

산림식생에 따른 유역 물수지 영향 평가

Assessment of Forest Vegetation Effect on Water Balance in a Watershed

김철겸* / 김남원**

Kim, Chul Gyum / Kim, Nam Won

Abstract

In this study, to evaluate the effect of forest vegetation on the long-term water balance in a watershed, semi-distributed and physically based parameter model, SWAT was applied to the Bocheong watershed, and the variation of hydrological components such as evapotranspiration, surface flow, lateral flow, base flow, and total runoff was investigated with coniferous and deciduous forests, respectively. First, SWAT model was modified to simulate the actual plant growth pattern of coniferous trees which have the uniform value of leaf area index all the seasons of the year. The modified model was applied to the watershed that is assumed to have only one land cover in the whole watershed, and the variation of the water balance components was investigated for each land cover. It was found that coniferous forest affected the increase in evapotranspiration and decrease in runoff more than deciduous forest. However, the age and the density of stand, the location, and soil characteristics and meteorological conditions including the tree species should be also considered to examine the effect more quantitatively and to reduce the uncertainties in simulated output from the hydrological model.

keywords : SWAT, Forest, Water balance, Evapotranspiration, Runoff

요 지

본 연구에서는 산림식생에 따른 장기적인 측면에서의 유역 물수지 영향을 살펴보기 위하여 보청천 유역을 대상유역으로 선정하고, 준분포형 매개변수 모형인 SWAT 모형을 적용하여, 침엽수와 활엽수에 따른 증발산, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 총 유출의 차이를 검토하였다. 먼저 SWAT 모형내 식생 성장 알고리즘을 수정하여 연중 일정한 엽면적지수를 갖는 국내 침엽수림의 성장 특성을 반영할 수 있도록 하였으며, 대상유역을 하나의 토지피복을 갖는 가상의 유역으로 설정한 후, 수정된 SWAT 모형을 적용하여 각 물수지 요소 변화를 모의한 결과, 침엽수가 활엽수에 비해 증발산 증가 및 유출 감소에 더 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나, 보다 정량적인 규명과 유출모형의 불확실성을 보완하기 위해서는 수종 외에 수령, 식재밀도, 식재위치, 토양특성자료 등 다양한 조건이 충분히 고려되어야 할 것이다.

핵심용어 : SWAT, 산림, 물수지, 증발산, 유출

* 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원

Researcher, Water Resources Research Department, Goyangsi, Gyeonggi-do, 411-712, Korea
(E-mail: cgkim@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원

Research Fellow, Water Resources Research Department, Goyangsi, Gyeonggi-do, 411-712, Korea
(E-mail: nwkim@kict.re.kr)

1. 서 론

장기 유출에 영향을 주는 유역내 토지이용 변화는 산림식생 변화, 농업용수 이용, 도시화 등의 인위적인 변화에 가장 크게 좌우되며, 이러한 변화는 유역내 강우, 증발산, 지표유출, 기저유출, 토양수분 등 유역 전반에 걸친 수문현상에 많은 영향을 준다. 특히, 우리나라 국토면적의 64% 정도(2002년 기준)를 차지하고 있는 산림의 경우, 인위적인 벌목이나 가지치기, 봄철과 가을철의 예상치 못한 산불 등으로 인해 산림식생이 파괴되기도 하고, 일부 지역에서는 인공조림 등을 통하여 새로운 식생을 조성하기도 하기 때문에, 이에 대한 정확한 물수지 거동 해석이 전체 유역 물수지 해석에 매우 중요한 역할을 하고 있다.

