

## 황구지천 유역의 오염부하 특성 및 지류 영향 평가

임수진<sup>1a</sup> · 임병란<sup>1b</sup> · 이한샘<sup>1c</sup> · 강주형<sup>2</sup> · 안태웅<sup>3</sup> · 신현상<sup>1d,†</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 환경공학과 · <sup>2</sup>환경보전협회 · <sup>3</sup>(주)엔솔파트너스

## Evaluation on Pollution Load Characteristics and Influence of Tributaries in the Hwangguji Stream

Su-Jin Lim<sup>1a</sup> · Byung-Ran Lim<sup>1b</sup> · Han-Saem Lee<sup>1c</sup> · Joo-Hyoung Kang<sup>2</sup> · Tae-Ung Ahn<sup>3</sup> · Hyun-Sang Shin<sup>1d,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>2</sup>Environmental Preservation Association

<sup>3</sup>Environment Solution Partners

(Received 11 May 2021, Revised 20 June 2021, Accepted 23 June 2021)

### Abstract

This study investigated the pollution characteristics of the main pollution zone in the Hwangguji watershed and the influence of the tributary on the main stream. The characteristics of the main pollution zone, including, the water quality index (WQI), stream rating, load duration curve (LDC), delivery load density (DLD), and contribution of the tributary to the mainstream, were evaluated by time-series visual heatmap. The WQI of the mainstream of Hwangguji was lowered to the poor (IV) level from the inflow point of Suwon stream (SW) and the LDC excess rate in the T-P was higher than that of BOD<sub>5</sub>, especially for the wet season, suggesting that management of non-point source with T-P is preferred. The contribution (%) of the tributaries in the upstream section of Hwangguji watershed were BOD<sub>5</sub> 14.54%, TOC 15.67%, T-N 5.43%, and T-P 6.97%. In particular, the Suwon sewage treatment plant located in the mainstream showed a high contribution of BOD<sub>5</sub> (64.40%) and T-P (53.54%), respectively, due to the high discharge rate (6.019 m<sup>3</sup>/sec). Meanwhile, Sammi and Gal stream have a large impact on the mainstream with high DLD and poor WQI. Thus, both streams were considered as pollution hot spots. These results provide useful basic data for preparing more effective water quality improvement and management plans in the watershed.

**Key words** : Hwangguji stream, Load duration curve, River grade classification, Tributaries, Water quality index

<sup>1a</sup> 석사(Master), d8066530314@daum.net, https://orcid.org/0000-0002-0248-3005

<sup>1b</sup> 연구교수(Research Professor), limbr@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-4960-9605

<sup>1c</sup> 연구교수(Research Professor), hansun213@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-4960-9605

<sup>2</sup> 연구원(Researcher), joohkang80@epa.or.kr, https://orcid.org/0000-0003-1095-5428

<sup>3</sup> 연구원(Researcher), ahntu@naver.com, https://orcid.org/0000-0002-5492-2591

<sup>1d,†</sup> Corresponding author, 교수(Professor), hyuns@seoultech.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-5197-8645

## 1. Introduction

하천의 수질은 도시화와 산업화로 인한 생활하수나 산업폐수의 유입으로 크게 영향을 받는다. 특히, 하천의 건천화와 수변환경 훼손이 하천 수질에 직접적인 악영향을 미치고 있다(Cho, 2011; Noh et al., 2017; Park et al., 2002). 이러한 배경으로 수질과 유량을 고려한 오염부하량을 기준으로 한 유역관리가 주목받고 있다. 수질오염총량관리제(Total Maximum Daily Loads, TMDLs)는 본류 말단의 수질을 기준으로 하여 목표수질과 할당량을 지정하고 있어 오염우심하천 수질개선대책 도출 시 수계구간별 손상도 및 배출부하량 분포를 고려하기 어렵다는 한계가 있어 이에 대한 보완이 요구되고 있다(Hwang et al., 2016; Park et al., 2017).

진위천은 기타 수계 최초로 수질오염총량관리제도(Total Water Pollution Load Management System)가 시행된 지점으로서 관리지역인 진위A 단위유역은 진위천 발원지부터 안성천 합류점까지를 범위로 하여 오산천과 황구지천의 전 구간을 포함하는 유역이다. 진위 A 단위유역의 목표수질 달성 여부는 진위천 말단인 궁안교 지점의 수질을 기준으로 한다(Han et al., 2014; Park et al., 2008). 따라서 진위A 단위유역의 총량제 목표수질을 달성하기 위하여 진위천 본류와 진위천으로 직접 유입되는 제 1지류인 오산천, 황구지천, 관리천을 대상으로 하는 연구가 다수 진행된 바 있다. Cho et al. (2018)는 진위천 단위유역을 대상으로 유량 및 수질 특성을 파악하고, 통계분석에 기반한 지류 하천의 등급화 평가를 실시함으로써 수질개선이 우선적으로 필요한 총량지점을 선정한 바 있다(Cho et al., 2018), Park et al. (2017)은 진위천 수계의 총량과 일반 수질측정망 자료에 기반한 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)을 이용한 오염구간 파악 및 오염원 공간 분포 특성을 분석하였고, 우심관리지역의 선정 및 효과적인 삭감 대책을 도출하였다.

이러한 단위유역과 총량지점에서의 유량과 수질자료가 수집되고 일부 데이터의 분석 및 수질예측을 위한 분석이 이루어지고 있으나, 관리가 단위유역 말단을 기준으로 설정됨에 따라 수계 구간별 우심지역을 중심으로 한 효과적인 관리가 충분하지 않은 실정이다. Cho et al. (2018)는 진위천 단위유역의 목표수질 관리를 위해서는 지류하천의 관리가 중요함을 강조하였으며, Park et al. (2017)도 효율적인 유역관리를 위해서는 유역 내 오염도가 높은 우심구간 지점(hot spot)의 우선관리가 필요함을 강조하였고 유역내 수질측정망 지점의 확대가 필요함을 제안하였다. 특히, Park et al. (2017)은 진위A 단위유역 중 황구지천의 오염도가 높아 진위천 말단의 수질을 개선하기 위해서는 황구지천 유역의 집중관리가 이루어져야 함을 강조한 바 있다. 따라서 황구지천의 사례에서처럼 측정망 자료만으로는 주요 오염 우심구간과 오염원을 평가하는 데 한계가 있는 경우 효율적인 수질관리를 위해서는 오염도가 높은 우심지역을 중심으로 한 오염부하 특성의 파악 및 유입지류의 영향 분석 등을 통한 보다 효과적인 하천 오염원 관리방안 마련을 위한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 황구지천 유역을 대상으로 오염우심구간에서의 오염특성과 오염원 영향을 보다 상세하게 파악하기 위하여 본류 구간의 측정망 자료 외에 유입지류를 대상으로 수질과 유량 모니터링을 실시하였고, 통합수질지수(Water Quality Index, WQI) 분석 및 하천 등급화를 통해 황구지천 본류 구간을 포함한 각 지류에서의 오염특성을 평가하였다. 또한, 황구지천 유역구간별 LDC와 유입지류별 배출부하밀도 등을 산출하여 주요 수질오염 우심구간과 오염부하특성을 규명하고, 본류에 영향을 미치는 지류의 오염부하 기여율과 수질영향 및 수질개선 우선순위 지류 하천의 도출과 오염개선방안을 제시하였다. 본 연구의 주요 목적은 진위A 단위유역에서의 주요 오염하천인 황구지천을 대상으로 지류 중심의 보다 근본적인 수질개선 방안을 도출하기 위한 수질·유량 모니터링 기초자료의 확보 및 유역의 수질 관리방안 마련에 필요한 오염특성 자료를 제공함에 있다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 연구대상유역

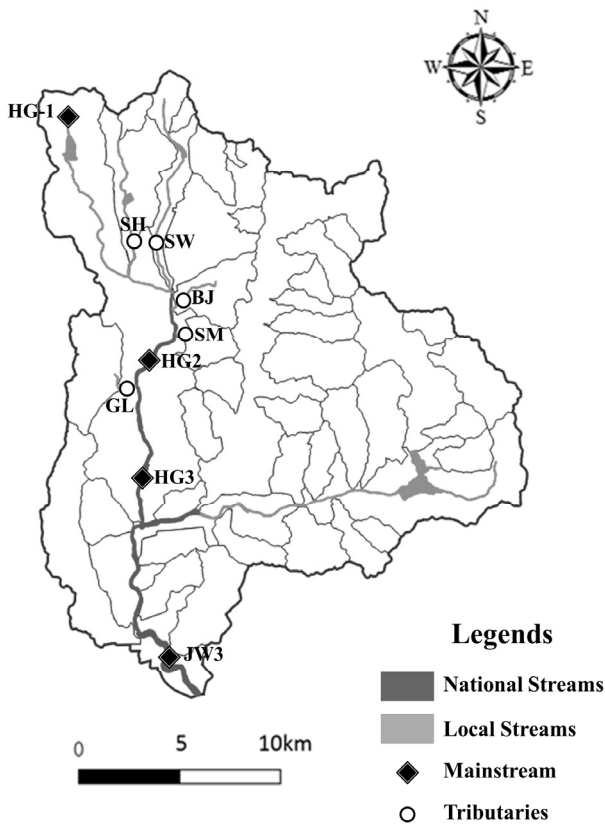
황구지천은 경기도 의왕시 오봉산에서 발원하여 왕송저수지를 거쳐 흐르며 서호천, 수원천, 원천리천이 합류된 후 신대황교 지점부터 본류인 황구지천(국가하천)이 시작된다. 이후 반정천, 삼미천, 갈천이 합류된 후 진위천에 합류되어 안성천으로 합류된다(Ahn et al., 2019). 연구대상 하천은 황구지천 유역을 대상으로 기존에 황구지천 유역 지자체에서 확보한 모니터링 자료(2011년~2018년)를 토대로 산정한 BOD와 T-P 평균농도가 하천의 생활환경기준 III(보통) 등급(BOD 5 mg/L, T-P 0.2 mg/L) 대비 수질초과지수가 0보다 큰 지류를 선정하였다. 여기서 모니터링 자료는 각 지자체를 직접 방문하여 확보하여 DB화하여 사용하였으며, 수질초과지수는 '(측정 평균값 - 기준값)/기준값'으로 산정하였다. 기준값으로 오염총량관리대상 오염물질 종류인 BOD 및 T-P를 선정하였으며, 농도는 황구지천 유역이 속하는 안성천 중권역 목표수질인 III 등급을 기준으로 하였다. 그 결과, 황구지천의 지류 중 상대적으로 오염도가 낮은 것으로 평가된 원천리천을 제외한 서호천(SH), 수원천(SW), 반정천(BJ), 삼미천(SM) 및 갈천(GL) 등을 선정하였고, 총 12개월 동안(2019.08~2020.07) 해당 하천의 유량 및 수질 실측 자료를 수집하였다. 황구지천 본류는 상류구간의 황구지천-1(HG-1), 중류구간의 황구지천2(HG2) 및 하류구간인 황구지천3(HG3) 지점을 대상으로 물환경측정망의 수질과 유량자료(2015 - 2020)를 활용하였다. 황구지천과 지류의 하천도 및 채수 지점은 각각 Fig. 1과 Table 1과 같다.

