

중규모 유역에서 Clark 방법과 ModClark 방법을 이용한 유출해석 시 적정 소유역 분할 개수에 대한 연구

이동훈* · 최종인** · 신수훈*** · 이재응****

Lee, Donghoon* · Choi, Jongin** · Shin, Soohoon*** · Yi, Jaeung****

A Study on Proper Number of Subbasin Division for Runoff Analysis Using Clark and ModClark Methods in Midsize Basins

ABSTRACT : In this study, flood runoff characteristics is analyzed according to subbasin divisions by physically based rainfall-runoff model and appropriate number of subbasin divisions is suggested for midsize test basins. The Clark method, a lumped model in HEC-HMS, and the ModClark method, a semi-distributed model are used to simulate rainfall-runoff processes on Andong-reservoir basin, Imha-reservoir basin, and Pyeongchang river basin. The test basins were divided into nine subdivision cases by equal-area subdivision method such as single basin, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 12, and 15 subbasins, and compared the simulated and observed values in terms of the peak flow and the peak time. The simulation results indicated that the peak flows tended to increase and the peak time shifted earlier as the number of subdivisions increased and this tendency weakened after the certain number of subdivisions. In this research, the specific number of subdivision was defined as the minimum number of subdivision considering both peak flow and peak time. Consequently, the minimum number of subdivisions is determined as 5 for Andong and Imha reservoir basins and 7 for Pyeongchang river basin.

Key words : HEC-HMS, ModClark, Subbasin, Subdivision

초 록 : 본 연구에서는 강우-유출 모형을 이용하여 소유역 분할에 따른 유출변화 특성을 파악한 후 다수의 시험유역에 대해 적합한 소유역 분할개수를 제시하였다. 강우-유출과정을 모의하기 위하여 HEC-HMS 내의 집중형 모형인 Clark 방법과 준분포형 모형인 ModClark 방법을 시험유역인 안동댐, 임하댐 및 평창강의 3개 유역에 적용하였다. 각각의 시험유역에 대하여 1개, 3개, 5개, 6개, 7개, 9개, 10개, 12개, 15개의 9가지 case로 등면적 분할을 하였으며, 모의된 첨두유량과 첨두시간을 실제 관측된 수문곡선과 비교 분석하였다. 시험유역에 대한 소유역 분할에 따른 유출모의 결과 소유역 분할 수가 증가할수록 첨두유량은 증가하였고 첨두시간은 짧아졌으며 이러한 경향은 일정 분할개수 이후 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 경향이 감소하기 시작하는 소유역 분할 수를 최소분할 개수로 나타내었으며, 첨두유량 및 첨두시간을 종합적으로 고려하였을 때 안동댐 및 임하댐 유역은 최소분할개수가 5개, 평창강 유역은 7개로 분석되었다.

검색어 : HEC-HMS, ModClark, 소유역, 유역분할

* 아주대학교 건설교통공학과 석사 (otation@ajou.ac.kr)

** 정회원 · 아주대학교 건설교통공학과 석사과정 (super2136@ajou.ac.kr)

*** 한국토지주택공사 동탄사업본부 과장 (shin4918@lh.or.kr)

**** 정회원 · 아주대학교 (Corresponding Author · Ajou University · jeyi@ajou.ac.kr)

Received September 27 2012, Revised October 11 2012, Accepted November 20 2012

1. 서론

최근 물리적 기반의 강우-유출모형에 대한 연구에서는 더욱 정확한 유출해석을 위하여 유역의 세분화를 통한 지형학적 특성을 고려하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 유역의 세분화는 분포형 모형의 경우 격자 크기의 결정이 중요한 요소로 고려되며, 실무에서 주로 사용하는 집중형 모형의 경우 소유역 분할이 중요한 요소로 고려된다. 집중형 모형으로 홍수량을 산정하는 방법은 상류유역을 단일유역으로 처리하는 방법과 소유역 별 홍수량을 산정하고 하도추적을 통하여 유역 출구점에서 전체유역에 대한 홍수량을 산정하는 방법으로 구분된다. 소유역 분할 시 발생하는 침투유량의 증가는 대상유역의 면적이 작아져서 단위도 종거의 침투치가 증가하고 침투홍수량은 크게 증가되는 반면 하도의 저류효과로 인한 홍수량 감소는 상대적으로 작기 때문이다(정종호, 유흥남, 2007). 이처럼 소유역 분할은 침투유량 및 침투시간에 큰 영향을 미치지만 이에 관한 연구는 유역의 지형인자 및 수문 매개변수의 산정과 같은 강우-유출해석 연구에 비하여 상대적으로 부족한 실정이다.

소유역 분할에 대한 외국의 연구동향을 살펴보면, Band (1986)는 DEM을 이용하여 유역분할에 대한 연구를 수행하였으며, Hromadka(1986)는 San Bernardino County의 수문설계 지침에서 임의의 소유역 분할은 피해야 하고 소유역 수가 많을수록 정확도가 높아지는 것은 아니라고 기술하였다. Norris 등(1993)은 HEC-1을 사용하여 소유역 분할에 대한 연구를 수행하였고 소유역 분할이 침투유량 예측에 현저한 영향을 미치며 이러한 영향은 소유역 분할 수가 증가할수록 감소한다고 주장하였으며, Tripathi 등(2006)은 SWAT을 이용하여 Nagwan 유역의 분할에 대한 연구를 수행하였고 소유역 분할 수가 증가할수록 증발산 예측량이 증가한다고 제시하였다. Luong(2008)은 HEC-HMS를 이용하여 5개 유역의 소유역 분할에 대한 연구를 수행하였으며, 소유역 분할 수 보다는 적합한 유출곡선지수의 산정이 유출모의에 더 중요하며 적합한 소유역 분할 수를 제기하기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다고 언급하였다.

국내의 연구동향을 살펴보면, 조홍제(1998)는 유역 내 유출의 평균화를 시도하기 위해서 소유역내 분수계를 기준으로 다수의 분할 소구역으로 나누어 전체소유역과 분할 소구역의 사면 특성치를 비교 분석하였으며, 이종태와 이상태(1997)는 도시유역에서 강우-유출을 해석하기 위한 설계조건으로서의 강우공간분포와 소유역의 분할이 미치는 영향을 9개 도시유역에 대하여 SWMM으로 평가하였다. 또한, 김경탁과 최윤석(2003)은 강우-유출 모형을 적용함에 있어서 동일 특성으로 구분되는 유역분할에 따른 유출 응답특성의 변화에 대하여

검토하였으며, 일정 유역분할 이후에는 유역분할이 유출모의 결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 제시하였다. 김영호(2003)는 보청천에 대하여 합성단위도 방법에 따른 유출분석 후 소유역의 분할 수가 증가할수록 침투유량 증가 영향이 감소한다고 제시하였으며, 최경창(2006)은 금호수위관측소 상류 유역을 1개에서 10개로 분할 후 7개 호우사상에 대하여 분석하였고 소유역 분할 수가 4개일 때가 유출해석에 적합하다고 제시하였다. 유승혁 등(2009)은 강우-유출의 해석과 관련하여 소유역 분할에 따른 영향분석을 위해 단일 유역과 다수 유역으로 구분하고 홍수량 산정결과와 민감도 분석을 수행하였으며, 유역 별 하도에서의 도달시간과 최원점에서의 집중시간을 산정하는 경우로 구분하여 유로연장의 조건별 영향을 분석하였다. 해당 논문에서 “일정 유역분할 이후에는 유역분할이 유출모의 결과에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었고, 소유역 분할에 따른 홍수량 증가 영향과 유로연장의 조건별 영향이 크지 않음을 판단할 수 있었다.”고 기술하였다. 또한, 신수훈(2012)은 평창강 유역을 1개에서 15개의 소유역으로 분할 후 공간분포된 강우의 적용이 가능한 ModClark 방법으로 유출분석을 수행하였으며, “소유역 분할에 따른 유출모의 결과 대체적으로 분할개수가 증가함에 따라 침투유량은 증가하고 침투시간은 감소하는 경향이 나타났으나, 침투유량 및 침투시간 모두 각각 일정분할 개수 이상에서는 이러한 경향이 감소하는 것으로 나타났다”라고 기술하였다.

