

韓國 河川의 日 流出量 模型 Daily Streamflow Model for the Korean Watersheds

김 태 철* · 박 승 기* · 안 병 기*
Kim, Tai Cheol · Park, Seong Ki · Ahn, Byoung Gi

Abstract

Daily streamflow model, DAWAST, considering the meteorologic and geographic characteristics of the Korean watersheds has been developed to simulate the daily streamflow with the input data of daily rainfall and pan evaporation. The model is the conceptual one with three sub-models which are optimization, generalization, and regionalization models. The conceptual model consists of three linear reservoirs representing the surface, unsaturated, and saturated soil zones and water balance analysis was carried out in each soil zones on a daily basis. Optimization model calibrates the parameters by optimization technique and is applicable to the watersheds where the daily streamflow data are available. Generalization model predicts the parameters by regression equations considering the geographic, soil type, land use, and hydrogeologic characteristics of watershed and is applicable to ungaged medium or small watersheds. Regionalization model cites the parameters from the analysed ones considering river system, latitude and longitude, and is applicable to ungaged large watersheds.

요 지

우리나라의 강수와 유역특성을 고려하여 일강우량과 증발량의 입력자료로 일유출량을 모의 발생할 수 있는 “한국 하천의 일 유출량 모형(DAWAST)”을 개발하였다. 이 모형은 개념화 모형을 기본모형으로 최적화모형, 일반화모형 및 수계화모형 등 3개의 부모모형으로 구성되어 있다. 기본모형은 유역을 지표면, 불포화층과 포화층의 3개 저수층으로 단순화하고 각 저수층에서 일단위로 물수지를 분석하였다. 최적화모형은 관측유출자료가 있는 유역에서 최적화 기법으로 매개변수를 보정하여 적용하고, 일반화모형은 유역특성인자로부터 매개변수를 예측하여 미계측 중·소유역에 적용하고, 수계화모형은 유역특성인자 조사가 없거나 어려운 지점에서 최적화기법으로 분석된 수문지점의 매개변수를 전용(轉用)하여 미계측 대유역에 적용하여 일유출량을 추정한다.

* 충남대학교 농과대학 농공학과

1. 서 론

생활수준향상, 산업발달 및 환경보전으로 물수요는 급격히 증가하고 있다. 이에 따라 방류되는 생활오수, 농업배수와 산업폐수로 인한 수질악화로 수자원은 양과 함께 질적으로 크게 문제가 되고 있다. 이러한 관점에서 저수지에서의 저수용량 결정, 다목적 이용, 갈수기 제한급수, 수질변화 및 침전량예측과 하천에서의 유행곡선 작성, 하천유지용수량 결정 및 이수관역화 계획 등 수자원을 보다 합리적으로 계획, 설계 및 관리하기 위해서는 일유출량의 정확한 추정은 매우 중요하다.

강우-유출현상은 매우 복잡하여 실제로 유역에 적용하기 위해서는 수문반응들을 여러가지 수식으로 단순화하여 자연현상을 예측하게 된다. 특히, 실용적인 차원에서는 기상특성과 유역특성의 입력 자료를 간단히 하고 모형구조와 매개변수를 단순화한 집중형, 개념화 유역수문모형이 개발되고 있다.

개념화 유출모형은 Crawford와 Linsley(1966)가 SWM-IV를 발표한 이후 사용목적에 따라 다양하게 발전하고 있다.

우리나라의 수자원계획을 위한 장기유출해석으로는 김현영과 박승우(1986)가 유역 물수지에 일본의 탱크모형을 도입하여 유역특성에 따른 매개변수의 변화를 구명하여 무게추지점에서의 적용 가능성을 검토하였으며, 권순국과 고덕구(1987)가 미국 USDAHL-74모형을 선택하여 5.89 km²의 도척시험유역에 적용하였으며, 김태철(1988)이 42개 수문지점 유출자료를 분석하여 SCS의 잠재저류능개념을 유효저류능개념으로 바꾸어 호우별로 적용하여 일유출량 추정을 위한 지역화모형을 발표하였으며, 김양수(1990)는 유효우량을 총강우량과 5일 선행강우량을 변수로 선행과 비선형 회귀모형을 4개 수문지점에서 분석하여 일유출량을 모의발생하였다.

이 연구에서는 우리나라의 수문관측자료를 이용하여 일유출량 추정이라는 개발목적에 부합되고 어느 하천에서도 일반적으로 적용할 수 있도록 간단한 입력자료와 단순한 구조의 집중형모형으로 유역 토양수분상태를 일별로 추정하여 일유출량을 모의

발생할 수 있는 “한국 하천의 일 유출량 모형(DAWAST)”을 개발하였다.

2. 강우-유출 기본모형의 구조

2.1 모형의 개념화

김태철 등(1991)은 토양층을 Fig. 1과 같이 지표면층, 불포화층(UMAX)과 포화층(LMAX)의 3개 저수층으로 단순화하여 강우-유출의 유역수문반응을 개념화하였다. 즉, 유역에 강우(P)가 있으면 차단, 증발, 지표면저류 등 초기손실(I_a)이 일어나고, 강우가 계속되어 초기손실량보다 크게 되면 침투(I)와 함께 표면유출(QS)이 일어난다. 침투에 의해 불포화 토양층의 토양수분량(WSU)은 점차 증가되고 침투가 계속되어 토양수분량이 포양용수량(FC) 이상되면 중력에 의해 포화토양층으로 침투침투(PERC)가 이루어져 포화층의 토양수분량(WSS)도 증가하게 된다. 이 포화층의 토양수분량이 일정량(LMAX) 이상되면 불포화층과 포화층 사이에서 중간유출(QI)이 발생한다. 무강수기에는 불포화층의 토양수분량은 유역증발산량(ET)에 의하여 감소되고, 포화층의 토양수분량은 기저유출(QB)로 누출되어 감소하게 된다.

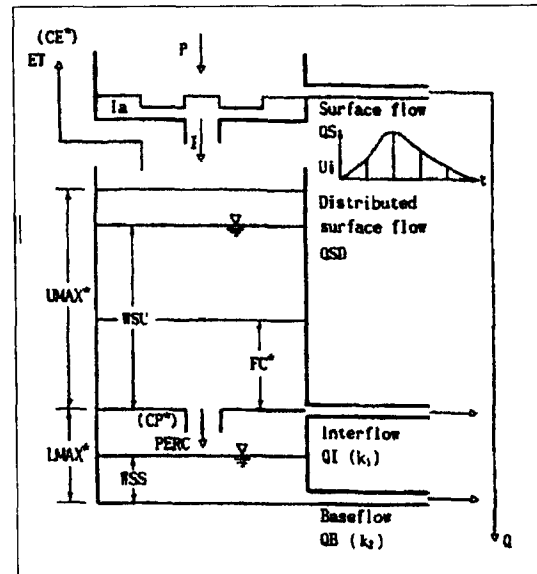


Fig. 1. Schematic Representation of the Conceptual Model

2.2 유역토양수분의 물수지분석

유출은 유역특성과 기상특성에 따라 영향을 받으며, 특히, 유역토양수분의 건습상태에 따라 크게 좌우되므로 이를 정확히 추정하는 것은 유효우량과 유출해석에 대단히 중요하다.

