

장기모의를 통한 도시유역 비점오염원 처리장치 용량 산정

주진걸 · 유도근 · 김중훈[†]

고려대학교 건축 사회환경공학부

Determination of Design Capacity for NPS Pollutant Treatment Facilities by Long-term Simulation in Urban Areas

Jingul Joo · Doguen Yoo · Joonghoon Kim[†]

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
(Received 20 August 2011, Revised 19 October 2011, Accepted 21 October 2011)

Abstract

In this study, a method to determine the design capacities of nonpoint source (NPS) pollutant treatment facilities in urban areas was suggested. A facility capacity to treat 80 percent of total SS discharge was estimated by 2-year rainfall - runoff - build-up and wash-off simulation at Goonja drainage district in Seoul. For wash-off simulation, four wash-off models (EMC, RC, EXP, and Joo model) were used. As the results, 80 percent of total SS discharge could be treated with only 7.7~31.4% facility capacity of peak flow. The suggested method and results will provide a guideline to determine design capacities of NPS pollutant treatment facility in urban areas.

keywords : Long-term simulation, Non-point source pollutant, SWMM, Treatment

1. 서론

점오염원의 저감 및 도시화와 개발로 인하여 하천으로 유입되는 전체 오염물 중 비점오염원이 차지하는 비율이 점차로 증가하고 있으며, 비점오염원이 수질악화에 미치는 영향은 점점 더 커지고 있다(ASCE, 1998). 2000년 현재 4대강으로 유입되는 전체 오염부하 가운데 비점오염원이 차지하는 비율은 평균 27.5%에 이르며 이는 점차 증가하고 있는 것으로 보고되고 있다(정부합동, 2000). 특히 도시유역의 경우 토지이용이 고밀도로 이루어지며, 차량 등의 이동이 많아 비점오염원의 발생량이 많으며, 불투수면적 비율이 높아 강우시 지표 또는 대기중의 오염물질이 강우 초기 고농도로 농축되어 도시하천으로 유입되어 도시유역을 통과하는 하천의 수질악화는 더욱 심각한 것으로 보고되고 있다(김석구 등, 2004; 최지용과 신창민, 1997; Elliott and Trowsdale, 2007; Göbel et al., 2007; Zoppou, 2001). 도시 지역에서 발생하는 비점오염원에는 전통적인 오염물질인 BOD, TN, TP, SS 뿐만 아니라, 화석연료 부산물, 중금속 등 독성물질이 다량 포함되어 있어 수생태계에 미치는 영향이 더욱 큰 실정이다(Barrett et al., 1998; Drapper et al., 2000; Furumai et al., 2002; Wu et al., 1998).

정부에서도 비점오염원에 의한 수질악화의 심각성을 인식하고, 2000년부터 환경영향평가 수행시 비점오염원 처리

시설을 도입하도록 하고 있으며, 2004년도에 물관리 종합대책의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책을 발표하였다. 그러나 비점오염원에 대한 연구의 부족으로 비점오염원 발생량의 정량적인 평가가 어려우며, 따라서 관련 정책에 따른 세부 지침이 미비한 실정이다. 또한 비점오염원 처리에 관한 환경부 기준은 “해당지역의 강우량 기준으로 80% 확률에 해당하는 강우 중 최대 강우강도를 설계 강우강도” 또는 “강우량 8 mm” (환경부, 2006)로 설정되어 있으나, 환경부 기준인 80% 확률에 해당하는 강우를 어떻게 결정할 것인가는 명확하지 않아 실무에서 처리장치의 적절 용량을 산정하는데 어려움을 겪고 있다.

비점오염원의 유출특성을 파악하고 경제적인 처리장치 용량을 산정하기 위하여, 도시유역에서의 강우 유출수의 특성을 정의하고(강용태 등, 2007; 김이형과 강주현, 2004a, 2004b; 노성덕 등, 2004; 이준호 등, 2005; 주진걸 등, 2010), 유량가중평균농도(EMC)로 나타내거나(김진관, 2006; Kim et al., 2007), 최근에는 도시유출 및 수질해석을 위한 모형(FFC2Q)이 개발되기도 하였다(도시홍수재해 관리기술 연구단, 2007a). 이러한 연구들은 대부분이 단기간동안 발생한 호우사상을 대상으로 수행되었다. 그러나 비점오염원의 유출은 강우량, 강우강도 등 강우특성 뿐만 아니라 선행무강우일수, 선행강우량 등에 따라 매우 민감하게 변하므로, 몇 개의 단기 호우사상에 대한 모의를 통해서만 연간 유출되는 비점오염물의 양을 정확하게 모의하기 어려우며, 적절한 처리장치 용량을 결정하기 곤란하다.

