

간척담수호 유역의 비점원오염 추정을 위한 SWMM의 적용  
-홍보간척지구-

Application of SWMM for pollutant load estimation  
of nonpoint source in Boryung watershed

○이준우\* · 김성준\*\*

I. 서론

간척사업으로 조성된 담수호의 경우 도시지역에서의 지표, 산업, 생활 유출수 및 농지에서의 농약 및 비료의 유입에 따른 영양물질과 침전 물질로 인한 호소의 부영양화로 이어지는 문제점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서는 유역에 대한 수질, 수리, 수문 특성에 대한 정확한 조사가 이루어져야 하고 특히 오염 배출원에 대한 조사가 이루어져야 한다. 대상유역의 경우 토지이용형태가 농지형태를 띄고 있어 비점원 오염이 대부분이다. 오염물질의 상당량을 도로나 논밭·토양에서 강우시 담수호로 유입된다. 따라서 적절한 유역관리를 위해서는 유역에서 유출되는 비점원 오염 부하량을 정확하게 추정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 오염부하 유출모형 중 많은 적용사례가 있는 SWMM (Storm Water Management Model)을 적용하여 1999년 3월에서 10월 동안의 보령호 유역에서 유출되는 오염 부하량을 산정 하였다. SWMM은 타 모델과 비교하여 최소의 보정으로 비교적 정확한 유출유량을 산정 할 수 있고 다양한 오염물질의 모의함에 있어 토지이용상태를 고려할 수 있기 때문에 모형의 적용성이 높다. 본 연구에서는 SWMM의 입력자료 생성에 있어 GIS(Geographic Information Systems), RS(Remote Sensing)를 적용하고자 한다. 유역의 모의 과정에 필요한 정보의 공간적 위치, 지형정보, 토지 이용도 등의 유역특성자료의 입력, 저장, 갱신, 해석에 있어 GIS, RS는 유용한 기능을 제공한다. 따라서 GIS, RS와 비점원 모델의 결합을 통해서 자연현상의 모의에 있어 발생할 수 있었던 문제점을 해결할 수 있다.

II. 모형의 기본 이론

SWMM은 미국 EPA(Environmental Protection Agency)에서 개발한 것으로, 1971년에 처음 개발되었으며, Version 3부터 연속모의가 가능해 졌고, 현재는 Version4(1988)가 사용되고 있다. 도시 및 일반직인 비도시 지역에 적용하여 유출수량 및 유출수질을 예측하는 모형으로 강우 사상별(Event) 및 연속모의가 가능한 모형이다. 그림 1은 SWMM 모형의 구조와 각 Block간의 상호작용을 보여주고 있다. 본 연구에서는 유출수의 수량과 오염 부하량을 구하기 위해 Runoff block만을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 Runoff Block에서 수리학적 계산식은 표 1과 같다.

\* 건국대학교 농공학과 석사과정

\*\* 건국대학교 농공학과 조교수

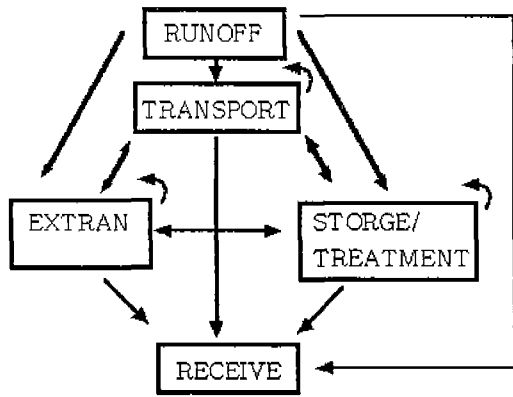


그림 1. SWMM 구조

표 1. SWMM 수식

지표유출	<ul style="list-style-type: none"> <li>연속방정식</li> </ul> $\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A \cdot i^* - Q$ <ul style="list-style-type: none"> <li>Manning 방정식</li> </ul> $Q = W \cdot \frac{1.49}{n} (d - d_p)^{5/3} \cdot S^{1/2}$
침투	$f_p = f_u + (f_c - f_u) e^{-at}$
오염물의 축적	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exponential</li> </ul> $PSHED = QFACT(1) \cdot (1 - e^{-QFACT(2)})$
오염물의 유실	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rating curve method</li> </ul> $POFF = RCOEF \cdot WFLOW^{WASHPO}$