2.2.1 불포화층의 물수지

이 연구에서는 일별 물수지를 실시하여 식 (1)과 같이 불포화층의 토양수분상태 변화량을 일별로 추정한다.

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

여기서 WSU_i 는 i 일의 불포화층 토양수분량, I_i 는 i 일의 침투량, ET_i 는 i 일의 유역증발산량, $PERC_i$ 는 i 일의 심층침투량이며 단위는 mm이다.

(1) 침 투

일단위의 침투량을 구하는 것이므로 식 (2)와 같이 강우가 초기손실보다 작으면 전부 침투되고, 초기손실보다 크면 강우에서 표면유출량을 뺀 양이 침투된다.

$$I_i = P_i \text{ if } P_i < I_a, I_i = P_i - QS_i \text{ if } P_i > I_a \quad (2)$$

여기서 P_i 는 i 일의 강수량, QS_i 는 i 일의 표면유출량, I_a 는 초기손실량이며 단위는 mm이다.

(2) 증 발 산

Beken(1989)이 제시한 식 (3)의 방법을 이용하여 증발접시 증발량에 유역피복계수를 곱한 잠재증발량과 불포화층의 토양수분량으로부터 일별로 추정한다.

$$ET_i = E_o(1 - e^{-CE \times WSU_i}), E_o = C \times EP_i \quad (3)$$

여기서 E_o 는 i 일의 잠재증발량, EP_i 는 계기증발량, WSU_i 는 불포화층의 현재 토양수분량이며 단위는 mm 이다. C 는 유역피복계수, CE 는 유역증

발산 매개변수이다.

(3) 심층침투

침투가 계속되어 불포화층의 토양수분상태가 유역토양의 포장용수량 보다 크게되면 중력에 의하여 하부포화층으로 심층침투(Percolation)가 이루지고, 심층침투량은 식 (4)와 같이 전날의 불포화층의 토양수분량과 포장용수량의 차에 의해 계산된다.

$$PERC_i = CP \times (WSU_{i-1} - FC) \times \frac{WSU_{i-1}}{UMAX}, \quad \text{if } P_i > \text{ and } WSU_{i-1} > FC \quad (4)$$

여기서 $PERC_i$ 는 i 일의 심층침투량, FC 는 포장용수량이며 단위는 mm이다. CP 는 심층침투 매개변수이다.

2.2.2 포화층의 물수지

포화층의 토양수분량은 식 (5), (6)과 같이 심층침투량과 기저유출변화량을 고려하여 일별로 추정한다.

$$WSS_{i+1} = WSS_i + PERC_i - QB_i, \quad \text{if } P_i > 0 \quad (5)$$

$$WSS_{i+1} = WSS_i - QB_i, \quad \text{if } P_i = 0 \quad (6)$$

여기서 QB_i 는 i 일의 포화층 기저유출량, WSS_i 는 i 일의 포화층 토양수분량, P_i 는 i 일의 강수량이며 단위는 mm이다.

2.3 유출성분

유출성분을 표면유출, 중간유출과 기저유출성분으로 분류하고 상기 방법으로 유역토양수분을 고려하여 각 성분을 분석한 후 합산($Q = QS_i + QI_i + QB_i$)하여 일유출량을 추정한다.

2.3.1 표면유출

표면유출은 유출성분중에서 양적으로 가장 크기 때문에 대단히 중요한 성분이다. 이 모형에서는 유역토양수분의 연속처리와 모형의 연속적 모의발생

에 적합하도록 SCS(1972)의 S를 원래의 최대저류능개념에서 불포화층의 유효저류능 S_a 개념으로 변형한다. 즉, S_a 를 매개변수 최적화기법으로 유역 특성에 따라 결정되는 최대저류능(UMAX)과 식 (1)에서 구한 i일의 유역토양수분량의 차이로 식 (7)과 같이 새로이 정의하였으며 S_a 를 식 (8)에 적용하여 표면유출을 구한다.

$$S_{ai} = UMAX - WSU_i, \quad UMAX > WSU_i \quad (7)$$

$$QS_i = (P_i - 0.2S_{ai})^2 / (P_i + 0.8S_{ai}) \quad (8)$$

여기서 S_{ai} 는 i일의 유효저류능, UMAX는 불포화층 최대토양수분량, WSU_i는 i일의 불포화층 토양수분량, QS_i는 표면유출량, P_i는 강수량이며 단위는 mm이다.

2.3.2 중간유출

포화층의 최대수분량 이상의 심층침투량은 수평 방향의 중간유출로 나타낸 Sacramento모형 (Ponce, 1989)의 구조를 적용하여 식 (9), (10)으로 구하였으며 중간유출은 감수곡선계수 k_1 에 따라 결정된다.

$$QI_i = (1 - k_1) \times (WSS_i - LMAX) \quad \text{if } WSS_i > LMAX \quad (9)$$

$$QI_i = 0 \quad \text{if } WSS_i \leq LMAX \quad (10)$$

여기서 QI_i 는 i일의 중간유출량, LMAX는 포화층 최대수분량이며 단위는 mm이다. k_1 은 중간유출 감수곡선계수이다.

2.3.3 기저유출

포화층의 수분량은 심층침투에 의해 보충되고 포화층의 기저유출량은 식 (11)으로 구하였으며 포화층 수분량과 기저유출 감수곡선계수 k_2 에 따라 결정된다.

$$QB_i = (1 - k_2) \times WSS_i \quad (11)$$

여기서 QB_i 는 i일의 기저유출량, 단위는 mm이며, k_2 는 기저유출 감수곡선계수이다.

