

TMDL 적용을 위한 소유역별 유출부하 특성 분석

김 주 훈* / 김 경 탁** / 이 진 원***

Estimation of Flow Loads Characteristics each Sub-watershed for TMDL

Joo Hun Kim** / Kyung Tak Kim** / Jin Won Lee***

요약 : 본 연구는 소유역별 토지피복특성을 분석하고, 각 소유역로부터 발생하는 비점오염원 부하 특성을 분석하여 각 소유역별로 토지피복특성에 적합한 오염부하 저감 대책을 수립할 수 있는 방법을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다. 연구대상유역은 무심천 유역으로 하였으며, 사용된 수질모형은 HyGIS-SWAT을 이용하였다. 토지피복도 분석에서 특정 분류항목이 50%이상의 토지피복 비율을 갖는 토지피복에 따라 시가지지역, 농업지역, 그리고 산림지역으로 구분하여 유출부하 특성을 분석하였다. 분석결과 유사량 및 영양염류의 연간 발생부하량의 크기는 농업지역, 산림지역, 시가지지역의 순서로 발생하는 것으로 분석되었다. 2번 소유역에 대해서 하천을 중심으로 버퍼구역을 설정하고 버퍼구역내 농업지역을 자연초지로 토지피복을 변화시켜 발생부하량을 분석하였다. 분석결과 토지피복변화는 변경전과 비교하여 토지피복변화는 농경지 면적이 소유역내 36.6%에서 27.9% 및 15.3%로 변화되는 것으로 나타났다 2번 소유역에 대한 유사발생량 및 영양염류 발생량 분석결과 유사발생량은 52% 에서 약 46% 정도 감소하는 것으로 분석되었고, 영양염류의 경우에도 변경전보다 49% 34% 정도 감소하는 것으로 분석되었다. 향후 추가적인 연구는 각 소유역별로 다양한 오염부하 저감 대책 시나리오를 수립한 후 어떠한 저감대책이 효과적인지를 평가하는 연구를 수행하고자 한다.

핵심용어 : 오염총량관리제도, HyGIS-SWAT, 유사발생부하량, 영양염류 발생부하량

Abstract : This research aims at suggesting the mitigation measures of decreasing pollution by analyzing land cover characteristics according to subwatershed, and non-pollutant load characteristics occurring in each subwatershed. Mushim-cheon is selected as a research area, and HyGIS-SWAT is used as a water quality model. This research analyzed outflow load characteristics by classifying land cover, which has over 50% classified items, into a city area, a farmland area and a forest area. The result shows that the yearly occurrence load quantity represents a farmland area, a forest area and a city area in order. In subwatershed-2, occurrence load quantity is analyzed by setting up a buffer zone in the center of stream, and by changing a farmland area into a natural grass land. Therefore, a farmland area in a subwatershed changes 36.6% into 27.9% and 15.3% comparing to previous land cover change. In the analysis of sediment loads occurrence quantity and nutritive salt load occurrence quantity in subwatershed-2, sediment loads occurrence quantity decreases 52% to about 47%, and nutritive salt load decreases 49% and 34% in compare with previous change. Hereafter, this research will set up the mitigation measures scenario, and find out which is more effective for the mitigation measures.

keywords : TMDL, HyGIS-SWAT, Landcover change, Sediment Load, Nutrivite salt Load

+ Corresponding author : jh-kim@kict.re.kr

* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 · E-mail : jh-kim@kict.re.kr

** 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구위원 · E-mail : ktkiml@kict.re.kr

*** 정희원 · 한국건설기술연구원 하천해안항만연구실 연구위원 · E-mail : jwlee@kict.re.kr

1. 서 론

오염총량관리제는 과학적 바탕위에서 수질관리의 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 유역관리제도로서 지자체에서 배출량을 줄인 양만큼 해당지역 개발용량이 늘어나게 되므로 수질보전을 위한 노력 자체가 해당 지자체의 개발 인센티브가 되는 제도이다.

오염총량관리제의 적용은 다음과 같은 절차에 의해 수행된다. 우선 목표수질에 의한 총량관리단위유역을 소유역으로 구분한다. 각 소유역에 대하여 오염원 조사 및 수계환경 자료 등을 수집하고 수질모델링을 통해 소유역별 할당부하량을 계산한다. 이를 바탕으로 기초지자체별 오염부하량을 할당한다. 이때 소유역 및 기초지자체별 오염부하량을 할당하고자 할 때 수질모델링을 통해 각 소유역 또는 기초지자체별 기준배출부하량 할당하게 된다.

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 평가하여 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 모형들은 2000년대 초반까지만 해도 산림지나 농업지역을 포함하는 소규모 하천유역을 대상으로 AGNPS나 AnnAGNPS가 가장 많이 적용되어 왔으나, 최근에는 HSPF 및 SWAT의 적용을

통해 소규모 유역에서부터 다목적댐 상류나 수계 단위의 대규모 유역까지 폭넓게 적용해 오고 있다(김철겸과 김남원, 2008). 특히, SWAT은 2000년대 후반부터 유출해석은 물론, 유역 유수량 및 오염부하량 등 수자원 분야 전반에 걸쳐 다양하고 활용되고 있다(김철겸, 2010). 한편 김주훈 등(2005)은 유역의 토지이용 특성에 따른 유출토사의 특성 분석에 대한 연구에서 산지 및 농경지 유역과 도시유역의 토지이용 특성에 따른 유출토사의 특성 분석을 수행한 바 있다.

