

Research Paper

강우조건에 따른 차집시설에서의 비점오염물질 유출특성분석

임자유 · 은범진 · 허정숙 · 최이송 · 오종민

경희대학교 환경학 및 환경공학과

Analysis of the Discharge Characteristics of Non-point Pollutants from the Interception Facilities according to Rainfall Conditions

Zi-Yu Lin · Beomjin Eun · Jeong Sook Heo · I Song Choi · Jong-Min Oh

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University

요약: 본 연구는 비점오염원 저감시설인 차집시설을 대상으로 다양한 강우조건에 따라 초기우수 유출수의 수질특성을 파악하고, 용존성 오염물질의 기원을 파악하기 위하여 수행되었다. 본 연구는 도시지역 내 위치한 G-배수구역의 10개 차집시설 중 비강우시에도 불명수가 유입되는 것으로 조사된 차집시설 #1, #5, #8, #9 및 #10 등 5개 지점에서 수질분석을 통하여 차집시설에서 비점오염물질의 유출특성을 파악하였다. 연구결과로써 강우량에 따라 차집시설에서 우수유출수의 수질특성에 영향을 받는 것으로 판단되었다. 비강우시 EC, BOD, TOC, TN의 평균농도는 강우시에 비하여 높은 것으로 조사되었으며, DO의 평균농도는 강우시에 비하여 낮은 것으로 조사되었다. 또한, 차집시설에서 유출수의 용존성 유기물은 주로 내부에서 생성된 유기물로 구성된 것으로 판단되었다. 우수유출수는 주변 환경에서 유입되는 오염물질의 영향을 많이 받으며, 강우로 인하여 차집시설의 외부로부터 유입되는 난분해성 휴믹계 물질이 많아진 것으로 판단된다.

주요어: 차집시설, 비점오염물질, 초기우수, 용존성유기물

Abstract: This study was carried out to understand the water quality characteristics of the initial stormwater runoff and the origin of soluble pollutants according to various rainfall conditions from a non-point source reducing facility. The water sample from this study was collected among 10 collection facilities in the G-drainage area. Specifically, five of the collection points including #1, #5, #8, #9, and #10 were reported with unknown water inflow even during non-rain conditions. The leakage characteristics of non-point pollutants from the collection facilities were then able to identify accordingly. The water quality characteristics of the stormwater runoff from the collection facilities were strongly affected by the amounts of rainfalls. The average concentrations of EC, BOD, TOC,

First Author: Zi-Yu Lin, Tel: +82-31-201-2125, E-mail: ziyulin96@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2974-4201

Corresponding Author: Jong-Min Oh, Tel: +82-31-201-2461, E-mail: jmoh@khu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-1104-5867

Co-Authors: Beomjin Eun, Tel: +82-31-201-2125, E-mail: bumjin0814@khu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2715-5283

Jeong Sook Heo, Tel: +82-31-201-2125, E-mail: jsheo1986@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2913-7716

I Song Choi, Tel: +82-31-201-2125, E-mail: isongchoi67@daum.net, ORCID: 0000-0001-8809-802X

Received: 25 October, 2021. Revised: 20 December, 2021. Accepted: 22 December, 2021.

and TN during non-rain were found to be higher than their concentrations during rain; on the other hand, the average concentrations of DO were found to be lower than its concentrations during rain. In addition, the distribution of organic components existing in the effluent of collection facilities were identified based on the dissolved organic matter analysis. In summary, the stormwater runoff was highly affected by pollutants flowing from the surrounding environment, and the amounts of hard-to-decompose humic substances were greatly increased in the collection facilities due to rain.

Keywords : interception facility, non-point pollution, initial rainfall, dissolved organic matter

I. 서론

지속적인 도시개발과 도시 면적의 확장으로 인한 토지이용 유형의 변화는 도시 물순환시스템에 영향을 미치는 주요 요인이 되었다. 또한, 도시개발로 인한 불투수층 면적의 확대에 따른 지표수의 유량 증가와 지하 수위의 저하로 인한 도시하천의 건천화 문제와 수질오염 및 생태계 변화 등의 2차적인 환경문제도 발생하고 있다(Ministry of Environment 2006). 오염배출을 명확히 확인할 수 있는 지점으로부터 하수 구나 도랑 등의 형태로 배출되는 점오염원 문제는 국가의 지속적인 관리로 인하여 개선효과가 뚜렷하게 나타난 반면, 강우시 넓은 면적의 불특정 오염원에서 불특정하게 오염물질을 배출하는 초기우수에 의한 비점오염물질은 현재까지 문제가 되고 있다(Ministry of Environment 2014). 비점오염물질은 주로 강우량, 토지형태 및 토지이용 방식 등과 밀접한 관련이 있으며, 질소 등과 같은 영양물질, 토사나 기름, 금속 등이 포함되어 하천에 유입될 경우 부영양화 등 다양한 수질문제를 야기한다. 빗물은 지표에서 배수시스템을 통해 하천, 호수 및 해역 등 자연수역으로 오염물질을 전달하는 매개체이므로, 도시의 비점오염물질이 우수유출수에 의해 혼합되어 오염부하를 증가시키는 주요 원인이 된다(Brezonik & Stadelmann 2002).

