Check for updates

Journal of Climate Change Research 2023, Vol. 14, No. 2, pp. 103~118
DOI: https://doi.org/10.15531/KSCCR.2023.14.2.103

# 대기의 강(Atmospheric River)이 남한의 스톰과 강수 특성에 미치는 영향

문혜진*† · 김진원** · 김진욱*** · 변재영**** · 변영화***** · 이명희******

*기상청 국가기상위성센터 연구원, **국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구위원, ***국립기상과학원 기후변화예측연구팀 연구사,
****기상청 국가기상위성센터 연구관, *****국립기상과학원 기후변화예측연구팀 팀장, ******기상청 국가기상위성센터 과장

# The Effects of Atmospheric Rivers on Storms and Precipitation Characteristics in South Korea

Moon, Hyejin*† · Kim, Jinwon** · Kim, Jin-Uk*** · Byon, Jae-Young**** · Byun, Young-Hwa***** and Lee, Myoung-Hee******

*Researcher, National Meteorological Satellite Center (NMSC), Korea Meteorological Administration (KMA), Jincheon, Korea
**Principal Researcher, Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences (NIMS), Seogwipo, Korea
***Research Scientist, Climate Change Research Team, NIMS, Seogwipo, Korea
****Deputy Director, NMSC, KMA, Jincheon, Korea
*****Director, Climate Change Research Team, NIMS, Seogwipo, Korea
******Director, NMSC, KMA, Jincheon, Korea

## ABSTRACT

Atmospheric rivers (ARs) that are characterized by an elongated plume of intense vertically-integrated water-vapor transport (IVT) in the atmosphere, are critical in the occurrence of heavy precipitation and hydrologic extremes, especially in the mid-latitudes, in addition to the poleward water-vapor transport. Although ARs affect regional hydrology and can lead to natural disasters, few studies have examined the relationship between ARs and continuous precipitation events like storms. This study analyzes the climatology of AR-related precipitation in South Korea (SK) on the basis of storm events. In SK, AR storms undergo a well-defined annual cycle with a peak in July and outnumber non-AR storms in all months. AR (non-AR) storm duration exhibits an annual cycle with the peak in August (no systematic annual cycle). AR storms are related to larger (smaller) IVT over East Asian coastal regions (western North Pacific) compared to non-AR storms. The IVT difference appears to lead to precipitation differences such that AR storms dominate non-AR storms in monthly and annual-total precipitation, especially in summer. The effects of AR storms on monthly storm-total and storm-mean precipitation are strongest in the central (July) and southern (August) parts of SK and decrease gradually towards the north. Seasonal variations in the occurrence and intensity of AR storms and associated daily precipitation in SK are characterized by a small number of heavy-precipitating AR storms in June and September and a large number of heavy-precipitating AR storms in July and August.

*Key words: Atmospheric River, Water Vapor Transport, Storm, Precipitation*

## 1. 서론

Atmospheric river (AR)는 저위도의 대기 중 수증기가 좁고 긴 통로 모양으로 고위도로 수송되는 현상을 지칭한다. 이러한 AR이 중위도 지역의 육지에 도달하게 되면 폭우와 홍수 등과 같은 극한 수문 현상에 영향을 준다(Kim et al., 2018; Gimeno et al., 2014; Rutz et al., 2014; Kim et al., 2013; Guan et al., 2010; Neiman et al., 2008; Ralph et al., 2006; Zhu and Newell, 1998, 1994). AR은 주로 중위도 저기압과 연관된 한랭전선 전면의 따뜻한 지

†Corresponding author : hjmoon12@korea.kr (NMSC, 64-18, Guam-gil, Gwanghyewon-myeon, Jincheon-gun, Chungcheongbuk-do 27803, Korea. Tel. +82-70-7850-5918)

ORCID 문혜진 0000-0001-5173-8580 변재영 0000-0002-6720-2163
김진원 0000-0003-3966-7219 변영화 0000-0002-6074-4461
김진욱 0000-0001-9892-9915 이명희 0000-0002-1447-734X

Received: January 4, 2023 / Revised: January 27, 2023 1st, February 17, 2023 2nd / Accepted: March 6, 2023

역에서 나타나는 하층 제트와 관련되어 나타난다(Ralph et al., 2006, 2004). 최근 연구에서는 북미의 태평양 연안 지역에 상륙하는 AR의 82%가 중위도 저기압과 연관되어 있음을 발견하였다(Zhang et al., 2019). 중위도 저기압 이외에도 제트기류와 로스비파 변형 등 다양한 요인들이 AR에 영향을 미친다(Horinouchi, 2014; Payne and Magnusdottir, 2014). AR은 전지구적으로 영향을 주며, AR이 미국과 유럽 서부 지역의 강수 등과 같은 수문 현상에 주는 영향들에 대해서는 잘 알려져 있다(e.g., Kim et al., 2013; Lavers and Villarini, 2013; Lavers et al., 2012; Dettinger et al., 2011; Neiman et al., 2011; Guan et al., 2010; Neiman et al., 2008; Ralph et al., 2006). 그러나 동아시아에 미치는 AR의 영향에 대한 연구는 많지 않다.

한반도를 포함한 동아시아는 여름 몬순이 활발하며, 여름에 많은 강수가 집중되어 홍수 및 산사태 등 호우와 관련된 피해가 자주 발생한다. 열대 지역에서부터 동아시아에 이르는 남북방향의 수증기 수송은 북반구 여름철에 최대이며(Knippertz and Wernli, 2010), 이는 동아시아 여름 강수와 연관되어 있다. 또한 여름에 나타나는 메이유-바이유 그리고 장마와 같은 강수밴드를 통해 동아시아 및 한반도에 많은 양의 강수를 야기한다(e.g., Oh and Ha, 2015; Sampe and Xie, 2010; Ninomiya and Akiyama, 1992; Tao and Chen, 1987). 최근 몇몇의 연구들에서 AR이 동아시아 여름 강수에 영향을 준다고 밝히고 있다. 동아시아 여름 몬순이 발달하고, 엘니뇨 이후의 여름에 나타나는 열대 북서태평양의 하층 고기압은 북서태평양 AR의 영향을 증가시키고 열대로부터의 하층 수증기 수송을 강화시킨다(Kamae et al., 2017b). 또한 여름철 북서태평양에서 나타나는 AR은 열대 인도양과 태평양 지역의 대기와 해양이 결합된 모드에 의해 주로 조절되며, 동아시아 여름 몬순의 변동성과 관련이 있다(Kamae et al., 2017a). Park et al.(2021)은 AR이 동아시아 여름 몬순 강수에 많은 부분을 차지하며, 특히 이른 여름 몬순 시기의 강한 강우와 관련되어 있다고 밝혔다. 또한 동아시아 여름 몬순의 이른 시기에 나타나는 AR은 준정체(quasi-stationary) 몬순의 남서풍 강화와 관련된 반면, 동아시아 여름 몬순의 늦은 시기의 AR은 몬순류에 의해 약해지며, 중위도 종관장에 의한 영향을 더 많이 받는다고 설명하였다. 한반도에 AR이 상륙하는 경우에 전체 강수량과 평균 및 극한 강수강도 또한 증가하였다(Moon et al., 2019). 또한 여름철 동아시아의 경우, AR이 상륙하는 빈도가 높으며 한반도의 연간 강수량 또한 여름철에 집중되어 있고 이 지역에 AR의 영향으로 인한 호우와 같은 막대한 수문학적 피해가 발생할 가능성이 증가한다(Kim et al., 2020; Moon et al., 2019; Kamae et al., 2017a).

인위적인 온실 기체 증가로 인해 현재 보고되고 있는 기후 변화는 바람, 스톰트랙과 강수 등에 영향을 미치는 대기 순환과 수증기량을 변화시킨다(Lavers and Villarini, 2015; Mbengue and Schneider, 2013). 이러한 기후 변화는 AR과 AR에 의한 지역적인 수문현상의 변화를 야기할 수 있다. 지구 온난화로 인해 전지구적으로 여러 지역에서 AR의 강도와 빈도 모두 증가한다고 알려져 있다(O'Brien et al., 2022; Kamae et al., 2021; Whan et al., 2020; Dettinger, 2011). 또한 기후 변화로 인한 AR의 활동 변화는 지역적으로 극한 현상을 발생시켜 인간의 생명과 재산에 큰 피해를 줄 수 있다. 그러므로 AR의 활동과 지역적인 수문 현상에 대한 정량적인 이해는 효율적인 수자원 관리와 재난 방지에 매우 중요하다.

현재까지 진행된 AR에 대한 대부분의 연구들은 AR이 영향을 주는 시각 또는 일 단위 등 짧은 시간 규모에 대해서 분석이 진행되었다. 그러나 홍수 및 산사태와 같은 강수 피해는 일 강수량만이 아니고 강수 지속 기간과 총강수량과도 밀접하게 관련되어 있으므로 각 AR의 영향을 받는 기간에 대한 분석이 매우 필요하다. Lamjiri et al. (2017)은 연속된 강수 현상을 스톰(storm)으로 정의하고, 스톰에 대한 AR의 영향을 미국 서부 지역에 대해 분석하였다. 미국 서부 해안의 연 강수량의 30 ~ 50%는 AR에 의해서 영향을 받으며, 가장 강한 스톰 중에서도 60 ~ 100% 백분위에 해당하는 극한 스톰에 대한 AR의 영향이 특히 크다고 밝혔다.

본 연구에서는 남한에 상륙한 AR이 지속적인 강수를 유발하는 스톰에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 분석하였다. 2장에서는 사용된 재분석 및 AR 자료와 스톰을 정의하는 방법에 대해 설명하고, 3장에서는 남한의 스톰에 미치는 영향에 대해, 4장과 5장에서는 남한이 AR 스톰의 영향을 받는 경우에 대한 강수 특성(4장)과 동아시아 종관 특성(5장)을 설명하고, 6장에서는 주요 결과를 요약하고 토의하였다.

