

실측 경사장 및 경사도를 고려한 양구 해안면 유역의 유사량 평가

유동선 · 김기성 · 장원석 · 전만식* · 양재의** · 김성철** · 안재훈*** · 임경제†

강원대학교 지역건설공학과

*강원발전연구원

**강원대학교 자원생물환경학과

***농촌진흥청 고령지농업연구소

Evaluation of Sediment Yield using Area-weighted Measured Slope and Slope Length at HeaAn Myeon Watershed

Dongseon Yoo · Ki-Sung Kim · Won Seok Jang · Mansig Jun* · Jae E. Yang** ·
Seong Chul Kim** · Jaehon Ahn*** · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon University

*National Kangwon Development Research Institute

**Department of Biological Environment, Kangwon University

***National Institute of Highland Agriculture, Rural Development Administration

(Received 11 June 2008, Accepted 5 August 2008)

Abstract

In this study, area-weighted slope and slope length module, considering measured field slope and slope length of the agricultural fields within the subwatershed, was developed using the ArcView Avenue programming to reflect the field topography of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) HRU in simulating the hydrology and water quality. Flow and sediment yield estimated values of the SWAT were compared with and without applying area-weighted slope and slope length module, developed in this study. There was 103% increases in estimated sediment with area-weighted slope and slope length module for the study watershed. The soil erosion and sediment yield from only agricultural field in Hae-an watershed was also assessed. There are 111% increase in estimated soil erosion and 112% increase in estimated sediment by applying area-weighted slope and slope length module. This study shows that the area-weighted slope and slope length module needs to be utilized in estimating the HRU field slope and slope length for accurate estimation of soil erosion and nonpoint source pollutant modeling with the SWAT although it is not feasible to measure topographic information for every agricultural fields within the watershed. The area-weighted slope and slope length module can be used in identifying soil erosion hot spot areas for developing cost effective and efficient soil erosion management practices.

keywords : Area-weighted slope and slope length module, Measured slope and slope length, Soil erosion, Soil and water assessment tool (SWAT)

1. 서론

북한강의 최대수역인 소양댐 유역의 경우 지난 몇 년간 계속되는 고탁수 문제가 좀처럼 개선되고 있지 않는 실정이다. 특히, 소양댐 유역내에는 홍천군 자운지구, 인제군 가야지구 및 서화지구, 양구군 해안지구 등의 고령지 농업지구가 분포되어 있다. 이러한, 농업지구를 중심으로 유입되는 토양유실이 소양강댐 유역의 탁수의 가장 직접적인 원인으로 지적되고 있다(전만식, 2007). 이에 따라 전 세계적으로 Universal Soil Loss Equation (USLE)모형이 토양유실량 산정에 많이 이용되어 왔으나(김기성 등, 2005), USLE

모형은 소규모 시험포 단위에서의 장기 평균 토양유실량을 모의가 가능하나 시간적으로 변화하는 토양유실량의 모의가 불가능한 단점을 가지고 있다. 한편, SWAT모형을 이용한 국내연구는 활발한 추세이다. 윤성완 등(2007)은 대청호 유역의 토지이용특성별 토양침식량을 산정하였고, 연구결과를 바탕으로 토양침식 제어대책의 적용가능성을 평가하였다. 박윤식 등(2007)은 고탁도 탁수문제의 임하댐 유역에 대하여 SWAT모형의 적용성 평가를 하였고, 허성구 등(2007)은 SWAT모형을 이용하여 객토 농경지의 토양특성을 고려하여 도암댐 유역에 대하여 수문 및 유사 거동모의를 하였다. 이러한 선행연구에서는 유역의 평균 경사도를 바탕으로 산정한 평균 경사장을 이용하여 유역의 수문 및 유사량을 평가하였다. SWAT모형은 Hydrological Response Unit (HRU)의 기본단위로 하여 유역내 수문 및 유사등을

† To whom correspondence should be addressed.
kjlim@kangwon.ac.kr

모의한다. HRU는 토지이용도와 토양도의 중첩을 통해 생성되며, 이 때 DEM을 이용한 소유역의 평균경사도와 이에 따른 경사장과의 관계식을 이용하여 HRU의 경사장을 산정한다. 즉, 소유역의 모든 HRU의 경사도와 경사장이 동일하게 산정되어 토양유실량 및 유출특성분석에 있어 많은 문제점을 내포하고 있다. SWAT모형은 경사가 완만한 미국 지형을 바탕으로 개발되어 우리나라와 같이 경사가 급한 곳이 많은 지역에 적용될 때 지형인자 추출 오류가 발생할 수 있다. SWAT 모형은 HRU의 경사장 산정 시 경사도가 25% 이상의 급한 유역내 모든 HRU의 경사장을 0.05 m로 일괄적으로 사용되도록 개발되었다(Arnold and Srinivasan, 1994). 또한, Jha 등(2002), 허성구 등(2008), 김종건 등(2008)에 따르면 경사도 및 경사장 변화에 따라 유사량 평가시 큰 차이가 발생할 수 있다. 특히, SWAT 모형 이용시 잘못된

지형인자 산정으로 인한 HRU의 토양유실 및 유사 평가 오류가 발생할 수 있으며 유역내 우심지역 선정에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이로 인해 소유역내 HRU의 지형특성을 고려하여 SWAT 모의를 수행하는 것이 정확한 유사거동 평가를 위해서 필요하다.

본 연구의 목적은 준분포형 모형인 SWAT모형이 소유역내 HRU의 지형특성을 반영하지 못하기 때문에 실측 경사도 및 실측 경사장을 반영시 수문 및 유사모의에 있다. 따라서 본 연구에서는 실측 경사장 및 경사도를 반영할 수 있도록 SWAT 면적가중 경사도/경사장 모듈을 개발하였으며, 기존 SWAT의 소유역 평균 경사장과 경사도를 소유역내 모든 HRU에 적용했을 때와 본 연구에서 개발한 면적가중 경사도/경사장 모듈 적용 후 유사거동을 비교 분석하였다.