Kim 등(2007)은 대전시 도시지역에 설치된 차집 시설에서 도시 비점오염물질의 유출특성을 파악하기 위하여 TCOD, TBOD, TN 및 TP를 분석한 바 있다. Suárez & Puertas(2005)는 스페인 5개 도시지역에서 초기우수 차집시설의 월류수(Combined Sewer Overflows, CSOs)의 오염부하량을 파악하기 위하여

강우시 우수유출수의 COD, BOD 및 TSS를 분석하였다. Brezonik 등(2002)은 우수유출수의 BOD, TN 및 TP 등을 분석하여 강우와 비점오염물질 부하량 간의 예측모형을 연구하였다. 그러나, 도시지역의 비점오염물질 중 용존성 유기물질(Dissolved Organic Matter, DOM)의 분석을 통하여 하수환경 내 유기물의 생성기원을 파악하는 연구는 선행 연구가 거의 전무하다.

Y시를 관통하는 진위천 수계 오산천 유역은 과거에 분류식 및 합류식 하수관거가 혼재되어 설치된 지역으로서, 강우시 유역내 분류식 지역의 초기우수 유출수와 미차집 하수 월류수가 다량 유출됨으로 시내를 관통하는 오산천 및 기흥호수의 수질오염을 악화시키는 결과를 초래하였다. 이에 Y시는 저수지 및 오산천 유역의 비점오염관리를 위한 대책으로 주요 우수유출부에 차집시설을 둔 초기우수 저류형 비점오염저감시설을 설치·운영하고 있다.

그러나, 일부 차집시설에서는 우수유출수뿐만 아니라 하수 및 불명수가 혼재되어 유입되고 있으며, 이로 인하여 저류조 내 수질에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 결과적으로 저류조의 합리적인 운영관리를 위해서는 강우유출수의 비점오염물질의 유출특성에 관한 연구가 필요하며, 특히 비강우시에도 지속적으로 하수와 합류되어 유입되는 오염물질의 유출특성과 비교하여 연구되어야 할 필요가 있다.

또한, 수환경에서 용존성 유기물은 자연분해과정을 거치면서 구조와 성분이 변화하며, 생성기원의 특성에 따라 다양한 구조 및 성분이 수환경의 특성을 반영한다. 그러므로 DOM 분석을 통하여 하수환경 내 유기물의 생성기원을 파악함으로써 수환경 내의 생물 화학 반응을 판단할 수 있다. 본 연구의 대상지역은

각 차집시설 주변지역의 토지이용 특성이 다르므로 DOM 분석을 통하여 각 차집시설에서 우수유출수 내 유기물의 생성기원을 추적할 수 있으며, 다양한 강우 조건에서 우수유출수 내 유기물 구성성분의 변화특성을 파악할 수 있다.

본 연구의 목적은 강우시 및 비강우시 차집시설에서 우수유출수의 물리·화학적 수질오염특성 분석과 용존성 유기물의 기원 조사를 통하여 차집시설에서 비점오염물질의 유출특성을 파악하고자 하였다. 연구결과는 전체 비점오염저감공정의 기초자료 제공과 향후 저류조와 하수처리시설의 최적 관리방안 마련을 위한 연구에 활용하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상지역 선정

본 연구는 Y시의 10개 차집시설을 대상으로 사전 현장조사를 하였으며, Figure 1에 차집시설 위치와 저류조까지 이송경로 등을 제시하였다. 초기우수 유

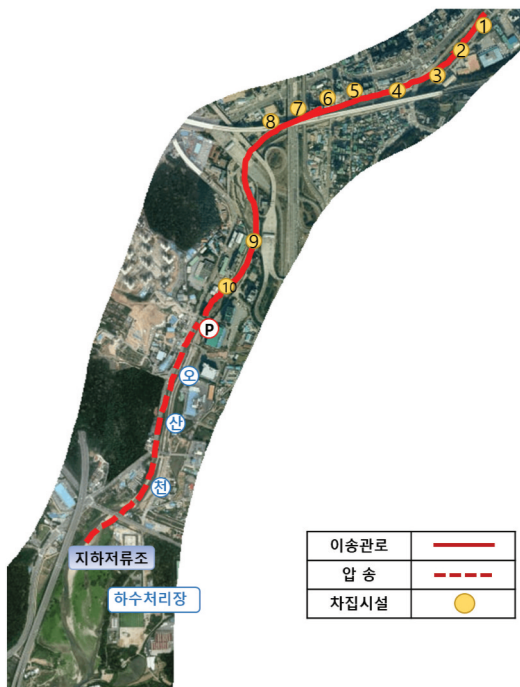


Figure 1. Location of the interception facilities and the transportation route to the underground settling tank in drainage area

Table 1. Interception facilities in drainage area

차집시설	용도지역	하수배제방식
#1	산업지역	분류식
#5	산업지역	분류식
#8	산업지역, 주거지역	분류식
#9	주거지역, 공공지역	분류식
#10	주거지역	분류식

출수는 각 차집시설에서 차집된 후 이송관로를 거쳐 지하저류조로 유입되고, 저류된 우수유출수의 전량을 하수처리장에 연계·처리하는 방식으로 운영된다. 현장조사 결과, 10개 차집시설 모두 분류식으로 되어있지만, 일부 차집시설(#1, #5, #8, #9 및 #10)은 비강우시에도 하수 및 불명수 등이 유입되는 것으로 확인되어 효율적인 수질관리를 위한 유출특성 분석이 필요하다고 판단되었다. 따라서, 본 연구에서는 비강우시 유입되는 불명수가 우수유출수의 수질성상에 미치는 영향을 파악하기 위하여 문제시된 차집시설을 조사대상지점으로 선정하였다. 차집시설 현황은 Table 1과 같다. 각 차집시설에 해당되는 지역의 토지이용 용도는 대부분 산업지역과 주거지역으로 구성되어 있다.

