

기후변화가 한강 유역의 시단위 확률강우량에 미치는 영향

남우성* · 안현준** · 김성훈*** · 허준행****

The Impact of Climate Change on Sub-daily Extreme Rainfall of Han River Basin

Woosung Nam*, Hyunjun Ahn**, Sunghun Kim***, and Jun-Haeng Heo****

접수일자: 2015년 5월 29일/심사완료일: 2015년 6월 18일/게재일자: 2015년 6월 30일

요약 전세계적으로 기상이변이 빈번하게 발생하면서 기후변화가 수문환경에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기후변화 연구에는 대체로 이산화탄소 배출 시나리오에 근거한 GCM 모의 결과가 사용되며, GCM 자료를 바탕으로 미래의 수문량 변화를 예측하는 방법으로 진행된다. 기후변화가 강우에 미치는 영향과 관련해서는 기후변화가 총강우량에 미치는 영향에 대한 연구가 주를 이루었으나 극한강우량에 미치는 영향에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 또한 상세화 된 강우 자료가 월단위 또는 일 단위이기 때문에 극한홍수량 산정에 필요한 시단위 극한강우량 추정에는 한계가 있다. 본 연구에서는 기후변화가 극한강우량에 미치는 영향을 분석하기 위해 A2 시나리오에 근거한 ECHO-G GCM 모델의 모의 결과를 상세화 시켜 얻은 한강 유역 내의 9개 강우 관측 지점의 일강우 자료를 바탕으로 강우의 scale invariance 특성에 근거한 시단위 확률강우량을 추정하였고, NSRPM (Neymann-Scott Rectangular Pulse Model)을 적용하여 시단위 확률강우량을 추정하였다. 이러한 방법으로 추정된 9개 지점의 확률강우량과 한강유역종합치수계획(국토해양부, 2008)에서 산정한 확률강우량을 비교하여 미래의 확률강우량 변화를 분석하였다. 분석된 한강 유역 내 강우 관측 지점의 확률강우량 변화 추이는 지점에 따라, 미래기간에 따라 상이하게 나타났으나 대체로 scaling에 의한 결과가 관측값에 근거한 확률강우량보다 대체로 큰 값을 보였고, NSRPM에 의한 결과는 미래 기간에 따라 관측값보다 크거나 작은 값을 보였다.

핵심용어 기후변화, 확률강우량, scale invariance, NSRPM

ABSTRACT Recent researches show that climate change has impact on the rainfall process at different temporal and spatial scales. The present paper is focused on climate change impact on sub-daily rainfall quantile of Han River basin in South Korea. Climate change simulation outputs from ECHO-G GCM under the A2 scenario were used to estimate daily extreme rainfall. Sub-daily extreme rainfall was estimated using the scale invariance concept. In order to assess sub-daily extreme rainfall from climate change simulation outputs, precipitation time series were generated based on NSRPM (Neyman-Scott Rectangular Pulse Model) and modified using the ratio of rainfall over projection periods to historical one. Sub-daily extreme rainfall was then estimated from those series. It was found that sub-daily extreme rainfall in the future displayed increasing or decreasing trends for estimation methods and different periods.

KEYWORDS Climate change, Sub-daily extreme rainfall, Scale invariance, NSRPM

*연세대학교 토목환경공학과 박사과정

**연세대학교 토목환경공학과 석박사통합과정

***연세대학교 토목환경공학과 석박사통합과정

****연세대학교 사회환경시스템공학부 토목환경공학과 교수(교신저자)(E-mail: jhheo@yonsei.ac.kr)

1. 서 론

전세계적으로 기상이변이 빈번하게 발생하면서 기후변화가 수문 환경에 미치는 영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기후변화 연구에는 대체로 이산화탄소 배출 시나리오에 근거한 GCM (General Climate (or Circulation) Model) 모의 결과가 사용되며, GCM 자료를 바탕으로 미래의 수문량 변화를 예측하는 방법으로 진행된다. Ekström et al.(2005)은 A2 시나리오를 바탕으로 기후변화가 영국의 확률강우량에 미치는 영향을 검토했고, Frei et al.(2006)은 A2 시나리오와 6개의 RCM(Regional Climate Model)자료를 분석하여 북유럽 지역에서 미래의 20년 재현기간에 해당하는 값이 현재 기후의 40~100년 재현기간에 해당한다고 제시한 바 있다. Thodsen(2007)은 HIRHAM RCM 결과를 이용하여 기후변화가 덴마크의 확률강우량에 미치는 영향을 평가했고, 김병식 등(2008) B2 시나리오와 YONU CGCM을 이용하여 미래 확률강우량을 추정했고, Kyselý and Beranová(2009)는 극한 일강우 사상에 대한 기후변화의 효과를 추정하기 위해 RCM에 POT (Peak Over Threshold) 기법을 적용하였다. 나양선(2010)은 A2 시나리오에 따른 미래 확률강우량 산정 결과 국내 남한강 유역의 확률강우량이 과거 대비 13~15% 증가한다고 분석한 바 있다.

