

산지 소규모 유역의 유출 특성 평가-용담 구량천

김성구*, 장형준, 이효상
충북대학교 토목공학부

Assessment of Small Mountainous Catchment Runoff at Yongdam-dam Guryang

Seong-Goo Kim*, Hyung-Joon Chang, Hyo-Sang Lee

School of Civil Engineering, Chungbuk National University

요약 최근 들어 홍수와 가뭄과 같은 자연 재해의 위험이 증가하고 있다. 이러한 위험을 저감하기 위하여 신뢰할 수 있는 수문자료는 수자원 분석 및 수공구조물 설계에 있어 매우 중요하다. 한국의 중부에 위치한 용담 구량천 유역은 K-water와 UNESCO IHP의 연구유역으로써 신뢰할 수 있는 강수량, 유출량, 증발산량 등의 수문자료를 제공하고 있다. 본 연구는 실측된 수문자료를 바탕으로 우리나라의 산지 유역의 유출 특성을 분석하기 위하여 용담 구량천 유역에서의 유출특성을 Probability Distributed Model을 적용하여 분석하였다. 분석 결과, 유역 유출을 홍수기(6월-9월), 평수기(10-5월)로 기간 분리하여 분석하는 것이 필요함을 확인하였다. 유역 유출비가 홍수기에는 0.27~0.41, 평수기에는 0.30~0.45의 분포를 나타내고 있다. Probability Distributed Model은 적용기간에 따라 차별화된 검정 매개변수를 제시하고 있다. 또한, 2015년 평수기를 제외하고 다른 기간은 유역의 유출을 모두 적합(Nash Sutcliffe Efficiency >0.7)하게 모의하고 있어 모형의 적용성을 확인하였다. 본 연구는 Probability Distributed Model을 활용한 기간분리를 통한 소규모 산지 유역의 유출특성방법을 제시한다.

Abstract The risk of disasters, such as floods and drought, has increased. Reliable hydrological data is important for analyzing the water resource and designing hydraulic structure to manage these risks. The Yongdam Guryang river catchment located in the central of Korea is the research catchment of K-water and UNESCO IHP, and the hydrological data, such as rainfall, runoff, evapotranspiration, etc. has been observed at the catchment. The aim of this study was to assess the runoff characteristics of the small mountainous catchment of Korea based on the observed hydrological data, and the Probability Distributed Model was applied as the Rainfall-Runoff Model at the Yongdam Guryang river catchment. The hydrological data was divided into the wet period from June to September and dry period from October to May according to data analysis. The runoff ratio was 0.27~0.41 in the wet period and 0.30~0.45 in the dry period. The calibration result by the Probability Distributed Model showed a difference in the calibrated model parameters according to the periods. In addition, the model simulated the runoff accurately except for the dry period of 2015, and the result revealed the applicability of the PDM. This study showed the runoff characteristics of the small mountainous catchment by dividing the hydrological data into dry and wet periods.

Keywords : IHP, Small mountainous catchment, PDM, Runoff characteristics, Yongdam-dam Catchment

1. 서론

최근 급증하는 이상기후 등으로 인하여, 기후변화 및

기온상승의 현상이 지속된다면 재현기간이 큰 홍수 및 가뭄의 발생으로 인한 수자원 관리의 어려움이 예상된다 [1]. 효율적인 수자원 관리를 위해서 유역의 수문분석이

본 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

Corresponding Author : Seong-Goo Kim(Chungbuk National Univ.)

Tel: +82-10-6278-3930 email: lupus1026@naver.com

Received February 1, 2018

Revised (1st March 13, 2018, 2nd March 26, 2018)

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

필요하며, 이를 위하여 유역별 강수량, 증발산량 및 유출량 등의 기초 수문자료의 확보가 필수적이다. 그러나 국토의 많은 부분을 차지하고 있는 소규모 산지 유역의 경우 수문자료의 관측 및 확보가 제한적인 실정이다.

이에 우리나라에서는 K-water에서 운영 중인 용담댐 시험 유역과 한국건설기술연구원에서 운영 중인 설마천 시험유역에서 다양한 방법을 통해 수집된 수문기상자료를 바탕으로 하여 유역의 전반적인 분석, 하천 조사 및 분석기술 등의 연구가 진행 중에 있다. 김동필과 이남훈 [2]은 설마천 유역을 대상으로 물수지 분석을 수행하였으며, 강수량, 유출량 및 증발산량이 산지하천 유역의 물순환 과정에 비교적 큰 영향을 미친다고 판단하였다. Kjeldsen 등[3]은 설마천 유역의 관측 홍수사상을 활용하고, Revitalised Flood Hydrograph (ReFH) 모형을 적용하여 유역 유출 특성의 비 선형성을 분석하였다.

