

## Atmospheric River 상륙이 한반도 강수와 기온에 미치는 영향 연구

문혜진<sup>1)\*</sup> · 김진원<sup>1)</sup> · Bin Guan<sup>2),3)</sup> · Duane E. Waliser<sup>3)</sup> ·  
최준태<sup>1)</sup> · 구태영<sup>1)</sup> · 김영미<sup>1)</sup> · 변영화<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>국립기상과학원 기후연구과

<sup>2)</sup>Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology

<sup>3)</sup>Joint Institute for Regional Earth System Science and Engineering, University of California, Los Angeles

(접수일: 2019년 6월 4일, 수정일: 2019년 8월 27일, 게재확정일: 2019년 9월 25일)

### The Effects of Atmospheric River Landfalls on Precipitation and Temperature in Korea

Hyejin Moon<sup>1)\*</sup>, Jinwon Kim<sup>1)</sup>, Bin Guan<sup>2),3)</sup>, Duane E. Waliser<sup>3)</sup>, Juntae Choi<sup>1)</sup>,  
Tae-Young Goo<sup>1)</sup>, Youngmi Kim<sup>1)</sup>, and Young-Hwa Byun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, South Korea

<sup>2)</sup>Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA

<sup>3)</sup>Joint Institute for Regional Earth System Science and Engineering, University of California, Los Angeles, CA, USA

(Manuscript received 4 June 2019; revised 27 August 2019; accepted 25 September 2019)

**Abstract** The seasonal climatology of atmospheric rivers (ARs) and their effects on the seasonal precipitation and temperature in Korea are examined using the AR chronology obtained by a methodology based on the vertically integrated water vapor transport (IVT) in conjunction with a fine-scale gridded analysis of station precipitation and temperature. ARs are found to affect Korea most heavily in the warm season with minimal impacts in winter. This contrasts the AR effects in the western North America and the Western Europe that are affected most in winters. Significant portions of precipitation in Korea are associated with AR landfalls for all seasons; over 35% (25%) of the summer (winter) rainfall in the southern part of the Korean peninsula. The percentage of AR precipitation over Korea decreases rapidly towards the north. AR landfalls are also associated with heavier-than-normal precipitation events for all seasons. AR landfalls are associated with above-normal temperatures in Korea; the warm anomalies increase towards the north. The warm anomalies during AR landfalls are primarily related to the reduction in cold episodes as the AR landfalls in Korea are accompanied by anomalous southerlies/southwesterlies.

**Key words:** Atmospheric river, water cycle, Korea precipitation, Korea temperature

## 1. 서 론

Atmospheric River (AR)은 가늘고 긴 강한 수증기 수송을 나타내는 현상으로 주로 중위도 저기압의 따

뜻한 지역에서 나타난다. AR은 대기의 전지구적, 지역적인 수증기 수지에 중요한 역할을 하며, 중위도에서 극향 수송되는 수증기의 대부분을 차지한다(Zhu and Newell, 1994; Neiman et al., 2008). AR은 지표 공기가 발산할 때 공기 흐름의 경계를 따라 발생하며, 해양에서 생성된 저기압과 연관된 전선에서 발생하기도 한다(Zhu and Newell, 1998). 전지구적으로 중위도의 일부 지역(10% 이하)에 AR이 존재하지만, 저위도에서 고위도로 수송되는 전체 수증기량의 약 90% 이

\*Corresponding Author: Hyejin Moon, Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea.  
Phone: +82-64-780-6678, Fax: +82-64-738-9071  
E-mail: hjmoon12@korea.kr

상을 AR이 감당하다(Zhu and Newell, 1998; Guan and Waliser, 2015). 또한 물 순환 중 하나인 지구 전체 하천 유출량의 약 22%가 AR에 의한 강수와 관련이 있다(Paltan et al., 2017).

AR은 전지구 수증기 수지는 물론, 지역적인 극한 수문현상의 발생에 큰 영향을 미치기 때문에, 최근 AR에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 선행 논문들은 전지구적인 수증기 수송에 대한 AR의 역할과 겨울철에 태평양과 대서양의 동쪽 해안 지역에서 발생하는 AR에 집중되어 있으며, AR이 상륙하면서 북아메리카와 유럽의 서쪽 해안 지역에 강한 홍수 피해를 자주 유발한다고 보고하였다(e.g., Ralph et al., 2006; Neiman et al., 2008, 2011; Guan et al., 2010; Lavers et al., 2012; Lavers and Villarini, 2013; Kim et al., 2013, 2018; Gimeno et al., 2014; Kamae et al., 2017b). 또한, AR의 강한 수증기 플럭스는 AR이 상륙하는 해안 지역, 특히 산악지형에서 발생하는 극한 수문현상과 밀접한 관계를 가진다(Ralph et al., 2006; Neiman et al., 2008; Kim et al., 2013). AR의 상륙은 종관순환과 밀접하게 연관되어 있으며, 스톱트랙과 수분 플럭스에 영향을 미친다(Zhu and Newell, 1994; Neiman et al., 2008; Guan and Waliser, 2015).

AR은 위성자료나 관측 및 재분석 자료에서 제공하는 연직 적분된 수증기량(Integrated water vapor; IWV) 또는 연직 적분된 수증기 수송량(Integrated water vapor transport; IVT) 등을 통해서 정의된다(e.g., Ralph et al., 2004, 2006; Wick et al., 2013; Lavers and Villarini, 2013; Guan and Waliser, 2015). 최근 연구들에서 격자화된 수증기 자료를 이용하여 AR을 객관적으로 정의하는 방법들이 개발되었다(Lavers et al., 2012; Guan and Waliser, 2015). 이러한 AR 탐지 방법의 향상은 수증기 플럭스와 지역적인 수문 현상 사이의 관계에 대한 객관적인 분석을 가능하게 하였다. AR의 상륙이 계절별, 지역별로 큰 변동성을 가지며, 전지구적으로 해안 지역에 영향을 준다는 것이 밝혀졌으며(Rutz et al., 2014), 전지구적으로 홍수와 같은 극한 현상과 연관이 있음이 보고되었다(e.g., Ralph et al., 2006; Lavers et al., 2011; Neiman et al., 2011). 또한 격자 자료를 이용한 AR 정의 방법을 통하여 CMIP5 (the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project) 등 모델 결과를 이용한 AR의 미래 전망 연구도 이뤄지고 있다(Lavers et al., 2013; Espizona et al., 2018).

많은 AR 연구들이 북아메리카와 유럽의 서쪽 해안 지역, 겨울철에 집중되어 있었으나, 최근 연구 범위가 넓어지며 그 외 지역과 계절에 대해서도 연구가 진행되고 있다. Mundhenk et al. (2016)은 북태평양을 지나가는 AR 발생빈도 및 계절 변동성을 연구하였

고, 이 지역의 AR 빈도가 ENSO (El Nino-Southern Oscillation) 및 MJO (Madden-Julian oscillation)와 상관성이 있음을 밝혔다. 또한 Kamae et al. (2017b)은 북서태평양 지역의 AR에 관한 연구에서 AR은 7~8월에 가장 활동적이고, 중국의 남쪽과 일본 서쪽을 포함하는 아시아 대륙의 극동 지역에 AR이 상륙하는 빈도가 높으며, ENSO, IPOC (Indo-western Pacific Ocean capacitor)와 밀접한 관련이 있다는 것을 발견하였다. 동아시아 지역의 AR은 봄, 여름, 가을에 발생하는 전체 강수의 14~44%를 차지하고, 지역별로 극한 강수의 20~90%를 설명할 수 있다. AR과 관련된 극한 강수는 지형의 기온기와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다(Kamae et al., 2017a).

