

SWAT모형에서 공간 입력자료의 다양한 해상도에 따른 수문-수질 모의결과와의 비교분석

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

박종윤* / 이미선** / 박근애*** / 김성준****

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

Abstract

This study is to evaluate the impact of varying spatial resolutions on the uncertainty of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) predicted streamflow, non-point source (NPS) pollution loads transport in a small agricultural watershed (1.21 km²) for three cases of model input; Case A is the combination of 2 m DEM, QuickBird land use, Case B is the combination of 10 m DEM, 1/25,000 land use, and Case C is the combination of 30 m DEM, Landsat land use, soil data is used 1/25,000 for three cases respectively. The model was calibrated for 2 years (1999-2000) using daily streamflow and monthly water quality records, and verified for another 2 years (2001-2002). The average Nash and Sutcliffe model efficiency was 0.59 for streamflow and *RMSE* were 2.08, 4.30 and 0.70 tons/yr for sediment, T-N and T-P respectively. The model was run for a small agricultural watershed with three cases of spatial input data. 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. On the other hand, The NPS loadings from the model prediction showed that the sediment, T-N and T-P of QuickBird land use (Case A) showed 23.7 %, 43.3 % and 48.4 % higher value than 1/25,000 land use (Case B) and 50.6 %, 50.8 % and 56.9 % higher value than Landsat land use (Case C) respectively.

keywords : Spatial Resolution, Output Uncertainty, Input Data, Modeling, QuickBird, SWAT

요 지

본 연구는 농촌소유역(1.21 km²)에서 다양한 공간입력자료의 해상도가 SWAT(Soil and Water Assessment

* 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 석사과정
Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
(e-mail: bellyon@konkuk.ac.kr)

** 건국대학교 대학원 지역건설환경공학과 박사수료
Ph. D Candidate, Dept. of Rural Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
(e-mail: misun03@konkuk.ac.kr)

*** 건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과 박사후과정
Post Doctor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
(e-mail: dolpin2000@konkuk.ac.kr)

**** 교수, 건국대학교 생명환경과학대학 사회환경시스템공학과 교수
Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea
(e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr)

Tool) 모형의 수문-수질 모의결과에 미치는 영향을 분석하고자 Case A(2 m DEM, QuickBird 토지이용도, 1/25,000 토양도), Case B(10 m DEM, 1/25,000 토지이용도, 1/25,000 토양도), Case C(30 m DEM, Landsat 토지이용도, 1/25,000 토양도)에 해당하는 해상도별 공간입력자료를 구축하였다. 모형의 적용성 평가는 경안천유역(255.44 km²) 출구점에서 일별 유출량 및 월별 수질자료를 이용하여 보정(1999~2000)하였으며, 2001~2002년 자료를 이용하여 검증하였다. 유출량에 대한 Nash-Sutcliffe 모형효율은 평균 0.59의 결과를 얻었으며, Sediment, T-N, T-P 부하량은 각각 2.08, 4.30, 0.70 tons/yr의 RMSE 오차로 검보정되었다. 농촌소유역을 대상으로 다양한 공간자료(Case A, B, C)를 적용하여 수문, 수질모의를 실시한 결과, 유출량은 토지이용도 해상도에 의한 모의결과의 불확실성이 가장 큰 것으로 분석되었다. QuickBird 토지이용도의 유역평균 CN값이 1/25,000과 Landsat 토지이용에 비해 0.4, 1.8 더 크게 분석됨으로서 총유출량도 증가하였다. 한편, 유사량과 영양물질 오염부하량에 대한 수질모의 결과는 QuickBird(Case A) 토지이용도의 유사량 및 T-N, T-P 부하량이 1/25,000(Case B) 토지이용도에 비해 23.7 %, 43.3 %, 48.4 %, Landsat(Case C) 토지이용도에 비해 50.6 %, 50.8 %, 56.9 % 높게 평가되는 것으로 분석되었다.

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

1. 서 론

최근의 국가 수자원정책 방향을 살펴보면, 기후변화에 따른 물 확보 방안과 토지이용 변화 등에 따른 비점 오염원관리에 그 초점이 맞춰지고 있다. 이미 국제사회는 1992년 “기후변화에 관한 국제연합 기본협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)”을 채택하고 다양한 국제기구를 설립, 운영 중에 있으며 미국, 영국, 일본 등 일부 선진국에서는 기후변화의 영향평가 및 적응방안에 대한 대책마련 등 이를 수자원정책에 반영하고 있다. 한편, 급격한 도시화·산업화 등에 의한 유역의 토지이용 변화는 물 순환체계 및 이용형태의 변화뿐만 아니라 비점오염원(Non-Point Source Pollution)에 의한 수질악화 등의 문제를 초래하였다. 비점오염은 특정지점에 국한되지 않고 광범위하게 발생하므로 수질개선을 위해서는 비점오염원의 평가 및 효율적인 관리가 필요하다(Park *et al.*, 2007). 이러한 유역환경변화는 유역관리 및 수자원계획에 있어 반드시 고려되어야 할 사항이다. 이를 위해 유역단위의 고밀도 모니터링과 수문-수질 모델링은 다양한 시나리오에 따른 수자원영향 평가에 있어 보다 효율적인 정량적 분석이 가능할 것이다.

GIS(Geographic Information System)와 RS(Remote Sensing)의 발전은 그 활용범위가 확대되면서 수치표고 모델(Digital Elevation Model, DEM), 토지이용도(Land Use), 토양도(Soil Map) 등의 공간자료를 보다 쉽게 작성할 수 있게 되었고, 주기적인 데이터 획득에 의한 정보 갱신과 수치화, 시계열 분석이 용이해 졌다(김성준과 이용준, 2007). 최근, IKONOS, QuickBird, KOMPSAT-2와 같은 고해상도 위성영상의 활용도가 높아짐에 따라 지

리, 재해, 농업 등 다양한 분야에서 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 특히, 수문관측이 이루어지고 있지 않은 미계측 유역에서의 수문학적 수지에 대한 정량화는 불가능하기 때문에 미계측 유역에 대한 수문-수질 모델링은 거의 현실적으로 어렵다. 따라서 미계측 유역에 대한 수문정보의 취득이나 분석을 위해서는 원격탐사 기술의 적용이 필요하다(채효석 등, 2004). 원격탐사 영상은 지표면의 정보를 담고 있으므로 해상도가 변화함에 따라 축척효과(Scale Effect)에 의해 특성이 변화한다(Goodchild and Quattrochi, 1997). 또한 GIS가 다 규모, 다해상도 자료를 자주 사용하는 공간분석, 지구적 모델링으로 그 영역을 확장해가고 있으므로 분석결과에서 규모의 효과를 잘 이해하는 것은 필수적인 요건이라고 할 수 있다(김성준, 2001).

수문학적 통합모형들은 유역관리 및 계획을 용이하게 하기 위해 더욱 사용된다(Joao and Walsh, 1992; Wilson, 1996; Lohani *et al.*, 2002). 성공적인 수문모형과 GIS 결합은 공간정보의 구성이 모델링을 하는데 있어 얼마나 잘 모형 구성요소들의 필요성에 부합하는가에 의존한다(Chen and Mackay, 2004). 따라서 공간정보의 정확성은 수문모형의 모의결과에 직접적인 영향을 미치며, 모의결과의 정확성은 모형의 공간입력자료가 유역의 특징을 얼마나 잘 표현할 수 있는나 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 공간입력자료의 선택에 있어서 어떤 공간자료를 어떤 해상도로 적용할 것인가

에 대한 명확한 기준을 제시할 수 없다. 유역의 면적규모와 특징, 분석 목적에 따라 공간자료의 해상도 선택은 다를 수 있으나 많은 입력 매개변수를 필요로 하는 수문, 수질모형에서 고해상도의 공간자료는 자료구입에 따른 많은 비용이 들기 때문에 사용자의 의지적 선택보다는 필연적 혹은 경험적 자료의 선택이 우선시 되고 있다.

