

## 기록적인 2023/24년 한반도 겨울 강수 특성 및 대기패턴의 영향

김형규<sup>1)</sup> · 송강현<sup>2)</sup> · 이준석<sup>1)</sup> · 김주완<sup>1)\*</sup> · 김백민<sup>3)</sup> · 장은철<sup>1)</sup>  
<sup>1)</sup>공주대학교 대기과학과, <sup>2)</sup>사단법인 넥스트, <sup>3)</sup>부경대학교 환경대기과학과  
(접수일: 2025년 2월 8일, 수정일: 2025년 2월 27일, 게재확정일: 2025년 2월 28일)

### Characteristics of Record-Breaking Precipitation in 2023/24 Winter over the Korean Peninsula and Relevant Atmospheric Patterns

Hyeong-Gyu Kim<sup>1)</sup>, Kanghyun Song<sup>2)</sup>, Junseok Lee<sup>1)</sup>, Joowan Kim<sup>1)\*</sup>,  
Baek-Min Kim<sup>3)</sup>, and Eun-Chul Chang<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Gongju, Korea

<sup>2)</sup>NEXT group, Korea

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

(Manuscript received 8 February 2025; revised 27 February 2025; accepted 28 February 2025)

**Abstract** This study investigates the atmospheric characteristics of the 2023/24 winter season (December to February) over the Korean Peninsula, which shows unusual precipitation and warm weather, and analyzes the associated changes in atmospheric patterns across the Northern Hemisphere. The daily average precipitation was about  $2.6 \text{ mm day}^{-1}$  during the 2023/24 winter in the observational data from Korean Meteorological Administration, which was approximately 2.5 times higher than the climatology. The primary reason for this precipitation is the advection of warm and moist air from lower latitudes. This intensified advection during this season is driven by two main factors: (1) a poleward shift in the storm track due to an anomalous high-pressure system over the East Sea and (2) anomalous anticyclonic circulation (AAC) over the Maritime Continent. The poleward shift in the storm track was caused by the northward movement of the East Asian jet stream, creating strong baroclinic instability around the Korean Peninsula. This led to the intensified meridional heat and moisture fluxes through low-pressure systems. Additionally, Rossby wave propagation, originating from central Siberia, influenced advection by establishing high pressure over the East Sea in February 2024. The AAC, induced by suppressed convection due to Walker Circulation and El Niño conditions, further contributed to warm, moist air inflow through southerly winds.

**Key words:** 2023/24 winter precipitation, Storm track, Rossby wave propagation, El Niño

## 1. 서론

대설을 포함하는 한반도 겨울철 강수는 태풍, 집중 호우에 이어 3번째로 높은 기상 재해 피해액을 기록

하고 있으며(Ahn et al., 2015), 2022년 기준으로 과거 10년간 지속적인 재산피해를 유발했다(MOIS, 2022; Lee and Song, 2025). 또한 2023년 12월 30일에 서울에서 내린 눈은 12 cm를 넘어 12월에 관측된 1981년 12월 19일 폭설 이래 42년만에 최대 적설량을 기록하였으며, 2023/24년 겨울에 관측된 강수와 기온도 이례적으로 높은 값을 보였다. 기상청에서 발표한 2023년 겨울 기후분석에 따르면 1973년 이후로 겨울철 기간 동안 가장 많은 강수량이 관측되었으며, 기온도

\*Corresponding Author: Joowan Kim, Department of Atmospheric Science, Kongju National University, 56 Gongjudaehakro, Gongju 32588, Korea.  
Phone: +82-41-850-8530, Fax: +82-41-850-8530  
E-mail: joowan.k@gmail.com

한 두 번째로 높은 해로 확인된다. 온난화에 따라 한반도의 겨울 강수 형태가 강설에서 강우로 바뀌며 (Choi and Kwon, 2008), 겨울철 강수가 증가하는 추세를 감안하여도(Lee et al., 2013; Oh et al., 2016), 2023/24년 겨울철은 이례적인 강수량과 기온을 기록하였다.

이러한 배경에도 한반도를 포함한 동아시아 지역의 겨울철 강수는 여름철 강수에 비해 강도가 약하고 피해가 적어 상대적으로 변동성에 대한 이해와 관심이 부족하다(Choi and Kwon, 2008; Ma et al., 2018). 그러나 겨울 강수는 단기적으로는 교통 사고, 운송 지연 및 농가 피해 등을 유발하고, 장기적으로 수자원 관리에도 중요하다. 특히 겨울철에 내린 강수는 초봄까지 수자원을 보존하는 역할을 하기 때문에 대부분의 강수가 여름철에 집중되어 나타나는 한반도의 경우 겨울 강수의 변동성 이해가 중요하며(Choi and Kwon, 2008), 향후 온난화에 의한 적설량의 극심한 변화로 수자원에 대한 스트레스가 증가할 가능성이 높아 지속적인 관심이 필요하다(Trenberth, 2011; Diffenbaugh et al., 2013).

겨울철 한반도를 포함한 동아시아 지역 강수량에 영향을 미치는 요인들은 다양하다. 그 중 동아시아 겨울몬순(East Asian Winter Monsoon; EAWM)은 동아시아 겨울철 강수에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 동아시아 겨울몬순은 10월부터 시베리아-몽골 지역을 중심으로 형성되고, 시베리아 지역에 자리잡은 고기압이 동아시아로 확장되면서 동아시아 지역의 날씨 및 기후에 영향을 미친다(Chan and Li, 2004; Chang et al., 2006). 추가로 엘니뇨 남방진동(El Niño-Southern Oscillation; ENSO) 또한 동아시아 지역에 다습한 겨울을 유발하여 강수를 증가시키는 것으로 알려져 있다(e.g., Wu et al., 2003; Kim et al., 2012; Son et al., 2014; Liu et al., 2019). 특히, 엘니뇨 시기에 북서태평양에서 발달한 고기압성 순환장은 EAWM을 약화시키며, 온난 다습한 저위도의 공기를 북으로 수송해 동아시아 지역의 강수를 증가시킬 수 있음이 보고되었다(e.g., Zhang et al., 1996; Wang et al., 2000; Jhun and Lee, 2004; Zhou and Wu, 2010; Zhou, 2011; Ma et al., 2018).

2023/24년 겨울 또한 전지구적으로 엘니뇨의 영향을 받은 해로 알려져 있으나, 동아시아 지역은 엘니뇨가 발생했던 다른 해에 비해서도 이례적인 강수량을 보여 다양한 요인들이 영향을 미친 것으로 판단된다. 최근 연구에 따르면 인도양 다이폴 모드(Indian ocean dipole; IOD) 또한 ENSO와 연동되어 동아시아 지역의 겨울철 강수를 증가시키는 것으로 알려졌으며(Kim et al., 2017; Shiozaki et al., 2024), 태평양 십년 주기 진동(pacific decadal oscillation; PDO)에 따른

EAWM의 변화(Wang et al., 2008; Kim et al., 2014), 북대서양 진동(North atlantic oscillation; Xiao et al., 2015; Bollasina and Messori, 2018), 북극 진동(Arctic oscillation; He et al., 2017), 매든-줄리안 진동(Madden Julian oscillation; Jeong et al., 2008; Kim et al., 2020), 티벳 고원의 열적 조건(Sun and Yang, 2012), 북서태평양의 해수면온도 영향(Sun et al., 2016), 열대 서태평양 워밍풀(warm pool) 지역의 열용량(Ren et al., 2017) 등의 다양한 요인이 동아시아 지역의 겨울철 강수에 영향을 미치는 것으로 알려져 있어, 한반도 겨울 강수의 지배 메커니즘은 복잡하다.