AR이 해안 지역에 상륙하게 되면 그 지역의 강수 등에 큰 영향을 준다고 알려져 있으므로 한반도에 AR이 상륙하는 경우, 그 영향력이 클 것으로 예상된다. 또한 동아시아의 경우, 여름철에 AR이 지나갈 확률이 높고, 우리나라 연간 강수량 또한 여름철에 집중되어 있으므로 이 지역에 AR 발생 시 호우와 같은 큰 피해가 발생할 가능성이 높아질 수 있다. 그러므로 한반도에 발생하는 AR의 발생빈도 및 AR이 강수에 미치는 영향 정도를 연구하는 것이 필요하다. 이 연구에서는 한반도 지역을 중심으로 AR 특성을 분석하고 우리나라에 AR이 상륙하였을 때, 강수와 기온에 미치는 영향을 이해하고자 한다. 2장에서는 자료 및 AR 정의 방법에 대해 설명하고, 3장에서 전지구 및 동아시아 지역의 AR을 분석하고, 4장에서는 AR이 우리나라의 계절별 강수와 기온에 미치는 영향을 설명하고, 5장에서는 주요 결과를 요약하고 토의하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 재분석 자료

본 연구는 AR을 정의하기 위한 고도별 재분석 자료와 한반도 상세 분석을 위한 고해상도 기온과 강수량의 장기 관측 자료를 사용하였다. 재분석 자료로는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 interim reanalysis (ERA-INTERIM)의 6시간 간격자료를 사용하였다. 이 자료의 해상도는 T255L60이며, 분석에는 수평격자  $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$  그리고 37개 층으로 내삽된 자료를 사용하였다(Dee et al., 2011). 그리고 한반도의 강수와 기온 분포를 분석하기 위해 Asian Precipitation-High Resolved Observational Data Integration toward Evaluation of Water Resource (APHRODITE) 프로젝트의 일별 강수와 기온 자료를 사용하였다(Yatagai et al., 2009, 2012). 아시아 지역( $15^{\circ}$ - $55^{\circ}$ N,  $60^{\circ}$ - $155^{\circ}$ E)에 대한 APHRODITE 자료의 수평격자는  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 이며, 각 지역의 고해

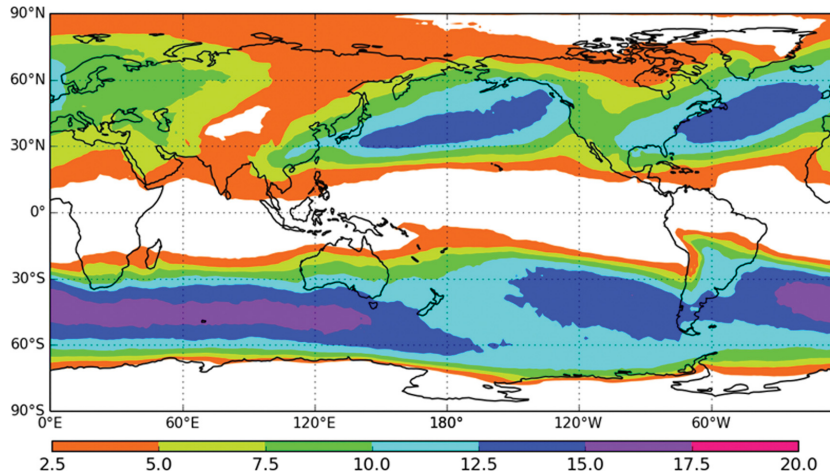


Fig. 1. Climatology (for 1979~2015) of annual mean frequency (%) of ARs from ERA-INTERIM.

상도 계측 자료를 이용해 구축되었다. ERA-INTERIM (1.5° × 1.5°) 격자 하나 안에 36개의 APHRODITE (0.25° × 0.25°) 격자가 겹쳐진다. 두 자료를 비교하기 위해 재분석 자료(ERA-INTERIM) 하나의 격자가 AR로 판명된 경우 36개 격자(APHRODITE) 모두 AR이 발생한 것으로 정의하였다. 본 연구의 분석기간은 1979년부터 2015년까지이며, 계절별 분석은 북반구 겨울(12, 1, 2월, DJF), 봄(3~5월, MAM), 여름(6~8월, JJA) 그리고 가을(9~11월, SON) 사계절에 대해 진행되었다.

2.2 Atmospheric river 정의 및 탐지

AR을 정의하는 방법 중 하나는 위성자료(e.g., Ralph et al., 2004), 재분석자료나 모델자료(e.g., Dettinger et al., 2011)에서 산출된 연직 적분된 수증기(Integrated water vapor; IWV)를 사용하여 일정 기준을 만족하는 영역으로 정의하는 방법이다. 또 다른 방법은 재분석 자료나 모델 자료로 계산한 연직 적분된 수증기 수송(Integrated water vapor transport; IVT)를 이용하여 IVT의 강도와 연속된 길이 등 일정 기준을 만족하는 수증기 수송 영역을 AR로 정의하는 방법 등이 있다. Rutz et al. (2014)는 IWV와 IVT를 이용하여 정의된 각각의 AR과 강수와의 연관성을 분석하였다. IVT를 이용하여 정의된 AR의 경우, 지형이 복잡한 지역에서 강수와 상관관계가 컸으며, AR이 상륙하는 해안 지역에서는 더 큰 상관관계를 나타냈다.

우리나라는 삼면이 해안인 지역이고 지형이 복잡하므로, 본 연구에서는 Guan and Waliser (2015)에서 제시한 IVT를 이용하여 AR을 정의하는 방법을 사용하였다. 분석에 사용된 IVT 강도는 비습과 바람장으로 부터 유도되었고, 1000 hPa부터 300 hPa까지 적분하여 계산되었다. 계산식은 다음과 같다.

