

## 물리적·개념적 연속 유출모형에 의한 유출해석 Runoff Analysis on the Physically-Based Conceptual Time-Continuous Runoff Model

배 덕 호\* · 조 원 철\*\*  
Bae, Deg Hyo · Cho, Won Cheol

---

### Abstract

The subjective research attempts to apply a rainfall-runoff model capable of considering time-variation of soil water contents which are highly correlated to the river flows on the Pyungchang river basin and to evaluate its performance for flow forecasting. The model used in this study is a physically-based conceptual time-continuous model, which is composed of the Sacramento soil moisture accounting model and the nonlinear multiple conceptual reservoirs model. The daily precipitation and evaporation data for 7 years and for 3 years were used for the parameter estimation and the model verification, respectively. As a result, the flows including a significant flood event were well simulated, and the cross-correlation coefficient between observed flows and computed flows for the verification periods was 0.87, but in general computed flows were underestimated for the low-flow periods. Also, the effects of precipitation and soil water content to the river flows were analysed for the flood and the drought.

---

### 요 지

본 연구의 목적은 하천유량에 결정적 영향을 미치는 토양수분 상태의 시간적 변화를 고려할 수 있는 강우-유출 모형을 평창강 유역에 적용하여 홍수예측 모형으로서의 가능성을 검증하는데 있다. 사용된 모형은 Sacramento 토양수분 모형과 비선형 다중저수지 형태의 유역홍수 추적 모형으로 구성된 물리적 개념에 근거를 둔 연속 모형이다. 모형의 매개변수 추정 및 모형 검증을 위해서 각각 7년, 3년간의 일 강수량 및 증발산 자료를 이용하였다. 모형의 적용 결과, 저유량일 때에는 계산유량이 관측유량보다 다소 적게 계산되었지만, 홍수시를 포함하여 전반적으로 만족할 만한 유출계산(상관계수 0.87)을 할 수 있었다. 또한, 홍수와 가뭄과 같은 극한사상이 발생하였을 때의 강수와 토양습윤 상태가 유출에 미치는 영향을 해석하였다.

---

\* 연세대학교 산업기술연구소 선임연구원

\*\* 연세대학교 토목공학과 교수

## 1. 서 론

일반적으로 강우-유출 모형의 개발 목적은 매우 다양하지만, 적어도 다음과 같은 두 가지 관점에서 그 중요성을 갖는다. 하나는 여러가지 수공학적 요소들의 영향을 받는 유출현상을 수식화하여 해석하므로써 유출현상을 보다 잘 이해할 수 있다는 점과, 또 다른 하나는 강우-유출 모형을 이용하여 과거의 유출현상을 보다 잘 재현할 수 있다는 것은 미래에 나타날 유출현상을 보다 잘 예측할 수 있는 가능성이 높아진다고 볼 수 있기 때문에 여러 이수 및 치수 목적으로 이용될 수 있다는 점이다.

현재 국내에서 활용되고 있는 강우-유출 모형의 종류를 조사하기 위해서 한국건설기술 연구원에서 수행한 학계, 관계 및 용역업체를 대상으로 한 설문조사(이홍래와 김형섭, 1993)에 의하면 합리식, 단위도, 가지야마 홍수량 산정공식, TANK 모형, ILLUDAS, RRL, ILSD, HEC-1, HEC-2, SSARR 모형, SWM, SWMM, USGS, DAMBRK, 저류함수법, CLARK의 유출해석 모형 등이 이용되고 있는 것으로 나타났다. 이들 중 홍수사상 해석을 위해서는 저류함수 모형과 HEC-1 모형이 주로 사용되고 있으며, 국내 5대강 유역을 중심으로 한 홍수통제소에서는 저류함수 모형을 기본적으로 활용하고 있다. 이러한 저류함수 모형은 HEC-1 모형이나 SSARR 모형 등이 적용계수가 복잡한데 비하여 유출개념이나 그 식이 간편하다는 점에서 널리 이용되고 있다. 그러나, 이와 같은 모형은 단일 홍수사상만을 해석할 수 있는 제한 사항이 있기 때문에 대유역의 홍수해석에는 매개변수나 초기치 산정 등 여러 문제점을 가지고 있다. 이와 같이 단순한 경험공식으로 부터 유출과정별로 해석을 실시하는 복잡한 모형에 이르기까지 수많은 강우-유출 모형들은 모형의 구성 및 형태, 적용범위, 적용목적 등을 고려할 때 서로 장단점이 있다. 지금도 유출현상을 보다 잘 모의할 수 있도록 새로운 모형을 개발하고, 기존의 모형을 개선·발전시키고 있다.

본 연구에서는 단시간의 홍수해석 뿐만 아니라 장기간의 유출수문곡선을 계산할 수 있는 모형을

국내에 적용·발전시켜, 국내에서의 이용성 여부를 검토하고자 한다. 또한, 홍수나 가뭄과 같은 극한사상(extreme event)이 발생하였을 때의 강수와 토양습윤 상태가 하천유량에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

## 2. 모 형

본 연구에 사용된 모형은 전 세계적으로 유출에 영향을 미치는 토양습윤(지하수) 상태를 가장 잘 모의할 수 있는 모형의 하나로 알려진 Sacramento 모형과 유출의 비선형성을 고려해 주는 개념적 다중저수지 형태의 유역홍수추적 모형으로 구성되어 있다.

