

GIS와 RS를 이용한 유역 오염총량 추정 및 관리

○강문성* · 박승우**

I. 서 론

유역의 수계로 유입되는 하·폐수를 배출허용 기준이나 방류수 수질기준에 따라 규제하는 농도 규제 중심의 수질관리는 수질오염 물질 배출이 수환경 용량을 초과하는 경우에는 수질개선에 한계가 있다 (환경부, 2000). 특히, 오염자가 정해진 배출기준치를 준수하더라도 동일한 수역에 집중되어 자정능력을 초과하는 오염물을 배출하는 경우에는 공공수역에 설정된 수질기준치를 달성할 수가 없다. 따라서 개별오염원에 대한 규제방식에서 일정한 유역내의 모든 오염원을 관리할 수 있는 유역별 오염총량관리 (total maximum daily loads, TMDL)가 필요하다.

오염총량관리는 수질기준을 만족시키기 위해 수체에서 받아들일 수 있는 수질 항목별 오염부하량의 최대치를 계산하여 삭감량을 산정한 후 유역별로 재분배하는 것이다 (Novotny & Olem, 1993; USEPA, 1999; NIER, 2001). 미국에서는 1972년 수질환경보전법 (Clean Water Act)의 303 (d)항에 의거하여 배출수 수질기준을 만족함에도 불구하고, 수질기준을 만족하지 못할 경우 TMDL을 각 주로 하여금 적용하도록 하였다 (USEPA, 1999; NIER, 2001). 미국의 TMDL 프로그램은 농도규제만으로는 수질기준을 달성할 수 없을 경우에 총량을 규제하는 것으로서, 점원오염원과 비점원오염원 그리고 불확실성에 대한 안전율을 고려하고 있다 (Novotny & Olem, 1993; USEPA, 1999)

우리 나라의 오염총량관리는 수질목표달성과 당해연도의 오염배출량의 총량관리를 모두 포함하고 있다 (환경부, 1998). 즉, 기준치 초과지역과 달성지역을 구분하여 기준치 초과지역은 삭감량을 할당하여 삭감가능량 및 삭감량을 고려하고, 기준치 달성지역에 대해서는 허용량을 할당하여 허용가능량 및 허용량을 고려하도록 오염총량관리 목표수질을 설정하고 있다. 우리 나라에서의 오염총량관리제도는 상수원 수질 개선을 위하여 1998년 처음으로 도입되었으나, 아직 초기단계라 해도 과언이 아니다.

오염총량의 추정 및 평가는 국내의 토지이용 특성을 반영할 수 있는 오염총량예측 모형의 개발과 더불어 방대한 모니터링 자료와 모형의 입력 자료를 효율적으로 처리할 수 있는 GIS와 원격탐사기법의 활용이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 소유역에서의 오염총량을 효과적으로 해석하기 위하여 원격탐사기법 및 지리정보시스템과 오염총량추정모형인 SWAT모형을 결합하여, 시험유역에 대하여 유역의 수문 및 수질관련 인자의 현장 모니터링을 실시하며, 시험유역의 위성영상 및 수치지형자료를 구축하여 오염총량모의모형의 보정 및 검정을 실시하여 모형의 적용성을 평가하는 데 목적이 있다. 또한, 소유역별 오염총량의 공간적 분포에 따른 정량적인 비교 평가를 통하여 모형의 응용성을 평가하도록 한다.

* 정희원, 서울대학교 농공학과 신진연구원

** 정희원, 서울대학교 농공학과 교수

II. 연구방법

1. 위성영상분석

위성영상을 이용한 토지피복분류는 인공신경망 모형과 최대우도법을 이용하였다. 위성영상은 Landsat-TM 영상을 사용했다.

2. 오염총량추정모형

오염총량추정모형은 SWAT모형을 사용하였다. 우리 나라의 토지이용특성을 고려하여 논에서의 지표배수량산정 모듈을 추가하여 유출량을 산정하였다.

3. 도형자료 구축

GIS 도형자료는 NGIS와 RGIS를 이용하여 시험구역에서의 기본도와 주제도를 구축하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시험구역

모형의 적용성을 검토하기 위하여 발안저수지 유역을 시험구역으로 선정하였다. 발안저수지 유역은 경기도 화성군 발안면과 팔탄면에 위치하고 있으며, 1996년부터 서울대학교 농공학과에서 수문/수질 모니터링을 실시하고 있다.