### 2.2 분석방법

수질항목 분석은 '수질오염공정시험기준'(환경부고시 제 2017-57호) 및 '환경시험·검사 QA/QC 핸드북'에 따라 수행하였다(NIER, 2011). 유량은 도섭법을 이용하여 측정하였으며, 측정기기는 초음파 유속계(Flow Tracker 2Sontek, 미국)를 이용하였다. 현장수질 항목은 채수 후 현장측정장비

**Table 1.** Monitoring site for the water quality and flow rate of tributaries and mainstream in Hwangguji stream

Site name	Address	Longitude	Latitude
Hwanggujicheon-1 (HG-1)	Geumcheon Bridge 1	E126°56'43"	N37°19'15"
Seoho stream (SH)	Jungbo Bridge	E126°59'37"	N37°15'18"
Suwon stream (SW)	Saeteo Bridge	E127°00'34"	N37°15'12"
Banjeong stream (BJ)	Tongsan Bridge	E127°01'26"	N37°13'01"
Sammi stream (SM)	Yangsang Bridge	E127°01'26"	N37°12'04"
Hwanggujicheon2 (HG2)	Sema Bridge	E127°00'34"	N37°11'01"
Gal stream (GL)	Jeongnam Bridge 2	E126°59'34"	N37°10'15"
Hwanggujicheon3 (HG3)	200 m Downstream of the Sugjik Bridge	E127°00'05"	N37°07'08"
Jinwicheon3 (JW3)	Gungan Bridge	E127°01'09"	N37°00'53"



**Fig. 1.** River map and sampling sites.

(Meter AL15, AQUALYTIC, 독일)를 이용하여 수온 (Temperature, Temp.), 수소이온농도(pH), 전기전도도(Electrical Conductivity, EC), 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)를 측정하였다. 유기물의 영향을 파악하기 위해 생물화학적산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD<sub>5</sub>), 화학적산소요구량 (Chemical Oxygen Demand, COD), 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)를 분석하였으며, 영양물질의 영향을 파악하기 위해 총질소(Total Nitrogen, T-N), 총인(Total Phosphorus, T-P)을 분석하였고, 부유성고형물질(Suspended Solid, SS)과 총대장균군(Total Coliforms)을 포함해 총 11개 항목에 대해 수행하였다.

BOD<sub>5</sub>는 5일간 산소소모량을 격막전극법으로 분석하였고,

COD는 과망간산칼륨 산화방식에 따라 분석하였으며, TOC는 고온연소산방식의 기기(FORMACS HT, SKALAR, 네덜란드)로 분석하였다. T-N과 T-P는 연속흐름법으로 분석하였고(AutoAnalyzer3(AA3), BLTEC, 독일), SS는 여과평량법 (GF/C Filter, Whatman, 영국), 총대장균군은 막여과법을 이용하여 분석하였다. 채수 지점은 하천의 대표성을 포함하기 위해 하천 말단의 하상변동이 적고, 수로가 직선이며 유수 장애가 없는 안정적으로 유량측정이 가능한 지점을 선정하였다. 채수는 물환경측정망(2016년 01월~2019년 06월) 측정일자를 조사하여 가능한 유사한 일자에 수행하였으며, 강우의 영향을 배제하기 위해 강우 전·후로 3일~5일 가량의 시간을 두어 진행하였다(Yu et al., 2020).

**2.3 통합 수질지수 및 하천 등급화 산정**

황구지천 유역의 수질오염특성을 분석하기 위해 실시간수질지수(Real Time Water Quality Index, RTWQI)를 산정하였다(Lumb et al., 2011). RTWQI는 국내 실시간수질정보시스템(ME, 2020b)에서 사용 중인 산정방식에 따라 기준값을 측정 기간 동안 1회 이상 초과하는 수질자료의 개수와 위반 횟수 및 위반정도를 산정하였으며, 산정된 결과에 따라 불량(0~20), 주의(20~40), 보통(40~60), 양호(60~80), 우수(80~100) 등급으로 구분하였다. 기존 RTWQI는 8개 수질항목(수온, pH, DO, 전기전도도, TOC, T-N, T-P, 탁도)을 점수 기준으로 하고 있으나, 본 연구에서는 주요 오염 지표로 사용되는 BOD가 포함되어 있지 않아 수질 평가에 한계가 있다고 판단하여 수질오염 판단기준으로 생분해성 유기물의 영향을 포함하기 위해 BOD<sub>5</sub>를 추가하였으며, 입자성 물질의 영향을 포함하기 위해 부유물질(SS)를 항목에 추가하여 분석하였다. 여기서 BOD<sub>5</sub>와 SS의 기준값은 RTWQI 점수분류기준과 거의 유사한 수준인 하천의 생활환경기준 II(약간 좋음) 등급으로 설정하여 분석하였다. 분류 각 지점 및 지류별 수치에 따라 QGIS Desktop 3.16.4 프로그램을 사용해 각 위치에 따른 WQI 값을 시각화하여 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)에 나타내었으며(Kawo and Karuppanan, 2018; Sener et al., 2017), Heatmap 분석을 활용해 계절에 따른 변화 추이를 확인하였다(Sheikhi et al., 2020).

하천 등급화는 수질 개선우선순위 하천을 도출하기 위해 각 지점의 BOD<sub>5</sub> 및 T-P와 유량 값에 따라 A, B, C 그리고 D 4개 그룹으로 분류하여 실시하였다. 황구지천 본류와 지류하천의 BOD<sub>5</sub>와 T-P는 각각의 평균값 및 유량을 바탕으로 오염특성을 파악하였으며, Group A, B, C, D는 각각 1~4 사분면으로 나타내었다. Group A가 가장 수질개선이 시급한 등급이며 Group C가 유량과 수질이 비교적 양호하여 당장의 개선조치보다는 장기적 관점에서의 수질유지가 필요한 등급을 의미한다. 분류방법은 X축을 수질농도(BOD<sub>5</sub>, T-P)로 설정하고, Y축을 유량으로 설정하여 두 축의 교차점을 기준으로 그룹화하였다(Lim et al., 2010; Shim et al., 2020). 여기서, X축인 수질농도는 안성천 중권역의 목표수질인 BOD<sub>5</sub> 5 mg/L, T-P 0.2 mg/L를 기준으로 하였고, Y축인 유량은 건전한 수생태계 기능을 확보하기 위한 하천 최소 유지 유량인 0.1 m<sup>3</sup>/sec를 기준으로 하였다(Cho et al., 2018; Na et al., 2015).

#### 2.4 부하지수곡선(LDC) 및 오염 부하밀도 산정

유량변동에 따른 수질영향과 목표수질 초과빈도 특성을 분석하기 위해 HG-1, HG2, HG3 지점에 대해 2015년 01월부터 2020년 12월까지 물환경측정망 자료를 수집하여 부하지수곡선(Load Duration Curve, LDC)을 분석하였다. LDC 산정을 위해서는 우선 하천의 전체적인 유량조건을 확률적으로 분석하는 유량지속곡선(Flow Duration Curve, FDC)를 산정하는 과정이 필요하며, FDC는 하천의 일 자료를 최대유량부터 최소유량까지 배열하고, 특정 유량을 초과하는 일수를 백분율로 정리하여 식(1)과 같이 산출하였다. 여기서 rank는 전체 유량값을 내림차순으로 순위 매긴 것을 의미하며, number of data는 전체 유량 데이터 수를 의미한다. Percent of days flow exceeded(초과유량백분율)은 rank를 오름차순으로 정렬하여 number of data로 나누어 X축은 누적도수분포와 같이 시간백분율을 나타내며 Y축은 유량을 나타낸다(Lee et al., 2018; Park et al., 2019). LDC는 FDC에 황구지천 유역이 위치한 안성천 중권역의 목표수질(BOD<sub>5</sub> 5 mg/L, T-P 0.2 mg/L)을 곱하여 산정하였다. 측정값의 부하량이 LDC보다 위에 위치할 경우, 목표수질을 초과한 것을 의미한다. 누적 유량 크기에 따라 홍수량(0%~10%), 풍수량(10%~40%), 평수량(40%~60%), 저수량(60%~90%), 갈수량(90%~100%)을 나타내며(U. S. EPA., 2007), 저수량보다 유량이 적을 때에는 측정값의 부하량이 LDC보다 위에 위치할 경우 점오염원의 영향이 큰 것으로 판단한다. 또한, 평수량보다 유량이 많은 때 측정값의 부하량이 LDC보다 위에 위치한다면 비점오염원의 영향이 큰 것으로 판단한다(Bonta and Cleland, 2003; Choi, Shin et al., 2012).

$$\text{Percent of Days Flow Exceeded (\%)} = \frac{\text{rank}}{\text{number of data}} \times 100 \quad \text{식(1)}$$

한편, 본류에 대한 지류의 수질오염 영향을 평가하기 위해

유량 및 수질 측정 자료를 이용해 유량(m<sup>3</sup>/sec)과 수질(mg/L)을 곱한 뒤 부하량 단위(kg/day)로 환산하기 위해 86.4를 곱하여 유달부하량(kg/day)을 식(2)와 같이 산정하였고, 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)을 활용하여 시각적으로 나타내었다(Choi, Jung et al., 2012; Lee et al., 2017).

$$\begin{aligned} \text{Pollutant Delivery Load (kg/day)} \\ = \text{Flow (m}^3/\text{sec)} \times \text{Water Quality Concentration (mg/L)} \times 86.4 \end{aligned} \quad \text{식(2)}$$