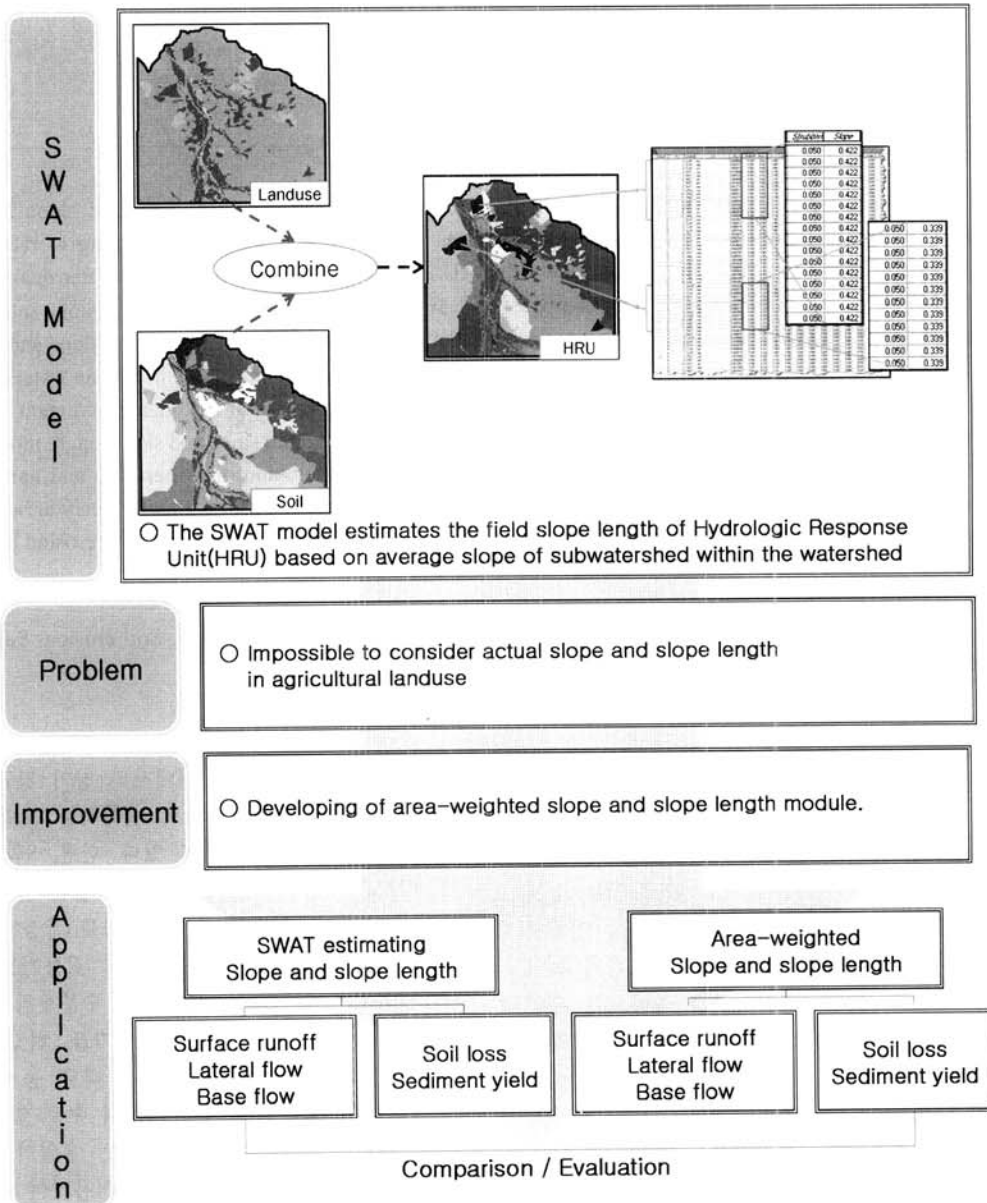


Fig. 1. Overview of this study.

2. 연구방법

2.1. 연구지역 선정

본 연구의 연구 대상지역은 소양강댐 유역 내 고령지 농업이 성행하고 있는 해안면 유역이다. 해안면의 유역면적은 61.97 km²이며, 지리적 위치는 북위 38° 15'~38° 20', 동경 128° 15'~128° 10'에 해당된다. 또한, 강원도 인제군 원통 서북방 19 km, 양구군 양구읍 동북방 26 km에 위치하며, 해안면의 수계는 한강의 일부인 소양강의 지류이나 하천의 발달은 매우 미약한 편이며 지표수는 거의 하천의 형태로 존재한다. 분지내의 하계의 분포는 방사상 내지는 수지상 패턴으로 되어있다(권영식 등, 1990). 아래 Fig. 2는 해안면 유역의 수계를 나타낸다.

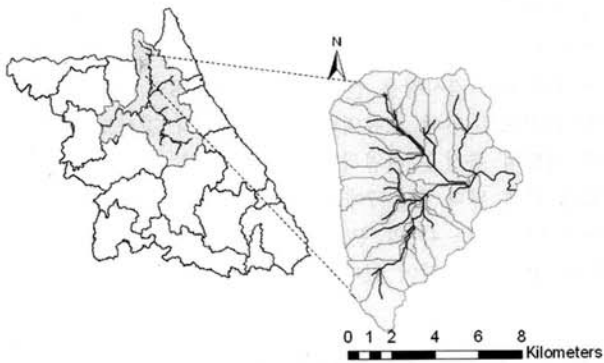


Fig. 2. Location of the Hae-an watershed.

2.2. 연구유역의 경사장 및 경사도 특성

해안면 유역은 지형적으로 분지이다. 해안면은 남-북 방향의 지름이 동-서 방향보다 약간 긴 거의 완전한 타원형 형태의 분지이며 대암산 줄기인 1304 고지-도솔산(1147 m)-가칠봉(1242 m)-930고지-807고지-907고지 등 인렬의 고지가 타원형으로 분수령을 형성하여 분지 내외의 경계선을 이루고 있다. 해안면 유역은 최고 1,314 m에서 최저 197 m까지의 고도분포를 보이며 분지저와 외곽능선의 고도차는 평균 400~500 m에 달한다. 사면전체의 평균경사는 11°이나 상부에서의 평균경사는 20°, 하부에서는 5°로서 분지저를 제외하고는 매우 급하다. 해안면 지역의 사면경사는 하부로 갈수록 매우 단조롭게 감소하며 따라서 사면의 형태는 U-자형의 오목사면이다(권영식 등, 1990). 아래 Fig. 3은 해안면 유역내 농경지를 나타낸다.

2.3. SWAT 모형 적용

2.3.1. SWAT 모형 개요

SWAT 모형은 미국 농무성의 농업연구국(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 유역단위의 모델이다. 이 모델은 미국 농무성에서 개발하여 이용해 온 CREAMS 모델, GLEAMS 모델 및 EPIC 모델과 같은 농업연구국 모델들을 결합하여 만들어졌다. 특히, SWAT은 강우-유출모델과 수질모델이 GIS와 연계된 호환모델로서 장기 유량과 수질을 모의할 수 있으며, 미계측 지역에서는 모의도 가능하며, 경작형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상



Fig. 3. Agricultural upland fields at the Hae-an watershed.

대적 효과도 정량화할 수 있는 특징을 지니고 있다. Fig. 4는 SWAT 모델의 입력 자료와 출력자료를 보여준다. SWAT 모델을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와, 시·공간적으로 변화하는 토지이용현황, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 SWAT 모델은 유역에서의 토지이용에 따라 발생하는 비점오염원과, 유역 내 소하천 별, 소유역 별, 그리고 소유역내 수문학적 반응단위별 유출량, 토양유실을 모의한다(Arnold and Srinivasan, 1994).

2.4. SWAT 모형의 입력자료 구축

2.4.1. 기상자료

SWAT 모형은 다음과 같은 기상자료들이 필요하다. 일 강수(mm), 일 평균풍속(m/sec), 일 평균상대습도(%), 일 최고·최저기온(°C), 일 수평면일사량(MJ/m²)이 필요로 한다. 본 연구에서는 기상청과 수자원공사에서 1993년 1월 1일 ~ 2007년 8월 31일까지 관측한 서화 지점의 기상 및 강수량 자료를 활용하여 구축하였다. 아래 Fig. 5는 해안면 유역의 월 강수량 및 평균기온을 나타낸다.

2.4.2. 해안면유역 DEM, 토양도, 토지이용도

국립지리원 1:5,000 수치지도를 이용하여 Digital Elevation Model(DEM)를 구축하였다(Fig. 6(a)). 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원(NIAST, 2000)에서 제공해주는 개략 토양도를(1:50,000)를 사용하였다(Fig. 6(b)). 토지이용도는 지적도를 기반으로 위성영상을 참고하여 디지털화하여 구축하였다(Fig. 6(c)). 해안면 유역의 토지이용현황은 산림이 전체 유역의 58.8%, 농경지가 37.2%, 시가화가 1.9%, 수역이 1.3%, 나지가 0.6%, 초지가 0.2%를 차지하고 있어 산림과 농경지가 대부분을 차지하고 있다. 또한, 해안면 전체 유역중 고령지 농업이 시행하는 해발고도 600 ~ 1,000 m인 지역이 44%를 차지하고 있다.

