

SWAT HRU별 지하수 오염부하량 산정을 위한 SWAT HRU Mapping Module 개발 및 적용

류지철¹⁾·문유리²⁾·문종필³⁾·김익재²⁾·옥용식⁴⁾·장원석¹⁾·강현우¹⁾·임경재^{1)*}

Development and Application of the SWAT HRU Mapping Module
for Estimation of Groundwater Pollutant Loads
for Each HRU in the SWAT Model

Ji Chul Ryu, Yuri Mun, Jongpil Moon, Ik Jae Kim, Yong Sik Ok,
Won Seok Jang, Hyunwoo Kang, and Kyoung Jae Lim

1) 강원대학교 농업생명과학대학 지역건설공학과(Dept. of Infrastructure Engg, KNU)

2) 한국환경정책평가연구원(Korea Environment Institute)

3) 농촌진흥청 국립농업과학원(National Academy of Agricultural Science)

4) 강원대학교 농업생명과학대학 바이오자원환경학과(Dept. of Biological Environment, KNU)

제 출 : 2010년 11월 10일 수 정 : 2010년 12월 8일 승 인 : 2011년 3월 17일

국 문 요 약

농업 지역에서의 비점 오염원에 대한 기작과 발생을 해석하기 위해 많은 노력이 진행되고 있다. 또한 우리나라 뿐 아니라 다른 나라에서도 수질 악화가 점점 심해지고 있는 것이 사실이다. 비점 오염물질은 직접유출과 기저유출로 분리되어 하천으로 이동된다. 보통 지하수는 지표수에 비하여 수질이 양호하다고 여기지만 농업지역에서의 오염된 하천 주위의 지하수 오염은 심각할 수 있다. SWAT 모형은 적용성 및 정확도가 높기 때문에 수문 및 수질 연구에 있어 국내외에서 널리 사용되고 있다. 하지만 SWAT 모형은 소유역별 수문학적 반응단위인 HRU를 이용하여 유역 내 수문 및 수질을 평가하는데, 소유역 내 HRU의 공간적인 정보를 표출하도록 되어 있지 않기 때문에 다양한 영농방법이 지표 수 및 지하수에 미치는 영향을 공간적으로 분석하는 데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 SWAT 모형의 단점을 개선할 수 있는 SWAT HRU Mapping module을 개발하였으며 이를 황계 2리 유역에 적용하여 지하수 함양량 및 대수층 유입 NO₃-N 부하량 및 농도를 분석하였다. 이에 따라 농경지에서 대수층으로 유입되는 NO₃-N 부하량이 산림에 비해 상당히 많은 것으로 분석되었다. 또한 같은 밭 지역이라고 해도 재배되는 작물의 종류 및 시비량 등에 따라 대수층으로 유입되는 오염부하에는 상당히 다른 영향이 있을 수 있으며, 재배작물과 토양 특성에 따라 NO₃-N이 대수층으로 유입될 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 SWAT HRU Mapping module은 유역에서의 기저유출을 통한 오염원의 시공간적 분석을 하는 데 매우 유용하게 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

■ 주제어 ■ 질산성질소, 비점오염물질, 지하수 함양량, SWAT HRU Mapping Module

* 교신저자: kjlim@kangwon.ac.kr

** 본 연구는 가이아 프로젝트의 연구비지원으로 수행되었습니다. 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

Abstract

The numerous efforts have been made in understanding generation and transportation mechanism of nonpoint source pollutants from agricultural areas. Also, the water quality degradation has been exacerbated over the years in many parts of Korea as well as other countries. Nonpoint source pollutants are transported into waterbodies with direct runoff and baseflow. It has been generally thought that groundwater quality is not that severe compared with surface water quality. However its impacts on groundwater in the vicinity of stream quality is not negligible in agricultural areas. The SWAT model has been widely used in hydrology and water quality studies worldwide because of its flexibilities and accuracies. The spatial property of each HRU, which is the basic computational element, is not presented. Thus, the SWAT HRU mapping module was developed in this study and was applied to the study watershed to evaluate recharge rate and NO₃-N loads in groundwater. The NO₃-N loads in groundwater on agricultural fields were higher than on forests because of commercial fertilizers and manure applied in agricultural fields. The NO₃-N loads were different among various crops because of differences in crop nutrient uptake, amount of fertilizer applied, soil properties in the field. As shown in this study, the SWAT HRU mapping module can be efficiently used to evaluate the pollutant contribution via baseflow in agricultural watershed.

Keywords | Nitrate, Non-point Source Pollution, Recharge Rate, Ground Water, SWAT HRU Mapping Module

I. 서론

최근 강원도 고랭지 지역에서의 비점오염 문제가 환경문제로 대두되고 있다. 고랭지는 지형적으로 경사가 심하며 입자가 큰 석비레로 성토하여 집중강우에 의한 토양의 유실이 심각하게 발생하는 지역이다. 또한 유기물의 함량이 낮아 작물의 생육에 적합하지 않아 초기에 다량의 비료와 유기질 부산물을 투입하여 영농을 하고 있어 수질오염이 심각하다(박철수 외, 2005). 이러한 고랭지 지역의 수질오염 문제를 해결하기 위해 환경부는 대표적인 고랭지 농업 지역인 도암호를 비점오염관리지역으로 지정하였으며(환경부, 2007), 환경부뿐만 아니라 정부나 기타 환경관련 단체에서도 이와 같은 오염원에 대한 사회적 관심을 높이고 저감하려는 노력을 많이 기울이고 있다. 하지만 비점오염 물질량은 정확한 기작이 분석되지 않고 있으며 특히 비료, 농약의 사용 증가에 따라 영양염류 및 유해물질에 의한 수질영향이 갈수록 문제가 되고 있다(주진호 외, 2007). 이러한 비점오염원에 의한 오염은 지표수에 의한 오염과 지하수에 의한 오염이 있는데. 보통 지하수는 지표수에 비하여 수질이 양호하다고 여기지만, 농업 소유역에

서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 기저유출에 의한 오염부하가 전체 하천 $\text{NO}_3\text{-N}$ 오염부하의 50% 이상을 차지할 정도로(Shin, 2006) 하천 주위의 지하수 오염이 심각할 수 있다(김건하, 이호식, 2009). 또한 지하수는 토양의 아래에 위치하므로 그 수질은 지하수층 위에 존재하는 토양의 특성, 재배작물, 영농 형태, 오염원의 종류, 오염 정도에 크게 영향을 받는다. 이를 해결하기 위해 적정 시비량의 결정을 통한 염류 축적의 억제, 지하수로의 용탈 방지 및 오염원의 토양 중 이동에 대한 특성 등 다양한 연구가 진행되고 있다(강운주 외, 2001).

