

SWMM 모형을 이용한 비점오염 분석 및 CSO 관리방안 연구 - 부산시 온천천 유역 대상 -

신현석[†] · 손정화 · 장종경 · 손태석 · 강두기* · 조덕준**

부산대학교 사회환경시스템공학부

*낙동수환경방재 기술원

**동서대학교 토목공학과

The NPS Analysis and CSO Management Based on SWMM for Oncheon Basin

Hyun Suk Shin[†] · Jeong Hwa Son · Jong Kyung Jang · Tae Seok Shon · Dookee Kang* · Dukjoon Cho**

School of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

*Nwater & Disaster prevention Technology

**Dongseo University, Department of Civil Engineering

(Received 11 November 2008, Revised 15 December 2008, Accepted 6 January 2009)

Abstract

Oncheon basin which are located in Busan is divided into 43 basin on the basis of main pipe, constructed with Storm Water Management Model (SWMM). Occurrence situation for Outflow and pollutant loads by long-term continuous rainfall is examined for treatment district and river analysis point of Oncheon basin and a reduction vs effectiveness table for effective CSOs managements is made for each of treatment districts according to each of managements. In case that treatment equipment is located at the discharge point of CSO, treatment efficiency is analysed. It is supposed that treatment equipment have an efficiency on the basis of a concentration and runoff discharge over a critical flow is discharged with it untreated and treating runoff discharge with treatment equipment at each of runoff discharge points and treating it gathered at sewage treatment plant (STP) through trunk sewer is compared for a relative treatment efficiency.

keywords : Non-point source, Sewage Treatment Plant (STP), Storm Water Management Model (SWMM), Treatment efficiency, Treatment equipment

1. 서론

도시화에 따른 인구의 집중 및 경제의 급속한 성장은 많은 긍정적 요소와 함께 물 환경 측면에서 역효과를 초래하게 되었다.

하수관거는 오수와 우수를 배제하는 방식에 따라 분류식, 합류식 관거로 나누어진다. 합류식 하수도는 동일 관거에 의하여 오수와 우수를 함께 배제하는 방식으로 분류식 하수도에 비하여 시공이 용이하고 건설비가 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 합류식 하수도는 평상시 생활오수 대부분이 하천에 유입되기 전에 우수토실에 의하여 별도로 설치된 차집관로를 통하여 하수처리장에 집수된 후에 일련의 처리 과정을 거쳐 하천에 방류하게 되지만 호우기간 동안에 강우로 인한 차집 용량의 초과한 경우 강우와 함께 유역에 산재해 있는 각종 오염물질과 함께 하천으로 유입되어 하천은 급속도로 오염되고 있는 실정이다. 이로 인하여 도시하천의 대부분은 우기 때마다 심한 악취와 수질오염 등으로 맑은 물이 흐르는 과거의 자연환경을 기대하기 어려운 실정이다.

따라서 우천 시에 유역에 산재해 있는 각종 오염물질이 강우와 함께 하천에 유입되어 하천의 수질이 심하게 악화되는 문제를 그대로 내포하고 있는 실정으므로 강우 시 비점 오염원에 대한 체계적인 관리방안이 요구된다.

본 연구에서는 부산의 대표하천의 하나인 온천천 유역을 대상으로 SWMM을 이용하여 유역지표에서의 오염원관리 효과와 차집용량의 증설 등에 의한 유출제한 효과를 주요 분구 및 하천지점별로 분석하여 온천천에 대한 정책적 관리방안의 수립에 필요한 기준이 되는 결과를 제시하고자 한다. 또한 이러한 분석절차는 부산지역의 모든 도시하천에서 동일한 절차에 의한 분석을 도입하면 전반적인 관리방안을 결정하는데 있어 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

국립환경과학원 낙동강물환경연구소(2007)에 따르면 우리나라에서는 비점오염원을 법적인 측면의 오염원으로 취급하지 않다가 1980년대에 이르러 연구를 시작하였다. 1980년대 후반부터는 비점오염원의 총부하량에 대한 과학적인 접근을 시도하였으며, 1990년대에 이르러 비점오염원 유출 모델을 본격적으로 연구하기 시작하였다.

우리나라에서 SWMM을 적용한 예로는 배상범(2003)이 도시유역에서 초기강우에 의한 비점오염원 부하량 산정에

[†] To whom correspondence should be addressed.
hsshin@pusan.ac.kr

관하여 경기도의 아파트 단지에 SWMM 모형을 적용하였다. 채준영(2004)은 도시하천인 안양천을 대상으로 SWMM을 적용하여 유출량을 해석하였고, 김창환(2002)은 SWMM을 이용하여 보령담수호 유역에 대한 비점원오염 추정에 대해 모의하였으며, 김말희(2004)는 연무 지역의 하수량, 하수수질 및 강우시 유출량을 계절별로 연속 측정하여 얻은 자료와 SWMM모형을 이용해 계산된 모의 결과값을 비교하였으며, 최지용(1994)은 수질에 미치는 장기적인 영향에 대한 모의가 가능한 KONDI를 개발·적용하였고, 이종태와 강태호(1997)는 SWMM모형을 통하여 유출·수질 인자의 민감도 분석을 하였다.

외국에서의 비점오염원에 대한 연구는 1920년대 초기에 주로 농촌지역에 대한 강우 시 토양유실을 중심으로 연구가 이루어졌으며, 1960년대 후반부터 중요성이 인식되어 1970년대 초반에서 1980년대 초까지 매우 활발한 연구가 진행되었으며, 현재에도 비점오염원과 관련된 연구는 지속적으로 이루어지고 있다.

SWMM을 적용한 국외 사례로는 Warwick and Tadepalli (1991)은 SWMM을 적용하여 유역의 개발에 따른 유출특성의 변화를 고찰하였고, Tsihrintzis 등(1995)은 아열대 도시지역에서의 SWMM을 이용한 검정과 보정을 하였으며, Huber(2001)는 SWMM에서의 새로운 옵션을 이용하여 지표면 흐름에 대해 모의하였으며, Huber(2006)는 EPA SWMM5를 이용하여 최적관리방안을 위한 방류수 EMC 분포에 대해 모의하였다. Ovbiebo and She(1995)는 XP-SWMM을 이용하여 Duwamsih river 유역에서의 유출 양과 수질에 대해 모의하였다.

2. 연구방법

2.1. 유역의 개황

부산광역시에 위치한 온천천은 수영강의 제1지류로서 금정산에서 발원하여, 동남방향으로 유하하다가 남산동, 구서동, 장전동, 명륜동의 시가지 주거지역을 남류하여 통과하면서 동래천 등 크고 작은 하천이 합류하고 세병교에서 다시 동쪽방향으로 유하하다가 안락동에서 수영강으로 합류된다.

2.2. 입력자료 구축

SWMM 모형의 적용을 위하여 대상유역을 선정하고, 선정된 대상유역에 대하여 하수도 대장 평면도(1:1000)로부터 간선관거를 분리하여 관망을 구성하였다. 구성된 관망으로부터 간선관거의 합류점 및 크기가 큰 맨홀을 기준으로 유출량 산정 지점을 선정한 후, 유역 내 지형과 각 지역의



Fig. 1. Satellite photograph of Oncheon stream basin.

인위적인 배수계통에 따라 전체 대상유역을 43개의 소유역으로 분할하였다.

각 분할된 소유역으로부터 유역면적, 유역 폭, 유역 평균 경사, 불투수율 등의 매개변수 산정을 위해 먼저 지형도(1:5,000)를 이용하여 지형자료를 구축하였고, 유역의 배수특성을 나타내는 조도계수는 운동파(Kinematic wave)공식에 의해 산정된 Engman(1986)의 조도계수 값 중 불투수지역과 투수지역으로 구분하여 불투수지역: 0.011, 투수지역: 0.150을 사용하였고, 표면저류는 이종태(2004) 도시유출 해석모형의 실무적용 지침(안) 및 적용 예제 보고서를 참고하여 불투수지역에 대해서는 포장된 지역으로 균일하게 0.30을 사용하였으며, 투수유역에 대해서는 산지가 지배적인 소유역에 대해서는 투수유역의 수립으로 1.0을 적용하였다. 침투손실은 국내에서 주로 적용되는 Horton(1933) 방정식을 적용하였으며 부산광역시(2007) 온천천 종합정비시행계획 수립 보고서를 참고하여 매개변수인 초기침투능: 76.2 mm/hr, 종기침투능: 9.4 mm/hr, 감소계수에 대한 초기값은 현장자료가 미비한 경우 주로 적용되는 0.00115 sec⁻¹을 사용하여 매개변수를 산정하였다. 소유역에 대한 지형자료 및 배수특성 자료의 산정 후에는 하수도 대장 평면도로부터 구성된 관망에 대하여 각 관거의 제원과 맨홀에 대한 자료를 결정하였다.

