



Analysis of the effect of climate change on IDF curves using scale-invariance technique: focus on RCP 8.5

Choi, Jeonghyeon^a · Lee, Okjeong^a · Kim, Sangdan^{b*}

^aDivision of Earth Environmental System Science, Pukyong National University

^bDepartment of Environmental Engineering, Pukyong National University

Paper number: 16-079

Received: 5 September 2016; Revised: 9 November 2016; Accepted: 9 November 2016

Abstract

According to 5th IPCC Climate Change Report, there is a very high likelihood that the frequency and intensity of extreme rainfall events will increase. In reality, flood damage has increased, and it is necessary to estimate the future probabilistic design rainfall amount that climate change is reflected. In this study, the future probabilistic design precipitation amount is estimated by analyzing trends of future annual maximum daily rainfall derived by RCP 8.5 scenarios and using the scale-invariance technique. In the first step, after reviewing the time-scale characteristics of annual maximum rainfall amounts for each duration observed from 60 sites operating in Korea Meteorological Administration, the feasibility of the scale-invariance technique are examined using annual daily maximum rainfall time series simulated under the present climate condition. Then future probabilistic design rainfall amounts for several durations reflecting the effects of climate change are estimated by applying future annual maximum daily rainfall time series in the IDF curve equation derived by scale-invariance properties. It is shown that the increasing trend on the probabilistic design rainfall amount has resulted on most sites, but the decreasing trend in some regions has been projected.

Keywords: Climate Change, IDF Curve, Probabilistic Design Rainfall Amount, RCP 8.5, Scale Invariance

Scale-Invariance 기법을 이용한 IDF 곡선의 기후변화 영향 분석: RCP 8.5를 중심으로

최정현^a · 이옥정^a · 김상단^{b*}

^a부경대학교 지구환경시스템과학부, ^b부경대학교 환경공학과

요 지

IPCC 제5차 평가보고서에 따르면 극한강우의 빈도 및 강도가 증가할 가능성이 매우 높을 것으로 예측되고 있다. 실제로 극한강우에 따른 침수피해가 증가하고 있으며, 이에 따라 기후변화의 영향을 반영한 미래 확률강우량 추정이 필요하다. 본 연구에서는 기후변화 RCP 8.5 시나리오로부터 도출된 미래 연 최대 일강수량 자료의 추세분석과 scale-invariance 기법을 이용하여 미래 확률강우량을 추정하였다. 먼저, 기상청 관할 60개 기상 관측소의 관측 강우자료를 이용하여 관측소별로 스케일 특성을 검토한 후, 현재기후 모의자료를 이용하여 scale-invariance 기법의 적용가능성을 검증하였다. 그 후, 미래 일 강수량 시계열을 scale-invariance 특성에 따라 유도된 IDF 곡선식에 적용하여 기후변화의 영향을 반영한 지속시간별 확률강우량을 추정하였다. 대부분의 지점에서 확률강우량이 증가할 것으로 예측되었으나, 일부 지역의 경우에는 감소할 가능성도 있음을 살펴볼 수 있다.

핵심용어: 기후변화, IDF 곡선, 확률강우량, RCP 8.5, 스케일 불변성

*Corresponding Author. Tel: +82-51-629-6529
E-mail: skim@pknu.ac.kr (S. Kim)

1. 서론

세계적으로 지구온난화에 따른 기후변화로 인해 극한강우의 빈도와 강도가 변화하고 있으며, 이로 인한 사회·경제적인 피해가 다수 발생하고 있다. 따라서 기후변화에 따른 극한강우의 변화가 중요사안으로 주목받고 있으며, 이에 대한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 전 지구적으로 최근 수십 년 동안 극한강우의 빈도와 강도의 상당한 변화가 관측되었으나(Perkins et al., 2012; Donat et al., 2013), 연 강수량 및 계절 강수량의 변화와 극한강우강도의 변화는 서로 일치하지 않는 것으로 관측되고 있다(Groisman et al., 2005). 기후변화의 영향을 확실하게 예측할 수 없지만, 극한강우의 변동성(특히, 극한강우의 강도)이 증가할 가능성이 매우 높을 것으로 예측되고 있다(Liuzzo and Freni, 2015). IPCC 제5차 평가보고서(IPCC, 2014)에 따르면 온실가스가 현재의 추세로 저감 없이 배출되는 경우(RCP 8.5 시나리오) 중위도에서는 지역적으로 강수량의 변화는 일정하지 않을 것이나 대부분의 중위도 대륙 지역에서는 극한강우의 빈도 및 강도가 증가할 가능성이 매우 높다고 보고되었다.

실제로 우리나라에서도 수공구조물의 설계규모를 넘어서는 극한강우의 발생으로 도시가 침수되고 수공구조물이 파괴되는 등 많은 피해가 발생하고 있다. 서울, 경기 및 강원 일부지역을 중심으로 2010년 9월에는 시간당 100 mm 이상의 집중호우로 인해 도시가 침수되었으며, 2011년 7월에도 시간당 100 mm 이상의 집중호우가 발생하여 도시 침수 및 우면산 산사태를 초래하여 심각한 인명피해와 재산피해가 발생하였다. 또한 2014년에는 부산 및 울산 지역을 중심으로 시간당 100 mm 이상의 집중호우가 발생하여 단 두시간만에 도시가 침수되고 교통이 마비되는 등 많은 피해가 발생하였다.

도시배수 및 홍수방어를 위한 수공구조물의 설계규모를 설정하기 위해 사용되는 자료는 해당지역의 IDF 곡선이다. 하지만 앞서 언급한 국내 피해 사례들과 같이 단 시간의 극한강우 발생으로 침수 피해가 발생한다는 것은 현재 수공구조물 설계 및 건설에 적용되고 있는 IDF 곡선이 더 이상 유효성을 가지지 않는다는 것을 의미하며, 이러한 피해를 방지하기 위해 수공구조물의 설계 및 건설 등에 기후변화의 영향이 고려되어야 한다. 즉, 수공구조물의 설계와 건설에 사용되는 IDF 곡선은 기후변화에 의해 발생하는 극한강우 강도의 증가를 반영하여야 한다(Raul Rodriguez et al., 2013). 도시배수시스템 및 홍수방어시스템의 설계에 있어서, 점차 증가하는 극한강우의 빈도와 강도를 수용하고 그에 따른 침수 피해를 방지하기 위하여 미래 IDF 곡선의 추정은 필수적이다.

기후변화의 영향을 미래 IDF 곡선에 반영하기 위해서는 정량화된 기후변화 자료가 필요하다. 기후변화의 영향의 정량화 방법론을 살펴보면 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 1) 지역 기후모델을 이용하는 방법(Gregersen et al., 2013), 2) POT (Peak over threshold) 방법(Gregersen et al., 2013), 3) 통계학적인 분석(Willems et al., 2013). 그러나 위 방법론은 일-단위 강우자료를 생성하기에는 적합하지만, 시간-단위의 강우자료가 사용되는 수공구조물의 설계 및 건설에는 실무적인 자료로 사용하기에 적합하지 못하다.

이에 본 연구에서는 지역적인 기후변화의 영향을 고려한 IDF 곡선의 변화정도를 살펴보기 위해, 기상청에서 제공하는 관측 강우량자료와 기후변화 시나리오 중 RCP 8.5 시나리오를 이용한다. 우선, 관측 강우량자료로부터 지속시간별 연 최대 강우시계열을 산출하고 Gumbel 분포를 이용하여 재현기간별 지속시간별 현재 IDF 곡선(확률강우량)을 산정한다. 또한 일-단위로 제공되는 기후변화 시나리오를 시간-단위로 상세화하기 위하여, scale-invariance 기법을 이용하기로 한다. 각 기상 관측소별 스케일 특성을 검토하며, 검토 결과에 따라 매개변수로 구성된 IDF 곡선식을 사용한다. 그 다음, 관측 강우량자료로부터 지역적인 특성을 반영한 매개변수를 산정하고, 기후변화 시나리오의 전망을 분석하여 기후변화의 영향을 포함한 매개변수를 산정한다. 이를 IDF 곡선식에 적용하여 미래 IDF 곡선을 확률적으로 전망한다.

