

SWAT을 이용한 기후변화의 수문학적 영향평가를 위한 Proxy-basin Differential Split-Sampling 및 Blind-Validation 테스트 적용

Application of Proxy-basin Differential Split-Sampling and Blind-Validation Tests for Evaluating Hydrological Impact of Climate Change Using SWAT

손 경 호* / 김 정 곤**

Son, Kyongho / Kim, Jeongkon

Abstract

As hydrological models have been progressively developed, they are recognized as appropriate tools to manage water resources. Especially, the need to evaluate the effects of landuse and climate change on hydrological phenomena has been increased, which requires powerful validation methods for the hydrological models to be employed. As measured streamflow data at many locations may not be available, or include significant errors in application of hydrological models, streamflow data simulated by models only might be used to conduct hydrological analysis. In many cases, reducing errors in model simulations requires a powerful model validation method. In this research, we demonstrated a validation methodology of SWAT model using observed flow in two basins with different physical characteristics. First, we selected two basins, Gap-cheon basin and Yongdam basin located in the Guem River Basin, showing different hydrological characteristics. Next, the methodology developed to estimate parameter values for the Gap-cheon basin was applied for estimating those for the Yongdam basin without calibration a priori, and sought for validation of the SWAT. Application result with SWAT for Yongdam basin showed R_{eff} ranging from 0.49 to 0.85, and R^2 from 0.49 to 0.84. As well, comparison of predicted flow and measured flow in each subbasin showed reasonable agreement. Furthermore, the model reproduced the whole trends of measured total flow and low flow, though peak flows were rather underestimated. The results of this study suggest that SWAT can be applied for predicting effects of future climate and landuse changes on flow variability in river basins. However, additional studies are recommended to further verify the validity of the mixed method in other river basins.

keywords : SWAT, Climate change, Proxy-basin differential split-sampling, Blind-validation

요 지

수문 모형의 발전이 거듭되면서, 최적 수자원의 관리를 위한 적절한 방법으로 인식되고 있다. 특히 수자원관리에

* 한국수자원공사 수자원연구원 연구원

Researcher, Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

** 교신저자, 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원

Principal Researcher, Korea Institute of Water and Environment, Korea Water Resources Corporation, Daejeon, Korea

(Corresponding Author, e-mail: jkkim@kwater.or.kr)

있어서 토지이용 변화 및 기후 변화에 따른 수문학적 영향 평가에 대한 요구가 증가하고 있다. 이 영향들을 평가하기 위해서는 우선 적용된 수문 모형의 강력한 검증이 요구된다. 그리고 수문모형의 적용 시 많은 지점에서 유량이 미 계측 되었거나, 측정된 자료마저 많은 오차를 포함하고 있는 경우가 있기 때문에 모형의 예측 값을 이용하여 수문분석이 이루어지는 경우가 많다. 이와 같은 경우에는 모형 결과 값에 대한 오차를 줄이기 위해서 강력한 모형 검증방법이 요구된다. 본 연구에서는 다른 물리적 특성을 가진 두 유역을 대상에 측정 유량을 통한 SWAT 모형의 검증 방법을 증명하고자 하였다. 이를 위하여, 금강유역에 위치한 수문학적 특징이 상이한 갑천유역과 용담유역을 선정하여, 먼저 갑천유역에 대하여 정밀한 검·보정을 실시하고, 갑천유역에서 개발된 방법론을 용담유역에 적용하여 모형의 검증을 시도하였다. 용담유역에 대하여 SWAT 모형을 적용한 결과 각 소유 역에서 R_{eff} 는 0.49 ~ 0.85, R^2 는 0.49 ~ 0.84로 모형은 관찰 값을 양호하게 모의하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 모의 결과는 첨두유량 값은 다소 과소 산정하였지만, 전체적인 경향 및 기저유출량을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과로부터 SWAT모형은 향후 토지이용변화 및 기후변화에 따른 유역특성변화 분석에 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 본 연구에서 사용된 혼용기법의 신뢰성을 높이기 위해서는 향후 추가적인 유역에 대한 방법론의 타당성 검증 절차를 거쳐야 할 것으로 사료된다.

핵심용어 : SWAT, 기후변화, Proxy-basin differential split-sampling, Blind-validation

1. 서 론

물리적 기반의 수문모형들은 수자원 관리에 활용 가능성이 있지만, 모형의 구성 및 모형에 사용된 각 매개변수들의 신뢰성 있는 추정을 위해서는 측정 자료가 많이 요구된다. 하지만, 현장에서 측정된 자료로부터 모든 매개변수들을 추정할 수 없는 경우가 빈번하기 때문에 추정된 매개변수들의 신뢰성에 대한 의문이 대두되는 경우가 많다. 특히 수문 모형을 이용한 토지이용도 및 기후변화 등과 같은 수문학적 현상의 영향을 모의하기 위해서는 모형의 구조뿐만 아니라 매개변수 값의 유효성에 대한 기대치는 더 높게 된다. 한 예로, Mroczkowski *et al.*(1997)은 CATPRO 모형(Pitman, 1978)을 산림의 제거와 같은 변화를 겪은 Wights 유역과 급격한 토지 이용도 변화가 없는 Salmon 유역에 적용하여, 유출량의 변화만으로 검·보정된 모형과 Chloride 및 지하수 수위를 이용하여 검·보정된 모형의 적용결과를 비교·분석 하였다. 그 결과 토지 이용도 변화가 없는 유역의 경우 유출량만으로 검·보정된 모형과 염소이온 및 지하수 수위로 검·보정된 모형 간에 큰 차이를 발견 할 수 없었으나, 토지 이용의 변화가 큰 Wights 유역의 경우에는 유출량만으로 검증된 모형은 측정된 염소이온과 지하수 수위를 정확히 예측할 수 없었다. 그러므로 토지이용도변화 및 기후변화 등에 의한 수문학적 변화를 모의하기 위해서는 좀 더 세밀하고 개선된 모형 검증방법이 요구된다(Klemes, 1986).

수자원관리를 목적으로 유역의 수문분석 시, 측정유량을 이용한 분석방법과 모형결과 값을 이용하는 방법

이 있다. 측정유량을 이용하는 경우, 실제 관심 있는 모든 지점에서 유량 측정을 위해서는 인력과 시간 부족과 같은 문제점이 발생하기 때문에, 미 계측지점의 수문분석을 위해서는 수문모형의 사용이 불가피하다. 한편, 수문모형을 사용하는 경우 모형결과의 유효성에 대한 평가는 객관적으로 실시하여야 하고, 만일 평가 과정을 거치지 않고 분석이 이루어진다면, 실측자료에 비해 많은 오차를 야기하게 될 것이다. 그러므로 효율적인 수자원관리를 위한 수문모형의 적용을 위해서는 위에서 언급된 문제들을 최소화하기 위한 모형의 검증방법이 요구된다.

일반적으로 사용되는 검증방법은 측정유량을 이용한 Split-Sampling 방법을 들 수 있다. 이 방법은 한 유역의 일정 기간을 보정과 검증단계로 나누어, 보정기간에 추정된 매개변수 값을 이용하여 검증기간의 입력자료(강우, 기상)만을 바꾸어서 모형이 측정값을 재현할 수 있는지를 검증한다. 하지만 이 방법은 보정된 매개변수가 시스템의 변화(토지이용변화, 기후변화, 등)를 겪는 경우 이에 대한 설명이 불가능하고, 한 유역에서 다른 형태의 구조를 가진 모형을 적용할 경우 어떤 모형이 더 적합한지에 대한 분별력을 잃는 등 여러 가지 구조적인 문제가 있음이 많은 연구에서 지적되었다(Uhlenbrook *et al.*, 1999; Hooper *et al.*, 1988; Refsgaard, 1997). 예를 들면, Uhlenbrook *et al.*(1999)은 HBV모형(Bergström and Forsman, 1973) 적용 시, 다른 형태의 모형구조를 구성하여 모형이 측정유량을 재현해 낼 수 있는지 알아 본 결과, 모형구조들 중에는 적용지역의 유역특성에 반하는 특성을 가졌지만 측정

유량을 잘 모의하는 경우도 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 단순한 Split-Sampling 방법은 어떤 모형이 해당 유역을 반영하는 적합한 구조를 가졌는지를 구분해 내지 못하는 단점이 있다.

