

# 하천 어류의 서식처 적합도 기준 및 물리 서식처 해석



**강 형 식**  
한국건설기술연구원, 박사후연구원  
kanghs@kict.re.kr



**임 동 균**  
한국건설기술연구원, 연구원  
himdk@kict.re.kr



**정 상 화**  
단국대학교 토목환경공학과 조교수  
bskang@dankook.ac.kr



**김 규 호**  
한국건설기술연구원, 책임연구원, 하천·해안연구실장  
khkim1@kict.re.kr

## 1. 머리말

하천은 지난 수천 년에 걸쳐 인간 및 동식물에게 용수 및 에너지를 공급해주고 운송을 위한 통로 등으로 이용되어 왔다. 그러나 지난 반세기에 걸친 인간의 인위적인 활동에 의해 하천의 특성이 변화되면서 자연 서식처 역시 영향을 받게 되었다. 예를 들어, 보

나 댐 등과 같은 수공 구조물 설치로 인해 하천 상, 하류간의 생태학적 단절을 초래 하였고, 하상 준설 및 하천변의 홍수방어 구조물 등으로 인한 하천 단면 및 하상고 변화는 하상이 다시 평형 상태로 회복하는 과정에서 또 다른 하천 단면 변화를 발생시킨다. 이와 같은 변화는 수많은 하천 생물 종에 대한 서식처 파괴의 원인이 된다. 이에 대한 한 예로서, 미국의 사례이지만, Johnson 등(2001)에 의하면 담수 어종의 약 20% 이상은 멸종되었거나 멸종 위기에 처해있는 것으로 밝혀졌다. 또한 북미 지역 수생생물 종의 멸종률은 지상생물 종의 멸종률 보다 다섯 배 가량 더 높은 것으로 추산되었다. 이와 같이 수생생물의 다양성에 대한 심각한 감소는 잘못된 하천 정책으로 인하여 수 생물체를 보호하는데 실패하고 있다는 것을 나타낸다(Johnson 등, 2001). 이와 같은 미국의 사례는 우리나라 역시 예외가 아닐 것이다.

하천복원 및 서식환경 조성 사업에 있어 최적 생태유량 산정 기술은 가장 중요하게 개발되어야 할 대상이다. 표 1은 해외에서 사용되고 있는 생태유량 산정 방법을 정리한 것이며, 각각의 산정 방법에 대해서는 본문에 언급하였다. 표 1에서 알 수 있듯이, 미국을 비롯한 선진 유럽국에서는 자국의 상황에 맞게 생태유량 산정 방법을 개발하여 사용하고 있다. 또한 표 1을 살펴 보면, 다양한 산정 방법 중 PHABSIM 모형이 가장 많이 사용되며, 이는 RCHARC, EVHA, RSS, CASIMIR 등과 함께 유량증진방법론(IFIM: Instream Flow Incremental Methodology) 기반 서식처 해석법에 해당하는 모형이다. 다시 말해서, 일반적으로 하천 생태유량을 산정하기 위한 방법은 크게 수문량분석법, 개략 수리계산법, 전문가 판단, IFIM 기반 서식처 해

석법 및 다변량통계법이 있으며, 이중 IFIM 기반 서식처 해석법이 생태유량을 산정하는데 있어 여러 국가에서 가장 많이 적용되고 있는 것을 볼 수 있다.

IFIM의 일반적인 절차는 크게 ①하천 개발 사업 전, 후에 대한 제도 분석, 해석 전략 및 범위 설정, 계획 수립, ②어류 서식처에 대한 거시 서식처(하도특성, 수온과 수질 등) 및 미시서식처(수심, 유속, 하상 재료 등) 해석, ③서식처 적합도 기준 도출, ④수문량 변화에 따른 물리서식처 모의, ⑤서식처 모의 결과에 대한 생태유량 협상 및 결정으로 이루어져 있으며, 완전한 합의가 이루어질 때 까지 위의 과정을 반복 수행한다. 이와 같은 절차 중 서식처 적합도 기준 및 물리서식처 모의는 기술적인 부분에 해당하는데, 특히 서식처 적합도 기준을 제시하기 위해서는 수년에서 수십 년 혹은 그 이상 기간 동안의 현장 모니터링 데이터가 있어야 하며, 서식처 적합도 지수를 산정하기 위한 신뢰할 수 있는 기법이 필요하다. 따라서 외국의 경우, 특히 미국을 예로 들면, 지난 30여 년간 약 150여 어종에 대한 서식처 적합도 지수가 구축되

