

# 기후변화가 하천 유황과 어류 물리서식처에 미치는 영향 평가

홍 일\* · 김지성\*\* · 김규호\*\*\* · 전호성\*\*\*\*

Hong, Il\* · Kim, Ji Sung\*\* · Kim, Kyu Ho\*\*\* · Jeon, Ho Seong\*\*\*\*

## Assessment of Climate Change Impact on Flow Regime and Physical Habitat for Fish

### ABSTRACT

Due to the recent climate change realization (timing, rainfall pattern changes), the flow regime is changing according to the watershed. The long-term change of flow regime is causing a significant change in structure and function of aquatic ecosystems. However, there is no analysis from the viewpoint of the aquatic ecosystem including flow rate alteration and ecological characteristics as well as the climate change connection in Korea yet. Therefore, We quantitatively assessed the impact of present-future flow regime alteration due to climate change on the *Pseudopungtungia nigra* habitat in the Mankyung river and floodplain area. As a result, it was confirmed that extreme hydrological conditions such as flood and drought are intensified in the future than the present. Especially, the changes of flow regime characteristics were clarified by comparing and analyzing the magnitude, frequency, duration, rate of change, and by linking flow regime characteristics with physical habitat analysis, it could be suggested that climate change would significantly increase the risk of future ecological changes.

**Key words :** Climate change, Flow regimes, IHA, EFCs, Physical Habitat

### 초 록

최근 기후변화 현실화로 강우 발생 시기와 패턴이 변화하면서 유역에 따라 유황이 변화하고 있는 실정이다. 이로 인한 하천 유황의 장기적 변화는 수중생태계의 구조와 기능에 커다란 변화를 야기한다. 하지만 국내에서는 기후변화와의 연계성은 물론, 유량변화와 생태학적 특성을 포함한 수생태계 관점에서의 분석은 대부분 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 기후변화로 인한 현재-미래의 유황 변화가 만경강 하도와 홍수터 영역에서 감돌고기의 서식환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 그 결과, 현재보다 미래에 홍수와 가뭄 등 극한 수문 조건이 심화됨을 확인하였고, 특히 크기, 빈도, 지속시간, 시기와 변화율 등을 비교분석함으로써 유황 특성의 변화를 명확히 파악하였다. 그리고 유황 특성과 물리서식처 해석을 연계함으로써 기후변화로 인해 미래 생태환경 변동에 대한 위험성이 크게 증대될 것이라는 결과 제시가 가능하였다.

**검색어 :** 기후변화, 하천유황, 수문변화지표, 환경흐름요소, 물리서식처

\* 종신회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · hongil93@kict.re.kr)

\*\* 종신회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jisungk@kict.re.kr)

\*\*\* 종신회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · khkim1@kict.re.kr)

\*\*\*\* 교신저자 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · jhyoo202@kict.re.kr)

Received February 20, 2018/ revised December 13, 2018/ accepted January 9, 2019

## 1. 서론

기후변화로 인한 자연재해는 해마다 크게 증가하고 있으며, 전 세계적으로 홍수 및 가뭄의 강도와 빈도 증가, 지구온난화로 인한 계절적인 하천 건천화 등 많은 문제들이 대두되고 있다(Kim et al., 2005). 기후변화는 수문순환 과정에 영향을 미치며, 이는 곧 물 순환과정의 핵심요소로 설명되는 유출량(Runoff)의 변동을 초래한다. 특히, 기후변화 현실화로 강우 발생 시기와 패턴이 변화하면서 유역에 따라 유향(Flow regime)이 변화되고 있는 실정이다.

유출량은 용수 공급과 가뭄재해에 대한 이수홍수 대응 및 관리, 하천생태계 유지를 위한 환경에 영향을 미치게 된다. 특히 크기(Magnitude), 시기(Timing), 빈도(Frequency), 기간(Duration), 변화율(Rate of Change) 등 5가지 주요한 유향(Flow Regimes) 특성은 하천생태계에 작간접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Poff et al., 1997). 하천생태계와 연계된 생물 군집의 구조와 기능은 많은 부분 유향변화에 기인하며(Poff and Ward, 1989), 흐름 크기, 빈도 그리고 연중변화에 대한 변경은 수중서식처의 주요부분이 변화될 가능성을 내포한다. 결국 하천흐름은 수중생태계 건강성의 구성요소이고, 하천흐름의 장기적 변화는 수중생태계 구조와 기능에 큰 변화를 초래하게 된다. 이와 같이 유향은 하천생태계의 생물학적 구조와 기능에 중요한 역할을 하며(Richter et al., 1996), 유향 특성을 분석하고 이해하는 과정은 하천생태계의 변화를 파악하고 예측하는데 있어 매우 중요하다고 할 수 있다.

국내에서는 유향변화의 양상을 파악하기 위해 갈수량, 저수량, 평수량, 풍수량을 산정하여 비교하는 방법을 사용하고 있다(Park et al., 2008). 하지만 이와 같은 지표는 크기와 빈도만을 고려할 수밖에 없어 유향 특성을 세부적으로 이해하고 정량적으로 제시하는데 한계가 있다. 국제적으로는 수문학적 변화과정을 통계적 기법을 적용하여 정량적 지표로 계산분석하는 모형을 개발하였고, 이를 활용한 다양한 연구가 시행되고 있다(Olden and Poff, 2003). Richter et al.(1996), 미국 Nature Conservancy(2007)에서 개발한 수문변화지표(IHA, Indicators of Hydrologic Alteration, Ver.7.1)는 유향 특성의 주요 지표들을 포함하고 있으며, 하천유량이나 수위지하수위저수지 수위 등과 같은 일 수문량을 입력 자료로 이용하여 총 67개의 통계적 매개변수들로 제시할 수 있는 모형이다.

자연적 또는 인위적 유향 변화의 결과로 나타나는 서식환경 정보는 장기간의 현장조사를 통해 취득할 수 있으나 과거자료의 부재, 미래자료의 예측 등 사공간적 한계와 더불어 비효율적 측면이 발생할 수 있다. 유량증분방법론(IFIM, Instream Flow Incremental Methodology) 개념에 입각한 물리서식처 모의시스템(PHABSIM)은 물리서식처 평가 및 의사결정 수단으로 전 세계에서 널리 활용되고 있으며(Bovee, 1986; Bovee et al., 1998), 이는 유향 변화에

대한 어류 서식환경 정보를 정량적이고 효과적으로 제시할 수 있다. 최근에는 다양하게 변화하는 서식환경에서 1차원 PHABSIM 보다 정확한 수심과 유속 모의가 가능한 River2D 모형을 적용하여 어류 서식환경을 평가하는 연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있다(Lacey and Millar, 2004; De Jalón and Gortazar, 2007; Lee et al., 2012). 특히, 국내에서는 생태추천(최적)유량 산정(Kang et al., 2004; Lee et al., 2006; Oh et al., 2008; Hur et al., 2014), 특정구간(댐, 보)에서 서식환경 평가(Im et al., 2007; Kang et al., 2010; Baek et al., 2013) 등과 관련된 연구가 상당 부분 이뤄졌으나 대상유역의 유향 특성을 고려한 서식환경에 대한 연구는 미미한 상태이다. 또한 기후변화와의 연계성은 물론, 유량 변화와 생태학적 특성을 포함한 수생태계 관점에서의 분석은 대부분 이루어지지 않고 있는 실정이다(Kim et al., 2009).