이외의 방법으로는 다른 형태의 측정 자료를 이용하여 모형의 검증을 시도하는 방법이 있다. 그 예로는 보존성 물질, 지하수 수위, 그리고 토양수분 등을 들 수 있다. Seibert and McDonnell(2002)은 지하수 수위와 동위원소를 이용한 수문곡선 분리방법으로 부터 산출된 함양 된지 오래된 물(old water)과 최근에 함양된 물(new water)의 비율을 모형의 검증에 이용하였고, Franks *et al.*(1997)은 관측된 습윤지역면적을 이용한 TOPMODEL의 검증 시 투수계수의 매개변수 값의 불확실성이 낮아짐을 증명하였다. 그러나 실제로 대부분의 유역에는 위와 같은 측정자료가 없기 때문에 침투유량 부분이나 기저유출부분과 같은 수문곡선의 여러 측면을 나누어 보정하는 방법(Boyle *et al.*, 2000), 다른 강우특성을 가진 기간을 나누어 한 구간은 보정기간으로 나머지 구간은 검증기간으로 이용하는 방법(Differential Split-Sampling Test), 기후나 토지의 특성이 다른 두 유역을 대상으로 한 유역에서 보정된 매개변수 값을 다른 유역에 적용하여 그 매개변수의 유효성을 평가하는 방법(Proxy-Basin Differential Split-Sampling), 또는 마지막으로 모형의 보정 전 단계부터 모형의 검증목적으로 사용될 측정자료에 대한 이용 없이 유역의 측정자료로부터 모든 매개변수 값과 모형구조를 구성하여 모형을 검증하는 방법(Blind-Validation Test) 등이 이용되고 있다(Klemes, 1986; Ewen *et al.*, 1996; Xu, 1999).

본 연구의 대상유역은 금강유역에 위치한 두 유역인 갑천유역과 용담유역이다. 갑천유역의 경우, 기존연구에서 김정곤 등(2006a)이 Soil and Water Analysis Tool (SWAT, Neitsch *et al.*, 2002) 모형을 이용하여 물순환 분석시스템을 구축한 사례가 있다. 그 연구에서 모형의 구조와 추정된 매개변수 값의 검증을 위해서 다목적·다지점 검증방법이 시도되었다. 사용된 검증방법은 세 가지로, 첫째로 최종 유역의 출구 점에서 측정된 유출량뿐만 아니라, 각 주요 수계지점에서 측정된 유출량을 이용한 모형의 검증, 두 번째로는 recursive digital filter(Arnold *et al.*, 2000)를 이용한 기저유출량 산정을 통한 기저유출량 예측에 관련된 모형검증, 마지막으로 측정된 지하수 수위를 이용하여 모형의 검증을 실시하였다. 이러한 검증결과로 갑천유역에 대하여 신뢰성 높은 물순환분석시스템을 구축하여 물수지 분석을 실시하고, 토지이용변화에 따른 물순환 변화를 고찰하였다

(김정곤 등, 2006b). 기존의 연구가 다목적함수를 통한 모형의 검증이었다면, 본 연구는 유역에서 유량자료만이 존재하거나 자료의 불량, 혹은 미 측정된 경우가 빈번한 경우에 적용 가능한 검증방법(Proxy Basin Differential Split-Sampling, Blind-Validation)을 시도했다는 데 큰 의미가 있다. 본 연구에 이용된 검증방법은 서로 다른 특성을 가진 갑천유역과 용담유역에 SWAT 모형을 적용함으로써, 향후 토지이용변화나 기후변화에 따른 수문학적인 변화분석에 이용될 수 있을 것이다(Klemes, 1986; Ewen *et al.*, 1996; Xu, 1999).

2. 유역 현황

금강유역은 유역면적이 9,835.3 km², 본류의 유로연장은 395.9 km, 유역의 평균 폭은 24.8 km, 유역 형상계수는 0.063이다. 본 연구에서는 유역의 최상류에 위치한 용담유역과 중류에 위치한 갑천유역을 선택하였다 (Fig. 1).

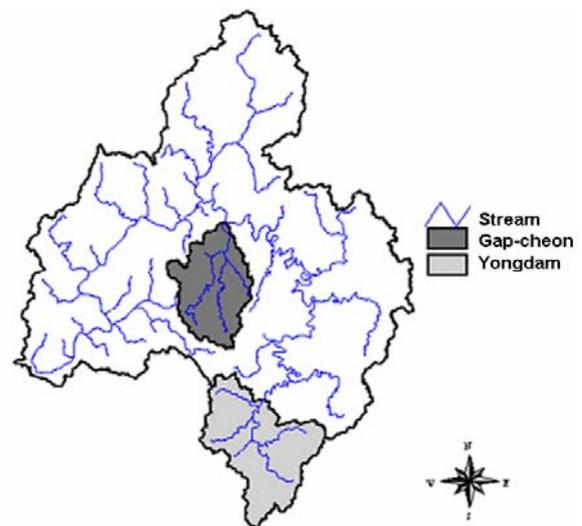


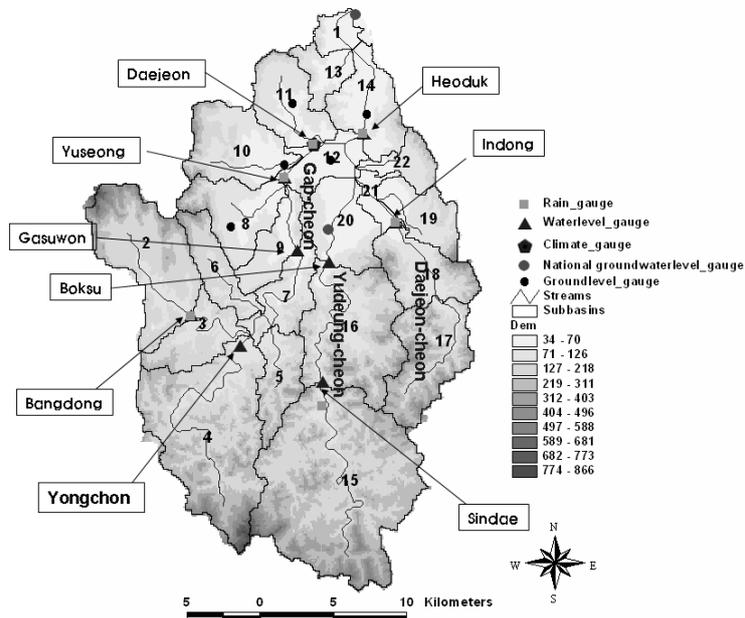
Fig. 1. Geum River Basin and Locations of Gap-cheon and Yongdam Basins in the Geum River Basin

2.1. 갑천유역

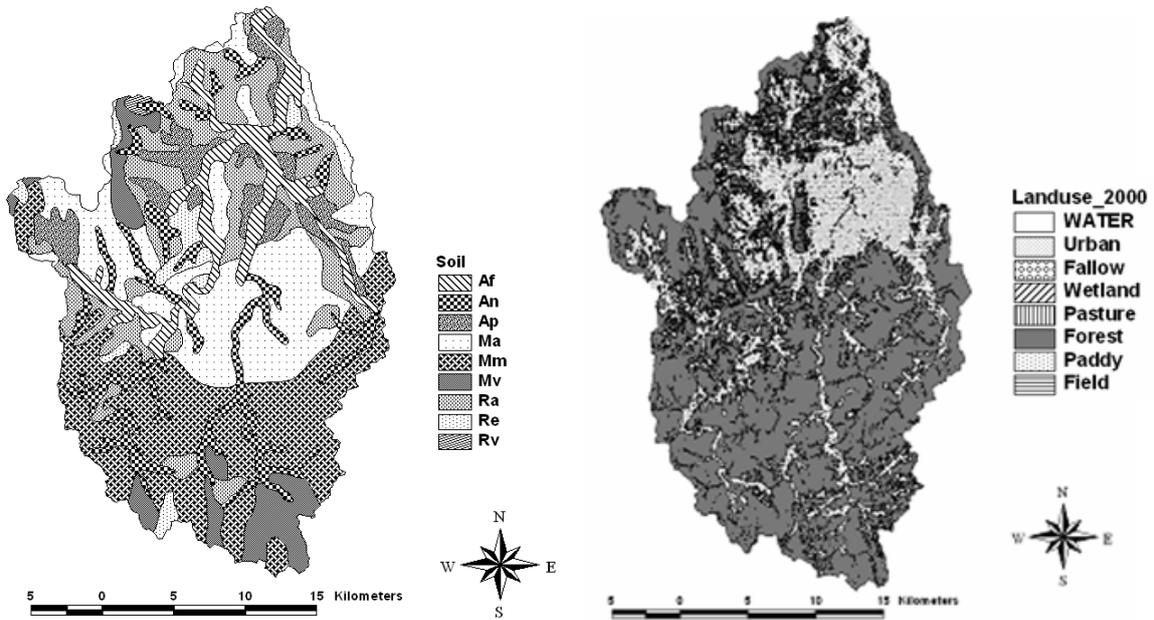
금강 유역의 중류에 위치한 갑천유역은 유역면적이 648.3 km², 유로연장이 60.0 km, 형상계수가 약 0.12인 비교적 장방형 형상을 하고 있으며, 대전광역시 시가지 중심부를 관류하는 갑천 본류 및 큰 두 지류인 유등천과 대전천으로 구성되어 있다(Fig. 2). 유역의 고도는 최저 EL. 34 m에서 최고 EL. 866 m까지 분포하고 있다. 배수가 양호한 사양질(Ma, Mm) 토양이 전체 유역의 45% 가량을 차지하며, 하천 수계를 따라 식양질(Af와 An) 토양이 분포하고 산악지역은 대부분 Mm이 차지하

고 있다. Gapcheon유역의 토지이용은 산림 지역이 59.8% 차지하며, 도시지역은 10.5% 차지하고 있다. 상류지역은 대부분 산림지역을 이루고 있고 하류 지역은 도시화가

많이 진행된 상태이며 하천을 따라 논이 많이 분포되어 있다(Table 1).



