

유출모형을 이용한 곡교천 유역의 강우-유출 특성 분석

황병기¹, 조용수^{1*}, 양승빈²

¹상명대학교 건설시스템공학부, ²상명대학교 환경자원학과

Analysis of Rainfall-Runoff Characteristics in Gokgyochun Basin Using a Runoff Model

Byung-Ki Hwan¹, Yong-Soo Cho^{1*}, Seung-Bin Yang²

¹Division of Civi Engineering, Sang-Myung University

²Department of Environmental Resources, Sang-Myung University

요약 곡교천 유역의 홍수-유출 특성을 파악하는 연구를 수행하기 위하여 HEC-HMS 모형을 적용하였다. 이 유역은 일부 소유역에서 대규모 농업용 저수지가 있어 소유역으로부터 발생한 초기 유출이 저수지에 의해서 상당량 저류되는 특징을 갖고 있다. 이러한 현상을 반영하기 위하여 3가지 침투모의 방법을 사용하였으며, 방법 1은 기존의 유출곡선지수법, 방법 2는 방법 1에 표면법 기능을 추가한 방법, 방법 3은 초기 및 일정손실을 방법이다. 모형은 3가지 방법으로 손실계산, Clark의 단위도법으로 강우의 직접유출 변환, 지수함수적 감소법으로 기저유량, Muskingum 법으로 하도추적 하는 과정을 포함한다. 모형에서 최적화 기법을 시행착오법과 병행하여 최적화 변수를 도출하였다. NSE, RAR, and PBIAS 등의 평가지표를 사용하여 모형의 보정을 수행하였다. 유출체적, 침투유량, 침투발생시각 등에 대하여 모의치와 실측치를 비교한 결과 초기손실을 반영할 수 있도록 설계된 방법2와 3에서 우수한 결과를 나타낸 반면, 그렇지 못한 방법 1은 모의치와 실측치의 차이가 큰 것으로 나타났다. 복합 강우인 경우에 방법 3은 방법 2에 비하여 좋은 결과를 나타내지 못하였다. 결론적으로 방법 2가 단일 강우나 복합강우 모두 좋은 결과를 주는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 정책입안자가 홍수관리대책을 수립하는 데 유용한 도구로서 사용되어 질 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract In this study, the HEC-HMS was applied to determine rainfall-runoff processes for the Gokgyuchun basin. Several sub-basins have large-scale reservoirs for agricultural needs and they store large amounts of initial runoff. Three infiltration methods were implemented to reflect the effect of initial loss by reservoirs: 'SCS-CN'(Scheme I), 'SCS-CN' with simple surface method(Scheme II), and 'Initial and Constant rate'(Scheme III). Modeling processes include incorporating three different methods for loss due to infiltration, Clark's UH model for transformation, exponential recession model for baseflow, and Muskingum model for channel routing. The parameters were calibrated using an optimization technique with trial and error method. Performance measures, such as NSE, RAR, and PBIAS, were adopted to aid in the calibration processes. The model performance for those methods was evaluated at Gangcheong station, which is the outlet of study site. Good accuracy in predicting runoff volume and peak flow, and peak time was obtained using the Scheme II and III, considering the initial loss, whereas Scheme I showed low reliability for storms. Scheme III did not show good matches between observed and simulated values for storms with multi peaks. Conclusively, Scheme II provided better results for both single and multi-peak storms. The results of this study can provide a useful tool for decision makers to determine master plans for regional flood control management.

Keywords : SCS-CN, Simple Surface Method, Initial and Constant rate, Clark's UH, Muskingum

본 논문은 상명대학교 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Yong-Soo Cho(Sang-Myung Univ.)

Tel: +82-41-550-5307 email: hydro92@daum.net

Received October 11, 2018

Revised December 11, 2018

Accepted February 1, 2019

Published February 28, 2019

1. 서론

재해연보에 의하면 2016년 태풍 차바로 인해 대암댐의 계획홍수량을 초과하는 유입량이 발생하였고, 태화강에 200년 빈도이상의 홍수가 발생하였다[1]. 이와 같이 최근 우리나라는 기후변화로 인해 매우 큰 강우가 자주 발생하여 하천 시설물 설계빈도 이상의 홍수가 증가하고 있다. 지속적인 하천 정비 사업으로 침수면적은 감소하고 있으나, 도시화, 산업화 등으로 불투수 면적이 증가하고 있고, 하천변의 저지대 개발 및 지하 생활공간 등이 증가하면서 내수배제 불량에 따른 침수위험성이 증대되고 있는 실정이다[2].