본 연구에서는 2023/24년 겨울철 기간 동안 한반도에서 관측된 이례적인 강수와 온난한 겨울철 배경 특성을 분석하고 이와 관련된 메커니즘에 대해 살펴본다. 2장에서는 분석을 위해 사용된 자료에 대한 설명을, 3장에서는 2023/24년 한반도 겨울철 특성과 이와 관련된 배경을 논의한다. 4장에서는 이례적인 기상 배경을 형성하는데 영향을 미칠 수 있는 요인들을 서술하였으며, 마지막으로 5장에는 위의 내용을 요약하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 자료

한반도 겨울철 기간 동안 관측된 강수 및 강설 분포를 파악하기 위해 기상청 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에서 제공하는 종관기상관측자료(automated synoptic observing system; ASOS)를 사용하였다. 기상청에서 전국 및 광역별 평균 산출을 위해 사용되는 62개의 관측소의 자료를 활용하였으며, 겨울 강수 특성을 확인하기 위해 1990년 12월 1일부터 2024년 3월 31일까지의 일 강수량 자료를 분석하였다. 강수 일수는 강수량이 0.1 mm 이상 관측된 날로 정의하였다. 62개 관측소 모두 분석 기간 이전부터 운영되어 장기 간의 강수 변화를 분석하는데 적합할 것으로 판단된다.

한반도 겨울철 강설 변화를 확인하기 위해 같은 기간 동안 ASOS의 일 신적설량과 눈 일수를 분석하였다. 1990년 12월 1일 전부터 2024년 3월 31일까지 연속적으로 관측을 수행하는 17개의 관측소 자료를 사용하였다. 최대한 많은 관측지점의 자료를 활용하고자 중간에 관측소 위치가 일부 변경된 북강릉(104)-강릉(105), 대구(143)-대구(기)(176), 북춘천(93)-춘천(101) 지점을 연속적으로 관측된 지점으로 간주하고 분석에 포함하였다. 눈 일수는 눈에 관련된 기상현상인 눈, 소낙눈, 가루눈, 눈보라, 소낙성 진눈개비, 진눈개비, 싸락눈 현상들 중 하나가 관측된 일수로 정의된 자료를 사용하였으며, 강수 일수와 함께 눈 일수의 변화를 확인하였다.

강수/강설이 관측된 날의 배경장을 분석하기 위해

유럽 중기 기상예보 센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)에서 제공하는 ERA5 재분석 자료(ECMWF Reanalysis v5; Hersbach et al., 2020)를 사용하였다. ERA5는 앙상블 멤버(Isaksen et al., 2010)가 사용된 4D-Var (Four-Dimensional Variational Data Assimilation) 자료 동화 기법이 적용되며(Bonavita et al., 2016), 이전 버전의 재분석자료인 ERA-Interim에 비해 많은 관측자료가 자료동화되어 자료의 개선이 이루어졌다. 또한 31 km (TL639)의 수평해상도와 137개의 하이브리드 시그마-연직 좌표계로 분석 시스템의 해상도 또한 높아졌으며, 물리과정의 개선을 통해 자료의 품질이 향상되었다(Hersbach et al., 2020). 본 연구에서는 ERA5 재분석자료의 6시간 시간해상도와 1.5° × 1.5°의 공간해상도, 37개의 층으로 구성된 수평 바람, 지위고도, 온도, 비습, 해수면온도를 사용하였다.

### 2.2 분석방법

스톰트랙의 활동성을 분석하기 위해서 Chang et al. (2002)에 제시된 종관에디의 남북 열속 및 수증기속을 공간 분포를 비교하였다. Chang et al. (2002)과 유사하게 2~7일에 주기에 대한 Lanczos 밴드 패스 필터링을 적용하여 925 hPa 겨울철 시간 평균을 통해 열속 및 수증기속의 공간분포를 산출하였으며 30년(1991~2020년) 기후값으로부터 이상치를 계산하였다. 겨울철 북태평양 스톰트랙은 한반도의 동남쪽에 위치하고 있으며(Blackmon et al., 1977; Chang et al., 2002; Hoskins and Hodges, 2019), 운동량, 열, 수증기를 중위도로 수송하여 동아시아 지역의 날씨에도 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

동아시아로 유입되는 로스비파의 전파에 따른 동아시아 지역의 대기패턴 변화를 확인하기 위해 Takaya and Nakamura (2001)에서 제시된 파동속(wave activity flux)을 분석하였다. 본 연구에 사용된 수평 방향의 파동속은

$$W = \frac{P}{2|\vec{U}|} \{U(v^2 - \psi'v'_x) + V(-u'v' + \psi'u'_x), \\ U(-u'v' + \psi'u'_x) + V(u^2 - \psi'u'_y)\}$$

로 정의되며,  $P$ ,  $\vec{U} = (U, V)$ ,  $\mathbf{u}' = (u', v')$ ,  $\psi'$ 는 각각, 1,000 hPa로 정규화된 기압, 평균과 섭동으로 나누어진 수평 바람장, 지위고도의 섭동으로 계산된 유선함수를 의미한다. 장기평균과 분석 특성상 정체파 형태의 파동을 가정하였다. 본 연구에서는 6시간 자료로부터 일평균한 자료를 이용하여 모든 아노말리 분석에 대한 유의성 검정을 수행하였으며, 모수적 특성에 대한 가정을 피하기 위해 부트스트랩 기법을 적용하

였다. 검증을 위해 총 10,000번의 표본을 무작위로 추출하였으며, 95% 유의수준에서 양측 검정을 적용하였다.

