



Experimental study of rainfall spatial variability effect on peak flow variability using a data generation method

Kim, Nam Won^a · Shin, Mun Ju^{a*}

^aKorea Institute of Civil Engineering and Building Technology

Paper number: 17-034

Received: 27 March 2017; Revised: 18 April 2017 / 19 April 2017; Accepted: 19 April 2017

Abstract

This study generated flood time series of ungauged catchments in the Andongdam catchment using a distributed rainfall-runoff model and data generation method, and extracted the peak flows of 50 catchments to investigate the effect of rainfall spatial variability on peak flow simulation. The model performance statistics for three gauged catchments were reasonable for all events. The flood time series of the 50 catchments were generated using distributed and mean rainfall time series as input. The distribution of the peak flow using the mean rainfall was similar or slightly different to that using the distributed rainfall when the distribution of the distributed rainfall was nearly uniform. However, the distribution of the peak flow using the mean rainfall was reduced significantly compared to that using the distributed rainfall when actual storms moved to the top or bottom of the study catchment, or the rainfall was randomly distributed. These cases were 35% of total number events. Therefore, the spatial variability of rainfall should be considered for flood simulation. In addition, the power law relationship estimated using the peak flow of gauged catchments cannot be used for estimating the peak flow of ungauged independent catchments due to latter's significant variation of the peak flow magnitude.

Keywords: Spatial distribution of rainfall, Spatially extended data, Distributed model, Peak flow distribution, Power law relationship

자료생성방법을 사용한 강우의 공간분포가 첨두유량의 변동성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

김남원^a · 신문주^{a*}

^a한국건설기술연구원 수자원·하천연구소

요지

본 연구에서는 안동댐유역을 대상으로 분포형 모형과 미계측유역 자료생성방법인 공간확장자료 생성방법을 사용하여 47개 미계측유역에 대해 홍수유출 시계열자료를 생성하고 3개 관측유역을 포함한 총 50개 유역에 대해 첨두유량을 추출하여 분석함으로써 강우의 공간분포가 유출에 미치는 영향을 실제유역과 실제사상에 대해 자세히 분석하였다. 20개 사상에 대해 GRM 모형의 매개변수 보정 및 검증결과 적절한 모형효율 통계결과를 얻었다. 이 추정된 매개변수와 실제강우(강우의 공간분포를 고려한 강우) 및 공간평균강우(실제강우를 공간적으로 평균한 강우)를 사용하여 50개 유역의 홍수유출 시계열자료를 생성하였으며 이 시계열 자료 중 첨두유량을 추출하여 분석한 결과 공간평균강우에 의한 첨두유량의 분포는 실제강우에 의한 첨두유량의 분포와 차이가 있었다. 강우의 분포가 유역전반에 비슷한 경우에는 실제강우와 공간평균강우에 의한 첨두유량의 분포가 비슷하거나 약간의 차이가 있었다. 하지만 호우가 상류 또는 하류방향으로 이동하거나 강우가 무작위로 분포되는 경우에는 공간평균강우에 의한 첨두유량의 분포가 실제강우에 의한 첨두유량의 분포보다 크게 좁아지는 것을 보였다. 이러한 사상의 비율을 조사한 결과 강우의 공간적 변동성을 고려하지 않고 홍수유출을 모의한다면 약 35%의 사상에 대해서는 적절하지 않은 첨두유량 모의결과를 얻을 수 있는 것으로 조사되었다. 따라서 홍수량 산정 또는 수자원 설계 시 강우의 시간분포 뿐만 아니라 공간분포 또한 고려해야 한다. 계측유역과 미계측유역의 첨두유량의 관계를 조사한 결과 낙동강 지류들에 위치한 미계측유역들의 첨두유량들은 그 크기가 넓게 분포됨에 따라 계측유역의 첨두유량을 사용하여 생성한 power law 관계를 이 미계측유역들의 첨두유량 추정 시 사용할 수 없었다. 또한 계측유역들의 첨두유량 또는 미계측유역 중 상하류로 연결된 비독립적인 소유역들의 첨두유량간에는 power law 가 존재하였으나 낙동강 지류들에 위치한 독립된 소유역들의 첨두유량들 간에는 상관관계가 없었다.

핵심용어: 강우의 공간분포, 공간확장자료, 분포형 모형, 첨두유량분포, Power law 관계

*Corresponding Author. Tel: +82-31-910-0475
E-mail: mjshin@kict.re.kr (M. J. Shin)

1. 서론

강우의 공간분포는 홍수수문곡선에 큰 영향을 미친다 (Singh, 1997). 이것은 총강우량이 같더라도 강우의 공간분포 특성에 따라 홍수수문곡선 및 침투유량의 크기가 다를 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 강우의 공간분포는 홍수량 산정과 홍수해석은 물론 수자원 설계에 큰 영향을 미칠 수 있다.

강우의 공간분포가 유출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해서 수문모형에 의한 모델링방법이 사용될 수 있다 (Obled et al., 1994). 분포형 또는 준분포형 수문모형을 사용하여 이 현상을 분석한 연구들이 있었는데, 다른 밀도의 강우 자료(5개와 21개의 강우관측소)와 준분포형 모형인 TOP-MODEL을 사용하여 소유역(71 km²)에 대해 유출을 모의함으로써 강우자료의 밀도가 유출에 미치는 영향을 분석한 연구 (Obled et al., 1994), 분포형 모형인 KINEROSR 모형을 사용하여 한 개의 소유역(4.4 ha)에 대해 강우의 시공간 분포와 바람의 방향과 속도가 유출에 미치는 영향분석(Faurès et al., 1995), 그리고 분포형 모형을 사용하여 한 개의 소유역(6.73 km²)에 대해 강우관측소 사용개수의 증가에 따른 유출의 불확실성 검토(Lopes, 1996) 등이 있었다. 국내에서는 공간분포된 강우와 준분포형 모형인 SWMM 모형을 크기가 다른 6개(0.06~12.77 km²)의 유역에 대해 적용함으로써 강우의 공간분포 영향이 수문곡선의 형태에 미치는 영향을 분석한 연구 (Lee and Lee, 1997)가 있었다. 하지만 이 연구들은 사용된 유역의 크기가 작아 소규모 이상의 유역에 대한 유출반응을 확인할 수 없다.

소규모 이상의 유역을 대상으로 한 연구로서 분포형 강우-유출모형인 MERCEDES 모형과 공간분포된 강우와 평균강우를 사용하여 유역크기가 다른 가상의 네 개의 유역(20~1500 km²)에 대해 유출을 모의함으로써 강우의 분포가 침투유량과 유출체적에 미치는 영향을 분석한 연구(Arnaud et al., 2002)와 준분포형 강우-유출모형인 RORB 모형과 공간분포된 강우, 한 개의 강우관측소의 강우, 복수의 강우관측소의 조합에 의한 강우, 그리고 레이더강우를 사용하여 Upper Lee 유역(1400 km²) 내에 위치한 7개 소유역에 대해 유출을 모의함으로써 강우의 공간분포가 유출에 큰 영향을 미치는 것을 확인한 연구(Segond et al., 2007) 등이 있었다. 국내에서는 용담댐상류에 위치한 천천유역(289.9 km²)을 대상으로 분포형 강우-유출모형을 사용하여 세 개의 태풍사상에 대해 두 가지 지점강우 내삽기법과 두 가지 레이더강우 합성기법에 의해 생성된 공간분포된 강우가 유출에 미치는 영향을 검토함으로써 공간분포강우 생성기법을 비교 및 분석한 연구(Lee

et al., 2012)가 있었다. 하지만 실제강우의 분포가 소규모부터 중규모에 걸쳐 10개 이상의 실제 유역의 유출에 미치는 영향을 자세히 분석한 연구는 충분하지 않은데 그 이유는 많은 유역 특히 소유역의 경우 대부분 미세측유역이기 때문에 관측유량자료를 수집하기가 매우 어렵기 때문이다(Tewolde and Smithers, 2007).