물수지 유출특성에 관한 연구로는 양해근 등[4]과 임창수 등[5]이 대표적이다. 양해근 등[4]은 섬진강댐과 소양강댐 유역에서 기후변화에 따른 물 순환 과정의 변화를 분석하였다. 그 결과, 기온과 강수량은 증가하는 모습을 보였으나, 증발산량은 지역적으로 차이를 보일 뿐, 연평균 기온과의 연관성은 보이지 않았다. 또한, Penman-FAO 24법과 기상요소들을 활용한 물수지방법과 실측값은 서로 비슷한 값을 보여 물수지 연구에 사용 가능하다고 판단하였다. 임창수 등[5]은 우리나라 5개 댐 유역(괴산댐, 섬진강댐, 소양강댐, 안동댐, 합천댐)에서 물수지 분석을 통하여 실제증발산량을 산정하였으며, 관측 기상 자료와 다변량회귀식을 활용하여 산정된 증발산량과 비교·검토를 실시하였다. 증발산량 산정에 적용된 식은 Penman, FAO P-M, Makkink, Priestley-Taylor, Hargreaves 등의 식을 통하여 산정된 잠재증발산량과 실제증발산량을 검토하였다. 그 결과, 실제증발산량과 잠재증발산량 사이의 상관관계는 적은 것으로 나타났으며, 다변량회귀식을 통한 실제증발산량 산정이 가능하다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 우리나라 소규모 산지 유역의 유출 특성을 분석하고자, 2014년부터 2016년까지 구량천 유역에서 관측된 실제 관측된 강수량, 유출량 및 실 증발산량 등의 수문자료를 Probability Distributed Model (PDM)[6]에 적용하여 소규모 산지 유역의 유출특성을 분석하였다. 특히, 우리나라의 강수패턴을 반영하기 위하여 홍수기(Wet Period, W) 및 평수기(Dry Period, D)

로 기간을 구분하여 분석하였으며, 집중호우에 따른 홍수사상별 유역 유출특성을 분석하였다.

2. 연구유역 및 자료

2.1 연구유역

본 연구에서는 K-water에서 운영 중인 UNESCO-IHP 시험유역인 용담댐유역 내에 위치한 구량천 유역을 연구 유역으로 선정하였다. 구량천 유역은 한반도 중부지방의 대표적인 하천인 금강의 최상류에 위치하고 있으며, 동경 127°42' 23" ~ 127°44' 53", 북위 35°50' 47" ~ 35°52' 50"에 위치하고 있다. 또한, 구량천 유역은 강수량, 유출량, 증발산량 등의 신뢰 할 수 있는 수문자료가 제공되고 있다. Fig. 1은 구량천 유역도와 수문자료 관측에 활용되는 사방댐 위어, 플럭스 타워의 개략적인 위치 및 전경이다.

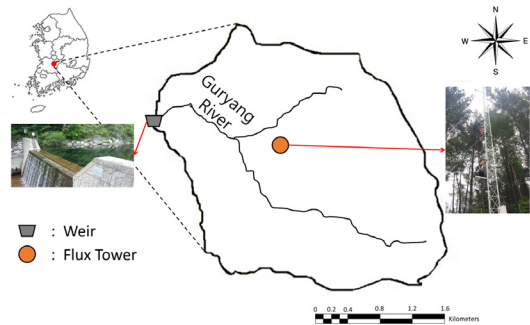


Fig. 1. The Guryang river catchment

구량천 유역의 유역 면적 9.3km²의 소규모 산지유역으로, 임상은 낙엽송림과 침활호효림으로 분포되어 있다. 유역의 일반특성은 Table 1과 같다.

Table 1. Characteristics of Guryang river catchment

Station	Stream	Area (km ²)
Deokgok	Guryang	9.3
Length (km)	Mean width of catchment (A/L, km)	form factor (A/L ²)
3.48	2.66	0.77

구량천 연구유역에서는 2011년부터 강수량, 유출량

및 증발산량 등의 수문자료가 시간단위 이하로 관측되고 있다. 그러나 2011년부터 2013년까지는 자료의 결측 및 오류가 확인되어 수문분석에 활용하기 어렵다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 2014년 및 2015년 수문자료를 활용하여 수문분석을 실시하였다. 수문자료별 수집 및 산정방법은 다음과 같다.

2.2 강수량

구량천 유역의 강수량 자료는 유역 내에 위치한 덕유산 플렉스타워에서 측정되었으며, 2014년 및 2015년 총 강수량은 1119mm 및 849mm로 나타났다. 이는 우리나라 1966년~2015년의 연평균강수량인 1245mm보다 적은 수치를 나타내고 있으며, 특히, 2014년은 역대 13번째, 2015년도는 역대 2번째로 강수량이 적은 해로 기록되고 있다[6].

2.3 유출량

구량천 유역의 유출량은 유역하류에 위치한 사방댐 위어에서 측정된 수위자료를 활용하여 산정하였으며, 산정에 활용된 수위-유량 관계곡선식(K-water, 2015)은 다음 식 (1)과 같다. 여기서, b 는 사방댐 위어의 폭으로, 그 값은 12m이다. h 는 측정된 수위 값이며 단위는 m이다.

$$Q = 1.84 \times b \times h^{3/2} \quad (1)$$

유출량은 단위가 m^3/s 로 강수량 자료와 직접적인 비교가 어렵다. 따라서 유출량을 유역면적(km^2)으로 나누어 유출고(mm/day)를 산정하였으며, 2014년 최대 40mm/day, 최소 0mm/day, 2015년 최대 43mm/day, 최소 0mm/day를 나타내고 있다.

