

선행강우지수를 고려한 저수유출 시뮬레이션 모델

Low Flow Simulation Model by using Antecedent Precipitation Index

전도석¹⁾ · ○허창환²⁾ · 지홍기³⁾ · 이순탁⁴⁾

1. 서 론

유역의 강우-유출관계에서 유역유출은 공간적으로 그 특성이 상이하고 시간적으로 변화가 심하며 유역유출계의 상태는 유역에서 발생한 선행의 수문사상에 크게 지배를 받고 있다. 확정론적 방법에 의한 유출모형은 유역의 수문기상현상과 물리 및 과정변수간의 관계를 구체적이고 명확한 수학적 이론의 근거에 의해서 설정하고 이들 매개변수의 거동을 정확히 표현해야 한다. 그러나 유역의 강우-유출과정이 강한 비선형성을 지니고 있고 유역유출계가 시간에 따라 동적거동을 하는 시변계이지만 실제 적용의 어려움으로 인하여 선형근사 및 시불변계로 접근하고 있는 실정이다. 특히, 유역유출계의 과정변수는 유역의 물리계인 토양 및 토지이용상태와 선행수문사상에 따라 유역의 습윤조건이 달라지므로 이를 반영할 수 있는 유역유출계의 수학적모형의 최적화와 선행수문사상을 고려한 과정변수의 합리적인 추정방법 등의 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 유역의 습윤상태를 설명하는 인자인 유역의 선행강우지수를 이용하여 저수유출과정을 해석하기 위하여 토양 습윤상태가 동적거동을 하는 것으로 취급하여 유출과정을 개념적으로 확립토록 하였으며, Dawdy-O'Donnell 모형을 기본형으로 하는 개념적 모형과 유역을 여러 개의 저류형 용기(Tank)의 조합으로 개념화한 비선형 모형인 탱크모형을 대상으로 이들 모형의 구조와 이론 및 선행강우지수를 고려한 매개변수를 추정하여 저수유출해석을 실시하도록 하였다.

2. 유역유출모형의 개념

2.1 개념적 모형

유역유출계에서 유출성분은 지표유출, 중간유출 및 지하수 유출 등으로 구분하고 있으나 이들 각 성분의 엄격한 분리가 매우 어렵다. 우선, 지표면유출은 유역의 지표면 처리상태에 따라 달라지며, 선행수문사상에 크게 지배된다. 다음으로, 중간유출은 강우가 지표면을 침투하여 식물근 혹은 지표하에 일시적으로 저류되었던 토양함수로서 서서히 유출을 일으키게 되며, 이는 토양의 깊이나 토지이용상태에 따라 크게 좌우된다. 마지막으로 지하유출은 지표면을 침투한 강우가 지표하의 심층부까지 침투된 후에 장시간 지속되는 유출의 형태로 나타나게 되며, 이는 대수층의 깊이와 지하불투수층의 구조에 따라 달라진다. 따라서, 본 연구에서는 유출과정을 개념화시킨

1) 정희원 · 영남대학교 대학원 토목공학과 석사과정 053-810-3791(E-mail : m0140205@chunma.yu.ac.kr)

2) 정희원 · 충주대학교 토목공학과 강사 043-841-5181(E-mail : chheo@hanmail.net)

3) 정희원 · 영남대학교 토목도시환경공학부 교수 · 공학박사 053-810-2414(E-mail : hkjee@yu.ac.kr)

4) 정희원 · 영남대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 이학박사 053-810-2412(E-mail : leest@yu.ac.kr)

Dawdy-O'Donnell 모형을 기본형으로 하는 개념적모형을 대상으로 이들 모형의 구조와 이론 및 모형의 매개변수 추정방법 등을 개발토록 하였다.