본 연구에서는 안동댐 유역을 대상으로 미세측유역의 유량 생성방법인 공간자료확장 방법을 통해 소유역부터 중유역까지의 다수의 관심 있는 실제 유역에 대한 유량 자료를 생성함으로써 실제강우의 공간분포가 유량에 미치는 영향을 분석하는데 목적이 있다. 다수의 관심 있는 미세측유역의 유량을 생성하기 위해 안동댐유역내 47개의 미세측유역을 무작위로 선정하였으며 따라서 안동댐 유역 내 3개 관측유역을 포함한 총 50개 유역을 대상유역으로 선정하였다. 크기가 상대적으로 큰 20개 사상을 선정하고 분포형 강우-유출 모형에 강우의 공간분포를 고려한 실제강우자료 및 강우의 공간분포를 고려하지 않은 공간평균강우자료를 입력자료로 사용하여 크기가 다른 50개 유역에 대해 20개 사상에 대한 시간단위별 홍수유출을 모의하였다. 이 모의된 홍수유출 자료 중 침투유량을 추출하여 비교 및 분석함으로써 강우의 공간분포가 침투유량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하려고 한다. 또한 침투유량과 유역면적간의 power law 관계를 조사하여 관측 침투유량을 사용한 power law 관계를 미세측유역의 침투유량 추정 시 적용 가능한지 조사하려고 한다. 2절에서는 대상유역, 입력자료 및 분포형 강우-유출 모형에 대해 설명하고 3절에서는 공간자료확장 방법과 본 연구에서 사용한 분석방법을 설명한다. 결과 및 토론은 4절에 있으며 결론은 5절에 있다.

2. 대상유역, 입력자료 및 분포형 강우-유출 모형

2.1 대상유역

본 연구에서는 안동댐 유역(1584 km²)을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 1). 안동댐유역은 산지유역으로서 남한의 동쪽에 위치하며 홍수조절, 생활, 농업 및 농업용수 공급에 중요한 역할을 하고 있다. 안동댐 유역 내에 위치한 세 군데의 한국수자원공사가 운영하는 수위관측지점(안동댐, 도산, 소천)을 세 관측유역의 출구지점으로 선정하였다. 또한 강우의 공간분포가 유출에 미치는 영향을 자세히 분석하기 위하여 추가적으로 크기가 다른 47개의 미세측유역(5.6~1459.7 km²)의 출구지점(Fig. 1의 Watch Points (WP); Table 1의 WP)을 무작위로 선정하였다. Table 1은 50개 유역의 면적, 유역평균경

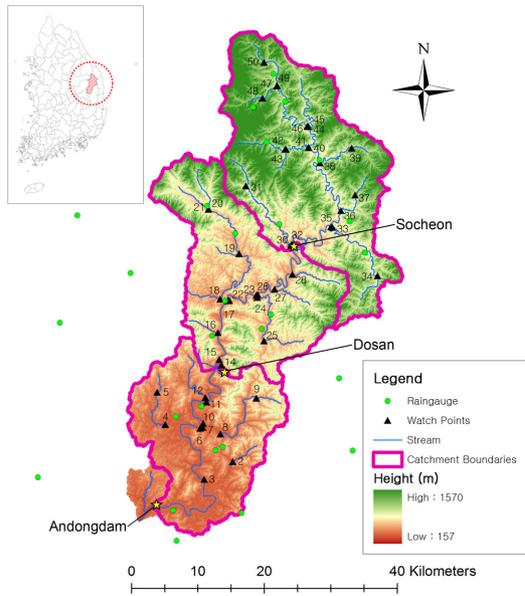


Fig. 1. Study area including three flow gauge points (Andongdam, Dosan, and Socheon) and 47 ungauged outlets (Watch Points)

사, 하천연장, 그리고 각유역의 출구지점이 위치한 하천의 분류(River class)를 보여준다. 여기에서 main은 본류인 낙동강을 의미하며 sub는 낙동강의 지류를 나타낸다.

2.2 입력자료

2.3절에서 설명할 분포형 강우-유출 모형의 시간단위 강우 입력자료를 구축하기 위해 안동댐유역 내외에 위치한 최대 27개의 강우관측소 자료를 사용하였다(Fig. 1). 이 강우관측소들은 기상청(<http://www.kma.go.kr>), 국토교통부(www.molit.go.kr), 그리고 한국수자원공사(www.kwater.or.kr)에서 운영하고 있다. 이 강우관측소들은 시간단위 강우자료를 1980년부터 보유하고 있으나 본 연구에서는 자료의 품질이 좋은 1998년부터 2009년까지의 기간 중 상대적으로 크기가 큰 20개의 사상을 추출하여 사용하였다(Table 2). 이 강우관측소의 자료는 분포형모형의 강우입력자료로 사용하기 위해 ordinary kriging 방법을 사용하여 격자형강우(해상도 200×200 m²)로 변환되었다. 본 연구에서는 이 강우의 공간분포가

Table 1. Size of area, average slope, and channel length of the 50 catchments

Name	Area (km ²)	Ave. slope	Ch. L (km)	River class	Name	Area (km ²)	Ave. slope	Ch. L (km)	River class
Andongdam	1584.2	0.21	147.2	main	WP 26	751.4	0.24	82.5	main
WP 2	14.7	0.19	5.6	sub	WP 27	39.1	0.24	10.6	sub
WP 3	1459.7	0.21	132.4	main	WP 28	28.4	0.27	11.1	sub
WP 4	51.6	0.1	12.6	sub	Socheon	645	0.25	62.5	main
WP 5	13.8	0.13	5.3	sub	WP 30	104.5	0.28	20.8	sub
WP 6	1327.7	0.23	119.6	main	WP 31	32.7	0.3	7.4	sub
WP 7	89.6	0.2	19.9	sub	WP 32	540	0.24	61.7	main
WP 8	81.2	0.21	16.4	sub	WP 33	88.5	0.21	23.3	sub
WP 9	17.6	0.2	5.5	sub	WP 34	37.3	0.21	10.1	sub
WP 10	1235.9	0.23	118.4	main	WP 35	402.1	0.25	49.9	main
WP 11	1221.5	0.23	114	main	WP 36	33.9	0.22	9.3	sub
WP 12	36.6	0.14	12.6	sub	WP 37	13	0.24	4.6	sub
Dosan	1157.4	0.23	101.6	main	WP 38	60.5	0.24	14.2	sub
WP 14	8.9	0.23	5.8	sub	WP 39	23.2	0.24	7.4	sub
WP 15	1142.6	0.23	99.5	main	WP 40	251.2	0.25	29.2	main
WP 16	11.2	0.25	5.6	sub	WP 41	49.2	0.26	12.8	sub
WP 17	231.7	0.19	33.1	sub	WP 42	22.2	0.28	9	sub
WP 18	34	0.1	6.5	sub	WP 43	14.2	0.22	4.2	sub
WP 19	5.6	0.13	4.3	sub	WP 44	189.9	0.25	25.2	sub
WP 20	28.6	0.29	7.5	sub	WP 45	58.6	0.24	15.1	sub
WP 21	47	0.24	10.8	sub	WP 46	131.2	0.25	24.6	sub
WP 22	850	0.24	89.5	main	WP 47	41.6	0.27	10.9	sub
WP 23	838.8	0.24	83.1	main	WP 48	32.6	0.28	7.7	sub
WP 24	86.4	0.18	20.3	sub	WP 49	53.6	0.23	12.5	sub
WP 25	39.2	0.18	10.2	sub	WP 50	19.6	0.25	7	sub

고려된 격자형강우를 실제강우라고 정의하였다. 또한 안동댐유역의 격자형강우(실제강우)를 매 시간마다 공간적으로 평균한 강우를 생성하였으며 이 강우를 공간평균강우라고 정의하였다. 이 실제강우와 공간평균강우를 사용하여 분포형 강우-유출 모형에 의해 모의된 유출량을 비교함으로써 강우의 공간분포가 유출에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

분포형 강우-유출 모형의 매개변수 추정을 위해 사용될 세관측유역 출구지점의 시간단위 유량자료는 안동댐의 경우 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)에서 제공하는 시 유입량자료를 사용하였고 도산과 소천지점의 경우 같은 기관에서 제공하는 수위자료와 수위유량 관계식을 사용하여 20개 사상에 대해 유량자료를 생성하였다. 분포형 모형의 지형입력자료를 생성하기 위해 1:25000 축척의 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)과 토지이용도와 토양도를 해상도 200×200 m²의 격자형 자료로 변환하였으며, 이 격자크기는 유역면적의 1% 보다 작아야 한다는 기존 연구(Bathurst, 1986)의 요구조건을 만족시킨다. 단, Bathurst (1986)의 연구는 약 30년 전의 연구이므로 Bathurst (1986)의 연구에서 사용된 자료는 현재 사용되고 있는 수치표고모형 등의 자료와 차이가 있을 수 있음을 밝혀둔다.

