

## BROOK90 모형을 이용한 산림소유역의 유출량 추정

임상준\* · 이상호 · 이희곤 · 안수정

(서울대학교 산림과학부)

Prediction of Runoff on a Small Forest Watershed Using BROOK90 Model. Im, Sangjun\*, Sang Ho Lee, Heegon Lee and Sujung Ahn (Department of Forest Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea)

Water balance is the major factor in forest ecosystem, and is closely related to the vegetation and topographic characteristics within a watershed. The hydrologic response of a forest watershed was investigated with the hydrological model. The deterministic, lumped parameter model (BROOK90) was selected and used to evaluate the applicability of the model for simulating daily runoff on the steep, forested watershed. The model was calibrated and validated against the streamflow data measured at the Bukmoongol watershed. The deviation in runoff volume ( $D_v$ ) was -1.7% for the calibration period, and the  $D_v$  value for the validation period was 4.6%. The correlation coefficient ( $r$ ) and model efficiency ( $E$ ) on monthly basis were 0.922, 0.847, respectively, for the calibration period, while the  $r$ - and  $E$ -value for the validation period were 0.941, 0.871, respectively. Overall, the simulated streamflows were close to the observations with respect to total runoff volume, seasonal runoff volume, and baseflow index for the simulation period. BROOK90 model was able to reproduce the trend of runoff with higher correlation during the simulation period.

Key words : runoff, BROOK90, forest watershed, baseflow index, PART

### 서론

산림유역에 내리는 강우의 대부분은 임관(林冠) 및 하층식생 등에 의해 일시적으로 차단, 저류된 후 대기중으로 증발되어 손실되거나 일부는 다시 지표면으로 떨어지게 된다. 지표면에 도달한 강우는 토양공극을 통하여 토양중으로 침투되게 되며, 강우강도가 토양의 침투능보다 크게 되면 지표면을 따라 유출된다. 이와 같이 산림유역의 수문순환은 기상, 식생, 토양 등 산림생태계를 구성하는 제반요소들의 상호작용에 의해 결정된다.

일반적으로 산림유역의 수문순환은 장기간의 현장 모니터링 자료를 분석하거나 수문모형을 이용하여 해석할

수 있다. 강우량, 증발산량, 유출량 등 수문요소를 직접적으로 현장에서 조사하는 현장 모니터링 방법은 자료가 정확한 반면에 자료의 수집에 시간과 노력이 많이 소요되며, 토지이용이나 기후의 변화로 인한 영향을 분석하기 어려운 단점이 있다. 수문모형에 의한 방법은 각 수문성분의 기작과 상호관계 등을 계량적으로 해석할 수 있으며, 토지이용이나 환경의 변화에 따른 수문반응을 쉽게 모의할 수 있는 장점이 있다. 그러나 수문모형을 적용하기 위해서는 실제 유역과 수문모형의 강우-유출관계가 잘 일치하도록 모형의 변수를 조정하여야 한다.

산림유역의 수문해석에 널리 이용되고 있는 수문모형에는 BROOK90 (Federer, 1995), FORGAP (Dam, 2001), TOPOG (Hatton *et al.*, 1992), FOREST-BGC (Running

\* Corresponding author: Tel: 02) 880-4759, Fax: 02) 873-3560, E-mail: junie@snu.ac.kr

and Coughlan, 1988), TOPMODEL (Beven *et al.*, 1995), MACAQUE (Watson, 1999) 등이 있다. 이들 모형은 대부분 수목의 성장과 이로 인한 강우차단량 및 증발량의 변화를 모의할 수 있으며, 산지 사면에 의한 유출과정을 포함하고 있다. 국내에서는 산림지에서 발생하는 유출과정을 단순화시켜 해석하거나 (우보명 등, 1998; 임상준, 2000), 외국에서 개발된 모형을 수정하여 국내에 적용하는 연구 등이 시도되고 있다 (최형태, 2001).

BROOK90 모형 (Federer, 1995)은 소규모 산림유역에서 발생하는 수문순환을 해석하기 위하여 개발된 모형으로, 강우 및 용설 차단량, 증산량, 토양증발량 등을 모의하며, 가변유출구간 (variable source area) 개념을 이용하여 지표면 유출량을 추정한다. 또한, 토양층을 여러 개로 구분하여 토양내의 수분이동을 모의한다. BROOK90 모형은 산림유역의 관리에 따른 수문성분의 변화를 추정하는 데 많이 이용된다. Hornbeck 등 (1987)은 벌채 후 조립된 수목의 성장특성에 따른 연도별 유출량의 변화를 추정하기 위하여 BROOK90 모형을 적용하였으며, Armbruster 등 (2004)은 BROOK90 모형을 이용하여 침엽수림에서 활엽수림 혹은 혼효림으로 수종을 갱신하는 경우에 대한 수문성분별 거동을 분석하였다. Canfield와 Lopes (2000)는 BROOK90 모형을 이용하여 Walnut Gulch 시험유역 (미국, Arizona)의 토양층별 토양수분 변화를 모의하였다. 또한, BROOK90 모형은 토양내의 수목의 뿌리가 증발량에 미치는 영향을 평가하는 데 이용되었다 (Federer and Vorosmarty, 2003).

