

HyGIS-SWAT을 이용한 토지피복도에 따른 유출부하 평가

김주훈^{1*} · 김경탁¹

Estimation of Flow Loads for Landcover Using HyGIS-SWAT

Joo-Hun KIM^{1*} · Kyung-Tak KIM¹

요 약

본 연구는 HyGIS-SWAT 모형을 이용하여 환경부의 대분류/중분류에 따른 유출부하 특성을 평가하고, 토지피복변화에 따른 유출부하 특성을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다. 대분류와 중분류 토지피복변화는 두 유역 모두 시가지 지역과 농업지역이 팽창하고 산림지역이 감소하는 것으로 분석되어 현재 지속적으로 도시화가 확대되는 추세를 반영하고 있는 것으로 판단된다. 분류항목특성에 따른 분석결과는 무심천유역의 경우 첨두유출은 상승하였고, 연중유출량은 감소하는 것으로 분석되었다. 구축시기에 따른 특성 분석결과는 갑천유역의 경우 첨두유출은 감소하고, 총유출은 증가하는 것으로 나타났다. 토지피복변화 시나리오는 도시화 확대와 농업지역 확대의 3가지 시나리오를 적용하여 분석하였다. 분석결과 도시화 및 농업지역 확대 시나리오 모두 유출 및 유사농도가 증가하는 것으로 분석되었다.

주요어 : HyGIS-SWAT, 오염총량제, 토지피복도, 유출, 유사농도

ABSTRACT

This study estimates the characteristics of flow loads by classification items of the Ministry of Environment and by land cover change using HyGIS-SWAT. The result of analyzing the land cover change using the classification items shows that the urban area and the farmland area in Mishim-cheon and Gap-cheon are expanding while the forest area is decreasing. The result of analyzing the characteristics of classification items shows that peak discharge increases and total yearly discharge decreases in Mushim-cheon. The result of analyzing the characteristics by data-construction period shows that peak discharge decreases but total discharge increases in Gap-cheon. Three land cover change scenarios are applicable to the expansion of urban area and farmland

2011년 3월 3일 접수 Received on March 3, 2011 / 2011년 4월 5일 수정 Revised on April 5, 2011 / 2011년 4월 27일 심사완료 Accepted on April 27, 2011

¹ 한국건설기술연구원 수자원연구실 Water Resources Dept., Korea Institute of Construction Technology(KICT)

* 연락처 E-mail : jh-kim@kict.re.kr

area. According to the result of application, urbanization influences and Farmland area expansion influences increase peak discharge, total yearly discharge and sediment concentration.

KEYWORDS : *HyGIS-SWAT, TMDL, Landcover, Discharge, Sediment Concentration*

서 론

오염총량관리제는 과학적 바탕위에서, 수질 관리의 효율성을 제고하고, 각 경제 주체들의 책임성을 강화하여, 행정목표(목표수질)를 적기에 달성하고자 하는 제도이다(환경부, 2004). 이는 하천구간별 목표수질을 정하고, 목표수질 한도내에서 지역과 배출원에 오염물질 배출총량을 할당하여 목표수질을 달성·유지하기 위한 오염물질의 허용총량을 산정하여 “환경과 개발”을 함께 고려하는 지속가능성을 확보할 수 있는 핵심적 유역관리체도로써 지자체에서 배출량을 줄인 양만큼 해당지역 개발용량이 늘어나게 되므로 수질보전을 위한 노력 자체가 해당 지자체의 개발 인센티브가 되는 제도이다.

오염총량관리제는 우선 목표수질에 의한 총량관리단위유역을 소유역으로 구분한다. 각 소유역에 대하여 오염원 조사 및 수계환경 자료 등을 수집하고 수질모델링으로 소유역별 할당부하량을 계산한다. 이를 바탕으로 기초지자체별 오염부하량을 할당한다. 이때에 소유역 및 기초지자체별 오염부하량을 할당하고자 할 때 수질모델링을 통해 각 소유역 또는 기초지자체별 기준배출부하량을 할당하게 된다(환경부, 2007).

모델링 기법은 강우-유출 관계의 해석뿐만 아니라, 오염물질의 거동을 해석하고 유역의 다양한 물리적 특성과 그 변화를 반영함으로써, 다양한 강우사상과 유역조건에 따른 유출현상을 규명할 수 있는 장점이 있다. US EPA(2005)에서는 오염총량관리를 위해 사용할 수 있는 64개 모형들을 대상으로 모의 가능 항목, 시공간적 적용 한계, 가정, 장단점, 입력자료 등 여러 세부적인 내용들을 비교 평

가하여 목적에 맞는 적절한 모형의 선택 기준과 적용 사례 등을 기술하고 있으며, 유역 TMDL 개발을 위한 핸드북(US EPA, 2008)에서는 이용되는 모형들의 예로 AGNPS/AnnAGNPS, GWLF, HSPF, LSPC, SWAT, SWMM 등을 제시하고 있다.

국내에서 오염물질의 거동을 모의하기 위해 사용한 모델들은 2000년대 초반까지만 해도 산림지역이나 농업지역을 포함하는 소규모 하천유역을 대상으로 AGNPS나 AnnAGNPS가 가장 많이 적용되어 왔으나, 최근에는 HSPF 및 SWAT의 적용을 통해 소규모 유역에서부터 다목적댐 상류나 수계단위의 대규모 유역까지 폭넓게 적용해 오고 있다(김철겸과 김남원, 2008). 특히, SWAT은 2000년대 후반부터 유출해석은 물론, 유역 유사량 및 오염부하량 등 수자원 분야 전반에 걸쳐 다양하게 활용되고 있으며(김철겸, 2010), Arnold(2010)에 의하면 SWAT모형의 개발과 적용 관련해서 저널로 출판된 수가 600건이 넘는다고 발표하였다.

