

연구논문

SWAT 모형을 이용한 토양유실량 저감효과 모의

정진권* · 김환기**

전북대학교 대학원 토목공학과*, 전북대학교 토목공학과 교수**
(2008년 7월 22일 접수, 2008년 8월 5일 승인)

Simulation of the Reduction Effect of Soil Loss Using SWAT Model

Jin-Kweon Jeong* · Hwan-Gi Kim**

Department of Civil Engineering, Chonbuk National University*
Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National University**
(Manuscript received 22 July 2008; accepted 5 August 2008)

Abstract

The purpose of this study was to simulate the reduction effect of soil loss in the Yongdam reservoir watershed using SWAT model. To evaluate accuracy for flow and sediment yield of SWAT model, calibration was performed for the period from Jan. 2002 to Dec. 2003, and the verification for Jan. 2005 to Dec. 2005. The calibration and the verification were carried out using data observed at the Cheoncheon gaging station. The R^2 and EI values in terms of a flow were 0.8 and 0.78 respectively for calibration, whereas they for verification were 0.88 and 0.86 respectively. In terms of a sediment yield, they were 0.7 and 0.48 respectively for calibration, whereas for verification were 0.64 and 0.54 respectively. As a results from model simulation, annual mean soil loss rates in terms of forest, paddy and upland were 0.02 ton/ha/yr, 0.15 ton/ha/yr and 7.58 ton/ha/yr, respectively. The results show that the land use type of a upland has more significant impact on a total soil loss as well as a sediment yield than other types of land use. The sediment delivery ratio was determined to be about 0.35. In this study 2 land cover change scenarios for upland area were considered. These scenarios were used an input to SWAT model in order to evaluate their impact on soil loss and sediment delivery. The results show that a reduction of the upland area would reduce the soil loss and sediment yield.

Keywords : SWAT model, Soil loss, Sediment Delivery Ratio

1. 서론

하천의 상류나 중류에 위치하고 있는 우리나라의 대형 인공호수들은 유역의 대부분이 임야와 농경지로 구성되어 있어 유역 내에 산업단지와 같은 대형 점오염원이 없음에도 불구하고 호수의 수질은 중영양 또는 부영양상태로 평가되고 있는데, 이는 여름철 강우기에 대량 유입되는 비점오염물질에 기인하는 것으로 보고되고 있다(금강수계관리위원회, 2006). 임야와 농경지로부터의 비점오염물질은 강우-유출과정 중 지표면에 퇴적된 오염물질의 씻김현상과 더불어 토양유실로 인해 토양입자에 부착되어 있던 오염물질이 유실 토양과 함께 유출된다. 몬순기후대에 속하는 우리나라는 여름철에 폭우가 집중되기 때문에 이 시기에 토사의 유실량이 급증하고, 유실된 토사는 하천을 통해 호수로 유입되어 장기간 저류함으로써 호수의 수질과 생태계에 악영향을 미치고 있다.

이와 같이 호수와 같은 폐쇄성 수역의 수질관리를 위해서는 유역 내에서 발생하는 토양유실량을 저감시켜 호수에 유입되는 유사량을 최소화하는 대책이 필요하며, 이러한 대책을 수립하려면 유역 내에서 발생하는 토양유실량의 정량화가 선행되어야 한다. 그러나 시·공간적으로 변화하는 토양유실량을 정확하게 측정하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에 토양유실에 가장 큰 영향을 미치는 인자들을 적용한 모형으로부터 토양유실량을 산정하여 왔다. 우리나라를 비롯하여 전 세계적으로 토양유실량 산정에 많이 사용하였던 모형은 USLE(Universal Soil Loss Equation)로서 이 모형은 강우인자(R), 토양침식성 인자(K), 경사인자(LS), 식생피복인자(C), 보전관리인자(P)의 곱으로 토양유실량을 계산한다. 하지만 USLE 모형은 대상지역내 토양유실 발생 패턴과 단위면적당 연평균 토양유실 발생가능성을 모의할 수 있을 뿐, 유실된 토양이 하류로 이동되어 하천으로 유입되는 유사량과 시간적으로 변화하는 토양유실량을 모의할 수 없다(박윤식 등, 2007a). 따라서 최근에는 다양한 강우사상과 지형인자를 반영하여 토양유실과 유사 운반과정

의 시·공간적 분포를 해석할 수 있는 유역모형을 적용하는 사례가 증가하고 있으며(구본경·조재현, 2007), 이 모의결과로부터 유역 내 비점오염원에 대한 최적관리방안(Best Management Practices, BMP)을 도출하고 있다.

