

# 流域 土壤 水分 追跡에 의한 流出 模型

## Daily Streamflow Model based on the Soil Water Storage in the Watershed

金 泰 喆\* · 盧 載 卿\*\* · 朴 承 基\*  
Kim, Tai Cheol · Noh, Jae Kyoung · Park, Seung Ki

### Summary

A lumped deterministic model(DAWAST model) was developed to predict the daily streamflow. Since the streamflow is dominantly determined by the soil water storage in the watershed, the model takes the soil water accounting procedures which are based on three linear reservoirs representing the surface, unsaturated, and saturated soil layers. The variation of soil water storage in the unsaturated zone is traced from the soil water balance on a daily basis. DAWAST model consists of 5 parameters for water balance and 3 parameters for routing. A optimization technique of unconstrained nonlinear Simplex method was applied for the determination of the optimal parameters for water balance.

Model verification was carried out to the 7 hydrologic watersheds with areas of 5.89~7,126 km<sup>2</sup> and the results were generally satisfactory. The daily streamflow can be arbitrarily simulated with the input data of daily rainfall and pan evaporation by the DAWAST model at the station where the observed streamflow data of short periods are available to calibrate the model parameters.

### I. 緒 論

산업의 발달에 따라 수자원의 사용량은 증가하는 반면, 수질 오염으로 신선한 수자원의 양은 감소하고 있다. 또한, 농·축산업의 집약화와 농업 구조 개선에 따른 정주권 개발로 농업 용

수의 수요 형식도 변화하고 있다. 이러한 관점에서 저수지의 저수 용량 결정, 저수지 관개 용수의 다목적 이용, 광역화에 따른 갈수기의 이·치수 계획 수립, 담수호의 부영양화 현상의 해석, 저수지 침전량 계산을 위한 하천 유황 곡선의 작성, 하천 유지 용수량의 결정 등 수

\* 忠南大學校 農科大學

\*\* 忠南大學校 地域開發研究所

키워드: 日 流出 模型, 潛在 貯留能, 土壤 水分,  
最適化 技法

자원의 합리적인 계획, 설계 및 관리를 위하여 일 유출량의 정확한 추정 은 필수적이다.

유출 현상은 유역의 토성, 식생, 토지 이용 상황 그리고, 지형과 기상 상태에 따라 매우 복잡하게 나타난다. 유역 수문 모형은 강우-유출 사이의 물 순환 과정을 여러가지 수식으로 나타내고, 수식상의 매개 변수들이 보정하여 실제 유출 현상에 일치시키는 확정론적 모형이 일반적이며, 이에 는 매개 변수를 공간적 처리에 따라 집중형 모형과 분산형 모형으로 분류된다. 수문 모형은 매개 변수를 추정하지 않고 유역 특성 인자로부터 유출량을 모의 발생하는 분산형 모형이 바람직하지만, 실제 유역에 적용하는 데는 문제가 있다.<sup>18)</sup>

우리나라에서의 일 유출량 추정 모형 개발에 관한 연구는 다음과 같다.

權과 高<sup>2)</sup>는 “유출량 추정 전산 모형 개발”에서 미국의 USDAHL-74 모형을 선택하여 589ha의 都尺 시험 유역에 적용하여 우리나라 유역의 장기 유출 해석에 적용하였다.

金과 朴<sup>8)</sup>은 “저수지 물 관리 연구”의 일환으로 유역 물 수지에 탱크 모형을 도입하여 분석하였으며, 유역 특성에 따른 매개 변수의 변화를 구명하여 무계측지점에서도 적용할 수 있는 가능성을 검토하였으며, 鄭 등<sup>15)</sup>은 관개 조직의 일별조작을 위한 일 유출량 예측에 적용 기법을 이용한 탱크 모형을 적용하였다. 또한, 李와 朴<sup>14)</sup>은 일본의 角屋, 永井이 개발한 장단기 유출 탱크 모형을 都尺, 公州 유역에 적용하였다.

嚴<sup>6)</sup>은 홍수 유출 해석에 적용해왔던 단위도법의 기본 이론을 장기 유출 해석에 도입하여 “수수량 추정 방법 재정립에 관한 연구”에서 유역 규모가 비교적 작은 11개 유역에 적용하여 일 유출량을 추정하였다.

金<sup>6)</sup>은 42개 수문 지점의 유출 자료를 분석하여 SCS 방법의 잠재 저류능 개념을 Stormflow event 별로 적용하여 “한국 하천의 일 유출량 추정을 위한 지역화 모형”을 발표하였다.

金등<sup>23)</sup>은 유효우량을 총 강우량과 5일 선행 강우량을 변수로 선형과 비선형회귀 모형을 4개 수문 지점에서 분석하여 “일 유출량의 모의 모형”을 발표하였다.

이 연구에서는 유역이 시간 불변의 定常的(Time-invariant)이고 閉合系(Closed system)라는 가정하에 유역의 토양층을 지표면, 불포화층과 포화층의 3개 저수층으로 단순화한 집중형 모형의 구조로, 토양 수분 상태를 일별로 추정하여 일 유출량을 모의 발생할 수 있는 日流出流域 模型(DAILY Watershed Streamflow model, DAWAST)을 개발하였다.

## II. 模型의 構造

### 1. 流出 模型의 概念化

토양층을 지표면, 불포화층과 포화층의 3개 저수층으로 단순화한 유역에 강우가 발생하면 차단, 증발, 지표면 저류와 침투 등의 초기 손실이 이루어지고, 강우가 계속되어 초기 손실량보다 크게 되면 침투와 함께 표면 유출이 일어난다. 표면 유출(유효우량)은 유역의 크기와 기저 시간의 크기에 따라 지체, 배분되어 나타난다. 한편, 침투된 수분으로 上部 불포화 토양층의 토양 수분은 점차 증가하고 침투가 계속되어 토양 수분이 불포화층의 포장 용수량을 초과하면, 그 때는 중력에 의하여 下部 포화 토양층으로 심층 침투가 이루어져 포화층의 토양 수분도 증가하게 된다. 이 포화층의 토양 수분이 일정한 값 이상이면 불포화층과 포화층 사이에서 중간 유출이 일어나고, 무강수기에는 이 포화층의 토양 수분량이 고갈(Depleted) 되어 기저 유출로 나타나는 것으로 강우-유출을 개념화하였다.

