

## 강우-유출모형의 매개변수 보정을 위한 최적화 기법의 비교분석

### The Comparative Analysis of Optimization Methods for the Parameter Calibration of Rainfall-Runoff Models

김 선 주\* · 지 용 근\*\* · 김 필 식\*\*\*

Sun Joo Kim · Yong Geun Jee · Phil Shik Kim

#### Abstract

The conceptual rainfall-runoff models are used to predict complex hydrological effects of a basin. However, to obtain reliable results, there are some difficulties and problems in choosing optimum model, calibrating, and verifying the chosen model suitable for hydrological characteristics of the basin. In this study, Genetic Algorithm and SCE-UA method as global optimization methods were applied to compare the each optimization technique and to analyze the application for the rainfall-runoff models.

Modified TANK model that is used to calculate outflow for watershed management and reservoir operation etc. was optimized as a long term rainfall-runoff model. And storage-function model that is used to predict real-time flood using historical data was optimized as a short term rainfall-runoff model. The optimized models were applied to simulate runoff on Pyeongchang-river watershed and Bocheong-stream watershed in 2001 and 2002. In the historical data study, the Genetic Algorithm and the SCE-UA method showed consistently good results considering statistical values compared with observed data.

*Keywords : Global optimization, Runoff model, Modified TANK model, Storage-function method, Genetic Algorithm, SCE-UA method*

#### I. 서 론

강우에 대한 유출예측의 정확성과 그 적용성을 향상시키기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며, 컴퓨터의 성능이 지속적으로 발달함에 따라 강우와 유출의 물리적 관계를 해석하는 강우-유출모형(Rainfall-Runoff Model) 또한 과학적이고 세분화되어 수문사상을 보다 현실적으로 모의하기 시작하였다. 그러나 강우-유출모형은 여러 형태로 구분되

\* 건국대학교 생명환경과학대학

\*\* 건국대학교 대학원

\*\*\* 건국대학교 생명환경과학대학

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3753

Fax: +82-2-444-0223

E-mail address: sunjoo@konkuk.ac.kr

어 사용되고 있어 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 적절한 모형을 선택해야 하는 어려움과 선택된 모형을 지역특성과 수문사상에 알맞게 보정(calibration)하고 검증(verification)해야 하는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 매개변수의 자동보정을 위한 전역최적화 기법 중 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)<sup>5),9)</sup>과 SCE-UA(Shuffled Complex Evolution - University of Arizona)<sup>10),15)</sup> 법을 이용하여 강우-유출모형의 매개변수를 보정하고 각 기법을 비교·분석하였다.

유출모형 중에서 장기유출모형으로는 유역관리를 위한 유출량 산정 및 저수지 운영 등에 사용되고 있는 수정 TANK모형<sup>2),14)</sup>을 선정하여 매개변수를 최적화하였고 단기유출모형으로는 홍수의 실시간 예측에 적합한 것으로 알려져 있는 저류함수모형<sup>8),16)</sup>을 선정하여 매개변수를 최적화하였다. 입력자료는 신뢰성을 위해서 2001년과 2002년 IHP 사업의 대표유역으로 선정된 보청천유역, 평창강유역의 실측 강우량자료와 유출량자료를 사용하였다. 수정 TANK모형의 경우 강우사상에 대해 과소하게 산정되는 문제점을 보완하기 위해 수정 TANK모형의 매개변수를 평수기(6월~9월 제외)와 홍수기(6월~9월)로 구분<sup>2)</sup>하여 최적화시키고, 그 결과를 실측유출량과 비교함으로써 수정 TANK모형의 오차를 최소화하였다. 강우-유출모형의 최적화를 위한 목적함수는 강우-유출모형의 보정에 일반적으로 사용되는 DRMS(Daily Root Mean Square)<sup>4)</sup>를 사용하였으며 최적화 기법의 적용성을 비교하기 위해서 각 기법을 이용한 최적화 전·후의 모의유출량과 실측유출량을 분석하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 대상지구

입력자료의 신뢰성을 위해 IHP(International

Hydrological Program)사업의 대표유역으로 선정된 보청천유역과 평창강유역을 대상지구로 선정하였다. 보청천유역은 유역면적 475.68 km<sup>2</sup>, 유로연장 49.00 km인 소유역이며 평창강유역의 유역면적은 519.64 km<sup>2</sup>으로 유로연장은 36.72 km이다. 강우데이터는 Thiessen가중치 산정을 통한 유역면적평균우량으로서 2001년, 2002년의 3월~12월의 일우량과 시우량 데이터를 입력값으로 사용하였으며, 보청천유역의 증발량데이터는 모금기상관측소의 2001년, 2002년 데이터를 사용하였고 평창강유역의 경우는 강릉기상관측소의 데이터를 입력데이터로 사용하였다. 실측유량데이터는 평창강유역의 상안미수문관측소 유량데이터를 이용하였고, 보청천유역의 경우 모금기상관측소 유량데이터를 실측값으로 사용하였다.