2. 자료 수집

2.1 관측자료

본 연구에서는 기상청 관할 60개 기상 관측소의 시간단위 관측 강우량자료를 1981년부터 2005년까지 수집하였다(<http://data.kma.go.kr>). 또한 수집된 관측 강우량자료를 이용하여 지속시간별 연 최대 강우시계열을 구축하였다. 사용된 지속시간은 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24-시간 및 1-일으로 총 25개의 지속시간이 사용되었다. Fig. 1에 적용된 기상 관측소의 위치를 나타내었다.

2.2 기후변화 시나리오

우리나라 기상청 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)에서는 세 가지의 공간해상도별 기후변화 시나리오를 제공하고 있다; 1) 기후변화예측모델(HadGEM2-AO)을 도입하여 생산한 135-km 공간 해상도의 전지구 기후변화 시나리오, 2)

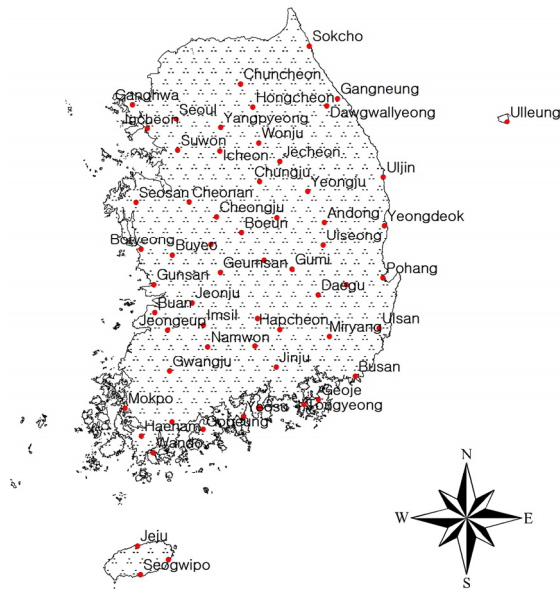


Fig. 1. Location of selected weather stations

지역기후모델(HadGEM3-RA)을 이용하여 역학적 상세화를 통해 생산한 12.5-km 공간 해상도의 한반도 기후변화양상블 시나리오, 3) 한반도 기후변화양상블 시나리오를 통계적으로 상세화하여 생산한 1-km 공간 해상도의 남한 상세 기후변화양상블 시나리오. 또한 평행상태 초기조건을 200년, 400년 제어적분으로 구분하여 공간해상도별로 RCP 자료를 제공하고 있다.

본 연구에서 기후변화 시나리오로 사용한 12.5-km 공간해상도의 400년 제어적분 RCP 8.5 자료는 1979년부터 2100년까지 제공되며, 1979년부터 2005까지는 현재기간 모의자료이며 2006년부터 2100년 미래기간 모의자료로 제공된다. 현재기간 모의자료의 경우는 앞의 2년의 자료를 제외한 1981년부터 2005년까지의 자료를 현재기간 모의자료로 사용하였으며 미래기간 모의자료는 2006년부터 2100년까지의 자료를 사용하였다. 제공 자료에 관한 자세한 사항은 기상청 기후정보포털을 참고할 수 있다.

관측 강우량자료의 기상청 관할 60개 기상 관측소에 대한 위치정보를 이용하여 RCP 8.5 자료로부터 기상 관측소에 상

응하는 격자의 일 강우자료를 추출하였다. 사용된 기후변화 시나리오 자료의 자세한 정보는 Table 1과 같다. 참고로 RCP 8.5 시나리오는 온실가스가 저감 없이 현재 추세로 배출되는 경우로 가장 큰 기후변화가 예측되는 시나리오이다.

3. 연구방법

3.1 확률강우량 산정

본 연구에서는 앞서 산출된 연 최대 강우시계열 자료에 Gumbel 분포를 적용하여 지속시간별 재현기간별 확률강우량을 추정하였다. Gumbel분포는 극치 중에서도 최대치에 해당하는 연 최대 강우량 및 홍수량자료의 분석에 많이 이용되며, 국내 확률강우량 산정 시 대부분 Gumbel 분포를 이용하여 실무적인 자료로 이용하고 있다(Kwon et al., 2009). 또한 ‘한국 확률강우량도 작성’(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2000)에서는 우리나라 지형에 대한 최적 확률 분포형을 Gumbel 분포로 채택하였고, ‘설계홍수량 산정요령’(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2012)에서도 Gumbel 분포 사용을 원칙으로 하고 있다. Gumbel분포의 확률밀도함수 및 누적확률밀도는 Eq. (1)과 (2)와 같다.

$$f(X) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[-\frac{X-X_o}{\alpha} - \exp\left(-\frac{X-X_o}{\alpha}\right)\right], -\infty < X < \infty \quad (1)$$

$$F(X) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{X-X_o}{\alpha}\right)\right] \quad (2)$$

여기서, α 는 축적변수, X_o 는 위치변수로 최빈값의 위치를 나타낸다. 또한 매개변수는 L-moment법을 이용하였으며, 확률강우량을 산정하는 식은 다음 Eq. (3)와 같다.

$$X_T = X_o - \alpha \ln\left[\ln\left(\frac{T}{T-1}\right)\right] \quad (3)$$

여기서, T 는 재현기간을 나타내며 X_T 는 재현기간(T)에 따

Table 1. Information of used climate change scenario

| Class | Form | Scenario | Spatial scale | Spatial Resolution | Temporal resolution | Temporal scale | |
|-----------------|--------|----------|---|--------------------|---------------------|----------------|-----------|
| Korea Peninsula | BINARY | RCP 8.5 | Latitude: 32°-44° Longitude: 123°-133° | About 12.5 km | Day (360 day) | Present | 1981~2005 |
| | | | | | | Future | 2006~2100 |

른 확률강우량을 의미한다. 사용된 지속시간은 앞서 연 최대 강우시계열 산출시 사용한 지속시간과 동일하며, 재현기간은 10, 30, 50년을 사용하였다.

3.2 스케일 특성 검토

Scale-Invariance 기법을 사용하기 위하여 각 기상 관측소 별로 관측 강우량자료의 스케일 특성을 검토하였다. 우선, 앞서 구축된 관측 연 최대 강우시계열의 지속시간별 모멘트 모멘트 차수(1, 2, 3, ..., m 차)에 대해 산정하여 전대수지상에 도시한 후에 차수별로 선형회귀선의 기울기를 산정하였다. 산정된 기울기를 모멘트 차수에 대해 다시 선형회귀를 실시하여 분석된 관계를 통해 스케일 특성을 검토하였다. 산정된 기울기와 모멘트 차수의 관계가 선형인 경우는 단일 스케일 (simple scaling)이며, 비선형인 경우는 다중 스케일(multi scaling)이다.

예를 들어, 인천 관측소의 지속시간별 관측 연 최대 강우시계열을 각 차수(본 연구에서는 $m = 5$)의 모멘트를 산정한다. 이를 전대수지상에 지속시간별로 도시한 후 모멘트 차수별로 선형회귀선을 도시하여 기울기를 산정한다(Fig. 2(a)). 산정된 기울기를 모멘트 차수별로 도시하여 다시 선형회귀를 실시하여 관계를 분석한다(Fig. 2(b)).

