

시화공단 인공하천의 수질오염 특성 연구

문희천[†] · 김요용 · 서인숙 · 김종성 · 김균희 · 황선민 · 송진호 · 김태화
경기도보건환경연구원 물환경연구부

Water Quality Characteristics of Artificial Streams in Shihwa Industrial Complex

Hee-Cheon Moon[†], Yo-Yong Kim, In-Sook Seo, Jong-Sung Kim, Gyun-Hee Kim,
Sun-Min Hwang, Jin-Ho Song, and Tae-Hwa Kim

Department of Water Environmental Research, Gyeonggi-do Institute of Health and Environment,
Suwon, 16205, Korea

Received November 17, 2017/Revised December 14, 2017/Accepted December 22, 2017

Water pollution level of artificial streams, Okgu, Gunja, Jeongwang, 4Ganseon and Siheong, in Shihwa industrial complex was investigated in order to provide the scientific data for water quality management of the streams. COD concentration from Okgu midstream with median value of 62.5 mg/L was the highest level of all sampling sites. At all artificial streams, Ni, Zn, Cu and Cr concentrations from midstream and downstream of industrial region were relatively higher than those of upstream of residential region. The high content of Cr⁶⁺ with median value of 0.293 mg/L was determined at 4Ganseon midstream. It was revealed that pollution of artificial streams was caused by intermittent and impulsive discharge of untreated or inadequately treated effluent through the storm sewer from industrial factories. Thus it is necessary to link and treat the stream water into sewage treatment plant. As an effective implementation to manage and improve the water quality of artificial streams, we suggest to pump the treated effluent from near sewage treatment plant into upstream of each artificial stream and irrigate it via artificial streams for waterfront revitalization of Shihwa Industrial Complex.

Key words: Shihwa industrial complex, Artificial streams, Pollutants, COD, Metals

1. 서 론

시화호 인근에 위치한 시화·반월 국가공업단지(이하; 공단)는 수도권 각지에 산재해 있는 중소기업의 집적화 및 인구 분산정책을 위해 1977년부터 1987년까지 반월 공단(경기도 안산시 소재) 조성을 시작하였으며 1986년부터 2006년까지 시화공단(경기도 시흥시 소재)이 조성되었다. 특히 시화·반월 공단은 도금, 피혁, 섬유, 금속 기계, 화학, 기계업종 등 약 15,000개의 영세 중소기업이 모여 형성된 대규모 공단이며 그 중 약 3,300개(시화공단 약 1,700개소, 반월 공단 약 1,600개소) 사업장의 생산활동 과정에서 발생하는 각종 폐수 및 하수가 시화

호로 직접 유입되어 시화호 수질 악화의 주요 요인이 되었다. 특히 시화공단 내 조성된 5개의 인공하천인 옥구천, 군자천, 정왕천, 4간선수로 및 시흥천은 주거지와 공단 내에서 발생하는 우수 배제 및 인근 주민의 친수공간 확보를 주목적으로 조성되었으나 완만한 하천 경사로 인한 정체, 하천 유지용수의 부족 및 처리되지 않은 생활하수와 공단폐수의 방류 등의 원인으로 극심한 오염을 나타내고 있다. 시화호로 유입되는 하천들 중 이들 인공하천들은 도시지역(안산천) 및 농업지역(반월천, 동화천, 삼화천)을 경유하여 흐르는 하천들에 비해 상대적으로 높은 유기물질, 총인 및 총질소 농도를 나타내었다.¹⁾ 또한 일반 하천과 달리 이들 하천 지표수 및 퇴적

[†]To whom correspondence should be addressed.

물 중 Cu, Zn, Cd 및 Pb 등이 고농도로 검출되었으며 이들 중금속 오염의 주된 요인으로 하천 주변에 밀집된 각종 사업장으로부터 미처리된 폐수의 유입에 의한 것으로 보고하였다.^{2,3)} 시화공단 내 중금속 오염이 심한 시흥천 지표수 시료에 대한 미생물 군집 분포에서 *Campylobacter*, *Arcobacter* spp., *Shewanella* spp., *Acinetobacter* spp. 등이 우점하였으며 이들 미생물들은 슬러지나 오·폐수뿐만 아니라 중금속과 난분해성 물질에 내성을 지니고 있으며 인공하천 내에 이런 미생물의 우점은 다른 미생물이 살기 어려운 환경임을 의미하고 있다.⁴⁾ 사실 시화·반월 공단은 분류식 하수관거 설치지역으로 하·폐수는 하수관을 통해 하수종말처리장으로 유입 처리하고 있으나 인공하천 주변의 우수관거를 통해 미처리된 하·폐수의 방류로 심각한 하천 오염을 유발하고 있다.⁵⁾

이러한 수질오염을 개선하고자 시화호 종합관리의 일환으로 2001년에는 시화호 주변의 하수처리장 확장 및 인공습지 조성을 추진하였으며 2007년에는 '시화호 인공수로 자연형 하천공사'를 추진한 바 있다. 하지만 현재 시화공단 내 인공하천의 수질 개선 효과는 크게 개선되지 못하고 있으며 특히 옥구천에서 물고기 폐사와 같은 수질오염 사고가 빈번히 발생하고 있고 미처리된 하·폐수의 유입이 시화호 오염의 주요 요인으로 남아 있다. 시화공단 내 인공하천들은 향후 하천복원 사업을 통해 친환경적 생태하천으로 조성될 계획이다. 성공적 하천복

원 사업을 추진하기 위한 선결 과제는 하천 유지용수 확보 및 하천 수질을 만족시켜야 하지만 현재 인공하천의 수질은 친환경 하천조성에 적합한 수질에 미치지 못하고 있다. 그러므로 인공하천의 수질 오염의 근본적인 원인 파악을 위한 지속적인 연구 및 수질 모니터링 등 다양한 수질환경개선 대책방안 마련이 필요하다.