시험구역의 유역특성인자는 유역면적, 형상계수, 유로장, 최대기복량, 기복량비, 하천평균경사, 하천빈도 등을 조사하였다. 발안유역의 HP#6 소유역은 면적이 385 ha, 유로장이 3.1 km, 유역경사가 1.5m/km였고, 형상계수가 1.56으로서 정방형의 소유역이다.

기상자료와 강우자료는 발안지 유역으로부터 약 10km에 위치한 수원기상대의 자료를 이용하였다. 발안유역과 수원측후소 간의 공간적인 차이가 존재하므로 보다 정확한 강수량 자료를 얻기 위해 발안저수지 유역내에 강수측점을 설치하였으며, 이를 수원측후소 강수량자료와 비교하였다. 이는 자료의 결측시 결측구간에 대하여 자료의 보정에 이용하였다.

2. 수문 자료

HP#6 측정의 하천수위자료는 자기 수위계와 압력식 수위계를 설치하여 수위를 관측하였다. 폭우시에 유속을 측정하여 수위-유량관계를 결정하고, 이로부터 유량자료를 수집하였다. 압력식 수위계는 Global Water에서 만든 WL-14 Global Water Level Logger를 이용하였다. 하천 수위측점에 대한 수위-유량관계를 조사하기 위해, 수위별로 유량을 조사하였다. 현장 출장을 통해 폭우시 고수위 유량 측정과 평상시 저수위 유량 측정을 측정하여 수위-유량관계를 구하였다.

논의 관개량은 시험구역내의 발안저수지의 시기별 관개량을 조사하였고, 시험구역의 지하수위 변화를 고찰하기 위하여 발안유역에 GW#1, GW#2, GW#3 지점을 선정하여 지하수위를 관측하였다. 시험지구의 지하수위 측정은 G & C Tech.의 Water Level Indicator를 이용하여 주기적으로 수행하였다.

3. 수질 자료

오염원 자료는 생활계, 축산계, 산업계 등으로 구분하여 해당 기관의 소장 자료와 현지 답사를 통해서 기초자료를 수집하여 정리하였다. 시험구역의 오염원은 봉담면 면사무소의 자료를 이용하여 인구, 축산, 그리고 산업계를 조사하였다.

수질 표본의 채취는 월 2회를 기준으로 결빙기 후인 3월~11월 기간동안에 정기적으로 실시하였으며, 폭우시에는 수시로 채수하였다. 수질 표본의 분석은 pH, DO, 수온 등은 현장에서 측정하였으며, 부유물질, TN, TP 등의 영양물질, 기타 수질 항목 등은 수질 표본으로부터 실험실에서 정량분석을 실시하였다.

시험구역에서의 오염부하량을 측정하기 위해 하천 측정에서 SS, TN, TP에 대한 오염부하량

(L)과 유량 (Q)의 회귀식인 L-Q식을 구하였다. 시험구역의 L-Q식은 1996년부터 2000년까지 측정된 자료를 이용하였으며, 특이치는 제외하였다.

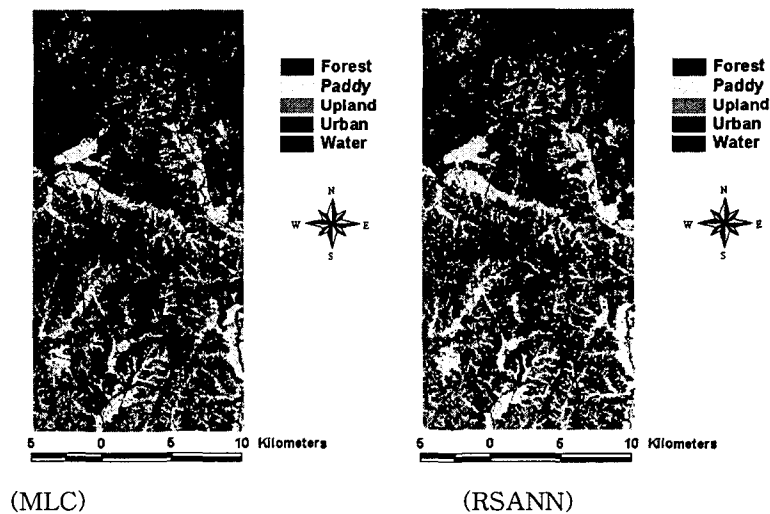
지하수의 수질 변화는 GW#1, 2, 3 측정점을 대상으로 1999년부터 2000년까지 2개년간 총 15회에 걸쳐 수질 모니터링을 실시하였다.