스케일의 적용에 대한 기준으로 Fig. 2(b)에서와 같이 결정계수(R^2)를 이용하였으며, 인천지역의 경우에는 결정계수가 1.00으로 스케일 특성이 단일 스케일로 확인되었다. 참고로, 분석된 모든 지점에서 결정계수가 0.99 이상이 도출됨을 살펴볼 수 있었다.

3.3 IDF 곡선식

스케일 특성을 이용한 IDF 곡선식은 Bulando and Rosso (1996)을 참고하여 아래와 같이 구성하였다.

$$h(\lambda d)_T = E[h_{24}](1 + V \cdot K_T)(\lambda d)^{n_T} \tag{4}$$

여기서, $h(\lambda d)_T$ 는 지속시간 λd -시간의 재현기간 T 년 확률강우량, $E[h_{24}]$ 는 지속시간 24-시간 연 최대 강우시계열의 평균이다. 또한 n_T 는 특정 재현기간 (T)의 스케일 지수(Scaling exponent)이며, K_T 는 특정 재현기간 (T)의 빈도계수(Frequency factor)이다. V 는 연 최대 강우시계열의 대표 변동계수(coefficient of variation)로서 아래와 같이 산정하였다.

$$V = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M V_i^2} \tag{5}$$

여기서, M 은 지속시간의 총 개수이며, V_i 는 각 지속시간 별 변동계수이다.

재현기간별로 확률강우량과 지속시간 24-시간 연 최대 강우시계열의 평균 및 대표 변동계수를 산정한 후, Eq. (4)를 이용하여 지속시간에 따른 회귀분석을 수행하면, 재현기간별 스케일 지수와 빈도계수를 산출할 수 있다.

참고로, Bulando and Rosso (1996) 논문은 관측자료를 기반으로 scale-invariance 기법을 이용하여 IDF 곡선을 유도한 연구이다. 본 연구에서는 이를 이용하여 미래의 IDF 곡선을 유도하고자하였다. 이를 위하여 Bulando and Rosso (1996) 논문에서 제시한 식들을 일부 재변형하여 연구에 적용하였다.

3.4 RCP 8.5 시나리오 편이보정

모의자료의 특성상 현재기간 모의자료의 값과 관측 강우량자료 값 사이에는 차이가 존재한다. 따라서 이러한 차이를 보정하기 위하여 지점별, 월별로 편이보정을 수행하였다. 먼저, 1981~2005년의 관측 강우자료와 동일한 기간의 현재기

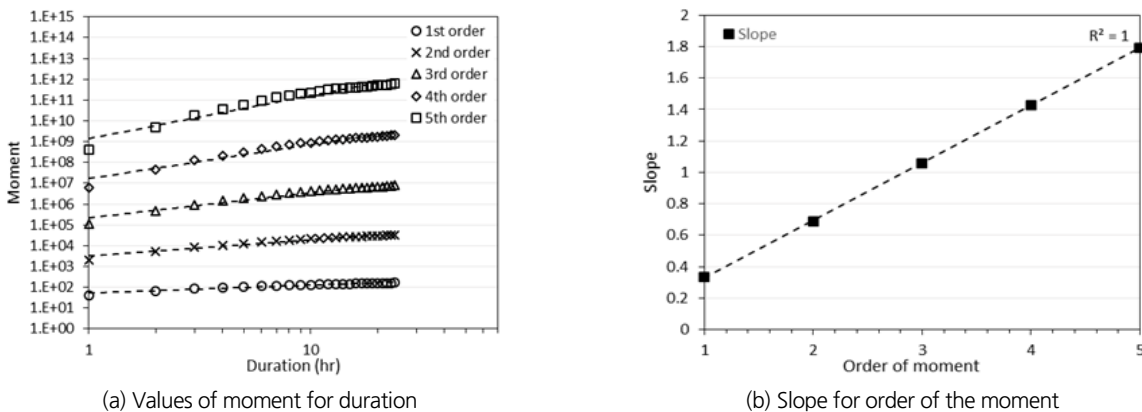


Fig. 2. Examination of scaling properties (Incheon station)

간 모의자료를 대상으로 무강우 일수 비율을 일치시켰다. 그 후 두 자료를 대상으로 Kernel smoothing 기법의 non-parametric 방법을 이용하여 최적분포형을 결정하고, Kernel density distribution mapping (KDDM) 방법을 이용하여 편이보정을 위한 함수관계를 구축하였다. 이를 바탕으로 편이보정된 현재기간 모의자료를 추출하였으며, 또한 미래기간 모의자료에 앞서 구축된 관계를 적용하여 편이보정된 미래기간 모의자료를 추출하였다. Kernel density distribution mapping (KDDM) 방법은 RCM 모의결과의 누가확률밀도함수를 같은 기간 관측 강우량자료의 누가확률밀도에 Quantile mapping 하는 방식이다(Kim et al., 2011). 예를 들어, 서울지점 7월 관측 강우량자료 P_o 에 대한 누가확률밀도 함수를 $F_o(P_o)$, 현재기간 모의자료 P_c 에 대한 누가확률밀도 함수를 $F_c(P_c)$ 라 할 때, P_c 의 편이보정된 값 P'_c 는 $F_o^{-1}[F_c(P_c)]$ 로 구할 수 있다. 여기서 F_o^{-1} 은 F_o 의 역함수를 의미한다. 이 과정을 통해 관측 강우자료와 편이보정된 현재기간 모의자료의 다양한 통계량이 서로 일치하게 된다. 이를 바탕으로 미래기간 모의자료 P_f 의 편이보정된 값 P'_f 는 $F_o^{-1}[F_c(P_f)]$ 로 추출하였다.

3.5 RCP 8.5 시나리오 전망분석

미래로 갈수록 변화하는 기후변화의 영향을 지역적으로 반영하기 위하여, 본 연구에서는 IDF 곡선식의 매개변수 ($E[h_{24}], V$)를 미래 특정 년도별로 각각 다르게 적용하였다. 우선, 각 지점 별 미래기간 모의자료의 지속시간 1-일 연 최대 강우시계열에 추세분석을 실시하여 기울기(m)를 산출하였다. 그 다음, 산출한 기울기를 현재기간 모의 강우자료로부터 산출한 지속시간 1-일 연 최대 강우시계열의 평균($E[h_{1d}^p]$)에 적용하여 미래년도별 지속시간 1-일 최대 강우시계열의 평균($E[h_{1d}^f]$)을 아래와 같이 추정하였다.

$$E[h_{1d}^f] = E[h_{1d}^p] + m(Y - Y_o) \tag{6}$$

여기서, Y 는 적용하고자 하는 미래년도이며, Y_o 는 현재기간 모의 강우자료의 마지막 년도(2005년)이다.

또한 미래년도별 지속시간 1-일 연 최대 강우자료의 변동계수 (V_{1d}^f)를 추정하고자, 본 연구에서는 현재기간 모의자료 및 미래기간 모의자료의 지속시간 1-일 연 최대 강우시계열을 25개년씩(1982~2006년, 2007~2031년, ..., 2076~2100) 이동하며 계산하여 2006년부터 2100년까지 총 95년간의 미래년도별 변동계수를 산출하였다. 이로부터 아래와 같은 추세 공식식을 이용하여 미래년도별 변동계수를 추정하였다.

$$V_{1d}^f = V_{1d}^p + \beta(Y - Y_o) + \frac{1}{2}\gamma(Y - Y_o) \tag{7}$$

여기서, V_{1d}^p 는 현재기간 모의자료의 지속시간 1-일 연 최대 강우자료의 변동계수이다.

