



물벼룩을 이용한 공공하수처리시설 공정별 생태독성 특성 연구

A study on ecotoxicity characteristics of public sewage treatment plant process using *Daphnia magna*

손경록^{1,*} · 김하람¹ · 박성룡¹ · 조광운¹ · 김연희¹ · 김진태² · 고미숙² · 문경란³ · 서광엽¹ · 박병훈¹
Gyeongrok Son^{1,*} · Haram Kim¹ · Sungryong Park¹ · Gwangwoon Cho¹ · Yunhee Kim¹ · Jintae Kim² ·
Misook Goh² · Kyoungan Moon³ · Gwangyeob Seo¹ · Byunghoon Park¹

¹광주광역시 보건환경연구원 환경연구부

²광주환경공단

³조선이공대학교 생명환경화공과

¹Department of Environmental Research, Health & Environment Research Institute of Gwangju

²Environmental Corporation of Gwangju

³Department of Bioenvironmental & Chemical Engineering, Chosun College of Science and Technology

pp. 141-153

pp. 155-164

pp. 165-175

Received 18 March 2024, revised 29 April 2024, accepted 2 May 2024.

*Corresponding author: Gyeongrok Son (E-mail: greens24@koreal.kr; Fax. 062-613-7619; Tel. 062-613-6151)

1 손경록 (연구사) / Gyeongrok Son (Researcher)

광주광역시 서구 무진대로 584, 61954
584, Mujin-daero, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

2 김하람 (연구사) / Haram Kim (Researcher)

광주광역시 서구 무진대로 584, 61954
584, Mujin-daero, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

3 박성룡 (연구사) / Sungryong Park (Researcher)

광주광역시 서구 무진대로 584, 61954
584, Mujin-daero, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

4 조광운 (과장) / Gwangwoon Cho (Chief)

광주광역시 서구 무진대로 584, 61954
584, Mujin-daero, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

5 김연희 (과장) / Yunhee Kim (Chief)

광주광역시 서구 무진대로 584, 61954
584, Mujin-daero, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

6 김진태 (과장) / Jintae Kim (Manager)

광주광역시 서구 천변우하로 79, 61954
79, Cheonbyeonuha-ro, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

7 고미숙 (차장) / Misook Goh (Assistant General Manager)

광주광역시 서구 천변우하로 79, 61954
79, Cheonbyeonuha-ro, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

8 문경란 (교수) / Kyoungan Moon (Professor)

광주광역시 동구 조선이공대길 11, 61453
11, Chosunigongdae-gil, Dong-gu, Gwangju 61453, Republic of Korea

9 서광엽 (부장) / Gwangyeob Seo (Head)

광주광역시 서구 무진대로 584, 61954
584, Mujin-daero, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

10 박병훈 (과장) / Byunghoon Park (Chief)

광주광역시 서구 무진대로 584, 61954
584, Mujin-daero, Seo-gu, Gwangju 61954, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the correlation between ecotoxicity and water quality items using *Daphnia magna* in public sewage treatment plant process and to obtain operational data to control ecotoxicity through research on removal efficiency. The average value of ecotoxicity was 1.39 TU in the influent, 1.50 TU in the grit chamber, and 0.84 TU in the primary settling tank and it was found that most organic matters, nitrogen, and phosphorus were removed through biological treatment in the bioreactor. Using Pearson's correlation analysis, the positive correlation was confirmed in the order of ecotoxicity and water quality items TOC, BOD, T-N, NH₃-N, SS, EC, and Cu. As a result of conducting a multilinear regression analysis with items representing positive correlation as independent variables, the regression model was found to be statistically significant, and the explanatory power of the regression model was about 81.6%. TOC was found to have a significant effect on ecotoxicity with $B=0.009$ ($p<.001$) and Cu with $B=16.670$ ($p<.001$), and since the B sign is positive (+), an increase of 1 in TOC increases the value of ecotoxicity by 0.009 and an increase in Cu by 1 increases the value of ecotoxicity by 16.670. TOC ($\beta=0.789$, $p<.001$) and Cu ($\beta=0.209$, $p<.001$) were found to have a significant positive effect on ecotoxicity. TOC and Cu have a great effect on ecotoxicity in the sewage treatment plant process, and it is judged that TOC and Cu should be considered preferentially and controlled in order to efficiently control ecotoxicity.

Key words: Correlation analysis, *Daphnia magna*, Ecotoxicity, Multiple linear regression analysis, Public sewage treatment plant

주제어: 상관관계 분석, *Daphnia magna*, 생태독성, 다중선형회귀분석, 공공하수처리시설

1. 서 론

생활하수는 사람의 생활이나 경제활동으로 인하여 액체성 또는 고체성의 물질이 섞여 오염된 물 등을 말하며, 발생한 생활하수는 배수설비와 하수관로를 통해 하수처리시설로 수집·이송되어, 물리·화학·생물학적 처리방법으로 유기물 및 영양염류 등 오염물질의 제거가 이루어진다 (MOE, 2023). 우리나라에서 생활하수는 공공하수도과 개인하수도로 나누어 관리되고 있으며, 정화조로 대표되는 개인하수처리시설은 하수처리구역 내에서 공공하수처리시설에 연계하여 처리하고, 일반적으로는 분뇨처리시설로 위탁하여 처리한다. 2022년 기준 우리나라 분뇨처리시설 188개소 중 79%에 달하는 149개소가 공공하수처리시설에 연계하여 처리하고 있으므로 (SIS, 2024), 우리나라에서 공공하수처리시설의 처리규모는 상당히 크다고 볼 수 있다. 우리나라 공공하수처리시설의 수는 최근 10년간 약 20%, 시설용량은 약 6% 증가하였고 (MOE, 2023), 하수도 보급률은 2022년 기준 95.1%로 양적확충과 함께 질적관리를 위한 고도처리 적용 비율도 높은 수준이지만 생활 속 화학제품과 의약품질 등의 사용이 지속적으로 증가함에 따라 배출되는 오염물질 형태가 다양해지고, 신중오염물질이 증가하면서 하수

처리에서 공공하수처리시설의 비중과 중요성은 점차 커지고 있는 상황이다.

특히 산업의 발달로 인해 현재 전 세계적으로 유통되고 있는 화학물질의 수는 20만여 종에 이르며 매년 3천여 종의 새로운 화학물질이 개발되어 상품화되고 있고, 국내에는 5만 4천 종 이상의 화학물질이 유통되고 있으며, 매년 천여 종이 새롭게 국내시장에 진입하여 화학물질의 사용이 꾸준히 증가하고 있는 실정이다 (MOE, 2023). 독성을 통합적으로 관리하기 위한 수질관리체계 구축이 필요함에 따라 우리나라는 2011년도부터 배출허용기준에 생태독성을 추가하고 하수, 폐수 등을 통해 배출되는 미지의 독성물질로부터 수생태계 위해성 저감을 위해 생태독성관리제도가 도입되어 시행되고 있다. 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용하여 생태독성에 대한 국내 연구는 활발히 진행되고 있으며, 물벼룩을 이용하여 하수원수 내 유해물질 변화에 따른 생태독성 평가연구를 비롯하여 (Seo et al., 2013), 업종에 따른 폐수배출시설 방류수 이화학적 분석과 생태독성간 특성 연구 (Kim et al., 2010; Lee and Lee, 2014; Oh et al., 2006), 회귀분석을 이용한 공단배수의 생태독성 원인물질 조사 (Kim et al., 2012b), 도금폐수 처리시설에서 중금속 독성원인물질 탐색을 위한 독성평가 연구 (Lee and Park, 2016)를 통해 폐수에