Sacramento 모형은 미국 국립기상청(NWS)의 홍수예측 모형의 여러 토양수분 모형 성분중의 하나로 사용되고 있다. 이 모형이 개발되기 전에는 미국의 각 홍수통제소에서는 각 지역마다 수문학적, 기상학적 조건이 다르기 때문에 서로 다른 홍수예보 모형이 사용되었다. 이에 따른 여러 문제점을 극복하기 위해서 국립기상청에서는 미국 전역에서 사용할 수 있는 통합적인 모형을 개발하고자 노력하였는데 그 산물이 Sacramento 모형이라 할 수 있다. 이 모형은 1972년 Burnash 등(1973)과 Peck(1976)에 의해서 개발되었고, Armstrong(1978)은 이 모형의 각 요소들에 대한 물리적 해석을 하였다. 그 후 Kitanidis 와 Bras(1980)는 상태-공간 형태의 비선형 미분방정식의 형태로 발전시켰다. 본 연구에서는 Georgakakos(1986)가 원래의 모형을 개선·발전시킨 모형을 사용하였으며, 이 모형은 현재 미국의 공식적인 홍수예보 모형으로서의 타당성을 검토하기 위해서 몇몇 홍수통제소에서 시험중에 있다(Georgakakos 등, 1995). 그림 1은 이 모형의 개념도를 나타낸다. 이 모형의 구성요소로는 하천유량에 영향을 미치는 지하수의 영역을 상층부(Upper Zone)와 하층부(Lower Zone)의 2개의 개념적인 저수지로 나누고 각각의 층에는 장력수(tension water)와 자유수(free water)의 영역으로 구성되어 있다고 생각한다. 상층부는 지표에 인접한 토양층 부분과 차단저류고(interception storage)를 나타내며, 주로

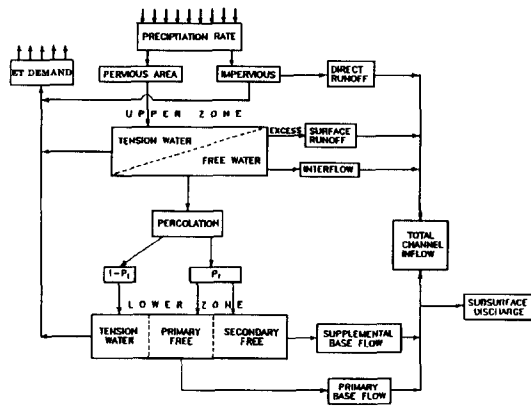


그림 1. Sacramento 모형의 개념도

증발산, 직접 유출, 지표면 유출, 중간 유출, 및 침투수와 관련이 있다. 이에 비해 하층부는 하천유량의 기저유출과 관련이 있는 지하수 저장고로 간주된다. 각각의 층을 장력수와 자유수 영역으로 나누는 이유는 토양입자 사이의 공극을 통한 지하수 흐름의 물리적 특성을 수식화하기 위한 것으로서, 장력수는 토양입자 주위에 흡착되어 있는 토양수분을 나타내며 자유수는 공극을 통해서 흐르는 지하수를 말한다. 이에 따라, 장력수는 단지 증발산에 의해

서만 없어질 수 있으며, 자유수는 상층부에서 하층부로 침투수, 하천으로의 유출, 하천으로 유입되지 않는 지하수 및 증발산에 의해서 변할 수 있는 것으로 간주된다.

모형의 입력자료로는 유역평균강수량( $u_p$ )과 증발산량( $u_e$ )이 요구되며, 하천 유입량( $u_c$ )이 모형의 출력치가 된다. 모형의 상태변수로는 상층부의 장력수량( $x_1$ )과 자유수량( $x_2$ ), 하층부의 장력수량( $x_3$ ), 주요 자유수량( $x_4$ ), 보조 자유수량( $x_5$ ) 및 강수로 인한 추가적인 불투수 지역의 저류고( $x_6$ ) 이고 모형에 포함되어 있는 14개의 매개변수에 대한 설명은 표 1과 같다.