또한, 수질오염 잠재력의 분석을 위하여 오염부하기여율(Contribution Values (%))과 유달부하밀도(Delivery Load Density (kg/day/km<sup>2</sup>), DLD)를 산정하였다. 오염부하기여율(%)은 황구지천 유역의 주요 오염구간을 파악하고자 황구지천 중하류에 대하여 산출하였다. 황구지천 중류에서의 오염부하기여율(%)은 HG2 지점의 유달부하량에 HG2에 도달하는 HG-1, SH, SW, BJ, SM 각 지류의 유달부하량을 나누어 구하였으며, 황구지천 하류는 HG3 지점의 유달부하량에 HG3 지점에 도달하는 HG2, GL 지류의 유달부하량을 나누어 구하였다. 여기서 기여율은 백분율(%)로 환산하여 나타내었으며, 유달부하밀도(kg/day/km<sup>2</sup>)는 유달부하량을 유역면적으로 나누어 산정하였다(Cho et al., 2018). 황구지천 본류인 HG-1, HG2, HG3 지점에서의 유달부하밀도 산정에 필요한 유역면적은 각각 진위A7, 진위A10, 진위A11 총량지점의 유역면적을 사용하였고, 지류는 각 하천의 유역면적을 사용하였다.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 본류와 지류의 유량-수질 변화 특성

연구대상유역에 대한 조사기간 동안 유량 및 수질에 대한 산술평균은 Table 2에 나타내었다. 황구지천 본류의 유량(m<sup>3</sup>/sec)은 평균 0.091~8.397로 나타났으며, HG-1 지점이 가장 낮은 유량을 HG2 지점이 가장 많은 유량을 나타냈다. 황구지천 최상류 부근인 HG-1 지점의 유량은 건전한 수생태계 기능을 확보하기 위한 하천 최소 유지 유량(0.1 m<sup>3</sup>/sec) 이하이나, HG-1 지점의 직하류에 위치한 진위A8 측정망(왕송저수지 유출구)에서의 평균 유량은 0.300 m<sup>3</sup>/sec로 나타나 황구지천 상류의 주요 유량은 왕송저수지 방류에 기인하였다. 왕송저수지의 수질은 2019년 평균 COD 10.4 mg/L, TOC 5.3 mg/L로 각각 호소 생활환경기준 VI(매우나쁨) 등급과 IV(약간나쁨) 등급에 해당되었고, T-N 3.271 mg/L, T-P 0.217 mg/L 모두 호소 생활환경기준 VI(매우나쁨) 등급에 해당되어 황구지천 상류 구간의 수질개선을 위해서는 왕송저수지의 수질 관리가 필요하다.

중류 구간의 HG2 지점은 상류 약 4 km에 위치한 수원하수종말처리장 방류량(2019년 평균 5.180 m<sup>3</sup>/sec)의 영향으로 평균유량(m<sup>3</sup>/sec)이 8.397로 높았으며, 황구지천 말단 지점은 농업용수 취수로 인해 HG2 보다 다소 낮은 값을 보였다. 한

**Table 2.** Flow rate and water quality of the monitoring sites studied in Hwangguji stream watershed

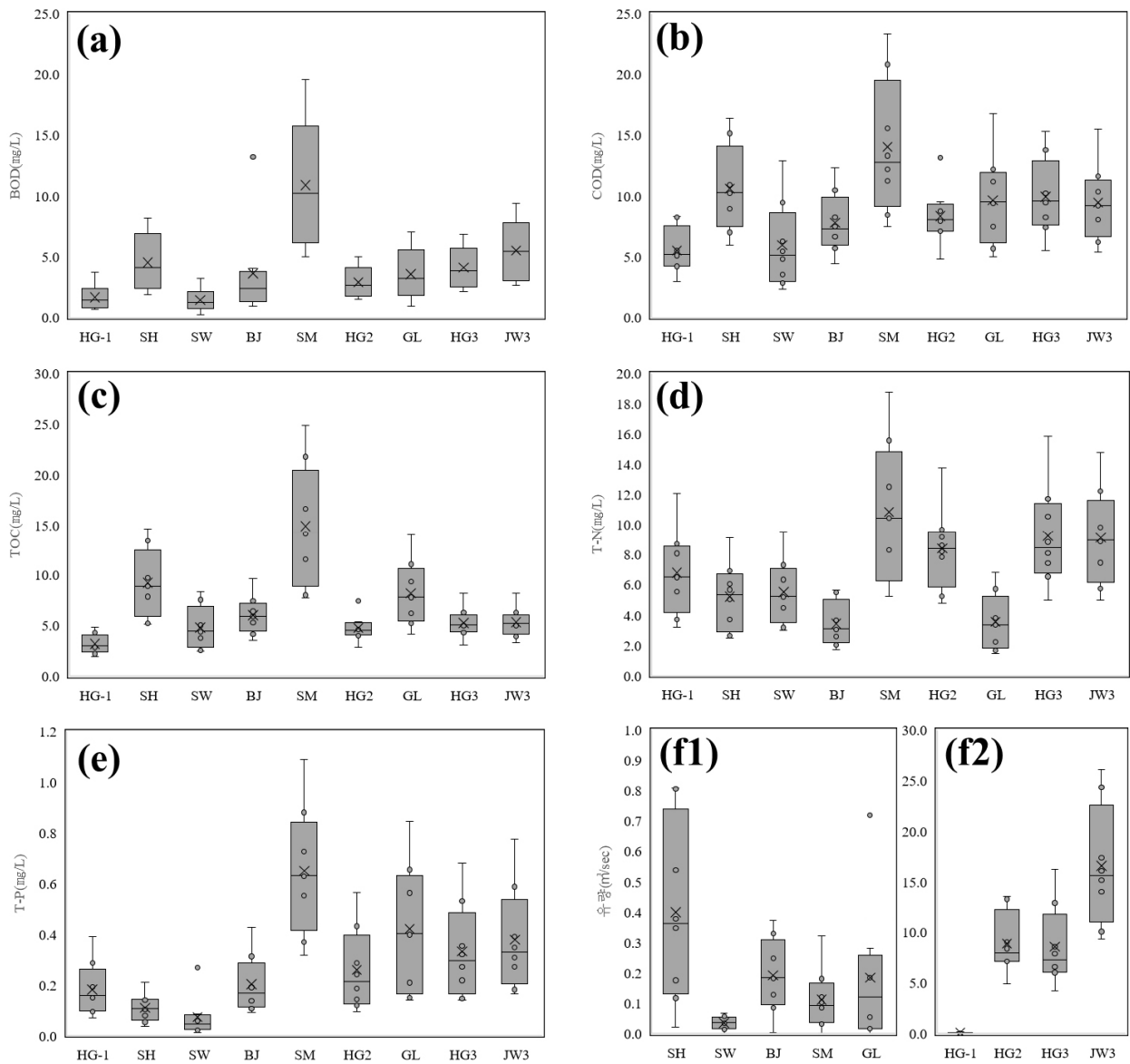
Sites		Flow Rate (m <sup>3</sup> /sec)	Temp. (°C)	DO (mg/L)	pH	EC (μS/cm)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TOC (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	SS (mg/L)	Total Coliforms
HG-1	Max.	0.127	26.6	13.0	8.1	632	3.7	8.3	4.3	8.705	0.390	8.3	360000
	Min.	0.041	8.1	6.3	7.4	341	0.7	4.2	2.2	3.195	0.095	3.0	3200
	Ave.	0.091	16.3	10.5	7.8	477	1.6	5.3	3.1	6.570	0.167	4.7	66022
SH	Max.	0.805	28.8	20.1	8.9	767	8.2	15.2	13.4	6.910	0.145	70.0	250
	Min.	0.022	4.1	4.8	7.0	359	1.9	7.0	5.1	2.620	0.037	8.0	5
	Ave.	0.378	15.8	10.7	8.2	575	4.3	10.3	8.9	5.046	0.104	25.0	53
SW	Max.	0.057	25.9	21.0	8.4	723	3.2	12.9	8.3	7.300	0.270	32.5	81
	Min.	0.001	3.1	4.3	7.0	424	0.2	2.8	2.5	3.164	0.012	2.0	11
	Ave.	0.035	14.5	9.5	7.9	570	1.3	5.4	4.5	5.232	0.072	9.4	30
BJ	Max.	0.329	29.9	21.9	8.5	1361	13.2	10.5	7.5	5.653	0.427	13.3	600
	Min.	0.004	3.8	4.6	7.0	302	0.9	5.7	4.1	2.020	0.106	1.0	0
	Ave.	0.182	16.9	9.8	7.9	785	3.1	7.5	5.9	3.185	0.190	6.0	97
SM	Max.	0.323	29.8	17.2	8.2	1134	19.6	20.8	21.8	15.570	0.880	60.0	5600
	Min.	0.002	3.4	2.8	6.3	464	5.0	8.4	8.0	5.210	0.318	4.0	320
	Ave.	0.102	16.3	8.2	7.5	742	10.6	13.3	14.4	10.430	0.628	23.0	2377
HG2	Max.	13.286	29.0	13.8	7.7	1547	4.4	9.5	5.4	9.665	0.565	16.0	260000
	Min.	7.112	9.2	7.3	7.1	821	1.6	7.1	4.0	4.785	0.120	3.1	2900
	Ave.	8.397	19.4	10.2	7.4	1240	2.7	8.1	4.6	8.178	0.240	7.5	48222
GL	Max.	0.720	28.4	21.3	8.6	760	7.0	12.2	11.1	6.835	0.654	36.0	820
	Min.	0.002	3.0	3.8	6.4	385	0.9	5.7	5.2	1.649	0.150	6.0	8
	Ave.	0.184	16.1	9.1	7.4	566	3.3	9.4	7.8	3.353	0.398	17.1	168
HG3	Max.	16.199	29.0	13.3	8.2	1413	6.1	13.8	6.3	11.700	0.680	21.6	2900000
	Min.	6.029	8.0	5.4	7.2	579	2.3	7.4	4.3	6.528	0.140	4.4	1300
	Ave.	7.888	18.6	10.6	7.7	1087	4.0	9.7	5.1	8.827	0.320	10.1	359289
JW3	Max.	24.318	28.5	13.1	8.0	1583	8.3	11.6	6.3	12.215	0.775	24.2	270000
	Min.	10.081	4.5	7.3	7.6	684	2.7	6.2	3.9	5.748	0.165	8.6	2600
	Ave.	16.079	16.8	9.5	7.8	1099	5.3	9.2	5.2	8.863	0.348	13.1	63422

