# GIS 기반 SWAT 모델을 이용한 동향·천천유역의 부유사량 분석

이근상[1※]·김유리[2]·예령[2]·이을래[3]

# The Analysis of Suspended Sediment Load of Donghyang and Cheoncheon Basin using GIS-based SWAT Model

Geun-Sang LEE[1※]·Yu-Ri KIM[2]·Lyeong YE[2]·Eul-Rae LEE[3]

## 요 약

본 연구에서는 용담댐 상류의 동향과 천천 유역을 대상으로 고탁수 발생에 영향을 주는 부유사량을 분석하기 위해 SWAT 모델을 적용하였다. DEM, 토지피복도, 토양도와 같은 GIS 자료 및 기상자료 등을 SWAT 모델의 입력자료로 활용하였으며 동향과 천천 수위국의 수위-유량 곡선식과 유량-유사량 곡선식을 관측자료로 이용하였다. 유량 분석 결과, 동향 지점의 결정계수($R^2$)와 모델효율성지수(EI)는 0.87과 0.87로 나타났으며, 천천 지점의 $R^2$과 EI는 모두 0.95로 높게 나타났다. 또한 유사량 평가에서는 동향지점의 $R^2$과 EI는 0.77과 0.76으로 나타났으며, 천천 지점의 $R^2$과 EI는 0.86과 0.80으로 높게 나타났다. SWAT 모델을 이용시 2003년의 부유사량이 강우량 및 강우강도의 영향으로 가장 높은 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 본 연구에서 모의된 부유사량 분석결과는 저수지 관리를 위한 토양침식 가능성 및 탁수발생 잠재성을 평가하기 위한 의사결정지원 자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : GIS, SWAT, 부유사량, 탁수

## ABSTRACT

This study applied SWAT model to analyze suspended sediment load that is influence on the high density turbid water in Donghyang and Cheoncheon basin, which are located in the upstream of Yongdam Dam. GIS data such as DEM, land cover map and soil map, and meteorological data were used as the input data of SWAT model. And the rating curve equation and Q-SS equation of Donghyang and Cheoncheon gauge station were applied as the measured values of them. As the result of flowout, the coefficient of determination ( $R^2$ ) and

2009년 3월 24일 접수 Received on March 24, 2009 / 2009년 6월 8일 수정 Revised on June 8, 2009 / 2009년 6월 19일 심사완료 Accepted on June 19, 2009

1 한국수자원공사 K-water연구원 책임연구원 K-water Institute, Kwater
2 한국수자원공사 K-water연구원 연구원 K-water Institute, Kwater
3 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원 K-water Institute, Kwater
※ 연락저자 E-mail : ilovegod@kwater.or.kr

the Nash-Sutcliffe coefficient of efficiency (EI) of model calibration showed high as 0.87 and 0.87 at Donghyang gauge station, and the $R^2$ and EI of model validation were high as 0.95 at Cheoncheon gauge station. Also, as the result of suspended sediment load, the $R^2$ and EI of model calibration were high as 0.77 and 0.76 at Donghyang gauge station, and the $R^2$ and EI of model validation marked high as 0.867 and 0.80 at Cheoncheon gauge station. It is considered that the suspended sediment load of 2003 showed the highest due to rainfall amounts and rainfall intensity in using SWAT model. The results of suspended sediment modeled in this study can be applied to the decision-making support data for the evaluation of soil erosion possibility and turbid water potential in the management of reservoir.

*KEYWORDS : GIS, Soil and Water Assessment Tool, Suspended Sediment Load, Turbid Water*

## 서 론

강우발생에 의한 토양침식은 하천에 유사를 공급하게 되어 저수지 퇴사를 유발하거나 지질특성이 취약한 유역의 경우에는 고농도의 탁수발생에 직접적인 영향을 준다. 특히 최근의 저수지 고탁수 발생 문제는 홍수기 치수적인 측면에서의 방류량 결정에서 벗어나 이수 및 환경생태적인 측면까지를 함께 고려해야 되는 어려움을 주고 있다.

저수지내 고탁수 발생 사례로는 임하호, 소양강 그리고 부분적이지만 용담댐 사례가 대표적이다. 먼저, 임하호는 2001년까지 연도별 최고탁도가 100~250 NTU (Nephelometric Turbidity Unit) 였지만, 2002년 태풍루사와 2003년 태풍 매미에 의한 집중강우로 최고 1,221 NTU의 고탁수가 발생하였으며 지속일수도 최대 315일에 이르고 있다. 임하호 탁수저감을 목표로 2003년 3월 "임하호유역 수질보전대책협의회"가 구성되어 운영되고 있으며, 임하호 탁수원인조사 및 저감대책 관련 연구가 진행중에 있다(이근상, 2006). 소양호유역은 2006년 태풍 에위니아의 집중적인 강우로 인해 다량의 토사가 하천으로 유입되어 고탁수 방류가 장기화되고 있다. 소양호 저수지는 2005년까지 30 NTU 이상의 방류가 년중 1~2개월 정도였고 최고탁도도 79 NTU 정도였으나, 2006년에는 30 NTU 이상의 방류가 7월부터 지속되고 있고 최고탁도도 328 NTU에 이르고 있다(이근상, 2007). 또한 용담댐유역은 2005년 7~8월의 집중호우로 시간당 최고 69 ㎜의 강수량을 기록하였으며, 이 기간중 상류에서 다량의 탁수가 유입되어 저수지 기준 100 NTU 이상의 탁수비율이 총 저수량의 73%를 차지하였다.

이러한 탁수발생에 영향을 주는 상류 유역의 토양침식 및 부유사량 추정은 해당 유역내의 토사발생 잠재성을 추정할 수 있는 자료가 된다. 하천내 부유사 모의를 위해서는 장기간의 유량 및 부유사 관측자료가 필요하며, 현재 한국수자원공사에서는 용담댐을 시험유역으로 지정하여 신뢰성 높은 자료 모니터링을 수행중에 있다. 유역단위의 부유사 모의를 위해 사용되는 모델중 본 연구에서는 GIS 기반의 준분포형 모델 적용이 가능한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델을 선정하였다.

국외 SWAT 연구를 보면, Arnold 등(1998)은 미국 텍사스의 6개 유역에 각 유역별 연평균 유사량과 관측치를 비교하여 유사량의 적정성을 비교하였으며, Jennifer Benaman 등(2005)은 농경지 유역에서 매개변수 유형에 따른 유사량 모의를 통해 적정 매개변수를 선정하여 제시한 바 있다. 또한 Kati와 Indrajeet(2008)

는 SWAT 모델을 이용한 유출과 유사량 예측 시 서로다른 HRU 분포에 따른 영향 및 통계학적 매개변수들의 차이를 연구하였다.

국내에서는 정재운(2005)이 주암호 외남천 유역의 유출 및 유사 그리고 비점오염 부하를 추정하기 위해 SWAT 모델을 활용하였으며, 김보경 등(2007)은 유출과 유사량 모의시 최적의 결과를 적용할 수 있는 매개변수를 제시하였다. 또한 김정곤 등(2008)은 탁수발생에 큰 차이를 보이고 있는 안동과 임하유역을 대상으로 SWAT 모델을 활용한 부유사 발생량을 예측하였으며, 예령 등(2009)은 SWAT 모델을 이용하여 기후변화에 따른 대청댐 유역의 토양침식 및 유사발생량을 모의하였다. 최근 기후변화에 대한 관심이 높아지면서 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 SWAT 모델을 활용한 연구도 있었다(박종윤 등, 2008).

본 연구에서는 용담댐 상류의 동향과 천천 유역을 연구대상지로 선정하여 탁수발생에 영향을 주는 부유사량을 분석하였다. 특히 동향과 천천 수위국에서 관측한 수위-유량 곡선식과 유량-유사량 곡선식을 이용하여 SWAT 모델에 의한 유량과 부유사량을 모의하였으며, 2003~2005년 그리고 2006~2008년 자료를 각각 보정과 검증을 위해 활용하였다.