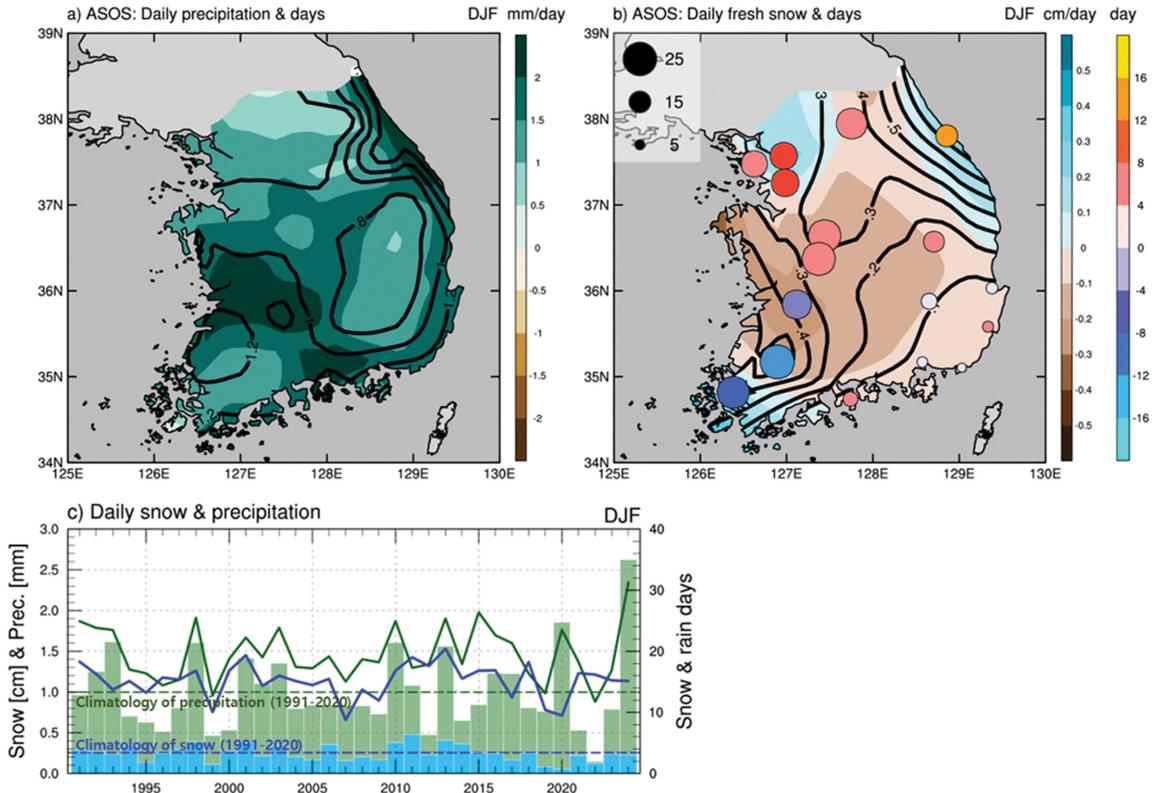
## 3. 결 과

### 3.1 2023/24년 한반도 겨울철 강수/강설 특성

Figure 1은 겨울 평균(12월~2월) 관측 일 강수량(Fig. 1a)과 신적설량(Fig. 1b), 강수 일수와 눈 일수를 분석한 결과이다. 1991년부터 2020년까지 30년 기간의 겨울철 자료를 이용해 계산된 기후값은 등치선으로 표시하였으며, 기후값 대비 2023/24년 강수 강도는 음영으로 표시하였다. 지점으로 제공되는 ASOS 자료의 공간분포를 표현하기 위해 스플라인 보간법(spline interpolation)을 적용하였다. 겨울철에는 상대적으로 높은 강수량이 해안가를 따라 나타나며, 서해안에 인접한 전라북도과 태백산맥 동쪽에 위치한 영동지방을 중심으로 일평균 1~1.5 mm 수준의 강수가 나타나는 특성을 보인다. 2023/24년 겨울철에는 전국적으로 강수량이 증가하였으며, 특히 전라북도과 강원도 영동 지역에서는 평균 대비 2표준편차(2σ) 이상 많은 강수가 기록되었다(Fig. 1a). 또한 강수 일수 역시 철원(95), 대관령(100)을 제외한 대부분의 관측소에서 증가하는 경향을 보였다(그림은 포함하지 않음).

신적설 기후값 또한 전라북도과 영동지역에서 강하게 나타나며, 강수량과 유사한 공간 분포를 보인다. 그러나 2023/24년 겨울 신적설은 강수량과는 다르게 대부분의 내륙지역에서 감소한 것으로 확인된다. 서울을 중심으로 일부 수도권과 동해안에 인접한 영동 지역, 남해에 인접한 전라남도에서 국지적인 증가를 보이나, 기후평균 강설량이 많은 전라북도 및 충청북도 서해안 지역에서는 일 평균 0.2~0.3 cm 수준의 감소가 나타난다. 강설량이 증가한 수도권과 영동지역은 눈 일수 또한 증가하여, 평년에 비해 눈이 긴 기간 동안 많이 내릴 수 있는 환경이 조성되었을 것으로 보인다. 대부분의 충청 및 전라도 지역에서는 강설량과 유사하게 눈 일수가 감소하였으며, 강수량은 반대로 증가하는 특성을 보여 높은 기온에 의해 강설보다는 강우의 형태로 강수현상이 발달한 것을 알 수 있다. 강설량이 증가한 전라남도 해안 지역에서는 눈 일수가 줄어든 것으로 보아, 평년에 비해 단기간에 집중되어 눈이 내렸을 것으로 확인된다.

1991년부터 2024년까지 관측된 한반도의 겨울 평균 일 강수량을 비교하였을 때, 2024년 겨울은 이례적으로 많은 강수량을 보인다(Fig. 1c 시계열). 분석에 사용된 관측소 당 평년에 비해 4표준편차 수준인 2.6 mm day<sup>-1</sup>의 일 강수량이 나타나며, 강수 일수 또한 3표준편차에 근접한 31.2일로 긴 기간 동안 강수가 증가한 것으로 확인된다. 이에 비해 신적설량과 눈 일



**Fig. 1.** Daily precipitation ( $\text{mm day}^{-1}$ ) and daily fresh snowfall ( $\text{cm day}^{-1}$ ) observed from the Automated Synoptic Observing System (ASOS) during the winter season of 2023/24 in the Korean Peninsula. (a) Climatology (solid line) and anomalies (shaded) of daily precipitation using tensor spline interpolation. (b) Same as (a), but for daily fresh snowfall ( $\text{cm day}^{-1}$ ). The size and color of the circles represent the climatology and anomalies of the number of snowfall days observed at each station. (c) Averaged daily precipitation ( $\text{mm day}^{-1} \# \text{stn}^{-1}$ , green bars), daily fresh snowfall ( $\text{cm day}^{-1} \# \text{stn}^{-1}$ , blue bars), precipitation days (day, green line), and snow days (day, blue line) for ASOS station during the winter season. Climatology for precipitation and fresh snowfall are shown as dashed lines.

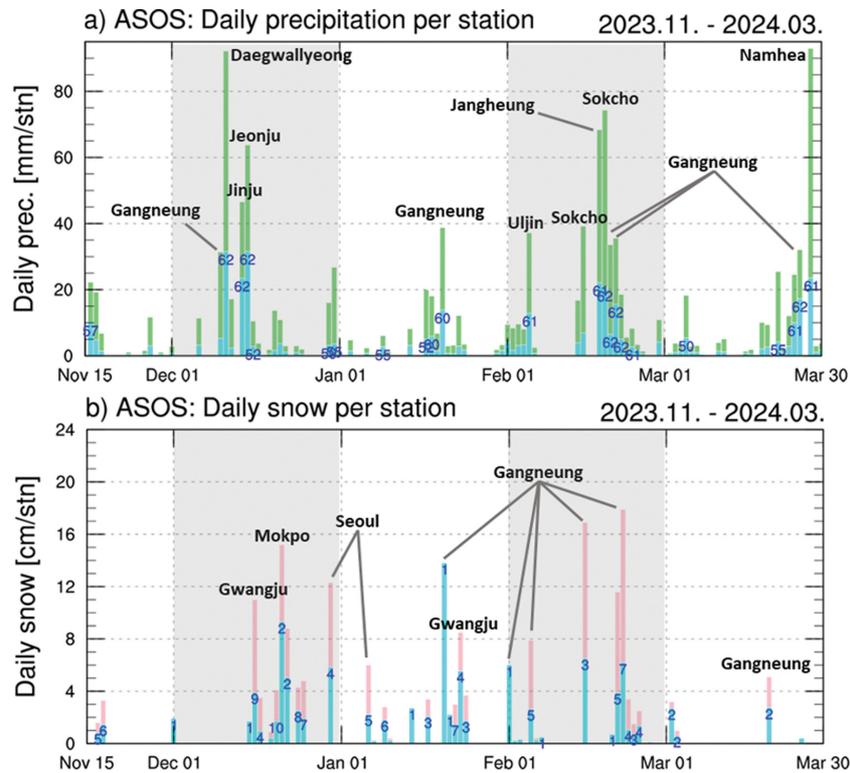
수는 평년과 비슷한 수준을 보여, 강수량의 증가는 대부분 강우의 형태로 발생한 것으로 판단된다.

2023년 11월 15일부터 2024년 3월 30일 사이에 관측된 일 강수량과 신적설량 시계열을 보면(Fig. 2), 대부분의 강수가 2023년 12월과 2024년 2월에 집중되어 나타나고 있으며,  $30 \text{ mm day}^{-1}$  이상의 강한 강수가 영동지역과 한반도 남부지역에서 확인된다. 강설은 강수량에 비해 상대적으로 균일한 분포를 보이고 있으나, 겨울 전반(12월~1월)에는 수도권과 호남지역의 강설이 후반(1월~2월)에는 영동지역 강설이 두드러지게 나타났다. 수도권과 호남지역은 시베리아 고기압의 남쪽 확장 또는 이동성 저기압의 영향으로, 영동지역은 시베리아 고기압의 동쪽 확장과 태백산맥에 의한 지형적인 효과로 강한 강설이 유도되는 것으로 알려져 있으며(Lee et al., 2008; Lee et al., 2012; Kim

et al., 2021) 각 사례의 중관 특성은 기존의 연구와 유사한 형태를 보였다(그림은 포함하지 않음).