GCM 자료는 대개 월단위 기후 시나리오를 생산하므로, 상세화(downscaling)를 통해 일단위 기후 시나리오를 추출하여 분석에 활용한다. 이러한 이유로 기후변화가 총강우량에 미치는 영향에 대한 연구와 더불어 기후변화가 일단위 확률강우량에 미치는 영향에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 하지만 수공구조물 설계에는 대개 시간위 확률강우량이 사용되므로, 기후변화가 시간위 확률강우량에 미치는 영향 평가가 필요하다고 할 수 있다.

시간위 자료가 없을 경우 활용할 수 있는 방법으로는 강우의 scale invariance 특성을 이용하여 임의의 지속기간의 확률강우량으로부터 미지의 지속기간의 확률강우량을 추정하는 방법과 강우의 통계적 특성을 기반으로 시간위 강우 자료를 발생시키는 기법들을 활용하는 방법이 있다.

강우에 대한 기하학적 통계분석을 위해 제안된 스케일 성질(Lovejoy, 1982; Lovejoy and Mandelbrot, 1985; Lovejoy and Schertzer, 1985)은 시·공간적 특성을 고려한 강우량의 추정을 비롯한 다양한 분야에 적용되고 있다. Waymire(1985)는 넓은 지역에 대한 강우 빈도의 스케일 한계를 설명하기 위해 lognormal 분포를 따르는 강우자료에 대해 단일 스케일 (simple scaling) 특성을 적용하였다. 기존에 제시된 단일 스케일 성질만으로 설명할 수 없는 강우 특성을 통계학적으로

설명하기 위해 다중 스케일(multiscaling) 특성을 이용하는 연구도 진행되었다(Gupta and Waymire, 1990; Schertzer and Lovejoy, 1987). Olsson and Burlando(2002)는 단일 스케일과 다중 스케일의 적용을 구분할 수 있도록 95% 신뢰구간의 적용을 제안한 바 있으며, Burlando and Ross(1996)은 단일 및 다중 스케일 성질과 빈도계수법을 이용하여 이탈리아 지역의 확률강우량을 추정하기도 하였다. Nguyen(2000)은 서로 다른 지속기간의 강우량 자료에 단일 스케일을 적용하여 최대 강우량 자료의 특성을 분석하였고, Nguyen et al.(2002)은 GEV(general extreme value) 분포를 따르는 강우 자료에 스케일 성질과 지역빈도해석 기법을 적용하여 확률 강우량을 추정한 바 있다. Bougadis and Adamowski(2006)는 Nguyen(2000)의 방법을 GEV 분포와 Gumbel 분포에 적용하여 IDF (Intensity-Duration-Frequency) 곡선을 유도하였고, Baldassarre et al.(2006)은 1시간 이상 지속기간의 강우 자료에 스케일 성질을 적용하여 1시간 이하 지속기간의 확률강우량 산정을 통해 IDF 곡선을 유도한 바 있다. 정영훈 등(2008)은 다양한 지속기간에 대한 확률강우량을 scale invariance 특성을 이용하여 추정하는 방법의 정확도를 평가하였다. 최근에는 다양한 분야에서 이용되고 있는 원격 sensing precipitation image와 시·공간적 스케일 성질을 결합하여 강우량을 추정한 연구가 진행되고 있다(Deidda et al., 2006).

강우 자료의 통계적 특성을 바탕으로 시간위 강우량을 모의하기 위해 NSRPM(Neyman-Scott Rectangular Pulse Model)을 활용할 수 있다. 천문학 분야에서 사용하기 위해 Neyman and Scott (1958)에 의해 개발된 Neyman-Scott 과정은 기존의 수문학 분야에서 강수 생성을 위해 사용되었던 구형펄스모형(Rectangular Pulse Model)이 강수의 자기상관구조를 표현하지 못하는 단점을 극복하기 위해 Rodriguez-Iturbe 등(1987)에 의해 도입되어 NSRPM으로 발전하였다(Velghe et al., 1994; Onof et al., 2000; Burton et al., 2008). 특히 최근에는 기후변화의 영향이 고려된 비정상성 강우 시계열을 모의하기 위해 NSRPM을 활용하는 연구가 진행되고 있다(Burton et al., 2010).

