

댐 운영을 고려한 금강의 생태수문학적 변화 평가 :

II. 수리학적 어류서식처 조건 분석

Evaluation of Eco-Hydrological Changes in the Geum River Considering Dam Operations : II. Hydraulic Fish Habitat Condition Analysis

박 상 영* / 김 정 곤** / 고 익 환***

Park, Sangyoung / Kim, Jeongkon / Ko, Ick Hwan

Abstract

A quantitative analysis was conducted to study the impacts of artificial flow alteration on fish habitate condition change in the Geum River downstream the Daechung Multi-purpose Dam (DMD). River Analysis Package (RAP) was employed for the analysis and three fish species of black shiner, long nose barbel and Korean shinner were selected as icon species. The results of the analysis showed enhanced fish habitat conditions during low flow seasons in spring and fall after DMD construction, while the impact of the Youngdam Multipurpose Dam located upstream the DMD was insignificant. This result could be attributed to the fact that the increased flow during dry seasons helped create preferable habitat conditions for the fish species tested in this study.

keywords : Flow Regime, Fish habitat Condition, Dam Operation

요 지

본 논문에서는 대청댐 하류 금강을 대상으로 댐건설에 따른 유황 변동이 어류서식처 환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 분석에는 RAP을 이용하였고, 대표어종으로는 쉬리, 참마자, 감돌고기를 선정하였다. 분석 결과에 따르면 유량이 감소하는 갈수기에 대청댐의 건설과 더불어 서식처 조건이 향상 하였으나, 용담댐 건설의 영향은 미미한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 댐건설에 따른 갈수기의 방류량 증가가 본 연구에서 선정한 대표어종들이 선호하는 서식처 조건을 유지하는데 도움이 된 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유황, 하천수리, 어류서식처, 댐운영

1. 서 론

하천의 생태시스템에 대한 분석은 하천을 중심으로

구성된 하도특성, 하천의 단면 및 하상 특성, 유량, 수질, 어류 및 식생 등의 동식물 특성 등 다양한 분야에 대한 분석이 이루어져야 한다. 그러나 이러한 모든 분

* 한국수자원공사 K-water연구원 선임연구원
Senior Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

** 교신저자, 한국수자원공사 K-water연구원 수석연구원
Corresponding Author, Head Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation
(e-mail: jkkim@kwater.or.kr)

*** 한국수자원공사 K-water연구원 연구위원
Senior Head Researcher, K-water Institute, Korea Water Resources Corporation

야는 매우 복잡하며 각 분야들 간 상호 작용의 영향 때문에 이들을 동시에 정량적으로 고려하여 하천의 생태 시스템을 평가하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 따라서 하천의 생태시스템에 가장 큰 영향을 미치는 주요 인자들을 선택하여 이를 대상으로 하천의 생태시스템을 분석하는 것이 현실적인 접근 방법일 것이다.

하천의 유량은 하천을 구성하는 가장 기초적인 요인 이므로 하천 생태시스템의 근간을 이루고 있다. 동일한 하천인 경우에도 유량이 많은 기간과 적은 기간에 따라 각각의 생태시스템이 존재하게 된다. 특히, 하천을 터전으로 생애주기(life cycle)를 형성하고 있는 어류의 경우, 수질이나 다른 생물집단(조류, 수서곤충 등)과 같은 이화학적 또는 생물학적 특성들보다 하천의 유속, 수심, 하상구조, 여울-소 배열과 같은 물리적 특성에 훨씬 큰 영향을 미친다.

미국, 유럽, 호주 등 선진국에서 하천 생태서식처 해석과 그에 따른 서식처 보전을 위한 하천유지유량(instream flow) 연구는 1970년대부터 시작되었으며, 국내에서는 한국수자원공사(1995)가 최초로 하천유지유량에 하천 생태계 개념을 도입하여 담수성 어류 서식처 제공 및 이동에 필요한 유량을 산정한 바 있다. 이후 이 분야의 연구는 유량의 변화에 따라 서식처 수리조건(수심, 유속 등)이 먼저 한계에 달하는 여울(riffle)을 대상으로 서식조건을 만족시키는 수리 및 수질 조건 등을 포함한 물리서식처 모의(PHABSIM) 기법의 적용과 이를 이용한 최적유량을 산정하는 연구가 진행되어 왔다(오국열 등, 2008; 임동균 등, 2007; 박봉진 등, 2005; 성영두 등, 2005; 강정훈 등, 2004; 김규호, 2000). 본 연구에서는 생태수문학적 하천 건강성평가를 전체적인 관점에서 접근하였으며, 선행 연구(고익환 등, 2009)에서 금강 유역에 대한 개념모델을 설정하고 댐 건설 및 운영으로 인한 유황변화를 분석하였으며, 두 번째 부분인 본 연구에서는 어류 모니터링 자료와 하천환경평가 프로그램인 RAP(River Analysis Package)를 이용하여 금강수계 대청댐 하류구간에 대하여 유황변동에 따른 수리학적 특성과 어류 서식처의 영향 정도를 정량적으로 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 어류 생태 모니터링