## SWAT 모델

SWAT 모델은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Arnold 등(1998)에 의해 개발된 유역모델로서, 일 단위의 모의가 가능한 준 분포형 강우-유출 모델이며 대규모 유역의 토지이용에 따른 물과 유사, 비료 및 농약 등 오염물질의 거동에 대한 해석과 토지관리 방법에 따른 영향을 예측하기 위해 개발되었다. SWAT 모델은 1990년대 초에 개발되어 현재도 기능이 계속 확장 중인 모델로서 강우-유출해석, 기후변화에 따른 수문응답예측, 유역의 비점 오염물질 거동해석, 유역관리대책의 평가 등에서 활발한 연구가 수행되고 있다(예령, 2008).

SWAT의 초기버전인 AVSWAT 96.2 버전에서는 기후변화에 따른 농업생산성을 평가하기 위해 CO2 항목이 추가되었으며, SWAT2000 버전에서는 기상발생기 기능이 추가되었다. 본 연구에서 사용한 ARCSWAT2005는 기존의 ArcView 3.x 기반에서 확장되어 구동되었던 AVSWAT에서 벗어나 GIS 최신버전인 ArcGIS 9.x에서 구동되어 좀 더 쉬운 사용자 인터페이스(User Interface)를 구현하였다(Francisco 등, 2006).

SWAT 모델은 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 네 가지 서브모델로 구분되며 수문모델은 지표면 유출, 차단, 중간유출(측방유출), 침투, 기저유출, 수로손실, 증발산 등으로 구성되어 있다. 모델내의 물수지방정식에 기초한 수문순환의 과정은 식 (1)과 같이 구성되어 있으며 일 단위로 물 수지를 산정하게 된다.

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

여기서, $SW_t$=최종일의 토양수분량(㎜), $SW_o$=$i$일의 초기토양수분량(㎜), $t$=시간(day), $R_{day}$=$i$일의 강수량(㎜), $Q_{surf}$=$i$일의 지표면 유출량(㎜), $E_a$=$i$일의 증발산량(㎜), $\omega_{seep}$=$i$일의 토양층 바닥에서 침루 및 침투되는 총량(㎜), $Q_{gw}$=$i$의 회귀수량(㎜)이다.

SWAT모델에서는 지표유출량 산정을 위해 SCS 유출곡선법(SCS, 1972)와 Green & Ampt 침투법(Green 등, 1911)을 제공하고 있으며, 증발산 산정을 위해서는 Penmann-Monteith 방법, Priestley-Taylor 방법과 Hargreaves 방법을 제시하고 있다.

일별 지표 유출량은 식 (2)와 같은 SCS 방

법을 이용하여 계산된다(SCS, 1972).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

여기서, $Q_{surf}$=누가유출량, $R_{day}$=일 강우량(㎜), $I_a$=유출 이전에 발생하는 지면저류, 차단, 침투로 인한 초기손실(㎜), $S$=저류상수이다.

저류상수는 토양, 토지이용, 토지관리와 경사에 따라 공간적으로 변하며 토양수분함량은 시간적으로 변하여 식 (3)과 같이 정의된다(갈병석, 2008).

$$S = 25.4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right) \quad (3)$$

SWAT모델은 수정범용토양유실모델인 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)에 의해 토양침식량을 산정한다. 경험적 모델인 USLE식은 미국에서 농경지의 토양 침식량 모의를 위해 개발되었으며, 강우에너지, 토양의 침식성, 사면길이, 사면의 경사도, 토양의 피복상태를 고려하여 토양침식량을 산정한다(Wischmeier, 1960). 그러나 USLE 모델은 농업지역의 연평균 토양침식 가능량을 산정하는데 효과적이지만 불규칙한 지형의 길이경사(LS) 산정에는 많은 한계가 있었으며, 퇴적을 반영하지 못하는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 유역의 지형을 고려할 수 있는 RUSLE(Revised SoilLoss Equation)가 개발되었다(Renard 등, 1997).

MUSLE모델은 USLE의 강우인자를 유출인자로 대체하였는데, 이것은 이송율 계산의 필요성을 제거시켜 토양침식량 산정 방법을 향상시키고 결과적으로 단일호우사상에 대한 모의가 가능하게 되었다. 또한 MUSLE모델에서는 유출량이 강우에너지 뿐만 아니라 선행토양수분상태의 함수로 산정되므로 침식량 예측성능이 보다 향상되었다. MUSLE는 유효유량과 첨두유출량의 곱인 유출에너지 인자와 유역의 특성인자 곱으로 나타낼 수 있다. 강우사상별 토양 침식량을 산정하는 MUSLE 모델은 식 (4)와 같다(Williams, 1995).

$$Y = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times A_{hru})^{0.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} P_{USLE} \times LS_{Ulse} \times CFRG \quad (4)$$

여기서, $Y$=유사량, $11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times A_{hru})^{0.56}$=유출에너지 인자, $Q_{surf}$=지표유출량 (㎥/ha), $q_{peak}$=첨두유출량(㎥/sec), $A_{hru}$=HRU 면적(ha), $K_{USLE}$=토양침식인자, $C_{USLE}$=작물관리인자, $P_{USLE}$=토양보전인자, $LS_{USLE}$=경사길이와 경사도인자, $CFRG$=토양입자의 형상계수이다.

첨두유출량($q_{peak}$)은 주어진 강우사상에서의 최대 유출율을 의미한다. 이는 호우의 침식능력을 나타내며, 유사량 손실을 예측하기 위해 사용된다. SWAT에서는 수정된 합리식을 이용하여 첨두 유출량을 계산한다. 합리식은 강우강도 i가 t=0에서 시작하여 무한히 연속적이라면 유출량은 도달시간 t=tc 일 때까지 증가할 것이라는 개념에 근거하고 있다. 전체 소유역 면적이 유역 출구에서의 유출량에 기여한다면 합리식은 식 (5)와 같다.

$$q_{peak} = \frac{C \times i \times A}{3.6} \quad (5)$$

여기서, $q_{peak}$=첨두유출량 (㎥/s), $C$=유출계수, $i$=강우강도 (㎜/hr), $A$=소유역 면적 (㎢)이다. 수정 합리식에서 첨두유출량은 도달시간 $t_c$의 비례적인 함수로 표현되며 소유역의 도달시간 $t_c$동안 발생하는 강우량은 추계학적 기법을 이용한 전체 일 강우량의 함수로 추정된다. 또한 소유역의 도달시간은 지표와 하천 흐름을 고려하는 Manning 공식을 이용하여 산정된다.

하천에서의 흐름추적은 물, 유사, 영양염류, 살충제, 박테리아 및 중금속 등 6가지에 대하여 모의한다. SWAT은 하도에서 유속과 유량을 정의하기 위하여 Manning 식을 사용한다. 유출은 운동파 모델의 변형인 변동저류추적법과 Muskingum 하도 추적법을 이용한다. 변동저류추적법은 Williams(1969)에 의해 개발되었으며, 하도구간에 대하여 연속방정식을 기초로 저류추적이 이루어진다. Muskingum 하도 추적법은 자연하도의 저류가 하상과 평행인 태형(prism)저류와 수면의 상승 하강으로 인한 쐐기(wedge)저류의 합으로 하도에서의 저류량을 모의한다. 태형 저류량은 유출량에만 비례하고, 쐐기저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정한다. 이러한 가정을 이용하여 저류량은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. X는 하도 저류량을 결정하는데 있어서 유입량과 유출량의 상대적인 중요도를 조절하는 가중치이다(예령, 2008).

$$Q_{stored} = K \times Q_{out} + K \times X(Q_{\in} - Q_{out}) \quad (6)$$

여기서, $Q_{stored}$=저류량 (㎥), $Q_{\in}$=유입량 (㎥), $Q_{out}$=유출량(㎥), $K$=하도에 대한 저류시간 상수(sec), $X$=가중치이다.