### 2. 流域 土壤 水分의 水 收支

유출에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 유역의 토양 수분 상태이므로 이를 정확히 추정하는

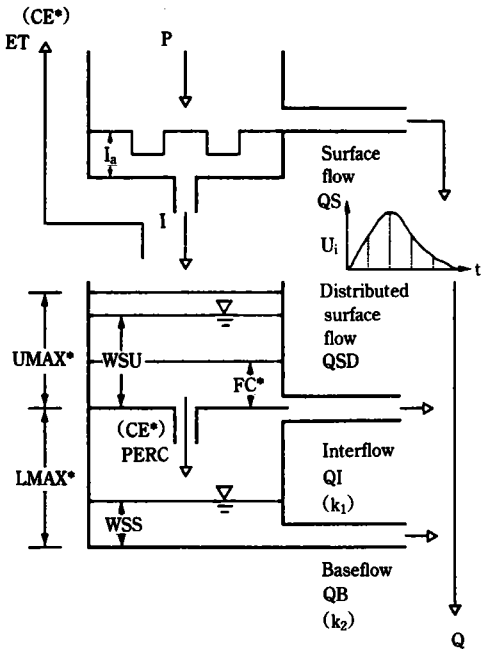


Fig. 1. Schematic diagram of DAWAST model

것은 유출 해석에서 대단히 중요하다. 따라서 이 연구에서는 불포화층과 포화층의 물 수지로부터 토양 수분 상태를 일별로 추적하였다.

가. 불포화층의 물 수지

불포화층의 토양 수분은 강우에 의한 침투로 증가되고 유역 증발산과 심층 침투에 의하여 감소되며, 그 물 수지 방정식은 식(1)과 같다.

$$WSU_{i+1} = WSU_i + I_i - ET_i - PERC_i \dots\dots(1)$$

여기서,  $WSU_i$ 는  $i$ 일의 불포화층의 토양 수분량(mm),  $I_i$ 는  $i$ 일의 침투량(mm),  $ET_i$ 는  $i$ 일의 유역 증발산량(mm),  $PERC_i$ 는  $i$ 일의 심층 침투량(mm)이다.

1) 침투: 강우가 있으면 초기 손실이 이루어진 후, 유출이 시작되고 불포화층으로 침투가 진행된다. 침투 과정은 침투 방정식 또는 침투 지수(Index)로 구한다 DAWAST 모형은 일 단위의 침투량을 구하는 것이므로 강우가 초기 손실

이하이면 유효 저류능의 계산에 중요성을 두어 모두 침투되는 것으로, 초기손실 이상이면 강우에서 직접 유출량을 뺀 양이 침투되는 것으로 처리하였다.

$$I_i = P_i \quad \text{if } P_i \leq I_a \dots\dots\dots(2)$$

$$I_i = P_i - QS_i \quad \text{if } P_i > I_a \dots\dots\dots(3)$$

2) 증발산: 불포화 토양층으로부터의 증발산은 기상 조건과 토양의 종류, 피복 상태, 토양 수분 상태에 따라 다르게 일어난다. 강우-유출 해석에서 실제 증발산량은 일반적으로 관측된 자유 수면 증발량 또는 계산된 잠재 증발량을 기준으로 구한다. DAWAST 모형에서는 Beken<sup>17)</sup>이 제시한 식(4)의 방법을 이용하여 증발접시 증발량과 불포화층의 토양 수분량으로부터 일별로 추정하였다.

$$ET_i = E_{oi}(1 - e^{-CE \times WSU_i}) \dots\dots\dots(4)$$

$$E_{oi} = C \times EP_i \dots\dots\dots(5)$$

여기서,  $E_{oi}$ 는  $i$ 일의 잠재 증발량(mm),  $EP_i$ 는  $i$ 일의 증발 접시 증발량(mm),  $C$ 는 증발 접시 계수( $C=0.70$ ),  $CE$ 는 유역 증발산 계수이다.

3) 심층침투: 침투가 계속되어 불포화층의 토양 수분 상태가 유역 토양의 포장 용수량보다 크게 되면 중력에 의하여 하부 포화층으로 심층 침투가 이루어진다. 심층 침투량은 식(6)과 같이 전 날의 불포화층의 토양 수분량과 포장 용수량의 차에 의해 계산된다.

$$PERC_i = CP \times (WSU_{i-1} - EC) \times \frac{WSU_{i-1}}{UMAX*}, \quad \text{if } P_i > 0 \text{ and } WSU_{i-1} > FC \dots\dots\dots(6)$$

$$PERC_i = 0, \quad \text{if } P_i = 0 \text{ or } WSU_{i-1} \leq FC \dots\dots\dots(7)$$

여기서,  $FC$ 는 포장 용수량(mm),  $CP$ 는 심층 투수 계수이다.

나. 포화층의 물 수지

포화층의 토양 수분량은 강우시에는 심층 침투에 의해 증가하고, 기저 유출에 의해 감소된다.

$$WSS_{i+1} = WSS_i + PERC_i - QB_i, \text{ if } P_i > 0 \quad \dots(8)$$

$$WSS_{i+1} = WSS_i - QB_i, \text{ if } P_i = 0 \quad \dots(9)$$

여기서,  $QB_i$ 는  $i$ 일의 포화층의 기저 유출량(mm),  $WSS_i$ 는  $i$ 일의 포화층의 토양 수분량(mm)이다.

3. 流出의 成分

유출 성분을 표면 유출, 중간 유출과 기저 유출성분으로 분류하고, 상기한 방법으로 유역 토양수분을 고려하여 각 성분을 분석한 후, 합산하여 일 유출량을 추정한다.