이러한 지하수에 의한 오염원을 산정하고 분석하기 위해 여러 가지 실험을 통한 분석이나 GLEAMS(Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) (Leonard et al., 1987), DRAINMOD(Drainage and related water management systems) (Water Resources Research Institute of the University of North Carolina, 1978), NAPRA WWW(National Agricultural Pesticide Risk Analysis World Wide Web) (Lim et al., 2003), SWAT(Soil and Water Assessment Tool) (Arnold, 1992; Arnold et al., 1998) 모형 등이 활용되고 있으며, 이 중 SWAT 모형은 다양한 작물 및 재배방법이 지표수 및 지하수 수질에 미치는 영향에 대한 유역단위로 평가가 가능하기 때문에 국내외에서 널리 활용되고 있다(김남원 외, 2009; 최대규 외, 2009; Ullrich et al., 2009; Pisinaras et al., 2010; Jang et al., 2010). SWAT 모형을 이용하여 수질경향을 예측한 기존의 연구들은 실측 모니터링 결과와 예측 모의 결과를 비교하였을 때, 수질 보정에 따른 R2 및 EI 지수가 높은 것으로 분석되었다. 하지만 이러한 연구들은 연구유역 내 경작지별 작물에 따른 영향을 고려하지 않았고, 모형의 검보정 시 경작지별 작물에 따른 시비량이나 작물의 경작 방법 등이 고려되지 않고 다른 수문 매개변수만을 이용하였기 때문에 실제 유역의 현황을 반영하지 못한 채 검보정이 이루어졌다. 이러한 이유는 SWAT 모형이 소유역별 수문학적 반응단위인 HRU (Hydrologic Response Unit)를 이용하여 유역 내 수문 및 수질을 평가하지만, 소유역 내 HRU의 공간적인 정보가 표출되지 않기 때문에 다양한 영농 방법이 지표수 및 지하수에 미치는 영향을 공간적으로 분석하는 데는 한계가 있기 때문이다.

따라서 본 연구의 목표는 1) SWAT HRU별 모의결과를 공간적으로 표출할 수 있도록 HRU 매핑 모듈을 개발하는 데 있으며, 2) 이를 농업소유역에 적용하여 지하수로 이동하는 오염원의 특성을 분석하는 데 있다. 본 연구의 결과는 지하수를 통한 오염원의 특성을 정량적으로 분석하고, 유역 특성에 적합한 지표수 및 지하수 관리 기법을 개발함으로

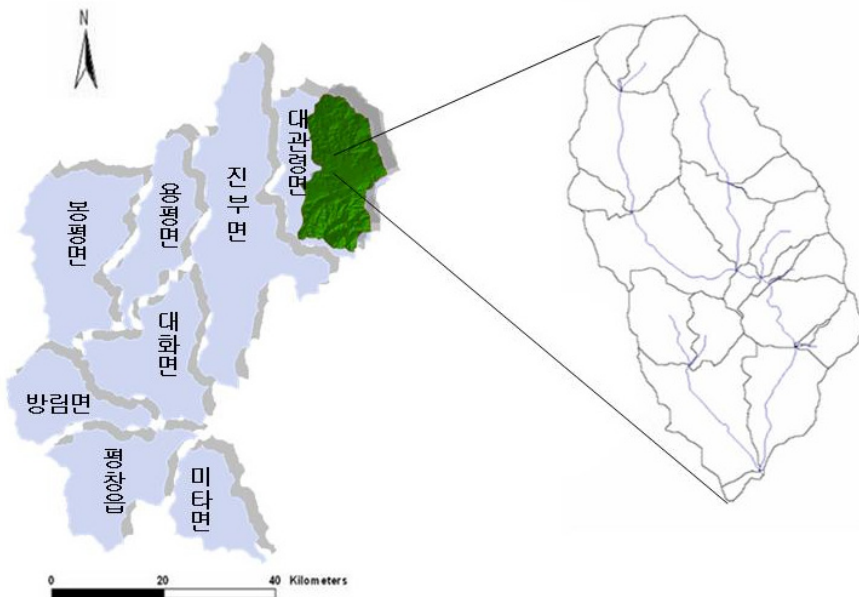
써 유역 내 수질을 개선하기 위한 최적 관리기법을 제공할 수 있으리라 판단된다.

II. 연구방법

1. 연구지역

본 연구의 연구 대상지역인 황계 2리 유역면적은 4.59km²이며 대관령 면적(221.6km²)의 약 2%를 차지하고 있다(그림 1). 황계 2리 유역은 해발고도가 높은 지대로서 지세, 토질 기후 등이 고랭지 농업에 적합한 지역에 속한다(허성구 외, 2008a). 본 연구에서는 고랭지농업연구소(2007)와 공동으로 2006년 4월 22일부터 2006년 8월 5일까지 황계 2리 유역의 일 유량, 질산성 질소 수질 모니터링, 작물별 시비량 자료 조사, 필지별 작물을 조사하였다.

그림 1 Location of study watershed, Daegwanryeong-myeon, Pyeongchang-gun



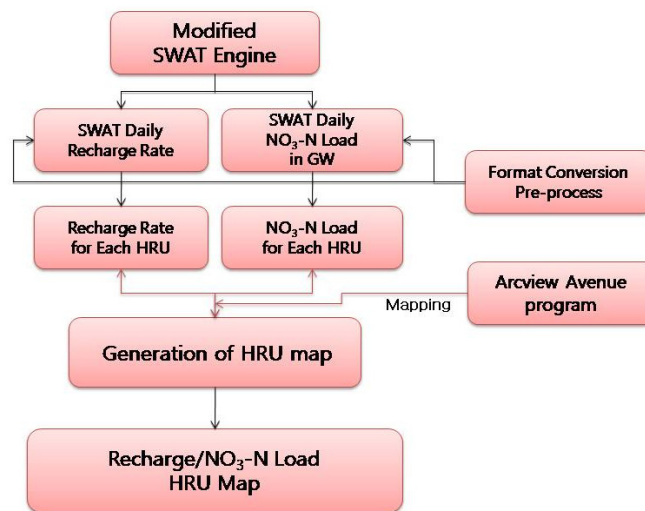
실측 유량의 경우 여름철 폭우로 인한 장비의 훼손으로 인해 측정이 중단되었지만, 질산성 질소에 대한 일별 농도, 실제 시비량 자료, 작물 지도를 구축하였기 때문에 유역의 특성을 다른 유역에 비해 더 자세하고 정확하게 SWAT 모형에 반영할 수 있을 것으로 판단하였고 이에 따라 유역 내 지하수 함양량 및 대수층 오염부하를 좀 더 정확히 모의할 수 있을 것이라 판단하여 황계 2리 유역을 연구지역으로 선정하였다.

2. SWAT모형의 개요

SWAT(Soil and Water Assessment Tool) 모형은 연속적 준 분포형 모형으로서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 그리고 관리상태의 변화에 따른 크고 복잡한 유역의 유출량, 유사량 및 농업화학물의 영향을 예측하기 위한 모형으로서 미국 농무성 농업연구소에 의해 개발된 모형이다(Arnold, 1992; Arnold et al., 1998).

이 모형은 미국 농무성에서 개발하여 이용해 온 CREAMS 모형, GREAMS 모형 및 EPIC 모형과 같은 농업 연구국 모형들을 결합하여 만들었다. 특히 SWAT는 강우-유출 모델과 수질모델이 GIS와 연계된 호환 모형으로서 장기 유량과 수질을 모의할 수 있으며, 미세측지역에서도 모의가 가능하며, 경작 형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화할 수 있는 특징을 지니고 있다.