편, 황구지천 지류 하천의 유량(m<sup>3</sup>/sec)은 평균 0.035~0.378로서 SW 지점이 가장 낮은 유량을 SH 지점이 가장 많은 유량을 보였다. 조사대상 황구지천 지류의 총 평균 유량(약 0.88 m<sup>3</sup>/sec)은 황구지천 중류구간(HG2)의 본류 유량에 비교해 크게 낮아(~10배) 유량 자체로는 본류에 대한 기여율이 높지 않음을 알 수 있다. HG2 지점에 인접한 상류 지점에서 지류 중 상대적으로 수질오염도가 높은 SM 지점의 평균유량은 0.102 m<sup>3</sup>/sec로 나타나 SM 하천의 경우 수질관리를 위해서는 수량 확보에도 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

수질은 황구지천 본류의 HG-1 지점의 농도(mg/L)는 BOD<sub>5</sub> 0.7~3.7(평균 1.6 mg/L), T-P 0.095~0.390(평균 0.167 mg/L)로 비교적 양호하였으나, 중류 구간인 HG2부터 저하되어 황구지천 말단인 HG3 지점은 BOD<sub>5</sub> 2.3~6.1(평균 4.0 mg/L), T-P 0.140~0.680(평균 0.320 mg/L)로 높아져 평균값 기준으로 각각 하천의 생활환경기준 III(보통) 등급과 V(나쁨) 등급이 해당하였다. 특히, 진위천 말단인 JW3 지점의 농도(mg/L)는 BOD<sub>5</sub> 2.7~8.3(평균 5.3 mg/L), T-P 0.165~0.775(평균 0.348 mg/L)로 HG3지점 보다 수질이 더욱 악화

되었다. 이는 기존의 연구결과(Park et al. (2017), Cho et al. (2018))와도 일치하는 것으로서 황구지천 하류로 내려가면서 지류 및 본류 구간의 오염원 유입으로 인해 수질오염도가 증가하며, 이로 인해 진위천 말단의 수질이 황구지천의 수질에 직접적인 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 결과는 황구지천 본류에서도 하류로 갈수록 모든 수질항목에서의 시계열 농도의 변화 폭이 크게 나타난 것으로부터도 확인할 수 있다 (Fig. 2).

지류의 경우, BOD<sub>5</sub>는 SW 지점에서 평균 1.3 mg/L로 가장 낮았고, SH, BJ, GL에서 평균 3.1~4.3 mg/L 범위로 보통 수준을 보였으나, SM 지점에서는 조사기간 5.0~19.6(평균 10.6 mg/L)로 VI(매우나쁨) 등급에 해당하였다. 마찬가지로 T-P도 SW는 평균 0.072 mg/L로 낮았으나, SM과 GL에서는 각각 평균 0.628 mg/L과 0.398 mg/L로 하천의 생활환경기준 VI(매우나쁨) 등급과 V(나쁨) 등급에 해당하였다. 특히, SM 지점의 경우 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 모든 BOD<sub>5</sub>와 T-P를 포함한 모든 수질항목에서 높은 평균농도 외에도 수질변화의 폭이 가장 크게 나타났으며, 월별 조사결과(data



**Fig. 2.** Flow rate and water quality of each site in Hwangguji stream watershed, (a) BOD, (b) COD, (c) TOC, (d) T-N, (e) T-P, flow rate of (f1) mainstream and (f2) tributaries.

not shown) 12월과 1월에 특히 오염도가 높은 경향을 보였다. 또한, 지류 중에서는 상대적으로 높은 유량(0.022~0.805 m<sup>3</sup>/sec)을 가진 SH 지점에서도 유기물 농도(BOD<sub>5</sub>, COD, TOC 등)에서 변동폭이 크게 나타났다. HG2 지점의 상류에서 유입되는 SM과 SH에서의 이러한 수질변동은 앞서 기술한 바와 같이 황구지천 중·하류에서의 수질변화에도 영향을 미칠 것으로 보인다. 유사하게 HG2 이후 합류되는 지류인 GL도 평균 수질은 보통(BOD<sub>5</sub>)과 나뭇(T-P) 수준이나 수질변화의 폭이 큰 하천이므로 HG3의 수질변화보다 높은 수질변동을 보여(T-N 제외) 본류 수질에 영향을 끼치고 있음을 알 수 있다(Fig. 2).

### 3.2 통합수질지수 평가

Fig. 3은 황구지천 본류에서의 수질변화 및 지류의 영향을 보다 쉽게 평가할 수 있도록 기 확보한 수질 정보를 RTWQI

분석을 통해 지수로 산정한 결과이다. 12개월간의 수질자료를 사용하여 도출한 평균 RTWQI를 통해 본류구간과 유입지류를 시각적으로 등급화 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 황구지천 본류는 HG-1에서 ‘보통’ 등급의 수질이었으나 유입지류(SH, SW, SM)를 거치면서 악화되어 중류(HG2) 이후 ‘주의’ 등급으로 저하되었으며, 해당 본류구간의 유입지류 하천인 SH 및 SW는 ‘주의’ 등급에 해당함을 SM은 ‘불량’ 등급에 해당함을 확인할 수 있다. HG-1 지점의 황구지천 상류 구간은 본 조사기간 동안의 WQI가 47점으로 황구지천 본류에서 유일하게 ‘보통’ 등급(40~59점)을 나타내었다. HG2 지점에서는 WQI가 HG-1보다 9점이 떨어진 38점으로 ‘주의’ 등급(20~39점)을 나타내었다. 이는 RTWQI 등급으로 판단할 때, HG-1와 HG2 사이 구간에서 수질오염이 유발되었음을 의미한다. 해당 구간에서 조사된 네 개의 유입지류 중 SH, SW 지점은 각각 33, 39점으로 ‘주의’ 등급을 나타내

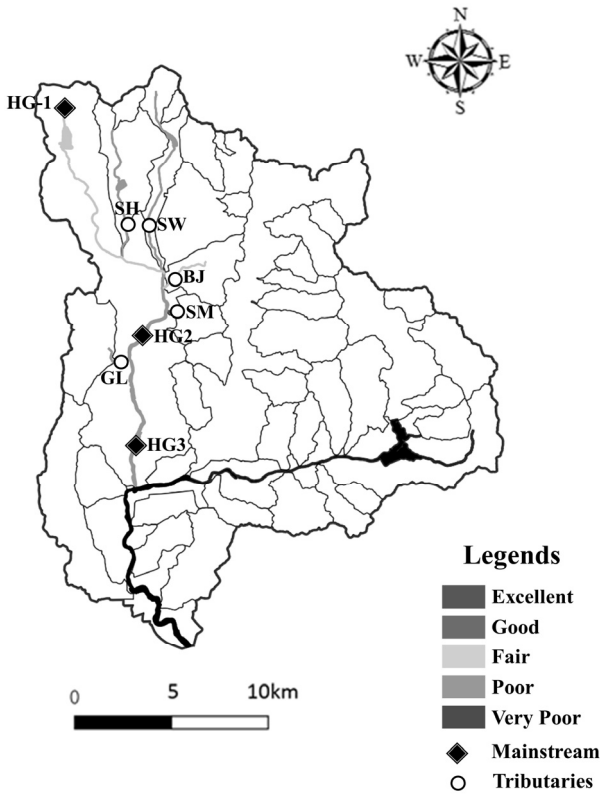


Fig. 3. WQI for the mainstream and tributaries of Hwangguji stream watershed.

었다. 특히, SM 지점은 17점으로 ‘불량’ 등급(0~19점)을 나타내 황구지천 유역에서 가장 오염도가 높은 지류로 나타났다. 한편, 황구지천 말단 지점인 HG3는 평균 WQI가 35점을 나타내 HG2 지점 보다 3점 더 감소한 ‘주의’ 등급을 보였으며, HG2와 HG3 사이에서 유입되는 지류인 GL의 평균 WQI는 26점으로 황구지천 유역에서 두 번째로 오염도가 높은 지점으로 나타났다. 이상의 결과로부터 황구지천 본류 구간의

오염이 지류의 오염 등급과 서로 연관되어 있으며, WQI를 활용한 수질정보를 통해 황구지천 본류에서의 수질 악화구간의 확인과 유입지류의 수질등급에 따른 영향을 시각적으로 보다 용이하게 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 황구지천 본류와 유입지류의 계절별 수질변화를 확인하기 위해 월별 RTWQI 등급 결과를 바탕으로 Heatmap 분석을 실시한 결과이다. 지점별 ‘주의’ 등급 및 ‘불량’ 등급 비율은 각각 상류지점(HG-1, SH, SW)에서 22.2%, 0.0%로 나타났고, 중류지점(BJ, SM, HG2)에서 41.7%, 5.6%였으며, 하류지점(GL, HG3)에서 54.2%, 0.0%로 나타나 황구지천 중·하류에 위치한 유입지류일수록 ‘주의’ 등급의 출현 빈도가 높은 경향을 보였다. 황구지천 유역의 본류와 지류에서 계절별로 WQI가 ‘주의’ 등급 이하를 보인 횟수는 여름(06월~08월)이 12회, 가을(09월~11월)이 10회, 겨울(12월~02월)이 9회, 봄(03월~05월)이 7회로 분석되어 강우기와 가을철 건기 시에 오염도가 높아지는 특징이 있음을 알 수 있었다. 특히, 오염도가 높은 SM 지점은 모든 기간 ‘주의’ 이상의 수질 등급을 나타냈으며, 10월과 01월에는 ‘불량’ 등급으로 수질이 악화되는 것으로 나타났다.

