

## 피라미에 대한 보 철거 구간에서의 물리서식처 모의(PHABSIM) 적용

### Application of Physical Habitat Simulation System (PHABSIM) in the Reach of Small Dam Removal for *Zacco platypus*

임 동 균\* / 정 상 화\*\* / 안 홍 규\*\*\* / 김 규 호\*\*\*\*

Im, Dongkyun / Jung, Sanghwa / Ahn, Hong Kyu / Kim, Kyu-Ho

#### Abstract

River restoration and environmental improvement projects have been performed by social needs, therefore methodology for evaluating such projects must be provided. The PHysical HABitat SIMulation system (PHABSIM) is proposed as a tool for the assessment of hydraulic habitat suitability for aquatic species related to flow regime in river. This study evaluates the change of physical habitat for *Zacco platypus* according to small dam removal and the model suitability by applying PHABSIM to the reach where small dam was removed. It is shown that the physical habitat is generally increased and improved where the small dam was removed. However, physical habitat in the spawning stage that has a weak swimming speed is decreased by increased flow velocity in the upstream area of small dam, so proper countermeasure for that condition should be needed. Consequently, PHABSIM can be effectively used to provide methodology for assessment and necessity of various river projects including a removal of out-aged hydraulic structures.

**keywords** : PHABSIM, small dam removal, physical habitat, habitat suitability

#### 요 지

하천환경에 대한 사회적 요구에 의해 다양한 하천 복원 및 환경개선사업이 진행되고 있으므로, 이와 같은 사업의 효과를 평가할 방법론이 제공되어야 한다. PHABSIM은 하천 흐름과 관련되어 있는 수생 생물의 수리적 서식처 적합도를 평가하기 위해 제안된 방법이다. 본 연구에서는 보 철거 구간에 PHABSIM을 적용하여, 보 철거에 따른 피라미의 물리서식처 변화와 모형의 적절성을 평가하였다. 그 결과 일반적으로 보를 철거할 경우가 존치할 때보다 물리서식처가 향상된 것으로 나타났다. 그러나 유영력이 약한 산란기의 물리서식처는 보 상류의 유속이 증가되어 감소하

\* 한국건설기술연구원 연구원

Researcher, River and Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi 411-712, Korea (e-mail: himdk@kict.re.kr) Tel: 031-910-0516

\*\* 한국건설기술연구원 연구원

Researcher, River and Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi 411-712, Korea

\*\*\* 한국건설기술연구원 선임연구원

Senior Researcher, River and Coast Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi 411-712, Korea

(e-mail: ahnhk@kict.re.kr)

\*\*\*\* 교신저자, 한국건설기술연구원 책임연구원

Corresponding Author, Research Fellow, River and Coast Research Division, Korea Institute of Construction

Technology, Goyang, Gyeonggi 411-712, Korea

(e-mail: khkim1@kict.re.kr)

는 것으로 나타났으며, 이에 대한 적절한 대책이 필요하다. 본 연구에 적용한 PHABSIM은 보 철거 사업을 포함한 다양한 하천사업의 평가와 필요성을 제시하는 효과적인 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

**핵심용어** : PHABSIM, 보 철거, 물리서식처, 서식처 적합도

## 1. 서론

과거 하천 난개발에 따른 서식처 감소, 오수 차집관 매설과 취수량 증대에 따른 하천 수량 감소, 그리고 산업화에 따른 수질 악화 등의 원인으로 인해 하천 생태계가 파괴되거나 위협을 받고 있다. 특히, 하천에는 본래의 기능을 상실한 보(淤)가 산재함에 따라 경관, 수질, 그리고 수생 서식구조 등을 악화시켜 하천환경을 저해하고 있다(Katopodis and Aadland, 2006; 한국건설기술연구원, 2007). 이에 따라 국내에서는 보를 철거하여 하천생태통로 및 수변 서식처 복원을 위한 연구(권보애, 2006; 한국건설기술연구원, 2007)가 진행되고 있으나, 보 철거를 포함한 다양한 하천복원사업의 효과를 평가하는 단계에는 미치지 못하고 있다. 따라서 하천 생태 서식환경을 조성 및 유지하기 위해서는 적절한 흐름영역의 확보와 수생 서식환경을 평가할 수 있는 서식처 모의기법의 도입이 필요하다.

미국, 유럽, 호주 등 선진국에서 하천 생태서식처 해석과 그에 따른 서식처 보전을 위한 하천유지유량(instreamflow) 연구는 70년대부터 시작되었으며, 국내에서는 90년대 후반부터 어류를 고려한 하천유지유량 개념이 도입되었다(김규호, 1999). 어류를 포함하여 하천 생태계를 고려한 하천유지유량은 주로 유량증분방법론(IFIM: Instream Flow Incremental Methodology) 개념에 입각한 물리적 서식처 모의 시스템(PHABSIM: Physical HABitat SIMulation system)에 의해 추정되고 있으며, PHABSIM에 의해 설정된 유량은 댐 개발 및 운영이나 하천 취수 등 하천 이수관리 측면에 관련된 수자원 의사결정수단으로 전 세계에서 널리 활용되고 있다(Bovee, 1982; Bovee et al., 1998).

그 동안 PHABSIM을 이용하여 특정 어류의 복원 및 보전을 위한 하천유지유량 산정 연구가 다양하게 진행되어 왔다(Gibbins et al., 2002; Vilizzi et al., 2004; Moir, 2005). 이러한 모의시스템은 어류 물리서식처에 대한 평가뿐만 아니라, 저서무척추동물(Gore et al., 1998)과 수중 및 수면에 서식하는 식물(Hearne et al., 1994)에도 적용할 수 있는 것으로 확인되었다. Shuler and Nehring(1993)은 하천사업에 인공 여울을 조성함으로써 어류 서식처가 양적 및 질적으로 향상되는 것을

확인하였으며, Booker and Dunbar(2004)는 도시하천의 물리서식처 평가를 통해 인공 정비가 적은 지역이 보다 높은 어류 서식처를 제공한다고 분석하였다. 또한 PHABSIM은 특정 어류의 생존유량(survival flow)을 고려한 수자원 분배 계획수립에도 적용되고 있다(Elliott et al., 1999; Strevens, 1999).

국내에서 유량증분방법론 개념을 도입하여 어류 서식조건을 유지하기 위한 적정 유량 산정 연구는 김규호(1999)에 의해 한강 달천 여울구간에서 처음으로 시도되었다. 이후 여러 연구자(강정훈 등, 2004; 성영두 등, 2005; 박봉진 등, 2005; 이주현 등, 2006)에 의해 다양한 대상구간에서 유사한 연구가 진행되고 있다. 그러나 이러한 국내 연구는 생태계 보전에 필요한 적정유량 산정에 초점이 맞춰져 있었으며, 그 결과 인위적 하천 물리구조의 변화에 따른 물리서식처를 평가한 연구는 거의 없다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 물리적 특성(유속, 수심, 하상재료, 수온)에 반응하는 어류의 생태적 특성을 고려하여 하천 수중 물리서식 환경을 평가할 수 있는 PHABSIM을 적용하였다. 보 철거 구간에서 실측한 수문 자료를 이용하여 PHABSIM의 수리해석 결과를 검증한 후, 목표종(target species)에 적합한 서식처 적합도 지수를 설정하여 대상구간의 물리서식처를 평가하였다. 본 연구에서 적용한 보 철거 구간에서의 PHABSIM 적용성 검증을 통해, 하천을 인위적으로 개선 또는 악화시키는 활동에 의해 변화되는 수중 물리서식처의 특성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 물리적 서식처 모의 시스템 개념

PHABSIM은 유량 변화와 관련된 물리 미소서식처(physical microhabitat)의 변화를 모의 및 예측한다. PHABSIM은 주로 하천의 물리 미소서식처 구조의 특징을 규명하고, 목표종(target species)의 생물학적 반응과 성장단계(life stage)를 반영하여 유량에 따른 물리서식처의 특징을 분석한다. 일반적으로 PHABSIM 결과는 유량에 따른 물리서식처의 가용성을 제시함으로써, 하천유지유량의 필요성과 연관된 연구 또는 유량 및 하천변화가 하천 생태에 미치는 영향을 분석하는 연구에 활용된다. Fig. 1은 PHABSIM의 개념과 절차를 도시한

것이다.

