

## 도시지역 비점오염원 관리를 위한 SWMM의 적용 -포항시를 대상으로-

이재용 · 장성호<sup>†</sup> · 박진식\*

부산대학교 지역환경시스템공학전공, \*경운대학교 보건환경학전공  
(2008. 5. 28. 접수/2008. 6. 18. 수정/2008. 6. 22. 채택)

## Application of SWMM for Management of the Non-point Source in Urban Area -Case Study on the Pohang City-

Jae-Yong Lee · Seong-Ho Jang<sup>†</sup> · Jin-Sik Park\*

Dept. of Environmental System Engineering, Pusan National University, Miryang 627-705, Korea

\*Dept. of Health & Environmental, Kyungwoon University, Gumi 730-852, Korea

(Received May 28, 2008/Revised June 18, 2008/Accepted June 22, 2008)

### ABSTRACT

Non-point source pollution that originates from surface applied chemicals in either liquid or solid form is a part of urban activities and it appears in the surface runoff caused by rainfall. This study investigates the characteristics of non point source pollution in relation to storm events and the first washing effect in the Study area, which is comprised of different land use types. Then, a Best Management Practices (BMP) model, for urban areas, is applied with the Storm water Management Model (SWMM) Windows Interface which was developed by the EPA in the USA. During the storm event analysis of the hydrographic and pollutographic data showed that the peak of pollutants concentration was within the peak flow, 30 to 60 minute into the storm event in the Study area. The results of simulation using SWMM Windows Interface, Structure Techniques as applied in the study were highly efficient for removal of pollutants. Predicted removal efficiency was 26.0% for SS, 22.1 for BOD, 24.1% for COD, 20.6% for T-N, and 21.6% for T-P, respectively.

**Keywords:** SWMM, BMPs, non-point source pollutions, rainfall, runoff

### I. 서 론

강우에 의해 인근 유역으로 대량 유입되는 비점오염원은 특정한 오염물질을 선별하여 치청하는 것이 아니라 대상 유역 환경에 배출되는 통합적 오염물질을 청하는 것으로, 미국 EPA에서는 비점오염물질(non-point source pollution)이란 명확한 오염물질 유출경로를 가지지 않고 농지, 임업, 광산, 건축, 매립지, 도시지역 등에서 강우에 의해 유출되는 오염물질이라고 정의한다.<sup>1,3)</sup>

국내에서는 공장폐수와 가정하수 등의 점오염원을 관리하여 하천 및 인근 유역에 유입되는 수질환경을 개

선하는 사업을 시행하여 왔으나 최근 강우에 의해 유입되어 수질환경오염을 가중시키는 비점오염원의 관리에 대한 중요성이 높아지고 있다.

이중 도시지역은 많은 인구와 산업시설의 집중으로 인하여 오염물질의 발생량이 크고, 지붕, 도로 같은 불투수성 표면이 많아서 강우유출수가 대부분 표면으로 유출되어 비점오염물질의 유출율이 임야, 농지, 등의 타 토지이용보다 크다. 일반적으로 도시지역 비점오염물질은 주로 거리의 오물, 대기로부터의 낙진, 교통수단의 배기가스와 타이어 가루 및 제동장치에서 마모되어 오는 금속성분 등이며, 도시지역에서의 비점오염원의 유출량은 개발전의 산지에 비해 BOD와 SS가 각각 92배, 24배 이상 유출되는 것으로 조사되었다.<sup>4,5)</sup> 도시지역 강우에 의한 유출수의 일반특성은 BOD와 영양물질 농도는 가정하수보다 낮으나, 박테리아 농도는 비교적

<sup>†</sup>Corresponding author : Department of Env. System Eng., Pusan University  
Tel: 82-55-350-5435 Fax. : 82-55-350-5439  
E-mail : jangsh@pusan.ac.kr

높으며, 대부분의 금속성 물질과 일부 유기 독성물질의 농도는 높아 공공수역의 수질에 미치는 영향이 크므로 강우시 도시유역에서의 비점오염물질의 유출특성을 조사 연구하는 것은 매우 중요하다.<sup>6)</sup> 따라서 본 연구에서는 포항시의 강우에 의한 비점오염원 유출 특성을 도시유출모형 중 기존에 많이 연구된 SWMM 모형을 이용하여 분석하고 비점오염원 최적관리 방안 중 구조적 방법과 비구조적 방법을 적용하여 비점오염원 저감효과를 모의하고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 대상지역

본 연구 대상지역은 포항시 두호동 일원으로 산악과 바다를 끼고 있는 도시 지역의 전형적인 모습을 보이는 지역이다. 본 연구 대상지점에서의 유역의 면적은 2.86 km<sup>2</sup>, 유로 연장은 1.47 km이며 토지이용현황을 보면 경작지는 3.6%를 차지하며, 대지 및 도로의 사용은 31.6%이며 임야가 64.8%로 높은 비율을 차지한다. 연구 지역의 특징은 고지대의 임야를 제외한 대부분이 도시화를 이루고 있는 것으로 나타났다.