2.4 일 유출량 모형의 구조

개념화 기본모형은 UMAX, LMAX, FC, CP, CE 등 5개의 물수지 매개변수와 U_i , k_1 , k_2 등 3개의 추적 매개변수로 구성되었고 일강우량과 일증발량을 입력하여 일유출량을 구할 수 있는 모형이다. 관측유출자료가 있는 지점에서는 최적화기법으로 매개변수를 보정하여 적용하는 최적화모형으로, 관측유출자료가 없는 지점에서는 유역특성인자로부터 매개변수를 예측하여 적용하는 일반화모형으로, 유역특성인자 조사치가 없거나 어려운 지점에서는 최적화기법으로 분석된 수문지점의 매개변수를 전용하는 수계화모형으로 구성하였으며 Fig. 2와 같다.

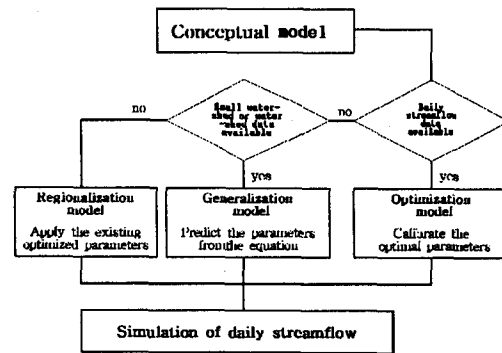


Fig. 2. Structure of DAWAST Model

3. 자료 및 방법

3.1 유역 및 수문자료

한국수문조사연보(건설부, 1962-1993)등을 중심으로 일유출량 자료가 비교적 양호하다고 판단되는 60개 수문지점을 선정하였으며, 일강우량과 증발량은 기상월보(기상청, 1962-1993)를 이용하여 분석하였다. 최적화모형의 물수지 매개변수 보정을 위하여 한강유역의 도척과 괴산, 금강유역의 기대, 용담 및 공주, 섬진강유역의 보성, 영산강유역의

나주지점 등 7개소를 선정하여 모형을 개발하였다. 유역규모는 5.9~7,126 km²이다. 일반화모형을 개발하기 위하여 최적화모형을 나머지 51개 유역에 적용하여 물수지 매개변수를 구하였다. 일반화모형과 수계화모형을 검증하기 위하여 각각 금강수계의 이평과 낙동강수계의 임하지점을 선정하였다.

3.2 모형의 매개변수 설정

모의발생 초기의 유역토양수분량을 파악하기 위한 초기 유효저류량과 유출량의 시간적 분포에 영향을 미치는 추적 매개변수인 일별 배분률과 감수곡선계수를 먼저 일반화하여 구한 다음 유출량에 영향을 미치는 물수지 매개변수를 구한다.

3.2.1 초기 유효저류량

연속적으로 모의발생하기 위하여 초기치 S_0 를 식 (12)와 같이 강우량과 기저유출량의 함수식으로부터 추정하였다(노재경, 1991). 기저유출량은 측정값을 사용하고 없으면 모의발생 시작일의 유출심(보통 0.2 mm)으로부터 감수곡선계수에 의하여 일별로 추정되는 값을 사용한다.

$$S_0 = 51.2 - 33.6QB_0 + 1.224P_0 \quad (10 \sim 3 \text{월})$$

$$S_0 = 63.5 - 23.6QB_0 + 0.816P_0 \quad (4 \sim 6 \text{월}) \quad (12)$$

$$S_0 = 79.0 - 16.2QB_0 + 0.425P_0 \quad (7 \sim 9 \text{월})$$

여기서 S_0 , QB_0 , P_0 는 각각 처음 강우발생일의 잠재저류능, 기저유출량, 강우량이며 단위는 mm이다.

3.2.2 추적 매개변수

추정된 일유효우량은 유역의 크기와 기저시간의 크기에 따라 유출이 지체되므로 일별로 배분하고 중간유출과 기저유출은 포화토양층의 수분량과 감수곡선계수에 따라 결정된다.

(1) 일별 배분률 (U_i)

Kim 등(1990)이 42개 수문지점의 일강우-유출량도로부터 2,000여개의 강우-유출사상을 분석한 결과를 고려하여, 유역면적 5,000 km²까지는 3일, 15,000 km²까지는 4일, 15,000 km² 이상은 5일

로 기저시간을 정하는 등 유역규모에 따라 Tabel 1과 같이 산정한 평균치를 일별 배분률로 적용한다.

Table 1. Daily Distribution Factor

Area (Km ²)	<250	<1,000	<5,000	<15,000	>15,000
U_1	0.52	0.37	0.17	0.11	0.22
U_2	0.37	0.44	0.60	0.45	0.28
U_3	0.11	0.19	0.23	0.32	0.20
U_4				0.12	0.16
U_5					0.14

(2) 감수곡선계수(k)

안병기 등(1991)이 제시한 중간, 기저유출 감수곡선계수를 적용한다. 감수곡선 계수의 수계별 차이는 크지 않았으며, 유역규모별로는 월별 변화의 성향이 뚜렷하고, 그 변이도 상당히 크기 때문에 유역규모를 고려한 월별 중간유출(k_1), 기저유출(k_2) 감수곡선계수를 식 (13)으로 구한다.

$$Q = Q_0 \times k', \quad k = a + b \times \log_{10} A \quad (13)$$

여기서 A 는 유역면적 (km²), k 는 감수곡선계수, a 와 b 는 월별 상수이다.

3.2.3 물수지 매개변수

관측된 유출자료의 유무에 따라 물수지 매개변수를 최적화, 일반화, 수계화모형으로 구분하여 구한다.

(1) 최적화모형

모형의 매개변수조합을 유역조건에 맞게 일치시키는 과정으로 추정유출량과 관측유출량이 가장 잘 일치되었을 때의 매개변수값 $UMAX$, $LMAX$, FC , CE , CP 등을 최적화 기법으로 보정한다. 보정절차는 Fig. 3과 같이 목적함수를 설정하고, 예민도분석에 의하여 매개변수의 초기치를 선정한다. Simplex 방법으로 최적매개변수를 보정하여 표면반응분석으로 확인한 후 일유출량을 모의발생한다.

(2) 일반화모형

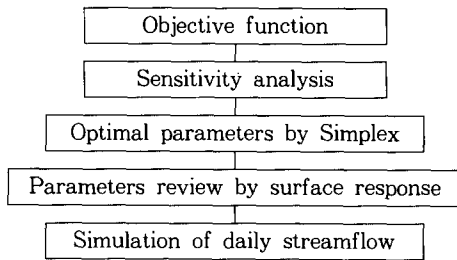


Fig. 3. Process of Parameter Calibration

58개 수문지점에 대하여 최적화모형으로 구한 5개 불포화층 물수지 매개변수를 종속변수로, 유역의 지형인자, 토양인자, 토지이용인자, 수문지질인자 등을 독립변수로 취하여 Stepwise 회귀분석으로 물수지 매개변수 예측방정식을 구하여 일반화한다.

