

# 겨울철 북극 증폭 유발 요인으로서의 북극 물수지의 급격한 변화 분석

손진선\* · 노우승\*\* · 홍민지\*\* · 김정훈\*\*\* · 안영준\* · 김맹기\*\*\*\*†

\*공주대학교 대기과학과 석사과정, \*\*공주대학교 대기과학과 학사과정,  
\*\*\*일본 도쿄대학교 첨단과학기술연구소 특임연구원, \*\*\*\*공주대학교 대기과학과 교수

## Analysis of abrupt changes in the Arctic water budget as drivers of wintertime Arctic amplification

Son, Jin-Seon\* · Noh, U-Seung\*\* · Hong, Min-Ji\*\* · Kim, Jeong-Hun\*\*\* · An, Yeong-Jun\* and Kim, Maeng-Ki\*\*\*\*†

\*Master's Student, Dept. of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Gongju, Korea

\*\*Bachelor's Student, Dept. of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Gongju, Korea

\*\*\*Project Researcher, Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, Tokyo, Japan

\*\*\*\*Professor, Dept. of Atmospheric Sciences, Kongju National University, Gongju, Korea

### ABSTRACT

This study analyzes the Arctic water budget during the winter season (December ~ February) over a 43-year period from 1980 to 2022, with a focus on changes before and after the regime shift identified in 2004. Using ERA5 reanalysis data, we quantitatively analyze key hydrological components of total column water vapor, evaporation, precipitation, and meridional moisture flux. The Arctic is warming at approximately twice the rate of lower latitudes, and winter water vapor plays a particularly crucial role in this process. Our results reveal that the 2004 regime shift is characterized by significant increases in all of these measures. These changes, especially pronounced in the Barents and Kara Seas, suggest an intensification of the Arctic water cycle. The increase in water vapor has led to an increase in downward long-wave radiation, which strengthens the water vapor feedback mechanism and further contributes to regional warming. Spatial correlation analysis indicates a robust association among reduced sea ice cover, rising surface temperatures, and increased water vapor transport. These interlinked processes underscore the complexity of Arctic climate dynamics and the role of the water cycle in driving Arctic amplification. Moreover, the quantitative assessment provided in this study highlights the importance of considering changes in hydrological processes when projecting future Arctic climate change. The findings can serve as a valuable foundation for further research into the interactions among moisture transport, sea ice dynamics, and regional warming in the Arctic.

*Key words : Arctic, Water Budget, Regime Shift, Water Cycle, Water Vapor Feedback, Arctic Warming*

## 1. 서론

최근 연구에 따르면, 지난 수십 년간 북극 지역의 온난화 속도는 전 지구 평균의 약 4배에 달하며, 이러한 현상은 북극 증폭(Arctic Amplification)이라 불린다(Rantanen et al., 2022). 북극 증폭은 모든 계절에 걸쳐 발생하지만,

강한 계절성을 가지며, 특히 가을과 겨울에 강하게 나타나고 7월에 가장 약하게 나타난다(Dai et al., 2019; Rantanen et al., 2022). 북극 증폭에 영향을 주는 요인은 대기 중 수증기량의 변화, 저위도로부터 북극으로의 수증기 및 열의 남북 수송, 북극의 물순환 등이 제시되고 있다(Cohen et al., 2014; Graversen and Burtu, 2016; Kim

†Corresponding author : mkkim@kongju.ac.kr (32588, no. 449, College of Natural Sciences, Gongjudaehak-ro 56, Gongju-si, Chungcheongnam-do, Korea. Tel. +82-41-850-8531)

ORCID 손진선 0009-0001-6709-5847  
노우승 0009-0001-6045-2047  
홍민지 0009-0008-4526-1614

김정훈 0000-0001-7752-0846  
안영준 0009-0003-2761-0546  
김맹기 0000-0002-0871-3676

et al., 2016; Papritz et al., 2022; Vihma et al., 2016; Woods and Caballero, 2016). 북극 대기 중에 있는 수증기는 하향 장파복사(long-wave radiation)를 증가시키고 (Ghatak and Miller, 2013; Kim and Kim, 2017), 강수에 필요한 수분을 공급함으로써 북극 물순환에 중요한 역할을 한다. 따라서 북극 증폭을 이해하기 위해서는 북극의 물수지(water budget)를 정량적으로 이해하는 것이 중요하다(Crewell et al., 2021).

북극 가강수량(precipitable water)의 시공간적 분포는 기온의 분포와 밀접하게 관련되어 있다(Ghatak and Miller, 2013). 또한 북극 수증기량은 북극 온난화에 따라 비선형적으로 증가할 수 있고, 국지적 증발과 증위도로부터의 남북 수송에 영향을 받기 때문에 복잡한 과정에 의해 결정된다(Papritz et al., 2022; Ridley et al., 2023). 그럼에도 불구하고 그 변화가 점진적인지 급격한지는 아직 명확히 규명되지 않았다. 특히 북극 증폭과 관련된 물수지 항목들이 어떤 시점에서 체계적인 변위를 보였는지, 그리고 이러한 변위가 수증기 피드백과 같은 내부 메커니즘과 어떻게 연계되어 있는지에 대해서는 보다 정량적인 분석이 요구된다. 반면, 증위도의 경우 겨울철 지표 기온의 급격한 변화에 관해 많은 연구에서 보고되었다(Kim et al., 2015; Lee et al., 2013; Lo and Hsu, 2010; Xiao et al., 2012; Ye et al., 2015; Yeh et al., 2011). 그 주요 원인으로 열대 태평양 해수면 온도의 증가, 해들리 순환의 북쪽 확장, 페렐 순환의 강화에 따른 아열대 고기압성 편차의 증가와 그로 인한 온난 이류 등이 제시되었다. 우리나라의 경우에도 겨울철 지표 기온의 급격한 변화에 대한 다양한 연구가 많이 보고되었다(An et al., 2020; Choi et al., 2017; Kim et al., 2021; Nam et al., 2022). 특히 겨울철 평균 기온은 1990년대 중반에 급격한 변화를 겪지 않은 반면, 12월과 1월은 1990년대 중반에 급격한 기온 증가를 경험하였으며, 이 중 1월의 급격한 기온 증가는 주로 북극 진동의 위상이 음에서 양으로 전환하는 1990년대 중반에 주로 발생하였다(Nam et al., 2022).

