

극한수문사상의 모의를 위한 포아송 클러스터 강우생성모형의 적용성 평가

김동균* · 권현한** · 황석환*** · 김태웅****

Kim, Dong-Kyun*, Kwon, Hyun-Han**, Hwang, Seok Hwan***, Kim, Tae-Woong****

Evaluation of the Applicability of the Poisson Cluster Rainfall Generation Model for Modeling Extreme Hydrological Events

ABSTRACT

This study evaluated the applicability of the Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulse (MBLRP) rainfall generation model for modeling extreme rainfalls and floods in Korean Peninsula. Firstly, using the ISPSO (Isolated Species Particle Swarm Optimization) method, the parameters of the MBLRP model were estimated at the 61 ASOS (Automatic Surface Observation System) rain gauges located across Korean Peninsula. Then, the synthetic rainfall time series with the length of 100 years were generated using the MBLRP model for each of the rain gauges. Finally, design rainfalls and design floods with various recurrence intervals were estimated based on the generated synthetic rainfall time series, which were compared to the values based on the observed rainfall time series. The results of the comparison indicate that the design rainfalls based on the synthetic rainfall time series were smaller than the ones based on the observation by 20% to 42%. The amount of underestimation increased with the increase of return period. In case of the design floods, the degree of underestimation was 31% to 50%, which increases along with the return period of flood and the curve number of basin.

Key words : Extreme flood, Extreme rainfall, Poisson cluster, Rainfall generation model

초 록

본 연구는 우리나라의 극한강우와 극한홍수를 모의하기 위한 MBLRP 포아송 클러스터 강우생성모형의 적용성을 평가하였다. 국내 61개의 기상청 지상기상관측시스템의 강우량 관측지점에 대하여 고립입자 군집화 최적화(ISPSO) 기법을 적용하여 모형의 매개변수를 추정하고, 추정된 매개변수를 바탕으로 각 강우관측지점에서 100년치의 가상 강우시계열을 생성하였다. 생성된 강우시계열을 이용하여 확률강우량 및 확률홍수량을 산정하고 이 값들을 관측치에 근거하여 산정된 값들과 비교하였다. 비교 결과, 모형에 의한 확률강우량은 관측치보다 평균적으로 20~42% 작았으며, 강우의 재현기간이 증가할수록 과소산정되는 정도가 증가하였다. 확률홍수량의 경우, 모형에 의한 값이 관측치에 근거한 값보다 31%에서 50% 작았으며, 이 과소산정량은 홍수의 재현기간의 증가 및 유역의 불투수도의 증가와 함께 증가하였다.

검색어 : 극한홍수, 극한강우, 포아송 클러스터, 강우생성모형

1. 서론

수문현상과 관련된 홍수, 가뭄, 산사태, 오염물질 확산, 생태계 파괴 등과 같은 재해의 위험도를 분석할 경우, 몬테카를로 모의(Monte Carlo simulation)는 필수적으로 활용되는 기법이다. 이러한 몬테카를로 모의를 실제로 구현하기 위해서는 충분한 길이의 강우 시계열의

* 정회원 · 홍익대학교 건설도시공학부 조교수 (kim.dongkyun@hongik.ac.kr)

** 정회원 · 전북대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (hkwon@jbnu.ac.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 수석연구원 (sukany@kict.re.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 부교수 (Corresponding Author · Hanyang University · twkim72@hanyang.ac.kr)

Received October 21, 2013/ revised December 4, 2013/ accepted March 12, 2014

확보가 필수적이다. 포아송 클러스터 강우생성모형(Poisson Cluster Rainfall Generation Model)은 무한한 길이를 가진 가상의 강우시계열을 제공함으로써 이러한 문제를 해결해 준다(Rodriguez-Iturbe et al., 1988). 포아송 클러스터 강우생성모형은 자기상관성 및 스케일링 거동에 기반을 둔 기존의 모형과 비교하였을 때, (1) 넓은 시간대(1시간-1일)에 대하여 평균, 분산, 자기상관계수, 무강우 확률 등 관측강우의 통계치를 비교적 정확히 재현할 수 있으며, (2) 세밀한 시간 해상도(1시간 이내)를 가진 강우시계열의 생성이 가능하다. 이러한 장점으로 인하여, 포아송 강우생성모형은 도시지역에서의 홍수(Moretti and Montanari 2004; Brath et al., 2006; Dowson et al., 2006), 농약의 확산(Nolan et al., 2008), 산사태(Bathurst et al., 2005), 사막화(Bathurst and Bovolo, 2004), 수자원 평가(Fowler et al., 2005), 홍수위험도 평가(Kilsby et al., 2000) 등의 다양한 분야에 응용되어왔다. 특히, 포아송 강우생성모형을 홍수모의에 적용한 선행 연구는 다수 존재한다. Khaliq and Cunnane (1996)은 포아송 강우생성모형이 관측시계열에 비해 극한강우를 과소산정하는 경향을 가진다는 것을 예측하였으며, Gyasi-Agyei and Willgoose (1997)은 포아송 강우생성모형을 개선하였으며, 이를 호주의 퀸스랜드 지역에 적용하여 극한값이 더욱 잘 예측된다는 것을 보여주었다. Brath et al. (2006)은 토지사용의 변화가 홍수에 미치는 영향을 평가하기 위하여 포아송 강우생성모형을 사용하였다.

우리나라의 수문현상에 포아송 강우 생성모형이 적용된 사례 또한 다수 존재한다. 예를 들어, Shin et al. (2011)은 강우의 지속기간을 대표하는 확률분포함수로 기존의 감마분포 대신 정규분포를 사용한 새로운 포아송 강우생성모형을 제안하고, 그 모형이 관측강우의 통계값들을 더 잘 재현함을 보였다. 한편, Kim et al. (2013d)는 포아송 클러스터 강우생성모형의 매개변수 지도를 국내 홍수 위험도 산정에 적용할 수 있는지의 여부를 검토하였다. 이 연구에서 가상 강우시계열은 포아송 강우생성모형의 매개변수 지도에서 읽은 매개변수 값들을 사용하여 생성되었다. 또한, 생성된 강우시계열로부터 산정한 확률강우량은 관측치로부터 산정한 값보다 약 5~40% 적었다. 확률홍수량의 경우, 포아송 강우생성모형은 약 20~45% 적은 값을 모의한다는 것을 보인 바 있다. 한편, Kim et al. (2013c)는 우리나라의 7월의 강우자료를 사용하여 매개변수 지도를 활용하는 포아송 클러스터 강우생성모형의 성능을 평가하였다. 이러한 선행 연구결과들을 고려해 보았을 때, 포아송 클러스터 강우생성모형의 수문학적 적용성을 포괄적으로 평가하기 위해서는 (1) 우리나라에 극한강우 및 극한홍수를 일으키는 6월, 7월, 8월, 9월의 강우를 모두 포함하여 분석을 해야 하고 (2) 매개변수 지도에 의한 오차를 제외한 포아송 강우생성모형 자체에 대한 평가가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급된 두 가지 사항을 모두

고려하여, 포아송 강우생성모형의 극한강우 및 극한홍수 모의에 대한 포괄적인 적용성을 평가하고자 하였다.

