

대구역 홍수예측을 위한 연속형 강우-유출모형 개발

Development of Continuous Rainfall-Runoff Model for Flood Forecasting on the Large-Scale Basin

배 덕 효* / 이 병 주**

Bae, Deg Hyo / Lee, Byong Ju

Abstract

The objective of this study is to develop a continuous rainfall-runoff model for flood prediction on a large-scale basin. For this study, the hourly surface runoff estimation method based on the variable retention parameter and runoff curve number is developed. This model is composed that the soil moisture to continuous rainfall can be simulated with applying the hydrologic components to the continuous equation for soil moisture. The runoff can be simulated by linking the hydrologic components with the storage function model continuously. The runoff simulation to large basins can be performed by using channel storage function model. Nakdong river basin is selected as the study area. The model accuracy is evaluated at the 8 measurement sites during flood season in 2006 (calibration period) and 2007~2008 (verification period). The calibrated model simulations are well fitted to the observations. Nash and Sutcliffe model efficiencies in the calibration and verification periods exist in the range of 0.81 to 0.95 and 0.70 to 0.94, respectively. The behavior of soil moisture depending on the rainfall and the annual loadings of simulated hydrologic components are rational. From this results, continuous rainfall-runoff model developed in this study can be used to predict the discharge on large basins.

Keywords : flood prediction, continuous rainfall-runoff model, storage function model, Nakdong river

요 지

본 연구에서는 대구역의 홍수모의가 가능한 연속형 강우-유출모형을 개발하고자 하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 가변저류변수와 유출곡선지수를 기반으로 하는 시간위 지표유출량 산정방법을 개발하였으며 수문성분을 토양수분에 대한 연속방정식에 적용하여 연속적인 강우에 대한 토양수분 모의가 가능하도록 모형을 구성하였다. 또한 유출수문성분과 유역 저류함수모형을 연계하여 유역에 대한 연속적인 유출모의가 가능하도록 하였으며 하도 저류함수모형을 이용하여 대구역에 대한 유출모의가 가능하도록 모형을 개발하였다. 대상유역은 낙동강 유역을 채택하였으며 2006년(보정기간) 및 2007~2008년(검증기간)의 홍수기간 동안 분류와 지류에 위치한 8개 유량관측지점에 대해서 모형의 정확도 평가를 수행하였다. 모든 평가지점에서 모의유량이 관측유량과 유사한 결과를 보이며 보정기간과 검증기간의 모형효율성계수는 각각 0.81~0.95와 0.70~0.94 범위의 우수한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 강우에 대한 토양수분의 거동과 수문 성분 발생량에서도 합리적인 결과를 도출하는 것으로 확인되었다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 개발된 연속형 강우-유출모형은 대구역의 홍수예측에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

* 세종대학교 물자원연구소 · 토목환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)
Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

** 교신저자, 선임연구원, 국립기상연구소 응용기상연구과 수문자원연구팀 (e-mail: bjlee0704@korea.kr)

Corresponding Author, Senior Researcher, Hydrometeorological Resources Research Team, Applied Meteorology Research Division, National Institute of meteorological Research, Seoul 156-720, Korea

1. 서론

우리나라는 지형적으로 하천의 유로가 짧고 경사가 급하며, 연 강수량의 2/3가 여름철에 집중하는 기상특성을 가지고 있어 홍수에 취약한 지역이라 할 수 있다. 이와 같은 홍수피해를 줄이기 위해 여러 가지 구조적·비구조적 대책이 강구되어 왔으며 지속적으로 그 노력을 경주하고 있다. 특히 홍수조절용 댐과 같은 수공구조물을 설치하는 구조적 홍수대응책 뿐만 아니라 미래에 발생할 홍수를 사전에 예측할 수 있는 홍수예경보 시스템을 개발하는 등의 비구조적 대책은 구조적 대책과 더불어 실질적인 홍수피해를 줄일 수 있는 방법으로 알려져 있다. Sugawara (1974)는 중소규모의 홍수에 대해서는 홍수조절용 댐을 이용하여 효과적으로 대응할 수 있지만 이례적으로 큰 홍수에 대해서는 큰 효과를 기대하기가 어려우며 대신 잘 구축된 홍수예측시스템이 홍수피해 완화 측면에서 더 효과적인 방법이라고 제안한 바 있다.

일반적으로 홍수예측 방법으로는 기상법, 수위법, 강우-유출법이 있으며 최근에는 예측강우의 정확도 향상과 수문해석기술의 발달로 인해 강우-유출법이 많이 이용되고 있다. 국가별로 하천 홍수예측에 이용되고 있는 강우-유출모형을 살펴보면, 미국은 국립기상청 (National Weather Service; NWS)에서 자체적으로 개발한 NWSRFS (National Weather Service River Forecast System)을 이용하여 홍수를 예측하고 있으며 이 시스템에서는 연속적인 수문해석을 위해 Sacramento 모형 (Burnash et al., 1973)을 이용하고 있다. 캐나다는 실시간 홍수예측모형으로 1989년 Grand River Integrated Flood Forecasting System (GRIFFS)을 개발하여 운영하고 있다 (Environment Canada et. al., 1989). 이 시스템에서는 물리적 기반의 연속형 강우-유출모형인 Guelph All Weather Sequential Event Runoff (GAWSER) 모형 (Schroeter, 1989)을 이용하고 있다. 또한 유럽연합은 유럽 조기 홍수경보시스템 (European Floods Alert System; EFAS)을 통해 유럽 회원국들에 대한 실시간 홍수경보에 대한 정보를 제공하고 있다. 이 시스템에서는 물리적 기반의 분포형 강우-유출모형 형태의 LISFLOOD 모형을 이용하고 있다 (Van Der Knijff and De Roo, 2008). 우리나라와 지형 및 기후가 유사한 일본에서는 홍수예보의 기본 모델로 저류함수모형 (Kimura, 1961)을 이용하였으나 2008년 5월 이후로는 연속형 강우-유출모형인 직렬 3단 탱크모형 (Ishihara and Kobatake, 1979)을 이용하고 있는 것으로 조사되었다. 이

상의 결과로부터 수문선진국들은 홍수예측 방법으로 강우-유출법을 이용하고 있으며 특히, 하천유량 예측을 위해 연속형 강우-유출모형을 이용하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 홍수발생 전 또는 홍수발생 기간 중 임의 예측시점에서 예측강우 손실정도와 밀접한 관련이 있는 유역 습윤상태를 정확하게 모의하는 것이 홍수예측결과의 정확도 향상 측면에서 무엇보다 중요하기 때문에 판단된다.

한편, 국내의 경우는 한강, 낙동강, 금강, 영산강의 4대 강 홍수통제소에서 하천의 홍수예보업무를 담당하고 있으며 홍수량 예측을 위한 강우-유출모형으로는 유역과 하도의 저류함수모형을 이용하고 있다. 저류함수모형은 모형의 매개변수를 과거의 홍수자료로부터 쉽게 도출할 수 있고 유역의 비선형성을 고려할 수 있다는 장점이 있으나 반면에, 사상형 강우-유출모형의 한계로 인해 실시간 홍수예측모형으로 활용하기에는 홍수 전 유역의 수문상태를 파악하기가 어렵고 매 호우마다 모형 매개변수 추정과정이 필요하며 유역의 수문반응이 복잡하고 분석기간이 긴 경우에 모형의 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 또한 유역기반의 집중형 모형은 유역 내 국지적 호우에 대한 상세한 영향을 보기 어려우며 격자형태의 레이더 및 수치모델의 예측광우와 직접연계가 어렵다는 한계를 가지고 있다.

국내의 강우-유출모형 개발 사례를 살펴보면, 유역과 하도의 흐름해석에는 다소 차이가 있으나 지형정보의 활용이 보편화됨에 따라 유역 내 격자 정보를 이용한 분포형 강우-유출모형의 개발이 다수를 이루고 있다 (김성준, 1998; 최현상과 한건연, 2004; 신철균 등, 2004; 최윤석 등, 2008; 김극수 등, 2009). 이들 모형은 기존의 홍수모의기법의 개선이라기보다는 격자 기반의 분포형 강우-유출모형의 개발에 초점이 맞춰져 있다고 하겠다. 박진혁과 허영택 (2010)은 GIS 기반의 분포형 강우-유출모형인 K-DRUM 모형을 개발하여 태풍 '에위니아' 사상에 대해 금강유역에 적용한 사례가 있다. 한편, 배덕효 등 (2009)은 토양수분을 기반으로 하는 수문성분 산정방법과 기존의 사상형 저류함수모형을 연계하여 연속형 모형을 개발한 사례가 있으나 적용된 각 수문성분 산정방법은 도출된 결과를 물리적으로 해석하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 대유역의 홍수예측에 활용이 가능한 유역단위의 연속형 강우-유출모형을 개발하고자 한다. 이를 위해 유역의 물리적 특성인자를 이용한 시간위 수문성분

산정방법과 이를 저류함수모형과 연계하여 연속형 강우-유출모형을 개발하고 낙동강 본류유역에 적용하여 대유역에 대한 홍수모의능력을 평가하고자 한다.