수문-수질 모델링에 있어 공간입력자료의 해상도 차이에 따른 모의결과의 불확실성은 DEM과 토지이용도 및 토양도의 해상도가 유출과 비점오염 부하량에 미치는 영향을 중심으로 많은 연구가 진행되어 왔다. Kalin *et al.*(2003)은 Iowa 유역에 대하여 KINEROS 모형을 이용하여 DEM 해상도 변화에 따른 유출량의 변화를 분석하였다. Vieux and Needham(1993)은 AGNPS 모형으로부터 입력자료의 격자크기 변화에 따라 유사량의 모의결과가 달라진다고 밝힌바 있으며, FizHugh and Mackay(2000)는 SWAT 모형을 이용하여 Wisconsin 유역에서 세밀한 소유역 구분은 유사량 모의결과에 44 % 저평가되는 결과를 가져온다고 지적하였다. Chaplot(2005)은 DEM 격자크기와 토양도 해상도가 SWAT 모형에서 유출과 NO₃-N, 유사량에 미치는 영향을 분석하였다. Mamillapalli *et al.*(1996)은 모형의 정확도 향상을 위해서는 공간자료의 이용 가능한 범위 안에서 유역특징을 잘 표현할 수 있어야 한다고 밝힌바 있다. 한편, 지금까지의 선행연구들은 유역면적과 DEM 격자크기의 변화, 단일 해상도의 토지이용도와 토양도의 격자크기 변화 등에 의한 수문-수질 평가 연구들을 수행해 왔다. 따라서 본 연구에서는 토지이용도를 중심으로 DEM과 토양도를 단일 해상도의 격자크기 변화가 아닌 고해상도(Fine), 중해상도(State), 저해상도(One)의 해상도 변화에서 오는 모의결과의 불확실성을 분석하고자 하였다. 수문-수질모의가 가능한 SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형(Arnold *et al.*, 1998)을 선정하여, 공간입력자료의 해상도 변화에 따른 유출량과 유사량 및 영양물질의 오염부하량에 대한 모의를 실시하였으며, 다음 Fig. 1은 본 연구를 수행하기 위한 연구 흐름도를 나타낸 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 모형의 개요

수문·수질모의를 위한 모형으로 미국 농무성(United States Department of Agriculture, USDA) 농업연구소(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT 모형을 선정하였다. SWAT 모형은 물리

적 기반의 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위해 개발된 모형으로 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모형으로 구성되어 있다(Arnold *et al.*, 1998). 이 중 수문 부모형에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 SCS(Soil Conservation Service) 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류모형(Kinematic Storage Model)을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 잠재증발산량을 산정하기 위하여 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법과 Penman-Monteith 방법을 제공하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 이용한다.

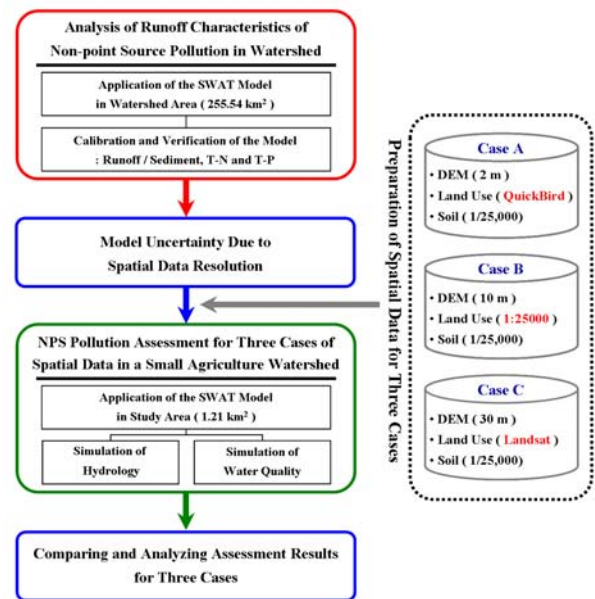


Fig. 1. The Analysis Flow Chart of This Study

2.1.1 물수지 방정식

SWAT 모형으로 어떤 유형의 문제에 대해서 연구하든지, 물수지는 유역 내에서 발생하는 모든 것 중에서 중요한 요소이다. 유사 또는 영양물질의 이동을 정확히 예측하기 위해서는 모형에 의해 모의되는 수문순환이 유역 내에서 발생하는 일들과 일치하여야 한다. 모형에서 수문순환을 정확히 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 다음

Eq. (1)과 같다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 는 최종의 토양수분량(mm), SW_0 은 i 일의 초기토양수분량(mm), t 는 시간(일), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), E_a 는 i 일의 증발산량(mm), W_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량(mm)이다.

본 연구에서는 지표유출량을 계산하기 위해 SCS-CN(Curve Number) 방법을 사용하였다. 이 방법은 경험모형으로, 다양한 토지이용과 토양형태 하에서 유출량을 추정하기 위한 일관성 있는 기준을 제공하기 위해 개발되었다(Rallison and Miller, 1981). SCS 유출곡선식(USDA-SCS, 1972)은 다음과 같다.

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

여기서, I_a 는 유출 이전의 지면저류, 차단과 침투를 포함하는 초기손실(mm)이다. 초기손실 I_a 는 보통 0.2S와 같으며 Eq. (2)에 대입하면

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \quad (3)$$

유출은 $R_{day} > I_a$ 일 때만 발생하며, S는 저류매개변수(mm)이다. 저류매개변수는 토양, 토지이용, 유역관리와 경사의 변화에 따라 공간적으로 변화하며 토양수분 함량에 따라 시간적으로 변화한다. 저류매개변수는 다음 식으로 정의된다.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (4)$$

여기서, CN은 일 유출곡선지수이다.

SCS 유출곡선지수는 토양의 투수성, 토지이용 및 선행토양함수조건(Antecedent Moisture Conditions, AMC)의 함수로서 I - 건조(위조점; Wilting Point), II - 보통습윤, III - 습윤(Field Capacity) 상태의 3가지 선행토양함수조건을 정의하였다. 선행함수조건 I에서 유출곡선지수는 가장 낮은 값을 나타내며 I과 III에서의 유출곡선지수는 다음 식에 의해 계산된다.

$$CN_I = CN_{II} - \frac{20 \cdot (100 - CN_{II})}{(100 - CN_{II} + \exp[2.533 - 0.0636 \cdot (100 - CN_{II})])} \quad (5)$$

$$CN_{III} = CN_{II} \cdot \exp[0.00673 \cdot (100 - CN_{II})] \quad (6)$$

여기서, CN_I 은 선행함수조건 I에서의 유출곡선지수, CN_{II} , CN_{III} 는 선행함수조건 II, III에서의 유출곡선지수이다.

침두유출율(Peak Runoff Rate)은 주어진 강우사상에서의 최대유출율을 의미한다. 침두유출율은 호우의 침식능력을 나타내며, 유수량 손실을 예측하기 위해 사용된다. SWAT에서는 다음 Eq. (7)와 같이 수정합리식(Modified Rational Method)을 이용하여 침두유출율을 계산한다.

$$q_{peak} = \frac{C \cdot i \cdot Area}{3.6} \quad (7)$$

여기서, q_{peak} 는 침두유출량(m^3/sec), C는 유출계수, i 는 강우강도(mm/hr), Area는 소유역 면적(km^2), 3.6은 변환상수이다. 유출계수는 호우마다 변하며, 다음 식으로 계산한다.

$$C = Q_{surf} / R_{day} \quad (8)$$

2.1.2 수정범용토양유실공식 (MUSLE)

SWAT 모형에서 강우와 유출에 의한 침식은 수정범용토양유실공식(MUSLE : Modified Universal Soil Loss Equation, Williams, 1975)에 의해 계산된다. MUSLE는 Wischmeier and Smith(1965; 1978)에 의해 개발된 범용토양유실공식(USLE : Universal Soil Loss Equation)의 수정버전이다. USLE에서는 강우에너지의 함수로서, 평균 연간 총 침식량을 예측하는 반면, MUSLE에서는 강우에너지 인자가 유출인자로 대체된다. 이로서 유수량 예측을 개선하고, 운송비가 불필요하게 되며, 각각의 호우사상에 대하여 적용이 가능해진다. 수정범용토양유실공식(Williams, 1995)은 다음 Eq. (9)와 같다.

$$Sed = 11.8 (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56} \quad (9)$$

$$K \times C \times P \times LS \times CFRG$$

여기서, Sed는 주어진 날의 유수량(ton), Q_{surf} 는 지표유출량(mm/ha), q_{peak} 는 침두유출율(m^3/s), $area_{hru}$ 는 HRU

면적(ha), K 는 USLE 토양침식성인자이다. Wischmeier and Smith(1978)는 단위포에서 측정된 특정 토양에 대해 토양침식성인자를 침식지표단위당 토양손실률로 정의하였다. C 는 USLE 피복 및 관리인자이며, P 는 USLE 관행인자, LS 는 USLE 지형인자이다. $CFRG$ 는 조립파편인자로서 다음 Eq. (10)에 의해 계산된다.

$$CFRG = \exp(-0.053 \cdot rock) \quad (10)$$

여기서, $rock$ 는 첫 번째 토양층의 암석비율(%)이다.