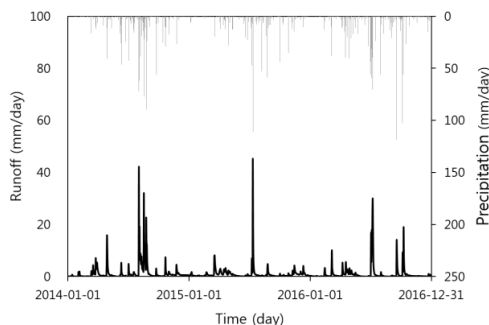


Fig. 2. Hydrograph of precipitation and runoff in the period of 2014~2016 at Guryang catchment

2.4 증발산량

구량천 유역의 증발산량은 덕유산 플렉스타워에서 3차원 풍향풍속계, 수증기 및 이산화탄소 분석기 등을 통하여 관측된 자료를 활용하고, 에디공분산 방법(eddy covariance method)을 적용하여 산정하였다. [7]자세한 산정과정은 K-water (2015)을 확인하며, 본 논문에서는 간략한 산정방법을 제시하며, (2)은 에디공분산 방법의 식이다.

$$E.T. = \frac{L_V \times H_2O - U_{Z-cov} \times 0.018 \times amb_press_mean}{R \times (Tc_mean + 273.15)} \quad (2)$$

여기서, $H_2O - U_{Z-cov}$: 수증기 농도(몰 혼합비)와 보정된 연직 바람과의 공분산

0.018 : H_2O 1 mmole의 분자량

amb_press_mean : 기압의 평균(kpa)

Tc_mean : 보정된 온도의 평균($^{\circ}C$)

L_V : 물의 기화열(J/g)

R : 공기의 기체상수($(kpa \cdot m^3)/(k \cdot mol)$)

에디공분산 방법은 지표면이 수평적으로 균일하고 편평하며 흡원과 발원이 존재하지 않는 이상적인 조건을 가정하며, 난류에 의한 평균 연직 플럭스로 정의된다. 플럭스 타워 19m 높이에 설치되어 있는 에디공분산 시스템인 3차원 풍향 풍속계(CAST3, Campbell Scientific, Inc.)는 X, Y, Z 방향의 풍속자료와 풍향자료를 측정하고 기체분석기(EC155, Campbell Scientific, Inc.)가 대기온도를 10 Hz간격으로 측정한다.

증발산량은 2014년 최대 4mm/day, 최소 0mm/day, 2015년 최대 5mm/day, 최소 0mm/day를 나타내고 있으며, 2015년 11월 4일 ~ 12월 22일의 자료는 측정되지 않았다.

3. 연구방법

본 연구에서는 구량천 유역 내에 설치된 플럭스 타워를 통하여 관측된 강수량, 증발산량 및 유출량 자료를 활용하여 유출 특성을 분석하였다. 측정된 자료를 바탕으로 연도별 평수기 및 홍수기 기간의 차별화된 유출특성을 검토하기 위하여 6월 1일부터 9월 30일 까지를 홍수

기(W)로 정하고, 10월 1일부터 다음해 5월 31일까지를 평수기(D)로 분리하여 유출비 검토를 수행하였다. 또한 홍수사상의 수문모의를 통하여 유출 특성을 검토하였다.

기간 분리된 관측 수문자료를 강우-유출모형인 PDM(Probability Distributed Model)[8]을 적용하여 연도별 홍수기, 평수기 및 홍수사상에 대한 검토를 수행하였으며, 관측 자료와 모형의 모의결과에 대한 상관관계 분석을 수행한 후, 모형 및 모의의 적합성을 확인하였다.

3.1 강우 유출 모형

강우-유출모형은 유역의 복잡한 수문작용을 개념화하여 강우-유출의 형태로 나타낸다. 일반적으로 유역의 유효 강수량을 산정하는 토양저류모형(Soil Moisture Accounting)부분과 유역 유출을 산정하는 유역추적모형(Routing)부분으로 구성되어 있다.

Moore[9]가 제안한 PDM은 유역에서 공간적 분포의 토양수분 저장용량을 확률분포로 개념화한 모형이다. 대상유역에 다르게 분포하고 있는 토양저류를 개념화한 토양 저류함수 모형과 병렬 2선형 저류지 유출 모형으로 구성되어 있다. 또한, 유역 내 저류용량의 편차를 고려하기 위하여 유역에서 공간적 토양저류분포를 Pareto 확률분포로 개념화하여 강우-유출 모형으로 적용된다. 모형의 변수는 유역의 저장용량을 나타내는 C_{max} , 유역의 토양수분저류 용량의 공간적 변화를 나타내는 b 로 구성되어 있다. 식 (2)는 토양 수분함수량의 공간적 다양성을 나타낸 확률분포함수이다. 여기서, c 는 토양수분저류 용량, C_{max} 는 유역의 최대 토양수분저류 용량, b 는 유역의 토양수분저류 용량의 공간적 변화이다.

$$F(c) = 1 - (1 - \frac{c}{C_{max}})^b, 0 \leq c \leq C_{max} \quad (3)$$

또한 유역의 최대 수분 저장용량(S_{max})은 다음 식 (3)과 같이 두 변수, C_{max} 와 b 를 사용하여 계산된다.

$$S_{max} = \frac{C_{max}}{(b+1)} \quad (4)$$

앞서 검토된 토양저류모형에서 산정된 유효우량은 유역의 다양한 경로를 통하여 유역의 유출구로 이동하며, 이를 표현하기 위하여 하나 이상의 유출경로들이 고려된

다.

