

서울시 공공하수처리시설과 한강에 대한 물벼룩 생태독성 평가연구

물환경 생태팀 · 먹는물분석팀*

양진영 · 조수석 · 하현주 · 김지희 · 천정완 · 윤호균 · 이태호
양인혜 · 이진호 · 김진아 · 박서희* · 길혜경 · 이목영 · 정 권

Acute Toxicity Tests with *Daphnia magna* at Public Sewage Treatment Facilities in Seoul and Recreational Water Sections in the Han River

*Aquatic Ecology Team · Drinking Water Analysis Team**

**Jin-young Yang, Soo-seock Cho, Hyun-ju Ha, Ji-hui Kim,
Chung-wan Chun, Ho-kyun Yoon, Tae-ho Lee, In-he Yang,
Jin-hyo Lee, Jin-a Kim, Seo-hee Park*, Hye-gyeong Gil,
Mok-young Lee and Kweon Jung**

Abstract

The purpose of this study conducted in 2017 was to evaluate the water quality of the Han River by conducting the acute toxicity tests with *Daphnia magna* at the public sewage treatment facilities in Seoul and at points in the Han River where waste water entered. In addition, we analyzed the physico-chemical parameters and tested for heavy metals in the water. Ecotoxicity tests with *Daphnia magna* were conducted on samples from the influent at the public sewage treatment facilities and the results showed an average toxicity unit(TU) of 1.6 and a maximum TU of 5.7. However, ecotoxicity tests of the effluent, which is discharged to the Han River after treatment, showed a TU of 0.0. Acute toxicity tests of 76 samples at five sites corresponding to 2~4 sections of the Han River recreational water body only showed a TU of 0.5 in the sample from the Seongsu Bridge collected on 10th October. There was a limit to the interpretation of the cause of toxicity. Except in one case, most of the samples in the Han River showed a TU of 0.0. The concentration of copper, zinc and chromium, the three heavy metals that affect *Daphnia magna*, were found to be lower than the half-effective concentration(EC₅₀) or the quantitative limit. Therefore, we considered the Han River to

be safe in terms of ecotoxicity with *Daphnia magna*. However, there is a limit to evaluate the ecological safety of the Han River with a single species of *Daphnia magna*, it is necessary to expand the evaluation with other species(luminescent bacteria, algae, fish, etc.) in the future.

Key words : acute toxicity, *Daphnia magna*, the public sewage treatment facilities, ecotoxicity, TU(toxic unit), recreational water body

서론

한강은 유로연장 499.44 km, 유역 평균폭 75.5 km에 달하는 우리나라의 대표적인 강으로 서울도심을 동서방향으로 관통하며 흐른다(1). 한강은 서울시민의 식수원으로 중요한 역할을 할 뿐만 아니라 친수활동공간으로 이용되고 있다. 한강의 친수활동 구간은 상수원 구간을 제외한 잠실수중보 하류(잠실대교)에서부터 행주대교까지 2~4구간으로 나누어져 있으며, 직·간접적인 친수활동(수영, 수상스키, 낚시 등)이 가능하다(2~4). 현재 한강 공원으로 조성된 많은 곳에서 수상스키, 바나나보트, 요트, 조정, 오리보트 등의 수상레저 활동과 유람선 관광, 수상안전 훈련과 낚시 등을 즐기는 사람들이 증가하고 있으며(5), 행주대교 인근에서

는 어업활동에 종사하며 생계를 유지하고 있는 어민들도 있다.

그러므로 한강의 수질은 직·간접적으로 사람에게 영향을 줄 것으로 예상된다. 한강의 수질에 영향을 주는 여러 요인들을 그림 1에 나타내었다. 오염원으로는 공공하수처리시설의 최종 방류와 한강 상류에 위치한 팔당댐의 방류, 여러 지류와 강우시 비점오염원 유입 등이 있다. 그중 공공하수처리시설은 한강으로 오염물질을 방류하는 대표적인 점오염원인데, 그 이유는 서울도심에서 발생하는 여러 오염물질의 대부분이 공공하수처리시설에서 처리되어 공공수역으로 배출되기 때문이다. 서울시는 4개의 공공하수처리시설을 운영하고 있으며, 탄천과 중랑 공공하수처리시설의 방류수는 한강의 친수활동 구간인 2~4구간, 난지와 서남 공공