(3) 수계화모형

대유역의 경우에는 유역특성 조사량도 많고, 중소유역이라도 유역특성인자에 대한 조사자료가 없는 경우에는 이미 분석된 58개 수문지점의 모형 매개변수를 전용하여 일유출량을 모의발생할 수 있도록 일반화하여 수계화모형이라 한다.

4. 결과 및 고찰

유출량에 영향을 미치는 물수지 매개변수를 유출자료의 유무에 따라 최적화 또는 일반화모형으로 구하였다. 각 모형으로 추정된 일유출량을 관측한 유출량과 비교하여 검정하였으며 유출성분의 특성

을 분석하였다.

4.1 최적화모형

4.1.1 물수지 매개변수

물수지 매개변수를 최적화하기 위하여 예민도 분석, Simplex 최적화, 반응표면 분석을 실시하였다. 최적화모형을 위한 대표유역 7개 수문지점에 대하여 물수지 매개변수는 Table 2와 같다.

매개변수의 범위는 UMAX 260~380 mm, LMAX 10~30 mm, FC 130~210 mm이며 CP 0.014~0.019, CE 0.006~0.009였다. LMAX가 UMAX의 1/10 정도로 값이 적은 것은 일유출량의 물수지에 영향을 미치는 포화층의 최대수분량이기 때문이며 지하수부존층과는 다른 의미이다 (Sutcliffe와 Green, 1986). 불포화 토양층의 공극율을 30 %로 보면 UMAX값으로부터 산정한 불포화층의 평균깊이는 780~1,140 mm이고, FC는 용적비로 UMAX의 33~55 %로 유역의 물리적인 의미를 가지는 안정적인 수준이다.

Table 2. Optimized Parameters

Watershed	Calibration	Verification	UMAX mm	LMAX mm	FC mm	CP -	CE -
Dochuck	1987~87	1985~86	380	10	210	0.016	0.007
Bosung	1976~78	1979~81	360	20	160	0.014	0.006
Gidae	1985~86	1983~84	260	20	140	0.016	0.006
Goesan	1976~78	1983~85	320	20	130	0.018	0.009
Yongdam	1970~72	1974~76	300	30	130	0.019	0.007
Naju	1970~72	1973~75	310	30	140	0.018	0.008
Gongju	1974~76	1971~73	320	20	140	0.014	0.007

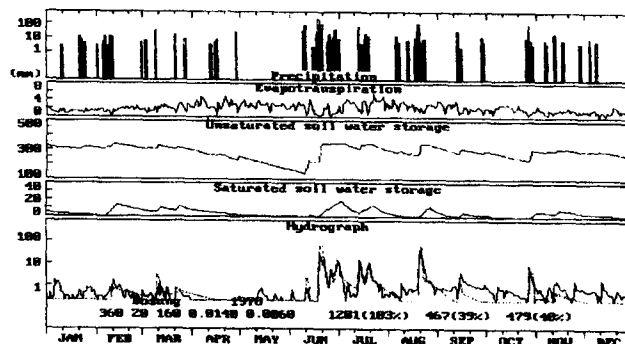


Fig. 4. Hydrograph Simulated by Optimization Model at Bosung Watershed in 1978

4.1.2 일유출량 모의발생

성분별 유출량을 분리한 결과, 표면유출은 53~75 %, 중간유출은 0~6 %, 기저유출량은 21~47 %였다. 최적화모형으로 7개 대표유역에서 모의발생한 일유출량과 관측유출량으로부터 관측-추정 순별(旬別) 유출량의 등가선을 비교하여 모형의 적합성을 검토하였다. 이들 등가선에 대한 통계치는 절편 0.9~7.9 mm, 기울기 0.786~1.093, 상관계수 0.919~0.982로서 양호한 값을 나타내고 있다. RMS오차는 0.5~1.9 mm, 연유출량 누가상대오차는 -1.7~11.7 %로서 비교적 안정된 값을 나타내었다.

최적화모형 대표유역 가운데 보성지점에서 모의발생한 결과는 Fig. 4와 같다. 1978년 보성유역의 강수량은 1201 mm, 관측유출량은 467 mm, 모의발생한 유출량은 479 mm로 강수, 증발산, 침투 및 심층침투의 변화에 따른 불포화 토양층과 포화 토양층의 수분변화 등 유역수문반응을 개념적으로 잘 나타내고 있다. 이러한 불포화 토양층과 포화 토양층의 수분변화를 파악하여 유역의 홍수 및 한발 해석에 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

4.1.3 연별 물수지 분석

최적화모형을 용담지점에 적용하여 구한 1970~1976년의 연별 물수지 분석결과는 Table 3과 같다. 유역수문현상으로 증발산량은 600.3~697.1 mm, 침투량은 553.4~637.1 mm, 심층침투량은 202.2~262.2 mm로 안정적인 변화를 보여주고 있다. 연도별 저류량(Storage)은 강수량에서 추정

Table 3. Annual Water Balance Analysis in Yongdam Watershed (Unit : mm)

Description\Year	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976
Observed rainfall	1497.3	1256.3	1552.9	1265.8	1352.5	1512.0	1024.8
Observed runoff	906.2	767.0	957.5	676.9	685.8	866.3	537.7
Estimated runoff	860.3	651.5	946.3	703.2	730.9	947.9	471.4
Evapotranspiration	600.3	618.2	602.7	697.1	630.8	618.2	624.2
Infiltration	637.0	604.8	606.6	562.6	621.6	564.1	553.4
Percolation	211.9	202.1	262.2	202.7	220.7	212.2	217.1
Soil water storage	Jan.1 260.5	274.1	238.7	284.9	274.0	280.9	279.1
Dec.31	274.6	239.2	285.7	274.6	281.5	279.6	285.5
Difference	+14.1	-34.9	+47.0	-10.3	+7.5	-1.3	+9.4
Ground water storage	Jan.1 5.3	6.2	0.4	19.7	11.9	8.3	14.7
Dec.31	6.2	0.4	19.7	11.9	8.3	14.7	13.5
Difference	+0.9	-5.8	+19.3	-7.8	-3.6	+6.4	-1.2
Storage	+51.7	-54.1	+70.2	-152.8	-5.3	-49.0	-62.6