따라서 본 연구에서는 연간 비점오염부하량에 대하여 평

[†] To whom correspondence should be addressed.
jaykim@korea.ac.kr

가하고 처리장치의 용량을 결정하기 위해서 EPA SWMM 모형을 사용하여 도시유역에서 우수와 부유고형물에 대한 장기 유출모의를 수행하였다. 장기모의 결과를 바탕으로 호우의 특성에 따라 시시각각 변하는 유량 및 농도 자료를 활용하여 연간 유출되는 오염물 총 질량의 80%를 저감하기 위한 비점오염원 처리장치의 적정 용량을 결정하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 모의방법

MOUSE (DHI, 2002), MUSIC (Chiew and McMahon, 1999), P8-UCM (Palmstrom and Walker, 1990), PURRS (Coombes, 2002), SLAMM (Pitt, 1998), SWMM (Huber and Dickinson, 1992), UVQ (Mitchell et al., 2003) 등 도시유역의 지표면 유출해석 및 유역 배수관망을 통한 유출 및 고형물 이송과 관련된 컴퓨터 모형이 많이 개발되어져 왔다. Elliott and Trowsdale (2007)은 최근 많이 사용되고 있는 10가지 모형을 선정하여 잠재적인 사용가능성, 모형의 적용시간, 유역구성 및 공간해상도, 유출발생, 홍수추적, 오염물질의 발생, 이송 및 처리가능성 등 포괄적인 사용성에 대해 비교 분석하였다. 그 결과 MOUSE (Modeling Of Urban SEwer) 및 SWMM (Storm Water Management Model) 모형이 다방면에서 우수한 것으로 나타나고 있다. 그 중 SWMM은 1971년 도시유역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의할 수 있도록 개발된 이후 계속적으로 개량되어 왔으며, 도시의 유출 유량과 수질의 모의에 가장 잘 알려진 모형으로 널리 이용되고 있다. 최근에 US. EPA에서는 Windows 시스템을 기반으로 한 SWMM 5.0과 DLL을 함께 제공함으로써, SWMM과 다른 프로그램 개발도구와의 연계 운영모형의 개발이 용이하게 되었다. 본 연구에서는 EPA SWMM 5.0 DLL을 사용하여 모의를 수행하였다.

SWMM 모형은 오염물질 축적(build-up)과 유실(wash-off) 과정을 통하여 비점오염원의 유출을 모의한다. Build-up은 건기 시 유역 표면에 오염물이 축적되는 과정을 나타내며, 선행건기일수, 도로의 청소빈도, 토지이용, 강우 등 여러 가지 요인에 따라 그 변화가 심하다. SWMM에서는 도시유역에서 오염물질의 축적(build-up)을 모의하기 위하여 식 (1)~(3)의 3가지 모형을 제공하고 있다.

- Power-linear

$$P_t = c_1 \times t^{c_2}, \text{ 단, } P_t \leq P_{\max} \quad (1)$$

- Exponential

$$P_t = P_{\max} \times (1 - e^{-c_1 t}) \quad (2)$$

- Michaelis-Menton

$$P_t = \frac{P_{\max} \times t}{(c_1 + t)} \quad (3)$$

여기서, t = time (days), P_t 는 시간에 따른 오염물 축적량(mass), P_{\max} 는 최대축적량(mass/area), C_1, C_2 는 유역특성에 맞는 계수이다.

본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되는 Exponential 모형을 사용하여 오염물의 축적을 모의하였다.

Wash-off는 건기동안 유역 표면에 쌓여있던 오염물들이 강우시 우수유출수와 함께 쓸려 유출되는 현상을 나타낸다. SWMM 모형은 Exponential, Rating Curve, EMC 방법 등 3가지 쓸림함수를 사용하여 비점오염원의 유출을 모의할 수 있다. 각 쓸림함수는 식 (4)~(6)과 같다.