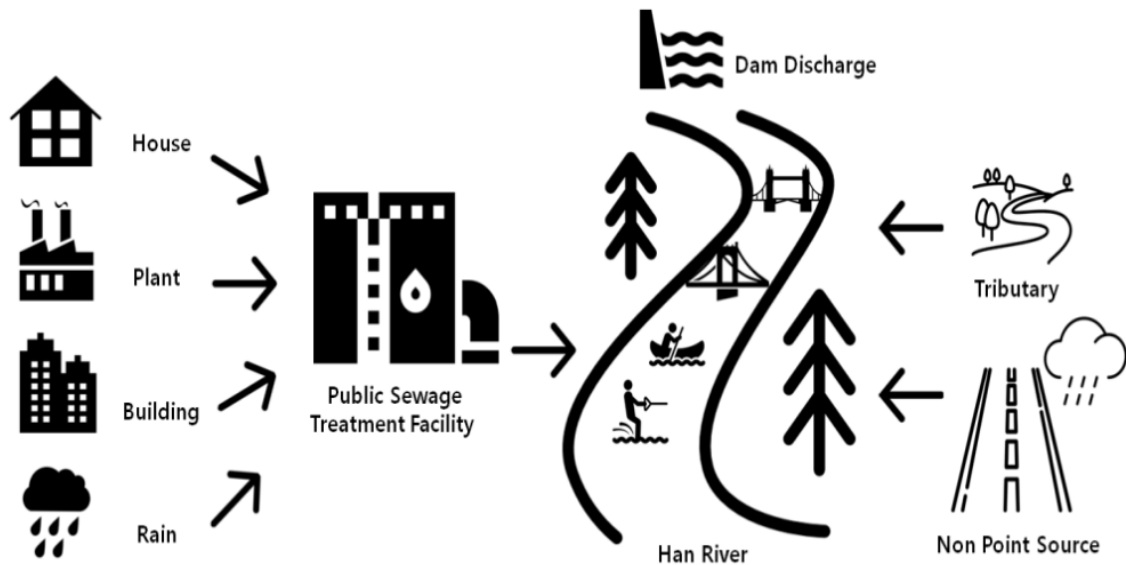


Fig. 1. Schematic diagram of water quality effect sources to the Han River.

하수처리시설의 방류수는 4구간에 유기물과 영양염류 등을 배출하여 수질에 영향을 줄 것으로 예상된다(6).

수질을 평가하는 여러 항목 중 하나인 물벼룩을 이용한 급성독성 시험법은 오염원에서 발생하는 개별오염물질로 알 수 없는 복합적인 요인에 의한 생태계 영향을 평가하는 생물검정법으로, 우리나라는 2011년부터 도입하여 수질오염물질 배출허용기준과 공공하수처리시설 방류수의 수질기준에 적용하고 있다(7). 물벼룩은 일반 담수환경에 널리 분포하고 있으며, 수계내 1차 소비자로서 환경변화 및 독성물질(중금속, 살충제, 유기물질 등)에 민감하게 반응하므로 생태독성 시험종으로 많이 이용하고 있다. 하지만 하천에 대한 생태독성 기준이 없기 때문에 하천에 대한 생태독성학적 측면에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구는 서울시 4개 공공하수처리시설의 유입수와 방류수의 수질특성, 물벼룩을 이용한 급성독성을 평가하고, 방류량이 한강 유량에서 차지하는 비율을 통해 한강의 수질에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 공공하수처리시설의 방류수가 유입되는 한강 친수활동 구간에 대한 수질특성, 물벼룩을 이용한 급성독성을 평가하고, 물벼룩에 대한 중금속의 영향을 조사하여 한강의 생태학적 측면에서 수질특성을 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 시험재료

서울시에서 운영 중인 공공하수처리시설은 중랑(Jungnang, JN), 탄천(Tancheon, TC), 난지(Nanji, NJ) 그리고 서남(Seonam, SN)이 있다(표 1). 이들 공공하수처리시설의 유입수와 방류수를 대상으로 2017년 1월부터 12월까지 매월 1회 이상 시료를 채수하여 총 156건에 대해 수질을 분석하였다. 또한 한강 친수활동 구간에 해당하는 잠실수중보 하류 5개 지점에서 2017년 4월부터 11월까지 총 76건의 시료를 채수하였고, 수질을 분석하였다. 이때 5개 지점은 성수대교(Seongsu Bridge, S1), 한남대교(Hannam Bridge, S2), 한강대교(Hangang Bridge, S3), 마포대교(Mapo Bridge, S4) 그리고 성산대교(Seongsan Bridge, S5)이며, 4월부터 7월까지는 성산대교 지점에서 채취한 8건의 시료를 분석대상으로 하였고, 8월부터 11월까지는 채수시점을 5개 지점으로 늘려 68건의 시료를 분석대상으로 하였다(그림 2). 행주대교(Haengju Bridge, S6)지점은 전체 유량을 살펴보기 위해 대상지점으로 선택하였고, 한강홍제통제소의 유량자료를 이용하였다(1). 그리고 4개 공공하수처리시설의 방류량은 각 하수처리시설에서 측정된 자료를 수합하여 관리하는

Table 1. Public sewage treatment facilities status in Seoul

Site	Capacity (10 ⁴ m ³ /d)	Treatment process	Disinfectant	Discharge water body		Management district
				Tributary	Main stream	
JN	159	AS ^a , AAO ^b , MLE ^c	Sodium hypochlorite, Ozone	Jungnang	Han River	Northeast area of Seoul
TC	90	MLE	Sodium hypochlorite	Tancheon	Han River	Southeast area of Seoul
NJ	86	AAO-MLE	Sodium hypochlorite	-	Han River	Northwest area of Seoul
SN	163	AS, MLE	Chlorine	-	Han River	Southwest area of Seoul

^a (Conventional) Activated Sludge

^b Anaerobic Anoxic Oxidation

^c Modified Ludzack-Ettinger

서울시 물재생시설과로부터 제공받아 사용하였다.