산림에 대한 영향 평가는 주로 산림 수종 및 수령에 따른 증발산, 유출에 미치는 정성적, 정량적 영향 등에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 이를 위해 1909년 미국 콜로라도에서 대조유역시험이 처음 시작된 이후로(Linsley, 1982), 산림시험을 통한 유출 영향 평가가 전 세계적으로 이용되고 있다(김재수, 1987). Anderson 등(1976)은 침엽수가 활엽수보다 연간 약 20% 정도 증발산량이 많은 이유로서, 활엽수는 월동중에 낙엽이 지므로 증산작용이 정지되는 반면 침엽수는 연중 일정한 증산작용을 하기 때문이라 하였다. Hibbert는 39개 시험유역의 결과로부터 산림 식피가 감소하면 유출량이 증가하고, 황폐지에 산림을 조성하면 유출량은 감소한다는 결론을 얻었지만, 지역에 따른 식생처리 효과의 변이가 심하고, 대부분의 경우에 그 변이량을 예측하기 어렵다고 하였다(김재수, 1987). 이에 Bosch와 Hewlett(1982)는 Hibbert의 자료를 보완하고, 94개 유역시험의 결과를 종합하여, 침엽수, 활엽수, 잡목림에서의 10% 벌채에 따른 연간 유출량 변화를 비교한 결과, 침엽수림 벌채로 인한 유출 증가가 가장 크게 나타난다고 하였다. Evan 등(1988)은 수종과 수령에 따른 계절별 증발산 및 유출 영향을 보다 상세히 비교하였는데, 작물의 종류, 수종, 수령, 작물형태, 기상조건 등에 따라 그 영향이 상이하기 때문에 이에 대한 고려가 전제되어야 한다고 하였다. 캐나다의 Trent 대학내에 소재한 Watershed Science Centre의 보고서(2000)에서도 산림식생 변화에 따른 수문학적 영향을 상세히 기술하고 있다. 산림의 제거는 수문학적으로 수목식생에 의한 강우 차단량 감소, 증발산 감소, 유출량 증가에 영향을 주며, 수목식생은 수종, 식재밀도, 수령, 위치, 강우강도, 강우사상 동안 또는 이후의 증발량 등에 따라 10~40% 정

도의 강우를 차단할 수 있고, 전 세계적인 통계로 산림 피복이 10% 증가함에 따라 연 34mm 정도의 유출이 감소한다고 적고 있다. 최근의 연구로서는, 독일에서 Eckhardt 등(2003)이 토지이용 변화 영향을 평가하기 위해 하나의 토지피복을 갖는 가상의 유역을 설정하고, SWAT 모형의 수정 버전인 SWAT-G를 적용하여 각 피복에 따른 수문변화를 검토한 결과, 증발산은 침엽수가 더 많은 것으로 나타나지만, 지표유출, 기저유출, 총 유출은 활엽수가 더 크게 나타난다고 발표하였다.

국내에서도 국립산림과학원(구. 임업연구원)의 시험유역을 중심으로 산림식생에 따른 장기적, 단기적인 측면에서의 수문학적 영향에 대한 연구가 진행되어 왔다.

김승(1997)은 임업연구원 시험유역자료를 이용하여 침엽수림, 활엽수림, 황폐지에 대한 연증발산(1985~1995년)을 물수지분석을 통하여 비교한 결과, 침엽수림의 실제증발산이 활엽수림에 비해 연평균 180 mm 더 크게 나타났으며, 이로 인해 유출을 또한 침엽수림이 0.53, 활엽수림이 0.60으로 차이가 나타났는데, 이는 광릉유역의 침엽수림이 유령림이기 때문에 상대적으로 임목생장이 왕성하기 때문이라 하였다(김재수, 1987). 김경하 등(2003a)은 전나무 림에서 간벌과 가지치기에 따른 영향을 파악한 결과 간벌과 가지치기를 실시하지 않을 경우 차단손실률이 40%에 이르기 때문에, 침엽수 인공림에서 적정시기에 간벌과 가지치기를 실시하여 차단손실률을 줄임으로써 지표에 도달하는 강수량을 증가시켜 가용수자원을 증가시킬 수 있다고 하였다. 또한 침두유출에 대한 영향 분석 측면에서, 김경하 등(2003b)은 광릉시험림의 산림지역에 대하여 임상이 침두유출에 미치는 영향을 조사한 결과, 인공침엽수 유령림의 경우 조림 후 임목이 빠른 속도로 성장하여 울폐됨에 따라 차단량과 증발산량이 증가하고 토심도 깊어 침두유출량이 많이 감소하는 반면 천연활엽수 장령림은 토양 및 임분 조건이 매우 좋기 때문에 200 mm의 강수량까지 침두유출량의 증가율이 완만해지는 것으로 나타난다고 하였다.

이상의 결과를 바탕으로, 본 연구에서는 산림식생의 영향을 보다 정량적으로 규명하기 위하여 준분포형 물리적 매개변수를 취하는 유역관리모형인 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)(Neitsch 등, 2001)을 이용하여, 우선 국내 유역에서의 산림식생 성장 특성을 모의할 수 있도록 알고리즘을 수정한 후, 수정된 모형을 통해 유역내 산림식생에 따른 물수지 영향을 정성적, 정량적으로 검토하였다.