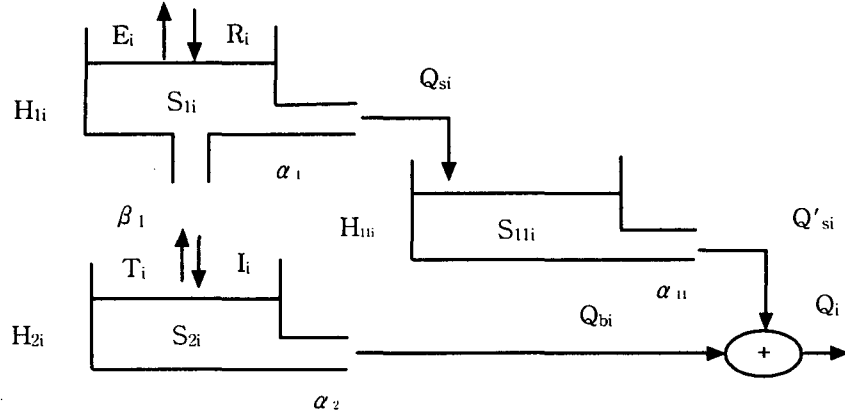


Fig. 1 Structure of the Conceptual Model

개념적 모형의 유출과정은 지표면에 입력된 강우(R_i)는 증발(E_i), 지표하로의 침투(I_i) 및 저류(S_{1i})가 되고 나머지는 부탱크(Q_{si})로 유출이 된다. 부탱크에 유입된 물은 다시 유출(Q'_{si})이 되는데 이는 부탱크의 저류량(S_{11i})에 지배된다. 또한 지표하에 침투된 물은 서서히 증산(T_i) 및 저류(S_{2i})가 되면서 유출(Q_{bi})에 기여하게 된다. 따라서 이들 각 모형의 구조에서 발생하는 유출과정을 수식화하면 $Q_{si} = \alpha_1 S_{1i}$, $Q'_{si} = \alpha_{11} S_{11i}$, $I_i = \beta S_{1i}$, $Q_{bi} = \alpha_2 S_{2i}$ 로 여기서, α_1 , α_2 및 α_{11} 는 각각 지표면 및 지표하와 부탱크의 유출계수이고 β 는 지표면에서 지표하로 침투되는 침투계수이다. 한편 지표면 및 지표하와 부탱크의 저류상태를 각각의 저류고(H_{1i} , H_{2i} 및 H_{11i})로 표시할 때 평균 저류량(S_{1i} , S_{2i} 및 S_{11i})은 시간단계 전후의 저류고(H_{1i} 및 H_{11i})의 평균으로 표시된다. 그러나 저류상태는 선행강우의 조건에 따라 달라지므로 초기조건인 지표면, 지표하 및 부탱크의 저류고(H_{10} , H_{20} , H_{110})를 계산해야 하지만 이를 구하기가 용이하지 않으므로 초기조건을 경험적으로 가정하고 경과시간을 부여함으로써 계산오차를 줄일 수 있다. 따라서 개념적 모형의 유출과정에 있어서 출력된 유출(Q_i)은 부탱크의 유출(Q'_{si})과 지표하의 유출(Q_{bi})의 합으로 표시할 수 있다.

2.2 탱크모형

탱크모형의 유출과정은 3단 직렬로 배열한 저류형으로 임의시간의 강우는 제 1단 탱크로 유입되어 저류수 중 일부는 유출공을 통하여 지표유출을 일으키고 나머지는 하단 탱크로 침투된다. 또한 유역에서 발생한 증발은 최상단인 제 1단 탱크에서 증발되며, 갈수시 상단 탱크의 저류고가 0이 되면 하단 탱크로부터 증발이 일어난다. 각 탱크의 유출성분을 살펴보면 먼저 제 1단 탱크의 1, 2 유출공으로부터 유출은 지표면 유출, 제 2단 탱크의 유출공의 유출은 지표하 유출, 제 3단 탱크의 유출공으로부터 유출은 지하수 유출에 해당한다. 따라서 하천유출은 지표유출 및 지표하유출 및 지하수유출 등의 3가지 성분의 합으로 이루어진다. 다음으로 탱크모형의 매개변수는 각 탱크의 측면유출공의 유출계수, 저면침투공의 침투계수 및 저류상태 등으로 구성되며, 이들 매개변수는 정밀한 수문관측지점에서 강우량, 증발량 및 실측된 기타의 수문자료들을 이용하여 추정한다.