2. 실험방법

강우시와 비강우시로 분리하여 차집시설 #1, #5, #8, #9 및 #10에서 강우시 3회와 비강우시 2회 현장 실험을 수행하였다(Table 2). pH, EC 및 DO는 현장에서 다항목측정기(Orion Star A329)로 측정하였으며, BOD₅, TOC, TN, TP 및 DOM 항목은 시료를 실험실로 옮긴 후, 수질오염공정시험법에 따라 분석하였다. T-N은 UV Absorption Photometry (220nm)를 이용하여 자외선 흡광광도법에 따라 측정하였으며, T-P는 Ascorbic Acid Reduction(880nm)을 이용하여 자외선 흡광광도법에 따라 측정하였다. BOD₅는 DO meter(YSI 6000, USA)를 이용하여 측정하였으며, 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)는 TOC analyzer(Shimadzu, TOC-VCSN)를 이용하여 측정하였다. 수질지표간의 상관도를 도출하기 위하여 강우량을 포함한 각 분석항목들의 상

Table 2. Descriptions of cases for the water characteristic sampling in different interception facilities

구분	사례	조사일시	강우량 (mm)	채수지점	분석항목
강우시	Case 1	2021. 05	8.9	차집시설 #1, #5, #8, #9, #10	pH, EC, DO, BOD, TOC, TN, TP, DOM
	Case 2	2021. 08	14.3		
	Case 3	2021. 08	13.2		
비강우시	Case 4	2021. 05	-		
	Case 5	2021. 07	-		

관관계를 분석하였다. 상관관계 분석은 Origin 2010 프로그램을 이용하여 수행하였다.

용존성 유기물(DOM) 구성성분의 비중 및 생성기원을 파악하기 위하여 형광측정법을 이용하였다. 형광측정법은 자연유기물질 성분에 대한 다양한 정보를 얻을 수 있는 분석방법으로, 소량의 시료만으로도 분석이 가능하며, 감도가 뛰어나고, 형광특성이 있는 유기물질에 대한 선택성이 탁월한 것으로 알려져 있다(Baker & Inverarity 2004). 본 연구는 다양한 형광측정법 중 3차원 여기-방출 Fluorescence(3D-excitation emission mapping, 3D-EEM)을 선택하여 우수유출수의 유기물질 특성을 분석하였다. 형광분광광도계(Fluorescence Spectrophotometer, F-7000) 장비를 이용하여 여기파장(Excitation wavelength, Ex) 200~450 nm, 방출파장(Emission wavelength, Em) 280~550 nm로 설정한 후, 3D-EEM를 측정하였다.

3. EEM 형광분광법(EEM Fluorescence Spectroscopy)

FRI(Fluorescence region integration)는 EEM 결과를 정량화하고자 적용하였으며, 여기방출 파장에 따라 DOM의 5개 형광영역을 구분하여 용존유기물 유형을 정의하였다(Chen et al. 2003). 용존유기물의 구성성분 중 상대 함량을 반영한 누적 여기방출 부피는 상대적인 성분의 부피로 정규화할 수 있다. 따라서, 정규화 된 Integral volume value(Φ_i , i구간의 적분 체적값) 및 형광반응의 백분율(P_i)을 통하여 용존유기물의 유기물 유형과 비중을 파악할 수 있다. 이러한 유기물의 종류에 따라 수환경의 오염특성과 수환경 내 미생물의 활성도도 달라질 수 있으며, 또한, 3D-EEM 이외에 형광지표(FI, Fluorescence Index), 휴믹화지표(HIX, Humification Index), 생물학적 지

표(BIX, Biological Index)를 이용하여 수환경 내 용존유기물의 변화 양상과 미생물에 의한 반응에 관한 정보를 확인할 수 있다.

형광지표 FI값은 여기파장 370 nm에서 확보한 450 nm와 500 nm 방출파장의 강도 비율이다. 휴믹 화지표 HIX는 일정한 여기파장 254 nm에서 측정된 방출파장 스펙트럼 상의 EM 300~345 nm에 대한 EM 435~480 nm 비율로 나타내어지며, 외부로부터 유입된 토양유기물의 휴믹화 정도를 알려주는 인자로 활용할 수 있다(Zsolnay et al. 1999; Ohno et al. 2008). 생물학적 지표 BIX는 여기파장 310 nm에

Table 3. DOM types by fluorescence 3D excitation-emission wavelengths

Region	Excitation (nm)	Emission (nm)	Composition
I	210-250	280-320	Tyrosine-like
II	210-250	320-380	Tryptophan-like
III	210-250	380-550	Fulvic acid-like
IV	250-360	280-380	Soluble microbial by-product-like (SMB)
V	250-430	380-550	Humic acid-like

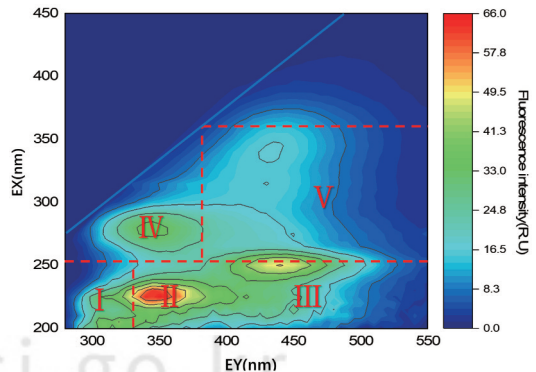


Figure 2. Five EEM distribution regions.

