

고랭지 농경지의 토양유실모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가

허성구 · 김기성 · 사공명* · 안재훈** · 임경재

강원대학교 농업생명과학대학 · *한국철도기술연구원 · **고령지농업연구소

Evaluation of SWAT Applicability to Simulate Soil Erosion at Highland Agricultural Lands

Sung-Gu, Heo · Ki-Sung Kim · Myung Sagong* · Jae-Hun Ahn** · Kyoung Jae Lim

College of Agriculture, Kangwon National University · *Korea Railroad Research Institute

**National Institute of Highland Agriculture

ABSTRACT : The Doam watershed is located at alpine areas and the annual average precipitation, including snow accumulation, is significantly higher than other areas. Thus, pollutant laden runoff and sediment discharge from the alpine agricultural fields are causing water quality degradation at the Doam watershed. To estimate soil erosion from the agricultural fields, the Universal Soil Loss Equation (USLE) has been widely used because of its simplicity to use. In the early spring at the Doam watershed, the stream flow increases because of snow melt, which results in erosion of loosened soil experiencing freezing and thaw during the winter. Also, extremely torrential rainfall, such as the typhoons 'RUSA' in 2002 and 'MAEMI' in 2003, caused significant amounts of soil erosion and sediment at the Doam watershed. However, the USLE model cannot simulate impacts on soil erosion of freezing and thaw of the soil. It cannot estimate sediment yield from a single torrential rainfall event. Also, it cannot simulate temporal changes in USLE input parameters. Thus, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was investigated for its applicability to estimate soil erosion at the Doam watershed, instead of the widely used USLE model. The SWAT hydrology and erosion/sediment components were validated after calibration of the hydrologic component. The R² and Nash-Sutcliffe coefficient values are higher enough, thus it is found the SWAT model can be efficiently used to simulate hydrology and sediment yield at the Doam watershed. The effects of snow melt on SWAT estimated stream flow and sediment were investigated using long-term precipitation and temperature data at the Doam watershed. It was found significant amount of flow and sediment in the spring are contributed by melting snow accumulated during the winter. Two typhoons in 2002 and 2003, MAEMI and RUSA, caused 33% and 22% of total sediment yields at the Doam watershed, respectively. Thus, it is recommended that the SWAT model, capable of simulating snow melt, sediment yield from a single storm event, and long-term weather data, needs to be used in estimating soil erosion at alpine agricultural areas to develop successful soil erosion management instead of the USLE.

Key words : Calibration, Sediment, Streamflow, SWAT, Validation

1. 서론

환경에 따른 관심이 고조되는 시점에서 강원도 고랭지 부근의 남한강 최상류인 송천에 댐을 막아 이루어진 도암댐이 건설됨으로써 강릉 남대천의 수계에 커다란 환경 오염이 야기 되고 있다.

각종 오염을 야기시키는 강원도 대관령 고랭지 농업 지역은 해발고도가 비교적 높은 고산지대이고, 기후적으로도 1987년 이후부터 연강수량이 급격히 증가하는 추세를 보이고 있다. 연중 평균기온이 낮아 대략 1개월 일찍 겨울이 시작되어 1개월 정도 늦게 끝나며 많은 적설량을 보이고 있다. 최근 2002년과 2003년 태풍 루사와 매미에 의해 단일 시간 내에 많은 강우로 인하여 상당한 양의 토양유실과 유사가 발생하여 이에 따라 하류지역 즉 도암댐 수계내 탁수 및 수질악화 문제가 심각하게 발생하였다.

이러한 탁수 및 수질 문제를 해결하기 위하여 농경지

Corresponding author : Kim, Ki-Sung
Tel : 033-250-6466
E-mail : kskim@kangwon.ac.kr

에서 발생하는 토양유실량을 산정해야 하며, 지난 40여년간 우리나라에서 뿐만 아니라 전 세계적으로 Universal Soil Loss Equation(USLE) 모형이 토양유실량 산정에 많이 이용되어 왔다(김기성 등, 2005). USLE 모형은 Wischmeier와 Smith(1965)에 처음 제안되었으며, 강우침식능 인자(R), 토양침식성 인자(K), 경사와 경사장 인자(LS), 식생 피복 인자(C), 작물경작 인자(P)들을 고려하여 단위면적당 연평균 토양유실 발생 가능성을 평가한다. 그러나 USLE 모형은 농업지역에 적용할 수 있는 Field-Scale 모형으로서 대상지역내 토양유실 발생 포텐셜을 모의하는 것이지, 유실된 토양이 하류로 이동되어 하천으로 유입되는 유사 발생량을 모의 할 수 없다.