따라서 본 연구에서는 기후변화로 인한 현재-미래의 유향 변화가 만경강 하도와 홍수터 영역에서 감돌고기의 서식환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다.

## 2. 연구방법

세계 각국은 미래 기후에 대한 보다 정확한 정보를 얻기 위하여 IPCC 권장 시나리오인 SRES (Special Report on Emission Scenario)기반의 GCM (General Circulation Model)과 RCM (Regional Circulation Model)을 이용하고 있으며 특히, 최근에는 고해상도 자료를 생산함으로써 국부지역에 대한 지형학적 특성을 효과적으로 모의할 수 있는 RCM 모형을 이용한 많은 연구가 진행되고 있다(Kim et al., 2010). 기상청은 IPCC 5차 평가보고서에서 새롭게 권장하는 대표농도경로(RCP, Representative Concentration Pathways)의 온실기체 배출시나리오에 따른 전지구 및 지역기후변화 시나리오를 산출하였다(NIMR, 2011).

본 연구에서는 RCP 기후변화 시나리오(RCP 8.5/6.0/4.5/2.6) 중 미래의 가장 극한사상을 예측하고 있는 RCP 8.5를 선정하였고, 고해상의 RCM과 Hybrid 축소기법(Kyoung, 2010)을 이용하여 기후변화가 고려된 일(Daily) 단위 강수량 자료를 모의하였다. 그리고 모의 발생된 일 강수 시계열 자료를 이용하여 대상 유역의 장기유출 모의를 수행하였다. 유향 특성은 현재-미래 유출량 자료에 대해 수문변화지표(IHA)를 이용하여 극히낮은흐름(Extreme Low Flows), 낮은흐름(Low Flows), 높은흐름펄스(High Flow Pulses), 작은홍수(Small Floods), 커다란홍수(Large Floods) 등 5개의 환경흐름요소(EFCs, Environmental Flow Components)를 분석하였다. 기후변화가 미치는 수생태계 영향 평가는 하도와 홍수터 영역에서 현재-미래의 유향 특성과 River2D 모형을 이용한 어류 물리서식처 해석 결과를 연계하여 분석하였다.

종합적으로 이 연구는 하천 유황과 어류 물리서식처에 대한 미래 기후변화의 영향을 평가하는 것이며, 이를 위해 총 3단계 과정으로 진행하였다(Fig. 1). 첫 번째 기후변화 시나리오를 이용한 일 유출량 추출 단계, 두 번째 수문통계 모형을 이용한 현재-미래 유황 특성 분석 단계, 세 번째 유황 특성과 물리서식처 해석을 연계한 수생태계 평가 단계이다.

### 3. 연구 대상 및 자료

대상유역의 본류 하천인 만경강은 완주군에서 발원하여 소양천, 전주천, 익산천 등의 지류를 포함하고 있으며, 유역면적 1,527 km<sup>2</sup>, 유로연장 77.4 km, 유역평균폭 19.73 km의 유역 특성을 갖고 있다. 또한 유역형상계수는 0.255이며, 유역 면적에 비해 유로연장이 긴 형태를 하고 있다. 만경강의 하상경사는 만경강 하류부 구간이 1/3,800, 중류부 구간이 1/540, 상류부 구간이 1/120로서 만경강 하류부 구간을 제외한 대부분 구간은 경사가 비교적 급하다. 유역면적의 42 %가 농경지, 40.5 %가 산림으로 이용되고 있어 토지이용

측면에서 하천 하류부 및 상류부가 명확히 구분되는 특성을 갖고 있다.

Fig. 2는 만경강 유역의 위치와 대상유역 내 위치한 관측소 현황을 나타낸 것이며, 어류 물리서식처 모의구간은 대상어종이 출현하는 만경강 중상류 구간인 봉동에서 하리까지 약 9 km의 하도 및 홍수터를 포함한다. 만경강 유역의 유출 모의를 위해 입력자료로 요구되는 일 단위 기상 시계열 자료(강우, 온도, 풍속, 일조시간, 상대습도)는 군산, 금산, 부안, 부여, 임실, 전주 등 총 6개 기상관측소를 이용하였으며, 지형학적 분석을 위한 DEM, 토지피복도, 토양도 등 지형자료는 수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 것을 이용하였다. 그리고 강우-유출 모의 매개변수 검보정은 대한 수위관측소 자료(2008년), 어류 물리서식처 모의 검보정은 봉동, 소양, 하리 수위관측소 자료(2016년)를 이용하였다.

### 4. 연구결과

#### 4.1 기후변화를 고려한 일 강수량 자료 생성

본 연구에서는 기상청에서 제공하는 RCP 8.5의 일 단위 강수량 RCM 자료를 활용하였다. 일반적으로 일 단위 강수량 RCM 자료는 실제 강수량 자료와 차이가 발생하며 특히 유출량에 큰 영향을 미치는 연 최대 일 강수량 값이 과소 추정되는 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위하여 본 연구에서는 Kyoung(2010)이 제안한 일기발생기(Weather generator)를 이용한 축소기법을 적용하였다. 이 기법은 Richardson(1981)에서 처음 제안되었으며, 농업, 수자원, 환경 분야에서 다양하게 적용되고 있다(Kyoung, 2010; Jeung et al., 2014).

일기발생기 모형의 검증은 위하여 만경강 유역의 6개 관측소의 1970~2005년 평균 월 강수량 관측값과 모형에서 추정된 자료의 평균값을 Fig. 3에 비교하였다. 비교 결과, 모형 결과와 관측값이 다소 차이가 있으나 그 차이가 비교적 작으며 관측자료의 계절성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 검증된 일기발생기 모형과 RCM 자료의 현재(1981~210), 미래(2011~2099) 월 강수량을 이용하여 일 강수량 시계열을 생성할 수 있으며, 일 강수량 자료 생산의 세부 절차 및 이론적 배경은 Kyoung et al.(2009)를 참고할 수 있다.

