토양수분과정을 고려한 GR4J 모형의 개량 및 국내유역 적용성 평가

Improvement of GR4J Model Applying Soil Moisture Accounting Process and Its Application in Korea Basin

임성수* · 유도근** · 김중훈***

Im, Sung Soo · Yoo, Do Guen · Kim, Joong Hoon

Abstract

Soil Moisture Accounting(SMA) process is an important topic in rainfall-runoff analysis because it determines the initial discharge in hydrological models. The SMA process is used in continuous NRCS method. However, it can not explain some events due to its assumption of initial rainfall losses. In this study, a modified SMA procedure is applied to solve the problem with the initial rainfall losses assumption of the NRCS method, and a modified GR4J model is developed using the modified SMA procedure. To verify the applicability of the proposed model, the results are compared with those from existing GR4J models in three different Korean basins. In this process, Harmony Search optimization algorithm is used to calibrate model parameters. And the calibrated parameters are verified to check the representability of the target basin. The developed model shows better results than existing models do and can improve accuracy of the rainfall-runoff model. Since the modified GR4J model shows outstanding efficiency while using less parameters, it is expected to be applied to many other Korean basins.

Key words : Soil moisture accounting, Parameter optimization, GR4J, Long term rainfall-runoff analysis

요 지

토양수분과정은 강우사상 발생 시 유역의 반응을 결정할 때 중요하게 고려되어야 할 과정으로 저류형 수문모형에 있어서 초기 유출량을 결정하는 역할을 한다. 이 같은 토양수분과정은 연속형 NRCS 방법에 주로 사용되었으나 초기강우손실 가정의 문제점 때문에 강우발생사상에 대하여 일부 사상은 설명할 수 없다. 본 연구에서는 NRCS 방법의 초기강우손실 가정의 문제점을 해결하고자 수정된 토양수분과정을 고려하여 모형을 개량하고 개량한 모형을 국내유역에 적용하여 적용성을 평가하였다. 수정된 토양수분과정 개선절차 적용에 있어서 집중형 장기강우유출모형인 GR4J(Ge'nies Rural a 4 parametres Journalier)를 선택하여 개선하였다. 이를 기존의 결과와 비교하여 개선된 절차가 결과에 어떤 영향을 미치는 지 살펴보았다. 이 과정에서 모형의 매개변수 추정은 최적화 알고리즘인 회음탐색법을 사용하였으며 매개변수 검증을 수행하여 각 매개변수가 유역의 특성을 대표하는 지 확인하였다. 토양수분과정 개선을 통해 더 향상된 강우-유출 값을 획득하였으며 연구 결과를 토대로 토양수분과정 개선을 통해 강우-유출 과정의 정확성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 유출기준저류고에 따른 토양수분과정 세분화는 유출량 추정의 정확성을 높이는 데 매우 중요한 역할을 하며 본 연구에서 사용한 GR4J 모형은 비교적 적은 매개변수를 사용하여 우수한 성능을 나타내기에 본 연구결과를 바탕으로 국내유역에서 적용하기에 적합한 모형으로 기대된다.

핵심용어 : 토양수분과정, 매개변수 최적화, GR4J, 장기유출해석

1. 서 론

강우-유출사상에 대한 해석과 이해는 수자원을 효율적으로 이용하기 위한 노력의 일환으로 수문학 분야에서 매우 중요한 연구주제이다. 유출해석에는 홍수해석을 위한 단기유출해석과 저수관리를 위한 장기유출해석이 있으며 이 중 장기유

출해석은 일 단위 이상의 연속적인 수문현상을 해석하는 방법으로 수자원의 효율적인 개발 및 관리, 이용에 있어서 중요하다. 이에 장기유출해석을 위한 수문모형이 국내외적으로 활발하게 개발 및 적용되고 있으며, 특히 국외의 경우 수문학 및 수리학적 이론에 바탕을 두고 사용자 편의성을 높인 장기유출해석 모형들이 개발되어 적극적으로 활용되고 있다.

