

국내유역에서의 PRMS 모형의 적용성에 관한 연구

A Study on PRMS Applicability for Korean River Basin

정 일 원* / 배 덕 효**

Jung, Il Won / Bae, Deg Hyo

Abstract

The objective of this study is to evaluate the applicability and simulation capability of PRMS, developed by U.S. Geological Survey, over the seven multi-purpose dam watersheds in Korea. The basic concepts of model components and their parameters are investigated for the evaluation of model applicability and the possibility of model parameter estimation is suggested based on the data availability. For model parameter estimation, some parameters are directly estimated from measurable basin characteristics, but the others are estimated by Rosenbrock's automatic optimization scheme. The results show that the simulated flows from the model were very close to the observed ones. Although the default values for snowmelt model parameter are used, the results from snowmelt simulation is also acceptable. The model shows that the simulation capability is not sensitive to the basin size, however, according to increasing basin area, simulation characteristics are close to those for lumped model rather than semi-distributed model.

keywords : PRMS, Continuous rainfall-runoff model, MMS

요 지

본 연구에서는 미국 지질조사국에서 개발한 PRMS 모형을 국내 7개 댐유역에 적용하여 국내 적용성과 모의한계를 분석하였다. 모형의 적용성을 평가하기 위해 모형 이론과 매개변수에 대해 검토하고, 국내 실정을 고려한 입력자료와 매개변수 추정의 가용성을 분석하였다. 각 적용유역들에서 GIS자료를 활용하여 추정 가능한 매개변수들은 추정하고 나머지 변수들은 Rosenbrock 방법을 이용하여 보정하였다. 모의결과를 다각적으로 분석하여 PRMS 모형의 모의 능력과 한계를 분석한 결과 PRMS 모형은 모든 적용유역에서 관측치에 높은 적합성을 나타내었다. 기본값을 사용한 용설모의에서도 비교적 정확한 모의가 가능한 것으로 나타났다. 적용 유역면적에 상관 없이 신뢰성 높은 유출분석이 가능하였으나, 대유역인 경우 준분포형적인 특성보다는 일체형모형에 가까운 유출 모의를 하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : PRMS, 연속 강우-유출모형, MMS

* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정

Ph.D Candidate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: bobilwon@daum.net)

** 세종대학교 물자원연구소·토목환경공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea
(e-mail: dhbae@sejong.ac.kr)

1. 서론

우리나라는 협소한 국토면적에 비해 복잡한 지형학적 특성을 띄고 있어 지역마다 강우특성과 유출특성이 상이하다. 또한 높은 인구밀도, 경제성장에 따른 생활환경의 변화로 인해 지속적으로 수자원 이용량이 증가하게 될 것이다. 이러한 상황에 체계적이고 효율적으로 대처하기 위해서는 장기적이고 종합적인 수자원계획을 수립하고 시행해나가는 것이 필요하다. 특히 가뭄이나 효율적인 댐운영 등의 이수문제 해결을 위한 수자원계획에서는 관심 지점의 장기 실측 유량자료가 요구되거나 수위자료의 신뢰성 문제와 수문관측소 위치와 개수의 제한 등으로 인해 주로 강우-유출모형을 이용하여 유출 분석을 수행하고 있는 실정이다.

지금까지 전세계적으로 많은 강우-유출모형들이 개발되었고, 국내에서도 그 적용성과 정확도를 분석하여 모형을 수정하거나 새로운 모형들이 개발되기도 하였다(김승, 1988; 고덕구, 1989; 배덕효와 조원철, 1995; 배덕효, 1997; 김현준, 2001). 일반적으로 유출모형은 새로운 알고리즘 또는 이론이 개발되거나 과거에는 측정이 불가능 했던 자료가 기술의 발달로 인해 활용 가능한 자료로써 주어지는 경우 새로운 모형을 개발하거나 기존 모형을 수정보완하기도 한다. 1980년대 이후 물리적인 공식과 경험식을 이용하여 강우-유출과정을 자연현상에 가깝도록 모의하기 위한 분포형(distributed) 및 준분포형(semi-distributed)모형들이 개발되었다. 그러나 이러한 수문모형들은 많은 수의 매개변수나 입력자료를 필요로 하므로 변수 추정이나 물리적 의미를 부여하고 해석하는 일이 쉽지 않아 수문모형의 신뢰성에 대한 문제가 제기되기도 하였다(Beven, 1989; Woolhiser, 1996). 그러다가 1990년대 들어서면서 과거에는 측정이 어려웠던 정보들이 컴퓨터의 발달과 RS(Remote Sensing) 및 GIS 기술의 급속한 발전, 영상자료 해석기술의 발전 등에 힘입어 그 적용 가능성이 확대되고 있다. 이러한 기술들의 발전으로 강우-유출모형의 입력자료로 사용되는 유역특성인자들을 합리적이고 편리하게 추정할 수 있게 되었다. 따라서 국내에서도 물리적기반의 정교한 유출해석을 수행할 수 있는 강우-유출모형의 국내 유역 적용성 검토와 더불어 국내 유역에 적합한 장기유출모형에 관한 연구가 필요한 실정이다. 최근 국내에서도 GIS와 RS자료 등을 활용할 수 있는 유출모형들에 대한 몇몇 연구들이 진행되고 있다. 대표적인 연구들로 Kim et al.(2003)은 용담댐유역과 보청천유역에 SWAT 모형을 적용하여 논농사지역에서의 적용성을 검토하였으며, 김병식 등(2003)은 SLURP 모형을 용담

댐유역에, 임혁진 등(2004)은 소양강댐유역에 적용하여 모형의 적용성을 평가하였다. 이러한 연구들은 국내에 처음으로 적용했다는 점에서 의미가 있으나, 몇몇 유역에만 제한적으로 적용된 경우로 유역별 유출특성이 상이한 국내 유역의 특성상 모형의 적용성을 적절히 평가했다고 하기에는 미흡하며, 국내 유역에 대한 유출모형의 적용성을 포괄적으로 평가하기 위해서는 아래와 같은 적용성 평가가 기본적으로 수행되어야 할 것이다.

첫째, 모형의 개발 목적 및 이론에 대한 검토가 필요하다. 왜냐하면 유출모형은 개발 목적에 따라 구조와 유출계산 알고리즘이 상이하기 때문이다. 예를 들어, 유출에서 용설의 영향이 지대한 지역에 적용하기 위해 개발된 모형은 용설량을 정확하게 모의하기 위한 물리적 알고리즘에 치중할 것이며, 산지가 거의 없는 평활한 유역에 적용하기 위한 모형들은 토양수분을 보다 정확히 모의하기 위해 선형저수지 개념 대신 미분방정식을 이용한 수치해석을 사용할 수 있기 때문이다.

둘째, 입력자료와 매개변수 추정의 가용성을 들 수 있다. 최근 개발된 모형들은 다양한 GIS/RS 자료를 기반으로 유출을 모의하도록 설계되어 있어 국내자료 가용성에 따라 유출분석의 신뢰도에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

셋째, 모형의 모의능력과 적용한계 및 사용성에 대한 평가가 수행되어야 할 것이다. 유역면적과 유출특성이 상이한 여러 유역에 적용하여 모의능력과 적용한계를 다각적으로 분석하여야 하며, 모형의 매개변수 추정이나 유출분석 과정에서의 편리성과 사용성에 대한 평가가 수행되어야 할 것이다.

본 연구에서는 미국 USGS에서 개발된 PRMS 모형을 선정하여 전술한 평가기준을 중심으로 국내 유역에 대한 적용성을 평가하였다. PRMS 모형의 이론과 매개변수에 대해 분석하고, 국내 7개 댐유역을 선정하여 자료를 수집하고 매개변수를 추정하였으며, 모형의 모의능력 및 적용한계에 대한 분석을 수행하였다.