2.3. 모형 검정 및 검증

2.3.1. 유량 검정 및 검증

과거 관측된 강우(부산지방기상청 10분 강우자료 사용) 및 유량 자료를 검토하여 검정 및 검증에 적용할 강우와 유량의 패턴이 양호한 자료를 추출하였다. 검정에 적용할 8개의 강우-유량 자료와 검증에 적용할 4개의 강우-유량 자료를 Table 2와 같이 선정하였다.

Table 1. Oncheon stream situation

Main stream	Main stream	1 tributary	2 tributary	Lengh (km)	Area (km ²)	Section		
						Start	End	Confluence
Oncheon stream	Suyeong river	Oncheon stream	-	14.85	56.28	Geumjeong Guseo	Dongnae Allak	Suyeong river
Dongnae stream	Suyeong river	Oncheon stream	Dongnae stream	2.67	1.98	Geumjeong Jangjeon	Geumjeong Jangjeon	Oncheon stream

Table 2. Rainfall event used in calibration and verification

Calibration of applied to rain event				
Start time	End time	Rainfall (mm)	Duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)
2006-04-09 20:50	2006-04-11 18:20	99	45.5	2.2
2006-05-06 05:30	2006-05-06 19:20	137	13.8	9.9
2006-05-09 14:10	2006-05-10 12:30	56	22.3	2.5
2006-05-18 20:20	2006-05-19 22:00	78	25.7	3.0
2006-06-14 15:40	2006-06-15 01:50	105	10.2	10.3
2006-07-04 06:20	2006-07-05 03:30	49	21.2	2.3
2006-08-18 15:50	2006-08-19 21:10	73	29.3	2.5
2006-09-15 16:00	2006-09-16 07:00	78	15.0	5.2
Verification of applied to rain event				
Start time	End time	Rainfall (mm)	Duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)
2004-12-04 10:00	2004-12-04 23:00	22.5	13	1.7
2005-05-05 17:00	2005-05-07 00:00	40	31	1.3
2005-09-05 17:00	2005-09-06 22:00	195.0	29.0	6.7
2006-07-10 04:40	2006-07-10 15:50	169	11.2	15.1

2004~2006년 사이의 온천천유역의 토지이용 변화와 관계 정비 여부에 따른 영향을 고려하여야 하나 변화 정도에 대한 정보 부족과 검증 및 검증과정에서 연도별 모형구축에 따른 영향이 크지 않을 것으로 판단하여 고려하지 않았다.

검정에 사용할 강우 사상을 구축된 모형에 적용하여 각 매개변수에 대한 민감도를 산정하였다. 매개변수에 대한 불확실성(uncertainty)을 ±50%(단, 면적은 ±5%)로 적용하고 강우사상별 매개변수의 변화에 따른 목적함수(침투유량)의 민감도를 검토하였다.

선정된 매개변수를 변화시키고 8개의 강우사상이 적용된 모형에서 동시에 목적함수를 산정하여 오차가 오차함수의 허용 범위 내 존재 여부를 검토하였으며, 반복 작업을 통해 오차함수의 허용 범위를 만족하는 매개변수를 산출하고 검증 절차에 따라 4개의 강우 사상을 적용한 모형에서 오차를 산출하여 허용 범위의 만족 여부를 검토하였다.

8개의 강우-유량 자료를 이용하여 검정을 실시하였으며 반복적인 매개변수의 변화를 적용하여 아래 그림과 같이

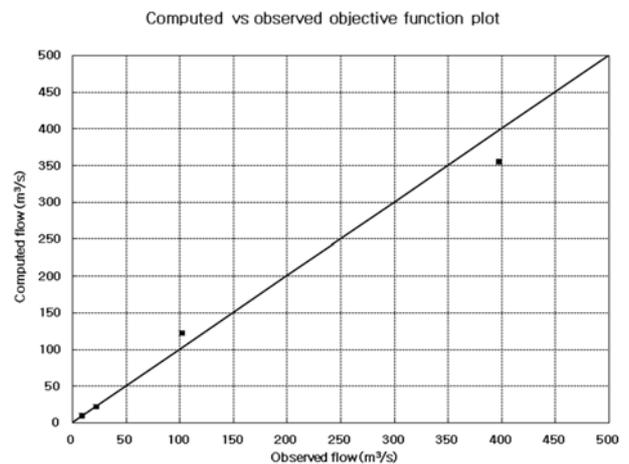


Fig. 3. The relationship between computed and observed data - verification process.

평가함수의 허용 임계치(<0.15)를 만족하는 최적 매개변수를 산정하였다(오차함수의 변화 : 0.93→0.14).

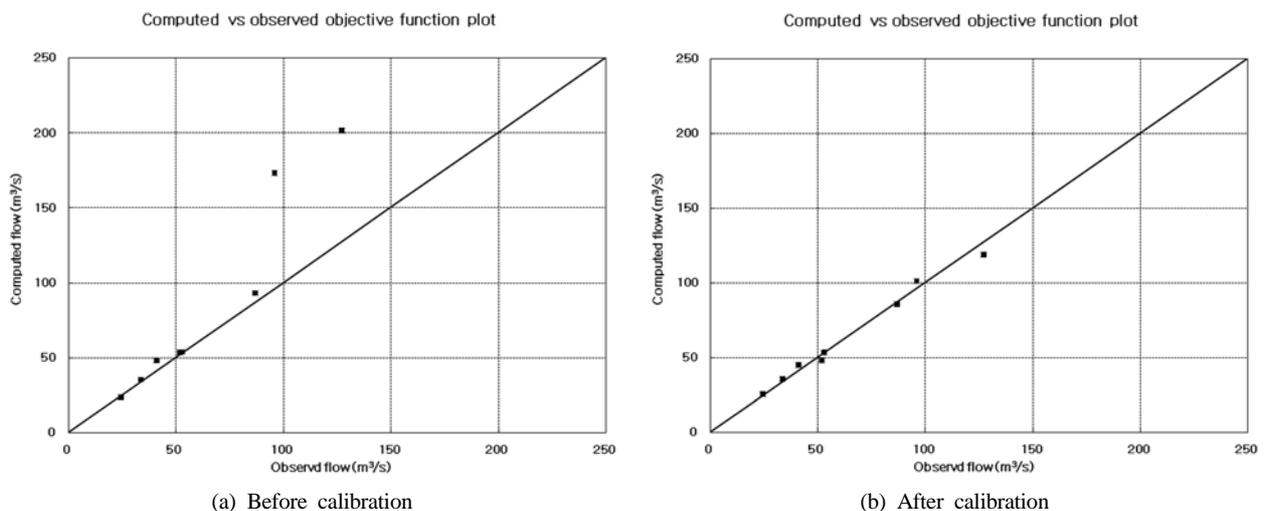


Fig. 2. The relationship between computed and observed data - calibration process.

검정 절차에서 허용 범위를 만족하는 매개변수 값을 검증하기 위해 4개의 강우 사상에 대해 산정된 매개변수를 적용하여 허위 오차의 만족 여부를 검토하였다. 산정된 오차가 허용범위(0.3)를 만족하는 0.25를 나타내므로 최종 모형이 완료된 것으로 간주하였다.

2.3.2. 수질 검정 및 검증

비점 오염원에 의한 강우유출수의 오염물질 농도를 모의하기 위하여 토지이용 상태를 도시지역(urban)과 비도시역(rural)으로 분류하고 오염물질의 축적(Buildup)과 쓸림(Wash-

off)에 관한 입력자료를 아래 표와 같이 설정하였다. 오염물질의 축적(Buildup) 함수는 기존 조사 자료를 참고하여 한계 축적치(limit)가 존재하는 Michaelis-Menton 형태의 식으로 설정하였고 오염물질의 쓸림(Washoff) 함수는 EMC(Event Mean Concentration)으로 설정하였다. Table 3은 최지용과 신창민(2002) 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안에서 인용된 최근 2개의 측정결과에 대한 평균을 사용하였다.