영양물질 추적을 위해 SWAT에서 사용되는 하천 내 동역학은 QUAL2E(Brown and Barnwell, 1987)로부터 채택되었다. 이는 하천 내 용해되거나 유사에 부착된 영양물질을 추적하고 토양입자에 붙어 있는 영양물질을 주수로로 통해 지표면 유출로 이송된다. 이러한 질소와 인은 HRU에서의 유사량과 관계가 있으며 유사량의 변화는 영양물질 부하량에 영향을 미친다.

2.2 모형의 적용성 평가

SWAT 모형은 보정자료가 없는 대규모의 미세측 유역에 적용하기 위한 목적으로 개발되었다(Arnold *et al.*, 1998). 그러므로 SWAT 모형에서 대부분의 매개변수는 GIS 인터페이스와 기상정보 및 모형 내부의 DB를 이용하여 자동적으로 추정할 수 있다(Fontaine *et al.*, 2002). 또한 몇몇 선행연구에서는 과거 연구결과로부터 개발된 GIS 자료를 이용하여 대규모의 다양한 유역에 보정 없이 수문해석을 성공적으로 수행한바 있다(Arnold *et al.*, 1999; Fontaine *et al.*, 2002). 그러나 실제로 이를 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 경험적 모형에서는 유출곡선지수(CN), 유출계수와 같은 매개변수를 직접적으로 찾을 수 없다. 그렇기 때문에 이러한 상황에서 모형의 정확성을 향상시키기 위해서는 매개변수에 대한 보정이 필요하다(Zhang *et al.*, 2007).

본 연구에서는 실측자료가 있는 경안천유역의 유역 출구점에서 유출 및 수질관련 매개변수를 보정하여 모형의 적용성을 평가한 후, 경안천 상류의 미세측유역인 농촌소유역에 대하여 관련 매개변수를 적용하였다. 보정결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수(R^2)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, $RMSE$)를 사용하였으며, 모형의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe(1970)가 제안한 모형 효율성계수(Model Efficient, ME)를 사용하였다. $RMSE$ 와 ME 는 다음 식으로 계산한다.

$$RMSE = \left\{ \left[\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2 \right] / N \right\}^{0.5} \quad (11)$$

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (12)$$

여기서, P 는 모의값, O 는 관측값, \bar{O} 는 관측값의 평균, $i = 1, 2, \dots, N$, 이때 N 은 총 모의기간이다.

2.3 대상유역 및 수문·수질 자료

본 연구에서는 Fig. 2(a)와 같이 팔당호 유입하천인 경안천의 경안수위관측소를 유출구로 하는 경안천유역을 대상유역으로 선정하였다. 유역면적은 약 255.44 km^2 이며, 유역 출구점에서의 유출 및 수질항목에 대해 모형의 보정 및 검증을 실시하였다. Fig. 2(b)는 경안천 상류의 농촌 소유역으로 유역면적은 약 1.21 km^2 이며, 농촌소유역을 대상으로 공간입력자료의 해상도 변화에 따른 수문·수질변화를 분석하였다. 경안천유역의 연평균 강우량은 1,200.5 mm이고 연 평균 기온은 10.9 $^{\circ}C$ 로 우리나라의 평균적인 기후 특성을 나타내고 있다. 행정구역상으로는 경기도 광주시와 용인시에 속하며, 유역 내 상수원 보호구역이 위치하고 있어 최근 도시화에 따른 유역의 수문·수질 변화에 대한 관심이 높은 지역이다(박종운 등, 2008). 특히, 수도권의 광역상수도 공급원인 팔당호는 상수 및 발전용수, 농업용수등을 공급하고 있는 매우 중요한 호소이다(최규석과 김환식, 1991).

2.4 입력자료 구축

본 연구에서는 공간입력자료의 해상도별 수문-수질 모의를 위해 Table 1과 같이 해상도 변화에 따라 3개의 Case별로 구축하였다. 토지이용도를 중심으로 고해상도(Case A, Fine), 중해상도(Case B, State), 저해상도(Case C, One)의 DEM, 토지이용도, 토양도를 구축하였으며, 각각의 입력자료의 구성은 다음과 같다.

먼저, 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)은 흐름방향, 흐름합산 등의 지형 전처리 과정을 수행하는데 중요한 입력자료로서, 함몰부 보간(Fill Sink) 등의 검수과정을 통한 DEM 제작이 이루어져야 한다. 본 연구에서는 공간입력 자료 중 가장 기본이 되는 DEM자료를 NGIS(National Geographic Information System)의 1/5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 2 m의 DEM으로 제작하였다(Fig. 3a). 또한 제작된 2 m DEM으로부터 Resample 작업을 통하여 10 m, 30 m DEM을 제작하였다.

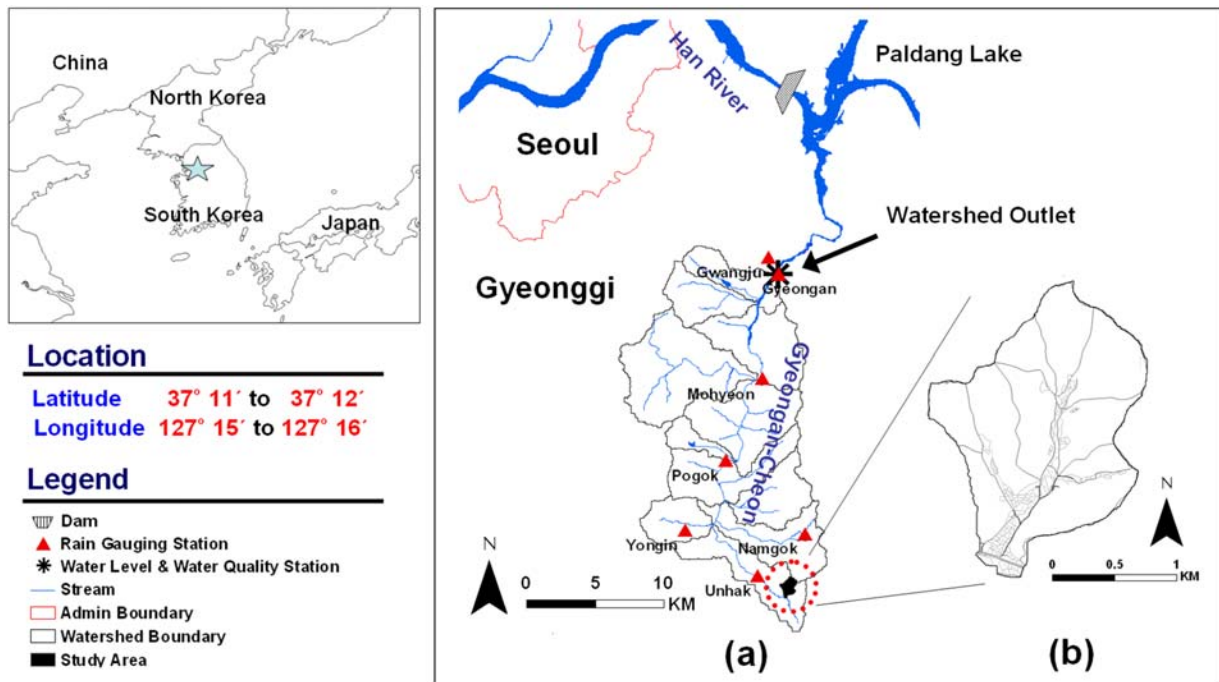


Fig. 2. Location and Boundary of the Upstream Reaches of (a) the Gyeongan–Cheon Watershed, (b) Study Area in the Han River, along with the Outlet Hydrologic, Water Quality, and Rain Gauging Station.

