

GIS 기반의 SWAT 모형을 이용한 하천 유출량 모의

Simulation of Daily Streamflows by SWAT Based on GIS

장대원* / 김남원** / 김형수*** / 서병하****

Dae Won Jang, Nam Won Kim, Hung Soo Kim, Byung Ha Seoh

요지

본 연구에서는 GIS와 연계되는 SWAT 모형을 이용하여 소양강댐 유역의 일 유출량을 모의하였으며, 모형에서 제공하는 단일 지점을 이용하는 기본 방법과 다지점 강우를 이용하기 위한 방법으로 나누어 비교하였다. 모형의 민감도 분석을 통해 매개변수를 최적화 하였고, 잠재 증발산량을 산정하기 위하여 Penman-Monteith 방법을 이용하였다. 과거의 관측 수문곡선을 SWAT 모형에 의해 모의된 일 유출 수문곡선과 비교한 결과, 두 가지 방법 모두 총 유출체적은 물수지에 기본을 둔 모형의 특성상 잘 일치 하였다. 그러나 갈수기와 홍수기의 일 유출 수문곡선은 다지점의 강우자료를 이용한 경우가 더 적합함을 알 수 있었다. 또한 SWAT 모형이 장기 일 유출량 모의에 적용 가능함을 확인하였다.

핵심용어 : SWAT, 다지점 강우, 증발산량 산정

1. 서론

최근 이상기후에 의한 호우 및 태풍의 피해가 급증하고 환경문제로 인한 수질관리의 필요성에 대한 인식이 증가하면서 장기 강우-유출모형 (continuous rainfall-runoff model)과 하천 수질모형의 개발 및 적용에 관한 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다. 수자원 개발이나 관리 분야에 있어서 강우에 따른 정확한 유출량의 예측은 매우 중요하며 지금까지 다양한 강우유출 모형들이 개발되어 왔다. 최근에는 지형적인 특성인자를 최대한 고려한 분포형 모형(distributed model)이 기존의 집중형 모형(lumped model)의 단점을 보완할 수 있다는 점에서 그 이용에 대한 연구가 진행되고 있다.

강우-유출 모형을 넓은 의미로 생각하면 유출량을 계산하기 위한 수문학적 순환 및 수리학적 입력자료 등의 정확성도 중요할 것이나, 좁은 의미의 수문학적 순환에 대해서는 각 순환요소에 작용하는 유역의 특성인자와 이들의 상호 작용 및 기상적 요소들의 정확성이 강우-유출모형의 효용성을 결정짓는 중요한 요소라 할 수 있다.

본 연구에서는 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 유역내의 장기 강우-유출과정과 유사 및 농업화학물질의 거동을 예측할 수 있는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형을 Arc-View와 연동하여 대규모 유역의 홍수량 및 일 유출량 추정에 적용하고자 한다.

2. SWAT 모형

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 장기간에 걸친 다양한 토양속성과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량, 유사량 및 농업화학물질의 영향을 예측하기 위한 모형으로서 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 모형이다.

SWAT 모형은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 장기-강우유출모형으로서 4가지의 부모형

* 인하대학교 환경토목공학부 박사과정(e-mail: badaidw@mail.co.kr)

** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원(e-mail: nwkim@kict.re.kr)

*** 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과 조교수(e-mail: sookim@inha.ac.kr)

**** 인하대학교 환경토목공학부 토목공학과 교수(e-mail: seohydro@inha.ac.kr)

(sub-model)으로 구성되어 있다. 즉 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형으로 구분된다. 이 중에서 수문 부모형은 저류방정식에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며, 차단, 지표면 유출, 중간 유출(측방유출), 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다. 모형에서 일변 지표면 유출량은 SCS 방법을 이용하여 산정하며, 측방유출은 Kinematic Storage Model(Sloan et al., 1983)을 이용하고 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 모형에서는 잠재 증발산을 산정하기 위하여 Hargreaves, Priestley-Taylor, Penman-Monteith 방법을 제공한다.

