

山林小流域의 長·短期 流出 解析을 爲한 降雨-流出模型의 開發^{1*}

禹保命² · 金載水³ · 李憲浩⁴ · 崔炯太²

Development of Rainfall-Runoff Model for a Long and Short Term Runoff Analysis in Small Forested Mountain Watersheds^{1*}

Bo Myeong Woo², Je Su Kim³, Heon Ho Lee⁴ and Hyung Tae Choi²

要 約

산림소유역의 유출현상을 정량적으로 분석·평가하기 위한 概念的인 降雨-流出 水文模型을 개발하기 위한 목적으로 산림소유역에서의 유출성분을 2단의 직렬저류탱크로 구성하고 여기에 산림수관에 의한 차단량과 집중호우 발생시의 지표유출성분을 재현하는 각각 1개씩의 탱크를 조합하여 총 4단의 탱크를 가진 강우-유출모형을 개발하였다.

또한, 본 모형의 적용성을 검증하기 위하여 전남 광양시 소재 서울대 농생대 부속 남부연습림 추산 시험장내 두 개소의 산림소유역을 시험유역으로 선정하고 1994년 1월부터 1996년 8월까지의 실측된 강우량, 유출수량 및 수관차단우량 자료로써 모형의 매개변수의 보정 및 적용성을 검증하였다.

보정 매개변수를 이용한 본 모형의 일유출량 모의발생치를 시험유역의 일별 실측치와 비교한 결과, 두 시험유역에서 모두 장기간 및 단기간에 있어서 실측치와 비교적 정확하게 일치하는 것으로 분석되었다.

ABSTRACT

The purpose of this study was to develop the Rainfall-Runoff Model for a long and short term runoff analysis in small forested mountain watersheds. This model was derived from tank model. This model is composed of four tank. Tank I, Tank II, Tank III, and Tank IV represent interception loss in forest canopy, direct runoff, base flow, and surface flow component, respectively. This model was tested with two experimental watersheds, located in southern part of Korea. As the result, this model had potentials for simulating and analyzing the long and short term runoff in small forested watersheds.

Key words : Rainfall-Runoff Model, runoff analysis, tank model, small forested mountain watershed

緒 論

산림이 수자원함양, 토사유출방지, 홍수조절 등에 미치는 영향은 과거로부터 경험적으로 인식되어 治山治水의 근간이 되어 왔으며, 현재도 산

림의 복합적 상호 작용이 인식되고 정량화됨에 따라 수자원함양과 상류유역의 보전 측면에서 그 기능이 더욱 중요시되고 있다.

산림의 이수기능을 정량적으로 평가하기 위한 연구는 산림소유역에 있어서의 流況資料의 분석에 기초를 두고 있다. 그러나, 대부분의 하천 수

¹ 接受 1997年 10月 6日 Received on October 6, 1997.

² 서울대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Seoul National University, Suwon, 441-744, Korea.

³ 충북대학교 산림과학부 Chungbuk National University, Cheongju 360-763, Korea.

⁴ 영남대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Youngnam University, Kyongsan 712-749, Korea.

* 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

위, 유량관측은 주로 규모가 큰 대하천에서 실시되어 왔고, 산림소유역과 같이 규모가 작은 유역의 수문관측자료는 매우 부족한 실정이다. 따라서 대부분의 산림소유역은 未計測 지역으로 남아 있으며, 이러한 지역의 流況자료를 얻기 위해서는 강우-유출관계를 이용하여 강우기록으로부터 유출량을 추정하는 방법의 적용이 필요하다.

탱크 모형은 유역의 강우-유출관계를 單一 탱크의 線形 시스템으로 개념화하는 것에서 출발한 것으로, 유역의 지표, 중간 및 기저유출현상을 각 성분별로 개념화하여 나타내는 것이다(USDR, 1983). 한계저류량을 각 탱크의 流出孔 높이로서 표시함으로써 그 값 이상의 저류량만이 유출되는 것을 나타낸다. 탱크모형에서 탱크의 수와 각 탱크의 유출공의 수는 유역특성과 관계되며, 菅原(1978)은 대유역의 경우 탱크의 수를 4~5개로 하고 각 탱크의 유출공 수를 2~3개로 하는 등의 제안을 한 바 있다.

우리나라에서는 金秉辰과 朴承禹(1988)가 탱크모형을 수정하고 매개변수를 보정하여 적용성을 검토하였고, 李南鎬 等(1988)과 鄭夏禹와 朴承禹(1991) 等은 灌溉組織의 日別 造作에 탱크모형을 적용하였다. 그리고, 李淳赫과 朴明根(1991)은 中小河川流域에서 적용성을 검증한 바 있다. 그러나, 산림소유역의 流況解析에 활용하기 위해서는 체계적인 검토가 필요한 것으로 알려지고 있다.

따라서, 이 연구의 목적은 산림소유역의 유출현상을 정량적으로 분석·평가하기 위하여, 탱크모형을 修正하고 실측된 자료로써 모형의 매개변수를 보정하여 산림소유역의 長·短期 流出解析에 적합한 概念的인 降雨-流出 水文模型을 개발하는데 있다.