(a) DEM and location of gauging stations



(b) Soil map

(c) Landuse map

Fig. 2. Characteristics of Gap-cheon Basin (after Kim *et al.*, 2006a)

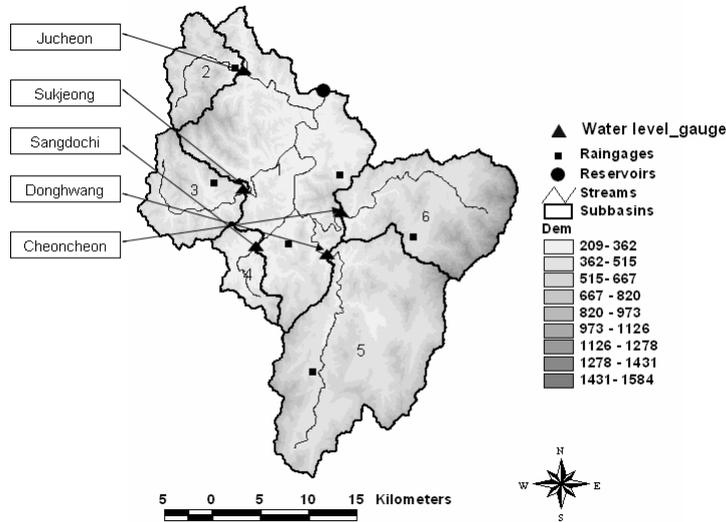
Table 1. Landuse Characteristics of Gap-cheon Basin (Year 2000)

Total	Water (water)	Urban (urld)	Fallow (agrc)	Wetland (wet)	Pasture (past)	Forest (frst)	Paddy (rice)	Field (agrr)
648.3(km ²)	1.44	67.83	7.78	0.02	25.68	388.35	101.64	56.24
100(%)	0.22	10.45	1.20	0.0	3.96	59.84	15.66	8.67

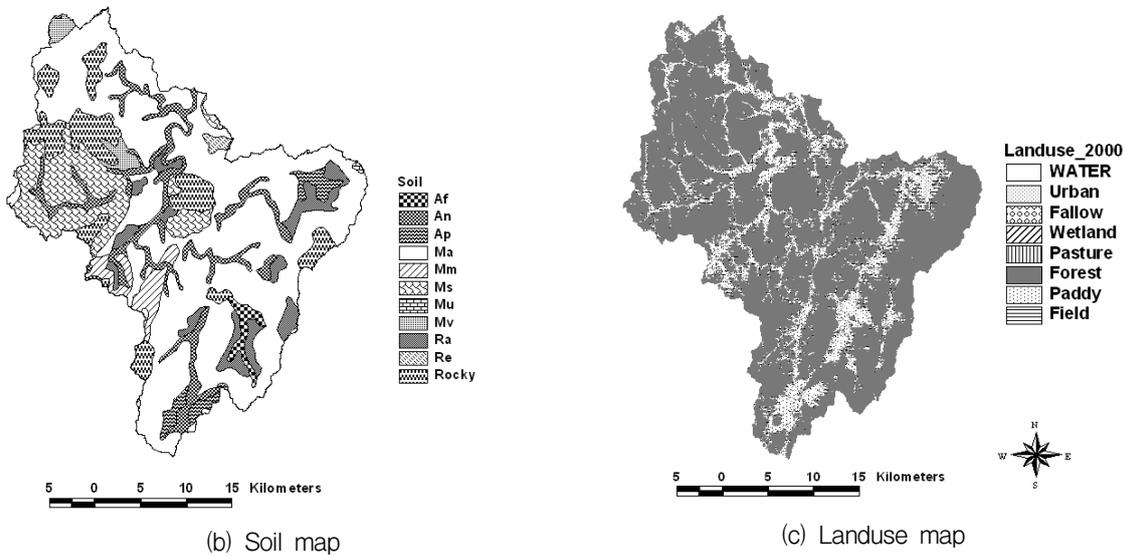
2.2. 용담유역

용담유역은 금강의 최상류에 위치하며 면적은 930 km²로 금강 유역 면적의 약 9.45%를 차지한다(Fig. 3). 유역의 고도는 최저 EL. 205 m에서 최고 EL. 1587 m 까지 분포하고 있으며, 용담댐의 만수위는 EL. 263.5 m 로서 유역 전체가 고 지대에 위치한다. 이 유역은 아직

도시화가 이루어지지 않은 전형적인 농촌지역으로서, 임야를 제외하면 전답 등의 농업으로 이용되는 토지가 주를 이루고 있다(Table 2). 특히, 암쇄토 및 적확생토 (Ma)가 55%정도로 가장 높은 비율을 차지하여, 주로 배수가 매우 양호한 식양질 또는 사양질로 이루어져 있다(Table 3).



(a) DEM and location of gauging stations



(b) Soil map

(c) Landuse map

Fig. 3. Characteristics of Yongdam Basin

Table 2. Landuse Characteristics of Yongdam Basin (Year 2000)

Total	Water (water)	Urban (url)	Fallow (agrc)	Wetland (wet)	Pasture (past)	Forest (frst)	Paddy (rice)	Field (agrr)
930(km ²)	1.01	26.92	1.80	0.00	25.49	741.51	83.22	50.05
100(%)	0.11	2.89	0.19	0.00	2.74	79.73	8.95	5.38

Table 3. Soil Type and Properties in Gap-cheon and Yongdam Basins

Soil name	Soil type	Soil depth (m)	AWC (cm ³ /cm ³)	K_{sat} (cm/h)	Area (%)	
					Gap-cheon	Yongdam
Af	silty clay loam	1.0	0.18	0.50	9.36	1.18
An	clay loam	1.0	0.15	0.27	10.63	9.83
Ap	silty clay loam	1.5	0.18	0.50	7.39	2.82
Ma	sandy loam	1.5	0.1	5.3	21.50	54.78
Mm	sandy loam	0.7	0.1	5.3	22.33	2.90
Mv	sandy loam	0.5	0.1	5.3	6.94	1.46
Ra	sandy loam	1.5	0.12	1.8	16.62	6.07
Re	silty loam	0.5	0.18	1.0	2.70	0.41
Rv	silty loam	1.0	0.18	1.0	0.20	0.0
Ms	sandy loam	0.5	0.07	4.3	0.0	11.33
Mu	sandy loam	1.0	0.10	5.0	0.0	0.1
Rocky	Rocky	0.1	0.02	0.1	0.0	9.53

Table 4. Comparison of the Properties of Gap-cheon and Yongdam Basins

Properties	Gap-cheon	Yongdam	Note
Area	648.3 km ²	930 km ²	
Major Landuse	Forest (59.8%)	Forest (79.7%)	- Ratio of urban area : Gap-cheon = 10.4% and Yongdam = 2.9%
Major Soil Type	Mm	Ma	- Mm : Lithosols, Micaceous and Hard Siliceous Materials, silty loam or sandy loam (Gap-cheon : 22.3% and Yongdam : 2.9%) - Ma : Lithosols, Siliceous Crystalline Materials, silty loam or sandy loam (Gap-cheon : 21.5% and Yongdam : 54.8%)
Average Annual Precipitation (Year 2001-04)	1,297 mm	1,699 mm	
Channel Length	60.0 km	62.6 km	
Altitude	34~866 m	205~1,587 m	

2.3. 유역 비교

갑천유역과 용담유역의 토양종류 및 유역특성을 Table 3과 Table 4에 나타내었다. 유역면적의 경우 용담유역이 1.4배 넓고, 평균고도의 경우 용담유역 (EL. 205~1587 m)이 갑천유역(EL. 34~866 m)보다 높다. 토지이용의 경우 용담유역은 갑천유역에 비해 상대적으로 산지가 많고, 도시지역 비율이 낮은 양상을 보인다. 그리고 토양의 경우 용담은 Ma가 55%의 지배적이고, 이에 비해 갑천유역은 다양한 토양특성을 보이면서 Ma와 Mm이 45%를 차지하고 하천을 따라서는 Af와 An이 분포되어 있다. 두 유역의 유로 연장은 갑천유역은 60.0 km이며, 용담유역은 62.6 km로 비슷하다.

