

PRMS 모형의 매개변수 민감도 분석

Sensitivity Analysis of PRMS Model Parameters

김광천*, 정일원**, 배덕효***

Kwang Cheon Kim, Il Won Jeong, Deg Hyo Bae

요 지

유역의 유출특성을 정확히 분석하기 위해서는 모형에 내재된 매개변수의 적절한 추정치가 필수적이나 정확한 추정이 불가능한 변수들의 최적해를 결정하는 것은 어려운 일이다. 본 연구에서는 괴산댐유역을 적용대상 유역으로 PRMS 모형의 최적 매개변수를 평가하고, 추정난해 매개변수 9개에 대한 민감도 분석을 수행함으로써 각 매개변수에 따른 결과의 불확실성과 유출특성에 미치는 영향을 분석하여 향후 정도 높은 매개변수 추정에 활용하고자 하였다. 연구결과 지표면유출 관련인자는 지표면-지표하유출량을 변화시키므로 유출특성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 지표하유출 관련 매개변수들은 비선형계수가 작아져 유출이 선형적으로 고려될 때 수문곡선에 영향을 주는 것으로 판명되었다. 한편 지하수유출 관련 계수는 지하수유출이 발생하는 경우 영향을 미치지 않는 것으로 나타났고, 지표하저수지에서 지하수유출을 발생시키는 매개변수는 크게 민감하지 않은 것으로 판명되었다. 그리고 토양대에서 지하수저수지로의 유입 관련 매개변수는 유출을 지연시키는 효과를 보였고 증발산을 조절하는 매개변수는 유출용적에만 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

핵심용어 : 민감도분석, PRMS, 장기유출모형

1. 서론

강우의 계절적 변화가 뚜렷한 국내 유역에서 수자원의 이용에 필수적인 수자원부존량의 평가, 수자원개발 계획 및 지속적인 관리에 있어 장기간의 유출량 자료는 필수적이다. 그러나 국내에 장기적인 계측자료가 충분하지 못한 상황이므로 통상 수문모형을 통해 장기유출량을 산정하고 있다. 수문모형은 자연의 유출 기작을 모형화한 것으로 자연유출량에 가까운 결과를 도출하기 위해서는 모형에 내재된 매개변수의 적절한 추정치가 필수적이나 대부분 모형은 추정난해한 매개변수를 포함하고 있다. 따라서 매개변수에 따른 결과의 불확실성과 유출모의 특성의 변화 가능성을 내포하고 있어 추정된 매개변수의 물리적 의미와 매개변수 변화에 따른 유출특성의 변화를 알기 위해서는 각 매개변수별 민감도 분석이 요구된다.

본 연구에서는 괴산댐 유역에 대해 PRMS 모형을 적용하여 최적화하고, 각 매개변수의 민감도를 분석함으로써 지표면유출, 지표하유출, 지하수유출 관련 매개변수들이 각각 유출특성에 어떤 영향을 미치는지를 살펴보고 그 변동성을 분석하여 추정된 매개변수의 적합성을 판단하고, 향후 매개변수 추정시 정확도를 향상시키는데 활용하고자 한다.

* 정회원·세종대학교 토목환경공학과 석사과정·E-mail : neoabraxas@nate.com

** 정회원·세종대학교 토목환경공학과 박사과정·E-mail : bobilwon@hanmail.net

*** 정회원·세종대학교 물자원연구소·토목환경공학과 부교수·E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

2. PRMS 모형

PRMS 모형은 1983년 USGS(U.S. Geological Survey)에서 개발한 모형으로 MMS(Modular Modeling System)를 기반으로 한다. HRU(Hydrologic Response Unit) 별로 유출을 해석하는 준분포형 모형으로 일유출모의시 약 105개의 매개변수를 필요로 하며 증발산량 계산을 Hamon, Jensen-Haise 방법 중 선택적으로 사용 할 수 있고 용설 모의가 가능하며 장·단기유출해석을 위한 유출현상을 경험식과 물리식으로 해석한다(Leavesley 등, 1983).