### 2. 유량 및 수질조사

강우시 비점오염원에 의한 오염물질의 유출부하특성을 산정하기 위하여 포항시 두호동 지점의 하수관거에서 유량 및 수질 조사를 실시하였다. 강우에 의해 발생하는 비점오염원 측정을 위하여 유량측정은 건기와 강우시를 포함하여 약 60일 동안 수행되었다. 미국 NPDES에서는 현장조사 기준이 일일 강우량이 최소 2.54 mm 이상이 되어야 하고, 강우이전의 건기일수가 최소한 3일 이상될 것을 제안하고 있다.<sup>7)</sup>

본 연구에서는 유역에서의 유량을 자동측정 및 데이터 저장이 가능한 전자식(FLO-TOTE 260) 유량계를 이용하여 15분 간격으로 측정하였으며 BOD, COD, SS, T-N, T-P 등의 수질분석은 시료를 실험실로 운반한 다음 즉시 분석하거나 냉장보관 하면서 분석하였다. 즉시 분석을 실시하지 않은 경우는 수질오염공정시험법에 준하여 시료전처리를 실시하여 시료의 변질을 방지하는 조치를 취한 다음 분석하였으며 본 수질조사

Table 1. Rainfall characteristics of the storm events survey.

Site	Date	Rainfall (mm)
Duho-dong Area	02. 04. 15-16	16.5
	02. 04. 30~05. 01	33.0
	02. 07. 21	36.5

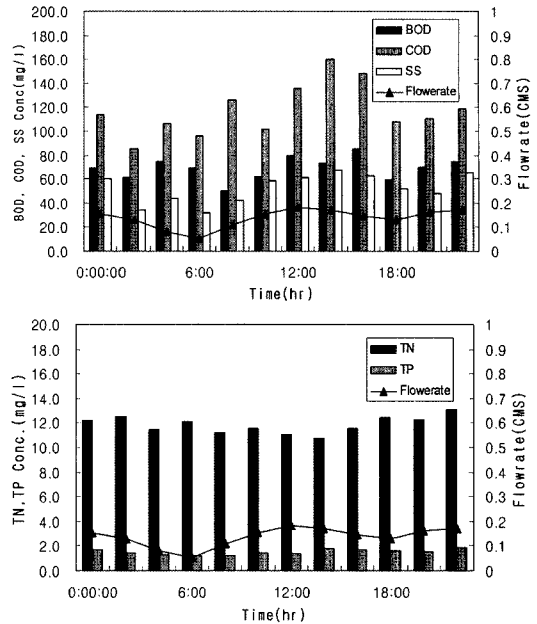


Fig. 1. Water quality analysis result at study area on dry weather.

는 수질오염공정시험법에 의해 분석하였다.<sup>8)</sup>

조사 기간 및 강우사상은 Table 1에 나타내었다.

### 3. 건기 및 강우시 유량 및 수질 특성

#### 1) 건기시 유량 및 수질 특성

연구 대상 유역의 건기시 유량 및 수질 특성을 Fig. 1에 나타내었다. 조사 지점에서의 건기시 평균유량 및 오염부하의 평균유량 0.13 m<sup>3</sup>/s, BOD 69.0 mg/l, T-N 11.8 mg/l, T-P 1.5 mg/l이었다. 특히 낮 시간대인 오후 12시에 유량 및 오염물의 부하가 증가하는 것으로 나타나는데 이것은 조사 대상지역이 식당이 밀집되어 있는 지역으로 점심 때 물의 사용량의 증가에 따라 오염물 부하의 증가가 같이 이루어진 것으로 사료된다.

#### 2) 강우시 유량 및 수질 특성

강우시의 수질 및 유량의 측정은 초기 세척효과를 알기 위하여 강우 강도에 따라 측정시간 30분에서 2시간 간격으로 조정하여 측정하였다.