이에 본 연구에서는 시화공단 내 인공하천의 일반수질오염물질 및 중금속 오염물질에 대한 시·공간적 오염 특성 평가를 통해 향후 각 하천의 수질관리 및 오염대책 수립에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료 채취

시화공단을 관통해서 흐르는 옥구천(유하길이 5.48 km), 군자천(4.67 km), 정왕천(4.50 km)의 상류, 중류, 하류 각 3지점과 4간선수로(2.08 km)의 중류와 하류 2지점 및 반월공단과 경계지점에 위치한 시흥천(8.86 km)의 상류, 중류, 하류 3지점 등 총 14개 지점을 선정하여 1개월 간격으로 비강우시 2015년 6월부터 2016년 11월까지 총 18회의 하천 지표수를 채취하였다(Fig. 1). 또한 간헐적으로 옥구천 및 4간선수로 중류 인근 우수관거 2지점의 시료를 채수하여 하천 수질에 대한 하수관거 유출수의 영향을 평가하였다. Table 1과 같이 각 시료채취 지점은 GPS(Global Positioning System) 좌표로 표시하

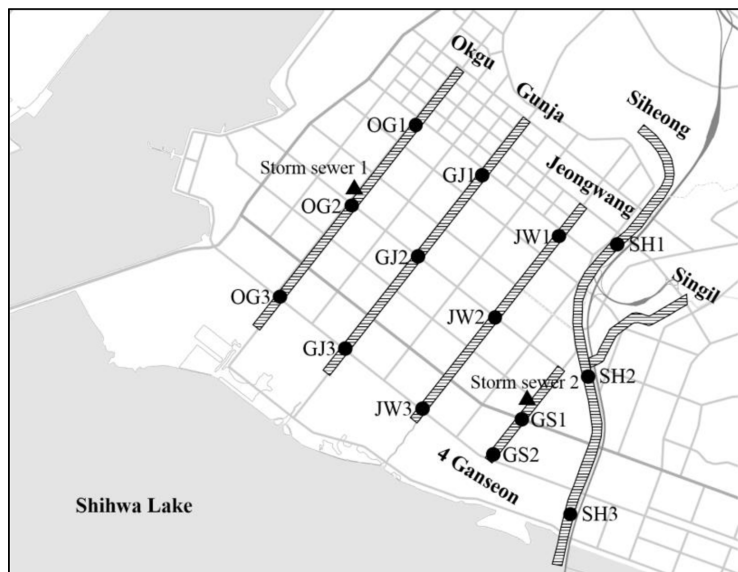


Fig. 1. Sampling sites of artificial streams in Shihwa industrial complex.

Table 1. Coordinates and business classification of each sampling site from artificial streams of Shihwa industrial complex

Name	Sampling sites	Coordinates	Business classification around sampling sites
OG1	Okgu upstream	37°21'00.8"N 126°43'22.2"E	Residential and commercial region
OG2	Okgu midstream	37°20'23.3"N 126°42'45.9"E	Food processing, Chemicals, Machinery, Textile/Dye
OG3	Okgu down stream	37°19'42.6"N 126°42'06.5"E	Textile/Dye, Metallic processing, Chemicals
GJ1	Gunja upstream	37°20'38.6"N 126°43'58.4"E	Residential and Commercial region
GJ2	Gunja midstream	37°20'01.0"N 126°43'21.9"E	Machinery
GJ3	Gunja downstream	37°19'20.4"N 126°42'42.6"E	Plating, Paper & pulp, Metallic processing
JW1	Jeongwang upstream	37°20'11.6"N 126°44'42.4"E	Residential and Commercial region
JW2	Jeonwang midstream	37°19'33.8"N 126°44'06.2"E	Electronics & Electrical, Paper & pulp
JW2	Jeongwan downstream	37°18'53.1"N 126°43'26.7"E	Machinery, Electronics & Electrical
GS1	4Ganseon midstream	37°18'49.8"N 126°44'21.7"E	Plating, Metallic processing, Painting, Paper & pulp
GS2	4Ganseon downstream	37°18'32.2"N 126°44'04.5"E	Fine chemicals, Machinery
SH1	Siheong upstream	37°20'09.9"N 126°45'13.9"E	Residential region
SH2	Siheong midstream	37°19'03.2"N 126°44'49.5"E	Paper & pulp, Metallic processing
SH3	Siheong downstream	37°18'18.5"N 126°44'52.9"E	Painting, chemicals, Food
Outflow1	Nearby Okgu midstream	37°20'37.1"N 126°42'58.8"E	-
Outflow2	Nearby 4Ganseon midstream	37°18'57.1"N 126°44'28.6"E	-

였으며 북위37도18분32.2초에서 북위37도21분0.8초 및 동경126도42분6.5초에서 동경126도44분42.4초에 위치해 있으며 행정구역상 시흥시 정왕동과 안산시 단원구에 위치해 있다. 각 시료 채취 지점 주변에는 주거·상업 지역 및 식품, 염색, 도금, 금속기계, 정밀화학, 전자·전기 업종 등이 복합적으로 밀집해있다.

2.2. 분석 방법

각 지점에서 채수한 시료를 신속히 실험실로 운반 후 생물학적 산소요구량(BOD; biological oxygen demand), 화학적 산소요구량(COD; chemical oxygen demand), 부유물질(SS; suspended solid), 총질소(TN; total nitrogen), 총인(TP; total phosphorus), 중금속(Cu; copper, Cr; chromium, Mn; manganese, Fe; iron, Zn; zinc, Ni; nickel, Ba; barium) 및 6가 크롬(Cr⁶⁺; hexavalent chromium)을 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다.⁶⁾

TN 및 TP는 연속 흐름법(Continuous flow analysis)으로 TN/TP 자동분석기(QuAAtro39, BLTEC, Germany)로 측정하였다. 중금속 분석을 위한 시료는 중금속 분해용 고순도 질산을 사용하여 마이크로웨이브 전처리 기기(Ethos touch control, Mile Stone, Italy)로 고온(180°C) 고압(410 psi)으로 분해하여 유도결합플라즈마 발광광도계(ICP-OES; Inductively coupled plasma-optical emission spectrophotometer, Optima 5300DV,

Perkin-Elmer, USA)를 이용하여 분석하였다. Cr⁶⁺은 자외/가시선 분광법(UV/Visible Spectrometer, Cary 300 Conc, Varian, USA)으로 측정하였다. 또한 각 항목별 통계분석은 윈도우용 SPSS version 1.8 프로그램으로 Pearson 상관계수를 구하여 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인공하천의 일반 수질오염물질 분포 특성

시화공단 내 5개 인공하천의 상류, 중류, 하류 지점의 BOD, COD, SS, TN 및 TP 분석 값은 최대값, 최소값, 중위값 및 4분위값 등을 갖는 박스 플롯(box plot)으로 나타내었다. 또한 이상치의 영향을 받는 평균값 대신에 중위값(Median)으로 데이터 분산 정도가 매우 큰 인공하천의 수질오염 특성을 평가하였다.