PRMS 모형의 개념적 유역수문순환 시스템은 그림 1과 같이 표현된다. 유역에서 발생한 강수는 피복별 식생에 의해 차단되고, 식생을 통과한 순강수는 지표에 도달하여 불투수층에 의해 지표면에 저류되거나 토양에 침투되어 지표면유출, 지표하유출, 지하수유출의 형태로 하천으로 유출되며 동시에 유역에 입사되는 태양복사에너지와 기온에 따라 증발산, 승화, 용설이 발생한다. 토양은 토양종류에 따른 토양깊이(soil_depth)와 식생의 근입깊이(root_depth)를 고려하여 함양대(recharge zone)와 하부층(lower zone)으로 구분된다. 함양대에서는 증발과 증산이 발생하지만 하부층에서는 증산만 발생한다. 침투된 강수는 토양의 포장용수량(field capacity)과 위조점(시들음점, wilting point) 사이 범위에서 토양에 저류되고 초과저류량은 지표하저수지 및 지하수저수지로 유입된다. 지표하저수지에서는 지표하유출과 지하수저수지의 유출을 발생시키고 지하수저수지에서는 지하수 유출과 지하수 싱크(sink)가 일어난다. 지표면유출량과 지표하유출량, 지하수유출량의 합이 수문응답단위에서의 하천유출량이 된다.

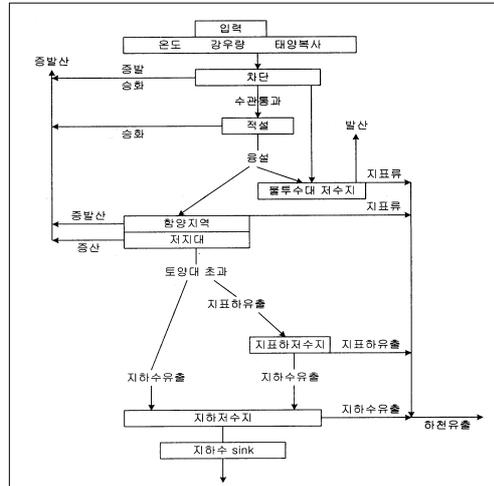


그림 1. 개념적 유역 시스템

전술한 바와 같이 PRMS 모형의 일유출모의에는 많은 매개변수가 요구되며 매개변수는 지형자료에서 직접 결정되는 추정가능 매개변수와 지형자료에서 결정하기 힘든 추정난해 매개변수로 구분한다. 추정가능 매개변수는 유출분석 대상유역의 DEM, 임상도, 토양도, 토지피복도 등을 통하여 직접 추출되며, 추정난해 매개변수는 모형자체 제안 값을 사용하여 모형을 실행시킨 다음 모의결과를 관측치와 비교·검토 후 민감도가 높은 매개변수들을 Rosenbrock 방법(Rosenbrock, 1960)을 사용하여 최적화 시키는 방법을 사용한다.

3. 민감도 분석 방법

유출모형의 민감도 분석은 연구목적별로 여러 방법이 있을 수 있으나, 본 연구에서는 각각의 추정난해 매개변수들이 유출특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 최적매개변수 추정을 선행한 후 추정난해 매개변수 중 지표, 중간, 지하수유출 방정식에 직접적으로 영향을 미치는 매개변수 5개, 지하수저수지의 유입에 관련된 매개변수 3개, 증발산 관련 매개변수 1개를 각각 모형의 제한 범위 내에서 변화시켜 유출특성의 변화 추이를 살펴보고자 한다.

4. 적용 및 분석

본 연구에서는 PRMS 모형의 매개변수 민감도 분석을 위해 괴산댐 유역을 적용대상 유역으로 선정하였다(그림 2). 수집된 수문기상자료를 토대로 1991~2001년 기간 동안 매개변수 보정을 실시하고 1982~1990년 기간에 대해 검정을 수행한 후, 추정이 난해하고 유출에 민감한 영향을 미치는 것으로 판단된 9가지 매개변수를 매개변수의 유효 범위 내에서 각각 변화시켜 유출특성에 반영되는 결과를 분석하였다.