#### 4.2 기후변화에 따른 유출량 변화 비교

만경강 유역의 현재-미래 유출량(일 유량) 자료를 획득하기 위해 RCP 8.5 기후변화 시나리오를 고려한 장기유출 모의를 수행하였다. 장기유출 모의는 기후변화라는 불확실성 요소가 반영되므로 GIS를 이용한 물리적 특성(증발산량, 토지피복 등) 변화를 고려할 수 있으며, 매개변수 추정 과정이 쉽고 안정성이 높은 SLURP

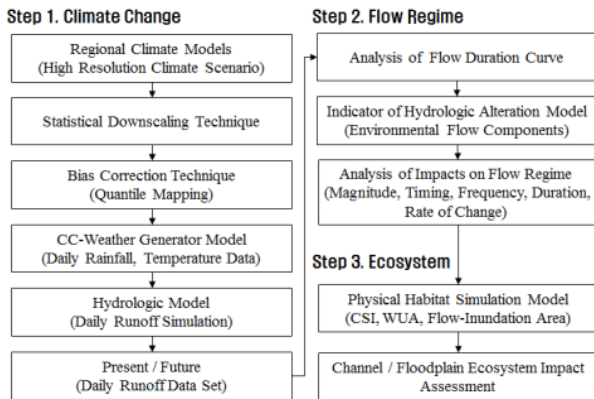


Fig. 1. Overall Scheme for Assessing Changes in Flow Regime and Physical Habitat

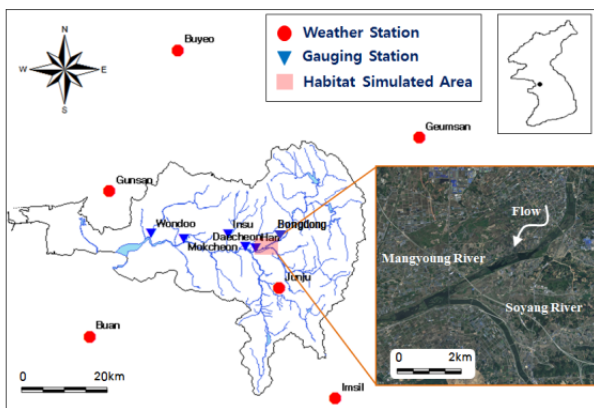


Fig. 2. Study Area in Mankyong River

기후변화가 하천 유황과 어류 물리서식처에 미치는 영향 평가

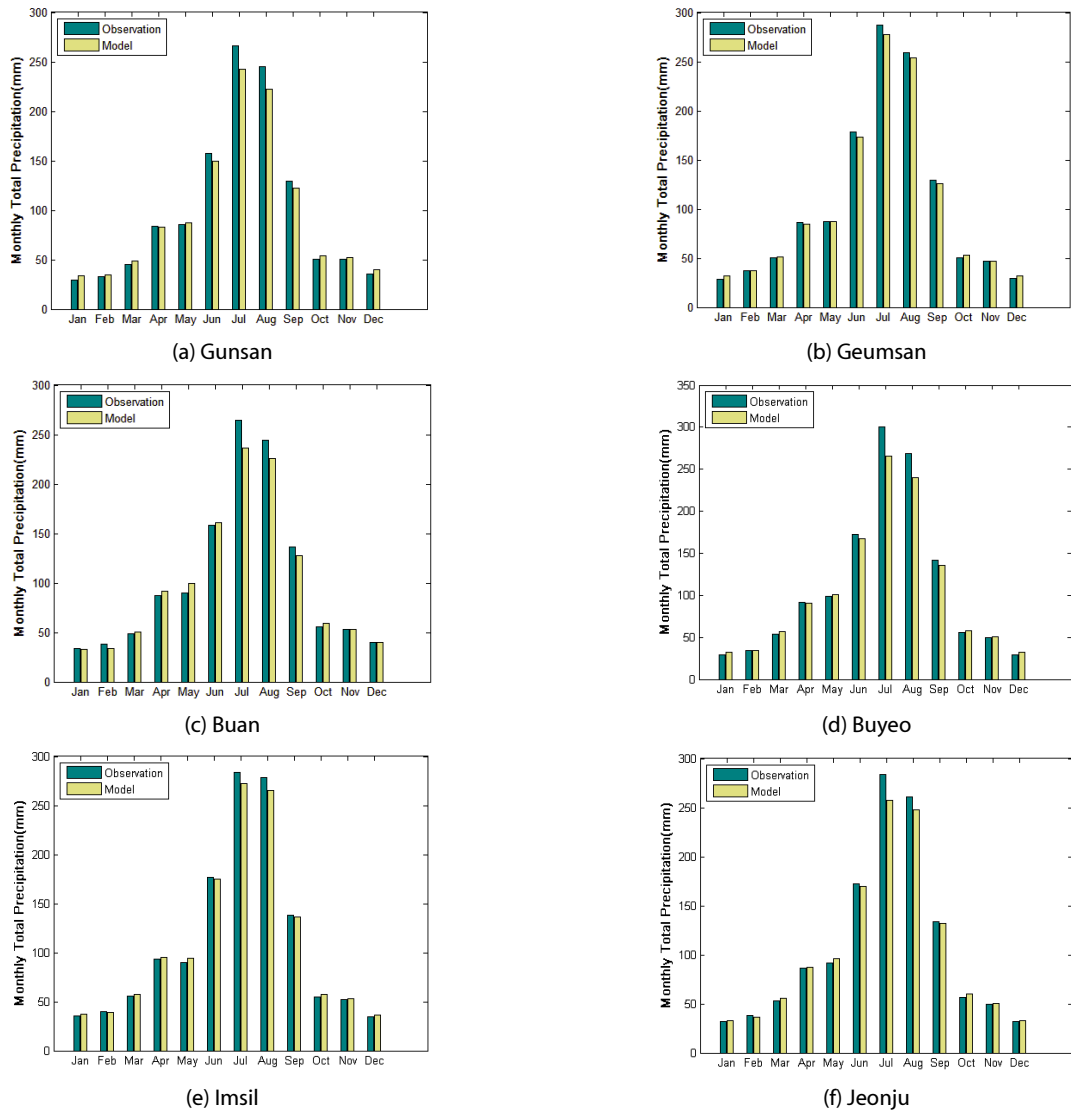


Fig. 3. Averaged Monthly Total Precipitation of Observation and Model

Table 1. Summary of Model Calibration and Verification at Daecheon Station

Contents	Calibration		Verification
	Before	After	
Simulated mean flow (m <sup>3</sup> /s)	13.34	20.84	17.66
Observed mean flow (m <sup>3</sup> /s)	19.39	19.39	21.55
Mean error (m <sup>3</sup> /s)	-6.04	1.46	-5.54
Ratio of mean error/observed mean error (m <sup>3</sup> /s)	-0.31	0.07	-0.26
Nash-Sutcliffe criterion	-1.96	0.65	0.59

(Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) 모형을 적용하였다. SLURP는 국외 뿐 아니라 국내에도 많은 연구와 사례를 토대로 적용성 검토가 이루어져 신뢰성이 확보된 모형이다.

모형의 개요와 구조에 대한 보다 자세한 설명은 Kim et al.(2003), Kim et al.(2005), Park et al.(2007), Kim et al.(2009) 등을 참고할 수 있다.

만경강 유역에 위치한 기상관측소와 각 지형자료를 SLURP 모형에 적용하여 장기유출을 모의하였으며, 최종 유출모의 지점은 대천 수위관측소로 하였다. 모형보정과 검증은 각각 대천 수위관측소 2008년 1월 1일~12월 31일까지의 유출량 자료와 2008년 1월 1일~2010년 12월 31일까지의 유출량 자료를 이용하였다. SLURP 모형 매개변수와 관련한 자세한 내용은(Kim et al., 2003; Kim, 2005)을 참고할 수 있다. Table 1의 Mean error는 평균오차를 의미하며, RMSE 평균제곱근오차로 추정 값 또는 모델이 예측한 값과 실제 환경에서 관찰되는 값의 차이를 다룰 때 사용하는 척도이다. Nash-Sutcliffe criterion는 두 자료간의 효율성을 나타낼 때 사용하며 1에 가까울수록 높은 효율성을 나타낸다. 모형 보정 전후 결과로 일 평균 계산 유출량은 관측 유출량과 거의 일치하였으며, 평균오차와 일 평균 관측 유출량의 비가 작아지는 것으로 확인되었으며, 효율계수의 경우 약 0.65로 비교적 양호한 결과라고 할 수 있다. 모형의 검증결과를 살펴보면 Nash-Sutcliffe criterion의 경우 0.59로 모의값이 관측값을 잘 모사한다고 할 수 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 SLURP 모의결과는 관측치에 대한 유출의 양과 경향을 잘 재현하고 있다.