물리서식처 모의의 전제조건은 어류를 포함한 하천 생물의 풍부도 및 다양성은 물리서식처의 가용성에만 제한을 받는다는 것이다(USGS, 2001). 이러한 전제조건으로 인해 PHABSIM은 어느 정도 한계를 가지게 된다. 즉, 생물의 풍부도 및 다양성은 수질, 인간의 활동, 영양물질 등에 의해 제한될 수도 있으며, 모형 적용 범위를 초과하는 시공간 기준에서 발생하는 다양한 상황이나 상태에 의해 제한될 수도 있다. 그러나 이러한 한계에도 불구하고 기존 연구(Jowett, 1992; Railsback et al., 1993; Nehring and Anderson, 1993; Bovee et al., 1994)에 의하면, PHABSIM 결과는 실제 물리서식처와 성장 잠재력(population potential)을 적절히 모의하는 것으로 나타났다.

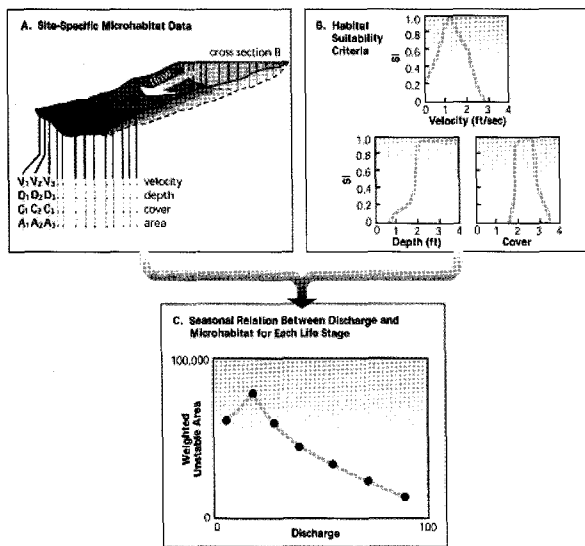


Fig. 1. PHABSIM concept and its process (Bovee et al., 1998)

PHABSIM은 주로 유량에 따른 물리서식처의 변화를 제시하며, 수질이나 에너지와 같은 하천 시스템의 거시적 구조는 포함하지 않는다. 즉, PHABSIM은 하천 시스템상의 물리적 구성요소와 유량의 변화 관계를 모의하여 하천 생물의 미소서식처 양과 크기를 제시한다. 또한 하천유량의 점증적 변화 모의를 이용하여 수심, 유속, 하상재료 및 은신처와 목표종의 시계열에 따른 적합도 관계를 설정할 수 있다. 이러한 PHABSIM의 최종결과는 유량에 따른 가중가용면적(WUA: Weighted Usable Area)이고, 가중가용면적은 하천내 하도 공간상의 물리서식처이다. 또한 가중가용면적은 대상 생물이 특정 성장단계별로 주어진 구간을 이용할 수 있는 기본 적합도(net suitability)에 대한 하나의 지표이다.

PHABSIM에는 기본적인 두 가지 성분, 즉 수리 모의와 서식처 모의가 있고, 최근에는 하도 구간 전체에 대한 거시 서식처 개념의 수질모의가 추가되고 있다. PHABSIM을 적용하기 위해서는 물리서식처 평가를 위한 연구 또는 사업을 설정한 후 필요한 정보를 구축한다. PHABSIM에 필요한 정보는 수리모형 구축을 위한 지형자료와 검증에 위한 수문자료, 그리고 서식처 모의에 필요한 생물 서식처 적합도 지수 등이 있다. 이러한 정보를 바탕으로 PHABSIM에서 적용하는 3가지 수리모형(STGQ, MANSQ, WSP)을 이용하여 수위 및 유속을 모의 및 검증하거나, 대상 구간에 적합한 수리모형을 이용하여 수위 및 유속을 모의할 수 있다. STGQ (STaGe-Discharge relationship)모형은 수위-유량 관계 곡선을 이용하고, MANSQ(MANning'S eQuation)모형은 Manning 방정식을 사용하며, WSP(Water Surface Profile)모형은 표준축차계산법을 사용한다. 또한 평가 대상 종의 선정 및 서식처 적합도 기준(Habitat Suitability Criteria)을 설정하고, 대상구간에 적합한 모형을 선택하여 물리서식처 모의를 수행한다. 분석된 결과는 유량증분방법론에 직접적으로 적용하거나, 하천사업과 관련 있는 이해당사자와 함께 다양한 대안을 비교함으로써 하천복원 방향을 결정하는 의사결정수단으로 활용되어 질 수 있다.

### 3. 자료 구축 및 모형 검증

#### 3.1 연구 대상구간

본 연구에서는 경기도에 의해 보를 철거하여 하천생태통로 및 수변 서식처 복원사업이 시행된 곡릉천을 대상으로 물리서식처를 평가하였다. Fig. 2는 곡릉천 유역 중 본 연구에서 적용한 대상구간이다. 대상구간은 곡릉천 상류로부터 약 14 km 하류에 위치한 곡릉 2보를 중심으로 상하류 약 900 m 구간이 설정되었다. 곡릉 2보는 높이 1.5 m, 길이 약 75 m인 콘크리트 보이며, 과거 취수용 보로 이용되어 왔으나, 주변지역의 토지이용 변화로 인하여 원래의 취수기능이 상실된 것이다. 이에 따라 경기도 고양시와 한국건설기술연구원은 기능이 상실된 곡릉 2보를 철거하기로 협의한 후, 지역 주민의 의견수렴과 설명회를 거쳐 2006년 4월 14일 완전 철거하였다(한국건설기술연구원, 2007). 또한 한국건설기술연구원에서는 보 철거를 통한 하천생태통로 복원 및 수질개선 효과 연구를 진행 중에 있으며, 보 철거에 따른 환경개선 효과 등을 검토하기 위하여 지속적으로 하상재료 및 생물 모니터링을 시행하고 있다.