4.1 적용대상유역

매개변수 민감도 분석의 대상유역으로 관측자료의 신뢰성이 높고 유역내 인위적인 용수사용량이 적은 괴산댐 유역을 선정하였다. 해당유역은 한강권역 중남부에 위치한 상류유역 댐지점으로 인위적인 용수사용량이 비교적 적고 회귀수량 역시 댐지점으로 들어오므로 자연유출량에 가깝다고 볼 수 있어 국내에서 수문자료의 정도가 비교적 높은 지점으로 판단되었다. 본 연구의 목적상 이러한 댐지점 자료를 활용하는 것이 보다 신뢰성있는 모형매개변수를 추정할 수 있을 것으로 판단되었으므로 괴산댐유역에 대한 강우자료와 댐자료, 토양도, 토지피복도, DEM, 임상도 등의 자료를 수집하여 본 연구에 활용하였다. 유역의 면적은 676.9 km², 관측자료 수집기간은 1982~2001년도이며 6개의 HRU로 구분하여 연구를 수행하였다.

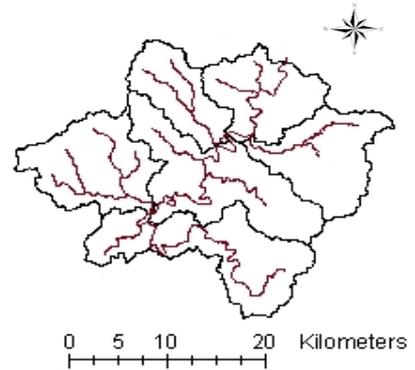


그림 2. 괴산댐 유역도

4.2 매개변수 추정 및 분석

수집된 자료를 통해 PRMS 모형의 최적 매개변수 추정을 수행하였다. GIS자료로부터 추정 가능한 매개변수를 산정하고, 모형제안 값을 그대로 사용하는 추정난해 매개변수를 고정시킨 후 모형제안 값을 사용할 수 없는 유출에 민감한 추정난해 매개변수들(표 1)의 최적매개변수를 혼합방법으로 추정하였으며, 모형의 검·보정 결과는 표 2와 같다.

표 1. 최적화를 통해 보정되는 추정난해 매개변수

변수명	변수 설명	초기값	최적값
smidx_coef	토양함수량과 기여면적 관계식의 계수	0.0100	0.0027
smidx_exp	토양함수량과 기여면적 관계식의 지수	0.3000	0.3050
ssrcoef_lin	지표하저수지에서 하천으로의 선형유출량 계산을 위한 계수	0.0800	0.0054
ssrcoef_sq	지표하저수지에서 하천으로의 비선형유출량 계산을 위한 계수	0.1500	0.1944
ssr2gw_rate	지표하저수지에서 지하수저수지로의 유입량 계산을 위한 계수	0.0050	0.0322
ssr2gw_exp	지표하저수지에서 지하수저수지로의 유입량 계산을 위한 지수	1.0000	0.0012
soil2gw_max	지하수저수지로 흐르는 토양수분 최대초과량	0.0100	0.0210
gwflow_coef	지하수저수지의 지하수유출을 계산하기 위한 계수	0.0300	0.0200
hamon_coef	잡재증발산을 계산하기 위한 hamon의 월별계수	0.0055	0.0055

표 2. 매개변수 검·보정 결과

통계치	분류	보정기간(1991~2001년)	검정기간(1982~1990년)
상관계수		0.84	0.90
평균제곱근오차(cms)		0.037	0.035
모형효율성계수		0.71	0.78
유출용적오차(%)		5.32	-13.06

매개변수 검·보정 결과 상관계수가 0.84 이상, 평균제곱근 오차가 0.037cms 이하로 나타나는 등 모의치가 관측치를 적합하게 모사하고 있음을 알 수 있었으며, 검정기간의 유출용적오차가 -13.06%로 조금 낮은 유의수준을 보이는 것으로 나타났다.

