

HadGEM3-RA 기후모델 일강우자료를 이용한 빈도해석 성능 평가

김성훈·김한빈·정영훈·허준행[†]

연세대학교 건설환경공학과

Assessment of Frequency Analysis using Daily Rainfall Data of HadGEM3-RA Climate Model

Sunghun Kim·Hanbeen Kim·Younghun Jung·Jun-Haeng Heo[†]

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Korea

(Received : 07 October 2019, Revised: 28 November 2019, Accepted: 28 November 2019)

요약

본 연구에서는 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 지점빈도해석(At-site Frequency Analysis, AFA)과 지역빈도해석(Regional Frequency Analysis, RFA) 등을 수행하였고, Monte Carlo simulation을 통한 RRMSE(relative root mean squared error) 값을 비교·분석함으로써 각 빈도해석 방법에 따른 성능을 평가하고자 하였다. 확률강우량 산정을 위하여 기상청에서 국가표준시나리오로 제공하는 RCM(Regional Climate Model) 자료 중 하나인 HadGEM3-RA(12.5km) 기후모델 자료로부터 우리나라 615개 지점에 대한 일 강우 자료를 추출하였고, 자료의 편의보정(bias correction)과 공간상세화(spatial disaggregation)를 위하여 분위사상법(quantile mapping)과 역거리제곱법(inverse distance squared method)을 적용하였다. 분석 결과 지역빈도해석 방법이 지점빈도해석보다 정확하게 확률강우량을 산정하는 것으로 나타났으며, 이는 기후변화 시나리오 기반의 확률강우량 산정시 지역빈도해석의 결과가 보다 합리적인 전망 결과를 도출할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 기후변화, 빈도해석, 확률강우량, Monte Carlo simulation, HadGEM3-RA

Abstract

In this study, we performed At-site Frequency Analysis(AFA) and Regional Frequency Analysis(RFA) using the observed and climate change scenario data, and the relative root mean squared error(RRMSE) was compared and analyzed for both approaches through Monte Carlo simulation. To evaluate the rainfall quantile, the daily rainfall data were extracted for 615 points in Korea from HadGEM3-RA(12.5km) climate model data, one of the RCM(Regional Climate Model) data provided by the Korea Meteorological Administration(KMA). Quantile mapping(QM) and inverse distance squared methods(IDSM) were applied for bias correction and spatial disaggregation. As a result, it is shown that the RFA estimates more accurate rainfall quantile than AFA, and it is expected that the RFA could be reasonable when estimating the rainfall quantile based on climate change scenarios.

Key words : Climate Change, Frequency Analysis, HadGEM3-RA, Monte Carlo simulation, Rainfall Quantile

[†] To whom correspondence should be addressed.
School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Korea
E-mail: jhheo@yonsei.ac.kr

• **Kim, Sunghun** School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Korea / Ph.D. candidate (sunghun@yonsei.ac.kr)
• **Kim, Hanbeen** School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Korea / Research fellow (hbkim8917@yonsei.ac.kr)
• **Jung, Younghun** School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Korea / Research fellow (yhjung2000@gmail.com)
• **Heo, Jun-Haeng** School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Korea / Professor (jhheo@yonsei.ac.kr)

1. 서 론

인간활동으로 인한 지구의 평균 기온 상승을 의미하는 지구 온난화는 기후변화로 이어지고 있으며, 이로 인한 극한 수문 사상의 빈도와 강도가 증가하고 있다. 수문 현상의 변화는 폭염, 태풍, 가뭄, 폭우-폭설 등과 같이 해마다 다양한 형태의 자연재해로 세계 각지에서 나타나고 있다. 기후변화에 관한 정부 간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서 발간한 제5차 평가보고서(Fifth Assessment Report, AR5)에서는 인간이 기후 시스템에 영향을 미치고 있으며, 그 정도가 점차 심화되어 전 지구적인 영향을 미치는 것으로 분석하고 있다(IPCC, 2014). 이러한 기후변화 영향에 적응하기 위하여 국내·외에서 다양한 연구가 활발히 진행되어왔으며(유철상과 이동률, 2000; 안소라 등, 2008; 배덕효 등, 2008; 김보경과 김병식, 2009; 김영호 등, 2011; 강나래 등, 2011; 장대원 등, 2012; 김병식과 하성룡, 2013; 송창우 등, 2013; 황세운 등, 2013; 남우성 등, 2015), 많은 연구가 현재 진행되고 있다.

기후변화 시나리오 자료 기반의 확률강우량 산정 관련하여 국내에서 최근 수행된 연구들을 살펴보면, 염용선 등(2019)은 남북공유하천유역을 대상으로 13개의 GCM(Global Climate Model) 기후모델 자료를 이용하여 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 대한 미래 극한강수량 변화 전망을 살펴보고, 유역내 11개 지점을 대상으로 지점빈도분석 결과를 바탕으로 미래 전망 결과를 분석하였다. 김성훈 등(2019)은 19개 기후모델 자료를 이용하여 기상청 60개 지점을 대상으로 관측자료와 기후변화 시나리오 자료의 연 최대값에 대한 수문통계량을 산정하였고, MRI-CGCM2, HadGEM3-RA 기후모델의 결과가 관측자료의 통계적 특성을 잘 모의함을 확인하였다. 김호성 등(2018)은 HadGEM3-RA의 RCP 4.5 시나리오 자료에 대한 지점빈도분석을 수행하여 확률강우량을 산정하였고, 이를 XP-SWMM 모형에 적용하여 도시유역(불광천유역)에 대한 유출 변화를 살펴보았다. 김경민 등(2018a)은 기상청 57개 지점을 대상으로 2개의 GCM, 4개의 RCM(Regional Climate Model) 자료를 이용하여 RCP 4.5, 8.5 시나리오에 대한 확률강우량을 산정하였고, 관측자료와 미래 양상불 조합을 통해 변화율과 변화율 변동계수를 추정하였다. 김경민 등(2018b)은 scale-invariance 기법을 이용하여 부산 지점 RCM 자료의 시간해상도가 미래 IDF곡선 추정에 미치는 영향을 분석하였고, 시간해상도에 따른 불확실성을 정량적으로 확인하였다. 앞선 두 논문에서 IDF곡선 추정에 필요한 확률강우량 산정방법은 지점빈도분석으로 동일하다. 황정운 등(2018)은 HadGEM3-RA 기후모델 자료를 이용하여 RCP4.5 시나리오에 따른 서울 효자배수분구의 확률홍수량 변화를 살펴보았고, 강우-유출 모형의 입력자료인 확률강우량은 지점빈도분석 결과를 사용하였다. 조현곤과 김광섭(2018)은 HadGEM3-RA의 서울 지점 자료를 logistic 모형, power 모형, 인공신경망 모형 등으로 누적 평균 연 최대 강수량을 산정하였고, 지점빈도분석을 수행하여 확률강수량을 산정하였다. 김형산 등(2016)은 충북지역 5개 강우관측소를 대상으로 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 지점빈도분석을 수행하였고, 누적된 자료의 전망기

간 별 확률강우량을 산정하여 미래전망 경향을 확인하였다. 앞서 언급한 연구들에서는 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 지점빈도분석을 수행하여 확률강우량을 산정하였고, 최적 확률분포형, 매개변수추정 방법 등은 연구자마다 다르게 적용하였다.

