



Hydrological impact of Atmospheric River landfall on the Korean Peninsula

Han, Heechan^a · Choi, Changhyun^{b*} · Moon, Heyjin^c · Jung, Jaewon^d · Lee, Choongke^e · Kim, Hung Soo^f

^aPh.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, Colorado State University, Fort Collins, USA

^bAssistant manager, Risk Management Office, KB Claims Survey and Adjusting, Seoul, Korea

^cResearcher, Innovative Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

^dPh.D. Institute of Water Resources System, Inha University, Incheon, Korea

^ePh.D Candidate, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

^fProfessor, Department of Civil Engineering, Inha University, Incheon, Korea

Paper number: 20-087

Received: 9 September 2020; Revised: 13 October 2020; Accepted: 13 October 2020

Abstract

Atmospheric rivers, which transport large amount of water vapor from mid-latitude to the inland, are an important driving force of water cycle and extreme hydrologic phenomena. The main objective of this study is to analyze the hydrological impact of the AR landfalls on the Korean Peninsula in 2000 - 2015. The result showed that the AR is closely related to the characteristics of precipitation, water level and runoff in the Korean Peninsula. The landfalls of the AR affected about 57% of annual precipitation on the Korean Peninsula, and had a greatest impact on the summer rainfall. It also affected the water level and runoff at the five major rivers of Korea, and water levels exceeding the thresholds of flood warning were observed when the AR landed. Moreover, it was found that the runoff above the third quartile with AR landfalls. These results suggest that the AR not only has a significant influence on the hydrological characteristics of the Korean Peninsula, but also have a close relationship with the extreme hydrological events like floods. The results of this study are expected to be used as the reference for the analysis of the impact of the AR on the various fields in the Korean Peninsula.

Keywords: Atmospheric river, The Korean peninsula, Hydrological impacts, Floods

Atmospheric River의 한반도 수문학적 영향에 대한 연구

한희찬^a · 최창현^{b*} · 문혜진^c · 정재원^d · 이충기^e · 김형수^f

^a콜로라도 주립 대학교 토목환경공학과 박사과정, ^bKB손해사정 위험관리실 대리, ^c국립기상과학원 미래기반연구부 연구원,

^d인하대학교 수자원시스템 연구소 박사후연구원, ^e인하대학교 토목공학과 박사과정, ^f인하대학교 사회인프라공학과 교수

요 지

중위도에서 내륙으로 많은 양의 수증기를 운반하는 대기천(Atmospheric rivers, AR)은 물 순환과 극한 수문현상에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 2000 - 2015년도에 한반도에 상륙한 AR이 수문학적으로 미치는 영향력을 분석하였다. 그 결과 AR은 한반도 지역의 강우, 하천수위 및 유량 특성과 밀접하게 연관되어 있는 것으로 나타났다. AR의 상륙이 한반도 연 강우량의 약 57%에 영향을 주었고, 여름철 강우량에 큰 영향을 주는 결과를 보였다. AR은 한반도 5대강 주변의 하천 수위와 유량 발생에도 영향을 주었는데, AR이 상륙한 당시 홍수 주의보 및 경보 기준을 넘는 수위가 관측되었다. 또한 유량의 경우, 한반도 5대강 대부분 지역의 3분위 이상 유량 값의 발생에 영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 AR이 한반도 수문학적 특성에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라, 홍수와 같은 극한 수문 현상 발생과 매우 밀접한 관련이 있음을 시사하고 있다. 본 연구는 한반도의 다양한 영역에 대한 AR의 영향 분석에 대한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대하는 바이다.

핵심용어: 대기천, 한반도, 수문학적 영향, 홍수

*Corresponding Author. Tel: +82-2-6390-0748

E-mail: karesma0cch@naver.com (C. Choi)

1. 서론

중위도에서 내륙으로 많은 양의 수증기를 운반하는 대기천(Atmospheric Rivers, AR)은 가늘고 긴 수증기의 운반을 나타내는 현상을 의미한다(Zhu and Newell, 1998; Gimeno *et al.*, 2014; Han *et al.*, 2019). 1990년대 초 Zhu and Newell (1994)에 의해 AR이라는 개념이 처음 제시되었고, 일반적으로 AR은 중위도 저기압의 따뜻한 지역에서 발생하여 저위도에서 고위도로 이동하는 수증기의 약 90%가 AR을 통해 이동된다(Moon *et al.*, 2019). AR 현상은 특정 지역이 아닌 전 세계적으로 나타나는 현상으로, 미국(Ralph *et al.*, 2006; Neiman *et al.*, 2011; Demaria *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2017; Han *et al.*, 2019), 유럽(Stohl *et al.*, 2008; Lavers and Villarini, 2013) 그리고 동아시아(Mundhenk *et al.*, 2016; Hirota *et al.*, 2016; Kamae *et al.*, 2017; Moon *et al.*, 2019)에서 AR이 관측되고 있다.

미국 항공우주국(NASA)의 보고서에 의하면, 증가하는 온실가스에 의해 AR의 발생빈도가 현재보다 증가할 것으로 예측되었다(Espinoza *et al.*, 2018; Han *et al.*, 2019). 많은 양의 수증기를 포함하고 있는 AR은 긴 지속기간 동안 많은 양의 강수를 발생시킬 뿐만 아니라 지역적인 극한 수문현상 발생에 큰 영향을 미치기 때문에 수문학적 영향력이 매우 크다(Ralph *et al.*, 2004; Demaria *et al.*, 2017). AR에 의한 극한 수문현상 발생의 빈도와 규모가 증가함에 따라, AR의 발생 시기, 이동경로, 그리고 AR의 수문학적 영향에 관한 다양한 선행연구가 수행되고 있다.