본 연구에서는 오염총량제 기본 방침에서 제시하고 있는 수질모델링에 있어서 각 소유역에 대하여 소유역별 토지피복특성을 분석하고, 각 소유역에서 유출되는 유출 특성과 소유역으로부터 발생되는 비점오염원 부하 특성을 분석하여 각 소유역별로 토지피복특성에 적합한 오염부하 저감 대책을 수립할 수 있는 방법을 제시하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. HyGIS-SWAT 모형

SWAT은 모형의 특성상 매우 많은 매개변수를 입력자료로 이용하고 있다. 이에 따라 GIS와 연계 운영할 수 있는 프로그램이 개발되어 실무에 이용되고 있으며, SWAT 구동에 필요한 공간 정보를 자동 생성하고, 시계열 자료 및 다양한 비공간 정보는 데이터베이스를 통하여 입력파일을 생성하는 과정을 거치게 된다.

GIS와 SWAT의 연계 프로그램 개발은 1990년대 초 GRASS(Geographic Resources Analysis Support System)와의 연계로부터 시작되었으며(Engel 등, 1993; Byars 등, 2000), Bian 등(1996)은 Arc/Info와 SWAT의 인터페이스 시스템을 개발하였으며, Luizo 등(2001)은 SWAT과 ArcView를 연계 운영할 수 있는 시스템을 개발하였다. Zapata(2003)는 ArcGIS를 기반으로 하는 수자원 분야에서의 시공간 DB의 통합 운영 모형인 ArcGIS Hydro 데이터 모형을 이용하여 ArcGIS와 SWAT의 연계 시스템을 개발한 바 있다.

2.1 HyGIS-SWAT 데이터 모형

2.1.1 공간데이터 모형

HyGIS-SWAT 데이터 모형은 HyGIS와 SWAT2005의 연계 시스템을 개발하기 위해서 HyGIS 데이터 모형의 표준에 따라서 개발되었다. SWAT2005에서 필요로 하는 공간정보는 유역에서의 DEM, 유역 경계, 소유역 경계, 소유역별 주하천망, 유출구 등이며, 이들 소유역과 주하천망에 대한 정보를 연계하는 네트워크 정보가 필요하다. 따라서 HyGIS-SWAT 공간 데이터 모형에서는 HyGIS 데이터 모형에서 「DrainageArea」, 「HydroPoin

t」, 「HydroJunction」 객체를 이용하고, 주하천망 객체인 「MainStream」을 추가하여 설계되었다.

2.1.2 시계열 데이터 모형

HyGIS-SWAT의 시계열 데이터 모형은 HyGIS 시계열 데이터 모형을 그대로 이용하고 있다. 이는 HyGIS에서 구축된 시계열 DB를 별도의 처리과정 없이 시스템 내에서 직접 참조할 수 있다는 것을 의미한다. HyGIS 시계열 데이터베이스는 Hydrography 그룹의 「MonitoringPoint」와 'HYDROCODE'를 통해서 연결되어 있으며, 이는 HyGIS-SWAT에서도 같은 형태로 적용될 수 있다.