*정회원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 석사과정

**고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 박사과정

***정회원 · 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 교수(교신저자)

그러나 국내의 장기 유출 모형에 관한 초기 연구에서는 국외에서 개발된 모형을 국내 수문환경을 고려하지 않고 적용하였으며, 일부에서 DAWAST (노재경, 1991)나 TPHM (김현준, 2001)와 같은 모형을 국내에서 개발하였으나, 농업용 저수지 설계와 같은 특정 목적을 위한 경우에만 적용되었다. 최근 들어 김현준 등 (2003)은 AnnAGNPS, ANSWERS2000, ARNO, CLEAMS, EPIC, GLEAMS, HBV96, HSPF, MIKE-SHE, MODHYDROLOGY, NAM, NWS-PC, PRMS, SFB, SLUPR, SSARR, SWAT, UBC, XINANJLANG 등 총 19 개의 유출 모형을 선정하여 각 모형에 대한 유용성 판단기준 목록을 구축하고 분석하였으며, 그 결과 이와 같은 국외 모형들이 국내에 적용되기 위해서는 국내 수문환경에 대한 고려가 필요하다고 주장하였다. 그 후 한국건설기술연구원 (2004)은 SWAT 모형을 다른 모형과의 연계와 수정 등을 통하여 한국형 장기유출모형인 SWAT-K를 개발하였으며, 최근 다양한 연구에 적용되고 있다.

이와 같이 국외에서 개발된 장기유출 모형의 국내 적용은 국내 수문환경에 적합한지 검증하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 Perrin et al. (2003)에 의하여 개발되어 최근 많은 적용(Moine et al., 2008; Payan et al., 2008; Oudin et al., 2008, 2010; Fenicia et al., 2011; Kavetski et al., 2011)을 통하여 우수성을 인정받고 있는 GR4J (Ge'nie Rural a 4 parametres Journalier) 강우 유출모형을 적절히 개량하고 개량 모형을 국내 유역에 적용하여 그 결과를 살펴 보고자 한다. 모형은 현재까지도 많은 개선부분이 필요하다고 알려진(노재경, 2003) 토양수분저류에 의한 유출부분을 개선하고 유효강우량 산정방법을 개량하였다. 현재 하천유역의 해석에 있어 유효강우량 산정방법으로는 여러 가지가 있으나 미 농무부(Natural Resource Conservation Service, 1986)에서 개발된 NRCS 방법이 가장 대표적이고 널리 사용되고 있다. 그러나 NRCS 방법은 초기강우손실 가정에 위배되는 일부 사상에서 이론적으로 설명할 수 없는 문제가 있으며, Michel 등(2005)은 NRCS 방법의 토양수분계산과정(Soil Moisture Accounting Procedure)에서 초기손실우량비 가정의 불합리성을 지적하고 새로운 토양수분계산절차를 제안하였다. 새로운 토양수분계산절차는 유출기준저류고를 제안하고 저류고의 초기 조건에 따라 유출량을 각기 다르게 계산하도록 제시하였다. 최종적으로 140개 유역을 대상으로 제안한 토양수분계산절차를 적용하여 유역특성별 선행토양함수식을 제시하였지만, 일반화된 선행토양함수식을 산출하기 위해 유출기준저류고를 범용적으로 각 유역에 적용하였으며 유역 개개의 특성은 고려하지 않았다. 따라서 보다 정확한 강우-유출 결과를 예측하기 위해서는 유역 특성을 반영한 토양수분절차를 적용할 필요성이 있다.

이에 본 연구에서는 유역별 특성을 고려하고자 Michel 등 (2005)이 제시한 토양수분절차에서 유출기준저류고를 유역의 특성을 반영하는 매개변수로 판단하여 매개변수 값에 따라 강우-유출해석결과에 어떤 영향을 주는지 확인하였으며, 강우-유출모형 적용대상으로 앞서 언급한 저류형 모형(reservoir model)인 GR4J(Ge'nie Rural a 4 parametres Journalier)

를 선정하여 토양수분저류고에 따라 유출량이 변화도록 개량하였다. 개량한 모형을 국내유역인 충주댐 유역과 횡성댐, 섬진강댐 유역에 적용하여 최종적으로 국내유역에서의 적용성을 판단하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 Michel Model의 토양수분과정

기존의 NRCS 방법에서는 유출량 Q 를 아래 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$Q = \begin{cases} \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} & \text{if } P > I_a \\ Q = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$I_z = \lambda S$$

여기서, Q 는 직접유출량(mm), P 는 강수량(mm), I_a 는 초기손실우량(mm), λ 는 최대잠재보유수량(mm), S 는 초기손실우량계수로 일반화된 NRCS 방법에서는 0.2로 가정한다. 다수의 유역에서의 경험식을 바탕으로 NRCS 방법에서는 최대잠재보유수량(S)과 CN(Curve Number)의 관계식을 식 (2)와 같이 계산한다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (2)$$

그러나 위와 같은 NRCS 방법은 시간독립적(time-independent)인 공식으로 강우사상의 종료 후 유출량 값만을 산정한다. Michel et al. (2005)은 NRCS 방법을 연속적인 강우-유출사상에 적용하기 위하여 직접유출량으로부터 아래 식 (3)과 같이 시간당 유출량(q)을 시간당 강수량(p)과 토양수분저류량(V), 유역의 비고정적인자인 초기보유수량, 초기손실우량, 최대잠재보유수량으로 표기하여 시간종속적(time-dependent)인 유출량으로 환산하였다.