2. 실험방법

물벼룩을 이용한 급성독성 시험은 수질오염공정 시험기준에 따라 실시하였으며(8), 시료는 원수 100%를 기준으로 희석하여 농도별로 4개의 비이커에 각각 5마리의 24시간 이내에 태어난 어린개체의 물벼룩을 사용하였다. 이때 국립환경과학원에서 분양받은 *Daphnia magna*를 시험생물종으로 사용하였다(9). 시료에 넣은 물벼룩에 대해 24시간이 경과한 후 농도별로 치사 및 유영저해를 나타내는 개체수를 육안으로 관찰하고 개수하였다. 물벼룩의 유영저해 개체수에 따라 식(1)을 통한 계산식으로 결과를 산출하거나 통계기법인 Trimmed Spearman Karber Method(EPA)를 이용하여 반수영향농도(EC₅₀, Effective Concentration of 50%)를 얻은 후 식(2)를 통해 결과를 산출하였다(10).

$$TU = 0.02 \times \frac{(\text{The number of mortality or immobilization}) \times 100}{20} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$TU = \frac{100}{EC_{50}} \quad (\text{Eq. 2})$$

한강시료는 현장 측정기(YSI 6820V2, USA)로 수온(Water temp.), 수소이온농도(pH), 용존산소량(DO), 전기전도도(Conductivity)와 탁도(Turbidity)를 측정하였고, 공공하수처리시설 유입수 및 방류수의 수온, 수소이온농도, 용존산소량은 공공하수처리시설에서 시료 채취시 측정된 자료를 제공받았으며, 전기전도도와 염분(Salinity)은 실험실에서 수질측정기(Orion 5-star, Thermo Scientific, USA)로 측정하였다. 경도(Hardness)는 탁상용 경도측정기(HI96735, Hanna, Romania)를 사용하였고, 암모니아(Ammonium nitrogen)는 탁상용 암모니아측정기(DR 890, HACH, USA), 잔류염소(Residual chlorination)는 휴대용

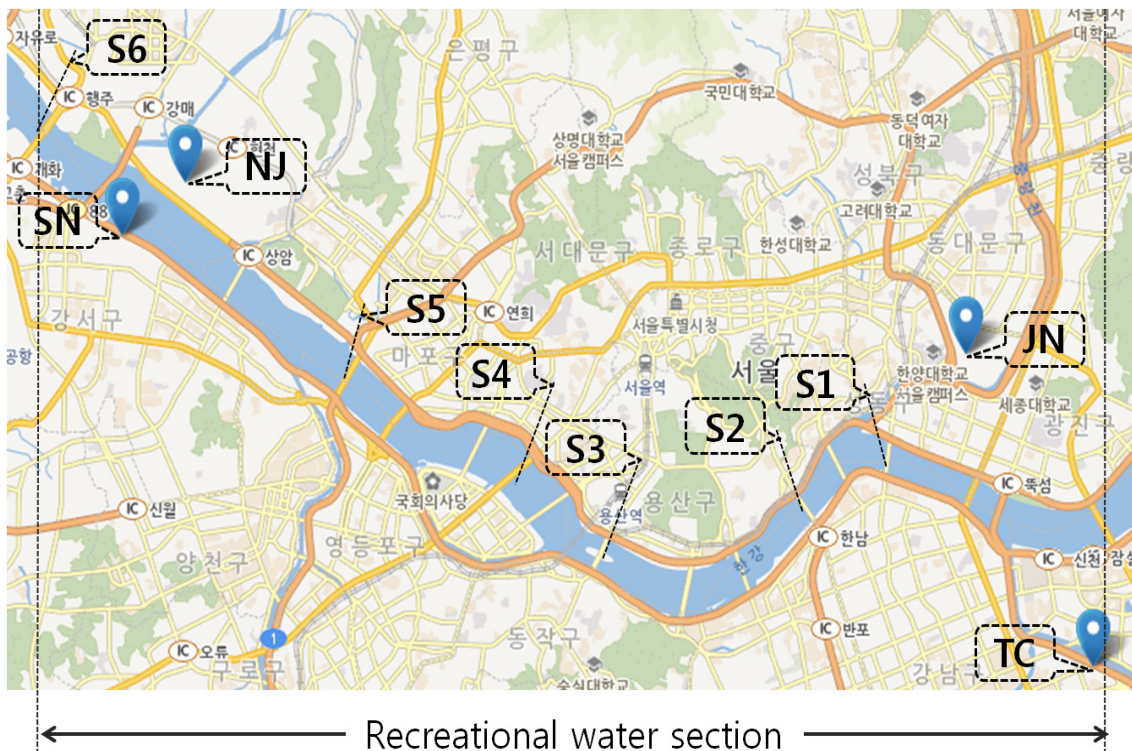


Fig. 2. Sampling sites at public sewage treatment facilities in Seoul and in the Han River.