서 방출파장 430 nm 형광세기와 방출파장 380 nm 의 비율로써, 용존유기물의 생성시기와 수환경 서식 미생물의 활동에 의한 생분해 가능성을 표현하는 인자이다(Table 3). Figure 2와 같이 그래프의 I, II, III, IV, V 구역 중 어느 구역에서 peak가 나타나는가를 확인함으로써 어떤 용존유기물 형태인지를 판단할 수 있다.

III. 결과 및 고찰

1. 강우시 및 비강우시 차집시설에서 수질 분석결과

차집시설에서 우수유출수의 수질분석 결과는 조사 지점에 따라 수질지표에 뚜렷한 차이를 보이는 것으

로 조사되었다. 강우시 각 사례별 차집시설에서 우수 유출수의 평균 수질농도와 비강우시 차집시설에서의 평균 수질농도를 Table 4와 Figure 3에 제시하였다. 강우시 사례별 강우량은 Case 1 8.9 mm, Case 2 13.2 mm, Case 3 14.3 mm로 조사되었으며, 평균 강우량은 12.1 mm이었다. 강우시 5개 조사지점에서 pH가 평균 7.8~8.1로 조사되었으며, 비강우시의 pH는 강우시 평균 pH 보다 다소 높은 것으로 나타났지만, 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 강우시 강우에 포함된 다양한 이온물질들이 생활하수의 이온과 결합하여 유출될 때 중화되어 pH가 낮아지는 것으로 분석할 수 있으며(Jeon et al. 2010), 또한, 생활하수의 잔류세제가 pH를 높일 수 있는 것으로 조사된 바

Table 4. Assessment of water quality during the rain and non-rain conditions

Location	pH		EC (µs/cm)		DO (mg/L)		BOD (mg/L)		TOC (mg/L)		TN (mg/L)		TP (mg/L)	
	rain	w/o rain	rain	w/o rain	rain	w/o rain	rain	w/o rain	rain	w/o rain	rain	w/o rain	rain	w/o rain
차집시설#1	7.8	8.3	839.7	934.9	6.4	5.7	4.8	13.2	4.4	10.6	7.6	12.2	0.9	1.1
차집시설#5	7.9	8.4	545.0	677.3	7.4	5.1	3.2	10.5	4.0	4.2	5.0	7.1	0.9	0.4
차집시설#8	8.0	7.7	680.3	926.7	7.0	5.8	2.6	8.2	4.8	2.2	3.8	7.7	0.5	0.5
차집시설#9	8.1	8.2	483.8	612.2	8.6	8.2	2.7	5.6	5.3	3.7	5.7	8.9	0.4	0.1
차집시설#10	8.1	8.3	659.3	632.6	7.8	8.8	3.4	6.8	4.3	2.2	3.0	4.2	0.2	0.7

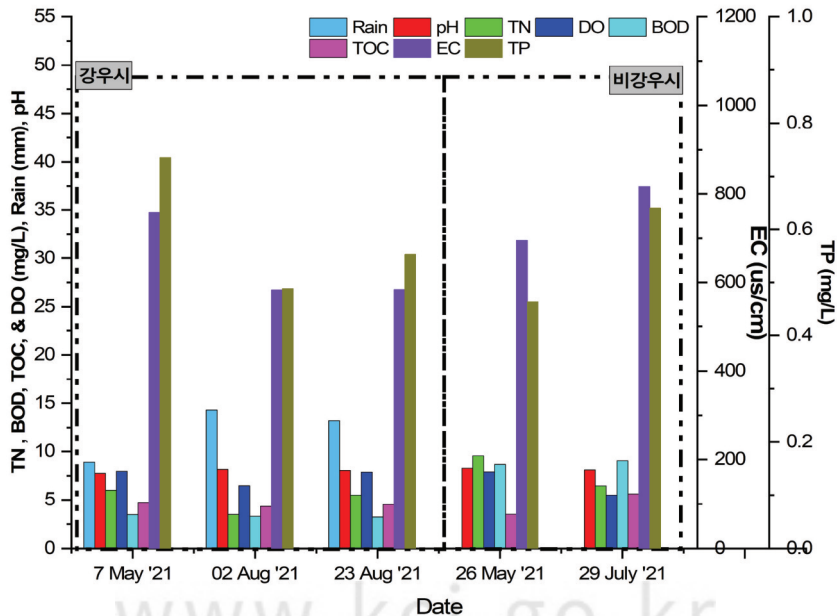


Figure 3. Average concentrations of water quality under rain and non-rain conditions.

있다(Hallberg et al, 2014). 전기전도도(EC)의 분석 결과는 강우시 차집시설#1의 EC 평균값이 839.7 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 가장 높게 조사되었는데, 비강우시 이 지점의 EC 평균값 또한 934.9 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 로 가장 높음 것으로 분석된 바, 차집시설#1 주변지역에서 유입된 불명수로 인하여 EC가 높았던 것으로 판단된다.