본 연구에서는 기존에 수행된 연구결과들(최기철 등, 1977; 안광국 등, 1992; 건설교통부, 2006)을 조사 분석함과 동시에 어류 생태 모니터링을 실시하였다. 종별 서식특성 파악을 위한 어류조사는 2007년~2008년 기간에

대청댐 하류구간인 현도, 공주 지점과 용담댐 하류의 앞섬, 수통, 옥천 지점을 선정하여 조사하였다(Fig. 1).

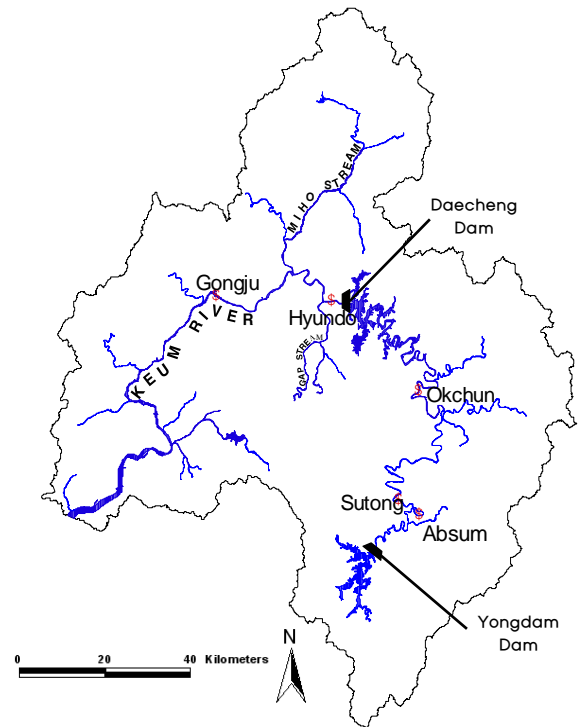


Fig. 1. Location of Fish Monitoring Sites

2.2 분석 방법

본 연구에서는 RAP(River Analysis Package)의 수리분석모듈을 사용하여 댐건설 전·후 유량변동에 따른 하천구간별 어류서식처 환경의 변화를 정량적으로 분석하였다(Marsh, 2004). RAP의 적용에서 수리분석 모듈(Hydraulic Analysis module, HA)은 하천의 수리학적 특성과 생물 서식조건(e.g. 여울, 소 등)간의 관계를 분석하고 관계식을 도출하는 단계에 사용되었다. 시계열 분석(Time Series Analysis, TSA) 모듈은 설정된 시나리오에 대하여 일단위 시계열자료를 분석하고 통계학적인 분석과 시간에 따른 변화를 분석하는데 사용되었다. TSA 모듈은 유황의 변화에 따른 변화를 모의하고 통계분석을 통한 생태계의 영향들을 분석하는데 사용할 수 있다. 시계열관리(Time Series manager, TSM) 모듈은 시계열자료의 결측치 분석 및 수식을 이용한 시계열자료의 합성, 관계식을 적용한 시계열자료의 생성 등을 수행한다(Fig. 2).

분석에 사용된 대청댐 하류구간의 지형자료와 수리매개변수는 현도교 부터 공주대교까지 45.395km 구간에 대하여 구축된 HEC-RAS 모형의 입력 및 출력 자료를 사용하였다. 수리분석모듈에 선정된 대표어종의 서식처 규칙을 적용하고 유량의 지배를 받는 하천의

수리학적 지표(hydraulic metric)로써 유속, 수심, 수표면적 등을 설정하여 분석함으로써 유량변동이 어류서식처 환경에 미친 영향을 정량적으로 분석하였다. 시계열 유량자료는 고익환 등(2009)이 KModSim모형을 이용하여 대청댐과 용담댐의 운영 전·후 가정조건하에서 산정한 1984년부터 2006년까지 23년간의 유량자료를 사용하였다.