2. 방법론

2.1 Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulse 모형

본 연구는 포아송 클러스터 강우생성모형 중, Rodriguez-Iturbe et al. (1988)이 제안한 Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulse (MBLRP) 모형을 사용하여 가상의 강우시계열을 생성하였다. Fig. 1은 MBLRP 모형의 개념도를 보여준다. MBLRP 모형에서, $X1[T]$ 은 폭풍우(Fig. 1에서의 흰색 원)의 도착을 나타내는 확률변수(random variable)로써, 매개변수 $\lambda[1/T]$ 를 가지는 포아송 과정(Poisson process)에 의해 지배를 받는다. $X2[T]$ 는 폭풍우의 활동기간(폭풍우가 포함하는 강우세포(rain cell, Fig. 1의 붉은색 원)가 도래할 수 있는 기간)을 나타내는 확률변수이며, 매개변수 $\gamma[1/T]$ 를 가지는 지수분포(exponential distribution)를 가진다. $X3[T]$ 는 폭풍우에 포함된 강우세포가 도착하는 시간을 나타내는 확률변수로써 매개변수 $\beta[1/T]$ 를 가지는 포아송 과정에 의해 결정된다. $X4[T]$ 는 강우세포의 지속기간을 나타내는 확률변수로써 매개변수 $\eta[1/T]$ 를 가진 지수분포를 가진다. 여기에서 $\eta[1/T]$ 는 매개변수 $\nu[T]$ 와 α [무차원]를 가진 감마분포(gamma distribution)를 가진다. 마지막으로 $X5[L/T]$ 는 강우세포의 강도를 나타내는 확률변수이며 매개변수 $1/\mu[L/T]$ 를 가지는 지수분포를 가진다. 아울러, 매개변수 γ 와 β 를 η 로 나눈 무차원 변수 $\phi(= \gamma/\eta)$ 와 $\kappa(= \beta/\eta)$ 를 편의상 통상적으로 사용한다.

이러한 모형의 가정에 따라 MBLRP 모형은 6개의 매개변수($\lambda, \nu, \alpha, \mu, \phi, \kappa$)를 가지며, 생성된 가상 강우시계열의 통계값이 관측치의 통계값을 재현할 수 있도록 보정된다. Rodriguez-Iturbe

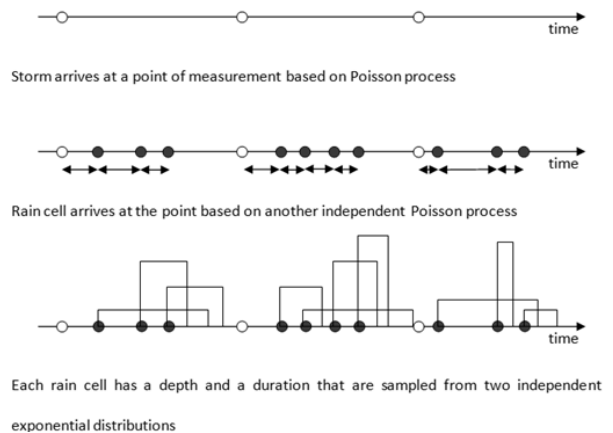


Fig. 1. Schematic of the Poisson Cluster Rainfall Generation Model (Kim et al., 2013d)

et al. (1988)은 가상 강우시계열의 평균, 분산, 자기상관계수 및 무강우 확률을 매개변수의 함수로 해석적으로 유도하였다. 추계학적인 관점에서 보았을 때, 가상 강우시계열과 관측 강우시계열의 유사성은 통계값의 유사성에 의해 결정된다는 점을 고려하여, MBLRP 모형의 매개변수는 가상 강우시계열과 관측치의 차이를 의미하는 목적함수(Objective Function, OF, Eq. (1))의 값을 최소화시킬 수 있도록 보정된다.

$$OF = \sum_{k=1}^n W_k \left[1 - \frac{F_k(\lambda, \nu, \alpha, \mu, \phi, \kappa)}{f_k} \right]^2 \quad (1)$$

여기에서, F_k 는 가상 강우시계열의 통계값을 나타내는 식이며 MBLRP 강우생성모형의 6개 매개변수의 함수이다. f_k 는 관측 통계값을 나타내는 상수항이다. k 는 강우 통계값의 종류(평균, 분산, 자기상관계수, 무강우 확률)를 나타내는 변수이다. n 은 매개변수의 보정에 사용되는 통계값의 갯수이다. 본 연구에서는 1시간, 3시간, 12시간, 24시간 지속기간 강우의 평균, 분산, 자기상관계수 및 무강우 확률을 사용하였고, 강우의 평균은 모든 시간대에서 동일하므로(예를 들어, 1시간의 시간해상도를 가진 강우시계열의 평균은 3시간의 시간해상도를 가진 강우시계열의 평균과 동일하다), 3시간, 12시간, 24시간의 평균값을 제외하여 총 13개(4가지 지속기간 × 4가지 통계값 - 제외된 3개 지속기간의 평균)의 통계값

Table 1. Parameters of the MBLRP Model Estimated at Seven ASOS Gauges in Korean Peninsula for the Month of June, July, August, and September. The Location of Each Gauge is Shown as Star Mark in Figure 2

Gage ID	Name	Month	λ	ν	α	μ	ϕ	κ
105	Gangneung	6	0.00881	4.280	35.19	10.36	0.03873	0.4216
		7	0.00883	4.713	26.87	10.37	0.03219	0.4643
		8	0.01198	4.322	34.87	15.11	0.04047	0.6237
		9	0.00891	4.681	26.82	10.36	0.03214	0.5055
108	Seoul	6	0.00882	4.379	32.86	10.36	0.03252	0.4208
		7	0.01202	4.591	28.34	13.26	0.03939	0.6233
		8	0.01134	4.716	26.75	15.07	0.03221	0.4246
		9	0.00881	4.436	27.12	10.37	0.03320	0.5177
133	Deajeon	6	0.00881	4.307	27.70	10.35	0.03231	0.4513
		7	0.01217	4.727	26.74	11.61	0.03776	0.4998
		8	0.00977	4.728	26.74	14.56	0.03303	0.4196
		9	0.00880	4.539	29.25	10.37	0.03277	0.4207
143	Deagu	6	0.00882	4.515	33.98	10.37	0.03225	0.4198
		7	0.01010	4.319	27.45	10.36	0.03350	0.4198
		8	0.00882	4.727	26.78	11.48	0.03293	0.4354
		9	0.00882	4.509	31.95	10.36	0.03218	0.4225
156	Gwangju	6	0.00883	4.605	27.46	10.36	0.03213	0.4344
		7	0.01106	4.375	26.88	14.34	0.04328	0.5184
		8	0.01029	4.724	26.75	14.91	0.03460	0.4227
		9	0.00885	4.429	29.77	10.35	0.03254	0.4195
159	Busan	6	0.00881	4.570	27.92	10.35	0.03216	0.5146
		7	0.00930	4.225	31.48	14.20	0.03371	0.6230
		7	0.00928	4.247	31.49	14.19	0.03381	0.6231
		8	0.00882	4.715	26.75	11.08	0.03211	0.5579
		9	0.00881	4.308	32.46	10.45	0.03543	0.5779
184	Jeju	6	0.00885	4.705	28.71	10.36	0.03214	0.4208
		7	0.00881	4.243	32.03	12.02	0.03246	0.6194
		8	0.00881	4.719	26.74	12.02	0.03264	0.5474
		9	0.00881	4.710	26.75	10.37	0.03216	0.5941

을 사용하였다(n=13).

Eq. (1)에서 F_k 는 복잡한 수학적 형태를 가지고 있고(Kim et al., 2013c 참조), 통계값의 종류가 다양한 시간해상도에 대해 존재하여 n 값이 매개변수의 개수인 6보다 크므로(n=13), OF 의 값을 이상적인 최소값인 0으로 만들어주는 매개변수의 값을 해석적으로 찾는 것은 불가능하다. 따라서, 경험적 최적화 알고리즘(Heuristic Optimization Algorithm)에 기반을 둔 방법을 사용하여 매개변수의 값을 산정하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 포아송 클러스터 강우생성모형과 관련한 선행연구(Kim and Olivera, 2012; Kim et al., 2013a; 2013b; 2013c; 2013d)에서 적용되어 그 성능이 검증된 고립입자 군집화 최적화(Isolated Species Particle Swarm Optimization) 기법(Cho et al., 2011)을 채택하였다. Table 1에 우리나라의 다양한 강우의 특성을 대표하는 7개 지점에 대하여 ISPOS 기법으로 추정된 MBLRP 모형의 매개변수를 정리하였다.