본 연구에서는 금강 상류에 위치한 용담호 유역 중 금강 발원지로부터 용담호 유입부까지의 유역을 대상으로 미국 농무성의 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 준분포형 모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)을 이용하여 유역 내의 토양유실량과 유사량을 산정하고, 토양유실량을 줄이기 위한 토지피복 변화 시나리오를 적용하여 강우 시 용담호로 유입되는 유사량의 저감효과를 평가하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구지역

금강수계의 효율적인 수자원 관리와 전주권에 대한 안정적인 용수공급을 위하여 금강 상류에 건설된 용담호는 유역면적이 930 km², 총 저수용량 8.15억 m³, 유효 저수용량은 6.72억 m³으로서 저수용량으로는 소양호, 충주호, 대청호, 안동호에 이어 우리나라 인공호수 중 5번째 규모의 대형 호수이다. 유역 내 행정구역은 전라북도 진안군, 장수군 및 무주군 등 3개 군, 14개 읍·면이 포함되어 있고, 주요 수계로는 금강본류, 구량천, 진안천, 정자천, 주자천 등 5개 하천이 유입되고 있다. 용담호 유역의 토지이용 현황은 임야가 723 km²로 가장 높은 점유율을 보이고, 다음으로 논과 밭이 각각 75 km²와 57 km²를 차지하고 있어 임야와 농경지가 유역 전체의 92%를 차지하는 전형적인 농촌·산간 지역이다.

2001년부터 담수가 시작된 용담호는 유역의 대부분이 임야와 농경지로 구성되어 있으나 담수초기부터 중영양~부영양상태를 보이고 있으며(유순주 등, 2005), 2002년부터 2005년까지 용담호로 들어오는 오염물질 중 BOD의 80%, TN의 63% 그리고



그림 1. 연구지역 유역도

TP의 61%가 강우 시에 유입되는 것으로 보고되어 용담호 유역도 비점오염원의 오염기여도가 매우 높은 것으로 나타났다(금강수계관리위원회, 2006).

본 연구의 대상지역은 용담호 유역 중 그림 1과 같이 금강 본류의 천천수위관측소 유역을 선정하였다. 연구지역의 유역면적은 297.5 km²이고, 이 중 임야는 205.7 km², 논 40.4 km² 그리고 밭은 36.7 km²로서 임야와 농경지가 전체의 95.1%를 차지하고 있으며, 천천수위관측소는 용담호의 유입부와 인접한 지점에 위치하고 있어 용담호 수질에 직접적인 영향을 미치는 지역이다.

2. SWAT 모형의 구축

1) SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위하여 개발된 모형이다(Arnold, 2005). SWAT 모형은 미

국 농무성에서 개발하여 사용해 온 CREAMS, GLEAMS 및 EPIC 모형의 장점만을 결합하여 1994년에 처음으로 만들어졌다(Arnold and Srinivasan, 1994). 특히 SWAT 모형은 강우-유출모형과 수질모형이 GIS와 연계된 호환모형으로 장기 유출량과 수질을 모의할 수 있다.

SWAT 모형은 유역의 서로 다른 표면특성을 반영할 수 있도록 대상유역을 몇 개의 소유역으로 구분하고 소유역 내에서 유사한 특성을 나타내는 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 세분한다. 전체적인 모의는 유역부분과 수체부분으로 나누어 실시되며, 유역에서는 각 수문반응단위에서 물수지식에 따라 강우량, 지하수로의 침투량, 증발산량 및 표면유출량을 산정한다. 토양침식은 USLE 모형의 강우인자를 유출인자로 대체하여 만든 MUSLE(Modified Universal Soil Loss Equation) 모형에 의해 계산된다. 수체는 하천과 저수지를 의미하며 이 모듈에서는 유량, 퇴적물, 영양염류 그리고 유기성 화학물질의 반응 등이 고려된다. 이러한 SWAT 모형은 유역에서의 토지이용에 따라 발생하는 비점오염원과 유역 내 소하천별, 소유역별 그리고 소유역 내 수문반응단위별 유출량과 토양유실을 모의할 수 있다(허성구 등, 2006).

2) SWAT 모형의 입력자료 구축

(1) 지형자료 입력

본 연구를 위해 SWAT 모형의 구동에 필요한 지형자료는 그림 2 ~ 그림 5와 같이 해당 지역의 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM), 토지피복도, 토양도 및 하천도 등이 있다.