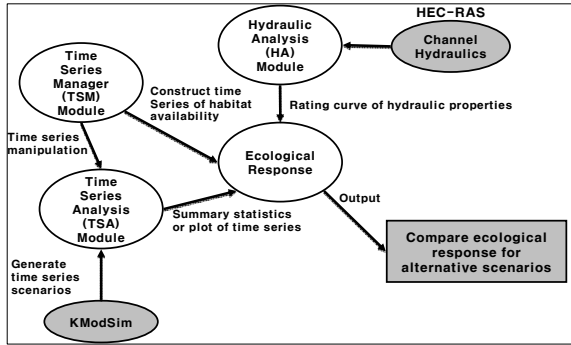


Fig. 2. Schematic of Eco-hydrological Analysis Process using RAP

3. 결과 및 토의

3.1 대표어종의 서식처 특성

해당 하천의 생태계를 대표할 수 있는 종, 멸종위기종, 특이종 또는 경제성이 있는 어종 등 연구 목적에 따라 대표 어종을 선정할 수 있다. 본 연구의 조사대상 지점에 대하여 문헌 조사 및 어류 모니터링 결과를 기반으로 총 15과 57종 3,955개체에 대한 서식현황은 다음과 같다.

잉어과 분류군이 약 77.0%(33종)으로 가장 높은 출현율을 보였으며 다음으로 바다방어과, 꺾지과 및 망둑어과가 약 5% 내외를 나타냈으며, 그 외의 분류군은 낮은 출현율을 보였다. 우점종은 우리나라 대부분 중·하류

하천의 우점종인 피라미(*Zacco platypus*)가 26.8%의 상대 풍부도(출현개체수/총개체수×100)를 보였으며, 모든 지점에서 출현빈도를 보인 쉬리 (*Coreoleuciscus splendidus*)가 5.2%로 아우점종으로 나타났다. 우리나라 고유어종은 18종으로 전체 종수 중 55%를 차지하였다. 멸종위기 보호어종 중 감돌고기(*Pseudopungtungia nigra*)는 대청댐 상류인 3개 지점에서 출현하였으나, 하류에서는 출현하지 않는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 감돌고기(*P. nigra*), 쉬리(*C. splendidus*) 및 참마자(*H. longirostris*)를 대표어종으로 선정하여 분석을 수행하였으며, 각 어종별 서식처 조건은 Table 1과 같다. 감돌고기는 주로 여울에 서식하면서 유량 변화에 민감하게 반응하는 어종이다. 현재 감돌고기는 대청댐 하류에서는 채집되고 있지 않으며, 멸종위기 보호종으로써 대표어종으로 선정하였다. 쉬리의 경우, 감돌고기와 서식처 조건은 유사하나 환경 내성력이 우수하고 유속과 수심 조건이 상대적으로 넓다. 쉬리는 대청댐 하류인 현도지점에서는 채집되었으나, 공주지점에서는 확인되지 않고 있다. 피라미를 제외한 모든 지점에서 서식 확인이 된 참마자는 서식처 조건 중 하상재료에서 모래부터 호박돌로 광범위하게 나타나 본 연구에서 대표어종으로 선정하였다.

3.2 유량-어류 서식처 조건 상관관계 분석

RAP의 수리분석모듈(HA)을 사용하여 대상 하천구간의 유량에 따른 각 어종별 서식처조건(Table 1)의 상관관계를 분석하였으며(Fig. 4), 모델에 입력된 HEC-RAS의 지점별 유량사상은 최소 17.8 m³/sec부터 최대 686.8 m³/sec로 총 12개이다. 그림에서 X축은 유량이고 Y축은 대청댐 하류에서 공주까지의 전체 구간에서 서식처 조건(수심 및 유속)을 만족하는 평균 수표면 폭을 나타낸다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 서식처 조건을