2.2 대상 지역 및 기상 강우시계열의 생성

본 연구에서는 기상청에서 운영하는 지상기상관측지점(Automatic Surface Observation System; ASOS)의 총 79개 관측지점 중 30년 이상의 관측치를 보유하고 있는 61개의 관측지점(Fig. 2)에

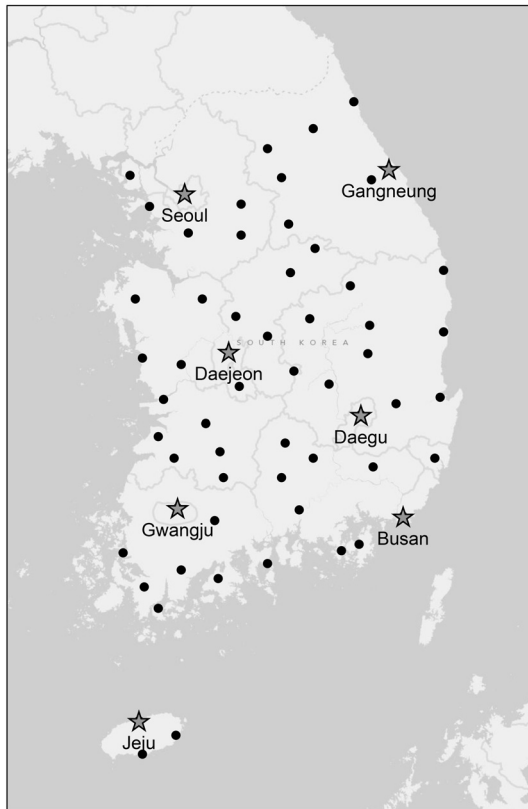


Fig. 2. Location of the 61 ASOS Gauges Used for this Study. Gauges are Maintained by Korea Meteorological Administration

대하여 MBLRP 모형을 사용하여 1시간 단위의 시간해상도를 가진 100년치의 강우자료를 생성한 후 이를 관측치와 비교하였다. 여름(6월, 7월, 8월, 9월) 이외의 기간에 대해서는 MBLRP 모형의 가정과 해당 기간 한반도 강우 발생 매커니즘의 차이로 인하여 매개변수가 정확히 산정되지 않았으며(Eq. (1)을 만족시키는 매개변수의 판별이 어려움), 우리나라에서 발생하는 대부분의 홍수가 6월 하순에서 9월 중순 사이에 일어난다는 점 등을 고려하여, 본 연구에는 6월, 7월, 8월, 9월을 모의의 대상으로 채택하였다.

2.3 확률강우량 산정

모의된 강우시계열과 관측 강우시계열에 대하여 1시간, 3시간, 6시간, 12시간, 24시간의 지속기간 별로 연도별 최대강우량을 추출하고, 200년, 100년, 50년, 30년, 10년 빈도의 확률강우량을 산정하였다. 극한강우는 지속기간에 상관없이 3변수 Generalized Extreme Value (GEV) 분포를 따른다고 가정하였으며, 분포의 매개변수는 L-moment 법을 이용하여 산정하였다. 원칙적으로는 각 지점 및 지속기간 별로 적합도 검정(Goodness-of-fit test)을 실시하여 별도의 최적확률밀도함수를 할당하여야 하지만, 우리나라의 경우 Generalized Extreme Value 분포와 Gumbel 분포가 자주 사용되고(Ministry of Construction & Transportation, 2000; Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011), 검증 대상지역의 관측 강우시계열의 길이가 35년 내외, 모의 강우시계열의 길이도 100달로 충분히 길다는 점을 고려하여 극한강우를 대표하는 확률밀도함수의 종류에 따른 확률강우량의 차이는 크지 않다고 가정하였다.

2.4 유출량 및 연최대홍수량 산정

본 연구에서는 NRCS-CN 방법을 사용하여 강우에서 유효우량을 산출하였으며, NRCS-CN 무차원단위유량도 기법을 사용하여 유효우량을 유역 출구에서의 유량으로 추적하였다. NRCS-CN 방법은 유효우량(Q)과 총강우량(P)의 관계를 S와 CN을 이용하여 Eq. (2)와 같이 유효우량을 계산한다.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (P \geq I_a) \quad (2a)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2b)$$

여기서, Q는 직접유출량에 상응하는 유효우량(mm), P는 총강우량(mm), I_a 는 초기손실량(mm), S는 최대잠재보유수량(mm), 그리고 CN은 유출곡선지수이다. 유역의 선행함수조건(Antecedent Soil Moisture Condition, AMC)이 유출량에 큰 영향을 미치

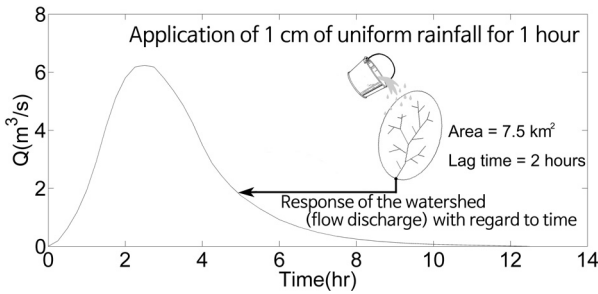


Fig. 3. NRCS Unit Hydrograph Corresponding to 1 Hour-1cm Effective Rainfall Used to Derive the Hydrograph at the Virtual Watershed Outlet

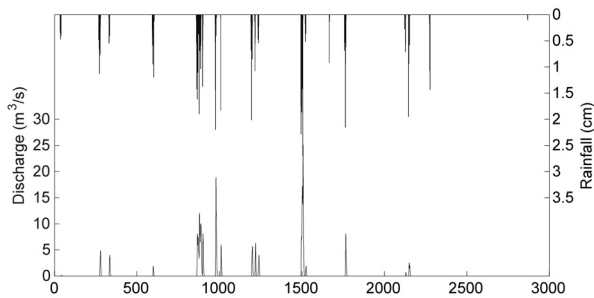


Fig. 4. Rainfall Hyetograph Simulated at Gauge 90 for the Month of June, July, August, and September (Bar Plot on the Top) and the Corresponding Flow Response at the Virtual Watershed (Line Plot on the Bottom) (Area = 7.5km², Lag Time = 2hr, Curve Number = 90)

므로, 이를 고려하기 위하여 CN을 Eq. (3)을 이용하여 보정하였다.

$$CN_I = \frac{4.2 CN_0}{10 - 0.058 CN_0} \quad (3a)$$

$$CN_{II} = CN_0 \quad (3b)$$

$$CN_{III} = \frac{23 CN_0}{10 + 0.13 CN_0} \quad (3c)$$

여기서, CN_I, CN_{II}, CN_{III}는 각각 AMC-I (P₅<3.6cm), AMC-II (3.6≤P₅<5.4cm), 그리고 AMC-III (P₅≥5.4cm)에 해당하는 유출 곡선지수이고, P₅는 선행5일강수량이다.

모의에 사용된 유역의 크기는 MBLRP 모형이 점 강우량을 모의한다는 점을 고려하여 유역 전반에 걸쳐 동일한 강우량을 가정할 수 있는 수준인 7.5km²를 선택하였고, 2시간의 지체시간 (Lag Time)을 갖는다고 가정하였다. Fig. 3에 이러한 유역과 그 특성에 따라 작성된 1시간 지속기간-1cm의 유효우량에 대한 유역

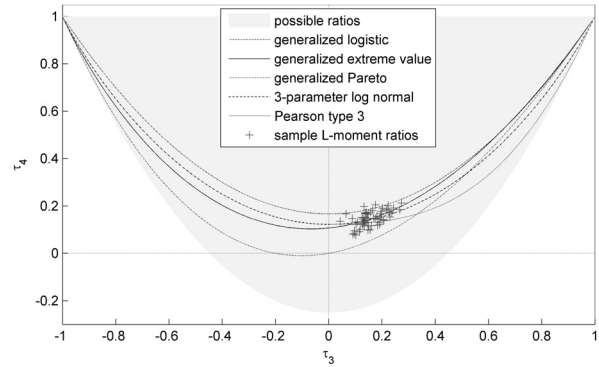


Fig. 5. L-moment Ratio Diagram Based on the Annual Peak Flow Data at 64 ASOS Rainfall Gauge Locations. The Annual Peak Flow Data Used to Obtain the 3rd and 4th L-moment Ratios Were Derived From the Hydrologic Modeling Using the Observed Rainfall Time Series at a Virtual Watershed (A = 7.5km², Lag Time = 2 hr, CN=80)

출구에서의 단위유량도(Unit Hydrograph)를 제시하였다.

