

팔당호와 팔당호 상류의 난분해성 유기물질 유출 특성 분석 및 상관성 분석

강채원 · 길경익[†]

서울과학기술대학교 건설시스템공학과

Analysis of Non-Biodegradable Organic Matter Leakage Characteristics and Correlation Analysis in Paldang Lake and its Upper Reaches

Chaewon Kang · Kyungik Gil[†]

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

(Received : 5 August 2023, Revised : 22 August 2023, Accepted : 24 August 2023)

요약

수도권에 일 약 8백만톤의 물을 취수하여 공급하는 팔당호는 수질보전정책 시행으로 BOD(Biochemical Oxygen Demand) 1.1mg/L를 달성하였으나 난분해성 물질을 포함하는 COD(Chemical Oxygen Demand) 항목은 점점 증가하는 양상을 보였다. 난분해성 유기물질의 상수원 유입은 잠재적인 BOD의 증가, 수도물의 냄새와 맛 유발, THM(Trihalomethane) 발생 증가, 조류 증식을 일으키며 유해 난분해성 미량오염물질이 잔류할 경우 수생 환경에서 내분비 교란과 항생제 내성과 같은 현상을 유발한다. 본 연구에서는 팔당호의 난분해성 유기물질 관리를 위해 팔당호와 팔당호 상류의 점 오염원과 비점오염원의 난분해성 유기물질 유출 농도를 파악하기 위한 모니터링을 실시하였다. 지역별 난분해성 유기물질 유출 농도를 비교하고 하수처리장에서의 제거율을 파악하였다. 또한 피어슨 상관성 분석 기법을 사용해 유기물질 지표와 선행건기일수, 선·선행건기일수간 상관성 분석을 실시하였다. 하천과 팔당호의 난분해성 유기물질 농도는 유사한 양상을 보였다. 하수처리장 유출수는 하천과 팔당호보다는 높은 농도를 보였으며, 유입수와 유출수 농도의 비교 결과 하수처리장에서 난분해성 유기물질 제거율은 65.73%였다. 난분해성 유기물질 유출 농도와 선행건기일수, 선·선행건기일수 사이에서는 유의미한 상관성이 나타나지 않았다. 이는 데이터 부족으로 판단되며 장기적인 모니터링으로 데이터 축적이 필요하다 사료 된다.

핵심어 : 난분해성 유기물질, 미량 오염 물질, TOC, 피어슨 상관성 분석, 팔당호

Abstract

Extracted from the metropolitan area, the Paldang Lake, which supplies approximately 8 million tons of water, has achieved a BOD (Biochemical Oxygen Demand) of 1.1 mg/L as a result of water quality preservation policies. However, concerning the COD (Chemical Oxygen Demand) component that encompasses refractory organic matter, there has been an observable upward trend in concentration. The introduction of refractory organic matter into the water source of Paldang Lake brings potential increments in BOD, generates off-putting tastes and odors in tap water, increases THM (Trihalomethane) formation, and triggers algae proliferation. Moreover, if residual hazardous refractory pollutants persist in aquatic environments, they may induce endocrine disruption and phenomena such as antibiotic resistance. In this study, a monitoring campaign was executed to discern the concentration of refractory organic matter emissions from point and non-point sources within Paldang Lake and its upstream region, with the aim of managing refractory organic matter in Paldang Lake. By comparing refractory organic matter emission concentrations across monitored areas, the elimination efficiency at wastewater treatment plants was assessed. Additionally, employing the Pearson correlation analysis technique, correlations among refractory organic matter indices, antecedent wet days, and antecedent dry days were explored. The concentrations of refractory organic matter in rivers and Paldang Lake exhibited a similar pattern. Wastewater treatment plant effluents exhibited higher concentrations compared to rivers and Paldang Lake. The assessment of refractory organic matter removal at wastewater

[†]To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology
E-mail : kgil@seoultech.ac.kr

• **Chaewon Kang** Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology / Graduate student (chaeoning0922@gmail.com)
• **Kyungik Gil** Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology / Professor (kgil@seoultech.ac.kr)

treatment plants indicated a removal efficiency of 65.73%. However, no significant correlation emerged between refractory organic matter emission concentration and antecedent wet days or priority antecedent dry days. This absence of correlation is attributed to data scarcity, underscoring the need for long-term monitoring and data accumulation.

Key words : Refractory Organic Matters, Micropollutant, Total organic carbon, Pearson correlation analysis, Paldang Lake

