

# SWAT 모형을 이용한 기후변화에 따른 수문 과정과 잠재적 반응 모의

## Modelling of Hydrologic Processes and Potential Response to Climate change through the Use of a Multisite SWAT

### I. 서론

유역의 흐름 조건을 결정하는 수문·수리학적 과정의 동적이고 자연의 상호작용 모의를 위해 지표수와 지하수가 적절하게 결합된 모형의 이용을 필요로 한다. 또한 기후 변화의 다양한 잠재적 효과와 수자원의 무수한 방면에 영향을 미치는 다양한 평가도 필요하다.

반면 증가된 매개변수의 수와 모형 구조의 기초적인 차이를 가진 새로운 모형들은 구동시 직면하는 문제의 해결이 필요하다. 이러한 문제는 단측 보정 기술로는 한계가 있으며, 특히 대상 유역의 수자원 평가에는 다측 보정이 필요하다. 모형의 자료 정확성 개선, 모의된 과정의 보다 나은 파악과 개선된 계산 능력은 완전히 혹은 부분적인 결합 모형과 요구된 매개변수들의 인증에 따른 현실적으로 실현 가능한 구동, 적절한 구축과 동시에 다측 보정을 용이하게 한다.

최근 연구는 덴마크의 유역을 대상으로 준분포 모형인 SWAT을 이용하고 매개변수를 보정하여 확립된 보정치들 제공함으로써 현재 수문 상황의 평가와 기후변화의 영향에 따른 수량을 정량화한다. 본 연구에서는 모형을 구축하고, 민감도 분석과 관측된 수문자료를 기초한 모형의

검·보정하고 기후 상황의 변화에 따른 수문을 정량화하여 평가하였다.

### II. 재료 및 방법

#### 1. 대상유역

Havelse 유역은 250km<sup>2</sup>의 면적을 가지며, 덴마크의 질랜드 북부 지역의 12° 02' 07" E-55° 48' 54" 에서 12° 21' 59" E-55° 58' 47" 에 위치한다. 지역의 지리적 특성은 용해수 모래와 점토가 상층에 있고 깊은 곳은 백암층과 제 3기의 석회암 퇴적층으로 구성되어있다. 평균 고도는 5~10m이며, 전반적으로 하상 모래, 실트와 점토로 구성되어있다. 2000년 유럽의 Corine land cover(CLC) 분류를 기초하였으며, 농업 활동이 Havelse 유역의 주요한 토지이용이며, 그 외 도시, 산업 및 공업 지역과 광산, 인공적인 비농업 식생 지역, 초지, 산림, 토탄지와 수역으로 분류된다.

#### 2. 입력 자료

모형의 구동을 위한 입력 자료와 검·보정을

위한 디지털 고도 자료, 토양도, 기상과 유출 수문 자료를 구축하였다. 고도 자료는 Geological Survey of Denmark and Greenland(GEUS)에서 제공하는 100×100m 격자 해상도로 구축하였다.

토지 피복 정보는 CLC 지도로부터 추출하였다. SWAT에서 기본 자료에 상응하는 16개 식생종으로 분류되었다(Fig 1(a)).

SWAT 구동을 위한 모형의 토층은 토양 수문 그룹, 토심, 체적밀도, 가용토양수분능, 수리전도도, 유기탄소 함량, 점토, 모래와 실트의 비율 같은 물리적 특성을 포함한다(Fig 1(b)).

기상 자료 그룹 가운데 일 강수량은 10×10km 해상도의 자료를 GEUS로부터 공급받고, 입력된 자료는 Allerup et al.(1998)가 제안한 표준수정계수를 사용하여 교란적인 영향이 수정되었다. 최고, 최저온도, 일사량, 풍속와 상대습도의 일 자료는 1999년 1월부터 2005년 12월의 대상 유역에서 가까운 Sjaesmark 기상관측소

자료를 Danish Meteorological Institute(DMI)로부터 구축하였다.

모형의 보정을 위해 필요한 수문 자료는 6개 관측소의 1/1/1999-31/12/2003의 일별 유출량을 구축하였다.

### 3. SWAT과 VIZAWAT

SWAT(Arnold et al. 1998)는 물리화학적 기반으로 일단위 장기 유역 단위 연속 모형이다. 공용도메인이고 소스가 공개되어 사용자의 수정을 허용한다. AVSWAT은 SWAT의 입력 자료 작성을 위한 인터페이스로 ArcView GIS가 연계되었다. 동일한 토지피복과 토양도에 따라 구성된 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)는 SWAT의 가장 작은 공간 단위이다.