본 연구는 오염총량관리제의 모델링에 적용할 수 있는 SWAT 모형에 대하여 모형의 기본 입력자료가 되는 토지피복도의 특성을 평가하기 위하여 HyGIS-SWAT 모형을 적용하여 환경부의 대분류/중분류의 분류항목 및 구축시기에 따른 유출부하 특성을 평가하고, 토지피복변화(토지계 오염원 발생부하량 변화)에 따른 유출부하 특성을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다.

연구대상 유역

연구대상유역으로는 금강유역 중 도시지역인 청주 무심천 유역과 대전의 갑천유역을 대상으로 적용성을 평가하였다. 두 유역 모두

상류지역은 산림지역 및 농경지 지역이고 중하류로 내려오면서 대규모의 도시지역이 형성되어 있는 지역이다(그림 1).

청주시의 중심을 관류하는 무심천은 청원군 남일면과 낭성면의 경계에 있는 선도산에서 발원하여 곳곳에 범람원을 형성시키면서 금강의 제1지류인 미호천과 합류하는 지방하천으로 국립환경과학원의 수질측정지점을 기준으로 유역면적이 약 198km²정도이고, 환경부의 중분류 토지피복도 분석에 의하면 산림지역이 47.2%로 가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 다음으로 농경지가 26.9%, 그리고 시가화/건조지역이 약 17%를 차지하고 있어 다른 유역에 비해 비교적 도시화 비율이 높은 지역이다.

갑천은 유역의 최남단 지점인 충청남도과 전라북도의 도경계에 있는 대둔산(EL. 877.7m)에서 발원하여 북서쪽으로 유하하다가 두계천, 금곡천, 매노천과 차례로 합류한다. 이후 대전광역시 부근에서부터는 북향으로 유향을 바꾸어 대전광역시를 관통하여 흐르며, 유성천과 합류하고, 갑천의 제1지류인 유등천과 합류한 후 대전광역시의 경계를 벗어나면서 금강으로 유입된다. 갑천 유역의 경우에도 금강홍수통제소의 회덕관측소를 기준으로 약 609km²의 유역면적을 가지며, 산림지역이 59.8%, 농업지역이 15.8%, 그리고 도시지역이 15.6%를 차지하고 있다.

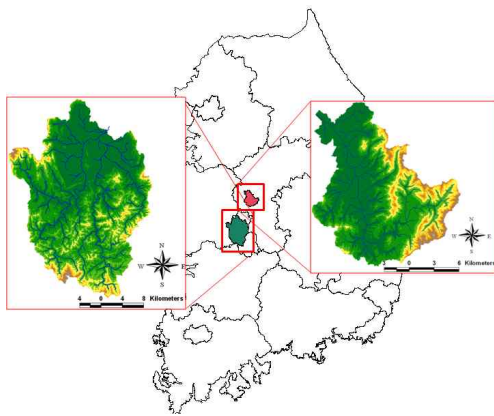


FIGURE 1. 연구대상지역

자료 처리

1. HyGIS-SWAT 입력자료 생성

1) 지형자료

수자원과 관련된 모형의 모의에 이용되는 지형자료는 지표면 유출 및 하도추적 등은 지표면의 투수성 정도, 경사도 등 지표면과 하천의 지형학적 특성이 많이 반영된다. 본 연구에서는 환경부의 대분류 토지피복도(분류항목 7, 제작시기 2001), 중분류 토지피복도(분류항목 23, 제작시기 2007)를 이용하여 분류항목별 특성, 제작시기별에 따른 분석 등에 이용하였고, 토양도는 SWAT 모형 실행과정 중 토양의 물리화학적 성질을 결정해 주는 입력자료로서 농업과학기술원의 정밀토양도 자료를 이용하였다.

2) 소유역 분할

HyGIS-SWAT 모형에서 소유역 구분은 수치고도모형인 DEM으로부터 Flow direction과 Flow accumulation을 계산하여 하천망을 생성시킨 후 유역의 최종 출구점을 Outlet으로 지정하여 분할하게 된다. 분할된 소유역과 각 소유역에 대한 주하천 길이를 계산하여 SWAT의 입력자료로 이용된다.

무심천유역의 경우 수질오염총량관리상의 “세유역”을 중첩시킨 후 세유역 말단지점에 소유역 출구를 지정하여 “세유역”과 유사하게 유역을 분할하였다(그림 2). 갑천유역의 경우에는 금강홍수통제소에서 관할하는 수위 관측소와 주요지류의 합류점을 대상으로 소유역을 분할하였다(그림 3).

3) 강우 및 기상인자

SWAT 모형에서는 강우, 풍속, 기온, 상대습도, 일사량 등의 기상자료를 입력하여 유출 및 증발산 등의 수문성분을 계산하게 되고, 또한 유사생성 및 유사유출, 그리고 각종의 영양염류 등에 대한 모의를 수행하게 된다.