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 자료

AR은 위성 등의 관측 자료나 재분석 자료에서 제공하

는 수증기 또는 수증기 수송 자료 등을 통해서 탐지된다. 본 연구는 Guan and Waliser (2015)로부터 제공받은 AR 자료와 고해상도의 장기 관측된 강수 자료를 사용하였다. AR 산출에 사용된 재분석자료는 유럽중기예보센터(ECMWF, European Centre for Medium-range Weather Forecasts)의 ERA-Interim (ECMWF Re-Analysis − Interim)을 사용하였고, 공간수평격자는 1.5° × 1.5°이고, 시간 간격은 6시간이다(Dee et al., 2011). 이 자료로 계산된 연직 적분된 수증기 수송량(IVT, Integrated water vapor transport)을 이용하여 AR이 산출되었고, 자세한 산출방법은 Guan and Waliser (2015)을 참고하였다.

분석에 사용된 IVT 강도는 비습과 바람장으로부터 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, q는 비습, u와 v는 각각 동서와 남북 바람이며, g는 중력가속도이다.

다음 단계는 각 공간 격자의 IVT 강도에 대한 한계치(threshold value)를 계산하는 것이다. 각각의 모든 공간 격자에 대해 각 월마다 해당 월을 기준으로 앞뒤 2개월에 대하여 총 5개월 동안의 기후 평균된(1979~2015년) IVT 강도 분포의 85%를 초과해야 한다. 이 조건을 만족하는 연속된 IVT 무리의 길이가 2000km 이상이고, 무리의 길이가 폭보다 2배 이상 큰 경우를 AR로 정의한다. 더 자세한 설명은 Guan and Waliser (2015)에서 찾을 수 있다.

강수 관측 자료는 APHRODITE (Asian Precipitation − Highly-Resolved Observation Data Integration Towards Evaluation)를 사용하였고, 공간수평격자는 0.25°×0.25°이며, 시간 간격은 하루(일 자료)이다(Yatagai et al., 2012, 2009). AR과의 연관성을 격자 별로 분석하기 위해서 격자 자료를 사용하였으며, 지속적인 강수에 대한 분석이므로 일 자료를 사용하였다. 이 자료를 이용하여 AR이 남한 지역의 강수에 미치는 영향을 분석하였다.

본 분석에 사용한 AR자료(AR 영역, IVT 강도)는 6시간 간격의 재분석 자료를 사용하여 하루에 4번 생산되었다. APHRODITE 강수 자료와의 시간 간격 차이를 고려하여 하루에 4번 정의된 AR 영역을 모두 합하여, AR 영역에 대한 일 자료를 재생산하였다. 그날 AR의 영향을 받은 모든 지역에 대해서 분석하므로, 하루 4번 중에서 한번 이상 AR이 있으면, 일 간격 자료에 AR이 영향을 준 것으로 정의하였다. 또한 ERA-Interim (1.5° × 1.5°)의 격자 하나에 36개의 APHRODITE (0.25° × 0.25°) 격자가 겹쳐진다. 두 자료를 비교하기 위해 선행 연구에서 재분석 자료(ERA-Interim) 하나의 격자가 AR로 판명된 경우 36개의 격자(APHRODITE) 모두 AR의 영향으로 정의한 바 있으며(Kim et al., 2020; Moon et al., 2019), 이 연구에서도 같은 방법을 적용하여 분석을 진행하였다. 또한 AR 스톰에 의한 동아시아 지역의 종관 분석을 위하여 ERA-Interim의 해면기압과 500 hPa 지위고도에 대한 일 자료를 사용하였다. 본 연구의 분석 기간은 1979년부터 2015년까지 37년이며, 주로 월별 기후장(climatology)에 대하여 분석하였다.

### 2.2. 스톰 정의 방법

스톰에 대한 정의 방법은 AR 과 스톰을 연계시켜 분석한 Lamjiri et al.(2017)을 기반으로 하였다. Lamjiri et al. (2017)은 한시간 간격의 강수 자료와 6시간 간격의 AR 자료를 사용하여 스톰을 정의하였으나, 본 연구에서는 사용한 자료가 다르기 때문에 시간 간격 및 임곗값을 달리하여 스톰을 정의하였다.

각 격자마다 강수가 없던 날 이후로 하루 강수량이 1 mm day$^{-1}$를 초과하면 강수기간이 시작되고, 하루 강수량이 1 mm day$^{-1}$를 연속적으로 초과하는 기간의 전체 강수량이 5mm 이상인 경우를 하나의 스톰으로 정의하였다. 하루 강수량이 1 mm day$^{-1}$ 이상으로 강수가 지속되다가 1 mm day$^{-1}$ 미만이 되면 스톰이 종료되는 것으로 정의하였다. 각 스톰에 대해서, 다음과 같이 용어를 정의하였다.

- 스톰 전체 강수량(mm): 스톰이 시작된 후부터 종료될 때까지의 전체 강수량
- 스톰 지속기간(day): 스톰이 시작된 후부터 종료될 때까지의 기간
- 스톰 평균 강수량(mm storm$^{-1}$): 분석기간(예, 연 또는 월) 동안의 스톰 전체 강수량을 스톰 개수로 나눈 것으로 분석기간 동안의 하나의 스톰에 대한 평균 강수량
- 스톰 강수강도(mm day$^{-1}$): 스톰 전체 강수량을 스톰 지속기간으로 나눈 것

또한 남한의 스톰에 대한 정의는 Fig. 1의 사각형 영역에 대해 각 요소들을 평균하여 분석에 사용하였다.

각 격자에서 스톰 지속기간 동안에 하루라도 AR의 영

향이 있는 경우 AR 스톰으로 정의하였다. 반대로 스톰 지속기간 동안에 AR의 영향이 하루도 없었던 경우는 non-AR 스톰으로 정의하였다. 이러한 방법으로 정의된 AR 스톰 또는 non-AR 스톰을 기반으로 남한에 대해 각 스톰에 따른 영향 정도를 월별로 분석하였다.

## 3. 남한의 스톰에 미치는 영향

남한에 영향을 미친 전체 스톰을 AR 영향 여부에 따라 AR 스톰과 non-AR 스톰으로 분류하였는데, 전체 스톰 중에서 AR 스톰이 차지하는 비율은 대부분의 분석기간, 분석지역에서 약 50% 이상이었다. 지역별로는 대체로 남해안 지역에서 AR 스톰이 차지하는 비율이 더 높게 나타났다(그림 미제시). 남한에 대해 평균한 경우에도 일년 내내 모두 50% 이상이었고, 2월(71%)과 7월(72%)이 가장 높았고, 1월(53%)과 9월(51%)이 가장 낮았다(Table 1).

남한에 영향을 미친 AR 스톰과 non-AR 스톰은 계절과 지역에 따라 뚜렷한 변화를 보였다. 겨울(1 ~ 2월과 12월)에는 남한의 대부분 지역에서 1개 이하의 AR 스톰에 영향을 받았다(Fig. 1). 3월부터 한달에 2개 이상의

Table 1. Fraction [%] of monthly number of AR storm and total precipitation for AR storm about total storm in South Korea. PR mean precipitation

| Month | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| AR storm | 53 | 71 | 68 | 66 | 58 | 56 | 72 | 62 | 51 | 54 | 66 | 58 |
| AR storm PR | 66 | 82 | 77 | 77 | 72 | 80 | 86 | 80 | 71 | 65 | 76 | 67 |

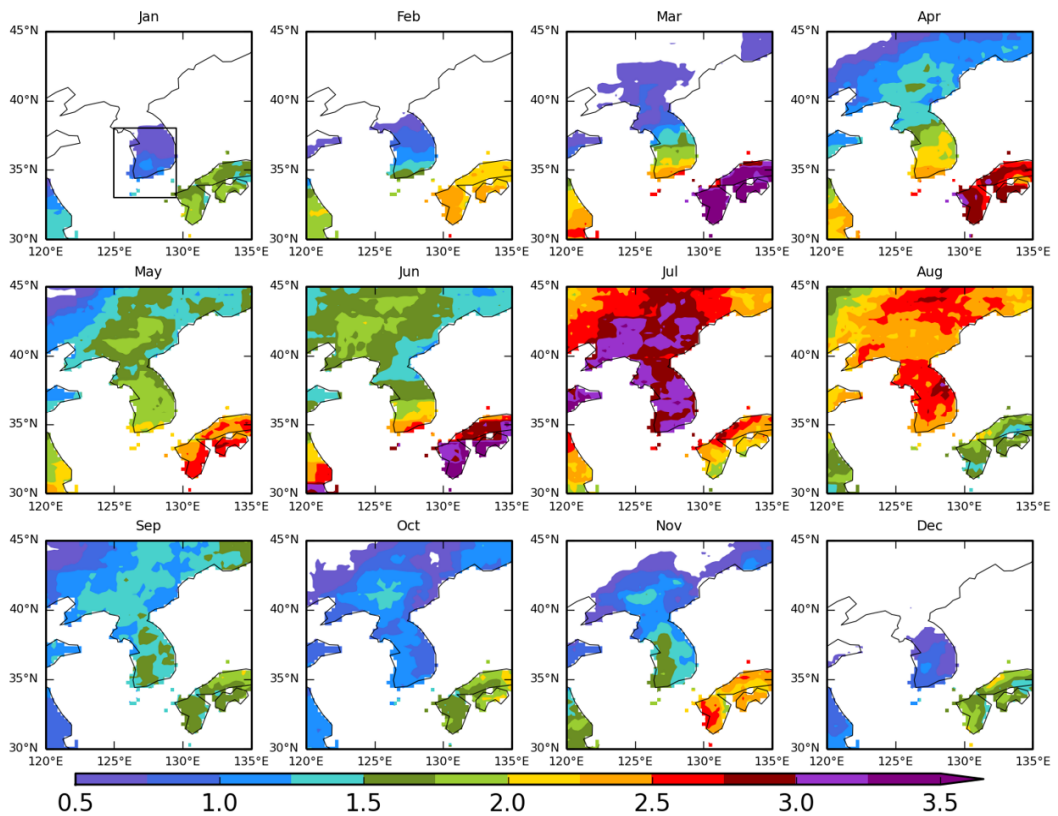


Fig. 1. The monthly mean number of AR storms for the 37-year period (1979 ~ 2015). The rectangle in first panel indicates the location of South Korea in this study

