

## 다목적댐 건설에 따른 하천의 생태 및 수문환경 변화

조연화·박서연·나종문·김태웅\*·이주헌<sup>†</sup>

중부대학교 토목공학과  
\*한양대학교 건설환경공학과

## Hydrological and Ecological Alteration of River Dynamics due to Multipurpose Dams

Yean-Hwa Cho·Seo-Yeon Park·Jong-Moon Na·Tae-Woong Kim\*·Joo-Heon Lee<sup>†</sup>

*Department of Civil Engineering, Joongbu University*

*\*Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University*

(Received : 05 October 2019, Revised: 21 November 2019, Accepted: 21 November 2019)

### 요약

자연적 기후변화와 댐 건설로 인한 인위적 수문환경의 변화로 인하여 하천의 유황(flow regime) 변화가 발생하며, 이러한 유황의 변화는 하천의 생태계뿐만 아니라 하천의 물리적 구조와 어류서식처 등에도 심각한 변화를 야기한다. 본 연구에서는 감천유역의 부항댐 건설로 인하여 나타난 수문특성변화와 동시에 하천의 생태건강성 및 수질, 하천단면 변화를 분석하였다. 감천의 유황 변화를 정량적으로 파악하기 위해 수문변화지표(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)에 의한 분석 결과, HA(Hydrologic Alteration)가 대부분  $\pm 1$  이상으로 댐 건설 후 하천생태계에 다양한 변화가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 생태건강성등급 및 수질은 각 요소마다 상이한 반응이 나타났으며, 하천의 하상 및 단면의 경우에는, 댐 건설 후에 하상 단면의 저하가 뚜렷하게 나타났다. 본 연구의 성과는 하천의 유황 변화에 의한 하천생태계의 변화를 평가하기 위한 효율적인 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 수문변화지표(IHA), 유황, 하천 단면, 하천 생태계, RVA

### Abstract

Alteration in the flow regime of rivers are caused by natural climate change and the changes in anthropogenic hydrological environment due to dam construction. These changes in flow regime cause serious changes not only in the fresh water ecosystems of the rivers but also in the physical structures and fish habitats of the streams. In this study, the alteration in the hydrological characteristics of the Gam river basin due to Buhang dam construction and the changes in ecological health condition, water quality, and river cross-section were analyzed. As a result of analysis by indicators of hydrologic alteration (IHA) to quantitatively change the flow regime of Gam river, HA (Hydrologic Alteration) is more than  $\pm 1$  and various changes have occurred in the river ecosystem after Buhang dam construction. In addition, ecological health condition and water quality showed different response for each element, and in the case of riverbeds and channel cross-sections, the degradation of channel bed was obviously monitored after dam construction. The results of this study are expected to be used as an efficient method for evaluating changes in stream ecosystems caused by stream regime changes.

Key words : Channel cross section, Flow regime, IHA(Indicator of Hydrologic Alteration), River ecosystem, RVA(Range of Variability Approach)

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang, Korea  
E-mail: leejh@joongbu.ac.kr

- Cho, Yean Hwa Department of Civil Engineering, Joongbu University / Graduate student (ghk5095@naver.com)
- Park, Seo Yeon Department of Civil Engineering, Joongbu University / Ph.D. candidate (bin\_t@naver.com)
- Na, Jong Moon Department of Civil Engineering, Joongbu University / Graduate student (najongmoon1108@naver.com)
- Kim, Tae Woong Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University / Professor (twkim72@hanyang.ac.kr)
- Lee, Joo Heon Department of Civil Engineering, Joongbu University / Professor (leejh@joongbu.ac.kr)

# 1. 서 론

최근 4대강 사업의 종료 후에도 국가 및 지방하천 개발이 지속됨에 따라서 과거 단순한 이수 및 치수 목적의 하천개발사업이 아닌 담수 생태계와의 조화가 대두되고 있다. 하지만, 기후변화와 인위적 하천개발로 인해 급격한 하천 생태환경의 변화가 발생되고 있으며, 이러한 변화로 인해 하천의 자연성이 심하게 훼손되고 있는 상황이다. 생태계 변화 원인은 크게 기후변화에 의해서 발생하는 자연적 원인과 댐과 같은 하천구조물에 의한 인위적 하천환경변화를 들 수 있다. 기후변화로 인해 유역의 강수량이 변화하고 하천유황의 변화를 야기한다. 또한, 인위적 하천환경변화는 댐이나 보와 같은 하천 구조물 건설을 예로 들 수 있으며, 댐 건설로 인한 댐 하류 방류량 조절로 인하여 하천유황의 변화가 발생한다.

하천유황의 장기적 변화는 하천생태계에 여러 가지 영향을 미치며 특히, 하천유량의 규모(Magnitude)별, 발생시기(Timing), 발생빈도(Frequency), 지속기간(Duration) 및 변화율(Rate of Change)과 같은 유황 특성의 변화는 식생뿐 아니라 하천의 구조, 어류서식처 등에도 심각한 변화를 야기한다(Poff et al., 1997). 따라서 하천의 유황 특성과 하상변동을 분석하는 일은 하천구조물 설계 및 운영, 하천관리, 하천 복원 과정에 매우 중요한 정보를 제공한다(Boulton, 2001; Shin et al., 2008).

하천의 유황변화와 수생태계에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 대표적인 방법 중 하나인 수문변화지표(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)법은 하천 및 수생태계와 관련된 수문학적 연구, 생태학적 연구, 환경유량 연구 등의 다양한 분야에 적용되었다(The Nature Conservancy, 2009).

수문변화지표법을 활용한 국외 연구로는 Lin et al.(2017), Djiby et al.(2017), González-Villela et al.(2018) 등의 연구가 있다. Lin et al.(2017)는 중국 주강삼각주 지역의 기후변화와 저수지 운영으로 인한 유황변화를 수문변화지표법을 활용하여 정량적으로 제시하였다. Djiby et al.(2017)는 수문변화지표법을 사용하여 Guiers 호수의 흐름 패턴을 정량화하였으며, González-Villela et al.(2018)는 Conchos 강의 기후변화와 댐 건설에 따른 수문변화를 평가하기 위해 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)와 수문변화지표법을 활용하였다. 세 가지 연구 모두 수문변화지표의 변동성을 중요시하며, 분석결과에서 저수지 및 댐 운영에 의해 호수와 강의 수문학적 특성이 크게 영향을 받은 것으로 나타났다.

국내학자들에 의한 유관연구로는 Yoon(2017), Hong et al.(2019) 등의 연구가 있고 기후변화를 고려하여 미래 기후변화 시나리오를 활용한 연구가 주로 이루어지고 있다. Yoon(2017)은 고삼저수지유역의 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 적용하여 기후변화에 따른 유황변화를 분석하고 수문변화지표법을 통한 환경유량지표 분석을 실시하여 기후변화에 따른 유황변화가 수생태계에 미치는 영향을 전망하였다. Hong et al.(2019) 또한 RCP 8.5 기후변화 시나리오와 수문변화지표법을 활용하여 환경유량지표군을 분석하였으며, 분석한 환경유량지표군의 특성과 River2D 모형을 이용해 어류 물리서식처 해석을 통해

미래 생태환경 변동이 클 것으로 제시하였다.

최근 들어서 기후변화 및 하천의 개발로 인한 하천의 자연성 훼손이 심각해지면서 수생태계 관점의 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 국내의 경우에는 댐건설 및 하천 개발에 따른 유황변화의 정량적 평가와 동시에 생태 및 수질변화, 하도변화를 분석한 생태학과 수문학이 연계된 생태수문학적 고찰과 연구는 다소 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 김천부항댐 건설을 기준으로 기상변화와 수문특성변화를 정량적으로 분석하고 김천의 생태건강성 및 수질, 하천단면 관측자료를 통해 댐 건설 후 김천유역의 수문학적 특성 및 생태학적 특성변화를 분석하고자 한다.