토양유실량 분석시 침식량에 영향을 주는 인자들 중 강우인자(R)에 관한 수많은 연구가 수행되어 왔다. 정팔균 등(1983)은 1964년부터 1980년까지의 전국 69개 관측 측후소 강우 자기 기록 자료를 사용하여 강우인자(R)를 계산하였으며, 평창군 지역의 강우인자(R)는 269이었다. 정영상 등(1999)은 1973년부터 1996년까지의 강원도내 기상청 기상자료를 토대로 고냉지 대관령 지역의 강우인자를 산출하였으며, 대관령 지역의 강우인자(R)값은 469였다. 이와 같이 강우인자값이 다른 이유는 앞서 언급된 바와 같이 1987년 이후 대관령 지역에서의 강수량 증가에 의한 것이다. 이는 다른 조건이 다 같은 상태에서 각기 다른 기간의 강우자료를 이용하여 분석된 강우인자(R)값을 이용하면 대관령 지역의 USLE 모의 토양유실 발생량이 약 174% 정도 차이가 난다는 것을 의미한다. 따라서 기상변화가 심한 곳에서 USLE 모형을 이용하여 토양유실을 모의하기에는 강우패턴 변화를 반영할 수 없어 USLE 모형의 적용에 한계가 있다.

또한 USLE 모형은 단위면적당 연평균 토양유실 발생 가능성을 모의 할 수 있을 뿐, 시간적으로 변화하는 토양유실량을 모의 할 수 없다. 따라서 고랭지 지역과 같이 3월 중순까지 상당한 양의 눈이 녹지 않고 있다가 기온 상승에 따른 융설로 인한 유량 증가와 토양유실 발생의 시간적 변화를 모의 할 수 없다. 그리고 태풍과 같은 단일 강우사상에 의해 발생하는 토양유실량을 USLE 모형을 이용하여 모의 할 수 없으며, 선행 강우사상에 의한 유량 증가 및 토양유실에 미치는 영향을 고려 할 수 없다.

본 연구의 목적은 고랭지 지역과 같이 기상변화가 심하고 겨울철 눈이 많이 내리는 지역에서 시간적 기상변화와 융설에 따른 영향을 고려하여 토양유실과 유사발생 이동을 모의할 수 있으며, 태풍과 같은 큰 규모의 단일 강우사상에 의한 토양유실과 유사의 거동을 모의할 수 있는 Soil and Water Assessment Tool(SWAT) 모형의 고랭지 지역에 대한 적용성을 검토하는데 있다.

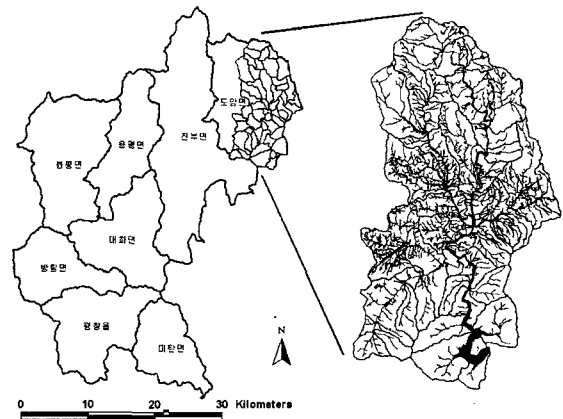


그림 1. 평창군 도암면 수계

II. 연구지역 선정 및 분석방법

1. 연구지역 선정

연구 대상지역은 강원도 평창군 도암면에 속하는 도암댐 유역으로 동경 128° 37'~128° 47', 북위 38° 35'~38° 47'에 위치해 있다. 그림 1은 평창군 도암면의 도암댐 수계를 나타내고 있다. 도암댐 수계는 상대적으로 해발고도가 높은 고산지대로서, 지세, 토질, 기후 등이 고랭지 농업에 적합한 지역에 속한다. 도암면의 면적은 221.6 km²로서 평창군 전체 면적 1463.7km²의 15.2%에 해당되며 이 중 농경지와 초지는 각각 8.1%와 4.4%를 차지한다. 반면, 산림이 82.6%를 차지하는 전형적인 산지 고원 지역이다(평창군청, <http://www.happy700.or.kr>).

2. 연구유역의 기후특성

이 유역은 고랭지 지역으로서 여러 가지 지형에 따라 복잡한 기상변화를 가지고 있다. 연중 평년 기온도 낮고 평난지 지역에 비해 대략 1개월 일찍 겨울이 시작되어 1개월 정도 늦게 끝난다.

대관령 기상대의 기상관측에 따르면 본 연구지역의 연평균 기온은 6.50℃이며, 영서지역에 위치한 춘천(10.92℃)에 비하여 4.42℃가량 낮다. 여름철 월평균 기온은 20℃ 미만으로 매우 서늘하다.