기후변화 시나리오에 따라 추출된 일 유량 자료는 현재(1981~2010)와 미래(2011~2099) 수문기간으로 나누어 유출 변동성을

비교하였다. Fig. 5는 현재와 미래의 월별 평균 유출량(좌)과 유황곡선(우)을 나타낸 것이다. 월별 미래 유출량의 경우 현재보다 4월, 5월에 증가하고 7월, 8월, 9월에는 감소하였으며 특히, 8월 유출량 감소는 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 미래 강우패턴 변화가 유출에 시기적 변화를 유발하는 것으로 볼 수 있다. 현재와 미래 유황변동을 분석한 결과, 미래 유황곡선은 현재보다 더 완만한 형태를 보이며, 평수량은 현재보다 높은 반면 갈수량, 저수량과 풍수량은 낮아지는 것으로 나타났다.

### 4.3 수문변화지표와 환경흐름요소를 이용한 유황 특성 분석

도입부에서 언급했듯이 수문변화지표(IHA)는 기후변화 영향으로 현재와 미래의 유황 변화에 대한 정량 분석과 평가를 수행하기 위해 사용되었다. 수문변화지표는 크기(피크 유량), 시기(연중 발생), 빈도(연중 횟수), 기간(연중 발생), 변화율(수문사상의 상승률과 하강률) 등 5가지 주요한 유황 특성에 기초한다. IHA 모형에서 환경흐름요소(EFCs)는 홍수 및 가뭄과 같은 수문학적 사건을 자동으로 식별하고 확률을 계산하고자 하는 시도이며, 34개의 수문학적 파라미터(Hydrologic Flow Parameters)를 제공한다(Nature Conservancy, 2007). 그리고 환경흐름요소는 낮은 흐름, 극히 낮은 흐름, 높은 흐름 펄스, 작은 홍수, 커다란 홍수 등 5가지 흐름특성으로 구분되며,

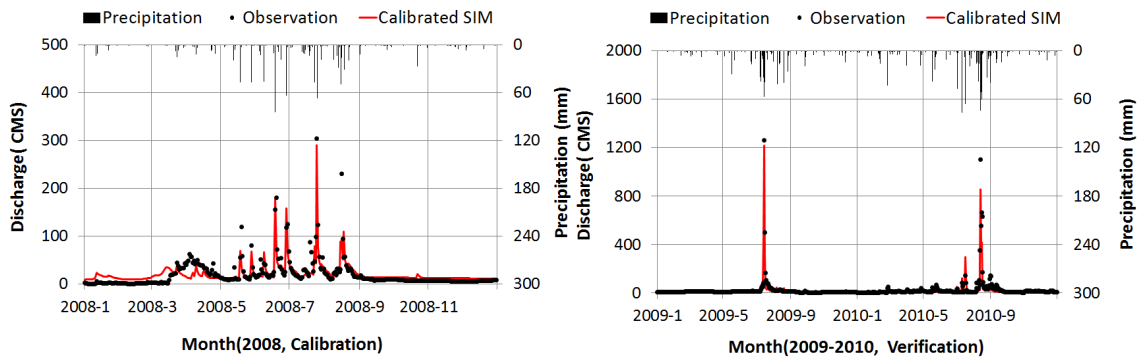


Fig. 4. Comparison with Simulated and Observed Runoff at Daecheon Station

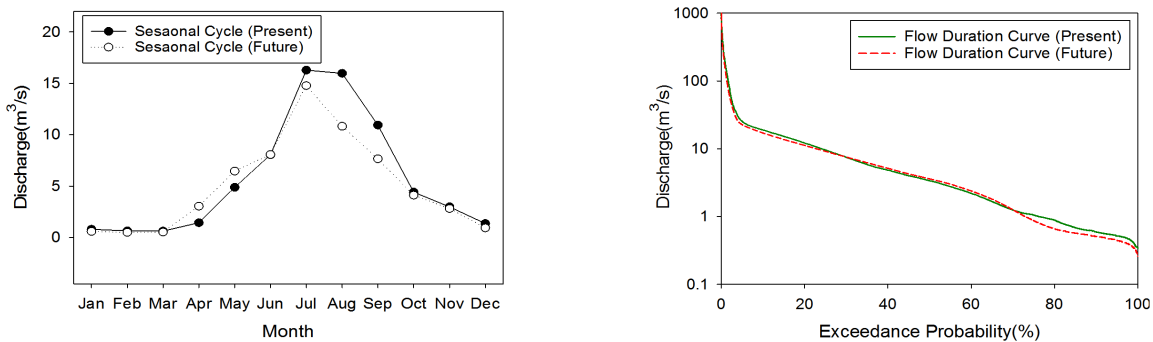


Fig. 5. Comparison of Monthly Runoff and Flow Duration Curve at Daecheon Station

해당 수문년에 대한 전체 스펙트럼으로 나타난다.

환경흐름요소(EFCs) 모델에서 수문기간 동안의 모든 일 유량은 5가지 흐름 범주 중 하나에 속하며, Fig. 6에서 제시한 알고리즘을 통해 수문 곡선을 통계 분석한다. 알고리즘은 우선적으로 모든 흐름의 50% (또는 중앙값) 유량을 기준으로 Initial High flow와

Low flow로 분리한다. 이후 극히 낮은 흐름(<10th percentile)과 높은 흐름 펄스(>75th percentile)의 임계치(threshold), 상승률과 하강률의 임계치(전날과의 차이로 인한 변화율) 그리고 재현기간 (Recurrence Interval)의 임계치(작은 홍수: 2년 빈도 사상, 커다란 홍수: 10년 빈도 사상) 등 단계별 기준에 따라 흐름을 분류한다.



Fig. 6. EFCs algorithm flow Chart (Hersh and Maidment, 2006)

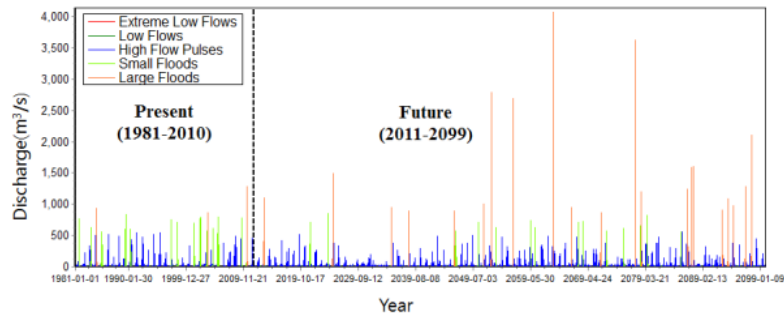


Fig. 7. Change of EFCs Under Climate Change

가령 동일한 유량이라 하더라도 전날과의 차이로 인한 변화율과 수문 이벤트에 따라 환경흐름요소의 형태는 다르게 정의될 수 있다.

