

STORM 모델을 이용한 非点汚染源 負荷의 規模와 特性에 關한 研究

김도연 · 이흥근
서울대학교 보건대학원 환경보건학과

A Study on Scale and Characteristics of Nonpoint Pollution Using STORM Model

Do Yeon Kim and Hong Keun Lee

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

ABSTRACT

The more accurate estimation of the pollutant loadings from nonpoint source is needed to evaluate water quality of water resources such as river and reservoir.

Therefore this study was performed to grasp the scale and characteristics of pollutant. In this study, STORM model was applied to I-cheon district to estimate runoff and pollutant loading of SS, BOD, T-N and PO₄-P.

The results estimated by STORM model were fitted well to surveyed water quality in flow, SS and BOD.

The annual loadings were estimated to be 36,463 kg/km²/yr of SS, 8,090 kg/km²/yr of BOD, 4,435 kg/km²/yr of T-N and 358 kg/km²/yr of PO₄-P.

It was also found that the monthly pollutant loadings of SS, BOD, PO₄-P were greatest in May and T-N in April.

Keywords : STORM, nonpoint source, pollutant loading, calibration, verification

I. 서 론

최근에 도시의 지표면 오염물질의 하천유입과 농촌지역에서의 비료와 농약의 유출로 인한 수질악화 현상이 점차 심각해지고 있다. 이러한 비점원은 BOD, 질소, 인과 부유물질, 중금속 등 많은 오염물질을 포함하고 있어 보다 정확한 오염부하량 산정과 수질에 미치는 영향평가, 제어대책등 전반적인 수질관리 방안이 요구된다.

그 동안 도시하수, 공장폐수등으로 인한 점오염원에 관해서는 많은 연구가 수행되었지만 토지사용에 기인하는 비점오염원에 대한 평가는 제대로 실시되지 못하고 있다.

일반적으로 비점오염원은 강우시 유출에 의해 오염물질이 배출되는 오염원으로서 강우특성과 지형, 지질, 토지이용형태에 따라 배출양상이 좌우되며 유

역에서의 비점오염원의 오염부하량 추정은 주로 오염원 원단위와 수학적모형에 의해 파악된다. 자연현상을 대상으로 한 수학적모형은 강우-유출과정, 토양침식의 발생, 지표면에 축적된 오염물질의 유입 등과 같은 현상을 시간적, 공간적으로 모의할 수 있는 모형을 말한다.

이러한 비점오염원을 주 대상으로 하는 수질모형에 대한 국내의 연구는 기존모형의 실제유역에의 적용이나 그에 바탕을 둔 개발이 주를 이루어 왔으며 대상유역환경의 특성에 적합한 모형의 도출을 위한 관계인자 및 여러 반응계수들의 보정과정을 포함하였다.

김병진²⁵⁾(1988)은 ANSWERS 모형을 반월 유역에 적용하였고, 이명우²⁴⁾(1989)는 HSPF 모형을 수정하여 소유역 수질예측모형을 개발하고 이를 전주 시 덕진공원 유역에 적용하였으며 김주성²⁶⁾(1993)은 이명우의 모형을 총괄모형으로 변형하여 같은 유

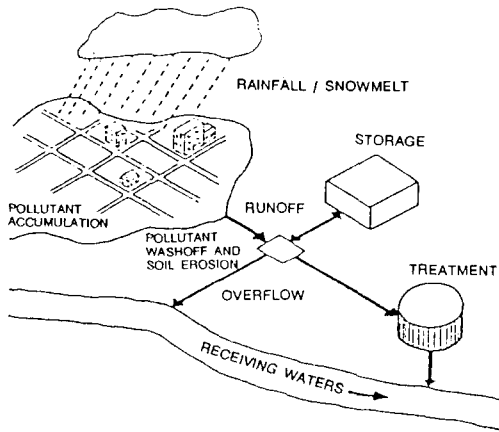


Fig. 1. Major Processes Modelled by STORM.

