

우리나라에서의 최근 (30, 50년) 극한 강수 특성 현황 및 변화경향

박인기* · 서명석**†

*환경예측연구소 전임연구원, **공주대학교 대기과학과 / 중부권미세먼지연구관리센터 교수

Recent (30, 50 years) extreme precipitation characteristics and changing trends in Korea

Park, In-Gi* and Suh, Myoung-Seok**†

*Associate Research Engineer, Environmental Prediction Research Inc., Daejeon, Korea

**Professor, Dept. of Atmospheric Sciences / Particle Pollution Research and Management Center, Kongju National University, Gongju, Korea

ABSTRACT

In this study, trends in extreme rainfall characteristics (Ext_Ra_Ch) were analyzed for 30-year (1993 ~ 2022) and 50-year (1973 ~ 2022) periods using observation data from 60 Korea Meteorological Administration stations. The quantile regression method was used to calculate trends in Ext_Ra_Ch for different accumulation hours (1, 3, 6, 12, 24 hours) and extreme levels (upper 0.5, 1, 2.5, 5, 10%). For Ext_Ra_Ch, the number of observing stations showing a tendency to increase and decrease was similar in the last 30 years, but in the last 50 years there was an increasing trend for most stations. The extreme rainfall intensity (ER_I) and frequency (ER_F) tended to increase significantly for short accumulation hours (< 6 h), while the change in amount of extreme rainfall (ER_A) tended to vary depending on the accumulation time and geographic location. ER_I and ER_F trends were negatively correlated in most cases, and the lower the extremity level, the stronger the negative correlation. However, ER_A and ER_F trends were positively correlated regardless of cumulative time and extremity level, and the higher the extremity level, the stronger the positive correlation. Although there were differences depending on the region and extremity level, ER_I and ER_F for short periods of less than 6 hours have increased significantly; thus, more in-depth research is needed on the causes of these phenomena.

Key words: Extreme Rainfall Intensity, Frequency, Quantile Regression, Extreme Level, Trend, Correlation

1. 서론

강수는 지리적 위치 및 계절에 따라 다르게 내리며 기온과 함께 그 지역의 생태계 형성 및 유지에 중요한 역할을 한다. 강수 특성이 극단적으로 약하거나 강함을 의미하는 극한 강수는 절대적 및 상대적으로 정의할 수 있는데 일반적으로 강수특성(강수량, 빈도, 강도)의 통계적 분포에서 상위 10%, 하위 10%로 분포하는 극단적인 강수 현상을 의미하기도 한다(Houghton et al., 2001). 최근 이산화

탄소와 같은 온실기체의 과다 배출, 열대우림 파괴, 도시화 등과 같은 인위적 요인에 의해 많은 지역에서 기온 및 강수 특성의 변화가 보고되고 있다(Masson-Delmotte, 2021; Stocker, 2013). 전 지구적으로(지리적 위치에 따라 상이하게) 기온이 상승됨에 따라 전 지구적 및 지역적 물순환에도 변화가 발생하고 있다. 그 결과 일부 지역에서는 극한 강수의 발생 빈도 및 강도가 증가되고 있는 반면 다른 지역에서는 가뭄의 강도가 강해지고 있다(Klein Tank and Können, 2003; Sung et al., 2017; Tian et al.,

†Corresponding author : sms416@kongju.ac.kr (56, Gongjudachak-ro, Gongju-si, Chungcheongnam-do, Korea. Tel. +82-41-850-8533) ORCID 박인기 0009-0001-5267-298X 서명석 0000-0002-3827-0044

2022; Yoon et al., 2012; Zolina et al., 2012). 특히 우리나라에서도 2017년 7월 16일 청주에 시간당 91.8 mm의 비가 쏟아져 일 누적 강수량 290.1 mm를 기록하여 1,060억 원의 피해가 발생하였다. 2017년 9월 11일에는 부산에 시간당 116 mm의 기습적 폭우로 부산 영도구에서 일 누적 강수량이 358 mm를 기록하며 침수, 붕괴 사고 등이 발생했다(Park and Yoon, 2018). 기후변화와 함께 발생하는 홍수, 가뭄 등 극한 강수에 의해 발생하는 자연재해는 물순환 변화와 함께 생태계 파괴, 생명 및 재산상 손실을 심화시킬 수 있으므로 심도 있는 연구가 필요하다(Myhre et al., 2019; Sung et al., 2017).

지구온난화로 많은 지역에서 집중호우, 가뭄 등과 같은 극한강수의 발생특성이 변화됨에 따라 이에 대해 국외에서 많은 연구들이 수행되어 왔다. Zolina et al. (2012)은 유럽의 지상관측자료(1950~2009)를 이용한 강수특성(강수량, 빈도, 강도) 변화 연구에서 건기와 우기의 계절별 일수 변화를 분석하여 과거에 비해 강수 관련 극한 현상의 발생 특성이 변화되고 있음을 보고하였다. 이들은 10월~3월에 발생하는 우기가 북부 및 중부 유럽에서 2%에서 7%로 증가하였음을 보이고 그 원인으로 대서양-유럽 지역에서의 기후 변화에 의한 사이클론 활동 변화를 제시하였다. Kirchmeier-Young and Zhang (2020)은 CanESM2 (Canadian Earth System Model, version 2), CanRCM4 (Canadian Regional Climate Model, version 4), CESM (Community Earth System Model) 등 세 개의 모델을 통해 온실 가스, 대기 에어로졸, 성층권, 오존 및 토지 사용 변화와 같은 인위적 요인과 화산 및 태양 복사와 같은 자연적 요인 그리고 강수 관측치에 대한 모델 반응 사이의 관계를 설명하는 스케일링 인자를 생성하여 각 모델의 북미지역 연최고 1일, 5일 누적 강수에 대해 알아보았다. 결과적으로 북미지역에서 연최고 1일과 5일 누적 강수량에서 증가 경향이 나타나고 있는데 그 강도가 상대적으로 짧은 1일에서 강함을 제시하였다.

국내에서도 극한강수의 발생특성 및 변화경향에 대한 연구가 활발히 진행되었다. Kim and Suh (2008)는 다양한 정보를 활용하여 불확실성을 유추하는데 합리적 방법인 베이저안 기법을 30년(1976~2005) 기상청 관측자료에 적용하여 집중호우시의 강수특성(강수량, 빈도, 강도) 모두 증가한 것으로 밝혔다. 특히 1996년을 기점으로 연평균 강수강도와 집중호우 현상의 평균값에 변위가 있음을 보여 이 기간 이후 집중호우일수와 강도의 증가가 복합적으로 작용하여 집중호우시의 강수량을 크게 증가시켰음

을 보였다. Lee et al. (2012)은 분위회귀분석방법(Quantile Regression: QR)을 이용하여 서울의 연강수량 및 계절별 강수량 변화경향을 분석해 최근 극한강수의 강도가 증가하고 있음을 보였다. 특히 강수량이 집중되는 시기인 6-9월의 일강수량 자료에 대하여 약 70퍼센타일 이상의 분위에서부터 평균 변화율 이상의 높은 증가율이 나타나고 있고, 평균 강수량의 증가가 상위 분위에서의 변화로 인한 결과임을 밝혔다.

최근 전 지구적으로 발생하고 있는 극한강수 현상의 변화 특성 및 원인에 대해서도 많은 연구들이 수행되었다. 또한 성층권 하부 및 대류권 상부는 냉각 또는 현상 유지를 하고 있는 반면 대류권 하층이 강하게 온난화됨에 따라 단시간에 강한 강수를 유발하는 대류성 강수의 증가가 보고되고 있다(Berg et al., 2013; Kim et al., 2009; Masson-Delmotte, 2021). Kim et al. (2023)은 국립기상과학원의 한반도 상세 기후변화 시나리오를 활용하여 극한 강수량 미래 변화를 분석하였으며, 저탄소 시나리오에 비해 고탄소 시나리오에서 21세기 전반기(2021~2040년) 이후에 극한 강수량 증가가 심할 것으로 전망하여 탄소 배출이 극한 강수 증가에 영향을 줄 수 있음을 제시하였다. 위 연구에서는 현재 관측자료와 미래 기후변화 시나리오별 모의 자료의 비교를 통해 극한 강수의 변화경향에 대해 분석하였다면, 본 연구에서는 과거 ASOS(60개) 강수 자료를 통해 극한 강수 변화경향이 현재까지 어떻게 변화해 왔는지를 분석하였다.

최근 국외 뿐 아니라 우리나라에서도 온난화의 영향으로 수 시간 이내의 짧은 시간에 국지적으로 강한 강수가 자주 발생하고 있는데 이에 대한 연구는 부족한 것이 현실이다(e.g., Jung et al., 2014; Kim et al., 2009; Lee and Kim, 2007; Park and Suh, 2022; Park et al., 2021). 특히 선행연구를 살펴보면 일강수량을 기준으로 극한 강수량을 분석하는 연구(e.g., Kim and Suh, 2008; Kirchmeier-Young and Zhang, 2020; Kunkel, 2003; Lee et al., 2012)가 많은데 돌발홍수를 발생시키는 극한강수는 강한 강수가 짧은 시간에 내리면서 발생하기 때문에 일강수량 자료로는 짧은 시간에 강하게 내리는 강수에 대해 파악하기 어려운 문제가 있다. 또한 Lee et al. (2012)처럼 서울과 같은 일부 지점에 대한 연구가 많기 때문에 한반도 전체에서의 극한강수 특성의 현황과 변화 경향을 알 수 있는 연구가 부족한 실정이다. Kunkel (2003)은 1895~2000년 기간 동안 5~10년 간격으로 극한 강수 지수(EPI)의 아노말리 분석을 통해 1920년대 이후 극한 강수량이 증가하였음을 보였다. 그러

나 대부분 연구에서는 30년이나 40년과 같이 특정기간 또는 특정연도를 기준으로 전후반기에 대한 연구가 진행되어 분석기간이 극한강수의 변화에 미치는 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 분석기간이 짧은 누적시간의 극한 강수 특성 변화경향에 미치는 영향을 알아보기 위해 최근 30년(1993~2022), 50년(1973~2022) 기간에 대해 누적시간 및 극한강수 수준별 변화 특성을 분위회귀분석(QR)을 통해 분석하고자 한다. 최근 온난화의 가속화로 극한 강수 특성에도 큰 변화가 발생하고 있음이 관측 및 모델링 연구에서 제시되고 있어 최근 30년에 대해서 상세히 분석을 하고자 한다. 2절에서는 본 연구에서 사용된 자료와 연구방법을, 3절에서는 QR을 통해 변화 경향을 분석하여 분석기간, 누적시간, 극한수준과 극한강수 특성사이의 관계에 대해 설명하였다. 4절에서는 본 연구에서 도출된 우리나라에서의 극한 강수 특성의 변화 현황에 대해 요약하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1. 자료

본 연구에서는 우리나라의 극한강수 특성(강수량, 빈도, 강도의 변화 경향과 상관관계 등을 분석하기 위하여 기상청 종관기상관측 자료를 이용하였다. 강수, 특히 극한강수와 같이 국지성이 강한 기후요소의 경우 다양한 방법으로 내삽된 격자점 자료를 이용할 경우 내삽방법이 강수특성 변화에 많은 영향을 줄 수 있기 때문에 여기서는 관측자료를 이용하였다(Gervais et al., 2014). 분석에 사용한 자료에 대해서는 Table 1에 정리하였으며, 분석에 사용된 관측지점은 Fig. 1에 나타내었다. 또한 분석에 사용된 지점에 대한 정보를 Table 2에 정리하였다. 분석 기간은 30년(1993~2022: 이하 30년)과 50년(1973~2022: 이하 50년)으로 하였으며, 관측주기는 1시간이고 사용지점 수는 최대 60개다. 기상청에서 제공하는 종관기상관측 자료는 품질검사가 이루어진 자료이므로 결측과 강수량이 음의 값 또는 1시간 누적 최댓값이 150 mm/h를 넘는 값에 대해서만 추가적으로 확인하였다. 제주도 고산 지점(185)은 1988년부터 관측이 시작되어 50년 분석에서 제외하였고, 완도 지점(170)은 1973~1974년에 결측이 많았기 때문에 50년 분석에서 1975년부터 사용하였다. 또한 안동 지점(136)은 전체적으로 결측이 많아 사용에서 배제하였으며 임실 지점(244)에서 확인된 음의 강수 값은 0.0 mm/h로 대체하였다.