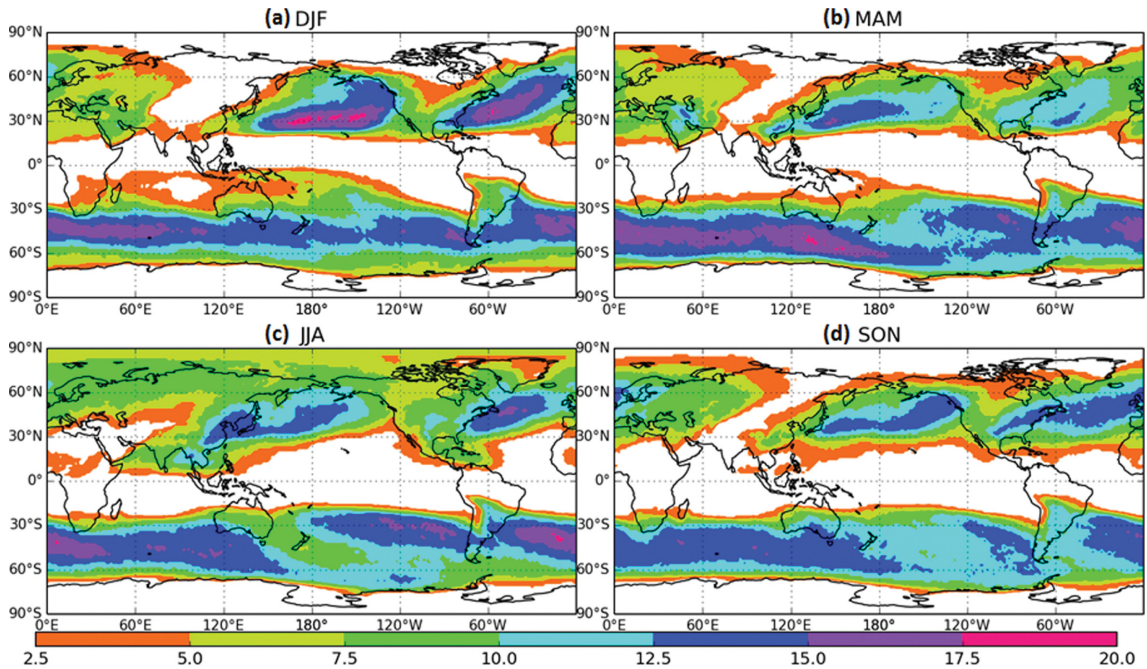
$$IVT = \sqrt{\left(\frac{1}{g} \int_{1000}^{300} qu \, dp\right)^2 + \left(\frac{1}{g} \int_{1000}^{300} qv \, dp\right)^2}$$

여기서,  $q$ 는 비습,  $u$ 와  $v$ 는 각각 동서와 남북 바람이며,  $g$ 는 중력가속도이다.

다음 단계는 각 공간 격자의 IVT 강도에 대한 한계치(threshold value)를 계산하는 것이다. 각각의 모든 공간 격자에 대해 각 월마다 그 월을 기준으로 한 5개월 동안의 IVT 강도의 85%를 초과해야 한다. 이 조건을 만족하는 연속된 IVT 무리의 길이가 2000km 이상이고, 무리의 길이가 폭보다 2배 이상 큰 경우를 AR로 정의한다. 본 분석에 사용한 AR은 6시간 간격의 ERA-INTERIM 자료를 사용하여 하루에 4번 계산되었다. APHRODITE 자료와의 시간 간격 차이를 고려하여 하루에 4번 정의된 AR 영역을 모두 합하여, AR 영역에 대한 일 자료를 생산하였다. 그날 AR의 영향을 받은 모든 지역에 대해서 분석하므로, 하루 4번 중에서 한번 이상 AR이 있는 경우에 일 자료에도 AR이 발생한 것으로 정의하였다. AR 자료의 해상도가 1.5°이므로 AR의 선두 부분이 해안에 도착하는 정확한 위치와 시간을 파악하는 것이 어렵다. 그래서 AR이 한반도의 육지부분이 포함된 격자에 도달하였을 때, 즉 한반도에 AR이 위치한 경우를 “AR 상륙”이라고 정의하였다.

3. 전지구 및 동아시아 지역의 계절별 AR 분석

전지구적인 AR 특성을 분석한 결과, AR은 중위도 해양에서 가장 강하며, 또한 자주 발생한다(Fig. 1). 선행 연구의 결과와 마찬가지로 미국 서부, 서유럽과 같은 대륙의 서안에서 AR이 자주 상륙하며, 동아시아



**Fig. 2.** Climatology (for 1979~2015) of seasonal mean frequency (%) of ARs. Averages for (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA and (d) SON from ERA-INTERIM.

의 해안 지역과 오스트레일리아 남부, 칠레, 서아프리카 지역 또한 AR이 상륙하는 빈도가 높았다. AR이 자주 발생하는 중위도 해양 지역에서 연평균 AR 발생빈도의 경년변동성은 약 20일 정도로 큰 변동성을 가진다(그림 미제시). AR 빈도의 변동성은 중위도 지역에서 연평균 기후의 약 80% 이하의 값을 가지며, 다른 지역과 비교해 보았을 때 꾸준히 발생하는 현상임을 알 수 있다(그림 미제시).

AR은 지역과 계절별로 강한 변동성을 나타낸다(Fig. 2). 겨울철에는 미국 서부, 서유럽 등과 같은 대륙의 서안으로 가장 빈번하게 상륙하였으며(Fig. 2a), 이 지역들의 AR은 겨울철 강수와 밀접한 관련이 있다고 연구되었다(Neiman et al., 2008; Lavers et al., 2012). 동아시아 지역은 여름철에 AR이 상륙하는 빈도가 높았으며, 오스트레일리아 남부는 겨울철에 높았다(Fig. 2c). 예외적으로 칠레는 남반구 봄철을 제외하고 대부분의 계절에서 AR이 상륙하는 빈도가 높았다(Fig. 2).

한반도를 포함한 동아시아 해안 지역의 AR 발생빈도는 여름철에 가장 높게 나타났다(Fig. 2c). 그 다음으로 봄, 가을, 겨울의 순서로 빈도가 높았다. 겨울부터 해양과 해안 지역에서 AR 빈도가 증가하기 시작하여 봄, 여름 동안에 점점 내륙 지역까지 빈도가 높아지다가 가을에 다시 감소하는 연변동성을 보인다. 여름철에는 동아시아 해안 지역, 특히 한국, 일본, 중

국의 동쪽, 극동 러시아 지역 등에서 AR이 자주 상륙한다. 동아시아 지역은 AR이 상륙하는 다른 지역에 비해 계절 간 차이가 뚜렷하였으며, 여름에는 AR이 상륙하는 빈도가 가장 높게 나타났다. 이 지역은 인구 밀도가 높고 작물 등의 주요 생산지이며, AR이 상륙할 때 발생하는 폭우, 홍수 등과 같은 극한 수문 현상으로 인해 극심한 피해가 발생할 수 있기 때문에 이 지역의 AR 연구는 매우 중요하다. 또한 한반도는 연강수량 중에 여름철 강수의 비율이 매우 높으므로 극한 수문현상의 발생 확률이 높다. 그러므로 본 연구에서는 한반도에 AR이 상륙할 경우, 강수와 기온에 미치는 영향을 연구하였다.

