

## 춘천 도시하천 공지천의 중·하류 갈수기 부영양화 특성 분석

정동성<sup>1</sup>, 홍은미<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 환경학과 학부생, <sup>2</sup>강원대학교 환경융합학부 조교수

# Analysis of Eutrophication Patterns of Mid- and Downstream Regions of the Urban Gongji Stream during the Dry Season

Jeong, D. S.<sup>1</sup> and E. M. Hong<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Undergraduate Student, Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, School of Natural Resources and Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

\*Corresponding author: Hong, E. M. (E-mail: eunmi.hong@kangwon.ac.kr)

### ABSTRACT

Received: 2 July 2020

Revised: 24 August 2020

Accepted: 4 September 2020

As urban river basins are exposed to various sources of pollution, their water quality may change rapidly. In particular, during the dry season, when the flow rate is reduced, eutrophication may easily lead to water pollution. Spatial variations in eutrophication patterns between the mid- and downstream regions of the urban Gongji stream, located at the center of Chuncheon, have been reported. Therefore, it is essential to assess the spatial characteristics through frequent on-site monitoring for efficient water quality management. In this study, eutrophication patterns of the mid- and downstream regions of the Gongji stream during dry season were assessed through on-site monitoring and water quality parameters were analyzed. Following eutrophication, overgrowth of attached algae occurred due to increased water temperature in the midstream region and overgrowth of phytoplankton due to altered hydraulic residence time occurred in the downstream region. Specifically, DO supersaturation caused by the overgrowth of attached algae in the midstream region reflected high diurnal DO fluctuations. Despite its similarity in shape with the nearby Uiam Lake, the downstream region showed differences in eutrophication patterns. Additional studies and management plans are warranted to control eutrophication of urban streams.

**Keywords:** Chlorophyll-a, Dry season, Eutrophication, Supersaturation, Urban stream



## 서론

강원도 춘천시에 위치한 공지천은 주거지와 상가가 밀집한 도심을 관류하여 의암호와 합류하는 전형적인 도시하천으로 친수 공간으로서의 수요가 나날이 증가하고 있다. 공지천 유역의 상류는 임야, 농경지가 주를 이루고 있고, 중·하류구간은 도심 시가지가 주를 이루고 있기 때문에 다양한 오염원에 노출되어 있다(Shin et al., 2000). 이러한 특징으로 도시하천인 공지천은 공간적 중요성과 상수원이 위치한 의암호 지류로서의 중요성으로 지속적인 수질관리가 필요하다. 이에, 과거부터 공지천 수질 관리를 위한 여러 사업이 수행되었으며, 그 결과로 지속적인 수질 개선 효과가 나타나고 있다(Koh et al., 2009). 그러나 대부분의 하천들과 마찬가지로, 하천의 오염 상태를 직접적으로 확인 할 수 있는 유기물 오염에 있어서 많은 개선이 있어온 것은 사실이지만, 간헐적으로 나타나는 부영양화 현상을 볼 때, 영양염 오염 개선에 있어서는 부족한 면이 있을 것으로 판단된다.

또한, 가뭄으로 저수위, 저유량, 저유속이 지속 되는 시기인 갈수기는 소량의 오염물질로도 쉽게 하천이 오염될 수 있으며(Han River Management Committee, 2017), 강수에 의한 세척 효과가 적은 갈수기 하천에서는 과도한 조류 번식이 나타날 수 있다(Kim et al., 2018). 특히, 갈수기 공지천은 조류 번식 현상이 지속적으로 보고되고 있으며, 공간적으로 다른 부영양화 현상을 보여주고 있다. 공지천 중류에서는 매년 봄철 하천 하상에 부착조류 군집이 대량으로 번식하는 현상과 부착조류의 수표면 부상 후 정체구간에서 대규모 스컴을 이루는 현상이 목격되고 있다. 이러한 부착조류 스컴은 미관상 상당히 좋지 않을 뿐 만 아니라 악취를 풍겨 많은 민원을 발생시키고 있다. 또한 2019년 1월 공지천 하류 구간에서 겨울철 잘 나타나지 않는 녹조현상이 나타나는 현상을 보여 이슈가 된 적이 있으며, 의암호와 공지천의 합류구간에서는 부유조류의 과다 번식 현상이 빈번하게 발생하고 있다.

그러나 공지천 수질과 관련한 연구는 대부분 의암호 합류구간 정체구간의 녹조 현상과 연계하여 공지천 하류에 관한 단편적인 연구가 대부분이다(Kim et al., 2014; Kim et al., 2017; National Institute of Environmental Research, 2014; Lee et al., 2016; Byeon et al., 2019; Kwon et al., 2014; Kim et al., 2014; Wonju Regional Environmental Office, 2017; Rhew et al., 2013). 반면에, 공지천 유역의 수질에 집중한 연구는 유역 비점오염 연구(Kim et al., 2005; Park et al., 2016; Kim et al., 2008; Song et al., 2015), 강우 인자에 따른 공지천의 수질 변화에 대한 연구(Koh et al., 2009; Han River Management Committee, 2017), 공지천 부착조류의 시공간적인 분포에 집중한 연구가 있으며(Lee et al., 2018), 4 - 10월 조사에 따른 공지천 수질개선 방안에 대한 연구가 있고(Korea Water Environment Management Institute, 2018), 갈수기 공지천의 공간적인 수질 모니터링에 관련한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 갈수기 도시하천 공지천 중·하류 현장 수질모니터링을 통해 공지천에서 공간적으로 다르게 나타나는 부영양화 현상들을 수치적으로 확인을 하고자 한다. 또한, 조류와 성장제한항목간의 상관분석 및 공간적인 이화학적 분석을 통해 갈수기 공지천 조류 번식의 제한요인을 추정하고 최종적으로 공지천에서 공간적으로 나타나는 부영양화 특성을 해석하는데 목적을 두었다.

## 재료 및 방법

### 연구대상지역

본 연구는 강원도 춘천시에 위치한 대표적인 도시하천인 공지천 중류 및 하류에서 수행되었다(Fig. 1). 공지천 중류는 복단면 구조와 함께 제외지 양측으로 산책로가 조성되어 있으며, 수심이 비교적 얇고, 인공 보가 연속적으로 위치

해 있어서 지속적으로 물이 흐르는 하천의 형상을 가지고 있다(Chuncheon-si, 2014). 공지천 하류는 의암호 수체와 공지천 유입수가 합류하는 합류부 초입으로 최대 2 m의 수심을 가지며, 중류의 약 5 배의 하폭을 가지고 있다. 또한, 하류의 합류부에서는 체류시간이 연중 20일 이상으로 호수에 가까운 형상을 가지고 있다(Park et al., 2013). 대조수역인 의암호 좌안은 의암호 상류부에 속하고, 호수의 형상을 띠고 있으며, 춘천하수종말처리장 방류수가 방류되는 지점이다. 의암호의 수체 흐름은 의암댐, 춘천댐, 소양댐의 방류와 연관이 있다고 알려져 있고, 이는 공지천 하류부에도 영향을 준다고 알려져 있다(Park et al., 2013).