모형에서 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표 유출, 기저 유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 다음 식(1)과 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t : 최종일의 초양수분량(mmH_2O), SW_0 : i일의 초기토양수분량(mmH_2O), t : 시간(일), R_{day} : i일의 강수량(mmH_2O), Q_{surf} : i일의 지표유출량(mmH_2O), E_a : i일의 증발산량(mmH_2O), w_{seep} : i일의 토양면에서 투수층으로 투수되는 총량(mmH_2O), Q_{gw} : i일의 회귀수량(mmH_2O)이다.

3. 입력자료 구축 및 적용

3.1 대상유역 및 수문·기상자료

SWAT 모형은 토지피복상태를 고려하고 토양의 함수량을 고려하는 준분포형 모형으로 토지이용상태 자료가 충분한지를 고려하여야 하며, 기후변화 시나리오 및 강우 및 온도의 공간적 변동성을 연계 운영 가능한 유역을 선정하여야 한다. 본 연구에서는 대상유역을 중규모 이상이면서 유입량 및 수위자료가 비교적 정확한 소양강댐 유역으로 결정하였다.

SWAT 모형에서 유출량 산정에 사용되는 기본적인 수문·기상자료는 강우, 최고·최저 기온, 태양복사량, 풍속, 습도 등이 있다. 이외에도 관측소의 위치정보를 나타내는 입력자료 및 관측 유출량 자료가 요구된다. 소양강 유역의 기상 자료는 대상유역의 인제 기상관측소와 춘천 기상관측소의 자료를 사용하였다. 소양강 유역 처럼 인제와 춘천 두 곳의 기상관측소 강우값을 이용할 경우에는 이러한 공간적인 강우의 분포를 반영할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 춘천과 인제 두 곳의 기상자료를 이용한 방법과 소양강 유역내의 강우관측소의 강우자료를 이용한 방법을 적용하였다. 춘천과 인제를 제외한 12개 강우관측소를 기상관측소로 사용하기 위하여, 기상자료는 춘천과 인제의 기상자료 값을 이용하였다.

3.3 적용방법

SWAT 모형에서는 대상유역을 출구점을 기준으로 소유역을 구분하며, 이를 다시 토지이용 및 토양도에 따라서 HRU(Hydro Response Unit)로 구분하여 적용한다.

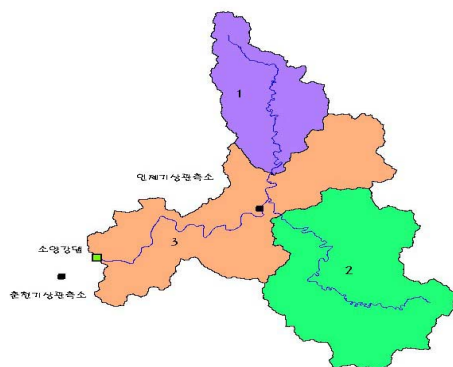


그림 1 소유역 분할과 기상관측소 현황

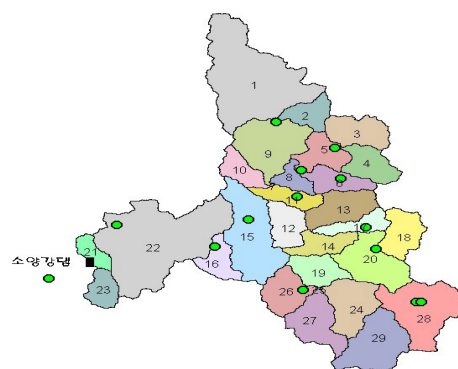


그림 2 소유역 분할과 강우관측소 현황

본 연구에서는 먼저 인제와 춘천 기상관측자료를 이용하기 위해서, 소양강댐 유역을 그림(1)과 같이 내린천 유역과 인북천 유역 그리고 소양강 유역으로 구분하고 토지이용 및 토양성분에 따라 총 75개(인북천-27, 내린천-22, 소양강-26)의 수문반응단위(HRU)로 구분하였다. 또한, 그림(2)와 같이 12개 지점에서 강우관측소의 강수량을 이용하기 위하여 29개의 소유역으로 구분하고 이를 1140개의 HRU로 구분하였다.

3.4 민감도 분석.