- Exponential Wash-off

$$W = C_1 q^{C_2} B \quad (4)$$

여기서, W는 단위면적당 오염물 유출량, C_1, C_2 는 계수, B는 유역에 단위면적당 쌓여있는 오염물의 양, q 는 단위면적당 유량

- Rating Curve Wash-off

$$W = C_1 Q^{C_2} \quad (5)$$

여기서 Q는 유량, C_1, C_2 는 계수

- EMC

$$W = EMC \cdot q \quad (6)$$

여기서 q 는 유량, EMC는 농도

SWMM에 포함되어 있는 3가지 쓸림함수 외에 다양한 쓸림함수들이 개발되었다. Sartor 등(1972, 1974)은 미국의 12개 도시에서 관측된 자료를 분석하여 SS의 유출량이 강우강도와 비례한다는 가정하에 지수형 쓸림모형을 제안하였다. 지수형 쓸림모형은 Alley (1981), Nakamura (1984), Grottker (1987), Calabro (2004), Soonthornnonda 등(2008), Zhang 등(2009) 등에 의해 다양한 요인들을 고려할 수 있는 모형으로 개선되었다. 그러나 유사의 이동은 물의 흐름에 의한 전단력과 상관관계가 있으며, 전단력은 유량보다는 유속과 직접적인 연관이 있다. 주진걸 등(2010)은 SS의 유출량이 유속에 비례한다는 가정하에 식 (7)과 같은 쓸림함수를 유도한 바 있다. 본 연구에서는 식 (7)의 모형을 SWMM 모형에 추가하여 총 4가지 모형을 사용하여 모의를 수행하였다.

$$\frac{dM(t+\Delta t)}{dt} = M(t) \cdot (1 - \exp(-\alpha \cdot K \cdot Q(t+\Delta t)^{2/5} \cdot \Delta t)) \quad (7)$$

여기서, $K = (\frac{1}{n})^{3/5} (\frac{1}{B})^{2/5} S^{3/10}$, n 은 manning의 조도계수, B는 유역폭, S는 유역경사, Q는 유량이다.

2.2. 대상지역

본 연구의 대상유역은 국토해양부의 ‘도시홍수 재해관리 기술 연구단’의 대상유역인 서울의 군자 배수구역이다(도시홍수재해 관리기술 연구단, 2007b). 군자 배수구역은 중랑천 좌안의 하류부인 광진구에 위치하고 있으며, 유역면적은 약 96ha이다. 군자 배수구역은 전체 유역면적의 약 75%가 주택, 상업, 도로 등의 불투수지역으로 이루어져 있으며, 상류 유역에는 일부 산지를 포함하고 있다. 주간선의 길이와 지선을 고려하여 대상 유역을 Fig. 1과 같이 총 10개의 소유역으로 구분하였다. 강우-유출 모의를 하기위한 유역 및 관 매개변수들은 실제 강우사상을 사용하여 보정한 주진걸 등(2010)의 연구결과를 활용하였으며, 각 소유역의 지형특성 및 관제원은 Table 1, 2와 같다.

불투수면적 비율, 오염물의 축적 및 쓸림속도에 따라 토지이용을 3가지로 구분하였다. Land usage 1은 거주 및 일반 상업지역, Land usage 2는 도로로 비교적 오염물의 축적과 쓸림이 활발하게 일어나는 지역을 나타낸다. Land usage 3는 학교 운동장, 나지 등 비포장지역으로, 오염물의 축적이 느리고 오염물의 쓸림이 활발하지 않은 지역을 나

타낸다. 각 토지이용별 축적 및 쓸림함수 매개변수는 Table 3과 같다. 각 소유역별 토지이용 비율은 Table 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

군자배수구역에서 2007년 1월 1일 00:00 ~ 2008년 12월 31일 24:00까지 2년간의 관측호우사상을 대상으로 강우-유출 모의를 수행하였다. 강우량은 시간단위 관측값을 사용하였으며, 우기 모의는 1분, 건기 모의는 60분 간격으로 수행하였다. 2년간의 모의 중 최대 유출량은 7.17 m³/sec이며, 614일은 유출이 없었다. Fig. 2는 대상 강우사상 및 유출수문곡선을 나타낸다.