옥구천(OG)의 경우, 대부분 아파트 단지 위주의 주거 지역과 일부 상가지역에 위치한 상류지점(OG1)의 BOD는 2.3 mg/L의 낮은 중위값을 나타낸 반면 화학제품 제조업, 식품제조업 및 염색 사업장이 밀집해 있는⁵⁾ 중류(OG2)와 하류(OG3)에서 상류 BOD의 6.3배와 3.7배나 높은 14.5와 8.6 mg/L의 중위값을 나타내었다(Fig. 2(a)). 이러한 경향은 COD 농도 분포(Fig. 2(b))에서 유사하게 나타났으며 상류지점(OG1)의 농도 3.7~15.9 mg/L(중위값 7.8 mg/L)에 비해 중류(OG2) 및 하류(OG3)는 4.0~175.2 mg/L (중위값 62.5 mg/L) 및 8.1~57.1 mg/L

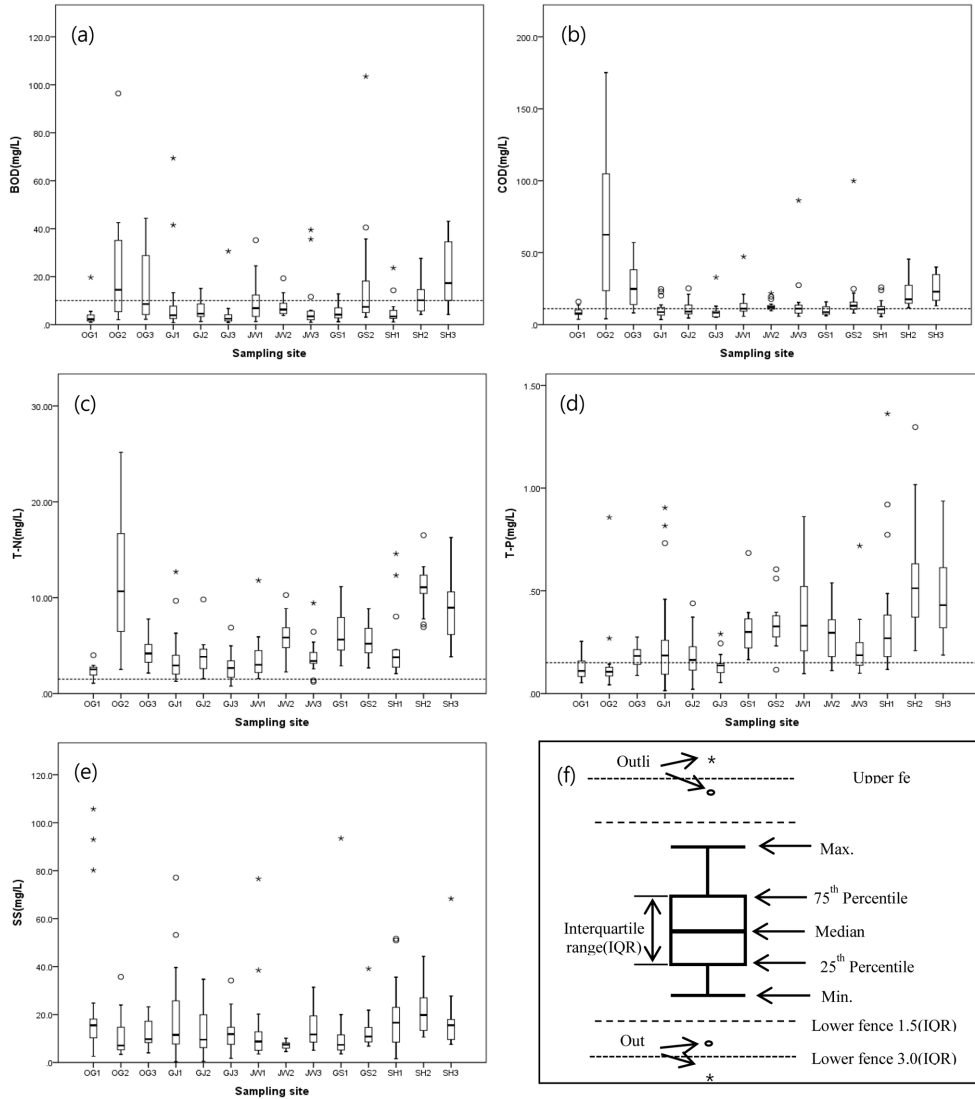


Fig. 2. BOD (a), COD (b), TN (c), TP (d) and SS (e) concentration of each sampling site from 5 streams of Shihwa industrial complex and a detailed explanation (f) on box plot. The dotted lines of (a), (b) and (c), (d) indicate pollutant levels of grade VI on river and lake environmental standard, respectively.

L(중위값 24.8 mg/L)로 급격히 증가하였다. 특히 옥구천 중류(OG2)에서 BOD 농도에 비해 COD 농도가 약 4.3 배나 높은 수치를 보이고 있는데 이것은 일반 생활하수의 유입에 의한 것이라기보다 생물학적으로 분해가 어려운 사업장에서 방류된 산화제 소모성 화합물질을 다량 함유한 폐수의 유입으로 추정할 수 있다. 또한 옥구천 중류(OG2)의 BOD 및 COD 중위값은 일반 하천 생활환경기준의 최하 등급인 매우 나쁨(VI) 등급(BOD 10.0 mg/L 및 COD 11.0 mg/L)⁷⁾보다 각각 약 1.5 및

5.7배나 더 높은 농도를 나타내었으며 다른 인공하천의 각 지점별 COD 값 중 가장 높은 수치를 나타내었다 (Fig. 2(b)). 옥구천의 각 지점별 TN 농도 분포(Fig. 2(c))는 COD 농도 변화와 매우 유사한 패턴을 나타내었고 중류(OG2)에서 가장 높은 농도범위인 2.49~25.23 mg/L(중위값 10.71 mg/L)를 나타내었다. TP 및 SS의 농도 분포는 상류, 중류, 하류로 갈수록 점점 증가하는 경향을 나타내고 있다(Fig. 2(d), 2(e)).

