

물순환모델에 의한 山地小流域의 流出特性 分析¹

- 八公山流域을 對象으로 -

朴宰澈² · 李憲浩²

Analysis of Runoff Characteristics for a Small Forested Watershed Using HCYMODEL¹

- At a watershed in Mt. Palgong -

Jae Chul Park² and Heon Ho Lee²

要 約

본 연구는 팔공산 산지소유역을 대상으로 기존의 물순환모델을 적용하여 산지 소유역에서의 장기유출특성을 구명하고자 실시하였다. 시험유역에서 1998년도와 1999년도의 5월에서 9월까지의 실측 강우량과 유출량의 수문자료를 이용하여 모델의 적합도 및 장기유출특성을 분석한 결과, 시험유역에서의 수위-유량 관계식 $Q=11.148H^{2.5867}$ ($R^2=0.9956$)를 산출하였고, 1998년 5월~9월의 유출율은 57.7%, 1999년 5월~9월의 유출율은 87.1%로 나타나 강우강도의 차이와 98년도 가을에 실시한 간벌의 영향으로 유출량이 증가한 것으로 판단하였다. 물순환모델을 적용하여 15개의 매개변수값을 결정하였으며, 이들 매개변수로 장기수문곡선을 재현한 결과, 모델의 적합도가 양호한 것으로 나타났다. 물순환모델로 계산한 간벌 전후의 유출성분의 분석에 의하면 간벌 후에 직접유출 성분과 기저유출 성분이 각각 4%, 7% 정도 증가하고, 증발산량은 약 11% 감소한 것으로 나타났다. 그리고 물순환모델의 직접유출에 관계하는 매개변수인 D_{50} 과 K_1 , 기저유출에 관계하는 매개변수인 K_b 를 이용하여 간벌의 영향과 모암의 풍화 정도 등 산림의 변화를 추정할 수 있었다.

ABSTRACT

This study was carried out to reveal characteristics of long-term runoff by using HCYMODEL in a small forested watershed. From May to September in 1998 and in 1999, the fitness of HCYMODEL and runoff characteristics were estimated by HCYMODEL using rainfall and discharge at the experimental watershed. The function of stage and discharge in the experimental watershed was determined as following equation $Q = 11.148 H^{2.5867}$ ($R^2=0.9956$). From May to September in 1998 and in 1999, the runoff rates were 57.7% in 1998 and 87.1% in 1999 at the experimental watershed. The discharge was assumed to be increased because of rainfall intensity difference and thinning. By applicability test, the HCYMODEL showed good estimation of runoff by optimized fifteen parameters. Comparing runoff characteristics before and after thinning by calculating through HCYMODEL, direct runoff and base runoff increased 4%, 7%, respectively as evapotranspiration decreased 11%. Parameters D_{50} and K_1 , which were related to the direct runoff, and a parameter K_b , which was related to the baseflow, were assumed to indicate that forest was changed by the effect of thinning and weathering process of bed rock.

Key words : HCYMODEL, thinning, rating curve, runoff characteristics, small forested watershed, runoff, discharge.

¹ 接受 2000年 3月 31日 Received on March 31, 2000.

² 영남대학교 산림자원학과 Dept. of Forest Resources, Youngnam University, Kyongsan 712-749, Korea.

緒 論

山源水資源에 대한 관심이 고조되면서 산림환경의 다양한 기능들 중 수원함양기능을 정량적으로 파악하기 위한 연구는 반세기 이전부터 실시되어왔다. 특히 對照流域法으로 산림의 수원함양기능이 구체적으로 밝혀지고, 산지 유역을 대상으로 장기유출 해석을 통해 장기간 불규칙하게 강하하는 강우로부터 발생하는 크고, 작은 유출량을 정량적으로 추정·예측하여 산림의 수원함양기능을 극대화시키기 위한 보다 적극적인 방법들이 모색되어져 왔다. 강우로부터 유출량을 구하기 위해 여러 가지 유출모델이 제안되었고, 산지 소유역의 유출해석을 위한 수문모형의 개발에 관한 연구도 많은 진전을 보이고 있다. 그러나 유출해석을 위한 이러한 수문모형들은 대부분 대유역이나 중소하천을 대상으로 개발되어 왔기 때문에 산지 소유역을 대상으로 하면 복잡한 매개변수와 다양한 관측값이 요구된다. 따라서 유출모델을 산지 소유역의 유출 특성을 파악하기 위한 도구로 이용하기 위해서는 체계적인 검토가 이루어져야 하고, 수문모형을 개발하거나 하나의 모형을 선정하는데는 사용 목적의 적합성, 구조의 단순성, 사용의 용이성 및 최소한의 입력자료 등을 고려하여 결정할 필요가 있다.

국내에서 산림의 유량조절기능에 관한 연구의 시초는 金東燮와 曹哲煥(1939)이 임내의 강우의 관측으로 강우량과 수관차단 증발산량의 관계식을 산출하고, 동일 강우량에 있어서 강한 강도의 비는 약한 강도의 비보다 수간유하량을 증가시킨다고 보고하였다.

이어서, 산림의 유출 조절에 관하여 金載水(1987)는 산림이 연강수량의 4%에 해당하는 유출을 건기에 증가시키고 우기에는 9%의 유출을 감소시켜 건기보다 우기에 유출조절 효과가 더 크게 나타난다고 하였으며, 李宗學 등(1989)도 건기보다 우기에 산림의 유출조절기능이 더 크기 때문에, 특히 수재해방지 측면에서 매우 중요하다고 하였다. 柳澤圭와 李天龍(1980)은 산림지의 지피상태별로 표면유출의 특성을 조사한 결과, 벌채지에서 연간 표면유출량이 가장 많고, 침엽수림, 혼효림, 활엽수림 순으로 적어지며, 활엽수림, 침엽수림, 잡목림 및 황폐지에 대한 유출률 조사에 의하면 임상이 좋은 산림이 황폐지보다 유출률이 작고, 유량조절효과가 인정된다고 하였다.

金景河 등(1992)은 갈수기 저수량과 주요 입지인자를 다변량 분석의 일종인 수량화 I 형으로 분석하여 지역, 지질, 임상, 상층올폐도, 기복량, 수계밀도의 순으로 편상관계수가 높게 나타난다고 하였으며, 임상의 경년변화에 따른 유출 특성에 대해 李憲浩(1991)는 연유출량의 변화에도 불구하고 임상이 좋은 산림에서 갈수량과 토양이 보유할 수 있는 잠재 수분량이 크다고 하였다. 金景河 등(1996)은 임상이 서로 다른 3개의 유역에 있어서 수문특성 중 유역의 저류량과 관계가 깊은 감수곡선상의 저류계수의 동태에 대해 보고한 바 있고, 偶保命 등(1992)은 2개의 산림 소유역에 있어서 유출량의 변화를 조사하여, 일년 중 주로 7~9월에 강우 후 유출이 지속적으로 이루어진다고 하였다.