2. PRMS(Precipitation-Runoff Modeling System) 모형 개념

PRMS(Leavesley et al., 1983)는 미국 USGS(U.S. Geological Survey)에서 개발한 모형으로 결정론적(deterministic) 모형이며 준분포형(semi-distributed) 모형이다. 1996년도에 개발된 MMS(Modular Modeling System) 버전은 다양한 수자원문제를 다룰 수 있도록 각 기능들이 모듈화되어 있어 사용자가 필요한 기능은 모듈을 추가하여 모형을 구축할 수 있도록 설계되어 있

다. 지금까지 국내에서 PRMS 모형을 이용하여 적용성을 평가한 몇몇 연구사례들(김철과 김석규, 2002; 구혜진 등, 2003; 정일원과 배덕효, 2003)이 있었으나 모형 이론과 매개변수에 대한 검토가 부족했으며, 적용유역수가 적어 다각적인 분석을 수행하지 못한 한계가 있었다. 본 연구에서는 PRMS 모형의 적용성 분석을 위해 우선 모형 이론과 매개변수에 관해 살펴보고 모형의 유출모의과정을 분석하였다.

2.1 PRMS 모형의 이론

PRMS 모형은 유역을 경사, 경사향, 고도, 식생분포, 토양타입, 강우분포 등의 지형학적 특성이 균질한 소유역으로 나누어 소유역별 유역변수를 산정한 다음 소유역별 유출해석을 실행하여 각 소유역별 수문학적 반응의 합을 유역의 총유역 반응으로 계산한다. 이러한 소유역을 수문응답단위(Hydrologic Response Unit, 이하 HRU)라 한다. PRMS 모형은 HRU별로 유출분석을 수행하고 전체유역에 대한 총합을 유역의 유출량으로 모의한다. Fig. 1은 HRU에서의 개념적 유역수문순환 시스템을 나타낸 것이다. 시계열 입력자료로는 최고·최저기온자료와 강수량 및 태양복사량자료가 필요하지만, 태양복사량자료가 없을 경우에는 모형 내부에서 계산하게 된다. 강수는 기온에 따라 강우와 강설로 구분되어 식생에 의해 차단되고 나머지가 지표면에 도달하게 된다. 차단된 강수는 증발에 의해 제거된다. 지표면에 적설이 있으면 강설인 경우는 적설에 추가되고 강우인 경우는 에너지수지를 고려하여 융설량을 산정하고 토양침투와 지표면유출을 발생시킨다. 지표면은 불투수지역과 투수지역으로 구분되며 불투수지역에서는 불투수저수지의 저류량을 초과할 경우 지표면유출을 발생시킨다.

투수지역의 토양층은 상부층(recharge zone)과 하부층(lower zone)으로 구분되는데, 상부층에서는 강수와 융설의 침투에 의해 수분이 유입되며 증발과 증산에 의해 감소되는데 비해 하부층에서는 증산작용에 의해서만 감소한다. 상부층의 토양수분량과 유출기여면적의 관계식에 의해 지표면유출이 발생하며, 토양층의 최대 함유량을 초과한 수분은 먼저 지하수저수지(ground-water reservoir)로 유입되고 하루동안의 최대 유입량을 초과한 나머지가 지표하저수지(subsurface reservoir)로 유입된다. 지표하저수지에서는 지표하유출과 지하수저수지의 유출을 모의하며, 지하수저수지에서는 지하수 유출과 지하수 싱크(sink)를 모의한다. 지표면 유출량과 지표하유출량, 지하수유출량의 합이 HRU에서의 하천 유출량으로 산정된다.

2.1.1 기온과 강수(Temperature and Precipitation)

최대·최소 기온자료는 기상관측소와 HRU와의 표고차를 고려하여 조절된다. 관측된 일최대기온과 일최소기온은 Eq. (1)에 의해 보정되어 각 HRU별로 적용된다. 기온자료의 단위는 섭씨(°C) 또는 화씨(°F) 둘 다 사용 가능하다.

$$T = T - \left[t_{lapse} \times \frac{hru_{elev} - tsta_{elev}}{1000} - t_{adj} \right] \quad (1)$$

여기서 hru_{elev} 는 HRU의 평균표고(ft)를 나타내며, $tsta_{elev}$ 는 기상관측소의 표고(ft)를 나타내며, t_{adj} 는 HRU의 경사 및 경사향을 고려한 기온 보정계수를, t_{lapse} 는 기온체감율(1,000ft 고도에 대한 온도 변화율)을 뜻한다.

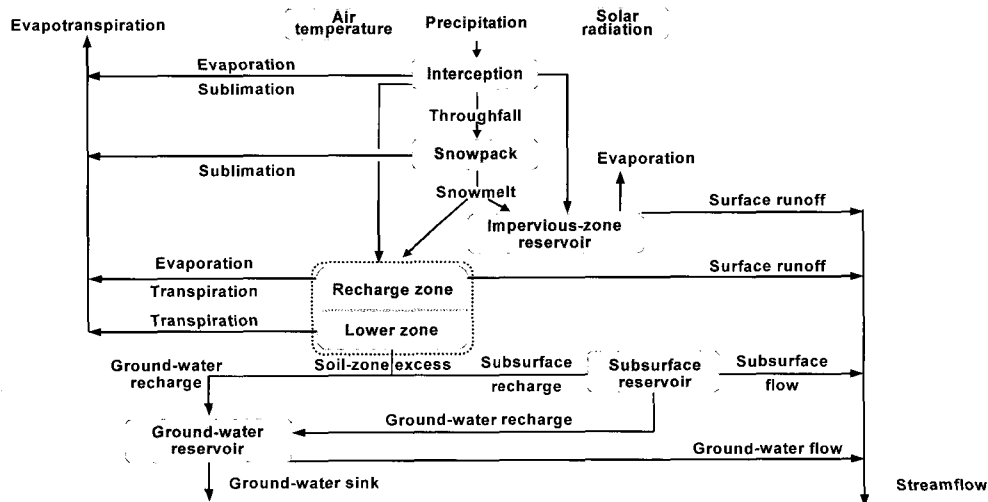


Fig. 1. Flow diagram of the PRMS conceptual model

일강수량(P)은 Eq. (2)에서와 같이 강수량 보정계수 (P_{adj})를 이용하여 HRU별로 보정되어 적용되며, 일최고기온에 따라 강설과 강우로 구분된다. PRMS 모형에서는 혼합강우도 고려가 가능한데, Eq. (3)에 의해 강우시 온도에 따라 총강수에 대한 강우의 비율(P_{rain})을 계산한다.

$$P' = P \times P_{adj} \quad (2)$$

$$P_{rain} = \left[\frac{T_{max} - T_{snow}}{T_{max} - T_{min}} \right] \times PMIX_{adj} \quad (3)$$

여기서 T_{max} , T_{min} 은 최고·최저기온이고 T_{snow} 는 일최고기온이 이 온도보다 작을 경우 모든 강수는 강설로 계산하는 온도이며, $PMIX_{adj}$ 는 혼합강수에서 강우의 비율을 조절하는 월별보정계수이다. 혼합강우 발생시 모형에서는 강우가 먼저 발생한다고 가정한다.

2.1.2 태양복사량(Solar Radiation)

태양복사량은 단파복사량만(shortwave radiation)을 고려하며 단위로는 랭리(ly; 표면 1cm²당 받는 cal량)를 사용한다. HRU에 입사되는 단파복사량(S_{rad})은 Eq. (4)로 계산된다.

$$S_{rad} = \left[S_{rad} \times \frac{radpl_{pot}}{hpl_{pot}} \right] / radpl_{cos} \quad (4)$$

여기서 S_{rad} 는 관측 단파복사량 또는 계산된 단파복사량(ly)을 나타내고, $radpl_{pot}$ 는 HRU의 경사·경사향 단면(radiation plane)에 대해 입사되는 잠재 태양복사량(ly), hpl_{pot} 는 수평면에 입사되는 잠재 태양복사량(ly), $radpl_{cos}$ 는 태양이 입사되는 경사·경사향 단면 경사의 코사인 값이다.