그림 2 Overview of SWAT HRU Mapping Module

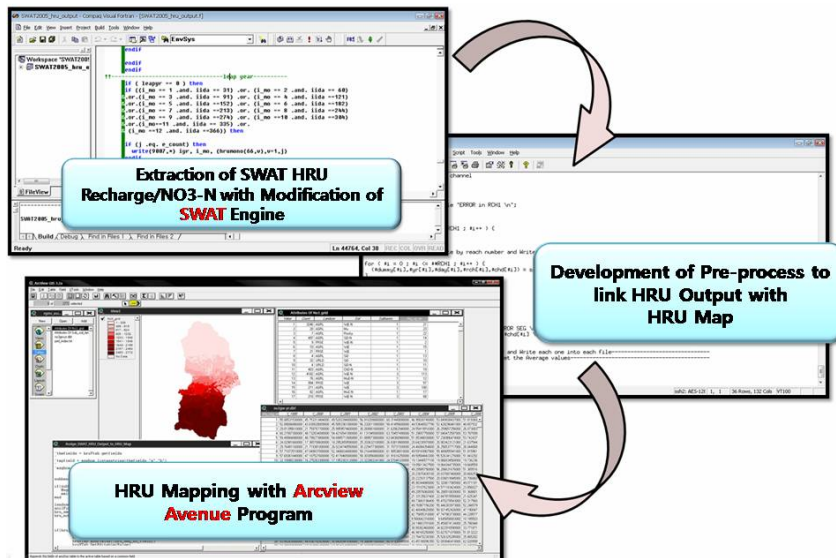


3. SWAT HRU Mapping Module 개발

SWAT HRU Mapping Module은 SWAT에서 계산되는 모의 값을 HRU 맵에 표출할 수 있는 프로그램으로 본 연구에서는 <그림 2>와 같은 순서로 개발하였다. <그림 2>에서와 같이 SWAT HRU Mapping Module의 개발순서를 간략하게 살펴보면, 먼저 HRU 소유역별로 일 지하수 함양량 및 대수층 NO₃-N 오염부하량을 산출할 수 있도록 SWAT 모형의 엔진을 수정하였고, 이렇게 산출된 HRU 소유역별 일 지하수 함양량 및 대수층 NO₃-N 오염부하량을 본 연구에서 개발한 전처리 프로세서를 이용하여 각각의 HRU 일련번호와 일치시킬 수 있는 포맷으로 변환하였다. 이렇게 포맷이 변환된 지하수 함양량 및 대수층 NO₃-N 오염부하량 자료를 ArcView Avenue Program으로 HRU 맵과 연계하는 전처리 프로그램을 개발하였다.

<그림 3>은 본 연구에서 개발된 SWAT HRU Mapping Module을 나타낸다. 그림에서 보이는 바와 같이 SWAT HRU Mapping Module은 SWAT 엔진 수정을 통해 생성되는 전체 유역에 대한 HRU 모의 결과값과, 이를 소유역별 HRU별 모의값으로 변환해 주는 전처리 프로세서, HRU 맵과 변환된 HRU 모의치를 연계해 주는 Avenue 프로그램으로 구성되어 있다.

그림 3 SWAT HRU Mapping Module



1) SWAT 엔진 수정을 통한 소유역별, HRU별 대수층 오염부하량 추출

SWAT HRU Mapping Module을 개발하기 위해서는 먼저 SWAT 엔진을 수정하여 HRU별 정보와 HRU별 모의값을 추출하는 작업이 필요하다. SWAT 모형은 소유역별 HRU별 수문, 토양유실, 그리고 비점 오염의 발생 및 거동을 일 단위(daily time-step)로 평가하는 모형이다. 이러한 일 단위 SWAT 모형의 소스코드를 수정하여 소유역별 그리고 HRU별로 지하수 함양량과 대수층 유입 오염 부하량을 추출하였다. 하지만 유역이 크고 HRU 개수가 많은 지역에서 소유역별, HRU별로 지하수 함양량 및 비점 오염 부하량을 추출 시 결과 파일이 대용량으로 커질 수 있다. <그림 4>는 월 단위 소유역별 HRU 지하수 함양량을 추출한 것이다.

그림 4 Recharge rate for all HRUs estimated with SWAT

Year	month	1	2	3	4	5	6	7	8	
2002	1	10.081	1.704	5.177	10.063	1.677	1.677	5.173	10.076	1
2002	2	28.667	21.439	6.903	28.654	21.422	21.422	6.900	28.663	21
2002	3	32.591	25.766	21.358	32.567	25.747	25.747	21.347	32.585	25
2002	4	12.376	9.662	8.271	12.365	9.654	9.654	8.265	12.373	9
2002	5	39.363	14.399	29.212	39.319	14.364	14.364	29.182	39.352	14
2002	6	23.715	9.255	19.757	23.695	9.235	9.235	19.742	23.710	9
2002	7	54.926	11.714	47.683	54.850	11.641	11.641	47.655	54.909	11
2002	8	125.704	53.967	92.980	125.637	53.908	53.908	92.954	125.689	53
2002	9	140.815	70.153	100.401	140.766	70.119	70.119	100.371	140.804	70
2002	10	80.659	36.851	56.400	80.610	36.820	36.820	56.363	80.647	36
2002	11	47.247	22.137	33.066	47.221	22.112	22.112	33.046	47.241	22
2002	12	18.300	8.574	12.807	18.290	8.565	8.565	12.800	18.298	8
2003	1	6.732	3.154	4.712	6.729	3.151	3.151	4.709	6.731	3
2003	2	10.341	5.964	1.631	10.327	5.951	5.951	1.630	10.337	5
2003	3	87.765	73.129	44.613	87.744	73.111	73.111	44.612	87.759	73
2003	4	143.987	110.576	72.719	143.964	110.558	110.558	72.707	143.981	110
2003	5	109.721	68.157	66.402	109.688	68.132	68.132	66.378	109.713	68
2003	6	57.995	29.799	37.142	57.964	29.771	29.771	37.118	57.988	29
2003	7	93.776	42.539	66.754	93.733	42.499	42.499	66.716	93.766	42
2003	8	87.179	40.954	63.186	87.146	40.924	40.924	63.164	87.171	40
2003	9	195.061	97.398	145.671	195.023	97.361	97.361	145.656	195.052	97
2003	10	129.337	65.010	95.285	129.304	64.980	64.980	95.262	129.329	65
2003	11	75.043	34.931	52.895	74.999	34.896	34.896	52.860	75.032	34
2003	12	53.081	26.404	36.888	53.056	26.383	26.383	36.868	53.075	26
2004	1	19.527	9.717	13.570	19.518	9.709	9.709	13.563	19.525	9

2) HRU별 지하수 함양량 및 대수층 유입 오염부하량 포맷 변환

SWAT 모형 내부에서는 소유역 내 HRU별 특성을 평가하는 데 있어서 전체 유역에서의 HRU 일련번호를 이용하여 평가하기 때문에 소유역 내 HRU별 정보가 사라지게 된다. 따라서 본 연구에서는 전체 유역 내 HRU별 모의값을 시간별로 변환하는 프로

그램을 개발하였으며 (그림 5), 소유역 HRU별 정보를 SWAT 모형의 HRU 입력자료에서 추출하여 이를 서로 연계하는 프로그램을 개발하였다.