가. 표면 유출

표면 유출은 가장 큰 성분이다. DAWAST 모형에서는 미국 농무성의 SCS의 유효 우량 추정방법<sup>27)</sup>을 변형하여 표면 유출을 추정하였다. SCS방법은 식(10)과 같고, 소유역 농업지대의 자료로부터 개발되었으며, 강우량과 직접 유출량의 관계를 잠재 최대 저류능 개념을 도입하여 나타낸 것이다.

$$Q = (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$S = 25,400 / CN - 254 \quad \dots\dots\dots(11)$$

여기서,  $Q$ 는 직접 유출량(mm),  $P$ 는 일 강우량(mm),  $S$ 는 잠재 저류능(mm),  $CN$ 은 流出數(Curve number)이다.

SCS 방법은 입력 자료가 간단하고, 모형의 기본 구조와 가정이 단순하며, 토양의 종류, 토지 이용 및 피복 상태, 유역 건습조건 등의 유역 특성을 유출수로 나타내어 쉽게 적용할 수 있기 때문에 유출 해석에 널리 이용되고 있다. HEC-1, CREAMS<sup>24)</sup>, SMAP<sup>25)</sup>, SPUR, EPIC, SWRRBWB 등의 모형에서 직접 유출의

추정을 SCS 방법을 택하고 있으며, 우리나라에서도 IHP 시험 유역에서 尹과 沈<sup>13)</sup>, 鮮<sup>10)</sup>에 의하여 설계 홍수량 추정에, 金 등<sup>7)</sup>에 의하여 장기 유출량 추정을 위한 유효 우량의 분리에 사용되었다. 그러나, 유효 우량을 추정하는 SCS 방법은 Hawkins 등<sup>19,20)</sup>, Hjelmfelt 등<sup>22)</sup>에 의해 다음과 같은 문제점이 지적되었다. 첫째, 시간 개념에 대한 정의와 침투와 유출에 영향이 큰 강우 강도가 고려되지 않고 둘째, 연속적인 유역 건습을 5일 선행 강우에 따라 AMC I, II, III의 세 단계로 불연속 처리함으로써 유출 반응이 크게 단절되며 셋째, 5일 선행 강우에 의한 유역 건습 판단의 객관성 결여 넷째, 분석 대상 유역에서 모든 호우에 단일 유출수를 적용하게 되는 점이다.

DAWAST 모형은 유역 토양 수분의 연속처리와 모형의 연속적인 모의 발생에 적합하도록 SCS의 Retention parameter  $S$ 를 식(11)의 토양의 최대 저류능 개념에서 불포화층의 유효 저류능  $S_a$  개념으로 변형하여 식(12)와 같이 최대 저류능과 현재의 토양 수분량의 차로 새로이 정의 하였다. 따라서  $S_a$ 는 유출수로부터 구하지 않고, 식(1)의 불포화 토양층 물 수지로부터 일별로 연속적으로 구하여 식(13)으로부터 표면 유출을 계산한다. 유역의 유효 저류능  $S_a$ 를 연속적으로 추적함으로써, 선행 토양 수분 조건에 따른 불연속성을 개선할 수 있다.

$$S_a = U_{MAX} - WSU, \text{ } U_{MAX} < WSU \quad \dots\dots(12)$$

$$QS = (P - 0.2S_a)^2 / (P + 0.8S_a) \quad \dots\dots\dots(13)$$

여기서,  $S_a$ 는 유효 저류능(mm),  $U_{MAX}$ 는 불포화층의 최대 토양 수분량(mm),  $WSU$ 는 불포화층의 토양 수분량(mm),  $QS$ 는 표면 유출량(mm)이다.

연속 추적의 초기치인 모의 발생 첫 날의  $S_a$  값은 식(14)와 같이 강우량과 기저 유출량의 함수식<sup>9)</sup>으로부터 추정한다.

$$S_0 = f(QBS_0, P_0) \dots\dots\dots(14)$$

여기서,  $S_0$ 는 첫번째 강우 발생일의 잠재 저류능,  $QBS_0$ 는 첫번째 강우 발생 하루전의 기저 유출량(mm),  $P_0$ 는 첫번째 강우 발생일의 강우량(mm)이다.

나. 중간유출

포화층의 수분량이 최대 수분량에 이르기까지는 우선 수직방향으로만 심층 침투가 진행되며, 그 이상이 되면 포화층의 최대 수분량 이상의 심층 침투량은 수평 방향의 중간 유출로 나타나는 Sacramento 모형의 구조를 적용하였으며, 중간 유출은 감수 곡선 계수  $k_1$ 에 따라 결정된다.

$$QI_i = (1 - k_1) \times (WSS_i - LMAX), \text{ if } WSS_i > LMAX \dots\dots\dots(15)$$

$$QI_i = 0, \text{ if } WSS_i \leq LMAX \dots\dots\dots(16)$$

여기서,  $QI_i$ 는  $i$ 일의 중간 유출량(mm),  $LMAX$ 는 포화층의 최대 수분량(mm),  $k_1$ 은 중간 유출 감수 곡선 계수( $0 < k_1 < 1$ )이다.

다. 기저 유출

포화층의 수분량은 심층 침투에 의해 보충되고, 포화층의 기저 유출량은 포화층의 수분량과 기저 유출 감수곡선 계수  $k_2$ 에 따라 결정된다.

$$QB_i = (1 - k_2) \times WSS_i \dots\dots\dots(17)$$

여기서,  $QB_i$ 는  $i$ 일의 기저 유출량(mm),  $k_2$ 는 기저 유출 감수 곡선 계수( $0 < k_2 < 1$ )이다.

4. 追跡 媒介 變數

추정된 일 유효우량(표면유출)은 유역의 크기와 기저 시간의 크기에 따라 유출이 지체되므로 일별로 배분하고, 중간 유출과 기저 유출은 포화 토양층의 수분량과 감수 곡선 계수에 따라 결정되므로, 일별 배분률(U)과 감수 곡선 계수(k)를 기존의 수문 자료로부터 분석하여 미리 결정된 후, 모형의 물 수지 매개 변수를 보정

하였다.