1) DO 및 BOD

DO농도의 경우, 강우시 평균 6.4~8.6 mg/L와 비강우시 평균 5.1~8.8 mg/L로, 강우시 DO농도가 다소 높은 것으로 분석되었다. 또한, BOD의 경우는 강우시 각 지점에서 평균농도 2.6~4.8 mg/L, 비강우시 5.6~13.2 mg/L로, 강우시가 더 낮게 조사되었다. 이는 비강우시에 유출되는 불명수 중에 BOD성 유기물질이 다소 포함되어 있기 때문으로 사료된다. 전반적으로 BOD는 강우량에 따라 큰 변화가 없지만 지점 위치에 따라 농도의 차이를 보이는 것으로 나타나 토지이용의 성격에 따라 농도분포의 차이를 보이는 것으로 분석된다.

2) TOC

TOC 조사결과, 각 차집시설에서 강우시 TOC 평균 농도는 4.0~5.3 mg/L로 뚜렷한 차이를 보이지 않았는데, 이는 강우시 유입된 우수의 희석작용 때문인 것으로 판단된다. 비강우시 차집시설#1에서 TOC 평균농도 10.6 mg/L로 타 차집시설에 비하여 상대적으로 높은 농도를 보였고, 각 지점별 농도도 차이가 있는 것으로 나타났다.

3) TN 및 TP

TN과 TP 농도는 조사지점에 따라 농도의 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 차집시설#1에서, 강우시 및 비강우시의 TN과 TP 평균농도는 타 차집시설보다 높은 것으로 나타났다. 이는 차집시설#1 지점의 불명수로 유입되는 농도가 상대적으로 높았기 때문으로 판단된다. 강우시에는 유출수의 양이 증가하여 타지점과 비교하여 평균농도의 차이가 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 불명수의 농도가 초기우수 유출수의 저류조 수질에 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

차집시설#5, #8, #9, #10에서는 TN의 경우, 비강우시 평균농도가 강우시보다 더 높은 것으로 조사되어 불명수의 영향이 큰 것으로 나타난 반면, TP는 강우시의 농도가 비강우시 보다 높은 것으로 나타나 유출특성에 차이를 보이는 것으로 조사되었다. 결과적으로 TN은 불명수의 수질 영향이 크고, TP는 강우유출수의 수질 영향이 큰 것으로 판단된다.

2. 오염물질별 상관관계 분석

수질분석 결과를 토대로 각 오염물질 간 상관관계를 분석하였다(Figure 4). pH와 강우량의 상관관계는 0.93으로 높은 정상관관계를 나타냈다. 강우량과 EC의 상관관계는 -0.45로 역의 상관성을 보였으며, 강우가 EC 농도를 감소시키는 역할을 한 것으로 판단된다. 실제로 Table 4의 EC 농도를 보면, 강우시보다 비강우시 높은 것으로 조사되어 강우유출수의 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, EC와 TN의 상관관계는 0.63, TN과 TP는 0.67로 높은 정상관관계로 분석되었으며, DO와 BOD의 상관관계는 -0.54로 역상관성으로 분석되었는데, 이는 미생물 산소요구량에 따라 수환경의 산소가 감소되었기 때문으로 분석된다.

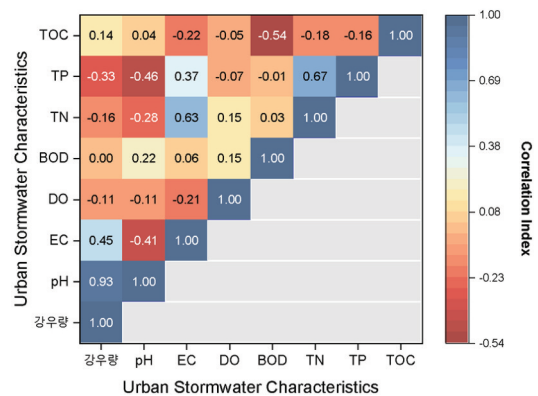


Figure 4. Correlation coefficients between the measured urban stormwater characteristics across all sampling locations.

3. 3D-EEMs 분석결과

Figure 5는 형광분석 결과를 강우시와 비강우시의 각 지점별 평균값으로 구분하여 나타낸 것이다. 각 지

점별 DOM 구성성분의 Integral values가 뚜렷한 차이를 보임을 확인하였으며, 이는 I(Tyrosine-like) 구역, II(Tryptophan-like) 구역과 III(Fulvic acid-like) 구역으로 분명하게 구분된다. 강우시 차집시설에서 DOM의 주요 구성성분은 II구역(Tryptophan-like) ($\Phi_{II,n}: 2.42 \pm 1.28 \times 10^3$), III구역(Fulvic acid-like) ($\Phi_{III,n}: 1.59 \pm 0.59 \times 10^3$)로 조사되었으며, I구역(Tyrosine-like)는 $1.16 \pm 1.69 \times 10^3$, V구역(Humic acid-like)는 $0.77 \pm 0.29 \times 10^3$, IV구역(Soluble

microbial by-product-like)는 $0.70 \pm 0.30 \times 10^3$ 으로 조사되었다. 비강우시의 경우 II구역($\Phi_{II,n}: 2.14 \pm 2.09 \times 10^3$), I구역($\Phi_{I,n}: 1.66 \pm 2.81 \times 10^3$), III구역($\Phi_{III,n}: 0.82 \pm 0.37 \times 10^3$), IV구역($\Phi_{IV,n}: 0.73 \pm 0.53 \times 10^3$), V구역($\Phi_{V,n}: 0.51 \pm 0.28 \times 10^3$)으로 분석된바, 전체 DOM 구성성분의 integral values는 TOC 농도와 유사한 변화 경향을 보였다.