따라서 이 연구에서는 겨울철 북극 물수지의 기후학적 특성을 고찰하고, 최근 수십 년 사이에 북극 물수지의 급격한 변화가 발생했는지를 파악하고자 한다. 또한 이러한 변화가 북극 증폭과 어떤 관계를 가지며, 어떤 물리적 과정들이 관여했는지를 분석하고자 한다.

## 2. 자료 및 연구 방법

이 연구에서는 1980/1981년부터 2022/2023년까지 총 43개 겨울에 해당하는 기간의 재분석 자료를 활용하였으며, 당해 12월과 이듬해 1월, 2월을 한 해의 겨울(DJF)로 정의하였다. 분석 영역은 70°N 이북의 북극 지역이다.

북극 물수지 분석을 위해 ECMWF (European Centre of Medium-range Weather Forecast)에서 제공하는 ERA5 (ECMWF Reanalysis 5<sup>th</sup> generation) 자료를 사용하였다. ERA5는 다양한 재분석 자료 중에서도 가장 많이 활용되고 있으며, 우수한 성능을 보여주는 것으로 알려져 있다(Hersbach et al., 2020). 분석 변수는 남북 방향 바람 성분(V-component of wind), 지면 기압(Surface pressure), 비습(Specific humidity, 이하  $q$ ), 2m 기온(2m Temperature, 이하 T2m), 평균 하향 장파복사속(Mean surface downward long-wave radiation, 이하 DLW), 평균 잠열속(Mean surface latent heat flux, 이하 LH), 증발량(Evaporation), 강수량(Total precipitation), 해빙 면적(Sea-ice cover, 이하 SIC)이다. 모든 변수는 1.0°×1.0°의 공간 해상도를 가지며, 이 중 증발량과 강수량은 1시간 누적 자료를, 나머지 변수들은 6시간 간격 자료를 사용하였다.

북극 물수지는 수증기량의 변화, 수증기 수송, 증발, 강수, 승화 등 다양한 항으로 구성되어 있으며, 이 연구에서는 Peixoto and Oort (1992)가 제시한 북극 물수지식을 사용하였다. 북극 대기 내 수증기 총량을 나타내는 가강수량(precipitable water,  $W_v$ )의 시간 변화율( $\frac{\partial[W_v]}{\partial t}$ )은, 70°N 경계를 통한 수증기 수송( $F_v$ ), 지표로부터 대기로 방출되는 증발( $E_1$ ), 강수( $P$ ), 승화( $E_s$ )에 의해 결정된다. 이 관계는 식 (1)로 표현된다.

$$\frac{\partial[W_v]}{\partial t} = F_v + [E_1 - P] + [E_s] \quad (1)$$

$$W_v = \int_{P_{sfc}}^{P_{top}} q \frac{dp}{g} \quad (2)$$

$$F_v = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{P_{sfc}}^{P_{top}} (v \cdot q) |_{\phi=70^\circ N} \frac{dP}{g} d\lambda \quad (3)$$

식 (1)의 가강수량  $W_v$ 는 지면부터 대기 상단까지의 비습을 기압에 대해 연직 적분한 값이며, 그 정의는 식 (2)과

같다. 또한, 70°N을 경계로 남북 수증기 플럭스( $F_v$ )는 식 (3) 과 같이 정의된다. 식 (3)에서  $q$ 는 비습,  $v$ 는 남북 방향 바람 성분,  $g$ 는 중력 가속도,  $P_{top}$ 은 대기 상단 기압으로, 이 연구에서는 300 hPa로 설정하였다. 승화( $E_s$ )는 ERA5 자료에서 직접 제공되지 않기 때문에, 물수지식의 나머지 항들을 먼저 계산한 후 잔차(residual)의 형태로 간접 추정하였다. 또한 물리적 의미를 쉽게 이해하기 위하여 북극의 면적 가중 누적은 대괄호 [ · ]로, 면적 가중 평균은 중괄호 { · }로 표기하였다.

북극의 급격한 기후 변화가 나타나는 시점을 탐지하기 위하여 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 Rodionov (2006)의 체계 탐지 알고리즘(Regime detection algorithm)을 활용하였다. 이 알고리즘은 시계열 내 급격한 평균 변화 구간을 통계적으로 탐지하는 기법으로, 이 연구에서는 분석의 편의를 위하여 급격한 변화가 나타나는 탐지 시점을 중심으로 이전 기간은 P1, 이후 기간을 P2로 정의하였다. 또한 두 변수의 공간 분포 사이의 유사성을 분석하기 위하여 패턴 상관계수(Pattern correlation coefficient, 이하 PCC)가 사용되었다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1. 가강수량, 기온, 수증기량의 급격한 변화와 공간분포 변화 특성

북극 물수지 분석에 앞서, 북극 증폭과 관련된 지표면 기온과 수증기의 시간에 따른 변화를 조사하였다. 하층에서 수증기량이 가장 큰 고도를 확인하기 위하여 북극 전역의 면적 가중 누적된 비습 [ $q$ ]의 연직 분포를 확인한 결과, [ $q$ ]는 925 hPa에서 가장 크게 나타나며, 이보다 상층에서는 고도가 증가하면서 급격하게 감소하는 경향을 보인다(Fig. 1(a)). 특히, 925 hPa에서의 [ $q$ ]와 면적 가중 평균된 지표 기온 {T2m}은 모두 2004년을 전후로 하여 급격한 상승을 보였고(Fig. 1), 2004년 이후 값은 이전 기간(P1)의 평균값 이하로 다시 낮아지지 않았다. 지표 기온의 경우, P1 기간에서 가장 높았던 해의 기온조차도 P2 기간에서 가장 낮은 해의 기온보다 낮게 나타나며, 이는 2004년을 기점으로 북극의 겨울이 완전히 다른 기후 상태로 전환되었다는 것을 의미한다. 이러한 특성은 정도의 차이가 있지만 비습에서도 유사하게 나타나며, 두 그룹 모두 P1 기간과 P2 기간의 평균값 차이의 유의확률( $p$  value)이