가. 日別 配分率

식(13)으로 계산된 일 강우량에 대한 표면 유출량은 기저 시간 만큼 지체되어 나타나므로 일별로 배분시킨다. 일별 배분은 첫째, 유역특성의 시간 불변성 둘째, 유역의 선형성 셋째, 강우의 시간적, 공간적 균일성 등의 가정에 근거한다.  $i$ 일의 강우에 대한 표면 유출량은 식(18)과 같이 일별 배분율에 따라 배분된다.

$$QSD_i = \sum_{j=1-n+1}^i U_{i-j-1} QS_j \dots\dots\dots(18)$$

$$\sum_{i=0}^n U_i = 1.0 \dots\dots\dots(19)$$

여기서,  $QSD_i$ 는  $i$ 일에 배분된 표면 유출량,  $U_i$ 는 일별 배분률,  $QS_j$ 는  $j$ 일의 강우에 의해 계산된 표면 유출량,  $n$ 은 기저 시간(일)이다. 배분률의 보정에는 제약 조건이 있는 비선형 Flexible Tolerance 기법을 사용하였다.<sup>9,21)</sup>

나. 減水 曲線 係數

강우가 발생하면 수문 곡선은 상승하여 침투부를 지나 하강하게 되며, 감수부의 수문 곡선은 식(20)과 같이 감수 곡선 계수에 따른 지수 함수 형태를 나타낸다. 감수 곡선 계수는 유출의 특성을 나타내는 중요한 인자이며, 유역의 지형적 특성과 증발산 등의 기상 조건에 따라 그 값이 계절별, 지역적으로, 다양하게 나타나고, 유역이 습윤할수록 저수 유출량의 감소가 크게 되므로 습윤하면 작은 값을, 건조하면 큰 값을 갖게 된다. 보통 저수 유출 특성의 지역화 분석을 위하여 강우-유출 事象 마다 유출 성분을 분리하여 각각 구하게 되지만, 분석하기에 양호한 강우-유출 사상이 드물고, 유출 성분 분리의 객관성이 없는 문제가 있다.

이 연구에서는 安 등<sup>11)</sup>이 제시한 중간, 기저 유출 감수 곡선 계수를 적용하였다.

$$Q_t = Q_0 \times k^t \dots\dots\dots(20)$$

$$k = a + b \times \log_{10} A \dots\dots\dots(21)$$

여기서,  $Q_t$ 는 t일 후 유출량,  $Q_0$ 는 초기 유출량,  $k$ 는 감수 곡선 계수,  $t$ 는 단위 시간(일),  $a, b$ 는 월별 상수,  $A$ 는 유역 면적( $km^2$ )이다.

5. 模型의 構成

DAWAST 모형은 강우시에는 표면, 중간, 기저 유출량을, 무강우시에는 기저 유출량을 계산하여 총 유출량을 모의 발생 시작일 부터 종료일 까지 연속적으로 일 단위로 계산할 수 있게 구성하였다. 모형은 Table-1과 같이 UMAX, LMAX, FC, CP, CE 등 5개의 물수지 매개 변수와  $U_i, k_1, k_2$  등 3개의 추적 매개 변수로 구성되어 있으며, 이들 매개 변수는 최적화 기법으로 보정하여 입력한다. 입력 자료는 유역 면적과 일 강우량과 증발량이며 출력 자료는 일 유출량 자료이다.

모형의 계산 순서는 모의 발생 시작일의 잠재 저류능 값( $S_0$ )을 식(14)에 의해 구하고, 이로부터 식(1)~(9) 등에 의해 강우량, 증발산, 침투량, 심층 침투량 등의 일별 물수지에 의한 잠재 저류능을 모의 발생 종료일 까지 일별로 계산하며 강우시와 무강우시의 계산 순서는 다음과 같다.

강우시에는 표면 유출량은 식(12)에 의해 계

산된 일별 잠재 저류능 값에 근거하여 식(13)에 의해 계산하고, 식 (18)의 일별 배분률에 따라 일별로 배분한다. 기저 유출량은 식(17)에 의해 포화층의 수분량으로부터 감수 곡선 계수에 따라 계산된다. 또한, 포화층의 수분량이 최대값 보다 클 경우는 식(15)로 중간 유출을 계산하여 총 유출량에 가산된다. 불포화층의 토양 수분량은 식(1)과 같이 침투에 의해 증가하며 증발산과 심층 침투에 의해 감소한다. 포화층의 토양 수분량은 식(8), (9)와 같이 심층 침투에 의해

Table-1. Parameters of the DAWAST model

Role	Name	Function of parameter	Unit
Input data	P	Daily areal rainfall	mm
	EP	Daily pan evaporation	mm
Water balance	UMAX	Maximum storage of soil water in unsaturated zone	mm
	LMAX	Maximum storage of soil water in saturated zone	mm
	FC	Field capacity	mm
	CP	Coefficient of percolation	-
	CE	Coefficient of evaporation	-
Routing	$U_i$	Rate of daily distribution	-
	$k_1$	Interflow recession constant	-
	$k_2$	Baseflow recession constant	-
Output	Q	Simulated daily streamflow	mm