강우 중에 함유된 질소와 인의 양은 해당지역의 대기 오염정도에 따라 상이하며 동일지역에서도 시기별 변화를 보이게 되므로 강수 수질 채취는 포장과 약 0.5 km 거리에 위치한 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과 옥상에서 실시하였다.

4. 위성영상 분석

최대우도법과 RSANN 모형에 의해 카테고리 분류를 수행하고 각각의 분류 성능을 비교 평가하였다. <그림1>은 최대우도법과 RSANN 모형에 의한 분류 결과를 보여주고 있다. 최대우도법과 RSANN 모형에 의한 분류 결과, RSANN모형은 최대우도법에 비해 도시지역과 밭에 대한 카테고리의 분류가 선명한 것으로 나타났다.

오차행렬에 의한 각각의 방법에 대한 분류성능을 평가한 결과, 최대우도법은 태만오차가 0.0~62.6%, 과실오차가 0.0~39.7%의 범위를 보였으며, RSANN모형은 각각 0.0~21.7%, 3.4~28.6%의 범위를 보임으로서 RSANN모형의 분류 성능이 뛰어난 것으로 나타났다. 전체적인 분류 성능을 나타내는 전체의 분류 정확도 역시 RSANN 모형에 의한 방법이 90%로서 최대우도법의 82.7%보다 높게 나타났다.



<그림1> Result of category classification using MLC and RSANN

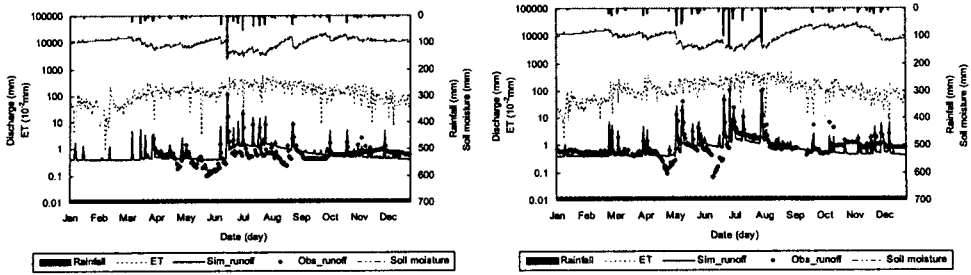
5. 모형의 보정

SWAT 모형의 보정은 시험구역인 HP#6 소유역에 대하여 1996년~1998년의 자료를 사용하였다. SWAT 모형의 보정을 위한 목적함수는 AGNPS 모형에서와 동일하게 RMSE와 RMSE를 이용하여 최적 매개변수를 추출하였다. 모형의 보정 순서는 먼저 유출량에 대하여 보정하였고, 유사량, 그리고 영양물질인 총질소 및 총인의 순서로 수행하였다.

1) 유출량

<그림2>는 보정기간인 1996년과 1997년에 대하여 강우량에 따른 증발산량, 토양수분함량, 그리고 유출량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있다. 실제 강우량에 대한 모의 유출량의 비로서 나타낸 유출율은 강우량이 880mm로서 적었던 해인 1996년에는 0.56이었고, 강우량이 1,204mm

로서 많았던 해인 1997년에는 0.68로서 상대적으로 큰 값을 보였다.



<그림2> Observed and simulated runoff at the HP#6 watershed (1996 & 1997)

2) 유사량

SWAT 모형을 이용한 일별 유사량의 추정은 RMSE와 RMAE를 목적함수로 하여 경사장, 유역 평균경사, Manning의 조도계수, USLE C인자, 그리고 USLE P인자 등으로 보정하였다.

<표1>은 최적 매개변수로부터 결측일을 제외한 일별 유사량의 추정 결과를 실측치와 비교하여 나타내고 있다.