어 있고, 지속적인 현장 모니터링을 통해 서식처 적합도 지수에 대한 산정 기법 개발이 계속되고 있다. 그러나 국내의 경우, 생태유량을 산정하기 위한 가장 기본적인 인자인 서식처 적합도 지수를 위한 지속적인 체계적인 조사와 평가가 이루어지지 않고 있는 실정이다. 특히, 소수의 현장 모니터링 데이터와 생태학자들의 경험에 의존하여 산정하기 때문에 실제의 최적 생태유량과는 큰 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 신뢰성 있는 생태유량을 산정하기 위해서는 지속적인 하천 생태환경 모니터링을 통해 서식처 적합도 지수를 산정하고, 이에 대한 다양한 기법 개발 연구 및 좀 더 정확한 물리서식처 모델링이 필요할 것이다.

본 고에서는 하천 생태유량 산정에 대한 기존의 다양한 방법에 대해 소개하고, 이중 현재 가장 많이 적용되고 있는 서식처 해석법 중 서식처 적합도 기준 및 물리서식처 모의에 대한 내용 소개와 이에 대한 국내외 연구동향에 대해 살펴보고자 한다.

표 1. 각 국의 하천 생태유량 설정 방안(건설교통부, 2007)

국가	적용 방법
영국	• PHABSIM, MAF, HABSCORE, RIVPACS
미국	• PHABSIM, RCHARC, Tennant Method, HEP/HIS, R2-CROSS, RVA
일본	• 인위적 생태환경 변화의 영향 평가 연구 진행 중
호주	• 전문가 패널기법, 전체적 접근법, PHABSIM
오스트리아	• PHABSIM, 전문가 패널기법
캐나다	• 7Q10, Tennant Method, PHABSIM, MMF 기법
체코	• IFIM을 기반으로 한 기법이 개발 중
덴마크	• 최저 유량 중앙값 적용
프랑스	• EVHA
핀란드	• EVHA
네덜란드	• PHABSIM, HEP, HIS, Mesohabitat
뉴질랜드	• RHYHABSIM
노르웨이	• RSS
남아프리카	• 일유량 기록 사용, 빌딩 블록기법, Biotopes, 지형적 변화
스페인	• Palau basic flow 기법, Basque 기법서식처 평가
스웨덴	• 하천시스템 수치모의를 이용한 하천유량연구단계
스위스	• Q95
독일	• CASIMIR
이탈리아	• Montana 기법, 윤번 방법, PHABSIM

## 2. 하천 생태유량 산정 방법

하천 생태유량 산정 방법을 정리하면 표 2와 같으며, 각각의 방법론에 대한 설명은 다음과 같다.

### 2.1 수문량 분석법

수문량 분석법에는 다양한 방법론이 적용될 수 있다. 가장 단순한 방법은 생태유량을 연평균유량의 일정 비율로 설정하거나, 계절적 유량지속곡선(flow duration curve)의 특정 값(예, 월유량의 중앙값)으로 설정하는 것이다. 수문량 분석법에 대한 자세한 사항은 Richter 등(1997)과 Palau와 Alcazar(1996)를 참고하도록 한다.

### 2.2 개략 수리계산법

개략 수리계산법은 적용 사례가 비교적 많은 방법이나, 현재까지는 만족스럽지 못한 방법으로 평가되고 있다.

