

대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT 모델의 적용

Application of SWAT for the Estimation of Soil Loss in the Daecheong Dam Basin

예 령* / 윤 성 완** / 정 세 응***

Ye, Lyeong / Yoon, Sung-Wan / Chung, Se-Woong

Abstract

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) developed by the USDA-Agricultural Research Service for the prediction of land management impact on water, sediment, and agricultural chemical yields in a large-scale basin was applied to Daecheong Reservoir basin to estimate the amount of soil losses from different land uses. The research outcomes provide important indications for reservoir managers and policy makers to search alternative watershed management practices for the mitigation of reservoir turbidity flow problems. After calibrations of key model parameters, SWAT showed fairly good performance by adequately simulating observed annual runoff components and replicating the monthly flow regimes in the basin. The specific soil losses from agricultural farm field, forest, urban area, and paddy field were 33.1, 2.3~5.4 depending on the tree types, 1.0, and 0.1 tons/ha/yr, respectively in 2004. It was noticed that about 55.3% of the total annual soil loss is caused by agricultural activities although agricultural land occupies only 10% in the basin. Although the soil erosion assessment approach adopted in this study has some extent of uncertainties due to the lack of detailed information on crop types and management activities, the results at least imply that soil erosion control practices for the vulnerable agricultural farm lands can be one of the most effective alternatives to reduce the impact of turbidity flow in the river basin system.

keywords : SWAT, Soil erosion, Reservoir turbidity, Land uses, MUSLE

요 지

미국농무성에서 토양과 토지이용 특성을 고려한 대규모 유역의 유출해석과 토양침식량 및 비점오염원 부하를 해석하기 위해 개발한 SWAT 모델을 대청댐 유역에 적용하여 토지이용 특성별 토양침식량을 산정하였다. 연구결과는 저수지관리자와 정책입안자들에게 저수지 탁수문제를 완화하기 위한 유역관리 대안의 효율성을 평가하는데 중요한 정보를 제공한다. 유출과 토양 유실량 산정에 영향을 미치는 주요한 매개변수들을 보정한 후, 모델은 실측 연간 유출 성분과 월별 유황변화를 비교적 잘 예측하였다. 모의결과, 토지 이용별 단위면적당 토양침식량은 밭이 33.1 ton/ha/yr로 가장 많았으며, 임야는 수목의 종류에 따라 2.3~5.4 ton/ha/yr, 도시지역 1.0 ton/ha/yr, 논 0.1 ton/ha/yr의 순으로

* 충북대학교 환경공학과 석사과정, 충북 청주시 흥덕구 개신동 12
Graduate student, Dept. of Environ. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
(e-mail: withye@chungbuk.ac.kr)

** 국립환경과학원 금강물환경연구소 연구원, 충북 옥천군 안내면 동대리 395-1
Researcher, Geum-River Environmental Research Laboratory, Okcheon-gun, 373-812, Korea

*** 충북대학교 환경공학과 부교수, 교신저자
Associate Prof., Dept. of Environ. Engrg. Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea
(e-mail: chung@chungbuk.ac.kr)

나타났다. 토지이용면적 가중 연간 토양침식량 산정결과, 밭은 유역전체 면적에서 차지하는 비율이 단지 10% 정도에 해당하지만 연간 총 토양침식량의 55.3%를 차지하는 것으로 나타났다. 비록 본 연구에서 적용한 토양침식량 산정 방법에 농작물의 종류와 경작형태에 대한 구체적인 정보를 포함하지 못하는 불확실성이 내재되어 있으나, 연구결과는 최소한 저수지의 탁수문제를 완화하기 위해서는 상류 유역의 토양침식 조절대책이 필요함을 시사하며, 유역의 점유율에 비해 토양침식에 기여도가 가장 큰 밭농사 지역에 대한 토양침식 억제 대책을 우선 실시하는 것이 가장 효율적일 것으로 판단된다.

핵심용어 : SWAT, 토양침식, 저수지 탁수, 토지이용, MUSLE

1. 서 론

최근 여름철 이상홍수사상의 증가로 대부분의 다목적 댐 저수지는 상류하천으로부터 유입되는 고탁도의 탁수로 인해 수자원의 이용, 저수지 수질관리 및 생태계에 적지 않은 부정적 영향을 미치는 것으로 지적되고 있다(정세웅 등, 2005a; 최지용 등, 2005). 임하댐과 도암댐의 경우 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미로 인해 발생한 탁수는 용수 공급 및 수력발전 중단 사태를 야기하였으며, 이는 탁수가 수자원의 양적·질적 확보에 어려움을 주고 있음을 시사한다. 탁수는 인을 포함한 다양한 오염원을 저수지로 단시간에 다량 유입시켜 부영양화뿐만 아니라 빛 투과능저하 및 저수지퇴사를 일으켜 저수지 생태계에 악영향을 미칠 수 있다. 유입된 탁수는 수개월씩 댐 저수지내에 체류하면서 댐 하류로 장기간 방류됨에 따라 지역주민의 민원을 야기하고 있어 사회적으로도 큰 문제가 되고 있다.

탁수발생의 주요원인은 대부분 강우-유출에 의한 상류 유역의 토양 침식에 의해 이루어지며 이러한 토양침식은 질소·인과 같은 영양염류도 함께 운반하므로 비점오염원으로도 문제가 되고 있다. 토양침식은 자연적인 현상 때문으로도 일어나지만, 유역에서의 밭농사 등의 경작지, 대형 토목공사, 벌목공사, 고랭지 채소밭 조성 과 같은 인위적인 원인도 크다(정세웅, 2004). 탁수발생은 여름철 강우특성에 큰 영향을 받으며, 특히 유역의 토지이용특성에 많은 영향을 받으므로, 탁수문제의 근본적이고 사전 예방적 해결을 위해서는 유역차원의 탁수발생 저감 대책이 필요하다(최지용 등, 2005).

저수지 탁수 저감을 위한 유역관리 대책에는 상류 유역의 토지 개발 및 이용 제어, 토양 유실 방지, 하천 제방 유실 억제, 훼손된 산림의 복원 등이 포함된다. 그리고 탁수유입을 방지하기 위한 우회수로 설치, 경작지 토사유출을 억제하는 밭 사면 보강 및 식생 발두렁 설치, 저류지 및 사방댐의 설치 등을 고려할 수 있다. 그러나 이러한 유역대책은 공간적으로 매우 광범위한 영

역에서 이루어져야 하므로 투자에 대한 경제성 문제뿐만 아니라 장시간이 소요되는 문제점이 있으며, 효과에 대한 평가도 쉽지 않다. 따라서 유역대책의 시행착오와 예산 낭비를 최소화하기 위해서는 시행에 앞서 토양 유실량 산정모형을 이용하여 소유역별 토지이용별 침식에 취약한 지역을 평가하고, 대책의 효과와 가능성 그리고 공간적 우선순위를 분석하는 것이 중요하다(정세웅, 2005b).

토양침식량 산정은 국내에서 많은 연구들이 수행되었다. 농촌지역의 토양침식에 관한 연구는 꾸준히 연구되어 왔으며(정영상 등, 1999; 조정래 등, 2005; 허성구 등, 2005), 토양 유실모형의 매개변수 특성에 관한 연구도 이루어진 바 있다(서규우, 2003; 손광익 등, 2003). 최근에는 지형정보시스템(GIS)의 다양한 기능과 기존의 토양유실모형을 결합하여 보다 정교한 토양침식 산정 연구가 이루어지고 있다. GIS를 이용하여 오덕근 등(2002)은 섬진강 다목적댐 유역의 토양 유실량을 산정하였고, 김주훈 등(2003)은 토양침식 위험지역을 분석하였으며, 고지연 등(2006)은 범용토양유실산정모형(USLE)과 GIS를 접목하여 낙동강 유역 농경지의 토양 침식 위험도를 평가하였다. 앞으로도 계속 발전하는 공간분석 기술을 활용한 강우, 유출, 식생 및 토지이용의 공간적 분포특성을 고려한 토양침식 연구가 활발히 이루어질 전망이다.