본 연구에서는 SWAT 모형의 28개 매개변수 중 Eckhardt와Arnold (2001)가 나눈 SWAT 모형의 매개변수 분류를 정리하여 유출 및 증발산에 영향을 미치는 지하수 부분의 매개변수 4개, HRU 관련 매개변수 1개, HRU 정보관련 매개변수 1개, 토양관련 매개변수 1개, 총 7개의 매개변수를 선정하였다.

본 연구에서의 민감도는 무차원 지수인 I 로 표시되며, I 는 모형의 출력자료의 변화에 대한 해당 매개변수의 변화의 비로서 정의된다. 수학적으로 민감도는 매개변수 x 에 대한 종속변수 y 의 편미분인 $\delta y/\delta x$ 로써 표현된다. 이 표현을 유한 차분식에 의해 대수적으로 접근시키면 y_0 은 매개변수 x 의 초기값인 x_0 의 출력결과가 되며, 초기매개변수 값은 $\pm\Delta x$ 의 크기로 변하게 되고 이때의 대응값으로 y_1, y_2 를 갖게 된다. 민감도 지수 I 를 구하면 다음 식(2)와 같다.

$$I = \frac{y_2 - y_1 / y_0}{2\Delta x / x_0} \quad (2)$$

이를 통해 민감도 지수가 계산되면 산정된 민감도 지수의 순위를 책정하기 위하여 민감도 지수의 순위를 결정한다. 지수의 등급이 높아질수록 모형의 결과값에 영향을 많이 준다고 볼 수 있다.

4. 결과

4.1 민감도 분석결과

민감도 분석결과 CN_2 , SOL_AWC , $ESCO$ 가 지표수 유출 및 지하수 유출에 가장 영향을 많이 미치는 인자로 분석되었으며, SOL_AWC , $ESCO$ 는 토양수분함량 및 증발산의 주요 인자로 나타났다. 전체적으로 토양의 유효수분함량인 SOL_AWC 가 모든 출력값에 중요 인자로 분석되었으며, 하천유출의 경우 지표수유출, 지하수유출, 증발산 등의 조합으로 구성되기 때문에 특별히 민감한 인자가 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

4.2 기상관측소를 이용한 일유출 검정

본 연구에서는 일유출을 모의하는데 필요한 자료기간을 1년으로 선택하였으며, 자료의 질적인 측면에서 유역의 유출반응을 모두 포함할 수 있도록 저수시와 홍수시의 자료가 포함되어 있는 1998년 자료를 선정하였다. 첫 번째 방법으로 세 곳의 수위관측소 자료를 사용하게 위하여 그림1과 같이 소유역을 나누어 적용하였다. 대상유역의 96-99년의 일유출 수문곡선은 그림(3)과 같고 이를 표(1)에 정리하였다.

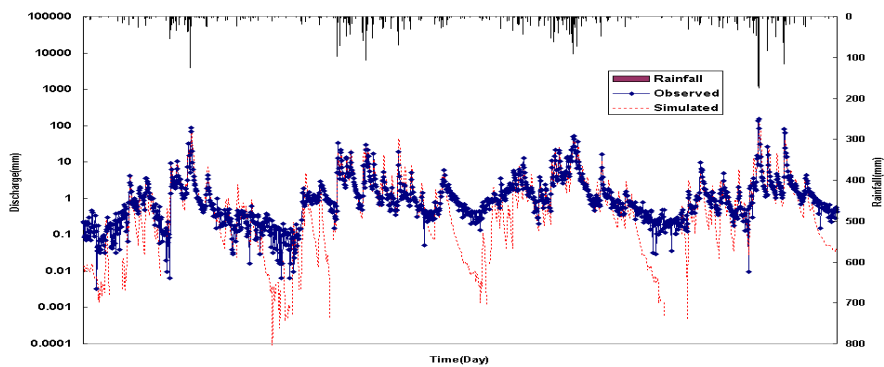


그림 3 기상관측소를 이용한 유출수문곡선(96-99)