역에 적용하였다. 강금석²¹⁾(1995)은 지리정보 시스템과 결합하여 SWMM 모형을 안양천에 적용하여 효율성을 확인하였다.

외국의 경우에는 Vieux와 Needham¹⁶⁾(1993)은 AGNPS 모형을 적용하였고, Ventura¹⁷⁾(1993)등은 SLAMM 모형을 이용하여 도시지역의 비점오염원에 의한 오염물질의 양을 해석하였으며 Warwick¹³⁾(1993)은 SWMM 을 적용하여 유역의 개발에 따른 유출특성의 변화를 고찰하였다.

본 연구의 목적은 비점오염 모형인 STORM 모형을 대상유역인 이천군 지역에 적용하여 실측값과 모의값의 보정 및 검증은 통하여 적용성을 검토하고 이와 같이 검증된 모형을 이용하여 유출량 및 BOD, SS, T-N, PO₄-P 등의 수질항목에 관한 오염원부하량의 규모와 특성을 파악하는데 있다.

II. STORM 모형의 이론

STORM 모형은 1973년 미국의 Water Resources Engineers, Inc.(WRE)에서 개발한 것으로 도시 및 비도시지역에 적용하여 강우시에 유역에서 유출되는 유출수량 및 SS, BOD, T-N, PO₄-P, Total Coliform 등의 유출수질을 예측하는 연속모의(Continuous Simulation)용 모형이다.

그림 1은 모형의 개념도이며 다음 요소들의 여러 상호작용에 의해 강우-유출 관계를 최종적으로 모의하게 된다.⁸⁾

1. 강우량과 기온
2. 유출 (runoff)

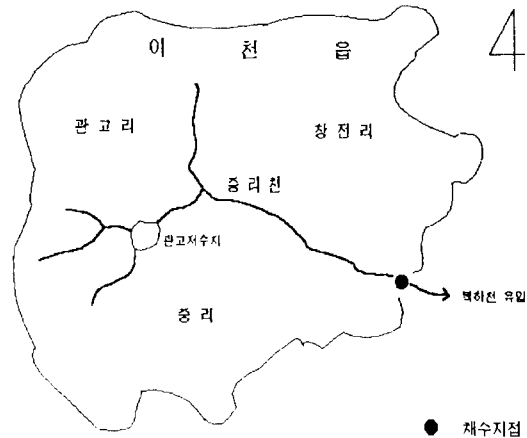


Fig. 2. Location of study area and sampling point.

3. 오염물의 축적(pollutant accumulation)
4. 지표면 침식
5. 처리속도(treatment rates)
6. 저류조에 의한 저장 (storage)
7. 처리,저류시설로부터의 범람 (overflow)

III. 모형의 적용

1. 대상유역

모형의 적용대상 유역은 그림 2의 유역도와 같이 경기도 이천군 이천읍의 일부지역으로 도시지역과 농촌지역, 산림지역을 함께 포함하고 있는 유역면적 8.67 km²의 소유역이다. 지형은 비교적 경사가 완만하고 하천을 따라 농경지가 발달되어 있으며 유역내 소하천인 중리천은 복하천에 유입된다.

최근 10년간의 기상자료를 분석한 결과 이천군의 연평균 강수량은 1371.9 mm이며 최고 강수량은 2313.3 mm, 최저 강수량은 954.7 mm로 나타났고 연평균 기온은 11.6°C, 연평균 증발량은 1035.9 mm로 나타났다.

2. 유역내 수질변동의 특성

비강우시 유역에서의 수질변화 형태를 시간별로 24시간 측정하여 모형의 보정시에 입력자료로 사용하였다. 측정항목은 STORM 모형에서 모의가 가능한 유량과 SS, BOD, T-N, PO₄-P의 4가지 수질항목이며 각 항목에 대한 수질변화특성을 분석하였다.