Fig. 2에 강우량이 16.5 mm일 때 유량변화에 따른 오염물의 농도변화를 나타내었다. Fig. 2에 의하면 유량의 변화에 따른 수질의 변화가 BOD 164.0~35 mg/l, COD 261.0~56.0 mg/l, SS 122.0~27.0 mg/l, T-N 37.6~ 13.5 mg/l, T-P 2.6~0.9 mg/l로 나타났다. 이때의 평균값은 BOD 88.0 mg/l, COD 135.0 mg/l, SS

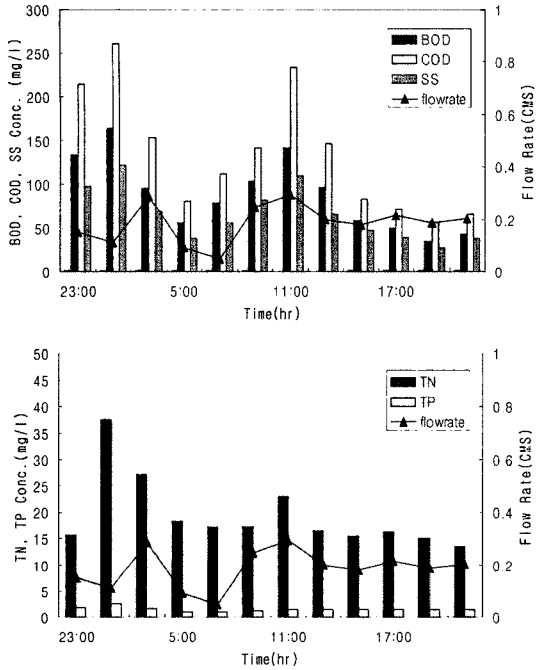


Fig. 2. The variation of flow rate and water quality at Pohang (on April 15 2002).

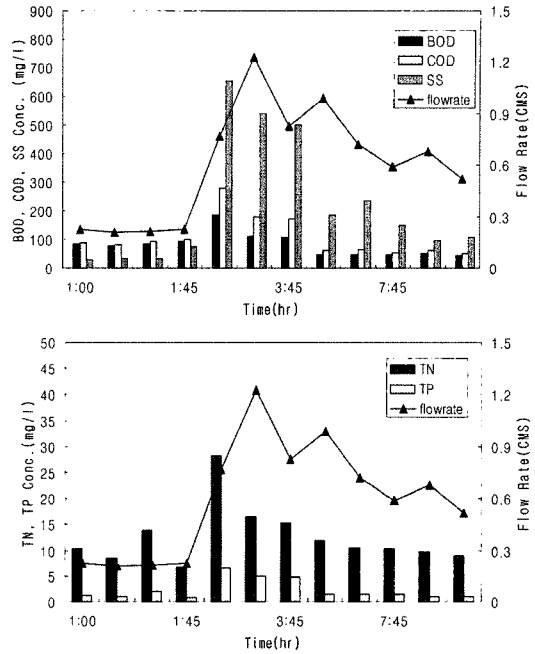


Fig. 4. The variation of flowrate and water quality at Pohang (on July 21 2002).

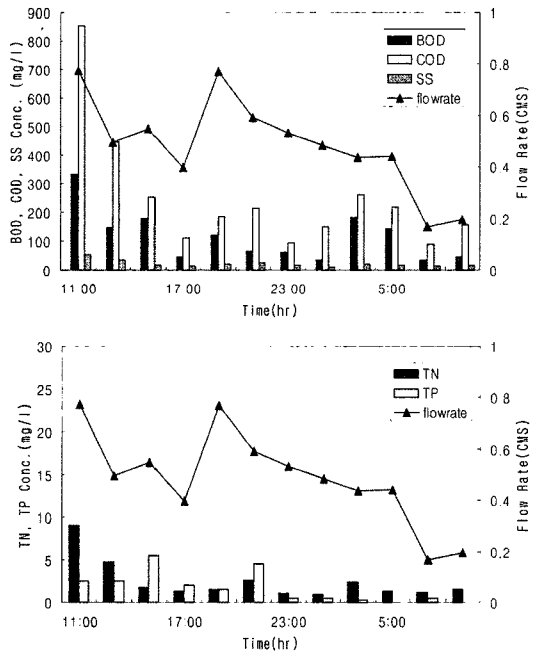


Fig. 3. The variation of flowrate and water quality at Pohang (on April 30 2002).

66.0 mg/l, T-N 19.4 mg/l, T-P 1.4 mg/l로 비강우시 보다 높은 유출량을 보였다. 초기 강우에 의한 오염물

부하 상승이후 오전 늦은 시간에 오염물 부하가 다시 상승한 것으로 나타났는데 이는 도시가정하수의 특성 상 늦은 아침에 침투 유량이 나타나기 때문인 것으로 판단된다.<sup>9)</sup>

Fig. 3에 강우량이 33.0 mm일 때의 유량변화에 따른 오염물의 농도변화를 나타내었다. Fig. 3에 의하면 유량의 변화에 따라 BOD 183.3~93.0 mg/l, COD 331.0~31.0 mg/l, SS 852.0~90.0 mg/l로 나타났으며 T-N 54.5~10.2 mg/l, T-P 9.1~0.9 mg/l를 나타냈다. 이때의 평균값은 BOD 104.4 mg/l, COD 115.8 mg/l, SS 252.4 mg/l T-N 23.9 mg/l, T-P 2.4 mg/l로 비강우시 보다 높은 유출량을 보였다. 특히 이때의 SS의 농도는 건기시 SS의 평균농도 보다 약 5배의 증가를 가져왔다.