주요 입력자료는 유역 지형, 기후, 토양과 토지 피복 정보이다. 지하수의 상호작용은 SWAT의 두 개의 대수층을 고려하여 포함된다. 자유대수층은 유역의 하천으로 유입되며, 피압대수층은

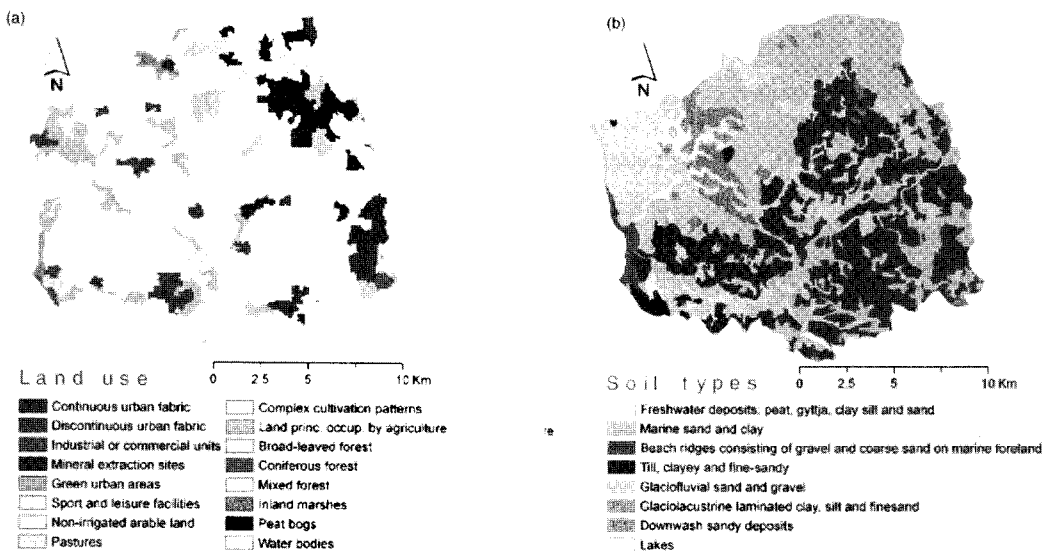


Fig 1. 입력 토지피복도와 토양도

유역 밖의 하천 유입에 기여한다(Arnold et al. 1998).

VIZSWAT 소프트웨어는 공간 자료 포맷과 시계열적으로 만드는 SWAT 결과 분석과 가시화를 위한 GIS 기반의 도구이다. GIS 기능과 통계적 자료를 사용하여 시계열 자료의 결합, 기본적인 통계치의 생성, 상호관계, 빈도, 흐름과 유황 분석을 용이하게 한다(Baird 2007).

#### 4 민감도 분석과 검보정

민감도, 검·보정 분석은 모형 연구의 매우 중요하게 요구된다. 민감도 분석을 위해 AVSWAT에서 사용된 LH-OAT 방법은 Morris(1991)가 제안한 One-factor-At-a-Time(OAT)를 기반으로 하고 Latine Hypercube(LH)를 적용한다(Francoset al. 2003; Srinivasan et al. 2006).

AVSWAT의 자동 보정은 민감도 분석의 결과를 기초로 한 최적화와 불확실성 분석을 고려한 Parasol(parameter solutions)방법을 사용한다(Srinivasan et al. 2006). 이 방법은 전역검색 알고리즘을 기반으로 한 shuffled complex evolution algorithm(SCE-UA)으로 명명된다(Duan 2003). 다측 보정은 다목적 함수의 정의로 수행되었다(White & Chaubey 2005; Migliaccio & Chaubey 2007). 보정 과정 동안 목적함수 값은 관측과 모의 사이에 차이를 나타낸다.

모의시 검증을 위해 표준 분리 검·보정 과정이 수행된다(Klemes 1986). 수문곡선의 전체적인

양상에 대한 고려없이 한 방면만 고려할 경우 잘못된 값을 추정할 수 있다. 결정계수 제곱(R<sup>2</sup>)과 Nash-Sutcliffe 모형계수(E)가 본 연구에 고려되었다. R<sup>2</sup>는 모의치와 관측치가 전혀 상응이 안 될 경우 0에서 모의 결과가 관측치와 같을 경우 1까지 나타낸다(Moriasi et al. 2007). E는 관측치의 분산에 관한 관측치와 모의치의 편차를 나타낸다. R<sup>2</sup>와 E는 1에 가까울수록 잘 예측된 모형이라 할 수 있다. Gassman et al.(2007)가 이전 SWAT 구동 연구에서 R<sup>2</sup>와 E의 통계치는 일, 월, 년 유출량 보정을 기반으로 계산되었다.