2. 대상유역 선정 및 입력자료 구축

대상유역으로서 IHP 대표유역 중의 하나인 금강수계의 보청천 유역을 선정하였으며, 선정된 하천구간 및 유역은 그림 1에 나타난 바와 같이 기대교 상류 유역으로서 유역면적은 348.15 km²이며, 이 중 산림지 면적은 219.79 km²로서 유역의 62.6%를 차지하고 있다(표 1 참고).

또한, 모형 구동을 위하여 상류로부터 산성교, 탄부교, 기대교 수위관측소 지점을 기준으로 3개의 소유역으로 구분하였으며, DEM(30×30m), 토지이용도(1:50,000), 개략토양도(1:50,000), 하천망 등의 GIS 자료, 우량관측소(보은)와 기상관측소(보은)자료를 이용하여 모형의 입력자료를 구축하였다.

3. SWAT 모형의 수정

3.1 모형내 식물생장 알고리즘 수정

SWAT 모형에서는 식물생장을 모의하기 위한 수단으로서, 열단위(Heat Unit)를 이용하고 있다. 열단위 개념은 식물이 성장하는데 필요한 온도 단위를 나타낸다. 예를 들어, 기준 온도 이상인 날에만 식물생장이 이

루어지고, 식물생장에 기여하게 되는 기준 온도 이상의 온도를 열단위라 정의하여, 이 누적치가 일정값에 도달하게 되면 식물의 생장이 완료되는 것으로 보는 것이다.

주어진 날의 열단위는 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{T_{av}} > T_{base} \text{ 일 때, } HU = \overline{T_{av}} - T_{base}$$

여기서, HU 는 주어진 날에 대한 열단위, $\overline{T_{av}}$ 는 주어진 날의 평균기온(°C), T_{base} 는 식물생장을 위한 기준 온도 또는 최소 온도(°C)이다.

따라서, 식물이 완전히 자라는데 필요한 총 열단위는 다음과 같이 계산된다.

$$PHU = \sum_{d=1}^m HU$$

여기서, PHU 는 총 열단위(또는 잠재 열단위), $d=1$ 는 식물 생육 시작일, m 은 식물이 완전히 생육하는데 필요한 일수이다.

또한, SWAT 모형에서는 식물생장과정에서 수목, 다년생 식물, 1년생 한대성 식물 등에 대해, 주간길이가

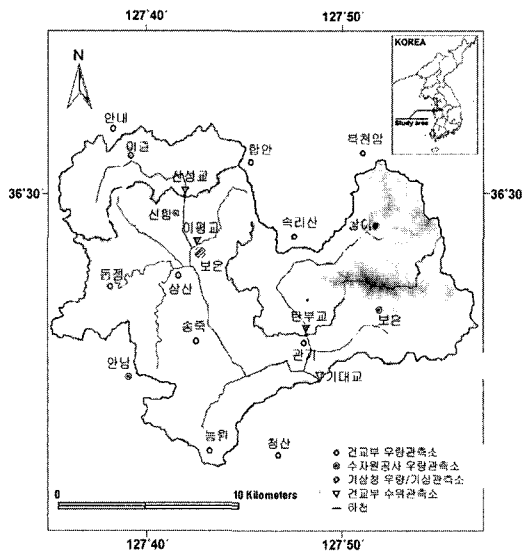


그림 1. 보청천 유역 수문관측망

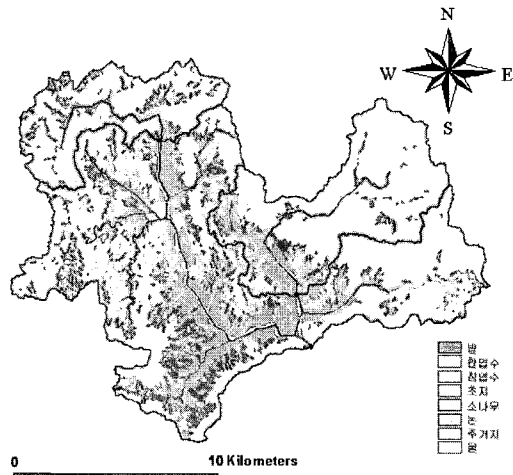


그림 2. 보청천 유역 토지이용 현황

표 1. 대상유역 토지이용 현황

유역면적 (km ²)	토지이용 비율(%)					
	침엽수	활엽수	논	밭	초지	기타
348.15	62.6	0.5	16.6	10.4	2.9	7.0

한계치보다 작아지는 기간 동안 휴지기에 접어들도록 모의하고 있으며, 이 기간 동안은 수목, 다년생 식물에 대해 엽면적지수가 최소값(0.75)을 갖도록 설정되어 있다. 그러나 이것은 Anderson 등(1976)이 언급한 바와 같이, 월동중에 낙엽이 지는 활엽수와 달리 연중 일정한 증산작용을 하는 침엽수와 같은 식물군에서는

비현실적인 수치이다.