Fig. 4에 총 강우량 36.5 mm일 때의 유량변화에 따른 오염물의 농도변화를 나타내었다. Fig. 4의 유량 변화에 따른 수질 변화량은 BOD 186.7~41.1 mg/l, COD 280.0~51.0 mg/l, SS 653.0~32.0 mg/l, T-N 28.1~6.7 mg/l, T-P 6.1~0.9 mg/l로 나타나 강우기간동안 유출량의 변화와 유사한 오염물질농도 변화를 나타냄으로 Fig. 2 및 Fig. 3과 다소 다른 경향을 보였는데 이는 가정하수의 영향이 상대적으로 적은 새벽시간대에 강우가 시작되었기 때문인 것으로 판단된다.

**5. SWMM을 이용한 비점오염원 모의**

SWMM 모형은 미국 EPA에서 개발된 것으로 1971년에 처음으로 소개되었고, Version 3부터 연속 모의가 가능해졌고, 현재까지 비점오염원의 유출모델로 널리 사용되고 있다.

SWMM 모형은 도시 및 일반적인 비도시 지역에 적용하여 유출량 및 수질을 예측 모의하는 모형으로 강우사상별 모의 및 연속모의가 가능한 모형이다. 이 모형은 세계적으로 많이 사용되고 있는 모형중의 하나로 비교적 그 정확성이 높은 것으로 알려져 있다.<sup>10,11)</sup>

개발 초기 SWMM 모형은 6개의 실행블록으로 구성되어 있었으나 현재 발표되어 가용되고 있는 SWMM 4.3 version은 서비스블록과 실행블록으로 구성되어 각 블록간에 유기적인 관계를 가지고 유량 및 수질을 동시에 모의할 수 있도록 구성되어 있다.<sup>12)</sup>

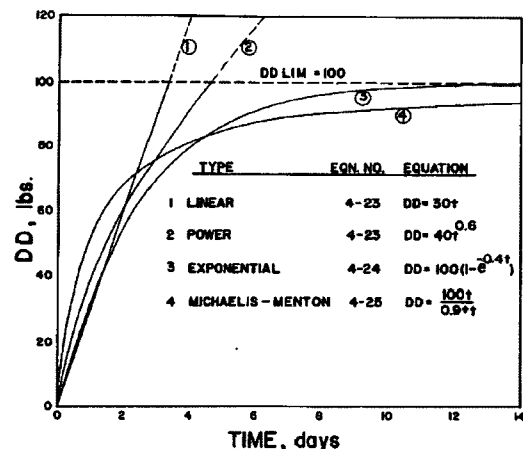
유출수질에 큰 영향을 주는 것은 각 유역의 토지이용에 따른 오염물질의 축적과 쓸림 과정이다.

SWMM에서는 Power-linear function, Exponential funtion, Michaelis-Menton funtion 등의 3가지 방법으

**Table 2.** Build-up equation used in SWMM

Type	Equation
Power-Linear	$PSHED(t) = QFACT(3) \cdot t^{QFACT(2)}$ $PSHED(t) \leq QFACT(1)$
Exponential	$PSHED(t) = QFACT(1) \cdot (1 - e^{-QFACT(2) \cdot t})$
Michaelis-Menton	$PSHED(t) = \frac{QFACT(1) \cdot t}{QFACT(3) + t}$

\*PSHED(t) = Constituent quantity. t = time, days  
Parameters QFACT are doubly subscripted.



**Fig. 5.** Comparison of linear and nonlinear buildup equation.

로 축적과정을 계산할 수 있으며 축적 방정식으로 아래의 Table 2와 같이 세 가지가 제시되고 있다.

이들 오염물질 축적 방정식의 시간경과에 따른 변화를 비교한 결과는 Fig. 5와 같다. 여기에서 PSHED(t)는 t 시간에서 오염물질의 축적량(kg), t는 선행 청천기간(days), QFACT(1)는 오염물질 한계량, QFACT(2)는 지수, QFACT(3)는 계수이다.