模型的 開發

1. 降雨-流出模型의 基本 構造

유역의 강우량은 단기적으로는 차단손실량 및 유출량, 저류량 등으로 배분되며, 장기적으로 볼 때는 하천유량과 증발산량으로 최종 배분된다. 먼저, 산림지역의 강우는 山林樹冠에 도달한다. 수관에 일시 차단·저류된 강우의 일부는 증발되며, 계속적으로 下層植生 및 낙엽층에 의해 차단 저류된다. 차단되고 남은 부분은 토양층으로 침투하여 토양의 수분부족량을 채우게 되며, 장차

증발산에 의해 손실된다. 계속적인 강우로 인하여 有效雨量이 발생하게 되면 지표토층을 통하여 直接流出을 형성하게 된다. 한편 鉛直下方으로 침투되는 강우는 地下水帶에 도달하여 地下水位를 상승시키며, 이렇게 증가된 지하수는 장기간에 서서히 유출되므로 乾天候時에도 계류유량을 형성·유지하게 된다.

본 강우-유출모형은 이러한 저류량과 유출량 및 차단량, 증발산량의 관계를 Fig. 1과 같이 4개 탱크의 조합으로 개념화한 것으로서 각 탱크들은 산림소유역의 水文循環過程中的 各 성분들을 재현하고 있다. Fig. 1에서 탱크Ⅰ은 산림의 樹冠에 의한 차단손실량을 나타내며, 탱크Ⅱ는 표토층에서의 강우의 침투 및 直接流出의 발생과정을 나타낸다. 基底流出은 탱크Ⅲ에 의해 재현되며, 탱크Ⅳ는 집중호우시의 地表流出을 나타낸다. 증발산량은 탱크Ⅰ에서의 차단증발량 및 탱크Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ에서 각각 발생하는 것으로 추정한다. 일반적인 탱크모형의 경우 유출성분을 지표유출, 지중유출, 지하수유출로 구분하여 유출이 발생하는 탱크를 3단의 直列 형태로 배열하나, 산림유역의 경우 지표수가 발생하기 어렵고 대부분 지중 및 지하수유출의 형태로 유출되기 때문에(Hewlett, 1984), 이 연구에서는 산림유역에서의 유출성분을 직접유출 및 기저유출성분으로 구분하여 2단의 직렬저류탱크를 구성하였으며, 여기에 산림수관에 의한 차단량과(村井, 1970), 대규모 집중호우 발생시의 지표유출성분을 재현하는 각각 1개씩의 탱크를 조합하여 모형을 구성하였다.

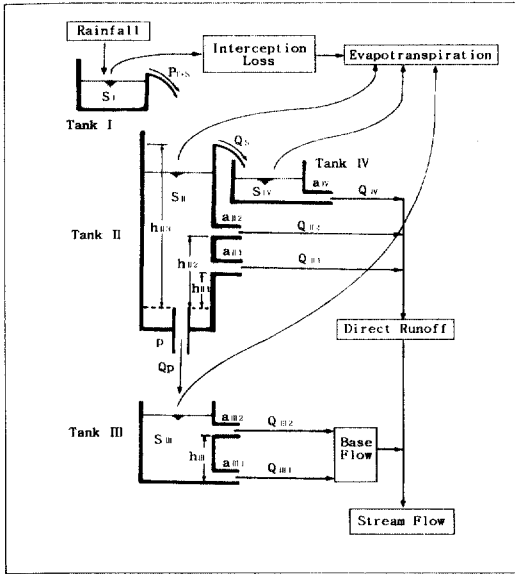
2. 水文過程의 模型化

(1) 流域 貯留量

유역 저류량은 강우에 의해 증가하여 流域出口로 배출되는 유출량과, 유역내 지면과 식물로부터의 증발산량에 따라 감소한다. 유역의 저류량의 변화를 연속방정식으로 표시하면 다음과 같다(菅原, 1978).

$$\frac{dS}{dt} = R - Q - E \dots \dots \dots (1)$$

여기서, S는 유역저류량, R은 강우량, Q는 유출량, E는 증발산량, t는 시간이다. 식 (1)은 저류량의 시간별 변화는 유역의 강우량에서 유출량과 증발산량의 합과 차이를 나타내고 있다



- a_{II1}, a_{II2}, a_{III}, p Coeff. of storage in Tank II
- a_{III}, a_{III2} Coeff. of storage in Tank III
- a_{IV} Coeff. of storage in Tank IV
- h_{II1}, h_{II2}, h_{III} Height of runoff hole in Tank II
- h_{III} Height of runoff hole in Tank III
- S_I Initial storage of Tank I
- S_{II} Initial storage of Tank II
- S_{III} Initial storage of Tank III
- S_{IV} Initial storage of Tank IV
- P_{T.S} Throughfall & Stemflow
- Q_S Surface runoff from Tank II
- Q_{II1} Discharge from runoff hole II1
- Q_{II2} Discharge from runoff hole II2
- Q_{III1} Discharge from runoff hole III1
- Q_{III2} Discharge from runoff hole III2
- Q_{IV} Discharge from runoff hole IV
- Q_P Percolation from Tank II

Fig. 1. Schematic of the Rainfall-Runoff Model

다. 식 (1)에서 시간간격 t를 1일로 하였을 때, t+1일의 저류량은 다음과 같이 표시된다.

$$S_{t+1} = S_t + R_t - Q_t - E_t \dots\dots\dots (2)$$

여기서 t는 일수이다.

