

## SCE-UA를 이용한 저류함수모형 최적 매개변수 선정 및 평가

### Determination and Evaluation of Optimal Parameters in Storage Function Method using SCE-UA

정 건 희\* / 박 희 성\*\* / 성 지 연\*\*\* / 김 현 준\*\*\*\*

Chung, Gunhui / Park, Hee-Seong / Sung, Ji Youn / Kim, Hyeon-Jun

#### Abstract

Storage function method has been used for flood forecasting in the major rivers in Korea, however, the researches on the relationship between the parameters and runoff characteristics was not sufficient. In addition, there has been a controversy about the optimized parameters without the consideration of the physical characteristics of the basin. Therefore, in this study, the SCE-UA method is used to optimize the parameters and the proposed method was applied with two stage optimization in the Jeongseon and Yeongwol watersheds located in the most upstream in the South Han river. The contour map was developed to investigate parameters and the error surface calculated from the runoff. The proposed parameters is to provide a range of the possible parameter set in a watershed, rather than a specific value. However, the applicability is examined using the average value of the proposed ranged parameters. In this study, the criticism about the optimization technique to find an optimal value having no physical meaning on a watershed is tried to avoid. The objective of this study is to provide a range of parameters for the flood forecasting model and the intuition about the behavior of the parameters, so the efficiency of flood forecasting is increased.

**Keywords** : flood forecasting, parameter optimization, SCE-UA

#### 요 지

저류함수법은 오랜 기간 국내 주요하천의 홍수예보에 활용되어 오고 있다. 그럼에도 불구하고, 매개변수와 유출 특성의 관계를 정확히 규명하지 못하고 있어, 저류함수법에 대한 매개변수 최적화 연구들은 유역의 물리적인 특성을 반영하지 못한다는 논쟁이 있다. 이에 본 연구에서는 SCE-UA방법을 이용하여 저류함수법의 매개변수를 최적화하고, 매개변수의 변화에 따라 유출곡선이 달라지는 양상을 분석하였다. 분석대상 유역으로는 남한강 최상류지역인 정선과 영월 소유역을 선정하였으며, 상·하류에 위치한 두 개의 유역을 단계적으로 최적화 하였다. 또한 매개변수와 오차평면과의 관계를 알아보기 위해 등고선도를 그려 매개변수가 달라짐에 따라 유출곡선 오차의 변화를 분석하였다. 본 연구는 최적화를 통해 매개변수의 특정 값을 제안하기보다는 실무에서 초기값으로 활용할 수 있는 매개변수의 가능한 범위를 제안하는데 그 목적이 있으며, 제안된 범위의 평균값을 사용하여 모의가 적절히 됨을 확인하였다. 또한 오차를 최소화하기 위해 무작위로 매개변수

\* 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: gunhui@kict.re.kr)

Senior Researcher, Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

\*\* 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: hspark90@kict.re.kr)

Senior Researcher, Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

\*\*\* 국토해양부 한강홍수통제소 시설연구사 (e-mail: gyoun@korea.kr)

Assistant Director, Han River Flood Control Office, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 328 Dongjakdaero, Seocho-gu, Seoul Korea

\*\*\*\* 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원 (e-mail: hjkim@kict.re.kr, Tel: 031-910-0266)

Corresponding Author, Research Fellow, Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

의 집합을 결정하기 보다는 유역의 물리적인 특성을 고려하여 가능한 매개변수를 고정하고, 매개변수의 변화가 오차에 미치는 영향을 등고선도를 이용하여 분석함으로써 매개변수가 모형의 결과에 미치는 영향에 대한 직관력을 제공하고자 하였으며, 그 결과가 실무에서 홍수예보 효율 제고에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 홍수예보, 매개변수 최적화, SCE-UA

## 1. 서 론

홍수로 인한 피해는 우리나라에서 가장 심각한 자연재해 중의 하나로서 홍수를 예보하는 하는 것은 홍수로 인한 피해를 미연에 예방하기 위해 매우 중요한 일이다. 홍수예보는 크게 강우예측과 유출해석부분으로 나눌 수가 있는데, 강우를 정확하게 예측하는 일은 주로 정교한 강우모형과 기상학자들의 몫으로 남겨놓는다고 하더라도 정확한 유출해석은 오랜 동안 수문학자들에게 중요한 고민거리였다. 특히 우리나라와 같이 홍수재해에 취약한 지역에서는 더욱 간절한 문제가 되었다. 이에 우리나라에서도 홍수 예보 모형을 개발하여 하천의 주요지점에 대해 홍수예보를 시행하고 있으며, 매년 보다 정확하고 신속한 예보를 통해 피해를 줄이기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 또한 우리나라 홍수예보 모형의 이론적 근간을 이루고 있는 저류함수법(Kimura, 1961)의 성능향상을 위해 여러 각도의 연구들이 오랫동안 다수 이루어져 왔다.

남궁달(1985)은 저류함수법과 운동과 모형의 유사성으로부터 유역의 수문인자 및 지형인자와 매개변수의 관계를 규명하고자 하였으며, 고석구 등(1991)과 심순보(1992)은 최적화 기법을 이용하여 저류함수법의 매개변수를 자동으로 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 이정규와 이창해(1996)는 Brent 방법을 이용하여 최적 매개변수를 산정하였고, 김운해 등(1998)은 저류함수법의 모의 결과와 관측결과에 실시간으로 적용되도록 하기 위해 다중모형 적용추정을 적용하였으며, 평창강과 충주댐 유역에 적용하여 타당함을 입증하였다. 다중모형적용추정은 항공기, 미사일, 목표추적장치, 자기부상시스템 등에 적용되고 있는 제어방식으로 측정된 강우량과 유출량을 이용하여 지정된 매개변수의 범위에서 실시간으로 모의유량을 조정하는 방법이다. 배덕효와 정일문(2000)은 추계동역학적 상태·공간형태의 하도 저류함수모형을 개발하여 실시간 홍수예보를 위해 팔당댐 인도교 지점에 대해 13개 홍수사상을 적용하여 확정론적인 모형에 비해서는 우수한 결과를 얻었으며, 실무에서 사용하고 있는 매개변수와도 비교적 비슷한 결과를 도출하였다. 이정규와 김한섭(2000a, b)

은 유역모형과 하도모형을 하나의 단일모형으로 하는 통합저류함수법을 제안하고, IHP 대표유역인 위천과 보청천 유역, 남한강유역, 낙동강 유역에 적용하여 침투유량의 예측 성능을 향상시킬 수 있음을 보여주었다. 또한 김종래 등(2006)은 Dynamic Effect를 고려한 저류함수를 이용하여 유출모형의 매개변수를 최적화하기 위한 방법을 제안하였으며, 송재현 등(2006)은 한강홍수통제소에서 사용하고 있는 저류함수모형에 적용되는 대표매개변수를 적용하는 경우와 시행착오법과 유전자알고리즘을 사용하여 매개변수를 산정한 결과를 두 가지의 목적함수 계산방법인 SSR (Sum of Squared of Residuals)과 WSSR (Weighted Sum of Squared of Residuals)을 사용하여 비교하고, 홍수유출의 관점에서는 WSSR이 침투유량과 이상치에 대한 영향을 더욱 잘 표현하며, 유전자 알고리즘에 의한 결과가 가장 변동성이 적은 것을 보였다. 김태균과 윤강훈 (2007)은 저류함수법의 포화우량을 통한 유효우량 산정 대신 SCS방법을 이용하여 유효우량을 산정하고 저류함수법으로 유역의 유출을 계산함으로써 매개변수의 수를 줄이고 보다 안정적인 매개변수 산정이 가능한 모형을 제안하였다. 최근 들어 정동국 등 (2008)은 한강유역의 지형인자를 이용하여 저류함수법의 매개변수 산정식을 제안하였다. 이재웅과 최광원(2008)은 적응뉴로퍼지 추론시스템(Adaptive Neuro-Fuzzy Inference, ANFIS)을 이용하여 홍수 예보 시스템을 보완하고, 탄천유역의 2003년에서 2005년까지의 강우사상을 통해 모형을 구축한 후, 2006년 사상을 이용하여 검증하였다. 배덕효와 이병주 (2009a, b)는 역시 앙상블 칼만필터를 이용하여 유역 및 하도 저류함수모형을 추계학적 연속형 저류함수모형으로 개발하고, 안동댐과 임하댐을 포함하는 지보수위관측소에 2006년과 2007년 강우-유출자료를 적용하여 그 적용성을 입증하였다. 가장 최근에는 배덕효와 이병주(2011)가 대유역의 홍수모의가 가능한 연속형 강우-유출모형을 개발하기 위해 지표유출량을 가변저류변수와 유출곡선지수를 이용하여 산정하고, 연속적인 강우에 대한 토양수분의 모의가 가능하도록 모형을 구성하였다. 구성된 모형은 2006년의 자료를 이용하여 보정하고, 2007~2008년의 자

료를 활용하여 8개 수위관측소에 대한 검증하여 그 적용성을 입증하였다.

저류함수모형은 일본에서 처음 제안되어 현재도 일본의 홍수예보에 사용되고 있으므로, 다수의 연구가 일본에서 수행되었으며, 그 중 일부 연구들은 일본 국내가 아닌 해외에도 소개되었다. Fujita and Kudo (1995)는 4차 모멘트를 이용하여 강우량의 불확실성을 고려한 저류함수법의 유출량을 계산하였고, Sugiyama et al. (1997)은 저류함수법과 운동과 모형의 관계를 이용하여 저류함수법의  $P$ 와 운동과 모형의  $p$ 가 같음을 보이고, 저류함수법의  $K$ 와  $T_l$ 이 운동과 모형의  $k$ , 유역면적, 토지이용도에 따라 달라짐을 보였으며, 그 관계식을 증명하기 위해 일본의 22개 유역, 91개 강우사상에 적용하였다. Sugiyama et al. (1999)은 Sugiyama et al. (1997)에서 제안된 저류함수법과 운동과 모형의 관계를 넓은 지역에 적용하기 위해 22개의 유역에서 선택된 91개의 유출사상에 적용하여 그 적용성을 증명하였다. Shamir et al. (2010)은 앙상블 칼만 필터 모형을 저류함수법에 적용하고, continuous soil water accounting 방법을 적용하였으며, 개발된 모형을 낙동강에 적용한 결과, 침투유량의 예측 정확도를 향상시키는 것으로 보고하였다.

위의 연구 동향에서 알 수 있듯이, 일본에서의 저류함수모형에 대한 연구는 실제 실무에 적용하기 위한 소유역 단위의 강우-유출사상을 다양하게 적용하여 결과를 정리하는 방법으로 실무에서 적용하기에 적합한 매개변수를 찾아내는 것에 초점이 맞추어져 있었다. 반면에 우리나라에서는 자료의 부족 등의 이유로 인해 제한적인 유역에 적은 수의 강우-유출사상만을 사용하여야 하는 제약이 있었으므로, 저류함수법을 실제 홍수예보에 적용하여 매개변수를 추정하기 보다는 모형의 성능개선에 대한 연구가 많이 이루어졌음을 알 수 있다. 그러나 저류함수법은 단위도범이나 다른 방법에 비해 많은 수의 매개변수를 가지고 있으며, 비선형적으로 강우와 유출의 관계를 나타내므로, 실무에서 매우 뛰어난 유출의 재현성능을 나타내고 있다. 게다가 실제 우리나라에서 사용하고 있는 홍수예보 모형에는 저류함수법을 기반으로 강우와 기저유량 확대율이 적용되어 있어, 강우와 유출자료의 측정오차까지도 보정해 줄 수 있는 개연성을 가지고 있다. 그러므로 저류함수모형의 정확한 매커니즘을 알지 못한다고 하더라도 유출예측성능을 어느 정도 이상 향상시키는데 어려움이 없으며, 실제 유역의 도달시간이나 유출율과 같은 매개변수들이 그 유역의 물리적인 특성을 반영해주지 못하는 경우에도 유출수문곡선의 재현성능이 뛰어난 경우가 빈번

하여 최적화 기법을 적용하는 것에 대한 논쟁이 오랜 기간 진행되고 있다.