오염물질의 쓸림 과정을 계산하는 방법은 먼저 유출율과 잔존 오염물양에 의하여 누가 오염물질 쓸림양을 구하는 관계식을 구성하고, 쓸림계수와 쓸림지수의 매개변수를 이용해서 쓰림을 계산하는 방법과 유출율과 누가 오염물 쓸림양과의 관계를 회귀분석하여 회귀계수들을 구하는 방법이 있다.<sup>13,14)</sup>

**III. SWMM 모형의 적용**

**1. 입력 자료의 구성**

SWMM은 1시간 이내의 작은 시간간격의 모의가 필요할 때, 혹은 하천과 관거에서의 흐름 추적이 요구될 때, 특정한 유출 형태와 수질형태의 모의가 필요할 경우 사용하며 하수관망이나 측구, 하천 등의 세밀한 모형이다. 본 연구에서는 도시 소유역에서의 강우에 의한 유출 특성을 SWMM모형을 이용하여 포항시 대상지역에 적용하였다.

SWMM의 입력자료는 아래의 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

**Table 3.** Channel data of study area

Channel No.	Length (m)	Slope (m/m)
1	303	0.0198
2	345	0.013
3	295	0.02
4	567	0.013
5	200	0.019
6	100	0.01

**Table 4.** Subcatchment data of study area

Subcatchment No.	Width (m)	Area (ha)	Impreviousness (%)	Average Slope (m/m)
1100	1210	146.2	5	0.01324
1200	900	35.6	30	0.01094
1300	500	46.2	60	0.0995
1400	600	16.3	60	0.0827
1500	500	22.0	60	0.0889
1600	600	20.7	95	0.0349

2. 모델의 보정

유량과 수질의 보정목적은 모델에 유역의 평균적인 상태를 고정시키는 것이다. 따라서 보정에 사용된 강우 사상과 실측치와 예측치를 일치시키는 것보다 보정에 사용된 인자가 전체를 통합시키는 것이 중요하다. 유역에 대한 정보가 충분하다면 모형의 계수들은 관측치 및 물리적인 값으로부터 얻을 수 있다. 본 연구에서는 정보의 부족으로 인하여 얻을 수 없는 계수와 민감도가 비교적 작은 경우에는 일반적인 입력계수를 이용하였

다. 하도의 Manning 계수는 0.013, 불투수지역의 Manning 계수는 0.015, 투수지역의 Manning 계수는 0.06, 불투수지역의 요지 저류량은 1.0 mm를 이용하였다.<sup>15)</sup> 수문곡선에서 가장 민감하게 반응하는 계수로는 최대 침투능과 최소 침투능 그리고 불투수비로 알려져 있다. 따라서, 모델의 보정은 이 계수를 조정하여 실시하였다. 투수지역의 요지 저류량은 2.54~7.62 mm의 범위값으로 제안되고 있다. 유량 및 수질의 보정을 위하여 7월 21일 측정된 값을 이용하였으며 Fig. 6~Fig. 11에

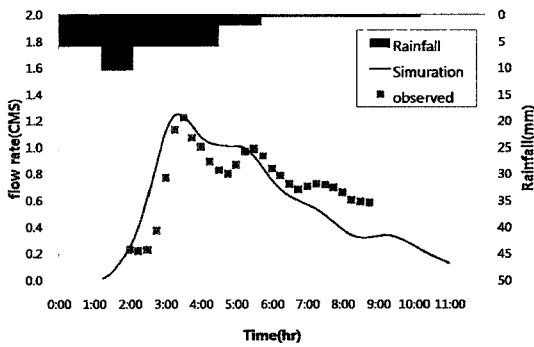


Fig. 6. Simulation results of flowrate at study area on July 21 2002.

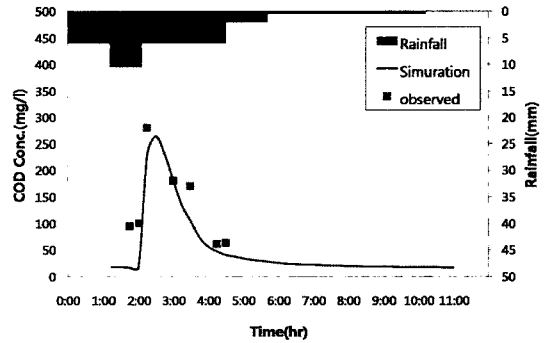


Fig. 9. Simulation results of COD at study area on July 21 2002.

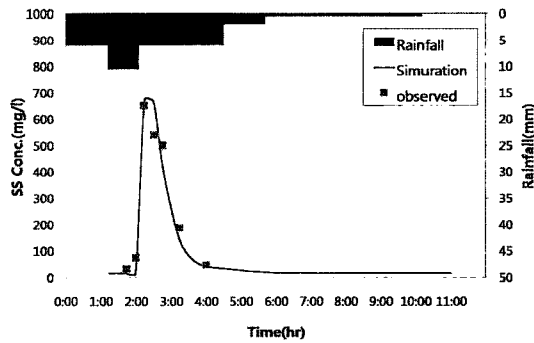


Fig. 7. Simulation results of SS at study area on July 21 2002

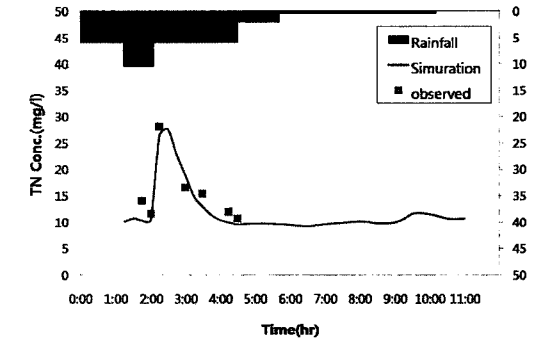


Fig. 10. Simulation results of T-N at study area on July 21 2002.