우리나라의 산림유역은 지형의 경사가 급하고 토양층의 깊이가 상대적으로 적으며, 수목의 수령이 20~30년 인 유령림 (幼齡林)의 단계를 크게 벗어나지 못하고 있기

때문에 이러한 산림의 임상이 산림수자원에 미치는 영향을 정확하게 파악할 필요가 있다. 또한, 산림유역의 유출량 추정에 대한 연구가 상대적으로 부족하고, 따라서 산림유역내의 유출성분 해석에 대한 체계적인 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 우리나라 산림소유역의 유출기작을 분석하기 위하여 BROOK90 모형을 적용하였다. 이를 위하여 북문골 산림소유역을 선정하였으며, 일별 유출량 자료를 이용하여 매개변수 보정과 검증을 실시하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구대상유역

BROOK90 모형의 적용성 평가를 위하여 북문골 산림소유역을 선정하였다. 북문골 유역은 Fig. 1과 같이 전라남도 광양시 옥룡면 추산리에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 남부학술림내에 위치하고 있다. Table 1과 같이 북문골 유역의 유역면적은 15.0 ha이고, 고도는 120~341 m의 범위를 보이고 있으며, 유역의 평균 경사는 29.1%로 조사되었다 (최형태, 2001).

유역내의 식생분포는 대부분 소나무, 리기다소나무, 곰솔, 잣나무, 테다소나무, 밤나무 등 침활혼효 인공식재림이며, 전체면적의 약 30% 정도가 밤나무 등의 활엽수림으로 구성되어 있다. 토양특성은 유역 출구쪽에 산재되어 있는 약 5% 정도의 식양토지역을 제외하고는 대부분 사양토로 이루어져 있다. 또한, 토양 단면의 깊이를 살펴보면 C층이 평균 5.9 cm (2~10 cm), A층이 24.1 cm (3~45 cm)로 조사되었다.

강우량 측정을 위하여 유역출구로부터 약 150 m 떨어진

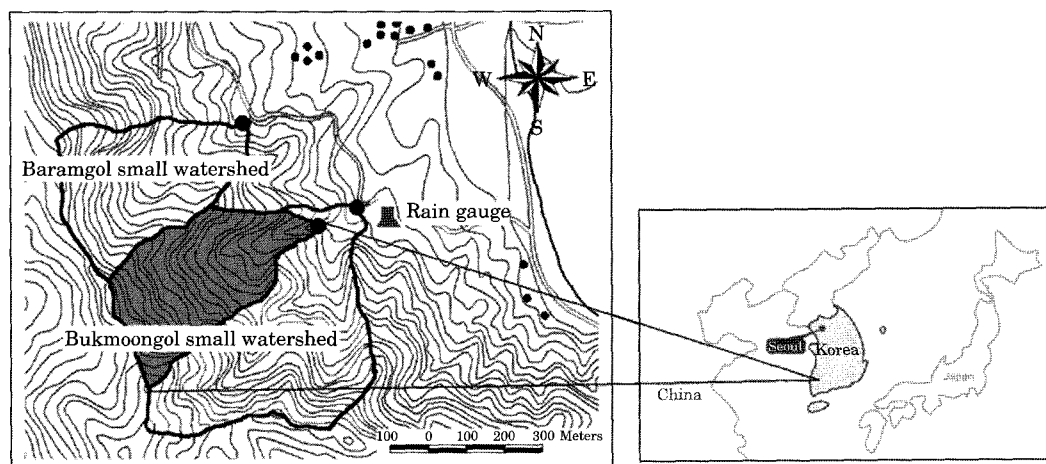


Fig. 1. Location of the Bukmoongol watershed.

**Table 1.** Watershed characteristic of the Bukmoongol watershed.

Factors	Description
Watershed size (ha)	15.0
Altitude (m)	120~341
Watershed slope (%)	29.1
Soil type	Sandy loam, Silt loam
Vegetation distribution	<i>Pinus densiflora</i> , <i>Pinus rigida</i> , <i>Fraxinus rynchophylla</i>

진 곳에 자기우량계를 설치하였으며, 유역 출구에 설치된 구형웨어의 자기수위계를 이용하여 월류수심을 측정하고, 수위-유량 곡선으로부터 유량을 추정하였다. 한편, BROOK90 모형의 구동에 필요한 기상자료 중에서 일별 최고·최저온도, 일 평균풍속, 복사량 등은 인근에 위치한 진주기상관측소의 일별 자료를 활용하였다.

**2. BROOK90 모형**

BROOK90 모형은 결정론적 (deterministic), 총괄형 (lumped) 수문모형으로, 식생층에 의한 강우차단량과 증산량, 토양증발량, 토양층에서의 수분이동 등을 모의하며, 지표유출과 지하수 유출성분을 일별로 모의한다 (Federer, 1995). BROOK90 모형은 1974년에 개발된 BROOK 모형을 수정한 것으로, Fig. 2와 같이 강우차단저류 (INTR), 강설차단저류 (INTS), 지표면 강설저류 (SNOW), i층의 토양층저류 (SWATi), 지하수저류 (GWAT) 등을 통해 수분이동을 모의한다.

