

지역 물수지 평가를 위한 NGIS와 환경 관측 자료의 활용에 관한 연구 -구량천 유역을 사례로-*

박종철**

A Study on the Application of the National GIS and Environmental Observation Data for Assessment of Regional Water Balance: A Case of the Catchment of Guryang Stream*

Jong-Chul Park**

요약 : 물리결정 물수지 모델은 개념적 모델보다 더 나은 모의 결과를 기대할 수 있지만, 입력 자료 작성이 쉽지 않다. 본 연구는 기상 자료, 토양도, 토지이용도를 이용하여 BROOK90의 매개변수 값을 결정하는 방안을 제시했다. 본 연구에서 제시한 방안의 효용성 및 타당성은 모의 하천유출량과 실측 하천유출량의 비교를 통해서 증명했다. 검증 기간(2001~2003) 동안의 두 값을 비교한 결과 일평균 모의오차, 모델 효율 계수, 결정계수가 각각 -0.517, 0.87 그리고 0.89로 나타났다. 이 연구는 슈퍼사이트 외의 여러 유역에서 물리결정 물수지 모델을 이용하여 정교한 수문학적 연구를 수행할 수 있는 방안을 제시했다는 점에서 의미가 있다.

주요어 : 지역 물수지, BROOK90, 지리정보체계, 환경 관측 자료, 모델 매개변수

Abstract : Physical based water balance model had better simulation results than conceptual model, however it is difficult to obtain input data for the model. This study suggests some methods to obtain parameter values of BROOK90 from meteorological data, soil map, land-use map. Comparing measured and simulated discharge proved the methods to be valid. For validation model(2001~2003), comparing measured and simulated discharge a daily mean bias error, Nash-Sutcliffe's model efficiency coefficient, coefficient of determination equal to -0.517, 0.87 and 0.89 respectively. The results of this study would be helpful to the hydrological study using physical based hydrological model not only in super site but in other catchments.

Key Words : regional water balance, BROOK90, GIS, environmental observation data, model parameter

1. 서론

수문지리학 내지 수문기상·기후학의 주요한 관심 분야의 하나는 하천유출 형성과정과 하천유출 구성성

분 등 수문학적 과정을 관측하고 모델화하는 일이다 (김만규, 1999b). 물순환 과정 중 하천유출 형성과정과 하천유출 구성성분에 대한 이해는 토양 및 지하수의 잔류농약 오염에 관한 연구와 비점오염원 확산, 산성 비와 하천수 산성화 사이의 관계, 사용 가능한 수자원

* 이 연구는 필자의 박사학위논문 일부를 정리한 것이며, 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다(UD080042AD).

** 공주대학교 군사과학연구원 연구원(Researcher, Research Institute of Military Science, Kongju National University), jcp@kongju.ac.kr

의 평가 연구에 중요하다. 특히 지역 규모¹⁾의 수문학적 과정에 대한 이해는 수문지형학적 특성이 유사한 인근의 미세측 지역에 대한 물수지 연구를 가능하게 하며, 광역적인 규모에서 물순환의 상세한 수문학적 과정들을 재현하는 일에 근간이 된다(Hattermann *et al.*, 2005; Bormann *et al.*, 2005). 아울러 수문학적 과정에 대한 이해를 바탕으로 한 물수지 연구는 환경변화에 따른 물수지 변화 예측 연구를 가능하게 한다는 점에서 매우 중요하다.

광역 규모 물수지 연구에서는 물수지 모델을 사용하지 않고 증발산을 계산하여 강우량에서 제외하는 방법을 이용하기도 한다(양해근, 2007; Komatsu *et al.*, 2008). 소유역의 침투 유량 측면에서는 단기간의 실측을 통해 강우유출 특성에 대하여 연구하기도 한다(다나카 등, 2000; 김태호·다나카, 2004; 안중기·김태호, 2006). 그러나 최근의 많은 물수지 연구들은 물수지 모델을 이용하고 있다. 물수지 모델을 이용하면 여러 환경문제를 풀어나가는 일에 중요한 단서를 제공하는 수문학적 과정을 재현할 수 있기 때문이다.

그런데 물수지 모델을 이용하여 양질의 연구 결과를 도출하기 위해서는 모델에 입력하는 기후, 수문 자료들이 매우 중요하다. 하지만 슈퍼사이트²⁾ 외의 지역에서 지역 규모의 물수지 모델 입력 자료를 확보하는 일은 쉽지 않다(손일, 1986; 양해근·김종일, 2004; 홍준범 등, 2006; Marechal and Holman, 2005; Pandey *et al.*, 2008).

국내외에는 장기간의 기후, 수문 자료들을 획득하고 있는 수문학적 실험 유역들이 있다. 이 유역들에서는 다양한 수문학적 가정이 실험되고 있으며, 그 결과는 물수지 연구 및 모델 개발에 기초 자료로 활용되기도 한다. 한국에서는 2000년대 들어 지정된 광릉슈퍼사이트³⁾가 대표적이다. 광릉슈퍼사이트 이전에는 한국에서 물수지 연구, 특히 지역 규모 물수지 연구에 필요한 자료 준비가 매우 어려웠다. 과거 한국 연구자들이 외국 유역을 대상으로 한 연구가 많았던 것은(Son, 1991; 손일, 1994; Cho and Lee, 1995; 김만규, 1999a, 1999b; Im *et al.*, 2003) 이러한 한국의 연구 여건과 무관하지 않아 보인다.

광릉슈퍼사이트에서는 다양한 기상, 수문 관측 자료

를 토대로 의미 있는 수문학적 연구 결과들이 많이 생산되고 있다. 김경하 등(2001)이 TOPMODEL을 사용하여 침엽수림과 활엽수림에서의 여름철 유출량을 비교한 결과와 김은숙 등(2007)이 TOPMODEL과 DHSVM을 수문학적 모델로 사용하는 RHESys를 이용하여 하천유출량을 모의했고 그 결과 모델 효율 계수가 0.75, 결정계수가 0.77인 결과를 도출한 연구 등이 있다. 그럼에도 불구하고 슈퍼사이트 외의 지역에서 활용 가능한 물수지 모델의 입력 자료를 어떻게 획득할 것인지에 대한 문제는 여전히 숙제로 남아 있었다.

이러한 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 GIS를 활용하는 연구들이 있었다. 그 동안 한국의 관련 연구들은 대부분 토지이용도와 토양도를 활용하여 개념적인 SWAT 모델의 HRU(Hydrological Response Unit)를 작성하는 관점에서 이루어졌다(장철희 등, 2003; 허성구 등, 2005; 김남원 등, 2006; 박종윤 등, 2008).

개념적 모델은 결정론적 모델에 비해 입력 자료의 확보 및 처리가 쉽다는 장점이 있다. 많은 연구자들이 개념적 모델을 사용하여 침투 유출과 하천유출량의 측면에서 의미있는 연구 성과를 도출하고 있다(Bormann and Diekkruger, 2004; Bormann *et al.*, 2005; Lazzarotto *et al.*, 2006; Troy *et al.*, 2007). 개념적 모델은 하천유출 형성과정과 하천유출 구성성분을 주로 CN(Curve Number)⁴⁾ 또는 HRU(Hydrological Response Unit), HOST(Hydrology of Soil Type) 등을 사용하여 산출한다. 개념적 모델은 복잡한 유출 형성 과정의 물리적 과정을 단순화하는 대신에 관측된 하천유출량 자료를 이용한 최적화를 수행하고 있다(Marechal and Holman, 2005). 이에 반해 결정론적 모델은 물이 토양으로 침투되고 유출되는 동안 거치는 여러 과정의 상호작용을 물리적인 법칙에 따라 수학적으로 기술한다. 이러한 차이 때문에 개념적 모델은 침투 유출 또는 하천유출 총량과 관련된 연구 목적에는 널리 사용할 수 있지만, 하천유출 구성성분의 분석에는 문제점을 가질 수도 있다(Kim, 1997).

물리결정 물수지 모델은 개념적인 모델에 비해 수문학적 과정을 세밀하게 모의하지만(김만규, 1999b;

Herrmann *et al.*, 1997), 상대적으로 자료 준비에 어려움이 많은 것이 사실이다. 이에 본 연구에서는 국가 GIS와 환경 관측 자료를 이용하여 물리결정 물수지 모델 입력 자료를 생산하는 방안을 제시함으로써 슈퍼사이트 외의 지역에서 물리결정 물수지 모델을 이용하여 지역 물수지를 평가할 수 있는 방안을 제시하고자 했다.

2. 연구지역 개관

연구지역은 용담댐 유역의 8개 표준유역¹⁾ 중 하나인 구량천 유역의 일부 유역으로 동향 수위관측소의 상류 지역이다. 이는 실측 하천유출량 자료의 확보가능성을 고려하여 설정한 것이다. 연구지역 면적은 165.2km² 이고, 평균 해발고도는 637.7m, 평균 지형경사는 22.4°, 평균 사면방향은 195.8°(NNE), 연평균 강수량

은 1480.4mm/year이다. 연구 유역은 전라북도 무주군 안성면, 진안군 동향면, 장수군 계북면의 경계지역에 위치한다. 무주군 안성면이 연구 유역의 가장 넓은 면적을 차지하고 있으며 다음으로는 진안군 동향면, 장수군 계북면 순이다.