3. 연구방법 및 모형 구축

3.1 Proxy-Basin Differential Split-Sampling (PBDS) 테스트

Klemes(1986)는 수문모형의 검증에 관한 문제점에 대해서 지적하면서, 모형의 검증을 위한 방법으로, Split-Sampling(SS), Differential Split-Sampling(DSS), Proxy-Basin(PB), Proxy-Basin Differential Split-Sampling(PBDS) 등과 같은 테스트 방법을 제시하고 정리하였다. 이 방법 중 PBDS 방법은 가장 어려운 모형검증 방법으로써, 다른 방법에 비해 유역의 특성을 더 잘 반영한 모형구조 및 매개변수 값들을 요구한다. 이 방법은 우선적으로 두 유역을 이용하고, 각 유역의 측정 시간별 데이터를 강우 혹은 다른 매개변수들의 특

정(토지이용)에 따라 두 구간으로 나누는 방법으로, 예를 들어 첫 번째 유역에서 모형이 건기 동안(산림제거 후)의 자료를 이용하여 보정되었다면, 두 번째 유역은 우기 동안(산림제거 전)에 측정된 자료를 이용하여 검증을 시도하는 방법이다. 이 방법은 토지이용변화 및 기후변화에 따른 수문현상변화 예측에 관한 모델링에 이용될 수 있는 장점이 있다.

3.2 Blind-Validation(BV) 테스트

이 방법은 Ewen and Parkin(1996), 그리고 Parkin *et al.*(1996)이 제안한 방법으로, 이들은 물리적 분포형 유역 모형인 SHETRAN(Ewen, J., 1995)을 이용하여 BV 방법을 평가하였다. 이 평가에서 유역의 측정자료 중에서 연속수문곡선, 침투유량, 월별유량 및 총 유량에 대한 불확실성을 정량화 하고, 그 값과 모형의 예측결과의 범위에 대한 비교를 실시하였다. BV 방법의 핵심은 수자원 관리자가 모형을 이용하여 가상의 기후변화 및 토지이용변화에 따른 수문학적 변화를 예측하듯이, 모형의 결과에 대한 어떤 개입도 없이, 마치 가상유역이 존재하는 것처럼 검증유역을 대상으로 예측을 시도하는 것이다. 이 방법의 기본 논리는 미래의 변화를 예측하기 위해서는 현재의 조건을 잘 모의할 수 있어야 하지만 미래예측에 대한 참 값은 현재 시점에서 알 수 없기 때문에 모형의 검증과정에서도 보정단계가 제외되어야 한다는 것이다.

3.3 모형 검증 방법

본 연구에서는 측정 유량자료만을 이용하여 모형의 검증정도를 높이기 위해서 두 가지 검증방법(PBDS 및 BV)을 함께 사용하였다. 사실 두 검증방법은 보정단계에서 서로 다른 원칙에 따라 적용된다. PBDS의 경우는 검증 전 단계에서 우선 모형의 매개변수 값을 구하기 위해서 보정의 과정을 거치며, 다른 조건의 자료를 이용하여 검증을 실시하는 것이고, BV의 경우는 초기의 작업부터 보정단계 없이 모든 매개변수 값이 추정되어 검증이 실시된다. 하지만 두 방법의 공통점은 PBDS의 경우 다른 특징을 가진 유역을 통해서 보정과 검증이 이루어지고, BV의 경우 실제로 다른 특징의 유역은 아니지만 하나의 가상의 유역이 있다고 가정하고 모형의 보정단계가 생략되어, 결국은 두 유역을 모의하는 결과를 보인다. 본 연구에서 모의기간을 건기 혹은 우기로 나누지 않았는데, 이는 모형의 보정과정을 생략하지 않고, 모형의 매개변수 값을 추정하는 과정을 거치기 위한 방법론적인 이유와, 본 연구에서 이용된 갑천유역과 용담유역은 도시유역과 산림유역으로 토지이

용도 측면에서 큰 차이를 보이며 연간 강우량에서도 큰 차이를 보이고 있기 때문이다(Table 4). 따라서 본 연구에서는 위 두 가지 방법의 혼용으로, 우선 PBDS의 원칙으로 다른 유역특성을 가진 유역을 선택하고, 한 유역에 대해서 보정단계를 거친 후, BV의 원칙에 따라 두 번째 유역에 적용될 경우에는 어떤 보정단계도 거치지 않고 매개변수 값들을 추정하여 검증단계를 거치도록 하였다.

본 연구와 유사한 검증 접근 방법으로 Uhlenbrook and Leibundgut(2002)의 경우로 산악지역인 Brugga 유역(40.0 km²)과 Zastler 유역(18.4 km²)을 대상으로 개념적 유역유출모형(TAC, tracer-aided catchment model)을 개발하여, 유역 내에서 측정된 유출량, 추적자 농도 및 유출성분 등을 통해서 모형의 검증을 시도하였다. 이와 더불어 인접유역에 대해서 매개변수의 보정 없이 단지 동일한 주 유출 프로세스(dominant runoff generation processes)를 가진 단위 유역의 공간적 분리만 실시하였는데, 결과적으로 모형은 측정유량을 잘 모의하는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 SWAT 모형은 토양과 토지이용도에 따라 수문반응단위(hydrological response unit, HRU)를 형성하여 각 HRU에 따라 유출특성이 결정되는 개념을 이용하기에, 앞에서 개발된 모형과 비슷한 형태를 취한다. 앞에 기술한 바와 같이 김정곤 등(2006a, b)은 갑천유역을 대상으로 각 소 유역에서 측정된 유출량 및 계산된 유출성분과 지하수 수위 등을 이용한 모형의 검증을 실시하였는데, 본 연구에서는 이와 더불어 다른 특성을 가진 유역에 대한 적용 시, 한 유역에서 개발된 매개변수의 보정방법이 다른 유역에서도 적용 가능함을 확인함으로써 향후 토지이용변화 및 기후변화에 따른 수문특성의 변화분석이 가능함을 증명하려고 하였다. Uhlenbrook and Leibundgut(2002)의 연구의 경우 인접 유역을 대상으로 했기에 PBDS보다는 PB에 가깝다는 것이며, 이는 본 연구와 가장 큰 차이로 할 수 있다.

Fig. 4에 본 연구에서 사용된 모형의 검증방법을 도식화 하였다. 그림에서 'A'유역은 갑천유역을 뜻하고, 'B'유역은 용담유역을 뜻한다고 할 수 있다. 'A' 유역은 보정단계를 거치기 때문에 짙은 회색으로 표기되었고, 'B' 유역은 보정단계를 거치지 않기 때문에 흰색으로 표기된다. 여기서 'Variables'는 모형의 검·보정 단계에서 사용된 측정 자료를 뜻한다. 그리고 'A' 유역에서 검·보정을 마친 후, 'B' 유역에 대해 보정 없이 검증과정을 거치면서 모형의 구조 및 매개변수 값에 대한 유효성은 증가한다고 가정한다.

