

SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향

The Effect of Future Land Use Change on Hydrology and Water Quality Using SWAT Model

박종윤*, 이미선**, 이용준*, 김성준*

Jong-Yoon Park*, Mi-Seon Lee, Yong-Jun Lee, Seong-Joon Kim

건국대학교 대학원 사회환경시스템공학과*, 지역건설환경공학과**

{bellyon*, misun03, dydwms, kimsj}@konkuk.ac.kr

요 약

최근 도시화·산업화가 진행됨에 따라 급격한 토지이용 변화가 발생되어 이로 인한 수질악화 등의 문제가 대두되면서 효율적인 수자원 관리를 위한 대책이 필요한 실정이다. 특히, 비점오염물질로 인한 수질 악화는 수문현상 및 토지이용변화와 밀접한 관련이 있어 그 발생량을 추정하기에 매우 어려움이 많았다. 근래 수문·수질관리를 하기 위한 방법으로 GIS기반의 수질모형을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)모형은 다양한 토지이용변화로 인한 장기유출과 수질모의가 가능한 모형으로서 적극 활용되고 있다. 본 연구에서는 경안천 유역을 대상으로 ArcView기반의 AVSWAT2000모형을 이용하여 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. Landsat TM, ETM⁺ 위성영상으로부터 시계열 토지이용도를 작성하고, CA-Markov기법을 이용하여 2030, 2060, 2090년도의 미래 토지이용변화를 예측하였다. 모형의 입력 자료인 수문·기상자료와 지형자료(DEM, 토양도, 하천도 등), 수질자료(TN, TP, SS)를 구축하여 미래 토지이용변화에 따른 유출량과 비점오염 부하량의 변화를 예측하였다.

핵심 용어 : SWAT, CA-Markov, 미래 토지이용변화, 비점오염원

1. 서론

최근 급격한 도시화·산업화가 진행되고 인구가 증가하면서 토지이용의 변화를 가져왔다. 도심지의 증가와 산림 및 농경지의 감소는 우수의 불투수지역 확대와 우수기능을 저하 시키며, 물순환 체계 왜곡에 따른 하천 유출량의 변화와 함께 비점오염원에 의한 수질악화 등의 문제를 야기시킨다. 따라서, 수자원 관리 및 계획에 있어 수문·수질 모델링을 통한 비점오염물의 발생과 유출량의 추정은 매우 유익한 수단이다(환경부, 1995).

GIS(Geographic Information System)

와 RS(Remote Sensing)의 발전은 그 활용범위가 확대되면서 수문모형의 필수 입력 자료인 토지이용도를 작성할 수 있게 되었고, 주기적인 데이터 획득에 의한 정보갱신과 수치화, 시계열분석에 용이하다는 장점을 이용함으로써 과거 수십년간의 인공위성 영상자료를 이용한 토지이용의 경년변화 추정이 가능하게 되었다. 그 동안 국내에서는 김성준 등(2003)이 WMS HEC-1 수문모형을 이용하여 토지이용이 하천유출에 미치는 영향을 파악하기 위한 방법을 제시하였으며, 이길성 등(2005)은 도시계획, 하수도계획 등의 문헌통계 자료를 통하여 미래 토지이용변화를 예측하고,

SWMM과 PLOAD모형에 적용하여 유출변화 및 비점오염 부하량을 예측한 바 있다. 이렇듯 최근 토지이용변화에 따른 유출특성과 수질변화를 분석하는 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.

이에 본 연구에서는 CA-Markov기법을 이용하여 미래 토지이용변화를 예측하고 수문·수질 모형인 SWAT모형에 적용함으로써, 미래 토지이용변화에 따른 하천 유출량과 비점오염 부하량의 변화 양상을 파악하고, 그 결과를 정량적으로 분석하고자 한다.

2. SWAT 모형과 CA-Markov기법

2.1 SWAT 모형의 개요

수문·수질분석을 위한 모형으로 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold에 의해 개발된 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)모형을 선정하였다. SWAT모형은 준 분포형 장기 강우-유출 모형으로서 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적의 4가지 부모모형으로 구성되어 있다.

수문 부모모형에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRUs)로 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 잠재증발산량의 산정은 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor방법과 Penman-Monteith 방법을 사용한다.