본 연구에서는 전역최적화기법인 SCE-UA방법을 이용하여 홍수예보모형의 매개변수의 최적화를 수행하였다. 그러나 최적화기법에 의해 제안된 매개변수들이 강우-유출모형이나 유역의 물리적인 특성을 반영하지 못한다는 비판을 피하기 위해 다단계의 최적화를 통해 유역의 물리적인 특성을 반영하면서도 유출수문곡선을 성공적으로 재현하는 매개변수를 제안하여 실무에서 홍수예보업무의 효율을 높이는데 도움을 주는 것을 목적으로 한다.

## 2. 홍수예보모형

하천유역으로부터의 홍수유출계산을 위한 저류함수법(貯溜函數法, storage function method)은 홍수류의 연속방정식에 유역이나 하도에서의 유출량과 저류량의 관계를 표시하는 저류함수를 대입하여, 홍수류의 연속방정식을 풀어 수문학적으로 홍수유출량을 계산하는 방법이다. 이 방법은 1961년 Kimura에 의해 제안되었으며, 주로 일본에서 널리 사용되어 왔다. 우리나라에서는 한강홍수예보에 30여년 이상 사용되어 왔고 계산절차가 간편하며, 홍수유출의 비선형성을 고려해 주는 방법이므로 선형모형보다 합리적인 것으로 알려져 있다.

홍수유출을 Manning 공식으로 표시할 수 있는 지표면 유출이라 가정하면 유역이나 어떤 하도구간의 저류량  $S$ 는 유출량  $O$ 의 멱함수로 표시할 수 있다. 즉

$$S = KO^P \quad (1)$$

여기서,  $K$ ,  $P$ 는 유역 혹은 하도구간에 대한 상수이다. 한편, 유역에 대한 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{3.6} f r_{ave} A - O = \frac{dS}{dt} \quad (2)$$

여기서  $f$ 는 평균유입계수이며,  $r_{ave}$ 는 단위시간당 유역평균 강우량(mm/hr),  $A$ 는 유역면적(km<sup>2</sup>),  $O$ 는 유역지체시간  $T_l$ 을 고려한 유역으로부터의 직접유출량(m<sup>3</sup>/sec),  $S$ 는 유역 내의 실제 저류량(m<sup>3</sup>)이다.

또한 하도구간에 대한 연속방정식을 표시하면 다음과 같다.

$$\left( \sum_{j=1}^n f_j I_j \right) - O = \frac{dS}{dt} \quad (3)$$

여기서,  $f_j$ 는 평균유입계수이며,  $I_j$ 는 유역 및 지류역으로부터 하도로의 유입량 혹은 하도구간의 상류단으로의 유

입량( $m^3/sec$ )이고,  $O$ 는 지체시간  $T_l$ 을 고려한 하도구간의 하류 단에서의 유출량( $m^3/sec$ ),  $S$ 는 하도구간 내의 실저류량( $m^3$ )이다.

유역의 저류함수를 사용하여 유출계산을 하기 위해서는 저류함수 Eq. (1)의 상수에 해당하는  $K$ ,  $P$ 와 유출의 상태가 포화점에 도달되기 전의 유출률인 1차 유출률  $f_1$ , 포화점에서의 포화우량  $R_{sa}$ , 그리고 강우로부터 유출의 지체현상을 나타내는 지체시간  $T_l$  등의 결정이 필요하다. 실제로 국내에서는 저류함수법을 주요하천의 홍수예보에 사용하고 있어, 유역별로 적절한 매개변수 산정이 매우 중요하지만, 5개의 매개변수( $T_l$ ,  $K$ ,  $P$ ,  $f_1$ ,  $R_{sa}$ )가 서로 유기적으로 연관되어 있어 유역을 대표하는 매개변수를 산정하는 것이 쉽지 않은 실정이다. 그러므로 실무에서는 유역별 매개변수의 초기 값을 결정하여 적용한 후, 강우 사상별로 유출량에 따라 다른 매개변수를 시행착오적으로 적용하여 기왕 강우사상에 대한 유출곡선을 맞추기 위해 노력하고 있다. 이는 많은 시간과 노력이 요구되며 최

종적으로 산출된 매개변수 또한 적절하지 않기가 쉽지 않다. 그러므로 보다 정확한 매개변수를 작은 노력으로 산출할 수 있는 방법을 개발하기 위해 많은 연구들이 있었으나(정동국 등, 2008; 김종래 등, 2006), 실제 사용되고 있는 방법은 여전히 시행착오적으로 계산하는 방법이다.

### 3. SCE-UA

본 연구에서는 전역 최적화 기법으로 최근에 가장 많이 사용되는 방법 중 하나인 SCE-UA 방법은 미국의 애리조나 대학교의 Duan et al. (1992, 1993)에 의해 제안된 방법으로 simplex procedure, controlled random search, competitive evolution, new complex shuffling concept가 조합된 방법이다. 전역 최적화 기법은 전체 해공간을 탐색하여 해를 찾아가는 방법으로 최적해에 해의 모집단이 궁극적으로는 모이도록 특정한 기법을 적용하여 해를 진화시킨다. 흐름도(Fig. 1)에서 알 수 있듯이 전체 모집단이  $p$ 개의

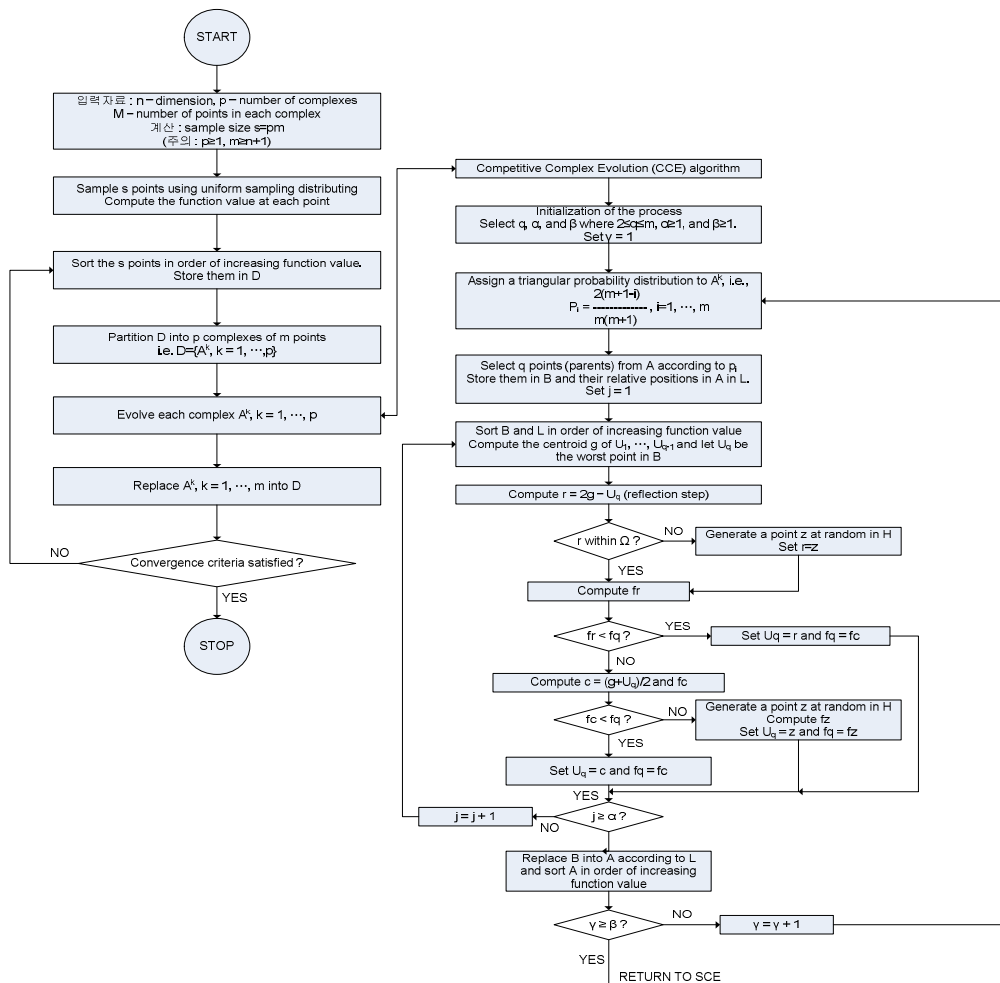


Fig. 1. Flowchart of SCE-UA Algorithm(Duan et al., 1992)

complex로 분리되며, 각각의 complex는  $m$  개의 포인트가 속해 있다. 매개변수의 범위 내에서 추출된 매개변수의 세트를 이용해 모의한 목적함수의 결과를 이용하여 매개변수를 점차 최적해 가까이로 이동시킨다. 이때 모집단이 모두 동시에 진화하지 않고,  $p$ 개의 complex로 나뉘어 진화하게 되는데, 이 때 경쟁 진화 알고리즘(CEE algorithm)이 사용된다. 각자 진화된 complex 들은 다시 모집단에서 섞이고,  $p$ 개의 complex로 나뉘어 진화하는 단계를 거치게 된다. 이러한 과정을 거쳐 점차 진화된 모집단의 구성요소들은 모두 최적해에 접근한다.

오차의 최소화를 위해 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 Nash-Sutcliffe 모형효율계수(NSE, Nash and Sutcliffe, 1970)를 목적함수로 정하여 최소화하였다. 평균제곱근오차와 모형효율계수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{T}}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2}$$

여기서,  $Q_o^t$ 는 시간  $t$ 에 관측된 유출량,  $Q_m^t$ 는 시간  $t$ 에서 계산된 유출량,  $\bar{Q}_o$ 는 관측된 유출량의 평균값이며,  $T$ 는 총 계산시간의 수 (자료의 수)이다. RMSE는 0이상 양의 값을 가지며, 0에 가까울수록 오차가 작음을 나타내는 반면, NSE는 음의 무한대 ( $-\infty$ )에서 1까지의 값을 가지고, 1에 가까울수록 오차가 작음을 나타낸다. 즉, RMSE=0과 NSE=1일 때 모형의 결과와 관측결과가 완벽하게 일치함을 의미한다. 그러나 NSE의 경우에는 관측치들의 분산을 고려하여 계산한다. NSE=0일 경우에는 모형이 계산한 결과가 관측치의 평균값과 같다는 것을 의미하며, 0보다 작은 경우에는 계산오차가 관측치의 분산보다 크다는 것을 의미한다.

#### 4. 홍수예보모형 매개변수 최적화

우리나라의 홍수예보모형은 저류함수법에 그 근간을 두고 있으면서도 실무에 적용성을 높이기 위해 5개의 매개변수( $T_b, K, P, f_1, R_{sa}$ ) 이외에 포화유출율( $F_{sa}$ ), 강우확대율과 기저유량확대율을 추가하여 다양한 경우에 적용이 가능하도록 하고 있다. 그러나 매개변수의 숫자가 8

개로 늘어날 경우 최적 매개변수 셋으로 유일해가 존재할 가능성은 매우 낮으며, 매개변수들이 서로 상관성을 가지면서 여러 개의 복수해가 존재할 것으로 예상된다. 그러므로 기본적으로 최적화해야 하는 대상 매개변수는 6개 ( $T_b, K, P, f_1, F_{sa}, R_{sa}$ )를 대상 매개변수로 선정하고, 추가적인 2개의 매개변수 중 강우확대율은 1.0을 대입하고, 초기 유출량 값을 결정하는 기저유량확대율은 초기유량값과 같은 값이 선정되도록 고정하였다.