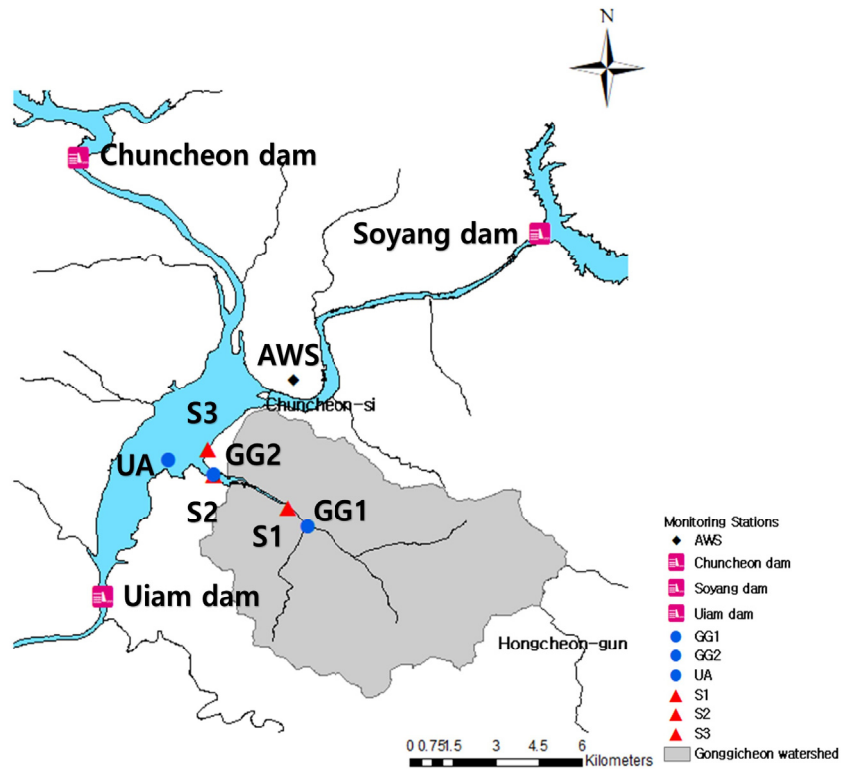


Fig. 1. Map of the Gongji stream watershed.

### 현장조사 및 실험분석

본 연구에서는 2019년 10월 29일부터 2020년 3월 29일까지 1 주일 간격으로 총 22회 공지천 중류(S1), 하류(S2) 및 의암호 좌안(S3)에서 수질 모니터링을 실시하였으며, 겨울철 결빙 시에는 불가피하게 현장 채수를 생략하였다. 현장조사시 유의한 결과를 얻기 위해 오후에 시작하여 일몰 전까지 채수 및 현장 조사를 실시하였으며, 폴리에틸렌 용기를 하천수로 세척 후 하천 중앙 지점의 표층에서 채수하였다. 또한, 수온이 충분히 높아진 2020년 3-4월 월 1회 공지천 중류에서 부착조류 생체량을 조사하였다.

채수한 시료의 수온, pH (Potential of Hydrogen), 전기전도도, DO (Dissolved Oxygen), 탁도(Turbidity)는 YSI PRO PLUS 다항목 수질 측정기와 탁도계를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며, 현장 측정 후 2시간 내에 실험실로 옮긴 즉시 환경부 수질오염공정시험기준에 따른 전처리를 수행하였다. 실험실 분석항목으로 클로로필-a (Chl-a,

Chlorophyll-a), BOD (Biological Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), 총 인(TP, Total Phosphorus)을 환경부 수질오염공정시험기준을 준수하여 분석하였다. 부착조류 클로로필-a는 3 × 3 방형구를 이용하여 50 mL DMF 용액으로 용출 후 부유 클로로필-a와 같은 방법으로 계산하여 면적당으로 환산하였다.

또한, 물환경정보시스템 공지천, 공지천2, 의암호3 지점의 과거 월별 수질 모니터링 자료를 수집하여 본 연구 결과와 비교하였으며, 강수 자료는 공지천과 가장 근접한 강원도 춘천시 우두동에 위치한 춘천기상대 정보를 이용하였다. 의암댐, 소양댐, 춘천댐의 유입량, 방류량, 댐 수위 등 댐의 수문자료는 국가수자원정보시스템에서 제공하는 일 자료를 이용하였다(Fig. 1).

### 부영양화 특성 분석

본 연구에서는 환경부 생활환경기준, OECD 부영양기준 및 한국형 부영양화 지수(TSI<sub>ko</sub>)를 활용하여 부영양화 특성 및 수질 오염도를 파악하였다. 환경부 생활환경기준은 하천과 호소로 구분되며, 행정적인 정책 목표로 이용되고 있다. 생활환경기준 매우 좋음 - 좋음 등급은 오염물질이 거의 없는 청정상태의 생태계를 의미하며, 약간 좋음 - 보통 등급은 일반적인 오염물질이 존재하는 생태계, 약간 나쁨 이상의 등급은 상당량의 오염물질을 포함하는 생태계를 의미한다(Table 1).