본 연구에서는 강우-유출모형으로 실무에서 많이 사용하는 집중형 모형인 Clark 방법과 공간분포된 강우의 적용이 가능한 준분포형 모형인 ModClark 방법을 사용하였으며, 소유역(subbasin) 분할에 따라 모의되는 유출형태 변화의 일반적인 경향을 파악하기 위하여 유출매개변수의 보정 없이 소유역 분할에 따른 유출모의를 수행하였다. 또한, 침투유량 및 침투시간을 실측자료와 비교분석하여 다수의 시험유역에 대한 유출해석에 적합한 소유역 분할 수를 제시하였다.

2. 강우-유출모형의 적용

본 연구에서는 HEC-HMS 내의 집중형 모형인 Clark 방법에서 유역평균강우량 산정법으로 Thiessen 가중치법을, 유효유량 산정법으로 NRCS CN방법, 단위도 법으로 Clark 유역 홍수추적법, 기저유량 산정법으로 Constant Monthly, 하도추적방법으로는 Muskingum 방법을 사용하였다. Clark 유역 홍수추적방법은 유역의 시간-면적관계를 사용하여 자연하천유역에 내리는 순간단위유효유량을 계산하고, 유역출구에서의 직접유출 수문곡선인 순간단위유량도를 유도하는 방법이며, 개념도는

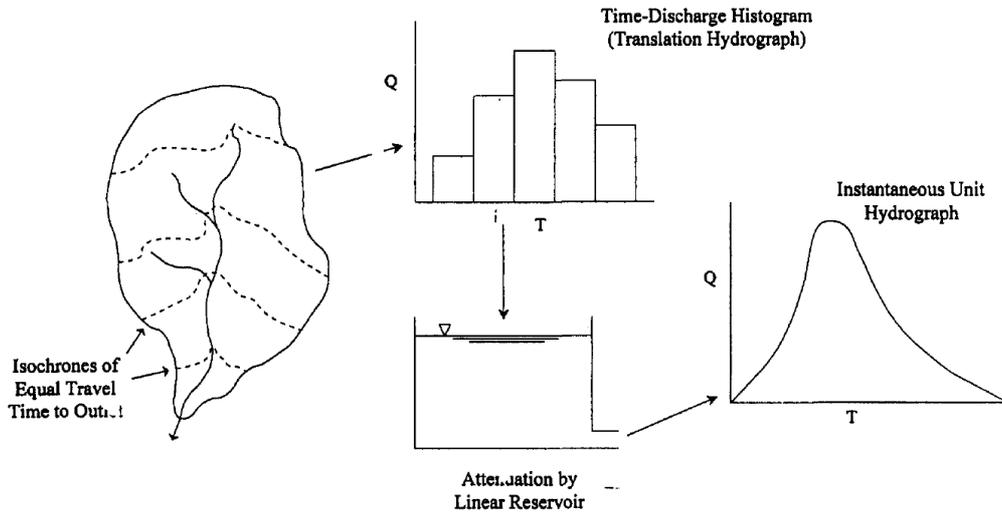


Fig. 1. Clark's method conceptual model(Kull and Feldman, 1998)

Fig. 1과 같다.

Clark 유역 홍수추적법은 Eq. (1)과 같은 선형저수지 방정식을 통하여 유출량을 산정하게 된다.

$$O_i = \left[\frac{\Delta t}{K+0.5\Delta t} \right] I_{avg} + \left[1 - \frac{\Delta t}{K+0.5\Delta t} \right] O_{i-1} \quad (1)$$

여기서, O_i 는 시간 i 에서의 직접유출, K 는 저류상수, I_{avg} 는 시간 $i-1$ 에서 i 사이의 평균유입량이며, Δt 는 시간구간이다. 본 연구에서는 Clark 유역 홍수추적법의 주 매개변수인 도달시간과 저류상수를 각각의 일반적으로 많이 사용되는 경험공식인 Kraven(II) 및 Sabol공식을 통하여 산정하였다.

ModClark 방법은 앞서 전술한 Clark 방법에서 단위도법을 HEC-HMS의 ModClark 방법을 사용하는 강우-유출해석 방법을 의미한다. ModClark의 개념은 Clark 유역 홍수추적방법의 기본원리를 공간적으로 분포된 강우 및 지형자료와 함께 격자별로 적용하여 각 격자별로 산정된 유출수문곡선을 유역 출구점에서 합산하여 유역의 총 유출량으로 계산하는 방법이다. ModClark의 개념도는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2와 같이 ModClark 방법은 대상유역을 포함할 수 있는 격자 형태로 구분하며, 공간적으로 분포된 강우량 및 유역의 지형특성을 격자 형태로 이용하여 유출을 수행한다. ModClark 방법은 유역별로 도달시간을 산정하는 Clark 방법과는 달리 Eq. (2)를 통하여 각 격자별로 도달시간을 배분하기 때문에 유역 내의 모든 영역에 대한 도달시간의 변동을 고려할 수 있다는 장점이 있다.

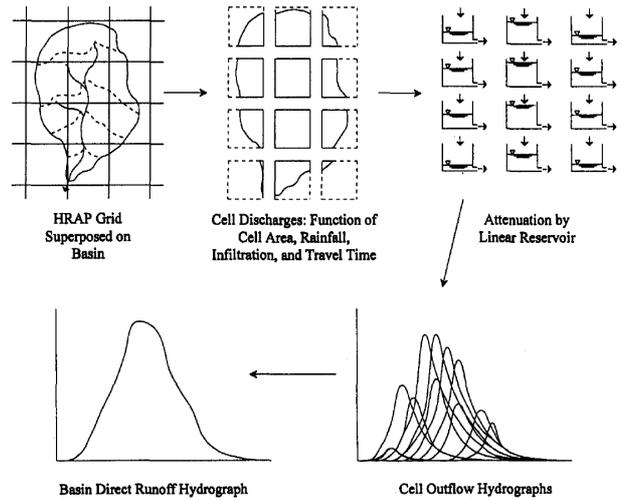


Fig. 2. Structure of the ModClark model(Kull and Feldman, 1998)

$$t_{cell} = T_c \frac{d_{cell}}{d_{max}} \quad (2)$$

여기서 T_c 는 유역 전체의 도달시간, t_{cell} 은 해당 격자로부터 유역출구까지의 도달시간, d_{max} 는 유역출구로부터 이동거리가 가장 긴 격자의 유역출구까지 이동거리를 나타낸다.

ModClark 방법은 격자별로 유출량을 산정하기 때문에 Clark 방법에서 유효우량 산정법으로 사용한 NRCS CN방법도 격자별로 적용하게 된다. 본 연구에서는 ModClark의 격자크기를 결정하기 위하여 동일한 조건에서 200 m, 500 m, 1 km, 2 km의 4가지 case의 격자크기에 따른 영향을 분석하였지만

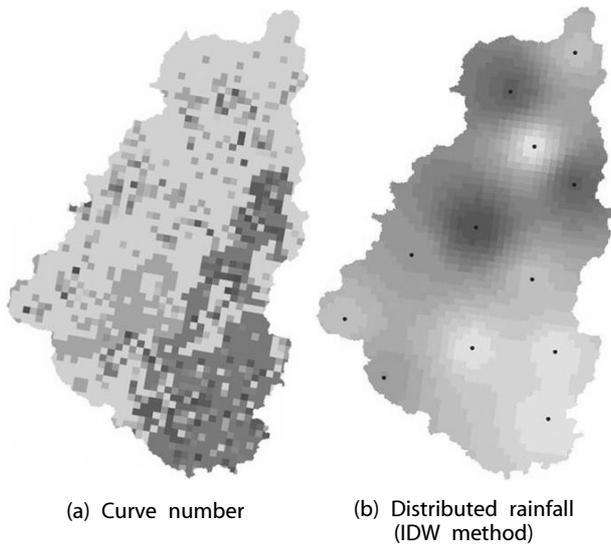


Fig. 3. Curve number and distributed rainfall using IDW method

의미 있는 결과를 찾지 못하였으며, 시험유역의 규모와 ModClark 모형이 격자형태의 자료만 이용한다는 점 및 자료의 적용성 등을 종합하여 ModClark방법의 격자크기를 1 km×1 km로 설정하고 자료구축 및 유출모의를 수행하였다. 또한, 격자별로 산정된 CN과 IDW방법을 통하여 공간분포된 지점강우량은 Fig. 3과 같이 표현된다.