그림 5 Recharge rate for each HRU using SWAT HRU Mapping Pre-processor

HRU_seq_no	Y_2002	Y_2003	Y_2004	Y_2005	Y_2006	Y_2007	Y_2008
1	614.443	1050.019	489.674	565.669	559.029	346.541	18
2	285.621	598.016	205.486	296.027	240.396	134.216	5
3	434.015	687.897	370.779	384.133	441.788	268.018	14
4	614.037	1049.677	489.316	565.218	558.576	346.162	17
5	285.265	597.715	205.217	295.630	240.032	133.895	5
6	285.265	597.715	205.217	295.630	240.032	133.895	5
7	433.799	687.680	370.654	384.055	441.555	267.834	14
8	614.346	1049.936	489.588	565.561	558.920	346.448	18
9	285.536	597.943	205.422	295.932	240.309	134.140	5
10	695.163	1150.666	558.631	647.507	636.149	399.429	21
11	695.163	1150.666	558.631	647.507	636.149	399.429	21
12	286.290	598.576	205.991	296.765	241.078	134.821	5
13	615.202	1050.655	490.344	566.513	559.878	347.303	18
14	535.059	879.780	432.644	484.420	494.360	306.646	16
15	615.456	1050.870	490.568	566.794	560.161	347.555	18
16	286.512	598.765	206.159	297.011	241.306	135.022	5
17	286.512	598.765	206.159	297.011	241.306	135.022	5
18	708.638	1043.341	593.579	573.749	731.081	548.891	25
19	615.502	1050.907	490.610	566.846	560.213	347.603	18
20	708.675	1043.370	593.613	573.769	731.119	548.932	25
21	535.316	879.969	432.871	484.688	494.631	306.891	16
22	616.155	1051.458	491.186	567.570	560.943	348.255	18
23	287.127	599.281	206.624	297.688	241.934	135.577	5
24	709.209	1043.776	594.075	574.057	731.651	549.476	25
25	616.126	1051.434	491.161	567.538	560.911	348.227	18
26	287.127	599.281	206.624	297.688	241.934	135.577	5

3) HRU 맵 생성 및 HRU 별 지하수 함양량 및 대수층 유입 오염부하량 매핑

앞에서 기술된 바와 같이 SWAT 모형은 HRU 맵을 내부적으로 생성하여 필요한 정보를 추출한 후 이를 저장하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 SWAT 모형의 HRU 생성방법과 동일한 방법으로 HRU 맵을 생성하였으며, 이렇게 생성된 HRU맵에 SWAT 예측치를 연결할 수 있는 ArcView Avenue 프로그램을 작성하였다. <그림 6>은 황계 2리 유역 내 소유역, 토지이용도, 그리고 토양도를 중첩시켜 생성한 HRU 맵과 그 속성 테이블을 보여 준다.

<그림 7>은 본 연구에서 개발한 SWAT HRU Mapping Module을 통해 추출된 지하수 함양량을 HRU별로 보여 주며 토지이용도와 토양도가 중첩된 HRU 분포 및 HRU 특성에 따른 연간 지하수 함양량을 나타낸다.

그림 6 HRU Map using subbasin, landuse, and soil maps

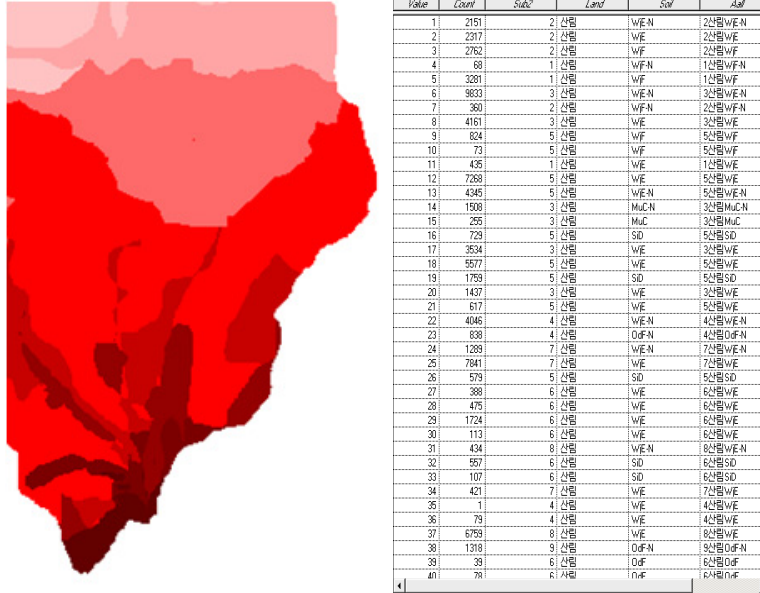
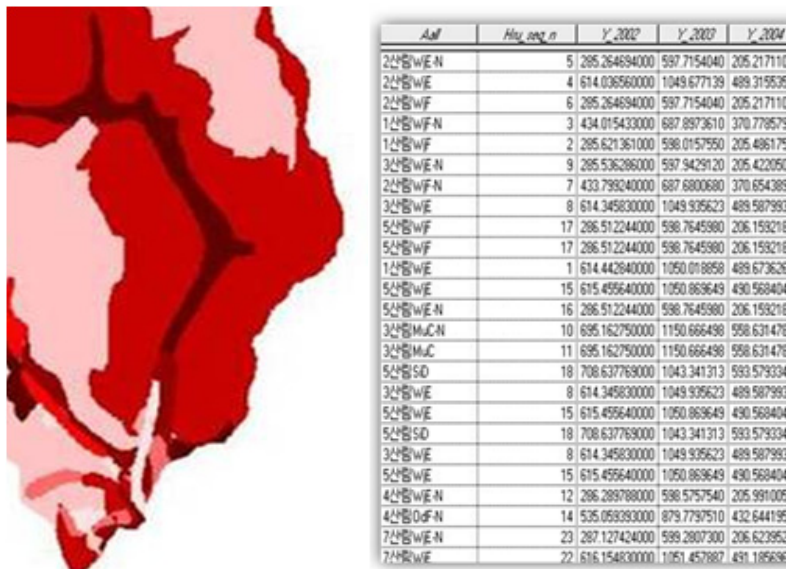


그림 7 Recharge rate generated by SWAT HRU Mapping module



4. SWAT HRU Mapping Module의 입력자료 구축 및 적용

1) 입력자료 구축

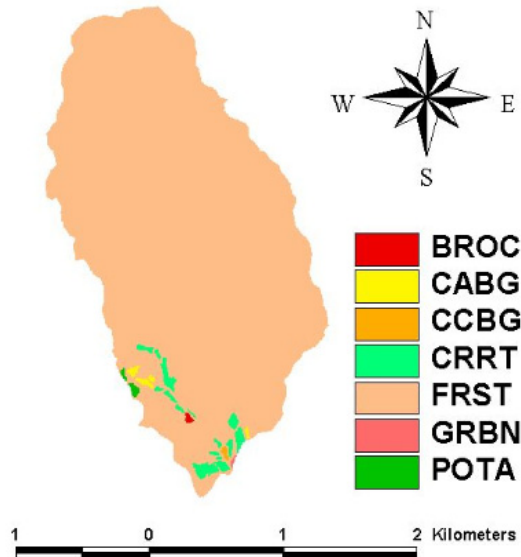
(1) 기상자료

SWAT 모형의 구동에 필요한 기상자료는 일 강수량, 일 풍속, 일 최대 및 최저온도, 일 습도, 일 일조량이다. 본 연구에서는 기상청의 대관령 지점에서 1974년부터 2008년까지 측정된 일 누계강우와 풍속, 일조량, 온도, 습도를 SWAT 모형에 이용하였다.