실무에서 시행착오적으로 최적매개변수를 결정할 경우, 적용하는 사람에 따라 먼저 조정하는 매개변수가 다를 수 있으며, 다른 매개변수 셋을 이용해 계산한 유출결과가 같은 오차를 가지는 경우도 발생할 가능성이 매우 높다. 이렇게 비선형성이 높은 강우-유출 관계에서는 복수의 최적해가 존재하는 것이 당연할 것이며, 같은 최소 오차를 발생시키는 매개변수의 셋 중에서 유역의 물리적인 특성을 가장 잘 나타내는 셋을 찾고, 유역별 매개변수의 거동 특성을 이해하는 것이 매우 중요한 연구가 될 것이다.

실제로 많은 연구에서 유역특성치인 유역면적( $A$ ), 유로연장( $L$ ), 유역평균경사, 하천경사를 기본적인 매개변수 산정식 개발을 위한 고려인자로 설정하여 경험식을 개발하였으며(최종남 등, 2009), 일본에서는 소유역별 경험식을 적용하여 성공적으로 홍수예보를 시행하는 것으로 알려져 있다. 그러나 일본의 경우에는 소유역의 면적이 100  $km^2$  이하로 매우 작으며, 매우 방대한 강우-유출사상을 이용하여 회귀식을 개발하였지만, 우리나라는 유역의 면적이 크고 일반적으로 적용이 가능한 회귀식을 제안하기에는 자료의 양이나 질이 충분하지 않아 매개변수의 특성을 파악하여 적용하는 것이 어렵다고 생각되어져 왔으며, 대부분 최적화기법이나 시행착오법에 의해 매개변수를 산정해 왔었다.

그러므로 본 연구에서는 다단계 최적화를 통해 유역의 적합한 매개변수를 제안하고, 매개변수의 거동특성을 밝히는 것을 그 목적으로 하며, 연구단계는 다음과 같다.

- ① 매개변수별 가능 최대 범위 설정에 따른 최적 매개변수 산정
- ② 문헌에서 가장 많이 고정값을 제안하고 있는 저류함수의 지수  $P$ 를 고정할 경우의 최적 매개변수 산정

#### 4.1 적용유역

본 연구를 적용할 대상유역을 선정하기 위해 다양한 유역을 살펴보았으나, 매개변수를 최적화하기 위해서는 유역 내 인위적인 물 사용량이나 저수지 등과 같은 인위적인 유량의 조정이 없어야 하므로 하천의 최상류지역이 가

장 적합한 것으로 판단되었다. 그러므로 남한강유역의 가장 상류인 정선과 영월 유역을 대상 유역(Fig. 2)으로 선정하여, 소유역별 매개변수를 도출하였다. 정선과 영월유역의 출구에 존재하는 수위관측소는 정선2와 영월 수위관측소로서 현황은 Table 1과 같다. 정선과 영월소유역은 남한강의 가장 상류이면서 영월수위관측소는 홍수예보지점이기도 하므로 양질의 자료를 보유하고 있어, 본 연구를 적용하는데 적합하다고 판단되었다. 정선과 영월 소유역의 수위-유량 관계곡선식은 Tables 2~3에 나타나있다.

정선과 영월소유역에 동시에 적용 가능한 강우-유출 사상은 2004년 이후부터이므로, 2004년부터 2011년까지 제안되는 매개변수의 보정을 위해 총 16개의 강우 사상을 선정하였으며, 강우사상의 시작시간, 종료시간, 총강우량, 유출량 및 유출률은 Table 4와 같다. 유출률은 직접유출량을 총강우량으로 나눈 값으로, 이론적인 최대값은 100%이지만, 간혹 100% 이상의 유출이 발생하기도 한다. 직접유출량 계산을 위한 기저유량은 직선분리법을 적용하였다. 본 연구에서 선정된 강우사상 중 강우사상4의 정선유출

량, 강우사상5의 정선과 영월유출량, 강우사상10의 정선유출량, 강우사상12의 영월유출량이 100% 이상의 유출률을 나타내었다(Table 4의 회색 칸). 이렇게 이론적인 최대값보다 큰 유출률이 계산된 이유는 관측 자료의 오류이거나, 기저유량을 직선분리로 분리함에 따라 발생된 오차일 수도 있다. 어떤 경우이던 매개변수 최적화에 의해 100% 이상의 유출률을 나타내는 유출곡선을 계산할 수 없으므로, 어느 정도의 오차가 예상된다. 실무에서는 이러한 경우에 사용할 수 있도록 강우량 확대계수라는 매개변수가 존재하나, 앞장에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 사용하지 않았다.

또한 반대로 유출률이 매우 작은 경우도 존재한다. 예를 들어, 강우사상6의 정선유역은 유출률이 34.10% 밖에 되지 않는다. 이것은 강우사상6이 5월 강우이므로 유역이 매우 건조한 상태에서 강우가 발생하여 많은 양의 강우가 토양층으로 침투된 것으로 판단된다. 실제로 대부분의 강우는 7~9월 사이 홍수기의 강우사상이지만 강우사상 1, 6, 11, 12번은 4월과 5월의 강우이다 (Table 4의 빗금친 열

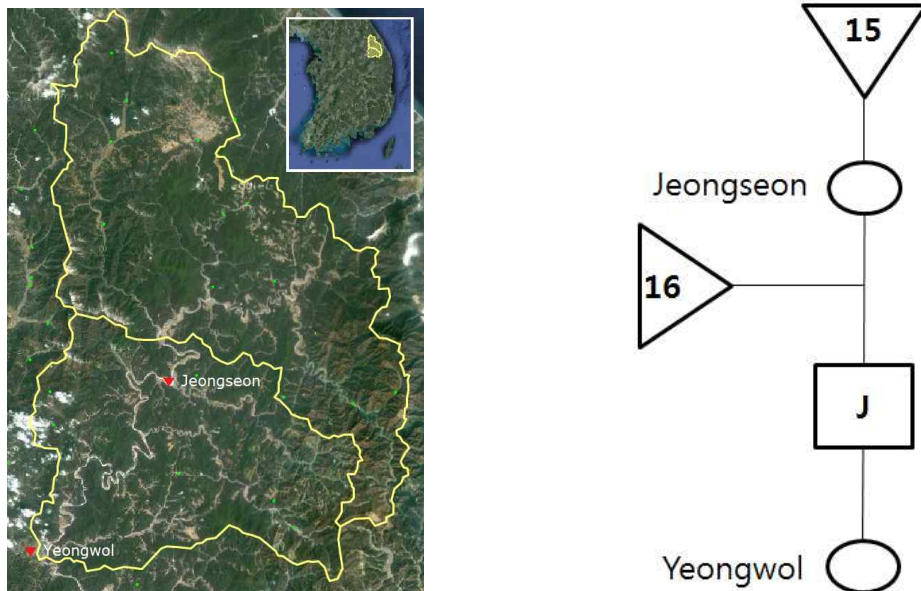


Fig. 2. Watershed Boundary and Structure Map of Jeongseon and Yeongwol Watersheds

Table 1. Water Level Gauging Stations at the Outlet of Jeongseon and Youngwol Watersheds (<http://www.wamis.go.kr>)

Station	Code	Latitude	Longitude	Organization	Watershed area (km <sup>2</sup> )
Jeongseon2	1001655	37-22-42	128-39-26	MLTM*	1,688.41
Yeongwol	1001690	37-10-55	128-20-32	MLTM	2,440.36

\*MLTM : ministry of land, transport, and maritime affairs

Table 2. Rating Curve of Jeongseon Water Level Gauging Station

Year	Applicable Range	Rating Curve ( $Q : \text{m}^3/\text{s}, H(h) : \text{m}$ )
2005 ( $H=h+1$ )	$0.25 \leq H \leq 0.93$	$Q = 29.68 \times (H+0.01)^{1.363}$
	$0.93 \leq H \leq 3.72$	$Q = 82.31 \times (H-0.30)^{2.469}$
	$3.72 \leq H \leq 5.43$	$Q = 124.63 \times (H+1.00)^{1.692}$
2006 ( $H=h+1$ )	$0.25 \leq H \leq 0.50$	$Q = 116.770 \times (H+0.180)^{4.741}$
	$0.50 < H \leq 1.10$	$Q = 11.016 \times (H+0.800)^{2.030}$
	$1.10 < H \leq 3.70$	$Q = 47.250 \times (H-0.150)^{2.987}$
2007 ( $H=h+2$ )	$3.70 < H \leq 5.43$	$Q = 152.575 \times (H+2.005)^{1.500}$
	$0.70 \leq H \leq 1.40$	$Q = 10.810 \times (H-0.700)^{2.990}$
	$1.40 \leq H \leq 1.80$	$Q = 46.850 \times (H-1.120)^{1.990}$
	$1.80 \leq H \leq 3.30$	$Q = 86.940 \times (H-1.300)^{2.000}$
2010 ( $H=h+2$ )	$3.30 \leq H \leq 4.44$	$Q = 178.120 \times (H-2.000)^{2.550}$
	$4.44 \leq H \leq 11.00$	$Q = 46.230 \times (H-0.800)^{2.800}$
	$0.70 \leq H \leq 1.10$	$Q = 3.090 \times (H-0.700)^{2.990}$
	$1.10 < H \leq 1.80$	$Q = 34.985 \times (H-0.900)^{3.210}$
2010 ( $H=h+2$ )	$1.80 < H \leq 3.30$	$Q = 58.385 \times (H-1.120)^{2.205}$
	$3.30 < H \leq 4.40$	$Q = 196.361 \times (H-2.060)^{2.350}$
	$4.40 < H \leq 7.73$	$Q = 155.249 \times (H-1.220)^{1.930}$

Source : <http://www.wamis.go.kr/>  
 ( $H$  : Converted Water Level,  $h$  : Real Water Level)

의 경우들). 이렇게 다양한 특성을 가지는 강우를 같은 유역이라고 하더라도 한 개의 매개변수로 통일할 수 있는가에 대해서는 향후 심도 있는 연구가 더욱 요구된다.