2.2 CA-Markov 기법

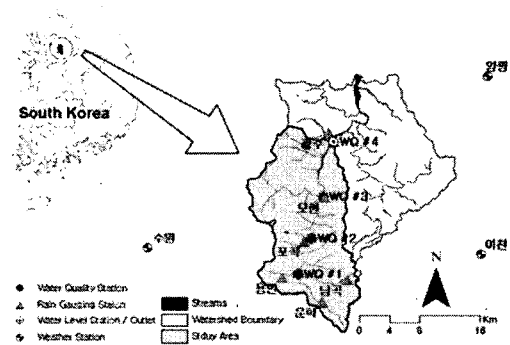
CA-Markov연쇄기법은 Markov Chain모델과 Cellular Automata의 이론적 체계가 결합한 기법이다. Markov Chain모델은 수치영상 또는 격자 기반의 GIS 데이터로부터 쉽게 계산되며, 현재 토지이용의 변화된 경향을 잘 반영하는 장점을 가지고 있지만, 시간이 변하더라도 전이 확률은 항상 일정하고 모든 위치에 동일하게 적용되는 것을 기본 가정으로 하기 때문에 실제적인 토지

피복변화의 경향을 나타내기 힘들다. 따라서, 시계열 공간자료를 모의함에 있어 일정한 간격의 추이경향을 가지는 자료의 변화만을 고려하게 되면 급격한 변화폭을 가지는 공간자료의 처리에는 어려움이 따른다. 이런 단점은 Cellular Automata 기법을 사용하여 보완 할 수 있는데, Cellular Automata는 비선형 동적 모형으로써 시계열 공간자료의 변화양상을 인접한 격자에 거리, 방향에 의해 공통적으로 적용시킴으로써 지역적인 인접 격자의 상태를 지속적으로 변화시킨다.

3. 모형의 적용

3.1 대상유역 및 수문·수질자료

본 연구에서는 팔당호 유입하천인 경안천의 경안 수위관측소를 유출구로 하는 상류유역을 대상유역으로 선정하였다(그림 1).



<그림 1> 대상유역 및 수문·수질 관측망

유역면적은 약 260.04km²로 연 평균 강우량은 1200.5mm이며, 행정구역상 경기도 광주시와 용인시에 속한다. 모형의 적용을 위하여 1995~2006년까지의 관측소별 일 강우자료와 기상청에서 제공하는 일별 온도, 태양복사량, 풍속, 상대습도 자료를 기상 입력자료로 구축하였다. 모형의 검·보정 작업을 위해 수위관측지점에서의 유량자료를 구축하였으며, 수질관측지점에 대한 월 평균 유시량(Sediment, SS) 및 총인(Total Phosphorus, TP), 총질소(Total Nitrogen, TN)의 환경부 수질자료를 구축하였다.

3.2 미래 토지이용도 작성

CA-Markov기법에 대한 검증을 위해서 대상 유역의 1987, 1991, 1996, 2001, 2004년 Landsat TM, ETM⁺ 위성영상으로부터 시계열 토지이용도를 작성하고 1996, 2001년 토지이용도를 이용하여 CA-Markov기법에 의한 2004년 토지이용도를 추정하였다. 이를 실제 분류한 2004년 토지이용도와 비교한 결과, CA-Markov기법에 의해 추정된 토지 이용도는 실제 2004년 토지이용도와 유사함을 알 수 있었다(표 1).

미래 토지이용도 작성은 CA-Markov기법을 이용하여 2030, 2060, 2090년에 해당하는 Grid 형식의 30m×30m 토지이용도를 작성하였다(그림 2). 표 2는 시계열 토지이용의 변화에 따른 토지피복 분류별 면적변화를 나타낸 것으로 산림의 경우 1987년부터 지속적으로 감소하여, 2090년에는 약 296km²로 줄어드는 것으로 예측되었다. 주거지와 나지의 경우는 1987년부터 계속해서 증가되는 경향을 보였으며, 초지는 골프장 개발 등으로 인하여 48.97km²로 증가 하였다. 논과 밭의 경우 추이 변화는 약간 증가한 후 수렴되었는데, 이는 논과

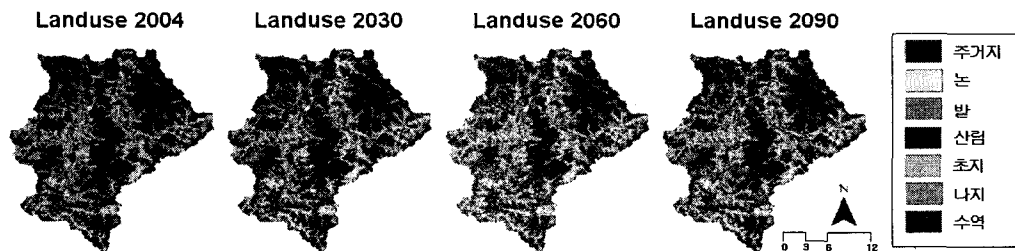
밭의 분포가 수계와 산림에 인접하는 공간 특성을 가짐으로 보인다.

