

장기유출모형의 하도추적기법에 대한 개선방안

Improvement of Channel Routing Method in Longterm Runoff Model

김남원*, 이정우**, 이병주***, 이정은****
Nam Won Kim, Jeong Woo Lee, Byong Ju Lee, Jung Eun Lee

요 지

본 연구의 목적은 SWAT 모형에서 적용되는 하도유출추적 방법인 변동저류추적법과 Muskingum 방법에 대한 문제점 및 한계점을 제시하고 이를 개선하고자 하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 충주댐 상류유역에 SWAT 모형을 적용하였으며 기존 두 가지 방법에 대한 한계점을 제시하였다. 또한 새로운 하도추적 방법으로 연속방정식과 Manning 식으로부터 비선형 저류방정식을 구성하여 적용하였으며 주하도 유입량에 대한 세가지 방법을 비교한 결과 기존 방법보다 본 연구에서 제시한 방법이 일 단위 장기유출모의에서 합리적인 유출량 결과를 제시하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 SWAT 모형의 적용성을 향상시킬 뿐만 아니라 유출 및 수질모의에도 상당한 영향일 미칠 것으로 판단된다.

핵심용어 : 하도유출추적, SWAT, 장기유출모형

1. 서 론

수자원의 효율적인 이용과 관리를 위해서는 장기간의 정교한 유출해석이 필요하며 이에 따라 국내외적으로 다양한 장기유출모형들이 개발 및 사용되어 왔다. 이러한 장기유출모형을 이용하여 신뢰성 있는 유출해석 결과를 얻기 위해서는 지표수, 지표하수, 지하수 등의 각 수문성분량을 정확하게 산정해야 할 뿐 아니라 하도유출의 지체 및 감쇠를 구현할 수 있도록 하도유출추적 과정이 수행되어야 한다. 하도 내 수량, 유하속도 등은 유사량 이동이나 화학물질 거동에도 직접적인 영향을 미치므로 하도유출추적의 정확성은 매우 중요한 문제이다.

하도유출추적방법은 하천흐름을 표현하는 방정식의 복잡성에 따라 여러 가지 방법이 있으나 대부분의 장기유출모형에서는 Muskingum 방법 등의 수문학적 하도추적방법을 채택하고 있다. Muskingum 방법을 이용할 경우 수치의 안정화를 유지하고 계산 유출량이 음의 값이 나오지 않도록 저류상수, 가중계수 등의 매개변수 값과 계산시간간격을 적절하게 설정해야 한다. 그러나 장기유출모의시 흔히 일 단위 시간간격을 사용함으로써 매개변수 설정 범위에 제약이 따르며 이로 인해 유출량의 시간적 변화를 유연하게 나타낼 수 없는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 최근 활용성 높은 준분포형 장기유출모형 SWAT (Arnold 등, 1993)을 충주댐 상류유역에 적용하여 일 단위 유출모의시 하도추적기법이 갖게 되는 문제점과 한계를 제시하고, 하도추적기법의 개선을 통하여 모형의 적용성 및 모의결과와 정확도를 향상시키고자 한다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원 · E-mail : nwkim@kict.re.kr
** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : ljw2961@kict.re.kr
*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : bilee@kict.re.kr
**** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : jeus22@kict.re.kr

2. SWAT 모형의 하도유출추적방법 및 한계점

SWAT 모형은 수문학적 반응단위(Hydrologic Response Unit; HRU)를 최소 계산단위로 하여 강수량에 대한 각 수문성분량을 계산하고 이 양은 지체효과가 고려되어 해당 소유역의 주하도로 유입되며 유입된 양은 하도추적 과정을 거쳐 하류로 이동하게 된다.

SWAT 모형에서 적용 가능한 하도유출추적 방법은 변동저류추적법(variable storage routing method)과 Muskingum 방법이 있다. 본 연구에서는 충주댐 상류유역을 수위관측소를 기준으로 소유역을 18개로 구분하여 1995년~1999년에 대해 SWAT 모형을 적용하였으며 이를 통해 각 방법에 대한 문제점을 분석하였다.