산림이 유출량에 미치는 국외 연구로는 Bosch와 Hewlett(1982)가 산림을 벌채하면 증발산량의 감소로 인해 연유출량이 증가한다고 하였으며, 中野(1971)도 벌채에 의해 유출량이 증가하다가 다시 임상이 회복됨에 따라 감소한다고 하였는데, 그 유출량 증가의 원인으로 임지 침투능의 감소, 임관 차단량의 감소 등을 지적하였다.

Reich(1972)는 산림의 면적비율이 지형적인 요인보다 홍수유출량을 감소시키는데 중요한 변수로 작용한다고 하였으며, Hewlett(1984)은 수목의 가용수량이 많은 우기에는 유출량이 감소하고 건기에는 유출량이 증가한다고 보고한 바 있다.

산지유역에서 강우의 유출특성을 평가하기 위해 사용하는 유출모델은 크게 물리모델과 개념모델로 구분할 수 있다. 물리모델은 물순환 소과정에 대응하는 물리·화학적 기구를 기본으로 하는 數式을 조합해서 유출현상을 설명하는 것으로, 포화·불포화 침투모델과 키네마틱웨이브법 등이 있다. 그리고, 개념모델은 산지 물순환 소과정에서의 복잡한 응답관계를 종합적으로 볼 수 있는 모델로, 강우와 유출의 응답관계를 표현하는 탱크모델, 저류함수법, 합리식, 그리고 단위도법 등이 있다(塚本良則, 1991).

우리 나라에서는 선형이고 구조가 간단한 Sharman의 단위도법과 부분적으로는 선형성을 적용하고 있지만 전체적으로는 비선형인 菅原(1978)의 탱크 모델 등이 여러 연구가들에 의해 중소하천유역에서 적합도가 높은 것으로 검증을 받았다(黃晶鉉, 1991; 呂泰烈, 1978; 李寬洙 등, 1995; 서영제, 1997). 최근에는 기저유출의 비선형성을 취하는 모델로 Beven 등(1984)이 운동방정식을 비선형의 지수관계로 가

정한 TOPMODEL을 제안하였다. 또한, 산지유역에서 직접유출과 기저유출이 비선형을 나타낸다는 福島와 武居(1981)의 유출모델에 鈴木(1985)의 수관차단모델을 조합한 새로운 개념모델을 제안하여 산림 소유역에 있어서 좋은 적합도를 보이고 있다.

본 연구는 산지소유역에서 장기간 불규칙하게 강하하는 강우와 그 강우로 인하여 발생하는 양적으로 다양한 유출량을 대상으로 하여 물순환모델을 이용하여 산지소유역의 강우-유출 특성을 구명하고, 나아가 물순환모델의 적합도와 적용가능성을 평가하는데 그 목적이 있다.

재료 및 방법

1. 연구재료

1) 시험유역의 개황

본 연구는 팔공산내 한 개의 소유역을 시험유역으로 선정하였으며, 이 유역은 팔공산 노적봉에서 1.8km 떨어진 갖바위(851.2m)의 동북쪽에 위치하고 있고, 행정구역상으로는 경상북도 경산시 와촌면 대한리(동경 128° 44' 30"~128° 45' 00", 북위 35° 58' 30"~35° 59' 00")지역이다(Fig. 1). 유역면적은 17.7ha이고, 1998년 10월에서 11월까지 약 2개월에 걸쳐 생명의 숲 가꾸기 공공 근로사업의 일환으로 시험유역 면적의 10.2%에 해당하는 약 1.7ha에 대한 간벌이 이루어졌다.

본 시험유역의 모암은 불국사 화성암류의 일부인 팔공산 화강암으로 장구한 세월 동안 풍화, 침식되어 대부분의 산정과 능선이 노출되어 있다(韓國動力資源研究所, 1981).

토양은 주로 온대의 낙엽활엽수림 혹은 낙엽활엽수와 침엽수와의 혼효림에서 발달하는 갈색삼림토양(brown forest soils)으로 구성되어 있고, 토성은 양질사토 또는 사질양토이다(大邱直轄市, 1994). 그리고 山中式 경도계로 측정된 토양 경도(soil hardness)는 평균 0.8~3.0kg/cm²이었다.

Table 1은 수문관측 유역의 지형 및 유역 환경인자를 나타낸 것으로, 이 수치들은 1/5,000 지형도를 이용하여 도상에서 계측하였으며, 일부 인자들은 현지에서 실측한 값이다.

시험유역의 식생은 소나무, 갈참나무, 물푸레나무, 당단풍, 생강나무 등으로 구성된 침활혼효의 천연림으로, 상층 식생은 주로 소나무와 갈참나무, 그리고 상수리나무로 평균 흉고직경은 13~28cm, 평균 수고는 8.5~11.5m이었다. 중층 식생은 당단풍, 율나무, 철쭉, 물푸레나무, 그리고 생강나무 등으로 평균 흉고직경은 2cm 미만이고, 평균 수고는 1~1.2m이었으며, 하층 식생은 고사리와 조릿대 등으로 구성되어 있다.

Table 1. Topographic features of the experimental watershed.

Factors	Unit	
Basin area(Thinning area)	ha	17.7 (1.7)
Form factor of basin		0.348
Drainage density	km/ha	0.038
Relief ratio	%	26
Mean gradient of relief	%	11.03
Altitude	m	489~700
Mean altitude of basin	m	645.6
Main stream length	km	0.509
Mean basin width	km	0.348
Soil hardness	kg/cm ²	0.8~3.0
Soil type		sandy loam
Bed rock		granite

2) 강우량 및 유출량 자료

산림 소유역의 장기유출 특성을 밝히기 위하여 1998년 4월부터 1999년 9월까지 약 1년 6개월 동안 시험유역에 내린 강우량과 유출량 자료를 조사하였다. 유출해석에 사용된 수문자료는 우량계 및 수위계의 오작동으로 인해 발생된 결측치를 제외

Fig. 1. Geographical location map of the experimental watershed.

- : station of rainfall gauging and stream water sampling

Table 2. Monthly rainfall and discharge observed at the experimental watershed from May to September in '98 and '99.