이 모형은 6개의 미분 방정식 시스템으로 구성되어 있으며 기본개념은 다음과 같다. 일단 지표로부터 강수량이 유입되면 상층부의 장력수 영역으로 들어오게 되며, 상층부의 장력수량의 변화는 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{dx_1}{dt} = \left[ 1 - \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right)^{m_1} \right] u_p - u_e \left( \frac{x_1}{x_1^0} \right) \quad (1)$$

계속된 유입 강수량이 상층부의 한계장력수

표 1. 평창강 유역 (방림)에 대한 Sacramento모형의 매개변수 산정치

기 호	설 명	추 정 값
$x_1^0$	상층부의 한계장력수(mm)	163.09
$x_2^0$	상층부의 한계자유수(mm)	11.65
$x_3^0$	하층부의 한계장력수(mm)	113.28
$x_4^0$	하층부의 한계 주자유수(mm)	87.38
$x_5^0$	하층부의 한계 보조장력수(mm)	10.61
$d_u$	상층부의 중간유출계수( $day^{-1}$ )	0.20
$d'$	하층부의 주자유수 유출계수( $day^{-1}$ )	0.04
$d''$	하층부의 보조자유수 유출계수( $day^{-1}$ )	0.08
$\epsilon$	침투함수 계수	93.01
$\theta$	침투함수 지수	1.70
$P_f$	침투수의 자유수 할당율	0.23
$\mu$	비 하천유입 기저유출율	0.60
$\beta_1$	한계장력수 상태의 불투수 면적비	0.20
$\beta_2$	불투수 면적비	0.03

(upper zone tension water capacity)  $\frac{x_1}{x_1^0}$  보다 많게 되면, 나머지 강수량은 자유수로 저장되는 것으로 간주하며, 상층부 자유수의 변화량은 다음과 같다.

$$\frac{dx_2}{dt} = \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right) \left[1 - \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right)^{m_2}\right] u_p - d_u x_2 - C_1(1 + \varepsilon y) \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right) \quad (2a)$$

여기서,

$$C_1 = d' x_4^0 + d'' x_5^0 \quad (2b)$$

$$y = 1 - \frac{x_3 + x_4 + x_5}{x_3^0 + x_4^0 + x_5^0} \quad (2c)$$

여기서 식 (2b), (2c)는 모형의 방정식을 간략하게 하기 위해서 사용한 보조변수들이다.  $C_1$ 은 상층부와 하층부가 가득 찼을 때 최소침투량을 나타낸다. 식 (2c)의 우변 두번째 항은 하층부의 토양 수분에 대한 한계토양수분의 비율을 나타내므로  $y$ 는 하층부 토양수의 결측율(deficiency ratio)이 된다. 따라서 식 (2a)의 우변 세번째 항은 상층부에서 하층부로의 침투량, 두번째 항은 중간 유출량을 의미한다.

한편, 상층부로부터 하층부에 유입된 토양수분은 장력수 영역과 자유수 영역으로 나누어진다. 이는 특정지역의 토양의 특성에 따라 다르며 이를 고려하는 매개변수는  $P_t$ 이다. 하층부의 장력수, 주요 자유수, 보조 자유수의 시간적 변화는 각각 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{dx_3}{dt} = C_1(1 + \varepsilon y) \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right) (1 - P_t) \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0}\right)^{m_3}\right] - u_c \left(1 - \frac{x_1}{x_1^0}\right) \left(\frac{x_3}{x_1^0 + x_3^0}\right) \quad (3)$$

$$\frac{dx_4}{dt} = -d' x_4 + C_1(1 + \varepsilon y) \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right) \left(1 - (1 - P_t) \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0}\right)^{m_3}\right]\right) \left(\frac{d' x_4^0}{C_1} \frac{x_5}{x_5^0} - 1\right) \left(\frac{x_4}{x_4^0}\right) + 1 \quad (4)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = -d'' x_5 + C_1(1 + \varepsilon y) \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right) \left(1 - (1 - P_t) \left[1 - \left(\frac{x_3}{x_3^0}\right)^{m_3}\right]\right) \left(1 - \frac{d' x_4^0}{C_1} \frac{x_5}{x_5^0}\right) \left(\frac{x_4}{x_4^0}\right) \quad (5)$$

또한, 홍수시 토양이 포화된 지역의 시간적인 변화를 고려하기 위해서 추가적인 비침투지역의 저유고를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\frac{dx_6}{dt} = \left[1 - \left(\frac{x_6}{x_3^0}\right)^2\right] \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)^{m_1} \left(1 - \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right)^{m_2}\right) u_p - u_c \left(1 - \frac{x_1}{x_1^0}\right) \left(\frac{x_6}{x_1^0 + x_3^0}\right) \quad (6)$$

그림 1에서와 같이 하천으로의 총유입량에 해당하는 이 모형의 출력 요소 ( $u_c$ )는 불투수지역에서의 직접유출량, 상층부에서의 지표유출과 중간유출, 하층부에서의 기저유출의 요소들로 구성되어 있으며, 아래에 설명할 유역홍수추적 모형의 입력치가 된다.

$$u_c = u_2 \beta_2 + \left(\frac{x_6}{x_3^0}\right)^2 u_p \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)^{m_1} \beta_1 + \left[1 - \left(\frac{x_6}{x_3^0}\right)^2\right] \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right)^{m_2} \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)^{m_1} u_p \beta_1 + u_p \left(\frac{x_1}{x_1^0}\right)^{m_1} \left(\frac{x_2}{x_2^0}\right)^{m_2} (1 - \beta_1 - \beta_2) + (d_u x_2 + \frac{d' x_4 + d'' x_5}{1 + \mu})(1 - \beta_1 - \beta_2) \quad (7)$$

이와같이 이 모형은 하천유량에 결정적 영향을

미치는 토양수분의 시간적 변화를 고려할 수 있는 개념적·물리적인 저수지 형태의 지하수 모형으로서 토양수분의 초기 조건으로부터 연속적인 시물레이션이 가능하다.