최근 발간한 「홍수량 산정 표준지침」(환경부, 2019)에서는 확률강우량 산정시 지역빈도분석을 권장하고 있다. 송창우 등(2013)은 IPCC AR4에서 제시한 RegCM3 모델 자료를 이용하여 기상청 58개 지점(13개 군집)을 대상으로 지역빈도분석을 수행하여 미래 확률강우량 전망을 분석한 바 있으나, 표준지침에서 수행한 615개 지점(26개 군집)과 비교하여 강우 관측지점수와 관측망 밀도는 상당한 차이가 있다. 또한 IPCC AR5에서 제시한 기후모델 자료를 이용한 지역빈도분석에 관한 연구는 상당히 미흡하며, 지역빈도분석 방법의 적용성을 평가하는 연구가 우선적으로 필요할 것으로 판단된다. 임정현 등(2017)의 설계홍수량 산정 관련 연구에서는 국내 실무에서 적용되는 각종 기준 및 이론 등을 검토하여 표준적인 절차인 「설계홍수량 산정요령」(국토해양부, 2012)을 이용하여 주관적 판단에 따른 불확실성을 최소화하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 「홍수량 산정 표준지침」(환경부, 2019)에서 제시된 방법과 같은 방법으로 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 지점빈도분석과 지역빈도분석 방법에 따른 성능을 평가하였다. 기후변화 시나리오 자료는 공간상세화(spatial disaggregation)와 편의보정(bias correction)의 과정을 거쳐 재생산되었고, Monte Carlo simulation을 수행하여 산정된 확률강우량을 이용하여 각 방법의 성능을 정량적으로 평가하였다.

2. 기후변화 시나리오 및 기후모델

2.1 기후변화 시나리오

IPCC 제5차 평가보고서에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하고 있다. RCP(representative concentration payhways) 시나리오는 Table 1과 같이 온실가스 농도 전망에 따라 4가지로 구분되어 사용되고 있다. 각 시나리오에 따른 동아시아 지역의 연평균기온 편차, 연강수량 편차비 전망은 Table 1에 나타내었다.

기후변화에 따른 미래 전망 결과는 현재기간(reference period, S0) 대비 미래기간(projection period, SF)에 대한 비율을 분석하고자 하는 변수에 적용하여 산정한다. 많은 연구에서 미래기간을 구분하는 명확한 절차나 기준은 없다. 즉, 일정 기간을

Table 1. Climate change effect in East Asia for the 21st century(2071~2100) compared to the present(1961~2010)(기상청, 2018).

RCP scenario	RCP2.6	RCP4.5	RCP6.0	RCP8.5
CO ₂ concentration (2100 year)	420ppm	540ppm	670ppm	940ppm
Temperature	+1.2°C	+2.4°C	+2.5°C	+3.8°C
Precipitation	+0.6%	+3.7%	+0.8%	+0.9%

구분하여 분석할 수 있고, 또는 누적하여 분석할 수 있으며 연구자의 주관에 따라 정할 수 있다. 또한, 기후변화 시나리오 자료는 관측값을 이용한 편의보정을 수행하는데, 편의보정 방법에 따라 미래 전망자료는 달라질 수 있다. 따라서, 본 연구는 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 빈도해석 방법의 성능을 평가하는 것에 목적이 있으므로 자료에 대한 불확실성을 최소로 하기 위하여 현재 모의기간(1979~2005년) 자료에 국한하여 분석을 진행하였다.

2.2 기후모델의 선정

기상청과 국립기상과학원은 제5차 IPCC의 기후변화 평가기준에 따라 4종의 새로운 온실가스 시나리오(RCP2.6/4.5/6.0/8.5)를 이용하여 전지구(135km의 공간해상도) 및 한반도 지역(12.5km 공간해상도) 기후변화 전망자료를 생산하였다. 또한, 지자체의 기후변화 적응대책 수립 지원을 위하여 남한을 대상으로 1km 공간해상도의 상세 지역기후 전망자료를 생산하였다(기상청, 2018). 생산된 자료는 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)을 통해 제공하고 있으며, 400년 제어적분 실험에 따른 한반도 및 남한 상세 미래 기후변화 전망 결과로 「한반도 기후변화 전망분석서」(기상청, 2018)를 발간하였다. 보고서에 사용된 기후모델은 영국 기상청 해들리 센터(United Kingdom Met Office Hadley Center)가 개발한 HadGEM2-AO 전지구기후모델로 Reichler and Kim(2008)은 HadGEM2-AO 기후모델과 유사한 다른 기후모델의 전망 결과를 비교하여 HadGEM2-AO 기후모델의 우수한 모의성능을 검증하였고, 특히 한반도를 포함한 동아시아와 환태평양 지역에서의 신뢰성이 상대적으로 높은 것을 확인하였다. 이에 기상청과 CORDEX-EA에서 진행한 연구에서는 HadGEM2-AO 기후모델 자료의 결과를 기반으로 RCM의 미래 전망 결과를 모의하였다. 또한, 서문에서 살펴보았듯이 최근 수행된 다양한 연구에서는 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 모델 자료를 이용하여 연구를 수행하고 있으며, 「한반도 기후변화 전망분석서」(기상청, 2018)의 미래 전망 결과도 HadGEM3-RA 모델의 전망결과를 바탕으로 하고 있다.

김성훈 등(2019)은 IPCC AR5에 포함된 13개의 GCM 모델과, CORDEX-EA에서 제공하는 5개의 RCM 모델, 기상청 국가표준시나리오인 HadGEM3-RA 모델의 강우자료를 이용하여 연최대 자료의 수문통계량(평균, 분산, 왜곡도, 첨예도)을 검토하였고, 우리나라 관측자료의 통계적 특성을 적절히 모의하는 HadGEM3-RA 모델을 시나리오 기반 극한 확률강우량 산정에 적합하다고 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 기상청(2018)과 김성훈 등(2019)의 연구결과를 참고하여 기후변화 시나리오 기반의 빈도해석을 위한 기후모델로 HadGEM3-RA 모델을 선정하였다.

2.3 편의보정(bias correction)

전지구기후모델(GCM)과 지역기후모델(RCM)로부터 생산된 기후변화 시나리오 자료는 실제 관측값과 비교하여 편(bias)이 발생하며, 편의를 보정하는 절차는 기후변화 연구에서

필수적인 과정 중 하나이다. 권현한 등(2008)은 RegCM3 RCM 기후모델의 자료와 실측 강수량자료와 통계 특성을 비교·검토하였고, 수자원분야에 RCM 자료를 활용하기 위하여 편의보정이 고려되어야함을 확인한 바 있으며, 이러한 편이는 기후모델 내부에서 해결하기가 쉽지 않으므로 자료 생산 후 보정해야 한다(박지훈, 2013). 편의를 보정하기 위한 다양한 방법이 있으며, 보다 개선된 결과를 위하여 현재까지 많은 연구들이 진행되고 있다.