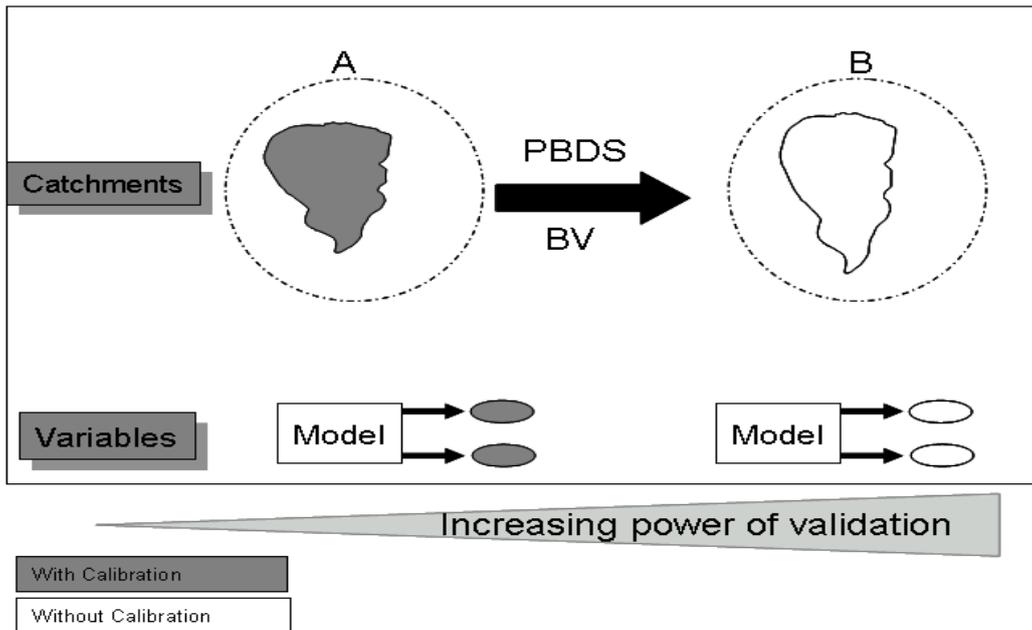


Fig. 4. Schematic of Model Validation Degree
(PBDS: Proxy-Basin Differential Split Sampling, BV: Blind-validation)

3.4 모형 구축

갑천유역의 유역경계와 수치고도모형(DEM), 토지피복도, 토양도 등을 사용하여 SWAT 모형을 구축하였다. 토지이용도는 한강 유역조사에서 위성영상을 이용해 수치 지형도와 혼합하여 구축된 수자원공사의 토지피복도를 이용하였으며, 위성영상사진은 2000년의 토지피복상태를 기준으로 하였다. 토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화사업을 통해 구축된 1:25,000 개략토양도와 농촌진흥청의 1:50,000 개략토양도를 이용하여 입력자료를 구축하였다. SWAT 모형에서는 대상유역을 출구점을 기준으로 소유역으로 구분하며, 이를 다시 토지이용 및 토양종류에 따라 수문반응단위(HRU)로 구분하여 적용한다. 본 연구에서는 먼저 갑천, 유등천, 대전천 유역의 경계를 구분하고 수위 관측지점인 회덕, 유성, 인동, 방동, 신대, 복수, 용촌, 및 가수원 지점을 중심으로 22개 소유역으로 구분하였다(Fig. 2a). 모형의 구축결과 토지이용 및 토양성분에 따라 총 681개의 HRU가 생성되었다. 기상자료는 1999년 1월 1일~2004년 12월 31일까지 5개년동안 관측된 대전 기상청의 최대 및 최저온도, 풍속, 상대습도, 일사량, 증발량 자료를 이용하였다. 강우의 경우는 6개 강우관측소에서 측정된 자료를 이용하였다.

용담유역에 대한 SWAT 모형의 구축은 갑천유역과 마찬가지로 유역경계도, DEM, 토지이용도, 토양도를 주요 입력자료로 이용하였다. 용담유역의 경우는 댐이

건설된 이후인 2002년부터 시험유역으로 선정되어 주요 유입하천인 주자천, 정자천, 진안천, 구량천 및 금강본류의 5개 지점에 대하여 수문, 수질 등의 자료가 축적되어 왔다. 특히, 유출량의 경우 자동수위측정기에 의해 연속적으로 수위가 측정되고 있으며 갈수기, 평수기의 유량측정에 의하여 수위-유량 곡선식이 개발되어 연속적인 유출량을 취득할 수 있다. 대상유역의 유량자료를 기준으로 전체유역을 6개 소유역으로 구분하였으며, 토양과 토지피복특성에 따라 총 219개의 HRU가 형성되었다(Fig. 3a). 기상 자료는 2001년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지의 5년을 대상으로 구축하였으며 장수기 상청의 최고 및 최저기온, 풍속, 상대 습도, 일사량, 증발량 자료를 이용하였다. 강우량의 경우 용담댐 유역에 설치되어있는 6개 강우관측소에서 측정된 자료를 이용하였다.

3.5 모형의 적용 방법 및 매개변수 추정

먼저 갑천유역을 대상으로 SWAT모형 적용 시, 주요 매개변수들은 측정된 유량 및 기저유출량으로부터 보정되었다. 그리고 그 값들에 대해서 최종적으로 측정된 자료(유출량, 기저유출량, 지하수 수위)를 이용하여 검증은 시도하였다. 다음 단계로, 이 매개변수 값들을 인접 유역인 용담댐 유역에 적용하였다. 적용 과정에서 모형 매개변수 값의 산정 단계에서 측정 유량과의 비교 없이 모든 매개변수들을 보정 전 단계에서 산정하였고, 마지막으로 각 소유역의 출구 점에서 측정된 유량을 이

Table 5. Major Parameters Estimated In SWAT Model
(GW = groundwater, Evap = evaporation, Geom = Geomorphology)

Name	Definition	Process
<i>ALPHA_BF</i>	Baseflow alpha factor (days)	GW
<i>BIOMIX</i>	Biological mixing efficiency	Soil
<i>CN2</i>	SCS runoff curve number for moisture condition II	Runoff
<i>epco</i>	Plant uptake compensation factor	Evap
<i>ESCO</i>	Soil evaporation compensation factor	Evap
<i>GW_DELAY</i>	Groundwater delay (days)	GW
<i>GW_REVAP</i>	Groundwater "revap" coefficient	GW
<i>REVAPMIN</i>	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	GW
<i>SLOPE</i>	Average slope steepness (m/m)	Geom
<i>SLSUBBSN</i>	Average slope length (m/m)	Geom
<i>sol_alb</i>	Moist soil albedo	Soil
<i>SOL_AWC*</i>	Available water capacity (mm/mm soil)	Soil
<i>sol_k</i>	Soil conductivity (mm/h)	Soil
<i>sol_z</i>	Soil depth	Soil
<i>surlag</i>	Surface runoff lag coefficient	Runoff
<i>CH_L</i>	Main Channel length	Channel
<i>CH_S</i>	Main Channel slope	Channel
<i>CH_W</i>	Main Channel width	Channel

용하여 모형의 구조 및 산정된 매개변수들에 대한 유효성에 대한 평가를 내렸다.

측정된 자료로 부터 산정된 모형의 주요 매개변수들을 Table 5에 나타내었다. SWAT 모형은 기본적으로 토양도와 토지피복도를 이용하여 토양속성성분과 CN 값을 산정한다. 이 과정에서, 한국의 지형적 특성과 다소 상이한 미국 토양보전국의 피복분류방법에 의해 산정된 CN 값을 이용할 경우, 과소 산정되는 결과를 보였기 때문에(배덕효 등, 2003; 오경두 등, 2005) 이 연구 결과를 바탕으로 CN 값들을 재 산정하였다. 그리고 CN 값 산정 시에 각 소유역 경사의 영향 또한 고려되었다(Williams, 1995). 토양속성성분(sol_k, sol_alb, sol_z, SOL_AWC)의 경우, 1:250,000 토양도를 바탕으로 모든 물리적 토양성분을 산정하여, 보정 없이 모형에 입력하는 방식을 취하였다. DEM과 하천 수계도를 이용하여 유출의 흐름방향 및 하천의 속성성분 값(Ch_k2, Ch_W, Ch_L, Ch_S)을 추정하였고, 하천유량 감쇄분석(streamflow recession analysis)을 통한 지하수 유출식의 상수 값(ALPHA_BF)을 예측하였다. 식물생장에 관련된 매개변수들(ESCO, epco)과 지하대수층으로부터의 증발량(GW_REVAP)은 토지피복도에 따른 상대적 차이를 고려하여 산정하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 갑천유역에 대한 모형 적용결과

모형의 예측유효성을 평가하기 위해서 그래픽을 통한 결과분석 외에 통계적 방법으로써 아래의 Nash-Sutcliffe식(Nash and Sutcliffe, 1970)을 이용한 모형 효율성계수(R_{eff})와 결정계수(R^2) 값을 이용하였다.

$$R_{eff} = 1 - \frac{\sum_i^n (Q_{obs,i} - Q_{pred,i})^2}{\sum_i^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\left(\sum_i^n Q_{obs,i} \times Q_{pred,i} - n \overline{Q_{obs}} \times \overline{Q_{pred}} \right)^2}{\left(\sum_i^n Q_{obs}^2 - n \overline{Q_{obs}}^2 \right) \left(\sum_i^n Q_{pred}^2 - n \overline{Q_{pred}}^2 \right)} \quad (2)$$

여기서 $Q_{obs,i}$ 는 i 일에 관측된 유량의 값, $Q_{pred,i}$ 는 i 일에 예측된 모형 유량 값, $\overline{Q_{obs}}$ 는 평균 관측 값, $\overline{Q_{pred}}$ 는 평균 모형 예측 값, 그리고 n 은 계산된 기간을 의미한다. R_{eff} 값의 경우 유출량의 첨두유량 값에 민감하고, R^2 값의 경우는 강우 사상에 따른 유출곡선의 반응시간에 민감하다. 그러므로 위의 두 가지 목적함수를 이용하여

더 많은 측면에서 모형의 유출예측에 대하여 평가할 수 있었다.