가장 일반적으로 적용되는 병렬 2선형 저류지 유출 모형은 유역의 빠른 반응과 느린 반응을 형상화한 2개의 저류지로 구성된다. 유효우량은 빠른 반응 저류지로 유입되는 비율을 나타내는 $\%(q)$ 변수를 통해 2개의 저류지로 나누어지며, 각 저류지에서 체류시간 변수 $rt(q)$ 와 $rt(s)$ 를 통해서 유출유량으로 연결된다. PDM에 대한 개념도는 다음 Fig. 3과 같다.

3.2 강우 유출 모형의 검토

본 연구의 검토 방법으로 적용한 Monte-Carlo 방법은 입력변수에 대한 반복적인 통계학적 샘플링을 통해 다양한 수학적 문제들에 대한 근사해를 얻어내는 방법이다.

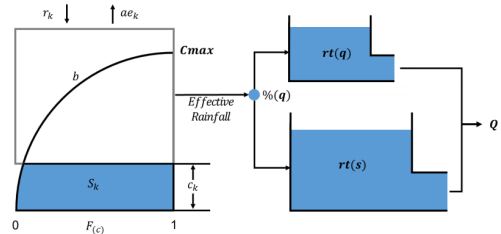


Fig. 3. Schematic diagram of the PDM

Monte-Carlo 방법은 실제에 대한 가정과 이에 대한 모형과의 일련의 조합을 기초하여 실제 상황을 반복적으로 수행하는 모의발생 과정으로 공학적인 목적을 위하여 시스템의 실행이나 반응을 예측하거나 조사하는데 적용될 수 있다. 최현상과 한건연[10]은 Monte-Carlo 해석 결과가 확정론적 결과에 비해 안정된 해를 제시하는 것으로 평가하고 있다[11].

모형의 정확도를 평가하기 위한 기준을 설정하는 문제는 모형의 모의과정에서 과정변수를 조정하는 기준과 동일하므로 모형의 검토에 있어서 대단히 중요하다[12]. 목적함수는 관측된 자료와 모형을 통해 모의된 자료의 차이를 정량적으로 평가하는데 사용되는 검증수단이다. 모의 성능을 분석하는 다양한 관점에 따라 다양한 목적함수가 수자원분야에서의 수문곡선 구간별 목적함수[13], 수문분석의 다 목적함수[11] 등이 적용되고 있다[12].

본 연구에서는 전체적인 수문곡선의 모의 성능을 분석하기 위하여 NSE(Nash Sutcliffe Efficiency)[14]를 적용하였다. 목적함수 NSE는 무차원인 목적함수로서 -∞에서 1까지 값을 가지며, 그 값이 1일 때 관측 값과 모의

값이 일치하여 모형의 성능이 우수함을 나타낸다. 목적 함수 NSE는 다음과 같은 식 (5)와 같다. 여기서, i 는 시간 단위, o_i 는 시간 i 에 관측된 유량, \bar{o} 는 관측유량의 평균, c_i 는 시간 i 에 모형 매개변수로 모의된 유량이다.

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - c_i(\theta))^2}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o})^2} \quad (5)$$

4. 결과

4.1 구량천 유역의 연 단위·단기 유출 특성

구량천 유역의 연도별 홍수기, 평수기 및 단기사상의 관측수문자료의 유출특성을 분석하였다. 다음 Fig.4는 구량천 유역의 월별 강수량을 나타낸 그래프이다. 연간 총 강수량의 약 50%에 해당하는 강수량이 7월 및 8월에 발생하였으며, 전형적인 우리나라의 강수패턴을 보이고 있다. 시간 최대강우강도는 2014년은 90mm/hr, 2015년은 111mm/hr, 그리고 2016년은 119mm/hr로 관측되었으며, 이는 금강유역의 최근 20년 평균 최대강우강도인 240mm/hr의 50%이하 수치를 보이고 나타나고 있다. 2014년에는 8월, 2016년에는 7월에 다른 월과 비교했을 때, 많은 비가 내린 것을 확인할 수 있다.

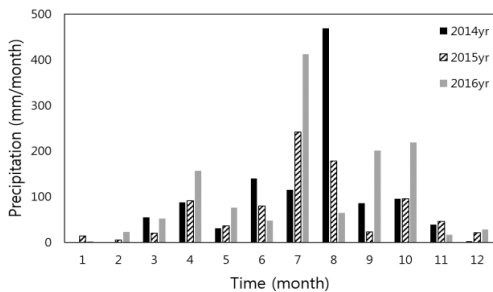


Fig. 4. Monthly precipitation at Guryang river catchment

다음 Fig. 5는 구량천 유역의 월별 유출량을 나타낸 그래프이다. 5~6월에 유출량이 1~2월 및 9~10월의 값과 비교하여 같거나 더 작은 값을 보이며, 7, 8월에 유출량이 급증함을 확인하였다. 이는 일반 유역과 비교되는 산지 유역만의 특성으로, 5~6월에 식생의 활발한 성장으로

인하여 증발산 및 성장에 상대적으로 많은 수분 양이 필요하기 때문으로 판단된다.

