

토양 매개변수의 해석적 산정을 통한 강우-유출 모의

Rainfall-Runoff Simulation by Analytical Estimation of Soil Parameters

정우창*·황만하**·송재우***

Woo Chang Jeong, Ma Ha Hwang, Jai Woo Song

Abstract

This study was carried out to investigate the applicability of SAC-SMA model with parameters which were derived from analytical relationships proposed by Koren etc. (2000), with various data of soil properties in a basin. The studied basin is Yongdam dam basin and the daily runoff with 2003-year hydrological data was simulated. Simulated runoff results were compared with those measured at three check points(Chuchun, Donhyang and Yongdam) and analyzed through the statistical techniques such as VE(Volume Error), RMSE(Root Mean Squared Error) and CORR(Correlation). As a result of analyses, the good agreement was obtained between simulated and measured results.

Keywords: rainfall-runoff relationship, lumped model, SAC-SMA model, Yondam basin.

1. 서론

현재까지 많은 수문학자들은 개념적 강우-유출 모형(conceptual rainfall-runoff model)의 매개변수를 산정하는데 있어 최적화 기법을 이용하는 자동 보정 기법을 사용하고 있으나 이를 실행하는데 있어 사용자의 주관적인 판단이 상당한 비중을 차지하고 있는 실정이다. 일반적으로 강우-유출 모형의 매개변수 보정을 위한 기법들은 과거의 수문학적 자료를 필요로 한다. 이러한 과거 자료들은 양적인 측면과 질적인 측면에서 서로 다른 지역에 대해 매우 상이한 양상을 나타낼 수 있으며, 심지어 같은 유역 내에서도 다른 형태를 나타내기도 한다. 이러한 불일치는 부적절한 최적화 결과를 초래할 수 있다. 따라서 공간적으로 일관성이 있으며 물리적으로 보다 현실성이 있는 매개변수의 객관적인 산정 절차가 필요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 SAC-SMA 모형(SACramento Soil Moisture Accounting Model)에 사용되는 매개변수와 토양 특성 자료의 관계를 통해 매개변수의 초기 값을 산정할 수 있는 해석적인 방법이 Koren 등(2000)에 의해 제안되었다.

Koren 등(2000)에 의해 제안된 유역의 토양 특성을 이용하여 매개변수를 산정하는 방법은 유역의 수문 활동이 유지되는 동안 매개변수의 물리적인 특성을 공간적으로 일관성 있게 개선시킬 수 있으며 매개변수를 산정하는데 이용된 토양 특성으로부터 인접한 유역에 대해 매개변수를 산정하는 양적인 척도를 얻을 수 있다. 즉, 미계측 유역에 대한 매개변수 추정이 가능한 것이다. 또한 제한적인 보정법의 사용으로 인한 매개변수의 부적절성도 감소시킬 수 있다.

본 연구에서는 용담댐 유역을 대상 유역으로 선정하였으며, 기간은 2003년 일 년 동안의 일별 수문 자료를 이용하여 Koren 등(2000)이 제시한 방법을 통해 SAC-SMA 모형의 적용성을 검토하였다. 유역 특성에 대한 자료의 정확성을 높이기 위해 용담댐 유역을 총 13개의 소유역으로 분할하였으며, 각

* 한국수자원공사, 수자원연구원, 수자원환경연구소, 선임연구원 (E-mail: jeongwc@kwater.or.kr)
** 한국수자원공사, 수자원연구원, 수자원환경연구소, 수석연구원 (E-mail: mhhwang@kwater.or.kr)
*** 홍익대학교 건설·도시공학부 토목공학과 교수 (E-mail: jwsong@wow.hongik.ac.kr)

각의 소유역에 대한 토양 특성 자료를 이용하여 매개변수를 산정하고 모의하였으며, 그 결과를 용담댐 유역 내 3개 지점에서의 관측치와 비교·검토를 하였다.