Year	Month	May	June	July	Aug.	Sep.	Total
	Factor						
1998	Rainfall (mm/month)	162.5	292.0	229.5	538.5	339.0 (46.5)	1,561.5 (1,269)
	Discharge (mm/month)	30.9	167.1	155.2	444.1	103.9 (17.3)	901.2 (814.6)
1999	Rainfall (mm/month)	165.5	208.5	246.5	345.5	323.5 (61.0)	1,289.5 (1,027)
	Discharge (mm/month)	56.8	110.0	193.5	281.7	481.6 (128.8)	1,123.6 (770.8)

※(): Rainfall used for HCYMODEL

하고 관측된 자료 중 간벌이 유출에 미치는 영향을 분석하기 위하여 1998년과 1999년의 5월에서 9월 까지 각각 5개월간의 수문자료를 선정하여 Table 2에 나타내었다.

장기유출 해석에 사용된 강우량은 1998년 5~9월까지 1,269mm, 1999년 5~9월까지 1,027mm로 총 2,296mm이었다. 시험유역에서의 1998년 이전 강우자료가 전무하여 시험유역과 인접한 대구측후소의 지난 10년간의 강우량을 살펴보면, 1991년에 1,296.2mm로 가장 많았고, 1994년에 567.5mm로 가장 적게 나타났다. 1988년~1997년까지 10년간 연평균 강우량이 970.1mm인 것에 비해 1998년과 1999년에는 강우량이 많았던 것을 알 수 있다. 강우량이 200mm이상으로 나타난 달은 우리나라의 전형적인 장마기간과 태풍의 영향을 받는 6월~9월에 집중되어 있으며, 이들 기간 중 월별 강우량을 살펴보면 1998년 8월에 집중호우로 인하여 1999년 8월보다 약 1.5배 많은 것을 제외하면 거의 비슷한 강우량을 나타내었다.

2. 연구방법

1) 강우와 유출량 관측

강우량의 관측은 양수관측시설의 수위계실(water level recorder room) 옥상에 전도형 자기우량계(직경 20cm, 단면적 314.16cm²)를 설치하여 매일 실시간 측정하였고, 2주 간격으로 작동상태를 점검하였으며, 기록지의 교체는 1개월 단위로 하였다.

유출량의 관측은 시험유역의 출구에 설치된 삼각형 깔날웨어(triangular weir)에서 월류수심을 자기수위계로 측정한 후, 수위-유량 관계 곡선(stage-discharge relation curve)을 이용하여 수

위를 유량으로 환산하였다. 수위의 검증을 위해 2주 간격으로 추가로 外水位를 측정하고, 기기의 작동상태를 점검하였으며, 1개월 단위로 기록지를 교체하였다. 수위-유량 관계 곡선의 작성에 사용된 실유량 측정 기기(Fig. 2)는 영남대학교 산림자원학과 산림공학연구실에서 자체 제작한 기구로 가로 122cm, 세로 140cm, 높이 30cm로 바닥 모서리 부분에 수평조절나사를 두어 산악지형에서 쉽게 사용하도록 고안하였으며, 측면에 2개의 배수밸브를 설치하였다.

Fig. 2. Schematic of device for discharge measuring.

2) 물순환모델의 적용

(1) 물순환모델의 개요

산림 소유역에서의 장기유출 해석을 위해 사용한 물순환모델[HICYMODEL(Hydrologic Cycle Model)]은 계산이 간단한 개념모델을 기초로 하여 만든 모델이다. 이 모델은 실제의 물순환 각

과정과 잘 대응하도록 몇 개의 서브시스템으로 나누어 각 매개변수가 가지고 있는 의미를 어느 정도 반영하는 물리모델적 요소도 포함하고 있다.

물순환모델은 Fig. 3에 표시한 것과 같이 산림 유역에 있어서 물의 이동을 의미하는 5개의 탱크로 구성되어 있으며, 강우는 이들 탱크의 변환계를 통해 유출과 증발산으로 나누어진다. 이 모델은 다른 개념모델과는 달리 강우를 직접유출과 기저유출로 분리할 수 있고 비교적 정도가 높은 것이 특징이다. 모델에 사용되는 매개변수는 총 15개 전후로서 유출형성에 관여하는 유출 매개변수와 증발산 작용에 관여하는 증발산 매개변수로 대별된다.

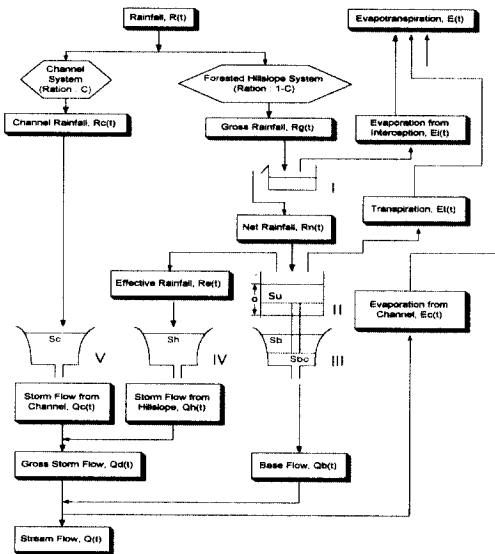


Fig. 3. Concept of the Hycymodel(福嶋와鈴木, 1986).

(2) 물순환모델의 구조

가) 유출모델

유역에 강우가 입력되면 Fig. 3에 나타낸 것처럼 강우 $R(t)$ 와 유출 $Q(t)$ 그리고 증발산 $E(t)$ 로 나누어진다. 이 중 유출 $Q(t)$ 는 직접유출 $Q_d(t)$ 와 기저유출 $Q_b(t)$ 로 구성되고, 증발산 $E(t)$ 는 유로면증발량 $E_c(t)$ 와 증산량 $E(t)$ 및 수관차단증발량 $E_i(t)$ 로 구성되어 있다.