2.1 변동저류추적법

변동저류추적법은 Williams (1969)에 의해 개발되었으며 주어진 하도구간에 대해서 식 (1)~(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{out,2} = SC \cdot q_{in,ave} + (1 - SC) \cdot q_{out,1} \quad (1)$$

$$q_{in,ave} = \frac{q_{in,1} + q_{in,2}}{2} \quad (2)$$

$$SC = \frac{2 \cdot \Delta t}{2 \cdot TT + \Delta t} \quad (3)$$

$$TT = \frac{V_{stored}}{q_{out}} \quad (4)$$

여기서, $q_{out,1}$ 과 $q_{out,2}$ 는 각각 시점과 종점에서의 유출량 (m^3/s), $q_{in,ave}$ 는 시간간격 동안의 평균 유입량 (m^3/s), $q_{in,1}$ 과 $q_{in,2}$ 는 각각 시점과 종점의 유입량 (m^3/s), SC : 저류계수, TT : 유하시간 (s), 그리고 Δt 는 시간간격 (s)이다.

변동저류추적법의 경우 음의 유출량이 발생하지 않기 위해서는 식 (1)에서 $SC \leq 1$ 이어야 하며, SWAT 모형에서와 같이 일 단위($\Delta t = 24hr$)로 유출모의를 수행하게 될 경우에 이 조건을 만족하기 위해서 TT 가 12시간보다 큰 값을 가져야 하는 제약이 따른다. 대상유역의 모의 과정에서 이러한 조건을 만족하는지를 확인하기 위해 모의기간동안 각 소유역에 대해 SC 와 TT 의 관계를 분석하였다. 그림 1은 18개 소유역 중 주천수위관측소 상류유역(8번 소유역)을 모의한 결과로 TT 가 12시간보다 작게 나타나는 경우가 빈번하게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 홍수기의 일정기간동안 TT 가 12시간보다 작게 산정되기 때문이다. 따라서 변동추적법을 이용하여 하도추적을 수행할 경우 홍수기 유하시간이 12시간보다 큰 유역에서 적용되어야 한다.

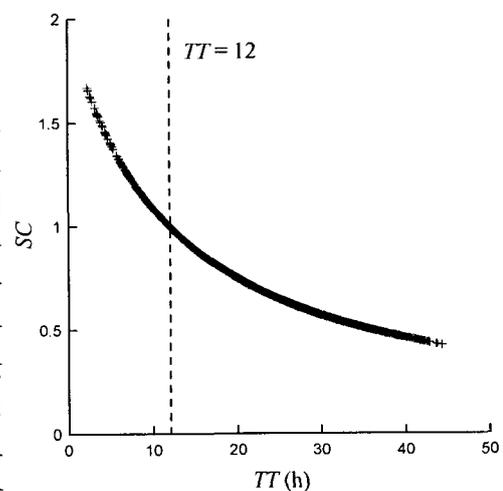


그림 1. 8번 소유역의 SC - TT 관계

2.2 Muskingum 방법

이 방법은 총 저류량은 썰기저류와 대형저류의 합으로 나타내고 이 관계를 저류방정식에 적용하여 하도 종점의 유출량을 산정하는 방법으로 산정 방법은 식 (5)~(8)과 같다.

$$q_{out,2} = C_1 \cdot q_{in,2} + C_2 \cdot q_{in,1} + C_3 \cdot q_{out,1} \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2 \cdot K \cdot X}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (7)$$

$$C_3 = \frac{2 \cdot K \cdot (1 - X) - \Delta t}{2 \cdot K \cdot (1 - X) + \Delta t} \quad (8)$$

여기서, $q_{in,1}$ 과 $q_{in,2}$ 는 각각 시점과 종점에서의 하도내 유입량 (m^3/s), $q_{out,1}$ 과 $q_{out,2}$ 는 각각 시점과 종점에서의 유출량 (m^3/s), K 는 유출량에 대한 저류량의 비로서 저류상수를 의미하며, X 는 하도구간내 저류량을 결정하는데 있어서 유입량과 유출량의 상대적인 중요도를 나타내는 가중 인자이다.