옥구천 주변에는 주거지역에 15개와 공단지역에 24개

Table 2. Pollutant concentration of storm sewer 1 (Unit; mg/L)

Sampling date	BOD	COD	SS	T-N	T-P
2016-09-29	148.0	1358.6	6.0	183.14	0.225
2016-10-27	7.0	26.1	4.3	9.33	0.373
2016-11-29	4.8	14.7	4.4	7.15	0.208

의 우수관거가 있으며⁵⁾ 그 중 가장 오염도가 심한 중류(OG2)와 인접한 우수관거(Storm sewer 1)의 시료를 비강우 시 3회에 걸쳐 분석한 결과 2016년 9월 29일 채수한 시료에서 BOD, COD 및 TN 값이 각각 148.0, 1358.6 및 183.14 mg/L의 고농도 오염물질이 유입되고 있었다(Table 2). 우수관거 유출수의 COD(1358.6 mg/L)/BOD(148.0 mg/L) 비는 9.2로 일반 생활하수와는 특성이 다른 생물학적 난분해성인 화학 및 염색 사업장의 미처리 폐수특성을 지니고 있으며 이러한 우수관거를 통한 간헐적/충격적 유입은 옥구천 중류(OG2)의 수질오염에 직접적인 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다(Fig. 2(a)-2(c)).

인공하천 주변의 우수관거 설치의 원래 목적은 강우 시 표면 유출수, 지하수 및 용출수를 하천으로 유도하기 위한 것인데 실제로는 미처리 폐수 방류 및 오점에 의한 오수의 배출 통로로 변질된 것이다. 그리고 강우 시 옥구천 유역특성 연구에서도 옥구천 인근 우수관거로 배출되는 공장폐수 유출수의 pH가 약 10.5 이상의 알칼리성 폐수를 확인한 바 있다.⁸⁾ 이러한 이유로 옥구천에는 각종 물고기 폐사 사고 및 민원이 끊이지 않고 발생하고 있는 실정이다. 또한, 옥구천 하류에는 비 강우 시 차집 펌프로 인근 시화하수종말처리장으로 전량 이송 처리되고 있지만 펌프 용량부족 및 강우 유량 증가로 비점오염물질 및 미처리된 오·폐수가 전량 차집되지 못하고 하류 보를 월류하여 시화호 수질오염에 큰 영향을 미치고 있는 실정이다.^{9,10)}

군자천(GJ)의 경우, 시화공단의 서쪽 중앙을 흐르는 하천으로 아파트, 일반주택 및 상가지역이 밀집한 상류지점(GJ1)에서 BOD 중위값 3.9 mg/L 나타내었고 사업장이 밀집한 중류(GJ2) 및 하류(GJ3) 지점에서 각각 중위값 4.6 및 2.4 mg/L로 낮은 농도 분포를 보였다(Fig. 2(a)). 정왕천(JW)은 군자천과 함께 시화공단의 중앙을 흐르고 있는 하천으로 항목별 수질오염도는 군자천과 유사하게 대부분 낮은 농도를 보이고 있다(Fig. 2).

4 간선(GS)은 시화공단 남서쪽에 위치하며 유하 길이가 2.08 km로 가장 짧은 하천이며 주거 지역이 없이 중류(GS1) 및 하류(GS2) 인근에 각각 도금/금속가공/제

지 및 정밀화학/기계 업종이 밀집해 있고 각 지점에서 유기물질 및 영양물질의 오염도는 군자천 및 정왕천과 유사하거나 약간 높은 경향을 보이고 있다.

인공하천 중 하천의 길이가 가장 긴(8.86 km) 시흥천(SH)의 상류지점(SH1)은 시흥천 본류의 주거지역에 해당하고, 중류지점(SH2)은 시흥천과 신길천이 합류한 후의 시화·반월 공단의 경계지점이며, 하류지점(SH3)은 시화호 유입 직전 지점이다. 주거지역인 상류지점(SH1)에서 가장 낮은 유기물질 농도, 즉 BOD 1.1~23.6 mg/L(중위값 3.4 mg/L)를 나타내었고, 제지/금속가공 업체가 밀집되어 있는 중류 지점(SH2)에서 4.2~27.6 mg/L(중위값 10.2 mg/L), 식품, 섬유, 화학업체가 모여 있는 하류지점(SH3)에서 상류지점의 농도보다 약 5배 정도 높은 4.2~43.1 mg/L(중위값 17.3 mg/L)를 나타내면서 하류로 갈수록 오염물질 농도가 증가하는 추세를 보였다. 이러한 경향은 COD 농도 분포에서도 유사하게 나타났다. 하류지점의(SH3) COD 농도는 22.9 mg/L의 높은 중위값을 나타내어(Fig. 2(b)) 옥구천 다음으로 유기물질 오염이 심한 것으로 나타났다. 총질소의 경우, 상류지점(SH1)은 2.08~14.58 mg/L(중위값 3.78 mg/L)로 낮은 수치를 보였지만 중류지점(SH2)에서 가장 높은 농도인 6.93~16.51 mg/L(중위값 11.09 mg/L) 수치를 보였으며 하류지점(SH3)에서 약간 낮은 농도 범위인 3.85~16.27 mg/L(중위값 8.95 mg/L)였다(Fig. 2(c)). 인공하천들 중 시흥천이 영양물질 오염이 가장 심한 상태였으며 중류지점(SH2)의 총질소 농도는 일반 호소 생활환경 기준 중 매우 나쁨(VI) 등급(1.5 mg TN/L)보다 약 7.4 배 정도 높은 농도를 나타내었다. 총인 역시 총질소와 각 지점에서 유사한 농도 분포를 보여주고 있으며 중류에서 가장 높은 농도인 0.209~1.297 mg/L(중위값 0.513 mg/L)을 나타내었다(Fig. 2(d)).