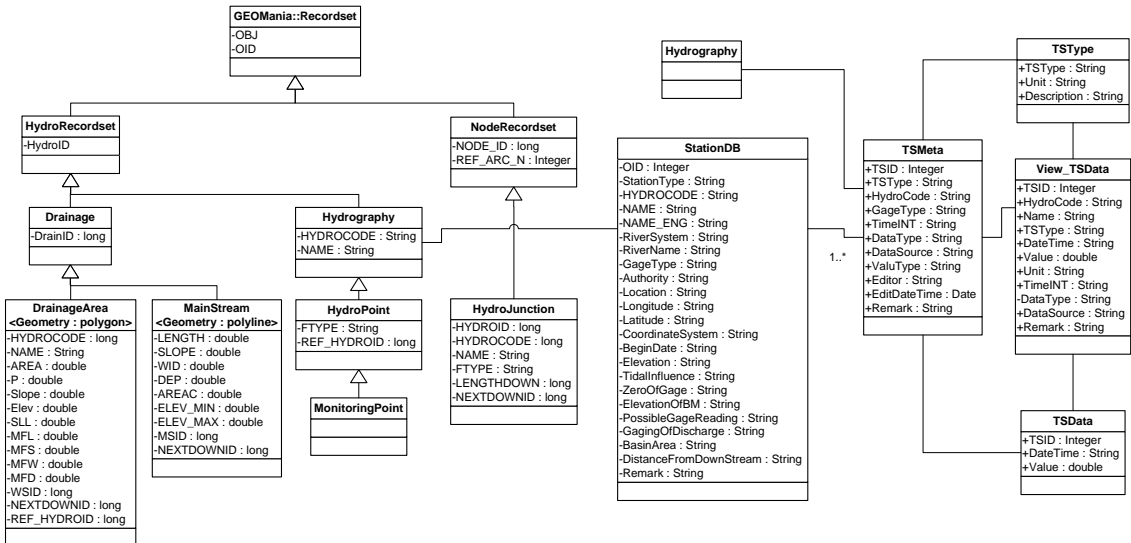


그림 1. HyGIS-SWAT 공간 데이터 모형과 시계열 DB의 관계도

<그림 1>은 HyGIS-SWAT의 공간 데이터 모형과 시계열 데이터 모형의 관계도를 나타낸 것이다. HyGIS-SWAT은 구동과정에서 실측 시계열 자료를 이용할 경우 관측소 레이어를 입력받게 설정되어 있으며, 이때 입력되는 관측소 레이어는 Hydrography 그룹의 「MonitoringPoint」에서 설계된 것과 같이 'HYDROCODE' 속성을 갖게 된다. 따라서 HyGIS-SWAT에서 시계열 DB로부터 자료를 추출하기 위해서는 입력된 관측소의

'HYDROCODE'와 시계열 DB의 「TSMeta」 테이블의 속성을 이용하여 다양한 질의어를 작성하고, 이를 이용하여 시계열 DB를 검색하는 과정을 거치게 된다(최윤석 등, 2007).

3. 연구 유역

연구대상유역은 청주시의 중심을 관류하는 무심천유역을 대상으로 하였다. 무심천 유역은 청원

군 남일면과 낭성면의 경계에 있는 선도산에서 발원하여 곳곳에 범람원을 형성시키면서 금강의 제 1지류인 미호천과 합류하는 하천으로 <그림 2>와 같이 유역의 상류는 산지 및 농경지가 발달해 있고 중하류에는 시가지 및 농경지가 주로 분포하고 있으며, <표 1>에서 보는바와 같이 무심천유역의 토지피복 특성은 농업지역과 도시지역의 면적이 각각 27% 및 17%로 분석되었다.

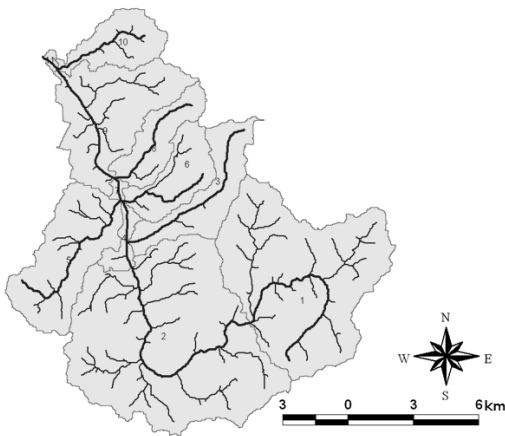


그림 2. 소유역 분할

SWAT은 유역의 지형자료와 시계열자료 및 토지경작과 오염물질의 거동에 관계하는 많은 매개 변수를 포함하고 있으며, 모형의 구동을 위해서는 다양한 공간, 비공간 자료 및 시계열자료가 요구된다. SWAT은 한 유역에서 다양한 물리적 과정이 모의되며, 모형을 위해서 유역은 수 개의 소유역으로 구분될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 SWAT 모형 구동을 위해 공간 기본자료는 환경부의 중분류토지피복도, 농업과학기술원의 정밀토양도, 그리고 DEM 자료를 수집하였고, 수문자료는 청주기상대의 일평균 강우량, 일최대/일최소기온, 일평균일사량, 일평균 풍속, 일평균습도 자료와 국토해양부/금강홍수통제소의 일평균유출량 자료(2002년 1월 1일 ~ 2010년 10월 31일)를 수집하여 정리하였다.

4. 적 용

4.1 토지피복도 분석

기초기술연구회(2011)의 자료에 의하면 무심천 유역은 환경부의 대분류와 중분류를 비교결과 시가화/건조지역이 10.9%에서 17.1%로 그리고 농업지역이 18.9%에서 27.4%로 증가되었고, 반대로 산림지역이 59.4%에서 47.2%로 감소된 것으로 보고하고 있다. 환경부의 두 토지피복도는 각각 2001년과 2007년에 제작된 것으로 불과 6년 사이에 빠르게 도시화가 빠르게 진행되고 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 환경부의 중분류 토지피복도를 이용하였고, 수질오염총량관리상의 “세유역”을 중첩시킨 후 세유역 말단지점에 소유역 출구점을 지정하여 “세유역”과 유사하게 11개 소유역으로 분할하였고, 유역의 토지피복 특성은 <그림 3>과 같다.