<표1> Observed and simulated suspended solids for calibration period

Period	No. of measure (day)	Total period (kg/ha/yr)	Measured period (kg/ha)		RB (%)	a	b	EI	R ²
			Obs.	Sim.					
1996	274	362.12	217.93	330.70	36.09	6.37	0.74	0.70	0.77
1997	350	753.67	578.56	753.24					
Total	624	1,115.79	796.49	1,083.94					

a-RMSE (kg/ha/day), b-RMAE (kg/ha/day)

3) 영양물질

SWAT 모형에 의한 총질소와 총인의 추정은 SOL_N과 SOL_P의 값을 보정하였다. <표2>는 총질소와 총인의 실측치와 모의치를 비교하여 평가한 결과를 통계적인 변량을 이용하여 나타내고 있다.

<표2> Observed and simulated TN and TP for calibration period

Item	Period	No. of measure (day)	Total period (kg/ha/yr)	Measured period (kg/ha)		RB (%)	a	b	EI	R ²
				Obs.	Sim.					
TN	1996	274	12.76	19.99	11.13	41.45	0.15	0.69	0.73	0.84
	1997	350	24.23	40.32	24.19					
	Total	624	36.99	60.31	35.32					
TP	1996	274	1.61	1.22	1.38	5.69	0.02	0.62	0.42	0.81
	1997	350	2.77	2.62	2.74					
	Total	624	4.38	3.84	4.12					

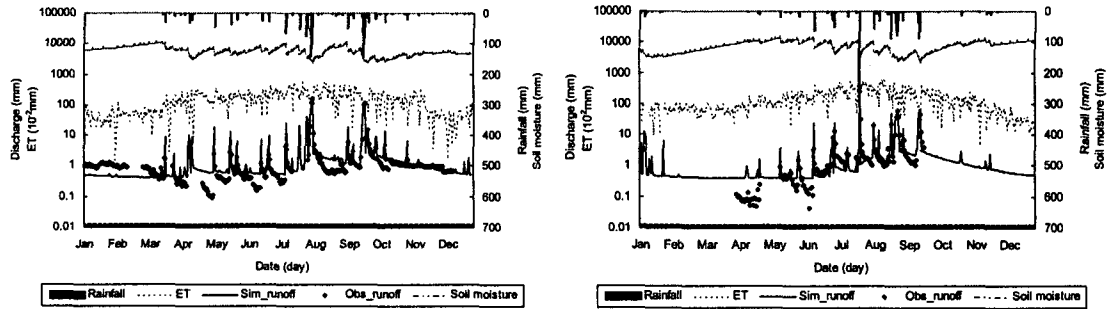
a-RMSE (kg/ha/day), b-RMAE (kg/ha/day)

6. 모형의 검정

SWAT 모형의 검정은 발안유역의 HP#6 소유역의 1999년과 2000년 자료에 대하여 수행하였다.

1) 유출량

SWAT 모형의 검정을 위한 유출량의 모의 결과는 <그림3>에서와 같다.



<그림3> Observed and simulated runoff at the HP#6 watershed (1999 & 2000)

2) 유사량

SWAT 모형에 의한 유사량의 검정 결과는 <표3>에서 보는 바와 같다. 검정 결과, 모의 유사량이 실측 유사량에 비하여 다소 높게 추정되었으며, 이는 모형의 보정 결과와 유사한 결과이다.

<표3> Observed and simulated suspended solids for verification period

Period	No. of measure (day)	Total period (kg/ha/yr)	Measured period (kg/ha)		RB (%)	a	b	EI	R ²
			Obs.	Sim.					
1999	299	1,024.84	802.39	875.18	16.13	10.08	0.59	0.89	0.89
2000	150	1,099.09	829.78	1,020.19					
Total	449	2,122.93	1,632.17	1,895.37					

a-RMSE (kg/ha/day), b-RMAE (kg/ha/day)

3) 영양물질

SWAT 모형에 의한 총질소와 총인의 검정 결과는 <표4>에서와 같다.

<표4> Observed and simulated TN and TP for verification period

Item	Period	No. of measure (day)	Total period (kg/ha/yr)	Measured period (kg/ha)		RB (%)	a	b	EI	R ²
				Obs.	Sim.					
TN	1999	299	29.62	36.39	24.38	16.13	10.08	0.59	0.89	0.85
	2000	150	30.34	30.95	27.11					
	Total	449	59.97	67.34	51.49					
TP	1999	299	3.49	2.45	3.00	25.30	0.04	0.67	0.19	0.85
	2000	150	3.58	2.19	2.84					
	Total	449	7.07	4.64	5.84					

a-RMSE (kg/ha/day), b-RMAE (kg/ha/day)