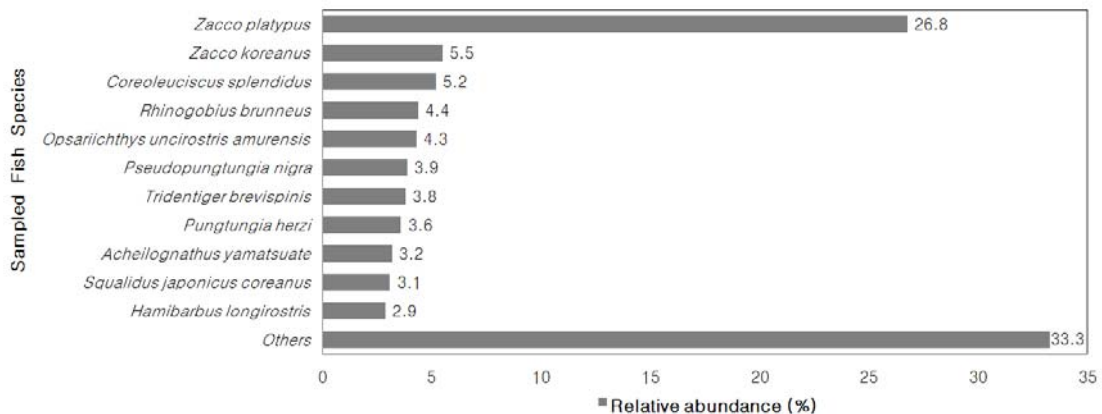


Fig. 3. Relative Abundance of the Sampled Species in Geum River

Table 1. Habitat Conditions of the Selected Fish Species

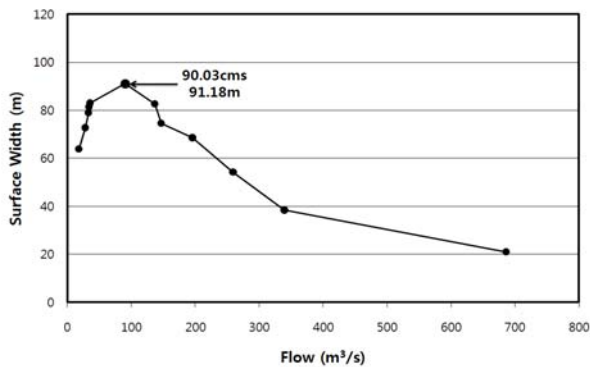
Species	Habitat Conditions
C. splendidus	<ul style="list-style-type: none"> • Velocity \leq 2.0 m/sec (Avg. 0.6) • Local depth : 0.2~1.5 m (Avg. 0.4) • Sediment material : gravel or cobbles
H. longirostris	<ul style="list-style-type: none"> • Velocity \leq 1.4 m/sec (Avg. 0.3) • Local depth : 0.1~1.1 m (Avg. 0.5) • Sediment material : sand or cobbles
P. nigra	<ul style="list-style-type: none"> • Velocity \leq 0.9 m/sec (Avg. 0.4) • Local depth : 0.3~0.9 m (Avg. 0.5) • Sediment material : gravel or cobbles

만족하는 수면폭은 유량이 증가함에 따라 증가하다가 최적 유량값을 초과하게 되면 유량이 증가함에 따라 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 최대 수면폭, 그래프 형태 등 각 어종별 유량-서식처 상관관계는 각각의 서식처 조건에 따라 다소 상이함을 알 수 있다.

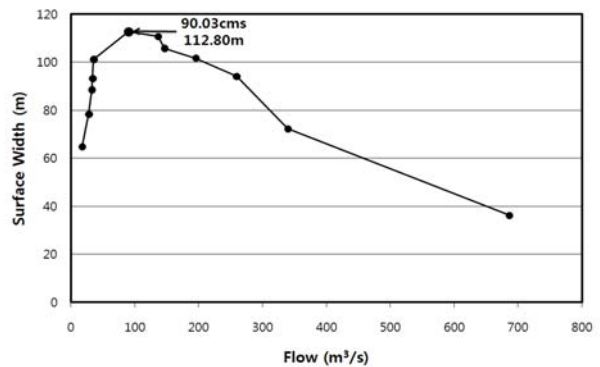
각 어종별 최적 유량은 쉬리의 서식처 조건을 만족하는 최적 유량을 분석한 결과 90.0 m³/sec의 유량이 흐를 때 최적 조건이며, 이때 평균 수표면 폭은 112.8m로 분석되었다(Fig. 4(a)). 참마자의 서식처 조건을 최적으로 만족하는 유량은 90.0 m³/sec로 분석되었으며, 이때 평균 수표면 폭은 91.2m로 나타났다(Fig. 4(b)). 감돌고기는 35.7 m³/sec의 유량이 흐를 때 최적 조건이며, 이때 이 구간에서 평균 수표면 폭은 59.0m로 분석되었다(Fig. 4(c)).

