

신규 댐 건설 전후의 수질변동 분석: 영주댐 상류유역을 중심으로

이새로미^a · 박재로^b · 황태문^c · 안창혁^{d,†}

한국건설기술연구원 국토보전연구본부

Analysis of Water Quality Characteristics According to Short-term Fluctuation of Water Level in the New Dam: Focused on the Upstream Watershed of Yeongju Multipurpose Dam

Saeromi Lee^a · Jae Roh Park^b · Tae Mun Hwang^c · Chang Hyuk Ahn^{d,†}

Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology
(Received 24 June 2020, Revised 20 August 2020, Accepted 28 August 2020)

Abstract

The relationship between dam construction and water quality has recently come to be considered an important issue. A dam is a physical factor which causes changes to the river system around it. Considering these points, this study was conducted to obtain basic data by analyzing the relationship between water level fluctuations and water quality parameters in the short-term. In terms of methodology, the new construction of the Yeongju Dam (M5) in 2016 was divided into Stage 1 as the lotic system and Stage 2 as the lentic system, with four years in each period, and the water level fluctuations and water quality were analyzed using official data. As a result of this study, M5, a stagnant area in which organic matter and nutrients accumulate, was found to be an important factor in water quality management. In addition, the water level changed rapidly ($0.9 \pm 0.2 \text{ m} \rightarrow 10.9 \pm 7.1 \text{ m}$) as the river environment condition was converted from the lotic system to the lentic system. In addition, water quality parameters such as BOD, COD, TOC, and Chl-*a* significantly changed in the short-term. Further, since the transport of organic matter and nutrients occurred well in the lotic system, sedimentation was expected to be dominant in the lentic system. Therefore, it was determined that when the river flow is blocked, autochthonous organic matter is an important factor for long-term water quality management in the future. This process can increase the trophic state of the water body. As a result of this study, the TSI_{KO} value was converted from mesotrophic in Stage 1 to eutrophic in Stage 2. Eventually, short-term changes in the river environment will affect not only changes in water level but also changes in water quality. Thus, a comprehensive and strategic approach is needed for long-term water quality management in the future.

Key words : Lentic system, Short-term period, Water level fluctuation, Water quality parameters, Yeongju Dam

^a 전임연구원(Research Specialist), saeromi@kict.re.kr, <https://orcid.org/0000-0003-3352-5607>

^b 선임연구위원(Senior Research Fellow), jrpark@kict.re.kr, <https://orcid.org/0000-0002-0961-2797>

^c 연구위원(Research Fellow), taemun@kict.re.kr, <https://orcid.org/0000-0002-0532-1394>

^{d,†} Corresponding author, 수석연구원(Senior Researcher), chahn@kict.re.kr, <https://orcid.org/0000-0002-6761-0693>

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

1. Introduction

댐은 홍수조절, 저수, 취수, 수력발전 등과 같은 인간 활동을 목적으로 건설된 인공구조물로서 과거부터 현재까지 지속적으로 증가하고 있다(Zarfl et al., 2015). 일반적으로 댐 건설은 이·치수와 같은 수량적 개념 대비 환경적 영향은 경제적 단위로 표현하기 어렵기 때문에 이에 대한 가치 평가가 누락되거나 미흡한 경우가 많다(Han et al., 2008).

댐은 흐름이 있는 강 또는 하천에 건설되므로 필연적으로 상·하류의 흐름을 제한하게 된다. 많은 선행연구에서는 댐 건설에 따른 흐름의 단절이 하천의 물리적 환경(수문, 유황, 유사, 하상재료 등), 수질(오염부하, 영양상태, 조류발생 등) 및 인근 생태계(종 다양성, 군집, 식생)에 다양한 영향을 준다고 보고하였다(An et al., 2019; Cho et al., 2019; Kim, Kim et al., 2020; Ko et al., 2020; Lee, 2017). Luo et al. (2020)는 7개의 댐이 분포한 Shaying River 유역을 대상으로 수질 및 생태적 영향을 분석한 결과, 수질보다 생태적인 영향이 더 컸으며, Zhang et al. (2010)은 댐으로 인한 상·하류의 단절이 하천 자정능력을 저하하므로 댐 주변의 수질관리를 위해서는 유역 전반에 존재하는 오염원 관리가 필요하다고 제시하였다. 먼저 댐 건설로 인한 가장 뚜렷한 변화 중 하나는 하상변동(침식 및 퇴적 변화)인데, 대표적으로는 상류에서 이송(transport)되는 유사가 차단되어 하류지역에 하상저하를 유발하는 현상이다(Cho et al., 2019; Lee, Kim, Hwang et al., 2019). 두 번째로는 수량차단으로 인한 하천 하류의 육역화, 식생침입, 여울과 소의 소실 등으로 하안(riparian)에서 수질오염 및 생태적 훼손이 발생한다(Kim, Lee et al., 2020; Lee, Kim, Hwang et al., 2019; Ock et al., 2019). An et al. (2019)은 영주댐 담수 이후에 날도래목이 많이 감소하였는데, 이는 공사 중 유속이 느려지면서 필의 함량이 증가함에 따라 갈따구류 등과 같은 파리목의 종 수 및 개체수가 우점하여 최종적으로 종다양성이 감소한 결과이다. 종다양성이 감소하거나 우점지수가 증가하는 생태적 영향은 미소생태계뿐만 아니라 어류 및 조류(藻類, algae)의 군집변화에도 영향을 미치게 된다(Choi et al., 2020; Na et al., 2015).

국내에서는 영주댐이 건설된 이후로 많은 환경적 관심을 받고 있다. 영주댐은 2016년 10월에 준공되어 담수를 시도 하였으나, 녹조 발생과 같은 수질적 문제를 포함한 다양한 이유로 인해 최근까지 제대로 된 담수를 할 수 없었다. 2019년 초까지도 영주댐은 저수위를 유지하였으며, 그 결과 매년 이른 봄부터 늦가을까지 영주댐 본 댐, 유사조절지 상류부를 중심으로 수질오염 및 녹조발생에 대한 이슈가 빈번하게 제기된 바 있다. 보통 신규댐은 초기에 수량을 담수하는 과정에서 댐 내부를 중심으로 빠른 수위변화가 나타나며 유수역이 정수역으로 전환되면서 수질인자 간 상호관계에 따라 다양한 환경적 변화가 나타나게 된다. 하지만 이러한 초기 수질변화나 댐에 직접적인 영향을 주는 상류유역의 수질정보는 전반적인 댐 관리에 중요한 자료가 될 수 있음에도 불구하고 다양한 한계점으로 인해 구체적인 정보는 미흡한 실정

이다. 영주댐과 관련된 선행연구는 식생 활착 변화(Lee, Kim, Hwang et al., 2019; Lee, Kim, Ji et al., 2019) 및 저서성 대형무척추동물 군집변화(An et al., 2019), 내성천 하류 수질변화(Lee, Kim, Hwang et al., 2019) 등이 진행되었으나, 기존 환경부 수질측정망이 영주댐 하류에만 집중되어 있다 보니, 댐 상류유역에 대한 정보는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 이러한 점들을 고려하여 영주댐의 상류지역을 주요 연구대상지로 선정하였고, 신규댐의 초기담수 과정에서 나타나는 수위변동을 분석하여 이를 토대로 단기적인 차원에서 댐건설 전·후의 수질 변화를 비교·분석하고자 한다. 또한, 분석된 자료를 사례연구(case study)로써 향후 장기적인 댐 수질관리를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 연구대상지 개황

영주댐은 내성천 유역에 건설되었고, 내성천 하류로부터 약 55.6 km 상류에 위치한 댐이다. 본 연구에서는 내성천 유역 내 영주댐을 기점으로 하여 댐의 상류인 영주시 및 봉화군 일대를 포함하는 총 4개의 표준유역을 연구대상지로 선정하였다(Fig. 1). 내성천은 낙동강 유역에 위치한 제1지류로써 구간별로 국가하천, 지방하천으로 구분되어 있다. 내성천 중권역은 16개의 표준유역으로 구성되며 제원은 유역면적 1,816 km², 평균 폭 16 km, 평균표고 319 E.L.m, 평균경사 29%, 유로연장 113 km로 영주시, 문경시, 안동시, 예천군, 봉화군 총 5곳의 행정구역을 경유하는 하천이다(ME, 2014). 해당지역은 경상북도 북부 산악지대에 위치하며, 분지상의 지형특징으로 한서의 기온차가 심한 대륙성 기후를 보이고, 봄과 가을이 짧고, 여름에 강우가 집중되는 특징이 있다. 지질은 주로 화성암(1,157 km²)으로 구성되어 있으며, 산악지대이기 때문에 토지이용은 대부분 임야로 이루어져 있다. 연구대상지에 속하는 영주시와 봉화군의 경우 농경지 비율이 각각 20%, 25%로 중권역내 타 시·군과 비교하여 높은 편이고, 인구와 축산시설(내성천 중권역의 25.2-56.8%)도 집중되어 있다(ME, 2014). 특히, 영주시는 산업폐수 발생 및 배출현황이 중권역 유역 내 타 시군과 비교하여 높은 편이나, 이는 댐 하류에 대한 영향인 점을 고려해야 한다.