AR 스톰의 영향을 받는 지역이 존재하며, 주로 남쪽 지역이 더 많은 AR 스톰의 영향을 받았다. 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 AR 스톰의 빈도가 증가하며, 6월까지 유사한 남북의 공간 분포를 보였다. 7월에 남한 전체 지역에서 AR 스톰이 약 2.75개 이상으로 일 년 중에서 가장 많은 영향을 받았다. AR 스톰의 빈도가 높은 남해안 지역 등 일부 지역에서는 3개 이상의 AR 스톰이 영향을 미쳐 연간 최댓값을 보였고 8월에 약 2.5개 정도로 그 다음으로 많은 영향을 받았다. 지역적인 분포는 다른 달과 달리 강원도 해안 지역이 많은 영향을 받았고, 남부지역이 상대적으로 적게 영향을 받았다. 9월부터는 남한에 영향을 미치는 AR 스톰의 개수가 점점 감소하여, 모든 지역에서 2개 이하였다. 9월부터 12월까지의 AR 스톰의 공간 분포를 보면 남북보다는 동서 분포가 더 뚜렷하며, 서쪽이 동쪽보다 더 많이 영향을 받았다. Kim et al.(2020)에서 한반도 주변의 월간 AR 빈도가 8월부터 남한의 서쪽보다 동쪽에서 더 높은 것과 반대의 공간분포를 보인다. 이는 Kim et al.(2020)에서는 AR 영향 빈도가 강수지속기간과 관계없이 AR의 영향을 받은 날의 수에 의해 정의되기 때문이다. 본 연구에서는 연속된 강수기간이 하나의 AR 스톰으로 정의된다. 이로 인해 AR 스톰의 개수는 AR 일의 수(Kim et al.(2020) 및 다른 연구에서 정의된 AR 빈도)보다 작으며, 긴 기간의 스톰이 많이 나타날 경우 AR 빈도와 반대되는 AR 스톰 개수의 분포가 나타날 수 있다.

non-AR 스톰은 일년 중에서 6월에 가장 많은 영향을 주었으며, 강원도 지역에서 2개 이상으로 가장 많았다(Fig. 2). 그리고 8월과 9월, 그 다음에 5월과 7월 순서로 non-AR 스톰이 많은 영향을 주었다(Table 2). AR 스톰이 주로 남한의 남부지역에서 많이 영향을 준 것과 달리 non-AR 스톰은 동해안 지역 및 북쪽에서 많이 영향을 주었다. 이는 한반도 남쪽에 AR 빈도가 높은 것과 연관이 있는 것으로 이해된다(Kim et al., 2020; Moon et al., 2019). 5월부터 9월을 제외한 나머지 달(1 ~ 4월, 10 ~ 12월)에는 non-AR 스톰이 대부분 지역에서 1개 이하로 매우 적은 영향을 주었다.

남한의 연평균 AR 스톰 지속기간의 일수는 2.46일이며, non-AR 스톰에 대한 연평균 지속기간의 일수는 1.91

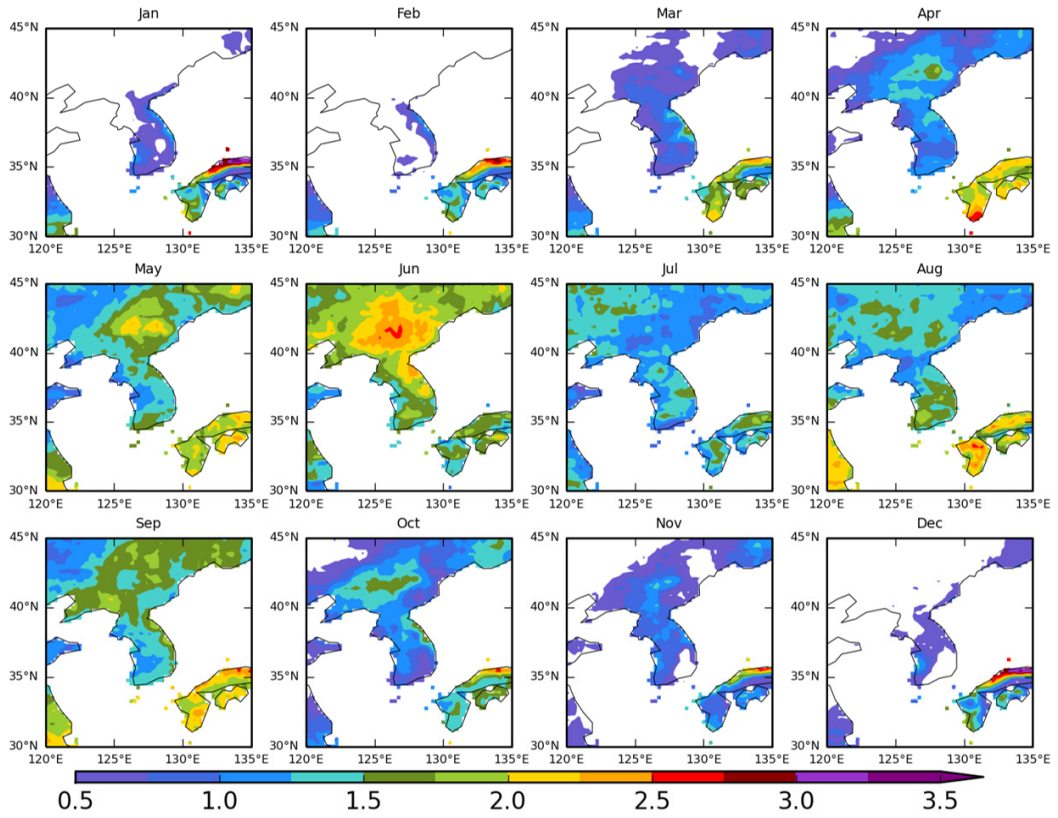


Fig. 2. The monthly mean number of non-AR storms for the 37-year period (1979 ~ 2015)

Table 2. The monthly mean of characteristics for AR storm over South Korea. PR mean precipitation

| Month | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| The number of AR storms | 0.81 | 1.21 | 1.90 | 2.11 | 1.89 | 2.07 | 3.00 | 2.50 | 1.45 | 1.05 | 1.50 | 0.83 |
| The number of non-AR storms | 0.73 | 0.50 | 0.86 | 1.07 | 1.39 | 1.60 | 1.19 | 1.54 | 1.42 | 0.92 | 0.79 | 0.62 |
| Total PR [mm] for AR storms | 14.87 | 27.07 | 43.73 | 64.09 | 69.99 | 133.87 | 217.50 | 189.26 | 88.94 | 30.77 | 33.59 | 13.76 |
| Total PR [mm] for non-AR storms | 8.12 | 5.98 | 11.74 | 19.47 | 26.83 | 31.64 | 34.35 | 48.15 | 36.59 | 16.34 | 10.51 | 6.65 |
| Mean PR [mm/storm] for AR storms | 17.97 | 21.53 | 22.03 | 29.86 | 36.59 | 63.61 | 72.29 | 75.94 | 61.29 | 28.96 | 22.12 | 16.14 |
| Mean PR [mm/storm] for non-AR storms | 10.51 | 11.28 | 13.47 | 17.89 | 18.84 | 19.67 | 29.57 | 31.09 | 25.05 | 17.88 | 13.17 | 10.76 |
| PR intensity [mm/day] for AR storms | 8.43 | 10.19 | 11.41 | 14.06 | 17.58 | 21.60 | 20.17 | 20.96 | 21.54 | 13.88 | 10.82 | 8.33 |
| PR intensity [mm/day] for non-AR storms | 5.80 | 6.68 | 8.36 | 10.47 | 10.23 | 10.19 | 13.60 | 12.85 | 12.71 | 10.07 | 7.06 | 5.63 |

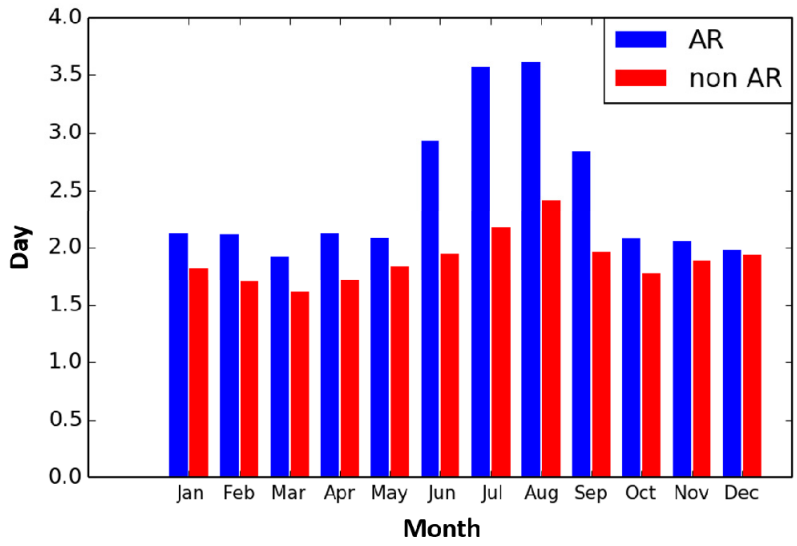


Fig. 3. The monthly mean of duration [day] for AR and non-AR storms in South Korea