Table 1. Summary of precipitation data used in this study

Data Information	30 years	50 years
Source	KMA ASOS	
Variable	PRCP (mm/h)	
Frequency	Hourly	
Period (Part 2)	1993 ~ 2022	1973 ~ 2022
# of Obs.	60	59
Quality Check	Excluding negative values and rainfall maximums exceeding 150 mm per hour.	

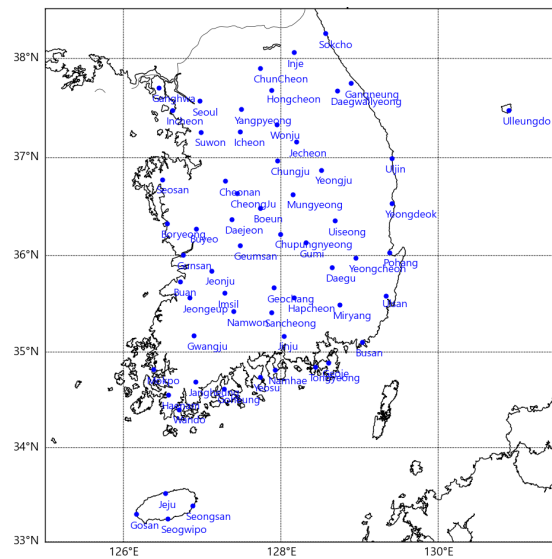


Fig. 1. Spatial distribution of observation stations used in this study

2.2. 연구방법

극한을 정의하는 방법에는 절대적 방법과 상대적 방법이 있다(KMA, 2023; Park and Suh, 2011). 절대적 방법은 고정된 기후요소 값을 기준으로 극한을 정의하는 것으로 기상청의 호우주의보(> 60 mm/3h 또는 > 110 mm/12h)와 호우경보(> 90 mm/3h 또는 > 180 mm/12h)가 이에 해당된다. 절대적 방법은 고정된 기준을 사용하므로 범용적으로 적용하기 편리한 장점이 있으나 지역별 기후특성 및 사회적 환경 차이를 반영하지 못하는 문제점이 있다. 상대적 방법은 지역별 기후특성을 반영하여 지역별로 다른 기준 값을 통해 극한을 정의하는 방법이다. 예를 들어 지역별로 관측 자료를 오름차순으로 나열한 후 상위 또는 하위 특정 임계값(%)을 기준으로 그 이상/이하인 값을 극한으

Table 2. Summary of observation stations used in this study

Station number	Station name	Station number	Station name	Station number	Station name	Station number	Station name
90	Sokcho	140	Gunsan	202	Yangpyeong	262	Goheung
100	Daegwallyeong	143	Daegu	203	Icheon	272	Yeongju
101	Chuncheon	146	Jeongju	211	Inje	273	Mungyeong
105	Gangneung	152	Ulsan	212	Hongcheon	277	Yeongdeok
108	Seoul	156	Gwangju	221	Jecheon	278	Uiseong
112	Incheon	159	Busan	226	Boeun	279	Gumi
114	Wonju	162	Tongyeong	232	Cheonan	281	Yeongcheon
115	Ulleungdo	165	Mokpo	235	Boryeong	284	Geochang
119	Suwon	168	Yeosu	236	Buyeo	285	Hapcheon
127	Chungju	170	Wando	238	Geumsan	288	Miryang
129	Seosan	184	Jeju	243	Buan	289	Sancheong
130	Uljin	185	Gosan	244	Imsil	294	Geoje
131	Cheongju	188	Seongsan	245	Jeongeup	295	Namhae
133	Daejeon	189	Seogwipo	247	Namwon		
135	Chupungnyeong	192	Jinju	260	Jangheung		
138	Pohang	201	Ganghwa	261	Haenam		

로 정의한다. 상대적 방법은 지역별 기후특성 차이를 반영하여 지역 환경에 적합한 정보를 제공할 수 있는 장점이 있으나 지역 및 분석기간별 강수 특성에 영향을 받는 단점이 있다. Kim et al. (2008)에서는 절대적, 상대적으로 정의된 강수와 기온의 극한 지수를 이용해 극한 사상의 발생빈도와 경향성을 분석하였고, 계절적으로 여름철에 집중호우 한계 기준이 더 크게 증가하였음을 밝혔다. 강수는 지형, 위도, 육지, 해양과 같이 지역별로 차이를 보이기 때문에 본 연구에서는 퍼센타일을 사용하는 상대적 방법을 통해 극한강수를 분석하고자 한다.

시공간적으로 불연속성이 큰 강수 현상에 대한 대부분 연구에서는 1일 이상의 시간규모에 대해 분석하였다. 여기서는 1일 이내의 짧은 시간에 발생하는 극한강수 현상을 분석하기 위하여 누적시간을 1, 3, 6, 12, 24시간으로 하였다. 이 때 돌발홍수를 유발하는 극한강수는 연속적인 강수에 의해 발생하기 때문에 단순 누적(예: 3시간 누적: 1-3, 4-6, 7-9, ...)이 아닌 Jung et al. (2015)에서 사용한 방법과 같이 1시간씩 이동하면서 누적(예: 3시간 누적: 1-3, 2-4, 3-5, 4-6, ...)하는 방법으로 누적시간별 강수 특성자료를 산출하였다. Fig. 2는 단순 누적과 이동 누적이 강수강도 차를 알아보기 위해 2013~2016년의 전지점 강수강도 자료를 분석한 상대적 발생빈도 그래프이다. 강수강도가 약할 경우에는 발생빈도에서 차이가 거의 없으나 강수강

도가 극한적으로 강해짐에 따라 발생빈도에 차이가 발생하고 있다. 4개년 모두에서 이동누적이 극한 강수강도가 단순 누적보다 강하게 발생하고 있는 점은 홍수, 범람, 산사태, 침수와 같은 극한 강수 피해를 예측 및 방재하는데 단순 누적보다 이동누적이 적절함을 제시한다.

극한수준별(상위 0.5, 1, 2.5, 5, 10%) 강수 특성 자료는 누적시간별 강수 자료를 오름차순으로 정리한 후 산출하였으며, 산출한 자료는 극한 수준별 강수량, 강수빈도, 강수강도이다. 즉, A 지점의 B 연도에 강수가 총 600시간 발생하였다면 극한수준 상위 0.5%의 빈도는 $3(600 \times 0.5\% = 3)$ 개가 된다. 이 3개 강수를 합하면 0.5% 강수량이 되며, 강수강도는 0.5% 강수량을 강수빈도(3)로 나눈 것이다.

이렇게 각 지점 및 연도별로 산출한 강수특성 자료에 QR 방법을 적용하여 변화 경향을 분석하고 이들 간의 상관관계 분석을 진행하였다. QR 방법은 잔차의 절댓값 합이 최소가 되는 해를 구하는 방법으로(식 1), 분산이 다른 데이터에서도 회귀분석이 가능하고, 중위수, 분위수 값을 예측하고 싶을 때 주로 사용하는 회귀분석 방법으로 이상치의 영향을 적게 받는다.

$$QR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho_{\tau}(|y_i - (\beta_0(\tau) + \beta_1(\tau)x_{i1} + \dots + \beta_p(\tau)x_{ip})|) \quad (1)$$

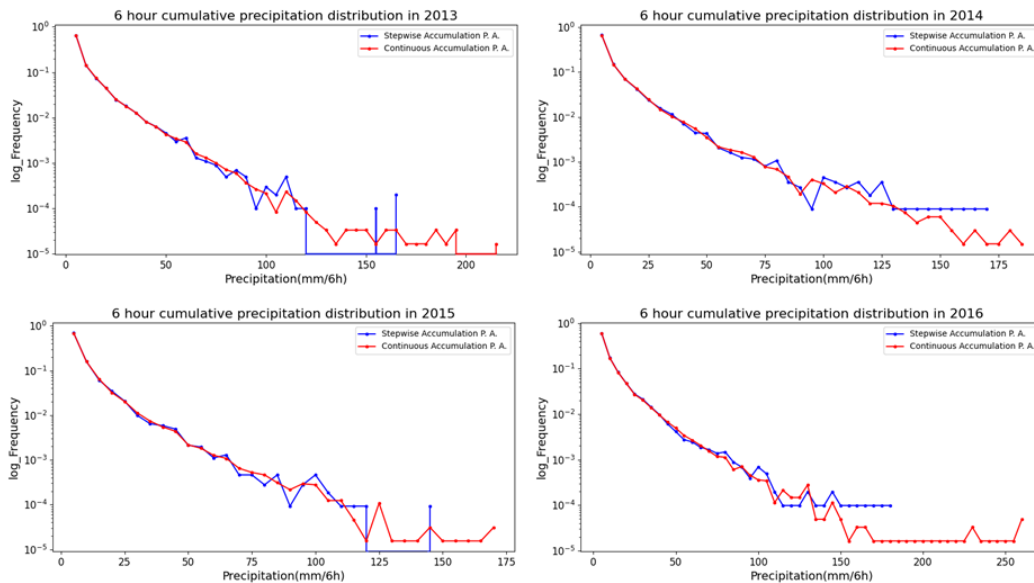


Fig. 2. Comparison of stepwise accumulation and continuous accumulation of precipitation

여기서 n 은 전체 표본의 수를 의미하며, y_i 는 실제 관측값, $(\beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip})$ 는 개발된 회귀식으로 예측한 값을 의미한다. 이 때 τ 는 분위수를 의미하는데 예를 들어 $\tau = 0.5$ 면 50%에 속하는 조건부 분위수 값만 사용하는 것이다. ρ 는 오차의 분위수에 따라 발생하는 손실에 대해 비대칭 가중치를 부여하는 함수이다.

