

SWAT HRU 단위의 경사도/경사장 산정을 위한 SWAT SD-HRU 전처리 프로세서 모듈 개발

장원석 · 유동선 · 정일문* · 김남원* · 전만식** · 박윤식 · 김종건 · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과

*한국건설기술연구원

**강원발전연구원

Development of SWAT SD-HRU Pre-processor Module for Accurate Estimation of Slope and Slope Length of Each HRU Considering Spatial Topographic Characteristics in SWAT

Wonseok Jang · Dongsun Yoo · Il-moon Chung · Namwon Kim · Mansig Jun · Younshik Park · Jonggun Kim · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon University

*Korea Institute of Construction Technology

**National Kangwon Development Research Institute

(Received 3 December 2008, Revised 19 January 2009, Accepted 24 January 2009)

Abstract

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model, semi-distributed model, first divides the watershed into multiple subwatersheds, and then extracts the basic computation element, called the Hydrologic Response Unit (HRU). In the process of HRU generation, the spatial information of land use and soil maps within each subwatershed is lost. The SWAT model estimates the HRU topographic data based on the average slope of each subwatershed, and then use this topographic datum for all HRUs within the subwatershed. To improve the SWAT capabilities for various watershed scenarios, the Spatially Distributed-HRU (SD-HRU) pre-processor module was developed in this study to simulate site-specific topographic data. The SD-HRU was applied to the Hae-an watershed, where field slope lengths and slopes are measured for all agricultural fields. The analysis revealed that the SD-HRU pre-processor module needs to be applied in SWAT sediment simulation for accurate analysis of soil erosion and sediment behaviors. If the SD-HRU pre-processor module is not applied in SWAT runs, the other SWAT factors may be over or under estimated, resulting in errors in physical and empirical computation modules although the SWAT estimated flow and sediment values match the measured data reasonably well.

keywords : Field slope, Field slope length, Hydrologic response unit, Spatially distributed-HRU, Soil and water assessment tool

1. 서론

최근 들어 집중 호우로 인한 고탁수 문제가 사회적인 화두가 되고 있다. 댐 상류에서 강우로 인한 탁수는 많은 환경적 생태학적 문제를 초래한다. 이러한 탁수로 인한 문제를 해결하기 위해서 정부와 지방자치단체에서는 다각적인 노력을 기울이고 있다. 가장 효과적인 오염방지 대책을 수립하기 위해서는 대상 오염물질의 발생원인 및 이동 경로에 대한 현상을 구명하는 것이 필요하다. 이를 통해서 대상 유역에 가장 적합한 오염방지 대책을 수립할 수 있을 것으로 기대된다. 최근 들어 유역에서의 토양유실 및 이로

인한 탁수문제를 해결하기 위하여 Soil and Water Assessment Tool(SWAT; Arnold, 1992) 모형이 널리 활용되고 있다(김종건 등, 2008; 박윤식 등, 2008; Jha et al., 2006; Luo et al., 2008). SWAT 모형은 유역에서의 강수에 따른 유출 및 비점오염의 발생 및 거동의 시간적·공간적 변화를 분석할 수 있기 때문에 널리 이용되고 있으나, 자연을 모의하는데 있어서 많은 한계 및 모형의 구조적 특성으로 인해 농경지를 많이 포함하는 유역에서 정확한 토양유실 및 유사거동을 평가하는데 한계가 있어왔다. 분포형 모형과는 달리 준분포형 모형인 SWAT 모형은 소유역내 수문학적 반응단위별로 유출, 유사, 그리고 비점오염 발생을 평가하는데 이때 Hydrologic Response Unit(HRU)의 지형정보가 활용된다. 이 지형정보는 SWAT 유사 평가시 매우 민감한 변수중의 하나이기 때문에 유역 단위 유사 평가시 정확한

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

지형자료의 입력이 요구된다. 그러나 SWAT 모형은 소유역 내 HRU의 경사도 및 경사장을 직접 산정하지 않고, 소유역의 평균경사도를 기준으로 하여 산정된 경사도를 소유역 내 모든 HRU에 동일하게 적용하는 단점이 있다(Arnold, 1992). 따라서 이러한 현재의 SWAT 구조를 그대로 이용하여 유역단위 유출 및 유사량을 평가하면 정확한 유사발생량을 평가할 수 없기 때문에 토양유실 관련 정책 수립의 자료로 활용하기 어렵고, 부정확한 유사 평가 결과 때문에 유역에 적합한 탁수 해결 방안을 제시하기가 쉽지 않다. 유역에서의 수문 및 수질을 평가하기 위해서는 모형의 정확한 평가가 이루어져야 하고, 정확한 평가를 위해서는 입력 데이터정확성을 보장받아야 한다. 유역의 경사도/경사장은 SWAT 모형 예측 유사량 평가에 많은 영향을 미친다. 그동안 SWAT의 경사도/경사장의 민감도에 관한 연구들이 수행되어 왔다. 김종건 등(2007)은 정확한 SWAT 토양유실 및 유사 모의를 위한 경사장 산정 모듈을 개발하였고, 허성구 등(2008)은 SWAT ArcView GIS Extension Patch를 이용한 소유역 분할에 따른 수문 및 유사 거동에 미치는 영향을 평가하였으며, Jha 등(2002)은 경사도/경사장 변화에 따라 유사량 평가시 큰 차이가 발생할 수 있다는 것을 검증하였다. 최근 들어 SWAT에서 쓰이는 다양한 매개변수들에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있는데, 유동선 등(2008)은 SWAT에서의 평균 경사도/경사장의 오류를 지적하고 면적가중 모듈을 개발·적용하여 기존의 SWAT에서 산정된 평균 경사도/경사장과 모듈 사용 후 경사도/경사장을 비교해서 실제값에 가까운 해결책을 제시 하였다. 하지만 면적가중이라는 모듈 자체도 최종적으로 경사도/경사장을 계산할 때는 면적을 고려한 평균 경사도/경사장을 산정하여 유사를 평가하기 때문에 정확한 필지단위 유사량을 평가하기에는 많은 문제가 있어 왔다.

본 연구의 목적은 1) 기존의 SWAT의 소유역 기준 평균 경사도/경사장과 유동선 등(2008)이 제시한 면적가중 모듈로 계산한 경사도/경사장 그리고 본 연구에서 개발한 SWAT SD-HRU(Spatially Distributed-HRU) 전처리 프로세서 모듈로 입력된 실제 경사도/경사장을 비교·분석하고, 2) 모의 유사량의 비교를 통해서 경사도/경사장이 유사 평가에 미치는 영향을 분석하는데 있다. 본 연구의 결과는 기존의 SWAT 모형이 유역의 평균 경사도/경사장을 이용하여 소유역내 모든 HRU의 지형자료로 활용하는데서 발생하는 문제점과 해결책을 제시함으로써 준분포형 모형의 단점을 보완하는데 활용될 수 있으며, 고탁수 문제 등과 같은 환경적인 문제에 있어서 SWAT SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 이용하여 좀 더 객관적인 결과를 제시하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역 선정

본 연구에서는 유동선 등(2008)의 면적가중 경사도/경사장 연구와의 객관적 비교를 위해 같은 소양강댐 유역 내

고랭지 농업이 성행하고 있는 해안면 유역을 연구대상지역으로 선정하였다. 해안면의 유역면적은 61.52 km²이며, 지리적 위치는 북위 38° 15'~38° 20', 동경 128° 15'~128° 10'에 해당된다. 또한, 강원도 인제군 원동 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(유동선 등, 2008). 해안면 면적은 양구군 전체 면적(700.8 km²)의 8.8%에 해당되며, 이 중 산림·농경지·초지는 각각 60.2%, 35.8%, 0.2%를 차지한다. 산림이 60.2%를 차지하는 전형적인 산지 고원 지역이다. 분지내의 하계의 분포는 방사상 내지는 수지상 패턴으로 되어있다(권영식 등, 1990). 아래 Fig. 1은 해안면 유역의 수계를 나타낸다.