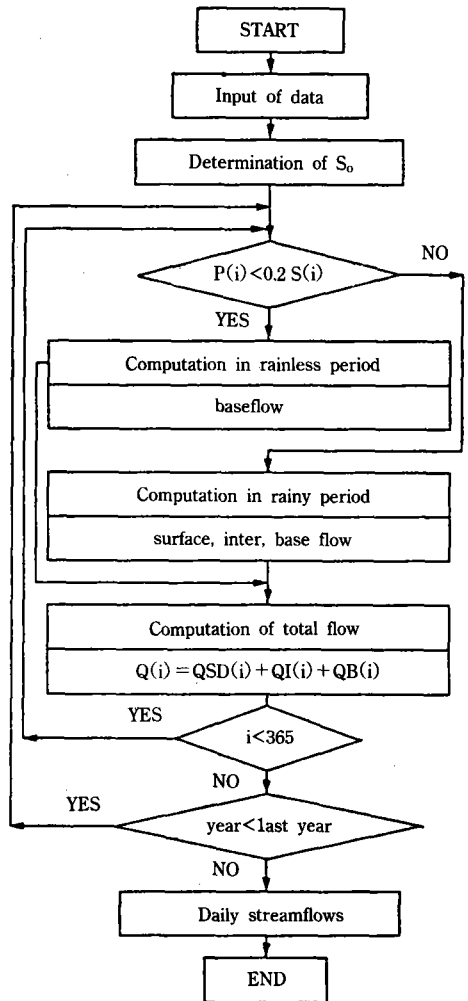


Fig. 2. Flow chart for the DAWAST model

증가하며 기저 유출에 의해 감소한다. 무강수 기에는 포화층의 통양 수분이 기저 유출로 나타나고 식(17)에 의해 계산된다. 이상의 기본 열개를 갖는 DAWAST 모형의 흐름도는 Fig. 2와 같다.

### III. 模型의 補正 및 檢定

#### 1. 對象 流域 및 水文 資料

개발된 DAWAST 모형의 적용성을 검토하기 위해 유역 규모를 고려하여 5.89km<sup>2</sup>에서 7,126 km<sup>2</sup> 사이의 7개소 유역을 선정하였다. 선정된 유역의 명칭 및 위치는 Fig. 3과 같으며, 유역별 면적, 주하천장, 하천 중심장, 주변장, 최고, 최저 표고 등은 Table-2와 같다.

이 연구에서 사용된 수문 자료는 서울대 都尺 시험 유역의 일 유출량, 강우량과 계기 증발량 그리고 건설부, 한천, 기상청 등 국가 기관에서 관측, 발간한 자료 중에서 비교적 양호하게 관리된 6개의 유역의 일별 하천 수위, 유량 측정, 강우량, 계기, 증발량 등이다. 강우량은 Thiesen 면적 우량을 사용하였다.

#### 2. 模型의 補正

모형의 보정은 모형의 적용을 위해 모형의 매개 변수 조합을 유역의 조건에 맞게 일치시키는 과정으로, 추정 유출량과 관측 유출량이 가장 잘 일치되었을 때의 매개 변수값을 추정

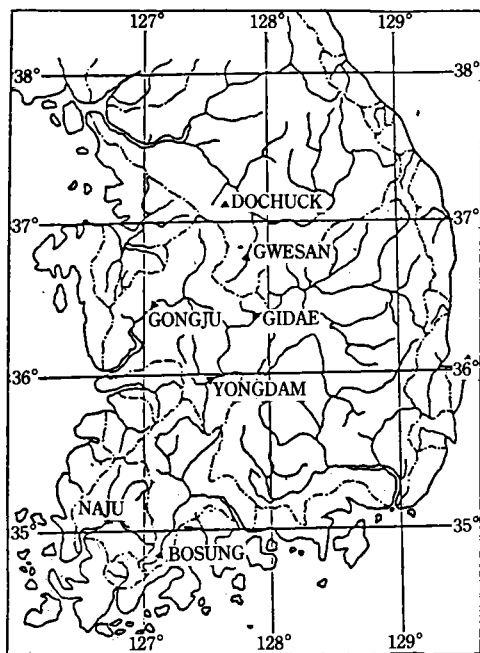


Fig. 3. Location of gauging station

하기 위하여 실시한다. 모형 보정 방법은 단순 시행 착오법과 최적화 기법이 있다. 이 연구에서는 제약 조건이 없는 비선형 심플렉스 최적화 기법<sup>21,26)</sup>을 사용하였다. 보정 절차는 Fig. 4와 같이 목적 함수를 설정하고, 예민도 분석에 의하여 매개 변수의 초기치를 선정한 후, 심플렉스 방법으로 최적 매개 변수를 보정하여 표면 반응 분석으로 확인한 후, 일 유출량을 모의 발생하였다. 각 지점의 결정된 최적 매개 변수는 Table-

Table-2. Physiographical factor of hydrologic stations

River	Station name	Watershed area(km <sup>2</sup> )	L (km)	L <sub>c</sub> (km)	Perimeter (km)	Max. El. (m)	Min. El. (m)
Han	DOCHUCK	5.89	3.3	1.5	10.6	644.0	116.0
Seomjin	BOSUNG	275.00	41.5	14.8	93.0	778.5	118.4
Geum	GIDAE	346.54	30.3	11.0	114.8	1,057.7	135.2
Han	GOESAN	671.00	79.2	26.2	144.0	1,057.7	132.5
Geum	YONGDAM	937.00	64.3	30.6	177.7	1,507.4	132.5
Youngsan	NAJU	2,060.00	75.1	26.5	260.0	1,187.0	1.4
Geum	GONGJU	7,126.00	306.0	93.0	421.0	1,507.4	9.2

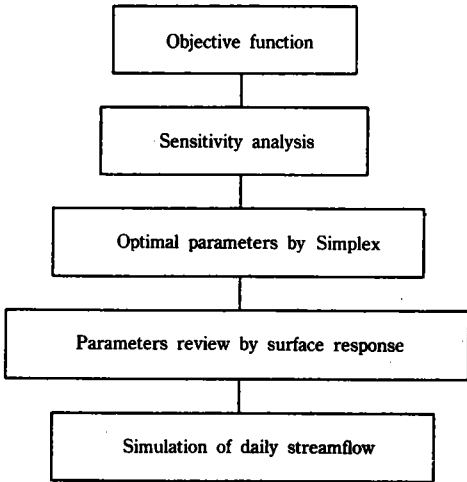


Fig. 4. Process of parameter calibration

3과 같다.