이와 같은 피해를 저감하기 위해서는 강우-유출과정에 대한 적절한 해석과 정확도 높은 강우의 예측과 홍수량 산정이 필요하다. 홍수량 산정 방안으로 강우-유출 모형을 이용하여 집중형 수문모형과 분포형 수문모형이 있다. 집중형 모형은 유역의 강우-유출 관계를 모의하기 위해 공간적으로 변화하지 않는 수문성분 과정을 대표하는 평균적인 모형 매개변수를 사용하는 반면, 분포형 모형에서는 공간적으로 변하는 물리변수를 사용하여 이를 격자기반으로 풀어서 유출을 산정하게 된다. 그러므로 분포형 모형은 유역의 각종 물리변수가 결정되면 집중형 모형에서처럼 별도의 모형검정 과정이 필요하지 않은 장점이 있으나, 유출 산정 시스템이 대단히 복잡하고 격자별로 많은 물리적 변수의 적정한 결정이 쉽지 않으며, 입력 자료의 양이 방대한 문제점을 갖고 있다[3]. 따라서 단기간에 발생하는 호우로 인한 홍수유출을 짧은 시간 단위로 모의하기 위해서 집중형 단일사상 모형이 주로 사용되며, 유역 수자원의 평가, 계획 및 관리를 위해 장기간의 하천 유출 모의를 위해서는 분포형 모형이 적합한 것으로 알려져 있다.

집중형 모형으로 STORM, ILLUDAS, HEC-1 등이 과거(1990년 이전)에 사용 사례가 높았으나, 그 이후에는 HEC-1를 보완한 HEC-HMS[4]를 국내외에서 강우-유출 모의를 위해 가장 많이 사용하고 있으며, 반면에 분포형 모형은 MIKE-SHE[5], *VfloTM* 모형[6]이 많이 적용되고 있다. 본 연구에서는 다수의 국내외 적용사례가 있는 HEC-HMS를 이용하고자 한다.

HEC-HMS에 대한 국내외 적용사례를 살펴보면, 국내 경우 안성천 유역의 일부인 진위천 유역에 적용하였으며[7], 지표면 유출에 대한 토지이용변화가 미치는 영

향을 분석하기 위해 한천 유역에 적용하였으며[8], 수문학적 특성을 고려한 관측자료 기반의 홍수량 산정을 한천 유역에 적용하였으며[9], 그 외에도 금강 유역[10], 강릉 남대천 유역[11] 등 다수의 적용 사례가 있다. 국외에서 강우에 따른 손실량 산정을 위해 다양한 침투 모형에 따른 모의 예측 결과를 비교하는 연구를 이탈리아 Mesima 유역에 적용하였으며[12], 요르단 Wadi Dhuliel 유역의 출구점에서 홍수 유출량을 성공적으로 모의한 바 있으며[13], HMS 모형에서 제공하는 다양한 서브모형의 적합성을 검토하기 위해 중국 Jinhae 시범 유역에 적용한 바 있으며[14], Snyder 단위도법, Clark's 단위도법에 대하여 유출변환 특성을 비교하는 연구를 수행하였으며 일본 Attanagalu Oya 유역에 적용한 바 있다[15].

본 연구는 삼교천 수계 내 집중 호우시 침수피해위험성이 높은 곡교천 유역의 수문환경변화에 따른 강우유출 거동을 분석하기 위해서 HEC-HMS를 적용하였다. 모형의 다양한 강우-유출 사상에 대한 유출제적, 침투유량 및 침투 발생시각, 도달시간 등에 관한 모의 능력을 평가하고, 유역에서 실제 관측한 수문사상과 모형의 여러 가지 방법으로 산출한 수문사상과 비교 및 분석함으로써, 곡교천 중-하류 지역 하천 특성에 가장 적합한 강우-유출 방법을 도출하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 자료 수집 및 분석

무한천 및 곡교천을 포함한 삼교천 유역은 한강수계 북동쪽과 금강수계 남동쪽 사이에 위치하며, 본 연구의 대상지역인 곡교천은 삼교천의 제1지류로서 삼교천 유역의 북동쪽에 위치하며 Fig. 1과 같다. 유역 면적은 591 km², 하천 본류 길이는 36.7 km, 형상계수는 0.21, 유역형태는 장방형에 가깝다. 하천경사는 국가 하천 구간에서 1/1,675 ~ 1/4,148로 완만하며, 유역의 평균 고도는 103.8(EL m)으로 전체적으로 EL. 200m 이하의 지역이 85.4% 이상을 차지하는 비교적 평탄한 지형을 이루고 있다[16]. 유역 내 수위-유량 관측소 2개소, 우량 관측소 4개소가 있으며, 궁평(Gungpyeung), 가혜(Gahye), 마산(Masan)과 같은 비교적 저수량이 큰 농업용 저수지가 있다(Fig.1).