상관분석은 두 변수의 선형적 관계를 알아보는 방법으로 극한강수 특성(강수량, 강수빈도, 강수강도) 사이의 상관성을 알아보기 위해 분석하였다. 상관분석 방법은 식 (2)와 같이 일반적으로 사용하는 피어슨 상관계수(Pearson Correlation)를 사용하였다.

$$r_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{S_x S_y} = \frac{1/(n-1) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y} \quad (2)$$

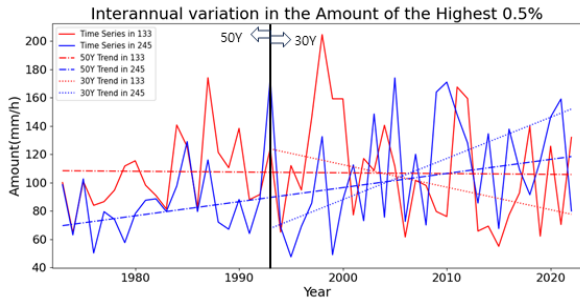
여기서 n 은 전체 표본 수를 의미하며, x_i 와 y_i 는 각 표본의 값을, \bar{x} 와 \bar{y} 는 각 표본의 평균을, S_x 와 S_y 는 각 표본에 대한 표준편차를 의미한다.

변화경향과 상관관계를 분석과정에서 산출된 결과가 유의한지는 유의수준으로 제시하였다. 본 연구에서는 유의수준을 $p \leq 0.01$ 이면 ***, $0.01 < p \leq 0.05$ 면 **, $0.05 < p \leq 0.1$ 이면 *로 나타냈다.

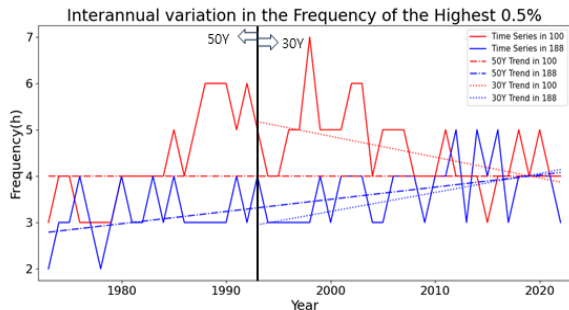
3. 결과

3.1. 분석기간별(30, 50년) 강수특성 시계열

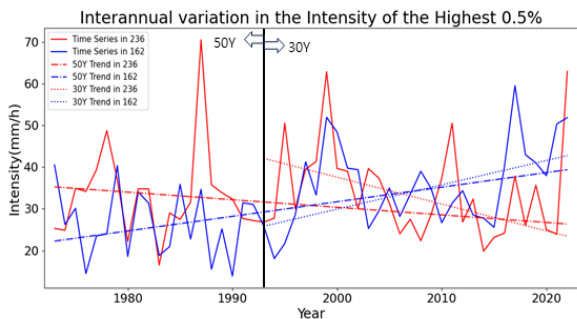
Fig. 3은 극한수준 상위 0.5%에 대해 강수특성별(강수량(a), 강수빈도(b), 강수강도(c)) 변화경향이 분석기간에 따라 상이한 몇 지점에 대한 경년변동을 그래프로 나타낸 것이다. 정읍(245)의 경우 Jang et al. (2016)에서 제시한 것과 같이 1994 ~ 1995년 가뭄 발생 시 강수량이 적은 해도 있지만 30, 50년 모두에서 증가경향을 보인다. 반면에 대전(133)은 최근 30년에서 강수량 감소경향이 강하지만 50년에서 변화경향이 매우 약하다. 강수빈도에서도 지점 및 분석기간에 따라 변화경향이 상이한데 성산(188)에서는 30, 50년 모두에서 빈도가 증가경향을 보인 반면 대관령(100)은 최근 30년에서 강한 감소경향을 보이지만 50년에는 변화경향이 약하다. 강수강도는 통영(162)에서 모든 기간 증가경향을 보인 반면 부여(236)에서는 모든 기간에서 감소경향을 보인다. 전체적으로 경년변동을 살펴봤을 때 기간이 짧은 30년에서는 Fig. 3과 같이 특정 해의 크거나 작은 값이 변화경향에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 시공간 변동성이 큰 기후요소 중 하나인 강수 현상과 같이 극한 강수 특성에서도 분석기간 및 지점에 따라 변화경향이 상이하게 나타나고 있다. 특히 분석기간이 짧은 30년에서 변화경향이 크게 나타나는 지점이 많은 이유는 경년변



(a) Amount of H0.5% in Daejeon(133) and Jeongeup(245)



(b) Frequency of H0.5% in Daegwallyeong(100) and Seongsan(188)



(c) Intensity of H0.5% in Buyeo(236) and Tongyeong(162)

Fig. 3. Temporal variations of extreme (H0.5%) precipitation characteristics according to the analysis period for the selected stations

동 그래프에서처럼 1998년 태풍 예니의 영향으로 포항에 일강수량 516.4 mm의 호우가 내린 것(NGII, 2020)처럼 특정 사건이 큰 영향을 주기 때문으로 볼 수 있다.

3.2. 분석기간별 극한강수 특성의 변화경향

Fig. 4는 최근 30년 극한 수준 및 누적시간별 극한강수 강도 변화경향을 QR로 분석해 지점별로 나타낸 것이다.

히트맵의 X축은 지점을 나타내고 있으며, Y축은 누적 시간을 나타내고 있다. 이 때 변화경향의 객관적 비교를 위해 누적 시간별 변화경향을 1시간으로 정규화하여 나타냈다. 30년 극한강수 강도의 변화경향은 극한수준이 높고 누적시간이 짧을수록 변화경향이 강하게 발생하고 있다. 극한강수 강도는 분석기간이 짧은 30년에서는 관측지점의 약 절반(35개 지점)인 제주, 호남 지역, 남해안 남동쪽, 동해안에서 증가경향이 나타나고 나머지 약 25개 지점인 충청, 경기 내륙, 영남 일부, 남해안 남서쪽 지역은 감소경향이 나타나고 있다. 변화경향의 유의수준은 누적 시간에 관계없이 약 11개 지점을 제외하고 대부분 유의하지 않고, 증감경향이 높게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 분석 기간이 짧으면 태풍과 같은 변동성이 큰 사건이 증감 경향에 영향을 주기 때문이다.

Fig. 5는 최근 50년 극한 수준 및 누적시간별 극한강수 강도 변화경향을 QR로 분석해 지점별로 나타낸 것이다. 50년 극한강수 강도 변화경향은 30년과 같이 극한수준이 높고 누적시간이 짧을수록 변화경향이 강하게 발생하고 있다. 극한강수 강도는 분석기간이 긴 50년에서는 감소경향을 보이는 충청, 경기 지역의 약 14개 지점을 제외하고는 대부분 증가경향이 나타나고 있다. 누적시간이 짧고 증가경향을 보이는 지점에서 변화경향이 유의하게 나타나고 있는데 누적 시간에 관계없이 약 20개 지점에서만 유의하게 나타나고 있다. 이는 과거에 비해 짧은 시간에 내리는 강수강도가 강해졌음을 의미한다. 또한 증감경향도 30년에 비해 낮게 나타나고 있는데 이는 분석기간이 길어지면 변동성이 큰 사건에 영향을 더 적게 받기 때문이다.

극한강수 강도의 변화 경향은 최근 30년에서는 누적시간 및 극한 수준에 관계없이 지역차가 크다. 반면 최근 50년에서는 극한 수준 및 누적 시간에 따라 변화경향의 차이는 있으나 상대적으로 지역 차는 약하다. 이러한 결과는 우리나라에서 극한강수 강도가 지속적으로 증가되고 있는데 최근으로 올수록 증감경향의 지역차가 커지고 있음을 제시한다.

Fig. 6은 Fig. 4와 같이 최근 50년에 대해 나타낸 것이다. 30년 극한강수량 변화경향은 극한 수준과 누적시간에 따른 경향이 잘 드러나지 않으며, 지점에 따라 증감경향이 다양하게 나타나 지리적 위치 특성의 영향을 받는 것으로 보인다. 분석기간이 30년일 때 극한강수량은 제주, 호남 지역, 남해안 남동쪽, 동해안에 위치한 약 32개 지점에서는 증가경향이, 충청, 경기 내륙, 영남 일부, 남해안

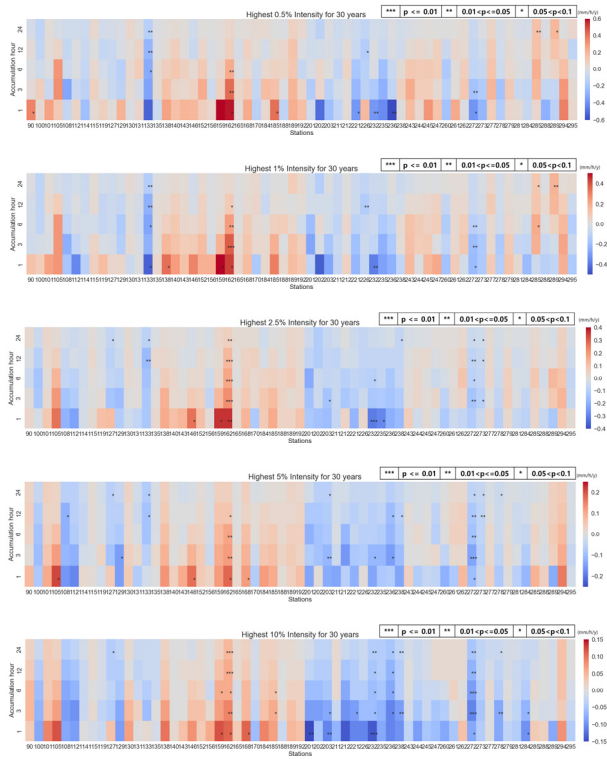


Fig. 4. Trend of extreme precipitation intensity according to the extreme level and accumulation time over 30 (1993 ~ 2022) years

남서쪽 지역에서는 감소경향이 나타나고 있다. 또한 천안, 대전, 부여, 보령 등 충남지역과 원주, 제천, 영주 등 내륙 지역에서는 강도의 경향과 일치하고 있다. 전체적으로 누적시간에 관계없이 약 7개 지점을 제외한 다른 지점들에서는 변화경향이 유의하지 않는데 이는 30년의 짧은 기간에서는 극한 강수 특성의 강한 변동성 외에도 태풍과 같은 특정 사건이 변화경향에 영향을 주었기 때문으로 보인다.