관측자료가 없을 경우 단파복사량을 산정하는 방법에는 도일계수와 최고기온의 관계를 이용하는 방법(Leaf and Brink, 1973)과 운량밀도와 최고·최저기온차의 관계를 이용하는 방법(Thompson, 1976)이 있다.

2.1.3 차단(Interception)

강수가 식생으로 피복되어 있는 지역에서 발생하면 식생에 의한 차단이 발생한다. 순강수량(P_n)은 식생에 의해 차단된 양을 제외한 강수량으로 Eq. (5)에 의해 계산된다.

$$P_n = [P \times (1 - D_{cov})] + (P_{thrufall} \times D_{cov}) \quad (5)$$

여기서 D_{cov} 는 식생의 피복밀도를, $P_{thrufall}$ 은 식생

(canopy)을 통해 지표면에 도달하는 강수량(in.)이다. $P_{thrufall}$ 은 강수량이 식생의 최대저류량 보다 클 경우 발생하는데, 최대저류량은 강수형태(여름강우, 겨울강우, 강설)에 따라 다른 값을 가진다.

2.1.4 용설(Snowmelt)

용설은 적설시스템과 12시간 간격으로 계산되는 에너지수지(energy balance)의 관계를 이용하여 모의한다. HRU별 적설층은 표층과 하층으로 구분하는데, 표층은 적설의 표면에서 3~5cm 정도이고 하층은 표층하부에서 지표면까지이다. PRMS 모형에서는 대기와 적설 사이의 에너지 교환(energy exchange) 및 토양과 적설 사이의 열전도(heat conduction)는 없는 것으로 가정한다. 용설모의에서 선행적설이 없는 경우 강설에 의해 새로운 적설이 구성되며, 선행적설이 있는 경우 강수는 적설 위에 더해져 누적되거나 용설을 일으킨다. 적설 위에 강우가 내리는 경우, 강우를 통해 전달된 열량은 적설의 온도와 적설 내에 포함되어 있는 수분량을 조절하게 된다. 이때 적설 온도가 0°C 이하이면, 비로 전달되는 열량은 적설의 온도를 상승시켜 온도가 0°C까지 상승하게 된다. 이때 적설이 보유할 수 있는 최대수분보유능(free-water holding capacity)을 만족하고, 이 값을 초과하게 되면 용설이 발생하게 된다. 또한 온도가 0°C에 도달하는데 필요한 열량보다 작을 경우 우선 비는 얼게되지만 액체가 얼음으로 변하면서 잠재열(latent heat of fusion, 80cal/g)을 방출함으로써 적설의 온도도 추가로 상승하게되어 온도가 0°C에 도달하면 또한 용설이 발생하게 된다.

2.1.5 잠재증발산(Potential Evapotranspiration)

PRMS 모형 내에서 잠재증발산량(PE)을 계산하는 방법으로는 관측자료가 있을 경우는 이용하고, 관측자료가 없을 경우는 Hamon 방법(1961)이나 수정 Jensen-Haise 방법(1963)을 이용하여 잠재증발산량을 산정한다. 실제증발산량은 Zahner(1967)가 제시한 토양수분상태를 고려한 방법을 이용하여 추정된다. Eqs. (6) and (7)은 각각 Hamon 방법과 수정 Jensen-Haise 방법을 나타낸 것이다.

$$PE = hacoef \times radpl_{sunhrs}^2 \times vdsat \quad (6)$$

여기서 $hacoef$ 는 Hamon의 월별계수이며, $radpl_{sunhrs}$ 는 12시간 단위로 정의되는 가능일조시간을 나타낸다. $vdsat$ (g/m³)는 절대습도(absolute humidity)로서 주어진 온도에서의 단위체적당 대기 중의 수증기질량을 나타낸다. $vdsat$ 는 Federer and Lash (1978)가 제안한

식으로 계산할 수 있다.

$$PE = jhcoef \times (T_m - jhcoef_{hru}) \times S'_{rad} \quad (7)$$

여기서 $jhcoef$ 는 월별계수이며, T_m 은 일평균기온이고, $jhcoef_{hru}$ 는 HRU의 온도계수, S'_{rad} 는 태양복사량(in/day)을 나타낸다.

2.1.6 토양수분(Soil-moisture)

토양층의 저류량은 토층단면(active soil profile)에서의 유입량과 유출량의 차로써 계산된다. 토양층의 깊이는 HRU에 존재하는 식생의 평균 근입깊이이고, 토양대의 최대가능수분보유능(maximum available water-holding capacity)은 토양층에 따른 최대보수량(field capacity)과 시들음점(wilting point)의 차로써 결정된다. 최대보수량은 강우로 토양이 포화된 후 1~3일이 지나면서 대공극의 물이 중력에 의해 빠지고 남은 소공극의 토양수분함량이고, 시들음점은 식물이 고사하게 될 때의 토양수분함량이다. 강수가 지표면에 도달하여 토양대에 침투되면, 침투량은 토양대의 유효수분에 더해지고 침투량이 토양대의 유효수분을 초과할 경우 지하수저수지와 지표하저수지로 이동하게 된다. 초과량은 토양대에서 먼저 지하수저수지로 이동 가능한 일최대유입량만큼 유입되고 그 양을 초과한 나머지 양이 지표하저수지로 유입된다.

2.1.7 지표면유출(Surface Runoff)

지표유출은 유출기여면적(runoff contributing area) 개념(Dickenson and Whitely, 1970; Hewlett and Nutter, 1970)을 사용하며, 지표유출량(SR)은 순강수량(P_n)에 유출기여면적비(CA)를 곱하여 계산한다. 유출기여면적비는 HRU의 면적에 대한 지표면유출의 기여면적비로서 선형방정식(Eq. (8)) 또는 비선형방정식(Eq. (9))으로 계산된다.

$$CA = CA_{min} + [(CA_{max} - CA_{min}) \times (\frac{SMR}{SMR_{max}})] \quad (8)$$

여기서 CA_{max} , CA_{min} 은 최대·최소 유출기여면적비이고, SMR_{max} 는 상부층의 최대수분보유량, SMR 는 현재수분보유량이다.

$$CA = smidx_coef \times 10^{(smidx_exp \times SM \times 0.5P_n)} \quad (9)$$

여기서 $smidx_coef$ 와 $smidx_exp$ 는 비선형방정식의 계수이고, SM 은 토양층의 현재수분보유량이다.

2.1.8 지표하유출(Subsurface Flow)

지표하저수지로의 유입은 토양층의 최대저류량과 지하수저수지의 일최대 유입량을 초과할 경우 발생하며 유출은 하천과 지하수저수지로의 유출로 구분된다. 지표하저수지에서 하천유출량(SSF)은 Eq. (10)으로, 지하수저수지로의 유출(SSG)은 Eq. (11)로 계산된다.

$$SSF = (ssrcoef_lin \times STO) + (ssrcoef_sq \times STO^2) \quad (10)$$

여기서 $ssrcoef_lin$, $ssrcoef_sq$ 는 지표하 흐름의 선형 및 비선형추적계수이며, STO 는 지표하저수지의 저류량이다.

$$SSG = ssr2gw_rate \times [\frac{STO}{ssr2gw_max}]^{ssr2gw_exp} \quad (11)$$

여기서 $ssr2gw_rate$ 와 $ssr2gw_exp$ 는 지표하저수지에서 지하수저수지로의 흐름을 추적하는데 사용되는 계수이고, $ssr2gw_max$ 는 지표하저수지에서 지하수저수지로 이동 가능한 최대수분량이다.