또한 하천에서의 유사이동은 퇴적(deposition)과 침식(degradation) 두 가지로 결정된다. 퇴적과 침식은 두 가지 하도추적법에 기초하여 유사의 연속방정식으로 계산한다. 연속방정식에 의하여 한구간(reach)에서의 유사량은 식 (7)과 같이 나타낸다. 유사이동에 의한 하천의 바닥 침식(downcutting)과 측방침식(widening)이 모의기간 동안 계산되어 반영된다.

$$Sed_{ch} = Sed_{ch,i} - Sed_{dep} + Sed_{\deg} \quad (7)$$

여기서, $Sed_{ch}$=하천 구간의 유사량, $Sed_{ch,i}$=초기유사량, $Sed_{dep}$=퇴적 유사량, $Sed_{\deg}$=재부상 유사량이다.

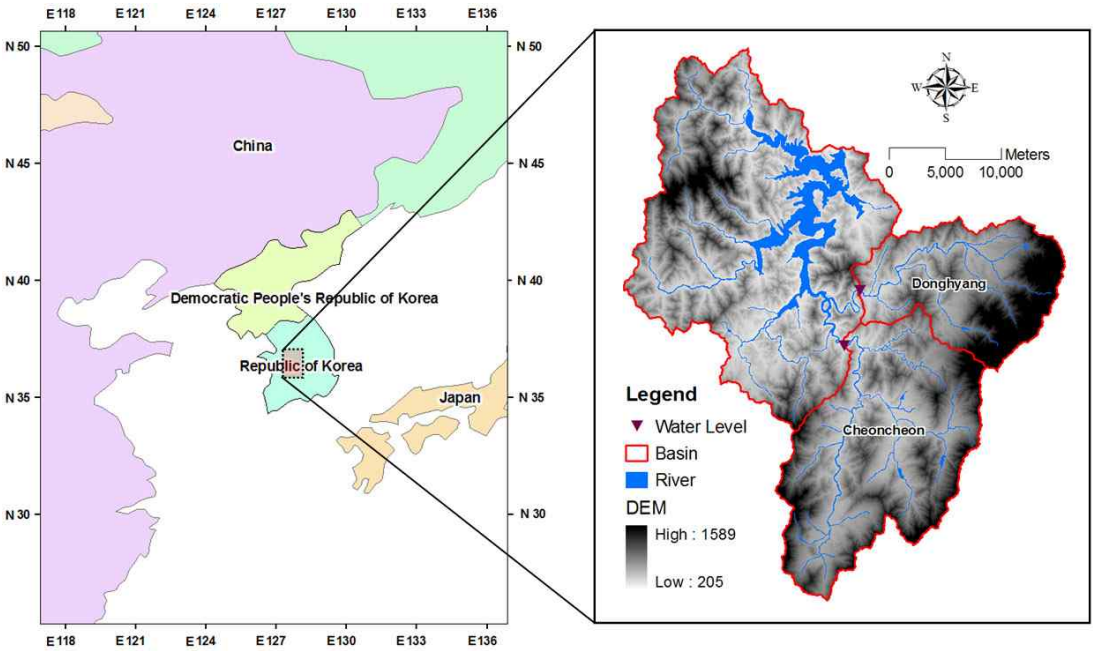



FIGURE 1. Study area

## 적용 및 분석결과

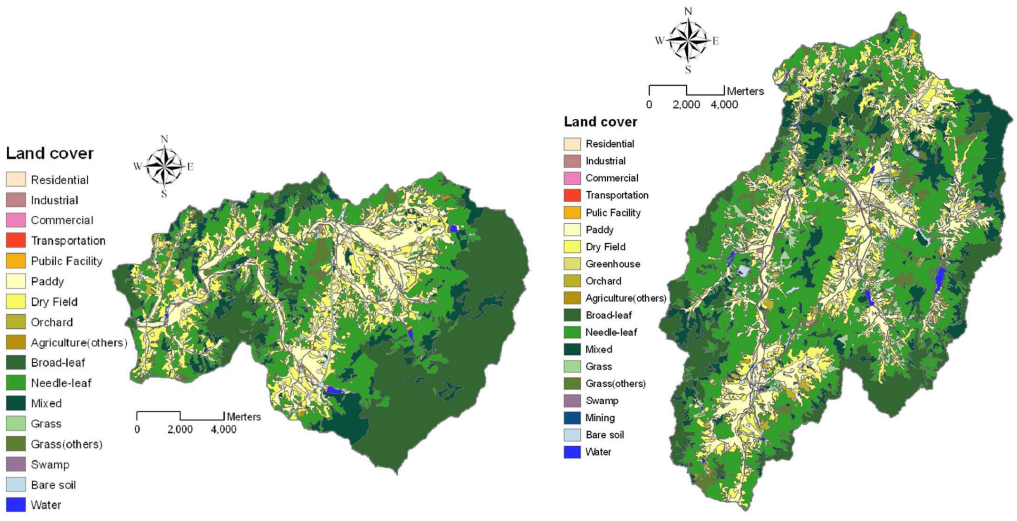
### 1. 연구대상지

용담댐은 금강본류, 전북 진안군 용담면 월계리에 높이 70 m, 길이 498 m의 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐으로서, 댐건설로 형성될 저수지 용량은 815백만 ㎥이고, 저수지에 수몰되는 면적은 31,595,000 ㎡, 이설도로는 11개노선 64.4 ㎞ 이다. 전주권의 용수공급을 위한 도수터널(직경 3.2 m, 길이 21.9 km)은 1997년 12월에 굴착 완료하였고, 터널 말단부에는 청정에너지 생산을 위한 수력발전소가 건설되었다. 용담댐 유역은 한국수자원공사에서 시험유역으로 지정되어 다양한 수리 수문자료의 수집 및 검증을 위한 대표유역으로 활용되고 있으며, 호내로 유입되기 전의 직상류에는 동향과 천천수위관측소가 위치하고 있어 강우-유출 및 유사량 관측을 통한 신뢰도 높은 자료 구축이 수행되고 있다. 본 연구에서는 동향과 수위관측소를 유출구로 하는 유역을 선정하여 강우-유출 및 유사량 검보정을 위한 연구대상지를 선정하였으며, 동향과 천천 유역의 면적은 각각 165 ㎢와 286 ㎢이다.

### 2. 입력자료의 구성

SWAT 모델은 물의 거동, 유사이송, 작물 성장, 영양물질의 순환 등과 같은 물리적인 과정을 모의하기 위하여 일 강수자료(mm), 일 최대·최저기온(℃), 태양복사에너지(MJ/㎡/day), 풍속(㎧)과 상대습도(%) 등의 기상 및 수문자료와 이들의 위치정보인 수치표고모형(DEM; Digital Elevation Model), 토양도, 토지피복도가 요구된다.

먼저, DEM 자료는 1:5,000 수치지형도의 등고선 레이어를 이용하여 격자크기 30m로 구축하였으며, 토양도는 농업과학기술원의 1:25,000 정밀토양도를 이용하였다. 또한 토지피복도는 그림 2와 같이 환경부에서 구축한 중분류 체계의 자료를 활용하였으며, 각 토지피복별 분포특성은 표 1과 같다. 동향과 천천유역은 비교적 산악지역에 위치하고 있어 각 토지피복별 분포특성에 특이할 만한 차이를 보이는 것은 없는 것으로 나타났으며, 따라서 강우-유출 및 부유사량을 서로 비교하고 검증하는데 일반화를 보일 수 있을 것으로 판단된다.

