

# WASMOD를 이용한 미계측 유역의 월 유출량 추정

## Estimation of Monthly Streamflow at Ungaged Basin Using WASMOD

조두찬\*, 남궁돈\*\*, 이영철\*\*\*

Cho Doo Chan, Nam Gung Don, Lee Young Chul

### 요지

수자원분야에서 강우-유출의 해석은 수자원 이용의 측면에서 가장 중요한 문제 중 하나이다. 특히 기존에 수위 측정 자료가 존재하는 지역에 대한 유출의 분석은 측정 자료를 통한 정밀한 강우-유출의 분석이 가능하나 유량 기록이 전혀 없는 산악지역이나 미개발지역의 하천에서 댐이나 제방과 같은 수공구조물의 설계 및 수자원 개발을 위해선 강우-유출 관계에 의한 유출량 산정은 상당히 복잡한 과정일 것이다. 미계측 유역에 유출모형을 적용하기 위해서는 모형변수의 초기치 설정과 과거 유출자료를 통하여 최적화된 매개변수를 결정해야 하기 때문에 미계측 유역에 유출모형을 적용하기란 그리 쉽지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 월 유출량 산정을 위한 모형 중 기존의 Xu가 제안한 WASMOD의 매개변수를 관측된 유출량과의 검정에 의해 산정하는 것이 아니라 유출에 영향을 주는 인자 중 유역의 지형학적 인자인 토지이용과의 상관관계를 분석하여 미계측 유역의 적용을 위한 방법을 모색하였다.

**핵심용어 : 월 유출량, 미계측 유역, 토지이용, WASMOD**

### 1. 서론

수자원분야에서 강우-유출의 해석은 수자원 이용의 측면에서 가장 중요한 문제 중 하나이다. 특히 기존에 수위 측정 자료가 존재하는 지역에 대한 유출의 분석은 측정 자료를 통한 정밀한 강우-유출의 분석이 가능하나 유량 기록이 전혀 없는 산악지역이나 미개발지역의 하천에서 댐이나 제방과 같은 수공구조물의 설계 및 수자원 개발을 위해선 강우-유출 관계에 의한 유출량 산정은 상당히 복잡한 과정일 것이다. 하천을 통한 유출현상은 유역의 지형인자, 식생피복상태, 토양의 종류, 유로특성, 지하층 강우분포, 인간활동 등에 의하여 영향을 받는 복잡한 자연현상이다. 엔지니어링 설계업무나 환경영향평가 사업 등 유역개발 관련 사업을 수행할 경우 미계측 유역에 대한 유출량 자료가 필요한 경우가 종종 생기게 된다. 미계측 유역의 유출량을 산정하기 위하여 유역의 특성과 기상자료로부터 유출량을 합성하는 방법, 인접 측정 지점의 자료를 이용하여 경험적으로 구하는 방법 등 다양한 방법들이 개발되어져 왔다. 그러나 미계측 유역에 유출모형을 적용하기 위해서는 모형변수의 초기치 설정과 과거 유출자료를 통하여 최적화된 매개변수를 결정해야 하기 때문에 미계측 유역에 유출모형을 적용하기란 그리 쉽지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서는 월 유출량 산정을 위한 모형 중 기존의 Xu가 제안한 WASMOD의 매개변수를 관측된 유출량과의 검정에 의해 산정하는 것이 아니라 유출에 영향을 주는 인자 중 유역의 지형학적 인자인 토지이용과의 상관관계를 분석하여 미계측 유역의 적용을 위한 방법을 모색하였다.

\* 정회원·대림산업(株) 기술연구소 토목설계지원팀 사원

\*\* 정회원·대림산업(株) 기술연구소 토목설계지원팀 대리

\*\*\* 정회원·대림산업(株) 기술연구소 토목설계지원팀 차장

## 2. 모형의 이론

### 2.1 강설량과 융설량의 산정

하천유출량과 물수지의 성분은 강수(precipitation)형태에 따라 상당한 영향을 받는다. 그리고 모형의 수행과정에서도 강설량과 융설량을 산정한다는 것은 상당히 민감할 것이라고 하였다.(Vandewiele et al, 1994) 따라서 WASMOD 모형에서는 Vandewiele와 Ni-Lar-Win(1993) 제시한 temperature index function을 이용하여 강설량과 융설량을 산정하였고 각각의 산정식은 식 (2.1) 및 식 (2.2)와 같다.