### III. 대상유역 및 자료

#### 3.1 대상유역

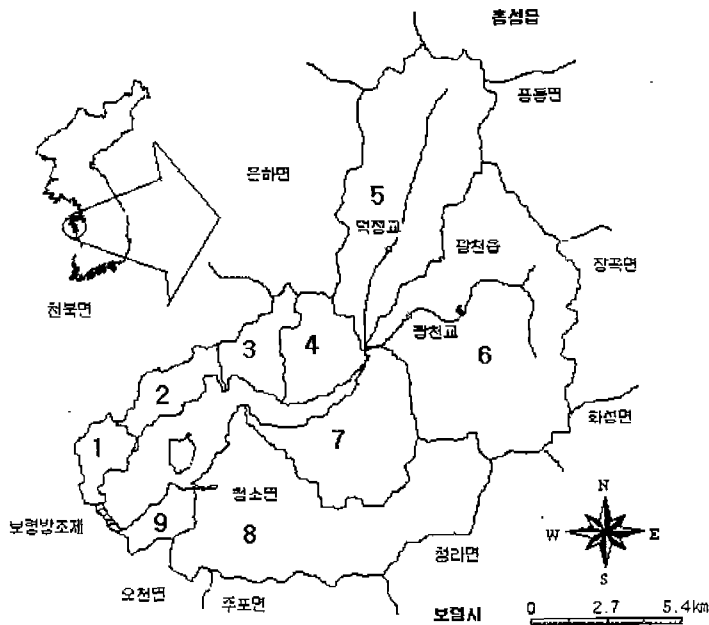


그림 2. 대상 유역

모형의 적용 대상 유역인 보령 담수호 유역은 우리나라 중서부 북위 36° 21' ~ 36° 24' 동경 126° 28' ~ 126° 42' 사이에 위치하고 있다. 행정 구역상 충남 홍성군, 보령시에 걸쳐 위치하고 있으며 유역면적은 128.38km<sup>2</sup>이며, 주 하천의 유로 연장은 약 25.3km에 달한다. 유역 평균 인구는 30,473명 ('96~'98)이고, 이중 5번과 6번 유역에 전체 60% 이상이 거주하고 있다. 축산 사육두수는 한우 10,978마리, 젖소 3,058마리, 돼지 102,182마리, 닭 635,627마리이다.

#### 3.2 모델의 입력자료

본 연구에 필요한 자료는 지형자료, 기상자료, 수문·수질자료를 중심으로 구축하였다.

##### 3.2.1 기상자료

IDRISI S/W로 측후소 위·경도 점 자료를 입력하여 티센망도를 작성하였다. 그 결과 보령측후소가 대상지역을 포함하고 있음을 알 수 있었다. 보령측후소의 연평균 기온은 12°C이고, 연평균 강우는

1,217.8mm이며 대부분이 6-9월 우기에 집중되고 있다. 모형에 적용한 강우자료는 1999년 3월~10월과 2000년 8월 24일 매시간 단위의 강우자료를 이용하였으며, 연속적인 변화를 보기 위해 1달 단위로 시간 강우자료를 모형의 입력자료로 사용하였다.

### 3.2.2 유량자료

연구에 사용한 유량자료는 5번 유역 소룡교와 6번 유역에 설치된 자기수위계를 설치하여 실측하였다. 유역에서 발생한 유출량이 담수호로 유입되는 유입량은 연평균 8,972.7만m<sup>3</sup>이며 이중 상당량이 추하천이 있는 5, 6, 8번 유역에서 유입된다. 유량의 보정을 위하여 1991년 홍보조사보고서의 1990년 9월 11일 덕정교를 검증을 위해 동일 광천교의 유출량 조사자료, 소룡교 유출량 조사자료 및 5, 6번 유역에 설치된 자기수위계 자료를 이용하였다.

### 3.2.3 수질자료

수질자료는 유역 내 주요지점에서 유역 내 부하량 년 변화를 알아보기 위해 정기적으로 측정된 자료와 모형의 보정을 위하여 2000년 8월 24일에 측정된 시간별 자료를 사용하였다. 수질자료는 미국 EPA에서 유역 유출수의 특성을 잘 나타내주는 것이라 추천한 항목인 BOD5, TN, TP에 대한 분석 자료를 이용하였다.

