

충주댐 유역의 SWAT-K와 HSPF모형에 의한 수문성분 모의특성 비교 분석

김남원 · 신아현 · 김철겸

한국건설기술연구원 수자원·환경연구본부 수자원연구실
(2008년 12월 9일 접수; 2009년 5월 7일 수정; 2009년 5월 28일 채택)

Comparison of SWAT-K and HSPF for Hydrological Components Modeling in the Chungju Dam Watershed

Nam-Won Kim, Ah-Hyun Shin and Chul-Gyum Kim

Water Resources Research Division, Water Resources & Environment Research Department, KICT,
Gyeonggi-Do 411-712, Korea

(Manuscript received 9 December, 2008; revised 7 May, 2009; accepted 28 May, 2009)

Abstract

SWAT-K model is a modified version of the original SWAT, and is known to more accurately estimate the streamflows and pollutant loadings in Korean watersheds. In this study, its hydrological components were compared with those of HSPF in order to analyse the differences in total runoff including evapotranspiration(ET), surface flow, lateral flow and groundwater flow from the Chungju Dam watershed during 2000~2006. Averaged annual runoff with SWAT-K overestimated by 1%, and HSPF underestimated it by 3% than observed runoff. Determination coefficients(R^2) for observed and simulated daily streamflows by both the models were relatively good(0.80 by SWAT-K and 0.82 by HSPF). Potential ET and actual ET by HSPF were lower in winter, but similar or higher than those by SWAT-K. And though there were some differences in lateral and groundwater flows by two models because of the differences in hydrological algorithms, the results were to be reasonable. From the results, it was suggested that we should utilize a proper model considering the characteristics of study area and purposes of the model application because the simulated results from same input data could be different with models used. Also we should develop a novel model appropriate to Korean watersheds by enhancing limitations of the existing models in the future.

Key Words : Comparison models, HSPF, Hydrological component, SWAT-K

1. 서 론

수자원의 보존 및 효율적 관리와 오염총량관리체
제의 목표수질 달성을 위해 유역의 장기적인 유출

분석은 매우 중요하다. 더불어 과거의 수문순환해
석은 거시적인 물수지 분석을 중심으로 이루어졌지
만 최근에는 강우, 증발, 토양수분, 지하수 등 각 수
문성분을 보다 면밀히 분석함으로써 물순환과정의
불확실성을 최소화하는데 관심이 집중되고 있다.
또한 농업용수, 댐건설, 도시화와 토지이용변화 등
의 자연적/인위적인 물순환 구조변화와 지구온난화

등의 기후변화에 따른 유출량의 변화를 정량화 할 수 있어야한다¹⁾. 이를 위한 유출분석은 장기적인 조사를 바탕으로 정량화 되어야하지만 시간과 비용의 경제성을 고려하였을 때 유출모형을 이용하는 것이 효율적이다²⁾. 국내에서 대표적으로 사용되고 있는 장기유출모형은 TANK, PRMS, SWAT, HSPF 등이 있다. 이 중에서 특히 SWAT과 HSPF는 준분포형 유역유출모형으로서 널리 사용되고 있다.

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)은 미국 농무성(U.S. Department of Agriculture)에서 미계측 지역의 비점오염원을 추정하기 위하여 개발된 모형이며, SWAT-K(Korea)는 기존의 모형을 국내 실정에 적합하도록 인위적, 자연적인 물순환 구조변화와 지표수-지하수 연계 해석 등을 개선하여, 강우·증발산·토양수분·지표수·지하수의 시공간적 분포를 정량적으로 산정 하도록 개선한 모형이다¹⁾. HSPF(Hydrological Simulation Program-FORTRAN)는 강우로 인한 비점오염물질의 유출과정을 하천 내에서의 수리학적 현상, 퇴적물, 화학물질의 상호작용과 결합시켜 모의할 수 있는, 유역모형과 수질모형이 결합된 형태를 취하고 있다. 두 모형은 모두 GIS 프로그램과 연계되어 유역의 분석시간을 줄이고 다양한 정보를 손쉽게 획득할 수 있으며, 일반적으로 SWAT은 농촌이나 산지에 주로 적용되고, HSPF는 도시 및 농촌 산지에 모두 적합한 혼합모형으로 알려져 있다.

SWAT과 HSPF의 비교 연구는 국내에서는 거의 이루어지지 않은 분야로서, 임 등³⁾은 미국 Polecat Creek 유역의 유출량과 유사량을 모의하였는데 HSPF 모형이 SWAT 모형보다 유출과 유사량을 관측치와 유사하게 모의함을 밝혔으나 입력 자료의 구축 및 모형의 적용은 SWAT 모형에 비해 많은 시간과 노력이 필요함을 서술하였다. 손 등⁴⁾은 용담댐 유역에 두 모형을 적용한 결과 HSPF는 high flow 구간을 잘 모의하고 있으며, low flow 구간은 과대 모의하고, SWAT 모형의 경우 high flow 구간을 과소 산정하였으나, low flow 구간은 상대적으로 모의능력이 높다고 서술한 바 있다. 국외 연구로 Singh 등⁵⁾은 Illinois의 Iroquois River 유역에 SWAT과 HSPF를 적용한 결과, 전체적으로 일별, 월별, 년별 유량을 실측값과 근사하게 모의하였으나 통계적인 모델효