영주댐 건설의 주요 목적은 하천유지용수 공급, 홍수재해 방어, 경상북도 북부지역의 안정적인 용수공급 등이며 2016년 10월에 준공되었다. 영주댐의 유역면적은 500 km²이며, 주요 제원은 길이 400 m, 높이 55.5 m, 총 저수용량 181.1 백만 m³, 연간발전량 16.3 GWh yr⁻¹, 용수공급량 203.3 백만 yr⁻¹이다(Kang and Lee, 2015a). 이를 통해 확보할 수 있는 홍수 조절용량은 75 백만 m³이며 낙동강 본류의 홍수위를 0.4 m 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라 186.6 백만 m³ yr⁻¹의 하천유지용수 및 10.7 백만 m³ yr⁻¹의 생공용수, 6백만 m³ yr⁻¹ 농업용수 확보가 가능하다. 영주댐 상류 약 14.4 km 지점에는 유사조절지(sediment control dam, SCD)를 설치하여 댐 내부로 유입되는 유사를 사전에 조절할 수 있도록 계획되었다. SCD의 제원은 연장 288.2 m (월류부 173 m), 월류부 높이 10 m, 비



Fig. 1. Water quality monitoring points in this study. ●: main stream (M1 to M5), ■: tributary (T1 to T3), △: WTP (waste treatment plant), ★: LWTF (livestock waste treatment plant), ▽: AIWTP: agro-industrial waste treatment plant, YD: Yeongju Dam, SCD: sediment control dam. S: subwatershed.

월류부 높이 18.3 m 이다(Kang and Lee, 2015b).

2.2 수질 모니터링 지점

환경부 물환경정보시스템(water environment information system, WEIS)에서 제공하는 내성천 유역의 수질 모니터링 자료(ME, 2019)는 주로 영주댐과 그 하류를 중심으로 이루어지고 있으며, WEIS와 중첩되는 지점은 영주댐과 토일천 지점이다. 본 연구에서는 영주댐 자체의 수질관리의 중요성을 고려하여 상류유역을 중심으로 지점을 선정하였다. 따라서 국토교통부 하천관리지리정보시스템에서 제시하는 표준 유역중 영주댐을 최하류로 하는 곳(S1: 내성천 상류, S2: 낙화암천, S3: 토일천, S4: 영주댐)을 대상으로 하였으며, 이에 따라 모니터링 지점은 본류 5개(M1: 복지교, M2: 적덕교, M3: 석포교, M4: 두월교, M5: 영주댐), 지류 3개(T1: 석천계곡, T2: 도촌교, T3: 와평교)지점을 선정하였다(Fig. 1).

내성천의 발원지(headwater)는 물야저수지이며, M1은 내성천의 최상류에 해당하는 지점으로 대부분이 임야로 이루어져 있지만, 하천 가까이에는 농경지가 조성되어 있다. 항시 수심이 얕고 바닥에 큰 자갈이 관찰될 정도로 투명도가 높지만, 일부시기에는 부착조류가 번성하기도 하였으며, 수변은 식생이 밀집되어 있다. M2는 인근에 취입보가 있어 일부 정체수역을 형성하지만, M1과 마찬가지로 수심이 낮고 투명도가 높으며, 수생식물과 부착조류가 발달하였고, 붕어 및 잉어와 같은 큰 어류가 관찰되기도 한다. 주변에 농경지와 축사가 분포하며 하상은 주로 모래와 잔자갈로 구성되어 있다. M2 상류에는 봉화농공단지폐수처리장[350 ton·day⁻¹, 고도처리

(cilium nutrient removal, CNR)], 봉화하수처리장[3,000 ton·day⁻¹, 선회와류식(sequential batch reactor, SBR)]과 같은 점오염원이 위치하며 이 중 봉화하수처리장은 분뇨처리시설(20 ton·day⁻¹, 액상부식법)과 연계처리 하게 되어 M3는 본 조사에서 중류에 해당하며 하상에서 모래가 발달한 지점으로 하폭이 넓고 수심은 얇은 반면 유수의 흐름이 활발하였다. 주변은 농경지가 인접해 있으며, 조사 당시에는 석포교 인근에서 하천정비공사가 진행 중이었다. M4는 2.0 km 하류에 위치한 SCD 영향으로 하류로 갈수록 수심이 증가하고 정체수역이 발달하는 구간이며, 하천에서 호수의 특징으로 변하는 곳이기도 하다. 고수부지에는 식생과 습지가 발달해 있으며 유역 내 유량이 증가하는 경우에는 일시적으로 침수되기도 한다. M5는 영주댐 지점이다. 댐 건설 이후 유수역에서 정체수역으로 전환되었으며, 현장조사 기간인 6-8월까지는 사수위(125 E.L..m) 상태로 낮은 수치를 기록하다가 10월에 저수위(135 E.L..m) 수준으로 상승하였다.

T1은 가계천으로 M1과 M2사이로 유입하는 지류로써 위치는 봉화군 시가지에 접해 있으며 상류에는 하천가로 농경지가 발달해 있다. 조사지점의 명칭은 석천계곡이며 유량이 풍부하고, 부착조류, 어류와 같은 수생생물들이 많이 관찰되었다. T2는 낙화암천으로써 인근 북서쪽을 중심으로 미활용 축산단지 부지들이 있고 주변에는 농경지가 분포한다. 본 지점에서는 7월의 현장조사에서 부분적으로 생활하수의 유입이 추정되었으며 약한 탁질과 사상형 부착조류의 발달이 관찰되었으나 하천정비공사에 의한 하상 정비 후 일정 부분 개선되었다. 정비 전·후 T2의 하상재료는 주로 자갈과 모래였다. T3는 토일천으로써 지류 중 유량이 풍부한 편이며 하상

은 자갈과 모래로 이루어져 있다. 이 지점 또한 하천정비공사 중이었으며 그 결과 하류에서 약한 탁질이 발생하기도 하였다. T3도 다른 대부분의 지류와 마찬가지로 농경지, 축사가 산재하였으며 일부 소규모 마을과 같은 주거지역이 분포하였다.

2.3 자료수집 및 수질분석

영주댐을 중심으로 수질항목과 수위변동과의 단기적 관계를 분석하기 위해 한강홍수통제소에서 제공하는 국가수자원관리종합정보시스템(water resources management information system, WAMIS) 자료를 활용하여 댐의 전반적인 체원과 수리학적 자료(유입량, 유출량, 수위 등)를 조사하였다(Han River Flood Control Office, 2019). 조사된 자료는 수질항목과 연계하여 수위변동에 따른 경향성을 분석하였다.

수질분석은 환경부 물환경정보시스템의 8년간(2012년 1월-2020년 6월) 모니터링 자료와 자체 측정된 현장조사 자료를 기반으로 진행되었다. 수질항목은 SS (suspended solids), TOC (total organic carbon), BOD (biochemical oxygen demand), COD (chemical oxygen demand), TN (total nitrogen), $\text{NH}_3^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, TP (total phosphorous), $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, Chl-*a* (chlorophyll-*a*)에 대해서 환경부 수질오염공정시험기준 및 standard method를 기준으로 분석하였다(APHA, 2005; ME, 2013). 기초수질(수온, pH, DO, electrical conductivity, turbidity)과 BGA (blue green algae)는 다항목수질측정기(ProDSS, YSI, USA)와 현장 측정용 형광센서(AlgaeCheck, Modernwater, UK)를 활용하였다. 또한, 핵심지역인 M5지점을 중심으로 인공구조물 설치에 따른 단기적인 수환경 변화를 파악하기 위해 댐 건설에 따른 실질적인 담수가 이루어진 시점을 종합적으로 고려하여 유수역인 4년 전(2012.1월-2015.12월)과 정수역인 4년 후(2016.1월-2020.6월)의 기간으로 나누어 다양한 수질항목에 대해 SigmaPlot10 (Systat Software Inc. USA)과 Excel 2016 (Microsoft, USA) 프로그램을 활용하여 상관관계, F-test 및 T-test 쌍체비교를 실시하였다.