관거 내에서의 세굴, 퇴적은 고려하지 않고 호우에 의한 수질 요소의 발생은 단지 지표유출에서만 발생하는 것으로 가정하였다. 유량에 대해 검정 과정에서 사용된 2004년

Table 3. SWMM data input for water quality simulation

Water quality	Build up (Michaelis-Menton)				Wash off (EMC)	
	Max. Buildup (kg/ha)		Buildup dependence	Half-saturation constant	mg/L	
	Urban	Rural			Urban	Rural
BOD	16.6	5.2	Area	3	209.4	20.9
COD	45.6	13.5	Area	3	270.0	27.0
TN	6.4	2.7	Area	3	24.4	2.4
TP	0.4	0.1	Area	3	5.1	0.5
SS	71.6	133.8	Area	3	471.7	471.7

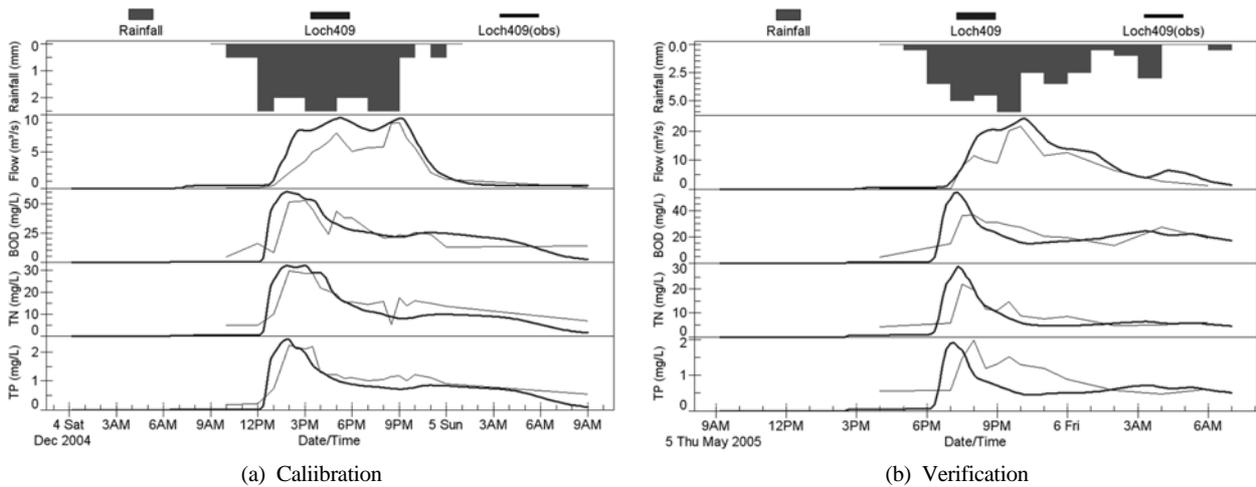


Fig. 4. Comparison of computed and observed data.

Table 4. Characteristic analysis table for long-term continuous rainfall

Year	Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
2000	Rainfall (mm)	17.5	0.0	47.5	63.5	68.0	93.0	311.5	326.0	160.0	40.0	75.0	2.5	1204.5
	Wet day (day)	8.0	0.0	6.0	10.0	7.0	12.0	10.0	11.0	12.0	5.0	5.0	2.0	88.0
2001	Rainfall (mm)	64.5	58.0	6.0	42.5	52.5	264.0	241.5	132.5	67.0	138.5	12.5	32.0	1111.5
	Wet day (day)	7.0	6.0	5.0	4.0	7.0	9.0	10.0	6.0	8.0	6.0	4.0	7.0	79.0
2002	Rainfall (mm)	84.5	13.0	117.0	385.5	122.0	76.0	304.5	633.5	98.0	93.5	18.5	79.5	2025.5
	Wet day (day)	7.0	4.0	7.0	6.0	11.0	8.0	12.0	13.0	4.0	7.0	4.0	7.0	90.0
2003	Rainfall (mm)	23.5	51.0	78.0	232.0	418.5	354.0	656.5	277.5	159.0	2.5	58.5	14.0	2325.0
	Wet day (day)	5.0	4.0	8.0	14.0	10.0	7.0	19.0	13.0	10.0	3.0	13.0	2.0	108.0
2004	Rainfall (mm)	1.0	77.5	48.0	214.5	210.5	189.5	63.5	249.0	230.5	14.5	32.0	26.0	1356.5
	Wet day (day)	2.0	4.0	6.0	7.0	14.0	9.0	8.0	12.0	12.0	2.0	6.0	4.0	86.0
2005	Rainfall (mm)	15.5	36.5	128.0	118.5	168.0	145.0	314.0	210.5	175.5	22.0	30.5	3.0	1367.0
	Wet day (day)	5.0	8.0	10.0	7.0	7.0	8.0	14.0	11.0	9.0	5.0	3.0	1.0	88.0
2006	Rainfall (mm)	24.0	35.0	24.5	166.0	259.0	175.0	591.0	67.5	133.0	13.0	30.5	7.5	1526.0
	Wet day (day)	3.0	8.0	4.0	11.0	11.0	11.0	19.0	6.0	11.0	3.0	6.0	4.0	97.0

12월 4일의 수질 자료를 이용하여 수질에 대한 검정을 실시하였다. 초기에 설정된 매개변수를 조정하여 모의값과 실측값의 패턴의 침투깊이 근접하도록 조정하였고 2005년 5월 5일의 수질자료를 이용하여 검증절차를 적용하였다.

2.4. 강우분석

장기 연속모의에 적용될 강우는 2000~2006년의 부산지방 기상청 시간강우 자료를 이용하였고 연도별/월별 강우 분석결과는 강우량(rainfall)과 우기일(Wet day)로 나타내었으며 Table 4와 같다. 연도별 강우량은 태풍 루사와 매매의 영향으로 2000 mm 이상을 기록한 2002년과 2003년을 제외하면 1313 mm의 평균 강우량을 보이고 있다.

3. 결과 및 고찰

구축된 모형을 기반으로 온천천 유역에 대한 단기 및 장기 모의를 적용하였다. 강우량 및 강우강도를 고려하여 선정된 계절별 단일강우와 최근 7년간의 강우를 이용해서 모의하였고 분석결과는 처리분구 및 하천 대상지점별 산출하여 연별/월별 발생현황 및 저감효과를 검토하였다. 관리방안별 분석을 위해 온천천을 상류, 중류, 하류로 구분하는 3개 지점으로 구분하고 대상 유역을 5개의 처리분구별로 구분하여 유출량 및 오염부하량에 대한 발생현황을 검토하고 관리방안별 저감효과를 분석하였다.

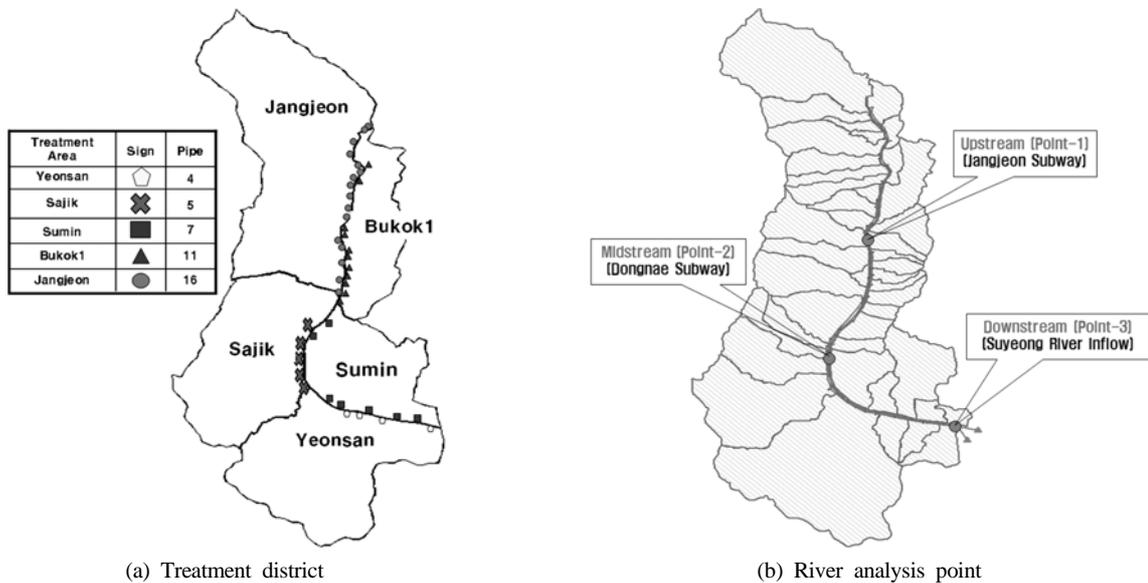


Fig. 5. Treatment district & river analysis point for Oncheon.