1. 서 론

팔당호는 국민 절반인 2500만 인구가 거주중인 수도권의 취수원으로 일 8백만톤의 물을 취수하여 공급한다(Yu et al., 2018). 팔당상수원의 수질보전을 위해 「팔당호 등 한강 수계 상수원 수질개선 특별종합대책」 등의 정부 정책을 추진하였다. 1997년부터 2012년까지 약 12조원의 예산을 투입하여 BOD 1.1mg/L를 달성하였으나 난분해성 물질을 포함하는 COD 항목은 1996년 2.8mg/L에서 2019년 3.9mg/L로 오히려 증가하는 추세를 보였다(Cho et al., 2019; GRI, 2020). 이는 팔당상수원 상류의 소규모 폐수배출시설의 난립과 11,000개가 넘어서는 축산농가, 강우 시 미처리 하수의 유입 등으로 유발된 현상으로 판단된다(GRI, 2020). 또한 산업화로 인해 난분해성 물질의 배출 종류와 배출 총량이 늘어나고 있다(Kim et al., 2006). 섬유산업, 플라스틱, 살충제, 제약산업 등의 산업폐수에는 방향족 화합물, 항생제, 살충제와 같은 난분해성 유기물질이 포함되어있다(Cao et al., 2021). 난분해성 유기물질의 증가는 상수원에 잠재적인 산소고갈과 수돗물에 냄새 및 맛을 유발하고, 난분해성 유기물질이 부식질일 경우 생분해성 유기물질보다 트리할로메탄(Trihalomethane, THM)을 2~3배 이상 생성하여 상수원의 위험이 된다(Han and Choi, 2011; Son et al., 2004). 상수원으로 사용되는 하천에 유입될 경우, 조류를 증식시키고 여과 공정에 악영향을 미치는 등 문제를 초래할 수 있다(Hur et al., 2006). 또한 가축 항생제와 같은 미량오염물질이자 난분해성 유기물질이 수생환경에 잔류하면 내분비 교란과 항생제 내성을 비롯한 현상을 유발한다(Luo et al., 2014). 이러한 난분해성 유기물질의 유입 경로는 외부 유입과 내부 생성으로 분류할 수 있다(Bahn, 2021; Kim et al., 2020). 외부 유입 경로로는 하수처리장 유출수와 같은 점 오염원과 축산 폐수 유출, (Kwon et al., 2002) 강우시 비점오염원의 탁수 유출등이 있으며(Joung et al., 2005) 내부 생성으로는 조류 증식과 조류의 유기물 분해 과정에서 난분해성 물질로의 유기물 전환 등이 있다(Hanamachi et al., 2008). 난분해성 유기물질의 관리를 위해 미국의 경우 「USGS Toxics」 프로그램으로 전국 수계에 대한 난분해성 미량오염물질의 배출원과 경로를 파악하는 연구를 수행하였다. 스위스 연방환경청(FOEN)은 하수처리장에서 발생하는 난분해성 미량오염물질의 현황을 분석하고 제거 효율을 분석하며 처리기술을 연구하는 「Strategie MicroPoll」 프로젝트를 수행하였다(Kim et al., 2013). 국내의 경우 2018년에 낙동강 수계의 상수원과 정수원 구간에서 난분해성 미량오

염물질의 거동 특성을 분석하는 연구와 한강수계에서 잠정 관리 유해물질의 실태를 조사하는 연구가 수행되었다. 하지만 취수원인 팔당호와 그 유입 하천에서 난분해성 유기물질의 구체적인 농도를 조사한 연구는 2011년에 수행되었으며, 연구의 현행화가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 팔당호의 난분해성 유기물질 농도와 팔당호 상류의 점 오염원과 비점오염원의 난분해성 유기물질 농도를 파악하기 위해 모니터링을 수행하였다. 모니터링은 팔당호와 팔당호 상류 유입 지천, 팔당호 상류 하수처리장의 유입부와 유출부에서 1년간 총 5회 진행되었다. 샘플의 총 유기탄소 TOC(Total Organic Carbon)와 용존성 유기탄소 DOC(Dissolved Organic Carbon)를 측정하였으며 난분해성 유기물질만의 농도를 파악하기 위해 총 난분해성 유기탄소인 R-TOC(Refractory-Total Organic Carbon)와 용존성 난분해성 유기탄소 R-DOC(Refractory-Dissolved Organic Carbon)를 측정하였다. 입자성 유기탄소인 POC(Particulate Organic Carbon)와 입자성 난분해성 유기탄소인 R-POC(Refractory-Particulate Organic Carbon), 생분해성 유기탄소 항목들은 분석한 데이터를 통해 산정하였다. 측정된 난분해성 유기물질의 농도로 팔당호와 팔당호 상류 점오염원과 비점오염원에서의 농도 특성을 분석하였다. 또한 난분해성 유기물질의 배출 점 오염원으로 판단되는 하수처리장의 유입수와 유출수 내 농도를 비교하여 제거 효율을 분석하였다. 비점오염원의 강우 유출 농도는 선행 건기일수가 큰 영향을 끼치므로(Lee and Lee, 2009) 피어슨 상관성 분석 기법을 사용해 팔당호 유역에서의 유기물질 농도와 선행 건기일수와 선행 강우일 기준 선행 건기일수(이하 선행 건기일수)간의 상관성을 파악하였다.

2. 연구방법

2.1 대상지역 및 모니터링 일정

팔당호와 팔당호 유입 지천, 유역 내 하수처리장의 유입

Table 1. Number of sampling.

Site	Date	Number of sampling
Paldang(3 site)	2022-10-11	18
	2022-12-05	18
river (9 site)	2023-03-13	18
STP influent (3 site)	2023-05-15	18
STP effluent (3 site)	2023-06-12	18