율지수(ME) 값에 의하면 보정기간동안 SWAT의 결과값이 약간 높게 산정됨을 밝혔다. 또한, 두 모델 모두 저유량의 모의능이 부족함을 파악하였는데, 이는 대유역에서 지표하저류 묘사 능력이 떨어지기 때문인 것으로 판단하였다. Nasr 등⁶⁾은 Ireland 3개의 소유역에 HSPF, SWAT, SHETRAN/GOPCF 모형을 적용한 결과 유출량은 HSPF, TP는 SWAT의 모의능력이 가장 우수한 것으로 서술한 바 있다. Saleh와 Du⁷⁾는 Texas Upper North Bosque River 유역의 일유량, 유사, 영양물질을 모의하였다. 그 결과 SWAT이 실측치에 좀 더 근사하게 모의되었으며, 모델효율지수(ME)값에 의하면 유량과 유사의 시간적 다양성은 HSPF의 모의능력이 더 우수한 것으로 나타났으나 일반적으로 SWAT의 영양물질 모의능력이 우수한 것으로 서술하였다. 또한, SWAT-K의 개선과 적용을 위하여 Kim 등⁸⁾은 준분포형 모형인 SWAT 모형이 수리전도도나 저류 상수 등의 지하수 관련 분포형 매개변수가 고려되지 못하는 점을 개선하기 위하여 분포형 지하수 모형인 MODFLOW 모형과 SWAT 모형을 결합하였다. 이를 무심천 유역에 적용하여 지하수위, 지하수 함양률, 대수층 증발산량 등의 모의에서 높은 적용성을 입증하였다. 김 등²⁶⁾과 Kim과 Lee⁹⁾는 미국에서 개발된 SWAT 모형의 국내 적용에 있어 일 유출량을 정확하게 모의하지 못하는 문제점을 해결하기 위하여 Manning 식과 연속방정식에 근거한 비선형 저류방정식에 의하여 하도추적법을 개선하였으며, 급일 발생한 강수로 인한 토양수 증가를 고려할 수 있도록 시간적으로 가중 평균된 유출곡선지수법을 개발하여 지체 감소와 침투 유출의 증가 등 유출곡선의 개선을 입증하였다.

본 연구에서는 동일 기간, 동일 입력자료 구축으로부터 두 모형을 구동하여 유출량의 모의능력 비교 및 각 모형별 결과값이 차이가 나는 이유를 분석하기 위하여 충주댐 유역에 대해 SWAT-K와 HSPF 모형의 장기유출분석을 수행하고, 물수지분석 및 지표수, 중간유출, 지하수유출, 증발산량의 수문성분별 모의결과 비교를 통하여 각 모형의 수문성분별 유출특성 파악과 함께 국내 조건에 적절한 모형의 선택과 향후 모형의 개선에 도움이 되고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 모형의 기본이론

2.1.1. 증발산량

모형의 주요 수문성분 계산식은 Table 1과 같다. 그 중 증발산은 물이 유역으로부터 제거되는 주요 기작으로서, SWAT-K 모형에는 Penman-Monteith 방법¹⁰⁻¹²⁾, Priestley-Taylor 방법¹³⁾, Hargreaves 방법¹⁴⁾이 포함되어 있고, HSPF 모형에는 Jensen-Haise 방법¹⁵⁾과 Hamon 방법¹⁶⁾이 포함되어 있는데, 본 연구에서는 SWAT-K에 Penman-Monteith 방법, HSPF 모형에 Jensen-Haise 방법으로 증발산량을 계산하였다.

2.1.1.1. SWAT-K(Penman-Monteith 방법)

FAO(Food and Agriculture Organization)에서 제시한 Penman-Monteith(P-M) 식은 에너지항과 공기동역학항의 결합으로 이루어진 식으로 공기동역학적 조건에 작물형에 따른 기공저항을 포함하여 수정한 방법이다¹⁷⁾. 표면저항이 70 s/m, 알베도 0.23인 높이 0.12 m의 잔디를 기준작물로 설정하여, 충분한 수분 공급이 이루어진다고 가정할 때 잔디로 덮힌 지면으로부터의 일별 잠재증발산량을 식 (1)과 같이 산정하고 있다¹⁸⁾.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (1)$$

여기서, ET_0 는 기준작물 증발산량(mm), Δ 는 온도에 따른 수증기압 변화율(kPa/°C), R_n 는 순복사에너지(MJ/m²), G 는 지열플럭스(MJ/m²), γ 는 습도계상수(kPa/°C), T 는 일평균 기온(°C), u_2 는 2 m 높이에서의 일평균 풍속(m/s), e_s 는 포화수증기압(kPa), e_a 는 실제수증기압(kPa)이다.

그러나, 이 식은 기준작물에 대한 잠재증발산량을 산정하기 때문에 유역내에서의 실제증발산량을 산정하기 위해서는 작물 및 토지피복과 토양에서의 가용수분을 고려하여야 한다. 따라서, SWAT-K에서는 유역내 다양한 작물 및 토지피복에 따라 토양수분 추적을 통하여 실제증발산을 계산한다. 실제증발산량 산정은 우선 식생 피복에 의해 차단되는 강우로부터 증발을 계산한 다음, 최대증산량, 최대승화/토양증발량을 산정한 후, 이에 따라 실제승화량과 토양으로부터의 실제증발량 및 식생증산량을 계산한다¹⁹⁾.

2.1.1.2. HSPF(Jensen-Haise 방법)

HSPF에서 잠재증발산량의 산정은 WDM(Weather Data Management)상에서 입력한 기상자료로부터 계산되어 Input Time Series로 모형 내에 입력된다. Jensen과 Haise¹⁵⁾는 토양표본에서 얻은 실제증발산량 3,000개의 관측치를 써서 수학적으로 식 (2)와 같이 태양복사량 R_s 와 증발산량 ET 의 관계를 다음과 같이 나타내었다²⁰⁾.

$$ET = C_T(T - T_X) R_s \quad (2)$$

여기서, ET 는 잠재증발산량(mm), C_T 는 온도상수, T 는 일평균온도(°F), T_X 는 온도축의 절편(F), R_s 는 수평면 위의 지구 표면이 받는 태양복사량(Langleys)이다.

Jensen-Haise 방법이 잠재증발산을 과소하게 산정하기 때문에 다음 식 (3)과 같은 온도상수 C_T 를 산정한다.

$$C_T = [(68.0 - 0.0036E_1) + 650(e_2 - e_1)]^{-1} \quad (3)$$

여기서, E_1 은 유역평균고도(ft), e_1 는 연중 최고기

Table 1. The methods used to simulate processes of SWAT-K and HSPF

Description/ Criteria	SWAT-K	HSPF
Potential evapotranspiration(PET)	Penman-Monteith Priestley-Taylor Hargreaves	Jensen-Haise Hamon
Rainfall excess on overland /Water balance	Daily water budget	Water budget
Runoff	SCS TR-55 method	Chezy-Manning equation
Interflow	Kinematic storage model	Empirical relations
Groundwater flow	Empirical relations	Empirical relations
River flow routing	Manning's equation	Water budget

온인 달의 평균최저온도에 대한 포화증기압(mb), e_2 는 연중 최고기온인 달의 평균최고온도에서의 포화증기압(mb)이고, C_T 는 유역단위로 계산한다.