Fig. 7은 Fig. 5와 같이 최근 50년에 대해 나타낸 것이다. 극한강수량은 극한 수준과 누적시간에 관계없이 대관령 등 약 3개 지점을 제외한 모든 지점에서 증가경향을 보이고 있다. 약 17개 지점을 제외한 대부분 지점에서 변화경향이 유의하게 나타나고 있는데 이는 우리나라에서 극한강수량이 지속적으로 증가되고 있음을 의미한다. 강수량의 변화경향이 30년과 50년에서 확연히 다르게 나타나고 있는데 이는 극한 강수량의 발생 특성이 분석기간에 따라 변동이 큼을 보여준다.

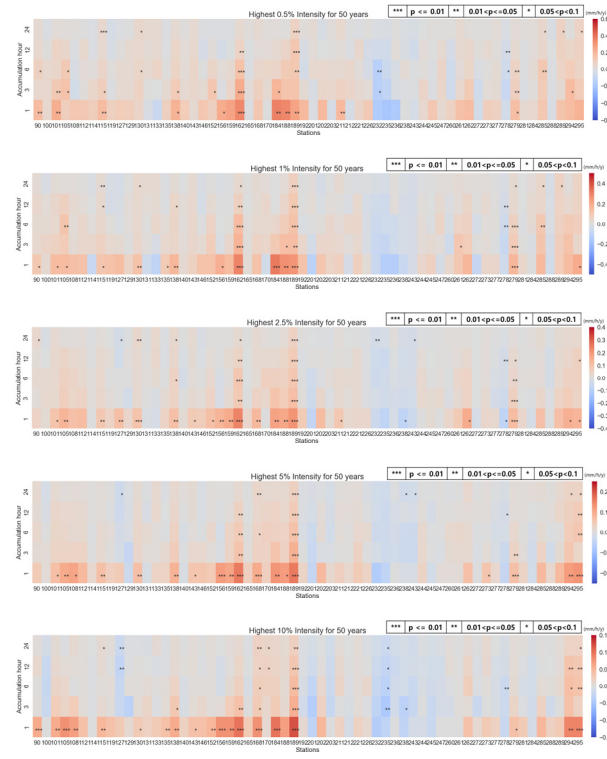


Fig. 5. Trend of extreme precipitation intensity according to the extreme level and accumulation time over 50 (1973 ~ 2022) years

극한강수량의 변화 경향 히트맵에서 최근 30년에서는 누적시간에 관계없이 지역별로 변화경향의 차이가 큼을 알 수 있다. 남해안과 동해안 북부를 제외한 제주도 같은 해안가와 산맥의 풍상쪽 사면에서는 증가 경향이 주로 나타나는 반면 내륙 평지나 풍하쪽에서는 감소경향이 발생하고 있다. 반면에 30년에 비해 지난 50년 동안 대부분 지역에서 유의한 극한 강수량의 증가가 발생하였다. 특히 지난 50년 동안 극한 강수량은 지리적 위치에 관계없이 대부분 지역에서 지속적으로 증가되어 왔다. 강수량과 밀접하게 관련된 강도도 50년 동안 대부분 지역에서 유의하게 증가되고 있다. Figs. 4~7을 종합해볼 때 최근 들어 우리나라에서는 지리적 위치, 누적시간 및 극한수준에 관계없이 극한강수 강도 및 강수량이 지속적으로 증가됨과 함께 극한 강수 특성의 공간 차도 커지고 있으며 특히 짧은 주기의 극한강수에서 지역 편차가 커지고 있다.

Fig. 8은 최근 30년 극한 수준 및 누적시간별 극한 강수빈도 변화경향을 QR로 분석해 지점별로 나타낸 것이

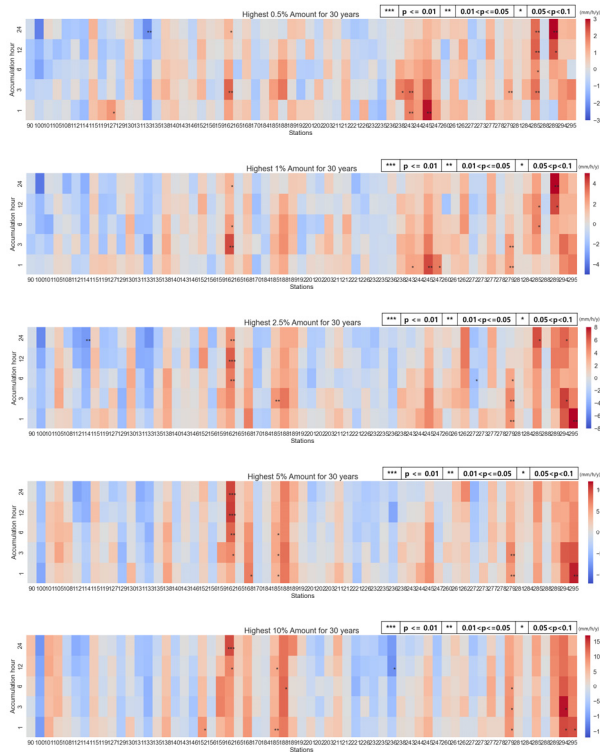


Fig. 6. Trend of extreme precipitation amount according to the extreme level and accumulation time over 30 (1993 ~ 2022) years

다. 30년 극한 강수빈도 변화경향은 극한 수준에 관계없이 누적시간이 짧을수록 변화경향이 강하게 발생하고 있다. 그러나 0.5% 극한 수준의 경우 빈도수 값의 분포가 넓게 나타나지 않기 때문에(대부분 0.5% 강수빈도가 2~5시간 내로 발생함) 중앙값으로 계산하는 QR의 변화경향이 크지 않고, 누적시간이 짧으면 값이 더 적으므로 경향이 나타나지 않는다. 분석기간이 30년으로 짧을 때 극한 강수빈도는 동해안과 경기 일부, 충청 일부, 호남 일부 등 한반도 서쪽 지역 약 20개 지점에서 감소경향이 나타나고 약 40개 지점에서는 증가경향이 나타나는데 장흥, 영천 등 일부 지점은 강도와 강수량과 반대경향이 나타나고 있다. 강도와 강수량의 변화경향이 지점에 따라 비례 또는 반비례로 나타나는 것은 두 강수 특성의 변화경향이 강수 빈도의 변화경향에 영향을 받기 때문이다. 즉, 강도와 빈도가 동시에 증가하면 강도와 강수량의 변화경향이 비례로 나타나지만 빈도가 감소하여 강도가 증가하게 되면 강수량은 감소경향을 보이게 된다. 유의수준은 약 24

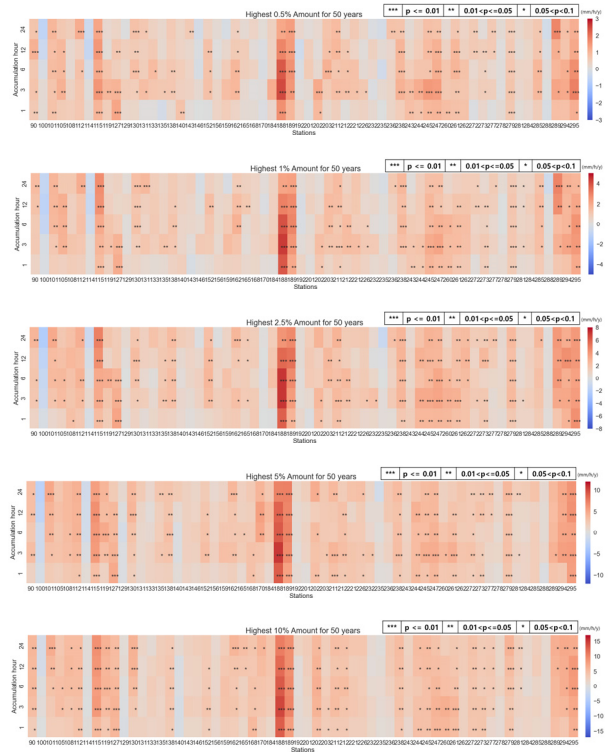


Fig. 7. Trend of extreme precipitation amount according to the extreme level and accumulation time over 50 (1973 ~ 2022) years

개 지점에서 유의하게 나타났고 대부분 증가경향을 보이는 지점에서만 유의하게 나타나는 것을 보아 최근 30년간 극한 강수빈도가 일부 지점에서 유의하게 증가했음을 알 수 있다.

Fig. 9는 최근 50년 극한 수준 및 누적시간별 극한 강수빈도 변화경향을 QR로 분석해 지점별로 나타낸 것이다. 50년 극한 강수빈도 변화경향은 극한 수준에 관계없이 누적 시간이 짧을수록 강하게 나타나며, 누적 시간 1시간에서 동해안, 남해안, 제주 일부 등 약 12개 지점 제외하고 약 48개 지점에서 증가경향을 보이고 있다. 유의수준은 약 7개 지점을 제외하고 대부분 유의하게 나타나고 있다. 이는 대부분 지역에서 지난 50년간 강수빈도가 특정 사건에 의해서 증가하지 않고 점진적으로 유의하게 증가했음을 의미한다. 강수빈도 또한 강수량과 같이 30, 50년에서 차이가 큰걸 보아 분석기간에 따른 변동이 매우 큼을 보여준다.

우리나라에서 극한 강수 빈도도 강도 및 양에서와 같이

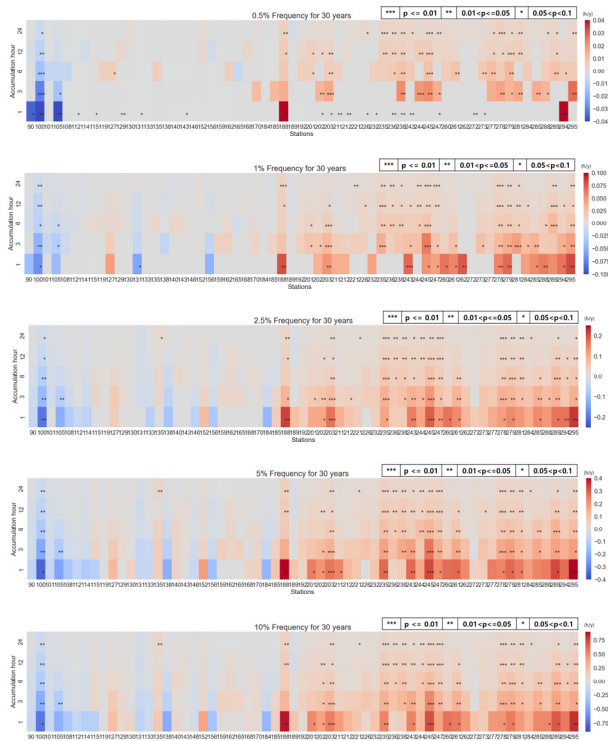


Fig. 8. Trend of extreme precipitation frequency according to the extreme level and accumulation time over 30 (1993 ~ 2022) years.