SWMM에서 제공하는 3가지 wash-off 모형인 Exponential, Rating Curve, EMC 및 Joo의 연구에서 제시한 방법을 사용하여 군자배수구역에서 SS의 유출량을 모의하였다. Table 5와 Fig. 3~6은 각 쓸림함수 별 SS 유출량을 나타낸다. 본 연구에서는 실제 호우사상에 대한 관측 값을 사용하여 보정한 매개변수를 사용하였으나, 유량이 동일함에도 불구하고 쓸림함수에 따라 침투유출량이 최대 3.9배나 차



Fig. 1. The shape and pipe network of Goonja drainage district.

Table 1. The surface characteristics of Goonja drainage district

Basin number	Basin area (ha)	Impervious area ratio (%)	Width (m)	Manning's roughness coefficient		Surface storage (mm)	
				Impervious area	Pervious area	Impervious area	Pervious area
1	7.57	44.7	598	0.01	0.1	2.54	5.08
2	11.75	46.4	713				
3	12.29	65.1	1,022				
4	10.37	94.9	240				
5	4.33	96.6	734				
6	6.81	94.4	138				
7	5.34	95.8	96				
8	9.70	93.2	376				
9	15.80	95.1	1,249				
10	12.45	97.4	1,528				

Table 2. The data of sewer in Goonja drainage district

Pipe	Length (m)	Slope	Manning's roughness coefficient	The characteristics of pipes		
				Shape	Height (m)	Width (m)
p1	124.53	0.020	0.018	Square	1.7	1.7
p2	421.30	0.007			1.7	1.7
p3	107.49	0.003			1.7	1.7
p4	267.40	0.003			1.8	1.8
p5	221.28	0.025			0.6	0.6
p6	20.24	0.023			0.7	0.7
p7	21.89	0.001			0.6	0.6
p8	256.84	0.001			2.1	2.0
p9	418.22	0.001			2.2	2.2
p10	13.17	0.052			2.2	2.2

Table 3. The parameters of build-up function and wash-off function depending on land usage

Land usage case	Build-up function parameters		Wash-off function parameters						
	P_{max}	c_1	Exponential		Rating curve		EMC		Joo (2010)
			C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	α
Land usage 1	210	0.035	0.18	0.030	3800	-0.0003	200.0	0.30	0.003
Land usage 2	230	0.040	0.20	0.080	3900	-0.0008	250.0	0.80	0.008
Land usage 3	150	0.020	0.15	0.010	3700	-0.0001	100.0	0.10	0.001

Table 4. Landuse of Goonja drainage district

(unit : %)

Subbasin number	Land usage 1	Land usage 2	Land usage 3
1	30	40	30
2	25	20	55
3	80	10	10
4	70	20	10
5	80	10	10
6	70	10	20
7	80	10	10
8	80	10	10
9	70	15	15
10	30	40	30

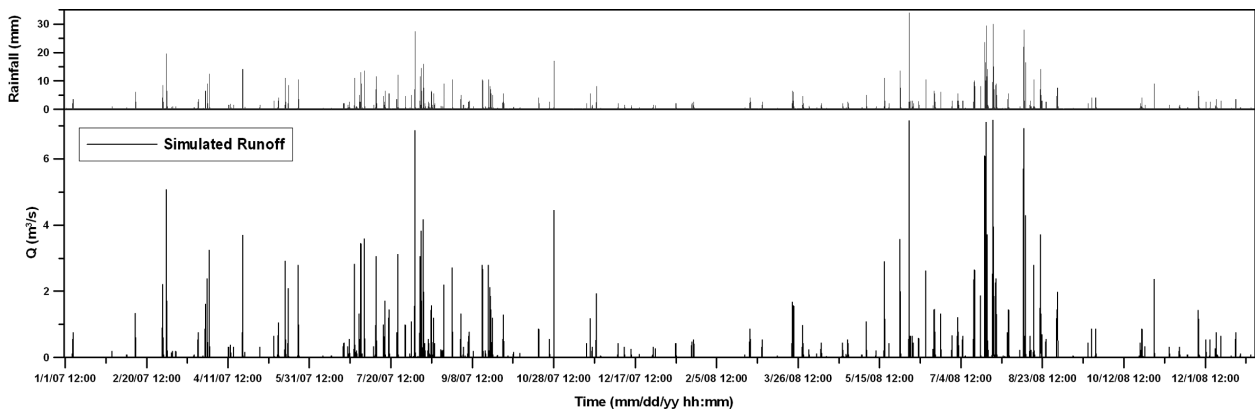


Fig. 2. Rainfall - runoff simulation result during 2 years at Goonja drainage district.

