유전자 알고리즘을 적용한 혼합유출모형의 개발

Development of Combination Runoff Model Applied by Genetic Algorithm

심 석 구* / 구 보 영** / 안 태 진***

Shim, Seok Ku / Koo, Bo Young / Ahn, Tae Jin

Abstract

The Tank model and the PRMS(Precipitation Runoff Modeling-modular System) model have been adopted to simulate runoff data from 1981 to 2001 year in the Seomgin-dam basin. However, the simulated runoff by each single model showed some deviations compared with the observed runoff, respectively. In this study a genetic algorithm combination runoff model has been proposed to minimize deviations between simulated runoff and observed runoff that should yield from single model such as Tank model or PRMS model. The proposed combination runoff model combining the simulated respective output of the Tank model and the PRMS model is to produce the optimum combination ratio of each single model applying to the genetic algorithm which may yield the minimum deviations between simulated runoff and observed one. The proposed combination runoff model has been applied to the Seomgin-dam basin. It has also been shown that the combination model by introducing optimal combination ratio should yield less deviations than single model such as the Tank model or the PRMS model.

keywords : Tank model, PRMS model, Optimum combination ratio, Combination runoff model

요 지

탱크모형과 PRMS(Precipitation Runoff Modeling-modular System) 모형으로 섬진강댐 유역의 유출량을 1981년부터 2001년까지 모의 발생하였다. 적용된 각각의 단일모형인 Tank 모형과 PRMS 모형에 의하여 모의된 유출량은 서로 상이한 모의 양상을 나타낸다. 본 연구에서는 Tank 모형과 PRMS 모형과 같은 단일모형에 의하여 모의되는 유출량의 편차를 최소화하고 관측유출량에 보다 잘 부합되는 유출모의결과를 생산하기 위하여 유전자 알고리즘 혼합유출모형을 제안하였다. 제안된 혼합유출모형은 Tank 모형과 PRMS 모형의 각각 결과를 혼합하는 모형이며, 유전자 알고리즘을 적용하여 모의 유출량과 관측 유출량을 최소화하는 Tank 모형과 PRMS 모형에 의한 각각의 유출량의 비율을 결정하는 최적배합비를 산정하였다. 제안된 혼합 모형을 섬진강댐 유역에 적용한 결과, Tank 모형 또는 PRMS 모형과 같은 단일모형으로 유출량을 모의하는 경우보다 두 개의 모형을 적절한 배합비를 도입한 혼합 모형으로 모의된 유출량은 관측유출량과의 각종오차를 작게 하는 것을 보여 주었다.

핵심용어 : 탱크 모형, PRMS 모형, 최적배합비, 혼합유출 모형

* 한경대학교 토목공학과 대학원 공학석사

Master of Engineering, Dept. of Civil Engrg. Hankyong National University, Ansong, Kyonggi 435-749, Korea

** (주) 이산 수자원부 대리

Junior Engineer, Dept. of Water Resources, ISan Engineering, 431-060 Anyang, Korea

*** 교신저자, 한경대학교 토목공학과 교수

Corresponding Author, Professor. Dept. of Civil Engrg., Hankyong National University, Ansong, Kyonggi 435-749, Korea

(e-mail: ahntj@hknu.ac.kr)

1. 서론

강우유출모형의 목적은 주어진 기왕의 강우-유출 사상을 충실히 재현하여 유역의 유출특성을 규명하고, 미래에 발생할 가능성이 있는 유출사상을 적절히 모의하기 위한 것이다. 타당한 유출모의 및 분석은 하천의 3대 기능인 치수, 이수, 환경계획수립에 근거로써 활용되고, 하천을 형성하게 하는 유역에 대한 관리와 정확하고 효율적인 수자원계획을 위하여 매우 중요하다고 말할 수 있다.

유출량의 모의를 위하여 과거부터 다양한 유출모형들이 개발되어 왔으나, 각 유출모형들은 일반적으로 동일한 유역에 대하여 동일한 강우량을 이용하여 모의하더라도 상이한 결과를 나타낸다. 이는 모형 개발자들이 물리적 유출과정을 모식화하는 과정에서 발생하는 개념적 차이와 모형 개발 목적의 상이성에서 발생하는 결과이다(정일원 등, 2005). 따라서 특정 유역에 대하여 한 가지의 유출모형을 선택한다는 것은 매우 큰 불확실성을 가지는 문제이며, 특정 모형의 물리적인 구조가 더욱 자연현상에 가깝다는 평가를 내리는 것 또한 매우 어렵다. 현재 하천기본계획 등의 실무에서는 일단위 유출량모의에 대하여 Tank 모형, DAWAST 모형 및 비유량법 등의 다수의 유출모형을 모의한 후, 모형들의 정확성에 대한 평가를 내리기가 난해하므로 이를 배제하고 하나의 특정 모형에 의해 생산된 모의유출 결과를 채택하는 경우가 많다. 특히, 과거에는 지형인자 등의 다양한 유출특성을 고려하지 않고 오직 유역간의 면적비만이 반영되는 비유량법이 채택되는 경우 또한 많이 있었다. 따라서 특정 모형의 채택이 난해한 점을 극복하고 보다 관측유출에 가까운 모의유출을 생산하기 위해서는 두 개 이상의 모형을 함께 고려하여, 각 단일 모형이 가지는 장점을 최대한 활용하고 단점을 극복할 수 있는 기법이 요구된다.