한편, 각 탱크에서의 저류량 S는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_i = S'_i + U_i - Q_i - E_i - D_i \dots\dots\dots (3)$$

여기서 S_i는 t일의 i번째 탱크의 저류량, S'_i는

(t-1)일의 i번째 탱크의 저류량을 말하며, U_i는 t일의 i번째 탱크의 유입량, Q_i는 t일의 i번째 탱크의 유출량, E_i는 수관차단 및 증발산량을 나타낸다.

U₁에서 U₄까지는 각각 t일의 R(일강우량), P_{T.S}(임내강우성분), Q_P(침투성분), Q_S(대규모 집중호우시 지표유출성분)이며, Q₁에서 Q₄는 각각 t일의 P_{T.S}(임내강우성분), Q_{II1}+Q_{II2}+Q_S+Q_P(탱크II의 유출 및 침투성분), Q_{III1}+Q_{III2}(탱크III의 유출성분), Q_{IV}(탱크IV의 유출성분)이 된다. 그리고, E₁에서 E₄까지는 각각 t일의 P_I(수관차단성분), E_{II}(탱크II에서의 증발산량), E_{III}(탱크III에서의 증발산량), E_{IV}(탱크IV에서의 증발산량)이 된다.

(2) 樹冠遮斷 및 林內降雨成分

강우시의 수관에는 다음의 물收支式이 성립한다.

$$P_I = P_G - (P_T + P_S + P_A + P_O) \dots\dots\dots (4)$$

여기서, P_I는 수관차단량, P_G는 임외강우량, P_T는 수관통과우량, P_S는 수간유하우량, P_A는 잎과 수간으로부터의 흡수량, P_O는 수관저류변화량이다. 식(4)는 일반적으로 강우의 시작부터 강우후에 임관이 건조될 때까지 하나의 기간을 수수지기간으로 한 것이기 때문에 수관저류변화량 P_O는 0이라고 할 수 있다. 또한, 수관통과우량 P_T 및 수간유하우량 P_S와 임외강우량 P_G 간에는 일차식이 성립하기 때문에 수관차단량 P_I도 임외강우량 P_G의 관계에서 다음과 같은 일차식으로 표현된다고 알려져 있다(野口, 1963).

$$P_I = a_i \cdot P_G + b_i \dots\dots\dots (5)$$

여기서, a_i, b_i는 회귀계수 및 회귀정수이다.

본 모형에서는 수관차단성분 및 임내강우량의 발생을 임외강우량 및 수관통과우량, 수간유하우량의 실측자료를 바탕으로 도출된 식(5)와 같은 일차식을 바탕으로 다음과 같이 정의하였다.

$$P_{T.S} = R - P_I, \quad P_I = a_i \cdot R + b_i \dots\dots\dots (6)$$

여기서, P_{T.S}는 임내강우량, R은 강우량, P_I는 수관차단량, a_i, b_i는 회귀계수 및 회귀정수이다.

(3) 流出成分

유역의 유출량은 저류량과 밀접한 관계를 갖는다. 즉, 저류량이 많을수록 유출량이 크며, 유출량이 작은 때는 저류량도 작다. 따라서 저류량과 유출량의 관계는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$Q=a(S-S_0)\dots\dots\dots(7)$$

여기서, a는 저류계수, S₀는 한계저류량으로 초기 차단량, 유출이 발생하지 않는 土壤孔隙水量 등을 나타낸다. 만약 S₀가 0인 경우에 식(7)은 선형 저수지 모형이 된다.

이 연구에서 개발된 강우-유출모형의 총유출은 다음과 같이 정의된다.

$$Q=Q_{II}+Q_{II}+Q_{III}+Q_{III}+Q_{IV} \dots\dots\dots(8)$$

여기서, Q는 총유출량, Q_{II}와 Q_{II}는 탱크II에서의 유출량이며, Q_{III}, Q_{III}는 탱크III에서의 유출량, Q_{IV}는 탱크IV에서의 유출량을 나타낸다.

① 直接流出成分

일반적으로 탱크모형에서는 직접유출성분을 지표유출성분과 지중유출성분으로 구분하여 정의하고 있으나, 산림유역의 경우 산림토양의 높은 침투성 및 투수성으로 인해 강우시 지표유출의 발생률이 저조하고 대부분이 지표하로 침투하여 산림토양 표층에서 지중유출이 대량으로 발생되게 된다. 이러한 流出水는 속도가 빠르므로 山地斜面에서의 洪水流出의 주성분이 된다. 따라서 본 모형에서는 지표유출 및 지중유출을 2개의 탱크로서 구분하지 않고 하나의 탱크로 통합, 정의하였다.