본 연구에서는 수정 TANK모형을 통해서 장기유출분석을 할 경우, 단기 강우사상 부분에서 과소하게 유출량이 산정되는 문제점을 보완하기 위해 수정 TANK모형의 매개변수를 평수기와 홍수기로 구분하여 최적화시키고, 그 결과를 실측 유출량과

Table 1 Parameter range of modified TANK model for calibration

Parameters	Normal period		Storm period	
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum
$a_{11}$	0.400	0.050	0.500	0.200
$a_{12}$	0.400	0.050	0.500	0.100
$a_2$	0.100	0.001	0.100	0.010
$a_3$	0.100	0.001	0.100	0.001
$b_1$	0.500	0.200	0.500	0.100
$b_2$	0.100	0.010	0.100	0.010
$h_{11}$	15.00	2.000	10.00	1.000
$h_{12}$	150.00	50.000	120.00	30.00
$h_2$	50.00	0.000	50.00	0.000

※ Normal period: except June~September, Storm period: June~September

비교함으로써 수정 TANK모형의 단기 강우사상에 대해 발생하는 오차를 최소화하고자 하였다. Table 1는 평수기와 홍수기로 구분한 수정 TANK모형의 매개변수 범위를 나타낸다.

## 2. 모형의 기본이론

### 가. 수정 TANK모형

수정 TANK모형의 1단 tank는 유출성분 중 지표유출을 개념화한 것이고 2단 및 3단은 각각 중간유출 및 기저유출을 개념화한 것으로서 대유역에서 4개의 tank를 사용할 때보다 매개변수의 수는 통상 19개에서 11개로 감소하였다.<sup>14)</sup>

수정 TANK모형은 유역을 유출구가 있는 일련의 tank로 연결된 것으로 묘사하며 단순한 방정식을 사용하는 간단한 모양으로 구성에도 불구하고 tank들의 조합은 고도의 비선형성을 나타내고 있다.<sup>4)</sup> 만약에 오랜 기간 동안 강우가 발생하지 않는다면, 1단 tank, 2단 tank의 순으로 유출이 발생하여 고갈되지만 기저유출은 3단 tank에서 계속 발생할 것이다.<sup>12)</sup> 수정 TANK모형의 이러한 구조상의 특징으로 인해서 수정 TANK모형은 선형모형으로 분류가 되지만, 모의발생의 계산과정은 비선형성을 나타내기 때문에 비선형모형으로 분류를 하는 경우도 있다.<sup>1),3)</sup>

본 연구에서 적용한 수정 TANK모형에 의한 유역의 유출량은 일별 강우량으로부터 식 (1)에 의하여 계산한다.

$$Q_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (ST_{i,t} - H_{ij}) A_{ij} \dots \dots \dots (1)$$

여기서,  $Q_{ij}$ 은  $t$ 일의 총유출량(mm),  $i$ 은 tank의 수,  $j$ 는 tank의 유출공수,  $ST_i$ 은  $i$ 탱크의 저류수심(mm),  $H_{ij}$ 는  $i$ 탱크의  $j$ 번째 유출공의 높이(mm),  $A_{ij}$ 는 유출공의 단면적(무차원),  $ST_{i,t}$ 는  $t$ 일의  $i$ 번째 탱크의 수심(mm)을 나타내며 그 구조

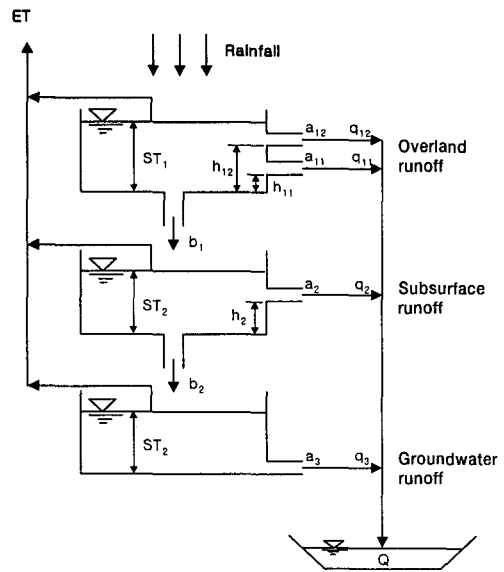


Fig. 1 Conceptual framework of modified TANK model

는 Fig. 1과 같다.

### 나. 저류함수모형

저류함수모형은 일반적인 홍수유출의 특성인 비선형성이 충분히 고려된다는 장점이 있어 한강 홍수예경보에 처음으로 사용된 이래 금강, 섬진강 및 영산강 홍수예경보에도 이 방법을 사용하고 있다.<sup>8)</sup>

저류함수모형은 홍수유출을 Manning 공식으로 표시할 수 있는 지표면 유출이라 가정하여 유역과 하도구간의 저류량  $S$ 를 유출량  $Q$ 의 지수함수로 나타내었다.

$$S_i = KQ_i^P \dots \dots \dots (2)$$

식 (2)는 홍수파의 운동방정식으로써  $S_i$ 은 유역의 저류량,  $Q_i$ 은 유역의 유출량,  $K$ ,  $P$ 는 유역의 저류상수로서 본 연구에서 적용한 유역에 대한 연속방정식은 다음의 물수지 방정식으로 나타낼 수 있다. Fig. 2는 저류함수모형의 유출과 침투의 관계를 개념적으로 나타내었다.<sup>7),11)</sup>

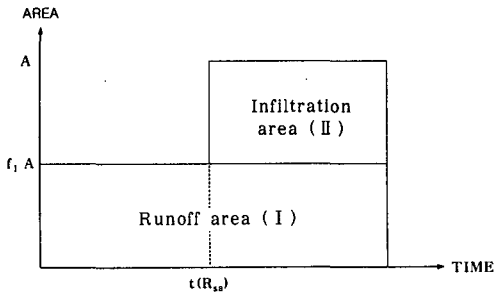


Fig. 2 Conceptual structure of Storage-Function model

$$\frac{1}{3.6} f \cdot r_{ave} A - Q_t = \frac{dS_t}{dt} \dots \dots \dots (3)$$

여기서  $f$ 는 유역유입계수,  $r_{ave}$ 는 시간당 유역 평균강우량,  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>),  $Q(t) = Q(I + T)$ 로서 유역의 지체시간  $T_t$ 을 고려한 유역으로부터의 직접유출량(m<sup>3</sup>/s),  $S_t$ 은 유역 저류량(m<sup>3</sup>)이다.