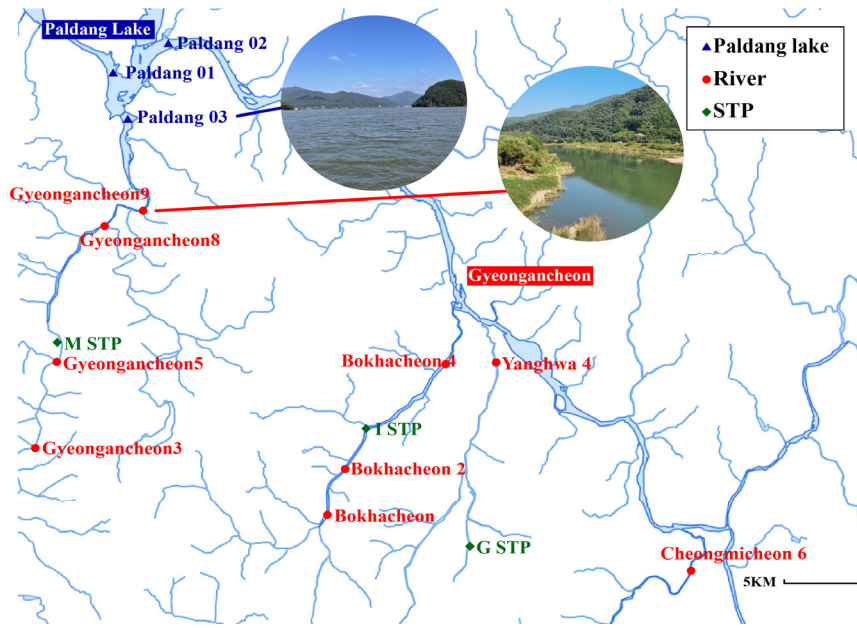


Fig. 1. Sampling location

부, 유출부의 난분해성 유기물질 농도를 파악하기 위해 모니터링 장소를 선정하였다. 팔당호는 한강으로 유출되는 팔당 01지점, 남한강에서 팔당호로 유입되는 팔당 02지점과 경안천에서 팔당호로 유입되는 팔당 03지점 총 세 지점을 선정하였다. 하천은 청미천, 양화천, 복하천, 경안천의 아홉 지점이 모니터링 되었다. 하수처리장은 M 하수처리장, I 하수처리장, G 하수처리장의 유입부와 유출부에서 모니터링을 진행하였다. 모든 모니터링 대상지는 국립환경연구원의 수질 측정망과 자료를 공유할 수 있도록 측정망의 지점과 동일한 위치로 선정되었다. 모니터링은 22년 10월, 22년 12월, 23년 3월, 23년 5월, 23년 6월로 총 5회 시행되었으며 모니터링은 비 강우시에만 시행되었다. Fig. 1에 모니터링 장소 총 18곳의 위치를 나타내었으며, 1년간 5회 진행한 샘플링 일자는 Table 1.에 정리하였다.

2.2 시료 분석 방법

본 연구에서 측정, 산정하는 항목은 유기물질 항목인 TOC, DOC, POC, 난분해성 유기물질 항목인 R-TOC, R-DOC, R-POC, 생분해성 유기물질 항목인 L-TOC

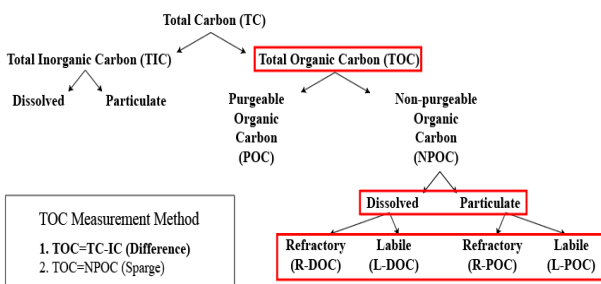


Fig. 2. Hierarchy of carbon types and TOC measurement methods

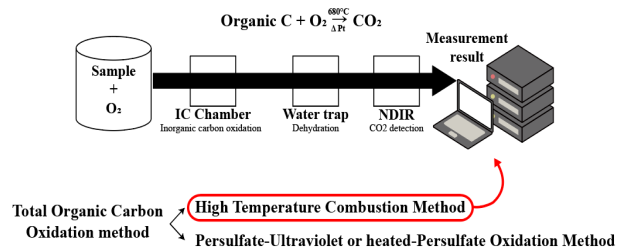


Fig. 3. High temperature combustion method process diagram

(Labile-Total Organic Carbon), L-DOC(Labile-Dissolved Organic Carbon), L-POC(Labile-Particulate Organic Carbon)로 Fig. 2의 탄소 유형 분류도에 표기하였다. 이 중 TOC, DOC, R-TOC, R-DOC를 측정하였으며, POC, R-POC, L-TOC, L-DOC, L-POC는 측정된 값을 토대로 산정하였다. 채취한 시료를 즉시 실험실로 운반하여 TOC와 DOC를 측정하였다. TOC 항목은 총 탄소인 TC(Total Carbon)와 총 무기 탄소인 TIC(Total Inorganic Carbon)를 측정하고 TC에서 TIC 값을 제하여 산정하였다 (Doležal and Tomić, 2003). Fig. 3과 같이 무기탄소 산화 방법으로는 고온연소산화법과 습식산화법이 존재하며 농도가 높으며 다량의 부유물질을 함유한 시료도 측정이 가능한 고온연소산화법을 사용하였다. 용존성 유기탄소인 DOC와 입자성 유기탄소인 POC는 0.45 μm GF/C 필터 여과지를 기준으로 구분하며, 여과시 여과지를 통과한 것을 DOC, 여과지 위에 잔류한 것을 POC로 분류한다. 따라서 DOC는 시료를 500°C로 선행 건조시킨 0.45 μm GF/C 필터 여과지(Whatman Westchester, PA)에 여과한 후 여과지를 통과한 시료를 총 유기탄소 분석기(elementar/TOC ANALYZER vario TOC cube)를 이용하여 측정한다. 입

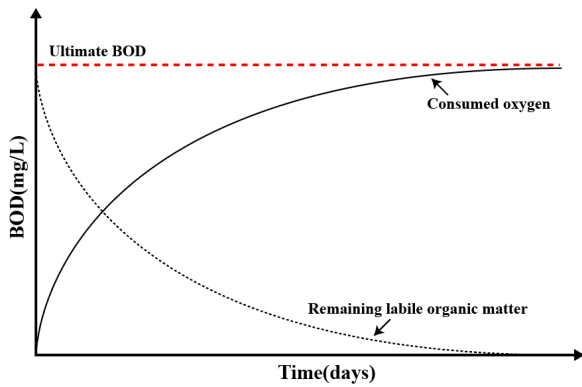


Fig. 4. Relationship of BOD and organic matter

자성 유기탄소인 POC는 TOC에서 DOC의 값을 제외하여 산정하였다. TOC와 DOC의 값은 시료당 3회 측정 후 측정값의 평균으로 산정하였다. 난분해성 항목인 R-TOC와 R-DOC 측정 전 시료에 난분해성 물질만을 남기는 전처리가 필요하다.(Kim and Gil, 2011) 시료를 28일간 20℃의 암실 환경에서 생분해 과정을 거치면 Fig. 4와 같이 생분해성 유기물질은 대부분 분해되어 사라지고 난분해성 유기물질만이 잔류하게 된다(Servais et al., 1999). 생분해성 유기물질을 제거하고 난분해성 유기물질만을 남긴 시료를 TOC, DOC와 동일한 방법으로 측정하여 R-TOC, R-DOC를 측정, R-POC를 산정하였다. L-TOC, L-DOC, L-POC는 R-TOC, R-DOC, R-POC를 TOC, DOC, POC에서 제하는 방식으로 산정하였다.