DEM 자료는 1:25,000의 수치지도를 이용하여 등고선 자료를 추출한 후 GIS 분석도구인 Arcview에서 소정의 처리과정에 의해 30 m × 30 m로 생성하여 구축하였다. 토지피복도는 환경부에서 제공하는 1:25,000의 토지피복 자료를 이용하였으며, SWAT 모형에서 요구하고 있는 토지이용 분류체계에 따라 산림, 논, 주택지 등 14가지로 분류하여 shape 파일 형태로 데이터베이스를 구성하였다. 토

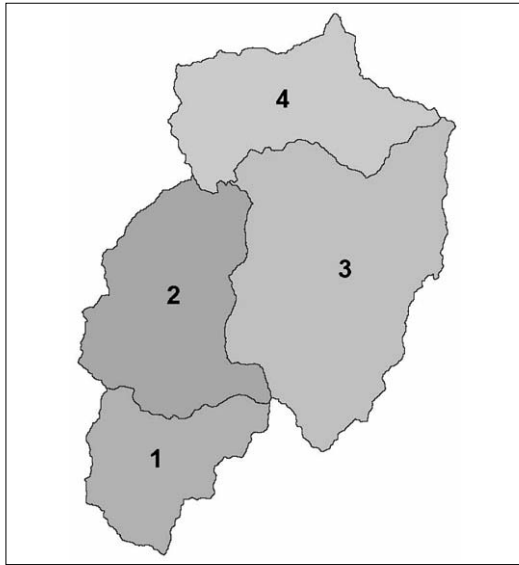


그림 6. 소유역 구분

적 특성인자를 계산하여 분할된 소유역의 면적, 유역경사, 하천길이, 하천 평균 폭, 하천 평균 깊이 등의 자료를 획득한다. 본 연구에서는 그림 6과 같이 연구지역을 4 개의 소유역과 68개의 HRU로 구분하여 각각의 정보를 획득하였다.

(3) 기상자료 입력

SWAT 모형에서는 강우, 풍속, 기온, 태양복사량, 상대습도 등의 기상자료를 입력하여 유출 및 증발산 등의 수문성분을 계산하게 된다. 본 연구에서는 천천수위관측소 유역과 인접한 거창, 금산, 임실, 장수 및 전주기상관측소에서 1999년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지 측정된 일별 기상자료를 수집하여 입력하였으며, 태양복사량의 경우 전주기상대에서만 관측되고 있어 1개 관측소의 태양복사량 자료를 입력하였다.

3) SWAT 모형의 보정 및 검증

SWAT 모형을 이용하여 천천수위관측소 유역의 토사유실량과 유사량을 산정하기 위해서는 SWAT 모형의 보정과 검증과정을 통하여 정확성이 사전에 평가되어야 한다.

본 연구에서 모형의 보정과 검증에 사용한 유량과 SS 자료는 금강수계관리위원회(2006)의 「비점

오염모델링 기술을 이용한 유역 오염물질 배출해석 보고서」에 수록된 2002~2005년의 관측자료를 이용하였다. 유사량의 보정과 검증은 천천수위관측소 지점에서 실측된 SS 농도와 SWAT 모형에서 예측된 SS 농도로부터 시행하였다. 한편 각 유역으로부터 발생한 토양유실량은 보정 및 검증자료를 현실적으로 확보하기가 어렵기 때문에 하천에서 관측된 유사량과 모델에서 예측된 SS농도를 비교하여 평가하였으며, 하천에서의 유사량 보정·검증 시 오차를 최소화하는 방법으로 대체하였다. SWAT 모형의 보정은 2002~2003년 그리고 검증은 2005년을 기준으로 수행하였다.

III. 연구결과

1. SWAT 모형의 보정 및 검증결과

본 연구에서 천천수위관측소 유역에 대한 모형의 보정과 검증은 금강수계관리위원회(2006)의 보고서에 수록된 천천수위관측소의 일유량, 금강물환경연구소와 전북보전환경연구원의 수질자료를 이용하여 실시하였다. SWAT 모형을 구동할 때 처음 1~2년은 정확한 모의를 위한 모형의 안정화 기간으로 설정되기 때문에 본 연구에서는 1999~2005년을 모의기간으로 설정하고 이중 1999~2001년을 모형의 안정화 기간, 2002~2003년을 보정기간 그리고 천천수위관측소 이전으로 유량 관측자료에 문제가 있는 2004년은 배제하고 2005년을 검증기간으로 정하였다.

천천수위관측소 지점에서 유량과 유사량에 대한 보정은 먼저 유출에 관계된 주요 매개변수들을 보정하고, 유출에 대한 보정이 완료된 후 유사관련 매개변수를 보정하였다. 2002년 1월부터 2003년 12월까지 유량의 관측값과 모의값으로부터 보정한 결과를 보면 상관결정계수(R^2)는 0.8이며, 모형효율지수는 0.78로 산정되었다. 또한 천천수위관측소 지점에서 실측된 SS 농도와 SWAT 모형에서 예측된 SS 농도로부터 유사량을 보정한 결과 상관결정계수는 0.7이며, 모형효율지수는 0.48로 나타났다.

