

## SWMM을 이용한 온천천 유역의 강우 이후 수질 개선 방안 연구

이정인\*, 정경원, 김경민, 조은정, 정재은

물환경생태팀

## A Study on the Improvement of Water Quality after Rainfall in Oncheon Basin Using SWMM

Jeong-In Lee\*, Gyeong-Won Jeong, Kyung-Min Kim, Eun-Jung Cho, Jae-Eun Jeong

*Aquatic Environment & Ecology Team*

### Abstract

In this study, the following results were obtained by investigating the non-point sources during rainfall on Oncheon basin, which is used by many citizens among the rivers in downtown Busan. The longer the days without rainfall in advance, the highest water quality concentration was found when the daily precipitation was 10-50mm, and all dry season surveys except 2019 showed poor water quality. To analyze the cause of a rapid increase in BOD concentration during rainfall, the correlation between each water quality item was analyzed using Pearson's correlation analysis using the SPSS 20.0 program, and the correlation between organic pollutant indicators (BOD, COD, TOC) was high in common. In particular, in rainfall, there was a high correlation between all items based on BOD, and the correlation between organic pollutant indicators (BOD, COD, TOC) and TN, TP, and SS items was high. As a result of analyzing the water quality characteristics of the influent water flowing into the non-point pollution reduction facility of the hot spring stream and the effluent discharged through the reduction facility, the reduction efficiency was analyzed. In particular, non-point pollution reduction facilities are found to have a great reduction effect on BOD and SS from the beginning of the inflow to two hours, and it is believed that sedimentation reservoirs and filtration facilities alone will have a great effect on initial excellent treatment. As a result of comparing the TP analysis results and the simulated results for four rainfall events at the Sebyeonggyo Bridge using the SWMM model, There was a difference between the time and duration, but the trend of change in TP concentration during rainfall was confirmed. In the future, it is expected that the predicted value will improve if the optimal parameter is calculated and applied through repetitive parameter changes.

**Keywords** : rainfall, BOD, SS, Pearson's correlation analysis, SWMM

## 1. 서론

비점오염원은 강우 시 도시, 농지, 산지 등 광범위한 지역으로부터 불특정하게 오염물질을 배출시키는 오염원으로서 생활오수, 산업폐수와 같은 점오염원과 대비된다. 비점오염원의 유형 및 배출 특성을 보면, 도시 지역에서는 도로변에 뿌려진 제설제, 쓰레기, 공업지역 퇴적물 등이 강우 시 집중 유출되며, 개발에 따른 불투수층 확대는 비점오염물질의 배출을 증가시켜 수계오염을 가중시키고 있다. 이 외에 하수관거 오점, 관거 누수, 우수토실의 월류(CSOs) 등으로 인해 하수가 섞인 빗물이 하천으로 방류되는 경우가 발생되고 있으며, 하수관거에 쌓인 퇴적물이 강우 시 빗물에 씻겨 하천으로 유입된다.

하천지역에서는 골재채취, 콘크리트 정비, 하천 직강 공사, 복개, 하천 둔치부의 주차장 또는 체육공원 조성 등으로 하천의 자정능력이 크게 저하되고, 하천 상류의 토지개발·이용에 따른 비점오염물질 유입은 계속적으로 증가되어 수질오염이 가중된다.

도로지역에서는 도로노면에 떨어진 기름, 마모된 타이어 분진, 도로공사 중 발생된 토사 등이 강우 시 직강하 콘크리트 배수로를 따라 그대로 하천에 유입되고 있다.

이외에도 건설현장의 토사유출, 골프장의 농약 및 비료 유출, 관광지·위락지역의 오염원 유출, 광산·폐광지의 광미(광석 찌꺼기)와 중금속 유출 등도 수질오염을 유발시키는 비점오염원이다.<sup>1)</sup>

또한 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 나뉘어진다. 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 처리과정을 거쳐 하천에 방류하게 되지만 호우기간 동안에 차집용량을 초과하는 경우는 유역에 산재한 비점오염원과 함께 하천으로 유입되어 하천의 자정능력을 훨씬 초과하는 수질의 악화로 하천은 급속도로 오염되고 있는 것이 현실이다. 이로 인하여 도시하천은 우기 때마다 심한 악취와 수질오염 등으로 맑은 물이 흐르는 과거의 자연환경을 기대하기 어려운 실정이 되었다.<sup>2)</sup>

따라서 불투수율이 높은 도시 지역에서는 강우 시 발생하는 비점오염원 관리가 하천 수질관리에 있어서 매우 중요한 역할을 하고 있다. 지금까지 평상시 하천 본류 및 지류에 대해서는 물환경보전법에 따라 BOD, SS, TOC 등 다양한 항목을 검사하고 각종 모니터링을 통해 하천에서 발생하는 오염물질들을 적정 수준으로 관리해 왔다. 하지만 부산지역 하천에서 강우 시 실질적으로 발생하는 비점오염원에 대해서는 연구사례가 부족한 실정이었다.

이에 본 연구에서는 부산 도심하천 중에서도 많은 시민들이 이용하는 온천천을 대상으로 강우 시 발생하는 비점오염물질 현황을 조사하고 강우 이후 수질 개선 방안 연구를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구대상

온천천은 수영강의 제 1지류로서 하천 연장 16 Km, 유역면적 약 56 Km<sup>2</sup>의 하천이며, 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.<sup>3)</sup>

2000년대 이후, 하수관거 정비와 낙동강 유지용수 공급 등 수질 개선을 위한 다양한 노력으로 온천천은 부산의 대표적인 생태하천이자, 시민들의 친수공간으로 유지되고 있다.

조사지점은 강우 시 비점오염의 영향을 많이 받는 세

Table 1. Oncheon stream situation

Section		Length (Km)	Area (Km <sup>2</sup> )	Coverage rate (%)
Start	End			
Geumjeong Cheongryong	Dongnae Allak Suyeong River	16.89	56.28	11.5

병교 일대 온천천 중 하류로 선정하였으며, 본류 2개 지점을 비롯하여 사직천, 거제천 등 각 지류 2개 지점도 조사지점에 포함하였다.

2.2 시료채취 및 분석

시료 채취 주기 및 분석항목은 환경부 비점오염저감 시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼 모니터링 평가방법

에 준하였으며, 하천환경 변화에 따라 유동적으로 적용하였다.

또한 프로펠러 유속계(Valeport사, 모델 001)를 사용하여 시료 채취시 실시간으로 유속을 측정하였으며, 수동으로 시료 채취가 어려울 시에는 자동 시료채취기(TELEDYNE ISCO사, Avalanche)를 강우 전 조사지점에 설치한 후 채취 프로그램을 설정하여 강우 시



Sajikcheon (Stream)

Sebyeonggyo (Bridge)

Geojecheon (Stream)

Fig. 1. Survey point

Table 2. Sample collection cycle and analysis items

	Content
강우사상	선행건기일수 3일 이상
시료채취	초기 강우 시 15분 간격, 2시간 이후부터 30분 간격으로 2시간 이상 채취
분석항목	BOD, COD, TOC, SS, T-N, T-P, NH <sub>3</sub> -N(수질오염공정시험기준)
현장측정	수온, pH, 전기전도도, 염분, DO

Table 3. Monitoring and Evaluation Method for Installation, Management, and Operation of Non-point Pollution Reduction Facilities (Ministry of Environment)<sup>4)</sup>

	Content
모니터링 주기	봄 4월 ~ 5월, 여름 8월 ~ 9월, 가을 10월 ~ 11월에 강우특성별 시료채취를 실시
시료채취 주기	선행건기일수 3일 이상, 시료채취 횟수는 강우사상 당 10회 ~ 12회로 선정
측정항목	BOD, COD, SS, T-N, T-P, 필요시 측정항목 추가
강우사상	최소 3일(72시간)의 선행건기일수, 강우량 10 mm이상

채취 후, 수거하는 방식을 적용하였다.

본 연구를 위한 현장조사는 2022년~2023년 2년간 실시하였으며, 강우사상에 따른 채취시점 선정과 급격한 강우강도의 변화, 최근 하천에서 발생한 인명사고 등 안전사고 우려로 인한 현장 조사의 어려움으로 갈수기 1회, 풍수기 1회 자료를 수집하였다.



Fig. 2. Propeller flow meter



Fig. 3. A flow velocity measurement

조사자료를 바탕으로 강우 시 온천천 본류 및 지천의 수질 유출특성을 파악하고 각 수질 항목간의 상관관계를 분석하였다. 또한 각 지점별 유기오염물질 증가 주요인 분석 및 오염 주성분을 파악하였으며, SWMM 모델링을 이용하여 향후 강우 시 수질을 예측하고자 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 갈수기 조사(2022년 3월 13일 사례)

조사 지점은 세병교, 사직천, 거제천으로 시료 채취

시기는 2022년 3월 13일 일요일 11시에서 15시로 조사 당일 강수량은 17.8 mm 였으며, 조사 전 선행건기 일수가 72일, 총 강수량 0 mm 로 이는 전년(2021년) 강수량(1월 25.8 mm, 2월 49.5 mm)과 비교해 보았을 때도 매우 적은 강수량을 보였다. 또한 이로 인해 토양 표면에 매우 많은 오염물질이 축적되어 강우 시 하천으로 유출될 것으로 예상되었다. 해당일의 시간대별 수질 조사결과는 Table. 5와 같다.