2.3 피어슨 상관성 분석

피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient, PCC)는 변수간 형성된 선형의 상관관계를 계량화하여 표현한 수치이며 두 변수의 공분산을 각 변수의 표준편차의 곱으로 나눈 값이다. 본 연구에서는 유기물질 항목들간의 상관관계와 유기물질 항목과 건기일수 간의 상관관계를 분석하기 위해 피어슨 상관성 분석 기법을 사용하였다. 두 변수의 피어슨 상관계수가 양수라면 양적 선형 관계를, 음수라면 음적 선형 관계를 가지 0이라면 두 변수는 선형의 상관관계가 아니라는 것을 의미한다. 두 변수 (x, y)간의 피어슨 상관계수(r)는 다음 식으로 계산할 수 있다. (Lee et al., 2021; Cha and Kim, 2018)

Table 2. Relationship between two variables according to Pearson correlation coefficient

Pearson correlation coefficient (r)	relationship
-1.0 ~ -0.7	a strong negative linear relationship
-0.7 ~ -0.3	a distinct negative linear relationship
-0.3 ~ -0.1	a weak negative linear relationship
-0.1 ~ +0.1	nearly negligible linear relationships
+0.1 ~ +0.3	a weak quantitative linear relationship
+0.3 ~ +0.7	a distinct quantitative linear relationship
+0.7 ~ +1.0	a strong quantitative linear relationship

$$r_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

- r = 피어슨 상관계수
- x_i = x 변수의 값
- \bar{x} = x 변수의 평균
- y_i = y 변수의 값
- \bar{y} = y 변수의 평균

피어슨 상관성 계수에 따른 두 변수간의 관계는 Table 2.에 정리되었다.

3. 연구결과

3.1 장소별 TOC 기반 유기물질 유출 농도 특성 분석

팔당호와 한강수계의 하천, 그리고 한강 유역의 하수처리장 유입수와 유출수 내 난분해성 유기물질 농도로 유출 특성을 분석하였다. 지점 특성에 따라 18개의 지점을 하천, 팔당호, 하수처리장 유입수, 하수처리장 유출수로 분류하였다. 계절별 영향을 고려하지 않고 장소별 특성만을 분석하기 위해 약 1년간 총 5회 진행된 샘플링의 데이터를 평균하여 Table 3에 정리하였으며 지점의 특성을 비교하였다. River은 하천지점, Paldang은 팔당호 지점, STP INF은 하

Table 3. Average concentrations of organic matters at the monitoring sites classified by site characteristics

	TOC (mg/L)	DOC (mg/L)	POC (mg/L)	R-TOC (mg/L)	R-DOC (mg/L)	R-POC (mg/L)	L-TOC (mg/L)	L-DOC (mg/L)	L-POC (mg/L)
River	5,409	4,314	1,095	4,774	3,889	0,878	0,635	0,425	0,217
Paldang	4,647	3,297	1,350	3,584	2,949	0,635	1,064	0,349	0,715
STP INF	64,980	40,515	24,466	17,343	13,610	3,733	47,637	26,905	20,733
STP EFF	8,733	6,351	2,382	5,944	4,996	0,948	2,789	1,355	1,434

수처리장 유입수(Sewage treatment plant influent), STP EFF는 하수처리장 유출수(Sewage treatment plant effluent)를 일컫는다. 하천 지점, 팔당호 지점, 하수처리장 유입수와 하수처리장 유출수 지점의 유기물질 농도와, 유기물질 농도 중 난분해성 유기물질 농도가 차지하는 비율을 Fig. 5에 나타내었다.

하천의 TOC는 평균 5.409mg/L이며 DOC는 평균 4.313mg/L, POC는 1.095mg/L로, 하천에 존재하는 TOC의 80%가량이 용존 형태를 띠는 것으로 나타났다. R-TOC는 4.774mg/L이며 TOC의 88.2%가 난분해성 유기물질로 존재했다. 팔당호의 TOC는 평균 4.647mg/L이고 DOC는 3.297mg/L, POC는 1.350mg/L로 팔당호에 존재하는 TOC는 70.94%가 DOC의 형태로 존재했다. 팔당호의 R-TOC는 3.584mg/L로 TOC중 77.12%가 난분해성이었다. 하천과 팔당호는 TOC와 R-TOC의 상당량이 용존 형태로 존재한다는 점에서 비슷한 양상을 보였다.