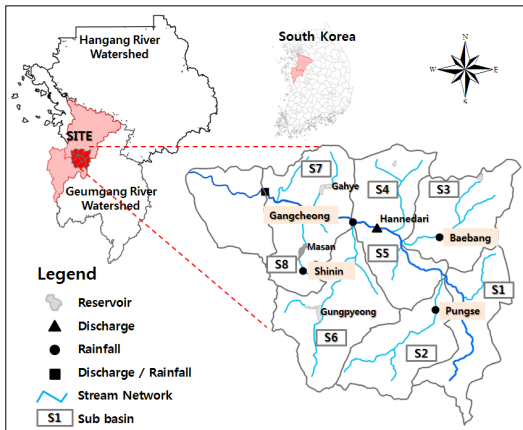


Fig. 1. Location of study site showing rainfall and discharge monitoring stations

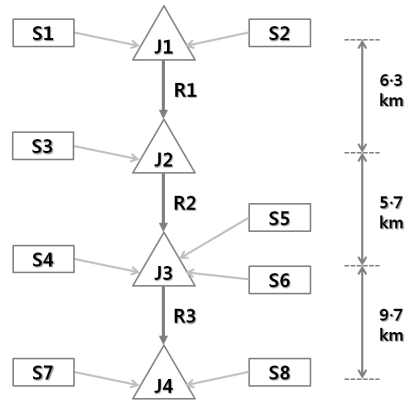
2011년부터 2016년까지 곡교천 유역에 내린 강우사상 중에서 본 연구에 사용된 7건의 강우사상 및 관련 수문자료를 국가수자원정보시스템[17]으로부터 수집하였으며 Table 1에 정리하였다. 총강우량 (Total precipitation)은 유역 내 강우량 측정소(Fig. 1)에서 획득한 자료에 Thissen 다각형에 의한 지배면적 가중치를 적용하여 강우사상별 유역 평균 강우량을 산정하였다.

Table 1. Hydrological characteristics of Gokgyochun watershed

| | Storm event | Total Precip.(mm) | Duration (h) |
|---|-------------|-------------------|--------------|
| 1 | 3Jul2011 | 80 | 20 |
| 2 | 30Aug2012 | 132.7 | 17 |
| 3 | 16Sep2012 | 119.5 | 28 |
| 4 | 29Aug2013 | 96.0 | 6 |
| 5 | 17Jul2014 | 110.2 | 12 |
| 6 | 23Jul2015 | 58.0 | 19 |
| 7 | 4Jul2016 | 114.5 | 68 |

2.2 강우 유출 모형 구축

강우에 의한 유출을 모의하기 위해 HEC-HMS를 적용하여 대상유역에 대한 모형을 구축하였으며, Fig. 2와 같이 8개 소유역(Sub-basin), 4개 합류점(Junction), 3개 하도구간(Reach)으로 구성하였다.



Legend
 △ Junction □ Sub-basin ➔ Flow direction

Fig. 2. Model segmentation implemented in HEC-HMS

국가수자원정보시스템(WAMIS, 2017)에서 제공하는 삽교천 수계 곡교천 유역 내 단위유역도를 근거로 소유역을 구분하였으며, 이는 곡교천상류, 풍서천, 천안천, 곡교천중류, 온양천, 강청수위표 단위유역을 포함한다. 곡교천중류와 강청수위표 단위유역은 본류를 중심으로 좌안과 우안으로 구분되어 있어 이를 반영하여 각각 2개의 소유역으로 구분하여 총 8개 소유역(S1-S8)으로 구성하였다. 곡교천 상류와 풍서천이 합류하는 지점을 J1(합류점1), 천안천이 유입하는 지점을 J2(합류점2), 온양천이 유입하는 지점을 J3(합류점3), 강청수위표 소유역 유출이 유입하는 지점을 J4(합류점4)로 하여 총 4개 합류점으로, 그리고 본류 구간을 합류점 기준으로 총 3개 하도구간(R1 - R3)으로 구축하였으며, 각 소유역에 대한 특성인자는 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Topographical parameters of sub-basins

| Sub-basin | Area | Length | Slope |
|-----------|-----------------|--------|---------|
| | km ² | km | m/m |
| S1 | 66.0 | 15.2 | 0.00605 |
| S2 | 70.2 | 14.2 | 0.00793 |
| S3 | 74.5 | 12.3 | 0.00274 |
| S4 | 51.0 | 8.2 | 0.00360 |
| S5 | 42.0 | 4.8 | 0.01166 |
| S6 | 94.3 | 18.4 | 0.00625 |
| S7 | 45.0 | 7.0 | 0.00488 |
| S8 | 48.0 | 6.6 | 0.00273 |