3.6 미래 IDF 곡선

IDF 곡선에는 지속시간 24-시간 연 최대 강우시계열의 평균이 사용되므로 1-일 지속시간을 이용하는 것에 대한 보완이 필요하다. 이에 본 연구에서는 지속시간 24-시간 및 지속시간 1-일 관측 연 최대 강우시계열(h_{24} 및 h_{1d})의 선형관계를 아래와 같이 회귀 분석하여 이에 대한 보완을 하였다.

$$h_{24} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot h_{1d} \tag{8}$$

변동계수 또한 각 지속시간별 변동계수로부터 산출된 대표변동계수가 사용되므로 아래와 같이 대표 변동계수와 지속시간 1-일 변동계수의 비를 관측자료로부터 산출하여 미래자료에 대한 보정을 수행하도록 하였다.

$$V = \alpha_3 \cdot V_{1d} \tag{9}$$

이렇게 산출된 환산계수를 미래기간 모의자료로부터 추정된 지속시간 1-일 연 최대강우량시계열의 평균($E[h_{1d}^f]$)과 지속시간 1-일 변동계수(V_{1d}^f)에 적용하여 미래의 지속시간 24-시간 연 최대강우량시계열의 평균($E[h_{24}^f]$)과 대표변동계수(V^f)를 산출하여, 미래 IDF 곡선을 도출하고자 하였다.

미래년도별 재현기간별 지속시간별 확률강우량($h^f(\lambda d)_T$)은 아래와 같이 산정하였다.

$$h^f(\lambda d)_T = E[h_{24}^f](1 + V^f \cdot K_T)(\lambda d)^{n_T} \tag{10}$$

지점별로 지역적인 기후특성을 반영하기 위해 앞서 산정된 스케일 지수(n_T)와 빈도계수(K_T)는 재현기간별로 관측자료로부터 산정한 값을 그대로 적용하였다. 참고로, scale-invariance 기법에서는 기본적으로 미래기간 모의자료의 스케일특성이 관측자료의 특성과 동일하다는 가정 하에 적용 가능할 것이다. 또한, 일-단위 자료의 확률분포특성과 시간-단위 자료의 확률분포특성이 서로 같다는 가정에서 출발한다. 따라서 일-단위 자료로부터 추정된 확률강우량의 변화가 시간-단위 자료의 확률강우량의 변화로 그대로 반영된다.

4. 결과

4.1 Scale-invariance 기법 및 RCM 자료의 적용성 분석

먼저, scale-invariance 기법의 적용성을 살펴보기 위하여 지속시간별 연 최대 시계열로부터 직접 산출한 확률강우량(OBS)과 scale-invariance 기법을 이용하여 산출한 확률강우량(SCALE)을 비교하였다. Fig. 3은 부산지점의 결과로서 직접 산출한 확률강우량과 scale-invariance 기법을 이용하여 산출한 확률강우량이 매우 유사하게 나타났다. 참고로 부산 지점의 경우 대표 변동계수(V)는 0.4144로 계산되었으며, 재현기간 10, 30, 50년에 해당하는 빈도계수(K_T)는 각각 1.5103, 2.4380, 2.8615, 그에 대응하는 스케일지수(n_T)는 0.4276, 0.4336, 0.4357로 추정되었다. 하지만 대부분의 관측소의 경우 지속시간 1-시간에서 스케일 확률강우량이 관측 확률강우량보다 대부분 크게 산정되는 것으로 나타나는 반면 지속시간 24-시간에 가까울수록 두 확률강우량 사이의 차이가 적게 나타났다. 참고로, 적용된 모든 지점에서 유사한 결과가 도출됨을 살펴볼 수 있었으며, 따라서 scale-invariance 기법의 적용성은 충분히 확보된 것으로 판단하였다.

미래 자료의 분석에 앞서서 본 절에서는 현재기간 모의자

료(일 강우자료)로부터 scale-invariance 기법을 적용하여 산출한 확률강우량(이하 현재기간 확률강우량)과 관측자료의 지속시간 1-일 연 최대 시계열로부터 scale-invariance 기법을 이용하여 산출한 확률강우량(관측 확률강우량)과의 비교를 수행하였다. 앞서 산출된 환산계수를 이용하여 현재기간 모의자료로부터 지속시간 24-시간 연 최대 강우시계열의 평균과 대표환산계수를 산정하고 이를 IDF 곡선식에 적용하여 시간적으로 상세화시켜 일-단위 이하의 확률강우량을 산정하였다. Fig. 4는 서울 지점의 관측 확률강우량(OBS) 및 현재기간 확률강우량(CTRL)을 비교한 결과이다. 서울 지점의 경우 전체적으로 확률강우량이 아주 미세하게나마 과소 추정되고 있음을 살펴볼 수 있다. 그러나 다른 지점들을 분석한 결과 이러한 현상은 일반적인 것이 아니며, 지점별로 지속시간에 따라 아주 미세하게나마 과대 혹은 과소 추정되고 있으나 그 차이가 매우 작음을 살펴볼 수 있었다. 따라서 RCM 자료를 바탕으로 scale-invariance 기법을 적용하여 미래 IDF 곡선을 도출하는 것에 대한 적용성은 충분히 확보된 것으로 판단하였다.

4.2 미래기간 모의자료를 이용한 확률강우량 산정

Fig. 5는 제주와 광주 지점의 미래기간 모의자료의 지속시

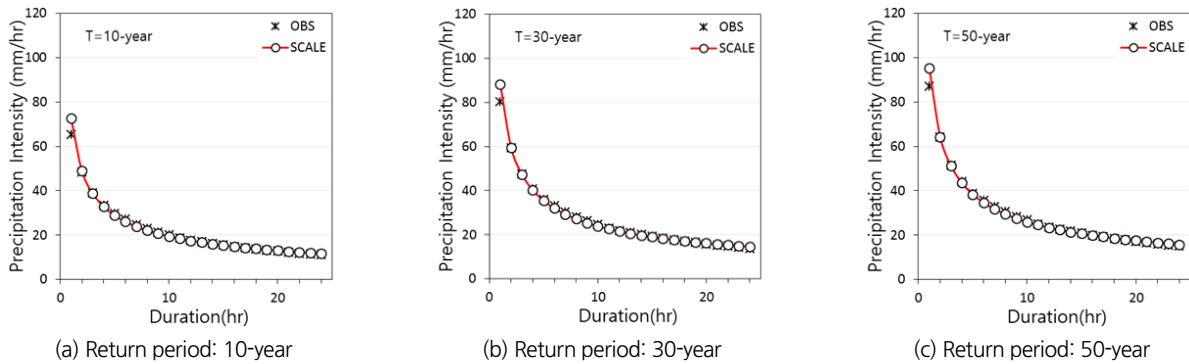


Fig. 3. Applicability of scale-invariance (busan station)

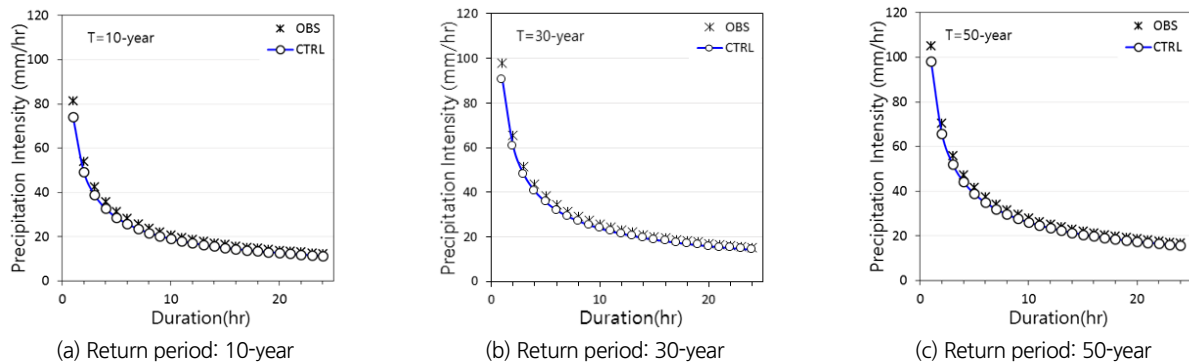


Fig. 4. Applicability of RCM output (Seoul station)