본 연구에서는 무심천유역에 대해서는 청주

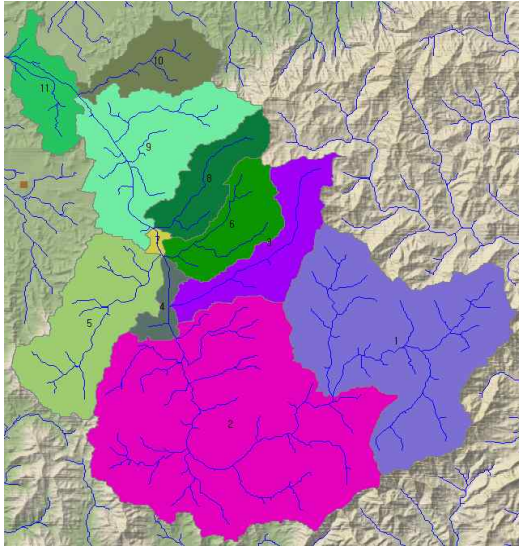


FIGURE 2. 무심천 유역 소유역 분할

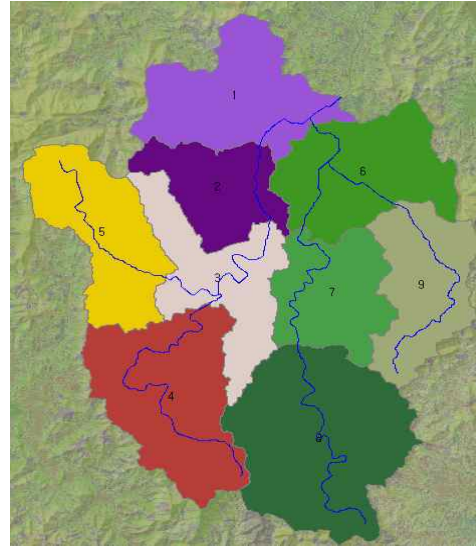


FIGURE 3. 갑천 유역 소유역 분할

기상관측소의 일강수량, 풍속, 기온, 상대습도와 일사량 자료를 이용하였고, 유출량 검증은

위해서는 금강홍수통제소에서 운영하는 청주 유량관측소 자료를 이용하였다. 갑천유역의

TABLE 1. 수문 및 기상자료 구축

유역명	관측소명	관측소 코드	기상, 수문자료	자료기간
무심천	청주기상대	30111131	일강수량 일평균 풍속 일평균 기온 일최고 기온 일최저 기온 일평균 상대습도 수평면일사량	2004.01.01. ~ 2010.10.31.
	금강홍수통제소(청주)	30011645	일유량	
	대전기상청	30091133	일평균 풍속 일평균 기온 일최고 기온 일최저 기온 일평균 상대습도 수평면일사량	
갑천	금강홍수통제소(신대)	30094010	일강우량	
	금강홍수통제소(회덕)	30094020	일강우량	
	금강홍수통제소(방동)	30094030	일강우량	
	금강홍수통제소(유성)	30094040	일강우량	
	금강홍수통제소(인동)	30094050	일강우량	
	금강홍수통제소(회덕)	3009680	일유량	

경우 기상자료는 대전 기상청의 자료를 이용하였고, 강수량 자료는 금강홍수통제소의 신대, 회덕, 방동, 유성, 인동 우량관측소 자료와 회덕 유량자료를 이용하였다. 이를 정리하면 표 1과 같다.

2. 모형 검보정

매개변수 보정방법에는 크게 시행착오법, 최적화기법에 의한 자동보정법, 그리고 이 두 가지를 병행하는 방법이 있다. SWAT과 같이 보정해야 할 매개변수가 많고 복잡한 모형에서는 여전히 시행착오법이 유용하게 적용되고 있다.

본 연구에서는 시행착오법에 의해 각 매개변수의 민감도 분석 결과를 바탕으로 단계별 변화에 따라 보정을 수행하였다. 시행착오법은 유출량에 대하여 매개변수를 보정한 후 유사관련 매개변수에 대하여 순차적으로 수행하였다. SWAT 입출력파일 문서(Neitsch *et al.*, 2004)는 각 매개변수가 위치하는 입력파일과 매개변수의 적용되는 범위에 대하여 간략히 설명하고 있다.

1) 유출량 검보정

SURLAG (Surface runoff lag coefficient)는 도달시간이 1일이 넘는 대유역

에서는 강우가 발생한 날에 발생한 지표유출의 일부만이 그날 내에 하도에 도달한다. 즉, 지표유출이 하도에 도달하는데 하루 이상이 걸리는 경우가 많다는 뜻이다.

기저유출 감수계수(ALPHA_BF, Baseflow alpha factor)는 함양변화에 반응하는 지하수량의 직접적인 지표이다. 함양에 느리게 반응하는 곳은 0.1~0.3, 빠르게 반응하는 곳은 0.9~1.0의 값을 갖는다. EPCO(Plant uptake compensation factor)는 특정일에 발생하는 수분흡수(water uptake)량은 식물이 증산에 필요한 물의 양과 토양내 가능한 물의 양의 함수이다. 토양 상부층에 잠재 수분흡수(potential water uptake)를 충족할 물이 없는 경우 사용자는 그 물을 하부층에서 사용하도록 할 수 있다. EPCO가 1.0에 가까워지면 모형은 하부층의 많은 물을 써서 water uptake 수요를 충족한다. 반대로 0.0에 가까워지면 원래의 깊이에 따른 분포에 변화를 주지 않는다.