2. 연속형 저류함수모형 개발

2.1 토양수분

일반적으로 연속형 강우-유출모형은 유역에 내리는 강우에 대해 현재의 토양수분조건을 고려하여 토양으로의 침투량, 지표유출량, 중간유출량, 실제증발산량, 대수층으로의 함양량, 지하수유출량을 모의하게 된다. 이때 토양내 유출성분량을 규정하기 위해 통상 토양층을 자유수 (free water)와 장력수 (tension water)로 구분하며 자유수는 측방흐름 (lateral flow)과 침투량 (percolation)에 기여하고 장력수는 실제증발산량에 기여하게 된다. 본 연구는 이러한 과정을 통해 유역 평균 토양수분을 모의하도록 모형을 설계하였으며 이때, 유역의 토양층은 단일 층으로 구성하였다.

토양수분 산정을 위한 연속방정식은 Eq. (1)과 같다. $SW(t)$ 는 t 시간의 토양수분량 (mm), $P(t)$ 는 강우량 (mm/h), $AET(t)$ 은 실제증발산량 (mm/h), $Q_{sur}(t)$, $Q_{lat}(t)$, $Q_{gw}(t)$ 는 각각 지표유출량 (mm/h), 중간유출량 (mm/h), 지하수유출량 (mm/h)을 의미한다.

$$\frac{dSW(t)}{dt} = P(t) - AET(t) - Q_{sur}(t) - Q_{lat}(t) - Q_{gw}(t) \quad (1)$$

2.2 실제 증발산량

증발산은 지표면과 토양층 내에 존재하는 물이 수증기 상태로 변하는 모든 과정을 의미한다. 실제 증발산량을 산정하기 위해서 대부분의 강우-유출모형은 잠재증발산 (potential evapotranspiration; PET) 개념을 도입하고 있으며 이러한 개념은 Thornthwaite (1948)에 의해 기후분류법의 일부로서 처음 도입되었다.

본 연구에서는 Penman-Monteith 방법을 이용하여 잠재증발산량을 산정하고 실제증발산량은 토양층 내 장력수 영역에서만 발생하고 현재의 잠재증발산량 이내에서 장력수내의 토양수분에 비례하여 발생한다고 가정하였다. Eq. (2)에서 $PET(t)$ 는 잠재증발산량 (mm/h), $SW_t(t)$ 는 장력수 영역내의 토양수분량 (mm), SW_t^0 는 장력수 영역의 포화수분량 (mm)을 의미한다. $SW_t(t)$ 와 SW_t^0 는 Eqs. (3) and (4)로부터 산정된다. 식에서 FC 와 ϕ 는 각각 포장용수량과 영구위조점에서의 토양수분량비 (mm/mm), Z 는 토양층 깊이 (mm)를 나타낸다.

$$AET_t(t) = PET(t) \left(\frac{SW_t(t)}{SW_t^0} \right) \quad (2)$$

$$SW_t(t) = \begin{cases} SW(t); & SW(t) < SW_t^0 \\ SW_t^0; & SW(t) \geq SW_t^0 \end{cases} \quad (3)$$

$$SW_t^0 = (FC - WP)Z \quad (4)$$

2.3 지표유출량

지표유출량은 유출수문성분 중 홍수유출량에 가장 많은 부분을 차지하는 성분으로 강우로부터 유량을 예측하는데 있어서 매우 중요한 성분이다. USDA-SCS (1972)에서는 일 강우량으로부터 지표유출량을 산정할 수 있는 SCS 유출곡선지수 (runoff Curve Number; CN) 방법을 제안하였다. 이 방법은 국내에서 단위도의 유효수량 산정에 활용되고 있으며 Arnold et al. (1998)은 물리적 기반의 연속형 강우-유출모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)의 지표유출량 산정 방법에 적용하는 등 국내외적으로 적용성과 검증이 이루어진 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 시단위 지표유출량 산정을 위해 기존의 SCS 방법을 개선하였으며 기존 SCS 방법과 개선된 방법을 기술하면 다음과 같다.

SCS (1972)에서 개발한 직접유출량 산정방법은 총강우량이 초기손실량보다 큰 경우 적용가능하며 관계식은 Eq. (5)와 같다. 식에서 Q_{dir} 은 직접유출량 (mm), R_{storm} 은 해당호우의 총강우량 (mm), S 는 저류변수 (retention parameter) (mm)를 의미한다. 또한 S 는 CN 으로부터 산정이 가능하며 관계식은 Eq. (6)과 같다.

$$Q_{dir} = \frac{(R_{storm} - 0.2S)^2}{(R_{storm} + 0.8S)} \quad (5)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

또한 SCS (1972)는 일 강우량으로부터 일 지표유출량을 산정하는 방법을 개발하였으며 이때 S 를 토양수분량에 따라 가변되도록 개선하였다 (Arnold et al., 1998). 지표유출량과 저류변수 산정식의 형태는 기존방법인 Eqs. (5) and (6)과 동일하며 산정방법은 Eq. (7)과 같다. 식에서 $Q_{sur\ day}$ 는 일 지표유출량 (mm/d), R_{day} 는 일 강우량 (mm/d)을 의미한다.

$$Q_{sur\ day} = \frac{(R_{day}(t) - 0.2S(t))^2}{(R_{day}(t) + 0.8S(t))} \quad (7)$$

SCS (1972)는 S 가 토양층 내 수분상태에 의해 그 거동이 지배된다는 가정 하에 토양수분량과의 관계로부터 가변저류변수 (variable retention parameter) 산정방법을 제안하였다. Fig. 1은 S 와 토양수분량간의 관계를 도시한

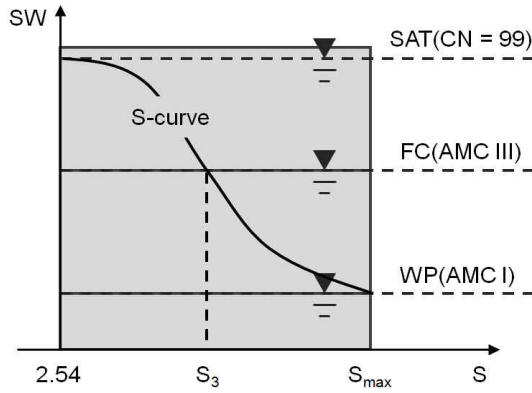


Fig. 1. Relationship between Soil Water Content (SW) and Retention Parameter (S)

것이며 X축은 저류변수 (mm), Y축은 토양수분량 (mm)이며 SAT 는 포화수분량, FC 는 포장용수량 상태의 토양수분량 (mm), WP 는 영구위조점 상태의 토양수분량 (mm)을 의미한다. FC 를 기준으로 이를 초과하는 토양수분은 자유수에 해당하며 WP 와 FC 사이의 영역은 장력수에 해당한다. 이 방법은 다음의 세 가지 가정사항을 갖는다.

- ① AMC I에서의 S 는 WP 상태의 토양수분량에 대응하는 $S (=S_{max})$ 와 같다.
- ② AMC III에서의 S 는 FC 상태의 토양수분량에 대응하는 $S (=S_3)$ 와 같다.
- ③ 토양이 완전히 포화된 상태에서 S 는 2.54mm, CN 은 99의 값을 가진다.

현재의 토양수분량을 고려한 $S(t)$ 는 Eq. (8)로부터 산정되며 S 곡선의 형태를 결정하는 형상계수 (shape parameter) w_1 와 w_2 은 각각 Eqs. (9) and (10)을 이용하여 산정할 수 있다. 식에서 S_{max} 와 S_3 는 각각 AMC I과 III에 해당하는 저류변수이며 Eqs. (11) and (12)로부터 산정된 CN 값을 Eq. (6)에 대입하여 산정하게 된다. CN_1 , CN_2 , CN_3 은 각각 AMC I, II, III에서의 유출곡선지수이다.

$$S(t) = S_{max} \cdot \left(1 - \frac{SW(t)}{[SW(t) + \exp(w_1 - w_2 \cdot SW(t))]} \right) \quad (8)$$

$$w_1 = \ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{max}^{-1}} - FC \right] + w_2 \cdot FC \quad (9)$$

$$w_2 = \frac{\left(\ln \left[\frac{FC}{1 - S_3 \cdot S_{max}^{-1}} - FC \right] - \ln \left[\frac{SAT}{1 - 2.54 S_{max}^{-1}} - SAT \right] \right)}{(SAT - FC)} \quad (10)$$

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - CN_2)])} \quad (11)$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0.00673(100 - CN_2)] \quad (12)$$