본 연구에서는 시험유역 별로 강우량 산정 시 자료의 사용성과 해당유역내외의 위치를 고려하여 안동댐의 경우 갈산관측소를 포함한 19개의 강우관측소를, 임하댐의 경우 길안관측소를 포함한 13개의 강우관측소를, 평창강유역의 경우 계방관측소를 포함한 20개의 강우관측소의 10분 단위 강우량 자료를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 Clark 방법과 ModClark 방법의 계산과정은 Table 1과 같으며, 시험유역별로 선정된 강우사상의 기간, 총 강우량, 지속시간 1시간 최대강우량 및 AMC 조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Computation methods of Clark and ModClark methods

Computation Method	Clark Method	ModClark Method
Rainfall Method	Thiessen aver.	IDW(1 km×1 km)
Loss Method	NRCS CN	NRCS CN(1 km×1 km)
Transform Method	Clark unit hydrograph	ModClark
Base flow Method	Constant monthly	Constant monthly
Stream routing Method	Muskingum	Muskingum
Time of concentration	Kraven(Ⅱ)	Kraven(Ⅱ)
Storage constant	Sabol	Sabol

Table 2. Rainfall characteristics of test basins

Test basins	Raifall num.	Rainfall date	Rainfall duration (hr)	Total depth (mm)	Maximum depth per 1 hour (mm/hr)	AMC condition
Andong-reservoir basin	AD-R1	2007-09-01	96	88.3	8.3	AMC(Ⅲ)
	AD-R2	2008-07-24	71	171.2	19.8	AMC(Ⅲ)
	AD-R3	2009-07-08	83	83.3	23.0	AMC(Ⅱ)
	AD-R4	2010-09-10	95	94.5	17.3	AMC(Ⅲ)
	AD-R5	2011-06-23	132	289.6	14.2	AMC(Ⅱ)
Imha-reservoir basin	IH-R1	2007-08-27	216	224.2	8.1	AMC(Ⅱ)
	IH-R2	2008-07-24	79	86.5	25.0	AMC(Ⅱ)
	IH-R3	2009-07-14	62	51.5	29.4	AMC(Ⅲ)
	IH-R4	2009-07-20	76	75.0	22.6	AMC(Ⅲ)
	IH-R5	2011-06-23	121	170.2	16.8	AMC(Ⅱ)
Pyeong chang river basin	PC-R1	2007-09-14	66	137.9	20.3	AMC(Ⅱ)
	PC-R2	2009-07-08	83	122.5	27.0	AMC(Ⅱ)
	PC-R3	2010-09-20	135	154.0	19.6	AMC(Ⅲ)
	PC-R4	2011-07-26	192	179.5	20.2	AMC(Ⅲ)
	PC-R5	2011-08-15	240	149.7	16.5	AMC(Ⅲ)

3. 소유역 분할 과정

3.1 소유역 분할기준의 선정

소유역을 분할하는 방법은 대상유역의 특성 및 개황과 소유역 분할에 사용되는 자료 및 강우-유출 해석방법에 따라 구별될 수 있다. 본 연구에서는 Luong(2008)이 기존까지 연구된 사례를 바탕으로 구분한 6가지 소유역 분할방법에서 동일한 성질의 방법을 제외한 Iso-temporal, Iso-characteristic, Gage-defined 및 Stream-order/bifurcation의 4가지 방법으로 축소하여 구분하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 Iso-temporal 방법은 소유역을 동일한 도달시간 (t_c)를 갖도록 분할하는 방법이며, Iso-characteristic 방법은 면적, 하천길이, 유출매개변수 등을 동일하게 갖도록 분할하는 방법이다. 또한, Gage-defined 방법은 소유역들의 출구지점을 관측소로 기준하여 분할하는 방법이며, Stream-order/bifurcation 방법은 유역 내 하천차수 및 분기수를 기준으로 분할하는 방법이다.

본 연구에서는 다수의 시험유역에 대하여 동일한 소유역 분할 방법을 기준하기 위해 일반적으로 적용되는 동일한 특성으로 소유역을 구분하는 Iso-characteristic 방법 중 면적을 동일하도록 분할하는 등면적 분할방법을 기준으로 하였다.

3.2 소유역 분할과정

안동댐 유역은 전체 유역에 대한 출구 지점으로 안동댐을 기준으로 하였으며, 단일유역일 때 유역면적은 1594.5 km², 유로연장은 149.9 km로 산정되었고, 형상계수는 0.075로 산정되었다. 임하댐 유역의 경우 전체 유역에 대한 출구 지점으로

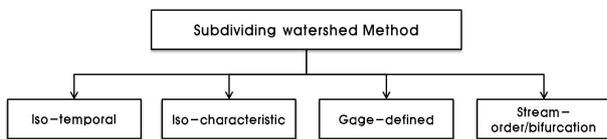


Fig. 4. Subdividing watershed method

Table 3. Topographic characteristics of test basins

Test basin	Area (km ²)	Flow length (km)	Form factor	T_c (hr)	K (hr)
Andong-reservoir basin	1594.5	149.9	0.075	19.83	13.58
Imha-reservoir basin	1363.5	92.6	0.183	12.25	13.38
Pyeongchang river basin	1764.7	138.2	0.098	17.76	30.89

임하댐을 기준으로 하였으며, 단일유역일 때 유역면적은 1363.5 km², 유로연장은 92.6 km로 산정되었고, 형상계수는 0.183로 산정되었다. 또한, 평창강 유역의 경우 전체 유역에 대한 출구 지점으로 팔괴 수위관측소를 기준으로 하였으며, 단일유역일 때 유역면적은 1764.7 km², 유로연장은 138.2 km로 산정되었고, 형상계수는 0.098로 산정되었다. 시험유역의 특성과 산정된 도달시간 및 저류상수를 Table 3에 나타내었다.

시험유역인 안동댐 유역, 임하댐 유역 및 평창강 유역의 소유역 분할을 단일유역, 3개, 5개, 6개, 7개, 9개, 10개, 12개, 15개의 총 9가지 case로 수행하였으며 이 과정을 Fig. 5~7에 나타내었다.

4. 소유역 분할에 따른 유출모의 결과

본 연구에서는 시험유역별로 선정된 강우사상에 대한 소유역 분할에 따른 유출모의 결과 중 첨두유량과 첨두시간의 변화양상을 Eq. (3)~(6)과 같은 통계지표를 통하여 분석하였다.

$$MRE(\%) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|X_s - X_o|}{X_o} \right) \quad (3)$$

