 원인보다는 대류불안정이 강화되면서 발생

한다. 그러나 모형들의 계통적 오차가 존재하기 때문에 정량적인 변화는 보다 많은 기후모형실험을 통해 검증될 필요가 있다.

## 4. 폭 염

폭염은 비정상적 고온 현상이 수일에서 수십 일간 지속되며 막대한 인명 및 재산 피해를 가져오는 자연재해이다. 피해규모 측면에서 급세기 발생한 최악의 폭염으로 지목되고 있는 2003년 유럽 폭염의 경우 영국, 포르투갈, 프랑스 등 서유럽 대부분 국가에서 큰 피해를 주었으며 30,000명이 넘는 많은 사망자를 직간접적으로 발생시킨 바 있다(Kosatsky, 2005). 우리나라의 경우, 1994년 폭염으로 인해 사망자가 3,300명 이상 발생한 것으로 기록되고 있다(Min et al., 2020). 우리나라에 발생한 폭염 사례들 중에서 기상학적으로 가장 오랫동안 지속되고 큰 피해를 준 폭염으로 기록되는 사례는 2018년 폭염으로 500명 이상의 온열 질환자가 발생한 바 있다(Park et al., 2019; Min et al., 2020).

폭염에 대한 정의는 국가별로, 기관별로 상이하여 아직 국제적으로 통용되는 기준이 없으나 일반적으로는 기온이 어느 임계 기온(threshold temperature)를 넘어서서 특정 기간 이상 유지되는 한정된 기간으로 정의된다(Rohini et al., 2016). 우리나라 기상청의 경우, 33°C 이상의 최고기온이 이틀 이상 지속되는 경우, 폭염으로 정의한다.

폭염은 지구온난화로 인해 증가하고 있는 다양한 기상재해들 중 가장 뚜렷한 증가 추세를 보이고 있다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 전 세계적으로 폭염의 발생 빈도가 증가하여 피해가 증폭되고 있다고 보고하고 있으며 대부분의 미래기후변화 시나리오들에서 그 경향성이 더욱 뚜렷해질 것임을 보고한 바 있다(Rohini et al., 2016; Luo and Lau, 2017; IPCC, 2021). 국내의 다양한 연구들에서도 최근 우리나라 폭염 발생 일수와 빈도가 증가하고 있음이 보고되고 있다(Lee and Lee, 2016; Yeh et al., 2018).

### 4.1 한반도에서 발생하는 폭염 특징과 메커니즘

폭염의 발생 메커니즘은 종관 규모적 관점에서 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있고, 지역에 상관없이 공통적으로 강하게 발달한 상층 기압능의 확장 또는 블로킹 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Park and Schubert, 1997; Black et al., 2004; Nakamura and Fukamachi, 2004). Park and Schubert (1997)는 우리나라 역사상 가장 강력한 수준의 폭염이 발생했던 1994년 여름철 몬순 기간을 분석

하여 여름철 티베트 고원의 가열에 따라 발생하는 티베트 상층 고기압이 동아시아 몬순의 북상을 저지하는 역할을 하여 동아시아 지역에 기록적인 폭염과 가뭄을 발생시킬 수 있음을 보였다. 티베트 상층 고기압의 역할은 이후 후속 연구들에 의해 한반도 여름철 폭염을 설명하는 주요 메커니즘으로 자리잡게 되었다(Yeh et al., 2018; Min et al., 2020). 특히 한반도에서 발생하는 폭염의 경우, 티베트 상층 고기압과 북태평양 고기압의 상대적인 배치와 강도가 폭염의 세기와 지속기간을 결정하는 주요 원인으로 지목되었다(Lee and Lee, 2016; Yoon et al., 2018).

최근에 수행된 여러 연구 결과들을 종합해 보면, 한반도 지역에서 발생하는 폭염은 적도, 중위도 및 극 지역에서 기인하는 원격상관에 크게 영향을 받는 것으로 밝혀지고 있다(Yoon et al., 2018). Yeon et al. (2019)은 한반도를 포함한 동아시아 지역에서 발생하는 폭염을 각각 북대서양과 북서태평양에서의 대류 활동과 연결 지은 바 있으며, 이로 인한 적도 지역 대기 순환장 변동이 상이한 원격상관 패턴을 유발하여 한반도 폭염을 발생시키고 있음을 보인 바 있다. Lee et al. (2019)은 2016년 발생한 폭염사례 분석을 통해 북동진하는 여름철 계절내진동의 위상이 한반도 폭염을 강화하는 역할을 하였음을 확인하여 적도지역으로부터의 원격상관이 한반도 폭염을 이해함에 있어 중요한 역할을 하고 있음을 제시하였다. 한편, 최근 연구결과에 따르면 북극 시베리아 지역으로부터의 파동 전파 역시 동아시아 및 한반도 지역에서의 폭염 발생에 중요한 역할을 하고 있음이 확인되고 있다(Kosatsky, 2005; Kim et al., 2022).

원격상관 메커니즘에 더해 국지적인 고기압성 침강에 의한 단열승온 효과의 되먹임 작용이 한반도 폭염의 강도를 증폭시킬 수 있다는 연구결과도 제시된 바 있다. Min et al. (2019)은 한반도에서 강하게 발생하였던 1994년, 2013년, 그리고 2016년의 폭염 사례에 대하여 중관 규모 발생 메커니즘을 분석하였고, 3개 연도의 합성장과 습윤 정적 에너지(moist static energy) 수치 분석을 통해 폭염 최성기 기간 동안 고기압 권역의 침강에 의한 단열승온 현상이 폭염을 심화할 수 있음을 제시하였다. 이 밖에도 토양수분과 지형의 영향(Seo et al., 2020), 한반도 연근해의 해수면 온도 분포의 중요성(Ham and Na, 2017) 등이 한반도 폭염을 증폭시키는 지역적인 요인으로 지목된 바 있다.

이상과 같이 현재까지 대규모 및 중관규모 분석을 통한 폭염 연구는 활발히 수행되어 폭염의 발생 메커니즘을 상당수 밝혀냈으나 한반도의 복잡한 지형을 반영한 연구는 다소 미흡한 편이어서 지역별로 상이한 폭염의 특징을 이해하기에는 한계가 있어 앞으로 보다 다양한 폭염 원인 규명 연구가 필요하다.

#### 4.2 폭염 예측성 및 미래시나리오 연구

현업 모델과 학계에서 개발한 자체 모델들을 활용하여 한반도 여름철 폭염에 대한 계절 예측성에 대한 평가 연구도 활발히 이루어지고 있다. Kim et al. (2019)은 부산대학교에서 개발한 대기대순환 모델과 지역규모 모델인 WRF의 연계를 통해 폭염 계절 예측성을 확인한 결과, 한반도 지역에서 발생하는 폭염에 대해 유의한 수준의 계절 예측성이 확보될 수 있음을 확인한 바 있다. Heo et al. (2019)은 기상청의 현업 모델인 GloSea5의 폭염 계절예측 성능을 재분석 자료를 활용해 비교 검증한 결과 여름철 폭염 장기예보에 있어 유의한 수준의 예측성을 확보하고 있음을 확인하였다. Shin et al. (2018)은 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오 하에서 폭염을 새롭게 정의하고 시간 경과에 따라 발생하는 폭염의 변화를 조사했을 때, 폭염의 강도, 빈도, 지속기간이 증가됨을 확인하였다.

폭염에 대한 다양한 예측성 연구들이 진행되고 있으나 대부분 계절 예보 측면에서 진행되어 왔다. 그러나 최근, 다양한 이상기후 현상의 범주에 속하는 극단적인 기상현상들이 수 주~1개월 정도의 시간규모에서 발생하고 있어 앙상블을 활용한 연장중기예보(Extended-Medium Range Forecast) 측면에서의 폭염 예측성 확보는 앞으로 기상학계에서 해결해야 할 과제로 남아 있다.

#### 4.3 한반도에서 발생하는 폭염으로 인한 영향과 피해

한반도에서 발생하는 폭염의 기상학적인 특징과 발생원인에 관한 국내 연구진들의 연구결과들은 주로 APJAS를 포함한 국외 SCI 학술지에 출판되어 온 것에 비해 국내학술지인 대기지에는 폭염으로 인한 인명피해가 커짐에 따라 학술적 가치가 있는 폭염 영향 연구(impact study)들이 주로 출판되어 왔다. Kim et al. (2006)은 1992년부터 2004년 까지 우리나라 6개 도시의 기상자료와 일사망자 자료를 분석하여 여름철 폭염이 사망률에 미치는 영향을 분석한 바 있으며, Kim et al. (2009)은 후속 연구를 통해 1991년부터 2005년까지 15년 동안 서울, 인천, 대전, 광주, 대구, 부산 등 6대 도시의 일별사망자와 기온자료를 이용하여 각 도시별 주민의 기후순응도를 분석해 본 결과, 남부지역에서 북부 지역으로 갈수록 주민의 폭염에 대한 취약성이 커진다는 것을 확인하였다.

비교적 최근에는 인공지능과 빅데이터 분석기법을 활용한 연구들이 도입되고 있다. Jung et al. (2020)은 2012년에서 2016년까지 우리나라에 발생한 폭염 사례들을 중심으로 뉴스 기사 텍스트 마이닝을 통해 폭염의 다양한 사회·경제적 영향을 평가한 바 있다. 한편, 국립기상과학원에서는 인지온도 확률예보기반 폭염-건강영향예보 지원 시스템을 개발하여 2019년 온열질





측치를 포함해서 대략 250년 간의 강수량 관측치가 누적되어 있다. 이러한 관측 자료를 활용한 초창기 연구는 우리나라 강수에 대한 다양한 시공간 분석을 통해 가뭄이나 그와 관련된 건조 환경의 계절 및 연별 변동성을 추정하였다(Moon, 1977; Ho and Kang, 1988; Byun et al., 1992; Byun and Han, 1994; Jung et al., 1999). 이어 국외에서 개발된 전지구후모형(general circulation model, GCM)을 도입하고 역학적 실험을 수행하여 우리나라 강수량 변화와 이를 따라 형성된 건조환경을 분석하였다(Kang et al., 1987; Oh et al., 1994; Oh, 1996; Oh et al., 1998; Ha and Moon, 2000). 우리나라와 동아시아 지역 전반에서 건조환경 및 가뭄을 일으키는 대기장에 관한 연구도 다수 수행되어(Lee, 1989; Chun and Park, 1990; Byun et al., 1992; Byun, 1996; Oh et al., 1997; Kim et al., 2000), 향후 가뭄의 생성 기작을 밝히는 후속 연구가 이루어지는데 귀중한 기반이 되었다.

## 5.2 가뭄 연구의 발달

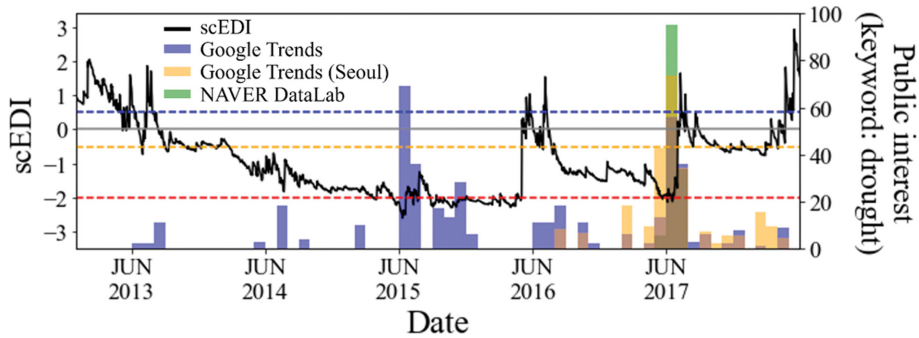
초기의 국내의 연구는 가뭄을 일정 수치 이하(5 mm 또는 2 mm)의 강수량이 연속되는 기간으로 정의하였다(Huschke, 1959; Streila, 1983; Byun, 1991). 그러나 이러한 선형적 정의를 통해서만 가뭄을 탐지하고 정확한 시공간적 특성을 파악하는 데 한계가 있다. 예를 들어, 일정 수치 이상의 강수량이 연속적으로 누적되더라도 평년치에 비해 그 값이 현저히 적다면 심한 가뭄이 발생할 수도 있다. 가뭄의 비선형적인 특성을 정량적으로 평가하기 위해서 무수히 많은 가뭄 지수가 개발되었으며, 미국에서 개발된 Palmer Drought Severity Index (PDSI; Palmer, 1965), Standardized Precipitation Index (SPI; McKee et al., 1993) 등의 기상학적 가뭄 지수가 대표적이다. 그러나, PDSI와 SPI는 누적된 강수 효과를 고려하지 못하고 일 단위의 가뭄 변화를 추적할 수 없는 등의 한계점을 가지고 있는데, 이를 해결한 Effective Drought Index (EDI; Byun and Wilhite, 1999)가 개발되어 큰 주목을 받았다(Deo et al., 2017; Kamruzzaman et al., 2019; Malik et al., 2021). 최근에는 Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010)의 구조에 실제 증발산량의 변동을 결합한 가뭄 지수인 Standardized Evapotranspiration Deficit Index (SEDI; Kim and Rhee, 2016)도 개발되어 세계적으로 널리 활용되고 있다(Vicente-Serrano et al., 2018; Alsafadi et al., 2022; Wang et al., 2022).