# 2. 연구방법

## 2.1 연구대상유역 및 분석자료

본 연구에서는 댐 건설에 따른 수문특성 및 생태적 변화를 살펴보기 위해 낙동강 1차 지류인 김천을 대상으로 하였다. 김천부항댐은 김천의 지류인 부항천에 위치하고 김천 상류에서 합류한다. 또한 2002년 착공하여 2013년 12월 준공되었고 댐 높이는 64m, 총 저수용량은 54.3백만<sup>3</sup>이다. 김천부항댐 건설에 따른 김천의 유황변화를 확인하기 위해 댐 준공 시점인 2014년을 기준으로 댐 건설 전 기간(2007~2013년)과 댐 건설 후 기간(2014~2018년)의 일유량을 이용하여 분석하였다. 수문자료의 통계학적 분석 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 최소 30년 이상의 수문기상 자료가 필요하나 자료의 관측 및 취득 문제로 인해 “국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)”에서 제공하는 2007년부터 2018년도까지 12년(댐 건설 전 7년, 댐 건설 후 5년)의 일유량 자료를 수집하였다.

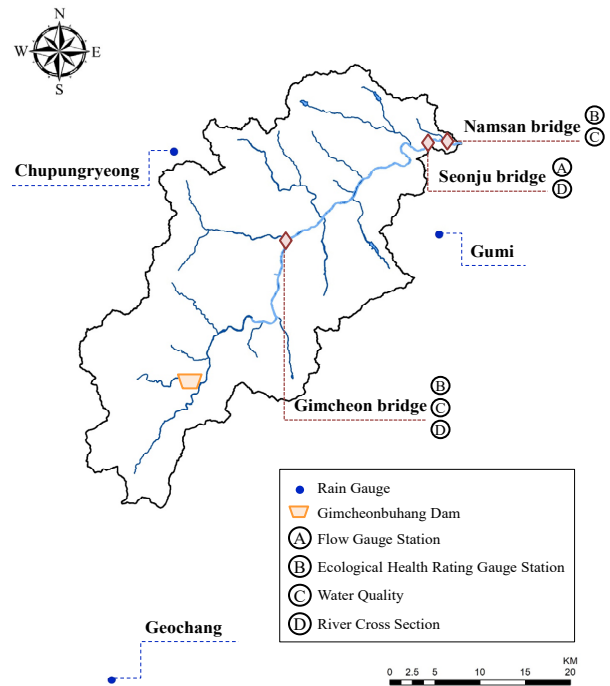


Fig. 1. Study area and location map of hydro-meteorological gaging stations

Table 1. Informations for hydro-meteorological data

Data type	Name of Gaging Station	Organizations	Data Period (year)	
			Pre-Dam	Post-Dam
Water level	• Seonju bridge	Ministry of Environment	2007~2013	2014~2018
Ecological health rating	• BGamcheonB5 (Namsan bridge) • BGamcheonB4 (Gimcheon bridge)		2009~2013	2014~2016
Water quality	• Gamcheon2-1 (Namsan bridge) • Gamcheon1 (Gimcheon bridge)		2007~2013	2014~2019
River cross section	• Seonju bridge • Gimcheon bridge	Korea Institute of Hydrological Survey	2007~2013	2014~2018
Rain Gauge	• Chupungryeong • Gumi • Geochang	Korea Meteorological Administration	1975~2018	

본 연구에서 사용한 관측지점 및 관측소를 Fig. 1과 같이 도시하였다. 일유량은 선주교 수위관측소 자료(2007~2018년)를 사용했으며, 생태건강성등급은 BGamcheonB5(남산교), BGamcheonB4(김천교) 지점 자료(2009~2016년)를 수질은 Gamcheon2-1(남산교), Gamcheon1(김천교) 지점 자료(2007~2019년)를 사용하였다. 하천 단면은 선주교 및 김천교 지점 자료(2007~2018년)를 사용하였으며, 강수량 자료는 추풍령, 구미, 거창 관측소 자료(1975~2018년)를 사용하였다(Table 1).

## 2.2 유역의 자연적인 기상변화 분석

대상유역의 분석 기간 동안 발생한 홍수 및 가뭄 등의 기상학적 변화 추세를 파악하기 위해 기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)의 종관기상관측(Automated Surface Observing System, ASOS)에서 제공하는 1975년부터 2018년까지 강수량 자료를 활용하여 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 산정하였다. SPI는 강수량 자료를 활용하여 특정 기간에 따른 강수 확률을 나타내는 지수로서(McKee et al., 1993, 1995), 임의 기간의 강수량 자료를 누적하여 확률 분포에 따라 적용 후 정규 분포로 변환하여 임의 기간의 평균 SPI를 0으로 표현한다(Edwards, 1997). 즉, 강수량이 평균치보다 큰 경우 SPI는 양수로 나타나고 작은 경우 음수로 나타난다(WMO, 2012).

특정 시간단위의 SPI는 각 시간단위에 따라 다양한 분야에 활용 가능하다. 1개월 및 3개월과 같은 SPI의 경우 단기간의 강수 부족으로 인한 가뭄 평가에 활용되며, 6개월 및 9개월은 중장기 가뭄 평가, 12개월 등과 같이 지속기간이 긴 SPI의 경우 장기 가뭄을 평가하는데 효율적이다(Hong, 2019; Lee et al., 2015).

Table 2. Classification of dry and wet condition by SPI

SPI	Category
≥ 2.0	Extremely moisture
1.5 to 1.99	Severely moisture
1.0 to 1.49	Moderately moisture
-0.99 to 0.99	Approximately normal
-1.0 to -1.49	Moderately dry
-1.5 to -1.99	Severely dry
≤ -2	Extremely dry

본 연구에서는 SPI의 지속기간 6개월로 설정하여 댐 건설 전후의 기상학적 변화 추이를 비교하였다. 또한, 두 기간의 SPI6의 차이를 정량화하여 제시하기 위해 R-index를 다음과 같이 계산하였다.

$$R = \frac{h1 - h0}{h1 + h0} \times 100 \quad (1)$$

여기서, h0는 댐 건설 전 기간(2007년~2013년)의 각 SPI 구간에 속하는 SPI6 빈도이고, h1은 댐 건설 후 기간(2014년~2018년)의 각 SPI 구간에 속하는 SPI6 빈도이다.

## 2.3 유역 수문환경변화 분석

본 연구에서는 김천부항댐 건설에 따른 감천의 유황변화를 분석하기 위해 IHA(Indicators of Hydrologic Alteration)에 의한 분석기법(TNC, 2009)을 이용하였다. IHA는 일유량 자료를 통계적으로 분석하고 인위적 이용 및 토지 이용 등의 변화에 따른 유황변화와 그로 인한 영향을 수문변화지표군(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)의 매개변수와 환경유량지표군(Ecological Flow Component, EFC)의 매개변수로 분리하여 제시한다.

### 2.3.1 수문변화지표군(IHA, Indicators of Hydrologic Alteration)

수문변화지표군 매개변수는 크게 다섯 가지 그룹으로 구분되며, 월유량 중앙값, 지속기간에 따른 유량 최댓값 및 최솟값, 유량 최댓값 및 최솟값 발생일, Low 및 High pulse 개수와 지속기간, 유량 증감률과 변곡점 개수로 분류된다.