그림 3에서와 같이 유량은 오전 10시에 0.5240

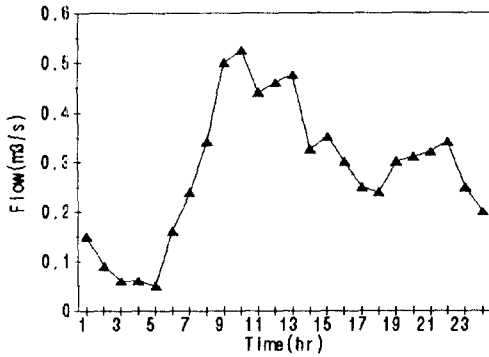


Fig. 3. Fluctuation of flow.

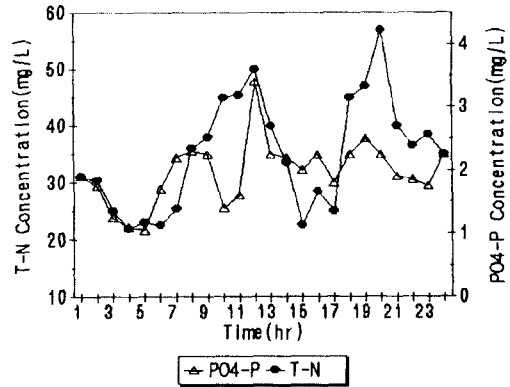


Fig. 5. Fluctuation of T-N and PO₄-P concentration.

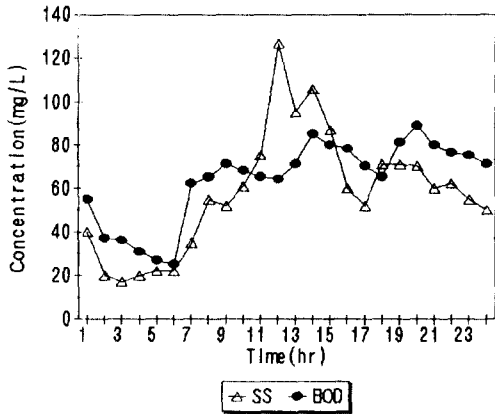


Fig. 4. Fluctuation of SS and BOD concentration.

m³/s로 가장 높았으며 물 사용량이 적은 오전 5시에 0.0502 m³/s로 가장 낮은 값을 보였다.

최대유량과 최소유량의 차이는 0.4738 m³/s 이었으며 24시간 평균유량은 0.2809 m³/s로 나타났다.

그림 4에서의 같이 SS는 오전 12시에 128 mg/L로 가장 높았으며 오전 3시에 16 mg/L로 가장 낮은 값을 보였다.

최대농도와 최소농도의 차이는 112 mg/L이었으며 24시간 평균 SS 농도는 58.6 mg/L로 나타났다.

BOD는 오전 8시에 90 mg/L로 가장 높았으며 오전 6시에 25 mg/L로 가장 낮은 값을 보였다.

최대농도와 최소농도의 차이는 65 mg/L 이었으며 24시간 평균 BOD 농도는 63.5 mg/L로 나타났다.

그림 5에서의 같이 T-N은 오전 8시에 56.3 mg/L로 가장 높았으며 오전 4시에 21.5로 가장 낮은 값을 보였다.

최대농도와 최소농도의 차이는 34.8 mg/L이었으며 24시간 평균 T-N 농도는 58.6 mg/L로 나타났다.

PO₄-P는 오전 12시에 3.42 mg/L로 가장 높았으며 오전 5시에 1.07 mg/L로 가장 낮은 값을 보였다.

최대농도와 최소농도의 차이는 2.35 mg/L이었으며 24시간 평균 PO₄-P 농도는 1.98 mg/L로 나타났다.

3. 모형의 보정 및 검증

1) 모형의 보정

모형의 보정을 위하여 1995년 5월 13일부터 5월 14일 사이의 강우사상을 이용하였으며 총 강우량은 20.5 mm이었다. 모형의 보정 과정은 기존의 모형에 적용된 여러 변수들을 대상구역의 유출특성에 맞도록 조정하는 변수의 최적화를 의미한다.