아래의 표 2는 SWAT에서 구분하고 있는 식물형태별 성장특성을 나타내고 있는 것으로서, 모형에서는 수목에 대해 성장종료 시점에서 잎 부분의 모든 생물자원이 잔류물로 바뀌도록 모의하고 있다.

표 2. SWAT에서 구분하는 식물형태별 성장특성(Neitsch 등, 2001)

1. 1년생 온대성 콩과식물(warm season annual legume)
 - 질소 고정 모의
 - 뿌리 생장에 따라 성장기간 동안 뿌리 깊이 변함
2. 1년생 한대성 콩과식물(cold season annual legume)
 - 질소 고정 모의
 - 뿌리 생장에 따라 성장기간 동안 뿌리 깊이 변함
 - 주간길이가 한계치보다 작은 경우, 가을에 심어진 식물 피복이 휴지기에 들어감
3. 다년생 콩과식물(perennial legume)
 - 질소 고정 모의
 - 뿌리 깊이는 항상 식물종과 토양에 대해 허용된 최대치와 동일
 - 주간길이가 한계치보다 작은 경우, 식물이 휴지기에 들어감
4. 1년생 온대성 식물(warm season annual)
 - 뿌리 생장에 따라 성장기간 동안 뿌리 깊이 변함
5. 1년생 한대성 식물(cold season annual)
 - 뿌리 생장에 따라 성장기간 동안 뿌리 깊이 변함
 - 주간길이가 한계치보다 작은 경우, 가을에 심어진 식물 피복이 휴지기에 들어감
6. 다년생 식물(perennial)
 - 뿌리 깊이는 항상 식물종과 토양에 대해 허용된 최대치와 동일
 - 주간길이가 한계치보다 작은 경우, 식물이 휴지기에 들어감
7. 수목(trees)
 - 뿌리 깊이는 항상 식물종과 토양에 대해 허용된 최대치와 동일
 - 새로운 성장은 잎 성장(30%)과 목본 성장(70%)으로 분할
 - 매 성장기간 종료 시점에서, 잎 부분의 생물자원은 잔류물로 변환

따라서, 본 연구에서는 이 부분에 대해서 침엽수의 경우 연중 일정한 엽면적지수를 갖도록 수정하였다. 우선 침엽수에 대한 새로운 식물형태를 추가하여, 기본적으로 "수목"의 생육특성을 적용한 후, 표 2에서 제시한 식물형태 중에서 2번째와 5번째인 "한대성 식물"은 그 성장특성상 겨울철에도 식생이 자라는 상태이기 때문에 그 특징을 부여하고, 또한 수목의 특징 중에서 휴지기간 동안 엽면적지수가 최소화되는 부분과 총 열단위가 0이 되는 부분을 제외하여, 연중 일정한 엽면적지수를 모의하도록 하였다. 나머지 대부분의 알고리즘은 수목에 적용된 생육특성을 그대로 적용하여 계산하였다.

3.2 수정모형의 적용성 검토

수정모형의 적용성 평가를 위해, 유역 최종 출구점인 기대교 지점에 대해 수정모형으로부터 계산된 모의 유출

량과 관측 유출량을 비교하였다. 1993년 유량자료를 이용하여 모형의 보정에 이용하였으며, 나머지 1990~1992년, 1994~1997년의 자료를 이용하여 검증 수행하였다.

그림 3(a), (b)는 각각 1993년과 1992년에 대한 모형 보정과 검증 결과를 보여주는 것으로 모의치와 관측치를 비교한 것이며, 표 3은 적용성 평가를 위해 상대편향(relative bias; RB), 제곱근평균제곱오차(root mean square error; RMSE), 평균절대오차(mean absolute error; MAE) 등을 산정하여 통계 분석을 수행한 결과이다. 각 통계치의 산정 방법은 다음과 같다(Maidment, 1992).