본 연구에서 사용된 유역홍수추적 모형은 Georgakakos와 Bras(1982)가 개발한 개념적인 비선형 저수지 모형으로서 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{ds_i(t)}{dt} = u_c(t) - \alpha s_i^m(t) \quad (8a)$$

$$\frac{ds_i(t)}{dt} = \alpha s_{i-1}^m - \alpha s_i^m(t) ; i=2, \dots, n \quad (8b)$$

여기서  $s_i(t)$ 는  $i$  번째 저수지에 시간  $t$ 에서의 저류된 유량을 나타내고,  $u_c(t)$ 는 첫번째 저수지로의 총 유입량을 나타내며 Sacramento 모형의 출력치이다.  $\alpha$  와  $m$ 은 각각의 저수지에서의 저유량( $s$ )와 유출량( $Q$ )의 비선형적 관계를 나타내는 모형의 매개변수들로서 다음 식으로 표현된다.

$$Q_i(t) = \alpha s_i^m(t) ; i=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

이 식은 kinematic 하도홍수추적 모형의 특성인 수위와 유량사이의 일가함수의 관계를 나타내므로 비교적 하상경사가 급한 유역에 적합한 방법으로 알려져 있다. 어떤 유역의 개념적인 저수지의 수  $n$ 은 그 유역의 평균 반응시간으로부터 결정된다(Georgakakos, 1987). 이 모형의 특징은 모형의 방정식이 비교적 단순하다는 점과 유량의 비선형성을 고려할 수 있는 장점이 있다.

### 3. 모형적용 및 해석

연구 대상지역은 그림 2와 같이 남한강의 지류인 방림을 유역출구로 하는 평창강 IHP유역이다. 이 지역은 그 동안 국제수문개발계획의 제 2단계 및 제 3단계 사업의 일환으로 기본적인 수문량을 측정·분석하여 왔다. 유역면적은 528km<sup>2</sup>이고 유역의 대부분은 침엽수와 낙엽수의 산악지형으로 태백

산맥이 그 주류를 이루고 있으며 일부는 전답으로 이용되고 있다. 또한, 북으로부터 남으로 상당한 경사를 이루고 있어 유역반응시간이 짧다. 대부분 지역의 해발표고는 400~1600m의 고지대에 속한다.

본 유역이 지질조건은 정선대향사의 서일부에 해당하는 지역으로 기저변성암층과 퇴적암류인 홍점층, 녹암층, 상부대석회암층, 기저변성암층 등으로 형성되어 있다. 유역의 좌안지대에 분포하고 있는 상부대석회암층에는 상당한 양의 지하수가 형성되어 있는 것으로 알려지고 있다. 토양조건은 표토가 비교적 얇고 그 지질은 다공성으로 상류하천의 물이 지하로 침투하였다가 하류하천에서 다시 나타나는 특이한 지역이다(윤석영 등, 1991).

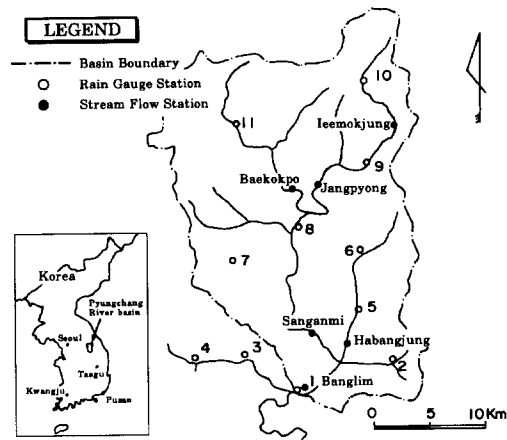


그림 2. 평창강 IHP 유역도

본 연구대상 지역에는 IHP사업의 일환으로 11개의 강수관측소와 6개의 수위관측소가 설치되어 1981년 10월부터 운영되고 있다. 건설부에서 운영하는 강수관측소에서는 매년 4월에서 10월까지 자기기록기와 보통우량계를 이용하여 강수량을 측정하고, 동절기인 10월부터 다음해 3월까지의 보통우량계에 의해 일강수량만을 측정하고 있다. 유역내에 기상청 산하의 기상관측소는 설치되어 있지 않지만, 인근 대관령 측후소에서 관측되는 여러 기본적인 기상자료를 이용할 수 있다. 본 연구에서 사용하는 모형을 적용할 수 있는 유역면적은 2,

500km<sup>2</sup> 정도이기 때문에 방류를 유출출구로 정하였다.

