

SWAT모형에서 공간 입력자료의 다양한 해상도에 따른 수문-수질 모의결과의 비교분석

Comparative Analysis of SWAT Generated Streamflow and Stream Water Quality Using Different Spatial Resolution Data

박종윤*, 이미선**, 박근애***, 김성준****

Jong Yoon Park, Mi Seon Lee, Geun Ae Park, Seong Joon Kim

Abstract

This study is to evaluate the impact of varying spatial resolutions of DEM (2 m, 10 m, and 30 m), land use (QuickBird, 1/25,000 and Landsat), and soil data (1/25,000 and 1/50,000) on the uncertainty of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) predicted streamflow, sediment, T-N, and T-P transport in a small agricultural watershed (1.21 km²). SWAT model was adopted and the model was calibrated for a 255.4 km² watershed using 30 m DEM, Landsat land use, and 1/25,000 soil data. The model was run with the combination of three DEM, land use, and soil map respectively. The SWAT model was calibrated for 2 years (1999-2000) using daily streamflow and monthly water quality (SS, T-N, T-P) records from 1999 to 2000, and verified for another 2 years (2001-2002). The average Nash and Sutcliffe model efficiency was 0.59 for streamflow and the root mean square error were 2.08, 4.30 and 0.70 tons/yr for sediment, T-N and T-P respectively. The hydrological results showed that output uncertainty was biggest by spatial resolution of land use. Streamflow increase the watershed average CN value of QuickBird land use was 0.4 and 1.8 higher than those of 1/25,000 and Landsat land use caused increase of streamflow.

Key words : Spatial Resolution, Output Uncertainty, Input Data, Modeling, SWAT

요 지

본 연구는 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형에서 공간입력자료의 다양한 해상도에 의한 수문-수질 모의결과를 비교분석 하고자 하였다. 경안천유역 상류의 농촌 소유역(1.21 km²)을 대상으로 Case A(2m DEM, QuickBird 토지이용도, 1/25,000 토양도), Case B(10m DEM, 1/25,000 토지이용도, 1/25,000 토양도), Case C(30m DEM, Landsat 토지이용도, 1/25,000 토양도)에 해당하는 해상도별 공간입력자료를 구축하였다. 모형의 적용성 평가를 위해 먼저, 경안수위관측소 상류유역(255.44 km²)을 대상으로 1999~2002년까지 4개년의 자료를 이용하여 유출량 및 Sediment, T-N, T-P에 대한 모형의 검보정을 실시하였다. 유출량에 대한 Nash-Sutcliffe 모형효율은 평균 0.59의 결과를 얻었으며, Sediment, T-N, T-P는 각각 2.08 tons/yr, 4.30 tons/yr, 0.70 tons/yr의 RMSE 오차로 검보정되었다. 모형의 검보정 후, 농촌 소유역을 대상으로 다양한 공간자료(Case A, B, C)를 적용하여 수문, 수질모의를 실시한 결과, 유출량은 토지이용도 해상도에 의한 모의결과의 불확실성이 가장 큰 것으로 분석되었다. QuickBird 토지이용의 유역평균 CN값이 1/25,000과 Landsat 토지이용에 비해 0.4, 1.8 더 크게 분석됨으로서 총유출량도 증가하였다. 유사량과 영양물질 오염부

* 정회원건국대학교 사회환경시스템공학과 석사과정-E-mail : bellyon@konkuk.ac.kr

** 정회원건국대학교 지역건설환경공학과 박사수료-E-mail : misun03@konkuk.ac.kr

*** 정회원건국대학교 지역건설환경공학과 박사수료-E-mail : dolpin2000@konkuk.ac.kr

**** 정회원건국대학교 사회환경시스템공학과 교수-E-mail : kimsj@konkuk.ac.kr

하량에 대한 수질모의 결과는 USLE 인자의 평균 LS 및 K , $CFRG$ 값의 순서로 해상도별 모의결과의 불확실성이 가장 컸으며 토지이용도에 의한 평균 C 값에는 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다. Case A의 유사량은 B와 C에 비해 23.7%, 50.6% 증가하는 것으로 나타났으며, 유사량 증가에 따른 T-N, T-P 부하량 역시 Case A, B, C 순으로 높게 평가되었다.