이러한 유출 모형간의 조합을 통하여 유출 시나리오를 개선하는 기법에 관한 연구사례는 아직 많지 않은 실정이다. 국내에서는 정일원 등(2005)이 ANN기법을 활용하여 PRMS 및 Tank 모형의 결과를 혼합시키는 슈퍼앙상블 기법을 연구한 바 있다. 국외에서는 Shamseldin and O'Connor (1999)가 LPM, LVGFM 및 SMAR 모형의 유출모의 결과를 혼합하고 실시간으로 편차를 보정하는 실시간 유출 모형 결과의 혼합기법(Real-Time Model Output Combination Method, RTMOCM)을 제안한 바 있다. 또한, 단순평균법(Simple Average Method, SAM), 가중평균법(Weighted Average Method) 및 인공신경망 이론

(Neural Network Method, NNM)을 활용하여 5가지의 유출모형결과를 혼합하여 11개소의 유역에 적용한 후, 단일모형의 모의에 비하여 유출모의를 혼합하는 방법보다 우수한 모의유출량을 도출한 연구사례(Shamseldin *et al.*, 1997)가 있다.

따라서, 본 연구에서는 여러 유출모형간의 결과 차이를 개선하고 모의결과를 개선할 수 있는 유출모의결과의 혼합(Combination) 기법을 개발하고자 하였다. 단일 유출모형의 혼합 모형에 적용되는 최적화 기법으로는 전역최적화(Global Optimization) 기법인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용하였으며, 혼합유출모의는 구조와 특성이 상이한 Tank 모형(Sugawara, 1995)과 PRMS(Leavesley *et al.*, 1983) 모형을 함께 운영하고 유전자 알고리즘을 적용하여 유출량의 편차를 최소화하는 Tank 모형과 PRMS 모형의 최적배합비를 결정하여 유출량을 모의하였다.

본 연구에서는 먼저 Tank 모형과 PRMS 모형의 자동최적화를 통하여 모형의 매개변수를 산정하고, 이에 따른 유출분석을 실시한다. 다음은 유전자 알고리즘을 활용하여 혼합 모형을 구축하고 Tank 모형 및 PRMS 모형의 유출결과를 활용하여 두 모형의 최적배합비를 산정한다. 끝으로 개별적인 모형 결과 및 혼합유출 모의 결과를 비교·분석하고 통계적인 평가를 수행하였다.

2. 유전자 알고리즘에 의한 혼합 유출 모형

유전자 알고리즘은 기존의 전통적 최적화기법보다 뛰어난 해를 찾을 수 있는 알고리즘으로 알려져 있으며, 많은 공학적 문제의 해결과 분석적, 경험적 연구에 사용되고 있다. 유전자 알고리즘은 세대교체 과정에서 최종적으로 살아남은 유전자가 최적의 해가 된다고 보고 반복계산을 통해 전역적인 최적해(Global Optimum)를 탐색한다. 유전자 알고리즘의 가장 큰 특징이자 장점은 광범위한 탐색 범위를 동시에 탐색하여 정해진 조건을 만족하는 해를 찾지 못해 발산하는 경우가 없다. 또한 단 한번의 실행으로 국지해(Local Optimum)가 아닌 최적해에 도달 할 수 있으며 비연속적인 식에 대해서도 적용할 수 있다는 것이다. 유전자 알고리즘은 일반적으로 선택(Selection), 교배(Crossover), 돌연변이(Mutation)의 기본 연산자에 의해 작동된다.