하수처리장 유입수는 TOC농도가 평균 64.98mg/L로 DOC 40.515mg/L, POC는 24.47mg/L로 다른 지점들보다 높은 농도로 나타났다. 또한 TOC중 DOC가 차지하는 비율이 62.35%로 네 지점들 중 제일 낮은 값을 보였다. 하수처리장의 R-TOC는 17.343mg/L TOC중 26.69%가 난분해성으로 나타났다. 하수처리장 유출수는 TOC 농도가 평균 8.73mg/L이었으며, DOC는 6.351mg/L, POC는 2.382mg/L로 나타났다. R-TOC는 5.944mg/L였으며, 하수처리장 유출수의 TOC중 68.064mg/L가 난분해성인 것으로 나타났다. 하수처리장 유입수에 비해 하수처리장 유출수에서는 전체 TOC중 R-TOC가 차지하는 비율이 높게 나타났는데, 하수처리장에 유입된 생분해성 유기물질들은 하수처리 공정에 의해 사용되고 제거되었기 때문에 판단된다. 또한 유출수에서 발견되는 SS는 대부분이 생물학적으로 분해가 용이치 않은 미생물들로 이루어졌기 때문에 유입수에 비해 유출수의 R-TOC의 비율이 높은 것으로 보인다(Dignac et al., 2000)

3.2 하수처리장에서의 TOC기반 유기물질 제거율 비교

Fig. 6는 하수처리장 유출수와 유입수의 농도를 비교하여 TOC 기반 유기물질 지표 별 제거율을 그래프로 나타낸 것이다. 유입 TOC 농도와 유출 TOC 농도를 비교하였을 때 TOC는 86.56%가량 제거되었다. TOC중 생분해성 TOC인 L-TOC는 94.15% 제거되었으며, 난분해성 TOC인 R-TOC는 65.73% 제거되었다. L-TOC중 L-DOC는 제거율이 94.96%, L-POC는 93.08%로 L-DOC의 제거율이 근소하게 더 높았는데, 하수처리공정에 사용되는 미생물이 사용하기 편한 상태로 존재할 경우 유기물질 제거가 더 용이하다는 것을 확인 가능하다. 반면 R-TOC중 R-DOC는 63.29%, R-POC는 74.60%로 R-POC의 제거율이 더 높았다. 난분해성 유기물질은 하수처리 공정에서 소비되기 힘들며, 침전 등의 물리적 기작으로 용존된 형태보다는 입자 형태 난분해성 유기물질이 더 많이 제거된 것으로 판단된다.

3.3 TOC 기반 유기물질 항목 간 상관관계

샘플링 지역 별 TOC기반 유기물질 항목, 그리고 선행건기일수와 선·선행건기일수간의 농도 상관관계를 파악하기 위해 Pythom의 seaborn 라이브러리를 사용하여 피어슨 상

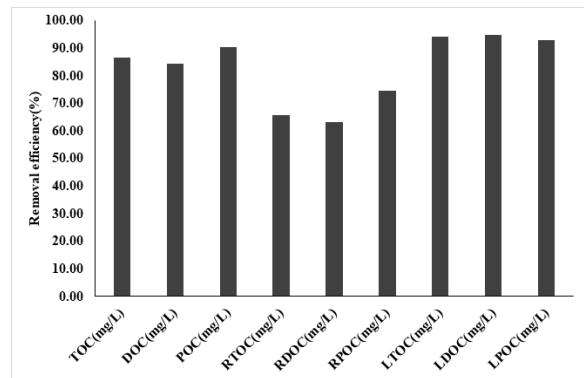
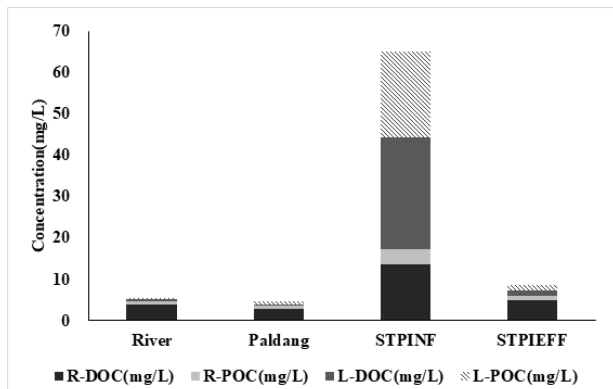
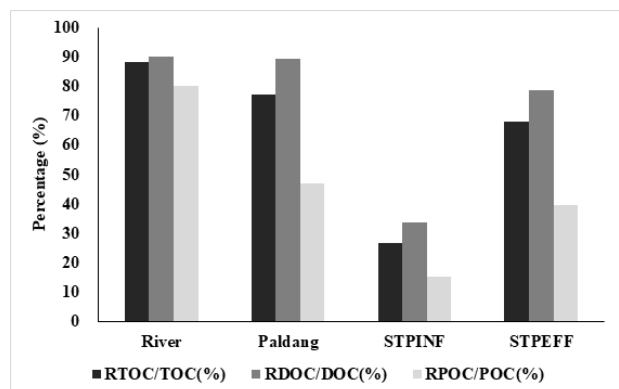


Fig. 6. Removing efficiency of organic matters from STP



(a) Concentration of organic matters



(b) Percentage of the concentration of refractory organic matters in the total concentration of organic matters

Fig. 5. Concentration of organic matters and Percentage of the concentration of refractory organic matters by monitoring site classification

관성 분석을 진행했으며 그 결과를 대소에 따라 컬러와 숫자로 표현해 Fig. 7에 정리하였다. 하천에서 R-TOC와 가장 큰 상관관계를 보이는 지표는 TOC($r=0.96$), DOC ($r=0.91$), R-DOC($r=0.91$), POC($r=0.74$), R-POC($r=0.74$)순으로 나타났으며, 입자성 유기물질보다는 용존성 유기물질의 농도가 더 큰 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 팔당호에서 R-TOC와 큰 상관관계를 보이는 지표는 R-DOC ($r=0.83$), R-POC($r=0.70$), DOC($r=0.65$), TOC ($r=0.63$)으로 나타났다. 하수처리장 유입수에서는 R-DOC ($r=0.93$), R-POC($r=0.67$), DOC($r=0.48$) 순으로 R-TOC와 상관관계가 큰 것으로 나타났으며, 하수처리장 유출수에서는 R-DOC ($r=0.85$), DOC($r=0.55$), TOC($r=0.47$) 순으로 R-TOC와 상관관계가 큰 것으로 나타났다. 모든 지점에서 R-TOC와 상관관계가 큰 난분해성 지표는 R-DOC로 나타났다. 난분해성 지표가 아닌 것 중에서는 DOC가 R-TOC와 대체로 큰 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 난분해성 유기물질은 28일간의 생분해 과정 후 분석 가능하여 측정에 오랜 시간이 소요되지만, R-TOC 측정 전 R-TOC와 상관성이 큰 DOC를 먼저 측정하여 R-TOC 농도의 대소를 미리 유추하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