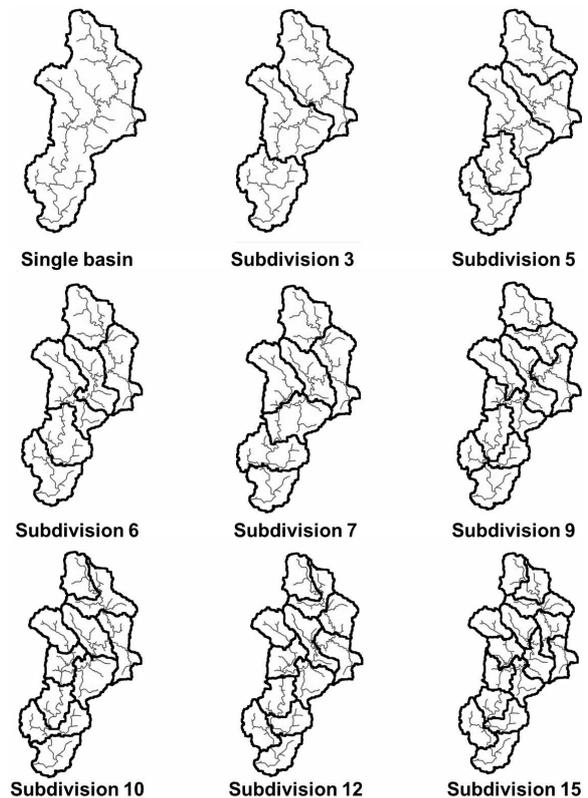


Fig. 5. Subdividing result of Andong-reservoir basin

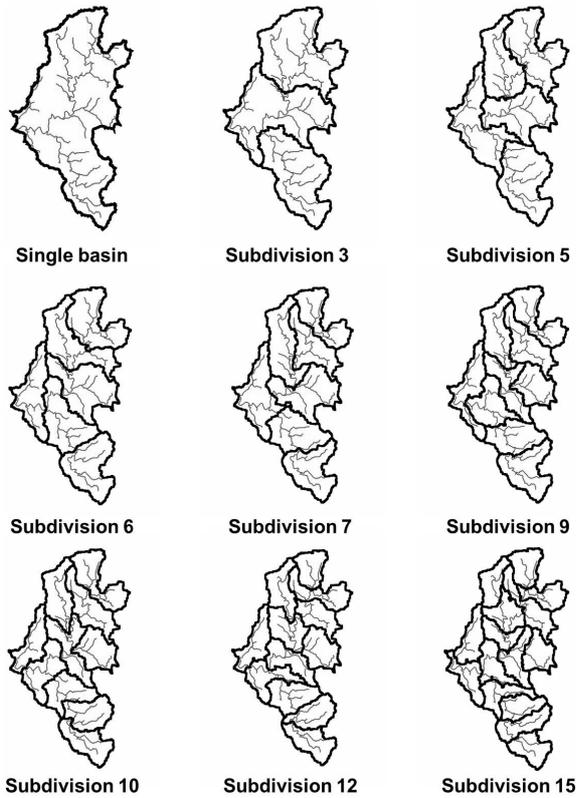


Fig. 6. Subdividing result of Imha-reservoir basin

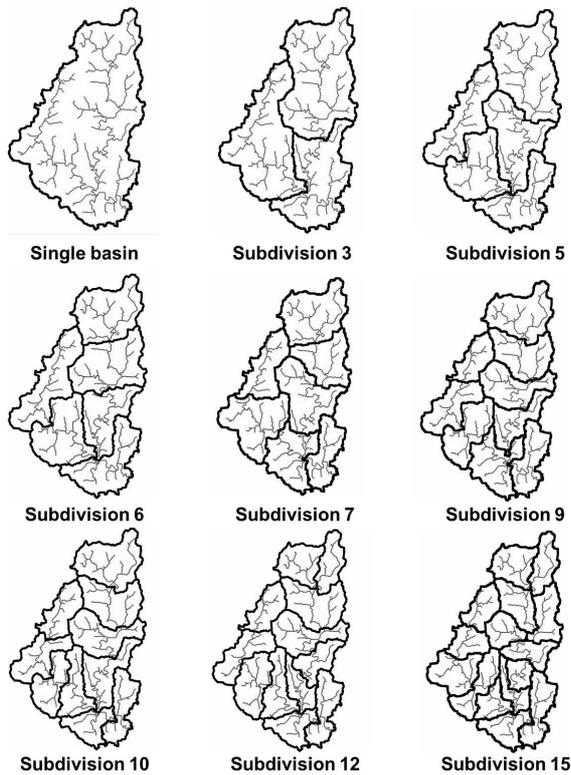


Fig. 7. Subdividing result of Pyeoungchang river basin

$$RRMSE(\%) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_s - X_o}{X_o} \right)^2} \quad (4)$$

$$MFE(hr) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_s - X_o) \quad (5)$$

$$RMSE(hr) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (X_s - X_o)^2} \quad (6)$$

위의 식에서 N 은 자료 수, X_s 는 모의된 침투유량 및 침투시간의 값, X_o 는 관측된 침투유량 및 침투시간의 값을 의미한다. 침투유량의 경우 Eq. (3)인 평균상대오차(Mean Relative Error, MRE)와 Eq. (4)인 상대평균제곱근오차(Relative Root Mean Square Error, RRMSE)의 2가지 통계지표를 적용하여 관측된 침투유량 간의 상대오차를 백분율로 나타내었으며, 침투시간의 경우 Eq. (5)인 평균예측오차(Mean Forecast Error, MFE)와 Eq. (6)인 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 통하여 관측된 침투시간 간의 차이를 시간의 단위로 나타내었다.

4.1 안동댐 유역의 유출모의 결과

안동댐 유역의 선정된 강우사상에 대한 소유역 분할에 따른 유출모의 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

안동댐 유역의 침투유량의 경우 소유역 분할 수가 증가할수록 상대평균오차(MRD)와 상대평균제곱근오차(RRMSE)가 모두 감소하다 일정해지는 경향을 나타내었다. Clark 방법의 결과에서는 상대평균오차(MRE)가 소유역 분할 수 15개(11.9%)에서, 상대평균제곱근오차(RRMSE)는 12개(16.3%)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며, ModClark 방법의 결과에서는 상대평균오차(MRE)가 소유역 분할 수 3개(10.7%)에서, 상대평균제곱근오차(RRMSE)는 5개(13.0%)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며 이를 Table 4와 Fig. 9에 나타내었다.

침투시간의 경우 침투유량과 마찬가지로 소유역 분할 수가 증가할수록 평균예측오차(MFE)와 평균제곱근오차(RMSE)가 모두 감소하다 일정해지는 경향을 나타내었다. Clark 방법의 결과에서는 평균예측오차(MFE)가 소유역 분할 수 15개(01:06)에서, 평균제곱근오차(RMSE)는 15개(04:03)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며, ModClark 방법의 결과에서는 평균예측오차(MFE)가 소유역 분할 수 12개(00:58)에서, 평균제곱근오차(RMSE)는 15개(03:15)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며 이를 Table 5와 Fig. 10에 나타내었다.

안동댐 유역의 경우 침투유량 및 침투시간의 통계지표가

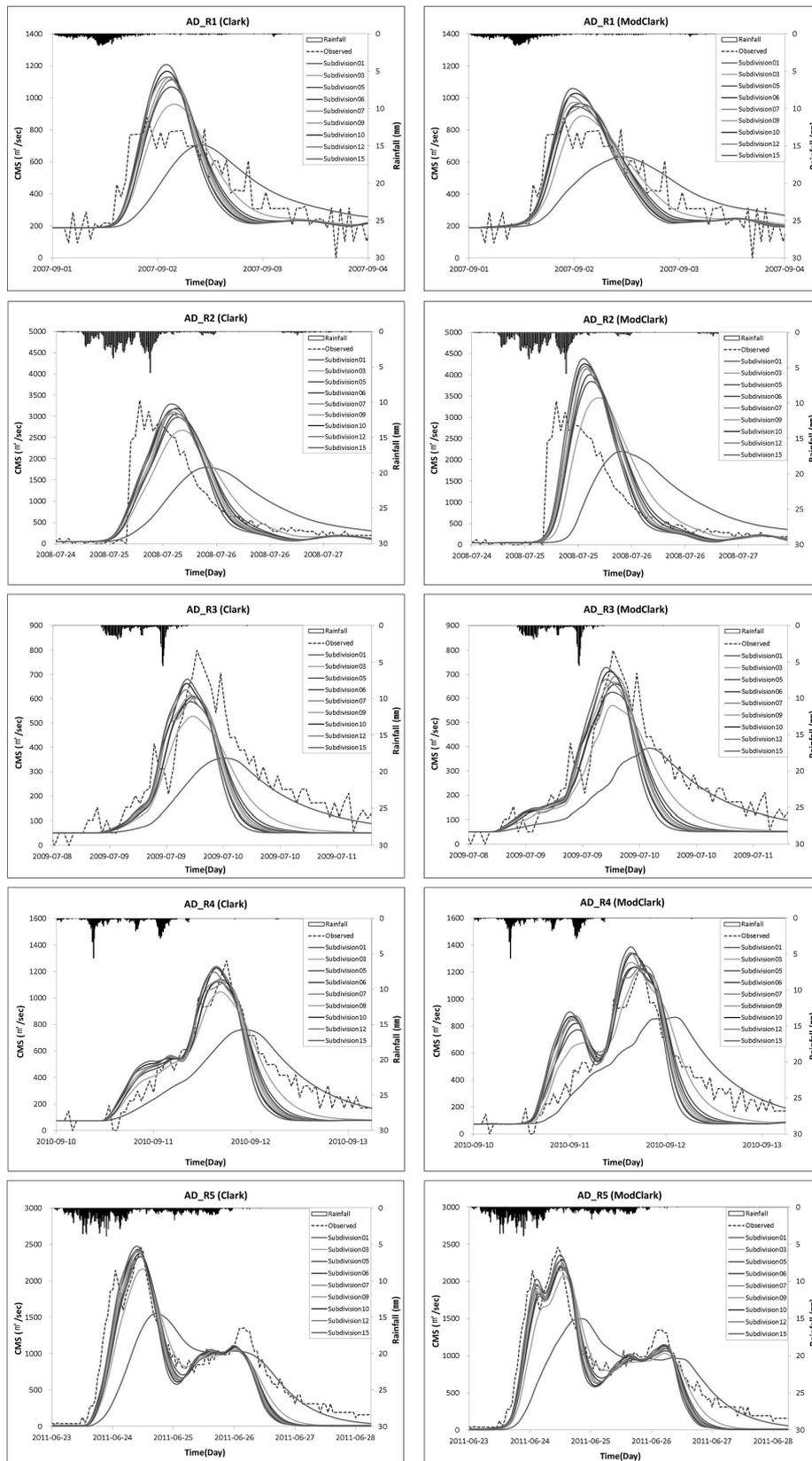


Fig. 8. Simulated hydrographs according to subdivisions of Andong-reservoir basin