유역은 유로의 불침투 지역과 토층의 임지사면 지역으로 이루어져 있고, 유로계 면적비율을 C 라고 하면 유로계에서는 유로강우 $R_c(t)(=R(t))$ 가

탱크 V의 저류 변환계를 통하여 유로계의 직접유출 $Q_d(t)$ 가 된다. 한편, $1-C$ 의 면적비율을 가지는 사면계에서는 임의강우 $R_h(t)(=R(t))$ 가 수목에 의한 수관차단으로 일부 수관차단증발 $E_i(t)$ 가 되고 나머지는 임내강우 $R_n(t)$ 가 된다. 임내강우 $R_n(t)$ 는 다른 저류변환탱크 II에 의해 직접유출이 되는 강우 $R_d(t)$ 와 기저유출을 형성하는 강우 $R_b(t)$ 로 나누어진다. $R_d(t)$ 는 저류변환탱크 IV에 의해 저류변환 되어 임지사면에서의 직접유출 $Q_d(t)$ 가 되고, 유로에서의 직접유출 $Q_d(t)$ 와 함께 직접유출 $Q_d(t)$ 의 구성성분이 된다. 그리고 $R_b(t)$ 는 저류변환탱크 III에 의해 저류변환된 기저유출 $Q_b(t)$ 가 된다.

이들 각 유출성분이 모여져서 최종적인 유역 유출량 $[Q(t) = Q_d(t) + Q_b(t) + Q_i(t)]$ 이 된다. 위에서 기술한 것처럼 강우 $R_h(t)(=R(t))$ 의 일부가 증발로 소실된 후에 나머지가 임내강우 $R_n(t)$ 로 변환되는 경우를 제외하면 유출모델의 계산은 각 탱크의 저류 변환에 근거하여 이루어진다.

이 저류탱크에 의한 변환은 다음의 식으로 표현된다.

$$S = K \cdot Q^P \dots \dots \dots (1)$$

이때, S 는 탱크의 貯留深, Q 는 유출량, P 와 K 는 저류함수의 매개변수로 P 가 1.0일 때는 선형 모델이 되고, 1.0 미만일 때는 비선형모델이 된다. Fig. 3에서 4개의 탱크 매개변수를 각각 S_u, S_b, S_h, S_c 로 나타내었으며, Q, K, P 도 동일하게 나타내었다. 운동 방정식의 결과를 이용하여 $P_c = P_h = 0.6, P_u = 1.0$ 을 고정값으로 하고(Fukushima, 1988), 조정 매개변수로 사용한 것은 P_b 뿐이다.

기저유출 $Q_b(t)$ 와 임지사면으로부터의 직접유출 $Q_d(t)$ 를 결정하는 $R_d(t)$ 의 분리는 福嶋(1986)가 제시한 토층두께 분포에 근거한 유효강우산정모델로 계산하였다. 이 모델에서 유역표토층의 평면 분포는 대수정규분포로 표현될 것으로 가정하고, 표토층의 16%, 50%가 포화에 도달하는 시점의 저류수심을 각각 $D_{16}, D_{50}(mm)$ 으로 정의하면 그 표준편차 σ 는 다음과 같다.

$$\sigma = \log \frac{D_{50}}{D_{16}} \dots \dots \dots (2)$$

탱크 III의 가저류량 $S_u'(t)$ 를

$$S_u'(t) = \frac{[S_u(t-1) + R_n(t)]}{D_{50}} \dots \dots \dots (3)$$

로 하고, 표준화변수 ζ 는

$$\zeta = \frac{1}{\sigma} \log S_u'(t) \dots \dots \dots (4)$$

를 사용하면 직접유출에 관한 유출기여면적을 m 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$m = \int_{-\infty}^{\zeta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\zeta^2}{2}} d\zeta \dots \dots \dots (5)$$

따라서 유효강우 $R_d(t)$ 는 임내강우 $R_n(t)$ 에 직접유출에 관한 유출기여면적을 m 을 곱하여 계산할 수 있다.

$$R_d(t) = m \cdot R_n(t) \dots \dots \dots (6)$$

이 모델은 ζ 의 적분에 의해서 강우량의 증가에 따른 유효강우의 발생지역(유출기여면적)이 점차 확대되어 가는 과정을 개념적으로 표현할 수 있다.

나) 증발산모델

물순환모델에서의 증발산량 산정은 일반적으로 증발산량이 계절변화하는 것에 근거하여 다음의 식으로 대상구역의 잠재 임지증산량 $E_{ip}(t)$ 를 구하였다.

$$E_{ip}(I) = \Delta \cdot \frac{12}{365} [A_1 + A_2 \cdot \sin(2\pi \cdot \frac{I-IG}{365})] \dots \dots \dots (7)$$

이때, I 는 day(1 ~ 365), Δ 와 IG 는 유역정수, A_1 과 A_2 는 증발계수이다.

(7)식은 일단위를 기본으로 하고, 하루중의 시간변화를 고려하는 경우에는 식을 변환하여 시간단위의 잠재 임지증산량 $E_{ip}(t)$ 도 구할 수 있다.

증발산 $E(t)$ 는 유로면 증발량 $E_c(t)$ 와 증산량 $E_s(t)$ 및 수관차단증발량 $E_d(t)$ 로 구성되어 있으며, 건조시의 증산억제 메카니즘과 사면에서의 직접유출량 감소 메카니즘도 포함하고 있다. 각각의 계산방법은 다음과 같다.

먼저, 임외강우 $R_g(t)$ 와 임내강우 $R_n(t)$ 의 관계는 다음 식과 같은 간단한 선형식으로 표현할 수 있다.

$$R_n(t) = A_3 \cdot R_g(t) - A_4 \dots \dots \dots (8)$$

단, $R_n(t) < 0$ 일 때 $R_n(t) = 0$, A_3, A_4 : 수관차단정수 따라서 일단위 수관차단증발량 $E_s(t)$ 는

$$E_s(t) = R_g(t) - R_n(t) = (1 - A_3) \cdot R_g(t) + A_4 \dots \dots \dots (9)$$

로 표현된다.

증산 $E(t)$ 는 기저유출에 관계하는 탱크 II 및 탱크 III으로부터 구할 수 있다. 기저유출에 관계하는 탱크 가운데 아래쪽 탱크에 의한 증발억제

한계유량을 Q_{bc} 라고 하면, 증발억제 한계저류심 S_{bc} 는 다음 식으로 표현된다.

$$S_{bc} = K \cdot Q_{bc}^p \dots \dots \dots (10)$$

단, S_u (탱크 II의 저류심) > 0 이면 $E_{ip}(t)$ 를 S_u 에서 뺀다.

$S_u \leq 0$, S_b (탱크 III의 저류심) $> S_{bc}$ 이면 $E_{ip}(t)$ 를 S_b 에서 뺀다.

$S_u \leq 0$, $S_b \leq S_{bc}$ 이면 $E_{ip}(t) \cdot Q_b(t) / Q_{bc}$ 를 S_u 에서 뺀다.

$$Q_{bc} = f(S_{bc}) \text{이다.}$$

$S_u \leq 0$, $S_b \leq S_{bc}$ 일 경우의 계산에서는 저류변환탱크 II에서 S_u 가 부(-)의 방향으로 증가하게 되므로 토양수분부족을 나타낸다. 이때, 강우 $R_n(t)$ 가 입력되면 $R_n(t)$ 는 우선 S_u 를 정(+)의 방향으로 회복시킨다.