### 3.3 지류 등급화 제시

이상의 황구지천 본류와 지류에서의 수질-유량 변화 특성을 기반으로 진위천 수질을 개선하기 위해 황구지천 유역 내에서 우선으로 수질 개선이 이루어져야 하는 하천을 평가하기 위하여 오염물질 지표인자인 BOD<sub>5</sub>와 T-P 및 유량을 고려한 등급화 분석을 실시하였고, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 그룹 분류기준은 수질항목의 경우 안성천 증권역 목표 수질인 BOD<sub>5</sub> 5 mg/L, T-P 0.2 mg/L를 기준으로 하였으며, 유량의 경우 건전한 수생태계 기능을 확보하기 위한 하천 최소 수량인 0.1 m<sup>3</sup>/sec를 기준으로 하였다. 유량과 수질측정값을 바탕으로 산출한 황구지천 유역 내 지류하천의 등급화 결과, Group A는 하천에 유입되는 유량이 많고 T-P 농도가 높

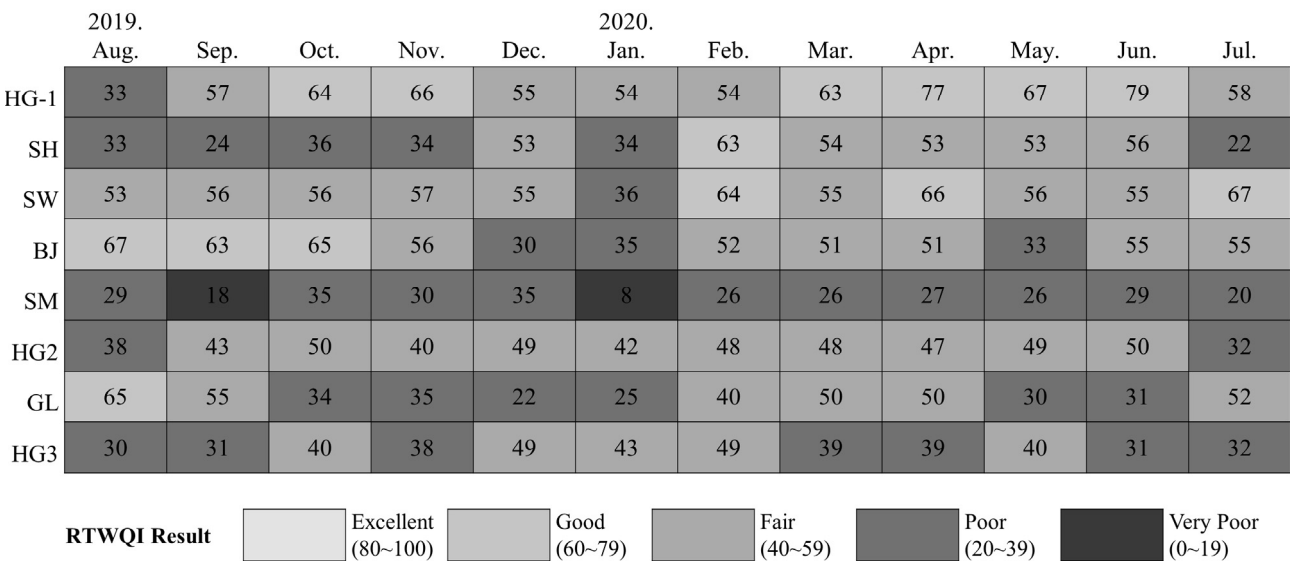


Fig. 4. Heatmap of monthly WQI value distribution of Hwangguji stream watershed.

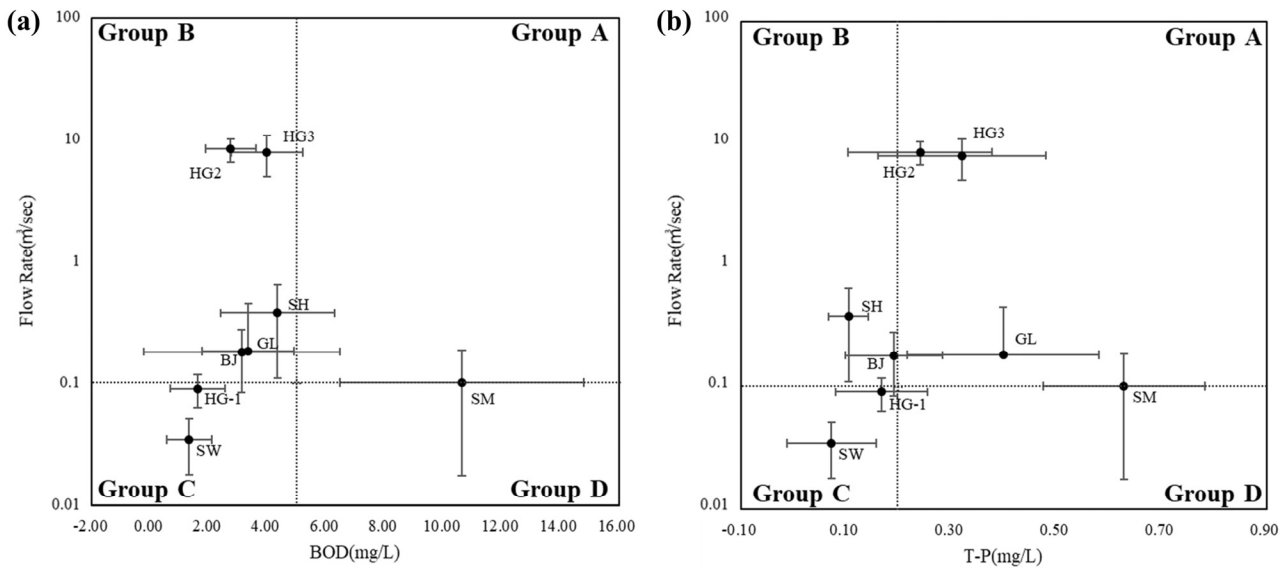


Fig. 5. Grade classification results according to water quality and flow rate of (a) BOD and (b) T-P.

아 분류에의 영향이 클 수 있으므로 수질 개선대책이 우선으로 필요한 그룹으로 지류 중에는 SM과 GL이 속하였다.

SM은 평균 유량이 0.102 (0.002~0.323) m<sup>3</sup>/sec로서 그룹화의 경계선에 있으면서 T-P와 함께 높은 BOD<sub>5</sub> 농도를 보여 분류의 오염에 있어서 비점 유래의 T-P 외에 생활계 오염원의 기여도도 높을 수 있음을 유추할 수 있다. SM은 2017년 오염원 조사자료(NIER, 2020)에 의하면 인접한 법정동의 하수처리구역은 높으나(가정인구수 95.46%, 가정물사용량 94.44%, 일반물사용량 84.34%), 상류 부근인 경기도 오산시 외삼미동의 경우 영업장 하수처리구역이 50.4%로 가장 낮았고, 현장조사 결과 하천 상류부는 인근에 농경지가 있어 비점오염원 유입 가능성이 높았다. GL은 하천 인근에 농경지와 산업체가 넓게 위치하는 하천으로, 2017년 오염원 조사자료(NIER, 2020)에 의하면 인접한 법정동의 하수처리구역은 가정의 경우 100%인 반면 영업장의 경우 평균 48.7%로 나타났다. 특히 중류에 위치한 경기도 화성시 정남면 관향리의 경우 제조업체가 다수 분포해 있으나 영업장 하수처리구역이 11.1%로 가장 낮아 미처리구역에서의 하수 유입 가능성이 높 존재하고 있어 개선이 필요하다. 특히, 모니터링시기(2020년 4월)의 현장조사 결과 GL은 전 구간 하천정비가 잘 되어있었으나, 저수지 인근인 상류부근 부터의 조류 발생 및 하류 고정물로 인한 하천 흐름의 정체가 하천 수질에 영향을 미치고 있음을 확인한 바 있다.

Group B는 비교적 충분한 유량을 유지하면서 BOD<sub>5</sub>와 T-P 농도가 비교적 낮아 물환경 관리측면에서는 양호한 하천으로서 시급한 개선보다는 유지와 관리가 요구되는 지점으로서 SH, BJ이 속하였다. 다만, 두 지류 모두 BOD<sub>5</sub>와 T-P 농도가 HG-1 지점보다 높아 상류분류 구간의 양호한 수질유지를 위해서는 관심이 필요한 하천임을 알 수 있다. Group C는 충분한 유량을 유지할 수 없어 유량 확보가 우선적으로 필요한 지류로서 SW가 속하였다. SW 지점의 현재 수질은 BOD<sub>5</sub> 0.2~3.2 mg/L, T-P 0.012~0.270 mg/L로 양호한 수

준이어서 수질개선의 시급성은 낮으나 저 유량으로 인해 오염원의 영향을 받을 수 있으므로 중장기적으로는 수량 확보에 더 많은 관심을 기울여야할 하천이다. 황구지천 지류 중에는 유량이 충분하지 못하면서 T-P 농도가 높아 수질 개선대책과 유량 확보가 동시에 필요한 지점(Group D)은 없는 것으로 나타났다.

### 3.4 부하지수곡선(LDC) 분석 결과

WQI를 통해 확인이 어려웠던 수량을 고려한 황구지천 분류 구간별 오염부하 현황과 주요 오염원에 대한 분석은 LDC를 작성하여 해석하였다. Fig. 6은 물환경측정망 수질 유량자료(ME, 2020c)를 사용하여 황구지천 유역이 포함된 안성천 중권역 목표수질인 III 등급(BOD<sub>5</sub> 5 mg/L, T-P 0.2 mg/L)을 기준으로 산정하여 나타낸 LDC 결과이다. 황구지천 분류 및 지류 구간별 BOD<sub>5</sub>와 T-P 항목의 LDC와 실측 유달부하량을 비교 분석하였으며, 전체 유황조건에서 기준을 초과한 항목수를 전체 항목 수로 나누어 줌으로서 초과빈도에 근거한 초과율(%)을 산정한 결과, 황구지천 상류 구간인 HG-1 지점은 BOD<sub>5</sub> 11.79%, T-P 21.40%가 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 황구지천 중류 구간인 HG2 지점은 초과비율이 BOD<sub>5</sub> 25.99%, T-P 81.94%로 HG-1보다 각각 14.20%, 60.54% 높게 나타나 HG-1와 HG2 사이 구간에서 T-P 오염이 특히 크게 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 황구지천 하류 구간인 HG3 지점에서는 초과비율이 BOD<sub>5</sub> 45.18%, T-P 92.98%로 HG2보다 각각 19.19%, 11.04% 높게 나타났으며, 특히 T-P 초과비율이 매우 높아 해당 분류 구간에 초점을 맞춘 수질개선대책이 우선적으로 필요함을 알 수 있다.