연구유역의 연평균 강수량은 1797.95mm로 남한 최다우지 가운데 하나로 꼽히며, 고도가 높고 태백산맥의 분수계에 위치하여 지형성 강우가 많기 때문에 춘천(1278.71mm) 지역보다 강수량이 많다. 중부지방의 다른 지역과 마찬가지로 여름철에 많은 강수가 집중되지만 8월 강수량이 비교적 많아 하천의 유량이 증가함을 알 수 있다 <그림 2>. 또한 겨울철에 기온이 낮아 눈이 많이 내린다는 점이 특징이다 <그림 3>. 이상에서 언급한 기후적인 특

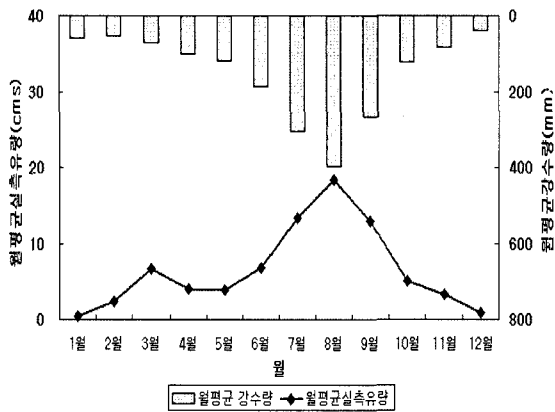


그림 2. 월평균 강수량 및 실추 월평균 유량 비교 (1974~2005)

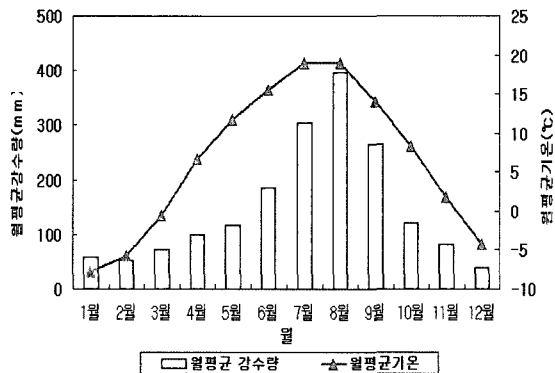


그림 3. 월평균 강수량 및 월평균 기온 비교(1974~2005)

정으로 인해 대관령 고랭지 지역에서는 경작 기간이 짧고, 냉량 습윤한 기후적인 특징을 가지고 있다.

3. SWAT 모형의 적용

가. SWAT 모형 개요

SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구국(Agricultural Research Service: ARS)에서 개발한 유역단위의 모형이다. 이 모형은 미국 농무성에서 이전에 개발하여 이용해 온 CREAMS 모형, GREAMS 모형 및 EPIC 모형과 같은 농업연구국 모형들을 결합하여 만들었다(Arnold와 Srinivasan, 1994). 특히 SWAT은 강우-유출모형과 수질모형이 GIS와 연계된 호환모형으로서 장기 유량과 수질을 모의할 수 있으며, 미계측 지역에서는 모의도 가능하며, 경작형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화할 수 있는 특징을 지니고 있다.

나. SWAT 모형의 입력자료

1) 기상자료

SWAT 모형의 운영에 필요한 기상자료는 일 강우(Pre-

cipitation), 일 풍속(Wind Speed), 일 일조량(Solar Radiation), 일 최고온도(Maximum Temperature)·일 최저온도(Minimum Temperature), 일 습도(Humidity)이다. 1974~2005년까지 대관령 지역에서 측정한 일누계강우, 풍속, 일조량, 온도, 그리고 습도 기상데이터를 사용하였다.

2) 토양도

도암담 수계내 토양속성은 농업과학기술원의 정밀토양도(1:25,000)를 사용하였으며, 대관령 지역은 주로 갈색산림토가 가장 많은 부분을 차지하며 비옥한 퇴적토는 적은 편이다. 토성별로 보면 양토가 62%로 가장 많고 다음이 미사질양토로 17%를 차지한다(그림 4)(농촌진흥청, 2000).

3) 토지이용도

도암담 수계내 토지이용현황은 환경부에서 제공하는 토지이용도를 사용하였다. 도암담 수계내에는 산림이 약 72.1%를 차지하며, 농업지역이 16.1%, 수역이 0.5%, 시가화 0.2%, 휴경지 5.0%, 초지가 6.0% 각각 차지하고 있다(그림 5).

4) DEM (Digital Elevation Model)

도암담 수계내의 물의 흐름과 소유역을 구분하기 위하여 Arcview GIS 프로그램을 이용하여 1:5,000 수치지도내 고도값만을 분리한 후, Triangulated Irregular Network (TIN)을 형성하고 이것을 가로, 세로 각각 5m×5m인 격자 형태의 DEM을 만들어 사용하였다(그림 6).