연구 유역의 수문학적 변화는 용담댐으로부터 물을 공급받는 지역 및 대청호의 물문제와 직·간접적으로 연관된다. 용담댐(2001년 완공)은 저수량으로 볼 때 소양강댐, 충주댐, 대청댐, 안동댐에 이어 한국 5번째 규모이다. 용담댐의 물은 진안 및 담하류 지역 뿐만 아니라 전주, 익산, 군산, 완주 그리고 충청남도 서천에 이르기까지 광역상수도로 공급되고 있다. 각 시·군 상하수도사업소에 의하면 2007년 전주, 익산, 완주의 생활용수 중 각각 84%, 42%, 45%를 용담댐의 물(광역상수도)이 공급했다. 따라서 연구 유역을 포함하는 용담댐 유역에서의 물수지 변화는 이 지역의 물문제와도 연관될 수 있다. 연구 유역을 흐르는 주요 하천들로는 금강의 제1지류인 구량천과 그 지류인 통안천, 명천,

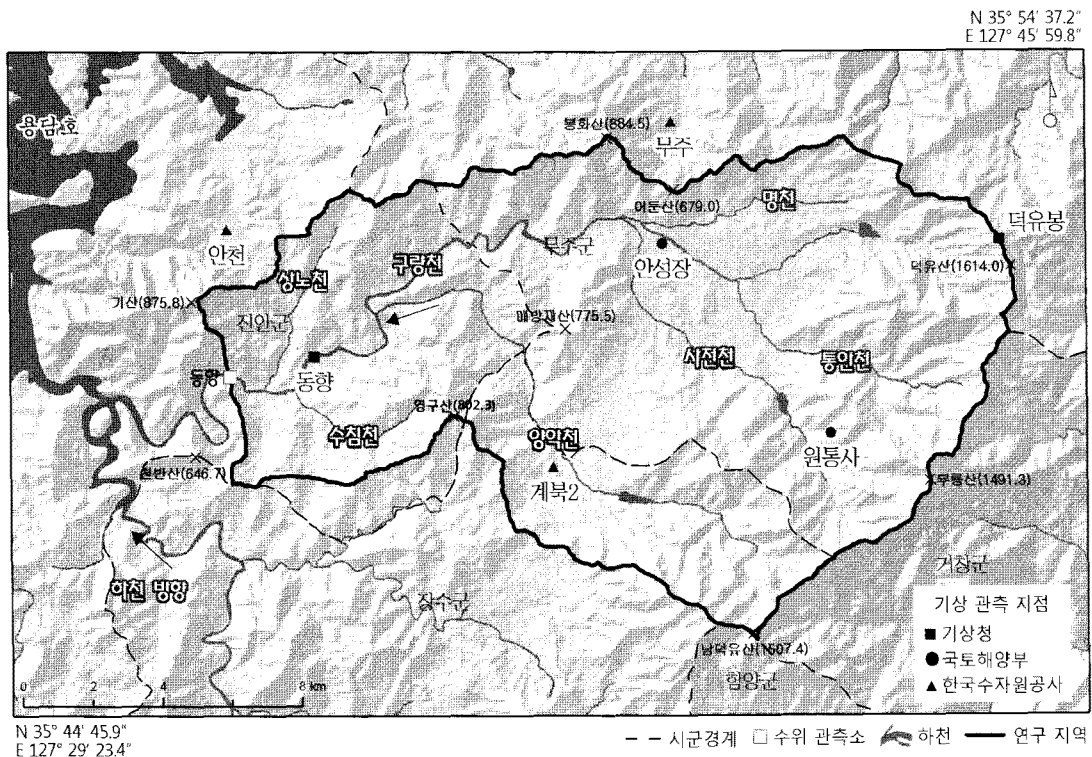


그림 1. 연구지역 및 음영기록

사전천, 양약천, 수침천, 상노천이 있다.

3. 연구방법 및 자료

1) 물수지 모델

본 연구에서 사용한 물수지 모델은 BROOK90 4.4e 이다. 이 모델은 물리 기반, 결정론적, 과정지향적, 일괄 매개변수 모델이다(Federer, 1995). 그림 2는 BROOK90 4.4e의 개념구조이다. 이 모델은 유역을 동질하다고 가정하고 일 증발산과 토양수 흐름을 모의한다. BROOK90은 2차원적인 매개변수의 분포 또는 물이 유역 밖으로 이동하는 것에 대해서 규정하지는 않는다. 그러나 증발산 과정, 수직적인 물의 흐름에 대해서 상세하게 모의한다.

이 모델은 강수 또는 강설이 유역의 물 공급원인 것으로 가정한다. 모델에서 물은 5곳에 저장된다. 5곳은 차단된 강수(INTR), 차단된 눈(INTS), 지표위의 눈(SNOW), 각 토양층에서의 토양수(SWATI 1~N), 지하

수(GWAT)이다. 5곳에 저장된 물의 소실은 증발산(EVAP), 하천유출(FLOW) 그리고 천부지하수에서 암반지하수로 깊이 침투되어 유역으로부터 소실된다.

모델에 저장된 5곳의 물에서는 차단된 강수로부터의 증발(IRVP), 차단된 눈으로부터의 증발(ISVP), 눈으로부터의 증발(SNVP), 최상부 모델 토층으로부터의 토양 증발(SLVP), 뿌리가 있는 각 토양층으로부터의 증산(TRAN 1~N)이 일어난다. 증발산은 Penman-Monteith 공식을 수정한 Shuttleworth and Wallace (1985) 공식을 사용하여 계산한다. 증발산 계산에 필요한 풍속, 일 태양복사량은 관측 값을 이용하거나 모델 내에서 제공되는 경험식으로 계산된 결과를 이용할 수도 있다. 연구자가 입력하는 풍속은 기상관측소에서(지상으로부터 약 1.5m 높이) 관측된 것이다. 모델은 나무가 상층에서의 공기역학적 저항을 계산하기 위해 입력된 풍속을 나무가 높이에서의 풍속으로 교정하여 사용한다. 지표면에 도달한 물(RNET+SMLT)은 4가지 성분으로 하천으로 유출된다. 4가지 성분은 지표유출(SRFL), 우회유출(BYFL), 토양수유출(DSFL), 지하수유출(GWFL)이다. 토양층에서의 수직적인 물의 흐름은 Darcy 법칙의 이론적인 근거에서 유도된 공식들로

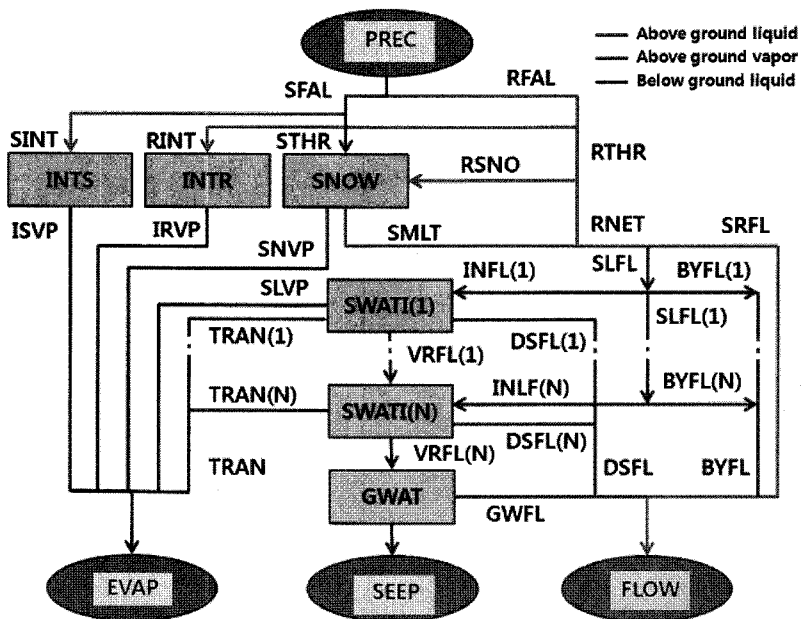


그림 2. BROOK90 4.4e 개념 구조

계산한다. 각 토양층에서의 토양수 결정에는 Campbell(1974)의 공식을 사용한다. BROOK90은 최대 10개까지의 토양층을 구현할 수 있으며, 각 토양층은 다른 물리적인 특성을 가질 수 있다.

연구유역은 총 면적의 70% 이상이 산림 및 초지이며 약 26%가 농경지이다. BROOK90은 증발산과 토양에서의 수직적인 물의 움직임에 대해 상세하게 모의할 수 있다. BROOK90은 수종의 차이에 따른 증산 연구(Federer and Lash, 1978a)와 산지 토지피복의 변화에 따른 하천유출 반응의 차이와 토양수 추정 연구(Federer and Lash, 1978b; Kim, 1997; Martin *et al.*, 2004)에 사용됐다. 따라서 BROOK90이 본 연구지역의 물수지 연구에 적합할 것으로 판단했다.

2) 사용 자료

수치지형도를 활용하여 획득할 수 있는 모델 입력 자료에는 유역의 평균적인 지형고도, 지형경사, 사면 방향이 있다. 본 연구에서는 1:25,000 국가수치지형도를 이용하여 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 작성하고 이를 공간분석하여 위의 자료를 획득했다. DEM은 GIS S/W인 ArcInfo를 이용하여 Topo To Raster⁷⁾ 방법으로 작성했으며, 공간 해상도는 30m로 했다. 김만규·박종철(2008)은 BROOK90과 같은 일괄 매개변수 모델의 지형 매개변수 값을 결정할 때에도 각 수치지형도가 표현할 수 있는 적정 해상도를 고려하여 DEM을 작성할 필요가 있다고 지적한 바 있다. 본 연구에서 DEM의 공간해상도는 1:25,000 수치

지형도를 이용하여 작성하는 DEM의 적정 공간해상도인 30m(건설교통부, 2001; 김연준·신계종, 2002)를 고려하여 결정된 것이다.

모델의 기상 입력 자료(강수량, 풍속, 강수 지속 시간, 비가 눈으로 바뀌는 기온)는 연구유역 내에 위치한 AWS(Automatic Weather Station)와 인근에 위치한 ASOS(Automatic Synoptic Observation System) 관측 자료로부터 수집했다. 연구에 사용한 기상 관측 지점의 현황은 표 1과 같다. AWS의 위치는 그림 1에서 확인할 수 있다. 장수 ASOS는 그림 1의 좌하단으로부터 약 13km 남쪽에 위치해 있다.