본 연구에서는 Eum and Cannon(2017)과 김성훈 등(2019)의 연구결과를 참고하여 Spatial Disaggregation with Quantile Delta Mapping(SDQDM) 방법을 적용하였다. SDQDM 방법은 기후모델 자료의 공간적인 상세화(spatial disaggregation)와 시나리오 자료의 장기추세를 반영하기 위한 Quantile Delta Mapping(QDM)을 결합한 방법이다. 기후모델로부터 생산된 강수량 자료는 격자 자료로 제공되기 때문에 이를 해당 지점의 주변 격자자료와 역거리제곱법을 이용한 공간적 상세화를 통해 Eqn. (1)과 같이 해당 관측 지점의 자료(P_x)로 재생산한다.

$$P_x = \frac{\sum_{i=1}^M P_i \times W_i}{\sum_{i=1}^M W_i} \tag{1}$$

여기서 i 는 해당 지점이 되며, W_i 는 주변격자 지점에서 해당 관측지점까지의 거리 제곱(D^2)에 반비례하는 가중치 값으로 Eqn. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$W_i = \frac{1}{D^2} \tag{2}$$

공간적 상세화를 통해 생산된 해당 지점의 자료(P_i)에서 연최대값(Annual Maximum, AM)자료를 추출하였고, 이를 편의보정에 사용하였다. QDM 방법은 Quantile Mapping(QM) 방법에서 기존 원자료(raw data)가 갖는 추세를 delta(Δ)값으로 고려해주는 방법으로 Cannon et al.(2015)에 의해 개발되었으며, 일반적인 식은 Eqn. (3)과 같다.

$$\hat{x}_m(t) = \hat{x}_{o:m}(t) \cdot \Delta_m(t) \tag{3}$$

여기서 $\hat{x}_m(t)$ 는 시간(t)에 따라 편의보정한 값을 나타내며, $\hat{x}_{o:m}(t)$ 는 기후모델 자료(m)를 관측값(o)에 편의보정한 값이고, $\Delta_m(t)$ 는 기후변화 시나리오 자료의 장기추세를 반영하기 위한 값이다. 본 연구에서의 시나리오 자료는 historical period(S0, 1979~2005)에 국한되어 있으므로, $\Delta_m(t)$ 값은 고려하지 않는다. 즉, $\hat{x}_{o:m}(t)$ 으로만 편의보정이 수행되는데, 이는 기존 QM 방법과 동일하며, $\hat{x}_{o:m}(t)$ 는 Eqn. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}_{o:m}(t) = F_{o,h}^{-1}\{F_{m,h}^{(t)}[x_{m,h}(t)]\} \tag{4}$$

여기서 h 는 historical period(S0)를 나타내며, 모델 자료의 기간(m, h)은 1979~2005년으로 모든 지점이 같고, 관측값의 기간(o, h)은 각 해당 지점의 자료 기간에 따라 다르다.

3. 수문자료의 빈도해석

수문자료의 빈도해석은 자연현상이 가지고 있는 불확실성을 확률분포형 등을 이용하여 신뢰할 만한 발생빈도나 주어진 빈도에 대응하는 확률수문량을 산정하는 것이다. 빈도해석 방법은 일반적으로 지점빈도해석(At-site Frequency Analysis, AFA)과 지역빈도해석(Regional Frequency Analysis, RFA)으로 구분할 수 있다. 각 빈도해석 방법과 절차에 대한 자세한 내용은 「수문통계학」(허준행, 2016)을 참고할 수 있으며, 본문에서는 기본적인 내용에 관하여 서술하였다.

3.1 지점빈도해석

수문자료에 대한 빈도해석은 확률분포형을 이용하여 과거 극치 사상의 발생 확률과 크기를 통계적으로 추정하는 과정으로 지점빈도해석은 주어진 지점의 자료만을 이용하는 것이다. 지점빈도해석의 기본적인 절차는 Fig. 1과 같으며, 우리나라에서는 이를 FARD 프로그램으로 개발하여 그동안 실무에서 널리 사용하였다.

본 연구에서 사용한 Generalized Extreme Value(GEV) 분포형은 국내 수문빈도해석 분야에서 주로 활용되고 있으며, 최근 발간한 「홍수량 산정 표준지침」(환경부, 2019)에서는 우리나라 강우량 자료에 대한 지역빈도해석 시 최적분포형으로 선정된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 실무에 적용되

는 GEV 분포형을 이용하여 지점빈도해석과 지역빈도해석을 수행하였으며, GEV 분포형의 확률밀도함수와 누가분포함수는 Eqn. (5)와 (6)에 각각 제시하였다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right]^{(1/\beta)-1} \exp \left[- \left(1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right)^{1/\beta} \right] \quad (5)$$

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 - \frac{\beta(x-x_0)}{\alpha} \right)^{1/\beta} \right] \quad (6)$$

여기서 x_0 는 위치매개변수(location parameter), α 는 규모매개변수(scale parameter), β 는 형상매개변수(shape parameter)를 의미한다.

3.2 지역빈도해석

지역빈도해석은 주어진 지점과 수문학적 동일 조건을 만족하는 주변 지점의 자료를 포함하여 빈도해석을 수행한다. 그러나 일반적으로 우리나라의 수문자료는 재현기간 100년 또는 200년 확률수문량을 산정하기에 부족한 경우가 대부분이다(허준행, 2016). 지역빈도해석은 지점빈도해석보다 정확하고 신뢰할 만한 결과를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 이영석 등(2007)은 Monte Carlo simulation를 통해 자료 기간이 비교적 짧은 우리나라 강우 관측 지점에서 지역빈도해석을 이용한 방법이 보다 정확한 확률강우량 산정에 유리하다고 판단한 바 있다.

지역빈도해석의 가장 대표적인 기법인 홍수지수법(index flood method)은 각 지점의 연최대 홍수자료를 평균으로 나눠 표준화된 자료를 이용하는 방법으로 Dalrymple(1960)에

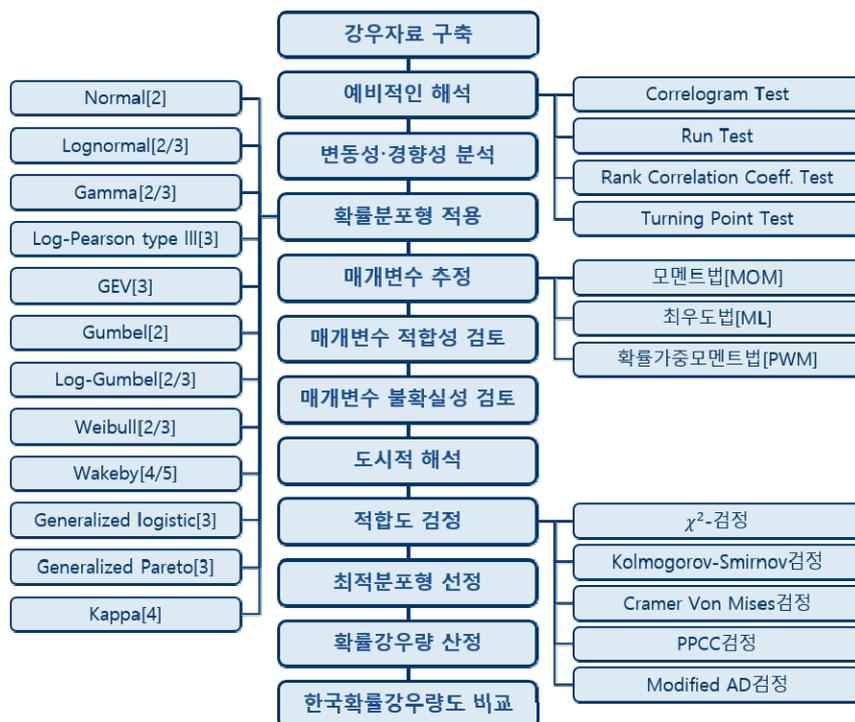


Fig. 1. At-site frequency analysis procedure(허준행, 2016)