<표 1> 토지피복분류결과와 CA-Markov기법의 비교

분류 항목	CA-Markov	2004년도	절대오차(km ²)
수역	1.54	3.64	-2.10
주거지	20.00	21.77	-1.77
나지	30.21	37.76	-7.55
초지	37.47	41.19	-3.72
산림	365.79	345.77	20.03
논	48.40	47.30	1.10
밭	58.021	63.37	-5.66

3.3 GIS자료 구축

SWAT모형의 기본 지형입력자료 구축을 위하여 NGIS의 1:5,000 수치지도로부터 격자크기 30m의 DEM(Digital Elevation Model)을 제작하였다(그림 3). DEM을 이용하여 흐름방향, 흐름합산 등의 지형 전처리 과정을 수행하고, 하천 및 유역 경계 추출은 시행착오법을 통해 기존 하천을 최적으로 표현하는 임계면적(Threshold Area)을 300ha로 설정하여 11개의 소유역으로 구분하였다.

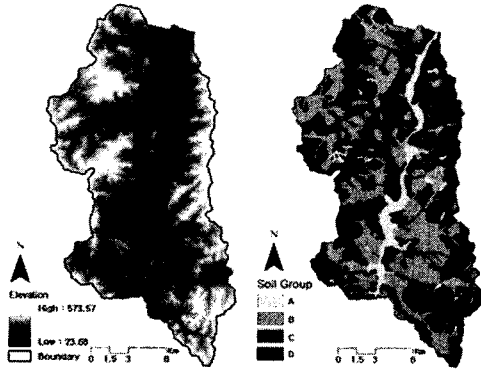


<그림 2> CA-Markov기법을 이용한 미래 토지이용도

<표 2> 추정된 토지이용도와 실제 분류한 토지이용도의 면적 비교

(단위 : km²)

항목 \ 년도	1987년	1991년	1996년	2001년	2004년	2030년	2060년	2090년
수역	3.72	3.03	4.89	2.26	3.64	2.40	2.52	2.41
주거지	12.68	17.21	17.85	19.99	21.78	31.48	35.87	37.88
나지	4.28	29.29	28.04	28.86	37.77	41.71	44.58	44.96
초지	34.15	17.02	10.82	25.86	41.19	43.04	44.10	48.97
산림	369.78	361.19	367.60	373.12	345.77	319.07	310.12	296.12
논	90.79	74.88	76.04	60.08	47.30	52.74	53.30	56.39
밭	45.71	46.84	55.85	51.44	63.67	70.69	70.62	74.39



<그림 3> DEM과 토양도(수문학적 토양그룹)

토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀도토양도를 기준으로 총 20개의 토양통에 대한 수문학적 토양그룹(A, B, C, D)의 분류와 토양층의 개수 및 토양층별 깊이를 농업과학기술원의 자료를 사용하여 산정하였다. 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 값들은 Saxton 등(1986)의 결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값(usersoil.dbf)을 부여하였다. HRU 생성을 위한 토지이용과 토양의 면적비율을 8% : 8%로 설정하여 총 196개의 HRU로 구분하였다.

4. 모형의 보정 및 검증

4.1 유출량 매개변수 선정 및 검·보정

Surface flow와 Base flow를 기준으로 유출 총량 및 침투유량과 감쇄곡선 형태에 영향을 미치는 유출관련 매개변수 7개를 선정하였다. 표 3은 보정에 사용된 매개변수 및 사용된 보정값을 나타내고 있으며, 실측자료가 비교적 양호하다고 판단되는 1999, 2000년을 보정기간으로 설정하고, 2001, 2002년에 대하여 검정을 실시하였다. 보정 기간동안 유역 유출구에서의 총 유출량을 먼저 보정한 후, 지표유출과 기저유출량을 보정하였다.