3.4 TOC 기반 유기물질 항목과 선행 건기일수, 선·선행 건기일수 간 상관관계

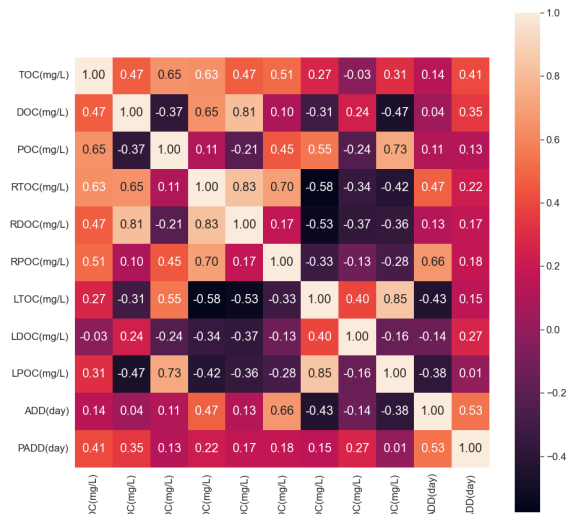
본 연구에서는 TOC기반 난분해성 유기물질과 선행 건기일수, 선·선행 건기일수와의 상관성을 파악하기 위해 피어슨 상관성 분석 기법을 사용하였다. Table 4 에 모니터링 시행일의 선행건기일수와 선·선행 건기일수를 정리하였다. 선행 건기일수는 강우유출수에서 오염물질의 농도에 큰 영향을 끼치는 지표이다. 또한 선행 강우일수가 동일할 시 선행 강우일 기준 선행 건기일수는 어떠한 상관성이 있을지 분석하기 위해 선·선행 건기일수를 분석에 도입하였다.

하천, 팔당호, 하수처리장 유입수, 하수처리장 유출수 모두 일관성있는 상관성을 발견하지 못했다. 하지만 선행건기일수가 동일하지만 선·선행건기일수가 다른 경우 다른 유출 형태를 보인 사례가 존재했다. 하천 중 경안천 지역의 모니터링 차수 별 농도를 정리한 Fig. 8의 그래프를 보면 2022년 10월 11일, 2023년 03월 13일, 2023년 06월 12일의 경우 같은 선행 건기일수를 가지고 있지만 전혀 다른 유출 양상을 보였다. 이와 같은 사례의 원인 규명을 위해 선·선행

Table 4. Antecedent dry day and prior antecedent dry day of monitoring date

Monitoring date	Antecedent dry day (day)	Recent rainfall	Prior antecedent dry day (day)
2022-10-11	1	2022-10-10	6
2022-12-05	6	2022-11-29	14
2023-03-13	1	2023-03-12	3
2023-05-15	9	2023-05-06	6
2023-06-12	1	2023-06-11	2

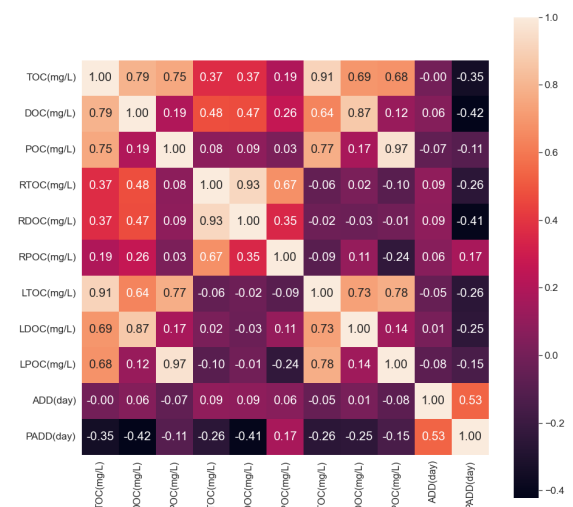
건기일수, 강우량, 강우강도, 유량, 유역면적 등의 변수를 함께 고려하는 동시에 지속적인 모니터링과 연구가 필요할 것으로 판단된다.