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 RPC(Rational Polynomial Coefficients) 정보가 있는 영상을 제공받아 분석에 사용하였다. QuickBird 영상으로부터 토지이용도의 제작은 기존 환경부, 건교부, USGS의 토지피복분류체계 및 현장조사를 통하여 QuickBird 영상으로부터 추출 가능한 정밀농업정보에 대한 항목을 결정하였으며, 정사보정된 QuickBird 영상을 스크린 디지털화 기법(On-Screen Digitizing Method)을 이용하여 총 21개 토지이용항목의 정밀토지이용도를 구축하였다(Fig. 3c). 환경부의 1/25,000 중분류 토지이용도는 IRS-1C, Landsat TM 위성영상으로부터 제작되었으며, 영상시기는 1999년~2001년이다. Landsat 토지이용도는 2004년 6월 3일 위성영상으로부터 경안천유역에 대해 총 7개 항목의 토지이용도를 제작하여 사용하였다.

SWAT 모형은 토양층을 중심으로 물수지를 파악하는 모형이므로 토양층 자료를 구축하는 것이 핵심이다(김남원 등, 2006). 이를 위해 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도와 1/50,000 개략토양도를

이용하여 미국 NRCS(The U.S. Natural Resources Conservation Service formerly the Soil Conservation Service) 토양분류 기준(Soil Survey Staff, 1996)에 따른 수문학적 토양그룹(Hydrologic Soil Group) A, B, C, D로 분류하였다(Fig. 3b). 그 결과, 두 토양도간의 토양통 구성 및 공간적 분포가 서로 상이한 것으로 분석되었다. 따라서 토양도의 해상도별 모의결과에 큰 의미가 없을 것으로 판단하고 1/50,000 토양도는 적용대상에서 제외하였다. 한편, 토양층의 개수 및 토양층별 깊이는 농업과학기술원의 자료를 사용하여 구축하였으며 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들은 Saxton *et al.*(1986)의 결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값(usersoil.dbf)을 부여하였다.

기상자료는 기상청에서 제공하는 수원, 양평, 이천관측소 자료를 사용하였으며, 모형의 보정을 위해 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 유역출구점(경안수위관측소)에서의 수위-유량 관계곡선식을 이용하여 수위자료(1999-2002)를 유량자료로 환산하여 사용하였다. 수질자료는 환경부에서 제공하는 유역 출구점에서의 월 평균 부유물질(Suspended Solids, SS) 및 총인(Total Phosphorus, T-P), 총질소(Total Nitrogen, T-N)의 농도자료(1999-2002)를 월 평균 유출량을 이용해 부하량으로 환산하였다.

Table 1. Preparation of Spatial Data for Three Cases

Case	Resolution	DEM	Land Use	Soil
A	Fine	2 m	QuickBird	1/25,000
B	State	10 m	1/25,000	
C	One	30 m	Landsat	

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 30 m DEM, Landsat 토지이용도, 1/25,000 토양도를 적용하여 실시하였다. 보정방법은 유역출구점에서의 1999년~2000년까지의 일별 유출량자료와 월별 수질자료를 이용하였으며, 2001년~2002년까지의 자료를 이용하여 검증하였다. 유출과 수질관련 보정 매개변수는 박중윤 등(2008)의 연구결과에 의한 경안천유역의 매개변수 및 보정값을 동일하게 사용하였다. 이 때 사용된 매개변수 및 보정값은 해상도별 수문-수질 모의를 위해 Fig. 2(b)의 미

계측 농촌소유역에 적용하였는데 이는 경안천유역 출구점을 대상으로 보정한 결과이므로 각각의 소유역을 대표하는 보정값으로 보기에 다소 무리가 있다. 따라서 상류의 소유역에 적용하였을 경우 검보정결과 그 이상의 오차를 내포하고 있으며 여기서 발생한 유출량의 오차는 오염 부하량에 영향을 미치지므로 Case별 수문-수질 모의결과에서는 다음 검보정결과에 대한 불확실성을 포함하고 있다.

Table 2는 보정 및 검증기간동안 실측치와 모의치의 일별 유출량을 비교한 것으로 목적함수별 통계결과는 $RMSE$ 가 3.82 mm/day, R^2 는 0.69, ME 는 0.59로 분석되었다. Fig. 4는 보정 및 검증기간동안의 실측치와 모의치의 수문곡선을 비교한 것이다. 전체적인 통계치와 수문곡선의 유출경향을 분석한 결과 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. Table 3은 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 tons/yr, 4.30 tons/yr, 0.70 tons/yr로 분석되었다. Fig. 5는 보정 결과에 따른 실측치와 모의치의 유사량 및 T-N, T-P 부하량을 비교한 것으로 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것으로 분석되었다.

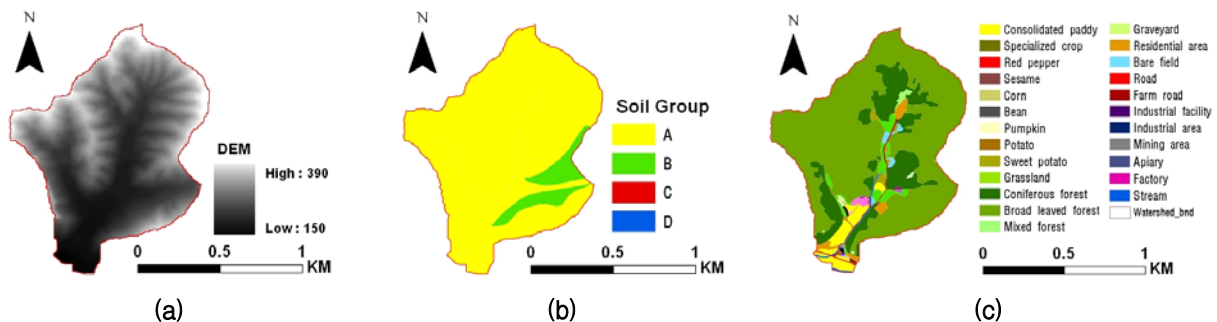


Fig. 3. Three Kinds of GIS Input Data for (a) 2 m Digital Elevation Model, (b) 1/25,000 Hydrologic Soil Group, (c) QuickBird Land use for NPS application

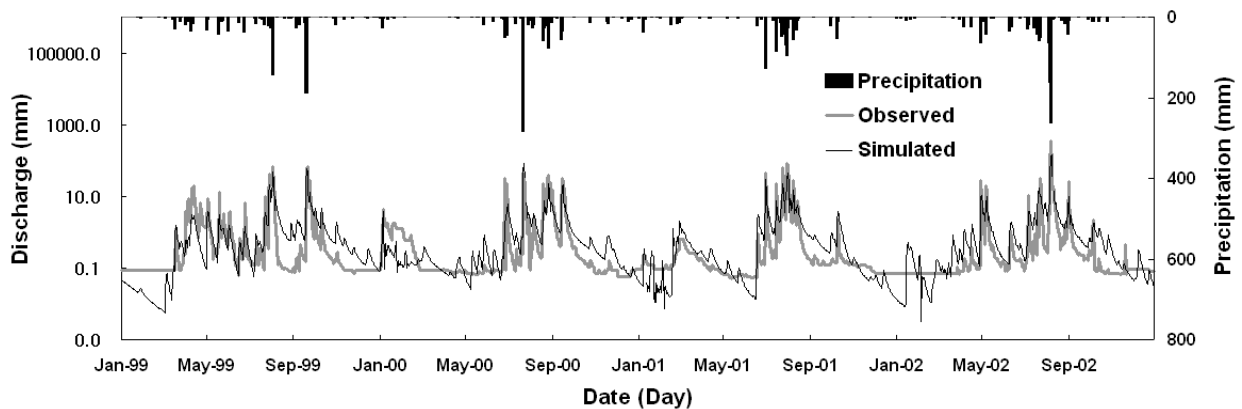


Fig. 4. Hydrograph Comparison between Simulated and Observed Daily Runoff Values During Calibration and Validation Period (1999-2002)

Table 2. Summary of Statistics for Daily Discharge for the Calibration (C) and Validation (V) Period

Year	Rainfall (mm)	Total Runoff (mm)		Runoff Ratio (%)		R^2	RMSE (mm/day)	ME	Note
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.				
1999	1296.8	781.4	638.0	60.3	49.2	0.73	2.24	0.72	C
2000	1108.0	617.4	559.9	55.7	50.5	0.59	2.59	0.36	C
2001	1118.1	677.4	543.2	60.6	48.6	0.73	3.35	0.63	V
2002	1463.5	930.6	801.4	63.6	54.8	0.71	7.10	0.63	V
Mean	1246.6	751.7	635.6	60.1	50.8	0.69	3.82	0.59	