### 3.3.2 지형자료 및 유역별 인자

기본자료인 토양배수별 분포도, DEM, 토지 피복도를 이용하여 모형에 필요한 자료를 생성하였다. Table 2는 모형에 사용된 각 유역별 인자를 정리한 것이다.

#### ● DEM, 하천도

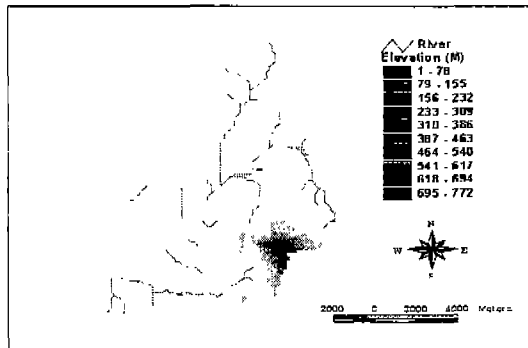


그림 3. DEM

미국 DMA에서 제공한 3초 DEM을 획득하여 I DRISI S/W를 이용하여 구축하였다. 구축된 DEM을 이용하여 Arc-view S/W를 이용하여 하천도를 작성하였다. 작성된 DEM과 하천도를 이용하여 모형에서 필요한 소유역별 평균경사 및 하천경사를 구하였다.

#### ● 토양배수별 분포도, 토지 피복도

토양 배수별 분포도는 농촌 진흥청 1/25,000 정밀토양도 및 1/250,000 개략 토양도를 ARC/INFO로 입력하여 배수분포별로 분류하여 작성하였다. 토지 피복도는 원격탐사자료(Landsat TM: 1991년 10월 2일, SPOT Panchromatic: 1997년 11월 15)를 ER-Mapper S/W를 이용하여 감독분류 최대우도법으로 토지 피복도를 작성하였다. 모형에 필요한 자료를 만들기 위해서 토양 배수별 분포도와 토지피복도의 속성 자료로부터 수리학적으로 유효한 불투수층을 추출하여 전체 면적에 대한 비율을 산정 하였다. 그리고 토지이용별 면적을 산정하기 위해서 토지 피복도를 이용하였다. 축산 농가의 비율은 1998년 통계 연보를 이용하여 각 유역별 가축두수를 조사, 이를 가축 두수 당 면적으로 환산(표 2.)하여 축산 농가의 면적을 산정 하였다. 그 외의 모형에서 사용되는 Manning조도계수, 투수지역·불투수 지역의 조도계수, 투수지역·불투수 지역의 표면 저류 등은 calibration에 의해 결정하였다.

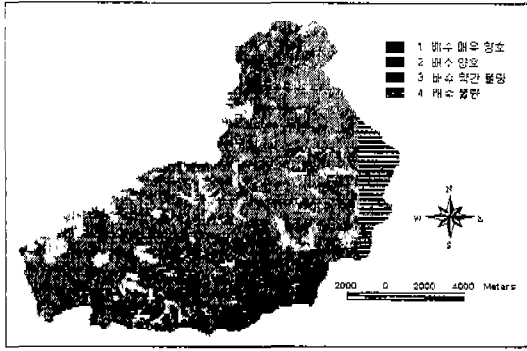


그림 4. 수문학적 토양군



그림 5. 토지 피복도

표 2. 가축 두수 당 환산 단위 면적 (unit: m<sup>2</sup>)

Dairy cow (per head)	Poultry cow (area per head)				Swine (per 100 head)
	30 head	50 head	70 head	90 head	
8.95	19.74	18.72	17.4	17.12	427.5

표 3. 유역별 지형 자료

유역	유역면적 (ha)	불투수층 (%)	경작지 (%)	산림 (%)	주거지 (%)	기타이용 (%)	축산 (%)	유역경사	하천경사
1	306.0	7.3	16.4	77.5	0.2	5.9	0.1	0.11	-
2	402.5	11.9	21.4	75.7	0.2	2.7	10.6	0.06	-
3	458.4	1.7	14.4	83.9	0.3	1.4	3.1	0.09	-
4	638.2	5.9	16.6	79.8	1.5	2.2	4.1	0.08	-
5	2696.5	8.0	17.9	79.5	1.4	1.2	0.1	0.13	0.007
6	3727.83	6.9	19.3	76.0	3.2	1.5	0.5	0.13	0.040
7	1368.6	36.7	16.1	79.8	0.6	3.6	3.0	0.14	0.039
8	2910.5	37.6	17.6	77.8	1.4	3.2	3.5	0.17	0.010
9	263.3	13.8	10.5	85.7	0.6	3.3	0.0	0.21	-