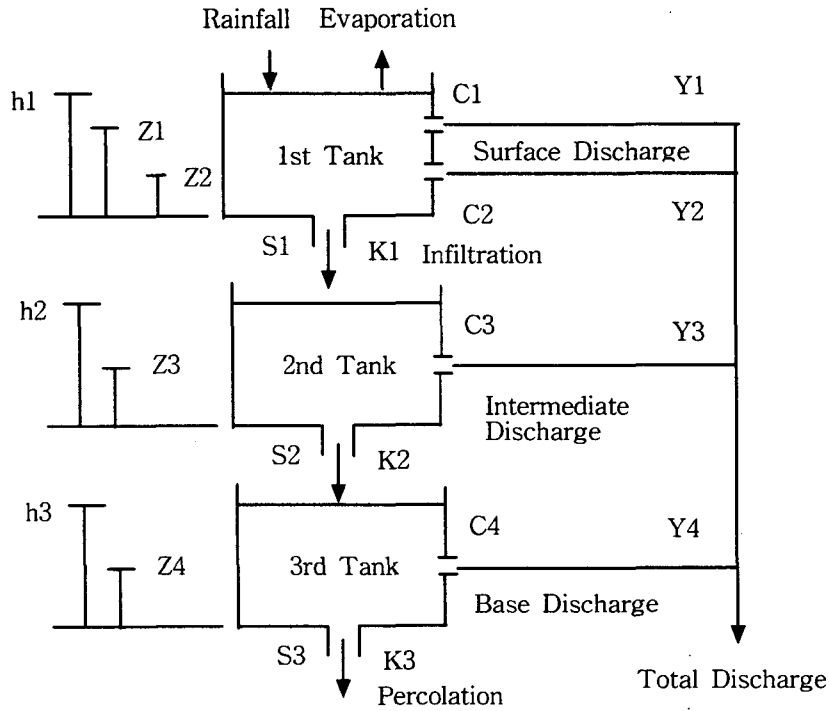


Fig. 2 Structure of Tank Model

탱크모형의 유출고와 침투고에 대한 기본방정식은 다음과 같다.

$$Y = C(h - Z) \tag{1}$$

$$S = Kh \tag{2}$$

여기서, Y는 유출고, C는 유출계수, h는 초기저류고, Z는 유출공의 높이, S는 침투고, K는 침투계수이다.

3. 모형의 매개변수 추정기법

3.1 개념적 모형

유역유출계에서 유출모형의 하부구조인 토양습윤상태는 선행강우지수에 지배되며, API는 역지수형과 지수형으로 구분하고 있다. 일반적으로 API는 장기유출과 단기유출에 따라 그 적용을 달리하고 있으며 가중지수를 달리하여 적용하고 있다. 따라서, API의 결정에 있어서 강우시계열이 발생하고 있을 때 각 시계열 API는 다음식 (3)~(4)와 같다.

$$API_t = a_1P_1 + a_2P_2 + \dots + a_tP_t \tag{3}$$

$$API_t = b_1P_1 + b_2P_2 + \dots + b_tP_t \tag{4}$$

여기서, P_t 는 해당 강우보다 t 시간 선행하는 강우량이며, a 및 b는 경과시간에 따른 가중지수이다. 즉, a는 1 보다 작은 상수이므로, t의 역수로 표시되며, t의 멱함수이다.

앞에서 정의한 모형매개변수의 초기치 추정에 있어서 지표하의 유출계수(a_{21})와 지표하로 유

입되는 침투계수(β_i)는 API_i 에 의해서 추정할 수 있으며, 유출계수 및 침투계수는 시간에 따라 변화하는 것으로 취급하여 식 (5)~(6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_i = f(API_i) = a^{API_i} b \quad (5)$$

$$\alpha_{2i} = f(API_i) = c^{API_i} d \quad (6)$$

여기서, a, b, c 및 d는 회귀상수이다.

3.2 탱크모형

하천유출량 계산에 적용되는 탱크모형은 그 구조가 다른 유출모형에 비하여 비교적 간단하고 계산과정이 단순하지만 유역내에 탱크모형과 직결되는 수문관측자료나 수문현상을 찾아내기가 힘들기 때문에 해당되는 지점의 과거 기록자료를 이용하여 여러번 반복하여 계산함으로써 모형의 매개변수를 결정해야 한다. 본 연구에서는 초기저류고와 유출공의 높이는 선행강우지수에 지배되므로 각 탱크의 유출계수와 침투계수를 식 (7)~(8)과 같이 API에 의해서 추정하였으며, 그 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$C = f(API) = a^{API} b \quad (7)$$

$$K = f(API) = c^{API} d \quad (8)$$

4. 적용 및 분석

본 연구에서 제시한 개념적 모형과 탱크모형에 대하여 이론과 알고리즘을 실제 하천유역에 적용하여 유역유출계산을 실시하였다. 적용대상유역은 비교적 정밀한, 강우, 수위 및 유량 등의 자료가 있는 IHP 대표유역인 낙동강 위천대표유역을 선정하였다.