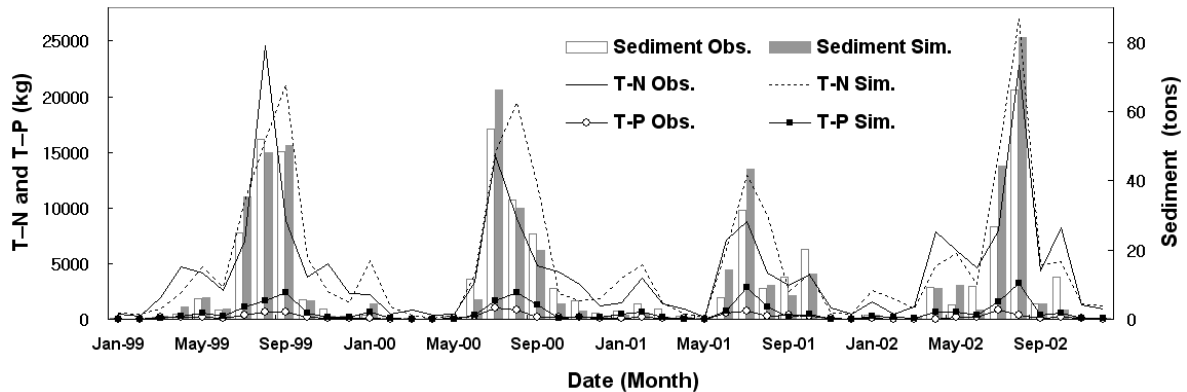


Fig. 5. Comparison between Simulated and Observed Monthly Sediment, T-N, and T-P Values During Calibration and Validation Period (1999-2002)

Table 3. Summary of Statistics for Monthly NPS Loads for the Calibration (C) and Validation (V) Period

(Unit : tons/yr)

Year	Sediment		T-N		T-P		R^2			RMSE			Note
	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Obs.	Sim.	Sed	T-N	T-P	Sed	T-N	T-P	
1999	145.6	153.9	65.8	69.2	2.79	7.34	0.97	0.55	0.93	3.30	4.57	0.63	C
2000	144.5	130.8	44.8	63.8	2.90	7.01	0.95	0.72	0.70	4.98	3.85	0.61	C
2001	90.7	75.5	36.2	60.9	2.66	6.65	0.64	0.72	0.63	0.03	5.16	0.69	V
2002	134.6	136.3	67.3	78.8	2.22	8.15	0.95	0.89	0.44	0.01	3.60	0.88	V
Mean	128.9	124.1	53.5	68.2	2.64	7.29	0.88	0.72	0.68	2.08	4.30	0.70	

3.2. 공간입력자료의 해상도별 민감도 분석

3.2.1 수치표고모델 (Digital Elevation Model, DEM)

지형공간자료에서 가장 유용한 자료 중에 하나는 수치표고이다. 고도의 공간적 분포를 표현하고 있는 DEM은 숫자배열로 이루어져 있으며, 유용한 수문학적 평가는 DEM에서 비롯될 수 있다. 이러한 DEM은 유역 경계와 하천망, 유역의 수문학적 특징들을 효율적으로 상세히 묘사하기 위해 사용될 수 있다(Bedient *et al.*, 2008). 이러한 이유로 인해 DEM 해상도는 SWAT 모형에서 유역경계추출과 하천망 생성, 소유역 분할에 영향을 미친다(Cotter *et al.*, 2003).

Table 4는 DEM 해상도가 유역특성에 미치는 영향을 정리한 것으로, DEM 해상도에 의한 고도(Altitude) 변화에는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만, 경사(Slope)에서 10 m와 30 m DEM의 최대, 평균, 표준편차는 2 m DEM 보다 낮게 평가되었다. 또한 DEM 해상도가 감소하면서, 유로장과 유역면적은 감소하였으며 하천의 평균경사는 증가하는 것으로 분석되었다.

3.2.2 토지이용도 (Land Use)

토지이용도는 수문해석 및 비점오염 평가에 있어 필수 정보 중에 하나이다. 토지이용 정보는 증발산, 침투, 지표유출 등의 수문학적 구성 요소들에 영향을 미치며, 이러한 토지이용의 영향은 유출량의 변화뿐만 아니라

Table 4. DEM Resolution Effects on Watershed Area and Topography

Characteristics		DEM Resolution		
		2 m	10 m	30 m
Altitude (m)	Min	150.0	150.0	150.0
	Max	390.0	387.5	369.8
	Mean	241.9	243.3	243.1
	SD	49.7	48.8	48.8
Slope (%)	Min	0.0	0.0	0.0
	Max	332.9	198.0	83.5
	Mean	52.4	50.8	43.8
	SD	30.8	25.5	18.0
Longest Channel Length (km)		2.131	2.006	1.890
Average Slope of Channels (m/m)		0.113	0.120	0.127
Watershed Area (km ²)		1.209	1.184	1.171

SD : Standard Deviation

유사량 및 질소와 인으로 대표되는 비점오염 부하량에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로 정확한 고해상도의 토지이용 정보는 유역에서의 수문-수질 평가에 있어 보다 신뢰할 수 있는 정보를 제공할 것이다.

해상도별 토지이용도는 2 m 해상도의 QuickBird, 10 m 해상도의 1/25,000, 30 m 해상도의 Landsat 토지이용도를 사용하였으며, Table 5와 같이 해상도별 토지이용도의 토지이용항목 및 면적을 비교하였다. 이러한 토지이용 정보는 SWAT 모형에 입력자료가 되는 CN값을 결정하기 때문에 SCS-CN 방법에 의한 유출량 계산에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 해상도별 토지이용도의 CN값을 비교분석하고자 1/25,000 토양도의 수문학적 토양군 정보를 이용하여 선행토양함수조건(Antecedent Moisture Content, AMC)에 따른 CN값을 면적가중법으로 산정하고 Fig. 6

과 같이 CN 분포도를 작성하였다. Table 6은 AMC 조건에 따른 유역평균 CN값을 비교한 것으로 QuickBird 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.

3.3 공간 입력자료의 해상도 변화에 따른 수문-수질 모의결과

3.3.1 수문모의 결과

모형의 검보정을 실시한 후, 1.21 km²의 농촌 소유역에 Case(A, B, C)별 DEM, 토지이용도, 토양도를 각각

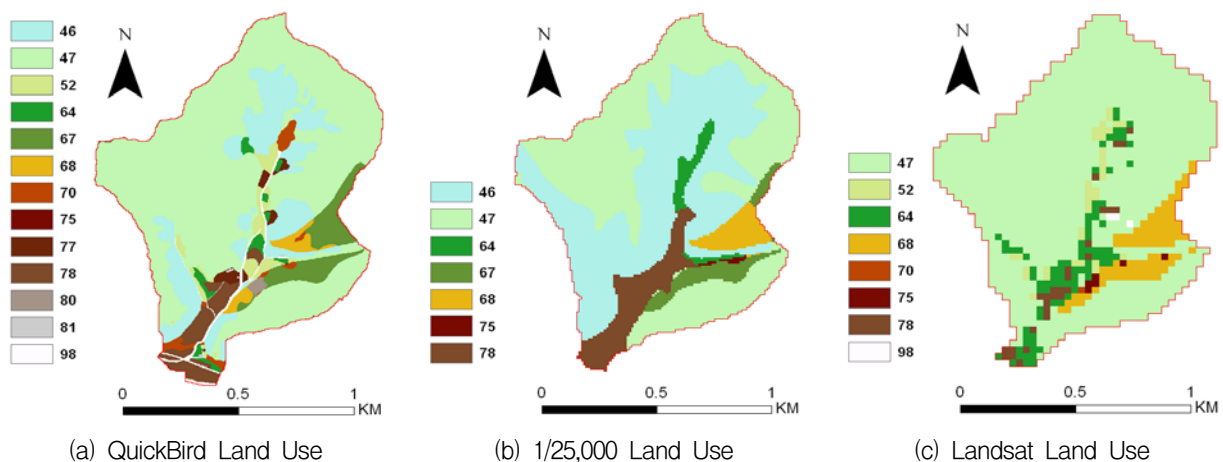


Fig. 6. SCS-CN Distribution from 1/25,000 Soil and (a) QuickBird Land Use, (b) 1/25,000 Land Use, (c) Landsat Land Use