3.2. 인공하천의 중금속 분포 특성

인공하천의 각 지점별 지표수를 대상으로 8가지 중금속 결과를 Fig. 3에 나타내었으며 유해 중금속인 Zn, Cu, Cr⁶⁺의 경우 해양환경기준과 비교하여 그 오염 정도를 평가하였다(하천 및 호소 환경기준 미 설정). 중금속 농

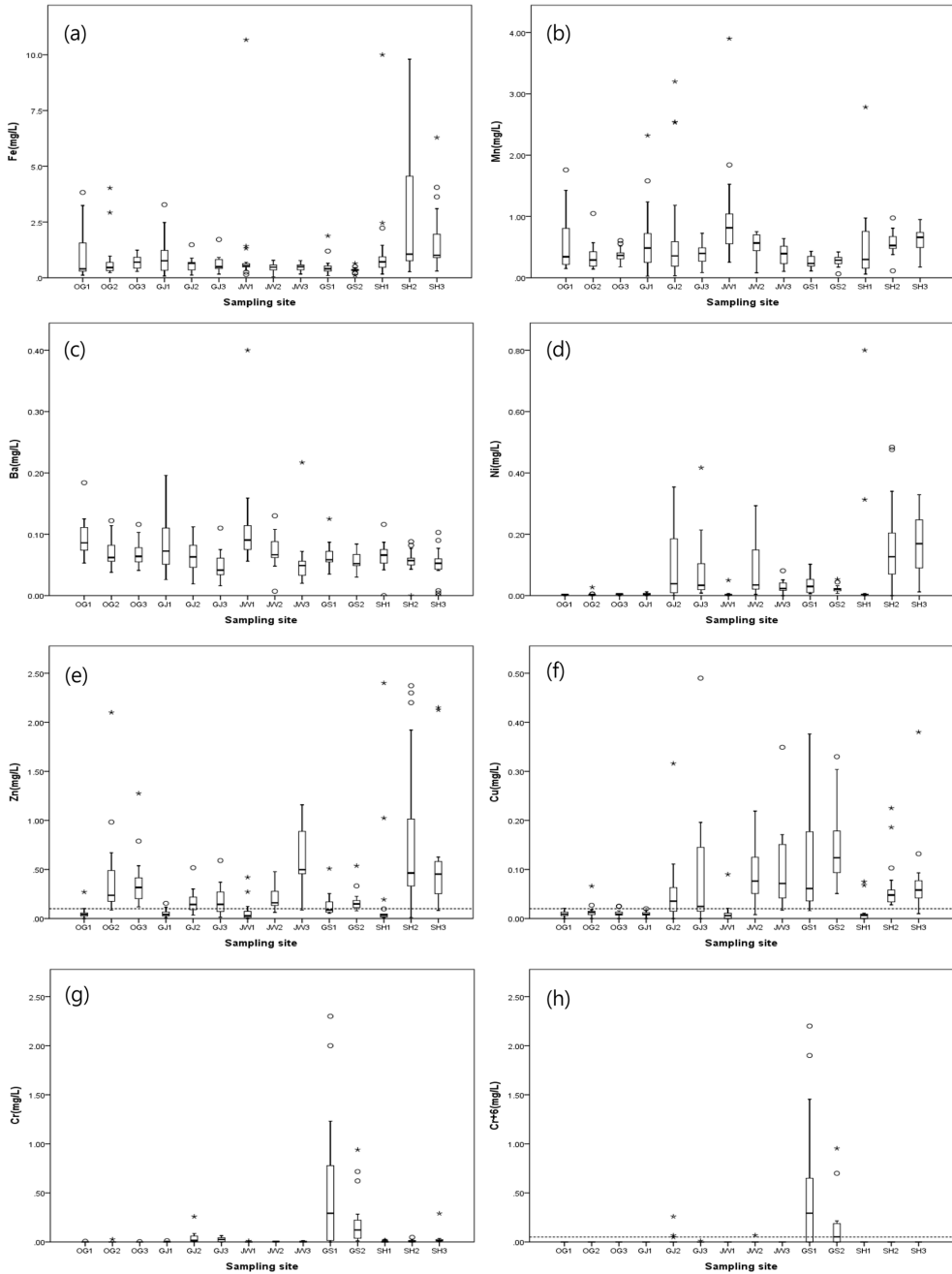


Fig. 3. Heavy metal concentration of each sampling site from 5 streams of Shihwa industrial complex. The dotted lines of (e), (f) and (h) indicate the Zn, Cu, and Cr^{6+} level of ocean environmental standard, respectively.

도 분포 또한 일반수질오염물질과 마찬가지로 각 지점별 농도의 분산 정도가 매우 큰 것을 알 수 있다. Fe의 경우, 하천별 각 지점에서 특이한 경향은 보이지 않았고 시흥천 중류지점(SH2) 및 하류지점(SH3)에서 0.346~

9.804 mg/L(중위값 1.060, mg/L) 및 0.300~6.289 mg/L(중위값 0.969, mg/L)로 가장 높은 농도 분포를 보여주고 있다(Fig. 3(a)). Mn과 Ba는 각 하천의 주거 및 상가 지역인 상류지점에서 사업장이 산재해 있는 중류 및 하