서의 생태독성 원인물질을 규명하고자 하는 연구사례들이 있다. 공공하수처리시설로 유입되는 유입수의 성상은 점점 복잡·다양해지고 수많은 화학물질에 대해 개별적으로 관리가 어려운 유해화학물질 독성으로부터 안전성을 확보하기 어렵기 때문에 하수처리시설에서의 생태독성 현황을 조사하고 제거효율에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 광주광역시 공공하수처리시설인 1하수처리장의 처리공정별 배출수의 수질항목 분석과 물벼룩(*D. magna*)을 이용한 생태독성을 조사하고, 통계분석을 이용하여 하수처리과정 중 생태독성과 수질항목간의 상관관계 분석과 회귀분석을 통해 하수처리장에서 생태독성을 제어하는데 필요한 공정 운영 기초자료를 확보하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 대상시설 및 채수지점

본 연구에서는 광주광역시 서구 치평동에 위치한 1하수처리장의 하수처리공정을 대상으로 하였다. 처리구역은 광주광역시 동구·서구·북구 및 남구·광산구 일부이며, 1991년 1단계 준공(300,000 m³/일)이 되었고 1997년 2단계 준공(300,000 m³/일)되어 현재 시설용량 600,000 m³/일로 운영되고 있다.

연구대상시설 하수처리공정은 하수관로를 통해 수집·이송된 유입수(Influent)와 유입된 하수 중 협잡물과 토사를 제거하는 침사지(Grit Chamber), 중력을 이용하여 침전가능한 오염물질을 상등액과 분리하는 최초침전지(Primary Settling Tank), 미생물에 의한 흡착, 산화, 동화작용 등 생화학적 반응을 유도하여 유기물과 질소, 인을 제거하는 생물반응조(Bioreactor), 생물반응조에서 생성된 활성슬러지의 혼합액을 플러크와 상등수로 침강분리하여 슬러지는 반송시키고 상등수는 다음 공정으로 배출하는 최종침전지(Final Settling Tank),

생물학적 처리 후 잔존하는 인을 화학적 고도처리 공법을 통해 제거하기 위한 공정인 총인처리시설(Phosphorus Treatment Facility), 최종 소독 후 방류하는 방류수(Effluent)로 구성되어 있다 (Fig. 1).

1하수처리장에서는 A₂O(Anaerobic-Anoxic-Oxic) 공법을 변형한 NPR(Nitrogen & Phosphorus Removal)과 총인제거를 위한 고속응집침전 공법인 ACTIFLO를 적용하고 있다. NPR은 혐기조(Anaerobic), 무산소조(Anoxic), 포기조(Oxic)로 구성되어 유입수를 혐기조와 무산소조에 분배 주입함으로써 탈질에 필요한 유기탄소원을 일부 확보하고, 포기조 내에 다공질의 미생물담체(BioCube)를 충전하여 담체 내 질산화미생물 고정으로 SRT(Solids Retention Time)가 길어짐으로써 수온 저하 시에도 높은 처리 효율을 유지하는 공법이며 (Park, 2009), 인의 화학적 고도처리를 위한 ACTIFLO 공법과 함께 유기물질과 질소, 인을 동시에 제거한 후 처리수를 영산강으로 방류하고 있다.

채수지점은 1하수처리장 내 하수처리공정을 대상으로 유입수(A), 침사지 유출수(B), 최초침전지 유출수(C), 생물반응조 호기조 유출수(D), 최종침전지 유출수(E), 방류수(F) 6개 지점이며, 채수기간은 2022년 8월부터 2023년 7월까지 월 1회 총 12회 시료를 채수하였다.

2.2 실험방법

생태독성시험은 수질오염공정시험기준에 따라 물벼룩을 이용한 급성독성시험법(ES 04704.1b)으로 실시하였다. 실험방법은 시료를 단계별로 5개 농도로 희석한 후 각 농도에 24시간 이내에 태어난 물벼룩을 넣고 24시간 후 죽거나 유영저해를 나타내는 개체수를 육안으로 관찰하고 계수하였다. 생태독성 결과값은 물벼룩을 이용한 급성독성시험법에 따라 미국환경보호청(U.S. EPA)에서 제시하고 있는 프로빗(Probit)과 트림드 스피어만-카버(Trimmed Spearman Karber) 통계프로

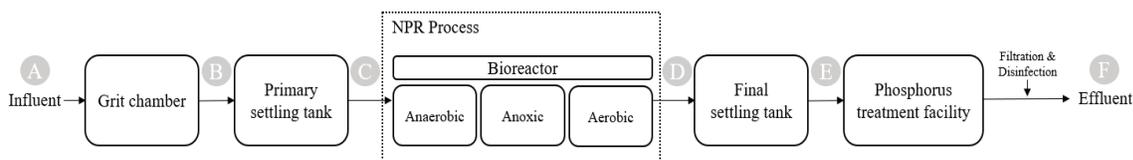


Fig. 1. Schematic diagram of sewage treatment process used at the study site.

그램을 이용하였다. 독성을 평가하는 지표용량을 산출하기 위한 방법으로 프로빗은 용량반응곡선에서 각각의 용량을 log 값으로 선형화시켜 산출하는 방법이고, 트림드 스피어만-카버방법은 용량반응곡선에서 최대치를 확률값 1로 정하여 0.5인 중앙값을 계산하는 방식으로 독성학, 환경과학 분야 등에서 EC₅₀(Effective Concentration of 50%)을 계산하는데 활용되고 있다 (Kim, 2004).

생태독성값(TU)은 통계학적 방법을 통해 EC₅₀를 구하고 식(1)에 따라 산출하였으며, 물벼룩을 이용한 급성독성시험법에 적용된 실험조건은 Table 1과 같다 (NIER, 2017).

$$\text{생태독성값(Toxic Unit, TU)} = 100 / \text{EC}_{50} \quad (\text{식1})$$

물벼룩을 이용한 급성독성시험 정도관리를 위해 수질오염공정시험기준에 따라 연구기간 동안 월 1회 다이크롬산칼륨(K₂Cr₂O₇)을 이용한 표준독성시험을 총 12회 수행하고 내부정도관리차트를 작성하여 관리하였다. 24 h-EC₅₀값은 1.0~1.2 mg/L 범위로 수질오염공정시험기준에서 정한 적정 범위(0.9~2.1 mg/L)를 유지하며 실험하였다 (Fig. 2).