OECD 부영양화 기준은 부영양화 지표로 잘 알려져 있으며, 총 인 농도가 0.035 mg/L, 클로로필-a 농도가 8 µg/L 이상 나타나면 부영양수역으로 규정하고 있다(OECD, 1982)(Table 2). TSI<sub>ko</sub>는 한국의 호소수를 분석한 부영양화 지표로, 각 항목별로 저수지 분포확률을 조사 후 지수화하여 영양단계로 나누어 구분하였다(Table 2). 각 항목별 TSI<sub>ko</sub>는 식(1) - (3) 과 같이 산정하며, TSI<sub>ko</sub>(Chl-a) 값이 TSI<sub>ko</sub>(TP) 값보다 크면 총 인이 조류성장에 있어서 제한요인으로 작용 될 수 있다. 그리고 TSI<sub>ko</sub>(TP) 값이 TSI<sub>ko</sub>(Chl-a) 값보다 크면 총 인이 조류성장에 있어서 제한요인으로 작용 되지 않고 다른 요인에 의해 제한될 수 있다고 알려져 있다. 또한 외부기원 유기물의 가중치를 50%, 내부기원 유기물의 가중치를 25%, 내부기원 유기물의 밀도를 결정하는 총 인을 25%두어 종합 TSI<sub>ko</sub>를 식(4)와 같이 산정되고, 종합 지수가 50을 초과하면 부영양 수역을 의미한다(National Institute of Environmental Research, 2006; Kal et al., 2018).

$$TSI_{ko}(\text{COD}) = 5.8 + 64.4 \log(\text{COD mg/L}) \quad (1)$$

$$TSI_{ko}(\text{Chl-a}) = 12.2 + 38.6 \log(\text{Chl-a mg/m}^3) \quad (2)$$

$$TSI_{ko}(\text{TP}) = 114.6 + 43.3 \log(\text{TP mg/L}) \quad (3)$$

$$TSI_{ko} = 0.5 TSI_{ko}(\text{COD}) + 0.25 TSI_{ko}(\text{Chl-a}) + 0.25 TSI_{ko}(\text{TP}) \quad (4)$$

각 변수들은 SPSS 프로그램을 이용한 Spearman's Rank법을 이용하여 유의성  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ 에서 상관분석을 실시하였다.

**Table 1.** Ministry of Environment water quality standards

Quality	pH		DO (mg/L)		BOD (mg/L)		COD (mg/L)		T-P (mg/L)		Chl-a (µg/L)	
	Stream	Lake	Stream	Lake	Stream	Lake	Stream	Lake	Stream	Lake	Stream	Lake
Excellent	6.5-8.5		7.5 ≤		≤ 1		-		≤ 2		≤ 2	
Great	6.5-8.5		5.0 ≤		≤ 2		-		≤ 4		≤ 3	
Good	6.5-8.5		5.0 ≤		≤ 3		-		≤ 5		≤ 4	
Medium	6.5-8.5		5.0 ≤		≤ 5		-		≤ 7		≤ 5	
Little bad	6.0-8.5		2.0 ≤		≤ 8		-		≤ 9		≤ 8	
Bad	6.0-8.5		2.0 ≤		≤ 10		-		≤ 11		≤ 10	
Very bad	-		< 2.0		10 <		-		11 <		10 <	

**Table 2.** Water quality parameters

Trophic state	OECD		TSiko
	T-P (mg/L)	Chl-a (µg/L)	
Hypertrophic	0.100 <	25 <	70 <
Eutrophic	0.035-0.100	8-25	50-70
Mesotrophic	0.010-0.035	2.5-8	30-50
Oligotrophic	< 0.010	< 2.5	< 30

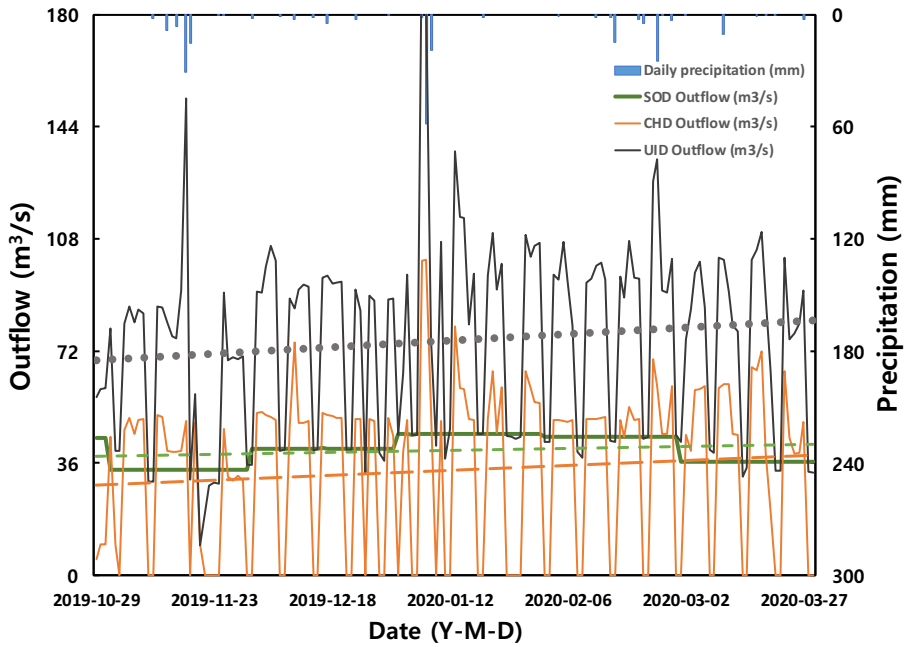
## 결과 및 토의

### 수문기상특성 분석

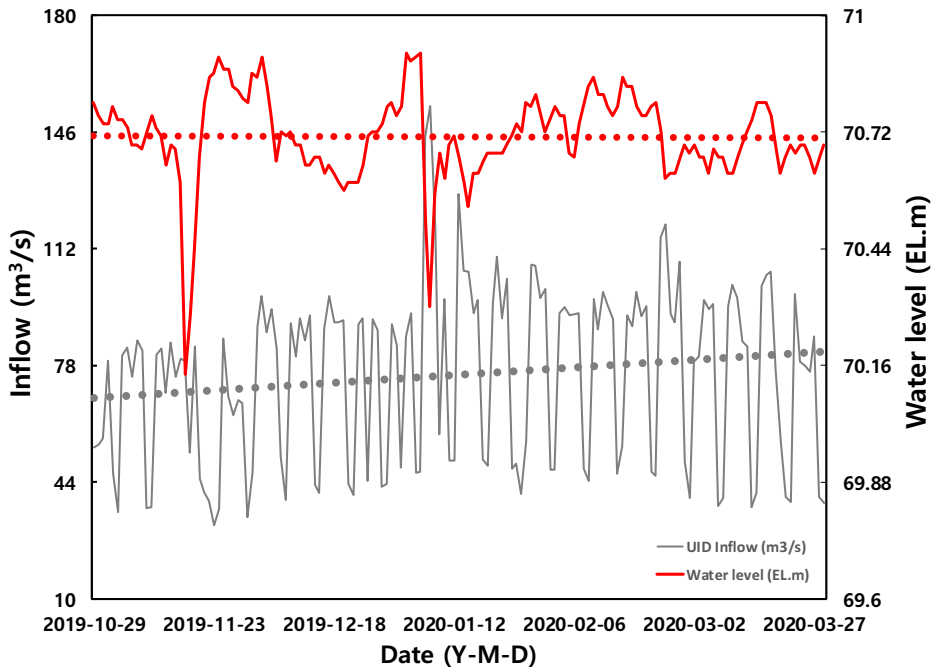
본 연구 모니터링 기간인 2019년 11월부터 2020년 4월까지 총 강수량은 239.9 mm로, 연 강수량의 25 %에 해당하였다. 또한 2019년 6 - 9월은 연 강수 67 %가 집중되는 전형적인 몬순기후 특징을 보여줌으로 조사기간의 11 - 4월은 상대적으로 강수량이 빈약한 갈수기로 볼 수 있다. 기상특성과 함께 댐 수문은 공지천의 수문 변동에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Park et al., 2013; kim et al., 2017). 본 연구에서는 공지천 수문특성분석을 위하여 의암댐, 소양댐, 춘천댐의 방류량과 수위 변동을 비교 분석하였다. 모든 댐에서의 총 방류량은 조사기간 이후로 증가하는 추세를 보이고 있다(Fig. 2). 특히, 하류 댐인 의암댐은 유입량이 증가함에도 불구하고 방류량이 증가해 수위는 소폭 감소하는 추세를 보이고 있다. 조사기간 나타난 댐 수문 형태는 공지천의 수질에 복합적인 영향을 주었을 것으로 추정된다.