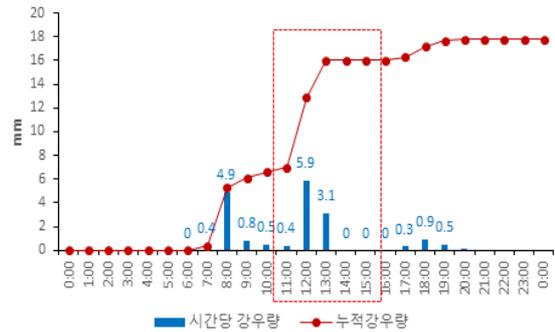


Fig. 4. Precipitation by Time Zone (March 13)

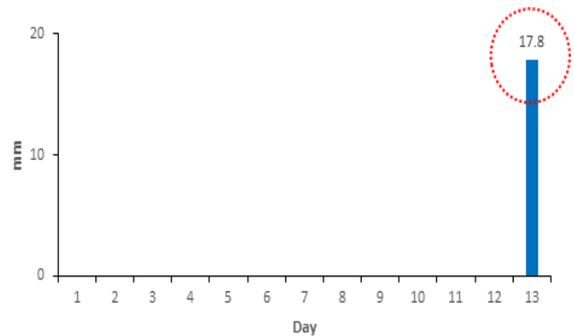


Fig. 5. Accumulated precipitation for March 2022

조사 당일 온천천 본류 세병교 지점의 경우 강우 시작 약 4시간 후(오후 13시경), 누적 강수량 16.4 mm에서 BOD 264.0 mg/L, SS 314.5 mg/L의 최고 농도를 보였으며, 오후 13시부터 15시까지 BOD 117 mg/~125.7 mg/L의 고농도가 지속되었다. 또한 총질소(18.782 mg/L) 및 총인(2.418 mg/L) 항목도 13시경 최고 농도를 보였으며, 특히 암모니아성 질소가 급격히 증가하여 8.538 mg/L 의 농도로 총질소 농도가 증가(총질소의 45 %)되어 하수 월류로 인한 하천 유입이 주된 증가요인으로 추정되었다.

온천천 지천(사직천, 거제천)의 수질은 전반적으로 본류 대비 BOD의 최고농도(348.0 mg/L ~ 417.0

mg/L)가 높았으며, 최고농도 발생시간은 조사지점 위치에서 하류로 갈수록 차이가 있었으나, 전체적인 수질 변화 흐름은 본류와 지천 모두 유사한 형태를 보였다.

Table 4. Highest concentration and occurrence time by Oncheon basin item

Point	Item	MAX.		Time (Accumulated precipitation)
		BOD (mg/L)	SS (mg/L)	
Sebyeonggyo Bridge		264.0	314.5	13:00 (Accumulated precipitation approximately 16.4 mm)
Sajikcheon Stream		348.0	586.0	12:30 (Accumulated precipitation approximately 13.3 mm)
Geojecheon Stream		417.0	397.5	13:00 (Accumulated precipitation approximately 16.4 mm)

Table 5. Water Quality Survey Results by time in Rainfall (2022. 3. 13.)

(Unit : mg/L)

Point	Time	BOD	COD	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	TOC
Sebyeonggyo Bridge	12:00	28.4	19.2	23.9	5.259	0.447	0.243	7.2
	12:30	27.0	18.5	33.3	4.962	0.605	0.174	5.5
	13:00	264.0	133.7	314.5	18.782	8.538	2.418	31.6
	13:30	151.5	67.8	303.0	14.020	5.407	1.754	24.4
	14:00	117.0	57.0	277.0	11.832	4.790	1.475	24.2
	14:30	125.7	67.6	207.8	10.913	5.671	1.142	20.2
Sajikcheon Stream	12:00	129.3	81.6	180.8	7.644	5.603	0.511	32.9
	12:30	348.0	125.6	586.0	22.397	11.142	3.270	78.6
	13:00	123.0	76.8	186.8	7.559	2.878	0.988	23.2
	13:30	57.6	23.9	56.2	4.145	2.126	0.315	8.9
	14:00	44.1	22.1	34.3	3.783	1.696	0.380	9.6
	14:30	32.4	21.3	29.4	4.483	1.089	0.366	8.2
Geojecheon Stream	12:00	18.1	13.7	11.3	2.968	0.089	0.071	4.7
	12:30	307.8	124.0	317.5	45.670	5.185	5.467	67.7
	13:00	417.0	148.8	397.5	46.069	9.450	6.762	99.5
	13:30	303.0	120.4	165.5	19.765	12.370	2.119	26.6
	14:00	132.0	65.6	104.2	18.996	12.384	2.156	18.3
	14:30	89.1	33.0	69.0	15.523	11.892	1.483	14.5

온천천 본류와 지천 모두 대부분 조사 항목에서 누적 강수량 10 mm~20 mm 를 나타내는 시간대에 최고 농도로 보였다가 이후 급격하게 농도가 낮아지며 수질이 회복되는 양상을 보였다.

갈수기와 풍수기의 강우 시 하천수질을 비교하기 위해 2022년 6월 27일 월요일 10시에서 14시에 온천천(목교, 이섭교), 사직천, 거제천 지점에 대하여 조사하였다. 조사 당일 강수량은 48.4 mm 였으며, 조사 전 6월의 선행강우일수는 총 8회, 누적강수량은 105.4 mm 로 3월 조사보다 많은 강수량을 보였다.

조사 당일 온천천 본류 이섭교 지점의 경우 강우

시작 약 4시간 후(오전 10시경), 누적 강수량 24.6 mm에서 BOD 24.2 mg/L로 선행강우 및 누적 강수량의 영향으로 갈수기 대비 9% 수준의 낮은 농도를 보였으며, 반면에 거제천 SS는 781.0 mg/L로 장마철 각종 부유물 및 폐기물의 영향으로 갈수기에 비해 높은 농도를 보였다. 또한 갈수기에 비해 낮은 농도지만, 하수 유입에 의한 암모니아성 질소 농도가 총질소 농도의 59%를 차지하며, 3월과 비슷한 양상을 보였다.

### 3.2 풍수기 조사(2023년 8월 18일 사례)

조사지점은 온천천 본류(세병교, 목교)와 사직천이고



Fig. 7. Water Quality Change by Time zone (2022. 3. 13.)

Table 6. Water Quality Survey Results of Sajikcheon Stream during the rainy season(2022. 6. 27.)

(Unit : mg/L)

Point \ Item	BOD	TOC	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP
Geojecheon Stream	29.5	22.9	781.0	5.519	3.252	0.857
Leeseop Bridge	24.2	13.1	339.1	4.889	2.019	0.499
Sajikcheon Stream	10.1	6.0	52.9	1.645	0.597	0.185
Mok Bridge	14.1	6.9	60.5	3.003	0.928	0.307

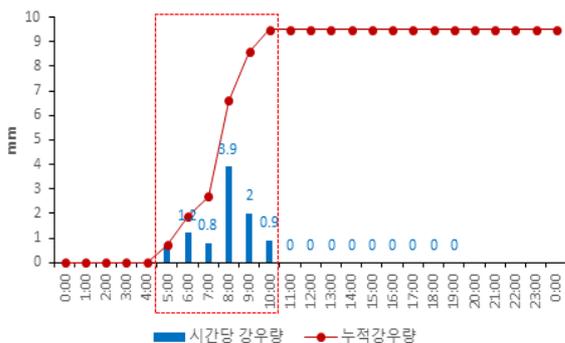


Fig. 8. Precipitation by Time Zone (August 18th)

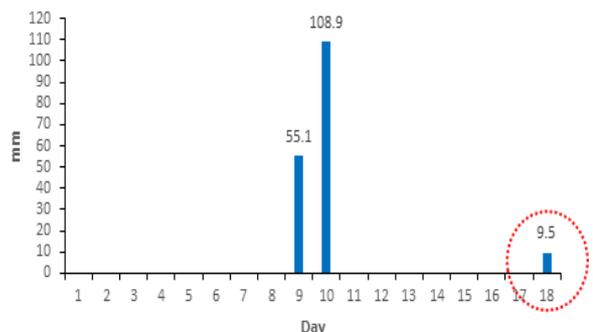
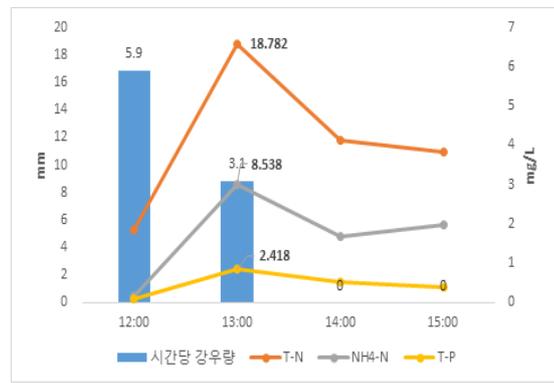
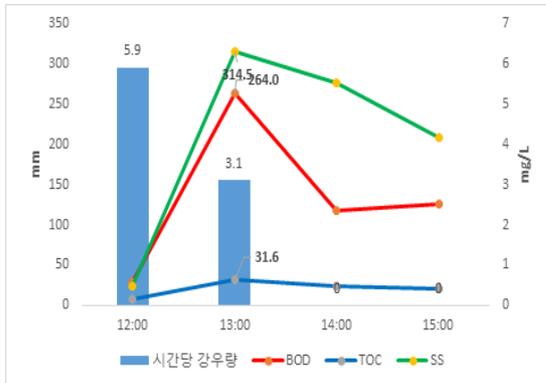


Fig. 9. Accumulated precipitation for August 2023

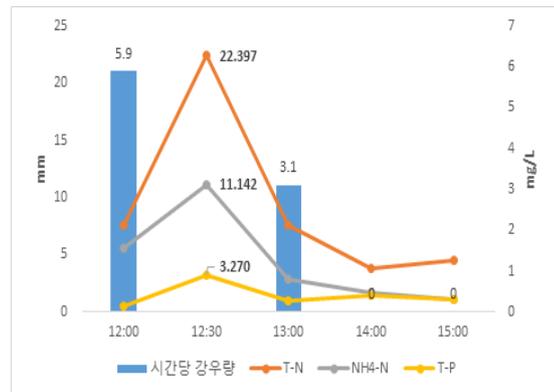
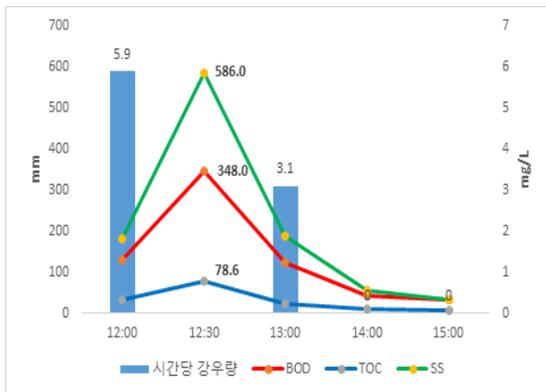
료 채취 시기는 2023년 8월 18일 9시에서 12시로 조사 당일 강수량은 9.5 mm 였으며, 조사 전 선행건기 일수가 7일, 총 강수량 173.5 mm 이었다. 2023년 1월부터 8월까지 총 강수량은 1,604 mm 이었다. 이는 전년(2022년) 8월까지 강수량(774.5 mm) 대비 약 2.1 배로 많은 강수량을 보였다.