2. SAC-SMA 모형의 개요

SAC-SMA 모형은 유역을 크게 투수영역과 불투수영역으로 분할하며, 투수 영역 내 토양층의 수분저류형태에 따라 상부 토양층(upper soil layer)과 하부 토양층(lower soil layer)으로 구분한다. 이러한 수분 저류형태의 분류는 강우가 발생하여 토양층 표면과 토양층 내에서 물이 연직 그리고 수평방향으로 이동하고 증발에는 유출을 형성하는 유역의 수문과정을 간단하고 효과적으로 나타내기 위한 것이다. 상부 토양층은 차단 저류(interception storage)를 나타내고 하부 토양층은 토양수분함량과 지하수 저류를 나타낸다. 토양층 내에서 수분의 저류는 수분의 이동이 자유로운 자유수(free water) 형태와 토사입자의 흡습력(hygroscopic force)에 의해 부착되어 있는 장력수(tension water) 형태로 이루어진다. SAC-SMA 모형의 물 분포 개념은 먼저 장력수 성분이 채워지고 나서 자유수 성분으로 공급되는 것이다. 장력수는 증발산에 의해서 소모되며, 하부 토양층의 지하수 저류형태는 장기간 동안 하천으로 서서히 배수되어 기저유출에 기여하는 주 자유수(primary free water)와 비교적 가까운 시기에 강우가 발생하여 신속히 하천으로 배수되어 기저유출에 기여하는 보조 자유수(supplemental free water)로 구분된다. 상부에서 하부로 수분이 이동하는 침투현상은 상부 토양층 내의 가용 자유수의 양과 하부 토양층 내의 수분 부족량의 함수로 그 정도가 결정된다.

3. 매개변수 산정 방법

Koren 등(2000)은 토양 특성과 SAC-SMA 모형에 사용되는 11개의 매개변수들과의 관계에 근거한 산정 방법을 제안하였다. SAC-SMA 모형은 모든 강우가 상부 토양층과 하부 토양층에 분배된다는 전제로 하는 전형적인 저류형식의 강우-유출모형이다. 각 층은 중력에 의해 지배되는 자유수와 증발산과 확산에 의해 지배되는 장력수를 포함한다. Koren 등(2000)은 장력수 저류용량은 가용 토양수(available soil water)에 관계되며, 자유수 저류용량은 중력수에 관계된다고 가정하였다. 가용 토양수와 중력수는 토양의 공극률(saturated moisture content, θ_{max}), 최대 토양 보수수량(field capacity, θ_{fld}) 그리고 시들점(wilting point, θ_{wlt})과 같은 토양특성으로부터 도출된다.

SAC-SMA 모형의 매개변수 산정은 대상 유역의 SCS유출곡선 지수인 CN값과 토성(soil texture)에 관한 자료의 분석으로부터 시작된다. 상부 토양층의 두께(Z_{up})는 CN값에 의한 초기 우수 손실 개념으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$Z_{up} = 5.08 \frac{\frac{1000}{CN} - 10}{\theta_{max} - \theta_{fld}} \quad (1)$$

식 (1)을 토대로 SAC-SMA 모형의 주요 매개변수의 산정은 다음과 같다.

$$UZTWM = (\theta_{fld} - \theta_{wlt}) Z_{up} \quad (2)$$

$$UZFWM = (\theta_{max} - \theta_{fld}) Z_{up} \quad (3)$$

$$LZTWM = (\theta_{fld} - \theta_{wlt})(Z_{max} - Z_{up}) \quad (4)$$

여기서 $UZTWM$ 은 상부 토양층 내의 장력수 최대 저류 용량(mm), $UZFWM$ 은 상부 토양층 내의 자유수 최대 저류용량(mm) 그리고 $LZTWM$ 은 하부 토양층 내의 장력수 최대 저류용량(mm)이다.

식 (4)의 Z_{max} 는 상부 토양층과 하부 토양층을 합한 총토양층의 깊이를 나타내며, 이는

토양특성 자료로부터 알 수 없으므로 본 연구에서는 Z_{max} 를 Z_{up} 보다 크다는 가정 하에서 점진적으로 증가시키면서 모의 일별 유출량과 관측 일별 유출량과의 비교를 통해 적절한 값을 산정하였다.

$$LZFSM = (\theta_{max} - \theta_{fld})(Z_{max} - Z_{up})(\theta_{wlt}/\theta_{max})^n \quad (5)$$

$$LZFPM = (\theta_{max} - \theta_{fld})(Z_{max} - Z_{up})[1 - \theta_{wlt}/\theta_{max}]^n \quad (6)$$

여기서 $LZFSM$ 은 하부 토양층 내의 보조 자유수 최대 저류용량(mm)이며, $LZFPM$ 은 하부 토양층 내의 주 자유수 최대 저류용량(mm)이다. Koren 등(2000)은 지수 n 을 주 자유수 저류용량과 보조 지하수 저류용량의 평균 비율이 1/3이 되도록 1.6을 사용하였다.