3. 결과 및 고찰

3.1 모형의 개요

대상지역 내 농업용 저수지를 포함한 저류지가 다수 분포하고 있으며 이중 궁평(Gungpyeung), 가혜(Gahye), 마산(Masan) 저수지는 소유역 내에서 집수 면적이 차지하는 비율이 높아 강우시 저류지 직상류 유역의 유출을 상당량 저류(제어)하는 것으로 파악되었다. 그러므로 선행무강우기간이 길어서 저류지 수위가 상당히 낮아져 있는 경우 유출지수 (CN)에 AMC-I 조건의 낮은 값을 사용한다 하더라도 저수지의 저류로 인한 초기손실이 발생한 부분을 적절히 반영하지 못할 우려가 큰 것으로 파악되었다. 이러한 현상을 고려하기 위해서 본 연구에서는 유출곡선지수 방법에 표면법 선택(Selecting a surface method) 기능을 추가하여 사용함으로써 또는 초기 및 일정손실율법에서 초기손실율 변수를 이용함으로써 저류지에 의한 저류를 반영할 수 있도록 하였다.

3.2 모형 보정

모형의 보정은 2011년 7월 3일, 2012년 8월 30일, 2012년 9월 16일, 2013년 8월 29일 등 4건의 강우사상 자료를 이용하였으며, 총강우량, 강우지속기간, 강우강도 등 관련 자료는 Table 1과 같다.

국가수자원종합정보시스템에서 제공하는 유역 및 기상관련 정보(WAMIS, 2017), 환경부에서 제공하는 토지피복도(MOE, 2012), 농업과학원에서 제공하는 정밀토

양도(NIAS, 2010) 자료를 획득하였으며, 이자료를 이용하여 ArcView GIS 소프트웨어를 사용하여 수문학적 토양군으로 분류하였다. 이 자료와 토지이용도를 이용하여 소유역별 평균 유출곡선지수를 산정하였으며, SCS 토양군별 최소침투율(Soil Conservation Service, 1988)을 근거로 소유역별 평균 일정손실율 f_c 를 산정하여 Table 3에 나타내었다.

유역 홍수추적을 수행하기 위해서 Clark 방법(Clark's UH)을 적용하였으며 최적화 과정을 통하여 보정된 매개변수 도달시간(Time of concentration, T_c), 저류상수(R)에 대하여 소유역별로 Table 4에 정리하였다.

수문곡선의 기저유량을 고려하는 방법(recession)은 지수함수적 감소방법을 사용하였으며, 이 방법은 초기유량, 기저유량 감소비, 침투 유량비와 같은 3개의 매개변수를 사용한다. 초기유량은 강우가 없는 상태에서도 지속적으로 존재하는 유량으로 선행강우의 함수이며, 강우 사상에 따라 큰 차이가 있으므로 강우 시작 전 유량을 초기유량으로 사용하였으며 강우 사상에 따라 0.04 ~ 0.12 CMS/km² 를 사용하였다. 기저유량 감소비는 감쇄상수라고도 하며, 하강 곡선의 변곡점 이후의 어떤 유량과 하루 경과후의 감소유량과의 비이며 0.1-0.9로 산정되었다. 이는 매뉴얼(USACE, 2010)에서 제시한 범위 [0.1~0.9]내에 있는 것으로 나타났다. 하강 곡선 상의 지수함수적으로 감소하기 시작하는 유량은 침투 유량과의 비로 나타내며 0.05 ~ 0.15로 산정되었다.