### 공지천 중·하류 유기물 오염지표 비교 분석

영양염에 의한 수질오염과 상대적인 비교를 위해 수질오염을 간접적으로 알 수 있는 유기물 오염 지표인 BOD, COD를 분석하였다. 평균적으로 공지천의 유기물 오염도는 영양염에 의한 오염보다 좋은 상태를 보였다. 공지천 중류는 평균적으로 BOD, COD 모두 환경부 하천 생활환경기준 매우 좋음을 나타내고 있어서 유기물 오염도는 매우 좋은 상태임을 알 수 있다. 한편, 중류의 총 인 농도는 생활환경기준 평균 좋음으로 유기물 오염 지표보다 한 단계 나뉘었다. 하류는 평균적으로 하천 생활환경기준 BOD, COD 모두 좋음을 나타냈고, COD 호소 기준으로는 약간 좋음 보였다. 한편, 중류의 총 인 농도는 하천 생활환경기준 평균 좋음, 호소 생활환경기준 평균 보통으로 유기물 오염 지표보



(a) Outflow of Chuncheon, Soyang, Uiam dam



(b) Water level and inflow of Uiam dam

Fig. 2. Hydrological and weather characteristics during the monitoring period.

다 비슷하거나 한 단계 나뉘었다. BOD와 COD는 평균적으로 공지천 중류에서 낮고, 하류에서 높은 양상을 보였는데, 긴 정체기간을 가지는 하류에서 유역의 오염물이 축적된 효과로 사료된다. 또한, 중류의 유기물 오염도는 불규칙하게 나타난 반면에 하류는 조사 초기 높은 농도를 보였으나, 점차 농도가 낮아지는 경향을 보였다.

### 공지천 중·하류 부영양화 특성 분석

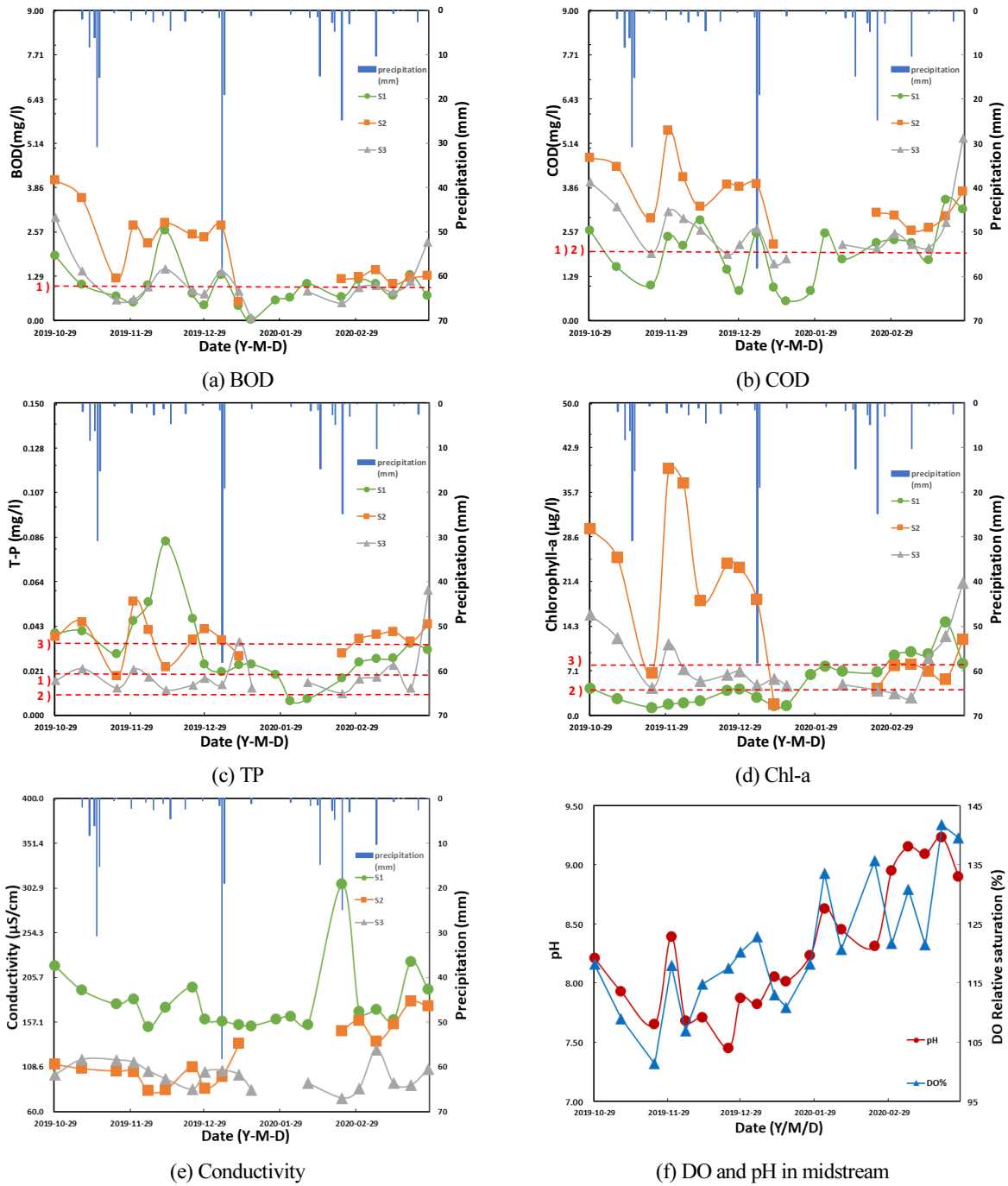
갈수기 공지천은 유기물 오염 지표에서 상대적으로 좋은 상태를 보인 것에 반하여 간헐적인 부영양화 현상을 보였다. 물환경정보시스템 2014 - 2020년 갈수기(11 - 4월) 공지천, 공지천2 지점 TN 월 평균은 3.7, 2.9 mg/L로, 부영양 기준(Forsberg et al., 1980)인 1.5 mg/L를 초과하는 것으로 나타났다. 또한, 최근 5년간(2016 - 2020년) 공지천, 공지천2 지점 갈수기(11 - 4월) TN/TP 비는 각각 월 평균 158.6, 101.9로, 조류의 성장에 있어서 인이 심각한 제한 인자인 것을 알 수 있다(Smith, 1980).