2.1.9 지하수유출(Groundwater Flow)

지하수저수지의 시스템은 선형저수지로 가정된다. 지하수저수지의 저류량은 기저유출 및 싱크(sink)에 의해 감소되는데, 지하수저수지에서 발생하는 기저유출(GW)은 다음 Eq. (12)와 같이 모의된다. $gwflow_coef$ 는 기저유출을 계산하기 위한 지하수 추적계수이고, $GSTO$ 는 지하수저수지의 저류량이다.

$$GW = gwflow_coef \times GSTO \quad (12)$$

2.2 PRMS 모형의 매개변수 분석

MMS(Modular Modeling System; Leavesley et al., 1996a,b) 버전의 PRMS 모형을 이용하여 일유출모의를 할 경우 잠재증발산 계산이나 태양복사량 산정시 채택한 방법에 따라 다소 차이는 있으나 약 104개 정도의 많은 매개변수 산정이 요구된다. 이 중에서 출력이나 저수지추적관련 변수들을 제외한 실제 유출량산정에 영향을 미치는 변수들은 약 71개 정도이다. 국내에서 PRMS 모형을 적용시 강수량 보정에 관련된 변수들은 기본값을 적용할 수 있으며, 기온 보정변수들은 고도에 따른 계감율만을 고려하면 된다. 용설관련 변수들은 국내유역의 경우 전체유량에 비해 차지하는 비중이 작으므로 기본값을 적용해도 모의 정확도에는 큰 영향을 미치지 않으며, 태양복사량 산정변수들은 경험식을 이용하여 산정된다. 따라서 이러한 변수들을 제외한 차단, 토양수분, 지표면유출, 지표하유출, 지하수유출에 관련

된 변수들만을 결정하면 되는데, 차단에 관련된 변수들은 모두 식생도(또는 임상도)로부터 추정 가능성이 가능하며, 지표면 유출에서 불투수면적비는 토지피복도를 이용하여 추출할 수 있다. 토양수분관련 변수들은 토양도와 식생도(또는 임상도)를 이용하여 추정한다. 결과적으로 Table 1에서 제시된 매개변수들만을 최적화함으로써 국내 유역에서 유출분석을 수행할 수 있다.

3. 모형의 적용

PRMS 모형에서는 GIS 자료를 이용하여 HRU를 생성하고 모형변수들을 추정하기 위해 Weasel(Leavesley et al., 1996a) 프로그램을 이용한다. 그러나 Weasel을 이용하여 HRU를 구분할 경우 너무 많은 HRU가 생성되고 실제 유역과도 차이가 발생할 수 있다. 또한 김남원 등(2005)의 연구에 의하면 HRU의 수를 증가시켜도 유출결과에 미치는 영향이 거의 없으므로 실제 유역을 고려하여 적절한 HRU를 구분하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 수자원단위지도상의 표준유역을 HRU로 규정하고 모형을 적용하였다. 모형 적용시 잠재증발산량 산정방법은 Hamon 방법을 이용하였으며, 융설모의를 고려하였다.

3.1 적용 대상유역 현황

본 연구에서는 PRMS 모형의 적용성을 평가하기 위해 국내유역에서 장기적인 관측이 이루어지고 있으며

자료의 신뢰성이 높은 지점들 중 유역면적과 유출특성이 상이한 7개의 유역을 선정하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 한강유역의 4개 댐유역과 낙동강유역의 3개 댐유역을 선정하였다. 각 유역의 HRU 수는 유역면적이 가장 작은 도암댐유역(149.42km²)이 1개, 유역면적이 가장 큰 충주댐유역(6,661.58km²)은 49개로 구분되었다. 유역별 평균표고는 도암댐유역이 915.14m로 가장 높고 괴산댐유역이 357.37m로 가장 낮았다. 평균경사는 소양댐유역이 45.97%로 가장 급경사를 보였으며, 그 다음은 안동댐유역이 42.39%로 나타났다. 각 유역에 대해 일단위의 강우자료와 댐유입량자료를 수집하였으며, 지형자료인 DEM, 토양도, 토지피복도, 임상도를 수집하여 지형관련 매개변수를 추출하는데 활용하였다.

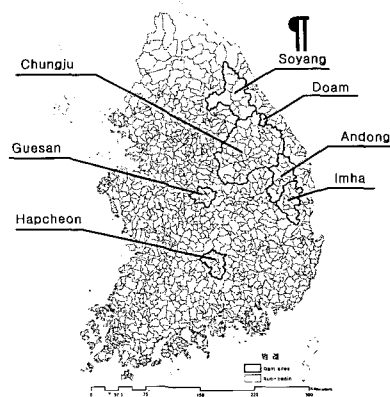


Fig. 2. Locations of the selected study area

Table 1. PRMS model parameters for Rosenbrock method

변수명	변수 설명	초기값
smidx_coef	토양함수량과 기여면적 관계식의 계수	0.010
smidx_exp	토양함수량과 기여면적 관계식의 지수	0.30
ssr2gw_exp	지표하저수지에서 지하수저수지로의 유입량 계산을 위한 지수	1.00
ssr2gw_rate	지표하저수지에서 지하수저수지로의 유입량 계산을 위한 계수	0.005
ssrcoef_lin	지표하저수지에서 하천으로의 유출량 계산을 위한 선형 계수	0.08
ssrcoef_sq	지표하저수지에서 하천으로의 유출량 계산을 위한 비선형 계수	0.15
soil2gw_max	지하수저수지로 흐르는 토양수분 최대초과량	0.01
gwflow_coef	지하수저수지의 지하수유출을 계산하기 위한 계수	0.03
hamon_coef	잠재증발산을 계산하기 위한 Hamon의 월별계수	0.0055

Table 2. General information for the selected study area

유역명	유역면적 (km ²)	HRU 수	HRU 평균면적 (km ²)	평균표고 (m)	평균경사 (%)	주하천길이 (km)
괴산댐	676.73	6	112.79	357.37	36.87	44.41
도암댐	149.42	1	149.42	915.14	32.62	12.86
소양댐	2,694.36	11	249.94	650.54	45.97	61.90
충주댐	6,661.58	49	135.95	609.06	34.89	103.14
안동댐	1,590.72	11	114.61	557.30	42.39	111.09
임하댐	1,367.74	11	124.34	394.67	40.35	18.30
합천댐	928.94	8	116.12	504.60	34.87	20.03

주) 수자원종합정보시스템(www.wamis.co.kr)

3.2 매개변수 검 · 보정

장기유출분석시 모형의 최적매개변수를 추정하기 위해서는 평년뿐만 아니라 가뭄과 홍수년을 포함하는 기간을 보정기간으로 선정하여야 다양한 수문사상에 대한 적절한 매개변수를 추정할 수 있다. 이러한 점을 고려하여 전체자료기간을 보정 및 검정기간으로 구분한 다음 보정기간에 대해서는 관측치와 비교하여 매개변수들을 추정하고 검정기간에서는 보정기간에서 추정된 매개변수를 그대로 적용하여 관측치에 대한 적합성을 검토하였다. 지형자료로부터 추정가능한 매개변수들은 추정하였고, 나머지 변수들에 대해서는 최적화기법을 적용하여 보정하였다. PRMS 모형의 매개변수 최적화는 우선 각 유역별로 Hamon의 월별계수를 보정하여 전체적인 물수지와 월별 물수지를 맞추고 Rosenbrock 방법(Rosenbrock, 1960)을 사용하여 최적화를 수행하였다. Table 3은 보정 및 검정기간에 대한 통계치를 나타낸 것이다. 보정 결과 모든 유역에서 상관계수 0.84 이상, 모형 효율계수 0.69 이상, 평균제곱근오차 3.10mm/day 이하로 관측치에 대해 높은 적합도를 보였다. 유출용적오차도 전체유역에서 10% 이하로 나타났고, 낙동강유역의 세 개 댐지점에서는 유출용적오차 2% 이내로 관측유량에 근접하는 유출량을 모의하였다. 보정된 유역별

매개변수에 대해 검증을 실시한 결과 전체 유역에서 상관계수가 0.80 이상으로 높은 적합도를 나타내었다. 특히 소양댐과 안동댐 그리고 합천댐에서는 유출용적오차가 6% 이하, 평균제곱근오차가 2.96mm/day 이하, 모형 효율성 계수가 0.70 이상으로 관측유량에 근접하게 모의하였다. 괴산댐과 도암댐유역은 유출용적오차가 약 11%로 다소 큰 차이를 보였으나 나머지 통계치에서는 적합한 결과를 나타내었다. 유역별로 매개변수를 보정한 결과 관측치를 잘 모의하는 것으로 나타났으며, 검정에서도 높은 적합성을 나타내었다.