Table 5. Annual load per unit area CSO outflow & pollutant loads in Sumin treatment district

Year	Per unit area CSO outflow (mm)	Per unit area occurrence of pollutant loads (kg/ha)				
		BOD	COD	TN	TP	SS
2000	826.5	268.07	473.41	88.68	7.15	1052.08
2001	767.1	237.21	468.01	84.86	6.39	993.02
2002	1478.1	342.35	639.96	122.73	9.37	1350.67
2003	1676.6	388.98	642.73	128.47	10.71	1370.57
2004	937.8	309.76	554.89	101.56	8.30	1209.52
2005	962.1	265.75	494.64	92.30	7.14	1080.95
2006	1076.6	304.27	508.99	97.90	8.33	1072.84

Table 6. Annual load per unit area CSO outflow & pollutant loads in Jangjeon treatment district

Year	Per unit area CSO outflow (mm)	Per unit area occurrence of pollutant loads (kg/ha)				
		BOD	COD	TN	TP	SS
2000	512.2	108.17	169.47	31.42	3.05	786.91
2001	483.4	102.10	165.78	30.67	2.91	784.96
2002	757.1	144.07	240.35	44.55	4.00	1168.41
2003	778.9	164.25	263.67	48.97	4.51	1354.66
2004	537.7	125.12	200.27	35.85	3.49	947.41
2005	563.7	114.30	189.25	34.28	3.21	914.05
2006	605.6	123.17	188.26	36.80	3.48	906.65

3.1. 대상유역의 유출량 및 오염부하량 분석

3.1.1. 처리분구별 발생 현황

3.1.1.1. 연별 유출량 및 오염부하량 발생현황

5개 처리분구(장전, 부곡1, 사직, 수민, 연산) 중 BOD 부하량이 가장 높은 수민처리분구와 가장 낮은 장전처리분구에 대해서 나타 내었다. 장기 연속강우에 의한 유출량 및 오염부하량 발생예측현황을 연별로 정리하였다. 연별 발생원단위를 살펴보면, 모든 처리분구에 있어 태풍 루사와 매미의 영향으로 인해 2002년과 2003년에 많은 유출량과 오염부하량을 보이고 있다. 유출량은 수민처리분구가 1676.6 mm, 장전처리분구는 778.9 mm 가장 높은 값을 보이고 있다. 단위면적당 BOD 부하량도 2003년에 수민처리분구가 389.0 kg/ha, 장전처리분구가 164.3 kg/ha으로 가장 낮은 값을 보이고 있다. 2000~2006년 중 2001년이 유출량과 오염부하량이 가장 낮은 것으로 보이고 있다.

3.1.1.2. 월별 유출량 및 오염부하량 발생현황

처리분구의 월별 CSO 발생원단위를 살펴보면, 모든 처리분구가 7월에 최대값, 12월에 최소값을 보이고 있다. 처리분구별로 최대값을 비교하면 수민 처리분구가 277.6 mm로 가장 높은 값을 보이고 장전 처리분구가 142.5 mm로 가장 낮은 값을

보이고 있고 최소값도 수민 처리분구가 12.2 mm로 가장 높은 값, 장전 처리분구가 5.0 mm로 가장 낮은 값을 보이고 있다.

처리분구별 자료를 살펴보면 유출량과 오염부하량은 입력된 강우량에 크게 의존하므로 강우량 발생 형태에 따라 분구의 발생 패턴이 유사하게 나타나고 있다.

연별결과에서 태풍의 영향으로 강우량이 많았던 해에 유출량과 부하량이 연평균 값보다 큰 값을 보였고 월별 결과에서는 강우량이 집중된 풍수기에 평균값보다 큰 값을 나타내고 있다.

3.1.2. 하천 분석지점별 오염부하량

3.1.2.1. 연별 유출량 및 오염부하량 발생현황

하천 분석지점별 연별 발생현황은 상류지점(point-1), 중류지점(point-2), 하류지점(point-3)에 대해 분석하였으며 그 중 point-1은 주로 산지가 우세한 지역이고 point-2와3지점은 도시지역이 우세한 동일한 유역 특성을 보이므로 동일하게 간주하여 point-3에서만 분석결과를 산출하였다. Point-1, Point-3을 살펴보면 연별 오염부하량 발생은 태풍으로 집중강우가 발생했던 2002년과 2003년에 다른 연도에 비해 많은 오염부하량이 발생한 것으로 모의되었다. 연별 오염부하량 범위는 Point-1은 BOD 98.7~158.2 kg/ha, COD 157.7~254.5 kg/ha, TN 29.0~46.6 kg/ha, TP 2.8~4.3 kg/ha, SS

Table 7. Monthly load per unit area CSO outflow & pollutant loads in Sumin treatment district

Month	Per unit area CSO outflow (mm)	Per unit area occurrence of pollutant loads (kg/ha)				
		BOD	COD	TN	TP	SS
January	16.7	11.35	21.61	3.50	0.31	45.71
February	21.5	11.94	22.56	3.74	0.32	48.26
March	37.7	23.83	44.43	7.10	0.64	93.64
April	125.2	31.02	59.70	11.77	0.86	127.54
May	131.1	38.55	59.20	12.04	1.02	131.40
June	132.4	33.11	64.21	11.94	0.92	135.56
July	277.6	49.99	78.94	18.14	1.41	172.25
August	201.3	41.83	77.87	15.16	1.14	165.67
September	101.9	23.46	43.25	8.60	0.62	96.86
October	28.7	14.61	26.16	4.27	0.38	56.54
November	17.1	15.57	26.43	3.78	0.40	56.07
December	12.3	7.08	16.03	2.32	0.19	31.87

Table 8. Monthly load per unit area CSO outflow & pollutant loads in Jangeon treatment district

Month	Per unit area CSO outflow (mm)	Per unit area occurrence of pollutant loads (kg/ha)				
		BOD	COD	TN	TP	SS
January	5.9	3.73	5.40	0.82	0.10	23.25
February	7.5	4.21	6.34	0.93	0.11	28.42
March	15.7	7.87	11.53	1.78	0.21	49.44
April	65.9	13.70	22.68	4.18	0.38	111.82
May	66.5	15.31	24.01	4.43	0.42	119.99
June	67.7	14.97	24.07	4.38	0.42	120.63
July	142.6	22.92	38.42	7.63	0.65	199.35
August	130.7	19.00	32.01	6.60	0.56	151.35
September	65.9	11.51	19.26	3.72	0.33	96.75
October	17.5	5.23	8.05	1.32	0.14	35.54
November	14.6	4.80	6.71	1.13	0.13	26.61
December	5.0	2.63	3.96	0.58	0.07	17.30

Table 9. Annual load per unit area CSO outflow & pollutant loads in river analysis point-1

Year	Per unit area CSO outfall (mm)	Per unit area occurrence of pollutant loads (kg/ha)				
		BOD	COD	TN	TP	SS
2000	4995.8	104.0	161.1	29.8	2.9	782.0
2001	4708.8	98.7	157.7	29.0	2.8	775.9
2002	7350.0	139.1	230.8	42.2	3.9	1170.5
2003	7504.8	158.2	254.5	46.6	4.3	1358.8
2004	5220.2	120.1	190.2	34.0	3.4	949.1
2005	5491.1	110.9	181.2	32.6	3.1	910.8
2006	5891.0	118.7	180.8	35.1	3.4	906.0

Table 10. Annual load per unit area CSO outflow & pollutant loads in river analysis point-3

Year	Per unit area CSO outfall (mm)	Per unit area occurrence of pollutant loads (kg/ha)				
		BOD	COD	TN	TP	SS
2000	5805.0	176.5	294.4	53.0	4.7	929.2
2001	5405.6	163.2	296.5	52.1	4.4	934.7
2002	9920.6	233.5	408.2	76.6	6.3	1304.2
2003	10871.8	260.5	417.5	82.8	7.1	1388.3
2004	6416.8	205.4	347.2	62.7	5.5	1118.8
2005	6667.1	179.6	316.1	57.3	4.8	1026.5
2006	7383.3	200.3	310.4	60.4	5.5	990.2

775.9~1358.8 kg/ha, Point-3은 BOD 163.2~260.5 kg/ha, COD 294.4~417.5 kg/ha, TN 52.1~82.8 kg/ha, TP 4.4~7.1 kg/ha, SS 929.2~1388.3 kg/ha의 범위를 보이고 있다. 산지가 우세한 지역인 point-1은 도시지역이 우세한 point-3에 비해 CSO 유출량 및 오염부하량이 낮은 것으로 모의되었다.