#### 4.2 최적 매개변수 산정

정선과 영월소유역은 서로 상·하류에 위치하고 있으므로, 정선 소유역의 매개변수를 먼저 최적화한 결과를 이용하여 영월소유역의 매개변수의 최적화를 시도하였다 (Fig. 3). 홍수예보모형은 30분 간격으로 모의되었다. 정선 소유역의 유출계산을 위해 사용된 저류함수법의 매개변수 6개( $K, P, T_b, f_1, F_{sa}, R_{sa}$ ), 영월소유역의 최적화의 대상 매개변수는 영월소유역 6개( $K, P, T_b, f_1, F_{sa}, R_{sa}$ ), 하도 3개( $K_c, P_c, T_c$ )로 총 9개이다. SCE-UA 방법의 매개변수는 complex 20개, complex 내 point의 개수는 5개로 총 모집단의 수는 100개로 결정하였으며, 총 50번의 루프를 수행하도록 하였다. Duan et al. (1993)에서는 기존의 방법과 달리 전체 모집단을 complex로 나누어짐으로 인해 효율이 증가함을 증명하기 위해 전체 모집단을 나누지 않고 계산하는 경우(m=s, SCE1)와 complex의 수를  $2n+1$ 으로 결정한 경우(SCE2)로 나누어 계산하였으며, complex

Table 3. Rating Curve of Yeongwol Water Level Gauging Station

Year	Applicable Range	Rating Curve ( $Q : \text{m}^3/\text{s}, H(h) : \text{m}$ )
2005	$0.34 \leq h \leq 0.80$	$Q = 67.39 \times (h+0.15)^{2.116}$
	$0.80 < h \leq 1.48$	$Q = 101.99 \times (h+0.05)^{3.111}$
	$1.48 < h \leq 3.90$	$Q = 198.75 \times (h-0.10)^{2.052}$
	$3.90 < h \leq 4.20$	$Q = 348.11 \times (h+1.00)^{1.371}$
2006	$0.34 \leq h \leq 0.70$	$Q = 50.300 \times (h+0.490)^{4.200}$
	$0.70 < h \leq 4.20$	$Q = 206.318 \times (h+0.010)^{1.985}$
	$4.20 < h \leq 4.80$	$Q = 232.630 \times (h-0.010)^{1.907}$
	$4.80 < h \leq 11.09$	$Q = 322.550 \times (h-0.010)^{1.699}$
2006	$0.40 \leq h \leq 0.55$	$Q = 19.893 \times (h+0.510)^{2.329}$
	$0.55 < h \leq 0.79$	$Q = 838.786 \times (h-0.250)^{2.995}$
	$0.79 < h \leq 4.20$	$Q = 206.318 \times (h+0.010)^{1.985}$
	$4.20 < h \leq 4.80$	$Q = 232.630 \times (h-0.570)^{1.907}$
2007	$4.80 < h \leq 11.09$	$Q = 322.550 \times (h-0.010)^{1.699}$
	$-0.53 \leq h \leq 0.32$	$Q = 15.165 \times (h+0.530)^{3.000}$
	$0.32 < h \leq 2.00$	$Q = 117.500 \times (h+0.012)^{2.299}$
	$2.00 < h \leq 4.27$	$Q = 18.296 \times (h+1.319)^{2.890}$
2007	$4.27 < h \leq 10.00$	$Q = 329.295 \times (h-0.980)^{1.750}$
	$-0.53 \leq h \leq 0.46$	$Q = 12.566 \times (h+0.530)^{2.780}$
	$0.46 < h \leq 1.60$	$Q = 40.216 \times (h+0.150)^{2.410}$
	$0.41 \leq h \leq 1.60$	$Q = 99.248 \times (h-0.410)^{2.560}$
2008	$1.60 < h \leq 2.50$	$Q = 131.220 \times (h-0.540)^{2.850}$
	$2.50 < h \leq 12.00$	$Q = 263.602 \times (h-0.450)^{1.700}$
	$0.45 \leq h \leq 1.50$	$Q = 261.251 \times (h-0.450)^{2.730}$
	$1.50 < h \leq 1.67$	$Q = 209.067 \times (h-0.320)^{2.151}$
2009	$0.45 \leq h \leq 1.67$	$Q = 59.125 \times (h-0.450)^{2.730}$
	$0.45 \leq h \leq 1.50$	$Q = 261.251 \times (h-0.450)^{2.730}$
	$1.50 < h \leq 2.00$	$Q = 209.067 \times (h-0.320)^{2.151}$
	$2.00 < h \leq 4.00$	$Q = 300.168 \times (h-0.450)^{1.721}$
	$4.00 < h \leq 6.37$	$Q = 58.965 \times (h+5.380)^{1.701}$
	$0.45 \leq h \leq 1.50$	$Q = 261.251 \times (h-0.450)^{2.730}$
	$1.50 < h \leq 3.00$	$Q = 209.067 \times (h-0.320)^{2.151}$
	$3.00 < h \leq 14.00$	$Q = 203.653 \times (h-0.530)^{1.702}$
2010	$0.45 \leq h \leq 1.10$	$Q = 370.319 \times (h-0.450)^{2.750}$
	$1.10 < h \leq 1.50$	$Q = 298.951 \times (h-0.500)^{1.900}$
	$1.50 < h \leq 3.00$	$Q = 213.992 \times (h-0.320)^{2.020}$
	$3.00 < h \leq 4.30$	$Q = 89.704 \times (h+0.900)^{2.102}$
	$4.30 < h \leq 14.00$	$Q = 303.929 \times (h+1.400)^{1.290}$

Source : <http://www.wamis.go.kr/>  
 ( $H=h+1$  : Converted Water Level,  $h$  : Real Water Level)

Table 4. Selected Rainfall Events in Jeongseon and Yeongwol Watersheds for Parameter Calibration

Rainfall Event	Starting Time	Ending Time	Rainfall (mm)		Direct Runoff (mm)		Runoff Rate (%)	
			JS*	YW*	JS	YW	JS	YW
1	2004-04-26 14:30	2004-05-08 19:30	72.58	46.70	14.05	9.07	53.74	35.26
2	2004-07-07 06:00	2004-07-10 06:00	60.29	50.43	18.77	18.54	77.98	59.06
3	2005-07-01 00:30	2005-07-09 19:00	104.65	145.47	58.60	47.14	63.41	71.64
4	2005-07-11 06:00	2005-07-24 13:00	54.78	92.31	47.35	54.18	115.01	91.38
5	2005-09-21 05:30	2005-09-30 05:00	57.81	59.18	25.27	37.58	134.31	108.88
6	2006-05-06 02:00	2006-05-15 08:30	61.53	58.46	10.65	18.45	34.10	79.66
7	2008-08-22 07:30	2008-09-01 21:30	66.87	70.17	32.06	32.73	54.49	61.76
8	2009-07-09 03:00	2009-07-11 20:00	133.62	102.63	1.14	7.67	41.97	40.32
9	2009-07-11 21:00	2009-07-17 19:00	249.98	243.25	42.60	64.22	92.61	70.89
10	2010-09-21 08:00	2010-10-07 11:30	79.71	121.58	43.78	44.00	103.86	97.33
11	2011-04-30 01:00	2011-05-09 12:00	74.83	92.78	35.95	35.32	92.26	83.11
12	2011-05-09 14:00	2011-05-20 05:30	82.54	96.30	22.84	24.04	68.98	100.66
13	2011-06-29 12:00	2011-07-02 00:30	69.28	77.97	22.14	20.47	74.40	58.66
14	2011-07-03 04:00	2011-07-07 05:30	117.22	151.93	33.52	32.66	99.75	75.46
15	2011-07-26 18:00	2011-07-30 04:00	79.37	89.71	10.46	9.60	68.52	62.03
16	2011-08-16 17:30	2011-08-22 17:30	80.78	140.87	12.89	8.13	67.87	73.40

\*JS: Jeongseon watershed, YW: Yeongwol watershed.

\* slashed rows : rainfall events in April and May, shadowed cells : runoff rate is more than 100%.

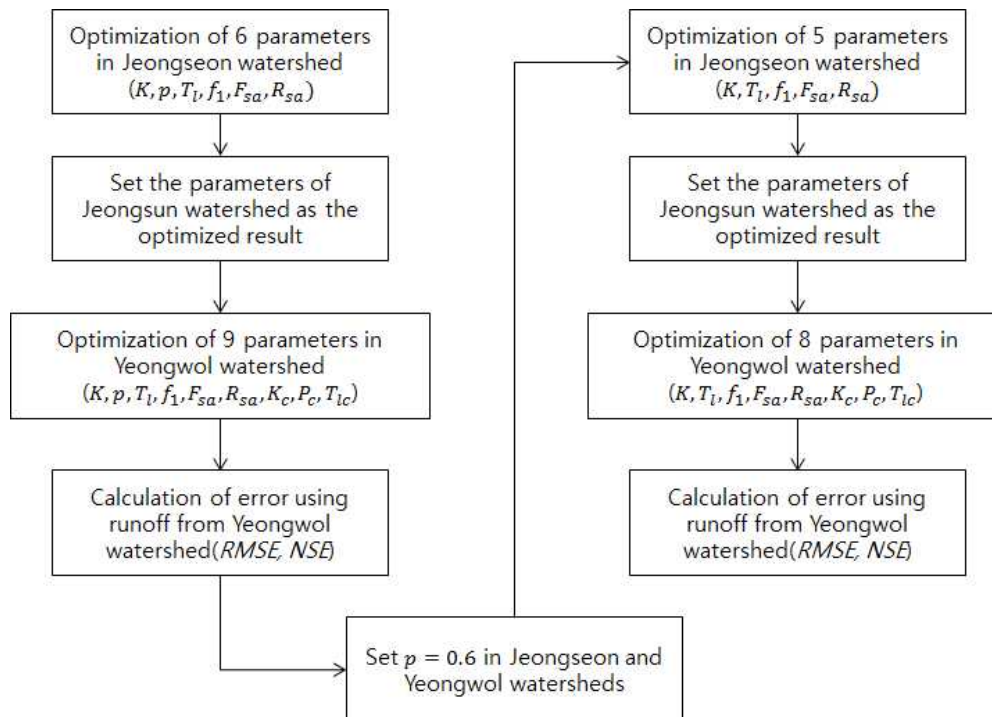


Fig. 3. Optimization Steps



를 나누어 계산하는 것이 보다 효율적임을 보였다. 본 연구에서는 각각의 complex로 나누어 진화하는 속도를 높이기 위해 complex의 수를 20으로 많이 설정하였다. 이는 시스템의 비선형성이 높은 특징으로 인해 초기모집단의 결과에서 빠르게 효율이 향상된 후, 향상속도가 급격히 떨어지는 저류함수법의 특성을 고려하기 위해 더욱 많은 complex로 나누어 독립적인 진화가 가능하도록 하기 위

합이다.

선택된 16개의 사상을 이용해서 매개변수별로 가능한 최대범위를 가능범위(Table 5)로 설정하고 최적화를 수행한 결과는 Table 6과 같으며, 이 매개변수들의 기초통계량을 Table 7에 나타나 있으며, 이때의 오차는 Table 8와 같다. 기초통계량 값에서 알 수 있듯이 포화유출률 ( $F_{sa}$ )의 변동계수가 정선소유역의 경우 0.11, 영월소유역

**Table 5. Basic Statistics of the Parameters in Jeongseon and Yeongwol Watersheds**

	Jeongseon						Yeongwol						Channel		
	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K_c$	$p_c$	$T_{lc}$
Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Max	80.0	1.0	10.0	1.0	1.0	300.0	80.0	1.0	10.0	1.0	1.0	300.0	80.0	1.0	20.0