탱크II의 각 유출공으로부터의 유출량은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{cases} Q_{II1}=a_{II1} \cdot S_{II} & (\text{if } S_{II} > 0), \\ Q_{II1}=0 & (\text{if } S_{II} \leq 0) \\ Q_{II2}=a_{II1} \cdot (S_{II}-h_{II1}) & (\text{if } S_{II} > h_{II1}), \\ Q_{II2}=0 & (\text{if } S_{II} \leq h_{II1}) \dots\dots\dots(9) \\ Q_{II3}=a_{II2} \cdot (S_{II}-h_{II2}) & (\text{if } S_{II} > h_{II2}), \\ Q_{II3}=0 & (\text{if } S_{II} \leq h_{II2}) \end{cases}$$

여기서, S_{II}는 탱크II의 저류량, h_{II1}, h_{II2}는 탱크II의 유출공의 높이, a_{II1}, a_{II2}는 탱크II의 각 유출공의 저류계수이다.

② 基底流出成分

기저유출성분은 탱크III의 상부, 하부의 2개의 유출공으로부터의 유출량의 합으로 정의하였다.

각 유출공에서의 유출량은 다음과 같다.

$$\begin{cases} Q_{III1}=a_{III1} \cdot S_{III} & (\text{if } S_{III} > 0), \\ Q_{III1}=0 & (\text{if } S_{III} \leq 0) \\ Q_{III2}=a_{III2} \cdot (S_{III}-h_{III}) & (\text{if } S_{III} > h_{III}), \dots\dots\dots(10) \\ Q_{III2}=0 & (\text{if } S_{III} \leq h_{III}) \end{cases}$$

여기서, S_{III}는 탱크III의 저류량, h_{III}는 유출공의 높이, a_{III1}, a_{III2}는 저류계수이다.

③ 集中豪雨時의 地表流出成分

일반적으로 산림유역의 경우에는 산림토양의 침투능 및 투수성이 좋아 대량의 홍수유출 발생 빈도가 적으나, 계속된 강우나, 대규모 집중호우 발생시 과포화된 산림지표면위로의 대량의 지표유출의 발생우려가 있다. 따라서 본 모형에서는 직접유출성분을 재현하는 탱크II에 일정수준이상의 강우가 발생하였을 때 초과분을 탱크IV로 전이하여 지표유출에 의한 직접유출의 증가분을 재현하도록 하였다.

탱크II에서 탱크IV로 유입되는 초과강우량은 다음 식으로 정의된다.

$$\begin{cases} Q_S=P_T \cdot s-h_{III} & (\text{if } P_T \cdot s > h_{III}), \\ Q_S=0 & (\text{if } P_T \cdot s \leq h_{III}) \dots\dots\dots(11) \end{cases}$$

여기서, Q_S는 집중호우시 지표유출을 발생시키는 초과강우량이며, P_T·s는 임내강우량, h_{III}는 초과강우량을 발생시키는 탱크II의 한계저류량이다. 한편, 탱크IV에서의 유출량은 다음과 같다.

$$\begin{cases} Q_{IV}=a_{IV} \cdot S_{IV} & (\text{if } S_{IV} > 0), \\ Q_{IV}=0 & (\text{if } S_{IV} \leq 0) \dots\dots\dots(12) \end{cases}$$

여기서 S_{IV}는 탱크IV의 저류량이며, a_{IV}는 저류계수이다.

(4) 浸透成分

전술한 바와 같이 본 모형에서는 지표면에서 지중으로의 침투성분을 고려하지 않고 하나의 탱크로서 통합 구성하였다. 따라서 본 모형에서 침투성분은 탱크II에서 탱크III으로의 배수량으로

가정하였다.

탱크II에서 탱크III으로의 침투성분 Q_P 는 다음과 같다.

$$\begin{cases} Q_P = p \cdot S_{II} & (\text{if } S_{II} > 0), \\ Q_P = 0 & (\text{if } S_{II} \leq 0) \end{cases} \dots\dots\dots(13)$$

여기서, S_{II} 는 탱크II의 저류량, S_{III} 은 탱크III의 저류량, p 는 침투계수이다.

(5) 流域 蒸發散量

한 지점에서의 증발산량은 다음과 같이 표시된다.

$$E_a = K_s \cdot K_c \cdot E_o \dots\dots\dots(14)$$

여기서, K_s 는 토양수분계수, K_c 는 작물 및 유역피복계수, E_o 는 잠재증발산량이다. 식(14)로부터 증발산계수 K_e 는 다음과 같다.

$$K_e = K_s \cdot K_c \dots\dots\dots(15)$$

한편, 본 모형에서 증발산량은 탱크 I에서의 수관차단량과 탱크II, III, IV에서의 증발산량의 합계로서 정의되며, 식(14)와 식(15)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_a = K_e \cdot E_o = P_I + E_{II} + E_{III} + E_{IV} \dots\dots\dots(16)$$

여기서, P_I 는 탱크 I에서의 수관차단량, $E_{II} \sim E_{IV}$ 는 탱크II ~ 탱크IV에서의 증발산량이다.

본 모형에서 유역 증발산량의 계산은 먼저 대상유역에서 관측 또는 근접 기상대에서 관측된 일평균 기온·상대습도·풍속·일조시간 등의 자료를 이용하여 Penman(1948)식에 의해 월별 잠재증발산량을 산정하고 USDA Forest Service의 침엽수와 활엽수 등의 월별 증발산계수(朴承禹, 1991)를 사용하여 실제 증발산량을 추정하였다.