온천천 분류 세병교 지점은 강우 시작 약 3시간 후(오전 9시경), 누적 강수량 8.6 mm에서 BOD 46.1

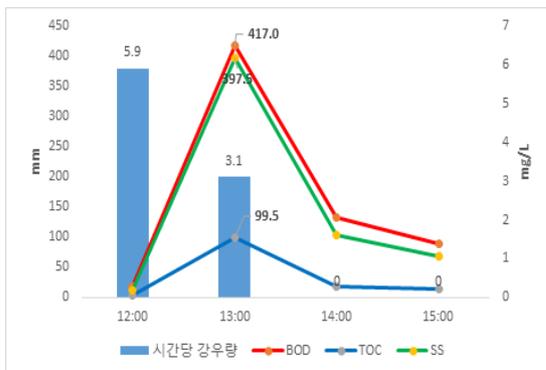
mg/L, SS 40.2 mg/L의 최고 농도를 보였으며, 이후 농도가 감소하는 추세를 보였다. 또한 총질소(6.798 mg/L) 및 총인(0.810 mg/L) 항목도 오전 10시경 최고 농도를 보였으며, 암모니아성 질소 또한 10시경 3.906 mg/L 로 최고농도를 나타낸 이후 감소추세를 보였다.



Sebyeonggyo Bridge



Sajikcheon Stream



Gjecheon Stream

Fig. 10. Changes in Water Quality by Time in the Oncheon Basin (2022. 3. 13.)

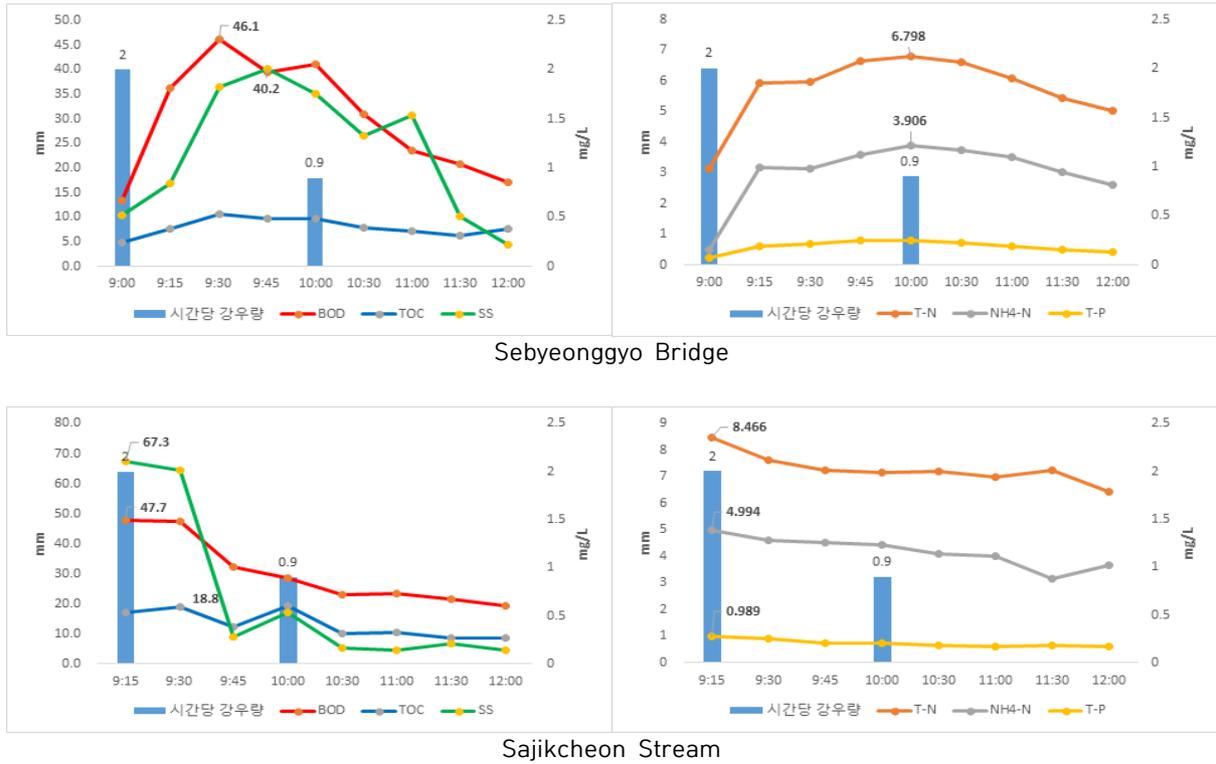


Fig. 10. Changes in Water Quality by Time in the Oncheon Basin (2023.8.18)

Table 7. Water Quality Survey Results in Rainfall (2023. 8. 18.)

(Unit : mg/L)

Point	Time	BOD	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	TOC
Sebyeonggyo Bridge	9:00	13.3	10.5	3.138	0.506	0.226	4.8
	9:15	36.2	16.9	5.924	3.186	0.594	7.5
	9:30	46.1	36.5	5.957	3.157	0.673	10.6
	9:45	39.6	40.2	6.660	3.591	0.787	9.7
	10:00	41.2	35.2	6.798	3.906	0.810	9.7
	10:30	30.9	26.5	6.626	3.740	0.716	7.8
	11:00	23.6	30.7	6.085	3.506	0.616	7.1
	11:30	20.9	10.2	5.440	3.029	0.486	6.2
Sajikcheon Stream	12:00	17.2	4.3	5.033	2.619	0.432	7.6
	9:15	47.7	67.3	8.466	4.994	0.989	17.3
	9:30	47.6	64.5	7.641	4.603	0.908	18.8
	9:45	32.2	9.0	7.242	4.522	0.752	12.3
	10:00	28.6	17.3	7.157	4.427	0.745	19.5
	10:30	22.9	5.4	7.217	4.114	0.640	10.3
	11:00	23.3	4.5	6.993	4.029	0.620	10.6
	11:30	21.7	6.7	7.244	3.145	0.663	8.7
	12:00	19.2	4.6	6.420	3.667	0.609	8.6

사직천은 전반적으로 분류 대비 약 30분 정도 이른 시간에 최고 농도(BOD 47.7 mg/L, SS 67.3 mg/L)가 나타났으며, 이후 감소추세를 보였다. 전반적으로 풍수기는 갈수기에 비해 급격한 수질변화가 없었으며, 과거 비점오염 조사시와 유사하게 BOD 100 mg/L 이상의 고농도는 나타나지 않았다.

이에 앞서 다양한 자료 확보를 위하여 7월 4일에 자동 시료채취기(TELEDYNE ISCO사, 모델 : Avalanche)를 강우 전 조사지점에 설치한 후 채취 프로그램을 이용하여 거제천 지점의 강우 시 하천수질을

조사하였다.

강우 시작 약 4시간 경과 후(오후 8시경), 누적 강수량 3.7 mm에서 BOD 8.3 mg/L, SS 18.4 mg/L의 최고 농도를 보였으며, 이후 농도가 감소하는 추세를 보였다. 조사 당시 선행건기일수가 2일에 불과하고, 일반적으로 하수가 월류되기 시작하는 강수량 10 mm에 도달하지 않아 전반적으로 농도가 높지 않고 수질의 변화가 크지 않았다.



Fig. 11. Automatic sampler



Fig. 12. Installation of an automatic sampler

Table 8. The results of the water quality survey of the Geojcheon Stream using automatic sampler (2023. 7. 4.)

(Unit : mg/L)

Item Time	BOD	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	TOC
20:20	8.3	18.4	2.063	0.036	0.164	17.0
20:35	7.3	2.4	2.251	0.062	0.170	5.5
20:50	5.7	2.1	2.357	0.029	0.173	4.1
21:05	4.8	1.9	2.304	0.033	0.168	4.1
21:20	5.2	2.0	2.242	0.051	0.179	3.5
21:35	5.1	5.8	2.268	0.057	0.173	3.5
21:50	4.7	9.2	2.246	0.030	0.184	4.2
22:05	4.8	8.6	2.183	0.029	0.170	3.6
22:20	4.9	13.7	2.328	0.030	0.187	3.7
22:35	4.8	10.7	2.288	0.071	0.177	3.3
22:50	4.4	4.0	2.328	0.065	0.174	3.9
23:05	5.0	7.1	2.286	0.030	0.175	3.3
23:20	4.3	7.3	2.240	0.231	0.170	3.5
23:35	4.2	8.3	2.049	0.100	0.120	3.0

3.3 강우 시 온천천 유역의 수질 특성(2018년 ~ 2023년)

2018년 2월부터 2023년 8월까지 강우 시 수행한 총 10회 조사결과를 바탕으로 온천천 유역의 수질 특성에 대하여 분석하였다. 세병교 지점은 BOD 농도 1.3 mg/L ~ 430.5 mg/L, COD 3.9 mg/L ~ 277.7 mg/L, SS 3.0 mg/L ~ 881.5 mg/L 로 조사되었고, 선행건기일수, 강수량 등 조사 당시 강우특성에 따라 항목별 큰 편차를 보였다.