수문변화지표군의 경우 분석된 각 매개변수의 변화 정도를 정량적으로 표현하기 위해 HA(Hydrologic Alteration)를 Low RVA category(0 ~ 33%), Middle RVA category(33 ~ 67%), High RVA category(68 ~ 100%)로 구분하며, 식 2와 같이 계산한다. 이때 Category를 분류하는 방법을 RVA(Range of Variability Approach)라고 하며, 경계값은 댐 건설 전 각 매개변수 자료의 33%와 67%를 기준으로 하였다.

$$HA = \frac{(\text{Observed frequency} - \text{Expected frequency})}{\text{Expected frequency}} \quad (2)$$

여기서, Observed frequency는 특정 범위에 속하는 기준 기

간 이후의 유량 빈도이고 Expected frequency는 특정 범위에 속하는 기준 기간 이전의 유량 빈도이다. 본 연구에서 Observed frequency는 댐 건설 후 유량빈도, Expected frequency는 댐 건설 전 유량빈도로 설정하였다. 즉, HA가 양의 값이면 댐 건설 전보다 댐 건설 후의 유량빈도가 증가하였음을 의미하고 HA가 음의 값이면 댐 건설 후의 유량빈도가 감소하였음을 의미한다. 또한 HA의 절댓값이 크면 댐 건설 후 변화가 크다는 것을 나타낸다.

2.3.2 환경유량지표군(EFC, Ecological Flow Component)

환경유량지표군 매개변수는 크게 다섯 가지 그룹으로 구분되며, 극치갈수량(Extreme low flow), 저수량(Low flow), 풍수량(High flow pulses), 소규모 홍수(Small floods), 대규모 홍수(Large floods)로 분류된다. 모든 일유량은 다섯 가지 분류 중 하나에 속하며 분류 기준은 생태학적으로 반응을 가져오는 과학적 판단을 근거하여 결정한다(Richter et al., 1996; Richter et al., 1997).

본 연구에서 환경유량지표군의 분류 절차는 Fig. 2와 같다. 일유량 중앙값을 기준으로 저수량과 높은 흐름(High flow)으로 나눈 후 중앙값보다 작은 경우 10% 이하는 극치갈수량, 10% 이상은저수량으로 분류하며, 중앙값보다 크고 75% 이상

인 경우 2년 빈도 사상은 소규모 홍수, 10년 빈도 사상은 대규모 홍수로 분류한다. 또한 중앙값보다 크고 75% 이하인 경우 증감률을 기준으로 분류한다.

2.4 유역의 수생태 변화 분석

감천 유역의 수생태의 변화를 정량적으로 평가하기 위해 환경부 “물환경정보시스템”에서 제공하는 생물측정망 측정결과를 활용하였다. 생물측정망의 생태건강성평가등급은 부착돌말류, 저서성 대형무척추동물, 어류, 식생, 서식 및 수변환경으로 분류되며 각 분류에 따른 건강성 평가방법은 국립환경과학원의 평가지침을 따른다.

부착돌말류의 경우 대상 하천의 대표 조사구간을 선정(Fig. 1)하여 조사 및 채집 후, 출현 종의 상대밀도, 종의 오염민감도, 종의 지표 값 등을 산정하고 산정된 값을 이용해 부착돌말영양지수(Trophic Diatom Index, TDI)를 산출한다.

저서성 대형무척추동물은 대상 하천의 대표 조사구간을 선정하고, 채집 후 얻어진 개체수를 단위면적당 개체수로 환산한 값을 기준으로 군집지수 및 저서동물지수 (Benthic Macroinvertebrate Index, BMI)를 산정한다.

어류는 어류 출현종수 및 출현 개체수, 조사구간의 우점종

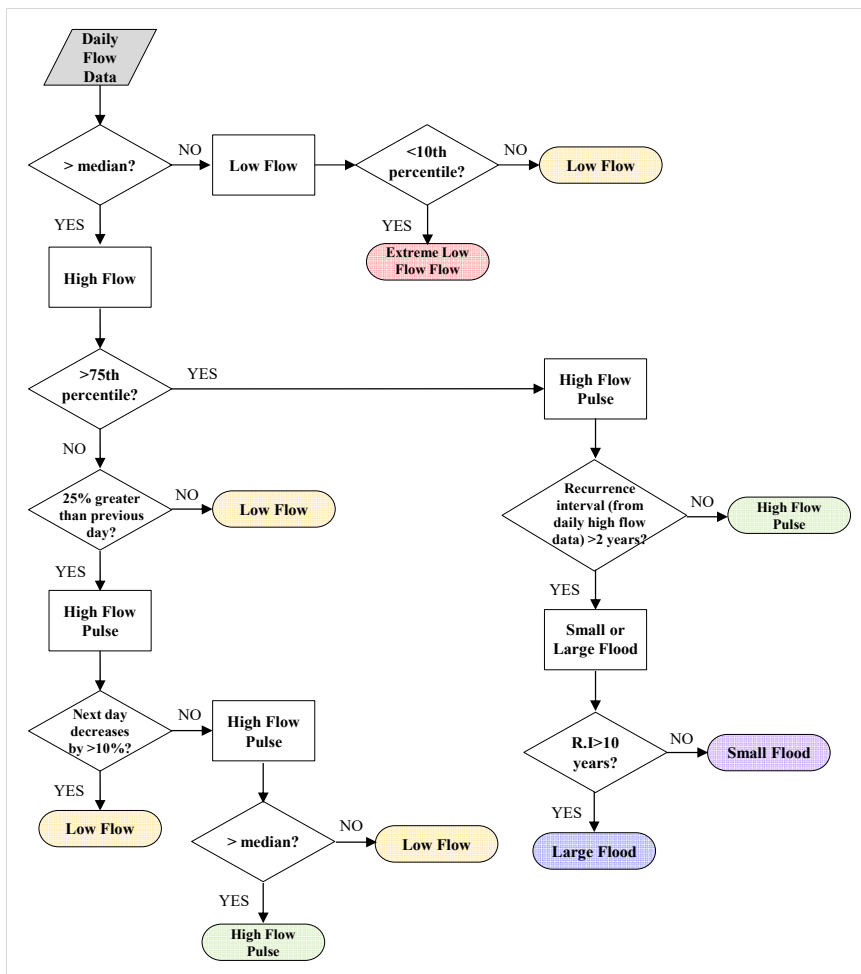


Fig. 2. Flow chart for EFC calculation algorithm in IHA (Hersh and Maidment, 2006)

Table 3. Classification of ecological health condition of rivers based on Trophic Diatom Index, Benthic Macro invertebrate Index and Fish Assessment Index

Class	Ecological Health Condition	Trophic Diatom Index (TDI)	Benthic Macro invertebrate Index (BMI)	Fish Assessment Index (FAI)
A	Extremely good	90 ≤ ~ ≤ 100	80 ≤ ~ ≤ 100	80 ≤ ~ ≤ 100
B	Good	70 ≤ ~ < 90	65 ≤ ~ < 80	60 ≤ ~ < 80
C	Moderately	50 ≤ ~ < 70	50 ≤ ~ < 65	40 ≤ ~ < 60
D	Bad	30 ≤ ~ < 50	35 ≤ ~ < 50	20 ≤ ~ < 40
E	Extremely Bad	0 ≤ ~ < 30	0 ≤ ~ < 35	0 ≤ ~ < 20

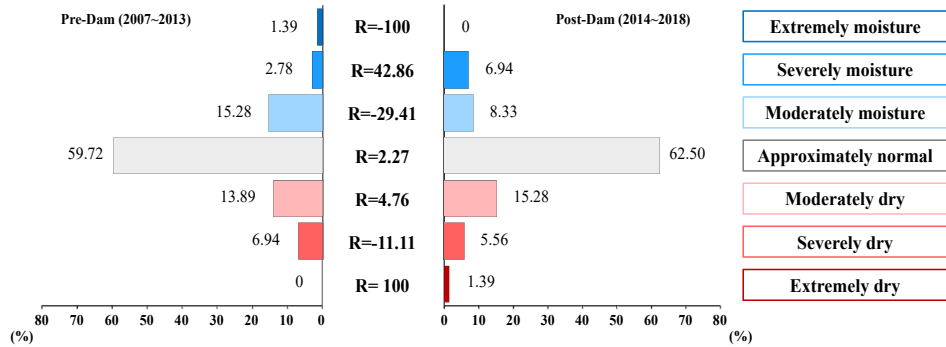


Fig. 3. Analysis of natural climate changes before and after the Buhang dam construction using SPI6 (Changes in moisture condition based on monthly precipitation during 2007-2018)