가뭄 지수를 활용하여 우리나라에서 발생한 여러 역사적 가뭄현상의 시공간적 특성을 정량적으로 분석한 연구들은 가뭄이 수년에서 수십 년 단위의 발생 주기성을 가지고 있는 것으로 추정한다(Byun et

al., 2008; Kim and Byun, 2010; Park, 2017). 고려사나 조선왕조실록 등의 역사서에 기록된 극심한 가뭄 시기들과 일치하는 124년 주기도 밝혀진 바 있으나, 관측 자료의 한계로 주기의 통계적 유의성을 확인하기는 어렵다. 공간적으로는 한반도와 비슷한 위도대에 위치한 중국과 일본에서 발생하는 가뭄 현상과 일부 발달 특성을 공유하고 있으며, 이는 동아시아 지역 몬순 활동의 영향을 받은 결과일 가능성이 높다(Min et al., 2003; Jun et al., 2008; Oh et al., 2014; Park et al., 2020a). 최근에는 기후변화 시나리오와 가뭄 지수를 동시에 활용하여 한반도의 미래 가뭄 변화를 전망한 연구도 다수 수행되었다. 연구 방법론에 따른 세부적인 시기나 장소의 차이는 있으나 미래에는 가뭄이 현재보다 더 빈번하고, 길어지며, 강해질 것으로 일관적으로 전망되고 있다(Boo et al., 2004; Kim and Byun, 2009; Im et al., 2012; Park et al., 2015; Choi et al., 2016; Park et al., 2020b; Kim et al., 2021).

우리나라의 가뭄에 대한 생성 메커니즘을 규명하기 위해 다양한 연구가 수행되었으며, 주로 저위도로부터 수분 유입 감소 및 한반도 상공에서의 강수 형성에 불리한 기압장 조성 과 같은 동북아시아 지역의 국지 대기순환장 변동에 의해 가뭄이 유도되는 것으로 밝혀졌다(Lee et al., 2003; Kang and Byun, 2004; Lee and Byun, 2009; Park et al., 2020a). 이러한 국지 대기순환장 변동은 다양한 시공간 규모에서 변화하는 대기 인자나 기후 변동성의 영향을 받는다. 태평양 10년 주기 진동(Pacific Decadal Oscillation), 엘니뇨 남방 진동(El Niño-Southern Oscillation), 북태평양 진동(North Pacific Oscillation)은 우리나라를 포함한 동아시아 지역에 가뭄을 일으키는 대기순환장을 형성하는 것으로 알려져 있다(Byun et al., 2001; Oh et al., 2003; Lee and Byun, 2009; Choi et al., 2011; Park et al., 2020a; Ham et al., 2022). 한반도 근처 상공에서의 제트류 변동(Park et al., 2010) 및 블로킹 현상(Kim and Byun, 2006)이나 강수 유형의 변경(Song and Sohn, 2019)도 가뭄 발생의 원인이 될 수 있다. 또한, 북대서양이나 유럽 지역의 해수면 온도 또는 대기순환장 변화에 의한 원격상관을 통해 우리나라에 가뭄이 생성되는 환경이 조성될 수 있다(Kim et al., 2005; Myung et al., 2020). 계절이나 시간적 규모에 따라 우리나라 가뭄의 원인이 되는 요소가 달라질 수 있으며, 때로는 여러 요인의 복합적인 작용에 의해서 가뭄이 형성될 수도 있다(Byun et al., 2001). 예를 들어, 적도 태평양에서 겨울철 라니냐가 봄철에 쇠퇴하더라도 북서태평양에서 음의 위상의 북태평양 진동이 발달함에 따라 우리나라에 봄철 가뭄이 발생하기 쉬운 대기장이 형성될 수 있다(Park et al., 2020a).





**Fig. 2.** Daily time series of scEDI in the Seoul station and monthly time series of the level of the public interest in drought. Blue, yellow, and red dashed lines indicate 0.5, -0.5, and -2.0 scEDI index, respectively (from Park et al., 2022).

**5.3 가뭄 연구의 근황**

전통적인 통계적·역학적 방법론 외에도, 최근에는 기계학습 기법을 활용한 가뭄 연구가 새롭게 등장하고 있다. 예를 들어, 위성 데이터를 기반으로 random forest, boosted regression trees 등의 기법을 활용하여 가뭄이나 그와 관련된 토양수분 등 기후적 인자의 변동을 조사한 연구가 수행되었다(Im et al., 2016; Park et al., 2018). 또한, 인터넷 검색활동이나 소셜미디어를 통한 빅데이터의 발달로 가뭄의 사회적 영향력을 탐지하고 그 강도를 정량적으로 측정할 수 있게 되었다. 이는 현재까지의 가뭄 연구분야 중 진행이 가장 더디었던 사회경제적 가뭄 연구를 가능하게 하는 중요한 데이터를 제공한다. 북미 지역을 대상으로 한 최근 연구에 따르면, 가뭄이 인간사회에 영향을 미칠 만큼 발달하는 경우 인터넷에 가뭄과 관련된 검색어가 급증하는 것이 발견되었으며, 이를 가뭄에 대한 사회적 반응과 관련된 잠재적 지표(가뭄 위험 인지도 등)로 간주할 수 있다(Kam et al., 2019; Kim et al., 2019). 이는 우리나라에서 심한 가뭄이 발생했던 2013~17년에 대한 연구에서도 확인되었다. 실제로 가뭄이 가장 극심했을 때, 즉 가뭄지수가 -2.0 근처일 때 온라인에서의 급격한 반응이 관찰되었으며, 이는 선제적인 사회적 대응의 부재를 나타내기도 한다(Fig. 2; Park et al., 2022).

2018년에는 우리 학계의 회원을 주축으로 가뭄특이 기상연구센터(KMA-CNU Center for Drought long-range Prediction Research, CDPR; <http://www.droughtcenter.kr/>)가 개설됨에 따라 우리나라 및 동아시아 지역의 가뭄에 대해 더욱 집중적으로 연구할 수 있는 환경이 조성되었다. 최근에는 동아시아 지역의 가뭄 및 열파와 관련된 급격한 환경변화에 대한 인간활동의 영향을 최초로 규명하여 국외에서 많은 주목을 받았다(Zhang et al., 2020). 또한, CDPR는 실시간으로 우리나라 토양수분의 변동과 미래 전망을 제공하고 있어, 기상청

의 수문기상 가뭄정보 시스템(<https://hydro.kma.go.kr/>)과 함께 국내의 농업적 가뭄을 모니터링하며 관련 피해를 억제하는 데 기여하고 있다.

**6. 한 파**

한파는 동아시아 겨울철에 발생하는 강력한 일기 현상으로서 매해 평균 십여 회 정도(Chen et al., 2004; Jeong and Ho, 2005) 발생하여 극심한 저온과 강풍, 그리고 때때로 대설을 동반하여 사회, 경제적으로 막대한 영향을 끼친다. 한파는 겨울철 눈과 얼음으로 덮여 지표의 복사 냉각이 강하게 일어나는 몽골-시베리아 지역에 지상 한랭고기압이 충분히 발달하였을 때, 상층 파동의 전파와 함께 이 고기압이 남동쪽으로 급격하게 확장하면서 발생한다(Takaya and Nakamura, 2005). 우리나라 기상청에서는 10~4월 사이 기온의 급격한 하강이 나타날 때를 한파일로 정의하여, 그 정도에 따라 주의보와 경보를 발령하여 국가적 대비태세를 수립하고 있다. 동아시아 국가마다 서로 다른 한파의 정의를 사용하지만, 한파를 동아시아 겨울 몬순 순환의 일부인 독립적인 역학체로 고려할 때에는, 대개 Zhang et al. (1997)에서 정의한 바와 같이 몽골-시베리아 지역에 지상고기압이 존재하고(중심기압 1,035 hPa 이상, 음의 상대와도 탐지), 중국 중북부지역에서의 북동풍 강화, 동아시아 지역에서의 급격한 온도 하강이 나타날 때에 한파가 발생했다고 본다.

**6.1 우리나라 한파 연구의 시작과 발달**

우리나라 학자들은 1970년대 이후 본격적으로 한파에 대한 연구를 진행해 왔다. 한국기상학회지에서 발견할 수 있는 최초의 한파 연구는 Joung (1975)으로서, 1961년부터 1971년까지 우리나라 한파 발생을 탐지하고, 이때 전국의 6개 관측소에서 나타나는 풍향, 기압, 기온의 변화를 체계적으로 조사하였다. 이후

Kim and Joung (1980)은 우리나라 한파 발생 이전에 몽골-동아시아 상공에서 나타나는 상층 경압과 발달 과정을 분석하였다. 1980년대에도 한파의 발생 과정에 대한 특성, 사례 분석에 대한 연구가 계속 이루어졌는데, 이 시기부터는 전지구적인 규모의 변동성과 동아시아 및 우리나라 한파 발생에 대한 관련성이 제시되기 시작했다. 동아시아 한파 발생의 전조현상을 다룬 가장 주목할 만한 연구로는 Joung and Hitchman (1982)으로서 한파 내습 전에 북대서양으로부터 시베리아 지역으로 동진하는 상층 파동이 한파발생을 유도함을 규명하여 이후 한파 연구들에 큰 영향을 미쳤다. Byun and Joung (1987)과 Park and Kim (1987) 등은 사례연구를 통해 우리나라 한파 내습 전에 바이칼호 부근의 기압능이 남동진하면서 강화되는 과정을 유라시아 전체 혹은 북반구 규모의 순환의 측면에서 보다 자세히 설명하였다. Lim (1994)는 겨울철 동아시아 제트류의 변동이 한파발생과 관련되어 있음을 제시하였다. 종관적인 관점에서 한파 내습 시 동아시아 순환 변화와 우리나라에서의 강한 지역적 한랭현상이 보다 자세히 연구되었다. Kim and Park (1987)은 우리나라 한파 내습이후 동아시아 지역의 국지적 순환을 연구하였고, Ryoo and Kwon (2002), Yoo et al. (2015)은 한파 내습 시 우리나라 주변 서고동저형의 기압배치 및 한국-일본 해상에서 형성되는 저기압성 순환이 한반도 주변에 강한 한랭이류를 강화시켜 지역적으로 매우 큰 폭으로 기온이 감소하는 지역적 강화 현상을 설명하였다. 2010년대 들어 대규모 순환 측면에서 동아시아 한파의 발달 패턴을 분류하는 연구가 시작되었는데, Takaya and Nakamura (2005b), Park et al. (2011, 2014) 등은 동아시아 한파를 크게 유라시아 대륙 북쪽에서 동진하는 파동과 관련되어 시베리아 고기압이 발달하여 남동쪽으로 팽창하는 파동 형태와 유라시아 대륙 북동쪽에서 발생한 블로킹이 시베리아 고기압을 강화시키면서 발달하는 블로킹 형태로 분류하다. Park et al. (2014)는 블로킹 형태의 한파가 상층 파동 형태의 한파에 비해 강도가 강하고 지속시간도 길어 우리나라에 미치는 영향이 더욱 크다는 것을 보였다.

### 6.2 한파의 발생에 영향을 미치는 외부 인자들

한파의 발생은 결국 시베리아 고기압의 계절 내 강화에 따른 결과로 나타나는데, 이 과정에서 다양한 외부 기후인자의 영향을 받는다고 알려져 있다. Chang and Lau (1980)는 아열대 서태평양의 대류 활동과 연관된 지역적 해들리 순환이 동아시아 몬순에 영향을 주어 한파 발생과 관련이 있음을 최초로 제시하였는데, 비슷하게 동아시아 몬순 순환 강도에 영향을 미치는 외부 기후 변동성은 한파 발생에 영향을 끼친다.