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 소유역에서의 오염총량을 효과적으로 해석하기 위하여 원격탐사기법 및 지리정보시스템과 오염총량모형을 결합하여, 시험유역인 발안유역의 HP#6 소유역에 대하여 유역의 수문 및 수질관련 인자의 현장 모니터링을 수행하였으며, 시험유역의 위성영상 및 수치지형자료를 구축하여 오염총량모의모형의 보정 및 검정을 실시하여 모형의 적용성을 평가하였다. 또한, 본 연구에서는 소유역별 오염총량의 정량적인 비교 해석을 통하여 모형의 응용성을 평가하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. RSANN 모형과 MLC법의 분류성능을 평가 결과, 오차행렬에 의한 총 분류정확도는 RSANN 모형이 90%, 최대우도법이 83%의 값을 보임으로서 RSANN 모형의 분류 성능이 더 우수한 것으로 나타났다.

2. NGIS 및 RGIS 수치지도와 정밀토양도 등을 이용하여 소유역 수치표고모델, 수계망도, 경사방향도, 토양도 등을 구축하였고, RSANN 모형에 의해 Landsat TM 영상을 대상으로 토지이용도를 작성하였다. 이로부터 유출곡선번호도, 토양유실관련 인자도 등을 추출하였다.

3. 논에서의 지표배수량을 고려하여 SWAT 모형을 1996년과 1997년 자료에 대하여 보정한 결과, RB는 0.01%, RMSE는 2.29mm, RMAE는 0.40mm, EI는 0.93, 그리고 결정계수는 0.93의 값을 보였다. 유사량의 RB는 36%, RMSE는 6.37 kg/ha, RMAE는 0.74 kg/ha, EI가 0.70, 그리고 결정계수는 0.77로 나타났다. 총질소의 RB는 42%, RMSE는 0.15 kg/ha, RMAE는 0.69 kg/ha, EI는 0.73, 그리고 결정계수는 0.84였으며, 총인의 경우에도 EI가 양의 값을 보였으며, 결정계수도 0.81로서 비교적 모의치와 실측치가 유사한 경향을 보였으며,

4. 1999년과 2000년 자료에 대하여 SWAT 모형을 검정한 결과, 유출량의 RB가 8.7%, RMSE는 6.21mm, RMAE는 0.51mm, EI는 0.87, 그리고 결정계수가 0.87의 값을 보였다. 유사량의 RB는 16.1%, RMSE가 10.08 kg/ha, RMAE가 0.59 kg/ha, EI가 0.89, 그리고 결정계수가 0.89로 나타났다. 총질소는 RB가 16.13%, RMSE가 10.08 kg/ha, RMAE가 0.59 kg/ha, EI가 0.89, 그리고 결정계수가 0.85로서 비교적 모의치와 실측치가 유사한 경향을 보였으며, 총인의 경우에도 EI가 양의 값을 보였고, 결정계수가 0.85로서 모형의 응용성이 있는 것으로 평가되었다.

5. SWAT 모형을 이용하여 소유역별 오염총량을 평가하기 위해서 23개 소유역별 오염총량을 추정하고 수질목표를 설정하여 소유역별 삭감부하량을 재분배한 결과, 소유역별 유사량과 영양물질의 총량은 1996년~2000년의 모든 자료기간에 대하여 도시화가 진행되고 있거나 주거지가 밀집되어 있는 2번과 7번 소유역이 큰 값을 보였으며, 목표수질을 4급수로 설정하였을 때 소유역별로 할당되는 영양물질 재분배 삭감량의 경우에도 2번과 7번 등의 소유역에서 크게 나타났으며 산림지와 농경지가 대부분인 8번, 17번 18번 소유역 등은 이미 오염총량 수질목표를 달성하고 있는 것으로 나타났다.

V. 참고문헌

1. 강문성, 2002. 인공신경망 원격탐사기법과 비점오염모형을 이용한 오염총량모의시스템 개발, 서울대학교 박사학위논문.
2. 강문성, 박승우, 2000. 다시기 위성영상을 이용한 소유역의 토지피복변화 평가, 한국농촌계획학회지, 6(2): 50-58.
3. 강문성, 박승우, 2001. 인공신경망이론을 이용한 소유역에서의 장기 유출 해석, 한국농공학회지, 제43권 제2호, pp. 69-77.