본 연구에서는 대상구역에서 강우사상에 대하여 시간별로 직접 실측한 유량과 BOD, SS, T-N, PO₄-P의 4가지 수질항목에 관하여 모형의 개발시 적용된 반응계수들의 default 값을 초기값으로 하여 실측치에 가장 근접한 모의 결과치를 얻을 수 있도록 시행오차법으로 보정하였다.

또한 모형보정의 신뢰성 평가를 위해 (모의치 - 실측치) / 실측치로 상대오차를 구하였다.

표 1과 같이 5월 13일부터 5월 14일사이 총 9시간 동안의 강우사상에 대하여 각 항목별로 오차의 범위가 유량은 3.5%~18.5%, SS 2%~10.2%, BOD 1.5%~28%, T-N 0.4%~34.8%, PO₄-P 1.4%~37.2%로 나타났다. 유량, SS, BOD는 비교적 상대오차값이 낮았으며 T-N과 PO₄-P는 최대오차값이 각각 0.348, 0.372로 나타났으나 전반적으로 실측치와 잘

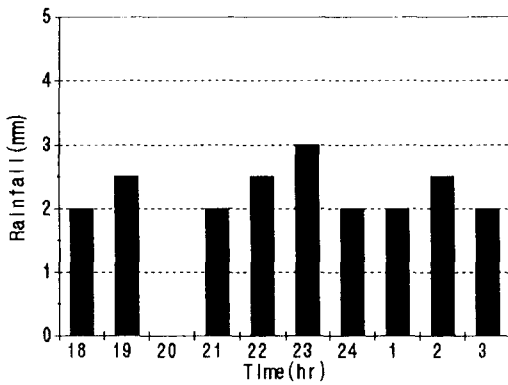


Fig. 6. Rainfall event for calibration.

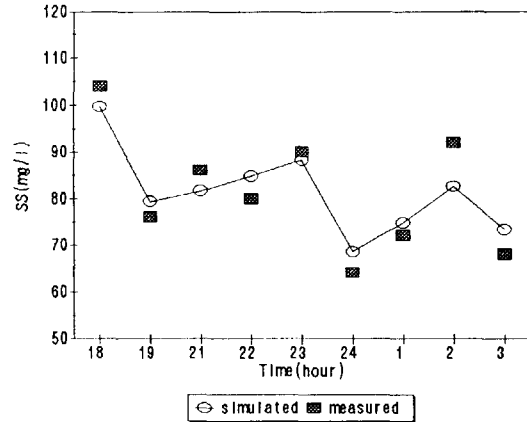


Fig. 8. Comparison between measured and simulated values for SS calibration result.

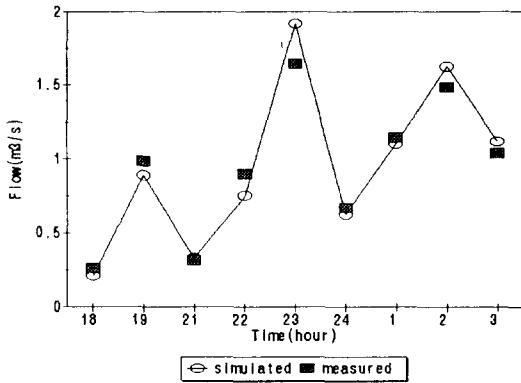


Fig. 7. Comparison between measured and simulated values for flow calibration result.

일치하는 경향을 보였다.

이상과 같이 보정을 완료한 STORM 모형에 대해 실측값과 모의값을 비교하면 그림 7, 8, 9, 10, 11과

같다.