본 연구에서는 기후변화가 극한강우량에 미치는 영향을 분석하기 위해 A2 시나리오에 근거한 ECHO-G 모델의 모의 결과를 상세화시켜 얻은 한강 유역 내의 9개 강우 관측 지점의 일강우 자료를 바탕으로 강우의 scale invariance 특성에 근거한 시간위 확률강우량과 NSRPM을 적용하여 산정한 시간위 확률강우량을 비교·분석하여 기후변화가 한강 유역의 시간위 확률강우량에 미치는 영향을 평가하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구에서는 기후변화가 극한강우량에 미치는 영향을 분석하기 위해 A2 시나리오에 근거한 ECHO-G 모델의 모의 결과를 상세화 시켜 얻은 한강 유역 내의 9개 강우 관측 지점의 일강우 자료를 바탕으로 강우의 scaling invariance 특성에 근거한 시간위 확률강우량을 추정하였고, Neymann-Scott Rectangular Pulse Model (NSRPM)을 적용하여 시간위 확률강우량을 추정하였다. 이러한 방법으로 추정된 9개 지점의 확률강우량과 한강유역종합치수계획(국토해양부, 2008)에서 산정한 확률강우량을 비교하여 미래의 확률강우량 변화를 분석하였다.

2.1 Scale-Invariance 개념에 의한 확률강우량 추정

지속기간 T 에 따른 확률강우량 $\xi_q(T)$ 는 식 (1)과 같은 형태로 표현할 수 있다(Gupta and Waymire, 1990).

$$h = \xi_q(T) = A_q T^{m_q} \quad (1)$$

여기서, A_q 와 m_q 는 지속기간 T 에 따른 확률강우량의 산정에 필요한 매개변수이다. 강우가 scale invariance 특성을 보인다하면 빈도 q 에 독립적인 스케일 지수(scaling exponent) m_q 는 이론적으로 감소하는 형태를 보이게 되며, 이와 같은 특징을 좁은 의미의 단일 스케일(strict sense simple scaling)이라 한다(Gupta and Waymire, 1990).

좁은 의미의 단일 스케일의 개념을 서로 다른 지속기간의 강우량에 적용하여 나타내면 식 (2)와 같다.

$$Z_{\lambda T}(t) = \lambda^n Z_T(t) \quad (2)$$

여기서, λ 는 스케일 인자(scaling factor), n 은 스케일 지수(scaling exponent)로 일정한 값을 가지며, 'λ'는 동일한 확률분포형 내에서 같다는 의미로 $Z_T(t)$ 와 $Z_T(t)$ 를 λ^n 으로 rescale 한 $Z_{\lambda T}(t)$ 는 같은 확률분포형을 가지게 된다.

식 (2)와 같은 스케일 특성은 최대강우량 뿐만 아니라 빈도 q 에 대한 확률강우량과 강우량의 모멘트에도 적용할 수 있으며 이를 식의 형태로 나타내면 다음과 같다(Gupta and Waymire, 1990).

$$H_{\lambda T} = \lambda^n H_T \quad (3)$$

$$\xi_q(\lambda T) = \lambda^n \xi_q(T) \quad (4)$$

$$E[H_{\lambda T}^l] = \lambda^{ln} E[H_T^l] \quad (5)$$

여기서, l 은 모멘트 차수를 나타낸다. 이와 같은 모멘트에 대한 스케일 관계는 좁은 의미의 단일 스케일보다 넓은

의미의 단일 스케일(wide sense simple scaling)로 정의된다(Gupta and Waymire, 1990). 실제 확률분포형에 스케일 성질을 적용하는 것은 가용자료 기간의 제약으로 인해 어려움이 따르므로 넓은 의미의 단일 스케일을 이용하여 자료의 특성을 분석할 수 있다.

2.2 NSRPM에 의한 확률강우량 추정

NSRPM은 5개의 확률분포형으로 이루어져 있다. 우선 점과정(point process)을 이용하여 강우 군집의 시작점(origin)을 선정한다. 이때 λ 라는 매개변수가 사용되며 그 식은 식 (6)과 같다.

$$p = \lambda \exp(-\lambda t) \quad (6)$$

선정된 강우 군집의 시작점에 대하여 기하함수(geometric function)를 이용하여 각 강우 군집의 강우세포(cell) 개수를 정한다. 이 때 μ_c 라는 매개변수가 사용되며 그 식은 식 (7)과 같다.

$$p = \frac{1}{\mu_c} \left(1 - \frac{1}{\mu_c}\right)^c \quad (7)$$

여기서 μ_c 는 강우 군집 내 시작점들의 강우세포 평균 개수를 나타낸다.