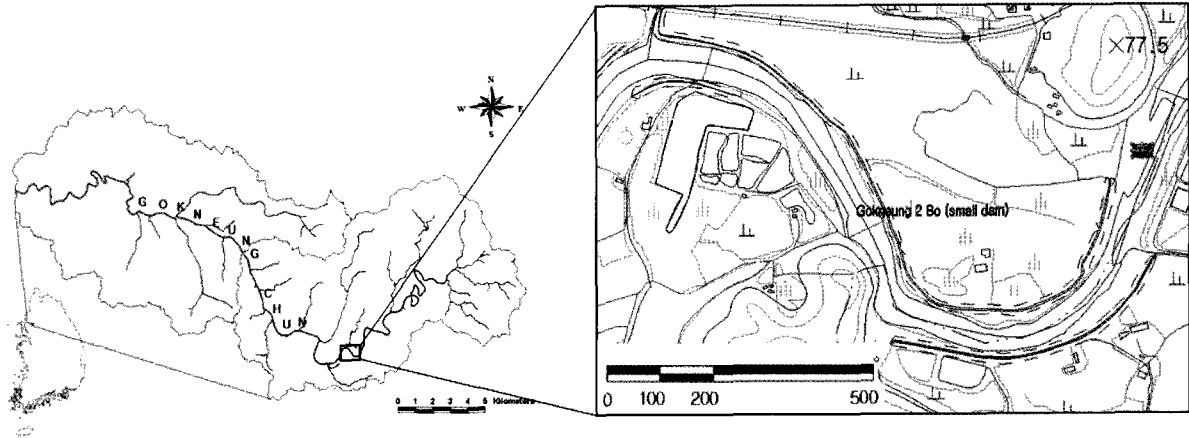


Fig. 2. Location of the study site and reach

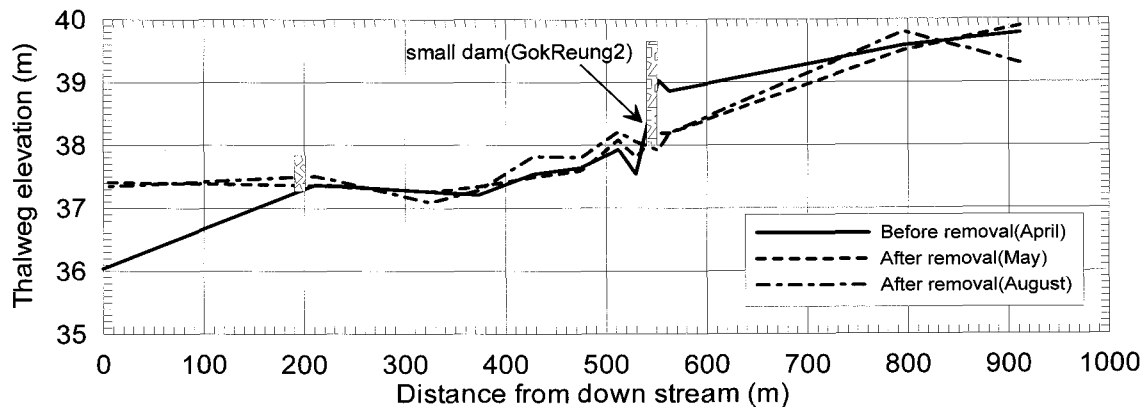


Fig. 3. Thalweg profiles in the study site

### 3.2 물리 및 어류 조사

본 연구에 적용한 대상구간의 물리조사(단면측량 및 하상재료)는 보 철폐(인위적 교란) 이전과 직후 및 홍수(자연적 교란) 이후, 총 3회의 자료(4월 1일, 5월 30일, 8월 4일)를 토대로 비교하였다. Fig. 3은 보 철폐에 따른 최심하상고 변화이다. 보 철폐로 인하여 상류에서는 최대 1.1 m의 하상 저하가 발생하였으며, 하류에서는 최대 1.3 m의 퇴적이 발생하였다. 상류 구간의 하상 저하는 오염된 토사에 의한 환경영향을 최소화시키기 위해 시행한 인위적 준설에 의한 영향이 크며, 홍수기를 거치면서 하상이 안정화되고 있는 양상을 나타내고 있다. 하류 구간에서 퇴적이 과도하게 발생한 것은 곡릉2보로부터 대략 400 m 지점에 위치한 물막이 보에 의한 영향으로 추정된다.

또한, 물리서식처 적합도 평가를 위해 단면측량과 함께 하상재료 특성을 비교하였다. 그 결과 보 하류에서  $D_{50}$ 은 조사 시기에 따라 2.74 mm에서 10.73 mm로 변화되었으며, 보 상류의 경우 0.51 mm에서 1.96 mm로 바뀌었다. 즉, 보 철폐에 의한 소류력 변화로 인하여 하

상재료 입경이 증가하는 것으로 나타났으며, 하상재료의 변화는 생물 물리서식처를 변화시키는 요인으로 작용할 것으로 추정된다.

어류조사 시기는 물리조사와 동일하게 3차례 실시하였다. Table 1은 본 연구에서 실시한 보 철폐 구간의 어류 개체수의 변화와 기존에 조사된 곡릉천 전 구간의 어류 조사결과를 나타낸 것이다. 보 철폐에 따른 생물조사 결과는 비록 짧은 기간에 실시되었지만, 보 철폐 이전에는 버들매치(*Abbottina rivularis*)가 전체 개체수의 52%를 차지하는 우점종이었으나, 보 철폐 이후에는 개체수가 급격히 감소하는 것으로 확인되었다. 반대로 밀어(*Rhinogobius brunneus*)는 보 철폐 이전에는 적은 개체수가 채집되었으나, 보 철폐 이후 개체수가 급격히 증가하였다. 김익수(1997)에 의하면 버들매치는 유속이 완만하고 모래나 진흙이 깔려 있는 하천에 분포하며, 밀어는 자갈이나 모래가 깔려 있는 하천에 서식한다고 기술되어 있다. 연구구간은 보 철폐로 인하여 유속이 정체되던 구간이 사라지고 하상재료 입경이 증가한 것으로 확인되었다. 이러한 하천의 물리적 변화와 문헌에 의한 각각의 어류 서식 조건을 검토하면, 생물

Table 1. Fish monitoring results

Scientific name	Korea institute of construction technology			Gokreung choen network
	1st survey	2nd survey	3rd survey	
<i>Zacco platypus</i>	23	38	37	1,229
<i>Abbottina rivularis</i>	83	5	3	89
<i>Rhinogobius brunneus</i>	12	6	97	7
<i>Pseudogobio esocinus</i>	5	19	28	3
<i>Abbottina springeri</i>	6	7	20	-
<i>Carassius auratus</i>	1	-	-	121
etcetera	30	35	17	196

조사에 나타난 버들매치와 밀어의 개체수 채집결과와 변화 원인을 정성적으로 확인할 수 있다. 즉, 보 철거 이전에는 상대적으로 버들매치에게 적합하고 밀어에게 부적합한 서식환경을 가지고 있었으나, 보 철거로 인하여 유속 및 하상재료의 입경이 증가하여 상대적으로 밀어에게 적합하고 버들매치에게 부적합한 서식처 조건을 제공하게 된 것으로 판단된다. 이러한 영향에 대한 분석은 향후에 어류전문가의 자문과 대상종에 적합한 서식처 적합도 지수의 설정을 바탕으로 한 물리서식처 모의를 통해 보다 정량적으로 평가할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 피라미(Pirami; Pale chub; *Zacco platypus*)를 목표종으로 선정하여 하천의 물리서식처를 분석하였다. 피라미를 목표종으로 설정한 이유는 Table 1에 제시되어 있는 것과 같이, 연구구간 내에서 우점 또는 차우점 종으로 확인되었을 뿐만 아니라, 곡릉천 전체 하천에 대해 조사를 시행한 기존 연구(곡릉천 친구들, www.gong-nunriver.or.kr)에서도 67 % 정도의 우점도를 나타냈기 때문이다. 또한 국내에서 피라미에 대한 서식처 적합도 지수는 다양한 방법으로 개발 및 적용된 사례가 많다.