강수량 자료는 5개 AWS의 자료를 장수 ASOS 자료로 검·보정하여 사용했다. 일강수량은 5개의 AWS 강수량 관측 자료를 티센 방법으로 면적평균한 것이다. 티센을 이용하여 강수량 자료를 획득할 때 보정은 크게 2개의 단계로 진행했다. 첫 번째 단계에서는 한 개의 관측소에서 상식을 뛰어넘는 강수량이 나타날 때 이를 수정했다. 예를 들어 다른 기상관측소들에서는 강수가 관측되지 않은 날에 한 관측소에서만 100~1,000mm/day의 강수량이 나타나는 경우 관측오류로 판단하여 0mm/day로 수정했다. 두 번째 단계에서는 결측 또는 관측오류 강수량에 대한 보정을 수행했다. 연구 유역 내 4개의 AWS와 장수 ASOS에서 강수가 발생했는데 한 관측소에서만 강수가 없는 것으로 나타나거나 결측(-9999) 값이 나타나는 경우가 있다. 이 경우는 해당 관측소가 유역 내에 없는 것으로 가정하고 티센망을 재 작성한 후 유역의 강수량을 계산함으로써 누락된 강수량을 보정했다. 2004~2007년 연구 유역의

표 1. 연구에서 사용한 기상관측소 현황

관측유형	관측소명	위도(°)	경도(°)	고도(m)	관측시작일	운영기관
ASOS	장수	35.6570	127.5203	407	1969. 05	기상청
AWS	동향	35.8355	127.5682	325	1993. 11	기상청
	탁유봉	35.8667	127.7500	1,515	2001. 10	기상청
	안성장	35.8403	127.6517	460	1960. 06	국토해양부
	원통사	35.8150	127.7008	800	1983. 04	국토해양부
	계북2	35.8076	127.6293	453	1999. 06	수자원공사

출처: 국가수자원관리 종합정보 홈페이지, 전주기상대 홈페이지

보정 전·후 연평균 강수량은 각각 1,391.4mm/year와 1,480.4mm/year이다. 보정 후 강수량은 보정 전보다 약 89mm/year가 많았다.

비가 눈이 되는 기온은 장수 ASOS의 3시간 간격 최심신적설과 1시간 간격의 평균기온자료를 활용하여 결정했다. 2004~2007년의 관측자료에서 최심신적설이 관측되었을 때의 3시간 평균기온을 분석한 결과 평균적으로 -0.4°C 일 때 눈이 내렸다. 강수지속시간은 2004~2007년(4년)에 대한 동향과 덕유봉 AWS의 1시간 강수량 자료를 분석하여 획득했다.

풍속은 장수 ASOS 자료를 사용했다. 연구 구역 내에 위치한 AWS 중 기상청의 AWS 만이 강수와 함께 기온, 풍속 자료를 제공한다. 표 2는 2004년부터 2007년까지 일평균 풍속이 10.8m/s 이상이 관측된 일수를 관측소별로 보여준다. 10.8m/s는 보퍼트의 풍력계급 중 된바람에 해당한다. 된바람에서는 큰 나뭇가지와 전선이 흔들리며 우산을 들기가 힘들다. 가장 인근에서 보정된 결과를 제공하는 장수 ASOS에서는 위의 기

간 된바람이 관측된 일자가 1일도 없다. 이에 비해 동향은 48회로 산 정상 덕유봉 보다도 많다. 그리고 동향 역시 2007년 4월 이후로는 단 1회도 관측된 적이 없다. 따라서 산의 정상에 있는 덕유봉이나 관측값을 신뢰하기 힘든 동향의 관측 값을 구역의 평균적인 풍속으로 입력하는 것에는 어려움이 있었다. 따라서 가장 인근에서 보정된 결과를 제공하는 장수 ASOS 자료를 사용했다.

실측 하천유출량은 동향 수위관측소의 수위자료를 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 유량(m^3/s)으로 환산하고, 이를 다시 구역면적으로 나누어 단위 유출고(mm/d) 형태로 사용했다. 사용한 수위-유량 관계곡선식은 표 3과 같다. 이 식은 건설교통부(현 국토해양부)에서 각 해에 유속과 하천의 종단면을 실측하여 작성한 것이다. 2007년에는 수위-유량 관계곡선식이 없기 때문에 2006년의 식을 사용했다.

표 2. 일평균 풍속이 10.8m/s(Beaufort의 풍력 계급 상 된바람) 이상 관측 일수

(단위: 일수)

관측소명	연도	월												합계
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
동향	2004	0	1	3	2	0	0	1	0	1	0	1	0	9
	2005	0	2	1	4	1	2	0	1	1	0	1	1	14
	2006	0	0	4	4	2	0	1	1	0	1	2	1	16
	2007	3	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
	합계	3	5	12	10	3	2	2	2	2	1	4	2	48
덕유봉	2004	0	0	0	1	1	2	1	0	0	0	0	0	5
	2005	0	1	0	0	1	0	0	1	2	0	0	0	5
	2006	0	0	0	0	1	1	0	2	1	0	2	0	7
	2007	0	0	1	0	0	1	1	0	3	0	0	0	6
	합계	0	1	1	1	3	4	2	3	6	0	2	0	23
장수	2004	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	합계	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

표 3. 연구에서 사용한 수위-유량 관계곡선식

적용범위	곡선식 Q: m ³ /s H(h):m	적용연도	비고
1.99 ≤ H < 2.325 2.325 ≤ H ≤ 4.26	Q = 5.079 × 10 ⁻¹⁰ H ^{28.868} Q = 0.2995 H ^{4.929}	2000	
H < 2.76 H ≥ 2.76	Q = 53.922 (H - 1.813) ^{2.798} Q = 53.291 (H - 1.813) ^{2.594}	2001	
2.15 ≤ H ≤ 2.94 2.94 ≤ H ≤ 4.15	Q = 0.00017 H ^{11.28} Q = 0.0665 H ^{5.739}	2002	
루사 전(2002.1~8) 루사 후(2002.9~)	Q = 37.367 (H - 1.847) ^{1.959} Q = 41.903 (H - 1.974) ^{1.908}	2003	
1.80 ≤ H ≤ 2.44 2.44 < H ≤ 5.6	Q = 35.425 (H - 1.70) ^{2.663} Q = 24.311 (H - 1.62) ^{2.166}	2004	
1.83 ≤ H < 2.59 2.59 ≤ H ≤ 6.05	Q = 1.533693 (H - 1.000) ^{5.379} Q = 4.516623 (H - 0.988) ^{3.012}	2005	1.83m 이하 6.05m 이상
2.020 ≤ H ≤ 2.736 2.736 < H ≤ 4.150	Q = 68.612 (H - 1.950) ^{4.637} Q = 20.712 (H - 1.706) ^{2.664}	2006~2007	

출처: 국토해양부 한국수문조사연보 (건설교통부, 2000~2006)

3) 연구결과의 검증 방법

모델 입력 자료의 작성 방법에 대한 타당성은 물수지 모의 결과 중 모의 하천유출량을 실측 하천유출량과 비교하여 검증했다. 모델의 교정 및 수립에는 2004~2007년의 자료를 사용하였으며, 검증에는 2001~2003년의 자료를 사용했다.

모의 하천유출량과 실측 하천유출량의 비교는 4가지의 통계적인 방법을 사용했다. 4가지 유형의 통계적인 방법은 일평균 모의 오차(MBE), Nash and Sutcliffe (1970)의 모델 효율 계수(E) 그리고 결정계수(R²), 총 하천유출량 모의 오차(ET)이다. MBE는 BROOK90 4.4e에 내장되어 있는 통계 모듈에서 제공하는 통계값이다. MBE는 측정된 하천유출량 일평균(M)과 모의된 하천유출량 일평균(S)의 차이이다. MBE는 S와 M이 각각의 날에 1:1이 되어야 한다고 가정했을 때 실제 모의된 값은 그 경향을 얼마나 나타내고 있는지를 보여준다. MBE는 유역에서 물이 지하수 깊이 침투되어 다른 유역으로 빠져나가지 않는다면 일일 증발 오우이다(Federer, 2002). Nash and Sutcliffe 모델 효율 계수는 모의 결과를 일 간격, 월 간격으로 평가할 때 이용

되곤 한다(Son, 1991; Hattermann *et al.*, 2005). 결정계수(R²)는 두 변수간의 관계가 얼마나 강한지를 측정할 때 널리 이용되는 통계량(김양렬·민충기, 2002)으로 수문학적 연구에서 모의 정확도를 평가할 때도 이용한다.