AR의 수문학적 영향은 일반적으로 다양한 수문학적 요소들의 관측 자료를 기반으로 분석된다(Ralph *et al.*, 2006; Norbiato *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2013; Modrick and Georgakakos, 2015). Demaria *et al.* (2017)는 30년 동안 AR이 강우, 토양수분 그리고 극한 홍수와 같은 수문학적 요소들에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 평균적으로 연간 최대 유량의 약 43%가 AR에 의해 발생하였고, AR 이벤트 중 약 25%는 10년 이상의 홍수 빈도를 유발한 것으로 나타났다. Ralph *et al.* (2013)은 California 지역에서 2004 - 2010년 동안 관측된 AR 이벤트(91개)의 지속기간, soil moisture와 runoff 간의 관계 등을 분석하였다. AR의 평균 지속기간은 약 20시간으로 나타났다, 이 중 약 12%는 30시간을 초과하는 것으로 보고되었다. 이러한 AR의 특성은 선행 토양수분량을 증가시켜 극한 홍수 발생에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Han *et al.* (2019)는 고해상도 홍수 예측 모형인 National Water Model을 이용하여 2004년에 California 지역에서 발생한 AR 이벤트의 수문학적 영향을 분석한 결과, AR 현상이 deep layer의 토양수분

과 지표 유출량에 영향을 미친다는 점을 확인하였다. Dettinger (2013)은 AR이 가뭄 현상에 미치는 영향을 분석한 결과, 미국 서부 지역의 가뭄 현상의 약 33% - 74%이 AR의 상륙과 동시에 소멸되거나 그 피해가 완화되는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 AR이 홍수와 같은 극한 수문 현상을 유발하는 동시에 가뭄 피해를 줄이는 역할을 수행할 수 있어 수문 분야뿐만 아니라 농업, 환경, 기상학과 같은 다양한 분야에서 AR에 대한 연구의 필요성을 시사하는 바이다.

전 지구적으로 발생하는 AR 현상은 주로 인공위성에서 제공하는 두 가지 자료, 연직 적분된 수증기량(Integrated water vapor, IWV) 또는 연직 적분된 수증기의 수송량(Integrated water vapor transport, IVT)를 통해 정의된다(Ralph *et al.*, 2004; Gimeno *et al.*, 2014; Moon *et al.*, 2019). 이러한 자료를 기반으로 AR 현상을 객관적으로 탐지하기 위한 선행 연구들도 활발히 진행되고 있다. Guan and Waliser (2015)은 ERA-Interim 기반의 IVT 자료를 이용하여 AR의 모양, 길이, 발생 장소 그리고 AR의 기본적인 통계 지수를 제공하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 실제 전 지구적으로 AR 현상이 관측되었던 시점과 특징을 매우 유사하게 탐지하는 결과를 보였다. Ralph *et al.* (2019)는 IVT와 AR 지속기간을 기반으로 위험등급을 5등급으로 구분하였다. 이러한 결과는 AR의 수문학적 영향력을 파악할 수 있을 뿐 아니라, AR 현상으로부터 발생 가능한 극한 수문현상에 대한 효율적인 대비를 위한 자료로 사용할 수 있다.

AR에 관한 대부분의 연구는 미국 서부와 유럽에 초점이 맞춰져 있는 반면에 동아시아와 한반도 지역에서 발생하는 AR에 관한 연구는 부족한 실정이다. AR이 전 지구적으로 발생하는 현상임을 감안한다면 AR이 동아시아와 한반도에 미치는 영향을 분석하는 연구도 필수적이다. 특히, 국토의 3면이 해안으로 이루어져 있는 한반도의 지형 특성상 AR로 인한 기상, 수문학적 영향에 관한 연구가 활발히 이루어져야 한다. Moon *et al.* (2019)은 AR이 한반도 지역의 강우와 기온에 미치는 영향에 대해 연구한 결과, AR이 계절별로 약 25% - 35%의 강우에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 한반도 강우뿐만 아니라 수문학적 측면에 대한 AR 영향 연구의 필요성을 의미하는 바이다.

Kamae *et al.* (2017)에 따르면, 한반도가 포함된 동아시아 지역에서는 주로 여름철에 AR의 관측 빈도가 높다. 연 강수량의 60% 이상이 여름철에 발생하는 한반도의 특성상 홍수로 인한 다양한 재해에 극한 수문현상을 동반하는 AR의 영향력이 클 수 있다. 따라서 AR로 인한 한반도의 극한 수문현상 및 홍수의 피해규모를 줄이기 위해서 AR의 수문학적 영향에 대한 연구는 필수적이다. 본 연구에서는 한반도 지역에 상륙하

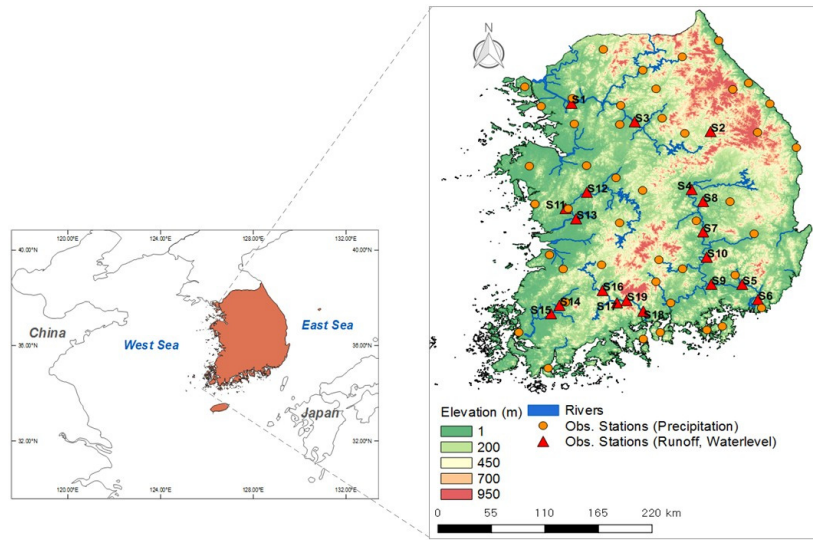


Fig. 1. Study area of this study. Orange circles are precipitation observatories and red triangles represent water level and runoff observatories on the rivers

는 AR의 특성과 이로 인해 발생하는 수문학적 영향을 분석하고자 한다. 2장에서는 연구지역과 AR에 대한 정의를 소개하고, 3장에서는 한반도 지역에 대한 AR의 수문학적 영향력을 설명하고, 4장에서는 결과에 대한 요약과 토의를 제시하였다.