각 강우 군집의 시작점의 강우세포 개수가 결정되면 지수(exponential) 분포를 이용하여 각 강우세포의 위치를 정한다. 강우세포의 위치를 정하는 지수 분포는 β 를 매개변수로 하며, 그 식은 식 (8)과 같다.

$$p = \exp(-\beta x) \quad (8)$$

강우세포들의 위치가 정해지면 각 강우세포들의 지속기간을 지수 분포를 이용하여 정한다. 지속기간을 정하는 분포의 매개변수로는 η 가 사용되며, η 는 각 강우세포의 지속기간의 평균의 역수이며 강우세포의 위치를 정하는 지수분포의 식은 식 (9)와 같은 형태를 보인다.

$$p = \exp(-\eta x) \quad (9)$$

지속기간이 정해지면 지수 분포를 이용하여 각 강우 세포들의 강우강도를 정한다. 이때는 ξ 가 매개변수로 사용되며, ξ 는 각 강우세포의 강우강도의 평균의 역수와 같다. 강우 세포들의 강우강도를 정할 때 사용하는 식은 식 (10)과 같다.

$$p = \exp(-\xi x) \quad (10)$$

이렇게 정해진 강우 세포들의 강우강도들을 중첩하여 시

간에 따른 강우를 생성한다(Calenda and Napolitano, 1999).

3. 적용 및 고찰

3.1 대상지역 및 자료

본 연구에서는 한강 유역의 9개 기상청 관측 지점의 강우 자료 및 GCM 모의 자료를 바탕으로 분석을 수행하였다. 한강 유역의 관측소 위치 정보는 Fig. 1 및 Table 1과 같다. 기후변화에 의한 미래의 시단위 확률강우량을 산정하기 위해 A2 시나리오를 입력 자료로 한 ECHO-G 모델의 모의 결과를 활용하였다. ECHO-G 모델에 의한 지점별 일단위 강우 자료를 바탕으로 weather generator를 이용하여 지점별

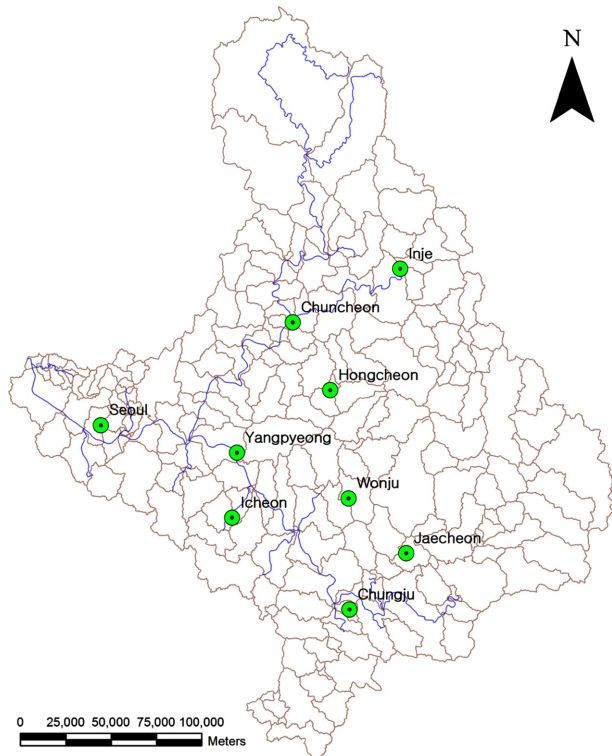


Fig. 1. Study area and the locations of recording stations

Table 1. Summary of recording stations in Han River basin

Site	Longitude	Latitude	Elevation (El. m)
Seoul	126-58-04	37-34-07	85.5
Chuncheon	127-44-16	37-53-60	76.8
Wonju	127-56-56	37-20-05	149.8
Hongcheon	127-52-57	37-40-51	140.6
Yangpyeong	127-29-48	37-29-09	49.0
Icheon	127-29-11	37-15-41	68.5
Inje	128-10-09	38-03-26	198.6
Jaecheon	128-11-47	37-09-23	264.4
Chungju	127-57-17	36-58-03	69.4

일단위 강우 자료를 생성시켰으며, 이 자료로부터 산정된 일단위 확률강우량에 scale invariance 특성을 적용하여 시단위 확률강우량을 산정하였다. 또한 동일한 지점에 대해 강우 관측 자료의 통계적 특성을 바탕으로 NSRPM에 미래 시단위 강우 자료를 발생시켰으며, ECHO-G 모델의 모의 결과로부터 계산된 과거 대비 미래 기간의 강우량 변화율을 NSRPM으로 발생시킨 자료에 반영하여 기후변화의 영향이 반영된 자료로 보정하였다.

