

분포형 유역 일유출 모형의 개발 및 적용성 검토

Development of a Grid-based Daily Watershed Runoff Model and the Evaluation of Its Applicability

홍우용* · 박근애** · 정인균*** · 김성준****

Hong, Woo-Yong · Park, Geun-Ae · Jeong, In-Kyun · Kim, Seong-Joon

Abstract

This study is to develop a grid-based daily runoff model considering seasonal vegetation canopy condition. The model simulates the temporal and spatial variation of runoff components (surface, interflow, and baseflow), evapotranspiration (ET) and soil moisture contents of each grid element. The model is composed of three main modules of runoff, ET, and soil moisture. The total runoff was simulated by using soil water storage capacity of the day, and was allocated by introducing recession curves of each runoff component. The ET was calculated by Penman-Monteith method considering MODIS leaf area index (LAI). The daily soil moisture was routed by soil water balance equation. The model was evaluated for 930 km² Yongdam watershed. The model uses 1 km spatial data on landuse, soil, boundary, MODIS LAI. The daily weather data was built using IDW method (2000-2008). Model calibration was carried out to compare with the observed streamflow at the watershed outlet. The Nash-Sutcliffe model efficiency was 0.78~0.93. The watershed soil moisture was sensitive to precipitation and soil texture, consequently affected the streamflow, and the evapotranspiration responded to landuse type.

Keywords : *grid-based, daily runoff model, MODIS LAI, runoff, soil moisture, evapotranspiration, Penman-Monteith*

요 지

본 연구에서는 GIS 공간자료(수치표고모델, 토지이용도, 토양도)와 Terra MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성영상에 의한 식생활력도를 이용하여 유역의 일단위 유출량을 모의하는 격자기반의 분포형 일유출 모형을 개발하고 그 적용성을 평가하였다. 모형은 격자단위로 지표유출, 중간유출 및 기저유출, 증발산량 그리고 토양수분의 시간적 변화와 공간적 분포를 모의할 수 있다. 모형은 크게 유출, 증발산, 토양수분의 3개 주요모듈로 구성하였다. 유출은 강우전의 토양수분을 추적하여 지표하 저류능을 계산하므로써, 총 유출체적에서 각 유출량을 배분하는 감수곡선을 도입하여 모의하도록 하였으며, 증발산은 MODIS 엽면적지수(Leaf Area Index; LAI)를 고려한 Penman-Monteith 증발산량을 산정하도록 하였다. 매일의 토양수분은 전일의 토양수분에서 당일의 유출량과 증발산량을 계산하는 물수지 방정식을 이용하여 추적하도록 하였다. 이 모형에 대한 적용성 평가는 유역면적 930 km²의 용담댐 유역을 대상으로 수행하였다. 공간해상도를 1 km로 맞춘 GIS 입력자료(토지피복도, 토양도, 경계자료 등)와 RS 입력자료(LAI)를 구축하였으며, 2000년부터 2008년까지의 기상자료를 수집하여 IDW 방법으로 공간분포화 하여 모형에 적용하였다. 검토지는 유역 출구 지점의 유출량 자료를 모의치와 비교하여 수행되었고, 보정결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수(R²)와 평균제곱근오차(RMSE : Root Mean Square Error)를 사용하였으며, 모형의 효율성 검증에 위해 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제안한 모형 효율성 계수를 사용하였다. 유출량에 대한 Nash-Sutcliffe 모형효율은 0.78~0.93로 모의치가 실측치의 경향을 잘 표현하는 것으로 나타났다. 유출량 분포도는 강우와 토양에 매우 민감하게 모의 되었다.

핵심용어 : 격자기반, 분포형, 일유출모형, MODIS LAI, 유출량, 토양수분, 증발산량, Penman-Monteith

1. 서 론

유라시아 대륙 동북부 반도에 위치한 우리나라는 지리적 특성 때문에 매년 여름철이면 집중호우와 태풍 등으로 귀중한 인명과 재산상의 피해가 발생하고 있으며, 최근에는 기상

이변으로 대규모의 가뭄과 홍수 그리고 이상고온 및 냉해의 발생이 잦아지고 있는 추세이다(장기환, 1999). 이러한 자연 재해는 온난화, 엘니뇨 및 라니냐 등 지구환경 변화에 따른 기후변화 등에 의해 일어나며, 이러한 문제를 극복하기 위해서는 물수지 분석을 통하여 수문현상을 이해하고 수자원의

*정회원 · 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사 (E-mail : carrot84@konkuk.ac.kr)

**정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후과정 (E-mail : dolpin2000@konkuk.ac.kr)

***정회원 · 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후과정 (E-mail : nemoik@konkuk.ac.kr)

****정회원 · 교신저자 · 건국대학교 생명환경과학대학 환경시스템학부 교수 (E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr)

통합적인 관리를 위한 노력이 필요하다. 물수지 분석은 토양 속에 함유된 수분이 강수와 증발에 의하여 보충되거나 감소되고 난 잔여량이 지표로 유출된 후 유역의 저류장치(호수, 지하수, 자연적 저류)에 의하여 일정기간 지체되었다가 유역의 최종유출로 나타나는 현상을 분석하는 것을 말하며, 이를 위하여 몇 개의 매개변수와 간단한 식으로 표현한 개념적인 모형을 물수지 모형이라 한다(황준식 등, 2005). 국내의 경우 한반도 전 수계에 적용 시켜 수자원 관련 자료의 가용성 및 신뢰도를 고려한 일관성 있는 물수지 분석 시스템을 구축하고자 하는 시도로서 물수지 분석 시스템을 연구(건설교통부, 1999)한 바 있다.

물 순환계통의 올바른 이해와 적합한 모형의 개발 및 검증은 위해서는 강우, 증발산 및 토양수분 등 수문 변수들의 대규모 원격측정이 필수적인 뿐 아니라 관측 격자 내에서 일어나는 시공간 변화도에 대한 해석 또한 병행되어야 한다(김광섭과 이을래, 2004; 김광섭, 2007). 최근 전 세계적으로 Geographic Information System (GIS) 및 Remote Sensing (RS) 데이터 등 디지털정보의 구축이 급속도로 진행되고 있고, 이들의 발달로 유역에 대한 정확하고 상세한 각종 수문매개변수 수집이 가능하여 유역을 부분유역으로 분할한 기존의 집중형 수문모형보다 유역내의 공간적인 유량변동을 보다 상세하게 고려할 수 있는 격자기반의 분포형 수문모형의 활용도가 높아지고 있다(박진혁 등, 2008).

강우-유출해석에 있어서 분포형 모형은 실제 복잡한 유역에서의 유출과정 또는 물질의 수문순환과정을 잘 이해할 수 있고, 어떤 유역의 토지이용형태의 변화가 초래하는 영향과 효과를 사전에 예측할 수 있으며, 신뢰성 있는 과거의 수문자료가 없거나 부족한 유역에서의 유출 계산이 용이하다. 따라서 토양수분의 시공간적 변화는 수문연구에 있어 매우 중요하므로 분포형 모형을 이용하여 토양수분을 모의하는 것은 매우 바람직한 일이라 판단된다. 수문학에서의 분포형 모형은 Freeze와 Harlan(1969)이 처음으로 물리적인 기반의 분포형 모형에 대한 청사진을 소개한 이후 그 발전을 거듭하고 있다. 우리나라에서도 1990년 이후부터 GIS에 대한 관심이 높아지면서 이를 수문분야에 적용해보려는 시도가 있어 왔다.