Table 3. Calibration results of model parameters for infiltration methods

| Parameter | Sub-basin | | | | | | | |
|--------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 |
| f_c (mm/h) | 7.8 | 7.8 | 7.2 | 7.3 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 7.6 |
| SCS-CN | 65 | 64 | 73 | 70 | 72 | 69 | 69 | 71 |

Table 4. Calibration results of model parameters for runoff processes

| Method | Parameter | Sub-basin | | | | | | | |
|------------|------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 |
| Clark's UH | T_c (hr) | 2.8 | 2.1 | 3.3 | 1.5 | 0.6 | 2.5 | 1.5 | 1.5 |
| | R (hr) | 4.2 | 3.2 | 4.9 | 2.4 | 1.0 | 3.5 | 1.9 | 1.9 |

하도추적은 Muskingum 방법을 적용하였으며, 보정 결과는 Table 5에 정리하였다. 하도 저류상수(K)는 추적구간의 길이를 반영하여 구간 길이가 짧은 R1은 0.7부

터, 길이가 가장 긴 R3는 1.2로 산정되었다. 홍수파의 저류정도를 결정하는 무차원 상수(X)는 0.2 안팎으로 산정되었으며, 이는 제시한 범위[0-0.5] 내에 있다. 미계측 유

역의 X값 추정은 어려운 문제이나, 대부분의 하천에서 0-0.3의 값을 적용하는 것으로 알려져 있다(USACE, 2010).

Nash-Sutcliffe 모형효율계수(NSE), 평균제곱근오차(RSR), 평균편차의 비율(PBIAS) 등 3개 평가지표를 사용하여 모형의 보정을 수행하였으며, 이 중에서 NSE 지표를 이용한 평가에 의하면, 방법 1(Scheme I), 방법 2(Scheme II), 방법 3(Scheme III)에 대하여 각각 0.66~0.88, 0.78~0.85, 0.52~0.73이며, 각각 좋음(0.5이상), 매우 좋음(0.75이상), 좋음(0.5이상)으로 평가되었다. 그 외의 지표도 유사한 결과를 나타내었다. 결과적으로 유출곡선지수를 단독으로 사용한 방법보다, 표면법 기능을 추가로 사용하여 저수지의 저류를 고려한 방법이

가장 좋은 결과를 주는 것으로 나타났다.

3.3 유출 시뮬레이션

2014년 7월 17일 강우 사상에 대하여 모의치과 실측치를 비교하여 도시하였다(Fig. 3). 모의유량은 침투모의 방법에 따라 기존의 SCS-CN을 사용한 방법 (Scheme I), 방법 1에 표면법 기능을 추가하여 사용한 방법(Scheme II), 초기 및 일정손실율법(Scheme III)을 사용한 방법을 포함한 3가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 유출 체적(Runoff volume), 첨두유량(Peak flow), 첨두발생시각(Time of peak flow) 등 3개 매개변수에 대하여 중요한 결과 값을 Table 6에 정리하였다.

Table 5. Calibration results of model parameters for channel routing

| Variables | Muskingum routing method | | | | | |
|------------------|--------------------------|-----|-----|------|------|------|
| | K (hr) | | | X | | |
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| Sub-reach | | | | | | |
| Calibrated value | 0.8 | 0.7 | 1.2 | 0.21 | 0.25 | 0.23 |

Table 6. Comparison of observed and simulated results for model verification

| Storm event | Parameter | Observed | Scheme I | | Scheme II | | Scheme III | |
|-----------------|------------------|----------|----------|----------|-----------|----------|------------|----------|
| | | | Sim. | Diff.(%) | Sim. | Diff.(%) | Sim. | Diff.(%) |
| July 17 2014 | Runoff vol. (mm) | 49.3 | 66.3 | 34.5 | 55.1 | 11.8 | 52.1 | 5.7 |
| | Peak flow (CMS) | 638.8 | 727.4 | 13.9 | 680.2 | 6.5 | 694.6 | 8.7 |
| | Time of peak (h) | 10.0 | 11.4 | 14.2 | 11.4 | 14.2 | 10.9 | 9.2 |
| July 23 2015 | Runoff vol. (mm) | 34.8 | 40.6 | 16.9 | 36.37 | 4.6 | 34.86 | 0.26 |
| | Peak flow (CMS) | 162.6 | 206 | 26.7 | 183.1 | 12.6 | 167.2 | 2.8 |
| | Time of peak (h) | 26.0 | 24.7 | 5.0 | 24.9 | 4.2 | 25.3 | 2.7 |
| July 4 2016 | Runoff vol. (mm) | 74.2 | 81.5 | 9.8 | 67.1 | 9.6 | 60.9 | 18.0 |
| | Peak flow (CMS) | 196.7 | 311.7 | 58.5 | 216.3 | 10.0 | 224.1 | 14.0 |
| | Time of peak (h) | 49.0 | 46.3 | 5.4 | 46.8 | 4.6 | 46.6 | 4.9 |

유출 체적에 대한 모의 결과는 방법 1, 방법 2, 방법 3에 대하여 실측치(Observed)와 모의치 (Simulated)의 편차(Difference)가 각각 34.5%, 14.0%, 5.7%로, 첨두유량은 각각 13.9%, 6.5%, 8.7%로, 첨두유량 발생시각은 각각 14.2%, 14.2%, 9.2%로 나타났다. 따라서 방법 1은 3개 매개변수 모두에서 편차가 큰 것으로 나타났으며, 이는 모의치가 실측치를 제대로 반영하지 못하는 것을 의미한다.