무심천 유역의 경우 그림 4와 같이 매개변수 보정기간은 2006년도 청주 유량자료를 이용하여 보정하였고, 보정된 매개변수를 이용하여 2010년의 자료를 이용하여 검증하였다. 무심천유역의 유출량 관측값과 모의값의 보정은 그림 5 및 그림 6에서와 같이 매개변수 보

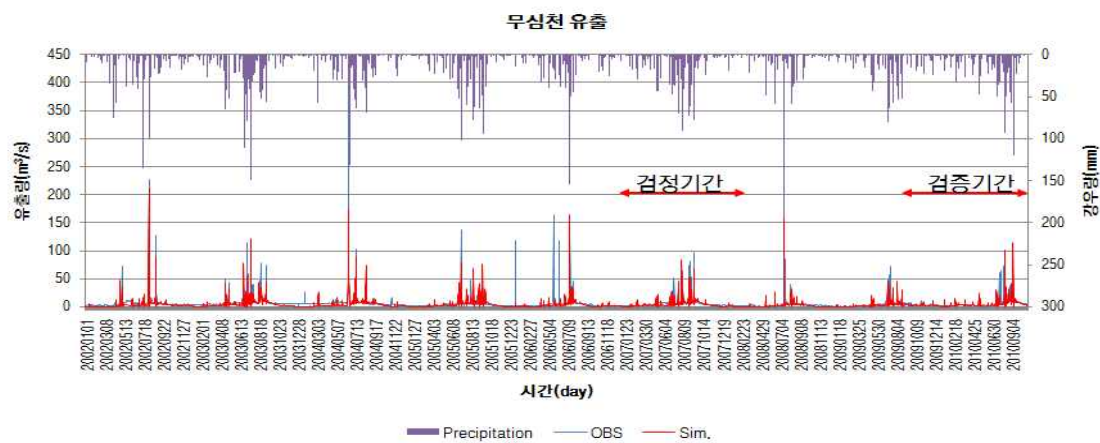


FIGURE 4. 무심천 유출량 검보정 결과

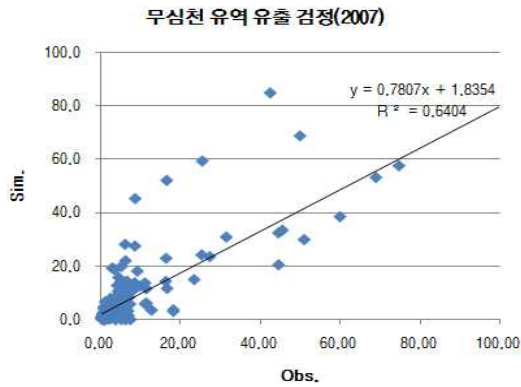


FIGURE 5. 유출 매개변수 검정(무심천)

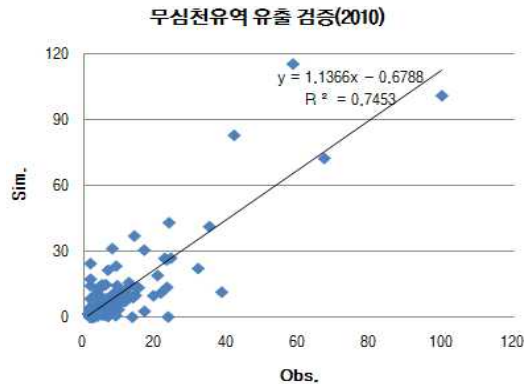


FIGURE 6. 유출 매개변수 검증(무심천)

정기간동안의 r^2 은 0.64이었고 검정기간의 r^2 은 0.75였다.

갑천 유역의 경우 그림 7과 같이 매개변수 보정기간은 2006년도 회덕 유량자료를 이용하여 보정하였고, 보정된 매개변수를 이용하여 2007년의 자료를 이용하여 검증하였다.

갑천유역의 유출량 관측값과 모의값의 보정은 그림 8 및 그림 9에서와 같이 매개변수 보정기간동안의 r^2 은 0.81이었고 검정기간의 r^2 은 0.71로 모의 결과가 관측값을 잘 반영하

고 있음을 알 수 있다.

2) 유사 검보정

국내에서 현재까지 수집되고 있는 유사 및 침식량 관련 관측자료는 특정 시험유역 및 시험하천에서의 단기간의 강우사상에 관한 것이 대부분이며, 환경부에서 2004년부터 약 8일간격으로 관측하고 있는 자료는 유사량이 아닌 부유물질(SS)을 대상으로 하고 있기 때문에 실제 유역에서 발생되어 하천으로 유입되는 유사량에 대한 직접적인 관측자료가 거의