조사결과, 선행건기일수가 길수록, 일 강수량이 10mm~50mm 일 때 수질지표항목들이 최고농도를 나타냈으며, 2019년을 제외하고는 모두 갈수기 조사 결과에서 수질이 나쁜 것으로 조사되었다. 이는 선행건기가 길수록 장기간 축적된 오염물질들이 초기 강우 시 빠르게 유출되어 오염도가 급격히 증가하는 결과를 언급한 선행 연구사례들과도 비슷한 양상을 보였다.<sup>5)</sup>

사직천 지점은 2018년 11월부터 2023년 8월까지 강우 시 수행한 7회의 조사결과, BOD 농도 7.4 mg/L ~ 813.0 mg/L, COD 5.9 mg/L ~ 238.0 mg/L, SS 4.5 mg/L ~ 1,701.0 mg/L 로 조사되어 세병교 지점보다 항목별로 더 큰 편차를 보였다.

거제천 지점은 2021년 5월부터 2023년 8월까지 강우 시 수행한 총 4회의 조사결과, BOD 농도 4.2 mg/L ~ 417.0 mg/L, COD 7.7 mg/L ~ 148.8 mg/L, SS 1.9 mg/L ~ 397.5 mg/L 로 분석되어, BOD는 세병교 지점과 유사하였으나, COD와 SS는 세병교 지점과 사직천 지점보다 낮게 나타났다.

또한 BOD/COD 비율은 세병교 지점에서 평상시 및 강우 전 0.2 ~ 1.1이었으나, 강우 이후 BOD 농도가 급격하게 증가하여 최대 6.3까지 상승하였으며, 모든 조사지점에서 동일한 경향을 보였고, 특히 지천의 경우 본류보다도 BOD/COD 비율이 더 크게 나타났다.

Table 9. Water Quality Survey Results in Rainfall (2018 ~ 2023)

(Unit : mg/L)

		BOD	COD	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	TOC
Sebyeong	Max.	430.5	277.7	881.5	30.062	8.538	11.054	175.4
	Min.	1.3	3.9	3.0	2.057	0.015	0.002	2.4
	Mean	71.1	33.4	151.1	5.922	1.401	1.074	13.3
	S.D.	98.1	43.1	180.6	4.784	1.512	1.527	19.4
Sajik	Max.	813.0	238.0	1,701.0	37.777	11.984	19.447	124.1
	Min.	7.4	5.9	4.5	1.867	0.362	0.089	3.0
	Mean	77.7	37.1	134.9	6.8	3.0	1.0	16.4
	S.D.	135.2	49.8	270.3	6.407	2.744	2.868	23.1
Geoje	Max.	417.0	148.8	397.5	46.069	12.384	6.762	99.5
	Min.	4.2	7.7	1.9	2.049	0.029	0.071	3.0
	Mean	82.2	50.0	88.9	9.2	3.3	1.1	15.1
	S.D.	116.1	44.0	112.3	11.541	4.173	1.580	21.3

Table 10. Maximum concentration during rainfall at the Sebyeonggyo Bridge (2018 ~ 2023)

Year	BOD(max.) (mg/L)	SS(max.) (mg/L)	Antecedent dry day (days)	the amount of precipitation (mm/day)
2018	395.0	881.5	18	45.0
2019	240.6	637.8	9	74.5
2020	232.2	481.2	4	31.0
2021	430.5	754.5	16	25.0
2022	264.0	314.5	72	17.8



Fig. 13. Changes in BOD/COD/TOC during rainfall (Sebyeonggyo Bridge)

Table 11. BOD/COD Results in Rainfall (2018 ~ 2023)

	Sebyeonggyo (before rainfall)	Sebyeonggyo	Sajik	Geoje	Road runoff	Farmland
Max.	1.1	6.3	5.8	7.2	1.8	1.2
Min.	0.2	0.3	1.1	1.3	0.3	0.7
Mean	0.4	1.8	2.4	3.4	0.8	0.9
S.D.	0.2	1.2	1.0	1.9	0.5	0.2

도심하천과 농경지와 도로 유출수에 대하여 강우 시 BOD/COD/TOC 수질변화 경향을 비교해 보았다. 비교 대상은 2022년 6월 5일에 회동저수지 인근의 도로에서 나오는 유출수와 농경지 유출수를 조사한 결과로 BOD/COD 비율은 도로 유출수 0.3 ~ 1.8, 농경지 0.7 ~ 1.2로 조사되어 세병교 지점의 평상시 강우 전 0.2 ~ 1.1보다 다소 높은 비율을 보였으며, 도심하천의 강우 이후 BOD/COD 비율을 크게 밀도는 결과를 보였다. 특히 농경지의 경우 도심하천과 비슷하게 강우 이후 BOD, COD 농도가 크게 올라가는 경향은 유사하였으나, 도심하천이 BOD 농도가 급격하게 증가하여 BOD > COD > TOC 순으로 고농도 경향을 보인 반면, 농경지의 경우 이와 반대로 TOC와 COD 농도가 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 이에 따라 부산지

역의 하천에서 하천의 용도와 토양의 투수율을 고려하여 비점오염원 저감방안도 현장의 상황에 맞게 적용되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.4 강우 시 수질항목간 상관관계 분석

강우 시 BOD농도가 급격하게 증가하는 원인 분석을 위해 통계 프로그램(SPSS 20.0)을 이용하여 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 실시하였다. 세병교의 경우 2018년에서 2023년까지 강우 시 비점오염원 조사자료와 같은 기간 물환경측정망 월별 측정결과(무강우 시)와 비교해 보았으며, 온천천의 지천인 사직천과 거제천은 세병교 강우 시 자료와 동일하게 비점오염원 조사결과를 바탕으로 상관관계를 분석하였다.

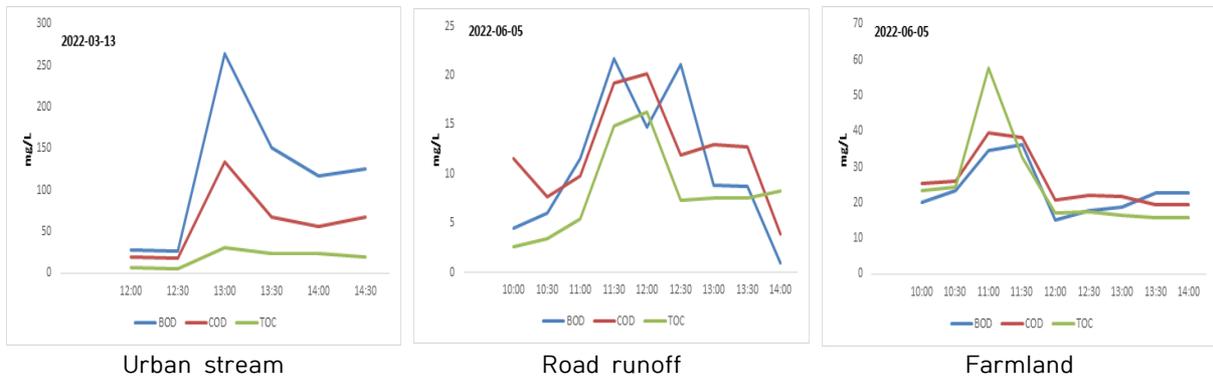


Fig. 14. Changes in BOD/COD/TOC during rainfall

Table 12. Correlation between each water quality item during rainfall (Sebyeonggyo Bridge)

		BOD	COD	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	TOC
Sebyeonggyo (rainfall) n=122	BOD	1.000						
	COD	.934**	1.000					
	SS	.801**	.800**	1.000				
	TN	.847**	.841**	.674**	1.000			
	NH <sub>3</sub> -N	.584**	.685**	.409**	.642**	1.000		
	TP	.685**	.619**	.611**	.795**	.288**	1.000	
	TOC	.816**	.915**	.703**	.776**	.489**	.605**	1.000
Sebyeonggyo (before rainfall) n=68	BOD	1.000						
	COD	.666**	1.000					
	SS	.279*	.569**	1.000				
	TN	.434**	.205	.139	1.000			
	NH <sub>3</sub> -N	.727**	.399**	.049	.618**	1.000		
	TP	.651**	.411**	.153	.554**	.835**	1.000	
	TOC	.319**	.684**	.277*	.005	.221	.195	1.000

\* Correlation is significant at the 0.05 level (two-tailed)

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (two-tailed)

분석결과, 공통적으로 유기오염물질 지표항목(BOD, COD, TOC)간 상관성이 높았으며, 이는 타 지역 하천 수의 유기오염물질 상관관계 분석결과와도 유사한 결과였고,<sup>7)</sup> 특히 강우 시에는 BOD를 기준으로 모든 항목간 높은 상관관계를 보였다.

강우 시 세병교 지점은 BOD와 TN, SS가 각각 0.847\*\*, 0.801\*\*의 상관계수로 비교적 높은 상관성을 보였으나, 상시(측정망)에는 이와 반대로 TN, SS가 각각 0.434\*\*, 0.279\*의 상관계수를 보여, 강우 시 비점오염원에서 유출된 유기물 등으로 BOD, TN, SS 농도가 동시에 상승한 것으로 분석되었다. TP는 강우 시와 평상 시 모두 큰 차이를 보이지 않았다.

사직천은 BOD와 TN, TP, SS가 각각 0.900\*\*, 0.904\*\*, 0.971\*\*의 상관계수를 나타냈으며, 특히 SS와 BOD의 상관성이 매우 높아 유출된 부유물질 중 생분해성 유기물 함량이 비례적으로 함유된 것으로 보인다. 또한, SS는 COD, TOC와도 높은 상관관계를 보였다.

거제천 또한 TN, TP, SS가 각각 0.907\*\*, 0.918\*\*, 0.921\*\*의 높은 상관계수를 나타냈으며, SS는 TOC와, COD는 TN, TP와 높은 상관관계를 보였다.