다. 유전자 알고리즘

유전자알고리즘(GA; Genetic Algorithm)은 미지수 함수  $Y = G(x)$ 의 최적해를 발견하는 모의진화(Simulation Evolution)형 탐색알고리즘의 성격을 가지고 있으며 자연선택과 유전 메커니즘에 입각해 통계적으로 탐색하는 진화적 과정의 알고리즘으로 John Holland(1975)에 의해 처음으로 소개되었다.<sup>9)</sup>

유전자 알고리즘은 그 개념과 이론이 단순하고, 해의 탐색능력이 우수하여 여러 분야의 최적화에 적용되고 있으며 복잡한 해 공간의 탐색능력이 우수하여 변수와 목적함수의 제약이 많은 문제를 푸는데 적합하고 또한 모형에 대한 유연성이 높아 제약식이나 목적함수의 변경이 용이하다는 장점이 있다.<sup>13)</sup> 그렇기 때문에 장기와 단기 유출모형의 특성에 유연하게 대처할 수 있다고 판단하여 본 연구의 최적화 기법으로 선정·적용하였다. Fig. 3은 유전자 알고리즘의 개략적인 구조를 나타내고 있다.

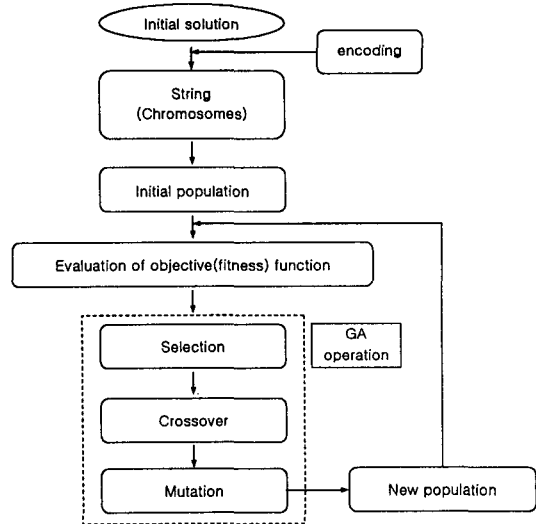


Fig. 3 Schematic of Genetic Algorithm

라. SCE-UA 법

탐색공간의 random location에서 시작한 multiple simplex를 기초로 한 “Shuffled Complex Evolution (SCE-UA)”법은 정보공유 개념과 생물학적 진화 특성의 원리로부터 시작된 전역최적화 방법으로서 유출모형의 반응표면에서 발생하는 다양한 문제들을 해결할 수 있는 장점이 있다.<sup>6)</sup>

SCE-UA법은 미국 국립 기상국의 NWSRFS (National Weather Service River Forecasting System)의 보정 모듈 중 하나이며, 최적해를 탐색하기 위해 다음과 같은 4가지 중요한 개념을 포함하고 있다. 1) 확률론적이고 확률론적인 접근의 결합, 2) 콤플렉스의 구조적 진화, 3) 경쟁 진화 (competitive evolution), 4) 콤플렉스의 혼합 (complex shuffling). Fig. 4는 SCE-UA법의 일반적인 구조를 나타내고 있다.

### III. 모형의 적용 및 결과

#### 1. 수정 TANK모형을 이용한 장기유출모의

전역최적화 기법 중 유전자 알고리즘과 SCE-UA법을 이용하여 수정 TANK모형의 매개변수를 평수기(6월~9월을 제외한 기간)와 홍수기(6월~9월)로 구분하여 최적화하고 장기유출을 모의하였다. 입력자료는 2001년과 2002년의 3월부터 12월 까지 일 강우와 증발량자료를 사용하였으며, 수정 TANK모형의 매개변수 중 초기  $ST_1$ ,  $ST_2$ ,  $ST_3$  는 모의하고자 하는 기간을 기준으로 3회 모의반복 후에 발생하는 저류량값을 초기값으로 사용하였다.<sup>4)</sup>