#### 4. 계절별 AR 영향 분석

##### 4.1 강수 분석

AR 상륙이 한반도 지역(124°-132°E, 33°-43°N)의 강수에 미치는 영향을 보기 위해 각 공간 격자별, 일별로 AR의 상륙 유무에 따라 강수량을 분석하였다. 계절별로 AR이 상륙하였을 때, 계절별 전체 강수량에 미치는 영향을 분석하기 위해, 계절별 전체 강수량 대비 AR이 발생한 날의 강수량 비율(이하 AR fraction으로 명명)을 산출하였다(Fig. 3). 한반도 전체 지역에서 봄과 여름에 AR fraction이 높았으며, 지역적인 강

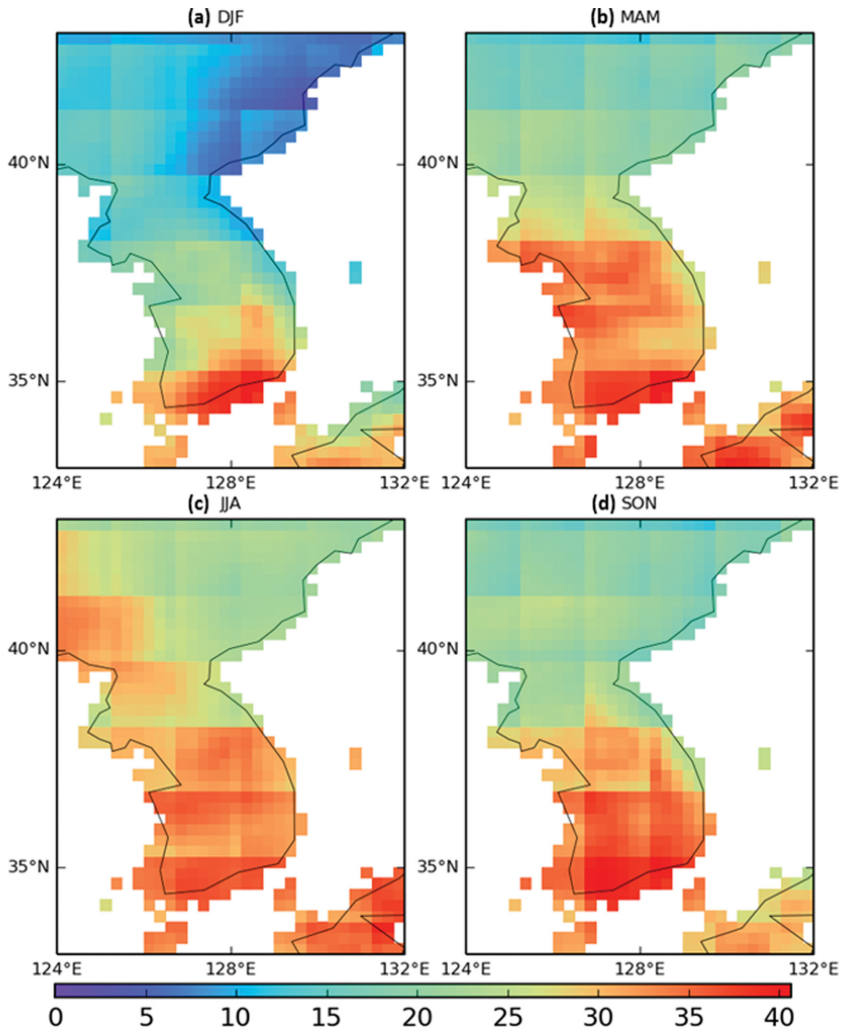


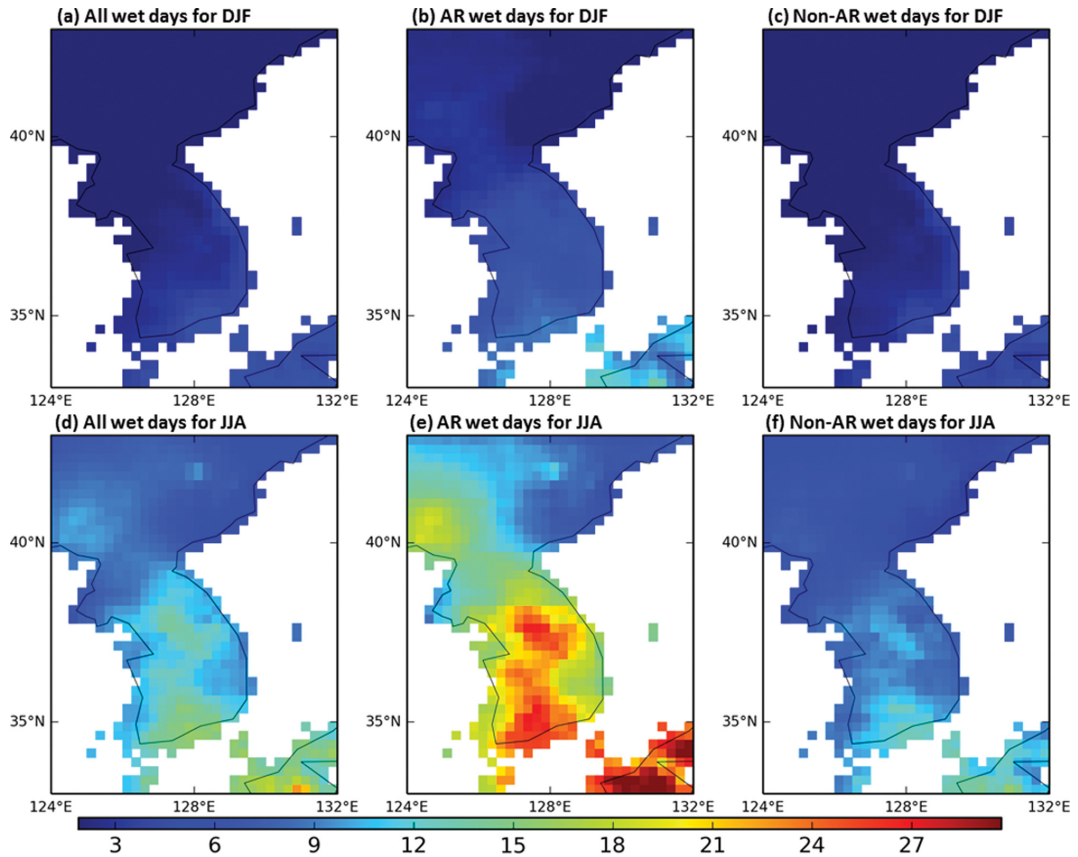
Fig. 3. The fraction (%) of AR precipitation to total precipitation for (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA and (d) SON.

수에 있어서도 의미 있는 차이를 보였다. AR 빈도가 가장 높은 여름철엔 한반도 남쪽 지역에서 AR fraction이 대부분 35% 이상, 남부 해안 지역에는 최대 40% 이상을 나타냈다(Fig. 3c). AR의 빈도가 상대적으로 적은 겨울철에도 남한 지역의 AR fraction은 20% 이상이었고, 남부 해안 지역은 35% 이상에 해당하는 지역적 강화를 보였고, 일부 지역은 40% 이상의 비율을 나타냈다(Fig. 3a). 다른 계절에는 북에서 남으로 갈수록 AR fraction이 높아지는 것과 달리, 봄에는 중부지방과 남부 해안 지역에서 35% 이상, 일부 지역은 40% 이상이었다(Fig. 3b). 가을엔 남부 지방에서 35% 이상, 남부 서쪽 지역에서 40% 이상이었다(Fig. 3d). 이는 동아시아 지역의 AR에 의한 강수가 봄, 여름, 가을 계절에 대한 전체 강수의 14-44%를 차지한다는 선행

연구와 유사한 결과이다(Kamae et al., 2017a).