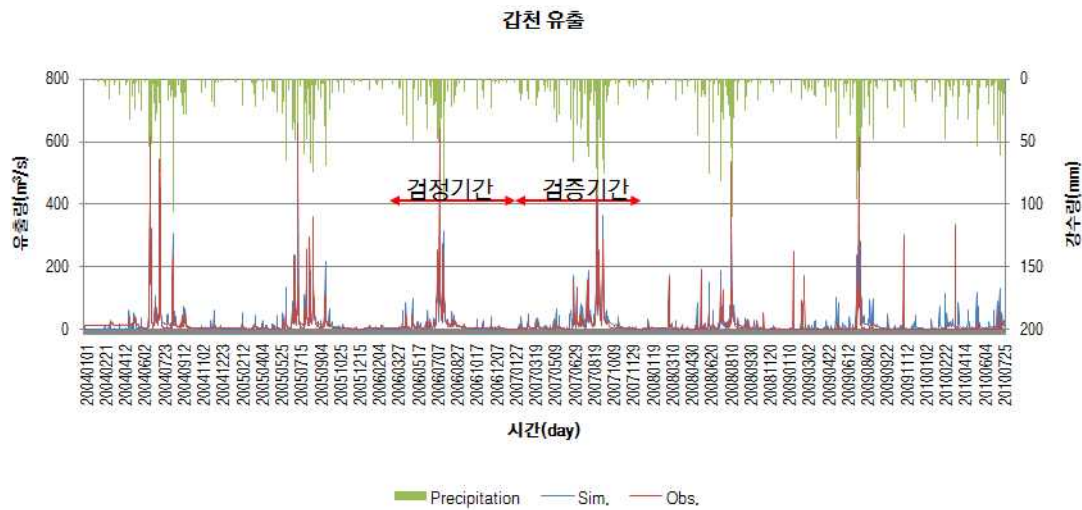


FIGURE 7. 갑천 유출량 검보정 결과

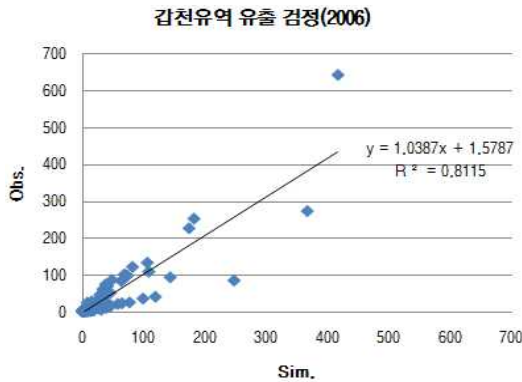


FIGURE 8. 유출 매개변수 검정(갑천)

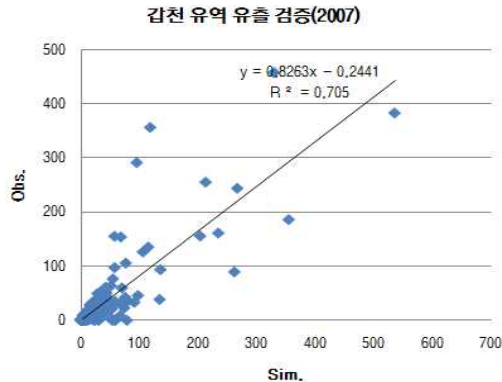


FIGURE 9. 유출 매개변수 검증(갑천)

없는 실정이다.

Kim *et al.*(2007)은 ‘5-day window’ 란 방법을 제안하였다. 이는 비연속적으로 측정되는 수질 관측치와 연속적으로 모의되는 모형 결과치와의 비교를 위해 수질 측정 전후 5일 간의 모의결과 범위(5-day window, 5일 창)에 관측치가 얼마나 포함되는가를 분석하여 7가지 항목에 대한 기준에 의해 관련 매개변수를 보정하는 방법이다(Kim *et al.*, 2007). 이때 5일이라는 시간적 설정은 이 방법을 제안한 연구자들의 과거 경험으로부터 얻어진 것으로, 국내에서는 고재영 등(2007)이 농촌 유역인 경기도 화성의 발안저수지 유역에서의 대장균 모의에 ‘7일 창(7-day window)’을 이용하여 보정을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 ADJ_PKR(소유역에서 유사추적(sediment routing)을 위한 침투율 조정

계수)과 PRF(주하도에서 유사추적을 위한 침투율 조정 계수)를 이용하여 유역에서 발생하는 유사량을 조절하고, SPCON과 SPEXP(하천 유사추적에서 유사억제량 계산을 위한 선형 및 지수 매개변수)를 이용하여 하천의 운송능력을 조절함으로써 하천으로 유입된 유사의 침식과 퇴적현상을 고려하였으며, CH_EROD(Channel erodibility factor)와 CH_COV(Channel cover factor)를 통해 하천내에서 침식되는 유사량을 조절하여 각 소유역 말단에서 모의되는 유사량을 관측값에 근접하도록 보정하였다. Kim *et al.*(2007)이 제시한 검보정 적합도 기준에 대하여 고재영 등(2007)이 수정한 표 2의 기준에 따라 적합도 검정을 실시하였다. 평균값, 중앙값, 기하평균값 등은 모두 적합한 것으로 평가되었으나 ‘7-day window’의 경우 적합도에 미치

TABLE 2. 유사 검정

Statistics	Criteria	검정		검증		Y/N	
		갑천	무심천	갑천	무심천	갑천	무심천
average	±100%	12.6%	76.8%	12.6%	69.1%	○	○
median	±100%	82.1%	36.2%	82.1%	35.9%	○	○
Geometric mean	±100%	86.3%	11.9%	86.3%	0.5%	○	○
7-day range	>70%	51.4%	57.5%	30.6%	54.5%	△	△
7-day max		31.4%	30.0%	16.7%	40.9%		
7-day min		17.1%	12.5%	52.8%	4.5%		