Fig. 3은 각 유역의 상관계수를 X축으로 평균제곱근오차를 Y축으로 그리고 모형효율을 원의 직경으로 하여 보정기간과 검정기간에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 보정기간에 대해서는 괴산댐유역을 기준으로 안정된 모의결과를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 검정기간에서는 충주댐유역의 평균제곱근오차(4.44mm/day)가 다소 안좋은 결과를 보이고 있으나 나머지 유역들에서는 상관계수와 평균제곱근오차에서 모두 안정된 결과를 보이고 있다. 이것은 PRMS 모형이 모든 적용유역에서 비교적 안정적으로 유출분석을 수행할 수 있다는 것을 나타낸다. Fig. 4는 장기유출에서 중요한 갈수기의 모의능력을 분석하기 위해 관측과 계산유량을 로그값으로 도시한 것이며, 아래엔 관측치와 계

Table 3. Statistical results for both model calibration and verification periods

구분		괴산댐	도암댐	소양댐	충주댐	안동댐	임하댐	합천댐
보정기간	VE(%)	8.76	-6.03	1.94	4.28	0.31	1.92	-1.63
	RMSE(mm/day)	3.10	2.55	2.83	2.29	2.23	2.70	1.94
	ME	0.69	0.85	0.82	0.80	0.76	0.77	0.88
	CORR-C	0.84	0.92	0.91	0.90	0.87	0.88	0.94
검정기간	VE(%)	-11.32	11.46	-4.28	-2.79	0.95	-5.45	5.42
	RMSE(mm/day)	2.91	2.24	2.96	4.44	2.44	2.56	2.02
	ME	0.79	0.78	0.84	0.72	0.70	0.64	0.80
	CORR-C	0.90	0.89	0.92	0.85	0.85	0.80	0.90

주) 유출용적오차(VE) = $100 \times (\sum S_i - \sum O_i) / \sum O_i$, 여기서 O 는 관측유량, S 는 계산유량.

평균제곱근오차(RMSE) = $\sqrt{\sum (O_i - S_i)^2 / n}$, 여기서 n 은 자료수.

모형 효율성계수(ME) = $[\sum (O_i - \bar{O})^2 - \sum (O_i - S_i)^2] / \sum (O_i - \bar{O})^2$, 여기서 \bar{O} 는 관측유량의 평균.

상관계수(CORR-C) = $SS_{os} / \sqrt{SS_o \times SS_s}$, 여기서 $SS_{os} = \sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})$, $SS_o = \sum (O_i - \bar{O})^2$, $SS_s = \sum (S_i - \bar{S})^2$.

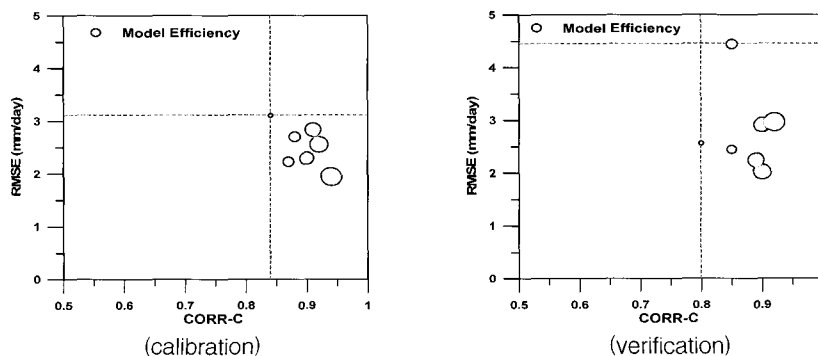
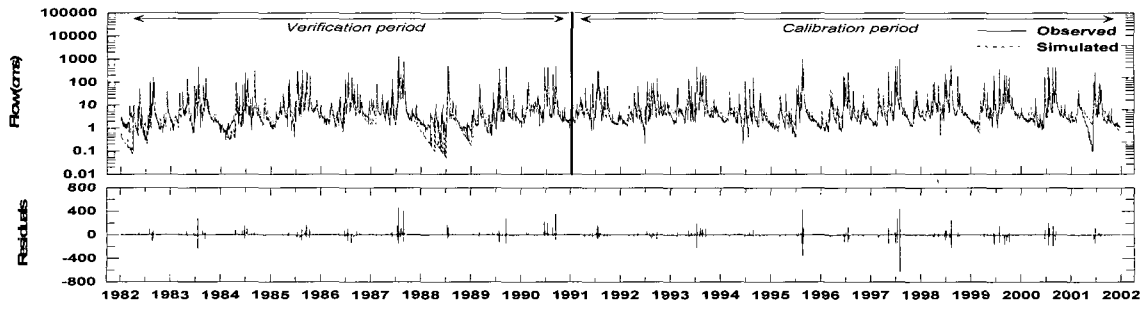
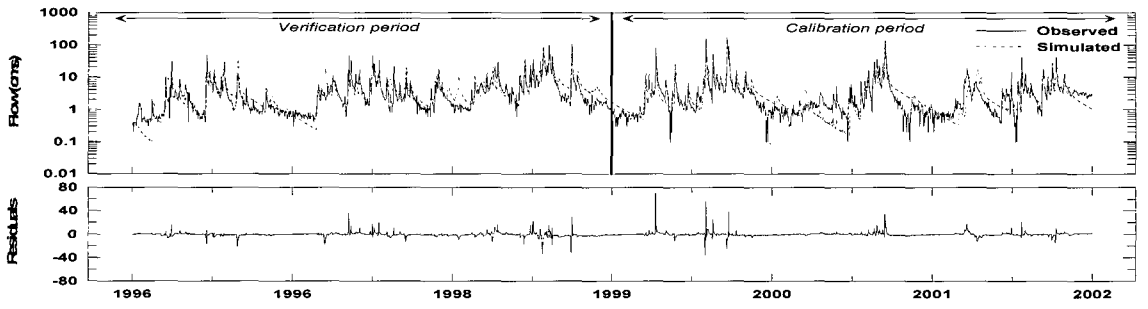


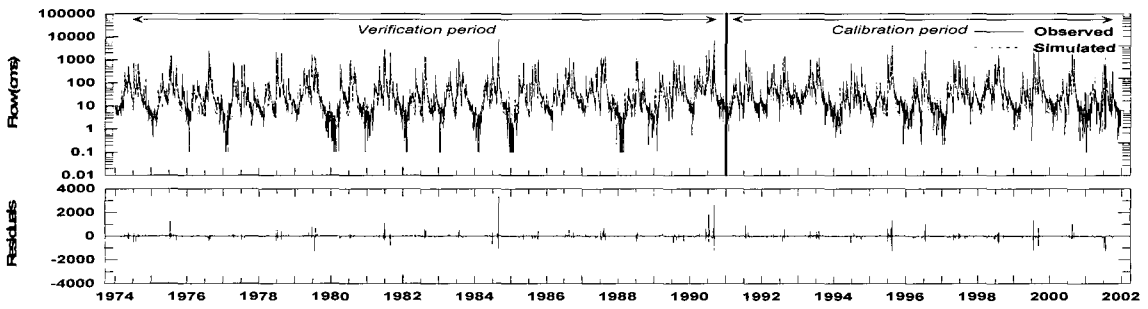
Fig. 3. Comparison of statistical results for model calibration and verification periods