본 연구에서는 전술한 연구사례 중, 이론은 간단하지만 혼합 효과가 단일 결과에 비하여 우수한 것으로 나타난 단순평균법이나 가중평균법과 같이 이론적으로는 간단하지만 혼합하여 더욱 양호한 유출모의 결과를 제시하기 위하여 유출모형별로 가중치를 두어 유출모형을

혼합하는 방법을 채택하였다.

$$Q_{combination,i} = w_{fd1} \cdot Q_{cal1,i} + w_{fd2} \cdot Q_{cal2,i} + \dots + w_{fdn} \cdot Q_{caln,i}$$

여기서, i 는 모의기간중의 특정일을 나타내며 n 은 혼합에 활용되는 유출모형의 개수를 의미한다. 즉, i 번째의 혼합된 유량인 $Q_{combination}$ 은 혼합비인 가중치 w_{fd} 를 개별모형의 모의유량에 곱하여 합산한 것이다. 여기서 혼합비는 저수, 평수 및 홍수의 기간별로 개별적으로 산정하여 유황(flow duration)별로 유출모형들이 다른 양상을 나타내는 것을 혼합에 반영할 수 있도록 하였다. 그러나 이러한 간단한 이론이라도 장기간에 걸쳐 다수로 산정된 유출모의결과를 최적으로 혼합할 수 있는 다수의 유황별 최적배합비를 찾아내는 것은 복잡한 최적화 대상의 문제이므로 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 활용하여 전역최적화 혼합 모형을 구축하기로 하였다.

최적화 알고리즘에서 목적함수(Objective Function)는 각 개체의 적합도를 평가하는 기반이나 목적함수의 값의 범위는 문제마다 다르기 때문에 보통 정해진 구간 사이의 양수 값을 갖도록 표준화된 값을 사용하며 표준화한 개체 선택의 기준이 되는 함수를 적합도함수(Fitness Function)라 한다. 본 연구에서는 평균제곱근 오차를 적합도 함수 구축에 적용하였으며, 평균제곱근 오차의 값이 최소화(Minimization)가 되도록 배합하는 것에 목적을 둔 적합도 함수를 다음과 같이 채택하였다.

$$Minimize RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{combination})^2}{n}}$$

여기서 Q_{obs} 는 관측유량이며, $Q_{combination}$ 은 혼합된 일모의유량을 의미하며, n 은 유량의 개수이다. 즉, 분석기간의 편차를 절대값으로 합산하여 평균한 의미를 갖는 것으로, 관측유량과 혼합된 모의유량의 일별 편차를 잘 반영할 수 있는 통계치이며 항상 양수 값을 가지므로 혼합유출모형의 목적함수이자 적합도함수로 선정하였다.

본 연구에서는 각 유출모형결과를 조합하여 개선된 유출모의결과를 얻기 위한 혼합모형의 최적화 알고리즘으로 Deb and Goyal (1995)이 제안한 단순 유전자 알고리즘(Simple Genetic Algorithm, SGA)을 수정하여 적용하였다. 본 연구에서 적용한 SGA는 토너먼트 선택

법을 채택하고 있으며, 단순교배 및 역위에 의한 연산법을 채택하였다. 개발한 알고리즘의 모형 흐름도는 Fig. 1과 같으며, 기본적인 과정은 다음과 같다.

- ① 우선 개별적으로 보정된 각각의 유출모형에서 발생된 유출분석결과 및 관측유량을 구축된 유전자 알고리즘 혼합유출모형의 단일모형 입력자료로써 입력한다.
- ② 혼합유출모형의 알고리즘에 따라 입력된 단일모형의 계산유량을 장기간의 관측치를 기준으로 하여 유황별로 분류한다.
- ③ 최적화 대상 매개변수인 유황별 최적배합비를 단일 모형결과에 대한 가중치로써 배합된다. 이 때, 최초로 임의발생되는 매개변수는 유전자 알고리즘의 초기 임의발생에 따라 생성된다. 최초 발생된 변수에 대하여 적합도 평가를 실시한 후, 선택 및 재생, 교배, 돌연변이 발생순으로 개체변수를 진화시킨다. 진화된 개체에 대하여 다시 적합도 평가를 실시하며, 사용자가 초기조건으로 지정한 세대까지 한 세대에 지정된 수만큼의 개체들을 생성하며 진화론적 최적화를 반복하여 수행한다.
- ④ 종결조건에 따라 생산종료된 혼합 모의결과를 선정된 모의기간에 대한 결과로 적합도 함수에 대한 검정을 실시하여 혼합모형에서 최종적으로 적용될 전역최적화된 최적배합비 셀(set)을 제공한다.