I, II 및 IV구역의 경우, 단순한 방향족 및 미생물 부산물이 나타나며, 수환경 내에 서식하는 미생물과

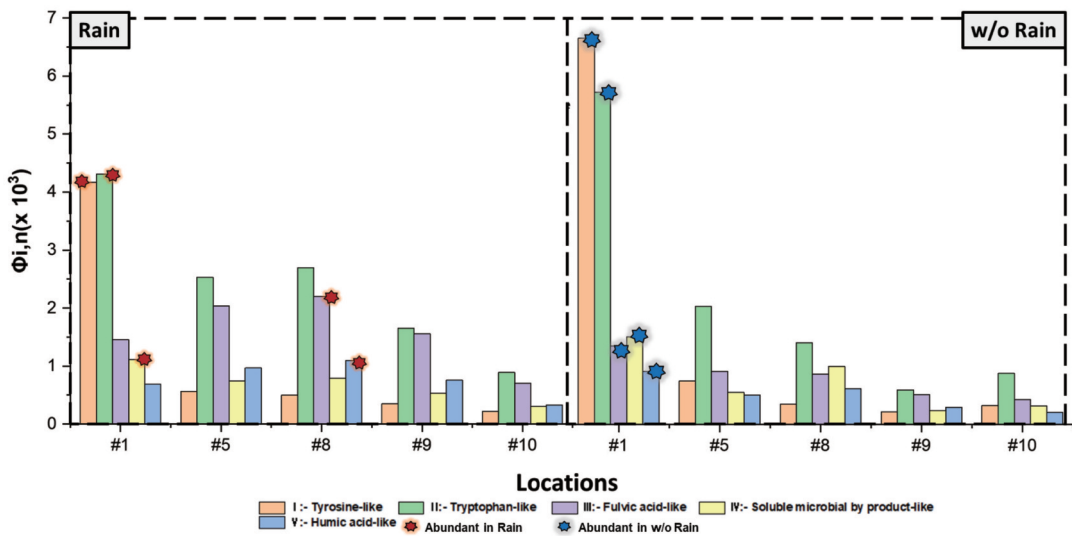


Figure 5. Component abundance from the DOM analysis across all locations during rain and non-rain.

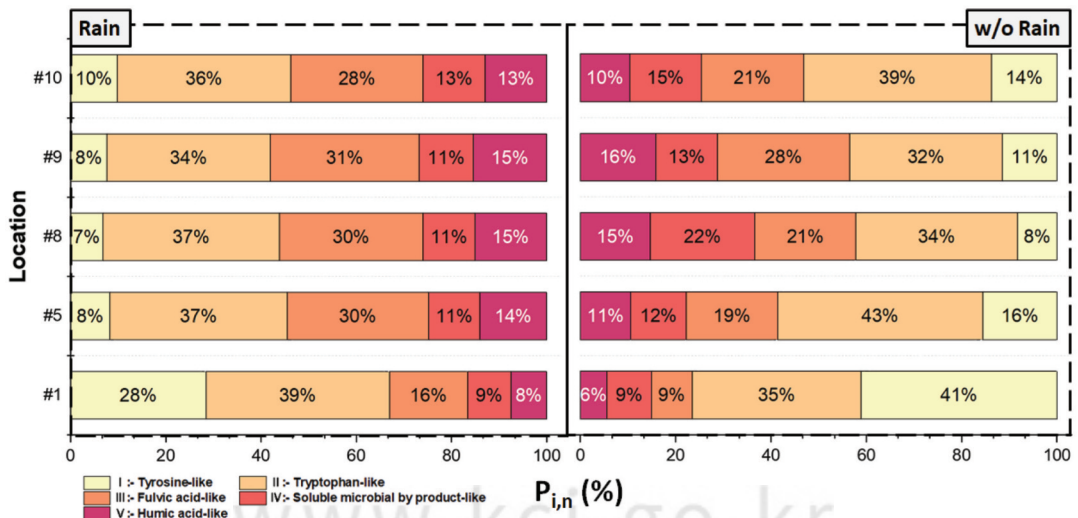


Figure 6. Percentage distributions of the components found from DOM analysis in different locations.

조류 및 박테리아의 생분해로부터 발생한 내부 생성 용존유기물의 함량이 클수록 높은 비중이 나타난다 (Coble 1996; Stedmon et al. 2003). Figure 6은 강우시 및 비강우시 각 지점별 형광광도의 구역별 비중을 나타낸 것이다. 강우시 모든 지점에서 II (Tryptophan-like)의 비중은 가장 높게 관찰되었다. 강우시 및 비강우시 차집시설#5, #8, #9, #10의 III (Fulvic acid-like) 구역의 비중은 차집시설#1에 비하여 대략 2배로 높게 조사되었다. 반대로, 차집시설 #1의 I(Tyrosine-like)구역은 다른 구역보다 높은 것으로 조사되었다. 차집시설#1에서 I, II, IV의 비중은 강우시 76.1%, 비강우시 89.9%로 가장 높은 것으로 분석되었다. 따라서, 불명수 중 단순한 방향족 및 미생물 부산물이 큰 비중을 차지하는 것으로, 차집시설에서 수질성상은 주로 불명수의 영향을 많이 받은 것으로 판단된다. 그러나, 강우시에는 I, II, IV의 비중이 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 우수유출수는 주변환경에서 유입되는 오염물질의 영향을 많이 받은 것으로 판단된다.