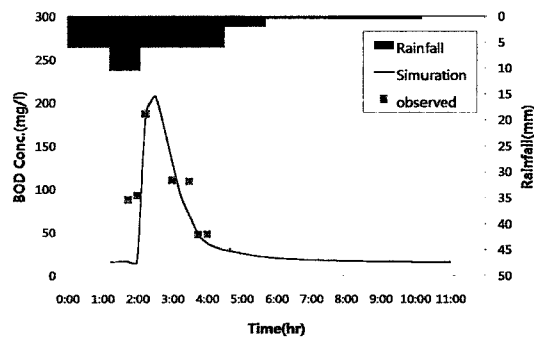


Fig. 8. Simulation results of BOD at study area on July 21 2002.

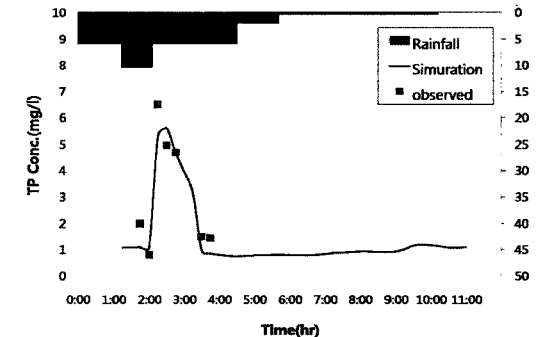


Fig. 11. Simulation results of T-P at study area on July 21 2002.

**Table 5.** Correlation Factor, relative error of the predicted and observed variables for calibration in study area

Item	Flowrate (m <sup>3</sup> /sec)	SS	BOD	COD	T-N	T-P
Correlation Factor (r)	0.828	0.979	0.809	0.922	0.957	0.959
Relative error (%)	1.9	22.7	28.8	36.7	10.0	13.2

강우시 유출량과 오염물질농도를 모의한 결과와 실측치와 모의값의 검증도를 나타내었다.

오염물질 중 특히 SS의 경우 0.979의 높은 상관성을 나타냈다. 이것은 SWMM이 가지는 유출특성 중 유사에 대한 적용도가 높은 것으로 나타났으며 상대적으로 COD의 상대오차가 36.7%의 높은 값을 나타내었는데 이것은 7월 21일이 강우세기가 초기 30분에 6.0 mm/hr의 높은 강우강도로 인하여 도로의 무기물질의 유입으로 인하여 농도 값이 다른 오염물질보다 상대적으로 높게 유출되었기 때문으로 판단된다. 모델의 모의값과 실측값에 대한 상관계수, 상대오차를 Table 5에 나타내었다.

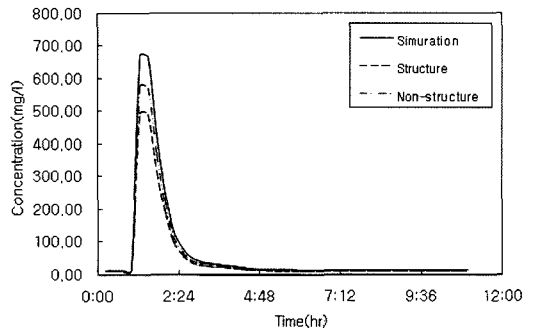
SWMM을 이용하여 유량 및 오염 부하량을 보정한 결과 상관계수는 유량은 0.828, 오염부하량은 BOD는 0.809, SS는 0.979, COD는 0.922로 나타났으며 T-N, T-P는 각각 0.957, 0.959의 높은 상관성을 나타내었고 상관오차는 유량, SS, BOD, COD, T-N, T-P가 각각 1.9%, 22.7%, 28.8%, 36.7%, 10.0%, 13.2%로 실측값과 모의값 사이의 상관성이 높은 것으로 나타났다.