일반적으로 저수량 대비 풍수량에서의 LDC 초과비율이 높을수록 비점오염원에 의한 오염 가능성이 높은 것으로 알려진다(Choi, Shin et al., 2012). Table 3은 분류구간에서의 각 유황별 LDC 초과비율을 산정한 결과이다. HG-1 지점의 경우, BOD<sub>5</sub>와 T-P 항목 모두 홍수량일 때 각각 50.00%,



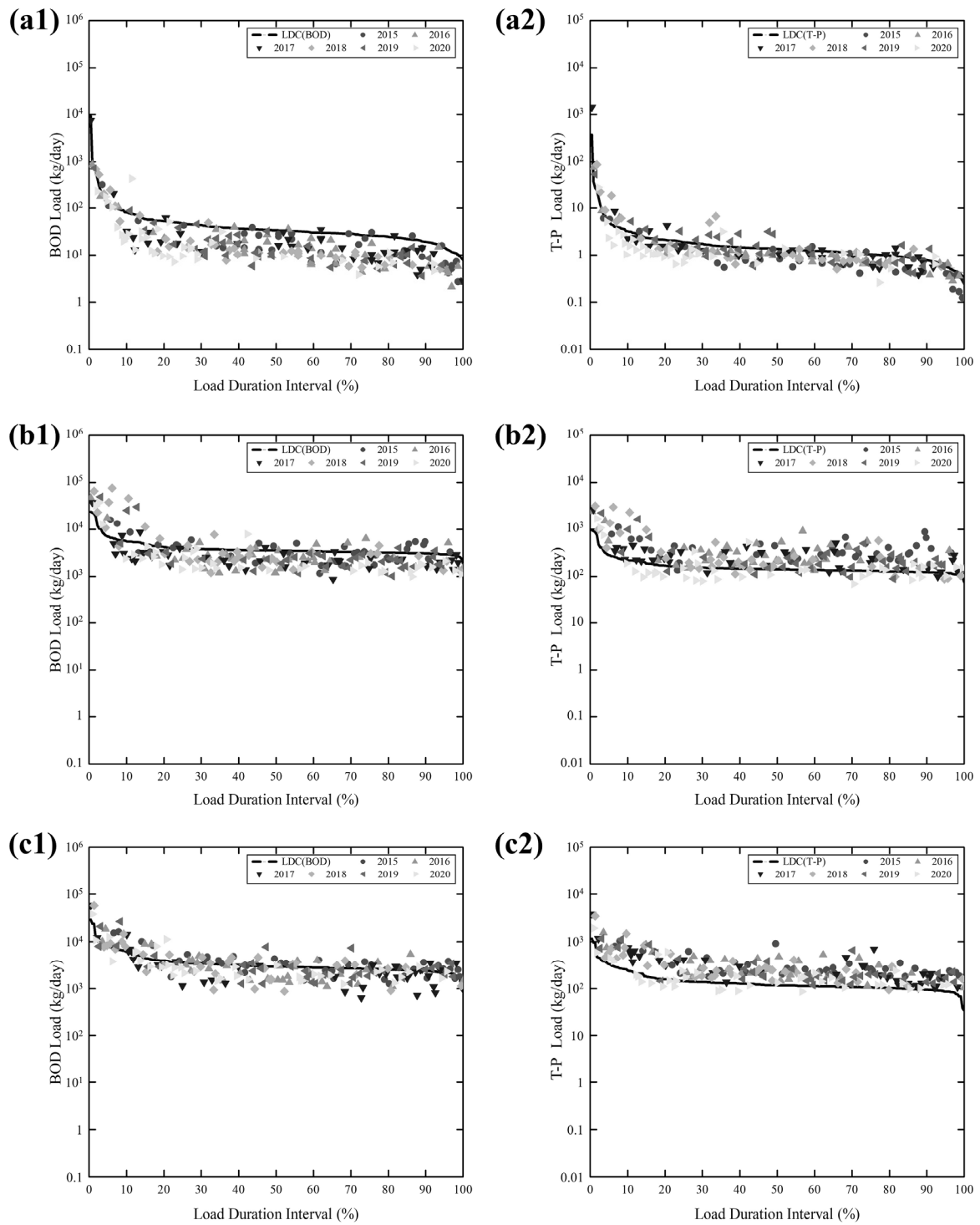


Fig. 6. LDC analysis results of (1) BOD and (2) T-P in the Hwangguji mainstream at (a) HG-1, (b) HG2, and (c) HG3.

Table 3. Excess rate of LDC values calculated for the Hwangguji stream watershed (average values from 2015 to 2020)

Sites	Excess rate (%) in BOD load						Excess rate (%) in T-P load					
	Whole	High flows	Moist conditions	Mid-range conditions	Dry conditions	Low flows	Whole	High flows	Moist conditions	Mid-range conditions	Dry conditions	Low flows
HG-1	11.79	50.00	11.11	4.26	7.58	4.55	21.40	59.09	20.83	17.02	15.15	13.64
HG2	25.99	72.73	25.00	17.39	20.59	17.39	81.94	95.45	73.53	84.78	83.82	82.61
HG3	45.18	77.27	46.38	35.56	33.33	65.22	92.98	100.00	82.61	95.56	97.10	100.00

59.09%로 다소 높았으며 다른 유황에서는 초과비율이 낮은 편이었다. HG2 지점에서는 BOD<sub>5</sub>의 경우 홍수량에서만 72.73%로 높게 나타난 반면, T-P의 경우 모든 유황에서 초과비율이 73.53~95.45%로 매우 높게 나타났다. 이는 HG-1 지점은 전반적인 수질은 양호하나 선제적으로 BOD<sub>5</sub>와 T-P 오염도를 유발할 수 있는 비점오염원에 대한 관리가 필요함을 시사하며, 특히, HG2 구간에서 강우시 유입되는 BOD<sub>5</sub> 오염원과 연중 지속적으로 유입되는 T-P의 관리가 필요함을 알 수 있다. 한편, HG3 지점에서는 BOD<sub>5</sub>의 경우 홍수량과 갈수량에서 각각 77.27, 65.22%로 높았으며 T-P의 경우 모든 유황에서 초과비율이 82.61~100%로 매우 높았다. 2017년 오염원 조사자료(NIER, 2020)에 의하면 HG2 지점은 경기도 군포시 당정동 일부에서 경기도 화성시 봉담읍 와우리 일부까지를 포함하는 황구지천 상류 소권역의 대지 면적이 전체 토지계 오염원 중 69.1%로 높은 비율을 차지하고, 농경지 면적도 23.7%로 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 특히, HG3 지점이 속하는 황구지천 하류 소권역은 경기도 수원시 영통구 망포동 일부에서 경기도 화성시 황계동까지를 포함하며, 대지 면적과 농경지 면적이 각각 33.7%, 43.1%로 상류 소권역에 비교해 대지보다는 농경지에 의한 비점오염원 유입 가능성이 높은 특징을 보였다. 이상의 결과로부터 화성시와 오산시가 인접해 있는 HG2 구간 및 화성시와 평택시가 인접해 있는 HG3 구간은 유황에 상관없이 T-P 항목에서의 초과비율이 높게 나타나 T-P 유래의 점오염원과 비점오염원이 동시에 관리대상이 되어야 함을 확인하였다.

### 3.5 유달부하량과 유달밀도 평가

황구지천 유역의 오염부하 특성을 보다 구체적으로 평가하기 위하여 본류와 지류의 유달부하량을 식(2)에 따라 산정하여 오염부하기여율과 유달부하밀도를 도출하였고, 그 결과는 Table 4에 나타내었다. HG2를 기준으로 유입 지류(SH~SM)의 기여율을 모두 합산한 결과, BOD<sub>5</sub> 14.54%, TOC 15.67%, TN 5.43%, T-P 6.97%로 나타났다. 즉, 수질이 악화되는 중류 구간(HG2)에 미치는 유입 지류의 영향은 유기물의 경우 약 15%, 영양염류는 5%~7% 수준으로 나타났다. 유입 유기물의 영향이 영양염류에 비교해 2~3배 높은 수준이나 전체적으로는 본류 구간에 대한 유입지류의 기여율이 매우 높은 수준은 아닌 것으로 나타났다. 이는 해당 본류 구간에서의 오염은 지류 외에도 본류에서의 오염 유입이 클 수 있음을 의미한다.

이를 확인하기 위해 중류구간에 위치한 수원하수종말처리장이 황구지천 수질에 미치는 영향을 분석하였다. 수질 측정은 2020년 10월에 이루어졌으며 시료채취 지점은 Fig. 7과 같이 황구지천 본류 1지점(화산교)과 HG2 지점 및 해당 구간에 위치한 지류(BJ, SM)에서 이루어졌다. 여기서, 수원하수종말처리장 유량 측정값은 2018년 하수도통계자료를 이용하였다(ME, 2020a). Table 5는 BOD<sub>5</sub> 및 T-P 측정값을 이용하여 HG2 지점에 대한 수원하수종말처리장 방류수의 수질 기여율 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그 결과 조사지점에서의 수원하수종말처리장의 BOD<sub>5</sub> 및 T-P 농도는 각각 2.2 mg/L, 0.102 mg/L로 방류수 기준치(10.0 mg/L, 2.0 mg/L)보

**Table 4.** Contribution values and delivery load density in the Hwangguji stream watershed

Sites	Area (km <sup>2</sup> )	Flow Rate (m <sup>3</sup> /sec)	Pollutant Delivery Load (kg/day)				Contribution Values (%) <sup>a</sup>				Delivery Load Density (kg/day/km <sup>2</sup> )			
			BOD	TOC	T-N	T-P	BOD	TOC	T-N	T-P	BOD	TOC	T-N	T-P
HG-1	4.23	0.09	12.69	24.46	51.84	1.32	0.64%	0.73%	0.87%	0.76%	3.00	5.78	12.26	0.31
SH	30.85	0.38	141.53	289.95	164.84	3.40	7.14%	8.69%	2.78%	1.95%	4.59	9.40	5.34	0.11
SW	25.43	0.03	3.93	13.49	15.63	0.21	0.20%	0.40%	0.26%	0.12%	0.15	0.53	0.61	0.01
BJ	14.15	0.18	48.89	92.37	50.03	2.99	2.47%	2.77%	0.84%	1.72%	3.46	6.53	3.54	0.21
SM	9.43	0.10	93.87	127.12	92.06	5.55	4.73%	3.81%	1.55%	3.18%	9.95	13.48	9.76	0.59
HG2	191.57	8.40	1983.09	3337.40	5933.62	174.31	-	-	-	-	10.35	17.42	30.97	0.91
GL	19.51	0.18	53.16	124.74	53.41	6.35	7.34%	80.19%	64.93%	14.53%	2.72	6.39	2.74	0.33
HG3	244.03	7.89	2709.17	3492.95	6015.89	217.98	-	-	-	-	11.10	14.31	24.65	0.89

<sup>a</sup>Contribution values (%) from upstream tributaries to HG2, but in the case of GL, it is the contribution values(%) to HG3 after HG2

**Table 5.** The contribution values of BOD and T-P from upstream pollution sources to HG2 site

Sampling <sup>a</sup> Sites	Flow Rate (m <sup>3</sup> /sec)	Pollutant Delivery Load (kg/day)		Contribution Values (%)		
		BOD	T-P	BOD	T-P	
Hwangguji stream (before BJ)	Hwasan Bridge	2.784	697.56	15.63	39.27%	15.80%
Banjeong stream (BJ)	Tongsan Bridge	0.099	12.83	1.09	0.72%	1.10%
Suwon sewage treatment plant	5-1 Songsan-dong, Hwaseong-si, Gyeonggi-do	6.019	1144.00	52.99	64.40%	53.54%
Sammi stream (SM)	Yangsan Bridge	0.086	81.73	6.05	4.60%	6.11%
Hwanggujicheon2 (HG2)	Sema Bridge	9.790	1776.30	98.97		

<sup>a</sup>Sampling and monitoring took place on the same day (2020.10.15.).