Chen et al. (2004)는 엘니뇨와 관련된 상층 단파가 라니냐(엘니뇨) 시기 동아시아 지역 한파의 증가(감소)를 유도하는 메커니즘을 제시하였다. 2000년대 들어서는 엘니뇨 이외에 한파 발생에 영향을 미치는 다양한 외부 인자들에 대한 연구가 국내과학자들에 의해 활발히 진행되었다. Thompson and Wallace (1998)에 의해 북반구 전체 기후변동성을 조절하는 인자로 북극진동(Arctic Oscillation)이 알려졌는데, Jeong and Ho (2005)는 특히 북극 진동의 음의 위상 시기에 시베리아 고기압이 강화되고 동아시아 기압골 및 제트가 강화되며 한파가 증가함을 밝혔다. 또한 Park et al. (2011)은 음의 북극진동 시기에는 블로킹 형태의 한파 발생이 빈번해지면서 우리나라가 보다 강력한 한파의 영향을 자주 받는다는 것을 제시하였다. Jeong et al. (2005)과 Park et al. (2010) 등은 열대 Madden-Julian Oscillation (MJO)의 전파에 따른 대기의 원격상관 (teleconnection)으로 인해 인도양 지역에 MJO 대류 중심이 위치할 때 동아시아 지역에 강력한 한파의 발생이 증가함을 보고하였다. 이 밖에도 Jeong et al. (2006)은 한파 발생과 관련된 시베리아 상층 파동 발달에 하루 성층권에서 남하하는 요란이 있음을 제시하여 성층권 순환과의 관련성을 제시하였다. Park et al. (2020)도 북극진동, MJO 등의 외부 인자가 한파의 형태, 강도, 지속기간 등의 한파의 특성에 대해 월별 계절 내 규모에서 영향을 끼친다는 것을 보였다.

### 6.3 최근 연구동향: 북극 한파의 발생 및 기후변화에 따른 한파 변화

지구 온난화에 따라 동아시아 지역에도 뚜렷한 온난화가 진행되고 있다. 대부분의 기후 모델들은 인위적 기후변화로 인해 21세기 동안 동아시아 지역에서 평균 온도의 상승과 극한 저온 발생의 감소, 즉 한파 발생의 감소를 예상하고 있다. 하지만 2000년대 후반에서 2010년대 초까지는 평균 온도의 상승에도 불구하고 북반구 전역, 특히 동아시아 지역의 극한 한파의 발생이 잦아지는 이례적 상황이 발생하였다(Woo et al., 2012). 이러한 극한 한파의 증가에 대한 원인에 대해 우리나라 과학자들은 북극 주변의 급격한 기후변화를 제시하여 전세계적인 주목을 받았다. Kim et al. (2014)은 북극 해빙의 감소와 관련된 북극 성층권 와도(polar vortex)의 약화를, Kug et al. (2015)는 북극지역 중에서도 Kara-Barents 해의 온도 증가가 유라시아 고위도 지역에서 남동쪽으로 상층 파동열을 유도하여 동아시아에 한파 발생을 유도함을 제시한 바 있다. 최근 Park et al. (2017)과 Heo et al. (2018)은 기후변화 시나리오에서의 한파의 미래 변화를 연구하였는데, 대부분 기후모델이 미래 한파 발생의 감소를 예측하고 있으나 이는 관측에서 나타난 최근 변

화와는 차이가 있어 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

## 7. 강 설

겨울철 산악지역에 쌓인 눈은 기본적으로 보존성이 뛰어나 오랫동안 유지되며 주변 지역에 수자원 역할을 할 뿐만 아니라 봄철에 빈발하는 산불의 발생이나 확산을 억제하는 긍정적인 기능을 한다(Murakami et al., 2003). 또한, 산악지역 강설은 설산 등산객들이나 겨울 스포츠를 즐기는 관광객들에게는 큰 즐거움을 선사하기도 한다. 하지만 강설이 집중되거나 어는 비나 얼음싸라기와 같은 강설 형태가 내리는 경우에는 지역 주민이나 관광객들에게 사회·경제적 피해를 초래한다. 이와 같은 강설로 인한 피해 이외에도 무거운 습설은 가건물이나 비닐하우스 파괴 등으로 인명 및 재산 피해를 초래하기도 한다. 하지만 강설로 인한 가장 큰 피해는 무엇보다 도로 교통에 미치는 영향에서 찾을 수 있다. 한파를 동반한 강설 시 비에서 눈으로 바뀌는 전이기(transition period)에 어는 비나 얼음싸라기와 같은 강설이 발생하면, 도로 교통이 마비되고 막대한 인명 피해가 초래될 수 있기 때문에 이에 대한 적절한 예보는 절실히 요구된다.

### 7.1 강설 연구 현황

국내의 강설 선행연구들을 조사한 결과 국내 논문은 47편, 국외 논문은 92편으로 조사되었으며, 주제별로 분류한 결과 국내는 주로 종관분석 연구(32%)와 지형효과 연구(19%)가 과반을 차지한 반면에 국외 연구들은 주로 호수효과(혹은 바다 효과)에 의한 강설 연구가 46%를 차지하였으며, 그 다음 주제는 눈결정 연구였다. 국내에서도 다행히 2014년부터 눈결정 연구가 영동지역을 중심으로 시작되었고(Seo et al., 2015), 2017년부터는 고해상도 눈결정 카메라가 도입되어 정량적인 분석이 시작되었다(Kim et al., 2018). 국내외 선행연구를 연구방법론에 따라 분류하면, 국내는 주로 모델링 연구(34%)가 대다수를 차지하였으나, 국외의 경우는 관측 연구(33%)가 모델링 연구(28%)보다 많았다. 2010년 이후로 영동지역 강설 관측연구가 활발해지면서 국내도 관측연구가 28% 정도로 증가한 것을 알 수 있다.

지금까지 강설 연구 성과를 정리하자면 한반도에서 강설 현상은 겨울철 시베리아 고기압이 강하게 남동쪽으로 진출하는 초겨울에는 주로 호남 지방에 강설이 빈발하지만, 2~3월의 늦겨울에는 영동지역에 강설이 주로 발생하는 경향이 있다(Nam et al., 2014). 호남지방의 강설은 강설량은 적어도 빈도는 높은 반면에 영동지방은 강설 빈도는 낮지만 강도가 강한 강설

이 잦은 경향이 있다(Kim B. et al., 2021). 영동지역 강설은 주로 겨울 절정기를 지나면서 약화된 시베리아 고기압이 한반도 남쪽을 지나는 이동성 저기압과 호응하면서 동해상에 북풍에서 북동풍 계열의 한기가 유입되는 조건에서 주로 발생하게 된다(Seo and Jhun, 1991; Park et al., 2009; Lee et al., 2012).

### 7.2 전형적인 강설 특성

구체적으로 강설 연구를 살펴보면 강설 메커니즘을 종합적으로 해석할 수 있는 집중 관측이 부족하였기 때문에 일차적으로 종관분석에 기반한 강설 구역과 기압배치 연관성을 분석하여 해안형 혹은 산악형 강설 분류 연구나 강설사례에 대한 수치 모델링 연구가 대부분이었다(Lee and Park, 1996; Lee and Lee, 2003; Kim and Kwon, 2005). 최근 2018년에는 평창 동계올림픽 기간을 전후하여 국제공동 관측 캠페인(International Collaborative Experiment for Pyeongchang Olympic and Paralympics: ICE-POP)을 통해 산악지역 부근 강설 입자 및 특성 연구(Gehring et al., 2020), 산악지역에서 시어와 난류가 강설 입자에 미치는 영향 연구(Kim K. et al., 2021) 등이 수행된 바 있다.

특히 국내 강설연구는 강설 강도가 강하고 피해가 크게 발생하는 영동지역에서 활발하게 수행되었다. 영동지역은 동해와 태백산맥을 인접하고 있어 각종 기상현상이 증폭되어 나타나는 경향이 있다. 다수의 선행 연구들로 인하여 뚜렷한 종관장의 지배를 받는 강설 사례들의 예보 정확도는 크게 향상된 측면이 있지만, 종관 강제력이 약한 경우 지형효과가 두드러지게 되어 종관 강제력이 강한 경우 보다 강설 예보의 어려움이 큰 것으로 알려져 있다(Kim B. et al., 2021). 이런 측면에서 강원 영동지역 강설 이해를 목적으로 영동지역에서는 2014~2019년까지 강설 현상 시에 장기간의 대설관측 캠페인(Experiment on Snow Storms At Yeongdong: ESSAY)이 수행되어 왔으나, 한 지점(강릉원주대학교)에서 라디오존데 관측을 통한 대기의 열역학적인 특성을 주로 분석하였기 때문에 공간적인 특징이나 연속적인 변화를 이해하는 데에는 한계가 있었다(Seo et al., 2015; Ko et al., 2016; Kim et al., 2018). 이를 보완하고 강설현상을 정교한 시·공간적 해석을 위해 2019년부터 겨울철과 봄철에(주로 2~4월) 강원지방기상청, 국립기상과학원, 강릉원주대학교 등 여러 기관이 동시에 참여하는 ‘강원영동 공동 입체기상관측 캠페인’이 수행되고 있다(Kim B. et al., 2021).

한반도에서 가장 활발하게 연구가 진행 중인 영동지역 강설은 기본적으로 차가운 한기가 따뜻한 동해상을 통과하면서 강한 대류불안정에 의해 강설구름이 발달한 이후 북풍 혹은 북동풍과 함께 영동 내륙

으로 진입하면서 강설이 발생한다(Seo and Jhun, 1991; Lee and Lee, 1994; Lee et al., 2012). 이를 국내에서는 동해 효과라고 하지만(Nam et al., 2014), 국외에서는 미국 오대호 주변 남동쪽 풍하측 지역, 유타주 솔트레이크 호수, 그리고 유럽의 내륙 호수 주변 등에서 주로 대설 현상이 보고되고 있어 호수효과라고 부른다(Kindap, 2010; Alcott and Steenburgh, 2013; Veals and Steenburgh, 2015; Kristovich et al., 2017; 2018). 하지만 지구상에서 호수 효과 강설이 가장 강하게 발생하는 지역은 바로 우리나라와 동해에 인접해 있는 일본 북서부 지역이다(Steenburgh and Nakai, 2020).

강원 영동지역의 전형적인 동해 효과에 의한 강설의 특징은 하층 2~3 km 이내에서 북풍 또는 북동풍과 함께 유입되는 한기로 인하여 동해상에 대류불안정에 의한 눈구름이 형성되는데, 이 때 하층 한기유입으로 인하여 경계층 구름 위에는 강한 역전층이 형성되는 경향이 있기 때문에(Kim et al., 2018), 동해상에 대류불안정에 의해 발생한 눈구름은 형태학적으로 층운 내지 층적운을 띄게 된다. 일반적으로 동해 효과 강설기간 중의 850 hPa 평균 온도는 263.5 K이었고, 평균 해기차(850 hPa 온도와 해수면온도 차이)는 19.5 K로 영동지역 동해 효과에 의한 강설 발생의 첫 번째 필수 조건이라고 할 수 있다(Nam et al., 2014). 강설기간 동안 레윈존데로 관측한 평균 운정 고도는 지상 2.3 km이고, 2.0~2.5 km 부근에서 최빈값이 나타나고 있다. 전반적으로 영동지역 전형적인 강설 시에 눈구름은 높게 발달하지 못하고 2~3 km 이내에 국한되는 경향이 있다(Kim et al., 2018; Kim B. et al., 2021).

### 7.3 지형효과에 따른 특이 강설 현상

앞 절에서 언급한 동해 효과 강설 이외에도 대류권 계면 하강이나 강한 경압불안정을 동반하는 특이(extreme) 강설 사례 시에는 구름이 3 km 이상, 최고 7 km까지도 발달하는 것을 확인할 수 있었다(Kim et al., 2019). 그리고 산맥에 의해 한기 유입이 활성화되면서 스킨선(squall line)을 동반한 온도 급감에 따른 특이강설사례 등도 자주 발생하고 있다. 특이 강설사례들은 겨울철(혹은 초봄)임에도 불구하고 눈구름이 경계층 내에 제한되지 않고 두꺼운 대류운으로 발달하며 단기간에 강설을 유발하거나 갑작스러운 온도 급감으로 인하여 강설 예보를 어렵게 하고 있다(Kim et al., 2021d).