결정된 매개 변수의 범위는 UMAX는 260~380 mm, LMAX는 10~30mm, FC는 130~210mm, CP는 0.014~0.019, CE는 0.006~0.009으로 분포하였다. 토양의 공극률을 30%로 보면, 불포화 토양층의 깊이는 0.78~1.14m에 상당하며, 포장

Table-3. Optimal parameters in each station

Station	Calibration	Verification	UMAX mm	LMAX mm	FC mm	CP -	CE -
DOCHUCK	'87~'87	'85~'86	380	10	210	.016	.007
BOSUNG	'76~'78	'79~'81	360	20	160	.014	.006
GIDAE	'85~'86	'83~'84	260	20	140	.016	.006
GOESAN	'76~'78	'83~'85	320	20	130	.018	.009
YONGDAM	'70~'72	'74~'76	300	30	130	.019	.007
NAJU	'70~'72	'73~'75	310	30	140	.018	.008
GONGJU	'74~'76	'71~'73	320	20	140	.014	.007

용수량, FC는 용적비로 UMAX의 33~55%로서 평균 46%이었다. 이상 결정된 각 매개 변수값은 상식적인 물리적 범위의 값을 나타냄으로써 안정된 매개 변수값의 범위이었다.

이상 결정된 매개 변수값으로 보정 기간에 모의 발생시켜 관측-추정 일 유출량 수문 곡선과 비교하였으며, 관측-추정 旬別 유출량의 등價線(Equal value line)으로 모형의 적합성을 검토하였다. DAWAST 모형의 운전 결과로부터, 침투에 의한 불포화층의 토양 수분 변화, 유역

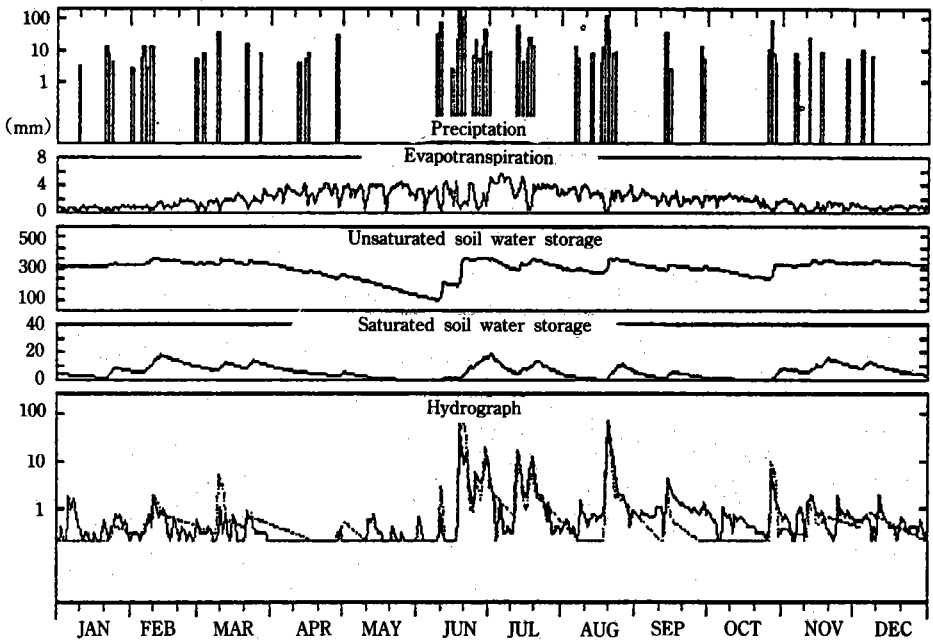


Fig. 5. Hydrograph representing hydrologic responses in calibration period(BOSUNG, 1978)



증발산량의 변화, 포화층의 토양 수분 변화 등 유역의 수문 반응을 상대적이지만 개념적으로 파악할 수 있었다. 일례로 寶城 지점의 수문 곡선을 예시하면 Fig. 5와 같으며, 첨두부와

감수부 모두 잘 일치하고 있고, 특히 가물었던 5, 6월의 유역 토양 수분 상태와 이에 따른 강우-유출의 수문 반응을 뚜렷하게 파악할 수 있었다. 寶城 지점의 등가선은 Fig. 6과 같다. 각 지점의 등가선은 Table-4와 같으며, 절편이 0.9~7.9, 기울기가 0.786~1.093, 상관 계수가 0.919~0.982로서 양호한 값을 나타내고 있다.

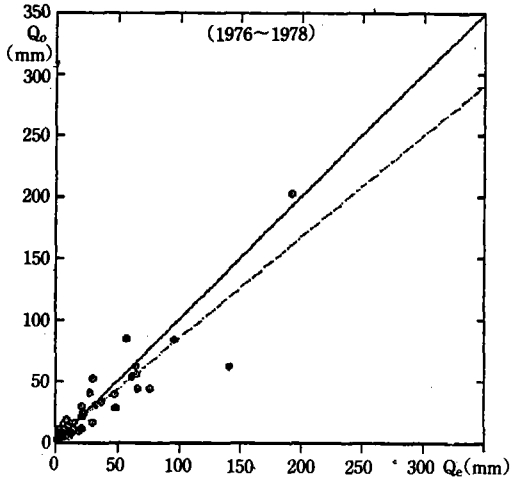


Fig. 6. Scattergram of ten-day streamflow depths in calibration period(BO-SUNG)

Table-4. Comparison of equal value line of ten-day streamflow depths in calibration period

Station	RMS (mm)	$Q_o = a + b \times Q_e$			Accumulated relative error (%)
		a	b	r	
DOCHUCK	1.9	7.9	0.786	0.982	1.5
BOSUNG	1.5	2.4	0.822	0.930	-1.7
GIDAE	0.6	2.0	0.915	0.919	1.4
GOESAN	0.5	3.2	0.849	0.900	5.9
YONGDAM	0.6	2.4	0.921	0.934	2.1
NAJU	0.6	0.9	1.093	0.966	11.7
GONGJU	0.2	1.5	0.931	0.963	4.0