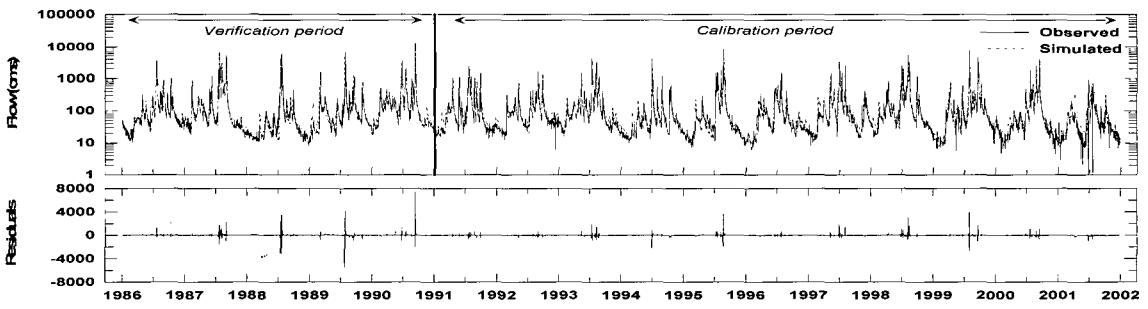
(a) Guesan



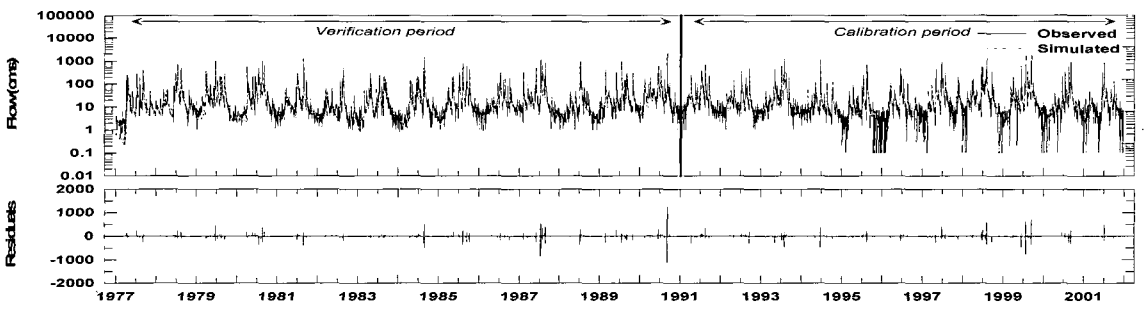
(b) Doam



(c) Soyang

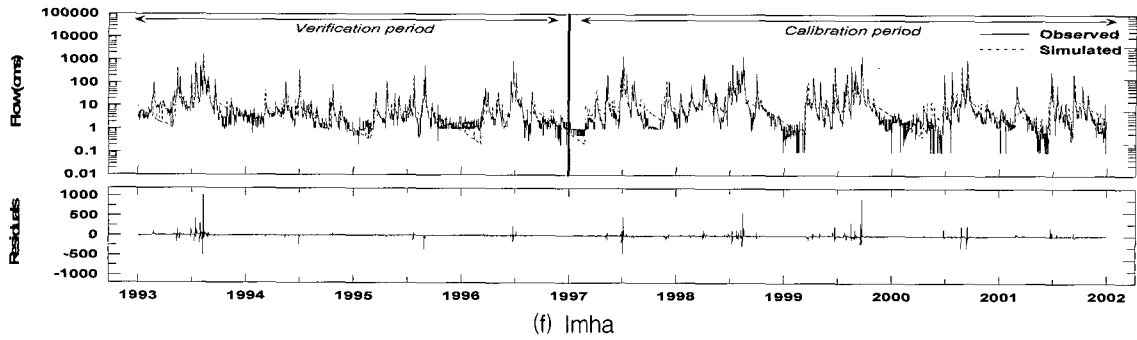


(d) Chungju

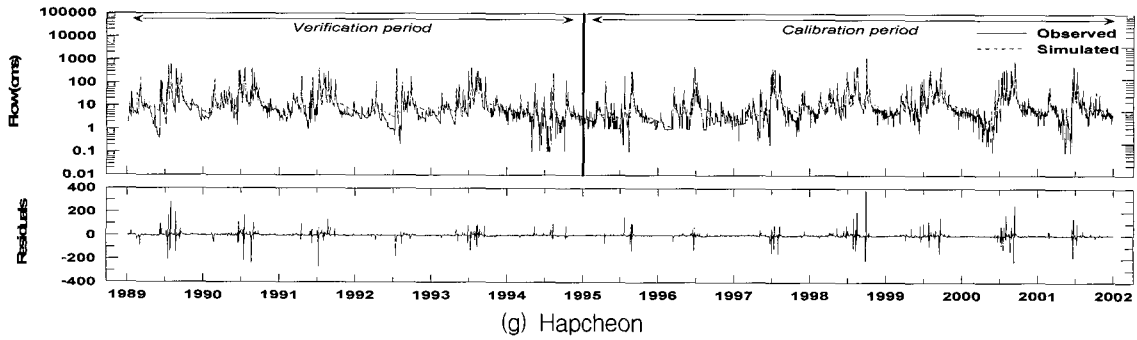


(e) Andong

Fig. 4. Observed and Simulated discharges for the selected study areas (continued)



(f) Imha



(g) Hapcheon

Fig. 4. Observed and Simulated discharges for the selected study areas

산치의 오차를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 모든 유역에서 전체적으로 계산치가 관측치에 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있으나 여름철의 큰 홍수사상에서는 첨두치에 대한 모의능력이 다소 떨어지고 첨두시간에서도 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 관측유량의 전체적인 패턴을 중점적으로 모의하는 장기유출모형의 제약성 때문으로 사료된다.

4. 적용성 분석

PRMS 모형의 적용성을 분석하기 위해 3장에서 추정된 매개변수를 이용하여 전체 자료기간에 대해 모의한

결과를 분석하였다. Table 4는 전체기간에 대한 통계치를 제시한 것으로 7개 유역 모두에서 유출용적오차 5% 이하, 평균제곱근오차 3.13mm/day 이하, 모형효율성계수 0.73 이상, 상관관계수가 0.86 이상으로 관측유량에 대해 적합성 높은 모의결과를 보여주었다. 이는 PRMS 모형이 다양한 국내유역에서도 비교적 신뢰성 높은 유출 분석이 가능함을 보여주는 결과라 할 수 있다.

Fig. 5는 PRMS 모형의 월별 모의능을 평가하기 위해 각 유역별 월평균유량을 비교한 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 도암댐을 제외한 모든 유역에서 월관측 유량과 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 도암댐유역

Table 4. Statistical results for total period over the study areas

구분		평균유출량 (m ³ /s)	최대유출량 (m ³ /s)	최소유출량 (m ³ /s)	유출율 (%)	VE (%)	RMSE (mm/day)	ME	CORR-C
괴산댐	관측치	13.42	1,292.4	0.00	54	-0.11	3.01	0.74	0.86
	계산치	13.40	1,195.0	0.04	54				
도암댐	관측치	4.45	159.6	0.10	61	3.47	2.40	0.83	0.91
	계산치	4.61	173.5	0.09	62				
소양댐	관측치	67.45	7405.6	0.00	68	-1.93	2.91	0.83	0.91
	계산치	66.16	7128.8	1.17	67				
충주댐	관측치	158.51	13,142.1	1.00	59	1.60	3.13	0.75	0.87
	계산치	161.05	10,287.6	8.86	61				
안동댐	관측치	30.54	2,082.0	0.00	56	1.08	2.35	0.73	0.86
	계산치	30.87	1,841.8	0.18	57				
임하댐	관측치	19.76	1,640.9	0.00	49	-0.29	2.64	0.73	0.86
	계산치	19.70	1,049.9	0.19	49				
합천댐	관측치	19.89	1,269.2	0.00	54	1.85	1.98	0.85	0.92
	계산치	20.26	882.3	1.13	55				