Fig. 1. Combination Runoff Model Coupled with Genetic Algorithm

$$\text{여기서, } SD1 = \sqrt{\left| \frac{\sum (Q_{obs}(i))^2}{n} - \left(\frac{\sum Q_{obs}(i)}{n} \right)^2 \right|}$$

$$SD2 = \sqrt{\left| \frac{\sum (Q_{cal}(i))^2}{n} - \left(\frac{\sum Q_{cal}(i)}{n} \right)^2 \right|}$$

3.3 단일 유출모형의 보정

3.3.1 Tank 모형에 의한 유출분석

Tank 모형은 일본의 Sugawara(1984)가 제안한 연속형 강우-유출모형으로 유역을 일련의 선형 혹은 비선형 탱크의 조합으로 표현한다. 탱크의 측면출구로 유출이 발생하며, 바닥출구로 침투가 발생하고 유역내에 저장된 저류성분을 탱크내에 보유하고 있다. 탱크수면에 강수가 발생하며 증발은 탱크로부터의 물손실로 간주하는 개념을 가지고 있다. Tank 모형은 알고리즘이 다른 강우-유출 모형에 비해 간단하지만 비교적 정확한 유출모의를 수행하는 장점을 가지고 있다(Yokoo et al., 2001). 4단 직렬탱크는 Fig. 2와 같이 유출공 개수, 침투공 개수 등 12개의 매개변수를 가진다.

Tank 모형의 입력자료는 관측유량 및 강우량, 증발산량이 있는데, 증발산량은 장기간의 강우량과 유출량의 차이인 손실량의 월평균 값(Table 2)을 월별 증발산량으로 적용하였다. 월평균 값은 해당월의 날짜로 나누어 일 증발산량으로써 일 유출계산에 활용되며, 강우가 발생하는 날에는 50%의 증발산량만 발생하는 것으로 가정한다.

Fig. 2. Schematic of Tank Model

입력자료를 구성한 후, 매개변수의 최적화를 위하여 지역탐색법의 특성을 가지지만 국내외 여러 연구(배덕효 등, 2003; Kim and Park, 1986, Chen *et al*, 2007; Paik et al, 2005)에서 Tank 모형에 대한 적용성이 검증된 Powell 방법을 적용하였다. 최적화를 위한 매개변수의 초기치는 수자원관리기법개발 연구조사(건설교통부, 1997)와 수자원 계획의 최적화 연구(Ⅲ)(건설교통부, 1999)에 제시된 값들을 이용하였으며, Table 3에 이 값들을 나타내었다. 초기값을 이용하여 Powell 방법에 의하여 최적화된 매개변수 집단은 Table 4와 같다.

Table 2. Monthly Mean Evapotranspiration(ET) in the Seomjin-dam Watershed

(unit : mm)

Jan.	Feb.	March	April	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
20.3	17.9	18.3	40.9	49.4	97.7	83.1	104.0	38.6	40.2	40.9	18.9	570.2

Table 3. Initial Parameter in Tank Model

구 분	1st Tank		2nd Tank	3rd Tank	4th Tank
outlet coefficient	up	0.30	0.90	0.07	0.001
	down	0.50			
outlet height	up	40.0	10.0	10.0	0.0
	down	20.0			
infiltration coefficient	0.30		0.80	0.006	-

Table 4. Parameter Set of Tank Model

parameter	A ₁₁	A ₁₂	B ₁	A ₂	B ₂	A ₃	B ₃	A ₄	H ₁₁	H ₁₂	H ₂	H ₃
value	0.246	0.112	0.074	0.219	0.078	0.024	0.039	0.0001	29.8	12.8	14.0	11.6

통계적 평가 결과는 Table 5와 같으며 관측치에 대하여 비교적 양호한 상관성을 가지는 것으로 나타났다. Tank 모형의 매개변수로 유출분석을 실시한 결과는 Fig. 3과 같다. 전체적으로 관측치에 잘 일치하는 것으로 보이나 저수부분에서는 관측치에 비하여 과다추정된 경향이 나타난다. 이는 관측유량이 0으로 나타난 일수가 156일로 많으며, 일부 과소하게 측정된 관측유량을 모형의 계산유량이 잘 일치시키지 못함으로써 나타난 결과로 사료된다.

3.3.2 PRMS에 모형에 의한 유출분석

PRMS 모형은 1983년 USGS(U.S. Geological Survey)에서 G. H. Leaesley, R. W. Lichty, B. M. Troutman, L. G. Saindon 등이 개발한 모형으로 MMS(Modular Modeling System)를 기반으로 한다. 지형조건 및 유출특성이 유사한 소유역인 HRU (Hydrologic Response Unit) 별로 유출을 해석하는 준 분포형 모형으로 일유출모의시 약 105개의 매개변수가

필요하며, 최적화 기법인 Rosenbrock 방법은 매개변수 추정방법으로 모형 내에서 제공한다. 본 연구에서는 적용한 PRMS(Precipitation Runoff Modeling-modular System)모형의 버전은 MMS(Modular Modeling System; Leavesley *et al.*, 1996)이다.