이 방법은 일단위 강우량으로부터 그날의 지표유출량을 산정하는 방법으로 기본적으로 강우량이 초기손실량 (0.2S)보다 큰 경우에만 지표유출량을 산정할 수 있는 방법이다. 반면에 본 연구에서와 같이 시단위 유출모의에서는 시단위 강우량의 크기가 일단위에 비해 그 양이 상당히 적기 때문에 강우량이 초기손실량보다 적게 발생할 가능성이 높고 이로 인해 지표유출량이 발생하지 않을 가능성이 높아지게 된다. 따라서 현재 일단위 지표유출량 산정방법을 그대로 적용할 경우 지표유출량이 과소추정된다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 개선하기 위해 Eq. (13)과 같이 현 시점부터 24시간 전을 기준으로 24시간 누적강우량과 전 시점까지의 23시간 누적강우량의 지표유출량 차이로부터 현재 1시간 동안의 지표유출량을 산정하도록 모형을 개선하였다. 식에서 $R(t)$ 는 시단위 강우량이며 우변의 첫 번째 항은 현 시점 ($t=1$)으로부터 이전 24시간 ($t=24$)까지의 누가강우량 (mm)에 대한 지표유출량 (mm)을 의미하고 두 번째 항은 현 시점의 이전시간 ($t=2$)부터 이전 24시간 ($t=24$)까지의 누가강우량 (mm)에 대한 지표유출량 (mm)을 의미한다. 따라서 현재까지의 총강우량으로부터 발생한 지표유출량에서 전 시점까지의 총강우량에 대한 지표유출량을 빼줌으로써 현 시점 (계산시간간격)에 내린 강우 (mm/h)에 대한 지표유출량 $Q_{sur}(t)$ (mm/h)를 산정할 수 있게 된다.

$$Q_{sur}(t) = \frac{\left(\sum_{t=1}^{24} R(t) - 0.2S(t) \right)^2}{\sum_{t=1}^{24} R(t) + 0.8S(t)} - \frac{\left(\sum_{t=2}^{24} R(t) - 0.2S(t) \right)^2}{\sum_{t=2}^{24} R(t) + 0.8S(t)} \quad (13)$$

Fig. 2는 기존의 일단위 지표유출량 산정방법을 적용한 결과와 본 연구에서 개선한 방법을 이용하여 산정한 지표유출량을 비교한 결과이다. Fig. 2(a)는 개선 전, Fig. 2(b)는 개선 후의 결과이며 48시간동안 시간당 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm의 강우가 내린다고 가정하였다. Fig. 2(a) 결과의 경우 15 mm/h 이상의 강우부터 유출이 발생하며 10 mm/h 이하의 강우는 초기손실량보다 적기 때문에 지표유출이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 토양수분이 포화된 이후에도 강우량 대비 유출량이 과소하게 산정되는 것으로 나타났다. 반면에 Fig. 2(b) 결과에서는 10 mm/h 이하의 강우에서도 지표유출이 발생하며 토양수분이 포화된 이후부터는 강우량과 지표유출량이 거의 유사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개선한 결과가 시단위 강우에 대한 지표유출반응에서 더 합리적인 결과를 보이는 것으로 판단된다.

유역 전반에 대해 발생한 지표유출량은 유역유출량으로 바로 고려되기보다는 어느 정도 지체가 되어 유출량에 기여한다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 앞서 산정

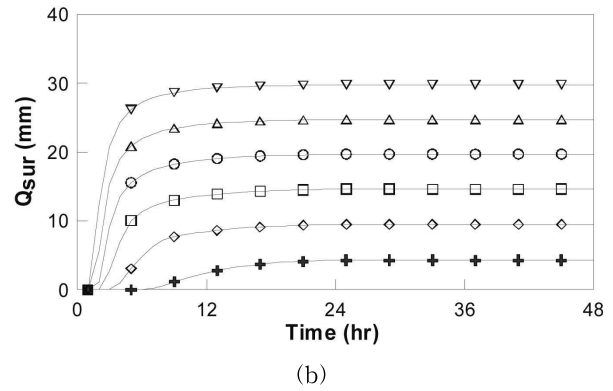
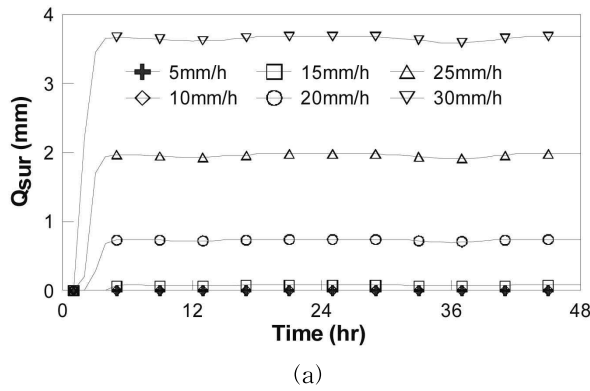


Fig. 2. Comparison of Surfaceflows before (a) and after (b) the Model Improvement for Given Rainfalls

된 지표유출량이 지체효과를 가질 수 있도록 Eq. (14)와 같이 모형을 구성하였다. 식에서 $Q_{sur}(t)$ 는 t 시점에서 지체효과가 고려된 지표유출량(mm), $Q_{sur}'(t)$ 는 t 시점에서 1시간 동안 발생한 지표유출량(mm), $Q_{surstor}(t-1)$ 는 전 시점에 발생한 지표유출량 중 유역유출량으로 반영되고 남은 양(mm), $surlag$ 는 지표유출 지체계수이다. $surlag$ 는 관측유출과의 보정과정을 통해 추정되는 매개변수이다.

$$Q_{sur}(t) = (Q_{sur}'(t) + Q_{surstor}(t-1))(1 - \exp[-surlag]) \quad (14)$$

2.4 중간유출량

토양층 내에서 측방흐름에 해당하는 중간유출량은 유출수문곡선에서 대략 상승부에서 하강부의 변곡점까지 곡선 형태를 결정하는 중요한 유출수문성분이다. Sloan et al. (1983)과 Sloan and Moore (1984)는 측방흐름을 산정하기 위한 방법으로 역학적으로 해석한 동역학적 저류 모형(kinematic storage model)을 제안하였다. 이 방법은 Ormsbee and Khan (1989)에 의해 HEC-1 모형에서 지표유출과 중간유출을 분리하기 위한 방법으로 적용되었으며 Neitsch et al. (2001)은 일 강우-유출모형의 측방흐름 산정방법으로 적용된 사례가 있다.

경사면 출구에서의 순 측방흐름(Q_{lat})은 Eq. (15)와 같이 산정할 수 있으며 식에서 Q_{lat} 은 토양층 내 측방흐름에 해당하는 중간유출량(mm/h), $SW_{exc}(t)$ 는 현재 토양수분량 중에서 포장용수량에서 토양수분량을 초과하는 토양수분량(mm), K_{sat} 는 포화수리전도도(mm/h), slp 는 토양층 경사(mm/mm), ψ_d 는 토양내 배수가 가능한 공극률(mm/mm), L_{hill} 은 경사면 길이(m)를 의미한다.

$$Q_{lat}(t) = 0.002 \left(\frac{SW_{exc}(t) \cdot K_{sat} \cdot slp}{\psi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (15)$$

토양층 내에서의 측방흐름 속도는 지표유출량보다 더

느리기 때문에 해당 계산시간동안 발생한 중간유출량을 바로 유역유출량으로 적용하기에는 무리가 있다. 본 연구에서는 중간유출량의 지체효과를 고려하기 위해 지표유출량과 동일한 방법을 적용하였으며 Eq. (16)과 같다. 식에서 $Q_{lat}(t)$ 는 t 시점에 지체효과가 고려된 중간유출량(mm), $Q_{lat}'(t)$ 는 Eq. (15)로부터 산정된 t 시점에서 1시간동안 발생한 중간유출량(mm), $Q_{latstor}(t-1)$ 는 전 시점에 발생한 중간유출량 중 유역유출량으로 유입되고 남은 양(mm), $latlag$ 는 중간유출 지체계수이다.

$$Q_{lat}(t) = (Q_{lat}'(t) + Q_{latstor}(t-1))(1 - \exp[-latlag]) \quad (16)$$

2.5 지하수유출량

지하수유출량은 홍수모의 시에는 그 영향이 크지 않으나 무강수기간 또는 저유량에서의 유출거동을 지배하는 유출수문성분이라 할 수 있으며 합리적인 지하수유출모의는 전체 유출수문곡선을 완성하는 측면에서 중요하다.