일반적으로 강설은 주로 중관 규모 일기 패턴에 의해 지배를 받을 경우에는 거시적인 규모에서는 강설 예보의 정확도는 높은 편이지만, 중관 강제력이 강하지 않은 강설 사례들은 예보가 더 어려운데, 이는 주

로 지형적인 요인에 의해 기인한다. 영동지역에서 늦겨울 또는 초봄(2~3월)에 태백산맥 동쪽에 한기가 축적되는 현상(Cold Air Damming: CAD)이 자주 발생하는데, 이는 산맥에 수직으로 부는 바람이 산맥과 평행하게 저위도 방향으로 풍향이 바뀌어 불면서 상대적으로 차가운 공기가 산사면에 축적되는 것이다(Dunn, 1987; Bell and Bosart, 1988). CAD는 겨울철 강수 입자의 성장(phase)을 변화시킬 수 있으며, 한랭전선을 형성하여 강설 위치를 변화시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다(Stark et al., 2013). 국내에서도 Lee and Kim (2008)과 Lee and Xue (2013)는 수치모의를 통해 영동 해안지역에 한기축적으로 인한 전선 형성 모델을 최초로 제시한 바 있지만 정밀한 관측이 부족하여 중관분석과 수치모델을 활용한 연구에 그쳤다. Kim M. et al. (2021)은 강설 예보가 있는 기간에 태백산맥 동쪽 산사면에 CAD가 발생할 경우에는 눈구름이 동해상에 머물면서 약한 강설이나 무강설 사례가 나타날 수 있음을 제시하였다. Kim H. et al. (2021)은 강설 사례 시 관측 및 모델 바람장 분석을 통해 하층 바람 특성에 따른 강설 변화를 토의하였고, 특히 동해상의 바람관측 중요성을 강조하였다. 그리고 Kim Y. et al. (2021)은 구름 상세 모의실험을 통해 전형적인 동해 효과에 의한 강설 사례 시에 하층 기온과 풍향 시어의 변화가 눈결정 성장 및 성장과정에 영향을 줄 수 있음을 확인하였고, 나아가 구름미세물리 관측의 필요성을 제시하였다.

### 7.4 제언

영동지역은 태백산맥 정상부근에서 동해까지 경사가 급하기 때문에 산맥과 동해 효과가 강화되어 나타나는 경향이 있다. 한반도와 같이 좁은 면적에 바다를 인접하고 있으며 복잡한 지형으로 이루어진 지역의 일기예보 개선을 위해서는 지형효과의 지배를 받는 중규모(mesoscale) 기상 차원의 분석과 이해가 요구되지만, 국내에서는 아직 중규모 관측 및 분석이 부족한 실정이다. 그러므로 영동지역과 같이 복잡한 지형으로 이루어진 자연 실험실(natural laboratory)에서 산맥과 동해 효과에 의한 중규모 기상 이해를 위한 목적 지향(target oriented) 통합 집중관측은 필수적이라 할 수 있다.

영동지역에서 지금까지 수행된 관측 캠페인 성과로 판단할 때, 2019년부터 시작된 강원영동 입체기상 관측 캠페인은 복잡한 지형효과에 의해 유발되는 중규모 기상현상을 이해하는 기본 플랫폼(platform)이 될 것이다. 향후 이와 같은 캠페인의 다양한 관측 방법이나 주요 연구성과는 지형이 복잡한 한반도의 다른 지역에서 관측캠페인 계획 수립이나 수행에 참고 자료가 되어 수치모델 검증이나 개선에도 크게 기여할

수 있을 것이다.

## 8. 강 풍

집중호우, 폭염 및 한파와 더불어 매우 강한 바람을 의미하는 강풍도 막대한 재산 및 인명 피해를 초래하는 위험기상 중 하나이다. 강풍을 다양한 기준에 의해서 정의할 수 있지만, 전 세계적으로 보퍼트 풍력계급(Beaufort wind scale) 7등급인  $14 \text{ m s}^{-1}$  이상을 강풍으로 분류하고 있다. 우리나라 기상청에서도 육상에서 풍속  $14 \text{ m s}^{-1}$  이상 또는 순간 풍속  $20 \text{ m s}^{-1}$  이상일 경우 강풍 주의보를 발표한다. 강풍은 강한 바람 자체로도 구조물 및 건축시설 파괴, 낙과 등의 피해를 야기할 뿐만 아니라 산불을 대형화 시키기도 한다. 우리나라에서 기록된 가장 큰 강풍 피해는 2003년 순간 최대풍속  $60 \text{ m s}^{-1}$ 을 기록한 태풍 매미가 초래하였는데, 동남권 지역에 건물 파괴, 구조물 붕괴, 선박 파손 등으로 4조 원 이상의 재산 피해를 야기했다. 이러한 강풍 피해를 줄이기 위해서는 시공간적 강풍의 특성을 충분히 이해하는 것과, 상세하고 정확한 예측정보를 이용해 선제적으로 강풍에 대비하는 것이 반드시 필요하다. 그러나 우리나라의 위험기상 중 강풍으로 인한 피해 규모는 매우 큰 편이지만 상대적으로 기후학적인 특성 연구는 부족하다. 본 절에서는 지금까지 수행된 우리나라의 강풍 연구들과 산불과의 연관성을 제시하고, 최근 연구 동향에 대해 소개한다.

### 8.1 우리나라 강풍 연구

막대한 강풍 피해에도 불구하고 우리나라의 강풍의 기후적 특성에 대한 연구는 극한 강수와 온도 연구와 비교해서 상대적으로 부족한 것이 현실이다. 이는 강풍 현상의 시, 공간적 규모가 다른 위험기상에 비해 작은 것과 연관될 수 있는데, 불확실성이 낮으면서 시, 공간적으로 고해상도의 장기간 바람 정보가 부족하기 때문이다.

우리나라의 강풍에 관한 연구는 바람이 강한 제주도 또는 영동 지역을 중심으로 수행되었고, 관측 정보가 충분해지기 시작한 2000년대 이후에서야 우리나라 전역에 대한 기후적인 특성 연구가 시작되었다. Kim et al. (2020)는 우리나라 61개 종관기상 관측장비의 최근 23년(1993~2018) 관측 자료를 이용해 강풍의 기후학적 시공간 변화 특성을 조사하였는데, 발생 빈도와 강도 모두 최근 감소추세가 있다는 것을 보였다. 지역적으로는 해안지역에서, 계절 측면에서는 겨울철에 감소 경향이 뚜렷함을 밝혔고, 그 원인으로 전지구적인 대기순환 변화, 도시화 확대, 대기 경계층 특성 변화 등을 제시하였다. 이는 30년간의

관측자료를 이용해 남한의 평균 바람의 시공간 특성을 분석한 Kim and Kim (2013)의 연구와도 일치한다. 또한, Kim et al. (2009)는 39년(1970~2008) 동안 우리나라 남서 연안지역에서 발생한 강풍의 원인별 특성을 분석하였고, 장기적으로 태풍에 의한 강풍 발생은 증가하는 반면, 겨울 계절풍과 전선풍에 의한 강풍 발생은 점차 감소하는 추세임을 보였다. 또한 Na and Jung (2021)은 1904년부터 2019년까지의 기상관측 자료를 이용해 우리나라의 비태풍 시기의 강풍 특성을 분석하였는데, 내륙보다는 해상·연안지역에서 강풍발생 빈도와 풍속이 더 높고, 계절적으로는 겨울철에 가장 강하다는 것을 보였다. 이 외에도 Choi and Moon (2008)은 56년 간의 우리나라 지상풍속 극값 변화를 분석하였다.

국지적 강풍 사례에 대한 연구는 봄철과 겨울철 강원 영동지역 강풍에 대한 것들이 대부분인데 강풍 발생 메커니즘으로 역전층 효과(Jang and Chun, 2008), 태백산맥 풍하측 기상요소 특성(Cho et al., 2015), 국지 하강풍 메커니즘(물뿔, 부분반사, 임계고도 반사)과 지형효과(Kim and Chung, 2006) 등이 제시되었다.

### 8.2 강풍과 산불 연관성 연구

우리나라의 강풍 발생 빈도는 지역별 편차가 크다. 특히, 영동지역에서 강풍이 빈번하게 발생하는데, 이에 대한 다양한 연구들이 존재한다. Kim and Chung (2006)은 10년 간(1995~2004) 전국 관측소 풍속 자료를 분석해 강풍의 통계적 특성을 조사하였고, 영동 지역이 타 지역에 비해 봄철 강풍 발생 빈도가 상대적으로 높고 대부분 태백산맥을 넘어오는 서풍 계열의 바람임을 밝혔다. Park and Han (2021)은 공동 입체 기상관측 자료를 이용해 2015년 4월 발생한 영동 강풍은 몽골과 만주 부근의 지상저기압과 중국 중서부에서 질리된 남해상의 이동성고기압이 형성한 한반도 주변의 기압계로 인해 발생했다는 것을 규명하였다.

이처럼 우리나라 주변의 특이한 기압장 분포로 인해 봄철과 겨울철 영서지역에서 태백산맥을 넘어 양양과 간성 사이로 부는 강풍을 양간지풍이라고 한다. 양간지풍은 예로부터 화풍이라고 불려 왔는데 강풍과 산불이 동시에 발생할 경우 산불이 대형화되어 천문학적 재산 및 인명 피해를 초래하기 때문이다. 예로 양간지풍은 산불을 확대시켜 1996년 고성(3,762 ha), 2019년 속초(1,260 ha)에 막대한 산림 피해를 초래하였다. 따라서 영동지역의 산불 피해를 줄이기 위해 양간지풍의 기후적 특성을 이해하는 연구가 수행되어 왔다. Lee and Kim (2011)은 영동지역의 강풍 풍속이 클수록 산불의 규모가 증가하는 관계가 있다는 것을 관측 자료 분석을 통해 밝혔다. Choi (2021)은 기상관측소 자료를 이용해 양간지풍의 기후적 시

공간 특성을 밝혔는데, 우리나라 주변의 기압장 분포 뿐만 아니라 국지적 지형이 양간지풍의 발생의 공간 분포와 강도에 영향을 미칠 수 있다는 것과 특정 해에 양간지풍의 발생빈도가 2배 이상 급증할 수 있다는 것을 제시하였다.

### 8.3 최근 강풍 연구 동향

우리나라의 강풍 특성 연구를 위해 최신 장비 기반의 집중관측 자료 활용이 최근 추진되고 있다. Kim and Kwon (2021)은 기존의 지상기상관측기기뿐만 아니라 윈드프로파일러, 윈드라이다, 라디오미터, 드론을 활용하는 강원영동 강풍 관측(G-WEX) 자료를 이용해 2020년 영동지역의 강풍 특성을 분석하였다. 관측 정보의 증가로 인해 우리나라의 강풍 기후적 특성을 분석하는 연구 외에도 상세 기후변화 시나리오를 이용해 우리나라의 미래 바람 변화를 분석하는 연구가 최근 수행되고 있다. Kim et al. (2015)는 12.5 km 수평해상도를 갖는 중규모 수치모델 MM5를 이용해 한반도 상세 기후변화 시나리오를 산출한 후 온난화(RCP8.5) 실험과 과거 재현(Historical) 실험 사이의 한반도 강풍 변화를 분석하였다. 그 결과 강풍의 평균 강도는 크게 변하지 않지만 경년변동성과 극한 강풍 강도는 증가할 수 있고, 극한 강풍 강도의 증가는 태풍 강도의 강화와 관련될 수 있다는 것을 보였다. 유사하게 Lee et al. (2013)과 Lee et al. (2019)에서도 태풍 강화로 인한 미래 강풍 강도가 증가할 수 있다고 제시하였다. 하지만 이러한 연구들은 수십 km의 저해상도 상세 기후변화 시나리오를 분석했기 때문에 태풍의 최대 강풍을 과소 모의한다는 문제점과, 국지적인 비태풍 시기의 강풍 재현에 불확실성이 크다는 한계를 갖고 있다. 또한 컴퓨팅 자원의 한계로 인해 많은 수의 시나리오를 활용하지 못한다는 제약이 있다. 따라서 기후변화 따른 미래 강풍 변화 연구의 신뢰도를 높이기 위해서 수치모델의 정확도 개선, 앙상블 기법의 고도화, 기계학습의 적용 등이 추진될 필요가 있다.

## 9. 요약

이 연구에서는 우리나라에 큰 피해를 끼치는 대표적인 위험기상 현상으로서 태풍, 집중호우, 가뭄, 한파, 강설, 그리고 강풍에 대한 지난 연구 논문을 정리하였다. 기상현상의 특징이나 국내 및 국외 연구 여건, 그리고 정리한 연구자의 관점이 다르기 때문에 일관된 형태로 과거의 연구 내용을 살펴보는 못했다. 어떤 위험기상 현상에 대해서는 국내에 출판된 논문을 위주로 살펴봤고, 다른 현상에 대해서는 국내, 외저널에 출판된 논문을 망라하였다.