표 1 기상관측소를 이용한 모형 적용결과

년도	강우 (mm)	관측유출량 (mm)	모의유출량 (mm)	R^2	ME	RMSE
1996	967.3	544.5	595.3	0.549	0.508	4.429
1997	1,309.3	774.8	1021.6	0.495	-0.014	3.976
1998	1,462.1	1,093.8	1030.6	0.749	0.749	9.375
1999	1,544.1	1,143.2	1128.4	0.452	0.432	9.677
96-99	5,282.8	3,549.6	3,782.7	0.562	0.494	5.925

4.3 강우관측소를 이용한 일유출 검정

SWAT 모형의 기본 방법(기상관측소 이용)을 이용하여 소양강댐 유역의 일 유출을 모의한 결과는 모형 효율계수 및 연 유출량을 측면에서 적절한 결과를 얻을 수 없었다. 강경석(2000)은 간헐 수문사상인 일 강우 계열을 모의하기 위해서는 강우의 시공간적 특성을 고려한 다지점 일 강우모형이 필요하다는 전제하에 다지점 일 강우모형에 의한 일 유출량을 모의하였다. 본 연구에서는 이를 위해 두번째 방법으로 나눈 소유역과 12개 강우관측소의 강우자료와 위치자료를 이용하였다. 그리고 강우관측소 자료를 기상관측소 자료로 이용하기 위하여 인제와 춘천의 기상자료를 이용하여 입력 기상자료를 구축하였다.

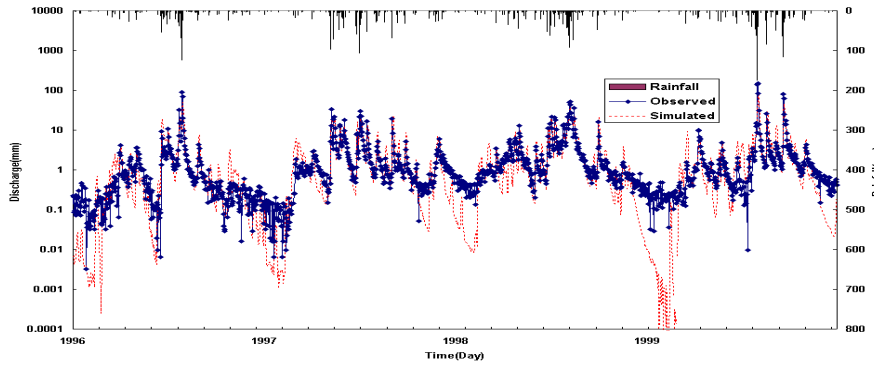


그림 4 강우관측소를 이용한 유출수문곡선(96-99)

그림 (4)는 구축된 자료를 이용하여 모의한 SWAT 모형의 결과이다. 표(2)의 결과값을 살펴보면, 대상기간 전반에 걸쳐 모형의 유의성을 검증하는 목적함수의 값들이 기상관측소만을 이용하는 경우보다 유효하게 나타났다. 특히 모형 효율계수가 음의 값(-0.014)이 나온 97년의 경우 0.465로 높아졌음을 알 수 있다. 그러나 여전히 동절기의 갈수유량은 관측치와 차이가 나타났다. 따라서 다지점 강우자료와 다분할된 소유역 외에도 모형의 갈수유량을 맞출 수 있는 매개변수의 최적화가 필요하다.

표 2 강우관측소 자료를 이용한 SWAT 모형 적용결과

년도	강우 (mm)	관측유출량 (mm)	모의유출량 (mm)	R^2	ME	RMSE
1996	967.3	544.5	617.78	0.575	0.574	4.126
1997	1,309.3	774.8	923.29	0.567	0.465	2.888
1998	1,462.1	1,093.8	1,055.83	0.777	0.820	2.859
1999	1,544.1	1,143.2	1,138.21	0.518	0.517	8.925
96-99	5,282.8	3,549.6	3,735.11	0.563	0.592	5.319

4.4 증발산량 산정 방법에 따른 일유출 검정

수문순환 과정에서 증발산량이 유출에 미치는 영향은 매우 크다. 본 연구에서는 3가지 증발산량 방법 (Penman-Monteith 방법, Priestley-Taylor 방법, Hargreaves 방법)에 따른 최적산정방법을 결정하였다.