(2) 토지이용도

횡계 2리 유역의 토지이용 현황은 연구 유역 내 현장조사를 바탕으로 구축된 자료와 환경부의 1/25,000의 대분류 수치 토지피복도(2005) 자료를 이용하였다. <그림 8>에서 보이는 바와 같이 횡계 2리 유역의 농업지역 2.5% 중 당근(CRRT)이 0.9ha, 배추(CABG) 6.7ha, 감자(POTA) 5.8ha, 브로콜리(BROC) 0.1ha, 양배추(CCBG)가 0.4ha를 차지하고 있고, 나머지는 산림(FRST)이 차지하고 있다.

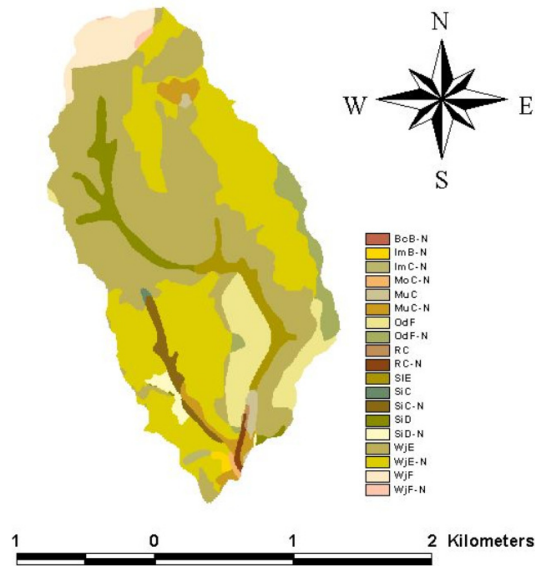
그림 8 Landuse in Heonggye 2-ri



(3) 토양도

횡계 2리 지역의 토양 속성은 <그림 9>와 같이 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 정밀토양도를 사용하였다. 횡계 2리 토양 속성 중 가장 많이 분포하는 토양은 WjE-N(32.93%)과 WjE(40.21%)이다.

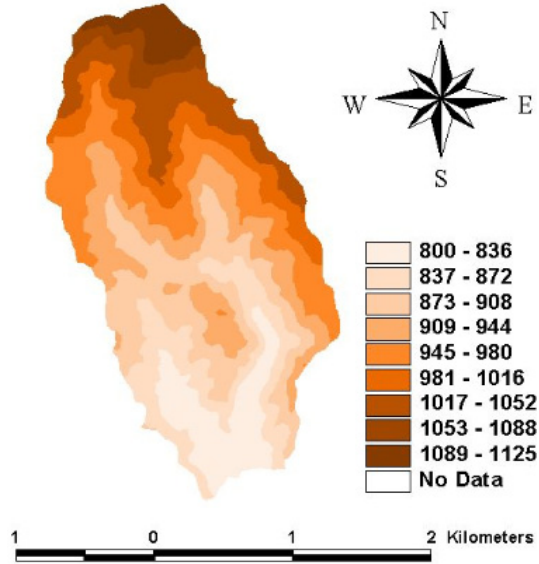
그림 9 Soil map in Heonggye 2-ri



(4) DEM (Digital Elevation Model)

횡계 2리 지역의 DEM은 ArcView GIS 프로그램을 이용하여 1:5,000 수치지도를 변환하여 격자 크기 5m × 5m인 DEM을 구축하였다(그림 10).

그림 10 DEM(Digital Elevation Model) in Heonggye 2-ri



(5) 재배작물 및 시비현황 DB

연구 구역 내 재배작물 및 시비현황은 National Institute of Highland Agriculture에서 제공한 <표 1>과 <표 2>의 영농자료와 방문조사(고랭지농업연구소, 2007)를 통해 얻은 조사자료를 활용하였다.

표 1 Status of fertilizer application for various crops in Heonggye 2-ri

Crops	Amount of applied fertilizer(kg/ha)		Fertilizer nutrient (N-P2O5-K2O)	Date of manure Application	Transplanting date
	manure				
Potato	manure	12,000	15-18-12 manure (12122kg/ha)	April 16	-
	N	150			
	P	180			
Carrot	manure	12,000	6-9.6-7.9-1500 manure (12122kg/ha)	May 20	N = 7(June 30), 7(July 20) K = 2.1(June 30), 2.1(July 20)
	N	60			
	P	96			
Cabbage	manure	12,000	5-6.5-4.3-1500 manure (12122kg/ha)	June 15	N = 3.2(July 15) K = 2.9(July 15)
	N	50			
	P	65			

표 1 Status of fertilizer application for various crops in Heonggye 2-ri (계속)

Crops	Amount of applied fertilizer(kg/ha)		Fertilizer nutrient (N-P2O5-K2O)	Date of manure Application	Transplanting date
	manure				
Broccoli	manure	12,000	8-7.1-4.5-1500 manure (12122kg/ha)	June 15	N = 4.3(July 15) K = 2.5(July 15)
	N	80			
	P	71			
Chinese Cabbage	manure	12,000	T-C=32 T-N=2.0 P2O5=3.49 K2O=0.96 MgO=0.67 C/N=16	June 25	1st (July 10) 2nd (July 25) 3rd (August 10) Harvest (August 25)
	N	20			
	P	34.9			
Soy Bean	manure	6,000	12-9-9 manure (12122kg/ha)	May 22	-
	N	40			
	P	75			

표 2 Planning, harvesting, and tillage dates for each crop at Heonggye 2-ri watershed

Crops	Planting		Harvest		Tillage	
	Apr. 25~ May 5	Straight row	Sep. 5	Straight row	14 days before planting	Rotary Hoe
Potato	Apr. 25~ May 5	Straight row	Sep. 5	Straight row	14 days before planting	Rotary Hoe
Carrot	Jun. 10	Straight row	Sep. 5	Straight row	14 days before planting	Rotary Hoe
Cabbage	Jun. 5	Contoured	Aug. 5	Contoured	14 days before planting	Rotary Hoe
Chinese Cabbage	Jun. 10	terraced	Aug. 5	terraced	14 days before planting	Rotary Hoe
Broccoli	May 15	Contoured	Jul. 30	Contoured	14 days before planting	Rotary Hoe
Soy Bean	Apr. 5	Contoured	Aug. 5	Contoured	14 days before planting	Rotary Hoe