2. 대상지역 및 대기천(AR)의 정의

2.1 대상지역 및 자료 수집

AR이 한반도에 미치는 수문학적 영향 분석을 위해 대한민국의 5대강 유역(한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강)을 연구지역으로 선정하였다(Fig. 1). 한강 유역은 한반도의 중앙부(북위 36.5° - 38.5°, 동경 126.5° - 129.0°), 낙동강 유역은 한반도 동남부(북위 35.1° - 37.2°, 동경 127.5° - 129.3°), 금강 유역은 한반도 중서부(북위 35.6° - 37.1°, 동경 126.7° - 128.1°), 영산강 유역은 한반도 남서부(북위 34.7° - 35.5°, 동경 126.4° - 127.1°), 섬진강 유역은 한반도의 남해안 중서부(북위 34.7° - 35.8°, 동경 126.9° - 127.9°)에 위치한다. 한강과 낙동강 유역은 유역면적이 가장 넓고, 유로연장이 제일 긴 것으로 나타났고, 유역평균폭도가 가장 커서 다른 3개의 하천에 비해 대하천인 것으로 나타났다. 영산강 유역은 형상계수가 가장 1에 가까우며, 유출의 집중성향이 매우 커서 침투 홍수량이 크게 발생 될 수 있을 것으로 판단되고, 금강의 경우 형상계수가 가장 작아 비교적 유출의 집중성향이 적은 것으로 분석되었다. 연구지역의 수문학적 영향 분석을 위해 유역별 본류에 위치한 홍수특보지점의 수문 자료(수위, 유량, 강우)를 수

Table 1. The list of stations for water level and runoff used in this study

Basin	No.	Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Flood alert level (m)	Flood warning level (m)
Han river	S1	Hangangaedgyo	37.5	127.0	8.5	10.5
	S2	Yeongwoldaedgyo	37.2	128.5	6.0	8.0
	S3	Yeojudaedgyo	37.3	127.6	6.0	8.0
Nakdong river	S4	Sangpunggyo	36.5	128.3	4.0	5.5
	S5	Samnangjin	35.4	128.8	5.0	7.0
	S6	Gupodaedgyo	35.2	129.0	4.0	5.0
	S7	Hogukeuidari	36.0	128.4	6.0	8.0
	S8	Nakdangyo	36.4	128.4	5.5	7.0
	S9	Gyenaeri	35.4	128.5	7.0	9.0
	S10	Seonghari	35.7	128.4	10.0	12.0
Geum river	S11	Baekjegyo	36.3	126.9	7.5	9.0
	S12	Geumganggyo	36.5	127.1	9.0	11.0
	S13	Hwangsandaedgyo	36.2	127.0	7.0	8.0
Yeongsan river	S14	Geukrakgyo	35.1	126.8	8.0	9.0
	S15	Najudaedgyo	35.0	126.7	10.0	11.0
Seomjin river	S16	Geumgokgyo	35.3	127.3	5.5	6.5
	S17	Guryegyo	35.2	127.5	7.0	8.0
	S18	Eupnaeri	35.1	127.7	12.0	13.0
	S19	Songjeongri	35.2	127.6	14.5	17.0

집하였고, Table 1은 선정된 수위 및 유량 관측 지점의 위치 및 홍수주의보, 경보 수위를 나타낸 것이다. 강우 데이터의 경우, 한반도의 5대강 및 주요 지역에 위치한 44개 지점들로부터

관측된 강우 자료를 수집하였다.

2.2 대기천(AR)의 정의 및 구분

본 연구에서 사용된 AR 자료는 Guan and Waliser (2015)에서 정의된 방법으로 계산된 AR 자료를 사용하였다(http://ucla.app.box.com/v/ARcatalog). AR 정의에 사용된 재분석 자료는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 Interim reanalysis (ERA-Interim)이며, 해상도는 T255L60, 수평 격자는 1.5° × 1.5°, 연직 격자는 37개 층으로 내삽되었으며, 시간 격자는 6시간 간격이다(Dee *et al.*, 2011). 이 자료를 이용하여 분석된 기간은 2000년부터 2015년까지이다. Guan and Waliser (2015)는 연직 적분된 수증기(Integrated water vapor transport, IVT)를 사용하여 일정 기준값을 만족하는 영역을 AR로 정의하였다.

AR 정의에 사용된 IVT는 각 수평 격자에서 다음 Eq. (1)으로 계산되며,

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

여기서, q는 비습, u는 동·서 바람, v는 남·북 바람, g는 중력가속도이다.

다음은 각 수평 격자마다 IVT 강도에 대한 한계값(threshold)를 계산하는 것이다. 각 시간마다 모든 수평 격자의 IVT 강도는 각각의 수평 격자에 대해 각 월마다 그 월을 기준으로 한 앞·뒤 2개월을 포함한 총 5개월 동안의 IVT 강도들의 85%를 초과해야 한다. 이 조건을 만족하는 수평 격자의 IVT 중에서 수평적으로 연속된 IVT 무리의 길이가 2,000 km 이상이고, 무리의 길이가 폭보다 2배 이상 큰 경우를 AR로 정의하였다. AR 정의에 대한 자세한 방법은 Guan and Waliser (2015)에서 확인할 수 있다.

이 자료는 전 지구적으로 계산되었으나, 본 연구는 우리나라에 대해서 이뤄졌으며 우리나라를 포함하는 9개의 격자 자료(3 × 3, 위도: 북위 34.5°, 36.0°, 37.5°, 경도: 동경 126.0°, 127.5°, 129.0°)를 사용하였다. AR의 형태를 이해하기 위해서 Fig. 2는 2015년 7월 23일 각 시간(00, 06, 12, 18UTC)에 대한 AR이며(하늘색), 동아시아 해안을 따라 발생하였으며 한반도에 상륙한 경우이다.