3.3 유황변화와 따른 어류 서식처 영향 분석

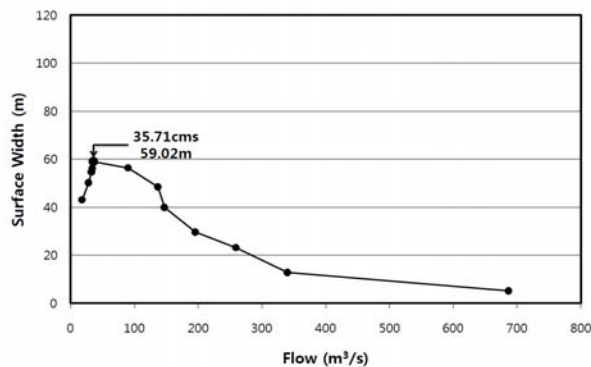
도출된 어종별 유량-수표면폭 상관관계곡선(Fig. 4)과 공주지점에서의 1984년부터 2006년까지 23년간의 일 유량 자료를 기반으로 유황변화에 따른 어류 서식처 영향을 분석하였다. Fig. 5는 전체 분석 자료 중에서 2004년부터 2005년을 기간에 대하여 댐건설에 따른 유황변화와 서식처 활용 특성을 분석한 결과를 보여주고 있다. 서식처 활용도는 계절적으로 변동은 있으나, 유량이 증가하는 하절기에는 서식처 활용도가 급격히 감소하는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과는 본 연구에서 선정된 대표어종의 서식처 조건이 저유량(low flow) 조건에 해당하기 때문인 것으로 판단된다. 수표면 폭으로