4. 연구결과

1) 일조시간을 이용한 태양복사량 획득

BROOK90 4.4e는 증발산량을 계산하기 위해서 일단위의 순태양복사량 자료를 필요로 한다. 그러나 연구 유역과 인근의 기상관측소에서는 태양복사량을 관측하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 BROOK90 4.4e에서 제공하는 경험식을 사용하여 태양복사량을 추정했다. 경험식에서는 순태양복사량을 순단파복사량과 순장파복사량을 계산하여 결정한다(식 1).

$$RN = SOLNET + LNGNET \quad (1)$$

RN: 순태양복사량 (MJ/m²)

SOLNET: 순단파복사량 (MJ/m²)

LNGNET: 순장파복사량 (MJ/m²)

$$\text{SOLNET}=(1-\text{ALBEDO})\times\text{SLRAD} \quad (2)$$

ALBEDO: 어떤 표면에서의 알베도

SLRAD: 수평면에서의 하루 동안의 단파복사량 (MJ/m²)

순단파복사량(SOLNET)은 하루 동안의 단파복사량 (SLRAD)과 알베도를 이용하여 식 (2)로 구한다. 단파복사량(SLRAD)은 연구자가 입력한 자료를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 연구자가 0을 입력하면 BROOK90은 일 잠재 태양복사량의 55%를 태양복사량으로 결정한다. 55%의 비율은 미국 전역의 평균적인 비율이다(U.S. Department of Commerce, 1968). 그러나 이런 경우 모델은 비가 오는 날과 흐린 날에도 55%의 태양복사량이 있는 것으로 가정한다. 따라서 본 연구에서는 일조시간과 잠재 태양복사량을 이용하여 단파복사량(SLRAD)을 계산하도록 모델의 단파복사량 추정 부분을 수정했다. 식 (3)은 본 연구에서 일조시간으로 단파복사량을 추정할 때 사용한 식이다. 이 식은 Prescott(1940)이 Angström(1924)의 공식을 계산하기 쉽도록 수정한 것이다. 이 식은 공식이 쉬울 뿐만 아니라 추정 결과도 양호하기 때문에 일조시간을 이용한 태양복사량 추정에 널리 사용되고 있다.

$$\frac{H}{H_0}=a+b\frac{S}{S_0} \quad (3)$$

H: 단파복사량 (MJ/m²)

H₀: 수평면에서의 잠재적인 태양복사량 (MJ/m²)

a, b: 경험적인 모델계수로 각각 0.22, 0.54

S: 일조시간 (h)

S₀: 낮의 길이 (h)

한편 BROOK90 4.4e에서 순장파복사량(LNGNET)은 식 (4)를 이용하여 계산한다. 이때 하늘이 맑을 때의 장파복사량(EFFEM)은 Brutsaert(1982)의 공식을 사용해서 예측한다. 운량에 따른 교정값(CLDCOR)은

식 (5)를 이용해서 계산한다. 이때 모델은 하루 중 일조시간의 비율(NOVERN)을 일 단파복사량과 일 잠재 단파복사량을 이용하여 식 (6)으로 추정한다. 그러나 본 연구 구역에서는 인근의 기상관측소에서 직접 관측한 일조시간의 획득이 가능했기 때문에, 이 식에서 관측 값을 사용하도록 BROOK90 4.4e의 소스 코드를 수정했다.

$$\text{LNGNET}=(\text{EFFEM}-1)\times\text{CLDCOR}\times\text{SIGMA}\times(\text{TA}+273.15)^4 \quad (4)$$

EFFEM: 하늘이 맑을 때의 장파복사량 (MJ/m²)

TA: 어떤 높이에서의 일평균 기온 (°C)

CLDCOR: 운량에 따른 교정값

SIGMA: Stefan-Boltzmann 상수,
5.67×10⁻⁸Wm⁻²K⁻⁴.

$$\text{CLDCOR}=\text{C3}+(1-\text{C3})\times\text{NOVERN} \quad (5)$$

NOVERN: 하루 중 일조시간의 비율

C3: Brusaert(1982)에 의한 상수로 0.2

$$\text{NOVERN}=(\text{RATIO}-\text{C1})/\text{C2} \quad (6)$$

RATIO=일 잠재 단파복사량에 대한 일 단파복사량의 비율

C1, C2: Brusaert(1982)에 의한 상수로 각각 0.25, 0.5

2) 토양도의 활용

농업과학기술원에서 작성한 정밀토양도를 이용하여 결정할 수 있는 모델 입력 자료는 모델 토층의 개수와 각 토층의 두께 그리고 토심 특성이다. 표 4는 토양도에 나타나는 연구 구역의 토층 분포 비율이다. 표토1은 연구지역 전체에 분포하고 있으며, 심토1은 62.2%, 심토2는 59.8%, 기층1은 52.3% 분포하고 있다. 다른 층은 일부 지역에서만 나타나고 있다. 따라서 본 연구에서는 모델 토층을 4개로 결정했다. 모델 토층1은 표토1~3, 모델 토층2는 심토2, 모델 토층3은 심토2~4, 모델 토층4는 기층1~4이다. 각 모델 토층의 두께는 토양통에서 나타나는 각 토층의 두께와 토양통이 연구 유

표 4. 토양도 분석을 통한 각 토양층 분포 비율 및 모델 토층 결정 결과

(단위: %)

표층			심토				기층			
1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4
100.0	8.0	0.9	62.2	59.8	23.3	2.3	52.3	4.9	0.5	0.3
모델 토층1			모델 토층2	모델 토층3			모델 토층4			

표 5. 토양도를 이용하여 결정된 BROOK90 매개변수 값

모델 토층	STONEF(f)	PSIF(kPa)	THETAF(f)	THSAT(f)	BEXP(-)	KF(mm/d)	WETINF(f)
모델 토층1	0.26	-8.6	0.293	-0.424	5.74	5.3	0.87
모델 토층2	0.11	-8.9	0.313	-0.453	5.76	6.3	0.93
모델 토층3	0.12	-9.1	0.337	-0.463	6.45	6.4	0.93
모델 토층4	0.13	-7.4	0.344	-0.465	7.46	4.9	0.93

STONEF: 토양 중 돌 포함비

THETAF: "field capacity"⁸⁾에서의 함수능력

BEXP: psi-theta 관계식에서의 지수

WETINF: C-H 공식의 포화도

PSIF: "field capacity"에서의 수두압

THSAT: 포화상태에서의 토양공극률

KF: "field capacity"에서의 수리전도도

역에서 차지하는 면적을 고려하여 계산한 결과 각각 14cm, 9cm, 20cm 그리고 27cm 이었다. 각 모델 토층의 물리적 특성은 김만규(2008)가 제안한 방법을 이용하여 결정했으며, 모델 토층의 STONEF는 각 토양층 설명서의 단면기술과 심도별 석력함량에 대한 내용을 분석하여 결정했다. 그 결과 연구 구역의 STONEF는 0.11~0.26의 범위로 나타났으며, 각 층에서 각각 0.26, 0.11, 0.12, 0.13의 값을 갖는 것으로 나타났다. 연구 구역의 STONEF는 처음 14cm의 토층에서 값이 가장 크고, 다음 층에서 값이 크게 낮아진 이후 심도가 낮아질수록 증가하는 특징을 보이고 있다. 이는 연구 구역에서 가장 넓은 면적에 분포하고 있는 덕산 토양통이 13cm 두께의 표토만을 가지고 있으며 다른 토양통에 비해 표토의 석력함량비가 57.9%로 매우 높기 때문이다.

3) 토지이용도의 활용

환경부(2002)에서 제작한 1:25,000 중분류 토지이용도를 분석하여 결정할 수 있는 모델 입력 자료는 토양 심도별 뿌리의 상대적인 밀도(m³/m³), 상대적인 식생

높이와 엽면적지수(LAI), 알베도와 조도 등이다. 이것은 연구지역의 식생, 토지피복과 관련된 변수들이다.

토양 심도별 뿌리의 상대적인 밀도는 Federer(2002)의 공식을 사용하여 계산했다. 이 공식은 Jackson *et al.*(1996)의 연구 결과를 수정한 것이다. 그들은 뿌리에 관한 250개의 연구 결과를 11개 바이오매스로 구분하고 전체뿌리 중에서 지표로부터 특정 심도까지의 뿌리가 차지하는 평균적인 비율을 계산하는 공식을 제안했다. Federer(2002)는 이를 토대로 증산에 관여하는 잔뿌리의 밀도를 계산할 수 있도록 식 (7)의 공식을 작성했다.

본 연구에서는 식 (7)을 이용하여 뿌리의 상대적인 밀도를 결정할 때 논과 밭의 5월 d_h는 작물이 성장초기인 점을 고려하여 온대 초지의 값을 적용했다. 그리고 뿌리의 밀도는 증산과 관련된 매개변수이기 때문에 활엽수, 초지의 잎이 녹색이 아니거나, 떨어져 증산을 하지 않는 시기에는 뿌리가 없는 것으로 가정했다. 초지의 뿌리는 4번째 모델 토층(지표로부터 43~70cm)에서는 없는 것으로 계산했다. 전 지구에서 초지는 전반적으로 지표로부터 10cm의 심도에서 자신의 전체 뿌리 중 44%가 나타나고(Jackson *et al.*, 1996), 반건조 기후

에서는 5~20cm, 습윤 기후에서는 10~50cm까지 뿌리를 내리기 때문이다(Wang *et al.*, 2007). 벼의 뿌리는 20cm까지만 있는 것으로 가정했다. 대맥, 보리, 밀의 뿌리는 토양환경에 따라 분포가 달라진다(조인상 등, 1983; Wilhelm, 1998). 그러나 森田 *et al.*(1986)은 일반계 품종의 벼 뿌리는 90% 이상이 토심 15cm 이내에 분포한다고 했다. 전원태 등(2003)은 이와 같은 배경에서 벼의 뿌리 분포 특성 연구 시 40cm 심도의 컬럼에서 20cm까지만 시료를 채취하기도 했다. 이와 같이 결정된 연구 구역의 토양 심도별 뿌리의 상대적인 밀도

는 표 6과 같다.

$$f=1-0.5^{d/d_0} \tag{7}$$

f=d 심도에서의 뿌리의 밀도

표 6. 각 모델 토층에서 잔뿌리 또는 흡수근의 상대적인 밀도

	각 모델 토층의 심도(cm)			
	0~14	15~23	24~43	44~70
상대적인 밀도(m ³ /m ³)	0.23	0.08	0.08	0.07

표 7. 연구지역에 상대적인 식생 높이의 인덱스

토지이용	면적비(%)	월별 지수(0~1)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
논	13.07	-	-	-	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	1.0	0.5	-	-
밭	13.34	-	-	-	0.2	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	-	-
과수원	0.46	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
기타재배지	0.23	-	-	-	0.2	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	-	-
활엽수림	28.26	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
침엽수림	28.60	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
혼효림	10.15	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
자연초지	0.25	-	-	0.3	0.5	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	-
기타초지	1.37	-	-	0.3	0.5	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	-
지수×면적비		0.67	0.67	0.68	0.74	0.78	0.89	0.92	0.93	0.96	0.82	0.68	0.67