3. 모형의 入力資料

강우-유출모형의 입력자료는 Table 1에서와 같이 ① 유역의 지상인자, ② 모형의 매개변수, ③ 모형의 초기 저류량, ④ 계산기간 및 계산기간동안의 일강우량, ⑤ 잠재증발산량 추정에 필요한 일평균 기온·풍속·상대습도·일조시간 등 기상자료로 구성된다.

모형의 계산과정은 ① 자료 입력, ② 잠재증발산량 및 실제증발산량 계산, ③ 각 탱크별 저류량으로부터 유출량과 배수량 계산, ④ 각 탱크별 증발산량 감산, ⑤ 각 탱크의 잔존 저류량 계산, ⑥ 각 탱크별 유출량 합산 등의 과정을 계산기간동안 반복 수행하며 최종적으로 계산기간동안의

Table 1. The input data of the Rainfall-Runoff Model.

Items	Variables	Contents
Watershed characteristics	Area	Watershed area(ha)
	LAT, LON	Latitude, Longitude
Parameters	a_i, b_i	Coeff. of interception loss in Tank I
	$a_{II1}, a_{II2}, a_{II3}, b$	Coeff. of storage in Tank II
	a_{III1}, a_{III2}	Coeff. of storage in Tank III
	a_{IV}	Coeff. of storage in Tank IV
	$h_{II1}, h_{II2}, h_{II3}$	Height of runoff hole in Tank II
	h_{III}	Height of runoff hole in Tank III
Initial storage	S_{II}	Initial storage of Tank II
	S_{III}	Initial storage of Tank III
	S_{IV}	Initial storage of Tank IV
Period of computation	Y_s	Starting year
	Y_p	Computing period
Hydrologic data	Rain	Daily rainfall(mm)
	Temp	Daily mean temperature(°C)
Weather data	Hum	Relative humidity(%)
	Wins	Wind speed(m/sec)
	Sun	Sunshine hours(hr)

일유출량, 증발산량을 순차적으로 출력한다.

4. 媒介變數의 補整

본 모형의 매개변수 보정을 위하여 施行錯誤法을 적용하였다. 유출량의 관측치와 추정치를 비교하여 다음 식으로부터 유역의 유출량 추정의 오차를 계산하였으며, 추정오차가 최소가 되도록 각 매개변수의 값을 조정하여 계산을 반복 수행하였다.

$$Er = \frac{1}{N} \sum \frac{|Q_o(t) - Q_{ca}(t)|}{Q_o(t)} \dots\dots\dots (17)$$

여기서, Er은 누적오차이고 Q_o(t)는 유출량 관측치, Q_{ca}(t)는 유출량 추정치, N은 사용자료(日)의 수이다. 한편, 매개변수를 보정하는데 있어서 선행연구결과를 참고하여 다음과 같은 제약 조건을 설정하였다(朴承禹, 1991; 菅原, 1978).

$$(a_{n1} \sim a_n ; p ; h_{n1} \sim h_m ; S_1, S_m, S_{iv}) \geq 0$$

$$a_n > a_{n3} > a_{n2} > a_{n1} > a_{m2} > a_{m1} \dots\dots\dots (18)$$

模型的 適用

1. 試驗流域의 環境因子 및 水文資料의 觀測

(1) 試驗流域의 環境因子

이 연구의 시험유역은 전남 광양시 소재 서울대학교 농업생명과학대학 부속 남부연습림 추산 시험장내에 위치한 2개소의 산림소유역(북문골 소유역, 바람골 소유역)으로서, 각 유역의 면적은 북문골 소유역이 15.0ha, 바람골 소유역은 14.6 ha로서 비슷하며, 시험유역의 標高는 120m에서 359m의 범위를 나타내고 있다. 최근 10년간 이 지역의 연평균강수량은 1,664.1mm이었다.

바람골 소유역은 소나무, 리기다소나무, 곰솔, 물푸레나무, 은수원사시나무 등의 Ⅲ 齡級 人工林이 대부분의 면적을 차지하고 있으며, 북문골 소유역은 I 齡級에서 Ⅷ 齡級까지의 齡級 分布를 보이는 소나무, 리기다소나무, 곰솔, 잣나무, 테다소나무, 밤나무 등의 人工林이 점유하고 있다.

시험유역의 지질계통은 대부분이 화강암의 기암으로 되어 있으며, 편마암지대가 산재되어 있다. 또한, 주요 토성은 사양토와 식양토로서 북문골 소유역은 대부분이 사양토이나, 바람골 소유역은 식양토와 사양토의 점유비율이 비슷하다.