### 3.3 수리모형 검증

유량 범위에 따른 각 단면의 가용한 수리 인자, 즉 수심 및 유속의 분포를 모의하기 위하여 대상구간의 수문자료는 과학기술부(2007)에서 제시한 2006년 곡릉천 수리자료를 이용하였다. Fig. 4는 대상구간의 2006년 유황도를 도시한 것이다. 대상구간의 홍수기는 6-8월에 집중되어 있으며, 풍수량(1년을 통하여 95일은 이보다 더 작지 않는 유량으로, 유황곡선에서 초과확률 74 %에 해당)을 제외한 유량은 대략 1.8 m<sup>3</sup>/sec를 초과하지 않는 것을 확인할 수 있다.

각 단면에서 유량에 대한 수위는 수위-유량관계 곡선을 이용한 STGQ(stage-discharge relationship) 모형과 표준축차계산법을 이용한 WSP(Water Surface Profile)

모형을 연계하여 계산하였다. PHABSIM 수리모형은 각 단면의 횡방향 격자에 따라 조도계수를 설정할 수 있으며, 본 연구에서 적용한 조도계수의 범위는 0.032-0.043 이다. Fig. 5는 보 철거 지점에서 350 m 상류에 위치한 대상구간 최상류 횡단면의 계산된 수위를 도시한 것이다. 한편, 본 연구에서 적용한 WSP 수위계산 모형은 PHABSIM에서 활용 가능한 모형 중 물리현상을 가장 적절히 반영한다고 Bovee et al.(1998)에 의해 제시된 바 있다. 또한 조도의 공간적 변화와 유량 증가에 따른 조도 변화를 고려할 수 있다.

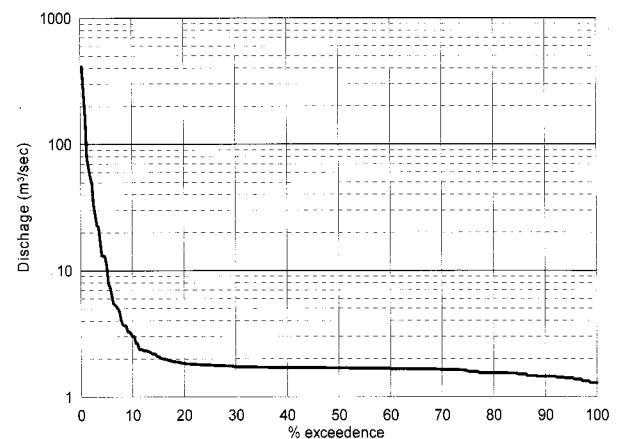
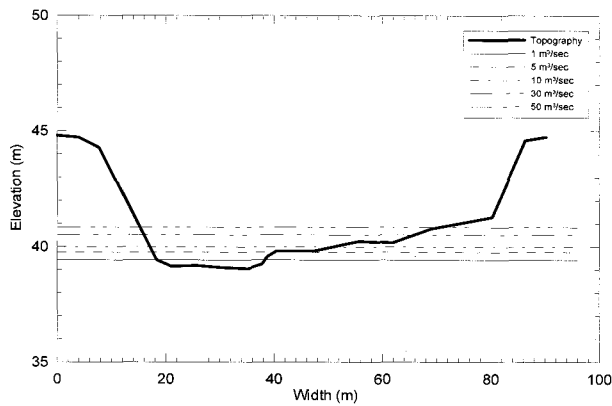
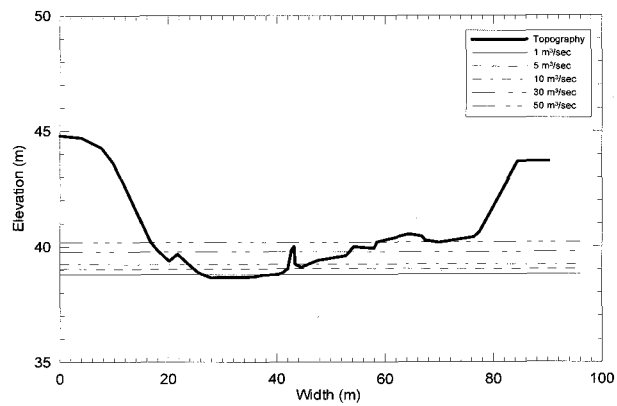


Fig. 4. Flow duration curve for the study site (2006 data)

유속모의는 각 단면에서의 지형, 유량, 그리고 수위 자료를 구축한 후 PHABSIM에서 제안된 해석방법을 적용하였다. Fig. 6은 보 철거 지점에서 약 50 m 상류에 위치한 단면에서 보 철거 후 홍수기의 실측치와 계산치를 도시한 것이다. 홍수기 실제 유속분포는 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)기법을 적용하여 측정된 한국건설기술연구원(2007)의 자료를 활용하였다. 제시된 LSPIV의 유속은 수심방향으로의 평균유속분포식을 적용하여 표면유속을 평균유속으



(a) Before small dam removal



(b) After small dam removal

Fig. 5. Calculated water surface elevations

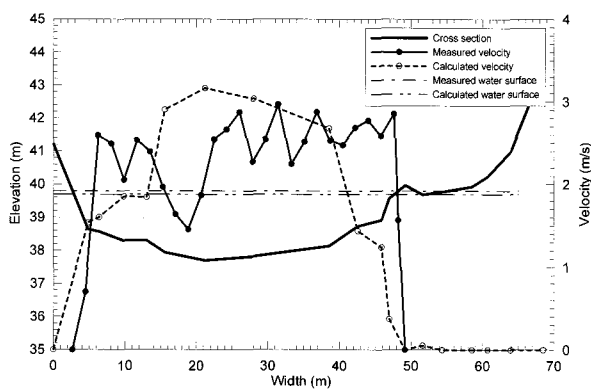


Fig. 6. Comparison of field and numerical simulation data

로 환산한 값이다. 현장 측정결과, 단면의 수위와 평균 유속은 각각 39.8 m와 2.33 m/sec로 측정되었으며, 계산된 수위와 평균유속은 각각 39.7 m와 2.32 m/sec로 모의되었다. 실측치와 계산치의 오차는 수위가 0.03 %, 유속이 0.43 %로 나타났으며 이러한 해석결과는 실제 사상을 적절히 모의함을 알 수 있다.