개념적 모형의 매개변수추정은 지표면유출의 매개변수 α_{11} , 지표하로의 침투를 나타내는 매개변수 β 및 지표하유출의 매개변수 α_{21} 로 나누어 각각의 매개변수에 대한 민감도분석을 실시토록 하였다. 먼저, 지표면유출을 표현하는 부탱크의 유출계수 α_{11} 은 각각 0.400부터 0.680까지 0.005씩 증가시키면서 Bias 및 RMS를 계산하였으며, 이들 값이 최소가 되는 값을 Table 1에 나타난 바와 같이 초기치로 사용하였다. 다음으로, 지표면의 침투계수 β 와 지표하의 유출계수 α_{21} 의 초기치를 구하기 위하여 API_i 의 함수로 표시하였다. 침투계수 β_i 의 회귀계수 a 및 b 그리고 지표하의 유출계수 α_{21} 의 회귀계수 c 및 d의 값을 -25%에서 +25%까지 5%씩 증가 및 감소시키면서 Bias와 RMS가 최소가 되는 값을 초기치로 구하였다.

지표면과 부탱크의 유출계수 α_{11} 및 α_{11} 은 각각 0.257~0.300 및 0.495~0.585이고 지표하의 유출계수와 지표면의 침투계수인 α_{21} 및 β_i 는 각각 API_i 의 지수식으로 나타낼 수 있었다. 한편 지표면과 지표하의 초기저류고 H_{10} 및 H_{20} 은 각각 0.0 및 50.0 mm로 하였으며, 수문사상의 선행시간은 적용유역이 비교적 중소유역에 해당하므로 선행사상의 영향을 충분히 반영할 수 있는 3일(72 hr) 동안 발생한 호우사상을 취하였다.

따라서 개념적 모형의 매개변수인 지표면유출 부탱크의 유출, 지표하유출 및 지표하로의 침투에 대한 각 유출 및 유출계수는 Table 1과 같다.

Table 1 Parameter for Conceptual Model

Basin	α_1	α_{11}	β	α_2	AMC-II
No. 1	0.300	0.585	0.956	0.006	65.8
No. 2	0.296	0.580	0.959	0.007	66.9
No. 3	0.292	0.540	0.957	0.007	69.2
No. 4	0.277	0.525	0.958	0.008	73.1
No. 5	0.288	0.495	0.958	0.008	76.2
No. 6	0.257	0.510	0.957	0.007	64.2

탱크모형의 매개변수 추정은 선행강우지수에 의해 결정된 초기저류고와 유출계수를 이용하여 계산된 유출수문곡선을 실측치와 비교해가면서 매개변수 조정에 따른 수문곡선의 변화와 모의된 결과를 통계분석방법으로 검증하면서 시행하였으며, 그 결과는 아래 Table 2와 같다.

Table 2 Parameter for Tank Model

Sub basin	Z1	Z2	Z3	Z4	K1	K2	K3	C1	C2	C3	C4
No.1	50	7	7	7	0.080	0.040	0.0070	0.065	0.080	0.040	0.0020
No.2	48	6	6	7	0.070	0.035	0.0050	0.063	0.075	0.030	0.0010
No.3	45	6	5	6	0.060	0.035	0.0050	0.062	0.073	0.030	0.0010
No.4	40	5	5	5	0.040	0.030	0.0020	0.055	0.065	0.010	0.0010
No.5	38	5	4	4	0.030	0.010	0.0010	0.015	0.040	0.001	0.0005
No.6	43	5	5	5	0.050	0.020	0.0020	0.050	0.070	0.020	0.0010

추정된 매개변수를 이용하여 본 연구의 분석유역 중에서 수위관측소 지점인 무성(No. 1), 병천(No. 2), 미성(No. 3), 고노(No. 4), 동곡(No. 5) 및 효령(No. 6) 지점에 대하여 1999. 11. 1~2000. 10.31 및 2000. 11. 1~2001. 10. 31의 일자료를 이용한 유출해석을 실시하였다. 분할된 소유역을 대상으로 계산된 유량과 실측유량을 비교할 수 있도록 유출수문곡선을 작성·비교하였으며, 이 때 모형의 적합성을 분석하였다.