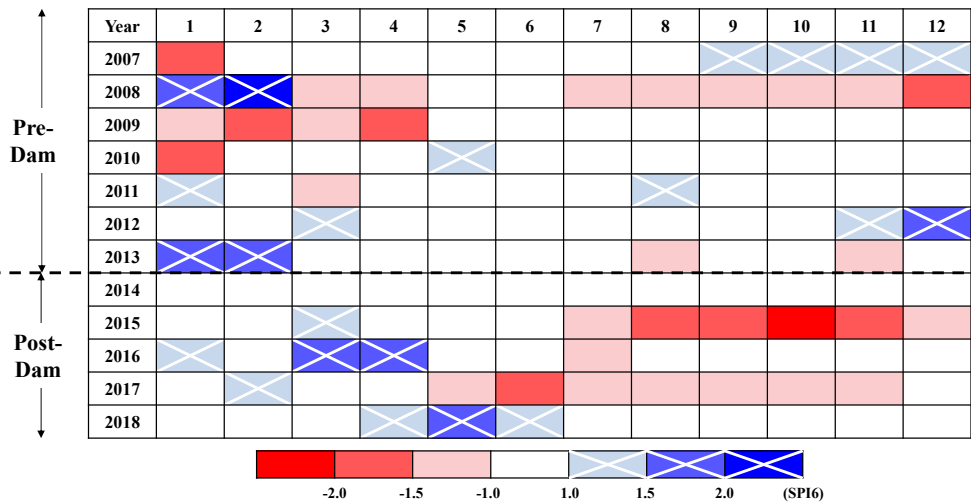


Fig. 4. Analysis of monthly meteorological drought condition before and after the Buhang dam construction using SPI6 (2007-2018)

및 점유율을 기준으로 평가하며, 합산된 평가항목의 합으로 어류생물지수(Fish Assessment Index, FAI)를 산정한다.

본 연구 대상지역의 경우 생물측정망에서 조사된 식생의 자료가 적고 서식 및 수변환경의 경우 2012년 평가지침이 변경됨에 따라 댐 건설에 따른 수생태 변화 분석에서 제외하였다.

### 3. 하천환경변화 분석결과

#### 3.1 감천유역의 자연적 기상 변화

댐 건설 전후(2007년~2018년)의 감천유역의 홍수 및 가뭄발생과 같은 기상학적 변화 정도를 분석하기 위해 SPI6와 SPI에

따른 Moisture condition(Table 2)을 활용하여 R-index를 산정하였다(Fig. 3.). 댐 건설 후를 기준으로, 습윤상태의 Extremely moisture와 Moderately moisture는 감소하였으며 Severely moisture는 증가하였다. 보통상태인 Approximately normal은 댐 건설 후 증가한 것으로 나타났다. 건조상태를 나타내는 Moderately dry, Extremely dry는 댐 건설 전에 비해 증가하였으며, Severly dry는 감소하였다.

한편, 댐 건설 전, 후의 월별 기상변화를 좀 더 자세하게 분석하기 위하여 Fig. 4와 같은 월별 SPI6을 산정하여 댐건설 전 및 후에 대하여 나타내었다. 댐 건설 전에는 2008년 3월부터 발생한 가뭄이 2009년 4월까지 영향을 미쳤으며, 댐 건설 후에는 2015년과 2017년에 매우 심한 가뭄이 발생했던 것으로

나타났다. 특히, 2015년 10월의 SPI6는 -2 이하로 Extremely dry에 속하는 심각한 가뭄이 나타났다(Fig. 4).

연구에 활용된 기상관측기록이 비교적 짧은 한계가 있지만, 부항댐 건설 전후의 감천유역의 자연적 기상변화는 크지 않은 것으로 분석되었으며, 건설전후에 극한의 홍수사상과 극심한 가뭄사상이 한 번씩 발생한 것으로 나타났다.

### 3.2 감천유역의 인위적 수문환경변화

#### 3.2.1 수문변화지표군(IHA, Indicators of Hydrologic Alteration)

감천유역의 수문변화지표군 분석 결과 Fig. 5와 같이 댐 건설 전, 후 월유량의 패턴 변화를 확인할 수 있다. 특히, 댐 건설 후 홍수조절 및 하천유지용수 방류량 조절로 인해 비홍수기 기간의 경우 유량은 증가하였으며 홍수기 기간의 경우 유량이 감소하는 것으로 나타났다. 댐 건설에 따른 월 유량 패턴의

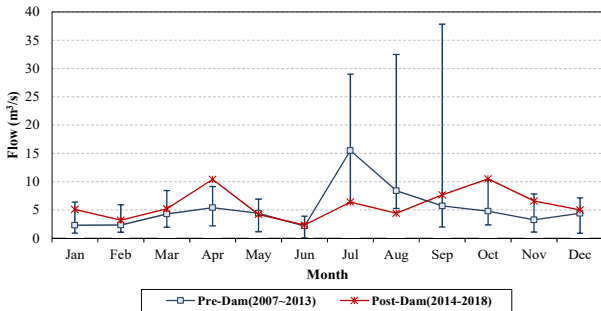


Fig. 5. Monthly flow change and RVA(Range of Variability analysis) before and after the Buhang dam construction

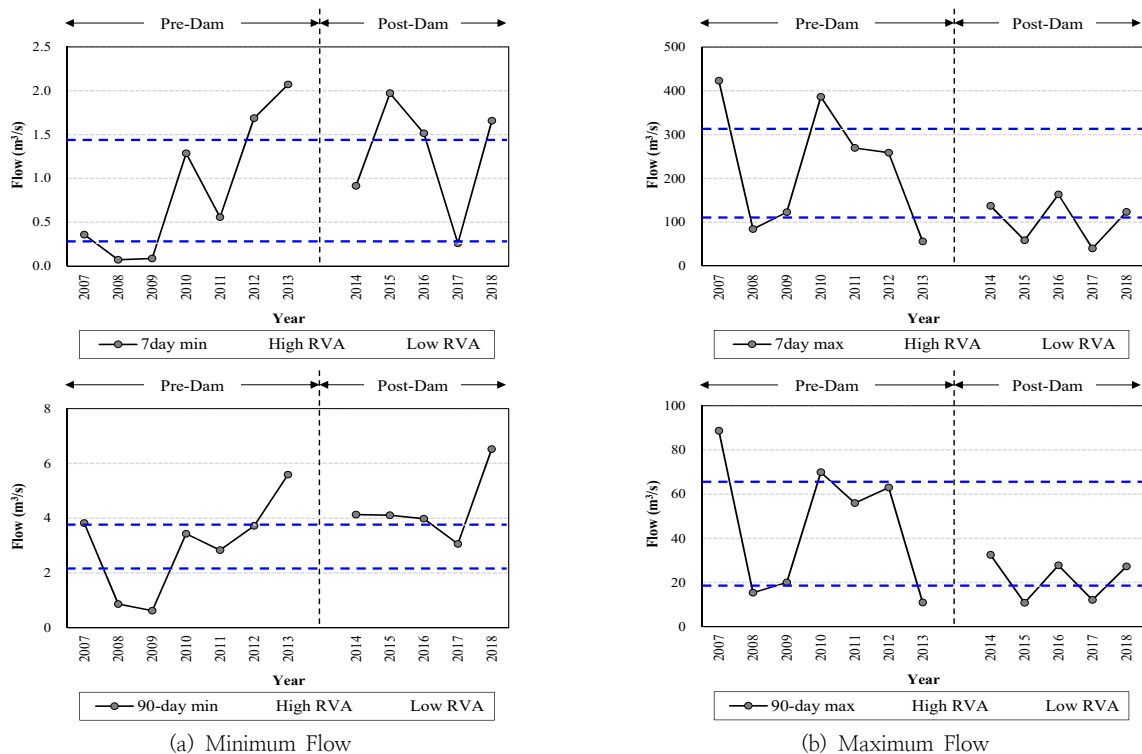


Fig. 6. Maximum and minimum flow change and RVA before and after the Buhang dam construction