Table 2 과 Fig. 5는 수정 TANK모형을 이용한

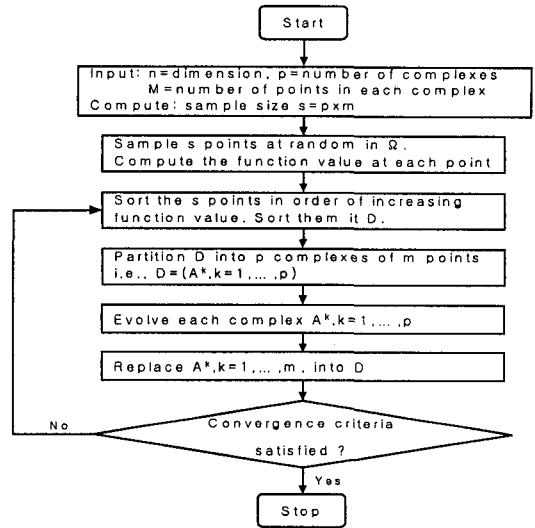


Fig. 4 Flowchart of SCE-UA method

Table 2 Simulation result of long-term runoff on Bocheong in 2001

		(unit: m <sup>3</sup> /month)													
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	r	RE (%)	SE (m <sup>3</sup> /s)
Obs.		241	163	179	269	265	381	297	271	614	198	-	-	-	-
Sim.	Before Opt.	188	103	114	219	201	272	146	93	142	144	6.87	0.81	2.44	2.10
	GA	220	133	145	246	239	321	199	153	252	179	5.51	0.89	2.17	1.86
	SCE-UA	232	143	156	254	256	350	231	193	343	195	3.92	0.92	1.89	1.73

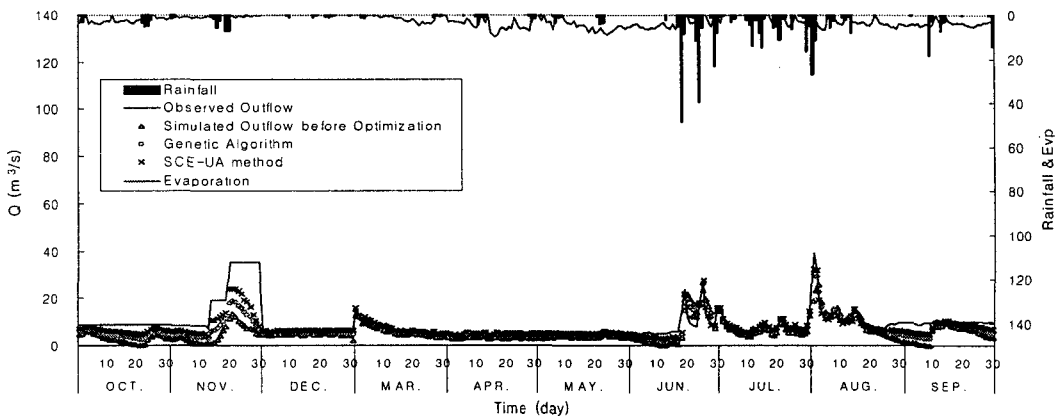


Fig. 5 Simulation result of Bocheong in 2001

2001년 보청천유역의 장기유출 모의결과를 매개변수 최적화 전과 후를 실측 유출량과 비교한 것으로, 실측 총유출량은 2,878 m<sup>3</sup>/yr이며 최적화 전의 총 모의유출량은 1,624 m<sup>3</sup>/year으로 나타났으며 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 후의 모의 총유출량은 2,087 m<sup>3</sup>/yr로 나타났고 SCE-UA법을 이용한 최적화 후의 총 유출은 2,353 m<sup>3</sup>/yr로 나타났다.

또한 실측유출량과 모의유출량을 일별로 분석한 결과 매개변수 최적화 전의 RMSE, 상대오차, 표준오차가 각각 6.87 m<sup>3</sup>/s, 2.44%, 2.10 m<sup>3</sup>/s로 나타났고 유전자 알고리즘을 이용한 매개변수 최적화 후는 RMSE, RE, SE가 각각 5.51 m<sup>3</sup>/s, 2.17%, 1.86 m<sup>3</sup>/s로 나타났으며 SCE-UA법에 의한 경우는 각각 3.92 m<sup>3</sup>/s, 1.89%, 1.73 m<sup>3</sup>/s로 나타났

다.  $r$ 의 경우 매개변수 최적화 전에는 0.81로 나타났고 최적화 후에는 0.89, 0.92를 각각 나타내 실측유출량과 모의유출량의 상관성이 증가하는 것으로 나타났다.

Table 3과 Fig. 6은 수정 TANK모형을 이용한 2002년 보청천유역의 장기유출 모의결과를 나타낸 것이다. 실측 총 유출량은 2,584 m<sup>3</sup>/yr이며 최적화 전의 총 모의유출량은 2,753 m<sup>3</sup>/yr으로 나타났다. 유전자 알고리즘을 이용하여 매개변수를 최적화한 후의 모의유출량은 2,667 m<sup>3</sup>/yr로 나타났고 SCE-UA법을 이용할 경우는 총 유출량이 2,642 m<sup>3</sup>/yr로 나타났다.