온도축의 절편 T_X 는,

$$T_X = 27.5 - 0.25(e_2 - e_1) - 0.001E_2 \quad (4)$$

여기서, E_2 는 소유역평균고도(ft)이며, T_X 는 소유역단위로 계산한다.

HSPF에서의 실제증발산량(SAET)의 산정은 5개의 서브루틴을 통하여 산정된 값의 합으로부터 식 (5)에 의해 계산된다. 우선 기저유량으로부터의 증발산(ETBASE)을 계산한다. 이로부터 계산되어지고 남은 증발산 요구량은 차단에 의한 증발량(EVICEP)에 의해 계산된다. 그 후 토양 상층부에서의 증발산(ETUZON)과 active groundwater로부터의 증발산(ETAGW) 계산을 거쳐 토양하층부에서의 증발산(ETLZON)을 계산하여 5단계의 총합으로부터 실제증발산량을 산정하게 된다. 특히, 토양하층부에서의 증발산(ETLZON) 산정은 앞의 4단계의 증발산량 산정보다 더 복잡한 과정으로부터 계산되어진다. 토양하층부에서의 계산은 식생의 증산에 의존하고 있는데 식생 유형, 뿌리 깊이, 식생피복 밀도, 토양층의 수분특성에 따른 식생 성장 단계 등을 통합하여 LZETP라는 하나의 변수로 월별 입력이 가능하다.

$$SAET = ETBASE + EVICEP + ETUZON + ETAGW + ETLZON \quad (5)$$

2.1.2. 중간유출

2.1.2.1. SWAT-K

중간유출은 지표면 아래이지만 물로 포화된 암석층의 상부에서 나와서 하천수에 기여하는 것으로 토양층(0~2 m)에서 중간 유출은 재배분에 의해 동시에 계산된다. SWAT-K에서는 중간 유출을 모의하기 위해 운동파저류모형(Kinematic Wave Storage Model)을 사용한다. 이 모형은 급한 경사를 따라 흐르는 2차원 단면에서의 지표하흐름을 모의하며 식 (6)과 같다.

$$Q_{at} = 0.024 \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\psi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (6)$$

여기서, Q_{at} 는 경사면 출구에서의 유출(mm/day),

$SW_{ly,excess}$ 는 단위면적당 경사면의 포화대에 저장된 배수 가능한 물 부피(mm), K_{sat} 는 포화수리전도도(mm/h), slp 는 단위거리당 표고의 증가, ψ_d 는 배수 가능한 토양 공극률(mm/mm), L_{hill} 는 경사면 길이(m)를 나타낸다.

2.1.2.2. HSPF

중간유출은 토양 내 저류량과의 선형적인 관계를 가정으로 하여 감수인자와 유입과 유출의 함수에 의해 식 (7)과 같이 계산되어진다.

$$IFWO = (IFWK1 \cdot INFLO) + (IFWK2 \cdot IFWS) \quad (7)$$

여기서, $IFWO$ 는 중간유출량(inches), $INFLO$ 는 횡방향 유입량을 포함한 총 유입량(inches), $IFWS$ 는 초기 중간저류량(inches)을 나타낸다. 식에 포함된 $IFWK1$, $IFWK2$ 는 아래와 같이 식 (8)에 의하여 계산된다.

$$\begin{aligned} IFWK1 &= 1.0 - (IFWK2 / KIFW) \\ IFWK2 &= 1.0 - e^{-KIFW} \\ KIFW &= -\ln(IRC) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, IRC 는 중간유출감수계수(day^{-1})를 나타낸다.

2.1.3. 지하수유출

2.1.3.1. SWAT-K

지하수유출은 얇은 대수층에 저류된 물이 특정값 $aq_{s,thr,q}$ 의 한계치를 초과하는 경우에만 발생하게 된다. 정상상태일 때의 지하수 함양량은 다음과 같은 식 (9)로 나타낸다²¹⁾.

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat} \cdot h_{wtl}}{L_{gw}^2} \quad (9)$$

여기서, Q_{gw} 는 1일에 주하천으로 유입되는 기저유량 혹은 지하수량(mm), K_{sat} 는 대수층의 수리전도도(mm/day), L_{gw} 는 지하수시스템에 대한 분할 경계 및 소유역으로부터 주하천까지의 거리(m), h_{wtl} 은 지하수면고(m)이다.

2.1.3.2. HSPF

모델상의 active groundwater 유출 계산은 식 (10)과 같이 횡단면적과 에너지 흐름경사에 비례하여 유출되고, 흐름의 대표횡단면적은 초기 지하수저류

수위와 관계가 있다고 가정한다. 에너지 흐름은 기본경사에 과거 active groundwater 증가에 의한 경사의 합으로 산정한다.

$$AGWO = KGW(1.0 + KVARY \times GWVS)AGWS \quad (10)$$

여기서, *AGWO*는 active groundwater 유출량 (inches/interval), *KGW*는 지하수유출 감수계수, *KVARY*는 active groundwater 저류량과 유출량 사이의 비선형적인 관계를 나타내는 변수(1/inches)이다. *GWVS*는 지하수경사지표(inches), *AGWS*는 초기 active groundwater 저류량(inches)이다.

2.2. 연구대상유역

본 연구의 대상지역은 충주댐 유역으로서 도암댐을 포함하여 충주댐 상류까지의 구간으로 본 유역을 포함하는 남한강 유역은 북한강과 더불어 한강 수계를 형성하는 주요 하천이다. 유역면적은 약 6,648 km²로 남한강 유역의 약 50%를 차지하고 있으며, 유로연장 375 km, 평균표고 EL.607 m로 전형적인 산림지역으로 분류된다. 행정구역상으로는 강원도, 충청북도, 경상북도의 3개도 13개 시·군으로 구성되어 있으며, 동강, 평창강, 주천강, 서강과 골지천, 지장천, 옥동천 등을 포함하고 있다(Fig. 1).