잔류염소기(Pocket Colorimeter™ II, HACH, China)로 측정하였다.

음이온류인 불소(Fluoride), 염소 이온(Chloride), 질산성 질소(Nitrate nitrogen) 및 황산 이온(Sulfate)은 이온크로마토그래피(Metrohm, 940IC, Switzerland)를 이용하여 분석하였다. 그리고 중금속류인 구리(Copper, Cu), 아연(Zinc, Zn) 및 크롬(Chromium, Cr)에 대해서는 유도결합플라즈마-원자발광분광법(ICP CIROS VISION, Spectro (DE), German)으로 분석하였다.

소량은 0.3~3.1 mg/L 수준을 보였다. 그리고 전기전도도는 377~844 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 암모니아는 11~40 mg/L, 경도는 64~120 mg/L이었고, 염도는 0.2~0.4 % 수준이었다(표 2). 방류수의 수온은 최저 11.0°C에서 최고 27.6°C을 나타내었으며, 수소이온농도는 6.1~7.4, 용존산소량은 1.0~10.0 mg/L 수준을 보였다. 그리고 전기전도도는 349~754 $\mu\text{s}/\text{cm}$, 암모니아성 질소는 0~22 mg/L, 경도는 47~119 mg/L이었고, 염도는 0.2~0.4 % 수준이었다(표 3). 유입수에 비해 방류수에서 농도가 감소한 항목은 수소이온농도, 전기전도도와 암모니아성 질소 항목이었으며, 경도와 염분의 농도 변화는 작게 나타났다.

결과 및 고찰

1. 공공하수처리시설의 유입수와 방류수

1) 이화학적 수질특성

수질특성을 살펴보면, 서울시 공공하수처리시설 유입수의 수온은 최저 10.5°C에서 최고 28.2°C을 나타내었으며, 수소이온농도는 6.6~7.5, 용존산

2) 물벼룩을 이용한 생태독성평가

서울시 공공하수처리시설의 유입수와 방류수에 대해 물벼룩을 이용한 급성독성을 실시하였다. 그 결과 유입수 60건의 생태독성 평균값은 독성지수(TU, toxic unit) 1.6으로 나타났으며, 방류수 96

Table 2. Water quality parameters of influent at public sewage treatment facilities in Seoul

	JN#2	JN#3	TC	NJ	SN
Water temp. (°C)	18.5 (11.7~25.3) ^d	18.7 (11.4~25.9)	19.7 (10.8~27.2)	19.7 (12.0~25.0)	19.2 (10.5~28.2)
pH	7.1 (7.0~7.2)	7.1 (7.0~7.2)	7.3 (7.3~7.5)	7.0 (6.8~7.1)	6.9 (6.6~7.3)
DO (mg/L)	0.7 (0.3~1.2)	1.2 (0.6~3.1)	1.3 (1.0~1.5)	0.4 (0.3~0.6)	1.4 (0.3~2.9)
Conductivity ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	670.9 (581~750)	739.9 (651~808)	741.8 (417~844)	688.1 (377~799)	768.1 (707~844)
Ammonium nitrogen (mg/L)	29.8 (22.0~40.0)	35.8 (12~22.0)	33.3 (16~39)	29.3 (11.0~36.0)	33 (28~38)
Hardness (mg/L)	91 (68~110)	91 (78~110)	92 (68~105)	89 (64~100)	96 (74~120)
Salinity (‰)	0.3 (0.3~0.4)	0.4 (0.3~0.4)	0.4 (0.2~0.4)	0.4 (0.2~0.4)	0.4 (0.3~0.4)
Acute toxicity (TU)	1.3 (0.0~5.7)	2.0 (0.3~5.7)	1.2 (0.0~2.5)	2.1 (1.1~3.2)	1.6 (0.4~4.0)

^d (min. ~ max.)