본 연구의 목적은 대청댐 유역을 대상으로 토양 및 물 순환 모형을 구축하고 토지이용과 토양특성을 고려한 소유역별 토양 침식량을 산정한 후 탁수저감을 위한 유역제어 대책의 가능성을 평가하는데 있다. 유역의 강우 유출 해석과 토양 침식량 산정은 미국 농무성에서 개발한 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 사용하였다(Neitsch et al., 2002). GIS를 기반으로 공간 입력자료를 생성하는 SWAT모형은 일 강우량으로부터 유역의 토지이용뿐 아니라 토양의 종류, 피복상태를 고려하여 토양 유실량을 모의하므로, 본 연구의 주요 목적인 토지이용별 침식량 산정에 적합한 모델로 판단하

었다. 본 연구의 범위는 대청댐 유역의 소유역별 토지 이용별 토양침식량의 산정에 있으므로, 자료의 한계로 인해 특정 개발지역 또는 하천제방과 하도 침식에 의한 토양유실량은 고려되지 못한 한계가 있다.

2. 이론적 배경 및 방법

2.1 토양 침식량 산정 모델

본 연구에서 사용한 SWAT모델은 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 강우-유출 모형으로 대규모 유역에서 장기간에 걸친 토지이용에 따른 물과 유사, 비료 및 농약 등 오염물질의 거동에 대한 해석과 토지관리방법에 따른 영향을 예측하기 위해 개발되었다. SWAT 모형은 현재도 기능이 계속 확장 중인 모델로서 강우-유출해석, 기후변화에 따른 수문응답예측, 유역의 비점오염물질 거동해석, 유역관리대책의 평가 등에서 활발한 연구가 수행되고 있다. SWAT모델은 수정 범용토양유실모델인 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation)에 의해 토양침식량을 산정한다.

경험적 모형인 USLE식(Wischmeier, 1960)은 미국에서 농경지의 토양 침식량 모의를 위해 개발되었다. 이 모형은 강우에너지, 토양의 침식성, 사면길이, 사면의 경사도, 토양의 피복상태를 고려하여 토양침식량을 산정한다. 그러나 USLE 모형은 농업지역의 연평균 토양 침식 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 Soil Loss Equation)가 개발되었다(Renard et al., 1997).

MUSLE모형은 USLE의 강우인자(rainfall energy factor)를 유출인자(runoff factor)로 대체하였는데, 이것은 이송율(delivery ratios) 계산의 필요성을 제거시켜 토양침식량 산정 방법을 향상시키고 결과적으로 단일호우사상에 대한 모의가 가능하게 되었다. 또한 MUSLE 모형에서는 유출량이 강우에너지 뿐만 아니라 선행토양수분상태의 함수로 산정되므로 침식량 예측성능이 보다 향상되었다. MUSLE는 유효유량과 침두유출량의 곱인 유출에너지 인자와 유역의 특성인자 곱으로 나타낼 수 있다. 강우 사상별 토양 침식량을 산정하는 MUSLE 모형은 Eq. (1)과 같다(Williams, 1995).

$$Y = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times A_{hru})^{0.56} \times K_{USLE} \times C_{USLE} \times P_{USLE} \times LS_{USLE} \times CFRG \quad (1)$$

여기서 Y: 유사량(metric tons),

$11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56}$: 유출에너지 인자, Q_{surf} : 지표유출량(m^3/ha), q_{peak} : 침두유출량(m^3/sec), A_{hru} : 수문응답단위(HRU)의 면적(ha), K_{USLE} : 토양침식인자, C_{USLE} : 작물관리인자, P_{USLE} : 토양보전인자, LS_{USLE} : 경사길이와 경사도인자, $CFRG$: 토양입자의 형상계수.

2.1.1 침두유출량(q_{peak})

침두유출량은 주어진 강우사상에서의 최대 유출율을 의미한다. 이는 호우의 침식능력을 나타내며, 유사량 손실을 예측하기 위해 사용된다. SWAT에서는 수정된 합리식을 이용하여 침두 유출량을 계산한다. 합리식은 강우강도 i 가 $t=0$ 에서 시작하여 무한히 연속적이라면 유출량은 도달시간 $t = t_c$ 일 때까지 증가할 것이라는 개념에 근거하고 있다. 전체 소유역 면적이 유역 출구에서의 유출량에 기여한다면 합리식은 Eq. (2)와 같다.

$$q_{peak} = \frac{C \times i \times A}{3.6} \quad (2)$$

여기서 q_{peak} : 침두유출량(m^3/sec), C : 유출계수, i : 강우강도(mm/hr) A : 소유역 면적(km^2), 3.6: 변환상수.

수정 합리식에서 침두유출량은 도달시간 t_c 의 비례적인 함수로 표현되며 소유역의 도달시간 t_c 동안 발생하는 강우량은 추계학적 기법을 이용한 전체 일 강우량의 함수로 추정된다. 소유역의 도달시간은 지표와 하천 흐름을 고려하는 Manning 공식을 이용하여 산정된다.

2.1.2 토양침식능 인자(K_{USLE})

같은 조건의 외부 요소들이 작용해도 토양의 종류에 따라 침식량은 다르다. 이것은 토양의 구성 특성에 따라 침식능이 다르기 때문이다. Wischmeier and Smith(1978)는 토양침식능을 단위구획 토지에서 측정된 (soil loss rate)/(erosion index unit)로 정의하였다. 단위구획은 2년 이상의 휴경지 22.1 m의 길이, 길이방향 경사 9%로 정의하였다.

본 연구에서는 토양침식능인자 K값 산정을 위해 Williams(1995)가 제안한 Eq. (3)을 사용하였다. Eq. (3)에서 K값은 토양의 구성성분과 유기탄소 함량에 의해 결정된다. K값 산정에 필요한 토양의 물리적인 정보들은 SWAT모델에 구축한 정밀 토양통 공간자료로부터 자동 추출 하였으며, 각각의 항목들은 Eqs. (4a)~(4d)와 같이 계산되어 진다.

$$K_{USLE} = f_{csand} \times f_{cl-si} \times f_{orgc} \times f_{hisand} \quad (3)$$

$$f_{csand} = \left\{ 0.2 + 0.3 \times \exp \left[-0.256 \times m_s \times \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\} \quad (4a)$$

$$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3} \quad (4b)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0.25 \times orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95 \times orgC]} \right) \quad (4c)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0.7 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 2.29 \times \left(1 - \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right) \quad (4d)$$

여기서 m_s : % 모래 함량 (0.05~2.00 mm 직경입자), m_{silt} : % 미사 함량 (0.002~0.05 mm 직경입자), m_c : % 점토 함량 (< 0.002 mm 직경입자), $orgC$: 총별 % 유기탄소 함량.

2.1.3 작물관리인자 (C_{USLE})

C_{USLE} 값은 휴경지에서의 토양유실량에 대한 특정 토지피복상태로부터 토양유실량비로 정의된다. 토지피복 식물의 옆면적은 차단에 의해 유효강우에너지를 줄여 줌으로써 침식량에 영향을 미친다. 식물의 피복상태는 식물의 성장단계에 따라 변하므로 SWAT은 Eq. (5)의 방정식을 사용하여 일별 C_{USLE} 값을 재계산한다.

$$C_{USLE} = \exp \left(\left[\ln(0.8) - \ln(C_{USLEmn}) \right] \times \exp \left[-0.00115 \times rsd_{surf} \right] + \ln \left[C_{USLEmn} \right] \right) \quad (5)$$

여기서 C_{USLEmn} : 토지피복에 따른 작물관리 최소값, C_{USLEoa} : 연평균 C, $C_{USLEmn} = 1.463 \ln[C_{USLEoa}] + 0.1034$, rsd_{surf} : 토양표면의 잔류량(kg/ha).