2.4.3. 해안면유역 실측경사장 및 경사도자료 구축

Fig. 7은 해안면유역의 SWAT모형에 의해 산정된 경사장 및 경사도를 나타낸다. 앞에서 언급되었듯이 SWAT모형은 소유역의 평균경사도를 기준으로 하여 소유역내 모든 HRU의 경사도와 경사장을 산정한다. 이러한 SWAT모형은 구조적 단점으로 인해 소유역내 모든 HRU의 경사도와 경사장의 지형적 특성을 반영하지 못하며 동일 경사장/경사도의 값은 같게 된다. Fig. 7에서 보이는 바와 같이 소유역의 평균경사도는 1 ~ 45°의 분포를 보이며 평균경사장은 0.05 ~ 1,587 m로 분포되어 있다.

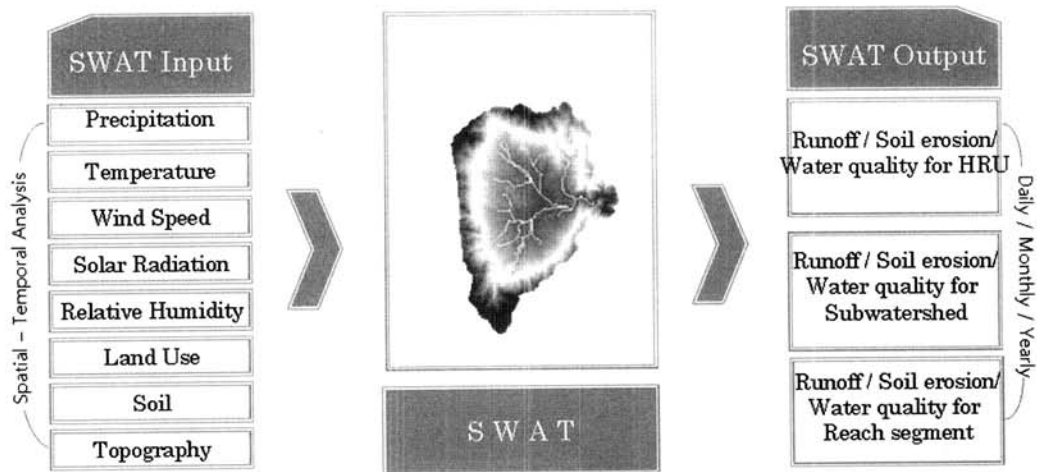


Fig. 4. Overview of the SWAT model - model input/output parameters.

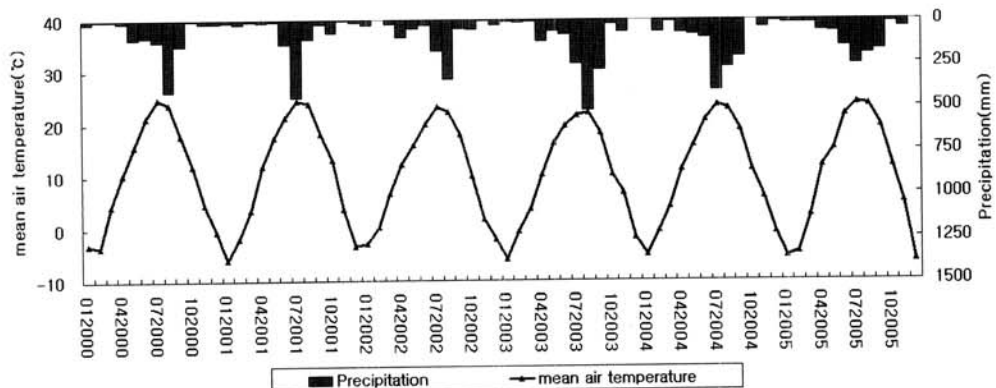


Fig. 5. Precipitation and mean air temperature at the Hae-an watershed.

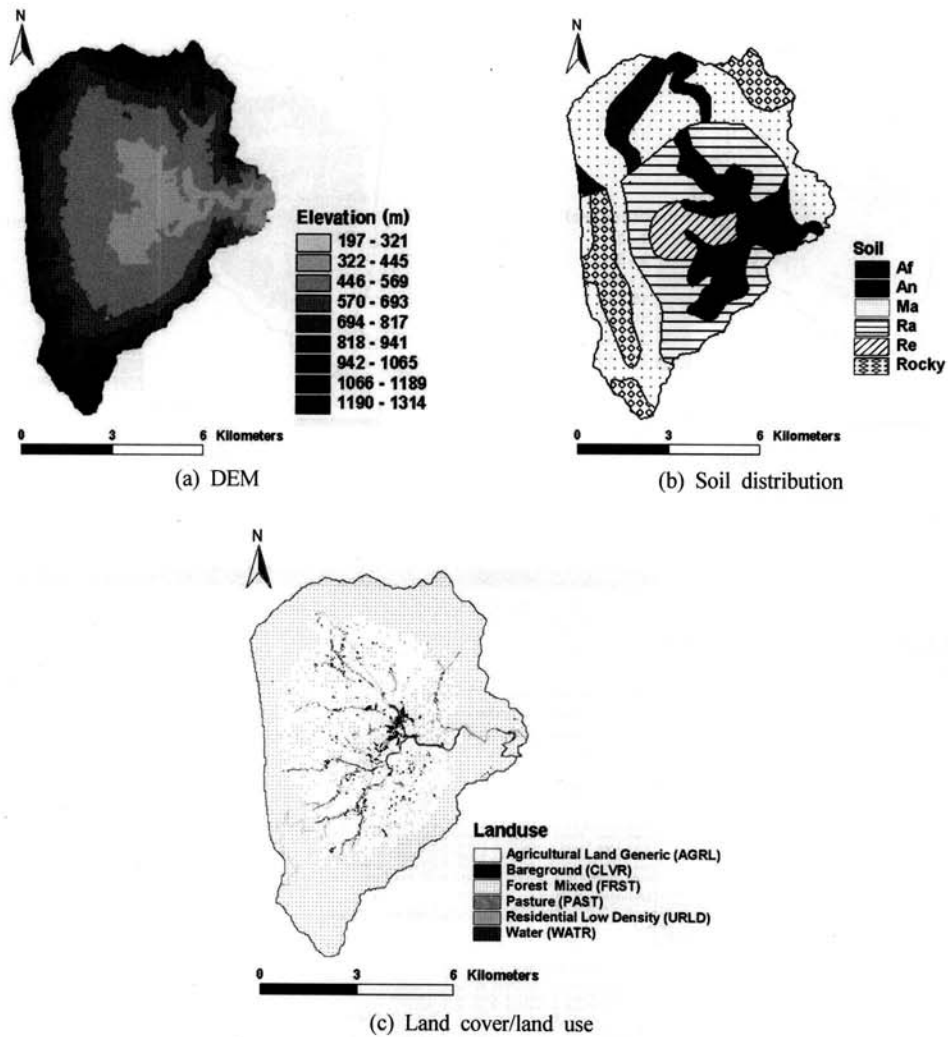


Fig. 6. SWAT input data for the Hae-an watershed.