한반도 지역에서 AR 발생빈도와 AR fraction는 강한 계절 변동성을 가지며, 여름철에 가장 높고, 겨울철에 가장 낮았다. 그리고 한반도 지역의 계절별 전체 강수량에 있어서 AR이 상륙하는 날에 발생한 강수량이 차지하는 비율이 높게 나타났으며, 특히 총 강수량이 많은 여름에 AR이 상륙한 날의 강수량이 차지하는 비율이 한반도 전체적으로 높았다. 그러므로 AR 상륙은 한반도 지역의 전반적인 수자원에 큰 영향을 미치는 현상으로 볼 수 있다.

AR이 겨울과 여름철의 강수강도에 미치는 영향을 이해하기 위해, 분석기간 중 일 강수량이 0.1 mm day<sup>-1</sup> 이상인 강수가 발생한 날(wet days)의 전체일(이하 전체일), AR 발생일과 AR 미발생일에 대한 각각의 강

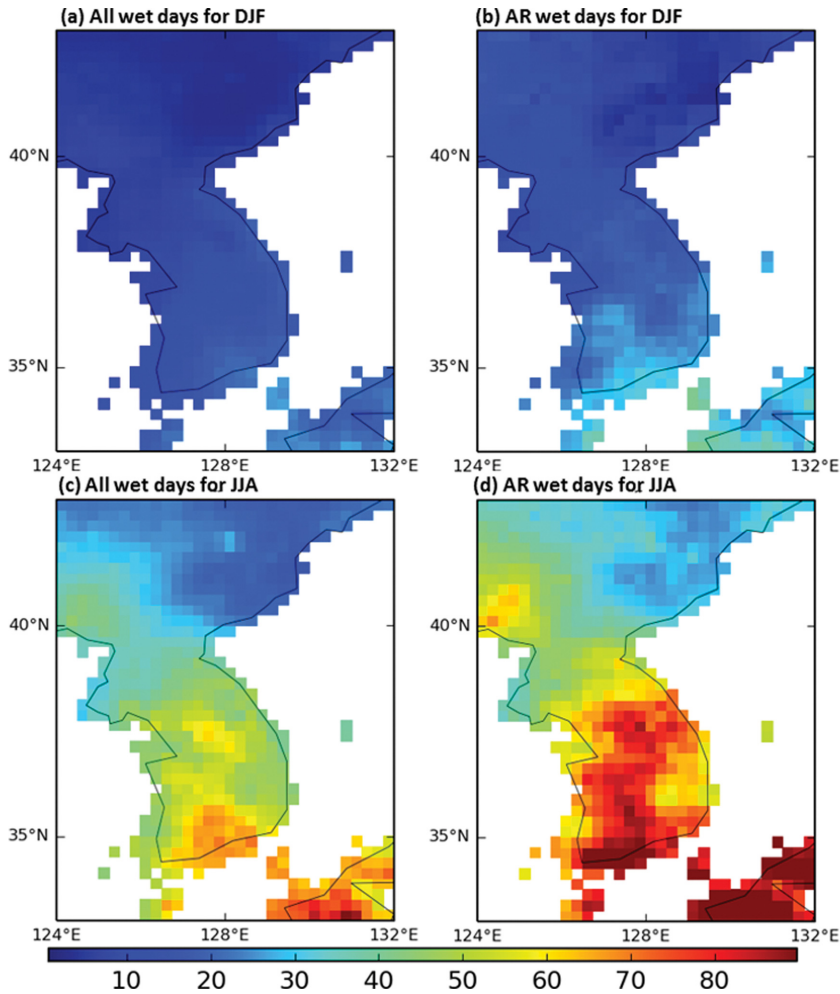


**Fig. 4.** The precipitation intensity ( $\text{mm day}^{-1}$ ) for all wet days (left panels), AR wet days (middle panels), and non-AR wet days (right panels) for DJF (upper panels) and JJA (lower panels).

수강도를 분석하였다(Fig. 4). 공간과 시간 격자마다 AR이 존재한 경우를 AR 발생일(AR wet days), 존재하지 않은 경우를 AR 미발생일(Non-AR wet days)로 정의하였다. 전체일(All wet days)에 대한 강수량은 분석 기간 전체에 대해서 강수가 발생한 날에 대한 평균 강수량을 의미한다. 겨울과 여름철, 모두 AR 발생일에 대한 강수강도가 전체일에 대한 강수강도보다 증가하였다. 한반도 중에서 남한 지역에서 AR 발생일의 강수강도가 가장 크게 증가했으며, 특히 여름에 산악과 그 인근 지역에서 강수강도가 크게 증가되었다. 이는 선행 연구들에서도 밝혀졌다(Kim et al., 2013, 2018, Kamae et al., 2017a). AR 미발생일의 강수강도는 여름철에 대부분의 지역에서 전체일의 강수강도보다 감소하였고 강수강도의 공간적인 패턴은 비슷한 모양을 보였다. 이러한 차이는 상대적으로 AR 발생일의 강수강도가 강하기 때문인 것으로 사료된다. AR에 의해 강한 강수강도를 보이는 지역은 앞서 설명한 AR에 의한 강수 비율이 높은 지역과 밀접한 관계가

있었다. 이는 AR이 상륙하면 전체 강수량을 증가시키고, 강한 강도의 강수, 즉 극한 강수의 증가에도 영향을 미친다는 것을 의미한다.

전체 강수의 상위 5% 강수(95%ile 강수)를 사용하여 AR과 극한 강수의 관련성을 분석하였다(Fig. 5). 95%ile 강수는 일 강수량이  $0.1 \text{ mm day}^{-1}$  이상인 강수가 발생한 날에 대해서 계산되었다. 한반도 지역의 95%ile 강수의 강도 분포는 전체 강수일에 대해서 겨울철엔  $2\sim 25 \text{ mm day}^{-1}$ , 여름철에는  $10\sim 70 \text{ mm day}^{-1}$ 였고, 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 강수강도가 강하였다. AR 발생일에 대한 95%ile 강수의 강도는 겨울철엔  $2\sim 35 \text{ mm day}^{-1}$ , 여름철에는  $20\sim 90 \text{ mm day}^{-1}$ 로 전반적으로 전체 강수일에 비해 증가하였다. 지역적으로 보았을 때 두 계절 모두 남부 지역에서 약  $10 \text{ mm day}^{-1}$  정도 크게 증가하였으며 특히, 여름철에는 한반도 남쪽의 산 지형에서 강수강도가 크게 증가하였다. 이렇게 고지대 지역에서 크게 증가한 것으로 보아 지형적인 요인이 AR에 의한 강수 증가에 큰 영향을 준



**Fig. 5.** The 95%ile precipitation intensity ( $\text{mm day}^{-1}$ ) for all wet days (left panels), AR wet days (right panels) for DJF (upper panels) and JJA (lower panels).