3.1.2.2. 월별 유출량 및 오염부하량 발생현황

하천 분석지점별 처리분구의 월별 발생현황을 살펴보면, 모든 하천 분석지점의 CSO 유출량 및 오염부하량은 풍수기인 7월에 최대값, 갈수기인 12월에 최소값을 보이고 있다.

3.2. 비점오염 및 CSO 관리방안 분석

3.2.1. 유역 오염원 감소와 차집 비율을 고려한 관리방안

선형 건기일 동안 지표면에 축적되는 단위 면적당 최대 축적부하량을 감소시킴으로써 저감효과를 검토하였다. 현재 모형에 적용된 단위 면적당 최대 축적부하량을 10%, 20%,

30%씩 저감시켜 모의하였고 적용된 단위 면적당 최대 축적부하량의 저감비율별 적용값은 Table 13과 같다. 계절별 단일 강우와 연속 강우를 적용하여 단일 강우의 강우 특성에 따른 특성 분석과 저감효과 및 연속강우에 따른 월별/연별 발생 특성과 저감효과를 분석하였다.

발생 오염원을 관리하는 측면과 달리 유량과 함께 거동하는 발생량을 관리하는 대표적인 방법은 처리장으로 이송되는 차집관거에 대한 차집 비율을 조절하는 것이다. 현재의 차집 비율은 모형의 검정 과정에서 처리장 유입량에 부합하도록 설정되었으므로 모형 검정과정에서 설정된 차집 비율이 각 소유역의 차집 비율이라고 가정하여 모의하였다.

각 처리분구 및 하천 지점별 최적 관리방안을 검토하기 위해 장기 연속강우에 따른 발생 전 오염원 관리와 발생 유출량 관리별 시나리오를 구성하여 발생특성 및 저감효과를 검토하였으며 사용된 분석 시나리오는 다음과 같다.

Table 11. Monthly load per unit area CSO outflow & pollutant loads in river analysis point-1

Month	Per unit area CSO outflow (mm)	Per unit area occurrence of pollutant loads (kg/ha)				
		BOD	COD	TN	TP	SS
January	56.7	3.6	4.9	0.7	0.1	22.7
February	71.3	4.0	5.9	0.9	0.1	28.0
March	150.3	7.4	10.6	1.6	0.2	48.3
April	639.9	13.2	21.6	4.0	0.4	111.4
May	642.9	14.7	23.3	4.2	0.4	121.1
June	655.2	14.6	23.0	4.2	0.4	120.7
July	1381.4	22.2	37.4	7.3	0.6	199.9
August	1277.4	18.5	30.8	6.3	0.5	151.4
September	642.8	11.2	18.7	3.6	0.3	97.8
October	169.9	5.0	7.5	1.2	0.1	35.0
November	143.9	4.6	6.2	1.1	0.1	25.9
December	48.5	2.5	3.7	0.5	0.1	16.9

Table 12. Monthly load per unit area CSO outflow & pollutant loads in river analysis point-3

Month	Per unit area CSO outflow (mm)	Per unit area occurrence of pollutant loads (kg/ha)				
		BOD	COD	TN	TP	SS
January	100.1	6.9	11.6	1.8	0.2	33.9
February	128.8	7.5	12.7	2.1	0.2	39.1
March	234.3	14.5	24.1	3.8	0.4	70.9
April	845.7	21.5	38.4	7.3	0.6	125.5
May	870.1	24.8	39.5	7.7	0.7	132.4
June	879.7	23.8	40.3	7.5	0.6	131.6
July	1861.5	35.2	57.2	12.1	1.0	193.7
August	1443.4	29.4	50.4	9.9	0.8	160.9
September	726.2	16.8	29.9	5.7	0.4	101.4
October	198.6	8.9	15.3	2.4	0.2	46.5
November	131.4	8.8	13.5	2.0	0.2	38.4
December	75.9	4.6	8.5	1.2	0.1	24.5

Table 13. Maximum buildup for each pollutant applied to scenario

Water quality	Max. Buildup (kg/ha)							
	Present		10% Reduce		20% Reduce		30% Reduce	
	Urban	Rural	Urban	Rural	Urban	Rural	Urban	Rural
BOD	16.6	5.2	14.94	4.68	13.28	4.16	11.62	3.64
COD	45.6	13.5	41.04	12.15	36.48	10.8	31.92	9.45
TN	6.4	2.7	5.76	2.43	5.12	2.16	4.48	1.89
TP	0.4	0.1	0.36	0.09	0.32	0.08	0.28	0.07
SS	71.6	133.8	64.44	120.42	57.28	107.04	50.12	93.66

Table 14. Intercepting ratio for subbasin applied to scenario

Subbasin	Day average sewage	Intercepting ratio (Present)	Intercepting ratio (2Q)	Intercepting ratio (3Q)	Subbasin	Day average sewage	Intercepting ratio (Present)	Intercepting ratio (2Q)	Intercepting ratio (3Q)
sub1	0.015	0.026	0.048	0.072	sub22	0.031	0.055	0.101	0.152
sub2	0.019	0.035	0.064	0.096	sub23	0.026	0.047	0.086	0.130
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
sub20	0.026	0.047	0.086	0.129	sub41	0.104	0.187	0.344	0.516
sub21	0.022	0.040	0.073	0.110	sub42	0.029	0.052	0.096	0.144

Table 15. Simulation scenario using long-term rainfall

Application method	1Q	2Q	3Q
0%	Scenario1	Scenario5	Scenario9
10%	Scenario2	Scenario6	Scenario10
20%	Scenario3	Scenario7	Scenario11
30%	Scenario4	Scenario8	Scenario12

(Q : Peak hourly flow)

3.2.2. 오염원 감소와 차집비율에 의한 저감효과

3.2.2.1. 처리분구별 시나리오에 따른 저감효과

1) 수민처리분구의 시나리오별 저감효과

Table 16, Fig. 6은 수민처리분구의 수질항목 전체에 대한 평균 저감효과를 나타내고 있는데 초기상태와 비교했을 때 50%의 저감을 나타내는 조합은 차집 2Q와 오염량 10% 감소인 경우이고 차집 3Q와 오염량 30% 감소 시 최대 71.65%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 16. Reduction efficiency of Sumin treatment district depending on scenario

Reduction efficiency (%)	Intercepting ratio			
	1Q	2Q	3Q	
Pollutant reduction ratio (%)	0	0.00	38.99	60.17
	10	6.90	44.16	64.01
	20	13.92	54.55	67.90
	30	21.10	66.58	71.65

2) 부곡1처리분구의 시나리오별 저감효과

Table 17, Fig. 7은 부곡1처리분구의 수질항목 전체에 대한 평균 저감효과를 나타내고 있는데 초기상태와 비교했을 때 50%의 저감을 나타내는 조합은 차집 2Q와 오염량 30% 감소인 경우이고 차집 3Q와 오염량 30% 감소 시 최대 64.21%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

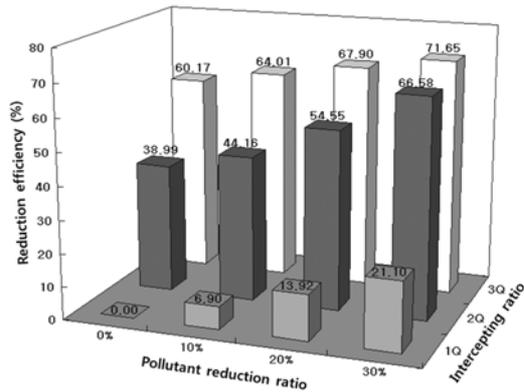


Fig. 6. Reduction efficiency graph of Sumin treatment district depending on scenario.

Table 17. Reduction efficiency of Bukok1 treatment district depending on scenario

Reduction efficiency (%)		Intercepting ratio		
		1Q	2Q	3Q
Pollutant reduction ratio (%)	0	0.00	32.77	52.09
	10	5.86	37.52	55.94
	20	12.13	42.58	60.03
	30	18.71	47.83	64.21

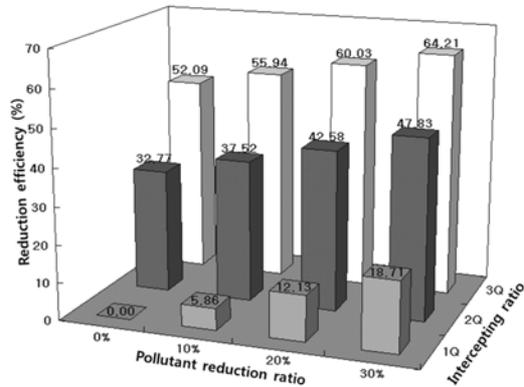


Fig. 7. Reduction effect graph of Bukok1 treatment district depending on scenario.