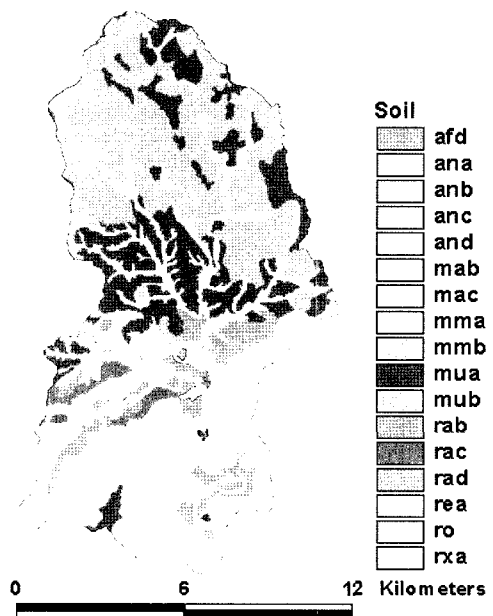


그림 4. 도암담유역 토양도

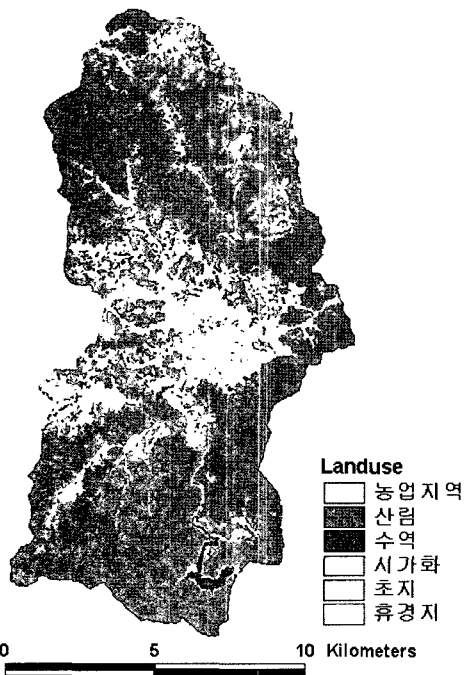


그림 5. 도암댐 유역 토지이용도

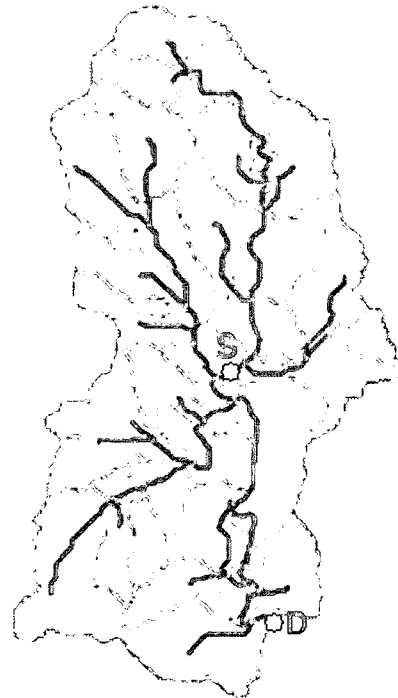


그림 7. 도암댐유역 수계추출 (D: 유량 측정 장소, S: SS 측정 장소)

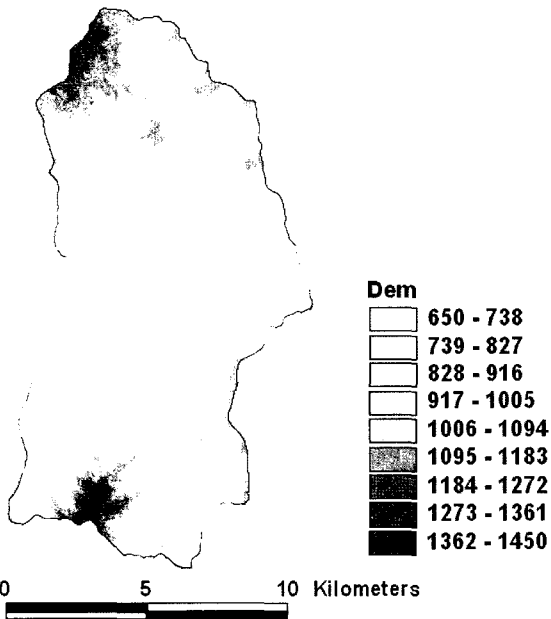


그림 6. 도암댐유역 Digital Elevation Model (DEM)

5) Watershed Delineation

유역 모형링을 위한 수계추출을 위해서 DEM과 실제 하천도를 이용하였다. 도암댐 수계내의 유역을 최대한 잘 반영 할 수 있도록 하기 위해서 Threshold 값을 변경 시키면서 실제 하천도와 비교하여 소유역을 생성하였다<그림 7>.