Fig. 4는 90번 관측지점에서 임의의 한 해의 6월에서 9월까지의 기간에 대하여 MBLRP 모형을 사용하여 모의된 강우시계열과 이에 따른 가상 유역의 출구에서의 반응을 보여준다. 본 연구에서는 한 개의 관측지점에 대하여 이러한 강우모의 및 유출량 산정과정을 통해 한 해의 최대유량을 산정하고, 이를 100회 반복하여 얻어진 100개의 연최대홍수량을 빈도분석에 사용하였다.

Fig. 5는 면적 7.5km², 지체시간 2시간, 곡선계수 80을 가진 가상유역에 관측강우를 적용하여 도출된 연최대홍수량을 근거로 작성된 L-moment ratio diagram (Hosking and Wallis, 2005)이다. 다이어그램의 “+” 표식은 본 연구에서 사용된 64개의 ASOS 지상기상관측지점에 대하여 각각 도출된 연최대홍수량의 3차 및 4차 L-moment 비를 나타낸다. 대부분의 “+” 표식이 GEV 분포를 나타내는 선의 주변에 위치하고 있음을 볼 수 있으며, 이러한 결과는 본 연구에서 고려한 다양한 유출곡선지수의 값에 대하여도 일관적으로 관측되었다. 따라서, 본 연구는 연최대홍수량을 나타내는 최적의 확률분포를 GEV로 선정하였다. 분포의 매개변수는 L-moment 법을 이용하여 산정하였다.

3. 결과

3.1 확률강우량

Fig. 6은 서울에 위치한 ASOS 지상기상관측지점에서의 관측강우에 대한 누적밀도함수(검정색)와 모의된 강우에 근거하여 산정된 누적밀도함수(회색)를 비교하고 있다. 1시간, 3시간, 12시간, 24시간의 누적시간을 가진 강우에 대하여 서로 다른 4개의 그래프를 제시하였다. 모든 지속기간에 대하여 MBLRP 모의에 근거한 누적

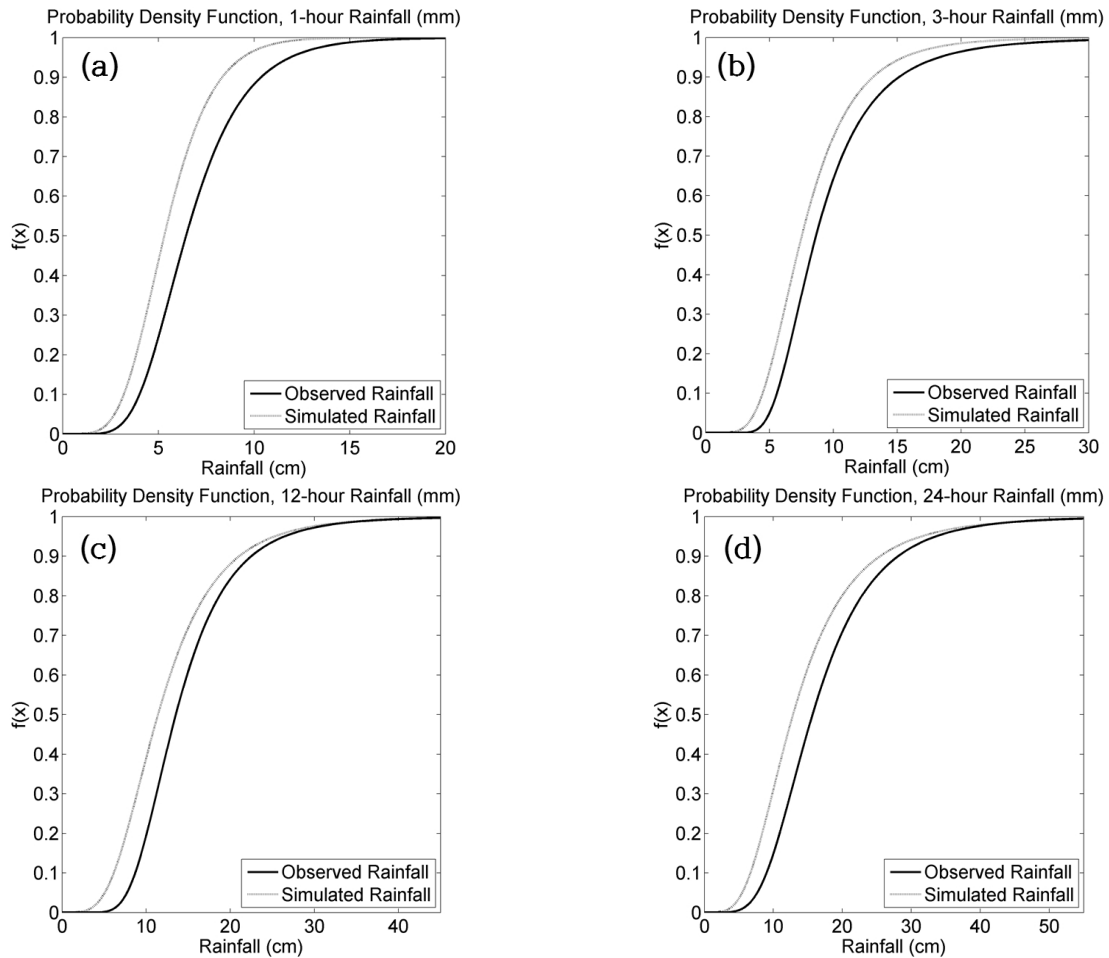


Fig. 6. Comparison Between the Probability Density Function of the Rainfall Time Series Observed at Seoul ASOS Gauge and the one Simulated at the Same Location Using the MBLRP Model. The Plots for (a) 1-hour, (b) 3-hour, (c) 12-hour, and (d) 24-hour Duration Rainfall are Shown

밀도함수가 관측치의 누적밀도함수보다 왼쪽에 위치하고 있는데, 이는 MBLRP 모형을 사용하여 강우를 모의하는 경우, 연최대강우량이 관측치보다 더 작게 나타날 것이라는 점을 나타낸다. 또한, 강우의 누적시간이 증가할수록 두 누적밀도함수의 차이가 감소함을 알 수 있는데, 이는 MBLRP 모형을 사용하여 생성된 강우를 도달시간 1-2시간 내외의 작은 크기의 유역에 적용하여 홍수량을 도출하는 경우 그 오차가 커질 수 있음을 나타낸다.