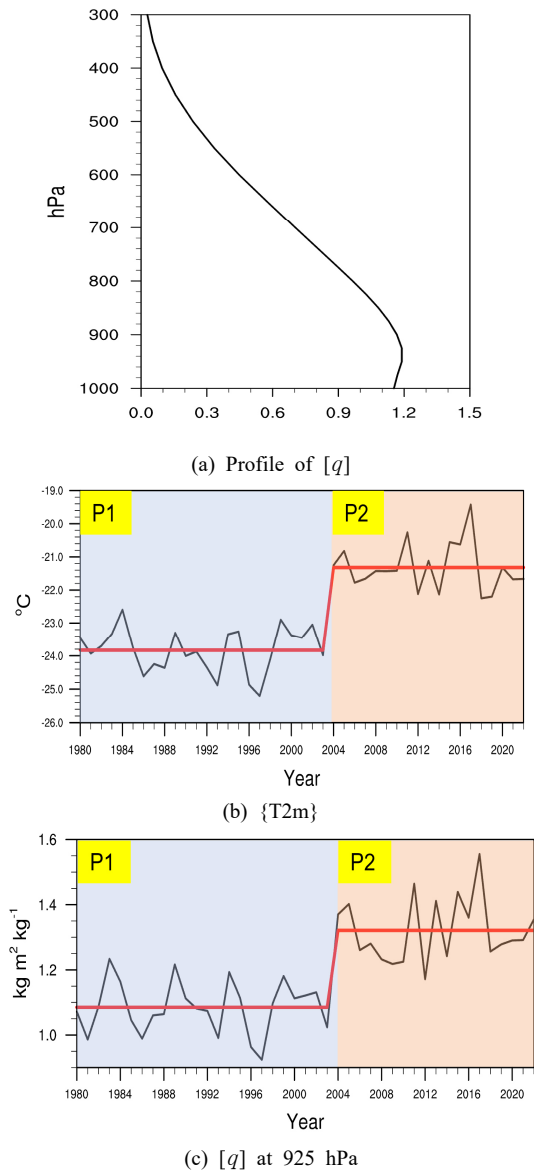


Fig. 1. (a) Vertical profile of climatological mean [ $q$ ] (units:  $\text{kg m}^2 \text{kg}^{-1}$ ). (b)–(c) Time series of (b) {T2m}(units:  $^{\circ}\text{C}$ ), (c) [ $q$ ] at 925 hPa(units:  $\text{kg m}^2 \text{kg}^{-1}$ ) over the Arctic. The red solid line in (b) and (c) represents the mean values before and after the regime shift. In (a) and (c), [ $q$ ] values are scaled by  $10^{10}$  for visualization purposes

0.01 보다 작다. 즉, 두 그룹의 평균값은 각 그룹의 변동성에도 불구하고 분명한 차이를 보이며, 적어도 최근까지는 P1 기간의 값으로 되돌아가지 않았다. 이는 두 기간이 완

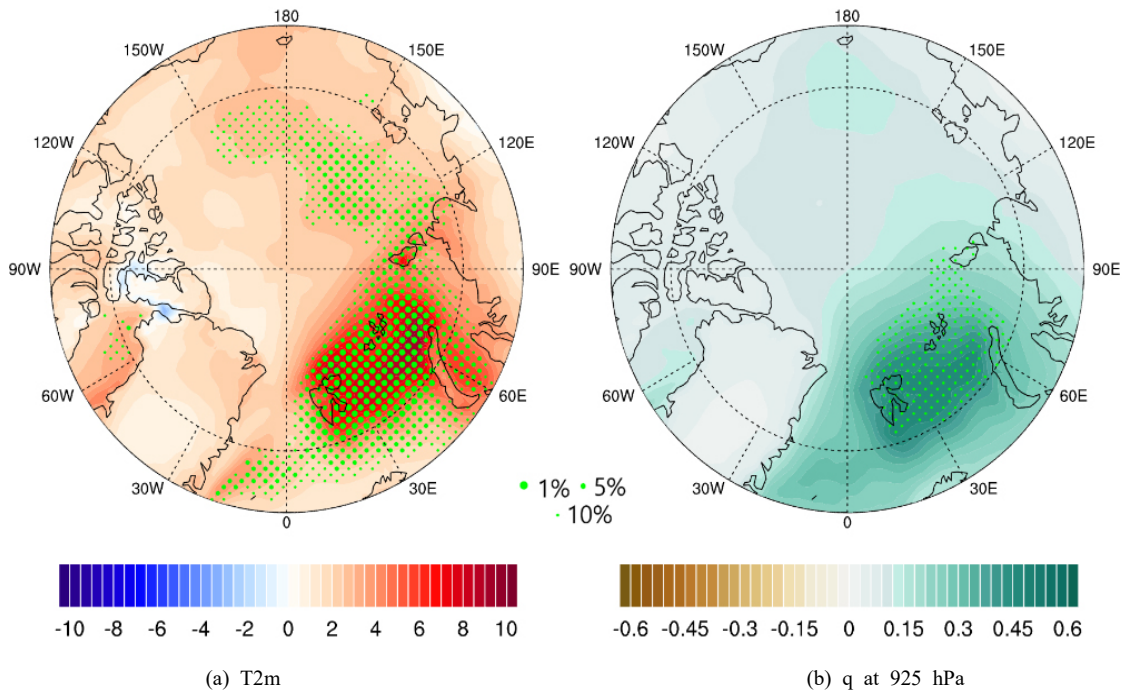


Fig. 2. Spatial distributions of the differences between the P2 and P1 periods (shading) for (a) T2m (units: °C) and (b)  $q$  at 925 hPa (units:  $10^{-3} \text{ kg kg}^{-1}$ ). The three green dots show 1%, 5%, 10% significance levels, respectively

전히 다른 기후로 전환되었음을 나타내며, 이러한 급격한 변화를 체계 변위(regime shift)로 정의한다.