$$V = V_0 + P - Q$$

$$V = V_0 + \frac{(S+I_a)P - I_a^2}{P+S-I_a} \quad (3)$$

$$q = f(p, V, \text{intrinsic basin parameters})$$

위 제안한 인자들을 이용하여 시간당 유출량 산정식을 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$q = p \frac{V - (V_0 + I_a)}{S} \left(2 - \frac{V - (V_0 + I_a)}{S} \right) \quad \text{if } V > V_0 + I_a$$

$$q = 0 \quad \text{otherwise} \quad (4)$$

여기서, V_0 는 초기보유수량이며 토양수분저류량과 초기보유수량, 초기손실우량간의 관계에 따라 유출량이 두 가지 경우로 계산된다. 초기보유수량(V_0)과 초기손실우량(I_a)의 합을 새로운 매개변수인 S_a 로 고려하면 위 식(4)은 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

그림 1. NRCS 방법의 초기유출 가정

그림 2. NRCS 방법의 문제점

$$q = p \frac{V - S_a}{S} \left(2 - \frac{V - S_a}{S} \right) \quad \text{if } V > S_a \quad (5)$$

$$q = 0 \quad \text{otherwise}$$

위 식 (5)을 다시 식 (1)의 NRCS 방법으로 적용하면 아래와 같다.

$$Q = \frac{(P + V_0 - S_a)^2}{P + V_0 - S_a + S} \quad \text{if } P + V_0 > S_a \quad (6)$$

$$Q = 0 \quad \text{otherwise}$$

여기서, Q 는 직접유출량, P 는 강수량, I_a 는 초기손실수량, S 는 최대잠재보유수량, V_0 는 초기보유수량, S_a 는 초기손실수량

인 I_a 와 초기보유수량 V_0 의 합으로 나타낸 새로운 매개변수이다. 그림 1을 보면 S_a 에 따라 유출량의 값이 달라지는 것을 볼 수 있다. 그러나 기존의 NRCS 방법의 경우 다음과 같은 상황을 설명할 수 없는 문제점이 있다. 그림 2의 예 1)을 보면 S_a 가 V_0 보다 크고 S 가 S_a 보다 매우 작은 상황에선 $S_a = I_a + V_0$ 에 의하여 I_a 가 S 보다 큰 값을 갖게 되어 초기가정에 위배되게 된다. 즉 토양수분저류량이 극히 낮은 상황에서 강우가 발생 하였을 경우 보유수량보다 초기강우손실 가정에 의해 발생하는 손실량이 더 큰 문제가 발생한다. 예 2)를 보면 만약 토양수분저류량이 가득 찬 상태에서는 초기손실수량이 발생할 수 없는 상황이 되기에 초기가정에 위배되게 된다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 Michel et al. (2005)은 NRCS 방법을 개량한 Michel Model을 제안하였다. Michel Model은 그림 3과 같이 토양보유수량에 따라 유출의 형상을 3가지로 나누어 설명하였다.

2.2 GR4J 강우 유출 모형

GR4J 모형은 저류지 개념(reservoir concept)을 이용한 집중형 강우-유출모형이다. Duan et al. (2006)이 MOPEX (The Model Parameter Estimation Experiment)에서 수행한 결과를 보면 GR4J 모형의 결과가 비교적 우수한 것으로 검증되었다. 또한 GR4J 모형의 경우 다른 모형에 비하여 비교적 적은 4개의 매개변수를 사용하여 적용이 용이하다는 장점을 지닌다. 그러나 국내에는 TANK 모형(김철과 김석규, 2004), TOPMODEL(한건연 등, 2004)을 적용한 사례들은 있었으나 GR4J를 시험한 연구사례가 없기에 국외에서 우수한 성능을 나타낸 GR4J 모형을 국내유역에 적용해보고자 하였다.

GR4J 모형은 X1부터 X4까지 4개의 매개변수가 적용되며 차단(interception), 토양수분저류(store), 홍수추적(routing store)의 3단계 과정을 거쳐 강우-유출과정을 계산한다(그림 4). GR4J모형은 연속적 일단위 계산을 수행하며 시간변수를 제외한 모든 단위는 mm로 표현된다. GR4J 모형의

그림 3. Michel Model의 초기유출 가정 (Michel 등, 2005)

그림 4. GR4J모형의 구조(Perrin 등, 2003)

표 1. GR4J모형의 매개변수 특성

매개변수	특성
X1	저류량에 대한 물리적 변수 (mm)
X2	기저유량 변수 (mm)
X3	일단위의 홍수추적 저류량 (mm)
X4	우상주랑도의 시간변수 (day)

매개변수 특성은 표 1와 같다.