일로 AR 스톰의 지속기간이 평균적으로 더 길었으며, t-검증 결과 99%의 유의수준을 만족하였다. 월별로는 7월과 8월의 지속기간이 3.5일 이상으로 가장 길었으며, 그 다음으로는 6월과 9월의 지속기간이 약 3일정도 였다 (Fig. 3). 반대로 3월과 12월은 2일 미만으로 AR 스톰의 지속기간이 가장 짧았다. 6월부터 9월을 제외한 나머지 8개월 동안의 AR 스톰의 평균 지속기간은 약 2일이었다. Non-AR 스톰의 지속기간은 AR 스톰의 지속기간보다 월변동성이 적었으며, 8월에 최대이고, 7월, 9월, 6월 순서로 지속기간이 길었으며 3월에 가장 짧았다. 남한에 영향을 주는 AR 스톰은 7월에 가장 많았고, 8월에 지속기간이 가장 길었다. 또한 non-AR 스톰은 6월에 가장 많은 영향을 주고, 8월에 가장 오래 지속되었다. AR 스톰과 non-AR 스톰 모두 여름에 많은 영향을 주었고, 이로 인한 여름의 강수 또한 많을 것으로 예상된다.

## 4. 남한의 AR 스톰에 의한 강수 특성

이번 장에서는 남한에 나타나는 AR 스톰의 강수 특성에 대해 분석하고, AR의 영향이 크고 강수가 집중된 여름에 대해 중점적으로 설명한다. AR 스톰에 의한 강수는 여름에 집중되었다(Fig. 4). 37년의 분석 기간에 대해 평균할 경우 7월에 중부 지방에서 AR 스톰 강수가 360 mm 이상으로 전체 분석 기간 및 지역 중에서 가장 많았다. 같은 달 남부 지방에서도 240 mm 이상의 AR 스톰 강수가 있었다. 남한 전체에서 AR 스톰에 의한 강수가 두번째와 세번째로 많은 8월과 6월의 경우 남부 지방에서는 각각 240 mm(8월)와 180 mm(6월) 이상으로 AR 스톰에 의한 많은 강수가 있었다.

남한지역 평균 강수의 경우, AR 스톰에 의한 월별 전체 강수량은 7월이 217.5 mm로 최대였고, 12월이 13.76 mm로 최소였다(Table 2). 6월부터 9(8)월까지 4(3)개월 동안에 일년간의 AR 스톰에 의한 전체 강수량에 68%(58%)로 여름에 많은 강수가 집중되어 있었다. 또한 남한 전체 스톰에 의한 강수량 중에서 AR 스톰에 의한 강수량이 차지하는 비율은 연평균 약 75%이고 월별로는 7월에 86%로 최대였고, 1월이 65%로 최소였다(Table 1). 이는 AR 스톰이 연중 남한지역 강수의 대부분을 차지하는 것을 보여준다.

Fig. 5는 한 개의 AR 스톰에 의한 평균 강수량(mm storm$^{-1}$)을 월별로 분석한 결과이다. 남한의 AR 스톰 당 평균 강수량의 연평균값은 39 mm였고, 최대와 최소는 8월(76 mm storm$^{-1}$)과 12월(16 mm storm$^{-1}$)에 나타났다(Table 2). 지역적으로 보면, 7월에 중부지방에서 최대 120 mm이상으로 한 개의 AR 스톰에 동반되는 평균 강수량이 가장 많았으며, 8월은 남부지방이 약 100 mm 이상으로 가장 많았다(Fig. 5). 6월은 남부지방에서 최대 약 80 mm이상의 강수를 동반하였고, 9월은 강원도와 남부지방에서 하나의 AR 스톰이 평균적으로 약 70 mm 이상의 강수를 동반하였다. 6월부터 9월을 제외한 다른 달에는 일부 남해안 지역을 제외하고는 하나의 AR 스톰에 동반되는 강수량이 약 10 ~ 30 mm 정도로 상대적으로 적었다. 반면에 non-AR 스톰 하나당 평균 강수량은 AR 스톰과 비교하였을 때, 약 1/2 정도로 적었다(Table 2).