· 상대편향

$$RB = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_f(i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o(i)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_o(i)}$$

· 제곱근평균제곱오차

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Q_f(i) - Q_o(i)]^2}$$

· 평균절대오차

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Q_f(i) - Q_o(i)|$$

여기서, Q_f 와 Q_o 는 각각 모의치와 관측치를 나타낸다.

모형내 CN-II의 값(CN2), 토양증발보상계수(ESCO), 토양의 유효수분함량(SOL_AWC), 기저유출 감수상수(ALPHA_BF), 기저유출에 대한 얇은 대수층의 임계수분량(GWQMN), 얇은 대수층의 revap 계수(GW_REVAP), revap 또는 깊은 대수층으로의 침투에 대한 얇은 대수층의 임계수분량(REVAPMN) 등을 조정하여 보정을 수행하였으며, 그림 3과 표 3에서 보여지듯이 보정 및 검증 결과 양호한 것으로 나타났다. 다만, 4월 이전 및 10월 이후 기간에 대해서는 다소 모의 정확성이 떨어지는데, 이는 동절기 유량 관측의 정확성 문제로 판단되며, 다른 기간에서는 비교적 안정된 결과를 나타내는

것으로 판단된다.

4. 산림식생에 따른 물수지 영향 평가

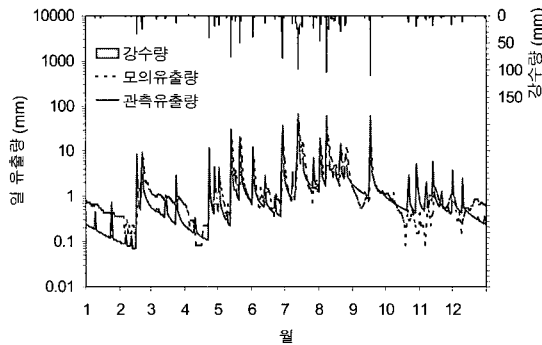
4.1 SWAT 모형에서의 물수지 관계

SWAT 모형에서의 수문순환은 다음과 같은 물수지 식에 의해 일별 모의된다(Neitsch 등, 2001).

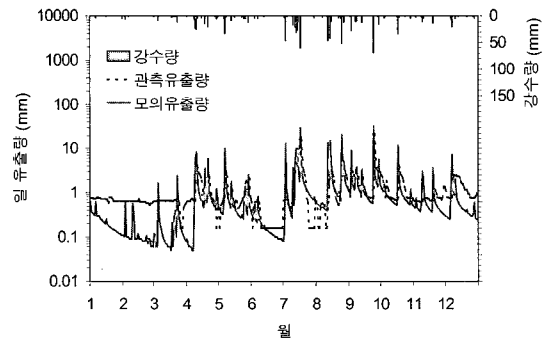
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw})$$

여기서, SW_t 와 SW_0 는 각각 주어진 날의 최종 및 초기 토양수분함량(mm), t 는 시간(days), R_{day} 는 강수량(mm), Q_{surf} 는 지표유출량(mm), E_a 는 증발산량(mm), w_{seep} 는 토양층으로부터 투수층으로 이동되는 수분량(mm), Q_{gw} 는 회귀수량(mm)이다.

SWAT 모형에서는 지표유출량 산정을 위해 SCS 유출곡선법(SCS, 1972)과 Green & Ampt 침투법(Green & Ampt, 1911)의 두 가지 방법을 제공하고 있으며, 증발산량 산정을 위해서는 Penman-Monteith 방법 (Allen 등, 1989), Priestley-Taylor 방법(Priestley와 Taylor,



(a) 모형 보정(1993년)



(b) 모형 검증(1992년)

그림 3. 수정모형의 보정 및 검증

표 3. 수정모형의 보정 및 검증 결과 분석

연도	강수량 (mm)	유출량(mm)		유출율(%)		RB	RMSE (mm)	MAE (mm)
		관측	모의	관측	모의			
1990	1,501	920	822	61	55	-0.10	5.77	2.25
1991	1,007	623	501	62	50	-0.19	2.79	1.27
1992	943	480	445	51	47	-0.07	2.70	1.01
1993	1,342	825	802	61	60	-0.02	4.35	1.49
1994	765	436	337	57	44	-0.23	2.61	1.11
1995	984	534	485	54	49	-0.09	4.64	1.14
1996	1,164	796	579	68	50	-0.27	5.70	2.06
1997	1,664	1,068	1,027	64	62	-0.04	15.19	3.68

1972), Hargreaves 방법(Hargreaves와 Samani, 1985)의 세 가지 방법이 제시되고 있다. 본 연구에서는 이 중에서 SCS 유출곡선법과 Penman-Monteith 방법을 이용하여 각각 지표유출량과 증발산량을 계산하였다.