#### 5. 기후변화 시나리오 구축

지표 온도와 강수량의 두 개 상태변수는 전 지구적 온난화 정도와 기후변화와 직접적으로 연관되었다. IPCC에 따르면 지구의 평균 온도가 기후변화 정책에 따라 1990년에서 2000년 사이에 1.4-5.8℃ 정도 증가할 것이라고 하였다. 이와 관련해서 유럽연합은 산업화 이전의 수준에서 2℃이상 증가하지 않을 것으로 목표를 세웠지만 현재 온도는 그 수준에 이미 0.8℃에 도달하였다(IPCC 2001; EEA 2005). 덴마크의 연구지역의 수량에 대한 기후변화의 영향을 정량화하기 위해 평균 1℃의 지구 온난화가 연 평균 온도와 강수량이 각각 1.1℃와 2.4%으로 고려되고 추가적으로 PRUDENCE 설계의 유럽 규모의 평가에 따라 Table 1의 계절적 변화가 고려된다(PRUDENCE 2005). 본 연구에서는 계절적 평균 변화율은 기후변화에 대한 수량의

Table 1. 지구의 1℃ 온난화에 따른 덴마크의 강수량과 최고, 저온도 변화 예측

	December, January, February	March, April, May	June, July, August	September, October, November	Annual
△P	9.8%	3.6%	-6.4%	1.5%	2.4%
△Tmax	1.4℃	1.4℃	1.4℃	1.6℃	1.4℃
△Tmin	0.6℃	0.6℃	0.7℃	0.9℃	0.7℃

Table 2. 민감도 분석 결과

The most sensitive parameters	Parameter definition	Ranks of the parameters
CN2	Initial SCS CN II value	1
SOL-Z	Soil depth (mm)	2
ESCO	Soil evaporation compensation factor	3
SMTMP	Snow melt base temperature (1C)	4
SOL-AWC	Available water capacity (mmH <sub>2</sub> O/mm soil)	5

SWAT 모의의 입력 값인 일 강수량, 최고, 저 온도를 수정하는데 사용된다.

### 6. SWAT 구축

SWAT의 모형 구동의 첫단계로 AVSWAT를 이용하여 고도와 역치값을 입력하여 Havelse 지역의 경계를 작성하였다. 본 연구 지역은 보정 지점에 따라 각 소유역의 유출구를 정하여 62의 소유역으로 나누었다. 상대습도, 일사량, 풍속과 온도 극한값은 기상 자료에 따라 정량화 하였다. 강수량 자료는 격자 단위로 사용되었다. 증발산량은 Penman - Monteith 방법을 사용하였다.

## Ⅲ. 결과 및 고찰

### 1. 민감도와 검·보정 결과

보정에 필요한 매개변수의 총 개수를 줄이기 위해 민감도 분석은 LH-OAT를 사용하여

SWAT 40개이상의 매개변수 분석하고 AVSWAT의 민감도 분석 도구를 사용하여 Table 2와 같이 민감한 매개변수의 순위를 정하였다. 가장 민감한 매개변수는 CN2로 함수 조건 II 일 때 SCS 유출곡선 지수이다. 토양 증발 보상 계수 ESCO는 모세관현상, crusting과 crack의 계산으로 토양의 증발의 깊이별 분포를 정해주는 매개변수이다. SOL-AWC는 토양의 포장용수량 중 식생이 사용할 수 있는 수량이며, AWC의 감소는 기저유량, 배수, 지표 흐름과 물 생산량의 감소로 물수지 구성 요소들과 역관계를 가진다.

민감도 분석에 따르면 SWAT의 일별 보정은 검정 기간을 남겨두고 1/1/1999에서 31/12/2001의 자료를 사용하였다. 5개 민감한 매개변수를 이용한 자동 보정 결과 Table 3과 같은 통계치를 작성하였다.

민감도 분석에 따른 첫 모의는 과대모의되므로 기저유출 증가와 지표수 감소의 추가적인 보정이 필요하다. 이러한 이유로 5개 매개변수 지하수 과정 관련된 4개 매개변수와 하천 특성에

Table 3. Havelse 지역의 초기 보정 통계치

Period	Analysis	Station name	R <sup>2</sup>	E
1 January 1999 ~ 31 December 2001	Calibration	Gr # se (52.52)	0.23	0.11
1 January 1999 ~ 31 December 2001	Calibration	L yngby	0.30	0.05
1 January 1999 ~ 31 December 2001	Calibration	Æ belholt	0.26	-0.05
1 January 1999 ~ 31 December 2001	Calibration	Havelse	0.29	-0.05
1 January 1999 ~ 31 December 2001	Calibration	Gr # se (52.07)	0.17	-0.13
1 January 1999 ~ 31 December 2001	Calibration	Koller ϕ d	0.20	-0.17