Table 5. Classification Items and Area (km²) for 3 Cases of Land Use

Class	QuickBird		1/25,000*		Landsat	
	Items	Area	Items	Area	Items	Area
Agriculture	Paddy	0.049	Paddy Upland crop	0.095 0.031	Paddy Upland crop	0.025 0.081
	Specialized crop	0.009				
	Red pepper	0.001				
	Sesame	0.001				
	Corn	0.002				
	Bean	0.002				
	Pumpkin	0.001				
	Potato	0.001				
	Sweet Potato	0.001				
Total Area (%)	0.067 (5.6)	Total Area (%)	0.126 (10.6)	Total Area (%)	0.106 (9.1)	
Grass	Grassland	0.034	-	-	Grassland	0.033
	Graveyard	0.002	-	-	-	-
	Total Area (%)	0.036 (3.0)	Total Area (%)	(0.0)	Total Area (%)	0.033 (2.8)
Forest	Coniferous forest	0.212	Coniferous forest Broad leaved forest	0.520 0.539	Forest	1.029
	Broad leaved forest	0.839				
	Mixed forest	0.004				
	Total Area (%)	1.055 (87.2)				
Urban	Bare field	0.013	-	-	-	-
	Residential	0.019				
	Road	0.002				
	Farm road	0.009				
	Factory	0.001				
	Apiary	0.001				
	Total Area (%)	0.045 (3.7)				
Water	Stream	0.006 (0.5)	-	(0.0)	Stream	0.003 (0.2)
Total Area	1.209		1.184		1.171	

* : 1/25,000 land use data produced from IRS-1C and Landsat TM satellite image

Table 6. Summary of Watershed Characteristics and Average CN for Three AMC Conditions

Data Resolution		Hydrologic Soil Group (%)		Land Use (%)		CN Value			CN AMC II (%)	
Land Use	Soil	A	B	Pervious	Impervious	AMC I	AMC II	AMC III	> 60	< 60
QuickBird		92.5	7.5	97.4	2.6	31.6	51.4	71.3	17.0	83.0
1/25,000	1/25,000	92.4	7.6	100.0	0.0	31.2	51.0	70.9	17.7	82.3
Landsat		92.4	7.6	100.0	0.0	30.9	50.7	70.6	16.5	83.5

적용하여 공간 입력자료의 해상도 변화에 따른 수문-수질 모의를 실시하였다. 여기서, 토양도는 3.2.3절에서 언급했듯이 1/50,000 개략토양도를 제외한 1/25,000 정밀 토양도만을 사용하였으며, 모형의 보정에 사용된 매개변수와 보정값을 그대로 적용하여 모의하였다. 또한 모형의 입력 매개변수인 CN값을 3.2.2절의 결과를 토대로 입력하였다.

Table 7은 AMC-II 조건에서의 Case별 모의결과를 유역 출구점에서의 유출량과 유출률에 대해 정리한 것

이다. 모의결과 Case A의 평균 유출량은 28.8 mm로 Case B와 C의 28.4 mm, 27.8 mm 보다 각각 1.33 %, 3.39 % 증가하는 것으로 분석되었으며, HRU별 지표유출량을 해상도별로 살펴보면 Case A가 18.6 mm, B가 18.4 mm, C가 16.9 mm로 분석되었다. 또한 DEM 해상도에 의한 유역면적의 변화는 Eq. (7)에 의해 침투유출량의 변화를 가져오게 된다. 이는 Kim *et al.*(2007)이 HEC-HMS 모형을 이용하여 각 강우사상에 따른 토지 이용 해상도별 총유출량과 침투유출량을 비교한 결과와

Table 7. Summary of Runoff Simulated Results for 3 Cases of Map Scale under AMC II

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 (1.33)	27.3 (1.70)	27.8 (3.39)	26.7 (3.15)

() : Percent of decrease based on Case A

마찬가지로, 고해상도의 공간입력자료에 의한 CN값의 증가가 SCS-CN 방법에 의한 유출량 산정 에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

한편, 토지이용도뿐만 아니라 토양도는 수문학적 토양군에 의한 CN값을 결정하며 토양의 물리적 성질 등에 의한 지하수 유출 및 기저 유출에 큰 영향을 미치기 때문에 장기유출 모의 시, 토양도 변화에 따른 유출모의 결과를 살펴볼 필요가 있다. Chaplot(2005)은 본 연구와 비슷한 방법으로 SWAT 모형을 이용하여 DEM의 격자크기(20, 30, 50, 100, 200 m) 및 토양도의 해상도(1/25,000, 1/250,000, 1/500,000)별 유출량, NO₃-N, 유사량을 모의 하였다. 그 결과, 공간입력자료의 해상도가 증가함에 따라 유출량, NO₃-N, 유사량 모두 증가하는 것으로 분석되었다.

3.3.2 수질모의 결과

SWAT 모형에서 MUSLE식에 의한 유사량 및 영양물질의 오염 부하량을 산정하기 앞서, Table 8과 같이 Case별 DEM과 토지이용도의 해상도 변화에 따른 USLE 각 인자 값의 변화를 살펴보았다. 여기서, USLE 인자 중 관행인자 *P*는 경작형태에 따른 토양유실의 비로서 경사도에 따른 등고선 경작, 등고선 대상재배, 테라스 등고선 경작 형태로 분류되나 대상지역의 경작형태를 파악하기가 쉽지 않고 SWAT은 모든 HRU에 대해 경사도를 고려하지 않기 때문에 모형의 적용에 있어 *P*값은 고려하지 않았다. 본 연구에서는 한국건설기술연구원(1992)에서 제시한 토양통별 *K*값을 사용하였으며, 박경훈(2003)이 제시한 토지이용별 *C*값을 사용하였다.

HRU별 USLE인자 *K*, *C*, *LS*, *CFRG*의 범위와 면적

Table 8. Summary of Mean USLE Factors at the HRU Level for 3 Cases of Map Scale

Factors		Resolution		
		Case A	Case B	Case C
Spatial Data	DEM	2 m	10 m	30 m
	Land Use	QuickBird	1/25,000	Landsat
	Soil	1/25,000	1/25,000	1/25,000
Watershed	Watershed Area (km ²)	1.209	1.184	1.171
	Subwatershed	1	1	1
	Number of HRUs	48	19	19
USLE Factors	Mean <i>K</i> Factor	0.264 (0.011 ~ 0.290)	0.265 (0.011 ~ 0.290)	0.265 (0.011 ~ 0.290)
	Mean <i>C</i> Factor	0.020 (0.002 ~ 0.500)	0.020 (0.002 ~ 0.150)	0.021 (0.004 ~ 0.150)
	Mean <i>LS</i> Factor	0.026	0.025	0.022
	Mean <i>CFRG</i> Factor	0.986 (0.985 ~ 0.994)	0.986 (0.985 ~ 0.994)	0.986 (0.985 ~ 0.994)
	Mean <i>K</i> × <i>C</i> × <i>LS</i> × <i>CFRG</i>	0.135×10 ⁻³	0.131×10 ⁻³	0.121×10 ⁻³

() : Range of Variation for HRU

Table 9. Summary of NPS Loads Simulation Results for 3 Cases of Map Scale under AMC II

(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 (23.71)	33.77 (43.27)	5.10 (48.35)	0.79 (50.62)	29.29 (50.80)	4.26 (56.87)