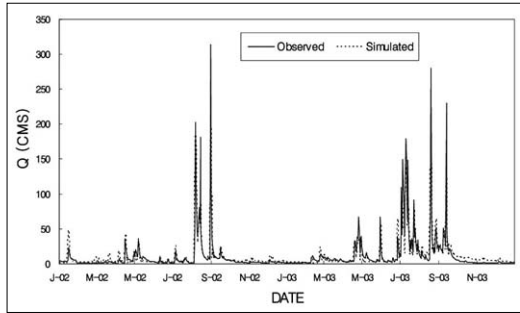


그림 7. 유량의 보정결과

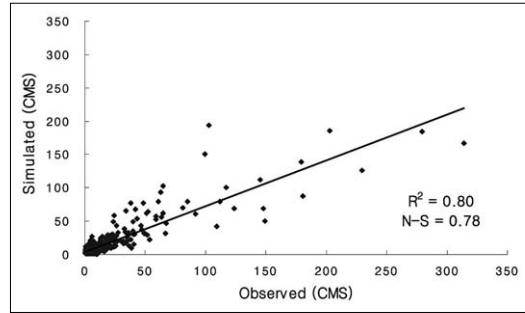


그림 8. 유량 보정결과의 정확성 평가

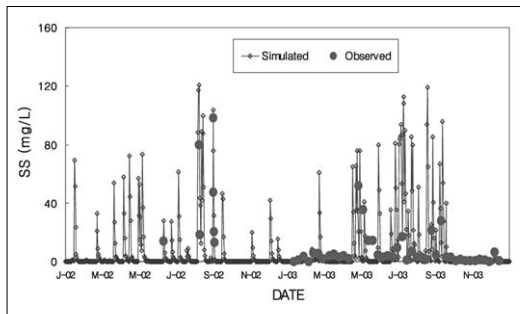


그림 9. 유사량의 보정결과

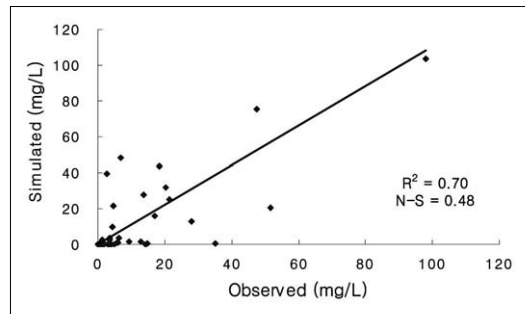


그림 10. 유사량 보정결과의 정확성 평가

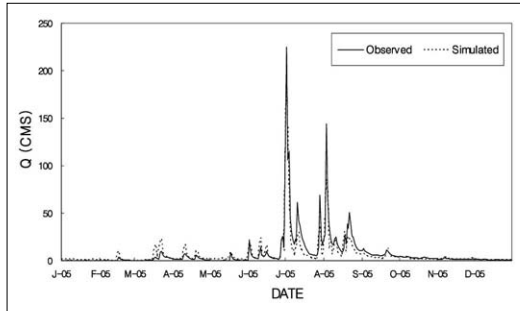


그림 11. 유량의 검증결과

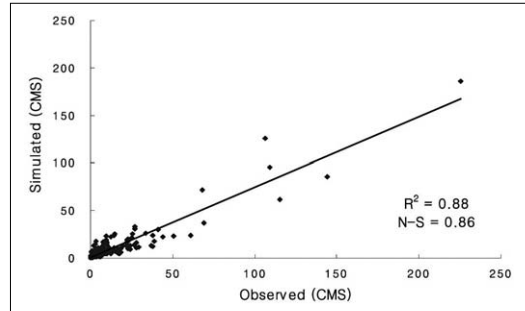


그림 12. 유량 검증결과의 정확성 평가

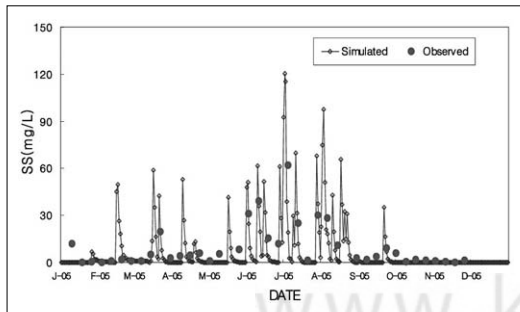


그림 13. 유사량의 검증결과

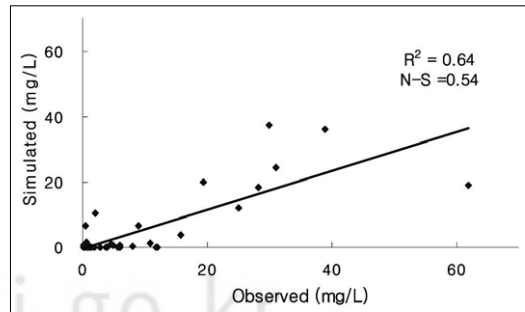


그림 14. 유사량 검증결과의 정확성 평가

보정에 사용한 매개변수를 2005년 1~12월에 적용하여 모형을 검증한 결과 유량의 상관결정계수와 모형효율지수는 각각 0.88과 0.86이었고, 유사량의 상관결정계수와, 모형효율지수는 각각 0.64와 0.54로 산정되었다.

모형의 정확성을 평가하는 방법은 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 자연현상을 모의할 때 상관결정계수와 모형효율지수(EI)를 이용하여 평가하는 방법을 제안한 Ramanarayanan *et al.*(1997)의 기준을 적용하였는데, 그들은 상관결정계수가 0.5 이상이고, 모형효율지수가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것이라고 제시하였다. 본 연구에서 사용한 모형효율지수는 Nash and Sutcliffe(1970)가 제시한 지수산정식을 사용하였다. 본 연구에서 보정과 검증에 마친 SWAT 모형의 정확성을 Ramanarayanan *et al.