이가 발생하였다. 이는 단일 호우사상의 관측 및 모의결과가 연간 발생하는 다양한 강우사상의 특성을 정확하게 반영하지 못하기 때문이며, 따라서 연간 비점오염원의 유출량에 대한 평가에는 반드시 장기모의에 의한 분석결과를 활

용하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

동일한 축적함수를 사용하였기 때문에 연간 축적되는 총 오염물의 양은 동일할 것으로 가정하였으나, 2년간의 총 SS 유출량도 쓸림함수별로 차이가 발생하였다. 이는 유역

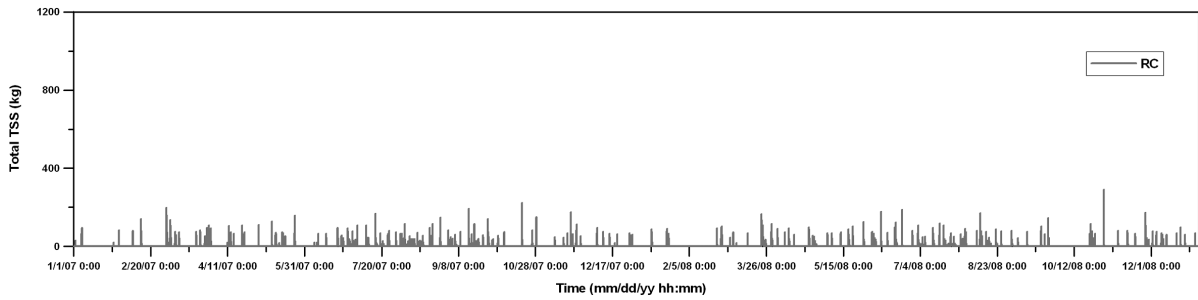


Fig. 3. Simulated SS discharges for 2 years at Goonja drainage district (using rating curve method).

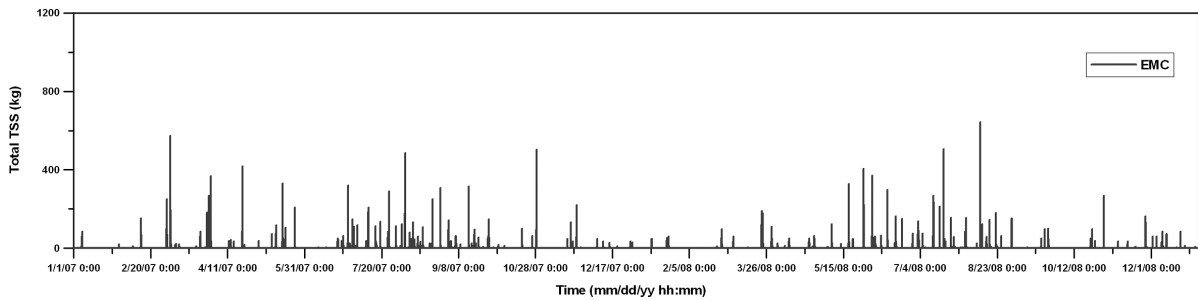


Fig. 4. Simulated SS discharges for 2 years at Goonja drainage district (using event mean concentration method).

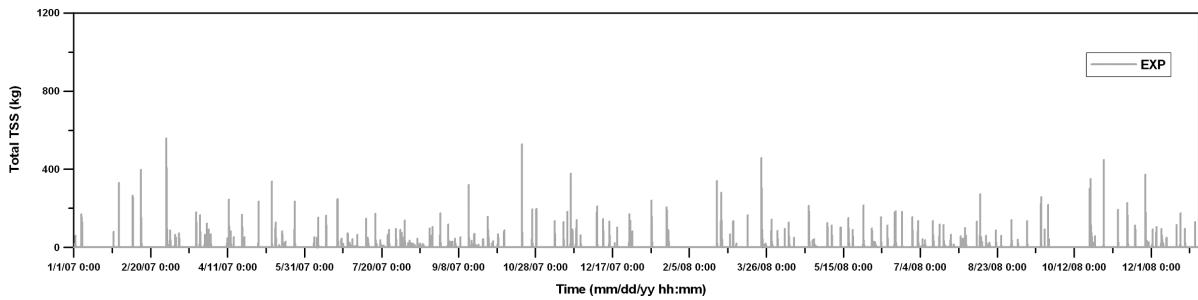


Fig. 5. Simulated SS discharges for 2 years at Goonja drainage district (using exponential method).