3.2.2.2. 하천 분석지점별 저감효과 검토

1) 하천 분석지점-1의 시나리오별 연평균 저감효과

Table 18, Fig. 8은 하천 지점-1의 수질항목 전체에 대한 평균 저감효과를 나타내고 있는데 초기상태와 비교했을 때 40%의 저감을 나타내는 조합은 차집 3Q와 오염량 10% 감소인 경우이고 차집 3Q와 오염량 30% 감소 시 최대 46.80%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

2) 하천 분석지점-3의 시나리오별 연평균 저감효과

Table 19, Fig. 9는 하천 지점-3의 수질항목 전체에 대한 평균 저감효과를 나타내고 있는데 초기상태와 비교했을 때 40%의 저감을 나타내는 조합은 차집 2Q와 오염량 30% 감소인 경우이고 차집 3Q와 오염량 30% 감소 시 최대 59.43%의 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

Table 18. Reduction efficiency of river analysis point-1 depending on scenario

Reduction efficiency (%)		Intercepting ratio		
		1Q	2Q	3Q
Pollutant reduction ratio (%)	0	0.00	24.78	39.52
	10	3.25	27.49	41.79
	20	6.71	30.34	44.15
	30	10.60	33.55	46.80

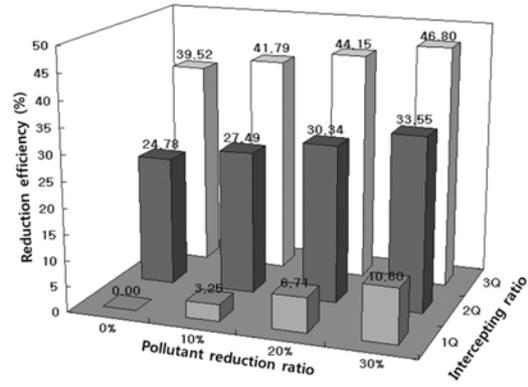


Fig. 8. Reduce efficiency graph of river analysis point-1 depending on scenario.

Table 19. Reduction efficiency of river analysis point-3 depending on scenario

Reduction efficiency (%)		Intercepting ratio		
		1Q	2Q	3Q
Pollutant reduction ratio (%)	0	0.00	31.70	50.61
	10	4.20	35.10	53.38
	20	8.70	38.73	56.32
	30	13.52	42.60	59.43

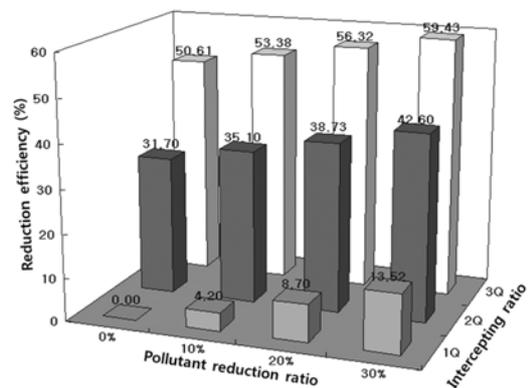


Fig. 9. Reduction efficiency graph of river analysis point-3 depending on scenario.

3.2.3. 처리시설을 고려한 관리방안

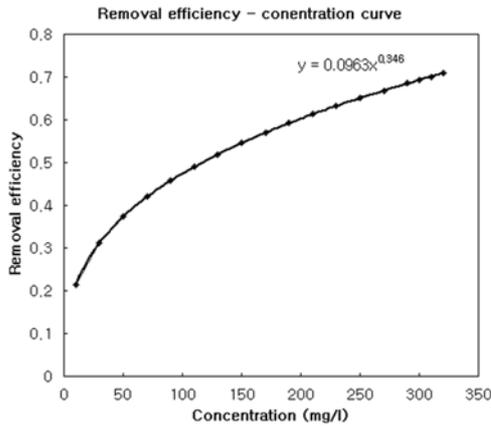
처리시설을 고려한 관리 방안을 검토하기 위해 대표적인 형태인 저류형 처리시설과 장치형 처리시설 중에서 도시지역인 온천천을 감안하여 장치형 처리시설로 설정하고 검토하였다. 상대적으로 작은 부지에 지하구조물로 설치되어 별

도의 부지확보 없이 여유 부지를 활용할 수 있는 장치형 처리시설에 대해 농도에 따른 처리효율을 고려하여 운영방안별 처리효율을 검토하였다. 장치형 시설의 임계유량을 환경부(2006)에 따르면 5 mm/hr(환경부가 비점오염원관리 업무편람에서 제시하고 있는 별도의 설계기준이 없을 경우 사용)의 평균강우강도와 합리식에 의해 각 소유역별로 산정하여 초과하는 유량은 미처리 방류되는 것으로 모의하였고 하수 처리장으로 유입된 유량 중 시간최대오수량을 초과하는 유량은 1차 침전지 처리 후 하천으로 방류되는 것으로 모의하였다. 장치형 처리시설 및 하수처리장 1차 처리에 대한 제거 효율은 Lager 등(1977)이 제시한 식 (1)을 참고하여 적용하였고 장치형 처리시설의 제거효율은 식 (1)을 상향조정하여 적용하였으며 Fig. 10으로 나타내었다.

$$R_{SS} = 0.0963 \cdot SS^{0.286} \quad (1)$$

R_{SS} : SS 제거 비율, $0 \leq R_{SS} \leq 1.0$

SS ; 유입 SS 농도, mg/l



(a) Microstrainer

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (2)$$

Q : 계획우수량(m^3/s), C : 유출계수(0.7),

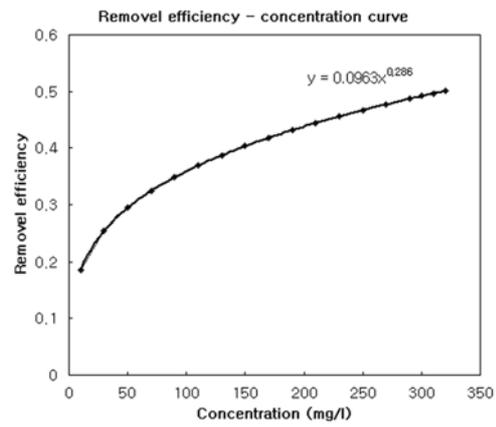
I : 5 mm/hr, A : 대상면적(ha)

모의에 적용할 처리시설에 대한 운영방안별 시나리오는 다음과 같다. 하수장에서의 처리방법은 간이처리와 통합처리 2가지 방법으로 하였으며, 통합처리는 각 도구별 처리장치를 두고 처리하는 경우와 상반되는 개념으로서 증가된 차집비율로 인해 처리장으로 유입되는 하수를 저류형 처리시설등을 이용하여 처리하는 과정이다. 유입된 전량을 처리한다고 가정하였고 도구별 처리시설과 동일한 농도별 처리효율을 적용하였다.

3.2.4. 처리시설에 의한 저감효과

3.2.4.1. 처리시설의 운영방안별 처리효율 검토

각 시나리오별로 산정된 하천 방류 유량과 오염부하량은 Table 21과 같다.



(b) Primary setting

Fig. 10. Treatment efficiency applied to simulation - assumed value.

Table 20. Management scenario in consideration of treatment facilities

Application method	Intercepted flow	Treated at local facility	at STP
Scenario1	1.0Q	×	Primary settling
Scenario2	1.0Q	○	Primary settling
Scenario3	1.5Q	×	Integrated treatment
Scenario4	2.0Q	×	Integrated treatment
Scenario5	1.5Q	×	Integrated treatment
Scenario6	3.0Q	×	Integrated treatment

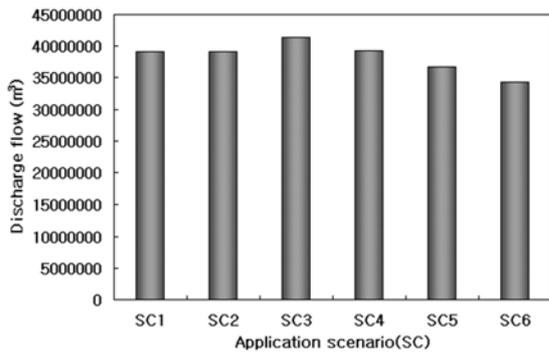
(Q : Peak hourly flow)

Primary settling ; Intercepted flows at local outlet are integrated in STP but are discharged after going through 1st depositing basin.