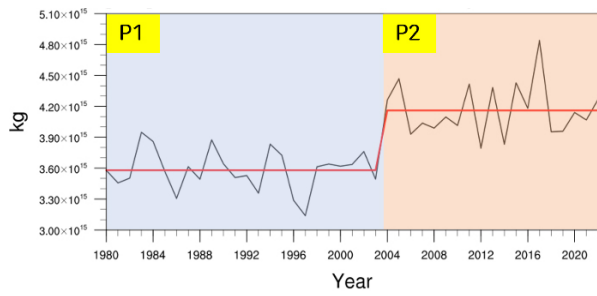
북극에서 지표 기온 및 비습 변화가 공간적으로 어떻게 나타났는지를 파악하기 위해, 두 시기 간의 공간 분포의 차이를 Fig. 2에 제시하였다. 분석 결과, 북극 대부분의 지역에서 지표 기온과 하층 비습이 P1에 비해 P2 기간에 증가하였으며, 특히 바렌츠-카라해(Barents-Kara Sea)에서 큰 증가폭이 나타났다. 유의수준 분석 결과, 비습보다 기온의 증가가 더 넓은 지역에서 통계적으로 유의하게 나타났고, 이는 수증기 외에도 기온 상승에 기여한 다른 요인이 있었음을 시사한다. 또한, Fig. 2에서 제시한 지표 기온과 비습의 변화 패턴 간의 PCC는 약 0.93으로, 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의한 값을 나타냈다. 이것은 비습의 변화가 기온 변화와 매우 밀접하게 연관되어 있음을 의미한다.

하층의 비습 이외에도 대기 중의 수증기 총량을 분석하기 위하여 면적 가중 누적된 가강수량 [ $W_v$ ]의 시계열을 분석하였다. 그 결과 [ $W_v$ ]도 925 hPa에서의 [ $q$ ]와 마찬가지로 2004년에 급격한 증가가 나타났다(Fig. 3(a)). P2 기간의  $W_v$ 는 P1 기간에 비해 대부분의 북극해에서 증가하

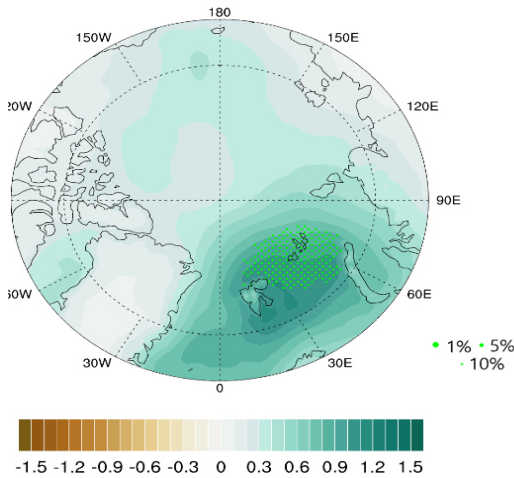
였으며, 특히 바렌츠 해에서 증가폭이 가장 뚜렷하게 나타났다. 가강수량의 증가는 925 hPa 비습의 증가보다 더 좁은 해역에서 유의하게 나타났다. 이것은 비습의 증가가 주로 하층에서 더 뚜렷하였으며, 그 변화가 나타난 해역도 더 넓다는 것을 의미한다. 이는 북극의 겨울이 하층 역전층이 발생하기 유리한 조건을 갖고 있어서 수증기가 상층으로 수송되기 어려운 것과 관련이 있다. 지표 기온과 가강수량 변화의 공간 패턴 간의 PCC는 약 0.92이며, 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의하였다. 이러한 결과는 Ridley et al. (2023)이 제시한 바와 같이, Clausius-Clapeyron 방정식에 따라 기온 상승이 수증기량 증가로 이어졌음을 보여준다.

### 3.2. 북극 물수지 변화의 특성

북극 대기 중에 있는 비습의 변화를 이해하기 위해서는 앞서 제시한 물수지식, 식 (1)에 기반한 분석이 필요하다. 2004년 전후의 물수지의 변화를 분석하기에 앞서, 전체 분석 기간(1980/81 ~ 2022/23)에 대한 북극 물수지의 기후학적 특성을 정량적으로 분석하였다(Fig. 4). 43개 겨울철(DJF)에 대한 기후 평균값을 계산한 결과, 위도 70°N을



(a)  $[W_v]$



(b)  $W_v$

Fig. 3. (a) Time series of  $[W_v]$ (units: kg) and (b) Spatial distribution of the differences in  $W_v$  (units:  $\text{kg m}^{-2}$ ) between P2 and P1 periods (shading). The red solid line in (a) represents the mean values before and after the regime shift. The three green dots show in (b) 1%, 5%, 10% significance levels, respectively

경계로 북극으로 유입되는 남북 방향 수증기 플럭스( $F_v$ )는 약  $5.42 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ 로 나타났으며, 증발량( $E_t$ )은 약  $6.80 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ , 강수량( $P$ )은 약  $13.21 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ 였다. 이 결과는 북극 지역 강수의 약 41%가 을 통해서 북극으로 수송되는 수증기에 의해, 약 51.5%는 북극 지역의 지표면 증발에 의해, 나머지 약 7%는 지표면에서 발생한 승화에 의해 공급되었음을 의미한다.

2004년을 기준으로 P1(이전)과 P2(이후)로 구분하고, 각 시기의 물수지를 Fig. 5의 좌측과 우측에 각각 제시하였다. 괄호 안에는 P1 대비 P2의 정량적 변화를 표시하였

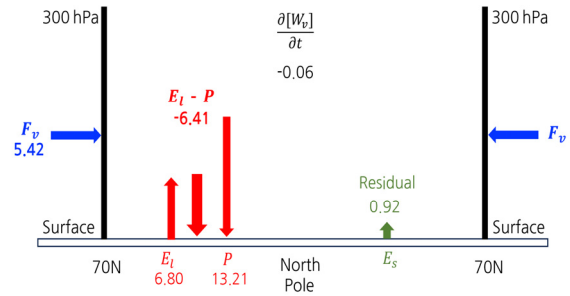


Fig. 4. Climatological mean values of the Arctic water budget over 43 years (1980 ~ 2022 DJF). The variables include the area-weighted sum of total column water vapor ( $[W_v]$ ), meridional moisture flux ( $F_v$ ), evaporation ( $[E_t]$ ), total precipitation ( $[P]$ ), and sublimation ( $[E_s]$ ). Units:  $10^{12} \text{ kg day}^{-1}$