2) 모형의 검증

보정된 STORM 모형을 1995년 5월 20일의 강우사상에 적용하여 모형의 검증을 실시하였다. 5월 20일의 총 강우량은 24 mm이었고 대상유역에서 강우사상에 대하여 시간별로 직접 실측한 유량과 SS, BOD, T-N, PO₄-P의 4가지 수질항목과 모형에서 모의한 모의값을 비교하였으며 모형검증의 신뢰성 평가를 위해 (모의치-실측치)/실측치로 상대오차를 구하였다.

표 2와 같이 5월 20일의 총 7시간동안의 강우사상에 대하여 각 항목별로 오차의 범위가 유량은 2.4%~22%, SS 3%~11.7%, BOD 2.5%~11.9%, T-N 2.4%~29.6%, PO₄-P 4.1%~20.2%로 나타났다.

모형의 보정시에 얻은 상대오차와 비교해 볼때 유량, SS에서는 최대오차값이 약간씩 증가하였으나 BOD, T-N, PO₄-P에서는 감소하는 경향을 보였으

Table 1. Relative errors for each measurement between Measured and Simulated values

Time	Relative Error					
	FLOW	SS	BOD	T-N	PO ₄ -P	
5.13	18:00	-0.185	-0.041	-0.023	0.059	0.167
	19:00	-0.096	0.044	-0.151	-101	-0.014
	21:00	0.041	-0.050	0.072	0.131	0.048
	22:00	-0.161	0.060	-0.015	-0.136	0.047
	23:00	0.167	-0.020	-0.083	-0.004	-0.064
	24:00	-0.064	0.070	-0.056	-0.022	-0.067
5.14	01:00	-0.035	0.038	-0.071	-0.158	0.094
	02:00	0.095	-0.102	-0.054	0.015	0.372
	03:00	0.076	0.078	0.280	0.348	0.150

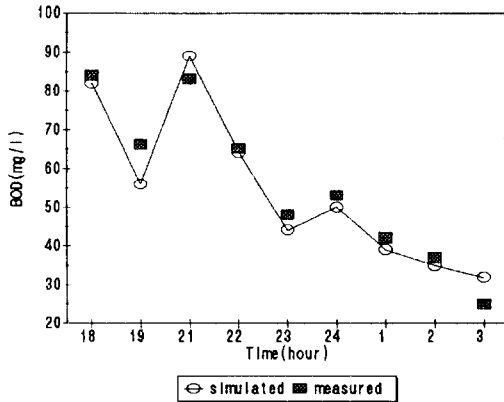


Fig. 9. Comparison between measured and simulated values for BOD calibration result.

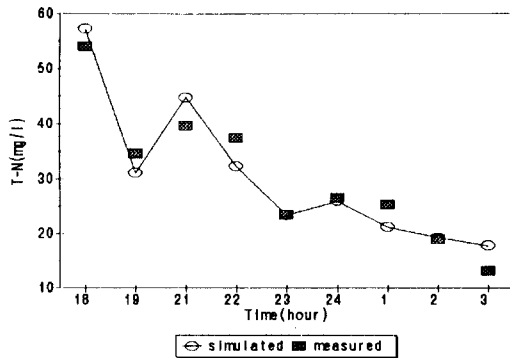


Fig. 10. Comparison between measured and simulated values for T-N calibration result.

며 모형의 보정과 검증결과로부터 STORM 모형은 대상유역에 적용성이 높은 것으로 나타났다.

4. 유출량과 오염물 부하량의 산정

1) 유출량

유출이란 강우가 지상에 도달하여 지표면을 따라 하천으로 유입되는 현상을 말한다. 일반적으로 증발, 차단 등에 의하여 강우의 일부는 손실되며 유역에서의 강우강도가 토양의 수분침투능보다 크게 되면 침투량을 제외한 나머지가 유출을 형성하게 된다.⁶⁾ 또한 유역내에서의 토양의 저류능, 불투수 비율, 전반적인 토지이용상태에 따라 전반적인 유출량이 결정된다.