분석결과, 공통적으로 유기오염물질 지표항목(BOD, COD, TOC)과 TN, TP, SS항목간 상관관계가 높았으며, 특히 온천천 지천인 사직천, 거제천에서 강우 시 SS가 BOD 농도의 급격한 증가와 높은 상관관계를 보여 비점오염 저감을 위해서는 유출 부유물질의 하천 유입을 저감하는 것이 효과적이라 판단된다.

Fig. 15에는 세병교 지점의 BOD와 각 항목간 산점도를 나타내었으며, 세병교 지점은 BOD 기준 COD>TN>TOC>SS>TP>NH<sub>3</sub>-N 순으로 높은 상관관계를 나타내었다.

Table 13. Correlation between each water quality item during rainfall (Tributary stream)

		BOD	COD	SS	TN	NH <sub>3</sub> -N	TP	TOC
Sajikcheon Stream n=45	BOD	1.000						
	COD	.959**	1.000					
	SS	.971**	.906**	1.000				
	TN	.900**	.883**	.876**	1.000			
	NH3-N	.556**	.726**	.484**	.742**	1.000		
	TP	.904**	.784**	.938**	.849**	.344*	1.000	
	TOC	.972**	.982**	.919**	.909**	.693**	.817**	1.000
Geojecheon Stream n=30	BOD	1.000						
	COD	.882**	1.000					
	SS	.921**	.757**	1.000				
	TN	.907**	.903**	.864**	1.000			
	NH3-N	.754**	.541*	.650**	.691**	1.000		
	TP	.918**	.879**	.901**	.987**	.656**	1.000	
	TOC	.898**	.883**	.882**	.944**	.554**	.967**	1.000

\* Correlation is significant at the 0.05 level (two-tailed)

\*\* Correlation is significant at the 0.01 level (two-tailed)

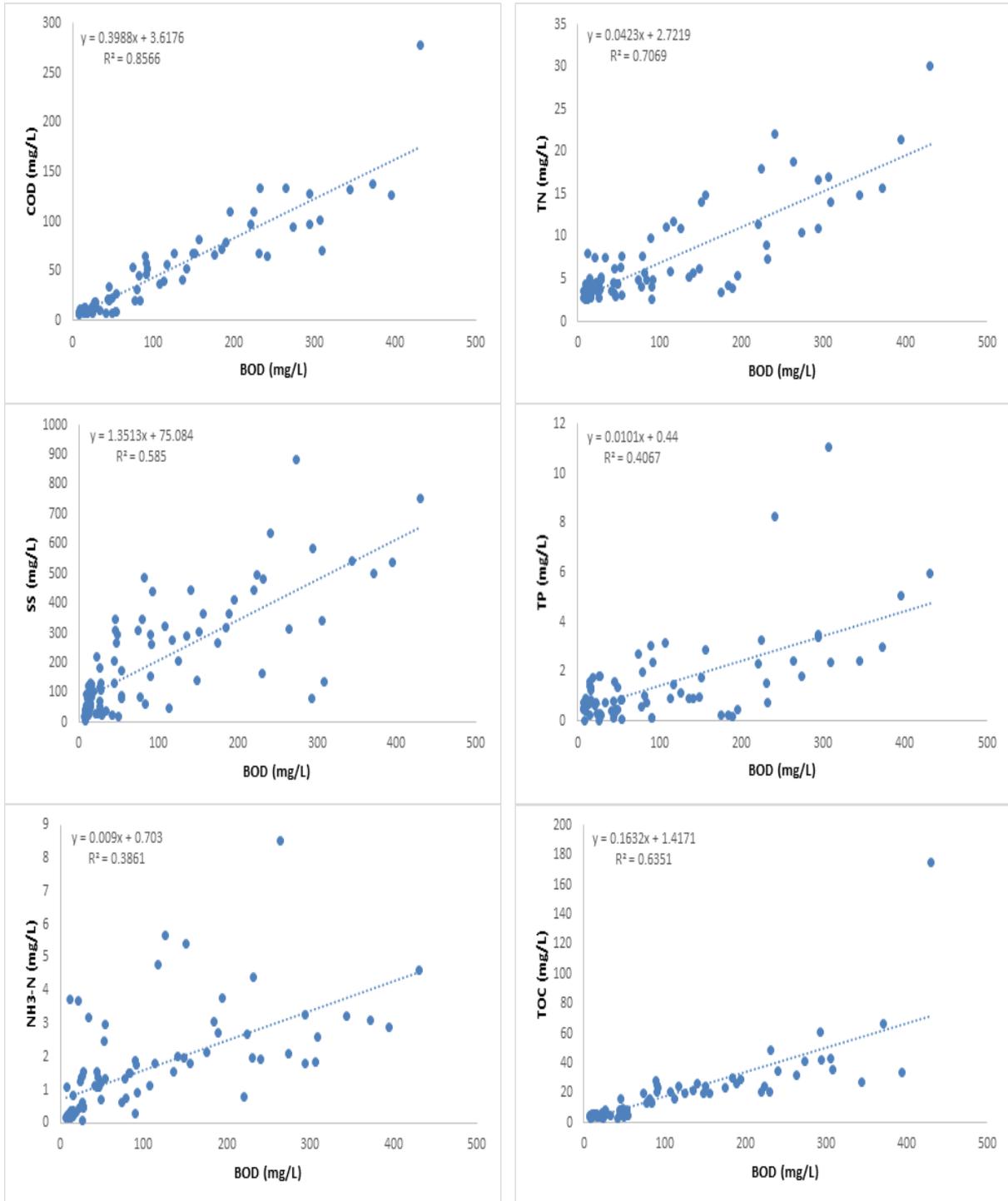


Fig. 15. Correlation between each water quality item during rainfall (Sebyeonggyo Bridge)

Fig. 16에는 사직천 지점의 BOD와 각 항목간 산점도를 나타내었으며, 사직천은 BOD 기준 TOC>SS>COD>TP>TN>NH<sub>3</sub>-N 순으로 높은 상관관계를 나타내었다.

Fig. 17에는 거제천 지점의 BOD와 각 항목간 산점도를 나타내었으며, 거제천은 BOD 기준 SS>TP>TN>TOC>COD>NH<sub>3</sub>-N 순으로 높은 상관관계를 나타내었다.

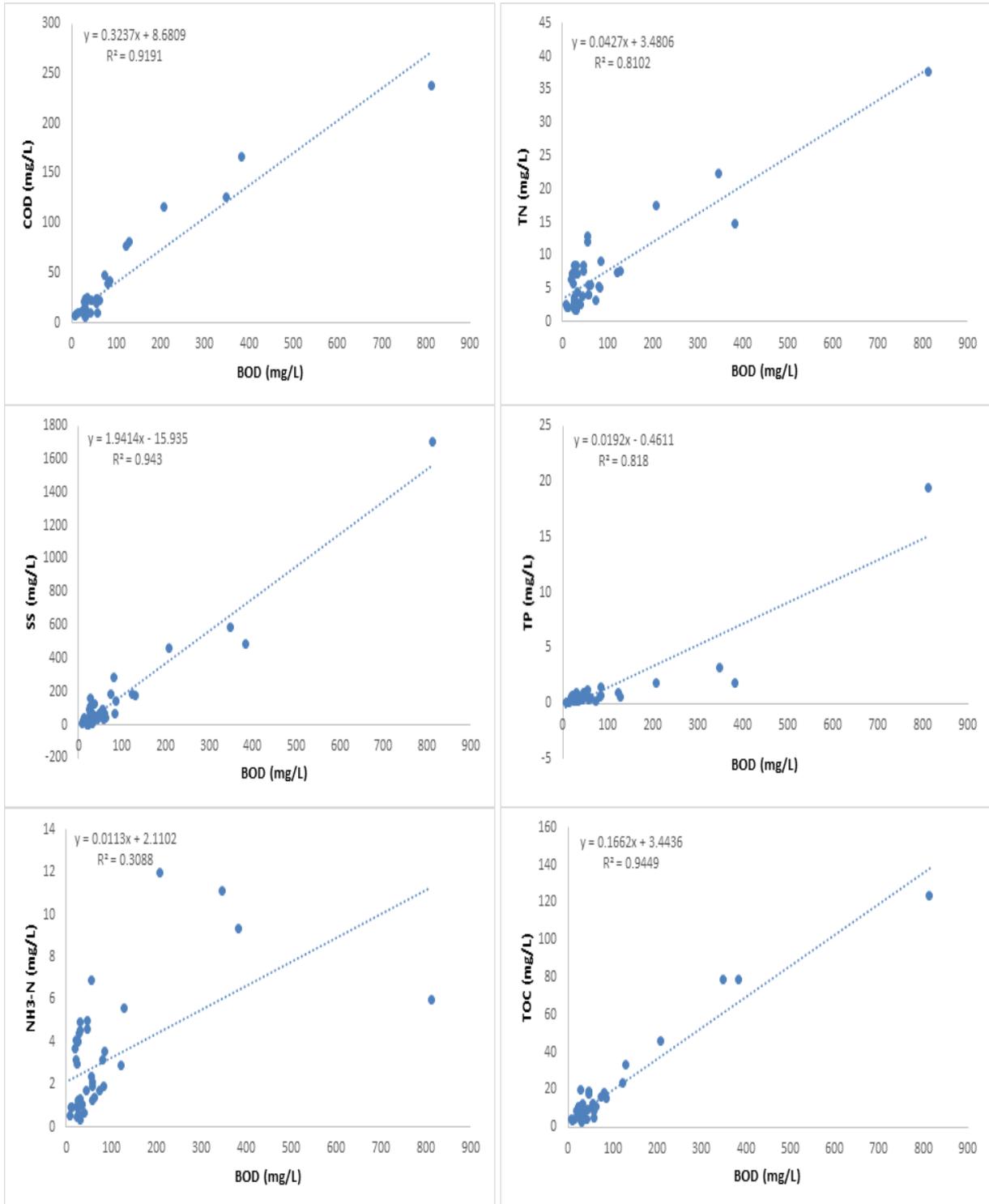


Fig. 16. Correlation between each water quality item during rainfall (Sajikcheon Stream)