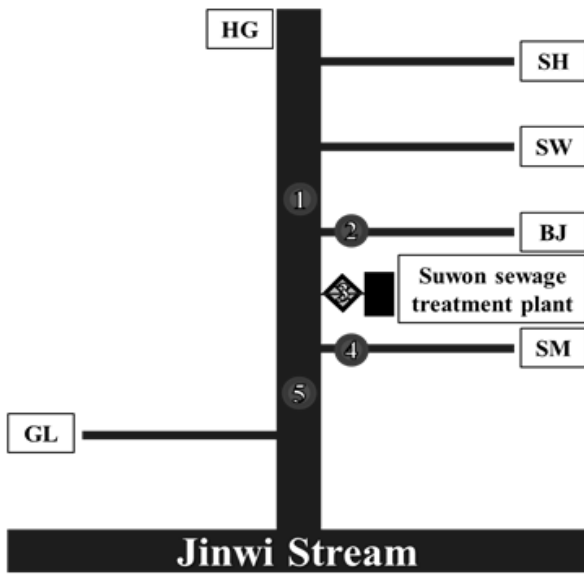


Fig. 7. Schematic diagram of the lower Hwangguji stream watershed.

다는 낮았으나, 하천의 생활환경기준 Ib(중음) 등급(BOD<sub>5</sub> 2.0 mg/L, T-P 0.04 mg/L)에 대비해서는 약 1.1, 2.5배 높은 수준으로 하천 수질을 악화시킬 수 있다. 여기에 처리장에서 높은 방류량(6.019 m<sup>3</sup>/sec)으로 인해 정량적으로 산출한 BOD<sub>5</sub> 및 T-P 기여율은 각각 64.40%, 53.54%로 매우 높았다. 이는 황구지천 본류 1지점 지점(화산교)으로부터의 기여율(BOD<sub>5</sub> 39.27%, T-P 15.80%)과 비교해서도 크게 높은 수치로서 황구지천의 본류의 수질 개선을 위해서는 장기적으로는 수원하수종말처리장의 방류수 수질에 대한 검토도 함께 이루어지는 것이 바람직하다. 한편 SM의 경우 낮은 유량(0.086 m<sup>3</sup>/sec)임에도 불구하고 해당 우심구간에서의 BOD<sub>5</sub>과 T-P 기여율이 각각 4.60%, 6.11%로 나타나 수량 확보와 함께 본류에의 오염원 유입을 저감하기 위한 수질개선이 요구된다.

한편, 오염도가 높은 중류(HG2)와 하류(HG3) 구간사이에

서 GL이 미치는 본류에 미치는 영향을 확인하기 위하여 오염부하 기여율을 평가한 결과, 각각 BOD<sub>5</sub> 7.3%, TOC 80.2%, T-N 64.9%, T-P 14.5%로 매우 높게 나타났다. 특히 TOC 및 T-N의 기여율이 50% 이상으로 높은 특징을 보였다. 이는 하천 인근으로부터 농경지 유래 비점오염원의 유입 또는 하수미처리구역에 위치한 산업체로부터의 하수 유입 등으로 인해 하천 수질 오염이 발생하였을 것으로 판단되며, GL이 황구지천 중하류 구간의 주요 오염발생 하천으로 보여졌다. 이러한 황구지천 본류 및 지류하천에서의 오염 특성은 유달부하밀도(kg/day/km<sup>2</sup>)를 통해서도 확인가능하였다(Table 4). HG2 지점의 유달부하밀도는 BOD<sub>5</sub> 10.35, TOC 17.42, T-N 30.97, T-P 0.91로 가장 높았으며, HG3 지점도 유사한 수준을 보였다. 이는 상기 분석 결과와 마찬가지로 상류인 HG-1 지점에서 양호하였던 수질이 중·하류로 내려오면서 오염원과 지류 등의 유입으로 인해 수질이 악화되었음을 나타내며, 수질항목 농도가 양호하더라도 수량 증가에 따른 오염부하의 양적증가로 인해 유달부하밀도가 증가함을 나타낸다. 지류 중에서는 SM의 유달부하밀도가 BOD<sub>5</sub> 9.95, TOC 13.48, T-N 9.76, T-P 0.59로 가장 높았다. SM 지점은 유량이 적은편이나 BOD<sub>5</sub>, TOC, T-P의 수질측정값 평균이 모두 하천의 생활환경기준 VI(매우나쁨) 등급에 해당하며, 현장조사 결과 상류 일부 지역이 하수처리구역으로 편입되지 못하고 있어 해당 지역의 영업장 등에서 방류하는 하수가 하천의 수질오염을 유발할 우려가 있는 것으로 확인되었다.

3.6 황구지천 본류와 지류에서의 오염특성 평가

Table 6은 본류인 황구지천과 지류인 서호천, 수원천, 반정천, 삼미천, 갈천의 수질오염특성 및 본류구간에 미치는 영향을 평가하기 위해 실시한 분석의 주요 결과를 종합적으로 해석한 결과이다. WQI 분석 결과 황구지천 본류는 HG-1에서 47로 보통 등급의 수질이였으나 유입 지류(SH, SW, SM)(17~42)를 거치면서 악화되어 중류(HG2) 이후 주의 등급(26~38)으로 저하됨을 확인하였으며, Heatmap 분석 결과

Table 6. Summary of pollution status for the Hwangguji stream watershed

Sites	WQI		Grade classification		LDC		Pollutant Delivery Load		Delivery Load Density (kg/day/km <sup>2</sup> )	
	Result	Index Rank	BOD	T-P	BOD Excess rate (%)	T-P Excess rate (%)	BOD Contribution Values (%)	T-P Contribution Values (%)	BOD	T-P
HG-1	47	Fair	C	C	11.79	21.40	0.64	0.76	3.00	0.31
SH	33	Poor	B	B	-	-	7.14	1.95	4.59	0.11
SW	39	Poor	C	C	-	-	0.20	0.12	0.15	0.01
BJ	42	Fair	B	B	-	-	2.47	1.72	3.46	0.21
SM	17	Very Poor	A	A	-	-	4.73	3.18	9.95	0.59
HG2	38	Poor	B	A	25.99	81.94	-	-	10.35	0.91
GL	26	Poor	B	A	-	-	7.34	14.53	2.72	0.33
HG3	35	Poor	B	A	45.18	92.98	-	-	11.10	0.89

여름과 가을에 수질오염도가 높고 봄에 수질오염도가 낮은 경향을 보였다.

황구지천 유역 내 지류 중 수질 개선이 우선으로 이루어져야 하는 하천은 SM과 GL로서, 특히 SM은 BOD<sub>5</sub>와 T-P 모두 농도가 높아(Group A) 개선이 시급한 하천으로 나타났으며, GL은 T-P 농도의 높은 특징을 나타냈다.

LDC 분석 결과(2015~2020년) 안성천 중권역 목표수질인 III 등급을 초과율은 황구지천 중류의 HG2 지점에서 BOD<sub>5</sub>와 T-P 모두 증가하였으며 특히 T-P의 초과율이 81.94%로 상류구간 HG-1(21.40%)에 비교해 약 3.8배 이상 크게 증가하였다. 이후 말단인 HG3 지점으로 가면서 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 즉, HG2에서 HG3로 가면서 T-P 초과율은 약 10% 더 증가하였으며, BOD<sub>5</sub>는 HG3에서의 초과율이 45.18%로 HG2(25.99%)에 비교해 약 1.7배 이상 크게 증가하는 특징을 보였다. 중하류 지점에서의 이러한 초과율은 풍수기에 크게 증가하는 특징을 보여 비점오염원의 영향이 큰 것으로 추정된다(Table 3). 즉, BOD<sub>5</sub>는 평수량을 기준으로 풍수기 유행에서 더 높은 경향을 보여 비점오염원의 영향이 큰 반면, T-P는 점 및 비점오염원의 영향이 모두 크게 나타나는 특징을 가짐을 알 수 있었다. 한편, 해당 구간(HG2, HG3)에서의 연도별 BOD<sub>5</sub>와 T-P 농도의 초과율 추이(2015~2020년)를 살펴본 결과(data not shown) BOD<sub>5</sub>(2018년도 제외)와 T-P 모두 전반적으로는 감소하는 추세이나 미미한 수준이어서 지속적인 관심이 요구된다.

#### 4. Conclusion

본 연구에서는 황구지천 유역을 대상으로 황구지천 본류 구간과 각 지류에 대해 유량·수질 모니터링 자료의 확보를 통해 황구지천 본류 구간을 포함한 각 지류하천에서의 오염부하특성을 평가하였고, 본류 구간을 포함한 지류의 오염부하 기여율과 수질영향 및 오염특성에 대한 유용한 자료를 확보할 수 있었다. 본 연구를 통해 도출한 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 황구지천 본류의 수질은 수원천(SW) 합류지점부터 주의 수준으로 악화되어 황구지천 중류와 하류로 내려가면서 오염도가 증가하여 진위천 말단의 수질에 직접적인 영향을 주고 있었다. 즉, 상류인 HG-1 지점에서 보통 이었던 지수등급이 유입지류(SM, SH)와 수원하수처리장 방류수 영향으로 HG2 지점에서 주의 등급으로 저하되었고, 이후 GL의 영향으로 HG3지점 수질이 더 저하되는 것으로 WQI 분석을 통해 확인하였다. WQI와 GIS의 결합을 통한 수질정보는 황구지천 본류에서의 수질 악화구간과 유입지류의 수질등급에 따른 영향을 시각적으로 용이하게 확인가능하게 하였으며, Heatmap 분석을 통해 오염은 여름과 가을에 특히 높은 경향을 가짐을 확인하였다.