핵심용어 : 공간해상도, 불확실성, 입력자료, 수문-수질 모델링, SWAT

1. 서론

수문-수질 모델링을 하는데 있어 모의결과의 정확성은 모형의 공간입력자료가 유역의 특징을 얼마나 잘 표현할 수 있느냐 하는 것에 의존한다 (Chaplot, 2005). 하지만, 대개의 수문, 수질모형 사용자들은 여러 해상도의 DEM, 토지이용도, 토양도와 같은 공간자료를 직접 제작하기 보다는 관련기관에서 제공하는 자료를 사용하는 경우가 많기 때문에, 공간입력자료의 해상도에서 오는 모의결과의 불확실성을 고려하기란 쉽지 않다. 또한 GIS가 다규모, 다해상도 자료를 자주 사용하는 공간분석, 지구적 모델링으로 그 영역을 확장해가고 있으므로 분석결과에서 규모의 효과를 잘 이해하는 것은 필수적인 요건이라고 할 수 있다(김성준, 2001). 지금까지 공간자료의 해상도에 관한 선행연구들을 살펴보면, 유역면적과 DEM 격자크기의 변화 등, 단일 해상도의 토지이용도와 토양도의 격자크기 변화에 의한 수문-수질 평가에 편중되어 왔다. 이에 본 연구에서는 토지이용도를 중심으로 DEM과 토양도를 단일 해상도의 격자크기 변화가 아닌 1/5,000, 1/25,000, 1/50,000급의 해상도 변화에서 오는 모의결과의 불확실성을 분석하고자 하였다. 해상도별 수문-수질모의가 가능한 SWAT 모형(Arnold et al., 1998)을 선정하여, 공간입력자료의 해상도 변화에 따른 유출량과 유사량 및 영양물질의 오염부하량에 대한 모의를 실시하였다. 이를 위해, 3가지 Case(A, B, C)에 대한 공간입력자료를 구축하였으며 Case별 자료의 구성과 전체적인 연구 진행순서는 Fig. 1과 같다.

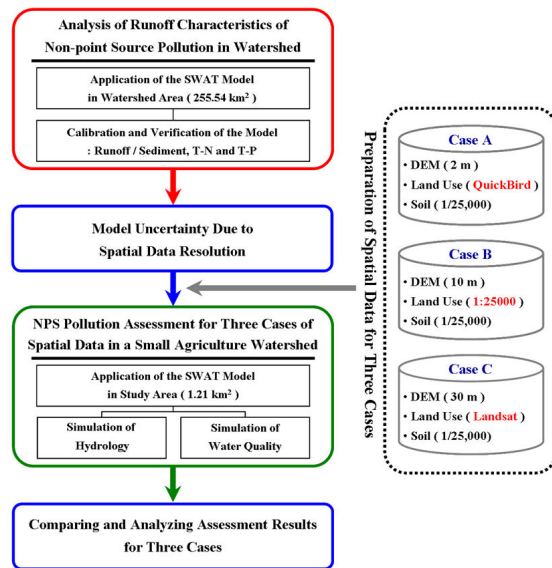


Fig 1. The Flow Chart of This Study.

2. 재료 및 방법

2.1 대상유역

본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같이 팔당호 유입하천인 경안천의 경안수위관측소를 유출구로 하는 경안천유역을 대상유역으로 선정하였다. 유역면적은 약 255.44km^2 이며, 유역 출구점에서의 유출 및 수질항목에 대해 모형의 보정 및 검증을 실시하였다. Fig. 2(b)는 경안천 상류의 농촌 소유역으로 유역면적은 약 1.21km^2 이며, 농촌소유역을 대상으로 공간입력자료의 해상도 변화에 따른 수문-수질변화를 분석하였다.