류에 비해 오히려 약간 높은 경향을 보였고 전체적으로 균일한 농도를 나타내고 있어 토양으로부터 유래한 자연농도로 추측된다 (Fig. 3(b), 3(c)). 하지만 Ni의 경우 옥구천 및 각 하천의 상류를 제외한 사업장 밀집 지역인 중, 하류로 갈수록 농도가 증가하는 경향을 보였다 (Fig. 3(d)). Zn은 Ni과 마찬가지로 주거지역인 상류에서는 낮은 농도가 분석된 반면 하류로 갈수록 농도가 점점 증가하여 정왕천 하류(JW3) 및 시흥천 하류(SH3)에서 높은 중위값(각각 0.498 및 0.483 mg/L)을 나타내어 해양환경기준(0.1 mg-Zn/L)을 최대 약 5배 정도초과하는 오염도를 보여주고 있다(Fig. 3(e)). 특정수질유해물질인 Cu 또한 옥구천을 제외한 다른 하천에서 금속, 기계, 전자/전기 및 도금 사업장들이 밀집한 중류 및 하류에서 높은 농도 분포를 나타내었으며 군자천, 정왕천, 4간선 및 시흥천의 중류 및 하류지점은 해양환경기준(0.02 mg-Cu/L)을 훨씬 초과하는 수질오염도를 나타내었다(Fig. 3(f)). 특히 4간선 하류지점에서 가장 높은 0.124 mg-Cu/L의 중위값은 미국 EPA의 담수 생물급성독성(CMC; criteria maximum concentration) 기준(0.013 mg Cu/L¹¹)을 약 10배 정도 초과하는 농도로 수서생태 독성 영향이 우려되는 수준이다. 다른 인공하천과는 달리 4간선 중류지점(GS1)의 Cr은 2.300 mg/L으로 최고 농도를 나타내었으며 특정수질유해물질인 Cr⁶⁺는 중위값 0.293 mg/L로 해양환경기준 0.05 mg-Cr⁶⁺/L를 약 5.9배를 초과하는 수준이었다.

결과적으로 Fe, Mn, Ba의 경우 하천 및 지점에 따른 농도 변화가 크지 않고 균일하게 나타난 것은 이 지역 자연 토질로부터 용출된 것으로 판단되지만 유해 중금속속인 Ni, Zn, Cu, Cr 및 Cr⁶⁺는 주거 및 상가 지역인 상류에 비해 공단 사업장들이 밀집해있는 중류 및 하류 지점에서 뚜렷한 농도 증가를 나타내고 있어 공단 내 사업장 폐수 방류에 의한 것으로 평가되며 이들 유해 중금속에 의해 인공하천에 서식하고 있는 생물종들에 대한 급/만성적 독성이 우려된다. 실제로 군자천과 정왕천의 지표수를 이용한 48시간 *Daphnia magna* 급성 생태독성 실험에서 각각 21.20% 및 31.58%로 높은 급성독성을(EC₅₀) 보였고 특히 인근 우수관거 유출수의 EC₅₀은 3.13%로 매우 높은 급성독성을 나타내어 인공하천의 생태독성 물질이 인근 우수관거에서 유래함을 시사하고 있으며 *Monia macrocopa* 만성 독성 실험에서도 군자천, 정왕천, 시흥천의 지표수에서 유의한 독성 영향이 관찰되었다.¹²⁾ 또한 시흥천의 지표수에서 오/폐수에서 서식하는 미생물뿐만 아니라 철강, 구리, 플라스틱에 부착하여

Table 3. Hexavalent chromium concentration of storm sewer 2

Sampling date	Cr ⁶⁺ (mg/L)
2016-06-23	1.046
2016-07-27	2.571
2016-08-30	1.248
2016-09-29	2.664
2016-10-27	3.365
2016-11-29	1.215

살아가는 *Acrobactor* 속 세균, 3가 철, 비소, 셀레늄을 환원시킬 수 있는 *Shewanell* spp. 및 카드뮴과 항생제에 내성이 있는 *Acinetobacter* spp. 등의 미생물 군집의 서식은 중금속 및 이화학적 오염물질에 의한 인공하천의 심각한 오염 정도를 나타내고 있다.⁴⁾

4간선수로 중류지점(GS1)에서 특이하게 검출되는 Cr⁶⁺를 대상으로 인공하천의 중금속 오염원인을 규명하기 위한 추가 실험을 실시하였다. 즉 4간선 중류지점에 가장 근접해 있고 도금단지와 연결된 우수관거(Storm sewer 2) 유출수를 6개월에 걸쳐 매월 비 강우 시 1회씩 시료를 채취하여 Cr⁶⁺를 조사한 결과 6회 모두에서 1.046 mg/L 이상이 검출되었으며 최고 3.365 mg/L로 높게 나타나 4간선 중류지점의 Cr⁶⁺ 오염의 주요 원인은 우수관거를 통해 인접 도금단지의 미처리 폐수의 유입에 의한 것임을 확인하였다(Table 3).

3.3. 인공하천의 오염물질 항목간 상관관계 분석

각 인공하천의 수질오염도에 직접적인 영향을 미치고 있는 중류 및 하류지점에서 일반 분석항목 사이 및 중금속 분석항목 사이의 상관분석 결과(Pearson 상관계수값)를 Table 5와 6에 각각 나타내었다. 상관계수의 해석은 문헌마다 조금씩 다르나 일반적으로 많이 사용하는 Cohen's 기준은 상관계수값 0.8 이상은 매우 강한 상관, 0.6~0.8은 강한 상관, 0.4~0.6은 보통 상관, 0.2~0.4는 약한 상관, 0.2 이하는 상관성이 없는 것으로 평가한다. 유기물질의 화학적 및 미생물학적 분해 지표인 COD 및 BOD 사이의 농도 비(Table 4) 및 상관계수로(Table 5) 하천 유기물질의 특성을 간접적으로 평가하였다. 각 하천의 COD와 BOD의 비 및 상관계수는 아주 다양하게 나타났으며 유기물질 오염이 심한 옥구천의 경우 다른 하천에 비해 가장 높은 COD:BOD 중위값의 평균 비(3.6:1)를 보인 반면 보통의 상관성(0.431, $p>0.01$)을 보였다. 이것은 생활하수와 같이 생분해도가 높은 유기물질에 비해 인근 화학단지 및 염색공단으로부터 생물학

Table 4. Ratio of median COD and BOD concentration at midstream and downstream of artificial streams

Sampling site	Okgu	Gunja	Jeongwang	4Ganseon	Siheong
Midstream	4.3(62.5/14.5)	2.0(9.1/4.0)	1.9(12.1/6.3)	2.0(8.6/4.2)	1.8(17.9/9.7)
Downstream	2.9(24.8/8.6)	3.4(8.2/2.4)	3.2(11.1/3.5)	1.8(13.1/7.4)	1.3(21.6/16.1)
Average	3.6	2.2	2.8	1.9	1.6