2.1.1 강우자료와 증발산량

GR4J 모형에서의 강우와 증발량 자료는 획득된 자료로부터 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$P_n = P - E \text{ and } E_n = 0, P \geq E \quad (7)$$

$$\text{otherwise } P_n = 0, E_n = E - P \quad (8)$$

여기서 P 는 강우량(mm), P_n 은 순강우량(mm), E 는 증발산량(mm), E_n 은 순증발산량(mm)이다.

2.1.2 토양수분저류(Soil Moisture Accounting store)

위 과정에서 P_n 이 0이 아닌 상황에서, P_n 의 일부인 P_s 는 토양수분저류고(S)에 따라 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)}{1 + \frac{S}{X_1} \tanh\left(\frac{P_n}{X_1}\right)} \quad (9)$$

여기서 X_1 은 최대토양수분저류량(mm)이다. E_n 이 0이 아니라

면 토양수분저류량에 따라 증발량은 다음과 같이 산정된다.

$$E_s = \frac{S \left(2 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \tanh\left(\frac{E_n}{X_1}\right)} \quad (10)$$

위 식 (3)과 (4)에 의하여 토양수분저류량은 식(11)와 같이 나타낸다.

$$S = S - E_s + P_s \quad (11)$$

여기서 S 는 토양수분저류량(mm)로 X_1 을 초과할 수 없는 값이며, 토양수분저류량에서 침투량인 $Perc$ 는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$Perc = S \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{4S}{9X_1} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (12)$$

$Perc$ 는 S 를 초과할 수 없으며, 토양수분 저류량은 아래와 같이 결정된다.

$$S = S - Perc \quad (13)$$

2.1.3 단위유량도를 이용한 선형홍수추적

선형홍수추적량(P_r)은 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$P_r = Perc + (P_n - P_s) \quad (14)$$

여기서 선형홍수추적량의 90%는 단위유량도 $UH1$, 10%는 단위유량도 $UH2$ 로 홍수추적과정을 적용한다. 단위유량도 $UH1$ 과 $UH2$ 는 시간변수인 $X4$ (days)에 따라 결정된다. 두 단위유량도는 S-Curve인 $SH1$ 과 $SH2$ 에 의하여 산정된다. $SH1$ 은 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$SH1(t) = 0, t \leq 0 \quad (15)$$

$$SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{5/2}, 0 < t < X_4 \quad (16)$$

$$SH1(t) = 1, t \geq X_4 \quad (17)$$

$SH2$ 는 아래와 같은 식으로 산정된다.

$$SH2(t) = 0, t \leq 0 \quad (18)$$

$$SH2(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{X_4}\right)^{5/2}, 0 < t < X_4 \quad (19)$$

$$SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{5/2}, X_4 < t < 2X_4 \quad (20)$$

$$SH2(t) = 1, t \geq 2X_4 \quad (21)$$

위 산정된 S-Curve로부터 단위유량도는 아래와 같이 산정

된다.

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j-1) \quad (22)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j-1) \quad (23)$$

2.1.4 기저유량 산정과정

GR4J 모형은 홍수추적저류량($X3$)과 기저유량변수($X2$)에 의하여 기저유량 변환값(F)은 아래 식 (24)와 같이 산정된다.

$$F = X2 \left(\frac{R}{X3} \right)^{7/2} \quad (24)$$

여기서 R 은 홍수추적저류지의 수위(mm)이다.

2.1.5 비선형 홍수추적

R 은 $UH1$ 으로부터 산정된 유량인 $Q9$ 과 기저유량 변환값으로부터 아래 식 (25)와 같이 산정된다.

$$R = \max(0; R + Q9 + F) \quad (25)$$

기저유량으로부터 산정된 유출량(Q_r)은 아래 식 (26)와 같이 산정된다.

$$Q_r = R \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{X3} \right)^4 \right]^{-1/4} \right\} \quad (26)$$

따라서 홍수추적저류지의 수위(R)은 아래와 같다.

$$R = R - Q_r \quad (27)$$

2.1.6 최종유출량 산정

$UH2$ 를 적용하여 산정된 유량인 $Q1$ 과 F 의 합으로 지표유출량 $Q1$ 은 식 (28)와 같이 산정된다.

$$Q_d = \max(0; Q1 + F) \quad (28)$$

최종유출량은 Q_r 과 Q_d 의 합으로 아래와 같다.