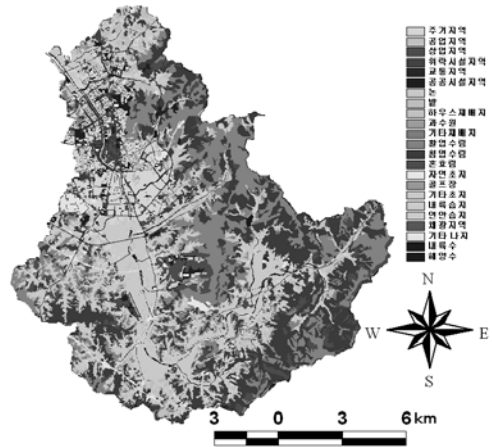


그림 3. 중분류 토지피복도(환경부)

<표 1>에서 보는바와 같이 소유역 규모는 2번 소유역이 62.1 km², 1번 소유역이 45.9 km²로 전체 유역 191.4 km²의 32% 및 24%를 차지하고 있어 전체 면적중 약 56%를 차지하고 있다. 유역의 토지피복 특성은 유역면적 1 km² 미만인 소유역을 제외하였을 때 시가화지역의 경우 소유역 9번이

표 1. 소유역별 토지피복비율(%)

| 대분류 | watershed | sub1 | sub2 | sub3 | sub4 | sub5 | sub6 | sub7 | sub8 | sub9 | sub10 | sub11 |
|--------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|------|-------------|------|------|------|-------------|-------|
| 시가화 지역 | 17.0 | 4.0 | 7.0 | 9.0 | 25.0 | 23.0 | 29.0 | 72.0 | 38.0 | 57.0 | 18.0 | 5.0 |
| 농업지역 | 27.0 | 19.0 | 37.0 | 22.0 | 53.0 | 31.0 | 18.0 | 0.0 | 9.0 | 10.0 | 56.0 | 71.0 |
| 산림지역 | 48.0 | 74.0 | 45.0 | 63.0 | 2.0 | 34.0 | 48.0 | 0.0 | 48.0 | 27.0 | 23.0 | 0.0 |
| 초지 | 4.0 | 2.0 | 6.0 | 4.0 | 2.0 | 4.0 | 2.0 | 2.0 | 1.0 | 2.0 | 2.0 | 8.0 |
| 습지 | 1.0 | 0.0 | 1.0 | 0.0 | 11.0 | 0.0 | 0.0 | 6.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.0 |
| 나지 | 2.0 | 0.0 | 2.0 | 1.0 | 1.0 | 7.0 | 2.0 | 13.0 | 4.0 | 3.0 | 0.0 | 0.0 |
| 수역 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 2.0 | 5.0 | 1.0 | 2.0 | 7.0 | 1.0 | 2.0 | 1.0 | 10.0 |
| 소유역면적 (km ²) | 191.4 | 45.9 | 62.1 | 12.3 | 2.7 | 19.3 | 9.5 | 0.6 | 8.5 | 21.4 | 8.7 | 0.4 |
| 면적비 | 100.0 | 24.0 | 32.0 | 6.0 | 1.0 | 10.0 | 5.0 | 0.0 | 4.0 | 11.0 | 5.0 | 0.0 |

57%로 소유역 토지피복 특성이 도시지역을 대표하고 있으며, 농업지역은 소유역 10번이 56%를 차지하고 있으며, 산림지역은 소유역 1번이 74%, 3번 소유역이 63%를 차지하고 있다.

4.2 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 결과(김철검, 2010)를 바탕으로

단계별 변화에 따라 보정을 수행하였다. 시행착오법은 유출량에 대하여 매개변수를 보정한 후 유사 관련 매개변수에 대하여 순차적으로 수행하였다.

4.2.1 유출량 검보정

무심천 유역의 경우 매개변수 보정기간은 2006년도 청주 유량자료를 이용하여 보정하였고, 보정된 매개변수를 이용하여 2010년의 자료를 이용하여 검증하였다. 무심천유역의 유출량 관측값과 모의값의 보정은 <그림 4> 및 <그림 5>에서와 같이 매개변수 보정기간동안의 r^2 은 0.64이었고 검증기간의 r^2 은 0.75였다.

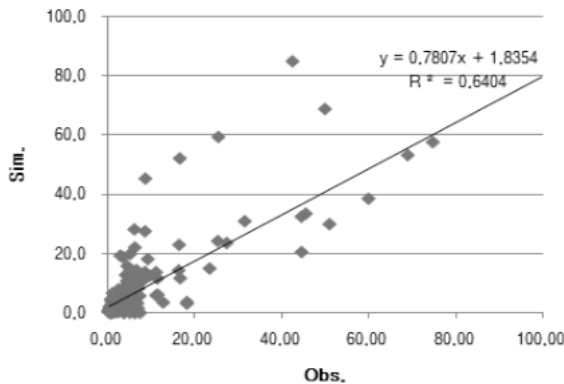


그림 4. 유출 매개변수 보정(2007)

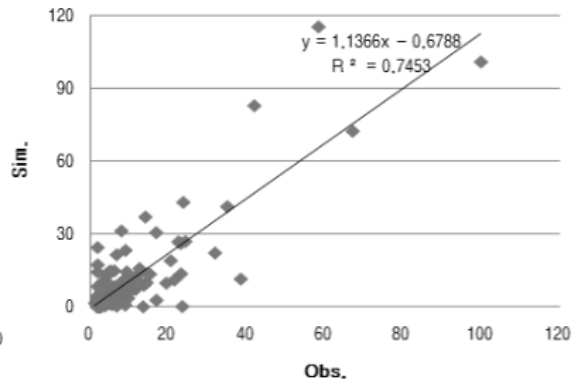


그림 5. 유출 매개변수 검증(2010)