Table 4. Optimal Parameters in Applied Watersheds

Name of River	Name of Watershed	Period analysed	UMAX mm	LMAX mm	FC mm	CP	CE
Han	Dochuck	1985~87	380	10	210	.016	.007
	Yimokjeong	1983~89	400	25	150	.017	.009
	Maesan	1974~75	380	20	120	.016	.008
	Backokpo	1991~93	400	35	150	.017	.008
	Gyeonggan	1984~89	345	28	160	.017	.009
	Banweolsung	1974~75	338	21	160	.018	.008
	Hoengseong	1984~86	311	22	139	.015	.008
	Janghoweon	1972~75	330	20	140	.018	.009
	Jucheon	1983~86	319	23	162	.015	.008
	Goesan	1976~85	310	30	130	.019	.009
	Whopo	1983~85	316	28	116	.019	.008
	Jeongseon	1985~85	338	32	129	.018	.009
	Yeongweol	1965~69	314	40	112	.020	.005
	Soyang	1974~76	322	29	127	.019	.009
Chungju	1965~68	322	28	122	.020	.005	
Yeoju	1968~70	303	30	135	.018	.007	
Nakdong	Supyeong	1973~74	310	30	120	.020	.006
	Gajang	1969~76	265	24	159	.015	.009
	Yian	1972~75	287	24	186	.013	.009
	Sanyang	1971~73	334	29	146	.017	.009
	Songriweon	1983~85	305	22	106	.022	.007
	Changri	1972~74	348	27	119	.020	.007
	Weolpo	1974~83	350	25	160	.018	.008
	Andong	1977~86	335	25	160	.017	.008
	Jeongam	1966~67	310	30	130	.019	.006
	Waegwan	1971~73	284	33	144	.019	.006
Jindong	1967~68	264	26	133	.017	.006	
Geum	Koeun	1973~75	380	25	170	.018	.009
	Guryong	1986~90	320	25	160	.017	.009
	Gidae	1983~86	295	27	162	.015	.008
	Hoeduk	1983~86	325	32	140	.017	.009
	Yongdam	1970~76	305	32	129	.018	.009
	Seoghwa	1965~68	354	27	153	.017	.008
	Okcheon	1967~68	306	34	138	.017	.008
	Songpo	1972~76	305	30	135	.018	.007
	Daechung	1983~86	313	34	141	.019	.006
Gongju	1967~76	302	31	138	.017	.009	
Seomjin	Beonam	1986~89	330	20	130	.018	.006
	Bosung	1976~81	377	24	167	.014	.008
	Abrok	1965~69	305	30	135	.018	.007
	Songjeong	1965~71	291	31	139	.017	.009
Youngsan	Hwasun	1974~75	340	20	160	.018	.009
	Yipkyo	1974~75	380	30	170	.018	.009
	Nampyeong	1965~72	260	30	120	.020	.006
	Mareug	1978~80	259	29	117	.017	.006
Naju	1970~75	260	30	120	.018	.007	
Ahnseong	Yidong	1966~68	321	20	131	.018	.009
	Songsan	1970~73	275	30	135	.020	.007
	Hoehwa	1970~72	343	40	113	.021	.006
	Yangryeong	1982~84	390	25	160	.016	.008
Youcheon	1971~73	275	38	105	.022	.005	
Sabkyo	Daeheung4	1964~66	320	30	130	.020	.007
	Daeheung2	1964~67	360	25	170	.018	.008
	Daeheung7	1964~66	370	30	160	.017	.008
	Suchon	1983~88	300	30	130	.020	.006
Mangyeong	Buahn	1987~88	376	30	159	.016	.007
	Kochang	1973~74	340	25	150	.019	.008
Yisa	Yangyulkyo	1965~69	380	30	140	.018	.008

유출량, 증발산량, 토양수분과 지하수변화량으로 구하였다.