모형의 보정은 회덕지점을 제외한 유량 측정지점은 측정유량의 정확도를 고려하여 2002년 혹은 2002년부터 2003년 기간의 자료를 이용하였고, 회덕지점은 2000년부터 2003년까지의 자료를 이용하였다. 모형의 검증 을 위해 회덕지점의 2004년 유출량 자료를 이용하였다. 갑천유역의 유량측정지점에서 일별 유출량에 대한 모형의 보정 및 검증 효율을 Table 6에 요약하였다. 각 소유역별 유출예측에 대한 평가는 유역의 최 하류에 위치한 회덕지점에서 가장 높은 효율(최대 0.79)을 보이는데 검증 기간(회덕, 2004)에 대하여 R_{eff} 값은 0.78, R^2 값의 경우는 0.80의 높은 효율을 얻었다. 그리고 회 덕지점 뿐만 아니라 나머지 소유역내에서 확인된 모형 의 유출량 예측에 관한 유효성평가 결과역시 측정 유 량을 잘 모의하고 있으며, R_{eff} 값은 최대 0.75에서 최 소 0.48을 보였다.

Fig. 5는 회덕 관측지점에서의 일별 관측 및 모의 유 출량을 보여주고 있다. 일별 유출량 분석결과를 보면 모형의 예측 값들은 관측유량의 전체적인 경향, 침투유 량 도달시간, 기저 유출량을 잘 나타내고 있지만, 침투 유량 값은 다소 과소 산정하는 경향을 보인다. 그리고 모형은 유출량뿐만 아니라 유출성분, 측정 지하수위 및 모형 매개변수 및 구조에 대한 검증이 이루어 졌고, 모 의 결과는 측정 자료를 잘 모의하는 것으로 나타났다 (김정곤 등, 2006a).

4.2 용담유역에 대한 모형 적용결과

갑천유역에 대하여 SWAT 모형 구축 시 적용한 매 개변수 추정 방법을 용담유역에 적용하여 측정 유량과

의 비교 없이 모든 매개변수들을 보정 전 단계에서 산 정하고, 각 소유역의 출구 점에서 측정된 유량을 이용 하여 모형의 구조 및 산정된 매개변수들에 대한 유효성 평가를 내렸다. 유출량에 대한 검증결과를 Table 7에 정리하였다. R_{eff} 값은 0.49~0.85의 범위를 보이며, R^2 값의 경우는 0.49~0.84의 범위를 나타냈다. 모형의 모 의 유출곡선과 주천교에서 측정된 일별 유량 값을 비교 한 결과를 보면 침투유량 값은 다소 과소 산정하고 저 유량 시에 과소 산정하는 경향을 보였지만 전체적인 경 향 및 유량의 감쇄 곡선부분을 잘 모의하고 있다(Fig. 6). 이와 같은 특징은 다른 소유역에서도 비슷하게 나타 났다.

4.3 토의

기존의 한국 지형에 적용된 SWAT 모형의 유출평가 결과를 살펴보면, 김남원 등(2006)의 충주댐 상류유역을 대상으로 댐 유입량과 모의 값을 비교한 결과에서, 충 주댐 지점에서의 일 관측유량과 모의유량을 나타낸 것 으로 전 기간의 유출용적의 평균제곱근오차(RMSE)는 286.71 m^3/s , 모형 효율성계수(R_{eff})는 0.71, 결정계수 (R^2)는 0.72를 보였다. 신현석과 강두기(2006)의 낙동강 유역 적용 결과는 풍수기(6월~9월)와 갈수기(10월~5 월)로 분리하여 분석한 결과, 풍수기의 침투유량에 대 해 다소 과소 산정하는 결과를 보이며, 계절별로 보면 대체로 갈수기의 오차(RMSE : 풍수기 40.21 m^3/s , 갈 수기 10.16 m^3/s ; R^2 : 풍수기 0.93, 갈수기 0.88)가 크게 나타나고 있다. 이 결과는 저, 갈수기 동안의 관측자료 의 문제점 및 모의과정에서 지표유출과 기저유출 분리 과정에서 오는 불확실성의 영향으로 분석되었다. 한편 2002년부터 2004년의 소양강댐 유입량과 모의 값을 비

Table 6. Result of Model Calibration and Validation for Gap-cheon Basin

Gauging Station	Period	R_{eff}	R^2
Heoduk	2000	0.75	0.82
	2001	0.51	0.60
	2002	0.79	0.84
	2003	0.75	0.76
	2004	0.78	0.80
Sindae	2002	0.61	0.66
	2003	0.66	0.68
Indong	2002	0.74	0.75
	2003	0.67	0.67
Boksu	2002	0.48	0.75
	2003	0.74	0.74
Yuseong	2002	0.68	0.78

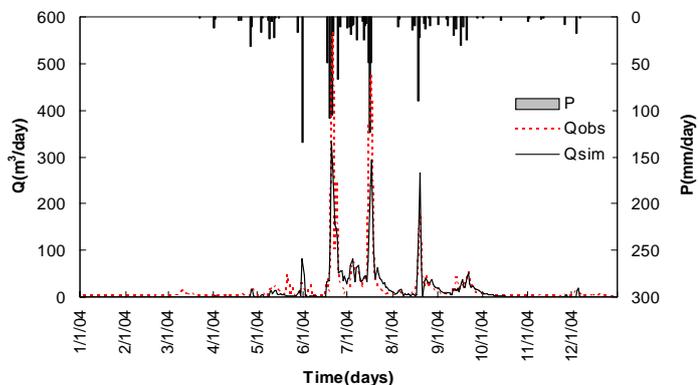


Fig. 5. Results of Model Validation for Flow (2004) at Heoduk Station (P: precipitation, Qobs: observed stream flow, Qsim: simulated stream flow)

Table 7. Result of Model Validation for Yongdam Basin

Gauging Station	Period	R_{eff}	R^2
Jucheon-Brid	2002	0.74	0.74
	2003	0.71	0.74
Sangdochi-Brid	2002	0.85	0.84
	2003	0.64	0.70
Cheoncheon	2003	0.75	0.77
	2005	0.49	0.49
Donghwang	2003	0.79	0.80
	2005	0.55	0.55
Sukjeong-Brid	2003	0.69	0.55
	2004	0.74	0.75
	2005	0.66	0.70

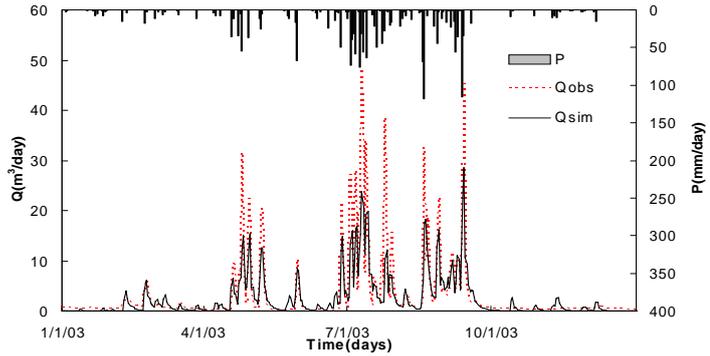


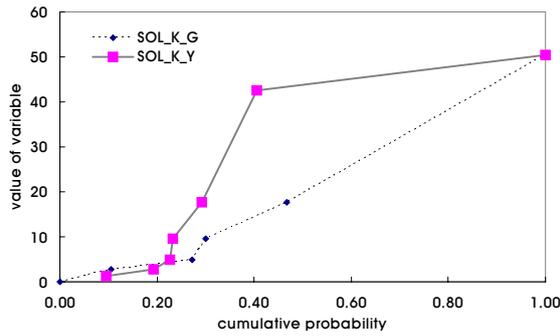
Fig. 6. Results of Model Validation for Flow (2003) at Jucheon Brid. Station (P: precipitation, Qobs: observed stream flow, Qsim: simulated stream flow)