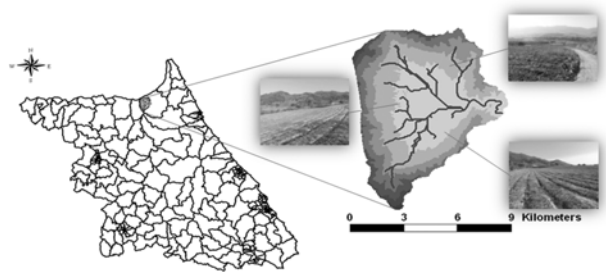


Fig. 1. Location of the Hae-an watershed.

2.2. SWAT 모형의 개요

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold(Arnold, 1992; Arnold et al., 1998)등에 의해 개발된 유역모형으로서 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위하여 개발되었다(Neitsch et al., 2005a). SWAT 모형은 한 유역내 HRU에 대해서 유출과 비점오염 발생 및 거동의 물리적 과정을 평가하여 유역단위 평가를 위해서 유역을 소유역으로 구분한다. SWAT 모형은 준분포형 모형이기 때문에 소유역의 HRU의 지형적인 특성을 제대로 반영하지 못하고 소유역의 평균 경사도에 따른 경사장을 소유역내 모든 HRU의 지형특성 자료로 활용하기 때문에, 소유역내 공간적으로 분포된 농경지 필지별 유사평가 등에 있어 한계점이 있다. 이와 같은 이유로 대상유역의 유사발생을 평가할 때 지형적인 특성을 고려하지 않는 SWAT 준분포형 모형의 단점을 개선하기 위한 많은 연구 필요성이 제기되어 오고 있다.

2.3. 해안면유역 실측경사도 및 경사장 자료 구축

Fig. 2는 해안면유역의 SWAT모형에 의해 산정된 경사도/경사장을 나타낸다. 앞에서 언급되었듯이 SWAT 모형은 소유역의 평균경사도/경사장을 기준으로 하여 소유역내 모든 HRU의 경사도/경사장을 산정한다. 이러한 SWAT모형은 구조적 단점으로 인해 소유역내 모든 HRU의 경사도/경사장

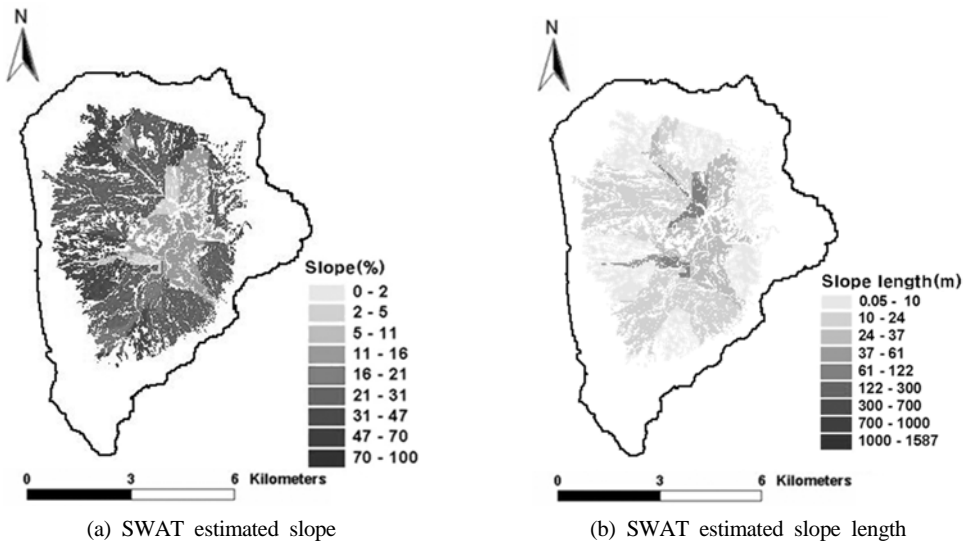


Fig. 2. SWAT estimated slope and slope length at the Hae-an watershed.

의 지형적 특성을 반영하지 못하며 소유역내 모든 HRU에 대해서 동일 경사도/경사장 값이 이용된다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 소유역의 평균경사도는 0.9~46.7%의 분포를 보이며 평균 경사장은 0.05~122 m로 분포되어 있다.

Fig. 3은 강원발전연구원에서 해안면 유역의 모든 농경지에서의 농경지를 대상으로 필지별로 실측한 실측 경사도/경사장을 보여준다(전만식, 2007). 기존의 경사도/경사장을 이용한 대부분의 연구에서도 SWAT에서 산정된 평균 경사도/경사장만을 이용하였고, 유동선 등(2008)의 면적가중 경사도/경사장 연구와 본 연구에서와 같이 실측 경사도/경사장 자료를 이용하지 않고 유역단위 유사량 평가를 수행하였기 때문에 그 예측치에 많은 불확실성이 내재되어 있다. 실측 경사도 분포범위는 1.75~100%로 비교적 경사가 급한 지역이 상당수 분포되어 있으며 경사장의 경우 1~1,587 m의 범위로 실측 경사도/경사장은 대체로 SWAT 모형에 의해 산정된 경사도/경사장 보다 더 크게 분포되어 있다.

2.4. SWAT 모형, 면적가중 모듈, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 이용한 모의 결과 분석

SWAT 모형의 모의 결과값은 RCH, BSB, SBS 파일안에 기록이 된다. 이 세 개의 파일에는 다양한 수문분석을 할 수 있는 결과 값들이 기록이 되어있고, 이 결과값들은 모의 기간에 따라 각각 생성되는 파일이 달라진다. 일별, 월별로 모의를 하면 RCH, BSB 파일이 생성이 되고, 연별로 모의를 하면 RCH, BSB, SBS 파일이 생성된다. SBS는 각 소유역내 HRU별, BSB는 각 소유역별, RCH는 각 수계내 Reach별 SWAT 모의 결과 값을 담고 있다. 본 연구에서는 동일한 임계값을 적용하여 해안면 유역내 총 45개 소유역을 구분하였고, 기존 SWAT 모형의 HRU와 면적가중 모듈(유동선 등, 2008)을 적용한 HRU 그리고 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 이용해서 산정된 경사도/경사장의 HRU 데이터를 이용하여 모의한 해안면 유역의 유출량 및 유사량 비교·분석하여 SD-HRU 모듈 적용의 필요성을 제시하

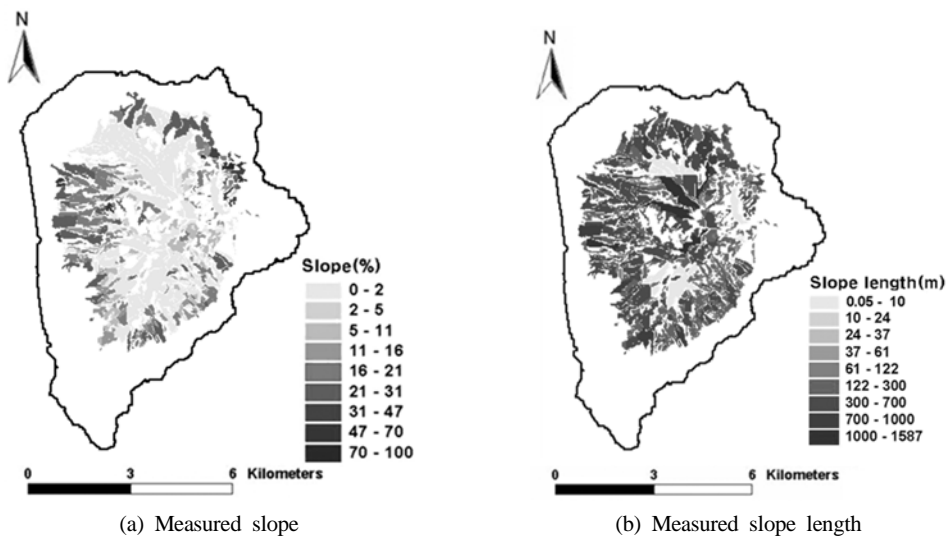


Fig. 3. Measured slope and slope length at the Hae-an watershed.