계산한 유출수문곡선과 실측수문곡선을 비교한 결과, 탱크모형의 결과가 개념적 모형보다 더 우수한 것으로 나타났으며, 개념적 모형의 결과도 실측수문곡선에 비교적 잘 접근되고 있음을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 유역의 강우-유출과정을 개념적으로 지표면과 지표하로 단순화시킨 개념적 모형과 탱크모형의 매개변수를 유역의 토양습윤상태를 나타내는 선행강우지수(API)로 표현함으로써 저수유출과정을 정밀하게 표현할 수 있었다.

일유출수문곡선
(2000. 11. 1 - 2001. 10. 31)

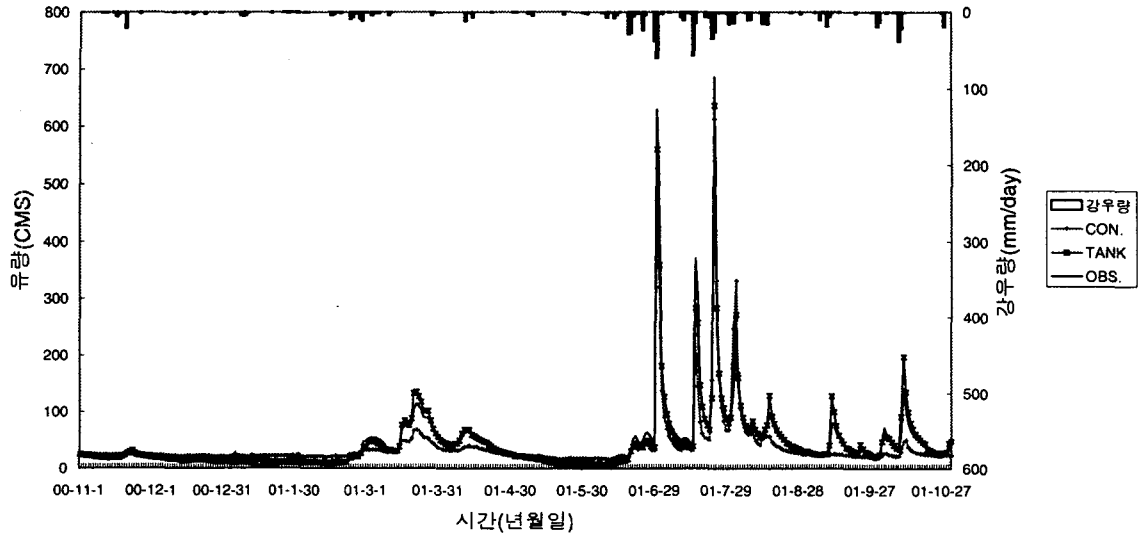


Fig. 3 Comparison of Hydrograph by the Conceptual and Tank Model(No.1)

5. 결 론

본 연구에서는 저수예측을 위한 유출모형을 개발하기 위하여 유출모형을 개념적으로 표현할 수 있는 유출모형인 개념적 모형과 탱크모형을 확정론적 관점에서 검토하여 모형화를 시도하여 복잡한 유역유출계의 유출과정을 개념화함으로써 모형의 구조를 간단히 하고 모형의 매개변수의 추정방법에 선행강우지수를 이용하여 최적의 유역유출모형을 확립토록 하였다.

참 고 문 헌

1. 서영제, 1997, 탱크모형의 매개변수 검정에 관한 연구, 한국수자원학회 논문집, 제 30권, 제4호, pp. 327~334.
2. 지홍기, 1989, 개념적모형에 의한 하천유출예측, HBV 모델 및 Tank 모델을 중심으로, 영남대학교 공업기술연구소 연구보고, 제 17권, 제 1호.
3. 지홍기, 1989, 수치해법에 의한 홍수유출모델, 영남대학교 공업기술연구소 연구보고, 제 17권, 제 2호.
4. Bergstorm, S. & Forsman, 1973, Development of a Conceptual Deterministic Rainfall-Runoff Model, Nordic Hydrology, Vol. 4, No. 3.
5. Dawdy, D. R., & O'Donnell, T., 1965, Mathematical Models of Catchment Behaviour, J. of Hyd. Div., ASCE 91(HY4), pp. 123.