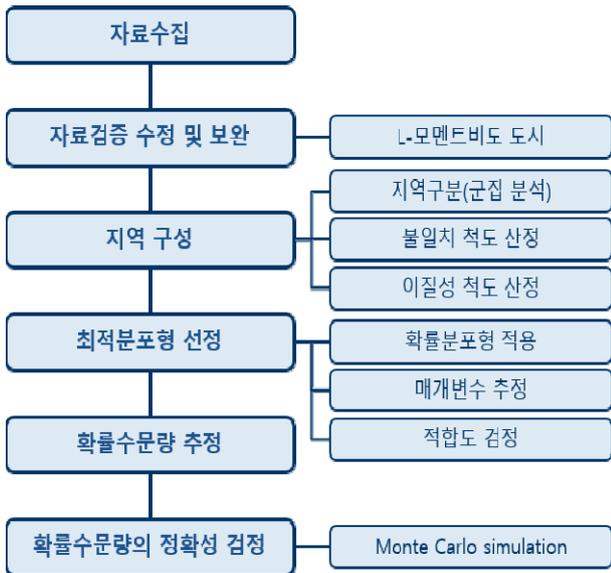


Fig. 2. Regional frequency analysis procedure(허준행, 2016)

의해 제안된 이후 다양한 연구가 진행되어 왔다. 본 연구에서는 지역빈도해석을 위하여 사용되는 여러 확률분포형 모형 중 「홍수량 산정 표준지침」(환경부, 2019)에 제시되어있는 GEV 분포형을 사용하였고, *L-moment*법(Hosking,1990)을 이용하여 매개변수를 추정하였으며 지역빈도해석 과정은 Fig. 2와 같다.

3.3 Monte Carlo simulation

지역빈도해석에 의해 추정된 확률강우량의 정확도는 이론적으로 평가하는 방법과 모의실험을 통하여 평가하는 방법으로 구분된다. 이론적인 접근 방법은 실제 관측 자료의 크기가 작은 경우의 특수성, 수치해석 해의 비수렴등의 한계로 인하여 평가가 제한되기 때문에 Monte Carlo simulation을 이용한 방법이 주로 사용되었다. 모의실험을 통한 확률강우량의 정확도는 ①지역성장곡선의 상대오차, ②확률수문량의 상대오차, ③지점 확률수문량의 상대편의, ④지점 확률수문량의 상대계급근 오차, ⑤확률수문량의 지역평균 상대편의, ⑥확률수문량의 지역평균 절대상대편의, ⑦확률수문량의 지역평균 상대계급근오차 등의 척도를 이용하여 산정할 수 있다(Hosking and Wallis, 1997).

「한국형 수문량 분석 선진화 기술 개발 연구단」에서는 Fig. 3과 같은 절차로 전국 강우관측소 지점(615개)에 대하여 지역구분 개수별(15~50개) 모의실험을 수행하였다(환경부, 2019). 최적 지역구분 개수의 선정 기준은 각 지점별 원자료의 지점빈도해석 확률강우량과 이를 통해 모의된 지역빈도해석 확률강우량의 RRMSE(relative root mean squared error)가 최소가 되는 조건을 기준으로 하였고, RRMSE를 구하는 식은 Eqn. (7)과 같다. 연구결과, 우리나라 강우량 자료의 경우 지역구분을 26개로 구분하는 것이 RRMSE가 가장 작은 것으로 나타났으며, 본 연구에서도 같은 방법으로 Monte Carlo simulation을 수행하였다.

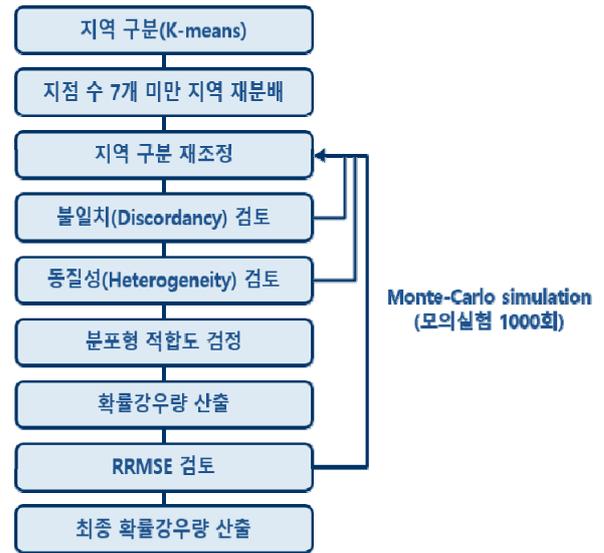


Fig. 3. Procedure for performance assessment of frequency analysis using Monte Carlo simulation(환경부, 2019)

$$R_i(F) = \left[M^{-1} \sum_{m=1}^M \left\{ \frac{\hat{Q}_i^{[m]}(F) - Q_i(F)}{Q_i(F)} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (7)$$

여기서 $Q_i(F)$ 는 해당지점 i 에서 관측값을 이용한 확률강우량 값이며, $\hat{Q}_i^{[m]}(F)$ 은 simulation 으로 발생한 자료를 이용한 확률강우량이다. 또한, M 은 simulation의 총 반복 횟수로 지점별로 1000번의 반복을 통하여 자료를 발생하였다.

지역별 성능 평가를 위하여 지점별로 산정된 RRMSE 값은 구분된 지역에 따라 Eqn. (8)을 이용하여 지역 평균(regional average) RRMSE 값으로 산정할 수 있다.

$$R^R(F) = N^{-1} \sum_{i=1}^N R_i(F) \quad (8)$$

여기서 N 은 지역내 지점수 이고, $R^R(F)$ 는 지역내에 속한 지점 RRMSE 값을 평균한 값이다.

4. 적용 결과

본 연구는 기후변화 시나리오 기반의 확률강우량 산정을 위하여 우리나라 615개 지점을 대상으로 지점빈도해석과 지역빈도해석을 수행하였다. 각 방법의 성능 평가를 위해 Monte Carlo simulation을 이용하여 RRMSE 값을 산정하고 비교·분석하였다. 기후변화 시나리오 자료는 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 기후모델의 reference(historical) period에 해당하는 1979년부터 2005년까지의 강우 자료를 이용하였고, 자료의 편의보정을 위한 관측값은 1961년부터 2017년까지의 강우 자료를 이용하였다.

「홍수량 산정 표준지침」(환경부, 2019)에서는 전국 615개의 강우관측소 지점을 대상으로 지역구분 개수에 대한 모의실험을 수행하였고, RRMSE가 가장 작게 나타난 26개의 지역 구분을

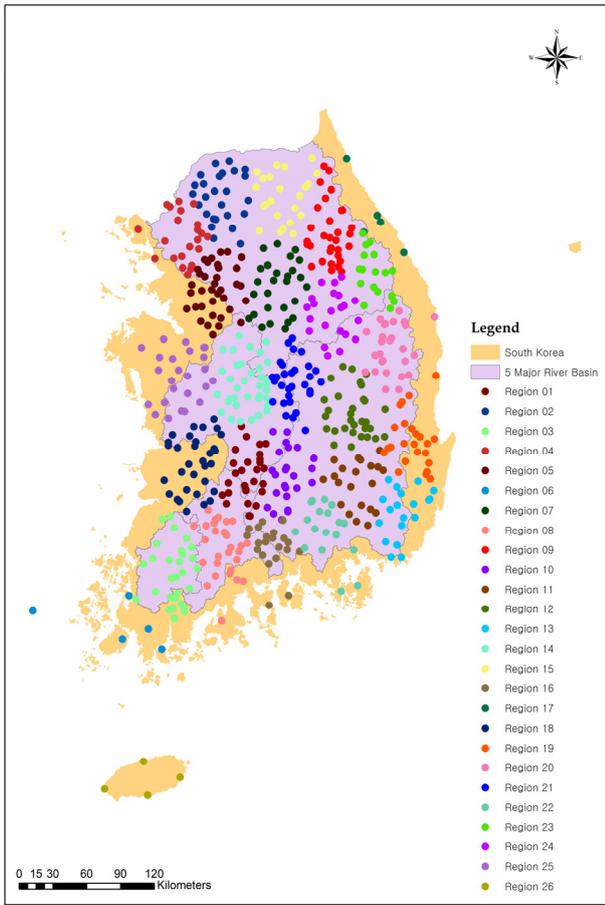


Fig. 4. Homogeneous regions for regional frequency analysis(환경부, 2019)