모형의 보정과 검증과정을 통해서 대상유역의 특성에 맞게 도출된 모형을 적용하여 유출량을 산정하였다. 1992년부터 1994년까지의 이천 기상대에서 관

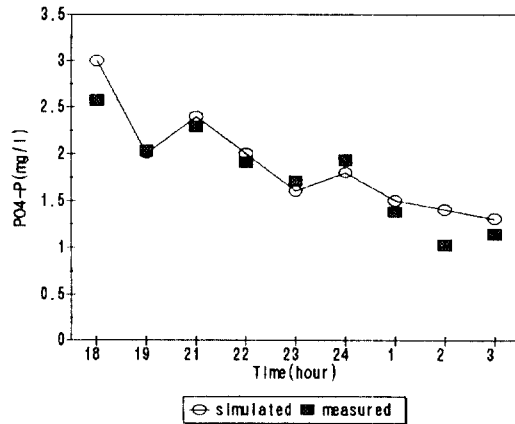


Fig. 11. Comparison between measured and simulated values for PO₄-P calibration result.

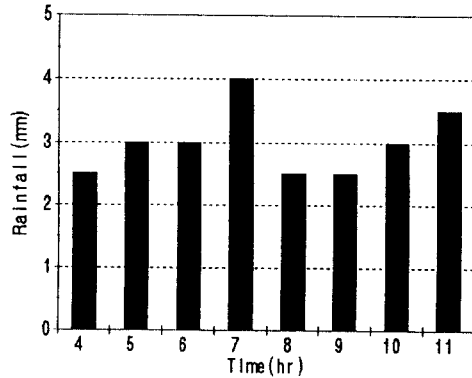


Fig. 12. Rainfall event for verification.

측한 전체 강우사상에 대한 시간별 강우자료를 모형에 입력하여 유출량을 모의하였으며 대상유역의 3년간의 평균 유출량을 분석한 결과는 그림 13과 같다.

유출량은 강수량이 많은 여름철인 7월과 8월에 각각 161.64 mm, 269.63 mm으로 상대적으로 높게 나타났다. 총 유출량의 22.7%, 37.9%를 차지하였다. 유출률에 있어서도 7월과 8월에 각각 64.3%, 68.1%로 가장 높았으며 1월에는 유출량과 유출률 모두 각각 1.22 mm, 18.2%로 가장 낮은 값을 보였다.

2) 오염물 부하량

모형의 보정과 검증과정을 통하여 대상유역의 특성에 맞게 도출된 모형을 적용하여 오염 부하량을 산정하였다. 1992년부터 1994년까지 이천 기상대에서 관측한 전체 강우사상에 대한 시간별 강우자료를 모형에 입력하여 오염부하량을 모의하였으며 대상유역의 3년간의 평균 오염 부하량을 SS, BOD, T-

Table 2. Relative errors between measurement and simulated values for verification result

Time	상대오차				
	FLOW	SS	BOD	T-N	PO ₄ -P
5.20 04:00	-0.186	-0.117	-0.066	-0.148	-0.120
05:00	-0.220	0.087	-0.051	0.024	-0.202
06:00	-0.060	-0.015	-0.119	-0.138	-0.041
07:00	-0.126	-0.050	0.025	0.109	0.126
08:00	-0.084	-0.030	0.075	0.053	0.133
09:00	0.099	-0.076	0.044	0.090	0.103
10:00	0.024	0.083	-0.062	0.296	0.171
11:00	0.144	-0.043	-0.071	-0.164	-0.190

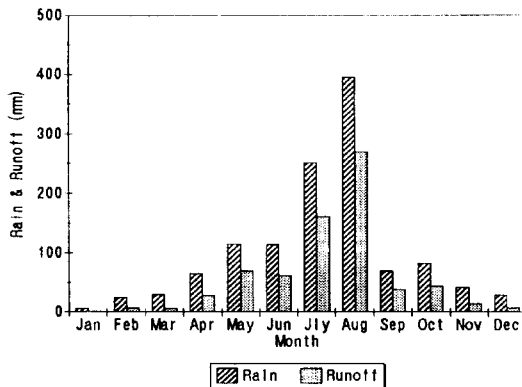


Fig. 13. Mean monthly runoff quantity of three years.