다) 매개변수의 종류 및 매개변수의 결정

물순환모델에 사용되는 매개변수는 유역내의 유로면적비, 임지사면 표층토의 유출기여면적을 별 토심 및 각 탱크의 저류변환계수, 증발산에 관계하는 매개변수인 유역정수, 증발계수, 그리고 수관차단정수 등이 있다(Table 3).

유로면적율 C 가 크면, 하도강우가 많아지고 직접유출이 증가한다. 그리고, D_{50}, D_{16} 은 사면내에서의 직접유출에 기여하는 면적율과 표층토내 저류수심 S_u 와의 관계를 설명하는 매개변수로 D 값이 큰 경우에는 사면토양의 보수성이 높아진다. 각 탱크의 저류변환계수 K_c, K_n, K_u, K_b 는 K 의 값에 따라 유출 Q 가 변화하게 되고, 특히 탱크 III의 저류변환계수 P_b 는 기저유출 체감시의 감쇠 정도에 영향을 준다. 또, 탱크 III에 대한 증산억제유량 Q_{bc} 는 Q_b 가 Q_{bc} 보다 적게 되면 증산억제가 시작된다.

매개변수의 최적화 방법은 먼저, 매개변수의 초기값을 가정하여 계산한 계산값과 관측값을 비교한 후 임의의 변수를 임의의 양만큼 조정하여 오차를 줄여가는 시행착오법을 사용하였다. 이 시행착오법은 이론적인 최적변수의 결정은 곤란하지만 비구조적 특성을 고려할 수 있는 장점이 있다.

주어진 매개변수를 사용하여 강우량으로부터 계산유량을 산출하고, 이 계산유량과 관측유량의 차이를 비교하여 다음 식과 같은 상대오차 F_1 과 유량오차 F_2 에 의해서 오차를 계산하였다.

Table 3. Parameters for HYCYMODEL.

Parameter	Definition
C	ratio of impermeable area
D ₅₀	effective top soil depth in which the ratio of the contributing area for subsurface flow is equivalent 50 percent
D ₁₆	effective top soil depth in which the ratio of the contributing area for subsurface flow is equivalent 16 percent
K _c	coefficient for storage function in Tank V
K _h	coefficient for storage function in Tank IV
K _u	coefficient for storage function in Tank II
K _b	coefficient for storage function in Tank III
P _b	coefficient for storage function in Tank III
Q _{bc}	discharge for storage function in Tank III
Delta, IG	coefficient for transpiration
A ₁ , A ₂	coefficient for transpiration
A ₃ , A ₄	coefficient for interception

먼저, 기존의 연구결과를 근거로 하여 각 매개변수들의 초기값을 설정한 후 강우를 각각의 성분으로 나누는 매개변수인 C, D₅₀, D₁₆을 조정하고, 증발산에 관계하는 매개변수들을 조정하여 유량오차 F₂를 실제 물수지 값에 근접시킨다. 그 다음 강우의 흐름에 관계하는 운동 매개변수들을 순차적으로 조정하여 F₁이 최소가 되고, F₂ 또한 최소가 될 때까지 시행착오법으로 최적화 매개변수의 값을 결정해 간다. 계산유량과 관측유량이 완전하게 일치하면 F₁ = 0, F₂ = 0가 되지만 실제로는 대략 F₁ < 0.2, F₂ < 0.1이 적합한 기준이 되고 있다.

$$F_1 = \frac{1}{n} \sum \frac{|Q_{obs} - Q_{cal}|}{Q_{obs}} \dots\dots\dots(11)$$

$$F_2 = \frac{|\sum Q_{obs} - \sum Q_{cal}|}{\sum Q_{obs}} \dots\dots\dots(12)$$

이 때, 관측유량은 Q_{obs}이고 계산유량은 Q_{cal}, 데이터 일수는 n이다.

結果 및 考察

1. 수위-유량 관계식의 산출

수문관측 시험구역의 출구 부근에 유량을 측정하기 위한 삼각형 웨어(V-notch)가 설치되어 있다. 이 웨어의 나비는 2.9m이고, 월류수심의 한계는 1.4m이다. 그리고 홍수시 流送 土砂의 一時貯砂와 수위측정시 수면의 안정화를 위하여 양수

웨어 상류측에 체적 29.89m³의 저수부가 설치되어 있다(Fig. 4).

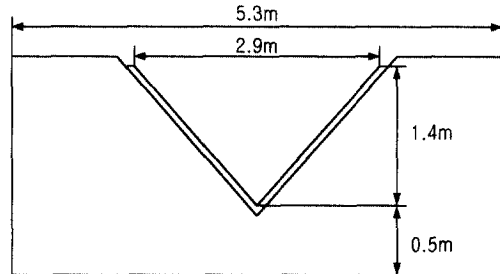


Fig. 4. Schematic diagram of the triangular weir.

수위-유량 관계식 산출을 위해 상승시의 수위와 하강시의 수위에 대하여 총 45회 측정하고, 그 분석결과를 Fig. 5에 나타냈으며, 유도한 관계식은 다음과 같다.

$$Q = 11.148 H^{2.5867} (R^2 = 0.9956) \dots\dots\dots(13)$$

단, Q : 유량(cm³/sec), H : 수위(cm)

(13)식의 수위-유량 관계식은 실측된 최고 수위가 29cm일 때까지를 기준으로 하여 구한 식이며, 그 이상의 수위에 대응하는 유량은 수위-유량관계곡선의 연장법 중 한가지인 전대수지 방법(logarithmic method)(박성우, 1995)을 이용하여 산정하였다.

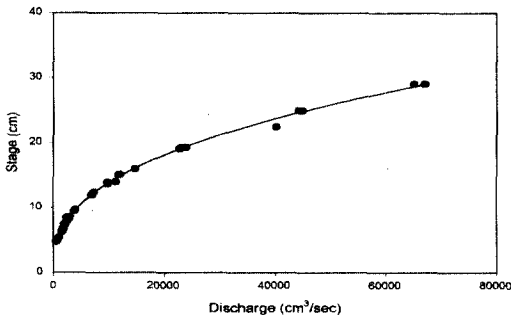


Fig. 5. Relationship between stage and discharge.