Table 4는 유전자 알고리즘과 SCE-UA을 이용한 최적화 전·후의 평창강유역 2001년, 2002년 장기유출 모의결과를 일별로 분석한 것이다. 2001

Table 3 Simulation result of long-term runoff on Bocheong in 2002

(unit: m<sup>3</sup>/month)

		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	$r$	RE (%)	SE (m <sup>3</sup> /s)
Obs.		82	99	459	229	346	658	555	80	43	34	-	-	-	-
Sim.	Before Opt.	87	103	486	343	385	647	516	93	55	39	26.18	0.88	4.53	2.36
	GA	85	102	475	302	364	638	524	91	49	36	16.49	0.94	3.43	2.09
	SCE-UA	85	100	463	284	348	650	542	88	47	35	12.64	0.97	2.89	1.94

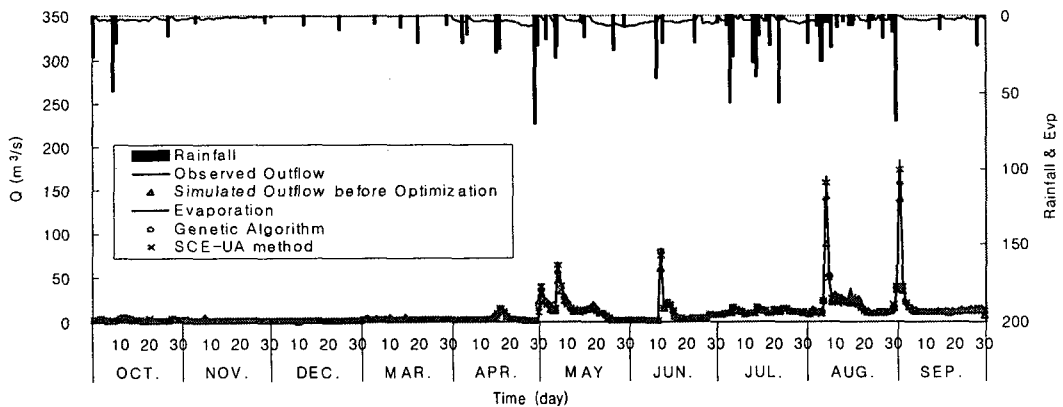


Fig. 6 Simulation result of Bocheong in 2002

Table 4 Simulation result of long-term runoff on Pyeongchang

(unit: m<sup>3</sup>/month)

		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	RMSE (m <sup>3</sup> /s)	r	RE (%)	SE (m <sup>3</sup> /s)	
2001	Obs.	306	208	26	107	1,152	349	17	180	74	30	-	-	-	-	
	Sim.	Before Opt.	276	227	77	168	1,011	392	53	197	96	41	8.37	0.80	4.36	2.16
		GA	295	197	21	100	1,181	333	9	181	63	20	2.82	0.91	1.36	1.68
		SCE-UA	301	203	24	104	1,105	340	13	181	68	25	2.31	0.94	1.19	1.34
2002	Obs.	69	564	825	139	1,106	3,113	999	231	17	5	-	-	-	-	
	Sim.	Before Opt.	89	643	1,311	721	1,772	3,031	1,058	297	17	7	36.99	0.94	4.88	2.48
		GA	77	645	1,066	410	1,504	3,369	1,093	287	19	6	14.97	0.97	3.12	2.15
		SCE-UA	72	624	987	329	1,424	3,218	1,067	291	18	6	12.64	0.99	2.89	2.01

년 실측 총 유출량은 2,449 m<sup>3</sup>/yr이며 최적화 전의 총 유출량은 2,538 m<sup>3</sup>/yr로 나타났다. 유전자 알고리즘에 의해 최적화 된 경우의 총 유출량은 2,400 m<sup>3</sup>/yr으로 나타났으며 SCE-UA법에 의해 최적화 된 경우의 총 유출량은 2,364 m<sup>3</sup>/yr로 나타났다. 2002년 실측 총 유출량은 7,068 m<sup>3</sup>/yr이며 최적화 전과 유전자 알고리즘에 의해 최적화 된 경우, SCE-UA법에 의해 최적화 된 경우를 비교하였을 때, 총 유출량은 각각 8,946 m<sup>3</sup>/yr, 8,476 m<sup>3</sup>/yr, 8,036 m<sup>3</sup>/yr로 나타났다. 또한 2001년 실측유출량과 모의유출량을 일별로 분석한 결과 매개변수 최적화 전의 RMSE, RE(Relative Error), SE(Standard Error)는 각각 8.37 m<sup>3</sup>/s, 4.36%, 2.16 m<sup>3</sup>/s로 나타났으며 유전자 알고리즘에 의한 매개변수 최적화한 경우는 RMSE, RE, SE가 각각 2.82 m<sup>3</sup>/s, 1.36%, 1.68 m<sup>3</sup>/s로 나타났고 SCE-UA법에 의해 최적화 된 경우는 각각 2.31 m<sup>3</sup>/s, 1.19%, 1.34 m<sup>3</sup>/s로 나타났다. 2002년의 유출량을 일별로 분석하여 최적화 전과 후를 비교하였을 때, 유전자 알고리즘에 의해 최적화 된 경우 RMSE, RE, SE가 각각 22.02 m<sup>3</sup>/s, 1.76%, 0.33 m<sup>3</sup>/s 감소하는 것으로 나타났고 SCE-UA법에 의해 최적화 된 경우 RMSE, RE, SE가 각각 24.35 m<sup>3</sup>/s, 1.99%, 0.47 m<sup>3</sup>/s 감소하는 것으로 나타났다. 실

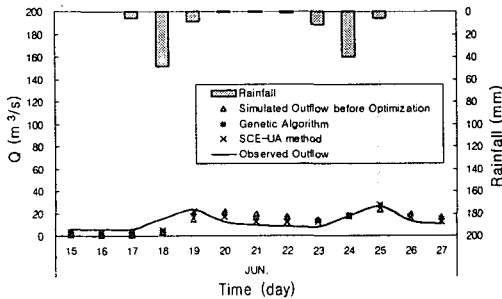
측값과 모의값의 유의성을 나타내는 상관계수, r은 각 년도에 대해 유전자 알고리즘의 경우 0.03~0.11% 증가하는 것으로 나타났고 SCE-UA법에 의한 경우 0.05~0.14% 증가하는 것으로 나타났다.