교한 결과를 보면 RMSE는 146~197 m³/s, R_{eff} 값은 0.49~0.60, R^2 값은 0.71~0.78의 값을 보였다(김남원 등, 2005). 전체적으로 홍수기에는 비교적 모형이 관측 유량을 잘 모의하고, 갈수기에는 제대로 모의하지 못하고 있는 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 지하수-지표수 상호작용과 지하수 함양량, 용설모의 등과 같은 모형 상의 한계와 관측유량의 낮은 신뢰성이 원인으로 판단되었다. 한편 기존에 용담유역에 적용된 유출 모형들의 결과를 살펴보면, 서동일 등(2005)의 SWAT 모형 적용 시 2003년 용담댐 유입량에 대한 측정유량과 모의 결과의 비교에서 사용된 토지피복도에 따라 RMSE 값이 대분류 경우는 50.59 m³/s를, 중분류 경우에는 48.51 m³/s를 보였다. 김익재 등(2007)의 SWAT 모형의 적용 결과에서는, R_{eff} 값이 보정기간(2003~2004년)에는 0.35~0.82의 범위였고, 검증기간(2006년)에는 장계천과 정자천 소유역에서 각각 0.80 및 0.77을 보였다. 본 연구의 결정계수 값을 기존 타유역에서 도출된 결과 치와 단순 수치비교를 통해 비교우위를 논하는 것은 논리의 비약이 될 수 있겠지만, 본 연구 결과의 통계적 정확성은 기존의 연구결과와 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않았다. 결론적으로 기존의 연구들이 보정단계를 거쳤다고 전제를 했을 때, 최종적으로 보정을 거치지 않은 본 연구에서의 모의결과는 측정 유량을 잘 모의하고 있음을 확인 할 수 있다.

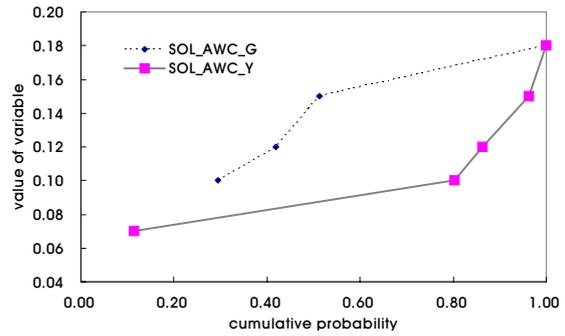
본 연구에서는 유출모형을 이용한 토지이용변화 및 기후변화에 따른 유출특성의 변화모의를 위해서는 단순히 유역의 최종 출구점에서 측정된 유량을 통한 검증방법의 문제점을 인식하고, 좀 더 정교한 검증방법을 시도 하였다. 실제 토지이용변화 및 기후변화 분석을 위해서는 모형의 구조 및 검증에 대한 요구뿐만 아니라,

모형 구조에 대한 이해 및 매개변수들이 실제 유역현황을 어떻게 대변하고 모의 되는지에 대한 이해도 역시 필요하다. 본 연구에 사용된 모형은 준 분포형 물리적 모형인 SWAT으로, 모형의 적용 시 모형 매개변수는 측정 자료와 기존 연구(김정곤 등, 2006a)의 결과로부터 추정되었다. 이렇게 추정된 매개변수 값들과 유역특성과의 비교를 통해서 유역의 특성 및 각 매개변수들에 대한 이해도를 증대 시킬 수 있다. 이는 향후 토지이용 변화 및 기후변화의 영향분석에 대한 기초자료를 제공할 수 있을 것이다. 모든 매개변수 값들의 비교는 본 논문의 분량문제로 제약이 있기 때문에, 김정곤 등(2006a)의 민감도 분석결과를 바탕으로 민감한 매개변수 6개를 추출하여 유역에 따른 모형의 매개변수 값들에 대한 비교를 실시하였다(Fig. 7).

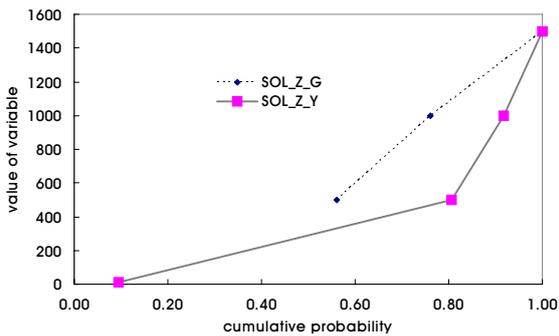
각 유역의 토양특성을 반영하여 Sol_K (토양의 수리 전도도)의 경우 용담유역이 갑천유역에 비해 크고, Sol_LAWC(가용토양수)의 경우 갑천유역이 용담유역보다 큰 값을 보인다. 토양층 깊이(Soil_z)의 경우는 전반적으로 갑천유역이 더 깊게 나타났다. 용담유역의 경우 Mm 토양을 제외한 대부분 토양이 얇은 토양깊이를 가지는 반면, 갑천유역은 Ma 토양을 제외하고는 1.0 m 이상의 깊은 토양깊이를 가진 토양통으로 구성되어 있다. CN 값의 경우, 용담유역이 갑천유역에 비해 상대적으로 작은 값부터 큰 값까지 고르게 분포해 있는 반면, 갑천유역은 대부분 60 이상의 큰 값을 보인다. 갑천유역의 경우 고도가 높은 지역인 산지지역의 경우는 일반적으로 작은 CN 값을 보임에도 불구하고, 경사도의 영향으로 큰 값을 나타냈다. 한편 고도가 낮은 저지대의 경우 대부분 도시지역이기 때문에, 큰 CN 값을 보이는 결과를 가져왔다. 용담유역의 경우는 하류부분에는 농



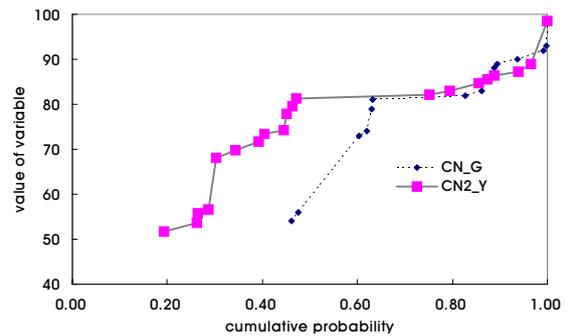
(a) Sol_K



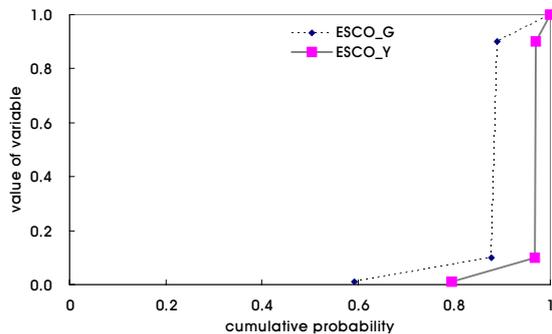
(b) SOL_AWC



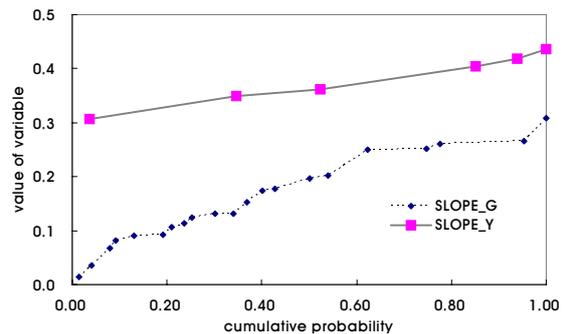
(c) SOL_Z



(d) CN



(e) ESCO



(f) SLOPE

Fig. 7. Comparison of cumulative distribution of major parameters (G: Gap-cheon basin and Y: Yongdam basin)

경지와 밭이 고르게 분포되어 있기에 상대적으로 작은 CN 값 역시 분포함을 확인할 수 있다. ESCO의 경우 갭천유역이 용담유역보다 높은 값을 보이고 있다. ESCO매개변수는 산지지역일수록 낮은 값을 가지므로 산지 비율에 있어 상대적으로 20% 가량 용담유역이 높은 영향을 반영한다고 볼 수 있다. SLOPE 매개변수의 경우 용담유역은 고지대에 위치하기에 높은 값을, 갭천유역의 경우는 상류지역의 높은 고도와 하류지역의 낮은 고도를 반영하여 고른 분포를 보이고 있다.