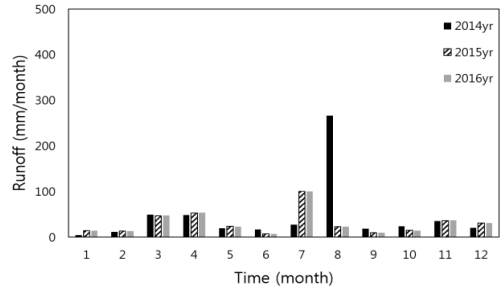


Fig. 5. Monthly runoff at Guryang catchment

다음 Fig. 6은 구량천 유역의 월별 증발산량 그래프이다. 증발산량은 1월부터 증가하지만 활발하지는 않고, 3월부터 증발산이 활발해져 8월까지 증가한다. 9월부터는 감소하기 시작하여 11월부터 이듬해 2월까지의 증발산이 거의 발생하지 않는다.

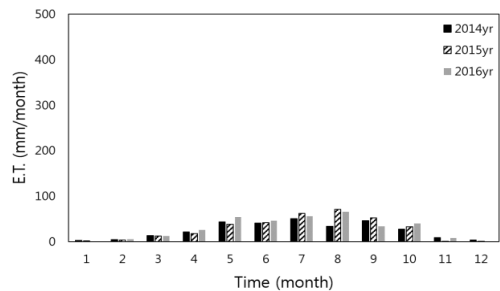


Fig. 6. Monthly evapotranspiration at Guryang river catchment

다음 Table 2는 구량천 유역의 홍수특성인자를 기간별로 정리한 표이다. 유출비는 강수량에 대한 유출량의 비로 정의된다. 년 단위의 유출비는 0.31 ~0.49의 분포를 보이고 있으나, 이를 홍수기 및 평수기로 나누면, 0.27~0.77의 세분화된 유출비를 확인할 수 있다. 그러나 2014년 평수기의 과도한 유출비는 상대적으로 적은 분모(강수량)의 영향으로 판단되어, 이를 일반화하기 어렵다. 2015년과 2016년의 홍수기는 상대적으로 적은 강수량의 영향으로 낮은 유출비를 나타내고 있다.

Table 2. catchment rainfall runoff Characteristics at Guryang river catchment

Period	T.P. (mm)	T.E. (mm)	T.R. (mm)	M.R.I. (mm/day)	P.R. (mm)	R.R. (Ru/Pr)
2014Y	1119	291	543	90	42	0.49
2015Y	849	331	376	111	45	0.44
2016Y	1298	343	399	119	30	0.31
2014W	809	169	329	90	42	0.41
2014D	302	110	232	29	8	0.77
2015W	522	225	141	111	45	0.27
2015D	471	130	210	44	10	0.45
2016W	726	200	194	119	30	0.27
2016D	263	46	78	103	19	0.30

T.P. : Total Precipitation, T.E. : Total Evapotranspiration, T.R. : Total Runoff, M.R.I. : Maxium Rainfall Intensity, P.R. : Peak Runoff, R.R. : Runoff Ratio, Ru : Runoff, Pr : Precipitation, W : Wet period-June~September, D : Dry period-Octo~Next year May

Fig. 7은 기간별 유출비를 나타낸 그래프이다. 연단위로 보면 2014년과 2015년의 값이 0.44~0.49로써 일반적인 유출경향보다 조금 작은 값을 나타내고 있다.

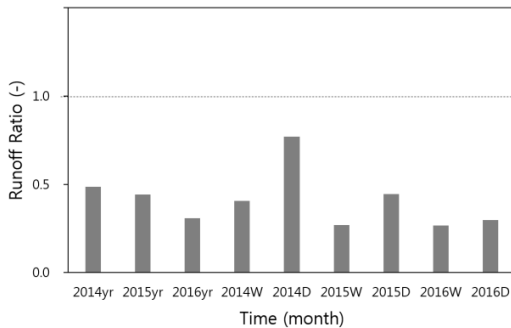


Fig. 7. Monthly runoff ratio at Guryang river catchment

4.2 PDM의 기간별 적용 결과

4.2.1 연 단위 수문사상 분석 결과

구량천 유역의 강우-유출모형 분석을 위해 2014년 1월 1일부터 2016년 12월 31일 기간의 수문자료를 연단위로 분리하여 적용하였으며, 검증은 Monte-Carlo 방법과 목적함수는 NSE를 활용하였다. 각 기간의 초기 토양저류량을 나타내는 Initial c는 전 기간에 걸쳐 PDM을

적용하고, 해당 기간 시점의 토양저류 함수의 모의 수치를 각 기간의 초기 값으로 적용하였다. 각 기간의 최적 검증 매개변수를 다른 연도의 같은 홍수기 및 평수기 기간에 적용하여 모형의 검증을 수행하였다.

