

저류함수모형의 민감도분석을 통한 경계조건 설정과 최적매개변수 결정에 대한 연구

Establishment of the Parameter Range by Sensitivity Analysis and Determination of Optimal Parameter for Storage Function Model

송재현*·김형수**·홍일표***·김상욱****·김범준*****

Song, JaeHyun·Kim, HungSoo·Hong, IlPyo·Kim, SangUg·Kim, Bum Jun

요 지

현재 국내 주요 하천의 홍수예경보시스템 운영과 다목적댐의 홍수조절관리를 위하여 수문학적 모형의 하나인 저류함수모형(storage function model)을 사용하고 있다. 저류함수모형은 산지가 많은 유역에 적합하도록 개발된 모형으로, 계산절차가 간편하고 홍수유출의 비선형성을 고려할 수 있는 방법이므로 선형모형보다 합리적이라고 알려져 있다. 그러나 실제 홍수사상에 저류함수모형을 적용하기 위해서는 적절한 매개변수의 적용이 필요하다. 현재까지 저류함수모형의 매개변수를 보정하기 위한 연구가 많이 되었지만, 실질적으로 보정된 매개변수를 실제 홍수사상에 적용함에 있어서는 많은 어려움이 존재한다.

따라서 이러한 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 저류함수 모형 중 유역유출 매개변수를 침투유량에 대한 상대민감도분석을 통하여 매개변수의 경계조건을 설정하고, 이 경계조건을 바탕으로 최적화기법(optimization technique)을 사용하여 과거 홍수사상에 대하여 보정을 수행하였다. 그리고 보정된 매개변수들의 홍수사상에 적용하기 위한 최적매개변수(optimal parameter) 결정을 위한 방법들을 제시 및 적용하여 비교 분석하였다.

핵심용어 : 저류함수모형, 상대민감도분석, 최적화기법, 최적매개변수

1. 서 론

저류함수모형을 실제 홍수유출현상에 적용하는데 있어 가장 어려운 점은 매개변수를 결정하는 것이다. 저류함수모형의 매개변수 추정방법은 홍수수문자료 등의 부족으로 인하여 경험식을 사용하고 있으나, 이는 우리나라의 유역특성을 충분히 반영하지 못하는 등 많은 문제점을 가지고 있으며, 현재 매개변수들을 결정할 수 있는 객관적이고 합리적인 방법이 제시되어 있지 않기 때문에 모형의 매개변수를 결정할 때 경험식을 이용하거나 수문기술자의 판단에 의한 보정에 의존하고 있는 실정이다.

저류함수모형 뿐만 아니라 유출모형의 매개변수를 자동으로 보정하기 위하여 우리나라에서는 Pattern Search 법(심순보 등, 1992), 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 이용한 방법(박봉진 등, 1997) 그리고 저류함수모형의 자동보정방법들(Random Search, Rosenbrock, Simulated Annealing 그리고 GA)을 적용 및 분석(송재현 등, 2006) 등의 연구가 진행되었다. 외국에서는 Shuffled Complex Evolution-University Arizona(SCE-UA) 법(Duan 등, 1994)과 다목적최적화 알고리즘(MOCOM-UA)이 개발(Yapo 등, 1998) 개발되었으며, GA와 퍼지최적모형(Fuzzy Optimal Model, FOM)을 결합(Cheng 등, 2002)한 연구 등이 발표되었다.

* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 Post-Master·E-mail: k6zero@kict.re.kr

** 정회원·인하대학교 환경토목공학부 부교수·공학박사·E-mail: sookim@inha.ac.kr

*** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원·공학박사·E-mail: iphong@kict.re.kr

**** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원·공학석사·E-mail: sukim@kict.re.kr

***** 정회원·인하대학교 환경토목공학부 석사과정·E-mail: qaz390@naver.com

따라서 본 논문에서는 금강 유역에 있는 미호천 유역을 대상유역으로 하여 자동보정으로 보정된 매개변수들을 모의 홍수사상에 적용하기 위한 최적매개변수(optimal parameter) 결정을 위한 방법들을 제시 및 적용하여 비교 분석하였다.

2. 대상유역 및 홍수사상

본 연구에서의 대상유역은 미호천유역의 청주와 옥산 수위관측소가 하류부에 존재하는 소유역 22번과 23번이다. 증평 수위관측소가 있는 소유역 20번은 증평 수위관측소가 2002년에 개설되어 적용에 무리가 있기 때문에 제외하였다. 그림 1은 대상 소유역을 포함하는 미호천 유역의 유역도와 유출모식도이다. 표 1과 2는 각 소유역에 대한 대상 홍수사상이다.