(a) *C. splendidus*

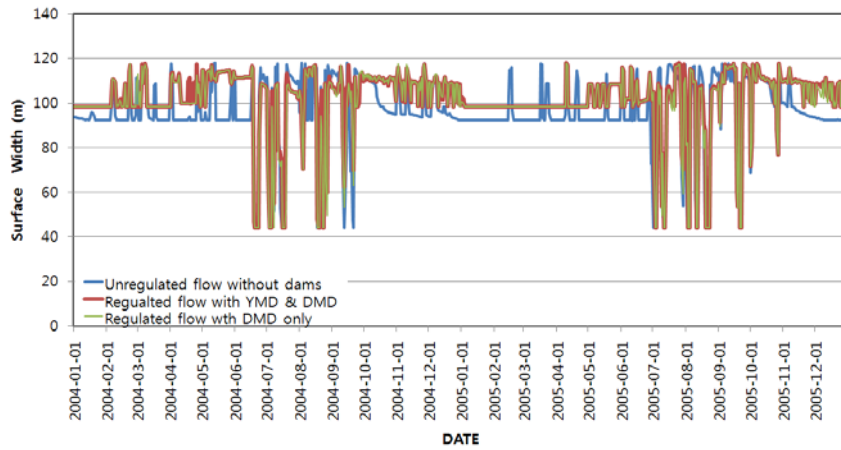


(b) *H. longirostris*

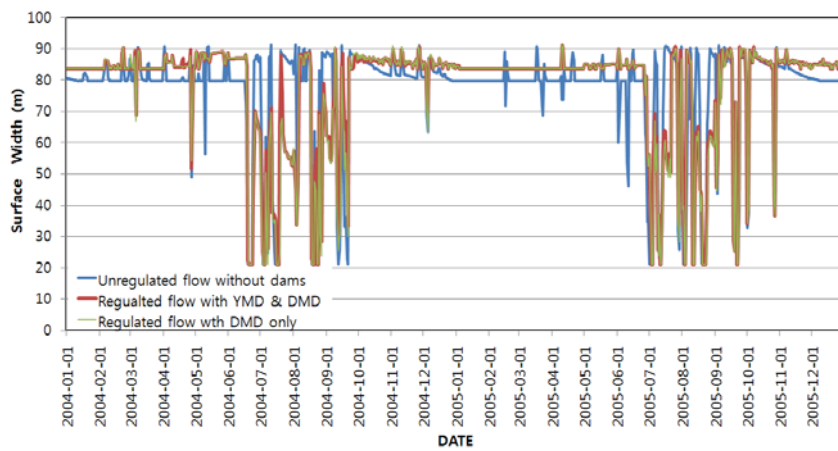


(c) *P. nigra*

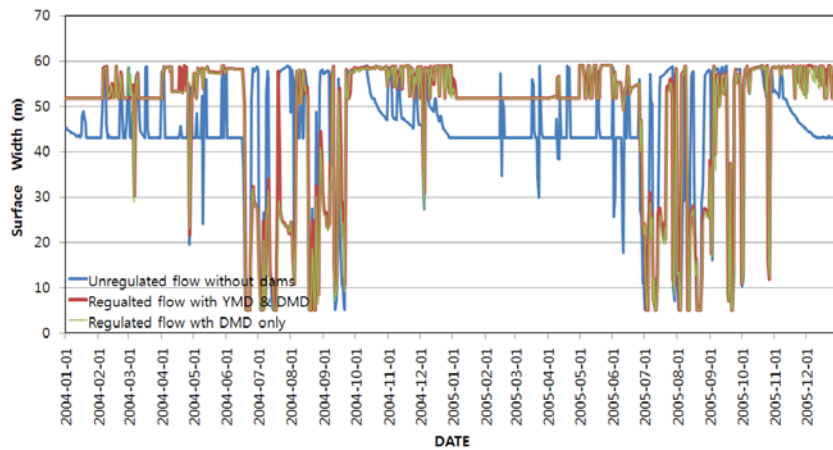
Fig. 4. Rating Curves between Flow and Surface Width with Suitable Fish Habitat Condition



(a) *C. splendidus*



(b) *H. longirostris*



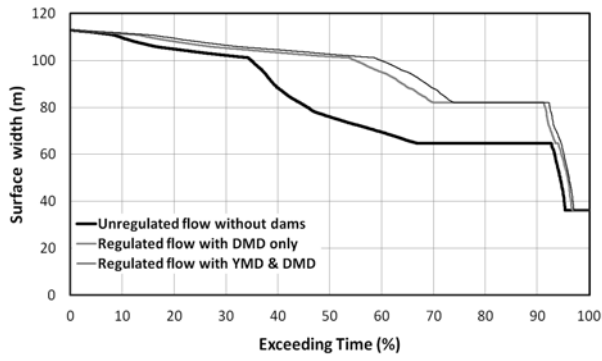
(c) *P. nigra*

Fig. 5. Temporal Habitat Availability of Each Fish Species
(DMD: Daecheong Multipurpose Dam; YMD: Youngdam Multipurpose Dam)

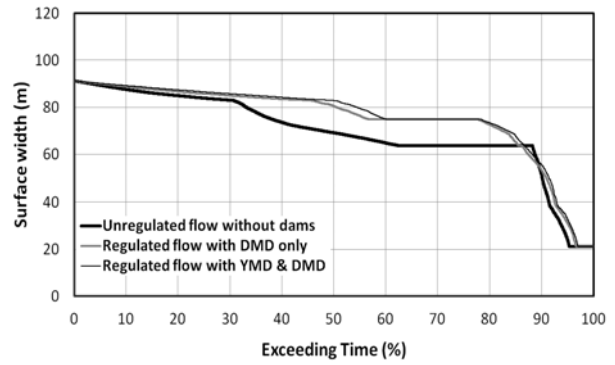
환산된 서식처 활용도는 하절기에는 큰 차이를 보이지 않으나 갈수기에는 전반적으로 증가하는 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 갈수기시 댐에서의 증가 방류에 따른 유향개선 효과로 사료된다. Fig. 5에서 용담댐

건설에 따른 영향은 크지 않은 것을 알 수 있다.

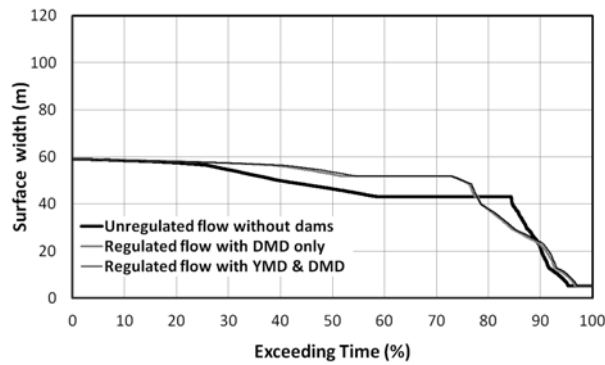
분석에 사용된 전 기간에 대하여 어종별 서식처 조건을 만족하는 시기의 수표면 폭을 누적하여 분석한 결과를 Fig. 6에 제시하였다. Fig. 6에서 X축은 초과시간,