2.1.4 하도추적

하천에서의 흐름추적(routing)은 물, 유사, 영양염류, 살충제, 박테리아 및 중금속 등 6가지에 대하여 모의한다. SWAT은 하도에서 유속과 유량을 정의하기 위하여 Manning 식을 사용한다. 유출은 운동과 모형(Kinematic wave model)의 변형인 변동저류추적법(Variable storage method)과 Muskingum 하도 추적법을 이용한다. 변동저류추적법은 Williams(1969)에 의해 개발되었으며, 하도구간에 대하여 연속방정식을 기초로

저류추적이 이루어진다. Muskingum 하도 추적법은 자연하도의 저류가 하상과 평행인 대(埤)형(prism)저류와 수면의 상승 하강으로 인한 쐐기(wedge)저류의 합으로 하도에서의 저류량을 모의한다. 대형 저류량은 유출량에만 비례하고, 쐐기저류량은 유입량과 유출량의 차에 비례한다고 가정한다. 이러한 가정을 이용하여 저류량은 Eq. (6)과 같이 나타낼 수 있다. X 는 하도 저류량을 결정하는데 있어서 유입량과 유출량의 상대적인 중요도를 조절하는 가중치이다.

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

여기서 Q_{stored} : 저류량(m^3), Q_{in} : 유입량(m^3), Q_{out} : 유출량(m^3), K : 하도에 대한 저류시간 상수(sec), X : 가중치.

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 Eq. (7)과 같이 나타낸다. 유사이동에 의한 하천의 바닥 침식(downcutting)과 측방침식(widening)이 모의 기간 동안 계산되어 반영된다.

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

여기서 Sed_{ch} : 하천 구간의 유사량, $Sed_{ch,i}$: 초기 유사량, Sed_{dep} : 퇴적 유사량, Sed_{deg} : 재부상 유사량.

2.2 대상유역 특성

연구대상지역인 대청호는 금강 중상류에 건설된 다목적 인공호로서 전체 유역 중 용담호 유역을 제외한 자체 유역면적은 3,204.0 km^2 , 유로연장 190.0 km로서 형상계수가 약 2.97인 장방형의 형상을 가지고 있다. 대전, 청주, 천안 등 충청권 지역과 전북권의 일부지역에 연간 약 1,649백만 m^3 의 용수를 공급하고 있는 중요한 수자원이다. 또한 대청댐 건설로 청주지구, 금강하류 및 만경강지구에 연간 약 349백만 m^3 의 관개용수를 공급한다.

행정구역으로는 전라북도 진안군, 장수군과 충청남도 금산군, 충청북도 영동군, 보은군, 옥천군, 청원군, 경상북도 상주시 및 대전광역시 일부지역을 점유하고 있다. 대청댐을 기준으로 대청호로 유입되는 하천은 등급별로 구분하였을 경우, 국가, 지방 1, 2급 하천의 제 5지류까지 157개로 구성된다. Fig. 1은 구축된 모형의 소유

역 구분, 주요수계, 점오염원 지점 및 강우관측소를 나타내었다.

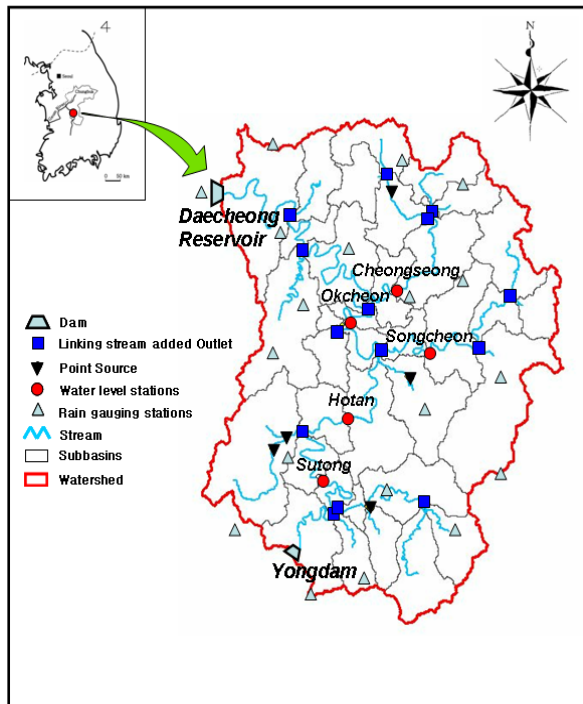


Fig. 1. Layout of Daechong Reservoir basin and its delineation of sub-basins

상수원으로써 가치가 매우 높음에도 불구하고 대청호는 여름철에 발생하는 탁수와 부영양화로 인한 수질 문제를 겪고 있다. 몇 차례의 홍수와 함께 유입하는 탁수는 연중 30 NTU 이상의 고탁도 방류를 50일 이상 지속시키기도 하며, 취수시설의 운영과 하천 이용에 적지 않은 어려움을 준다. 탁수의 장기화는 용수이용뿐만 아니라 댐 하류 어업과 관광 효과 저하에도 영향을 미친다. 탁수와 함께 유입하는 많은 양의 인과 저수지 바닥 퇴적 인의 용출은 하절기에 조류의 성장을 촉진한다. 따라서 유역으로부터의 토양침식과 영양염류의 유입 부하량을 줄이기 위한 적절한 비점오염원 관리대책이 시급히 마련되어야 한다.

2.3 입력자료 구성

SWAT모형의 수치표고모형(DEM) 자료는 환경부에서 제공하는 파일을 ArcView GIS 3.2 프로그램을 이용하여 모형 입력자료의 형태인 Grid 형태로 변환시켰다. 조효섭 등(2003)은 선행연구를 통해 DEM의 격자크기는 25 m×25 m ~ 50 m×50 m가 가장 적합함을 제시한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 모의결과의 정확성을 고려하여 30 m×30 m 격자크기를 사용하였다. 좌표체계는 Transverse-Mercator 법(Bessel 타원체)을 사용하

였으며, 매개변수는 한국측지계의 중부 원점 값을 적용하였다.

대청댐 상류 유역 내 토지이용현황은 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도를 사용하였다. 토지피복도는 shape 파일의 형태를 Grid 형태로 변환하여 사용하였으며, 속성부호를 SWAT의 입력자료 속성 값(SWAT Land use Class)으로 변환하였다. 대청댐 유역의 토지 이용 분류결과, 전체 유역면적(319,423 ha)중 논 9.8%, 밭 10.3%, 침엽수림 24.7%, 활엽수림 27.8% 및 혼합림이 19.9%로 임야 전체 합은 72.39%로 나타났고, 도시지역과 수계지역 등 기타지역의 합은 약 7.5%로 계산되었다.

토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 정밀토양도를 사용하였다. 김경탁(2003)은 개략토양도와 정밀토양도의 적용에 따른 모의결과의 오차를 연구한 바 있으며, 모델의 정확성 향상을 위해서는 정밀토양도를 사용할 것을 제안하였다. 토양의 속성자료에는 각 토양통의 정보와 해당 토양을 이루는 Layer의 수, 배수그룹 및 토심, 용적밀도, 투수계수 및 알베도 등의 정보가 포함된다. 또한, 각 토양 Layer별 토성함량 및 유기물 함량, 토양수분 함유 가능량인 AWC(Available Water Capacity) 등의 정보가 포함되어 있다. 따라서 본 연구의 토양 속성자료는 농업과학기술원(2000)에서 제공하는 정밀 토양도 속성자료를 활용하여 입력하였다. 제공하지 않는 속성자료는 농업과학기술원에서 제공하는 자료를 기본으로 하여 사용자지침서에서 제시하는 식을 이용하여 산정하였다.

이 밖의 기상과 강우는 대청댐 상류유역에 위치한 보은과 금산관측소 및 추풍령기상대의 자료를 사용하였다. 각각의 관측소에서 2001~2005년 동안 기온, 풍속, 습도 및 일사량 자료를 사용하였다. 대청호와 같이 면적이 큰 대규모 유역에서 보은, 금산 및 추풍령 세 곳의 기상관측소의 강우자료만을 사용하게 될 경우 강우의 공간적 분포를 반영할 수 없다는 단점이 있다. 유철상 등(2005)은 SWAT 모형 적용을 위한 적정 강우계 밀도에 대해 연구를 수행한 바 있으며, 적정 강우계 밀도는 약 1개소/130 km²로 제시하였다. 본 연구에서 강우자료는 대청호 상류 유역에 존재하는 20곳의 강우관측소에서 2001~2005년 동안 관측자료를 사용하였다. 1개의 관측소가 대표하는 면적은 약 170 km²로써 다소 넓지만 유역 특성의 차이를 고려할 때 큰 무리가 없을 것으로 판단된다. 또한, 유역의 정확한 유출량 산정을 위하여 대청댐 유역의 상류에 위치한 용담댐의 일 방류량을 유량경계조건(Inlet)으로 입력하였다.