앞서 언급된 결과들에 대해 조금 더 일반적인 결론을 도출하기 위하여, 우리나라 7월에 대하여 61개의 ASOS 지상기상관측지점에서의 관측 강우자료와 MBLRP 강우생성모형을 사용하여 생성된 가상 강우자료에 근거한 확률강우량을 비교하여 Fig. 7에 제시하였다. 확률강우량의 다양한 재현기간(200년, 100년, 50년, 30년, 10년 빈도)과 지속기간(1, 3, 6, 12, 24시간)에 대하여 별도의 그래프를 작성하였다. 각 그래프 안의 점선은 1:1 선을 나타내고,

실선은 원점을 y절편으로 하는 최소자승회귀선을 나타낸다. 일반적으로, 가상 강우자료를 기반으로 산정된 확률강우량은 관측치에 기반을 두고 산정된 값보다 작았다. 이는 MBLRP 모형을 사용하여 극한강우를 모의하는 경우, 그 값이 관측치보다 작을 가능성이 크다는 점을 나타낸다. 확률강우량의 과소산정량은 확률강우량의 재현기간이 증가함에 따라 증가하였으나, 확률강우의 지속기간에 대한 일관적인 추세는 나타나지 않았다. 이러한 분석은 6월, 7월, 8월, 9월의 강우 및 이를 모두 포함하는 강우시계열에 대하여 수행되었다. Figs. 8 and 9는 분석결과를 요약하여 보여준다.

Fig. 8은 6월, 7월, 8월 및 9월의 확률강우량에 대한 분석결과이다. 각 그래프의 x축은 확률강우량의 재현기간을, y축은 Fig. 7의 그래프내의 회귀선의 방정식의 기울기를 나타낸다. 그래프 안의 각 선은 서로 다른 지속기간에 대한 것이다. 그래프의 y값이 1에 가까울수록 MBLRP 모형을 사용하여 생성한 강우시계열에 근거한

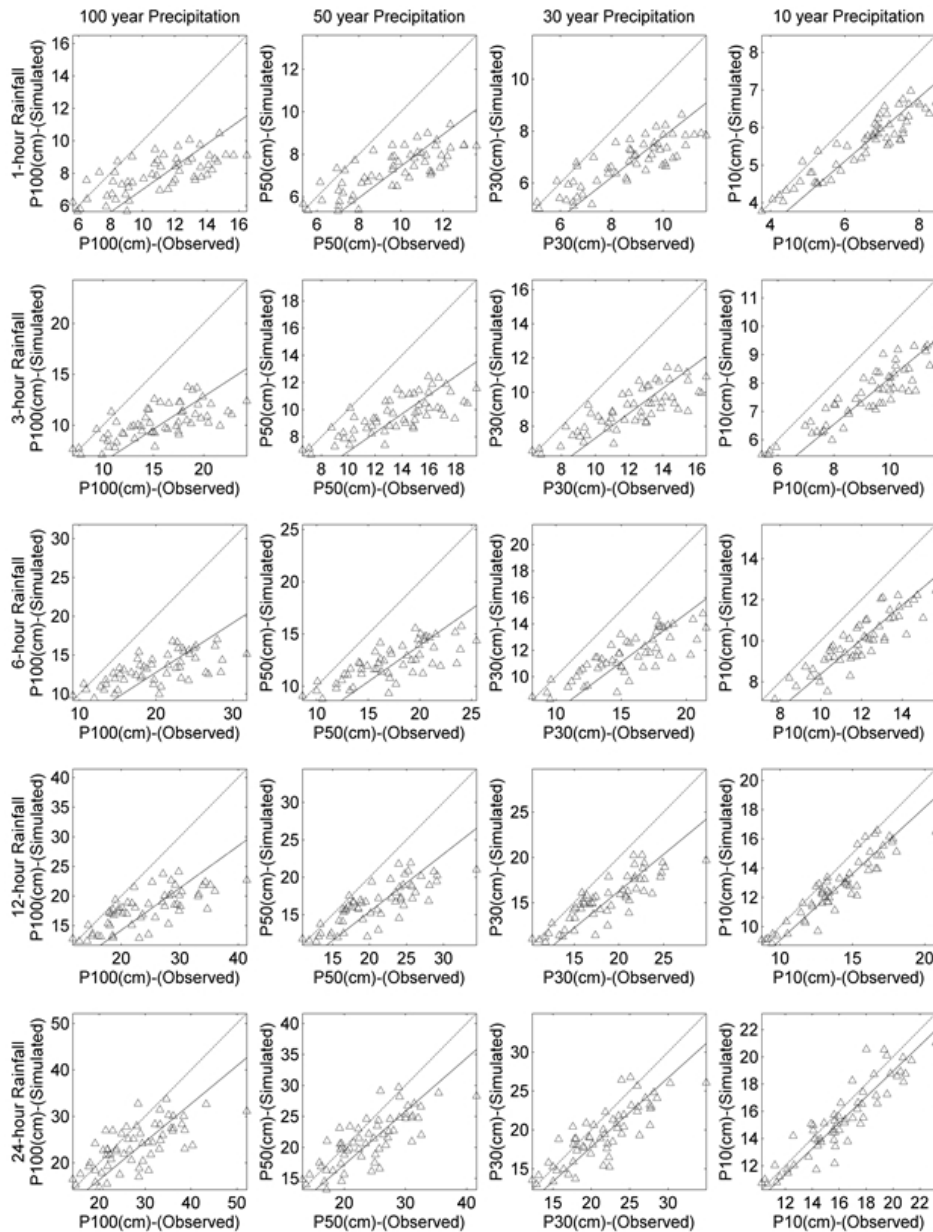


Fig. 7. Comparison Between the Design Rainfall Based on Observed Rainfall Time Series (x-axis) and the One Based on the Simulated Rainfall Time Series Generated by MBLRP Model for the Month of July. The Plots in the 1st, 2nd, 3rd, 4th, and 5th Row Corresponds to the 1-hour, 3-hour, 6-hour, 12-hour, and 24-hour Duration Rainfall, and the 1st, 2nd, 3rd, and 4th Column Corresponds to Different Frequency of Design Rainfall

확률강우량이 관측치의 확률강우량에 가깝다는 것을 나타내며, 이 값이 낮을수록 과소산정의 정도가 커진다. Fig. 8은 6월, 7월, 8월, 9월 모두에 대하여 확률강우량의 재현기간의 증가에 따른 과소산정량의 증가의 추세가 나타나고 있음을 보여준다. 6월과 7월의 확률강우량의 과소산정량은 나머지 두달의 확률강우량의 과소산정량보다 적었다. Fig. 9는 6월, 7월, 8월, 9월의 모든 강우 시계열을 포함하는, 즉 연최대강우량에 기반을 둔 확률강우량에

대한 분석 결과이다. 이 경우에도, 확률강우의 재현기간의 증가에 따라 MBLRP 모형의 과소산정량은 증가하였으며, 과소산정량은 20%에서 42% 사이의 값을 가졌다.

이러한 과소산정의 원인으로는 (1) MBLRP 모형이 단 6개의 매개변수를 통해 강우를 모의하지만, 실제 강우 현상은 훨씬 복잡한 물리적 매커니즘에 의하여 일어난다는 점, 그리고 (2) 모형의 매개변수의 보정에 있어(Eq. (1) 참조) 극한강우와 직접적으로 관련된