(a) *C. splendidus*



(b) *H. longirostris*



(c) *P. nigra*

Fig. 6. Cumulative Habitat Curve of Each Fish Species

Table 2. Changes of Surface Widths with Suitable Habitat Conditions for Each Species under Different Scenarios

Species	Surface width at Median Exceeding Percentile (Unit = m)		
	Unregulated Flow	Regulated Flow with DMD only	Regulated Flow with YMD & DMD
<i>C. splendidus</i>	76.0	101.6	102.6
<i>H. longirostris</i>	69.2	80.5	82.9
<i>P. nigra</i>	46.3	52.6	53.5

Y축은 서식처 조건을 만족하는 구간의 평균 수표면 폭을 나타내고 있다. 초과시간 0~30% 구간은 상대적으로 댐 건설 전과 댐 건설 후 서식처 조건의 변화가 적었으며, 이는 댐 건설 전과 댐 건설 후의 유입 유량에 큰 차이가 없다는 것을 나타낸다. 초과시간 30~80% 구간에서는 댐 건설 전보다 댐 건설 후 어류서식처 조건이 급격히 증가되는 것으로 나타났으며, 이는 댐 건설 후에 댐에서 하류하천에 지속적으로 유량을 공급하면서 어류서식처 조건이 향상된 것으로 판단된다. 다음으로, 초과시간 80~100%구간에서는 어류서식처 조건이 급격히 감소되는 것으로 나타났으며, 이 구간은 홍수기에 해당하는 구간이므로 강우시 유입유량의 상승이 서식처

조건을 악화시키는 요인이 된다는 것을 알 수 있다.

Table 2에 50%(median) 초과시간 값의 변화를 각 어종별로 요약하였다. 댐 건설 전 쉬리의 서식처 조건을 만족하는 평균 수표면 폭의 중앙값은 76.0m인 반면, 대청댐 건설 후에는 101.6m, 용담댐 건설 후에는 102.6m로 증가하는 경향을 보인다. 참마자와 감돌고기는 댐 건설 전 각각 69.2m, 46.3m로 중앙값이 계산되었으며, 대청댐 건설 후에는 각각 80.5m, 52.6m로 증가, 용담댐 건설 후에도 각각 82.9m, 53.5m로 증가하였다. 중앙값뿐만 아니라 초과시간 0~80%구간에서는 모두 비슷한 경향을 보이고 있다. 결과적으로 서식처 활용도는 대청댐의 건설과 더불어 증가하였으며, 용담댐 건설

의 영향을 미미한 것으로 분석되었다.

참마자는 대청댐 상하류에 걸쳐 분포하고 쉬리는 대청댐 직하류까지 발견되는 반면, 감돌고기는 대청댐 건설전에는 대청댐 하류에서 극소량이 출현하였으나, 현재는 거의 출현하지 않는 것으로 보고되고 있다. 댐 건설에 따른 유량 변화는 오히려 감돌고기와 같은 어종의 서식처 조건의 향상에도 기여한 본 연구의 결과를 감안할 때, 감돌고기와 같은 민감한 계류성 어종 개체군들이 대청댐 하류에서 거의 출현되지 않고 있는 것은 유황변화에 따른 서식처 조건의 변화 보다는 댐 하류에 설치되어있는 각종 소규모 수공구조물에 의한 여울-소 배열의 감소, 도시화에 따른 수질악화, 수온변화 등의 요인과 더 밀접한 상관관계가 있을 것으로 예상되어 향후 좀 더 세밀한 분석을 실시하여야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 논문에서는 금강수계의 어류 모니터링 자료와 하천 생태환경 평가 도구인 RAP 모형을 이용하여 쉬리, 참마자 및 감돌고기를 대상으로 유량변동이 어류서식처 환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 대청댐 하류구간에 대하여 유량과 서식처 조건과의 상관성을 분석한 결과, 서식처 조건을 만족하는 수면폭은 유량이 증가함에 따라 증가하다가 최적 유량값을 초과하게 되면 유량이 증가함에 따라 오히려 감소하였다. 최대 수면폭, 그래프 형태 등 각 어종별 유량-서식처 상관관계는 각각의 서식처 조건에 따라 다소 상이하였다.
- 2) 댐건설에 따른 유황변화가 어류 서식처에 미친 영향을 분석한 결과, 댐 건설 전 쉬리의 서식처 조건을 만족하는 평균 수표면 폭의 중앙값은 76.0m 인 반면, 대청댐 건설 후에는 101.6m, 용담댐 건설 후에는 102.6m로 증가하는 경향을 보였다. 참마자와 감돌고기도 댐 건설 전 각각 69.2m, 46.3m로 중앙값이 계산되었으나, 대청댐 건설 후에는 각각 80.5m, 52.6m로 증가, 용담댐 건설 후에도 각각 82.6m, 53.5m로 증가하였다. 특히, 갈수기에 댐에서의 증가 방류에 따라서 갈수기에 서식처 활용도가 증가하는 것으로 분석되었다. 서식처 활용성 증가는 대청댐의 건설의 영향은 큰 반면, 용담댐 건설의 영향은 미미한 것으로 분석되었다.
- 3) 감돌고기와 같은 민감한 계류성 어종 개체군들이 대청댐 하류에서 잘 출현되지 않고 있는 것은 유