2) SWAT HRU Mapping Module 적용

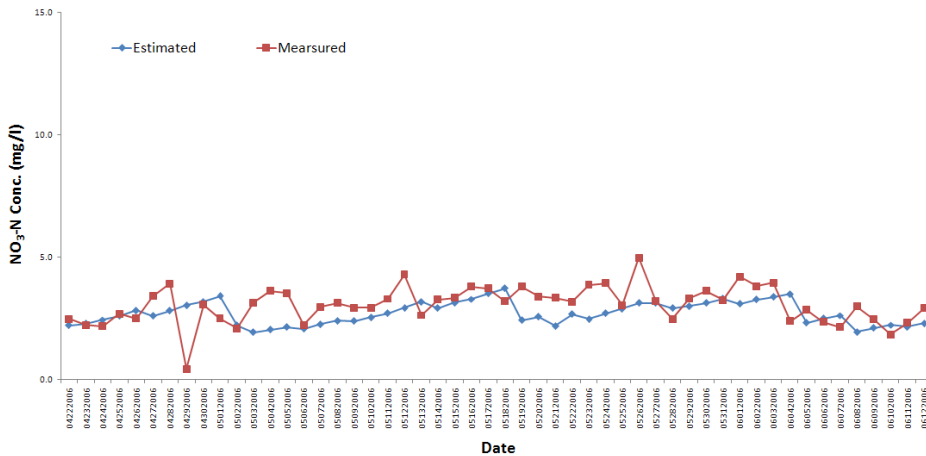
횡계 2리 유역의 지하수 함양량 및 대수층 유입 오염 부하량을 HRU별 공간적인 맵을 나타내고 분석하기 위해 본 연구에서 개발한 SWAT HRU Mapping Module을 횡계 2리 유역에 적용하였다. 횡계 2리 유역의 지하수 함양량 및 대수층 유입 오염부하량 HRU 맵을 나타내기 위해서 먼저 HRU 맵을 생성해야 하고 SWAT 모형의 결과를 HRU 맵에 연계해야 한다. 이러한 일련의 과정은 본 연구에서 개발된 SWAT HRU Mapping Module을 적용하여 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 황계 2리 소유역의 NO₃-N 실측치 및 예측치 비교

<그림 11>은 황계 2리 유역의 전체 모의 기간 중 2006년 4월 22일부터 2006년 7월 29일까지의 실측 일별 하천 NO₃-N 농도와 SWAT 모의 일별 NO₃-N 농도 변화를 나타낸 것이다. 소유역에서의 NO₃-N 농도를 정확하게 예측하기 위해서는 수문 컴포넌트별 보정 및 검증 작업이 선행되어야 하며, 유역 내 다양한 토양조사 및 영농자료 조사를 통해 모형의 입력자료를 구축해야 한다. 그러나 본 연구에서는 유역 내 각 필지별, 작물별 영농자료 조사가 완료된 유역을 연구 대상유역으로 선정하였으나, 유역 내 유출량 자료가 없어서 수문 컴포넌트 평가를 수행하지 못하였다. 대신 도암댐 유역 전체에 대해서 보정 및 검증 연구(허성구, 2006)에서 사용된 매개변수를 이용하여 황계2리 유역에 적용하였다. 이러한 이유로 일단위로 황계 2리 유역에서의 정확한 NO₃-N 농도를 산정하는 데 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 각 작물별 시비량 자료 및 재배방법을 모형의 입력자료로 활용하여 SWAT 모형 예측치를 분석하였지만 계분 퇴비의 부숙화 정도에 따라 퇴비 내 영양물질의 차이가 상당히 클 수 있고, 대상유역 내 토양의 영양염류 함유량 자료 부재 등으로 인해 예측치가 실측치와 차이를 보일 수 있다. 또한 이외에도 모형이 고려할 수 없는 많은 불확실성이 내재되어 있어 정확한 모의가 불가능 하지만 일반적인 수질 경향은 잘 예측하는 것으로 분석되었다.

그림 11 Result of Simulated NO₃-N Concentration in Hoenggye 2-ri



2. SWAT HRU별 지하수 함양량 산정

<그림 12>와 <그림 13>은 본 연구에서 개발한 SWAT HRU Mapping Module을 적용하여 2006년과 2007년 황계 2리 소유역 지하수 함양량을 공간적으로 나타내는 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 황계 2리 유역 내 토지이용도/토양도와 지하수 함양지도와 비슷한 경향을 보이고 있는데 이는 유역 내 토지이용 및 토양 특성이 지하수 함양에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 2007년도 지하수 함양량이 2006년도 지하수 함양량에 비하여 적었는데 이는 연강수량의 차이(2006년 연강수량 2,113.5mm, 2007년 연강수량 1,401.1mm)에 의한 것으로 분석되었다.

그림 12 Recharge Rate (mm/yr) in 2006

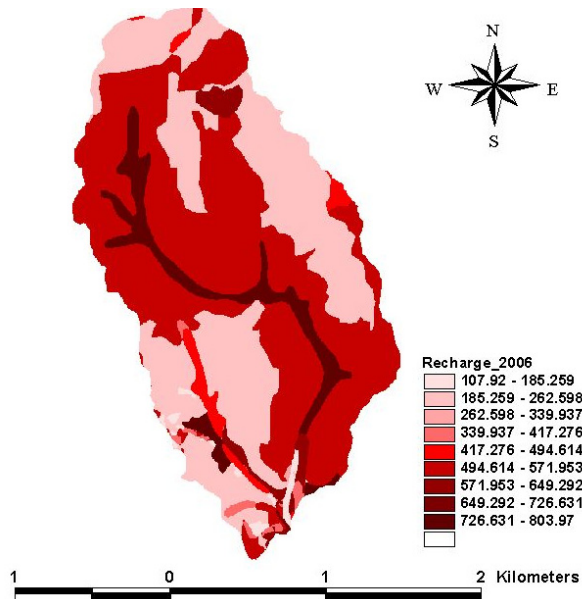
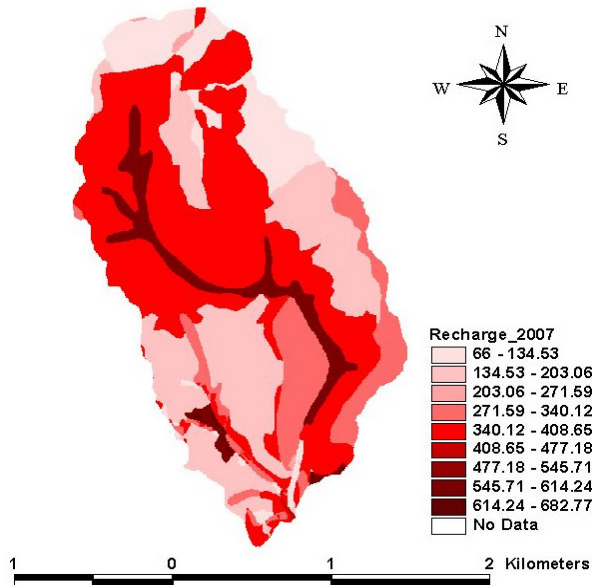


그림 13 Recharge Rate (mm/yr) in 2007



3. SWAT HRU별 대수층 유입 오염 부하량 산정

본 연구에서 개발한 SWAT HRU Mapping Module을 이용하여 황계 2리 유역의 대수층 유입 오염부하량을 산정하였다. <그림 14>와 <그림 15>는 2006년과 2007년의 NO₃-N 대수층 유입량 (kg/ha/yr)을 공간적으로 나타내는 그림이다. 황계 2리 유역의 대수층 유입 오염부하량은 지하수 함양량 예측경향과 비슷하지만 황계 2리 유역의 농경지가 많이 분포되어 있는 곳은 다른 지역에 비해 오염부하량이 크게 나타났다.