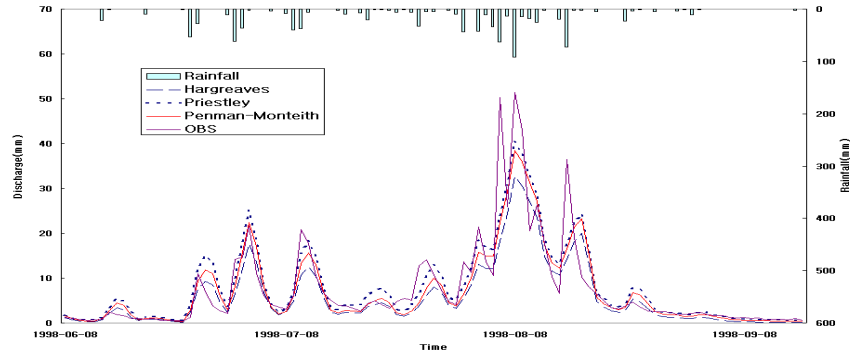


그림 5 홍수기의 증발산량 산정방법에 따른 일 유출 비교(98)

그림(5)는 98년 홍수기(6월-9월)를 대상기간으로 소양강댐 유입지점에서의 실측 유입량(또는 유출량)과 관측유입량을 비교한 것이다. 전반적으로 일유출 추세를 잘 반영하고 있는 듯 하나 98년 전체에 대한 보정을 실시한 결과 Priestley-Taylor 방법은 유출량을 과다 모의하였고, Hargreaves 방법은 과소 모의하였다. 따라서 소양강댐 유역에서의 증발산량 산정은 조금 더 많은 변수들의 영향을 고려한 Penman-Monteith 방법이 적합함을 알 수 있다.

4.5 매개변수의 보정 및 검증

위와 같이 3가지 방법을 통하여 적절한 소유역 구분과 기상자료의 입력 방법, 그리고 증발산량의 산정 방법을 결정하였지만 동절기의 갈수유량에 대한 결과는 적절하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 최종 모형의 보정(Calibration)을 강우의 공간분포를 반영할 수 있는 다음의 방법으로 적용하였다. 유역은 29개의 소유역으로 나누었으며 기상자료는 강우관측소 자료를 활용하여 구축하였다. 증발산량의 산정은 Penman-Monteith 방법을 이용하였다. 모형의 보정은 유역의 최종 출구점인 소양강댐 지점의 1998년 일 유입량 자료를 이용하였고, 검증(Verification)은 1996년, 1997년, 1999년 자료를 이용하였다. 매개변수 보정값은 표(3)과 같다.

표 3 매개변수의 기준값 및 보정값

입력과일	매개변수	하한치	상한치	보정값
*.mgt	CN ₂	35	98	▽7
*.gw	GWQMN	0	5000	2000
	ALPHA_BF	0	1	0.1
	GWREVAP	0.02	0.2	0.02
	REVAPMN	0	500	100
*.sol	SOL_AWC	0	1	▽0.08
*hru	ESCO	0	1	0.86

그림(6)은 보정된 매개변수를 이용하여 검증한 모형의 일 유출 수문곡선이다. 표(4)는 최종 모의결과를 정리한 것이다.

표 4 SWAT 모형에 의한 모의결과

	보정	검정			1996-1999
	1998	1996	1997	1999	
강우(mm)	1,462.1	967.3	1,309.3	1,544.1	5,282.8
관측유출량(mm)	1,093.8	544.5	774.8	1,143.2	3,549.6
모의유출량(mm)	1,060.5	621.2	929.9	1,144.1	3,751.7
R ²	0.778	0.578	0.569	0.518	0.601
ME	0.822	0.576	0.468	0.517	0.594
RMSE	2.850	4.113	2.882	8.925	5.307

표(4)에서 알 수 있듯이 모의기간 동안의 총 유출량은 보정과 검정시 모두 실측과 근사한 값을 보였다. 전반적으로 매개변수 보정전과 보정후의 차이는 아주 크게 나타나지는 않았다. 그러나 그림(6)에서 최종 모형의

결과는 매개변수 보정전과는 다르게 동절기의 갈수유량이 관측치와 비교적 잘 맞음을 알 수 있다.