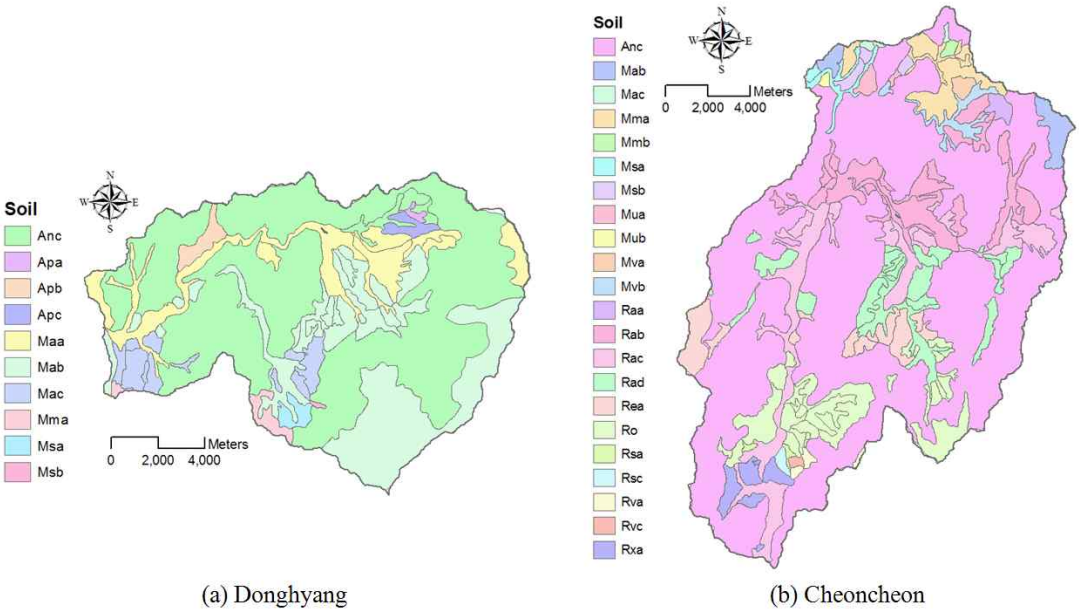



(a) Donghyang (b) Cheoncheon

FIGURE 2. Land cover map of Donghyang and Cheoncheon basin

TABLE 1. Land cover of Donghyang and Cheoncheon basin

| Land cover | | Code | Donghyang basin | | Cheoncheon basin | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Area(㎢) | (%) | Area(㎢) | (%) |
| Urban Area | Residential Area | 11 | 2.76 | 1.67 | 5.19 | 1.81 |
| | Industrial Area | 12 | 0.06 | 0.04 | 0.24 | 0.08 |
| | Commercial Area | 13 | 0.03 | 0.02 | 0.10 | 0.04 |
| | Recreation Facility | 14 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Transportation Area | 15 | 1.59 | 0.96 | 2.49 | 0.87 |
| | Public Facility | 16 | 0.11 | 0.06 | 0.38 | 0.13 |
| | Σ | | 4.55 | 2.75 | 8.4 | 2.93 |
| Agricultural Area | Paddy | 21 | 21.59 | 13.06 | 37.25 | 13.05 |
| | Dry Field | 22 | 22.05 | 13.34 | 33.25 | 11.59 |
| | Plastic Greenhouse | 23 | 0.00 | 0.00 | 0.04 | 0.01 |
| | Orchard | 24 | 0.75 | 0.46 | 3.15 | 1.10 |
| | Agricultural (others) | 25 | 0.39 | 0.24 | 0.58 | 0.20 |
| | Σ | | 44.78 | 27.1 | 74.27 | 25.95 |
| Fores | Broad-leaf | 31 | 46.75 | 28.26 | 36.43 | 12.73 |
| | Needle-leaf | 32 | 47.29 | 28.60 | 110.95 | 38.73 |
| | Mixed | 33 | 16.79 | 10.16 | 32.86 | 11.50 |
| | Σ | | 110.83 | 67.02 | 180.24 | 62.96 |
| Grass | Grass | 41 | 0.42 | 0.25 | 8.11 | 2.83 |
| | Grass (others) | 42 | 2.24 | 1.36 | 8.55 | 2.98 |
| | Σ | | 2.66 | 1.61 | 16.66 | 5.81 |
| Swamp | Swamp | 51 | 0.23 | 0.13 | 1.04 | 0.36 |
| Bare | Mining | 61 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | 0.09 |
| | Bare soil | 62 | 1.35 | 0.81 | 3.19 | 1.12 |
| | Σ | | 1.35 | 0.81 | 3.44 | 1.21 |
| Water | Water | 71 | 0.97 | 0.58 | 2.23 | 0.78 |
| | Sum | | 325.64 | 196.96.00 | 559.14 | 195.3.00 |




(a) Donghyang (b) Cheoncheon

FIGURE 3. Soil map of Donghyang and Cheoncheon basin

TABLE 2. Soil types of Donghyang and Cheoncheon basin

| Soil Code | Donghyang | | Cheoncheon | | Soil Code | Donghyang | | Cheoncheon | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Area(㎢) | (%) | Area(㎢) | (%) | | Area(㎢) | (%) | Area(㎢) | (%) |
| Anc | 92.97 | 56.37 | 168.77 | 58.95 | Mva | – | – | 0.87 | 0.31 |
| Apa | 0.39 | 0.22 | – | – | Mvb | – | – | 3.07 | 1.07 |
| Apb | 1.99 | 1.17 | – | – | Raa | – | – | 1.18 | 0.41 |
| Apc | 1.41 | 0.82 | – | – | Rab | – | – | 20.80 | 7.27 |
| Maa | 19.02 | 11.50 | – | – | Rac | – | – | 21.70 | 7.58 |
| Mab | 39.28 | 23.79 | 4.04 | 1.41 | Rad | – | – | 15.80 | 5.52 |
| Mac | 6.87 | 4.12 | 0.52 | 0.18 | Rea | – | – | 9.14 | 3.19 |
| Mma | 1.89 | 1.11 | 8.02 | 2.80 | Ro | – | – | 20.42 | 7.13 |
| Mmb | – | – | 0.43 | 0.15 | Rsa | – | – | 0.51 | 0.18 |
| Msa | 1.39 | 0.81 | 2.30 | 0.80 | Rsc | – | – | 0.54 | 0.19 |
| Msb | 0.16 | 0.07 | 1.52 | 0.53 | Rva | – | – | 0.84 | 0.29 |
| Mua | – | – | 1.15 | 0.40 | Rvc | – | – | 0.32 | 0.11 |
| Mub | – | – | 0.25 | 0.09 | Rxa | – | – | 4.08 | 1.43 |
| Sum | 165.37 | 100.00 | 286.28 | 100.00 | | | | | |

기상자료중 일 강우자료는 한국수자원공사 댐통합정보시스템에서 제공하는 안천, 상전, 주천, 부귀, 계북2, 천천2, 장계, 북상, 서하, 성수 등 총 10개 강우관측소의 2001년~2008년 자료를 이용하였으며, 최대·최저기온(℃), 일평균 풍속(㎧), 일 상대습도(%)는 WAMIS에서 제공되는 금산과 장수 관측소의 자료를 이용하였다.

## 3. 적용 및 분석결과

동향과 천천유역을 포함하고 있는 용담댐 유역의 DEM 자료를 기반으로 SWAT 모델 구축을 위한 소유역을 생성하였다. 이를 위해 DEM 자료로부터 흐름방향도와 흐름누적도를 계산한 후 Threshold area를 1800 ha로 설정하여 하천망을 생성하였으며, 검·보정 지점인 동향과 천천 수위국을 소유역의 출구점으로 추가하여 연구대상지내에 총 14개의 소유역을 구성하였다.