표 8. 연구지역에 상대적인 엽면적지수(LAI)의 인덱스

토지이용	면적비(%)	월별 지수(0~1)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
논	13.07	-	-	-	0.2	0.3	0.8	1.0	1.0	1.0	0.5	-	-
밭	13.34	-	-	-	0.2	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	-	-
과수원	0.46	-	-	-	0.2	0.5	0.6	0.8	1.0	1.0	0.1	-	-
기타재배지	0.23	-	-	-	0.2	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	-	-
활엽수림	28.26	0.2	0.2	0.2	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0	0.8	0.3	0.2	0.2
침엽수림	28.60	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8
혼효림	10.15	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	0.8	0.9	1.0	0.9	0.6	0.5	0.5
자연초지	0.25	-	-	0.3	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	-
기타초지	1.37	-	-	0.3	0.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	-
지수×면적비		0.34	0.34	0.34	0.47	0.60	0.79	0.89	0.96	0.86	0.52	0.34	0.34

표 9. 토지피복별 BROOK90 매개변수 값

토지이용	ALB	ALBSN	KSNVP	ZOG	MAXHT	MAXLAI	MXRTLN	FXYLEM	GLMAX	LWIDTH	CR
상록수	0.14	0.14	0.3	0.020	25	6	2100	0.5	0.53	0.004	0.5
낙엽수	0.18	0.23	0.3	0.020	25	6	3000	0.5	0.53	0.1	0.6
초지	0.20	0.50	1.0	0.010	0.5	3	1000	0	0.8	0.01	0.7
경작지	0.22	0.50	1.0	0.005	0.3	3	110	0	1.1	0.1	0.7
도심지	0.20	0.50	1.0	0.020	0	0	0	0	0	0	0.7
나지	0.30	0.50	1.0	0.001	0	0	0	0	0	0	0.7
물	0.10	0.10	1.0	0.000	0	0	0	0	0	0	0
논	0.22	0.10	1.0	0.000	0.8	4.5	90	0	1.1	0.1	0.7
논물	0.12	0.10	1.0	0.005	0.8	4.5	90	0	1.1	0.1	0.7
혼효림	0.16	0.19	0.3	0.020	25	6	2550	0.5	0.53	0.052	0.55

* 매개변수 설명은 표 11에서 볼 수 있다.

표 10. BROOK90 매개변수 값을 결정하기 위한 토지이용 재분류

토지이용	면적		월											
	km ²	%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
주거~공공시설지역	4.55	2.76	도심지											
논	21.60	13.07	나지				물		논물			논	나지	
밭	22.05	13.34	나지				경작지						나지	
기타재배지	0.39	0.23	나지				경작지						나지	
활엽수림, 과수원	48.45	28.72	낙엽수림											
침엽수림	47.26	28.60	상록수											
혼효림	16.77	10.15	혼효림											
자연초지, 기타초지	2.67	1.62	초지											
내륙습지, 내륙수	1.18	0.71	물											
기타나지	1.34	0.81	나지											

d=토양 심도

d_h=뿌리의 반은 위로 향하고 반은 아래로 향하는 깊이

상대적인 식생 높이(RELH)와 상대적인 엽면적지수(RELLAD)는 표 7, 표 8과 같이 월별 인덱스를 작성하고, 이를 다시 면적 비율로 계산하는 방식으로 결정했다. 인덱스는 현장조사를 통해 직관적으로 작성했다. 토지이용도에 나오는 침엽수림과 활엽수림의 침엽수와 활엽수는 각각 상록수와 낙엽수인 것으로 가정했

다. 토지이용도의 산림지역 속성은 산림청(2008)의 임상도에 따른다. 임상도에서는 침엽수 또는 활엽수가 수관점유면적 또는 입목본수 비율이 75% 이상을 차지하는 임지를 각각 침엽수림과 활엽수림으로 정의한다. 따라서 침엽수림, 활엽수림, 혼효림에서의 상록수와 낙엽수 비율을 각각 8:2, 2:8, 5:5인 것으로 계산했다.

BROOK90 4.4e의 식생 매개변수란 나무갓의 유형과 증산에 영향을 주는 매개변수들에 대한 정보를 의미한다. 김만규(2008)는 6개의 토지피복 유형에 따른

표 11. 토지이용도를 분석하여 획득한 BROOK90 매개변수 값

매개변수	설명	값	단위
ALB	적설이 없는 지표면 알베도	0.18	fraction
ALBSN	적설층 알베도	0.26	fraction
KSNVP	눈 증발을 감소시키는 배수	0.53	fraction
ZOG	지표면 조도	0.01	m
MAXHT	식생 최고 높이	16.93	m
MAXLAI	최대 엽면적지수	4.50	m ² /m ²
MXKPL	최대 식물 수리전도도	17	mm·d ⁻¹ ·MPa ⁻¹
GLMAX	기공이 최대로 열려있을 때 잎의 최대 전도도	0.49	cm/s
LWIDTH	평균 잎 너비	0.05	m
MXRTLN	단위 면적당 잔뿌리의 최대 길이	1748.22	m/m ²
FXYLEM	목질부의 식물 수리저항	0.34	fraction
ROOTDEN	상대적인 뿌리의 밀도	표 6	m ³ /m ³
CR	나무갯에서 광합성을 활성화시키는 복사량에 대한 사멸 계수	0.58	fraction
RELH	연중 상대적인 식생 높이 지수	표 7	index
RELLAI	연중 상대적인 엽면적지수	표 8	index

식생 매개변수 값을 제시한 바 있다. 본 연구에서는 그
 의 토지피복 유형에 물, 눈, 눈물 그리고 혼효림 유형
 을 추가했다(표 9). 추가한 토지피복 유형에 대한 매개
 변수 값은 Ponce *et al.*(1997)이 제안한 토지이용에 따
 른 알베도의 범위, 이정택 등(1997)이 관측한 벼의 엽
 면적지수 그리고 전원태 등(2003)이 연구한 벼의 단위
 면적당 최대 실뿌리 길이의 결과를 활용하여 결정했
 다. 본 연구에서 눈물은 눈에 물이 차 있고, 벼가 자라
 고 있는 시기로 정의했다. 이 시기의 알베도와 지표면
 조도는 물과 같고, 최대 엽면적지수(MAXLAI) 등 식생
 의 특성은 벼의 특성과 같은 것으로 계산했다. 토지이
 용도에 표 9의 값을 적용하기 위하여 토지이용도를 표
 10과 같이 토지피복 유형으로 재분류했다. 표 9와 표
 10을 이용하여 BROOK90 매개변수의 값을 결정한 결
 과는 표 11과 같다.

4) 모델 교정

표 12는 a priori 모의 결과의 통계 결과로,
 BROOK90에 내장되어 있는 통계 모듈(EVAL)로 계산

한 것이다. a priori 모의는 위에서 결정된 매개변수의
 값에 어떠한 교정도 하지 않고 수행한 모의를 말한다.
 이 표에서 ALL ALL MBE⁹⁾는 0.073mm/day로 나타
 났다. 실측 하천유출량이 5mm/day 이하일 때는 모의
 하천유출량이 대부분 실측 하천유출량 보다 적다. 2~5
 월의 실측 하천유출량이 0.5mm/day 미만일 때 모의
 하천유출량이 실측량 보다 많은 것을 제외하면 실측
 하천유출량이 5mm/day 이하일 때는 모두 모의 하천
 유출량이 실측량보다 적다. 반면 실측 하천유출량이
 5mm/day를 초과할 때는 모의 하천유출량이 실측량보
 다 많다. 6~9월 많은 강수가 있을 때 모의된 하천유출
 량은 실측량 보다 매우 크다. 따라서 이 때 양의 MBE
 가 다른 시기 음의 MBE 값을 상쇄시켜서 전반적인 평
 균인 ALL ALL MBE는 양의 값을 보이고 있다. MBE를
 실측된 평균 하천유출량으로 정규화한 NBE를 통해 실
 측 하천유출량에 대한 모의 하천유출량의 오차 비율을
 살펴보면, 2~5월과 10~1월의 모의 오차 비율이 각각
 -26.7%와 -85.0%로 크게 나타나고 있다.

a priori 모의의 통계적 평가는 다음과 같은 사실들
 을 보여주고 있다. 모의 하천유출량은 실측된 양보다

표 12. BROOK90 EVAL을 이용한 a priori 모의(2004~2007) 결과의 통계 결과

		실측 하천유출량(mm/day)			
		<0.5	0.5-5	>5.0	ALL
일수(day)	2~5월	232	249	0	481
	6~9월	79	284	125	488
	10~1월	335	157	0	492
	ALL	646	690	125	1461
평균 모의 하천유출량 (mm/day)	2~5월	0.229	1.126	-	0.693
	6~9월	0.282	1.864	13.920	4.696
	10~1월	0.304	0.693	-	0.428
	ALL	0.275	1.331	13.920	1.941
MBE (mm/day)	2~5월	0.007	-0.364	-	-0.185
	6~9월	-0.182	-0.415	4.052	0.767
	10~1월	-0.245	-0.617	-	-0.364
	ALL	-0.147	-0.443	4.052	0.073
NBE(%)	2~5월	3.0	-32.3	-	-26.7
	6~9월	-64.4	-22.3	29.1	16.3
	10~1월	-80.7	-89.0	-	-85.0
	ALL	-53.5	-33.2	29.1	3.7

MBE: 일평균 모의 오차, NBE: 정규화한 모의 오차

평균적으로는 많다. 그러나 6~10월 큰 강수가 있을 때와 2~5월 실측 하천유출량이 5mm/day 미만일 때를 제외하고는 모의 하천유출량이 실측 하천유출량보다 적다.