대수층에서의 물의 거동은 지하수함양량과 지하수유출량의 두 가지 수문변수를 통해 설명된다. 본 연구에서는 지하수함양량 산정을 위해 Venetis (1969)와 Sangrey et al. (1984)에 의해 제안된 강수-지하수 반응모형의 지수감소 가중함수(exponential decay weighting function) 방법을 이용하였으며, 이 방법은 토양층에서 대수층까지의 함양이 순간적으로 일어나지 않는 지역에 적합한 것으로 알려져 있다. 지하수함양량 산정식은 Eq. (17)과 같다. 식에서 $W_{rchr}(t)$ 는 t 시점의 대수층 함양량(mm), δ_{gw} 는 지질층 전역에 대한 지체시간 또는 배수시간(h)을 의미한다. 또한 $W_{perc}(t)$ 는 t 시점에서 계산시간동안 토양층을 빠져나가는 토양수분량(mm)이며 Eq. (18)을 이용하여 산정할 수 있다. 식에서 Δt 는 계산시간간격(h), $latlag$ 는 앞서 Eq. (16)에서 언급한 중간유출 지체계수이다. 식에서 δ_{gw} 와 $latlag$ 는 관측유출과의 보정을 통해 추정된다.

$$W_{rchrg}(t) = (1 - \exp[-1/\delta_{gw}]) \cdot W_{perc}(t) + \exp[-1/\delta_{gw}] \cdot W_{rchrg}(t-1) \quad (17)$$

$$W_{perc}(t) = SW_{exc}(t) \cdot (1 - \exp[-\Delta t \cdot latlag]) \quad (18)$$

Arnold et al. (1993)은 지하수위와 지하수유출량의 변화가 선형적인 관계를 갖는다는 가정 하에 Smedema and Rycroft (1983)가 제안한 지하수위-지하수유출량의 관계를 개선하였으며 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 지하수유출량을 산정하였다. 이 때, 대수층에 저장된 지하수함양량이 전량 지하수유출에 기여되지 않도록 하기 위해 대수층 내 지하수위가 임계수위 (threshold water level) 이상일 경우 지하수유출량이 발생하도록 하였다. 지하수함양량으로부터 발생하는 지하수유출량 산정식은 Eq. (19)와 같으며 α_{gw} 는 기저유출 감수상수 (recession constant) 또는 비례상수이며 관측유량과의 보정과정을 통해 추정된다.

$$Q_{gw}(t) = Q_{gw}(t-1) \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + W_{rchrg}(t) \cdot (1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]) \quad (19)$$

2.6 유역과 하도의 저류함수모형

본 연구에서는 유역과 하도의 유출모의를 위해 각각에 대한 저류함수모형을 적용하였다. 유역의 저류함수와 개선된 연속방정식은 각각 Eqs. (20) and (21)와 같다. 유역의 저류함수는 기존의 방법과 동일하며 식에서 $Q_s(t)$ 는 유역 유출량 (mm/h), $S_s(t)$ 는 유역 저류량 (mm), K_{sb} 와 P_{sb} 는

유역에 대한 저류상수이다. 반면에, 연속방정식은 유출계수와 유역평균강우량의 곱으로 표현된 기존의 유효우량을 앞서 산정된 유출성분으로 대체하여 Eq. (21)과 같이 개선하였다. 식에서 τ 는 유역 지체시간 (h)을 의미한다.

$$Q_s(t) = \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{1/P_{sb}} \quad (20)$$

$$\frac{dS_s(t)}{dt} = \frac{1}{3.6} A [Q_{sw}(t-\tau) + Q_{lat}(t-\tau) + Q_{gw}(t-\tau)] - Q_s(t) \quad (21)$$

하도의 저류함수모형은 기존의 저류함수모형과 그 형태가 동일하다. Eqs. (22) and (23)은 각각 하도의 저류함수와 연속방정식을 나타낸다. Eq. (22)에서 $Q_c(t)$ 는 하도 유출량 (m³/s), $S_c(t)$ 는 하도구간내 저류량 (m³), K_{ch} 와 P_{ch} 는 하도 저류상수를 의미한다. 또한 Eq. (23)에서 우변 첫 번째 항은 하도로 유입되는 지천의 유출량이며 $Q_c(t)$ 는 하도유출량을 나타낸다. 식에서 $S_c(t)$ 는 m³, $Q_c(t)$ 는 m³/s 단위를 갖는다.

$$Q_c(t) = \left(\frac{S_c(t)}{K_{ch}} \right)^{1/P_{ch}} \quad (22)$$

$$\frac{dS_c(t)}{dt} = \sum \left(\frac{S_s(t)}{K_{sb}} \right)^{1/P_{sb}} - Q_c(t) \quad (23)$$

2.7 모형 매개변수 및 민감도 분석

앞서 기술한 유역의 토양수분, 실제증발산량, 지표, 중간, 지하수유출량 및 유역과 하도 출구점의 유출량 산정에 필요한 모형 매개변수는 총 19개가 존재하며 Table 1

Table 1. Description of the Model Parameters

Parameter	Definition	Unit	Estimation method
AKM	Subbasin area	km ²	GIS data
SLP	Mean slope of the subbasin	m/m	"
Z	Depth of soil layer	m	"
SAT	Rate of water content at saturation	mm/mm	"
FC	Rate of water content at field capacity	mm/mm	"
WP	Rate of water content at wilting point	mm/mm	"
KS	Saturated hydraulic conductivity	mm/h	"
CN2	Runoff curve number under AMC II	-	"
SURLAG	Surface runoff lag coefficient	-	Calibration
LHIL	Mean slope length	m	"
LATLAG	Lateral flow lag coefficient	-	"
GWDELAY	Delay time for aquifer recharge	h	"
ALPHA_BF	Baseflow recession constant	-	"
AQMIN	Threshold water level in shallow aquifer for baseflow	mm	"
KSB	Storage function constant of the subbasin	h ^{PSB}	"
PSB	Storage function constant of the subbasin	-	"
LAGSB	Lag time of the Subbasin	h	"
KCH	Storage function constant of the channel	s ^{PCH}	"
PCH	Storage function constant of the channel	-	"

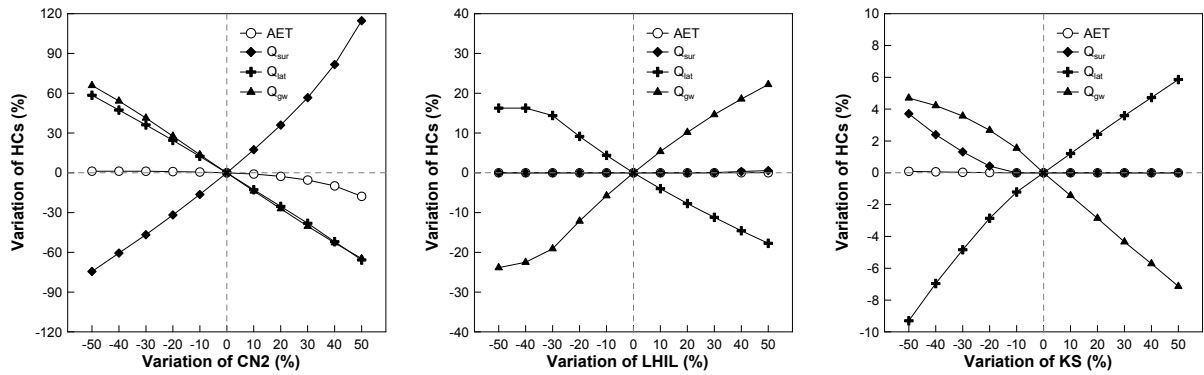


Fig. 3. Sensitivity of CN2, LHIL and KS on the Loadings of Hydrologic Components (HCs)

과 같다. 직접 추정 가능한 매개변수는 8개이며 이 중 유역면적, 유역평균경사는 수치표고모델 (Digital Elevation Model; DEM)로부터 산정이 가능하며 토양층 깊이, 토양수분이 포화, 포장용수량, 영구위조점 상태에서 각각의 토양수분비, 포화수리전도도는 토양도와 토양종류별 속성정보로부터 산정할 수 있다. 또한 CN2는 토지피복도와 수문학적 토양군 주제도 및 토지피복과 토양조건에 대한 CN 산정 표를 이용하여 산정할 수 있다. 이외의 11개 매개변수는 관측유량과의 매개변수 검보정 과정을 통해 간접적으로 추정할 수 있다.

대상유역에 대한 최적 매개변수를 추정하기에 앞서 매개변수 변화에 따른 유출결과의 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석은 안동댐 유역을 대상으로 유역 수문성분 발생량과 유출량의 두 부분으로 나누어 수행하였다. Table 1에 제시된 모든 매개변수에 대해서 분석을 수행하는 것은 무리가 있으므로 이들 중 유출발생량에 직접적으로 영향을 미치는 매개변수를 대상으로 분석을 수행하였다. Fig. 3은 CN, LHIL, KS의 변화에 따른 실제증발산량, 지표, 중간, 지하수유출 발생량의 민감도를 분석한 결과이다. 매개변수의 변화폭은 초기값 (Tables 2 and 3)을 기준으로 $\pm 50\%$ 를 적용하였다. CN2가 감소함에 따라 지표유출량은 줄어들고 토양층으로 침투량이 증가함으로 인해 중간유출량과 지하수유출량은 증가하는 것을 확인할 수 있으며 실제증발산량은 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있다. LHIL은 감소함에 따라 중간유출량은 증가하고 지하수유출량은 감소하며 실제증발산량과 지표유출량은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. KS는 감소함에 따라 중간유출량은 감소하고 반대로 지표유출량과 지하수유출량은 소폭 증가하며 실제증발산량은 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이들 매개변수 중에서는 CN값이 수문성분 발생량에 가장 민감하며 LHIS, KS 순으로 민감도가 높음을 확인할 수 있다.