*(1997)의 기준으로 평가해 보면 유량은 보정과 검증결과 모두 정확도가 매우 높았으나, 유사량의 경우 정확도 평가 기준보다는 높지만 유량에 비해 정확도가 낮은 것으로 나타났다. 이러한 이유는 유사의 경우 유역 출구에 도달할 때까지 매우 복잡한 과정을 수반하고, 대부분 경험식에 의해 모의되고 있으며, 관측치의 오차가 존재하기 때문에 관련 매개변수 보정도 쉽지 않기 때문인 것으로 알려져 있다(과학기술부·한국건설기술연구원, 2007).

2. 연도별 토양유실량 산정

SWAT 모형에서 유역으로부터의 토양유실량은 MUSLE를 적용하여 각 HRU 및 소유역별로 강우나 융설이 발생한 일자에 산정된다. 천천수위관측소 유역 내에서 2002년부터 2005년까지 4년간의 연평균 토양유실량은 28,936 ton/yr이었고, 연도별 토양유실량의 변화는 그림 15와 같이 그 해의 강수량에 따라 많은 차이를 보이고 있다. 특히 규모가 큰 태풍이었던 “루사”와 “매미”의 영향을 받았던 2002년과 2003년의 토양유실량이 2004년과 2005년에 비하여 많은 것으로 나타났으며, 단위면적당 연평균 토양유실량의 최대치는 2003년의 1.46

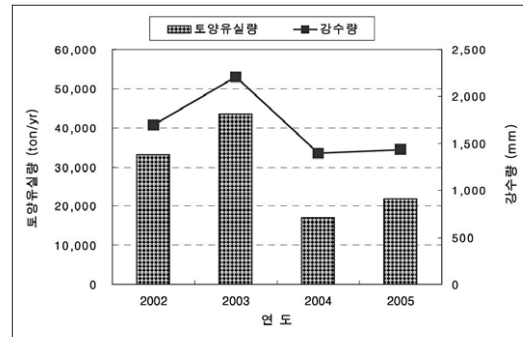


그림 15. 연도별 토양유실량

ton/ha/yr, 최소치는 2004년의 0.57 ton/ha/yr로 약 2.6배의 차이를 보이며, 4년 동안의 단위면적당 연평균 토양유실량은 0.97 ton/ha/yr로 산정되었다.

3. 토지이용형태별 토양유실량 산정

동일한 강우사상이 발생하는 지역 내에서도 토양유실량은 지표면의 토지이용형태에 따라 많은 차이를 보인다. 본 연구에서는 연구지역의 토지이용형태별 토양유실량을 알아보기 위해 SWAT 모형에서 2002~2005년까지 모의된 연평균 값으로부터 본 유역의 대부분을 차지하고 있는 임야와 논, 밭의 단위면적당 토양유실량을 산정하였다. 산정방법은 유역 내 임야와 논 및 밭의 전체면적을 각각 구하고, 이들 지목으로부터 유실된 2002~2005년까지의 연간 토사량을 계산하여 토양유실량을 지목별 면적으로 나눈 후 4년간의 값을 산술평균하였다.