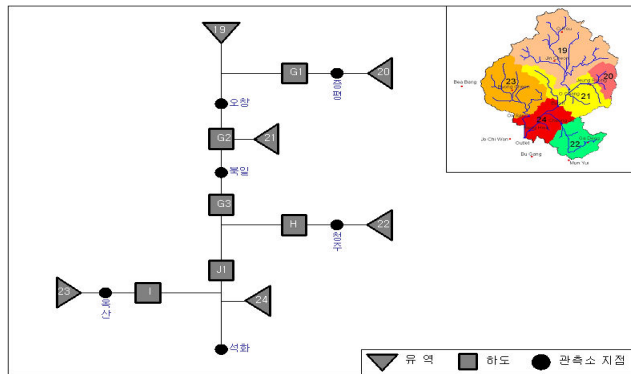


그림 1. 미호천유역 유역도와 유출모식도

표 1. 소유역 22번에 대한 홍수사상

| 년도 | 총강우량 (mm) | 홍수기간 | 자료의 개수(개) | 선행5일강우량 (mm) | AMC type |
|---------|-----------|-----------------|-----------|--------------|----------|
| 1995 | 390.53 | 8월 24일 ~ 8월 28일 | 120 | 113.80 | III |
| 1997(A) | 161.88 | 6월 29일 ~ 7월 03일 | 120 | 110.89 | III |
| 1997(B) | 246.93 | 8월 03일 ~ 8월 07일 | 120 | 13.44 | I |
| 1998 | 121.87 | 8월 10일 ~ 8월 12일 | 53 | 71.23 | III |
| 2000 | 155.00 | 8월 25일 ~ 8월 29일 | 120 | 154.36 | III |
| 2002 | 267.53 | 8월 05일 ~ 8월 09일 | 120 | 0.00 | I |
| 2003(A) | 133.65 | 7월 21일 ~ 7월 24일 | 96 | 43.08 | II |
| 2003(B) | 151.19 | 7월 08일 ~ 7월 11일 | 96 | 41.24 | II |

표 2. 소유역 23번에 대한 홍수사상

| 년도 | 총강우량 (mm) | 홍수기간 | 자료의 개수 (개) | 선행5일강우량 (mm) | AMC type |
|---------|-----------|-----------------|------------|--------------|----------|
| 1997(A) | 102.76 | 6월 29일 ~ 7월 03일 | 120 | 173.42 | III |
| 1997(B) | 189.55 | 8월 03일 ~ 8월 07일 | 120 | 1.09 | I |
| 1999 | 117.88 | 8월 01일 ~ 8월 05일 | 120 | 70.84 | III |
| 2001 | 115.43 | 6월 28일 ~ 7월 02일 | 120 | 22.48 | I |
| 2003 | 128.16 | 7월 21일 ~ 7월 24일 | 96 | 60.71 | III |

3. 최적 알고리즘 및 목적함수

최적화 알고리즘을 이용하여 매개변수를 보정 시에 사용되는 가장 보편적인 목적함수는 잔차제곱의 합 (Sum of Squared of Residuals, SSR)이다. 하지만 SSR의 경우 기존 연구들에서 지적한 바 있는 이상자료에 대한 영향과 홍수예측의 관점에서 첨두값에 대한 보정이 항상 좋은 결과만을 나타내지는 않았다. 따라서 첨두값에 대하여 보완을 할 수 있는 목적함수를 제시하고, 제시한 목적함수와 SSR을 유전자 알고리즘에 적용하여 보정을 하였다. 보정된 매개변수를 모의 홍수사상에 적용하기 위한 최적매개변수 결정방법은 ① 각 목

적합수의 보정된 매개변수들의 평균값 ② 선행강우량과 총가우량의 유사성 ③ AMC type에 대한 평균값을 적용한 3가지 방법을 적용하였다.