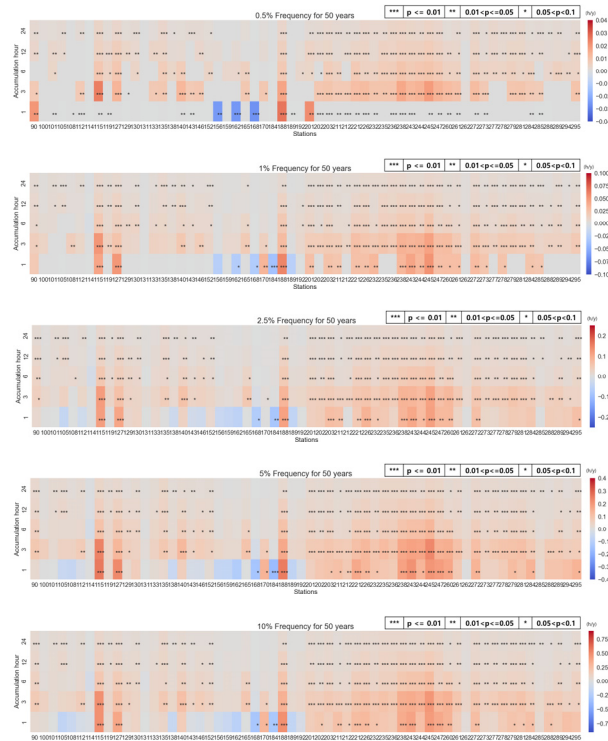


Fig. 9. Trend of extreme precipitation frequency according to the extreme level and accumulation time over 50 (1973 ~ 2022) years

누적시간 및 극한수준에 관계없이 지속적으로 증가되어 왔다. 다만 최근으로 올수록 변화경향이 누적시간 및 지리적 위치의 영향을 많이 받음을 알 수 있다. 결과적으로 최근으로 올수록 극한강수 발생 빈도의 지역 차(국지성)가 커지고 있음을 알 수 있다.

3.3. 분석기간별 극한강수 특성의 변화경향 공간분포도

Fig. 10은 분석기간별(30, 50y) 상위 0.5%[(a), (d)], 2.5%[(b), (e)], 5.0%[(c), (f)]의 극한강수 강도 변화경향을 지점별로 1시간 누적시간에 대해 공간분포도로 나타낸 것이다. 극한강수 강도의 변화경향은 극한 수준과 분석기간 및 지점에 따라 다르게 나타나고 있다. 30년[(a), (b), (c)]에서는 전체적으로 제주, 호남 지역, 남해안 남동쪽, 동해안에서는 증가경향을 보이며 충청, 경기 내륙, 영남 일부, 남해안 남서쪽 지역은 감소경향을 보이고 있다. 50년[(d), (e), (f)]에서는 충청, 경기 일부를 제외한 대부분 지역에서 증가경향을 보이고 있다. 또한 극한 수준이 높을수록 증

감경향이 강하게 나타나고 있으며 상대적으로 기간이 짧은 30년에서 가장 강하게 나타나고 있다. 증가경향을 보이는 지점은 주로 해안에 인접한 지역이고, 감소경향을 보이는 지점은 강수량이 감소하면서 강도도 약해진 지점으로 내륙 평지이거나 풍하쪽에 위치한 지역들이다. 분석기간이 짧은 30년에서는 전체적으로 감소경향이 많이 나타나지만 기간이 길어질수록 감소경향이 줄어들고 증가경향이 늘어나고 있다. 분석기간이 짧을 때 변화경향의 지역 차가 크게 나타나는 것은 태풍과 같은 특정 사건의 영향이 작용한 것으로 본다. 결론적으로 극한강수 강도의 경우 대부분 지점에서 과거에 비해 평균적으로 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 11은 분석기간별 상위 0.5%[(a), (d)], 2.5%[(b), (e)], 5.0%[(c), (f)]의 극한강수량 변화경향을 지점별로 1시간 누적시간에 대해 공간분포도로 나타낸 것이다. 극한강수량의 변화경향은 극한 수준과 분석기간 및 지점에 따라 다르게 나타나고 있다. 30년[(a), (b), (c)]에서는 전체적

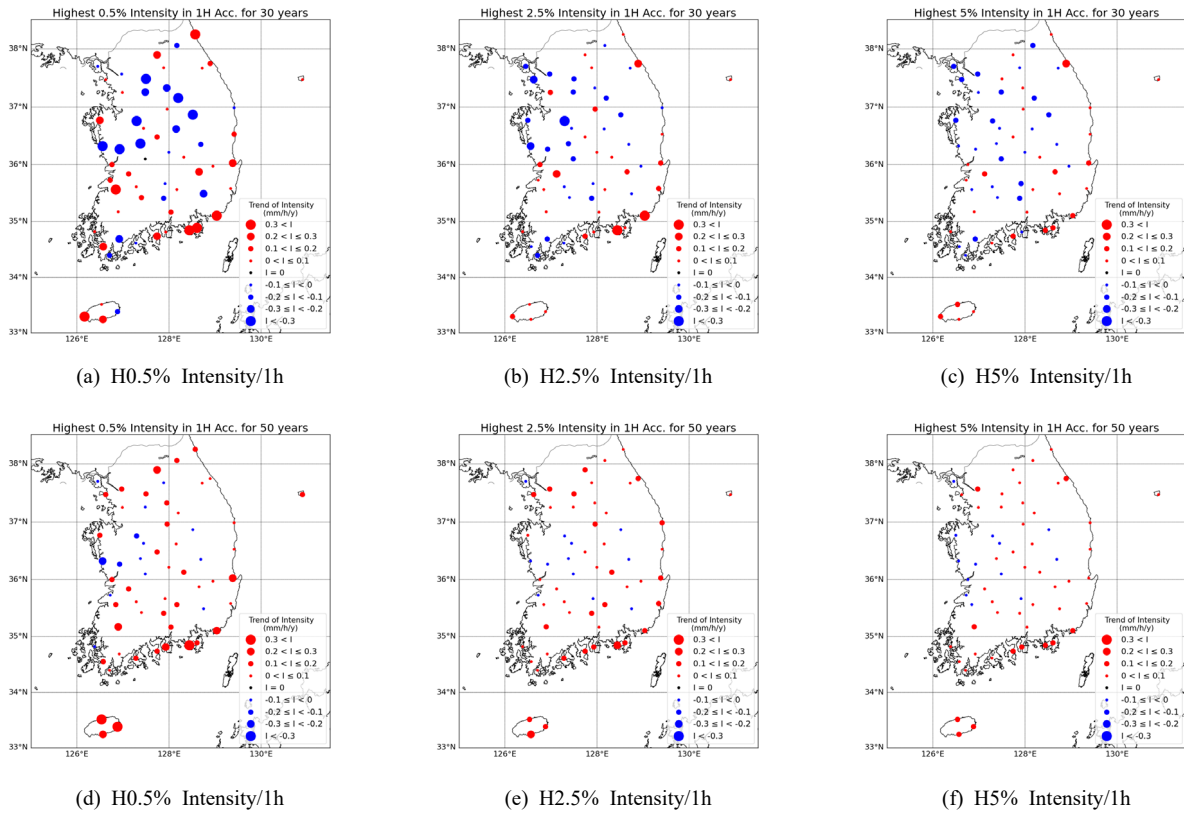


Fig. 10. Spatial distribution of trend of extreme precipitation intensity according to the extreme level and analysis period. (a), (b) and (c) represents for 30 years and (d), (e) and (f) for 50 years.

으로 제주, 호남 지역, 남해안 남동쪽, 동해안에서는 증가 경향을 보이며 충청, 경기 내륙, 영남 일부, 남해안 남서쪽 지역은 감소경향을 보이고 있다. 강도에서와 같이 증가 경향을 보이는 지점은 주로 해안에 인접한 지역인 반면 감소 경향을 보이는 지점은 주로 내륙 평지 지역, 풍하쪽 또는 분지 지역에 해당한다. 또한 1990~2000년대 초반에는 기록적인 태풍의 영향으로 연강수량이 많았지만 그 이후에는 태풍의 영향을 거의 받지 않아서 감소 경향을 보이는 지점이다. 30년의 강수량 증감경향은 대부분 강도의 증감경향과 일치하고 있다. 그러나 50년[(d), (e), (f)]에서는 충청과 경기 일부에서 감소 경향을 보이는 강도와 다르게 강수량은 대부분 지점에서 증가 경향이 나타나고 있다. 극한 수준의 경우 강수량은 극한 수준이 낮을수록 더 많은 강수를 포함하기 때문에 극한 수준이 낮을수록 증감 경향이 강하게 나타나고 있다. 전체적으로 분석기간이 상대적으로 짧은 30년에서 증감 경향이 다양하게 나타나고 극한 수준이 낮을수록 그 경향이 강해지고 있다. 50년에서

는 대부분 지역에서 증가 경향이 나타나고 있으며 극한 수준이 낮을수록 그 경향이 강해지고 있다.

Fig. 12는 분석기간별 0.5%[(a), (d)], 2.5%[(b), (e)], 5.0%[(c), (f)]의 극한강수 빈도 변화 경향을 지점별로 1시간 누적시간에 대해 공간분포도로 나타낸 것이다. 극한강수 빈도의 변화 경향은 극한 수준에 큰 차이를 보이고 있는데 0.5%에 해당하는 빈도수는 2~5시간의 좁은 범위를 가지게 된다. 이러한 빈도수를 QR을 통해 평균이 아닌 중앙값으로 기울기를 계산하면 변화 경향이 크게 나타나지 않아 0.5%에 대한 공간분포도는 대부분 경향이 보이지 않는다. 강수빈도는 극한 수준이 낮을수록 더 많은 강수횟수를 포함하기 때문에 극한 수준이 낮을수록 강수빈도의 증감 경향이 강하게 나타난다. 또한 강수빈도는 분석기간 및 지점에 따라 강도와 강수량과는 다른 경향을 보이고 있다. 30년[(a), (b), (c)]에서는 전체적으로 동해안과 경기 일부, 충청 일부, 호남 일부와 같은 한반도 서쪽 지역에서 감소 경향을 보이고 대부분 증가 경향을 보이고 있다. 50년