국내의 연구로는 최진웅과 고양수(2006)가 지리정보시스템을 이용한 장기유출모형을 개발한 바 있다. 이 연구에서는 유역 증발산량의 산정에 중점을 두어 Soil Conservation Service (SCS)방법으로 하천의 일 단위 유출량을 모의하도록 구성하여 경기도 화성군 반월유역에 적용한 바 있으며, 김성준(1998)은 유역을 일정한 크기의 격자로 분할하여 구성하고 각각의 지표격자 및 하천격자에서 발생된 유출량은 운동과 가정에 의하여 산정한 후 격자물수지법에 의해 흐름방향을 따라 유입유출을 계산함으로써 홍수량을 시공간적으로 계산하는 분포형 모형인 KIMSTORM (Kinematic wave storm runoff model)을 개발한 바 있다.

국외에서 개발한 분포형 강우-유출모형은 AGNPS, ASNWERS, DWMS, KINEROS2, GSSHA, VflowTM, MIKE-SHE, Hydro-BEAM 등이 있다. 이 중 세계적으로 널리 사용되고 있는 MIKE SHE 모형은 덴마크에서 개발된 모형으로 강우에 대해서는 지점 우량을 입력 자료로 사용하

며, 식생에 의한 증발산은 Penman-Monteith 식을 이용한다. 침투는 Richard 방정식의 해석을 통해 산정하고, Saint-Venant식을 이용하여 지표면이나 하도 추적을 모의한다.

또한, 인공위성 영상의 처리기법이 발달하고 다양한 해상도의 자료를 획득할 수 있게 되어 분포형 모형의 입력 자료로써 유용하게 사용이 가능하게 되었다. 위성영상은 자료의 분석이 간편하며, 공간 자료이므로 공간의 변화를 분석하는데 있어 매우 편리하다. 이 중 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 위성영상은 극궤도 위성인 Terra와 Aqua 위성에 장착되어 있는 MODIS 센서로 획득되는 저해상도 위성영상이다. 같은 지역을 하루에 2~3번 촬영하므로 시계열 자료를 획득할 수 있으며, 공간해상도는 250 m, 500 m, 1 km이고, NASA에서 필요한 정보를 Product로 생산, 웹상에서 바로 다운로드 받아 사용할 수 있다.

본 연구의 목적은 위성영상에 의한 광역적 식생정보를 활용하는 격자기반의 분포형 일유출 모형을 개발하는데 있으며, 개발한 분포형 일 물수지 모형을 용담댐 유역에 적용하여 그 적용성을 판단하였다. 적용성 평가는 MODIS LAI의 해상도에 맞추어 1 km 해상도로 진행되며, 모형의 민감도 분석을 통하여 유출과 토양수분의 양과 경향의 변화에 큰 영향을 미치는 매개변수를 파악한 후 검보정의 과정을 거쳐 적용성을 검토하였다. 모형의 결과는 셀별 값을 가지는 분포형으로 출력되며, 유역의 평균 수문자료가 Text file로 출력되므로 시간적 변화에 따른 공간 수문 정보를 획득할 수 있다.

2. 분포형 일 유출모형의 개요

본 연구에서는 MS Window 운영체제에서 실행 가능하도록 Fortran 90 언어를 이용하여 개발하였다. 모형의 구성은 자료의 준비, 모형의 실행 및 출력으로 정리할 수 있으며, 기상자료 및 모형 매개변수, GIS 및 RS 자료가 입력된다. GIS자료는 유역경계, 수치표고모델(DEM), 토지이용도, 유효 토심도 및 토양종류도, 위도, 공간 기상자료 등이며, RS자료는 MODIS 위성영상에서 추출한 엽면적 지수이고 이들 자료는 ASCII Grid 형식으로 구축하였다. 토지피복 및 토양 관련 매개변수, 작물 관련 매개변수는 사용자가 직접 작성한 데이터를 선택적으로 입력할 수 있다. 모형에서는 입력된 기본 매개변수 중 주요 매개변수에 대하여 사용자가 직접 수정이 용이하도록 하였으며, 입력 자료는 파일 목록과 경로 지정만으로 적용할 수 있도록 하였다. 모형의 실행부분에서는 유역 내 격자에 대하여 강우를 분포시켜 각 격자의 물수지를 계산하고, 계산 시간간격에 따라 각 셀에 대한 모의결과를 ASCII File 및 CSV (Comma Separated Variables)형식으로 출력한다.

3. 모형의 구조 및 이론

3.1 모형의 구조

강우에 의한 유출성분을 모의하기 위하여 각 격자를 3단 탱크형태로 구성하여, 첫 번째 탱크는 두 번째 탱크의 토양층이 포화되면 지표유출이 발생하게 되며, 두 번째 탱크는 강우에 의하여 침투된 토양수 중에서 포장용수량 이상의 토

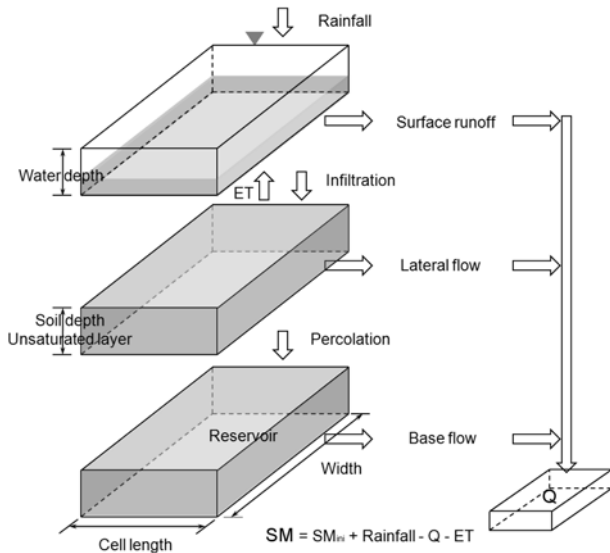


Fig. 1 Schematic Representation of the Flow System (Kim et al., 2003)

양수분을 대상으로 수평으로는 중간유출, 수직으로는 세 번째 탱크로 침투가 발생하도록 하였으며, 또한 이 층에서 증발산량이 발생하도록 하였다. 세 번째 탱크는 두 번째 탱크에서의 침투를 고려한 하천으로의 기저유출이 발생하도록 구성하였다(Fig. 1).

3.2 모형의 이론

3.2.1 유출량 산정

1) 지표 유출

본 연구에서는 강우 전 토양층의 저류능을 추적하여 SCS (Soil Conservation Service)-CN (Curve Number)방법을 적용하여 지표유출 체적을 산정하였으며, 유역 출구로 도달하는데 하루이상 경과하는 지표유출의 경우에는 감수곡선식을 도입하여 시간배분을 하도록 하였다.

SCS-CN방법에서의 S는 초기손실유량까지를 포함하는 토양의 최대 잠재보유수량을 나타낸다. 한편 본 연구에서는 강우 시 S를 식 (2)와 같이 토양의 유효공극률에서 당일 모의된 토양수분을 뺀 값으로 식 (1)에 대입하여 지표유출을 계산하도록 하였다.

$$Q'_{surf} = \frac{(P - 0.2S')^2}{P + 0.8S'} \quad P \geq 0.2S' \quad (1)$$

$$S' = (PO_e - SM_i) \cdot S_d \quad (2)$$

여기서, P는 총강우량(mm/day), Q'_{surf} 는 지표유출체적(mm), S'는 토양수분 저류기능량(mm), PO_e 는 토양의 공극률(m^3/m^3), SM_i 는 토양수분(m^3/m^3), S_d 는 유효토심(mm)을 나타낸다.

하천을 통하여 하루 이상 유하하는 지표유출의 경우에는 식 (1)에 의하여 계산된 총 지표유출량의 일부를 다음 날로 지체시켜야 하는데, 본 연구에서는 식 (3)과 같이 SWAT모형에서 사용되고 있는 감수곡선식을 사용하였다.