2.4 모형의 보정 및 성능평가

2.4.1 모형의 보정

일반적으로 SWAT 모형을 이용하여 유출해석을 할 때, 초기 1~2년은 시스템의 초기화와 안정화를 위해 사용하고 결과 해석에는 포함하지 않는다. 특히 SWAT 과 같은 장기유출 모형의 경우 유출량의 모의는 토양수 분변화에 따라 SCS의 CN값이 연속적으로 계산되므로, 본 연구에서는 모의기간을 2002~2005년으로 설정하여 2002~2003년의 기간을 모형의 안정화 기간으로 사용하고, 2004년과 2005년의 모의결과를 관측값과 비교하여 보정을 수행하였다. 모형의 유출량 및 유사량 보정을 위해 대청댐 일원 수문기초조사 보고서(한국수자원공사, 2002~2005)의 수위-유량곡선식을 사용하여 수위관측소별로 유량의 실측값을 산정하였다. 모형의 평가를 위한 실측 유사량은 동 보고서에 제시된 유량과 유사량의 상관관계식을 이용하여 일별 유출량으로부터 산정하였다.

SWAT 모형의 보정과정은 2004년 수문사상을 대상으로 직접유출과 기저유출에 대한 성분별 연간 총 유출량의 물 수지가 관측 유량과 일치하도록 관련된 매개변수를 조정된 후, 월별 및 일별 유출량을 보정하였다. 공

간적으로는 최상류 유역부터 순차적으로 보정을 실시하였으며, 하류 합류점에서 보정할 때는 이미 보정된 상류 유역의 매개변수는 고정하고 나머지 유역에 대하여 보정을 실시하였다. 관측유량으로부터 직접유출량과 기저유출량을 구분하는 것은 Digital Filter 기법을 사용하였다(Ahmed et al., 2002; Arnold et al., 1995). 소유역별 물 수지와 유출량 보정에 사용된 주요 매개변수는 Table 1과 같다.

소유역별 토양 침식량과 토사 유출량 보정에 사용된 매개변수는 Table 2와 같다. USLE_P는 테라스(terrace) 또는 밭고랑(contour) 설치 등 토양침식 방지 대책의 도입 정도와 경작형태에 따라 결정되는 매개변수이며 P값이 1이면 아무런 대책이 없는 경우에 해당한다. 본 연구에서는 상세한 자료 확보가 어려워 눈에 대한 P값만 보정하였으며, 0.5~0.8 범위를 사용하였다. USLE_C는 작물의 종류, 성장단계, 경운방법(tillage)에 따라 다른 값을 가지며, 본 연구에서는 USDA(1997)에서 제시한 식생피복인자를 사용하였다. 유역의 약 70%를 차지하는 산림은 수목별로 0.004~0.009, 약 10%를 차지하는 밭과 논은 각각 0.4와 0.3을 사용하였다. 나머지 토양 침식과 관련된 매개변수는 모델이 제시하는 범위에서 시행착오법을 이용하여 보정하였다. 하천에서의 최

Table 1. Model parameters used for annual water budget and runoff calibration

Variable	Definition	Default value	Adjusted value
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.95	0.2
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.2	0.027
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" or percolation to the deep aquifer to occur (mm)	1	0.65
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0	200
CH_K	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)	0.5	100
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0.048	0.036

Table 2. Model parameters used for calibration of soil losses

Variable	Definition	Default value	Adjusted value
USLE_P	USLE support practice factor	1	variable
USLE_C	Minimum value of the cover and management factor	0	variable
SPCON	Coefficient in sediment transport equation	0.0001	0.001
SPEXP	Exponent in sediment transport equation	1.5	1.2
CH_EROD	Channel erodibility factor	0	0.3
CH_COV	Channel cover factor	0	0.7

대 토양유출량($CONC_{sed,mx}$)은 침두유속의 함수로 정의된다(Eq. (8)). $SPCON$ 은 토사이동 계수, $SPEXP$ 는 침두유속($V_{ch,pk}$)의 지수로써 1~2사이의 값을 가지며 모델의 초기값은 1.5이다. 하천구간의 퇴적과 침식은 초기 토사유출량과 최대 토사유출량에 의해 결정되며, 이때 초기 토사유출량이 최대 토사유출량보다 작을 경우 침식에 의한 토사의 재부상이 일어난다. 매개변수 CH_EROD 과 CH_COV 는 하천에서 침식량을 결정하는 토양침식과 피복인자로써 모델의 초기값은 0이고, 값이 커질수록 침식은 많이 일어난다.

$$CONC_{sed,mx} = SPCON \times v_{ch,pk}^{SPEXP} \quad (8)$$

여기서 $CONC_{sed,mx}$: 토양침식 최대농도(ton/m^3), $SPCON$: 토사이동 계수, $v_{ch,pk}$: 침두유속(m/s), $SPEXP$: 토사이동 지수.

2.4.2 모형의 평가

모의결과의 적합성을 평가하기 위해 상대오차(Relative Error, RE), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 모형효율성지수(Efficient Index, EI)를 사용하였다(Eqs. (9)~(11)). RMSE는 해석하고자 하는 변량과 같은 차원을 갖는 지표이다. 즉, 모의 결과가 평균적으로 어느 정도 오차가 발생하는지를 나타내는 지표로 일종의 오차 평균치라 할 수 있다. RMSE 값이 0에 가까울수록 모델의 성능이 보다 우수하다는 것을 나타낸다.

EI는 Nash and Sutcliffe(1970)에 의해 제안되었으며, Servat and Dezetter(1991)은 연구를 통해 수문모델의 효율성 산정 지표로써 Nash의 목적함수가 가장 적합한 것을 밝힌바 있다. 제안된 EI 값은 Eq. (11)과 같이 계산된다. EI는 추정치와 실측치가 일치하면 1.0이고, 그 값이 0과 1.0 사이에 있으면 추정치를 사용하는 것이

실측치의 평균을 이용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있다. 또한 EI가 0보다 작으면 모형의 추정결과가 나쁘거나 실측자료가 일관성이 없음을 의미한다.

$$RE = \frac{(Q_i - P_i)}{Q_i} \times 100 \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (10)$$

$$EI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

Q_i : 관측유량, P_i : 모의유량, \bar{O} : 실측유량의 평균, N : 관측 및 모의유량 데이터 쌍의 개수

3. 결과 및 고찰

3.1 연간 유출량 산정결과

2004년 1년 동안 대청댐 상류 주요 수위표지점의 연간 유출량의 관측값과 SWAT 모의값의 유출 성분별 비교와 상대오차의 크기를 Table 3에 나타내었다. 수통, 호탄, 송천 지점에서 SWAT 모델은 관측 기저유출량을 과소평가하는 경향을 보였으며, 옥천 지점을 제외한 모든 지점에서 직접유출량은 다소 과다 산정되는 경향을 보인다. 총 유출량의 상대오차(RE)와 평균오차(RMSE)의 범위는 각각 -1.3%~14.2% 및 3.81~17.25이고, EI의 범위(평균)는 0.51~0.62(0.59)로 나타났다. 일부 관측소에서 유출성분별 편차가 다소 크게 나타나고 있으나, 모의값은 유역의 연간 유출현상을 비교적 잘 반영하는 것으로 평가된다.