이용한 지역빈도해석 절차를 제시하고 있다. 본 연구에서도 기존에 수행된 연구를 참고하여 26개의 지역을 사용하였으며, 수문학적 동질지역 구분 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

지점빈도해석과 지역빈도해석의 결과를 비교하기 위하여 Monte Carlo simulation을 수행하였다. GEV 분포형을 모집단 분포형으로 가정하고 산정된 매개변수를 이용하여 Monte Carlo simulation을 1000회 반복하여 자료를 발생하였고, 각 빈도해석 방법을 적용하여 RRMSE 값을 산정 후 이를 비교·분석하였다.

Table 2는 615개 지점에 대하여 RRMSE 값을 비교한 결과이며 지점빈도해석과 지역빈도해석을 채택한 지점 개수와 비율을 나타낸다. 관측값(OBS)을 이용한 모의실험 결과에서는 10년 빈도 일 때 지역빈도해석이 450개(73.17%) 지점에서 RRMSE 값이 지점빈도해석 보다 작은 것으로 나타났다. 또한, 재현기간이 커짐에 따라 지역빈도해석의 모의 성능이 증가하였고, 500년 빈도의 RRMSE 값은 지역빈도해석의 결과가 488개(79.35%) 지점에서 작게 나타났다. 기후변화 시나리오 자료(S0)를 이용한 모의실험에서는 관측값과 유사한 경향을 나타냈다. 지역빈도해석의 결과는 10년 빈도에서 431개의 (70.08%) 지점에서 RRMSE 값이 상대적으로 작게 나타났으며, 500년 빈도에서는 477개의(77.56%) 지점에서 성능이 우수한 것으로 나타났다. 관측값의 경우 각 지점의 자료 개수가 지점별로 다르지만, 기후변화 시나리오 자료의 경우 자료기간은 1979년부터 2005년까지로 615개 모든 지점은 27년의 자료가 있으므로 기후변화 시나리오 자료를 통한 모의실험 결과는 상당한 의미가 있다고 할 수 있다. 즉, 확률강우량 산정을 위한 빈도해석 방법 적용시 지역빈도해석의 결과가 지점빈도해석의 결과보다 적합할 것으로 판단된다.

Fig. 5(a)~5(d)는 615개 관측지점을 자료기간에 따라 구분하여 RRMSE 결과를 도시한 결과이다. 빈도해석 방법에 관계없이 관측지점의 자료기간이 증가함에 따라 RRMSE 값은 대체로 작게 나타났다. 또한, 5년 빈도 이하에서는 지점빈도해석의 RRMSE 값이 작게 나타났으며, 10년 빈도 이상에서는 지역빈도해석의 RRMSE 값이 작게 나타났다.

Table 3은 관측값을 이용한 지점빈도해석과 지역빈도해석 모의실험의 RRMSE 값을 나타내고 있으며, 26개의 지역과 전체 지점(615개)의 평균 RRMSE 값을 8개 재현기간(10, 30, 50, 80, 100, 200, 300, 500년 빈도)별로 나타내었다. 17번, 19번 지역의 평균 RRMSE 값은 지점빈도해석 결과가 작게 나타났으며, 10번, 15번, 25번 지역에서도 10년, 30년 빈도의 지점빈도해석 결과가 작은 것으로 나타났다. 이를 제외한 나머지 지역의 평균 RRMSE 값은 지역빈도해석 결과가 작은 것으로 나타났으며, 전체 지점의 평균 RRMSE 값(Avg.)은 모든 빈도에 대해 지역빈도해석 결과가 작게 나타났다.

Table 4는 기후변화 시나리오 자료를 이용한 RRMSE 값으

Table 2. Results of RRMSE for the observed and S0 annual maximum rainfall

Return Period (T)		10	30	50	80	100	200	300	500
OBS (1961~2017)	AS	165	142	142	139	138	135	128	127
	AS(%)	26.83	23.09	23.09	22.6	22.44	21.95	20.81	20.65
	RFA	450	473	473	476	477	480	487	488
	RFA(%)	73.17	76.91	76.91	77.4	77.56	78.05	79.19	79.35
S0 (1979~2005)	AS	184	152	151	148	146	138	135	138
	AS(%)	29.92	24.72	24.55	24.07	23.74	22.44	21.95	22.44
	RFA	431	463	464	467	469	477	480	477
	RFA(%)	70.08	75.28	75.45	75.93	76.26	77.56	78.05	77.56