황변화에 따른 서식처 조건의 변화와 더불어 유황변화의 감소에 의한 여울-소 배열을 감소, 수질, 수온변화 등의 요인과 하류하천에 건설된 수공구조물의 영향이 밀접한 상관관계가 있을 것으로 판단되어, 향후 이에 대한 세밀한 분석이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신연구개발사업의 일환으로 진행되는 ‘자연과 함께하는 하천복원기술개발(Ecoriver 21)’ 중 ‘어류생태 모니터링 및 조절하천 유지유량 확보기술(3-1과제)’ 및 한국수자원공사 K-Water연구원의 ‘금강유역 하천생태환경 개선 방안 연구(KIWE-WRE-08-15)’의 지원으로 이루어진 연구 성과입니다.

참 고 문 헌

- 강정훈, 이은태, 이주현, 이도훈 (2004). “어류의 서식처 조건을 고려한 하천의 필요유량 산정에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 915-927.
- 건설교통부(2006). **금강유역조사**, 11-1500000-001761-14.
- 고익환, 김정근, 박상영 (2008). “댐 운영을 고려한 금강의 생태·수문학적 변화 평가 : I. 유황변화 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제1호, pp.1-8.
- 김규호 (2000). “하천 어류 서식 환경의 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제33권, 제2호, pp. 10-22.
- 김남원, 이정은, 이병주 (2007). “한강유역의 다목적댐 운영에 따른 유황변동 특성 분석 및 평가.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제1-B호, pp. 53-63.
- 박봉진, 성영두, 정관수 (2005). “영천댐 건설이 금호강의 어류 서식환경에 미치는 영향에 관한 평가.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제9호, pp. 771-778.
- 성영두, 박봉진, 주기재, 정관수 (2005). “하천의 어류 서식환경을 고려한 생태학적 추천유량 산정.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제7호, pp. 545-554.
- 안광국, 홍영표, 김재구, 최신석 (1992). “금강담수어의 대상분포와 집단분석에 관한 연구.” **한국육수학회**

- 지, 한국육수학회, 제25권, pp. 99-112.
- 오국열, 정상만, 이주현, 최계운, 김도희 (2008). “1차원 및 2차원 물리서식처 모의를 이용한 어류서식조건 유지에 필요한 최적유량 산정 - 피라미를 대상으로 -.” **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제8권, 제1호, pp. 117-123.
- 임동균, 정상화, 안홍규, 김규호 (2007). “피라미에 대한 보 철거 구간에서의 물리서식처 모의(PHABSIM) 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제40권, 제11호, pp. 909-920.
- 최기철, 이지영, 김태룡 (1977). “금강(錦江)에 건설중인 대청댐을 중심한 어류조사.” **한국육수학회지**, 한국육수학회, 제10권, 제1호, pp. 25-32.
- 한국수자원공사 (1995). 하천유지유량 결정 방법의 개발 및 적용. **한국수자원공사조사계획처 IPD-95-2 연구보고서**, pp. 127-140, 196-214, 414-434.
- Marsh, N. (2004). *River Analysis Package Users Guide*. CRC for Catchment Hydrology, Australia.
- (논문번호:08-33/접수:2008.03.11/심사완료:2009.04.09)