#### 4. 물리서식처 모의

##### 4.1 서식처 적합도 지수

서식처 평가에서 가장 기본이 되는 요소는 서식처 적합도 지수이다. U.S. Fish and Wildlife Service (1981)는 서식처 물리, 화학, 영양구조 등 육상 및 수생 생물에 대한 모든 서식환경을 포함한 서식처 적합도 지수 설정방안을 제시하고 있다. 이러한 서식처 적합도 지수를 설정하기 위해서는 다양한 문헌 및 생태전문의 정밀한 조사와 복잡한 절차가 요구된다. 이에 비해 PHABSIM에서는 수심, 유속, 하상재료, 그리고 수온에 대한 물리서식처 적합도 기준만을 제시하며, 적용되는

물리서식처 적합도 기준은 현장조사와 생태전문의 자문을 통해 설정이 가능하다. Fig. 7은 김규호(1999)와 성영두 등(2005)에 의해 제시된 피라미의 수심, 유속, 하상재료, 그리고 수온의 물리서식처 적합도 기준을 도시한 것이다. 두 연구결과와 물리서식처 적합도 지수의 차이에서 오는 민감도 연구는 향후 연구를 통해 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 김규호(1999)의 물리서식처 적합도 기준을 적용하여 물리서식처 평가를 시행하였다.

##### 4.2 어류 서식처 평가

본 연구에서는 보 철거에 따른 수중 물리서식처의 변화를 검토하기 위해 PHABSIM을 이용하여 보 철거 이전과 이후에 대한 물리서식처 모의를 수행하였다. 목표종은 피라미이며, 대상구간은 2006년 4월에 보를 철거한 곡릉천 약 900 m 이다. 대상구간에 대해 흐름방향으로 최대 219 m, 최소 7 m 간격으로 총 14개의 단면을 분할하였으며, 각 단면은 19-46개의 격자로 구성하였다. 본 연구에서는 물리서식처만을 평가하며, 보에 의한 화학 및 영양구조에 대한 영향은 고려하지 않는다. 또한 보 철거에 의한 영향은 곡릉천 전 구간에 영향을 미치는 것이 아니라, 대상구간에 국한된다.

Caissie(1995)는 하천 수생생태계를 유지하기 위한 최저 유량 기준을 제시하기 위하여 연평균 유량의 25 % 방법과 90 분위수, 7일 연속 10년 빈도 갈수량(7Q10), Tennant 기준치(Tennant, 1976), 그리고 월 중앙 유량을 비교하였으며, 그 중 연평균 유량의 25 % 방법과 Tennant 방법이 적합한 것으로 제시하였다. 대상구간의 연평균 유량(5.68 m<sup>3</sup>/sec)의 25 % 값은 1.42 m<sup>3</sup>/sec이며, 90 분위수 방법에 의하면 1.45 m<sup>3</sup>/sec이다. 따라서 본 연구에서 보 철거에 의한 서식처 적합도

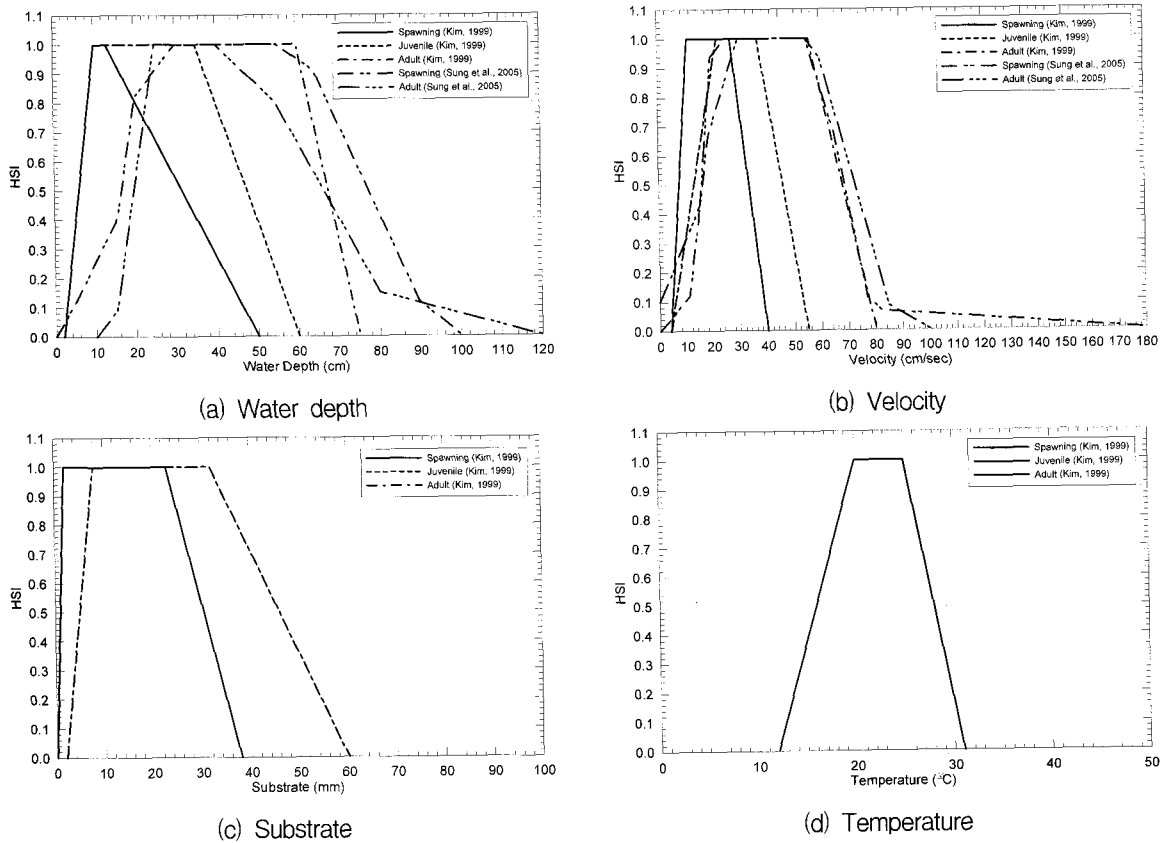


Fig. 7. Habitat suitability criteria for *Zacco platypus*(Kim, 1999; Sung et al., 2005)

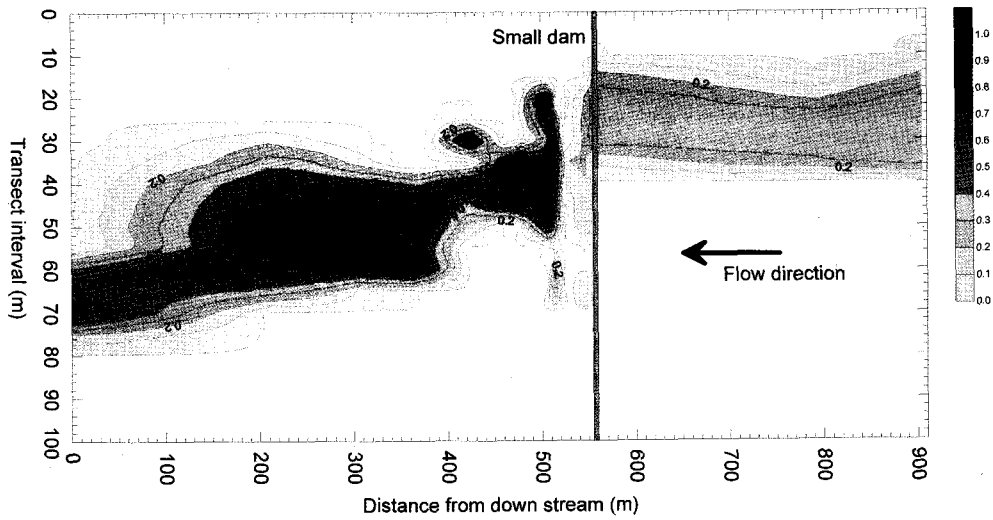
변화 검토를 위해, 기존 연구자들이 제안한 방법에 의해 설정된 최저 유량조건과 유사한 1.5 m<sup>3</sup>/sec를 선정하였다.