2.3. 입력자료구축

본 연구에서 SWAT-K와 HSPF를 적용하기 앞서 하천도, 유역도, 환경부의 1/50,000 토지이용도, 100 m×100 m의 수치고도모형(DEM), 농업과학기술원의

1/25,000 정밀토양도 등의 GIS자료를 구축하였다. 환경부 수질측정망과 건교부 수위관측소, 수치고도 모형(DEM)을 기준으로 유역을 14개 소유역으로 분할하였고, 토지이용도는 환경부 토지피복분류를 참고하여 시가화건조지역, 농업지역, 산림지역, 초지, 나지, 습지, 수역으로 분류하였다. SWAT-K의 경우 HRU(Hydrologic Response Unit)생성을 위한 토지이용과 토양특성 임계면적 비율은 3%로 설정하여 총 262개의 HRU를 생성하였다. 기상자료는 대관령, 동해, 원주, 영월, 충주, 제천, 태백, 제천, 영주 등 9개의 기상관측소의 1990~2006년 자료를 기상청으로부터 제공받았다. 이 기상자료를 Thiessen법에 의하여 분할하여 각 모형의 입력형식에 맞게 변환하여 입력하였다. 본 연구에 사용한 모든 입력자료는 비교의 정확도를 높이기 위해 모형의 특성에 따라 입력방식의 차이는 있지만, 두 모형 모두 같은 기간, 동일한 자료를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출량 분석

유출량 분석을 위한 모의기간은 2000~2006년으로 초기 모의 시 발생하는 결과값의 불안정화를 배제하기 위하여²²⁾ 1998년부터 2년 동안의 warming up 기간을 고려하여 모의를 수행하였다. 본 연구에서는 충주댐 지점의 일단위 관측 댐유입량 자료를 활용하여 모형의 보정을 수행하였으며, 이는 기존의 연구^{23,24)}에서 언급한 바와 같이, 상류 지역의 유출 자료가 부족하고 정확성이 매우 의심되어, 비교적 자료의 정확성이 검증된 대상유역 최하류 지점의 유출 자료와 유역 전체의 특성을 고려한 공간적인 입력자료와 매개변수를 이용하여 모형을 구축하였다. 각 모형의 매개변수 보정은 유출량에 비교적 큰 영향을 주는 인자를 중심으로 모형의 초기 구동 시 기본적으로 설정되어 있는 초기값(Initial value)을 기준으로 총유출량과 침투유량에 변위가 큰 변수부터 시행착오법으로 수정하였다(Table 2).

모의 결과 전체 기간 연평균 유출량은 SWAT-K가 827 mm, HSPF가 771 mm로 평균관측치 811 mm에 비하여 SWAT-K는 약 1% 과다하게 모의되었고, HSPF는 약 3% 과소하게 모의되었다(Fig. 2, Table 3). 모형의 적용 타당성을 가늠할 수 있는 결정계수

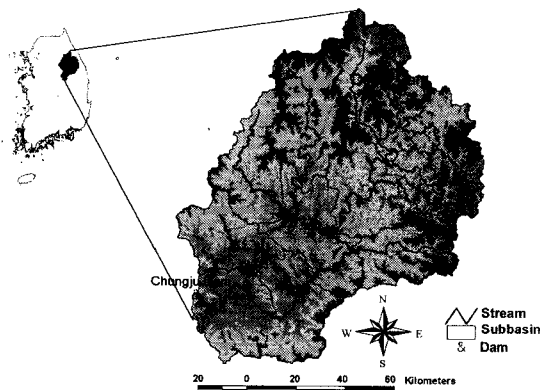


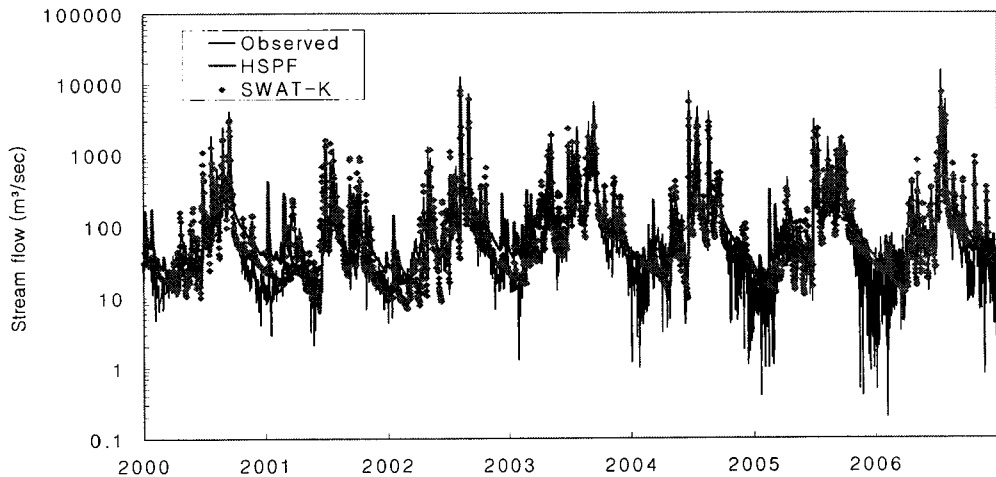
Fig. 1. Location of study area.

Table 2. Parameters for calibration of SWAT-K and HSPF

Parameter	Description	Units	Model range	Initial value
SWAT-K				
ESCO	Soil evaporation compensation factor	none	0.0~1.0	1.0
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	m	0.0~50.0	0.05
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	days	0.0~1.0	0.048
CH_N2	Manning's n-value for main channel	none	-0.01~0.3	0.014
GW_DELAY	Groundwater delay	days	0.0~500.0	31.0
HSPF				
INFILT	Index to infiltration capacity	in/hr	0.0001~100.0	0.16
DEEPR	Fraction of groundwater inflow to deep recharge	none	0.0~1.0	0.1
INTFW	Interflow inflow parameter	none	0.0~none	0.75
LZSN	Lower zone nominal storage	in	0.01~100.0	4.0~6.5
AGWRC	Groundwater recession coefficient	none	0.001~0.999	0.98