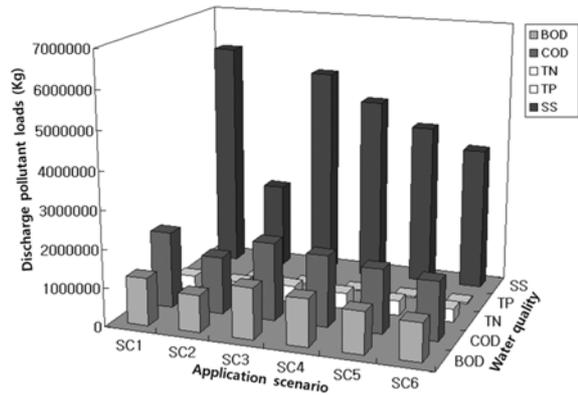
Integrated treatment ; Intercepted flows at local outlet are integrated in storage in STP and are treated at specific efficiency and then discharge.

Table 21. Simulation results based on management scenario

Application method	FLOW (m^3)	BOD (kg)	COD (kg)	TN (kg)	TP (kg)	SS (kg)
Scenario 1	39127170	1238560	2003760	384290	34190	6011760
Scenario 2	39127170	970980	1495630	375390	33990	2235940
Scenario 3	41355700	1333800	2033090	442180	41350	5506600
Scenario 4	39261120	1226320	1863050	418300	39370	4827240
Scenario 5	36795320	1090110	1676080	382170	35540	4228690
Scenario 6	34299780	997740	1535590	354080	33040	3743230

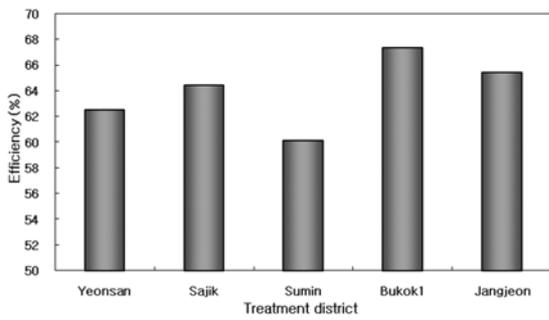


(a) River discharge flow

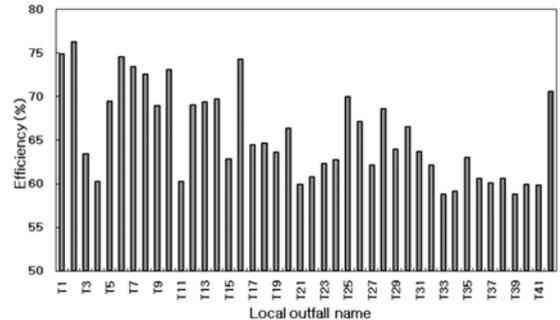


(b) River discharge pollutant loads

Fig. 11. An efficiency according to treatment facilities operation plan.

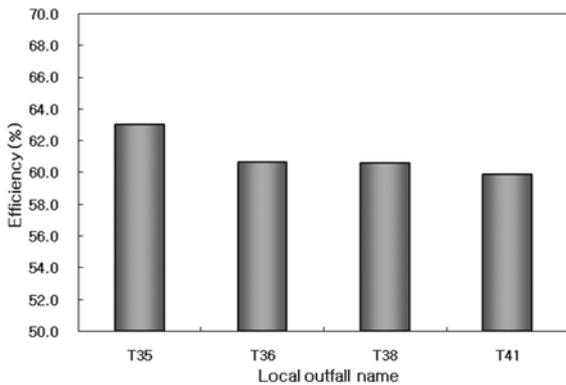


(a) Removal efficiency for treatment district

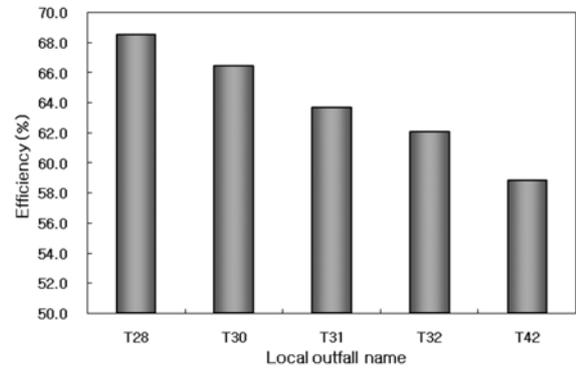


(b) Removal efficiency for local outfalls

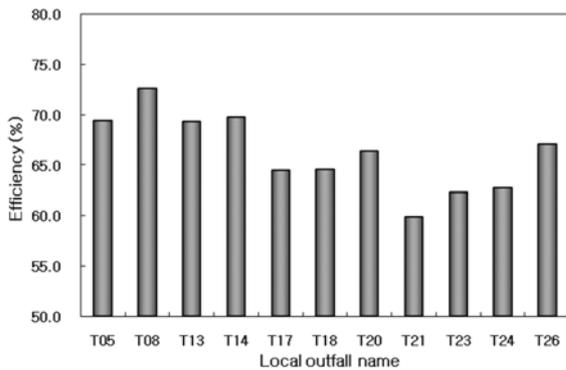
Fig. 12. Removal efficiency for treatment district and local outfalls for SS.



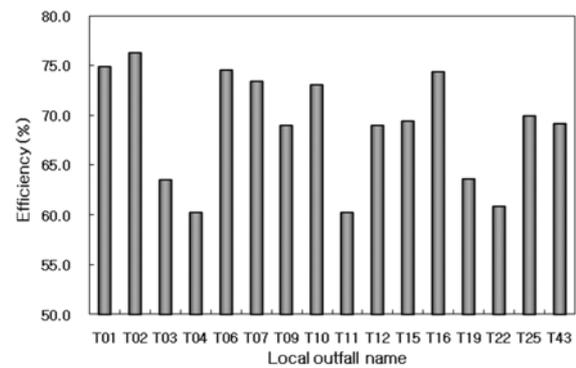
(a) Yeonsan treatment district



(b) Sajik treatment district

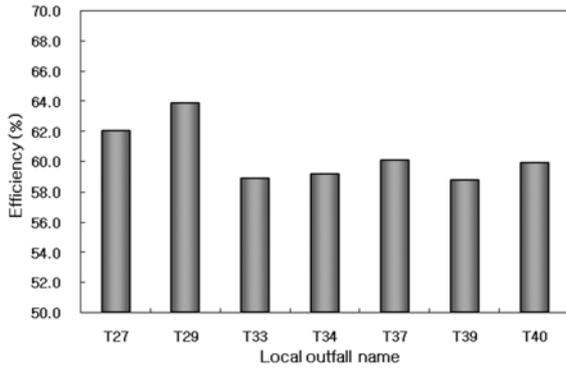


(c) Sumin treatment district



(d) Jangeon treatment district

Fig. 13. Removal efficiency for local outfalls for SS.



(e) Bukok1 treatment district

Fig. 13. Removal efficiency for local outfalls for SS (continued).

시나리오별 산정결과에서 각 도구별로 처리시설을 적용한 시나리오2는 도구별로 차집비율을 증가시켜 처리장에서 일괄 통합 처리하는 경우(시나리오3, 4, 5)와 비교 시 더 큰 저감효과가 있는 것으로 분석되었다. 하지만 모든 도구에 처리시설을 두는 것은 비현실적이므로 가장 효율이 높은 도구를 선정하는 것이 필요하다.

저감효과의 상대적인 비교를 위해 도구별 저감효과를 분석하였으며 장치형 처리시설의 분석항목 중 SS에 대한 저감효과로 상대적인 비교를 실시하였다. 각 도구별 저감효과와 처리분구별 저감효과는 Fig. 12와 같으며 부곡1 처리분구와 장전 처리분구가 상대적으로 높은 저감효과를 나타냈고 수민 처리분구가 가장 낮은 저감효과를 나타냈다. 처리시설이 동일 처리분구에 집중되는 것을 방지하기 위해 전체적인 저감효과 외에 Fig. 13의 처리분구 내 저감효과에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

온천천 유역의 주요 도구들을 하천으로 월류되는 유출관과 처리장으로 유입되는 차집관으로 모의한 SWMM모형을 구축하고 모니터링 시스템의 2006년 15개 강우사상과 유량자료 및 수질자료를 이용하여 검정 및 검증을 실행함으로써 모형 구축을 완료하였다.