강우량은 먼저 아래의 식에 의하여 수목의 잎이나 줄기 등에 의한 차단손실이 발생한다.

$$\frac{dINTR}{dt} = RINT - IRVP \tag{1}$$

$$\frac{dINTS}{dt} = SINT - ISVP \tag{2}$$

여기서, INTR, INTS=강우 및 강설의 수관저류능 (canopy storage), RINT, SINT=강우 및 강설의 수관차단량 (catch rate), IRVP, ISVP=증발량을 의미한다.

Penman-Monteith 공식을 수정한 Shuttleworth-wal-lace 공식 (1985)을 이용하여 증산량 ( $\lambda E_c$ )과 토양면 증발량 ( $\lambda E_s$ )을 구한다.

$$\lambda E_c = \frac{\Delta(A - A_s) + \rho c_p D_o / r_{ca}}{\Delta + \gamma(1 + r_{cs} / r_{ca})} \tag{3}$$

$$\lambda E_s = \frac{\Delta A_s + \rho c_p D_o / r_{sa}}{\Delta + \gamma(1 + r_{ss} / r_{sa})} \tag{4}$$

여기서, A=총 에너지 (A=순복사에너지 ( $R_n$ )- 토양열플럭스 (S)),  $A_s$ =가용 에너지 ( $A_s$ =단파복사에너지 ( $R_{ns}$ )- 토양 열플럭스 (S)),  $\Delta$ =수증기압-온도곡선의 기울기,  $c_p$ =공기의 비열,  $\rho$ =공기의 밀도,  $D_o$ =포차 (vapor-pressure deficit),  $\gamma$ =건습계 상수,  $r_{ca}$ ,  $r_{cs}$ ,  $r_{sa}$ ,  $r_{ss}$ =수관 및 표면경계층 공기역학적저항과 표면저항을 각각 표시한다. 한편,  $D_o$ 는 아래의 식 (5)를 이용하여 구한다.

$$D_o = D + [\Delta A - r_{aa} \lambda E_c (\Delta + \gamma)] / \rho c_p \tag{5}$$

여기서, D=기준 높이에서의 포차이며,  $r_{aa}$ =대기중의 공기역학 저항이다.

BROOK90 모형에서는 두 가지의 직접유출 성분을 모의한다. 하나는 지표면유출이며, 다른 하나는 토층통과유출 (bypass flow)이다. 지표면 유출성분은 지표면을 따라 하천으로 유출되는 성분이며, 토층통과유출은 토층의 공극 (macropore or pipe)을 따라 토양층을 빠르게 이동하여 하천으로 직접 유출되는 성분을 의미한다.

토층통과유출, BYFRAC<sub>i</sub>는

$$BYFRAC_i = QFFC^{(1 - (1/QFPAR) \times (WETNES_i - WETF_i) / (1 - WETF_i))} \tag{6}$$

여기서, WETNES<sub>i</sub>, WETF<sub>i</sub>=i-토양층의 수분 및 포장용수량, QFFC, QFPAR=매개변수이다.

지표면유출, SRFL은 유출기여면적에 의해 계산된다.

$$SRFL = (SAFRAC + IMPEV) \times (RNET + SMLT) \tag{7}$$

여기서, IMPEV=유역내 불투수층 비율, RNET+SMLT=강우 및 강설에 의한 지표면의 수분 공급량이며, SAFRAC=유출기여부분을 나타낸다.

$$SAFRAC = QFFC^{(1 - (1/QFPAR) \times (SUM - SWATQF) / (SWATQX - SWATQF))} \tag{8}$$

여기서, SUM=QLAYER까지의 전체 수분량, SWATQF, SWATQX=포장용수량 및 포화수분량이다.

한편, 지하수 유출량 (GWFL)과 지하침투량 (SEEP)은 지하수 저류량 (GWAT)을 이용하여 다음과 같이 각각 계산한다.

$$SEEP = GWAT \times GSC \times GSP \tag{9}$$

$$GWFL = GWAT \times GSC \times (1 - GSP) \tag{10}$$

여기서, GSC, GSP=지하수 유출량 및 지하침투량을 결정하는 매개변수이다.