Fig. 8은 유량조건 1.5 m<sup>3</sup>/sec에 대한 성어의 복합 서식처 적합도(composite habitat suitability) 분포를 도시한 것이다. x와 y축은 각각 하류부터의 거리와 횡단면 좌안측부터의 거리이다. 복합 서식처 적합도는 0~1 사이의 값을 나타내며, 1에 근접할수록 물리서식처가 적합한 구간이다. 보 철거 이전의 물리서식처 분포인 Fig. 8(a)를 살펴보면, 보 하류부분의 물리서식처는 상대적으로 양호하나 보 주변에서 악화된 후, 보 상류부근에서 다소 개선된 것을 알 수 있다. 또한 보 상류의 경우 흐름이 정체되는 구간으로 물리서식처 구조가 단순하게 분포되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)는 보 철거 이후의 물리서식처 적합도 분포로 보 철거로 보 주변을 포함한 대상구간 전반에 걸쳐 물리서식처가 향상된 것을 나타내고 있다. 특히 보 철거로 인하여 상류구간의 흐름 및 수심이 다양해짐으로써 보 철거 이전에 비해 물리서식처 구조 또한 다양하게 형성되는 것을 알 수 있다.

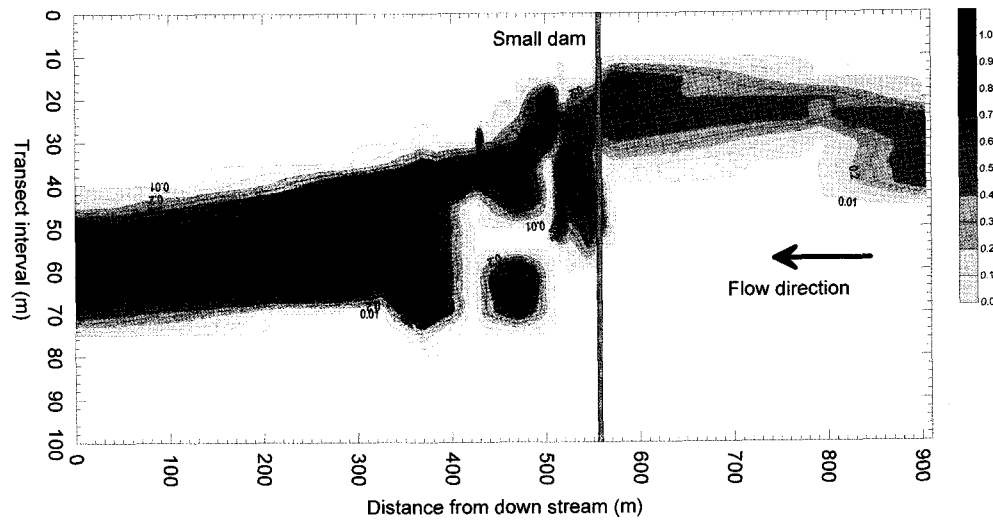
Table 2와 Fig. 9는 유량조건 1.5 m<sup>3</sup>/sec에 대해 보

철거에 따른 복합 서식처 적합도의 차이와 성어의 가중가용면적 변화를 나타낸 것이다. 구간에 따라 물리서식처가 감소 또는 증가되는 것으로 분석되었으며, 보 철거로 인하여 대상구간 전반에 대한 가중가용면적은 산란기, 치어기, 성어기에 대해 대략 10%, 45%, 50%씩 증가하였다. 보 철거를 시행하면 일반적으로 보 상류의 지체 및 저류 구간이 제거되어 어류가 서식할 수 있는 총 윤표면적(total wetted area)이 감소될 것으로 판단되며, 본 연구의 결과에서도 보 상류의 총 윤표면적은 7,000 m<sup>2</sup>에서 5,800 m<sup>2</sup>으로 17% 감소하였다. 그러나 보 상류구간의 총 윤표면적이 감소하였음에도 불구하고, 피라미가 서식하기 적합한 흐름으로 바뀌어 가중가용면적은 증가하였다. 보 하류 50 m 이내 구간의 경우 하천의 상하류 연속성을 복원함으로써 물리서식처가 크게 개선된 것으로 분석되었다. 그러나 보 하류 50-100 m 구간의 경우 하상변동 등과 같은 원인으로 인해 물리서식처가 다소 악화되었다.

일반적으로 가중가용면적은 유량에 따라 점차 증가한 후 감소되는 곡선 형태를 이룬다(Bovee et al., 1998). 기존 연구자(김규호, 1999; 성영두 등, 2005; 강정훈 등, 2004)에 따르면 곡선의 첨두치에 해당되는 가중



(a) Before small dam removal



(b) After small dam removal

Fig. 8. Composite habitat suitability for adult Pirami(*Zacco platypus*) at  $1.5 \text{ m}^3/\text{sec}$

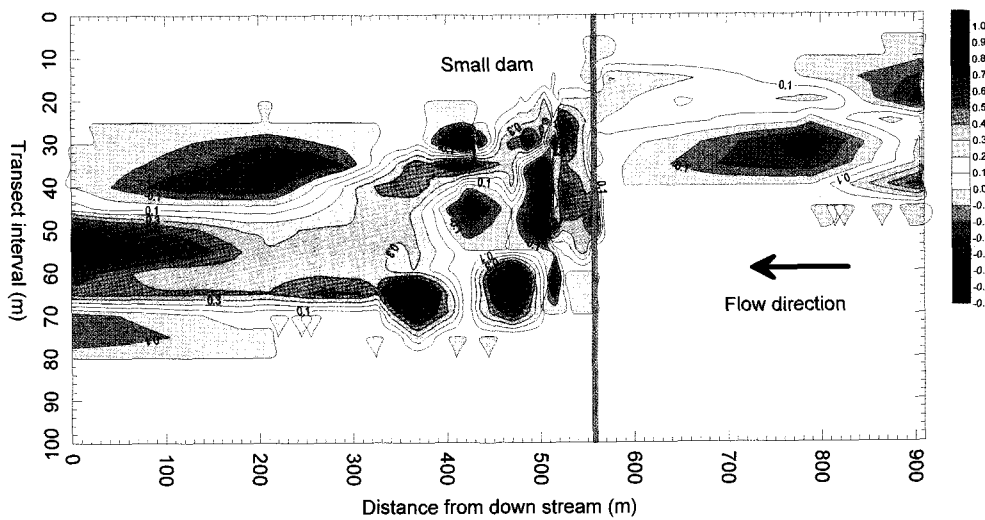


Fig. 9. Difference of composite habitat suitability for adult Pirami(*Zacco platypus*) between before and after small dam removal



Table 2. Change of the Weighted Usable Area for the small dam removal and life stages

Flow (m <sup>3</sup> /sec)	Life stage	Condition	Weighted Usable Area(m <sup>2</sup> )		
			Total reach	Upstream at small dam	Downstream at small dam
1.5	Spawning	Before small dam removal	9,500	2,000	7,500
		After small dam removal	10,300	3,300	7,000
		Change rate of WUA by removal	△ 8.4 %	△ 65.0 %	▽ 6.7 %
	Juvenile	Before small dam removal	7,700	2,000	5,700
		After small dam removal	11,300	2,500	8,800
		Change rate of WUA by removal	△ 46.8 %	△ 25.0 %	△ 54.4 %
	Adult	Before small dam removal	9,000	2,300	6,700
		After small dam removal	13,400	3,200	10,200
		Change rate of WUA by removal	△ 48.9 %	△ 39.1 %	△ 52.2 %