Table 2. Periods of the 20 events^[a]

Event	Period
1998_Evt 1	1998/08/14:19 - 1998/08/17:23
1999_Evt 1	1999/08/02:13 - 1999/08/05:04
1999_Evt 2	1999/09/19:20 - 1999/09/22:01
1999_Evt 3	1999/09/23:04 - 1999/09/25:19
2000_Evt 1	2000/09/13:01 - 2000/09/15:18
2000_Evt 2	2000/09/16:04 - 2000/09/18:04
2002_Evt 1	2002/08/05:20 - 2002/08/09:16
2002_Evt 2	2002/08/30:23 - 2002/09/02:04
2003_Evt 1	2003/06/27:09 - 2003/06/29:18
2003_Evt 2	2003/09/11:24 - 2003/09/15:01
2004_Evt 1	2004/06/19:04 - 2004/06/23:03
2004_Evt 2	2004/07/15:09 - 2004/07/19:02
2004_Evt 3	2004/08/17:19 - 2004/08/20:22
2006_Evt 1	2006/07/10:07 - 2006/07/12:08
2006_Evt 2	2006/07/15:14 - 2006/07/17:10
2006_Evt 3	2006/07/28:04 - 2006/07/31:01
2007_Evt 1	2007/09/01:02 - 2007/09/03:17
2008_Evt 1	2008/07/24:19 - 2008/07/27:03
2009_Evt 1	2009/07/11:21 - 2009/07/14:08
2009_Evt 2	2009/07/14:15 - 2009/07/16:22

^[a]The format of period is Year/Month/Day:Hour

2.3 분포형 강우-유출 모형

강우의 공간분포특성이 침투유출에 미치는 영향을 규명하기 위해 물리적 이론을 기반으로 한 분포형 강우-유출 모형인 grid based rainfall-runoff model (GRM) (Choi et al., 2015)을 사용하여 시간단위 유출을 모의하였다. 이 모형은 표면유출, 침투, 중간유출, 지하수유출 그리고 수공구조물의 영향을 모의할 수 있다. 표면유출과 중간유출은 운동파모형(Beven, 1981)을 사용하여 계산하고 침투는 Green-Ampt 모형을 사용하여 계산하며 지하수유출은 Darcy의 법칙(Freeze and Cherry, 1979)을 사용하여 계산한다. GRM 모형에 대한 더욱 자세한 설명은 Choi et al. (2015)의 연구를 참고하기 바란다. GRM 모형은 12개의 매개변수를 사용하며(Table 3) 이 중 보정에 사용된 매개변수는 Table 3의 1번부터 5번까지의 매개변수들이다. 이 매개변수들의 추정방법은 3.1절에서 설명할 것이다. 초기유출에 관련된 6번 매개변수는 안동댐유역의 각 사상의 초기 관측유출값을 사용하였다. 7번부터 12번까지의 매개변수들은 GRM모형에서 제시한 기본값을 사용하였는데(7번 매개변수는 0, 8번부터 12번까지의 매개변수는 1) 그 이유는 DEM, 토지이용도 및 토양도에서 추출한 유역의 지형 및 지질특성을 가능한 그대로 반영하기 위함이다.

3. 방 법

3.1 공간자료확장 방법에 의한 미계측유역의 유량자료 생성

2.1절에서 언급한 미계측유역의 유량자료를 생성 및 확보하기 위해서 공간자료확장 방법을 적용하였다. 이 방법은 보정 및 검증유역에서 모의유량이 관측유출을 적절히 모의한다면 추정된 매개변수값들을 상류지역에 있는 미계측유역에 적용하여 유출을 생성하는 방법이다. 이 방법은 유역출구지점에서 분포형 모형(이 연구에서는 GRM 모형)의 모의유량이 관측유출과 일치한다면 유역출구지점의 상류부에 위치하는 각 격자에서 계산된 유량은 추적과정을 통해 유역출구지점에서 합류되므로 상류부의 각 격자에서 계산된 유량은 타당하다는 가정을 기초로 한다. 따라서 이 공간자료확장 방법은 계측유역의 유량자료를 사용하여 추정된 매개변수들을 미계측유역에 확장 적용하여 유량자료를 생성한다는 의미를 갖고 있다. 이 공간확장자료 생성방법의 기본개념은 기존의 연구(Kim et al., 2013, 2014, 2015; Jung et al., 2015; Kim et al., 2016a, 2016b)에서 사용된 바 있다.

이 방법에서 중요한 점은 유역의 지형적 특성을 나타내는

Table 3. Description of the parameters of the GRM model

No.	Name of parameter	Unit	Range	Description	Calibration
1	IniSaturation	-	0-1	Initial soil saturation ratio	Yes
2	MinSlopeLdSrf	-	0.0001-0.04	Minimum slope of land surface	Yes
3	MinSlopeChBed	-	0.001-0.04	Minimum slope of channel bed	Yes
4	MinChBaseWidth	m	-	Minimum channel width	Yes
5	ChRoughness	-	0.025-0.15	Channel roughness coefficient	Yes
6	IniFlow	CMS	-	Initial stream flow	No
7	DryStreamOrder	-	0-max. str. order	Initial dry stream order	No
8	CalCoefLCRoughness	-	0-4	Land cover roughness coefficient	No
9	CalCoefPorosity	-	0-4	Soil porosity	No
10	CalCoefWFSuctionHead	-	0-4	Soil wetting front suction head	No
11	CalCoefHydraulicK	-	0-4	Soli hydraulic conductivity	No
12	CalCoefSoilDepth	-	0-4	Soil depth	No

물리적 매개변수(Table 3에서 2번부터 5번까지의 매개변수) 값이 모든 호우사상에 대해 일관된 값을 갖아야 한다는 점이다. 왜냐하면 호우특성은 유역의 물리적 특성에 영향을 미치지 않기 때문이다. 여기에서 주의할 점은 물리적 매개변수는 GRM 모형 모의 시 사용되는 물리적 입력자료의 경계조건(최소하도경사 등)을 의미하며, GRM 모형 모의 시 유역들의 분포형 물리적 입력자료를 그대로 사용하므로, 물리적 매개변수값의 일관된 추정 의미는 물리적 입력자료의 각 격자값이 동일한 물리적 특성값을 갖도록 추정한다는 것이 아니라 물리적 입력자료의 경계조건을 모든 호우사상에 대해 동일하도록 추정한다는 것이다. 모든 사상에 타당한 물리적 매개변수값을 추정하기 위해서 이 물리적 매개변수들을 20개의 사상에 대해 동시에 시행착오법으로 보정하였다. 매개변수 보정을 위해 사용된 목적함수는 수문분야에서 널리 사용되고 있는 Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970)이다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (1)$$

여기에서 $Q_{obs,i}$ 는 시간단위 관측유량, $Q_{sim,i}$ 는 모의유량, $\overline{Q_{obs}}$ 는 관측유량의 평균, n 은 총 시간의 수이다. NSE의 범위는 $[-\infty, 1]$ 이며 1은 관측유량값과 모의유량값이 정확히 일치함을 의미한다. 본 연구는 홍수유출 모의가 목적이므로 NSE를 목적함수로 사용하는 것은 타당하다(Legates and McCabe, 1999; Krause et al., 2005). 토양의 초기포화도에 관련된 1번

매개변수는 사상마다 선행토양함수량이 다르므로 앞에서 언급한 물리적 매개변수 보정 후에 NSE 목적함수를 사용하여 사상마다 각각 보정하였다.

앞에서 설명한 공간확장자료 생성을 위한 매개변수 보정 방법은 모든 사상을 사용하기 때문에 자료의 기간을 분리하여 매개변수를 보정 및 검증하는 전통적인 split-sample test (Klemeš, 1986)와 다르다. 그 대신 이 방법은 전체유역정보를 사용하여 매개변수 보정유역(안동댐유역)에 대해 매개변수를 보정하고 보정된 매개변수값을 미계측유역이라고 가정한 매개변수 검증유역(도산 및 소천)에 적용함으로써 추정된 매개변수값의 적절성을 검증하였다. 보정 및 검증유역에 적용된 매개변수값의 적절성 확인하기 위해 세 가지의 통계값인 NSE, percent bias (PBIAS), 그리고 modified correlation coefficient (r_{mod})를 사용하였다. NSE는 모의값에 대한 전반적인 적절성을 나타낸다(Moriasi et al., 2007). PBIAS는 모의 시계열자료의 체적에 대한 적절성을 나타내며(Gupta et al., 1999) 최적의 PBIAS는 0 이고 양의 값은 모의유량값의 과대 추정을 의미한다.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \times 100 \quad (2)$$

r_{mod} 는 상관계수 계산 시 이상치에 의한 영향과 체적의 차이에 대한 비민감도의 영향을 제거함으로써 보다 명확한 상관관계를 나타낸다(McCuen and Snyder, 1975).

$$r_{mod} = r \times \frac{\min(\sigma_{sim}, \sigma_{obs})}{\max(\sigma_{sim}, \sigma_{obs})} \quad (3)$$

여기에서 r 은 상관계수이고 σ_{sim} 와 σ_{obs} 는 각각 모의유량과 관측유량의 표준편차를 나타낸다. 세 통계값의 적절한 범위는 $NSE > 0.5$ (Moriassi et al., 2007), $PBIAS \pm 30\%$ (Smith et al., 2012), 그리고 $r_{mod} > 0.6$ (Smith et al., 2012) 이다.