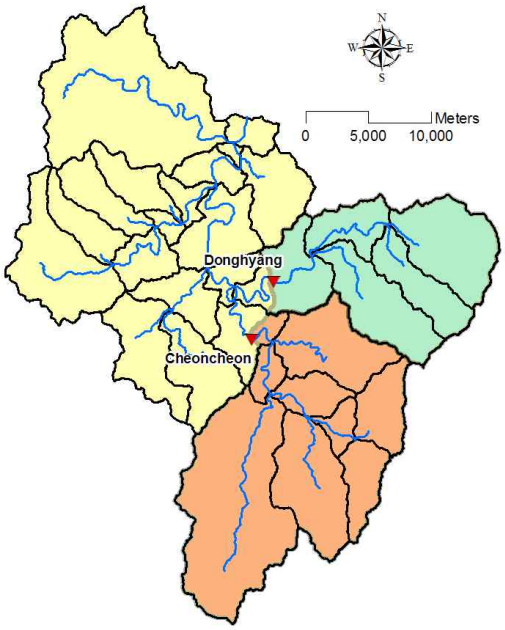



FIGURE 4. Sub-basin of Yongdam Dam

SWAT 모델의 기본단위인 HRU는 분할된 각 소유역내에서 동일한 토지이용과 토양특성의 조합으로 구성되며, 토지이용과 토양특성의 비율을 지정하여 각 소유역별 HRU 수를 조절할 수 있다. 토지이용과 토양특성 비율을 모두 0%로 할 경우 매우 작은 영역까지 HRU로 구성되어 처리시간과 용량만 증가하는 문제가 발생한다. 따라서, 본 연구에서는 HRU 생성을 위한 기준을 5%로 지정하여 5% 미만인 토지이용과 토양통은 제외시켜 모델 효율성을 높였으며, 최종적으로 생성된 HRU는 208개로 나타났다.

유량과 부유사량의 검보정 결과에 대한 평가를 위해, 본 연구에서는 결정계수($R^2$)와 모델효율성지수(EI)를 사용하였다(Nash와 Sutcliffe, 1970; Legates와 McCabe, 1999).

$$EI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (8)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \overline{O})^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (9)$$

여기서, $O_i$=관측값, $P_i$=모의값, $\overline{O}$=평균관측값이다.

효율성 지수는 Nash와 Sutcliffe(1970)에 의해 제안되었으며, $EI$는 관측유량과 모의유량과의 관계가 1:1 직선에 얼마나 근접하여 위치하는지를 나타내는 지표다. $EI$가 0보다 작으면 모델의 추정결과가 나쁘거나 실측자료가 일관성이 없음을 의미하고 추정치와 실측치가 일치하면 1.0을 나타내므로 0과 1.0 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이 실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있

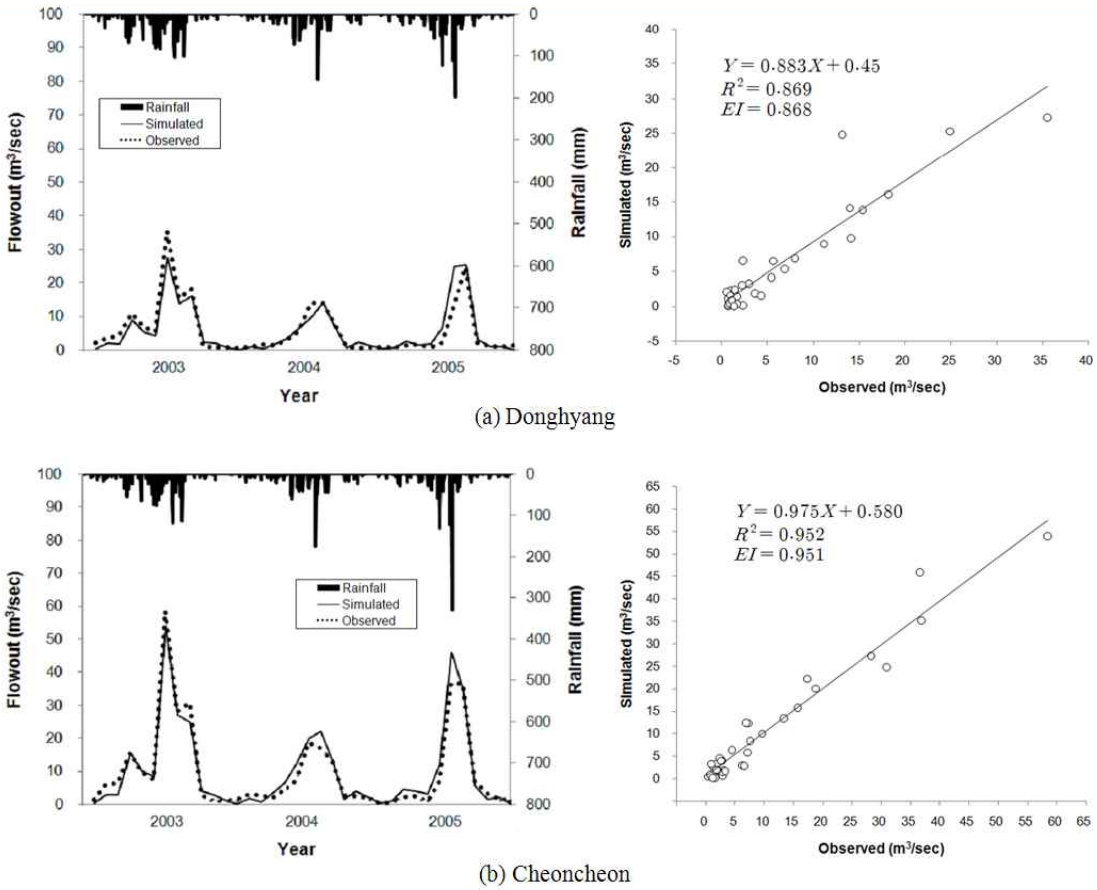



FIGURE 5. Model calibration of Flowout at Donghyang and Cheoncheon gauge station

TABLE 3. The equation of Q-SS at Donghyang and Cheoncheon gauge station

| Gauge station | Year | Eq. of Q-SS | Gauge station | Years | Eq. of Q-SS |
|---|---|---|---|---|---|
| Dong-hyang | 2003 | $SS = 6.00E-07 \times Q^{1.7975}$ | Cheon-cheon | 2003 | $SS = 3.00E-07 \times Q^{1.932}$ |
| | 2004 | $SS = 1.00E-09 \times Q^{2.2166}$ | | 2004 | $SS = 2.00E-09 \times Q^{2.1438}$ |
| | 2005 | $SS = 4.97E-08 \times Q^{1.978}$ | | 2005 | $SS = 8.36E-08 \times Q^{1.896}$ |
| | 2006 | $SS = 1.31E-07 \times Q^{1.931}$ | | 2006 | $SS = 3.43E-05 \times Q^{1.53}$ |
| | 2007 | $SS = 9.02E-07 \times Q^{1.741}$ | | 2007 | $SS = 2.08E-07 \times Q^{1.818}$ |
| | 2008 | $SS = 1.00E-06 \times Q^{1.741}$ | | 2008 | $SS = 1.00E-10 \times Q^{2.371}$ |