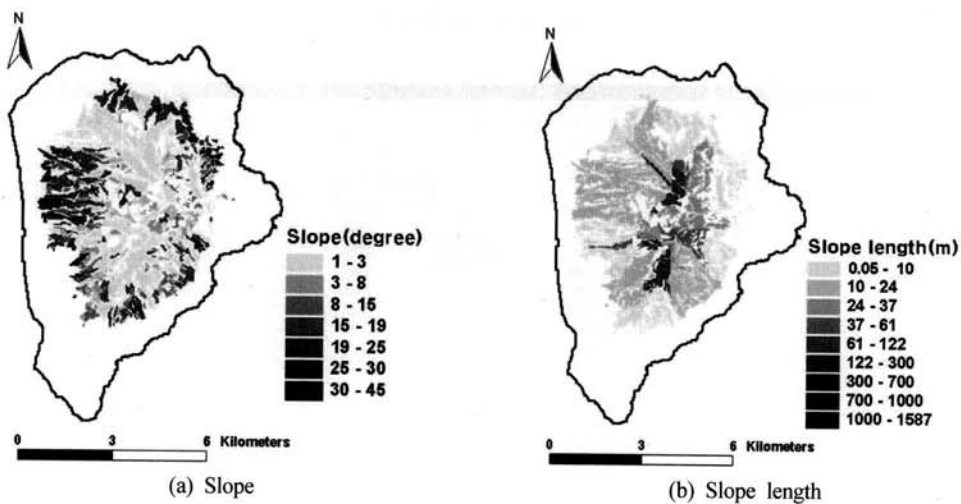


Fig. 7. SWAT estimated slope and slope length at the Hae-an watershed.

Fig. 8은 해안면 유역의 모든 농경지에서의 농경지를 대상으로 현장에서 측량을 통해 측정된 실측 경사도와 경사장 자료이다(전만식, 2007). 실측 경사도 분포범위는 1~45°로 비교적 경사가 급한 지역이 상당수 분포되어 있으며 경사장의 경우 1~1,587 m의 범위로 실측 경사장 및 경사도

는 대체로 SWAT모형에 의해 산정된 경사장보다 더 크게 분포되어 있다.

2.4.4. 해안면 유역 실측경사장 및 경사도 적용

SWAT모형은 유역의 토지이용과 토양속성의 중첩에 의

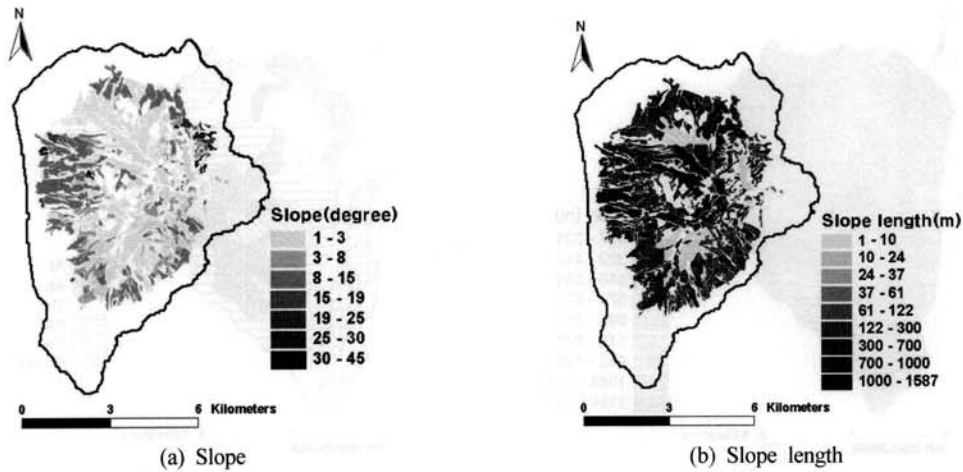


Fig. 8. Measured slope and slope length of the Hae-an watershed.

```

HRRU_Assignment_1
This scripts uses unique combinations of subbasin/luse/soil grids
and the SWAT HRRU table to assign slope and slope length to the HRRU virtual table
KJ Lia (kjlia@kangwon.ac.kr)
Jan 23, 2008

theView = av.getActiveDoc
theTheases = theView.getTheases
coabThese = MsgBox.List(theTheases, "Please select the Subbasin/Luse/Soil Combination These", "Combination These")
if(coabThese = nil) then exit end
coabVTab = coabThese.getVTab

coab_sub_id_Field = coabVTab.FindField("Subbasin")
coab_count_Field = coabVTab.FindField("Count")
coab_land_Field = coabVTab.FindField("Land")
coab_soil_Field = coabVTab.FindField("Soil")
coab_slp_length_Field = coabVTab.FindField("Slubasn")
coab_slope_Field = coabVTab.FindField("slp_fract")

hruTable = av.FindDoc("hru dbf")
if(hruTable = nil) then
    MsgBox.Error("Cannot locate hru dbf file", "Error")
end
hruVTab = hruTable.getVTab

hru_sub_id_Field = hruVTab.FindField("Subbasin")
hru_land_Field = hruVTab.FindField("Landuse")
hru_soil_Field = hruVTab.FindField("Soil")
hru_slp_length_Field = hruVTab.FindField("Slubasn")
hru_slope_Field = hruVTab.FindField("slp_fract")

countList = List Make
slope_length_list = List Make
for each tap_coabRec in tap_coabVTab
    tap_coab_sub_id_Value = tap_coabVTab.returnValue(tap_c
    tap_coab_count_Value = tap_coabVTab.returnValue(tap_c
    tap_coab_land_Value = tap_coabVTab.returnValue(tap_co
    tap_coab_soil_Value = tap_coabVTab.returnValue(tap_co
    tap_coab_slp_length_Value = tap_coabVTab.returnValue(tap_c
    tap_coab_slope_Value = tap_coabVTab.returnValue(tap_c
    if((tap_coab_sub_id_Value = tap_hru_sub_id_Value) and
    if(tap_coab_slope_Value > 0) then
        countList.add(tap_coab_count_Value)
        slopeList.add(tap_coab_slope_Value)
    end
end
    
```

(a) Avenue script code

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	SUBBASIN	HRRU	LAND/ SOIL	HRRU_FR	SLSUBSN	SLOPE	OV_N	LAT_TIME	LAT_S
2	1	1	PAST Ra	0.0000139	0.050	0.444	0.150	0.000	
3	1	2	PAST An	0.0000139	0.050	0.444	0.150	0.000	
4	1	3	CLVR Ra	0.0000694	0.050	0.444	0.060	0.000	
5	1	4	CLVR An	0.0000069	0.050	0.444	0.060	0.000	
6	1	5	FRST Ma	0.0175682	0.050	0.444	0.100	0.000	
7	1	6	FRST Ra	0.0006872	0.050	0.444	0.100	0.000	
8	1	7	URLD Ma	0.0000764	0.050	0.444	0.100	0.000	
9	1	8	URLD Ra	0.0002638	0.050	0.444	0.100	0.000	
10	1	9	URLD An	0.0000208	0.050	0.444	0.100	0.000	
11	1	10	AGRL Ma	0.0007219	0.050	0.444	0.140	0.000	
12	1	11	AGRL Ra	0.0019574	0.050	0.444	0.140	0.000	
13	1	12	AGRL An	0.0005553	0.050	0.444	0.140	0.000	
14	2	1	PAST Ma	0.0000208	0.050	0.395	0.150	0.000	
15	2	2	WATR Ma	0.0000555	0.050	0.395	0.010	0.000	
16	2	3	WATR An	0.0001802	0.050	0.395	0.010	0.000	
17	2	4	CLVR Ma	0.0000416	0.050	0.395	0.060	0.000	
18	2	5	CLVR An	0.0001109	0.050	0.395	0.060	0.000	
19	2	6	FRST Ma	0.0372085	0.050	0.395	0.100	0.000	
20	2	7	FRST Ra	0.0001386	0.050	0.395	0.100	0.000	
21	2	8	FRST An	0.0011300	0.050	0.395	0.100	0.000	
22	2	9	URLD Ma	0.0004853	0.050	0.395	0.100	0.000	
23	2	10	URLD Ra	0.0000139	0.050	0.395	0.100	0.000	
24	2	11	URLD An	0.0000763	0.050	0.395	0.100	0.000	
25	2	12	AGRL Ma	0.0065373	0.050	0.395	0.140	0.000	
26	2	13	AGRL Ra	0.0009359	0.050	0.395	0.140	0.000	

(b) HRRU table

Fig. 9. SWAT Area-weighted slope and slope length assignment module.