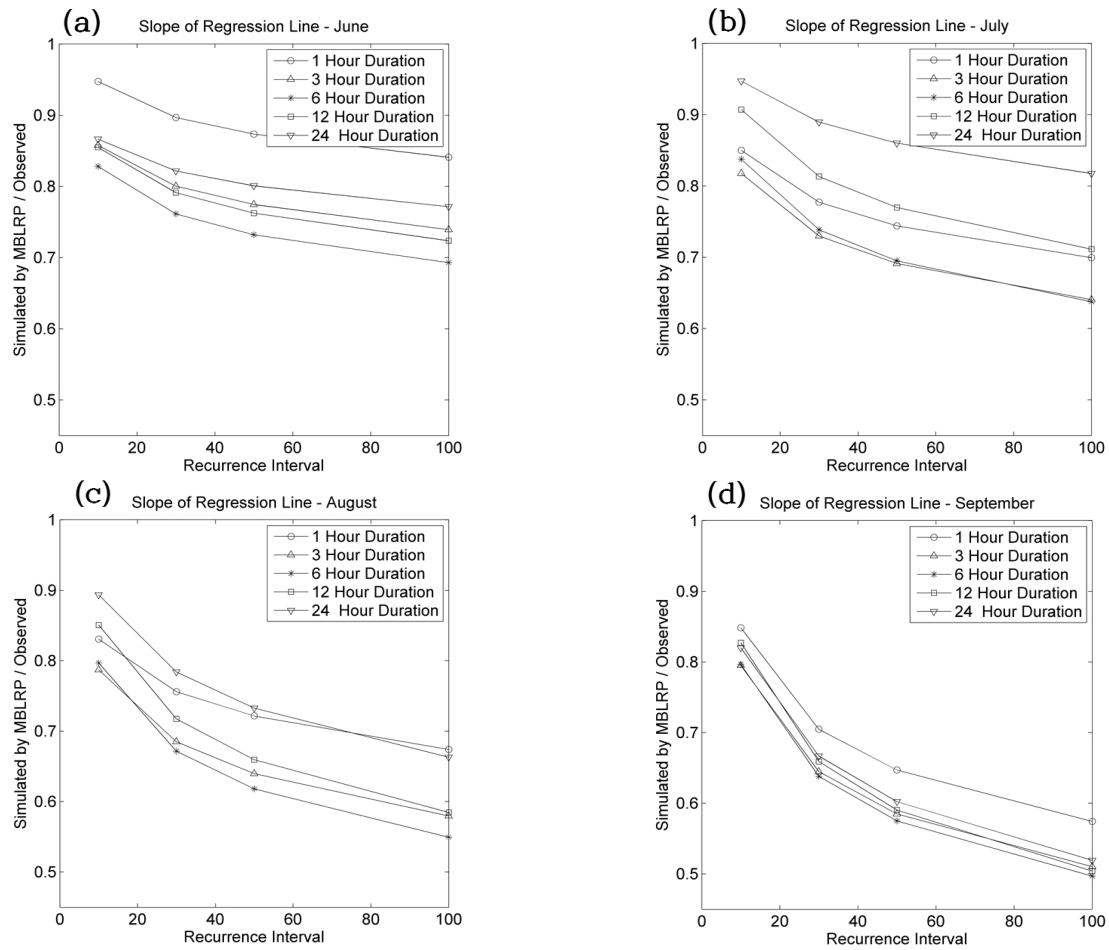


Fig. 8. Ratio of the Design Rainfall Estimated From the Observed Rainfall to the One Estimated From the Simulated Rainfall Time Series by MBLRP Rainfall Model for the Month of June, July, August, and September, Separately. The Plots for (a) June, (b) July, (c) August, and (d) September Are Shown

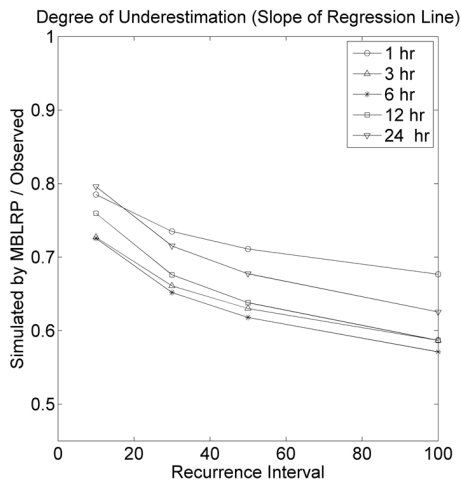


Fig. 9. Ratio of the Design Rainfall Estimated from the Observed Rainfall to the One Estimated from the Simulated Rainfall Time Series by MBLRP Rainfall Model for the Month of June, July, August, and September, Merged Together

값을 사용하지 않고 강우의 평균, 분산, 자기상관계수 및 무강우 확률 등의 통계치를 사용한다는 점을 들 수 있겠다. 한편, Fig. 9에 도시된 y값은 MBLRP 모형을 사용하여 산정된 강우시계열의 극한값들의 일반적인 과소산정정도를 정량화하는 지표로 사용될 수 있을 것이다.

3.2 확률홍수량

Fig. 10은 61개의 관측지점에 대하여 관측 강우자료와 MBLRP 모형을 통해 생성된 7월의 가상 강우자료를 가상의 유역에 적용하여 월별 최대홍수량을 구하고 이에 근거하여 산정한 확률홍수량을 관측치로부터 추정된 확률홍수량과 비교한 그래프이다. 확률강우량의 다양한 재현기간(200년, 100년, 50년, 30년, 10년 빈도)과 유역의 유출곡선지수(CN = 50, 60, 70, 80, 90)에 대하여 별도의 그래프를 작성하였다. 각 그래프의 x축은 MBLRP 모형을 통해 생성된 가상 강우자료에 기반하여 산정한 확률강우량을 나타내고,

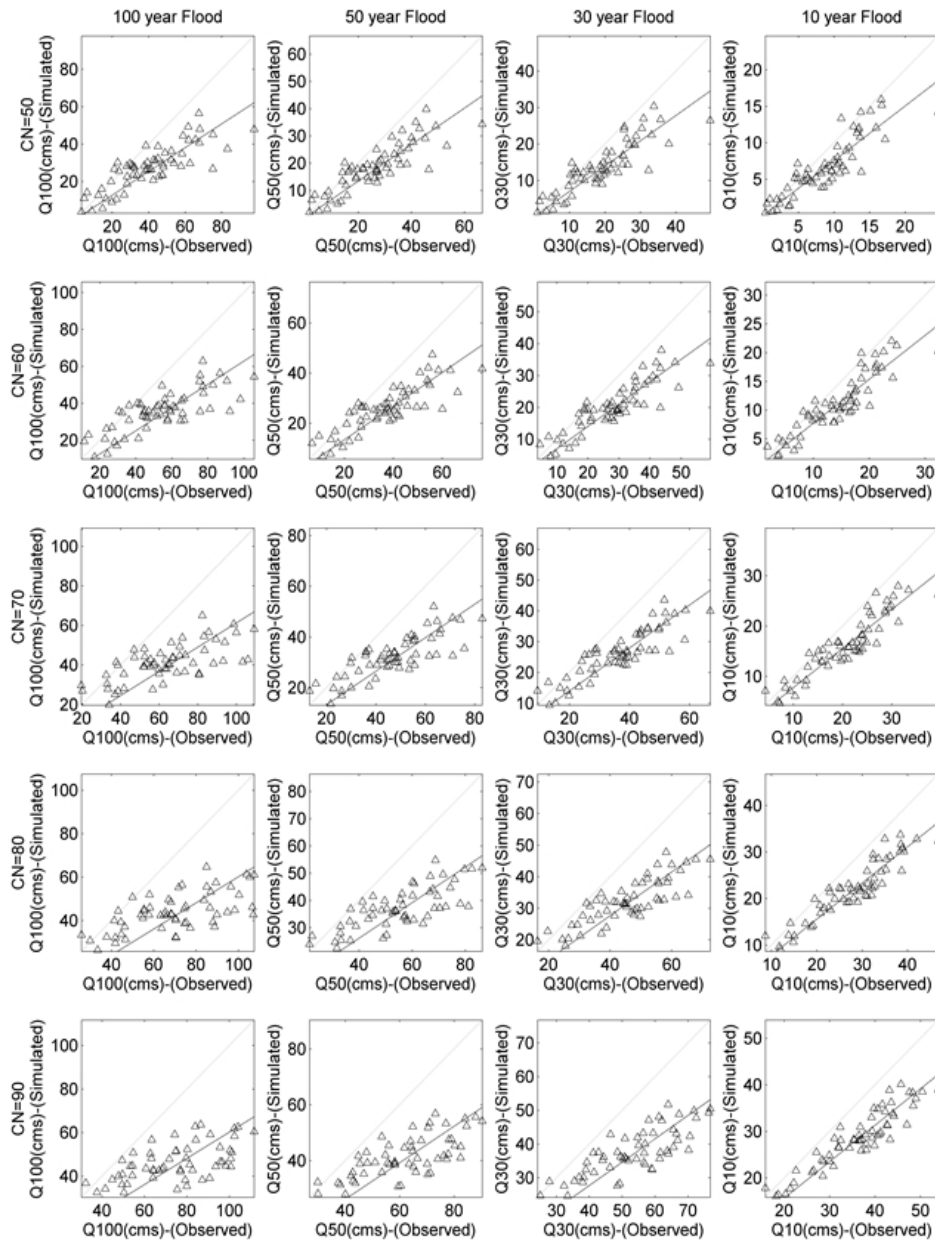


Fig. 10. Comparison Between the Design Flood at a Virtual Watershed Based on Observed Rainfall (x) and the one Based on the Simulated Rainfall Time Series Generated by MBLRP Model for the Month of July. The Plots in the 1st, 2nd, 3rd, 4th, and 5th Row Corresponds to the Curve Number of 50, 60, 70, 80, and 90, Respectively, and the 1st, 2nd, 3rd, and 4th Column Corresponds to Different Frequency of Design Flood (100-year, 50-year, 30-year, and 10-year Flood, Respectively)