Table 1에서 유역과 하도에 대한 유출량의 크기 및 형태

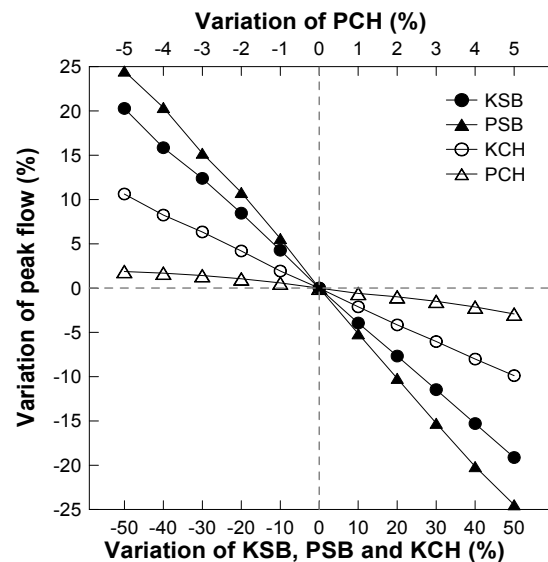


Fig. 4. Sensitivity of KSB, PSB, KCH and PCH on the Peak Flow

에 직접적으로 관여하는 매개변수는 유역과 하도의 저류 매개변수 KSB, PSB, KCH, PCH이다. 매개변수 중 PCH는 하도의 저류량 단위가 'm³'이므로 인해 다른 매개변수에 비해 유출모의결과가 매우 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 따라서 민감도 분석 시 PCH의 변화폭을 $\pm 5\%$ 로 제한하였으며 이외의 매개변수는 $\pm 50\%$ 를 적용하였다. Fig. 4에서 PCH를 제외한 매개변수의 경우 $\pm 50\%$ 변화폭 이내에서 침투유량의 변화는 PSB, KSB, KCH 순으로 약 $\pm 25\%$, ± 20 , 10% 이내의 변화가 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 PCH는 제한된 범위 내에서 약 $\pm 3\%$ 이내의 변화가 발생하는 것으로 나타났다.

3. 대상유역 선정 및 모형 입력자료 구축

3.1 대상유역 선정

본 연구에서는 우리나라 제2권역인 낙동강유역을 대상

유역으로 선정하였다. 낙동강유역은 한강유역과 달리 홍수조절용 댐의 저수용량이 유역규모에 비해 적어 홍수방어에 취약한 유역이라 할 수 있다. 낙동강유역은 2004년 이전까지 43개 소유역으로 유역을 분할하여 홍수예보를 수행하였으며 2004년부터 현재까지 증설된 수위관측소와 우량관측소를 고려하여 114개 소유역으로 분할하여 홍수예경보를 운영하고 있다. 각 소유역에 대해 가용 유량관측자료가 존재하지 않을 경우 유출모의결과의 정확도를 평가하기가 어려우며 과도한 소유역 분할은 모형을 복잡

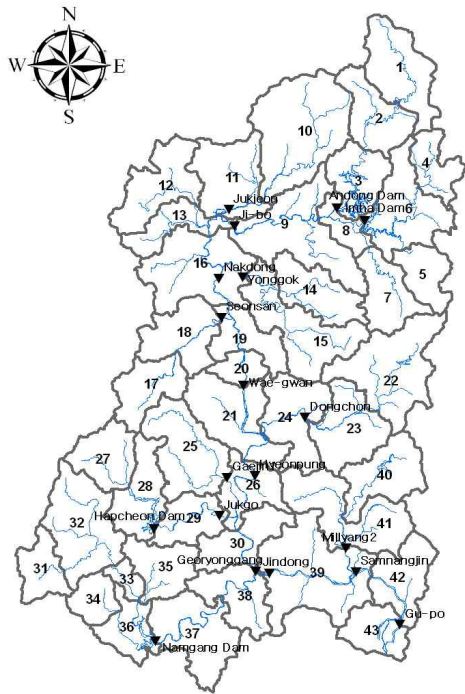


Fig. 5. Sub-basin Boundary and Valid Measurement Site on Nakdong River Basin

하게 할 뿐만 아니라 계산시간을 길게 하므로 본 연구에서는 Fig. 5와 같이 43개 소유역으로 유역을 구성하였다.

3.2 수문자료 구축

유출모형의 매개변수 추정 및 모의결과의 정확도 평가를 위해 2006년과 2007년에 대해 시단위 강우자료와 유량 자료를 수집하였다. 강우자료는 국토해양부와 한국수자원공사에서 관할하는 151개 우량관측소로부터 수집하였으며 티센법을 이용하여 각 소유역의 유역평균강우량을 산정하였다. 관측유량지점은 소유역 분할 및 관측유량자료 보유현황을 고려하여 15개 수위관측소와 4개 댐지점을 평가후보지점으로 채택하였다. 유역내 관측지점의 위치는 Fig. 5와 같으며 유출계수, 관측유량형태, 상하류 물질수지 분석을 통해 각 관측소의 자료품질 정도를 조사하였다. 각 지점의 유량자료를 분석한 결과 대체로 본류 수위

관측소와 댐지점의 자료가 품질이 우수하고 지천의 수위 관측소는 결측치나 이상치가 많이 존재하는 것으로 조사되었다. 본 연구에서는 최종적으로 19개 후보지점 중 상대적으로 자료품질이 우수한 지보, 동촌, 왜관, 진동, 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐의 8개 지점을 최종 평가지점으로 채택하였다.

3.3 모형 입력변수 구축

앞서 기술한 각 수문성분 산정방법을 이용하여 유출모형을 수행하기 위해서 직접 추정이 가능한 유역면적 (Area), 유역평균경사 (Slope), 토양층깊이 (Z), 포화토양수분량비 (SAT), 포장용수량에서의 토양수분량비 (FC), 영구위조점에서의 토양수분량비 (WP), 포화수리전도도 (Ks), AMC II에 대한 유출곡선지수 (CN2)를 구축하였다. 이용된 자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS)을 통해 30 × 30 m 해상도의 수치표고모델 (DEM)과 토지피복도를 구축하였으며 농업과학기술원으로부터 1:25000 축척의 정밀토양도를 구축하였다. 이들 주제도를 GIS 작업을 통해 각 특성인자들에 대해 소유역별 평균값을 도출하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 소유역에 따라 각 인자들에 대한 범위를 살펴보면 유역면적은 122.1~1166.1 km², 유역평균경사는 0.137~0.361, 토양층 깊이는 572.9~1092.3 mm, 포화토양수분량비는 0.332~0.480, 포장용수량의 토양수분량비는 0.150~0.270, 영구위조점의 토양수분량비는 0.059~0.126, 포화수리전도도는 36.3~81.7 mm/h로 나타났다. 토지피복형태와 수문학적 토양군에 따른 유출곡선지수는 배덕호 등 (2003)과 이병주 등 (2003)에서 제안한 방법을 적용하였으며 각 소유역별로 53.0~77.9의 범위를 갖는 것으로 나타났다.