4. 모형의 보정(Model Calibration) 및 검정(Model Validation)

SWAT 모형을 이용하여 용설에 따른 토양유실량을 모의하기 위해서 먼저 SWAT 모형의 수문 및 토양유실/유사 컴포넌트의 정확성을 평가해야 한다. 모형의 정확성 평가를 위한 실측자료는 도암댐 수계 (그림 7의 D 지점)의 유량 자료와 송천 지점 (그림 7의 S 지점)의 유사량 자료를 이용하였다.

먼저 SWAT 모형의 수문 컴포넌트를 실측치와 비교 후 보정/검정 과정을 실시하였다. 수문 컴포넌트 중 가장 민감한 변수들을 선택하여 매개변수 (유출지수(CN), 토양증발보상인자(ESCO), 평균경사(SLOPE), 평균유로연장(SLLUBSN), 지하수 매개변수(GWQN), 작물경작인자(USLE_C), 침식조절인자(USLE_P))를 변경시켜 모형의 보정을 실시하였다 (Arnold 등, 1999, Santhi 등, 2000, Spruill 등, 2000). 이러한 인자들을 이용하여 모형 예측 월별 유량값을 실측값과 비교한 후 통계변량을 이용해 비교하면서 모형보정을 실시하였다. 보정된 모형변수를 이용하여 유량검정을 실시하였다. 유량의 보정/검정 후 예측유사량을 실측유사량과 비교·분석하였다. 실측유량값은 한국수력원자력에서 측정한 실측자료(한국수력원자력, URL: <http://www.khnp.co.kr>)를 이용하였으며, 유사량은 물환경정보시스템에서 측정한 실측자료(물환경정보시스템, URL: <http://water.nier.go.kr/weis/>)

를 이용하였다.

5. 용설에 의한 토양 유실 모의

용설은 봄이 되어 기온이 상승하면서 산간과 지표에 쌓인 눈이 녹는 현상을 말한다. 도암댐 수계에서는 겨울철에 쌓인 눈이 봄철 기온 상승으로 용설 되어 상당한 양의 토양유실을 발생시키기도 한다. 따라서 본 연구에서

는 겨울철 기온과, 강수량, 그리고 SWAT 모의 유량 및 유사량 자료를 비교하여 봄철 용설에 따른 강수량, 유량, 그리고 유사발생량 관계를 분석 하였다.