3.2 Scale-Invariance 특성과 NSRPM에 의한 미래 기간의 확률강우량 추정

본 연구에서는 정영훈 등(2008)이 밝힌 국내 강우자료의 scale-invariance 특성이 미래에도 유지된다는 가정 하에 강우 관측 자료로부터 평균 스케일 지수를 산정하였다. Scale invariance 특성을 이용하여 시단위 확률강우량을 산정하기 위한 한강 유역 내 9개 지점의 평균 스케일 지수는 Table 2와 같다. NSRPM의 매개변수는 각 지점의 7, 8월 시우량 관측 자료를 이용하여 추정하였다. 전체 기간이 아닌 7, 8월의 강우량만을 이용하여 매개변수를 추정한 이유는 확률강우량 산정에 활용되는 연최대값이 대개 7, 8월에 발생하기 때문에 매개변수 산정의 효율성을 향상시키기 위해 이 시기의 자료만을 이용하였다. 매개변수 추정은 정창삼(2009)이 제안한 방법으로서 유전자 알고리즘을 이용하는, 직접적인 매개변수 추정법을 적용하였다. 직접적인 매개변수 추정법에 의해 매개변수를 추정할 경우 목적함수를 만족시키는 여러 개의 매개변수들이 추정되므로, 그 가운데 적절한 해를 선택하기 위해 본 연구에서는 관측 자료로부터 산정한 재현 기간 100년 이상의 확률강우량과 NSRPM에 의해 발생된 자료로부터 산정한 재현기간 100년 이상의 확률강우량의 차이가 가장 작은 해의 집단을 NSRPM의 적정 매개변수로 선정하였다. 이러한 방법으로 선정된 NSRPM의 매개변수를 Table 3과 같다.

이러한 두 가지 기법에 의해 산정된 지속기간 48시간, 재

Table 2. Scale exponents of 9 sites of Han River basin

Site	Average Scale Exponent
Seoul	0.2999
Chuncheon	0.3988
Wonju	0.3642
Hongcheon	0.3825
Yangpyeong	0.3432
Icheon	0.3999
Inje	0.3871
Jaecheon	0.3833
Chungju	0.3336

Table 3. Parameters of NSRPM

Site	λ	μ_c	σ	η	ξ
Seoul	0.000100	24.549903	0.143173	1.863416	0.471862
Chuncheon	0.000100	17.182953	0.085151	1.314872	0.411484
Wonju	0.000115	9.700192	0.094129	1.185669	0.274725
Hongcheon	0.000105	26.784959	0.103702	1.483163	0.587436
Yangpyeong	0.000100	7.557466	0.092578	0.658218	0.253659
Icheon	0.000100	19.081021	0.107838	2.153661	0.373933
Inje	0.000111	15.040439	0.081889	1.107418	0.457766
Jaecheon	0.000100	12.540617	0.087703	0.991657	0.357333
Chungju	0.000100	58.567187	0.146167	2.721461	1.208484