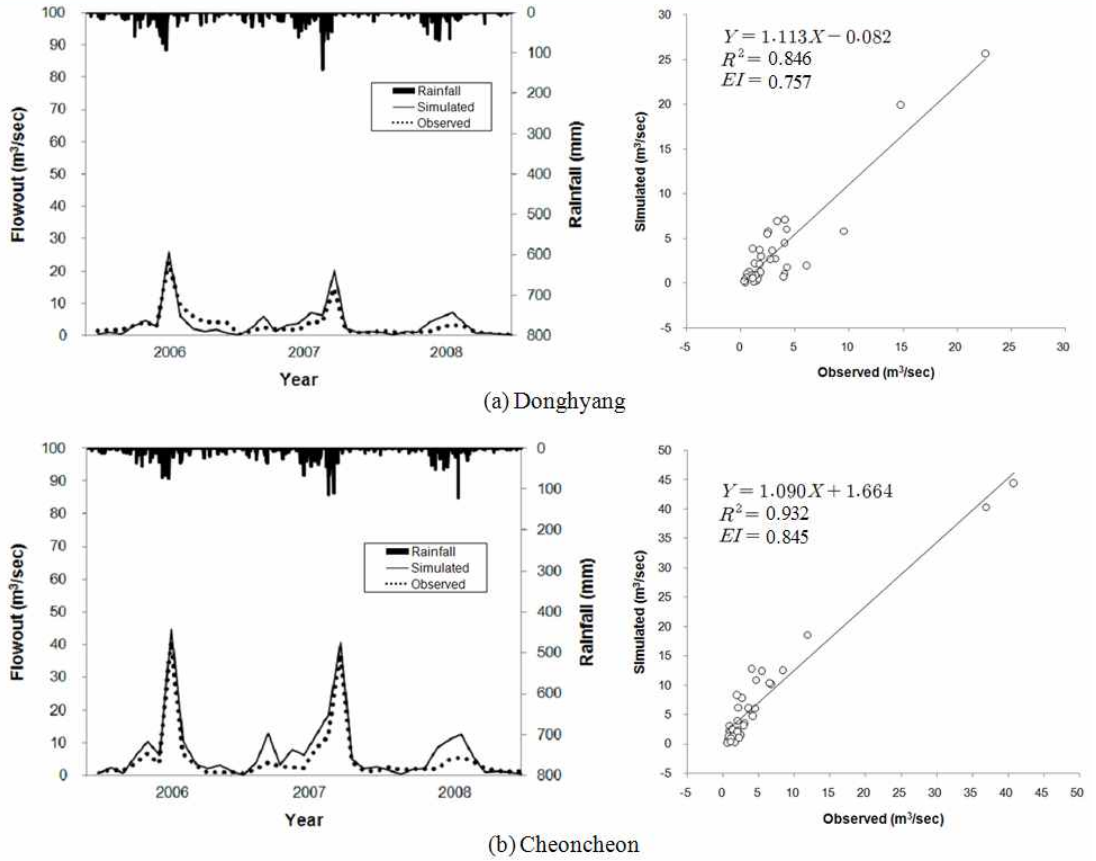



FIGURE 6. Model validation of Flowout at Donghyang and Cheoncheon gauge station

다. 결정계수는 피어슨의 적률상관관계(Pearson's product-moment correlation)의 제곱으로 표현되고, 모델에서 관측유량의 분산정도를 설명할 수 있다(Legates와 McCabe, 1999). 즉, 결정계수는 관측유량과 모의유량에 대한 상관관계정도를 나타내며, $R^2$이 1에 가까울수록 모의 결과가 실제 현상을 잘 표현한다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 용담댐 상류 유역에 대하여 천천, 동향 수위국의 월 유량과 월 유사량 자료를 이용하여 검보정을 수행하였다. 동향과 천천 유역에 위치하고 있는 일단위 강우자료를 기반으로 모의된 유량의 검보정을 위해, 2003년~2005년까지의 관측된 월단위의 유량과 유사량을 보정자료로 선정하였으며 2006~2008년까지는 검증자료로 활용하였다. 모의된 월단위 유량과의 비교를 위한 관측유량은 한강홍수통제소 홈페이지(www.hrfco.go.kr)의 수문조사연보시스템에서 제공하는 수위-유량 곡선식 자료를 이용하였으며, 유사량은 한국수자원공사에서 매년 수행하고 있는 용담댐 하천유량측정 보고서를 활용하였다(한국수자원공사, 2002~2008).

동향과 천천유역의 모델 보정과 검증결과는 각각 그림 5 및 6과 같다. 먼저, 동향과 천천 수위국 지점을 활용하여 2003년~2005년 동안의 유량을 보정한 결과 동향 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.869와 0.868로 나타났으며, 천천 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.952와 0.951로 매

우 높게 나타났다.

유량자료의 보정을 위한 매개변수 조정은 0.01~1의 범위를 갖는 ESCO와 35~98의 범위를 보이는 CN2 값을 선정하여 실시하였다. ESCO는 토양증발 보상계수로서 유출총량에 대한 보정매개변수 역할을 한다. ESCO의 값이 증가할수록 토양층의 증발량이 줄어들면서 상대적으로 다른 유출요소를 증가시킨다. CN2는 평균수분 상태일때의 수문학적 곡선번호로서 CN값이 증가할 수록 유속이 커져 유출이 증가하는 특성을 갖는다. 도심지의 경우 CN값이 높게 나타나고 산림과 같은 피복에서는 CN값이 낮게 나타난다. 매개변수 조정은 유역마다 특성이 서로 상이하여 일관성 있게 조정하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 시행착오법을 이용하여 매개변수 조정을 실시하였으며, 수행 결과 ESCO는 1.0을 적용한 경우가 가장 좋은 결과를 보였다. 또한 토지피복도와 토양도에서 계산된 천천의 CN 값은 좋은 결과를 보였지만, 동향유역은 전체적으로 -20%를 조정하여 적용한 경우가 가장 좋은 결과를 나타내었다(표 4).

Green 등(2006)은 $R^2$이 0.5 이상이고 $EI$가 0.4 이상, Chung 등(1999)은 $R^2$가 0.5 이상, Ramanarayanan 등(1997)과 Santhi 등(2001a, 2001b)은 $R^2$가 0.6 이상이고 $EI$가 -0.5 이상이면 모델이 자연현상을 잘 모의한다고 제안한 바 있다.

매개변수 조정을 통해 수행한 동향과 천천 유역의 유량 보정결과를 이용하여 2006년~2008년까지 유량 자료를 검증한 결과 동향 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.846과 0.757로 나타났으며, 천천 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.932와 0.845로 매우 높게 나타났다. 이러한 연구들을 볼 때, 본 연구에서 SWAT 모델을 이용하여 모의한 동향과 천천 유역의 유량은 매우 좋은 결과라고 해석된다.

동향과 천천지점에 대한 유량 모의 결과를 기반으로 부유사량을 모의하였다. 모의된 부유사량 자료의 검보정을 위해 2003년~2008년까지의 "용담댐 하천유량측정 보고서"에 제시되어 있는 Q-SS 곡선식을 이용하였다(한국수자원공사, 2003~2008).

그림 7은 2003년~2005년 동안의 동향과 천천 수위국 지점의 부유사량을 보정한 결과로서, 동향 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.772와 0.759로 나타났으며, 천천 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.857과 0.803으로 매우 높게 나타났다.

부유사량 보정을 위한 매개변수는 주로 USLE 입력인자와 유사량 결정계수인 SPCON이 이용된다. 본 연구에서는 USLE 입력인자는 계산된 결과를 그대로 활용하였으며

TABLE 4. Adjusted major parameters in SWAT model

| Name | Definition | Min | Default | Max | Adjusted (sub-basin) |
|---|---|---|---|---|---|
| ESCO | Soil evaporation compensation factor | 0.01 | 0.95 | 1 | 1.0 (All) |
| CN2 | SCS runoff curve number for moisture condition II | 35 | variable | 98 | -20% (Donghyang) |
| SPCON | Linear parameter for calculating maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing | 0.0001 | 0.0001 | 0.01 | 0.01 (All) |