4. 모형 적용성 평가

4.1 모의유량 정확도 평가

본 연구에서 개발한 연속형 저류함수모형의 정확도를 평가하기 위해 관측유량의 품질이 양호한 본류 4개 지점 (안동댐, 지보, 왜관, 진동)과 지류 4개 지점 (임하댐, 동촌, 합천댐, 남강댐)의 총 8개 지점을 선정하였다. 매개변수 추정과정에서 Table 2에서 산정된 매개변수는 고정변수로 설정하였으며 이외의 매개변수는 평가지점의 위치를 고려하여 상류에서 하류 방향으로 순차적으로 수동보정을 수행하였으며 다수의 유역과 하도가 존재하는 경우는 공통 매개변수 개념을 적용하였다. 최종적으로 추정된 값은 Table 3과 같다. 지표유출 지체계수 (SURLAG), 유역저류상수 (KSB), 유역지체시간 (LAGSB), 하도저류상수 (KCH)는 각 유역과 하도에 대해 추정하였으며 이외의 매

Table 2. Estimation of the Characteristics on Each Sub-basin

Sub. No	Area (km ²)	Slope (mm/mm)	Z (mm)	SAT (mm/mm)	FC (mm/mm)	WP (mm/mm)	Ks (mm/h)	CN2 (-)
1	651.7	0.333	765.5	0.377	0.260	0.091	58.5	61.8
2	498.5	0.279	938.7	0.375	0.244	0.084	38.5	58.3
3	440.7	0.205	960.7	0.341	0.150	0.059	49.0	58.0
4	315.6	0.279	727.6	0.341	0.244	0.097	44.8	66.7
5	336.3	0.26	727.3	0.378	0.235	0.099	41.5	66.7
6	714.8	0.236	682.1	0.375	0.236	0.101	45.5	68.1
7	455.5	0.275	644.4	0.394	0.236	0.109	39.5	68.5
8	213.1	0.175	946.5	0.332	0.179	0.065	59.3	59.1
9	933.3	0.186	741.5	0.376	0.214	0.091	46.9	66.7
10	1166.1	0.184	925.3	0.373	0.202	0.069	45.2	58.0
11	649.1	0.204	912.0	0.382	0.203	0.075	45.3	59.7
12	609.5	0.304	824.7	0.400	0.226	0.088	47.4	60.9
13	354.4	0.187	848.6	0.422	0.193	0.069	58.0	60.3
14	501.0	0.195	572.9	0.396	0.252	0.119	36.5	73.1
15	799.0	0.199	805.1	0.411	0.227	0.103	39.6	66.3
16	895.3	0.155	949.8	0.417	0.210	0.082	50.2	63.9
17	446.6	0.245	972.5	0.375	0.212	0.071	39.5	53.0
18	538.5	0.173	1092.3	0.397	0.234	0.081	45.2	61.0
19	391.6	0.167	998.4	0.403	0.210	0.080	59.6	61.1
20	192.9	0.184	934.5	0.412	0.211	0.083	61.6	64.7
21	720.6	0.165	930.2	0.402	0.235	0.094	58.0	66.7
22	927.8	0.208	597.4	0.418	0.250	0.123	41.3	75.9
23	606.5	0.166	711.5	0.433	0.231	0.115	45.1	75.6
24	608.5	0.201	800.1	0.415	0.226	0.103	40.5	69.8
25	742.2	0.259	875.0	0.388	0.238	0.089	46.3	61.2
26	409.1	0.202	665.8	0.404	0.251	0.118	60.1	76.6
27	439.4	0.258	923.8	0.378	0.216	0.075	36.3	55.1
28	491.3	0.252	906.0	0.369	0.218	0.077	65.0	58.0
29	651.7	0.205	765.1	0.377	0.260	0.091	58.5	70.5
30	651.7	0.211	765.0	0.377	0.260	0.091	58.5	75.7
31	651.7	0.292	765.5	0.377	0.260	0.091	58.5	56.8
32	824.5	0.261	875.3	0.381	0.221	0.079	43.4	58.1
33	122.1	0.267	826.1	0.399	0.239	0.090	61.2	62.3
34	256.4	0.361	640.6	0.376	0.259	0.088	81.7	64.0
35	425.5	0.216	669.8	0.407	0.250	0.111	38.4	69.6
36	344.5	0.191	771.9	0.401	0.244	0.109	72.5	73.8
37	707.3	0.18	705.2	0.428	0.270	0.126	42.5	76.0
38	479.0	0.189	668.6	0.420	0.269	0.125	43.3	76.7
39	1135.1	0.19	786.5	0.431	0.251	0.113	53.0	74.9
40	550.0	0.318	706.4	0.390	0.232	0.105	41.6	71.0
41	812.8	0.29	734.6	0.425	0.239	0.111	40.6	72.8
42	491.4	0.266	697.2	0.431	0.226	0.102	50.4	70.6
43	355.8	0.137	872.8	0.480	0.228	0.102	67.1	77.9
Mean	570.0	0.226	804.9	0.395	0.231	0.094	50.1	66.2

Table 3. The Optimized Model Parameters Using Manual Calibration

Subbasin/ Channel No.	SURLAG	KSB	LAGSB	KCH	Subbasin/ Channel No.	SURLAG	KSB	LAGSB	KCH
1	4.0	60	2	4000	21	4.0	50	1	10000
2	4.0	60	1	4000	22	1.3	50	3	4000
3	2.0	60	1	4000	23	4.0	50	1	4000
4	4.0	40	1	10000	24	4.0	50	1	4000
5	2.0	40	2	10000	25	1.3	50	3	60000
6	4.0	40	1	10000	26	4.0	50	1	60000
7	1.3	50	2	10000	27	4.0	60	0	30000
8	1.0	50	1	10000	28	4.0	60	0	60000
9	2.0	50	3	20000	29	2.0	50	2	20000
10	1.3	30	4	20000	30	2.0	50	2	30000
11	2.0	30	2	10000	31	2.0	50	2	30000
12	2.0	50	3	10000	32	2.0	50	2	30000
13	2.0	50	2	10000	33	4.0	60	1	X
14	4.0	60	2	4000	34	4.0	50	1	
15	4.0	60	2	4000	35	4.0	50	1	
16	4.0	50	1	10000	36	2.0	50	2	
17	4.0	50	1	10000	37	4.0	50	1	
18	4.0	50	1	4000	38	4.0	50	1	
19	4.0	50	1	4000	39	4.0	50	1	
20	4.0	50	1	25000	40	4.0	70	1	
LHIL=0.5 ALPHA_BF=1.0 PSB=0.3					41	4.0	70	1	
LATLAG=0.1 AQMIN=2.0 PCH=1.0					42	4.0	40	1	
GWDELAY=100					43	4.0	40	1	

Table 4. Statistical Analysis for Simulated Discharges at the 8 Gauged Sites

Site	Calibration Period				Verification Period 1				Verification Period 2			
	REV (%)	REQ (%)	RMSE (m ³ /s)	ME (-)	REV (%)	REQ (%)	RMSE (m ³ /s)	ME (-)	REV (%)	REQ (%)	RMSE (m ³ /s)	ME (-)
Ji-bo	-4.99	-3.21	117.93	0.94	-4.40	-3.08	79.40	0.90	8.70	13.73	49.72	0.79
Wae-gwan	-4.90	-5.22	404.44	0.95	-3.50	-14.59	239.89	0.94	-3.19	20.42	200.63	0.82
Dongchon	15.08	57.47	132.06	0.85	27.37	-7.45	54.19	0.93	-5.48	9.31	28.36	0.86
Jindong	7.65	9.03	604.14	0.95	13.01	34.71	557.66	0.91	-3.28	19.99	128.08	0.95
Andong dam	3.48	11.27	119.54	0.92	8.11	9.83	79.33	0.73	10.75	8.49	131.79	0.79
Imha dam	2.88	-7.56	87.26	0.93	11.62	-19.70	52.09	0.89	44.29	-1.68	26.43	0.76
Hapcheon dam	7.22	0.82	107.22	0.81	26.96	-14.76	102.05	0.70	-79.53	-92.68	20.10	-0.25
Namgang dam	-1.01	-6.21	349.12	0.85	9.64	-18.99	372.09	0.75	-61.90	-63.04	36.63	-0.30

Relative error in volume (REV) = $(\sum \xi - \sum a_i) / \sum a_i \times 100$

Relative error in peak flow (REQ) = $(\xi_p - a_p) / a_p \times 100$

Root mean square error (RMSE) = $\sqrt{\sum (a_i - \xi_i)^2 / n}$

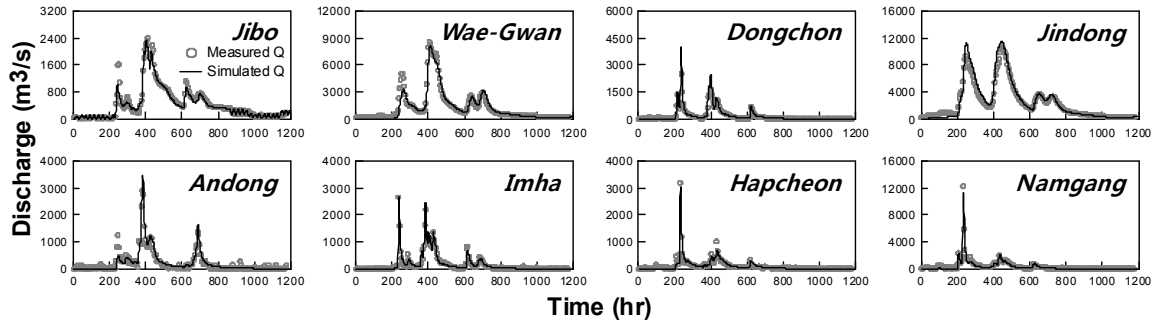
Nash-Sutcliffe efficiency (ME) = $1 - \frac{\sum (a_i - \bar{a})^2}{\sum (a_i - \xi_i)^2}$

where, a_i and ξ_i are observed and simulated flow, a_p and ξ_p are observed and simulated peak flow and n is the number of data.