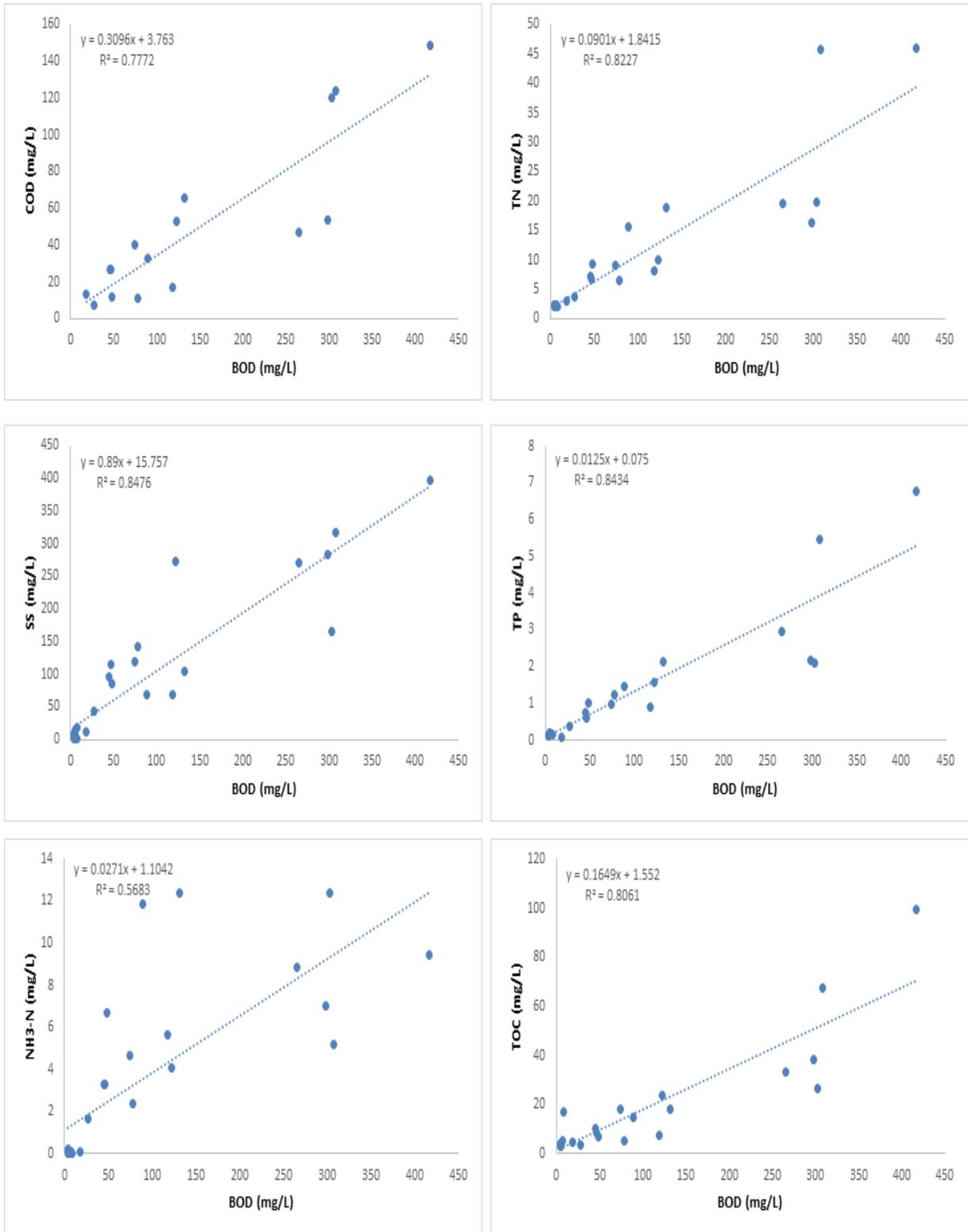


Fig. 17. Correlation between each water quality item during rainfall (Geojecheon Stream)

### 3.5 온천천 비점오염저감시설 수질 특성

온천천 유역의 지천 중 사직천에는 비점오염원 중 큰 비중을 차지하는 BOD, SS 저감을 위해 2020년에 설치된 비점오염저감시설이 있으며, 사직천 비점오염저감시설은 사직천 최종방류지역에 비점오염저감시설 저류조(V=3,400m<sup>3</sup>), 장치형 여과시설(Q=8,417m<sup>3</sup>/hr)을 설치하여 강우 시 사직천 수계에서 발생하는 초기우수를 저류조에 우선저류(저류된 유량은 강우 종료 후 공공하수처리시설로 연계 처리)하고, 저류용량 이상으로 유입되는 초기우수는 장치형 여과시설에서 연속처리하여 BOD 66.4%, SS 89.1% 처리효율로 방류하도록 설계되었다.<sup>8)</sup>

이번 연구에서는 2022년 8월 ~ 9월, 2023년 3월과 8월 총 4회에 걸쳐 본 연구원에서 분석한 결과를 바탕으로 비점오염저감시설에 유입되는 유입수와 저감시설을 통해 방류되는 유출수의 수질특성을 조사하여 저감효율을 분석하였다.

2022년 비점오염저감시설에서의 수질 조사결과, 유입수는 앞선 조사결과들과 유사하게 누적 강수량 약 10 mm에서 최고 농도였으며, 이후 낮아지는 양상을 보였다. 8월에 조사한 유입수 BOD는 일시적으로 143.4 mg/L의 고농도 우수가 유입되는 등 10 mg/L~20 mg/L 분포를 보였으나, 저감시설을 거친 유출수 BOD는 10 mg/L 이내로 안정적인 수질 변화를 보였다. SS는 유입 초기 93% 저감을 시작으로 이후 5시간동안 약 44%~60%의 저감효율을 보였다.

9월의 경우 유입수 BOD는 10 mg/L~60 mg/L 농도 분포를 보였으며, 저감시설을 거친 유출수

BOD는 10 mg/L~20 mg/L로 유입 초기에는 60% 내외의 저감효율을 보였으나, 유입 3시간 후 20 mg/L 농도 이내에서는 저감효율이 낮게 나타났다. SS는 초기 66% ~ 75% 저감효율을 보였으며, 이후 지속적으로 감소되며, 5시간 이후에는 약 11%의 저감효율을 보였다.

2023년 3월의 유입수 BOD는 유입 초기 최대 87% 저감하였으나 이후 점차 저감효과가 감소하여, 약 2시간 이후부터는 농도의 변화가 거의 없었으며, SS 또한 유사한 경향을 보여, 초기 최대 80% 저감효율을 시작으로 점차 저감효율이 감소되어, 약 2시간 이후부터는 저감효과가 나타나지 않았다.

2023년 8월의 유입수 BOD는 3월에 비해 저농도로 유입되어 초기부터 약 5시간 이후까지 지속적으로 60%~89%의 저감효율을 보였으며, SS는 80%~95%의 저감효율을 보였고, 3월에 비해 고농도임에도 양호한 저감효율을 보였다.

비점오염저감시설 분석결과, 유입 초기에는 BOD 60%~90%, SS 또한 60%~90%의 저감효율을 보였으나, 이후 점차 감소하여 유입 2~3시간 이후부터는 저감효율이 급격하게 낮아졌다. 그 외 TN, TP, TOC 항목에서는 유의미한 저감효과가 나타나지 않았으며, 4회의 조사결과 BOD, SS 모두 공통적으로 유입수 대비 유출수의 농도가 현저히 낮았으며, 특히 비점오염저감시설에 유입 초기부터 2시간까지 유입수가 고농도인 경우 저감효과가 큰 것으로 조사되었다.

우리나라 하수도 보급률은 94.3%(2019년 기준)이며, 하수관거 보급률은 82.3%이다. 이 중 합류식 27.1%,

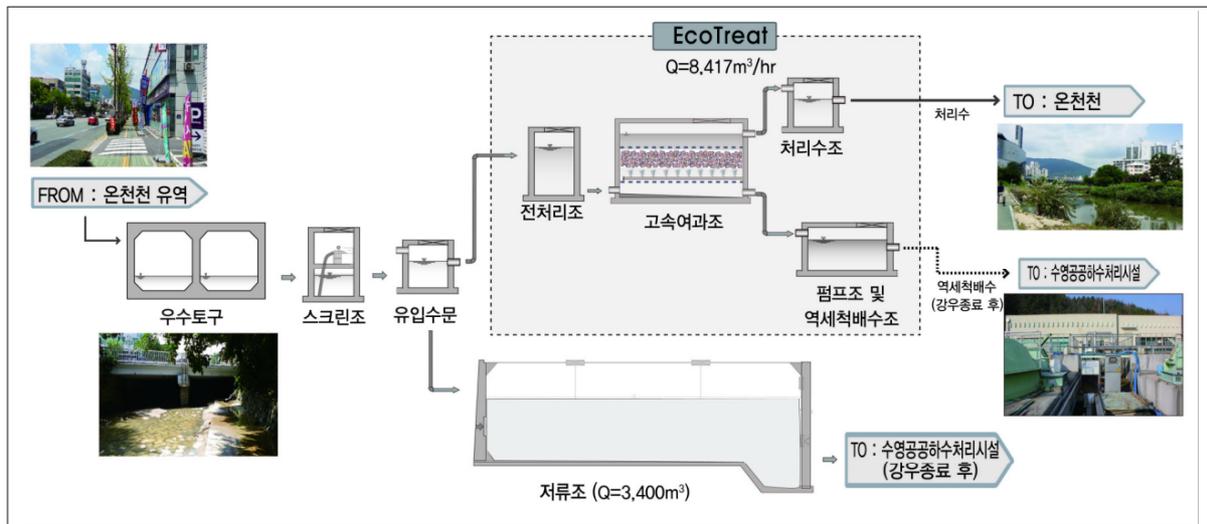


Fig. 18. Process Flow of Sajikcheon Non-point Pollution Reduction Facility

분류식 72.9%로 분류식 하수관거 비중이 점차 증가하고 있다.<sup>9) 10)</sup> 이처럼 온천천 비점오염원 관리의 근본적인 대책은 분류식 하수관거 확충 및 하수처리시설의 용량 증설이며, 차선책으로 향후 비점오염저감시설을 설치하는데 적합한 처리방법을 결정하는데 있어 정확한 정보 제공을 위해 각 하천별 비점오염원의 유출 특성을 지속적으로 파악해야 할 것이다.