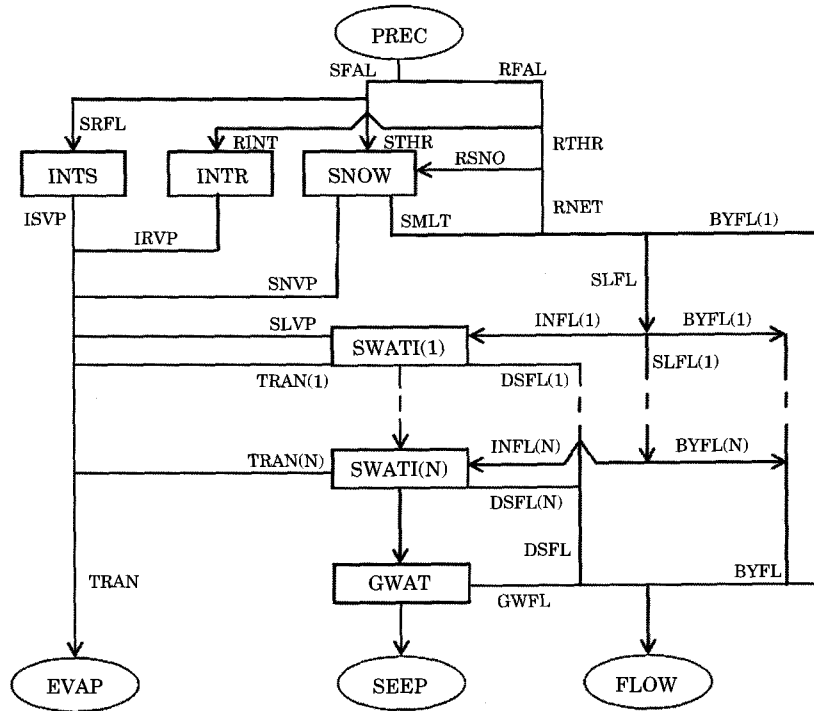


Fig. 2. BROOK90 Model.

결 과

1. 매개변수 보정

BROOK90 모형의 매개변수는 크게 지형 변수, 유출 변수, 식생 변수, 토양 변수 등으로 이루어져 있으며, 이 중에서 지형 변수, 식생 변수, 토양 변수 등은 지형, 식생, 토양 자료 등으로부터 산정할 수 있으며, 유출 변수는 현장에서 계측된 강우-유출량 자료를 이용하여 추정하여야 한다.

이러한 모형의 보정에는 시행착오법(trial-error)에 의한 수동보정(manual calibration)과 최적화 기법을 이용한 자동보정(automatic calibration)으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 수동보정을 통하여 매개변수를 추정하였으며, 실측치와 추정치를 비교하기 위하여 다음과 같이 3개의 통계적 변량을 이용하였다. 유출량 편차(deviation of streamflow:  $D_v$ )는 계산기간 동안의 실측 유출량과 추정 유출량을 비교하는 데 많이 이용되며(ASCE, 1993), 상관계수(correlation coefficient:  $r$ ), 모형 효율(model efficiency:  $E$ )은 유출량의 추정 결과를 비교하기 위하여 이용하였다.

$$D_v(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n S_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (11)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (12)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

매개변수의 초기치는 Federer(1995)에 의해 제시된 값을 이용하였으며, 1994년 12월~1996년 11월(2년)의 일별 강우-유출량 자료를 이용하여 매개변수를 조정하였다. 매개변수의 보정은 먼저 전체 모의기간의 총 유출량이 일치하도록 증발산량을 조정하였다. 초기값에 의하여 추정된 유출량을 실측 유출량과 비교한 결과, BROOK90 모형의 의해 모의된 유출량이 실측 유출량보다 작게 모의되었다. BROOK90 모형의 유출량은 증발산량에 의하여 결정되기 때문에 염면의 기공저항 변수인 GLMAX를 0.48에서 1.50으로 조정하였다. 총 유출량이 잘 모의되도록 GLMAX 변수를 조정한 후에는 지표수 유출성분과 지하수 유출성분을 비교하여 매개변수를 조정하였다. 이를

**Table 2.** Initial and final values of BROOK90 model parameters.

Parameter	Description	Range	Initial	Final
GLMAX	Maximum leaf conductance ( $\text{cm s}^{-1}$ )	0.2~2.0	0.48	1.50
DRAIN	Fraction of drainage from lower soil layer to groundwater	0~1.0	1.0	0.7
INFEXP	Infiltration exponent that determines the distribution of infiltrated water with depth	0~2	1.0	2.0
QFPAR	Fraction of water content between field capacity and saturation at which the quick flow fraction is 1	0.2~5.0	0.3	3.5
QFFC	Quick flow fraction for source area flow	0.02~0.3	0.2	0.3
GSC	Fraction of groundwater storage that is transferred to groundwater flow and deep seepage ( $1 \text{ day}^{-1}$ )	0.005~0.5	0.0	0.05

위하여 PART 프로그램을 이용하여 유출량 중에서 지하수 유출성분을 분리하였다. PART (Rutledge, 1998)는 USGS의 일별 하천유출량 자료로부터 기저유량을 분리하기 위하여 개발된 모형이다. PART의 적용 결과, 실측 유출량 자료의 지하수 유출 성분(baseflow index, BFI)은 59.7%인 반면에 모의 유출량의 BFI는 15.5%로 나타났다. 따라서 총 유출량 중에서 지표면 유출량을 감소시키기 위하여 INFEXP와 IDEPTH 변수를 각각 조정하였다. IDEPTH는 토양수분이 저류되는 토층의 깊이를 나타내며, INFEXP는 IDEPTH내에서 토양수분 분포를 나타내는 변수이다. 최종적으로 QDEPTH와 QFFC의 조정을 통하여 지표수 유출성분을 감소시켰으며, 반대로 GSC를 증가시켜 지하수 유출성분을 증가시켰다.