Table 5. Characteristics of Gauged Watersheds

Watershed	Geographical				Soil type				Land use			Hydrogeologic		
	Area	Main S.L	Peri-meter	Slope	A	B	C	D	Dry field	Pad.	Forest	Igne.	Sedi.	Meta.
	km ²	km	km	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄
Dochuck	5.9	3.3	10.6	21.7	0.0	23.3	61.0	15.7	5.7	7.5	79.2	0.0	0.0	100.0
Yimokjeong	55.9	14.5	35.0	13.3	0.0	16.1	53.4	30.5	2.2	10.1	83.0	75.5	0.0	24.5
Maesan	122.5	12.5	50.0	3.5	1.8	34.9	57.7	5.6	16.6	10.8	62.6	88.3	0.0	11.7
Backokpo	141.6	24.3	55.8	6.8	0.7	21.5	52.6	25.2	3.4	11.0	87.7	63.1	0.0	36.9
Gyeongang	264.3	32.3	99.8	3.5	3.2	54.8	39.8	2.1	15.6	10.5	63.9	2.0	0.0	98.0
Banweolsung	274.2	22.5	102.5	2.6	2.8	38.8	53.8	4.7	20.1	13.6	56.8	83.0	0.0	17.0
Hoengseong	445.2	34.5	102.5	5.5	0.9	34.0	51.3	13.7	5.9	8.1	81.2	58.3	36.3	5.4
Janghoweon	484.5	35.0	150.0	2.8	4.1	46.1	44.7	5.1	18.7	14.0	57.4	70.0	2.6	27.4
Jucheon	528.8	60.0	124.0	4.4	1.2	17.4	70.0	11.4	4.9	14.6	75.9	3.1	7.9	89.0
Goesan	671.0	79.2	144.0	3.6	0.5	26.2	61.1	12.2	15.4	8.5	71.1	11.8	25.7	62.5
Whopo	1,611.0	112.8	223.0	3.5	2.4	17.4	46.4	33.8	3.0	11.2	80.5	25.5	33.6	40.9
Jeongseon	1,709.0	108.6	226.5	3.1	1.7	7.5	28.8	62.1	0.7	8.3	86.7	39.0	49.1	11.9
Yeongweol	2,430.0	153.0	254.5	2.8	1.2	10.3	38.9	49.7	0.8	8.3	86.7	25.3	67.5	7.2
Soyang	2,703.0	114.5	335.0	3.1	1.5	11.0	40.0	47.5	0.9	9.0	85.7	22.0	64.0	14.0
Chungju	6,657.0	257.0	422.0	1.9	1.8	13.2	44.7	40.4	2.8	9.7	82.1	17.1	56.4	26.4
Yeosu	11,130.0	312.0	665.5	1.5	2.5	21.9	48.0	27.6	6.7	10.1	76.6	34.5	37.5	27.2
Supyeong	85.8	17.6	46.2	9.7	0.0	16.0	64.4	19.6	3.9	5.4	88.0	0.0	56.0	44.0
Gajang	149.4	18.4	59.0	6.1	2.3	30.4	60.9	6.4	20.2	10.3	61.2	56.4	0.0	41.7
Yian	189.9	40.0	72.5	5.9	0.3	24.8	59.4	15.5	12.0	8.1	73.1	9.1	83.8	6.8
Sanyang	211.8	32.0	72.0	7.2	1.2	18.3	58.9	21.7	8.3	7.6	78.9	0.6	61.4	38.0
Songriweon	475.0	39.5	105.5	5.1	3.0	55.7	38.5	2.8	6.2	9.8	78.8	78.5	0.7	20.8
Changri	924.6	59.5	163.0	4.7	2.7	23.9	61.3	12.1	10.8	5.8	77.0	35.4	18.6	46.0
Weolpo	1,140.0	73.0	157.5	4.0	2.3	51.4	69.3	7.0	9.9	11.5	71.4	68.0	0.3	31.7
Andong	1,584.0	142.0	232.0	3.7	1.1	7.7	75.2	16.0	4.0	8.7	81.9	40.0	29.7	29.9
Jeongam	2,990.0	152.0	335.5	3.5	4.3	16.5	69.6	9.6	12.4	6.0	73.2	29.9	37.5	29.4
Waegwan	11,074.0	285.5	639.5	1.5	3.5	22.0	63.6	10.9	9.6	9.1	73.3	25.2	47.0	25.8
Jindong	20,130.0	393.0	892.0	1.3	4.3	18.7	65.9	11.1	11.1	8.3	71.1	24.1	48.2	23.4
Koewn	88.0	17.7	39.5	5.8	2.9	46.3	48.9	1.9	15.2	9.7	66.3	58.1	0.0	41.9
Guryong	207.2	35.0	90.5	4.3	2.9	40.3	53.2	3.6	16.3	8.8	66.8	11.3	8.0	80.7
Gidae	346.5	30.0	114.8	5.0	3.8	29.4	52.3	14.5	10.2	9.8	71.4	72.3	9.9	17.8
Hoeduk	647.7	47.3	114.0	3.3	3.5	35.7	57.5	3.3	8.7	8.1	67.9	45.4	11.7	26.4
Yongdam	937.0	56.5	177.5	4.3	1.1	24.8	62.0	12.0	8.0	6.5	79.7	10.7	22.0	67.3
Seoghwa	1,590.4	65.0	165.5	1.6	4.7	52.3	40.0	3.0	18.6	13.8	55.8	46.3	11.0	33.4
Okcheon	2,942.6	151.0	323.5	2.6	2.2	22.0	65.9	9.9	8.5	7.4	77.7	30.5	21.3	48.2
Songpo	3,940.0	204.0	365.0	2.3	3.0	25.2	61.8	10.0	9.3	8.7	74.6	38.1	18.0	44.0
Daechung	4,134.0	229.0	387.0	2.3	2.8	23.8	64.6	8.8	9.3	8.7	74.1	35.9	17.6	46.4
Gongju	7,126.0	277.0	421.0	1.8	3.7	32.7	57.1	6.6	12.0	9.8	68.3	49.6	11.8	34.9
Beonam	219.2	14.2	84.0	8.4	1.0	15.9	80.5	2.6	8.2	4.9	81.9	60.9	0.0	39.1
Bosung	275.0	38.5	93.0	4.0	0.4	29.7	63.4	6.5	18.9	7.6	66.0	3.6	9.8	86.6
Abrok	2,448.0	140.3	309.5	2.5	2.7	23.8	66.3	7.3	13.8	7.5	70.3	52.5	27.4	17.7
Songjeong	4,477.0	162.5	485.5	2.2	2.4	20.8	69.1	7.7	14.5	6.9	71.1	34.4	20.4	43.0
Hwasun	97.5	20.0	46.6	8.2	1.1	24.9	72.2	1.8	10.9	9.4	72.6	19.7	63.2	14.6
Yipkyo	134.3	19.3	60.2	5.3	2.1	21.0	73.6	3.3	10.8	5.2	78.4	0.5	27.9	71.6
Nampyeong	576.2	42.5	84.0	3.5	3.2	16.8	71.3	8.7	11.9	8.1	70.7	19.9	49.9	25.4
Mareug	684.0	47.5	133.3	4.5	3.4	18.1	67.5	11.0	21.8	9.0	53.0	32.4	43.2	7.3
Naju	2,060.0	74.5	260.0	2.6	4.3	19.4	65.5	10.9	19.4	10.0	57.4	20.3	51.3	17.1
Yidong	48.5	10.5	38.5	6.6	3.6	48.4	47.4	0.6	15.8	10.5	63.6	0.0	0.0	98.8
Songsan	242.3	33.0	85.0	3.7	3.0	37.1	45.5	14.5	26.4	18.0	31.0	29.6	0.0	44.3
Hoehwa	367.3	27.8	95.0	2.7	4.9	56.8	36.5	1.8	18.6	11.6	58.8	8.4	0.0	74.1
Yangryeong	388.0	32.5	98.4	2.7	4.0	36.3	53.5	6.2	23.6	11.9	53.0	50.8	0.0	40.9
Youcheon	491.7	35.5	112.5	2.4	4.1	36.4	52.5	7.0	24.9	13.4	49.7	45.3	0.0	32.7
Daeheung4	44.5	9.5	27.5	6.8	4.0	43.9	51.7	0.4	16.5	8.9	66.5	0.0	9.9	90.1
Daeheung2	125.7	17.0	52.5	4.2	5.1	33.0	57.6	4.3	18.1	11.4	61.7	4.3	13.5	82.2
Daeheung7	157.8	15.0	62.5	4.3	4.9	48.0	46.5	0.6	14.3	9.6	67.3	0.0	2.6	97.6
Suchon	254.8	25.5	78.0	4.2	3.8	38.4	50.5	7.3	21.7	15.3	52.9	47.3	0.0	40.8
Buahn	59.0	13.0	26.5	6.4	1.6	8.9	42.5	47.0	10.3	7.9	74.1	00.0	0.0	0.0
Kochang	203.1	22.7	69.1	5.1	1.1	39.1	56.2	3.6	20.0	14.8	55.1	61.0	0.0	39.0
Yangyulkyo	186.7	21.2	50.0	6.5	0.0	23.4	75.0	1.6	12.7	6.2	74.6	3.5	0.0	96.5

4.2.1 매개변수 보정

58개 수문지점에 최적화모형을 적용하여 구한 물수지 매개변수는 Table 4와 같다.

4.2 일반화모형

유출자료가 없는 미계측 수문지점에서도 유역특성인자로부터 물수지 매개변수를 예측하여 일유출량을 추정할 수 있도록 일반화모형을 설정하였다.