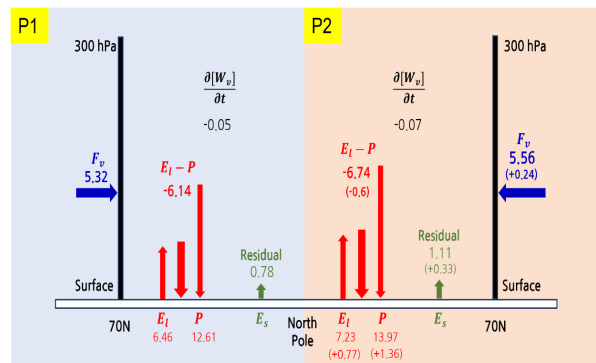


Fig. 5. The Arctic water budget for the P1 period (left) and P2 period (right). The variables include the area-weighted sum of total column water vapor ( $[W_v]$ ), meridional moisture flux ( $F_v$ ), evaporation ( $E_t$ ), total precipitation ( $P$ ), and sublimation ( $E_s$ ). The values in parentheses on the right panel represent the differences between P2 and P1 periods. Units:  $10^{12} \text{ kg day}^{-1}$

다. P2 기간의 물수지 구성 성분은 P1 기간의 물수지에 비해 모두 증가했다. 정량적으로 살펴보면, P2 기간에는 P1 기간에 비해서 남북 수송을 통해 북극 대기로 약  $0.24 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ 이 추가로 유입되었으며, 증발에 의해 북극 대기에 추가 공급된 양은 약  $0.77 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ , 승화로부터의 추가 공급량은 약  $0.33 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ 였다. 이

Table 1. Mean, standard deviation (STD), and increasing rates of each components in the Arctic water budgets. The variables include the area-weighted sum of total column water vapor ( $[W_v]$ ), meridional moisture flux ( $F_v$ ), evaporation ( $E_1$ ), total precipitation ( $P$ ), and sublimation ( $E_s$ ). Scale:

$$10^{12}, *Increasing Rate = \frac{(P_2 - P_1)}{P_1} \times 100$$

Variables	Units	P1	P2	P2-P1	*Increasing Rate
		MEAN/STD	MEAN/STD	MEAN/STD	
$[W_v]$	kg	3582.60/195.76	4160.54/260.79	557.95/65.03	16%
$F_v$	kg day <sup>-1</sup>	5.32/1.16	5.56/1.10	0.24/-0.06	5%
$[E_1-P]$	kg day <sup>-1</sup>	-6.14/1.18	-6.74/1.14	-0.60/-0.04	10%
$[E_1]$	kg day <sup>-1</sup>	6.46/0.55	7.23/0.75	0.77/0.20	12%
$[P]$	kg day <sup>-1</sup>	12.61/1.26	13.97/1.37	1.36/0.11	11%
$[E_s]$	kg day <sup>-1</sup>	0.78/0.16	1.11/0.22	0.33/0.06	43%

와 같이 북극 대기에 공급된 수증기는 대부분 강수를 통해 다시 북극 지면으로 이동하였으며, 강수의 총 증가량은 약  $1.36 \times 10^{12}$  kg day<sup>-1</sup>에 달하였다. 이는 P1 기간에 비해 P2 기간에 북극의 물순환이 전반적으로 강화되었음을 의미한다.

Table 1에는 물수지의 각 성분에 대한 평균과 표준편차를 각 기간에 대해서 제시하였으며, 그 차이와 증가율도 함께 제시하였다. P2 기간의  $[W_v]$ 는 P1 기간 대비 약 16% 증가하였고, 다른 성분들은 최소 약 5%( $F_v$ )에서 최대 약 43%( $E_s$ )가 증가하였다. 절대량 증가 측면에서는 강수량의 증가가 가장 크지만, 증가한 비율은 승화량이 가장 크게 나타났다. 2004년 체제 변위 이후 바렌츠-카라해의 해빙이 녹으면서 더 많은 수증기가 대기에 공급되었고, 동시에 70°N을 통해서 북극 대기로 공급된 수증기의 양도 증가하였다. 이로 인해 북극 대기 중의 수증기량이 증가했고, 이에 따른 강수량도 함께 증가한 것으로 해석된다.

### 3.3. 수증기 피드백

앞 절에서는 P2 기간에 발생한 물순환의 강화를 정량적으로 제시하였다. 이 과정에서 가장 눈에 띄는 변화는 증발량과 강수량의 확연한 증가이다. P2 기간에 증발량의 증가는 해빙의 감소와 밀접하게 연관되어 있을 가능성이 높다. 해빙과 증발량의 변화 패턴이 공간적으로 일치하는

지를 확인하기 위하여 두 기간의 차에 대한 공간 분포를 분석하였다. Fig. 6(a)에서 확인되듯이, 바렌츠-카라해를 중심으로 해빙의 감소가 뚜렷하게 나타났으며, 그린란드해를 포함한 북극의 다른 해역에서도 유의한 감소가 나타났다. 해빙의 감소가 뚜렷한 해역에서는 증발량의 증가가 뚜렷하게 나타났다(Fig. 6(b)). 해빙의 감소와 증발량의 증가 패턴 사이의 PCC는 -0.90으로, 유의수준 0.01에서 통계적으로 유의하였다. 또한 증발량이 증가한 해역은 가강수량의 증가 해역(Fig. 4(b))과 잘 일치한다. 이는 해빙 감소에 따라 노출된 해수면에서 증발이 증가하면서, 대기 중 수증기량이 증가했음을 의미한다.

가강수량의 증가는 대기 중에 수증기가 풍부하다는 것을 뜻하며, 이는 수증기 피드백을 통한 지표 기온의 상승을 유도할 수 있다(Kim and Kim, 2017). 이를 확인하기 위해서 지표면에서 하향 장파복사량의 공간적 변화(Fig. 6(d))를 분석한 결과 DLW의 증가가 북극 전 해역에서 나타났으며, 특히 바렌츠-카라해에서 뚜렷하게 나타났다. 또한 DLW 증가 패턴은 지표 기온 증가 패턴(Fig. 2(a))이나 잠열속 증가 패턴(Fig. 6(c))과 잘 일치하였다. 특히 지표 기온과 하향 장파복사량의 증가 패턴은 PCC 0.98(유의수준 0.01)로, 공간적으로 높은 일치성을 보인다. 이러한 결과는 해빙의 감소가 증발의 증가를 유도하고, 증발의 증가는 대기 중 수증기량을 증가시키고, 다시 DLW를 증가시켜 지표 기온 상승으로 이어지는 수증기 피드백의 연쇄 메커니즘이 실제로 나타나고 있음을 시사한다. 또한 지표