상부 토양층의 자유수 탈수계수인 UZK 는 자유수의 함수비 개념으로부터 경험적인 방법을 통해 다음과 같이 산정된다.

$$UZK = 1 - \left(\frac{\theta_{fld}}{\theta_{max}} \right)^n \quad (7)$$

Amstrong(1978)은 보조 지하수 탈수계수($LZSK$)를 결정하기 위해 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$(8)$$

주 지하수 탈수계수는 균질의 자유수면을 가진 대수층에 대한 Darcy 식을 근거로 하여 다음과 같은 식을 통해 결정한다(Dingman, 1993).

$$LZPK = 1 - \exp \left[- \frac{\pi^2 K_s (Z_{max} - Z_{up}) D_s^2 (1 + \beta) \Delta t}{\mu} \right] \quad (9)$$

여기서 K_s 는 투수계수, D_s 는 수계밀도(stream channel density) 그리고 μ 는 토양의 비산출량(specific yield)이다.

Linsley 등(1958)과 Armstrong(1978)은 비산출량(μ) 산정을 위해 토성(soil texture)를 사용하는 경험식을 제안하였다.

$$\mu = 3.5 (\theta_{max} - \theta_{fld})^{1.66} \quad (8)$$

최대 침투율인 $ZPERC$ 는 아래의 식을 통해 계산된다.

$$ZPERC = \frac{LZTWM + LZFSM(1 - LZSK)}{LZFSM \times LZDK + LZFPF \times LZPK} + \frac{LZFPM(1 - LZPK)}{LZFSM \times LZSK + LZFPF \times LZPK} \quad (10)$$

침투곡선의 형상을 정의하는 $REXP$ 는 토양 타입과 관련있으며, 1.0의 최소허용값은 하부 토양층 여유량의 감소로써 거의 일정한 침투의 감소를 나타내며, 이는 사질의 토양과 관련이 있다. 1.0보다 큰 값은 점토질의 토양과 같이 침투의 빠른 감소를 의미한다. $REXP$ 는 아래의 식을 통해 계산된다.

$$REXP = \left(\frac{\theta_{wlt}}{\theta_{wlt, sand}} - 0.001 \right)^{0.5} \quad (11)$$

$PFREE$ 는 모세관력을 벗어나기 위해 발생하는 균열 그리고 단층을 따라 흐르는 물과 관련있으며, 다음과 같이 계산된다.

$$PFREE = \left(\frac{\theta_{wlt}}{\theta_{max}} \right)^n \quad (12)$$

4. SAC-SMA 모형의 적용

본 연구에서는 비교적 수문자료의 신뢰성이 양호한 금강유역의 최상류에 위치하고 있는 용담댐 유역을 대상으로 유출모의를 수행하였다. 유역면적은 930 km^2 이며, 금강유역의 약 10%를 차지하고 있다(그림 1). 매개변수를 산정하는데 있어 그 정확도를 높이기 위해 용담댐 유역을 13개 소유역으로 분할 하였으며, 모의결과를 관측 유출량과 비교하기 위해 천천과 동향 그리고 용담댐과 같이 3개 제어지점의 관측유출량 자료를 이용하였다. 그림 2는 소유역별 CN값을 나타낸 것이며, 표 1은 소유역별 토양의 물리적인 특성치를 나타낸 것이다.

표 2는 SAC-SMA 모형에 사용되는 다양한 매개변수들을 소유역별로 산정한 값들을 나타낸 것이며, 소유역별 토양의 총깊이(Z_{max})를 점진적으로 변화시켜가면서 모의된 유출결과를 관측된 유출자료와의 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 유출체적오차(Volume Error, VE) 그리고 상관계수를 이용한 분석을 통해 최적의 Z_{max} 를 선정하였을 때의 값들에 해당된다. 그림 3과 4는 표 2에서 얻어진 매개변수값들을 이용하여 3개의 제어지점에서 2003년 일변 모의 유출량과 관측유출량을 비교한 것이다.