N, PO₄-P 4가지 수질항목에 대하여 산정한 결과는 표 3과 같다.

유역전체에서 발생한 연간 오염 부하량은 SS가 36,462 kg/km²/yr로 가장 높게 나타났고 BOD 8,089.6 kg/km²/yr, T-N 4,434.8 kg/km²/yr이었으며 PO₄-P는 357.9 kg/km²/yr로 가장 낮은 값을 보였다.

또한 월별오염 부하량은 SS 12~8,182.3 kg/km²/month, BOD 16.9~1,373.7 kg/km²/month, T-N 9.2~717.8 kg/km²/month, PO₄-P 0.6~61.4 kg/km²/month의 범위를 나타냈다.

SS와 BOD, PO₄-P의 오염부하량은 5월에 가장 높은 값을 보였고 각각 총 오염부하량의 22.4%, 17.0%, 17.1%를 차지하였으며 T-N의 경우에는 4월에 가장 높은 값을 보였고 총 오염부하량의 16.1%를 차지하였다.

반면에 유출량이 적은 1월에는 4가지 수질항목 모두 가장 낮은 오염 부하량을 나타냈다.

Table 3. Mean monthly pollutant loading of three years
Unit(kg/km²)

Month	SS	BOD	T-N	PO ₄ -P
Jan	12.0	16.9	9.2	0.6
Feb	625.0	305.0	164.4	12.0
Mar	707.8	467.3	253.1	18.0
Apr	4449.1	1347.2	717.8	55.3
May	8182.3	1373.7	713.4	61.4
Jun	6113.0	1159.7	606.2	50.9
Jul	6483.7	1038.8	536.7	47.2
Aug	4195.5	855.5	448.2	37.2
Sep	1113.1	286.6	151.7	11.9
Oct	1928.6	576.3	306.9	23.7
Nov	1804.8	290.4	326.9	24.8
Dec	847.4	372.2	200.3	14.9
Total	36462.0	8089.6	4434.8	357.9

IV. 결 론

본 연구에서는 비점오염원의 유출특성과 부하량의 규모를 파악하기 위하여 STORM모형을 이천군 지역에 적용하였다. 대상유역의 특성에 맞게 모형을 보정한 후 유출량 및 SS, BOD, T-N, PO₄-P 등으로 나누어 오염 부하량을 산정하였으며 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 모형의 보정결과 유량, SS는 비교적 상대오차 값이 낮았으며 T-N과 PO₄-P는 최대오차값이 각각 0.348, 0.372로 나타났으나 전체적으로 실측치와 잘 일치하는 경향을 보였다.

(2) 모형의 검증 상대오차를 모형의 보정시에 얻은 상대오차와 비교해 볼 때 유량, SS에서는 최대 오차값이 약간씩 증가하였으나 BOD, T-N, PO₄-P에서는 감소하는 경향을 보였으며 모형의 보정 및 검증결과로부터 대상유역에 적용성이 높은 것으로 나타났다.

(3) 유출량은 강수량이 많은 여름철인 7월과 8월에 각각 161.64 mm, 169.63 mm로 상대적으로 높게 나타났으며 유출율에 있어서도 7월과 8월에 각각 64.3%, 68.1%로 가장 높게 나타났다.

(4) 유역에서 발생한 연간 오염 부하량은 SS 부하량이 36,463 kg/km²/yr 로 가장 높게 나타났고 BOD 8,089.6 kg/km²/yr, T-N 4,434.8 kg/km²/yr 였으며 PO₄-P는 357.9 kg/km²/yr로 가장 낮은 값을 보였다.