6. 태풍에 의한 토양 유실 모의

태풍은 북태평양 서부에서 발생하는 열대저기압 중에서 중심 부근의 최대풍속이 17m/s이상의 강한 폭풍우를

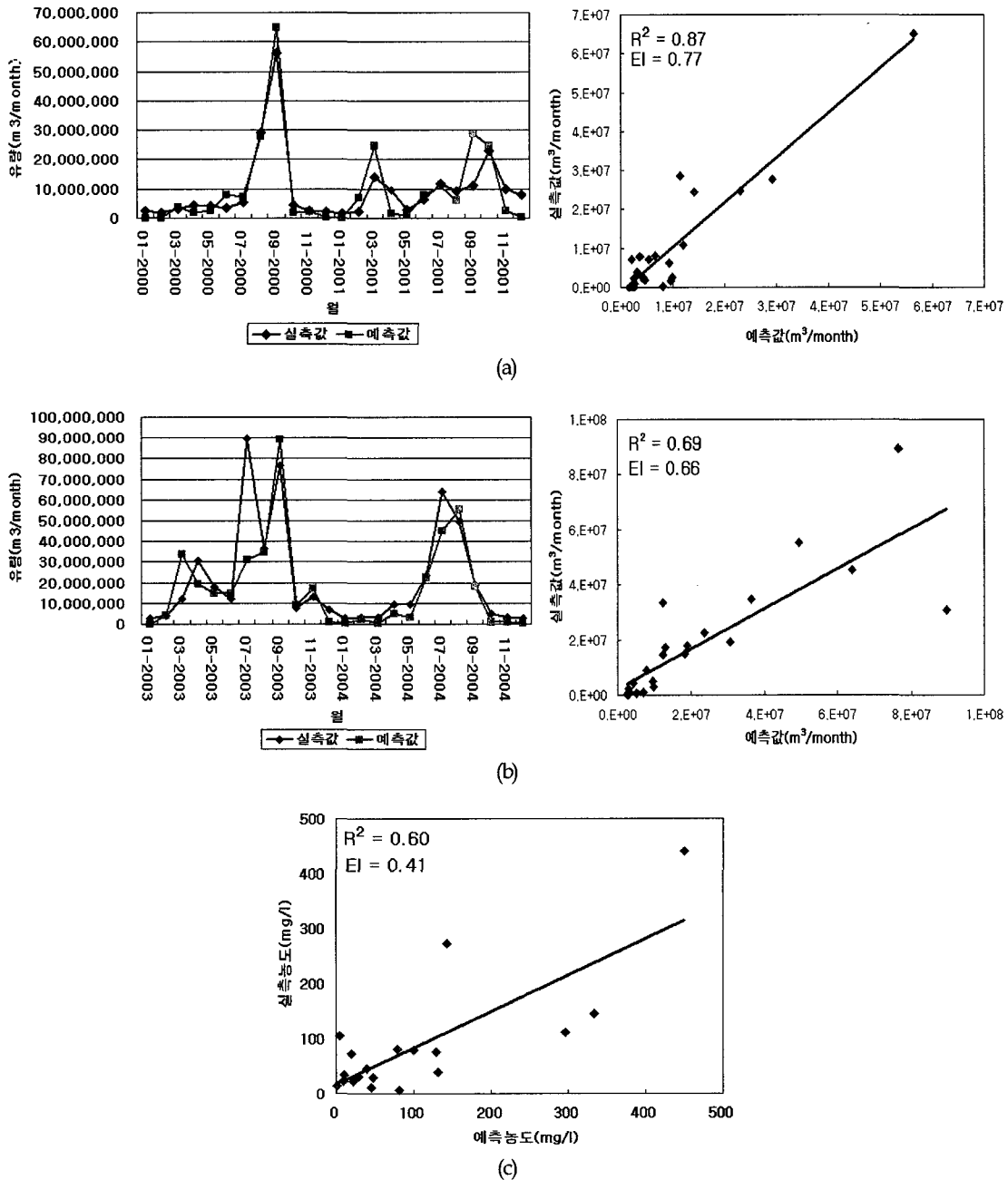


그림 8. SWAT 수문 컴포넌트의 보정 (2000~2001) (a) 과 검정 (2003~2004) (b) 및 SWAT 모의 유사농도와 실측 유사농도와의 비교 (2003~2004) (c)

동반하고 있는 것을 의미한다. 태풍 루사는 2002년 8월 23일에 발생하여 한반도에 8월 30일부터 9월 1일에 상륙하여 기상관측 이래 가장 많은 1일 강수량을 기록한 태풍이다. 태풍 매미는 2003년 9월 6일 발생하여 9월 14일 소멸한 중형급 태풍으로 기상관측 이래 중심부 최저기압이 가장 낮은 태풍이다(기상청, URL: <http://www.kma.go.kr>). 고랭지 도암댐 수계 내에서는 태풍에 의해 상당한 양의 토양유실이 발생되기도 하였다. 따라서 본 연구에서는 태풍 루사와 매미가 있던 해에 실측 강수량과 SWAT 모의 유량 및 유사량 자료를 비교하여 태풍에 따른 집중적인 강우발생시 강수량, 유량 그리고 토양유실량 관계를 분석하였다.

III. 결론 및 고찰

1. 모형의 보정(Model Calibration) 및 검증(Model Validation)

2000~2001년도의 실측값과 모의 값을 이용하여 유량 보정한 결과 수문곡선과 결정계수(R^2)는 0.87, 모형효율지수(EI)는 0.77로 나타났다<그림 8(a)>. 보정된 매개변수를 이용하여 2003~2004년을 적용해 본 결과 수문곡선과 결정계수(R^2)는 0.69, 모형효율지수(EI)는 0.66로 나타났다<그림 8(b)>. 보정된 매개변수를 이용하여 모의 유사농도와 2003~2004년 실측 유사농도를 비교분석한 결과 결정계수(R^2)는 0.60, 모형효율지수(EI)는 0.41로 나타났다<그림 8(c)>. Ramanarayanan et al. (1997)은 결정계수(R^2)가 0.5 이상이고 모형효율지수(EI)가 0.4 이상이면 모형이 자연 현상을 잘 모의하는 것으로 제안하였다. 따라서 보정된 SWAT 모형은 도암댐 수계내 유량/유사량 모의에 상당히 적합한 것으로 판단된다.

2. 고랭지 지역에서의 융설에 대한 모의 결과

1974~2005년까지 도암댐 기온자료를 분석한 결과 3월 기온이 영하인 날이 많았다가 3월 중순이후 영상으로 증가하는 경향을 보였다. 이중 1998년 기온자료와 SWAT 모의 유량 및 유사발생 자료가 융설에 의한 유량 및 토양 유실 증가를 명확히 보여준다. 1998년 1월 강수량은 197mm이었고 2월 강수량은 92mm 이었으나, 3월 강수량은 22mm였다<그림 9(a)와 (b)>. 그러나 SWAT 모의 하천 유량은 1월에는 $0.9\text{m}^3/\text{sec}$, 2월에는 $4.9\text{m}^3/\text{sec}$ 이었다가, 그리고 3월에 $11.8\text{m}^3/\text{sec}$ 로 급격히 증가되는 것을 알 수 있다. 이는 1월(평균기온 -7.20°C)과 2월(평균기온 -3.20°C)에 내린 눈이 녹지 않고 쌓여 있다가, 3월 중순 기온 상승에 따른 융설로 인해 녹은 물이 하천으로 유입된 것으로 판단된다. 이러한 경향은 유사량에 있어서 비슷한 경

향을 보였다. 따라서 융설로 인한 유량증가와 유사량발생을 모의 할 수 있는 SWAT과 같은 모형을 이용하여 고랭지 농업지역에서의 토양유실저감 대책을 개발·이행해야 한다.