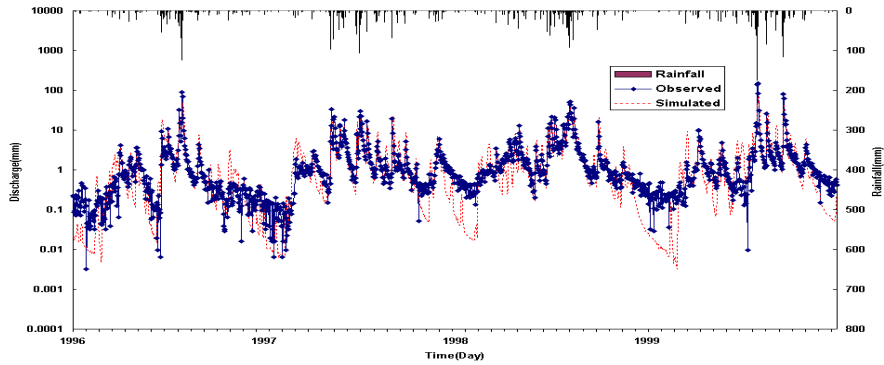


그림 6 소양강댐 지점의 1996-1999년 일 유출 수문곡선(검정)

5. 결론

본 연구에서는 소유역 구분 방법 및 강우관측소 자료의 사용 여부에 따라서 SWAT 모형을 모의했다. 그림(7)에서 알 수 있듯이 29개의 소유역으로 구분하여 다지점 강우자료를 이용한 방법이 관측 수문곡선과 더 잘 맞음을 확인할 수 있다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

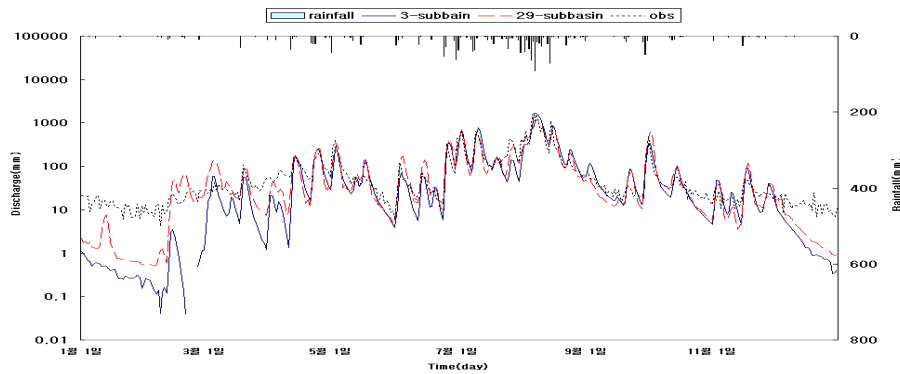


그림 7 모형의 유출량 보정결과 (98)

- (1) SWAT 모형의 다양한 증발산량 산정 방법을 적용한 결과, 관측 수문곡선은 비교적 모두 잘 반영하였으나 연 유출용적에서는 Priestley-Taylor 방법은 과다 모의하였고, Hargreaves 방법은 과소 모의하였다.
- (2) 29개의 소유역에 12개의 강우관측소와 2개의 기상관측소를 이용하여 일 유출량을 추정한 결과, 소양강댐의 관측수문곡선을 잘 재현하였으며 관측치와 연 유출량의 차이도 미비하게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

6. 참고문헌

1. 건설기술연구원 (2002). 장기-강우 유출모형 구조비교, 수자원의 지속적 확보기술개발사업 : 지표수 수문성분 해석기술 개발.
2. 김남원, 신성철, 김철검 (2003). SWAT 모형의 매개변수 민감도 분석, 대한토목학회 정기학술발표회.
3. K. Eckhardt, J.G. Arnold (2001). Automatic calibration of a distributed catchment model, Journal of Hydrology, 251, pp. 103-109.

5. K. Eckhardt, S. Haverkamp, N. Fohrer (2002). SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments, *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, pp. 641-644.