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor, i-1}) \cdot \left(1 - \exp\left[-\frac{sur_{lag}}{t_{conc}}\right]\right) \quad (3)$$

$$t_{conc} = 0.833 \frac{L}{S^{0.6}} \quad (S \geq 1/200) : \text{Rziha 공식} \quad (4)$$

$$t_{conc} = 0.444 \frac{L}{S^{0.515}} \quad (S < 1/200) : \text{Kraven(I) 공식} \quad (5)$$

여기서, Q_{surf} 은 당일 지표유출량(mm), Q'_{surf} 은 당일 강우로 발생한 총 유출량(지표유출체적)(mm), $Q_{stor, i-1}$ 은 당일 강우이전의 강우사상으로 발생한 유출량 중에서 지체된 유출량(mm), sur_{lag} 는 지표유출 지체계수, t_{conc} 는 도달시간(hrs), S는 식 (4)와 식 (5)에 의해 하천평균경사(m/m), L은 하천연장(km)이다. 도달시간 t_{conc} 는 하천의 평균경사와 연장에 의하여 정해진다.

2) 지표하 유출

일반적으로 유역규모의 거의 모든 공간수문학적 모형은 비포화상태의 측방흐름을 무시하고 포화상태에서 지표하 흐름이 일어난다고 가정하고 있으며, 연속방정식과 Darcy의 법칙을 결합한 형태로 지표하 흐름을 모형화 한다(정인균, 2008). 따라서, 지표하 흐름은 포화상태에서 일어난다는 가정에 의하여 다음 식을 적용하였다(Beven, 1982; Sloan과 Moore, 1984). 단, 지표하 흐름은 다음 식 (6), (7)과 같이 토양층의 수분이 포장용수량을 초과할 때 발생하도록 하였다.

$$Q_{sub} = K_{sat} \cdot S_o, \quad F_c < SW_c < PO_e \quad (6)$$

$$Q_{sub} = 0, \quad SW_c = F_c \quad (7)$$

여기서, Q_{sub} 는 지표하 유출량(mm), S_o 는 경사(m/m), K_{sat} 는 포화투수계수(m/sec), SW_c 는 토양수분함량(m^3/m^3), F_c 는 포장용수량(m^3/m^3), PO_e 는 유효공극률(m^3/m^3)이다.

지표하 유출의 감수곡선식은 식 (8)을 사용하였다.

$$Q_t = Q_0 K_r^t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (8)$$

여기서, Q_0 는 감수곡선상의 어떤 시점에 있어서의 유량, Q_t 는 Q_0 보다 t시간 이후의 유량크기, K_r 은 감수상수, t는 시간(일), α 는 토양 및 대수층의 특성을 표시하는 계수로서 $\alpha = -\ln K_r$ 의 관계를 가진다. K_r 의 값은 1보다 작으며, 시간 t의 단위를 무엇으로 취하느냐에 따라 값이 달라지나 극히 작은 유역의 경우를 제외하면 일 단위(24시간)의 시간을 사용하는 것이 보통이다. 본 연구에서는 지표유출이 끝나는 하강부의 변곡점부터 다음 강우까지의 Q와 t를 log로 표시하여 직선관계로 나타난 후 식의 경사를 이용하여 α 값을 추측하였다.

3.2.2 Penman-Monteith 증발산량 산정

1) Penman-Monteith 공식

본 연구에서는 증발산량 추정을 위하여 FAO Penman-Monteith 공식(Verhoef and Feddes, 1991, 식 (9))을 사용하였다. 공기동력학 저항 산정 시 위성영상으로부터 추출한 LAI 자료를 이용함으로써 공식의 결과값을 실제증발산량으로 사용하였다(Neitsch 등, 2002).

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (9)$$

여기서, ET는 기준증발산량(mm/day), λ 는 잠재기화열(MJ/

kg), Δ 는 포화증기압경사(KPa/°C), R_n 는 순복사에너지(MJ/m²/day), G 는 토양 열 플럭스(MJ/m²/day), γ 는 건습계상수(KPa/°C), ρ_a 는 공기밀도(kg/m³), c_p 는 공기비열(MJ/m²/°C), e_a 는 실제증기압(mb), e_s 는 포화증기압(mb), r_a 는 공기동력학저항(sec/m), r_s 는 피복저항(sec/m)이다.

2) MODIS LAI

본 연구에서는 실제 LAI를 고려해 Penman-Monteith 잠재증발산량을 실제증발산량으로 변환하여 사용하였다. 실제 LAI 자료는 위성영상으로부터 획득하였으며, 증발산량의 변수 중 지표면 저항 r_s 를 식 (10)과 같이 산정 시 LAI를 대입한다.

$$r_s = \frac{r_1}{LAI_{active}} \quad (10)$$

여기서, r_s 는 지표면저항(sec/m)을 의미하며, r_1 은 기공저항(sec/m), LAI_{active} 는 햇빛이 쬐였을 때의 LAI 값으로 보통 LAI(m²(leaf area)/m²(soil surface))의 50%로 계산된다.

본 연구에서 사용한 LAI는 MODIS 센서의 15번째 Product로, MODIS 자료는 일반 사용자에게 실시간으로 공개되므로 위성 수신 시스템을 구축하여 직접 수신이 가능하며, 제공되는 Product는 NASA의 WIST site(<https://wist.echo.nasa.gov/api>) 받을 수 있다. 본 연구에서 증발산량 산정 시 사용한 매개변수의 세부적인 식은 Table 1과 같다.

3.2.3 토양수분 산정

1) 토양수분의 이론

본 연구에서는 토양수분량을 유효공극률(PO_e) 이하, 영구

위조점(WP) 이상으로 식 (11)과 같이 제한하였고, 배수가능 토양수분(SW_{dr})은 식 (12)와 같이 토양수분이 포장용수량(FC) 이상일 때 발생하도록 하여 지표하 흐름과 침투의 조건으로 설정하였다.

$$\begin{aligned} SW_c &= PO_e, & PO_e &\leq SW_c \\ &= SW_c, & WP < SW_c < PO_e \\ &= WP, & SW_c &= WP \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} SW_{dr} &= D_c(PO_e - FC), & PO_e &= SW_c \\ &= D_c(SW_c - FC), & FC < SW_c < PO_e \\ &= 0, & SW_c &= FC \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, SW_c 는 토양의 함수율(%), PO_e 는 유효공극률(m³/m³), FC 는 포장용수량(m³/m³), WP 는 영구위조점(m³/m³), D_c 는 유효토심(m), SW_{dr} 은 배수가능 토양수분(m³/m³)이다.