3.1 적정 목적함수

적정 목적함수로서 SSR에 침투유량과 침투유량 발생시간에 대한 가중치를 준 목적함수로 <식 2-1>을 제안하였으며, 개발된 신규 목적함수를 WSSR(Weighted Sum of Squared of Regiduals)이라 명명하였다.

$$F = \left[\sum_{i=1}^n (Q_{obs}(i) - Q_{sim}(i))^2 \right] \times W_1 \times W_2 \quad (1)$$

$$W_1 = 1 + \frac{|Q_{obs,peak} - Q_{sim,peak}|}{Q_{obs,peak}} \quad (2)$$

$$W_2 = 1 + \frac{|T_{obs,peak} - T_{sim,peak}|}{100} \quad (3)$$

여기서, i 는 관측자료의 개수이고, Q_{obs} 는 관측유량, Q_{sim} 은 모의유량, $Q_{obs,peak}$ 는 관측침투유량, $Q_{sim,peak}$ 는 모의침투유량, $T_{obs,peak}$ 는 관측침투유량 발생시간 그리고 $T_{sim,peak}$ 는 모의침투유량 발생시간이다.

3.2 매개변수의 경계조건 결정

매개변수의 기본값을 결정하기 위하여 용담댐 및 미호천에 대한 금강홍수예경보 시스템 개선(건설교통부, 2003) 보고서의 미호천 유역에대한 지형 및 지질 특성을 이용하여 기본값을 결정하였다. 이러한 물리적 특성을 반영하여 얻은 기본값을 바탕으로 유역매개변수의 경계조건을 결정하기 위하여 대상 소유역에 대한 매개변수의 침투유량 상대민감도분석을 수행하였고, 매개변수 T_1 의 경우는 침투유량에 영향이 없기 때문에 상대민감도분석에서 제외하였다. 상대민감도분석을 수행하기 소유역 22번은 1995 ~ 2002년까지의 6개의 홍수사상을 적용하였고, 소유역 23번은 1997 ~ 2001년까지의 4개의 홍수사상을 적용하였다. 적용한 결과에 따라 다음 표 3과 같은 유역매개변수의 경계조건을 결정하였다.

표 3. 소유역 22, 23번에 대한 매개변수의 Scale Factor

| 소유역번호 | Scale Factor | 경계조건 |
|-------|-----------------|------------------------------------|
| 22 | λ_K | $-0.4 \leq \lambda_K \leq 0.5$ |
| | λ_P | $-0.3 \leq \lambda_P \leq 0.5$ |
| | λ_{f_1} | $-0.5 \leq \lambda_{f_1} \leq 0.4$ |
| | λ_{R_m} | $-0.5 \leq \lambda_{R_m} \leq 0.5$ |
| 23 | λ_K | $-0.3 \leq \lambda_K \leq 0.5$ |
| | λ_P | $-0.1 \leq \lambda_K \leq 0.5$ |
| | λ_{f_1} | $-0.5 \leq \lambda_K \leq 0.5$ |
| | λ_{R_m} | $-0.3 \leq \lambda_K \leq 0.5$ |

4. 적용 및 분석

소유역 22번의 경우 1995 ~ 2002년의 6개의 홍수사상을 보정에 적용하였으며, 소유역 23번의 경우 1997 ~ 2001년의 4개의 홍수사상을 보정에 적용하였으며, 그리고 소유역 22번의 경우 2003년의 2개의 홍수사상에 대하여 모의를 수행하였고, 소유역 23번의 경우는 2003년 1개의 홍수사상에 대하여 모의를 수행하였다. 보정시 사용한 목적함수는 SSR과 WSSR을 그리고 위에서 제시한 경계조건을 사용하였다. 최적매개변수 결정방법 3가지로 산정된 매개변수는 다음 표 4, 5와 같다.

표 4. 소유역 22번에 대한 최적매개변수 결정방법별 매개변수

| 최적매개변수 결정 방법 | 매개변수 | | | | |
|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|----------|
| | K | P | T_l | f_1 | R_{sa} |
| 평균값 (SSR) | 20.613 | 0.607 | 0.500 | 0.677 | 100.405 |
| 평균값 (WSSR) | 22.394 | 0.597 | 0.500 | 0.741 | 102.181 |
| 선행강우량과 총강우량의 유사성 (SSR_2003(A)) | 15.926 | 0.661 | 1.000 | 0.736 | 111.992 |
| 선행강우량과 총강우량의 유사성 (SSR_2003(B)) | 16.041 | 0.854 | 0.000 | 0.769 | 97.706 |
| 선행강우량과 총강우량의 유사성 (WSSR_2003(A)) | 20.485 | 0.457 | 1.000 | 0.692 | 90.556 |
| 선행강우량과 총강우량의 유사성 (WSSR_2003(B)) | 18.809 | 0.699 | 0.000 | 0.771 | 111.071 |