Fig. 4. Subbasins and outlets at the Hae-an watershed.

였다(Fig. 4). 해안면 지역의 최종 출구지점인 RCH 파일 27번 수계의 유량 및 유사 예측 자료와 SBS파일의 HRU의

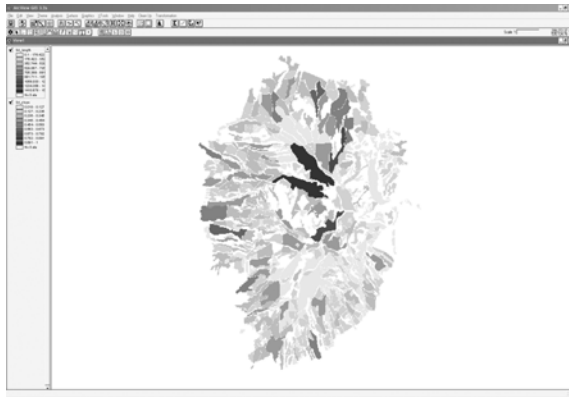
지표유출, 중간유출, 기저유출의 자료를 이용하여 유출량 특성을 분석하였다. 또한, 전체유역내 농경지에서 발생하는 토양유실 및 유사량을 분석하기 위하여 SBS파일내 농경지에 대한 토양유실 및 유사량 자료를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

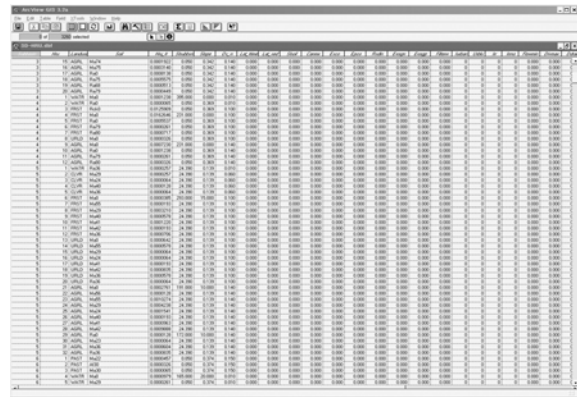
3.1. Spatially Distributed-HRU(SD-HRU) 전처리 프로세서 모듈 개요

본 연구에서는 SWAT 모형이 HRU 단위로 경사도 및 경사장을 산정하지 않고 소유역의 평균경사도를 이용하여 모든 HRU 별 경사장을 산정하기 때문에 ArcView GIS기반 Spatially Distributed-HRU(SD-HRU) 전처리 프로세서 모듈을 개발하였고, 이 모듈은 ArcView Avenue 프로그래밍을 통해 개발되었다(Fig. 5).

Fig. 6은 현재 SWAT 모형의 HRU 형성과정과 본 연구



(a)



(b)

```

C:\ArcView GIS 3.7a
File Edit Script Window Help
[Icons]

C:\Create_SD_HRU_in_SWAT
This script converts Soil Grid into Shape File then
create Grid using the ID Field (which was from Grid Cell Value)
then creates SD-HRU
KJ Lim (kjl@kangwon.ac.kr)
March 3, 2008

theView = av.getActiveDoc
theThemes = theView.getThemes
theGThemes = List Make

for each aTha in theThemes
  if(aTha.is(GTheme)) then
    theGThemes.Add(aTha)
  end
end

--Spatially-Distributed-HRU map
This script uses unique combinations of subbasin/landuse/soil grids
and the GRAT HRU table to assign slope and slope length to the HRU virtual table
KJ Lim (kjl@kangwon.ac.kr)
March 3, 2008

theView = av.getActiveDoc
theThemes = theView.getThemes
theGThemes = List Make

for each aTha in theThemes
  if(aTha.is(GTheme)) then
    theGThemes.Add(aTha)
  end
end

combTheme = MsgBox List(theGThemes, "Please select the Subbasin/Landuse/Soil Combination Theme", "HRU_GRID Combination Theme")
if(combTheme = nil) then exit end
combVTab = combTheme.getVTab

comb_sub_id_Field = combVTab.FindField("Subbasin")
comb_land_Field = combVTab.FindField("Landuse")
comb_soil_Field = combVTab.FindField("Soil")
comb_sip_length_Field = combVTab.FindField("SlopeLength")
comb_slope_Field = combVTab.FindField("Slope")
-- 여기서 = tan(radians(경사도)) 이렇게 해서 fraction 으로 계산

hruTable = av.FindDoc("hru.dbf")
if(hruTable = nil) then
  
```

(c)

Fig. 5. SD-HRU pre-processor module in SWAT. (a) SD-HRU slope and slope length map, (b) SD-HRU table, (c) SD-HRU pre-processor module in avenue language.

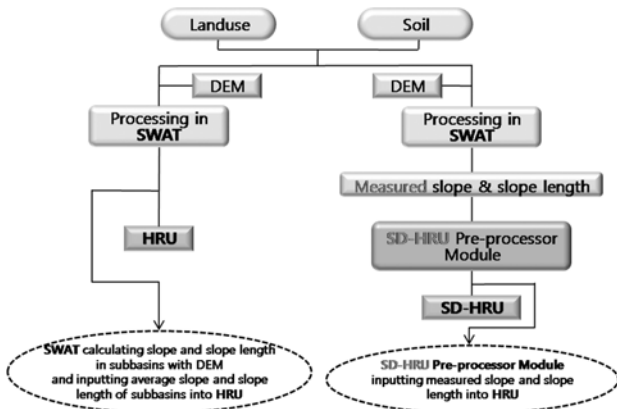


Fig. 6. Block-scheme of SD-HRU pre-processor module.

에서 개발한 SWAT SD-HRU 전처리 프로세서 모듈의 개요를 보여주는 그림이다. SWAT 모형의 HRU는 Land Use와 Soil 데이터의 중첩을 통해 이루어지며, HRU별 경사도와 경사장은 DEM으로부터 산정된 Subbasin의 평균 경사도를 통해 산정된 경사장값이 입력된다. 반면 본 연구에서 개발한 SD-HRU는 Land Use와 Soil 데이터의 중첩시 토양

도의 공간적 분포를 고려하여 같은 속성을 가지고 있더라도 일련의 아이디를 새로 제공함으로써 HRU 생성시 공간적 분포를 고려할 수 있도록 하였다. 이를 통해 실측 경사도 및 경사장을 공간적으로 분포된 SD-HRU에 할당할 수 있게 되었다.