건에서는 모두 TU 0.0으로 나타나 유입수의 독성이 하수처리과정에서 감소되어 공공하수처리시설 방류수 수질 기준인 TU 1.0 이하로 방류되는 것으로 확인하였다(표 2~3). 하현섭 등(11)의 연구에서도 인천관내 7개 공공하수처리장의 유입수에서 나타난 독성이 하수처리공정을 거치면서 방류수에서는 생태독성이 감소한다고 보고하였다. 그러나 김시영 등(12)의 연구에서는 2곳의 공공하수처리장 중 1곳의 방류수에서 TU 0.4로 독성이 나타났는데, 이는 최종 방류수를 염소로 소독한 것이 영향을 준 것으로 보였다. 잔류염소농도가 0.03~0.05 mg/L 수준에서는 생태독성이 나타나지 않는다고 알려져 있으며(12, 13), Park 등(14)의 연구에서도 염소 소독부산물인 총트리할로메탄(THMs, trihalomethanes)과 할로아세트에시드(HHAs, haloacetic acids)의 농도가 각각 100 µg/L

일 때 급성독성을 보이지 않았지만, 만성독성에 대해 고려해 보아야 한다고 평가하였다.

3) 공공하수처리시설 방류량과 한강유량

서울시 공공하수처리시설의 월평균 방류량은 48.8 m³/s이었으며, 최소 44.3 m³/s에서 최대 64.1 m³/s 수준이었다. 한강 하류구간인 행주대교 지점(S6)의 월평균 유량은 866.1 m³/s이었으며, 최소 494.0 m³/s에서 최대 2,215.6 m³/s으로 나타났다(그림 3). 행주대교 지점의 유량에서 4개 공공하수처리시설의 방류량이 차지하는 비율을 표 4에 제시하였다. 행주대교 지점의 유량 중 방류수는 평균 6.9% 수준을 차지하고 있었으며, 장마기간인 7월에서 10월까지는 방류수의 비율이 2.8%에서 6.6% 수준이었다. 나머지 기간에는 최소 7.1%에서 최대 9.3%를 보였는데, 이는 한강 유량

Table 3. Water quality parameters of effluent at public sewage treatment facilities in Seoul

	JN#2	JN#3	JN#4	TC#1	TC#2	NJ#1	NJ#2	SN
Water Temp. (°C)	19.0 (11.9~25.5) ^d	19.5 (11.7~26.2)	19.9 (13.5~26.3)	20.5 (12.9~27.5)	20.6 (12.8~27.6)	19.5 (11.0~26.1)	19.5 (11.0~26.0)	19.6 (11.8~27.6)
pH	6.5 (6.4~6.6)	6.5 (6.3~6.7)	6.7 (6.4~7.2)	6.5 (6.2~7.4)	6.6 (6.4~6.9)	6.4 (6.2~6.6)	6.3 (6.1~6.4)	6.5 (6.2~6.7)
DO (mg/L)	8.5 (6.3~10)	6.0 (4.3~6.8)	2.7 (1.0~5.8)	1.3 (1.2~1.5)	1.5 (1.2~1.8)	1.9 (1.7~2.2)	1.9 (1.7~2.3)	8.1 (6.9~8.4)
Conductivity (µs/cm)	535.9 (452~651)	602.1 (534~666)	668.1 (585~729)	582.3 (431~675)	619.8 (465~754)	536.9 (429~597)	536.8 (421~598)	554.1 (349~711)
Ammonium Nitrogen(mg/L)	1.1 (0.0~3.0)	3.1 (0.0~7.0)	15.7 (2~22)	1.8 (0~5.0)	4.3 (2~10)	1.1 (0~6.0)	0.8 (0~5.0)	10.2 (3~20)
Hardness (mg/L)	86 (67~110)	90 (79~105)	88 (65~110)	91 (80~110)	91 (78~105)	89 (60~110)	90 (72~115)	82 (47~119)
Salinity (‰)	0.3 (0.2~0.3)	0.3 (0.3~0.3)	0.3 (0.3~0.4)	0.3 (0.2~0.3)	0.3 (0.2~0.4)	0.3 (0.2~0.3)	0.3 (0.2~0.3)	0.3 (0.2~0.3)
Residual chlorination(mg/L)	0.01 (0~0.02)	0.01 (0~0.02)	0.01 (0~0.03)	0.01 (0~0.02)	0.01 (0~0.01)	0.01 (0~0.01)	0.01 (0~0.02)	0.01 (0~0.03)
Acute toxicity(TU)	0	0	0	0	0	0	0	0

^d (min. ~ max.)

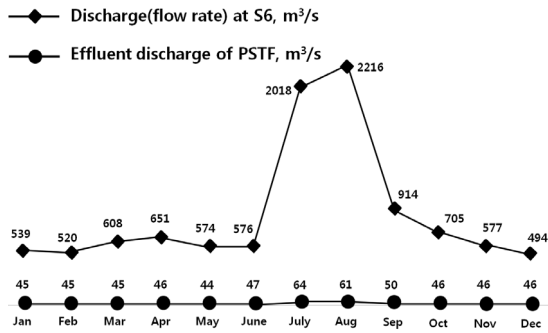


Fig. 3. Effluent discharge of public sewage treatment facilities(PSTF) in Seoul and discharge at Haengju Bridge(S6)

이 적은 시기와 일치하였다. 따라서 유량이 적은 시기에는 방류수의 수질이 한강 수질에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 환경부 자료(15)에서도 2015년에 팔당댐 방류량 감소와 하류구간의 유량 감소로 한강에서 하수처리장 방류수 비중이 증가하여 총인의 농도가 높아졌고, 그 결과 조류 발생에 영향을 준 것으로 평가하였다.