수질항목은 수온, pH(potential of Hydrogen), DO(Dissolved Oxygen), EC(Electric Conductivity), BOD(Biochemical Oxygen Demand), COD(Chemical Oxygen Demand_{Mn}), TOC(Total Organic Carbon), SS (Suspended Solids), T-N(Total Nitrogen), T-P(Total Phosphorus), NH₃-N(Ammonia Nitrogen), 철(Fe), 구리

Table 1. Ecotoxicology test conditions

Items	Experiment conditions
Test organism	<i>Daphnia magna</i>
Exposure period	24 h
Test temperature	20±2°C
No. organism per test chamber	5
Test volume per test chamber	50 mL
No. replicate chambers per concentration	4
Age of test organism	less than 24 h old
End point	EC ₅₀
Photo period	16 h : 8 h (light : dark)
Dilution ratio of sample	100%, 50%, 25%, 12.5%, 6.25%, control

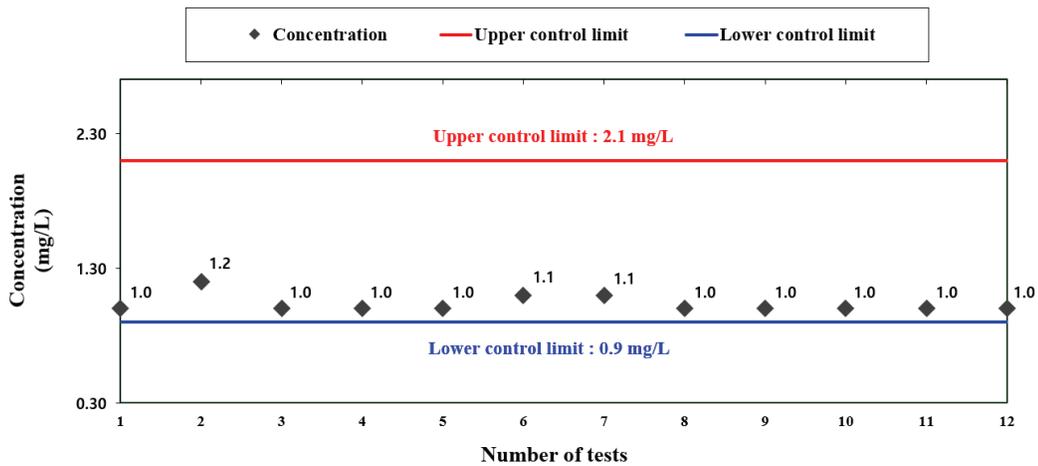


Fig. 2. Standard ecotoxicity test using K₂Cr₂O₇.



(Cu), 망간(Mn), 아연(Zn), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 비소(As), 안티몬(Sb), 수은(Hg)으로 수질오염공정시험 기준에 따라 분석하였다.

2.3 통계분석

수질항목과 생태독성 사이의 상관관계를 파악하기 위해 SPSS(ver. 29.0)프로그램을 이용하여 통계분석을 수행하였다. 통계분석은 무작위 표본추출, 독립적 측정 및 정규 분포의 가정하에 둘 이상의 변수 간의 긴밀한 관련성 정도를 측정하는 통계기법인 피어슨의 상관관계분석(Pearson's correlation analysis)을 통해 (Kim, 2019) 생태독성과 수질항목 간의 상관성을 확인하고자 수행하였으며, 인자 간의 유의성 판단은

p-value 0.05를 기준으로 하였다. 다수의 연속형 독립 변수가 연속형 종속변수에 미치는 영향을 검증하기 위해 상관관계분석 결과에서 유의한 상관관계를 보이는 수질항목을 대상으로 생태독성과 다중선형회귀분석(Multiple linear regression analysis)을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공정별 수질분석

유입수, 침사지, 최초침전지, 생물반응조, 최종침전지, 방류수 총 6개 지점에서 TOC 등 22개 수질항목을 조사한 결과는 다음과 같다 (Table 2).

Table 2. Water quality data at the sewage treatment process

Items	Unit	Influent (A)	Grit chamber (B)	Primary settling tank (C)	Bioreactor (D)	Final settling tank (E)	Effluent (F)
Ecotoxicity	TU	1.4 ± 0.53 (0.5~2.6)	1.5 ± 0.65 (1.0~3.2)	0.8 ± 0.57 (0.3~2.1)	0.0 ± 0.00 (0.0~0.0)	0.0 ± 0.00 (0.0~0.0)	0.0 ± 0.00 (0.0~0.0)
Temp	°C	19.1 ± 4.28 (12.4~25.8)	19.9 ± 4.05 (13.2~26.3)	20.0 ± 3.92 (13.6~26.3)	20.6 ± 3.95 (14.5~26.8)	20.5 ± 4.03 (14.3~26.8)	20.0 ± 4.33 (13.2~26.5)
pH	-	7.5 ± 0.15 (7.3~7.8)	7.3 ± 0.12 (7.0~7.5)	7.2 ± 0.14 (7.0~7.4)	7.1 ± 0.35 (6.6~7.7)	7.2 ± 0.21 (7.0~7.5)	7.1 ± 0.25 (6.7~7.5)
DO	mg/L	1.5 ± 0.63 (0.5~3.1)	1.0 ± 0.44 (0.2~1.8)	2.0 ± 0.70 (0.9~3.1)	1.5 ± 0.96 (0.4~4.1)	5.9 ± 1.55 (2.2~7.7)	6.9 ± 1.62 (2.3~8.6)
EC	μS/cm	709 ± 63.2 (554~793)	774 ± 59.7 (621~864)	745 ± 61.7 (568~809)	528 ± 58.6 (453~631)	538 ± 50.9 (454~611)	555 ± 57.0 (417~612)
SS	mg/L	162.9 ± 40.43 (42.0~206.0)	415.5 ± 105.18 (250.0~600.0)	177.6 ± 170.75 (60.0~590.0)	13.7 ± 9.12 (3.2~36.0)	10.0 ± 6.89 (3.2~26.4)	3.1 ± 1.23 (1.2~5.2)
BOD	mg/L	173.7 ± 44.30 (85.8~252.0)	250.5 ± 54.89 (162.0~366.0)	178.2 ± 65.40 (84.0~330.0)	28.6 ± 9.45 (13.5~48.0)	16.4 ± 3.80 (7.2~22.2)	2.0 ± 0.77 (1.3~3.6)
COD	mg/L	106.6 ± 34.37 (60.0~200.0)	169.0 ± 34.50 (108.0~240.0)	109.5 ± 58.38 (42.0~235.0)	17.1 ± 4.17 (9.6~26.0)	12.1 ± 2.12 (8.4~16.4)	8.6 ± 1.42 (5.4~11.3)
TOC	mg/L	86.3 ± 28.19 (60.2~173.8)	166.2 ± 39.83 (111.2~243.6)	94.8 ± 60.31 (19.4~235.3)	10.5 ± 3.32 (6.6~18.7)	8.2 ± 2.43 (3.8~13.6)	6.2 ± 1.21 (3.0~8.1)
NH ₃ -N	mg/L	32.13 ± 6.769 (15.94~40.58)	37.72 ± 6.372 (20.26~45.44)	32.59 ± 6.041 (15.39~39.30)	6.66 ± 4.840 (0.82~16.82)	6.21 ± 3.353 (0.72~13.11)	6.18 ± 2.187 (3.27~10.25)
T-N	mg/L	36.99 ± 5.755 (23.56~43.50)	45.03 ± 7.959 (25.49~55.41)	37.44 ± 7.926 (16.10~48.13)	9.10 ± 4.998 (1.67~19.19)	11.13 ± 3.334 (6.64~18.94)	10.25 ± 2.669 (5.32~14.61)
T-P	mg/L	3.879 ± 0.596 (2.307~4.587)	8.372 ± 2.046 (4.962~13.806)	7.886 ± 1.986 (3.473~11.296)	9.839 ± 5.901 (0.347~21.244)	0.493 ± 0.238 (0.236~1.100)	0.223 ± 0.062 (0.099~0.316)