#### IV 모형의 적용

##### 4.1 민감도 분석

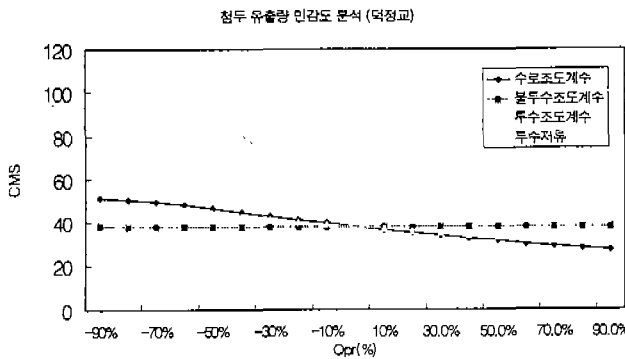


그림 6. 민감도 분석 결과

민감도 분석은 5번 유역에 있는 덕정교를 중심으로 하는 유역에서 실시하였으며, 수로조도계수: 0.061, 불투수 조도계수: 0.02, 투수조도계수: 0.02, 저류깊이: 4를 중심으로 10%씩 가감하여 가장 영향을 많이 미치는 인자에 대해 알아보았다. (불투수층 8.04%, 산림 79%, 주거지 1.4%, 경작지 17.9%, 기타이용 1.2%) 분석결과는 저류깊이가 가장 민감한 것으로 나타났으며, 수로조도계수, 투수조도계수, 불투수 조도계수 순으로 나타났다.

## 4.2 보정 및 검증

### 4.2.1 유출량 보정 및 검증

강우시 유출량 보정은 90년 9월 11일 강우시 덕정교 유출량을 이용하였으며, 검증은 동일 광천교 유출량과 2000년 8월 24일 소룡교 유출량으로 검증하였다. 유출량은 미측정 항목인 수로조도계수와 지류깊이 그리고 유역조도계수를 보정 인자로 하였다. 침투 유량과 총 유량에 기준을 두어 보정을 시행하였으나, 농촌지역의 특성상 침투 유량보다는 총 유량에 가중치를 두었다. 보정시 저류깊이는 60mm에서 가장 정확한 결과를 보였는데 이는 농촌지역의 토지이용에 있어는, 산림에서의 강우 손실로 인한 것으로 판단된다. 보정과 검증 결과는 덕정교 (그림 7.), 광천교 (그림 8.), 소룡교 (그림 9.)와 같다. 실측과 검증결과를 보면 정확도 88.6%를 나타내었으며, 유출량의 예측은 보정과 검증에 의해 비교적 정확한 예측이 가능하였다.

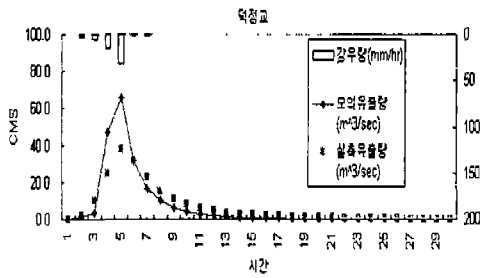


그림 7. 보정 (덕정교)

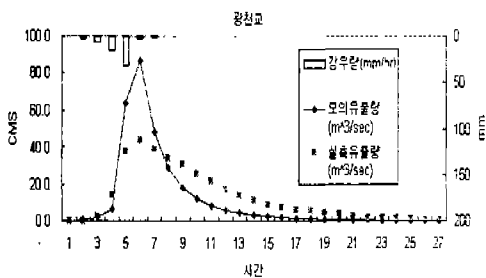


그림 8. 검증 (광천교)

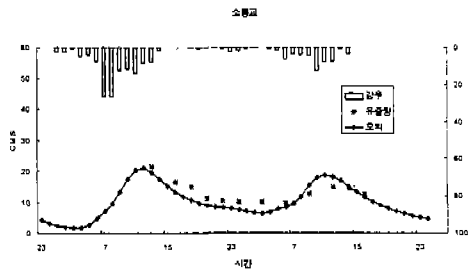


그림 9. 검증 (소룡교)