2.4 TSI_{KO}

본 연구에서는 기존 미국의 TSI (trophic state index) 지수를 국내 실정에 적합하게 재구성한 경험식인 TSI_{KO}를 활용하였다(Seo et al., 2014). 본 지표는 국내 부영양화 지수를 표현할 수 있는 수질평가 지표로서 값의 범위는 공식(1)-(4)에 의해 총 4단계[oligotrophic (≤ 30), mesotrophic (31-50), eutrophic (51-70), and hypereutrophic (>71)]로 구분되었다.

$$\text{TSI}_{\text{KO}} (\text{COD}) = 5.8 + 64.4 \log (\text{COD mg L}^{-1}) \quad (1)$$

$$\text{TSI}_{\text{KO}} (\text{Chl-}a) = 12.2 + 38.6 \log (\text{Chl-}a \text{ mg m}^{-3}) \quad (2)$$

$$\text{TSI}_{\text{KO}} (\text{TP}) = 114.6 + 43.3 \log (\text{TP mg L}^{-1}) \quad (3)$$

$$\text{TSI}_{\text{KO}} (\text{total}) = 0.5\text{TSI}_{\text{KO}} (\text{COD}) + 0.25\text{TSI}_{\text{KO}} (\text{Chl-}a) + 0.25\text{TSI}_{\text{KO}} (\text{TP}) \quad (4)$$

3. Results and Discussion

3.1. 상류유역 수질

영주댐 상류유역의 수질조사 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 조사의 목적은 상류지역의 부족한 수환경 모니터링 자료의 보완, 댐을 기준으로 수위변동에 따른 상·하류 수질변화 등을 파악함에 있고, 이는 수위변화가 급격하게 발생하는 시기(2019년)를 중심으로 진행되었다. 우선으로 수질특성 및 경향성을 파악하기 위해 M1-M5지점에 대해 14개 수질인자(수온, pH, DO, EC, COD, TOC, turbidity, TN, TP, $\text{NH}_3^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, Chl-*a*, BGA)의 분석을 하였다. 시공간적인 수질 변화는 하류로 갈수록 유기물 및 조류 농도가 증가하는 경향이 나타났으며, 특히 하천에서 호수로 변하는 구간인 M4 (SCD)와 M5 (영주댐)에서 두드러졌다.

수온, pH, DO는 하류로 갈수록 증가하는 양상을 보였다 (Fig. 2a,b,c). 수온의 범위는 5.0-29.7°C로써 계절 간 편차가 크게 나타났고, 상류에서 하류로의 수온차는 최대 7.1°C에서 최소 1.3°C의 차이를 보였으며, 이 차이는 11월에 가장 높게 관찰되었다. pH는 7.7-9.7의 범위를 나타내어 전반적으로 약 염기성 상태를 보였으며, 9이상의 높은 pH는 7월에서 9월의 조사시기에 영주댐 지점인 M5에서 나타났고, M4지역에서는 8월에만 나타났다. 전체적인 DO의 범위는 7.8-16.9 mg L⁻¹ (최대 포화도 224%) 이었다. DO는 시기적으로도 상하류간 변화가 다르게 나타났지만, 상류지역인 하천지점에서 하류지역인 호수의 특성으로 바뀌는 지점까지 차이가 확연하게 나타났다. 계절적 변화는 겨울(12월)의 경우 상하류간 편차가 거의 없었지만, 남조류와 같이 수표면을 중심으로 부유성 조류가 급성장하는 여름(8월, 9월)에는 DO차이가 크게 나타났다. 미국환경청(United States Environmental Protection Agency, USEPA)에서는 기체포화도 110%에 대해 관리를 하고 있으며, 포화도가 높으면 어류 등 수생태 생물에게 기포병(gas bubble trauma, GBT)의 잠재적인 요인이 되고 있다(Lutz, 1995). 110%가 넘는 DO포화도는 정체수역이 조성된 M2, M4, M5에서 빈번하게 발생하였으며, 지류중에서도 T3 지점에서 7월과 8월에 관찰되었다. 특히 영주댐은 조사기간 내내 110%가 넘는 DO포화도가 관찰되었는데, 높은 DO%의 원인은 주로 조류의 광합성 활동과 관계가 있다(Kent et al., 2005; Lutz, 1995). EC는 M1에서 M4 구간까지는 점진적으로 증가하였지만, M5에서는 다소 감소하였다(Fig. 2d). EC는 국내 대형댐에서는 지류 및 유입수에서의 농도와 강우에 의한 희석효과 등으로 농도가 좌우될 수 있는데(An, 2001), 영주댐의 경우 M1에서 M4의 경우 오염원 유입 및 적은 유량의 영향으로 EC가 높다가 수량이 급격히 증가하는 희석효과로 인해 M5에서 감소하는 경향이 나타난 것으로 사료된다. 탁도는 계절적인 차이가 크게 나타났으며 강우가 동반된 시기('19. 8, 9월)나 조류를 포함한 수중 유기물이 풍부한 시기에 높았다(Fig. 2g).

유기물 인자인 COD, TOC는 M4와 M5에서 뚜렷하게 증가하였다(Fig. 2e,f). 특히 9월에 가장 높은 수치를 보였는데 이는 본 댐 내 급격한 수위변화 및 강우에 따른 초기세척(first

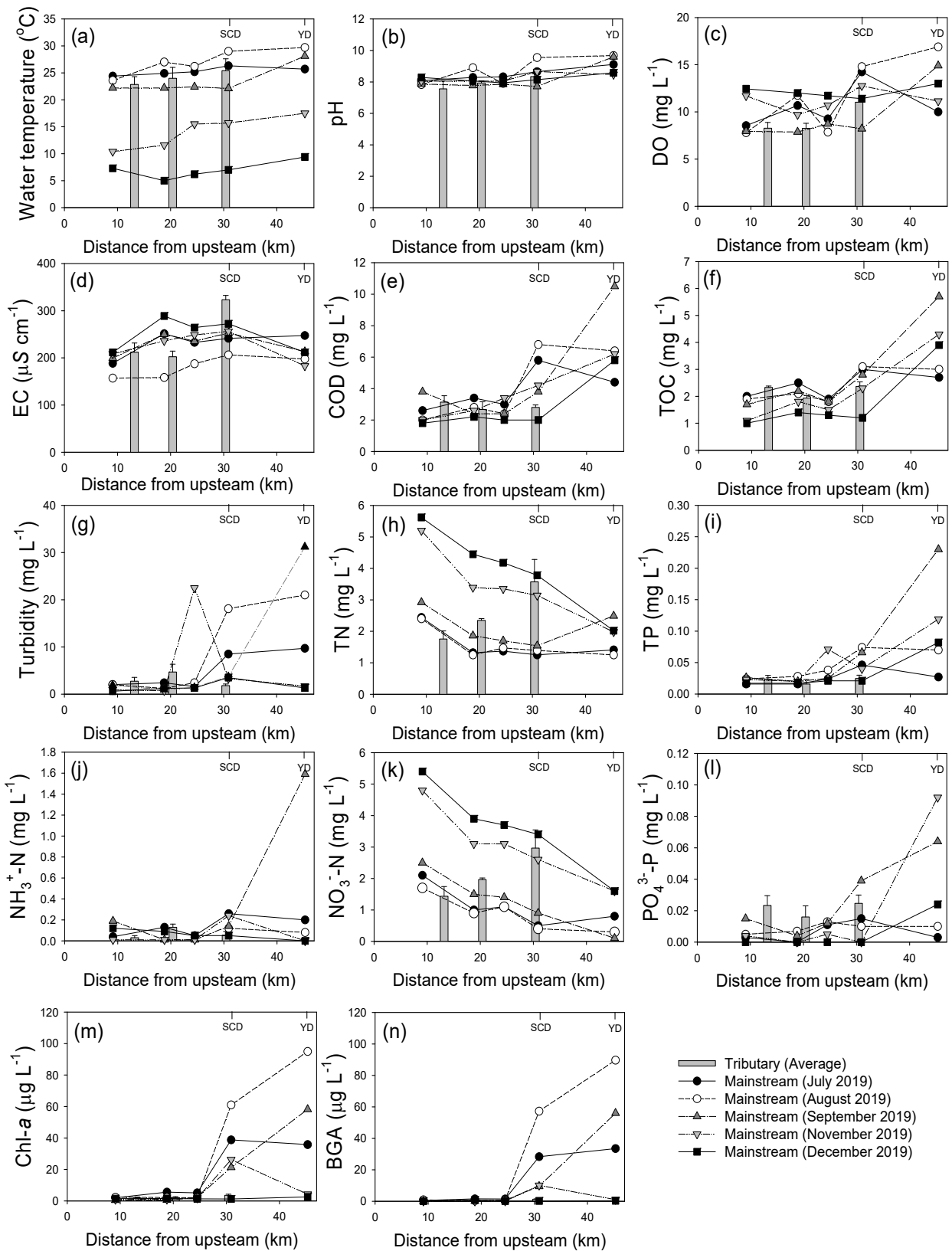


Fig. 2. Spatial water quality results of upper watershed in Naeseong Stream. The dots on the graphs are listed in order from upstream to downstream (M1 to M5). These results are focused on the water level changes occurring at the Yeongju Dam (M5) from July to December 2019.

flush)과 관련이 있을 것으로 예상하였다. 실제 본 댐의 수위는 8월까지 사수위 수준(125 EL.m)을 유지하다가 9월 동안 빠르게 증가한 후(137 EL.m) 2020년 6월(149 EL.m)까지 서서히 증가하였다. 다양한 이유로 많은 유량이 갑자기 공급될 때 유기성 오염물질의 초반 유입은 선행연구에서도 제시된 바 있다(Kwak et al., 2012). 본류는 크게 유수역인 M1-M3과 정수역인 M4, M5로 구분할 수 있으며 유수역에서 COD, TOC의 평균 농도는 각각 $2.6 \pm 0.6 \text{ mg L}^{-1}$ 와 $1.7 \pm 0.4 \text{ mg L}^{-1}$ 였지만, 정수역에서는 $5.6 \pm 2.1 \text{ mg L}^{-1}$ 와 $3.2 \pm 1.2 \text{ mg L}^{-1}$ 까지 증가하였다. 또한, 평균 COD/TOC가 유수역(1.6)에서 정수역(1.8)으로 갈수록 증가한 점을 미루어 볼 때 총 탄소량 대비 난분해성 유기물의 증가가 예상되었다(Oh et al., 2015). 반면에 지류는 전반적으로 본류와 유사하거나 낮은 농도를 나타내었다.