2.2 입력자료 구축

본 연구에서 기상입력자료는 수원, 양평, 이천 관측소의 일별 기상자료 및 경안천 유역 내 7개 강우관측소의 강우자료를 사용하였다. 해상도별 DEM(Digital Elevation Model), 토지이용도, 토양도의 공간입력자료를 구축하였다. 먼저, DEM은 NGIS(National Geographic Information System)의 1/5,000 수치지도로부터 격자크기 2m의 DEM을 제작하였다. 또한 제작된 2m DEM으로부터 Resample 작업을 통하여 10m, 30m DEM을 제작하였다. 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도와 1/50,000 개략토양도를 이용하여 수문학적 토양그룹(Hydrologic Soil Group) A, B, C, D로 분류하였다. 해상도별 토지이용 자료의 구축을 위해 QuickBird, Landsat TM(Thematic Mapper) 위성영상으로부터 1/5,000급의 QuickBird 토지이용도와 1/50,000급 Landsat 토지이용도를 제작하였으며, 환경부에서 1/25,000 중분류 토지이용도를 제공받아 사용하였다. 본 연구에 사용된 QuickBird 영상은 2006년 5월 1일 영상으로 총 21개 토지이용항목의 정밀토지이용도를 구축하였다. 환경부의 1/25,000 중분류 토지이용도는 총 4개의 토지이용항목으로 IRC-1, Landsat TM 위성영상으로부터 제작되었으며, 영상시기는 1999년~2001년이다. Landsat 토지이용도는 2004년 6월 3일 위성영상으로부터 총 7개 항목의 토지이용도를 제작하여 사용하였다.

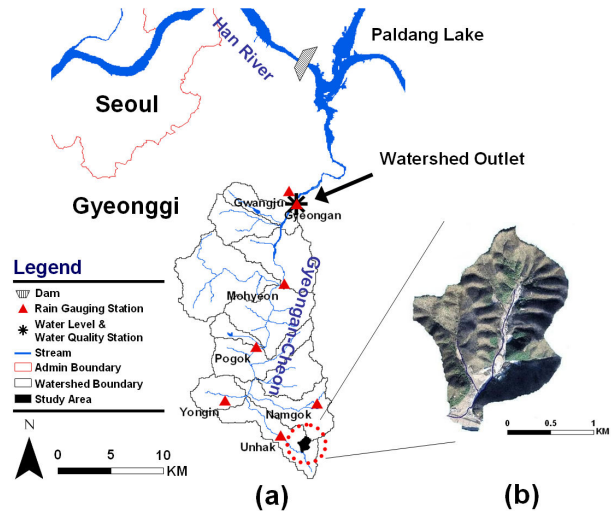


Fig 2. Location and Boundary of (a) the Gyeongan-Cheon Watershed, (b) Study Area.

3. 결과 및 고찰

3.1 모형의 보정 및 검증

SWAT 모형의 보정과 검증은 Fig. 2(a)의 경안천 유역에 대해 총 11개의 소유역으로 구분하여 1999년~2000년까지의 일별 유출량자료와 월별 수질자료(SS, T-N, T-P)를 이용하였으며, 2001년~2002년까지의 자료를 이용하여 검증하였다. 유출과 수질관련 보정 매개변수는 박종윤 등(2008)의 연구결과에 의한 매개변수 및 보정값을 사용하였다. 보정 및 검증기간동안 실측치와 모의치의 일별 유출량을 비교한 결과는 $RMSE$ 가 3.82mm/day, R^2 는 0.69, ME 는 0.59로 분석되었다. 수질모의에 따른 유사량 및 T-N, T-P 보정 및 검증 결과를 정리한 것으로 R^2 가 0.88, 0.72, 0.68, $RMSE$ 가 2.08, 4.30, 0.70tons/yr로 분석되었다.