3. 고랭지 지역에서의 태풍에 대한 모의 결과

태풍 루사와 태풍 매미가 있던 2002년 8월과 2003년 9월의 강수량자료를 분석한 결과 루사는 8월 31일 하루 동안 단일강우 712mm를 기록하였다. 2002년 총강수량 (2,697mm)의 27%, 총유량 ($3,528\text{m}^3/\text{sec}$)의 34%, 총유사량 (2,524천톤)의 33%가 태풍 루사에 의해 발생 하였다<그림 10(a)와 (b)>. 매미는 9월 12일~9월 13일 양일에 걸쳐서 총강우 396mm를 기록하였다. 2003년 총강수량 (2,674mm)의 15%, 총유량 ($3,641\text{m}^3/\text{sec}$)의 18%, 총유사량 (2,625천톤)의 22%가 태풍 매미에 의해 발생하였다<그림 11(a)와 (b)>. 따라서 태풍과 같은 큰 강우사상에 의해 발생하는 유사발생량을 모의 할 수 있는 SWAT과 같은 모형을 이용하여 고랭지 지역에서의 효율적인 토양유실저감 대책을 개발·이행해야 한다.

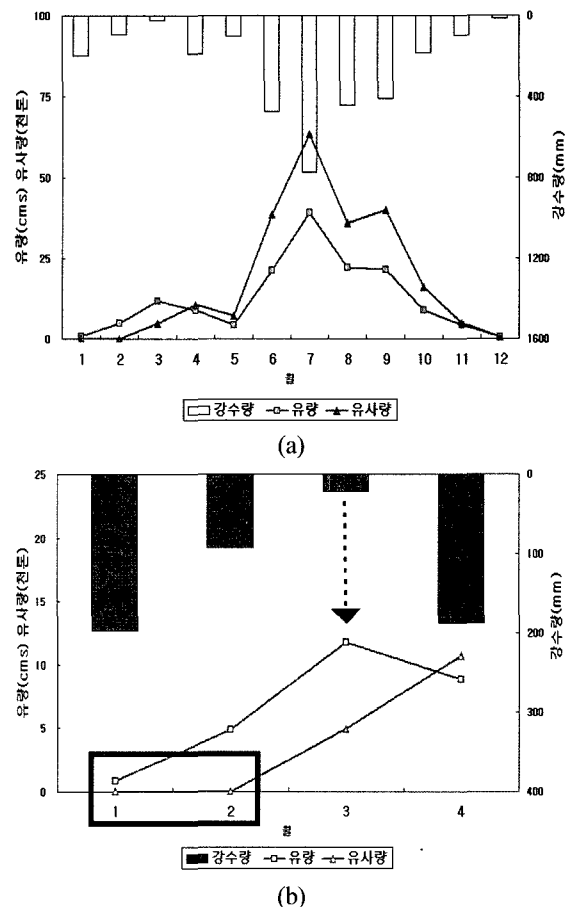
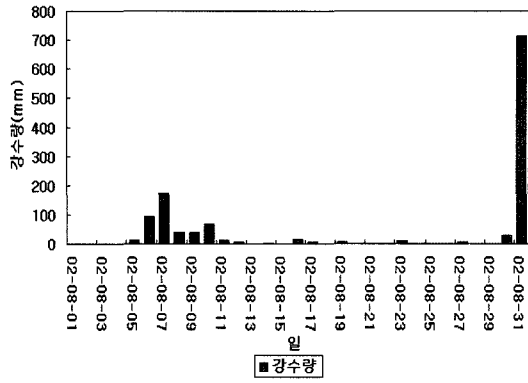
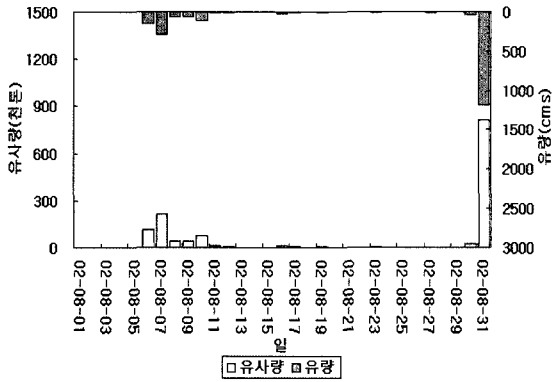