TN은 하류로 갈수록 점차 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2h). TN은 공간적으로 상류인 M1에서 큰 범위를 보였고($2.4\text{-}5.6 \text{ mg L}^{-1}$), 계절적으로는 유량이 적은 12월(5.6 mg L^{-1})에 가장 높았다. NO_3^- -N는 TN과 유사한 패턴을 보였으며 TN 농도의 평균 $78.3 \pm 16.8\%$ 를 차지하는 것으로 파악되었다(Fig. 2k). 본 연구대상지는 잠재적 질소원(농경지, 축사 등)이 존재하므로 이들이 하류로 전달되는 과정에서 다양한 경로를 통해 biomass에 흡수되거나 화학적으로 소멸하였을 것으로 판단된다(Xia et al., 2018). 관련된 유사한 선행연구에서는 유역 내 NO_3^- -N의 이동경로가 상당부분 지하수라고 제시한 바 있다(Lee et al., 2020; Schmutz and Sendzimir, 2018). NO_3^- -N과는 반대로 전반적인 NH_3^+ -N의 농도는 낮았다(Fig. 2j). 하지만 NH_3^+ -N 농도는 유역 내 강우유출 등과 같은 순간적인 유입으로 정수역에서 특정시기(9월)에 급증하기도 하였다.

TP는 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며 M5에서 가장 높았다(Fig. 2i). 상류인 T1의 TP 농도 범위는 $0.016\text{-}0.026 \text{ mg L}^{-1}$ 였으나 최 하류인 T5는 $0.027\text{-}0.119 \text{ mg L}^{-1}$ 로써 계절적 편차가 크게 나타났다. P계열의 거동은 입자의 침식 및 이송과 연관성이 높기 때문에 유역의 크기, 지형학적 특징, anthropogenic pressure에 따라 상이하다(Withers and Jarvie, 2008). 용존된 형태인 PO_4^{3-} -P는 공간적으로 TP와 유사한 경향을 보였다(Fig. 2l). PO_4^{3-} -P는 9월과 11월에 M5에서 가장 높은 수치를 보였는데 이들은 공통적으로 강우유출에 의한 유량 공급으로 인해 수위가 상승한 시기였다. 일반적으로 강우유출이 발생하면 유역의 비점오염원의 유입이 용이하므로 TP나 PO_4^{3-} -P의 부하량 증가를 촉진하게 된다. 관련하여 댐의 수위 상승에 따라 P가 증가하는 사례는 선행 연구에서도 유사하게 나타났다(Lee and Kim, 2016).

Chl-*a*와 BGA는 하류에서 뚜렷하게 증가했다. Chl-*a*와 BGA는 유수역(M1-M3)에서 각각 평균 2.0 mg L^{-1} , 0.5 mg L^{-1} 수준이었으나 정수역(M4, M5)에서는 34.4 mg L^{-1} , 28.6 mg L^{-1} 수준으로 증가하였다. 특히 가장 높은 농도는 M5에서 8월에 나타났으며(Chl-*a* $95.0 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$, BGA $89.7 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$), 이 시기에 우점한 종은 *Microcystis* sp. 였다. 반면에 유수역의 Chl-*a*/BGA 비율은 17.6-44.6% 수준으로 나타났다. 종합적으로, M5는 영주댐 상류유역에서 유량이 공급됨에 따라 유기물,

영양염류가 축적되는 장소이며, 체류시간 증가에 따라 조류 성장에 유리한 지점으로 예상되기에 8, 9월과 같이 광량이 증가하고 온도가 상승하는 조건이 추가로 갖추어진다면 조류 생체량의 증가 가능성이 상승할 수 있을 것이다.

본 결과를 요약하면 상류유역은 지류보다는 본류 자체의 영향이 컸으며 대부분의 수질인자들이 하류에 위치한 영주댐을 중심으로 집중되는 경향이 있다고 판단되었다. 특히 하류의 정수역으로 갈수록 유기물 인자의 증가 경향이 컸으며, 질소와 인은 강우유출에 의한 영향을 크게 받을 것으로 판단되었고, 이러한 이유로 인해 경우에 따라 댐을 중심으로 조류성장잠재력의 증가가 예상되었다. 하지만 본 연구에서는 주로 영주댐의 수위변동이 급격하게 일어나는 기간을 대상으로 했으므로 향후 장기적 관점에서 지속적인 조사 및 평가가 필요할 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고 본 조사결과와 같이 대형 댐에서 급격한 수위변동이 이루어지는 시기의 현장자료는 드물기 때문에 향후 관련 연구에서 유용한 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 수위변화와 수질의 관계

M5 지점에 대한 8년간 수위변동 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에서는 M5에서 유입, 유출량 비교를 통해 실질적인 담수영향을 받은 2016년 1월을 기준으로 Stage 1 (lotic system)과 Stage 2 (lentic system)로 구분하였다(준공일: 2016년 10월). 수위변화는 단계적으로 나타났으며 댐 건설전보다 이후에 더 급격한 변화를 보였다. Stage 1의 수위는 $1.0 \pm 0.5 \text{ m}$ 수준이었으나, Stage 2에서는 2016년 1월에 4.1 m 수준으로 상승하였으며 준공 직전인 2016년 7월부터는 급상승하여 2018년 3월까지 약 9개월간 평균 $17.3 \pm 3.0 \text{ m}$ 수준으로 운영되었다. 하지만 2018년 4월부터 2019년 8월까지 약 17개월 동안은 수위가 급감하여 평균 $4.5 \pm 0.7 \text{ m}$ 수준으로 나타났다. 이후 2019년 8월 이후부터는 유입량 대비 방류량이 감소하여 내부 저류량이 증가하였으며 그 결과 2020년 6월에는 수위가 최대 27.5 m 수준까지 상승하였다. 종합하면, M5 지점의 하천환경은 2016년 1월 이후 인공구조물이 건설되면서 하천 흐름을 방해하여 유수역에서 정수역으로 전환됨에 따라 단기적으로 수위가 급변하였으나 실질적으로 충분한 담수가 이루어진 기간은 길지 않았다.

하천환경이 유수역에서 정수역으로 전환된 후에는 일정기간 동안 Chl-*a* 발생빈도가 증가하였다. Stage 1의 Chl-*a*는 평균 $4.9 \pm 8.1 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 로써 2014년 7월에 최고농도($53.9 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$)를 기록하였지만, Stage 2는 평균 $21.0 \pm 21.6 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ 이었으며 최고농도는 2019년 8월($95.0 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$)에 나타났다. 특히 장기간 수위가 낮았던 2018년 4월-2019년 8월 사이에 높은 Chl-*a* 농도가 빈번하였다. 반면에 수위가 급격하게 증감한 시기의 Chl-*a* 농도는 상대적으로 낮았다. 이러한 결과를 볼 때 댐 운영이 안정화되기까지 이루어지는 몇 차례의 수리학적 영향은 수질변화에 직·간접적으로 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