Table 5는 2001년, 2002년 평창강유역과 보청천유역의 장기유출모의 결과 중 강우 발생기간에 대한 수정 TANK모형의 매개변수 최적화 전·후의 유출모의결과를 실측유출량과 비교한 것으로 CASE I(2001. 6. 15~2001. 6. 27), CASE II(2002. 7. 29~2002. 8. 24), CASE III(2002. 4. 27~2002. 5. 12), CASE IV(2002. 7. 31~2002. 8. 21)는 보청천유역의 네 가지 강우사상에 대해서 나타낸 것이다. 유전자 알고리즘과 SCE-UA법을 이용한 매개변수 최적화 전·후의 상관계수(r)를 각각 비교하였을 때, 유전자 알고리즘의 경우 평균 0.07% 증가하였으며 SCE-UA법에 의한 경우 평균 0.103% 증가하는 것으로 나타났다.

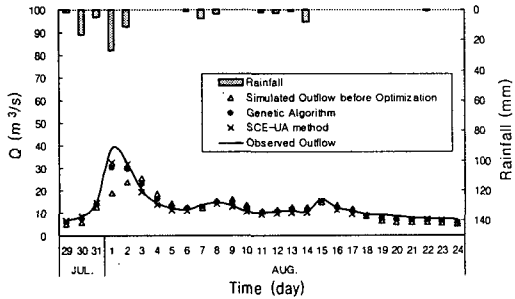
CASE V(2001. 6. 26~2001. 7. 8), CASE VI(2001. 7. 21~2001. 8. 5), CASE VII(2002. 4. 26~2002. 5. 10), CASE VIII(2002. 8. 1~2002. 8. 17)는 2001년, 2002년 평창강유역의 장기유출모의 결과 중 강우 발생기간에 대해 매개변수 최적화 전·후의 유출모의결과를 실측유출량과 비교한 것으로 상관계수(r)는 유전자 알고리즘

Table 5 Comparison of before and after optimization of daily runoff during the rain period

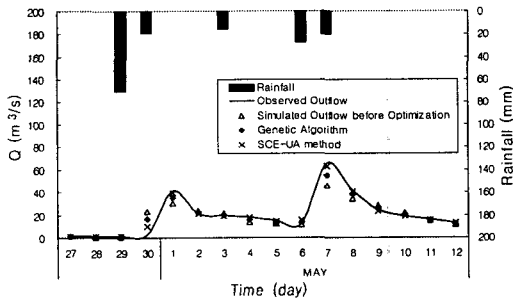
		Bocheong				Pyeongchang			
		CASE I	CASE II	CASE III	CASE IV	CASE V	CASE VI	CASE VII	CASE VIII
r	Before Opt.	0.78	0.86	0.79	0.83	0.88	0.86	0.87	0.88
	GA	0.85	0.92	0.86	0.90	0.94	0.95	0.92	0.93
	SCE-UA	0.90	0.94	0.90	0.93	0.97	0.96	0.96	0.97



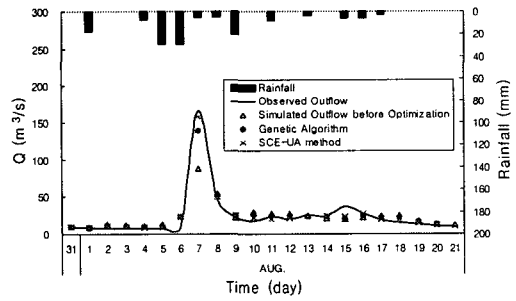
(a) CASE I



(b) CASE II



(c) CASE III



(d) CASE IV

Fig. 7 Comparison of before and after optimization of daily runoff in Bocheong during the rain period

의 경우 평균 0.06% 증가하였고 SCE-UA법에 의한 매개변수 최적화 후에는 0.093%가 증가하는 것으로 나타났다. Fig. 7은 최적화 전·후의 강우 발생 시 보청천유역 유출모의 결과를 비교한 것이다.

## 2. 저류함수모형을 이용한 홍수유출모의

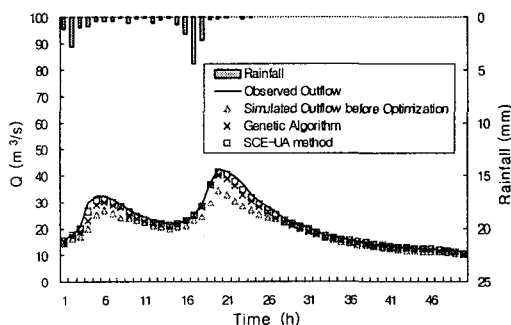
유전자 알고리즘과 SCE-UA법을 이용하여 단기 유출모형으로 선정된 저류함수모형의 매개변수를 최적화하고 보청천유역과 평창강유역의 2001년,