2. 장기유출 특성

1) 강우와 유출 특성

관측기간동안의 일우량을 월별 강우빈도로 살펴 보면 0.1~10mm 범위의 강우가 1998년, 1999년에 각각 53.4%, 50%이고, 30mm 미만의 강우빈도는 각각 76.2%, 76.6%로 분석에 사용된 적은 일우량의 월별 강우빈도는 거의 유사하게 나타났지만 70mm 이상의 강우빈도는 각각 3.4%, 11.7%로 다소 차이가 있었다.

연구기간 중 1998년 10~11월에 시험유역의 10.2%인 1.7ha의 간벌이 이루어졌다. 이를 기점으로 간벌 전과 간벌 후를 비교해 보면, 먼저 간벌 전은 총 강우량이 1,561.5mm로 팔공산 수문관측유역에 276,385.5ton이 유입되었고, 간벌 후는 총 강우량이 1,289.5mm로 다소 적은 228,241.5ton이 유입되었다. 그리고 가장 적은 유출량을 보이는 1998년 5월은 토양수분의 결핍으로 토양내로 침투

가 증가했기 때문으로 판단되고, 1998년 9월에는 태풍 "예니"의 영향으로 일우량이 200mm가 넘는 경우도 있었다. 한편, 강우량에 비해 가장 많은 유출량이 나타나는 1999년 9월은 집중호우와 높은 강우강도에 의한 결과로 추정된다.

두 기간 중 유출량을 보면 간벌 전이 159,515ton이고, 간벌 후가 198,880ton으로 유출율이 각각 57.7%, 87.1%로 나타났다(Table 4). 간벌 전은李宗學 등(1989)이 보고한 사방지는 71.3%, 활엽수림지는 61.9%, 침엽수림지는 48.5%의 연평균 유출율과 비슷한 결과를 나타내고 있다. 일반적으로 산림벌채로 인한 유출율의 증가가 10~50%로 추정되고 있고, 팔공산 시험유역에서는 간벌 이후 29.4%의 유출율 증가가 있었는데 中野(1971)의 평상시 유출보다 산림벌채 이후 20~40%의 유출율 증가가 있었다는 연구결과와 비교해 보면 간벌 면적에 비해 유출율이 높은 것으로 나타났다. 이는 임상과 식생이 다소 불량하고, 산 능선부는 풍화가 심하게 일어나 토양이 척박한 상태에서 간벌에 의한 산림의 홍수조절효과의 감소와 높은 강우강도 및 1999년 9월의 폭우로 인한 유량의 증가 때문으로 판단된다.

2) 물순환모델의 적용

(1) 매개변수 결정 및 모델의 적합도

수문관측 유역의 일강우와 일유량 자료를 대상으로 물순환모델을 적용시켜 본 결과, 본 시험유역에서 결정된 매개변수와 상대오차 및 유량오차는 Table 5에 나타낸 것과 같다.

Table 4. Monthly rate of runoff at the experimental watershed.

Year	Month	May	June	July	Aug.	Sep.	Total
	Factor						
1998	Rainfall (mm/month)	162.5	292.0	229.5	538.5	339.0 (46.5)	1,561.5 (1269)
	Discharge (mm/month)	30.9	167.1	155.2	444.1	103.9 (17.3)	901.2 (814.6)
	Runoff rates (%)	19.0	57.2	67.6	82.5	30.6 (37.2)	57.7 (64.2)
1999	Rainfall (mm/month)	165.5	208.5	246.5	345.5	323.5 (61.0)	1,289.5 (1027)
	Discharge (mm/month)	56.8	110.0	193.5	281.7	481.6 (128.8)	1,123.6 (770.8)
	Runoff rates (%)	34.3	52.8	78.5	81.5	148.9 (211.1)	87.1 (75.1)

*() : Rainfall data used for HCYMODEL

Table 5. Optimum parameter values and errors by the function F_1 and F_2 .

Parameter	C	D_{50}	D_{16}	K_c	K_h	K_u	K_b	P_b	S_{bc}
Year	Delta	IG	A_1	A_2	A_3	A_4	F_1	F_2	
1998	0.0022	29.54	21.45	3.89	28.34	59.850	375.7	0.0435	0.17
	0.887	1440	140.35	0.09	1.043	0.11	0.4634	0.0135	
1999	0.0022	28.70	27.85	3.89	25.34	59.815	375.7	0.0563	0.27
	0.592	720	105.35	0.09	1.053	0.02	0.3558	0.0146	

Fig. 6과 Fig. 7에 98년도와 99년도 5~9월까지의 관측 수문곡선과 모델에 의한 계산 수문곡선을 함께 표시하였다. 일부분을 제외하고는 모델에 의한 계산 수문곡선이 관측 수문곡선을 잘 재현하고 있으며, 본 모델에 의한 매개변수 결정 및 적합도는 양호한 것으로 나타났다. 매개변수 C 는 간벌 전과 간벌 후가 같았으며, 산림의 토층분포를 나타내는 D_{50} , D_{16} 과 운동 매개변수인 K_c , K_h , K_u 는 간벌의 영향으로 인해 값이 변화한 것으로 추정된다. 98년도의 상대오차 F_1 이 99년도보다 크게 나

타난 것은 98년도에 우량계와 수위계의 잦은 고장에 기인한 것으로 판단되며, 정확한 원인 구명을 위해서는 수문관측구역에서 더 많은 강우와 유량 자료를 대상으로 분석할 필요가 있는 것으로 생각된다.

(2) 직접유출 특성

C , D_{50} , D_{16} 은 직접유출성분의 양을 설명하는 매개변수로, 이 가운데 C 는 1998년과 1999년이 0.0022로 동일하게 나타났다. 이는 유역면적의 약 10.2% 면적에 간벌을 실시하였으나 간벌구역이 주로 산각(山脚)부분에 위치하고 있어서 유로면적을 증가에는 크게 영향을 미치지 못하였기 때문으로 추정된다. 매개변수 D_{50} 은 Table 5에 표시한 바와 같이, 관측구역에서 간벌후 1년이 경과하였을 때 0.84 정도 감소하였다. 이것은 간벌에 의한 표층토의 저수기능저하의 영향으로 추정되고, 福嶋 등(1989)이 간벌의 영향을 밝힌 연구결과와 비슷하게 나타났다. 즉, 매개변수 C 는 동일하고 D_{50} 이 감소하면 소규모 강우에서는 직접유출량이 비슷하지만 대규모 강우에서는 크게 증가하는 것을 의미한다. K_c , K_h 는 직접유출의 발생속도를 설명하는 매개변수로 K_c 는 98년, 99년 모두 동일한 값을 나타내고 있지만, K_h 는 3이 감소하였다. 이 결과는 직접유출의 발생속도가 상대적으로 빨라진 것을 의미하며, 간벌에 의해 지피식생을 포함한 지표부근의 수리지항이 약화되었기 때문으로 판단된다.