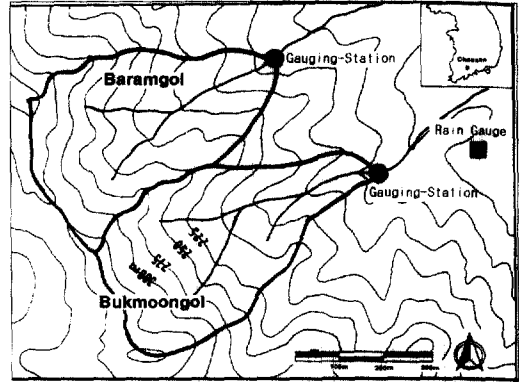


Fig. 2. Map of the Choosan Gauging-Stations and its geographical location

(2) 水文資料의 觀測

강우량은 북문골 소유역 출구에서 동쪽으로 약 150m 떨어진 곳에 설치한 자기우량계를 이용하여 시간별 강우량을 측정하였으며, 보조용으로 보통우량계를 사용하였다. 또한, 유출수량의 측정은 각 소유역의 출구에 설치된 鋼製銳緣直角 웨어(sharp-crested rectangular weirs)에서 자기수위계로서 웨어의 월류수심을 연속 측정하여 유출수량을 산출하였다. 한편, 수관에 의한 차단손실량을 측정하기 위하여 30년생 테다소나무림(*Pinus taeda*)과 소나무림(*Pinus densiflora*)에 각각 100 m²(10m×10m)의 시험구를 설치하고 매강우별로 수관 통과우량 및 수간유하우량을 수집·측정하였다.

2. 媒介變數의 決定

(1) 媒介變數의 補整

Table 2는 1994년 1월부터 12월까지의 두 시험유역의 수문자료 및 기상자료를 이용하여 강우-유출모형의 매개변수 보정을 실시한 결과이다. 추정오차는 북문골 소유역의 경우에는 연유출물에서 8.66%이었으며, 바람골 소유역의 경우는 8.85%이었다. Table 2에서 보는 바와 같이 두 시험유역의 매개변수중 가장 작은 값을 보인 것은 기저유출을 재현하는 탱크Ⅲ의 저류계수 a_{m1}이었으며, 위로 올라갈수록 저류계수의 값이 증가하여 지표유출을 재현하는 탱크Ⅳ의 저류계수 a_n에서 가장 큰 값을 나타내었다.

또한, 두 시험유역에 있어서 매개변수들 간에 큰 차이는 보이지 않는 것으로 분석되었다. 그러나, 탱크Ⅱ의 유출고 h₀₃에 있어서는 두 시험유역간

Table 2. Simulating Rainfall-Runoff Model parameters.

parameter	Experimental watersheds	
	Bukmoongol	Baramgol
a _{II1}	0.049	0.041
a _{II2}	0.093	0.143
a _{III1}	0.001	0.001
a _{III2}	0.012	0.010
a _V	0.691	0.441
h _{II1}	14.75	17.91
h _{II2}	39.57	47.41
h _{III3}	92.52	142.17
h _{III}	7.67	8.27
b	0.068	0.075

에 큰 차이를 보이는 것으로 나타나, 집중호우발생시 두 유역의 유출특성이 서로 크게 다르다는 것을 알 수 있었다.

(2) 媒介變數의 敏感度 分析

강우-유출모형의 매개변수인 차단저류능 계수 a_i, b_i와 각 탱크의 저류계수 a_{II1}, a_{II2}, a_{III1}, a_{III2}, a_V, b, 그리고 유출공의 높이 h_{II1}, h_{II2}, h_{III3}, h_{III}의 변화에 대한 추정유출량의 변화를 검토하기 위하여 두 시험유역의 1994년도 자료를 적용하였다. 매개변수의 변화에 따른 유출량 변화율을 비교하기 위하여 민감도를 다음과 같이 정의하였다.

$$SE_i = \frac{\partial Q/Q_0}{\partial P_i/P_{i0}} \dots\dots\dots (19)$$

여기서 SE_i는 i번째 매개변수의 민감도, Q는 추정유출량, Q₀는 기준유출량, P_i는 i번째 매개변수의 값, P_{i0}는 i번째 매개변수의 기준값이다. 식(19)는 민감도 SE값이 클수록 매개변수의 변화에 따른 유출량의 변화가 큰 것을 나타낸다. 매

개변수는 각 변수의 기준치에 대하여 10~50%까지 10%씩 가감하여 유출량을 추정하였으며, 그 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

북문골 소유역에서의 각 매개변수의 평균민감도는 0.005~0.083의 범위를 보여주고 있으며, 민감도가 가장 낮은 매개변수는 탱크II의 저류계수 a_{II2}와 탱크IV의 저류계수 a_V였으며, 민감도가 가장 높은 매개변수는 탱크III의 저류계수 a_{III2}인 것으로 분석되었다. 한편, 바람골 소유역에서의 각 매개변수의 평균민감도는 0.004~0.079의 범위를 보여 북문골 소유역과 큰 차이를 보이지 않았으며, 민감도가 가장 낮은 매개변수는 탱크IV의 저류계수 a_V였으며, 북문골 소유역에서 가장 낮은 민감도를 보여주었던 탱크II의 저류계수 a_{II2}는 민감도가 0.016으로 다소 높은 것으로 분석되었다. 민감도가 가장 높은 매개변수는 북문골 소유역에서와 동일하게 탱크III의 저류계수 a_{III2}인 것으로 분석되었다. 바람골 소유역에 대한 매개변수의 민감도 분석결과, 북문골 소유역의 경우와 유사한 결과를 보였다. 매개변수의 민감도 분석결과, 보정이 필요한 매개변수중 어느 하나,