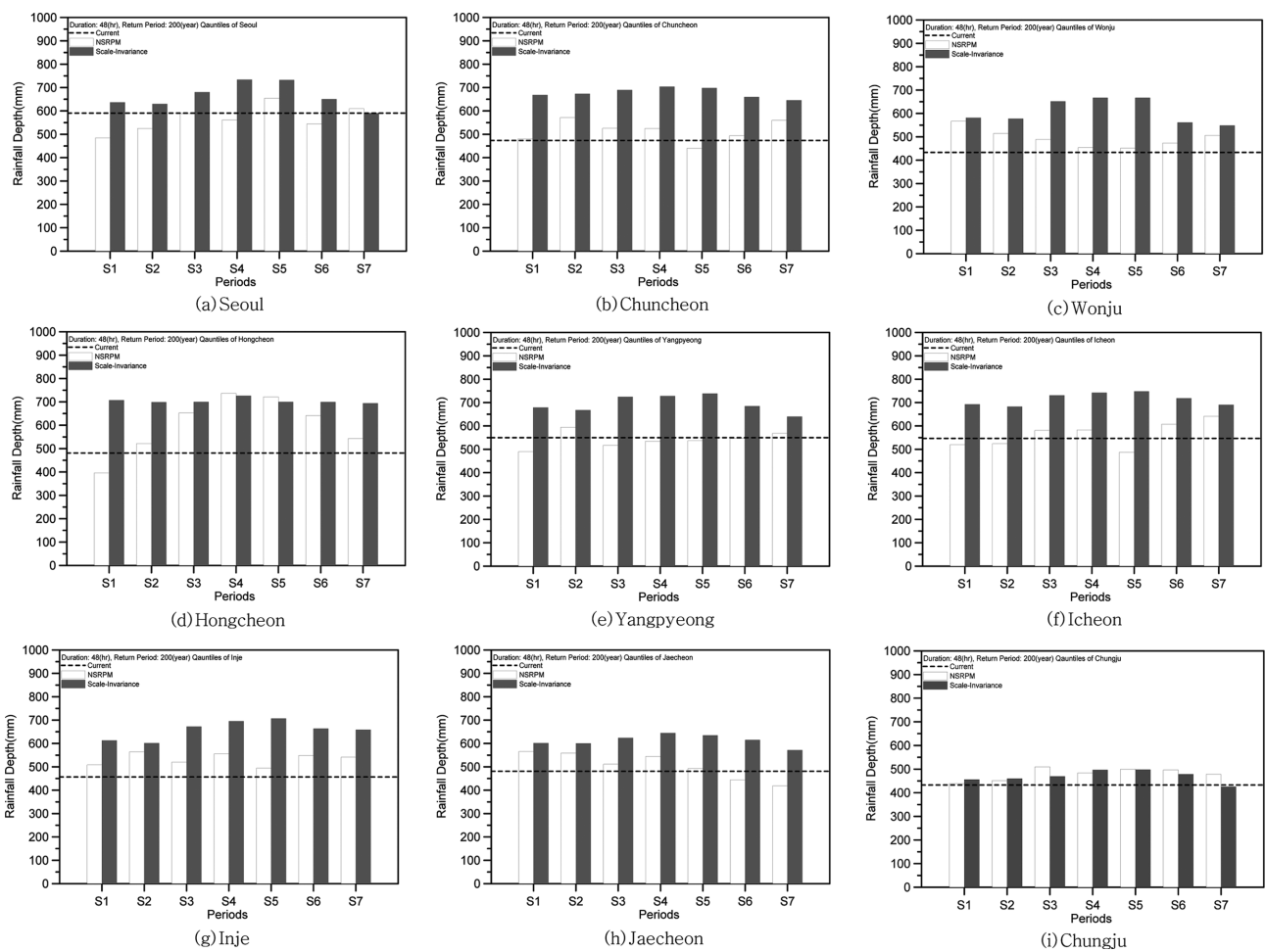


Fig. 2. Rainfall quantiles of 9 sites by scale-invariance method and NSRPM in Han River basin

현기간 200년에 대한 확률강우량은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 x축은 Table 4의 미래 전망 기간이고, y축은 확률강우량을 의미한다. 흰색 막대는 NSRPM에 의한 확률강우량을, 검정색 막대는 scale invariance 특성을 이용하여 산정한 확률강우량을 나타내며, 검은색 점선은 관측 자료에 의한 확률강우량으로서 한강유역종합치수계획(국토해양부, 2008)에서

발췌한 값이다. Fig. 1에서 확인할 수 있는 것처럼, 2011년 ~2099년까지의 확률강우량이 기존의 관측 자료에 의한 확률강우량에 비해 대체로 증가하는 경향을 보인다. 하지만 NSRPM에 의한 확률강우량의 경우 서울(S1, S2, S4, S6), 춘천(S5), 홍천(S1), 양평(S1, S3~S6), 이천(S1, S2, S5), 제천(S7)에서 관측값에 의한 확률강우량에 비해 감소하는 경우

Table 4. The abbreviation of projection periods

Abb.	Periods
S1	2011~2040
S2	2021~2050
S3	2031~2060
S4	2041~2070
S5	2051~2080
S6	2061~2090
S7	2071~2099

가 발생했다. scale invariance 특성을 이용하여 산정한 확률강우량의 경우 충주(S7)에서만 감소를 보였다. 이로부터 scale invariance 특성으로부터 산정한 확률강우량의 증가율이 NSRPM에 의해 산정된 확률강우량의 증가율에 비해 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 NSRPM이 강우의 극값 발생 양상을 제대로 모의하지 못하는 특성 때문인 것으로 판단된다. 관측 자료에 의한 확률강우량 대비 각 기법에 의한 미래 기간 확률강우량 증감률은 Table 5와 같다. 미래 기간에 대한 증감률의 평균값을 비교해 보면, 서울과 양평 지점의 미래 기간 확률강우량을 NSRPM으로 추정했을 때 감소되는 것으로 나타났으나, scale invariance 특성에 근거하여 추정된 확률강우량은 모든 지점에서 증가하는 것으로 확인되었다. 각각의 경우의 증감률을 미래 기간 별로 평균해 보면, NSRPM으로 추정했을 때 S3와 S4 기간의 증가율이 비교적 크게 나타났고, scale invariance 특성을 이용하여 추정된 확률강우량은 S3~S5 기간의 증가율이 비교적 크게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 기후변화가 한강유역의 확률강우량에 미치는 영향을 평가하기 위해 A2 시나리오와 ECHO-G GCM의 전망 결과를 상세화시켜 얻은 일단위 강우 자료를 바탕