본 연구에서는 1983년 1월부터 10년간의 일자료를 이용하였다. 사용하는 모형의 입력치로는 Sacramento 모형을 위한 유역평균강수량(MAP)과 증발산 자료가 필요하며, 모형검증을 하기 위해서 관측유량이 필요하다. 유역평균강수량은 유역내외에 존재하는 11개의 점강수 관측지점으로 부터 관측된 강수량을 산술평균하여 구하였으며 증발산 자료는 대관령 축후소의 자료를 이용하였다. 유역출구인 방림에서의 유량은 관측된 수위자료로 부터 수위-유량관계곡선을 이용하여 환산하였다. IHP 사업의 일환으로 매년 홍수기에 주로 부자와 유속계를 이용한 유량측정 성과에 의해 1983년부터 현재까지 매년 누적된 유량과 수위로 작성된 수위-유량 관계곡선을 제시하고 있다. 윤석영 등(1991)은 갈수기의 수위-유량 관계곡선을 보완하기 위해서 유량을 실측하여 보완된 관계곡선식을 제시하였으며, 본 연구에서도 이 보완된 관계식을 이용하였다.

개념적인 모형을 적용하기 위해서는 먼저 모형에 포함된 매개변수들을 과거에 관측된 기상학적, 수문학적 자료들로부터 추정하여야 한다. 본 연구에 사용된 모형에 포함된 모형의 매개변수로는 Sacramento 모형에 14개, 개념적인 저수지 유역홍수추적 모형에 2개가 포함되어 있다. 일반적으로 모형의 매개변수를 추정하는 방법에는 자동추정법(automatic estimation)과 수동보정법(manual estimation)이 이용되고 있다. 자동추정법은 최적화 기법을 사용하여 수렴 한계치의 변화에 따라 매개변수를 추정하는 방법으로서 비교적 빠르다는 장점이 있지만, 자동추정법의 목적함수에 따라 추적하기 때문에 수학적으로는 적합한 결과를 얻을 수 있으나 물리적 의미를 갖지 못하는 최적치로 수렴하는 경우가 있다. 특히 본 연구에서 사용한 모형과 같은 다수의 매개변수를 갖는 비선형 미분방정식으로 구성된 시스템에서는 매개변수들의 초기치 선정에 따라 다른 최적치(local optimum)로 수렴을 하기 때문에 다른 초기치로 여러번 추정을 할 필요가 있다. 수동보정법은 임의의 매개변수 값(nominal value)에 대한 모형의 모의 결과를 관측

치와 비교하여 사용자의 주관에 따라 매개변수를 조정하는 방법이다. 이는 매개변수를 추정하고자 하는 모형에 일련의 매개변수를 포함하고 있는 경우 하나의 매개변수에 대해서 교란(perturbation) 시키고 나머지 매개변수들은 초기 매개변수 값으로 고정시켜 두고 추정하기 때문에 매개변수들 사이의 상호 연관성은 추정할 수 없으며, 사용자의 모형 및 유역 특성을 완전히 이해할 수 있는 경험이 필요하다. 또한 이 방법은 물리적 의미를 지니고 있는 매개변수의 추정이 쉽다는 장점 이외에도 비선형 모형 시스템에 의한 최대유량의 크기와 발생시간 계산 등과 같은 수문학적 특성을 고려하고자 할 때에는 유일한 방법으로 알려져 있다. 본 연구에서는 모형의 매개변수 추정을 위해서 수동보정법을 사용하였으며 추정된 값은 표 1과 같다.

그림 3은 방림을 유역출구로 하는 평창강 유역에서의 본 연구에서 사용하는 모형의 적용성을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 10년의 일자료중에서 1983년 1월 1일부터 1989년 12월 31까지의 7년간은 모형의 매개변수 산정에 이용하였으며, 1990년 1월 1일부터 1992년 12월 31까지의 3년간 자료는 모형의 검증에 이용하였다. 그림 3(a)는 유역 내외에 존재하는 11개 강수 관측지점으로 부터 산술평균법에 의해 계산된 유역평균강수량을 나타낸다. 어떤 특정한 일자에 강수량 자료의 결측치가 생긴 관측지점은 MAP 계산시 제외되었다. 그림 3(b)는 강수량이 하천유량에 미치는 영향을 직접 비교하기 위해서 방림에서 관측된 유량 Q(cms 단위)을 다음의 관계식을 이용하여 유량 깊이 d(mm/day)로 환산한 값이다.

$$d = \frac{3.6 \times 24 \times Q}{A} \quad (10)$$

여기서 A(km<sup>2</sup>)는 유역면적을 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 주로 여름과 가을철에 연최대유량을 갖는 강수와 유량의 계절적 변화가 뚜렷하다. 본 연구에 사용된 10년의 기간중에는 가뭄기간과 2개의 현저한 홍수기간을 포함하고 있다. 1988년은 가뭄해로 기록되었으며, 1984년 9월 2일의 연최대 유량 434.53mm/day (2655 cms)와 1990년