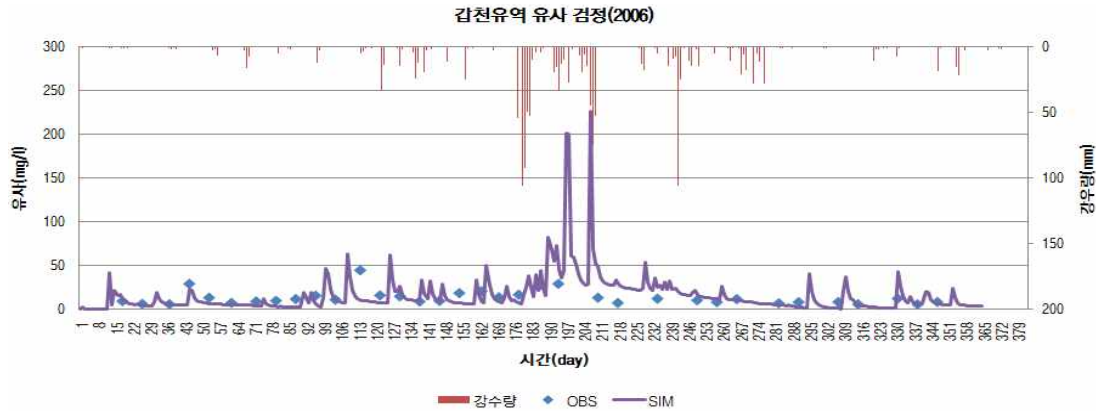


FIGURE 10. 유사검정(갑천)

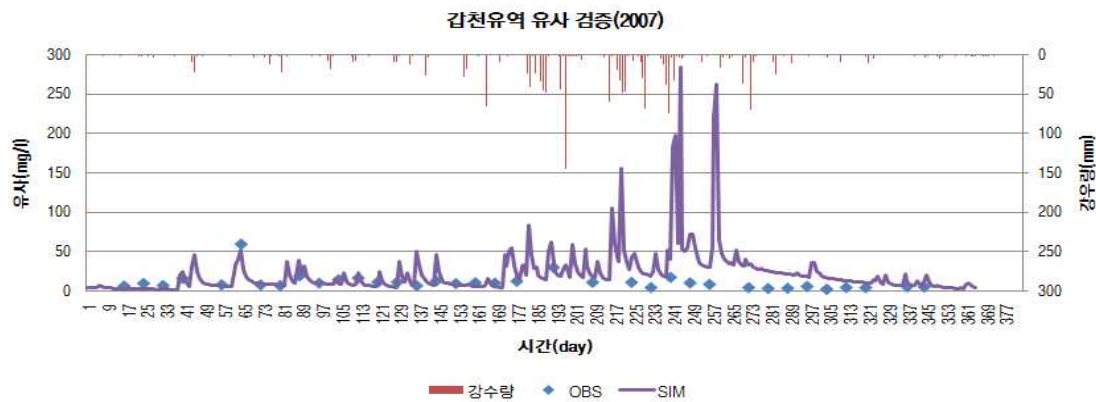


FIGURE 11. 유사검증(갑천)

지 못하였다. 관측값이 참값이라는 전제하에 매개변수를 조정하였으나 일부 관측값의 경우 물리적인 의미가 다르게 해석될 수 있는 자료가 포함되어 있어 적합도에 충분히 만족할 만한 정도는 되지 못하였다. 그림 10 및 그림 11은 갑천유역에 대한 유사 검보정자료를 나타낸 것이다.

토지피복도에 따른 유출부하특성 분석

1. 토지피복특성 분석

환경부의 토지피복도는 대분류 토지피복도와 중분류 토지피복도가 있다. 이 두 토지피

복도의 분류항목은 각각 7개 및 23개로 구분하고 있으며, 자료의 제작시기도 2001년 및 2007년이다.

본 연구에서는 앞서 제시한 검보정 중분류 토지피복도 결과를 바탕으로 대분류 토지피복도를 적용했을 때와 중분류 토지피복도를 대분류 토지피복도로 재조정하여 적용했을 때 유역의 유출부하 특성을 분석하였다. 이는 분류항목의 중요성과 자료의 제작시기에 따른 토지피복변화가 유역 유출부하에 얼마만큼의 영향을 미치는가에 대한 평가를 위한 목적으로 수행하였다.

환경부의 2007년도에 구축된 중분류 토지피복도 자료와 2001년도에 구축된 대분류 토

지피복도 자료를 분석한 결과 시가화/건조지역의 면적비율이 무심천 및 갑천유역 각각 10.9%에서 17.1%, 11.6%에서 15.6%로 증가하였고, 농업지역의 경우 무심천 유역은 18.9%에서 27.4%, 갑천유역은 11.7%에서 15.8%로 증가하는 것으로 나타났고, 산림지역은 무심천유역의 경우 59.4%에서 47.2%로 그리고 갑천유역은 68.4%에서 59.8%로 감소하는 것으로 분석되어 두 유역 모두 도시지역 및 농경지 지역이 증가하고 산림지역이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 현재 지속적으로 도시화가 확대되는 추세를 반영하고 있는 것으로 판단된다.