y축은 관측 강우자료를 근거로 하여 산정한 확률홍수량을 나타내며, 점선과 실선은 1:1 선과 원점을 y절편으로 하는 최소자승회귀선을 나타낸다. 확률강수량의 경우와 마찬가지로 가상 강우자료를 기반으로 산정된 확률홍수량은 관측치에 기반을 두고 산정된 값보다 작았으며, 홍수의 재현기간이 증가함에 따라 과소산정량은 증가하였다. 이는 모의된 강우시계열을 바탕으로 산정한 확률강수량의 과소산정량이 재현기간에 따라 커지는 것이 주원인인 것으로 판단

된다. 또한, 유역의 유출곡선지수의 증가에 따라 확률홍수량의 과소산정량이 증가하였다. 이는 모형에 의한 극한강우량과 관측치의 극한강우량의 차이가 유역의 투수도가 큰 경우 침투현상을 통해 다소 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

과소산정되는 확률홍수량에 대한 좀 더 일반적인고 정량적인 정보를 얻기 위하여 동일한 분석을 6월, 7월, 8월, 9월의 강우 및 이를 모두 포함하는 강우 시계열에 대하여 실시하였다. Fig.

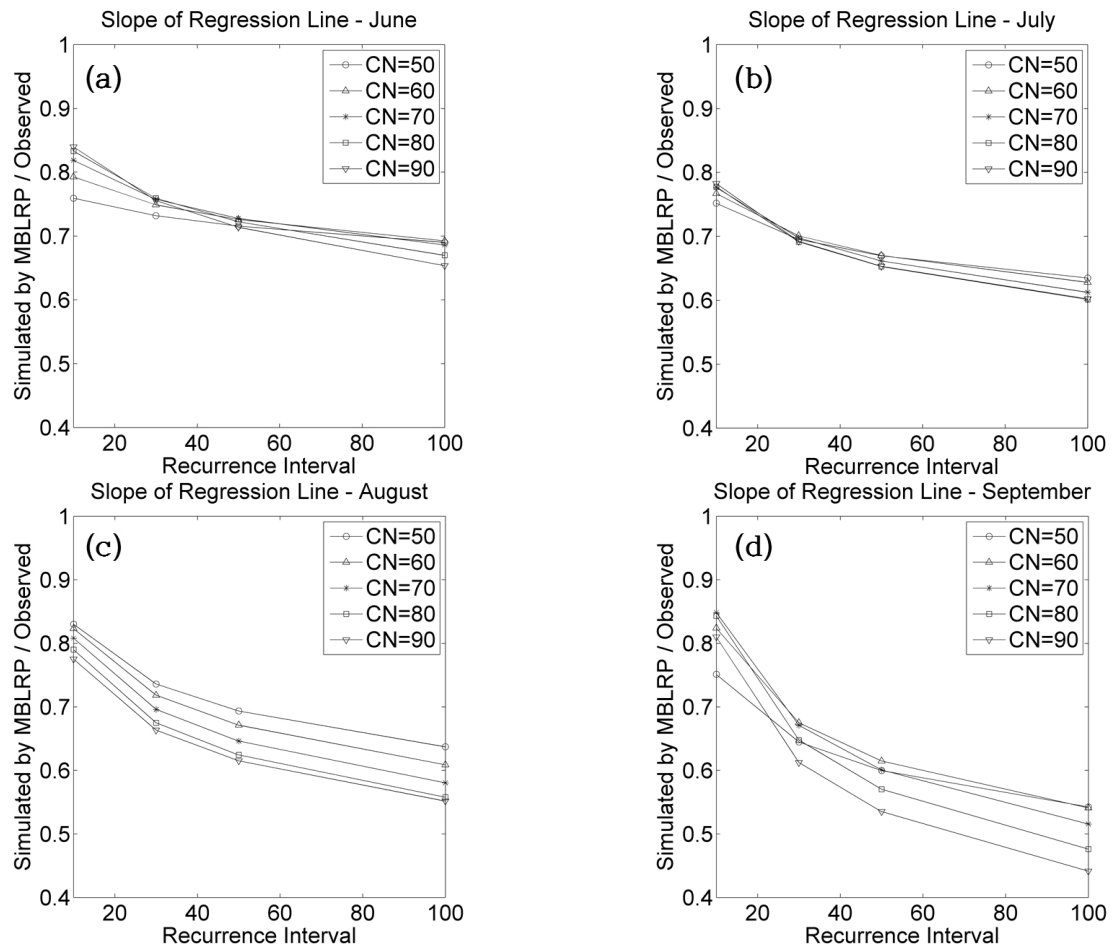


Fig. 11. Ratio of the Design Flood at a Virtual Watershed Estimated From the Observed Rainfall to the One Estimated From the Simulated Rainfall Time Series by MBLRP Rainfall Model for the Month of June, July, and August, Separately. The Plots for (a) June, (b) July, (c) August, and (d) September are Shown

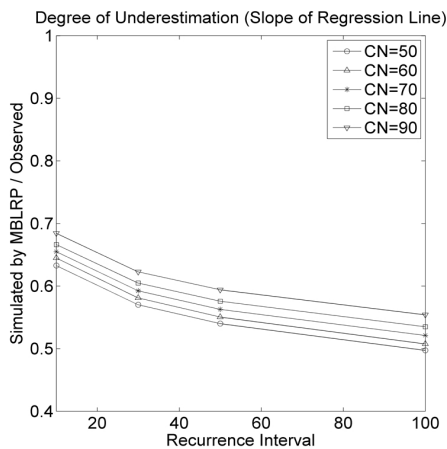


Fig. 12. Ratio of the Design Flood at a Virtual Watershed Estimated From the Observed Rainfall to the One Estimated From the Simulated Rainfall Time Series by MBLRP Rainfall Model for the Month of June, July, August, and September, Merged Together

11은 6월, 7월, 8월, 및 9월에 대한 Fig. 10의 각 그래프의 최소지속 회귀선의 기울기를 강우의 재현기간 및 곡선계수에 따라 재구성한 것이다. 7월의 경우와 마찬가지로 6월, 8월, 9월에도 홍수의 재현기간의 증가 및 곡선계수의 증가에 따른 확률홍수량의 과소산정량의 증가 추세가 뚜렷하였다. 6월, 7월에 대한 모형의 성능이 나머지 두 달에 비하여 다소 높았다. Fig. 12는 6월, 7월, 8월, 9월의 모든 강우시계열을 포함하는, 즉 연최대홍수량에 기반을 둔 확률홍수량에 대한 분석 결과이다. 이 경우에도 마찬가지로 강우재현기간의 증가 및 유역 곡선계수의 증가에 따라 MBLRP 모형에 따른 확률홍수량의 과소산정량은 증가하였으며, 증가범위는 22%에서 35% 사이이다.