Notes    △: increase and ▽: decrease

가용면적의 유량을 대상생물에 대한 최적유량으로 산정한다. 이러한 최적유량 산정방법은 대상생물의 관점에서 분석된 것으로, 하천의 다양한 생물과 수문상황을 고려하지 않은 방법론이다. 이는 주로 댐하류와 같이 유량이 조절되는 하천의 경우에는 하천 물리서식처를 유지하기 위한 최적유량을 설정하는 기준이 될 수 있다. 그러나 자연 하천은 수문상황과 지형조건, 그리고 하천생태계가 유기적인 관계를 맺고 있으므로, 1-2가지의 생물을 바탕으로 최적유량을 산정하는 것은 바람직하지 않을 수도 있다. 하천의 포괄적인 생물상과 수문상황 등을 반영하지 않고 단일종 혹은 소수의 종을 바탕으로 설정된 최적유량을 적용하는 것은 설정된 최적유량에 의해 하천의 하상이 변화되고, 변화된 하상은 생물 서식처에 영향을 주는 유기적 관계를 이루기 때문이다. 즉, 이와 같은 접근방법은 자연 하천의 경우 대상 하천의 실제 수문상황을 반영하지 못하는 왜곡된 유량 사상이 최적유량으로 설정될 수 있다.

Fig. 10은 대상구간에서의 유량에 따른 가중가용면적 관계를 도시한 것이다. 제시된 결과는 최적유량을 산정하는데 있어 필요한 다양한 요소(하도, 수문, 포괄적 생물상 등)를 반영하지 못하였으므로, 대상구간의 최적유량을 설정하기에는 한계를 가진다. 그러나 보를 철거함으로써 동일한 가중가용면적을 제공하는 유량이 감소한 것으로 분석되었다. 즉, 성어기 피라미의 보 철거 이전에 최대 가중가용면적을 제공하는 유량은 약 10

m<sup>3</sup>/sec이나, 보 철거 이후에는 약 3 m<sup>3</sup>/sec의 유량으로 보 철거 이전과 유사한 가중가용면적을 제공할 수 있는 것으로 분석 되었다.

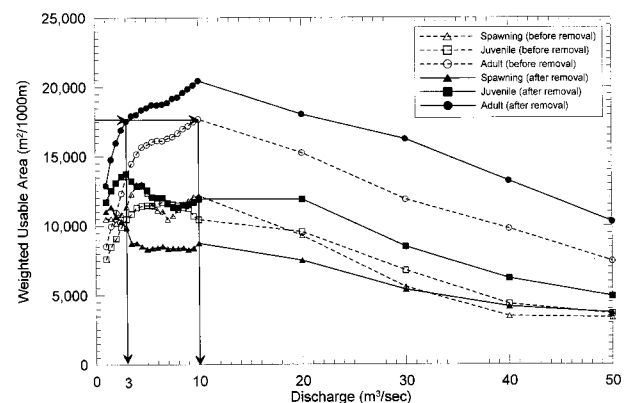


Fig. 10. Weighted usable area at various discharges

Fig. 11은 보 철거로 인한 물리서식처의 변화를 도시한 것이다. 횡축은 유량이며, 종축은 보 철거로 인해 변화된 총 유효면적과 각 성장단계에 따른 가중가용면적의 변화율을 나타낸 것이다. 총 유효면적의 경우 보 철거로 인하여 약 20 %정도 감소되었다. 이러한 결과는 보 철거로 대상구간의 하상변동에 의한 지형조건 변화와 본 연구에서 산정된 가중가용면적의 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 피라미 산란기 물리서식처의

경우  $2 \text{ m}^3/\text{sec}$  이하에서는 약간 증가되었으나,  $2 \text{ m}^3/\text{sec}$  이상의 유량에서는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 원인은 산란기 피라미가 성어기에 비해 상대적으로 흐름에 약한 유영 특성을 가지기 때문이다. 즉, 보 철거 이전에는 보에 의한 지체 및 저류효과가 발생하여 유속이 감소하였으나, 보가 철거됨에 따라 유속 감소효과가 발생하지 않아 산란기 물리서식처의 감소가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 대상구간뿐만 아니라 보 철거 사업이 시행되는 구간에는 수제 및 거석과 같은 유속 감소구조물을 설치하여 유영력이 떨어지는 산란기의 물리서식처를 증대시키는 노력이 필요하다. 성어기의 경우, 보 철거를 통해 물리서식처가 크게 증대된 것으로 나타났다. 특히 대상구간에서 90 % 이상의 빈도를 나타내는  $2 \text{ m}^3/\text{sec}$  이하의 유량인 경우, 물리서식처가 약 50 % 정도 증가한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 보 철거로 인해 피라미 개체수가 23마리에서 37마리로 60 % 증가된 어류조사 결과와 유사하다고 할 수 있다(Table 1 참조).

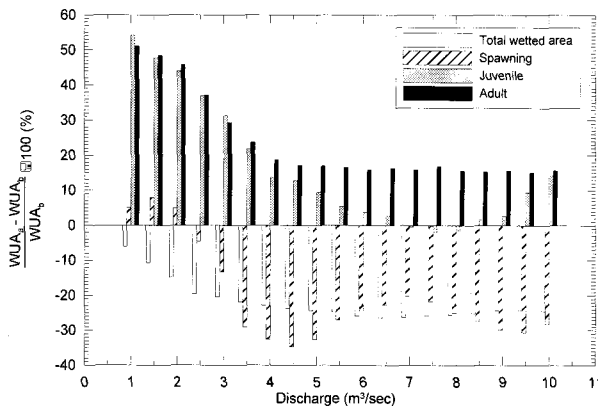


Fig. 11. Physical habitat change on the removal reach of small dam for each life stage where  $WUA_b$  and  $WUA_a$  are the WUA before and after small dam removal respectively

본 연구에서 제시된 결과는 곡릉천 전 구간의 물리서식처를 대상으로 평가한 것이 아니라, 보 철거를 시행한 대상구간에서만 유효하다. 또한 PHABSIM은 물리적 요소 이외에, 생물의 서식 및 성장에 영향을 미치는 다양한 인자(수질, 영양구조 등)를 고려하지 못했기 때문에 생물량의 변화를 직접적으로 예측하는 것은 한계가 있을 수 있다(USGS, 2001). 그러나 기존 연구결과에 의하면 PHABSIM과 현장자료(서식처, 생물 개체수 등) 결과 사이에는 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 본 연구의 경우에서도 기존 연구와 마찬가지로

지로 하천환경의 변화에 따른 물리서식처 및 생물량의 변화 양상을 적절히 모의하는 것으로 나타났다. 따라서 PHABSIM은 향후 진행될 보 철거를 포함한 다양한 하천환경개선 사업의 계획에서 유지관리 단계까지 적용하여 사업의 효과를 분석 및 판단하는 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