Items	Unit	Influent (A)	Grit chamber (B)	Primary settling tank (C)	Bioreactor (D)	Final settling tank (E)	Effluent (F)
Fe	mg/L	0.224 ± 0.0895 (0.000~0.348)	0.253 ± 0.1488 (0.000~0.693)	0.273 ± 0.1119 (0.000~0.490)	0.303 ± 0.3703 (0.000~1.288)	0.108 ± 0.1377 (0.000~0.525)	0.053 ± 0.0600 (0.000~0.238)
Cu	mg/L	0.020 ± 0.0141 (0.000~0.063)	0.013 ± 0.0049 (0.000~0.018)	0.010 ± 0.0038 (0.000~0.015)	0.002 ± 0.0033 (0.000~0.009)	0.002 ± 0.0038 (0.000~0.009)	0.001 ± 0.0027 (0.000~0.008)
Zn	mg/L	0.106 ± 0.1232 (0.003~0.498)	0.106 ± 0.1002 (0.003~0.366)	0.074 ± 0.0411 (0.003~0.136)	0.064 ± 0.0405 (0.000~0.156)	0.067 ± 0.0529 (0.006~0.212)	0.062 ± 0.0461 (0.010~0.186)
Mn	mg/L	0.088 ± 0.0410 (0.000~0.187)	0.068 ± 0.0223 (0.000~0.091)	0.071 ± 0.0219 (0.002~0.090)	0.072 ± 0.0240 (0.000~0.106)	0.062 ± 0.0192 (0.000~0.075)	0.064 ± 0.0216 (0.000~0.081)

Mean ± Standard Deviation

(Minimum~Maximum concentration)

유입수에서 평균 수질결과는 EC 709(SD=63.2) μ S/cm, SS 162.9(SD=40.43) mg/L, BOD 173.7(SD=44.30) mg/L, COD 106.6(SD=34.37) mg/L, TOC 86.3(SD=28.19) mg/L, NH₃-N 32.13(SD=6.769) mg/L, T-N 36.99(SD=5.755) mg/L 및 T-P 3.879(SD=0.596) mg/L로 나타났으며, 침사지에서 EC 774(SD=59.7) μ S/cm, SS 415.5(SD=105.18)

mg/L, BOD 250.5(SD=54.89) mg/L, COD 169.0(SD=34.50) mg/L, TOC 166.2(SD=39.83) mg/L, NH₃-N 37.72(SD=6.372) mg/L, T-N 45.03(SD=7.959) mg/L 및 T-P 8.372(SD=2.046) mg/L로 유기물질, 질소, 인이 증가하는 모습을 보였다 (Fig. 3, Fig. 4).

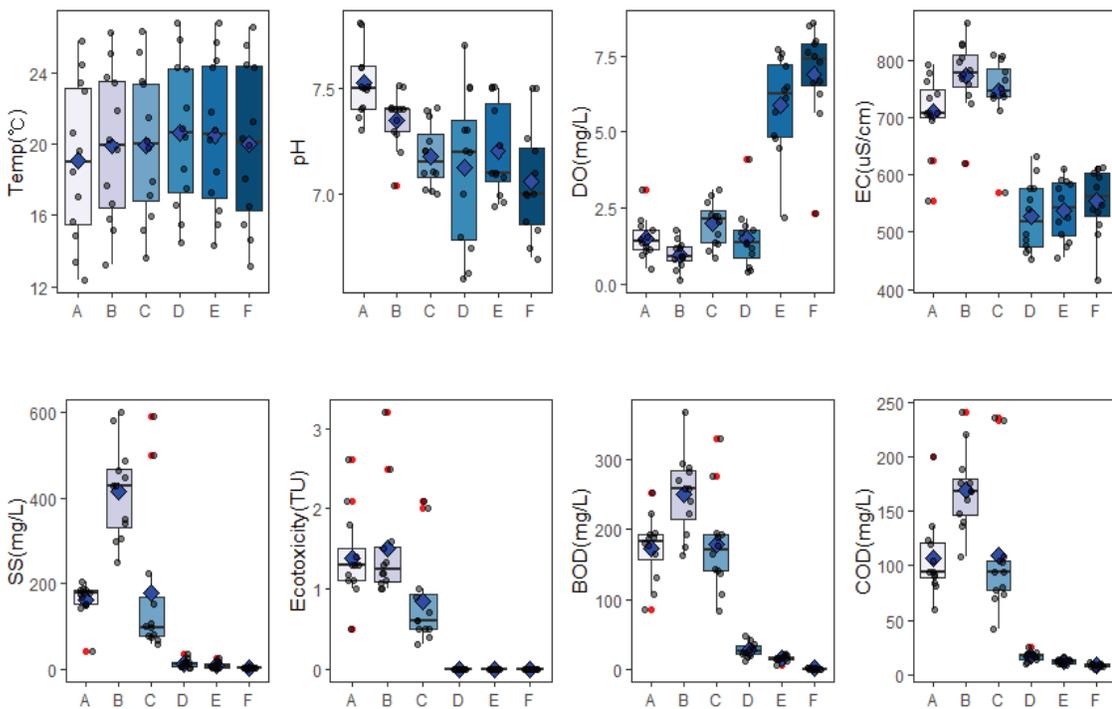


Fig. 3. Results of water quality by process(Temp., pH, DO, EC, SS, Ecotoxicity, BOD, COD).



질산성 질소(Nitrate Nitrogen)를 N_2 로 탈질시켜 질소를 제거하기 위해서는 탄소원이 충분해야 하고 C/N비(C/N ratio)가 낮아 탄소원이 부족할 경우 생물학적 탈질작용이 원활히 이루어지지 않아 하수처리장 방류수 수질기준 중 총질소의 수질기준을 초과할 우려가 있다 (Eom and Kim, 2018). C/N비가 낮은 하수에서 질소를 제거하기 위해서는 인위적으로 외부탄소원을 주입해야 하는데 (Isaacs et al., 1994; Kim et al., 2012a), 1 하수처리장에서는 침사지에서 분뇨처리수 등 연계처리를 통해 탄소원 보충을 하고 있어서 유기물질 등 농도가 유입수에 비해 높은 결과를 보였다.

최초침전지에서는 EC 745(SD=61.7) $\mu\text{S/cm}$, SS 177.6(SD=170.75) mg/L, BOD 178.2(SD=65.40) mg/L, COD 109.5(SD=58.38) mg/L, TOC 94.8(SD=60.31) mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 32.59(SD=6.041) mg/L, T-N 37.44(SD=7.926) mg/L 및 T-P 7.886(SD=1.986) mg/L로 나타났으며, 생물반응조에서는 EC 528(SD=58.6) $\mu\text{S/cm}$, SS 13.7(SD=9.12) mg/L, BOD 28.6(SD=9.45) mg/L, COD 17.1(SD=4.17) mg/L, TOC 10.5(SD=3.32) mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 6.66(SD=4.840) mg/L, T-N 9.10(SD=4.998) mg/L 및 T-P 9.839(SD=5.901) mg/L로 나타났다. 생물반응조 혐기조에서 생물학적으로

로 인을 방출시켜 호기조에서 미생물이 과잉 섭취할 수 있도록 하고, 무산소조는 호기조의 내부반송수의 질산염 탈질화반응(Denitrification)을 통해 대부분의 유기물질과 질소성분이 감소하는 모습을 보였다. 과잉으로 인을 섭취하는 과잉섭취(Luxury uptake)현상이 일어나 인의 농도가 증가하였으나, 생물학적 인 제거는 과잉 축적된 슬러지의 주기적 슬러지 인발을 통해 최종적으로 이루어지므로 (Kim and Kang, 2012; Moon et al., 2007; Song, 2004) 다음 공정인 최종침전지에서 침전되어 제거되는 것으로 판단된다 (Fig. 4).