() : Percent of decrease based on Case A

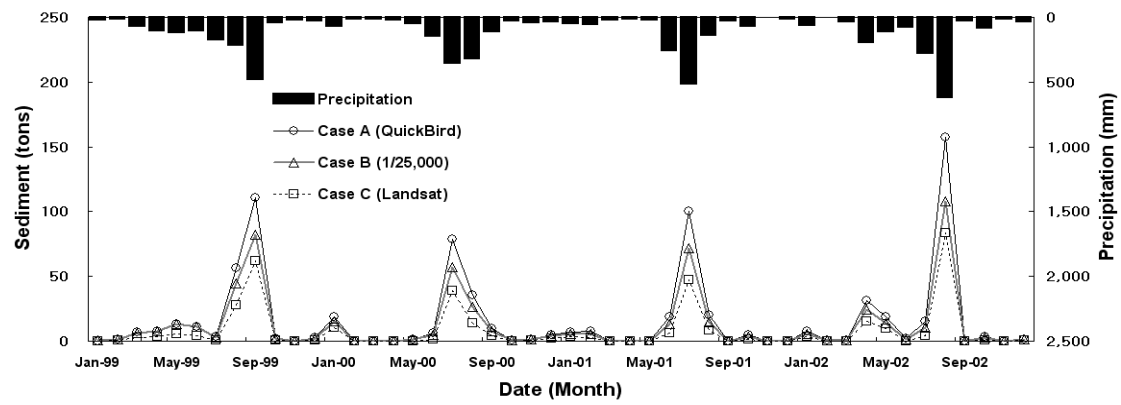
가중법에 의한 평균값을 분석하였다. 먼저, 토양도에 의한 평균 K 값과 $CFRG$ 값의 변화는 모든 Case에 대해 1/25,000 정밀토양도를 적용했기 때문에 큰 변화가 없었다. 또한 각각의 해상도별 토지이용도를 적용했을 때, 각 Case별 C 값의 범위는 달랐으나 평균 C 값은 Case A, B가 0.020, C가 0.021로 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다. 반면, DEM에 의한 평균 LS 값의 차이는 Case A가 0.026, B가 0.025, C가 0.022로 고해상도의 DEM으로 가면서 평균값이 증가하는 것으로 분석되었다. Eq. (9)에 의한 HRU별 $K \times C \times LS \times CFRG$ 를 계산한 결과, Case A, B, C의 평균값은 0.135×10^{-3} , 0.131×10^{-3} , 0.121×10^{-3} 이며, 값의 범위는 Case A가 $0.000563 \times 10^{-3} \sim 3.747 \times 10^{-3}$, B가 $0.000542 \times 10^{-3} \sim 1.081 \times 10^{-3}$, C가 $0.000953 \times 10^{-3} \sim 0.951 \times 10^{-3}$ 로 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 나타내는 결과이다. 이와 비슷한 연구결과로 Cotter *et al.*(2003)은 일반적으로 SWAT 모형의 결과값은 토양도, 토지이용도보다 DEM에 의한 영향이 더 크다고 하였다. 특히, Miller *et al.*(1999)은 본 연구지역과 마찬가지로 작은 소유역에서의 DEM 해상도는 모의결과에 더욱 민감하다고 밝힌바 있다. 또한 MUSLE에 의한 유사량과 그에 따른 영양물질의 오염 부하량은 지표유출량에 큰 영향을 받으므로, 토지이용도의 해상도 증가에 따른 CN 값의 증가는 지표유출의 증가로 이어지며 유사량과 영양물질의 오염 부하량에 영향을 미친다.

공간 입력자료의 해상도가 수질에 미치는 영향을 분석하기 위해 3.3.1절의 수문모의 방법과 마찬가지로 유역 출구점에서의 유사량 및 T-N, T-P 수질항목에 대

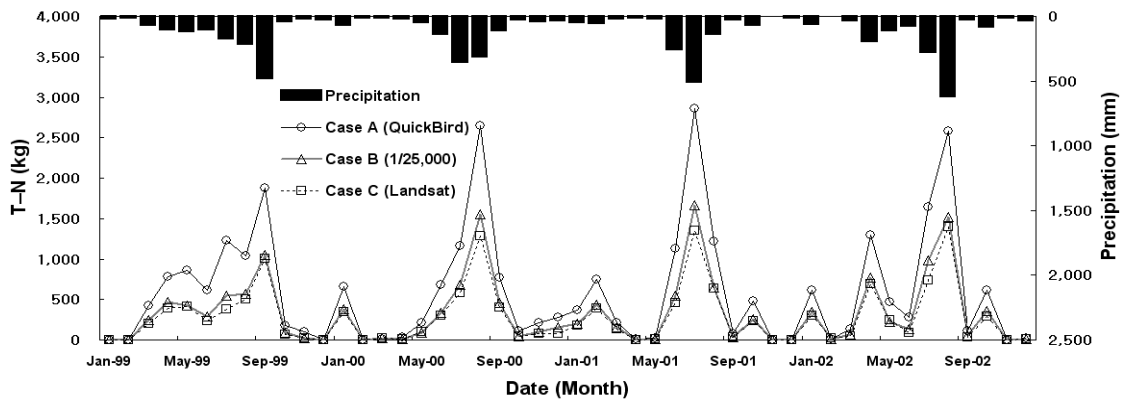
한 모의를 실시하여, Fig. 7과 같이 모의기간(1999년~2002년)동안의 해상도별 결과를 비교·분석하였다. 그 결과, 유사량은 강우시에 민감하게 반응하면서, Case A, B, C 순별로 높게 평가되었다. T-N, T-P 오염 부하량은 강우시와 비강우시 모두 민감하게 반응하였으며 유사량과 마찬가지로 Case A의 오염 부하량이 가장 큰 것으로 분석되었다. Table 9는 월별 수질 모의결과를 정리한 것이다. 비점오염원에 의한 유사량 및 T-N, T-P 오염 부하량의 결과는 Case A가 B에 비해 각 수질항목에 대하여 23.7 %, 43.3 %, 50.6 %, Case C에 비해서는 50.6 %, 50.8 %, 56.9 % 높게 평가되는 것으로 분석되었다. 각 해상도별 유사량의 차이는 T-N, T-P 오염 부하량에도 영향을 미쳤는데, 이러한 결과는 Table 8의 해상도별 USLE 인자값에서 오는 유사량 모의결과의 불확실성이 T-N, T-P 모의결과에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

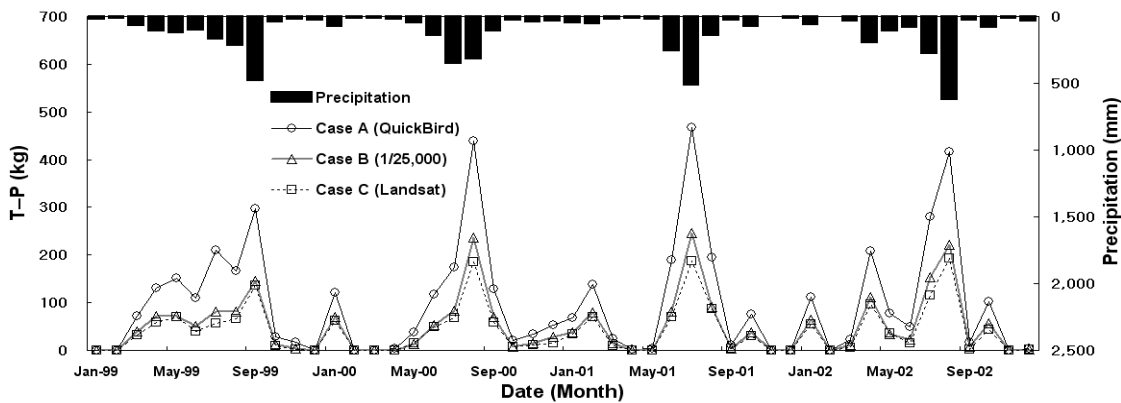
본 연구는 수문-수질모델링을 하는데 있어 공간입력자료인 DEM, 토지이용도, 토양도의 공간해상도가 모의결과에 미치는 영향을 비교·분석하고자, 경안천 상류의 농촌 소유역(1.21 km²)을 대상으로 고해상도 위성영상 및 다른 여러 해상도의 영상으로부터 농업토지이용도(QuickBird, 1/25000, Landsat)를 작성하고, 2 m, 10 m, 30 m 격자크기의 DEM과 1/25,000 토양도를 구축하여 3가지 Case(A, B, C)에 대한 공간입력자료를 구성하였다. GIS 기반의 수문-수질모형인 SWAT 모형에 적용함으로써 공간입력자료의 해상도에서 모의결과의 불확실성 및 해상도별 유출량 및 비점오염 부하량을 비교분석 하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.



(a) Sediment



(b) T-N



(c) T-P

Fig. 7. Comparison of NPS Loads for 3 Cases of Map Scale

1) DEM 해상도에 따른 유역특성의 변화를 분석한 결과, 해상도별 고도의 큰 변화는 없었으나 유역 최대 및 평균경사와 표준편차에서 2 m DEM이 10 m와 30 m DEM에 비해 저평가 되었다. 유역 면적은 해상도 증가에 따라 면적도 증가하는 경향을 보였다. 한편, 1/25,000과 Landsat 토지이용도의 토지이용항목은 4개와 5개로 분류되었으며, 고해상도 위성영상으로부터 작성된 QuickBird 토지이용도는 1/25,000과 Landsat 토지이용도에

서 분류되지 않았던 주거지 및 도로 등이 새로이 분류되는 등 총 21개의 토지이용항목으로 분류되었다.