Fig. 7은 기존의 수문곡선 유형을 수문변화지표를 이용하여 환경흐름요소로 통계 분석한 결과이다. 그리고 현재와 미래 수문기간에 대한 정량적 유형특성 결과는 34개의 환경흐름요소 파라미터를 분석하여 Table 2에 제시하였다. 그 결과, 연중 대부분을 차지하

는 낮은 흐름은 현재보다 미래에 8.9 % 증가할 것으로 예측되었으며, 이는 2월에서 8월 기간의 월별 낮은 흐름 증가 요인에 따른 것으로 확인되었다. 높은 흐름 펄스는 크기와 기간이 각각 10.8 %, 23.1 % 감소하였고, 빈도 및 상승률과 하강률이 각각 29.4 %, 18.2 %, 31.9 % 증가하는 것으로 나타났다. 높은 흐름 펄스가 낮은 흐름 기간에 일반적으로 나타나는 높은 수온이나 낮은 산소농도를 상당

Table 2. Predicting Results of EFCs Change According to Climate Change

EFCs type	Hydrologic parameters	Present	Future	Variation
Extreme Low Flows	Peak flow (minimum flow during event, m <sup>3</sup> /s)	0.52	0.49	▽
	Duration (days)	19	14	▽
	Timing (Julian date of peak flow)	73	68	-
	Frequency (number)	1.0	3.0	▲
Monthly Low Flows (median values of low flows during each calendar month)	January (m <sup>3</sup> /s)	0.9	0.8	▽
	February (m <sup>3</sup> /s)	1.0	1.1	▲
	March (m <sup>3</sup> /s)	1.0	1.3	▲
	April (m <sup>3</sup> /s)	1.2	1.9	▲
	May (m <sup>3</sup> /s)	3.1	3.9	▲
	June (m <sup>3</sup> /s)	2.5	5.2	▲
	July (m <sup>3</sup> /s)	7.8	7.9	▲
	August (m <sup>3</sup> /s)	7.1	7.2	▲
	September (m <sup>3</sup> /s)	6.4	6.2	▽
	October (m <sup>3</sup> /s)	4.1	3.8	▽
	November (m <sup>3</sup> /s)	3.0	2.7	▽
	December (m <sup>3</sup> /s)	1.4	1.0	▽
	Mean values of monthly low flows (m <sup>3</sup> /s)	3.3	3.6	▲
High Flow Pulses	Peak flow (maximum flow during event, m <sup>3</sup> /s)	15.5	13.8	▽
	Duration (days)	7	5	▽
	Timing (Julian date of peak flow)	159	168	-
	Frequency (number)	8.5	11.0	▲
	Rise rates (m <sup>3</sup> /s/day)	5.8	6.9	▲
	Fall rates (m <sup>3</sup> /s/day)	-1.8	-2.4	▲
Small Floods	Peak flow (maximum flow during event, m <sup>3</sup> /s)	686	680	▽
	Duration (days)	46	41	▽
	Timing (Julian date of peak flow)	218	182	-
	Frequency (number)	0.5	0.2	▽
	Rise rates (m <sup>3</sup> /s/day)	42	132	▲
	Fall rates (m <sup>3</sup> /s/day)	-29	-26	▽
Large Floods	Peak flow (maximum flow during event, m <sup>3</sup> /s)	930	1149	▲
	Duration (days)	41	47	▲
	Timing (Julian date of peak flow)	218	184	-
	Frequency (number)	0.2	0.2	-
	Rise rates (m <sup>3</sup> /s/day)	307	130	▽
	Fall rates (m <sup>3</sup> /s/day)	-36	-45	▲

부분 해소시키며, 유기물 등 영양분을 공급해주는 기능을 포함한다 (Nature Conservancy, 2007)는 측면에서 볼 때 이 결과는 수문생태학적 변동성을 가중할 것으로 판단된다. 작은 홍수는 크기, 기간, 빈도가 각각 1.0 %, 11.0 %, 60.0 % 감소한 반면, 시기가 36일 앞당겨짐에 따라 이로 인해 수생태계에 미치는 영향은 상당할 수 있을 것으로 사료된다. 극히 낮은 흐름과 커다란 홍수의 경우 크기가 각각 5.8 % 감소, 23.6 % 증가할 것으로 나타남에 따라 미래에 극한 수문조건의 강도는 보다 커질 것으로 예측된다. 또한 시기가 34일 앞당겨지고 기간과 빈도가 증가한다는 점에서는 극히 낮은 흐름과 커다란 홍수가 미래에 미치는 수문생태학적 영향은 보다 심화될 것으로 판단된다.

#### 4.4 감돌고기의 물리서식처 해석

감돌고기는 한국에서도 금강, 만경강, 웅천천 일부에서만 출현하는 고유종으로 최근 수질오염 및 댐 건설 등과 같은 하천정비 사업으로 인한 개채수 감소로 현재는 환경부 멸종위기 야생동식물 1급으로 보호되고 있다. 산란기(5~6월)에는 유속이 완만한 돌 밑이나 바위틈의 썩지 산란장에 탁란하며, 성어기는 중상류 구간의 맑은 물이 흐르는 바위와 큰 돌 바닥 위에서 10마리 이상 소단위로 무리 지어 서식하는 특성이 있다. 본 연구에서는 만경강에서의 생태학적 중요도를 감안하여 물리서식처 모의를 위한 대상어종으

로 감돌고기를 선정하였다. 선정된 감돌고기는 앞서 언급된 것처럼 수질 및 서식지에 민감한 어종으로 하천복원 시 수생태환경의 복원수준을 알아볼 수 있는 중요한 어종으로 판단된다. 감돌고기의 수심, 유속, 하상재료별 서식처 적합도 지수(HSI, Habitat Suitability Index)는 만경강 생물 모니터링 자료(Hur et al., 2016)를 토대로 Bovee(1986)가 제시한 방법을 활용하여 산정하였다(Fig. 8).

물리서식처 모의는 캐나다 Alberta 대학에서 개발한 2차원 수리 서식처 모형인 River2D를 이용하였다(Steffler and Blackburn, 2002). River2D의 수리 동역학적 모의과정은 천수방정식을 지배 방정식으로 사용하고 있으며, 자연하천에서 상류 및 사류 등과 같은 흐름상태의 모의가 가능하고, 부정·부등류 모의에도 적용된다. 모형에 사용된 DEM은 만경강 하천기본계획(MLTMA, 2012)에서 제공한 단면 측량자료 및 조도계수를 사용하여 구축하였다. 수리모형의 검보정은 2016년 7월 5일~20일 사이의 15일 동안 10분 간격으로 관측된 봉동, 소양 유량 데이터를 사용하여 부정류 모의를 실시하였다. 그 결과 봉동, 소양, 하리 지점에서의 계산된 홍수위는 실측 홍수위와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다(Fig. 9). 또한 모의 결과에 따른 오차를 정량적으로 분석하기 위해 RMSE 분석을 수행하였고, 그 결과 RMSE 오차 범위는 0.01~0.03, 침두 홍수위의 절대오차 범위는 0.03~0.05 m로 비교적 홍수사상을 잘 재현하는 것으로 확인하였다.

