

선행강우지수를 고려한 홍수유출 시뮬레이션 모델

Flood Runoff 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.

따라서, 본 연구에서는 유역유출은 유역의 습윤상태를 설명하는 인자인 유역의 선행수문사상으로부터 그 지수를 이용할 수 있도록 강우-유출과정에 있어서 토양습윤상태가 강우-유출계내에서 동적거동을 하는 것으로 취급하여 강우-유출과정의 개념적 알고리즘을 확립토록 하였다. 한편, 모형의 기본구조는 유역유출과정을 지표유출과 지표하유출(중간 및 지하유출 포함)로 나누었으며, 각각의 유출성분을 대변할 수 있는 지표와 지표하에서 유출이 발생하는 유역유출과정으로 모형화하여 홍수유출을 해석하고자 한다.

2. 유역유출모형의 개념

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

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)

지하불투수층의 구조에 따라 달라진다. 따라서, 본 연구에서는 유출과정을 개념화시킨 Dawdy-O'Donnel 모형을 기본형으로 하는 개념적모형을 대상으로 이들 모형의 구조와 이론 및 모형의 매개변수 추정방법 등을 개발토록 하였다.

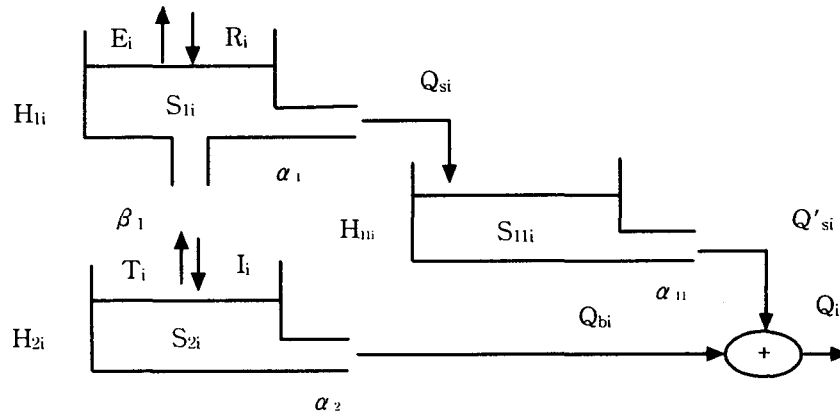


Fig. 1 Structure of the Conceptual Model

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_{1ii})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 $Q_{si} = \alpha_1 S_{1i}$, $Q'_{si} = \alpha_{11} S_{1ii}$, $I_i = \beta S_{1i}$, $Q_{bi} = \alpha_2 S_{2i}$ 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_{1ii})로 표시할 때 평균 저류량(S_{1i} , S_{2i} 및 S_{1ii})은 시간단계 전후의 저류고(H_{1i} 및 H_{1i-1})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.

3. 모형의 매개변수 추정기법 및 예측기법

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 (1)~(2)와 같다.

$$API_t = a_1 P_1 + a_2 P_2 + \dots + a_t P_t \quad (1)$$

$$API_t = b_1 P_1 + b_2 P_2 + \dots + b_t P_t \quad (2)$$

여기서, P_t 는 해당 강우보다 t 시간 선행하는 강우량이며, a 및 b 는 경과시간에 따른 가중지수

이다. 즉, a 는 1보다 작은 상수이로서, t 의 역수로 표시되며, t 의 멱함수이다.

앞에서 정의한 모형매개변수의 초기치 추정에 있어서 지표하의 유출계수 (α_{2i})와 지표하로 유입되는 침투계수 (β_i)는 API_i 에 의해서 추정할 수 있으며, 유출계수 및 침투계수는 시간에 따라 변화하는 것으로 취급하여 식 (3)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\beta_i = f(API_i) = a^{API_i} b \quad (3)$$

$$\alpha_{2i} = f(API_i) = c^{API_i} d \quad (4)$$

여기서, a, b, c 및 d 는 회귀상수이다.

하천의 유출과정을 예측하기 위해서는 앞에서 제시한 개념적 모형을 대상으로 모형매개변수의 추정과정을 거쳐서 유역유출의 계산이 실시되어야 하므로 유역의 유출과정과 모형의 프로그램 구성은 Fig. 2와 같다.