사용 계수	수로 조도계수	초기수심	불투수층 조도계수	투수층 조도계수	불투수층 표면저류	투수 표면저류
값	0.12	1.2	0.014	0.8	0.014	60

표 4 사용 계수

### 4.2.2 오염물질 부하량 보정

오염 물질 부하량 보정에는 검증자료로 사용되었던 2000년 8월 24일 강우시 측정된 수질자료를 이용하였다. 오염물질 보정에 있어서 가장 민감한 반응을 보인 유출계수(WASHPO)와 지수(RCOEF)를 보정 인자로 이용하였다. 오염 물질 부하량은 경작지, 주거지, 축산 농가, 기타(산림)로 나누어 단위 면적 당 BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P 오염물질의 유실계수와 지수들을 변화시켜 보정을 실시하였다. 결과는 그림 10, 11, 12와 같다.

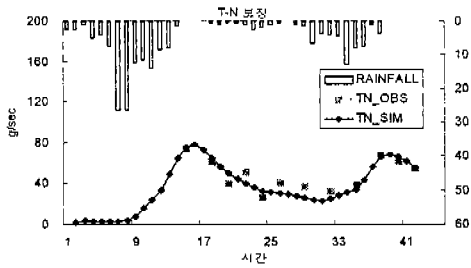


그림 10. T-N 보정 (소룡교)

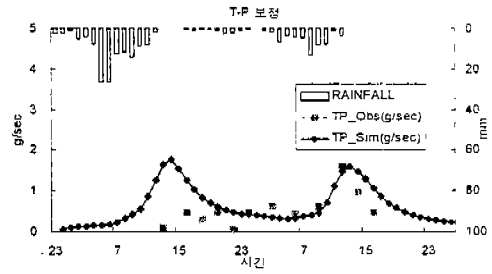


그림 11. T-P 보정 (소룡교)

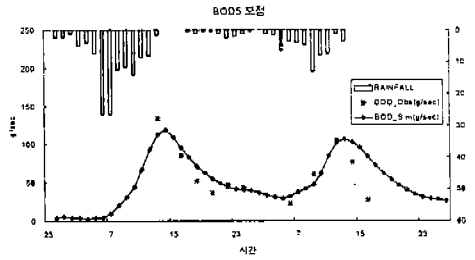


그림 12. BOD<sub>5</sub> 보정 (소룡교)

## V. 오염 부하량

### 5.1 토지 이용별 부하량 기여도

토지 이용별 오염 부하량 기여도를 알아보기 위해 1번 유역과 2번 유역을 선정하였다. 담수호 유역의 토지 이용을 보면 대부분이 산림으로 이루어져 있으며, 5, 6유역은 도시지역과 농공단지들을 포함하고 있으며, 2번 유역은 축산 농가의 비율이 다른 유역에 비해서 상대적으로 높다. 요즘 농촌지역의 오염에 이슈가 되고 있는 축산농가에서 발생하는 부하량의 기여도를 알아보려고 축산 농가의 비율이 가장 높은 2번 유역과 1번 유역을 선정 기여도를 알아보았다. 경우는 99년 9월 경우를 적용하였다.

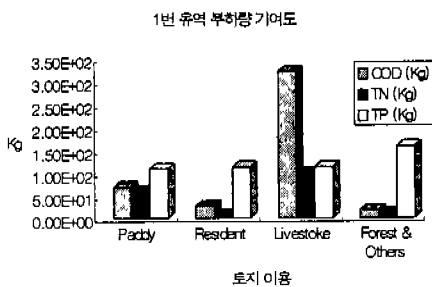


그림 13. 소유역 #1

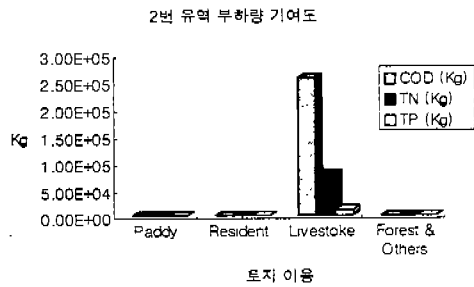


그림 14. 소유역 #2

그림 13, 14를 보면 토지 이용 중 축산농가가 부하량 기여도가 가장 높다는 것을 알 수 있다. 이는 유역을 관리하는데 있어 축산지역의 관리가 중요하다는 것을 알 수 있다. 또한, 그 차지하는 비중에 따라 급격하게 오염 부하량 기여도가 현저히 높아짐을 알 수 있다.