그림 9. 월별 강수, 유량, 및 유사량 (1998년)

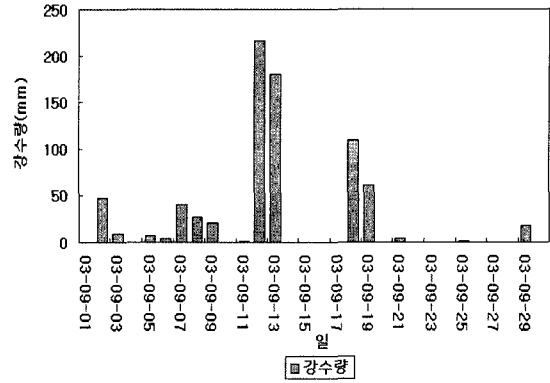


(a)

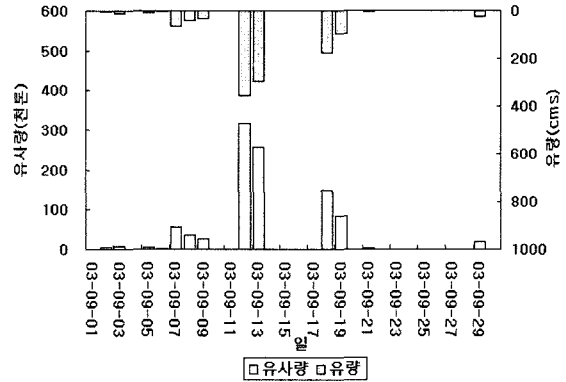


(b)

그림 10. 태풍 루사의 일별 강수, 유량, 및 유사량 (2002년 8월 1일 ~ 31일)



(a)



(b)

그림 11. 태풍 매미의 일별 강수, 유량, 및 유사량 (2003년 9월 1일 ~ 30일)

IV. 요약 및 결론

그동안 고령지 지역에서의 토양유실량을 산정하고 토양유실 방지대책을 세우기 위해서 USLE 모형이 많이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 USLE 모형은 사용하기 편한 장점이 있으나, 도암댐 고령지 농업지대와 같이 강우패턴이 변화하는 지역에서는 강우변화에 따른 토양유실 영향을 제대로 모의할 수 없다. 또한 도암댐 지역과 같이 태풍과 봄철 융설에 따른 하천 유량 증가와 이에 따른 토양유실이 많이 발생하는 지역에서는 USLE 모형을 이용하여 태풍과 융설에 따른 토양유실 증가를 모의할 수 없다. 따라서 장기 기상자료를 이용하여 수문 및 토양유실의 시·공간적 분석이 가능하고 태풍과 융설에 따른 유사발생을 모의할 수 있는 SWAT과 같은 모형을 이용하여 도암댐 수계내 효율적인 토양유실 저감 방안을 수립하여 실행해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 권순국, 김선주, 김태철, 서승덕, 윤광식, 이근후, 이

순혁, 최예환, 최진규, 2000, 응용수문학 향문사.
 2. 김기성, 허성구, 정영상, 김지만, 임경재, 2005, 홍천군 산지농업지대의 토양침식 취약성 분석, 농촌계획 11(2) : 51-57
 3. 농촌진흥청, 고령지 농업시험장, 고령지 화훼재배기술
 4. 정필균, 고문환, 임정남, 엄기태, 최대웅, 1983, 토양유실량 예측을 위한 강우 인자의 분석, 한국토양비료학회지 16(2) : 112-118
 5. 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의, 1999, 강원도 경사지 토양 유실 예측용 신USLE의 적용을 위한 강수 인자와 토양 침식성 인자의 검토 32(1) : 31-38
 6. 평창군청, <http://www.happy700.or.kr>, Last accessed Oct. 5, 2005
 7. 한국수력원자력(주), <http://www.khnp.co.kr>, Last accessed Oct. 5, 2005
 8. 물환경정보시스템 <http://water.nier.go.kr/weis>, Last accessed Oct. 5, 2005
 9. 기상청 <http://www.kma.go.kr>, Last accessed Oct. 5, 2005
 10. Wischmeier, W. H. and D. D. Smith, 1965, Predicting

- rainfall Erosion Losses from Cropland East of Rocky Mountain, USDA. Agr. Handbook, 282
11. Arnold, J. G. and R. Srinivasan, 1994, Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS. Water Resources Bulletin, American Water Resources Association 453-462
 12. Ramanarayanan, T. S., J. R. Williams, W.A. Dugas, L.M. Hauck, and A.M.S. McFarland, 1997, Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. ASAE International Meeting, Minneapolis, MN. Paper No. 97-2209