M5는 상류유역의 말단지점이자 수체가 댐에 의해 저류된 지점으로써, 내성천 유역에서 수질관리의 핵심지점이라고 볼

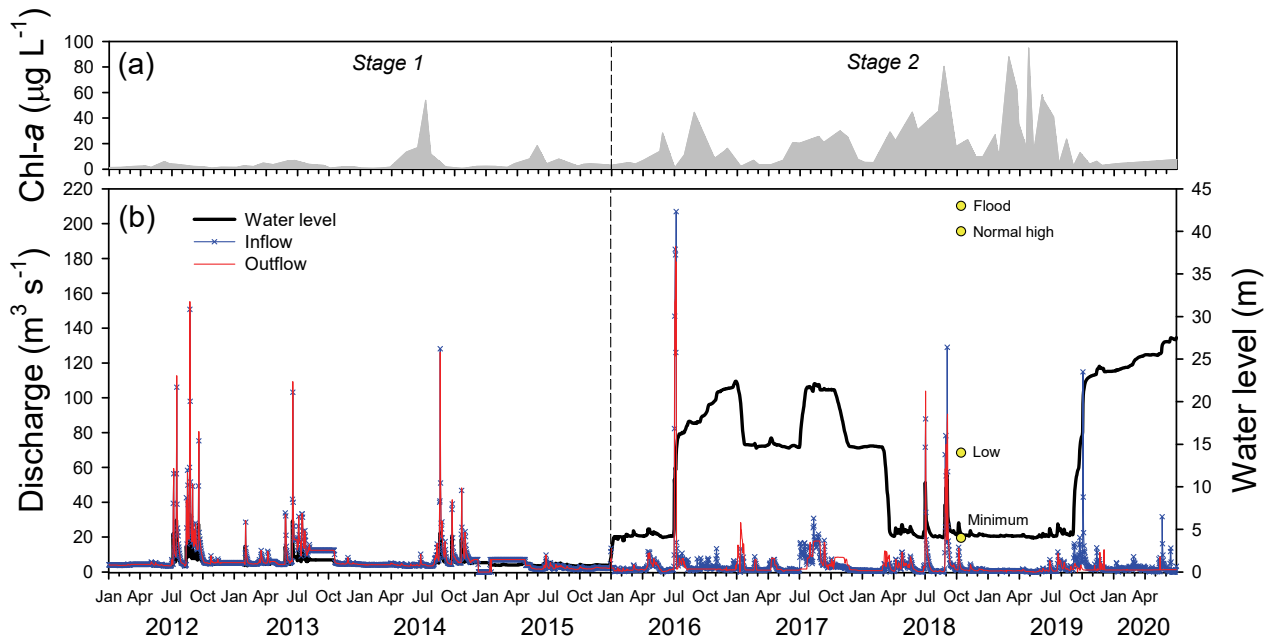


Fig. 3. Fluctuations of Chl-a (a) and hydraulic parameters (b) in the M5 from 2012 to June 2020. The dotted line indicates the time points at which changes to the river environment occurred due to the dam construction. Dots represent the maintenance water level in the Yeongju Dam. Stage 1 is the lotic system, which is not affected by water level fluctuations during the four years period (2012-2015), and Stage 2 is the lentic system, which can be directly affected by water level fluctuations due to dam construction during the four years period (2016-June 2020).

수 있다. 댐에 초기 담수가 이루어지는 과정은 다양한 이유로 인해 일정 시간이 필요하며 이때 발생하는 물리·화학적 변화에 따라 다양한 수질인자의 변동이 동반될 수 있다. 이러한 단기적인 수환경 변화를 파악하기 위해 본 연구에서는 M5지점에서 댐 준공시점을 기준으로 4년 전(2012.1월-2015.12월)과 4년 후(2016.1월-2020.6월)의 기간 동안 수위 변동에 따른 다양한 수질항목에 대한 변화를 환경부 물환경 정보시스템 자료와 본 연구에서 수행한 현장자료를 기반으로 분석하였다(Fig. 4).

Stage 1과 Stage 2의 비교 검증을 위해 표본자료(n=48)를 대상으로 F-test 및 T-test 쌍체비교를 실시하였다. 그 결과 Stage 1과 Stage 2에서 유의한 차이를 보이는 인자는 각각 BOD, COD, TOC, Chl-a, 수위 5개 항목으로 나타났으며 ($p < 0.05$), 유수역에서 정수역으로 전환 후 수위증가에 따라 유기물과 조류발생이 증가하였다고 판단되었다. 또한, 수위 상승과 관련해서 Stage 1은 pH, EC와 같은 기초수질항목이나 SS, TP와 같은 입자성 물질과 관련이 있었지만, Stage 2는 다양한 수질항목(COD, TOC, SS, TN, PO_4^{3-} -P, Chl-a)과 복잡한 관계를 나타내었다.

기초항목인 수온, pH, DO, EC는 Stage 1과 Stage 2 사이에서 뚜렷한 차이를 보이거나 수위변화에 따른 유의한 증감을 보이지 않았다(Fig. 4a-d). 우선 수온은 계절별로 변화가 큰 인자이며 본 연구에서는 1.0-32.1°C 범위를 나타내었다. 보통 지표수의 열수지(heating budget)는 태양복사열에 의해 좌우되지만 장기적으로 수체가 커지면 열에 대한 수용력이 더욱 증가하므로 전체적인 수온은 낮아질 수 있다. pH는 6.8-9.2의

약산성-약알칼리의 범위가 유지되었으며, DO는 평균 $11.4 \pm 3.1 \text{ mg L}^{-1}$ 수준을 나타내었다. EC는 Stage 1에서 수위 상승에 따라 유의한 감소세를 보였지만 Stage 2에서는 수위 약 15 m 지점부터 불규칙한 증가가 관찰되기도 하였다.

수중 유기물을 나타내는 대표적 지표인 BOD, COD, TOC는 Stage 1과 2에서 유의한 차이를 보였으며 Stage 2에서 평균 2.1-2.6배 상승하였다(Fig. 4e-g). BOD는 수위 상승에 따라 약한 감소 경향을 보인 반면, COD와 TOC는 Stage 2에서 점진적인 증가 경향을 보였다. Lee and Choi (2009)에 의하면 팔당댐, 의암댐, 충주댐을 포함하는 한강수계에서 67% 이상의 지점이 BOD가 감소하는 패턴을 보였으며, 78%이상의 지점에서 COD의 상승 패턴을 보였다고 보고하였다. 이러한 특징은 BOD의 경우 산소 소비가 빠른 생물학적 반응인 반면에 COD는 상대적으로 분해가 느린 난분해성 유기물질(recalcitrant or anthropogenic organic materials)이 포함되기 때문이며, 상류에서 전달된 유기성 오염원의 이송과 누적이 주요 원인으로 판단된다(Dou et al., 2015). 그리고 본 연구대 상지처럼 급격한 수위 변동은 인근 토양에 분포된 다양한 유기물의 유입이 용이하며, 본격적으로 정수역이 조성된 이후에는 축적된 수중 유기물의 성장에 따라서 분해속도 및 최종 산물이 다르게 나타날 수 있을 것이다. 이러한 관점에서 TOC가 COD와 유사한 경향을 보이는 점도 수위의 증가가 상당부분 탄소계 난분해성 유기물질의 증가에 기여할 수 있다는 점을 시사한다.

SS는 Stage 2에서 약한 감소 경향으로 전환되었다(Fig. 4h). Stage 1은 유수역 조건이므로 난류 발생으로 부유성

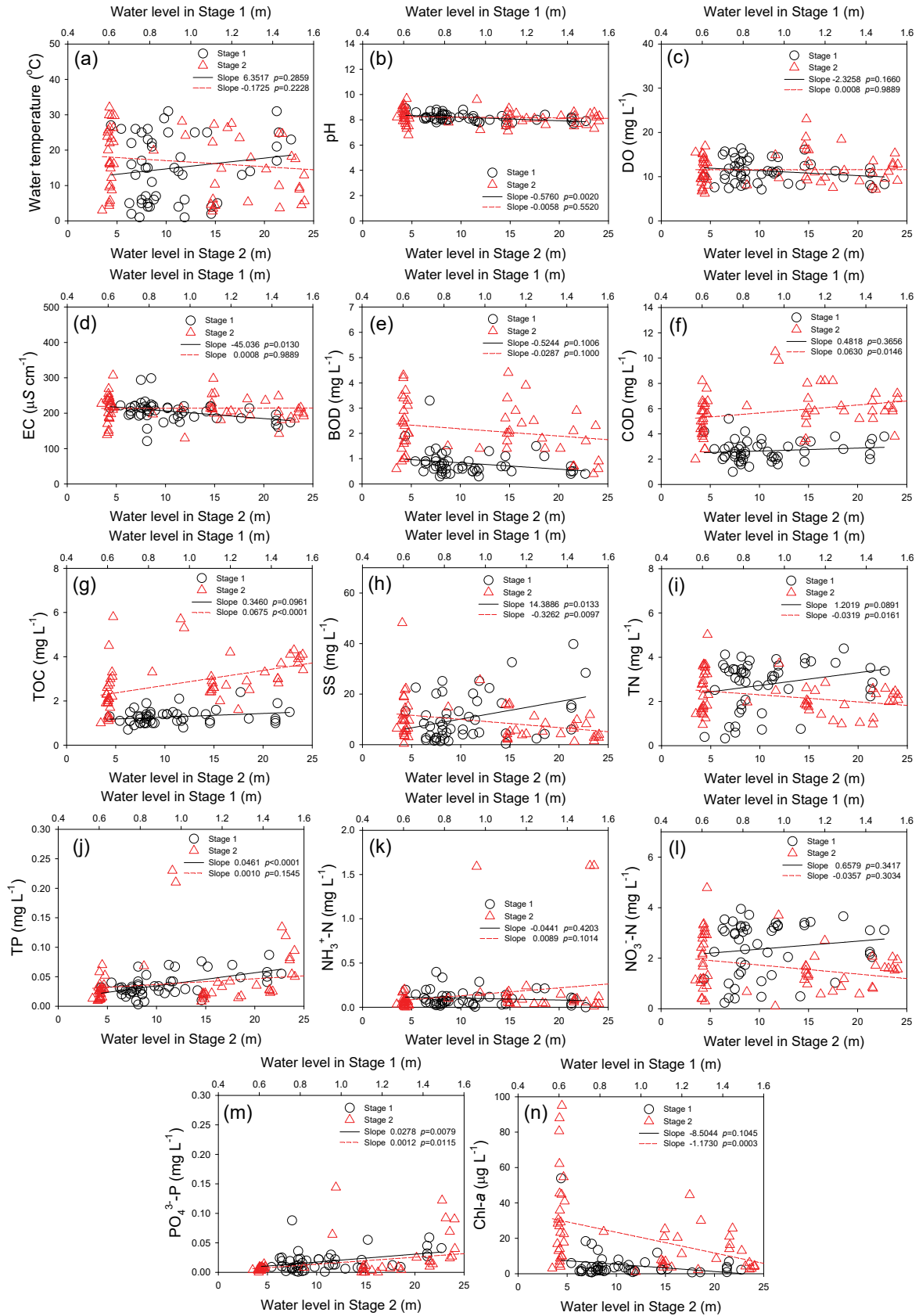


Fig. 4. Relationship trends with water quality parameters and water level following the four years before and after construction of the Yeongju Dam. ○ and the black correlation line means the four years before dam construction, from January 2012 to December 2015. △ and the red-dotted correlation line means four years after dam construction, from January 2016 to June 2020.