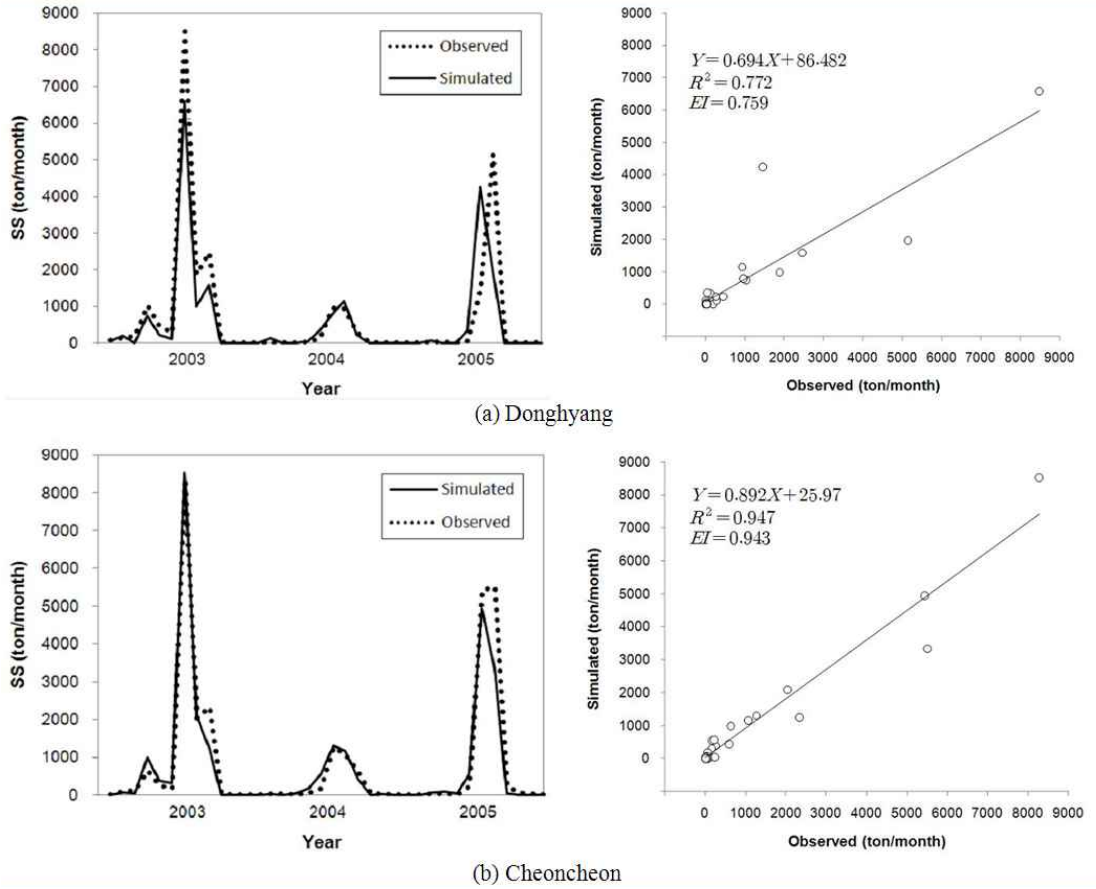



FIGURE 7. Model calibration of SS at Donghyang and Cheoncheon gauge station

TABLE 5. Suspended Sediment Load of Donghyang and Cheoncheon basin

| Year | Rainfall Amounts (㎜) | | Suspended Sediment (ton/year) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Donghyang | | Cheoncheon | |
| | Donghyang | Cheoncheon | Simulated | Observed | Simulated | Observed |
| 2003 | 1,956 | 2,278 | 10,516 | 14,981 | 13,688 | 13,917 |
| 2004 | 1,349 | 1,468 | 2,674 | 2,316 | 3,735 | 3,222 |
| 2005 | 1,641 | 1,749 | 6,646 | 6,781 | 9,116 | 11,537 |
| 2006 | 1,284 | 1,507 | 5,894 | 8,315 | 6,939 | 13,323 |
| 2007 | 1,359 | 1,903 | 3,316 | 1,620 | 6,093 | 5,266 |
| 2008 | 804 | 1,011 | 841 | 321 | 1,587 | 245 |

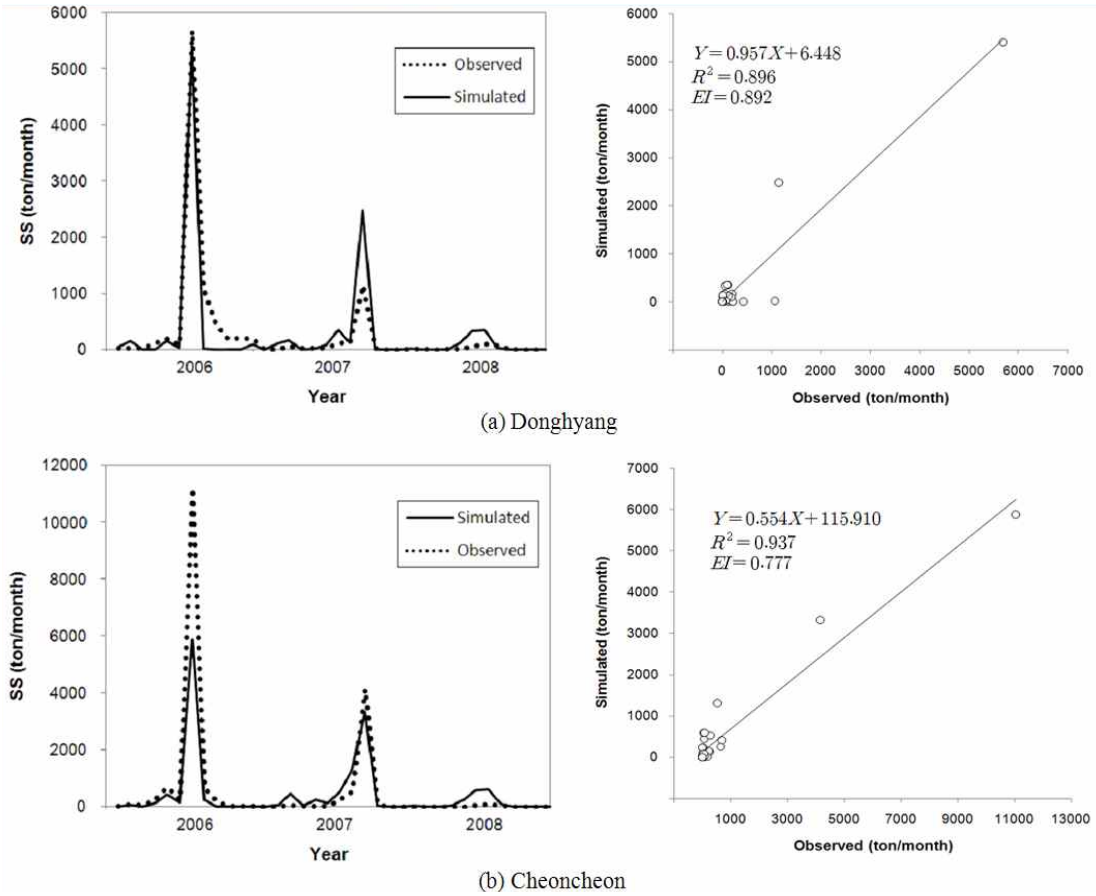



FIGURE 8. Model validation of SS at Donghyang and Cheoncheon gauge station

SPCON은 최대값인 0.01 일 때가 가장 좋은 결과를 나타내었다. SPCON을 조정한 결과를 이용하여 2006~2008년까지 부유사량을 검증한 결과, 동향 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.896과 0.911로 나타났으며 천천 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.937과 0.779로 매우 높게 나타났다. 이러한 결과를 볼 때, 유량에 기초하여 모의된 동향과 천천 유역의 부유사량도 자연현상을 잘 모의하는 것으로 판단된다(Chung 등, 1999; Green 등, 2006; Ramanarayanan 등, 1997; Santhi 등, 2001a).

SWAT 모델을 이용하여 부유사량을 추정한 결과는 표 5와 같다. 분석 결과, 2003년의 부유사량이 가장 높게 나타났으며, 각 연도별 강우량 자료와 비교시 2003년도의 부유사량의 비율이 다른 연도에 비해 큰 차이를 보였다. 이는 강우량 측면보다는 특정 강우사상의 강우강도에 의한 영향이 크게 반영된 것으로 해석된다.

## 요약 및 결론

최근 유역관리 측면에서 토사유출 및 탁수관리 문제가 매우 중요하게 다루어지고 있다. 본 연구에서는 저수지 관리 측면에서 탁수발생의 원인이 되는 부유사 발생량을 모의하기 위해 용담댐 상류의 동향과 천천 유역을 연구대상지로 선정하여 GIS 기반의 SWAT 모델

을 적용하였다. SWAT 모델은 용담댐과 같은 농촌지역에 적용 가능한 유역모델로서 하천내 수위-유량 관계식 및 유량-유사량 곡선식 자료가 잘 구축된 하천 유역에 대한 모의에 적합하다. SWAT 모델을 구축하기 위해 수치지형도를 기반으로 DEM을 추출하였으며, 토지피복도와 정밀토양도는 환경부와 농업과학원의 자료를 활용하였다.