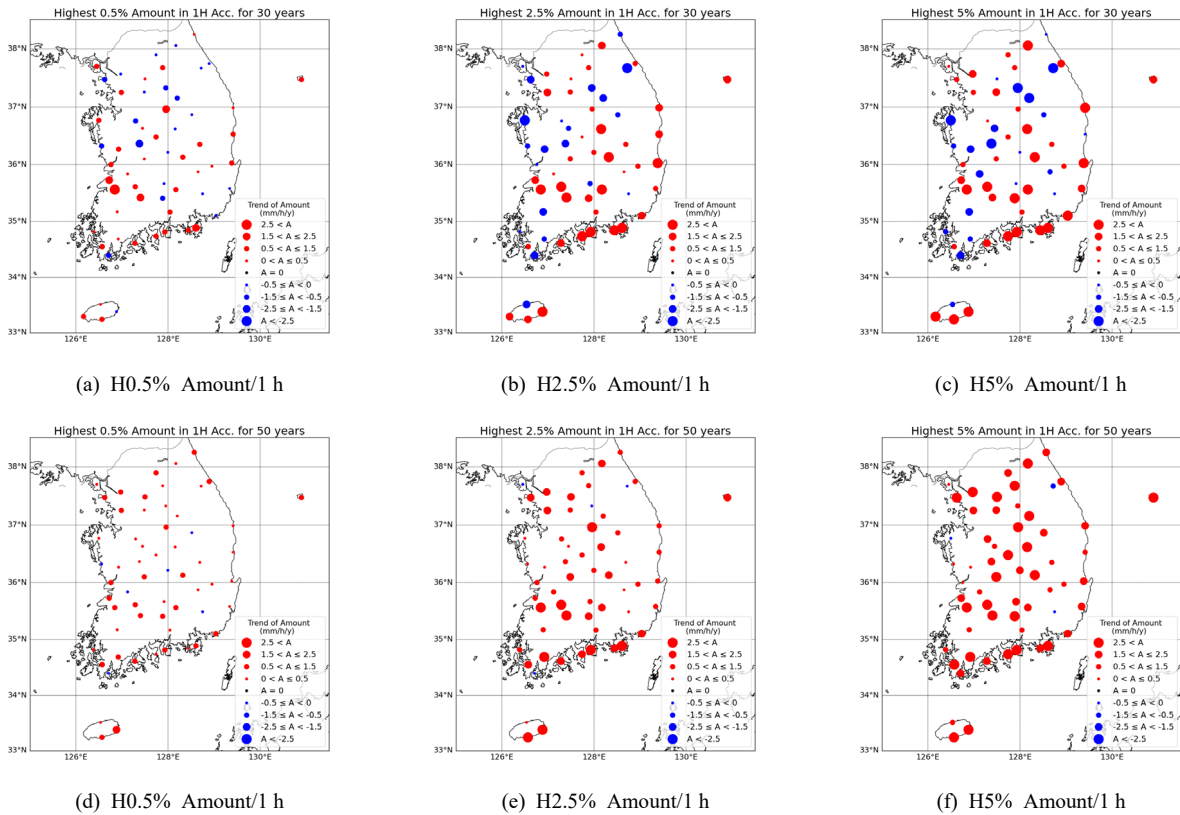


Fig. 11. Spatial distribution of trend of extreme precipitation amount according to the extreme level and analysis period. (a), (b) and (c) represents for 30 years and (d), (e) and (f) for 50 years.

[(d), (e), (f)]에서는 남해안과 동해안 일부, 제주 일부지역에서 감소경향을 보이고 그 외에 대부분 지역에서 증가경향을 보인다. 강수빈도는 대부분 해안가에서 감소경향이 나타난다. 반면에 강수량과 강도는 해안가에서 증가경향을 보이는데 이는 강수가 내리는 빈도는 감소해서 비가 자주 오지는 않지만 한 번 내릴 때 많은 양의 강수를 내려 강도가 강해졌음을 의미한다. 전체적으로 분석기간이 상대적으로 짧은 30년에서 증감경향이 다양하게 나타나고 극한 수준이 낮을수록 강수빈도의 변화경향 값이 크게 나타난다. 50년에서는 대부분 증가경향이 많이 나타나고 극한 수준이 낮을수록 변화경향 값이 크게 나타나고 있다. 하지만 앞의 Fig. 9 극한강수 빈도의 히트맵과 함께 공간 분포도를 확인하면 누적시간이 1시간으로 짧을 때 남해안과 제주 일부에서 감소경향이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 50년 기간 동안 남해와 제주에 1시간 짧은 강수가 감소했다는 것을 의미한다.

3.4. 분석기간별 강수특성 사이의 관계

Fig. 13은 극한 수준 상위 5%일 때 1시간에 대한 극한 강수 특성 변화 사이의 관계를 분석기간별(30[(a), (b), (c)], 50[(d), (e), (f)])로 나타낸 것이다. 극한강수 강도와 빈도 변화 사이의 관계[(a), (d)]는 분석기간에 관계없이 음의 상관관계를 보이며 분석기간이 길수록 음의 상관성이 강해지고 있다. 극한강수량과 빈도 변화 사이[(b), (e)]에는 분석기간에 관계없이 양의 상관관계를 보이며, 분석기간이 짧을수록 양의 상관성이 강해지는 것을 알 수 있다. 마지막으로 극한강수량과 극한 강수강도[(c), (f)]는 분석기간에 관계없이 양의 상관성을 보이며, 분석기간이 길수록 양의 상관성이 강해지고 있다. 분석기간에 관계없이 극한강수 강도와 빈도 변화경향에서는 음의 상관성이, 그 외의 관계에서는 양의 상관성이 나타난 것은 본 연구에서 극한 강수 특성을 상대적으로 정의한 것과 관련된 것으로 보인다. 즉, 강수빈도가 증가할 경우 대부분 약한

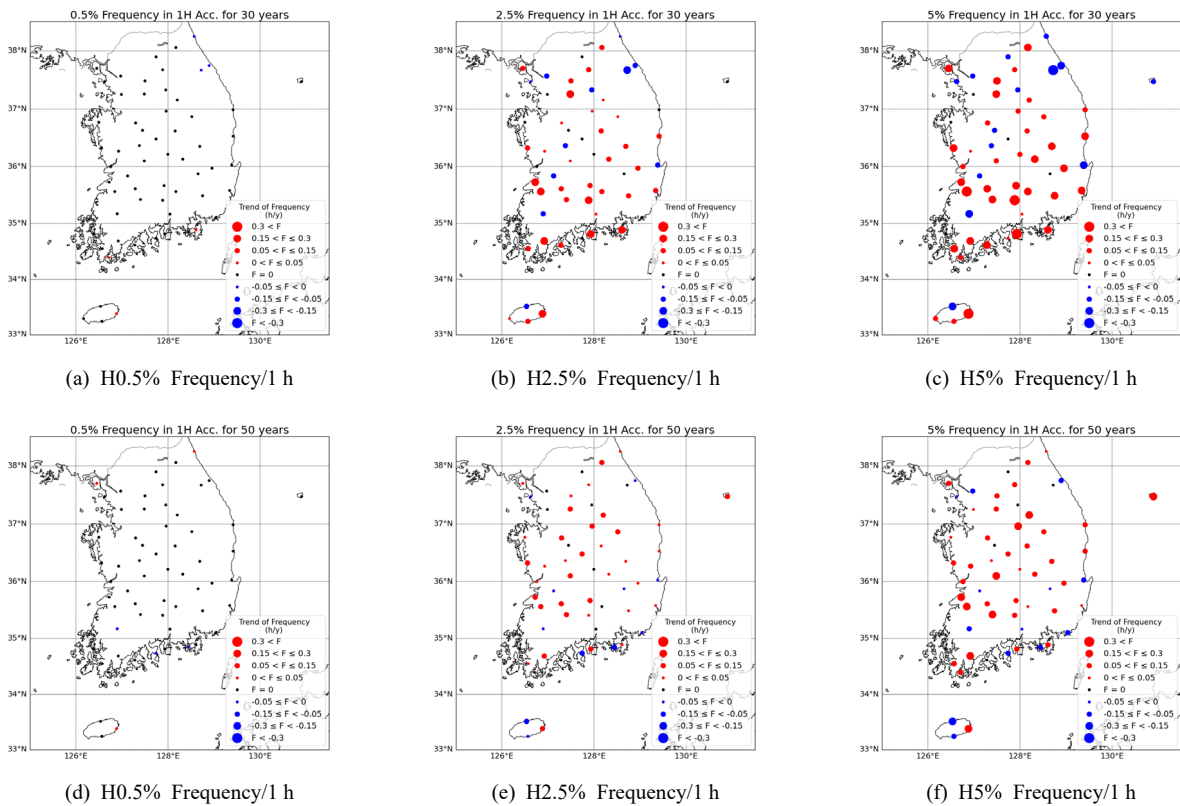


Fig. 12. Spatial distribution of trend of extreme precipitation frequency according to the extreme level and analysis period. (a), (b) and (c) represents for 30 years and (d), (e) and (f) for 50 years.

강수의 빈도가 증가하기 때문에 극한 강수 빈도는 증가되지만 강도는 감소하게 되어 두 특성 사이에는 음의 상관관계가 나타나게 된다. 반면에 극한 강수량도 증가하게 되어 양의 상관성이 나타나게 된다.

Table 3은 극한강수 빈도와 강도 변화사이의 관계를 극한 수준 및 누적시간별, 분석기간별로 나타낸 것이다. 극한강수 강도(I)와 빈도(F) 사이에 극한 수준이 상위 0.5%, 1%와 같이 높고, 누적시간이 6시간 이상으로 길고, 분석기간이 30년으로 짧은 기간일 때는 일부 양의 상관관계를 보인다. 이는 긴 시간에 강하게 내리는 강수가 최근 짧은 기간에 일부지점에서 빈도가 증가하면 강도도 증가하였음을 의미한다. 양의 상관관계를 보이는 일부를 제외하면 대부분 음의 상관관계를 보이고 있다. 전체적으로 분석기간이 길수록, 극한 수준이 낮을수록, 누적시간이 짧을수록 상관성이 강해지고 있다. 이러한 관계는 일반적으로 극한강수 강도의 증가는 극한강수 빈도의 감소에 영향을 받는

것을 의미한다. 그러나 기간이 짧고 극한 수준이 높을 때 양의 상관성이 일부 나타나는 원인은 짧은 기간에 강한 강도와 높은 빈도를 가진 태풍과 집중호우와 같은 사건이 영향을 준 것으로 보인다.