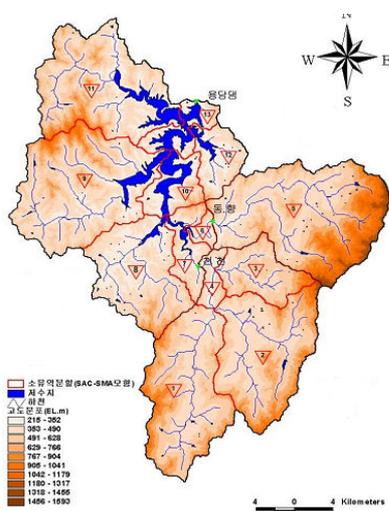


그림 1. 용담댐 유역도

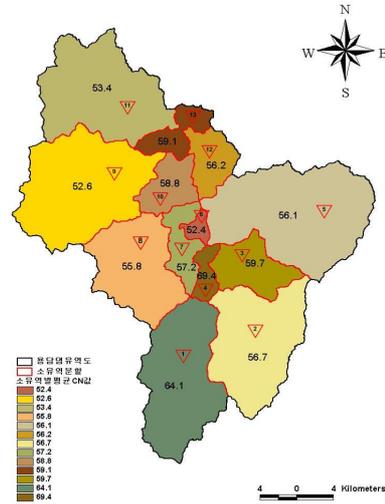


그림 2. 소유역별 CN값

표 1. 소유역별 토양의 물리적인 특성치

소유역	θ_{max}	θ_{fld}	θ_{wlt}	K_s (m/hr)
1	0.437	0.302	0.121	75.478
2	0.420	0.275	0.099	111.762
3	0.435	0.296	0.111	88.679
4	0.441	0.319	0.133	45.698
5	0.435	0.299	0.117	81.784
6	0.426	0.306	0.126	61.219
7	0.446	0.327	0.139	35.276
8	0.444	0.312	0.126	62.303
9	0.440	0.306	0.132	50.547
10	0.413	0.283	0.109	88.040
11	0.435	0.299	0.129	48.213
12	0.440	0.304	0.119	78.080
13	0.407	0.275	0.106	81.182