것으로 생각된다.

한반도 지역 중에서도 AR의 빈도와 상륙하는 비율이 높고, 강수강도가 강한 한반도 남쪽 지역( $125.5^{\circ}$ - $129^{\circ}\text{E}$ ,  $34.5^{\circ}$ - $38^{\circ}\text{N}$ )에 대해서 강수에 대한 AR 발생일과 미발생일의 계절별 확률분포함수(Probability Distribution Function; PDF) 분석을 하였다(Fig. 6). 사계절 모두 AR 발생일에 중간 및 강한 강도의 강수 확률의 증가가 뚜렷하였다. 계절별로 보았을 때, 겨울철에는 극한 강수와 같이 강한 강도의 경우가 AR 발생일에 높게 나타났다. 봄에는 다른 계절에 비해 두 경우의 강수 확률 차이가 가장 컸으며, 겨울철과 마찬가지로 가장 강한 강도가 있던 강수일은 AR이 발생한 경우였다. 여름철에는 강수강도 증가에 따라 꾸준히 AR 발생일의 강수확률이 높았고, 약한 강수강도보다 강한 강수

강도에서 더 큰 차이를 보였다. 가을철에도 마찬가지로 AR 발생일에 나타난 강한 강수강도의 확률이 높았다. 또한 극한 강수에 있어서도 AR 발생일의 강수 확률이 AR 미발생일보다 높았다. 가을철에는 태풍으로 인한 강한 강수가 증가하지만 본 연구에 의하면 태풍에 의한 강수는 AR의 성격을 띄지 않는다.

#### 4.2 기온 분석

계절간 차이가 뚜렷한 겨울과 여름철에 대해서 한반도 지역의 기온에 AR이 미치는 영향을 분석하였다. AR 발생일과 미발생일에 대한 평균 기온과 전체일의 평균 기온 차이를 통하여 AR의 영향을 분석하였다(Fig. 7). 겨울과 여름철에 모두 AR이 한반도에 상륙한 경우, 한반도 전체에서 기온 증가가 있었다. 겨울

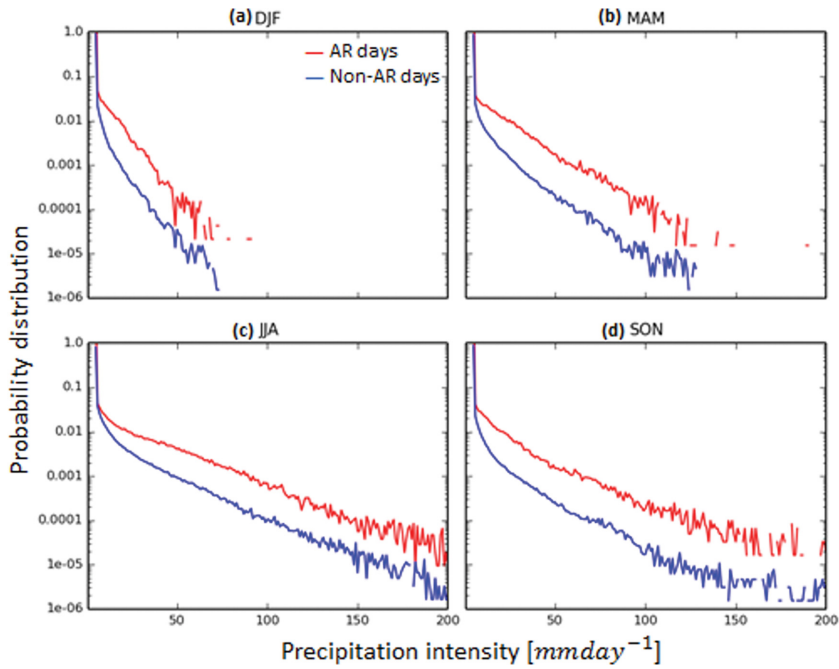


Fig. 6. The PDFs of daily precipitation intensity of AR days (red lines) and Non-AR days (blue lines) for (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA and (d) SON.

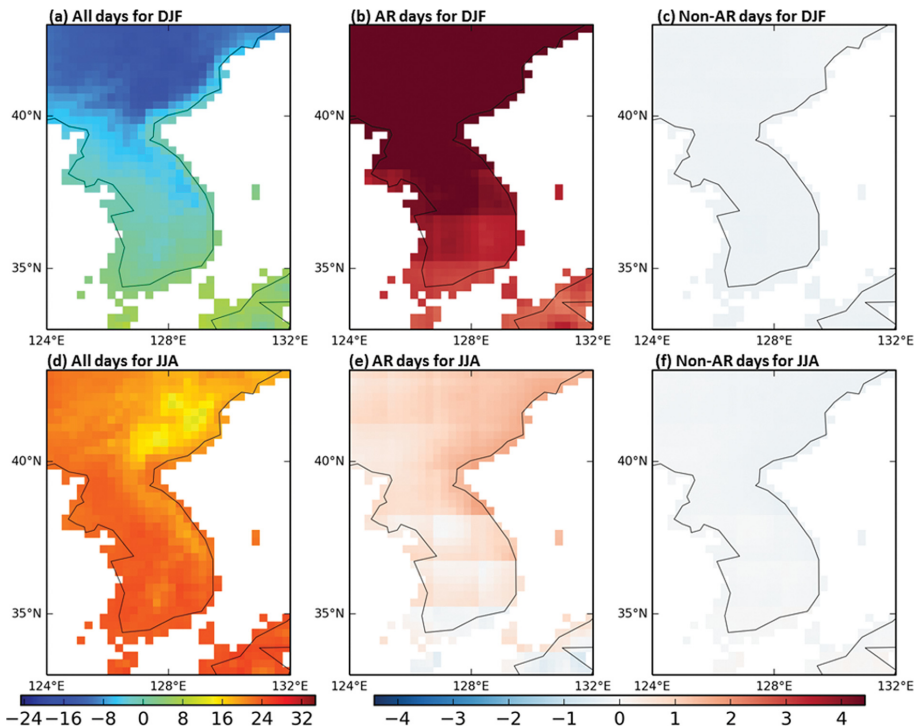


Fig. 7. The surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) for all days (left panels). The difference of surface temperature between AR days (middle panels), non-AR days (right panels) and all days for DJF (upper panels) and JJA (lower panels).