### 5.2 유역별 연평균 부하량

1999년 3월부터 10월까지의 총 강수량은 1216.23mm, 각 유역에서 담수호로 유입되는 유출량은

9.81E+07m<sup>3</sup>, SS는 2.42E+07kg, COD는 5.00E+06kg, TN은 8.68E+05kg, TP는 1.94E+05kg이었다. 각 유역별 유출량과 오염 부하량은 다음 표 5와 같다. 표 5에서 보면 각 유역의 유출량과 오염 부하량은 유역의 면적에 비례하였는데 이에 비해 2번 유역은 유출량에 비해 오염 부하량이 높은 것을 알 수 있다. 이는 SWMM의 경우 토지 이용에 따른 오염물질 부하량을 충분히 반영하는 것을 알 수 있다. 도시지역과 달리 초기 유출 및 오염 부하량이 적게 나타나는 것은 도시지역에 비해 토지 이용에 있어 투수층이 많은 농촌유역이므로 토양의 저류능력에 따르는 것으로 생각된다.

표 5. 평균 유출량 및 부하량 ('99. 3 ~10)

Watershed	Rainfall(mm)	Flow (m <sup>3</sup> )	SS (kg)	COD (kg)	TN (kg)	TP (kg)
1	1216.23	2.89E+05	3.73E+03	1.43E+02	1.08E+02	6.86E+01
2	1216.23	3.88E+05	1.02E+05	9.17E+04	1.29E+04	2.90E+03
3	1216.23	4.17E+05	1.04E+04	2.48E+04	3.63E+03	8.26E+02
4	1216.23	5.94E+05	3.66E+04	5.13E+04	8.06E+03	1.66E+03
5	1216.23	2.12E+06	2.81E+04	3.36E+03	3.47E+03	7.56E+02
6	1216.23	3.31E+06	4.94E+04	3.00E+04	1.45E+04	1.64E+03
7	1216.23	1.54E+06	1.44E+05	1.02E+05	1.53E+04	3.44E+03
8	1216.23	3.34E+06	2.65E+06	3.22E+05	5.03E+04	1.28E+04
9	1216.23	2.60E+05	3.75E+03	1.34E+02	1.72E+02	1.25E+02

#### IV 요약 및 결론

본 연구는 대상유역에서 SWMM을 이용하여 1999년 3월~1999년 10월까지 유출량과 오염 부하량을 산정 하였다.

1. GIS, RS는 SWMM의 적용에 있어 어려움이 있었던 유역특성자료의 획득과 입력 자료의 구축을 용이하게 하였다.
2. 월 평균 부하량은 강우에 따른 유출량에 비례하는 것으로 나타났다. 이는 농촌지역의 오염 부하량이 비점원 형태로 강우에 의한 쓸림에 의한 것이라 판단된다. 이러한 계절별 특성은 우리나라의 강우 특성을 잘 반영하고 있다.
3. SWMM의 경우 실측한 유량과 수질자료를 이용하여 모형을 보정한 후 강우시 유출량을 예측하여 부하량을 구하는 방법으로 유역특성이 비슷한 실측자료를 이용하여 보정과 검증은 한다면, 유량 미측정 지점의 적용시 모형에 의해 유량을 예측하고 토지이용별로 오염물질 부하량을 산정에 있어 적합하다 판단된다.

#### VI 참고문헌

1. 농어촌 진흥공사, 1998, 홍보지구농업종합개발사업 계획서, pp51-58
2. 류재현, 1993, 축산경영학, pp136-148
3. U.S. EPA, 1988, Storm Water Management Model, version 4: user's manual, pp96-104
4. Vladimir Novotny, 1995, Nonpoint pollution and urban stormwater management, pp293-336
5. 전지홍, 2000, 유역에서의 비점원오염 부하량 산정법 비교에 대한 연구, 전국대학교 대학원 석사학위논문, pp 18-25