2002~2005년까지 유역 내에서의 토양유실량을 토지이용형태별로 살펴보면 임야 1.5%, 논 2.1% 그리고 밭이 약 96%로서 본 유역에서 토양유실은 대부분 밭에서 발생하는 것으로 나타나 용담호의 기능과 수질을 보전하기 위해서는 유역 내의 밭에 대한 관리대책 수립이 선행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 이 기간 동안 임야와 논, 밭의 단위면적당 토양유실량 평균치는 임야 0.02 ton/ha/yr, 논 0.15 ton/ha/yr 그리고 밭이 7.58 ton/ha/yr로 산정되었다. 그러나 농촌진흥청·농업과학기술원(2003)에서 산정한 우리나라의 지목별 단위면적당 토양유실량은

임야 3.5 ton/ha/yr, 논 1.0 ton/ha/yr, 밭 41.0 ton/ha/yr으로서 이들이 제시한 값보다 훨씬 낮은 값을 보였다. 이러한 이유로는 토양유실량 산정에 적용한 식과 산정기간이 다르기 때문인 것으로 판단되나, SWAT 모형으로 경안천 유역과 충주댐 유역에서 지목별 토양유실량을 산정한 과학기술부·한국건설기술연구원(2007)의 결과와 본 연구결과는 큰 차이를 보이지 않아 앞으로 이 분야에 대한 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

4. 유사운송비 산정

유사운송비(Sediment Delivery Ratio, SDR)란 총 토양유실량에 대한 유역의 최종 출구나 임의지점에서 유사량의 비로 정의되며, 이는 유역의 크기 및 형상, 강우 패턴, 직접유출량, 침투유량, 토지이용도, 작물, 경사, 토양입자 등과 같은 유역 내 물리적 인자의 영향을 받는다(박윤식 등, 2007b). 이러한 모든 자연 요소에 지배되는 유사운송비를 정확히 계산하기는 어렵지만 여러 연구자들에 의해 경험식이 개발되었다.

Yin *et al.*(2005)은 수질환경 분야에서 정의하는 유달부하량과 같은 개념의 식을 제의하였으나 대부분의 유사운송비 산정식은 유역 크기와의 함수로 나타내었으며(USDA, 1972; Vanoni, 1975; Boyce, 1975), Williams and Berndt(1977)는 유역면적 대신에 유역의 평균 경사도로 개발한 식을 제시하였다. 이들이 제안한 식은 다음과 같다.

$$SDR = \frac{S_y}{T} \quad (\text{Yin et al.}) (1)$$

(S_y : 최종 유출구 혹은 임의 지점에서의 유사량,
T: 유역의 총 토양유실량)

$$SDR = 0.3750 \text{ AREA}^{-0.2382} \quad (\text{USDA}) (2)$$

$$SDR = 0.472 \text{ AREA}^{-0.125} \quad (\text{Vanoni}) (3)$$

$$SDR = 0.5656 \text{ AREA}^{-0.11} \quad (\text{Boyce}) (4)$$

(AREA: 유역의 평균면적(km²))

$$SDR = 0.627 \text{ SLOPE}^{0.403} \quad (\text{Williams and Berndt}) (5)$$

(SLOPE: 유역의 평균경사)

본 연구에서는 SWAT 모형에서 모의된 유역 내

표 1. 산정방법별 유사운송비 비교

구 분	유사 운송비			
	2002년	2003년	2004년	2005년
Yin <i>et al.</i>	0.35	0.37	0.33	0.36
Vanoni	0.23			
Boyce	0.30			
USDA	0.09			
Williams and Berndt	0.28			

총 토양유실량과 천천수위관측소에서의 유사량을 이용하여 유사운송비를 구하였다. 이 방법은 Yin *et al.*(2005)이 제시한 식과 같으며, 다른 연구자들이 제의한 식에 의한 유사운송비와 비교한 결과는 표 1과 같다. 표에 의하면 본 연구에서와 같이 유사운송비를 산정할 경우 매년 달라지는 기상현상과 하천의 수리특성을 적절히 반영할 수 있지만, 유역면적과 유역경사를 이용한 방법으로 산정할 경우 항상 같은 값을 얻게 되어 정확성이 낮아지는 문제가 발생하게 된다. 본 연구에서 2002년부터 2005년까지 산정한 유사운송비는 0.33~0.37로서 유역면적과 유역경사를 이용한 방법보다 높게 나타났다.

5. 토양유실량 저감방안 적용

본 연구에서는 연구지역 하류에 위치한 용담호의 수질보전을 위한 유역관리의 일환으로 유역 내에서 토양유실량이 가장 큰 지목인 밭의 토양유실량을 최소화시키기 위해 밭을 초지로 변화시키는 시나리오를 적용하여 시나리오별로 토양유실량과 천천수위관측소 지점의 유사량 변화를 모의하였다. 시나리오는 2 가지로서 시나리오별 내용은 다음과 같으며, 시나리오를 적용하여 모의된 유역전체의 토양유실량과 유사량은 그림 16, 그림 17과 같다.