휴믹부분은 소수성 경향이 강하고, 카르복실릭과 페놀릭 부분을 가지는 휴믹산과 펠빅산을 포함한다. III구역의 경우 펠빅산 유사물질, V구역의 경우 휴믹

산(부식산)과 유사한 유기물을 나타내며, 산림, 토양, 동식물의 잔재 및 기타 퇴적물과 같은 외부생성 용존 유기물의 함량이 많을수록 III구역의 피크값이 높게 나타난다(Coble 1996; Stedmon et al. 2003). 비강우시 모든 조사지역에서 III 구역의 비중은 강우시에 비하여 8.9~13.9%로 감소되는 것으로 나타났으며, V구역은 비슷한 비중을 차지하였다. 따라서 강우로 인하여 차집시설에 외부로부터 유입되는 난분해성 휴믹계물질이 많아지는 것으로 판단할 수 있다.

4. 형광지표 분석결과

일반적으로, 형광지표 FI 값이 1.4 이하면 육상기원 시료로 토양유기물질(Soil Organic Matter, SOM) 생성에 기원을 둔 외부생성 용존 자연유기물질 성분이 많은 것으로 분석된다. 형광지표 FI값이 1.9 이상이면 휴믹화가 낮고, 내부기원 시료로 생물학적 기원을 가진 자체 생성 용존 자연유기물질이 많은 시료로 해석된다(McKnight et al. 2001). 생물학적 지표 BIX값이 1보다 크면 미생물에 기인한 용존유기물과 상응성이 높고, 0.8~1의 범위를 나타내면 내부생성 용존 자연유기물질 성분이 많고, 0.8 미만이면 외부 토양에서 기인한 용존유기물에 가깝다고 알려져

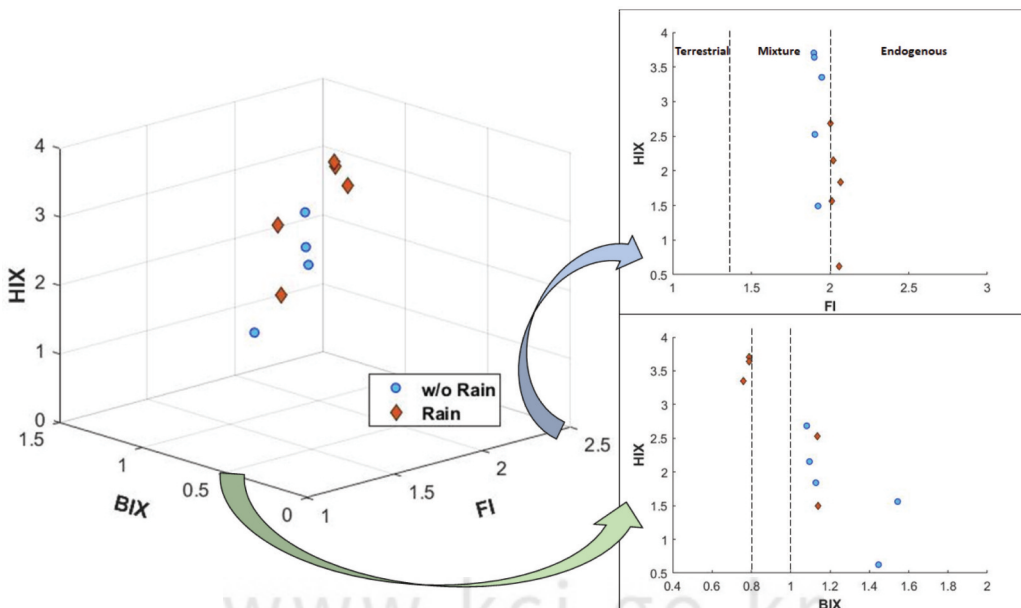


Figure 7. Distributions of the fluorescence characteristics (FI, BIX, and HIX) across all locations.

있다(Huguet et al, 2009). 휴믹지표 HIX값이 높을수록 외부로부터 유입된 토양유기물의 휴믹화 정도를 알려주는 인자로 활용할 수 있다. HIX값 10 이상은 휴믹화가 강하고 외부생성되는 유기물로 구성되며, 4 이하는 내부생성 기원, 휴믹화 진행 정도가 낮은 것으로 새로 생성된 유기물로 판단할 수 있다(Huguet et al, 2009).