Fig. 7은 기존 SWAT 모형이 Land Use와 Soil 데이터의 중첩을 통해 HRU를 형성하는 것을 보여준다. 그림에서 보이는 바와 같이 토지이용과 토양속성이 다른 HRU가 소유역내 공간적으로 분포되어 있더라도 SWAT HRU 속성 테이블에서는 하나의 HRU로 인식되어 평가된다. 이 과정에서 소유역의 평균경사도를 기준으로 산정된 경사장 값이 소유역내 모든 HRU의 지형자료로 활용되는 단점이 있다. 이와 달리 SD-HRU는 본 연구에서 개발한 SWAT SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 사용하여 각 HRU에 실측 경사도/경사장이 입력된다. Fig. 8에서 보이는 바와 같이 토지이용과 토양속성이 다른 HRU가 소유역내 공간적으로 분포되어 있는 것을 고려하여 여러 개의 HRU로 인식하여 각각에 대한 지형특성을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 강원도 양구군 해안면 유역에 대하여 본

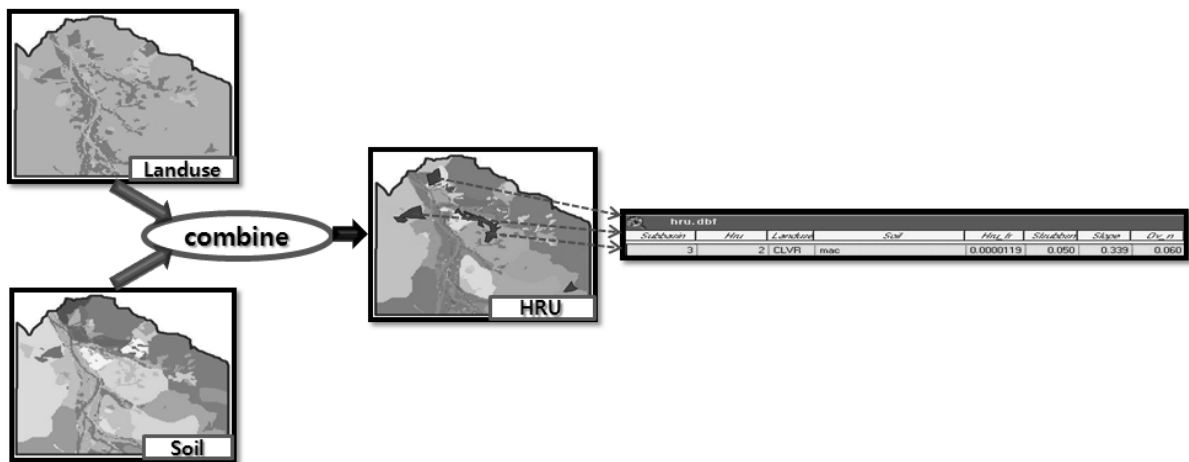


Fig. 7. Concept of HRU in SWAT. (Only one HRU record for 3 spatially separated landuse and soil combinations)

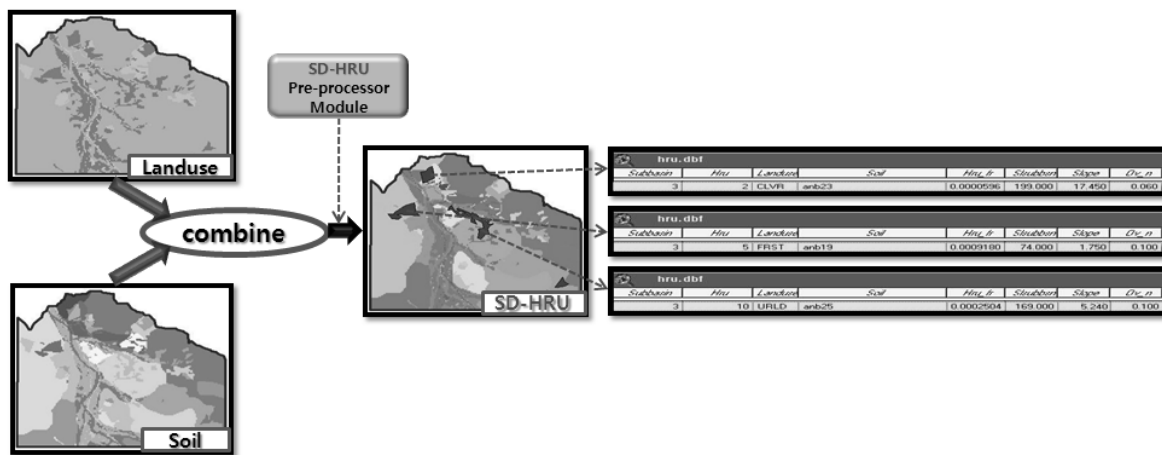


Fig. 8. Concept of SD-HRU in SWAT. (Three HRU records for 3 spatially separated landuse and soil combinations)

연구에서 개발한 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 적용하여 실측 경사도/경사장 데이터를 입력하였다. 본 모듈의 적용으로 그 동안 기존 SWAT에서 문제시 되었던 HRU에서의 소유역 평균 경사도/경사장 값의 입력이 아닌 실측 경사도/경사장이 입력됨으로써 공간적인 개념이 무시되었던 것에서 오는 SWAT 결과값 오류 문제를 해결 할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2. 해안면유역 실측 경사도 및 경사장 자료에 따른 SD-HRU 경사도 및 경사장 자료

Fig. 9는 기존 SWAT에 의해 산정된 소유역의 평균 경사도, 면적가중 모듈에 의해 산정된 소유역의 평균 경사도(유동선 등, 2008), 실측경사도와 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 이용하여 산정된 소유역내 평균 경사도를 비교한 것을 나타낸다. SWAT에 의해 산정된 경사도는 소유역별로 0.9~51.7%의 범위로 분포되었고, 면적가중 모듈로 산정된 경사도는 0.9~51.7%의 범위로 분포되었으며, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈로 산정된 실측 경사도는 4.9~82%의 범위로 분포되었다. 각각의 경사도의 평균값은 22.6%, 21.9%, 12.6% 로 SWAT > 면적가중 모듈 > SD-HRU 전처리 프로세서 모듈 순서로 SWAT에 의해 산정된 경사도가 가장 크게 산정되었고, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈로 산정된 실측 경사도가 가장 작게 산정되었음을 알 수 있다.

Fig. 10은 기존 SWAT에 의해 산정된 평균 경사장, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사장(유동선 등, 2008), SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사장을 비교한 것을 나타낸다. SWAT에 의해 산정된 경사장은 소유역별로 0.050~121.951 m의 범위로 분포되었고, 면적가중에 의해 산정된 경사장은 0.050~1,587 m의 범위로 분포되었으며, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈로 산정된 실측 경사

장은 0.050~1,587 m의 범위로 분포되었다. 본 연구에서 이용한 실측자료는 농경지에 대한 실측 자료만을 측정하였기 때문에 실측자료가 없는 산림지역 등의 농경지 외의 지역은 기존 SWAT에서 산정한 값을 사용하였고, 최저값인 0.050 m는 SWAT에서 경사도 25% 이상인 지역의 경사장을 0.050 m로 일률적으로 산정하기 때문이다(Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2005b). 각각의 경사장의 평균값은 21.027 m, 79.048 m, 300.674 m로 경사도의 관계와는 달리 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈 > 면적가중 모듈 > SWAT 순서로 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈로 산정된 실측 경사장이 가장 크게 산정되었고, SWAT에 의해 산정된 평균 경사장이 가장 작게 산정되었다. SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에서 산정된 경사장은 SWAT에서 산정된 값보다 약 280 m(↑1330%)증가하였고, 면적가중 모듈에서 산정된 값보다 약 222 m(↑280%)증가하였다. 각각의 방법에 의한 경사도 비교시 큰 차이가 없었지만 경사장의 차이는 상당히 많이 난다는 것을 알 수 있다. 즉 기존 SWAT 모형 및 면적 가중 경사도 경사장 모듈(유동선 등, 2008)로는 유역내 농경지의 경사장을 제대로 평가할 수 없으며, 본 연구에서 개발된 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 보다 정확하게 경사장을 산정할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3. 해안면유역의 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈 고려 유무에 따른 수문 및 유사비교

Fig. 11은 해안면유역의 SWAT에 의해 산정된 평균 경사도/경사장, 면적가중 모듈(유동선 등, 2008)에 의해 산정된 경사도/경사장, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장에 따른 유량변화를 나타낸 것이다. 유동선 등(2008)의 선행연구와 객관적인 비교를 하기 위해서 모의기간을 2000년 1월~2005년 12월까지로 같게 하였고,