2) 모형의 적용성 평가는 경안천유역(255.44 km²)에 대해 Landsat 토지이용도와 30m DEM, 1/25,000 토양도를 이용하여 유역 출구점에서의 유출량 및 수질항목에 대한 보정(1999~2000) 및 검증(2001~2002)을 실시하였다. 그 결과, 유출량에 대한 RMSE는 2.24~7.10(mm/day), R²는 0.59~0.73,

ME는 0.36~0.72로 모의치와 실측치의 유출량은 유의성이 있는 것으로 분석되었다. 유사량은 R^2 가 0.64~0.97로 높은 상관성을 보였으며, 영양물질은 0.44~0.93의 상관성을 보이는 것으로 분석되었다.

- 3) AMC-II 조건에서 Case A(QuickBird)의 유역평균 CN값은 51.4로 Case B(1/25,000)와 Case C(Landsat)에 비해 0.4, 0.7 증가하는 것으로 분석되었다. 모의기간 동안의 Case별 총 유출량을 비교한 결과, Case A의 유출량은 Case B와 C에 비해 1.33 %, 3.39 % 높게 평가되었다. 이러한 결과는 토지이용도에 의한 CN값의 영향이 가장 큰 것으로 분석되었다.
- 4) Case별 DEM과 토지이용도의 해상도 변화에 따른 USLE 각 인자 값의 변화를 분석한 결과, 토지이용도에 의한 C값의 변화는 거의 없었으나, DEM에 의한 LS값에서 차이를 보였다. Case별 수질 모의결과, Case A의 유사량 및 T-N, T-P 오염 부하량은 Case B에 비해 23.71 %, 43.27 %, 48.35 %, Case C에 비해 50.62 %, 50.80 %, 56.87 % 높게 평가되었는데, 유출량의 증가와 함께 USLE의 LS값에 의한 영향이 가장 컸던 것으로 분석되었다.

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. 또한 본 연구의 결과는 특정 소유역에 대한 결과로서 다양한 유역환경을 대표할 수 없기 때문에 일반적으로 적용하는 것에 한계가 있다. 그러므로 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 공간입력자료의 규모 및 해상도에 대한 이해와 적용을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 : 2-2-3)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김남원, 정일문, 원유승 (2006). "완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 481-488.
- 김성준 (2001). "원격탐사와 지리정보시스템에서 규모와 해상도 효과의 이해." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제34권, 제3호, pp. 76-86.
- 김성준, 이용준 (2007). "면적규모 및 공간해상도가 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용 예측결과에 미치는 영향." **한국지리정보학회논문집**, 한국지리정보학회, 제10권, 제2호, pp. 58-70.
- 박경훈 (2003). "GIS 및 RUSLE 기법을 활용한 금호강 유역의 토양침식위험도 평가." **한국지리정보학회논문집**, 한국지리정보학회, 제6권, 제2호, pp. 24-36.
- 박종윤, 이미선, 이용준, 김성준 (2008). "SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향 분석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제2B호, pp. 187-197.
- 채효석, 김성준, 고덕구 (2004). "원격탐사 자료를 이용한 미계측 유역의 수문정보 추출." **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제37권, 제3호, pp. 44-49.
- 최규석, 김환식 (1991). "팔당 상수원에 유입하는 오염물질 부하량과 유출 특성에 관한 연구." **환경과학논문집**, 제12권, pp. 151-171.
- 한국건설기술연구원 (1992). **댐설계를 위한 유역단위 비유사량 조사연구**.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Allen, P.M. (1999). "Continental-scale simulation of the hydrologic balance." *Journal of American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 35, No. 5, pp. 1037-1052.
- 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*, JAWRA, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Bedient, P.B., Huber, W.C., and Vieux, B.E. (2008). *Hydrology and floodplain analysis*, 4th Ed., Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.
- Brown, L.C., and Barnell, T.O. Jr. (1987). *The*

- enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual.* EPA document EPA/600/3-87/007, USEPA, Athens, GA.
- 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.
- Chen, E., and Mackay, D.S. (2004). "Effects of distribution-based parameter aggregation on a spatially distributed agricultural nonpoint source pollution model." *Journal of Hydrology*, Vol. 295, pp. 211-224.
- Cotter, A.S., Chaubey, I., Costello, T.A., Soerens, T.S., and Nelson, M.A. (2003). "Water quality model output uncertainty as affected by spatial resolution of input data." *Journal of American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 39, No. 4, pp. 977-986.
- FitzHugh, T.W., and Mackay, D.S. (2000). "Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model." *Journal of Hydrology*, Vol. 236, pp. 35-53.
- Fontaine, T.A., Cruickshank, T.S., Arnold, J.G., and Hotchkiss, R.H. (2002). "Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT)." *Journal of Hydrology*, Vol. 262, pp. 209-223.
- Goodchild, M.F., and Quattrochi, D.A. (1997). *Introduction: scale, multiscale, remote sensing and GIS.* In D. A. Quattrochi & M. F. Goodchild (eds), *Scale in remote sensing and GIS*, Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 1-11.
- Joao, E.M., and Walsh, S.J. (1992). "GIS implications for hydrologic modeling: simulation of nonpoint pollution generated as a consequence of watershed development scenarios." *Computer Environment and Urban Systems*, Vol. 16, pp. 43-63.
- Kalin, L., Govindarajua, R.S., and Hantush, M.M. (2003). "Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 276, pp. 89-111.
- Kim, S.H., Lee, M.S., Park, G.A., and Kim, S.J. (2007). "Application of QuickBird satellite image to storm runoff modeling." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 23, No. 1, pp. 15-20.
- Lohani, V., Kibler, D.F., and Chanat, J. (2002). "Constructing a problem solving environment tool for hydrologic assessment of land use change." *Journal of the American Water Resources Association*, JAWRA, Vol. 38, No. 2, pp. 439-452.
- Mamillapalli, S., Srinivasan, R., Arnold, J.G., and Engel, B.A., (1996). "Effect of spatial variability on basin scale modeling." *To be presented at the Third International NCGIA Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Sante Fe, New Mexico, January, 21-25.
- Miller, S.N., Guertin, D.P., Kamran, H.S., and Goodrich, D.C., (1999). "Using high resolution synthetic aperture radar for terrain mapping: Influences on hydrologic and geomorphic investigation." *Proceedings of Wildland Hydrology*, AWRA Summer Specialty Conference, Bozeman, Montana.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.E. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Park, J.Y., Lee, M.S., and Kim, S.J. (2007). "Analysis of non-point source pollution loading in a small rural watershed using high spatial resolution image." *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing (ISRS) 2007*, Jeju Island, South Korea, 31 Oct. ~ 2 Nov., CD-ROM.
- Rallison, R.E., and Miller, N. (1981). *Past, present and future SCS runoff procedure.* In V. P. Singh (ed.), *Rainfall runoff relationship*. Water Resources Publication, Littleton, CO., pp. 353-364.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. (1986). "Estimating generalized soil-water characteristics from texture." *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 50, No. 4, pp. 1031-1036.
- Soil Survey Staff (1996). *National soil survey handbook*, title 430-VI, USDA Natural Resources Conservation Service, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.
- USDA Soil Conservation Service (1972). *National Engineering Handbook*. Section 4 Hydrology 1972 (Chapters 4-10).
- Vieux, B.E., and Needham, S. (1993). "Nonpoint-pollution model sensitivity to grid-cell size." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, No. 2, pp. 141-157.
- Williams, J.R. (1975). *Sediment-yield prediction with*

- universal equation using runoff energy factor.* In present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, ARS-S-40, USDA-ARS.
- Williams, J.R. (1995). *The EPIC model*, In Computer models of watershed hydrology, Singh, V. P., (ed.), Chapter 25: pp. 909-1000, Water Resources Publications.
- Wilson, J.P. (1996). "GIS-based Land Surface/Subsurface Modeling: New Potential for New Models?" *NCGLA Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, New Mexico, January 21-25.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1965). *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains*, Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*, Agriculture Handbook 282, USDA-ARS.
- Zhang, X., Srinivassan, R., and Hao, F. (2007). "Predicting Hydrologic response to climate change in the Luohe river basin using the SWAT model." *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ASABE, Vol. 50, No. 3, pp. 901-910.
- (논문번호:08-48/접수:2008.04.03/심사완료:2008.09.30)