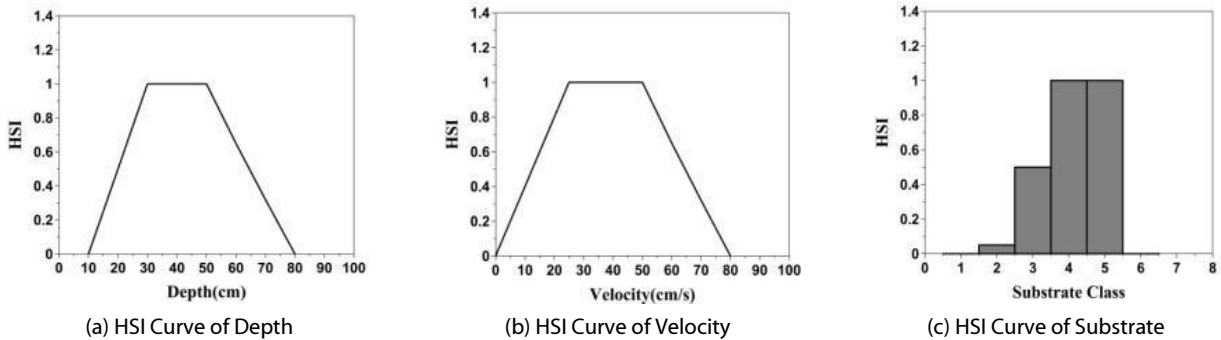


Fig. 8. HSI Curve for *Pseudopungtungia nigra*

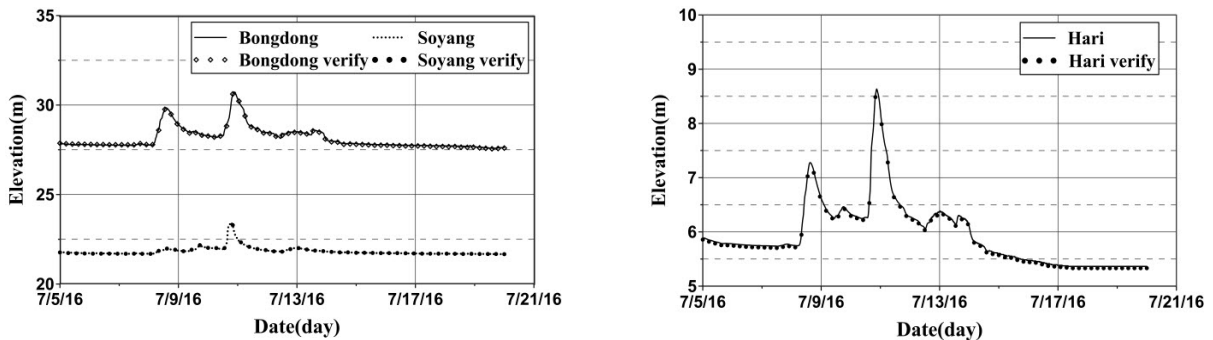


Fig. 9. Comparison between Observed and Simulated Flood Elevation



감돌고기의 물리서식처 모의는 유량점증방법론(IFIM)에 근거하여 유량 0.4 m<sup>3</sup>/s에서 1,000 m<sup>3</sup>/s까지 점증적으로 증가시키며 수행하였고, 그 결과로 가중가용면적(WUA, Weighed Usable Area)을 산정하였다. Fig. 10은 감돌고기의 유량-가중가용면적 관계를 도시한 것이며, 최대 가중가용면적(WUA<sub>max</sub>)에 해당하는 유량(Q<sub>opt</sub>)은 41.4 m<sup>3</sup>/s로 나타났다. 임의의 구간에서 가중가용면적이 크다는 것은 그만큼 대상어종의 서식처 및 활동 영역이 크다는 것을 의미하며, 최대 가중가용면적에 해당하는 유량은 미시서식처 조건을 고려한 최적의 필요유량으로 제시할 수 있다. Fig. 11은 극히 낮은 흐름, 커다란 홍수, 높은 흐름 펄스의 유량과 최적 유량(Q<sub>opt</sub>)에 대한 감돌고기의 복합서식처 적합도(CSI: Composite Suitability Index)를 도시한 결과이다. 복합서식처 적합도가 1.0이라는 것은 해당 지점이 대상어종에게 가장 적합한 수심 및 유속을 가진다는 것을 의미한다. 극히 낮은 흐름과 커다란 홍수의 유량에서는 일부 구간을 제외한 대부분의 영역에서 0에 가까운 복합서식처 적합도로 분포하였다. 반면에 높은 흐름 펄스와 최적 유량에서는

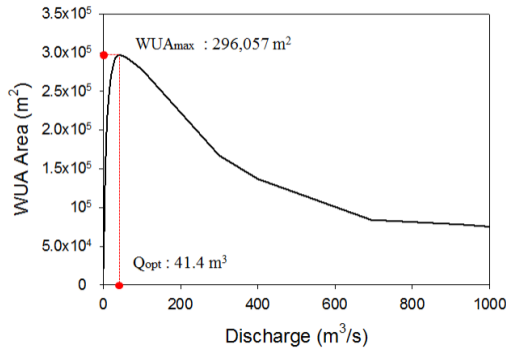


Fig. 10. WUA of *Pseudopungtungia Nigra* with Discharge Change

상대적으로 전반적인 복합서식처 적합도가 높게 분포하는 것으로 나타났으며, 특히 최적 유량조건(Q<sub>opt</sub>)에서의 분포도는 현재 지형에서 최대 가중가용면적의 현황을 보여준다.

#### 4.5 유황 특성과 물리서식처를 연계한 기후변화 영향 평가

유황 특성은 크기, 시기, 빈도, 기간, 변화율로 나타나며, 각각은 복합적으로 연계되어 하천생태계의 구조와 기능에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 34개의 환경흐름요소 파라미터 계산 결과 (Table 2)를 통해 현재와 미래의 유황 변동성을 분석하였다. 그리고