Table 3. Calibration results for annual runoff in major stations during 2004

(Units: mm)

Control point	Item	Base Flow	Surface flow	Total Water Yield	RE	RMSE	EI
Sutong	Observed	259.7	717.2	976.9	-8.1%	3.81	0.62
	SWAT	173.0	724.2	897.6			
Hotan	Observed	481.4	769.7	1,251.0	-9.6%	5.23	0.61
	SWAT	285.0	844.5	1,130.5			
Songcheon	Observed	236.3	594.4	830.7	+7.4%	17.25	0.61
	SWAT	203.4	686.5	892.2			
Okcheon	Observed	188.7	742.3	931.0	-1.3%	10.56	0.62
	SWAT	190.0	726.9	919.3			
Cheongseong	Observed	149.0	585.6	734.6	+14.2%	5.02	0.51
	SWAT	146.7	691.2	838.8			

3.2 월간 유출량 산정결과

2004년 수문사상 동안 대청댐 상류 주요 수위표지점에서 유출량의 월별 관측값과 모의값을 선형회귀분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 각 수위표 지점의 실측값과 모의값의 1차 선형회귀 방정식의 기울기값은 0.866~1.135의 범위를 보였다. 모의값이 관측값의 변동 특성을 반영하는 정도를 평가하는 모형의 효율성계수 EI도 0.393~0.960의 범위를 보이고 있어, SWAT 모델은 대청댐 유역의 월별 유출량 변동 특성을 비교적 잘 반영하는 것으로 평가되었다. Chung et al.,(1999)은 결정계수(R^2)가 0.5 이상, Ramanarayanan et al.,(1997)은 결정계수(R^2)가 0.5 이상이고 모형효율성지수(EI)가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의한다고 제안한 바 있다. 본 연구결과 SWAT 모델의 모의값은 관측값과 호탄지점을

제외한 모든 지점에서 R^2 와 EI 값이 이러한 기준을 만족하므로 모델은 대청댐 유역의 월별 유출 현상을 잘 반영하는 것으로 판단된다.

3.3 일별 유출량 산정결과

대청댐 저수지로 유입하는 금강분류인 옥천지점과 보청천의 청성지점에서 2004년 1년동안 일 유출량 수문곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 무주남대천, 봉황천, 영동천, 초강이 금강과 합류한 하류에 위치한 옥천지점의 유역면적은 2,051.9 km^2 , 보청천 유역 하류에 위치한 청성지점은 유역면적이 491.0 km^2 로 각각 대청호 전체유역의 63.14% 및 15.36%에 해당한다. SWAT모델은 강우시 유출현상을 비교적 잘 모의하였으나, 수문곡선의 하강기에 발생하는 장기 기저유출 현상을 정확히 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 오차의 원인은

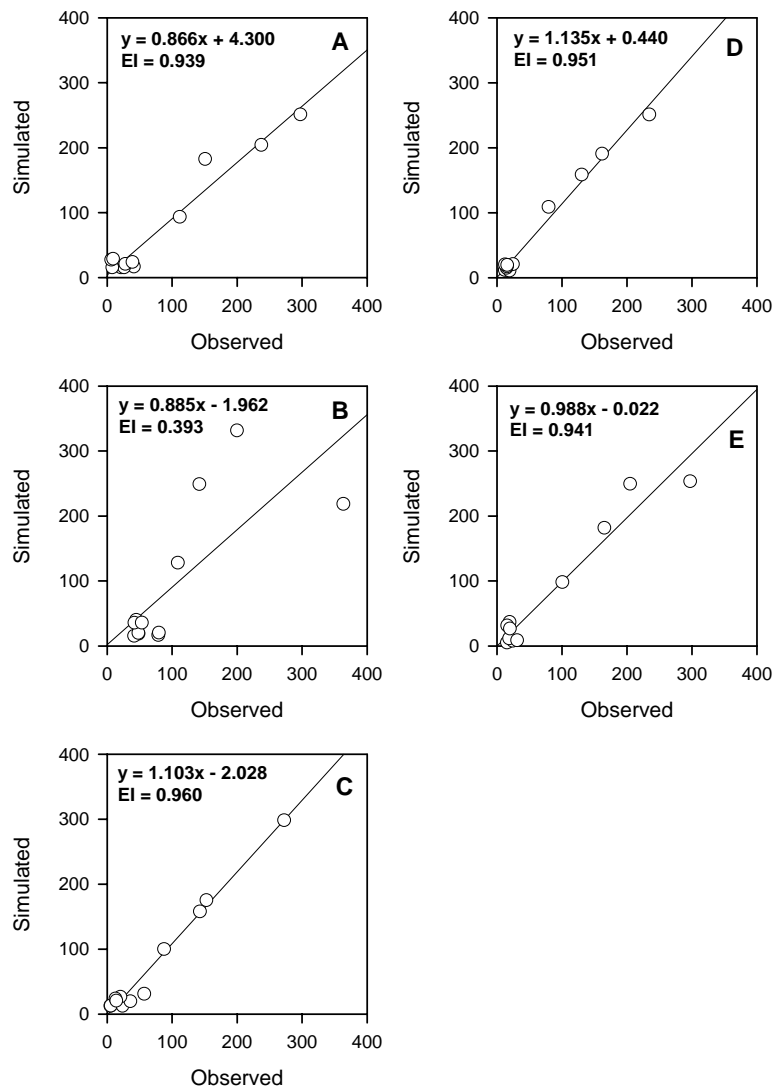


Fig. 2. Linear relationships between observed and simulated monthly runoff flow(mm) at control stations in Daechong Reservoir basin: A=Sutong, B=Hotan, C=Songcheon, D=Cheongseong, E= Okcheon

유역에 산재해 있는 농업용 보나 논과 같은 저류시설의 효과가 유역의 수문응답단위 구성과정에서 제대로 반영되지 못했기 때문인 것으로 추정된다. 대청댐 유역에 분포하는 논 면적은 31,198.2 ha, 습지는 1,345.9 ha로 각각 유역의 9.77%, 0.41%를 차지하고 있다. 또한 용담댐 하류로부터 대청댐상류까지 소규모 농업용 저수지와 보는 각각 401개와 612개가 산재되어 있다(건설교통부 등, 2006).

옥천과 청성지점에서 보정기간동안 모형의 성능평가를 위해 실측값과 모의값을 통계적으로 비교한 결과를 Table 4에 나타내었다. 옥천지점의 경우 RE, RMSE 및 EI는 각각 -1.33, 122.1 및 0.62로 나타났고, 청성지점에서는 각각 -0.07, 29.5 및 0.51로 계산되었다. 보정결과, 모형은 일 유출량을 모의하는데 있어 실측값을 비교적 적절하게 반영하는 것으로 판단된다.