4.3 매개변수 민감도 분석

도출된 매개변수를 고정시키고 최적화를 통해 보정되는 추정난해 매개변수 9개에 대해 각각 민감도 분석을 수행하였다. 매개변수가 추정된 기간에서의 유출변동 특성을 보기위해 보정기간에 대해서만 민감도 분석

을 실시하였고 매개변수는 모형의 제안 값 안에서 변화시켰다. 표 3은 모형제안의 하한 값, 최적 값, 상한 값의 매개변수에 대한 관측유량과 모의유량의 통계치를 나타낸 것이다.

표 3. 매개변수 변화에 따른 유출특성 통계치

변수명	범위	변수값	상관계수	평균제곱근오차 (cms)	모형효율성계수	유출용적오차 (%)
smidx_coef	하한	0.0001	0.88	0.32	0.81	5.20
	최적	0.0027	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	0.1000	0.40	0.94	-0.69	17.78
smidx_exp	하한	0.2000	0.88	0.33	0.79	5.25
	최적	0.3050	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	0.8000	0.42	0.92	-0.61	11.89
ssrcoef_lin	하한	0.0000	0.84	0.39	0.71	5.32
	최적	0.0054	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	1.0000	0.77	0.52	0.49	5.30
ssrcoef_sq	하한	0.0000	0.39	0.67	0.14	6.98
	최적	0.1944	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	1.0000	0.75	0.55	0.43	5.31
ssr2gw_rate	하한	0.0000	0.84	0.40	0.70	5.28
	최적	0.0322	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	1.0000	0.69	0.53	0.47	5.50
ssr2gw_exp	하한	0.0000	0.84	0.39	0.71	5.32
	최적	0.0012	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	3.0000	0.75	0.48	0.57	5.33
soil2gw_max	하한	0.0000	0.84	0.39	0.71	5.31
	최적	0.0210	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	5.0000	0.48	0.64	0.22	5.52
gwflow_coef	하한	0.0000	0.84	0.40	0.70	-21.05
	최적	0.0200	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	1.0000	0.84	0.40	0.70	5.28
hamon_coef	하한	0.0040	0.83	0.42	0.67	25.28
	최적	0.0055	0.84	0.39	0.71	5.32
	상한	0.0080	0.84	0.40	0.70	-22.42

분석결과 지표면유출 관련 변수인 smidx_coef, smidx_exp은 직접유출과 기저유출 성분비를 변화시키므로 수문곡선의 침투시간과 지체시간에 미치는 영향이 크며, 특히 지표하유출의 성분비가 커질 때 토양대에서의 증발산 손실도 증대 되므로 유출용적에 크게 영향을 미치는 것으로 판명되었다. 지표하유출에 선형, 비선형적으로 관련된 변수인 ssrcoef_lin와 ssrcoef_sq는 유출에 큰 영향을 미치지 않는 것임은 ssrcoef_sq가 0인 경우 지표하 유출의 비선형성이 고려되지 않아 수문곡선의 형상에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 지표하저수지에서 지하수저수지로의 유입량을 결정하는 ssr2gw_rate, ssr2gw_exp는 크게 민감하지는 않았으나 지하수유출과 지표하유출의 시간적 차이로 인해 유출용적을 제외한 유출특성에 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 토양대에서 지하수저수지로의 직접일유입량인 soil2gw_max이 커질수록 유출이 지연되어 침투유량이 작아지고 지체시간이 늦어지는 현상을 보였다. 지하수유출을 계산하기 위한 gwflow_coef는 지하수감수곡선의 기울기로서 가장 민감하지 않은 것으로 나타났으나 모형의 개념상 지하수유출을 고려하지 않은 경우에는 지하수저수지에 지속적으로 수분이 누적되어 유출용적에 큰 영향을 미치는 것으로 드러났다. 증발산 관련 계수인 hamon_coef의 변화는 수문곡선의 패턴을 유지시키면서 그 총량만을 변화시키므로 유출용적오차에 주로 반영됨을 알 수 있었다. 그림 3은 유출에 민감하게 작용하는 6개의 매개변수 변화에 따른 실측유량과 모의유량의 상관계수와 유출용적 오차를 보여준다.