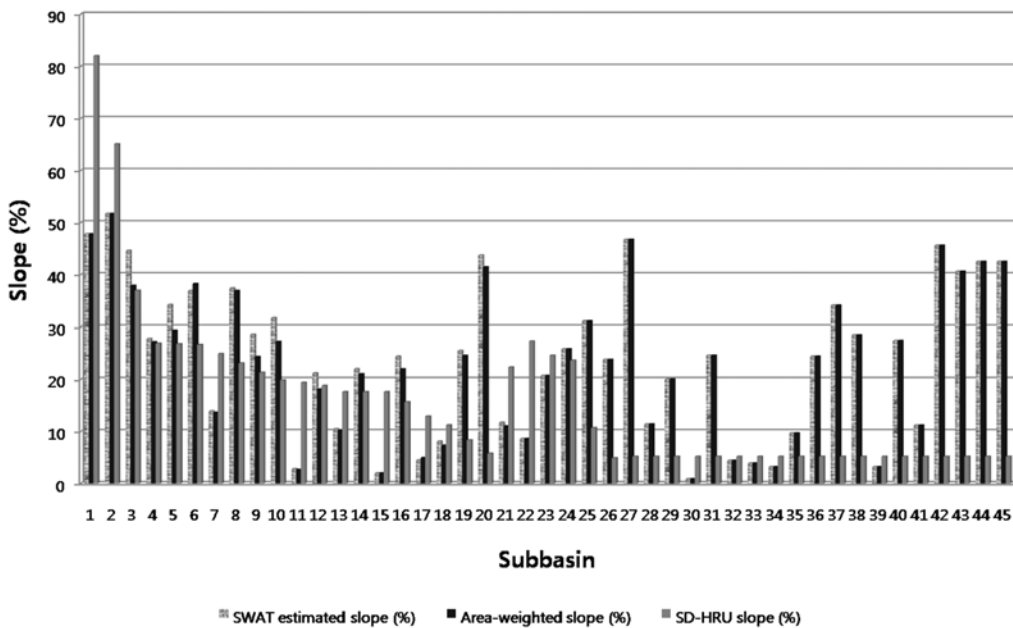


Fig. 9. Comparison of slope estimated by SWAT, Area-weighted module and SD-HRU pre-processor module.

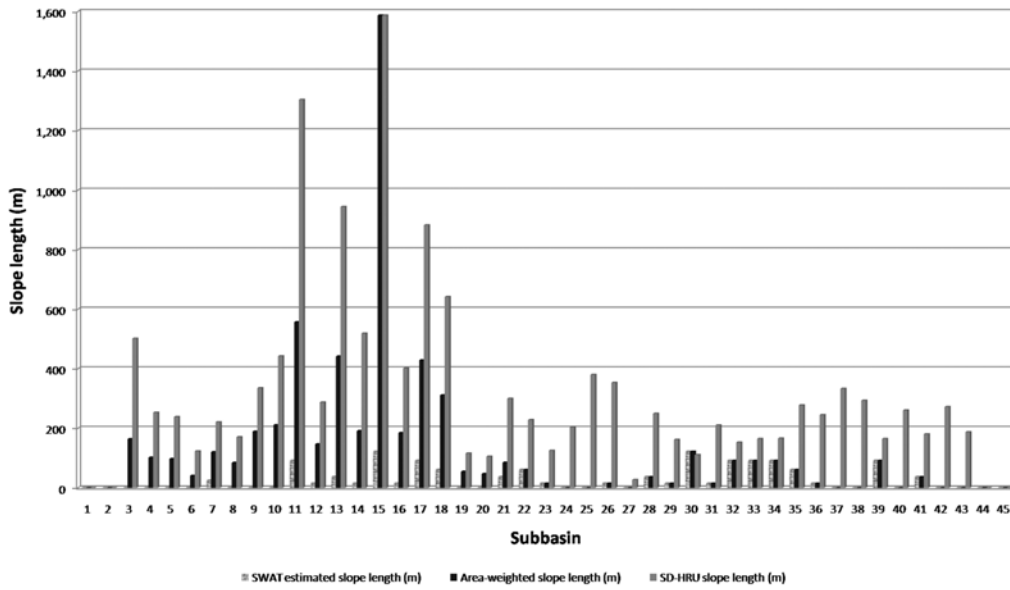


Fig. 10. Comparison of slope length by SWAT, Area-weighted module and SD-HRU pre-processor module.

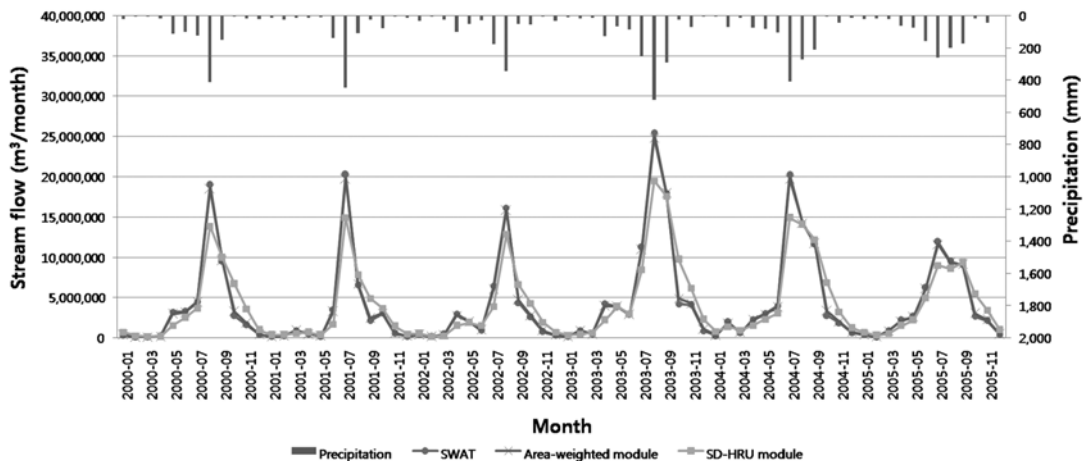


Fig. 11. Comparison of simulated streamflow by SWAT, Area-weighted module and SD-HRU pre-processor module.

이때 기존 SWAT에 의한 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 유량값은 51,664,992 m³/year이고, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 유량값은 51,486,753 m³/year이며, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 유량값은 50,430,589 m³/year로 큰 차이가 나타나지 않았다.

3.3.1. 표면유출 비교

Fig. 12는 해안면유역의 SWAT에 의해 산정된 평균 경사도/경사장, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장에 따른 표면유출 변화를 나타낸 것이다. SWAT에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 표면유출값은 12,180,866 m³/year이고, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 표면유출값은 12,217,756 m³/year이며, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에

의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 표면유출값은 13,314,459 m³/year로 SD-HRU로 산정된 표면유출량이 SWAT에 의해 산정된 표면유출량에 비해 약 9.3% 증가하였고, 면적가중 모듈에 의해 산정된 표면유출량에 비해 약 8.9% 증가하였다. 따라서 표면유출은 경사장의 변화에 따라 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3.3.2. 중간유출 비교

Fig. 13은 해안면유역의 SWAT에 의해 산정된 평균 경사도/경사장, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장에 따른 중간유출 변화를 나타낸 것이다. SWAT에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 중간유출값은 30,944,397 m³/year이고, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 중간유출값은 25,325,907 m³/year이며, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 중

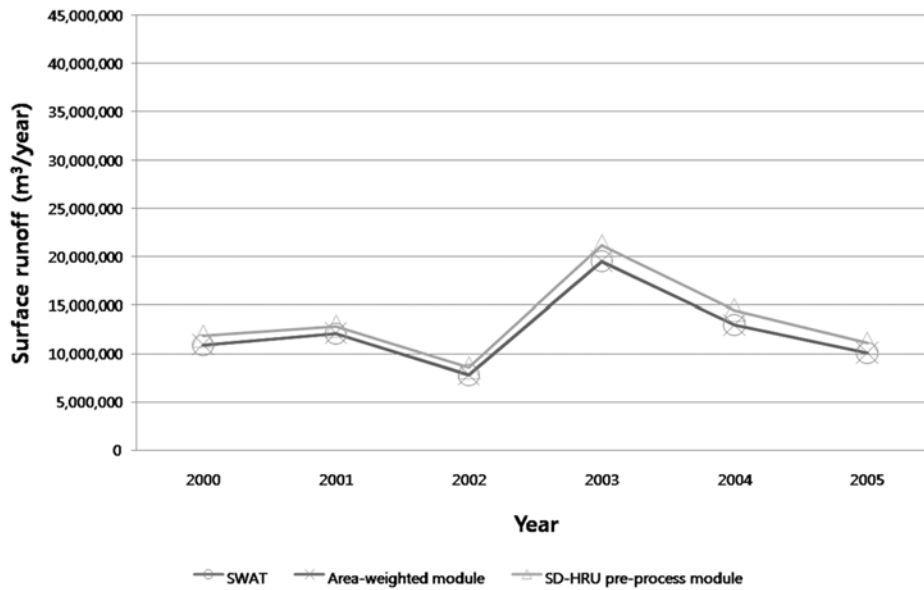


Fig. 12. Comparison of simulated surface runoff by SWAT, Area-weighted module and SD-HRU pre-processor module.