일반적으로 기본적인 장기유출모형은 Eq. (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$Q = P - ET \pm S \quad (5)$$

여기서 Q는 유출량, P는 강우량이며, ET는 증발산량, S는 차단, 적설, 불투수층의 지표저류량, 토양수분량, 지표하저수지, 지하수저수지에 의한 저류량이다. PRMS 모형은 P와 ET, S와 Q의 관계를 자연현상에 가깝게 경험식과 물리 법칙으로 모형화 하였다. PRMS모형의 개념적 유역수문순환 시스템과 유출모의 과정을 크게 기상과 지상 그리고 눈 세 부분으로 나누어서 살펴보면 다음과 같다.

Fig. 3a. Simulated Runoff and Observed Runoff by Tank Model('91-'92)

Fig. 3b. Simulated Runoff and Observed Runoff by Tank Model('91-'02)

Table 5. Estimated Statistics of Tank Model

	VE (%)	RMSE (mm/day)	ME	CORR-C
Tank Model (1991~2001)	8.11	3.57	0.64	0.80

PRMS모형을 최적화하기 위하여 우선 PRMS모형의 증발산량 모듈인 Hamon 방법의 월별계수(Hamon coefficient)를 보정하여 전체적인 물수지와 월별 물수지를 맞추었다. 이후 Rosenbrock 방법을 사용하여 최적화를 수행하는 순서로 최적화하였다. 최적화를 수행하는 매개변수는 총 9개로 이 중 잠재증발산량 산정을 위한 Hamon의 월별계수(hamon_coef)는 물수지방식으로, 지하수유출계수(gwflow_coef)는 관측유량 자료를 이용하여 최적화를 수행하였고 나머지 변수들은 자동추적방법인 Rosenbrock 방법으로 최적화하였다. PRMS모형에 의한 관측유량과 모의유량 결과를 비교하여 도시하면 Fig. 4와 같다. 도식적인 판단 결과, Tank 모형에 비하여 상대적으로 평·저수기의 관측량에 잘 일치하는 모의유량을 나타내는 것으로 사료된다.

통계적 평가결과는 Table 6과 같다. 상관계수는 0.86으로 관측치에 대하여 양호한 상관성을 나타내었으며, 보정기간의 관측유출량에 대하여 전반적으로 Tank 모

형에 비하여 도식적으로나 통계적으로나 양호한 결과를 나타내었다.

3.4 혼합유출 유전자 알고리즘 모형의 민감도 분석

유전자 알고리즘은 전역최적화 기법이지만 교배율 및 돌연변이의 발생 확률, 세대 수 및 개체 수 등의 초기조건에 따라, 최적화되는 해의 정도에 차이가 나타난다. 특히 기존의 일반적인 최적화 알고리즘들의 계산 반복 횟수(Iteration)에 비유할 수 있는 세대 수(Generation number)와 한 세대에 유전자 알고리즘의 특성에 따라 임의적으로 발생하는 개체의 갯수인 개체 수(Population size)에 대하여 특히 민감한 변화를 보인다. 본 연구에서의 하나의 개체란 즉, 각각의 단일 유출 모형의 결과를 혼합시키기 위한 하나의 배합비 계수들의 셀을 의미한다. 그러나 이러한 유전자 알고리즘의 초기조건들인 세대 수와 개체군 수를 크게 하여 계산 반복 횟수를 되도록 많이 증가시킨다 할지라도 반드시

Fig. 4a. Simulated Runoff and Observed Runoff by PRMS Model('91-'92)

Fig. 4b. Simulated Runoff and Observed Runoff by PRMS Model('91-'02)

Table 6. Estimated Statistics of PRMS Model

	VE (%)	RMSE (mm/day)	ME	CORR-C
PRMS Model (1991~2001)	3.84	3.05	0.74	0.86

Table 7. Result of Sensitivity analysis of Genetic Algorithm Combination Runoff Model (unit : mm/day)

Population Size Generation Number	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
20	3.0469	3.0334	3.0300	3.0300	3.0311	3.0305	3.0300	3.0302	3.0300	3.0300
40	3.0418	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0305	3.0300	3.0302	3.0300	3.0300
60	3.0418	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0305	3.0300	3.0301	3.0300	3.0300
80	3.0418	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0304	3.0300	3.0301	3.0300	3.0300
100	3.0418	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0304	3.0300	3.0301	3.0300	3.0300
120	3.0418	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0302	3.0300	3.0301	3.0300	3.0300
140	3.0398	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0301	3.0300	3.0301	3.0300	3.0300
160	3.0398	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0301	3.0300	3.0301	3.0300	3.0300
180	3.0397	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0301	3.0300	3.0301	3.0300	3.0300
200	3.0397	3.0325	3.0300	3.0300	3.0307	3.0301	3.0300	3.0301	3.0300	3.0300

Table 8. Initial Condition of Combination Genetic Algorithm

Generation Number	Population Size	Crossover Probability (%)	Mutation Probability (%)
20	140	70	1

그 결과가 향상되는 것은 아니며 경우에 따라 해의 정도가 퇴보하는 경우도 나타나는 것으로 알려져 있다(구보영, 2007). 이는 진화론적 측면에서 차세대 개체가 반드시 우성을 가지지는 않는 실제 자연현상에 비유된다.