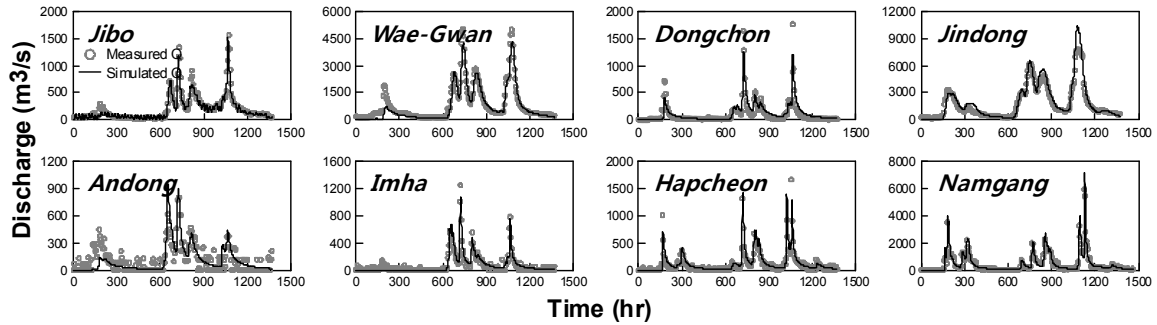
개변수들은 공통 매개변수를 추정하였다.

매개변수 정확도 평가를 위해 보정기간 2006.7.1~2006.8.18 및 검증기간 2007.8.1~9.30과 2008.7.15~9.9을 채택하였다. Fig. 6은 8개 지점에 대한 유출모의결과를 도시한 것이다. 유량이 큰 본류와 유량이 적은 지류에서 모두 모의유량이 관측유량과 유사한 거동을 보이는 것을 확인할 수 있으며 지점별로 고유량과 저유량에서도 모의유량이

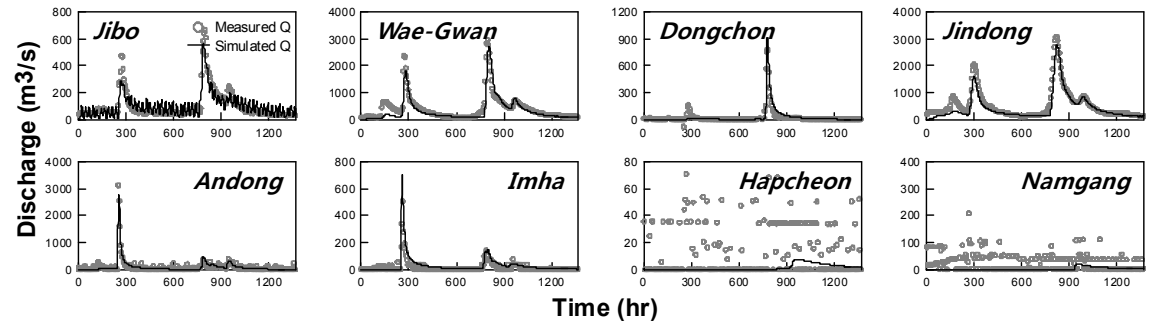
관측유량을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 다만, 2007년 안동댐과 2008년 합천댐과 남강댐의 경우 관측유량이 저유량에서 시간에 따른 유량의 변동성이 심하게 나타남을 알 수 있는데 이는 댐 유입량 관측방법에 기인한 것으로 판단된다. 2008년 호우사상에서 낙동강 남서부에 위치한 합천댐과 남강댐의 경우는 큰 홍수가 발생하지 않은 것으로 조사되었다.



(a) Calibration Period (2006.7.1~8.18)



(b) Verification Period 1 (2007.8.1~9.30)



(c) Verification Period 2 (2008.7.15~9.9)

Fig. 6. Measured and Simulated Discharges at 8 Gauged Sites for Each Period

모의된 홍수량의 평가 시 첨두홍수량 뿐만 아니라 호우에 대한 유출용적과 전체적인 거동에 대한 평가도 매우 중요하기 때문에 통계지표로 유출용적오차 (REV), 첨두유량오차 (REQ), 평균제곱근오차 (RMSE), 모형효율성계수 (ME)를 이용하였으며 Table 4는 통계지표 산정 결과를 나타낸 것이다. 보정기간의 경우 동천수위관측소를 제외하고 유출용적오차 8% 이내, 첨두유량 12% 이내의 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 평균제곱근오차는 상대적인 유량크기로 인해 진동수위관측소가 $604.14 \text{ m}^3/\text{s}$ 가 가장 크며 모형효율성계수는 지천에 위치한 관측지점의 경우는 대체로 0.81~0.93의 범위를 갖고 본류의 경우는 0.92~0.95의 범위를 갖는 것으로 확인되었다. 2007년 검증기간의 경우는 유출용적오차가 28% 이내, 첨두유량은 35% 이내의 정확도를 갖는 것으로 나타났으며 평균제곱

근오차는 대체로 보정기간과 유사하고 모형효율성계수는 동천수위관측소를 제외하고 보정기간보다 정확도가 낮게 산정되었다. 여기서 안동댐의 경우 통계치가 낮게 산정된 주된 이유는 Fig. 6(b)에서와 같이 관측유량의 변동성이 크기 때문으로 판단된다. 2008년 검증기간에 대해서도 본류구간의 평가지점에 대해서는 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 이상의 도식적, 통계적 평가결과로부터 본 연구에서 개발한 연속형 강우-유출모형은 대유역의 홍수 예측을 위한 유출모형으로 충분히 활용이 가능할 것으로 판단된다.

4.2 수문성분 분석

앞서 총유출량의 모의결과에 대한 정확도 평가를 수행하였으며 추가적으로 토양수분, 지표유출량, 중간유출량,

지하수유출량이 합리적으로 모의되는지를 파악하는 것은 모형의 신뢰도 검증 차원에서 매우 중요하다고 할 수 있다. 통상 이들 세부 수문성분에 대한 관측자료가 존재하는 경우에는 직접적인 비교가 가능하나 일반적으로 이들 성분을 관측하는 것은 매우 어려울 뿐만 아니라 일부 지점에서 존재한다고 하더라도 모형검증에 활용할 정도의 정확도 높은 시계열 자료를 구축하기는 어려운 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강우에 대한 토양수분의 거동 및 강우량 대비 각 유출성분과 실제증발산량의 발생비를 분석하고자한다.

우선, Fig. 7과 같이 강우량에 따른 토양수분과 유출곡선지수의 거동을 분석하였다. 대상지역은 임의로 낙동강 유역의 최상류유역에 위치한 1번 소유역을 선정하였다. 강우가 발생함에 따라 토양수분량이 증가하고 이로 인해 유출곡선지수가 유사한 형태로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 토양수분량이 포장용수량에서의 토양수분량까지 채워진 상태에서는 강우가 추가적으로 발생하더라도 더 이상 증가하지 않으며 유출곡선지수도 동일한 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같은 상태는 현재 토양수분 상태가 장력수와 자유수 영역의 경계인 포장용수량에서의 토양수분량과 동일한 상태라 할 수 있으며, 이를 초과하는 토양수분량은 측방흐름과 침투량에 기여하게 된

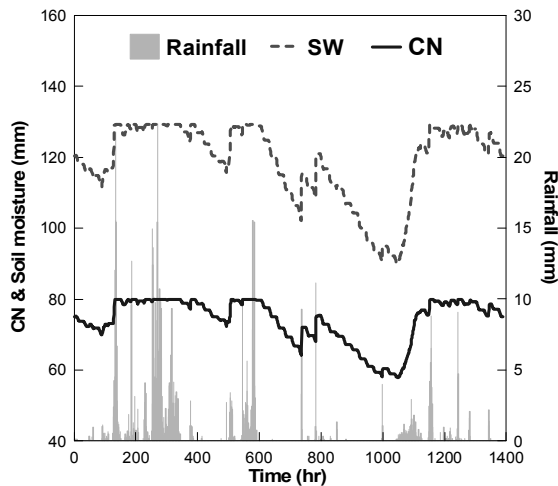


Fig. 7. Relationship between Soil Moisture (SW) and Runoff Curve Number (CN)

다. 이러한 원리는 모든 소유역에 대해 동일하게 적용되며 이상의 결과로부터 본 연구에서 개발한 모형의 토양수분은 강우에 대해 합리적인 거동을 보인다고 할 수 있다.