Table 4. Peak-flow errors according to subbasin divisions of Andong-reservoir basin

Watershed	Metric	Number of Subdivision									Selected
		1	3	5	6	7	9	10	12	15	
Clark	MRE	39.8%	19.0%	15.6%	15.0%	15.5%	14.8%	12.3%	12.6%	11.9%	15
	RRMSE	41.6%	20.8%	17.4%	17.5%	18.1%	17.8%	17.0%	16.3%	18.3%	12
ModClark	MRE	36.9%	10.7%	11.6%	11.9%	11.8%	12.1%	13.1%	13.4%	14.4%	3
	RRMSE	37.7%	14.8%	13.0%	13.1%	13.6%	14.0%	15.3%	15.0%	17.2%	5

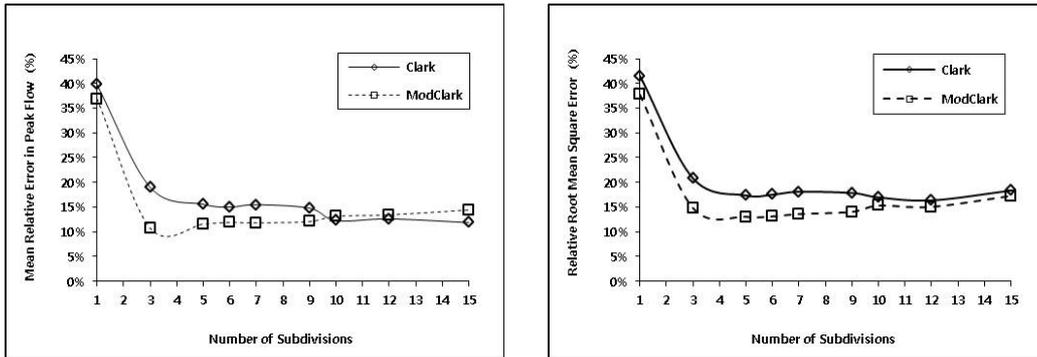


Fig. 9. Peak-flow errors according to subbasin divisions of Andong-reservoir basin

Table 5. Peak-time errors according to subbasin divisions of Andong-reservoir basin

Watershed	Metric	Number of Subdivision									Selected
		1	3	5	6	7	9	10	12	15	
Clark	MFE	08:46	02:48	02:04	02:12	02:08	01:42	01:26	01:10	01:06	15
	RMSE	09:42	05:07	04:40	04:32	04:07	04:13	04:30	04:20	04:03	15
ModClark	MFE	10:46	03:04	02:04	02:24	02:58	01:42	01:34	00:58	00:58	12
	RMSE	11:07	04:49	03:53	03:53	03:56	03:35	03:19	03:21	03:15	15

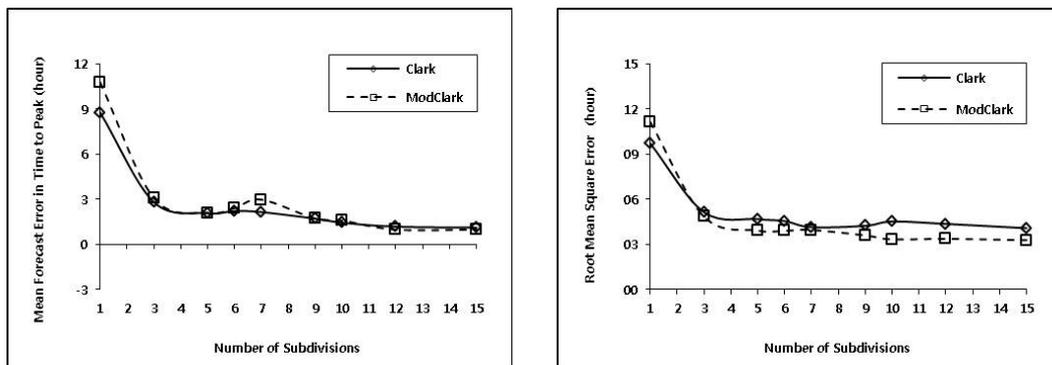


Fig. 10. Peak-time errors according to subbasin divisions of Andong-reservoir basin

서로 다른 분할개수에서 최소값을 나타내었지만 소유역 분할 수 5개 이후로는 소유역 분할 수가 증가하여도 첨두유량 및 첨두시간의 오차가 약간의 변동성을 갖지만, 거의 일정해지는 양상을 볼 수 있다.

4.2 임하댐 유역의 유출모의 결과

임하댐 유역의 선정된 강우사상에 대한 소유역 분할에 따른 유출모의 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

임하댐 유역의 첨두유량의 경우 소유역 분할 수가 증가할수록

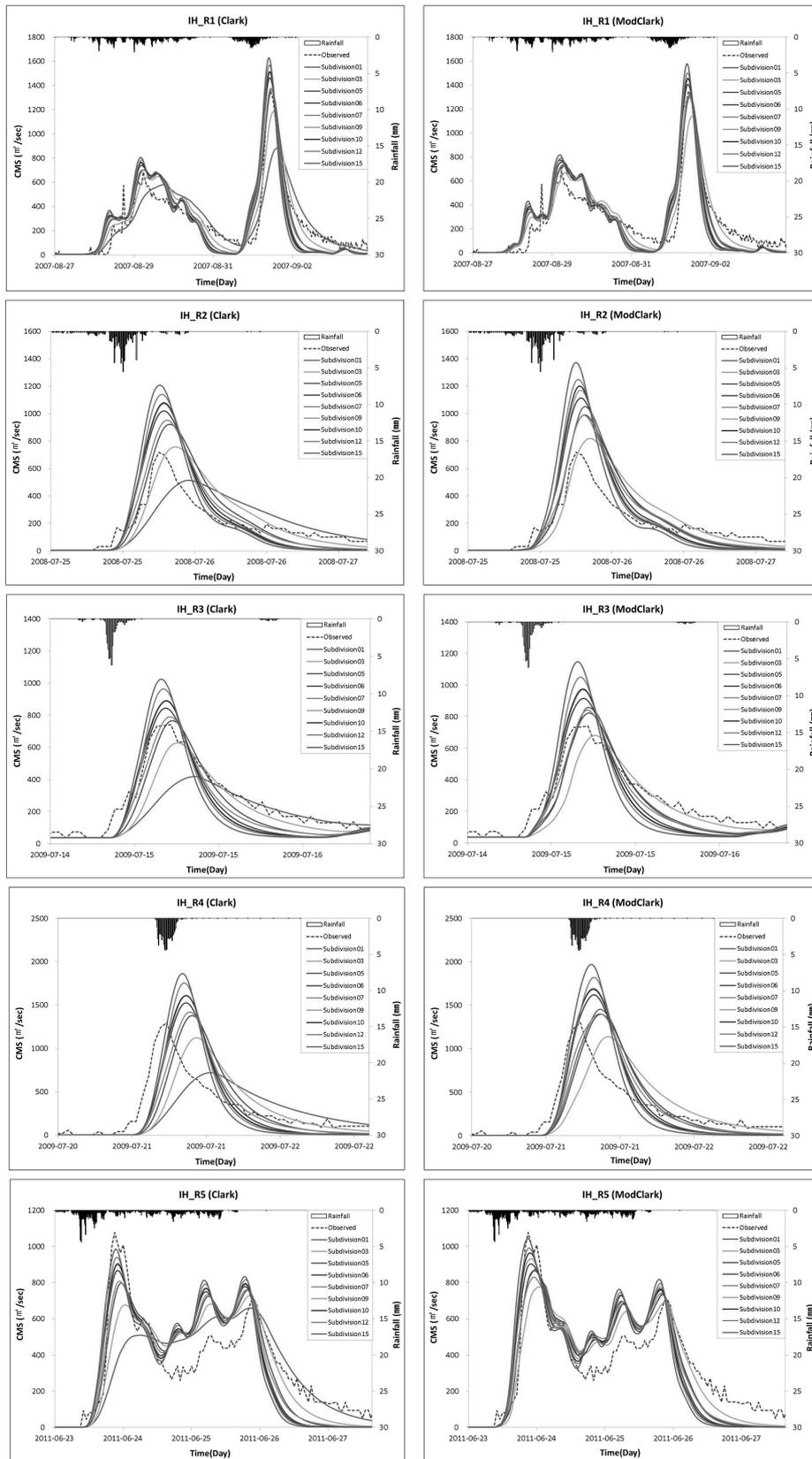


Fig. 11. Simulated hydrographs according to subdivisions of Imha-reservoir basin

상대평균오차(MRD)와 상대평균제곱근오차(RRMSE)가 모두 감소하다가 발산하는 경향을 나타내었다. Clark 방법의 결과에서는 상대평균오차(MRE)가 소유역 분할 수 5개(13.0%)에서, 상대평균제곱근오차(RRMSE)는 5개(17.6%)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며, ModClark 방법의 결과에서는 상대평균