(3) 기저유출 특성

Table 5에서 기저유출에 관계하는 매개변수 K_u 는 1년간 약 0.035가 감소하였으나, 매개변수 K_b 는 98년과 99년 모두 375.7로 동일하게 나타났다. 이 결과는 기저유출성분의 증가가 시간적으로 약간 빨라졌다는 것을 의미하며, 또한 이는 기저유출의 운동 매개변수가 유역의 지질조건을 강하게

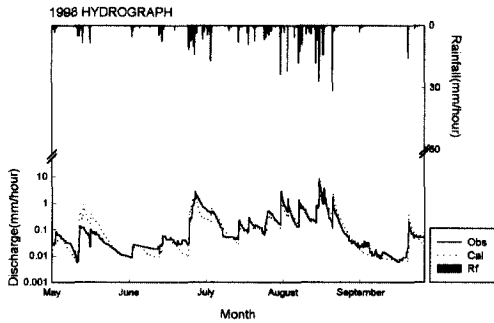


Fig. 6. Calibration of observed and calculated hydrograph at the experimental watershed in 1998. Obs : Observed discharge, Cal : Calculated discharge, Rf : Rainfall

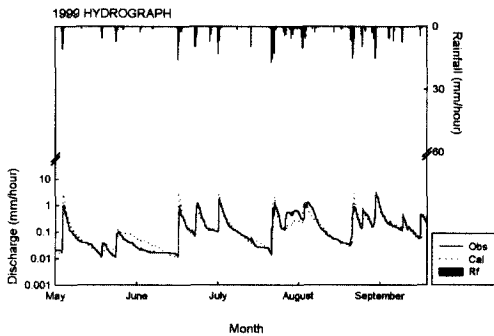


Fig. 7. Calibration of observed and calculated hydrograph at the experimental watershed in 1999.

반영할 수 있다는 福嶋 등(1989)의 연구결과에서 유추해 볼 때, 수문관측 유역에서 운동 매개변수 K_b 의 변동은 유역 상류부에서 모암의 풍화가 빠르게 진행되고 있기 때문으로 추정된다. 그리고 매개변수 P_b 는 1년간 약 0.0128이 증가하여 기저유출의 체감시 완만하게 감쇠하는 것을 알 수 있었다. 또한 증산억제 한계수심 매개변수 S_{bc} 가 98년도가 0.17인데 비해 99년도는 0.27로 0.1이 증가하였는데, 이는 증산량이 억제되어 기저유출량의 증가에 의한 것으로 판단된다.

물순환모델을 이용하여 계산한 1998년 및 1999년도의 시간단위 장기유출 수문곡선으로부터 직접유출량 및 기저유출량을 분리하여 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. 두 장기유출 수문곡선에서 기저유출의 분리형상이 강우의 증감에 민감하게 대응하는 것으로 나타났으며, 이 결과로 유역 고유의 운동 매개변수를 정확하게 결정하면 직접유출과

기저유출의 분리는 한층 정확하고 용이하게 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

(4) 모델에 의한 장기유출 성분의 물수지 분석

물수지법에 의한 실제 증발산율은 98년도에 35.8%로 나타난 반면, 99년도에 24.9%로 나타나서 증발산량이 약 10.9%가 줄어들었다. Fig. 10은 수문관측 유역에 대하여 98년 5~9월과 99년 5~9월까지 물순환모델로 계산한 유출성분을 직접유출율 QD, 기저유출율 QB, 그리고 증발산율 EV의 3성분으로 나누어 나타낸 것으로, 간별 후에 직접유출량과 기저유출량이 각각 4%, 7% 정도 증가하였으나, 증발산량은 11%가 감소하였다. 이와 같이 실제 증발산량과 모델에 의한 증발산량의 비교 시 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 이는 산림을 벌채하면 증발산량이 줄어들고 유출량이 증가한다는 Bosch와 Hewett(1982), Toshio 등(1994)의 연구결과와도 일치하였다. 그리고 일반적으로 산림지에서 간벌 또는 개벌 등의 벌채로 인한 영향은 증발산량에서 확실하게 나타나는 것과 같이 증발산량의 감소는 이상기온에 따른 영향일 수도 있지만 직접유출량 및 기저유출량의 증가에 따른 증발산량의 감소는 간벌에 의한 직접적인 영향으로 판단된다.

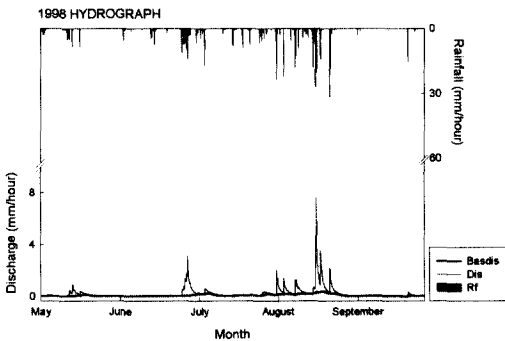


Fig. 8. Separation of direct runoff and base flow from calculated hydrograph at the experimental watershed in 1998.
Basdis : Base discharge, Dis : Discharge

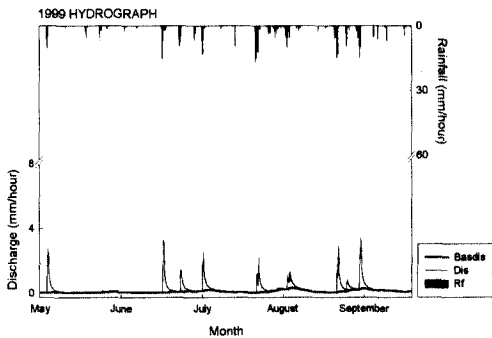


Fig. 9. Separation of direct runoff and base flow from calculated hydrograph at the experimental watershed in 1999.