**2. BMPs를 이용한 SWMM의 모의**

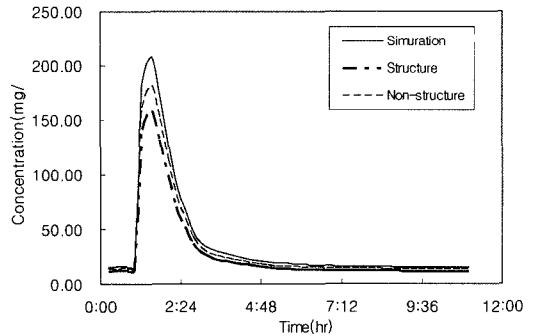
본 연구에서는 도시 지역의 주거지, 상업지역, 소규모의 주차장과 공원 등 소규모 배수지역에 적합한 침투도랑(Infiltration trenches)을 설치하는 방법인 Structure BMPs(Best Management Practices)에서 오염물의 쓸림이 50% 감소한다는 가정과 도시지역 도로를 주 2회 청소하는 방법인 Non-Structure BMPs에서 오염물의 축적이 30% 감소한다고 가정하여 SWMM을 모의하

였다. 모의에 적용한 결과는 Fig. 12~Fig. 17에 나타내었다.

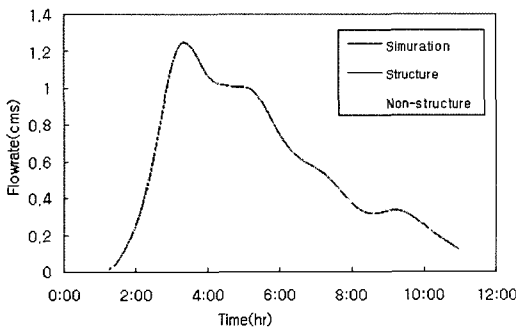
BMPs(Best Management Practice)를 SWMM에 적용한 결과 Table 6에 나타난 것과 같이 Structure BMPs의 적용에서는 유량의 변동은 없었으며 항목별 부



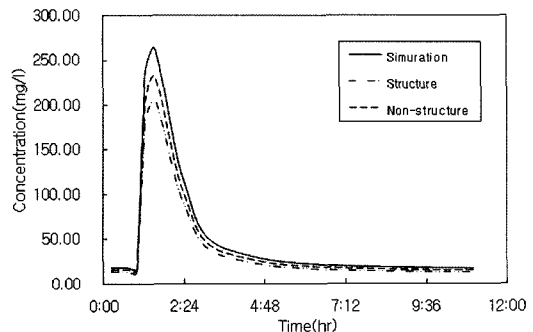
**Fig. 13.** The variation of simulation SS for each techniques.



**Fig. 14.** The variation of simulation BOD for each techniques.



**Fig. 12.** The variation of simulation flowrate for each techniques.



**Fig. 15.** The variation of simulation COD for each techniques.

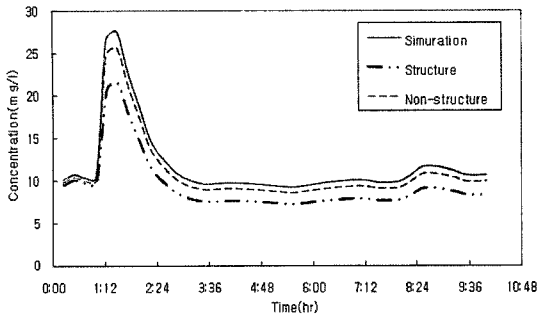


Fig. 16. The variation of simulation T-N for each technique.

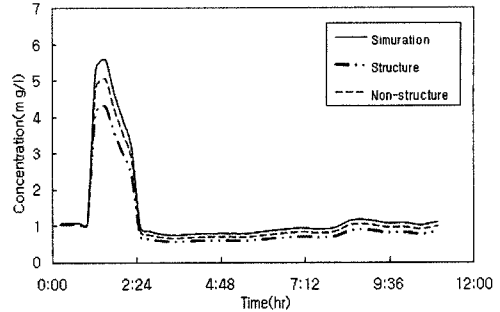


Fig. 17. The variation of simulation T-P for each techniques.

Table 6. The total load of simulation values for each techniques

	Flow rate (m <sup>3</sup> /sec)	SS	BOD	COD	T-N	T-P
Predicted	50358.3	3413.4	1839.8	2371.4	590.3	67.8
Structure	-	2527.3 (-26%)	1396.4 (-24.1%)	1849.7 (-22.0%)	468.8 (-20.6%)	53.2 (-21.5%)
Non-Structure	-	2936.9 (-14.0%)	1598.8 (-13.1%)	2077.4 (12.4%)	551.0 (-6.7%)	61.6 (-9.1%)

하량의 변동은 SS, BOD, COD, T-N, T-P가 각각 26.0%, 24.1%, 22.0%, 20.6%, 21.5%씩 감소하는 것으로 나타났으며 Non-Structure BMPs 경우 역시 유량의 변동은 없었으며 부하량의 변동은 SS, BOD, COD, T-N, T-P 순으로 각각 14.0%, 13.1%, 12.4%, 6.7%, 9.1%의 적은 양의 감소를 나타내는 것을 모의 값에 의해 예측할 수 있다.