표 5. 소유역 23번에 대한 최적매개변수 결정방법별 매개변수

| 최적매개변수 결정 방법 | 매개변수 | | | | |
|-----------------------------|--------|-------|-------|-------|----------|
| | K | P | T_l | f_1 | R_{sa} |
| 평균값 (SSR) | 24.757 | 0.667 | 2.750 | 0.547 | 96.760 |
| 평균값 (WSSR) | 23.360 | 0.656 | 1.000 | 0.645 | 88.996 |
| 평균값 (AMC-III) | 25.287 | 0.624 | 1.500 | 0.763 | 94.946 |
| 선행강우량과 총강우량의 유사성 (SSR_2003) | 21.215 | 0.685 | 3.000 | 0.787 | 93.237 |
| 선행강우량과 총강우량 유사성 (WSSR_2003) | 17.460 | 0.695 | 2.000 | 0.765 | 85.862 |

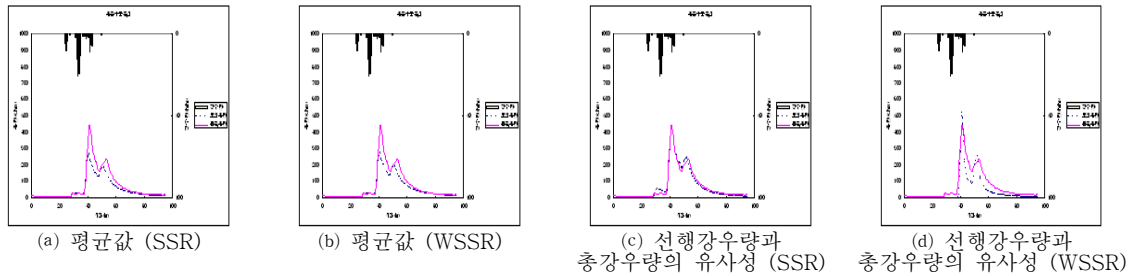


그림 2. 소유역 22번에 대한 최적매개변수 결정방법별 2003(A)년 모의수문곡선

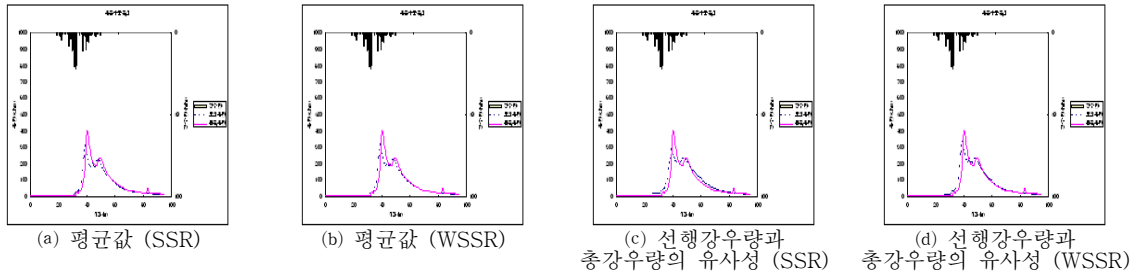


그림 3. 소유역 22번에 대한 최적매개변수 결정방법별 2003(B)년 모의수문곡선

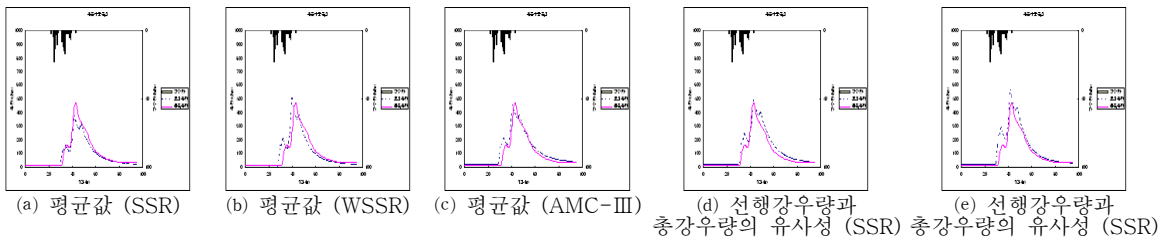


그림 4. 소유역 23번에 대한 최적매개변수 결정방법별 2003년 모의수문곡선

3가지 방법으로 산정된 매개변수를 모의홍수사상에 적용하여 비교해 보았다. 단, 소유역 22번의 경우 적용된 홍수사상을 살펴보면 모의하기 위한 2003년의 홍수사상은 AMC-II 조건이므로 ③의 AMC type에 대한 평균값을 적용하지 못하였다. 그림 2 ~ 4는 각각 소유역의 모의 홍수사상에 적용하여 얻은 수문곡선이다. 그림 2 ~ 4에 나타난 바와 같이 제시된 3가지의 최적매개변수 결정방법에서 목적함수별 평균값을 적용하였을 경우 소유역 22번에서는 침투유량을 잘 모의하지 못하였고, 소유역 23번에서는 매우 뛰어나지는 않지만 모의 결과가 좋은 것도 있었다. 하지만 평균값을 적용할 경우 매우 큰 변동성을 없는 것으로 나타났다. 선행강우

량과 총강우량의 유사성으로 택한 매개변수를 적용하였을 경우 소유역 22번에서는 매우 잘 모의된 결과도 있었으나 그렇지 않은 경우도 발생하였다. AMC type의 평균값의 경우 소유역 23번에서만 적용할 수 있었다.

5. 결론

저류함수모형의 매개변수를 보정하기 위한 최적 알고리즘 및 목적함수를 유전자알고리즘과 SSR에 가중치를 부여한 WSSR을 적용하였고, 그에 따른 보정된 매개변수에서 모의 홍수사상제 적용하기 위한 최적 매개변수 결정방법을 적용한 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서 제시한 SSR을 개선한 WSSR은 침투유량의 보정이 잘 이루어졌고, SSR에 비하여 이상자료에 대한 영향이 개선되었다. 하지만 WSSR로 보정한 매개변수를 모의 홍수사상에 적용하였을 때 모의 침투유량이 관측침투유량보다 크게 발생하였다. 이러한 점을보완하기 위해서는 단일 목적함수보다는 2개 이상의 다중 목적함수를 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (2) 목적함수별 평균값의 적용에서는 침투유량을 잘 모의하지는 못하였지만 큰 변동성이 없었다. 가장 기본적인 방법이지만 매개변수의 특성을 파악하여 보정된 매개변수들 중에서 이상치에 대한 것을 배제하는 등의 기술적 판단이 요구될 것으로 판단된다.