### 3.2 2023/24년 한반도 겨울철 대기 특성

2023/24년 겨울철에 평년보다 높은 강수량이 나타난 원인을 이해하기 위해, 대류권 하부의 수증기 및 온도 구조를 분석하였다(Fig. 3). 해당 겨울의 중요한 특징으로는 중국-한반도-일본 남부로 이어지는 온난 다습한 편차가 뚜렷하며(Figs. 3a-b), 특히 한반도 남부에는 해당 편차가 강화되어 나타난다. 온도와 수증기의 편차는 지역적으로 일치하는 구조를 보여 해당 현상이 동일한 물리적/역학적 원인에 의해 유도되었음을 알 수 있다. 겨울철 한반도 남부는 일반적으로 해양에서 배출되는 잠열 및 현열에 의한 수증기와 에너지 공급의 영향을 받으나, 2023/24년 겨울철 한반



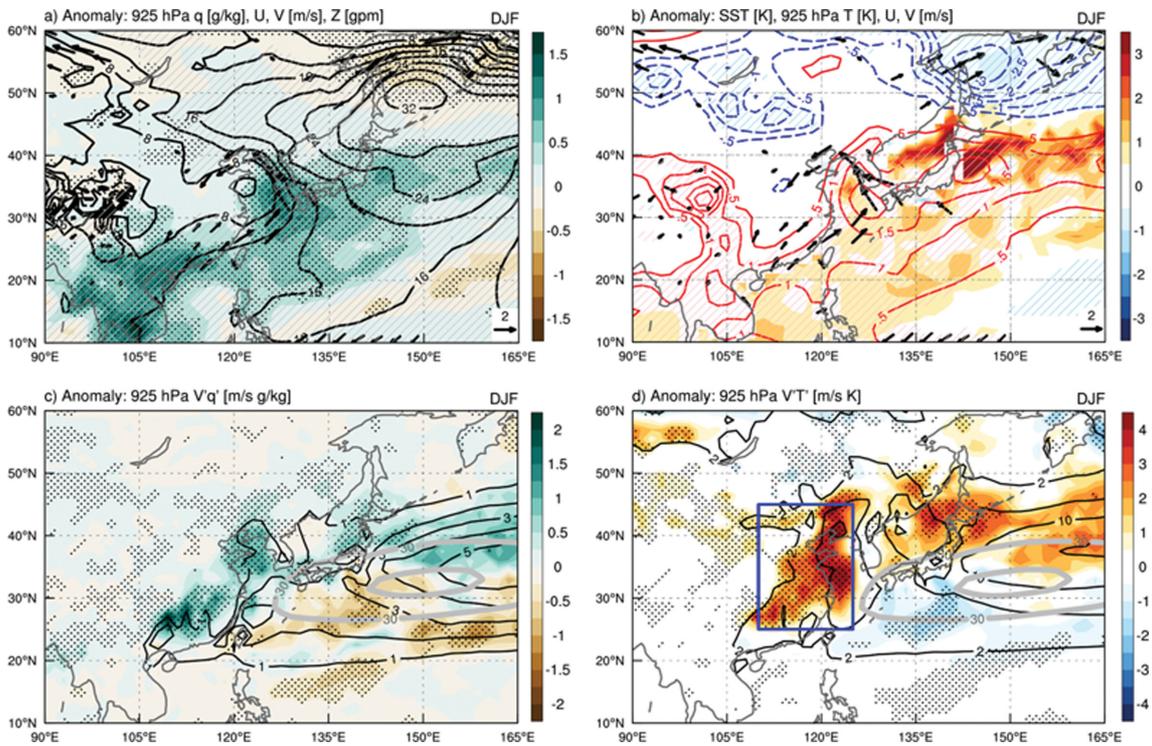
**Fig. 2.** Precipitation (mm) and fresh snowfall (cm) from the ASOS during the winter season of 2023/24. (a) Daily precipitation ( $\text{mm \#stn}^{-1}$ , light blue bar) with average for stations where rainfall is observed. The observed station numbers are marked as blue. The maximum daily precipitation (green bars) is indicated by labeling the corresponding station name separately. For visual clarity, the number of stations is not shown when fewer than 50 stations are recorded. (b) Same as (a), but for daily fresh snowfall ( $\text{cm \#stn}^{-1}$ ).

도 주변으로 나타난 온난 습윤한 편차의 주된 원인은 중국 남부 연안을 따라 나타나는 남서풍 편차에 의한 이류로 확인된다. 기후적으로 한반도는 북풍과 이로 인한 한랭 건조 이류의 영향을 받는 지역이나, 2023/24년에는 북풍의 영향이 감소하여 온난 다습한 겨울이 나타났다. 해당 남서풍 편차는 한반도에 접근할수록 서해에 위치한 저기압성 편차에 의해 남풍으로 바뀌며, 한반도 내륙까지 다량의 수증기와 온난한 공기를 유입하였다. 이는 2023/24년 겨울철 동안 이례적인 강수량과 온난 다습한 기후를 조성하는데 중요한 영향을 미친 것으로 판단된다.

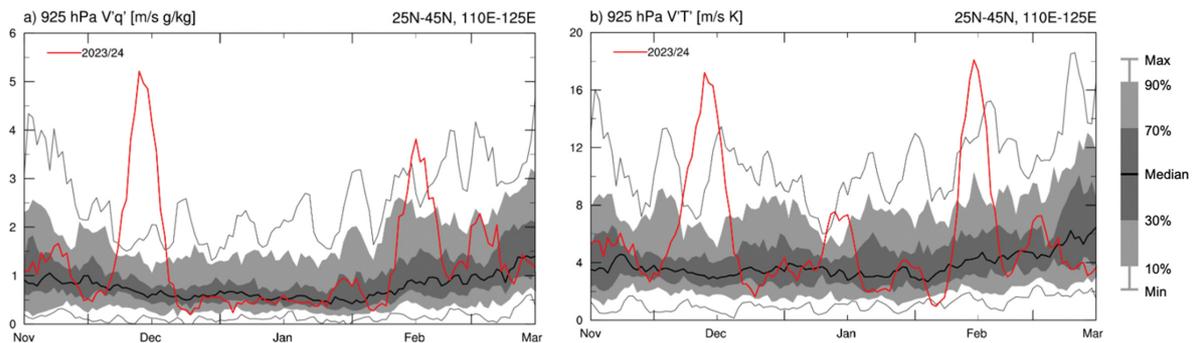
2023/24년 겨울철은 한반도 주변의 저기압 활동성이 평년에 비해 강했기 때문에 평년에 비해 온난 다습한 대기는 저기압의 활동성에 영향을 받거나 혹은 영향을 주었을 것으로 판단된다. 중관 저기압이 유도하는 온도와 수증기 이류에 의한 한반도에서의 영향을 확인하기 위해 저기압에 의한 수평 열속과 수증기 속을 분석하였다(Figs. 3c-d). 예상한 바와 같이 2023/

24년 겨울에는 한반도 주변의 열속과 수증기속이 증가하는 경향을 보인다. 그러나 이러한 증가가 주로 서해상에 집중되어 있으며, 실제로 온도와 습도의 상승이 관측된 한반도 및 일본 남부에서는 상대적으로 큰 값을 보이지 않았다. 이는 한반도의 온도와 습도 증가가 단순히 강화된 저기압의 활동성만으로는 설명될 수 없으며, 대규모의 대기 순환의 영향을 받았음을 시사한다.

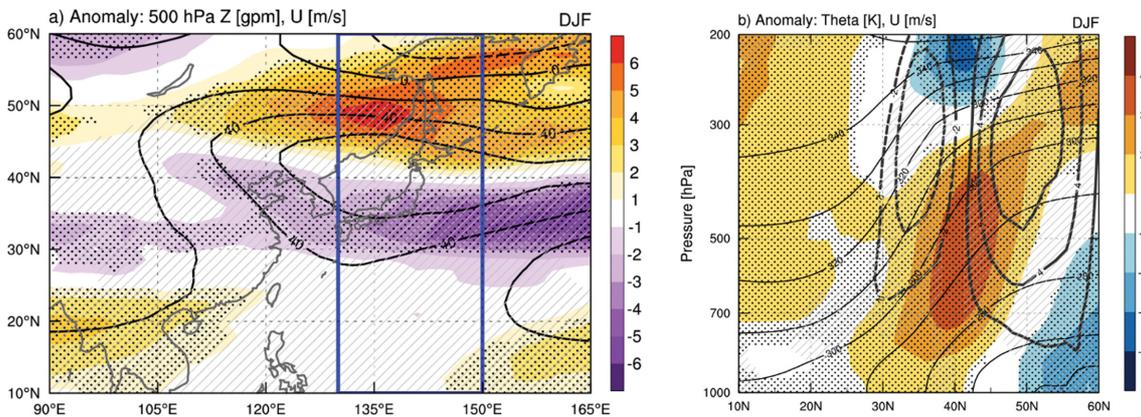
한반도 지역의 저기압의 활동성 강화(Figs. 3c-d)는 대기 순환장 변화보다는 한반도 강수를 유도한 원인으로 해석된다. Figure 4에 나타난 대류권 하층 저기압의 열속 및 수증기속 시계열을 보면, 12월과 2월의 저기압 활동성이 평년(1991~2020년) 대비 크게 증가하여 극값을 경신하며, 이는 Fig. 2의 강수량 분포와도 매우 잘 일치한다. 이러한 저기압 활동성 변화는 열속과 수증기속의 공간분포(Figs. 3c-d)에서 더욱 구체적으로 확인할 수 있다. 특히 열속과 수증기속의 변화가 제트를 중심으로 쌍극자 형태를 보이며, 이에 따라 저기압에 의한 열속과 수증기속의 위치가 강화되