마지막으로 앞의 과정을 통해 매개변수 보정 및 검증유역에 대해 적절히 추정된 매개변수값을 47개 미계측유역에 적용함으로써 미계측유역들의 시간단위 유량자료를 사상별로 생성하였다.

3.2 공간확장자료를 사용한 강우의 공간분포가 침투유량에 미치는 영향 분석

3.1절에서 생성한 47개 미계측유역의 시간단위 홍수유출 시계열자료와 세 개의 보정 및 검증유역의 홍수유출 시계열 자료는 강우의 공간분포를 고려한 자료이다. 이 공간분포가 고려된 강우자료는 2.2절에서 설명하였듯이 공간적으로 분포된 지점강우관측소의 자료를 ordinary kriging 방법을 사용하여 공간적으로 보간한 격자형 강우자료이다. 강우의 공간 분포가 유출에 미치는 영향을 비교 및 조사하기 위해서 2.2절에서 설명한 공간평균강우량 자료를 사용하여 관측 및 미계측 유역을 포함한 50개 유역의 홍수유출을 추가적으로 모의하였다. 공간평균강우량 자료를 사용하여 홍수유출을 모의 시 사용된 매개변수값은 앞에서 실제강우를 사용하여 보정 및 검증한 매개변수값을 그대로 사용하였는데 그 이유는 강우의 분포에 의한 영향만을 비교 및 분석하기 위함이다. 그리고 강우의 공간분포가 침투유량에 미치는 영향을 분석하기 위해 실제강우자료와 공간평균강우자료를 사용하여 생성한 50개 유역의 홍수유출 시계열 자료 중 침투유량만을 추출하여 비교 및 분석하였다.

3.3 계측 및 미계측유역의 침투유량 자료를 사용한 power law 관계분석

관측유역의 침투유량 자료를 사용하여 미계측유역의 침투 유량의 추정이 가능한지 그리고 독립된유역과 비독립된유역의 홍수량들은 어떠한 관계를 갖는지를 조사하였다. 먼저 실제강우자료를 사용하여 생성한 50개 유역의 침투유량 자료 중 낙동강 본류에 있는 3개의 비독립된 관측유역의 침투유량을 추출하여 power law 관계를 조사하고 이 관계를 낙동강 지류에 있는 독립된 소유역에 적용가능한지 사상별로 조사하였다. 그리고 낙동강 본류에 위치하고 있는 관측유역들의 관측

침투유량들과 각각 다른 지류에 위치하고 있어 독립된 미계측 유역들의 침투유량들 그리고 동일 지류지만 복수의 미계측 유역들을 포함하고 있어 비독립된 미계측유역들의 침투유량들의 관계를 조사함으로써 독립된 그리고 비독립된 유역들의 침투유량의 power law 관계유무를 조사하였다. 이 결과들은 남아프리카의 25개 유역에 대해 침투유량과 유역크기 간에 power law 관계를 갖는다는 Pegram and Parak (2004)의 연구를 검증 또는 보완할 수 있다.

4. 결과 및 토론

4.1 매개변수의 보정 및 검증

3.1절에서 설명한 매개변수 보정방법을 사용하여 추정된 일관된 물리적 매개변수(Table 3에서 2번부터 5번까지의 매개변수)값들은 다음과 같다: MinSlopeLdSrf: 0.0001; Min SlopeChBed: 0.025; MinChBaseWidth: 20; ChRoughness: 0.04. 그리고 초기포화도에 관련된 1번 매개변수는 20개 사상마다 다르며 그 추정된 값은 Table 4와 같다.

Table 5는 이 추정된 매개변수값들을 사용하였을 때 매개

Table 4. Calibrated parameter values for the 20 events

Event	IniSaturation
1998_Evt 1	0.70
1999_Evt 1	0.60
1999_Evt 2	0.35
1999_Evt 3	0.66
2000_Evt 1	0.45
2000_Evt 2	0.93
2002_Evt 1	0.08
2002_Evt 2	0.31
2003_Evt 1	0.07
2003_Evt 2	0.90
2004_Evt 1	0.10
2004_Evt 2	0.77
2004_Evt 3	0.53
2006_Evt 1	0.38
2006_Evt 2	0.62
2006_Evt 3	0.60
2007_Evt 1	0.65
2008_Evt 1	0.22
2009_Evt 1	0.55
2009_Evt 2	0.60

변수 보정유역(안동댐)과 미계측유역이라고 가정한 매개변수 검증유역(도산, 소천)에 대해 GRM 모형의 모형효율성에 대한 세 가지의 통계값(NSE, PBIAS, r_{mod})을 보여준다. Table 5에서 보여주듯이 20개 사상에 대해 모형효율성을 조사한 결과 안동댐유역은 20개 사상 모두 세 가지 모형효율 통계값이 적절하였다. 도산과 소천유역에서는 세 가지 모형효율 통계값들이 대부분 적절하였으나 몇몇 사상에서는 적절하지 않았다. 도산유역의 2000_Evt 1 사상의 경우 PBIAS 값이 만족범위 밖에 있었지만 NSE값은 만족범위인 0.5에 근사하였고 r_{mod} 값은 적절하였으므로 이 사상에 대한 GRM 모형의 모의유량값은 적절하다고 판단하였다. 같은 방법으로 소천유역의 모형효율 통계값들을 검토한 결과 2004_Evt 1 사상은 세 가지 모형효율 통계값들이 모두 적절하지 않았다. 이 부적절한 결과의 주요 원인은 모형구조나 입력기상자료의 오류 보다는 수위자료 또는 수위유량 관계식에 포함된 오류가 그 원인으로 판단된다. 그 이유는 소천유역의 다른 사상에서는 동일한 GRM 모형의 물리적 매개변수값들을 사용함에도 불구하고

대부분 적절한 모형효율 통계값들을 얻었으며 또한 2004_Evt 1 사상에 대해 안동댐과 도산유역의 경우 소천유역 유출모의에 사용한 실제강우입력자료를 사용함에도 불구하고 적절한 모형효율 통계값들을 얻었기 때문이다. 따라서 소천유역의 2004_Evt 1 사상에 대한 모의유량값은 타당하다고 판단하였다. 수위자료 또는 수위유량 관계식에 포함된 오류에 대한 자료품질분석은 본 연구의 연구범위 밖의 사항이므로 생략하였다.

4.2 강우의 공간분포가 침투유량에 미치는 영향

20개 각 사상에 대하여 50개 유역의 유역면적크기대비 침투강우강도와 모의침투유량의 분포를 조사하였다. 유역별 모의침투유량을 동일한 그림 안에서 비교하기 위해 모의침투유량의 단위를 m^3/s 에서 mm/h 로 변환하였으며 조사결과 사상별로 분포형태가 달랐다. 따라서 호우의 이동 유무와 강우의 분포를 강우관측소자료를 사용하여 조사한 후 20개 사상들을 네 가지 종류(Type 1~4)로 분류하였다. Type 1은 호우의

Table 5. Model performance for the calibration and validation catchments^[a]