$$Q = Q_r + Q_d \quad (29)$$

2.3 토양수분과정을 고려한 GR4J 모형의 개량

본 연구에서는 Michel 등(2005)이 제안한 새로운 토양수분 계산절차를 일단위 집중형 모형(daily-lumped model)인 GR4J 모형에 적용하여 토양수분 보유량에 따른 강우-유출(rainfall-runoff process)을 평가하였다. 토양수분계산절차를 적용할 때 유출기준저류고(S_a)를 새로운 매개변수로 판단하여 기존 GR4J 모형의 4개 매개변수에 추가로 1개 매개변수를 적용하여 모형화하였다. 해당 과정에서 개량한 부분은 토양수분저류(production store)과정으로 관련인자는 저류량에 대한 물리적 변수인 $X1$ (mm)이다. $X1$ 은 유역특성에 따라 변하는 매개변수로 기존의 GR4J모형 연산과정을 개량하여 토양수분 계산절차를 적용하였다.

$$\text{for } S_{t-1} + P_t - PE_t \leq S_a, P_{s_t} = P_{n_t} \quad (30)$$

$$\text{for } S_{t-1} + P_t - PE_t > S_a$$

$$\text{for } P_{n_t} > 0$$

$$P_{s_t} = \frac{X1 \left(1 - \left(\frac{S_t}{X1} \right)^2 \right) \tanh \left(\frac{P_{n_t}}{X1} \right)}{1 + \frac{S_t}{X1} \tanh \left(\frac{P_{n_t}}{X1} \right)} \quad (31)$$

$$\text{otherwise } P_{s_t} = 0$$

여기서 PE 는 잠재증발산량 (mm), P_n 은 순강우량 (mm), P_s 는 순강우량 중 토양수분저류량 (mm), P 는 강우량 (mm), E_n 은 순증발산량 (mm), $X1$ 은 최대토양수분저류고 (mm), S 는 토양수분저류고 (mm), E_s 는 토양수분저류고로부터의 증발산량 (mm), S_a 는 유출기준저류고 (mm)이다. $X1$ 은 유출기준저류고(S_a)와 토양수분저류고(S)의 합으로 나타낼 수 있다.

Michel Model에서 제안한 새로운 매개변수인 S_a 를 강우-유출량의 기준량으로 고려하면 식 (30)과 같이 기존토양수분보유량 S_{t-1} 과 강우량 P_t 의 합과 잠재증발산량 PE_t 의 차가 유출기준저류고 S_a 보다 작거나 같으면 순강우량 P_n 은 토양수분저류량 P_s 로 환산된다. 기존토양수분보유량 S_{t-1} 과 강우량 P_t 의 합과 잠재증발산량 PE_t 의 차가 유출기준저류고 S_a 보다 크면 토양수분저류량이 발생하고 순강우량 P_n 이 0보다 클 경우 식 (31)과 같이 토양수분저류량이 계산되며 순강우량이 발생하지 않으면 토양수분저류량은 0으로 계산된다. 본 개량식을 통해 기존의 GR4J 강우-유출 계산식을 유출기준저류고(S_a)에 따라 세분화하여 적용할 수 있게 된다.

2.4 매개변수 최적화 기법

본 연구에서는 유출기준저류고(S_a)를 유역의 특성을 반영하는 매개변수로 고려하여 토양수분절차를 계산하게 된다. 이때 유역의 토양수분저류고(S)는 입력인자로 반영되며 토양수분저류고와 유출기준저류고의 비의 값을 매개변수로 취하여 총 5개의 매개변수 추정을 실시하였다. 매개변수의 제약조건 범위로는 Perrin 등(2003)이 429개 유역에 적용한 결과의 90% 범위로 결정하였다. 추가로 S 와 S_a 의 비의 범위는 Michel 등(2005)가 140개 유역에 적용한 값으로 결정하였다. 개량된 모형에 적용된 매개변수 범위는 표 2와 같다.