2) 토양수분의 산정

본 연구에서는 다음 물수지 방정식 식 (13)에 의하여 토양수분을 모의하였다.

$$SM_t = SM_{ini} + \sum_{i=0}^t (R_{day} - ET - Q_{surf} - Q_{latf} - Q_{basf}) \quad (13)$$

여기서, SM_t 는 최종의 토양수분량(mm), SM_{ini} 은 i 일의 초기토양수분량(mm), t 는 시간(일), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), Q_{latf} 는 i 일의 중간유출량(mm), Q_{basf} 는 i 일의 기저유출량(mm), ET 는 i 일의 증발산

Table 1. Parameters for Evapotranspiration Calculation

Parameter	Input data	Equation
λ	-	$ET[mm/day] \approx \frac{ET[MJ/m^2/day]}{2.45}$
R_n	Temperature, Elevation, Latitude, Albedo, Actual vapour pressure	$R_n = R_{ns} - R_{nl}$ $R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$ $R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,k}^4 + T_{min,k}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right)$
G	Temperature, Soil depth, Soil heat capacity	$G = c_s \frac{T_i + T_{i+1}}{\Delta t} \Delta z$
a	Pressure, Virtual air temperature, Specific gas constant	$\rho_a = \frac{P}{T_{kv} R}$
c_p	Psychrometric constant, Ratio molecular weight of water vapour/dry air	$c_p = \frac{\gamma \cdot \epsilon \cdot \lambda}{P}$
e_s	Temperature	$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2}$
e_a	Dewpoint temperature, Daily mean relative humidity	$e_a = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{dew}}{T_{dew} + 237.3} \right] = \frac{RH_{mean} e_s}{100}$
r_a	Height of wind measurement, Height of humidity measurement, von Karman's constant, windspeed at 2 m	$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right]}{k^2 u_z}$
r_s	Bulk stomatal resistance of well-illuminated leaf, Active leaf area index	$r_s = \frac{r_1}{LAI_{ocive}}$

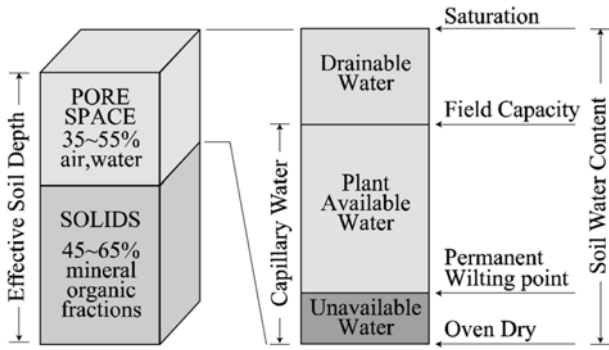


Fig. 2 Soil Bulk Volume and Soil Moisture Content (정인균 등, 2008)

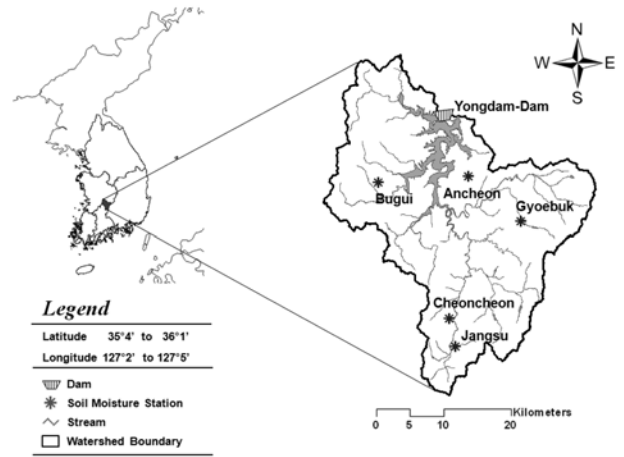


Fig. 4 Study Area (Yongdam dam watershed)

량(mm)이다.

본 모형에서 산정된 토양수분의 범위는 Fig. 2와 같이 유효공극률, 포장용수량, 영구위조점 및 토양깊이에 따라 결정된다. Fig. 3은 본 모형의 계산 흐름도이다. 여기서, SM_{ini} 는 초기토양수분, SMR은 토양수분 저류기능량, PREC는 강수량, Q_{surf} 는 지표유출량, E_a 는 실제증발산량, F.C.는 포장용수량, Q_{sub} 는 지표하유출량, SM은 토양수분량, PO_e 는 토양의 공극률을 나타내며, SM1, 2, 3는 최종 토양수분 SM을 계산하는 과정을 나타내는 변수로서, SM1은 전일 토양수분을 포함한 당일 발생한 순 토양수분, SM2는 증발산 후 토양수분, SM3는 지표하 유출 후 토양수분으로 최종 토양수분량을 나타낸다.

4. 재료 및 방법

4.1 대상유역

본 연구의 대상유역은 금강 최상류의 용담댐 유역으로 북위 $35^{\circ} 35' \sim 36^{\circ} 00'$, 동경 $127^{\circ} 20' \sim 127^{\circ} 45'$ 의 범위에 위치하고 있으며 무주군, 진안군, 장수군을 포함한 충청남도, 전라북도, 경상남도의 경계에 걸쳐있다(Fig. 4). 용담호는 금강 중하류에 홍수피해를 경감시키고 전주 지역 및 댐 하류 지역의 원활한 용수 공급을 위해 건설된 다목적댐 저수지이며, 연구지역이 포함되어 있는 무주군, 진안군, 장수군은 과거

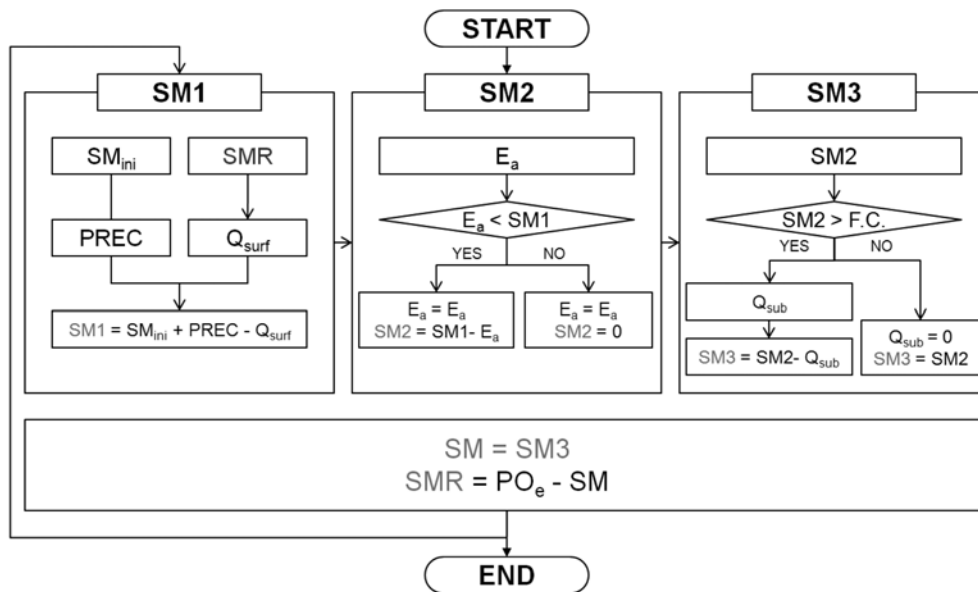


Fig. 3 Flowchart of Model

Table 2. Meteorological Data Sets for Model Input and Observed Data for Model Test

	Type	Description	Period
Weather	Precipitation	Daily precipitation (mm)	2000-2008
	Temperature	Daily max., avg., min. temperature (°C)	
	Wind speed	Daily mean wind speed (m/sec)	
	Duration of sunshine	Daily duration of sunshine (hr)	
	Humidity	Daily mean relative humidity (%)	
Observed	Streamflow	Daily streamflow data (mm)	

1994년, 1995년에 큰 가뭄기록이 있고 2001년에도 봄 가뭄을 겪는 등 빈번한 재해가 일어나는 것으로 보아 토양수분을 중심으로 용담댐 유역의 수문 흐름을 연구하는 것은 매우 중요한 일이 될 것이다. 용담댐 유역은 그 중요성만큼 많은 연구의 대상지역으로 선정되어 연구된 바 있다(김영성 등, 2007; 이혜숙 등, 2008; 박진혁 등, 2009)

용담댐의 총 저수용량은 815×106 m³, 저수면적은 36.2×106 m², 저수지길이는 31 m로 전형적인 인공호의 특징을 가지고 있다. 유역의 면적은 930 km²로 금강 유역면적의 약 9.5%를 차지하고 있으며, 대부분이 산지유역과 농업지역으로 각각 70%, 21%를 차지하고, 유역의 연평균 강우량은 1,259.7 mm이다.