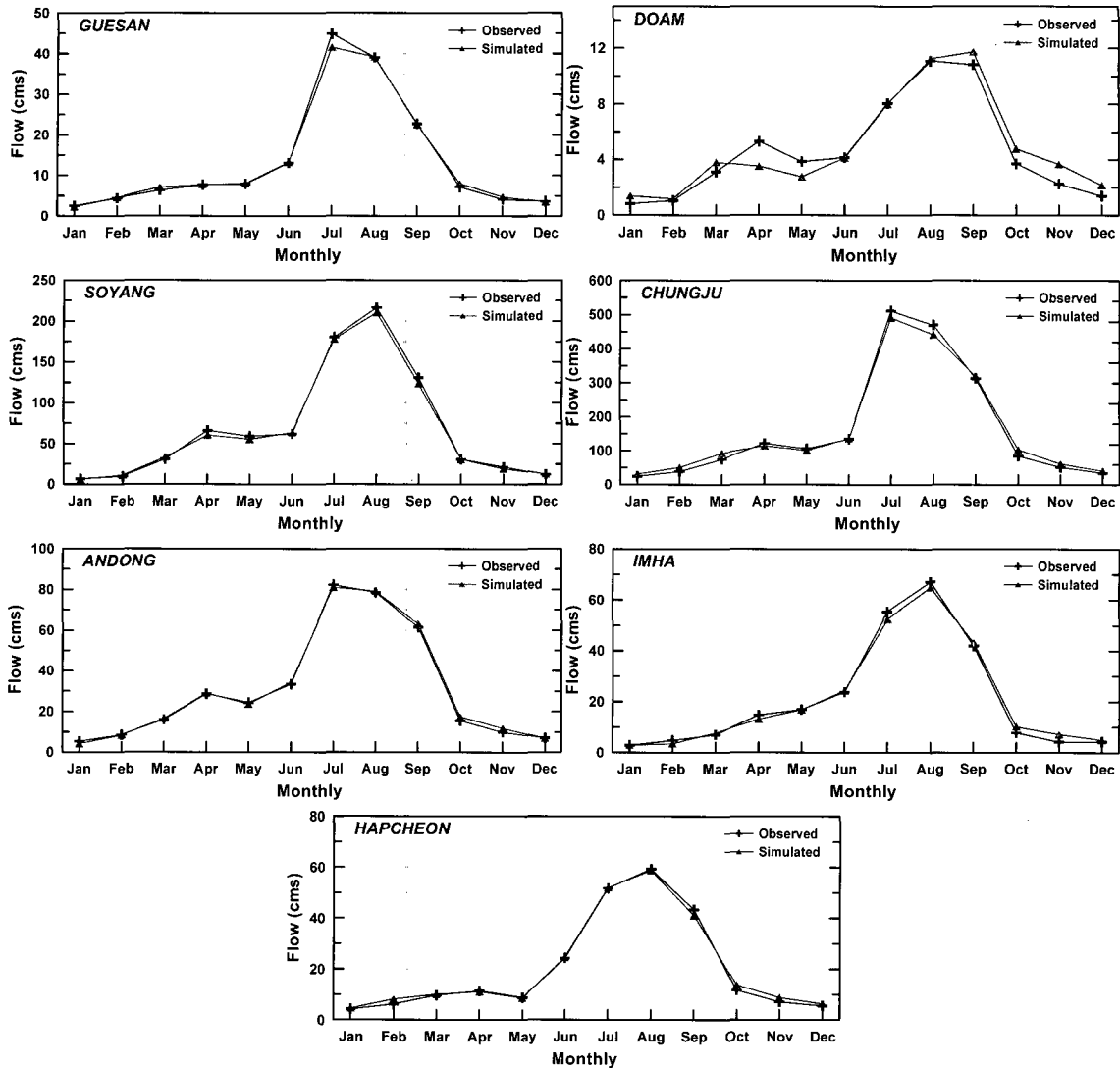


Fig. 5. Comparison of mean monthly discharges for the selected study areas

은 자료기간이 짧고 댐유입량에 대한 신뢰성이 다른 유역에 비해 낮은 유역으로 PRMS 모형은 비교적 월별 패턴을 잘 모의하는 것으로 판단된다. Fig. 5에서 소양댐과 충주댐 그리고 안동댐유역의 경우 다른 유역에 비해 4월달 유출량이 5월달 보다 높게 나타나는 것은 태백산맥의 지형적인 영향으로 용설에 의한 유출량의 발생으로 볼 수 있다. 모형 결과에서 이러한 패턴을 잘 모의하는 것을 볼 수 있는데, 이는 PRMS 모형의 용설모의가 국내 실정에서도 어느 정도 적합성을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 고지대에 위치하고 있는 도암댐유역의 경우 4월달의 용설을 제대로 모의하지 못하고 있는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 국내에서도 용설의 영향이 큰 유역인 경우에는 용설관련 변수들의 정확한 추정 수행되어야 보다 신뢰성 높은 유출분석이 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 6은 각 유역별 모의결과에 대한 월별 상관계수

와 평균제곱근오차를 도시한 것이다. 상관계수는 1월달과 3월달에 유역별로 큰 편차를 보이고 있으나 나머지 달에서는 한 두개의 유역을 제외한 모든 유역에서 비슷한 수치를 나타내어 안정적인 결과를 보였다. 1월달과 3월달에 유역별로 큰 편차를 보이는 이유는 겨울철 갈수시 관측유량의 신뢰도가 낮은 영향이거나 또는 용설 모의관련 변수를 기본값으로 적용한 영향에 의한 것으로 판단된다. 평균제곱근오차는 여름철인 7월과 8월달에 큰 편차를 보이고 있는데, 이는 앞 절에서 언급한 바와 같이 PRMS 모형이 큰 홍수사상의 침투유량 모의에는 취약성을 보이기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 7은 유역면적에 따른 모의정확성을 평가하기 위해 유역면적이 작은 유역부터 큰 유역순으로 정규화(normalization)된 통계치를 나타낸 것이다. 유출용적오차는 유역면적이 커짐에 따라 약간의 감소경향이 있고, 평균제곱근오차는 유역면적이 커짐에 따라 약간의 증가

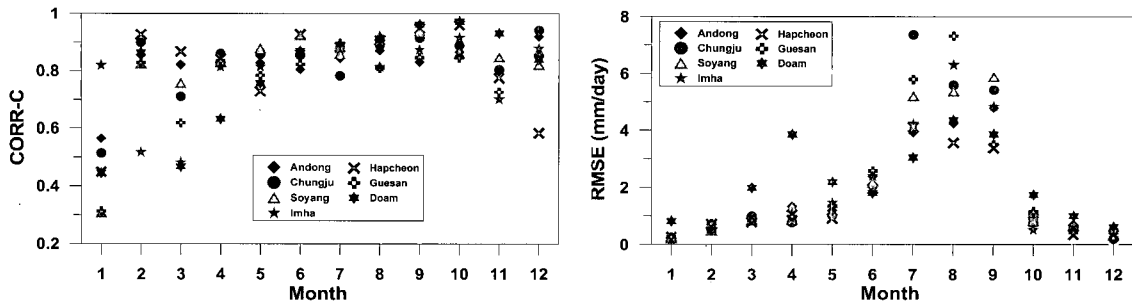


Fig. 6. Monthly correlation coefficient(CORR-C) and root mean square error(RMSE)