Table 4는 극한강수 빈도와 강수량 변화사이의 관계를 극한 수준 및 누적시간별, 분석기간별로 나타낸 것이다. 극한강수 빈도(F)와 강수량(A) 사이에는 극한 수준과 누적시간, 분석기간에 상관없이 양의 상관성을 보이고 있다. 극한 수준 상위 0.5%는 누적시간이 짧은 1시간에서 QR 분석을 통한 변화경향이 잘 보이지 않아 상관성이 낮고 유의수준도 낮게 나타나고 있다. 이는 앞의 강도와 빈도의 관계에서도 적용된다. 이 부분을 제외하면 대부분 누적시간이 짧고 극한 수준이 높을 때 양의 상관성이 높게 나타나고 있으며, 분석기간이 30년으로 짧을 때 상관성이 높게 나타나고 분석기간이 길어지면 상관성이 약해지고 있다. 전체적으로 위의 상관성을 통해 극한강수량의 증가는 극한강수 빈도의 증가에 의한다는 것을 의미한다. 기

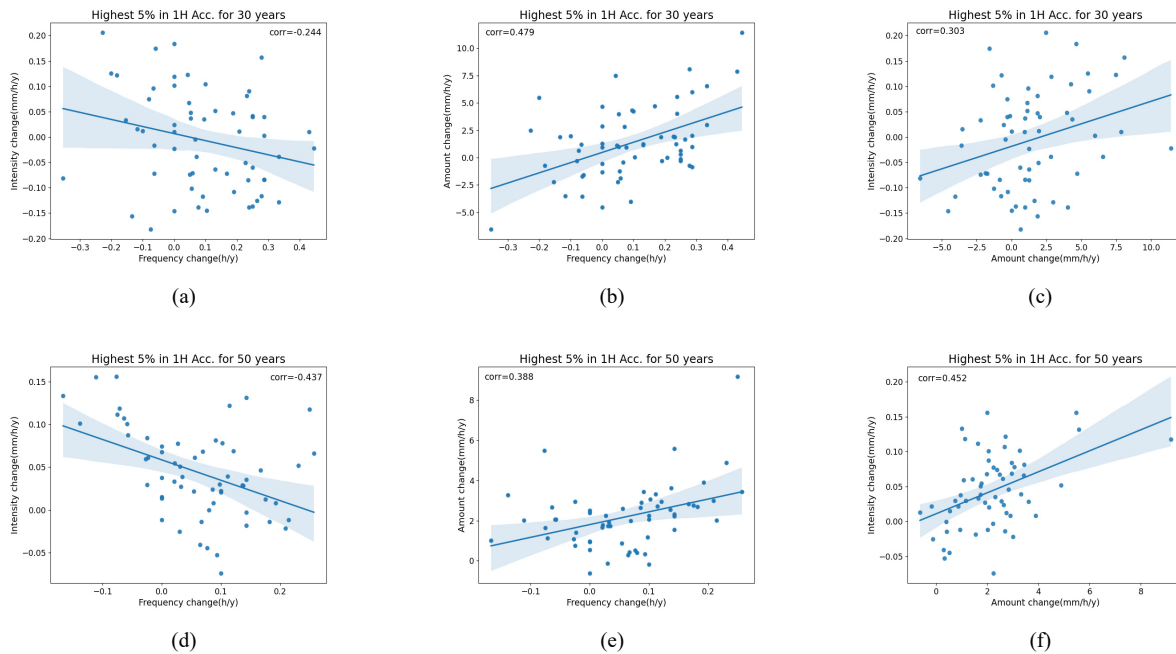


Fig. 13. Relationship between extreme precipitation characteristics in the top 5% extreme precipitation according to the analysis period. (a), (b) and (c) stand for the relation for 30 years between trend of intensity and frequency, between trend of amount and frequency, between trend of intensity and amount, respectively. (d), (e) and (f) are same as in the (a), (b) and (c) except for the analysis period, 50 years.

Table 3. Correlation between frequency change (F) and intensity change (I) of extreme precipitation according to the extreme level and accumulation hours over analysis period (Anal_P)

F : I	Anal_P	Accumulation hour					Ave.
		1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	
Top 0.5%	30	-0.05	0.00	0.01	0.18	0.13	0.05
	50	-0.10	-0.21	-0.29**	-0.18	-0.14	-0.18
Top 1%	30	-0.20	-0.08	0.01	0.17	0.10	0.00
	50	-0.33***	-0.31**	-0.28**	-0.26**	-0.19	-0.27
Top 2.5%	30	-0.23*	-0.10	0.06	-0.04	-0.16	-0.09
	50	-0.45***	-0.31**	-0.27**	-0.35***	-0.34***	-0.34
Top 5%	30	-0.25*	-0.13	-0.05	-0.08	-0.16	-0.13
	50	-0.43***	-0.36***	-0.30**	-0.39***	-0.43***	-0.38
Top 10%	30	-0.35***	-0.26**	-0.16	-0.17	-0.27**	-0.24
	50	-0.55***	-0.48***	-0.40***	-0.40***	-0.52***	-0.47
	Ave.	-0.29	-0.22	-0.17	-0.15	-0.20	-0.21

※Stars mean the level of significance. (***) : $p \leq 0.01$, (**) : $0.01 < p < 0.05$, (*) : $0.05 < p \leq 0.1$)

Table 4. Correlation between frequency change (F) and amount change (A) of extreme precipitation according to the extreme level and accumulation hours over analysis period (Anal_P)

F : A	Anal_P	Accumulation hour					Ave.
		1h	3h	6h	12h	24h	
Top 0.5%	30	0.16	0.44***	0.44***	0.48***	0.34***	0.37
	50	0.20	0.34***	0.27**	0.34***	0.23*	0.28
Top 1%	30	0.52***	0.51***	0.40***	0.45***	0.40***	0.46
	50	0.40***	0.28**	0.26**	0.25*	0.28**	0.29
Top 2.5%	30	0.55***	0.46***	0.32**	0.36***	0.30**	0.40
	50	0.42***	0.40***	0.31**	0.28**	0.29**	0.34
Top 5%	30	0.48***	0.38***	0.28**	0.25*	0.21	0.32
	50	0.39***	0.31**	0.27**	0.26**	0.18	0.28
Top 10%	30	0.43***	0.35***	0.29**	0.20	0.08	0.27
	50	0.29**	0.28**	0.28**	0.24*	0.15	0.25
	Ave.	0.38	0.38	0.31	0.31	0.25	0.33

※Stars mean the level of significance. (***) : $p \leq 0.01$, (**) : $0.01 < p < 0.05$, (*) : $0.05 < p \leq 0.1$)

Table 5. Correlation between intensity change (I) and amount change (A) of extreme precipitation according to the extreme level and accumulation hours over analysis period (Anal_P)

I : A	Anal_P	Accumulation hour					Ave.
		1h	3h	6h	12h	24h	
Top 0.5%	30	0.53***	0.60***	0.63***	0.65***	0.85***	0.65
	50	0.50***	0.53***	0.60***	0.60***	0.69***	0.58
Top 1%	30	0.33***	0.56***	0.58***	0.68***	0.79***	0.59
	50	0.46***	0.49***	0.63***	0.59***	0.69***	0.57
Top 2.5%	30	0.37***	0.59***	0.76***	0.61***	0.65***	0.60
	50	0.44***	0.48***	0.46***	0.58***	0.57***	0.51
Top 5%	30	0.30**	0.56***	0.62***	0.67***	0.70***	0.57
	50	0.45***	0.47***	0.60***	0.55***	0.58***	0.53
Top 10%	30	0.34***	0.51***	0.62***	0.66***	0.70***	0.57
	50	0.35***	0.41***	0.46***	0.54***	0.51***	0.45
	Ave.	0.41	0.52	0.60	0.61	0.67	0.56

※Stars mean the level of significance. (***) : $p \leq 0.01$, (**) : $0.01 < p < 0.05$, (*) : $0.05 < p \leq 0.1$)

간이 짧고 극한 수준이 높을 때 상관성이 높게 나타나는 것은 최근 기후변화에 의한 기온 상승에 의한 대류성 호우 등의 증가가 빈도와 강도 증가에 영향을 준 것으로 보인다.

Table 5는 극한강수 강도와 강수량 변화사이의 관계를 극한 수준 및 누적시간별, 분석기간별로 나타낸 것이다. 극한강수 강도(I)와 강수량(A) 사이에는 극한 수준과 누적

시간, 분석기간에 상관없이 양의 상관성을 보이고 있다. 강도와 강수량의 관계는 30년 상위 0.5%, 24시간에서 상관계수가 0.85가 나타나는 것과 같이 다른 강수특성 보다는 상관성이 가장 높게 나타나고 있다. 전체적으로 강도와 강수량은 누적시간이 길고 극한 수준이 높을수록 양의 상관성이 높게 나타나고 있다. 누적시간이 1시간으로 짧을 때는 분석기간이 길수록 상관성이 높게 나타나고 있는

나 누적시간이 길수록 50년보다 30년에서 상관성이 더 높게 나타나고 있다. 전체적으로 극한강수량의 증가는 빈도 뿐 아니라 강도에 의해서도 증가하는데 상관성이 더 높은 것으로 보아 강도의 영향이 더 큰 것으로 보인다. 기간이 짧고, 극한 수준이 높을 때 상관성이 높게 나타나는데 이는 기후변화로 인한 기온 상승이 대류성 호우와 같은 강한 강수를 일으키면서 강수량과 강도에 모두 영향을 준 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 극한 수준별, 누적시간 및 분석기간에 따라 극한강수 특성의 변화경향을 알아보기 위해 기상청 ASOS 시간 강수 자료를 이용하여 1시간 이동 누적 강수량을 산출하였다. 기상청 60개 지점의 ASOS 시간 강수 자료를 이용하여 극한 수준, 누적시간 및 분석기간에 따라 극한강수 특성(강수량, 빈도 및 강도)의 변화경향을 알아보았다. 극한수준은 지점별로 상위 0.5, 1, 2.5, 5, 10%에 대해 분석하였으며, 누적시간의 경우 1, 3, 6, 12, 24시간으로 하였고 분석기간은 최근 30년과 50년으로 하였다. 강수의 시간적 연속성을 고려하여 1시간씩 이동하면서 누적 강수량 및 빈도를 산출하였으며 강도는 누적강수량을 빈도로 나눈 값으로 산출하였다. 극한강수 특성의 변화경향 분석은 비정상치의 영향을 적게 받는 분위회귀(QR) 방법을 이용하였다.

극한강수 강도의 변화경향은 전체적으로 분석기간에 관계없이 극한수준이 높고 누적시간이 짧을수록 변화경향이 강하게 발생하고 있다. 분석기간이 짧은 30년에서는 약 35개 지점에서는 증가경향이, 나머지 약 25개 지점에서 감소경향이 나타나고 있다. 분석기간이 50년으로 길어지면 14개 지점을 제외하고 전체적으로 증가경향이 우세하나 강도는 약하다. 또한 분석기간이 50년으로 길어질 때 누적시간이 짧은 극한강수 특성의 증가경향에서 유의수준이 상대적으로 높다. 극한강수 강도 변화의 공간분포에서 분석기간이 30년일 때는 제주, 호남 지역, 남해안 남동쪽, 동해안에서 증가경향을 보였으며, 충청, 경기 내륙, 영남 일부, 남해안 남서쪽에서 감소경향이 나타났다. 50년에는 충청, 경기 일부를 제외한 대부분 지역에서 증가경향을 보이고 있다. 극한강수량의 변화 경향은 극한 수준 및 누적시간 보다는 지리적 위치 특성의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다. 분석기간이 30년일 때 약 32개 지점은 증가경향, 약 28개 지점은 감소경향을 보였으나

50년에는 약 3개 지점을 제외한 지점에서 증가경향을 보였다. 또한 분석기간이 50년으로 길 때 대부분 지점에서 유의수준이 높게 나타났다. 지리적으로 30년에는 제주, 호남 지역, 남해안 남동쪽, 동해안에서 증가경향을 보이며, 충청, 경기 내륙, 영남 일부, 남해안 남서쪽 지역은 감소경향을 보이고 있다. 50년에는 대부분 지점에서 증가경향이 나타나고 있다. 극한강수 빈도의 변화경향은 전체적으로 극한 수준과 분석기간에 관계없이 누적시간이 짧을수록 변화경향이 강하게 발생하고 있다. 분석기간 30년에서 관측 지점의 약 40개 지점은 증가경향 약 20개 지점에서는 감소경향을 보이고 있는데 일부 지점에서는 강도와 강수량에서 반대 경향이 나타나고 있다. 50년에는 1시간에서 감소경향을 보이는 약 12개 지점을 제외하고 극한수준에 관계없이 대부분 지점에서 유의한 증가경향을 보이고 있다. 강수빈도의 경우 30년에는 동해안과 경기 일부, 충청 일부, 호남 일부에서 감소경향을 보이고 그 외 대부분 지역에서 증가경향을 보이고 있다. 50년에는 남해안과 동해안 일부, 제주 일부 지역에서 감소경향을 보이고 그 외 대부분 지역에서 증가경향을 보인다.