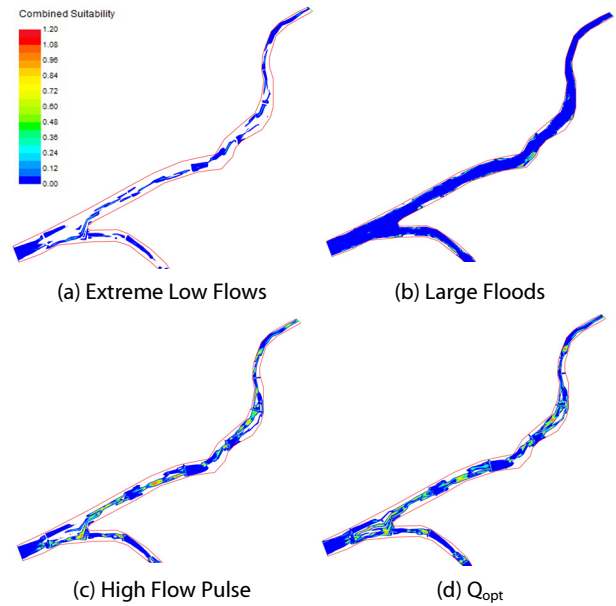


Fig. 11. Comparison of CSI between EFCs and Q<sub>opt</sub>

Table 3. Comparison of EFCs Characteristics between Present and Future

Classification		Extreme Low Flows	Low Flows	High Flow Pulse	Small Floods	Large Floods
Present	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	0.52	3.29	15.5	686.4	929.5
	Physical Habitat (WUA, m <sup>2</sup> )	22,685	107,325	249,607	84,013	77,958
	Water Area (m <sup>2</sup> )	1,011,440	1,536,581	1,862,898	3,020,546	3,122,196
	WUA/Water Area ratio (%)	2.2	7.0	13.4	2.8	2.5
Future	Discharge (m <sup>3</sup> /s)	0.49	3.58	13.8	679.8	1149.0
	Physical Habitat (WUA, m <sup>2</sup> )	21,044	112,627	240,706	83,714	66,579
	Water Area (m <sup>2</sup> )	993,450	1,550,663	1,835,990	3,023,746	3,220,625
	WUA/Water Area ratio (%)	2.1	7.3	13.1	2.8	2.1
Rate of Change (%)	Discharge	5.8 ▽	8.8 ▲	10.8 ▽	1.0 ▽	23.6 ▲
	Physical Habitat (WUA)	7.2 ▽	4.9 ▲	3.6 ▽	0.4 ▽	14.6 ▽
	Water Area	1.8 ▽	0.9 ▲	1.4 ▽	0.1 ▲	3.2 ▲
	WUA/Water Area ratio	5.6 ▽	4.0 ▲	2.2 ▽	0.5 ▽	17.2 ▽

(WUA: Weighted Usable Area)

5가지 흐름특성에 대해 현재-미래 변화되는 감돌고기의 물리서식처 해석 결과를 Table 3에 제시하였다.

유량점증에 따라 산정된 가중가용면적의 관계도(Fig. 11)를 살펴보면, 최적 유량조건(Qopt)을 기준으로 유량이 낮은 흐름 보다 낮거나 작은 홍수 보다 클수록 가용한 물리서식처는 작아진다. 극히 낮은 흐름과 커다란 홍수의 경우 유량 변화율이 각각 5.8 % 감소, 23.6 % 증가하고 물리서식처는 각각 7.2 %, 14.6 % 감소하였다. 특히, 이 두 가지 흐름은 연중 발생 빈도와 기간이 증가되는 결과를 감안할 때 연중 서식환경에 미치는 악영향은 보다 클 것이다. 작은 홍수는 유행별 특성 변화가 크지 않고 물리서식처 변동 폭은 0.4 %로 미미하였다. 하지만 작은 홍수의 연중 발생시기(Timing)가 7월에서 6월로 앞당겨지는 결과는 감돌고기의 산란기가 5-6월임을 감안할 때 감돌고기의 생애주기(Life Stage)에 악영향을 야기할 수 있다. 낮은 흐름과 높은 흐름 펄스는 유량 변화율이 각각 8.8 % 증가, 10.8 % 감소하였고, 물리서식처는 각각 4.9 % 증가, 3.6 % 감소하였다. 연중 대부분을 차지하는 낮은 흐름의 경우 물리서식처가 보다 나아지는 효과가 있으나 수문생태학적 중요도를 갖는 높은 흐름 펄스는 상승률(18.2 %)과 하강률(31.9 %)의 변동이 크기 때문에 서식환경에 추가적인 영향을 줄 수 있을 거라 판단된다.

수면적과 물리서식처 비율(ratio)의 변동 폭은 커다란 홍수(17.2 %) > 극히 낮은 흐름(5.6 %) > 낮은 흐름(4.0 %) > 높은 흐름 펄스(2.2 %) > 작은 홍수(0.5 %) 순으로 나타났다. 특히, 극히 낮은 흐름, 커다란 홍수의 수면적 대비 물리서식처 비율은 2.1~2.5 % 범위로 매우 낮게 나타났다. 하지만 이와 같은 극한 흐름 조건에서의 물리서식처 분포 결과는 Figs. 11(a) and (b)에서 볼 수 있듯이 피난처로서의 중요한 의미로 해석할 수 있다.

## 5. 결론

기후변화 영향으로 유역의 유행이 변화되고 있는 실정이고, 홍수가림 등 자연재해는 물론 이로 인해 수반되는 환경생태학적 측면에서도 악영향을 야기할 수 있다. 특히, 물 순환과정의 핵심요소로 설명되는 유출량은 아치수 및 환경과 밀접한 관계를 가지며, 기후변화의 영향을 받게 될 것임을 쉽게 예상할 수 있다. 하지만 국내에서는 기후변화와의 연계성은 물론, 유량변화와 생태학적 특성을 포함한 수생태계 관점에서의 분석은 대부분 이루어지지 않고 있는 실정이다(Kim et al., 2009). 본 연구에서는 기후변화로 인한 현재-미래의 유행 변화가 만경강 하도와 홍수터 영역에서 감돌고기의 서식환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 하였다.

5가지 환경흐름요소를 살펴본 결과 극히 낮은 흐름과 커다란 홍수와 같은 극한 수문 조건의 경우 현재보다 미래에 보다 악화되며,

이에 따라 서식환경이 저하될 것으로 예측되었다. 그리고 높은 흐름펄스와 작은 홍수의 경우도 서식환경의 저하는 동일하게 나타났다. 결국 환경흐름요소가 해당 수문년에 대해 전체 스펙트럼으로 나타난다는 점에서 낮은 흐름에서의 서식환경이 일부 개선되더라도 극한 수문조건을 포함한 그 외 흐름에서의 서식환경 저하는 기후변화로 인한 미래 생태환경 변동에 대한 위험성이 크게 증대될 수 있음을 보여준다. 다만, 기후변화의 영향을 고려한 유행의 예측은 강우 조건의 불확실성이 매우 크게 내포되어 있으므로, 본 연구에서 사용한 자료 및 기법 이외의 다양한 조건을 고려한 강수량 발생 가능성을 추가 검토할 필요가 있다.

어류의 물리서식처를 개선하고 확보하는 것은 기후변화에 따른 갈수와 홍수의 크기, 빈도, 기간, 시기, 변화율(상승률과 하강률) 등 유행변동의 예측치를 고려할 때 매우 복잡하고 어려운 문제이다. 특히 댐 방류 운영, 농공용수 이용, 자연유행 정보, 유지유량 고시 등 국내 수자원 관리 여건상 유량 조절(Control)을 통해 서식처를 개선하기에는 한계가 있다. 하지만 하도 및 홍수터를 포함한 지형 조성은 흐름, 지형, 생물의 상호작용에 의해 형성되는 물리서식처 측면에서 볼 때 보다 개선된 형태의 서식환경을 도모할 수 있는 가능성을 내포한다. 가령 최근 국내에서 다수 추진되고 있는 구하도 및 폐천부지 등을 대상으로 한 하천공간 복원 시 생물유행 특성이 반영된 습지 및 하도 등을 계획설계한다면 미래 극한 수문조건에 대응할 수 있는 방안으로 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C02)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Baek, K. O., Park, J. H. and Kim, Y. D. (2013) "Assessment of influx efficiency at by-pass fishway using two-dimensional physical habitat simulation model -focused on zacco platypus-." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 6, pp. 629-642 (in Korean).
- Bovee, K. D. (1986). "Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology (No. FWS/OBS-86/07)." USDI Fish and Wildlife Service.
- Bovee, K. D., Lamb, B. L., Bartholow, J. M., Stalnaker, C. B. and Taylor, J. (1998). "Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology (No. USGS/BRD/ITR-1998-0004)." Geological Survey Reston Va Biologicalresources Div.
- De Jalón, D. G. and Gortazar, J. (2007). "Evaluation of instream habitat enhancement options using fish habitat simulations case-studies in the river Pas (Spain)." *Aquatic Ecology*, Vol. 41, No. 3, pp. 461-474.