4.2.2 유사 및 영양염류 검보정

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

유사량 검보정은 비연속적으로 측정되는 수질 관측치와 연속적으로 모의되는 모형 결과치와의 비교를 위해 수질 측정 전후 7일간의 모의결과 범위(7-day window, 7일 창)에 관측치가 얼마나

포함되는가를 분석하여 7가지 항목에 대한 기준에 의해 관련 매개변수를 보정하는 방법(고재영 등, 2007)을 적용하였다.

고재영 등(2007)이 제시한 <표 2>의 검보정 적합도 기준에 따라 적합도 검정을 실시하였다. 평균값, 중앙값, 기하평균값 등은 모두 적합한 것으로 평가되었으나 '7-day window'의 경우 적합도에 미치지 못하였다. 관측값이 참값이라는 전제하에 매개변수를 조정하였으나 일부 관측값의 경우 비강우시의 큰 유출부하가 발생한다든지 혹은 강우시에도 유출부하의 변동이 없는 등 물리적인 의미가 다르게 해석될 수 있는 자료가 포함되어 있어 적합도에 충분히 만족할 만한 정도는 되지 못하였다.

표 2. 유사 및 영양염류 검보정

| Statistics | Criteria | 유사량 | | T-N | | T-P | |
|----------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 보정 | 검증 | 보정 | 검증 | 보정 | 검증 |
| average | ±100% | 76.8% | 69.1% | 63.7% | 50.0% | 45.4% | 8.6% |
| median | ±100% | 36.2% | 35.9% | 91.9% | 91.1% | 99.7% | 99.7% |
| Geometric mean | ±100% | 11.9% | 0.5% | 90.2% | 73.1% | 95.6% | 99.2% |
| 7-day range | >70% | 57.5% | 54.5% | 40.0% | 51.7% | 40.0% | 55.2% |
| 7-day max | | 30.0% | 40.9% | 60.0% | 48.3% | 60.0% | 44.8% |
| 7-day min | | 12.5% | 4.5% | 0% | 0% | 0% | 0% |

4.3 소유역별 유출부하 특성

소유역별 유출부하 특성을 분석하기 위하여 한국건설기술연구원에서 개발한 HyGIS-SWAT 모형을 이용하여 분석하였다. 미국 농무성에서 개발한 SWAT은 미국의 토양과 토지피복에 대하여 DB를 구축하였는데 HyGIS-SWAT은 국내 토양 정보를 DB화하여 일반사용자가 SWAT 모형 구동시 기상자료와 지형자료만 구축하여도 유역의 유출부하 특성을 분석할 수 있다는 장점이 있다.

분석결과 유출률은 0.57에서 0.71정도로 분석되었고, 소유역의 면적분포가 0.6km²에서 62.1km²로 상대적인 유역규모가 달라 분석된 유출률이 유역을 대표할 수 있다고 단정짓기는 어려울 것으로 판단

되며, 다만 산림지역 면적이 큰 1번 소유역 및 3번 소유역에서 조금 적은 유출률을 기록하고 있으며, 9번 소유역의 경우 도시화 지역 면적이 상대적으로 많아 유출률이 크게 나타난 것으로 판단된다.

유사 발생량의 경우 시가화 지역으로 대표되는 9번 소유역의 경우 토사발생량이 76,683 t/km²/yr로 산림지역으로 대표되는 1번 소유역(261,533 t/km²/yr) 및 3번 소유역(233,501 t/km²/yr)과 농업 지역으로 대표되는 10번 소유역(287,220 t/km²/yr) 등 다른 소유역에 비해 매우 적게 발생하는 것으로 분석되었다.

영양염류의 경우 Org_P는 도시지역인 9번 소유역에서 5.36 t/km²/yr로 농경지 면적이 상대적으

로 많은 비율을 차지하는 10번(170.35 t/km²/yr) 소유역 및 산림지역으로 대표되는 1번 소유역(49.9 t/km²/yr) 및 3번 소유역(71.3 t/km²/yr)보다 적게 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 Org_N의 경우에도 농업지역인 10번 소유역에서 각각 901.8 t/km²/yr로 매우 높게 발생되고, 도시화지역

인 9번 소유역이 상대적은 26.4 t/km²/yr로 적게 발생하는 것으로 분석되었다.

<표 3>에서 보여지는 바와 같이 유역의 토지피복 특성에 따른 유사량 및 영양염류의 연간 발생 부하량은 농업지역, 산림지역, 시가화지역의 순서로 발생하는 것으로 분석되었다.