- 시나리오 1 : 대부분의 밭이 농업용수 취수를 용이하게 하기 위해 하천 주위에 위치한다는 전제하에 하천경계로부터 1,000 m까지 100 m씩 일정하게 거리를 증가시켜 그 안에 있는 밭을 초지로 변환한 후 이에 따른 토양유실량과 유사량의 변화를 모의한다.
- 시나리오 2 : 동일한 조건에서는 경사가 급한

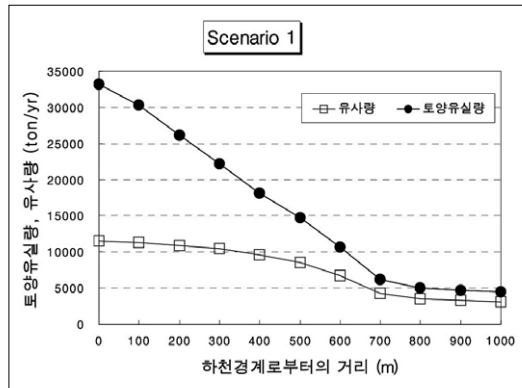


그림 16. 시나리오 1 적용결과

농경지일수록 토양유실량이 더 크다는 전제 하에 유역 내 모든 밭의 평균경사를 산정하여 5% 미만, 5~10%, 11~20%, 21~30% 그리고 30% 이상 등 5 가지로 구분한 후 경사도가 높은 곳부터 낮은 곳으로 변화시키며 각 경사도 범위에 포함된 밭을 초지로 바꾸어 토양유실량과 유사량의 변화를 모의한다.

시나리오 1을 적용시켜 하천경계를 기준으로 100 m씩 1,000 m까지 거리를 증가시키며, 그 안에 있는 밭을 초지로 변환시킨 결과, 전체 밭 면적의 약 90%인 33 km²의 밭이 초지로 바뀌었다. 그림 16을 보면 700 m까지는 토양유실량이 급격하게 감소하다가 이후 완만한 감소추세를 보여 700 m까지는 100 m마다 약 12%씩 급격하게 감소하였으나, 700 m 이상부터는 감소율이 3% 이하로 낮아졌다. 천천 수위관측소 지점의 유사량은 토사유실량과는 달리 500 m까지는 약 6%로 완만한 감소율을 보인다 500~700 m 사이에서는 약 19%로 급중한 후 이후 다시 3.5%로 감소하였다. 이러한 이유는 유사량을 산정한 연구지역의 하구에 하천경계로부터 500~700 m 사이에 있는 밭이 많았기 때문인 것으로 판단된다.

시나리오 2를 적용시켜 경사도에 따라 밭을 초지로 변환시킨 결과 30% 이하의 경사도를 가진 밭이 전체의 98%인 36 km²였으며, 경사도가 30%를 초과한 밭의 면적은 0.7 km² 정도밖에 되지 않았다. 그림 17을 보면 토양유실량의 경우 경사도가 20%

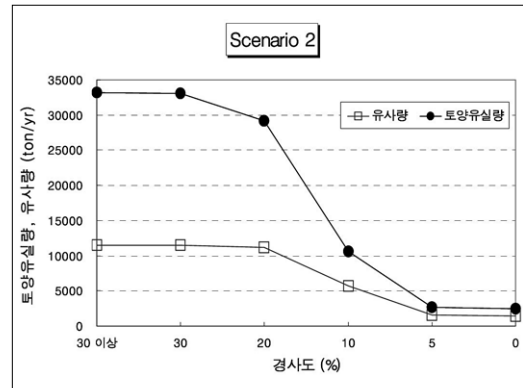


그림 17. 시나리오 2 적용결과

이상에서는 완만한 감소추세를 보이다 20~5%까지 감소율이 급감하며 5% 이하는 변화가 거의 없는 것으로 모의되었다. 이는 연구지역에 있는 대부분의 밭이 20~5% 사이의 경사도를 가지고 있다는 것을 의미하며, 유사량 역시 경사도가 20~5% 사이의 밭을 초지로 변환시켰을 때 감소율이 커지는 것으로 나타났다.