Muskingum 방법에서도 음의 썰기저류가 발생하지 않도록 하기 위해 식 (6)~(8)의 C_1 , C_2 , C_3 의 계수 값이 양의 값을 가지도록 식 (9)와 같은 조건을 만족하도록 K 와 X 의 값을 설정해야 한다.

$$2 \cdot K \cdot X < \text{triangle} < 2 \cdot K \cdot (1 - X) \quad (9)$$

SWAT 모형에서는 저류상수 K 를 식 (10)과 같이 만수시 저류상수 $K_{bnkfull}$ 와 만수의 10%로 흐를 때 저류상수 $K_{0.1bnkfull}$ 의 가중 합으로 추정하고 있다.

$$K = coef_1 \cdot K_{bnkfull} + coef_2 \cdot K_{0.1bnkfull} \quad (10)$$

여기서, $coef_1$ 와 $coef_2$ 는 사용자에게 입력되는 가중계수이며, $K_{bnkfull}$ 과 $K_{0.1bnkfull}$ 를 산정하기 위하여 Cunge (1969)에 의해 개발된 다음과 같은 식이 사용된다.

$$K = \frac{1000 \cdot L_{ch}}{c_k} = \frac{1000 \cdot L_{ch}}{v_c} \cdot \frac{3}{5} \quad (11)$$

여기서, L_{ch} 는 하도 길이 (km), c_k 는 특정 수심에서 흐름에 관련된 파속 (m/s)으로 유량의 변동 정도가 하도를 따라 전달되는 속도이며, v_c 는 유속 (m/s)이다.

저류상수 K 는 식 (10)과 (11)로부터 가중계수 $coef_1$, $coef_2$ 와 유속 v_c 에 따라 결정된다. 본 연구에서는 18개 소유역의 주하도에 대한 C_1 , C_2 , C_3 계수를 분석하였다. 그 결과 그림 2와 같이

18개 소유역 모두 C_3 값이 음의 값을 나타내며 주하도 연장이 짧을수록 -1값에 가깝게 나타났다. 따라서 이러한 결과는 Muskingum 방법의 제약조건을 벗어나게 되며 이로 인해 결과적으로 유출수문곡선이 수치적으로 불안정하게 계산되어 감수부를 제대로 묘사하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 또한 계산 시간간격 Δt 시간인 경우에서 식 (9)의 조건을 만족하도록 가중계수 $coef_1$ 와 $coef_2$ 값을 키울 경우 수문곡선의 지체가 과도하게 일어나는 문제가 발생하게 된다. 이는 SWAT 모형뿐만 아니라, 다른 장기유출모형을 이용하여 일단위로 유출 모의를 수행할 경우에도 동일하게 발생할 수 있는 문제이다.

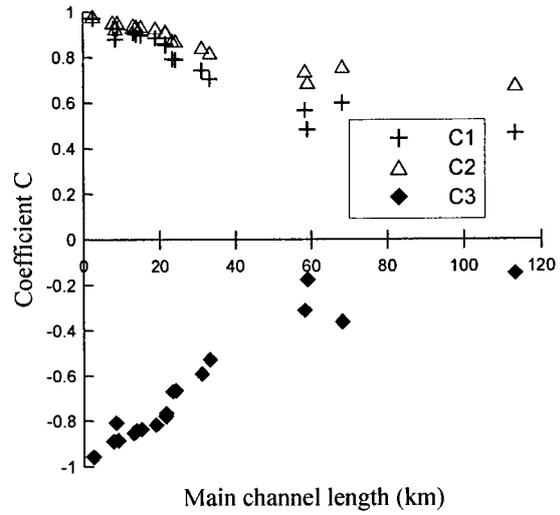


그림 2. 소유역 주하도에 대한 C_1 , C_2 , C_3

3. 하도유출추적방법의 개선

전술한 바와 같이 SWAT 모형에서와 같이 일단위로 유출모의를 수행할 경우 매개변수 설정 범위에 제약이 따르며 이로 인해 유출량의 시간적 변화를 유연하게 나타낼 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 SWAT 모형이 가지는 하도유출추적에 대한 문제점을 해결하고자 하도유출추적 방법을 개선하였다. 이를 위해서 하도내 흐름을 운동과 근사로 표현하여 식 (13)과 같이 Manning식으로 나타내고 이를 연속방정식 식 (12)와 결합하여 비선형 저류방정식을 구성하였으며, 이 방정식의 해인 수심과 유출량을 계산하는 하도유출추적 방법을 제시하였다.

$$\frac{dS}{dt} = I - O \quad (12)$$

$$O = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2} = \frac{1}{n} A_{ch}^{5/3} P^{-2/3} S_f^{1/2} \quad (13)$$

여기서, S 는 하도 저류량 (m^3), I 는 하도 유입량 (m^3/s), O 는 하도 유출량 (m^3/s), R 은 동수반경 (m), S_f 는 마찰경사로 운동과 근사에 의해 하도경사 (m/m), A 는 하도 단면적 (m^2)이며 P 는 윤편 (m)이다.