2. 한강 친수활동 구간

1) 이화학적 수질특성

4월부터 11월까지 채수한 한강시료의 최저 수온은 11.7℃, 최고 수온은 26.6℃이었으며, 수소이온농도는 7~8.4의 수준이었고, 용존산소량은 7.2~12.3 mg/L를 보였다. 암모니아성 질소는 거의 검출되지 않았고, 경도는 32~105 mg/L수준을 보였다. 염분은 0.1‰ 수준을 보여 물벼룩이 영향을 받지 않는다고 알려진 염분 4‰ 이하인 것으로 나타났다(11). 분석한 항목 중 탁도는 최저 1.3 NTU에서 최고 115.9 NTU로 나타나 변동폭이 컸으며, 여러 음이온 중에서도 염소 이온의 변동폭

이 가장 크게 나타났다(표 5). Sarah J. 등(16)은 경도 및 알칼리도가 높은 경우 침전물 발생으로 물벼룩에 치명적일 수 있으며, 너무 낮은 이온 균형에서도 영향을 받는 것으로 조사하였다.

2) 물벼룩을 이용한 생태독성평가

한강시료 76건에 대해 물벼룩을 이용한 급성독성 시험을 실시하였다. 한차례 10월 10일에 채수한 성수대교(S5) 시료에서 TU 0.5의 독성을 보였다. 이때 원수 100% 비이커 4개 중 1개에서만 시험에 사용한 물벼룩 5마리가 모두 치사한 것으로 나타났다. 이는 시험과정 중 비이커의 오염 또는 일시적으로 물벼룩에 충격을 줄 수 있는 시료특성이 있을 수 있지만, 원인탐색과정을 별도로 수행하지 않아 결과에 대한 해석에는 한계가 있었다. 나머지 75건의 시료에서는 모두 생태독성이 나타나지 않았다(표 5). 다만, 물벼룩이라는 단일종으로 수환경의 생태독성측면의 안전성을 평가하기에는 한계가 있으므로 향후 다른 시험종(발광박테리아, 조류, 어류 등)으로 확대하여 평가할 필요가 있다.

국내에서 연구된 하천의 생태독성조사 사례를 살펴보면, 노 등은 인천시의 자연형으로 조성된 5개 도심하천에서 조사기간 동안 모든 구간에서 생태독성이 나타나지 않았다고 보고하였다(17). 또한 환경부 자료에 따르면 전라북도내 2개 하천과 산단하천 6곳 모두에서 생태독성이 나타나지 않았다고 보고하였다(18). 그러나 윤의 연구에서는 부산시 도심하천인 온천천의 조사에서 초기강우로 인한 지류의 오수월류로 생태독성이 유발될 수 있음을 보였고, 동천의 경우 해수의 영향을 받는 감조하천으로 생태독성을 나타내었다고 보고하였다(19).

Table 4. The ratio of effluent discharge of public sewage treatment facilities in Seoul to discharge at Haengju Bridge(S6)

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ratio ^e (%)	8.3	8.7	7.4	7.1	7.7	8.2	3.2	2.8	5.4	6.6	8.0	9.3

^e Ratio(%) = $Q_{\text{Effluent}}/Q_{\text{Total}} \times 100$

Q_{Effluent} : Effluent discharge of public sewage treatment facilities in Seoul, m³/s

Q_{Total} : Discharge(flow rate) at Haengju Bridge, m³/s

3) 중금속 영향

한강시료에 대해 중금속 3종을 분석하였다. 물벼룩에 독성을 일으킬 수 있는 중금속은 카드뮴, 납, 수은, 비소, 구리, 아연, 크롬 등이 있으며, 이중 구리(Cu), 아연(Zn), 크롬(Cr)에 대해 분석한

결과 구리는 한차례 성산대교(S5)에서 0.011 mg/L 검출된 경우를 제외하면 모두 정량한계 이하였다(표 5). 구리의 24시간-반수영향농도(EC₅₀)가 0.030 mg/L이고, 48시간-EC₅₀가 0.021~0.146 mg/L 수준으로 알려져 있어, 이번에 검출