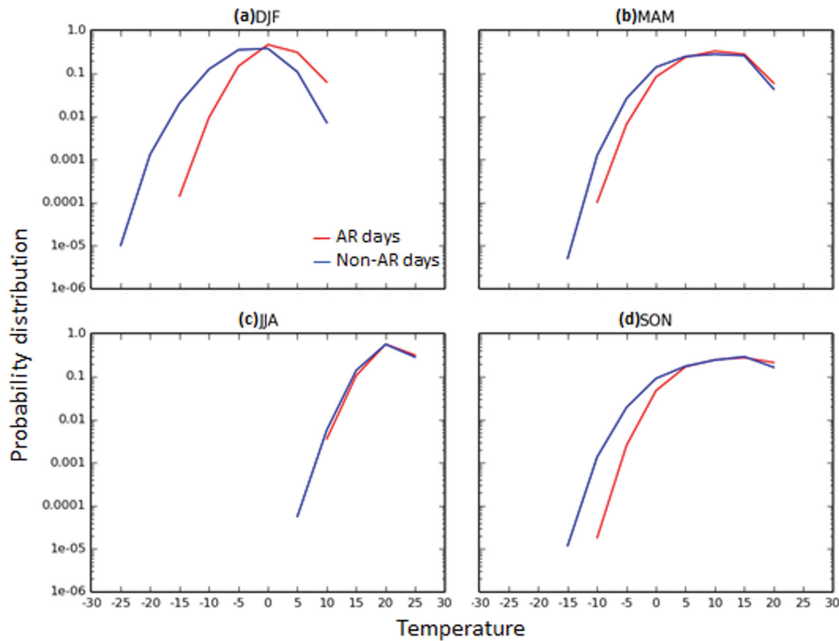


Fig. 8. Same as Fig. 6 but for the surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ).

철이 여름철보다 기온 증가가 크게 나타났고, 북쪽으로 갈수록 기온이 크게 상승하였다. 겨울철에 남쪽 지역은 약  $2^{\circ}\text{C}$  이상, 북쪽 지역은 약  $5^{\circ}\text{C}$  이상의 기온 상승이 있었다. 여름철에는 북쪽일수록 그리고 동쪽일수록 기온 상승이 크게 나타났다. 그러나 남해안 일부 지역은 기온이 약간 감소하는 지역도 있었다. 또한 AR 미발생일과 전체일에 대한 차이는 크지 않았으나 약  $1^{\circ}\text{C}$  이하의 기온 감소가 나타났다.

강수와 마찬가지로 기온에 대해서도 AR 발생일과 미발생일에 대해서 각 계절별 PDF 분석을 진행하였다 (Fig. 8). 사계절 모두 낮은 기온의 발생 확률이 감소하고, 높은 기온의 발생 확률이 증가하였다. 그 중에서도 겨울철에 가장 뚜렷한 차이가 나타났다. 여름철에는 기온 분포의 차이가 크지 않았지만, AR이 발생할 경우  $5\sim 10^{\circ}\text{C}$  사이의 저온의 기온 분포가 나타나지 않았다. 봄과 가을에는 낮은 기온의 감소가 상대적으로 크게 나타났으며, 높은 기온의 변화는 약간 증가하였다.

AR 상륙과 기온의 관계는 AR이 상륙할 때 나타나는 특정한 중관 기상 조건에 의해 결정된다. 예를 들어 복사와 같은 지역적인 강제력과 온난 이류와 같은 중관 순환 등에 따라 영향을 받으나, 세부적인 과정들은 본 연구에서 다루기에 너무 복잡하다. 이 분석의 결과는 각각 하나의 격자에 대한 것이며, 연속적인 공간(중관장)을 고려하지 않았기 때문에 기온 변화에 대한 물리적인 원인을 밝히기 어렵다. 본 연구와 다른 방법으로 중관장을 고려한 결과를 마지막 장

에서 토의하였다. 또한 이에 대해서는 더 자세한 분석이 필요하며, 추후 연구에서 진행할 계획이다.

### 5. 요약 및 토의

본 연구에서는 한반도에 AR이 상륙한 경우, 강수와 기온에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 먼저 전 지구적인 AR 발생빈도를 연평균, 각 계절별로 논의하였다. 전체 분석기간(1979~2015) 동안에 AR 발생빈도는 계절별, 지역별 변동성에서 큰 차이를 보였다. 중위도 해양에서 가장 빈번하게 발생하였으며 열대와 극 지역에서는 거의 발생하지 않았다. 겨울철에는 대륙의 서쪽 해안인 미국 서부, 서유럽, 오스트레일리아 남서쪽에서 빈도가 높으며, 여름철에는 동아시아 해안 지역에서 높게 나타났다. 예외적으로 칠레 남부는 남반구 봄을 제외하고 다른 계절 내내 발생빈도가 높았다. 한반도 지역에 대해서는 봄과 여름에 AR이 자주 상륙했으며, 지역별로도 뚜렷한 차이를 보였다.

계절별 AR fraction을 분석한 결과, 전 계절에서 AR이 존재했던 날에 AR에 의한 강수량이 차지하는 비율이 높게 나타났다. 특히 여름철엔 한반도 남쪽 지역의 AR fraction이 35% 이상, 남부 지역은 최대 40% 이상을 차지하였으며, 다른 계절에도 한반도 남쪽 지역은 겨울철에 20% 이상, 봄과 겨울철엔 35% 이상이었다. 특히 이러한 결과는 한반도 수자원과 연관하여 AR이 중요한 영향을 미치고 있다는 것을 의미한다.

한반도에 AR이 상륙한 경우, 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 강수강도가 크게 증가했으며, 특히 여름에 남해안 지역에서 강수강도가 크게 증가되었다. AR 상륙으로 인해 강수강도가 강해지는 지역은 AR fraction이 높은 지역과 비슷한 분포를 나타냈다. 즉, AR이 발생하면 전체 강수량을 증가시키며, 강한 강수(극한 강수)의 증가에도 영향을 미친다.

한반도 지역의 95%ile 강수의 강도는 지역적으로 보았을 때 겨울과 여름 모두 남부 지역에서 크게 증가하였고, 여름철에는 한반도 남쪽의 산 지형에서 크게 증가하였다. AR 발생일과 미발생일에 대한 계절별 PDF 분석을 통해서 사계절 모두 AR 발생일에 중간 및 강한 강도의 강수 확률의 증가가 뚜렷하였다.

AR이 상륙한 경우, 겨울철과 여름철에 한반도 전체에서 기온이 증가하였고, 겨울철이 여름철보다 기온 증가가 크게 나타났으며, 북쪽으로 갈수록 기온이 크게 상승하였다. 또한 사계절 모두 AR이 상륙하면 낮은 기온의 발생 확률이 감소하고, 높은 기온의 발생 확률이 증가하였다. 여름철에는 기온 분포의 차이가 크지 않았지만, AR이 발생한 경우 낮은 기온이 발생하지 않았다. 봄, 가을에는 낮은 기온의 감소가 상대적으로 크게 나타났으며, 높은 기온의 변화는 약간 증가하였다.

본 연구를 통해 AR이 한반도에 상륙하면 전체 강수량이 증가하며, 중간 및 강한 강도의 강수가 더 강해지는 것을 알 수 있었다. 또한 AR 상륙은 모든 계절에 걸쳐 극한 강수 발생 확률이 증가하는 경향을 나타냈으며, 특히 여름철에 이러한 경향이 가장 뚜렷하였다. 기온 또한 증가하는 경향이 있으며, 사계절 모두 높은 기온의 발생 확률이 높아지고 낮은 기온의 발생 확률이 없어지거나 낮아졌다.