오차(MRE)가 소유역 분할 수 3개(15.5%)에서, 상대평균제곱근오차(RRMSE)는 3개(16.9%)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며 이를 Table 6과 Fig. 12에 나타내었다.

침투시간의 경우 소유역 분할 수가 증가할수록 평균예측오차(MFE)와 평균제곱근오차(RMSE)가 모두 감소하다 일정해지

Table 6. Peak-flow errors according to subbasin divisions of Imha-reservoir basin

Watershed	Metric	Number of Subdivision									Selected
		1	3	5	6	7	9	10	12	15	
Clark	MRE	38.0%	15.8%	13.0%	20.3%	15.2%	24.3%	24.6%	30.6%	35.9%	5
	RRMSE	38.4%	18.1%	17.6%	23.4%	19.2%	27.6%	28.0%	34.8%	41.3%	5
ModClark	MRE	19.1%	15.5%	16.0%	24.8%	17.1%	29.1%	29.4%	35.0%	43.6%	3
	RRMSE	24.2%	16.9%	20.2%	30.0%	21.1%	35.0%	36.3%	42.5%	53.5%	3

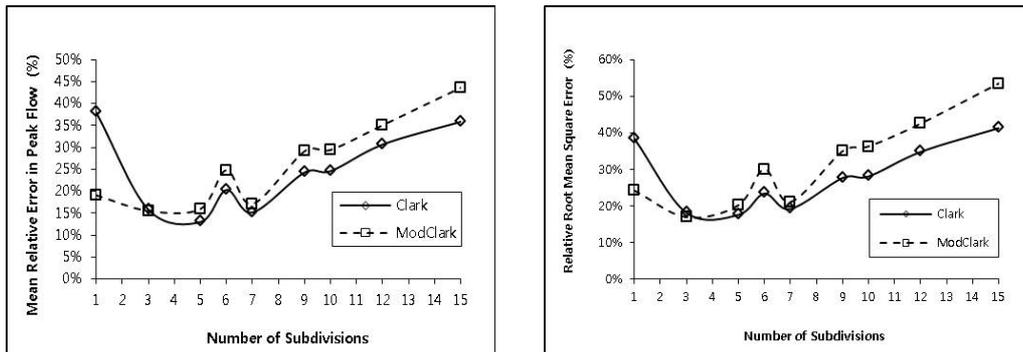


Fig. 12. Peak-flow errors according to subbasin divisions of Imha-reservoir basin

Table 7. Peak-time errors according to subbasin divisions of Imha-reservoir basin

Watershed	Metric	Number of Subdivision									Selected
		1	3	5	6	7	9	10	12	15	
Clark	MFE	13:22	11:34	01:52	00:46	01:20	00:48	00:48	00:32	00:10	15
	RMSE	21:46	21:20	02:19	01:34	01:54	01:34	01:34	01:25	01:19	15
ModClark	MFE	01:36	02:46	01:36	00:34	01:20	00:38	00:30	00:14	-00:10	15
	RMSE	01:57	03:02	01:56	01:09	01:46	01:12	01:06	01:07	01:09	10

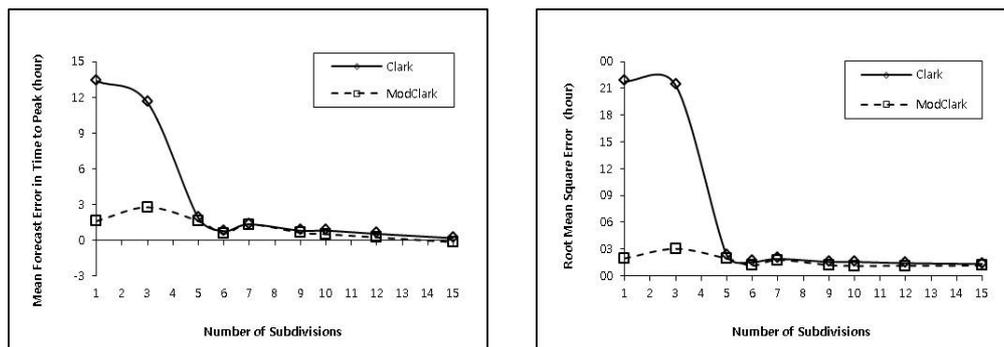


Fig. 13. Peak-time errors according to subbasin divisions of Imha-reservoir basin

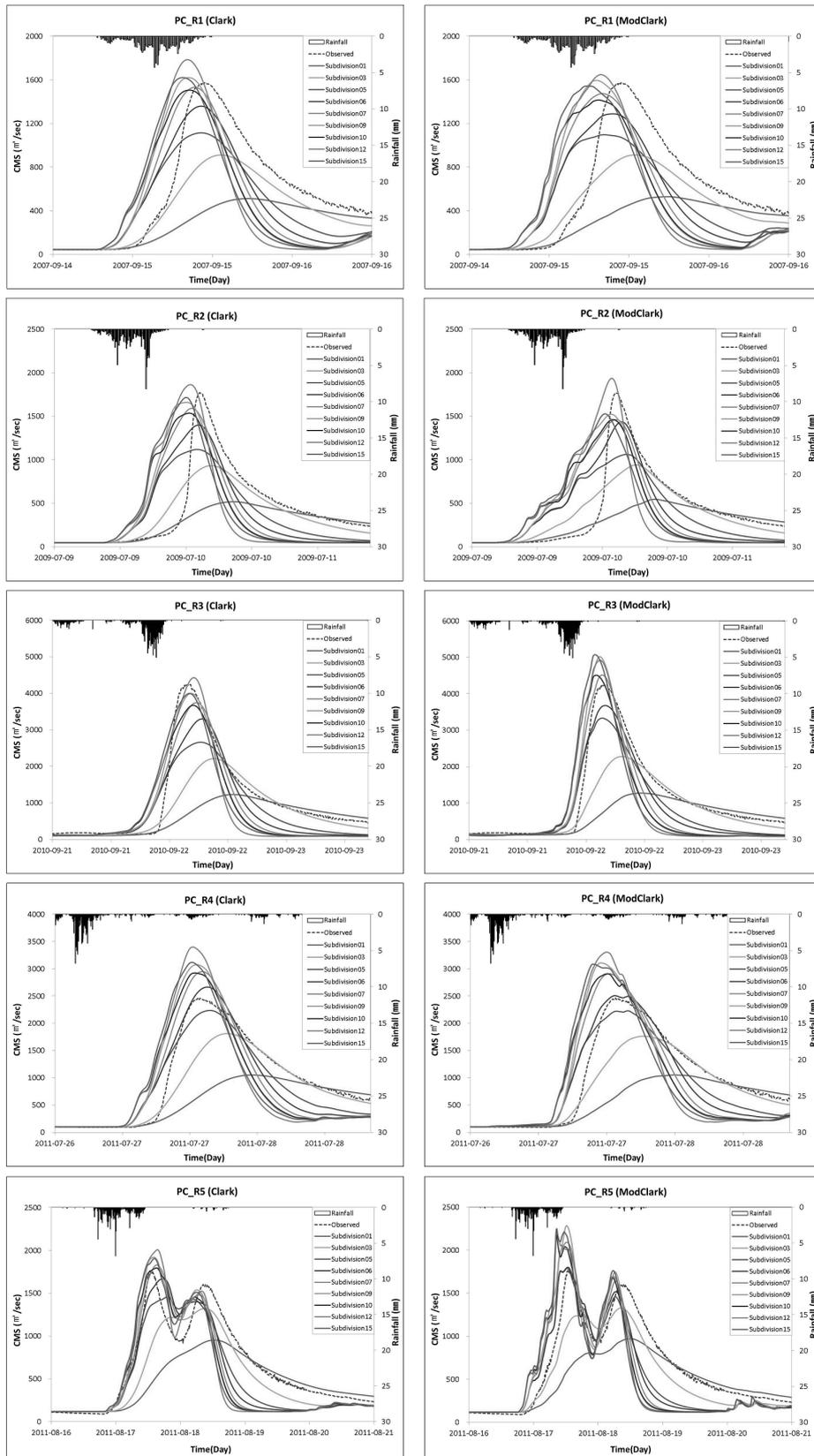


Fig. 14. Simulated hydrographs according to subdivisions of Pyeongchang river basin