**Fig. 3.** Anomaly results at 925 hPa for the 2023/24 winter season (2023/24 minus climatology). (a) Specific humidity ( $\text{g kg}^{-1}$ , shading), horizontal wind ( $\text{m s}^{-1}$ , vectors), and geopotential height (gpm, contours). (b) Sea surface temperature (K, shading) and atmospheric temperature (K, contours). (c) Meridional moisture flux ( $\text{m s}^{-1} \text{g kg}^{-1}$ , shading). (d) Meridional temperature flux ( $\text{m s}^{-1} \text{K}$ ). The result in (c-d) is calculated with band-pass filtering for 2~7 days, followed by Chang et al. (2002). The climatology of the flux (black contour) and a jet stream ( $\text{m s}^{-1}$ , gray contour) at 500 hPa is indicated in (c-d). The stippling (Hashing) indicates statistical significance at the 5% level for shading (contour) based on the two-tailed bootstrap. Only vectors statistically significant at the 5% level are shown. Figure (b) doesn't dot for visual clarity because most regions show significance.



**Fig. 4.** Meridional flux results at 925 hPa by eddy. (a) Meridional moisture flux ( $\text{m s}^{-1} \text{g kg}^{-1}$ ). (b) Meridional temperature flux ( $\text{m s}^{-1} \text{K}$ ). The fluxes are averaged for the blue box ( $25^{\circ}\text{N}-45^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}\text{E}-125^{\circ}\text{E}$ ) in Fig. 3d with 7 day moving average. The 2023/24 winter season indicates a red line, and minimum/maximum (median) values show a gray (black) line. The lower and upper boundaries for light (dark) gray boxes indicate the range of 10-90% (30-70%) from 1990/91 to 2019/20.



**Fig. 5.** Anomaly results for the 2023/24 winter season (2023/24 minus climatology). (a) Geopotential height (gpm, contour) and zonal wind ( $m s^{-1}$ , shading). (b) Zonally averaged potential temperature (K, shading) and zonal wind ( $m s^{-1}$ , contour) in the blue box ( $130^{\circ}E-150^{\circ}E$ ) in (a). The climatological structure of potential temperature shows a black contour. The stippling (Hashing) represents statistical significance at the 5% level. Solid and dashed contours indicate positive and negative values, respectively.

고 북상하는 경향이 뚜렷하게 나타난다. 이러한 북상은 일반적으로 한반도 남쪽에 위치한 겨울철 동아시아 제트(Fig. 5a)에서도 동일하게 발견되며, 제트기류와 스톱트랙의 북상이 2023/24년 겨울 한반도 주변에서 저기압 활동 강화의 원인으로 확인된다. 또한 열속과 수증기속의 변화는 음의 값보다 양의 값이 큰 비대칭적 구조를 보이는데 이는 저기압의 활동성 강화를 의미하며, 한반도 주변의 온난다습한 대기의 영향으로 저기압의 발달과 강수 과정이 강화되었음을 확인할 수 있다.

2023/24년 겨울철에 발생한 제트기류의 북상은 동해 및 일본에서 장시간 관측된 대류권 상층의 고기압과 관련이 있는 것으로 보인다(Fig. 5). 고기압을 중심으로 상층 제트의 북상이 뚜렷하게 나타나고, 대류권 중하층에는 강한 양의 온도(온위) 편차가 나타나 해당지역 온도 증가로 인한 온도경도 지역의 북상이 있음을 알 수 있다. 해당 지역에서 관측된 양의 온도 편차에 의한 온도 경도의 북상은 지균균형을 통해 상층 제트의 북상에 기여할 뿐 아니라, 경압 불안정의 북향 강화를 야기하여 저기압이 발달하기 쉬운 배경을 제공한다(Holton, 1972). 이러한 온난 편차는 동해 및 북태평양 지역에서 관측된 양(+)의 해수면 온도 편차(Fig. 3b)와 공간적으로 잘 일치하며, 음(-)의 PDO 위상에서 나타나는 해수면 온도 패턴과 유사한 양상을 보여준다. 이는 제트기류 및 스톱트랙의 북상에 PDO가 일정 부분 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 그러나 해당 시기에 시베리아 지역에서 발달한 로스비파가 고기압성 편차가 나타나는 지역으로 수렴하는 특성도 동시에 나타나(4장에 서술) 2023/24년 겨울에 발달한

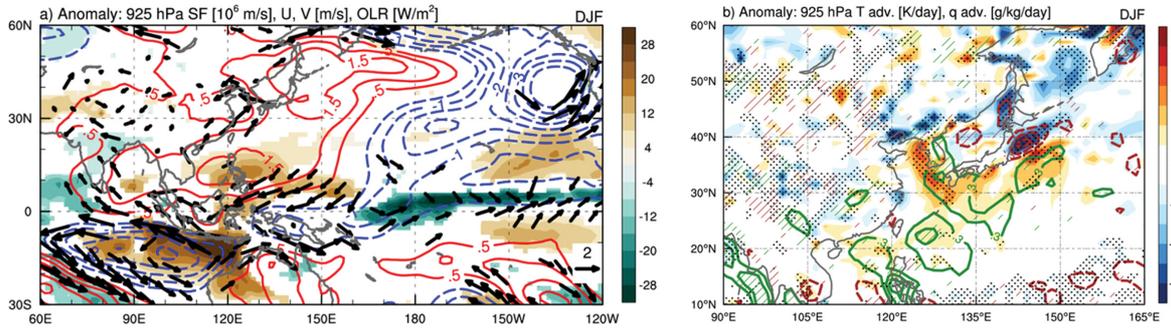
고기압 편차의 주요 요인을 규명하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4. 2023/24년 겨울철 대기 변화의 물리적 원인

본 연구에서는 유례없이 많은 강수가 발생한 2023/24년 겨울철 대기 특징으로 1) 한반도의 온난다습한 하부 대류권과 2) 동아시아 제트의 북상을 제시하였다. 제트의 북상은 스톱트랙에서 발달하는 저기압이 한반도에 직접적인 영향을 미칠 수 있도록 하였으며, 한반도에서의 온난다습한 대류권은 저기압의 발달을 강화하여 많은 강수 현상을 유발하는데 기여한 것으로 보인다. 4장에서는 이러한 대기를 형성하는데 영향을 미칠 수 있는 물리적 원인들을 제시하고 그 관계를 이해하고자 하였다.