9월 11일의 328.95mm/day (2010 cms)는 국내에 현대식 관측시스템이 도입된 이후 세번째와 네번째의 큰 홍수로 기록되었다. 그림 3(c)는 모형에 의해서 계산된 하천유량을 나타낸다. 즉 1983년 1월 1일부터 7년간의 일자료를 이용하여 모형의 매개변수를 산정한 후, 1990년 1월 1일부터는 단지 관측된 강수량과 증발산 자료를 이용하여 하천유량을 계산한 결과를 나타낸다. 이들 계산된 유량을 관측유량과 비교할 때 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 특히, 1984년과 1990년에 발생한 2개의 홍수사상의 최대유량에 대해서는 상대오차가 각각 +3.7%, -13.1%를 나타냈다. 표 2는 관측유량과 계산유량사이의 통계적 결과를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 모형은 연속적 물리적 모형이기 때문에 초기조건으로부터 계절에 상관없이 연속적으로 유량계산이 가능하지만, 적용대상 지역이 동절기에는 용설의 영향을 무시할 수 없는 지역이므로 통계 결과 산출시 비동절기인 4월에서 10월 까지만 포함시켰다. 표에서 제시된 것처럼 계산기간과 검증기간 동안의 평균차차는 2.45, 3.22mm/day, 관측유량과 모형에 의한 계산유량 사이의 상관계수가 각각 0.82, 0.87로서 비교적 정확한 유량계산을 할 수 있었다. 각 기간동안의 일평균 유량에 대한 유출용적의 오차는 각각 16.8 %와 24.8 % 적게 계산되었다. 이와 같은 결과에 대한 원인으로는 여러가지로 추측해 볼 수 있다. 첫째, 용설의 영향을 생각해 볼 수 있다. 윤석영 등(1991)이 수행한 평창강 유역의 수문특성조사 결과에 의하면 이 지역의 대부분이 해발표고가 400m 이상인 상대적으로 연평균 기온이 낮고, 동절기 기온 역시 낮은 지역이다. 또한 우리나라의 지형특성인 동고서저 현상에 따라 동부 산악지대에서 겨울철에 내리는 많은 눈이 이듬해 봄에 기온이 상승함에 따라 녹아 하천유량에 영향을 준다는 사실을 현지답사를 통하여 파악하였다. 이 보고서에 의하면 용설에 의한 유출이 끝나는 시기를 평균적으로 3월말로 추정하지만, 매년의 이에 대한 편차는 매우 크다고 생각된다. 본 연구에서 사용한 모형에 의한 계산유량은 실제의 적설량도 강우로 간주하여 계산을 하기 때문에 적설에 의한 하천유량에 미치는 지체시간을 고려할 수 없기 때문에 4월과 5월의 계산유량이 적게 산

출된 것으로 생각된다. 둘째, 본 유역의 지하수의 유출특성을 생각해 볼 수 있다. 유역내의 중하류지역에는 많은 용천(spring)이 존재하여 갈수기시 일정한 하천유량을 유지하는데 도움을 주고 있다. 이와 같은 지하수의 유출특성이 관측유량이 계산유량보다 많은 하나의 원인이 될 수 있다고 생각된다. 셋째, 갈수시의 수위-유량관계곡선의 문제점을 지적할 수 있다. 그림 3에서 알 수 있는 것처럼 대부분의 홍수 유량은 비교적 정확히 계산된 반면, 저수위에서는 전반적으로 적게 계산되었다. 이에 대한 하나의 원인으로는 앞에서 언급한 것처럼 갈수시 수위-유량관계 곡선식의 부정확성을 생각해 볼 수 있다. 이와 같은 여러가지 상황을 종합해 볼 때, 본 연구에서 사용한 모형에 의한 유량계산은 만족할 만한 결과를 제시한다고 사료된다.

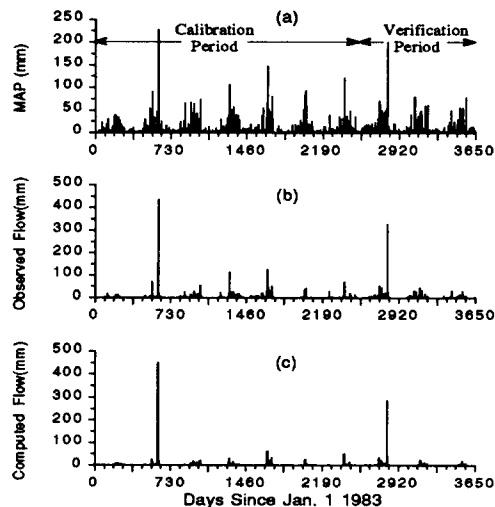


그림 3. 평창강 유역(방림)에서의 강수량에 따른 관측 유량과 계산유량

그림 4와 5는 각각 가뭄기간과 홍수기간의 강수와 증발과 같은 기상조건에 따른 토양수분의 변화와 이들이 유출에 미치는 영향을 나타낸다.