하천의 물을 인위적으로 차단하거나 조절하는 시설로 인해 하천유량 감소와 생태계의 연속성 단절을 초래하고 있다. 최근 보를 철거하여 하천생태통로 및 수변서식처 복원을 위한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있으나, 보에 의해 어류 서식처가 어떠한 영향을 받는지 명확히 단기간에 규명하기 어려운 것이 사실이다. 본 연구에서는 하천 서식환경을 평가하기 위해 광범위하게 이용되고 있는 PHABSIM을 이용하여 보 철거에 따른 하천 물리서식처의 변화를 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 하천 생태계를 유지하기 위한 최저 기준인 연평균 유량의 25 % 값을 적용하여 해석한 결과, 보 철거로 인해 구간에 따라 물리서식처가 감소 또는 증가되는 것으로 분석되었다. 특히, 보 철거로 인하여 대상구간 전반에 대한 가중가용면적은 피라미의 산란기, 치어기, 성어기에 대해 대략 10 %, 45 %, 50 %씩 증가 하였다.
- 2) 최적 생태유량 산정을 위해서는 보다 다양한 인자를 검토하여야 할 것으로 판단되며, 본 연구 대상구간에서 보를 철거함에 따라 보 철거 이전의 30 % 유량만으로도 유사한 물리서식처를 제공하는 것으로 나타났다.
- 3) 피라미 성어기의 물리서식처는 보 철거에 의해 15-50 % 정도 증가하였으나,  $2 \text{ m}^3/\text{sec}$  이상의 산란기 물리서식처는 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서 보 철거 구간에는 수제 및 거석과 같은 유속 감소구조물을 설치하여 산란기의 물리서식처를 증대시키는 노력이 필요하다.
- 4) 본 연구에서 적용한 PHABSIM은 하천환경 변화에 따른 물리서식처 변화 양상을 적절히 모의하는 것으로 나타났으며, 향후 진행될 다양한 하천환경 개선사업에 적용하여 사업의 효과를 분석하는 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 건설핵심기술연구개발사업(06 건설핵심B01)에 의한 "자연과 함께하는 하천복원 기술 개발"의 연구성과입니다.

## 참고 문헌

- 강정훈, 이은태, 이주현, 이도훈 (2004). "어류의 서식처 조건을 고려한 하천의 필요유량 산정에 관한 연구." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제11호, pp. 915-927.
- 과학기술부 (2007). **지표수 조사 시스템 적용 보고서**.
- 권보애 (2006). 보 철거로 인한 하상변도 - 곡릉천 곡릉2보를 중심으로 -, 석사학위논문, 연세대학교.
- 김규호 (1999). 하천 어류 서식 환경의 평가와 최적유량 산정, 박사학위논문, 연세대학교.
- 김익수 (1997). 한국동식물도감 제37권 동물편(담수어류). 교육부.
- 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.
- 이주현, 정상만, 이명호, 이용수 (2006). "유지유량 증분 방법론(IFIM)에 의한 한강수계 지류에서의 어류서식 필요유량 산정." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제2B호, pp. 153-160.
- 한국건설기술연구원 (2007). **기능을 상실한 보 철거를 통한 하천생태통로 복원 및 수질개선 효과 3차년도 중간보고서**.
- Booker, D.J. and Dunbar, M.J. (2004). "Application of physical habitat simulation (PHABSIM) modelling to modified urban river channels." *River Research and Applications*, Vol. 20, pp. 167-183.
- Bovee, K.D. (1982). *A guide to stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. Instream Flow Information Paper No. 12, U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-82/26, Fort Collins, Colorado.
- Bovee, K.D., Lamb, B.L., Bartholow, J.M., Stalnaker, C.B., Taylor, J., and Henriksen, J. (1998). *Stream habitat analysis using the instream flow incremental methodology*. U.S. Geological Survey, Biological Resources Division Information and Technology Report, USGS/BRD-1998-0004.
- Bovee, K.D., Newcomb, T.J., and Coon, T.G. (1994). *Relations between habitat variability and population dynamics of bass in the Huron River*, Michigan, National Biological Survey Biological Report 21.63.
- Cassie, D. (1995). *Hydrometeorological conditions for the Miramichi River basin during 1994*, Department of Fisheries and Oceans Atlantic Fisheries Research Document 95/88.
- Elliott C.R.N., Dunbar, M.J., Gowing, I., and Acreman, M.C. (1999). "A habitat assessment approach to the management of groundwater dominated rivers." *Hydrological Processes*, Vol. 13, pp. 459-475.
- Gibbins, C.N., Moir, H.J., Webb, J.H., and Soulsby, C. (2002). "Assessing discharge use by spawning atlantic salmon : a comparison of discharge electivity indices and PHABSIM simulations." *River Reserach and Applications*, Vol. 18, pp. 383-395.
- Gore, J.A., Crawford, D.J., and Addison, D.S. (1998). "An analysis of artificial riffles and enhancement of benthic community diversity by physical habitat simulation (PHABSIM) and direct observation." *Regulated Rivers : Research & Management*, Vol. 14, pp. 66-77.
- Hearne, J., Johnson, I., and Armitage, P. (1994). "Determination of ecologically acceptable flows in rivers with seasonal changes in the density of macrophyte." *Regulated Rivers : Research & Management*, Vol. 9, pp. 177-184.
- Jowett, I.G. (1992). "Models of the abundance of large brown trout in New Zealand rivers." *North American Journal of Fisheries Management*, Vol. 12, pp. 417-432.
- Katopodis, C. and Aadland, L.P. (2006). "Effective dam removal and river channel restoration approaches." *International Journal of River Basin Management*, Vol. 4(3), pp. 153-168.

- Moir, H.J., Gibbins, C.N., Soulsby, C., and Youngson A.F. (2005). "PHABSIM modelling of atlantic salmon spawning habitat in an upland stream: testing the influence of habitat suitability indices on model output." *River Research and Applications*, Vol. 21, pp. 1021-1034.
- Nehring, R.B. and Anderson, R.M. (1993). "Determination of population-limiting critical salmonid habitats in Colorado streams using IFIM/PHABSIM." *Rivers*, Vol. 4(1), pp. 1-19.
- Railsback, S.F., Blackett, R.E., and Pottinger, N.D. (1993). "Evaluation of the fisheries impact assessment and monitoring program for the Terror Lake hydroelectric project." *Rivers*, Vol. 4(4), pp. 312-327.
- Shuler, S.W. and Nehring, R.B. (1993). "Using the physical habitat simulation model to evaluate a stream habitat enhancement project." *Rivers*, Vol. 4, pp. 175-193.
- Stevens, A.P. (1999). "Impacts of groundwater abstraction on the trout fishery of the River Piddle, Dorset; and an approach to their alleviation." *Hydrological Processes*, Vol. 13, pp. 487-496.
- Tennant, D.L. (1976). "Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources." *Fisheries*, Vol. 1, pp. 6-10.
- U.S. Fish and Wildlife Service (1981). *Standards for the development of habitat suitability index models*. Division of Ecological Services, 103 ESM.
- U.S. Geological Survey (2001). *PHABSIM for windows - User's manual and exercises*. Mid-continent ecological science center.
- Vilizzi, L., Copp, G.H., and Roussel, J. (2004). "Assessing variation in suitability curves and electivity profiles in temporal studies of fish habitat use." *River Research and Applications*, Vol. 20, pp. 605-618.

(논문번호:07-100/접수:2007.09.28/심사완료:2007.10.29)