4. 적용 및 분석

본 연구에서 제시한 개념적 모형에 대하여 이론과 알고리즘을 실제 하천유역에 적용하여 유역 유출계산을 실시하였다. 적용대상유역은 비교적 정밀한, 강우, 수위 및 유량 등의 자료가 있는 IHP 대표유역인 낙동강 위천대표유역을 선정하였다. 유역유출계에서 홍수수문곡선의 유출성분은 응답시간을 달리하는 지표면유출, 중간유출 및 지하수유출로 구성이 되어 있으나 실제 하천에서 관측된 수문곡선은 이들 성분이 합성된 형태로 나타나므로 실제하천의 자료로부터 명확한 성분 분리점을 찾기가 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 위천유역의 6개 수위표 지점을 대상으로 5개의 호우사상에 대하여 수치 filter에 의한 성분분리를 수행하였으며, 중간유출과 기저유출에 대한 응답시간 T_{c1} 및 T_{c2} 를 구하기 위하여 관측 수문곡선의 감소부 유량에 대하여 기울기 α_1' 및 α_2' 를 추정토록 하였다.

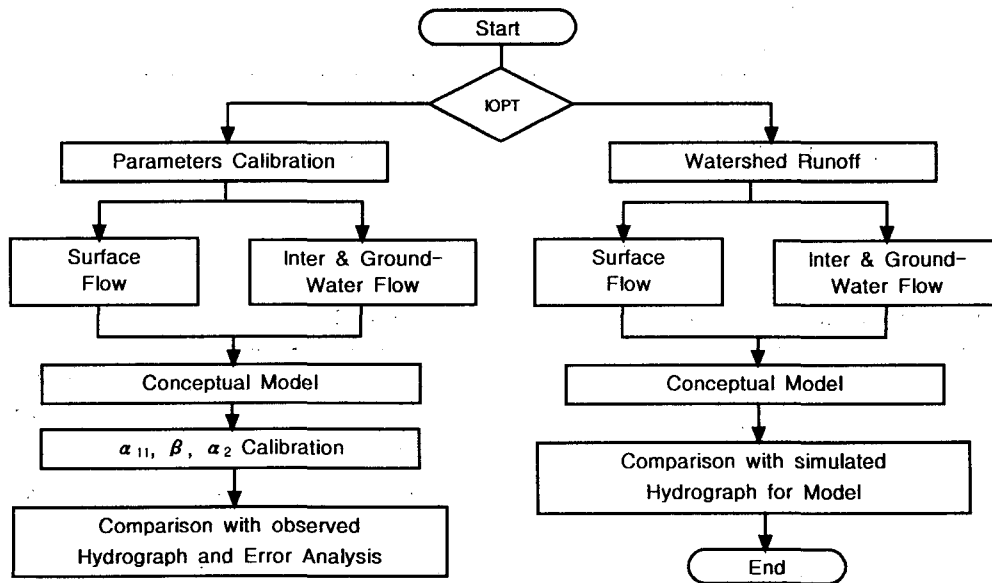


Fig. 2 Procedures of Parameters Calibration and Runoff Calculation

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_i의 함수로 표시하였다. 침투계수 β 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.

이상과 같이 모형의 민감도 분석에 의해서 기왕의 호우사상으로부터 분석한 결과 개념적 모형에 의한 모형매개변수의 초기치는 Table 1과 같았으며, 지표면과 부탱크의 유출계수 α_1 및 α_{11} 은 각각 0.257~0.300 및 0.495~0.585이고 지표하의 유출계수와 지표면의 침투계수인 α_{21} 및 β 는 각각 API_i의 지수식으로 나타낼 수 있었다. 한편 지표면과 지표하의 초기저류고 H₁₀ 및 H₂₀은 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.