IV. 결론

금강 상류에 위치한 용담호 유역 중 금강 발원지로부터 용담호 유입부까지를 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 토양유실량과 유사량을 산정하고, 토양유실량을 줄이기 위한 토지피복 변화 시나리오를 적용하여 강우 시 용담호로 유입되는 유사량의 저감효과를 평가하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유량과 유사량 모의를 위해 SWAT 모형을 보정 및 검증한 결과 유량의 보정 시 상관결정계수와 모형효율지수는 각각 0.8과 0.78이었으며, 유사량 보정 시에는 상관결정계수와 모형효율지수가 각각 0.7과 0.48로 산정되었다. 또한 모형의 검증 시 상관결정계수와 모형효율지수는 유량의 경우 0.88과 0.86이었고, 유사량은 0.64와 0.54로 산정되어 SWAT 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 나타났다.
2. 2002~2005년까지 토양유실량을 모의한 결과

그 해의 강수량에 따라 많은 차이를 보였고, 해당 기간 동안의 단위면적당 연평균 토양유실량은 0.97 ton/ha/yr로 산정되었다.

3. 토지이용형태별 토양유실량은 밭이 전체의 약 96%를 차지하여 본 유역에서 토양유실은 대부분 밭에서 발생하는 것으로 나타났다. 임야와 논, 밭의 단위면적당 토양유실량 평균치는 각각 0.02 ton/ha/yr, 0.15 ton/ha/yr, 7.58 ton/ha/yr로 산정되어 우리나라의 평균치보다 낮은 값을 보였으며, 2002년부터 2005년까지 산정한 유사운송비는 0.33~0.37로서 유역면적과 유역경사를 적용한 경험식보다 높게 나타났다.
4. 토양유실량과 유사량을 최소화하기 위해 하천 경계로부터의 거리와 경사도에 따라 밭을 초지로 변화시키는 2개의 시나리오를 적용한 결과 거리의 경우 토양유실량은 700 m까지, 유사량은 500~700 m 사이에서 저감율이 높았다. 경사도를 적용한 시나리오에서는 토양유실량과 유사량 모두 20~5%까지의 경사도를 가진 밭을 초지로 변환하였을 때 저감효과 큰 것으로 평가되었다.

참고문헌

- 과학기술부 · 한국건설기술연구원, 2007, 지표수 수문성분 해석시스템 개발, 223-241.
- 구본경, 조재현, 2007, 분포형 유역모델을 이용한 유사 운반과정의 시 · 공간적 변동 해석, 한국물환경학회지, 23(6), 872-880.
- 금강수계관리위원회, 2006, 비점오염모델링 기술을 이용한 유역 오염물질 배출해석 최종 보고서.
- 농촌진흥청 · 농업과학기술원, 2003, 전국 토양침식 위험성 평가, 18-20.
- 박윤식, 김종건, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재, 2007, 임하댐 유역의 유사거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가, 한국물환경학회지, 23(4), 467-473.
- 박윤식, 김종건, 김남원, 김기성, 최중대, 임경재, 2007, SATEEC 시스템을 이용한 면적/경사도에 의한 유달율 산정방법에 따른 유사량 분석, 한국물환경학회지, 23(5), 650-658.
- 유순주, 채민희, 황종연, 이재안, 박종겸, 최태봉, 2005, 담수 이후 용담호 영양상태 변동 요인 분석, 한국물환경학회지, 21(4), 360-367.
- 허성구, 김기성, 안재훈, 임경재, 최중대, 2006, 소유역 구분이 SWAT 예측치에 미치는 영향 평가, 한국관개배수학회지, 13(2), 55-62.
- Arnold, J. G., 2005, Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation.
- Arnold, J. G. and Srinivasan R., 1994, Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS, Water Resources Bulletin, *American Water Resources Association*, 30(3), 453-462.
- Boyce, R. C., 1975, Sediment Routing with Sediment Delivery Ratio. In: Present and Prospective Technology for ARS, USDA, Washington, D. C..
- Nash, K. G. and Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models, Part 1, A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S., 1997, Using APEX to identify alternative practices for animal waste management, Minneapolis, MN. Paper No. 97-2209.
- USDA, 1972, Sediment Source, Yields, and Delivery Ratios, National Engineering Handbook, Section 3 Sediment.
- Vanoni, V. A., 1975, Sedimentation Engineering, Manual and Report No. 54, American

- Society of Civil Engineers, New York, N.Y.
- Williams, J. R. and Berndt, H. D., 1977, Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. *Trans. of the ASAE*, 20, 1100-1104.
- Yin, Z., Walcott S., Kaplan, B., Cao, J., Lin, W., Chen, M., Liu, D., and Ning, Y., 2005, An analysis of the relationship between spatial patterns of water quality and urban development in Shanghai, China, Computers, *Environment and Urban System*, 29, 197-221.
- 최종원고채택 08. 08. 11