위의 모의에서 보여 지듯이 유역에서의 비점오염원의 관리 방안 형태에 따라 비점오염원의 제거 효율의 상대적 차이가 있었으나 도시 지역에서의 비점오염원 관리를 위해서는 Structure BMPs와 Non-Structure BMPs의 적용이 필요한 것으로 연구되었다.

#### IV. 결 론

1) 현장조사시 가장 높은 강우 강도인 6.0 mm/hr의 초기 강우에 의한 비점오염원의 부하량을 건기시 오염 부하량과 비교하였을 때 BOD, COD, SS, T-N, T-P가 각각 10.7, 10.4, 58.2, 24.5, 27.3배의 증가를 가져 왔으며 특히 SS 부하량의 증가가 가장 크게 나타났다.

2) 본 연구에서 SWMM 모형을 모의한 결과 모의값과 실측값의 각 항목별 상관계수는 0.8이상의 높은 상관성을 나타내었으며 유량의 상관성은 0.825와 상대적으로 낮은 1.9%를 나타냄으로 모델의 적용에 있어서도 양호한 것으로 나타났다.

3) 비점오염원의 관리를 위해 BMPs에 의한 SWMM

모형 모의를 Structure BMPs와 Non-Structure BMPs를 적용한 결과 Structure BMPs의 적용에서는 유량의 변동은 없었으며 항목별 부하량의 변동은 SS, BOD, COD, T-N, T-P가 각각 26.0, 24.1, 22.0, 20.6, 21.5%씩 감소하는 것으로 나타났다. SWMM 모의에서 BMPs의 방법 중 Structure 방법이 상대적으로 높은 오염 처리효과를 나타내는 것으로 연구되었다.

#### 참고문헌

- Jang, S. H. and Park, J. S. : Runoff characteristics of non-point source according to rainfall in nam watershed. *Korea Journal of the Environmental Health*, **31**(1), 1-6, 2005.
- Paik, D. H., Lim, Y. H., Choi, J. K., Jung, P. G. and Kwak, D. H. : Study on the runoff characteristics of non-point source pollution in municipal area using SWMM model -A case study in Jeonju City-. *Journal of the Environmental Sciences*, **14**(12), 1185-1194, 2005.
- Whipple, W. and Hunter, J. V. : Settle ability of urban runoff pollution. *Journal of the Water Pollution Control Federation*, **53**(12), 1726-1731, 1981.
- Ministry of Environment Republic of Korea : Report of research for Non-Point Source Pollutant, pp.571, 1996.
- Jang, S. H. and Park, J. S. : A study on the runoff characteristics of non-point source in urban watershed -Case study on the dalseo and daemyung watershed-. *Journal of the Environmental Sciences*, **14**(12), 1171-1176, 2005.

6. Kim, D. Y. and Lee, H. K. : A study on scale and characteristics of nonpoint pollution using STORM model. *Korea Journal of the Environmental Health*, **22**(1), 5-11, 1996.
7. Gang, T. H., Lee, J. T. and Youn, S. Y. : A Study on the Storm Water Runoff and NPS Pollutant Discharge in a Small Urban Drainage Basin, Inst. of IND. Tech. Journal, Kyonggi Univ., Vol. 12, 1996.
8. Ministry of Environment Republic of Korea, Standard Method for Water Pollution, 1999.
9. Metcalf & Eddy (2004), "Wastewater engineering treatment and reuse 4 edition" McGraw-Hill, Inc.
10. Baffaut, C. and Delleur, J. W. : Calibration of SWMM Runoff quality model with expert system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, **116**(2), 52-61, 1990.
11. Park, J. K. and You, I. J. : Hydraulic modeling for water quality prediction in hanchun river system. *Korea Journal of the Environmental Health*, **25**(4), 99-106, 1999.
12. Huber, W. C. and Dickinson, R. E. : Storm water management model user's manual, Version 4, Athens, GA, EPA/600/3/3-85/077(NTIS PB86136041) EPA, 1998.
13. Cho, J. H. and Cho, N. H. : Estimation of nonpoint pollutant loads in th Hwanggujichoen basin using SWMM. *Korea Society of Environment Impact Assessment*, **12**(5), 249-358, 2003.
14. Huber, W. C. and Dickinson, R. E. : Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual. U.S. EPA, 1998.
15. Keum, S. K. : SWMM using Geographic Information System, Master of Science in the Department of Civil Engineering Graduate School, Seoul National University Seoul, Korea, 1995.