식 (12)와 식 (13)을 시간에 대해 차별화하면 식 (14)와 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{ch} \frac{A_{ch,2} - A_{ch,1}}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2} \quad (14)$$

$$O_2 = \frac{1}{n} A_{ch,2}^{5/3} P_2^{-2/3} S_f^{1/2} \quad (15)$$

여기서, 아래첨자 1과 2는 각각 시간간격의 시점과 종점을 의미한다. 식(15)를 식(14)에 대입하고, $f(A_{ch}) = 0$ 의 형태로 나타내고 Bisect 기법을 이용하여 미지수 수심 d 를 반복적으로 계산하도록

하였다. 시간간격 중점시 유출량 O_2 는 앞서 계산된 수심 d 를 식(15)에 대입하여 산정할 수 있다.

본 연구에서 제시한 하도유출추적 방법에 대한 타당성 검증을 위해 그림 3과 같이 주하도 유입량에 대해서 변동저류추적법과 Muskingum 방법을 이용한 유출량 결과와 본 연구에서 제시한 유출량 결과를 비교하였다. 비교지점은 주천 수위관측소 지점으로 1998년 8월 1일~20일의 유출량 결과를 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 변동저류추적법의 경우 유입량과 거의 동일한 결과를 나타냄으로서 지체 효과를 구현하지 못하는 것으로 나타났으며

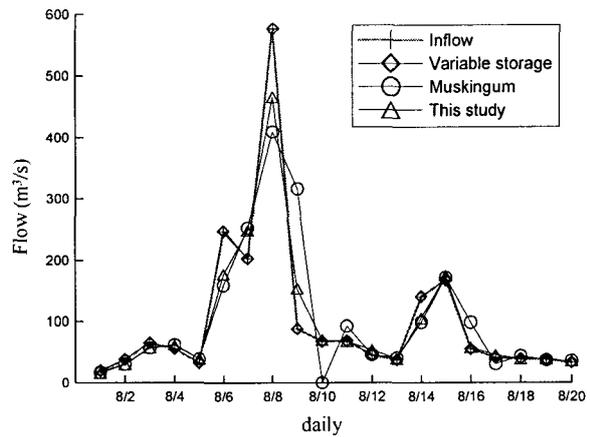


그림 3. 하도추적 방법별 유출량 결과비교

Muskingum 방법은 8월 10일날 유량값이 0.0 m^3/s 로 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 상술했던 C_3 값이 음의 값을 가짐으로 인해 전날 유출량이 큰 경우 당일날 유출량이 경우에 따라 음의 값으로 나타나기 때문이다. 본 연구에서 제시한 방법은 주하도 유입량에 대해 안정적인 유출량값을 모사할 뿐만 아니라 하도의 조도나 경사 등의 수리학적 특성이 반영된 것으로 SWAT 모형의 하도추적법과 같이 하도길이나 유하시간 등에 제약을 받지 않는 장점이 있다고 하겠다.

4. 결론

장기유출모형에서는 유역유출추적을 통한 각 수문성분의 모의결과 뿐만 아니라 하도유출추적 결과 또한 유출모의결과에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 최근 유출 및 수질 모의에 활용도가 높은 SWAT 모형을 충주댐 상류유역에 적용하여 각 하도유출추적방법의 적용과정에서 발생하는 문제점 및 한계점을 제시하였다. 또한 이를 개선하기 위해 연속방정식과 Manning 식으로부터 비선형 저류방정식을 구성하여 적용하였으며 그 타당성을 제시하였다.

본 연구의 결과는 SWAT 모형을 이용한 장기유출 모의시 모형의 적용성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 2-2-2)에 의해 수행되었습니다. 지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Arnold, J. G., P.M. Allen, and G. Bernhardt(1993). A comprehensive surface -groundwater flow model. Journal of Hydrology. Vol. 142. pp.47-69.
2. Cunge, J.A.(1969). On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). J. Hydraulics Research 7(2):205-230.
3. Williams, J. R.(1969). Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Transactions of the ASAE 12(1):100-103.