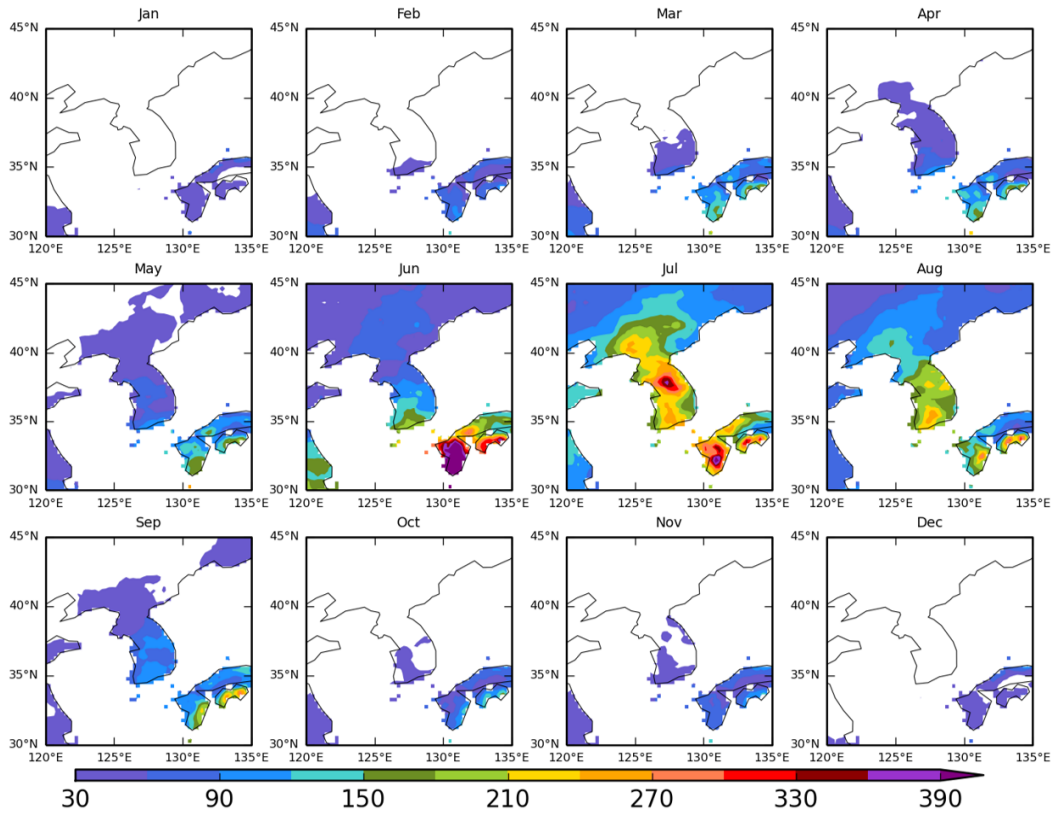


Fig. 4. The monthly mean of total precipitation [mm] for AR storms

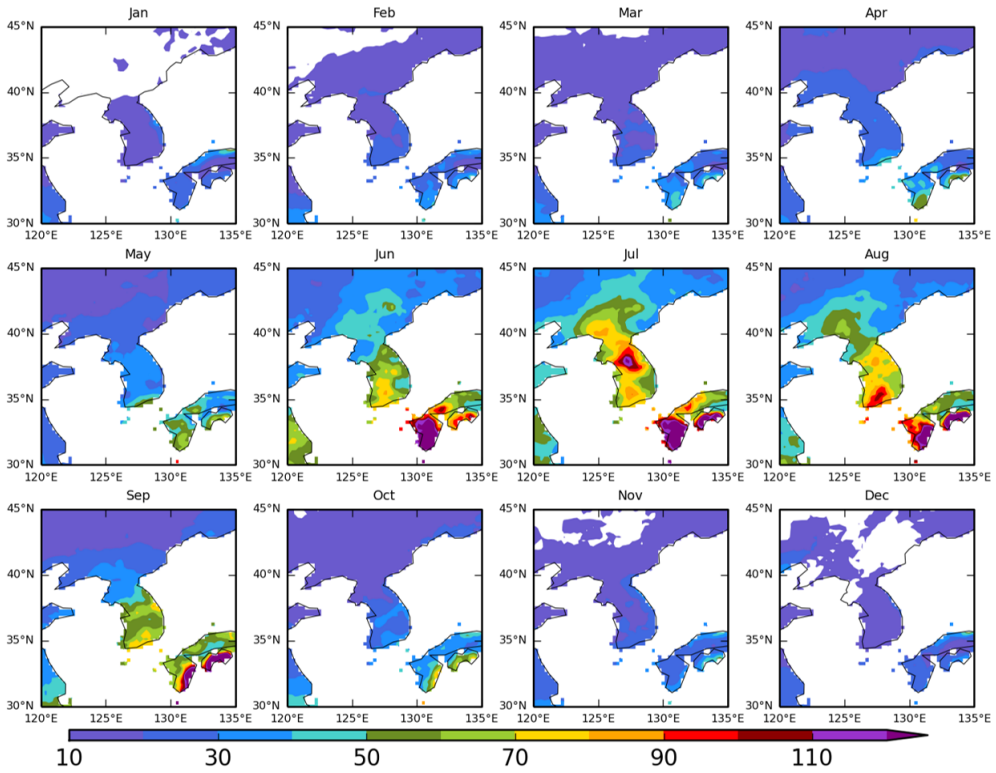


Fig. 5. The monthly mean of mean precipitation [mm storm$^{-1}$] for AR storms

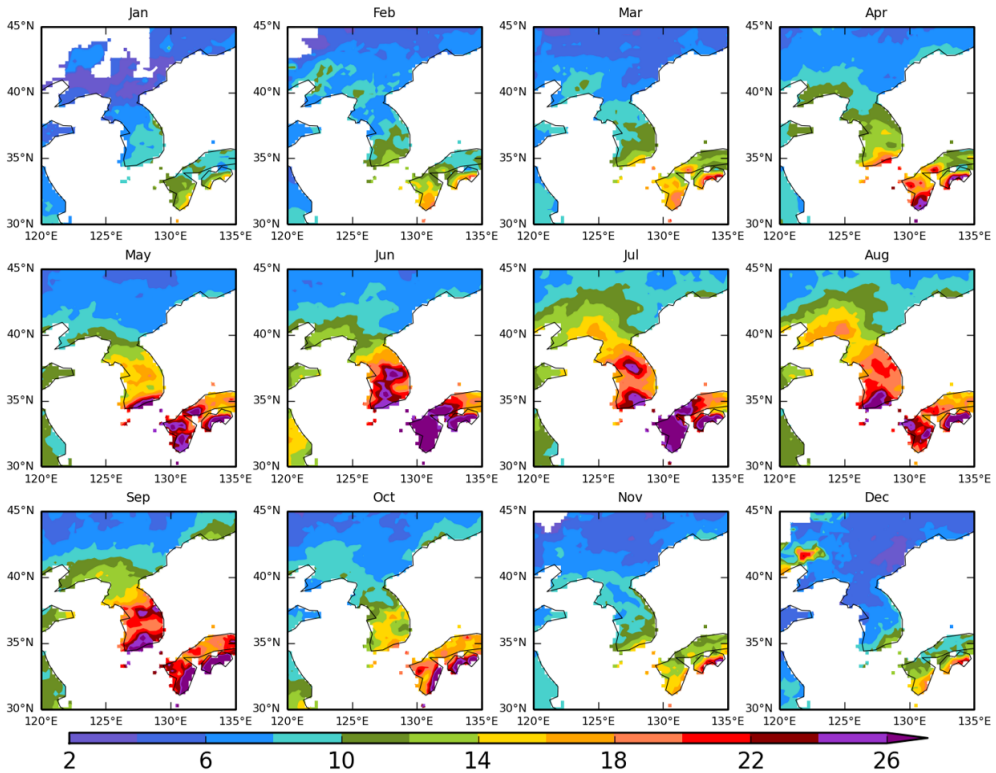


Fig. 6. The monthly mean of precipitation intensity [mm day$^{-1}$] for AR storms

마지막으로 AR 스톰에 의한 평균 일 강수강도를 월별로 분석하였다. 강수강도에 대한 결과는 다른 강수 특성들의 결과와 다른 연 변동성을 보였다(Fig. 6). 6월부터 9월까지 4개월 동안은 남해안 지역과 중부지방에서 약 24 mm day$^{-1}$ 이상의 강한 강수강도를 보였다. 특이한 결과로는 네 달 중에서 6월의 일강수강도가 가장 강하였다(Table 2). 8월은 다른 세 달(6,7,9월)과 달리 중부지방(약 20 ~ 22 mm day$^{-1}$)보다 남해안 지역(최대 26 mm day$^{-1}$ 이상)에서 일강수강도가 뚜렷하게 강하였다. 5월은 남한 중에 남해안 지역에서만 최대 26 mm day$^{-1}$ 이상으로 강수강도가 집중적으로 강하였다.

AR 스톰의 강수강도에 대해 남한을 영역 평균할 경우, 6월이 21.6 mm day$^{-1}$로 강수강도가 가장 강했고, 9월이 21.54 mm day$^{-1}$로 두번째로 강하였다. 7월과 8월은 각각 20.17 mm day$^{-1}$, 20.96 mm day$^{-1}$의 강수강도를 보였다(Table 2). 다른 AR 스톰 특성들이 대부분 7월과 8월에 최댓값을 보이는 데 반해, AR 스톰의 강수강도는 6월과 9월이 최대였고, 6월부터 9월까지 비슷한 강도를 보였다. AR 스톰 개수와 함께 보면, 6월과 9월은 7월과 8월에 비해 AR 스톰에 영향 받는 빈도는 적지만, AR 스톰에 의한 일 강수량이 더 많음을 의미한다.

AR 스톰과 non-AR 스톰에 기인한 강수 특성을 이해하기 위해 AR 스톰 또는 non-AR 스톰인 경우에 대한 연평균과 계절별 수증기 수송(IVT)을 분석하였다. AR 스톰 또는 non-AR 스톰에 해당하는 IVT 값은 스톰 강수량과 같은 방법으로 하루 동안에 남한에 어느 한 지역이라도 AR 또는 non-AR 스톰의 영향을 받은 날에 대하여 IVT를 연 또는 계절 평균하였다. 연 평균 및 모든 계절에서 non-AR 스톰 보다 AR 스톰인 경우에 남한, 일본 서부와 중국 동부를 포함한 동아시아 해안 지역에 IVT가 매우 강하게 나타난다(Fig. 7). 남한이 AR 스톰에 영향을 받는 경우 남한 지역에 양의 IVT 차이가 나타난다. AR 스톰과 non-AR 스톰에 대한 IVT 차이는 한반도, 일본 서부와 중국 동부를 포함한 동아시아 해안에 더 강한 AR 강수를 야기한다(Figs. 7p-t). APHRODITE 강수 자료가 육지에만 국한되기 때문에 Fig. 7에서 확인할 수 없

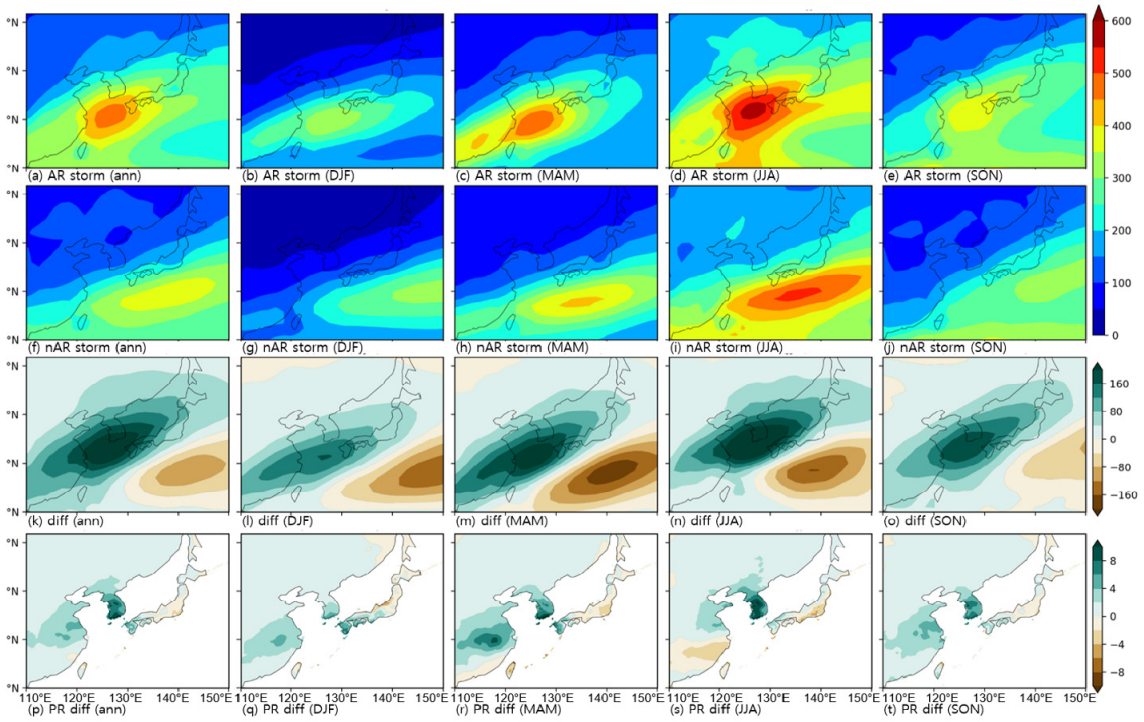


Fig. 7. Annual and seasonal mean composite of IVT [kg $m^{-1}s^{-1}$] for the (a-e) AR storms and (f-j) non-AR storms as well as (k-o) the differences between the AR and non-AR storms over South Korea. Figs. 7. (p-t) are the differences in the annual and seasonal mean precipitation [mm day$^{-1}$] between the AR and non-AR storms

지만, 일본 서쪽의 북서태평양 부근의 강수 또한 강하게 나타날 것이다.