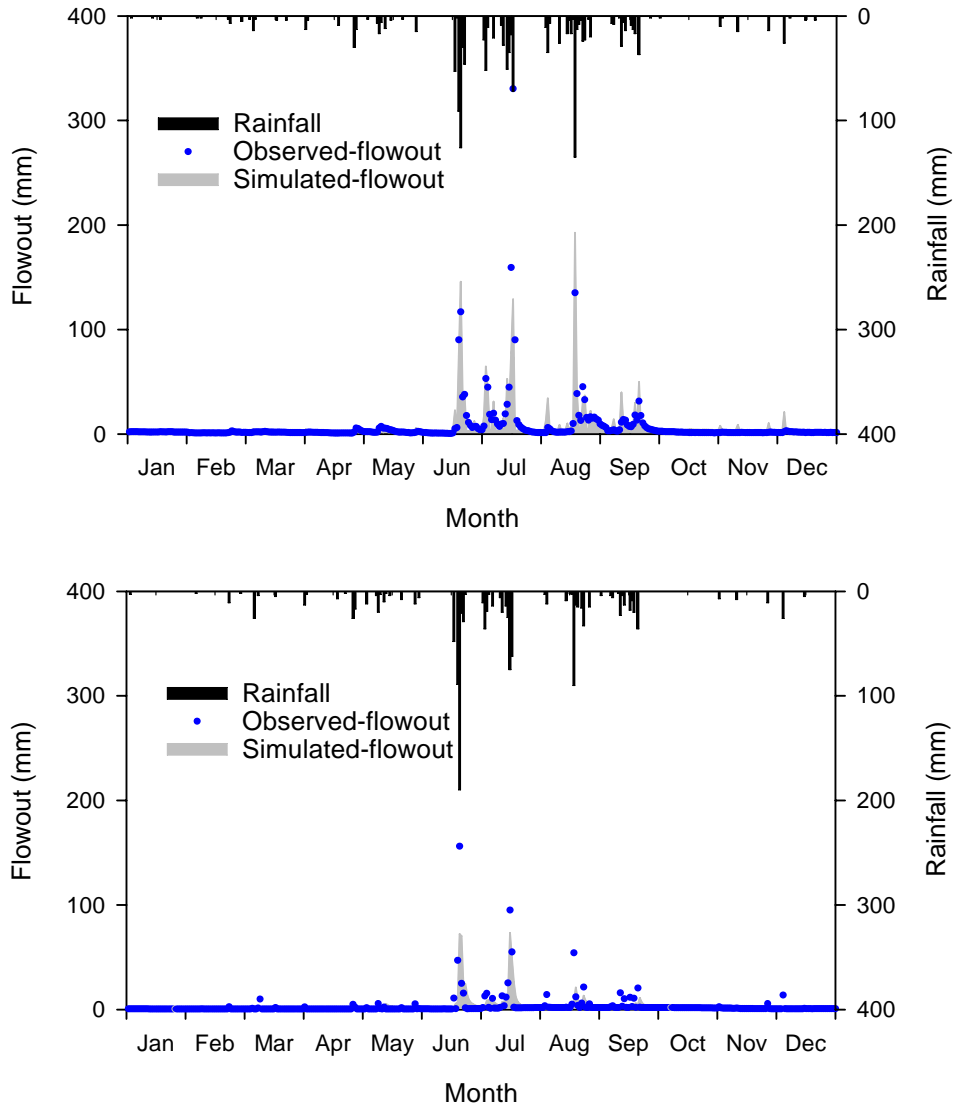


Fig. 3. Comparisons of observed and simulated daily runoffs in Okcheon(above) and Cheongseong(below) stations during 2004

Table 4. Statistical evaluations of model performance for daily runoff simulations in 2004

Stations/ Factors	Rainfall(mm)	Mean of runoff(CMS)		RE	RMSE	EI
		Observed	Simulated			
Okcheon	1,507.0	58.05	78.43	-1.33	122.1	0.62
Cheongseong	1,354.0	15.22	12.45	-0.07	29.5	0.51

3.4 월간 유사량 모의 결과

Fig. 4는 청성과 옥천 지점의 월간 유사량 모의값과 실측값을 비교한 결과를 나타낸 것이고, Fig. 5는 이들 값들의 선형회귀분석 결과를 보여주고 있다. 보정결과 2004년과 2005년의 청성지점의 월별 유사량 모의값은 관측값의 변동성향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 그러나 옥천지점의 경우 2004년 홍수기의 모의값은 관측값을 과소평가 하는 경향을 보였으나, 2005년의 경우 모의 값이 관측값을 과대평가 하는 경향을 보이고 있다. 이것은 2004년과 2005년 7월의 1일 최대 강우량을 비교하였을 경우, 각각 183 mm와 94 mm로 약 2배의 차이가 있었던 결과로 판단된다. 홍수기인 6월과 7월의 경우 모의값은 관측값을 과소평가하는 경향을 보이고 있다. 2005년에도 월별 모의값은 관측값의 변동성향을 잘 반영하는 것으로 나타났으나, 갈수기 동안에는 SWAT 모의값이 관측값을 과대평가하는 경향을 보였다.

이러한 오차의 원인은 대부분의 선행연구에서도 지적되었듯이 SWAT 모델이 일 강우량 자료를 사용하기 때문으로 판단된다. 일 강우량 자료의 사용은 몇 분 또는 시간 단위의 짧은 기간에 발생하는 집중호우의 강우

에너지를 과소 산정하게 되며, 그것은 토양침식량 산정의 주요한 오차 원인이 되는 것이다. 또한 홍수시 하천에서 실측한 부유사량은 하천의 제방침식과 하천 바닥에 퇴적한 부유물질의 재부상에도 영향을 받으나, 모의 결과는 자료의 부족으로 이러한 현상을 반영하지 못하였다. 홍수기 동안 하천의 토사 유출량을 보다 정확히 모의하기 위해서는 일 강우보다는 시간별 강우강도를 사용하고 제방 토양침식량도 모의에 고려하여야 할 것으로 판단된다. 또한 수문곡선의 감소구간의 오차를 줄이기 위해서는 소유역에 산재해 있는 논과 농업용 저류시설, 습지 등에 의한 토사 포획 영향도 정확히 반영되어야 할 것으로 판단된다.

3.5 토양 침식량 산정

Fig. 6에 대청댐 유역의 소유역별 토양침식량 산정결과를 나타내었다. 대청댐 유역의 연간 단위 면적당 토양침식량은 소유역별로 2004년의 경우 0.03~31.59 ton/ha, 2005년의 경우 0.01~19.62 ton/ha의 범위를 보였다. 토양침식량이 상대적으로 많은 소유역은 무주남대천, 보청천, 소옥천, 금강분류 인접 유역으로서 무주, 보은, 옥천, 금산, 영동 등 시가화 지역과 농경지 비율이 비교적 높은 지역들로 나타났다.

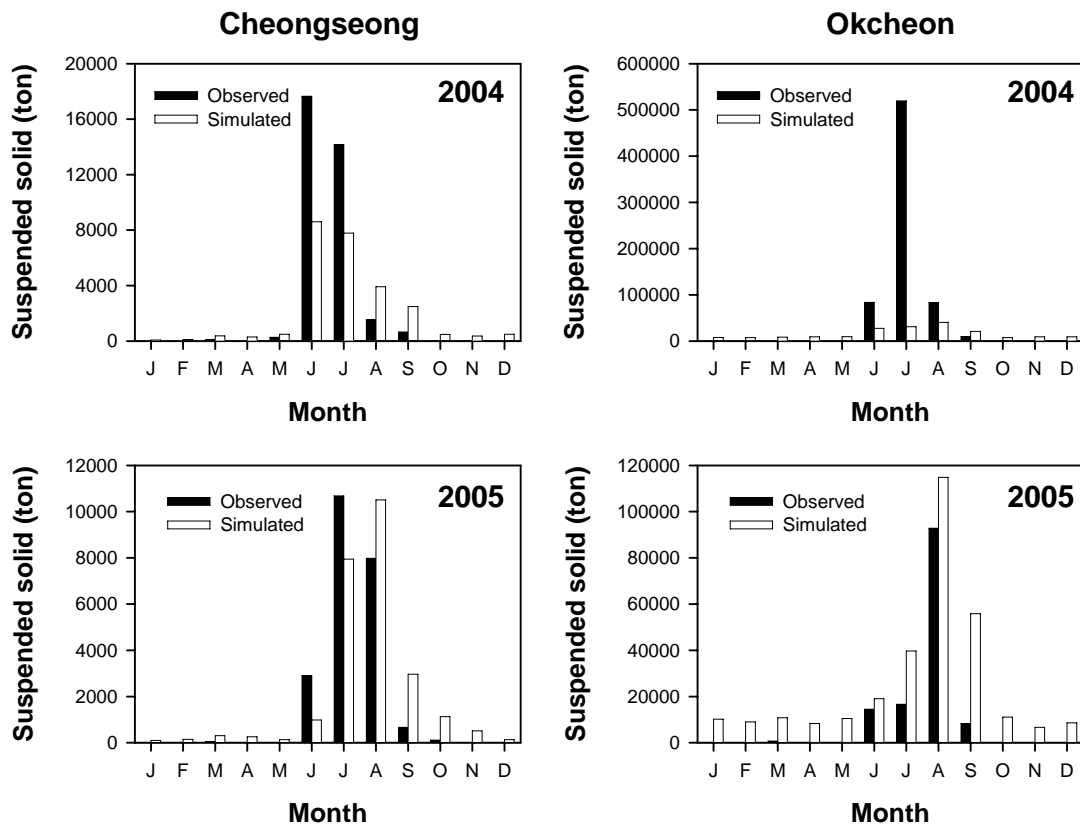


Fig. 4. Comparisons of observed and simulated monthly soil losses at Cheongseong and Okcheon stations