표 3. 소유역별 유출부하 특성

(단위 : t/km²/yr)

| 소유역번호 | Area(km ²) | Runoff rate | Sediment | Org_N | Org_P | NO ₃ | Min_P |
|-------|------------------------|-------------|----------|--------|--------|-----------------|-------|
| 1 | 45.91 | 0.59 | 261,533 | 217.55 | 49.91 | 152.33 | 5.22 |
| 2 | 62.09 | 0.63 | 380,505 | 446.70 | 101.48 | 150.04 | 11.31 |
| 3 | 12.31 | 0.58 | 233,501 | 333.35 | 71.32 | 142.53 | 6.49 |
| 4 | 2.69 | 0.71 | 123,564 | 9.76 | 2.34 | 3.32 | 0.39 |
| 5 | 19.32 | 0.66 | 253,036 | 441.20 | 95.77 | 160.37 | 12.33 |
| 6 | 9.49 | 0.62 | 217,102 | 382.27 | 77.99 | 141.67 | 10.98 |
| 7 | 0.59 | 0.61 | 2,927 | 45.31 | 11.68 | 123.11 | 13.11 |
| 8 | 8.47 | 0.65 | 129,504 | 271.21 | 54.05 | 140.74 | 9.80 |
| 9 | 21.43 | 0.68 | 76,683 | 26.36 | 5.36 | 15.28 | 1.40 |
| 10 | 8.65 | 0.62 | 287,220 | 901.78 | 170.35 | 167.32 | 13.22 |
| 11 | 0.45 | 0.57 | 97,037 | 1.16 | 0.27 | 0.33 | 0.04 |

표 4. 토지피복변화(2번 소유역)

(단위 : %)

| 중분류 | 변경전 | buf150 | buf300 | buf500 | 중분류 | 변경전 | buf150 | buf300 | buf500 |
|--------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 주거지역 | 4.13 | 4.13 | 4.13 | 4.13 | 기타재배지 | 0.41 | 0.34 | 0.22 | 0.22 |
| 공업지역 | 0.64 | 0.64 | 0.64 | 0.64 | 활엽수림 | 14.75 | 14.75 | 14.75 | 14.75 |
| 상업지역 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 0.21 | 침엽수림 | 20.42 | 20.42 | 20.42 | 20.42 |
| 위락시설지역 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 혼효림 | 10.23 | 10.23 | 10.23 | 10.23 |
| 교통지역 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 1.25 | 자연초지 | 0.64 | 9.39 | 22.00 | 22.03 |
| 공공시설지역 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 골프장 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
| 논 | 24.38 | 16.88 | 8.31 | 8.33 | 기타초지 | 5.46 | 5.46 | 5.46 | 5.46 |
| 밭 | 11.17 | 10.22 | 6.67 | 6.63 | 내륙습지 | 1.31 | 1.31 | 1.31 | 1.31 |
| 하우스재배 | 0.57 | 0.35 | 0.01 | 0.01 | 기타 나지 | 2.02 | 2.02 | 2.02 | 2.02 |
| 과수원 | 0.11 | 0.10 | 0.07 | 0.07 | 내륙수 | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 1.12 |

<표 1>에서 보는바와 같이 2번 소유역의 경우 유역 전체 면적(191.4 km²) 중 약 32%인 62.1 km²를 차지하고 있으며 이 소유역의 토지피복비율 중 농업지역이 차지하는 비중이 37%로 전체 유역의 9%정도를 차지하고 있으며, <표 4>에서 보는바와 같이 2번 소유역내 토지피복비율은 논지역이 24%로 가장 많은 비율을 차지하고 침엽수림이 20%, 활엽수림이 15%를 차지하고 있다.

본 연구에서는 농업지역에서 유사량 및 영양염류 발생부하량이 크게 나오는 것을 감안하여 2번 소유역에 대하여 DEM으로부터 추출한 하천을 중심으로 150m, 300m 500m 버퍼구역을 설정하고 이 버퍼구역내 다른 토지피복은 그대로 두고 농업지역에 대해서만 자연초지로 토지피복을 변화시켰을 때의 토지피복변화를 분석하였다. 변경전과 비교하여 150m 버퍼구역내 토지피복변화는 농경지 면적이 소유역내 36.6%에서 27.9%로 감소하고 있으나 300m 및 500m 버퍼구역내 토지피복변화

는 15.28 및 15.26%로 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다.

<표 4>와 같이 소유역 전체 농경지 비율이 36%에서 15%로 감소시키고 자연초지의 비율은 0.64%에서 각각 9.4% 및 22%로 증가시켰을 때 유사량 및 영양염류의 연간 발생부하량을 분석하였다.