따라서 본 연구에서는 보다 최적의 값을 갖는 결과를 도출하기 위하여 최적의 유출모형의 배합비를 산출할 수 있는 초기조건을 알아보기 위한 민감도 분석을 수행하였다. 연구의 결과에 보다 적합하게 활용할 수 있는 초기조건들을 선정하기 위하여 보정기간과 동일한 섬진강댐 유역의 1991년부터 2001년까지의 PRMS 모형과 Tank 모형의 결과들을 혼합하는 문제에 대하여 각 초기조건들을 20씩 바꾸며 조합하였으며, 이에 따라 발생하는 목적함수인 RMSE에 대한 결과를 Table 7에 나타내었다.

민감도 분석 수행 결과, 개체 수는 40 이상일 때 세대수와 관계없이 민감도 분석의 범위내에서 동일한 결과를 나타내며 140을 전후하여 최적값이 나타나는 것으로 산정되었다. 또한 개체수가 20일 때는 세대 수가 180에서 최적값이 나타났는데, 반복 수행을 가장 적게 하여 공학적으로 효율적이며 모의의 초기조건은 세대 수 20, 개체 수 140정도가 적당한 것으로 나타났다. 따라서 이를 토대로 하여 Table 8과 같이 모형의 초기조건을 선정하였다. 상대적으로 덜 민감하다고 판단되는

초기조건들인 돌연변이 발생율과 교배율은 기존 연구(Kokosiński, 2005)에서 제시된 값을 참고하여 각각 70%와 1%를 채택하였다.

3.5 혼합유출모형의 적용

본 연구의 목적인 단일모형결과의 조합을 통한 개선된 혼합 결과 산정을 위하여 전술한 바와 선정된 초기조건을 적용하여 최적배합비를 산정하였다. 이를 통하여 단일모형결과를 검·보정기간에 대하여 동일한 배합비를 적용하여 혼합 유출모의 시나리오를 생산하고 산정된 최적배합비를 검증하기 위하여 단일모형결과 및 관측치와 통계적 및 도식적으로 비교·분석하였다. 혼합유출모형을 통하여 유황별로 구분 후 산정된 전역적인 최적배합비는 Table 9와 같다.

Tank 모형이 저수기 및 홍수기에서 PRMS 모형에 비하여 상대적으로 많은 배합비를 부여받는 것으로 나타났다. PRMS 모형은 평수기에서 Tank 모형에 비하여 높은 배합비를 나타내었다. 저수기 및 평수기의 경우, 각 모형별 계산유출량이 관측유출량에 비하여 과다 산정된 경향이 있으므로, 상대적으로 적은 배합비가 산정되었다. 특히 저수기의 경우, $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ 미만의 매우 적은 관측유출량이 저수기의 총 모의날짜인 2004일 중 743일에 나타나는 등, 각 유출모형의 최적화를 수행했

Table 9. Optimal Combination Ratio for Runoff by the Genetic Algorithm Combination Model

	$Q \leq \text{Normal Flow Rate}$	Normal Flow Rate $< Q \leq \text{Abundant Flow Rate}$	Abundant Flow Rate $< Q$
Tank	0.0519	0.171	0.746
PRMS	0.0497	0.255	0.347

음에도 불구하고 모형의 물리적인 구조상 모의하기 어려운 매우 적은 양의 관측유량이 많았다. 따라서 모형별 계산유출량의 과다산정에 의해 적은 배합비를 산정하게 된 것으로 판단된다. 개별 유출모형의 배합비의 합이 1 혹은 특정숫자가 되거나 특정범위에서 나타나도록 별도의 제약조건(constraints)을 설정하지 않았으며, 관측유출량만을 고려하여 최적의 배합비를 산정하도록 모형을 구성하였다.

최적화된 배합비를 적용하여 보정기간(1991~2001)에 대해 혼합 유출모의결과를 산정한 후, Tank 모형 및 PRMS 모형, 혼합 모형의 강우-유출 모의 결과를 Fig 5와 같이 도식하였으며 계산유량과 모의유량의 통계치를 Table 10과 같이 산정하였다.