극한강수 강도(I)와 빈도(F) 사이에 대부분 음의 상관성이 나타나나 극한 수준이 상위 0.5%, 1%와 같이 높고, 누적시간이 6시간 이상으로 길고, 분석기간이 30년 일 때는 일부 양의 상관관계가 나타나기도 한다. 전체적으로 분석기간이 길수록, 극한 수준이 낮을수록, 누적시간이 짧을수록 상관성이 강해지고 있다. 반면에 극한강수량(A)과 빈도(F) 사이에는 극한 수준과 누적시간, 분석기간에 상관없이 양의 상관관계가 나타나고 있다. 대부분 누적시간이 짧고 극한 수준이 높을 때 양의 상관성이 높게 나타나고 있으며, 분석기간이 길 때보다 짧을 때 상관성이 높게 나타나고 있다. 극한강수 강도(I)와 강수량(A) 사이에는 극한 수준과 누적시간, 분석기간에 상관없이 양의 상관성을 보이고 있다. 전체적으로 누적시간이 길고 극한 수준이 높을수록 상관성이 강해지고 있다. 누적시간이 짧을 때는 분석기간이 길수록 상관성이 높게 나타나고 있으나 누적시간이 길수록 짧은 30년에서 상관성이 더 높게 나타나고 있다. 극한강수 강도와 빈도의 경우 기간이 짧고 극한 수준이 높을 때 양의 상관성이 일부 나타나는 것은 짧은 기간에 강한 강도와 높은 빈도를 가진 집중호우와 태풍이 영향을 준 것으로 보인다. 또한 극한강수량과 극한강수 빈도와 극한강수량과 극한강수 강도는 모두 누적시간에는 차이를 보이거나 기간이 짧고, 극한 수준이 높을 때 상관성이 높게 나타나는 것은 최근 기후변화의 기온 상승에

의한 대류성 호우 등의 증가가 영향을 준 것으로 보인다.

선행연구에서와 같이 본 연구에서도 우리나라에서 극한강수량, 강도 및 빈도에 어떠한 변화가 발생하고 있음을 알아보았다. 지역에 따라 차이는 있으나 전반적으로 분석기간에 관계없이 누적시간이 짧고 극한 수준이 높을 때 증가경향이 크게 나타나고 있다. 다른 지역에서와 같이 우리나라에서도 과거에 비해 짧은 시간에 강하게 내리는 강수가 증가하고 있음을 의미한다. 즉, 최근 사회적으로 문제가 되고 있는 국지성 돌발홍수가 더 자주 발생할 수 있음을 의미하므로 이에 대한 대비가 필요함을 제시한다. 또한 분석기간이 30년으로 짧을 때는 기록적 태풍의 영향을 받았던 대관령과 집중호우의 영향을 받은 강화 등에서는 변화경향의 크기가 지역별로 차이가 발생하고 있다. 이렇게 분석기간이 짧을 경우, 극한강수 특성의 변화경향은 특정 해에 발생한 기록적 강수 등과 같은 일부 예외적 현상에 의해 많은 영향을 받고 있다. 반면에 분석기간이 길 때는 대부분 증가경향을 보이는 등 일관적인 변화경향을 보이는 경우가 많다. 본 연구에서 살펴본 결과 과거에 비해 극한 강수량, 강수 강도, 강수 빈도는 대부분 지역에서 증가하고 있으며, 특히 짧은 시간에 강하게 내리는 강수가 증가하고 있으므로 최근 오송 지하차도 침수 사건과 같은 극한 강수에 의한 생명 및 재산 피해의 위험성은 계속 증가할 것이다. 그러므로 극한강수 특성의 상세한 변화경향에 대해 보다 깊이 있는 연구를 통해 위험기상에 대한 예측 기술 향상이 필요하다.

사사

본 연구는 기상청 <「위험기상 선제대응 기술개발사업」-여름철 대류성 호우 발생의 강도 및 구역 예측 정량화 기술 개발>(RS-2023-002396533)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Berg P, Moseley C, Haerter JO. 2013. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nat Geosci* 6: 181-185. doi: 10.1038/ngeo1731
- Gervais M, Tremblay LB, Gyakum JR, Atallah E. 2014. Representing extremes in a daily gridded precipitation analysis over the United States: Impacts of station density, resolution, and gridding methods. *J Clim* 27(14): 5201-5218. doi: 10.1175/JCLI-D-13-00319.1
- Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA. 2001. *Climate change 2001: The scientific basis*. Geneva, Switzerland: IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Working group I contribution to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jang HW, Cho HW, Kim TW, Lee JW. 2016. Quantitative characterization of historical drought events in Korea -Focusing on outlier analysis of precipitation-. *J Korea Water Resour Assoc* 49(2): 145-153 (in Korean with English abstract). doi: 10.3741/JKWRA.2016.49.2.145
- Jung SP, Kwon TY, Han SO. 2014. Thermodynamic characteristics associated with localized torrential rainfall events in the middle west region of Korean Peninsula. *Atmosphere* 24(4): 457-470 (in Korean with English abstract). doi: 10.14191/Atmos.2014.24.4.457
- Jung SP, In SR, Kim HW, Sim JK, Han SO, Choi BC. 2015. Classification of atmospheric vertical environment associated with heavy rainfall using long-term radiosonde observational data, 1997~2013. *Atmosphere* 25(4): 611-622 (in Korean with English abstract). doi: 10.14191/Atmos.2015.25.4.611
- Kim BK, Kim BS, Kim HS. 2008. On the change of extreme weather event using extreme indices. *J Korean Soc Civ Eng* 28(1B): 41-53 (in Korean with English abstract). doi: 10.12652/Ksce.2008.28.1B.041
- Kim CS, Suh MS. 2008. Change-point in the recent (1976-2005) precipitation over South Korea. *Atmosphere* 18(2): 111-120 (in Korean with English abstract).
- Kim C, Suh MS, Hong KO. 2009. Bayesian changepoint analysis of the annual maximum of daily and subdaily precipitation over South Korea. *J Clim* 22(24): 6741-6757. doi: 10.1175/2009JCLI2800.1
- Kim ST, Lee WS, Jung IW, Han JM, Byun YH, Kim JY.

2023. Change in extreme precipitation by watersheds of South Korea under future shared Socio-Economic Pathway (SSP) Scenarios. *J Clim Change Res* 14(2): 83-93 (in Korean with English abstract). doi: 10.15531/KSCCR.2023.14.2.083
- Kirchmeier-Young MC, Zhang X. 2020. Human influence has intensified extreme precipitation in North America. *PNAS* 117(24): 13308-13313. doi: 10.1073/pnas.1921628117
- Klein Tank AMG, Können GP. 2003. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-99. *J Clim* 16(22): 3665-3680. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2
- KMA(Korea Meteorological Administration). 2023. Climate scenario. http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/qna/User_manual.html
- Kunkel KE. 2003. North American trends in extreme precipitation. *Nat Hazards* 29(2): 291-305. doi: 10.1023/A:1023694115864
- Lee KM, Baek HJ, Cho CH. 2012. Analysis of changes in extreme precipitation in Seoul using quantile regression. *J Clim Res* 7(3): 199-209 (in Korean with English abstract).
- Lee TY, Kim YH. 2007. Heavy precipitation systems over the Korean peninsula and their classification. *J Korean Meteorol Soc* 43(4): 367-396 (in Korean with English abstract).
- Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Chen Y, Goldfarb L, Gomis MI, Matthews JBR, Berger S, Huang M, Yelekçi O, Yu R, Zhou B, Lonnoy E, Maycock TK, Waterfield T, Leitzell K, Caud N. 2021. *Climate change 2021: The physical science basis*. Geneva, Switzerland: IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. doi: 10.1017/9781009157896
- Myhre G, Alterskjær K, Stjern CW, Hodnebrog Ø, Marelle L, Samset BH, Sillmann J, Schaller N, Fischer E, Schulz M, Stohl A. 2019. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Sci Rep* 9: 16063. doi: 10.1038/s41598-019-52277-4
- National Geographic Information Institute (NGII). 2020. The national atlas of Korea 2020. http://nationalatlas.ngii.go.kr/pages/page_2222.php
- Park ES, Yoon DK. 2018. Natural disasters and social disaster in 2017. *Korean Soc Hazard Mitig* 18(1): 57-62.
- Park HI, Chung SR, Park KH, Moon JI. 2021. Development of GK2A convective initiation algorithm for localized torrential rainfall monitoring. *Atmosphere* 31(5): 489-510 (in Korean with English abstract). doi: 10.14191/Atmos.2021.31.5.489
- Park IG, Suh MS. 2022. Current status and trends of extreme precipitation characteristics during the last 30 years (1991-2020) over Korea. *J Clim Res* 17(2): 69-87 (in Korean with English abstract). doi: 10.14383/cri.2022.17.2.69
- Park WS, Suh MS. 2011. Characteristics and trends of tropical night occurrence in South Korea for recent 50 years (1958-2007). *Atmosphere* 21(4): 361-371 (in Korean with English abstract). doi: 10.14191/Atmos.2011.21.4.361
- Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. 2013. *Climate change 2013: The physical science basis*. Geneva, Switzerland: IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. doi: 10.1017/CBO9781107415324
- Sung JH, Chung ES, Kim YJ, Lee BR. 2017. Meteorological hazard assessment based on trends and abrupt changes in rainfall characteristics on the Korean peninsula. *Theor Appl Climatol* 127(1-2): 305-326. doi: 10.1007/s00704-015-1581-0
- Tian Y, Yan Z, Li Z. 2022. Spatial and temporal variations of extreme precipitation in Central Asia during 1982-2020. *Atmosphere* 13(1): 60. doi: 10.3390/atmos13010060

- Yoon JH, Mo K, Wood EF. 2012. Dynamic-model-based seasonal prediction of meteorological drought over the contiguous United States. *J Hydrometeorol* 13(2): 463-482. doi: 10.1175/JHM-D-11-038.1
- Zolina O, Simmer C, Belyaev K, Gulev SK, Koltermann P. 2012. Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years. *J Clim* 26(6): 2022-2047. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00498.1