### 3.6 SWMM 모델링 결과 비교

최근 들어 급변하는 기후환경과 무관하지 않게 다양한 형태의 강우사상과 예측할 수 없는 강한 강우강도로 인해 하천에서 크고작은 사고가 빈번하게 일어나고 있으며, 2023년 한해에만 부산에서는 두건의 인명사고가 발생했고, 특히 온천천에서는 강우 시 단시간에 급격한 유량 증가로 인해 안전사고 위험이 크다. 이와 관련하여 비점오염원 조사에도 많은 제약을 받

고 있으며, 향후 비점오염원 조사를 함에 있어 모델링을 통한 강우 시 오염도 예측을 하는 것이 바람직하다고 판단된다. 도심하천은 도심지의 불투수지역 비율이 높으며, 일반 하천유역과는 다른 특성이 있기 때문에 그 특성을 잘 반영하여 강우 시 유출과 오염물 농도를 예측하기 위해서는 미국 환경보호청 (Environmental Protection Agency, EPA)에 의해 개발된 SWMM(Storm Water Management Model) 모델이 적합하다.

SWMM 모델은 기본적으로 도시유역이나 인위적 배수계통을 갖는 유역에 대해 유출 모의가 가능하며 단일.연속 강우에 의한 계산이 가능하고, 강우간격은 임의로 설정할 수 있으며, 연산 시간간격은 강우사상에 대해 임의 조정이 가능하다. 공간적 특성은 작은 배수유역에서 큰 배수유역까지 적용이 가능하고 배수유역은 수백 또는 수천개 소유역 및 관로를 구성할 수 있으

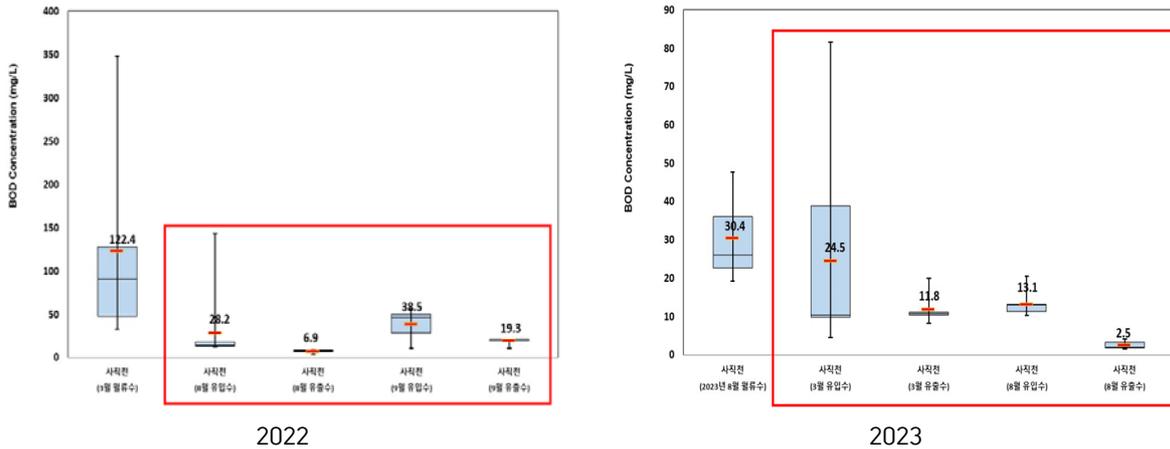


Fig. 19. Distribution of BOD concentration in non-point pollution reduction facilities (2022 ~ 2023)

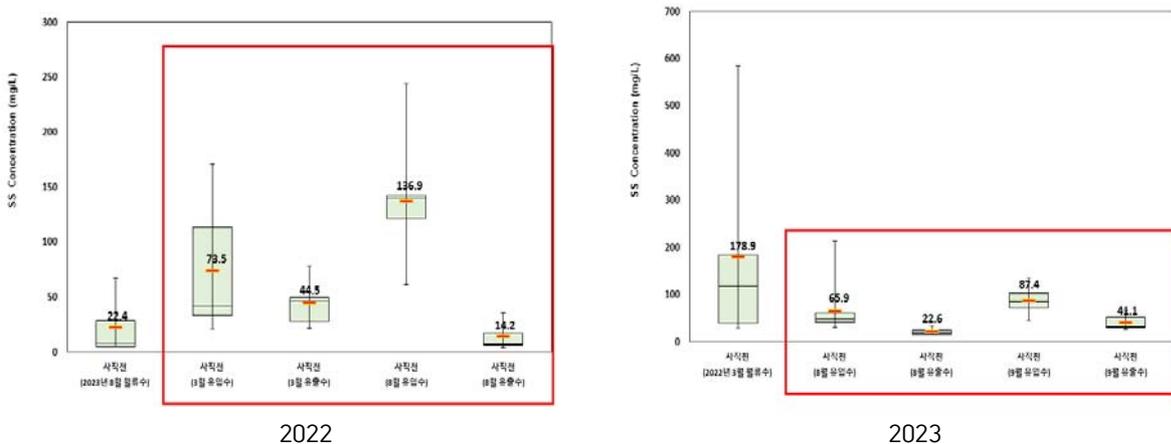


Fig. 20. Distribution of SS concentration in non-point pollution reduction facilities (2022 ~ 2023)

며, 도시 유역내에 강우사상으로 인해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 오염물질의 처리와 비용 계산 등을 모의할 수 있는 종합적인 모형이다.<sup>11) 12)</sup>

현재 수질오염총량관리 대상물질은 BOD, TP로 되어 있으며, 전체 수질오염원 중 비점오염원에서 배출되는 오염부하량(BOD, TP)은 점오염원의 2배 이상 차지하며, 2018년 기준 비점오염원 배출부하량은 BOD 700.6톤, TP 52.7톤으로 전국 수질오염물질 배출량

(BOD 1,035톤, TP 73.1톤)의 각 67.7%, 72.1%이다. 특히 TP의 경우 BOD에 비해 비점오염 배출부하량의 비율이 높은 수준이다.<sup>13)</sup> 향후 2025년까지 TP는 현재 수준(53톤/일)으로 배출될 전망으로 비점오염원에서는 각별한 관리가 필요한 항목으로 이번 연구에서 모델링 항목으로 분석하였다.

본 연구에서는 SWMM 모델을 이용하여 세병교 지점에서의 4개의 강우사상에 대하여 TP 분석결과와 모의된 결과를 비교해 보았다. 온천천 유역의 SWMM 모델링을 위하여 부산시 하수도정비기본계획과

Table 14. Comparison of TP concentration between analysis results and simulation results

(Unit : mg/L)

	2021. 05. 20		2021. 11. 08		2022. 03. 13		2023. 08. 18	
	analysis results	simulation results						
Max.	0.861	0.920	3.003	1.530	2.418	0.790	0.810	0.810
Min.	0.121	0.410	0.308	0.120	0.243	0.700	0.226	0.130
Mean	0.383	0.787	1.322	0.807	1.319	0.748	0.521	0.573
S.D.	0.264	0.194	1.090	0.447	0.898	0.038	0.250	0.304

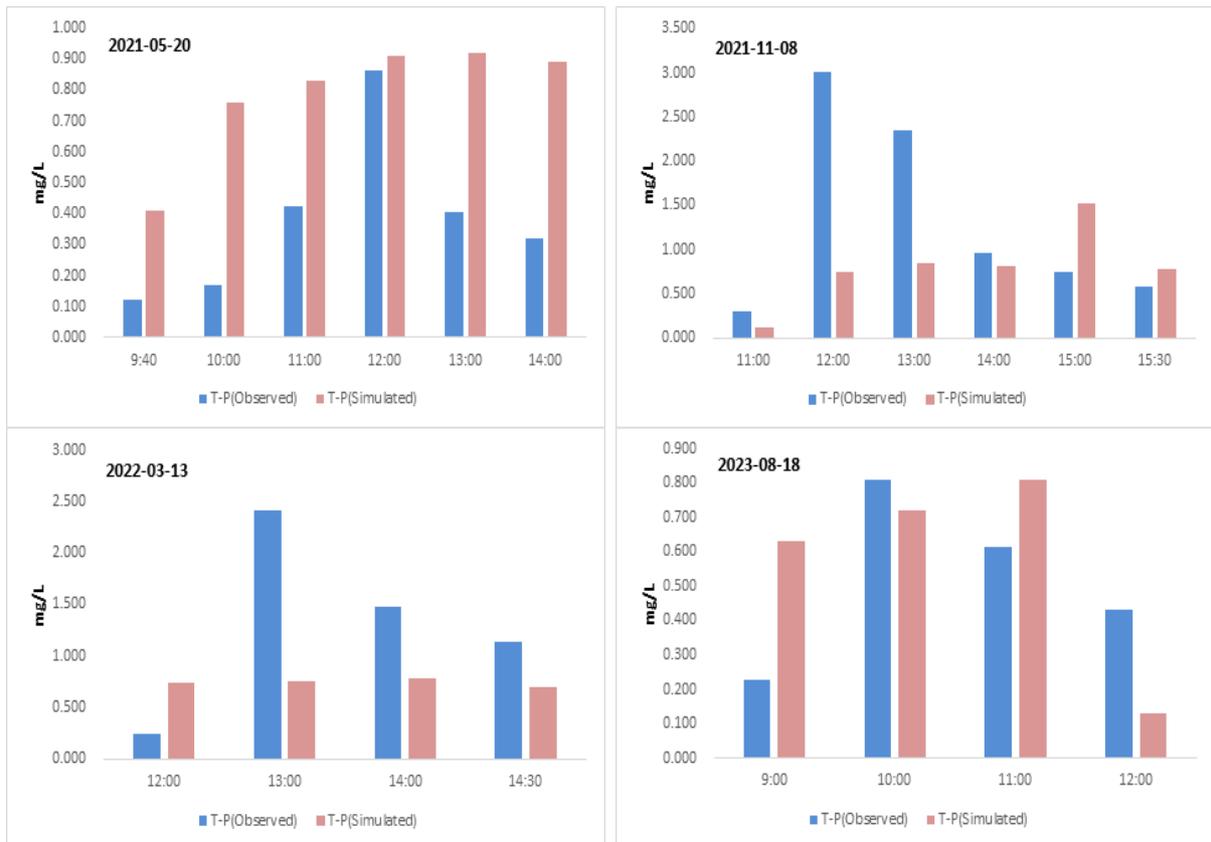


Fig. 21. Comparison of TP concentration between analysis results and simulation results