4.2 산림식생에 따른 물수지 변화

산림식생 수종에 따른 물수지 영향 비교를 위해, 대상유역을 한 개의 토지피복(침엽수 또는 활엽수)을 가지는 가상유역으로 설정하였고, 이 때 산림지에 대한 엽면적지수의 모형 입력치는 국내에 대한 정확한 값을 얻을 수 없어, 기존 연구(건설부, 1990)에서 가정하여 이용하였던 최대치 4를 적용하였다.

그림 4~7은 물수지 요소 중 증발산, 지표유출, 기저유출, 총 유출에 대한 산림식생의 영향을 검토하기 위해 1991년~1993년의 월별값을 예시한 것이다.

그림 4의 증발산 비교결과에서 보듯이, 연중 일정한

엽면적지수를 갖는 침엽수의 특성상 봄과 겨울에 활엽수에 비해 증발산량 발생이 많게 나타났고, 그림 5의 지표유출에서는 침엽수가 활엽수에 비해 강우차단효과가 크게 영향을 미쳐 활엽수가 침엽수보다 지표수가 크게 나타났으며, 그림 6의 기저유출에서는 반대의 경향을 나타내었다. 총 유출에서는 그림 7에 나타난 바와 같이 침엽수가 활엽수에 비해 작게 나타났다.

표 4와 그림 8은 1990년부터 1999년까지의 10년에 대해 연평균 증발산, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 총 유출 등을 비교한 결과로서, 증발산의 경우 침엽수가 활엽수에 비해 70~90 mm/year 정도 크게 나타났으며, 총 유출은 활엽수가 침엽수에 비해 70~80 mm/year 정도 크게 나타났고, 지표유출과 기저유출도 활엽수가 침엽수에 비해 큰 경향을 보였다. 이러한 경향은 기존의 침엽수/활엽수에 대한 비교 연구 결과(Eckhardt 등, 2003; 김승, 1997)와도 일치하는 것으로 나타났다.