하여 구분되는 HRU단위로 유역을 나누어 모의하며, DEM을 바탕으로 소유역별로 평균 경사도와 경사장을 일괄적으로 산정한다. 기존 SWAT모형 산정 경사장 및 경사도 대신에 실측 경사도와 경사장을 적용하기 위하여, 본 연구에서는 ArcView GIS기반의 면적가중 경사도/경사장 모듈을 개발하여 해안면 유역내 모든 농경지에서의 실측 경사도와 경사장을 SWAT모의에 반영하였다. 본 연구에서 개발된 모듈은 이 모듈은 Avenue 스크립트 언어를 이용하여 실측 조사된 경사도 및 경사장 GIS 데이터베이스를 각각의 HRU별 면적비에 따라 평균 경사도와 경사장을 자동으로 할당해준다. 또한, SWAT 매개변수 파일중 하나인 hru.dbf파일로 변환해주어 SWAT모형의 경사도와 경사장 매개변수에 적용가능하다(Fig. 9).

2.4.5. SWAT 모형의 모의 결과 분석

SWAT모형은 모의기간에 따라 RCH, BSB, SBS등의 파일을 생성한다. SBS는 각 소유역내 HRU별, BSB는 각 소유역별, RCH는 각 수계내 Reach별 SWAT 모의 결과 값을 담고 있다. 본 연구에서는 해안면 유역의 최종 출구지점인 RCH 파일 19번 수계의 유량 및 유사자료를 이용하였고, 유출심의 분석을 위해 SBS파일의 HRU의 지표유출, 중간유출, 기저유출의 자료를 이용하여 분석하였다. 또한, 전체 유역내 농경지에서 발생하는 토양유실 및 유사량을 분석하기 위하여 SBS파일내 농경지에 대한 토양유실 및 유사량 자료를 이용하여 분석하였다(Fig. 10).

3. 결과 및 고찰

3.1 해안면유역 실측경사장 및 경사도자료에 따른 면적가중 경사장 및 경사도 자료

Fig. 11은 해안면 유역의 모든 농경지에서의 농경지를 대상으로 실측 경사도와 경사장 측정된 자료를 바탕으로 본 연구에서 개발한 면적가중 경사도/경사장 모듈을 사용하여 실측된 경사도와 경사장을 적용하여 산정된 경사장 및 경

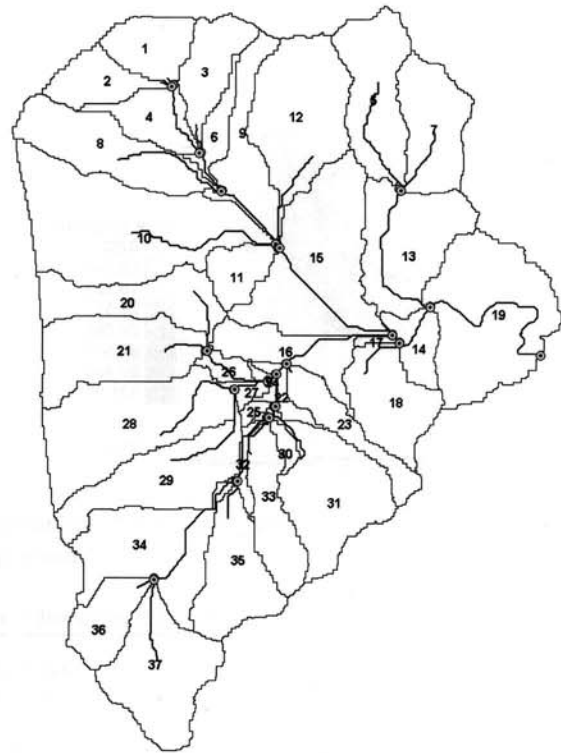


Fig. 10. Subbasins and outlets at the Hae-an watershed.

사도를 나타낸다.

Fig. 12는 SWAT에 의해 산정된 경사장과 면적가중 모듈에 의해 산정된 실측 경사장을 비교한 것을 나타낸다. SWAT에 의해 산정된 0.05 m, 15.244 m, 18.293 m, 24.39 m, 36.585 m, 60.976 m, 91.463 m, 121.951 m의 경사장이 실측경사장을 반영한 면적가중 모듈 적용시 10~546 m의 범위로 적용되었다(Table 1). Fig. 12에서 보이는 바와 같이 전체적으로 실측 경사장을 반영한 모듈 적용으로 HRU 경사장이 SWAT 산정 경사장보다는 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경사장의 증가는 MUSLE 기반 SWAT 유사 평가시 같은 경우에 따른 유출발생시 유사량을 크게 산정하게 된다. 즉, 기존 SWAT 모형에서 소유역의 평균경사도를 바탕으로 하여 산정된 경사장이 소유역내 모든 HRU에 적

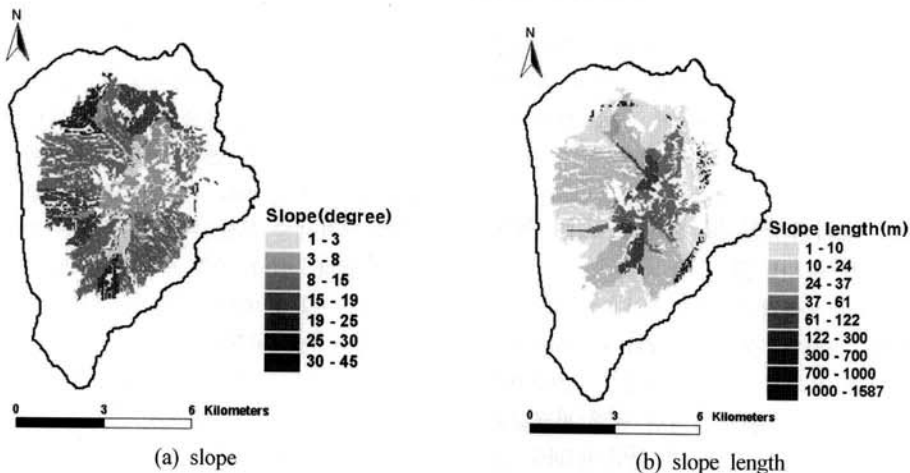


Fig. 11. Area-weighted Slope and slope length at the Hae-an watershed.