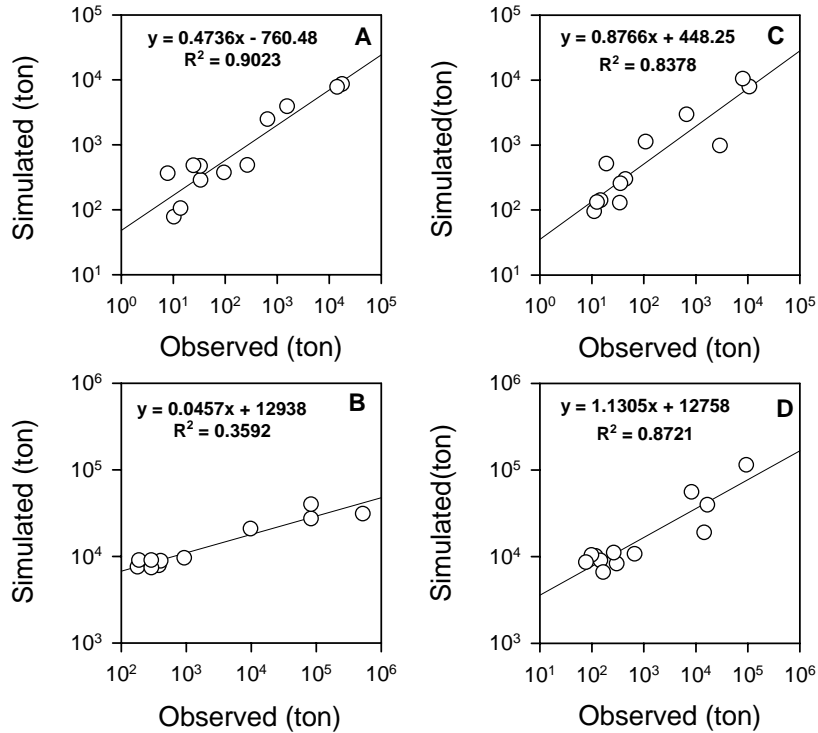


Fig. 5. Observed and simulated monthly soil losses at control stations(n=12):
A-Cheongseong(2004), B-Okcheon(2004), C-Cheongseong(2005), D-Okcheon(2005)

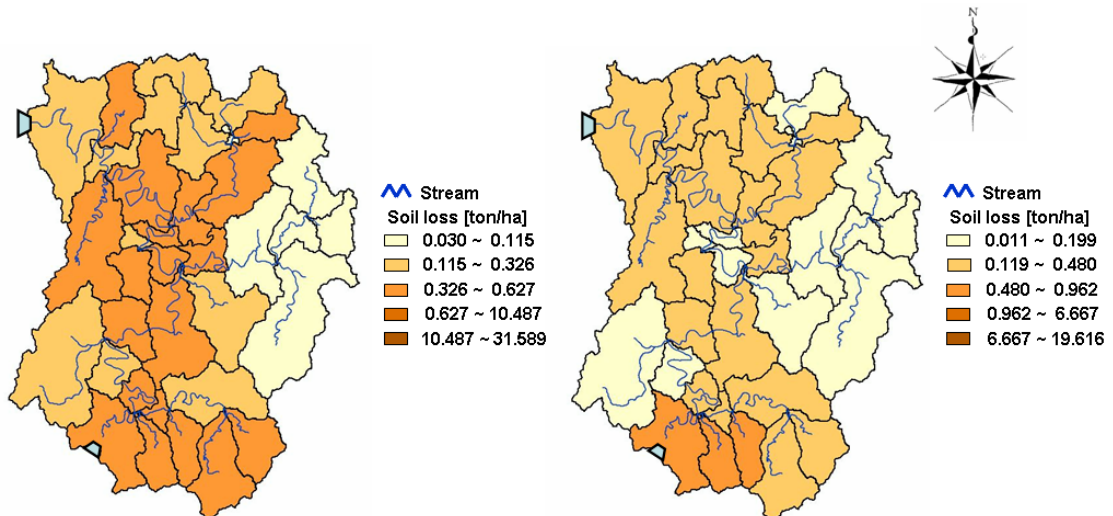


Fig. 6. Spatial distributions of estimated annual soil loss per unit area for sub-basins
in 2004(left) and 2005(right)

SWAT 모델(MUSLE)의 토양침식량 산정결과의 적합성 여부를 판단하고 전국 평균 침식량과의 비교를 위해 대청댐 유역의 토지 이용별 토양침식량 산정결과와 RUSLE식을 이용한 전국 평균 토양침식량 산정결과(농업과학기술원, 2005)를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 밭의 경우 대청호 유역은 33.1 ton/ha/yr로 산정되어 전국 평균값인 41 ton/ha/yr보다 약간 작은 것으로 나타났다. 임야의 경우 전국 평균은 3.5 ton/ha/yr로 나타났

으며, 대청호 유역도 유사한 범위로 산정되었다. 논인 경우 전국 평균은 1 ton/ha/yr였으나, 대청호 유역은 0.1 ton/ha/yr로 낮게 산정되었다. 두 모델은 지배방정식에서 고려하는 인자들의 특성이 약간 상이하므로 해석에 주의가 필요하다. 기본적으로 RUSLE는 MUSLE 방법과 달리 유출에너지인자를 사용하지 않으며, 비록 기존의 USLE식을 수정하였지만 강우침식인자(R)를 사용한다. 아울러 RUSLE는 강우에 의해 유역으로부터

이탈 가능한 토양 침식량을 산정하는데 반해, MUSLE 는 유출구까지 이동하는 토양침식량을 산정하므로 물리 적으로 서로 다른 의미를 가진다. 따라서 Fig. 7에 제시 된 결과의 차이는 MUSLE 모형의 유출에너지인자와 RUSLE 모형의 강우침식인자(R) 값의 차이로 해석할 수 있으며, 임야지역에서 토양침식량이 MUSLE가 높게 나온 것은 본 연구에서는 수목을 3가지 종류로 상세히 구분한 결과로 판단된다.

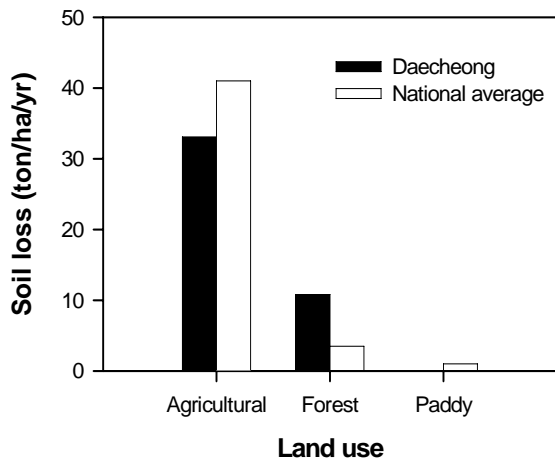


Fig. 7. Comparisons of specific soil losses between estimates for Daecheong Reservoir basin and national average for different land uses

3.6 토양침식 억제를 위한 유역제어대책의 가능성 평가

토지 이용별 단위 면적당 토양침식량 산정결과는 Table 5와 같다. 토지 이용별 토양침식량은 밭이 33.1 ton/ha로 가장 많았으며, 임야는 수목의 종류에 따라 2.3~5.4 ton/ha, 도시 1.0 ton/ha, 논 0.1 ton/ha의 순으

로 나타났다. 밭 면적이 유역에서 차지하는 비율은 10%이지만 단위유역면적당 가장 큰 침식량을 보여 전체 토양침식량의 55%를 차지하였으며, 전체유역의 72%를 차지하는 임야는 44%의 기여율을 보였다.

따라서 대청호 탁수를 유발하는 상류 유역의 토양유실은 절반 이상이 밭 경작지로부터 발생하고 있으므로, 저수지 탁수문제를 완화하기 위해서는 토양 침식량이 많은 토지이용의 최소화, 경작지 토사유출을 억제하기 위한 밭 사면 보강, 식생 밭두렁 설치, 보존형(conser-vational tillage) 농업 시행 등의 대책이 필요한 것으로 판단된다. 임야지역은 비록 전체적인 토양유실량의 기여도는 44%이지만, 광범위한 영역에 분포하고 있어 유역제어 대책의 시행에 어려움이 있을 것으로 판단된다. 점유 면적에 비해 토양 유실량이 많은 밭 농사 지역에 대하여 유역대책을 우선 실시하는 것이 경제성과 효과 면에서 유리할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대청호 유역에 토양과 물 순환 해석 모델인 SWAT 모델을 구축하고, 2004년과 2005년의 수문사상을 대상으로 토지이용특성별 토양침식량을 산정 하였다. 그리고 연구결과를 바탕으로 대청호의 탁수저 감을 위한 유역제어 대책의 일환인 토양침식 제어대책 의 적용가능성을 평가하였으며, 본 연구를 통해 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) SWAT 모형은 대청호 유역의 강우유출현상을 비교적 잘 반영하는 것으로 나타났으나, 홍수기에는 모의값이 관측값을 다소 과소평가하는 경향을 보 였으며 갈수기에는 과대평가하는 경향을 보였다.