UIS(Urban Information System)자료 등을 활용하였으며, Arc-GIS를 이용하여 소유역 면적, 경사, 불투수율, 토지이용도, CN 값 등을 산정하였다.

입력된 자료를 바탕으로 SWMM 모의결과와 실제 분석된 TP농도의 분석결과, 풍수기 강우사상을 제외하고 3개의 강우사상에서 다소 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 특히 갈수기 선행건기일수가 길고 현장에서 고농도로 유출될수록 그 차이는 크게 나타났다. 하지만 시점과 지속시간에는 차이가 보였지만 강우 시 TP 농도의 변화추세는 확인할 수 있었으며, 향후 반복적인 매개변수 변화를 통하여 최적 매개변수를 산정하여 적용하면 예측값이 향상될 것으로 판단된다.

#### 4. 요약 및 결론

도심하천 유역은 토지의 불투수율이 높고 도시화에 따른 인구 집중 등으로 인해 각종 오염물질이 축적되어 있으며, 이로 인해 강우 시 발생하는 비점오염원으로 하천은 급속도로 오염되고 있고, 그에 따른 관리방안과 조사연구가 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부산 도심하천 중 많은 시민들이 이용하는 온천천을 대상으로 강우 시 비점오염원에 대하여 조사하고 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 2018년 2월부터 2023년 8월까지 강우 시 수행한 총 10회의 조사결과를 바탕으로 온천천 유역의 수질 특성에 대하여 분석하였다. 조사결과 선행건기일수, 강수량 등 조사 당시 강우특성에 따라 항목별 큰 편차를 보였다. 선행건기일수가 길수록, 일 강수량이 10mm~50mm 일 때 최고농도로 나타났다. 2019년을 제외하고는 모두 갈수기 조사 결과에서 수질이 나쁜 것으로 조사되었다. 또한 온천천 본류보다 지류의 수질이 항목별로 더 큰 편차를 보였다.
2. BOD/COD 비율은 세병교 지점에서 평상시 및 강우 전 0.2 ~ 1.1이었으나, 강우 이후 BOD 농도가 급격하게 증가하여 최대 6.3까지 올라갔으며, 모든 조사지점에서 동일한 경향을 보이며, 특히 지천의 경우 본류보다도 BOD/COD 비율이 더 크게 나타났다. 도심하천과 농경지와 도로 유출수에 대하여 강우시 BOD/COD/TOC 수질변화 경향을 비교해 본 결과 농경지와 도로 유출수가 도심하천의

강우 이후 BOD/COD 비율을 크게 밀도는 결과를 보였다. 특히 농경지의 경우 도심하천과 반대로 TOC와 COD 농도가 급격하게 증가하는 경향을 보였으며, 이에 따라 부산지역의 하천에서 하천의 용도와 토양의 투수율을 고려하여 비점오염원 저감 방안도 현장의 상황에 맞게 적용되어야 할 것으로 판단된다.

3. 항목간 상관분석 결과, 공통적으로 유기오염물질 지표항목(BOD, COD, TOC)간 상관관계가 높았으며, 특히 강우 시에는 BOD를 기준으로 모든 항목간 높은 상관관계를 보였다. 세병교 지점은 강우 시 BOD와 TN, SS이 높은 상관성을 나타내었다. TP는 강우 시와 평상 시 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 사직천은 특히 SS와 BOD의 상관성이 높았는데 유출 부유물질과 생분해성유기물질 함유율 또한 상당히 관련성이 높은 것으로 판단된다. SS는 COD, TOC와도 높은 상관관계를 보였으며, 거제천 또한 TN, TP, SS가 TOC와 BOD와 높은 상관관계를 보였다. 분석결과, 공통적으로 유기오염물질 지표항목(BOD, COD, TOC)과 TN, TP, SS 항목간 상관관계가 높았으며, 특히 온천천 지천인 사직천, 거제천에서 강우 시 SS가 BOD 농도의 급격한 증가와 높은 상관관계를 보여 비점오염 저감 대책시 주요 대상물질로 추정된다.
4. 온천천 유역의 지천 중 사직천 비점오염원의 큰 비중을 차지하는 BOD, SS 저감을 위해 2020년에 설치된 비점오염저감시설을 대상으로 유입되는 유입수와 저감시설을 통해 방류되는 유출수의 수질특성을 조사하여 저감효율을 분석하였다. 분석결과, 유입 초기에는 BOD 60%~90%, SS 또한 60%~90%의 저감효율을 보였으나, 이후 점차 감소하여 유입 2~3시간 이후부터는 저감효율이 급격하게 낮아졌다. 그 외 TN, TP, TOC 항목에서는 유의미한 저감효과가 나타나지 않았으며, 4회의 조사결과 BOD, SS 모두 공통적으로 유입수 대비 유출수의 농도가 현저히 낮았으며, 특히 비점오염저감시설이 유입 초기부터 2시간까지 저감효과가 큰 것으로 분석되어 침전저류와 여과시설만으로도 초기우수 처리에는 큰 효과가 있을거라 판단된다.

5. SWMM 모델을 이용하여 세병교 지점에서의 4개의 강우사상에 대하여 TP 분석농도와 모의된 농도를 비교해 본 결과, 풍수기 강우사상을 제외하고 3개의 강우사상에서 농도 차이를 보였으며, 특히 갈수기 선행건기일수가 길고 현장에서 고농도로 유출될수록 그 차이는 크게 나타났다. 하지만 시점과 지속시간에 따른 농도 차이를 보였지만 강우 시 TP 농도의 변화추세는 확인할 수 있었으며, 향후 반복적인 매개변수를 수정하여 최적 매개변수를 산정 후 적용하면 예측값이 향상될 것으로 예상된다.
6. 위 결과를 토대로 분석한 결과, 온천천 비점오염원 관리의 근본적인 대책은 분류식 하수관거 확충 및 하수처리시설의 용량 증설이며, 차선책으로 향후 비점오염저감시설을 설치하는데 적합한 처리 방법을 결정하는데 있어 정확한 정보 제공을 위해 각 하천별 비점오염원의 유출 특성을 지속적으로 파악해야 할 것이다.

### 참고문헌

1. 국립환경과학원 환경총량관리연구부 수질총량과, “비점오염부하량 평가기법 연구(1)” pp.1~2 (2006)
2. 손정화 “SWMM모형을 이용한 온천천유역의 CSOs 및 비점오염 분석 연구”, 부산대학교 p.1 (2009)
3. 신현석 “SWMM모형을 이용한 비점오염 분석 및 CSOs 관리방안 연구”, 한국물환경학회지 25(2), p.269 (2009)
4. 환경부, 비점오염저감시설의 설치 및 관리.운영 매뉴얼 모니터링 평가방법 (2008)
5. 김수현, “수영강의 수질변화와 강우유출의 영향”, 부경대학교 p.154 (2016)
6. 권혁준, “유역 하천 모니터링을 통한 도암호 비점오염원 유출 특성 분석”, 강원대학교 p.24 (2021)
7. 울산광역시보건환경연구원보 제8권, “하천수의 총체적 유기오염물질간의 상관관계 분석”, pp.335~336 (2015)
8. 부산광역시, 온천천 비점오염저감사업 계획 보고서 (2017)
9. 환경부, “2019 하수도 통계” (2020)
10. 이다원, “강우시 합류식 하수관거 월류수가 도시 하천 수질에 미치는 영향 분석”, 서울과학기술대학교 p.1 (2022)
11. 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency-EPA)
12. 전건, “비점오염원 저감을 위한 부상공법의 최적 설계 및 개선효과 분석연구”, 서울시립대학교 pp.42~47 (2021)
13. 환경부, 제3차 강우유출 비점오염관리 종합대책 (2020)
14. 김재영, “침강에 의한 도시 강우 유출수 오염물질 저감 특성 분석”, 대한환경공학회지 38(4), pp.213~217 (2016)
15. 정재형, “강우 시 중랑천 유역의 수질변화 특성”, 대한환경공학회지 제36권 제6호 pp.412~415 (2014)
16. 서울특별시보건환경연구원보 제50권, “도심하천인 안양천의 강우로 인한 수질변동 특성 및 영향”, pp.257~263 (2014)
17. 인천광역시보건환경연구원보 제17권, “하천 비점오염원 유출특성 및 최적방안 연구”, pp.386~401 (2020)
18. 이정훈, “SWMM을 이용한 수영강 유역의 비점오염원 관리방안에 대한 연구”, 한국방재학회논문집 14(2), pp.327~336 (2014)