Table 2는 북문골 유역에 대하여 BROOK90 모형의 매개변수 보정 결과를 보여주고 있다.

## 2. 유출량 추정

Table 2에 정의된 매개변수를 이용하여 북문골 산림유역에 대한 일 유출량을 추정된 결과는 Table 3과 같다. 수문모형의 적용에 있어서 가장 중요한 문제 중의 하나가 수문모형의 적용가능성을 평가하는 것이다. 일반적으로 모형의 평가에 많이 이용되는 방법은 실측치와 추정된 모의치를 통계적인 변수 등을 이용하여 비교하는 것이다. Donigian 등(1984)은 HSPF 모형의 평가를 위하여 유출량의 편차와 상관계수 등을 이용한 모형의 평가기준을 제시한 바 있으나, 이러한 평가기준은 통계적인 방법, 자료의 종류, 모의 기간, 계산시간 간격 등에 따라 다르기 때문에 일괄적인 기준을 적용하기는 매우 어렵다.

1994년 12월부터 1996년 11월까지의 보정기간에 대하여 현장에서 계측된 일 평균 유출량은  $196.8 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 이었으며, BROOK90 모형에 의해 추정된 일 평균 유출량은  $200.2 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 로서, 실측치와 모의치의 유출량 편차( $D_v$ )

**Table 3.** Results of runoff predictions on the Bukmoongol watershed.

Statistical criteria	Calibration	Validation
Daily basis		
Observed mean streamflow, $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$	196.8	427.6
Simulated mean streamflow, $\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$	200.2	407.9
Deviation (%)	-1.7	4.6
Correlation coefficient	0.625	0.787
Model efficiency	0.534	0.617
Monthly basis		
Correlation coefficient	0.922	0.941
Model efficiency	0.847	0.871

는 -1.7%로 나타났다. 모형의 검증기간에 대한 실측 및 모의 유출량은 각각  $427.6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 과  $407.9 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 이었으며,  $D_v$ 는 4.6%이었다.

유출량의 상관계수( $r$ )와 모형효율( $E$ )을 구한 결과는 Table 3과 같다. 모형의 보정기간에 대한 일 유출량의 상관계수와 모형효율은 각각 0.625와 0.534로 나타났으며, 검증기간에 대해서는 그 값이 각각 0.787과 0.617이었다. Fig. 3은 모형의 보정 및 검증기간에 대한 일별 강수량, 증발산량 및 유출량을 비교하여 표시한 것이다. BROOK90 모형의 일 유출량 추정 결과를 살펴보면 Fig. 3에서의 같이 여름철의 홍수유출 성분을 작게 모의하였으나 대체적으로 수문곡선을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

유출량의 월별 변동에 대한 추정 결과를 평가하는 상관계수와 모형효율을 비교한 결과, 높은 상관성을 보였으며 모형의 검증기간에 대한 결과가 보정기간에 대한 결과보다 좋은 것으로 나타났다. 월별 유출량의 상관계수는 보정기간과 검증기간에 대하여 각각 0.922와 0.941로 매우 높게 나타났으며, 모형효율의 경우도 그 값이 0.847과 0.871로 나타났다. Fig. 4는 모형의 보정기간과 검증기간