태풍 연구 부분에서는 관측, 단기와 장기 예측 그리고 태풍 역학의 이해, 그리고 기후적 분석으로 나누어서 과거 연구의 활동을 살펴봤다. 집중호우 연구 부분에서는 우리나라에서 발생하는 집중호우의 대표적인 형태인 고립된 뇌우형, 대류 밴드형, 스콜라인형, 그리고 구름성단형의 중규모 대류계 패턴 연구를 정리하였다. 중규모 특징을 분석하기 위해서 여러 수치모델 결과를 소개했으며, 우리나라와 다른 나라의 집중호우 형태도 비교했다. 끝으로 집중호우 현상의 장기변화에 대한 연구 결과를 소개했다. 가뭄 연구 부분에서는 가뭄의 생성, 발달, 소멸에 대한 변동, 가뭄의 세기와 기간을 객관적으로 결정할 수 있는 가뭄지수의 정의와 메커니즘 연구, 그리고 최근에 진행되고 있는 새로운 연구 트렌드를 소개하였다. 폭염 연구 분야에서는 한반도에 나타나는 폭염의 특징과 메커니즘을 조사했다. 일반적으로 폭염은 강한 상층 기압능의 확장과 블로킹이 작용해서 발생하는데, 우리나라의 경우에는 여러 연구에서 공통적으로 티베트 상층 고기압과 북태평양 고기압의 배치와 강도에 큰 역할을 하고 있음을 밝혔다. 폭염 예측과 미래 시나리오 개발에 관한 내용뿐 아니라 폭염의 영향과 피해를 예측하려는 여러 노력에 대한 연구결과를 소개했다.

한파 연구 부분에서는 우리나라에 영향을 끼치는 한파의 발생을 규명하고, 연관된 다양한 시간과 공간 규모의 기상 인자를 찾기 위한 여러 연구자의 노력을 정리하였다. 또한, 최근에 활발하게 진행되고 있는 연구 트렌드로서 북극 한파의 발생과 기후변화에 따른 한파의 변화 등의 연구도 정리하였다. 강설 연구 부분에서는 국내, 외 강설 연구 현황을 살펴서, 국내에서는 주로 영동지역에 내리는 강설에 관한 종관 분석과 지형분석 연구를, 국외에서는 호수(바다 포함) 효과 연구가 광범위하게 이루어지고 있음을 알았다. 특히, 국내에서는 강설 특징을 밝히는 수치모델링 연구가 활발하게 이루어졌다. 이들 연구 결과를 증명하기 위한 집중관측의 필요성을 강조하였다. 강풍 연구 부분에서는 먼저 우리나라 강풍 연구의 현황을 소개했다. 2000년 이후 전국적으로 바람의 관측자료가 확보되기 전까지는 바람이 강한 제주도와 영동지역을 중심으로 많은 연구가 이루어졌다. 특히, 산불 발생과 밀접하게 연관되어 있는 영동지역의 양간지풍에 관한 연구를 소개했다. 최근 들어 활발하게 진행되고 있는 최신 관측장비를 이용한 집중관측 연구 결과도 소개했다.

## 감사의 글

가뭄 연구 부분을 부경대학교 변희룡 명예교수, 포항공과대학교 감중훈 교수, 국립재난안전연구원 김도

우 박사, 국립환경과학원 이그립 박사가 검토하고 의견을 주었다. 서울대학교 김무찬 연구원이 참고문헌 정리를 도와주었다.

## REFERENCES

- Ahn, M.-H., S.-H. Bae, E.-H. Sohn, J.-Y. Byon, and A.-S. Suh, 2002: Application of NOAA/AMSU data for the tropical cyclone center fixing. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 147-160.
- Ahn, S.-H., B.-J. Kim, S.-Y. Park, and G.-U. Park, 2010: The climatological characteristics of the landfall typhoons on North Korea. *Atmosphere*, **20**, 239-246.
- Alsafadi, K., N. Al-Ansari, A. Mokhtar, S. Mohammed, A. Elbeltagi, S. S. Sammen, and S. Bi, 2022: An evapotranspiration deficit-based drought index to detect variability of terrestrial carbon productivity in the Middle East. *Environ. Res. Lett.*, **17**, 014051, doi: 10.1088/1748-9326/ac4765.
- Bae, H.-J., S. Yang, T.-B. Jeong, A.-R. Yang, D.-H. Cha, G. Lee, H.-Y. Lee, D.-S. Byun, and B.-M. Kim, 2022: An estimation of ocean surface heat fluxes during the passage of typhoon at the Jeodo ocean research station: typhoon lingling case study 2019. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 305-314, doi: 10.1007/s13143-021-00252-3.
- Black, E., M. Blackburn, G. Harrison, B. Hoskins, and J. Methven, 2004: Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather*, **59**, 217-223, doi: 10.1256/wea.74.04.
- Boo, K.-O., W.-T. Kwon, J.-H. Oh, and H.-J. Baek, 2004: Response of global warming on regional climate change over Korea: An experiment with the MM5 model. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L21206.
- Byun, H.-R., 1991: A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Seoul National University.
- \_\_\_\_\_, 1996: On the atmospheric circulation caused the drought in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 455-469.
- \_\_\_\_\_, and D. A. Wilhite, 1999: Objective quantification of drought severity and duration. *J. Climate*, **12**, 2747-2756.
- \_\_\_\_\_, and Y.-H. Han, 1994: On the existence of the seasonal drought in the Korean Peninsula. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 457-467.
- \_\_\_\_\_, K.-A. Kang, and K.-H. Kim, 2001: Correlations between Nino-3 anomalies and Asian drought-flood. *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**, 453-464.
- \_\_\_\_\_, D.-K. Lee, and C.-H. Joung, 1992: A study on the atmospheric circulation during the dry period before the Changma. Part II: Compared with those before and after the period 1992. *J. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 89-107.
- \_\_\_\_\_, S.-J. Lee, S. Morid, K.-S. Choi, S.-M. Lee, and D.-W. Kim, 2008: Study on the periodicities of droughts in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 417-441.
- Chen, T.-C., W.-R. Huang, and J. Yoon, 2004: Interannual variation of the East Asian cold surge activity. *J. Climate*, **17**, 401-413, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<0401:IVOTEA>2.0.CO;2.
- Cheong, H.-B., I.-H. Kwon, H.-G. Kang, J.-R. Park, H.-J. Han, and J.-J. Kim, 2011: Tropical cyclone track and intensity prediction with a structure adjustable balanced vortex. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 293-303.
- Cho, Y.-J., T.-Y. Kwon, and B.-C. Choi, 2015: Characteristics of meteorological variables in the leeward side associated with the downslope windstorm over the Yeongdong region. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **36**, 315-329, doi: 10.5467/JKES.2015.36.4.315.
- Choi, E.-S., and I.-J. Moon, 2008: The variation of extreme values in the precipitation and wind speed during 56 years in Korea. *Atmosphere*, **18**, 397-416.
- Choi, G., 2020: Climatic characteristics of a local wind called Yangganjipung blowing in the northeast coastal region of South Korea. *J. Climate Res.*, **15**, 49-66, doi: 10.14383/cri.2020.15.2.49.
- Choi, K.-S., Y. Cha, and R. Lu, 2019: Possible relationship between Korea affecting tropical cyclone activity and Pacific Decadal Oscillation in summer. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **55**, 557-573, doi: 10.1007/s13143-018-0076-1.
- \_\_\_\_\_, and K. Kang, 2008: How is the snow-cover in the Tibetan Plateau related to the typhoon activity around the Korean Peninsula? *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 201-207.
- \_\_\_\_\_, and B.-J. Kim, 2007: Climatological characteristics of tropical cyclones making landfall over the Korean Peninsula. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 97-109.
- \_\_\_\_\_, D.-W. Kim, and H.-R. Byun, 2008: Relationships between summer droughts in Korea and activities of tropical cyclones over the northwestern Pacific. *Atmosphere*, **18**, 279-286.
- \_\_\_\_\_, D.-W. Kim, and H.-R. Byun, 2009: Statistical model for seasonal prediction of tropical cyclone frequency around Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 21-32.
- \_\_\_\_\_, and T.-R. Kim, 2010: Change of TC activity around



- Korea by Arctic Oscillation phase. *Atmosphere*, **20**, 387-398.
- \_\_\_\_\_, S.-B. Oh, H.-R. Byun, R. H. Kripalani, and D.-W. Kim, 2011: Possible linkage between East Asian summer drought and North Pacific Oscillation. *Theor. Appl. Climatol.*, **103**, 81-93, doi: 10.1007/s00704-010-0286-7.
- \_\_\_\_\_, C.-C. Wu, and Y. Wang, 2011: Effect of ENSO on landfalling tropical cyclones over the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 391-397.
- Choi, W.-S., C.-H. Ho, K. Kang, and W.-T. Yun, 2014: Seasonal prediction of tropical cyclone activity in summer and autumn over the western North Pacific and its application to influencing tropical cyclones to the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **24**, 565-571, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.4.565.
- Choi, Y.-W., J.-B. Ahn, M.-S. Suh, D.-H. Cha, D.-K. Lee, S.-Y. Hong, S.-K. Min, S.-C. Park, and H.-S. Kang, 2016: Future changes in drought characteristics over South Korea using multi regional climate models with the standardized precipitation index. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 209-222, doi: 10.1007/s13143-016-0020-1.
- Chun, Y.-S., and S.-U. Park, 1990: Characteristics of the regional circulation over Asia during the dry Changma period in 1982. *J. Korean Meteor. Soc.*, **26**, 12-24.
- Cook, C., 1965: Statistical prediction of movements and surface pressure of typhoon centers which might hit Korea and her neighborhood. *J. Korean Meteor. Soc.*, **1**, 23-27.
- Deo, R. C., H.-R. Byun, J. F. Adamowski, and K. Begum, 2017: Application of effective drought index for quantification of meteorological drought events: a case study in Australia. *Theo. Appl. Climatol.*, **128**, 359-379, doi: 10.1007/s00704-015-1706-5.
- Ha, K.-J., K.-Y. Kim, and M.-H. Yeo, 1997: An estimation of the radius of maximum wind in typhoon using GMS TBB. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 677-690.
- \_\_\_\_\_, and J.-Y. Moon, 2000: A study of the impact of surface albedo changes on Northern Hemisphere circulation using a GCM. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 1-14.
- Ham, Y.-G., S.-Y. Kang, Y. Jeong, J.-H. Jeong, and T. Li, 2022: Large-scale sea surface temperature forcing contributed to the 2013-17 record-breaking meteorological drought in the Korean Peninsula. *J. Climate*, **35**, 3767-3783, doi: 10.1175/JCLI-D-21-0545.1.
- \_\_\_\_\_, and Na, H. Y., 2017: Marginal sea surface temperature variation as a pre-cursor of heat waves over the Korean Peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 445-455, doi: 10.1007/s13143-017-0047-y.
- Heo, J.-W., C.-H. Ho, T.-W. Park, W. Choi, J.-H. Jeong, and J. Kim, 2018: Changes in cold surge occurrence over East Asia in the future: role of thermal structure. *Atmosphere*, **9**, 222, doi: 10.3390/atmos9060222.
- Heo, S.-I., Y.-K. Hyun, Y. Ryu, H.-S. Kang, Y.-J. Lim, and Y. Kim, 2019: An assessment of applicability of heat waves using extreme forecast index in KMA climate prediction system (GloSea5). *Atmosphere*, **29**, 257-267, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.3.257.
- Ho, C.-H., and I.-S. Kang, 1988: The variability of precipitation in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 38-48.
- \_\_\_\_\_, H.-S. Kim, 2011: Reexamination of the influence of ENSO on landfalling tropical cyclones in Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 457-462, doi: 10.1007/s13143-011-0030-y.
- \_\_\_\_\_, H.-S. Kim, and P.-S. Chu, 2009: Seasonal prediction of tropical cyclone frequency over the East China Sea through a Bayesian Poisson-regression method. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 45-54.
- Hong, S. Y., 2004: Comparison of heavy rainfall mechanisms in Korea and the central US. *J. Meteor. Soc. Japan*. Ser. II, **82**, 1469-1479, doi: 10.2151/jmsj.2004.1469.
- \_\_\_\_\_, and J. W. Lee, 2009: Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea. *Atmospheric Res.*, **93**, 818-831, doi: 10.1016/j.atmosres.2009.03.015.
- Huschke, R. E., 1959: Glossary of Meteorology. American Meteor. Soc., Boston.
- Im, E.-S., J.-B. Ahn, and D.-W. Kim, 2012: An assessment of future dryness over Korea based on the ECHAM5-RegCM3 model chain under A1B emission scenario. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **48**, 325-337, doi: 10.1007/s13143-012-0031-5.
- Im, J., S. Park, J. Rhee, J. Baik, and M. Choi, 2016: Downscaling of AMSR-E soil moisture with MODIS products using machine learning approaches. *Environ. Earth Sci.*, **75**, 1120, doi: 10.1007/s12665-016-5917-6.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitze, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)].

- Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- Jang, W., and H.-Y. Chun, 2008: Severe downslope windstorms of Gangneung in the springtime. *Atmosphere*, **18**, 207-224.
- Jeong, J.-H., and C.-H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14704.
- \_\_\_\_\_, C.-H. Ho, B.-M. Kim, and W.-T. Kwon, 2005: Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia. *J. Geophys. Res.*, **110**, D11104, doi:10.1029/2004JD005408.
- \_\_\_\_\_, B.-M. Kim, C.-H. Ho, D. Chen, and G.-H. Lim, 2006: Stratospheric origin of cold surge occurrence in East Asia. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L14710.
- \_\_\_\_\_, D. I. Lee, and C. C. Wang, 2016: Impact of the cold pool on mesoscale convective system-produced extreme rainfall over southeastern South Korea: 7 July 2009. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 3985-4006, doi: 10.1175/MWR-D-16-0131.1.
- Jeong, Y. Y., I.-J. Moon, and S.-H. Kim, 2013: A study on upper ocean response to typhoon Ewiniar (0603) and its impact. *Atmosphere*, **23**, 205-220, doi: 10.14191/Atmos.2013.23.2.205.
- Jin, C.-S., C.-H. Ho, D.-S. R. Park, W. Choi, D. Kim, J.-H. Lee, K.-H. Chang, and K.-R. Kang, 2014: Development of the automated prediction system for seasonal tropical cyclone activity over the western North Pacific and its evaluation for early predictability. *Atmosphere*, **24**, 123-130, doi: 10.14191/Atmos.2014.24.1.123.
- Jo, E., C. Park, S.-W. Son, J.-W. Roh, G.-W. Lee, and Y.-H. Lee, 2020: Classification of localized heavy rainfall events in South Korea. *Asia-Pac J. Atmos. Sci.*, **56**, 77-88, doi: 10.1007/s13143-019-00128-7.
- Joung, C.-H., 1975: A study on variation of some daily weather elements with day during polar outbreak at selected stations in South Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **11**, 1-10.
- \_\_\_\_\_, and H.-R. Byun., 1987: A case study of global circulation of the atmosphere during a cold surge in East Asia. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 23-33.
- Jun, K. Y., H.-R. Byun, and D.-W. Kim, 2008: Lag-correlation of Korean drought in East Asia. *Atmosphere*, **18**, 249-266.
- Jun, S., W. Lee, K. Kang, K.-Y. Byun, J. Kim, and W.-T. Yun, 2015: Applicability of the superensemble to the tropical cyclone track forecasts in the western North Pacific. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 39-48, doi: 10.1007/s13143-014-0058-x.
- Jung, S. P., S. R. In, H. W. Kim, J. Sim, S. O. Han, and B. C. Choi, 2015: Classification of atmospheric vertical environment associated with heavy rainfall using long-term radiosonde observational data, 1997-2013. *Atmosphere*, **25**, 611-622, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.4.611 (in Korean with English abstract).
- Jung, J. I., K. Lee, and S. Kim, 2020: Text mining and network analysis of news articles for deriving socio-economic damage types of heat wave events in Korea: 2012-2016 cases. *Atmosphere*, **30**, 237-248, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.3.237.
- Jung, H.-S., G.-H. Lim, and J.-H. Oh, 1999: Interpretation of the transient variations in the time series of precipitation amounts in Seoul. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**, 354-371.
- Kam, J., K. Stowers, and S. Kim, 2019: Monitoring of drought awareness from Google Trends: a case study of the 2011-17 California drought. *Weather, Climate, and Society*, **11**, 419-429, doi: 10.1175/WCAS-D-18-0085.1.
- Kamruzzaman, M., S. Hwang, J. Cho, M.-W. Jang, and H. Jeong, 2019: Evaluating the spatiotemporal characteristics of agricultural drought in Bangladesh using effective drought index. *Water*, **11**, 2437, doi: 10.3390/w11122437.
- Kang, I.-S., C.-H. Ho, and S.-S. Kim, 1987: Interannual and intraseasonal variations of summer precipitation simulated by a GCM and the influence of tropical Pacific SST on the interannual variability. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 12-24.
- \_\_\_\_\_, Y.-M. Lee, and S.-I. An, 1995: Interannual variability of typhoon activity over the western North Pacific and El-Nino. *J. Korean Meteor. Soc.*, **31**, 15-26.
- Kang, M., M. Belorid, and K.-R. Kim, 2020: Development of impact-based heat health warning sSystem based on ensemble forecasts of perceived temperature and its evaluation using heat-related patients in 2019. *Atmosphere*, **30**, 195-207, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.2.195.
- Kang, K.-A., and H.-R. Byun, 2004: On the developing processes of the climatological drought over the East-Asia in 1982. *J. Korean Meteor. Soc.*, **40**, 467-483.
- Kim, B.-J., S.-L. Lee, and G.-U. Park, 2009: Characteristics of strong wind occurrence in the southwestern region of Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitigation*, **9**, 37-44.

- Kim, B.-G., M.-G. Kim, T.-Y. Kwon, G.-M. Park, Y.-D. Han, S.-B. Kim, and K.-H. Chang, 2021: Observation and understanding of snowfall characteristics in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **31**, 461-472, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.461 (in Korean with English abstract).
- Kim, B.-M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.-H. Yoon: 2014, Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nature Commun.*, **5**, 4646, doi: 10.1038/ncomms5646.
- Kim, D., K.-J. Ha, and J.-H. Yeo, 2021: New drought projections over East Asia using evapotranspiration deficits from the CMIP6 warming scenarios. *Earth's Future*, **9**, e2020EF001697, doi: 10.1029/2020EF001697.
- \_\_\_\_\_, and J. Rhee, 2016: A drought index based on actual evapotranspiration from the Bouchet hypothesis. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 10277-10285, doi: 10.1002/2016GL070302.
- Kim, D.-K., Y.-H. Kim, and K.-Y. Chung, 2013: Vertical structure and microphysical characteristics of typhoon Kompasu (2010) at landfall. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 161-169, doi: 10.1007/s13143-013-0017-y.
- Kim, D.-W., and H.-R. Byun, 2009: Future pattern of Asian drought under global warming scenario. *Theor. Appl. Climatol.*, **98**, 137-150.
- \_\_\_\_\_, and H.-R. Byun, 2010: Spatiotemporal characteristics and assessment of historical drought in Korea. In : López-Fran cos A. (comp.), López-Fran cos A. (collab.). Economics of drought and drought preparedness in a climate change context. Zaragoza : CIHEAM / FAO / ICARD A / GD AR / CEIGRAM / MARM, 101-105 pp. (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 95).
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2012: Atmospheric vertical structure of heavy rainfall system during the 2010 summer intensive observation period over Seoul metropolitan area. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 148-161, doi: 10.5467/JKESS.2012.33.2.148 (in Korean with English abstract).
- Kim, G., and Coauthors, 2018: Future changes in extreme precipitation indices over Korea. *Int. J.-Climatol.*, **38**, e862-e874, doi.org/10.1002/joc.5414.
- Kim, H., B.-J. Kim, H.-G. Nam, J.-H. Jung, J.-K. Shim, 2020: Climatological spatio-temporal variation of strong wind in Korea. *Atmosphere*, **30**, 47-57, doi: 10.14191/Atmos.2020.30.1.047.
- \_\_\_\_\_, M.-Y. Lee, S. Kim, Y.-K. Lim, S. D. Schubert, and A. M. Mold, 2021: Representation of tropical cyclones by the modern-era retrospective analysis for research and applications version 2. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **57**, 35-49, doi: 10.1007/s13143-019-00169-y.
- Kim, H. H., S. K. Park, D. Zupanski, and M. Zupanski, 2010: Uncertainty analysis using the WRF maximum likelihood ensemble filter system and comparison with dropwindsonde observations in typhoon Sinlaku (2008). *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 317-325, doi: 10.1007/s13143-010-1004-1.
- Kim, H.-J., and C.-H. Joung, 1980: An observational study on the development of 500 mb level baroclinic wave during polar outbreaks. *J. Korean Meteor. Soc.*, **16**, 17-29.
- \_\_\_\_\_, I.-J. Moon, and I. Oh, 2022: Comparison of tropical cyclone wind radius estimates between the KMA, RSMC Tokyo, and JTWC. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 563-576, doi: 10.1007/s13143-022-00274-5.
- Kim, H.-M., H.-G. Nam, B.-J. Kim, and J.-B. Jee, 2021: An Analysis of Observed and Simulated Wind in the Snowfall Event in Yeongdong Region on 8 February 2020. *Atmosphere*, **31**, 433-443, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.433 (in Korean with English abstract).
- Kim, J., G. Kim, C.-S. Jin, D.-K. Lee, D.-H. Cha, 2015: A study on future change in surface wind over the Korean Peninsula based on a regional climate change scenario. *J. Climate Res.*, **10**, 329-340, doi: 10.14383/cri.2015.10.4.329.
- Kim, J.-H., G.-M. Choo, B.-J. Kim, S.-H. Won, and H. J. Kwon, 2007: Performance of MTM in 2006 typhoon forecast. *Atmosphere*, **17**, 207-216.
- \_\_\_\_\_, and I.-U. Chung, 2006: Study on mechanisms and orographic effect for the springtime downslope wind-storm over the Yeongdong region. *Atmosphere*, **16**, 67-83.
- \_\_\_\_\_, K. Jan, and D. G. Lee, 2009: Characteristics of heat acclimatization for major Korean cities. *Atmosphere*, **19**, 309-318.
- \_\_\_\_\_, and D.-Y. Kim, 2013: Spatio-temporal characteristics of wind observations over South Korea: 1982-2011. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 551-560, doi: 10.1007/s13143-013-0049-3.
- \_\_\_\_\_, S.-J. Kim, J.-H. Kim, M. Hayashi, and M.-K. Kim, 2022: East Asian heatwaves driven by Arctic-Siberian warming. *Sci. Rep.*, **12**, 18025, doi.org/10.1038/s41598-022-22628-9.
- \_\_\_\_\_, and H. J. Kwon, 2007: Seasonal prediction of tropical cyclone frequency in the western North Pacific using GDAPS ensemble prediction system. *Atmosphere*, **17**, 269-279.