4.2 기본 입력자료 구축

4.2.1 수문기상자료

본 연구에서는 용담댐 유역의 1개의 기상관측소와 13개의 AWS (Automatic Weather System)의 기상자료를 수집하였다. Table 2는 본 분포형 모형에서 필요로 하는 수문 기상자료의 종류 및 형태를 정리한 것으로 본 연구에서는 2000년부터 2008년까지의 자료를 입력 자료로 사용하였다.

본 분포형 모형은 모든 입력 자료를 map으로 넣는 형식을 취하고 있으므로, 본 연구에서는 기상자료를 IDW (Inverse Distance Weighting)법을 이용하여 공간 분포화 시켜 입력 자료로써 사용하였으며, 공간 분포화 하는 과정은 IDWPG 프로그램(한국농촌공사, 2009)를 사용하였다.

4.2.2 지형 자료

본 모형에서는 지형 입력 자료로서 Table 3과 같이 다음의 자료들을 필수 입력 자료로 요구한다. 먼저, 토지이용 정보는 증발산, 침투, 지표유출 등의 수문학적 구성요소들에 영향을 미치므로 이에 본 연구에서는 환경부에서 제공하는 1:25,000의 중분류 토지 피복 분류도를 사용하였다. 환경부 토지피복분류도(Fig. 5)는 2000년 5월 8일의 Landsat ETM+ 영상과 1999년 10월 25일의 IRS-1D Pan 영상을 융합하여 작성한 자료이다. 본 연구에서는 중분류 토지이용도를 연구

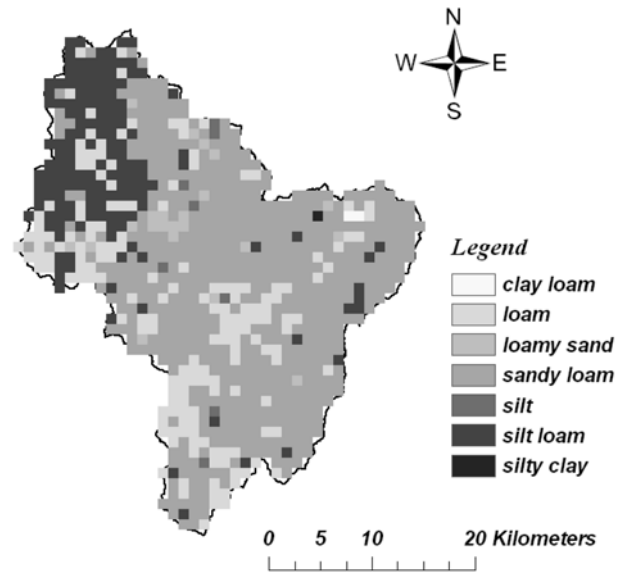


Fig. 6 Soil Texture Map

Table 3. GIS Data Sets

Data type	Description	Source
Land use	Land use classification 1:25,000 classes	EGIS
Soil	Soil classification and physical properties (field capacity, wilting point, porosity, soil depth)	KRDA

EGIS: Environmental Geographic Information System
KRDA: Korea Rural Development Administration

의 목적에 맞게 11개의 토지이용항목으로 나누어 적용하였다. 토지이용도는 모형 내에서 작물높이, 알베도, 기공저항, 작물계수 선정 등에 이용된다.

본 모형은 토양층을 중심으로 물수지를 파악하므로, 토양도 자료는 매우 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 토양 종류에 따른 공극률, 포장용수량, 위조점, 토양 유효 깊이속성을 map으로 작성하여 사용하였다(Fig. 6). 토양의 속성은 토양별 sand, clay, silt의 비율을 이용하여 포장용수량, 위조점, 공극률을 계산하였고 토양 깊이는 농업기술과학원에서 토양별 유효 토심 자료를 획득하였다. Table 4와 5는

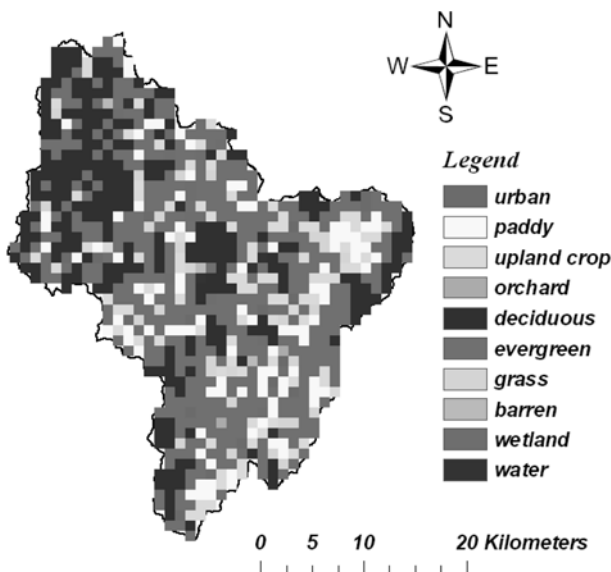


Fig. 5 Land Use Map

Table 4. Land Use Area for Yongdam Dam Watershed

Class	Area	
	km ²	%
Urban	19	2.0
Paddy	103	11.1
Upland crop	96	10.3
Orchard	2	0.2
Deciduous	258	27.7
Evergreen	400	43.0
Grassland	29	3.1
Bare field	3	0.3
Wetland	14	1.5
Water	6	0.6
Total	930.0	100.0

Table 5. Soil Type for Yongdam Dam Watershed

Soil type	Area		Porosity (cm ³ /cm ³)	Field capacity (cm ³ /cm ³)	Wilting point (cm ³ /cm ³)	Saturated hydraulic conductivity (cm/hr)
	km ²	%				
Clay loam	1.3	0.1	0.464	0.318	0.197	0.23
Loam	194.8	20.9	0.463	0.270	0.177	1.32
Loamy sand	26.9	2.9	0.437	0.125	0.055	6.11
Sandy clay loam	0.8	0.1	0.398	0.255	0.148	0.43
Sandy loam	617.0	66.3	0.453	0.207	0.095	2.59
Silt	2.2	0.2	0.000	0.000	0.000	0.00
Silt loam	83.2	8.9	0.501	0.330	0.133	0.68
Silty clay loam	3.8	0.4	0.471	0.366	0.208	0.15
Total	930.0	100.0	-	-	-	-

용담댐 유역의 토지이용도와 토양도의 속성 정보를 나타낸 것이다.

4.2.3 원격탐사자료

본 연구에서 사용한 MODIS LAI는 시간 해상도 8일, 공간 해상도 1 km인 Level 4 자료이다. Fig. 7은 MODIS LAI의 전처리 과정을 나타낸다. The Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)에서 제공하는 MODIS Reprojection Tool을 이용하여 한반도에 맞도록 Korea_TM으로 좌표체계를 재설정 하고, GIS 프로그램을 이용하여 고유 Gian 값과 Offset 값을 LAI 값으로 변환하였다. MODIS

LAI 영상은 대기 보정된 자료이나, 구름의 영향을 최소화하기 위하여 각 셀에서 가장 큰 값을 추출하여 영상을 재구축하는 MVC (Maximum Value Composite) 기법을 통해 8 day 기준 자료에서 월별 기준 자료로 변환하여 사용하였다.