생물반응조에서 생성된 활성슬러지의 혼합액을 플럭과 상등수로 침강분리하여 상등수를 다음공정으로 배출 후 총인처리시설을 거쳐 처리된 방류수 수질결과는 EC 555(SD=57.0) $\mu\text{S/cm}$, SS 3.1(SD=1.23) mg/L, BOD 2.0(SD=0.77) mg/L, COD 8.6(SD=1.42) mg/L, TOC 6.2(SD=1.21) mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 6.18(SD=2.187) mg/L, T-N 10.25(SD=2.669) mg/L 및 T-P 0.223(SD=0.062) mg/L로 나타나 방류수 수질기준 이내로 처리되어 방류하고 있었고, 조사기간 중 하수처리 전 공정에서 카드뮴(Cd), 납(Pb), 크롬(Cr), 비소(As), 수은(Hg), 안티몬(Sb)은 검출되지 않았다.

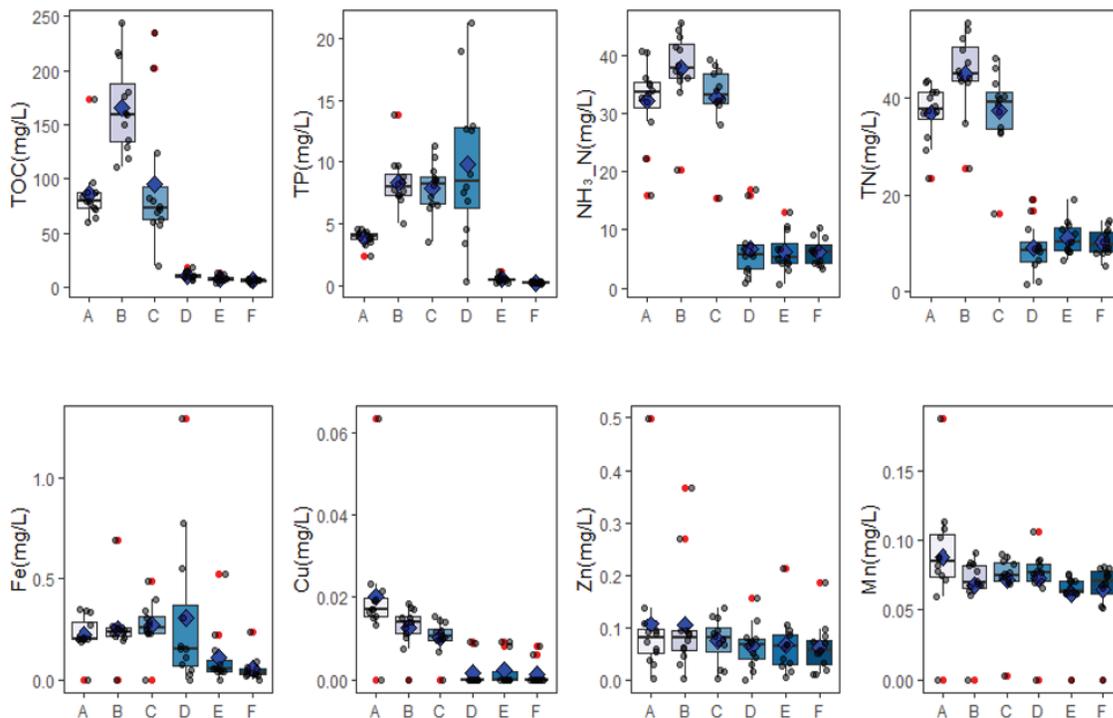


Fig. 4. Results of water quality by process(TOC, T-P, $\text{NH}_3\text{-N}$, T-N, Fe, Cu, Zn, Mn).

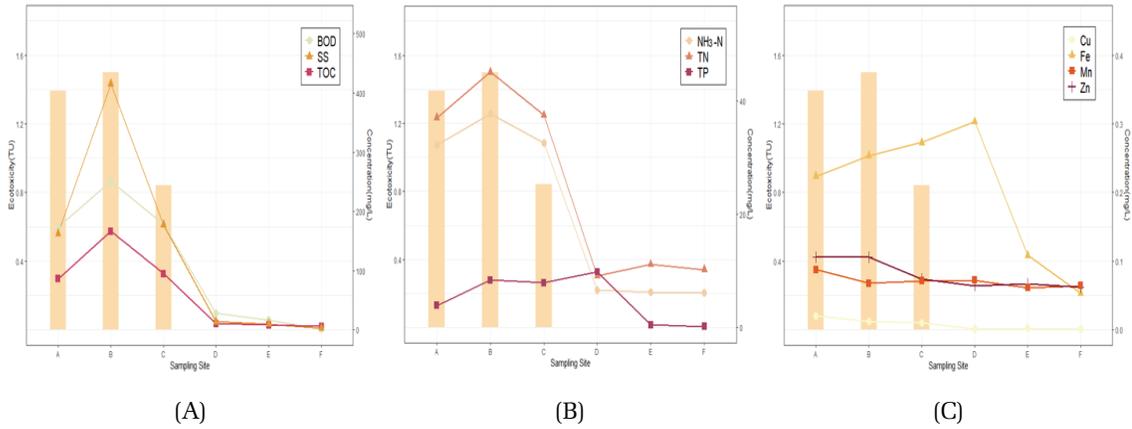


Fig. 5. Variations of ecotoxicity according to water quality by process.

3.2 수질항목과 생태독성 변화

하수처리장에서 공정별로 생태독성 평균값은 유입수에서 1.39 TU, 침사지에서 1.50 TU, 최초침전지에서 0.84 TU를 보였다. 침사지에서 연계처리수 유입으로 생태독성값은 7.8% 증가하였고, BOD 44.3%, COD 58.5%, TOC 92.7%, SS 155.1%, NH₃-N 17.4%, T-N 21.7%, T-P 115.9% 증가하였다 (Fig. 5).

최초침전지에서는 침사지 유출수 대비 BOD 28.9%, COD 35.2%, TOC 43.0%, SS 57.3%로 비중이 큰 물질만을 침전 제거하여 낮은 제거효율을 보였고, 생물반응조에서는 최초침전지 유출수 대비 BOD 83.9%, COD 84.4%, TOC 88.9%, SS 92.3%로 생물학적 반응

을 통해 높은 제거율을 나타냈다 (Fig. 6). 생태독성은 생물반응조에서 100% 제거되는 것으로 나타났는데, 하수처리장 생물학적 반응조에서 미생물에 의해 유기물질이 분해됨에 따라 생태독성물질 또한 함께 제거된 결과를 확인한 연구사례와 같이 (Lee et al., 2013), 본 연구에서도 생물반응조에서 생물학적 처리를 통해 생태독성물질 원인물질이 100% 제거된 것으로 판단된다.