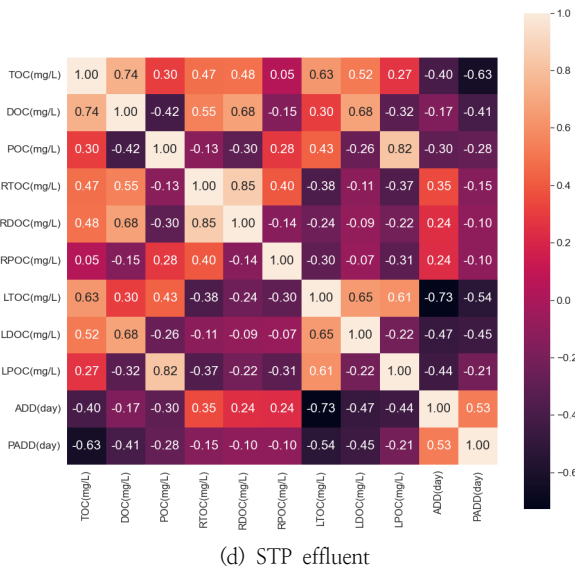
(a) River



(b) Paldang



(c) STP Influent



(d) STP effluent
Fig. 7. Pearson Correlation Analysis Results

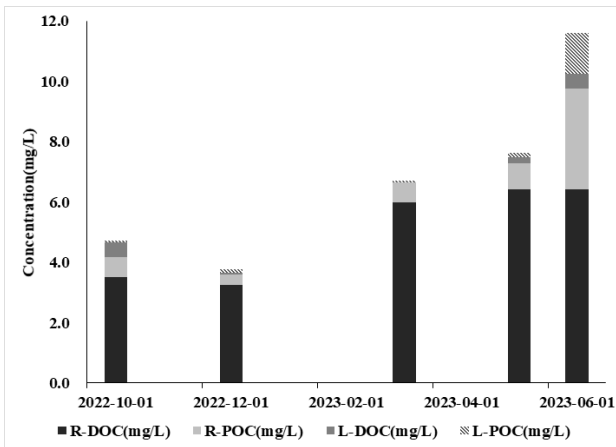


Fig. 8. Organic matter concentrations in the Gyeongan river by sampling period

3.5 결과 분석

R-TOC 농도의 경우 하수처리장의 유입수에서 17.343mg/L로 가장 높았고, 하수처리장 유출수에서 5.944mg/L로 두 번째로 높게 나타났으며, 비점오염원의 유입 경로인 하천에서는 4.774mg/L로 낮은 값을 보여 점오염원인 하수처리장 유출수의 농도 부하가 가장 높게 나타났다. 하지만 팔당호로 유입되는 난분해성 유기물질의 총량에 기여하는 정도를 파악하기 위해서는 각 지점의 유량 또한 고려하여 분석해야 할 것으로 보였다.

하수처리장에서 R-TOC는 5.944mg/L 농도로 유출되었지만, 하수처리장 내에서 65.73% 제거되었다. 따라서 하수처리장은 난분해성 유기물질의 점 오염원이지만 난분해성 유기물질을 65.73% 제거하는 처리시설로도 작동함을 파악할 수 있었다. 향후 하수처리장에서의 난분해성 물질의 거동특성을 규명하기 위해서는 모니터링 대상지인 세 하수처리장의 공법에 따른 난분해성 유기물질을 제거양상 파악을

위한 지속적인 모니터링연구가 필요할 것이다.

피어슨 상관성 분석 결과 측정에 28일이 소요되는 R-TOC측정 전에 R-TOC와 상관성이 큰 DOC를 먼저 측정하여 대상지의 난분해성 유기물질 총량의 대소를 파악하는 것이 난분해성 유기물질 저감을 위한 빠른 조치에 도움이 될 것으로 보였다. 또한 비점오염원에서의 난분해성 유기물질 거동과 큰 관련이 있는 선행건기일수, 선·선행건기일수와의 상관성 분석 결과 유의미한 상관성이 나타나지 않았다. 이것은 현재로서는 다양한 데이터의 부족으로 판단되었다. 난분해성 물질의 거동 분석과 관련해 선행건기일수와 선·선행건기일수에 따른 해석은 독창적인 방법으로 볼 수 있는데, 이를 위해서는 장기적인 모니터링에 의한 데이터의 축적이 선행되어야 할 것으로 사료되었다.

4. 결론

- 하천, 팔당호는 유기물질과 난분해성 유기물질 지표에서 거의 비슷한 양상을 보였다. 하수처리장 유입수는 생분해성 유기물질 비율이 높았고, 하수처리장 유출수에서는 난분해성 유기물질 비율이 높았는데 유출 SS의 대부분이 쉽게 분해되지 않는 미생물이기 때문에 판단된다. 농도 부하는 하수처리장 유입수와 유출수에서 상대적으로 높게 나타났는데 팔당호로 유입되는 난분해성 유기물질의 총량에 대한 기여도를 파악하려면 각 지점의 유량 또한 고려해 분석해야 할 것으로 보였다.
- 하수처리 공정에서 L-DOC는 94.96%가 제거되었으며, R-DOC는 63.29%만이 제거되었다. L-DOC는 하수처리 공정에 사용되는 미생물이 소비하기 용이한 형태로 존재하여 제거율이 높았으며 R-DOC는 미생물에게 소비되지 않고 침전 등의 기작으로도 제거가 어려워 제거 효율이 상대적으로 낮게 나타났다. R-TOC는 하수처리장 내에서 65.73%가 제거되었으며 난분해성 유기물질 제거에 유리한 공법 파악을 위해 세 하수처리장의 공법에 따른 제거 양상 분석이 필요하다.
- 피어슨 상관성 분석 결과 DOC는 하천, 팔당호, 하수처리장 유입수와 유출수 모두에서 R-TOC와 뚜렷한 양적 선행관계 혹은 강한 양적 선행 관계를 가졌으며다. 분석에 오랜 기간이 걸리는 R-TOC 분석 전 DOC를 분석하여 R-TOC값의 대소를 유추하는 것이 난분해성 유기물질 저감을 위한 빠른 조치에 유효할 것으로 보였다.
- 유기물질 지표 농도와 선행건기일수, 선·선행 건기일수간의 뚜렷한 상관성은 발견되지 않았다. 이것은 데이터 부족으로 인한 결과로 판단되었으며, 장기적인 모니터링으로 데이터의 축적이 선행되어야 할 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 한강수계관리위원회 환경기초사업의 지원을

받아 수행되었습니다.