그림 4의 시간간격 366에서 730은 가뭄해인 1988년을 나타내고, 그림 5의 시간간격 619는 1990년 9월 11일의 328.95mm/day (2010 cms)를 기록한 홍수를 나타낸다. 각 그림의 (a)와 (b)

표 2. 비동절기(4월-10월)의 관측유량과 모형에 의한 계산유량의 통계적 결과

통계치 \ 기 간	계산기간 (1983. 1. 1-1989.12.31)	검증기간 (1990. 1. 1.-1992.12.31)
첨두유량의 상대오차(%)	3.7 (84년 홍수)	-13.1 (90년 홍수)
유출용적 오차(%)	-16.83	-24.86
평균잔차(mm/day)	2.45	3.22
평균제곱 오차(mm/day)	9.60	8.30
상관계수	0.82	0.87

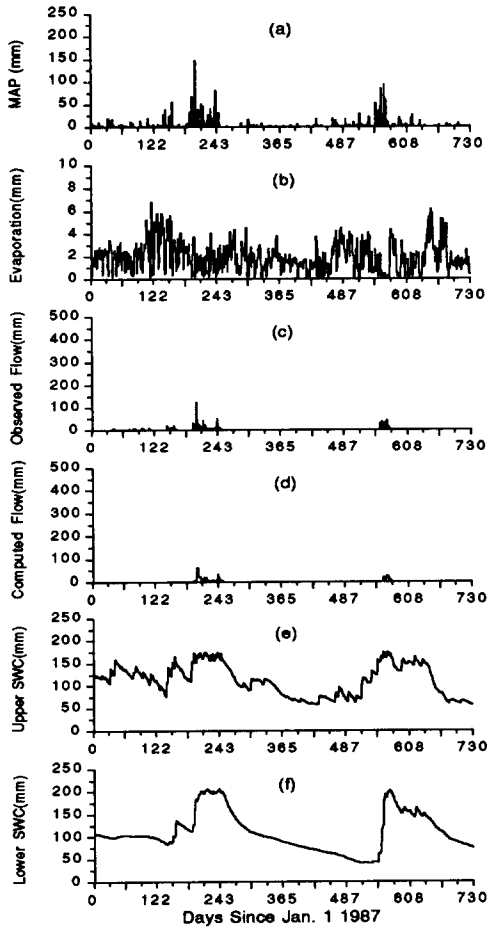


그림 4. 1988년 가뭄의 기상조건에 의한 토양수분의 변화와 유출특성

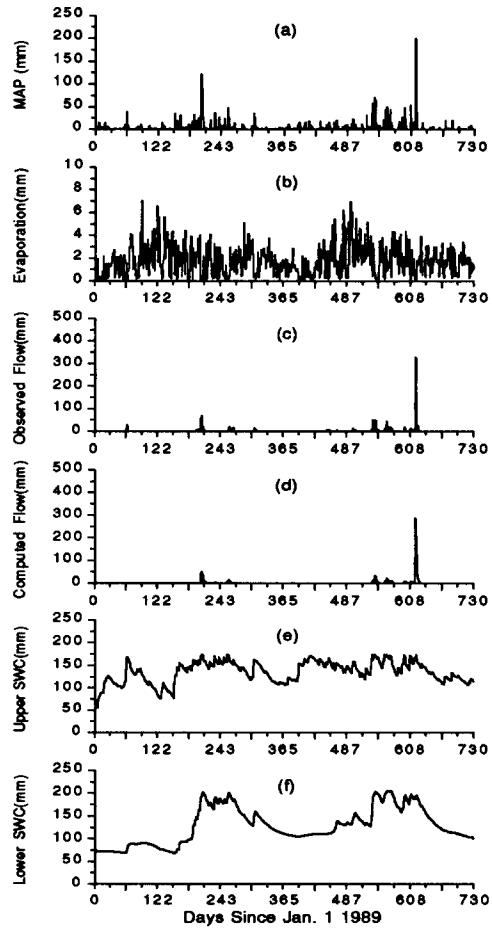


그림 5. 1990년 홍수의 기상조건에 의한 토양수분의 변화와 유출특성

에 표시한 가뭄시와 홍수시의 기상조건을 비교할 때, 증발산량의 월별 변화양상은 4월과 5월에 최대가 되며 7월에서 10월사이에는 강수와 지표토양

의 습윤상태에 따라 변화가 심함을 알 수 있다. 또한, 가뭄해의 강수량은 홍수해와 비교할 때 상대적으로 매우 적은 것을 알 수 있는 것 처럼 가뭄