4.2.2 유역특성인자

물수지 매개변수와 물리적으로 관계가 깊은 유역특성인 지형인자, 토양인자, 토지이용인자, 수문지

질인자 등은 Tabel 5와 같다.

(1) 지형인자는 유역면적, 주하천장, 주변장, 경사도를 1/25,000, 1/50,000 지형도에서 구하였다.

(2) 토양인자는 SCS 방법과 같이 A, B, C, D 4개의 Soil Type으로 구분하여 토양도에서 구성비를 구하였다.

(3) 토지이용인자는 24개 지적요소를 밭, 논, 대지, 도로, 하천, 산림지로 분류하고 밭, 논, 임야의 구성비를 구하였다.

(4) 수문지질인자는 1/250,000 및 1/50,000 지질도에서 충적층, 화성암, 퇴적암, 변성암지역으로 분류하고 화성암, 퇴적암, 변성암지역의 구성비를 구하였다.

4.2.3 매개변수 예측방정식

매개변수 예측방정식을 Stepwise 회귀분석에 의하여 250 km² 이하인 소유역 19 개소, 250~1,000 km²인 중유역 19개소, 1,000 km² 이상인 대유역 20개소로 유역규모를 나누어 예측방정식을 구하였다. 따라서, 유역규모에 따라 Table 6의 회귀식으로 예측한 물수지 매개변수로 일유출량을 모

의발생하는 일반화모형을 적용하였다.

4.2.4 일반화모형의 적용 결과

일반화모형의 검정지점으로 금강수계 이평지점을 선정하여 관측 일유출량과 추정 일유출량을 비교하여 모형의 적합성을 검정하였다. 이평지점의 유역면적은 79.5 km², 주하천장은 19.4 km, 주변장은 51.5 km, 유역평균경사는 8.2 %이며, 토양인자인 A, B, C, D 4개군의 Soil Type은 각각 2.2 %, 33.1 %, 50.9 %, 13.8 %이고, 토지이용인자 중 밭은 8.1 %, 논은 9.4 %, 산림은 74.8 %이며, 수문지질인자중 화성암은 38.5 %, 퇴적암은 0.8 %, 변성암은 60.7 %의 구성비로 형성되어 있다. 예측방정식으로 구한 물수지 매개변수는 UMAX 351 mm, LMAX 25 mm, FC 159 mm, CP 0.017, CE 0.008이다. 추적매개변수를 적용하여 모의발생한 일유출량 수문곡선은 Fig. 5와 같다.

이평지점의 1983년 강수량은 1,221 mm이었고 관측된 유출량은 897 mm로 유출율 73 %로 과대하게 평가된 반면, 일반화모형으로 구한 유출량은

Table 6. Prediction Equation for Ungauged Watersheds

Watershed size	Prediction equation
Less than 250 km ²	$\begin{aligned} \text{UMAX} &= 289.94 + 0.3154 X_1 - 1.4036 X_3 + 1.4545 X_{11} - 0.6739 X_{13} \\ \text{LMAX} &= 19.97 - 1.2229 X_4 + 0.1150 X_7 + 0.3332 X_8 + 0.0769 X_{14} \\ \text{FC} &= 90.3 + 1.9205 X_2 - 0.4113 X_3 + 4.6079 X_4 + 6.8372 X_5 \\ \text{CP} &= 0.0145 - 0.000063 X_2 + 0.000041 X_7 + 0.000154 X_9 \\ \text{CE} &= 0.0077 - 0.000012 X_1 + 0.000111 X_2 - 0.000032 X_8 \end{aligned}$
250~ 1,000 km ²	$\begin{aligned} \text{UMAX} &= 380.53 - 5.1977 X_{10} - 1.6019 X_{13} + 0.2993 X_{14} \\ \text{LMAX} &= 25.0 + 1.5794 X_5 + 0.8127 X_9 + 0.7647 X_{11} - 0.7212 X_{12} \\ &\quad - 0.6802 X_{13} - 0.6384 X_{14} \\ \text{FC} &= 233.1 - 0.1846 X_1 + 0.7474 X_3 + 1.6946 X_7 - 2.7813 X_9 \\ &\quad - 4.2534 X_{10} - 1.3910 X_{11} - 0.5243 X_{13} \\ \text{CP} &= - 0.0352 + 0.000020 X_1 - 0.000087 X_3 + 0.000696 X_5 \\ &\quad + 0.000118 X_6 + 0.000663 X_9 + 0.000705 X_{10} + 0.000457 X_{11} \\ \text{CE} &= 0.0264 - 0.000008 X_1 + 0.000054 X_3 - 0.000681 X_4 - 0.000438 X_5 \\ &\quad - 0.000308 X_9 - 0.000280 X_{10} - 0.000150 X_{11} \end{aligned}$
Larger than 1,000 km ²	$\begin{aligned} \text{UMAX} &= 324.0 - 0.0612 X_3 + 0.9581 X_6 - 2.8831 X_9 + 0.3866 X_{12} \\ \text{LMAX} &= 47.2 - 0.1194 X_7 - 1.1277 X_{10} \\ \text{FC} &= 151.8 - 0.4888 X_{13} \\ \text{CP} &= 0.00797 - 0.0000036 X_1 + 0.0000199 X_2 + 0.000681 X_4 \\ &\quad + 0.0000969 X_5 + 0.000101 X_{13} + 0.0000355 X_{14} \\ \text{CE} &= 0.00875 - 0.0000186 X_2 + 0.00000844 X_3 + 0.0000573 X_8 \\ &\quad - 0.0000716 X_{13} \end{aligned}$

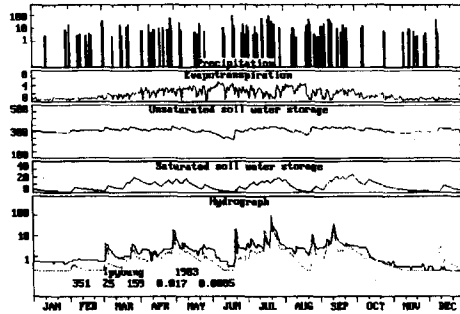


Fig. 5. Hydrograph Simulated by Generalization Model at Iypeong Watershed in 1983

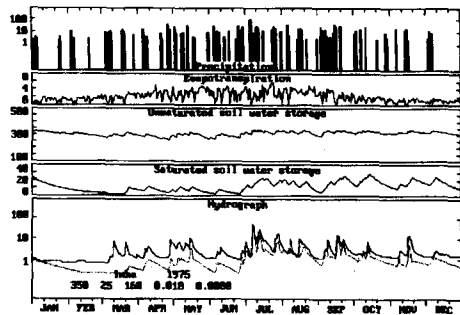


Fig. 6. Hydrograph Simulated by Regionalization Model at Imha Watershed in 1975

586 mm로 48 %의 유출율로 적절하게 나타났다.