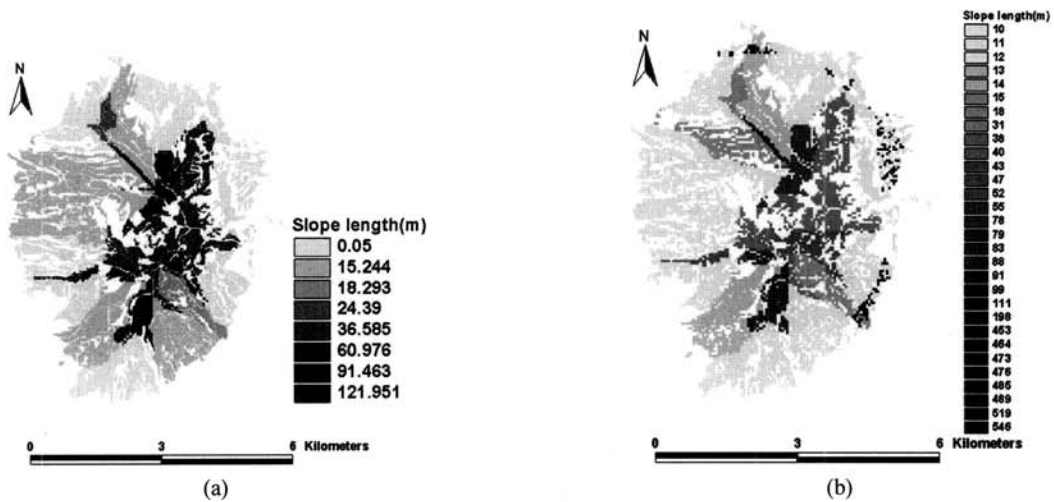


Fig. 12. Comparison of slope, slope length estimated by SWAT and Area-weighted slope, slope length. (a) SWAT estimated slope and slope length, (b) Area-weighted slope and slope length

Table 1. Changes in areas between SWAT estimated slope and slope length and Area-weighted slope and slope length

SWAT estimated slope length → Area-weighted slope length	Area (ha)	SWAT estimated slope length → Area-weighted slope length	Area (ha)
0.05 m → 10 m	701.11	18.293 m → 473 m	3.46
0.05 m → 198 m	2.30	24.39 m → 10 m	1.38
0.05 m → 453 m	2.07	24.39 m → 14 m	0.23
0.05 m → 464 m	0.46	24.39 m → 31 m	25.34
0.05 m → 485 m	8.76	36.585 m → 12 m	0.23
0.05 m → 489 m	1.38	36.585 m → 38 m	159.21
0.05 m → 498 m	3.23	36.585 m → 40 m	47.23
0.05 m → 519 m	11.75	36.585 m → 43 m	2.07
0.05 m → 546 m	0.23	36.585 m → 52 m	0.23
15.244 m → 11m	171.88	60.976 m → 47 m	17.74
15.244 m → 12m	209.66	60.976 m → 52 m	54.37
15.244 m → 13m	132.71	60.976 m → 55 m	15.67
15.244 m → 14m	101.15	91.463 m → 78 m	47.46
15.244 m → 15m	67.28	91.463 m → 79 m	6.91
15.244 m → 453m	0.23	91.463 m → 83 m	47.23
15.244 m → 476m	4.38	91.463 m → 88 m	9.68
15.244 m → 493m	6.91	91.463 m → 91 m	9.91
18.293 m → 18m	50.46	121.951 m → 99 m	0.23
18.293 m → 52m	0.23		

용될 경우 HRU 별 SWAT 예측 유사발생량이 적어지게 되며, SWAT 모형 보정 및 검증시 이러한 이유로 유사발생 및 이동에 관련된 매개변수가 지나치게 크게 산정되는 결과를 초래하게 될 것이다.

3.2. 해안면유역의 실측경사장 및 경사도 고려 유무에 따른 수문 및 유사비교

Fig. 13은 해안면유역의 실측경사장 및 경사도에 고려 유무에 따른 유량변화를 나타낸 것이다. 2000~2005년까지 기존 SWAT모형에 의해 모의된 유량 평균값은 3,968,022 m³/month이며 면적가중 모듈 적용후 모의된 유량 평균값은 3,885,020 m³/month로 큰 차이가 나타나지 않았다(Table 2). 그러나 HRU 경사장 증가로 인해 중간유출 컴포넌트는 상

당부분 줄어들었다.

아래 Fig. 14는 실측경사장 및 경사도 고려 유무에 따른 해안면 전체유역의 유출심 변화를 나타낸다. 기존 SWAT모형에 의해 모의된 연평균 표면 유출심은 175.6 mm, 중간 유출심은 448.7 mm, 기저 유출심은 191.8 mm로 분석되었으며, 면적가중 모듈 적용후 모의된 연평균 표면 유출심은 182.2 mm(↑4%), 중간 유출심은 208.4 mm(↓115%), 기저 유출심은 408.1 mm(↑53%)로 분석되었다. 즉, 면적가중 경사도/경사장을 고려한 SWAT 모의시 각 중간유출량이 큰 폭으로 감소하였는데, 이는 SWAT 중간유출 모듈이 운동과 공식을 이용하는데, 경사장 길이에 반비례하게 중간유출을 모의하기 때문이다(식 (1)). 표면 유출심의 경우 미세한 증가가 있었으며, 기저유출심의 경우 증가를 보였는데 이는

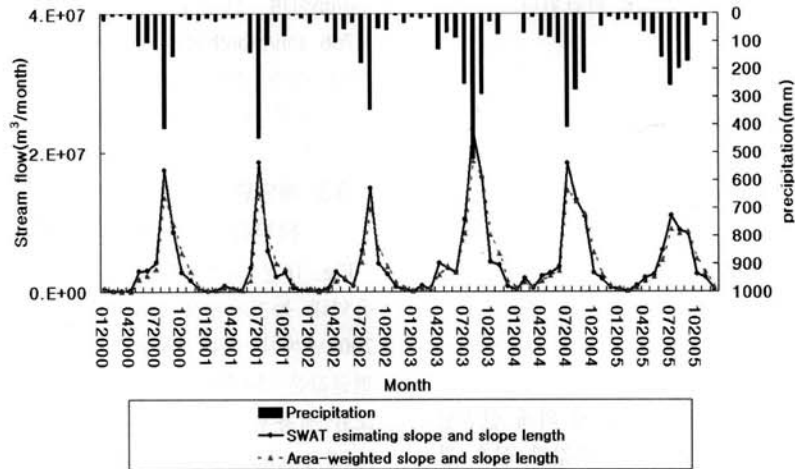
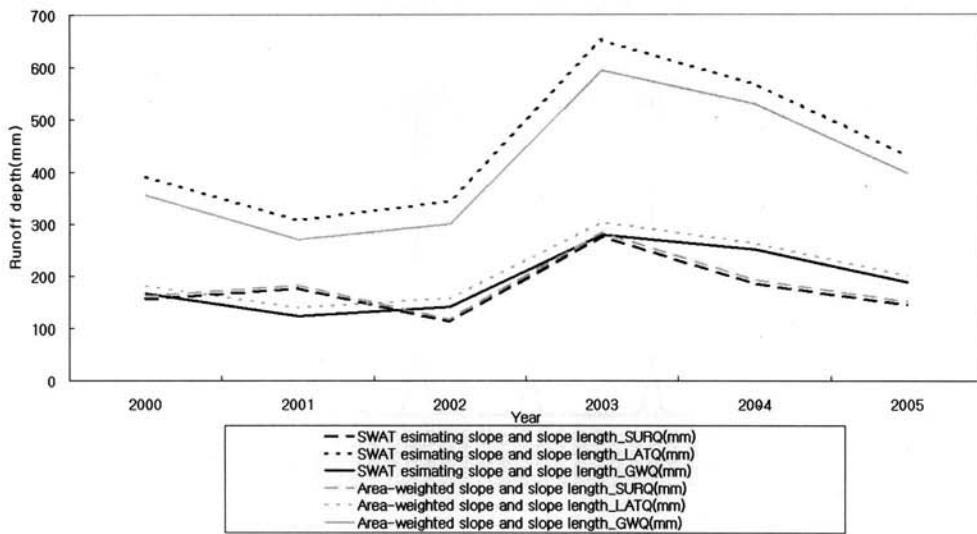
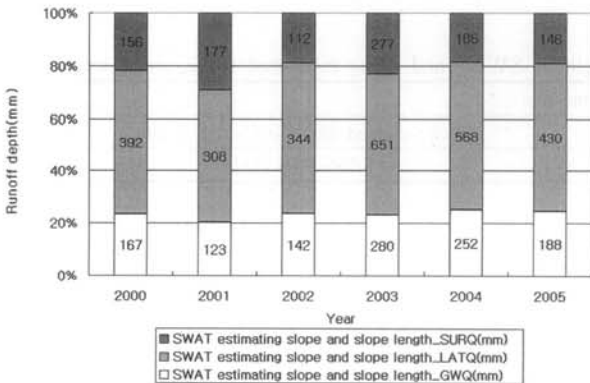