는 경향을 나타내었다. Clark 방법의 결과에서는 평균예측오차(MFE)가 소유역 분할 수 15개(00:10)에서, 평균제곱근오차(RMSE)는 15개(01:19)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며, ModClark 방법의 결과에서는 평균예측오차(MFE)가 소유역 분할 수 15개(-00:10)에서, 평균제곱근오차(RMSE)는 10개(01:06)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며 이를 Table 7과 Fig. 13에 나타내었다.

임하댐 유역의 경우 침투유량 및 침투시간의 통계지표가 서로 다른 분할개수에서 최소값을 나타내었지만 침투유량에서 가장 작은 오차를 보인 분할개수 5개와 침투시간에서 오차시간이 수렴하기 시작하는 분할개수 5, 6개를 고려하여 적합한 소유역 분할 수를 5개라고 분석되었다.

4.3 평창강 유역의 유출모의 결과

평창강 유역의 선정된 강우사상에 대한 소유역 분할에 따른 유출모의 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

평창강 유역의 침투유량의 경우 소유역 분할 수가 증가할수록 상대평균오차(MRD)와 상대평균제곱근오차(RRMSE)가 모두 감소하다가 약간의 변동성을 가지며 일정해지는 경향을 나타내었다. Clark 방법의 결과에서는 상대평균오차(MRE)가 소유역 분할 수 15개(9.3%)에서, 상대평균제곱근오차(RRMSE)는 7개(11.4%)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며, ModClark

방법의 결과에서는 상대평균오차(MRE)가 소유역 분할 수 6개(10.9%)에서, 상대평균제곱근오차(RRMSE)는 6개(13.2%)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며 이를 Table 8과 Fig. 15에 나타내었다.

침투시간의 경우 침투유량과 마찬가지로 소유역 분할 수가 증가할수록 평균예측오차(MFE)와 평균제곱근오차(RMSE)가 모두 감소하다가 약간의 변동성을 가지며 일정해지는 경향을 나타내었다. Clark 방법의 결과에서 평균예측오차(MFE)가 소유역 분할 수가 12개(-00:06)에서, 평균제곱근오차(RMSE)는 9개(01:41)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며, ModClark 방법의 결과에서는 평균예측오차(MFE)가 소유역 분할 수 6개(00:08)에서, 평균제곱근오차(RMSE)는 6개(00:42)에서 오차가 가장 낮게 나타났으며 이를 Table 9와 Fig. 16에 나타내었다.

평창강 유역의 경우도 침투유량 및 침투시간의 통계지표가 서로 다른 분할개수에서 최소값을 나타내었지만 소유역 분할 수가 7개 이후로는 소유역 분할 수가 증가하여도 침투유량 및 침투시간의 오차가 약간의 변동성을 갖지만, 모두 거의 일정해지는 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

4.4 비교 및 고찰

본 연구의 시험유역인 안동댐 유역, 임하댐 유역 및 평창강유역의 유출모의 결과 모두 소유역의 분할 수가 증가할수록 침투유

Table 8. Peak-flow errors according to subbasin divisions of Pyeongchang river basin

Watershed	Metric	Number of Subdivision									Selected
		1	3	5	6	7	9	10	12	15	
Clark	MRE	62.5%	37.8%	26.0%	14.1%	9.6%	9.7%	10.3%	14.9%	9.3%	15
	RRMSE	63.3%	39.1%	28.3%	15.6%	11.4%	12.4%	12.0%	19.2%	12.8%	7
ModClark	MRE	61.6%	37.7%	20.6%	10.9%	13.3%	17.8%	15.0%	18.0%	17.5%	6
	RRMSE	62.3%	38.9%	24.9%	13.2%	14.5%	20.4%	16.2%	21.0%	19.7%	6

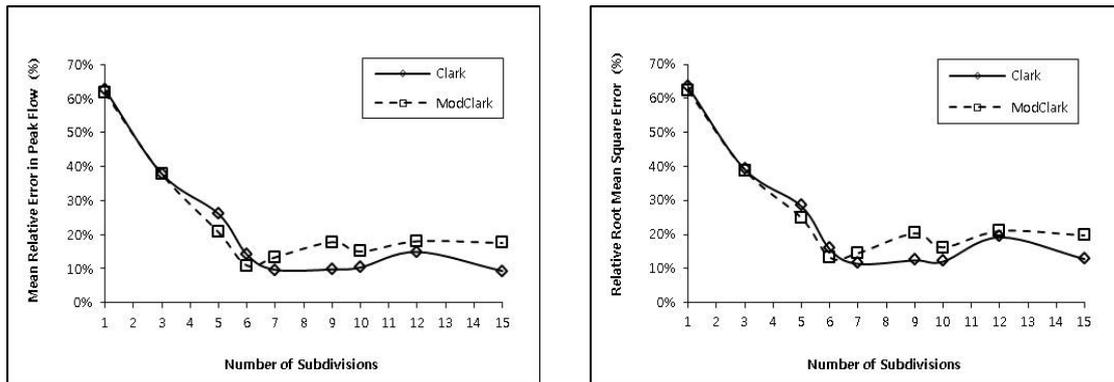


Fig. 15. Peak-flow errors according to subbasin divisions of Pyeongchang river basin

Table 9. Peak-time errors according to subbasin divisions of Pyeongchang river basin

Watershed	Metric	Number of Subdivision									Selected
		1	3	5	6	7	9	10	12	15	
Clark	MFE	11:14	07:14	02:10	01:56	00:34	-00:30	-00:08	-00:06	-00:50	12
	RMSE	12:59	09:51	03:19	02:47	01:46	01:41	01:50	02:00	02:00	9
ModClark	MFE	11:16	06:56	00:20	00:08	-00:46	-01:30	-02:04	-01:56	-03:14	6
	RMSE	12:54	09:30	01:41	00:42	01:12	01:55	02:28	02:20	03:28	6

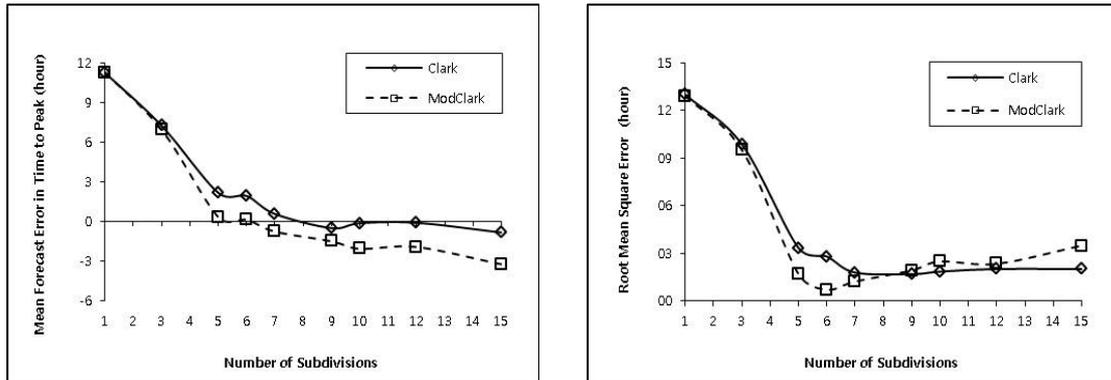


Fig. 16. Peak-time errors according to subbasin divisions of Pyeongchang river basin

량은 증가하였고 침투시간은 짧아졌으며 이러한 경향은 일정 분할개수 이후 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 침투유량의 경우 상대평균오차(MRE), 침투시간의 경우 평균예측오차(MFE)를 기준하여 Clark 방법 및 ModClark 방법의 종합적인 평가를 통해 소유역 분할에 따른 경향이 급격히 감소하는 시점을 최소분할 개수로 나타내었다.