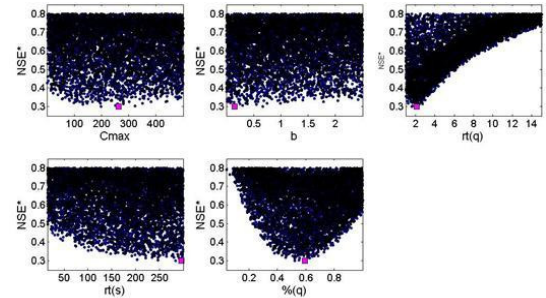


Fig. 8. PDM calibration parameter at Guryang catchment in 2014

Fig 8의 매개변수의 반응표면은 10,000개의 Monte-Carlo 검증 결과를 각각의 점으로 표시한 것으로, 아래 방향으로 불록하게 도시된 것과 정점에 위치한 네모로 표시된 최적의 매개변수의 그림이 우수한 검증 결과를 나타낸다. 유역의 $rt(q)$, $rt(s)$ 및 $\%(q)$ 가 우수한 검증 성능을 나타내고 있다. 그러나 C_{max} , b 는 평평한 반응표면을 보여주고 있어, 검증 매개변수의 민감도가 낮다고 판단된다.

다음 Fig. 9, 10은 구량천 유역의 2014년 PDM 검증 및 검증 적용 결과 예시이다. 전체적인 수문모의와 소규모의 홍수 사상에 대하여 우수한 모의 성능(NSE : 0.90, 0.89)을 나타내고 있다. 1월~5월의 기간에서는 관측 값보다 조금 작게 산정되었지만 그 값이 1mm 이하로 큰 영향은 없다고 판단된다.

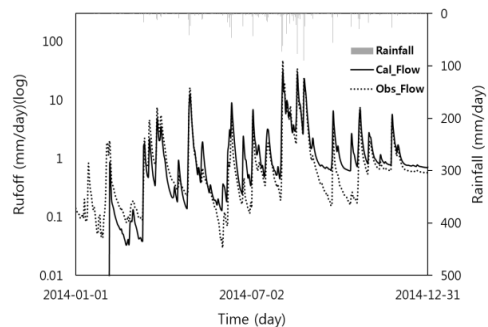


Fig. 9. The PDM calibration hydrograph at Guryang catchment in 2014 (NSE=0.90)

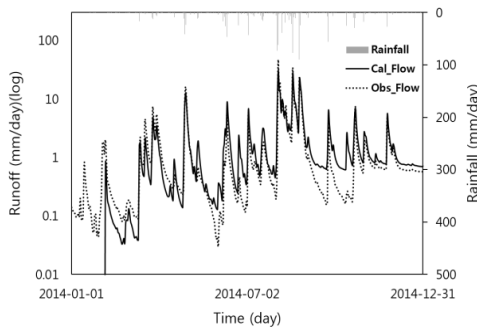


Fig. 10. The PDM validation hydrograph at Guryang catchment in 2014 (NSE=0.89)

구량천 유역의 검정 및 검증 매개변수 산정 결과와 목적함수의 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Calculation parameters and objective function estimation results at Guryang catchment

Period	Model Parameters					Objective Function (NSE)	
	C_{max}	b	$rt(q)$	$rt(s)$	$\%(q)$	Cal.	Val.
	(mm)	(-)	(day)	(day)	(-)		
2014Y	408	0.32	2	251	0.58	0.90	0.89
2015Y	418	0.37	2	261	0.49	0.88	0.89
2016Y	333	0.54	2	296	0.40	0.89	0.88
2014W	428	0.05	2	275	0.53	0.89	0.91
2014D	468	1.74	3	89	0.56	0.76	0.71
2015W	321	0.18	2	148	0.65	0.94	0.90
2015D	8	0.30	4	247	0.41	0.63	0.60
2016W	391	0.40	2	270	0.47	0.94	0.90
2016D	251	0.98	4	273	0.17	0.75	0.70

W : Wet period-June-September, D : Dry period-October-Next year May

2015 평수기 기간의 모의를 제외하고, 모두 적합한 검정 결과(NSE > 0.7)를 제시하고 있다.

연 단위 모형의 적용에서는 C_{max} 는 333~418mm, b 는 0.32~0.54, $rt(q)$ 는 1.5~1.9, $rt(s)$ 는 251~296, $\%(q)$ 는 0.40~0.58의 값을 제시하고 있다. 이를 홍수기(W), 평수기(D)으로 나누어 적용한 결과, 다른 결과를 제시하고 있다. 2014년의 평수기와 2015년의 평수기는 다른 기간과 차별화된 결과(2014년의 b , 2015년의 C_{max})을 나타내고 있다. 특히 2015년의 평수기는 NSE < 0.7 이하의 값을 제시하고 있다. 평수기와 홍수기의 유

역 유출 특성의 차이를 확인할 수 있으며, 기간분리의 필요성을 제시하고 있다.