Table 3. Analysis of water budget for SWAT-K and HSPF from 2000 to 2006

Hydrological component (mm)	SWAT-K	%	HSPF	%	OBSERVED	%
Precipitation	1341.00	100.00	1341.00	100.00	1341.00	100.00
Total Q	827.21	61.69	771.09	57.50	811.39	61.51
Surface Q	272.78	20.34	250.31	18.67	-	-
Lateral Q	428.76	31.97	225.37	16.81	-	-
Groundwater Q	127.08	9.48	292.84	21.84	-	-
Evapotranspiration	513.10	38.26	568.91	42.42	-	-
Percolation	133.72	9.97	293.70	21.90	-	-

**Fig. 2.** Comparison of observed and simulated hydrographs for SWAT-K and HSPF models from 2000 to 2006.

(R^2)는 SWAT-K가 0.80, HSPF가 0.82, Nash and Sutcliffe²⁵⁾ 모형효율(ME)은 SWAT-K가 0.77, HSPF가 0.80으로 계산되어 모의치가 관측치에 높은 적합

성을 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 3). 기존 국내 유역의 적용 연구에서 SWAT의 경우 침투 유량에 비하여 기저유출 모의 능력이 우수하였고, HSPF의

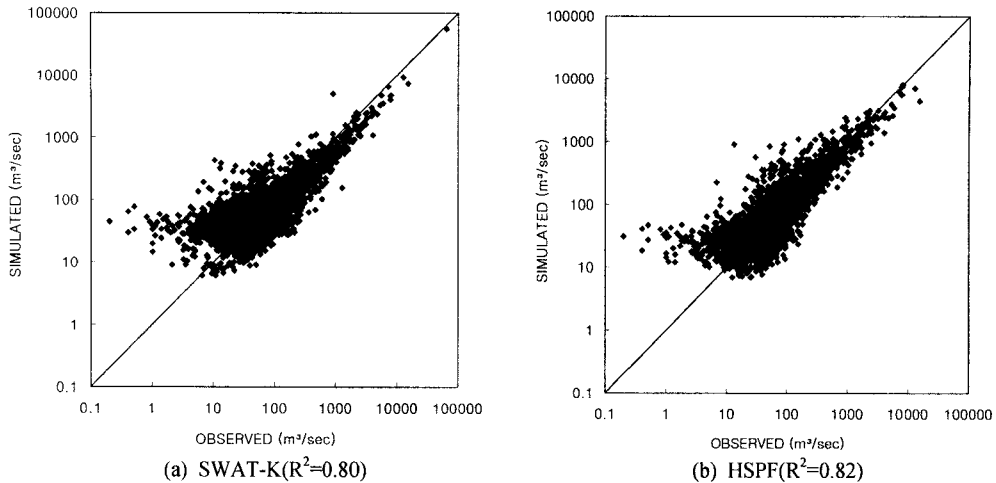


Fig. 3. Comparison of observed and simulated stream flows.

경우 기저유출 모의 능력이 다소 부족한 데 비하여 침투유량 모의 능력이 높다는 결과가 있었다⁴⁾. 그러나 본 연구에서 사용된 SWAT-K는 연속방정식과 Manning 식을 이용한 비선형 저류방정식에 의한 하도추적 방법의 개선²⁰⁾으로 기존 SWAT에서 사용하는 Muskingum 방법의 한계인 유출량의 시간적 변화를 유연하게 나타낼 수 없는 문제를 개선하였고, 기존 SWAT의 CN 산정법이 유출수문곡선의 침투유출을 관측치에 비하여 과소 산정하는 문제를 해결하기 위하여 원래 CN이 가지고 있는 금일 발생한 강수의 영향을 고려한 시간 가중평균 CN 산정법을 제안하여⁹⁾ 기존의 SWAT에 비하여 SWAT-K에서 유출의 지체와 감쇠를 현실적으로 구현하여 침투유출 모의 능력이 개선되었음이 기존의 연구^{9,26)}에 의하여 입증된 바 있다.

3.2. 수문성분별 분석

총 유출량의 모의 결과 두 모형 모두 모의치가 관측치를 근사하게 재현하였다. 총유출량은 두 모형이 근사한 오차범위의 값을 보였으나 장기적인 연중 변화 양상을 비교해 보았을 때, 동절기의 유량 모의결과가 다소 차이를 나타내었다(Fig. 2). 이와 같은 두 모형의 유출해석능력 차이의 원인을 규명하기 위하여 수문성분별 모의치를 비교하였다(Fig. 4, Fig. 5). 수문성분별 분석은 2004~2006년에 대해 분석 후, 증발산량의 경우 각 모형의 차이가 가장 잘 드러나는 2004년에 대하여 분석을 수행하였다.

잠재증발산량(PET)과 실제증발산량(SAET) 모두 HSPF가 SWAT-K에 비하여 겨울철에는 낮게, 여름철에는 비슷하거나 높게 산정되었다(Fig. 6, Fig. 7). 이는 실제증발산량의 산정을 위해 선행되어야 하는 잠재증발산량의 산정에 있어서 Penman-Monteith 식을 사용하는 SWAT-K는 식의 표면저항을 계산하기 위한 변수인 엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)산정 시 국내 식생 특성 중 특히 동절기 침엽수의 특성을 고려하여 식생을 모의하는 반면, HSPF는 온도만을 변수로 하는 비교적 간단한 Jensen-Haise 식을 사용하기 때문에 계절별 식생 특성의 모의가 불가능하다. HSPF에서는 실제증발산을 계산하는 과정에서 SWAT-K와 같이 겨울철 침엽수의 특성을 LZETP 매개변수를 통해 고려해주고자 하였으나²⁷⁾ 겨울철 잠재증발산량이 낮게 산정되기 때문에 변수의 수정이 실제증발산량에 큰 영향을 미치지 못하였다. 따라서 Jensen-Haise 식은 연중 기온의 변화를 따르기 때문에 여름철 고온에 의해 증발산량이 다소 높게 산정되고, 겨울철에는 증발산량이 낮게 산정되어 겨울철 유출이 높아지는 것으로 판단된다. 또한, Leavesley 등²⁸⁾에 의하면 Jensen-Haise 방법은 겨울철 PET를 과소 모의하는 경향이 강하다고 하였다.

한편, 두 모형이 각기 다른 방법으로 증발산량을 산정하기 때문에 실제증발산과 잠재증발산의 비로부터 유역의 토양함수비를 산정하여 모형으로부터 계산되는 증발산량을 검증 및 분석하고자 하였다.