**Table 6. Optimal Parameters of Jeongseon and Yeongwol Watersheds**

Rainfall Event	Jeongseon						Yeongwol						Channel		
	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K_c$	$p_c$	$T_{lc}$
1	48.70	0.33	10.14	0.56	0.75	96.30	192.87	0.85	11.29	0.35	0.75	158.88	157.82	0.58	5.88
2	22.46	0.89	6.61	0.75	0.89	8.02	73.33	1.00	16.91	0.62	0.67	139.17	21.88	0.25	6.54
3	25.75	0.58	2.89	0.90	0.92	133.97	25.77	0.31	7.38	0.61	0.64	96.98	21.82	0.77	0.22
4	25.44	0.62	3.45	0.88	0.96	145.50	15.40	0.99	10.26	0.51	0.69	23.96	11.73	0.56	2.92
5	19.69	0.78	12.83	0.79	0.96	115.57	27.30	0.16	4.73	0.17	0.95	1.82	77.23	0.19	2.70
6	18.61	0.87	13.94	0.26	0.68	151.77	28.21	0.65	7.98	0.82	0.84	162.36	260.55	0.09	9.38
7	33.15	0.91	5.07	0.64	0.81	194.10	20.60	0.46	3.74	0.70	0.79	174.78	4.55	0.82	8.82
8	44.73	0.30	3.37	0.17	0.79	51.69	36.68	0.61	12.43	0.57	0.65	18.08	94.82	0.30	4.35
9	14.14	0.80	2.98	0.21	0.89	36.00	24.72	0.08	5.25	0.02	0.45	9.20	171.74	0.60	1.16
10	16.26	0.76	4.07	0.21	0.97	25.36	21.82	0.62	1.70	0.07	0.97	25.57	26.97	0.12	0.20
11	8.71	0.87	5.65	0.03	0.88	25.17	22.58	0.78	12.19	0.08	0.90	14.67	90.65	0.59	1.19
12	41.06	0.54	5.88	0.32	0.89	31.16	31.49	0.75	21.06	0.67	0.78	35.42	85.95	0.34	4.13
13	10.59	0.99	5.53	0.06	0.83	21.90	36.25	0.48	2.33	0.91	0.91	94.31	239.47	0.48	2.60
14	14.57	0.87	3.53	0.37	0.89	26.31	44.30	0.52	5.56	0.70	0.88	178.03	23.21	0.03	1.19
15	22.04	0.68	8.65	0.58	0.69	102.60	43.03	0.32	0.31	0.26	0.76	13.69	97.92	0.10	4.94
16	45.00	0.45	6.85	0.87	0.93	159.38	38.93	0.69	0.83	0.16	0.96	52.89	64.75	0.29	1.01

**Table 7. Basic Statistics of the Parameters in Jeongseon and Yeongwol Watersheds**

	Jeongseon						Yeongwol						Channel		
	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K_c$	$p_c$	$T_{lc}$
Average	25.68	0.70	6.34	0.48	0.86	82.80	42.71	0.58	7.75	0.45	0.79	74.99	90.69	0.38	3.58
Standard Deviation	12.98	0.21	3.43	0.31	0.09	61.18	42.30	0.27	5.93	0.29	0.14	67.15	79.48	0.25	2.91
Min	8.71	0.30	2.89	0.03	0.68	8.02	15.40	0.08	0.31	0.02	0.45	1.82	4.55	0.03	0.20
median	22.25	0.77	5.59	0.47	0.89	74.00	29.85	0.62	6.47	0.54	0.79	44.16	81.59	0.32	2.81
Max	48.70	0.99	13.94	0.90	0.97	194.10	192.87	1.00	21.06	0.91	0.97	178.03	260.55	0.82	9.38
Coefficient of Variance	0.51	0.30	0.54	0.64	0.11	0.74	0.99	0.47	0.77	0.64	0.18	0.90	0.88	0.66	0.81

의 경우 0.18로 가장 작은 값을 나타내며, 저류상수인  $K$ 의 변동계수가 영월소유역의 경우 0.99, 하도의 경우 0.88로 가장 큰 것으로 나타났다. 기존의 Sugiyama et al. (1997, 1999)의 문헌에서는 저류함수의 지수인  $p$ 의 값을 0.6으로 고정할 수 있다고 제안하였다. 본 연구의 결과에서도 정선소유역  $p$ 의 평균값은 0.7, 영월소유역의 평균값은 0.58로 문헌에서 제안한 값인 0.6으로 고정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 이때의 오차를 Table 8에서 살펴보면, NSE가 강우사상6을 제외하고는 모든 사상에서 0.9 이상으로 모형에 의해 계산된 유출량의 값이 관측된 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다. NSE에 의한 오차계산에 의하면 강우사상6이 가장 큰 오차를 가지며, 강우사상2가 0.995로 가장 작은 오차를 가진다. 그러나 RMSE에 의한 오차계산을 살펴보면, 가장 작은 오차를 가지는 사상이 강우사상1이고, 가장 큰 오차를 가지는 사상은 강우사상14로 계산되었다. 그러므로 같은 매개변수에 의한 계산결과도 오차를 계산하는 방법에 따라 다르게 판단됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 수문곡선의 첨두유량 부분 오차를 유량이 낮은 부분에 비해 더욱 중요하게 다루어 최소화하는 목적함수인 NSE를 사용하도록 하였다. 이는 홍수기 사상을 대상으로 매개변수를 최적화하는 본 연구의 목적과 부합된다.

### 4.3 $P$ 를 고정한 경우의 최적 매개변수 산정

고정된 값으로 적용하기로 결정된 정선과 영월소유역의  $P$ 를 제외한 나머지 매개변수들의 범위는 최대 한 후, 다시 매개변수 최적화를 시도하였다. 0.6으로 고정된 저류함수의 지수  $P$ 는 유출량과 저류량 사이의 비선형성을 나타내는 지수이다. 이는 유출량과 저류량 사이의 관계를 Manning's 공식으로 표현할 경우, 가상수로가 대상수로라고 가정할 때, 그 지수가 2/3가 되고, 0.6에 근접한 값이므로 수리학적이나 물리적으로도 타당하다고 할 수 있다.

그러므로 이번에는 정선소유역에 대해 매개변수 5개 ( $K, T_b, f_1, F_{su}, R_{su}$ )를 최적화하고, 그 값을 이용해 영월소유역의 8개 매개변수(영월소유역 5개( $K, T_b, f_1, F_{su}, R_{su}$ ), 하도 3개( $K_c, P_c, T_{lc}$ ))를 최적화하였으며, SCE-UA 매개변수는 이전 경우와 동일하게 적용하였다. 여기서 한 가지 명시할 것은, 하도의 저류함수 지수인  $P_c$ 의 경우에는 0.6으로 고정하지 않았다. 이것은 Table 7에서 보이는 것과 같이 그 평균값이 0.38로 0.6과 거리가 있으며, 하도의 저류함수와 유역의 저류함수의 특성이 같다고 볼 수 없기 때문이다.

최적화한 결과 매개변수는 Table 9에 기술되어 있으며, 기초통계량은 Table 10과 같고, 이때 목적함수 값은 Table 8에 기술되어 있다. Table 7과 비교하였을 때, 그 평균값

Table 8. Errors of Optimized Results

Rainfall Event	All parameters are used		p is fixed as 0.6	
	NSE*	RMSE	NSE*	RMSE
1	0.974	15.33	0.975	15.20
2	0.995	37.64	0.996	33.06
3	0.963	119.82	0.961	123.94
4	0.926	112.31	0.923	115.00
5	0.928	123.46	0.923	127.73
6	0.890	81.01	0.908	74.14
7	0.979	43.01	0.968	53.78
8	0.991	72.00	0.985	93.56
9	0.988	163.14	0.984	186.80
10	0.971	91.41	0.981	72.92
11	0.960	94.68	0.970	82.30
12	0.919	105.72	0.944	87.79
13	0.987	94.98	0.990	84.51
14	0.976	209.29	0.990	133.83
15	0.974	101.92	0.996	42.51
16	0.961	102.58	0.979	75.92

\*NSE : Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient.

Table 9. Optimal Parameters of Jeongseon and Yeongwol Watersheds ( $p = 0.6$ )

Rainfall Event	Jeongseon						Yeongwol						Channel		
	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K_c$	$p_c$	$T_{lc}$
1	38.7044	0.6	9.3271	0.1823	0.8239	32.9816	159.9285	0.6	19.4485	0.3081	0.4508	142.2109	246.0597	0.4878	6.3247
2	33.9451	0.6	6.0623	0.8786	0.9611	174.6623	43.475	0.6	3.2283	0.7321	0.8758	193.2626	29.2971	0.0106	6.4018
3	28.5085	0.6	3.6021	0.6347	0.9734	0.3258	18.4599	0.6	6.3866	0.2642	0.5587	11.9067	28.615	0.1015	2.2789
4	15.6257	0.6	5.8005	0.6259	0.9604	19.2316	41.7636	0.6	9.0286	0.8274	0.9978	97.7449	153.3515	0.4472	2.4642
5	21.8586	0.6	9.6055	0.6367	0.8536	33.3816	6.691	0.6	11.5334	0.5187	0.8225	0.5761	150.4463	0.0597	8.0876
6	24.7741	0.6	12.2892	0.2672	0.6683	137.8257	38.1332	0.6	16.144	0.3655	0.9237	6.6626	73.1279	0.1677	7.4136
7	42.7038	0.6	5.8034	0.5433	0.6696	10.3061	16.003	0.6	8.9478	0.149	0.9062	17.2828	39.0328	0.4629	5.5075
8	23.1232	0.6	2.9146	0.0787	0.6284	41.4599	45.2437	0.6	10.2015	0.2799	0.4975	10.9877	116.9918	0.5728	5.2719
9	31.6434	0.6	2.8067	0.113	0.9589	2.805	28.9895	0.6	0.6104	0.1861	0.4784	46.9602	60.8642	0.2386	2.9297
10	20.6765	0.6	5.2904	0.0231	0.9884	15.0902	26.0532	0.6	2.4945	0.0835	0.9978	20.121	45.2016	0.1733	0.2019
11	34.0416	0.6	4.4878	0.9086	0.9832	125.3613	12.1295	0.6	10.8058	0.0563	0.5196	3.4919	141.0275	0.5164	0.8424
12	41.9709	0.6	7.8759	0.6635	0.9041	40.2297	34.4151	0.6	14.9154	0.7261	0.8294	178.5104	44.7788	0.3276	3.3821
13	16.4239	0.6	6.4165	0.1435	0.8744	7.9049	39.3186	0.6	14.2695	0.4034	0.7072	23.5143	186.5417	0.3385	0.4536
14	17.8433	0.6	5.0968	0.073	0.8092	18.4845	22.7952	0.6	7.3921	0.0687	0.8145	23.3576	2.0354	0.2319	0.6169
15	27.5518	0.6	4.9804	0.5408	0.9537	36.8528	35.2439	0.6	6.8179	0.1733	0.9697	25.8037	81.6603	0.3344	1.2477
16	30.9638	0.6	6.0476	0.201	0.9464	18.1915	4.8961	0.6	5.7178	0.1738	0.6005	1.5609	35.6018	0.8064	1.2786

Table 10. Basic Statistics of the Parameters in Jeongseon and Yeongwol Watersheds ( $p = 0.6$ )

	Jeongseon						Yeongwol						Channel		
	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K$	$p$	$T_l$	$f_1$	$F_{sa}$	$R_{sa}$	$K_c$	$p_c$	$T_{lc}$
Average	28.15	0.60	6.15	0.41	0.87	44.69	35.85	0.60	9.25	0.33	0.75	50.25	89.66	0.33	3.42
Standard Deviation	8.70	0.00	2.54	0.30	0.12	52.66	35.57	0.00	5.19	0.25	0.20	65.11	68.64	0.21	2.69
Min	15.63	0.60	2.81	0.02	0.63	0.33	4.90	0.60	0.61	0.06	0.45	0.58	2.04	0.01	0.20
median	28.03	0.60	5.80	0.40	0.93	26.11	31.70	0.60	8.99	0.27	0.82	21.74	67.00	0.33	2.70
Max	42.70	0.60	12.29	0.91	0.99	174.66	159.93	0.60	19.45	0.83	1.00	193.26	246.06	0.81	8.09
Coefficient of Variance	0.31	0.00	0.41	0.74	0.14	1.18	0.99	0.00	0.56	0.75	0.27	1.30	0.77	0.64	0.79

들의 변동폭이 크지 않고, 변동계수의 경향성 또한 달라지지 않았으므로 매번 완전히 다른 값의 매개변수가 선택되는 것이 아니라 같은 패턴의 매개변수 세트가 최적화가 수행됨을 알 수 있다. 이때 최적화된 사상별 강우, 유출곡선은 Figs. 4~10에 도시되어 있다. 강우사상의 침투유량 부분은 대부분 잘 모의되고 있으나, 강우사상 4, 5, 6, 7, 12와 같이 강우 종료 후 유량이 초기 유량과 같은 수준의 작은 유량으로 떨어지지 않고 유지되는 경우에는 저유량 부분을 정확히 모의하기가 쉽지 않아, 전체 NSE값이 상대적으로 작게 산정되었다. 그러나 NSE의 특성상 평균값에 가까운 고수위일 때 가중치가 더 커지게 되므로, 저수

위보다 침투유량을 정확히 모의하는 결과를 보여준다. 또한 수문곡선의 침투유량 후의 수위가 기저유량보다 큰 유량으로 긴 시간 유지되는 것은 기저유량을 직선으로 분리함으로써 발생한 오차로 판단되어지므로, 이 부분의 오차는 크게 고려하지 않았다.