$$s_t = P_t \{1 - e^{[(c_t - a_1)/(a_1 - a_2)]^+}\} \quad (2.1)$$

$$m_t = sp_{t-1} \{1 - e^{-[(c_t - a_2)/(a_1 - a_2)]^2}\} \quad (2.2)$$

여기서,  $s_t$  : 강설량,  $m_t$  : 융설량,  $P_t$  : 강수량,  $sp_{t-1}$  : 전달의 적설량,  $c_t$  : 평균온도,

$$a_1, a_2 : \text{모형의 매개변수} (a_1 > a_2), x^+ = \max(x, 0)$$

식 (2.1)에서 산정한 강설량으로부터 적설량을 산정하면 식 (2.3)와 같다.

$$sp_t = sp_{t-1} + s_t - m_t \quad (2.3)$$

결국 강우량은 강수량 중에서 강설량을 제외한 양으로 식 (2.4)와 같다.

$$r_t = P_t - s_t \quad (2.4)$$

### 2.2 증발산량의 산정

WASMOD 모형에서는 실제 증발산량( $e_t$ )을 산정하기 위해 여러 인자 중에서 잠재증발산량( $ep_t$ )과 가용수량( $w_t$ )을 가장 중요시하였다. 가용수량( $w_t$ )과 잠재증발산량( $ep_t$ )은 강우량( $r_t$ )과 토양수분저류량( $sm_{t-1}^+$ )과의 관계로부터 식 (2.5)과 (2.6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$w_t = r_t + sm_{t-1}^+ \quad (2.5)$$

$$ep_t = [1 + a_3(c_t - \overline{c_m})] \overline{ep_m} \quad (2.6)$$

여기서,  $w_t$  : 가용수량,  $ep_t$  : 잠재증발산량,  $r_t$  : 강우량,  $c_t$  : 월 평균온도,  $\overline{c_m}$  : 장기 월평균온도

$\overline{ep_m}$  : 장기 월평균 잠재증발산량,  $a_3$  : 모형의 매개변수,  $sm_{t-1}^+$  : 전달의 토양수분저류량 [ $\max(sm_{t-1}, 0)$ ]  
WASMOD모형에서는 실제증발산량을 산정하기 위한 식은 (2.7), (2.8)과 같다.

$$e_t = \min\{ep_t[1 - a_4^{w_t/ep_t}], w_t\} \quad (0 \leq a_4 \leq 1) \quad (2.7)$$

$$e_t = \min\{w_t(1 - e^{-a_4 ep_t}), ep_t\} \quad (a_4 \leq 0) \quad (2.8)$$

여기서,  $e_t$  : 실제증발산량,  $a_4$  : 모형의 매개변수

### 2.3 기저 및 지표유출량의 산정

기저 유출량( $s_t$ )은 유역의 토양수분 저류량( $sm_{t-1}$ )과 밀접한 관계가 있으며 식 (2.9)와 같다.

$$s_t = a_5(sm_{t-1}^+)^{b_1} \quad (2.9)$$

실제 강우량( $n_t$ )는 식 (2.10)와 같고, 지표 유출량( $f_t$ )는 식 (2.11)과 같다.

$$n_t = r_t - ep_t[1 - e^{-r_t/ep_t}] \quad (2.10)$$

$$f_t = a_6(sm_{t-1}^+)^{b_2}(m_t + n_t) \quad (2.11)$$

여기서,  $a_5, b_1, a_6, b_2$  : 모형의 매개변수 [  $b_1, b_2$  : 지역 상수 (반 건조지역; 0.5, 그 외의 지역; 1, 2 ) ]

### 3. 실제유역의 적용

#### 3.1 모형의 매개변수와 토지이용간의 상관분석

본 연구에서는 모형의 매개변수를 관측된 유출량과의 검증에 의해 산정하는 것이 아니라, 유역의 토지이용과의 상관분석을 통하여 추정하고자 하였다. 모형의 매개변수는 유출량을 산정하기 위한 미지의 값으로 각각의 매개변수는 토지이용과 상관관계가 높다고 하였다. (Xu, 1999) 따라서 본 연구에서는 모형의 매개변수와 토지이용간의 상관관계를 분석하여 매개변수를 추정하고자 하였다. 우선 평창강 대표유역의 방림, 하반정, 상안미, 백옥포, 장평, 이목정 수위관측소별 소유역에 대한 토지이용도를 추출하여 모형의 검증에 통한 최적화된 매개변수와와의 다중회귀분석을 통하여 미계측 유역 적용을 위한 매개변수 추정식을 산정하였다.