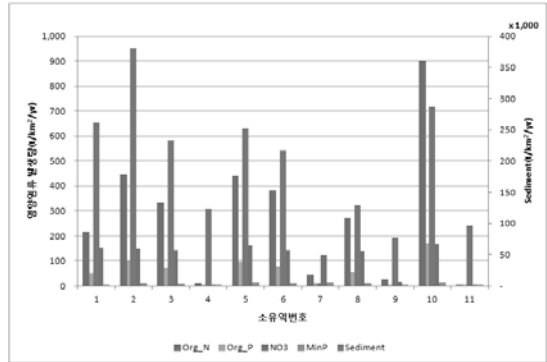


그림 6. 소유역별 발생부하량 특성

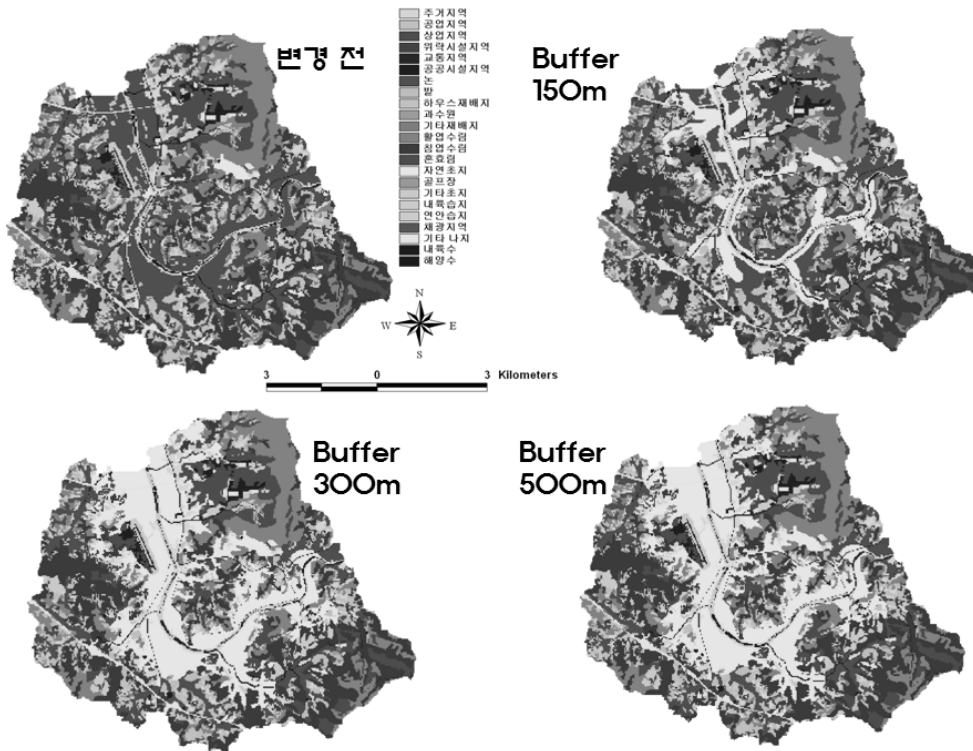


그림 7. 버퍼구역내 토지피복변화(농업지역 => 자연초지)

분석결과 유사발생량 및 영양염류 발생량은 <표 5>와 같이 감소하는 것으로 분석되었다. 유사발생량은 토지피복 변화 전에 380,505 t/km²/yr에서 150m 버퍼 구역내 피복변화에서는 199,207 t/km²/yr로 52% 정도 감소되었고, 300m 및 500m 버퍼구역내 피복변화에서는 각각 174, 386 t/km²/yr 및 173,769 t/km²/yr로 약 46% 정도 감소하는 것으로 분석되었다. Org_N의 경우에도 변경전보다 각각 49% 및 35% 정도로 감소되는 것으로 분석되었으며, Org_P의 경우에도 약 48%에서 34% 정도 감소하는 것으로 분석되었다.

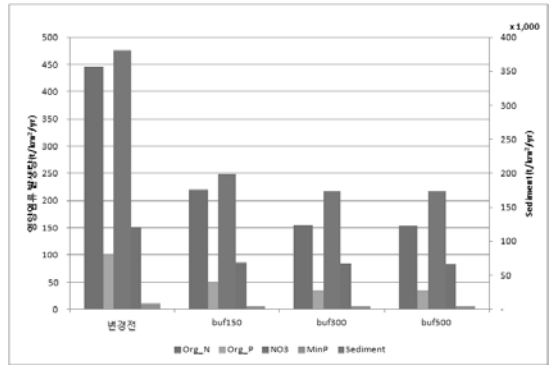


그림 8. 토지피복변화에 따른 발생부하량 변화

표 6. 토지피복변화에 의한 유사 및 영양염류 발생부하량 변화

(단위 : t/km²/yr)

| 2번 소유역 | Runoff rate | Sediment | Org_N | Org_P | NO ₃ | Min_P |
|--------|-------------|----------|-------|-------|-----------------|-------|
| 변경 전 | 0.63 | 380,505 | 446.7 | 101.5 | 150.0 | 11.3 |
| buf150 | 0.64 | 199,207 | 219.8 | 48.4 | 85.8 | 5.8 |
| buf300 | 0.64 | 174,386 | 154.4 | 34.3 | 83.7 | 4.9 |
| buf500 | 0.64 | 173,769 | 154.2 | 34.3 | 83.7 | 4.9 |

5. 결 론

수질오염총량제는 96개 목표수질 설정지점을 설정하고 목표수질에 도달할 수 있도록 목표수질 설정지점의 각 소유역으로부터의 오염부하량을 할당하여 목표수질을 달성하도록 하고 있다. 본 연구는 금강의 제2지류인 무심천유역을 대상으로 환경부의 중분류 토지피복도를 이용하여 소유역별 토지피복 특성에 따른 유출부하 특성을 분석하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

유역을 11개 소유역으로 분할하고 소유역면적 1km² 미만인 소유역을 제외하고 각 소유역에서 특정 분류항목이 50%이상의 토지피복 비율을 갖는 토지피복에 따라 시가지지역(9번 소유역), 농업지역(10번 소유역), 그리고 산림지역(1번 및 3번 소유역)으로 구분하여 유출부하 특성을 분석하였다. 분석결과 유사량 및 영양염류의 연간 발생부하량의 크기는 농업지역, 산림지역, 시가지지역의 순

서로 발생하는 것으로 분석되었다.