매개변수 추정방법으로 사용된 최적화 기법은 Geem 등(2001)이 제안한 화음탐색법(Harmony Search)으로 음악에서 최적화 음에 해당하는 것이 공학에서는 최적해라고 보고 해

표 2. 개량한 모형의 매개변수의 범위 (Perrin 등, 2003; Michel 등, 2005)

매개변수	구 간
$X1$ (mm)	31.25 – 1268.75
$X2$ (mm)	-6 – 4
$X3$ (mm)	2.5 – 317.5
$X4$ (day)	0.9875 – 3.0125
S_a/S (-)	0 – 0.75

를 찾아가는 기법이다. 일반적으로 발견적 탐색법은 자연현상의 관찰을 통해 만들어 졌지만, 화음탐색법은 화음이라는 인공적인 현상으로부터 만들어진 알고리즘이다. 여러 가지 악기가 소리를 내 어떠한 화음을 만들 때, 각 악기에서 나오는 여러 소리는 하나의 화음을 생성하게 된다. 이렇게 만들어지는 화음 중에는 잘 어울리는 화음이 있을 수도 있고, 불협화음을 나타내는 경우도 있을 것이다. 결국 연습과정을 통해 불협화음은 점차 사라지게 되고, 화음으로서 적합한 화음(local optimum) 중에서도 미적으로 가장 아름다운 화음(global optimum)이 있을 것이다. 즉, 화음탐색법은 연습과정을 통해 찾아지는 최적 화음이 찾고자 하는 최적해라 보는 기법이다. 화음탐색법은 HM(Harmony Memory), HMCR(Harmony Memory Considering Rate), PAR(Pitch Adjusting Rate)을 주요 인자로 하여 최적해를 탐색한다. 본 연구에서는 $X_1 \sim X_4$, S 와 S_a 의 비까지 5개의 매개변수를 HM으로 보고 HMCR과 PAR을 통한 반복적 해찾기로 유역특성에 맞는 최적해를 산출하였다.

최적화 기법의 목적함수는 Nash-Sutcliffe 계수(Nash와 Sutcliffe, 1970)를 사용하였다. Nash-Sutcliffe 계수는 수문모형의 평가에 사용되는 척도로 모형의 정확도를 정량적으로 표현한다. Nash-Sutcliffe 계수는 관측유량과 모의유량의 차이로 계산되어 본 연구에서는 목적함수를 아래 식과 같이 적용하였다.

Objective Function = Maximize $N_a(\sqrt{Q})$

$$N_a(\sqrt{Q}) = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{cal,i}})^2}{\sum_{i=1}^n (\sqrt{Q_{obs,i}} - \sqrt{Q_{obs,i}})^2} \right) \quad (32)$$

여기서, $Q_{obs,i}$ 는 관측 유량, $Q_{cal,i}$ 는 모의유량, N_a 는 Nash-Sutcliffe 계수함수이다. Nash-Sutcliffe 계수는 -∞부터 1까지의 범위를 갖으며 1의 Nash-Sutcliffe 계수값은 모의결과와 관측결과가 완벽하게 일치함을 뜻한다.

3. 모형 적용 및 결과

3.1 시험유역 적용

본 연구의 적합성을 평가하기 위해서 토양수분과정을 고려하여 개량한 GR4J 모형을 충주댐 유역에 적용하였다. 이는 댐 지점에 유역의 신뢰할만한 유출량 자료가 있어서(김남원 등, 2007) 모의결과를 평가하기에 용이하다고 판단하였다. 그림 5와 같이 한국 중부지방에 위치한 충주댐유역은 면적이 6,648 km², 둘레는 471.6 km, 유역의 평균고도는 609.1 m, 유역 평균경사는 24.1 %이다. 사용한 강우-유출 자료는 국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS)에서 추출한 1987년 1월 1일부터 2007년 12월 31일까지 20년 기간의 자료를 사용했다.

20년간의 관측자료를 사용하여 매개변수 최적화를 시행한 결과 약 5,000번의 시산 후 일정한 목적함수 값에 수렴하는

그림 5. 충주댐유역

그림 6. 최적화 시산에 따른 목적함수값

표 3. 최적화 결과 비교

적용 모형	목적함수 값(%)
제안 모형(개량된 GR4J)	88.3
기존 모형(GR4J)	86.6

것을 확인하였다(그림 6).

개량한 모형에서 새로운 매개변수로 고려한 S 와 S_a 의 비가 유역의 유출특성을 나타낼 수 있는 매개변수인지 확인하기 위해 기존 GR4J 모형의 정확도와 비교하였다. 개량된 GR4J 모형이 약 1.7% 향상된 결과를 나타내었으며(표 3), 이 같은 결과는 S 와 S_a 의 비를 새로운 매개변수로 고려하는 과정이 유출량에 영향을 주는 것을 확인하였다.