2002년의 실측시우량과 유량자료를 이용하여 단기 유출을 모의하였다. Table 6와 Fig. 8은 보청천유역의 실측유출량과 모의유출량을 시우량별로 비교한 것이다. 2001년의 강우사상에 대한 단기유출 모의결과, 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 후 RMSE는 19.23 m<sup>3</sup>/s 감소하였고 SCE-UA법에 의한 최적화 후는 RMSE가 24.72 m<sup>3</sup>/s 감소하였다. 2002년의 강우사상에 대해서 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 후 12.87 m<sup>3</sup>/s 감소하였고 SCE-UA법의 경우는 20.37 m<sup>3</sup>/s 감소하는 것

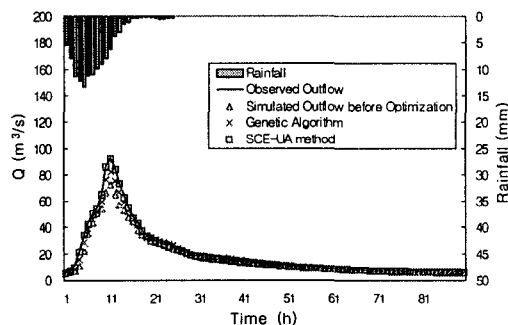


Table 6 Simulation result of short term runoff on Bocheong

Year	2001				2002			
	Obs.	Simulated			Obs.	Simulated		
		Before Opt.	GA	SCE-UA		Before Opt.	GA	SCE-UA
Total runoff (m <sup>3</sup> )	1,121	976	1,055	1,088	1,844	1,586	1,679	1,742
Peak flow (m <sup>3</sup> /s)	42	34	40	41	93	72	82	92
RMSE (m <sup>3</sup> /s)	-	35.48	16.25	10.76	-	29.34	16.47	8.97
<i>r</i>	-	0.87	0.91	0.95	-	0.86	0.92	0.96
RE	-	0.49	0.28	0.20	-	0.65	0.38	0.22
SE (m <sup>3</sup> /s)	-	8.67	4.94	2.95	-	17.94	8.54	5.67



(a) 2001. 6. 18.~2001. 6. 20. : 40h



(b) 2002. 8. 31.~2002. 9. 4. : 90h

Fig. 8 Simulation result of short term runoff on Bocheong

로 나타났다. RE는 2001년의 경우 최적화 전보다 최적화 후 각각 21%와 29% 감소하는 것으로 나타났다. 2002년의 경우 27%와 43% 감소한 것으로 나타났다. 2001년의 경우 SE는 최적화 기법을 적용할 경우에 대해서 각각 3.73 m<sup>3</sup>/s와 5.72 m<sup>3</sup>/s 감소하는 것으로 나타났고 2002년의 경우는 9.40 m<sup>3</sup>/s와 12.27 m<sup>3</sup>/s 감소한 것으로 나타났다. 실측 유출량과 모의유출량의 유의성을 나타내는 *r*를 비교하였을 때, 유전자 알고리즘의 경우는 각 년도에 대해서 5%와 6% 증가하였으며 SCE-UA법의 경우는 8%와 10% 증가하는 것으로 나타났다.

평창강유역의 단기유출량을 최적화 전과 후로 구분하여 분석한 결과, 유전자 알고리즘과 SCE-UA

법을 이용한 최적화 후의 총 유출량이 실측값에 보다 가까운 것으로 나타났으며 침투유량의 경우에도 최적화 후에 실측침투유량에 가까운 것으로 나타났다. 이 중에서 SCE-UA법에 의해 매개변수를 최적화한 경우 실측유출량에 보다 근접하게 모의하는 것으로 나타났다. 유의성을 나타내는 *r*의 경우 최적화 후에 각 년도에 대해서 유전자 알고리즘은 8%와 2% 증가한 것으로 나타났고 SCE-UA법은 12%와 6% 증가하는 것으로 나타났다. 또한 각 년도에 대한 RMSE, RE, SE는 전역최적화 기법을 이용한 경우 감소하는 것으로 분석되었다 (Table 7).

Table 7 Simulation result of short term runoff on Pyeongchang

Year	2001				2002			
	Obs.	Simulated			Obs.	Simulated		
		Before Opt.	GA	SCE-UA		Before Opt.	GA	SCE-UA
Total runoff (m <sup>3</sup> )	6,192	4,966	5,635	5,905	2,836	2,591	2,738	2,815
Peak flow (m <sup>3</sup> /s)	250	143	211	230	174	160	169	175
RMSE (m <sup>3</sup> /s)	-	123.86	86.35	32.89	-	12.55	9.61	6.76
r	-	0.80	0.88	0.92	-	0.91	0.93	0.97
RE	-	0.52	0.29	0.16	-	0.41	0.27	0.13
SE (m <sup>3</sup> /s)	-	16.53	9.67	4.84	-	2.26	1.76	0.66

#### IV. 결 론

본 연구는 강우와 유출의 해석에 사용되는 강우-유출모형을 보정하기 위해 적용되는 최적화 기법 중 유전자 알고리즘과 SCE-UA법을 이용하여 장·단기 유출모형의 매개변수를 보정하고자 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

장기유출모형으로는 수정 TANK모형을 선정하여 강우발생 기간의 부정확성에 대한 단점을 보완하기 위해 매개변수를 평수기와 홍수기로 구분하여 최적화시켰으며, 단기유출모형은 저류함수모형을 선정하여 매개변수를 최적화시켰다.