월간 오염부하량은 SS와 BOD, PO₄-P가 5월에 가장 높은 값을 보였고 T-N의 경우에는 4월에 가장 높은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 94년도 환경부 G-7 환경공학기술개발 사업비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Loague, K M., Freeze, A. R. : A comparison of rainfall-runoff modeling techniques on small upland catchment. Water Resour. Res 21(2), 229-248, 1985.
- 2) F. J Humenik, M. R. Overcash : Rural nonpoint source water quality in a southeastern watershed. J WPCF 52(1), 29-43, 1980.
- 3) Yoram.Litwin., Anthony S. Donigian, Jr. : Continuous Simulation of Nonpoint Pollution. J WPCF, 1978.
- 4) Waninelist, M. F. : Stormwater Management Quality and Quantity. Ann Arbor Science, Michigan, 1978.
- 5) Pavoli, J. L. : Handbook of Water Quality Management Planning. Van Nostrand Reinhold, 1977.
- 6) Vladimir Novotny : Handbook of nonpoint pollution. Van Nostrand Reinhold, 1981.
- 7) J.J Warwick, J.S. Wilson : Estimating Uncertainty of Stormwater Runoff Computations. J of Water Res Planning and Management 116(2), 1990.
- 8) The Hydrologic Engineering Center : Storage Treatment Overflow Runoff Model. User's Manual, 1977.
- 9) N. A. Zoghoul, A. M. Shurbqji : A Storm Water Management Model for Urban Areas In Kuwait. Water Resource Bulletin 26(4), 563-575, 1990.
- 10) S. E. Jorgensen : Application of Ecological Modeling in Enviromental Management. Part A. Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
- 11) C. S. Melching, B. C. Yen, H. G. Wenzel Jr : A Reliability Estimation in Modeling Watershed Runoff with Uncertainties. Water Resour Res 26(10), 2275-2286, 1990.
- 12) Martin P. and Yousef A : Nonpoint source effects on water quality. Journal WPCF 441-451, 1977.
- 13) J.J. Warwick : Efficacy of SWMM Application, Journal of Water Resources Planning and Management. ASCE 117(3), 352-366.
- 14) Alexander, G. R. : Best Management Practices for Nonpoint Sources Control. U.S. EPA 905/76-005, 1976.
- 15) 한국수자원공사 : GIS를 이용한 수자원 관리 및 계획에 관한 연구, 1993.
- 16) 김주성 : 소유역 수질예측을 위한 지표유출모형의 개발. 서울대학교 석사학위 논문, 1993.
- 17) 이기춘, 박승우, 최진규 : 도시소유역의 유출변화 분석. 한국농공학회지 31(1), 45-57, 1989.
- 18) 박진호 : 팔당호 주변의 비점오염원이 호소수질에 미치는 영향평가. 서울대학교 석사학위 논문, 1994.
- 19) 강금석 : 지리정보 시스템을 결합한 SWMM. 서울대학교 석사학위논문, 1995.
- 20) 장정렬 : 동출유역 수질관리 모형의 개발에 관한 연구, 서울대학교 석사학위 논문, 1994.
- 21) 신현석, 윤용남 : 소도시유역에서의 유출과 비점원오염물 배출간의 상관 관계 수립에 의한 NPS 오염물 배출량의 산정. 한국수문학회지 12 , 85-95, 1993.
- 22) 김건하 : 비점원 오염물질의 배출양상에 관한 연구. 고려대학교 석사학위논문, 1992.
- 23) 이운상 : USLE모형의 이용한 농촌지역의 비점오염원 규모와 특성에 관한 연구. 서울대학교 대학원 석사학위 논문, 1992.
- 24) 국립환경연구원 : 하천 및 호소수질의 최적화 관리방안. 세계환경의 날 기념 학술세미나, 1989.
- 25) 이명우 : 토지이용을 고려한 소유역의 수질예측 모형에 관한 연구. 서울대학교 대학원 박사학위논문, 1990.
- 26) 김병진, 박승우 : 수문모형 ANSWERS의 반월유역에의 적용. 한국농공학회지 30(1), 81-90. 1988.