Table 5. Pearson correlation coefficients for pollutant concentrations of each artificial stream (n=181)

Item	Stream	BOD	COD	SS	T-N	T-P
COD	Okgu	0.431**	1.000			
	Gunja	0.882**	1.000			
	Jeongwang	0.768**	1.000			
	4 Ganseon	0.931**	1.000			
	Siheong	0.743**	1.000			
SS	Okgu	0.053	-0.083	1.000		
	Gunja	0.102	0.136	1.000		
	Jeongwang	0.365*	0.138	1.000		
	4 Ganseon	0.039	0.047	1.000		
	Siheong	0.446**	0.390*	1.000		
T-N	Okgu	0.366*	0.781**	0.047	1.000	
	Gunja	0.596**	0.580**	-0.167	1.000	
	Jeongwang	0.532**	0.490**	-0.215	1.000	
	4 Ganseon	0.229	0.160	-0.139	1.000	
	Siheong	0.083	0.289	0.262	1.000	
T-P	Okgu	0.705**	-0.012	0.244	-0.015	1.000
	Gunja	0.389*	0.567**	0.197	0.660**	1.000
	Jeongwang	0.547**	0.675**	-0.092	0.771**	1.000
	4 Ganseon	0.139	0.014	0.086	0.184	1.000
	Siheong	0.151	0.292	0.018	0.486**	1.000

** and * indicate that correlation coefficients are significant at the 0.01 and 0.05 level, respectively.

적 난분해성 물질이 매우 불균등하고 변칙적으로 유입되고 있음을 시사하고 있다. 두 번째로 유기물질 오염도가 심한 시흥천의 경우 COD:BOD 비가 1.6:1로 낮지만 강한 상관성(0.743 ($p>0.01$))을 나타내어 옥구천에 비해 상대적으로 생분해도가 큰 유기물질의 유입 비중이 높음을 추정해볼 수 있다. 이에 비해 낮은 유기물질 농도를 나타낸 군자천, 정왕천 및 4간선수로는 1.9~2.8의 COD:BOD 비를 나타내었으며 0.768~0.931 ($p>0.01$)의 강한 또는 매우 강한 상관계수를 보였고 다른 하천에 비해 상대적으로 중간 정도의 생분해도를 가진 유기물질이 유사한 조성으로 균일하게 유입됨을 추정해 볼 수 있다. 또한 유기물질과 영양물질 사이의 상관관계에서 옥구천, 군자천, 정왕천의 경우 BOD와 TN은 0.366, 0.596, 0.532로 약한~보통의 상관성을 보였고 BOD와 TP는 0.705, 0.389, 0.547로 약한~강한 상관성을 보였다. 하지만 4간선 및 시흥천의 경우 유기물질과 영양물질 사이의 상관성은 보통 또는 상관성이 없는 것으로 나타났다.

다른 하천에 비해 낮은 농도의 중금속 오염도를 나타내었던 옥구천은 Fe, Mn, Cr, Cu, Ni 사이에 0.640~0.791($p>0.01$)의 강한 상관관계를 나타내었고 특히 Ni은 Cr 및 Cu와 각각 0.843 및 0.922($p>0.01$)의 매우 강한 상관성을 보여주어(Table 6) 옥구천 중/하류 지역에는 Ni, Cr 및 Cu를 배출하는 사업장이 산재해있음을 시사하고 있다. 시화공단 중앙에 위치한 정왕천 인근에는 각종 기계/장비, 조립금속제품, 자동차 부품 제조업이 밀집해있어 Cr은 Fe, Mn, Ba, Zn, Cu 등과 보통의 상관관계(0.452~0.604 ($p>0.01$))를 나타내었다. 4간선수로의 경우, Ni과 Cr은(0.805 ($p>0.01$)) 매우 강한 상관성을 나타내었고 Cu와 Zn, Cu와 Mn 및 Ni과 Mn은 0.605~0.706 ($p>0.01$)의 강한 상관성을 보여주었다. 특히 Cr과 Cr⁶⁺는 0.972($p>0.01$)의 매우 강한 상관관계를 보여주고 있다. 이것은 Cr 중 거의 대부분이 특정수질유해물질인 Cr⁶⁺형태로 존재하고 있음을 시사하고 있다. 시흥천의 중금속 오염물질 사이의 상관관계는 다른 하천에

Table 6. Pearson correlation coefficients for heavy metal concentrations of each artificial stream (n=181)

Item	Stream	Fe	Mn	Ba	Ni	Zn	Cu	Cr	Cr ⁶⁺
Mn	Okgu	0.640**	1.000						
	Gunja	0.207	1.000						
	Jeongwang	0.649**	1.000						
	4 Ganseon	0.031	1.000						
	Siheong	0.415*	1.000						
Ba	Okgu	0.163	0.499**	1.000					
	Gunja	0.557**	0.586**	1.000					
	Jeongwang	0.522**	0.594**	1.000					
	4 Ganseon	0.143	0.465**	1.000					
	Siheong	-0.180	-0.050	1.000					
Ni	Okgu	0.762**	0.709**	0.292	1.000				
	Gunja	0.079	0.228	0.143	1.000				
	Jeongwang	0.049	0.239	0.236	1.000				
	4 Ganseon	0.069	0.706**	0.523**	1.000				
	Siheong	-0.056	0.410*	0.371*	1.000				
Zn	Okgu	0.552**	0.018	-0.193	0.058	1.000			
	Gunja	0.136	0.074	0.252	0.591**	1.000			
	Jeongwang	0.417*	0.117	0.229	-0.143	1.000			
	4 Ganseon	0.372*	0.282	0.272	0.191	1.000			
	Siheong	0.804**	0.320	-0.145	0.038	1.000			
Cu	Okgu	0.686**	0.660**	0.371*	0.843**	0.083	1.000		
	Gunja	0.147	0.099	0.387*	0.355*	0.646**	1.000		
	Jeongwang	0.411*	0.348*	0.298	0.292	0.460**	1.000		
	4 Ganseon	0.335*	0.600**	0.241	0.298	0.613**	1.000		
	Siheong	-0.051	0.327	-0.295	0.413*	-0.084	1.000		
Cr	Okgu	0.791**	0.693**	0.246	0.922**	0.043	0.812**	1.000	
	Gunja	0.073	0.035	0.274	0.445**	0.433**	0.170	1.000	
	Jeongwang	0.604**	0.565**	0.588**	0.260	0.452**	0.488**	1.000	
	4 Ganseon	0.046	0.605**	0.229	0.805**	0.011	0.420**	1.000	
	Siheong	0.006	0.355*	-0.336*	0.297	-0.030	0.950**	1.000	
Cr ⁶⁺	Okgu	-	-	-	-	-	-	-	-
	Gunja	-0.115	0.037	0.160	0.233	0.074	-0.015	0.881**	1.000
	Jeongwang	-0.028	-0.024	0.018	0.561**	-0.061	0.099	-0.082	1.000
	4 Ganseon	0.035	0.602**	0.280	0.854**	-0.020	0.343*	0.972**	1.000
	Siheong	-	-	-	-	-	-	-	-