추가적으로 43개 소유역에 대한 강우량 대비 지표유출량 (Q_{sur}), 중간유출량 (Q_{lat}), 지하수유출량 (Q_{gw}), 실제증발산량 (AET)의 발생비를 분석한 결과는 Fig. 8과 같다. 수문성분비 분석은 2년 (2006.1.1~2007.12.31)에 대해 수행하였다. 총유출물 (Q_{tot})은 지리산 유역을 일부 포함하

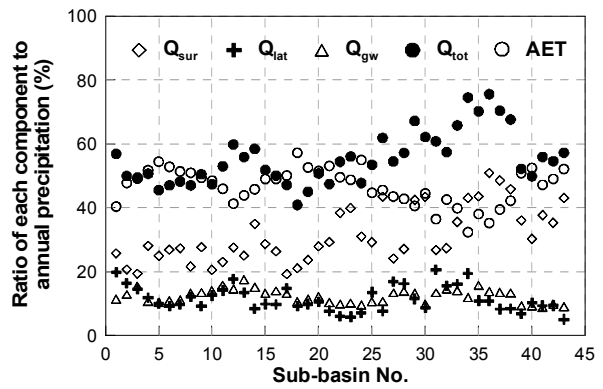


Fig. 8. The Ratio of Each Hydrologic Component (Q_{sur} , Q_{lat} , Q_{gw} , Q_{tot} and AET) to Precipitation for Each Sub-basin During 2006 and 2007 Year

고 있는 남강 상류유역 (31~36번)이 평균 67%로 가장 높게 발생하고 나머지 유역인 대체로 40~60% 이내의 유출률을 보이는 것으로 나타났다. 43개 소유역에 대한 수문성분의 평균 발생비는 강우량 대비 실제증발산량 46.73%, 지표유출량 31.47%, 중간유출량 11.52%, 지하수유출량 12.35%로 나타났다. 통상 우리나라의 경우 지역에 따라 차이는 있으나 장기유출에서 강우량 대비 실제증발산으로 인한 손실량이 40~50%, 총유출량이 50~60%임을 감안할 때 본 연구의 결과는 수문성분 모의에서도 합리적인 결과를 가진다고 하겠다.

5. 결론

본 연구에서는 대유역 홍수에측에 활용이 가능한 연속형 강우-유출모형을 개발하기 위해 유역과 하도의 저류함수모형과 물리적 기반의 수문성분 산정 컴포넌트를 연계하였으며 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기존의 가변최대잠재보유수량을 이용한 지표유출량 산정방법은 지표유출량이 과소추정되는 한계가 있음을 증명하였으며 시단위 지표유출량 산정이 가능하도록 모형을 개선하였다. 또한 중간유출량은 동역학적 저류모형으로부터 산정되고 지하수함양량과 지하수유출량은 각각 지수감소 가중함수법과 지하수위 변화량법으로부터 산정되도록 모형을 구성하였다. 마지막으로 유역과 하도의 연속적인 유출모의를 위해 유출수문성분과 저류함수모형을 연계하여 연속형 저류함수모형을 개발하였다.
2. 낙동강유역 내 8개 유량관측지점에 대해 2006~2008년 홍수기간 동안 모형 적용성 평가를 수행하였다. 도식적 분석결과 본류와 지류에서 모두 모의유량이 관측유량을 잘 모의하고 지점별로 고유량과 저유량에서도 높은 정확도를 보이는 것을 확인할 수 있었

다. 또한 통계적 결과에서도 본류에 위치한 관측지점의 경우는 유출용적오차 10% 이내, 모형효율성계수 0.79 이상의 정확도를 보이며 지류의 경우는 유출용적오차 28% 이내, 모형효율성계수 0.7 이상의 정확도를 갖는 것으로 나타났다. 이상의 결과는 한달 이상의 장기간의 모의기간과 관측유량의 불확실성을 고려할 때 충분히 타당성이 있다고 하겠다.

3. 모형에서 산정되는 세부수문성분들에 대한 평가를 수행하기 위해 강우에 대한 토양수분 거동과 연평균 강우량 대비 세부수문성분비를 분석하였다. 토양수분의 경우 지속적인 강우에 대해서 토양수분이 장력수 영역내에서 합리적으로 거동하는 것을 확인하였다. 또한 2006년과 2007년의 2년간의 강우량 대비 실제증발산량 46.73%, 지표유출량 31.47%, 중간유출량 11.52%, 지하수유출량 12.35%로 모의되었다. 이상의 결과는 우리나라의 경우 대체로 강우량 대비 실제증발산으로 인한 손실량이 40~50%, 총유출량이 50~60%임을 감안할 때 본 연구의 결과는 수문 성분 모의에서도 합리적인 결과를 가진다고 하겠다.

최근 실시간 홍수예보모델에 대한 관심이 증가하고 있으며 본 연구에서 개발한 연속형 강우-유출모형을 실시간 홍수예측에 활용하기 위해서는 레이다 예측강우와의 연계, 유출모형과 댐운영 모형과의 연계, 실시간 관측유량의 자료동화 기법 연계에 대한 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업 (08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

김극수, 한건연, 김광섭 (2009). “다방향 흐름 분배와 실시간 보정 알고리즘을 이용한 분포형 강우-유출 모형 개발 (I)-이론-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제3호, pp. 247-257.

김성준 (1998). “격자기반의 운동과 강우유출모형 개발 (I).” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제3호, pp. 303-308.

박진혁, 허영택 (2010). “GIS기반 K-DRUM을 이용한 금강권 대유역 홍수유출 적용.” **한국지형공간정보학회지**, 한국지형공간정보학회, 제18권, 제1호, pp. 11-20.

배덕효, 이병주, 정일원 (2003). “위성영상 피복분류에 대한 CN값 산정 (I): -CN값 산정-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제9호, pp. 985-997.

배덕효, 이병주, Georgakakos, K.P. (2009). “앙상블 칼만 필터를 연계한 추계학적 연속형 저류함수모형 (I)-모형 개발 -.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 953-961.

신철균, 조효섭, 정관수, 김재환 (2004). “저류함수기법을 이용한 격자기반의 강우-유출 모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 969-978.

이병주, 배덕효, 정창삼 (2003). “위성영상 피복분류에 대한 CN값 산정 (II): -적용 및 검증-.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제9호, pp. 999-1012.

최윤석, 김경탁, 이진희 (2008). “유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제9호, pp. 895-905.

최현상, 한건연 (2004). “GIS와 불확실도 해석기법을 이용한 분포형 강우-유출 모형의 개발 (I)-이론 및 모형의 개발 -.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제4호, pp. 329-339.

Arnold, J.G., Allen, P.M., and Bernhardt, G. (1993). “A comprehensive surface-groundwater flow model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 142, pp. 47-69.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). “Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.

Burnash, R., Ferral, R., and McGuire, R. (1973). “A Generalized Streamflow Simulation System, Conceptual Modeling for Digital Computers.” California-Nevada River Forecast Center, Sacramento, CA.

Environment Canada, Ontario Ministry of Natural Resources, Schroeter, H.O. (1989). “Grand River Integrated Flood Forecasting System (GRIFFS) V1.0 Final Technical Report.” April 7, 1989.

Ishihara, Y., and Kobatake, S. (1979). Runoff Model for Flood Forecasting, Bull. *DPRI, Kyoto University*, Vol. 29, pp. 27-43.

Kimura, T. (1961). The Flood runoff Analysis Method by the Storage Function Model. The Public Works Research Institute Ministry of Construction (in Japanese).

- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R., (2001). "Soil and Water Assessment Tool-Theoretical Documentation (version 2000)."
- Ormsbee, L.E., and Khan, A.Q. (1989). "A parameteric model for steeply sloping forested watersheds." *Water Resources Research*, Vol. 25, pp. 2053-2065.
- Sangrey, D.A., Harrop-Williams, K.O., and Klaiber, J.A. (1984). "Predicting ground-water response to precipitation." *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 7, pp. 957-975.
- Schroeter, H. (1989). GAWSER training guide and reference manual. School of Engineering, University of Guelph, Ontario, Canada.
- Sloan, P.G., and Moore, I.D. (1984). "Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds." *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 12, pp. 1815-1822.
- Sloan, P.G., Morre, I.D., Coltharp, G.B., and Eigel, J.D. (1983). Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds. Water Resources Institute Report 142. University of Kentucky, Lexington.
- Smedema, L.K., and Rycroft, D.W. (1983). Land-drainage-planning and design of agricultural drainage systems, Cornell University Press, Ithica, N.Y.
- Soil Conservation Service (1972). National Engineering Handbook : section 4-Hydrology. SCS.
- Sugawara, M. (1974). On natural disasters-some thoughts of a Japanese, unpublished manuscript.
- Thorntwaite, C.W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate." *Geographical Review*, Vol. 38, pp. 55-94.
- Van Der Knijff, J., and De Roo, A. (2008). LISFLOOD-distributed water balance and flood simulation model, User Manual. EUR 22166 EN2, JRC Scientific and Technical Reports, p. 109.
- Venetis, C. (1969). "A study of the recession of unconfined aquifers." *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, Vol. 14. No. 4. pp. 119-125.

논문번호: 10-082	접수: 2010.09.13
수정일자: 2010.10.29/2011.01.03	심사완료: 2011.01.03