교정 작업은 원칙적으로 모델 설계자가 권고하는 내용을 참고하여 수행했지만 매개변수의 수많은 조절과 그 결과를 확인하는 Try & Error 과정이었다. 교정 작업에서는 BROOK90의 매개변수 중 조절 매개변수만을 사용했다. BROOK90의 매개변수는 고정 매개변수와 입력 매개변수로 구분되며, 입력 매개변수는 체계적인 사고를 통해 그 값이 결정된 매개변수와 조절 매개변수로 구분할 수 있다(Federer, 2002). 고정 매개변

수는 BROOK90에서 사용하는 물리 공식의 상수들에 대한 정의이다. 조절 매개변수는 표 13과 같이 총 하천 유출량에 영향을 주는 매개변수와 유출 속도에 영향을 주는 매개변수로 구분할 수 있다. 이 변수들 중 본 연구에서 선택한 조절 매개변수와 값의 조절 결과는 표 14와 같다.

본 연구에서는 건기 때의 증발산을 감소시키기 위해 식생 매개변수(Canopy Parameters)의 조절 매개변수를 조절했다. 식생 매개변수 중 KSNVP는 눈의 증발을 감소시키는 배수로 임의적인 교정 요소이다. 본 연구에서는 겨울철 눈의 증발을 감소시켜 하천유출이 형성 되도록 KSNVP를 0.53에서 0.50으로 조절했다. MXRTLN은 단위면적당 최대 실뿌리 길이이다. 이 매개변수는 근권¹⁰⁾ 저항력을 계산할 때 사용된다. 이 변수는 토양이 건조하거나 뿌리가 빈약할 때 증산의 조절과 관련해서 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 건기의 증산 작용을 억제시키기 위해 MXRTLN을 1748.22m/m²에서 1744.00m/m²로 조절했다.

0.5mm/day 이하의 실측 하천유출량이 나타날 때

표 13. BROOK90 조절 매개변수의 구분(Federer, 2002)

총 유출량에 영향을 주는 변수	DURATN, KSNVP, GLMAX, MXKPL, MXRTLN.
유출 속도에 영향을 주는 변수	RSTEMP, MELFAC, IDEPTH, QDEPTH, INFEXP, QFPAR, QFFC and GSC.

표 14. 연구에서 사용한 조절 매개변수와 교정 값

변수 유형		매개변수	단위	a priori	교정
식생 매개변수	외부	KSNVP	fraction	0.53	0.50
	구조	MXRTLN	m/m ²	1748,22	1744,00
		MXKPL	mm·d ⁻¹ ·MPa ⁻¹	17	19
유출 매개변수	침투	IDEPH	mm	0	200
		INFEXP	fraction	0	0.3
		IMPERV	fraction	0	0.034
		QDEPTH	mm	0	300
		QFPAR	fraction	0	1.3
		QFFC	fraction	0	0.034

하천유출량을 증가시키기 위한 교정과 많은 강수량이 있을 때 유출이 실제보다 빠르게 유출되는 것을 교정하기 위해 유출 매개변수의 조절 매개변수를 이용했다. 유출 매개변수 중 INFEXP는 토양 깊이에 따라 침투된 물의 분포를 결정하는 침투 지수이다. 이 값이 증가하면 침투를 도와주는 대공극이 증가하고 IDEPTH에 가까워질수록 침투된 물의 분포가 지하급수적으로 증가한다. INFEXP가 1이면 침투된 물이 균일하게 분포한다는 것을 의미한다. IDEPTH는 침투가 분포하는 깊이로 수직적인 대공극의 깊이로 이해할 수 있다. INFEXP와 IDEPTH를 증가시키면 물은 토양의 더욱 깊은 곳까지 침투되어 배수가 빨리 일어난다. QDEPTH는 강수 시 토양이 젖는 깊이로 지표유출을 계산할 때 사용한다. QDEPTH의 증가는 지표가 건조할 때 연구지역으로부터 빠른 유출이 발생하도록 만든다. QDEPTH가 작으면 지표유출 발생이 건기와 우기에 더 큰 차이를 나타낸다. 본 연구에서는 INFEXP를 0.3, IDEPTH와 QDEPTH를 각각 200mm, 300mm로 결정했다. QFPAR, QFFC는 토양의 수분 함양 능력을 이용하여 빠른 유출의 비율을 결정하는 값이다. 본 연구에서는 QFPAR, QFFC를 각각 1.3과 0.034로 결정했다.

한편 여름철 강수 시에도 식생에 의한 증산이 발생하도록 하여 하천유출 정점을 낮추고자 했다. 이를 위하여 MXKPL을 17mm·d⁻¹·MPa⁻¹에서 19mm·d⁻¹·MPa⁻¹로 증가시켰다. MXKPL은 최대 식물 수리전도도로 식

생 내부를 흐르는 물에 대한 내부 저항력이다. MXKPL은 토양수분잠재력이 식생의 증산에 영향이 미치지 않을 정도로 충분히 젖어있고 LAI와 식생의 높이가 최고조에 달했을 때 증산 비율을 최소 수분잠재력(기공이 닫힐 정도)으로 나눈 값이다. MXKPL은 식생이 사용할 수 있는 토양수를 결정할 때 매우 중요한 매개변수이다. MXKPL은 어떤 한 식생에 대한 값이 아니라 단위 면적 내에 있는 모든 식생의 특성이 반영된 값이다. MXKPL이 감소하면 식생의 토양수 사용 가능성이 준다. 따라서 실증산량은 가장 높은 토양수 함양비에서의 잠재적 증산량 아래로 감소한다.

많은 강수량이 있을 때 유출이 실제보다 빠르게 유출되는 것을 교정하기 위해서는 강수가 천부지하수에 저장되었다가 유출되도록 할 수도 있다. 이때 사용하는 매개변수는 GSC이다. GSC를 감소시키면 건기에 지하수 흐름이 증가되고 우기에 그것이 감소된다. Federer(2002)는 미국 Hubbard Brook 유역에 대한 연구에서 GSC를 0.05로 조절했다. 그리고 김만규(2008)는 충청도 병천천 유역에 대한 연구에서 GSC를 0.6으로 결정했다. 그는 병천천 유역의 지하수 흐름이 Federer(2002)의 연구지역보다 건기에는 더욱 느리고, 우기에는 상대적으로 빠르다는 것을 의미한다고 했다. 그러나 본 연구에서는 GSC를 고려하지 않았다. GSC를 고려하면 유출 속도 특히 유출량 감소 속도가 실측 자료와 큰 차이가 났기 때문이다.

한편 본 연구에서는 지표유출과 같이 강수가 하천으

표 15. 교정 기간(2004~2007)의 모의, 실측 하천유출량 간의 통계적 비교

연도	MBE(mm/day)	모델 효율(E)		결정 계수(R ²)		ET(%)
		일 간격	월 간격	일 간격	월 간격	
2004	-0.384	0.89	0.95	0.90	0.98	-17.2
2005	0.012	0.84	0.89	0.95	0.93	0.9
2006	0.314	0.68	0.90	0.87	0.99	19.2
2007	0.009	0.86	0.89	0.92	0.99	0.4
4년간	-0.012	0.83	0.93	0.92	0.97	-0.5

로 직접 도달하게 만드는 지표면의 불투수층 면적 비율인 IMPERV를 0.034로 결정했다. 이는 연구 구역 내의 하천 면적과 주거지역, 공업지역 등을 고려하여 결정된 값이다. 연구 구역에서 내륙습지와 내륙수는 유역 면적의 0.7%이고, 토지이용 중 불투수층으로 작용할 수 있는 주거지역, 공업지역, 상업지역, 교통지역은 유역 면적의 2.7%이다. 따라서 이의 합인 3.4%를 IMPERV 값으로 결정했다.

교정 결과 a priori 모의 결과에 비해 MBE가 0.073mm/day에서 -0.012mm/day로 개선되었다. 이때의 일과 월간격의 E는 0.83, 0.93으로 나타났으며, R²은 각각 0.92, 0.97로 나타났다. ET는 -0.5%이었다. 일평균 모의 오차(MBE)와 총 하천유출량의 모의 오차(ET)가 음의 값을 나타낸 것은 모의된 하천 유출량이 실측 하천유출량에 비해 적다는 것을 의미한다(표 15).

5) 검증 결과 및 연구구역의 물수지

표 16은 본 연구에서 수립한 물수지 모델을 이용하여 검증 기간(2001~2003)에 대하여 모의한 하천유출

량을 실측 하천유출량과 비교한 결과이다. 검증 결과 MBE가 -0.517mm/day, ET가 -16.3%으로 나타나 모의 하천유출량이 실측 하천유출량 보다 적은 것으로 나타났다. 일 간격 E와 R²은 각각 0.87과 0.89로 나타나고, 월 간격 E와 R²은 각각 0.93, 0.97로 나타났다. 따라서 모의 경향은 실측 하천유출 경향과 매우 유사하다는 것을 알 수 있다. 특히 월 간격 모의 하천유출량은 실측 하천유출량과 매우 높은 유사성을 보인다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞서 제시한 자료 활용 방안들이 합리적이라는 것을 의미한다.