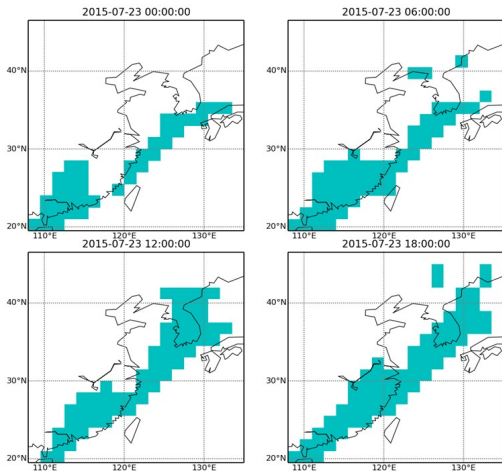


Fig. 2. A map showing AR (blue) cases during 00, 06, 12, 18UTC, 23, July, 2015

2.3 대기천(AR)에 따른 강우 구분

본 연구에서는 강우특성에 대한 AR의 영향을 분석을 위해 AR의 영향을 받은 강우 사상(AR related precipitation)과 그렇지 않은 강우 사상(Non-AR related precipitation)을 구분하였다. AR의 관측 시간 간격이 6시간이기 때문에 하루 4회의 시점 중 AR의 관측 유무에 따라 AR 및 Non-AR 강우 사상으로 구분하였다. Fig. 3은 AR 및 Non-AR 강우 사상을 구분하는 개념도를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 1일 기준으로 1회 이상의 AR의 상륙이 관측된 경우는 AR 강우로, 그렇지

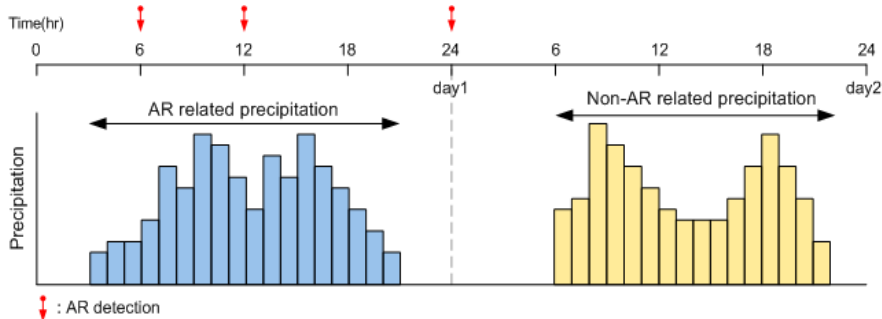


Fig. 3. Conceptual diagram representing how to divide AR related and Non-AR related daily based precipitation. Red mark denotes the point when the AR landfalls is detected

지 못한 경우는 Non-AR 강우로 구분하였다. 이렇게 구분된 일 강우량을 기반으로 3.1절에서 한반도의 연 강우량과 월 강우량 특성 분석이 수행되었다.

3. 대기천(AR)이 한반도의 수문학적 특성에 미치는 영향 분석

3.1 대기천(AR)의 상륙에 따른 강우특성 분석

강우는 수문학적 측면에서 가장 기본적이면서 중요한 요소 중 하나로 본 연구에서는 AR이 한반도 강우특성에 미치는 영향을 분석하였다. Fig. 4(a)는 2000 - 2015년도에 한반도 44개 강우 관측소에 관측된 AR의 발생빈도와 AR에 따른 연 평균 강우량을 보여주고 있다. 연 강우량에 미치는 AR의 분석을 위해, 한반도 내에 44개 강우 관측소에서 AR의 상륙 여부에 따라 AR precipitation과 Non-AR precipitation으로 구분하여 연 평균 강우량을 산정하였다. 그 결과, AR은 한반도 강우 발생에 많은 기여를 하는 것으로 나타났는데 그 기여도의 범위는 약 45%부터 최대 72%로 나타났다. 16년간 평균 기여도는 약 57%로 나타나 AR이 한반도 강우 발생에 상당 부분을 차지하는 것을 알 수 있었고, 특히 2004년과 2012년에는 연 강수량의 70% 이상이 AR 시즌에 발생하였다.

Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이, 1년 중 한반도에서 AR 현상이 관측된 평균 일수는 약 63일로 나타나 발생빈도가 1년 중 약 17%이며, 이는 연 평균 강수일수의 약 50%, 연 강수량의 약 57%에 기여하기 때문에 그 영향력이 매우 큼을 알 수 있었다. 물론, 이러한 강수량은 오직 AR만의 영향이 아닌, 여름철 장마, 전선형 강우, 그리고 가을철 태풍과 같은 다양한 기상학적 요소가 복합적으로 작용하였을 것이라 판단된다. 하지만, AR이 1년 중 한반도 강수량 및 강수일수의 절반 이상에 관여하는

것으로 분석되었기에 장마, 태풍과 같이 강수 특성에 미치는 AR의 영향 연구가 필요한 바이다.

연 강우를 AR 기간과 Non-AR 기간의 일수로 나누어서 구한 일 강우의 범위는 AR 시즌은 8 mm/day - 18 mm/day인 반면, Non-AR 시즌은 1 mm/day - 3 mm/day로 그 차이가 명백하게 나타났다. 이러한 결과로 한반도 강우뿐만 아니라 홍수와 같은 극한 수문현상에 AR이 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 4(b)는 AR이 한반도의 월별 강우특성에 미치는 영향을 보여주고 있다. AR은 한반도의 봄(3월 - 5월)과 여름(6월 - 8월)에 가을(9월 - 11월)과 겨울(12월 - 2월)에 비해 영향력이 높은 것으로 나타났다. 특히, AR은 한반도 여름철 강우의 약 60%, 겨울철 강우의 경우 약 40%에 관여하는 결과를 보였다. 가을, 겨울철에는 AR 시즌 동안 발생한 강수량이 Non-AR 시즌 동안에 비해 낮거나 그 차이가 미미하게 나타났다. 특히, 7월에는 AR 강우와 Non-AR 강우의 명백한 차이를 보였는데, 그 차이는 35% 이상으로 나타났다. 이는 동아시아 및 한반도 지역에 대해 AR이 다른 계절에 비해 상대적으로 여름철 강우에 높은 영향력을 보인다는 선행 연구들과 비슷한 결과이다(Kamae et al., 2017; Moon et al., 2019).