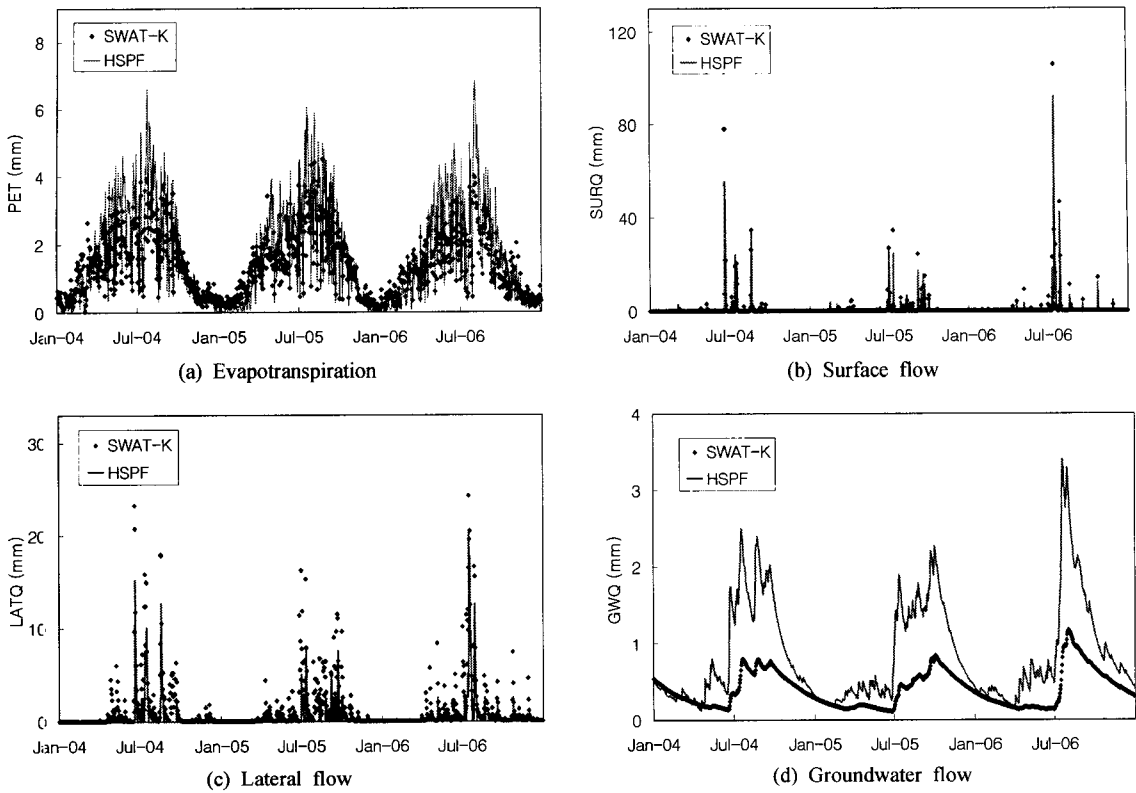


Fig. 4. Comparison of simulated hydrological components for SWAT-K and HSPF.

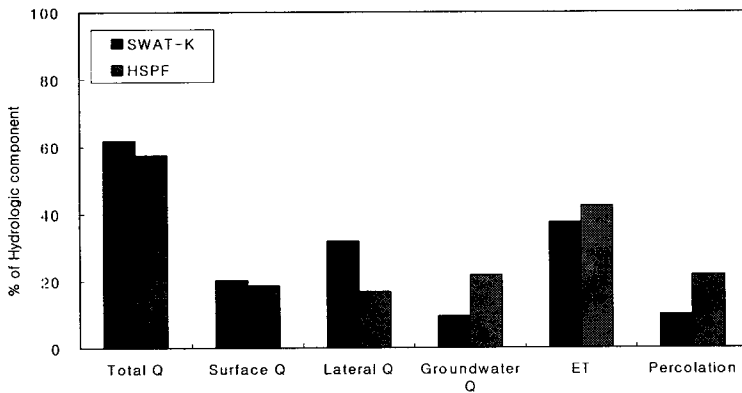


Fig. 5. Analysis of hydrological components for SWAT-K and HSPF.

그 결과 연평균 토양함수비가 HSPF 88%, SWAT 60%로 HSPF가 높게 산정되었다. 특히 동절기의 값이 큰 차이를 보이는 이유는 SWAT-K의 잠재증발산량 산정에 있어 동절기 식생을 고려하여 실제증발산량에 비하여 잠재증발산이 크게 산정되기 때문인 것으로 판단된다. 동절기를 제외하고는 일정 간격

의 차이를 보이거나 그래프의 연중 변화양상이 두 모형 모두 유사한 결과를 보여 전체적인 분석결과 특정 방법의 오류가 아닌 앞서 설명한 증발산량 산정 방법의 차이에서 기인함을 확인하였다(Fig. 8).

지하수유출량의 결과 차이를 실측값과 비교해보기 위하여 장기간의 지하수유출량이 지하수 함양량

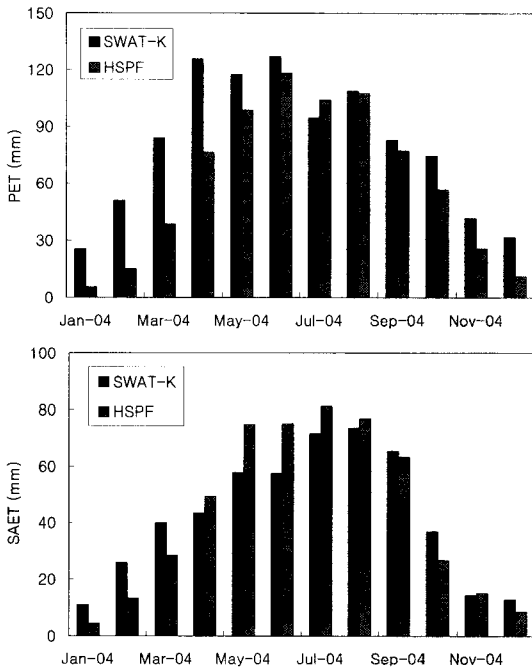


Fig. 6. Model simulated monthly PET and SAET for 2004.