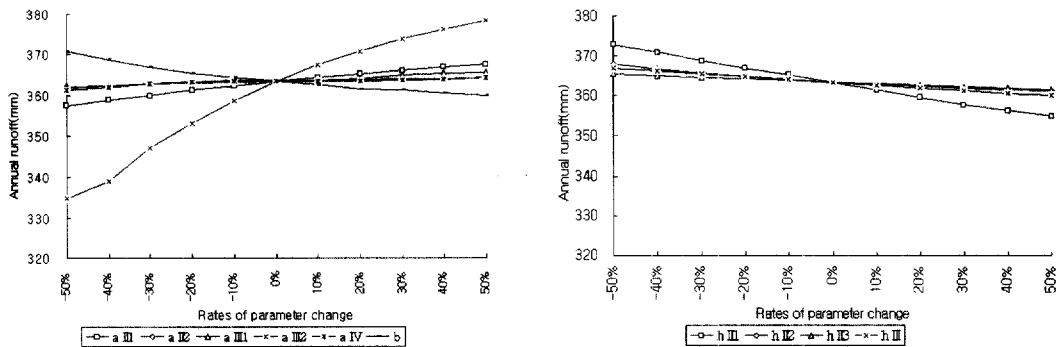


Fig. 3. Parameter sensitivity analysis diagram in Bukmoongol watershed.

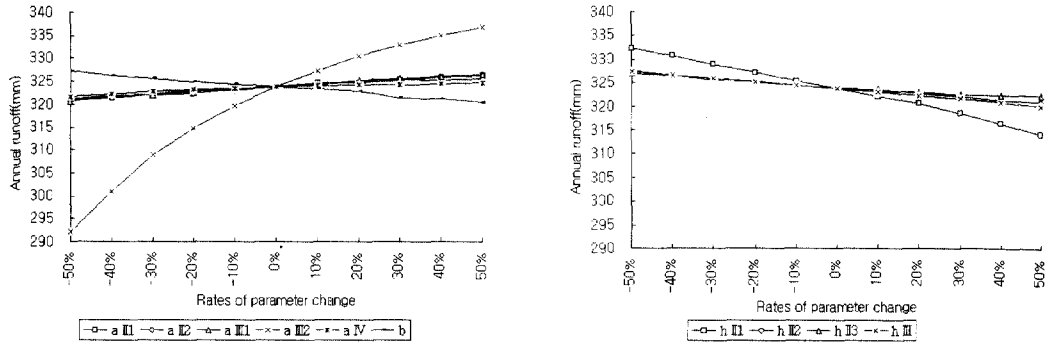


Fig. 4. Parameter sensitivity analysis diagram in Baramgol watershed.

혹은 일부의 매개변수의 값이 잘못 보정되었다 하더라도 유출량의 계산결과가 최대 4% 미만의 변동폭을 가짐으로 인해, 推定精度에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

3. 模擬發生의 結果

Table 3은 두 시험유역에서 실측된 연유출량과 모형에 의해 추정된 연유출량을 비교한 결과이다.

Table 3에서 보는 바와 같이 두 시험유역에서 각 연도별 연간 유출율에 있어서 실측치와 계산치와는 최대 5.3%에서 최소 2.0%의 차이를 보

이는 것으로 분석되어 모형에 의한 추정치가 비교적 정확한 것으로 확인되었다. 한편, 모형에 의한 일유출량 계산 결과와 실측치에 대한 상관관계와 판단하기 위하여 두 시험유역의 일유출량 계산치와 실측치에 대한 상관계수를 구한 결과, 두 시험유역 모두 상관계수 0.89 이상의 높은 상관성을 가지는 것으로 분석되었다. 또한, 개발된 강우-유출모형의 거동을 분석하기 위하여 두 시험유역의 일별 실측치와 모형에 의한 모의발생치를 도식적으로 비교한 결과는 Fig. 5 및 Fig. 6에서와 같다.

Table 3. Comparison of observed and simulated annual discharge using calibrated parameters in two experimental watersheds (Unit : mm)

Year	Precipitation	Bukmoongol		Baramgol	
		Qo	Qe	Qo	Qe
1994	1,131.4	331.3(29.3%)	360.0(31.8%)	299.5(26.5%)	326.0(28.8%)
1995	1,138.7	516.5(45.4%)	477.9(42.0%)	442.9(38.9%)	420.5(36.9%)
1996	887.5	406.9(45.8%)	359.3(40.5%)	397.2(44.8%)	363.4(40.9%)