기온 변화를 종관 분석으로 이해하고자 PDF를 계산했던 한반도 남쪽 지역(125.5°-129°E, 34.5°-38°N)에 대해서, Guan and Waliser (2015)에서 정의된 “landfall” (AR의 중심축의 끝부분이 육지와 처음 만나는 지점) 한 날을 계절별로 추출하여, 그날에 대한 기온과 바람을 분석하였다(그림 미제시, ERA-INTERIM 자료 사용). 사계절 모두 한반도 근처 대기 하층(850 hPa)에서 남풍-남서풍 아노말리가 나타났다. 850 hPa 기온 아노말리는 사계절 모두 한반도 대부분 지역에서 양의 아노말리였으며, 가을, 봄, 겨울 순서로 컸고 여름철에 가장 작았다. 남한 지역의 양의 기온 아노말리는 AR이 상륙하면서 남풍과 남서풍에 의한 따뜻한 공기의 이류로 야기되었다고 생각한다. 본 연구의 4장에서 언급한 PDF 분석은 각 격자마다 AR 유무에 따라 분석을 진행하였기 때문에 이러한 접근법이 다소 상이하다. 하지만 종관 분석을 통한 한반도 기후 변화에 AR이 미치는 영향 연구는 본 연구에서 사용

한 방법인 공간 격자마다의 일별 분석 외에 다른 방법을 이용한 차후 연구를 통해서 밝힐 필요가 있다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「AR6 기후변화 시나리오 개발·평가」(1365003000)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597, doi:10.1002/qj.828.
- Dettinger, M. D., F. M. Ralph, T. Das, P. J. Neiman, and D. R. Cayan, 2011: Atmospheric rivers, floods and the water resources of California. *Water*, **3**, 445-478, doi:10.3390/w3020445.
- Espinoza, V., D. E. Waliser, B. Guan, D. A. Lavers, and F. M. Ralph, 2018: Global analysis of climate change projection effects on atmospheric rivers. *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 4299-4308, doi:10.1029/2017GL076968.
- Gimeno, L., R. Neito, M. Vazquez, and D. A. Lavers, 2014: Atmospheric rivers: a mini-review. *Front. Earth Sci.*, **2**, doi:10.3389/feart.2014.00002.
- Guan, B., and D. E. Waliser, 2015: Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 12514-12535, doi:10.1002/2015JD024257.
- \_\_\_\_\_, N. P. Molotch, D. E. Waliser, E. J. Fetzer, and P. J. Neiman, 2010: Extreme snowfall events linked to atmospheric rivers and surface air temperature via satellite measurements. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L20401, doi:10.1029/2010GL044696.
- Kamae, Y., W. Mei, and S.-P. Xie, 2017a: Climatological relationship between warm season atmospheric rivers and heavy rainfall over East Asia. *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 411-431, doi:10.2151/jmsj.2017-027.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, M. Naoi, and H. Ueda, 2017b: Atmospheric rivers over the Northwestern Pacific: climatology and interannual variability. *J. Climate*, **30**, 5605-5619, doi:10.1175/JCLI-D-16-0875.1.
- Kim, J., D. E. Waliser, P. Neiman, B. Guan, J.-M. Ryoo, and G. A. Wick, 2013: Effects of atmospheric river landfalls on the cold season precipitation in California. *Climate. Dyn.*, **40**, 465-474, doi:10.1007/s00382-012-1322-3.
- \_\_\_\_\_, and Coauthors, 2018: Winter precipitation charac-

- teristics in western US related to atmospheric river landfalls: observations and model evaluations. *Climate Dyn.*, **50**, 231-248, doi:10.1007/s00382-017-3601-5.
- Lavers, D. A., and G. Villarini, 2013: The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 3259-3264, doi:10.1002/grl.50636.
- \_\_\_\_\_, R. P. Allan, E. F. Wood, G. Villarini, D. J. Brayshaw, and A. J. Wade, 2011: Winter floods in Britain are connected to atmospheric rivers. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L23803, doi:10.1029/2011GL049783.
- \_\_\_\_\_, G. Villarini, R. P. Allan, E. F. Wood, and A. J. Wade, 2012: The detection of atmospheric rivers in atmospheric reanalyses and their links to British winter floods and the large-scale climatic circulation. *J. Geophys. Res.*, **117**, D20106, doi:10.1029/2012JD018027.
- \_\_\_\_\_, R. P. Allan, G. Villarini, B. Lloyd-Hughes, D. J. Brayshaw, and A. J. Wade, 2013: Future changes in atmospheric rivers and their implications for winter flooding in Britain. *Environ. Res. Lett.*, **8**, 034010, doi:10.1088/1748-9326/8/3/034010.
- Mundhenk, B. D., E. A. Barnes, and E. D. Maloney, 2016: All-season climatology and variability of atmospheric river frequencies over the North Pacific. *J. Climate*, **29**, 4885-4903, doi:10.1175/JCLI-D-15-0655.1.
- Neiman, P. J., F. M. Ralph, G. A. Wick, J. D. Lundquist, and M. D. Dettinger, 2008: Meteorological characteristics and overland precipitation impacts of atmospheric rivers affecting the West Coast of North America based on eight years of SSM/I satellite observations. *J. Hydrometeorol.*, **9**, 22-47, doi:10.1175/2007JHM855.1.
- \_\_\_\_\_, L. J. Schick, F. M. Ralph, M. Hughes, and G. A. Wick, 2011: Flooding in Western Washington: The connection to atmospheric rivers. *J. Hydrometeorol.*, **12**, 1337-1358, doi:10.1175/2011JHM1358.1.
- Paltan, H., D. E. Waliser, W. H. Lim, B. Guan, D. Yamazaki, R. Pant, and S. Dadson, 2017: Global floods and water availability driven by atmospheric rivers. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 10387-10395, doi:10.1002/2017GL074882.
- Ralph, F. M., P. J. Neiman, and G. A. Wick, 2004: Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/98. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1721-1745.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, S. I. Gutman, M. D. Dettinger, D. R. Cayan, and A. B. White, 2006: Flooding on California's Russian River: role of atmospheric rivers. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13801, doi:10.1029/2006GL026689.
- Rutz, J. J., W. J. Steenburgh, and F. M. Ralph, 2014: Climatological characteristics of atmospheric rivers and their inland penetration over the Western United States. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 905-921, doi:10.1175/MWR-D-13-00168.1.
- Wick, G. A., P. J. Neiman, and F. M. Ralph, 2013: Description and validation of an automated objective technique for identification and characterization of the integrated water vapor signature of atmospheric rivers. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **51**, 2166-2176, doi:10.1109/TGRS.2012.2211024.
- Yatagai, A., O. Arakawa, K. Kamiguchi, H. Kawamoto, M. I. Nodzu, and A. Hamada, 2009: A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **5**, 137-140, doi:10.2151/sola.2009-035.
- \_\_\_\_\_, K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi, and A. Kitoh, 2012: APHRODITE: constructing a long-term daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1401-1415 doi:10.1175/BAMS-D-11-00122.1.
- Zhu, Y., and R. E. Newell, 1994: Atmospheric rivers and bombs. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1999-2002.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 1998: A Proposed Algorithm for Moisture Fluxes from Atmospheric Rivers. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 725-735.