관측유출량이 너무 크게 산정되어 추정유출량을 평가하기는 어려우나 강우에 의한 유역수문반응은 대체로 잘 나타내고 있다.

4.3 수계화모형의 적용 결과

Table 4와 같이 이미 분석되어 있는 수문지점의 물수지 매개변수를 전용하여 일유출량을 추정하는 수계화모형은 대유역에 적용하는 것이 바람직할 것이다. 수계화모형을 적용하여 유역면적 1,360 km²인 입하지점의 유출량을 추정하려면 수계, 유역규모 및 지리적위치를 고려할 때, 낙동강수계의 유역면적 1,140 km²인 월포지점의 물수지 매개변수를 전용하게 되며 모의발생한 일유출량 수문곡선은 Fig. 6과 같다.

입하지점 1975년 강수량은 1,153 mm였고 관측된 유출량은 1,015 mm로 88 %의 유출율로 과대하게 평가된 반면, 수계화모형으로 구한 유출량은

541 mm로 47 %의 유출율로 적절하게 나타났다.

관측값이 너무 크게 산정되어 추정값의 평가는 어려우나 강우에 의한 유역수문반응은 대체로 잘 나타내고 있다.

5. 결 론

물수요증가와 수질악화로 인하여 제한적인 수자원을 보다 합리적으로 계획, 설계, 관리하기 위해서는 일유출량의 정확한 추정은 매우 중요하다. 우리나라 어느 하천에서나 일반적으로 적용할 수 있는 간단한 입력자료와 단순한 구조의 “한국 하천의 일 유출량 모형(DAWAST)”을 개발하였다.

이 모형은 유역을 지표면, 불포화층과 포화층의 3개 저수층으로 단순화하고 유역수문반응을 불포화층과 포화층에서의 토양수분변화와 증발산량 변화를 개념적으로 나타내는 5개의 물수지 매개변수와 표면유출, 중간유출 및 기저유출의 시간적 분포를 나타내는 3개의 추적 매개변수로 기본모형을

구성하였다.

물수지 매개변수는 관측유출자료가 있는 유역에서는 최적화기법으로 보정하여, 관측유출자료가 없는 유역에서는 유역특성인자로부터 예측하는 회귀방정식으로, 유역특성인자 조사가 없거나 어려운 지점에서는 최적화기법으로 분석된 수문지점의 매개변수를 전용하였다. 추적매개변수인 일별 배분률과 감수곡선계수는 수계, 유역규모, 계절 및 강우조건을 고려하여 일반화하였다.

(1) 불포화토양층의 토양수분량을 일별 물수지 분석에 의하여 일별로 연속적으로 추적하였다. 최적화기법으로 구한 최대저류능에서 이 토양수분량을 뺀 값을 유효저류능으로 정의하여 이로부터 유효우량을 보다 합리적으로 추정할 수 있었다.

(2) Simplex 기법으로 최적화한 물수지 매개변수 값은 유역특성에 따라 UMAX는 260~400 mm, LMAX는 10~40 mm, FC는 106~210 mm, CP는 0.013~0.022, CE는 0.005~0.009였으며 대체로 유역수문반응의 물리적인 범위를 나타내고 있다.

(3) 유출자료가 있는 수문지점에서는 최적화모형으로 물수지 매개변수를 보정하여 유역토양수분 상태를 일별로 추정하고 일유출량을 모의발생할 수 있다. 수자원개발 대상지점에서는 적어도 2~3년간 수문관측을 실시하고 이 최적화모형을 적용하여 합리적으로 수자원을 계획, 설계 및 관리하는 것이 바람직할 것이다.

(4) 유출자료가 없는 수문지점에서는 지형, 토양, 토지이용 및 수문지질인자 등 유역특성인자로부터 물수지 매개변수를 예측하는 일반화모형을 적용하고 유역특성자료가 없거나 구하기 어려운 수문지점에서는 기왕의 수문관측지점의 수계명, 유역면적, 위도·경도에 따라 이미 다른 유역에서 보정된 물수지 매개변수를 전용하는 수계화모형을 적용하여 일유출량을 모의발생할 수 있다.

참 고 문 헌

권순국, 고덕구 (1987). "산지유역에 대한 USDAHL-74 유역수문모형의 장기유출해석적용." 한국농공학회지, 제29권, 제2호, pp. 53-63.

기상월보. (1962-1993). 기상청.

김양수 (1990). "일 유출량의 모의발생," 박사학위논문, 인하대학교.

김태철 (1988). "한국하천의 일 유출량 추정을 위한 지역화모형." 한국과학재단 보고서, 충남대학교 농업과학연구소.

김태철, 노재경, 박승기 (1991). "유역토양수분 추적에 의한 유출모형." 한국농공학회지, 제33권, 제4호, pp. 61-72.

김태철 (1990~1993). "농업수자원 종합관리시스템 개발 (I-IV)." 연구보고서, 농림수산부, 농어촌진흥공사.

김현영, 박승우 (1986). "유역특성에 따른 탱크모형 매개변수의 변화." 한국농공학회지, 제28권, 제2호, pp. 44-52.

노재경 (1991). "토양수분저류에 의한 일 유출량 유역모형," 박사학위논문, 서울대학교.

안병기, 김태철, 박승기, 이경구 (1991). "장기유출해석에서의 감수곡선계수 변화." 한국농공학회지, 제33권, 제1호, pp. 45-54.

한국수문조사연보. (1962-1993). 건설부.

Kim, T.C., Park, S.K., and Noh, J.K. (1990). "Regionalized daily streamflow model using a modified retention parameter in SCS method." *J. of KSAE*, Vol. 32, No. E, pp. 47-58.

Beken, A.V. (1989). "A monthly water balance model applied to two different watershed." *Surface and subsurface hydrology*, WRP, pp. 178-189.

Crawford, N.H., and Linsley, R.K. (1966). "Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model." *Tech. Report No. 39*.

Ponce, V.M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice-Hall, New Jersey.

Sutcliffe, J.V., and Green, C.S. (1986). "Water balance investigation of recharge in Madhya Pradesh, India." *Hydrological Science*, Vol. 31, No. 3, pp. 383-394.

Soil Conservation Service (1972). *National engineering handbook: Section 4. Hydrology*, United States Dept. of Agriculture.

(접수: 1996년 6월 27일)