5. 모형의 적용 및 평가

5.1 모형의 민감도 분석 및 검토

5.1.1 모형의 민감도 분석

본 연구에서는 모형의 유출량 및 토양수분의 보정을 위하여 용담댐 유역 전체에 대한 유출 및 토양수분과 관련된 대

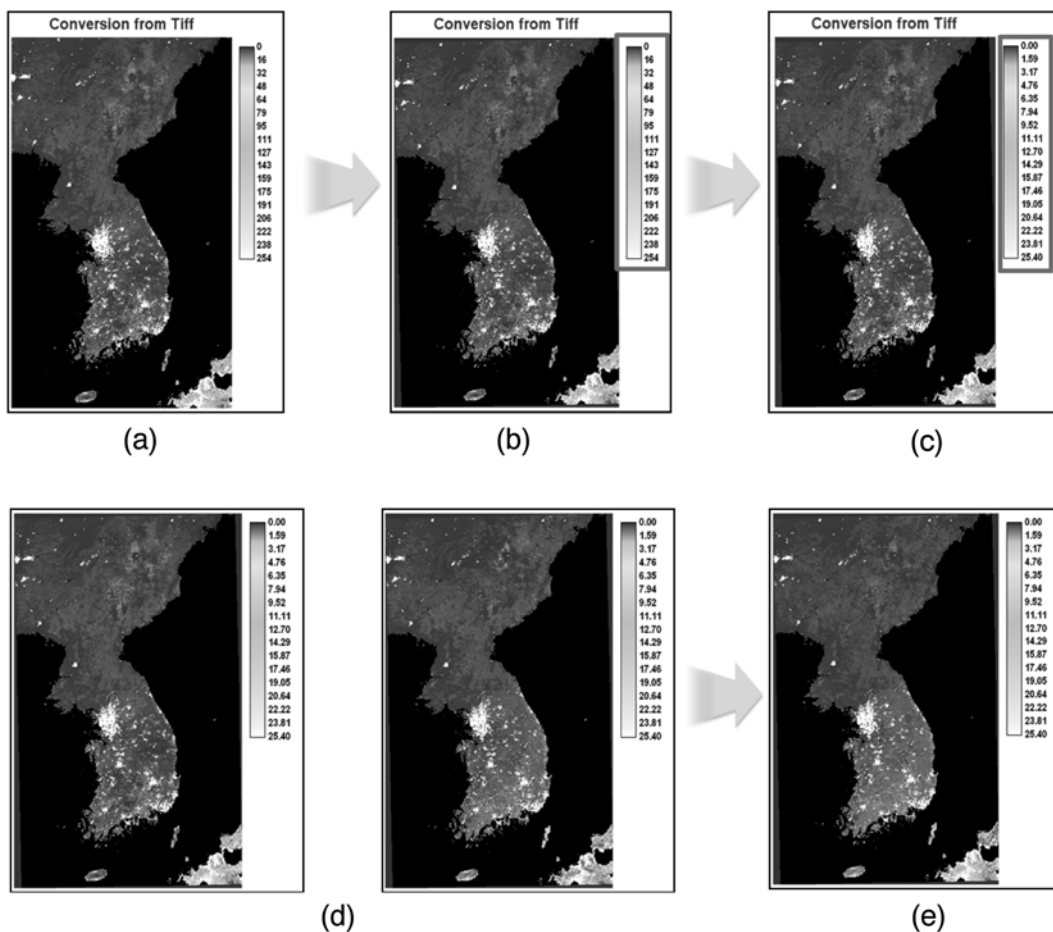


Fig. 7 Treatment Process of MODIS LAI; (a) UTM 52N, (b) Korea TM, (c) Transform factor, (d) 8 day composite LAI, (e) Monthly LAI

Table 6. Soil Type for Yongdam Dam Watershed

Parameter	Definition	Unit	LB	UB
surlag	Surface lag coefficient	-	1	12
per_rt	Soil percolation ratio	%	0.1	0.15
slp_l	Lateral flow recession curve slope	mm/day	0.1	0.5
time_l	Lateral flow basin lag time	day	1	9
slp_b	Base flow recession curve slope	mm/day	0.01	0.05
time_b	Base flow basin lag time	day	3	11

LB : Lower Bound, UB : Upper Bound

표 매개변수를 선정하고 보정에 사용하였다. 민감도 분석 (Sensitivity Analysis, SA)은 Runoff, Evapotranspiration, Soil Moisture 등 각 프로세스 별 변경 가능한 매개변수를 선정하고 민감도 분석에 따른 민감도 등급을 결정하여 보정에 사용하였다. Table 6과 같이 본 연구에서 선정한 유출, 토양수분 관련 매개변수로써 6개의 매개변수를 선정하였으며, 2000~2008년까지의 일 유출량 모의, 토양수분량 모의를 통한 민감도 분석결과 Fig. 8과 같이 매개변수에 대한 민감도 등급을 결정하였다.

유출관련 매개변수 등급은 per_rt가 크게 민감한 것으로 나타났다으며, time_l, slp_l로 중간층에 관련한 매개변수가 민감하게 분석되었다. 또한 토양수분 매개변수는 per_rt가 민감하고 slp_b, time_b로 기저층에 관련한 매개변수가 비교적 민감하게

나타났다. surlag (surface lag coefficient)는 유출량이나 토양수분량에 직접적인 영향을 미치지 않는 값이 클수록 지표 유출을 재분배 하여 유출되는 속도가 빨라지는 것으로 나타났다. surlag 값이 커짐에 따라 감수곡선의 경사가 커지고, 침투 유출량이 증가하므로 surlag를 모형의 보정 시 지표 유출의 흐름을 조절하는 데 이용하였다. time_l, slp_l과 time_b, slp_b는 각각 중간유출 관계식의 집중시간과 경사, 기저유출 관계식의 집중시간과 경사를 나타낸다. slp은 값이 클수록 침투 유출량이 감소하고 유출 속도가 줄어드는 경향을 나타내었고, time 또한 slp와 같은 경향을 나타내었다.

5.1.2 유출 검보정

본 연구에서는 연구지역인 용담댐 유역의 출구지점에서의 유출 자료를 이용하여 유역을 모형으로부터의 결과가 관측 기록 자료에 일치되도록 보정을 실시하였다. 초기 매개변수를 안정화하기 위하여 2000년을 초기 안정화 기간으로 지정하고, 2001-2004년을 보정기간, 2005-2008년을 검증기간으로 사용하였으며, 침투 유출 및 기저 유출 기준으로 유량과 감수곡선에 영향을 미치는 매개변수를 선정하여 보정을 실시하였다. 보정 방법은 민감도 분석 결과를 참고하여 총 유출량을 기준으로 지표유출량과 침투 및 기저유출, 감수곡선 형태를 기준으로 보정을 실시하였다.

Fig. 9는 보정 및 검증기간 동안의 실측치와 모의치 수문곡선을 비교한 것으로 Table 7에 검보정 실시에 따른 통계 분석 결과를 정리하였다. 출구 지점에 대한 연평균 일 유출량을 비교한 결과 유출률은 전체적으로 약 16% 크게 모의되었고, 비교적 연 강우량이 적은 2001, 2004년과 2008년에 특히 과대추정 되었다. NSE는 보정기간에 0.84, 검증기간에 0.91, R²는 0.80과 0.87로 각각 분석되었다. RMSE는 각각 2.27 mm/day, 1.91 mm/day로 나타났다.