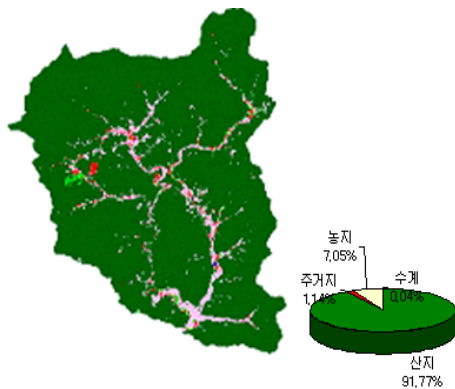


그림 1. 평창강 유역의 토지이용도

$$\begin{aligned} a_1 &= 3.2548 + 0.5489 F(\%) + 1.049874 U(\%) \\ &\quad + 0.594136 FL(\%) + 1.6516548 W(\%) \\ a_2 &= 1.00846 + 2.54984F(\%) + 1.224684U(\%) \\ &\quad + 0.644717FM(\%) + 0.998421 W(\%) \\ a_3 &= 2.481684 + 1.549813F(\%) + 0.951684U(\%) \\ &\quad + 0.6987154FM(\%) + 1.2548311 W(\%) \\ a_4 &= 1.325484 + 0.09481231F(\%) + 0.7549816U(\%) \\ &\quad + 0.874984FM(\%) + 0.879421 U(\%) \\ a_5 &= 0.94841 + 0.748115F(\%) + 0.988794F(\%) \\ &\quad + 1.0584216FM(\%) + 1.2514841FM(\%) \\ a_6 &= 1.112847 + 0.94817F(\%) + 0.954814U(\%) \\ &\quad + 0.9481165FM(\%) + 0.541817W(\%) \end{aligned}$$

표 1. 토지이용에 따른 모형의 매개변수 추정치

매개변수	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
결정계수	0.64840	0.74816	0.70461	0.69948	0.71546	0.74545

모형의 매개변수와 토지이용(%)을 다중회귀분석을 한 결과 다중회귀식의 결정계수는 표. 1과 같다.

#### 3.2 미계측 유역에서의 월 유출량 추정

본 연구에서는 소양강댐 유역을 미계측 유역이라 가정하여 월유출량을 산정하였다. 모형의 매개변수는 평창강 대표유역의 토지이용도(%)와 최적화된 매개변수와와의 다중회귀분석을 통하여 산정한 추정식에 따라 GIS 프로그램인 Arcview를 이용하여 소양강댐 유역의 토지이용현황을 추출하였다. 그림 2는 소양강댐 유역의 토지이용현황을 나타낸 것이다. 소양강댐 유역의 토지이용현황을 살펴보면 산지 91.99%, 농지 5.58%, 수계 1.70%, 주거지 0.73%를 차지하고 있다. 매개변수 추정식으로부터 소양강댐 유역의 토지이용(%)을 따른 모형의 추정 매개변수를 산정하였다. 표 3은 추정된 매개변수의 값들을 나타내었다. 추정된 매개변수를 모형의 입력치로 1995년 1월부터 1999년 12월까지의 월 유출량을 산정하였다.

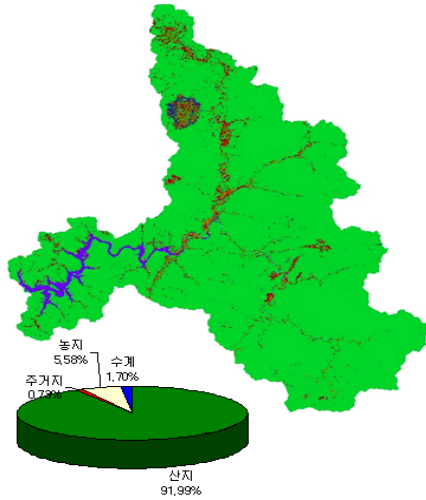


그림 2. 소양강댐 유역의 토지이용도

관측치의 유출량과 모의치의 유출량을 비교한 결과 대체로 관측 유출량을 잘 재현하는 것으로 판단되나, 일부 관측치의 유출량을 초과하는 부분도 있음을 알 수 있다.

표 2. 소양강댐 유역 토지이용현황 (단위 :km², [%])

유역명	토지이용별				
	산지	농지	수계	주거지	총면적
소양강댐	2456.8 [91.99]	149.1 [5.58]	45.4 [1.70]	19.5 [0.73]	2670.7 [100]

관측치와 모의치를 비교한 결과 모형의 결정계수는 0.845, 평균제곱근 오차는 32.19, 일치도는 0.853, 모형의 효율성 계수는 0.864로서 관측치의 유출량을 잘 재현하는 것으로 나타났다. <표4>는 관측치와 모의치에 대한 수문모형평가지수를 나타낸 것이다.