Event	Andongdam			Dosan			Socheon		
	NSE	PBIAS	r_{mod}	NSE	PBIAS	r_{mod}	NSE	PBIAS	r_{mod}
1998_Evt 1	0.86	-15.0	0.90	0.80	14.2	0.76	0.88	-3.0	0.86
1999_Evt 1	0.72	-21.7	0.88	0.83	-18.9	0.94	0.53	-14.1	0.65
1999_Evt 2	0.70	-5.9	0.66	0.87	-10.7	0.86	0.78	-3.5	0.79
1999_Evt 3	0.90	-9.2	0.89	0.93	-8.3	0.89	0.75	-4.9	0.68
2000_Evt 1	0.82	17.9	0.89	0.48	34.3	0.71	0.93	14.0	0.96
2000_Evt 2	0.89	-8.4	0.93	0.90	12.1	0.93	0.70	-21.5	0.79
2002_Evt 1	0.86	0.7	0.88	0.81	-21.5	0.70	0.87	13.4	0.93
2002_Evt 2	0.99	0.7	0.96	0.85	-29.7	0.76	0.98	-1.0	0.85
2003_Evt 1	0.93	-12.0	0.91	0.83	-23.5	0.73	0.76	-16.8	0.81
2003_Evt 2	0.89	22.0	0.86	0.92	-8.4	0.86	0.07	20.0	0.52
2004_Evt 1	0.78	28.4	0.86	0.75	29.0	0.90	0.05	40.0	0.56
2004_Evt 2	0.74	-2.7	0.82	0.84	-2.7	0.89	0.00	-7.2	0.52
2004_Evt 3	0.85	18.9	0.93	0.96	15.0	0.97	0.45	24.7	0.62
2006_Evt 1	0.92	-5.1	0.90	0.95	-2.5	0.89	0.79	12.5	0.73
2006_Evt 2	0.95	-7.3	0.96	0.92	-1.8	0.88	0.55	20.7	0.70
2006_Evt 3	0.92	-9.2	0.97	0.98	-2.5	0.97	0.68	4.8	0.65
2007_Evt 1	0.88	-2.3	0.84	0.91	-8.8	0.82	0.26	14.9	0.56
2008_Evt 1	0.89	-2.3	0.93	0.95	-10.3	0.96	0.83	6.2	0.79
2009_Evt 1	0.93	8.9	0.88	0.96	-7.6	0.89	0.87	-7.2	0.91
2009_Evt 2	0.90	-8.4	0.90	0.81	-26.8	0.90	0.75	-23.7	0.76

^[a]The bold and underlined numbers represent the values placed outside of the acceptance range for each performance evaluation statistic: NSE > 0.5, PBIAS \pm 30%, and r_{mod} > 0.6

이동이 미비하고 강우의 분포가 유역전반에 걸쳐 비교적 비슷한 경우로서 실제강우입력자료가 공간평균강우의 형태와 비슷한 경우이고, Type 2는 호우가 상류방향으로 이동하는 경우, Type 3는 호우가 하류방향으로 이동하는 경우이며, Type 4는 시간별 강우강도가 유역마다 달라 강우의 분포가 무작위

한 경우이다. 이 Type별 사상 중 대표적인 네 가지 사상(1998_Evt 1, 2003_Evt 1, 2003_Evt 2, 2006_Evt 3)에 대해서 Fig. 2와 같이 나타내었다. Fig. 2에서 횡축은 유역면적의 크기를 나타내고 종축은 첨두강우강도와 모의첨두유량의 크기를 나타낸다. 여기서 나타낸 유역별 첨두강우강도(파란색 원 표시)

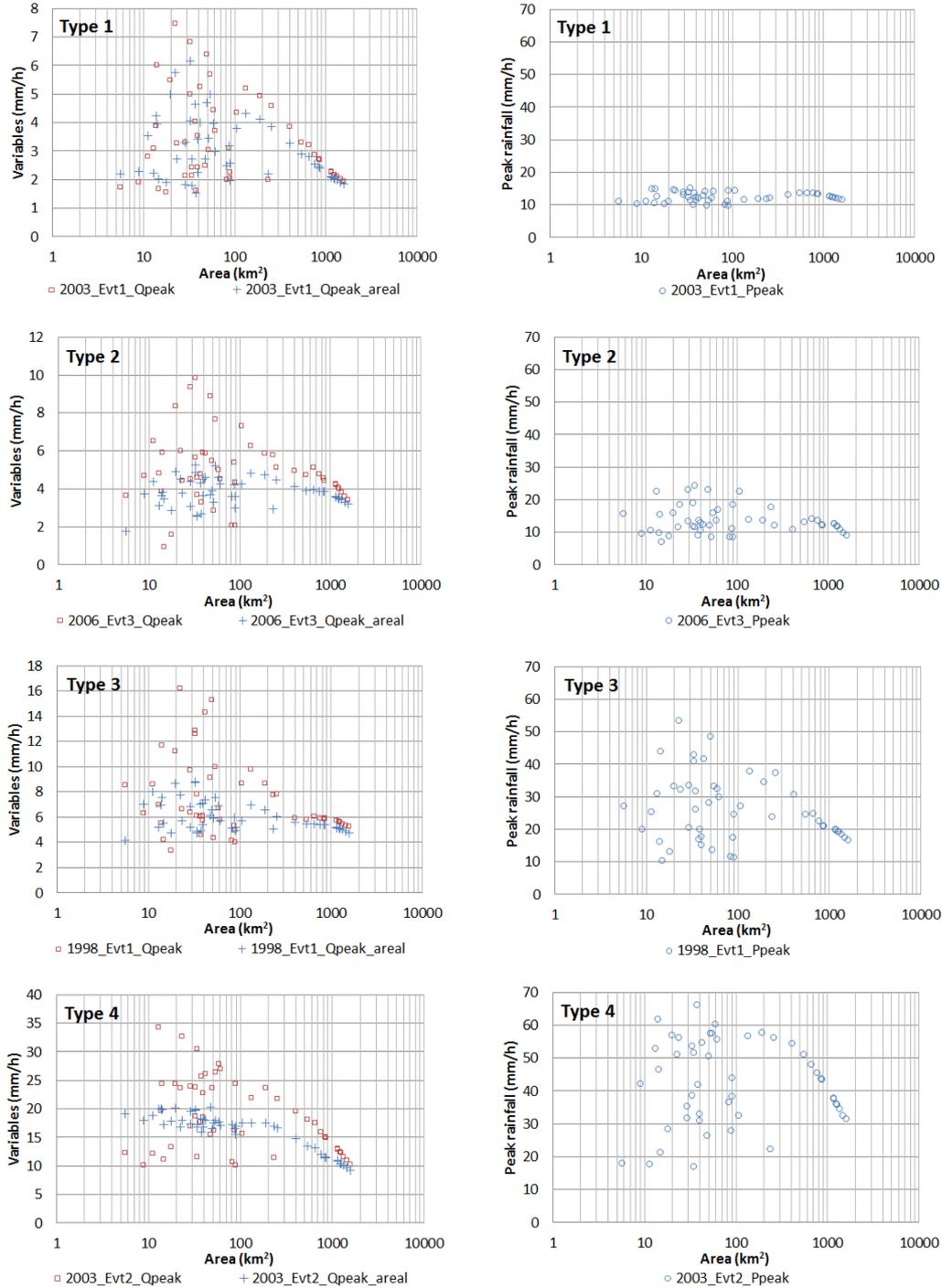


Fig. 2. Comparison of the peak flow with and without the rainfall spatial variability

는 실제강우입력자료에서 추출한 것이며 공간평균강우량의 침투강우강도는 50개 유역에 대해 동일하므로 그림에서 생략하였다. 빨간색 네모표식은 실제강우입력자료를 사용하였을 경우 모의침투유량을 나타내며 파란색 크로스 표식은 공간평균강우입력자료를 사용하였을 경우 모의침투유량을 나타낸다.

Fig. 2에서 보여주듯이 Type 1의 경우 실제강우를 사용한 경우의 유역별 모의침투유량의 분포(2003_Evt 1_Qpeak)가 공간평균강우를 사용한 경우의 유역별 모의침투유량의 분포(2003_Evt 1_Qpeak_areal)와 비슷한 경향을 나타내었다. Type 1의 침투강우강도의 분포(2003_Evt 1_Ppeak)에서 보듯이 50개 유역의 침투강우강도의 크기가 다른 Type의 침투강우강도의 크기에 비해 비교적 비슷한 것을 확인할 수 있다 (Type 1의 침투강우강도의 변동계수는 0.12, Type 2는 0.31, Type 3는 0.39, Type 4는 0.30). 이것은 강우의 분포가 유역전반에 걸쳐 비교적 비슷한 경우에는 공간평균강우를 사용하여 시간단위 홍수유출을 모의하여도 비교적 적절한 결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 하지만 호우가 상류방향으로 이동 (Type 2)하거나 하류방향으로 이동 (Type 3)하는 경우에는 공간평균강우를 사용한 경우의 유역별 모의침투유량의 분포(2006_Evt 3_Qpeak_areal, 1998_Evt 1_Qpeak_areal)가 실제강우를 사용한 경우의 유역별 모의침투유량의 분포(2006_Evt 3_Qpeak, 1998_Evt 1_Qpeak)보다 좁아지는 것을 확인