과 홍수의 일차적인 원인은 강수의 부족에 기인한 것을 알 수 있다. 각 그림의 (c)와 (d)는 각각의 기상조건에 따른 관측유량과 모형에 의한 계산유량을 나타내며, (e)와 (f)는 모형에 의해서 계산된 상층부와 하층부의 토양수분 상태를 나타낸다. 가뭄시와 홍수시의 토양수분 상태를 그때의 강수량과 유출량과 비교할 때, 매우 흥미로운 점이 발견된다. 그림 5의 시간간격 619에 나타난 홍수는 상층부와 하층부의 토양수분이 거의 포화된 상태에서 약 2일 동안에 395mm의 집중호우로 인해서 야기된 것을 알 수 있다. 이에 비해 그림 4의 1987년 9월부터 1988년 6월사이의 약 10개월 동안은 비가 거의 오지 않았기 때문에 1987년 9월 이후로 토양의 수분상태가 계속 감소하여 1988년 6월말에는 상층부와 하층부의 토양이 매우 건조한 상태에 도달하였다. 이 상태하에서 내린 1988년 7월의 강수는 토양수분의 상승은 초래하였지만 하천 유출에는 거의 영향을 미칠 수 없었다. 그 후 1988년 8월 이후의 계속된 강수의 부족으로 토양수분은 계속 건조하였으며 1988년의 가뭄을 가속시켰다. 이와 같이 하천 유출량은 강수량뿐 만이 아니라 강수의 시간적 분포(강수의 집중도)에 영향을 받으며, 특히 강수가 시작되기 전의 토양의 습윤상태가 하천 유량의 증감에 절대적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Sacramento 토양수분 모형과 비선형 다중저수지 형태의 홍수추적 모형으로 구성된 물리적 개념에 근거를 둔 모형을 평창강 유역의 유출계산을 위해서 적용한 결과를 분석하였다. 모형에 포함된 매개변수를 추정하기 위하여 연속된 7년간의 강수량과 증발산 자료를 이용하였으며, 모형검증을 위해서 매개변수 추정에 사용되지 않은 3년간의 자료를 이용하여 하천유량을 계산하고 관측유량과 비교하여 모형의 타당성을 검토하였다. 적용대상 지역의 용설의 영향, 지하수의 이동특성 등과 같은 유출특성 및 저수위시의 수위-유량관계 곡선의 부정확성 등에 의한 자료의 불확실성에 의해 저수위시에는 계산유량이 관측유량보다 다소 적

게 계산되었지만, 홍수시를 포함하여 전반적으로 만족할 만한 유출계산을 할 수 있었다. 특히, 홍수와 가뭄과 같은 극한사상이 발생하였을 때의 강수와 토양습윤 상태가 유출에 미치는 영향을 고찰할 수 있었다. 본 연구에서 사용한 모형이 기존의 다른 모형에 비해 갖는 장점은 단일 홍수사상 뿐 만이 아니라, 몇십년에 걸친 장기간의 연속된 유출계산이 가능하다는 것과 모형의 구조는 다소 복잡하지만 모형의 입력자료는 일반적으로 통상 관측되는 강수량 자료와 증발산 자료만을 이용하므로 입력자료의 획득이 용이하다는 것이다. 향후 본 모형을 다른 여러 지역에 적용하여 각 지역에 대한 모형의 적용성 및 기상조건-토양상태-하천유출의 상관관계를 규명할 필요가 있으며, 본 연구에서 사용한 모형의 매개변수를 효율적으로 추정할 수 있는 기법이 연구되어야 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 제1저자의 한국과학재단 국내 Post-Doc. 연구과제의 일부로서 수행되었으며, 지원해주신 한국과학재단에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- 윤석영, 김 승, 김규호 (1991). "평창강유역의 수문특성조사." 연구보고서, 건기연 91-WR-111, 한국건설기술연구원.
- 이홍래, 김형섭 (1993). "수문모형 평가에 관한 연구: 강우-유출모형을 중심으로." 연구보고서, 건기연 92-WR-111-2, 한국건설기술연구원.
- Armstrong, B.L. (1978). "Derivation of initial soil moisture accounting parameters from soil properties for the National Weather Service River Forecast System." *Rep. NWS HYDRO-37*, NOAA, Silver Spring, Md.
- Burnash, R.J.C., Ferral, R.L., and Mcguire, R.A. (1973). "A generalized streamflow simulation system: Conceptual modeling for digital computers." *Technical Rep.*, NWS, NOAA and State of Calif. Dept. of Water Resour., Joint

- Federal-State River Forecast Center, Sacramento, Ca.
- Georgakakos, K.P. (1986). "A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting: 1. Formulation." *WRR*, Vol. 22, No. 13, pp. 2083-2095.
- Georgakakos, K.P. (1987). "Real-time flash flood prediction." *J. of Geophysical Research*, Vol. 92, No. D8, pp. 9615-9629.
- Georgakakos, K.P., Bae, D.-H., and Cayan, D.R. (1995). "Hydroclimatology of continental watersheds: 1. Temporal analyses." *WRR*, Vol. 31, No. 3, pp. 655-675.
- Georgakakos, K.P., and Bras, R.L. (1982). "A precipitation model and its use in real-time river flow forecasting." *Rep. No. 286*, Ralph M. Parsons Lab., Dept. of Civil Eng., MIT, Cambridge, Mass.
- Kitanidis, P.K., and Bras, R.L. (1980). "Real-time forecasting with a conceptual hydrologic model: 1. Analysis of uncertainty." *WRR*, Vol. 16, No. 6, pp. 1025-1033.
- Peck, E.L. (1976). "Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather Service River Forecast System." *NWS HYDRO-31*, NOAA, Silver Spring, Md.
- 〈접수: 1995년 9월 22일〉