##### 4.1 온난다습한 대기 환경 형성의 잠재적 원인

2023/24년 겨울철의 두드러진 특징은 한반도 주변의 온난다습한 대기 환경이다. 온난다습한 공기는 인도차이나반도에서 시작하여 중국 남부, 한반도를 거쳐 일본 남부지역까지 이어져 대규모 순환장이 해당 현상에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다(Fig. 3). 또한 온도와 수증기 편차는 한반도를 중심으로 서쪽(동쪽)에 형성된 저기압(고기압) 편차와 구조적으로 잘 일치하여 해당 기압배치가 온도 및 수증기 편차에 영향을 미쳤음을 보인다. 2023/24년 겨울철 지위구조는 전형적인 겨울철 기압배치인 서고동저와 반대로 나타나며, 겨울 몬순 순환의 약화에 의해 한반도를 포함한 동남아시아 지역이 시베리아 기단의 영향을 적게



**Fig. 6.** Anomaly results for the 2023/24 winter season (2023/24 minus climatology). (a) Outgoing longwave radiation ( $\text{W m}^{-2}$ , shading), stream function ( $10^6 \text{ m s}^{-1}$ , contour), and horizontal wind at 925 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ , vector). Only values statistically significant at the 5% level are shown, except for the stream function. (b) The advection for temperature ( $\text{K day}^{-1}$ , shading) and specific humidity ( $\text{g kg}^{-1} \text{ day}^{-1}$ , contour). The stippling (Hashing) represents statistical significance at the 5% level. Solid and dashed contours indicate positive and negative values, respectively.

받았던 것으로 보인다.

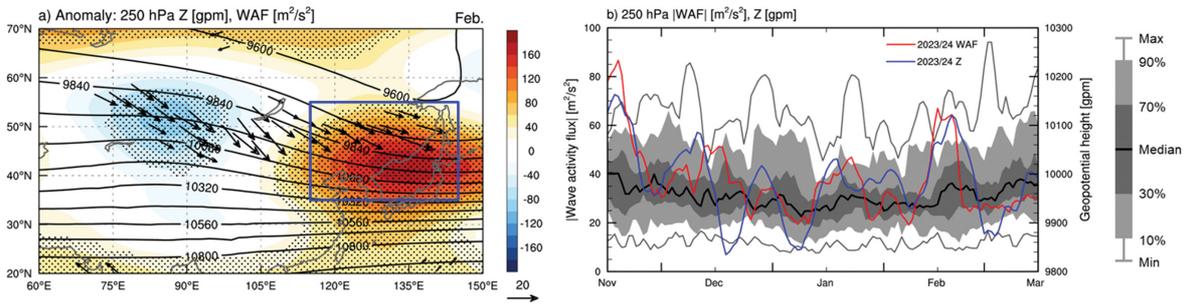
Jhun and Lee (2004)에 따르면, 약한 동아시아 겨울 몬순은 양의 북극 진동과 밀접한 관계를 보인다. 그러나 2023/24년 겨울철에는 뚜렷한 양의 북극진동이 나타나지 않았으며, 엘니뇨의 영향이 더 작용한 것으로 확인된다. Figure 6은 2023/24년 겨울철에 대한 하층 순환장과 이류를 나타낸 그림으로, 엘니뇨에 의한 동태평양에서의 강화된 대류와 서태평양에서 대류 억제된 워커 순환(Walker Circulation)의 약화를 보인다. 이러한 변화는 하층에서 필리핀 해를 중심으로 고기압성 아노말리 순환을 유도하며(Wang et al., 2000), 중국 연안을 따라 한반도로 유입되는 남서풍을 형성한다(Zhang et al., 1996). 결과적으로 동아시아 지역으로의 온난다습한 공기 이류가 강화된다(Fig. 6b). Wang et al. (2000)에 따르면 서태평양의 고기압성 순환은 대류 억제에 의한 단열 냉각으로 발생한 Gill-형태 반응(Gill-type response; Gill, 1980)이며, 엘니뇨가 발달하는 겨울철에 나타나는 것으로 알려져 있다(Zhang et al., 1996; Wang et al., 2000; Wu et al., 2003).

남풍의 강화는 인도양에 의한 추가적인 기여가 있는 것으로 알려져 있다(Watanabe and Jin, 2002; Kim et al., 2017; Shiozaki et al., 2024). 특히, 엘니뇨 시기에 서인도양이 온난하고 동인도양이 한랭해지는 양의 IOD가 강해지면, 필리핀 해를 중심으로 대류가 억제되고 고기압성 아노말리 순환을 강화한다. 이는 동아시아 지역으로 유입되는 남풍을 추가적으로 강화시킬 수 있는 배경으로 작용한다. 2023/24년 겨울철 또한 강한 양의 IOD가 확인되며, 필리핀 해의 대류 억제를 통한 남풍 강화에 일부 기여했을 것으로 보인다.

#### 4.2 동해상 정체성 고기압

2023/24년 겨울철 강수에 기여한 동해상 정체성 고기압은 Son et al. (2014)에서 논의된 쿠로시오 고기압과 유사한 패턴을 보이며, 필리핀해의 고기압성 아노말리 순환과 함께 남풍을 형성하는 중요한 역할을 한다. Son et al. (2014)은 쿠로시오의 정체성 고기압 편차가 엘니뇨 시기에 적도에서 형성되는 열적 강제력에 의해 발달한다고 제시하였다. Park and Son (2024)는 선형 순압 모델(linear barotropic model)을 이용하여 엘니뇨와 관련된 서인도양 지역의 대류 및 서태평양에서의 대류 억제 현상을 열적 강제력에 따른 대기 반응으로 확인하였다. 이 열적 강제력은 서인도양과 서태평양에서 로스비파를 유도하고, 동해상 정체성 고기압 형성에 기여할 수 있음을 보여준다. 실제로 엘니뇨와 동해상 정체성 고기압은 유의미한 상관관계를 가지며(e.g., Son et al., 2014; Geng et al., 2023), 서태평양 지역에서 대류활동이 약할 때 나타나는 전형적인 패턴과 유사하다. 서태평양 지역의 대류활동에 따라 사례를 분류한 후 분석한 합성장 결과는 선형 연구들과 유사하게 동해상 정체성 고기압의 존재를 지지한다(결과는 제시하지 않음). 그러나 한반도에 대한 열대 대류의 원격 영향은 로스비파 전파 경로에 영향을 미치는 대기패턴에 따라서 한 계절 내에서도 다르게 나타나기 때문에(e.g., Park and Son, 2024), 향후 이에 대한 계절내 규모의 자세한 분석이 요구된다.

이 외에도 PDO가 2023/24년 겨울철에 영향을 미쳤을 가능성을 고려해 볼 수 있다. 일반적으로 2023/24년 겨울철과 같이 음의 PDO가 나타나면 북서태평양의 해수면온도가 평년보다 더 온난하게 나타나며, 동아시아 지역에 온난하고 많은 강수가 나타나는 것으로 알려져 있다(Mantua and Hare, 2002). Chu et al.



**Fig. 7.** (a) Anomaly results at 250 hPa for geopotential height (gpm, contour) and horizontal wave activity flux ( $m^2 s^{-2}$ , vector) for February 2024. Climatology of geopotential height indicates using black contour. The stippling represents statistical significance at the 5% level. Only vectors statistically significant at the 5% level are shown. (b) The amplitude of horizontal wave activity flux ( $m^2 s^{-2}$ ) and geopotential height (gpm) for the blue box ( $35^{\circ}N-55^{\circ}N, 115^{\circ}E-145^{\circ}E$ ) in (a) with 7 days moving average. The result of 2023/24 indicates a red line for amplitude and a blue line for geopotential height. The minimum/maximum (median) of the amplitude shows a gray (black) line for the period from 1990/91 to 2019/20. Lower and upper boundaries for light (dark) gray boxes indicate the range of 10-90% (30-70%).

(2020)은 음의 PDO 시기에 엘니뇨에 의한 서태평양 패턴(West Pacific Pattern)의 반응이 강화되며, 동해상에 정체성 고기압이 더 강하게 형성됨을 보였다. 또한 Wang et al. (2008)은 음의 PDO 시기에 EAWM과 엘니뇨의 관계가 더욱 밀접하게 나타난다고 보고하였다. 한편, Shi (2021)에서는 음의 PDO 시기에 북서태평양 지역의 온난한 해수면온도에 의해 대기가 온난해지고 중위도 제트가 강해됨에 따라 해당 상관관계가 더욱 강해질 수 있음을 제시하였다(Fig. 5b와 유사). 그러나 이러한 관계는 다양한 기후 요인들과 복합적으로 작용할 수 있으며, 이에 대한 구체적인 메커니즘을 규명하기 위한 추가 연구가 필요하다.