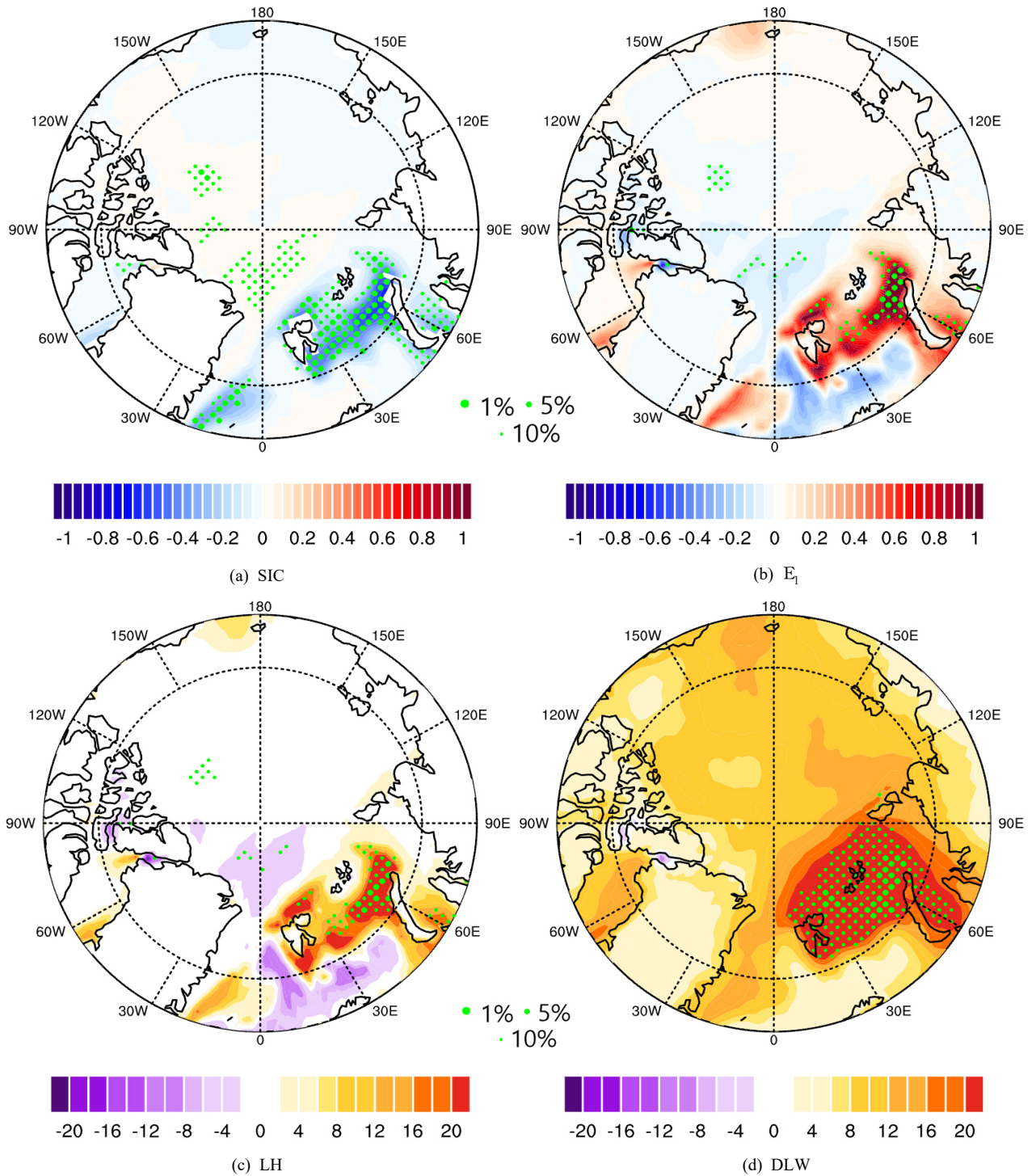


Fig. 6. Spatial distributions of the differences between the P2 and P1 periods (shading) for (a) Sea - ice cover (SIC, units: 0-1), (b) Evaporation ( $E_1$ , units:  $\text{mm day}^{-1}$ ), (c) Mean surface latent heat flux (LH, units:  $\text{W m}^{-2}$ ), and (d) Mean surface downward long-wave radiation (DLW, units:  $\text{W m}^{-2}$ ). The three green dots show 1%, 5%, 10% significance levels, respectively

기온의 증가는 해빙의 감소에 기여할 수 있고, 이는 다시 알베도 감소를 유도해 더 많은 태양 복사를 흡수하게 하는 얼음 알베도 피드백을 유도한다(Kashiwase et al., 2017; Riihela et al., 2021; Schneider and Dickinson, 1974). 따라서 수증기 피드백과 얼음-알베도 피드백에 의해 바렌츠-카라해를 포함하여 더 광범위한 북극에서 지표 기온의 증폭이 나타났다.

요약하면, 2004년 이후의 북극 증폭은 다양한 내부 피드백 메커니즘이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 특히 물순환 강화에 따른 대기 중 수증기의 증가와 이에 따른 하향 장파복사의 증가는 수증기 피드백 메커니즘을 통해 지표 기온의 상승에 중요한 기여를 했을 가능성이 있다. 지표 기온 상승은 해빙의 감소로 이어져, 이는 다시 얼음-알베도 피드백을 강화하여 북극 증폭을 가속했을 것으로 보인다. 이러한 과정에는 중위도로부터 북극으로의 수증기 수송 증가가 일정 부분 기여하였다.

### 3.4 기후 지수들과의 연관성

북극 지역에서 관측된 급격한 기후 체계 변화의 원인을 다각도로 확인하기 위해, 주요 기후 지수들의 시계열에 체계 변위(regime shift)가 존재하는지를 분석하였다. 분석 대상은 북극 진동(Arctic Oscillation, AO), 북대서양 진동(North Atlantic Oscillation, NAO), 태평양 10년 주기 진동(Pacific Decadal Oscillation, PDO), 대서양 수십년 진동(Atlantic Multi-decadal Oscillation, AMO)이다.