4.2.2 단기 수문사상 분석 결과

구량천 유역의 시간단위 변화를 확인하기 위하여 2014년~2016년 기간의 4개의 단기수문사상을 선정하였다. 선정된 단기사상 4개의 홍수특성인자(강수량, 증발산량, 유출량, 유출비, 최대강우강도, 침투홍수량 및 선행 5일 강수량)를 검토한 결과는 Table 4와 같다.

단기홍수사상에서 침투홍수량은 강우강도 40mm/hr 이상에서는 동일한 시간대에 발생하고, 강우강도 40mm/hr 이하에서는 1시간 이상 차이로 강우에 의한 유출 반응이 일어나는 것을 확인하였다. 이는 연구유역인 소규모 산지유역의 강우사상에 대해 유출이 빠르게 반응하고 있다고 판단된다. 다음 Fig. 11은 단기사상의 예시(E4)이다.

Table 4. Flood event characteristics at Guryang catchment

Event	E1	E2	E3	E4
Period	2015/7/11 ~ 2015/7/15	2015/8/24 ~ 2015/8/28	2016/7/1 ~ 2016/7/3	2016/9/16 ~ 2016/9/20
T.P. (mm)	119.3	59.8	99.5	135.5
T.E. (mm)	6.4	6.3	2.9	4.8
T.R. (mm)	82.6	12.2	24.4	33.5
R.R. (-)	0.69	0.20	0.25	0.25
M.R.I. (mm/hr)	17.3	6.8	15.8	14.6
P.R. (mm/hr)	5.3	0.6	3.4	1.9
P5 (mm)	97.6	25.7	0.1	5.8

T.P. : Total Precipitation, T.E. : Total EvapoTranspiration, T.R. : Total Runoff, M.R.I. : Maxium Rainfall Intensity, P.R. : Peak Runoff, R.R. : Runoff Ratio, P5 : 5days antecedent Precipitation

[E1]을 제외한 모든 사상에서 유출비가 0.25이하의 유출비를 나타내고 있으며, 이는 선행강우가 적고, 가뭄이 심한 2015, 2016년의 영향으로 판단할 수 있다.

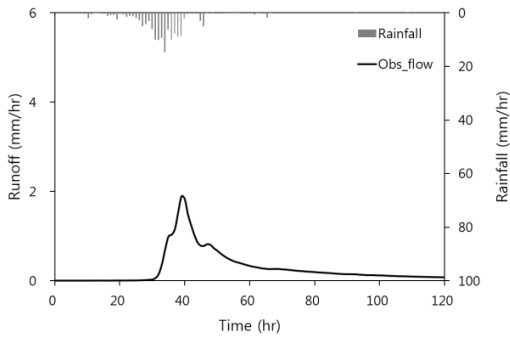


Fig. 11. Precipitation-Runoff graph (E4) at Guryang catchment

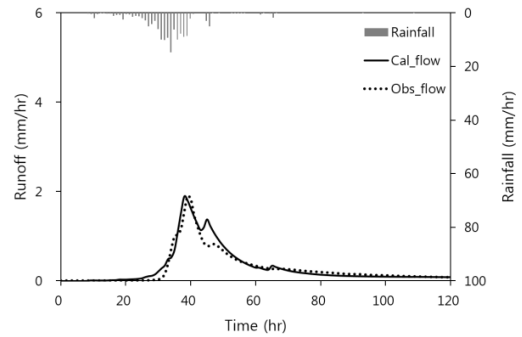


Fig. 12. Calibration Precipitation-Runoff graph (E4) at Guryang catchment (NSE=0.91)

구량천 유역의 단기사상별 검정 및 검증 매개변수 산정 결과와 목적함수의 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Calculation parameters and objective function estimation results at Guryang catchment

Event	Model Parameters					Objective Function (NSE)
	C_{max}	b	$rt(q)$	$rt(s)$	$\%(q)$	
	(mm)	(-)	(day)	(day)	(-)	
E1	150	0.34	7	117	0.60	0.96
E2	212	0.08	15.0	156	0.68	0.91
E3	249	0.08	8	16	0.53	0.87
E4	264	0.09	8	215	0.50	0.91

단기사상은 연 단위사상과 같은 방식으로 검정을 수행하였다. 4개의 단기사상 모두 적합한 검정 결과(NSE > 0.7)를 제시하고 있다. 다음 Fig. 12 는 구량천 유역의 2014~2016년 단기사상의 PDM 검정 결과 수문곡선 예시이다. 구량천유역의 4개 단기사상 전체적인 수문모의와 대하여 우수한 모의 성능(NSE : 0.96, 0.91, 0.87, 0.91)을 나타내고 있다.