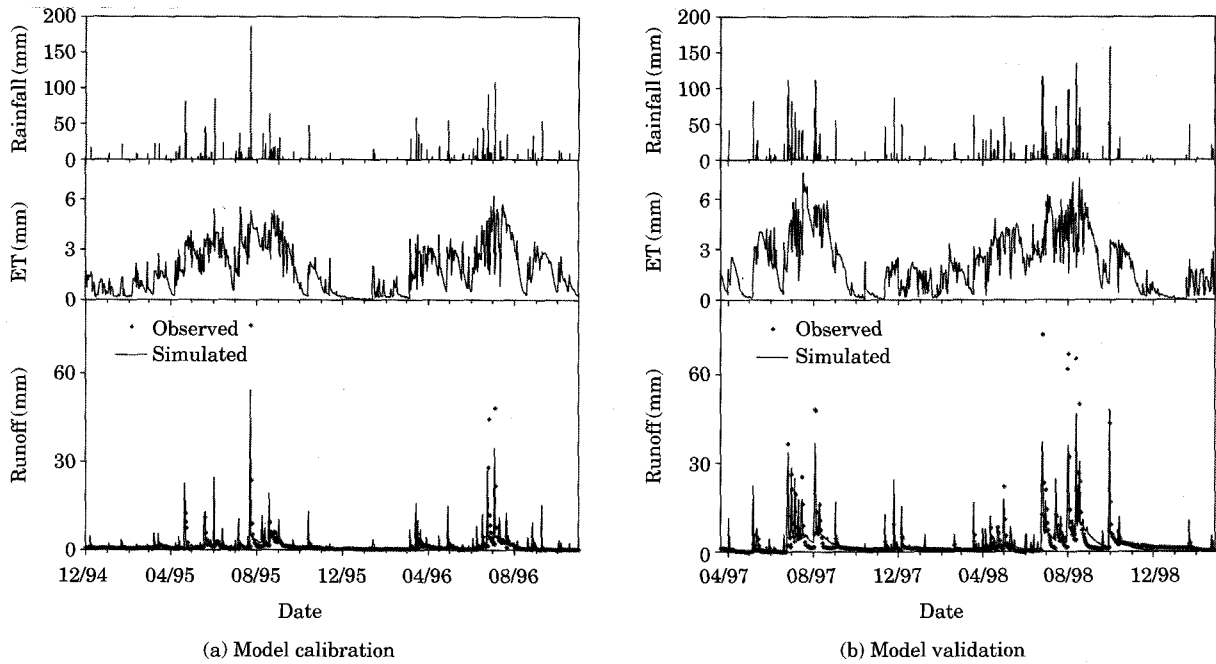


Fig. 3. Time series of rainfall, evapotranspiration, and runoff on the Bukmoongol watershed.

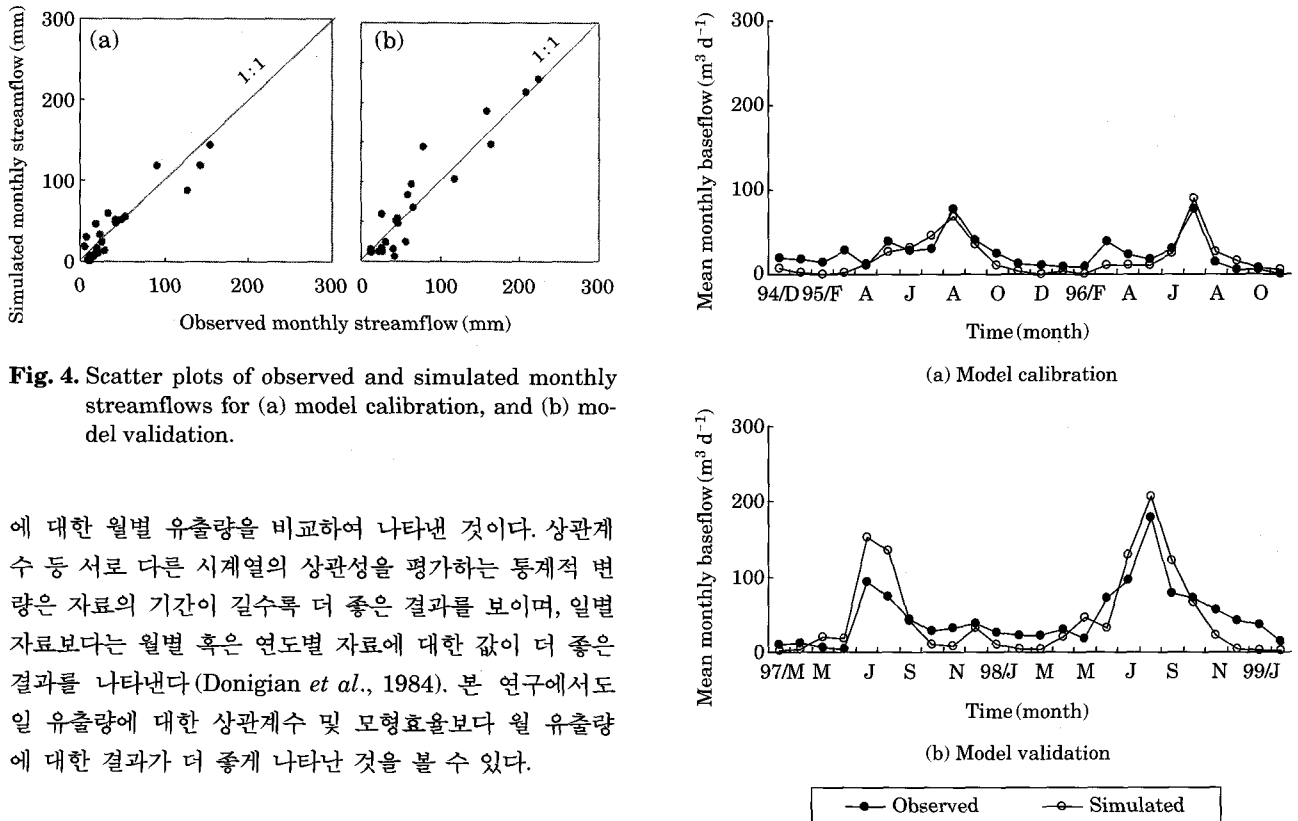


Fig. 4. Scatter plots of observed and simulated monthly streamflows for (a) model calibration, and (b) model validation.

에 대한 월별 유출량을 비교하여 나타낸 것이다. 상관계수 등 서로 다른 시계열의 상관성을 평가하는 통계적 변량은 자료의 기간이 길수록 더 좋은 결과를 보이며, 일별 자료보다는 월별 혹은 연도별 자료에 대한 값이 더 좋은 결과를 나타낸다 (Donigian *et al.*, 1984). 본 연구에서도 일 유출량에 대한 상관계수 및 모형효율보다 월 유출량에 대한 결과가 더 좋게 나타난 것을 볼 수 있다.