할 수 있다(앞에서 언급한 침투강우강도의 변동계수가 가장 큰 Type 3 (1998_Evt 1) 사상에 대해 호우의 공간적 이동을 Fig. 3과 같이 일례로 도시하였음). 이것은 호우가 이동하는 경우에는 공간평균강우량을 사용하여 모의한 침투유량값이 실제호우에 의한 침투유량값을 적절히 모의할 수 없음을 의미한다. 또한 이것은 홍수량 산정 시 호우의 공간적 이동을 고려하지 않고 산정한 침투유량값은 실제 가능한 침투유량값보다 매우 작을 수 있다는 것을 의미한다(본 연구에서는 특히 유역면적이 300 km² 보다 작은 경우). 그리고 국지성 호우로 인해 강우의 분포가 무작위한 경우 (Type 4)에는 공간평균강우를 사용하여 모의한 유역별 모의침투유량의 분포(2003_Evt 2_Qpeak_areal)가 실제강우를 사용한 경우의 유역별 모의침투유량의 분포(2003_Evt 2_Qpeak)보다 매우 좁아지는 것을 보여준다. 이것은 시간단위 홍수량 산정 시 유역별로 강우의 분포가 비교적 균등한 사상의 경우를 제외하면 호우의 공간적 불균질성이 반영된 실제강우를 사용하는 것이 적절하다는 것을 의미한다. 또한 이 결과는 강우의 공간적 특성을 고려하지 않으면 홍수량 모의 시 문제가 발생할 수 있다는 기존의 연구 (Arnaud et al., 2002)를 뒷받침한다.

앞에서 강우의 공간분포를 고려하지 않고 산정한 침투유량값 특히, 유역면적이 300 km² 보다 작은 경우에는 실제 가능한 침투유량값과 매우 다를 수 있다는 것을 보였다. 이 강우의 공간적 변동성이 유출에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기

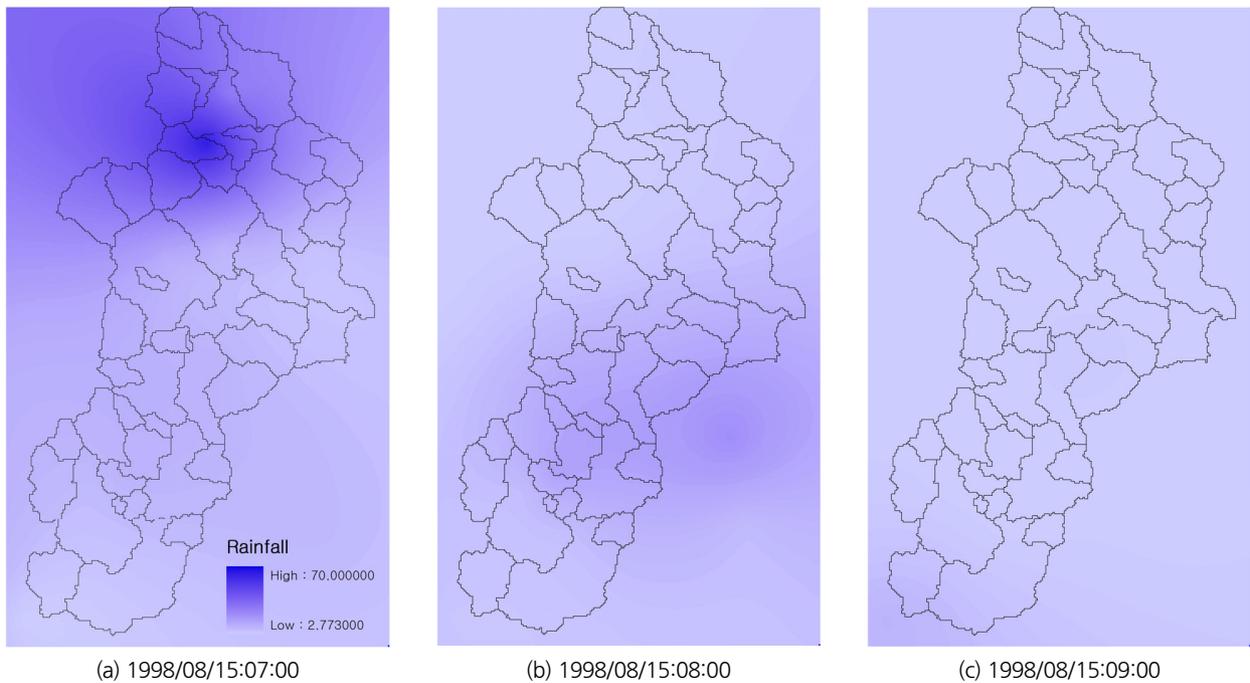


Fig. 3. Spatial distribution of rainfall when the storm moved to the catchment's outlet direction

위해 유역면적이 300 km² 보다 작은 유역들에 대해 실제강우를 사용한 경우의 모의침투유량값의 표준편차(σ Qpeak)와 공간평균강우를 사용한 경우의 모의침투유량의 표준편차(σ Qpeak_areal), 그리고 σ Qpeak와 σ Qpeak_areal과의 비율의 백분율(% σ ratio = 100(σ Qpeak_areal / σ Qpeak))을 계산하였으며 그 결과를 Table 6에 사상 및 Type별로 나타내었다. 이 % σ ratio로부터 호우의 Type별로 공간평균강우를 사용한 경우의 모의침투유량이 얼마만큼 실제강우를 사용한 경우의 모의침투유량의 변동성을 모의할 수 있는지를 확인할 수 있다.

먼저 20개 사상 중 Type별 개수는 Type 1의 경우 13개(65%), Type 2의 경우 4개(20%), Type 3의 경우 2개(10%), 그리고 Type 4의 경우는 1개(5%)의 사상이 있었다. Type 1의 경우 % σ ratio의 범위는 34.78부터 111.80 까지였으며 평균은 66.07이었다. 이것은 Type 1의 경우에 대해서는 공간평균강

우를 사용한 경우의 모의침투유량이 실제강우를 사용한 경우의 모의침투유량의 변동성을 평균적으로 약 66% 정도 모의할 수 있다는 것을 의미한다. Type 1의 사상 중 네 가지 사상(2000_Evt 2, 2002_Evt 2, 2004_Evt 2, 2009_Evt 2)의 % σ ratio 값은 각각 41.68, 37.41, 34.78, 41.67% 로서 50% 보다 낮음으로 인해 Type 2와 Type 3의 % σ ratio 값의 범위(각각 14.68~46.47% 와 32.12~37.71%)와 겹쳤는데 이것은 호우의 이동 이외의 요소 즉, 선행토양함수량이나 강우강도의 크기 등이 침투유량에 영향을 미침으로 인해 이 네 가지 사상의 % σ ratio 값이 낮아진 것으로 판단된다. 예를 들면, 2000_Evt 2와 2009_Evt 2 사상의 경우 선행사상(2000_Evt 1과 2009_Evt 1)과의 시간간격이 작음으로 인해(Table 2) 선행사상의 토양함수량이 그 이후 사상의 초기토양함수량이 상대적으로 크도록 영향을 미쳤으며, 이 상대적으로 높은 초기토양함수량을 가진 사상들에 대해 소유역들의 약간의 침투강우강도의 차이는 침투유량에 직접적으로 영향을 미침으로 인해 공간평균강우를 사용한 경우의 침투유량과 조금 더 큰 차이가 발생하였다. 그리고 2002_Evt 2와 2004_Evt 2 사상의 경우에는 강우의 공간분포가 비교적 균등하더라도 소유역들의 침투강우강도의 차이가 약간 더 크게 발생하여 이로 인한 모의침투유량은 공간평균강우를 사용한 경우의 모의침투유량과 조금 더 큰 차이를 갖았다. Type 2와 Type 3의 % σ ratio 값의 평균은 각각 약 31% 와 35%로서 Type 1의 경우의 절반정도에 해당하였으며, Type 4의 경우 % σ ratio 값은 약 19%로서 낮은 변동성을 보였다. 이것은 공간평균강우를 사용한 침투유량 모의는 무작위성 강우분포(Type 4)의 변동성에 의한 유출의 변동성을 모의하기에 매우 적절하지 않음을 의미한다. 이 공간평균강우와 실제강우를 사용한 경우의 침투유량의 차이는 강우관측소의 밀도가 미세측 소유역의 침투유량모의 시 큰 영향을 미친다는 것을 또한 의미한다.