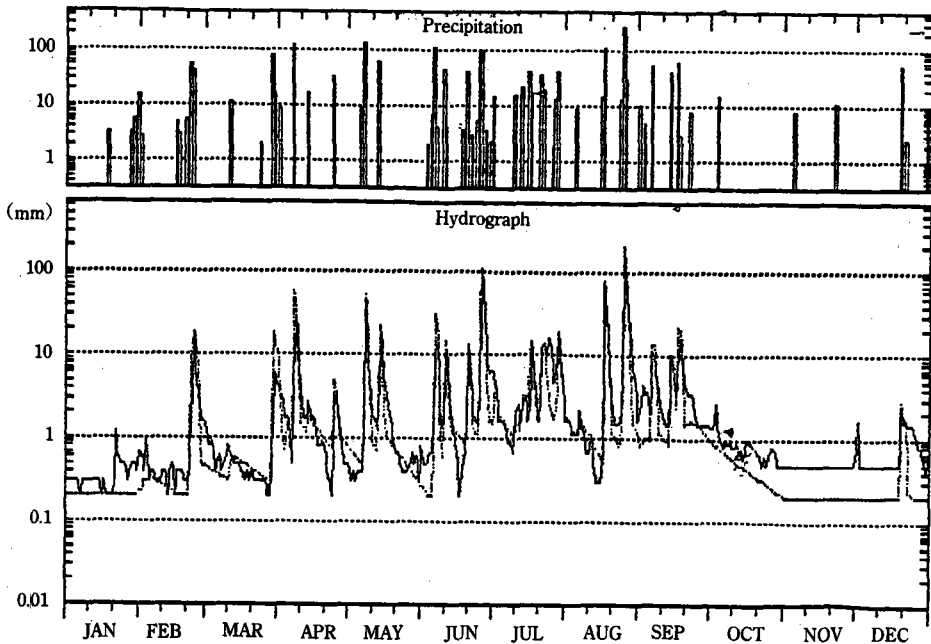


Fig. 7. Hydrograph in verification period(BOSUNG, 1979)

한편, RMS(Root Mean Square)는 0.2~1.9mm, 년 유출량의 누가 상대 오차는 -1.7~11.7%로써 작은 값을 나타내었다.

### 3. 模型의 檢定

결정된 매개 변수 값으로 검정 기간에 모의 발생시켜 관측-추정 일 유출량 수문 곡선과 관측-추정 旬別 유출량의 등가선(Equal Value Line)으로 모형의 적합성을 검토하였다.

寶城 지점의 수문 곡선과 등가선은 각각 Fig. 7, 8과 같다. Fig. 7의 모의 발생된 수문 곡선은 침투부와 감수부 모두 관측치와 잘 일치하고 있다.

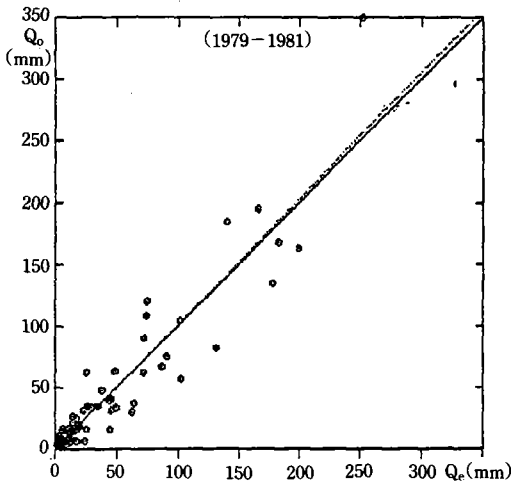


Fig. 8. Scattergram of ten-day streamflow depths in verification period(BO-SUNG)

각 지점의 순별 유출량 등가선 비교는 Table-5와 같으며, 절편이 -1.4~5.5, 기울기가 0.817~1.073, 상관계수가 0.926~0.961로서 양호한 값을 나타내고 있다. 한편, RMS는 0.2~1.4 mm, 년 유출량의 누가 상대 오차는 -6.6~8.0%로써 작은 값을 나타내었다.

Table-5. Comparison of equal value line of ten-day streamflow depths in verification period

Station	RMS (mm)	$Q_o = a + b \times Q_e$			Accumulated relative error (%)
		a	b	r	
DOCHUCK	0.8	5.5	0.817	0.946	8.6
BOSUNG	1.3	-1.4	1.021	0.958	-1.6
GIDAE	0.6	0.6	0.911	0.929	-5.4
GOESAN	1.4	0.9	0.981	0.961	3.2
YONGDAM	0.5	0.5	0.916	0.926	-6.6
NAJU	0.6	0.1	1.073	0.956	7.2
GONGJU	0.2	0.8	1.022	0.959	6.4

### IV. 結 論

유역이 시간 불변의 定常的(Time-invariant)이고 閉合系(Closed system)라는 가정하에 토양층을 지표면, 불포화층과 포화층의 3개 저수층으로 단순화한 집중형 모형의 구조로, 유역 토양 수분 상태를 일별로 추정하여 일 유출량을 모의 발생할 수 있는 확정론적, 집중형 연속 모형인 DAWAST 모형을 개발하였다. 유역면적 5.89~7,126km<sup>2</sup>의 7개소 유역을 선정하여, 최적화 기법으로 모형의 매개 변수를 보정하였고, 보정된 매개변수로 검정 기간에 대하여 모형의 적용성을 검토하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. DAWAST 모형은 토양의 불포화층과 포화층에서의 토양 수분 변화와 증발산량 변화를 나타내는 물리적 의미를 가진 5개 물수지 매개변수와 3개의 추적매개 변수의 간단한 모형 구성으로 유역의 강우-유출 수문 반응을 해석할 수 있었다.