본 연구는 기존에 구축된 측정값을 통하여 모형에 필요한 매개변수 값을 산정하기위해 측정유량 값에 접근하지 않고, 보정단계 없이 모의 할 수 있음을 보여 주

었다. 그러므로 본 연구 결과는 미 계측 유역을 대상으로 유역유출모형을 적용 할 때 나타나는 문제 중의 하나인 최소한의 자료가 무엇인가에 대한 답을 제공한다고 본다. 본 연구로부터는 토지이용도, 토양도, DEM 및 각 기상데이터가 구비되었을 경우, 대상 유역의 유출모의가 가능할 것이라 판단할 수 있다. 한편, 금강유역과 같은 큰 유역을 대상으로 수문 모형을 적용할 경우에 토지 피복도나 토양도와 같은 유역특성을 반영하고 관심 있는 특정지역을 고려하여 모형을 구축하는 과정에서 많은 지점에서 유량이 미 계측되었거나, 계측되었다 할지라도 관리 소홀로 인한 측정 자료에 대한 신뢰도가 낮아지는 경우가 존재한다. 하지만, 본 연구결과로부터

이와 같은 경우에도 SWAT 모형의 예측 유량만으로도 수문분석을 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다. 향후, 다양한 유역적용을 통한 통계적 결과분석을 통하여 향후 SWAT 모형을 이용한 지역화연구(Regionalization) 또한 가능할 것이라 본다.

5. 결 론

본 연구의 대상유역은 금강유역에 위치한 갑천유역과 용담유역으로 두 유역은 인접한 유역임에도 불구하고, 토양, 토지이용, 지형 등에서 많은 차이를 보이고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 특성을 반영할 수 있는 준 분포형 물리적 모형인 SWAT모형의 향후 토지이용 변화와 기후변화에 따른 수문특성의 변화 분석에 대한 활용성을 평가하기 위하여 PBDS방법과 BV방법의 혼용을 통한 모형의 검증에 시도하였다. 우선 갑천유역을 대상으로 모형의 검·보정단계에서 매개변수 값과 유역의 특성평가를 통해서 주요 매개변수 값들의 추정 방법을 고안하였고, 실제적으로 용담유역에 적용 시는 어떤 측정 자료에 대한 접근 없이 매개변수 값을 추정하고 측정 유량을 통한 모형 검증을 실시하였다.

갑천유역의 경우 모형의 검·보정의 결과는 각 소유역의 유출예측에 대한 평가에 있어서 유역의 최 하류에 위치한 회덕지점에서 가장 높은 효율(최대 0.79)을 보이고 있다. 검증기간에 대하여 R_{eff} 값은 0.78, R^2 값의 경우는 0.80의 높은 효율을 얻었다. 그리고 회덕지점뿐만 아니라 나머지 소유역내에서도 R_{eff} 값이 최대 0.75에서 최소 0.48의 범위에서 모형이 측정유량을 잘 모의하고 있음을 알 수 있었다. 용담유역에 대하여 SWAT 모형을 적용한 결과 각 소유역에서 관측 값과 모의 값이 양호한 결과를 보였다($R_{eff} = 0.49 \sim 0.85$, $R^2 = 0.49 \sim 0.84$). 그리고 모의 유량은 침투유량은 다소 과소 산정하였지만, 전체적인 경향 및 기저유출량을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

본 연구 결과의 통계적 정확성은 기존의 연구결과와 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않으며, 기존의 연구들이 보정단계를 거쳤다고 전제 했을 때, 최종적으로 보정을 거치지 않은 본 연구에서의 모의결과는 측정 유량을 잘 모의하고 있음을 확인 할 수 있다. 본 연구에서는 다른 유역특성을 가진 인접 유역에 SWAT 모형을 이용한 PBDS와 BV방법을 혼용한 검증방법의 적용에서 SWAT 모형의 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 SWAT모형은 향후 토지이용변화 및 기후변화에 따른 유역특성변화 분석에 사용될 수 있을 만큼 모형의 구조 및 매개변수에 대한 신뢰도를 보여

주었다고 판단된다. 그러나 본 연구에서 사용된 혼용기법의 신뢰성을 높이기 위해서는 향후 추가적인 유역에 대한 방법론의 타당성 검증 절차를 거쳐야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 수자원공사 수자원연구원 연구과제(과제번호 : KIWE-WRE-07-15 및 KIWE-WRE-07-16)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 김남원, 이정은, 원유승 (2005). "소양강댐 유역에 대한 SWAT 모형의 적용." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 628-632.
- 김남원, 이병주, 이정은 (2006). "SWAT 모형을 활용한 갈수량 분석." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp.780-784.
- 김익재, 손경호, 김정곤 (2007). "SWAT 모델을 이용한 수변 완충지역에서 비점오염원 저감효율 평가." **한국수자원학회 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회
- 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006a). "갑천 유역을 대상으로 SWAT 모형의 다 변수 다 지역 검·보정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 867-880.
- 김정곤, 손경호, 노준우, 장창래, 고익환 (2006b). "SWAT 모형을 이용한 갑천유역에 대한 수문 특성 분석 및 도시화 영향 평가." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제10호, pp. 881-890.
- 배덕효, 이병주, 정일원 (2003). "위성영상 피복 분류에 대한 CN값 산정(D): - CN값 산정-." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제6호, pp. 985-997.
- 서동일, 김종성, 유경미 (2005). "토지피복지도를 이용한 비점오염물질 부하량 산정을 위한 SWAT 모형의 적용." **대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문집**, 대한환경공학회, pp. 423-428.
- 신현석, 강두기 (2006). "SWAT모형을 이용한 인공저류시설물의 하류장기유출 영향분석 기법에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제39권, 제164호, pp.227-240 ,
- 오경두, 전병호, 양경규, 안원식, 조병호 (2005). "도시 지역 CN 산정연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 1009-1020.
- Arnold, J.G., Muttiah, R.S., Srinivasan, R., and Allen,

- P.M. (2000). "Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin." *Journal of Hydrology*, Vol. 227, pp. 21-40.
- Bergström, S. and Forsman, A. (1973). "Development of a conceptual deterministic rainfall-runoff model." *Nord. Hydrology*, Vol. 4, pp. 147-170.
- Boyle, D.P., Gupta, H.V., and Sorooshian, S. (2000). "Toward improved calibration of hydrological models: Combining the strengths of manual and automatic methods." *Water Resource Research*, Vol. 36, pp. 3663-3674.
- Ewen, J. (1995). Contaminant transport component of the catchment modelling system SHETRAN. In: Trudgill, S.T., (Ed.), *Solute Modelling in Catchment Systems*, Wiley, Chichester, UK, pp. 417-441.
- Ewen, J. and Parkin, G. (1996). "Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts, 1. Method." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 583-594.
- Franks, S.W., Gineste, P., Beven, K.J., and Merot, P. (1997). "On constraining the predictions of a distributed model: the incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process." *Water Resources Research*, Vol. 34, pp. 789-797.
- Hooper, R.P., Stone, A., Christophersen, N., de Grosbois, E., and Seip, H.M. (1988). "Assessing the Birkenes model of stream acidification using a multi-signal calibration methodology." *Water Resources Research*, Vol. 24, pp. 1308-1316.
- Klemes, V. (1986). "Operational testing of hydrological simulation models." *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 31, pp. 13-24.
- Mroczkowski, M., Raper, G.P., and Kuczera, G. (1997). "The quest for more powerful validation of conceptual catchment models." *Water Resources Research*, Vol. 33, pp. 2325-2335.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2002). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*, Version 2000.
- Parkin, G., O'Donnell, G., Ewena, J., Bathursta, J.C., O'Connell, P.E., and Lavabreb, J. (1996). "Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts, 2. Case study for a Mediterranean catchment." *Journal of Hydrology*, Vol. 175, pp. 595-613.
- Pitman, W.V. (1978). "Flow generation by catchment models of differing complexity - A comparison of performance." *Journal of Hydrology*, Vol. 38, pp. 59 - 70.
- Refsgaard J.C. (1997). "Parameterization, calibration and validation of distributed hydrological model." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Seibert, J. and McDonnell, J.J. (2002). "On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration." *Water Resour. Research.*, Vol. 38, No. 11, 1241, doi: 10.1029/2001WR000978.
- Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, Ch., and Rodhe, A. (1999). "Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure." *Hydrol. Sci. J.* Vol. 44, No. 5, pp. 279-299.
- Uhlenbrook, S. and Leibundgut, Ch. (2002). "Process-oriented catchment modelling and multiple-response validation." *Hydrological processes*, Vol. 16, 423-440.
- Williams, J.R. (1995). Chapter 25. The EPIC Model. p. 909-1000. In *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Highlands Ranch, CO.
- Xu, C.-Y. (1999). "Operational testing of a water balance model for predicting climate change impacts." *Agric. For. Meteor.*, Vol. 98-99, pp. 295- 304.

(논문번호:07-30/접수:2007.03.26/심사완료:2008.07.24)