Fig. 10. Comparison of hydrological components.
QD : Direct runoff, QB : Base flow,
EV : Evapotranspiration

結 論

본 연구는 팔공산 소재 한 소유역을 연구 대상으로 기존의 물순환모델을 적용하여 산지소유역의 장기유출특성을 구명하고, 동시에 모델의 적합도를 검증하기 위하여 실시하였다. 강우와 유량 데이터의 축적이 부족한 관측유역임에도 불구하고 계산 수문곡선이 관측 수문곡선을 잘 재현하기 때문에 물순환모델의 적합도는 양호한 것으로 나타났으며, 시험유역에서 관측된 1998년 5월부터 1999년 9월까지의 측정자료를 대상으로 물순환모델에 의한 팔공산 유역의 유출특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 팔공산 수문관측 유역에서의 수위-유량 관계식은 $Q=11.148H^{2.5867}$ ($R^2=0.9956$)로, 이는 최고 수위가 29cm일 때까지를 기준으로 산출되었다. 이 관계식은 향후 팔공산 유역의 유량산정시에 바로 적용할 수 있다.

2. 수문관측 유역에서 1998년 5월~9월의 유출율은 57.7%이고, 1999년 5월~9월의 유출율은 87.1%로 나타나 유출율이 약 29.4% 증가하였는데, 이것은 다수의 높은 강우강도의 강우와 1999년 9월의 집중호우 및 간벌의 영향으로 유출량이 증가한 것으로 판단하였다.

3. 물순환모델을 적용하여 총 15개의 매개변수 값을 결정하였으며, 이들 매개변수로 장기수문곡선을 재현한 결과, 실측 수문곡선과 관측 수문곡선이 대체로 일치하여 모델의 적합도가 양호한 것으로 나타났다.

4. 수문관측 유역에서 물순환모델로 계산한 간벌 전후의 유출성분을 분석한 결과, 간벌 후에 직접유출 성분과 기저유출 성분이 각각 4%, 7% 정도 증가하고, 증발산량은 약 11% 감소하였다.

5. 물순환모델의 직접유출에 관계하는 매개변수인 D_{50} 과 K_b , 기저유출에 관계하는 매개변수인 K_0 를 이용하여 간벌의 영향과 모암의 풍화 정도 등 산림의 변화를 추정할 수 있었다.

이상과 같이 물순환모델은 미세측 산지소유역에 대해서도 적용할 수 있는 모델이지만 비슷한 매개변수의 통합과 모암, 지질, 임상 등에 따른 고유 매개변수의 지정 등을 통해 매개변수의 감소가 필요하고, 또한 적설량을 고려한 부분이 모델에 고려되어야 할 것으로 생각된다.

引 用 文 獻

1. 金景河·李天龍·李元圭, 1992. 流域의 立地條件이 渇水期貯水量에 미치는 影響. 林研研報 44: 75-86.
2. 金景河·元亭圭·李天龍·程龍鎬, 1996. 山林小流域의 水文特性(1) - 林相別 貯留係數의 經時的 變化 -. 山林科學論文集 54: 71-80.
3. 金東燮·曹哲煥, 1939. 林內外 雨量 觀測. 林試試報 20: 19-37.
4. 金載水, 1987. 山林이 洪水量에 미치는 影響과 小流域內 蒸發散量 推定. 林研研報 35: 69-78.
5. 柳澤圭·李天龍, 1980. 林相別 流水流土量 調査. 林試試報 307-329.
6. 朴成宇, 1995. 應用水文學. 鄭文社, 186-187p.
7. 서영재, 1997. 탱크모형의 매개변수 결정에 관한 연구. 韓國水資源學會誌 30(4): 327-334.
8. 呂泰烈, 1978. 中小河川流域에 있어서의 單位圖 및 瞬間單位圖에 關한 研究. 嶺南大 碩士學位論文.
9. 禹保命·李鎭雄·金樂培, 1992. 森林環境이 水資源涵養機能에 미치는 影響에 關한 研究(1) - 秋山 山林水文環境試驗場의 設置 및 觀測 結果 -. 서울대 農生大 演習林研究報告 28: 13-48.
10. 李寬洙·李英錫·鄭鎭光, 1995. 탱크모형의 매개변수 추정을 위한 상태공간모형의 결정. 韓國水資源學會誌 28(2): 125-135.
11. 李宗學·金泰勛·李元圭·崔敬·李天龍·朱鎮順, 1989. 山林의 流出調節에 關한 研究. 林研研報 38: 98-111.
12. 李憲浩, 1991. 林相의 經年變化가 水流出特性에 及ぼす 影響. 東大演報 86: 77-178.
13. 韓國動力資源研究所, 1981. 韓國地質圖(대울도폭). 연화인쇄포장공사, 29p.
14. 黃晶鉉, 1991. 多重回歸模型을 이용한 單位圖 誘導에 關한 研究. 慶熙大 碩士學位論文.
15. 官原正巳, 1978. 流出解析法. 共立出版, 25-75p.
16. 福嶋義宏·式居有恒, 1981. 山地小流域의 短期流出에 對する 모델. 土木學會水理講論集 25: 229-236.
17. 福嶋義宏·鈴木雅一, 1986. 山地流域을 對象とした水循環モデル의 提示と 桐生流域의 10年連

- 續日・時間記録への適用. 京大演報 57 : 162-185.
18. 福嶋義宏・友村光秀・鈴木雅一・窪田順平. 1989. 暖候性の古生層山地流域における降雨・降雪と流出(I) -無雪期の流出特性-. 日林誌 71(5) : 187-195.
 19. 鈴木雅一. 1985. 短期水収支法による森林流域からの蒸発散量推定. 日林誌 67(4) : 115-125.
 20. 中野秀章. 1971. 森林伐採および伐跡地の植被變化が流出に及ぼす影響. 林試研報 240 : 1-251.
 21. 塚本良則. 1991. 森林水文學. 文永堂出版. 178-216p.
 22. Beven, K.J., M.J. Kirkby, N. Schofield and A.F. Tagg. 1984. Testing a Physically-based flood forecasting model(TOPMODEL) for three U.K. catchments. J. Hydrology 69 : 119-143.
 23. Bosch, J.H. and J.D. Hewlett. 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. J. Hydrology 55 : 3-23.
 24. Fukushima, Y. 1988. A model of river flow forecasting for a small forested mountain catchment. Hydrological Processes 2 : 167-185.
 25. Hewlett, J.D. 1984. Forest, flood, and erosion : A watershed experiment in the south eastern Piedmont. For. Science 30 : 424-434.
 26. Reich, B.M. 1972. The influence of percentage forest on design floods. National Symposium Watersheds in Transition Proc. Am. Water Resour. III : 335-340.
 27. Toshio, S., T. Yoshio. and H. Ikuhiro. 1994. Effects of contour-line strip-cutting on stream flow(I). J. Jpn. For. Soc. 76(5) : 393-401.