모든 지점의 FI값은 강우시 1.90~1.95, 비강우시 2.00~2.07 범위로 나타났는데, 이는 외부생성보다 내부생성 기원에 높은 값을 보여 차집시설에서 휴믹화가 낮으며, 용존성 유기물은 미생물, 조류 및 박테리아에 의한 성분에서 유래되는 것으로 예측할 수 있다. 생물학적 지표 BIX의 분석결과는 비강우시 모든 지점은 1 이상으로 나타났는데, 이는 비강우시 차집시설에 수환경 내 서식 미생물의 활동이 활발하며, 용존유기물이 최근에 생긴 것으로 판단된다. 모든 조사지점의 휴믹지표 HIX 값은 4.0 이하로 낮게 조사되었으며, 강우시는 비강우시에 비하여 약간 높게 측정되었다. 따라서 모든 조사지점에서 용존성 유기물질은 주로 내부생성에서 기원되는 것이 검증되었다(Figure 7).

IV. 결론

본 연구는 비점오염 저감시설인 차집시설을 대상으로 다른 강우조건에 따라 우수유출수의 수질성상을 파악하고 용존성 오염물질의 기원을 파악하기 위한 목적으로 수행되었으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 강우량은 차집시설에서 우수유출수의 수질특성에 영향이 있는 것으로 판단되었다. 강우량과 pH, BOD의 상관관계는 정상관관계로 조사되었으며, 반대로 강우량과 EC, TN, TP의 상관관계는 역상관관계로 조사되었다.

2. 조사지점에서 비강우시에도 생활하수가 유입되고, 우수유출수의 수질에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 비강우시 BOD 농도가 강우시보다 다소 높게 조사되었으며, 이에 따라 하수 내에 플랑크톤 등 호기성 미생물 함량이 많은 것으로 판단되었다. 차집시설의 하수는 강우에 의해 희석되므로 강우시 우수

유출수의 BOD, TN, 농도가 낮아지는 것으로 분석되었다. TP 농도는 강우조건에 따라 뚜렷한 변화경향을 보이지 않은 것으로 판단되었다.

3. 차집시설에서 우수유출수의 용존성 유기물질은 주로 수환경 내에 서식하는 미생물, 조류 및 박테리아의 생분해로부터 유래된 내부생성 용존유기물질로 구성된 것으로 조사되었다. 강우로 인하여 일부 외부생성 용존유기물질은 우수유출수와 혼합되어 차집시설에 유입된 것으로 판단되며, 조사된 차집시설에서 우수유출수의 외부생성 용존유기물질의 비중이 높아지는 것으로 판단되었다.

4. 배수구역의 초기우수 수질오염농도와 용존유기물질은 주변지역 하수에 의한 외부영향을 많이 받는 것으로 조사된 바, 배수구역의 차집시설에 대한 하수와 우수를 분리·차집할 수 있는 정비·관리가 항시 필요하다. 특히, 초기우수의 용존성 유기물질의 특성은 비점오염시설의 유기물질 처리의 기초자료로 활용될 것으로 기대한다.

사사

본 연구는 경기녹색환경지원센터의 연구비지원(과제번호 21-05-01-30-33-2)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ministry of Environment. 2006. Water environment management plan.
- Ministry of Environment. 2014. Act on Water Quality and Aquatic Ecosystem Conservation.
- Jeon GW, Nam SY, Im YH, Jang SJ, Park HC. 2010. pH, EC and Anions Changes of Rainfall Component at the Suburban Pinus Forest in 2009. The Korean Forestry Society 2010(0): 352-353.
- Baker A, Inverarity R. 2004. Protein-like fluorescence intensity as a possible tool for determining river water quality. Hydrological Processes

- 18(15): 2927-2945. <https://doi.org/10.1002/hyp.5597>
- Brezonik PL, Stadelmann TH. 2002. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA. *Water Research* 36(7): 1743-1757. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00375-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00375-X)
- Chen W, Westerhoff P, Leenheer JA, Booksh K. 2003. Fluorescence Excitation-Emission Matrix Regional Integration to Quantify Spectra for Dissolved Organic Matter. *Environmental Science and Technology* 37(24): 5701-5710. <https://doi.org/10.1021/es034354c>
- Coble PG. 1996. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy. *Marine Chemistry* 51(4): 325-346.
- Hallberg M, Renman G, Byman L, Svenstam G, Norling M. 2014. Treatment of tunnel wash water and implications for its disposal. *Water Science and Technology* 69(10): 2029-2035. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.113>
- Huguet A, Vacher L, Relexans S, Saubusse S, Froidefond JM, Parlanti E. 2009. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary. *Organic Geochemistry* 40(6): 706-719.
- Kim G, Yur J, Kim J. 2007. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon city, Korea. *Journal of Environmental Management* 85(1): 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.07.009>
- McKnight DM, Boyer EW, Westerhoff PK, Doran PT, Kulbe T, Andersen DT. 2001. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity. *Limnology and Oceanography* 46(1): 38-48. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.1.0038>
- Ohno T, Amirbahman A, Bro R. 2008. Parallel factor analysis of excitation-emission matrix fluorescence spectra of water soluble soil organic matter as basis for the determination of conditional metal binding parameters. *Environmental Science and Technology* 42(1): 186-192. <https://doi.org/10.1021/es071855f>
- Stedmon CA, Markager S, Bro R. 2003. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy. *Marine Chemistry* 82(3): 239-254.
- Suárez J, Puertas J. 2005. Determination of COD, BOD, and suspended solids loads during combined sewer overflow (CSO) events in some combined catchments in Spain. *Ecological Engineering* 24(3): 199-217.
- Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, Steinweg B, Saccomandi F. 1999. Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying. *Chemosphere* 38(1): 45-50.