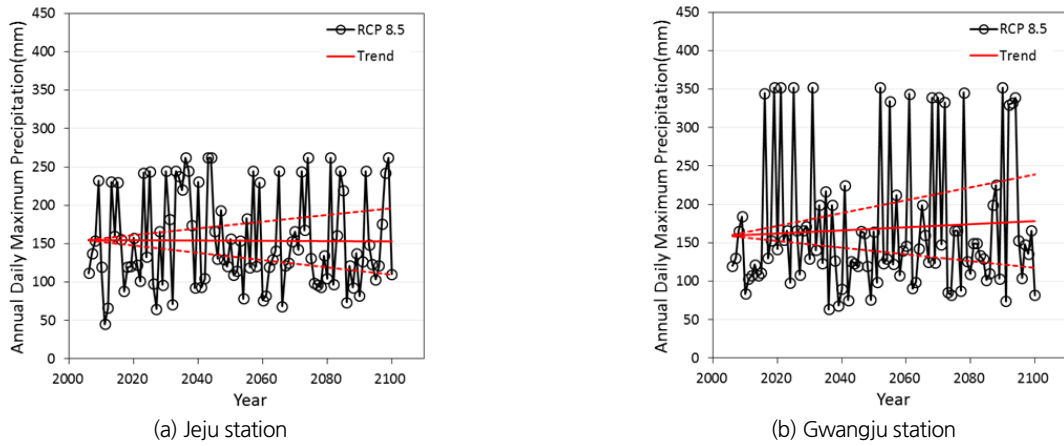


Fig. 5. Projection of future annual daily maximum precipitation under RCP 8.5

Table 2. Trend of future annual daily maximum precipitation

| Station Name | Change rate (mm/year) | Station Name | Change rate (mm/year) |
|---------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| Sokcho | 0.3379 [-0.3417 to 1.0175] | Jinju | 0.2407 [-0.2031 to 0.6844] |
| Dawgwallyeong | 0.5908 [-0.7916 to 1.9733] | Ganghwa | 0.5653 [-0.1365 to 1.2672] |
| Chuncheon | 0.1463 [-0.2883 to 0.5810] | Yangpyeong | 0.3793 [-0.1678 to 0.9265] |
| Gangneung | 0.9519 [-0.1611 to 2.0649] | Icheon | -0.1157 [-0.6646 to 0.4333] |
| Seoul | 0.4485 [-0.0339 to 0.9310] | Hongcheon | 0.3623 [-0.0505 to 0.7752] |
| Incheon | 0.1391 [-0.3788 to 0.6569] | Jecheon | -0.1975 [-0.6697 to 0.2748] |
| Wonju | 0.1498 [-0.3715 to 0.6711] | Boeun | 0.1236 [-0.6621 to 0.9092] |
| Ulleung-do | -0.0314 [-0.2764 to 0.2137] | Cheonan | -0.0761 [-0.6152 to 0.4630] |
| Suwon | 0.2211 [-0.3812 to 0.8235] | Boryeong | 0.0635 [-0.6123 to 0.7393] |
| Chungju | -0.0991 [-0.6187 to 0.4206] | Buyeo | -0.0870 [-0.7628 to 0.5888] |
| Seosan | -0.0200 [-0.5856 to 0.5456] | Geumsan | -0.0186 [-0.4110 to 0.3739] |
| Uljin | 0.0651 [-0.2260 to 0.3562] | Buan | -0.0308 [-0.3518 to 0.2902] |
| Cheongju | -0.0132 [-0.5331 to 0.5067] | Imsil | 0.2212 [-0.1657 to 0.6080] |
| Daejeon | 0.0751 [-0.4695 to 0.6197] | Jeongeup | 0.0655 [-0.2239 to 0.3548] |
| Chupungnyeong | 0.1997 [-0.3363 to 0.7356] | Namwon | 0.0792 [-0.2213 to 0.3798] |
| Andong | -0.0078 [-0.2190 to 0.2033] | Jangheung | 0.4024 [-0.5247 to 1.3295] |
| Pohang | -0.1653 [-0.8712 to 0.5405] | Haenam | -0.0298 [-0.9236 to 0.8640] |
| Gunsan | 0.2083 [-0.4256 to 0.8421] | Gogeung | 0.4773 [-0.3204 to 1.2751] |
| Daegu | 0.0684 [-0.2994 to 0.4361] | Yeongju | -0.1910 [-0.7421 to 0.3602] |
| Jeonju | 0.1989 [-0.1818 to 0.5797] | Mungyeong | 0.0166 [-0.2225 to 0.2557] |
| Ulsan | 0.2808 [-0.2340 to 0.7956] | Yeongdeok | 0.2035 [-0.2254 to 0.6324] |
| Gwangju | 0.2021 [-0.4403 to 0.8445] | Uiseong | -0.1634 [-0.5092 to 0.1825] |
| Busan | 0.6310 [-0.0063 to 1.2683] | Gumi | 0.1234 [-0.2306 to 0.4774] |
| Tongyeong | 0.4104 [0.0679 to 0.7528] | Yeongcheon | 0.0400 [-0.1955 to 0.2755] |
| Mokpo | 0.0512 [-0.5601 to 0.6624] | Geochang | 0.0325 [-0.4025 to 0.4674] |
| Yeosu | 0.2546 [-0.1015 to 0.6106] | Hapcheon | 0.2023 [-0.2748 to 0.6794] |
| Wando | 0.2833 [-0.4327 to 0.9994] | Miryang | 0.2746 [-0.0722 to 0.6213] |
| Jeju | -0.0195 [-0.4760 to 0.4370] | Sancheong | -0.0296 [-0.6493 to 0.5900] |
| Seongsan | 0.1978 [-0.3693 to 0.7649] | Geoje | 0.5625 [-0.0573 to 1.1822] |
| Seogwipo | 0.4200 [-0.2686 to 1.1085] | Namhae | 0.2740 [-0.4878 to 1.0359] |

간 1-일 연 최대 강우시계열을 도시하여 회귀 분석한 결과를 나타낸 것이다. 제주 지점의 경우에는 기울기가 -0.0195 mm/year 으로 산정되어 미래로 갈수록 최대 강우시계열의 평균이 감소하고 있다. 또한 광주 지점의 경우에는 기울기가 0.2021 mm/year 로 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 그림에서 점선은 추세 기울기의 95% 신뢰구간을 의미한다. Table 2에는 지점별 지속시

간 1-일 연 최대 시계열의 미래 선형추세(mm/year)를 정리하였다. 표에서 괄호 안의 값은 기울기의 95% 신뢰구간을 나타낸다.