그림 14 HRU NO₃-N Load (kg/ha/yr) in Groundwater Flow in 2006

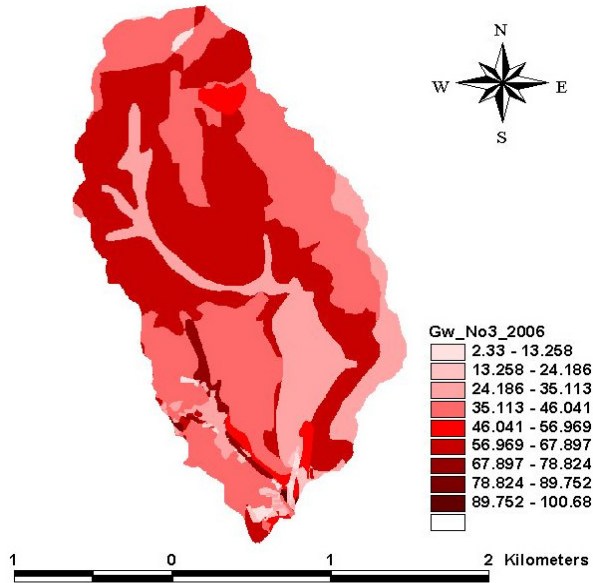
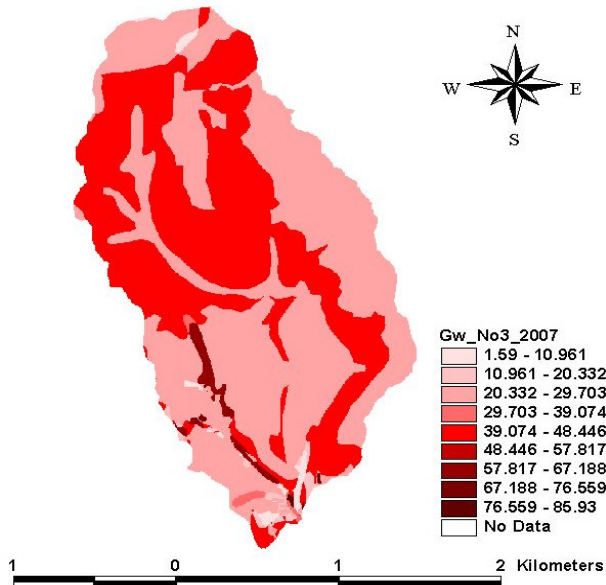


그림 15 HRU NO₃-N Load (kg/ha/yr) in Groundwater Flow in 2007



<표 3>은 위에서 2006년과 2007년 황계 2리 소유역의 작물종류별 연간 대수층 유입 NO₃-N 부하량 및 농도를 분석한 표이다. 2006년 대수층 유입 NO₃-N 부하량 및 농도를 비교하면 일반적으로 밭작물에서의 대수층 유입 NO₃-N 부하량이 큰 것으로 나타났다으며, 각각의 작물에 따라 많은 차이가 나타났고, 2007년 결과에서도 이와 비슷한 경향이 나타났다. 또한 <표 3>에서 보이는 바와 같이 대부분 밭작물에서 대수층으로 유입되는 NO₃-N의 농도가 산림에 비해서 상당히 높은 것으로 분석되었다. 따라서 밭작물 경작지에서의 대수층으로 유입되는 오염부하량을 줄이기 위해서는 다양한 지표수/지하수 수질 개선을 위한 최적 관리기법을 개발하여 적용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

표 3 NO₃-N Load in Groundwater Flow for Various Crops

Crops	2006		2007	
	NO ₃ -N Load in Groundwater (kg/ha/yr)	NO ₃ -N Conc. in Groundwater (mg/l)	NO ₃ -N Load in Groundwater (kg/ha/yr)	NO ₃ -N Conc. in Groundwater (mg/l)
Potato	54.74	23.11	39.47	22.17
Carrot	16.51	9.58	12.96	9.14
Cabbage	49.09	11.57	48.76	13.95
Broccoli	39.38	16.91	29.32	16.08
Forest	33.61	7.52	24.13	8.62
Chinese Cabbage	85.17	20.15	71.48	22.15
Soybean	51.78	19.26	42.34	19.13

국립환경연구원(1993)은 비점오염원으로부터의 오염물질 유출 특성 조사를 위해 우리나라 일부 지역을 대상으로 밭 작물별 시비 특성 및 질소, 인 유출 부하원단위를 제시한 바 있다. 우리나라 일부지역에 대해 단위포장 시험에 의한 질소수지 조사결과 옥수수(1974년) 재배 시 질소의 침투유출량은 29kg/ha/yr, 수수(1975년) 재배 시 57kg/ha/yr, 무와 당근(1976년) 재배 시 85kg/ha/yr, 그리고 옥수수와 배추(1997년) 재배 시 132kg/ha/yr로 연평균 76kg/ha/yr 의 질소 침투 유출량을 보였다(국립환경연구원, 1993). Suthar et. al.(2009)은 인도 Rajasthan 22개의 일부 농촌지역에서의 지하수의 NO₃-N 오염정도를 연구하였는데 Rajasthan 22개의 일부 농촌지역의 지하수 NO₃-N 오염농도를 살펴보면 최고로 낮은 지역은 7.1 mg/l이고 최고 높은 지역은 161 mg/l로 나

타났으며 Rajastahn 지역의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도값이 크게 나온 이유는 과도한 농약 사용과 가축의 분뇨, 유기물 찌꺼기 등에 의한 원인으로 사료되었다. 위의 선행연구 결과는 본 연구와 연구 대상지역이 다르고 재배 작물 및 영농정보가 다르기 때문에 지하수의 오염원 특성이 같을 수는 없지만 지역의 농업 유무나 형태 또는 작물이나 시비량에 따라서 대수층으로 유입되는 오염부하량과 농도가 크게 차이를 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한 황계 2리 유역에 대한 SWAT 모형의 예측 정확성은 유역 출구에서 측정한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 수질 농도로 평가하였지만, 대수층으로 유입되는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 장기 실측자료의 부재로 인해 SWAT 예측 대수층 유입 $\text{NO}_3\text{-N}$ 수질 자료에는 어느 정도 불확실성이 있을 수 있다.