## 5. 남한의 AR 스톰의 동아시아 종관 특성

남한이 AR 스톰이나 non-AR 스톰의 영향을 받은 경우 종관 패턴을 파악하기 위해 각 경우에 대한 해면기압과 500hPa 지위고도를 분석하였다. 하루 동안에 남한에 어느 한 지역이라도 AR 또는 non-AR 스톰의 영향을 받은 날에 대하여 월 평균하였으며, 각 월마다 동아시아 지역이 특정한 종관장의 영향을 받고 있을 가능성을 보여준다. 먼저 AR 스톰의 영향을 받은 경우, 동아시아 지역의 해면기압 아노말리가 대체로 한반도의 서쪽과 동아시아 해안을 따라 AR이 주로 나타나는 경로(한반도의 남서쪽 방향; 중국 동부의 해안 및 연안 지역)에서 음의 값이었다(Fig. 8). 즉 이 기간 동안 한반도가 저기압의 영향을 받을 가능성이 높음을 의미한다. 월별 종관 특성은 겨울과 여름의 뚜렷한 계절적인 차이를 보인다. 1월에서 5월까지는 동서 패턴으로, 한반도, 동해와 한반도 서쪽에 저기압 아노말리, 일본과 일본 동쪽 태평양에 고기압 아노말리가 뚜렷하다. 6월에서 9월의 경우 북태평양에 고기압 아노말리, 동아시아 내륙에는 저기압 아노말리가 나타난다. 북서태평양 고기압의 서쪽 가장자리에 양의 해면기압 아노말리로 북태평양 고기압이 동쪽으로 확장되는 듯한 패턴이 나타났고, 한반도 남동쪽으로 음의 해면기압 아노말리가 뚜렷하며, 이 경계를 따라 AR이 지나온 것으로 추측된다. 또한 여름 동안에 해면기압의 아노말리 강도는 겨울보다 상대적으로 약하게 나타났다. 그리고 11월 이후로 앞에서 설명한 겨울철 종관 특성이 다시 나타나기 시작한다. AR 스톰과 관련된 해면기압장의 구조는 겨울에는 남서-북동의 축을 그리고 여름에 북서-남동의 축을 보이며, 이는 몬순의 진행과 관련이 있을 것으로 추정되며 이에 대한 메커니즘을 알기 위해서는 추후 심층적인 연구가 필요하다. Non-AR 스톰의 영향을 받는 경우, 해면

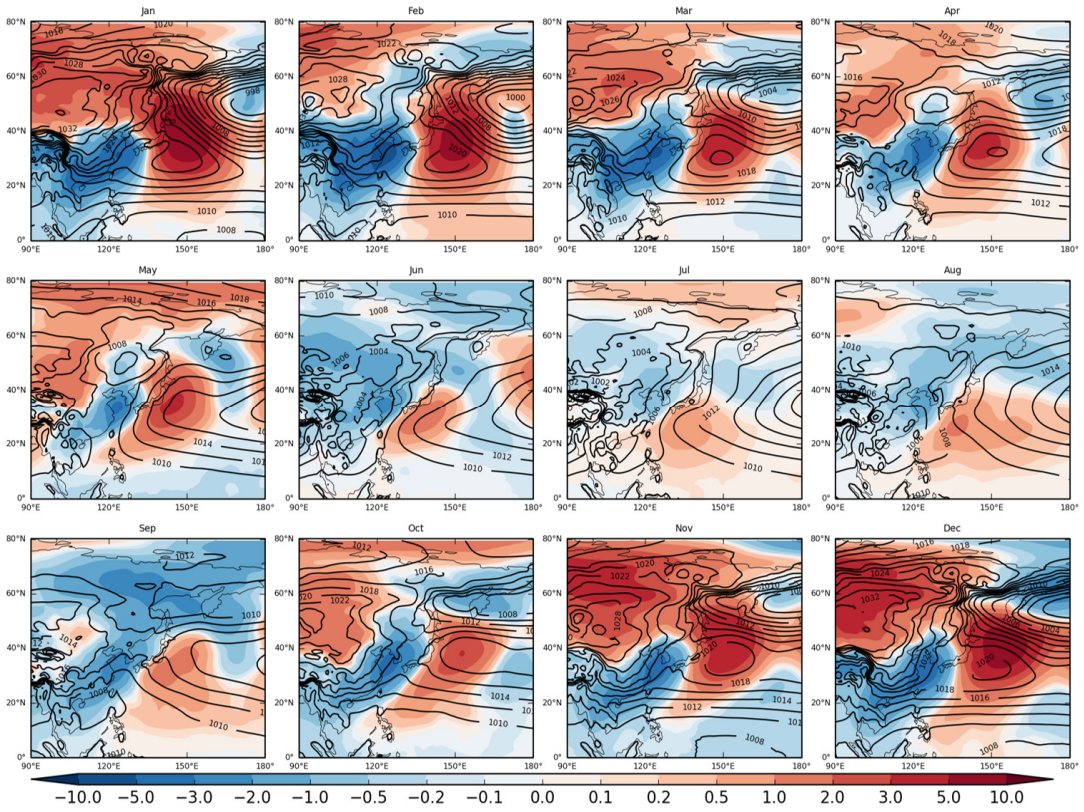


Fig. 8. The monthly mean composite (contour) and anomaly (shading) of sea level pressure [hPa] for AR storms in South Korea

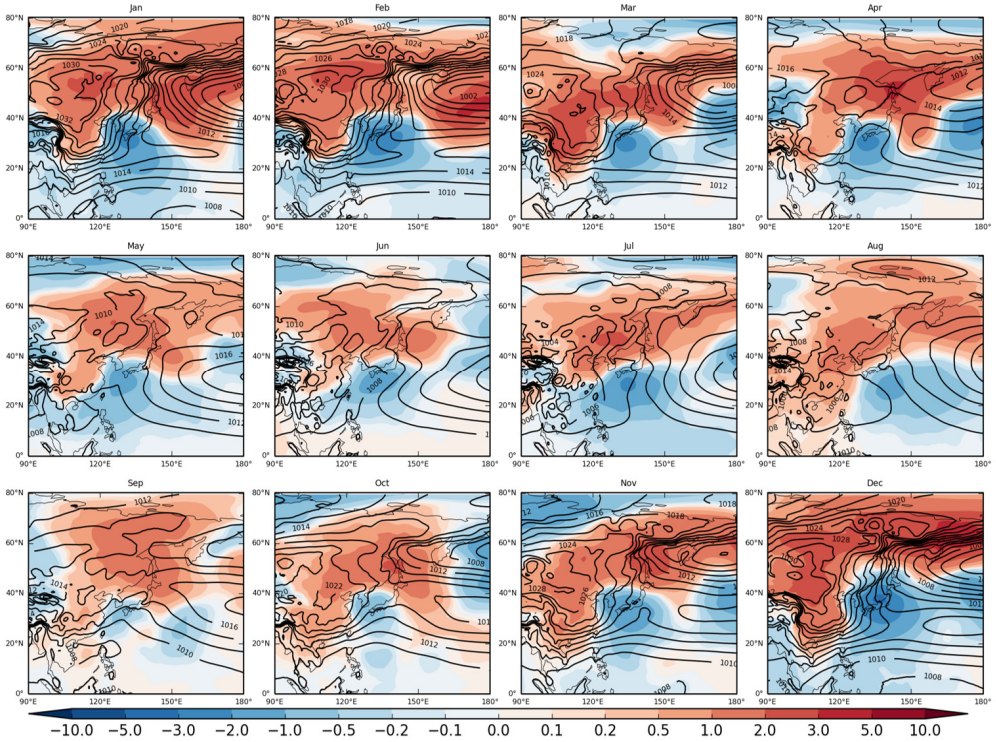


Fig. 9. Same as Fig. 8., except for non-AR storms in South Korea

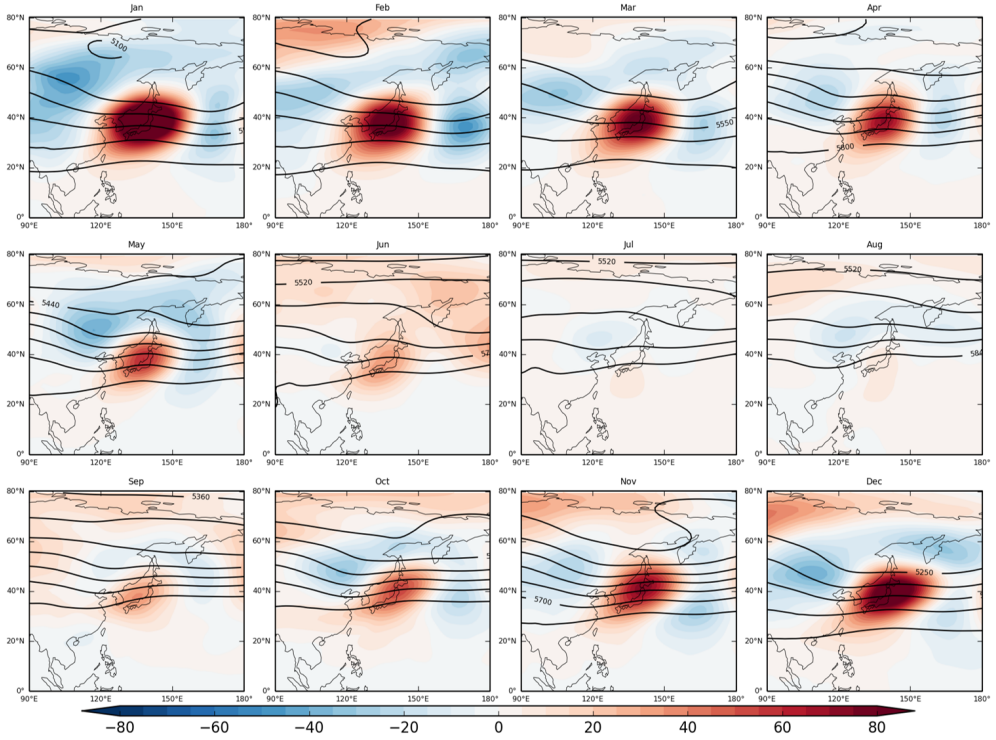


Fig. 10. The monthly mean composite (contour) and anomaly (shading) of 500hPa geopotential height [gpm] for AR storms in South Korea

기압은 일년 내내 남북 방향의 음과 양의 아노말리가 뚜렷하며, 계절적인 차이는 뚜렷하지 않다(Fig. 9). 이는 일본 남쪽 북서태평양에 음의 아노말리 지역에 저기압이 발달하여 남한지역으로 유입되는 AR의 특성인 따뜻하고 습윤한 강한 수증기 수송의 영향이 약할 것으로 예상된다. 또한 여름과 가을에 나타나는 강한 강수의 원인으로는 태풍이나 뇌우의 영향이 큰 것으로 추정되고 있으며(Kim et al. 2023; Kim et al. 2020), 이에 대한 자세한 분석은 본 연구에서 다루지 않았다.