Table 4. 최종 매개변수

Calibration parameters	Initial estimations	Calibrated values
CN2	-a	22%
SOL-Z (mm)	-b	-24%
ESCO	0.95	0.00018
SMTMP (°C)	0.50	0.11
SOL-AWC (mmH <sub>2</sub> O/mm soil)	-b	-24%
Alpha-Bf (days)	0.048	0.12
GW-Delay (days)	31	48.84
GW-Revap	0.02	0.20
Revapmin (mm)	1	0.018
CH-K2 (mm/h)	0	101.48

<sup>a</sup> AVSWAT에서 계산된 초기값

<sup>b</sup> 자료로부터 계산된 값

관련된 매개변수를 포함하여 총 5개 매개변수가 추가적으로 침투와 중간과 기저흐름 감수를 적절하게 표현할 수 있게 선택되고 고려된다. (i) 지하수 지체 시간(GW-Delay, day)은 뿌리 영역에서 천층 대수층에 도달하는 기간, (ii) 깊은 식생 뿌리로부터 직접적인 지하수 흡입과 수분 부족으로 수분의 천층 대수층에서 뿌리 영역으로의 이동에 관련된 지하수 'revap' 계수 (GW-Revap) (iii) 깊은 대수층로의 침투와 'revap'가 일어나는 천층 대수층의 수분 역치

깊이(Revapmin), (iv) 지하수 감수 곡선에 영향을 미치는 기저유출 알파 요인(Alpha-Bf), (v) 주하천의 유효수리전도도(CH-K2)가 추가된다. 5개 매개변수를 이용하여 다시 보정을 실시한 결과는 최종적으로 보정된 매개변수는 Table 4와 같으며, 보정 결과 통계치는 Table 5와 같다.

Table 1과 같이 지구 평균 1도 증가에 따른 온도와 강수량 변화가 고려되어 모의되었다. 평균 유출량 결과를 2개의 관측소에 대하여 연별, 3개월 기간으로 비교하였다.

Table 5. 최종 검 · 보정 통계치

Station name	Simulation type	Stream flow		Stream flow		Stream flow	
		R2	E	R2	E	R2	E
Grase (52.52)	Calibration	0.55	0.48	0.53	0.40	0.58	0.27
	Validation	0.64	0.50	0.69	0.45	0.39	0.10
Havelse	Calibration	0.62	0.31	0.62	0.21	0.65	0.53
	Validation	0.65	0.38	0.72	0.32	0.43	0.34
Æbelholt	Calibration	0.22	0.12	0.62	0.42	0.12	0.05
	Validation	0.06	0.03	0.67	0.63	0.03	0.00
Lyngby	Calibration	0.27	0.19	0.65	0.56	0.15	0.09
	Validation	0.04	0.03	0.26	0.13	0.02	0.01
Grase (52.07)	Calibration	0.38	0.02	0.53	0.01	0.24	0.07
	Validation	0.39	0.12	0.69	-0.08	0.16	0.13
Kollerød	Calibration	0.29	0.01	0.54	-0.22	0.12	0.12
	Validation	0.19	-0.01	0.67	-0.10	0.05	0.05

Table 6. 2개 하천 관측소의 모의된 변화

	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Annual
Havelse station					
Mean observed flow (m <sup>3</sup> /s)	1.00	0.72	0.32	0.41	0.62
Simulated change (%)	8.32	7.96	-16.18	-4.91	2.53
Simulated change in mean observed flow (m <sup>3</sup> /s)	0.083	0.057	-0.052	-0.020	0.016
Mean scenario flow (m <sup>3</sup> /s)	1.08	0.78	0.27	0.39	0.64
Græse(52.52) station					
Mean observed flow (m <sup>3</sup> /s)	0.24	0.18	0.09	0.10	0.15
Simulated change (%)	8.06	7.20	-14.77	-3.30	2.32
Simulated change in mean observed flow (m <sup>3</sup> /s)	0.018	0.013	-0.013	-0.003	0.004
Mean scenario flow (m <sup>3</sup> /s)	0.26	0.19	0.08	0.10	0.15

Table 6은 나타난 결과 연간 하천유출량은 지구온난화에 대해 상대적으로 변화 때문에 2.5% 가까이 증가하는 것으로 예측되었고 영향은 Græse (52.52) 관측소보다 큰 배수지역과 높은 유출량을 가진 Havelse 관측소의 유출량이 조금 높을 수 있다.