변화로 수생생물의 서식처 가용성 변화와 같은 생태계에 변화가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 6은 지속기간별(7일 및 90일) 최소유량과 최대유량에 대한 유량변동을 RVA를 통해 나타냈으며 Fig. 7은 수문변화 지표군의 식(2)에 의한 HA 산정결과다. Fig. 6 및 Fig. 7에서와 같이 1, 3, 7, 30, 90일 지속기간별 최소유량은 모두 댐 건설 후 증가하였으며, 그 중 지속기간 7일인 최소유량이 댐 건설 전 0.56m<sup>3</sup>/s에서 댐 건설 후 1.51m<sup>3</sup>/s로 댐 건설 전에 비해 171.76% 증가한 것으로 나타났다. 반대로 1, 3, 7, 30, 90일 지속기간별 최대유량은 모두 감소하였으며, 그 중 지속기간 1일 최대유량은 댐 건설 전 662.9m<sup>3</sup>/s에서 댐 건설 후 240.3m<sup>3</sup>/s로 댐 건설 전에 비해 63.75% 감소한 것으로 나타났다. 특히, Fig. 7에서와 같이 지속기간 90일 최소유량의 High RVA category의 HA 값이 +1.8로 크게 나타나 자연하천에서 유지되고 있던 생물 간의 균형이 무너지고 서식지의 구조가 변형될 것으로 예상된다(TNC, 2009).

세 번째는 최소유량 발생일, 최대유량 발생일로 최소유량은 61일, 최대유량은 4일 지체되었다. 61일 지체된 최소유량 발생일의 High RVA category의 HA는 +1.8로 High RVA category에 속하는 빈도가 댐 건설 후 크게 증가하였음을 알 수 있다. 즉, 최소유량 발생일이 크게 변하여 생물의 생애주기가 변화될 것으로 예상된다(TNC, 2009). 네 번째로는 Low pulse의 개수와 High pulse의 지속기간의 변화는 없지만 Low pulse의 지속기간과 High pulse의 개수는 증가하는 것으로 나타난다. 다섯 번째로는 유량의 증감률로서, Fall rate가 증가하고 Rise rate는 감소한 것으로 나타났다.

Fig. 7은 수문변화지표군 매개변수 HA 산정결과이며, 3가지

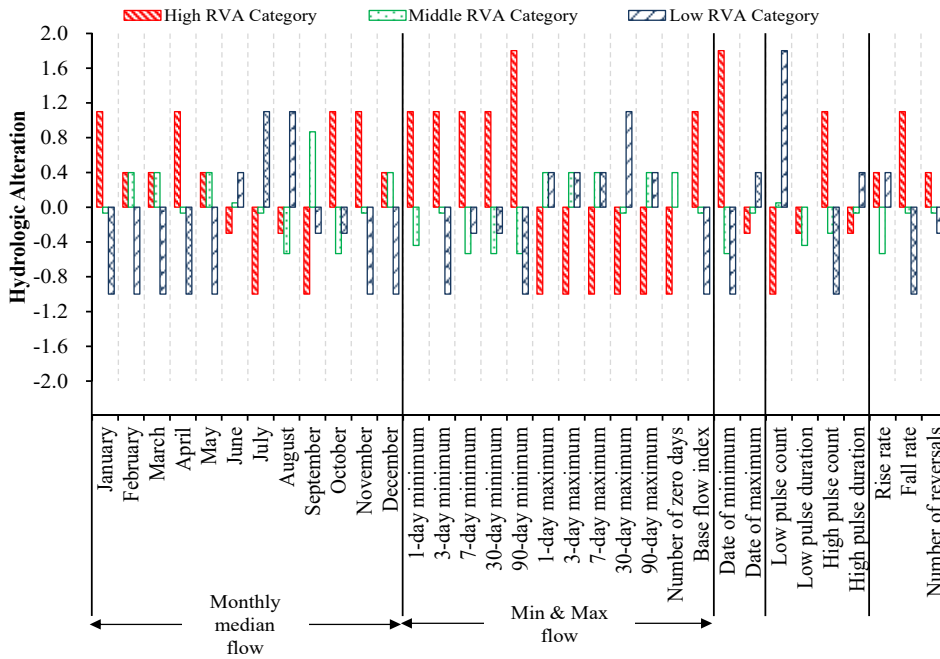


Fig. 7. Hydrologic alteration of Gam river for 3 RVA categories(High, Middle, Low) for 5 groups

의 RVA category에서의 변동성을 보여준다. 감천유역의 매개 변수는 HA가 ±1 이상 값을 가지는 경우가 거의 대부분이며, 지속기간별 최소유량의 증가, 최대유량의 감소가 뚜렷한 변화로 나타났다. 또한 월평균유량, 홍수와 갈수의 발생빈도, 지속기간 등도 댐건설 후에 크게 변한 것으로 분석되었다. 따라서 댐 건설 전후의 변동성을 분석하면 댐 건설 후 하천생태계에 다양한 변화가 발생하였을 것으로 판단된다.

3.2.2 환경유량지표군(EFC, Ecological Flow Component)

감천유역의 환경유량지표군에 대한 분석 결과, 2007년부터 2018년까지의 환경유량과 관련된 유량의 변화는 Table 4와

같다. 첫 번째로는 극치갈수량으로서 댐건설 후에 190% 증가한 것으로 나타났다. 두 번째는 월별 저수량(Monthly low flows)으로서, 댐 건설 후 7.87% 증가하였지만 1월과 10월의 유량 증가를 제외하면 댐 건설 전과 거의 비슷한 규모로 나타난다. 세 번째는 풍수량으로 발생빈도는 57.14% 증가하였고 첨두 유량(Peak flow)은 13.73% 감소하였다. 첨두 유량 감소로 인해 하상기질의 크기가 감소하고 장기간의 저유량 후 정상적인 수질상태로 회복하는 능력 또한 감소할 것으로 판단된다(TNC, 2009). 네 번째는 소규모 홍수와 대규모 홍수로 댐 건설 후에 댐에 의한 홍수조절효과로 인하여 소규모 홍수와 대규모 홍수의 발생빈도가 0으로 나타났다. 홍수가 사라지면서

Table 4. Change of ecological flow components(Extreme low flow, low flow, high flow pulse, small flood and large flood) of Gam river

EFCs type	Hydrologic parameters	pre	post	Variation
Extreme Low Flows	Low flow (minimum flow during event, m <sup>3</sup> /s)	0.25	0.725	▲
	Duration (days)	8	4.25	▼
	Timing (Julian date of peak flow)	169	163.8	▼
	Frequency (number)	1	0	▼
Monthly Low Flows	January (m <sup>3</sup> /s)	2.3	3.8	▲
	February (m <sup>3</sup> /s)	2.3	3.2	▲
	March (m <sup>3</sup> /s)	4	3.9	▼
	April (m <sup>3</sup> /s)	4.95	4.1	▼
	May (m <sup>3</sup> /s)	3.7	2.95	▼
	June (m <sup>3</sup> /s)	2.6	2.25	▼
	July (m <sup>3</sup> /s)	3.9	4.4	▲
	August (m <sup>3</sup> /s)	4.25	4.1	▼
	September (m <sup>3</sup> /s)	4.55	5	▲
	October (m <sup>3</sup> /s)	4.4	6.225	▲
	November (m <sup>3</sup> /s)	5.2	5.5	▲
	December (m <sup>3</sup> /s)	4.55	4.95	▲