모의결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위해서 결정계수(R^2)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였으며, 모형의 효율성은 Nash와 Sutcliffe(1970)가 제

안한 모형효율성계수(Model Efficient, ME)를 사용하였다. 보정기간동안의 총 강우량 2404.8mm에 대하여 실측치와 모의치의 유출량은 200.9mm, 유출률은 8%의 차이를 보였으며, 검·보정기간동안의 전체적인 통계치와 수문곡선의 유출경향을 살펴볼 때 비교적 모의치가 실측치를 잘 따르는 것으로 나타났다(그림 4, 표 4).

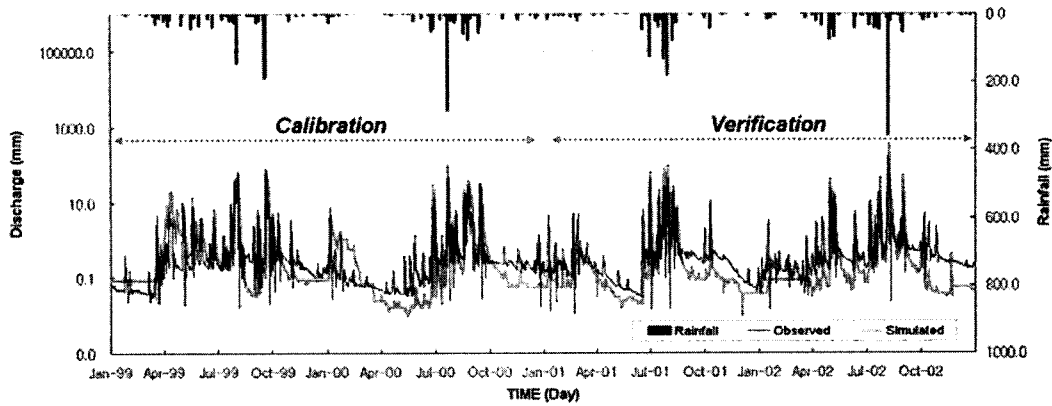
<표 3> 유출관련 매개변수 및 보정결과

Input file	Parameter	Calibrated Value	Range	
			min.	max.
*.mgt	CN ₂	▲ 8	35	98
*.gw	GWQMN	2500	0	5000
	GW_REVAP	0.2	0.02	0.2
	REVAPMN	400	0	500
	CH_K2	50	-0.01	150
*.sol	SOL_AWC	▽ 0.05	0	1
*.hru	ESCO	1	0	1

4.2 오염 부하량 매개변수 선정 및 검·보정

유사량 및 영양물질 보정을 위해 관련 매개변수를 선정하고 조절범위 안에서 수차례 값을 조정함으로써, 비점오염원에 따른 수질모의를 하기 위한 최적의 매개변수를 선정하였다(표 5).

SWAT 모형에서 질소와 인에 대한 영양물질의 모의 기작은 유사량에 의한 영양물질의 이동과 유출에 의한 영양물질의 모의 기작으로 이루어져 있다(심상보, 2006). 따라서 영양물질에 대한 보정을 하기 앞서 유사량에 대한 보정 및 검정을 실시하였다. 유사량에 대한 보정은 유역출구지점(WQ #4)의 월 평균 SS(mg/L) 농도자료를 이용하였다. 그림 5는 보정결과에 따른 실측치와 모의치를 비교한 것으로 모의치가 실측치의 경향을 잘 따르고 있으며, 높은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다(표 6).



<그림 4> 실측치와 모의치의 수문곡선 비교 (1999~2002)

<표 4> 통계적 변량을 이용한 유출량 검·보정결과

Period	Year	Rainfall (mm)	Discharge (mm)		Runoff Ratio(%)		R ²	RMSE (mm/day)	ME
			Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			
Calibration	1999	1296.8	781.40	637.99	0.60	0.49	0.73	2.24	0.72
	2000	1108.0	617.37	559.86	0.56	0.51	0.59	2.59	0.36
Verification	2001	1118.1	677.36	543.17	0.61	0.49	0.73	3.35	0.63
	2002	1463.5	930.63	801.44	0.64	0.55	0.71	7.10	0.63