Table 5. Water quality parameters of water samples in the Han River

	S1	S2	S3	S4	S5
Water temp.(°C)	20.1 (11.7~26.5) ^d	20.3 (12.3~26.4)	20.5 (11.7~26.5)	20.4 (11.7~26.5)	21.2 (11.9~26.6)
pH	7.48 (7~8)	7.37 (7.1~7.7)	7.36 (7~7.6)	7.39 (7~7.63)	7.59 (7.1~8.4)
DO(mg/L)	9.7 (8.4~11.1)	9.1 (8.1~10.3)	8.95 (7.2~10)	9.18 (7.4~10.4)	9.41 (7.2~12.3)
Conductivity(μs/cm)	228 (133~286)	263 (133~345)	246 (143~313)	242 (143~317)	268 (138~903)
Ammonium nitrogen (mg/L)	0	0 (0~1)	0	0	0 (0~1)
Hardness(mg/L)	67 (32~88)	72 (39~94)	70 (47~81)	67 (34~84)	66 (42~105)
Salinity(‰)	0.1 (0.1~0.3)	0.1 (0.1~0.2)	0.1 (0.1~0.1)	0.1 (0.1~0.3)	0.1 (0.1~0.4)
Turbidity(NTU)	6.5 (2.7~31.3)	7.0 (3~34.2)	8.5 (3.4~28.6)	9.8 (3.6~28.7)	20.5 (1.3~115.9)
Fluoride ^f (mg/L)	0.11 (0.10~0.15)	0.11 (0.10~0.12)	0.10 (0.09~0.12)	0.10 (0.09~0.11)	0.11 (0.08~2.22)
Chloride ^g (mg/L)	20.19 (6.82~33.86)	26.03 (5.72~42.92)	22.2 (6.98~36.93)	21.76 (6.98~36.17)	30.89 (6.29~208.50)
Nitrate ^h (mg/L)	2.35 (1.75~3.01)	3.11 (1.66~4.35)	2.76 (1.76~3.79)	2.75 (1.79~3.67)	2.81 (1.49~5.35)
Sulfate ⁱ (mg/L)	15.20 (8.73~19.73)	16.61 (8.04~22.13)	15.76 (9.99~20.87)	15.65 (9.11~20.45)	16.82 (8.72~43.68)
Acute toxicity(TU)	0~0.5	0	0	0	0
Cu ^j (mg/L)	< 0.006	< 0.006	< 0.006	< 0.006	< 0.006~0.011
Zn ^k (mg/L)	< 0.002~0.003	< 0.002~0.006	< 0.002~0.005	< 0.002~0.010	< 0.002~0.013
Cr ₁ (mg/L)	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007	< 0.007

^d (min. ~ max.) ^f LOD(Limit of Detection) is 0.004 mg/L, ^g LOD is 0.015 mg/L, ^h LOD is 0.003 mg/L, ⁱ LOD is 0.009 mg/L, ^j LOQ(limits of quantification) is 0.006 mg/L, ^k LOQ is 0.002 mg/L, ^l LOQ is 0.007 mg/L, ^{r-i} Sample numbers were 75.

된 0.011 mg/L는 물벼룩에 영향을 주는 수준이하인 것으로 판단된다(19~23). 아연의 48시간-EC₅₀가 0.56~0.916 mg/L 수준으로 알려져 있는데, 시료 중 최고농도가 0.013 mg/L로 나타나 물벼룩에 영향을 주는 수준이하인 것으로 판단된다(19~23). 크롬은 모든 시료에서 정량한계 이하로 나타났다.

결 론

본 연구는 서울시 4개 공공하수처리시설의 유입수와 방류수 그리고 방류수 유입수계인 한강의 수질에 대해 이화화학목, 물벼룩을 이용한 급성독성항목, 중금속 항목을 분석하여 생태학적 측면의 수질특성을 평가하고자 하였다.

1. 서울시 공공하수처리시설의 수질특성을 살펴보면, 유입수에 비해 방류수의 수소이온농도, 전기전도도와 암모니아성 질소 항목에서 농도가 감소하였고, 경도와 염분의 농도 변화는 작게 나타났다.
2. 서울시 공공하수처리시설 유입수에 대한 물벼룩을 이용한 생태독성은 평균 TU 1.6을 나타내었으며, 최대 TU 5.7을 나타내기도 하였다. 방류수의 생태독성은 모두 TU 0.0을 나타내어 물벼룩을 이용한 급성독성 시험기준인 TU 1.0 이내로 처리되어, 유입수계인 한강으로 방류되고 있음을 확인하였다.
3. 서울시 공공하수처리시설의 2017년도 평균 방류량은 48.8 m³/s이었으며, 행주대교 지점에서 방류수가 차지하는 비율은 6.9% 수준이었다. 특히 한강 유량이 적은 시기에 방류수가 차지하는 비율이 최대 9.3%를 나타내기도 하여 방류수의 수질이 한강 수질에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.
4. 한강시료의 수질특성은 암모니아성 질소가 거의 검출되지 않았고, 경도는 32~105 mg/L, 염분은 0.1% 수준을 보였다. 탁도는 최저 1.3

NTU에서 최고 115.9 NTU로 나타나 변동폭이 컸으며, 여러 음이온 중에서도 염소이온의 변동폭이 가장 크게 나타났다.