반면에 방법 2는 첨두유량이, 방법 3은 유출체적과 첨두시각에서 편차가 가장 작은 것으로 나타났으며, 방법

2와 3의 차이는 근소하며 모두 우수한 것으로 평가되었다. 방법 3을 적용한 수문곡선에서 상승부가 나머지 방법에 비하여 지체되어 상승하는 것으로 나타났으며, 이는 유출의 초기손실을 반영한 매개변수를 적용한 결과로 사료된다.

2015년 7월 23일 강우 사상에 대하여 모의치와 실측치를 비교한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 유출 체적에 대한 모의 결과는 방법 1, 방법 2, 방법 3에 대하여 실측값(Observed)과 편차(Difference)가 각각 16.9%, 4.2%, 0.3%로, 첨두유량은 각각 26.7%, 12.6%, 2.8%로, 첨두

유량 발생시각은 각각 5.0%, 4.2%, 2.7%로 나타났다. 따라서 방법 1은 3개 매개변수 모두에서 편차가 큰 것으로 나타났으며, 반면 방법 2와 방법 3은 근소한 차이가 있으나 전반적으로 실측치를 잘 모의하는 것으로 나타났다.

2015년 7월 23일 강우 사상에 대한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 피크가 다수인 복합강우로서 매개변수에 대한 비교 결과가 Fig. 3, Fig. 4와는 다른 양상을 나타내었다. 방법 2가 모든 매개변수에서 편차가 가장 낮은 것으로 나타났으며, 이는 복합강우의 경우에 방법 3의 초기 손실에 대한 효과가 다수의 피크를 거치면서 감소하여 적절한 효과를 나타내지 못한 것으로 보인다.

결과를 종합하면, 저수지의 저류 효과를 반영하기 위하여 표면법의 기능을 추가한 방법 2와 초기손실을 매개변수를 통하여 반영할 수 있는 방법 3이 저류 효과를 반영할 수 없는 상태로 설계된 방법 1에 비하여 실측치를 모사하는 데 우수한 것으로 나타났다. 특히 갈수기 또는 무강우기간이 길어 저수지의 수위가 낮아져 있을 경우 초기강우량의 상당수가 유출로 나타나지 못하고 저류지를 채우는 데 사용되어, 방법 1을 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 방법 2와 방법 3의 경우, 모든 매개변수에서 우수한 결과를 나타냈으나, 단일강우인 경우에는 방법 3이 방법 2보다 다소 나은 결과를, 복합강우 경우에는 오히려 방법 2가 나은 결과를 주는 것으로 나타났다.

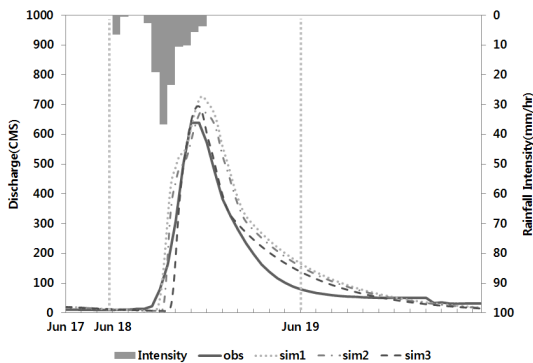


Fig. 3. Comparison of calculated and observed results for storm event (July 17-18, 2014)

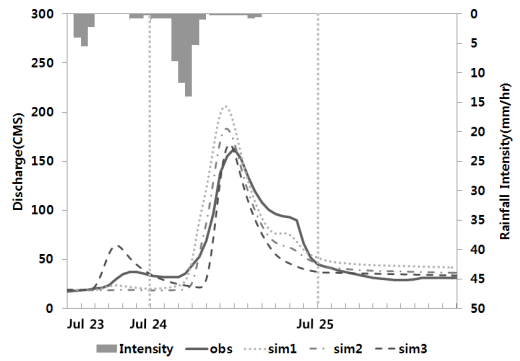


Fig. 4. Comparison of calculated and observed results for storm event (July 23-24, 2015)