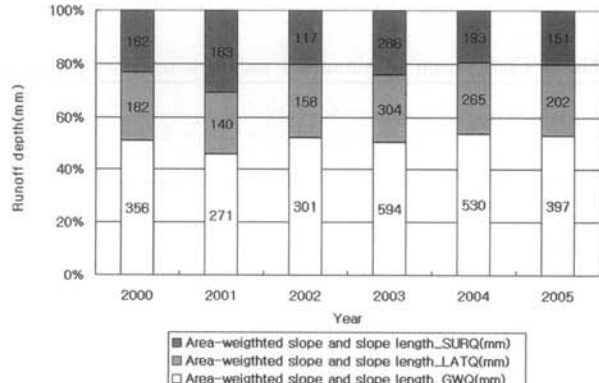
Fig. 13. Comparison of simulated streamflow using slope, slope length of SWAT and using measured slope, slope length.



(a)



(b)



(c)

Fig. 14. Comparison of simulated runoff depth using slope, slope length of SWAT and using measured slope, slope length.

Table 2. Comparison of simulated streamflow using slope, slope length of SWAT and using measured slope, slope length

Streamflow (m ³ /month)	
SWAT estimating slope and slope length	Area-weighted slope and slope length
3,968,022	3,885,020 (↓ 83,003)

중간유출심의 감소로 인해 증가한 것으로 판단된다.

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\Phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (1)$$

- K_{sat} : 포화수리전도도 ($mm \cdot h^{-1}$)
- slp : 경사도 (slp)
- SW_{ly} : 토양수분량 ($mm \text{ H}_2\text{O}$)
- Φ_d : 토양내 배수가능 공극 (mm/mm)
- L_{hill} : 경사장 (m)

아래 Fig. 15는 해안면유역의 기존 SWAT에 의해 산정된 경사장 및 경사도를 이용하여 나온 모의 유사값과 실측 경사장 및 경사도 자료를 이용하여 면적가중 적용하여 나온 모의 유사값을 나타낸 것이다. 2000~2005년까지 기존 SWAT모형에 의해 모의된 월평균 유사 값은 4,299 ton/

month이며 면적가중 모듈 적용후 모의된 월평균 값은 8,766 ton/month로 4,466 ton/month(↑104%) 차이가 났다. 이는 실측 경사장을 반영하였기 때문에 SWAT HRU 별 모의 유사량이 증가했기 때문이다.

3.3. 해안면유역내 농경지 실측경사장 및 경사도 고려 유무에 따른 토양유실비교

Fig. 16은 실측경사장 및 경사도 고려유무에 따른 해안면 유역내 농경지에서 발생한 토양유실량을 나타낸다. 2000~2005년까지 기존 SWAT모형에 의해 모의된 토양유실 연평균값은 54,760 ton/year(24.5 ton/ha/year)이며, 면적가중 모듈 적용후 모의된 토양유실 연평균값은 138,180 ton/year(61.8 ton/ha/year)로 83,419 ton/year(37.3 ton/ha/year) 차이가 났다(Fig. 15(a)). 해안면 유역내 농경지에서 발생하여 하천으로 유입되어 유역출구로 이동된 총 유사량은, 2000~2005년까지 기존 SWAT모형에 의해 모의된 유사 연 평균

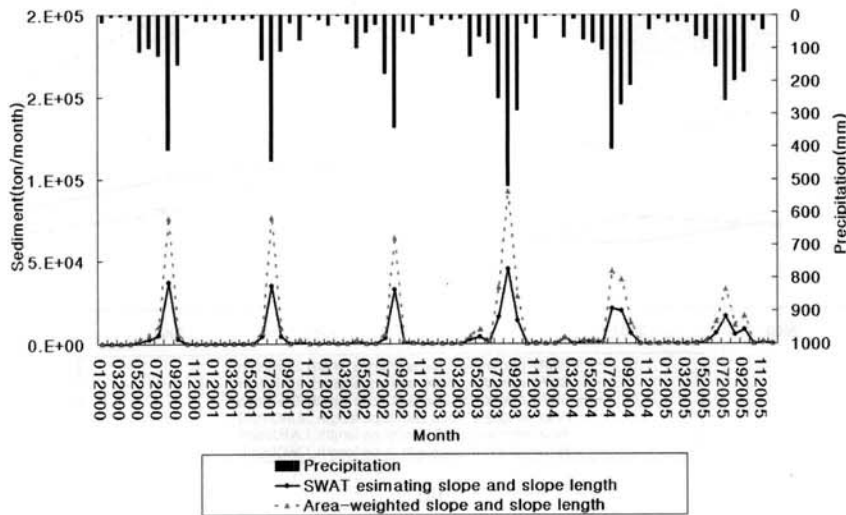


Fig. 15. Comparison of simulated sediment using slope, slope length of SWAT and using measured slope, slope length.

Table 3. Comparison of simulated sediment using slope, slope length of SWAT and using measured slope, slope length

Sediment (ton/month)	
SWAT estimating slope and slope length	Area-weighted slope and slope length
4,299	8,766 (↑4,466)

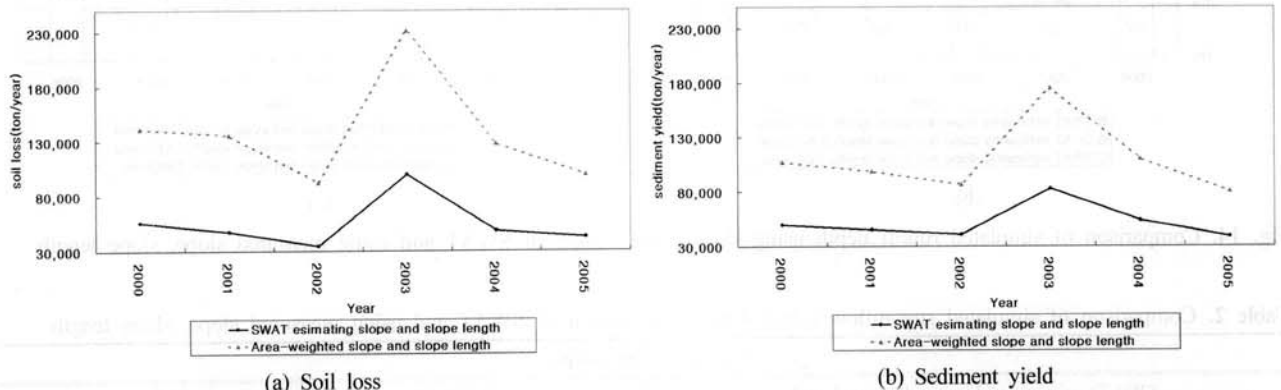


Fig. 16. Comparison of simulated soil loss and sediment using slope, slope length of SWAT and using measured slope, slope length at agricultural fields.