최적화 결과에 의해 매개변수의 범위와 평균값이 산정되었으며(Table 10), 이를 box plot으로 나타내면 Fig. 11과 같다. 그러나 이러한 표와 그래프만으로는 매개변수의 정확한 분포 및 경향을 파악하는데 한계가 있다. 그러므로 유역 특성치에 따라 변하는 것으로 알려진 매개변수  $K$ ,  $T_l$ 이 목적함수에 어떤 영향을 미치는지를 조사하기

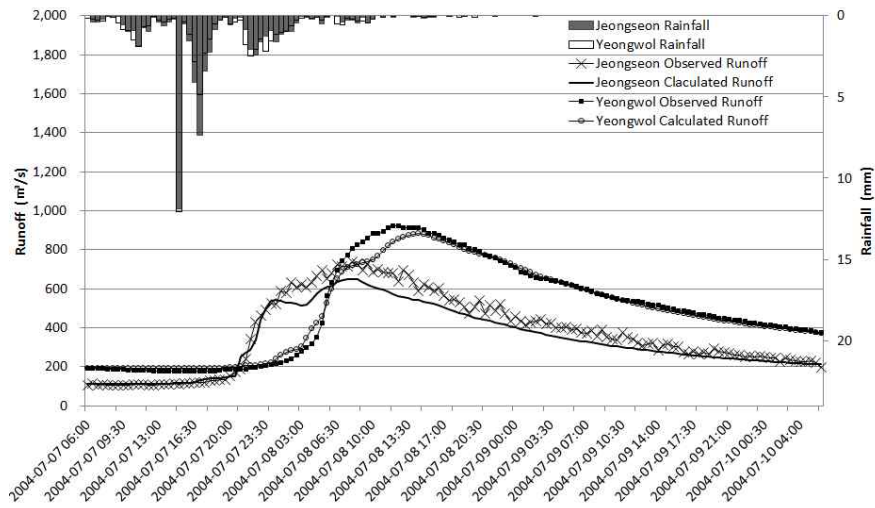


Fig. 4. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Event 2)

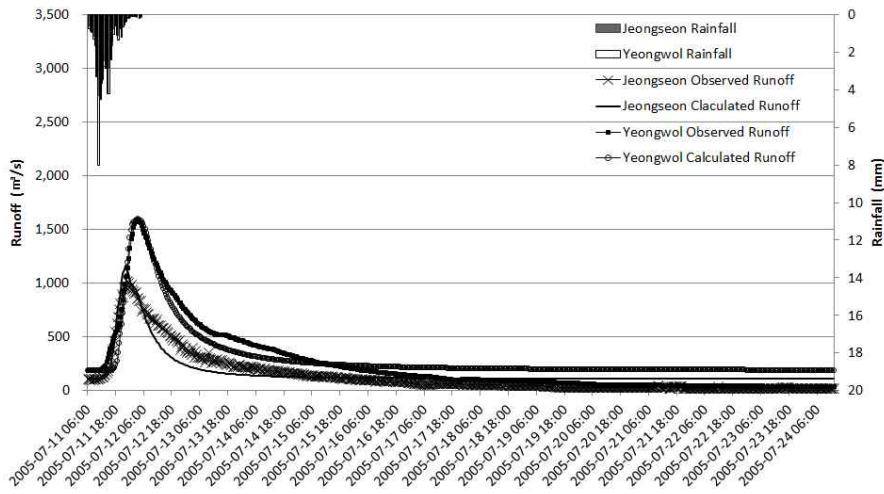


Fig. 5. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Event 4)

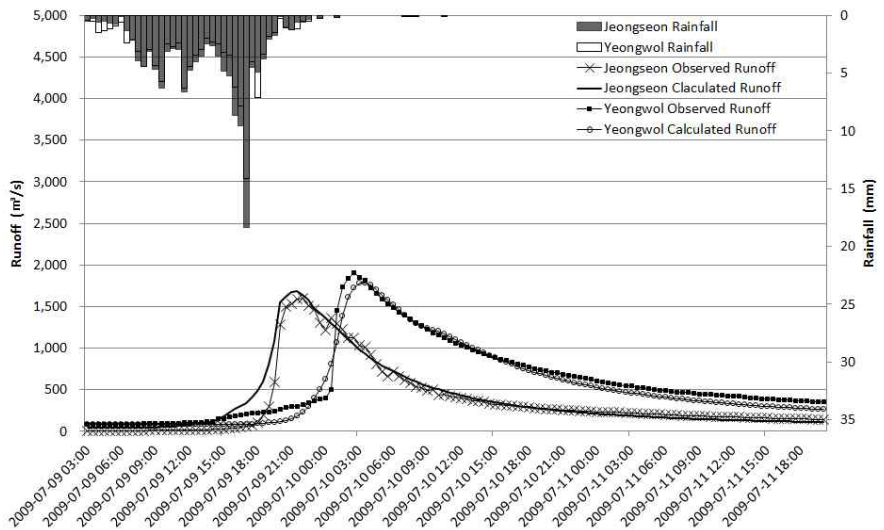


Fig. 6. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Event 8)

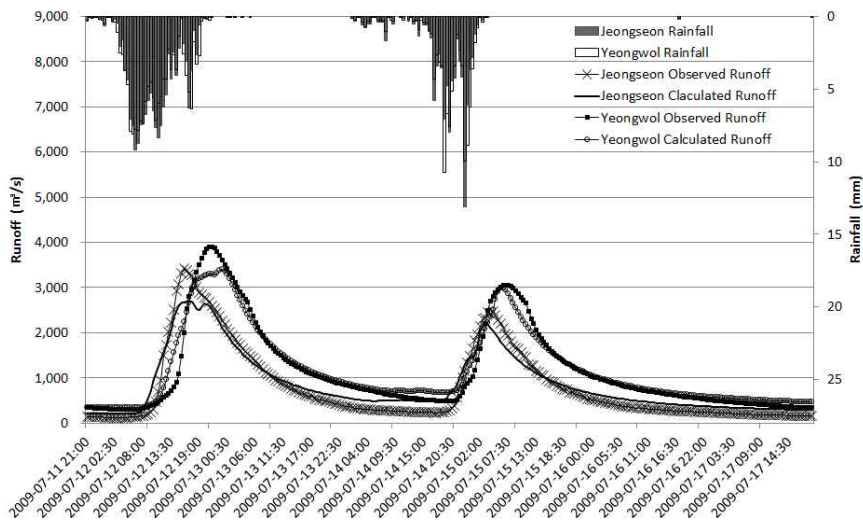


Fig. 7. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Event 9)

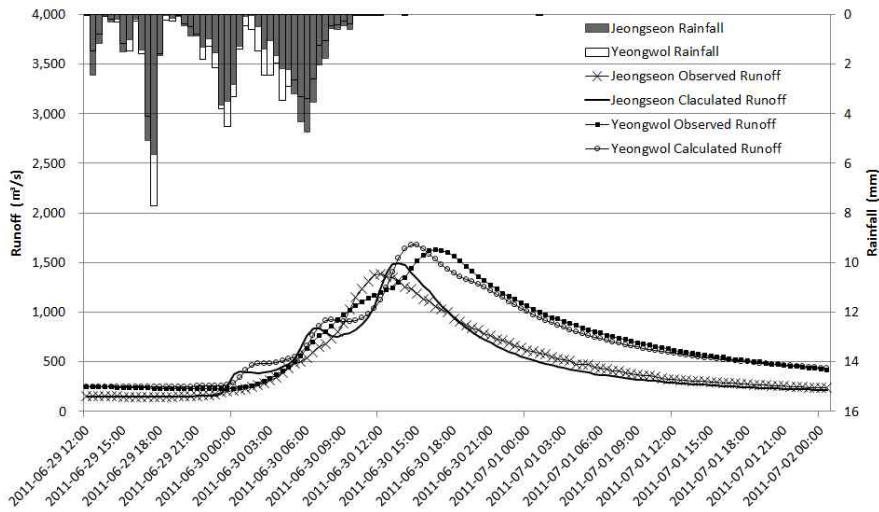


Fig. 8. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Event 13)

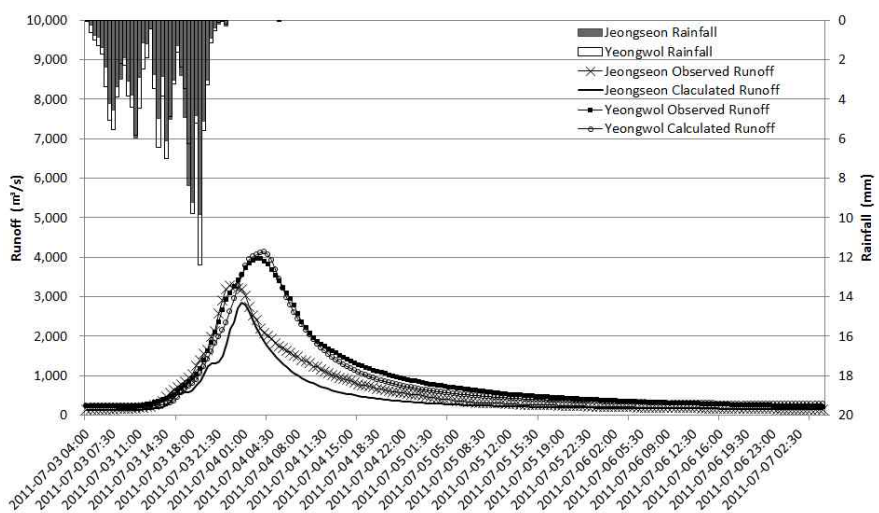


Fig. 9. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Event 14)

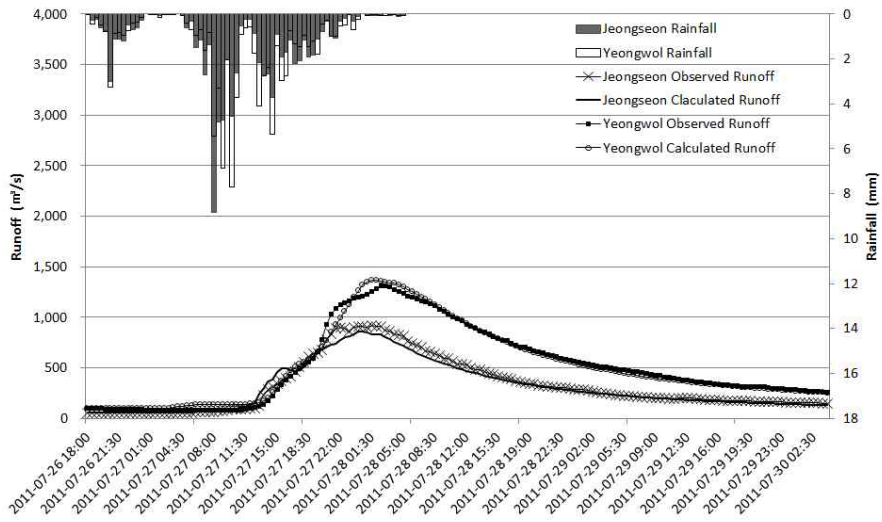


Fig. 10. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Event 15)