온천천 유역을 구역별로 발생특성 및 저감효과를 분석하기 위해 기존 연구를 참고하여 5개의 처리분구로 분할하고 관리방안별 온천천에서의 개선효과를 검토하기 위해 3개의 하천 분석지점으로 분류하여 강우에 의한 유출량 및 오염부하량 발생 현황을 검토하였다. CSO에 대한 관리방안별 저감효과를 검토하기 위해 오염원 감소와 차집비율 증가 및 처리시설을 고려하는 방안을 기초로 모의를 적용하여 처리분구 및 온천천의 개선효과를 분석하였다.

각각의 시나리오에 대한 처리분구 및 하천지점의 수질항목별 저감효과를 산정하여 수질항목별 관리방안에 대한 저감효과를 검토하였고 수질항목 전체에 대한 평균 저감효과를 이용해서 처리분구별 및 하천지점별 차집비율과 오염량 감소에 따른 저감효과 분석표를 작성하였다. 각 도구별 처리시설에 대한 처리시설 설치 시 처리효과를 분석하고 장

치형 처리시설을 도구에 개별적으로 설치한 경우와 차집관을 통해 처리장으로 유입된 유량을 일괄 처리하는 경우의 상대적인 처리효과를 검토하였다.

비점저감시설의 최적 저류규모와 연계하여 비점저감 저류시설의 규모와 그에 따라 요구되는 관리방안에 대한 정보를 제공함으로써 효율적인 유역 관리방안을 제시하였다. 본 연구의 확대적용의 일환으로 오염원 감소, 차집비율 조정 및 처리시설 운영에 대한 좀 더 세부적인 시나리오를 구성하여 작성된 각 도구별/처리분구별 처리효과 분석표는 CSO의 종합적인 관리에 있어 활용 가능한 자료가 될 것이다.

하수처리장에는 시간 최대오수량의 1Q까지만 2차 처리를 적용하고 나머지는 일차 침전지를 이용한 간이처리만 적용하여 방류한다고 가정하였다. 본 연구에서는 차집 비율을 증가시킨 경우 처리장의 처리용량에 대한 고려를 하지 않고 차집된 전량이 처리된다고 가정한 것이기 때문에 차집비율 증가 시의 저감효과는 다소 과대평가되었다고 볼 수 있다. 따라서 차집비율 증가가 분석표에서 저감효과가 높게 나타나지만 처리장과의 연계를 통해 1차 처리만 거치고 방류되는 간이처리 방류수의 오염부하량을 감안한 적절한 판단이 요구된다.

처리시설에 의한 관리방안 시나리오를 통하여 각각의 처리분구에 설치된 도구에 장치형 처리시설을 설치한 경우와 설치하지 않은 경우를 비교하여 도구 및 분구별 효율 우선순위를 선정하였다. 선정된 분구별 우선순위를 살펴보면 부곡1, 장전, 사직, 연산, 수민 처리분구 순으로 나타났으며 도구 및 분구별 우선순위는 향후 도구에 장치형 처리시설을 설치할 경우 좋은 지표로 활용될 수 있다.

비점저감시설을 고려하는 경우 도구에 처리시설을 두는 경우와 설치 여건의 한계로 각 도구로부터 유량을 모은 후 한 지점에서 처리하는 경우를 생각할 수 있다. 도구별 설

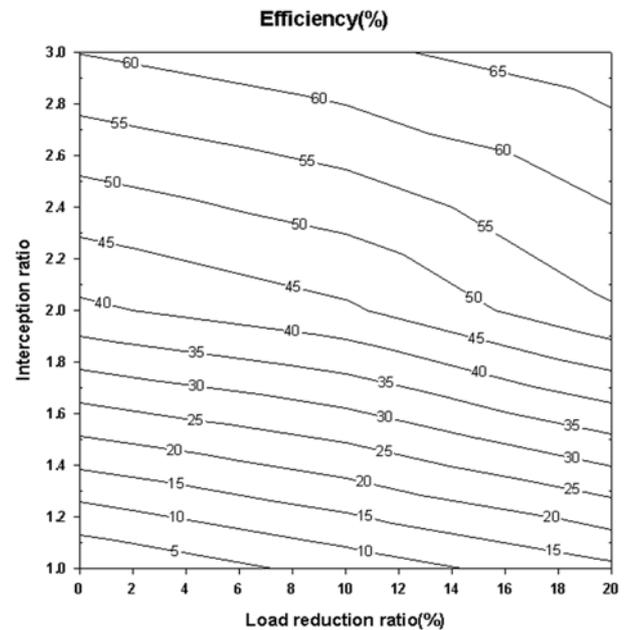


Fig. 14. Equivalent reduction efficiency curve based on scenario in Sumin.

치 여부를 연간모의에 따른 효율검토를 통해 판단할 수 있고 저류형 처리시설의 규모와 처리효율을 고려하여 최적의 차집비율에 대한 검토가 가능하다. 현재 차집비율이 CSO 발생측면에서 최적의 값이 아니므로 처리장의 처리용량을 고려하여 그 비율을 결정할 필요가 있으며 아울러 현장 여건을 감안하여 효율적인 장치형 및 저류형 처리시설의 운영이 필요한 것으로 판단된다.

유역 오염원 감소와 차집 비율을 고려한 관리방안 시나리오 활용 방안으로는 유역 내 저류형 처리시설의 설치를 고려할 때 설치 현장 여건으로 인해 규모와 축소가 불가피한 경우 감소한 용량으로 인한 저감된 효율의 대체 방안으로 Fig. 14와 같이 등저감 효율곡선을 산정하여 오염을 저감 혹은 차집비율조정을 고려할 때 적절한 추정값을 제시할 수 있다.

사 사

본 연구는 2007년도 부산지역환경기술개발센터에서 실시한 “부산지역 강우특성을 고려한 합류식 하수관거 월류수(CSOs)의 최적관리방안”의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

국립환경과학원 낙동강물환경연구소(2007). 주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 저감기법 연구.

김말희(2004). SWMM을 이용한 도시하수관거에서의 비점오염원 관리에 관한 연구. 석사학위논문, 한밭대학교.

김창환(2002). SWMM을 이용한 보령담수호 유역의 비점원 오염 추정. 석사학위논문, 건국대학교.

배상범(2003). 도시유역에서의 초기강우에 의한 비점오염부하량 산정에 관한 연구. 석사학위논문, 경기대학교.

부산광역시(2007). 온천천 종합정비시행계획수립 보고서.

이종태(2004). 도시유출해석모형의 실무적용 지침(안) 및 적용 예제. FFC04-01, 건설교통부 도시홍수재해관리 기술연구사업단.

이종태, 강태호(1997). 도시 배수유역의 유출-수질 특성인자의 민감도 분석. 한국수자원학회 논문집, 30(1), pp. 83-93.

채준영(2004). XP-SWMM을 이용한 도시화 유역에서의 유출 관리 방안 연구. 석사학위논문, 배재대학교.

최지용(1994). 중·소수계의 수질관리를 위한 장기 비점오염원 모델의 개발. 박사학위논문, 한국과학기술원.

최지용, 신장민(2002). 비점오염원 유출저감을 위한 우수유출수 관리방안.

환경부(2006). 비점오염원관리 업무편람.

Engman, E. T. (1986). Roughness Coefficients for Routing Surface Runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 1(1), pp. 39-53.

Horton, R. E. (1933). The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. *Transactions American Geophysical Union*, 14, pp. 446-460.

Huber, W. C. (2001). New Option for Overland Flow Routing in SWMM. Urban Drainage Modeling(Proceedings of the Specialty Symposium of the World Water and Environmental Resources Conference). *Environmental and Water Resources Institute*, Orlando, FL.

Huber, W. C. (2006). Use of EPA SWMM5 for Generation of BMP Effluent EMC Distribution. Proceedings of Second BMP Technology Symposium, *EWRI World Water and Environmental Resources Congress*, May 2006, Omaha, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, CD-ROM.

Lager, J. A., Smith, W. G., Lynard, W. G., Finn, R. F., and Finmore, E. J. (1977). *Urban Stormwater Management and Technology: Update and User's Guide*. EPA-600/8-77-014 (NTIS PB-275264). Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Ovbiebo, T. and She, N. (1995). Urban runoff quality and quantity modeling in a subbasin of the Duwamish River using XP-SWMM. In Proceedings of the Watershed Management Symposium, pp. 320-329.

Tsihrintzis, V., Hamid, R., and Fuentes, H. (1995). Calibration and verification of watershed quality model SWMM in sub-tropical urban areas. Proceedings of the 1st International Conference on Water Resources, Part 1 (of 2), ASCE, pp. 373-377.

Warwick, J. J. and Tadepalli, P. (1991). Efficacy of SWMM application. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 117(3), pp. 352-366.