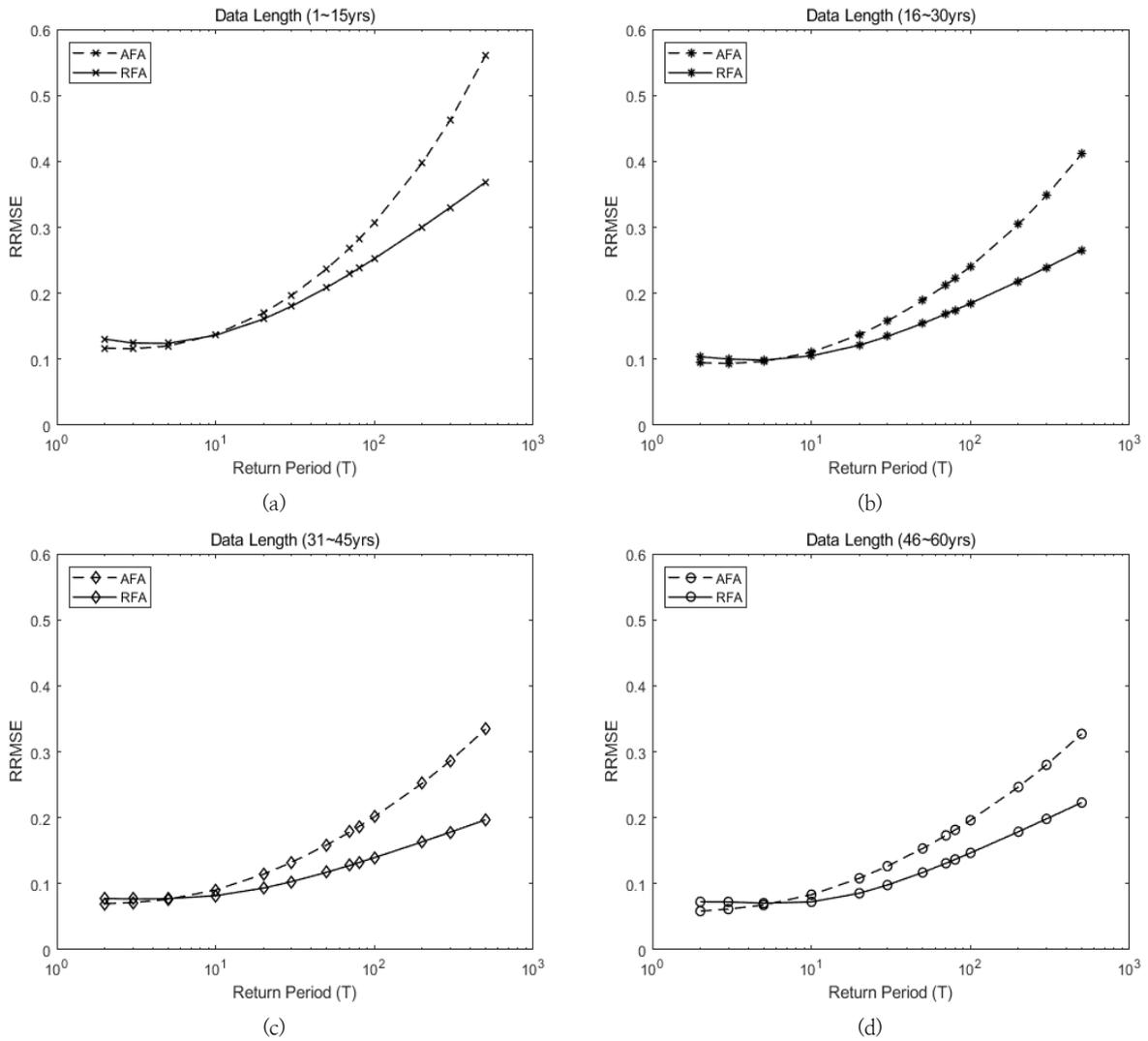


Fig. 5. RRMSE of the observed annual maximum rainfall based on the sample size and return period

로, 10년, 19년, 21년, 25년 지역의 100년 빈도 이하 평균 RRMSE 값은 지점빈도해석 결과가 작게 나타났다. 또한, 1년, 2년, 10년, 19년, 21년, 25년 지역에서도 10년, 30년 빈도의 지점빈도해석 결과가 작은 것으로 나타났다. Table 4에서 음영으로 표시된 부분을 제외한 나머지 지역의 평균 RRMSE 값은 지역빈도해석의 결과가 작은 것으로 나타났으며, 전체 지점의 평균 RRMSE 값(Avg.)은 관측값과 동일하게 모든 빈도에 대해 지역빈도해석의 결과가 작게 나타났다.

Fig. 6.은 관측값과 기후변화 시나리오 자료를 이용하여 전체 지점에 대한 평균 RRMSE 값을 재현기간별로 나타내었다. 관측값을 이용한 결과는 ‘○’으로 기후변화 시나리오 자료(S0)를 이용한 결과는 ‘□’으로 표기하였고, 지점빈도해석의 결과는 점선, 지역빈도해석은 실선으로 나타내었다. 그림에서 10년 빈도 이상일 경우 대체로 지역빈도해석의 RRMSE 값이 지점빈도해석보다 작게 나타났으며, 빈도가 증가할수록 RRMSE 값의 차이도 증가하는 것으로 나타나 지역빈도해석을 이용하는 것이 보다 적합할 것으로 판단된다.

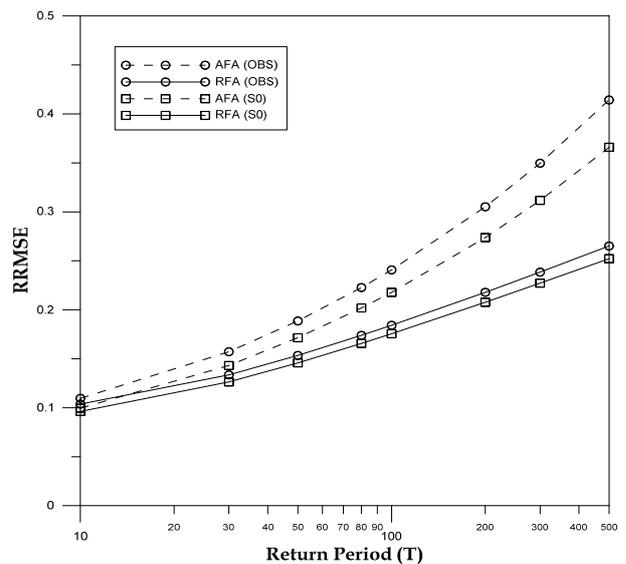


Fig. 6 RRMSEs of the observed and scenario rainfall for the at-site and regional frequency analyses

Table 3. RRMSE of the observed rainfall in 26 regions for the return periods

OBS R	AFA								RFA							
	10	30	50	80	100	200	300	500	10	30	50	80	100	200	300	500
1	0.093	0.130	0.154	0.181	0.195	0.244	0.278	0.327	0.093	0.127	0.147	0.166	0.175	0.204	0.220	0.241
2	0.113	0.157	0.186	0.219	0.236	0.296	0.338	0.398	0.112	0.152	0.176	0.199	0.211	0.247	0.269	0.296
3	0.131	0.196	0.240	0.288	0.314	0.409	0.476	0.578	0.121	0.165	0.193	0.221	0.235	0.283	0.313	0.352
4	0.132	0.187	0.223	0.262	0.283	0.358	0.409	0.485	0.112	0.125	0.136	0.148	0.155	0.178	0.192	0.212
5	0.127	0.186	0.225	0.267	0.289	0.369	0.425	0.507	0.112	0.136	0.152	0.170	0.180	0.211	0.231	0.257
6	0.108	0.170	0.210	0.253	0.276	0.358	0.415	0.498	0.094	0.138	0.165	0.194	0.208	0.258	0.289	0.333
7	0.109	0.157	0.188	0.221	0.238	0.301	0.343	0.405	0.097	0.114	0.130	0.147	0.156	0.185	0.203	0.227
8	0.117	0.166	0.199	0.235	0.255	0.326	0.376	0.449	0.103	0.128	0.145	0.162	0.171	0.199	0.216	0.238
9	0.108	0.152	0.180	0.211	0.227	0.283	0.321	0.375	0.101	0.123	0.135	0.148	0.155	0.176	0.189	0.206
10	0.099	0.139	0.166	0.194	0.209	0.262	0.297	0.348	0.110	0.149	0.173	0.197	0.208	0.246	0.268	0.297
11	0.107	0.155	0.186	0.218	0.235	0.295	0.335	0.392	0.095	0.115	0.130	0.146	0.154	0.181	0.196	0.217
12	0.092	0.132	0.158	0.186	0.200	0.252	0.287	0.336	0.085	0.108	0.122	0.136	0.143	0.166	0.181	0.199
13	0.132	0.193	0.234	0.278	0.302	0.388	0.448	0.537	0.120	0.153	0.175	0.199	0.211	0.253	0.279	0.313
14	0.104	0.145	0.173	0.203	0.219	0.276	0.314	0.370	0.099	0.123	0.138	0.155	0.163	0.190	0.207	0.228
15	0.093	0.129	0.154	0.179	0.193	0.240	0.271	0.315	0.094	0.130	0.152	0.173	0.183	0.216	0.236	0.262
16	0.109	0.155	0.186	0.220	0.237	0.302	0.347	0.413	0.105	0.134	0.156	0.179	0.191	0.228	0.251	0.280
17	0.106	0.155	0.188	0.222	0.241	0.306	0.350	0.415	0.111	0.176	0.219	0.263	0.286	0.362	0.410	0.477
18	0.128	0.190	0.231	0.276	0.300	0.388	0.451	0.544	0.119	0.153	0.179	0.207	0.221	0.267	0.296	0.333
19	0.108	0.152	0.182	0.214	0.231	0.291	0.333	0.392	0.126	0.179	0.212	0.245	0.261	0.312	0.342	0.380
20	0.112	0.162	0.195	0.230	0.249	0.317	0.364	0.433	0.110	0.145	0.167	0.191	0.202	0.240	0.263	0.294
21	0.093	0.133	0.159	0.188	0.203	0.256	0.292	0.344	0.087	0.118	0.137	0.157	0.166	0.197	0.215	0.239
22	0.098	0.139	0.166	0.195	0.210	0.263	0.298	0.349	0.092	0.111	0.128	0.146	0.155	0.186	0.205	0.231
23	0.113	0.166	0.200	0.237	0.256	0.325	0.372	0.441	0.097	0.112	0.128	0.146	0.155	0.189	0.210	0.237
24	0.098	0.141	0.168	0.198	0.213	0.267	0.304	0.356	0.086	0.107	0.121	0.136	0.144	0.169	0.185	0.206
25	0.107	0.153	0.184	0.218	0.236	0.300	0.345	0.411	0.112	0.155	0.182	0.209	0.222	0.263	0.288	0.320
26	0.086	0.122	0.144	0.168	0.180	0.222	0.249	0.286	0.082	0.103	0.116	0.130	0.138	0.162	0.178	0.199
Avg.	0.110	0.157	0.189	0.223	0.241	0.305	0.350	0.414	0.104	0.134	0.153	0.174	0.184	0.218	0.238	0.265