3. 기저유출량 비교

Table 4는 실측 유출량과 추정 유출량을 계절별로 구

Fig. 5. Observed and simulated mean monthly baseflow on the Bukmoongol watershed.

**Table 4.** Results of runoff simulation for the Bukmoongol watershed.

Period	Discharge ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )			Baseflow ( $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ )		
	Observed	Simulated	Dv (%)	Observed	Simulated	Dv (%)
<b>Calibration</b>						
Winter (Dec. Jan. ~ Feb.)	69.4	28.1	59.5	66.96	10.36	84.5
Spring (Mar. ~ May)	175.0	179.2	-2.4	126.14	56.79	55.0
Summer (Jun. ~ Aug.)	462.4	467.2	-1.0	207.22	233.19	-12.5
Fall (Sep. ~ Nov.)	77.6	122.8	-58.3	71.90	64.10	10.8
<b>Validation</b>						
Winter (Dec. Jan. ~ Feb.)	158.5	89.6	43.5	147.02	44.94	69.4
Spring (Mar. ~ May)	166.1	212.8	-28.1	79.14	76.09	3.8
Summer (Jun. ~ Aug.)	1,076.6	1,002.7	6.9	421.55	547.81	-29.9
Fall (Sep. ~ Nov.)	304.3	321.0	-5.5	252.84	221.45	12.4

분하여 비교한 것이다. 모형의 보정기간에 대하여 겨울(12월, 1~2월), 봄(3~5월), 여름(6~8월), 가을(9~11월)의 계절별 평균 유출량을 비교한 결과,  $D_v$ 는 겨울(59.5%)과 가을(-58.3%)에 큰 차이를 보였으며, 봄과 여름에는 각각 -2.4%, -1.0%로 실측 유출량과 모의 유출량이 매우 유사하게 나타났다.

한편, PART 프로그램을 이용하여 기저유량을 분리하여 비교하였다. 모형의 보정기간에 발생한 일 평균 기저유량은  $118.46 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 인 반면에 BROOK90 모형에 의해 추정된 일 평균 기저유량은  $91.62 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 로 나타났다. 계절별로 기저유량을 비교한 결과,  $D_v$ 는 -12.5%부터 84.5%의 범위를 보였다. Fig. 5(a)는 모형의 보정기간에 대한 월별 기저유량의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에 의하면 1994년 12월부터 1995년 3월까지의 기간과 1996년 3월을 제외하고는 실측 유출량에 의해 발생한 기저유량과 BROOK90 모형에 의해 추정된 기저유량이 대체적으로 일치하고 있음을 알 수 있다.

모형의 검증기간에 발생한 기저유량은 일 평균  $225.49 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 이었으며, BROOK90 모형에 의해 추정된 기저유량은 일 평균  $223.55 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. Fig. 5(b)는 모형의 검증기간에 대한 기저유량의 추정 결과를 보여주고 있다. Fig. 5(b)에 의하면 전체적으로 실측 유출량에 의한 기저유량과 모의 유출량에 의한 기저유량이 대체적으로 일치하고 있음을 보여주고 있으나 1997년 7~8월, 1998년 11~12월에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

## 고 찰

본 연구에서는 산림소유역의 유출량을 추정하기 위하

여 결정론적, 총괄형 수문모형인 BROOK90 모형을 선정하였다. 또한, BROOK90 모형의 적용성 평가를 위하여 산림소유역인 북문골 유역을 대상유역으로 선정하였으며, 현장에서 측정된 강우-유출량 자료를 이용하여 모형의 보정과 검증을 실시하였다.

모형의 보정은 1994년 12월부터 1996년 11월까지의 자료를 이용하였으며, 1996년 3월부터 24개월동안 측정된 자료를 이용하여 모형의 검증을 실시하였다. 모형의 보정은 총 유출량, 계절별 유출량, 기저유량 등을 잘 모의하도록 매개변수를 조정하였으며, 일별 및 월별 유출량에 대한 통계적 변량을 이용하여 최종적으로 모형의 매개변수를 추정하였다.

모형의 적용 결과, 실측 유출량과 모의 유출량의 편차( $D_v$ )는 보정기간에 대하여 -1.7%이었으며, 검증기간에 대한  $D_v$ 는 4.6%로 나타났다. 실측 유출량과 모의 유출량으로부터 계산한 기저유량은 보정기간에 대하여 각각  $118.46 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 과  $91.62 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ 이었으며, 검증기간에 대한 기저유량의  $D_v$ 는 4.6%이었다.

모형의 보정기간에 대한 일별 유출량의 상관계수는 0.625이었으며, 검증기간에 대한 상관계수는 0.787로 나타났다. 월별 유출량의 실측치와 추정치를 비교한 결과, 모형의 보정기간에 대한 상관계수와 모형효율은 각각 0.922, 0.847이었으며, 검증기간에 대한 값은 각각 0.941, 0.871로 나타났다. 전체적으로 월별 유출량의 추정 결과가 일별 유출량에 대한 비교 결과보다 좋게 나타났으며, 이는 다른 연구자들의 경우와 일치하였다.