유역의 C_{max} 는 E1과 나머지 사상이 차이를 나타내고 있으며, 상대적으로 적은 유출비를 나타내는 E2,3,4 에서 201~263mm의 수치를 제시하고 있다. 또한 유역 토양저류용량을 형상을 제시하는 b 매개변수를 0.08로 일관된 수치를 제시하고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 용담댐 시험 유역에서 생산되는 구량천 유역의 2014~2016년의 강수량, 수위 및 증발산량 등의 관측 수문자료를 바탕으로 소규모 산지유역인 구량천 유역의 유출 특성을 분석하였다. 또한 PDM을 적용하여 모형의 적합성을 평가하였다. 본 논문의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 수문 자료 기간 분리(평수기 및 홍수기)에 따른 유역 유출 특성을 분석한 결과, 홍수기의 유출비보다 평수기의 유출비가 크게 산정되어, 각 기간별 유출 특성의 차이를 확인하였다.
- 2) 구량천 유역을 홍수기와 평수기로 나누어 PDM모형을 적용한 결과, 연단위의 분석보다 개선된 모의 성능과 매개변수를 제시하고 있어, 향후 기간별 모형의 적용이 필요함을 확인하였다.
- 3) PDM의 모의적용결과, 목적함수 NSE의 값이 연 단위 유출은 검정 0.75~0.94, 검증 0.70~0.91을 나타내며, 단기 사상 모의 결과 0.87~0.96의 범위를 나타내어 우수한 모의 성능을 나타내고 있다.

본 논문의 결과는 추가적으로 수집된 수문 자료를 활용한 연구 결과와 비교·분석이 가능하며, 2014년 및 2015년은 가뭄이 심한 해이므로 가뭄 시 소규모 산지 유역의 유출 특성으로 제시 할 수 있다. 그러나 연구 결과의 일반적인 적용을 위해서는 이후 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

References

[1] W. Ludwig, P. Serrat, L. Cesmat, and J. Garcia-Estevés, “Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the Te’t River (Southern France)”, *Journal of Hydrology*, pp. 204-221, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.11.022>

[2] D. P. Kim, and N. H. Lee, “Water Balance Analysis using Observation Data of the Seolmacheon and Chatancheon Experimental Catchment of the 2012”, *Journal of Korea Water Resources Association* 2013, pp. 631~635, 2013.

[3] T. Kjeldsen, H.J. Kim, C.H. Chang, and H. S. Lee, “Evidence and Implications of Nonlinear Flood Response in a Small Mountainous Watershed”, *Journal of Hydrologic Engineering*, DOI 107107-1604-2-0059, 2016.
DOI: [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001343](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001343)

[4] H. Yang, “Water Balance Change of Watershed by Climate Change”, *Journal of the Korean Geographical Society*, no. 42 vol. 3, pp. 405-420, 2007.

[5] C. S. Rim, G. H. Lim, S. E. Yoon, “A Study on the Hydroclimatic Effects on the Estimation of Annual Actual Evapotranspiration Using Watershed Water Balance”, *Journal of Korea Water Resources Association*, vol. 44, no. 12, pp. 915-928, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2011.44.12.915>

[6] H. S. Kim, H. S. Kim, G. I. Chun, K. U. Kang, “Drought Evaluation in 2014~2015”, *Water for Future*, vol. 49, no. 7, pp. 61-75, 2016.

[7] K-water, “Yongdam experimental catchment manage white book”, 2016.

[8] R. J. Moore, “The probability-distributed principle and runoff production at point an basin scales,” *Hydrological Sciences Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 273-297. 1985.
DOI: <https://doi.org/10.1080/02626668509490989>

[9] R.J. Moore, “The PDM rainfall-runoff model”, *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 1, pp. 483-499. 2007.
DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-483-2007>

[10] H. S. Choi, K. Y. Han, “Development of Distributed Rainfall-Runoff Model by Using GIS and Uncertainty Analysis (I) - Theory and Development of Model”, *Journal of Korea Water Resources Association*, no. 37, vol. 4, pp. 329-339, 2004.
DOI: <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2004.37.4.329>

[11] S. E. Ahn. “Analysis of Conceptual Rainfall-runoff Model PDM using Multi-objective Function”, Department of Civil Engineering Graduate School, Chungbuk National University. 2010.

[12] Y. N. Yoon, Hydrology. pp. 746, *CHEONG MOON GAK*, 2007.

[13] H.J. Chang, “Application of the ReFH Conceptual Rainfall Runoff Model at Jeungpyeong and Jalovecky” Department of Civil Engineering Graduate School, Chungbuk National University. 2014.

[14] J.E. Nash, and J.V. Sutcliffe, “River flow forecasting through conceptual models part I- A discussion of principles”, *Journal of Hydrology*, vol. 10, no. 3, pp. 282-290. 1970.

김 성 구(Seong-Goo Kim)

[정회원]



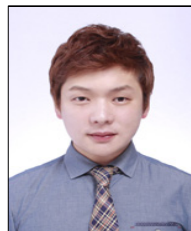
•2018년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)

<관심분야>

토목, 수공학, 강우 유출 모형

장 형 준(Hyung Joon Chang)

[정회원]



•2016년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)

•2018년 2월 : 충북대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)

<관심분야>

토목, 수공학, 강우 유출 모형

이 효 상(Hyo-Sang Lee)

[정회원]



•2001년 11월 : Imperial College London, UK(Master's Degree)

•2006년 5월 : Imperial College London, UK (Ph.D)

•2007년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 토목공학부 교수

<관심분야>

토목, 수공학, 강우 유출 모형