### 공지천 중류 공간적 특성

공지천 중류의 공간적인 특성 및 부영양화 특성 분석 결과는 Table 3과 같다. 갈수기 공지천 중류의 한국형 부영양화 지수(TSI<sub>ko</sub>)는 35로 중영양을 보였고, 총 인 농도는 평균 0.031 mg/L, 클로로필-a 농도는 5.5 µg/L로 총 인은 OECD 부영양화 기준인 0.035 mg/L와 비슷한 농도를 보였으며, 클로로필-a는 중영양 기준인 2.5 µg/L를 초과하였다. 그러나 이 기준들은 호소 기준이며, 유수환경인 하천에서는 부유식물플랑크톤이 번식하기 어려운 조건이기 때문에, 이 기준을 적용하는 것은 한계가 있을 것으로 판단하였다. 수심이 낮은 유수환경 수역에서 부착조류는 중요한 1차 생산자이며, 부유 식물플랑크톤보다 부착조류가 우점하는 하천의 영양상태는 저서성 조류의 생체량으로 분류하는 것이 적합한 것으로 알려져 있다(National Institute of Environmental Research, 2016). 부착조류의 생체량이 7-20 µg/cm<sup>2</sup> 이상이면 부영양 수역으로 분류되며, 미관상 불쾌한 수준인 것으로 알려져 있다(Dodds et al., 1998). 이에 본 연구에서 공지천 중류에서의 부착조류 모니터링을 분석한 결과, 공지천 중류에서 부착조류 클로로필-a 농도는 3월 하천 중앙 지점에서 67.0 µg/cm<sup>2</sup>, 가장자리 지점에서 37.0 µg/cm<sup>2</sup>로 나타났으며, 4월 하천 중앙 지점에서 30.2 µg/cm<sup>2</sup>, 가장자리 지점에서 26.4 µg/cm<sup>2</sup>로 나타났다. 3, 4월 모두 부착조류 기준 심각한 부영양 수준이었으며, 이 시기 DO 상대포화 퍼센트 농도가 2월, 3월 평균 129%, 최대 142%의 과포화 상태가 유지되었고, pH는 3월 평균 8.5를 초과하여 하천 생활환경기준 등급 외로 나타났다(Fig. 3(f)). 이러한 동태는 과다 번식한 부착조류의 광합성으로 인해 나타난 현상으로 판단되는데, 과도한 부착조류 번식은 과도한 DO 일주기 변동을 일으켜 수생태계 환경에 용존산소 고갈에 따른 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2012). 따라서 이 시기 중류지점은 밤 시간대에 DO의 고갈이 나타날 수 있기 때문에, 일주기 변동과 수중 생물의 피해에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 특히, 3월 현장 조사 당시 하상에서 부착조류의 대규모 번식과 부착조류가 수표면으로 부상하여 하류로 떠 내려가는 모습을 관찰되었다. 따라서 하류 정체 구간에서 발견되는 대규모 부착조류 스킴은 중·상류에서 기원한 것으로 추정된다. 이러한 부착조류의 과도한 부상은 이 시기 중류구간 클로로필-a의 농도에 일정부분 영향을 주었을 것으로 추정된다. 중류의 클로로필-a 농도는 초반 일정하다가 2020년 늦겨울부터 급격하게 높아지는 모습이 나

**Table 3.** Spatial characteristics of the Gongji midstream region (S1)

Width (m)	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	Depth (m)		Velocity (m/s)			TSI <sub>ko</sub>			OECD		
		Max.	Mean	Max.	Min.	Mean	COD	TP	Chl-a	TSI <sub>ko</sub>	TP	Chl-a
18.4	0.215	63	36	0.044	0.001	0.024	25	50	41	35	Meso	Meso
Periphyton	March						April					
	Sidepoint			Midpoint			Sidepoint			Midpoint		
	37.0			67.0			26.4			30.2		



- 1) Excellent by Ministry of Environment standard of river water quality.
- 2) Excellent by Ministry of Environment standard of lake water quality.
- 3) OECD Eutrophication standards.

Fig. 3. Physicochemical characteristics of the Gongji stream.

타났는데, 우수환경을 가진 공지천 중류 지점에서 평균보다 월등히 높은 클로로필-a 농도는 봄철 나타나는 부착조류의 부상, 갈수기 가뭄으로 인한 체류시간 증가, 저수온기 수온상승 등이 복합적으로 작용했을 것으로 추정된다.