Table 10에서 보는 바와 같이 유출 용적오차는 Tank 모형이 8.11%로 4% 미만의 다른 모의결과에 비해 상대적으로 큰 것으로 나타났다. PRMS 모형은 모형 효

율성 계수와 상관계수에서 혼합 모의와 비슷한 결과를 나타냈으며, 혼합 모형 대비 유출용적오차는 0.8%, 평균 제곱근 오차는 0.02mm/day로 적은 차이를 보였다. 유출용적오차와 평균제곱근오차에 관한 혼합 모형은 통계치가 상대적으로 가장 양호한 것으로 산정되었으며 도식적으로 양호한 모의결과를 나타내는 것으로 판단된다. 도식적으로 살펴본 결과 혼합 모형이 가장 관측치에 유사한 결과를 나타내었으며, PRMS와 Tank 모형은 저수기 및 평수기에 관측 수문곡선에 비하여 과소하게 추정되는 양상을 나타내었다.

보정기간에 대하여 최적화된 혼합 모형의 배합비를 동일하게 검정기간에 적용한 후, 마찬가지로 보정기간과 동일한 모형 매개변수가 적용된 단일 유출모의 결과와 비교·분석을 통하여 연구결과의 신뢰성을 검증하였다. Fig 6과 같이 도식적으로 살펴본 결과 PRMS 모형이 저수기 및 평수기에 과소추정되는 양상을 보이며

Fig. 5. Simulated Runoff and Observed Runoff by Tank, PRMS and Combination Models (Calibrated Period)

Table 10. Estimated Statistic of Tank, PRMS and Combination Models(Calibrated period)

	Tank	PRMS	Combination
Volume Error (%)	8.11	3.84	3.06
Root Mean Square Error (mm/day)	3.57	3.05	3.03
Model Efficiency	0.64	0.74	0.74
Correlation Coefficient	0.80	0.86	0.86

Fig. 6. Observed Runoff and Simulated Runoff by Tank, PRMS and Combination Models (Period of Verification)

Table 11. Estimated Statistic of Tank, PRMS and Combination Models(period of verification)

	Tank	PRMS	Combination
Volume Error (%)	3.94	6.53	1.59
Root Mean Square Error (mm/day)	3.05	4.35	3.10
Model Efficiency	0.73	0.45	0.72
Correlation Coefficient	0.86	0.69	0.85

Tank 모형은 풍수기에 과소추정되는 형태가 나타났다. 혼합 모형은 단일모형결과에 비하여 수문곡선의 변동량이 크고 관측치의 곡선이 나타내는 양상에 상대적으로 유사한 것으로 판단된다.

통계적으로는 Tank 모형이 검정기간에 대해 유출 용적오차를 제외한 세 가지의 통계치에서 가장 양호한 것으로 산정되었다(Table 11). 혼합 모형은 유출용적오차가 1.59%로 가장 양호한 것으로 산정되었으며, 나머지 통계치를 Tank 모형과 비교해 보면 모형효율성 계수는 0.01, 평균 제곱근 오차에서 0.05 mm/day의 미미한 차이를 나타내었다. PRMS 모형은 모형 효율성 계수가 0.45로 나타났고 전반적으로 보정기간과 상이하게 양호하지 못한 결과를 나타내었다.

Tank 모형은 보정기간에서 다른 두 가지 유출모의결과에 비하여 양호하지 못한 결과를 나타냈으며, PRMS 모형은 검정기간에서 상대적으로 관측치와의 유사성이 낮은 결과를 나타냈다. 혼합 모형은 검·보정 기간 모두에서 관측치에 가장 유사한 양상을 보였으며, 유출용적오차는 검정 및 보정기간의 모든 기간에 대하여 단일모형의 결과보다 양호하게 산정되었다. 검정기간에서 혼합 모형의 평균 제곱근 오차는 3.10 mm/day, 모형 효율성 계수는 0.72로 산정되어 해당 통계치에서는 Tank

모형에 비하여 불리한 결과를 보여주었으나, 유출용적오차가 상대적으로 많이 적고 검·보정기간 모두에서 상관성 높고 정량적으로도 양호한 유출분석결과를 산정할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 섬진강댐의 1989~2001년까지 21년간의 강우-유출 및 지형데이터를 활용하여 개념적인 유출모형인 Tank 모형과 준분포형 모형인 PRMS 모형의 혼합 유출 모의를 수행하였다. 각 모형의 매개변수는 지역탐색법인 Powell 방법과 Rosenbrock에 의하여 자동보정되었다. 그러나 이러한 개별적인 유출모형들은 검·보정 기간에 대하여 각각 정도가 상이한 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 각 개별모형의 물리적인 구조의 차이에서 나타나는 불확실성을 개선하기 위하여 혼합의 최적배합비를 전역최적해로 산정할 수 있는 유전자 알고리즘 혼합 유출모형을 구축하였다.