AR 시즌에 발생된 강우에 대한 태풍의 영향력을 확인하기 위해 2000년 2015년 사이에 한반도에 상륙한 태풍의 자료를 수집(<https://www.weather.go.kr>)하여 분석하였다. 해당 기간 동안 한반도에 상륙한 태풍은 총 10개이고, 총 78일간 영향을 주었다. 해당 기간은 AR의 총 관측기간에 비해 약 7%로 매우 낮은 비중을 차지할 뿐만 아니라, AR과 태풍이 동시에 상륙한 경우는 약 34일로 그 비중은 매우 낮았다. 다만, 한반도에 상륙한 태풍의 개수가 3개인 2012년도의 경우, 태풍에 의한 강우는 AR 강우의 약 6%를 차지하여 1~3%의 비중을 나타내는 다른 연도에 비해 그 영향력이 다소 높았음을 알 수 있다.

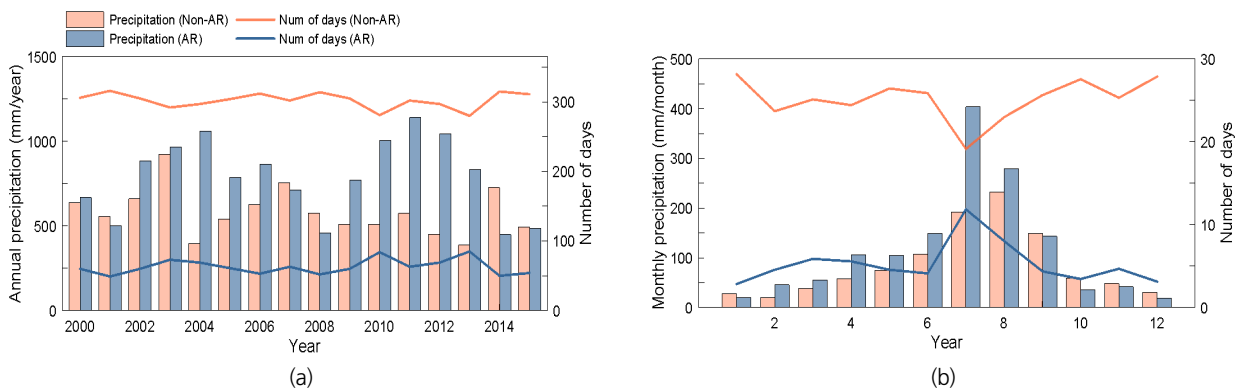


Fig. 4. Observed precipitation over the Korean Peninsula. Total precipitation during Non-AR (orange) and AR (blue) seasons and number of days of AR for each year are shown in (a). Monthly precipitation and number of days of AR for each month are represented in (b)

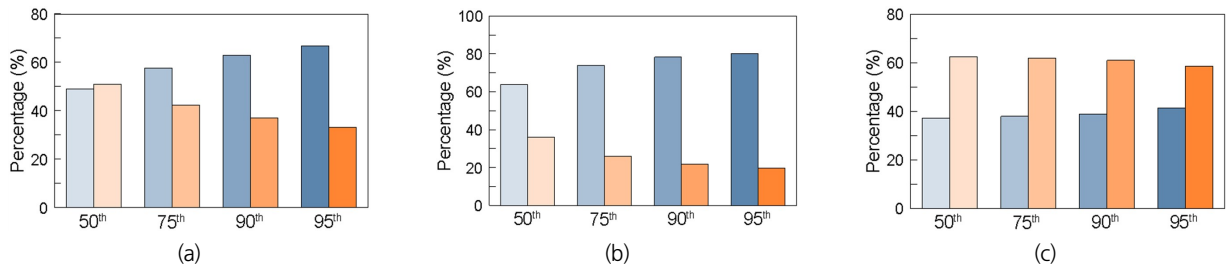


Fig. 5. Contribution of AR to 50th, 75th, 90th, and 95th percentile of precipitation for (a) total period 2000-2015, (b) 2004, and (c) 2014

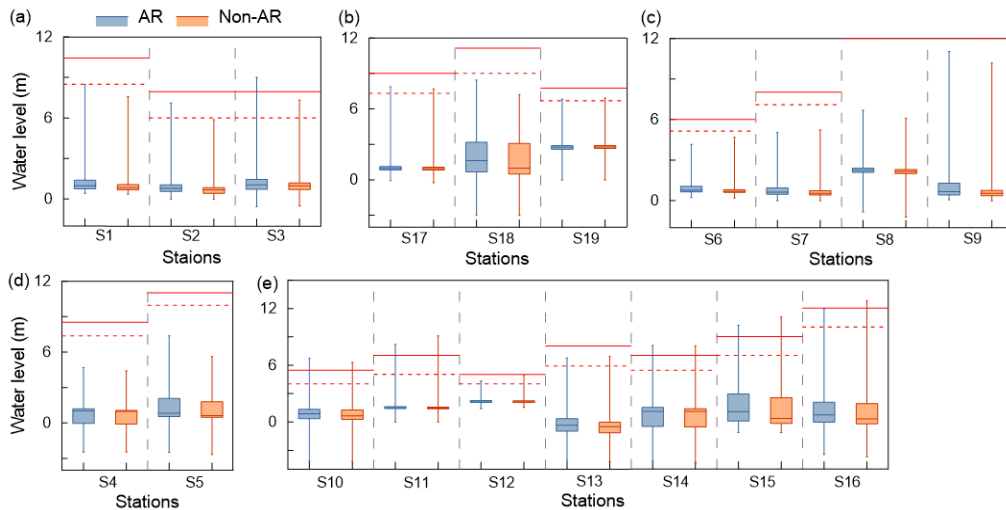


Fig. 6. Whisker-box plots of observed water level over five rivers, (a) Han river, (b) Geum river, (c) Seomjin river, (d) Yeongsan river and (e) Nakdong river, during Non-AR (orange) and AR (blue) seasons. The thresholds of flood alert and warning are indicated by red line, dotted line