Table 4. RRMSE of the scenario rainfall(S0) in 26 regions for the return periods

S0 R	AFA								RFA							
	10	30	50	80	100	200	300	500	10	30	50	80	100	200	300	500
1	0.081	0.112	0.133	0.155	0.166	0.206	0.232	0.269	0.083	0.116	0.135	0.153	0.162	0.189	0.204	0.224
2	0.097	0.135	0.160	0.187	0.201	0.250	0.283	0.330	0.100	0.142	0.165	0.188	0.198	0.232	0.252	0.278
3	0.106	0.161	0.197	0.236	0.256	0.329	0.380	0.453	0.104	0.151	0.181	0.210	0.225	0.272	0.300	0.337
4	0.115	0.164	0.196	0.231	0.249	0.312	0.355	0.416	0.098	0.108	0.118	0.129	0.134	0.154	0.167	0.184
5	0.121	0.180	0.218	0.258	0.280	0.357	0.410	0.488	0.107	0.131	0.147	0.164	0.173	0.204	0.223	0.248
6	0.117	0.181	0.224	0.270	0.295	0.384	0.448	0.542	0.102	0.147	0.175	0.204	0.219	0.267	0.297	0.338
7	0.105	0.152	0.183	0.215	0.232	0.293	0.334	0.393	0.093	0.110	0.126	0.143	0.151	0.179	0.197	0.220
8	0.092	0.131	0.157	0.184	0.198	0.248	0.281	0.329	0.086	0.115	0.133	0.152	0.161	0.191	0.208	0.231
9	0.100	0.141	0.167	0.195	0.209	0.259	0.293	0.340	0.097	0.121	0.135	0.149	0.156	0.179	0.193	0.211
10	0.090	0.127	0.151	0.177	0.191	0.238	0.270	0.316	0.106	0.147	0.172	0.197	0.208	0.245	0.267	0.293
11	0.105	0.151	0.181	0.212	0.229	0.286	0.325	0.380	0.089	0.106	0.117	0.129	0.135	0.155	0.168	0.184
12	0.087	0.123	0.147	0.173	0.186	0.232	0.263	0.306	0.084	0.111	0.127	0.144	0.152	0.178	0.194	0.214
13	0.121	0.179	0.216	0.257	0.278	0.354	0.406	0.481	0.107	0.136	0.155	0.175	0.185	0.218	0.239	0.267
14	0.090	0.126	0.149	0.174	0.187	0.233	0.263	0.306	0.089	0.114	0.131	0.148	0.157	0.186	0.203	0.225
15	0.096	0.134	0.159	0.185	0.198	0.245	0.277	0.320	0.091	0.120	0.137	0.154	0.162	0.188	0.203	0.223
16	0.094	0.132	0.157	0.183	0.196	0.242	0.273	0.316	0.100	0.127	0.148	0.170	0.180	0.214	0.235	0.260
17	0.114	0.173	0.211	0.254	0.276	0.359	0.417	0.503	0.117	0.164	0.196	0.230	0.247	0.304	0.340	0.387
18	0.108	0.161	0.194	0.231	0.251	0.320	0.368	0.438	0.104	0.136	0.159	0.184	0.196	0.238	0.263	0.296
19	0.098	0.140	0.167	0.196	0.211	0.265	0.301	0.354	0.115	0.167	0.198	0.228	0.242	0.287	0.313	0.346
20	0.100	0.145	0.174	0.206	0.222	0.280	0.320	0.377	0.102	0.138	0.162	0.185	0.197	0.235	0.259	0.290
21	0.082	0.116	0.138	0.162	0.174	0.217	0.246	0.286	0.084	0.122	0.145	0.167	0.178	0.212	0.232	0.257
22	0.097	0.136	0.161	0.188	0.203	0.252	0.285	0.331	0.089	0.105	0.118	0.133	0.140	0.166	0.182	0.203
23	0.107	0.157	0.189	0.224	0.242	0.307	0.352	0.416	0.094	0.108	0.121	0.138	0.147	0.178	0.197	0.223
24	0.101	0.145	0.174	0.204	0.220	0.276	0.314	0.367	0.088	0.109	0.123	0.138	0.146	0.171	0.187	0.207
25	0.095	0.138	0.165	0.195	0.210	0.265	0.302	0.356	0.099	0.148	0.176	0.203	0.217	0.259	0.284	0.316
26	0.104	0.148	0.176	0.206	0.222	0.277	0.313	0.365	0.097	0.117	0.129	0.142	0.149	0.173	0.188	0.208
Avg.	0.100	0.143	0.171	0.202	0.218	0.274	0.312	0.366	0.096	0.126	0.146	0.166	0.176	0.208	0.227	0.252

5. 결 론

본 연구는 기후변화 시나리오 기반의 확률강우량 산정을 위하여 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 기후모델 자료를 이용하였고, 관측자료와 편의를 보정하기 위하여 SDQDM 방법을 적용하였다. 우리나라 615개 지점을 대상으로 지점빈도 해석과 지역빈도해석을 수행하였고, 지역빈도해석을 위한 수문학적 동질지역은 26개로 구분하였다. 또한, 각 지점에서 Monte Carlo simulation를 통하여 8개 재현기간별 RRMSE 값을 산정 후 이를 비교·분석하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

관측값을 이용한 simulation 결과 지역빈도해석의 RRMSE 결과가 지점빈도해석의 결과보다 작게 나타났으며, 재현기간별로 73~80%의 지점에서 지역빈도해석 결과가 보다 정확한 확률강우량을 산정하는 것으로 나타났다. 또한, 관측지점의 자료기간이 길수록 RRMSE 값은 작게 나타났으며, 자료기간이 지점빈도해석 수행에 충분한 경우(46~60년)에도 지역빈도해석 결과가 우수한 것으로 나타났다.