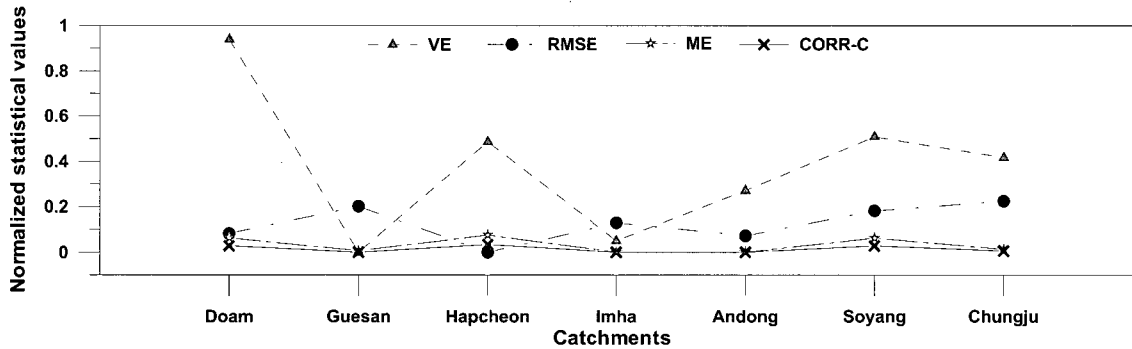


Fig. 7. Statistical results according to watershed area

경향이 있으나 뚜렷하게 유역면적에 따른 경향이라고 판단하기는 어렵다. 상관계수와 모형효율성계수는 특징적인 경향없이 모든 유역에서 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 PRMS 모형의 적용 유역면적에 따른 분석에서는 뚜렷한 특징이 나타나지는 않았으나 모형구조상 적용 유역면적이 커짐에 따라 준분포형 모형의 특징보다는 일체형모형에 가깝게 모의된다고 볼 수 있다. 왜냐하면 PRMS 모형에서는 저수지 추적을 제외한 일유출모의시 각 HRU 별로 산정된 유출량에 대해 하도추적을 고려하지 않고 단순히 유역출구에서의 합으로 계산하기 때문이다. 따라서 PRMS 모형을 이용한 장기유출분석시 강수에 의해 유역내에서 발생하는 지표면유출이 하루이내에 유역출구에 도달하는 유역에 적용하는 것이 준분포형 모형 개념에 합당할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 PRMS 모형에 대한 국내 유역에서의 적용성을 분석하기 위해 모형이론을 검토하고 매개변수 추정을 위해 가용한 지형자료를 활용하였으며, 모형의 모의능력과 적용한계를 평가하기 위해 7개의 댐지점에 대해 적용하여 모의결과를 다각적으로 분석하였다. 본 연구에서 적용한 MMS 버전의 PRMS 모형은 모형 매개변수의 수정 및 최적화와 그래프를 통한 결과분석 및 다양한 출력형태를 제공하고 있으며, 지형자료를 이용

한 매개변수의 추정시 Weasel을 이용할 수 있어 편리하다. PRMS 모형은 경험식과 물리식을 이용하여 유출 분석을 수행하는 모형으로 많은 매개변수들이 요구되지만 지형자료와 기존의 경험치를 이용할 경우 10개 정도의 매개변수만을 결정함으로써 신뢰성 높은 유출분석을 모의할 수 있는 것으로 나타났다. 7개의 적용유역에 대해 적용한 결과 관측유량에 대해 높은 적합성을 나타내었으며, 월별 유출모의와 용설모의에서도 모의능력이 우수한 것으로 나타났다. 유역면적에 따른 적용성 평가에서도 유역면적에 큰 영향없이 모의능력이 뛰어난 것으로 나타났으나, 유역면적이 커짐에 따라 일체형모형에 가까운 모의특성을 보이므로 강수에 의한 지표면유출이 하루이내에 유역출구에 도달할 수 있는 유역에만 적용하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

PRMS 모형은 국내 유역에서도 적용성이 높은 모형으로 판단되며, 보다 정확한 유출분석을 위해서는 외국에서 개발된 경험적 변수들에 대한 국내유역에서의 추정에 관한 연구들이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- 고덕구 (1989). 소유역의 장기유출 예측을 위한 모의 발생 수문모형의 개발. 박사학위논문, 서울대학교, pp. 1-2.
- 구혜진, 전경수, 오윤근, 성영두 (2003). "PRMS 모형의 괴산댐유역과 충주댐유역의 적용." **한국수자원학회 2003 학술발표회논문집(2)**, 한국수자원학회, pp. 631-634.
- 김남원, 김현준, 박선호 (2005). "PRMS의 HRU 크기에 따른 장기유출특성." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제2호, pp. 167-177.
- 김승 (1988). "비선형 다중감소모형 개발", **30회 수공학연구발표회논문초록집**, pp. 148-157.
- 김병식, 서병하, 김형수, 김남원 (2003). "SLURP 모형을 이용한 하천 유출량 모의." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제4B호, pp. 289-303.
- 김철, 김석규 (2002). "PRMS을 이용한 도시화에 의한 수문영향 평가." **한국수자원학회 2002 학술발표회 논문집(1)**, 한국수자원학회, pp. 123-127.
- 김현준 (2001). 2매개변수 쌍곡선형 일유출 모형의 개발. 박사학위논문, 서울대학교, pp. 1-3.
- 배덕효 (1997). "저류함수법을 이용한 추계학적 실시간 홍수예측모형 개발." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 449-457.
- 배덕효, 조원철 (1995). "물리적·개념적 연속 유출모형에 의한 유출해석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 193-202.
- 임혁진, 권형중, 장철희, 김성준 (2004). "SLURP 모형을 이용한 유출수문분석-소양강댐 유역을 대상으로." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제8호, pp. 631-641.
- 정일원, 배덕효 (2003). "PRMS 모형의 국내 적용성 검토에 관한 연구." **한국수자원학회 2003 학술발표회 논문집(2)**, 한국수자원학회, pp. 639-642.
- Beven, K. (1989). "Changing ideas in hydrology - The case of physically based models." *J. Hydrol.*, vol. 105, issues 1-2, pp. 157-172.
- Dickenson, W.T., and Whitely, H.Q. (1970). *Watershed areas contributing to runoff*, International Association of Hydrologic Sciences Publication 96, pp. 1.12-1.28.
- Federer, Anthony C., and Lash, Douglas (1978). *Brook: A hydrologic simulation model for eastern forests: Durham*, New Hampshire, University of New Hampshire, Water Resources Research Center, Research Report No. 19, p. 84.
- Hamon, W.R. (1961). "Estimating potential evapotranspiration, Proceedings of the American Society of Civil Engineers." *Journal of the Hydraulic Division*, Vol. 87, No. HY3, pp. 107-120.
- Hewlett, J.D., and Nutter, W.L. (1970). *The varying source area of streamflow from upland basins*, in *Symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management*, Montana State University, Bozeman, Montana, 1970, Proceedings, pp. 65-83.
- Jensen, M.E., and Haise, H.R. (1963). "Estimating evapotranspiration from solar radiation", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, *Journal of Irrigation and Drainage*, Vol. 89, No. IR4, pp. 15-41.
- Kim, C.G., Kim, H.J., Jang, C.H., Kim, N.W. (2003). "Runoff Estimation from Two Mid-Size Watersheds Using SWAT Model", *Water Engineering Research*, Vol. 4, No. 4, pp. 193-202.
- Leaf, C.F., and Brink, G.E. (1973). *Hydrologic simulation model of Colorado subalpine forest*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service Research Paper RM-107, pp. 23.
- 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. 83-4238.
- Leavesley, G.H., Markstrom, S.L., Brewer, M.S., Viger, R.J. (1996a). *The modular modelling system (MMS) - the physical process modelling component of a database-centered decision support system for water and power management*, Water, Air, and Soil Pollution 90, pp. 303-311.
- Leavesley, G.H., Restrepo, P.J., Markstrom, S.L., Dixon, M., Stannard, L.G. (1996b). *The modular modelling system - MMS : user's manual*, U.S. Geological Survey Open File Report 96-151, pp. 142.
- Rosenbrock, H.H. (1960). "An automatic method of finding the greatest or least value of a function", *Computer Journal*, No. 3, pp. 175-184.
- Thompson, E.S. (1976). "Computation of solar radiation from sky cover", *Water Resources*

Research, Vol. 12, No. 5, pp. 859-865.
Woolhiser, D.A. (1996). "Search for physically based runoff model - A hydrologic El Dorado", *J. Hydraul. Eng.*, 122(3), pp. 122-129.
Zahner, R. (1967). *Refinement in empirical functions for realistic soil-moisture regimes under forest*

cover, in Sopper, W.E., and Lull, H.W., eds., *International Symposium of Forest Hydrology*, New York, Pergamon Press, pp. 261-274.

(논문번호:05-71/접수:2005.05.17/심사완료:2005.07.14)