본 연구에서 수립한 물수지 모델을 이용하여 현재 연구 구역의 물수지 특성을 분석한 결과는 다음과 같다. 연구 구역에서는 연 강수량의 53.7%가 하천으로 유출되고 있으며, 46.3%가 증발산 되고 있다. 증발산량 중 식물의 증산이 차지하는 비율은 73.9%로 매우 높다. 열 에너지 만에 의한 증발량은 26.1%이다. 표 17은 증발산량의 상세 구성 내용이다. 증발량 중에서는 강수 차단으로부터 증발되는 비율이 가장 높다. 강수 차단으로부터 증발되는 양은 증발량의 58.2%이고 토양층으로부터의 증발량은 36.1%로 모의됐다. 차단된

표 16. 검증 기간(2001~2003)의 모의, 실측 하천유출량 간의 통계적 비교

연도	MBE(mm/day)	모델 효율(E)		결정 계수(R ²)		ET(%)
		일 간격	월 간격	일 간격	월 간격	
2001	-0.466	0.83	0.90	0.84	0.96	-27.0
2002	0.682	0.91	0.93	0.93	0.98	-18.1
2003	-0.457	0.79	0.93	0.83	0.98	-10.5
3년간	-0.517	0.87	0.93	0.89	0.97	-16.3

표 17. 연구구역의 2001~2007년 연평균 물수지

강수량 (mm/Year)	실측 하천유출량 (mm/Year)	모의 하천유출량 (mm/Year)	모의 실증발산량(mm/Year)		
			실증산량	실발산량	합계
1557.1	917.9	835.5	531.8	188.2	720.0
강수량의 100%	강수량의 59.0%	강수량의 53.7%	강수량의 34.2%	강수량의 12.1%	강수량의 46.3%
			증발산량의 73.9%	증발산량의 26.1%	증발산량의 100%

표 18. 연구구역의 2001~2007년 연평균 모의 실증발산량 구성 성분

모의 실증발산량(mm/year)					모의 실증산량 (mm/year)	모의 실발산량 (mm/year)
차단된 비로 부터의 증발량	차단된 눈으로 부터의 증발량	토양으로부터의 증발량	눈으로부터의 증발량	합계		
109.6	3.4	68.0	7.2	188.2	531.8	720.0
증발량의 58.2%	증발량의 1.8%	증발량의 36.1%	증발량의 3.8%	증발산량의 26.1%	증발산량의 73.9%	증발산량의 100%

강설과 적설층으로부터의 증발량은 각각 3.4%, 7.2%로 모의됐다.

5. 결론

물리결정 물수지 모델은 개념적인 모델에 비해 수문학적 과정을 세밀하게 모의하지만, 상대적으로 자료 준비에 어려움이 많다. 본 연구에서는 기상 관측 자료, 토양도, 토지이용도를 이용하여 물리결정 물수지 모델 입력 자료를 결정하는 방안을 제시했다. 본 연구에서는 BROOK90 물수지 모델에서 경험식을 이용하여 태양복사량을 결정할 경우 일조시간을 이용하는 방안을 제시했다. 그리고 농업과학기술원에서 작성한 정밀토양도를 이용하여 모델 토층 개수, 토층 두께 그리고 토심 특성을 결정하는 방안을 제시하였다. 아울러 환경부의 토지이용도를 활용하여 토양심도별 뿌리의 상대적인 밀도, 상대적인 식생 높이와 엽면적 지수 등 물리결정 물수지 모델의 식생 매개변수 값을 결정하는 방안을 제시했다.

2004~2007년의 자료로 결정한 매개변수 값을 이용

하여 2001~2003년의 물수지를 평가한 결과, 통계적인 값들은 본 연구에서 제시한 방안이 타당하다는 것을 증명했다. 검증 기간(2001~2003)의 실측 하천유출량과 모의 하천유출량 사이의 일평균 모의 오차는 -0.517, 총 하천유출량 모의 오차는 -16.3%이었다. 일 간격의 모델 효율 계수와 결정계수가 각각 0.87과 0.89로 나타났다. 그리고 월 간격의 모델 효율 계수와 결정계수는 0.93과 0.97로 나타났다. 본 연구에서 나타난 검증 기간의 모델 효율 계수와 결정계수는 권형중 등(2008)이 동일 구역에서 2001~2004년 자료와 PRMS 모형을 이용하여 교정 모의한 결과인 일 간격 모델 효율 0.65보다도 매우 좋은 결과이다. 또한 Kim(1997)이 1983~1986년 자료를 이용하여 독일의 소유역 슈퍼사이트(0.76km²)에서 BROOK_{top}을 이용하여 교정 모의한 결과인 월 간격 결정계수 0.97과도 견줄만한 것으로 매우 의미 있는 결과이다. 다만 일평균 모의 오차와 총 하천유출량의 모의 오차가 교정 기간에 비해 상대적으로 큰 오차를 보인다는 점은 향후 추가 논의가 필요하다. 이 부분에 대해서는 모델의 모의 한계성, 매개변수 값의 정확도 제고, 검증 자료인 실측 하천유출량의 오류 가능성 등 여러 측면에서 검토가 필요할 것이다.

연구지역에서는 최근 기업도시 건설과 이와 무관하지 않은 도로가 건설되고 있다. 논과 배추, 고추 등을 재배하던 밭은 수익성이 높은 천마 재배지로 바뀌는 사례가 증가하고 있다. 천마는 재배기간 동안 잎과 줄기가 나오지 않기 때문에 재배지가 마치 나지와 같은 모습을 보인다. 본 연구의 결과물은 이와 같은 토지이용 변화가 미칠 수문학적 영향을 연구하는 데 기여할 수 있을 것이다. 아울러 지하수와 계곡수를 생활용수로 사용하고 있는 산간곡지 마을들에 기후변화가 미칠 사회, 경제적인 영향을 연구하는 데에도 기여할 수 있을 것이다. 본 연구에서 작성한 물수지 모델 매개변수 값은 인근의 수문지형학적 특성이 유사한 미계측 유역의 물수지 모델 수립에 기초자료로 이용할 수 있다. 그리고 무엇보다도 본 연구에서 제시한 방안들은 슈퍼사이트 외의 여러 유역에서 물리결정 물수지 모델을 이용하여 정교한 수문학적 연구를 수행할 수 있는 방안이라는 점에서 의미가 있다.

사사

논문을 세심히 살펴봐 주시고 건설적인 의견을 주신 세분 심사위원께 감사드립니다. 그리고 GIS 자료처리와 분석 과정에서 많은 도움을 준 공주대학교 자연지리학 및 GIS 연구실 식구들에게도 감사드립니다.

주

- 1) 국내의 유역구분 현황, 국내외 문헌들에 나타나는 연구 유역 면적과 표현을 고려하였을 때 600km² 이하의 면적을 연구 대상으로 할 때 지역 규모 물수지 연구로 보는 것이 합리적일 것이다.
- 2) 수문, 기상 관측 장비들이 집중되어 있으며, 다양한 수문학적 실험이 진행되고 있는 지역이다.
- 3) 광릉슈퍼사이트는 1998년 LTER(Long-Term Ecological Research) 지역으로 등록되고, 2002년 한국산림과학원에서 운영하는 KoFlux(Korea Flux)로 선정되었다. 이곳에는 기상연구소에서 설치한 플럭스 타워(flux tower)가 있어 미기 후 자료를 관측하고 있다.
- 4) 미국 자연자원보호청(Natural Resources Conservation

Service, 前 Soil Conservation Service)에서 1986년 개발한 방법으로 침투홍수량 산정을 위해 이용해 왔다. SCS 방법은 토지피복상태에 따라 불투수율이 다르고 이에 따라 유출량이 결정된다. SCS 방법은 토양으로의 실제침투량은 초기손실을 제외한 유역의 총강우량에서 직접유출량을 빼서 계산한다.

- 5) 국토해양부에서 제작한 수자원단위지도에서는 우리나라의 유역을 대권역, 중권역, 표준유역으로 구분하고 있다.
- 6) 본 연구에서는 최상부 모델 토층의 두께와 물리적 특성을 표토층과 동일하게 설정했다.
- 7) Topo To Raster는 하천에 의한 침식, 분수령 등이 올바르게 재현된 DEM을 제작하도록 설계된 DEM 작성 알고리즘이다.
- 8) BROOK90에서는 Field Capacity를 2m 심도에서 고정된 중력 잠재 토양수리경사도를 가지며, 초기에 포화되어 있는 동일한 단면으로부터 배수가 시작된 48시간 이후에 30cm 깊이에서의 물의 비율로 정의한다.
- 9) 일반적으로 a priori simulation 결과의 ALL ALL MBE가 0.05mm/day 이하로 나오면, 이 모델은 fitting parameter 교정을 적게 하거나 fitting parameter 교정 없이도 의미 있는 모의를 수행하는 것이다(김만규, 2008).
- 10) 식물 뿌리로부터 2~3mm 범위 또는 토양 중에서 식물 뿌리가 영향을 미치는 범위이다.