전체 강우의 상위 50%(중간값)부터 상위 5%(95th percentile)까지의 강우를 사용하여 AR과 극한 강우의 관련성을 분석하였다(Fig. 5). 이를 위해, 0.1 mm/day 이상의 강우가 관측된 모든 시점에 대한 강우 분포를 4개(50th, 75th, 90th, 95th percentiles)로 구분하여 AR과의 관련성을 분석하였다. 그 결과는 극한 강수에 대한 AR의 영향력이 명백하게 나타났는데, 2000 - 2015년도 전체 기간 동안에 상위 50%부터 상위 5% 강우에 대해 AR은 약 49%부터 약 67%의 기여도를 보였다(Fig. 5(a)). 상위 50%(50th percentile) 강우의 경우, AR 보다는 Non-AR의 비율이 더 높은 것으로 나타나 상대적으로 강한 강우 강도에 AR의 영향력이 더 큰 결과를 알 수 있었다. Figs. 5(b) and 5(c)는 AR 강우의 비율이 가장 높았던 2004년과 가장 낮았던 2014년도의 강우 분포를 나타내고 있다. 2004년의 경우 상위 5% 강우의 약 80%에 대해 AR이 영향을 미치는 반면에 2014년도에는 그 영향력이 약 절반가량으로 줄어드는 결과를 보였으며, 이를 통해 극한 수문 현상을 유발하는 극한 강우에 대한 AR의 영향력을 확인할 수 있다.

3.2 대기천(AR)에 의한 수위와 유량 특성 분석

본 연구에서는 AR의 수문학적 영향을 확인하기 위해 한반도 5대강의 주요 19개 수위 관측소에서 관측된 수위 자료를 AR 및 Non-AR 시대로 구분하여 분석하였다. Fig. 6은 5대강의 19개 지점에서 관측된 수위 자료의 Whisker-box plots를 보여주고 있다. 다수의 관측소에서 수위 자료의 1 - 3분위를 나타내는 box의 폭은 AR과 Non-AR 시대에 관계 없이 유사하게 나타났지만, 수위 자료의 최대값과 중간값에서 차이가 발생하였다. 전반적으로 최대 수위와 중간 수위 값이 AR 시대에 Non-AR 시대에 비해 높았으며, 연구 기간 동안 평균 수위 또한 AR 시대에 높게 나타났다. 이러한 결과는 강우로 인한 수위 상승에 AR이 영향을 미칠 뿐만 아니라, 하천 및 주요 강의 저수위 보다는 고수위 발생에 큰 기여를 한다는 점을 의미한다. Fig. 6의 빨간 점선과 실선은 각 지점의 홍수 주의보와 경보발령에 대한 기준 수위를 나타낸다. 한강의 경우, 3개 지점에서 AR 시대에 하천 수위가 주의보 및 경보 기준선을 초과하는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 한강의 여주대교(Fig. 6(a), 오른쪽 패널)에서 Non-AR 시즌 동안 홍수 주의보/

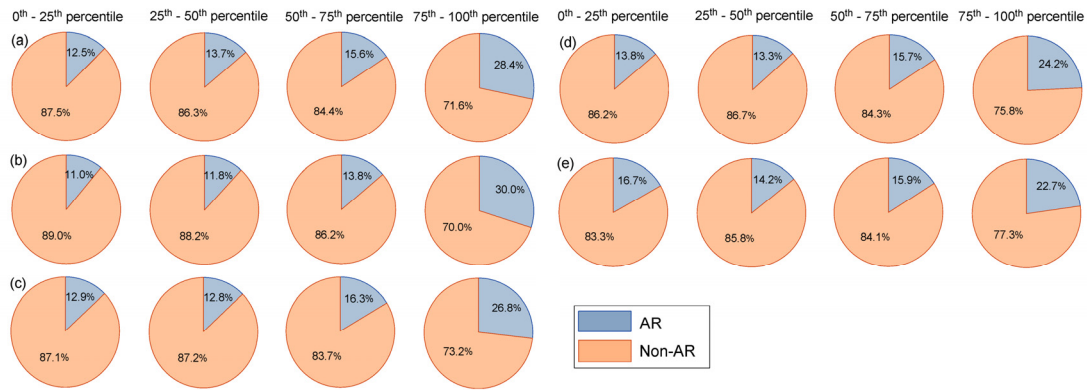


Fig. 7. Pie plots of observed runoff for each quartile over five rivers, (a) Han river, (b) Yeongsan river, (c) Seomjin river, (d) Nakdong river and (e) Geum river, during Non-AR (orange) and AR (blue) seasons

경보 기준을 초과하는 일수가 1일/0일인 반면에, AR 시즌의 경우 초과 일수가 12일/5일로 상대적으로 높은 위험도를 보였다.

이러한 결과들은 AR이 한반도 5대강 주요 지점의 수위 특성에 영향을 미친다는 점을 보여준다. 또한, AR 시즌에 발생하는 강우로 인한 수위 상승은 Non-AR 시즌에 비해 한반도 주요 지점의 홍수와 같은 자연재해의 발생을 높일 가능성이 크다는 점을 확인하였다.