Table 5. Estimated annual soil losses for different land uses in Daecheong Reservoir basins during 2004

Year	Land Use	Area(ha)	Area(%)	Specific Soil Loss(ton/ha/yr)	Total Soil Loss(ton/yr)
2004	AGRL	32,955.0	10.3	33.1	1,090,810 (55.3%)
	FRSE	88,687.1	27.8	5.4	478,910 (24.3%)
	FRSD	78,964.3	24.7	3.1	244,789 (12.4%)
	FRST	63,580.8	19.9	2.3	146,236 (7.4%)
	RICE	31,198.2	9.8	0.1	3,120 (0.2%)
	URHD	8,793.9	2.8	1.0	8,794 (0.4%)
	WATR	9,391.0	2.9	0.0	0 (0.0%)

AGRL: Agricultural Land-Generic, FRSE: Forest-evergreen, FRSD: Forest-deciduous, FRST: Forest-mixed, RICE: Paddy Field, URHD: Urban, WATR: Water, respectively

- 2) 토지이용별 토양침식량 산정결과 단위면적당 토양 침식량은 논 0.1 ton/ha/yr, 임야는 수중에 따라 2.3~5.4 ton/ha/yr, 밭은 33.1 ton/ha/yr 순으로 나타났으나, 토지 이용별 점유면적을 고려한 연간 총 유출량은 밭 1,090,810 ton/yr, 임야 869,936 ton/yr, 논 3,120 ton/yr 순으로써 밭과 임야가 각각 55%와 44%를 차지하였다.
- 3) 연구결과를 종합해 볼 때, 대청호 탁수를 유발하는 상류 유역의 토양 유실량의 대부분은 점유 면적(10%)에 비해 토양 유실량의 기여도가 가장 큰 밭 농사 지역에서 유출되므로 이들 지역에 대한 토양침식 억제 대책을 우선 실시하는 것이 경제성과 효과면에서 가장 유리할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 : 1-6-2)에 의해 수행되었습니다. 연구를 지원해 주신 분들께 감사드립니다.

참고 문헌

건설교통부, 한국수자원공사 (2006). **금강유역조사**.
 고지연, 이재생, 정기역, 윤을수, 최영대, 김춘식, 박성태, 김복진 (2006). "USLE 및 GIS, RS를 이용한 서낙동강 유역 농경지 토양침식 위험도 평가." **한국토양비료학회논문집**, 한국토양비료학회, 제39권, 제3호, pp. 173-183.
 김경탁 (2003). "정밀토양도를 이용한 CN 산정에 대한 제안." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권, 제4호, pp. 45-53.
 김주훈, 김경탁, 연구방 (2003). "GIS를 이용한 토양침식 위험지역 분석." **한국지리정보학회논문집**, 한국지리정보학회, 제6권, 제2호, pp. 22-32.
 농업과학기술원 (2000). Taxonomical classification of Korean soils.
 농업과학기술원 (2005). 비점오염원 관리와 국토 보전을 위한 전국 토양침식 위험성 평가.
 서규우 (2003). "USLE 계열모형의 매개변수 특성 분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제2B호, pp. 79-85.
 손광익, 노준우 (2003). "GIS를 이용한 USLE의 LS인자 산정기법 개발." **대한토목학회논문집**, 한국토목학회, 제23권, 제4B호, pp. 281-287.

오덕근, 김주훈, 심순보 (2002). "GIS를 이용한 유역 토양 유실량 분석(II)." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제4B호, pp. 421-428.
 유철상, 김정준, 김남원 (2005). "SWAT 모형의 적용을 위한 적정 강우계밀도의 추정." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제5호, pp. 415-425.
 정세웅, 박재호, 윤성완, 배정옥 (2005a). "대청호 유입탁수의 수리 및 수질특성." **한국물환경학회·대한상하수도학 공동총계학술발표회 논문집**, pp. 375-378.
 정세웅, 오정국, 고익환 (2005b). "CE-QUAL-W2 모형을 이용한 저수지 탁수의 시공간분포 모의." **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제8호, pp. 655-664.
 정세웅 (2004). "저수지 장기간 탁수발생의 원인과 대안." **수자원정보**, 한국수자원공사, 제31권, pp. 88-93.
 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의 (1999). "강원도 토양 유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수인자와 토양 침식성 인자의 검토." **한국토양비료학회 논문집**, 한국토양비료학회, 제32권, 제1호, pp. 31-38.
 조정래, 정종철 (2005). "RUSLE와 SEDD를 이용한 고랭지 경작지로부터의 토양유실 평가." **한국 GIS학회지논문집**, 한국GIS학회, 제13권, 제1호, pp. 79-90.
 조효섭, 정관수, 김재한 (2003). "GIUH적용을 위한 DEM 격자크기 및 Threshold Area의 민감도 분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 799-810.
 최지용, 이기중, 이지현 (2005). "유역관리를 통한 다목적댐 저수지의 효율적인 탁수관리방안" **한국환경정책·평가연구원**, 한국수자원공사.
 한국수자원공사. (2002~2005). **대청댐 일원 수문기초조사 보고서**.
 허성규, 김기성, 사공명, 안재훈, 임경재 (2005). "고랭지 농경지의 토양유실모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가." **한국농촌계획학회논문집**, 한국농촌계획학회, 제 11권, 제 4호, pp. 67-74.
 Ahmed Abu El-Nasr, Patrick Willems, Jeffery Anold and Jan Feyen (2002). "Comparison of two methods to split the total discharge in its components." *In Proceedings of the Fifth International Conference on Hydroinformatics*, pp. 254-259.
 Arnold, J. G. , Allen, P. M. , Muttiiah, R. S. and

- Bernhardt, G. (1995). "Automated base flow separation and recession analysis techniques." *Journal of Groundwater*, Vol. 33, No.6 pp. 1010-1018.
- Chung, S. W., Gassman, P. W., Kramer, L. A., Williams, J. R., Gu, R. (1999). "Validation of EPIC for two watersheds in southwest Iowa". *Journal of Environmental Quality*, Vol. 28, No. 3, pp. 971-979.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. (1970). River flow forecasting through conceptual model; Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol 10 No.3, pp. 398-409.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan and J.R. Williams. (2002). Soil and Water Assessment Tool, SWAT : User's Manual-version 2000, Grassland, *Soil and Water Research Laboratory*, Agricultural Research Service, Texas.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Heuck, L.M. and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEC to identify alternative practices for animal waste management, Minneapolis, MN. 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.
- Servat, E., and Dezetter, A. (1991) Selection of calibration objective functions in the context of rainfallrunoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 36. No. 4. pp. 307 - 330.
- United States Department of Agriculture(USDA). (1997). Predicting soil erosion by water; A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation(RUSLE). United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Agriculture Handbook No. 703.
- Williams, J.R. (1969). Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Transactions of the ASAE*, Vol. 12. No. 1. pp. 100-103.
- Williams, J.R. (1995). Chapter 25. The EPIC Model, In *Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications*, Highlands Ranch, CO, pp. 909-1000.
- Wischmeier, W.H. (1960). Cropping-management factor evaluation for a universal soil-loss equation. *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 23, pp. 322-326.
- Wischmeier, W.H., D.D. Smith. (1978). Predicting rainfall losses : A guide to conservation planning, *USDA Agricultural Handbook* No. 537, U.S. Gov. Print Office, Washington, D. C.

(논문번호:07-62/접수:2007.07.03/심사완료:2008.01.07)