수정 TANK모형을 이용한 장기유출분석 결과, 최적화 전의 모의결과보다 최적화 후 모의 결과의 RMSE는 43~72%, 상대오차는 23~73%, 표준오차는 18~38% 감소하는 것으로 나타났으며 상관계수는 5~14% 증가하는 것을 나타냈다. 장기유출분석 중에서 강우발생 기간에 대한 유출분석결과, 매개변수를 평수기와 홍수기로 구분하여 최적화한 후에 유의성이 최소 85%에서 최대 97%까지 향상되는 것으로 나타났다. 최적화 기법을 이용하여 강우기간에 대한 부정확성을 보완함으로써 효율적인 장기물수지 분석이 가능하다고 판단되며 단기유출모형에 비해 장기유출모형에 대한 최적화 연구가

미흡한 실정을 고려해보면 향후 연구에 도움이 될 것이라 판단된다.

저류함수모형의 단기유출량을 시간별로 분석한 결과, 실측값에 대한 RMSE는 최대 55.30 m<sup>3</sup>/s, 최소 4.36 m<sup>3</sup>/s 감소하였으며 상대오차는 평균 16% 감소하였다. 표준오차는 평균 11.43 m<sup>3</sup>/s 감소하는 것으로 나타났고 유의성은 평균 40% 증가하는 것으로 나타났다.

연구 결과, 적용기간과 적용횟수의 부족함이 존재하지만 전역 최적화기법인 유전자 알고리즘과 SCE-UA법을 이용하여 매개변수를 최적화한 후 모의를 실시하였다. SCE-UA법을 이용한 최적화 후 모의결과의 유의성이 90% 이상으로 나타났고 유전자 알고리즘은 유의성이 86% 이상으로 나타나 SCE-UA법에 의한 최적화 모형이 보다 높은 유의성을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 유전자 알고리즘의 경우 최적화 하고자 하는 매개변수의 수에 제한성이 적은 장점을 갖고 있으므로 선정된 모형의 특성을 정확히 파악한 후 최적화 기법을 적용한다면 좀 더 신뢰성 있는 강우-유출분석이 가능하다고 판단된다. 또한 최적화 기법을 이용한 유출모형의 매개변수 보정에 대한 연구가 지속적으로 이루어진다면 더욱 신뢰성 있는 매개변수 보정이 이루어 질 것으로 판단된다.

## References

1. Kim, Sun Joo, Jee, Yong Geun and Phil Shik Kim, 2004, Parameter Optimization of Long and Short Term Runoff Models Using Genetic Algorithm, *Proc. Annual Conference the Korean Society of Agricultural Engineers*, pp. 163. (in Korean)
2. Kim, Sun Joo and Phil Shik Kim, 2001, Water Management Program for Water Management Automation System with Open Architecture, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol.43(5): pp.83-92. (in Korean)
3. Analysis of Hydrologic Runoff, 2003, KOWACO.
4. Kang, Min Goo, Park, Seung Woo, Im, Sang Jun and Hyun Jun Kim, 2002, Parameter Calibrations of a Daily Rainfall-Runoff Model Using Global Optimization Methods, *Korea Water Resource Association*, Vol.35(5), pp.541-552. (in Korean)
5. Shim, Soon Bo, Kim, Yeon Kuk, Kim, Man Sik and Kyu Cheoul Shim, 2001, Estimation of Optimal parameter on WASP5/EUTRO5 Model using Genetic Algorithm, *Journal of Korean Society of Civil engineers*, Vol.21(4), pp.315-326. (in Korean)
6. Kang, Min Goo, Park, Seung Woo and Chang Eon Park, 1998, Calibrating a Rainfall-Runoff Model Using SCE-UA method, *Proc. Annual Conference the Korean Society of Agricultural Engineers*, pp.359-365. (in Korean)
7. Yoon, Yong Nam, 1998, Engineering Hydrology, ChungMunGak Co.
8. Park, Bong Jin, Cha, Hyung Sun and Ju Hwan Kim, 1997, A Study on Parameters Estimation of Storage Function Model Using the Genetic Algorithms, *Korea Water Resource Association*, Vol.30(4), pp.347-355. (in Korean)
9. Wang, Q. J., 1997, Using genetic algorithms to optimise model parameters, *Environmental Modeling & Software*, Vol.12(1), pp.27-34.
10. Yapo, P. O., Gupta, H. V. and S. Sorooshian, 1996, Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data, *Journal of Hydrology*, Vol.181, pp.23-48.
11. Lee, Hee Chul, 1995, A Study on the Parameter Estimation of the Storage Function Model, MSc. thesis: Kyunghee Univ. (in Korean)
12. Singh, V. P., 1995, Computer Models of Watershed Hydrology, *Water Resource Publication*.
13. McKinney, D. C. and M. D. Lin, 1994, Genetic algorithm solution of groundwater management models, *Water Resources Research*, Vol.30(6), pp.1897-1906.
14. Park, Seung Woo, 1993, A Tank Model Shell program for Simulating Daily Streamflow from Small Watersheds, *Korea Water Resources Association*, Vol.26(3): pp.47-61. (in Korean)
15. Duan, Q., Sorooshian, S. and V. Gupta, 1992, Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models, *Water Resources Research*, Vol.28(4), pp.1015-1031.
16. Shim, Soon Bo, Kim, Sun Koo and Seok Ku K 1992, Automatic Calibration of Storage-Function Rainfall-Runoff Model Using an Optimization Technique, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.12(3), pp.127-137. (in Korean)