5. 한강시료 76건에 대한 물벼룩을 이용한 급성독성 시험에서 S1 지점에서 한차례 TU 0.5를 나타내었고, 나머지 75건에서는 모두 생태독성을 나타내지 않았다. 하지만, 별도의 원인탐색과정을 수행하지 않았기 때문에 독성을 일으킨 원인을 추정하는데 한계가 있었다.
6. 물벼룩이라는 단일종으로 한강수질에 대한 생태학적 측면의 안전성을 평가하기에는 한계가 있으므로 향후 다른 시험종(발광박테리아, 조류, 어류 등)으로 확대하여 평가할 필요가 있다.
7. 한강시료에서 물벼룩에 독성을 일으킬 수 있는 구리, 아연, 크롬의 분석결과를 살펴보면, 중금속 3종 모두 반수영향농도(EC₅₀)보다 낮은 농도수준이거나 정량한계 이하로 나타났다. 향후 물벼룩에 영향을 준다고 알려진 다른 중금속에 대한 추가적인 조사가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. 한강홍제통제소 홈페이지 <http://www.hrfco.go.kr>
2. 환경부 : 조류경보제 대상 호소·하천 지정 고시. 2018.
3. 환경부 : 물환경보전법 시행령 [별표 2]. 2018.
4. 하현주, 오석률, 윤호균, 조수석, 양진영, 김지희, 문병진, 윤중섭, 전재식, 정권 : 한강 친수활동구간 조류독소 마이크로시스틴 분포 및 남조류 발생 영향요인. 서울특별시 보건환경연구원보, 52:259~269, 2016.
5. 서울특별시 한강사업본부 홈페이지 <http://hangang.seoul.go.kr>
6. 양진영, 신덕영, 박서희, 이진, 홍주희, 하현주, 최예덕, 이준연, 김진아, 배경석, 전재식, 정권 : 공공하수처리시설의 방류수 수질기준 개선 연구. 서울특별시 보건환경연구원보,

- 51:254~264, 2015.
7. 권오상, 김상훈 : 국내 공공하수처리장에서의 생태독성관리 및 향후과제. 국립환경과학원.
 8. 환경부 : 수질오염공정시험기준. 2017.
 9. 국립환경과학원 : 생태독성 시험생물종 분양 규정, 2017.
 10. 국립환경과학원 : 생태독성 시험방법 및 운영 지침, 2015.
 11. 하현섭, 민왕기, 김미자, 이병옥, 한지은, 조영민 : 공공하수처리시설 생태독성 영향인자 조사 연구. 인천보건환경연구원보, 14:346~355, 2014.
 12. 김시영, 윤나나, 지화성, 한상민, 권동민, 이경심 : 물벼룩을 이용한 산업폐수 배출수의 생태독성 특성 연구. 부산시보건환경연구원보, 20(1):131~142, 2010.
 13. 환경부 : 생태독성 저감 기술 지원 사례집 (III), 2009.
 14. Keun-Young Park, Su-Young Choi, Seung-Hoon Lee, Ji-Hyang Kweon, Ji-Hyeon Song : Comparison of formation of disinfection by-products by chlorination and ozonation of wastewater effluents and their toxicity to *Daphnia magna*. Environ. Pollution, 215:314~321, 2016.
 15. 환경부 : 조류경보제 운영 매뉴얼. 환경부 국립환경과학원, 2017.
 16. Sarah J. Bogart, Samuel woodman, Dylan Steinkey, Cindy Meays, Greg G. Pyle : Rapid changes in water hardness and alkalinity: Calcite formation is lethal to *Daphnia magna*. Science of the Total Environ., 559:182~191, 2016.
 17. 노재일, 곽완순, 이병옥, 민성은, 정유진, 조영민 : 관내 하천에 대한 생태학적 독성평가. 인천보건환경연구원보, 14:356~364, 2014.
 18. 보도자료, 환경부, 도내 주요 하천 생태독성 '이상무', 새만금지방환경청 측정분석과, p.1~3, 2015.
 19. 윤나나 : 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 부산시 도심하천 및 수로의 생물독성평가. 부산대학교 대학원 석사학위논문, 2008.
 20. Mount, DI and Norberg, TJ : A seven-day life cycle cladoceran toxicity test. Environ. toxicol. and chem., 3(3):425~434, 1984.
 21. Khangarot, BS and Ray, PK : Correlation between heavy metal acute toxicity values in *Daphnia magna* and Fish. Environ. Contam. and Toxicol., 38:722~726, 1987.
 22. Guilhermino, L, Diamantino, TC, Riberiro, R, Goncalves, F and Soares, AMMM : Suitability of test media containing EDTA for the evaluation of acute metal toxicity to *Daphnia magna* Straus. Ecotox. Environ. Safe, 38:292~295, 1997.
 23. 정재원 외 : 물벼룩에 대한 중금속의 급성 및 만성독성. 한국환경과학회지, 10(4):293~298, 2001.