** and * indicate that correlation coefficients are significant at the 0.01 and 0.05 level, respectively.

비해 낮게 나타났지만 Fe과 Zn 및 Cr과 Cu 사이에 매우 강한 상관성(각각 0.804 및 0.950($p>0.01$))을 나타내었다.

4. 결 론

시화공단의 5개 인공하천 14지점 및 인근 우수관거 2 지점에서 채수한 지표수의 이화학적 분석을 통해 각 하천의 수질오염 특성을 평가하였다. 일반 하천의 오염물질 거동에 비해 인공하천의 수질오염물질의 시·공간적

데이터의 변동 폭이 매우 크고 주거 및 상가 지역에 위치한 상류지점보다 사업장들이 밀집한 중류 및 하류지점에서 오염도가 매우 높게 나타났다. 이것은 중류 및 하류지점에 인접한 우수관거로부터 고농도 하/폐수의 간헐적인 유입에 의한 것으로 확인되었다. 가장 높은 유기물질 농도를 보여준 옥구천은 COD에 대해 매우 낮은 BOD상관계수(0.431, $p>0.01$)를 나타내어 사업장으로부터 생물학적 난분해성 유기물질의 다량 유입을 시사하고 있다. 시화공단의 중앙에 위치한 군자천, 정왕천, 4간선 및 시흥천의 중류 및 하류에서 특정유해물질인 Cu의

농도가 해양환경기준을 훨씬 초과하였으며 특히 4간선의 중류지점에서 가장 높은 Cr^{6+} (중위값 0.293 mg/L) 농도를 나타내어 이들 하천의 중금속 오염도가 심각한 수준이었다.

오염된 인공 하천수는 시화호 수질오염을 가중시키는 직접적인 요인으로 작용하고 있어 우수관거 유출수를 포함한 인공 하천수를 인근 환경기초시설을 통한 연계 처리가 시급한 것으로 나타났다. 또한 이들 인공하천의 유지용수 확보와 수질개선을 통한 친수공간 및 근린공원으로의 전환을 위해 인근 환경기초시설의 방류수를 각 하천의 상류로 이송/통수하여 하천 복원수로의 활용을 제안하고자 한다. 아울러 본 연구결과는 시화공단 내 인공하천 수질관리, 오염대책 수립 및 시화호 수질 개선을 위한 과학적 기초자료로 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 시·도 보건환경연구원 국비보조 사업의 일환으로 수행(078-1900-1946-309-330) 되었으며 시료 채수에 협조해주신 경기도공단환경사업소 직원 여러분들의 노고에 감사드립니다.

참고문헌

1. 장정익, 한인섭, 김경태, 나공태, “시화호 유입하천의 수질오염물질 농도에 관한 연구”, *대한환경공학회지*, **2011**, 33, 289-299.
2. 김경태, 이수형, 김은수, 조성록, 박청길, “시화호와 주변 하천 표층수층의 중금속 거동 특성”, *한국해양환경공학회지*, **2002**, 5, 51-67.
3. 김경태, 김은수, 조성록, 박준건, 박청길, “시화호 및 주변 하천 표층 퇴적물의 중금속 분포 변화”, *Ocean and Polar Research*, **2003**, 25, 447-457.
4. 서경진, 김주미, 김민정, 김성근, 이지은, 김인영, 조경적, 고광표, “Principal Component Analysis와 Multi-Dimensional Scaling 분석을 이용한 시화공단 시흥천의 수질지표 및 미생물 군집 분포 연구”, *한국환경보건학회지*, **2009**, 35, 517-525.
5. 오은석, “반월·시화 산업단지 내 신길천의 수질오염원 분석 및 추적시스템 개발”, 박사학위논문, **2016**.
6. 국립환경과학원, “수질오염공정시험기준”, **2017**.
7. 환경부, “환경정책기본법 시행령”, **2017**.
8. 김세원, 최광순, 김동섭, 이윤경, “강우시 시화공단 1간선수로 유역특성에 따른 오염물질 유입특성”, *대한상수도학회·한국물환경학회 공동주최 학술발표논문집*, **2008**, 454-455.
9. 이미경, 최광순, 김세원, 오영택, 권혁재, 김호준, 김동섭, “시화호 유역의 강우시 오염물질 유출특성”, *대한상수도학회·한국물환경학회 공동주최 학술발표논문집*, **2006**, 770-771.
10. 이혜원, 최종현, “SWMM 모형을 이용한 시화호 유역의 강우 유출 특성분석에 관한 연구”, *대한환경공학회지*, **2015**, 37, 14-22.
11. US EPA, “National recommended water quality criteria”, **2004**.
12. 박예나, 김선미, 한선영, 이지연, 이진영, 박윤석, 윤충식, 최경호, “시화호 유입 지천의 퇴적물 용출수가 수서 지표생물에 미치는 급·만성 생태 독성 영향”, *한국환경독성학회*, **2008**, 23, 267-276.