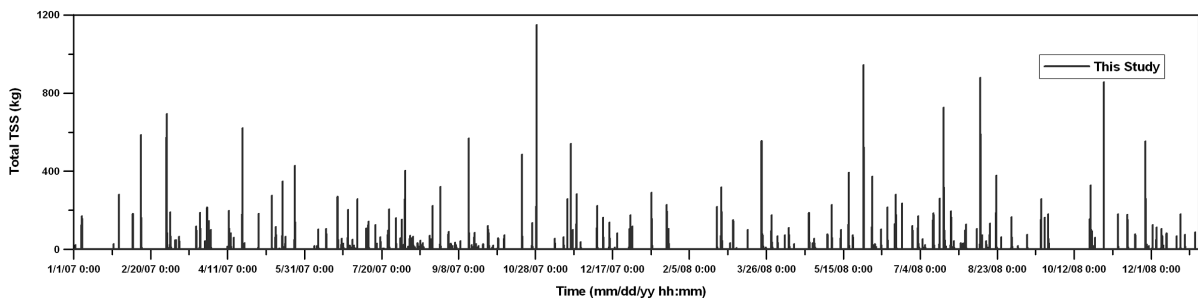


Fig. 6. Simulated SS discharges for 2 years at Goonja drainage district (Using Joo method).

Table 5. Simulated SS discharges for 2 years at Goonja drainage district

	Exponential	Rating Curve	EMC	Joo
Total discharge (kg)	378,951	279,544	222,581	471,037
Peak discharge (kg/hr)	1,672	876	1,933	3,452

에 쌓여있는 오염물의 양에 따라 축적되는 속도가 다른 Exponential 모형의 특징 때문으로 판단된다. 모의 시작 시

와 비교적 큰 강우가 발생한 이후에는 유역에 남아있는 오염물의 양이 없기 때문에 동일한 속도로 오염물이 축적된다. 그러나 비교적 작은 강우가 발생하였을 때에는 쓸림함수에 따라 유역에서 유출되는 오염물의 양이 다르며, 유역에 남아있는 오염물의 양은 축적량에 영향을 미치게 된다. 대장기간 중 총 1,071시간 동안 비가 왔으며, 이 중 강우강도가 10 mm/hr 이상인 시간은 전체 강우시간의 4.1%인 44시간에 불과하여, 강우 후 잔여 오염물의 양이 총 유출량의 차이에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다.

Table 6. Capacity of treatment facility to treat 80% of total SS discharge(unit : m³/sec)

	Peak discharge	Exponential	Rating curve	EMC	Joo
Capacity of treatment facility	7.17 (100%)	0.55 (7.7%)	0.57 (7.9%)	2.25 (31.4%)	2.05 (28.6%)

유역출구에 설치될 비점오염원 처리장치의 용량을 산정하기 위하여 시행착오법으로 연간 발생하는 전체 SS 유출량의 80%에 해당하는 우수 유출량을 산정하여, Table 6에 나타내었다. Exponential 방법으로 산정하였을 경우 처리장치의 용량이 가장 작게 산정되었으며, 0.55 m³/sec의 우수를 처리할 경우 근자배수구역에서 발생하는 전체 SS의 80%를 처리할 수 있는 것으로 산정되었다. EMC 방법이 가장 많은 2.25 m³/sec의 우수를 처리해야 하는 것으로 나타났다. Joo의 방법은 SS의 총 유출증량 및 침투 유출량이 가장 큰 것으로 나타났으나, 총 오염물 유출의 80%를 처리하기 위한 처리장치의 용량은 2.05 m³/sec로 EMC 방법보다 작은 것으로 산정되었다. 이 용량은 2년간의 모의 최대 유출량인 7.17 m³/sec의 약 28.6%에 불과했다.