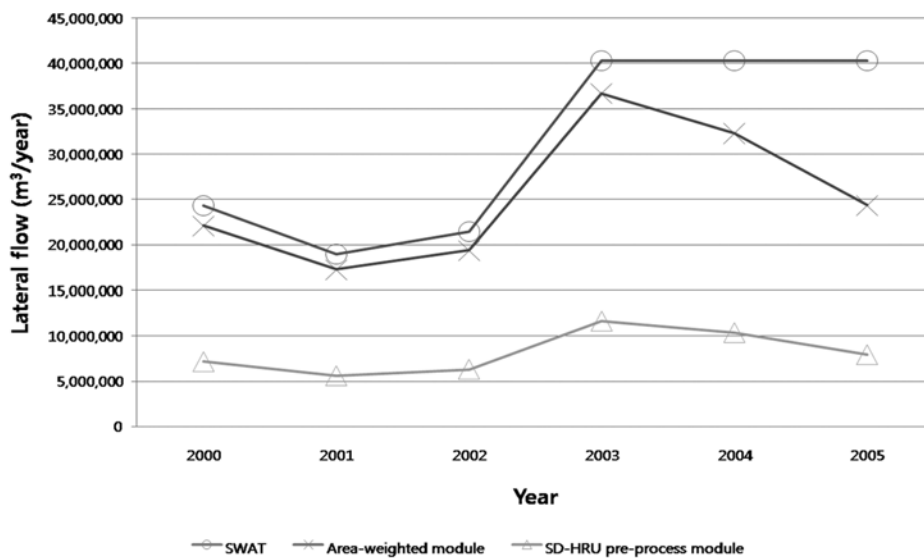


Fig. 13. Comparison of simulated lateral flow by SWAT, Area-weighted module and SD-HRU pre-processor module.

간유출값은 8,152,852 m³/year로 연평균 표면유출 때와는 달리 뚜렷한 차이가 보인다. SWAT에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값과 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값은 비슷한 경향을 보이지만, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값은 SWAT에서 모의된 연평균 값보다 22,791,545 m³/year(↓280%) 작게 산정되었고, 면적가중 모듈에 의해 모의된 연평균 값보다 17,173,055 m³/year(↓211%) 작게 산정되었다. 이는 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사장이 상당히 크기 때문에 중간유출이 줄어든 것으로 사료된다. SWAT 모형에서는 식 (1)(Neitsch et al., 2005b; Sloan et al., 1983; Sloan and Moore, 1984)과 같이 중간유출을 모의하는데, 경사장의 길이에 반비례하게 중간유출을 산정한다.

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

where Q_{lat} is the amount of lateral flow discharged to the main channel on a given day (mm H₂O), K_{sat} is the saturated hydraulic conductivity (mm·h⁻¹), and the slope is input to SWAT as the increase in elevation per unit distance (slp). $SW_{ly,excess}$ is the water content of the soil layer (mm H₂O), Φ_d is the drainable porosity of the soil (mm/mm), and L_{hill} is the hill slope length (m)(Neitsch et al., 2005b; Sloan et al, 1983; Sloan and Moore, 1984).

3.3.3. 기저유출 비교

Fig. 14는 해안면유역의 SWAT에 의해 산정된 평균 경사도/경사장, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장,

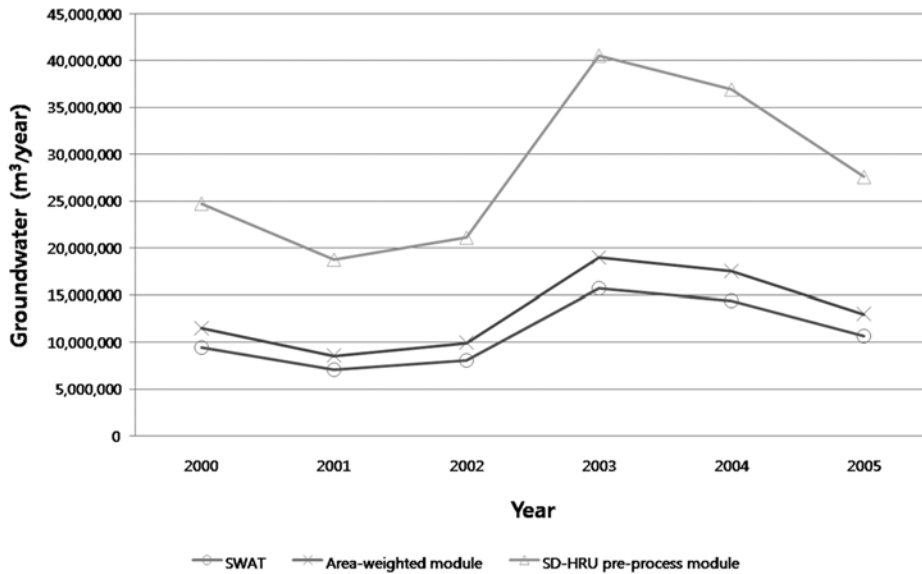


Fig. 14. Comparison of simulated groundwater by SWAT, Area-weighted module and SD-HRU pre-processor module.

SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장에 따른 기저유출 변화를 나타낸 것이다. SWAT에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 기저유출값은 10,863,119 m³/year이고, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 기저유출값은 13,257,383 m³/year이며, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 기저유출값은 28,263,746 m³/year로 서로 큰 차이를 보인다. SWAT에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값과 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값은 표면유출, 중간유출때와 같이 비슷한 경향을 보이지만, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값은 SWAT에서 모의된 연평균 값보다 17,400,627 m³/year(↑160%) 크게 산정되었고, 면적가중 모듈에 의해 모의된 연평균 값보다 15,006,362 m³/year(↑113%) 크게 산정되었다. SWAT Users' Manual, Ver. 2005(Neitsch et al., 2005b)에서 경사장이 길어질수록 하천 도달 시간도 길어지고, 그에 따라 대수층의 높이가 높아진다는 것을 알 수 있다. 식 (2)(Hooghoudt, 1940)를 보면 알 수 있듯이 대수층의 높이가 높아질수록 기저유출도 비례하여 증가하게 된다. 따라서 해안면 영역의 실측 경사장이 상당히 크기 때문에 이에 비례하여 기저유출도 증가하게 된 것이다.

$$Q_{gw} = \frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \cdot h_{wtbl} \quad (2)$$

where Q_{gw} is the groundwater flow, or base flow, into the main channel on day i (mm H₂O), K_{sat} is the hydraulic conductivity of the aquifer (mm/day), L_{gw} is the distance from the ridge or subbasin divide for the groundwater system to the main channel (m), and h_{wtbl} is the water table height (m) (Hooghoudt, 1940).