대부분의 지점에서 증가하는 추세를 나타냈으며, 전체 60개 지점 중 17개 지점에서 감소하는 추세를 나타냈으나, 증가하는 지점의 증가추세와 비교할 때 감소하는 지점의 감소율은

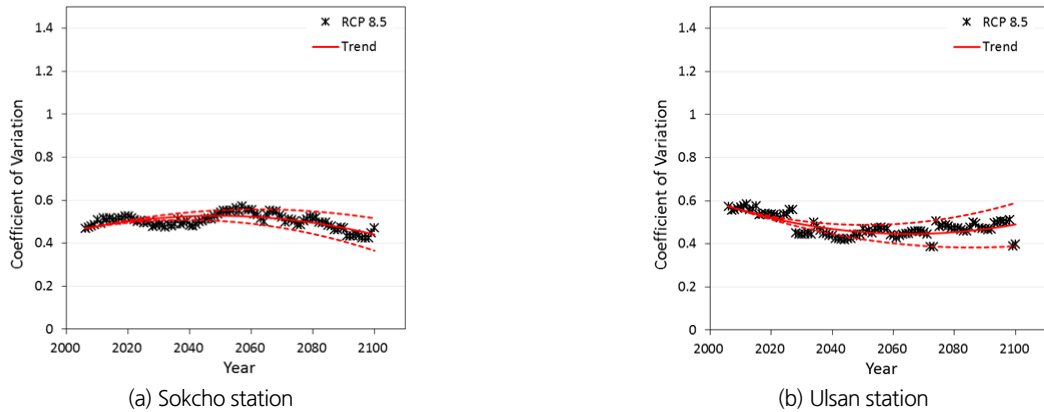


Fig. 6. Projection of future coefficient of variation under RCP 8.5

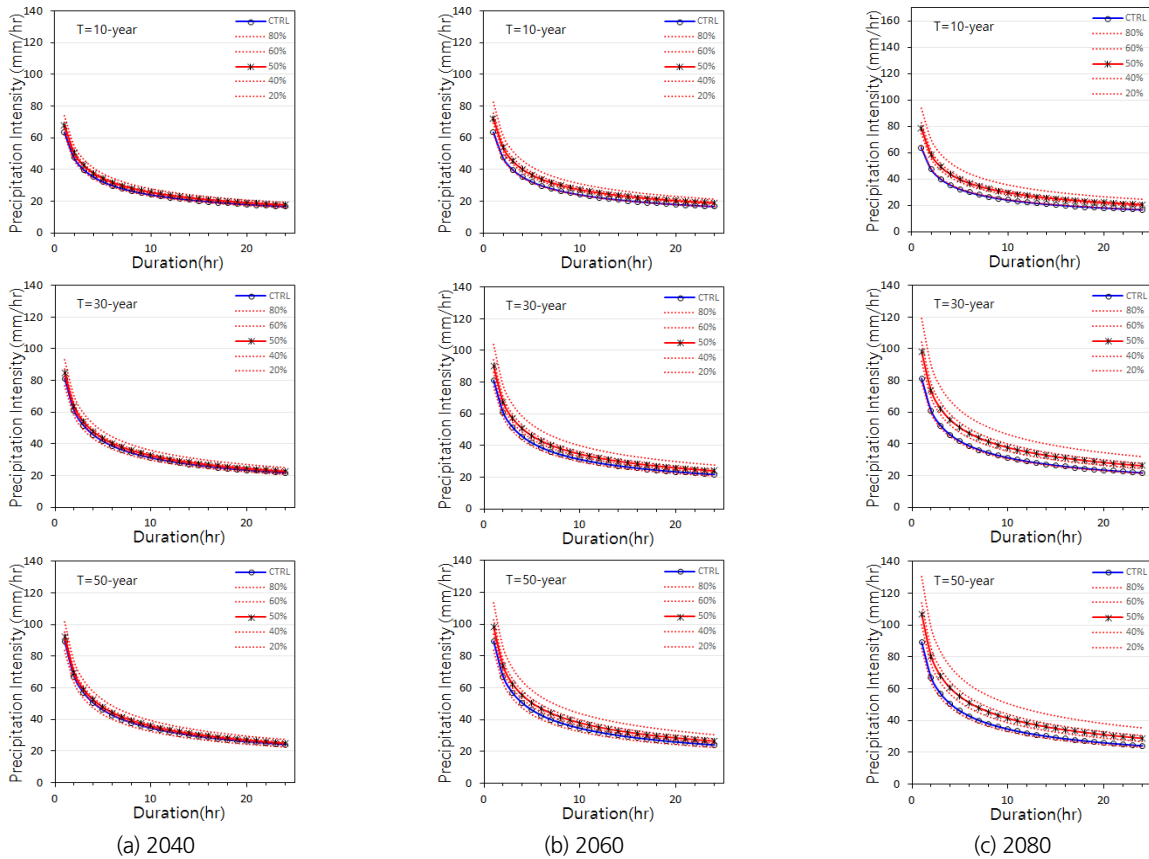


Fig. 7. Future IDF curves of Gangneung station

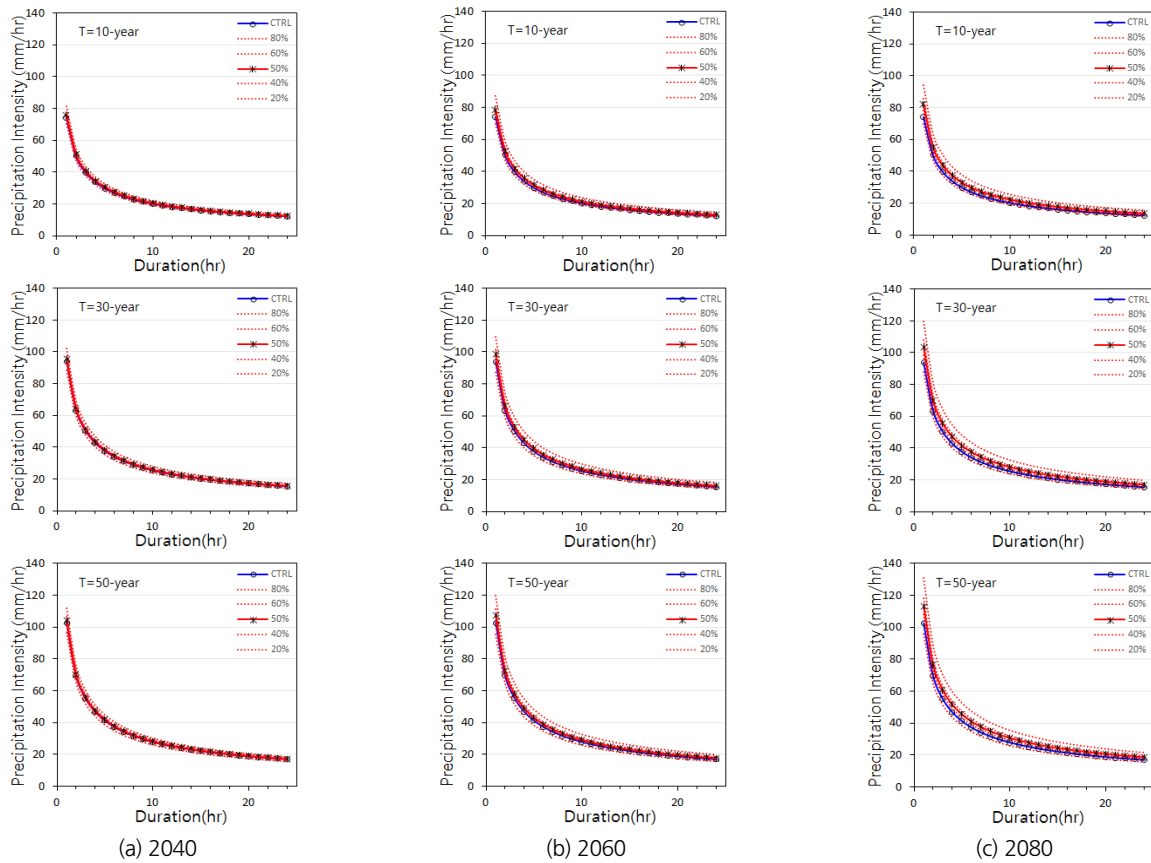


Fig. 8. Future IDF curves of Suwon station

매우 미미한 것으로 분석되었다. 이에 대부분의 지점에서 연 최대 강우량의 평균이 증가함에 따라 미래의 확률강우량이 현재보다 증가할 것으로 판단된다. 그러나 이는 단순히 최대 강우시계열의 평균만을 고려한 것이며 보다 타당한 미래 확률 강우량의 추정을 위해서는 최대 강우시계열의 분산도 함께 고려되어야 한다.