IV. 결론

고랭지 밭이 많이 분포되어 있는 강원도 평창군 도암면 황계 2리 지역은 환경부가 비점오염지역 특별 대상 관리지역으로 선정했을 만큼 비점오염에 대한 오염이 심각하게 진행되고 있다. 따라서 이러한 비점오염원 중 대수층 유입 비점오염원을 분석하기 위해 본 연구에서는 수문, 유사, 비점오염 발생 및 이동 분석에 전 세계적으로 사용되고 있는 SWAT 모형의 HRU 모의 결과의 공간적 분석을 위해서 SWAT HRU Mapping Module을 개발하였다. 이 SWAT HRU Mapping Module 적용 가능성을 평가하기 위하여 강원도 평창군 도암면 황계 2리 소유역에 적용하여 지하수 함양량 및 대수층 유입 비점오염원을 공간적으로 분석하였다. 본 연구에서 결과로 제시한 HRU 맵은 지하수 함양량과 대수층 오염부하 특성을 시간적/공간적으로 평가하는 데 활용될 수 있다. 황계 2리 소유역의 2006년 대수층 유입 $\text{NO}_3\text{-N}$ 부하량 및 농도를 비교하면 일반적으로 밭작물에서의 대수층 유입 $\text{NO}_3\text{-N}$ 부하량이 큰 것으로 나타났다. 2007년 결과에서도 이와 비슷한 경향이 나타났다. 또한 대부분 밭작물에서 대수층으로 유입되는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 산림에 비해서 상당히 높은 것으로 분석되었다. 본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 같은 밭이라 하더라도 재배되는 작물의 종류 및 시비량 등에 따라 대수층으로 유입되는 오염부하에는 상당한 영향이 있을 수 있으며, 또한 재배 작물과 토양 특성에 따라 상당량의 $\text{NO}_3\text{-N}$ 가 대수층으로 유입될 것으로 판단된다. 따라서 하천에서의 오염부하 특성을 분석하고, 수질 개선을 위한 여러 가지 최적 관리기법 개

발 및 적용 시 질산성 질소의 대수층 유입 부하량의 정확한 분석 및 관리가 필요하며, 이러한 정확한 분석 및 관리를 하기 위해서는 대수층 유입 질산성 질소의 공간적인 분포를 이용하여 분석하는 것이 필요하기 때문에 본 연구에서 개발한 SWAT HRU Mapping Module이 효과적으로 사용될 수 있으리라 판단된다.

본 연구에 있어서 황계 2리 유역의 장기적인 실측 유량 데이터 및 장기적인 $\text{NO}_3\text{-N}$ 데이터 부재로 인해 모형의 검보정이 수행되지 못하였다. 또한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 등 비점오염원 물질들은 재배 작물과 토양 특성, 시비량 등에 많은 영향을 받지만 본 연구에서는 계분 등의 부숙화 정도에 따른 차이를 고려하지 못해 정확한 영농정보가 반영되지 못하였다. 비록 모형의 보정 및 검증 작업이 수행되지 않았으나 본 연구에서 개발된 SWAT HRU Mapping module을 이용하여 유역 내 지하수 함양량 및 대수층 유입 비점오염 부하의 공간적 특성 분포를 고려하여 모형을 평가한다면 지하수의 지속적인 개발 가능성 산정 및 다양한 지하수 오염 저감 대책을 수립할 수 있을 것으로 판단되며, 특히 작물별 대수층 오염관리 대책에도 유용하게 사용될 수 있을 것이라고 판단된다.

참고문헌

- 강윤주, 서영진, 이동훈, 최충렬, 박만, 최정. 2001. “논농사가 천층 지하수의 수질에 미치는 영향”. 『한국환경농학회』 20(4): 262-268.
- 김건하, 이호식. 2009. “질산성 질소 기저유출이 지표수 수질에 미치는 영향”. 『대한토목학회』 29(1): 105-109.
- 김남원, 정일문, 유상연, 이정우, 양성기. 2009. “제주 지역 지표수-지하수 연계 해석”. 『한국환경과학회』 18(9): 1017-1026.
- 박철수, 정영상, 주진호, 이정태. 2005. “고랭지 석비레 성토 밭의 토양유실 저감을 위한 최적영농관리방안”. 『한국토양비료학회지』 38(5): 119-126.
- 고랭지농업연구소. 2007. 『GIS를 이용한 고랭지 농지 이용별 환경부하 평가기술 개발』.
- 국립환경연구원. 1993. 『비점원오염원으로부터의 오염물질 유출 특성 조사를 위한 방법론적 연구』.
- 장원석, 유동선, 정일문, 김남원, 전만식, 박윤식, 김종건, 임경재. 2009. “SWAT HRU 단위의 경사도/경사장 산정을 위한 SWAT SD-HRU 전처리 프로세서 모듈 개발” 『한국물환경학회』 25(3): 351-362.
- 주진호, 정영상, 양재의, 옥용식, 오상은, 유경렬, 양수찬. 2007. “낙동강 수계 고랭지 밭의 비점오염 물질 유출 특성 조사 및 단위 유출량 산정”. 『한국환경농학회』 26(3): 223-238.
- 최대규, 신현석, 윤영삼, 김상단. 2009. “SWAT모형을 이용한 영양물질 모의 및 유달을 추정에의 적용”. 『한국물환경학회』 25(3): 375-385.
- 허성구. 2006. 『도암댐 유역의 산림파편화에 따른 수(水) 환경영향 평가』. 강원대학교 석사학위 논문, p.81.
- 허성구, 김재영, 유동선, 김기성, 안재훈, 윤정숙, 임경재. 2007. “객토 농경지의 토양특성을 고려한 도암댐 유역에서의 수문 및 유사 거동 모의”. 『한국농공학회』 49(2): 49-60.
- 허성구, 유동선, 김기성, 안재훈, 박윤식, 김종건, 장원석, 임경재. 2008a. “SWAT 모형을 이용한 상류수계 비점오염 평가”. 『한국관계배수학회』 15(2): 36-49.
- 허성구, 김남원, 박윤식, 김종건, 김성준, 안재훈, 김기성, 임경재. 2008b. “SWAT ArcView GIS Extension Patch를 이용한 소유역 분할에 따른 수문 및 유사 거동에 미치는 영향평가”. 『한국물환경학회』 24(2): 147-155.

- 환경부. 2007. <http://www.me.go.kr/kor/index.jsp> [2007.8.13].
- Arnold, J. G. 1992. *Spatial scale variability in model development and parameterization*. Ph.D. thesis, Purdue University.
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams. 1998. "Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development". *Journal of American Water Resources Association*, 34(1): 73-89.
- Jang, W. S., Y. Park, J. Kim, N. Kim, J. Choi, Y. S. Ok, J. E. Yang, and K. J. Lim. 2010. "Development of the SWATDWDWM for Accurate Estimation of Soil Erosion from an agricultural field". *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(1): 79-88.
- Lim, K. J., B. A. Engel, K. S. Kim, and J. D. Choi. 2003. "Nutrient Enabled National Agricultural Pesticide Risk Analysis (NAPRA) WWW Decision Support System Agricultural Best Management Practices". *Korean Society of Rural Planning* 9(1): 85-93.
- Leonard, R. A., W. G. Knisel, and D. A. Still. 1987. "GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems". *American Society of Agricultural Engineers*, 30(5): 1403-1418.
- Pisinaras, V., C. Petalas, G. D. Gikas, A. Gemitzi, and V. A. Tsihrintzis. 2010. "Hydrological and water quality modeling in a medium-sized basin using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT)". *Desalination*, 250(1): 274-286.
- Shin, Y. C. 2006. *Analysis of pollutant load characteristics by baseflow using ESTIMATOR Model*. M.S. diss. Kangwon National University, p.67.
- Water Resources Research Institute of the University of North Carolina. 1978. *A water management model for shallow watertable soils*.
- Suthar, S., P. Bishoi, S. Singh, and P. K. Mutiyar. 2009. "Nitrate contamination in groundwater of some rural areas of Rajasthan, india". *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3): 189-199.
- Ullrich, A., and M. Volk. 2009. "Application of the Soil and Water Assessment Tool(SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity". *Agricultural Water Management*, 96(8): 1207-1217.