본 연구에서는 AR이 한반도 유량 발생 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 5대강의 주요 19개 지점에서 관측된 일 유량을 4개 기준으로 나누었다. 각 지점에서 관측된 유량을 0th - 25th, 25th - 50th, 50th - 75th 그리고 75th - 100th percentiles로 구분하여 각 기준에 해당하는 AR의 기여도를 산정하였다. Fig. 7은 각 기준별 유량 발생에 대한 AR 시즌과 Non-AR 시즌의 기여도를 5대강 지점들에 대해 보여주고 있다. Percentile이 증가함에 따라 AR의 기여도 역시 증가하는 경향을 보였다. 대부분의 지점에서 관측 유량의 0th - 75th percentile에 대해서 AR의 기여도는 약 11% - 16%로 나타났다. 즉, 유량 값의 3분위(75th percentile)까지는 AR의 영향력이 20% 미만으로 유량에 대한 기여도가 높지 않은 것을 알 수 있었다. 반면에, 유량의 3분위 이상(75th - 100th)에서는 다른 percentiles에 비해 AR의 기여도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다.

AR은 3분위 이상의 유량 값에 대해 약 23%부터 최대 30%까지 영향력을 미치는 것으로 나타났다. 1 - 3분위에 비해 3분위 이상에 대한 AR의 기여도는 2배 이상 차이가 났고, 이는 저 유량 보다는 고유량 발생에 AR의 영향력이 더 높은 것을 의미한다. 이러한 결과는 AR의 상륙이 한반도의 홍수와 같은 극한 수문 현상의 발생 위험을 높일 수 있다는 점을 보여주고 있다.

4. 요약 및 결론

중위도 지역에서부터 다량의 수증기를 동반하는 AR은 내륙지역에 상륙함과 동시에 많은 양의 강우를 발생시킬 뿐만 아니라 해당 지역의 수문학적인 측면에서 영향력이 매우 크다. 본 연구에서는 한반도에 AR이 미치는 수문학적 영향에 대해 연구하였다. 이를 위해, 지상 관측소에서 2000 - 2015년도에 관측된 강우, 하천 수위 및 유량에 대한 AR의 영향력을 분석하였으며, 도출된 결과의 요약은 다음과 같다.

- 1) AR의 상륙이 한반도 강우특성에 미치는 영향을 분석한 결과, AR 시즌 동안 강우 발생에 큰 기여를 하는 것으로 나타났다. 연구 기간 동안 관측된 강우량의 약 57% 발생에 영향을 미친 것으로 분석되었고, 2004년과 2012년에는 연 강수량의 70% 정도가 AR 시즌에 발생한 것으로 나타났다.
- 2) 월별 및 계절별 강우에 대한 AR의 영향을 분석한 결과, 다른 계절에 비해 여름철 강우에 영향력이 매우 높은 것으로 나타났고, 한반도 여름철 강우량의 약 60%에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 특히, 7월에는 그 영향력이 가장 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 수문학적으로 가장 기본적이고 중요한 요소인 강우에 AR이 밀접한 연관을 가지고 있는 것을 의미한다.
- 3) 한반도의 강우뿐만 아니라 주요 5대강 수위 특성에도 AR의 영향력이 큰 것으로 나타났다. AR 시즌 동안 관측된 수위는 Non-AR 시즌에 비해 다소 높은 것으로 분석되었을 뿐만 아니라, 각 하천의 홍수 주의보, 경보 기준 수위를 초과하는 경우가 나타났다. 이러한 결과는 AR이 한반도에 상륙하는 시기에 홍수발생의 위험도가 높을 수 있다는 점을 의미한다.
- 4) AR이 한반도에 상륙한 경우 유량이 상승하는 것으로 나타

났다. 특히, AR은 3분위 이상의 유량 값에 대한 영향력이 큰 결과를 보였는데, 최대 30%의 영향력을 보였다. 이러한 결과는 특정 지역이 아닌 한반도 5대강에서 모두 비슷한 결과를 보였다. 이는 유량 특성 중 저유량 보다는 고유량 발생뿐만 아니라, 홍수와 같은 극한 수문현상 발생에도 AR이 밀접하게 관여하는 것을 알 수 있다.

- 5) 마지막으로 여름철의 장마 및 전선형 강우, 가을철의 태풍의 영향력이 큰 한반도의 경우, 다양한 기상학적 요소들이 복합적으로 작용하여 수문학적으로 큰 영향을 주기 때문에 본 연구에서 제시하는 강우 및 수문학적 요소들의 특성은 오로지 AR만의 영향으로 결론짓기는 어렵다. 또한 각각의 기상현상들이 발생하는 원인과 정의가 다르기 때문에 각 현상들을 독립적으로 구분하여 수문학적인 영향력을 분석하기에는 무리가 있다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 결과들은 AR을 포함한 각 기상 현상들이 독립적으로 혹은 복합적으로 작용한 경우에도 한반도에서 AR의 상륙이 관측된 경우, AR이 강우 및 수문학적 특성들에 영향을 주었다는 가정을 기반으로 하고 있다.

본 연구는 AR이 한반도에 상륙하는 경우 강우, 수위 및 유량과 같은 수문학적 요소들에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 특히, 강우의 경우 여름철에 AR의 기여도가 큰 것으로 나타나, 연 강우의 60% 이상이 여름철에 발생하는 한반도에 경우 그 영향력이 더욱 높은 것을 알 수 있었다. 또한 수위와 유량의 경우 한반도 5대강 주요 지점에서 높은 수위와 유량 발생 확률을 높이는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 AR이 한반도의 수문학적 영향력이 높을 뿐 아니라 전반적인 수자원 관리 및 홍수 발생에 영향을 미칠 확률이 높다는 점을 의미한다.

AR에 대한 관측 및 분석에 대한 연구가 활발한 미국과 유럽에 비해 국내의 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서 수문학적 측면에 대한 AR의 영향력을 확인한 만큼, 농업, 환경 그리고 다양한 분야에 대한 AR의 영향을 차후 연구를 통해서 밝힐 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 일 자료를 기반으로 분석하였지만, 추후 더 상세한 공간 및 시간 해상도의 자료를 이용한 연구를 제안하는 바이다.