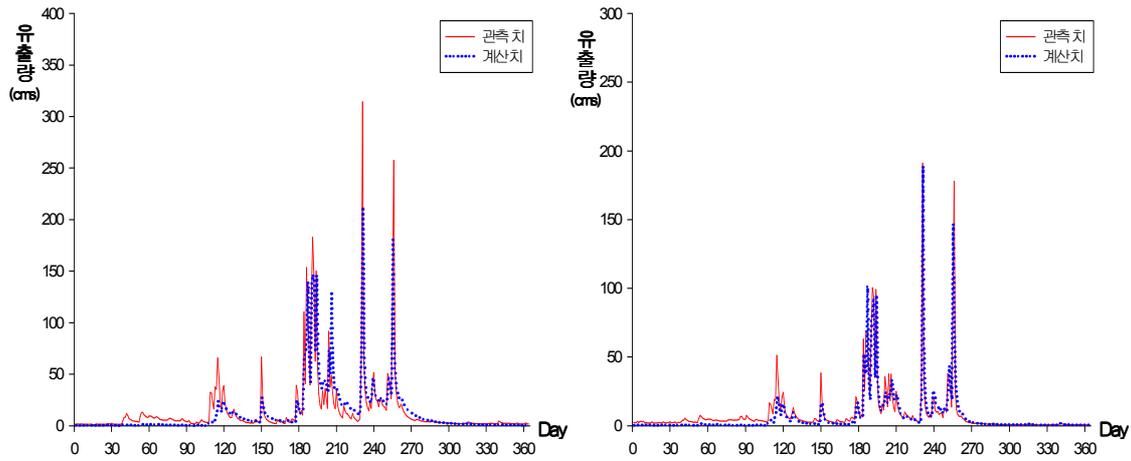


그림 3. 천천(좌)와 동향(우)지점 모의 유출량과 관측유출량의 비교 결과

표 2. 소유역별 주요 매개변수 산정값

소유역 매개변수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
UZTWM	38.15	47.09	45.64	34.15	53.20	69.22	60.05	56.70	59.44	47.64	55.41	53.86	45.01
UZFWM	28.45	38.79	34.29	22.40	39.75	46.15	38.01	40.24	45.78	35.59	44.33	39.59	35.16
LZTWM	171.7	211.9	205.4	153.7	159.6	276.9	240.2	226.8	237.8	190.6	221.7	215.4	180.0
LZFSM	31.99	41.15	38.58	25.21	29.84	46.20	37.97	40.27	45.75	35.63	44.36	39.60	35.18
LZFPM	96.04	133.4	115.7	75.58	89.42	138.4	114.1	120.7	137.4	106.8	133.0	118.8	105.5
UZK	0.330	0.350	0.320	0.310	0.330	0.314	0.309	0.322	0.342	0.325	0.348	0.324	0.332
LZSK	0.120	0.120	0.120	0.110	0.120	0.114	0.113	0.117	0.125	0.117	0.127	0.117	0.119
LZPK	0.030	0.056	0.008	0.004	0.006	0.010	0.005	0.026	0.006	0.010	0.005	0.009	0.009
ZPERC	46.93	29.72	64.78	78.84	67.01	67.96	79.34	48.31	63.97	62.33	63.03	64.00	60.97
REXP	1.570	1.570	1.620	1.590	1.620	1.618	1.618	1.618	1.619	1.558	1.603	1.620	1.485
PFREE	0.250	0.240	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250

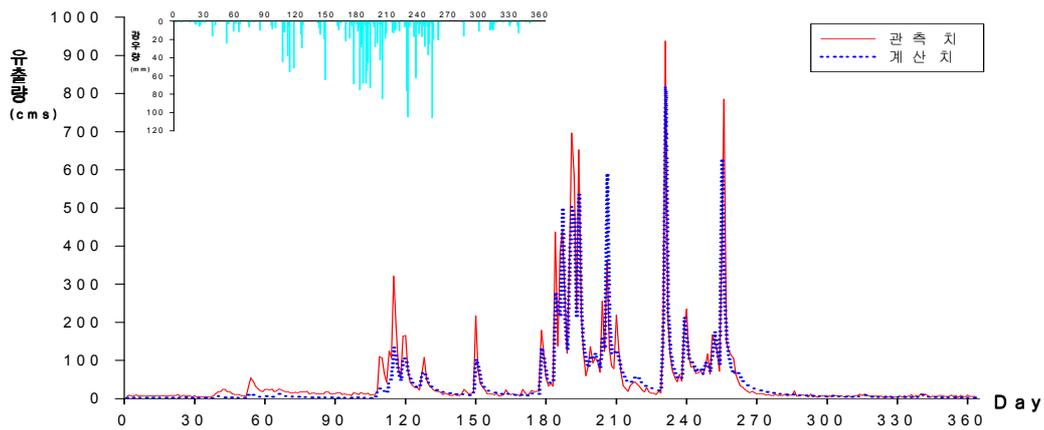


그림 4. 용담댐 지점에서의 모의 유출과 관측 유출과의 비교결과

5. 결론

본 연구에서는 유역의 물리적인 토양 특성 자료를 이용하여 Koren 등(2000)이 제시한 해석식을 통

해 SAC-SMA 모형의 매개변수를 산정하였으며, 이를 용담댐 유역에 대한 2003년 일 유출 모의에 적용하였다. 모의된 유출치는 매개변수를 보정하지 않았음에도 불구하고 관측 유출치와의 비교결과 비교적 좋은 일치(상관계수: 0.91)를 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제시된 대상 유역의 유출모의에 있어 유역의 물리적 토양 특성을 이용하여 매개변수를 산정하는 방법은 높은 정확도를 나타낼 수 있으며, 매개변수의 공간적뿐만 아니라 물리적 일관성에 대한 문제를 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Armstrong, B.L. (1978). Derivation of initial soil moisture accounting parameters from soil properties for the national weather service river forecast system, NOAA Technical Memorandum NWS HYDRO 37.
2. Dingman, S.L.. (1993). Physical Hydrology, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
3. Koren, V.L., Smith, M., Wang, D., Zhang Z. (2000). Use of soil property data in the derivation of conceptual rainfall-runoff model parameters, 15th Conference on Hydrology, AMS, January 9-14, Long Beach, CA.
4. Linsley, P.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H. (1958). Hydrology for Engineers, 3rd. Ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, NY.