남한에 AR 스톰이 영향을 주는 경우, 동아시아 지역의 중층 대기(500 hPa)에 대한 종관 특성으로는 한반도 서쪽(중국 동해안 및 서해 서부)에 기압골이 분포하였으며, 이런 특징은 겨울에 더 뚜렷하였다(Fig. 10). 여름(6월~)으로 오면서 500 hPa 지위고도의 아노말리의 강도와 지역적 대비가 약화되는 경향이 있었다. 또한 7월과 8월에는 다른 계절과 달리 반대로 음의 아노말리가 나타나기도 하였다. 남한에 non-AR 스톰이 영향을 주는 경우에는 한반도 서쪽에 음의 아노말리, 한반도 동쪽 해양에는 양의 아노말리가 나타났다(Fig. 11). 이러한 특징은 겨울(특히 12월)에 가장 뚜렷하게 나타났다. 여름(6 ~ 9월)에는 아노말리 강도가 크지 않으며, 이는 상대적으로 non-AR의 스톰의 영향이 AR 스톰의 영향보다 적기 때문에 나타나는 특성으로 추측된다. AR 스톰의 영향을 받는 경우 500 hPa의 상층 기압골은 non-AR 스톰의 영향을 받는 경우보다 한반도를 기준으로 더 서쪽에 나타나고, 음과 양의 아노말리의 대비가 뚜렷한 특징을 보였다. 즉, 한반도 서쪽에 기압골이 분포하고 기압골 전면에 하층 저기압성 아노말리로 인해 수증기 수송이 증가하여 남한에 AR 스톰이 나타날 가능성이 증가한다. 반면에 기압골의 위치가 한반도에 근처에 위치하고 하층 저기압성 아노말리가 일본에 가까운 경우에는 남한에 non-AR 스톰이 나티나는 것으로 추정된다. 그러나, 이러한 종관장의 차이가 남한의 스톰에 미치는 메커니즘은 현재까지 명확하게 알려져 있지 않고, 이에 대한 상세한 분석은 향후 추가적인 연구가 필요하다.

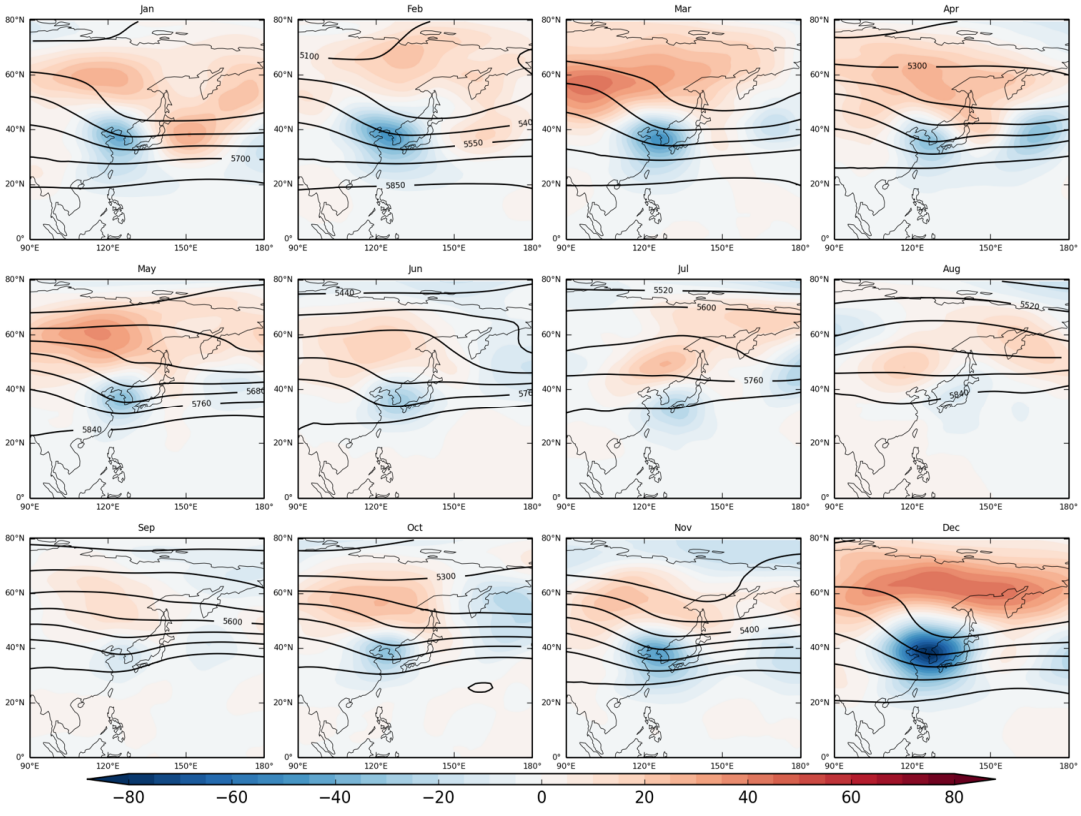


Fig. 11. Same as Fig. 10., except for non-AR storms in South Korea

## 6. 요약 및 토의

본 연구에서는 하루 이상 지속적으로 나타나며 최소 강수량 기준을 만족시키는 강수 현상을 스톰으로 정의하고, 이 기간 동안 AR의 영향 여부에 따라 AR 스톰과 non-AR 스톰으로 나누어 남한의 강수에 스톰이 미치는 영향을 연구하였다. 7월에 약 3개 정도로 가장 많은 AR 스톰이 영향을 주었으며, 다음은 8월의 순서로 많았다. 여름에 강수가 많은 것과 동일하게 AR 스톰 또한 여름에 가장 많이 영향을 주었다. Non-AR 스톰도 여름에 많은 영향을 주었으나, AR 스톰과는 월별 강도 차이가 나타났다. Non-AR 스톰은 6월과 8월에 가장 많은 영향을 주었고, 7월의 경우 5월과 9월보다 적었다.

스톰의 평균 지속기간은 AR 스톰의 경우, 6월부터 9월까지 4개월간 약 3일 정도이며, 7월과 8월에 약 3.5일으로 가장 오래 지속되었다. 나머지 계절은 약 2일 정도 지속되었다. Non-AR 스톰의 경우 대체로 AR 스톰의 지속기간보다 짧았으며, 7월과 8월을 제외하면 2일 이하로 지속되었다. 남한에 대해 평균한 경우, 8월에 2.42일로 가장 오래 지속되었다.

AR 스톰 개수는 3월부터 8월까지는 대체로 남북 공간분포, 9월부터 12월까지는 동서 공간분포를 보이며, 계절별로 공간분포가 다르게 나타났다. 이러한 계절적인 분포는 북태평양의 스톰트랙의 위치와 밀접하게 관련이 있으며, 이는 동아시아 여름 몬순 강수 밴드가 북쪽으로 이동하다가 늦을 가을부터 겨울까지는 북태평양의 동쪽을 향해 이동하는 것과 연관이 있다(Kim et al., 2023; Kim et al., 2020). AR 빈도 또한 월별로 지역별로 다르며, AR 빈도가 높은 지역은 AR 일과 강수현상이 연속되어 며칠 동안의 강수 현상이 하나의 AR 스톰으로 정의될 수 있다. 이로 인해 AR 스톰의 개수는 지역적으로 줄어들기 때문에 다른 공간분포가 나타날 수 있다. 즉, 스톰 지속기간이 길어지는 것은 스톰의 개수가 줄어드는 것과 관련이 있다.

다음은 남한에 영향을 주는 스톰으로부터 기인한 강수 특성을 정리하였다. 연 변동성의 특징으로는 스톰에 의한 전체 강수량이 여름에 집중되어 있었다. AR 스톰에 의한 강수량은 7월, 8월 그리고 6월 순서로 많았으며, 연간 AR 스톰에 의한 강수량의 약 58%가 여름 동안에 집중되었다. 또한 전체 스톰에 의한 총 강수량 중에 AR 스톰이 차지하는 비율은 연평균 75%, 여름의 경우 82%로 대부분을 차지하였다.

AR 스톰 하나당 평균 강수량은 6월부터 9월까지 4개월 동안에 60mm 이상으로 가장 많았다. 특히 7월과 8월에는 AR 스톰 하나당 평균 강수량이 70mm 이상으로 한번에 많은 양의 강수가 집중되도록 영향을 주었다. 여름에 지역별로 다른 월별 특성을 보였는데, 중부지방의 경우 7월에 AR 스톰에 의한 전체 강수량과 평균 강수량이 최대였고. 남부지방은 8월에 두 요소 모두 최대였다.

AR 스톰의 평균 강수강도는 뚜렷한 연 변동성을 보이며, 가장 강한 강수강도는 6월부터 9월까지 4개월 동안 나타났다. 그러나 AR 스톰의 평균 강수강도는 앞에서 분석된 강수 특성들과 다른 연 변동성을 보였다. 다른 강수 특성(전체 강수량 및 평균 강수량)에서 대부분 최댓값을 보였던 7월과 8월보다 6월과 9월에 AR 스톰에 의한 강수강도가 더 강하였다. 즉, 6월과 9월에 AR 스톰이 자주 나타나지는 않지만 AR 스톰인 경우 하루에 내리는 강수량이 더 많았다. 7월과 8월엔 하루에 내리는 강수량이 많은 강한 AR 스톰이 더 자주 영향을 주었다.