Qo : Observed Discharge, Qe : simulated Discharge

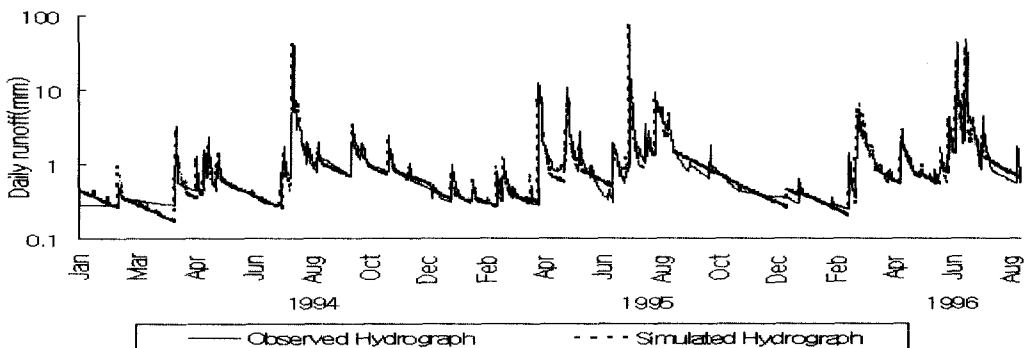


Fig. 5. Comparison of observed and simulated hydrographs in Bukmoongol watershed.

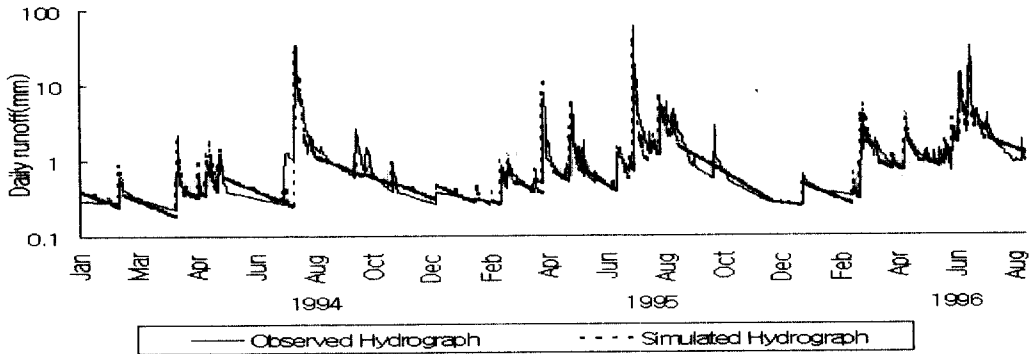


Fig. 6. Comparison of observed and simulated hydrographs in Baramgol watershed.

그림에서 보듯이 일유출량 모의발생치는 실측치와 비교적 정확하게 일치하는 것으로 나타났다. 그러나, 겨울철에 대해서는 모의발생치와 실측 유출량간에 다소 차이를 보이고 있으나, 유량 차이에서는 큰 차이를 보이지는 않았다. 이상의 결과를 종합해 볼 때, 본 모형을 이용한 산림소유역의 일유출량 모의발생의 정확도가 높은 것으로 나타났다.

結 論

이상의 결과를 살펴볼 때, 본 모형에 의한 추정 일유출량이 실측치와 대체적으로 잘 일치하여 모형에 의한 모의발생의 정확도가 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서, 본 모형의 구성시 기본 개념으로 설정하였던 산림소유역에서의 수문순환 과정에 대한 적합성을 확인할 수 있었으며, 산림소유역에 있어서 본 모형을 이용한 長短期間의 流況分析이 가능한 것으로 판단되었다.

그러나, 본 모형에 사용된 매개변수의 보정에 있어서 이를 다른 미계측 산림소유역에 적용하였을 시 매개변수와 대상유역의 지상인자와의 관계를 통한 일반적인 매개변수의 보정방법이 아직 확립되지 못함으로 인하여 모형의 범용성에는 일정정도의 한계를 가지고 있는 것으로 판단된다. 따라서, 향후 임의의 산림소유역에 대한 적용은 보다 충분한 검토가 필요하며, 지속적인 연구가 요망된다.

引用 文 獻

1. 朴承禹. 1991. 修正 tank 模型을 利用한 中 小河川의 日流出量 推定. 國際水文開發計劃 (IHP)研究報告書. 建設部. 70pp.
2. 李南鎬·鄭夏禹·朴承禹. 1988. 半月地區의 月別 沈水深의 特性分析. 韓國農工學會誌 30(4) : 117-125.
3. 李淳赫·朴明根. 1991. 長短期流出 兩用 貯留탱크模型의 開發에 關한 研究. 韓國農工學會誌 33(1,2) : 55-67, 51, 60.
4. 鄭夏禹·朴承禹. 1991. 貯水池 물管理研究. 서울大學校 農業開發研究所. 211p.
5. 菅原正巳. 1978. 流出解析法. 共立出版(株). 257p.
6. 野口陽一. 1963. 森林의影響. 地球出版. pp.18-21.
7. 村井 宏. 1970. 森林植生による降水のしや斷について研究. 日林試 研究報告 232 : 25-64.
8. Hewlett, J.D. 1984. Forest, flood and erosion : A watershed experiment in the south eastern Piedmont. For. Sci. 30 : 424-434.
9. Penman, H.L. 1948. Natural evapotranspiration from open water, bare soil, and grass. Proc. Roy. Soc. London. A193. pp.120-146.
10. USDR. 1983. HYDROSS - Hydrologic river operation study system, User's Guide. U.S. Dept. of Interior. Bureau of Reclamation. 132p.