감사의 글

The AR detection code was provided by Bin Guan via <https://ucla.box.com/ARcatalog>. Development of the AR

detection algorithm and databases was supported by NASA.

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B3005695).

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「AR6 기후변화시나리오 개발-평가」(KMA2018-00321)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormanna, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., H'olm, E.V., Isaksen, I., K'ollberg, P., K'ohler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J., Park, B., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Th'epaut, J., and Vitart, F. (2011). "The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system." *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, Vol. 137, pp. 553-597.
- Demaria, E., Dominguez, F., Hu, H., von Glinski, G., Robles, M., Skindlov, J., and Walter, J. (2017). "Observed hydrologic impacts of landfalling atmospheric rivers in the Salt and Verde river basins of Arizona, United States." *Water Resources Research*, Vol. 53, pp. 10025-10042.
- Dettinger, M.D. (2013). "Atmospheric rivers as drought busters on the US West Coast." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 14, No. 6, pp.1721-1732.
- Espinoza, V., Waliser, D.E., Guan, B., Lavers, D.A., and Ralph, F.M. (2018) "Global analysis of climate change projection effects on Atmospheric Rivers." *Geophysical Research Letters*, Vol. 45, pp. 4299-4308.
- Gimeno, L., Nieto, R., Vázquez, M., and Lavers, D.A. (2014). "Atmospheric rivers: A mini-review." *Frontiers in Earth Science*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-6.
- Guan, B., and Waliser, D.E. (2015). "Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 120, No. 24, pp. 12514-12535.
- Han, H., Kim, J., Chandrasekar, V., Choi, J., and Lim, S. (2019). "Modeling streamflow enhanced by precipitation from atmospheric river using the NOAA national water model: A case study of the Russian river basin for February 2004." *Atmosphere*, Vol. 10, No. 8, p. 466.
- Hirota, N., Takayabu, Y.N., Kato, M., and Arakane, S. (2016) "Roles of an atmospheric river and a cutoff low in the extreme precipitation event in Hiroshima on 19 August 2014." *Monthly Weather Review*, Vol. 144, pp. 1145-1160.
- Hu, H., Dominguez, F., Wang, Z., Lavers, D.A., Zhang, G., and

- Ralph, F.M. (2017). "Linking atmospheric river hydrological impacts on the US West Coast to Rossby wave breaking." *Journal of Climate*, Vol. 30, No. 9, pp. 3381-3399.
- Kamae, Y., Mei, W., and Xie, S.P. (2017). "Climatological relationship between warm season atmospheric rivers and heavy rainfall over East Asia." *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 95, No. 6, pp. 411-431.
- Kim, J., Waliser, D.E., Neiman, P.J., Guan, B., Ryoo, J.M., and Wick, G.A. (2013). "Effects of atmospheric river landfalls on the cold season precipitation in California." *Climate dynamics*, Vol. 40, No. 1-2, pp. 465-474.
- Lavers, D.A., and Villarini, G. (2013). "The nexus between atmospheric rivers and extreme precipitation across Europe." *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, pp. 3259-3264.
- Modrick, T.M., and Georgakakos, K.P. (2015). "The character and causes of flash flood occurrence changes in mountainous small basins of Southern California under projected climatic change." *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 3, pp. 312-336.
- Moon, H., Kim, J., Guan, B., Waliser, D.E., Choi, J., Goo, T., Kim, Y., and Byun, Y.H. (2019). "The effects of Atmospheric River landfalls on precipitation and temperature in Korea." *Atmosphere*, Vol. 29, No. 4, pp. 343-353.
- Mundhenk, B.D., Barnes, E.A., and Maloney, E.D. (2016). "All-season climatology and variability of atmospheric river frequencies over the North Pacific." *Journal of Climate*, Vol. 29, pp. 4885-4903.
- Neiman, P.J., Schick, L.J., Ralph, F.M., Hughes, M., and Wick, G.A. (2011). "Flooding in western Washington: The connection to atmospheric rivers." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 12, pp. 1337-1358.
- Norbiato, D., Borga, M., Degli Esposti, S., Gaume, E., and Anquetin, S. (2008). "Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions: An assessment for gauged and ungauged basins." *Journal of Hydrology*, Vol. 362, No. 3-4, pp. 274-290.
- Ralph, F.M., Coleman, T., Neiman, P.J., Zamora, R.J., and Dettinger, M.D. (2013). "Observed impacts of duration and seasonality of atmospheric-river landfalls on soil moisture and runoff in coastal northern California." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 14, No. 2, pp. 443-459.
- Ralph, F.M., Neiman, P.J., and Wick, G.A. (2004). "Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/98." *Monthly Weather Review*, Vol. 132, pp. 1721-1745.
- Ralph, F.M., Neiman, P.J., Wick, G.A., Gutman, S.I., Dettinger, M.D., Cayan, D.R., and White, A.B. (2006). "Flooding on California's Russian River: Role of atmospheric rivers." *Geophysical Research Letters*, Vol. 33, L13801.
- Ralph, F.M., Rutz, J.J., Cordeira, J.M., Dettinger, M., Anderson, M., Reynolds, D., Schick, L.J., and Smallcomb, C. (2019). "A scale to characterize the strength and impacts of atmospheric rivers." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 100, No. 2, pp. 269-289.
- Stohl, A., Forster, C., and Sodemann, H. (2008). "Remote sources of water vapor forming precipitation on the Norwegian west coast at 60 N - a tale of hurricanes and an atmospheric river." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 113, D05102.
- Zhu, Y., and Newell, R.E. (1994). "Atmospheric rivers and bombs." *Geophysical Research Letters*, Vol. 21, pp. 1999-2002.
- Zhu, Y., and Newell, R.E. (1998). "A proposed algorithm for moisture fluxes from atmospheric rivers." *Monthly weather review*, Vol. 126, pp. 725-735.