고형물이 하류로 쉽게 이송된다. 하지만 Stage 2는 정수역 조건이며 일정시간이 확보된 후에는 부유성 고형물질의 침강이 더욱 우세하게 작용할 수 있어 수심이 증가할수록 내부에 쉽게 누적될 수 있음을 보여주었다. 다만 Fig. 2g처럼 강우가 동반되거나 조류를 포함한 수중 유기물이 풍부한 시기에는 일시적으로 탁도가 증가할 수 있지만, SS와 반드시 일치한다고 볼 수는 없다.

TN은 수심증가에 따라 점차 감소하였다(Fig. 4i). M5에서 나타난 TN과 NO₃⁻-N의 높은 상관관계를 고려하면(Table 1,2), 전반적인 TN의 농도의 변화는 유량증가에 의한 희석이나 다양한 생물학적 또는 화학적 반응으로 손실된 것으로 예상된다(Xia et al., 2018). 반면에 NH₃⁺-N의 비율은 상대적으로 낮았으나(Fig. 4k), Stage 2에서는 일부 불특정 고농도 값이 기록되기도 하였다. 이는 토양에 불균일하게 분포된 질소화합물 또는 강우 시 유역에서 유출된 질소계 오염원의 순간적인 유입에 의한 영향으로 사료된다.

TP와 PO₄³⁻-P는 수위상승에 따라 점진적으로 증가하였다(Fig. 4j,m). P-cycle은 주로 입자의 침식(erosion), 도시 및 농업지역의 강우유출(runoff), 점오염원 유입 등에 의해 전달되며 phosphate buffer system에 의해 안정화 된다(Horne and Goldman, 1994). 일반적으로 수체 내 P의 농도는 유역에서 발생한 입자의 이송과 침강의 함수이며(Thomann and Mueller, 1987), 대상지가 신규댐인 점, 수위가 단기간에 급변한 점, 정수역으로 전환된 후에도 수심이 비교적 낮은 점 등을 고려하면 저질(sediment)에서의 용출보다 외부로부터의 누적, 이류(advection)와 확산(diffusion)에 의한 재부유(resuspension)가 중요한 기작으로 판단되었다(Withers and Javie, 2008). Lee and Kim (2016)은 영주댐 담수 전에 초분류로부터 유출될 수 있는 인 부하량을 조사하였으며, 수몰지역의 버드나무림에 의한 인 부하량 증가를 제시한 바 있다. 이러한 관점에서 장기적으로 정수역인 호 내에 충분한 배출 없이 P-source의 누적이 지속된다면 P-retention 증가에 따른 저질에서의 용출도 배제할 수 없을 것이다.

Chl-*a*는 Stage 1, 2에서 유의한 차이를 보였으며 Stage 2에서는 수위상승에 따라 유의하게 감소하였다(Fig. 4n). 유수역 조건에서 Chl-*a*의 범위는 0.7-53.9 µg L⁻¹이었지만 정수역으로 전환된 이후에는 2.2-95.0 µg L⁻¹으로 농도의 변폭이 컸으며, 특히 수심 약 5 m 이내에서 조류발생이 빈번하여 성장 잠재력이 높게 추정되었다(Fig. 4n). 정수역 조건에서 수심이 낮을 경우 조류의 성장에 필요한 체류시간과 유광대(euphotic zone)가 충분히 제공될 뿐만 아니라 댐 건설로 인한 nutrient retention이 증가할 수 있다. 이러한 경우에는 조류 대발생(algal bloom)의 잠재력이 높지만, 단기적이고 급격한 수위변화가 진행되면 유광공급에 의한 희석효과, 난류형성, 유광대 변화, 영양염류 순환 변화, 수온 분포 변동 등의 복합적인 영향으로 조류성장이 저해될 수도 있다(Ji et al., 2017; Kim et al., 2014; Schwierzke-Wade et al., 2011). 하지만 별도의 수위변화 없이 장기적으로 정수역이 안정화 된다면 체류시간 증가, 유광대 안정화, nutrient retention 증가, 수표면적 확대, 탁도 감소, 유역의 생지화학적 특징 등의 영향

으로 특정조건에 따라 조류가 번무할 가능성도 배제할 수 없다. 또한, 본 연구대상지와 같이 5-9월을 중심으로 남조류가 우점할 수 있는 정체수역에서는 조체(藻體)가 수표면 또는 수체 가장자리에 집중되는 공간적 농도 분포가 예상될 수 있다(Na et al., 2015). 따라서 향후 장기적이고 효율적인 댐 관리방안을 위해서는 현재의 단기적 수질변화의 양상을 참고하여 적절한 대응이 필요할 것이다.

3.3. 상관관계 분석

영주댐에서 단기적 수위변동에 따른 전반적인 수질특성을 이해하기 위해 M5지점에 대해 다양한 수질인자(수온, pH, DO, EC, BOD, COD, TOC, SS, TN, TP, NH₃⁺-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P, Chl-*a*)와 수위의 상관관계 분석을 추가로 실시하였다(Table 1, 2). 일반적으로 댐 건설 전의 하천 공간은 좁고 얕으며 물질의 이송이 주요한 기작이기 때문에 외부기원유기물(allochthonous organic matters)이 지배적이지만, 댐 건설 후에는 하천의 폭과 수심이 깊어지며 침강과 내부순환에 의해 내부생성유기물(autochthonous organic matters)이 유의한 특징을 가지며(Schmutz and Sendzimir, 2018), 이러한 경향은 본 연구에서도 유사하게 나타났다.

댐 건설 전인 Stage 1은 유수역으로써 영양염 및 유기물의 이송이 원활했으며 상대적으로 유기물 인자(BOD, COD, TOC)들과 상관관계가 높았다(Table 1). 또한, 영양염류 측면에서 TN과 NO₃⁻-N이 서로 높은 상관관계를 나타낸 점을 미루어 볼 때 N계열은 무기질소가 풍부하였으며($R=0.87, p<0.0001$), Chl-*a*와 유의한 상관관계를 나타내었다($p<0.01$). 또한 N계열 인자들은 타 수질항목들과(기초수질, 유기물 등) 복합적인 관계를 나타내어 해당 지점에서 중요한 수질인자 중 하나로 판단되었다. 하지만 P계열은 Chl-*a*보다는 SS나 수위와 관련성이 높았는데 이는 PO₄³⁻-P의 농도가 $0.019 \pm 0.017 \text{ mg L}^{-1}$ 수준으로 낮은 점도 있었지만, Stage 1의 경우 수심 0.7-1.5m 범위에서 흐름이 지속되는 조건이었으므로 부유성 조류의 생물학적인 이용보다 고형물의 이송이 우세했던 것으로 판단되었다.

반면에 댐 건설 후인 Stage 2는 정수역으로써, 수위의 영향이 상대적으로 크게 나타났다(Table 2). 정수역으로 전환된 이후, 저수위에서 Chl-*a*가 급증하였다가 고수위에서 감소하는 현상($R=-0.46, p<0.0003$)은 단계적인 혼합효과로써 체류시간/nutrient retention 증가→조류성장→유광공급→희석에 의한 단기적 패턴으로 해석할 수 있다. 또한, Stage 2는 하류로의 이송이 제한된 상태에서 침강과 내부순환이 우세하므로 수위와 유기물 인자와의 상관관계가 강화되어 결국 내부생성유기물이 중요할 것으로 판단되었다. 그리고 상류에 위치한 SCD가 1차 침전지 역할을 함으로써 본류의 유기물 전달을 일부 억제할 수 있지만 본 댐 내 수심 및 체류시간 증가에 따라 SS의 침강이나 BOD와 같이 쉽게 분해될 수 있는 유기물의 생물학적 반응이 선행될 수 있을 것으로 예상되었다. 또한, 장기적으로는 저질의 퇴적물이 누적되면서 입자성 물질과 관련된 P계열 인자의 중요성이 증가할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 1. Correlation analysis between various water quality parameters and water level in Stage 1 from January 2012 to December 2015