표 3. 토지이용에 따른 모형의 매개변수 추정치

매개변수	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$
추정치	1.817790	-0.521430	0.335623	0.302020	0.063337	0.233420

표 4. 관측치와 모의치 결과비교

	수문모형평가지수			
	$R_2$	RMSE	IOA	ME
모의결과	0.845	32.19	0.853	0.864

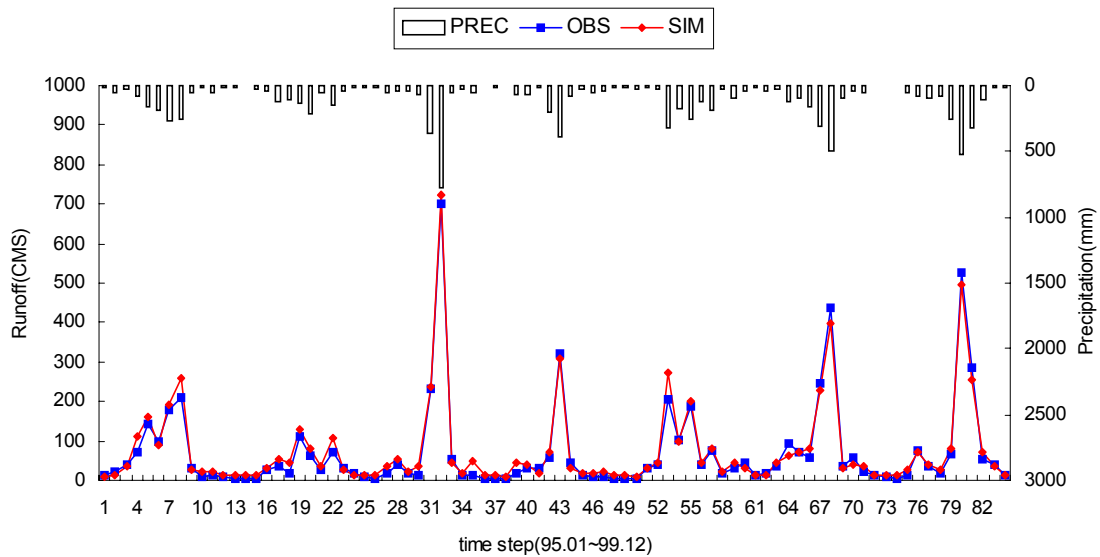


그림 3. 관측치와 모의치의 유출수문곡선

#### 4. 결론

본 연구에서는 물수지 모형인 WASMOD(Water And Snow MODeling system) 모형의 매개변수와 유역의 지형학적 인자인 토지이용과의 상관관계를 분석하여 미계측 유역의 적용을 위한 방법을 모색하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 유출에 영향을 미치는 요인으로서 여러 가지가 있으나, 이 중 유역의 토지이용과의 모형의 매개변수와의 상관관계를 분석하여 매개변수를 추정하고자 하였다.
- (2) 매개변수 추정식을 통하여 미계측 유역이라 가정된 소양강댐 유역에 대하여 토지이용에 따른 초기 매개변수를 결정하였다. 결정된 매개변수를 입력변수로 소양강댐 유역의 월 유출량을 추정한 결과 수문모형의 평가지수인 평균제곱근오차(RMSE)는 32.19 일치도(IOA)는 0.853 모형의 효율성 계수(ME)는 0.864을 나타내었다.
- (3) 미계측 유역이라 가정된 소양강댐 유역의 월 유출량을 추정한 결과 관측 수문곡선과 비교할 때 일부 하기는 하나 대체로 모의 관측수문곡선은 관측수문곡선을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 따라서 미계측 유역의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.
- (4) 미계측 유역 적용을 위한 방법 중 모형의 매개변수와 토지이용과의 상관관계뿐만 아니라, 유역내 지하수 위나 기타 유출에 영향일 미칠 수 있는 인자들에 대하여 복합적인 상관관계를 모색할 필요가 있으며, 이를 통하여 보다 정확한 매개변수 추정식을 산정하도록 개선해야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

1. Xu, C.-Y, and Singh, V.P. (1998). "A review on monthly water balance models for water resources investigation and climatic impact assessment." Water Resources Management, Vol. 12, pp. 31-50.
2. Xu, C.-Y. (1997). "Application of water balance models to different climate regions in china for water resources assessment." Water Resources Management, Vol. 11, pp. 51-67.
3. Xu, C.-Y. (1999). "Estimation of Parameter of a Conceptual Water Balance Model for Ungauged Catchments." Water Resources Management, Vol. 13, pp. 353-368.
- Xu, C.-Y. (1999a). "Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts." Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 98-99, pp. 295-304.
4. Xu, C.-Y. (1999b). "Parameter estimation of a conceptual water balance model in ungauged catchment." Water Resources Management, Vol. 13, pp. 353-368.
5. Xu, C.-Y. (2001). "Statistical Analysis of Parameters and Residuals of Conceptual Water Balance Model-Methodology and Case Study." Water Resources Management, Vol. 15, pp. 75-92.
6. Xu, C.-Y. and Vadewiele, G.L. (1995). "Parsimonious Monthly Rainfall-runoff Models for Humid Basins with Different Input Requirements." Advances in Water Resources, Vol. 19, pp. 39-48.