## 공지천 하류 공간적 특성

공지천 하류의 부영양화 특성 분석 결과는 Table 4와 같다. 갈수기 공지천 하류에서의 한국형 부영양화 지수(TSI<sub>ko</sub>)는 49로 부영양(50)에 가까운 상태를 보였고, TSI<sub>ko</sub>(Chl-a)는 60, TSI<sub>ko</sub>(TP) 52로 총 인 농도가 조류 성장제한에 영향을 줄 수 있을 것으로 추정되며(Park et al., 2018), 대조 수역인 의암호의 종합 TSI<sub>ko</sub>가 39인 것과 대조된다(Table 4). 총 인 농도는 평균 0.037 mg/L, 클로로필-a 농도는 16.9 µg/L로 총 인은 OECD 부영양화 기준인 0.035 mg/L을 초과하였으며, 클로로필-a은 부영양 기준인 8 µg/L를 초과하였다(OECD, 1982). 공지천 하류에서는 최대 39.5 µg/L의 클로로필-a의 양을 보이기도 했는데, OECD 과영양기준 농도인 25 µg/L을 초과하거나 비슷한 농도가 5회 나타났다. 이는 대조수역인 의암호 좌안 클로로필-a 농도가 평균 7.8 µg/L로, 과영양 해당하는 농도가 단 1회도 나타나지 않은 것과는 대조되는 결과였다. 또한 조사기간 공지천 하류는 중류와 다른 이화학적 양상이 보이는 것을 확인하였다. 전기전도도는 수중에 용존해 있는 이온들의 총량을 나타내는 항목으로서 수역의 오염 상태를 잘 반영하고 있는데(Jeong et al., 2015), 조사 초기 공지천 하류(평균 101.8 µS/cm)와 의암호(평균 104.0 µS/cm)가 비슷한 전기전도도의 양상을 보여주고 있는데 반해, 초겨울부터 하류의 전기전도도 값이 증가하여 평균 158.7 µS/cm의 값을 보였다(Fig. 3(e)). 이는 봄철 중류 전기전도도 값(평균 180.6 µS/cm)과 유사하게 나타났으며, 반대로 봄철 의암호 전기전도도 값(평균 95.6 µS/cm)과 큰 차이를 보여주었다. 이는 하류의 수체가 초기에는 의암호에서 역류해온 물로 이루어져 있다는 것을 의미하고, 점차 공지천 본류의 물이 하류로 원활하게 흘러 들어감과 동시에 하류의 수체가 교체되었음을 추정할 수 있다. 이러한 결과는 하류의 체류시간이 점차 짧아졌기 때문으로 판단되는데, 소양호의 방류량이 증가하고 의암호 수위가 감소할 시 합류부 정체구간이 해소된다는 선행연구와 조사기간 댐 수문형태와 일치하였다(Park et al., 2013). 또한, 이러한 이화학적 형태는 BOD, COD, 클로로필-a 농도 변화에서도 나타났는데, 모두 전기전도도와 상관성이 나타났다(Table 6).

**Table 4.** Spatial characteristics of the Gongji downstream region (S2) and Uiam Lake (S3)

Station	TSI <sub>ko</sub>			OECD		
	COD	TP	Chl-a	TSI <sub>ko</sub>	TP	Chl-a
S2	42	52	60	49	Eu	Eu
S3	33	41	47	39	Meso	Meso

## 클로로필-a 상관성 분석을 통한 조류 성장 제한요인 추정

갈수기 공지천 조류 번식의 제한요인을 추정하기 위해 조류와 조류 성장제한 항목간의 상관계수를 통한 상관분석을 수행하였다(Tables 5 - 7). 갈수기 강수에 따른 조류 생체량의 상관성을 보기 위해 중·하류 지점의 선행무강우 일수와 클로로필-a 농도를 상관분석 하였다. 공지천 중류에서는 상관성이 나타나지 않았는데, 중류는 전형적인 하천 형상으로 물이 지속적으로 흐르고 있는 우수 환경이기 때문에 부유 식물플랑크톤이 번식하기에는 어려운 조건이며, 유량, 저수기 수온 상승 등 다른 성장제한요인과 복합적으로 작용했을 것으로 추정된다(Kim et al., 2003). 공지천 하류는 선행무강우일과 약간의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 도심 속 위치한 공지천 유역의 본류에 해당하여 비교적 약한 강수에도 유량 변동에 큰 영향을 받는 것으로 추정되며, 심각한 정체구간임에도 불구하고 강수에 의한 세척 효과에 의해 일시적으로 체류시간이 짧아져 조류의 농도가 낮아지는 것으로 추정된다(Kim et al., 2003).

**Table 5.** Correlation coefficients of water quality parameters at S1 (Gongji midstream)

S1	Chl-a	temp.	pH	Cond.	DO	Turb.	BOD	COD	T-P	Ant. dry
Chl-a	1.000									
temp.	0.535*	1.000								
pH	0.809**	0.546*	1.000							
Cond.	0.282	0.733**	0.155	1.000						
DO	-0.037	-0.718**	-0.120	-0.321	1.000					
Turb.	-0.087	0.209	-0.288	0.437	-0.266	1.000				
BOD	0.348	0.236	0.068	0.283	-0.182	0.513*	1.000			
COD	0.434	0.389	0.389	0.485*	-0.018	0.294	0.647**	1.000		
T-P	-0.251	0.205	-0.310	0.337	-0.504*	0.653**	0.355	0.251	1.000	
Ant. dry	0.009	-	-	-	-	-	-	-	-	1.000

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ **Table 6.** Correlation coefficients of water quality parameters at S2 (Gongji downstream)

S2	Chl-a	temp.	pH	Cond.	DO	Turb.	BOD	COD	T-P	Ant. dry
Chl-a	1.000									
temp.	0.035	1.000								
pH	-0.462	0.155	1.000							
Cond.	-0.603*	0.547*	0.643**	1.000						
DO	-0.003	-0.932**	-0.090	-0.421	1.000					
Turb.	-0.297	0.302	0.656**	0.635**	-0.147	1.000				
BOD	0.835**	0.107	-0.372	-0.550*	-0.038	-0.335	1.000			
COD	0.894**	0.066	-0.334	-0.500*	-0.035	-0.332	0.812**	1.000		
T-P	0.650**	0.234	-0.107	-0.047	-0.162	0.209	0.347	0.538*	1.000	
Ant. dry	0.686**	-	-	-	-	-	-	-	-	1.000

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$ **Table 7.** Correlation coefficients of water quality parameters at S3 (Uiam Lake)

S3	Chl-a	temp.	pH	Cond.	DO	Turb.	BOD	COD	T-P	Ant. dry
Chl-a	1.000									
temp.	0.506*	1.000								
pH	0.090	0.264	1.000							
Cond.	0.187	0.509*	-0.458	1.000						
DO	-0.073	-0.321	0.514*	-0.587*	1.000					
Turb.	0.187	0.406	0.316	0.306	-0.146	1.000				
BOD	0.451	0.602**	0.185	0.334	-0.251	0.343	1.000			
COD	0.612**	0.672**	0.086	0.486*	-0.201	0.377	0.725**	1.000		
T-P	0.480*	0.303	-0.044	0.470*	-0.195	0.715**	0.235	0.335	1.000	
Ant. dry	0.275	-	-	-	-	-	-	-	-	1.000

\* $p < 0.05$ , \*\* $p < 0.01$

총 인과 클로로필-a 농도의 관계는 공지천 중류에서 상관성이 나타나지 않는 것에 반하여 공지천 하류는 총 인과 약간의 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 총 인의 양은 조류 번식에 있어서 가장 큰 성장제한요인으로 알려져 있으나 (Ahn, et al., 2013), 공지천의 중류는 선행무강수일 상관분석과 같은 이유로 상관성이 나타나지 않은 것으로 추정된다. 하류의 경우는 약간의 상관성을 보여주고 있는데, 급격한 유량 변화 없이 수체가 안정적일 경우 심한 정체수역인 하류에서는 총 인 농도에 따라 조류 성장이 제한 받을 것으로 추정된다.