5.2 분포형 일 물수지 모형을 이용한 유출량 평가

Fig. 10은 모형의 출력결과로서 월별로 선정한 유역 내 셀 단위의 일 유출량 분포도를 보여주고 있다. 동일한 날의 강우량 분포도와 비교해 본 결과 강우량과 유출량의 분포도가 유사한 패턴을 나타내었으며, 토양종류가 clay loam(식양토)에서 유출이 크게 발생하였고, loam(양토)은 상대적으로 유출이 작게 발생하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 10의 원내). 또한 같은 강우조건에서 초지나 밭 보다는 논이나 시가지에 유출량이 많은 것으로 나타났다. 이것은 강우량과 토양의 배수 상태에 따른 유출의 특성이 잘 반영 되었다고 판단

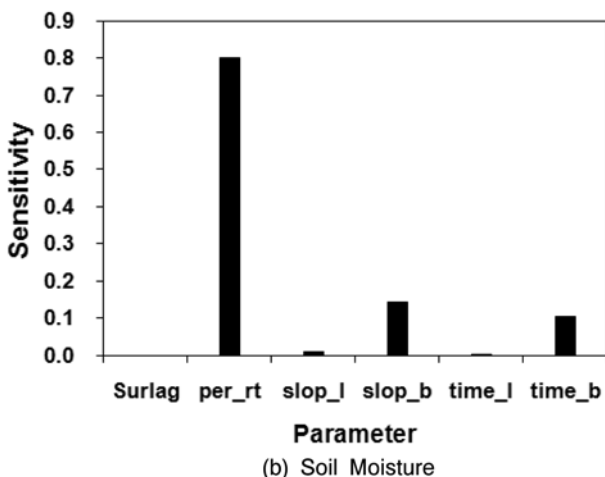
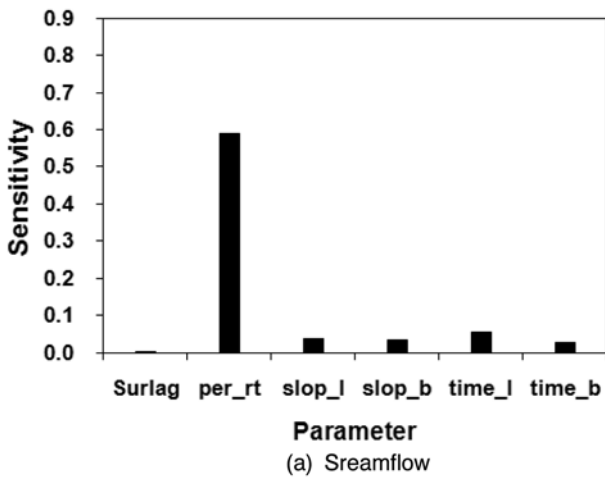


Fig. 8 The Result of Sensitivity Analysis for Streamflow and Soil Moisture

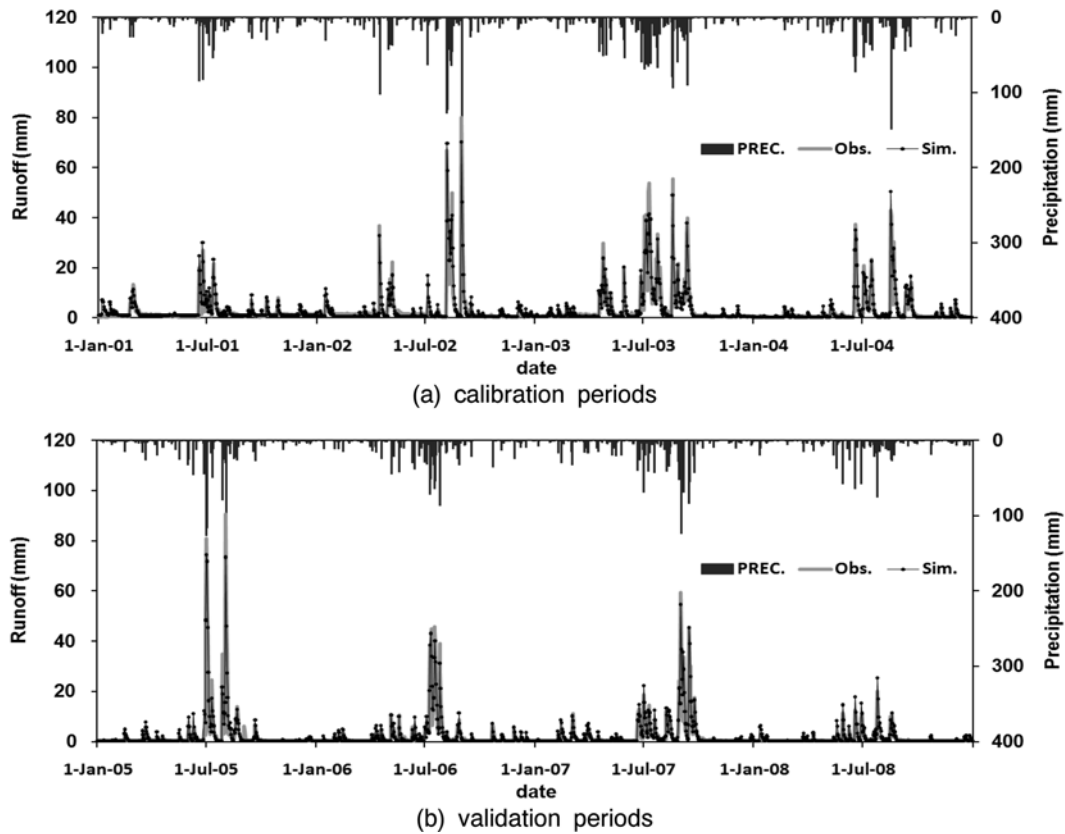


Fig. 9 Hydrograph Comparison between Simulated and Observed Daily Discharge at Yongdam Dam

Table 7. Summary of Statistics for Daily Discharge for the Calibration and Validation Periods at the Yongdam dam

Year	Rainfall (mm)	Discharge (mm)		Runoff ratio (%)		R ²	RMSE (mm/day)	NSE
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			
2001	997.9	728.6	907.7	73.0	91.0	0.79	1.47	0.78
2002	1667.6	1224.2	1294.9	73.4	77.7	0.82	2.78	0.86
2003	2041.0	1610.9	1624.3	78.9	79.8	0.82	2.75	0.89
2004	1394.9	832.7	981.8	59.7	70.4	0.78	2.08	0.84
2005	1419.9	836.7	985.1	58.9	69.4	0.88	2.65	0.90
2006	1312.0	798.3	843.9	60.8	64.3	0.89	1.62	0.93
2007	1514.5	872.9	1062.2	57.6	70.1	0.85	2.13	0.86
2008	872.0	324.0	464.7	37.2	53.3	0.85	1.27	0.96
Mean	1402.5	903.5	997.8	62.5	72.0	0.83	2.09	0.88

된다. 논외의 경우, 벼의 생육기간(6월 1일-9월 10일)에는 토양수분이 포화된 담수상태이므로 여유고(물꼬높이-당일 담수심)를 채운 나머지의 강우량이 모두 지표 유출되기 때문이며, 시가지는 콘크리트 등 불투수지역이 차지하는 비율이 다른 토지이용보다 크기 때문인 것으로 파악된다.

6. 결 론

본 연구에서는 위성영상의 광역적 정보와 높은 시간해상도를 최대한 활용하고자 MODIS LAI를 입력 자료로 사용하여 유역의 일 유출을 공간적으로 모의 할 수 있는 분포형 모형을 개발하였다. 본 모형은 지표격자를 3개의 층으로 구분하였고 그 3개의 층 안에서 유출, 증발, 토양수분의 거동을 설명하였다. 모형은 FORTRAN 90언어를 이용하여 개발

되었으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

모형의 구성은 자료준비, 모형실행 및 출력으로 요약할 수 있다. 모형에는 기상자료 및 모형 매개변수, GIS, RS 자료가 입력되며, 이 자료는 ESRI ASCII Grid 형식으로 구축하게 된다. 토지피복 및 토양 관련 매개변수, 작물 관련 매개변수는 사용자가 직접 작성한 데이터를 선택적으로 입력할 수 있다. 모형에서는 입력된 기본 매개변수 중 주요 매개변수에 대하여 사용자가 직접 수정이 용이하도록 구성되었으며, 입력 자료는 파일 목록과 경로 지정만으로 적용할 수 있도록 하였다. 모형의 실행부분에서는 유역 내 격자에 대해 강우를 분포시켜 각 격자층의 물수지를 계산하고, 시간의 변화에 따른 공간적 분포를 파악할 수 있도록 유출, 증발산량, 토양수분 분포도를 생성한다. ESRI ASCII File로 출력이 가능하며, 유역의 평균 수문정보 및 토지이용별 평균

수문정보가 CSV 형식으로 저장된다.