Fig 15는 SWAT, 면적가중 모듈, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의한 표면유출, 중간유출, 기저유출의 변화를 각 수문 컴포넌트 별로 나타낸 것이다. 앞에 기술된 표면유출, 중간유출, 그리고 기저유출 비교에서도 알 수 있었듯이 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 적용하였을 때 표면유출을 제외한 중간유출, 기저유출의 변화가 가장 뚜렷하다는 것을 알 수 있다. SWAT에 의해 모의된 연평균 표면 유출심은 158.8 mm, 중간 유출심은 298 mm, 기저 유출심은 253.1 mm이고, 면적가중 모듈에 의해 모의된 표면 유출심은 207.7 mm, 중간 유출심은 268.6 mm, 기저 유출심은 296 mm이며, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 모의된 표면 유출심은 212.6 mm, 중간 유출심은 112.1 mm, 기저유출심은 439.3 mm이다. 즉, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈로 모의된 연평균 표면 유출심, 중간 유출심, 기저 유출심은 SWAT에 의해 모의된 값보다 표면 유출심은 53.7 mm 증가, 중간 유출심은 185.9 mm 감소, 기저 유출심은 186.2 mm 증가하였고, 면적가중 모듈에 의해 모의된 값보다 표면 유출심은 4.9 mm 증가, 156.5 mm 감소, 143.3 mm 증가 하였다. 표면유출, 중간유출, 그리고 기저유출분석에서 언급되었듯이 HRU 경사장의 증가로 인해 이와 같은 수문 컴포넌트의 변화가 생겼을 것이라고 사료된다.

3.4. 해안면유역의 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈 고려 유무에 따른 유사량 비교

Fig. 16은 해안면유역의 SWAT에 의해 산정된 평균 경사도/경사장, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장, SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장에 따른 유사량을 나타낸 것이다. SWAT에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 유사량은 86,002 ton/year(13.98 ton/ha/year)이고, 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 유사량은 170,666 ton/year(27.74 ton/ha/year)이며, SD-HRU 전처리

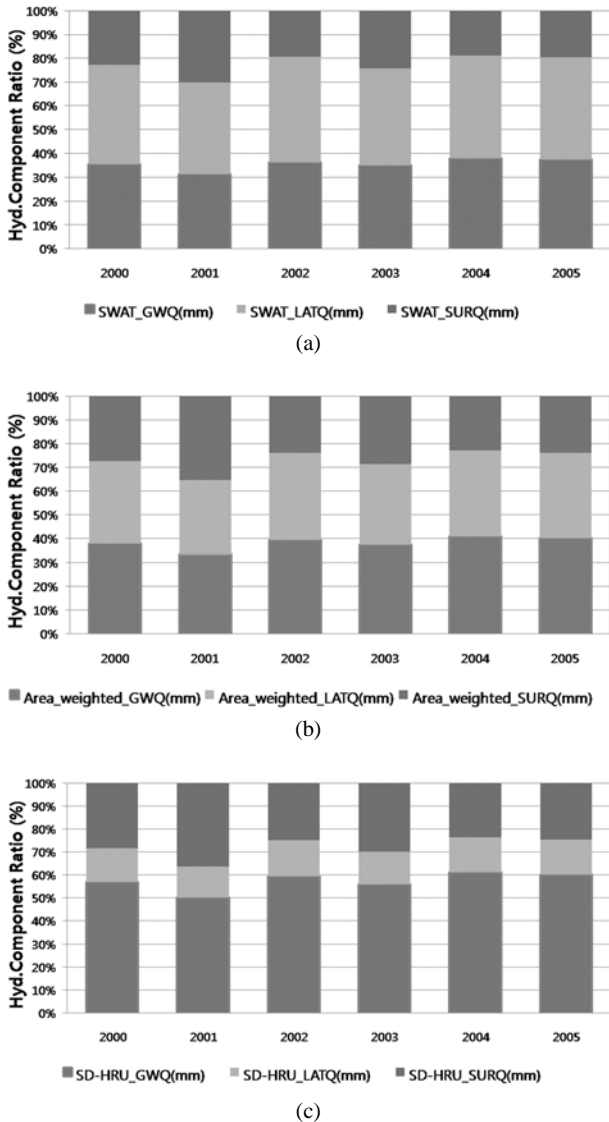


Fig. 15. Comparison of simulated runoff by (a) SWAT, (b) Area-weighted module and (c) SD-HRU pre-processor module.

프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 연평균 유사량은 187,165 ton/year(30.42 ton/ha/year)로 서로 큰 차이를 보인다. SWAT에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값은 면적가중 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값과 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값에 비해 상당히 작은 값이 산정되었다. SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 경사도/경사장을 사용하여 모의된 값은 SWAT에서 모의된 연평균 값보다 101,163 ton/year(16.44 ton/ha/year)(↑20%) 크게 산정되었고, 면적가중 모듈에 의해 모의된 연평균 값보다 16,498 ton/year(2.68 ton/ha/year)(↑10%) 크게 산정되었다. SWAT에 의해 산정된 경사장에 비해 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에 의해 산정된 실측 경사장의 증가는 MUSLE 기반 SWAT 유사 평가시 같은 경우에 따른 유출발생시 경사장의 증가로 유사량을 크게 산정하게 된다. 식 (3)(Williams, 1995)과 식 (4)(Williams, 1995)에서도 알 수 있듯이 경사장(L)이 커지면 LS_{USLE} 이 커지고, 그에 따라 유사량이 비례하여 커진다는 것을 알 수 있다.

$$LS_{USLE} = \left(\frac{L_{hill}}{22.1}\right)^m \cdot (65.41 \cdot \sin^2(\alpha_{hill}) + 4.56 \cdot \sin\alpha_{hill} + 0.065) \quad (3)$$

where LS_{USLE} is the topographic factor which is expected ratio of soil loss per unit area from a field slope to that from a 22.1 m length of uniform 9 percent slope under otherwise identical conditions. L_{hill} is the slope length (m), m is the exponential term, and α_{hill} is the angle of the slope (Williams, 1995).

$$SED = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG \quad (4)$$

where SED is the sediment yield on a given day (metric

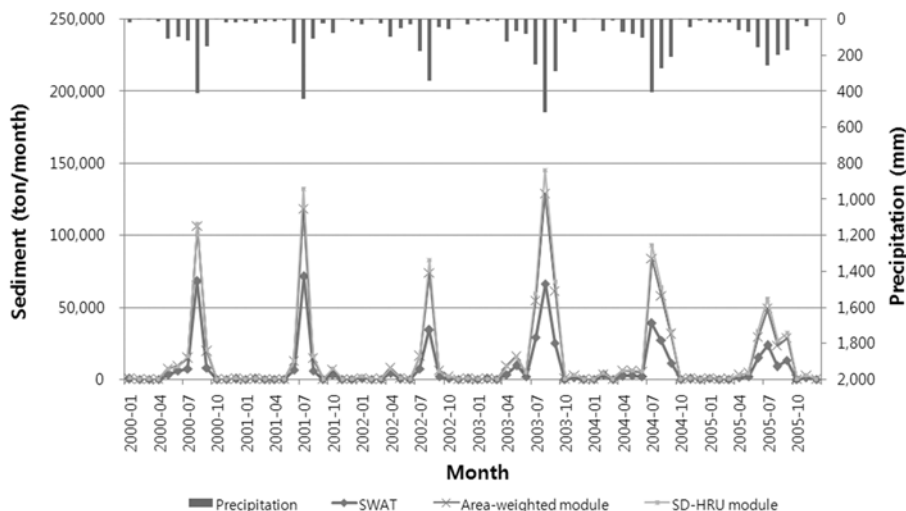


Fig. 16. Comparison of simulated sediment by SWAT, Area-weighted module and SD-HRU pre-processor module.

tons), Q_{surf} is the surface runoff volume (mm H₂O/ha), q_{peak} is the peak runoff rate (m³/s), $area_{hru}$ is the area of the HRU (ha), K_{USLE} is the USLE soil erodibility factor (0.013 metric ton m² hr/(m³-metric ton cm)), C_{USLE} is the USLE cover and management factor, PUSLE support practice factor, LS_{USLE} is the USLE topographic factor, and $CFRG$ is the coarse fragment factor (Williams, 1995).