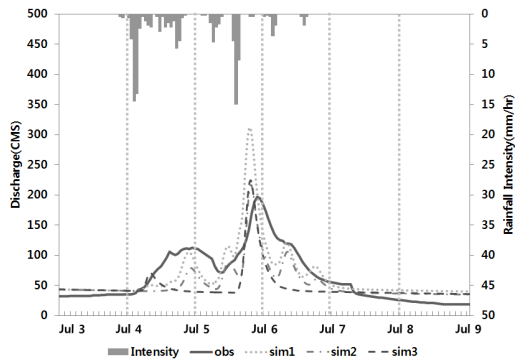


Fig. 5. Comparison of calculated and observed results for storm event (July 4-6, 2016)

궁평 저수지의 집수면적이 소유역 S6의 36%, 가혜 저수지의 집수면적이 소유역 S7의 30%, 마산 저수지의 집수면적이 소유역 S8의 37%이므로, 각 소유역에서 발생하는 유출량의 상당부분이 저수지 직상류 집수구역에서 발생하였고, 저수지 수위가 낮을 경우 강우 시 초기유출의 상당량을 저류하여 침투유량의 발생을 지연시키거나 피크유량의 높이를 낮추게 하는 데 큰 역할을 하는 것으로 생각된다.

자료[16]에 의하면 송악, 가혜, 마산 저수지의 강우 직전 저수율은 2014년 강우 시 각각 39%, 41%, 60%이었으며, 2015년 강우 시 각각 36%, 46%, 74%이었으며, 2016년 강우 시 각각 48%, 45%, 76%이었다. 2014년, 2015년 강우 시에는 3개 저수지 상류 집수구역에서 발생하는 유출량을 각각 전량 차집하는 것으로, 2016년 강우 시에는 마산 저수지가 40%를 차집하고, 송악, 가혜 저수지는 각각 전량 차집하는 것으로 산정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 곡교천 중상류 유역의 수문환경변화에 따른 홍수유출 변동을 분석하기 위해서 HEC-HMS를 적용하였다. Clark의 단위도법으로 소유역유출을, Muskingum 방법으로 하도구간 내 추적을, 지수함수감소법을 기저유량으로 사용하였으며, 손실은 기존의 유출곡선지수법(SCS-CN)을 사용(방법 1), 초기손실을 반영하기 위해서 방법 1에 표면법의 기능을 추가로 사용(방법 2), 초기 및 일정손실유출법을 사용(방법 3) 등 3가지 방법을 사용하였으며, 이를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1. Nash-Sutcliffe 모형효율계수(NSE), 평균제곱근오차(RSR), 평균편차의 비율(PBIAS) 등 3개 평가지표를 사용하여 모형의 보정을 수행한 결과, 방법 2와 3이 대부분의 지표에서 우수한 결과를 나타내었다.
2. 강우 시 직접 유출된 양을 의미하는 유출 체적의 경우 실측치와 모의치의 편차가 방법 1, 방법 2, 방법 3에 대하여 2014년 강우는 각각 34.5%, 14.0%, 5.7%로, 2015년 강우는 각각 16.9%, 4.2%, 0.3%로, 2016년 강우는 9.8%, 9.6%, 18.0%로 나타났다. 이는 2014년, 2015년 단일강우에는 초기손실을 고려하는 방법 2와 3이 그렇지 못하는 방법 1에 비하여 우수한 결과를 나타내었으나, 복합강우인 2016년 강우에 대하여는 단일 강우와 달리 방법 1, 2가 우수한 결과를 나타내었다.
3. 침투유량에 대해서 2014년 강우는 각각 13.9%, 6.5%, 8.7%로, 2015년 강우는 각각 26.7%, 12.6%, 2.8%로, 2016년 강우는 각각 58.5%, 10.0%, 14.0%로 나타났으며, 방법 2와 3이 양호한 결과를 주는 것으로 나타났다. 침투유량 발생시각은 2014년 강우는 각각 14.2%, 14.2%, 9.2%로, 2015년 강우는 각각 5.0%, 4.2%, 2.7%로, 2016년 강우는 각각 5.4%, 4.6%, 4.9%로 나타났으며, 3가지 방법 모두 차이가 없는 것으로 나타났다.
4. 결과적으로, 저수지의 저류 효과를 표면법의 기능의 추가를 통하여 반영할 수 있는 방법 2와 초기손실을 매개변수를 통하여 반영할 수 있는 방법 3이 저류 효과를 반영할 수 없는 상태로 설계된 방법 1에 비하여 실측치를 모사하는 데 유출체적, 침투유

량, 침투발생시각 등 3개 매개변수에서 모두 양호한 결과를 주는 것으로 나타났다. 방법 1의 경우 갈수기 또는 선형 무강우 기간이 길어 저수지의 수위가 낮아져 있을수록, 소유역에서 저수지 직상류의 집수구역의 면적이 차지하는 비율이 높을수록 실측치와 모의치의 편차는 커지는 것으로 나타났다.