- Hersh, E. S. and Maidment, D. R. (2006). "Assessment of hydrologic alteration software." *Center for Research in Water Resources*, University of Texas at Austin.
- Hur, J. W., Kang, H. S., Kim, G. H., Lee, J. H., Lee, J. W., Han, J. S. and Kim, G. H. (2016). "Assessment and present-condition investigation of biological habitats in river space." *Bio-Monitoring Center*, Sejong, Korea (in Korean).
- Hur, J. W., Kim, D. H. and Kang, H. S. (2014). "Estimation of optimal ecological flowrate of fish in chogang stream." *Ecology and Resilient Infrastructure*, Vol. 1, No. 1, pp. 39-48 (in Korean).
- Im, D. K., Jung, S. H., Ahn, H. K. and Kim, K. H. (2007). "Application of physical habitat simulation system (PHABSIM) in the reach of small dam removal for zacco platypus." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 11, pp. 909-920 (in Korean).
- Jeung, S. J., Kim, B. S., Jun, K. W. and Choi, J. I. (2014). "Impact assessment of climate change on long term runoff in the young san river based on the RCP 8.5 climate change scenarios." *Korean Review of Crisis & Emergency Management*, Vol. 10, No. 2, pp. 289-305 (in Korean).
- Kang, H. S., Im, D. K. and Kim, K. H. (2010). "Numerical investigations of physical habitat changes for fish induced by the hydropeaking in the downstream river of dam." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 2B, pp. 211-217 (in Korean).
- Kang, J. H., Lee, E. T., Lee, J. H. and Lee, D. H. (2004). "Estimation of river instream flow considering fish habitat conditions." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 37, No. 11, pp. 915-927 (in Korean).
- Kim, B. K., Kim, B. S. and Kwon, H. H. (2009). "Impact assessment of agricultural reservoir on streamflow simulation using semi-distributed hydrologic model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 1B, pp. 11-22 (in Korean).
- Kim, B. S. (2005). *Impact assessment of climate change on hydrologic components and water resources in watershed*. Ph.D. Dissertation, Inha University, Incheon, Korea (in Korean).
- Kim, B. S., Kim, B. K., Kwon, H. H. and Seoh, B. H. (2009). "Assessment of climate change impact on flow regime and aquatic ecosystems using the indicators of hydrologic alteration (IHA) in the han river basin, Korea." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference 2009*, Pyeongchang, 2009, pp. 134-138 (in Korean).
- Kim, B. S., Kim, H. S. and Seoh, B. H. (2005). "Impact and assessment of climate change on water resources." *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, Vol. 53, No. 4, pp. 30-42 (in Korean).
- Kim, B. S., Kim, S. J., Kim, H. S. and Jun, H. D. (2010). "The evaluation of future water deficit considering climate change in the han-river basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 3, pp. 309-323 (in Korean).
- Kim, B. S., Seoh, B. H., Kim, H. S. and Kim, N. W. (2003). "Simulation of daily streamflows using SLURP model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 4B, pp. 289-303 (in Korean).
- Kyoung, M. (2010). *Assessment of Climate Change Effect on Standardized Precipitation Index and Frequency Based Precipitation*. Inha University Graduate School Civil Engineering. Doctorate Thesis (in Korean).
- Kyoung, M., Lee, J. K. and Kim, H. S. (2009). "Downscaling technique of monthly GCM using daily precipitation generator." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 5B, pp. 441-452 (in Korean).
- Lacey, R. W. and Millar, R. G. (2004). "Reach scale hydraulic assessment of instream salmonid habitat restoration." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 40, No. 6, pp. 1631-1644.
- Lee, J. H., Jeong, S. M., Lee, M. H. and Lee, Y. S. (2006). "Estimation of instream flow for fish habitat using instream flow incremental methodology (IFIM) for major tributaries in han river basin." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 2B, pp. 153-160 (in Korean).
- Lee, S. H., Oh, K. R., Cheong, T. S. and Jeong, S. M. (2012). "An assessment of fish habitat of natural fishway by hydraulic model experiments and numerical analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 3, pp. 317-329 (in Korean).
- MLTMA (2012). "Schematic plan for mankyung river." Ministry of Land Transport and Maritime Affairs, Iksan, Korea (in Korean).
- Nature Conservancy (2007). "Indicators of hydrologic alteration version 7.1: user's manual."
- NIMR (2011). "Climate change scenario report for responding to IPCC fifth assessment report." (in Korean).
- Oh, K. R., Jeong, S. M., Lee, J. H., Choi, G. W. and Kim, D. H. (2008). "Estimation of optimum flow needed for fish habitat by application of one and two dimensional physical habitat simulation model - focused on zacco platypus-." *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 8, No. 1, pp. 117-123 (in Korean).
- Olden, J. D. and Poff, N. L. (2003). "Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes." *River Research and Applications*, Vol. 19, pp. 101-121.
- Park, B. J., Kim, J. T., Jang, C. L. and Jung, K. S. (2008). "Hydrologic regimes analyses on down stream effects of the young chun dam by indicators of hydrologic alterations." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 163-172 (in Korean).
- Park, M. J., Park, G. A. and Kim, S. J. (2007). "Analysis of hydrologic behavior of SLURP model including agricultural reservoir operation." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 5B, pp. 515-523 (in Korean).
- Poff, N. L. and Ward, J. V. (1989). "Implications of streamflow variability and predictability for lotic community structure: a regional analysis of streamflow patterns." *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 46, No. 10, pp. 1805-1818.
- Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., Sparks, R. E. and Stromberg, J. C. (1997). "The natural flow regime : a paradigm for river conservation and restoration." *Bioscience*, Vol. 47, No. 11, pp. 769-784.
- Richardson, C. W. (1981). "Stochastic simulation of daily precipitation,

temperature and solarradiation.” *Water Resources Research*, Vol. 17, No. 1, pp. 182-190.  
Richter, B. D., Baumgartner, J. F., Powell, J. and Braun, D. P. (1996). “A method for assessing hydrologic alterations within

ecosystems.” *Conservation Biology*, Vol. 10, No. 4, pp. 1163-1174.  
Steffler, P. and Blackburn, J. (2002). “Two-dimensional depth averaged model of river hydrodynamics and fish habitat.” *River2D user’s manual*, University of Alberta, Canada.