3.2 공간입력자료의 해상도에 의한 불확실성 분석

농촌 소유역을 대상으로 DEM, 토지이용도, 토양도의 공간 해상도가 유역특성에 미치는 영향을 분석하였다. 먼저, DEM 해상도에 의한 고도(Altitude)변화에는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만, 경사(Slope)에서 10m와 30m DEM의 최대, 평균, 표준편차는 2m DEM 보다 낮게 평가되었다. 또한 DEM 해상도가 감소하면서, 유로장과 유역면적은 감소하였으며 하천의 평균경사는 증가하는 것으로 분석되었다. 토지이용 정보는 SWAT 모형에 입력자료가 되는 CN값을 결정하기 때문에 SCS-CN 방법에 의한 유출량 계산에 직접적인 영향을 미치게 된다. 토지이용 해상도별 CN값을

면적가중법으로 산정한 결과, QuicBird 토지이용도는 AMC-II 조건에서 1/25,000, Landsat 토지이용도에 비해 CN값이 0.4, 0.7 증가하는 것으로 분석되었다. 이것은 1/25,000과 Landsat 토지이용도에서는 분류되지 않았던 주거지와 도로 등의 토지이용항목이 고해상도의 위성영상으로부터 제작된 QuickBird 토지이용도에서 불투수층(2.6%)으로 분류됨에 따라 CN값이 증가한 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 1/25,000 정밀토양도와 1/50,000 개략토양도를 사용하여 해상도별 모의를 실시하고자 하였으나, 토양도의 토양특성 및 공간분포의 일관성이 없기 때문에 토양도의 해상도별 모의결과에 큰 의미가 없을 것으로 판단하고, 1/50,000 토양도는 적용대상에서 제외하였다.

한편, Table 1은 해상도별 입력자료의 USLE 인자별 평균값 및 유역특성을 정리한 것으로 HRU별 USLE인자 K , C , LS , $CFRG$ 의 범위와 면적가중법에 의한 평균값을 분석하였다. 먼저, 토양도에 의한 평균 K 값과 $CFRG$ 값의 변화는 모든 Case에 대해 1/25,000 정밀토양도를 적용했기 때문에 큰 변화가 없었다. 또한 각각의 해상도별 토지이용도를 적용했을 때, 각 Case별 C 값의 범위는 달랐으나 평균 C 값은 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다. 반면, DEM에 의한 평균 LS 값은 고해상도의 DEM으로 가면서 증가하는 것으로 분석되었다. HRU별 $K \times C \times LS \times CFRG$ 를 계산한 결과, Case A, B, C의 평균값은 고해상도로 감에 따라 평균값이 증가하는 것으로 나타났다. 비록 토양도를 제외한 DEM과 토지이용도만을 고려한 결과이나 이는 유사량 산정에 있어 공간입력자료 중 DEM에 의한 LS 값의 영향이 크다는 것을 의미한다.

Table 1. Summary of Mean USLE Factors at the HRU Level and Watershed Characteristics for 3 Cases of Map Scale

Factors	Resolution		
	Case A	Case B	Case C
DEM	2 m	10 m	30 m
Land Use (Number of Classification Item)	QuickBird (21)	1/25,000 (4)	Landsat (5)
Soil (Number of Soil Types)	1/25,000 (6)	1/25,000 (6)	1/25,000 (6)
Watershed Area (km ²)	1.209	1.184	1.171
Watershed Average CN Value	51.4	51.0	50.7
Number of Subwatershed	1	1	1
Number of HRUs / Area (km ²)	48 / 0.025	19 / 0.062	19 / 0.062
Mean K Factor	0.264	0.265	0.265
Mean C Factor	0.020	0.020	0.021
Mean LS Factor	0.026	0.025	0.022
Mean $CFRG$ Factor	0.986	0.986	0.986
Mean $K \times C \times LS \times CFRG$ at the HRU	0.135×10^{-3}	0.131×10^{-3}	0.121×10^{-3}