4. 결론

일반적으로 비점오염원은 유출량이나 총 유출체적을 알기 어렵기 때문에, 처리장치의 적정 설계용량을 결정하는 것이 매우 어려운 일이다. 현재 환경부의 설계기준은 80%에 해당하는 강우로 제시되어 있다. 이 기준은 처리장치의 용량을 비교적 명확하게 결정할 수 있는 장점이 있으나, 처리되거나 유출된 비점오염원의 양을 알 수 없는 단점이 있다. 유출수의 농도는 동일한 강우사상에서도 시시각각 변하기 때문에, 강우의 80%를 처리하는 것이 오염물의 80%를 처리하는 것은 아니다. 게다가 우리나라는 강우가 여름철에 집중되어 내리기 때문에, 강우량의 편차가 크다. 비점오염원 처리장치의 용량을 80% 강우로 설정하였을 때는 그 용량이 너무 클 수 있다.

따라서 모의를 통하여 비점오염원 유출량을 확인하고, 전체 오염물 유출량 중 일정부분을 처리할 수 있는 적절한 기준이 제시되어야 한다. 이는 오염총량제의 실질적인 적용을 위해서도 필요하다. 본 연구에서는 2년간의 장기모의를 통하여 총 유출오염물 체적의 80%를 처리하기 위한, 비점오염원 처리장치의 용량을 제시하였다. 비점오염원의 유출량을 모의하기 위하여 EPA SWMM 5.0 모형에서 제공하고 3가지 모형(EMC, RC, EXP)와 Joo 모형 등 4가지 방법을 사용했다. 각 방법에 따라 산정된 처리장치의 용량에는 차이가 있었으나, 연최대우수유출량의 7.7~31.4%를 처리하면, 총 오염물의 80%를 처리할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 도시지역에서 발생하는 비점오염원을 정량화하고, 비점오염원을 처리하기 위하여 설치되는 시설의 용량을 합리적으로 결정하기 위한 방법을 제시하였으며, 이는 관련정책들의 세부 지침으로 활용되어 정량적이고 과학적인 비점오염원 관리를 가능케 할 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(KRF-2007-314-D00279).

참고문헌

- 강용태, 한상윤, 전종규(2007). 초기강우에 의한 공업지역내의 비점오염원 유출특성에 관한 연구. *한국수처리학회지*, **15**(1), pp. 59-68.
- 김석구, 김영임, 윤상린, 이용재, 김이호, 김종오(2004). 강우강도에 따른 노면유출수의 유출 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 494-499.
- 김이형, 강주현(2004a). 강우로 인해 고속도로로부터 유출되는 폐기물의 성상, 부하량 및 유출 특성. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 415-421.
- 김이형, 강주현(2004b). 강우시 발생하는 고속도로 유출수의 초기우수 특성 및 기준. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(6), pp. 641-646.
- 김진관(2006). *유역개발에 따른 비점오염원의 적정처리용량 결정*. 박사학위논문, 고려대학교.
- 노성덕, 이대근, 전양근(2004). 도로상의 비점오염물질 저감을 위한 초기 우수유출수 처리에 관한 연구. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(5), pp. 525-533.
- 도시홍수재해 관리기술 연구단(2007a). *도시홍수재해관리기술 연구(IV)*, R&D/03산학연 C01-01.
- 도시홍수재해 관리기술 연구단(2007b). *중량천 수문자료집 2007*, FFC06-03 도시홍수재해 관리기술 연구단기술보고서.
- 이준호, 조용진, 방기웅(2005). 강우시 도로유출수 수질특성 및 임경분포. *대한환경공학회지*, **27**(7), pp. 777-784.
- 정부합동(2000). *4대강 물관리 종합대책(1998-2000)*.
- 주진걸, 정동휘, 김종훈, 박무중(2010). 도시유역의 부유고형물 유출평가를 위한 슬림모형 개발. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(5), pp. 789-795.
- 최지용, 신창민(1997). *도시지역 비점오염원 관리방안 연구*, 한국환경정책평가연구원.
- 환경부(2006). *비점오염원관리업무편람*.
- Alley, W. M. (1981). Estimation of impervious-area washoff parameters. *Water Resources Research*, **17**(4), pp. 1161-1166.
- ASCE (1998). *Urban Runoff Quality Management*, Reston, Va.
- Barrett, M. E., Irich, Jr. L. B., Malina, J. F., and Charbeneau, R. J. (1998). Characterization of highway runoff in Austin, Texas, area. *Journal of Environmental Engineering*, **124**(2), pp. 131-137.
- Calabro, P. S. (2004). Design storms and water quality control. *Journal of Hydrologic Engineering*, **9**(1), pp. 28-34.
- Chiew, F. and McMahon, T. A. (1999). Modelling runoff and diffuse pollution loads in urban areas. *Water Science and Technology*, **39**, pp. 241-248.
- Coombes, P. J. (2002). *Rainwater Tanks Revisited: New*