Fig. 6은 속초와 울산 지점의 미래기간 모의자료의 변동계수의 추세 분석결과를 도시한 것이다. 속초 지점의 경우 변동계수가 증가하다가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 울산 지점의 경우에는 감소하다가 증가하는 경향을 보이고 있음을 살펴볼 수 있다. 그림에서 점선은 추세 패턴의 95% 신뢰구간을 의미한다. 변동계수의 경우 연 최대 시계열과는 다르게 일반적인 경향을 찾아볼 수는 없었으며, 지점별로 매우 상이한 패턴을 보이고 있음을 살펴볼 수 있었다.

상기 분석결과를 토대로, 미래년도별 재현기간별 지속시간별 확률강우량을 산정하였으며, 수원과 여수 지점에 대한 결과를 Fig. 7과 8에 도시하였다. Fig. 7과 8에 나타난 점선들은 각각 신뢰구간 20~80%에 해당하는 신뢰구간을 의미한다.

두 지점 모두 미래로 갈수록, 재현기간이 길수록 확률강우량이 증가할 확률이 감소할 확률보다 상대적으로 높게 나타나고 있음을 살펴볼 수 있으며, 다른 지점들에서도 유사한 패턴을 보이고 있음을 관찰할 수 있었다. 또한 미래로 갈수록 불확실성의 범위가 급격하게 증가하고 있음을 살펴볼 수 있다.

Fig. 9은 지속시간 1시간에 대한 현재 확률강우량 대비 미래 확률강우량 증가율의 공간적인 분포를 미래년도별 재현기간별로 전국적으로 나타내었다. 확률강우량의 보간에는 Krige (1951)의 역거리가중법(Inverse Distance Weighting)을 사용하였다. Fig. 9에서 증가율의 공간적인 형태가 모든 미래년도와 재현기간이 대하여 비슷하게 나타나고 있다. 대부분의 지역에서 확률강우량이 증가할 것으로 나타났다. 보은 지점을 중심으로 하는 중부지방 일부와 강화 및 대관령 지점을 중심으로 하는 한반도의 북쪽, 그리고 남해안 지역에 상대적으로 큰 증가율이 분포하고 있다. 반면, 울진 및 포항을 포함하는 한반도 동쪽과 부여 및 부안을 포함하는 한반도 서쪽 일부에서는 감소할 것으로 나타났다. 그러나 증가율의 변동 범위는 미래년도별 재현기간별로 큰 차이를 보이고 있다. 재현

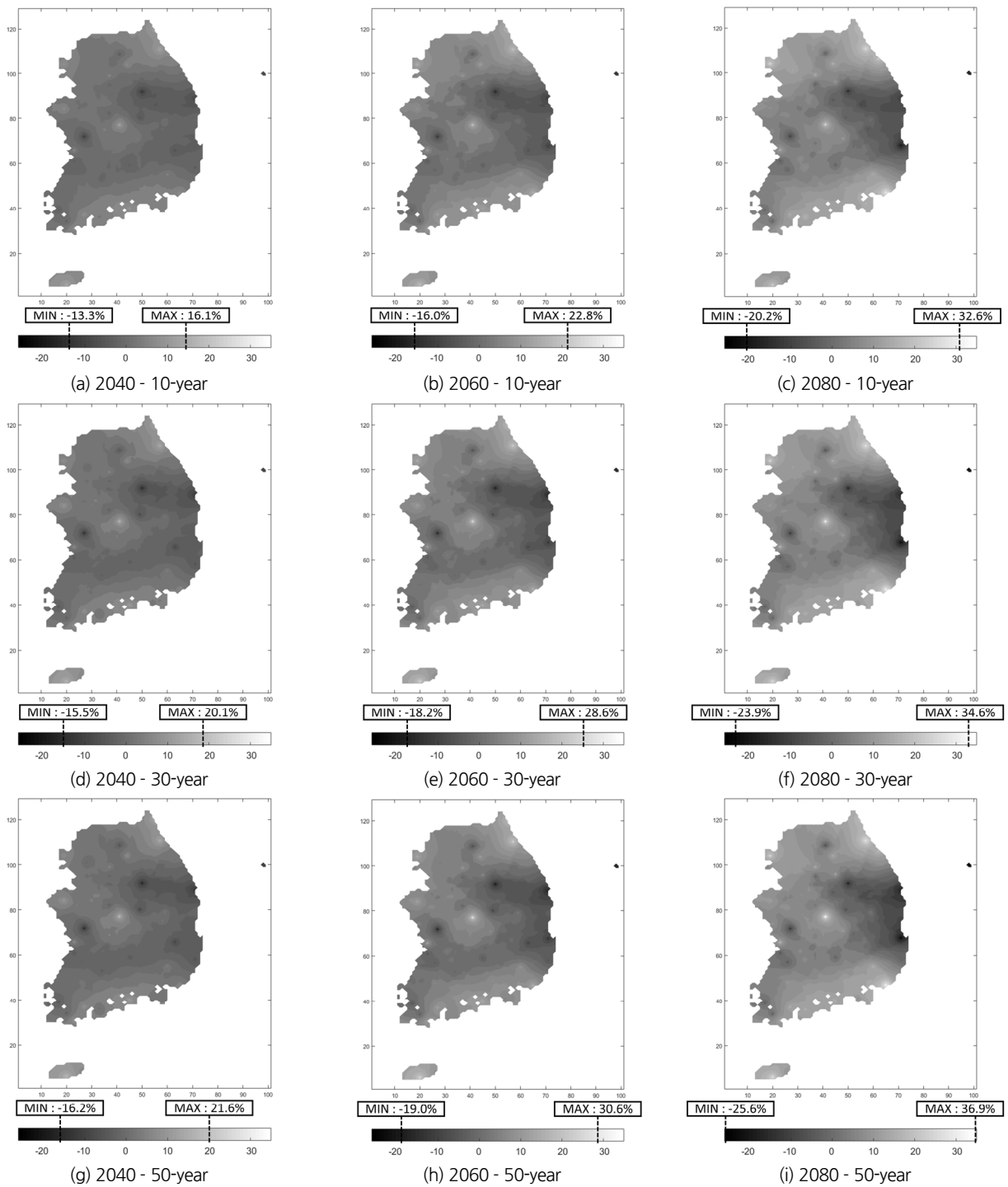


Fig. 9. Spatial distribution of the rate of increase of probability precipitation with 1-hr duration

기간 10년의 경우, 2040년에는 지점에 따라 최대 16.1%까지 증가하며, -13.3%까지 감소되는 것으로 나타났다. 하지만 2080년의 경우, 보은 지점 부근에서 최대 32.6%까지 증가할 것으로 나타났으며, 제천 지점 부근은 -20.2%까지 감소할 것

으로 나타났다. 재현기간 30년에서는 2040년의 경우 -15.5%에서 20.1%까지의 증가율을 나타내고 있으며, 2060년의 경우 -18.2%에서 28.6%, 2080년의 경우 -23.9%에서 34.6%의 증가율을 나타내고 있다. 또한, 재현기간 50년의 경우에도 증가

울의 공간적인 형태는 비슷하게 타나났지만, 미래로 갈수록 증가율의 변동 범위가 커지는 것으로 나타났다. 특히, 2080년에는 보은 지점의 경우 현재보다 36.9% 증가하며, 부산 지점의 경우 현재보다 35.3% 증가할 것으로 나타났다. 반면, 울릉도 지점의 경우에는 약 -25.6%까지 감소할 것으로 나타났다. 참고로 Fig. 9(a)의 2040은 미래년도 2040년을, 10-year은 재현기간 10년을 의미한다. 범례의 범위는 모든 미래년도와 재현기간에 대하여 동일하게 적용하였으며, MIN과 MAX는 해당 미래년도, 해당 재현기간의 증가율 최솟값 및 최댓값을 나타낸다.