3.3 공간 입력자료의 해상도 변화에 따른 수문-수질 모의결과

모형의 검보정을 실시한 후, 1.12km²의 농촌 소유역(Fig. 2b)에 Case별 DEM, 토지이용도, 토양도를 각각 적용하여 공간 입력자료의 해상도 변화에 따른 수문-수질 모의를 실시하였다. Table 2는 AMCII 조건에서의 Case별 모의결과를 유역 출구점에서의 유출량과 유출률에 대해 정리한 것이다. 모의결과 Case A의 평균 유출량은 Case B와 C보다 각각 1.33%, 3.39% 높게 평가되었다. 이는 고해상도의 공간입력자료에 의한 CN값의 증가가 SCS-CN 방법에 의한 유출량 산정에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다. Table 3은 월별 수질 모의결과를 정리한 것으로 비점오염원에 의한 유사량 및 T-N, T-P 오염 부하량의 결과는 Case A가 B에 비해 각 수질항목에 대하여 23.7%, 43.3%, 50.6%, Case C에 비해서는 50.6%, 50.8%, 56.9% 높게 평가되었다. 이는 토지이용도에 의한 CN값 및 DEM에 의한 USLE LS 인자값에 의한 것으로 판단된다.

Table 2. Summary of Runoff Simulated Results for 3 Cases of Map Scale

Year	Rainfall (mm)	Case A		Case B		Case C	
		Total Runoff (mm)	Runoff Ratio (%)	Total Runoff (mm)	Runoff Ratio (%)	Total Runoff (mm)	Runoff Ratio (%)
1999	1296.8	30.3	28.0	29.8	27.5	29.3	27.2
2000	1108.0	24.7	26.7	24.4	26.4	23.8	25.8
2001	1118.1	25.7	27.6	25.6	27.5	24.8	26.6
2002	1463.5	34.4	28.2	33.8	27.7	33.3	27.3
Mean	1246.6	28.8	27.6	28.4	27.3	27.8	26.7

Table 3. Summary of NPS Loads Simulated Results for 3 Cases of Map Scale

Unit : Sediment = tons/ha, T-N and T-P = kg/ha

Year	Case A			Case B			Case C		
	Sediment	T-N	T-P	Sediment	T-N	T-P	Sediment	T-N	T-P
1999	1.78	58.62	9.77	1.47	31.27	4.72	0.92	27.47	4.01
2000	1.31	56.19	9.33	0.99	32.30	4.89	0.61	27.65	4.04
2001	1.31	58.96	9.71	0.97	33.58	4.99	0.60	29.14	4.18
2002	1.97	64.35	10.66	1.43	37.94	5.79	1.01	32.89	4.80
Mean	1.59	59.53	9.87	1.21	33.77	5.10	0.79	29.29	4.26

4. 요약 및 결론

해상도별 토지이용도와 DEM에서 오는 수문-수질 모의결과는 저해상도에 비해 고해상도의 공간자료에서 더 높게 평가되었다. 특히, 유출량에 비해 수질항목에서 해상도 변화에 따른 결과값의 차이가 컸으나, 비점오염 부하량은 강우 시 지표유출량에 기인하여 그 값이 달라질 수 있기 때문에 유출량의 영향 역시 배제할 수 없다. 때문에 관측자료가 없는 미계측 유역에서의 수문-수질 모델링은 공간입력자료의 해상도에서 오는 모의결과의 불확실성을 고려하여, 유역의 수문학적 특징과 토지이용상태 등 보다 신뢰할 수 있는 공간자료의 선택이 필요할 것으로 사료된다. 따라서 본 연구의 결과는 SWAT 모형뿐만 아니라 다른 여러 유역모형에서 사용되는 공간자료의 규모 및 해상도에 대한 이해는 물론, 향후 유역관리 및 오염총량제 등의 의사결정에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 2-2-3, 50%)과 건설교통부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C03, 50%)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김성준(2001). 원격탐사와 지리정보시스템에서 규모와 해상도 효과의 이해, 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제3호, pp. 76-86.
2. 박종운, 이미선, 이용준, 김성준(2008). SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향 분석, 대한토목학회 논문집, 제28권, 제2B호, pp. 187-197.
3. 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, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
4. Chaplot, V.(2005). Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions, Journal of Hydrology, Vol. 312, pp. 207-222.