참고문헌

- 건설교통부, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 한국수문조사연보.
- 건설교통부, 2001, 한국지형에 적합한 수치표고자료구축방안.
- 권형중 · 황의호 · 이근상 · 유병혁 · 고덕구, 2008, “수문학적 유역특성자료 자동화 추출 및 분석시스템 적용 (2): PRMS 모형을 이용한 용담댐 유역을 대상으로,” 한국지리정보학회지, 11(3), 13-23.
- 김경하 · 정용호 · 박재현, 2001, “경기도 광능의 활엽수림과 침엽수림 유역의 유출량 산정을 위한 준분포형 수문모형(TOPMODEL)의 적용,” 한국임학회지, 90(2), 197-209.
- 김남원 · 정일문 · 원우승, 2006, “완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의,” 대한토목학회논문집, 26(5B), 481-488.
- 김만규, 1999a, “기후변화 시나리오에 따른 지역 물수지 추

- 정,” 제4기학회지, 13, 53-65.
- 김만규, 1999b, “토지이용 변화와 자연식생 변화 시 지역 물수지,” 지역개발연구논총, 8, 119-134.
- 김만규, 2008, “충청도 병천천 유역에 대한 ‘물리결정 물수지 모델 - BROOK90’의 지형, 식생, 토양 parameter 획득 연구와 a priori simulation 결과 해석,” 한국지형학회지, 15(1), 37-52.
- 김만규 · 박종철, 2008, “수치표고모형(DEM)의 해상도가 물리 결정 일괄 매개변수 물수지 모델의 모의 결과에 미치는 영향 평가,” 한국지리정보학회지, 11(3), 151-165.
- 김양렬 · 민충기, 2002, 경영경제 통계학, 명경사.
- 김연준 · 신재중, 2002, “DTED와 1:50,000 수치지형도에 의한 격자 DEM의 지형 매개변수 비교,” 한국지리정보학회지, 5(3), 19-32.
- 김은숙 · 강신규 · 이보라 · 김경하 · 김준, 2007, “광릉 원두부 유역 생태수문과정의 통합을 위한 지역 생태수문 모사 시스템(RHESSys)의 모수화와 적용,” 한국농림기상학회지, 9(2), 121-131.
- 김태호 · 다나카 유키야, 2004, “한라산 아고산대 조면현무암 소유역의 유출 특성,” 한국지형학회지, 11(4), 1-10.
- 다나카 유키야 · 김태호 · 마츠히라 유키노리, 2000, “화강암 및 편마암 산지 소유역의 강우유출 특성,” 대한지리학회지, 35(4), 641-647.
- 박종윤 · 이미선 · 이용준 · 김성준, 2008, “SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용 변화가 수문-수질에 미치는 영향 분석,” 대한토목학회논문집, 28(2B), 187-197.
- 산림청, 2008, 2007년말 산림기분통계 조사결과.
- 손일, 1986, “소유역분지의 홍수특성과 지형변수와의 관계,” 지리학, 33, 13-25.
- 손일, 1994, “토지이용 변화에 따른 수문특성의 변화를 추적하기 위한 림프모형의 개발,” 대한지리학회지, 29(3), 233-252.
- 안중기 · 김태호, 2006, “한라산 아고산 초지대 소유역의 물수지,” 대한지리학회지, 41(4), 404-417.
- 양해근, 2007, “기후변화에 따른 유역의 물수지 변화,” 대한지리학회지, 42(3), 405-420.
- 양해근 · 김종일, 2004, “도시화에 수반되는 광주천 유역의 물수지 변화,” 한국지역지리학회지, 10(1), 192-205.
- 이정택 · 이춘우 · 주문갑 · 홍석영, 1997, “태양광 반사율을 이용한 벼 군락의 엽면적지수 추정,” 한국작물학회지, 42(2), 173-182.
- 장철희 · 김현준 · 김남원, 2003, “용담댐 유역의 장기-유출 분석을 위한 AVSWAT 2000 모형의 적용,” 한국수자원학회 2003년도 학술발표회논문집, 46-49.
- 전원태 · 박창영 · 조영손 · 박기도 · 윤을수 · 강위금 · 박성태 · 최진룡, 2003, “화확비료 및 퇴비 장기사용에 따른 벼 뿌리 분포 특성,” 한국작물학회지, 48(6), 484-489.
- 조인상 · 김이열 · 최대용 · 임정남 · 엄기태, 1983, “토양의 물리적 특성이 대맥의 뿌리 분포에 미치는 영향,” 한국토양비료학회지, 16(2), 126-130.
- 허성구 · 김기성 · 사공명 · 안재훈 · 임경재, 2005, “고랭지 농경지의 토양유실모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가,” 농촌계획, 11(4), 67-74.
- 홍준범 · 김병식 · 윤석영, 2006, “VfloTM 모형을 이용한 물리기반의 분포형 물수지 모델의 정확성 평가,” 대한토목학회지논문집, 26(6B), 613-622.
- 환경부, 2002, 1:25,000 토지피복분류도(안천, 적상, 대량, 장기).
- 森田茂紀, 岩淵輝, 山崎耕字, 1986, 水稻1次根の伸長方向と根重との關係, 日昨紀, 52, 520-525.
- Angström, A., 1924, Solar and terrestrial radiation, *The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 50, 121-126.
- Bormann, H. and Diekkruger, B., 2004, A conceptual regional hydrological model for Benin (West Africa): validation, uncertainty assessment and assessment of applicability for environmental change analyses, *Physics and Chemistry of the Earth*, 29(11-12), 759-768.
- Bormann, H., Fasz, T., Giertz, S., Junge, B., Diekkruger, B., Reichert, B., and Skowronek, A., 2005, From local hydrological process analysis to regional hydrological model application in Benin: Concept, results and perspectives, *Physics and Chemistry of the Earth*, 30(6/7), 347-356.
- Brutsaert, W., 1982, *Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications*, D.Reidel, Hingham MA.
- Cho, S. M. and Lee, M. W., 1995, Water quality

- modeling in the delaware river basin by SWAT (Soil and Water Assessment Tools), *Journal of Environmental Impact*, 4(2), 39-57.
- Campbell, G. S., 1974, A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Science*, 117, 311-314.
- Federer, C. A. and Lash, D., 1978a, *Brook: A Hydrologic Simulation Model for Eastern Forests*, Water Resource Research Center, University of New Hampshire, Durham.
- Federer, C. A. and Lash, D., 1978b, Simulated Streamflow Response to Possible Differences in Transpiration Among Species of Hardwood Trees, *Water Resources Research*, 14(6), 1089-1097.
- Federer, C. A., 1995, *BROOK90 - A simulation model for evapotranspiration, soil water and streamflow*, Version 3.24, Computer freeware and documentation, USDA, Forest Service, Durham, USA.
- Federer, C. A., 2002, *BROOK90 - A simulation model for evapotranspiration, soil water and streamflow*, <http://home.maine.rr.com/~stfederer/index.htm>.
- Hattermann, F. F., Wattenbach, M., Krysanova, V., and Wechsung, F., 2005, Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment validation and uncertainty analysis, *Hydrological Processes*, 19(3), 693-714.
- Herrmann, A., Kim, M. K., and Buchtele, J., 1997, Runoff formation, water balances and runoff components from rainfall-runoff models for a small agricultural basin with irrigation in quaternary northern Germany, *Proc. ERB Conf. on Ecohydrological Processes in Small Basins*, Strasbourg, 24-28.
- Im, S. J., Kevin, M. B., Mostaghimi, S., and Cho, J. P., 2003, Predicting runoff and sediment yield on a forest dominated watershed using HSPF and SWAT Models, *Journal of Korean Society of Rural Planning*, 9(4), 59-64.
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., and Schulze, E.-D., 1996, A global analysis of root distributions for terrestrial biomes, *Oecologia*, 108, 389-411.
- Kim, M. K., 1997, *Klima-und Landnutzungsänderungen und deren hydrologischen Auswirkungen im Harz und Harzvorland-Wasserhaushaltsmodellierung mit modifiziertem Programmpaket BROOK90 (BROOK_{TOP})*, Institut fuer Geographie und Geoökologie der Technischen Universität Braunschweig, ISSN 0170-7299.
- Komatsu, H., Maita, E., and Otsuki, K., 2008, A model to estimate annual forest evapotranspiration in Japan from mean annual temperature, *Journal of Hydrology*, 348(3/4), 330-340.
- Lazarotto, P., Stamm, C., Prasuhn, V., and Fluhler, H., 2006, A parsimonious soil-type based rainfall-runoff model simultaneously tested in four small agricultural catchments, *Journal of Hydrology*, 321(1/4), 21-38.
- Marechal, D. and Holman, I. P., 2005, Development and application of a soil classification-based conceptual catchment-scale hydrological model, *Journal of Hydrology*, 312(1/4), 277-293.
- Martin, A., Seegert, J., and Feger, K. H., 2004, Effects of changes in tree species composition on water flow dynamics - Model applications and their limitations, *Plant and Soil*, 264, 13-24.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models. Part I a discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Pandey, A., Chowdary, V. M., Mal, B. C., and Billib, M., 2008, Runoff and sediment yield modeling from a small agricultural watershed in India using the WEPP model, *Journal of Hydrology*, 348(3/4), 305-319.
- Ponce, V. M., Lohani, A. K., and Huston, P. T., 1997, Surface albedo and water resources: hydroclimatological impact of human activities, *Journal of Hydrologic Engineering*, 2(4), 197-203.

- Prescott, J. A., 1940, Evaporation from a water surface in relation to solar radiation, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2, 471-479.
- Shuttleworth, W. J. and Wallace, J. S., 1985, Evaporation from sparse crops - an energy combination theory, *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 111, 839-855.
- Son, I., 1991, *Modelling the Hydrological Effects of Land-use Change in Small Catchment*, Unpublished Ph.D. Thesis, Univ. of Southampton.
- Troy, B., Sarron, C., Fritsch, J. M., and Rollin, D., 2007, Assessment of the impacts of land use changes on the hydrological regime of a small rural catchment in South Africa, *Physics and chemistry of the earth*, 32(15/18), 984-994
- U.S. Department of Commerce, 1968, *Climatic Atlas of the United States*, Environmental Science Services Admin.
- Wang, X., Xie, H., Guan, H., and Zhou, X., 2007, Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions, *Journal of Hydrology*, 340(1/2), 12-24.
- Wilhelm, W. W., 1998, Dry-matter partitioning and leaf area of winter wheat grown in a long-term fallow tillage comparisons in the US Central Great Plains, *Soil & Tillage Research*, 49, 40-56.
- <http://www.wamis.go.kr>
- <http://jeonju.kma.go.kr>
- 교신: 박중철, 314-701, 충청남도 공주시 신관동 182, 공주대학교 인문사회과학대학 지리학과(이메일: jcp@kongju.ac.kr, 전화: 041-850-8425)
- Correspondence: Jong-Chul Park, Department of Geography, College of Humanities and Social Sciences, Kongju National University, 182, Shinwandong, Gongju, Chungnam, 314-701, Korea (e-mail: jcp@kongju.ac.kr, phone: +82-41-850-8425)
- 최초투고일 09. 08. 24
수정일 09. 09. 15
최종접수일 09. 09. 16