2) 본류구간에서의 LDC 분석 결과 중류인 HG2 지점과 HG3 지점에서의 BOD<sub>5</sub>와 T-P 초과비율은 각각 25.99%와 81.94% 및 45.18%와 92.98%로 중류에서 하류로 가면서 지

속적으로 증가하였다. 초과비율은 특히 홍수량일 때 높았고, BOD<sub>5</sub> 보다도 T-P 초과비율이 높아 비점오염원과 T-P 오염원에 대한 관리가 우선적으로 요구됨을 알 수 있었다.

3) 오염부하특성 분석결과 HG2에서 HG3로 갈수록 BOD<sub>5</sub>와 T-P의 유달부하량이 높았으며 특히, HG2 지점에서 유달 밀도가 크게 증가하는 특징을 보였다. HG2를 기준으로 산정한 상류 구간 유입 지류(SH~SM)의 기여율은 BOD<sub>5</sub> 14.54%, TOC 15.67%, T-N 5.43%, T-P 6.97%로 유기물이 영양염류에 비교해 2~3배 높았다. 특히 본류에 위치한 수원하수종말처리장은 높은 방류량(6.019 m<sup>3</sup>/sec)으로 인해 BOD<sub>5</sub>(2.2 mg/L)와 T-P(0.102 mg/L)에서 각각 64.40%와 53.54%의 높은 기여율을 보여 본류의 수질 개선을 위해서는 장기적으로는 방류수 수질에 대한 검토가 필요하다.

4) 지류 영향분석 결과, SM과 GL은 일정 유량(>0.1 m<sup>3</sup>/day)을 가지면서 T-P 농도가 높아 본류에의 영향이 클 수 있어 수질 개선이 우선으로 이루어져야 하는 하천으로 분류된다. 또한, SW은 유량이 적어 수생태계 기능이 적절히 확보되기 어려울 수 있으므로 수량 확보가 요구되는 하천임을 알 수 있었다. 특히, SM은 유달부하밀도가 높고 해당 우심구간에서의 BOD<sub>5</sub>과 T-P 기여율이 각각 4.60%, 6.11%로 평가 대상 타 하천(BJ)에 비교해 높아 본류에의 오염원 유입을 저감하기 위한 수질개선이 시급한 하천으로 나타났다. GL의 HG3 구간에 대한 오염기여율도 TOC 및 T-N에서 각각 80.2%, 64.9%으로 높은 특징을 보여 황구지천 하류 구간에서의 수질개선이 필요한 지류 하천이었다.

5) 향후 황구지천 수질개선을 위해서는 황구지천 본류로 유입되는 비점오염원 저감이 중요하며, 지류 중 SM은 하수처리구역이 낮은 지역에 차집관로 확충이 필요할 것으로 판단된다. GL은 영업장의 하수처리구역 확대가 요구되며 특히 하류 쪽에서 유속이 정체되는 구간에서의 하천 흐름 개선이 필요하다. 또한, SM과 GL 모두 농경지 유래 비점오염원 유입이 우려되므로 농경지와 하천사이에 식생여과대, 저류지 등의 적절한 비점오염물질저감시설 설치와 강우유출수가 우회할 수 있도록 방지턱이나 도랑 등의 조성이 필요하다.

이상의 연구를 통해 진위A 단위유역에서의 주요 오염하천인 황구지천 유역의 오염우심구간에 대한 오염특성을 파악할 수 있었고 해당 구간 지류에서의 수질과 유량 자료를 포함한 유역의 오염부하특성에 대한 기초자료를 확보하였다. 본 연구결과는 황구지천 유역에서 우선적으로 개선이 필요한 지점과 효율적인 수질관리 및 하천 오염의 개선을 위한 주요 오염특성을 분석한 자료로서 보다 효율적인 하천의 수질관리 및 수질 개선방안의 마련에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### Acknowledgement

본 연구는 한강수계관리위원회 환경기초조사사업에 의해 이루어졌습니다.

## References

- Ahn, T. J., Jo, D. H., and Noh, H. S. (2019). *Gyeonggi-do Assembly*, [https://www.ggc.go.kr/site/main/board/clnc\\_rsrgrp/87046](https://www.ggc.go.kr/site/main/board/clnc_rsrgrp/87046) (accessed Nov. 2020).
- Bonta, J. V. and Cleland, B. (2003). Incorporating natural variability, uncertainty, and risk into water quality evaluations using duration curves, *Journal of the American Water Resources Association*, 39(6), 1481-1496.
- Cho, H. K. (2011). A study on the related characteristics of discharge-water quality in Nakdong river, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(3), 373-384. [Korean Literature]
- Cho, Y. C., Choi, J. W., Noh, C. W., Kwon, P. S., Kim, S. H., and Yu S. J. (2018). Evaluation of discharge-water quality characteristics and river grade classification of Jinwi river unit basin, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 27(6), 704-716. [Korean Literature]
- Choi, D. H., Jung, J. W., Lee, K. S., Choi, Y. J., Yoon, K. S., Cho, S. H., Park, H. N., Lim, B. J., and Chang, N. I. (2012). Estimation of pollutant load delivery ratio for flow duration using L-Q equation from the Oenam-cheon watershed in Juam lake, *Journal of Environmental Science International*, 21(1), 31-39. [Korean Literature]
- Choi, K. W., Shin, K. Y., Lee, H. J., and Jun, S. H. (2012). Assessment of the water quality of Jungnang stream by flow conditions using load duration curve, *Journal of Environmental Health Sciences*, 38(5), 438-447. [Korean Literature]
- Han, M. D., Son, J. Y., Ryu, J. C., Ahn, K. H., and Kim, Y. S. (2014). The effects of pollutants into sub-basin on the water quality and loading of receiving streams, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 36(9), 648-658. [Korean Literature]
- Hwang, H. S., Lee, S. J., Ryu, J. C., Park, J. H., Kim, Y. S., and Ahn, K. H. (2016). A study on selection method of management watershed for total pollution load control at tributary, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(6), 528-536. [Korean Literature]
- Kawo, N. S. and Karuppanan, S. (2018). Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo river basin, Central Ethiopia, *Journal of African Earth Sciences*, 147, 300-311.
- Lee, S. J., Rhee, H. P., Park, J. H., Kim, Y. S., and Hwang, H. S. (2017). A study on verification of delivery ratio methodology for basic plan at TPLMs (Total Pollutant Load Management System), *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 39(12), 714-722. [Korean Literature]
- Lee, S. R., Shin, J. Y., Lee, G. J., Sung, Y. S., Kim, K. S., Lim, K. J., and Kim, J. G. (2018). Analysis of water pollutant load characteristics and its contributions during dry season: Focusing on major streams inflow into SouthHan river of Chungju-dam downstream, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 40(6), 247-257. [Korean Literature]
- Lim, B. S., Cho, B. W., Kim, Y. I., and Kim, D. Y. (2010). Application of priority order selection technique for water quality improvement in stream watershed by relationship of flow and water quality, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(8), 802-808. [Korean Literature]
- Lumb, A., Sharma, T. C., and Bibeault, J. F. (2011). A review of genesis and evolution of Water Quality Index (WQI) and some future directions, *Water Quality, Exposure and Health*, 3, 11-24.
- Ministry of Environment (ME). (2020a). *Ministry of environment*, <http://me.go.kr> (accessed Dec. 2020).
- Ministry of Environment (ME). (2020b). *Real-time water quality information system*, <http://koreawqi.go.kr> (accessed Dec. 2020).
- Ministry of Environment (ME). (2020c). *Water environment information system (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr/waterData/generalSearch.do> (accessed Dec. 2020).
- Na, S. M., Lim, T. H., Lee, J. Y., Kwon, H. G., and Cheon, S. U. (2015). Flow rate · water quality characteristics of tributaries and a grouping method for tributary management in Nakdong river, *Journal of Wetlands Research*, 17(4), 380-390. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2011). *Environmental testing and inspection QA/QC handbook*, NIER NO. 2011-08-1294, National Institute of Environmental Research, 129-200. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2020). *Water Emission Management System (WEMS)*, <https://wems.nier.go.kr> (accessed Dec. 2020).
- Noh, H. S., Jo, D. H., Kim, Y. S., and Ahn, T. J. (2017). Changes and influences of stream water quantity due to urbanization: Focusing on urban streams in Gyeonggi-do, *Journal of Wetlands Research*, 19(4), 491-500. [Korean Literature]
- Park, B. C., Shin, Y. C., and Suh, A. S. (2002). An application and case study on the evaluation method of river naturalness using GIS - The special reference to Musim - cheon river in Cheongju city -, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 5(1), 48-57. [Korean Literature]
- Park, B. G., Ryu, J. C., Na, E. H., Seo, J. Y., and Kim, Y. S. (2017). Study on the application of spatial-analysis of pollutants and load duration curve for efficient implementation of TMDLs system, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 39(12), 655-663. [Korean Literature]
- Park, H. K., Jeung, M. H., Beom, J. A., Choi, D. H., Jung, J. W., Ko, J. H., Kim, Y. S., and Yoon, K. S. (2019). LDC construction through water quality and discharge monitoring for evaluation of nonpoint source pollution management, *Journal of Korean Society of Water Science and Technology*, 27(4), 43-57. [Korean Literature]
- Park, J. D., Park, J. H., Rhew, D. H., and Jeong, D. H. (2008). A study on the method of implementation assessment for total maximum daily load management, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 17(2), 125-132. [Korean Literature]

- Sener, S., Sener, E., and Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu river (SW-Turkey), *Science of the Total Environment*, 584-585, 131-144.
- Sheikhi, S., Shahbazi, H., Mosaferi, M., Firuzi, P., and Aslani, H. (2020). Spatio-temporal variation of WQI, scaling and corrosion indices, and principal component analysis in rural areas of Marand, Iran, *Groundwater for Sustainable Development*, 11, 100480.
- Shim, K. H., Shin, S. M., Kim, S. M., Kim, Y. S., and Kim, G. H. (2020). Priority selection of water quality improvement through water quality data of tributaries of Nakdong river, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 36(5), 364-372. [Korean Literature]
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA.). (2007). *An approach for using load duration curves in the development of TMDLs*, 841-B-07-006, United States Environmental Protection Agency, 1-68.
- Yu, J. H., Lee, H. S., Lim, B. R., Kang, J. H., Ahn, T. U., and Shin, H. S. (2020). Analysis of pollution characteristics in the mainstream and its tributaries of Gongneung stream using water quality index and pollution load data, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 36(2), 125-136. [Korean Literature]