EFCs type	Hydrologic parameters	pre	post	Variation
High Flow Pulses	Peak flow (maximum flow during event, m <sup>3</sup> /s)	15.3	13.2	▽
	Duration (days)	4	4	-
	Timing (Julian date of peak flow)	194	189	▽
	Frequency (number)	7	11	▲
	Rise rates (m <sup>3</sup> /s/day)	8.8	4.7	▽
	Fall rates (m <sup>3</sup> /s/day)	-2.35	-1.96	▲
small Floods	Peak flow (maximum flow during event, m <sup>3</sup> /s)	756.2	-	-
	Duration (days)	56	-	-
	Timing (Julian date of peak flow)	224	-	-
	Frequency (number)	0	0	-
	Rise rates (m <sup>3</sup> /s/day)	52.18	-	-
	Fall rates (m <sup>3</sup> /s/day)	-23.72	-	-
Large Floods	Peak flow (maximum flow during event, m <sup>3</sup> /s)	1205	-	-
	Duration (days)	66	-	-
	Timing (Julian date of peak flow)	261	-	-
	Frequency (number)	0	0	-
	Rise rates (m <sup>3</sup> /s/day)	33.38	-	-
	Fall rates (m <sup>3</sup> /s/day)	-38.63	-	-

식생의 분포 및 개체수 조절과 대량 서식지 생성이 어려우며, 먹이 및 서식지 구조물의 유입이 감소할 것으로 판단된다 (TNC, 2009).

### 3.3 댐건설에 따른 수생태 및 하천지형의 변화

#### 3.3.1 댐하류의 수생태 및 수질환경 변화

김천부항댐 건설에 따른 감천유역의 생태 및 수질의 변화를 파악하기 위해 김천교(BGamcheonB4, BGamcheon1)와 남산교(BGamcheonB5, BGamcheon2-1) 지점의 생태건강성평가 등급과 수질 자료를 활용하였다.

생태건강성평가등급은 “물환경정보시스템”의 BGamcheonB4 및 BGamcheonB5 지점 2009~2016년 자료를 사용하였다. 부착돌말류 건강성등급(TDI)의 경우에는 BGamcheonB4 지점에서 댐 건설 전 보다 등급이 하락하였고, BGamcheonB5 지점의 경우 연도별로 등급의 차이가 크게 변화하는 것을 보였다. 저서성 대형무척추동물의 생물등급은 BGamcheonB4 지점에서 댐 준공 직후 E 등급까지 하락 후 회복하였으며, BGamcheonB5 지점에서 거의 변동이 없다. 어류의 건강성등급은 BGamcheonB4 및 BGamcheonB5 지점 모두 C 또는 D 등급으로 변동이 거의 없는 것으로 나타난다.

댐 건설 전후의 수질환경 변화를 비교하기 위해 목표 수질을 기준으로 “물환경정보시스템” 수질측정망의 2007~2019년 자료를 분석하였다. 목표수질은 “감천 중권역 물환경관리계획 (2013)”에서 제시된 값을 적용하였으며, T-P는 0.11(mg/l), BOD는 1.0(mg/l)으로 설정하였다.

Gamcheon1의 측정자료 분석결과 댐 건설 후 기간에서 BOD 최댓값과 최솟값 차가 크게 나타났으며, 댐 건설 후 BOD가 증가하는 것으로 나타났다. TP는 댐 건설 전부터 감소하는 경향을 가지고 2009년부터 목표 T-P 이하로 나타났다.

Gamcheon2-1의 BOD는 댐 건설 후 최댓값과 최솟값의 차가 크게 나타나며, 댐 건설 후 증가하였지만 2015년부터 감소하여

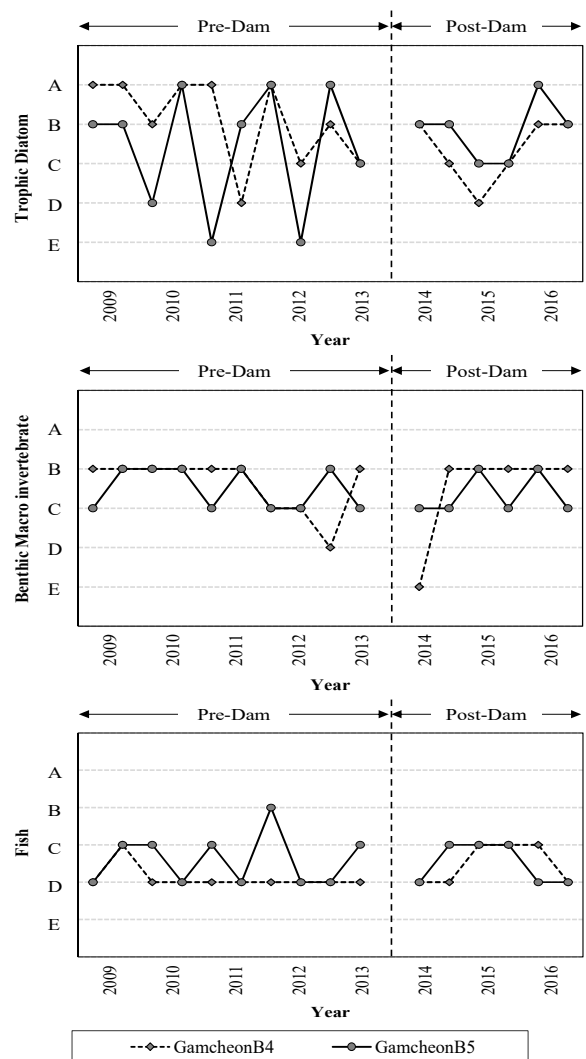


Fig. 8. Changes in ecological health condition(Trophic Diatom, Benthic Macro invertebrate, Fish) and water quality(TP and BOD) at BGamcheonB4 and BGamcheonB5 station of Gam river