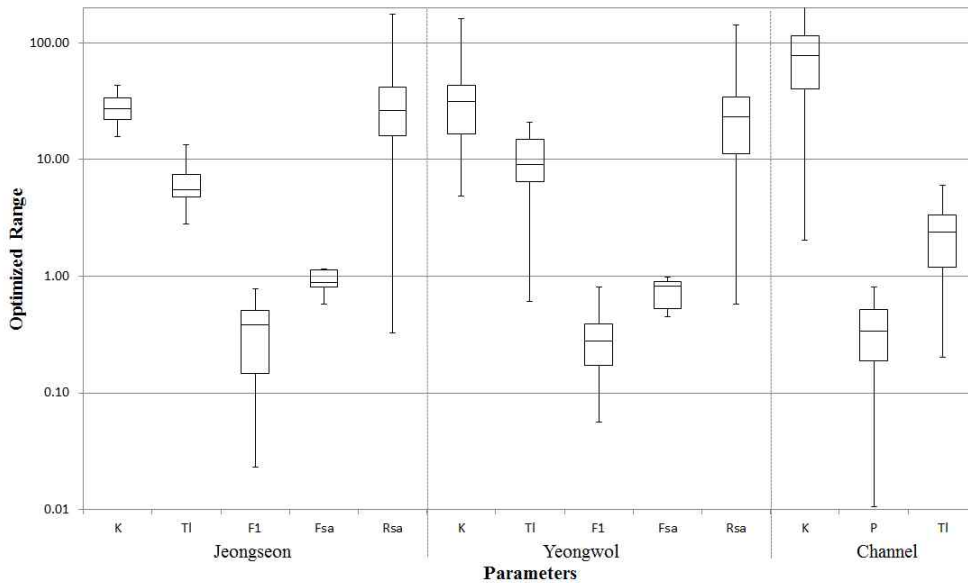


Fig. 11. Optimized Range of the Parameters in Jeongseon and Yeongwol Watersheds ( $p = 0.6$ )

위해, 다른 변수들은 모두 평균값으로 고정하고, 두 개의 값만 최적화를 수행하고 그 결과를 최적화하는 수행횟수에 따라 등고선도를 그려보았다. 총 강우사상이 16개이고, 2개의 소유역이며, SCE-UA의 루프횟수는 50번이므로, 총 1,600개의 등고선도가 그려질 수 있으나 그 변화를 뚜렷이 나타내는 대표적인 경우만 본 연구에 수록하였다. Fig. 12는 정선소유역의 강우사상1에 대한 등고선도를 나타낸다. 그림의 가로축은  $K$ , 세로축은  $T_1$ 을 나타내며, 등고선은 목적함수값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 계산 루프횟수가 첫 번째 일 때는 무작위로 전체 목적함수 해공간에 흩어져있는 것을 볼 수 있으며, 루프 횟수가

증가함에 따라 오차가 작아지는 방향(NSE=1)으로 흩어져 있던 점들이 모이는 것을 볼 수 있다. 정선소유역의 강우사상 1의 경우에는 목적함수 해공간이 명확한 1개의 최고점을 가지고 있으므로, 해들이 최고점 ( $K, T_1$ )  $\approx (40, 10)$  근처로 모이며 최적해를 탐색하는 과정을 볼 수 있다. 그러나 Fig. 13에 도시되어 있는 영월소유역 강우사상7의 경우를 살펴보면, 정선소유역보다 훨씬 복잡한 해공간을 가지고 같은 목적함수 값을 가지는 여러 개의 국지해가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 무작위하게 흩어져있던 해들이 여러 개의 국지해를 향해 모이는 것을 볼 수 있다. 이렇게 영월소유역의 매개변수들과 같이 복

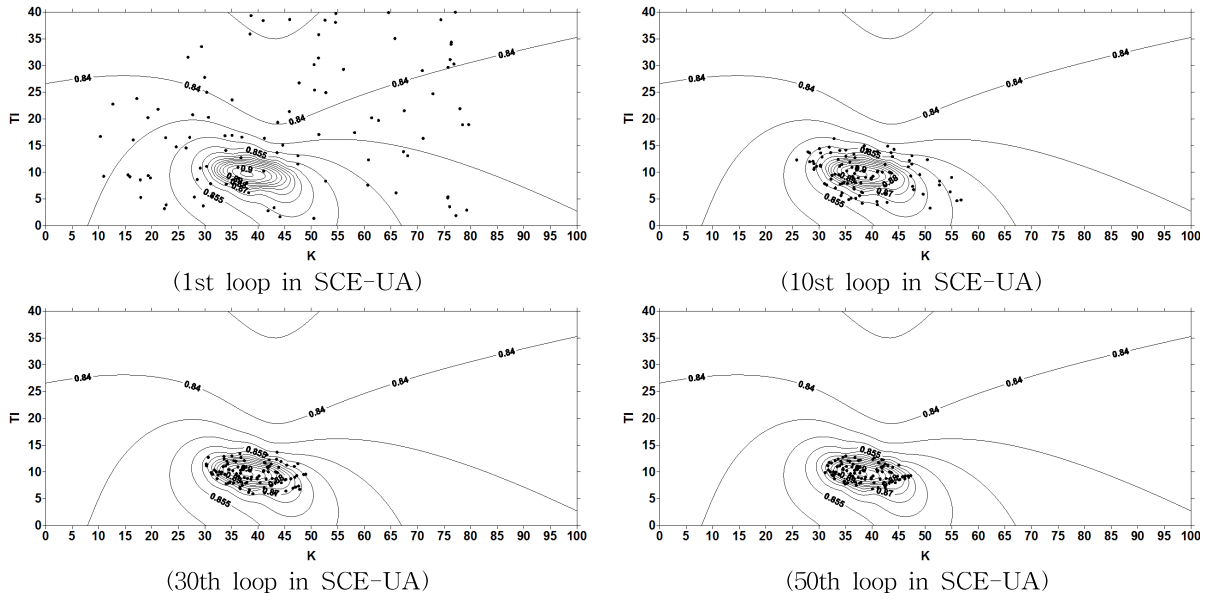


Fig. 12. Error Surface of Objective Function in Jeongseon Station (Event 1)

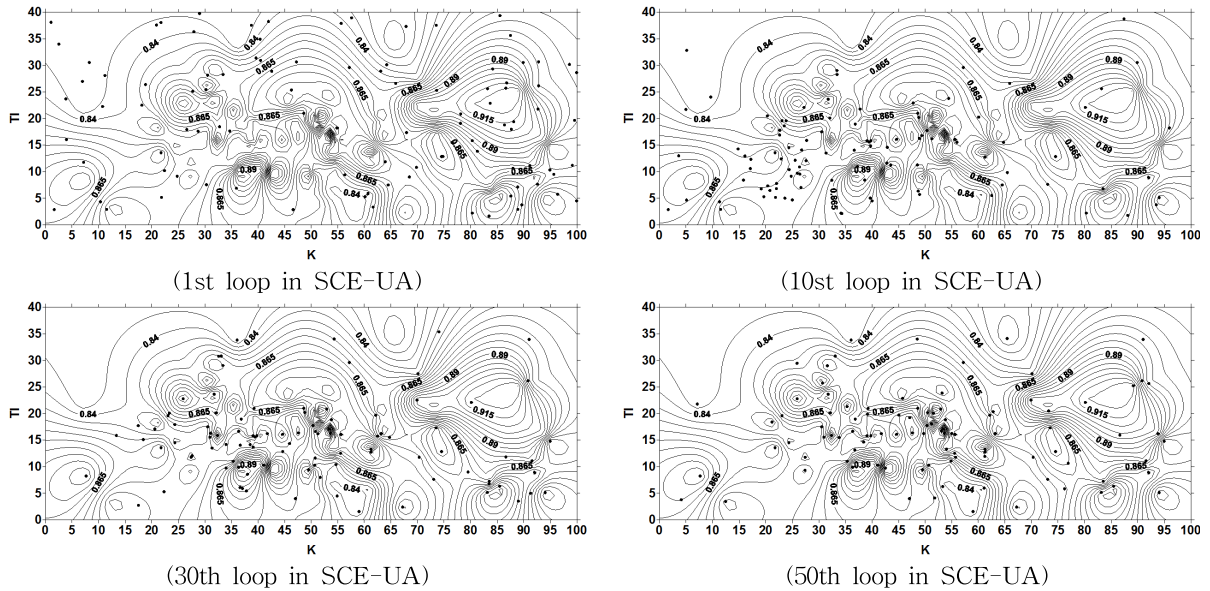


Fig. 13. Error Surface of Objective Function in Yeongwol Station (Event 7)

잡한 해공간을 가지고 있는 경우에는 단순한 전역최적화 방법을 이용하는 것 보다 물리적인 개념을 이용하여 매개 변수의 범위를 좁혀서 최적화 속도를 높여주는 것이 보다 타당할 것으로 판단된다.

#### 4.4 검증

정선과 영월소유역의 매개변수를 16개의 강우사상을 이용하여 최적화하고 그 기초통계량을 계산하여 매개변수가 가지는 범위를 제시하고, 등고선도를 그려 매개변수

값에 따른 목적함수의 변화를 보였다. 이렇게 제안된 매개변수의 범위와 목적함수의 변화특성은 실무에서 홍수 예보 시 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단되나, 실제로 홍수예보를 수행할 때에는 한 개의 매개변수값 만을 사용하게 된다. 그러므로 제안된 매개변수들의 평균값을 이용하여 매개변수 검증에 사용하지 않은 사상 2개(Table 11)에 적용하여 그 오차를 계산하여 보았다. 그 결과 오차는 NSE가 정선과 영월의 경우 0.953과 0.706으로 산정되었다. 이때의 유출수문곡선은 Figs. 14 and 15에 도시되어

Table 11. Rainfall Events in Jeongseon and Yeongwol Watersheds used for Parameter Validation

No.	Starting Time	Ending Time	Rainfall (mm)		Direct Runoff (mm)		Runoff Rate (%)	
			JS	YW	JS	YW	JS	YW
1	2007-09-14 14:00	2007-09-21 21:00	187.64	150.43	17.16	26.75	90.02	80.55
2	2009-07-17 19:30	2009-07-25 17:00	86.96	68.67	53.19	63.93	58.54	46.79