Table 4. Comparison of simulated soil loss and sediment using slope, slope length of SWAT and using measured slope, slope length at agricultural fields

	Soil loss		Sediment yield	
	(ton / year)	(ton / ha / year)	(ton / year)	(ton / ha / year)
SWAT estimating slope and slope length	54,760	24.5	51,813	23.1
Area-weighted slope and slope length	138,180 (↑ 83.419)	61.8 (↑ 37.3)	109,721 (↑ 57,909)	49.1 (↑ 26)

값은 51,813 ton/year(23.1 ton/ha/year)이며, 면적가중 모듈 적용후 모의된 연 평균값은 109,721 ton/year(49.1ton/ha/year)로 57,909 ton/year(26 ton/ha/year) 큰 차이가 나타났다 (Fig. 15(b)).

4. 결론

본 연구의 목적은 강원도 양구군 해안면 유역내 현장 조사를 통해 구축한 실측 경사도 및 경사장값을 고려하여, 기존 SWAT모형에 의하여 산정되는 경사장 및 경사도 산정에 따른 토양유실량과 실측 경사도 및 경사장을 고려한 면적가중 모듈을 적용했을 때, SWAT모형의 토양유실량 및 유사 변화를 비교 분석하는데 있다. 해안면 전체유역에 대한 유량의 경우 실측 경사장 및 경사도 고려 이전, 월 평균 3,968,022 m³/month이며 고려 이후 월 평균 3,85,020 m³/month로 83,003 m³/month 매우 작은 차이가 발생했으나, 각 수문컴포넌트, 이 중 중간유출과 기저유출에 있어서 큰 차이가 발생했다. 이는 수용성 비점오염물질의 경우 SWAT 예측 오염물질의 하천유입경로에 따라서 큰 차이가 발생할 수 있다는 것이다.

유사의 경우 실측 경사장 및 경사도 모듈 적용이전은 월 평균 4,299 ton/month이며 고려 이후 8,766 ton/month로 4,466 ton/month 차이가 났다. 전체유역에 대하여 실측경사장 및 경사도 고려 유무에 따라, 유량의 경우 2%, 유사 경우 103%의 차이를 보였다. 해안면 유역내 농경지에서 발생한 토양유실량은 모듈 적용 이전 연 평균 54,760 ton/year(24.5 ton/ha/year), 모듈 적용 이후 연 평균 138,180 ton/year(61.8 ton/ha/year)로 83,419 ton/year(37.3 ton/ha/year) 차이가 났다. 해안면 유역내 농경지에서 발생한 유사 경우, 고려 이전 연 평균 51,813 ton/year(23.1 ton/ha/year)이며 고려이후 연 평균 109,721 ton/year(49.1 ton/ha/year)로 57,909 ton/year(26 ton/ha/year) 차이가 났다. 해안면 유역내 농경지에 대하여 고려 유무에 따라, 토양유실의 경우 111%, 유사의 경우 112%의 차이를 보였다.

본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 기존 SWAT모형을 이용한 유출 및 토양유실/유사 평가 시, SWAT모형의 준분포형 모형으로서의 구조적 특성 및 제한점으로 인하여 유역내 HRU의 지형을 정확히 반영하지 못하였다. 이로 인해 정확한 수문 컴포넌트별 분석을 수행할 수 없었다. 특히, 경사가 급한 고령농경지에서의 유사거동 및 지표유출 및 기저유출에 의한 하천

유입량 등을 정확한 평가를 수행할 수 없다. 따라서 본 연구에서 개발한 실측 경사도 및 경사장을 반영한 면적가중 모듈 개발을 통해 보다 정확한 유출 특성별 평가가 가능해졌다.

- 2) 본 연구에서 개발된 면적가중 경사도 및 경사장 산정 모듈의 적용을 통해서 소유역내 농경지에서의 발생 유사량을 보다 정확하게 파악할 수 있게 되었다. 실측 경사장을 반영한 모듈 적용으로 HRU 경사장이 SWAT 산정 경사장보다는 증가하는 것으로 나타났다. 기존 SWAT 모형에서 소유역의 평균경사도를 바탕으로 하여 산정된 경사장이 소유역내 모든 HRU에 적용될 경우 HRU 별 SWAT 예측 유사발생량이 적어지게 되며, SWAT 모형 보정 및 검증시 이러한 이유로 유사발생 및 이동에 관련된 매개변수가 지나치게 크게 산정되는 결과를 초래하게 될 것이다.
- 3) 특히 SWAT 모형은 최근에 효과적인 탁수저감대책을 수립하기 위하여 널리 활용되고 있다, 그러나 소유역의 평균경사도를 이용하여 소유역내 모든 HRU의 경사도 및 경사장을 산정하기 때문에, SWAT 모형 예측 자료를 이용하여 탁수 발생 우심지역 선정시 지형을 제대로 고려하지 못하기 때문에 정확한 우심 지역 선정 및 이에 따른 효과적인 대책 수립을 하는데 많은 어려움이 있다. 그러나, 본 연구에서 개발된 면적 가중 및 경사도 산정 모듈을 통해서 정확한 우심 지역 파악이 가능해질 것이라 사료된다.
- 4) 그러나, 현실적으로 큰 유역내 모든 농경지의 경사도와 경사장을 실측하여 본 모듈을 적용하여 정확한 유출 및 유사거동을 평가하는 데는 많은 어려움이 따를 것이다. 향후 연구에서는 소유역내 각각의 HRU별 지형특성을 보다 현실성 있게 반영할 수 있는 모듈의 개발이 필요하며, 5 m 등고선(1:50006 지형도)으로는 농경지내 HRU의 경사도 및 경사장을 정확한 추출이 불가할 것으로 판단되어 LiDAR(Light Detection And Ranging)와 같이 보다 정밀한 고해상도 자료가 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 한강수계관리위원회에서 실시한 한강수계 2007년도 환경기초 조사사업의 용역과제인 “한강 수계 탁수저감 대책 마련을 위한 연구”의 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 권영식, 이형호, 한옥, 김원형, 김동진, 김두일, 염승준 (1990). 해안분지의 지구과학적 분석. *한국지구과학회지*, 11(3), pp. 236-241.
- 김기성, 허성구, 정영상, 김지만, 임경재(2005). 홍천군 산지 농업지대의 토양침식취약성 분석. *농촌계획학회지*, 11(2), pp. 51-57.
- 김종건, 박윤식, 김남원, 정일문, 장원석, 박준호, 임경재 (2008). 저해상도 DEM 사용으로 인한 SWAT 지형 인자 추출 오류 개선 모듈 개발 및 평가. In review.
- 농촌진흥청 농업과학기술원(2000). <http://www.niast.go.kr>.
- 박윤식, 김종건, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재(2007). 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가. *한국물환경학회지*, 23(4), pp. 467-473
- 윤성완, 예령, 정세웅(2007). 대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT 모델의 적용. *공동 춘계 학술발표회* 논문집, 한국물환경학회.대한상하수도학회, pp. 1101-1110.
- 전만식(2007). 소양강댐 흙탕물저감대책. 강원도발전연구원 연구보고서.
- 허성구, 김남원, 박윤식, 김종건, 김성준, 안재훈, 김기성, 임경재(2008). SWAT ArcView GIS Extension Patch를 이용한 소유역 분할에 따른 수문 및 유사 거동에 미치는 영향 평가. *한국물환경학회지*, 24(2), pp. 147-155.
- 허성구, 김재영, 유동선, 김기성, 안재훈, 윤정숙, 임경재 (2007). 객토 농경지의 토양특성을 고려한 도암댐 유역에서의 수문 및 유사 거동 모의. *한국농공학회지*, 49(2), pp. 49-60.
- 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), pp. 453-462.
- Jha, M., Gassman, P. W., Secchi, S., Roy, G., and Arnold, J. G. (2002). Impact of Watershed Subdivision Level on Flows, Sediment Loads, and Nutrient Losses Predicted by SWAT. Working Paper 02-WP 315. pp. 22-23.