Table 6. Standard deviation (σ) of the peak flow with and without the spatial variability in rainfall for the catchments having size less than 300 km²

Event	σ Qpeak	σ Qpeak_areal	% σ ratio	Type
1999_Evt 2	2.90	1.91	65.86	1
1999_Evt 3	1.84	1.38	75.05	1
2000_Evt 1	1.44	0.84	58.73	1
2000_Evt 2	3.30	1.38	41.68	1
2002_Evt 2	6.68	2.50	37.41	1
2003_Evt 1	1.63	1.18	72.26	1
2004_Evt 1	2.17	1.22	56.16	1
2004_Evt 2	3.47	1.21	34.78	1
2004_Evt 3	1.86	2.07	111.80	1
2006_Evt 1	3.04	2.02	66.63	1
2007_Evt 1	1.02	1.09	107.04	1
2009_Evt 1	1.97	1.77	89.79	1
2009_Evt 2	5.39	2.25	41.67	1
Mean			66.07	1
1999_Evt 1	9.92	2.06	20.73	2
2002_Evt 1	4.74	2.20	46.47	2
2006_Evt 2	3.73	0.55	14.68	2
2006_Evt 3	2.04	0.83	40.55	2
Mean			30.61	2
1998_Evt 1	3.28	1.24	37.71	3
2008_Evt 1	6.59	2.12	32.12	3
Mean			34.91	3
2003_Evt 2	6.66	1.29	19.41	4

4.3 공간확장자료에 의한 침투유량의 power law 관계 조사

관측유역의 침투유량 자료를 사용하여 미세측유역의 침투유량의 추정이 가능한지 그리고 독립된유역과 비독립된유역의 침투유량들은 어떠한 관계를 갖는지를 조사하기위해 Fig. 2에서 실제강우를 사용한 경우의 침투유량을 유역별로 분류하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. Fig. 4에서 Main은 낙동강 본류에 출구지점을 위치한 미세측유역의 침투유량을 나타내며 Main_obs는 낙동강 본류에 출구지점을 위치한 관측유역(안동댐, 도산, 소천)의 침투유량을 나타낸다. 그리고 Sub는 낙동강 지류에 한 개의 출구지점을 위치한 미세측유역의 침투유량

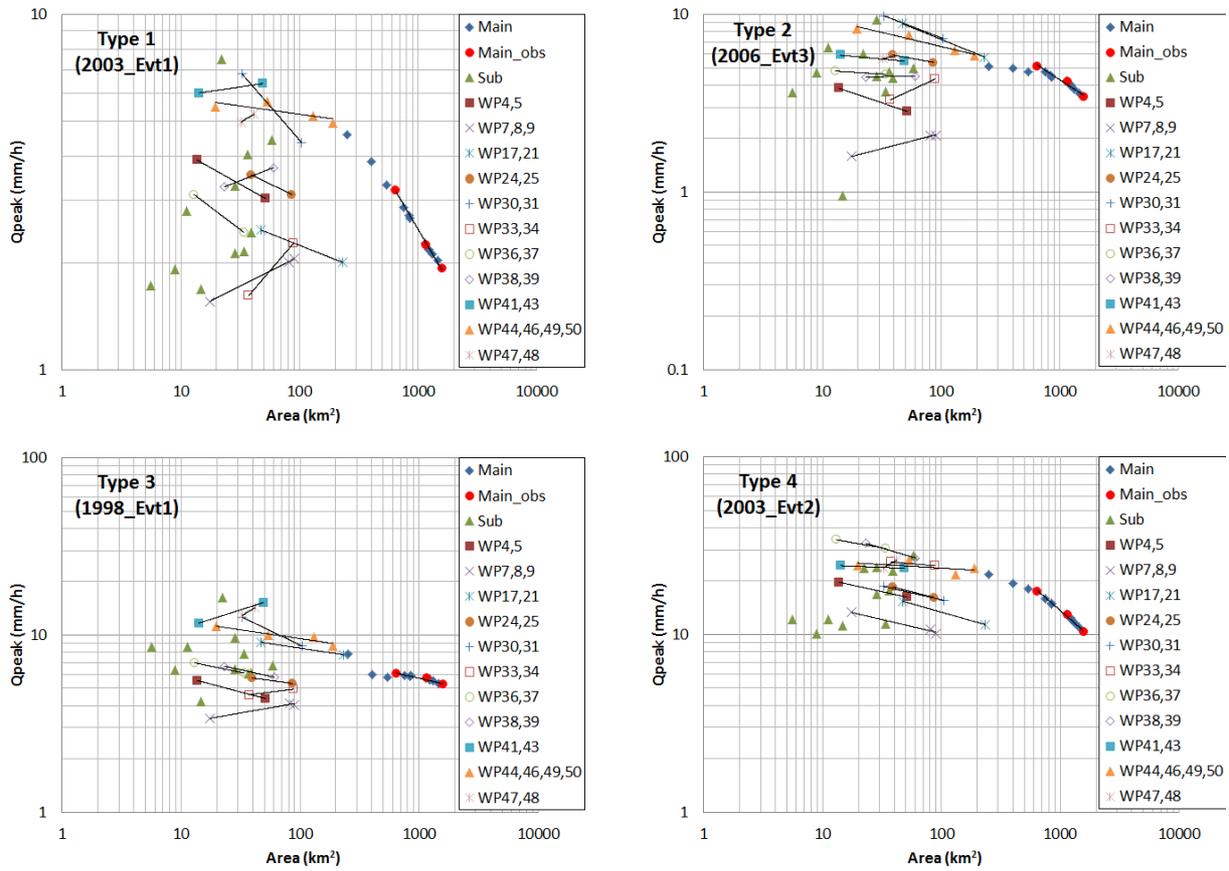


Fig. 4. Distribution of the simulated peak flow using the rainfall data with spatial variability. Main and Main_obs represent the peak flow of catchments having the outlets placed on the Nakdong river, whereas Sub and numbered WP represent the peak flow of catchments having the outlets placed on the tributaries of the Nakdong river. The Main and Main_obs represent the peak flow of ungauged and gauged catchment, respectively. The Sub and the numbered WP represent the peak flow of independent and dependent ungauged catchment, respectively. The solid black line represents the trendline of peak flows using power equation

을 나타내며 번호가 매겨진 WP는 한 개의 낙동강 지류에 두 개 이상의 출구지점을 위치한 미계측유역의 첨두유량을 나타낸다. 여기에서 번호는 소유역의 번호를 나타낸다. 예를 들면 WP4,5는 한 개의 낙동강 지류에 대해 하류지점에 WP4 유역의 출구가 존재하며 그 상류에 WP5 유역의 출구가 존재하는 경우로서 이 유역들의 첨두유량 결과로부터 상류와 하류의 첨두유량간의 상관성을 확인할 수 있다. 따라서 Main_obs와 WP는 각각 Main과 Sub의 특별한 경우라고 할 수 있다.

Fig. 4의 Main 유역들은 4.2절에서 설명한 네 가지의 모든 Type에 대해서 유역의 크기가 커질수록 첨두유량이 작아지는 power law 관계(Pegram and Parak, 2004)가 성립되는 것을 보여준다. 하지만 Main 유역들의 첨두유량의 추세는 Main_obs 유역들의 첨두유량의 추세선의 기울기와 조금 다른 것을 확인할 수 있다. 예를 들면 Type 2에서 Main_obs의 추세선의 기울기는 Main의 추세의 기울기보다 가파른 것을 확인할 수 있다. 이것은 관측첨두유량에 의한 추세선을 사용

하여 관측유역보다 상류에 위치한 Main 유역들의 첨두유량을 추정할 수 없음을 의미한다.