Parameters	Temp.	pH	DO	EC	BOD	COD	TOC	SS	TN	TP	NH ₃ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	Chl- <i>a</i>	WL
Temp.	1.0000	0.4465**	-0.8993**	-0.0873	0.2623	0.5816**	0.3861**	0.3872**	-0.5881**	0.0955	0.0085	-0.5777**	0.1769	0.4356**	0.1572
pH		1.0000	-0.2241	0.1747	0.4486**	0.2541	-0.0228	-0.0987	-0.4504**	-0.3484*	0.2149	-0.4334**	-0.0992	0.5507**	-0.4353**
DO			1.0000	0.0428	-0.2606	-0.5988**	-0.4319**	-0.4820**	0.4423**	-0.2523	-0.0815	0.4684**	-0.2011	-0.3202*	-0.2032
EC				1.0000	0.2595	0.1280	-0.2884*	-0.2985*	-0.3381*	-0.3067*	0.0947	-0.3472*	-0.2671	0.1083	-0.3559*
BOD					1.0000	0.5343**	0.2674	-0.1360	-0.1302	-0.1600	0.3264*	-0.3683**	-0.2042	0.5258**	-0.2398
COD						1.0000	0.4282**	0.1633	-0.3531*	-0.0004	0.9976	-0.5425**	-0.0334	0.4867**	0.1335
TOC							1.0000	0.3047*	-0.0296	0.3768**	-0.0227	-0.2174	0.1701	0.1133	0.2430
SS								1.0000	0.0034	0.5296**	0.0436	0.0808	0.5478**	0.1397	0.3551*
TN									1.0000	0.2814*	0.0689	0.8708**	0.0001	-0.5032**	0.2481
TP										1.0000	0.0736	0.1661	0.5443**	-0.0699	0.5566**
NH ₃ ⁺ -N											1.0000	-0.0178	0.2529	0.2823	0.1191
NO ₃ ⁻ -N												1.0000	0.0511	-0.4180**	0.1402
PO ₄ ³⁻ -P													1.0000	0.0136	0.3790**
Chl- <i>a</i>														1.0000	-0.2372
WL															1.0000

WL: Water level, *: p<0.05, **: p<0.01

Table 2. Correlation analysis between various water quality parameters and water level in Stage 2 from January 2016 to June 2020

Parameters	Temp.	pH	DO	EC	BOD	COD	TOC	SS	TN	TP	NH ₃ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P	Chl- α	WL
Temp.	1.0000	0.2645*	-0.7281**	-0.0841	0.3610**	0.5537**	0.2945*	0.3698**	-0.0989	0.2472	0.0996	-0.2534	0.0234	0.4462**	0.1611
pH		1.0000	-0.0583	0.0657	0.0462	0.1251*	0.0304	0.0734	-0.4448**	0.0307	0.2965*	-0.5091**	-0.1719	0.2429	-0.0790
DO			1.0000	0.1684	-0.193	-0.3798**	-0.1797	-0.3000*	0.0093	-0.0752	0.0644	0.0786	-0.0658	-0.2647*	0.0019
EC				1.0000	-0.0373	-0.1889	-0.0927	-0.3167*	0.0274	-0.3102*	-0.0685	0.0004	-0.3382**	-0.2602*	0.0109
BOD					1.0000	0.3323*	-0.0119	0.0940	0.1535	-0.1371	0.1534	0.0582	-0.3003*	0.5425**	0.2262
COD						1.0000	0.5322**	0.1571	-0.0825	0.5527**	0.2682*	-0.1724	0.3478**	0.2661*	0.3164*
TOC							1.0000	-0.0196	0.0254	0.6161**	0.4070**	-0.1987	0.5317**	-0.1589	0.5036**
SS								1.0000	0.0071	0.1110	-0.0126	-0.0060	0.0526	0.3559**	-0.3428**
TN									1.0000	0.1138	-0.0447	0.8901**	0.1581	-0.0473	-0.3122*
TP										1.0000	0.5748**	-0.0285	0.8479**	-0.0436	0.1877
NH ₃ ⁺ -N											1.0000	-0.1568	0.3477**	-0.1801	0.2154
NO ₃ ⁻ -N												1.0000	0.1356	-0.1057	-0.3034*
PO ₄ ³⁻ -P													1.0000	-0.2512	0.3295*
Chl- α														1.0000	-0.4564**
WL															1.0000

WL: Water level, *: p<0.05, **: p<0.01

3.4. TSI_{KO} 분석

본 연구에서 조사된 수질인자의 시계열 자료를 토대로 TSI_{KO} 분석을 실시하였다. Stage 1 (n=48)과 Stage 2 (n=54)의 TSI_{KO} 값을 비교 분석한 결과 상호 유의한 차이를 나타내었다. Stage 1은 TSI_{KO} 35.8±7.7을 보였으나 Stage 2는 TSI_{KO} 51.7±8.0 수준으로 44.6% 상승한 결과를 보였다. 도출된 TSI_{KO} 값을 앞서 제시된 4단계 지표에 대입하면 Stage 1은 mesotrophic, Stage 2는 eutrophic에 해당하는 수치로 각각 나타났다. TSI_{KO}는 국내 담수 시스템을 대변할 수 있는 COD, Chl-*a*, TP를 주요 인자로 활용한 경험식으로 본 연구결과에서도 유수역에서 정수역으로 평균수위가 크게 변하는 동안 (0.9±0.2 m→10.9±7.1 m) 내부 및 외부기원유기물 인자인 COD와 Chl-*a*가 유의하게 증가한 것이 주된 원인으로 판단된다. 결국 신규댐 건설에 따른 단계적 하천환경변화는 영양상태의 변화를 가져올 수 있기 때문에 장기적인 수질관리를 위한 전략적 접근이 필요할 것으로 판단된다.

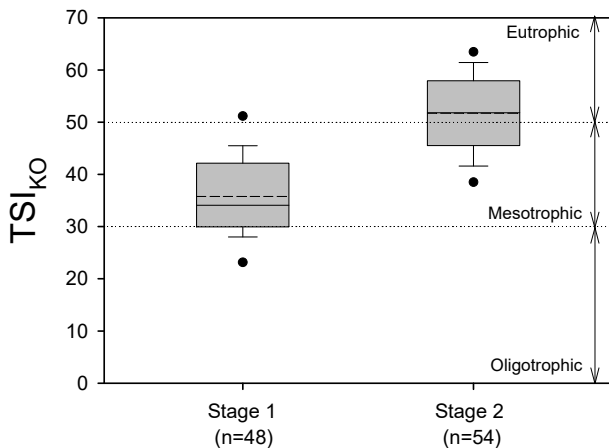


Fig. 5. TSI_{KO} result of Stages 1 and 2 in this study. The box plot shows the median (line within box), mean value (dotted line within box), 25th and 75th percentiles (sides of the box), 10th and 90th percentiles (error bars), and 5th and 95th percentiles (circles), respectively.

4. Conclusions

본 연구는 댐 건설에 따른 하천환경변화 측면에서 단계적으로 나타나는 수질변화 특성을 파악하기 위해 실시하였다. 본 댐에 영향을 줄 수 있는 상류유역의 수질현황을 조사하였으며, 본 댐 지점이 유수역에서 정수역으로 전환됨에 따라 수위변동과 수질인자와의 상관관계 분석을 하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

1) 영주댐 상류유역의 시공간적 수질 변화는 하류로 갈수록 유기물 및 조류 농도가 증가하였으며 특히 정수역인 M4와 M5에서 뚜렷하였다. 유기물과 영양염류가 축적되기 시작하는 M4와 체류시간이 증가하는 M5는 향후 조류 성장에 유리한 장소로 예상되므로 수질관리를 위한 중요한 지점으로

고려되어야 할 것이다.

2) M5 지점은 댐 건설 영향으로 2016년 1월 이후 유수역에서 정수역으로 전환되었다. BOD, COD, TOC, Chl-*a*, 수위 5개 항목이 유의한 차이를 보였으며 특히 평균수위는 정수역인 Stage 2에서 크게 상승하였다(0.9±0.2 m→10.9±7.1 m). 수위상승의 영향은 Stage 1에서는 pH, EC와 같은 기초수질 항목이나 SS, TP와 같은 입자성 물질과 관련이 있었지만, Stage 2는 다양한 수질항목(COD, TOC, SS, TN, PO₄³⁻-P, Chl-*a*)과 복잡한 관계를 나타내었다. 따라서 변화된 하천환경에서 나타난 단계적인 수위변동과 수질인자와의 관계를 미루어 볼 때 적절한 댐 내 수위관리가 M5지점의 중요한 수질 관리 요소 중 하나로 작용할 수 있을 것으로 판단되며 이를 고려한 장기적 관점에서의 관리방안이 필요할 것이다.