수온과 클로로필-a 농도의 관계에서는 공지천 중류에서 상관성을 보인 것과 대조적으로 공지천 하류에서는 상관성이 나타나지 않았다. 저수온기에서 수온은 조류 성장제한인자로 잘 알려져 있으며(Kwon, et al., 2006), 수온이 상승하기 시작하는 2월 이후 공지천 중류에서는 조류 생체량이 저수온기 수온 상승에 영향을 받은 것으로 추정할 수 있다 ( $r = 0.662, p < 0.01$ ). 수온과 상관성을 보이지 않는 공지천 하류에서의 조류 생장은 저수온기에서도 온도가 성장제한 인자가 아닌 것으로 추정되는데, 팔당호에서 *Anabaena spp.*는 수온이 약 13°C 이하 조건에서도 체류시간이 최소 약 11일 이상이면 출현 하는 것으로 알려져 있으며(Rhew, et al., 2013), 조사기간 공지천 하류의 수질은 체류시간에 의존적인 모습을 보여주고 있기 때문에, 공지천 하류는 조류의 종 조성 혹은 체류시간 같은 다른 성장제한 요소가 복합적으로 작용했을 것으로 추정된다.

## 결론

본 연구는 갈수기 공지천 중·하류 구간의 공간적인 부영양화 특성을 파악하기 위해 2019년 10월부터 2020년 4월까지 다양한 조사를 수행하였다. 이 시기 공지천은 몬순기후의 전형적인 특징이 잘 나타났는데, 조사기간은 갈수기로서 비교적 빈약한 강수량을 보였다.

조사기간 공지천은 공통적으로 유기물 오염보다 부영양에 의한 오염이 비교적 더 크게 나타났으며, 영양염에 있어서 인이 절대적인 제한 인자로 작용하는 것으로 나타났다.

공지천 중류지점은 수온상승기 부착조류에 의한 부영양화가 뚜렷하게 나타났다. 한국형 부영양화 지수는 중영양, 총 인 농도는 OECD 중영양을 보였으나, 부착조류 클로로필-a 농도는 3, 4월 모두 부착조류 기준 심각한 부영양 수준이었으며, 미관상에도 최악의 모습을 보였다. 이 시기 하류 정체 구간에서 발견되는 대규모 부착조류 스킴은 중·상류에서 기원한 것으로 추정된다. 또한, 중류는 저수온기 수온 상승 시기에 조류의 생체량이 유의미하게 증가함을 보였다. 부유조류가 성장하기 힘든 우수환경에서도 수온 조건에 따라 조류의 성장이 나타날 수 있음을 추정할 수 있다.

공지천의 하류지점에서는 중류와 달리 체류시간 변화에 따라 부유조류에 의한 부영양화가 뚜렷하게 나타났다. 한국형 부영양화 지수는 부영양에 가까웠고, 총 인 농도는 OECD 부영양화 기준을 초과하였으며, 클로로필-a 농도는 부영양 기준을 초과하였다. 이는 인접해 있는 의암호 좌안 클로로필-a 농도가 OECD기준 평균 중영양을 보인 것과 대조된다. 또한,  $TSI_{ko}(Chl-a)$ 값이  $TSI_{ko}(TP)$ 보다 높고, 조류와 총 인 농도가 약한 상관성을 보였기 때문에 총 인 농도에 따라 조류의 성장이 제한받을 수 있음을 확인하였다. 공지천 하류는 중류와 달리 체류시간 변화에 따른 부영양화 양상이 잘 나타났다. 공지천 하류의 조류 생체량은 선행무강수일수와 상관성이 있는 것으로 나타났는데, 심각한 정체구간임에도 불구하고 강수에 의한 세척 효과에 의해 일시적으로 체류시간이 짧아져 조류의 농도가 낮아질 수 있음을 추정할 수 있다. 하류의 전기전도도, Chl-a, BOD, COD의 양상을 통해 하류의 수체가 의암호에서 역류해온 물로 정체되어 있다가, 댐 방류량이 점차 증가함에 따라 공지천 본류의 물로 교체됨과 동시에 체류시간이 짧아졌음을 간접적으로 보여주었다.

갈수기 공지천에서 매년 나타나는 수질 오염 이슈에 대해 수치적으로 확인하였고, 공간적으로 다른 형태로 나타나

는 부영양화 현상을 확인 하였다. 따라서 갈수기 공지천의 부영양현상을 개선하기 위해서는 공간적인 특성을 고려해야 될 것으로 판단된다. 특히, 공지천 중류의 경우 부착조류에 의한 DO, pH의 급격한 일주기변동이 나타날 수 있어 추가적인 연구가 필요하다고 사료되며, 많은 친수공간이 밀집된 공지천 하류의 경우 의암호와 인접해 있으면서 비슷한 현상을 가짐에도 불구하고 부영양화 상태에 있어서 상반된 모습을 보이기 때문에, 대책 마련이 필요하다고 사료된다.

## 사사

이 논문은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업(2020003050001)과 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2019R1I1A2A01062301)의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.