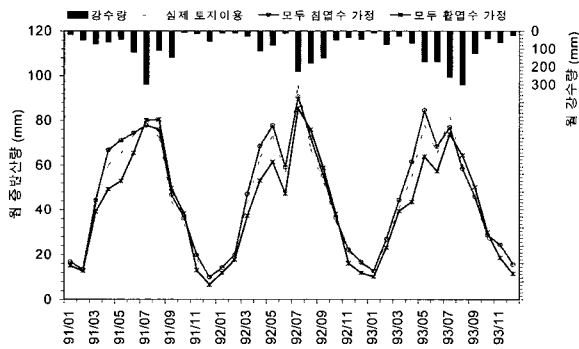


그림 4. 산림 식생에 따른 월별 증발산 변화

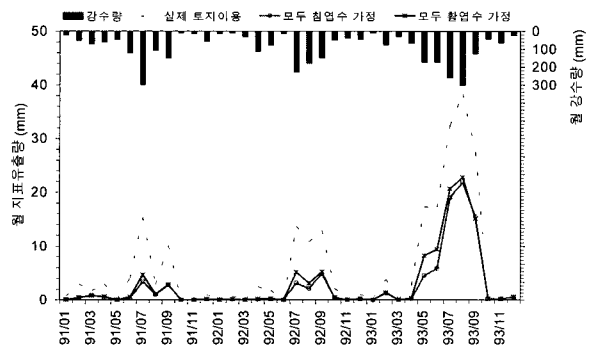


그림 5. 산림 식생에 따른 월별 지표유출 변화

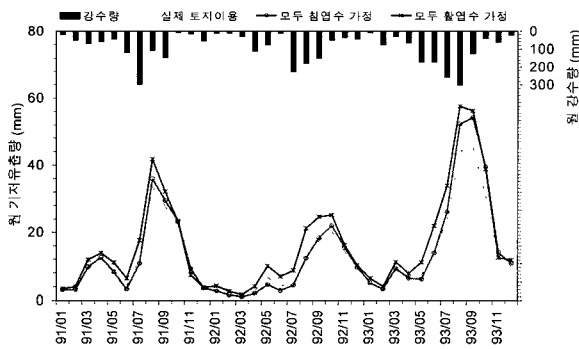


그림 6. 산림 식생에 따른 월별 기저유출 변화

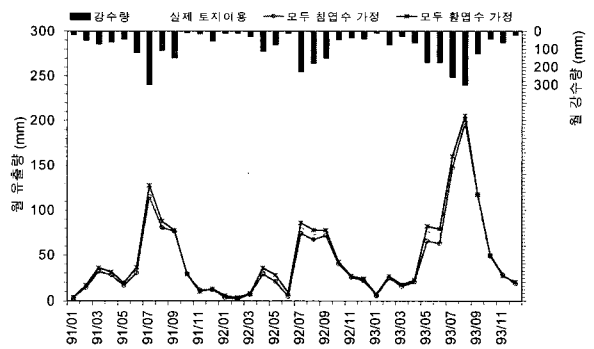
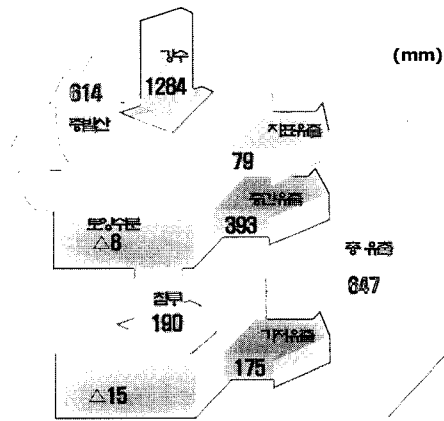


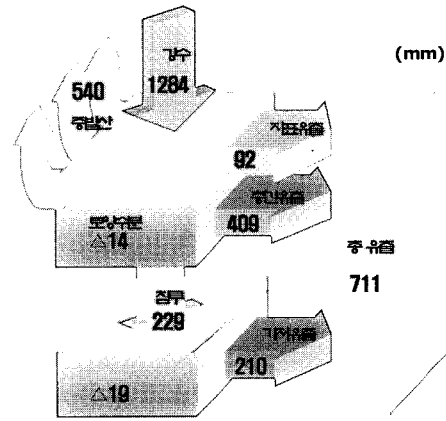
그림 7. 산림 식생에 따른 월별 총 유출 변화

표 4. 산림 식생에 따른 연 물수지 비교

산림 식생	강수량 (mm)	증발산 (mm)	지표유출 (mm)	중간유출 (mm)	기저유출 (mm)	침투 (mm)	총 유출 (mm)
침엽수	1,284	614	79	393	175	190	647
활엽수	1,284	540	92	409	210	229	711



(a) 모두 침엽수라 가정한 경우



(b) 모두 활엽수라 가정한 경우

그림 8. 산림 식생에 따른 물수지 모식도

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 유역내 인위적인 토지이용 변화 중 우리나라 유역에서 많은 비중을 차지하고 있는 산림식생에 의한 영향을 보다 정량적으로 규명하기 위해서, SWAT 모형에서 제시하고 있는 식물성장 모의 알고리즘을 현실에 맞게 수정하고, 이 수정된 알고리즘을 대상유역인 보청천 유역에 적용하여 산림식생에 따른 유역 물수지 변화 영향을 검토하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. SWAT에서는 수목과 다년생 식물에 대해 휴지기 동안 엽면적지수를 최소치(0.75)로 설정하여 작물 성장을 모의하고 있어, 침엽수와 같이 연중 일정한 엽면적지수를 갖는 식물군에 적용시 실제 성장특성을 반영하기 곤란하다. 따라서, 모형내 식물성장 알고리즘에서 침엽수림 지역에 대해 새로운 형태의 식물군 특성을 부여함으로써, 휴지기 동안 엽면적지수가 최소화되는 문제를 해결하고, 연중 일정한 엽면적지수를 갖도록 수정함으로써, 침엽수의 실제 성장특성을 잘 모의할 수 있도록 하였다.
2. 수정된 모형의 실제 유역에 대한 적용성을 평가하기 위해, 보청천 유역에 대해 보정과 검증을 수행한 결과, 연도별 일 유출에 대한 상대편향이 -0.27 ~ -0.02, 제공근평균제곱오차가 2.61~15.19 mm, 평균 절대오차가 1.01~3.68 mm로서 양호한 결과를 나타내었다.
3. 수정 개선된 알고리즘을 적용하여 침엽수와 활엽수의 수문학적 영향을 파악한 결과, 동절기를 포함하여 연중 일정한 엽면적지수를 갖는 침엽수의 성장특성상, 활엽수에 비해 연 증발산량이 많이 발생하고,