<표 5> 수질관련 매개변수 및 보정결과

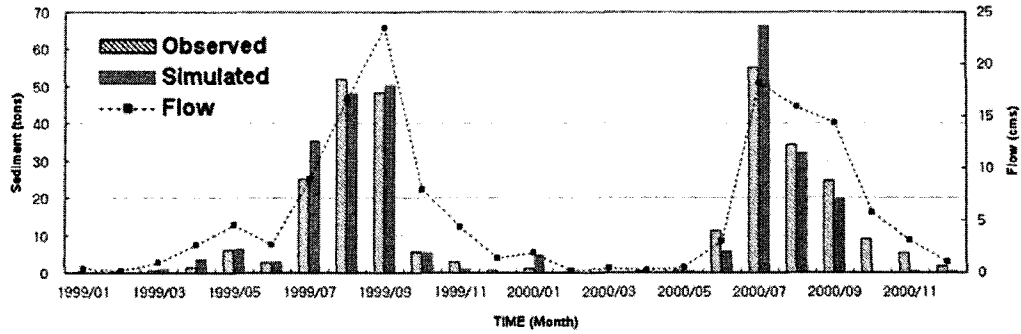
Input file	Parameter	Calibrated Value	Range	
			min.	max.
*.mgt	USLE_P	4	-5	5
	USLE_C	0.45	0.001	0.5
*.hru	SLSUBBSN	145	10	150
	SLOPE	0.3	0.0001	0.6
	BIOMIX	0.9	0	1
*.chm	SOL_ORGN	0.01	0	10000
	SOL_NO ₃	0.0001	0	5
*.bsn	NPERCO	0.0001	0	1
*.swq	BC3	0.2	0.2	0.4
*.swq	RS3	1	0	1
*.swq	RS4	0.1	0.001	0.1
*.hru	ERORGN	0.1	0	5
*.swq	BC4	0.01	0.01	0.7
*.swq	RS2	0.1	0.001	0.1
*.swq	RS5	0.1	0.001	0.1
*.hru	ERORGP	1	0	5

유사량 보정 후, 영양물질인 월 평균 TN(mg/L), TP(mg/L) 농도자료를 이용하여 보정을 실시하였다. 그 결과, 대체적으로 경향은 비슷하나 실측치에 비해 모의치가 다소 높게 분석되었다(표 6).

5. 미래 토지이용변화에 따른 수문-수질 변화 분석

5.1 수문변화 분석

수문변화 분석은 기준년도(2004년)의 수문 모의결과를 토대로 모든 수문, 기상 입력자료 및 조건을 동일하게 설정한 상태에서 2030, 2060, 2090 년도의 미래 토지이용변화에 따라 유출구에서의 유출량 및 유출률을 비교 하였다. 유출률의 큰 변화는 없었지만, 2030년에 총 유출량이 1.8% 증가 하였으며, 2060년과 2090년의 유출량의 증가율은 약 0.6%와 0.7%로 나타났다.



<그림 5> 보정 결과에 따른 실측치와 모의치의 유사량 비교(1999~2000)

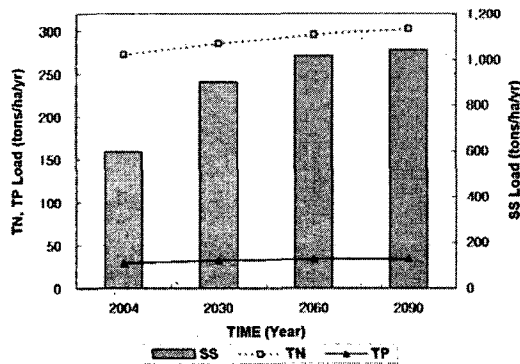
<표 6> 통계적 변량을 이용한 수질 검·보정결과

Year	Flow (cms)	Sediment load (tons/ha)		R ²	a	TN load (tons/ha)		TP load (tons/ha)		R ²		a		
		Obs.	Sim.			Obs.	Sim.	TN	TP	TN	TP			
C	1999	74.21	145.6	153.9	0.97	3.30	65.8	69.2	2.79	7.34	0.55	0.93	4.57	0.63
	2000	64.52	144.5	130.8	0.95	4.98	44.8	63.8	2.90	7.01	0.72	0.70	3.85	0.61
V	2001	59.35	90.7	75.5	0.64	0.03	36.2	60.9	2.66	6.65	0.72	0.63	5.16	0.69
	2002	83.96	134.6	236.3	0.95	0.01	67.3	78.8	2.22	8.15	0.89	0.44	3.60	0.88