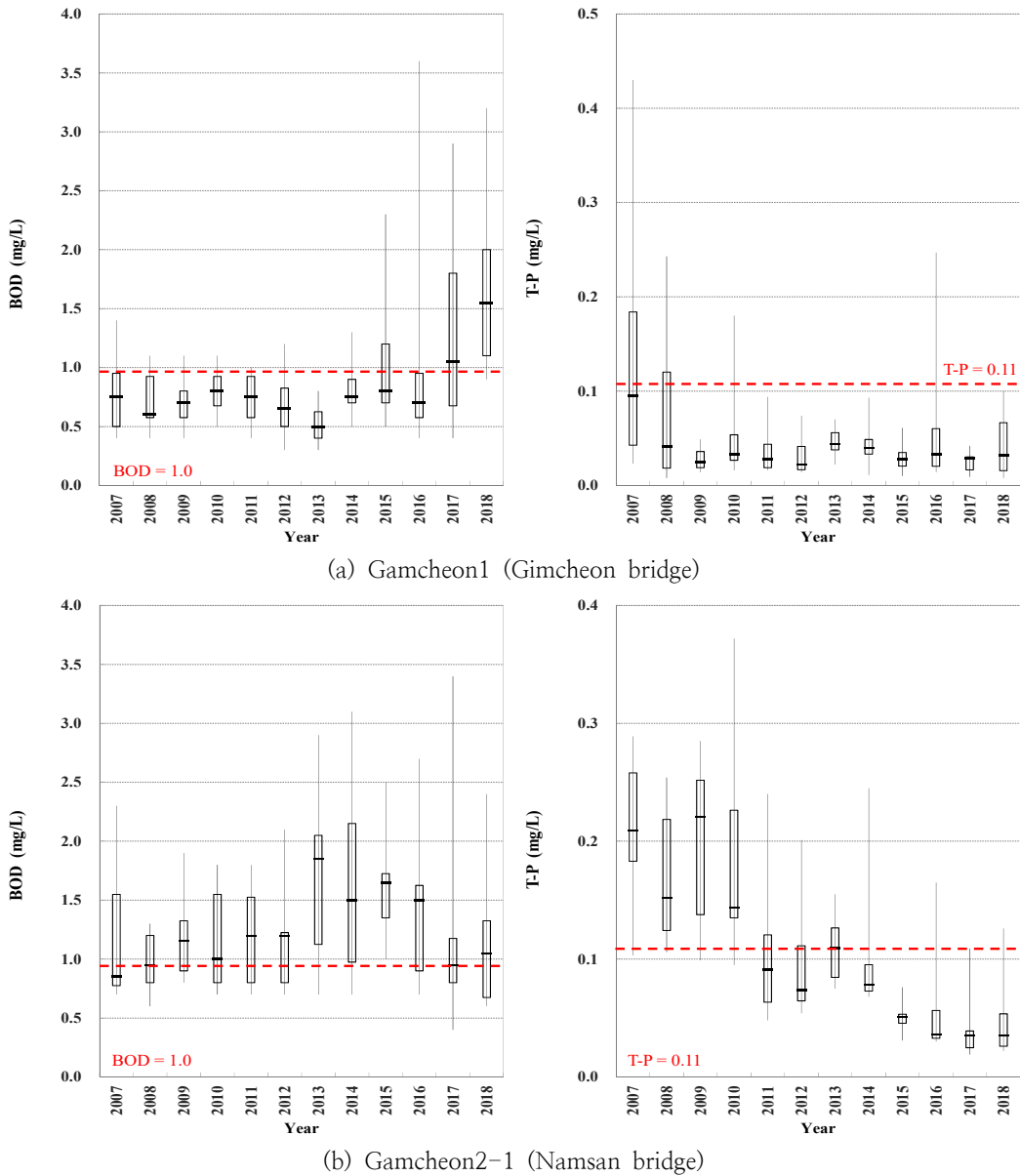


Fig. 9. Changes in water quality (TP and BOD) at Gamcheon1 (Gimcheon) and Gamcheon2-1 (Namsan) station of Gam river

2017년에는 목표 BOD에 만족하였다. T-P의 경우 2011년부터 감소하는 경향을 보였으며, 2011년에는 목표 T-P를 달성하였다. Gamcheon1과 Gamcheon2-1 모두 댐건설 후 BOD의 최댓값과 최솟값의 차가 증가하고, T-P는 감소하는 경향을 보였다.

3.3.2 댐하류 하천지형의 변화

댐 하류의 하천 지형의 변화를 살펴보기 위해 “한국수자원조사기술원”에서 제공한 감천유역의 김천교 및 선주교 지점의 하천단면 측량자료를 활용하였다. 김천교 지점은 2009년도부터 2018년까지 유량측정에서 실시된 단면 측량자료를 활용하였고, 선주교 지점은 2007년부터 2018년까지의 유량측정에서 실시된 단면 측량자료를 활용하였다(Fig. 10).

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이, 선주교와 김천교 2개 지점의

단면에서 댐 건설 후에 하상 침식 현상이 뚜렷이 나타났다. 댐 하류의 하상고 저하는 댐으로 인해 많은 유사가 차단되어 댐 하류로는 미량의 유사만 방출되어 유발된다(Brandt, 2000).

4. 결 론

댐이나 보와 같은 하천의 횡단구조물 건설로 인해 하천 수생태계의 변화가 나타나고 있으며, 이러한 문제를 가져오는 원인은 하천구조물 건설에 따른 유황변화에서 찾을 수 있다. 본 연구에서는 감천유역의 김천부항댐 건설에 따른 수문환경변화를 정량적으로 평가하여 하천 생태계에 미치는 영향을 분석하고자 하였으며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 댐 건설 전, 후의 자연적인 기상변화를 확인하기 위해 SPI6를 적용하여 R-index를 분석하였다. R-index 분석 결과,

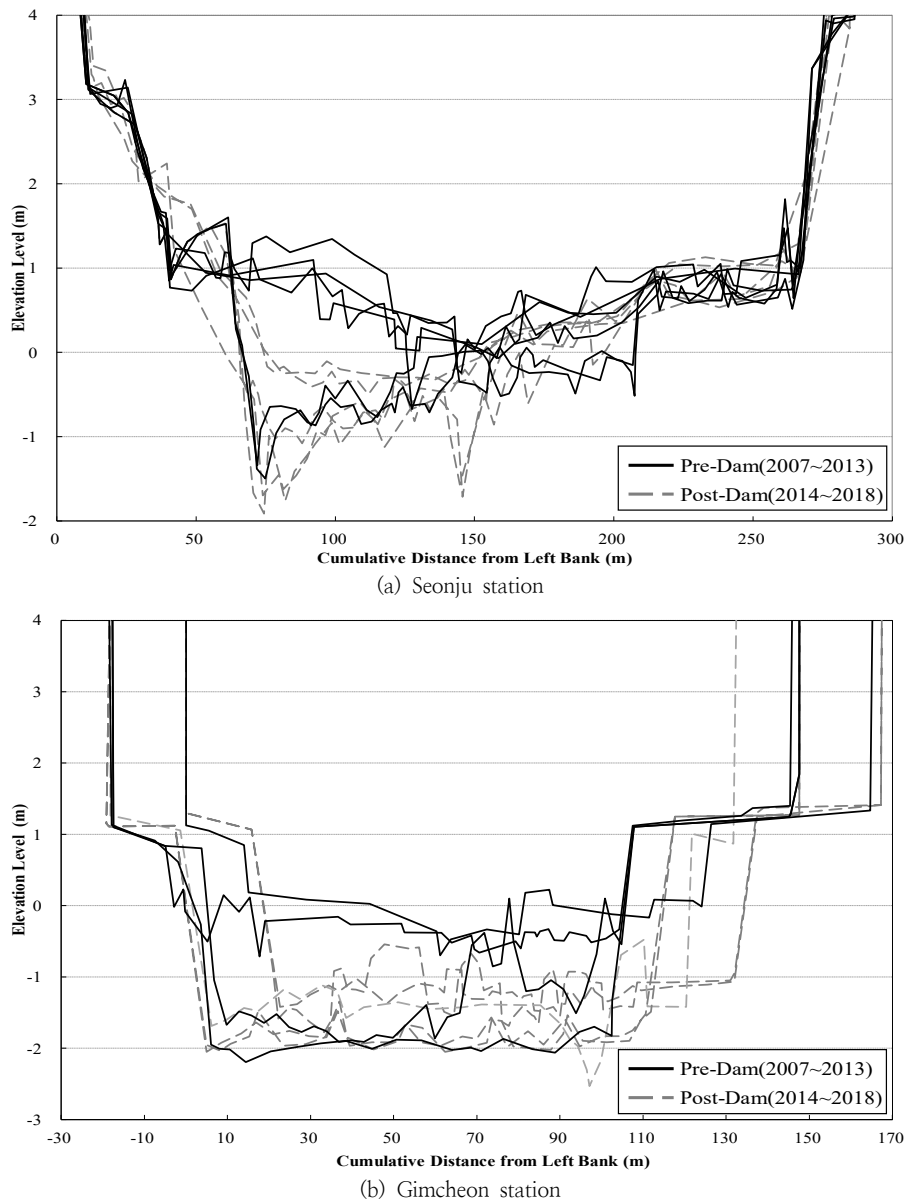


Fig. 10. River cross section changes of Seonju and Gimcheon station in Gam river

댐 건설 이전과 댐 건설 이후의 홍수와 가뭄의 발생정도는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