4. 결론

최근 수질 문제에 있어서 저수지의 탁수현상은 수자원의 관리와 이용적 측면에서 중요한 요인으로 작용된다. 우리나라에서는 임하호, 안동호, 소양호 등에서 탁수 현상이 보고된 바 있으며, 이들 저수지를 대상으로 유역모형인 SWAT, HSPF 등을 이용한 탁수 거동 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 수문, 유사 분석에 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 준분포형 유역모형인 SWAT 모형의 구조적인 단점을 제시하고 단점을 보완할 수 있도록 SWAT SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 개발하였으며, 기존 SWAT 모형과의 비교/분석을 통해서 SWAT으로 탁수 현상 등을 예측할 때 좀 더 정확한 모의를 할 수 있는 방안을 제시하였다.

본 연구에서 개발한 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈 적용시 기존 SWAT에 비해 경사도는 SWAT에서 산정된 값보다 약 10% (↓79%) 감소하였고, 면적가중 모듈에서 산정된 값보다 약 9.3% (↓73%) 감소하였다. SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에서 산정된 경사장은 SWAT에서 산정된 값보다 약 280 m (↑1330%) 증가하였고, 면적가중 모듈에서 산정된 값보다 약 222 m (↑280%) 증가하였다. 경사장의 확연한 증가로 인해 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈에서 산정된 유사량도 SWAT에서 모의된 연평균 값보다 101,163 ton/year (16.44 ton/ha/year) (↑20%) 크게 산정되었고, 면적가중 모듈에 의해 모의된 연평균 값보다 16,498 ton/year (2.68 ton/ha/year) (↑10%) 크게 산정되었다. 유사량 결과값에서도 알 수 있듯이 SWAT 모형으로 유사량 모의시 경사장에 대한 영향이 크다는 것으로 분석되었고, SWAT 모형을 이용한 선행 연구들에서 무시되었던 HRU의 공간적인 개념이 수문/유사등을 모의 할 때 작지 않은 결과차이를 보여준다는 것을 알 수 있었다. 유동선 등(2008)에 의해 선행연구된 면적가중 모듈을 이용해 HRU의 공간적인 개념을 고려하여 기존 SWAT 모형과 비교하는 연구도 실측 경사도/경사장을 이용하여 기존 SWAT 모형의 HRU의 공간적인 개념이 무시되는 문제를 해결하기 위해 접근하였지만, 실측 경사도/경사장을 면적가중 모듈을 이용하여 SWAT 모형에 실측 데이터를 입력하는 과정에 면적가중평균 개념을 적용하기 때문에 실측 데이터를 기반으로 한 평균값의 입력으로 기존 SWAT 모형의 HRU의 공간적인 개념이 무시되는 문제를 해결하지 못했다. 즉 앞으로 SWAT 모형을 이용해서 수문/유사등을 모의하는데 있어서 HRU의 공간적인 개념을 고려하여 좀 더 객관적으로 평가를 하는 것이 상당히 중요하다는 것을 알 수 있었다. 이번 연구 목적은

SD-HRU 전처리 프로세서 모듈을 개발하고, SWAT 모형에 적용하여 기존 SWAT 모형과의 상대적인 비교를 통해 SWAT 모형의 구조적인 오류를 분석하여 해결방안을 제시하는 것이다. 현재 SD-HRU 전처리 프로세서 모듈의 경우 실측 경사도/경사장 데이터를 이용하여 대상유역에 적용함으로써 SWAT에서 공간적인 개념이 무시되는 오류를 보완했는데, 실측자료가 없는 유역에서의 적용을 위해서 DEM + 토지이용도에서 경사도/경사장을 공간적으로 각 HRU별로 산정할 수 있는 모듈 개발이 필요하다고 사료된다.

본 연구에 있어서 장기 실측 데이터의 부재로 인해 모형의 보정 및 검증 작업이 수행되지 않았다. 하지만 향후 장기 유량 및 유사 모니터링 및 유역내 농경지의 지형특성을 측정하여, SD-HRU 전처리 프로세서의 적용 필요성을 제시할 것이다. 비록 모형의 보정 및 검증작업이 수행되지 않았으나, 본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 SWAT SD-HRU 전처리 프로세서를 이용하여 유역내 비점오염원의 공간적 특성 분포를 고려하여 모형을 평가하고 이를 통해 다양한 탁수 저감 대책을 수립할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project의 “농촌 비점오염원 제어를 위한 효율적 관리기술 개발” 과제(과제번호 : 07-II-6) 및 21세기 프론티어 연구개발사업인 “수자원의 지속적 확보기술개발 사업단”의 연구비지원(과제번호 : 2-2-3)으로 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 권영식, 이형호, 한옥, 김원형, 김동진, 김두일, 염승준(1990). 해안분지의 지구과학적 분석. *한국지구과학회지*, **11**(3), pp. 236-241.
- 김종건, 박윤식, 김남원, 정일문, 장원석, 박준호, 문종필, 임경재(2008). 저해상도 DEM 사용으로 인한 SWAT 지형인자 추출 오류 개선 모듈 개발 및 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(4), pp. 488-498.
- 김종건, 박윤식, 김남원, 허성구, 김기성, 최중대, 임경재(2007). 정확한 SWAT 토양유실 및 유사 모의를 위한 경사장 산정 모듈의 개발. *2007공동 추계학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회. 한국물환경학회, pp. 91-97.
- 박윤식, 김종건, 김남원, 박준호, 장원석, 최중대, 임경재(2008). VFSSMOD-W 모형을 이용한 SWAT 모형의 초생대 유사 저감 효율 모듈 개선, *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(4), pp. 473-479.
- 유동선, 김기성, 장원석, 전만식, 양재의, 김성철, 안재훈, 임경재(2008). 실측 경사장 및 경사도를 고려한 양구 해안면 유역의 유사량 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(5), pp. 569-580.
- 전만식(2007). *소양강댐 휴탕물저감대책*. 강원도발전연구원 연구보고서.
- 허성구, 김남원, 박윤식, 김종건, 김성준, 안재훈, 김기성, 임경재(2008). SWAT ArcView GIS Extension Patch를 이용

- 한 소유역 분할에 따른 수문 및 유사 거동에 미치는 영향 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **24**(2), pp. 147-155.
- Arnold, J. G. (1992). Spatial scale variability in model development and parameterization. *Ph.D. Dissertation*, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development. *Journal of American Water Resources Association*, **34**(1), pp. 73-89.
- Hooghoudt, S. B. (1940). Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. Versl, *Landbouwkd*, Onderz, **46**, pp. 515-707.
- Jha, M., Arnold, J. G., Gassman, P. W., Giorgi, F., and Gu, R. R. (2006). Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi river basin streamflows using SWAT. *Journal of American Water Resources Association*, **42**(4), pp. 997-1016.
- 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 lossless predicted by SWAT*, Working Paper 02-WP, **315**, pp. 22-23.
- Luo, Y., Zhang, X., Liu, X., Ficklin, D., and Zhang, M. (2008). Dynamic modeling of organophosphate pesticide load in surface water in the northern San Joaquin Valley watershed of California. *Environmental Pollution*, **156**(3), pp. 1171-1181.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005a). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*. USDA, ARS, Temple, Texas.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005b). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2005*. USDA, ARS, Temple, Texas.
- Sloan, P. G., Morre, I. D., Coltharp, G. B., and Eigel, J. D. (1983). *Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds*. Water Resources Inst, Report 142, Univ, Kentucky, Lexington.
- Sloan, P. G. and Moore, I. D. (1984). Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, **20**(12), pp. 1815-1822.
- Williams, J. R. (1995). Chapter 25: The EPIC model. *Computer models of watershed hydrology*, In V. P. Singh (ed.), Water Resources Publications, pp. 909-1000.