으로 시단위 확률강우량을 산정하였다. 일단위 자료로부터 시단위 확률강우량을 산정하기 위해 강우의 scale invariance 특성을 이용하여 일단위 확률강우량으로부터 시단위 확률강우량을 산정하였다. 또한 관측 자료의 통계적 특성을 바탕으로 시단위 강우 자료를 발생시킬 수 있는 NSRPM을 이용하여 강우를 발생시키고, GCM 모의 결과 산정된 과거 대비 미래의 강우량 변화율을 고려하여 기후변화가 고려된 미래 기간의 시단위 강우 시계열을 구성하여 이로부터 미래의 시단위 확률강우량을 산정하였다. 이러한 두 가지 방법에 의해 산정된 시단위 확률강우량과 과거 관측 자료에 의해 산정된 확률강우량을 비교하여 기후변화가 한강 유역의 미래 확률강우량에 미치는 영향을 분석하였다. 분석 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 2011년~2099년까지의 확률강우량은 과거에 비해 대체로 증가하는 경향을 보인다.
- (2) NSRPM에 의한 확률강우량은 scale invariance에 의한 확률강우량에 비해 과거 대비 증가율이 작으며, 이는 NSRPM이 강우 자료의 극값을 구현하는 면에서 한계가 있기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) S3, S4(2031~2070) 기간의 확률강우량이 다른 기간에 비해 더 많이 증가하는 경향을 보인다.
- (4) 탄소 배출 시나리오와 GCMs에 따라 미래의 강우가 다양한 양상을 보일 수 있으므로 향후 다양한 시나리오와 GCMs를 바탕으로 기후변화에 의한 미래 확률강우량 전망이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 한국연구재단에서 부여한 과제번호 : 2014006671).

Table 5 The increasing rates of projected rainfall quantiles to observed ones

Periods	Increasing rate (%)																			
	Seoul		Chuncheon		Wonju		Hongcheon		Yangpyeong		Icheon		Inje		Jaecheon		Chungju		Avg. for each period	
	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.	NSRP-M	Scale-Inv.
S1	-18.0	7.8	1.3	41.1	30.9	34.2	-17.6	47.0	-10.8	23.5	-4.9	26.7	11.3	34.2	17.5	25.1	1.4	5.4	1.2	27.2
S2	-11.1	6.6	20.8	42.2	18.7	33.3	8.5	45.2	8.2	21.4	-4.1	24.9	23.5	31.8	16.2	24.9	4.4	6.2	9.5	26.3
S3	-0.5	15.1	11.0	45.6	12.9	50.3	35.7	45.4	-6.0	31.8	6.3	33.7	13.9	47.2	6.3	29.7	17.9	8.5	10.8	34.2
S4	-4.9	24.2	10.8	48.7	4.7	53.9	53.1	50.9	-2.7	32.4	6.7	35.7	21.5	52.3	13.3	34.0	11.9	14.8	12.7	38.5
S5	10.9	24.0	-6.9	47.4	4.2	53.9	50.0	45.4	-2.3	34.4	-10.8	36.8	8.3	54.8	2.5	32.0	15.5	15.0	7.9	38.2
S6	-7.8	10.0	4.3	39.3	9.3	29.5	33.3	45.4	-0.6	24.5	11.1	31.4	20.2	45.3	-7.5	27.9	14.7	10.6	8.6	29.3
S7	3.2	0.0	18.2	36.3	16.9	26.6	12.9	44.3	3.3	16.4	17.4	26.3	18.5	44.2	-13.0	18.8	10.4	-1.6	9.8	23.5
Avg.	-4.0	12.5	8.5	43.0	13.9	40.2	25.1	46.2	-1.5	26.3	3.1	30.8	16.7	44.3	5.0	27.5	10.9	8.4		