과 같다는 가정을 기반으로 하는 해석적 방법인 Digital Filter 방법을 이용하는 BFLOW 모형²⁹⁾에 의한 결과를 이용하였다. Digital Filter 방법은 전자신호를 해석하고 처리하는데 사용되는 방법으로 고주파 신호와 저주파 신호를 분리하여 고주파 신호인 직접유출성분과 저주파 신호인 기저유출성분을 필터를 통해서 분리하는 방법이다³⁰⁾. 2003년부터 2006까지 4개년간의 BFLOW 모형에 의한 지하수유출 분석 결과, 총 유출에 대한 지하수 유출율은 Filtering parameter에 따라 5~33%까지 분포하였다(Table 4).

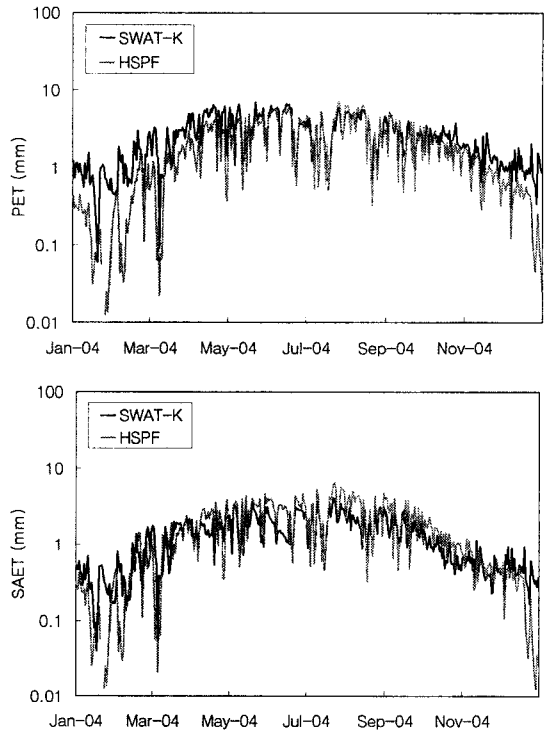


Fig. 7. Model simulated daily PET and SAET for 2004.

모형의 모의 결과 HSPF의 경우 지하수유출이 총 유출의 21.84%, SWAT-K가 9.48%의 비율을 보여 두 모형 모두 가능한 범위내에서 모의되었음을 알 수 있다. 두 모형의 중간유출과 지하수유출 결과는 각 성분별로 큰 차이가 나지만 두 모형 모두 물수지법에 의하여 유역의 물수지를 계산하기 때문에 중간유출과 지하수유출 성분합의 비율은 전체유출량에서 비슷한 비율을 차지했다. 따라서 대유역에서 지

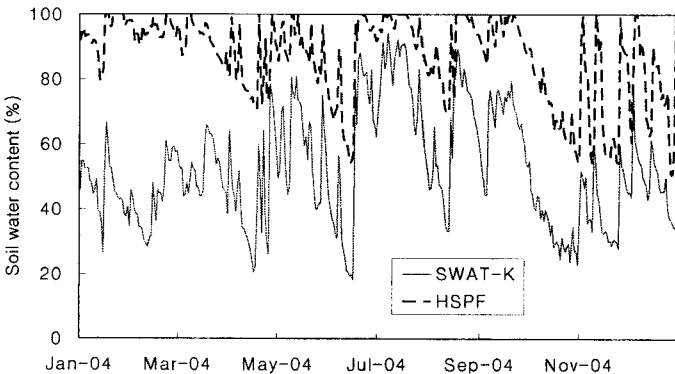


Fig. 8. Estimation of soil water content ratio for 2004.

Table 4. Estimation of groundwater recharge by BFLOW

Year	Rainfall (mm)	Estimation of recharge rate(%)			
		Filtering parameter			
		0.9	0.925	0.95	0.975
2003	1687	33	28	21	13
2004	1370	19	16	12	7
2005	1342	30	26	21	14
2006	1453	17	14	10	5
Mean value	1463	25	21	16	10

표하저류 모의 능력이 떨어지는 준분포형 모형의 한계와 앞서 설명한 성분별 계산과정 차이에 의하여 중간유출과 지하수 유출은 다른 범위의 값을 보여주고 있으나, 각 모형의 특성을 반영하는 적정범위 내에서 각 수문성분별 유출량을 모의하고 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 대표적 준분포형 모형인 SWAT의 개선된 모형인 SWAT-K와 HSPF 모형의 총유출 모의능력 비교 및 동일자료를 사용하여 모형을 구동하였을 때 유출량의 차이를 분석하고자 수문성분별 모의값을 비교하여 각 모형의 유출구조와 모의 특성을 파악하고자 하였다.

전체적으로 총유출량은 두 모형 모두 실측값을 매우 근사하게 모의하였으나 갈수기 모의결과는 다소 차이를 나타냈다. 전체 기간 연평균 유출량은 SWAT-K는 관측치에 비해 약 1% 과다, HSPF는 약 3% 과소하게 모의 되었고, 결정계수(R^2)는 SWAT-K가 0.80, HSPF가 0.82, 모형효율(ME)은 SWAT-K가 0.77, HSPF가 0.80으로 나타났다. 잠재증발산량과 실제증발산량 모두 HSPF가 SWAT-K에 비하여 겨울철에는 낮게, 여름철에는 비슷하거나 높게 산정되었다. 이는 Penman-Monteith 식을 사용하는 SWAT-K는 동절기 침엽수의 특성을 고려하여 식생을 모의하는 반면, HSPF는 온도만을 변수로 하는 Jensen-Haise 식을 사용하기 때문에 각 계산식의 특성에서 기인한 것으로 판단된다. 수문성분별로 모의치를 비교한 결과 중간 유출은 SWAT-K가, 지하수유출은 HSPF가 크게 산정되어 각 모형의 중간 유출과 지하수유출의 유출 구조를 분석하고, Digital

Filter방법을 이용하는 BFLOW 모형에 의한 실측 유출에 근거하여 지하수 유출량 분석 결과 두 모형 모두 적정범위 내에서 지하수유출을 모의하고 있으나 각 모형의 계산 구조의 차이로 인하여 결과값의 차이를 보이는 것을 확인하였다.