References

- [1] Ministry of Public Safety and Security(MPSS), 2016, 2015 Annual report of disaster.
- [2] Ministry of Land Infrastructure and Transport(MOLIT), 2016, Master plan for water resources (revision 3.0).
- [3] Hong, J.B., Kim, B.S., Yoon, S.Y., 2006, Evaluation of Accuracy of the Physics Based Distributed Hydrologic Model Using *VfloTM* Model, Journal of the Korean Society of Civil Engineer, 26, 613-622.
- [4] USACE, 2015, Hydrologic modeling System HEC-HMS, user's manual (version 4.1), US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2015.
- [5] DHI, 1999, MIKE-SHE water movement: user manual, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark.
- [6] Vieux and Associates, 2004, *VfloTM* desktop user manual, Norman, Oklahoma, USA.
- [7] Kim, S.H., Park, M.J., Gang, S.M., Kim, S.J., 2006, Modeling rainfall - runoff simulation system of Jinwie watershed using GIS based HEC-HMS model, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Vol.9, No.4, pp.119-128.
- [8] Yang, S.C., Yang, S.K., Lee, J.H., Jung, W.Y., Ko, K.H., 2015, Flood discharge analysis on land use changes in Han Stream Jeju Island, Journal of Environmental Science, 24(4), 425-435.
- [9] Yang, S.K., Kim, M.C., Gang, B.S., Kim, Y.S., Kang, M.S., 2017, Estimation of flood discharge based on observation data considering the hydrological characteristics of the Han stream basin in Jeju Island, 26(12), 1321-1331.
- [10] Jin, S.J., Ham, C. H., Cho, K. H., Kim, G. S., 2012, An Application in the Geum River basin using HEC-HMS model, 38th Convention and Civil Expo, Korean Society of Civil Engineers, 525-528.
- [11] Lim, J. H., Lee, B. H., Kim, B. S., 2012, Analysis of flood runoff characteristics in the Youngdong region using HEC-HMS hydrologic model, 38th Convention and Civil Expo, Korean Society of Civil Engineers, 718-721.
- [12] Zema, D. A., 2017, Comparing different infiltration methods of the HEC-HMS model : The Case study of the Mesima Torrent (Southern Italy), Land Degradation and Development, 28, 294-308.
- [13] Abushandi, E., Merkel, B., 2013, Modeling rainfall

runoff relationships using HEC-HMS for a single rain event in an arid region of Jordan, *Water Resources Management*, 27, 2391-2409.

- [14] Jin, H., Liang, R., Tumura, P., 2015, Flood runoff in semi-arid and sub-humid regions, a case study: a simulation of Jiange watershed in Northern China, *Water*, 7, 5155-5172.
- [15] Halwatura. D, Najim, M.M., 2013, Application of the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment, *Environmental Modeling and Software*, 46, 155-162.
- [16] Ministry of Construction and Transportation(MOCT), 2005, Master plan report on Sapgyecheon watershed.
- [17] Water Resources Information System(WAMIS), 2017, <http://www.wamis.go.kr>

양 승 빈(Seung-Bin Yang)

[정회원]



- 2014년 2월 : 상명대학교 환경조경학과 (학사)
- 2016년 2월 : 상명대학교 환경조경학과 (석사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 상명대학교 환경자원학과 박사과정

<관심분야>
환경생태계획, 습지생태학, GIS

황 병 기(Byung-Ki Hwang)

[종신회원]



- 1989년 2월 : (미)버지니아 공과대학교(Virginia Tech.) 대학원 토목공학과 수공학전공 (공학석사)
- 1995년 2월 : (미)버지니아 대학교(U. of Virginia) 대학원 토목환경공학과 수질관리전공 (공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 건설시스템공학과 교수

<관심분야>
수질관리모델링, 강우-유출해석

조 용 수(Yong-Soo Cho)

[정회원]



- 2000년 2월 : 충북대학교 공과대학원 토목공학과 (수공학석사)
- 2007년 8월 : 충북대학교 공과대학원 토목공학과 (수공학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 건설시스템공학과 겸임교수

<관심분야>
강우-유출해석, 하천해석, 수질관리모델링