5. 결론

본 연구에서는 기후변화의 영향으로 인한 극한강우의 변동을 지역적으로 살펴보기 위해, scale-invariance 기법을 이용하여 미래 IDF 곡선을 작성하였다. 각 지점별 스케일 특성을 검토하였으며, 검토 결과에 따라 매개변수로 구성된 IDF 곡선식을 사용하였다. 그 다음, 관측 강우량자료로부터 지역적인 특성을 반영한 매개변수를 산정하고, 기후변화 시나리오의 전망을 분석하여 기후변화의 영향을 포함한 매개변수를 산정하였다. 이를 IDF 곡선식에 적용하여 미래 IDF 곡선을 확률적으로 전망하였다.

신뢰구간 20~80%의 미래 IDF 곡선을 작성한 결과, 대부분의 지점에서 미래로 갈수록, 재현기간이 길수록 확률강우량이 현재보다 상대적으로 높게 나타나고 있었으며 불확실성의 범위가 급격하게 증가하였다. 또한 역거리가중법을 이용하여 지속시간 1-시간 확률강우량 증가율을 공간적으로 분석한 결과, 모든 미래년도와 재현기간에 대해 증가율의 공간적인 형태는 유사하게 타나났지만, 확률강우량의 변동 범위는 미래로 갈수록, 재현기간이 길수록 커지는 것으로 나타났다. 분석된 결과는 미래의 기후변화에 따른 확률강우량의 변동을 확률적으로 살펴볼 수 있을 것으로 판단되며, 향후 다양한 기후변화 시나리오로부터 확률강우량의 변동을 연구하는데 기초가 될 것으로 판단된다. 또한 시간-단위의 강우자료가 요구되는 수공구조물의 설계에 기후변화의 영향을 반영하기 위한 기초자료 생산에 참고할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 RCP 8.5 시나리오 이용하여 나타낸 결과를 보면 우리나라 대부분의 지역에서 현재보다 확률강우량이 증가할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 따라서 과거강우의 통계적 분석을 기반으로 하는 현재의 수공구조물을 고려할 때, 기후변화의 영향에 따른 확률강우량의 증가를 수공구조물의 설

계에 반영하지 않는다면 극한강우의 발생 시 수공구조물 파괴로 인한 홍수 피해와 같은 사회·경제적인 피해의 증가를 야기할 수 있다. 하지만, 미래 기후변화 시나리오의 경우 불확실성을 전제로 하며, 편이보정을 거치더라도 미래 기후변화 시나리오 자체의 신뢰성을 판단하기는 어렵다. 또한 본 연구에서 사용된 RCP 8.5 시나리오는 다양한 미래 기후변화 시나리오 중 하나이다. 이러한 미래 기후변화 시나리오의 불확실성 및 다양성은 미래 확률강우량의 과대추정 및 과소추정 가능성을 의미한다. 그러므로 다른 시나리오와의 비교를 통해 미래 극한강우 변동의 타당성을 판단하여야 하며 이에 대한 추가 연구가 요구된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 지원 국토교통기술화 사업지원(16TBIP-C111520-01)의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Burlando, P. and Rosso, R. (1996). "Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation." *Journal of Hydrology*, Vol. 187, No. 1, pp. 45-64.
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J. H., Willett, K. M., Aguilar, E., Brunet, M., Caesar, J., Hewitson, B., Jack, C., Klein Tank, A. M. G., Kruger, A. C., Marengo, J., Peterson, T. C., Renom, M., Oria Rojas, C., Rusticucci, M., Salinger, J., Elayah, A. S., Sekele, S. S., Srivastava, A. K., Trewin, B., Villaruel, C., Vincent, L. A., Zhai, P., Zhang, X., and Kitching, S. (2013). "Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset." *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Vol. 118, No. 5, pp. 2098-2118.
- Gregersen, I. B., Sorup, H. J. D., Madsen, H., Rosbjerg, D., Mikkelsen, P. S., and Arbjerg-Nielsen, K. (2013). "Assessing future climatic changes of rainfall extremes at small spatio-temporal scales." *Climatic Change*, Vol. 118, No. 3, pp. 783-797.
- Groisman, P. Y., Knight, R. W., Easterling, D. R., Karl, T. R., Hegerl, G. C., and Razuvaev, V. N. (2005). "Trends in intense precipitation in the climate record." *Journal of Climate*, Vol. 18, No. 9, pp. 1326-1350.
- Hawkins, E., Osborne, T. M., Ho, C. K., and Challinor, A. J. (2012). "Calibration and bias correction of climate projections for crop modelling: An idealised case study over Europe." *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 170, pp. 19-31.

- IPCC (2014). "Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change." IPCC, Geneva, Switzerland.
- Jung, Y., Kim, S., Kim, T., and Heo, J. (2008). "Rainfall quantile estimation using scaling property in Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 9, pp. 873-884.
- Kim, E., Choi, H. I., Park, M. J., Cho, S. J., and Kim, S. (2011). "The effect of climate change on Korean drought occurrences using a stochastic soil water balance model." *Scientific Research and Essays*, Vol. 6, No. 13, pp. 2771-2783.
- Krige, D. G. (1951). "A statistical approach to some mine valuations and allied problems at the Witwatersrand." Master's thesis, University of Witwatersrand, p. 272.
- Kwon, Y., Park, J., and Kim, T. (2009). "Estimation of design rainfalls considering an increasing trend in rainfall data." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2B, pp. 131-139.
- Lee, M., Shin, S., and Bae, D. (2012). "The application assessment of future design rainfall estimation method using scale properties." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 3, pp. 253-262.
- Lee, O., and Kim, S. (2016). "Future PMPs projection under future dew point temperature variation of RCP 8.5 climate change scenario." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 2, pp. 505-514.
- Liuzzo, L., and Freni, G. (2015). "Analysis of extreme rainfall trends in sicily for the evaluation of depth-duration-frequency curves in climate change scenarios." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 20, No. 12.
- Mailhot, A., and Duchesne, S. (2010). "Design criteria of urban drainage infrastructures under climate change." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 136, No. 2, pp. 201-208.
- Ministry of Construction and Transport (2000). "1999 Report of research and investigation of water resources management method development. Vol 1. Probability Rainfall Map." Ministry of Construction and Transport.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012). "Design flood estimation tips." Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- Perkins, S. E., Alexander, L. V., and Nairn, J. R. (2012). "Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells." *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, No. 20.
- Rodriguez, R., Navarro, X., Casas, M. C., Ribalaygua, J., Russo, B., Pouget, L., and Redano, A. (2014). "Influence of climate change on IDF curves for the metropolitan area of Barcelona." *International Journal of Climatology*, Vol. 34, No. 3, pp. 643-654.
- Willems, P. (2013). "Adjustment of extreme rainfall statistics accounting for multidecadal climate oscillations." *Journal of Hydrology*, Vol. 490, pp. 126-133.