마지막으로 2023/24년 겨울철에 관측된 동해상의 정체성 고기압 편차는 고위도에서 동아시아로 전파되는 로스비파의 영향도 일부 받은 것으로 분석된다. Figure 7은 2024년 2월 동안 대류권 상층에서의 수평 파동속과 지위고도 아노말리를 보여준다. 해당 기간 시베리아 내륙에서 동해로 전파되는 강한 수평 파동속이 확인되었으며, 수평 파동속의 전파가 끝나는 동해 지역에서는 양의 지위고도 편차가 나타났다. 이는 시베리아를 거쳐서 전파된 고위도의 로스비파가 2024년 2월에 강하게 나타난 동해상 정체성 고기압과 밀접하게 관련되어 있으며, 해당 기간 동안 고기압이 다른 시기에 비해 강하게 나타난 이유를 설명한다(Fig. 7). 2023년 12월에도 평년 대비 다소 강한 고기압이 관측되었으나, 이 시기에는 고위도 로스비파와 동해상 정체성 고기압 간의 뚜렷한 관계는 나타나지 않았다. 고위도로부터 전파된 로스비파는 엘니뇨와는 별개의 요인으로, 동해상 정체성 고기압을 강화하는 보조적 역할을 한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 한반도의 2023/24년 겨울 특성을 파악하기 위해 1990년 12월 이후의 기간에 대해 분석하였다. 2023/24년 겨울철은 분석 기간 동안 가장 많은 강수량을 기록했으며, 두 번째로 높은 기온이 관측되었다. 평년 대비 약 2.5배에 달하는 강수량이 주로 12월과 2월에 집중되었으며, 강설 또한 유사한 시기에 관측되었다. 그러나 평년보다 온난한 대기 상태로 인해 강설의 유의미한 증가는 나타나지 않았고, 강우가 더 우세하게 형성되었다. 이 시기의 온난다습한 대기 상태는 남해를 중심으로 뚜렷하게 나타났으며, 잠열과 현열에 의한 열과 수증기 공급 영향이 일부 있으나, 중국 연안을 따라 한반도로 유입된 남풍을 통한 저위도의 온난 다습한 공기 수송이 강수량 증가에 더 중요한 역할을 한 것으로 판단된다.

강수량에 직접적인 영향을 미친 저기압의 활동은 12월과 2월에 집중되었으며, 해당 시기 저기압에 의한 수증기와 열의 북향 수송은 서해를 중심으로 평년보다 강하게 나타났다. 이러한 저기압 영향 증가는 상층 제트의 북상과 한반도 지역의 경압 불안정 강화에 따른 것으로 분석된다. 제트의 북상은 동해에서 발생한 양의 지위고도 아노말리와 맞물려 나타나며, 이는 연직으로 온난한 대기에 의해 형성된 것으로 확인된다. 이러한 현상은 평년에 비해 온난했던 동해의 해수면 온도 패턴과 일치하며, 상층 대기에서 남북 온도 경도를 강화하여 제트의 북상을 유도한 것으로 분석된다.

본 연구에서는 대규모 배경 순환장 변화의 원인을 이해하기 위해 동아시아 겨울 몬순에 대한 엘니뇨의

영향을 분석하였다. 엘니뇨 시기에는 약화된 워커 순환과 서태평양 지역의 대류 감소 현상이 나타나며, 이에 대한 Gill-형태 반응을 통해 필리핀해 지역에 고기압성 아노말리 순환이 유도된다. 이 순환은 저위도의 온난다습한 공기를 동아시아 지역으로 이류시켜, 겨울철 한반도를 포함한 동아시아 지역의 강수를 강화할 수 있다. 해당 메커니즘은 양의 IOD가 나타날 때 더욱 강하게 발현되는 것으로 알려져 있으며, 2023/24년 겨울철에도 양의 IOD가 확인되어 온난다습한 공기를 수송하는데 영향을 준 것으로 보인다.

동해상에 나타난 정체성 고기압은 상층제트와 스톱트랙의 북상에 기여하여 한반도 지역 저기압 영향을 증가시킨 것으로 판단된다. 이러한 정체성 고기압은 일반적으로 적도 지역의 열적 강제력에 대한 로스비파 반응으로 형성되는 것으로 알려져 있다. 그러나 2023/24년 겨울철에는 적도의 열적 강제력뿐만 아니라 음의 PDO로 인한 북서태평양의 온난한 해수면온도, 고위도에서 전파된 로스비파의 영향이 복합적으로 섞여있는 것으로 분석된다. 엘니뇨 시기에 음의 PDO가 동반되면 동해상 정체성 고기압이 형성되며, 이는 동아시아 겨울 몬순과 엘니뇨의 상호작용을 강화시켜 동아시아 지역의 겨울 강수를 증가시키는 것으로 보고되고 있다. 그러나 이러한 현상의 구체적인 메커니즘은 아직 명확히 밝혀져 있지 않다.

본 연구는 2023/24년 겨울 한반도에서 발생한 이례적인 강수가 제트 기류의 북상 및 이에 따른 한반도 지역의 저기압 영향의 강화를 통해 유도되었음을 확인하였다. 그러나 열대 및 고위도의 강제력과 지역적인 해수면온도 등 다양한 원인이 겨울철 동아시아 제트 기류의 북상 및 몬순 순환의 변화에 복합적으로 작용하고 있어, 겨울철 강수량을 예측하는 데는 저기압뿐만 아니라 ENSO, IOD, PDO를 통해 동아시아 지역으로 전파되는 로스비파 및 지역적 순환장의 변화 또한 함께 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다. 이 연구는 기상청 「위험기상 선제대응 기술개발사업」(RS-2023-00240346)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Ahn, S.-H., K.-J. Park, J.-Y. Kim, and B.-J. Kim, 2015: The characteristics of the frequency and damage for meteorological disasters in Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, **15**, 133-144, doi:10.9798/KOSHAM.2015.15.2.133.
- Blackmon, M. L., J. M. Wallace, N.-C. Lau, and S. L. Mullen, 1977: An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation. *J. Atmos. Sci.*, **34**, 1040-1053, doi:10.1175/1520-0469(1977)034<1040:AOSOTN>2.0.CO;2.
- Bollasina, M. A., and G. Messori, 2018: On the link between the subseasonal evolution of the North Atlantic Oscillation and East Asian climate. *Climate Dyn.*, **51**, 3537-3557, doi:10.1007/s00382-018-4095-5.
- Bonavita, M., E. Hólm, L. Isaksen, and M. Fisher, 2016: The evolution of the ECMWF hybrid data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **142**, 287-303, doi:10.1002/qj.2652.
- Chang, C. P., Z. Wang, and H. Hendon, 2006: The Asian winter monsoon. In *The Asian Monsoon*, Springer Praxis Books. Springer, Berlin, Heidelberg, 89-127, doi:10.1007/3-540-37722-0\_3.
- Chang, E. K. M., S. Lee, and K. L. Swanson, 2002: Storm track dynamics. *J. Climate*, **15**, 2163-2183, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<02163:STD>2.0.CO;2.
- Chan, J. C., and C. Li, 2004: The East Asia winter monsoon. In *East Asian Monsoon*, 54-106, doi:10.1142/9789812701411\_0002.
- Choi, G.-Y., and W.-T. Kwon, 2008: Current and future changes in the type of wintertime precipitation in South Korea. *J. Korean Geogr. Soc.*, **43**, 1-19.
- Chu, C., H. Hu, X.-Q. Yang, and D. Yang, 2020: Midlatitude atmospheric transient eddy feedbacks influenced ENSO-associated wintertime Pacific teleconnection patterns in two PDO phases. *Climate Dyn.*, **54**, 2577-2595, doi:10.1007/s00382-020-05134-4.
- Diffenbaugh, N. S., M. Scherer, and M. Ashfaq, 2013: Response of snow-dependent hydrologic extremes to continued global warming. *Nature Clim. Change*, **3**, 379-384, doi:10.1038/nclimate1732.
- Geng, X., K.-M. Noh, K. Kim, and J.-S. Kug, 2023: Mid-winter breakdown of ENSO climate impacts in East Asia. *npj. Clim. Atmos. Sci.*, **6**, 155, doi:10.1038/s41612-023-00474-4.
- Gill, A. E., 1980: Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 447-462, doi:10.1002/qj.49710644905.
- He, S., Y. Gao, F. Li, H. Wang, and Y. He, 2017: Impact of arctic oscillation on the East Asian climate: A review. *Earth. Sci. Rev.*, **164**, 48-62, doi:10.1016/j.earscirev.2016.10.014.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global

- reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Holton, J. R., 1972: *An Introduction to dynamic meteorology*. Academic press, 319 pp.
- Hoskins, B. J., and K. I. Hodges, 2019: The Annual cycle of Northern Hemisphere storm tracks. Part I: Seasons. *J. Clim.*, **32**, 1743-1760, doi:10.1175/JCLI-D-17-0870.1.
- Isaksen, L., M. Bonavita, R. Buizza, M. Fisher, J. Haseler, M. Leutbecher, and L. Raynaud, 2010: Ensemble of data assimilations at ECMWF. ECMWF Technical Memoranda, 48 pp.
- Jeong, J.-H., B.-M. Kim, C.-H. Ho, and Y.-H. Noh, 2008: Systematic variation in wintertime precipitation in East Asia by MJO-induced extratropical vertical motion. *J. Climate*, **21**, 788-801, doi:10.1175/2007JCLI1801.1.
- Jhun, J.-G., and E.-J. Lee, 2004: A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Climate*, **17**, 711-726, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<0711:ANEAWM>2.0.CO;2.
- 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.
- Kim, D.-W., K.-S. Choi, and H.-R. Byun, 2012: Effects of El Niño Modoki on winter precipitation in Korea. *Climate Dyn.*, **38**, 1313-1324, doi:10.1007/s00382-011-1114-1.
- Kim, H., S.-W. Son, and C. Yoo, 2020: QBO modulation of the MJO-related precipitation in East Asia. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **125**, e2019JD031929, doi:10.1029/2019JD031929.
- Kim, J.-W., S.-W. Yeh, and E.-C. Chang, 2014: Combined effect of El Niño-Southern Oscillation and Pacific Decadal Oscillation on the East Asian winter monsoon. *Climate Dyn.*, **42**, 957-971, doi:10.1007/s00382-013-1730-z.
- \_\_\_\_\_, S.-I. An, S.-Y. Jun, H.-J. Park, and S.-W. Yeh, 2017: ENSO and East Asian winter monsoon relationship modulation associated with the anomalous northwest Pacific anticyclone. *Climate Dyn.*, **49**, 1157-1179, doi:10.1007/s00382-016-3371-5.
- Lee, J. G., and Y. J. Kim, 2008: A numerical simulation study using WRF of a heavy Snowfall Event in the Yeongdong Coastal Area in Relation to the North-easterly. *Atmosphere*, **18**, 339-354.
- Lee, J.-H., 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.
- Lee, M., and K. Song, 2025: Changing winters, heavy snow damage and the necessity for new statistics. Issue brief, NEXT Group [Available online at [https://nextgroup.or.kr/ko/research/public/issuebrief/view?post\\_id=441&page=1&size=10](https://nextgroup.or.kr/ko/research/public/issuebrief/view?post_id=441&page=1&size=10)].
- Lee, S., D.-H. Bae, and C.-H. Cho, 2013: Changes in future precipitation over South Korea using a global high-resolution climate model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 619-624, doi:10.1007/s13143-013-0054-6.
- Liu, J., H. Wang, E. Lu, and A. Kumar, 2019: Decadal modulation of East China winter precipitation by ENSO. *Climate Dyn.*, **52**, 7209-7223, doi:10.1007/s00382-016-3427-6.
- Ma, T., W. Chen, J. Feng, and R. Wu, 2018: Modulation effects of the East Asian winter monsoon on El Niño-related rainfall anomalies in southeastern China. *Sci. Rep.*, **8**, 14107, doi:10.1038/s41598-018-32492-1.
- Mantua, N. J., and S. R. Hare, 2002: The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanogr.*, **58**, 35-44, doi:10.1023/A:1015820616384.
- MOIS, 2022: Disaster Yearbook, 2022, Ministry of the Interior and Safety, 502 pp.
- Oh, S.-G., and Coauthors, 2016: Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios. Part 2: precipitation. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 171-189, doi:10.1007/s13143-016-0018-8.
- Park, C.-H., and S.-W. Son, 2024: Subseasonal variability of ENSO-East Asia teleconnections driven by tropical convection over the Indian ocean and Maritime Continent. *Geophys. Res. Lett.*, **51**, e2023GL108062, doi:10.1029/2023GL108062.
- Ren, Q., Z. Zhu, L. Hao, and J. He, 2017: The enhanced relationship between Southern China winter rainfall and warm pool ocean heat content. *Int. J. Climatol.*, **37**, 409-419, doi:10.1002/joc.4714.
- Shi, J., 2021: Reexamining the decadal variation in the ENSO-East Asian winter monsoon relationship. *Geophys. Res. Lett.*, **48**, e2021GL094208. doi:10.1029/2021GL094208.
- Shiozaki, M., H. Tokinaga, and M. Mori, 2024: What determines the East Asian winter temperature during El Niño?—role of the early onset El Niño and tropical Indian ocean warming. *J. Climate*, **37**, 4031-4043, doi:10.1175/JCLI-D-23-0627.1.
- Son, H.-Y., J.-Y. Park, J.-S. Kug, J. Yoo, and C.-H. Kim, 2014: Winter precipitation variability over Korean

- Peninsula associated with ENSO. *Climate Dyn.*, **42**, 3171-3186, doi:10.1007/s00382-013-2008-1.
- Sun, C., and S. Yang, 2012: Persistent severe drought in southern China during winter-spring 2011: Large-scale circulation patterns and possible impacting factors. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **117**, D0112, doi:10.1029/2012JD017500.
- Sun, J., S. Wu, and J. Ao, 2016: Role of the North Pacific sea surface temperature in the East Asian winter monsoon decadal variability. *Climate Dyn.*, **46**, 3793-3805, doi:10.1007/s00382-015-2805-9.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2001: A Formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 608-627, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2.
- Trenberth, K. E., 2011: Changes in precipitation with climate change. *Climate Res.*, **47**, 123-138, doi:10.3354/cr00953.
- Wang, B., R. Wu, and X. Fu, 2000: Pacific-East Asian teleconnection: how does ENSO affect East Asian climate? *J. Climate*, **13**, 1517-1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- Wang, L., W. Chen, and R. Huang, 2008: Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L20702, doi:10.1029/2008GL035287.
- Watanabe, M., and F.-F. Jin, 2002: Role of Indian Ocean warming in the development of Philippine Sea anticyclone during ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 116-116-4, doi:10.1029/2001GL014318.
- Wu, R., Z.-Z. Hu, and B. P. Kirtman, 2003: Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia. *J. Climate*, **16**, 3742-3758, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3742:EOERAI>2.0.CO;2.
- Xiao, M., Q. Zhang, and V. P. Singh, 2015: Influences of ENSO, NAO, IOD and PDO on seasonal precipitation regimes in the Yangtze River basin, China. *Int. J. Climatol.*, **35**, 3556-3567, doi:10.1002/joc.4228.
- Zhang, R., A. Sumi, and M. Kimoto, 1996: Impact of El Nino on the East Asian monsoon. *J. Meteor. Soc. Japan Ser. II*, **74**, 49-62, doi:10.2151/jmsj1965.74.1\_49.
- Zhou, L.-T., and R. Wu, 2010: Respective impacts of the East Asian winter monsoon and ENSO on winter rainfall in China. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **115**, D02107, doi:10.1029/2009JD012502.
- \_\_\_\_\_, 2011: Impact of East Asian winter monsoon on rainfall over southeastern China and its dynamical process. *Int. J. Climatol.*, **31**, 677-686, doi:10.1002/joc.2101.