Table 1 Initial values of parameter for conceptual model

| Basin | H ₁₀ (mm) | H ₂₀ (mm) | API (hr) | α_1 | α_{11} | $\beta_i = a \cdot API_i^b$ | | $\alpha_{21} = c \cdot API_i^d$ | |
|-------|-------------------------|-------------------------|-------------|------------|---------------|-----------------------------|------|---------------------------------|-------|
| | | | | | | a | b | c | d |
| No.1 | 0.0 | 50.0 | 72 | 0.300 | 0.585 | 0.933 | 0.95 | 0.998 | 0.006 |
| No.2 | 0.0 | 50.0 | 72 | 0.296 | 0.580 | 0.938 | 0.95 | 0.999 | 0.006 |
| No.3 | 0.0 | 50.0 | 72 | 0.292 | 0.540 | 0.943 | 0.95 | 0.999 | 0.006 |
| No.4 | 0.0 | 50.0 | 72 | 0.277 | 0.525 | 0.948 | 0.95 | 0.998 | 0.007 |
| No.5 | 0.0 | 50.0 | 72 | 0.288 | 0.495 | 0.948 | 0.95 | 0.998 | 0.007 |
| No.6 | 0.0 | 50.0 | 72 | 0.257 | 0.510 | 0.953 | 0.95 | 0.999 | 0.007 |

따라서 개념적 모형의 매개변수인 지표면유출 부탱크의 유출, 지표하유출 및 지표하로의 침투에 대한 각 유출 및 유출계수는 Table 1에 제시된 매개변수의 초기치를 사용하여 Table 2와 같이 결정토록 하였다.

Table 2 Final values of parameter for conceptual model

| Basin | α_1 | α_{11} | β | α_{21} | 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 |

지금까지 유역유출모형의 구조와 이론을 전개하고 이를 수행할 수 있는 알고리즘과 프로그램을 개발하여 유역을 종합적으로 해석하고 예측할 수 있도록 IHP 대표유역인 위천유역을 대상으로 개념적 모형을 이용한 홍수유출해석을 위하여 매개변수 추정과 개념적 모형에 적용시킨 결과에 대하여 적합성을 분석하였다.

적용지점은 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 1988. 7. 13, 1989. 7. 11, 1989. 8. 21 및 1997. 5. 12의 4개의 호우를 대상으로 홍수유출수문곡선을 계산하고 이를 실측 홍수유출수문곡선과 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

첫째, 홍수유출수문곡선의 비교에서 개념적 모형에 의하여 계산된 홍수유출수문곡선은 대체로 실측홍수유출수문곡선의 상승부, 첨두부 및 감소부에서 수문곡선의 형상을 잘 나타내고 있었다.

둘째, 홍수유출수문곡선의 첨두부의 적합성을 판정할 수 첨두유량과 첨두발생시간은 Table 3과 같았으며, 여기서 계산된 첨두유량은 대체로 실측치에 접근되어 있으며, 첨두발생시간 역시 대체로 1 시간 이내의 차이를 나타내고 있으므로 개념적 모형에 의한 홍수유출해석이 비교적 잘 수행되었음을 알 수 있었다.

Table 3 Results of peak discharge and peak time

| Storm | Peak Discharge(cms) | | | | | | Peak Time(hr) | | | | | |
|---------|---------------------|------------------|------------------|------------------|----------------|------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 | No.6 | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 | No.5 | No.6 |
| 88.7.13 | 782.1 (618.1) | 459.6 (360.9) | 281.0 (344.4) | 182.2 (192.5) | 43.3 (47.8) | 278.1 (303.8) | 14 (18) | 15 (16) | 15 (15) | 14 (14) | 14 (14) | 14 (15) |
| 89.7.11 | 192.7 (174.1) | 111.1 (113.1) | 59.2 (66.3) | 40.9 (36.5) | 10.9 (15.0) | 52.2 (58.4) | 29 (32) | 29 (29) | 29 (29) | 7 (7) | 8 (8) | 29 (29) |
| 89.8.21 | 396.2 (411.6) | 253.3 (265.9) | 145.1 (175.3) | 91.7 (113.6) | 23.2 (31.4) | 117.4 (131.8) | 34 (33) | 31 (32) | 31 (31) | 34 (27) | 29 (28) | 31 (31) |
| 97.5.12 | 256.1 (263.1) | 240.3 (254.2) | 128.6 (131.9) | 123.9 (116.8) | 56.0 (58.4) | 92.9 (84.8) | 13 (13) | 11 (10) | 10 (11) | 8 (8) | 9 (9) | 12 (12) |