서로 다른 지류에 위치한 독립된 유역들(Sub)의 첨두유량들은 상관관계가 없었으며 그 이유는 이 독립된 유역들이 매우 다른 물리적 특성을 갖기 때문인 것으로 판단된다. 하지만 동일한 지류에 위치한 비독립된 유역들(WP)의 첨두유량은 유역의 크기가 커짐에 따라 대부분 첨두유량이 작아지는 power law 관계가 성립되는 것을 확인할 수 있었다(예로 WP44,46,49,50). 이 231.7 km²보다 작은 Sub 유역들 및 WP 유역들의 첨두유량은 유역크기에 따라 매우 넓게 분포되어 있었다. 또한 WP 유역들의 첨두유량의 추세선의 기울기는 앞에서 언급한 관측첨두유량의 추세선의 기울기와 차이가 있었다. 이것은 낙동강 본류의 관측첨두유량을 사용한 power law 관계식을 사용하여 낙동강 지류에 위치한 소유역들의 첨두유량을 추정할 수 없음을 의미한다. 유역의 크기가 증가함에 따라 반대로 첨두유량이 증가하는 몇몇 예외적인 WP 유역들이

있었지만 이 유역들도 사상의 Type별로 그 경향이 달랐다. 예를 들면 WP7.8.9 유역들은 Type 1, 2와 3에서 유역크기가 증가함에 따라 침투유량이 증가하였으나 Type 4에서는 반대로 침투유량이 감소하였다. 이것은 호우의 특성이 power law 관계에 영향을 미치는 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 안동댐유역을 대상으로 물리적 기반의 분포형 모형과 공간확장자료 생성방법을 사용하여 47개 미세측유역에 대해 홍수유출 시계열자료를 생성하고 3개 관측유역을 포함한 총 50개 유역에 대해 침투유량을 추출하여 분석함으로써 강우의 공간분포가 유출에 미치는 영향을 실제유역과 실제사상에 대해 자세히 분석하였다. 20개 사상에 대해 GRM 모형의 매개변수 보정 및 검증결과 적절한 모형효율 통계결과를 얻었다. 이 추정된 매개변수와 실제강우 및 공간평균강우를 사용하여 50개 유역의 홍수유출 시계열자료를 생성하였으며 이 시계열 자료 중 침투유량을 추출하여 분석한 결과 공간평균강우에 의한 침투유량의 분포는 실제강우에 의한 침투유량의 분포와 차이가 있었다. 강우의 분포가 유역전반에 비슷한 경우(Type 1)에는 실제강우와 공간평균강우에 의한 침투유량의 분포가 비슷하거나 공간평균강우에 의한 침투유량의 분포가 실제강우에 의한 침투유량의 분포보다 약간 좁아지는 차이가 있었다. 하지만 호우가 상류 또는 하류방향으로 이동하거나(Type 2와 Type 3) 강우가 무작위로 분포되는 경우(Type 4)에는 공간평균강우에 의한 침투유량의 분포가 실제강우에 의한 침투유량의 분포보다 크게 좁아지는 것을 보였다. Type 별 사상의 비율을 조사한 결과 Type 1의 경우는 전체 사상 중 65%를 차지하였고 Type 2의 경우는 20%, Type 3의 경우는 10%, 그리고 Type 4의 경우는 5%를 차지하였다. 이것은 강우의 공간적 변동성을 고려하지 않고 홍수유출을 모의한다면 약 35%의 사상에 대해서는 적절하지 않은 침투유량 모의결과를 얻을 수 있다는 것을 나타내며 또한 홍수체적에 대해서도 적절하지 않은 모의결과를 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 홍수량 산정 또는 수자원 설계 시 강우의 시간분포 뿐만 아니라 공간분포 또한 고려해야 한다. 계측유역과 미세측유역의 침투유량의 관계를 조사한 결과 낙동강 지류들에 위치한 미세측유역들의 침투유량들은 그 크기가 넓게 분포됨에 따라 계측유역들의 침투유량을 사용하여 생성한 power law 관계식을 이 미세측유역들의 침투유량 추정 시 사용할 수 없었다. 또한 계측유역들의 침투유량 또는 미세측유

역 중 상하류로 연결된 비독립적인 소유역들의 침투유량간에는 power law 가 존재하였으나 낙동강의 서로 다른 지류들에 위치한 독립된 소유역들의 침투유량들 간에는 상관관계가 없었다. 따라서 대상유역 내 미세측유역의 침투유량을 추정 시 관측 침투유량에 의한 관계식을 사용하는 것 보다는 본 연구에서 사용한 공간확장자료 생성방법을 사용하는 것이 적절하다고 판단된다. 또한 본 연구에서 사용한 공간확장자료 생성방법을 통해 생성한 관심 있는 미세측유역의 침투유량 자료는 다양한 침투유량 분석에 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술 지역특성화사업 「제주권 국토교통기술 지역거점센터」 연구과제(17RDRP-B076 272-04)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Arnaud, P., Bouvier, C., Cisneros, L., and Dominguez, R. (2002). "Influence of rainfall spatial variability on flood prediction." *Journal of Hydrology*, Vol. 260, No. 1, pp. 216-230.
- Bathurst, J. C. (1986). "Sensitivity analysis of the Systeme Hydrologique European for an upland catchment." *Journal of Hydrology*, Vol. 87, No. 1, pp. 103-123.
- Beven, K. (1981). "Kinematic subsurface stormflow." *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 5, pp. 1419-1424.
- Choi, Y. S., Choi, C. K., Kim, H. S., Kim, K. T., and Kim, S. (2015). "Multi-site calibration using a grid-based event rainfall-runoff model: a case study of the upstream areas of the Nakdong River basin in Korea." *Hydrological Processes*, Vol. 29, No. 9, pp. 2089-2099.
- Faurès, J. M., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A., and Sorooshian, S. (1995). "Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 173, No. 1, pp. 309-326.
- Freeze, R. A., and Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, New Jersey, pp. 15-236.
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., and Yapo, P. O. (1999). "Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 4, No. 2, pp. 135-143.
- Jung, Y., Kim, N. W., and Lee, J. E. (2015). "Dam effects on spatial extension of flood discharge data and flood reduction scale II." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 3, pp. 221-231.
- Kim, N. W., Jung, Y., and Lee, J. E. (2013). "Spatial extension of

- runoff data in the applications of a lumped concept model.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 9, pp. 921-932.
- Kim, N. W., Jung, Y., and Lee, J. E. (2014). “Simulation conditions based characteristics of spatial flood data extension.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 6, pp. 501-511.
- Kim, N. W., Jung, Y., and Lee, J. E. (2015). “Dam effects on spatial extension of flood discharge data and flood reduction scale I.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 3, pp. 209-220.
- Kim, N. W., Lee, J. E., Lee, J. W., and Jung, Y. (2016a). “Regional-frequency analysis using spatial data extension method: I. An empirical investigation of regional flood frequency analysis.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 5, pp. 439-450.
- Kim, N. W., Lee, J. E., Lee, J. W., and Jung, Y. (2016b). “Regional-frequency analysis using spatial data extension method: II. Flood frequency inference for ungauged watersheds.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 5, pp. 451-458.
- Klemeš, V. (1986) “Operational testing of hydrological simulation models.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 13-24.
- Krause, P., Boyle, D. P., and Bäse, F. (2005). “Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment.” *Advances in Geosciences*, Vol. 5, pp. 89-97.
- Lee, G. H., Lee, K. H., Jung, K. S., and Jang, C. L. (2012). “Analysis on the effect of spatial distribution of rainfall on soil erosion and deposition.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 7, pp. 657-674.
- Lee, J. T., and Lee, S. T. (1997). “The effects on the characteristics of urban storm runoff due to the space allocation of design rainfall and the partition of the subbasin.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 30, No. 2, pp. 177-191.
- Legates, D. R., and McCabe, G. J. (1999). “Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation.” *Water Resources Research*, Vol. 35, No. 1, pp. 233-241.
- Lopes, V. L. (1996). “On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modelling.” *Catena*, Vol. 28, No. 1, pp. 107-119.
- McCuen, R. H., and Snyder, W. M. (1975). “A proposed index for comparing hydrographs.” *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 6, pp. 1021-1024.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Hrmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.” *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V. (1970). “River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles.” *Journal of hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Obled, C., Wendling, J., and Beven, K. (1994). “The sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns: an evaluation using observed data.” *Journal of hydrology*, Vol. 159, No. 1-4, pp. 305-333.
- Pegram, G., and Parak, M. (2004). “A review of the regional maximum flood and rational formula using geomorphological information and observed floods.” *Water SA*, Vol. 30, No. 3, pp. 377-392.
- Segond, M. L., Wheater, H. S., and Onof, C. (2007). “The significance of spatial rainfall representation for flood runoff estimation: a numerical evaluation based on the Lee catchment, UK.” *Journal of Hydrology*, Vol. 347, No. 1, pp. 116-131.
- Singh, V. P. (1997). “Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph.” *Hydrological Processes*, Vol. 11, No. 12, pp. 1649-1669.
- Smith, M. B., Koren, V., Zhang, Z., Zhang, Y., Reed, S. M., Cui, Z., Moreda, F., Cosgrove, B. A., Mizukami, N., and Anderson, E. A. (2012). “Results of the DMIP 2 Oklahoma experiments.” *Journal of hydrology*, Vol. 418-419, pp. 17-48.
- Tewolde, M. H., and Smithers, J. C. (2007). “Flood routing in ungauged catchments using Muskingum methods.” *Water SA*, Vol. 32, No. 3, pp. 379-388.