우리나라의 산림소유역에 대한 적용 결과, BROOK90 모형은 총괄형 수문모형임에도 불구하고 모형의 매개변수가 많아 모형의 보정에 많은 노력이 요구되고 있으나, 산지사면의 유출과정을 포함하고 있으며 토양층과 수목에 의한 증발산 과정을 적절하게 나타내고 있었다. 그러

나 BROOK90 모형의 적용을 위해서는 우리나라의 토양 조건과 식생에 따른 매개변수의 결정이 우선적으로 이루어져야 할 것이다.

## 적 요

산림 수자원의 효율적인 관리를 위해서는 산림유역에서 발생하고 있는 수문현상에 대한 정확한 정보가 필요하다. 본 연구에서는 수문모형을 이용하여 산림유역의 식생 및 지형에 따른 수문반응을 해석하였다. 이를 위하여 결정론적, 총괄형 모형인 BROOK90 모형을 선정하였으며, 산림 소유역인 북문골 유역(15 ha)에서 측정된 일별 하천유량 자료를 이용하여 모형의 매개변수 보정과 검증을 실시하였다. 북문골 소유역의 실측 유출량과 BROOK90 모형에 의해 추정된 일별 평균 유출량의 편차는 모형의 보정기간에 대하여 -1.7%이었으며, 검증기간에 대해서는 4.6%로 나타났다. 한편, 월 평균 유출량의 상관계수와 모형효율을 이용하여 모형의 적용성을 분석하였다. 보정기간에 대한 상관계수와 모형효율은 각각 0.922와 0.847이었으며, 검증기간에 대해서는 그 값이 각각 0.941, 0.871로 나타났다. 북문골 소유역의 일별 유출량 자료를 이용하여 BROOK90 모형의 적용한 결과, BROOK90 모형은 우리나라와 같이 사면의 경사가 급하고 토층이 얇은 산림유역의 유출량 추정에 잘 활용될 수 있으며, 별채나 기후변화 등에 따른 산림유역의 수문반응을 평가하는 도구로 활용할 수 있을 것으로 보인다.

## 사 사

본 연구는 서울대학교 발전기금의 2004년 신입교수 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

## 인 용 문 헌

- 우보명, 김재수, 이현호, 최형태. 1998. 산림소유역의 장단기 유출해석을 위한 강우-유출모형의 개발. *한국임학회지* 87(1): 11-19.
- 임상준. 2000. 농업유역의 논 관개회귀수량 추정 모형의 개발, 서울대학교 박사학위논문. p. 120.
- 최형태. 2001. 분포형 수문모형 TOPMODEL을 이용한 산림유역 강우-유출모형의 개발, 서울대학교 박사학위논문. p. 183.
- Armbruster, M., J. Seegert and K.-H. Feger. 2004. Effects of changes in tree species composition on water flow dynamics-Model applications and their limitations. *Plant and Soil* 264: 13-24.
- ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *J. Irrig. Drain. Eng.* 119(3): 429-442.
- Beven, K.J., R. Lamb, P. Quinn, R. Romanowicz and J. Freer. 1995. TOPMODEL. p. 627-668. In *Computer models of watershed hydrology* (Singh, V.P. ed.). Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO.
- Canfield, H.E. and V.L. Lopes. 2000. Simulating soil moisture changes in a semiarid rangeland watershed with a process-based water-balance model. *USDA Forest Service Proceeding RMRS-P-13*, pp. 316-319.
- Dam, O. 2001. Forest filled with gaps: Effects of gap size on water and nutrient cycling in tropical rain forest. *Tropenbos-Guyana Series 10*. Georgetown. Guyana.
- Donigian, A.S. Jr., J.C. Imhoff, B.R. Bicknell and J.L. Kittle. 1984. Application guide for Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF), EPA-600/3-84-065, Environmental Research laboratory, Athens, GA.
- Federer, C.A. and C. Vorosmarty. 2003. Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J. Hydrometeo.* 4(6): 1276-1290.
- Federer, C.A. 1995. BROOK 90: A simulation model for evaporation, soil water, and streamflow. Computer freeware and documentation. USDA Forest Service. New Hampshire.
- Hatton, T.J., J. Walker, W. Dawes and F.X. Dunin. 1992. Simulation of hydroecological responses to elevated CO<sub>2</sub> at the catchment scale. *Aust. J. Bot.* 40: 679-696.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Running, S.W. and J.C. Coughlan. 1988. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecol. Model.* 42: 125-154.
- Rutledge, A.T. 1998. Computer programs for describing the recession of ground-water discharge and for estimating mean ground-water recharge and discharge from streamflow data-update: USGS Water-Resources Investigations Report 98-4148. p. 43.
- Watson, F.G.R. 1999. Large scale, long term, physically based modelling of the effects of land cover change on forest water yield, PhD dissertation of the Univ. of Melbourne, Australia, p. 443.

(Manuscript received 10 November 2006,  
Revision accepted 12 March 2007)