최적화한 각각의 매개변수 값은 두 모형에 동일하게 적용되었고 값은 표 4와 같다. 개량한 GR4J 모형의 경우 기존 모형의 매개변수값과 차이를 나타내며 이는 새로운 매개변수인 유출기준저류고(S_a)가 모형의 연산에 영향을 주는 결과로 볼 수 있다. 최적화된 매개변수를 모형에 적용하여 20년간

표 4. 최적화 결과값의 매개변수

적용 모형	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (days)	S_a/S (-)
개량한 GR4J (5개 매개변수)	22.8	-0.8	160.8	1.4	0.041
GR4J (4개 매개변수)	140.38	0.63	71.90	2.01	-

그림 7. 최적화된 매개변수를 적용한 강우-유출 모의결과

표 5. 2년 단위 강우-유출 자료 결과

모의년수	X1 (mm)	X2 (mm)	X3 (mm)	X4 (day)	S_a/S (-)	목적함수 값 (%)
1998년-1999년	22.8	-0.8	160.8	1.4	0.041	93.6
2003년-2004년						89.4

강우-유출발생을 실측값과 모의값, 강우량으로 구분한 후 도식하여 그림 7과 같이 나타냈다.

20년 간 강우-유출자료를 모의한 매개변수의 유역대표성을 확인하고자 충주댐유역의 2년 단위 강우-유출 자료를 획득하여 검증하였다. 적용한 매개변수는 20년 자료 적용치와 동일한 값을 사용하였으며 총 2개의 강우-유출 사상을 시험하였다.

2년 강우-유출 자료들의 결과는 위의 표 5와 같다. 목적함수의 값은 89.4%, 93.6%로 산출되었다. 강우-유출 사상별로 결과의 차이는 있지만 20년 자료의 88.3%와 비교해볼 시 대체적으로 양호한 결과를 나타냈다. 이 같은 결과를 바탕으로 20년 자료의 매개변수 최적화 과정에 이상이 없으며 모형의 적용성이 양호하다고 판단된다.

3.2 추가유역 모의

국내유역에서 개량된 GR4J 모형의 적용성을 판단하기 위해 기존의 충주댐 유역에 추가로 2개 유역을 시험하였다. 추가 유역은 횡성댐, 섬진강댐 유역으로 각각 2년의 강우-유출

자료를 획득하여 개량한 GR4J 모형을 적용하였다. 강우자료의 연한은 2004년부터 2006년까지의 기간 중 결측치가 없는 2년 단위의 자료를 사용하였다. 각각의 관측자료를 이용하여 회음탐색법을 통한 최적화로 매개변수를 추정하고 목적함수 값을 산출하였다. 산출결과는 대체로 모든 유역에서 양호한 결과를 나타내고 있으며 각각의 매개변수는 표 6과 같다.

4. 결 론

본 연구에서는 토양수분과정을 고려한 강우-유출사상 모의를 목적으로 유출기준저류고(S_a)를 반영한 모형을 제안하였다. 토양수분과정의 개량은 모형의 정확도를 향상시키는 목적도 있지만 근본적으로 기존의 NRCS 방법을 이용한 강우-유출과정 해석에 있어서 일부 설명되지 않는 사상까지 적용하고자 하는 목적이 있다. 보다 일반화된 과정적용을 위해 유출기준저류고를 도입하여 초기 강우-유출 발생과정을 세분화하였으며 실제 유역에 적용하고자 집중형 모형을 선정하여 적용하였다. 즉 초기 토양수분과정을 개량한 모형을 기존의 모형 정확도와 비교하여 제안한 모형의 적합성을 판단해보고자 하였다.

모형의 개량은 저류형 모형(reservoir model)인 GR4J 모형의 토양수분저류(production store) 과정에서 유출기준저류고(S_a)를 고려하여 개선하였고 이 과정에서 유출기준저류고, 강우량, 증발산량 간의 관계를 통해 유출과정을 세분화 하였다. 다음으로 유출기준저류고(S_a)를 유역의 고유 특성을 갖는 매개변수로 판단하여 최적화 과정을 통해 매개변수를 추정하였으며 추정된 매개변수 값의 검증을 통해 유출기준저류고()를 유역의 고유 매개변수로 고려할 수 있음을 알 수 있었다. 개량한 모형과 기존 모형의 목적함수 값을 비교하였을 때 약 1.7 %의 결과값 향상을 획득하였고 추가유역 모의 결과를 통해 토양수분과정의 고려가 강우-유출 예측 정확성에 영향을 주는 것을 확인하였다. 그러나 GR4J 모형과 개량한 GR4J 모형의 매개변수를 비교하면 비교적 큰 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이러한 점은 두 모형이 매개변수의 수가 차이가 있으며, 각 매개변수들이 모형내에서 서로 상호작용하여 강우-유출과정을 모의하기 때문에 나타나는 종합적 특징이라고 판단된다.