Rodionov (2006)의 체계 탐지 알고리즘을 적용한 결과, 위 기후 지수들의 DJF 평균 시계열에서는 2004년과 일치하는 뚜렷한 체계 변위가 나타나지 않았다. 이는 같은 방법으로 탐지된 북극 지표 기온 및 하층 수증기량의 체계 변위 결과와는 상반된 경향이며, 해당 기후 지수들이 2004년에 발생한 북극 물수지의 급격한 변화를 주도했다고 보기에는 어려움이 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 1980년부터 2022년까지 43개 겨울철(DJF) 기간의 ERA5 재분석 자료를 이용하여 북극 물수지의 기후학적 특성과 물수지의 급격한 변화를 정량적으로 분석하였다. 또한 물수지의 급격한 변화와 북극 증폭과의 관계를 수증기 피드백의 관점에서 분석하였다.

분석 결과, 기후 평균적으로 남북 방향 수증기 플럭스

( $F_v$ )가 약  $5.42 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ 이며, 증발량( $E_i$ )과 강수량( $P$ )이 각각 약  $6.80 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ , 약  $13.21 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ 으로 나타났다. 이것은 겨울철 북극 강수량의 약 41%가  $70^\circ\text{N}$ 을 통해서 북극으로 수송되는 수증기에 의해 기여되며, 약 51.5%는 지표면 증발에, 약 7%는 승화에 의해 각각 기여된다는 것을 의미한다. 또한 2004년을 기준으로 북극 물수지는 이전 기간(P1) 대비 이후 기간(P2)에 뚜렷한 변화를 겪었으며, 물수지식의 모든 항들이 증가하는 방향으로 변화하였다. 이것은 2004년 이후에 북극 물순환이 이전에 비해서 전반적으로 강화되었음을 시사한다. 특히 P2 기간에 강수량은 P1 기간에 대비해서 약 11%(약  $1.36 \times 10^{12} \text{ kg day}^{-1}$ ) 증가하였는데, 강수량 증가에 대한 기여도는 증발량의 증가가 약 56.6%, 승화량의 증가가 약 24.3%, 북극으로의 수증기 수송의 증가가 약 17.6% 기여한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 북극 증폭에 기인한 해빙의 감소가 해면 증발량의 증가를 유도하였고, 이는 다시 대기 중 수증기량의 증가와 강수량 증가의 주요 요인으로 작용하였음을 의미한다.

2004년 이후 해빙의 감소와 증발량의 증가 패턴은 공간적으로 밀접하게 연관되어 있으며, 대기 중의 수증기량 및 가강수량 증가 패턴과도 마찬가지로 유의수준 0.01에서 높은 패턴 상관관계를 보였다. 이러한 특성은 특히 바렌츠-카라해에서 뚜렷하게 나타났다. 따라서 최근 북극 물순환의 강화는 바렌츠-카라해의 해빙 감소에 기인하며, 그 결과 급격한 증발량의 증가가 대기 중 수증기량의 급격한 증가로 이어졌다. 대기 중 수증기량의 급격한 증가는 수증기 피드백을 통해 하향 장파복사량을 증가시켰으며, 지표 기온의 급격한 상승을 유도하였다. 실제로 지표 기온 증가 패턴과 하향 장파 복사량의 증가 패턴 간의 패턴 상관관계수는 약 0.98로 매우 높게 나타났다. 이러한 결과는 2004년 이후 물순환의 갑작스러운 강화와 북극 증폭 사이에 수증기 피드백이 매우 중요한 연결 고리로 작용하고 있음을 보여준다. 추가적으로 해빙의 감소는 얼음-알베도 피드백을 통해 지표 기온의 상승을 유도하여 북극 증폭에 기여했을 것으로 해석된다.

한편, AO, NAO, PDO, AMO와 같은 기후 지수들의 시계열 분석에서는 2004년의 뚜렷한 체계 변위가 나타나지 않았다. 이는 북극 기후 시스템의 급격한 변화가 해당 기후 지수의 장기 변동성과는 직접적으로 연결되지 않음을 의미한다.

이 연구는 ERA5 재분석 자료를 기반으로 수행되었으며, ERA5는 높은 공간 해상도(31 km)와 대류권의 기온,

바람, 비습을 잘 모의하는 우수한 성능(Hersbach et al., 2020)으로 인해 널리 사용되는 자료이다. 그러나 재분석 자료의 불확실성을 고려할 때, 향후 다른 재분석 자료를 활용한 교차 검증이 필요하다. 또한 CMIP5에 참여한 모델들의 과거 재현 실험자료에 기반하여 중위도의 갑작스러운 기온의 상승을 재현하는지를 조사해 보았으나, 이를 잘 재현하는 모델은 아직 발견하지 못하였다. 이는 향후 CMIP7과 같은 지구시스템 모델에서 기후 시스템의 다른 평형상태로의 갑작스러운 이동이 보다 잘 모의 가능해야 함을 시사한다.

결과적으로, 본 연구는 북극 물순환의 급격한 변화가 해빙 감소와 내부 피드백 강화, 특히 수증기 피드백에 의해 주도되었음을 보여주며, 북극 증폭을 이해하는 데 있어 물수지 구성 요소들의 역할을 정량적으로 규명한 데 의미가 있다.

## 사사

이 논문은 정부(기상청)의 재원으로 한국기상산업기술원의 기상기후데이터 융합분석 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 일본학술진흥회(JSPS)의 과학연구비(KAKENHI, 과제번호 JP24H02223)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## Reference