TABLE 3. 분류체계별 토지피복별 비율

유역명 분류항목	무심천		갑천	
	대분류	중분류	대분류	중분류
수역	0.7%	1.4%	0.4%	1.2%
시가화	10.9%	17.1%	11.6%	15.6%
나지	2.8%	2.7%	3.0%	2.1%
습지	0.0%	0.7%	0.01%	0.9%
초지	7.3%	3.6%	4.7%	4.6%
산림	59.4%	47.2%	68.4%	59.8%
농업지역	18.9%	27.4%	11.7%	15.8%

평가결과 앞서 언급한 바와 같이 중분류 토지피복도를 기준하여 매개변수를 검보정한

후 중분류토지피복도와 비교하여 대분류 토지피복도를 적용했을 때 무심천유역의 경우 침투유출은 6%상승하였고, 총유출은 17%감소하는 것으로 나타났다. 유사농도의 경우에는 매우 크게 반응하는 것으로 나타나 침투유사의 농도비는 중분류 토지피복도와 비교하여 54%정도였고 총유사농도도 49%정도로 매우 낮게 나타났다.

구축시기별에 따른 특성을 분석하기 위해 23개 항목의 중분류의 토지피복을 대분류의 7개 토지피복항목으로 재분류하여 분석하였다. 분석결과 표 4에서 보는바와 같이 매개변수 검보정한 중분류를 기준으로 했을 때 총유출량은 36%, 침투유출량은 42%정도로 나타났으나 오히려 유사농도의 경우에는 1%에서 13%정도 차이가 나는 것으로 분석되었다.

갑천유역의 경우에는 분류항목은 2%에서 23%정도의 차이를 보이고 구축시기별로는 -1%에서 +16%정도의 차이가 나는 것으로 분석되어 유역별로 매우 큰 편차를 보이고 있어 다양한 연구유역을 대상으로 이에 대한 분석을 수행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

2. 토지피복변화에 따른 유출부하 특성 분석

토지피복변화에 따른 특성을 분석하기 위해 2번 소유역 일부에 대하여 산림지역 및 농업지역을 도시화하는 것과 산림지역을 농경지역으로 변화되었을 경우의 유출부하 특성을 분석하였다. 3가지 시나리오에 따른 각각의 토지피복변화는 표 5 및 그림 12와 같다.

TABLE 4. 토지피복특성에 따른 유출부하

구분	무심천유역				갑천유역			
	분류항목		구축시기		분류항목		구축시기	
	중분류 (23)	대분류 (7)	중분류 (2007)	대분류 (2001)	중분류 (23)	대분류 (7)	중분류 (2007)	대분류 (2001)
침투유출	1.00	1.06	1.00	0.42	1.00	1.00	1.00	0.99
총유출	1.00	0.83	1.00	0.36	1.00	1.02	1.00	1.16
침투유사농도	1.00	0.54	1.00	0.99	1.00	1.13	1.00	0.99
총유사농도	1.00	0.49	1.00	0.87	1.00	1.23	1.00	0.99

TABLE 5. 토지피복변화 시나리오

분류항목	Baseline	변화1	변화2	변화3
수역	1.04%	1.04%	1.04%	1.04%
시가화	6.92%	9.58%	38.91%	6.92%
나지	1.94%	1.94%	1.31%	1.94%
습지	1.23%	1.23%	0.31%	1.23%
초지	6.32%	6.18%	4.20%	6.32%
산림지역	47.16%	45.76%	36.02%	36.02%
농업지역	35.39%	34.27%	18.20%	46.52%
합계	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

즉 변화1 및 변화2는 6.92%의 도시화지역을 각각 9.58% 및 38.91%로 변화시켰을 때이고 변화3은 산림지역을 농경지역으로 변화시켜 산림지역은 47.16%에서 36.02%로 감소시키고 농업지역은 35.39%에서 46.52%로 증가시켜 강우에 따른 유출량 및 유사농도를 비교하였다.

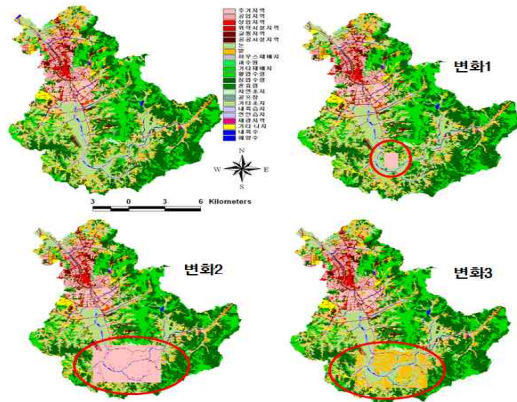


FIGURE 12. 토지피복변화 시나리오

토지피복변화에 의한 유출량 및 유사농도변화를 분석한 결과 표 6에서 보는바와 같이 침투유출의 경우 각각의 시나리오에 따라 1%에서 7%증가하는 것으로 나타났고, 년총유출량 변화는 2%에서 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 유사농도의 변화는 침투유출농도의 경우 2%에서 9%로 증가하였고, 년총유사농도는 0%에서 35%까지 증가하는 것으로 나타났다.