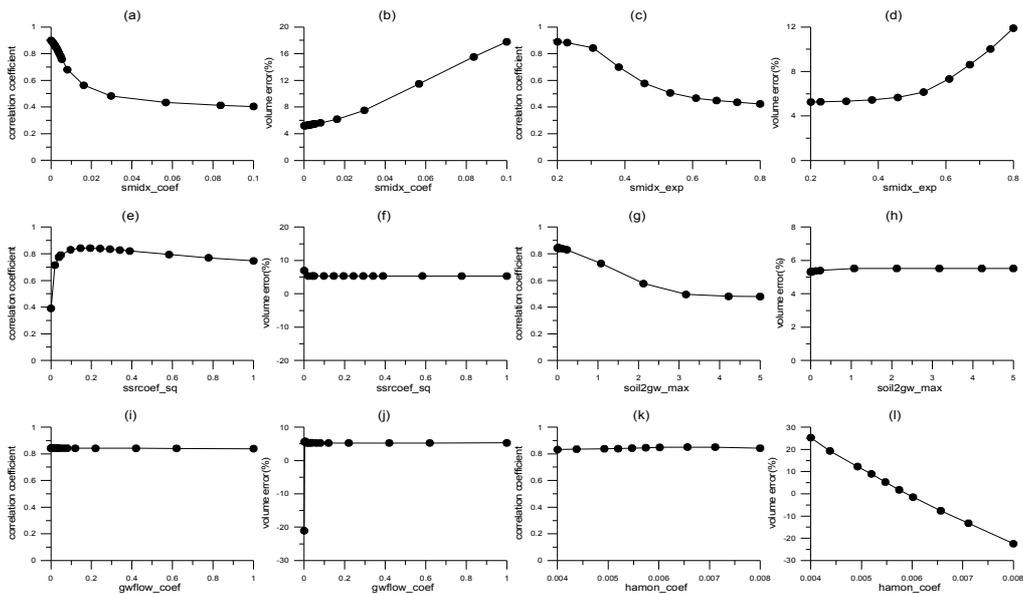


그림 3. 매개변수 변화에 따른 실측유량과 모의유량의 상관계수와 유출용적 오차 : 각각 (a), (b)는 smidx_coef. (c), (d)는 smidx_exp. (e), (f)는 ssrcoef_sq. (g), (h)는 soil2gw_max. (i), (j)는 gwflow_coef. (k), (l)는 hamon_coef에 대한 통계분석 결과

5. 결론 및 향후과제

연구결과 지표유출을 지배하는 매개변수들의 민감도가 가장 높은 것으로 나타났다. 지표면유출 관련인자는 지표면-지표하유출량을 변화시키므로 수문곡선 형태와 유출용적에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 지표하유출 관련 매개변수들은 유출특성에 큰 영향을 미치지 않으나 비선형계수가 작아져 유출이 선형적으로 고려될 때는 수문곡선에 영향을 주는 것으로 판명되었다. 한편 지하수유출 관련 계수는 지하수 유출을 고려하는 범위, 즉 0이 아닌 경우에는 유출모의에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났고, 토양대에서 지하수저수지로의 유입 관련 매개변수는 유출을 지연시키는 효과가 큰 것으로 판명되었다. 마지막으로 증발산을 조절하는 매개변수는 유출용적에만 큰 영향을 미치는 것으로 판명되었다.

PRMS 모형의 매개변수 민감도 분석 결과 각 매개변수가 모형내에서 영향을 미치는 매커니즘과 변동에 따른 유출변화 특성을 파악하였으며, 본 결과는 향후 매개변수 추정시 보다 정도 높은 결과를 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 추가적으로 유출성분별 관련 매개변수군의 민감도 분석을 통해 유출성분비별 민감도 분석이 수행된다면 정확한 유출분석에 보다 나은 방향을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-9-2)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. G. H. Leavesley, R. W. Lichty, B. M. Troutman, and L. G. Saindon(1983). Precipitation-Runoff Modeling System, USGS.
2. Rosenbrock H. H.(1960). An Automatic Method for Finding the Greatest or Least Value of a Function, Computer J.