- \_\_\_\_\_, D. G. Lee, I.-S. Park, B.-C. Choi, and J.-S. Kim, 2006: Influences of heat waves on daily mortality in South Korea. *Atmosphere*, **16**, 269-278.
- Kim, K., W. Bang, E. C. Chang, F. J. Tapiador, C.-L. Tsai, E. Jung, and G. Lee, 2021: Impact of wind pattern and complex topography on snow microphysics during ICE-POP 2018. *Atmos. Chem. Phys.*, **21**, 11955-11978, doi: 10.5194/acp-2021-128.
- Kim, K.-H., Y.-H. Kim, and D.-E. Jang, 2009: The analysis of Changma structure using radiosonde observational data from KEOP-2007: Part II. The dynamic and thermodynamic characteristics of Changma in 2007. *Atmosphere*, **19**, 297-307.
- Kim, K.-L., and S.-U. Park, 1987: Regional secondary circulation over East Asia during a cold-air outbreak over Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 70-92.
- Kim, M.-G., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-J. Chae, J.-H. Jeong, Y.-G. Choi, and G.-M. Park, 2021: Analysis of association of snowfall with cold air damming in the Yeongdong region. *Atmosphere*, **31**, 421-431, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.421 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-H., and I.-J. Moon, 2022: Evaluation of the reliability of tropical cyclone data using ENSO. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **58**, 365-377, doi: 10.1007/s13143-021-00260-3.
- Kim, M.-K., I.-S. Kang, and C.-H. Ho, 2000: Scenario of Korean winter precipitation using large-scale predictors of a gradual CO<sub>2</sub> increasing experiment. *J. Korean Meteor. Soc.*, **36**, 65-74.
- Kim, S., C.-K. Park, and M.-K. Kim, 2005: The regime shift of the northern hemispheric circulation responsible for the spring drought in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **41**, 571-585.
- \_\_\_\_\_, W. Shao, and J. Kam, 2019: Spatiotemporal patterns of US drought awareness. *Palgrave Commun.*, **5**, 107, doi: 10.1057/s41599-019-0317-7.
- Kim, Y.-H., E.-S. Kim, M.-J. Choi, K.-M. Shim, and J.-B. Ahn, 2019: Evaluation of long-term seasonal predictability of heatwave over South Korea using PNU CGCM-WRF chain. *Atmosphere*, **29**, 671-687, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.5.671.
- Kim, Y.-H., E.-H. Jeon, D.-E. Chang, H.-S. Lee, and J.-I. Park, 2010b: The impact of T-PARC 2008 dropsonde observations on typhoon track forecasting. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 287-303, doi: 10.1007/s13143-010-1011-2.
- Kim, Y. J., B. Y. Ahn, B. J. Kim, and S. Kim, 2021: Effects of Meteorological Conditions on Cloud and Snowfall Simulations in the Yeongdong Region: A Case Study Based on Ideal Experiments. *Atmosphere*, **31**, 445-459, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.445 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y.-J., and T.-Y. Kwon, 2021: Analysis of spatial variability of surface wind during the Gangwon Yeongdong Wind Experiments (G-WEX) in 2020. *Atmosphere*, **31**, 377-394, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.377.
- \_\_\_\_\_, and C.-Y. Yoon, 1994: Forecasts of typhoon using the quasi-Lagrangian typhoon model Part III: the design and effects of wind-balanced bogus typhoon. *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 155-175.
- \_\_\_\_\_, and S.-C. Yoon, 1992: Forecasts of typhoon using the quasi-Lagrangian typhoon model Part II: bogussing and process taking serious view of mass field and comparison of the results. *J. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 379-392.
- Kim, Y. T., M. Park, and H.-H. Kwon, 2020: Spatio-temporal summer rainfall pattern in 2020 from a rainfall frequency perspective. *J. Korean Soc. Disaster and Security*, **13**, 93-104, doi: 10.21729/ksds.2020.13.4.93.
- Kim, Y.-W., and H.-R. Byun, 2006: On the causes of summer droughts in Korea and their return to normal. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 237-251.
- Korea Meteorological Administration (KMA), n.d.: Weather warning announcement standards. [Available online at <https://www.weather.go.kr/w/weather/warning/standard.do>].
- Kosatsky, T., 2005: The 2003 European heat waves. *Euro-surveillance*, **10**, doi: 10.2807/esm.10.07.00552-en.
- Kug, J.-S., J.-H. Jeong, Y.-S. Jang, B.-M. Kim, C.-K. Foland, S.-K. Min, and S.-W. Son, 2015: Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nat. Geosci.*, **8**, 759-762, doi: 10.1038/ngeo2517.
- Kwon, H. J., 1991: Reexamination of the CLIPER model in the track forecast of typhoons approaching Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **27**, 135-143.
- \_\_\_\_\_, 1998: Error analysis of typhoon movement report from RSMC Tokyo. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 258-262.
- \_\_\_\_\_, and J.-Y. Kim, 2005: On extratropical transition of tropical cyclone Mindulle. *Atmosphere*, **15**, 17-25.
- \_\_\_\_\_, and S.-H. Lee, 1993: A study of the development of the regional enhanced CLIPER model in the typhoon track forecast. *J. Korean Meteor. Soc.*, **29**, 195-204.
- \_\_\_\_\_, and J.-Y. Rhyu, 2008: A new proposition on the definition of the tropical cyclone influence on the Korean peninsula. *Atmosphere*, **18**, 43-53.
- \_\_\_\_\_, S.-H. Won, and S.-K. Park, 2006: Climatological

- differences between the two typhoon centers' tropical cyclone information in the western North Pacific. *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 183-192.
- Kwon, I.-H., H.-B. Cheong, H.-G. Kang, H.-J. Han, and J.-R. Park, 2010: Structure change of typhoon Nari (2007) in the weakening stage. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **46**, 327-340, doi: 10.1007/s13143-010-1006-z.
- Kwon, M., 2012: Estimation and statistical characteristics of the radius of maximum wind of tropical cyclones using COMS IR imagery. *Atmosphere*, **22**, 473-481, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.4.473.
- Lee, D., H.-J. Kwon, S.-H. Won, and S. K. Park, 2006: Typhoon simulation with a parameterized sea surface cooling. *Atmosphere*, **16**, 97-110.
- Lee, D.-K., 1989: An observational study of the Northern Hemisphere summertime circulation associated with the wet summer and the dry summer in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **25**, 205-220.
- \_\_\_\_\_, D.-H. Cha, C.-S. Jin, and S.-J. Choi, 2013: A regional climate change simulation over East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 1-10, doi: 10.1007/s13143-013-0058-2.
- \_\_\_\_\_, J.-C. Ha, and J. Kim, 2008a: Application of the Sawyer-Eliassen equation to the interpretation of the synoptic-scale dynamics of a heavy rainfall case over East Asia. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 49-68.
- \_\_\_\_\_, D.-E. Jang, and T.-K. Wee, 1992: Typhoons approaching Korea, 1960-1989 Part I: Statics and synoptic overview. *J. Korean Meteor. Soc.*, **28**, 133-147.
- \_\_\_\_\_, H.-R. Kim, and S.-Y. Hong, 1998: Heavy rainfall over Korea during 1980-1990. *Korean J. Atmos. Sci.*, **1**, 32-50.
- \_\_\_\_\_, J.-G. Park, and J.-W. Kim, 2008b: Heavy rainfall events lasting 18 days from July 31 to August 17, 1998, over Korea. *J. Meteor. Soc. Japan*. Ser. II, **86**, 313-333, doi:10.2151/jmsj.86.313.
- Lee, H., C. S. Jin, D. H. Cha, M. Lee, D. K. Lee, M. S. Suh, S.-Y. Hong, and H. S. Kang, 2019: Future change in tropical cyclone activity over the western North Pacific in CORDEX-East Asia multi-RCMs forced by HadGEM2-AO. *J. Climate*, **32**, 5053-5067, doi: 10.1175/JCLI-D-18-0575.1.
- Lee, J.-H., H.-S. Jeong, and C.-H. Park, 2003: Characteristics of spring drought in Korea and analysis of its cause. *Atmosphere*, **13**, 370-373.
- Lee, J. W., S. H. Eun, B.-G. Kim, and S. O. Han, 2012: An analysis of low-level stability in the heavy snowfall event observed in the Yeongdong region, *Atmosphere*, **22**, 209-219, doi: 10.14191/Atmos.2012.22.2.209 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. Y., 2022: Record heavy rain in the central region... Seoul's daily precipitation sets record high (2 reports overall). *Yonhap News*. [Available online at <https://www.yna.co.kr/view/AKR20220808148952530>].
- \_\_\_\_\_, H.-J. Kim, and Y.-R. Jeong, 2019: Influence of boreal summer intraseasonal oscillation on the 2016 heat wave over Korea. *Atmosphere*, **29**, 627-637, doi: 10.14191/ATMOS.2019.29.5.627.
- \_\_\_\_\_, J.-S. Park, K. Kang, and K.-Y. Chung, 2008: Characteristics of the extratropical transition of tropical cyclones over the western North Pacific using the cyclone phase space (CPS) diagram. *Atmosphere*, **18**, 159-169.
- Lee, M.-I., S. D. Schubert, and D. Kim, 2011: Representation of tropical storms in the northwestern Pacific by the modern-era retrospective analysis for research and applications. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **47**, 245-253, doi: 10.1007/s13143-011-0013-z.
- Lee, S.-M., and H.-R. Byun, 2009: Some causes of the May drought over Korea. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **45**, 247264.
- Lee, S.-Y., and J.-E. Kim, 2011: A study on meteorological elements effecting on large-scale forest fire during spring time in Gangwon Young-dong region, *J. Korean Soc. Hazard Mitigation*, **11**, 37-44, doi: 10.9798/KOSHAM.2011.11.1.037.
- Lee, T. Y., and Y. H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean peninsula and their classification. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **43**, 367-396.
- Lee, W.-J., J.-S. Park, and H. J. Kwon, 2007: A statistical model for prediction of the tropical cyclone activity over the western North Pacific. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43**, 175-183.
- 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, doi: 10.1002/joc.4671.
- Lee, Y.-K., and M. Kwon, 2015: An estimation of the tropical cyclone size using COMS infrared imagery. *Atmosphere*, **25**, 569-573, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.3.569.
- Lim, G.-H., 1995: Spatial and temporal evolution of the tropospheric upper and lower level winds during the cold surge periods in East Asia. *J. Korean Meteor. Soc.*, **31**, 373-392.
- Luo, M., and N.-C. Lau, 2017: Heat waves in Southern China: Synoptic behavior, long-term change, and urban-

- ization effects. *J. Climate*, **30**, 703-720, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0269.1.
- Malik, A., A. Kumar, O. Kisi, N. Khan, S. Q. Salih, and Z. M. Yaseen, 2021: Analysis of dry and wet climate characteristics at Uttarakhand (India) using effective drought index. *Nat. Hazards*, **105**, 1643-1662, doi: 10.1007/s11069-020-04370-5.
- McKee, T. B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, January 17-22, 1993. *American Meteorological Society*, Boston, Massachusetts, 179-184 pp.
- Min, K. H., C. H. Chung, J. H. Bae, and D. H. Cha, 2020: Synoptic characteristics of extreme heatwaves over the Korean Peninsula based on ERA Interim reanalysis data. *Int. J. Climatol.*, **40**, 3179-3195, doi: 10.1002/joc.6390.
- Min, S.-K., W.-T. Kwon, E.-H. Park, and Y. Choi, 2003: Spatial and temporal comparisons of droughts over Korea with East Asia. *Int. J. Climatol.*, **23**, 223-233.
- Moon, I.-J., and E.-S. Choi, 2011: A definition and criterion on typhoons approaching to the Korean Peninsula for the objective statistical analysis. *Atmosphere*, **21**, 45-55, doi: 10.14191/Atmos.2011.21.1.045.
- \_\_\_\_\_, J.-S. Shim, D. Y. Lee, J. H. Lee, I.-K. Min, and K. C. Lim, 2010: Typhoon researches using the Jeodo ocean research station: Part I. Importance and present status of typhoon observation. *Atmosphere*, **20**, 247-260.
- Moon, M., Y. Choi, and K.-J. Ha, 2016: Effect of sea surface temperature gradient induced by the previous typhoon's cold wake on the track of the following typhoon: Bolaven (1215) and Tembin (1214). *Atmosphere*, **26**, 635-647, doi: 10.14191/Atmos.2016.26.4.635.
- Moon, S. E., 1977: On the characteristics of the extraordinary weather from 1941 to 1970 in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **13**, 51-57.
- \_\_\_\_\_, B.-J. Kim, H.-A. Kim, E.-J. Seo, Z. Liu, and B. Wang, 1998: Numerical forecasting of typhoon tracks with adaptive grid model. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 177-189.
- Myoung, B., J. Rhee, and C. Yoo, 2020: Long-lead predictions of warm season droughts in South Korea using North Atlantic SST. *J. Climate*, **33**, 4659-4677, doi: 10.1175/JCLI-D-19-0082.1.
- Na, H., and W.-S. Jung, 2021: Characteristics of strong winds on the Korean Peninsula during the non-typhoon period: data analysis for 116 Years from 1904 to 2019. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **37**, 55-65, doi: 10.5572/KOSAE.2021.37.1.055.
- Nakamura, H., and T. Fukamachi, 2004: Evolution and dynamics of summertime blocking over the far East and the associated surface Okhotsk high. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 1213-1233. doi:10.1256/qj.03.101.
- Oh, H.-T., W.-T. Kwan, and W.-S. Lee, 2003: The precipitation variation in El Nino onset over Korea in September. *Atmosphere*, **13**, 314-317.
- Oh, J.-H., 1996: Study of the Asian summer monsoon for the El Nino event of 1987 and the La Nina event of 1988 with the METRI/YONU GCM. *J. Korean Meteor. Soc.*, **32**, 111129.
- \_\_\_\_\_, W.-T. Kwon, and S.-B. Ryoo, 1997: Review of the researches on Changma and future observation study (KORMEX). *Adv. Atmos. Sci.*, **14**, 207-222.
- \_\_\_\_\_, C.-E. Park, J.-W. Kim, and H.-J. Seang, 1994: Impacts of climatic change in Korea due to CO<sub>2</sub> doubling (scenarios for the precipitation change). *J. Korean Meteor. Soc.*, **30**, 335-362.
- Oh, S.-B., H.-R. Byun, and D.-W. Kim, 2014: Spatiotemporal characteristics of regional drought occurrence in East Asia. *Theor. Appl. Climatol.*, **117**, 89-101, doi: 10.1007/s00704-013-0980-3.
- Oh, S.-N., K.-J. Ha, K.-Y. Kim, and J.-W. Kim, 1998: Effects of land hydrology in northeastern Asia in a doubling CO<sub>2</sub> climate experiment. *J. Korean Meteor. Soc.*, **34**, 293-305.
- Paek, J.-S., and J.-J. Baik, 1999: Roles of symmetric and asymmetric circulations in barotropic tropical cyclone motion. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**, 1-19.
- Palmer, W. C., 1965: Meteorological Drought. Research Paper 45. US Department of commerce, *Weather Bureau*, Washington, DC, 1-58.
- Park, C., and S. Schubert, 1997: On the nature of the 1994 East Asian summer drought. *J. Climate*, **10**, 1056-1070.
- Park, C., S. W. Son, and J. H. Kim, 2021a: Role of baroclinic trough in triggering vertical motion during summertime heavy rainfall events in Korea. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 1687-1702, doi:10.1175/JAS-D-20-0216.1.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2021b: Diverse synoptic weather patterns of warm-season heavy rainfall events in South Korea. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 3875-3893, doi: 10.1175/MWR-D-20-0388.s1.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2021c: Record-breaking summer rainfall in South Korea in 2020: synoptic characteristics and the role of large-scale circulations. *Mon. Wea.*