결론

본 연구는 환경부의 중분류/대분류의 토지피복도 자료의 특성에 따라 HyGIS-SWAT 모형의 적용성을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다. HyGIS-SWAT의 적용성을 평가하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

첫째, 모형의 정확도 검증을 위한 연구를 수행하였다. 수행 절차는 유출량에 대한 모의와 실측자료와의 검증 후 유사농도 모의와 실측자료와의 검증을 수행하였다. 연구수행을 위한 유역으로는 청주시를 관류하는 무심천 유역과 대전시를 관류하는 갑천유역을 대상으로 하였다. 모형의 유출량 검증은 $r^2 = 0.64 \sim 0.81$ 이었고, 유출량 검증 결과는 $r^2 = 0.71 \sim 0.75$ 로 대체로 만족할 만한 정확도를 보였다. 유사농도에 대한 검증은 평균값, 중앙값, 기하평균값, 그리고 비연속적으로 측정되는 관측치와 연속적으로 모의되는 결과치와의 비교를 위해 7-window방법을 적용하였다. 적용결과 평균, 중앙값, 기하평균값 모두는 정확도 검증에 만족하는 결과를 보였으나

TABLE 6. 토지피복변화 시나리오

분류항목	Baseline	변화1	변화2	변화3
침투유출	1.00	1.01	1.03	1.07
년총유출	1.00	1.02	1.09	1.10
평균유출	1.00	1.02	1.09	1.10
침투유사농도	1.00	1.02	1.08	1.09
년총유사농도	1.00	1.00	1.19	1.35
년평균유사농도	1.00	1.00	1.19	1.35

7-window에서는 다소 미치지 못한 결과를 제시하였으나 관측값의 물리적 오류가 포함된 것도 한 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

둘째, 토지피복 특성에 따른 모형의 적용성을 평가하였다. 우리나라의 토지피복도는 환경부에서 배포하고 있는 대분류/중분류 토지피복도가 있다. 각 토지피복도의 분류항목별에 따른 특성과 구축시기에 따른 특성으로 구분하여 적용하였다. 대분류와 중분류 토지피복변화는 두 유역 모두 시가지 지역과 농업지역이 팽창하고 산림지역이 감소하는 것으로 분석되어 현재 지속적으로 도시화가 확대되는 추세를 반영하고 있는 것으로 판단된다.


분류항목특성에 따른 분석결과는 무심천유역의 경우 침투유출은 6%상승하였고, 연총유출량은 17% 감소하는 것으로 분석되었으나, 갑천유역의 경우 총유출에서만 2%정도 증가하는 것으로 분석되었다. 구축시기에 따른 특성 분석결과는 무심천유역의 경우 매우 큰 편차를 보이는 것으로 분석되었으나 갑천유역의 경우 침투유출 1%감소, 총유출 16%증가된 것으로 나타났다. 유사농도의 경우에도 무심천 유역은 침투유사농도와 총유사농도가 각각 1%, 17% 감소하는 것으로 분석되었으나 갑천유역의 경우에는 두 항목 모두 1%감소하는 것으로 분석되어 유역별로 큰 편차를 보이고 있어 다양한 연구유역을 대상으로 분석을 수행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

셋째, 토지피복변화(토지계 오염원 발생부하량 변화)에 따른 유출부하 특성을 평가하였다. 토지피복변화 시나리오는 도시화 확대와 농업지역 확대의 3가지 시나리오를 적용하여 분석하였다. 분석결과 도시화 영향은 침투유출의 경우 1%~3% 증가하는 것으로 나타났고, 총유출은 최대 9%까지 증가하는 것으로 분석되었다, 또한 유사농도의 경우에도 침투유사농도 및 연총유사농도 모두 19%정도 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 농경지 확대에 따른 변화 분석 결과 침투유출은 7%, 연총유출은 10% 증가하였고, 침투유사 및 연총유사농도는 모두 35%정도 더 유출되는 것으

로 분석되었다.

향후 연구에서는 공간해상 특성의 영향을 평가하기 위하여 공간자료의 격자크기에 따른 유출부하 특성과 유역의 토지피복과 토양도의 유출특성을 반영하는 수문응답단위(HRU, Hydrologic, Response Unit)별 특성에 대하여 분석을 수행하고, 현재 수변구역 지정 시나리오에 따라 오염부하 저감효과를 분석하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 기초기술연구회의 일반연구사업(사업명: 위성정보 활용지원 운영사업, 과제명: 위성영상을 이용한 하천정보생산 및 활용에 관한 연구)과 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신 사업과제(과제번호 06국토정보B01)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다. 

참고문헌

- 고재영, 장태일, 박승우. 2007. HSPF 모형을 이용한 농촌유역에서의 대장균 모의. 대한토목학회지 11(4):99-109.
- 김철겸, 김남원. 2008. 충주댐 유역의 오염원에 따른 오염부하량 발생 특성. 수질보전 한국물환경학회지 25(2):256-267.
- 김철겸. 2010. SWAT-K를 이용한 비점오염물질의 수문학적 운송특성 분석. 서울대학교 박사학위 논문.
- 환경부. 2004. 오염총량관리제도 이해.
- 환경부. 2007. 수질오염총량관리제 고시·훈령·규정집.
- Arnold, J.G. 2010. Outlook of SWAT Model as a Total Solution of Water, Pollutant, & Food Problem. 2010 Internation SWAT Conference. Korea.

- Kim, S.M., B.L. Benham, K.M. Brannan, R.W. Zeckoski, and G.R. Yagow. 2007. Water Quality Calibration Criteria for Bacteria TMDL Development. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 23(2):171–176.
- Neitsch, S.L., J.G. Arnold, J.R. Kiniry, R. Srinivasan, and J.R. Williams. 2004. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2005.
- US EPA, 2005. TMDL Model Evaluation and Research Needs. EPA/600/R-05/149. National Risk Management Research Laboratory.
- US EPA. 2008. Handbook for Developing Watershed TMDLs. 