- An YJ, Won JJ, No JH, Kim JH, Kim MK. 2020. Regime shift of cold winter temperature in Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Res* 15(2): 105-118.
- Choi W, Ho CH, Kim MK, Kim J, Yoo HD, Jhun JG, Jeong JH. 2018. Season-dependent warming characteristics observed at 12 stations in South Korea over the recent 100 years. *Int J Climatol* 38(11): 4092-4101.
- Cohen J, Screen JA, Furtado JC, Barlow M, Whittleston D, Coumou D, Francis J, Dethloff K, Entekhabi D, Overland J, Jones J. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat Geosci* 7(9): 627-637. doi: 10.1038/ngeo2234
- Crewell S, Ebell K, Konjari P, Mech M, Nomokonova T, Radovan A, Strack D, Triana-Gómez AM, Noël S, Scarlat R, Spreen G, Maturilli M, Rinke A, Gorodetskaya I, Viceto C, August T, Schröder M. 2021. A systematic assessment of water vapor products in the Arctic: From instantaneous measurements to monthly means. *Atmos Meas Tech* 14(7): 4829-4856. doi: 10.5194/amt-14-4829-2021
- Dai A, Luo D, Song M, Liu J. 2019. Arctic amplification is caused by sea-ice loss under increasing CO<sub>2</sub>. *Nat Commun* 10: 121.
- Ghatak D, Miller J. 2013. Implications for Arctic amplification of changes in the strength of the water vapor feedback. *J Geophys Res: Atmos* 118(14): 7569-7578. doi: 10.1002/jgrd.50578
- Graversen RG, Burtu M. 2016. Arctic amplification enhanced by latent energy transport of atmospheric planetary waves. *Q J R Meteorol Soc* 142(698): 2046-2054.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, Hirahara S, Horányi A, Muñoz-Sabater J, Nicolas J, Peubey C, Radu R, Schepers D, Simmons A, Soci C, Abdalla S, Abellan X, Balsamo G, Bechtold P, Biavati G, Bidlot J, Bonavita M, De Chiara G, Dahlgren P, Dee D, Diamantakis M, Dragani R, Flemming J, Forbes R, Fuentes M, Geer A, Haimberger L, Healy S, Hogan RJ, Hólm E, Janisková M, Keeley S, Laloyaux P, Lopez P, Lupu C, Radnoti G, de Rosnay P, Rozum I, Vamborg F, Villaume S, Thépaut JN. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc* 146(730): 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803
- Kashiwase H, Ohshima KI, Nihashi S, Eicken H. 2017. Evidence for ice-ocean albedo feedback in the Arctic Ocean shifting to a seasonal ice zone. *Sci Rep* 7: 8170. doi: 10.1038/s41598-017-08467-z
- Kim BM, Hong JY, Jun SY, Zhang X, Kwon H, Kim SJ, Kim JH, Kim SW, Kim HK. 2016. Major cause of unprecedented Arctic warming in January 2016: Critical role of an Atlantic windstorm. *Sci Rep* 7: 40051.
- Kim HM, Kim BM. 2017. Relative contributions of

- atmospheric energy transport and sea ice loss to the recent warm Arctic winter. *J Clim* 30(18): 7441-7450. doi:10.1175/JCLI-D-17-0157.1
- Kim YH, Kim MK, Lau WKM, Kim KM, Cho CH. 2015. Possible mechanism of abrupt jump in winter surface air temperature in the late 1980s over the Northern Hemisphere. *J Geophys Res: Atmos* 120(24): 12474-12485.
- Kim YJ, Woo CM, Jin SM, Kim JH, Sang J, Lee Y, Kim MK. 2021. Change in the impacts of teleconnection patterns on December temperature in Korea during the period before and after regime shift (in Korean with English abstract). *J Clim Res* 16(2): 133-146.
- Lee SS, Kim SH, Kim JG, Ha KJ, Seo YW. 2013. Robust warming over East Asia during the boreal winter monsoon and its possible causes. *Environ Res Lett* 8(3): 034001. doi: 10.1088/1748-9326/8/3/034001
- Lo TT, Hsu HH. 2010. Change in the dominant decadal patterns and the late 1980s abrupt warming in the extratropical Northern Hemisphere. *Atmos Sci Lett* 11(3): 210-215. doi: 10.1002/asl.275
- Nam SH, Baek JY, Yook YS, Kim JH, Oh JS, Kim MK. 2022. Causes of January mean temperature change before and after regime shift in Korea (in Korean with English abstract). *J Clim Res* 17(3): 187-198. doi: 10.14383/cri.2022.17.3.187
- Papritz L, Hauswirth D, Hartmuth K. 2022. Moisture origin, transport pathways, and driving processes of intense wintertime moisture transport into the Arctic. *Weather Clim Dyn* 3: 1-20. doi: 10.5194/wcd-3-1-2022
- Peixoto JP, Oort AH. 1992. *Physics of climate*. Melville, New York: American Institute of Physics. p. 273-276.
- Rantanen M, Karpechko A Y, Lipponen A, Nordling K, Hyvärinen O, Ruosteenoja K, Vihma T, Laaksonen A. 2022. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Commun Earth Environ* 3:168. doi: 10.1038/s43247-022-00498-3
- Ridley JK, Blockley EW, Ringer MA. 2023. Arctic sea ice causes seasonal differences in the response of Arctic water vapor to climate warming in the CMIP6 model, HadGEM3-GC3.1. *Geophys Res Lett* 50(16): e2022GL102541. doi: 10.1029/2022GL102541
- Riihelä A, Bright RM, Anttila K. 2021. Recent strengthening of snow and ice albedo feedback drive Antarctic sea-ice loss. *Nat Geosci* 14(11): 832-836. doi: 10.1038/s41561-021-009841-x
- Rodionov SN. 2006. Use of prewhitening in climate regime shift detection. *Geophys Res Lett* 33(12): L12707. doi: 10.1029/2006GL025904
- Schneider SH, Dickinson RE. 1974. *Climate modeling*. *Rev Geophys* 12(3): 447-493.
- Vihma T, Screen J, Tjernstrom M, Newton B, Zhang X, Popova V, Deser C, Holland M, Prowse T. 2016. The atmospheric role in the Arctic water cycle: A review on processes, past and future changes, and their impacts. *J Geophys Res: Biogeosci* 121(3): 586-620. doi: 10.1002/2015JG003132
- Woods C, Caballero R. 2016. The role of moist intrusions in winter Arctic warming and sea ice decline. *J Clim* 29: 4473-4485.
- Xiao D, Li J, Zhao P. 2012. Four-dimensional structures and physical process of the decadal abrupt changes of the northern extratropical ocean-atmosphere system in the 1980s. *Int J Clim* 32(7): 983-994. doi: 10.1002/joc.2326
- Ye K, Wu R, Liu Y. 2015. Interdecadal change of Eurasian snow, surface temperature, and atmospheric circulation in the late 1980s. *J Geophys Res: Atmos* 120(7): 2738-2753. doi: 10.1002/2015JD023148
- Yeh SW, Kang YJ, Noh Y, Miller AJ. 2011. The North Pacific climate transitions of the winters of 1976/77 and 1988/89. *J Clim* 24(4): 1170-1183. doi: 10.1175/2010JCLI3325.1