## 인용문헌(References)

- Ahn, C. Y., Oh, H. M., Lee, J. Y. (2013) Control of microalgal growth and competition by n: p ratio manipulation, *Korean J Environ Biol* 31:61-68.
- Byeon, M. S., Yu, S. J., Youn, S. J., Im, J. K. (2019) Characteristics of cyanobacteria and odorous compounds production in lake uiam and lower gonji stream, *J Korean Soc* 35:99-104.
- Chuncheon-si (2014) Gongji Stream Master Plan.
- Dodds, W. K.; Jones, J. R.; Welch, E. B. (1998) Suggested classification of stream trophic state: Distributions of temperate stream types by chlorophyll, total nitrogen, and phosphorus. *IWA*, 32:1455-1462.
- Han River Management Committee (2017) Integrated monitoring and management plan for non-point source pollution (V).
- Han River Management Committee (2017) A study of the investigation and improvement on the water quality deteriorating area in urban stream of han river.
- Jeong, S. H. (2015) Experimental and numerical study of two-dimensional mixing based on the conductivity tracing in natural streams, master of engineering, Seoul National University Department of Civil and Environmental Engineering.
- Kal, B. S., Seo, H. S., Park, J. B., Lee, C. G., Choi, M. J., Hong, S. H. (2018) Analysis of the trophic characteristics of the sooak river watershed using the korean trophic state index, *J. of Wetlands Research* 20:330-337.
- Kim, B. C., Kim, S. J., Kim, J. K., Shin, M. S., Ahn, B. Y., Lee, J. Y., Jeong, K. J. (2012) Oxygen fluctuation monitored with high frequency in a eutrophic urban stream (the anyang stream) and the effect of weather condition, *Korea J Limnol* 45:34-41.
- Kim, B. H., Park, M. H., Byeon, M. S., Byun, J. H., Cho, I. H., Hwang, S. J. (2014) Relationship between a dense bloom of cyanobacterium anabaena spp. and rainfalls in the north han river system of south korea, *J of Ecology and Environment* 47:116-126.
- Kim, K. C., Seo, J. Y., Shin, M. H., Lim, K. J., Jun, M. S., Choi, Y. H., Choi, J. D. (2008) Investigation of pollution sources for gongjichun watershed, *J Korea Water Resour. Assoc* 2008:2051-2055.
- Kim, D. U., Park, W. J., Lee, C. K. (2005) Runoff characteristics of non-point source on seasonal variation in the combined sewer overflows, *J Korean Soc* 2005:717-721.
- Kim, J. M., Noh, H. L., Yang, H. J., Han, M. S., Heo, S. N. (2003) Relationship between limnological characteristics and algal bloom in lake-type and river-type reservoirs, korea, *J of Ecology and Environment* 36:124-138.
- Kim, K. H., Park, M. H., Park, C. H., Seo, W. B., Shin, J. K., Lee, S. W., Sim, Y. B., Choi, B. G., Hwang, S. J. (2017)

- Rainfall and hydrological comparative analysis of water quality variability in euiam reservoir, the north-han river, korea, *J of Ecology and Environment* 50:29-45.
- Kim, K. S., Kim, J. G., Sung, Y. S., Shin, J. Y., Lee, G. J., Lee, S. R., Lim, K. J. (2018) Analysis of water pollutant load characteristics and its contributions during dry season: focusing on major streams inflow into south-han river of chungju-dam downstream, *J Korean Soc Environ Eng* 40:247-257.
- Kim, Y. J., Kim, H. N., Park, E. R., Park, J. R., Youn, S. J., Lee, B. C., Lee, J. K., Hwang, M. Y. (2014) Formation of phytoplankton community and occurrences of odorous compounds by sediment incubation, *J. Korean Soc* 30:658-664.
- Koh, S. Y., Kim, Y. J., Park, S. B., Oh, H. S., Lee, S. J., Lee, T. W., Jeong, W. G., Huh, B. N., Huh, I. R., Hyun, G. W. (2009) A study on water quality of gongji stream, *Inst. Health and Environ* 20:58-66.
- Korea Water Environment Management Institute (2018) A study on the improvement of gongji stream water quality
- Kwon, O. S., Ahn, K. Y., Cho, Y. S., Jeong, D. H., Chung, H. M., Choi, I. C. (2014) A study on impact of public sewage treatment works affecting water qualities of the lake uiam in chuncheon city, *J Environ. Impact Assess* 23:406-416.
- Kwon, O. Y., Lee, J. H. Jeong, S. W. (2006) Environmental studies in the lower part of the han river viii. physicochemical factors contributing to variation of phytoplankton communities, *J of Ecology and Environment* 39:340-351.
- Lee, G. H., Lee, S. J., Lim, B. C., Jeong, W. G., Hur, B. N., Hur, I. R. (2016) Long term monitoring for the control of cyanobacterial blooms in lake uiam, *J Korean Soc. Environ. Eng* 19:109-118.
- Lee, J. Y., Jung, Y. K., Choi, J. S. (2018) Spatial and temporal appearance of filamentous cyanobacteria and periphyton composition in restored urban streams, *J of Environment* 13:1-9.
- National Institute of Environmental Research (2006) A study on the development of comprehensive water environment evaluation method (3).
- National Institute of Environmental Research (2014) A spatially distributed modeling study on the algal dynamics in the middle-upper reaches of the north han river, korea (II).
- National Institute of Environmental Research (2016) Nutrient criteria technical guidance manual rivers and streams by EPA (2000).
- OECD(1982) Eutrophication of waters, monitoring, assessment and control, organization for economic co-operation and development, 154.
- Park, M. J., Shin, J. Y., Lee, S. I., Ju, S. H., Choi, J. D. (2016) Runoff characteristics of non-point source pollutants from the watershed of mixed land-use, *J Korean Soc Agric Eng* 2016:103-103.
- Park, S. S., Park, S. G., Lee, Y. S., Lee, H. W. (2013) A hydrodynamic modeling study to analyze the water plume and mixing pattern of the lake euam, *J of Ecology and Environment* 46:488-498.
- Rhew, D. H., Byeon, M. S., You, K. A., Youn, S. J., Hwang, S. J. (2013) Growth characteristics of blue-green algae (*anabaena spiroides*) causing tastes and odors in the north-han river, korea, *J of Ecology and Environment* 46:135-144.
- Ryding, S.O.; Forsberg, C. (1980) Eutrophication parameters and trophic state in 30 swedish waste receiving lakes, *Archiv für Hydrobiologie* 89:189-207.
- Shin, J. K., Cho, K. J., Cho, J. L., Hwang, S. J. (2000) Eutrophication and water pollution characteristics of the kyongan stream to paltang reservoir, *Korea J Limnol* 33:387-394.
- Smith, V.H. (1982) The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: an empirical and theoretical analysis, *Limnol Oceaogr* 27:1101-1112.
- Song, M. Y., Lee, H. D., Jeon, M. S., Jeong, B. S. (2015) A study on the traveling route and control method of eutrophication sources in han river basin, *Gyeonggi Research Institute* 2015:1-111.
- Wonju Regional Environmental Office (2017) A joint study on the water quality management in the upper han river.