References

- APHA, AWWA and WEF (1998). Standard Method for Examination of Water and Wastewater, 20th edition Washington D.C., U.S.A
- Yu, S, Lee, E, Park, M, Kim, K, Im, J, Im, J, Ryu, I, Choi, H, Byeon, M, Noh, H (2018). Changes in the Water Environment Based on the Statistical Data in the Lake Paldang, J. Korean Soc. Water Environ, 34(6), pp. 688–702. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.15681/KSWE.2018.34.6.688>]
- Cho, H, Son, J, Kim, G, Shin, M, Cho, Y, Shin, K, Noh, H (2019). Non-parametric Trend Analysis Using Long-term Monitoring Data of Water Quality in Paldang Lake, J EIA, 28(2), pp. 83–100. [Korean Literature][DOI <https://doi.org/10.14249/eia.2019.28.2.83>]
- Gyeonggi Research Institute (GRI) (2020). Improving the Safety of Tap Water in Gyeonggi-do, 99-3-6, Gyeonggi Research Institute, [Korean Literature]
- Cao, Q, Sang, L, Tu, J, Xiao, Y, Liu, N, Wu, L, Zhang, J (2021). Rapid degradation of refractory organic pollutants by continuous ozonation in a micro-packed bed reactor, *emosphere*, 270, 128621. [DOI <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128621>]
- Kim, J, Shin, M, Jang, C, Jung, S, Kim, B (2006). Comparison of TOC and DOC Distribution and the Oxidation Efficiency of BOD and COD in Several Reservoirs and Rivers in the Han River System, J. Korean Soc. Water Environ, 23(1), pp. 72–80. [Korean Literature]
- Son, H, Jeong, C, Kang, L (2004). The Relationship between Disinfection By-Product Formation and Characteristics of Natural Organic Matter in the Raw Water for Drinking Water, Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 26(4), pp. 457–466.[Korean Literature]Han, D, Choi, J (2011). Selection of the Optimum Organic Matter Index for Surface Water Quality Management, Journal of Environmental Policy, 10(4), pp. 61–80. [Korean Literature][DOI <http://dx.doi.org/10.17330/joep.10.4.201112.61>]
- Hur, J, Shin, J, Park, S (2006). Characterizing Fluorescence Properties of Dissolved Organic Matter for Water Quality Management of Rivers and Lakes. J. of Korean Society of Environmental Engineers, 25(4), pp.940–948. [Korean Literature]
- Luo, Y, Guo, W, Ngo, H, Nghiem, L, Hai, F, Zhang, J, Liang, S, Wang, X (2014). A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. *Science of the total environment*, 473, 619–641. [DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.065>]
- Bahn, G, Cho, M, Kang, J, Kim, L (2021). Study on the Selecting of Suitable Sites for Integrated Riparian Eco-belts Connecting Dam Floodplains and Riparian Zone - Case Study of Daecheong Reservoir in Geum-river Basin - , Journal of Wetlands Research, 23(4), pp. 327–341.[Korean Literature][DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2021.23.4.327>]
- Kim, S, Cho, Y, Chae, M, Kil, G, Seok, K (2020). Characteristics of organic matters in small streams into the Daecheong Reservoir. *Journal of Environmental Analysis, Health and Toxicology*, 23(3), pp. 155–164. [Korean Literature][DOI <https://doi.org/10.36278/jeaht.23.3.155>]
- Kwon, Y, Han, S, Lee, J (2002). Pollution Loadings in DaeChungHo Watershed, J.KSWW, pp. 555–556..[Korean Literature]
- Hanamachi, Y, Hama, T, Yanai, T (2008). Decomposition process of organic matter derived from freshwater phytoplankton. *Limnology*, 9, pp. 57–69. [DOI <https://doi.org/10.1007/s10201-007-0232-2>]
- Kim, H, Hong, Y, An, J (2013). A Study on the Management of Micropollutants in Water System Considering Climate Change and other Potential Effects, *Korean Chem. Eng. Res*, 51(6), pp. 645–654. [Korean Literature][DOI <https://doi.org/10.9713/kcer.2013.51.6.645>]
- Lee, H, Lee, S (2009). Runoff Characteristics of Stormwater in Small City Urban Area, J. of KSEE, 31(3), pp. 193–202, [Korean Literature]
- Heo, S, Im, J, Gil, K(2017). Runoff Characteristics of Refractory Organic Matters from Han River Basin during Dry Days, *Journal of Wetlands Research*, 19(3), pp. 353–358. [Korean Literature][DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.3.353>]
- Doležal, D, Tomić, T (2003). Validation Procedures for Determination of Total Organic Carbon in Water. In XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium, Dubrovnik, Croatia
- Kim, T, Gil, K (2011). Runoff Characteristics of Refractory Organic Matters from Kyongan River Watershed during Rainfall Event and Dry Season , J. Korean Soc. Water Environ.27(4), pp. 397–404. [Korean Literature]
- Servais, P, Garnier, J, Demarteau, N, Brion, N, Billen, G (1999). Supply of organic matter and bacteria to aquatic ecosystems through waste water effluents, *Water Research*, 33(16), pp. 3521–3531. [DOI [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00056-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00056-1)]
- Wetzel, RG (1984). *Limnology: Lake and river ecosystems*, Academic Press, San Diego, U.S.A
- Lee, D, Lee, M, Lee, J, Park, H, Jun, H, Yoo, S (2021).

- Real-time adaptive model training technique using Pearson correlation coefficient 48(2) pp. 1536–1538.[Korean Literature]
- Cha, J and Kim, J (2018). Analysis of fine dust correlation between air quality and meteorological factors using SPSS, *Journal of the Korea Institute of Information & Communication Engineering*, 22(5), pp. 722–727. [Korean Literature]
- Dignac, M, Derenne, S, Ginestet, P, Bruchet, A, Knicker, H, Largeau, C (2000). Determination of structure and origin of refractory organic matter in bio-epurated wastewater via spectroscopic methods. Comparison of conventional and ozonation treatments. *Environmental science & technology*, 34(16), pp. 3389–3394. [DOI <https://doi.org/10.1021/es9913838>]