한편, 본 연구에서 제시한 Fig. 12에 보인 확률홍수량의 과소산정량은 특정크기(7.5km²)와 지체시간(2시간)을 가진 유역에 대하여 불투수도만을 변수로 하는 NRCS-CN 방법을 사용하여 산출된 값이라는 점을 염두에 두어야 할 것이다. 따라서, 이와 다른 특성을

가진 유역과 다른 방법론을 사용하는 수문모형을 사용하는 경우, 이와 다른 결과가 도출될 수도 있다. 따라서, 좀 더 일반적인 결론을 얻기 위해서는 (1) 다양한 유역의 특성에 대해 다양한 유출량-유량 산정 모형을 사용하여 도출된 결과를 분석하여야 할 것이고, (2) 유량과 강우가 오랜 기간 동안 관측된 유역에 대하여 모형을 검증하는 방안도 고려해볼 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 우리나라 전역에 대하여 산정된 MBLRP 모형의 매개변수를 사용하여 생성한 가상의 강우시계열을 이용하여 극한 강우 및 극한홍수를 모의하였다. MBLRP 모형을 기반으로 생성된 가상 강우시계열을 사용하여 산정된 확률강우량은 관측치로부터 산정한 확률강우량보다 약 20%에서 42% 정도 작았고, 그 차이는 확률강우량의 재현기간의 증가에 따라 증가하는 추세를 보였다. 가상의 유역에 MBLRP 모형을 적용하여 산정한 확률홍수량은 관측치의 확률홍수량보다 약 31%에서 50% 정도 작게 나타났으며, 과소산정량은 재현기간의 증가 및 유역불투수도의 증가에 따라 증가하는 추세를 보였다. 이러한 과소산정의 원인으로는 (1) 6개의 매개변수를 통해 극도로 복잡한 강우 현상을 모의하는 MBLRP 모형의 단순성과 (2) 강우의 극한값을 고려할 수 없는 MBLRP 모형의 매개변수 산정과정상의 문제를 생각해볼 수 있을 것이다. 특히, 확률홍수량과 관련한 결과는 특정 면적과 특정 지체시간을 가진 가상의 유역에 대한 결과로서, 좀 더 다양한 유역특성에 대한 모의를 수행한다면 더욱 일반적인 결론을 도출 할 수 있을 것으로 기대되어, 본 연구팀에서는 이와 관련한 연구를 현재 수행 중에 있다.

본 연구는 이러한 연구결과를 통해, MBLRP 모형에 기반을 둔 몬테카를로 모의를 사용하여 재현기간이 큰 강우의 극한값에 영향을 받는 수문현상을 예측하고 그 불확실성 산정하는 경우, 그 결과값이 관측치에 근거한 값 보다 일반적으로 작을 수 있으며, 과소산정의 정도 또한 상당하다는 점을 최종 결론으로 제시하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요(시드)사업(지역특성을 반영한 상세 격자강우량 생산기술 개발)과 2013년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(한국연구재단 2013R1A1A1011676)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

Bathurst, J. C. and Bovolo, C. I. (2004). "Development of guidelines for sustainable land management in the agri and cobres target basins." *Deliverable 28 of the EU funded MEDACTION Project*, pp. 37, Available at: <http://www.ncl.ac.uk/medaction>.

Bathurst, J. C., Moretti, G., El-Hames, A., Moaven-Hashemi, A. and Burton, A. (2005). "Scenario modeling of basin-scale, shallow landslide sediment yield, Valsassina, Italian southern alps." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 5, pp. 189-202.

Brath, A., Montanari, A. and Moretti, G. (2006). "Assessing the effect on flood frequency of land use change via hydrological simulation (with uncertainty)." *J. Hydrology*, Vol. 324, No. 1-4, pp. 141-153.

Cho, H., Kim, D., Olivera, F. and Guikema, S. (2011). "Enhanced speciation in particle swarm optimization for multi-modal problems." *European Journal of Operational Research*, Vol. 213, pp. 15-23.

Dawson, R., Hall, J., Speight, L., Djordjevic, S., Savic, D. and Leandro, J. (2006). "Flood risk analysis to support integrated urban drainage." *Proceedings of the Fourth CIWEM Annual Conference on Emerging Environmental Issues and Future Challenges*, Newcastle upon Tyne. Aqua Enviro, pp. 12-14.

Fowler, H. J., Kilsby, C. G., O'Connell, P. E. and Burton, A. (2005). "A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of scenarios of climatic variability and change." *Journal of Hydrology*, Vol. 308, pp. 50-66.

Gyasi-Agyei, Y. and Willgoose, G. R. (1997). "A hybrid model for point rainfall modeling." *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 7, pp. 1699-1706.

Hosking, J. R. M. and Wallis, J. R. (2005). *Regional frequency analysis: An Approach Based on L-moments*, Cambridge University Press.

Khaliq, M. and Cunnane, C. (1996). "Modelling point rainfall occurrences with the modified Bartlett-Lewis rectangular pulses model." *Journal of Hydrology*, Vol. 180, pp. 109-138.

Kilsby, C. G., Burton, A., Birkinshaw, S. J., Hashemi, A. M. and O'Connell, P. E. (2000). "Extreme rainfall and flood frequency distribution modelling for present and future climates." *Proceedings of the British Hydrological Society Seventh National Hydrology Symposium*, pp. 3.51-3.56.

Kim, D. and Olivera, F. (2012). "On the relative importance of the different rainfall statistics in the calibration of stochastic rainfall generation models." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 17, No. 3.

Kim, D., Olivera, F. and Cho, H. (2013a). "Importance of Inter-annual variability of rainfall statistics in stochastically generated rainfall time series - Part I - Impact on peak and extreme rainfall values." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, pp. 1601-1610.

Kim, D., Olivera, F., Cho, H. and Lee, S. O., (2013b). "Importance

- of inter-annual variability of rainfall statistics in stochastically generated rainfall time series, Part II - Impact on watershed response variables." *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 27, pp. 1611-1619.
- Kim, D., Olivera, F., Cho, H. and Scolofsky, S. (2013c). "Regionalization of the parameters of the modified Bartlett-Lewis rectangular pulse model." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, Vol. 24, pp. 421-436.
- Kim, D., Shin, J. Y., Lee, S. O. and Kim, T. W. (2013d). "The application of the Poisson cluster rainfall generation model to the flood analysis." *J. Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 5, pp. 439-447 (in Korean).
- Ministry Of Construction and Transportation (MCT) (2000). *Research report on water resources management techniques. 1999, Vol. 1, Development of design rainfall maps in Korea*, Ministry Of Construction and Transportation, Korea (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2011). *Improvement and supplement of probability rainfall*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea (in Korean).
- Moretti, G. and Montanari, A. (2004). "Estimation of the peak river flow for an ungauged mountain creek using a distributed rainfall-runoff model." In: A. Breath, A. Montanari, E. Toth (eds.), *Hydrological Risk: Recent Advances in Peak River Flow Modelling, Prediction and Real-Time Forecasting - Assessment of the Impacts of Land-Use and Climate Changes*, pp. 113-128.
- Nolan, B. T., Dubus, I. G., Surdyk, N., Fowler, H. J., Burton, A., Hollis, J. M. Reichenberger, S. and Jarvis, N. J. (2008). "Identification of key climatic factors regulating the transport of pesticides in leaching and to tile drains." *Pest Management Science*, Vol. 64, No. 9, pp. 933-944.
- Rodriguez-Iturbe, I., Cox, D. R. and Isham, V. (1988). "A point process model for rainfall: Further Developments." *Proceedings of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, Vol. 417, No. 1853, pp. 283-298.
- Shin, J. Y., Joo, K. W., Heo, J. H. (2011). "A study of new modified Neyman-Scott rectangular pulse model development using direct parameter estimation." *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 44, No. 2, pp. 135-144 (in Korean).