기후변화 시나리오를 이용한 simulation 결과도 관측값과 유사한 경향을 보였으며, 70~78%의 지점에서 지역빈도해석 RRMSE 값이 작게 나타났다. 이는 기후변화 시나리오 자료를 이용한 경우에도 지역빈도해석 방법이 보다 정확한 확률강우량을 산정할 수 있음을 의미한다. 따라서, 확률강우량 산정을 위한 지역빈도해석은 향후 기후변화 시나리오 자료 분석시 기존의 지점빈도해석 보다 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 기후변화 시나리오를 이용한 확률강우량을 산정에 있어서 다양한 빈도해석방법과 편의보정 방법을 적용하여 평가하는 과정이 필요할 것으로 생각되며, 시나리오 자료 기반의 지역구분 방법과 이를 평가하여 적용하는 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (과제번호 83081)

References

- Ahn, SR, Lee, YJ, Park, GA, Kim, SJ(2008). Analysis of future land use and climate change impact on stream discharge, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 28(2B), pp. 215-224. [Korean Literature]
- Bae, DH, Lee, BJ, Jung, IW(2008). Analysis of construction conditions change due to climate change, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 28(4D), pp. 513-521. [Korean Literature]
- Cannon, AJ, Sobie, SR, Murdock, TQ(2005). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes?, *J. Climate*, 28, pp. 6938-6959. [DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>]
- Cho, HG, Kim, GS(2018). Nonstationary probability rainfall estimation at Seoul using neural networks and GCM data, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(2), pp. 63-73. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.2.63>]
- Dalrymple, T(1960). *Flood Frequency Analysis*, U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap., 1543-A.
- Eum, HI, Cannon, AJ(2017). Intercomparison of projected changes in climate extremes for South Korea: application of trend preserving statistical downscaling methods to the CMIP5 ensemble, *Int. J. Climatol.*, 37, pp. 3381-3397. [DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4924>]
- Heo, JH(2016). *Statistical Hydrology*, Goomibook, pp 1-196. [ISBN: 978-89-8225-152-8(93530)]
- Hosking, JRM, Wallis, JR(1997). *Regional Frequency Analysis (An Approach Based on L-Moments)*, Cambridge University Press, pp 1-224.
- Hwang, JY, Ahn, JH, Jeong, CS, Heo, JH(2018). A study on the variation of design flood due to climate change in the ungauged urban catchment, *J. of Korea Water Resources Association*, 51(5), pp. 395-404. [Korean Literature] [DOI : <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2018.51.5.395>]
- Hwang, SW, Her, YG, Chang, SW(2013). Uncertainty in regional climate change impact assessment using bias-correction technique for future climate scenarios, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(4), pp. 95-106. [Korean Literature] [DOI : <http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2013.55.4.095>]
- Im, JH, Lee, DH, Park, MS, Park, JH, Park, SH(2017). Analysis of the change in design flood due to climate variation, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(6), pp. 81-85. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.6.81>]
- IPCC(2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*, IPCC, Geneva, Switzerland, pp 1-151.
- Jang, DW, Kim, BS, Kim, JH(2012). The quantification of disaster impact of extreme rainfall under climate change in Korea, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 12(4): 169-178. [Korean Literature]
- Kang, NR, Kim, SJ, Lee, KH, Kim, DG, Kwak, JW, Noh, HS, Kim, HS(2011). Impact of climate change on an urban drainage system, *J. of Wetlands Research*, 13(3), pp. 623-631. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2011.13.3.623>]
- Kim, BK, Kim, BS(2009). Analysis of Impact Climate Change on Extreme Rainfall Using B2 Climate Change Scenario and Extreme Indices, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 29(1B), pp. 23-33. [Korean Literature]

- Kim, BS, Ha, SR(2013). The impact assessment of climate change on design flood in mihochen basin based on the representative concentration pathway climate change scenario, *J. of Wetlands Research*, 15(1), pp. 105–114. [Korean Literature]
[DOI: <https://doi.org/10.17663/JWR.2013.15.1.105>]
- Kim, HS, Hwang, JY, Ahn, JH, Jeong, CS(2018). Analysis of rate of discharge change on urban catchment considering climate change, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 38(5), pp. 645–654. [Korean Literature]
[DOI: <http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2018.38.5.0645>]
- Kim, HS, Maeng, SJ, Lee, SW, Choi, HS(2016). Analysis of probability rainfall using climate change scenarios, *Crisisonomy*, 12(2), pp. 89–97. [Korean Literature]
[DOI: <http://dx.doi.org/10.14251/crisisonomy.2016.12.2.89>]
- Kim, KM, Lee, JH, Keum, JH, Park, MJ, Kim, SD(2018a). Uncertainty of future Intensity–Duration–Frequency curves using multi–regional climate models, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(6), pp. 405–416. [Korean Literature][DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.6.405>]
- Kim, KM, Choi, JH, Lee, JH, Kim, SD(2018b). Effect of RCM temporal resolution on estimating future IDF curves, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(4), pp. 341–352. [Korean Literature][DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2018.18.4.341>]
- Kim, SH, Shin, JY, Ahn, HJ, Heo, JH(2019). Selecting climate models to determine future extreme rainfall quantiles, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 19(1), pp. 55–69. [Korean Literature] [DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.55>]
- Kim, YH, Yeo, CG, Seo, GS, Song, JW(2011). Estimation of regional probable rainfall based on climate change scenarios, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 11(3), pp. 29–35. [Korean Literature]
- Korea Meteorological Administration(2018). *Climate Change Outlook Report for Korean Peninsula*, Korea Meteorological Administration, 11–1360000–001555–01, pp. 1–173.
- Kwon, HH, Kim, BS, Kim, BK(2008). Analysis of precipitation characteristics of regional climate model for climate change impacts on water resources, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 28(5B), pp. 525–533. [Korean Literature]
- Lee, YS, Heo, JH, Nam, WS, Kim, KD(2007). Application of regional rainfall frequency analysis in South Korea(II) : Monte Carlo simulation and determination of appropriate method, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 27(2B), pp. 113–123. [Korean Literature]
- Ministry of Environment(2019). *Standard Guideline for Design Flood*, Ministry of Environment, 11–148000–001604–14, pp IV 1–39.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2012). *Design Flood Calculation Tips*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, pp. 1–34.
- Nam, WS, Ahn, HJ, Kim, SH, Heo, JH(2015). The impact of climate change on sub–daily extreme rainfall of Han river basin, *J. of Korean Society of Disaster and Security*, 8(1), pp. 21–27. [Korean Literature]
[DOI: <http://dx.doi.org/10.21729/ksds.2015.8.1.021>]
- Park, JH, Kang, MJ, Song, IH, Hwang, SH, Song, JH(2013). Development of IDF curves based on RCP4.5 scenario for 30–reservoirs in South Korea, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(6), pp. 145–159. [Korean Literature][DOI: <http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.6.145>]
- Reichler, T, Kim, J(2008). How well do coupled models simulate today's climate?, *Bulletin of the American Meteorological Society(BAMS)*, 89(3), pp. 303–311.
[DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-3-303>]
- Song, CW, Kim, YS, Kang, NR, Lee, DR, Kim, HS(2013). Regional frequency analysis for rainfall under climate change. *J. of Wetlands Research*, 15(1), pp. 125–137. [Korean Literature][DOI: <http://dx.doi.org/10.17663/JWR.2013.15.1.125>]
- Yeom, WS, Park, DH, Kwon, MS, Ahn, JH(2019). Prospects of future extreme precipitation in South–North Korea shared river basin according to RCP climate change scenarios, *J. of Korea Water Resources Association*, 52(9), pp. 647–655. [Korean Literature][DOI: <http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2019.52.9.647>]
- Yoo, CS, Lee, DR(2000). A study on the variation of wet days and rainfall intensity due to climate change, *J. of The Korean Society of Civil Engineers*, 20(4–B), pp. 535–544. [Korean Literature]