- Opportunities for Urban Water Cycle Management*. Ph.D. thesis, University of Newcastle, Australia.
- DHI (2002). *MOUSE Surface Runoff Models Reference Manual*. DHI Software, Horsolm, Denmark.
- Drapper, D., Tomlinson, R., and Williams, P. (2000). Pollutant concentration in road runoff: Southeast Queensland case study. *Journal of Environmental Engineering*, **126**(4), pp. 313-320.
- Elliott, A. H. and Trowsdale, S. A. (2007). A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, **22**, pp. 394-405.
- Furumai, H., Balmer, H., and Boller, M. (2002). Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff. *Water Science and Technology*, **46** (11-12), pp. 413-418.
- Göbel, P., Dierkes, C., and Coldewey, W. G. (2007). Storm water runoff concentration matrix for urban areas. *Journal of Contaminant Hydrology*, **91**, pp. 26-42.
- Grottker, M. (1987). Runoff quality from a street with medium traffic loading. *The Science of the Total Environment*, **59**, pp. 457-466.
- Huber, W. C. and Dickinson, R. E. (1992). *Storm Water Management Model, Version 4 : User's manual*, EPA/600/3-88/001a, Environmental research laboratory, W.S. Environmental Protection Agency, Athens, GA, October.
- Kim, L. H., Ko, S. O., Jeong, S. M., and Yoon, J. Y. (2007). Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm. *Science of the Total Environment*, **376**, pp. 178-184.
- Mitchell, V. G., Diaper, C., Gray, S. R., and Rahilly, M. (2003). UVQ: Modelling the movement of water and contaminants through the total urban water cycle. In: 28th International Hydrology and Water Resources Symposium, Wollongong, NSW. Institution of Engineers, Australia.
- Nakamura, E. (1984). Factors affecting the removal rate of street surface contaminants by overland flow. *Journal of Research*, **24**, pp. 1-24.
- Palmstrom, N. and Walker, W. W., Jr. (1990). P8 urban catchment model: User's guide. Program documentation, and evaluation of existing models, design concepts, and Hunt-Potowomut data inventory. The Narragansett Bay Project Report No. NBP-90-50.
- Pitt, R. (1998). Unique features of the Source Loading and Management Model (SLAMM). In: W. James (ed.), *Modeling the Management of Stormwater Impacts*, **6**. Computational Hydraulic International, Guelph, Ontario, pp. 13-35.
- Sartor, J. D. and Boyd, G. B. (1972). Water pollution aspects of street surface contaminants, EPA-R2-72-081(NTIS PB-214408), Environmental Protection Agency, Washington, DC, November 1972.
- Sartor, J. D., Boyd, G. B., and Agrdy, F. J. (1974). Water pollution aspects of street surface contaminants. *Water Pollution Control Federation*, **46**(3), Part 1, pp. 458-467.
- Soonthornond, P., Christensen, E. R., Liu, Y., and Li, J. (2008). A washoff model for stormwater pollutants. *Science of the Total Environment*, **402**, pp. 248-256.
- Wu, J. S., Allan, C. J., Saunders, L., and Evett, J. B. (1998). Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff. *Journal of Environmental Engineering*, **124**(7), pp. 584-592.
- Zhang, W., Keller, A. A., and Wang, X. (2009). Analytical modeling of polycyclic aromatic hydrocarbon loading and transport via road runoff in an urban region of Beijing, China. *Water Resources Research*, **45**, W01423.
- Zoppou, C. (2001). Review of urban storm water models. *Environmental Modelling and Software*, **16**, pp. 195-231.