참고문헌

1. 국토해양부 (2008) 한강유역종합치수계획 보고서.
2. 김병식, 김보경, 경민수, 김형수 (2008) 기후변화가 극한강우와 I-D-F 분석에 미치는 영향 평가, *한국수자원학회논문집*, 한국수자원학회, 제41권, 제4호, pp. 379-394.
3. 나양선 (2010) 기후변화에 따른 설계 강우 및 홍수변화에 관한 연구. 석사학위 논문, 세종대학교.
4. 정영훈, 김수영, 김태순, 허준행 (2008) 스케일 성질을 이용한 확률강우량의 추정, *한국수자원학회논문집*, 제41권, 제9호, pp. 873-884.
5. 정창삼 (2009) Neyman-Scott 구형 펄스모형의 직접적인 매개변수 추정연구, *한국수자원학회 논문집*, 제42권, 제11호, pp. 1017-1028.
6. Baldassarre, G. D., Brath, A., and Montanari, A. (2006) Reliability of different depth-duration-frequency equations for estimating short-duration design storms, *Water Resources Research*, Vol. 42, W12501.
7. Bougadis, J., and Adamowski, K. (2006) Scaling model of a rainfall intensity-duration-frequency relationship, *Hydrological Processes*, Vol. 20, pp. 3747-3757.
8. Burlando, P., and Rosso, R. (1996) Scaling and multiscaling models of depth-duration-frequency curves for storm precipitation, *Journal of Hydrology*, Vol. 187, pp. 45-64.
9. Burton, A., Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Kilsby, C.G. (2010) Downscaling transient climate change using a Neyman-Scott rectangular pulses stochastic rainfall model, *Journal of Hydrology*, Vol. 381, pp. 18-32.
10. Burton, A., Kilsby, C.G., Fowler, H.J., Cowpertwait, P.S.P., O'Connell, P.E. (2008) RainSim: a spatio-temporal stochastic rainfall modelling system, *Environmental Modelling and Software*, Vol. 23, No. 12, pp. 1356-1369.
11. Calenda, G., Napolitano, F. (1999) Parameter estimation of Neyman-Scott processes for temporal point rainfall simulation, *Journal of Hydrology*, Vol. 225, pp. 45-66.
12. Deidda, R., Badas, M. G., and Piga, E. (2006) Space-time multifractality of remotely sensed rainfall fields, *Journal of Hydrology*, Vol. 322, pp. 2-13.
13. Ekström, M., Fowler, H.J., Kilsby, C.G., Jones, P.D. (2005) New estimates of future changes in extreme rainfall across the UK using regional climate model integration. 2. Future estimates and use in impact studies, *Journal of Hydrology*, Vol. 300, pp. 234-251.
14. Frei, C., Schöll, R., Fukutome, S., Schmidli, J., Vidale, P.L. (2006) "Future change of precipitation extreme in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models", *Journal of Geophysical Research* Vol. 111, D06105.
15. Gupta, V. K., and Waymire, E. (1990) Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 95(D3), pp. 1999-2009.
16. Kysely, J., Beranova, R. (2009) Climate-change effects on extreme precipitation in central Europe: Uncertainties of scenarios based on regional climate models, *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 95, No. 3-4, pp. 361-374.
17. Lovejoy, S. (1982) Area-perimeter relation for rain and cloud areas, *Science*, Vol. 216, pp. 185-187.
18. Lovejoy, S., and Mandelbrot, B. B. (1985) Fractal properties of rain and a fractal model, *Tellus*, Vol. 37A, pp. 209-232.
19. Lovejoy, S., and Schertzer, D. (1985). Generalized scale invariance in the atmosphere and fractal models of rain, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 8, pp. 1233-1250.
20. Neyman, Jerzy, and Scott, Elizabeth, L. (1958) Statistical Approach to Problem of Comology, *Journal of the Royal Statistical Society*, Vol. B20, No. 1, pp. 1-43.
21. Nguyen, V.-T.-V. (2000) Recent advances in modeling of extreme rainfall and floods, *International European-Asian Workshop on Ecosystems, Hanoi, Vietnam*, pp. 52-59.
22. Nguyen, V.-T.-V., Nguyen, T.-D., and Ashkar, F. (2002) Regional frequency analysis of extreme rainfalls, *Water Science and Technology*, Vol. 45, No. 2, pp. 75-81.
23. Olsson, J., and Burlando, P. (2002) Reproduction of temporal scaling by a rectangular pulse rainfall model, *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 611-630.
24. Onof, C., Chandler, R.E., Kakou, A., Northrop, P., Wheeler, H.S., Isham, V. (2000) Rainfall modelling using Poisson-cluster processes: a review of developments, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 14, No. 6, pp. 384-411.
25. Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D. R., and Isham, V. (1987) Some Models for Rainfall Based Stochastic Point Process. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A410, No. 1839, pp. 269-288.
26. Schertzer, D., and Lovejoy, S. (1987) Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92(D8), pp. 9693-9714.
27. Thodsen, H. (2007) The influence of climate change on stream flow in Danish rivers, *Journal of Hydrology*, Vol. 333, No. 2-4, pp. 226-238.
28. Velghe, T., Troch, P.A., De Troch, F.P., Van de Velde, J. (1994) Evaluation of cluster-based rectangular pulses point process models for rainfall, *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 10, pp. 2847-2857.
29. Waymire, E. (1985) Scaling limit and self-similarity in precipitation fields, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 8, pp. 1271-1281.