생물반응조에서 NH₃-N은 79.6%의 제거율을 보여주었는데, 수중에서 NH₃-N은이온화되지 않은 암모니아(NH₃)와 암모늄이온(NH₄⁺)으로 존재하며 pH가 증가함에 따라 독성은 증가한다고 알려져 있다 (MOE, 2009). 물벼룩(*D. magna*)에 대한 24h-LC₅₀은 99.94 mg/L

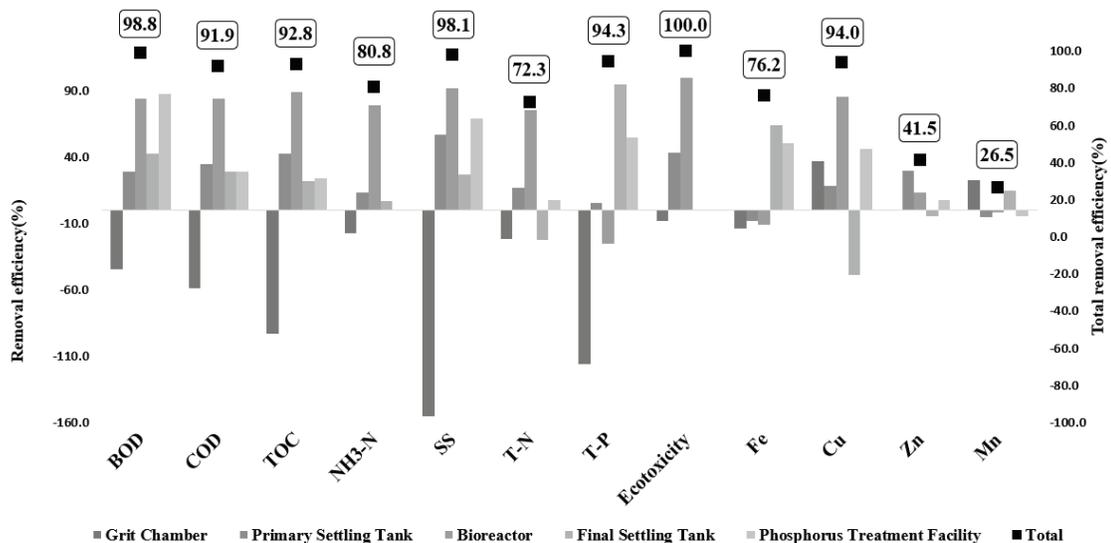


Fig. 6. Removal efficiencies of sewage treatment process.



Table 3. Removal efficiencies of sewage treatment

Items	Unit	Influent	Effluent	Total removal efficiency (%)
Ecotoxicity	TU	1.4	0.0	100.0
BOD	mg/L	173.7	2.0	98.8
COD		106.6	8.6	91.9
TOC		86.3	6.2	92.8
SS		162.9	3.1	98.1
NH ₃ -N		32.1	6.2	80.8
T-N		37.0	10.2	72.3
T-P		3.879	0.223	94.3
Fe		36.99	10.25	76.2
Cu		0.020	0.001	94.0
Zn		0.106	0.062	41.5
Mn	0.088	0.064	26.5	

(Loureiro et al., 2012), pH 7.95 조건에서 24h-EC₅₀ 180 mg/L (MOE, 2009) 연구결과가 있으며, 1하수처리장에서 생태독성이 나타나는 공정에서 15.39~45.44 mg/L 농도범위와 pH 7.0~7.8 범위로 나타나, NH₃-N는 생태독성을 일으키는 주요 인자는 아닐 것으로 판단되었고, 여러 질소형태 중 NH₃-N의 비중이 67.6~98.1%로 높은 T-N의 경우도 생태독성을 유발하는 인자는

아닐 것으로 추정된다.

최종침전지에서는 침사지 유출수 대비 T-P 95.0%, Fe 76.2% 제거되어 (Fig. 6), 주로 침전에 의해 제거되는 것으로 나타났고, 생태독성 감소 경향과는 달라 생태독성에 미치는 영향이 적을 것으로 판단된다.

유입수 대비 수질항목별로 최종 제거율은 BOD 98.8%, COD 91.9%, TOC 92.8%, SS 98.1%, Cu 94.0%로 나타나 높은 제거율을 보였고, NH₃-N 80.8%, T-N 72.3%, T-P 94.3%, Fe 76.2%, Zn 41.5%, Mn 26.5%의 제거율을 확인할 수 있었다 (Table 3).

3.3 수질항목과 생태독성과의 상관관계

공공하수처리시설 내에서 생태독성과 수질항목간 상관관계를 확인하기 위해 피어슨의 상관관계분석을 실시하였다. 상관계수는 데이터간에 관계성이 얼마나 존재하는지를 분석하는 것이며, 상관계수가 -1에 가까울수록 부(-)적 상관관계가 강하고 1에 가까울수록 정(+)적 상관관계가 강하다고 할 수 있다. 생태독성은 EC, BOD, TOC, NH₃-N, SS, T-N항목과 강한 정(+)적 상관관계가 보였고 DO항목과는 부(-)적 상관관계를 보였으며, 생태독성과 각 수질항목간 상관계수 결과를 시각화하였다 (Fig. 7).

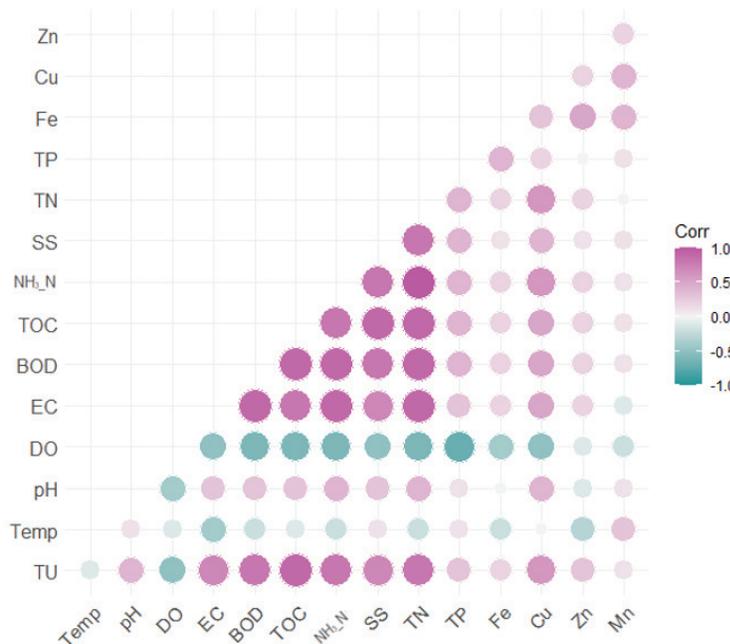
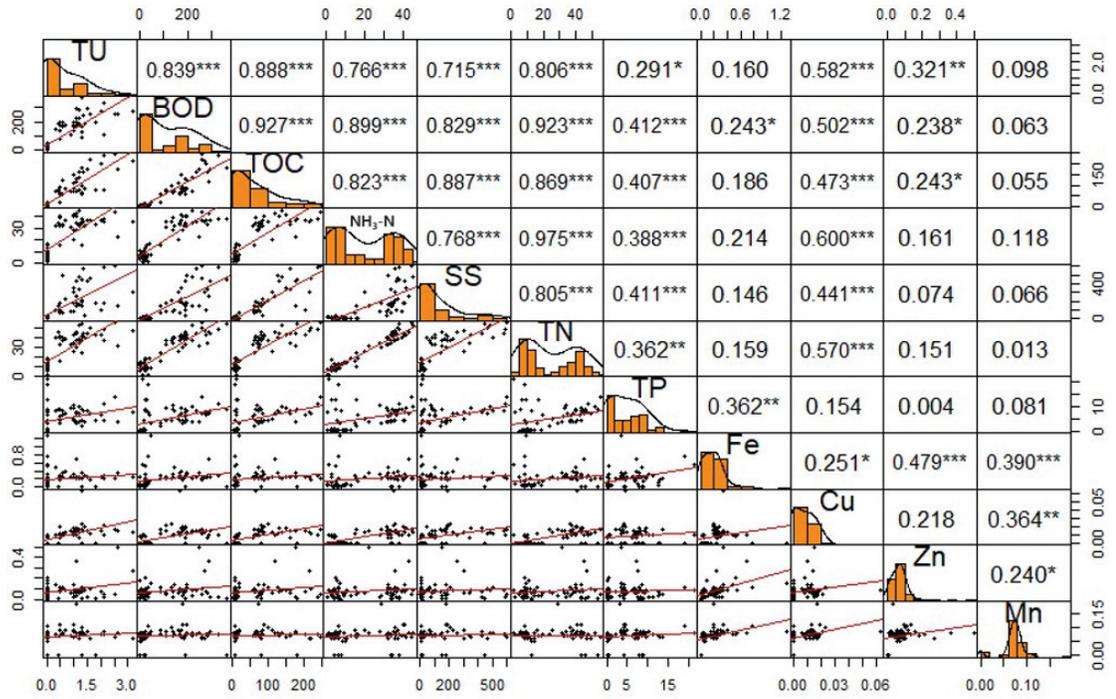


Fig. 7. Pearson correlation coefficients between ecotoxicity and water quality.



* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Fig. 8. Scatter plots between ecotoxicity and water quality.

생태독성과 유의한 강한 정(+)적 상관관계를 보이는 수질항목의 상관계수는 TOC($r=.888, p<.001$), BOD($r=.839, p<.001$), T-N($r=.806, p<.001$), NH₃-N($r=.766, p<.001$), SS($r=.715, p<.001$), Cu($r=.582, p<.001$)순으로 나타났으며, 공공하수처리장 유입수를 대상으로 상관관계 분석을 통해 생태독성과 수질항목 중 BOD, T-N, NH₃-N가 생태독성과 정(+)적 상관관계를 확인한 연구 (Gwon et al. 2016)와 공공하·폐수처리시설에서 TOC, BOD, SS, T-N 등이 생태독성과 정(+)적 상관관계를 보인 연구 (Song et al. 2020), 하수원수 내 생태독성값과 Cu와의 상관관계가 있음을 확인한 연구 (Seo et al., 2013)와 유사한 결과를 확인할 수 있었다. T-P($r=.291, p<.05$), Zn($r=.321, p<.01$)는 낮은 상관관계를 보여주었고, Fe과 Mn은 생태독성과 유의한 상관관계를 보이지 않는 것으로 나타났다.

3.4 수질항목과 생태독성간 다중선형회귀분석

하수처리공정에서 처리되는 수질항목들이 생태독성에 미치는 영향을 알아보기 위해 다중선형회귀분석을 실시하였다. 수질항목과 생태독성과의 강한 상관

관계를 보인 EC, BOD, TOC, NH₃-N, TN, Cu를 독립변수로 설정하였고, 생태독성값(TU)을 종속변수로 하여 분석하였으며, 모든 독립변수를 회귀식에 투입한 후 종속변수와 편상관관계가 가장 적은 독립변수 순으로 제거하는 후진(Backward)방법을 선택하였다.

분석결과 회귀모형은 통계적으로 유의하게 나타났으며($F=155.876, p<.001$), 회귀모형의 설명력은 약 81.6%($R^2=0.821, \text{adj. } R^2=0.816$)으로 나타났다. Durbin-Watson=1.555로 2에 가까운 값을 보여 잔차의 독립성 가정에는 문제가 없는 것으로 평가되었고, 분산팽창지수(Variance Inflation Factor, VIF)도 모두 10 미만으로 나타나 독립변수 간의 유사성으로 인해 서로의 영향력을 감소시킬 수 있는 다중공선성 문제는 없는 것으로 판단되었다 (Table 4).

TOC와 Cu 중 생태독성 값에 영향을 미치는 상대적 영향력을 파악하기 위해 표준화 계수의 β (Standardized Coefficients)를 통해 비교하였다. TOC $\beta=0.789(p<.001)$, Cu $\beta=0.209(p<.001)$ 으로 TOC가 Cu보다 상대적으로 생태독성에 높은 영향을 주는 것으로 판단되었다 (Table 4).



Table 4. Result of multiple linear regression analysis

Dependent Variable	Independent Variable	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error.	β			Tolerance	VIF
Ecotoxicity	TOC	0.009	0.001	0.789	13.586***	<.001	0.781	1.281
	Cu	16.670	4.633	0.209	3.598***	<.001	0.781	1.281

$F=155.876(p<.001)$, $R^2=0.821$, $adjR^2=0.816$, Durbin-Watson=1.555

* $p<.05$, ** $p<.01$, *** $p<.001$

TOC는 $B(\text{Unstandardized Coefficients})=0.009(p<.001)$ 로 생태독성에 유의한 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. β 부호가 정(+)적이므로 TOC가 1 증가하면 생태독성의 값은 0.009만큼 높아진다고 할 수 있다. TOC는 유기물 산화에 사용되는 산소의 양을 측정하여 유기물을 간접적으로 측정하는 BOD나 COD와는 달리 유기물을 직접 산화시켜 발생하는 이산화탄소의 양을 측정하는 방법으로, 모든 유기물을 측정할 수 있는 새롭게 등장한 유기물 지표이다 (Byun et al., 2010). BOD와 COD 중심의 유기물질 관리의 한계점을 보완하기 위한 다양한 연구가 수행되었고 (Choi and Han, 2011; Jeong et al., 2016) 그 결과 2013년부터 하천과 호소의 생활환경기준에 TOC가 도입되어 방류수 수질기준에 TOC가 신설되었다. 2020년부터는 수질측정지표로서 TOC가 활용되고 있는데 통계분석 결과 1하수처리장에서 생태독성을 유발하는 주요 인자로 판단된다.

Cu는 $B=16.670(p<.001)$ 으로 통계적으로 유의하게 나타났으며, Cu 역시 β 부호가 정(+)적이므로 Cu의 농도가 1 증가하면 생태독성의 값은 16.670만큼 증가하는 것으로 나타났다. Cu는 수중에서 장기간 노출될 경우 물벼룩의 생식과 성장에 영향을 미치며 (Kim et al., 2011), 중금속의 독성값은 정도에 따라 차이를 나타내거나 화합물의 종류 및 형태에 따라 다른 결과를 보이기 때문에 중금속의 농도에 따른 독성결과가 정확히 일치하지는 않으나 (Yim et al., 2006) Cu에 대한 물벼룩의 24h 급성독성 EC_{50} 값은 0.030 mg/L, NOEC (No Observable Effect Concentration)는 0.010 mg/L으로 나타났고 (Jeong et al., 2001), 48h 급성독성 EC_{50} 값은 0.021~0.146 mg/L으로, 유입수 0.000~0.063 mg/L 침사지 0.000~0.018 mg/L 최초침전지 0.000~0.015 mg/L의 농도 범위가 나타난 1하수처리장에서 생태독성을

높이는 원인 중 하나로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 광주광역시 1하수처리장 하수처리공정을 대상으로 2022년 8월부터 2023년 7월까지 공정별 수질과 생태독성의 변화 특성을 분석하고, 생태독성과 상관관계가 높은 수질 인자를 파악하기 위한 상관관계분석과 다중선형회귀분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

전체공정의 제거율은 유입수 대비 BOD 98.8%, COD 91.9%, TOC 92.8%, SS 98.1%, NH_3-N 80.8%, T-N 72.3%, T-P 94.3%, Fe 76.2%, Cu 94.0%, Zn 41.5%, Mn 26.5%로 방류수 수질기준 이내로 처리되고 있었고, 생물반응조에서 생태독성물질은 100% 제거되는 것으로 나타났다.

생태독성과 수질항목간 상관관계분석을 실시한 결과 TOC, BOD, T-N, NH_3-N , SS, EC, Cu순으로 생태독성과 정(+)의 상관관계를 보였으며, 다중선형회귀분석을 실시한 결과 TOC($\beta=0.789$, $p<.001$), Cu($\beta=0.209$, $p<.001$)는 생태독성에 유의한 정(+)의 영향을 미치는 것으로 나타나, 효율적인 생태독성물질 제어를 위해서는 TOC와 Cu가 우선 고려되어야 할 것이다.