2) 감천유역의 수문환경변화를 분석하기 위해 IHA를 활용하여 수문변화지표군(HA)과 환경유량지표군(EFC)을 산정하였다. HA 분석결과 대부분  $\pm 1$  이상으로 댐 건설 후 하천생태계에 다양한 변화가 발생한 것으로 판단되었으며, 환경유량지표군 분석 결과, 극치 갈수량은 190% 증가함에 따라 수생 및 강가 생태 군락의 외래종 유입, 제한된 하도구간내 포식자 먹이 밀도 등의 영향을 미칠 수 있으며, 댐건설로 인하여 소규모 홍수와 대규모 홍수가 사라지는 현상으로 어류의 이동 및 산란, 범람원 내의 식물 분포 및 개체수, 수생 및 강가 생태 군락 등의 생태계에 적지 않은 변화를 야기할 수 있을 것으로 예상된다.

3) 생태건강성평가등급 분석 결과 B<sub>GamcheonB4</sub>과 B<sub>GamcheonB5</sub>

에서의 부착돌말류 생물등급은 연도별로 크게 변화하였으며, 저서성 대형무척추동물의 생물등급 및 어류는 댐 건설 후에도 건강성등급의 변화가 없는 것으로 나타났다.

수질 변화 분석 결과 Gamcheon1과 Gamcheon2-1 BOD는 댐 건설 후 기간에 최댓값과 최솟값의 차이가 증가하였으며, T-P는 댐 건설 후에 뚜렷하게 감소하는 경향을 보인다.

4) 댐 건설에 따라 김천교와 선주교 지점 모두 하천의 침식이 뚜렷하게 발생하였으며, 이는 댐 건설로 인해 상류에서 내려오는 유사가 차단되어 하상고가 저하되는 현상이 나타나는 것으로 판단된다.

유황변화가 생태계에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기는 어려우며, 댐 운영, 용수 이용, 하천 관리 등 수자원 관리를 통한 하천유량의 조절 또한 쉽지 않은 게 사실이다. 본 연구에서도 댐의 건설로 인한 하천유황의 변화는 정량적으로 뚜렷한

변화를 추정할 수 있었지만, 유황의 변화가 하천의 생태계와 수질환경 및 하천구조에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기는 쉽지 않았다. 하지만 하천구조물 설계시 생태계를 고려한 명확한 목표를 설정하고 댐과 같은 하천시설물의 운영에 자연 하천 유량을 고려한다면 생태 환경 변화를 최소화할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구성과는 이와 같은 자연생태계의 복원을 위한 주요한 수단으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2017R1D1A1A02018546)이며, 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음(과제번호 83070). 또한 하천단면 측량자료를 제공해주신 한국수자원조사기술원 김치형, 이대영 박사님에게도 감사드립니다.

## References

- Boulton, AJ (2001). An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis, *Freshwater Biology*, 41, pp. 469–479. [DOI:10.1046/j.1365-2427.1999.00443.x]
- Brandt, SA (2000). Classification of geomorphological effects downstream of dams, *Catena*, 40, pp. 375–401. [DOI:10.1016/S0341-8162(00)00093-X]
- Daegu Regional Environmental Office (2013), *Gamecheon water environment management plan('14~'15)*.
- Djiby, S, Diekkruger, B, Gaye, A, and Gaye, AT (2017). Assessment of Hydrologic Alteration within Ecosystem in a Sahalian Shallow Lake: Lake Guiers, Senegal, *Modern Environmental Science and Engineering*, Research Center for Limnology, Indonesian Institute of Sciences, Indonesia, pp. 200–216.
- Edwards, DC (1997). *Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales*, Master's Thesis, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- González-Villela, R, Martínez, MJM, and Sepúlveda, JSS (2018). Effects of climate change on the environmental flows in the Conchos River (Chihuahua, Mexico), *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(4), pp. 431–440. [DOI:10.1016/j.ecohyd.2018.10.004]
- Hersh, ES and Maidment, DR (2006). *Assessment of hydrologic alteration software*, CRWR Online report 06–11, Bureau of Engineering Research and University of Texas at Austin.
- Hong, HP (2019). *Drought Risk Assessment Considering Future Socio-Hydrologic Condition and Climate Change*, Master's Thesis, The University of Joongbu. [Korean Literature]
- Hong, I, Kim, JS, Kim, KH, Jeon, HS (2019). Assessment of Climate Change Impact on Flow Regime and Physical Habitat for Fish, *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, 39(1), pp. 33–34. [Korean Literature] [DOI:10.12652/Ksce.2019.39.1.0033]
- Korea Institute of Hydrological Survey (KIHS) (2017), [http://www.kihs.re.kr/index\\_new.php](http://www.kihs.re.kr/index_new.php)
- Lee, JH, Jang, HW, Kim, JS, Kim, TW (2015). Quantitative Characterization of Historical Drought Events in Korea—Focusing on Drought Frequency Analysis in the Five Major Basins—, *J. Korea Water Resources Association*, 48(12), pp. 1011–1021. [Korean Literature] [DOI:10.3741/JKWRA.2015.48.12.1011]
- Lin, K, Lin, Y, Xu, Y, Chen, X, Chen, L, Singh, VP (2017). Inter- and intra-annual environmental flow alteration and its implication in the Pearl River Delta, South China, *J. of Hydro-environment Research*, 15, pp. 27–40. [DOI:10.1016/j.jher.2017.01.002]
- McKee, TB, Doesken, NJ, and Kleist, J (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, 17(22), pp. 179–183.
- McKee, TB, Doeskin, NJ, and Kieist, J (1995). Drought monitoring with multiple time scales, *In Proceedings of the 9th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, Boston, pp. 233–236.
- National Institute of Environmental Research (2016). *Biomonitoring Survey and Assessment Manual*, Ministry of Environment.
- Poff, NL, Allan, JD, Bain, MB, Karr, JR, Prestegard, KL, Richter, BD, Sparks, RE and Stromverg, JC (1997). The natural flow regime : a paradigm for river conservation and restoration, *Bioscience*, 47(11), pp. 769–784.
- Richter, B, Baumgartner, J, Wigington, R and Braun, D (1997). How much water does a river need?, *Freshwater Biology*, 37(1), pp. 231–249. [DOI:10.1046/j.1365-2427.1997.00153.x]
- Richter, BD, Baumgartner, JV, Powell, J and Braun, DP (1996). A method for assessing hydrologic alterations within ecosystems, *Conservation Biology*, 10(4), pp. 1163–1174. [DOI:10.1046/j.1523-1739.1996.10041163.x]
- Shin, KS, Jeong, SM, Lee, JH, S, P (2008). Flow characteristics and riverbed changes simulation for the upstream and downstream sections of Gongju bridge, *J. of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 8(2), pp. 119–127. [Korean Literature]
- The Nature Conservancy (TNC) (2009). *Indicators of Hydrologic Alteration. Version 7.1 User's Manual*, USA.
- Water Environment Information System (2003), <http://water.nier.go.kr/publicMain/mainContent.do>

Water Resources Management Information System (WAMIS)  
(2011). <http://www.wamis.go.kr/>  
World Meteorological Organization (WMO). (2012).  
*Standardized Precipitation Index. User Guide*. Report 1090,

Switzerland.  
Yoon, TY (2017). *A Study on Analysis of Environmental Flow  
on Agricultural Reservoir by Climate Change*, Master's  
Thesis, The University of Seoul. [Korean Literature]