안동댐 유역의 경우 침투유량 및 침투시간이 모두 최소분할개수 5개에서 상대평균오차(MRE) 15.6%, 평균예측오차(MFE) 02:04으로 나타났으며 이후 침투유량 및 침투시간의 오차는 모두 미세하게 감소하다가 거의 일정해지는 것으로 나타났다. 임하댐의 경우 침투유량은 소유역 분할개수가 5개에서 상대평균오차(MRE)가 13.0%로 나타났지만 이후 오차율이 36%까지 발산하는 경향을 보였으며, 침투시간의 경우 최소분할개수 6개에서 평균예측오차(MFE)가 00:40으로 나타났고 이후 미세하게 감소하다가 0에 수렴하는 것으로 나타났다. 평창강의 경우 침투유량 및 침투시간 모두 최소분할개수 7에서 상대평균오차(MRE) 11.5%, 평균예측오차(MFE) -00:06으로 나타났으며 이후 침투유량의 경우 오차율이 5%이내에서 변동하며 일정해지는 경향으로 나타났으며, 침투시간의 경우 오차시간이 일정하다가 약간 증가하는 경향으로 나타났다.

임하댐 유역은 안동댐 유역 및 평창강 유역과는 달리 소유역의 분할개수가 증가할수록 침투유량이 최소분할개수의 제한

없이 분할개수와 비례하며 증가하는 것으로 나타났다. 이는 방사형 형태로 형상계수가 0.183인 임하댐 유역이 폭이 좁은 형태로 형상계수가 0.075인 안동댐 유역과 0.098인 평창강 유역과는 다르게 소유역 분할개수를 증가할수록 하도추적 구간이 더욱 짧아지고 많아지기 때문에 하도추적을 통한 유출량의 저감효과가 분할개수와 비례하며 상쇄되기 때문인 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구는 강우-유출 모형을 이용하여 소유역 분할에 따른 유출변화 특성을 파악 후 다수의 시험유역에 적합한 소유역 분할개수를 제시하는데 그 목적이 있다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 시험유역에 대한 유출모의 결과 실측 수문곡선에 비하여 단일유역보다 소유역 분할을 고려하였을 때 모의된 수문곡선의 정확도가 향상된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 단일유역보다 소유역 별로 계산된 유출량 및 하도추적이 유역의 공간적 특징을 세분화하여 더욱 상세히 반영했기 때문으로 분석된다. 하지만 소유역 분할 수를 증가할수록 정확도가 계속 향상되는 것은 아니었으며, 적합한 소유역 분할 수는 유역특성 및 강우사상 별로 다른 양상을 보였다.

둘째, 시험유역에 대한 소유역 분할에 따른 유출모의 결과 소유역 분할 수가 증가할수록 첨두유량은 증가하였고 첨두시간은 짧아졌으며 이러한 경향은 일정 분할 개수 이후 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 경향이 감소하기 시작하는 소유역 분할 수를 최소분할 개수로 나타내었으며, 첨두유량 및 첨두시간을 종합적으로 고려하였을 때 안동댐 및 임하댐 유역은 최소분할 개수가 5개, 평창강 유역은 7개로 분석되었다.

셋째, 본 연구의 시험유역 중에서 폭이 좁은 형태로 형상계수가 비교적 작은 안동댐 유역 및 평창강 유역과는 달리 방사형 형태로 형상계수가 비교적 큰 임하댐 유역의 유출모의 결과에서는 소유역의 분할개수가 증가함에 따라 최소분할 개수의 제한 없이 첨두유량이 분할개수에 비례하며 지속적으로 증가하는 결과가 나타났다. 이는 형상계수가 큰 방사형 형태의 유역일수록, 소유역 분할개수가 증가함에 따라 하도추적구간은 더욱 짧아지고 많아지기 때문에 하도추적으로 인한 유출량의 저감효과가 분할개수와 비례하며 상쇄되기 때문인 것으로 분석되었다.

넷째, 본 연구에서 분석한 15개의 강우사상 중 11개의 사상에서 ModClark 방법의 결과가 Clark 방법의 결과보다 첨두시간이 실측수문곡선에 상대적으로 근접하였다. 이는 Clark 방법과는 달리 ModClark 방법이 각 격자별로 도달시간을 부여하여 유출해석을 수행하기 때문으로 판단되었다. 하지만 첨두유량의 경우 ModClark 방법은 Clark 방법보다 상대적으로 저류상수에 민감한 반응을 보이며 과대 혹은 과소 산정되는 경우가 나타났다. 따라서 준분포형 모형인 ModClark 방법을 통하여 공간분포 자료를 활용하는 것이 기존의 집중형 모형인 Clark 방법보다 항상 정확하다고 판단되지는 않았다.

본 연구를 통하여 시험유역인 안동댐, 임하댐 및 평창강 유역에 대해 소유역 분할에 따른 유출변화 특성을 검토하였으며, 시험유역 별로 최소분할 개수를 제시하였다. 하지만 본 연구의 결과는 시험유역에 대한 분석결과만 포함하고 있기 때문에 일반적으로 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단되며, 추후 더욱 다양한 시험유역을 통하여 형상계수와 같이 유역의 분할과정과 밀접한 관계를 가지는 매개변수를 고려한 적정 소유역 분할방안을 제시해야 할 것이다. 또한, 유출해석에 관련된 연구의 중요한 목적 중 하나가 정확한 유출수문곡선의 산정이라는 측면에서 보았을 때, 소유역 분할에 대한 연구는 지하수유출 및 중간유출을 더욱 상세히 고려할 수 있는 강우-유출모형의 적용이 필요하며, 레이더강우 및 인공위성자료 등을 고려하여 유역의 공간적 및 지형학적 특성을 더욱 반영해야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0008716).

References

- Band L. E. (1986) Topographic partition of watershed with Digital elevation models. *Water Resource Research*, Vol. 22, Issue 1, pp. 15-24.
- Cho, Hongje Cho, Inryul (1998) Flood Runoff Analysis using a Distributed Rainfall Runoff Model, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 31, No. 2, pp.199-208
- Choi, Kyungchang (2006) *A Study of the Changing Characteristics on Runoff According to Dividing Watershed*, Master's thesis, Kyungil University, Gyeongbuk
- Hromadka, T. V. (1986) *San Bernardino county hydrology manual. Technical report*, Williamson and Schmid, Civil Engineers, Irvine, California
- Hydrologic Engineering Center (2001) *HEC-HMS : Hydrologic Modeling System User's Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, Davis, CA
- Jeong, Jongho, Yoon, yongnam (2007) *Design of Water Resources*, goomibook, Seoul-si
- Kim, Kyungtak, Choi, Yunseok (2003) A Study on Runoff Response according to Dividing Watershed, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 6, pp. 911-924
- Kim, Youngho (2003) *Analysis of Runoff using GIS in Bocheong Stream Basin*, Master's thesis, Chungbuk National University, Chungbuk
- Kull, D. W. and Feldman, A. D. (1998) Evolution of Clark's Unit Graph Method to Spatially Distributed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-19
- Lee, Jongho, Lee, Sangtae (1997) The Effect 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
- Luong, T. (2008) *Subdivision of watersheds for modeling*, Master's thesis, Houston University, Houston, Texas
- Norris, G. and Haan, C. T. (1993) Impact of subdividing watersheds on estimated hydrographs. *Applied engineering in agriculture, ASAE*, Vol. 9, Issue. 5, pp. 443-445
- Shin, Soohoon (2012) *Analysis of Runoff Variation According to Subbasin Division*, Master's thesis, Ajou University, Gyeonggi-do
- Tripathi, M. P., Raghuvanshi, N. S. and Rao, G. P. (2006) *Effect of watershed subdivision on simulation of water balance components, Hydrological processes*, Vol. 20, Issue. 5, pp. 1137-1156
- Yoo, Seunghyuk, Lee, Jaegeun, Ahn, Jaehyun (2009) A Study on the Change of Runoff due to Dividing Watershed, *2009 Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, Korea Water Resources Association, Gangwon-do, pp. 976-980