3) 단계적인 수위변화는 유량공급, 희석효과, 난류형성, euphotic zone 변화, 영양염류 순환 변화, 수온하락 등의 복합적인 영향으로 조류성장이 저해될 수 있지만, 장기적인 관점에서 수위가 확보되고 정수역의 안정화가 진행된다면 체류시간 증가, 수문환경 변화, nutrient retention 증가, 수면적 확대 등의 조건에 따라 조류가 번무할 가능성을 배제할 수 없다. 또한, 유수역에서는 물질의 이송에 의한 외부기원유기물이 우세하지만 댐 건설 후에는 내부순환에 의해 내부생성 유기물이 더 중요해지며 추후 호수의 영양단계가 상승할 수 있다. 따라서 향후 장기적인 본 댐 내 수질관리를 위해서는 이러한 특징들을 충분히 고려해야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원의 재원으로 2020년 장기조사사업인 「UAV/USV를 활용한 보, 댐 처리방안에 따른 상류지역 하천수질 변화 장기조사」와 「(19주요-대2-전략) 수자원·환경분야 미래기술 개발을 위한 특화전략연구(2)(20190158)」의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- American Public Health Association (APHA). (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater, 21th edition*, American Public Health Association, Washington, D.C., USA. 1-1368.
- An, C. H., Han, J. S., Choi, J. K., and Lee, H. G. (2019). Benthic macroinvertebrate community changes after impoundment of Yeongju dam in Korea, *Korean Society of Environment and Ecology*, 33(5), 515-524. [Korean Literature]
- An, K. G. (2001). Hydrological significance on interannual variability of cations, anions, and conductivity in a large reservoir ecosystem, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 34(1), 1-8. [Korean Literature]
- Cho, Y. H., Park, S. Y., Na, J. M., Kim, T. W., and Lee, J. H. (2019). Hydrological and ecological alteration of river dynamics due to multipurpose dams, *Journal of Wetlands Research*, 21(5), 16-27. [Korean Literature]

- Choi, K. S., Han, M. S., Kang, D. W., and Ko, M. H. (2020). Fish community characteristics in the Gyeongan stream, a tributary of the Han river drainage system, Korea, *Korean journal of environment and ecology*, 34(2), 142-156. [Korean Literature]
- Dou, M., Li, G., and Li, C. (2015). Quantitative relations between chemical oxygen demand concentration and its influence factors in the sluice-controlled river reaches of Shaying river, China, *Environmental monitoring and assessment*, 187(1), 4139.
- Han River Flood Control Office. (2019). *Water resources management information system (WAMIS)*, <http://www.wamis.go.kr/> (accessed Apr. 2020).
- Han, S. Y., Kwak, S. J., and Yoo, S. H. (2008). Valuing environmental impacts of large dam construction in Korea: An application of choice experiments, *Environmental Impact Assessment Review*, 28(4-5), 256-266.
- Home, A. J. and Goldman, C. R. (1994). *Limnology*, McGraw-Hill International editions, 2nd, Biological Science Series, New York, 1-576.
- Ji, D., Wells, S. A., Yang, Z., Liu, D., Huang, Y., Ma, J., and Berger, C. J. (2017). Impacts of water level rise on algal bloom prevention in the tributary of Three Gorges Reservoir, China, *Ecological Engineering*, 98, 70-81.
- Kang, K. H. and Lee, W. S. (2015a). Construction project of Yeongju multi-purpose Dam, *Water for Future*, 48(3), 63-70. [Korean Literature]
- Kang, K. H. and Lee, W. S. (2015b). Introduction for eco-friendly project of Yeongju multi-purpose Dam, *Water for Future*, 48(9), 72-77. [Korean Literature]
- Kent, R., Belitz, K., and Burton, C. A. (2005). Algal productivity and nitrate assimilation in an effluent dominated concrete lined stream 1, *Journal of the American Water Resources Association*, 41(5), 1109-1128.
- Kim, D. H., Kim, W., Kim, E. S., Ock, G. Y., Jang, C. L., Choi, M. G., and Cho, K. H. (2020). Applications and perspectives of fluvial biogeomorphology in the stream management of South Korea, *Ecology and Resilient Infrastructure*, 7(1), 1-14. [Korean Literature]
- Kim, D. W., Min, J. H., Yoo, M., Kang, M., and Kim, K. (2014). Long-term effects of hydrometeorological and water quality conditions on algal dynamics in the Paldang dam watershed, Korea, *Water Science & Technology: Water Supply*, 14.4, 601-608.
- Kim, J. W., Lee, H. W., Lee, Y. S., and Choi, J. H. (2020). A study on the water quality relationship between continuous dam discharge and downstream in North Han river, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 36(2), 89-97. [Korean Literature]
- Ko, M. H., Han, M. S., and Kweon, S. M. (2020). Distribution status and extinction threat evaluation of the Korean endemic species, *Iksookimia yongdokensis* (Pisces: Cobitidae), *Korean Journal of Ichthyology*, 32(1), 1-7. [Korean Literature]
- Kwak, S., Bhattra, B. D., Kim, E., Lee, C., Lee, H., and Heo, W. (2012). Characteristics of non-point pollution discharge on stormwater runoff from lake Doam watershed, *Korean journal of limnology*, 45(1), 62-71. [Korean Literature]
- Lee, C., Hamm, S., Cheong, J., Kim, K., Yoon, H., Kim, M., and Kim, J. (2020). Contribution of nitrate-nitrogen concentration in groundwater to stream water in an agricultural head watershed, *Environmental Research*, 184, 109313.
- Lee, C. J., Kim, D. G., Hwang, S. Y., Kim, Y. J., Jeong, S. J., Kim, S. H., and Cho, H. G. (2019). Dataset of long-term investigation on change in hydrology, channel morphology, landscape and vegetation along the Naeseong stream (II). *Ecology and Resilient Infrastructure*, 6(1), 34-48. [Korean Literature]
- Lee, C. J., Kim, D. G., Ji, U., and Kim, J. S. (2019). Dataset of long-term monitoring on the change in hydrology, channel morphology, landscape and vegetation along the Naeseong stream (I), *Ecology and Resilient Infrastructure*, 6(1), 23-33. [Korean Literature]
- Lee, G. R. (2017). Altitude changes of riverbeds in Naeseong river before and after Yeongju dam construction, *Journal of the Korean Geomorphological Association*, 24(1), 13-24. [Korean Literature]
- Lee, H. W. and Choi, J. H. (2009). Temporal analysis of trends in dissolved organic matter in Han river water, *Environmental Engineering Research*, 14(4), 256-260.
- Lee, Y. S. and Kim, H. J. (2016). Assessment of water quality impact by submerged plants in the newly impounded dam reservoir, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, 17(6), 579-587. [Korean Literature]
- Luo, Z., Shao, Q., Zuo, Q., and Cui, Y. (2020). Impact of land use and urbanization on river water quality and ecology in a dam dominated basin, *Journal of Hydrology*, 584, 124655.
- Lutz, D. S. (1995). Gas supersaturation and gas bubble trauma in fish downstream from a midwestern reservoir, *Transactions of the American Fisheries Society*, 124(3), 423-436.
- Ministry of Environment (ME). (2013). *Standard methods for the examination of water contaminants* (2013 revision), Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (ME). (2014). *Water environment management plan for Naeseong stream mid-watershed*, Daegu Regional Environmental Office, Ministry of Environment.
- Ministry of Environment (ME). (2019). *Water Environment Information System (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr/> (accessed Apr. 2020).
- Na, E. H., Park, S. Y., Kim, J. H., Im, S. S., and Kim, G. H. (2015). A study on spatial and temporal patterns of water quality in the middle area of the Nakdong river, *Korea, Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(6), 723-731.
- Ock, G. H., Choi, M. K., and Park, H. G. (2019). Temporal adjustment of channel geometry and spatial changes in riverbed materials along the downstream channels of large dams in the Geum River basin, *Ecology and Resilient Infrastructure*, 6(4), 287-294. [Korean Literature]
- Oh, E. H., Lim, H. S., Ahn, G.W., Lee, H. H., Park, J. S., and

- Yang, S. I. (2015). The characteristics of TOC, COD/BOD on Youngsan river basin, *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis*, 18(1) 38-48.
- Schmutz, S. and Sendzimir, J. (2018). *Riverine ecosystem management, science for governing towards a sustainable future*, aquatic ecology series, ISBN 978-3-319-73249-7, Springer, 1-571.
- Schwierzke-Wade, L., Roelke, D. L., Brooks, B. W., Grover, J. P., Valenti and Jr, T. W. (2011). *Prymnesium parvum* bloom termination: role of hydraulic dilution, *Journal of Plankton Research*, 33(2), 309-317.
- Seo, A., Lee, K., Kim, B., and Choung, Y. (2014). Classifying plant species indicators of eutrophication in Korean lakes, *Paddy Water Environment*, 12(Supp. 1), S29-S40.
- Thomann, R. V. and Mueller, J. A. (1987). *Principles of surface water quality modeling and control*, Harper Collins Publishers Inc. New York, 1-644.
- Withers, P. J. A. and Jarvie, H. P. (2008). Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review, *Science of the Total Environment*, 400, 379-395.
- Xia, X., Zhang, S., Li, S., Zhang, L., Wang, G., Zhang, L., and Wang, J., and Li, Z. (2018). The cycle of nitrogen in river systems. sources, transformation, and flux, *Environmental Science Processes & Impacts*, 20(6), 863-891.
- Zarfl, C., Lumsdon, A. E., Berlekamp, J., Tydecks, L., and Tockner, K. (2015). A global boom in hydropower dam construction, *Aquatic Sciences*, 77(1), 161-170.
- Zhang, Y., Xia, J., Liang, T., and Shao, Q. (2010). Impact of water projects on river flow regimes and water quality in Huai River Basin. *Water Resources Management*, 24(5), 889-908.