본 연구에서는 하수처리공정에서 물벼룩을 이용한 생태독성의 특성을 확인하였지만, 생태독성을 통합적으로 관리하기 위해서는 한 가지 시험생물종만을 사용하는 것보다 여러 생물종을 사용하는 것이 수환경에서 전반적인 독성영향을 평가하는데 바람직할 것으로 보이며, 향후 급성독성 뿐만 아니라 만성독성까지 모두 고려한 추가적인 생태독성 평가연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2023년 환경부 “환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업”(NIER-2023-01-03-002)과 광주광역시 보건환경연구원 “연구지원 및 역량강화” 사업의 지원으로 수행하였습니다.

References

- Byun, J.D., Kim, T.D., Jung, B.H., Shin, T.S. and Kim, H.N. (2010). TOC as a potential index for organic contents of wastewater treatment plant effluents, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 13(2), 99-103.
- Choi, J.Y. and Han, D.H. (2011). Development of water quality standard for TOC as organic matter index, *Seoul Studies*, 12(3), 173-184.
- Eom, H.k. and Kim, S.C. (2018). A study on the denitrification and microbial community characteristics by the change of C/N ratio of molasses and nitrate nitrogen, *Korean J. Microbiol.*, 54(2). 105-112.
- Gwon, O.G., Kim, Y.S., Bak, S.H., Kim, D.H., Lee, G.J. and Yu, J.G. (2016). Acute toxicity assessment of public sewage treatment plants effluents, *The Annual Report of Chungcheongbuk-do Institute of Health & Environment*, 25. 215-242.
- Isaacs, S.H., Henze, H., Søeberg, H. and Kümmel. M. (1994). External carbon source addition as a means to control an activated sludge nutrient removal process, *Water Res.*, 28, 511-520.
- Jeong, D.H., Cho, Y.S., Ahn, K.H., Chung, H.M., Park, H.W., Shin, H.S., Hur, J. and Han, D.H. (2016). A study on the determination method of TOC effluent limitation for public sewage treatment plants, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 30(3), 241-251.
- Jeong, J.W., Cha, M.S. Cho, S.J. and Lee, S.J. (2001). Acute and chronic toxicity of heavy metals to *Daphnia magna*, *J. Environ. Sci. Int.*, 10, 293-298.
- Kim, H.J., Cheon, K.H., Kim, M.S., Youn, D.N., WON, G.H., Choi Y., Cho, H.S., Yoo, J.H., Lee, J.Y., Chae, S.B. and Jee, S.I. (2019). Ecotoxicity of water pollutants in slaughterhouse wastewater of evaluation on *Daphnia magna*, *J. Korean Soc. Environ. Technol.*, 20(2), 100-105.
- Kim, J.S., Kim, K.R., Kang, H.S., Won, I.S., Kim, K.Y. and Lee, S.I. (2012a). Nitrogen removal characteristics in dynaflo biofilter system using sewage wastewater of low C/N ratio, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 34(3), 189-194.
- Kim, K.R., Kim, K.Y. and Lee, S.I. (2011). Effect of copper ion(Cu⁺⁺) on chronic toxicity of water flea; *Daphnia magna*, *Daphnia sp.*, and *Moina macrocopa*, *J. Korean soc. Water Sci. Technol.*, 19(4), 57-64.
- Kim, M.S. and Kang, G.Y. (2012). The study on evaluating performances of lab scale-advanced A₂O with changing system using biofilm process, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 26(2), 209-218.
- Kim, S.K., Kim, K.C. and Lee, B.M. (2004). Mathematical and statistical characterization of LD₅₀ estimation, *J. toxicol. pub. health*, 20(4), 321-324.
- Kim, S.Y., Yoon, N.N., Ji, H.S., Han, S.M., Kwon, D.M. and Lee, K.S. (2010). Characteristics of ecotoxicity in industrial effluent using *Daphnia magna*, *The Annual Report of Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment*, 20, 131-142.
- Kim, Y.Y., Woo, J.S., Hwang, S.M. and Kim, M.J. (2012b). Investigation of eco-toxicological substances in banwol industrial drainages using the regression analysis, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 28(3), 467-472.
- Lee, J.A. and Park, D.K. (2016). Toxic effects of metal plating wastewater on *Daphnia magna* and *Euglena agilis*, *Korean J. Environ. Biol.*, 34(2), 116-123.
- Lee, S.H. and Lee, H.S. (2014). Comparison between ecotoxicity using *Daphnia magna* and physicochemical analyses of industrial effluent, *J. Environ. Sci. Int.*, 23(7), 1269-1275.
- Lee, S.W., Jo, J.W. and Kim, J.K. (2013). The dynamic characteristics of ecological toxicity in sewage treatment plant using the *Daphnia magna*, *J. Korean Soc. Environ. Technol.*, 14(6), 420-425.
- Loureiro, S., Meyer, T., Ferreira, A., Amorim, M. and Soares, A. (2012). Single and joint effects of perchlorates to *Daphnia magna* : Additivity and interaction patterns, *Fresenius Environ. Bull.*, 21(4), 845-852.
- Ministry of Environment (MOE). (2023). White paper of environment.
- Ministry of Environment (MOE). (2009). Identification of Ecotoxicity from Wastewater Treatment Facilities and Investigation of Sources of Toxicity(II).
- Moon, T.H., Ko, K.B. and Song, E.Y. (2007). An application of the NPR process for the treatability improvement of an existing sewage treatment plant, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 23(5), 756-760.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2017). *Standard method for water pollutants ES 04704.1b - acute toxicity test method of the Daphnia magna straus*



- (*cladocera, crustacea*), National Institute of Environmental Research.
- Oh, K.T., Kim, J.W., Kim, W.K., Lee, S.A., Yun, H.G. and Lee, S.K. (2006). Ecotoxicity assessment of industrial effluent in Korea, J. Korean Soc. Water Environ., 22(1), 37-44.
- Park, H.J. (2009). Improvement of the advanced treatment process in the present sewage treatment plants in Korea, Master's Thesis, Yonsei University, 24-35.
- Seo, B.W., Lee, J.H., Lee, Y.H. and Kang, S.H. (2013). Research variation of hazardous substances in sewage ecotoxicological assessment, J. Korean Soc. Water Wastewater, 27(5), 604-611.
- Sewerage information system(SIS), Sewerage statistics, <https://www.hasudoinfo.or.kr/stat/statRefDetail.do> (March 5, 2024)
- Song, E.Y. (2004). A study on application of the NPR process for improvement of the existing sewage treatment plants : focused on "S" sewage treatment plant, Master's Thesis, Yonsei University, 23-27.
- Song, J.Y., Jung, E.H., Kim, T.Y., Kim, J.K., Lee, H.J., Go, S.M., Kim, H.R., Lee, S.H. and Kim, J.S. (2020). Characteristics of effluent using ecotoxicity from public sewage and wastewater treatment facilities in sincheon watershed, The Annual Report of Gyeonggi-do Institute of Health & Environment, 33, 361-369.
- Yim, J.H., Kim, K.W. and Kim, S.D. (2006). Effect of hardness on acute toxicity of metal mixtures using *Daphnia magna* : Prediction of acid mine drainage toxicity, J. Hazard Mater., 138(1), 16-21.

pp. 141-153

pp. 155-164

pp. 165-175