유출기준저류고(S_a)에 따른 토양수분과정 세분화는 유출량 추정의 정확성을 높이고 과정의 일반화에 매우 중요한 역할을 한다. 또한 본 연구에서 사용한 GR4J 모형은 비교적 적은 매개변수를 사용하여 우수한 성능을 나타내기에 본 연구 결과를 바탕으로 국내유역에서 적용하기에 적합한 모형으로 기대되며, 토양수분과정 세분화를 통한 개선된 GR4J 모형은 유출기준저류고(S_a)를 유역 고유 매개변수로 고려한 만큼 향

표 6. 추가모의 결과

유역	강우자료(Year)	목적함수값(%)	X1(mm)	X2(mm)	X3(mm)	X4(day)	S_a/S (-)
충주댐	2005-2006	88.3	22.8	-0.70	160.8	1.40	0.041
횡성댐	2004-2005	94.1	87.7	-2.93	114.0	1.09	0.415
섬진강댐	2004-2005	85.3	77.6	1.27	39.0	1.08	0.137

후 유역특성과 상관성 분석을 수행하여 일반화된 관계를 제시할 수 있다면 미세측유역에서 적용에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발 사업인 ‘내배수 홍수방재 시설물의 성능평가 및 최적 운영기술 개발 [NEMA-자연-2011-42]’ 과제의 일환으로 이루어 졌습니다. 이에 감사 드립니다.

참고문헌

국가수자원관리 종합정보시스템(WAMIS), <http://www.wamis.go.kr/>.
 김남원, 이병주, 이정은 (2007) 공간모의유량을 이용한 갈수량 거동 특성에 관한 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27호, 제4B권, pp. 431-440.
 김철, 김석규 (2004) 지형자료를 이용한 TANK 모형의 매개변수 최적화, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제6B호, pp. 553-560.
 김현준 (2001) 2매개변수 쌍곡선형 일유출 모형의 개발, 박사학위논문, 서울대학교.
 김현준, 장철희, 김남원 (2003) 장기 강우-유출 모형의 비교, **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권, 제3호, pp. 49-57.
 노재경 (1991) 토양수분저류에 의한 유역 일 유출량 모형, 박사학위논문, 서울대학교.
 노재경 (2003) 용수 수요를 고려한 DAWAST 모형의 적용성 평가, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 1097-1107.
 한건연, 이창희, 이재영, 이수현 (2004) 지형지수 산정을 통한 수문모형에서의 적정 해상도 도출, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제6B호, pp. 521-618.
 한국건설기술연구원 (2004) 지표수 수문성분 해석기술 개발, 과학기술부.
 Duan, Q., Schaake, J., Andréassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H.V., Gusev, Y.M., Habets, F., Hall, A., Hay, L., Hogue, T., Huang, M., Leavesley, G., Liang, X., Nasonova, O.N., Noilhan, J., Oudin, L., Sorooshian, S., Wagener, T., and Wood, E.F. (2006) Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops, *Journal of Hydrology*, Vol. 320, No. 1-2, pp. 3-17.

Fenicia F., Kavetski D., and Savenije H.G. (2011) Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 1. Motivation and theoretical development, *Water Resources Research*, Vol. 47, pp. 1-13.
 Geem Z.W., Kim J.H., and Loganathan, G.V. (2001) A new heuristic optimization algorithm: harmony search, *Simulation*, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68.
 Kavetski D., and Fenicia F. (2011) Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights, *Water Resources Research*, Vol. 47, pp. 1-19.
 Michel, C., Andréassian, V., and Perrin C. (2005) Soil Conservation Service Curve Number method : How to mend a wrong soil moisture accounting procedure?, *Water Resources Research*, Vol. 41, pp. 1-6.
 Moine N.L., Andréassian V., and Mathevet T. (2008) Confronting surface- and groundwater balances on the La Rochefoucauld-Touvre karstic system (Charente, France), *Water Resources Research*, Vol. 44, pp. 1-10.
 Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
 Natural States Department of Agriculture (1986), *Urban hydrology for small watershed*, Technical Release 55(TR-55).
 Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C. (2008) Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments, *Water Resources Research*, Vol. 44, pp. 1-15.
 Oudin L., Kay, A., Andréassian, V., and Perrin C. (2010) Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar?, *Water Resources Research*, Vol. 46, pp. 1-15.
 Payan J.L., Perrin C., Andréassian V., and Michel C. (2008) How can man-made water reservoirs be accounted for in a lumped rainfall-runoff model?, *Water Resources Research*, Vol. 44, pp. 1-11.
 Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2003) Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation, *Journal of Hydrology*, Vol. 279, No. 1-4, pp. 275-289.

◎ 논문접수일 : 2012년 04월 16일
 ◎ 심사의뢰일 : 2012년 04월 19일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 05월 25일