한강홍수통제소의 수문조사연보시스템에서 제공하는 수위-유량 곡선식을 관측유량으로 활용하여 2003년~2005년 동안의 일강우 자료를 이용하여 동향과 천천 유역의 유량을 모의한 결과, 동향 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.869와 0.868로 나타났으며, 천천 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.952와 0.951로 매우 높게 나타났다. 유량보정을 위해 ESCO와 CN2를 선정하였으며, 시행착오법을 이용하여 분석한 결과 ESCO는 1.0 그리고 CN2는 동향유역에 대해서만 -20%를 적용한 경우가 가장 좋은 결과를 얻었다. 보정결과를 이용하여 2006년~2008년까지 유량 자료를 검증한 결과 동향 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.846과 0.757로 나타났으며, 천천 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.932와 0.845로 매우 높게 나타났다. 따라서, 본 연구에서 SWAT 모델을 이용하여 모의한 동향과 천천 유역의 유량은 매우 좋은 결과라고 해석된다.

한국수자원공사에서 매년 수행하고 있는 용담댐 하천유량측정 보고서에 제시된 유량-유사량 곡선식을 활용하여 2003년~2005년 동안의 부유사량 자료를 모의한 결과, 동향 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.772와 0.759로 나타났으며, 천천 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.857과 0.803으로 매우 높게 나타났다. 유사량 보정은 시행착오법을 이용하여 계산한 결과 SPCON이 최대값인 0.01 일 때가 가장 좋은 결과를 나타내었다. SPCON을 조정한 결과를 이용하여 2006~2008년까지 유사량을 검증한 결과, 동향 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.896과 0.911로 나타났으며 천천 지점의 $R^2$과 $EI$는 각각 0.937과 0.779로 매우 높게 나타났다. 따라서, 동향과 천천지점의 SWAT 모델을 활용한 유사량 모의도 좋은 결과를 나타낸 것으로 해석된다.

SWAT 모델을 이용하여 연도별 부유사량을 추정한 결과 2003년의 동향과 천천의 부유사량이 각각 10,516 ton과 13,688 ton 으로서 가장 높게 나타났다. 각 연도별 강우량 자료와 비교시 2003년도의 부유사량의 비율이 다른 연도에 비해 큰 차이를 보였으며, 이는 강우량 측면보다는 특정 강우사상의 강우강도에 의한 영향이 크게 반영된 것으로 해석된다. 본 연구에서 모의된 부유사량 분석결과는 저수지 관리를 위한 토양침식 가능성 및 탁수발생 잠재성을 평가하기 위한 자료로 활용될 수 있을 것이다. KAGIS

## 참고 문헌

갈병석. 2008. SWAT 모형을 이용한 낙동강 유량 및 부유사량 변동 분석 연구. 석사학위논문. 부산대학교.

김보경, 김상단, 이은태, 김형수. 2007. SWAT 모형 매개변수의 적정 범위 추정방법 개발 : 임하호 유입량 및 부유사량에의 적용. 대한토목학회논문집 27(6B): 661-668.

김정곤, 손경호, 노준우, 이상욱. 2008. SWAT 모델을 이용한 임하·안동 유역의 부유사량 발생량 추정. 대한환경공학회지 30(12): 1209-1217.

박종윤, 이미선, 이용준, 김성준. 2008. SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향 분석. 대한토목학회논문집 28(2B): 187-197.

예령, 윤성완, 정세웅. 2008. 대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT 모델의 적용, 한국수자원학회논문집 41(2): 149-162.

예령, 정세웅, 이홍수, 윤성완, 정희영. 2009. SWAT 모형을 이용한 대청댐 유역의 기후인자에 따른 유출 및 유사량 민감도 평가. 수질보전 한국물환경학회지 25(1): 7-17.

이근상. 2006. GIS 공간분석을 이용한 안동·임하호 유역의 토사유실 비교 평가. 대한토목학회논문집 26(2D): 341-347.

이근상. 2007. GIS 기반 고랭지밭의 토사유실 영향 분석. 대한토목학회논문집 27(5D): 657-662.

정재운. 2005. SWAT 모형에 의한 주암호 외남천 유역의 비점오염 부하 추정. 석사학위논문. 전남대학교.

한국수자원공사. 2002. 2002년 용담댐 일원 하천 유량측정 등 수문조사 보고서. 용담댐관리단.

한국수자원공사. 2003. 2003년 용담댐 일원 하천 유량측정 등 수문조사 보고서. 용담댐관리단.

한국수자원공사. 2004. 2004년 용담댐 일원 하천 유량측정 등 수문조사 보고서. 용담댐관리단.

한국수자원공사. 2005. 2005년 용담댐 일원 수자원·환경기초시설 조사. 용담댐관리단.

한국수자원공사. 2006. 2006년 용담댐 일원 수자원·환경기초조사. 용담댐관리단.

한국수자원공사. 2007. 2007년 용담댐 일원 수자원·환경기초조사. 용담댐관리단.

한국수자원공사. 2008. 금강수계 수자원·환경 기초조사 용역. 용담댐관리단.

Arnold, J. G., R. Srinvasan, R. S. Muttiah and J. R. Williams. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part 1: Model development. Journal of the American Water Resources Association 34(1): 73-89.

Chung, S. W., P. W. Gassman, L. A. Kramer, J. R. Williams and R. Gu. 1999. Validation of EPIC for two watersheds in southwest Iowa. Journal of Environmental Quality 28(3): 971-979.

Francisco Olivera, M. Valenzuek, R. Srinivasan, J. H. Choi, Hindae Cho, Srikanth koka and Ashish Agrawal. 2006. ArcGIS-SWAT : A Geodata Model and GIS Interface for SWAT. Journal of the American Water Resources Association 42(2): 295-309.

Green, W. H. and G. A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Sciences 4: 11-24.

Green, C. H., M. D. Tomer, M. Di Luzio and J. G. Arnold. 2006. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. Transactions of the ASAE 49(2): 413-422.

Jennifer Benaman, A. M., Christine A. Shoemaker, F. and Douglas A. Haith, M. 2005. Calibration and Validation of Soil and Water Assessment Tool on an agricultural watershed in upstate New York. Journal of Hydrologic Engineering 10(5): 363-374.

Kati, W. Migliaccio and Indrajeet Chaubey. 2008. Spatial distributions and stochastic parameter influences on SWAT flow and sediment predictions. Journal of Hydrologic Engineering 13(4): 258-269.

Lagates, D. R. and G. J. McCabe. 1999. Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydro-climatic model validation. Water Resource Research 35(1): 233-241.

Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual model; Part 1 - A discussion of principles. Journal of Hydrology 10(3): 398-409.

Olivera, F., M. Valenzuela, R. Srinivasan, J. Choi, H. Cho, Koka, S. and A. Agrawal, 2006. ArcGIS-SWAT : A Geodata Model and GIS Interface for SWAT. Journal of the American Water Resources Association 42(2): 295-309.

Ramanarayanan, T. S. Williams, J. R., Dugas, W. A., Heuck, L. M. and McFarland, A. M. S. 1997. Using APEC to identify alternative practiced for animal waste management, Minnea-polis. ASAE Paper. No. 97-2209.

Renard, K. G., G. R. Foster, G. A. Weesies, D. K. McCool and D. C. Yoder. 1997. Predicting Soil Erosion by Water : A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture. Agriculture Handbook. No. 703.

Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan and L. Hauck. 2001a. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources.

Journal of the American Water Resources Association 37(5): 1169-1188.

Santhi, C., J. G. Arnold, J. R. Williams, Hauck, L. and W. A. Dugas. 2001b. Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution. Transactions of the ASAE 44(6): 1559-1570.

Soil Conservation Service. 1972. Section 4 : Hydrology in National Engineering Handbook, SCS.

Williams, J. R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Transactions of the ASAE 12(1): 100-103.

Williams, J. R. 1995. Chapter 25. The EPIC Model, In Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Highlands Ranch, Co. 909-1000.

Wischmeier, W. H. 1960. Croppong-management factor evaluation for a universal soil-loss equation. Soil Science Society of America Proceedings 23: 322-326. 