상대적으로 침투유출 모의 능력이 우수한 HSPF와 기존 SWAT에 비하여 침투유출 모의능력이 개선되고, 상대적으로 갈수기 모의능력이 우수한 SWAT-K의 구조적인 특성 파악을 통하여 모형을 사용함에 있어서 같은 자료를 사용하더라도 모형의 특성에 따른 결과값의 차이를 확인하였다. 따라서 대상유역의 특성과 모형 적용의 목적을 고려하여 적절한 모형을 사용해야 하며 본 연구를 바탕으로 향후 각 모형의 한계점을 개선하여 좀 더 우리나라 실정에 적합한 모형의 개발과 사용이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-2-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 한국건설기술연구원, 2007, 지표수 수문성분 해석 시스템 개발, 2단계 연구보고서, 384.
- 2) 윤춘경, 신아현, 정광욱, 장재호, 2007, BASINS/WinHSPF를 이용한 남한강 상류유역의 비점오염원 저감효율평가, 수질보전 한국물환경학회지, 23(6), 951-960.
- 3) 임상준, Brannan K. M., Mostaghimi S., 조재필, 2003, HSPF와 SWAT 모형을 이용한 산림유역의 유출 및 유사량 추정, 한국농촌계획학회논문집.

- 9(4), 59-64.
- 4) 손경호, 이혜숙, 김정근, 2006, SWAT과 HSPF 모델을 이용한 용담댐 유역 유출량과 유사량 분석, 공동추계학술발표회 논문집, 대한상하수도학회·한국물환경학회, 738-746.
 - 5) Singh J., Knapp H. V., Arnold J. G., Demissie M., 2004, Hydrological Modeling of the Iroquois River Watershed Using HSPF and SWAT, Journal of the American Water Resources Association, 41(2), 343-360.
 - 6) Nasr A., Bruen M., Jordan P., Moles R., Kiely G., Byrne P., 2007, A comparison of SWAT, HSPF and SHETRAN/GOPC for modelling phosphorus export from three catchments in Ireland, Water research, 41(5), 1065-1073.
 - 7) Saleh A., Du B., 2004, Evaluation of SWAT and HSPF within BASINS Program for the Upper North Bosque River Watershed in Central Texas, Journal of American Society of Agricultural Engineers, 47(4), 1039-1050.
 - 8) Kim N. W., Chung I. M., Won Y. S., Arnold, J. G., 2008, Development and application of the integrated SWAT-MODFLOW model, Journal of hydrology, 356(1/2), 1-16.
 - 9) Kim N. W., Lee J., 2008, Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation, Hydrological Processes, 22, 4936-4948.
 - 10) Allen R. G., 1986, A Penman for all seasons, J. Irr. Drainage Eng. (ASCE), 112(4), 348-368.
 - 11) Allen R. G., Jensen M. E., Wright J. L., Burman R. D., 1989, Operational estimates of evapotranspiration, Agron. J., 81, 650-662.
 - 12) Monteith J. L., 1965, Evaporation and environment. In The State and Movement of Water in Living Organisms, Proceedings of 15th Symposium Society for Experimental Biology, Swansea. Cambridge University Press, London, 205-234.
 - 13) Priestley C. H. B., Taylor R. J., 1972, On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters, Month. Weather Revision, 100, 81-92.
 - 14) Hargreaves G. L., Hargreaves G. H., Riely J. P., 1985, Agriculture benefits for Senegal River Basin, J. Irr. Drainage Eng. (ASCE), 111(2), 113-124.
 - 15) Jensen M. E., Haise H. R., 1963, Estimating evapotranspiration from solar radiation: Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of Irrigation and Drainage, 89(4) 15-41.
 - 16) Hamon R. W., 1961, Estimating Potential Evapotranspiration, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulic Division, 87(HY3), 107-120.
 - 17) 유승환, 최진용, 장민원, 2006, 논벼에 대한 Penman-Monteith와 FAO Modified Penman 공식의 작물 계수 산정, 한국농공학회논문집, 48(1), 13-23.
 - 18) Di Luzio M., Srinivasan R., Arnold J., 2001, Arcview Interface for SWAT2000 User's Guide, TWRI Report TR-193, Texas Water Resources Institute, College Station, TX.
 - 19) Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R., Williams J. R., 2001, Soil and Water Assessment Tool; the theoretical documentation (version 2000, U. S. Agricultural Research Service).
 - 20) Bicknell B. R., Imhoff J. C., Kittle Jr., J. L., Jobses T. H., Donigian Jr., A. S., 2001, Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF): User's manual for Version 12, U.S.EPA, Environmental Research Laboratory, Athens, GA.
 - 21) Hooghoudt S. B., 1940, Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond, Versl. Landbouwk. Onderz., 46, 515-707.
 - 22) 김철겸, 이정은, 김남원, 2007, 충주댐 상류유역의 유사 발생에 대한 시공간적인 특성, 한국수자원학회 논문집, 40(11), 887-898.
 - 23) 김남원, 이병주, 이정은, 2007, 공간모의유량을 이용한 갈수량 저동 특성에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 27(4B), 431-440.
 - 24) 김철겸, 김남원, 2008, 충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성, 수질보전 한국물환경학회지, 24(4), 465-472.
 - 25) Nash J. E., Sutcliffe J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual model, Journal of Hydrology, 10(3), 282-290.
 - 26) 김남원, 이정우, 이병주, 이정은, 2007, 비선형 저류방정식을 이용한 일 단위 하도추적법, 대한토목학회논문집, 27(5B), 533-542.
 - 27) Jensen M. E., Rob D. C. N., Franzoy C. E., 1969, Scheduling irrigations using climate-crop-soil data, National Conference on Water Resources Engineering of the American Society of Civil Engineers, New Orleans, LA.
 - 28) Leavesley G. H., Lichty R. W., Troutman B. M., Saindon L. G., 1983, Precipitation Runoff Modeling System: User's Manual, Water Resources Investigations 83-4238, U.S. Geological Survey, Denver, CO.
 - 29) Nathan R. J., McMahon T. A., 1990, Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analyses, Water Resources Research, 26(7), 1465-1473.
 - 30) 건설교통부, 2007, 우리나라 지역특성에 맞는 최적 지하수 함양량 산정 기법 개발, 66.