- (3) 선행강우량과 총강우량의 유사성으로 택한 매개변수의 적용에서는 매우 잘 모의된 결과도 나타났지만 그렇지 않은 경우도 비교적 많이 발생하였다. 이것은 많은홍수사상의 자료가 있다면 간단히 선행강우량과 총강우량의 비교만으로 최적매개변수를 산정하여 모의효율을 높일 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) AMC type의 평균값의 적용에서는 아쉽게도 소유역 23번에서만 적용할 수 있었으므로 방법 자체의 적용성에 미흡한 점이 있었다. 하지만 이 경우도 (3)과 마찬가지로 많은 홍수사상의자료가 있다면 적용해 볼만한 가치가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 '홍수에보모형의 성능 평가 및 개선' 연구사업의 일환으로 수행되었으며, 건설교통부와 연구수행에 많은 조언을 해 주신 한국건설기술연구원의 연구진에 감사드립니다.

참고문헌

1. 심순보, 김선구, 고석구(1992). 최적화 기법에 의한 저류함수 유출모형의 자동보정, 대학토목학회 논문집, 제12권 제 3호, pp. 127-137.
2. 박봉진, 차형선, 김주환(1997). 유전자 알고리즘을 이용한 저류함수모형의 매개변수 추정에 관한 연구, 한국수자원학회 논문집, 제 30권 제 4호, pp. 347-355.
3. 건설교통부(2003). 용담댐 및 미호천에 대한 금강홍수예경보 시스템 개선 보고서, 한국건설기술연구원.
4. 건설교통부(2004). 금강홍수예경보 보고서, 금강홍수통제소.
5. 송재현, 김형수, 홍일표, 김상욱(2006). 저류함수모형의 매개변수보정과 홍수예측 (1) 보정 방법론과 모의홍수수문곡선의 평가, 대한토목학회 논문집, 제 26권 제 1B호, pp. 27-38.
6. Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K.(1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, Journal of Hydrology, Vol. 158, pp. 265-284.
7. Yapo, P. O., Gupta, H. V., and Sorooshian, S.(1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models, Journal of Hydrology, Vol. 204, pp. 83-97.
8. Cheng, C. T., Ou, C. P., and Chau, K. W.(2002). Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multi-objective rainfall-runoff model calibration, Journal of Hydrology, Vol. 268, pp.72-86.