모형은 유역의 경사와 하도의 길이에 따라 감수곡선의 형태가 달라져 유출의 경향이 달라지고, 유역의 토양은 토양수분에 많은 영향을 미친다. 모형의 결과는 유역에 따라 각기 다른 경향을 나타내므로 모형은 검토정과 민감도 분석을 통하여 여러 시험유역에 대한 적용성이 검토되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 유역면적이 930 km²인 용담댐 유역에 대하여 적용성 평가를 수행하였다. 적용성 평가는 MODIS LAI의 해상도에 맞추어 1 km 해상도로 진행하였으며, 모형을 실제에 적용시키기 위하여 유출 자료를 이용한 검토정을 수행하였다. 유역 출구점인 용담댐 유역의 유입량(cms)과 해당 일의 유역 유출량 평균(cms) 자료를 비교하여 Hydrograph를 작성하였으며, R², RMSE, NSE를 이용하여 적용성을 평가하였다. 유출곡선을 분석한 결과 강우가 적은 해인 2001, 2004년과 2008년에 침투유출이 과대 추정되는 것으로 나타났고, 강우가 비교적 많은 2003년과 2005년에 모형의 침투유출이 실측값을 충분히 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 이것은 모형에서 포화투수계수에 따라 변동되는 값으로, 모형 안의 포화투수계수가 실제와 차이가 있다고 판단된다.

모형의 보정은 보정기간의 R² 0.80, 검증기간은 0.87로 나타났으며, NSE는 보정기간에 0.84, 검증기간에 0.91 그리고 RMSE는 각각 2.27 mm/day, 1.91 mm/day로 나타났다.

유출량 분포도는 토양의 배수 정도 매우 많은 영향을 받는 유출량의 특성이 잘 나타나며, 강우분포도와 유사한 패턴을 보이는 것으로 보아 분포도는 유출곡선과 동일하게 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. 또한, 증발산량은 일조량이 클수록, 풍속이 클수록, 상대습도가 작을수록, 기온이 높을수록 큰 경향을 나타내었으며, 다른 달에 비하여 온도와 일조량이 크고, 강우량이 많으며 그에 비례해 습도 또한 큰 특성을 가지는 6, 7, 8월에 약 200% 크게 나타났다. 증발산량을 토지이용별로 분석해 보면 논 > 산림 > 초지 > 나지 > 밭 순으로 나타났다. 대체적으로 증발과 증산이 동시에 발생하는 경우에 증발산량은 매우 높게 나타났으며, 증발량 보다는 증산량이 증발산량에서 더 큰 비중을 차지하는 것으로 보인다.

본 연구에서 개발한 일 토양수분 추적모들은 유출의 모형 효율 0.88의 값을 가지므로 지표유출의 감수곡선과 지표하 유출의 감수곡선은 모의가 잘 되었다고 판단되나 특히 강우량이 많은 해의 경우 침투 유출은 다소 낮게 모의되었다.

본 연구에서 개발한 일 토양수분 추적모들은 여러 가지 요인에 의한 많은 불확실성을 내포하고 있어 그에 따른 모의결과의 불확실성은 더욱 커지게 마련이다. 또한 포화 흐름만을 모의하며 경사로 인한 측방 흐름은 모의하지 않았기 때문에 본 연구의 결과를 절대적 판단기준으로 적용하기에는 무리가 있다. 하지만 본 연구를 통해 토양 내 수분의 거동을 시각적으로 파악하고 그 평가기법을 제시함으로써 물수지 정보를 보다 정확하게 모의하는 연구에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2009 건설기술혁신사업인 ‘기후변화에 의한 수문 영향분석과 전망’ 과제에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- 건설교통부(1999) **수자원 계획의 최적화연구** (II), (물수지분석 시스템 연구).
- 김광섭(2007) 유역관리를 위한 토양수분 분석(I) - 토양수분 관측 연구동향. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제40권 제1호, pp. 62-71.
- 김광섭, 이을래(2004) 신경망기법과 보조자료를 사용한 원격측정 토양수분자료의 Downscaling기법 개발. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권 제1호, pp. 21-2.
- 김성준(1998) 격자기반의 운동과 강우유출모형 개발(I) - 이론 및 모형. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권 제3호, pp. 303-308.
- 김영성, 양재민, 이현석, 고덕구(2007) 용담댐 수자원 시험유역. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제40권 제6호, pp. 48-53.
- 농업기상정보시스템, <http://weather.rda.go.kr/index.asp>
- 농업기술과학원, <http://www.niast.go.kr/>
- 박진혁, 강부식, 이근상(2008) “레이더강우를 이용한 GIS 기반의 분포형 모형 적용성 분석. **한국지형공간학회지**, 한국지형공간학회, 제16권 제1호, pp. 23-32.
- 박진혁, 허영택, 류경식, 이근상(2009) GIS격자기반 K-DRUM을 활용한 용담댐유역 홍수유출모의. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권 제1D호, pp. 145-151.
- 이혜숙, 정선아, 박상영, 이요상(2008) HSPF와 CE-QUAL-W2 모델의 연계적용을 이용한 용담댐 저수지 탁수현상의 모델 연구. **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제30권 제1호, pp. 69-78.
- 장기환(1999) 이상기후현상과 다목적댐 운영, **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제47권 제5호, pp. 34-44.
- 정인균, 이미선, 박종윤, 김성준(2008) 격자기반 운동과 강우유출 모형 KIMSROTM의 개선(I). **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권 제6B호, pp. 697-707.
- 최진용, 고양수(2006) 토양수분 기뭇지수의 개발. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제29권 제3호, pp. 24-28.
- 한국농촌공사(2009) **농촌홍수관리시스템 개발**.
- 황준식, 정대일, 김영오(2005) 국내 월유출 모의 대안을 위한 물수지 모형 연구. **한국수자원학회 2005년도 학술발표회논문집**, 한국수자원학회, pp. 95-99.
- Beven, K.J. (1982) On subsurface stormflow: Predictions with simple kinematic theory for saturated and unsaturated flows. *Water Resources Research*, Vol. 18, No. 6, pp. 1627-1633.
- Freeze, R.A. and Harlan, R.L. (1969) Blueprint for a physically-based digitally simulated hydrologic response model. *Journal of hydrology*, Vol. 9, pp. 237-258.
- Kim, S.J., Kwon, H.J., Park, G.A., and Lee, M.S. (2005) Assessment of land-use impact on streamflow via a grid-based modeling approach including Paddy Fields. *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 3801-3717.
- Nasa Website, <https://wist.echo.nasa.gov/api>
- Nash, J.E and Sutcliffe, J.E. (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. (2002) Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000. *Texas Water Resources Institute*, College Station, Texas.
- Sloan, P.G. and Moore, I.D. (1984) Modelling subsurface stream-

flow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 15, pp. 1815-1822.

Verhoef, A. and Feddes, R.A. (1991) *Preliminary review of revised FAO radiation and temperature methods*. Report 16, Landbou-

wuniversiteit Wageningen, Wageningen.

(접수일: 2010.4.20/심사일: 2010.5.16/심사완료일: 2010.5.16)