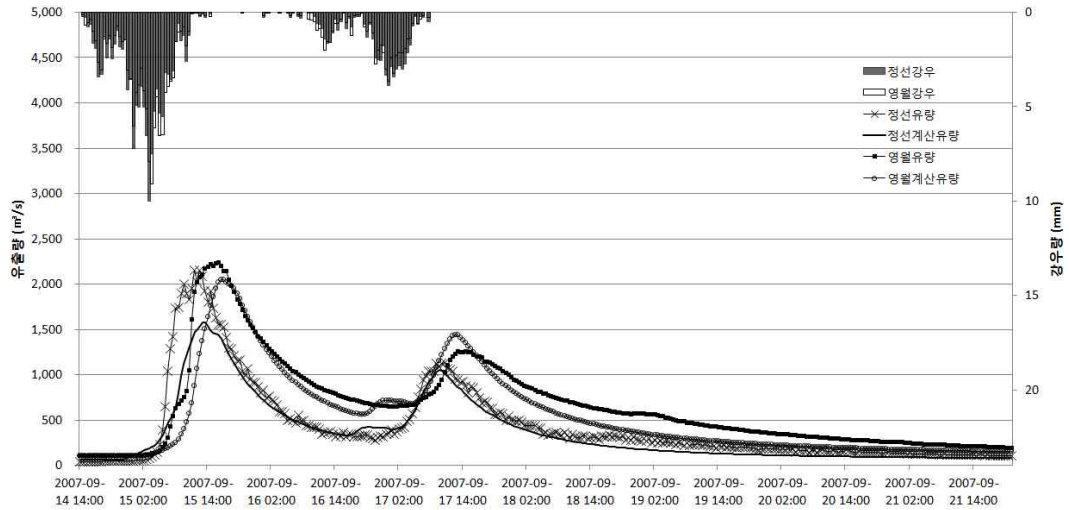


Fig. 14. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Validation Event 1)

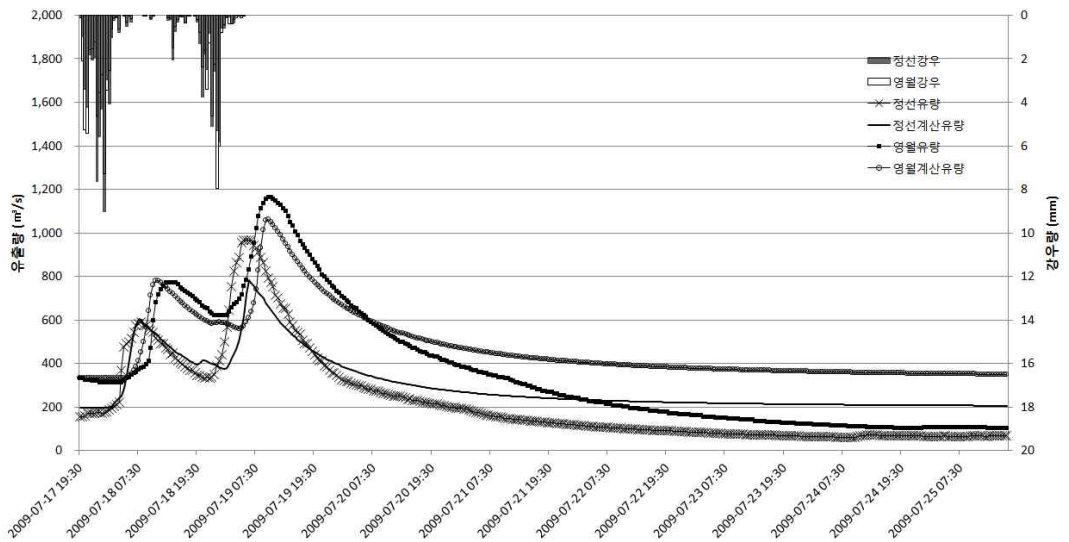


Fig. 15. Rainfall and Runoff Hydrograph in Jeongseon and Yeongwol Watersheds (Validation Event 2)

있다. 결과에서 보이는 것과 같이 침투유량값은 비교적 적절하게 모의가 되는 것으로 보인다. 그러나 검증사상 2의 경우에는 침투유량 발생 후의 기저유량이 초기 시작유량보다 매우 작은 수준까지 낮아지는 사상이므로 현재의 매개변수로는 저유량의 적절한 모의가 불가능한 것으로 판단되었다. 그러므로 NSE가 작은 값이 산정되었으나 대

부분의 오차가 저유량에서 발생한다고 결론지을 수 있다. 또한 같은 소유역이라고 해도 강우사상의 특성에 따라 다른 매개변수값을 가지는 것이 일반적이므로, 제안된 매개변수의 평균값이 최적해라고 논의될 수는 없다는 것을 명시하며, 그럼에도 불구하고 시행착오적으로 매 강우사상마다 매개변수를 추정하는 것은 매우 비효율적이며 다양한 접근을



통해 소유역의 매개변수가 가질 수 있는 범위를 제시하여 그 평균값이 유효한 유출계산을 이끌어 낼 수 있다는 것을 보였다는 것에 본 적용의 시사점이 있다 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구는 남한강 최상류 유역인 정선과 영월소유역을 대상으로 국내 주요하천의 홍수예보모형에 주로 쓰이고 있는 저류함수법의 매개변수 범위를 추정하고, 그 거동에 따른 모형의 오차가 어떤 특성을 가지고 있는지를 분석하였다. 정선과 영월소유역은 서로 상·하류에 위치하므로 정선 소유역의 매개변수를 먼저 최적화 한 후, 그 결과를 이용하여 영월소유역과 정선소유역 유출량이 흐르는 하도를 동시에 최적화하는 2단계 최적화를 수행하였다. 전역최적화기법인 SCE-UA를 사용하였으며, 매개변수를 최적화한 후, 매개변수의 통계치를 분석한 결과, 소유역의 저류함수 지수인  $P$ 는 0.6으로 고정하여도 무방하다는 결론을 내렸다. 이렇게 매개변수의 개수를 줄이고 다시 최적화를 수행한 결과, 매우 양호한 결과를 얻었으며, 정선과 영월소유역에 적용이 가능한 매개변수의 범위를 제안하였다. 또한 유역마다 고유의 매개변수를 제안할 수 있다고 알려져 있는  $K$ ,  $T_1$ 의 변동성을 오차평면 등고선도를 그려 조사하였다. 그 결과 정선소유역은 대체로 단순한 한 개 혹은 두 개의 불룩한 최적해를 나타내는 봉우리를 가지는 반면, 하류에 위치하면 더 많은 매개변수를 가지는 영월소유역은 매우 복잡한 오차평면을 가지는 것으로 나타났다. 이는 직관적으로 예상하고 있던 사실이지만, 실제로 영월소유역의 경우 매우 많은 국지해가 존재하며, 같은 오차를 가지는 매우 다양한 매개변수 셋이 존재한다는 것을 시각적으로 확인하였다는 장점이 있다. 제안된 매개변수의 범위는 실무에서 홍수예보 시 매우 유용하게 사용될 것으로 판단되나, 실제 유출을 모의할 때에는 어떤 방법을 사용하던 한 개의 매개변수만을 선택하여 입력하여야 한다. 그러나 실제로 강우사상마다 달라지는 매개변수들이 존재하므로 유역별 고유의 매개변수 값을 모두 제안하는 것은 무리가 있다. 이에 제안된 매개변수의 적정성을 보이기 위해 제안된 범위를 이용한 평균값으로 매개변수의 검증을 시도하였다. 그 결과, 양호한 결과를 보였으며, 이는 실무에서 홍수예보 시 시작점으로 적절히 사용될 수 있을 것으로 판단되었으며, 분석의 결과는 매개변수의 거동에 대한 직관력을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 보다 다양한 경우에 적용하고 매개변수의 거동과 유역의 물리적인 관계를 더욱 심도 있게 조

사할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 수탁연구사업 '추계학적 기법을 이용한 홍수예측체계 개선 연구'의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 木村俊晃(Kimura) (1961). "貯留關數法に 洪水流出の 追跡法." **博士學位論文**, 日本土木研究所, pp. 89-96.
- 고석구, 안상복, 윤재홍 (1991). "최적화 기법에 의한 저류함수 모형의 자동보정." **수자원연구소 연구발표논문집**, pp. 33-44.
- 김운해, 김영철, 유정웅 (1998). "강우-유출량 예측을 위한 적응 저류함수법." **전기학회논문집**, 전기학회, 제47권, 제2호, pp. 231-236.
- 김종래, 김주철, 정동국, 김제한 (2006). "동적효과를 고려한 저류함수모형의 최적매개변수 결정." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제7호, pp. 593-603.
- 김태근, 윤강훈 (2007). "SCS 초과우량산정방법을 이용한 저류함수법 적용." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제7호, pp. 523-532.
- 남궁달 (1985). "저류함수법에 의한 강우-유출모형의 변수 추정." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제18권, 제2호, pp. 185-185.
- 배덕효, 이병주 (2009a). "양상불 칼만필터를 연계한 추계학적 연속형 저류함수모형 (I): -모형개발-." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 953-961.
- 배덕효, 이병주 (2009b). "양상불 칼만필터를 연계한 추계학적 연속형 저류함수모형 (II): -적용 및 검증-." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제11호, pp. 963-972.
- 배덕효, 이병주 (2011). "대유역 홍수예측을 위한 연속형 강우-유출모형 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제44권, 제1호, pp. 51-64.
- 배덕효, 정일문 (2000). "저류함수법에 의한 추계동력학적 하도홍수추적모형의 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 341-350.
- 송재현, 김형수, 홍일표, 김상욱 (2006). "저류함수모형의 매개변수 보정과 홍수예측 (1) 보정방법론과 모의 홍수 수문곡선의 평가." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회,

제26권, 1B호, pp. 27-38.

심순보 (1992). “최적화 기법에 의한 저류함수 유출모형의 자동보정.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제12권, 제3호, pp. 127-137.

이정규, 이창해 (1996). “저류함수법의 시변성 매개변수 조정에 퍼지이론 도입에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제29권, 제4호, pp. 149-160.

이정규, 김한섭 (2000a). “홍수예보를 위한 통합저류함수모형의 퍼지제어 (I) - 이론 및 모형의 수립.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제6호, pp. 689-699.

이정규, 김한섭 (2000b). “홍수예보를 위한 통합저류함수모형의 퍼지제어 (II)-이론 및 모형의 수립.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제6호, pp. 701-709.

이재응과 최창원 (2008). “Neuro-Fuzzy 추론기법을 이용한 홍수 예·경보.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제41권, 제3호, pp. 341-351.

정동국, 전용운, 이범희 (2008). “저류함수모형 매개변수 산정 개선방법의 한강유역 적용.” **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제8권, 제2호, pp. 149-158.

최종남, 안원식, 김태균, 정건희 (2009). “저류함수법의 매개변수 산정식 개발.” **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제9권, 제5호, pp. 125-130.

Duan, Q.Y., Sorooshian, S., and Gupta, V.K. (1992). “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models.” *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1015-1031.

Duan, Q.Y., Gupta, V.K., and Sorooshian, S. (1993). “Shuffled complex evolution approach for effective

and efficient global minimization.” *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 76, No. 3, pp. 501-521.

Fujita, M., and Kudo, M. (1995). “Stochastic response of a storage function model for flood runoff estimation of higher-order moments.” *Environment International*, Vol. 21, No. 5, pp. 523-531.

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.

Sugiyama, H., Kadoya, M., Nagai, A., and Lausey, K. (1997). “Evaluation of the storage function model parameter characteristics.” *Journal of Hydrology*, Vol. 191, pp. 332-348.

Sugiyama, H., Kadoya, M., Nagai, A., and Lansey, K. (1999). “Verification and Application of Regional Equations for the Storage Function Runoff Model.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 5, pp. 1147-1157.

Shamir, E., Lee, B., Bae, D., and Georgakakos, K.P. (2010). “Flood Forecasting in Regulated Basins Using the Ensemble Extended Kalman Filter with the Storage Function Method.” *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 1030-1044.

논문번호: 12-052	접수: 2012.05.22
수정일자: 2012.07.17/08.08	심사완료: 2012.08.08