2. DAWAST 모형은 유역 토양 수분의 연속 처리와 모형의 연속적 모의 발생에 적합하도록 SCS의 Retention parameter S를 토양의 최대 저류능 개념에서 불포화층의 유효 저류능 S<sub>2</sub> 개념으로 변형하여 최대 저류능과 현재의 토양

수분량의 차이로 새로이 정의하였다. 이  $S_a$ 는 유출수로부터 구하지 않고, 불포화 토양층 물 수지로부터 일별로 연속적으로 구하여 유효우량을 계산한다.

3. 모형의 물 수지 매개 변수 결정에는 제약 조건 없는 비선형 Simplex 기법을 사용하였고, 추적 매개 변수인 배분률의 결정에는 제약 조건 있는 비선형 flexible tolerance 기법을 사용하였다.

4. 보정된 매개 변수는 유역에 따라 UMAX는 260~380mm, LMAX는 10~30mm, FC는 130~210mm, CP는 0.014~0.019, CE는 0.006~0.009의 변화를 보였으며, 각 매개 변수 값은 상식적인 물리적 값의 범위에 있음을 알 수 있었다.

5. 모형의 적용성을 평가한 결과, 검증 기간에 걸쳐 누가 상대 오차는 -6.6~8.0%이었다. 따라서, 모형의 매개 변수를 보정할 수 있는 2~3년의 유출 자료가 있는 수문 지점에서는 DA-WAST모형에 일 강우량과 증발량을 입력하여 일 유출량을 모의 발생할 수 있을 것이다.

### 參 考 文 獻

1. 國土開發研究院, 1988, 西海岸 開發에 對備한 用水 需給에 관한 研究.
2. 農水産部, 農業振興公社, 1986, 流出量 推定 電算模型 開發 (II).
3. 農水産部, 農業振興公社, 1987, 受水量 推定 方法 再定立에 관한 研究 (II).
4. 農林水産部, 農漁村振興公社, 1990, 韓國 河川의 日 流出量 推定 實用化 模型 (I).
5. 權純國, 高德九, 1987, 山地 流域에 대한 US-DAHL-74 流域水文 模型의 長期流出 解析 適用, 韓國農工學會誌 29(2), pp. 53-63.
6. 金泰喆, 1988, 韓國 河川의 日 流出量 推定을 위한 地域化 模型, 韓國科學財團研究報告書, 忠南大學校, 農業科學研究所.
7. 金泰喆, 安秉基, 朴承基, 1989, 長期 流出 解析을 위한 有效雨量 推定, 韓國農工學會誌, 31(2), pp. 116-124.
8. 金顯榮, 朴承禹, 1986, 流域 特性에 따른 탱크 模型 媒介變數의 變化, 韓國農工學會誌, 28(2), pp. 44-52.
9. 盧載卿, 1991, 土壤 水分 貯留에 의한 日 流出量 流域 模型, 서울大學校 博士 學位論文.
10. 鮮于仲皓, 1977, SCS 方法 및 回歸分析에 의한 有效 降雨量 決定, 韓國水文學會誌, 10(2), pp. 101-111.
11. 安秉基, 金泰喆, 朴承基, 李景九, 1991, 長期 流出 解析에서의 減水 曲線係數 變化, 韓國農工學會誌, 33(1), pp. 45-54.
12. 嚴柄鉉, 1984, 長期 流出의 水文學的 模型 開發을 위한 主要 水系別 單位圖誘導, 韓國農工學會誌, 26(4), pp. 52-65.
13. 尹龍男, 沈淳輔, 1976, 單位流量圖法에 의한 小流域의 計劃 洪水量 決定, 韓國水文學會誌, 9(2), pp. 76-86.
14. 李淳赫, 朴明根, 1991, 長短期流出 兩用貯留 탱크 模型의 開發에 관한 研究 (I), 韓國農工學會誌, 33(1), pp. 55-67.
15. 鄭夏禹, 李南鎬, 朴承禹, 1990, 河川 日 流出量의 實時間 豫測, 韓國農工學會誌, 32(3), pp. 47-55.
16. Bathurst, J. C., 1986a, Physically-based distributed modeling of an upland catchment using the Systeme Hydrologique Europeen, J. of Hydrology 87, pp. 79-102.
17. Beken, A. V., 1989, A monthly water balance model applied to two different watersheds, in Surface and Subsurface Hydrology, WRP, pp. 178-189.
18. Beven, K., 1989, Changing ideas in hydrology-the case of physically-based models, J. of Hydrology 105, pp. 157-172.
19. Hawkins, R. H., 1979, Runoff curve numbers

- from partial area watersheds, *J. of Irri. and Drain.* 105(4), ASCE, pp. 375-389.
20. Hawkins, R. H., A. T. Hjelmfelt, Jr., M. ASCE, and A. W. Zevenbergen, 1985, Ruoff probability, storm depth, and curve numbers, *J. of Irri. and Drain.* 111(4), ASCE, pp. 330-340.
21. Himmelblau, D. M., 1972, *Applied Nonlinear Programming*, McGraw-Hill, p. 498.
22. Hjelmfelt, Jr. A. T., L. A. Kramer, and L. E. Burwell, 1982, Curve numbers and random variables, in *Rainfall-Runoff Relationship*, edited by V. P. Singh, WRP. pp. 364-370.
23. Kim, T. C., S. K. Park, and J. K. Noh, 1990, Regionalized daily streamflow model using a modified retention parameter in SCS method, *J. of the KSAE* 32(English edition), pp. 47-58.
24. Knisel, W. G., 1980, *CREAMS : A Field Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion From Agricultural Management System*, USDA, Conservation Research Report No. 26, p. 640.
25. Lopes, J. E. G., B. P. F. Braga Jr., and J. G. L. Conejo, 1982, SMAP-A simplified hydrologic model, in *Applied Modeling in Catchment Hydrology*, edited by V. P. Singh, WRP, pp. 167-176.
26. Nelder, J. A. and R. Mead, 1965, A simplex method for functional minimization, *The Computer Journal* 9, pp. 308-313.
27. Soil Conservation Service, 1972, *National Engineering Handbook*, section 4, Hydrology, United States Dept. of Agriculture, available from U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.