특히 봄과 겨울의 증발산량이 활엽수에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 또한, 식생에 의한 강우 차단 효과로 인해 침엽수에서의 지표유출, 지하유출, 총 유출이 활엽수보다 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

이상과 같이, 침엽수가 활엽수보다 증발산 증가, 유출 감소에 효과가 큰 것을 파악할 수 있었으며, 수정된 알고리즘 및 SWAT 모형을 이용하여 산림식생에 따른 유역 물수지 영향을 정성적, 정량적으로 규명할 수 있었다. 그러나, 기존 연구들과 마찬가지로, 산림식생에 따른 영향 파악은 단순 수종에 따른 비교보다는 수령, 식재밀도를 비롯하여 토양특성 및 기상조건 등 다양한 조건이 모두 고려되어야 하므로, 이를 위해서는 선진 외국과 같이 산림사업 연구가 보다 활발이 진행되어 충분한 관측자료 및 관련 자료를 제공함으로써 유출모형의 불확실성을 보완해 나가야 할 것으로 생각한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원 (과제번호 2-2-2)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- 건설부 (1990). 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서, pp. 245.
- 김경하, 정용호, 정창기 (2003). “전나무림에서 간벌과 가지치기가 임내우 및 차단손실량에 미치는 영향.” 한국임학회지, 제92권, 제3호, pp. 276-283.
- 김경하, 정용호, 정창기, 전재홍, 유재윤 (2003). “산림

- 소유역에서 장기 수문자료를 이용하여 분석한 임상이 침투유출량에 미치는 영향.” *한국임학회지*, 제 92권, 제5호, pp. 462-469.
- 김승 (1997). *월유출모형의 개발*, 건기연 97-125, 한국 건설기술연구원.
- 김재수 (1987). “산림이 홍수량에 미치는 영향과 소유역내 증발산량 추정.” *임업연구원연구보고*, 제35호, pp. 69-78.
- Allen, R. G., M. E. Jensen, J. L. Wright, and Burman R. D. (1989). “Operational estimates of evapotranspiration.” *Agron J.*, No. 81, pp. 650-662.
- Anderson, H. W., Hoover, M. D., and Reinhart, K. G. (1976). *Forest and Water: Effects of forest management on floods, sedimentation and water supply*. USDA Forest Service, Gen. Tech. Rep. PSW 18, p. 115.
- Bosch, J. M. and Hewlett, J. D. (1982). “A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration.” *Journal of Hydrology*, Vol. 55, pp. 3-23.
- Eckhardt, K., Breuer, L., and Frede, H.-G. (2003). “Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects.” *Journal of Hydrology*, Vol. 273, pp. 164-176.
- Evan R. C. Reynolds and Frank B. Thompson (1988). *Forest, climate, and hydrology : Regional impacts*. The United Nations University, Tokyo, Japan.
- Green, W. H. and Ampt G. A. (1911). “Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils.” *Journal of Agricultural Sciences*, No. 4, pp. 11-24.
- Hargreaves, G. H. and Samani Z. A. (1985). “Reference crop evapotranspiration from temperature.” *Applied Engineering in Agriculture*, No. 1, pp. 96-99.
- Linsley, R. K. (1982). *Hydrology for engineers*. 3rd ed., McGraw Hill Ltd.
- Maidment, D. R. (1992). *Handbook of hydrology*. McGraw Hill Ltd., pp. 26.2-26.3.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool : the theoretical documentation (version 2000)*. U. S. Agricultural Research Service.
- Priestley, C. H. B. and Taylor R. J. (1972). “On the assessment of surface heat flux and evapotranspiration using large-scale parameters.” *Mon. Weather. Rev.*, No. 100, pp. 81-92.
- Watershed Science Centre (2000). *Water budget analysis on a watershed basis*. Trent University, Canada.

(논문번호:04-57/접수:2004.05.31/심사완료:2004.08.13)