또한 유전자 알고리즘의 초기조건에 따라 최적해가 상이하게 나타나는 오차를 최소화하기 위하여 초기조건에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 가장 민감한 초기조건인 개체수는 40 이상일 때 세대수와 관계없이 민감도 분석의 범위내에서 동일한 결과를 나타내며 140을

전후하여 최적값이 나타났다.

혼합 유출모의 결과는 보정기간에 대하여 0.86, 검정 기간에 대하여서는 0.85로 높은 상관계수가 산정되었으므로 검·보정 기간 모두에서 개별모형에 의한 결과에 비하여 상대적으로 관측치에 유사한 양상을 보였으며, 유출용적오차는 3.06% 이하로 산정되었다. 또한 평균 제곱근 오차는 3.10 mm/day 이하이며, 모형 효율성 계수는 0.72 이상으로 산정되어 정량적으로도 양호한 유출분석결과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 혼합 유출 모형 기법을 통하여 유출모의 시 모형의 구조적인 차이에 의하여 상이하게 나타나는 모의결과를 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 혼합 유출 모형은 단일 모형을 적용하여 유출량을 모의하는 경우보다 양호한 결과를 보여, 혼합 유출 모형의 적용 가능성을 보여 주었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국건설교통평가원 건설핵심기술연구사업(06건설핵심B01)의 연구비의 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 (1997). **수자원 계획의 최적화에 관한 연구(III)**.
- 건설교통부 (1999). **수자원관리기법 개발조사**.
- 구보영 (2007). **다목적 유전자알고리즘을 이용한 tank 모형 매개변수 최적화**, 세종대학교 석사학위논문.
- 배덕효, 정일원, 강태호, 노준우 (2003). "유출성분을 고려한 Tank 모형의 매개변수 자동추정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제3호, pp. 423-436.
- 정일원, 배덕효, 김광천 (2005), "ANN을 활용한 슈퍼양상불 기법 개발", **2005 한국수자원학회 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 889-893.
- Chen, R.-S., Pi, L.-C., and Hsieh, C.-C. (2007). "Application of parameter optimization method for calibrating tank model", *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 41 Issue 2, pp. 389-402.
- Dawdy, D. R., and O'Donnel, T. (1965). "Mathematical models of catchment behavior", *Journal of Hydraul. Div, Proceedings of the ASCE*, pp. 123-136.
- Deb, K. and Goyal, M. (1995). "Optimizing engineering designs using a combined genetic search." *Proceedings of the 6th International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufman Publishers, pp. 521-528.
- Kim, H.-Y., and Park, S.-W. (1986). "Comparison of optimization algorithm in parameter calibration of Tank Model-An evaluation of parameter variation for a linear reservoir (TANK) model with watershed characteristics." *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 28, No. 2, pp. 42-52.
- Kokosiński, Z. (2005). "Effects of versatile crossover and mutation operators on evolutionary search in partition and permutation problems." *Intelligent Information Processing and Web Mining*, pp. 299-308.
- Leavesley, G.H., Lichty, R. W., Troutman, B. M., and Saindon, L.G. (1983). "Precipitation-runoff modeling system, user's manual." *Water-Resources Investigations*, pp. 83-238.
- Leavesley, G.H., Markstrom, S.L., Brewer, M.S., and Viger, R.J. (1996). "The modular modeling system(MMS) - the physical process modeling component of a database-centered decision support system for water and power management." *Water, Air, and Soil Pollution* 90, pp. 303-311.
- Nash, J.E, and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, 10: pp. 282-290.
- Paik, K., Kim, J. H., Kim, H. S., and Lee, D. R. (2005). "A conceptual rainfall-runoff model considering seasonal variation hydrological processes." *Hydrological Processes*, vol. 19, pp. 3837-3850.
- Shamseldin, A. Y. and O'Connor, K. M. (1999). "Real-time combination method for the outputs of different rainfall-runoff models." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 44, No. 6, pp. 895-912.
- Shamseldin, A. Y. and O'Connor, K.M. and Liang, G. C. (1997). "Methods for combining the outputs of different rainfall - runoff models." *Journal of Hydrology*, Vol. 197, pp. 203-229.
- Sugawara, M. (1995). "Tank model," *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh, V.J., ed.,

- Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.
- Sugawara, M., Watanabe, I., Ozaki, E. and Katsuyama, Y. (1984). "Tank Model with snow component." *National Research Center for Disaster Prevention*, No. 65, 1984.
- Yokoo, Y., Kazama, S., Sawamoto, M., and Nishimura, H. (2001). "Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression." *Journal of Hydrology*, Vol. 246(1-4), pp. 209-222.
- (논문번호:08-120/접수:2008.12.17/심사완료:2009.02.02)