남한에 AR 스톰이 영향을 주는 경우, 대체로 한반도 서쪽과 동아시아 해안을 따라 AR이 나타나는 지역에서 해면기압의 음의 아노말리(저기압)가 나타났다. 여름철의 경우, 북태평양 고기압이 동쪽으로 확장되는 듯한 패턴이 나타났고, 한반도 남동쪽으로 음의 해면기압 아노말리가 뚜렷하며, 이 경계를 따라 AR이 형성되거나 지나온 것으로 추측된다. 남한에 AR 스톰이 영향을 주는 경우 500hPa의 상층 기압골은 non-AR 스톰이 영향을 주는 경우보다 한반도를 기준으로 더 서쪽에 나타나는 특징을 보였다. 동아시아 지역의 AR과 관련된 종관장의 특성과 메커니즘은 현재 별로 알려져 있지 않으며, 추후 심층적인 연구가 필요하다.

과거 선행연구에서 이뤄진 AR에 대한 연구는 대부분 AR이 영향을 주는 시간이나 일 단위로 분석되었다. 하지만 본 연구에서는 강수가 하루 이상으로 강하게 지속되는 경우를 하나의 스톰으로 정의하여, 스톰 단위로 AR의 영향을 분석하였다. 그 결과 여름에 AR 스톰에 기인한 총 강수량이 많으며, 일강수량으로 정의되는 강수강도 또한 강하게 나타남을 알 수 있었다. 이렇게 지속적으로 집중되어 나타나는 강수는 홍수나 산사태 등을 야기할 수 있으며, 자연재해와 수자원에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 이러한 지속적인 강수(스톰)와 AR의 영향에 대한 분석은 매우 중요하다. 또한 이러한 스톰 기반의 연구가 앞으로 더 발전한다면 강수 예측성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사사

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원분들께 감사의 말씀을 드립니다. 이 연구에 사용된 AR 자료는 Bin Guan으로부터 제공되었으며 (https://ucla.box.com/ARcatalog), AR 탐지 알고리즘과 데이터베이스는 NASA의 지원으로 개발되었습니다. 본 연구는 기상청 R&D 프로그램「기상위성 예보지원 및 융합서비스 기술개발」(KMA2020-00120)과 기상청 국립기상과학원「기상업무지원기술 개발연구」“신기후체제 대응 기후변화 시나리오 개발·평가(KMA2018-00321)”의 지원으로 수행되었습니다.

## References

Dee D, Coauthors. 2011. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quart J Roy Meteor Soc 137: 553-597.

Dettinger MD, Ralph FM, Das T, Neiman PJ, Cayan DR. 2011. Atmospheric rivers, floods and the water resources of california. Water 3: 445-478.

Gimeno L, Neito R, Vazquez M, Lavers DA. 2014. Atmospheric rivers: a mini-review. Front Earth Sci 2. doi: 10.3389/feart.2014.00002.

Guan B, Molotch NP, Waliser DE, Fetzer EJ, Neiman PJ. 2010. Extreme snowfall events linked to atmospheric rivers and surface air temperature via satellite measurements. Geophys Res Lett 37: L20, 401.

Guan B, Waliser DE. 2015. Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. J Geophys Res Atmos 120: 12514–12535.

Horinouchi T. 2014. Influence of upper tropospheric disturbances on the synoptic variability of precipitation and moisture transport over summertime East Asia and the northwestern Pacific. J Meteor Soc Japan 92: 519–541. doi: 10.2151/jmsj.2014-602.

Kamae Y, Mei W, Xie S-P. 2017a. Climatological relationship between warm season atmospheric rivers and heavy rainfall over East Asia. J Meteor Soc Japan 95: 411-431.

Kamae Y, Mei W, Xie S-P, Naoi M, Ueda H. 2017b. Atmospheric rivers over the Northwestern Pacific: Climatology and interannual variability. J Clim 30: 5605-5619.

Kamae Y, Imada Y, Kawase K, Mei W. 2021. Atmospheric rivers bring more frequent and intense extreme rainfall events over East Asia under global warming. Geophys Res Lett 48: e2021GL096030. doi: 10.1029/2021GL096030.

Kim J, Waliser DE, Neiman P, Guan B, Ryoo JM, Wick G. 2013. Effects of atmospheric river landfalls on the cold season precipitation in California. Clim Dyn 40: 465-474.

Kim J, Guan B, Waliser DE, Ferraro RD, Case JL, Iguchi T, Kemp E, Putman W, Wang W, Wu E, Tian B. 2018. Winter precipitation characteristics in western US related to atmospheric river landfalls: observations and model evaluations. Clim Dyn 50: 231-248.

Kim J, Moon H, Guan B, Waliser DE, Choi J, Gu TY, Byun YH. 2020. Precipitation characteristics related to atmospheric rivers in East Asia. Int J of Clim 2020: 1-14. doi: 10.1002/joc.6843.

Kim TJ, Kim J, Park C, Son SW, Kim JU, Kwon SH, Moon H, Byun YH. 2023. Evaluation of a CMIP6 multi-GCM ensemble for atmospheric rivers and precipitation over East Asia. Asia-Pac J Atmos Sciences. doi: 10.1007/s13143-022-00311-3.

Knippertz P, Wernli H. 2010. A Lagrangian climatology of tropical moisture exports to the Northern Hemispheric extratropics. J Clim 23: 987–1003. doi: 10.1175/2009JCLI3333.1.

Lamjiri MA, Dettinger MD, Ralph FM, Guan B. 2017. Hourly storm characteristics along the U.S. West Coast: Role of atmospheric rivers in extreme precipitation. Geophys Res Lett 44: 7020–7028. doi: 10.1002/2017GL074193.

Lavers DA, Villarini G, Allan RP, Wood EF, Wade AJ. 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.

Lavers DA, Villarini G. 2013. The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe. Geophys Res Lett 40: 1-6. doi: 10.1002/grl.50636.

Lavers DA, Villarini G. 2015. The contribution of atmospheric rivers to precipitation in Europe and the United States. J Hydrol 522: 382-390. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.12.010.

Mbengue C, Schneider T. 2013. Storm track shifts under climate change: What can be learned from large-scale dry dynamics. J Clim 26: 9923-9930. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00404.1.

Moon H, Kim J, Guan B, Waliser DE, Choi J, Goo TY, Kim Y, Byun YH. 2019. The effects of atmospheric river landfalls on precipitation and temperature in Korea (in Korean with English abstract). Atmosphere 29: 343-353.

Neiman PJ, Ralph FM, Wick GA, Lundquist JD, Dettinger MD. 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.

Neiman PJ, Schick LJ, Ralph FM, Hughes M, Wick GA. 2011. Flooding in Western Washington: The connection to atmospheric rivers. J Hydrometeorol 12: 1337–1358.

Ninomiya K, Akiyama T. 1992. Multi-scale features of Baiu, the summer monsoon over Japan and the East Asia. J Meteor Soc Japan 70: 467–495, doi: 10.2151/jmsj1965.70.1B_467.

O'Brien TA, Wehner MF, Payne AE, Shields CA, Rutz JJ, Leung LR et al. 2022.. Increases in future AR count and size: Overview of the ARTMIP Tier 2 CMIP5/6 experiment. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 127: e2021JD036013. doi: 10.1029/2021JD036013.

Oh H, Ha KJ. 2015. Thermodynamic characteristics and responses to ENSO of dominant intraseasonal modes in the East Asian summer monsoon. Clim Dyn 44: 1751–1766.

Park C, Son SW, Kim H. 2021. Distinct features of atmospheric rivers in the early versus late east Asian summer monsoon and their impacts on monsoon rainfall. J Geophys Res Atmos 126. doi: 10.1029/2020JD033537

Payne AE, Magnusdottir G. 2014. Dynamics of landfalling atmospheric rivers over the North Pacific in 30 years of MERRA reanalysis. J Climate 27: 7133–7150. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00034.1.

Ralph FM, Neiman PJ, Wick GA. 2004. Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/1998. Mon Weather Rev 132: 1721–1745.

Ralph FM, Neiman PJ, Wick GA, Gutman S, Dettinger MD, Cayan D, White A. 2006. Flooding on California's Russian river: Role of atmospheric rivers. Geophys Res Lett 33: L13801. doi: 10.1029/2006GL026689.

Rutz JJ, Steenburgh WJ, Ralph FM. 2014. Climatological characteristics of atmospheric rivers and their inland penetration over the Western United States. Mon Wea Rev 142: 905-921.

Sampe T, Xie SP. 2010. Large-scale dynamics of the meiyu-baiu rain band: Environmental forcing by the westerly jet. J Climate 23: 113–134. doi: 10.1175/2009JCLI3128.1.

Tao S, Chen L. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China, Monsoon Meteorology (Chang C-P, Krishnamurti TN, eds). Oxford University Press. p. 60–92.

Whan K, Sillmann J, Schaller N, Haarsma R. 2020. Future changes in atmospheric rivers and extreme precipitation in Norway. Clim Dyn 54:2071-2084. doi: 10.1007/s00382-019-05099-z.

Yatagai A, Arakawa O, Kamiguchi K, Kawamoto H, Nodzu MI, Hamada A. 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.

Yatagai A, Kamiguchi K, Arakawa O, Hamada A, Yasutomi N, Kitoh A. 2012. APHRODITE: constracting a long-term daukt gridded precipitation

dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. Bull Amer Meteor Soc. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00122.1.

Zhang Z, Ralph FM, Zheng M. 2019. The relationship between extratropical cyclone strength and atmospheric river intensity and position. Geophys Res Lett 46: 1814–1823. doi: 10.1029/2018GL079071.

Zhu Y, Newell RE. 1994. Atmospheric rivers and bombs. Geophys Res Lett 21: 1999–2002.

Zhu Y, Newell RE. 1998. A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers. Mon Wea Rev 126: 725-735.