a: RMSE (tons/ha), C: Calibration Period, V: Verification Period

5.2 수질변화 분석

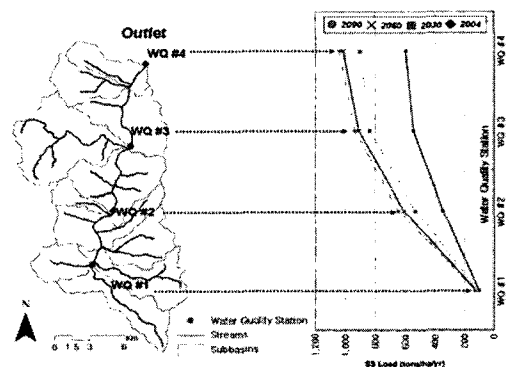
미래 토지이용변화에 따른 비점오염 부하량의 변화를 분석하기 위해 수문분석과 같은 방법으로 유역출구지점(WQ #4)에서 기준년도와의 수질 모의결과(SS, TN, TP)를 비교하였다(그림 6).



<그림 6> 토지이용변화에 따른 수질변화

모의결과를 살펴보면, 2030년 유사량이 306.6tons, 약 51.4% 증가함에 따라 총인과 총질소의 량도 5.0%와 11.7%로 각각 증가

하였다. 2060년과 2090년으로 갈수록 증가률은 감소하지만, 계속되는 증가추세를 보였다. 한편, 하천흐름에 따른 소유역별 비점오염 부하량의 변화 형태를 알아보기 위해 4개의 수질 관측지점(WQ #1, 2, 3, 4)으로부터 유사량의 증가 추세를 살펴 보았다. 그 결과, WQ #1 지점의 상류유역에서 내려오는 유사량의 변화는 작았지만, WQ #2 지점에서 큰 폭의 증가량을 보이며, 하류로 갈수록 점차 증가하는 것을 알 수 있었다(그림 7).



<그림 7> 하천흐름에 따른 유사량 변화

6. 결론

본 연구에서는 과거 꾸준한 토지이용의 변화가 이루어진 경안천 유역을 대상으로 과거 20여년 간의 토지피복 분류결과와 구축된 수문·기상 자료 및 GIS자료(DEM, 하천도, 토양도 등)를 기반으로 SWAT모형을 통한 유출 및 수질모의를 실시하였다. 모형의 적용성을 평가한 결과, 실측치의 경향을 잘 나타내었으며, 수문분석결과 도시화에 따른 산림의 감소와 도심지, 나지의 확장으로 2004년을 기준으로 2090년에 총 유출량이 3.1% 증가하였다. 비점오염 부하량의 수질변화는 산림이 농경지, 초지로 변화함에 따라 비점 오염원의 증가와 함께 시비량이 증가하게 되어, 유사량이 증가하고 TN, TP 부하량 또한 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다.

따라서, 본 연구의 결과는 향후 유역관리에 있어 수문·수질 관리 계획을 수립하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원격탐사개발사업의 세부과제인 “정밀 농업/임업 정보추출/분석 기술 개발(M104DA010003-07D0100-00118)”에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- 김남원, 정일문, 원유승 (2006). 완전연동형 SWAT-MODFLOW 모형을 이용한 지표수-지하수 통합 유출모의. 대한토목학회논문집, 제26권, 제5B호, pp. 481-488.
- 김성준, 박근애, 정인균, 권형중 (2003). WMS HEC-1을 이용한 안성천 평택수위 관측소 상류유역의 수문 경년변화 분석. 한국수자원학회논문집, 제36권, 제4호, pp. 609-621.
- 심상보 (2006). SWAT 모형을 이용한 대청호 유역의 비점오염물질 유출특성 연구. 석사학위논문, 청주대학교.
- 이길성, 정은성, 박선배, 진락선 (2005). 학의천 유역의 토지이용변화에 대한 유출량 및 수질의 변화. 한국수자원학회, 학술발표회 논문집, pp. 664-668.
- 이용준, 박근애, 김성준 (2007). 시계열 Landsat 영상과 CA-Markov기법을 이용한 미래 토지 이용변화 예측. 대한원격탐사학회, 학술발표회 논문집, pp. 55-60.
- 환경부 (1995). 비점오염원 조사연구. 환경부 연구보고서.
- Arnold, J.G., Allen, P.M. (1999). Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from streamflow records, Journal of American Water Resource Association 35 (2), 411-424.
- Arnold, J.G., Neitsch, S.L., Kiniry, J.R., Williams, J.R., and King, K.W. (2002). Soil and Water Assessment Tool : Theoretical Documentation Ver. 2000. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, TWRI Report TR-191.
- FitzHugh, T.W., Mackay, D.S. (2000). Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. Journal of Hydrology, 236, 35-53.