#### IV. 결론

(1) 본 연구는 SWAT의 검·보정과 민감도 분석을 체계적인 과정을 통해 현재 흐름 양상을 평가하고 덴마크의 Havelse 유역의 기후변화에 따른 수량의 지역적 정량화한다.

(2) SWAT의 지동 민감도 분석과 보정 도구를 이용하여 모형 매개변수의 적절한 설정과 주요 분석 결과를 이용하여 더욱 효율적인 모의를 유도한다. 다측 보정은 매개변수의 최적화를 위한 모든 시험 중 다른 보정측 가운데 가장 적절한 값을 요구한다. 모형의 민감도 분석과 다측 보정은 2단계를 거친다: 먼저 사용할 수 있는 자동화된 수단을 사용하고 보정 매개변수가 작성된다.

(3) 보정의 적절한 설정은 유량지점과 토지피복

변화, 유역 사이의 수문학적 접속성과 초기 평가로부터 6개 관측소의 전체 설정 결과를 평가함으로써 실행된다. 모형의 일별 보정과 검증은 기저유출과 지표, 지하수 흐름 구성에 상응하는 하천 유출량을 관측치와 모의치의 일반적인 모형 통계치(R<sup>2</sup>, E)를 기반으로 하였다. 이러한 통계치는 주로 일반적으로 받아들일 수 있는 한계 가운데 변화하고, 본 연구 결과 'good' 모의로 나타났다. 보정된 일별 수문곡선을 통한 육안검사는 관측치와 모의치가 잘 맞는 것으로 나타났다.

(4) 지구의 1°C 온난화에 대한 강수량과 온도에 따라 Havelse와 Græse 강의 연평균 하천 유출량이 2.5% 증가한다.

(5) 결과의 타당성은 Havelse 유역 시스템의 2개의 관측소의 기후변화 따른 수량의 정량화의 평가뿐 아니라 유사한 대기 입력 특성 모두 기준년과 모의 기간(건기, 습기, 과도기) 연평균의 변화 평가에만 단기 모의에 사용되는 초기 가정과 연관된다.

## 참고문헌

1. Allerup, P., Madsen, H. and Vejen, F., 1998. Standardværdier (1961-90) af nedbrkorrektioner. Technical Report 98-10, Danish Meteorological Institute, in Danish, Denmark.
2. Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. and Williams, J.R., 1998. Large Area Hydrological Modelling and Assessment Part I: Model Development. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 34 (1), pp.73~89.
3. Baird, 2007. A visualization tool for the SWAT model, User manual for VIZSWAT Ver. 1-1, Baird & Associates, Madison, WI, USA.
4. Duan, Q., 2003. Global Optimization for Watershed Model Calibration. In Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, H.V., Rousseau, A.N. and Turcotte, R. (eds), *Calibration of Watershed Models*, AGU, Washington, DC. pp.89~104.
5. Francos, A., Elorza, F.J., Bouraoui, F., Galbiati, L. and Bidoglio, G., 2003. Sensitivity Analysis of Distributed Environmental Simulation Models: Understanding the Model Behaviour in Hydrological Studies at the Catchment Scale. *Reliab. Eng. Syst. Safe.*, 79 (2), pp.205~218.
6. Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. and Arnold, J.G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Trans. ASABE*, 50 (4), pp.1211~1250.
7. Klemes, V., 1986. Operational Testing of Hydrological Simulation Models. *Hydro. Sci. J.*, 31, pp.13~24.
8. Migliaccio, K.W. and Chaubey, I., 2007. Comment on Cao W, Bowden BW, Davie T, Fenemor A. 2006. "Multi-Variable and Multi-site Calibration and Validation of SWAT in a Large Mountainous Catchment with High Spatial Variability." *Hydrological Processes* 20 (5), pp.1057~1073. *Hydro. Process.*, 21, pp.3226~3228.
9. Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D. and Veith, T.L., 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans ASABE*, 50 (3), pp.885~900.
10. Morris, M.D., 1991. Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33 (2), pp.161~174.
11. Nash, J.E. and Sutcliffe, J.E., 1970. River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part I - A Discussion of Principles. *J. Hydrol.*, 10, pp.282~290.
12. Srinivasan, R., Jacobs, J.H., Uhlebrook, S., van Griensven, A., Holvoet, K. and Bauwens, W., 2006. Soil and Water Assessment Tool. European SWAT Summer School Handouts, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands.
13. White, K.L. and Chaubey, I., 2005. Sensitivity Analysis, Calibration, and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 41 (5), pp.1077~1089.

## 출 처

G. Onusluel Gul and D. Rosbjerg  
*Water and Environment Journal* 2009. 3. 1