() : Observed Value

5. 결 론

본 연구에서는 홍수예측을 위한 유출모형을 개발하기 위하여 유출모형을 개념적으로 표현할 수 있는 유출모형인 개념적 모형을 확정론적 관점에서 검토하여 모형화를 시도하였다. 복잡한 유역유출계의 유출과정을 개념화함으로써 모형의 구조를 간단히 하고 모형의 매개변수의 추정방법에 선행강우지수를 이용하여 최적의 유역유출모형을 확립토록 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 유역의 유출과정에 있어서 복잡한 유출계의 물리과정을 지표면과 지표하로 구분하여 단순화시킨 개념적 모형을 제시하였으며, 유역의 토양습윤상태를 API의 함수로 표현함으로써 강우-유출과정을 정밀하게 표현할 수 있도록 모형화 하였다.

2) 강우-유출과정에서 유역의 지체효과를 표현하기 위하여 개념적 모형에서 부탱크를 부착함으로써 유역지체에 대한 모형의 매개변수를 해석적으로 결정하는 방법을 확립할 수 있었다.

3) 본 연구에서 수행된 개념적 모형의 매개변수 추정은 모형의 RMS와 Bias를 기준으로 추정될 수 있도록 하였으므로, 다른 유역에서의 적용성이 높을 것으로 판단된다.

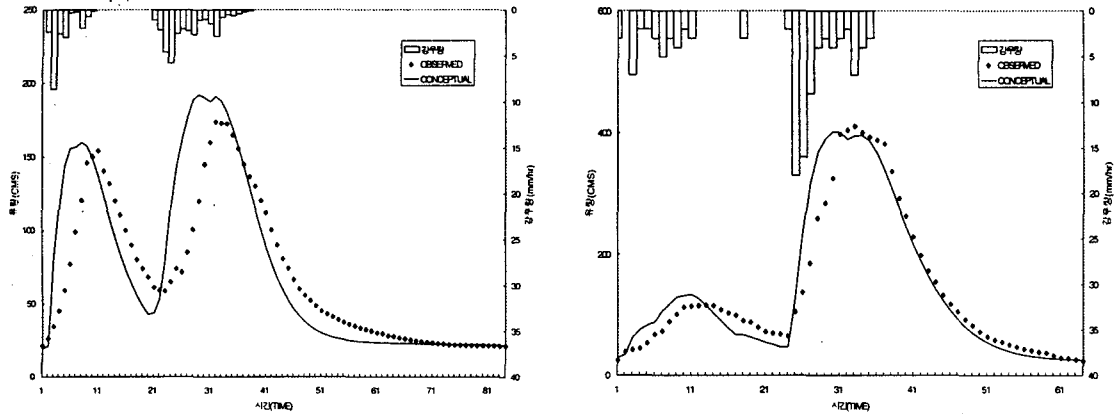


Fig. 3 Comparison of Hydrograph by the Conceptual Model(No.1)

참 고 문 헌

1. 지홍기, 1989, 개념적모델에 의한 하천유출예측, HBV 모델 및 Tank 모델을 중심으로, 영남대학교 공업기술연구소 연구보고, 제 17권, 제 1호.
2. 지홍기, 1989, 수치해법에 의한 홍수유출모델, 영남대학교 공업기술연구소 연구보고, 제 17권, 제 2호.
3. Bergstorm, S. & Forsman, 1973, Development of a Conceptual Deterministic Rainfall-Runoff Model, Nordic Hydrology, Vol. 4, No. 3.
4. Dawdy, D. R., & O'Donnell, T., 1965, Mathematical Models of Catchment Behaviour, J. of Hyd. Div., ASCE 91(HY4), pp. 123.
5. O'Donnell, T., 1960, Instantaneous Unit Hydrograph Derivation by Harmonic Analysis, IASH Pub., No. 51, pp. 546.
6. Wood, E. E.(ed.), 1980, Recent Developments in Real Time Forecasting, Control of Water Resource Systems, Oxford, Pergamon.