- Rev.*, **149**, 3085-3100, doi: 10.1175/MWR-D-21-0051.1.
- Park, C. E., 2017: Spatial and temporal aspects of drought in South Korea based on standardized precipitation index (SPI) and Palmer drought severity index (PDSI). *J. Agric. Life and Environ. Sci.*, **29**, 202214, doi: 10.12972/jales.20170019.
- Park, C.-K., H.-R. Byun, R. Deo, and B.-R. Lee, 2015: Drought prediction till 2100 under RCP8.5 climate change scenarios for Korea. *J. Hydrol.*, **526**, 221-230, doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.10.043.
- \_\_\_\_\_, C.-H. Ho, D. S. R. Park, T.-W. Park, and J. Kim, 2020a: Interannual variations of spring drought-prone conditions over three subregions of East Asia and associated large-scale circulations. *Theor. Appl. Climatol.*, **142**, 1117-1131, doi: 10.1007/s00704-020-03371-5.
- \_\_\_\_\_, J. Kam, H.-R. Byun, and D.-W. Kim, 2022: A self-calibrating effective drought index (scEDI): evaluation against social drought impact records over the Korean Peninsula (1777-2020). *J. Hydrol.*, accepted, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128357.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2020b: Projections of future drought intensity associated with various local greenhouse gas emission scenarios in East Asia. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **31**, 9-19, doi: 10.3319/TAO.2019.06.16.01.
- Park, H. S., K. L. Kim, and K.-Y. Chung, 2003: The operational procedure on estimating typhoon intensity in KMA. *J. Korean Meteor. Soc.*, **39**, 291-299.
- Park, J. H., K. E. Kim, and B. H. Heo, 2009: Comparisons of development mechanisms of two heavy snowfall events occurred in Yeongnam and Yeongdong regions of the Korean peninsula. *Atmosphere*, **19**, 9-36 (in Korean with English abstract).
- Park, J. I., and H. M. Kim, 2010: Typhoon Wukong (200610) Prediction based on the ensemble Kalman filter and ensemble sensitivity analysis. *Atmosphere*, **20**, 287-306.
- Park, J.-K., and S.-E. Moon, 1995: The climatological characteristics of typhoon visit to Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **31**, 139-147.
- Park, J.-S., J.-G. Jhun, and M. Kwon, 2010: Prominent features of large-scale atmospheric circulation during spring droughts over northeast Asia. *Int. J. Climatol.*, **30**, 1206-1214, doi: 10.1002/joc.1948.
- Park, S., E. Seo, D. Kang, J. Im, and M.-I. Lee, 2018: Prediction of drought on pentad scale using remote sensing data and MJO index through random forest over East Asia. *Remote Sens.*, **10**, 1811, doi: 10.3390/rs10111811.
- Park, S. K., D.-L. Zhang, and H. H. Kim, 2008: Impact of dropwindsonde data on the track forecasts of a tropical cyclone: An observing-systems simulation experiment study. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **44**, 85-92.
- Park, S.-U., and S.-S. Kim, 1987: The Synoptic conditions in the East Asian region accompanying cold-air outbreaks over Korea during December 1985 through February 1986. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 56-90.
- Park, S.-W., H.-J. Jo, S. Beak, H. Yoo, and K. Woo, 2019: Analysis of heat-related illness surveillance in 2018. *Public Health Weekly Report*, **12**, 630-638 (in Korean with English abstract).
- Park, T.-W., J.-W. Heo, J.-H. Jeong, and C.-H. Ho, 2017: Characteristics of East Asian cold surges in the CMIP5 climate models. *Atmosphere*, **27**, 199-211, doi: 10.14191/Atmos.2017.27.2.199.
- \_\_\_\_\_, C.-H. Ho, and Y. Deng, 2014: A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia. *Climate Dyn.*, **43**, 753-770, doi: 10.1007/s00382-013-1817-6.
- \_\_\_\_\_, C.-H. Ho, and S. Yang, 2011: Relationship between the Arctic Oscillation and cold surges over East Asia. *J. Climate*, **24**, 68-83, doi: 10.1175/2010JCLI3529.1.
- \_\_\_\_\_, C.-H. Ho, S. Yang, and J.-H. Jeong, 2010: Influences of Arctic Oscillation and Madden-Julian Oscillation on cold surges and heavy snowfalls over Korea: A case study for the winter of 2009-2010. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **115**, D23122, doi: 10.1029/2010JD014794.
- \_\_\_\_\_, J. G. Hong, and D.-S. R. Park, 2020: Intra-seasonal characteristics of wintertime extreme cold events over South Korea. *Int. J. Climatol.*, **40**, 2639-2658, doi: 10.1002/joc.6356.
- Park, Y.-J., and Y.-D. Han, 2021: Analysis on the Yeongdong downslope windstorms generation condition verified by observation cases, *Atmosphere*, **31**, 405-420, doi: 10.14191/Atmos.2021.31.4.405.
- Rha, D. K., C. H. Kwak, M. S. Suh, and Y. Hong, 2005: Analysis of the characteristics of precipitation over South Korea in terms of the associated synoptic patterns: A 30 years climatology (1973-2002). *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **26**, 732-743 (in Korean with English abstract).
- Rohini, P., M. Rajeevan, and A. K. Srivastava, 2016: On the variability and increasing trends of heat waves over India. *Sci. Rep.*, **6**, 26153, doi: 10.1038/srep26153.
- Ryoo, S.-B., and W.-T. Kwon, 2002: Climatological characteristics of cold winter and cold days over South



- Korea. *Atmosphere*, **12**, 288-291 (in Korean).
- Seo, E., M. I. Lee, S. D. Schubert, R. D. Koster, and H. S. Kang, 2020: Investigation of the 2016 Eurasia heat wave as an event of the recent warming. *Environ. Res. Lett.*, **15**, 114018, doi: 10.1088/1748-9326/abbbae.
- Seo, E.-K., and J.-G. Jhun, 1991: A case of heavy snowfalls occurred in the Korean peninsula from 29 January to 1 February 1990. *Atmosphere*, **27**, 165-179 (in Korean with English abstract).
- Seo, K. H., J. H. Son, S. E. Lee, T. Tomita, and H. S. Park, 2012: Mechanisms of an extraordinary East Asian summer monsoon event in July 2011. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, doi: 10.1029/2011GL050378.
- 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*. Ser. II, **83**, 683-709, doi: 10.2151/jmsj.83.683.
- Shin, J., R. Olson, and S. I. An, 2019: Projected heat wave characteristics over the Korean Peninsula during the twenty-first century. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 53-61, doi:10.1007/s13143-017-0059-7.
- Shin, U., and T. Y. Lee, 2015: Origin, evolution and structure of meso- $\alpha$ -scale lows associated with cloud clusters and heavy rainfall over the Korean peninsula. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 259-274, doi: 10.1007/s13143-015-0076-3.
- Sohn, B., G. H. Ryu, H. J. Song, and M. L. Ou, 2013: Characteristic features of warm-type rain producing heavy rainfall over the Korean Peninsula inferred from TRMM measurements. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3873-3888, doi: 10.1175/MWR-D-13-00075.1.
- Song, C. G., K. M. Lee, S. D. Lee, S. J. Nahm, D. K. Lee, J. M. Levis, and R. Jones, 1997: The parallelization of adjoint data assimilation method for the barotropic tropical cyclone track forecast model. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **33**, 111-125.
- Song, H. J., B. Lim, and S. Joo, 2019: Evaluation of rainfall forecasts with heavy rain types in the high-resolution unified model over South Korea. *Wea. Forecasting*, **34**, 1277-1293, doi: 10.1175/WAF-D-18-0140.1.
- \_\_\_\_\_, and B.-J. Sohn, 2019: Polarizing rain types linked to June drought in the Korean peninsula over last 20 years. *Int. J. Climatol.*, **40**, 2173-2182, doi: 10.1002/joc.6325.
- Suh, A.-S., K.-L. Kim, C.-K. Lee, and M.-S. Lee, 1992: The location of the center of a typhoon from the satellite cloud images. *J. Korean earth Sci. Soc.*, **28**, 333-346.
- Steila, D., 1983: Drought analysis in four southern states by a new index. The University of Arizona.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005a: mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4423-4440.
- \_\_\_\_\_, and H. Nakamura, 2005b: Geographical dependence of upper-level blocking formation associated with intraseasonal amplification of the Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4441-4449.
- Vicente-Serrano, S. M., S. Beguería, and J. I. López-Moreno, 2010: A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate*, **23**, 1696-1718, doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2018: Global assessment of the standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) for drought analysis and monitoring. *J. Climate*, **31**, 53715393, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0775.1.
- Wang, Y., S. Wang, W. Zhao, and Y. Liu, 2022: The increasing contribution of potential evapotranspiration to severe droughts in the Yellow River basin. *J. Hydrol.*, **605**, 127310, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127310.
- Won, S.-H., H. J. Kwon, W.-J. Lee, K.-Y. Chung, K.-R. Kang, and B.-J. Kim, 2008: Algorithm for estimation of the radius of gale/hurricane wind from the TC advisory. *Atmosphere*, **18**, 15-23.
- Woo, S. H., B. M. Kim, J. H. Jeong, S. J. Kim, and G. H. Lim, 2012: Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979-2011). *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **117**, doi: 10.1029/2011JD016929.
- Yeh, S.-W., Y.-J. Won, J.-S. Hong, K.-J. Lee, M. Kwon, K.-H. Seo, and Y.-G. Ham, 2018: The record-breaking heat wave in 2016 over South Korea and its physical mechanism. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1463-1474, doi: 10.1175/mwr-d-17-0205.1.
- Yeo, S.-R., S.-W. Yeh, and W.-S. Lee, 2019: Two types of heat wave in Korea associated with atmospheric circulation pattern. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **124**, 7498-7511, doi: 10.1029/2018JD030170.
- Yoo, Y.-E., S.-W. Son, H.-S. Kim, and J.-H. Jeong, 2015: Synoptic characteristics of cold days over South Korea and their relationship with large-scale climate variability. *Atmosphere*, **25**, 435-447, doi: 10.14191/Atmos.2015.25.3.435.
- Yoon, D., D. H. Cha, G. Lee, C. Park, M. I. Lee, and K. H. Min, 2018: Impacts of synoptic and local factors on heat wave events over southeastern region of Korea

- in 2015. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, **123**, 12-081, doi: 10.1029/2018JD029247.
- Yoon, S.-C., and G.-B. Lee, 1990: On the movement of a typhoon in a non-divergent barotropic atmosphere. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **26**, 25-37.
- \_\_\_\_\_, and K.-S. Park, 1990: Characteristics of the typhoons approaching Korea and the performance of the WPCLPR model. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **26**, 104-110.
- Zhang, P., J.-H. Jeong, J.-H. Yoon, H. Kim, S.-Y. S. Wang, H. W. Linderholm, K. Fang, X. Wu, and D. Chen, 2020: Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. *Science*, **370**, 1095-1099, doi: 10.1126/science.abb3368.
- Zhang, Y., K. R. Sperber, and J. S. Boyle, 1997: Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: results from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605-2619.