소유역별 분석결과 2번 소유역에서 유사량 단위면적당 가장 많이 발생하는 것으로 분석되었으며, 10번 소유역에서 Org_N 및 Org_P가 가장 많이 발생되고, 9번 소유역에서 가장 적게 발생하는 것으로 분석되었다.

2번 소유역의 경우 유사량 및 영양염류의 연간 발생부하량이 다른 소유역에 비해서 크게 발생하고 있어 2번 소유역에 대해서 하천을 중심으로 버퍼구역을 150m, 300m 및 500m로 설정하고 버퍼구역내 농업지역을 자연초지로 토지피복을 변화시켜 발생부하량을 분석하였다. 분석결과 토지피복변화는 변경전과 비교하여 150m 버퍼구역내 토지피복변화는 농경지 면적이 소유역내 36.6%에서 27.9%로 감소하고 있으나 300m 및 500m 버퍼구역내 토지피복변화는 15.28 및 15.26%로 큰 변화가 없는 것으로 나타났다

2번 소유역에 대한 유사발생량 및 영양염류 발

생량 분석결과 유사발생량은 150m 버퍼 구역내 피복변화에서는 52% 정도 감소되었고, 300m 및 500m 피복변화에서는 약 46% 정도 감소하는 것으로 분석되었고, 영양염류의 경우에도 변경전보다 150m 버퍼구역내 토지피복변화에서는 Org_N 및 OrgP는 각각 49% 및 48% 정도로 감소되는 것으로 분석되었으며, 300m 및 500m 피복변화에서는 각각 35% 및 34% 정도 감소하는 것으로 분석되었다.

따라서 수질오염총량제 시행시 각 소유역의 토지피복 특성에 따라 1번 및 2번 소유역에서는 유사량 배출 억제 시설 등을 설치하여 유사량 배출을 줄이도록 하며, 농업지역인 10번 소유역에 대하여 영양염류의 배출을 줄이도록 하는 등 소유역별 특성에 맞는 저감대책을 수립함으로써 보다 더 효율적인 오염물질 저감정책을 수립할 수 있을 것으로 사료된다.

향후 추가적인 연구는 각 소유역별로 다양한 오염부하 저감 대책 시나리오를 수립한 후 어떠한 저감대책이 효과적인지를 평가하는 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

기초기술연구회. 2010. 위성정보 활용지원 운영(위성영상을 이용한 하천정보 생산 및 활용에 관한 연구)
고재영, 장태일, 박승우. 2007. HSPF 모형을 이용한 농촌유역에서의 대장균 모의. 대한토목학회

지. 11(4):99-109.

김주훈, 오덕근, 김경탁. 2005. 토지이용에 따른 부유 토시 유출 평가. 한국습지학회지 7(1):119-128.
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.
최윤석, 김경탁, 박정술, 김주훈. 2007. HyGIS-SWAT2007 개발. 2008대한토목학회 정기학술대회 논문집. 3376-3379쪽.
환경부. 2004. 오염총량관리제도 이해
Bian Ling, Hao Sun, Clayton Blodgett, Stephen Egbert, WeiPing Li, LiMei Ran and Antonis Koussis. 1996. An integrated interface system to couple the swat model and Arc/Info. Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling Santa Fe, New Mexico. Jan. 21-25. pp.1-10.
Byars, B.W., R. Srinivasan and J.G. Arnold. 2000. SWAT/GRASS Interface Users Manual pp.5-9.
Engel, B.A., R. Srinivasan, J.G. Arnold, C. Rewerts, and S.J. Brown. 1993. Nonpoint source(NPS) pollution modeling using models integrated with Geographic Information System(GIS). Water Science Technology. 28(3-5):685-690.
Luzio, M.Di., R. Srinivasan and J.G. Arnold. 2001. ArcView Interface for SWAT2000 User's Guide. pp.1-334.
US EPA, 2005. TMDL Model Evaluation and Research Needs. EPA/600/R-05/149. National Risk Management Research Laboratory. <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r05149/600r05149.pdf>
US EPA. 2008. Handbook for Developing

Watershed TMDLs

Zapata Valenzuela, 2003. Development of an ArcGIS interface and design of a geodatabase for the soil and water assessment tool. Master of Science, Texas A&M University. Houston, Texas, USA.

pp.11-13.

- 논문접수일 : 2011년 06월 20일
- 심사의뢰일 : 2011년 06월 21일
- 심사완료일 : 2011년 10월 04일