### 2.3 서식처 해석법

서식처 해석법은 생태환경 인자를 고려하여 유량을 설정하는 가장 복잡한 모형 중 하나이다. 서식처 해석법은 대상 생물에 대한 물리서식처 적합도 지수와 수리해석 결과를 결합하여 하천이 제공하는 서식처 크기를 모의하는 것이다. 서식처 해석법에 포함된 모형은 표 2에 나타난 것과 같이 매우 다양하지만, 서로 유사한 구조를 갖는다. 즉, 하천 흐름을 모의할 수 있는 수리해석 부분과 대상 생물의 서식처 적합성을 분석할 수 있는 서식처 해석 부분, 그리고 다양한 유량에 대한 분석을 시행하는 시계열 모의 부분으로 구성되어 있다. 이와 같은 서식처 해석법은 다양한 생태유량 산정법 중 가장 널리 이용되고 있는 접근법이다.

## 2.4 다변량 통계법

서식처 해석법과 같은 역학적 접근(mechanistic approach)은 유속, 수심, 은신처와 같은 물리 서식처 인자만을 고려하는 한계를 가진다. 반면, 다변량 통계법은 생물 및 화학적 변수에 대한 광범위한 환경조건을 고려하여 통계적으로 분석하는 방법이다. 그러나 다변량 통계법은 좀 더 세부적인 연구가 필요하며, 현재까지는 적용 사례가 많지 않다.

## 3. 서식처 적합도 기준

### 3.1 어류 서식처

어류 서식환경의 변화 및 서식처 적합도에 대한 평가를 수행하기 위해서는 어류 서식처에 대한 연구가 선행되어야 한다. 어류 서식처는 하천 생태계에 포함되어 있으며, 하천 생태계에서 시·공간적으로 물리, 화학, 생물학적 특성 변화 및 어류의 생리학적, 행동적, 생애주기의 특성에 따라 서식처가 변화하게 된다. 따라서 어류 서식처에 대한 연구를 위해서는 ① 흐름 영역(flow regime), ②수로의 형태, 수심, 유속, 은신처 등의 물리적 서식처 구조, ③수온 및 수질, ④유역의 에너지(영양소 및 유기물) 유입 등과 같은 특성에 대해 먼저 살펴보아야 한다. 각각의 인자에 대한 자세한 기술은 본 고에서 생략한다.

한편, 서식처의 공간 규모에 따른 분류는 표 3과 같다. 표 3과 같이 서식처의 규모는 크게 미소서식처, 중형서식처, 대형서식처로 분류할 수 있다. 일반적으로 미소서식처는 물고기 한 마리가 확인되고 유속과 수심 및 기타 인자에 대한 현장 측정을 실시할 수 있는 하천 지점 또는 규모를 말한다. 다시 말해서, 미소서식처의 공간크기는 연구 대상 동물의 실제 크기와 동일하다고 할 수 있다. 지금까지 국내·외의 연구 동향을 살펴보면, 대부분 미소서식처에 대한 연구가

표 2. 하천 생태유량 산정 기법(건설교통부, 2007)

방법론		내 용
수문량분석법	7Q10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10년에 단 한 번 연속 7일 동안 발생할 것이 예상되는 유량</li> <li>• 오염수 희석 표준 설정에 사용</li> <li>• 최저 생태 유량을 총체적으로 과소평가하기 때문에 하천 유량 보호에 대해 적용하기에는 부적절한 것으로 평가</li> </ul>
	Q95 percentile	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 영국과 웨일즈에서 최소유량 지표로 사용</li> <li>• 일반적으로 하천유량 목표 설정에 있어 부적합한 것으로 평가</li> </ul>
	Tennant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국 중서부에서 측정된 유량의 연평균에 따라 목적에 적합한 유량 % 설정</li> <li>• 영국에서 생태를 고려한 방법과 접목하여 개발 중</li> <li>• 개발에 있어 상당한 연구와 다양한 방법의 활용이 요구됨</li> </ul>
	Arkansas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arkansas 생물에 대한 Tennant 방법</li> </ul>
	ABF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8월 중앙유량 또는 월 최저유량 중앙값을 이용하여 산란기 유량 설정(영국)</li> </ul>
	NGPRP	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 풍수년, 갈수년, 평년으로 여러 해들을 구분</li> <li>• 평년의 90% 유량 적용</li> </ul>
	Hoppe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 송어 생활단계를 기준으로 일 유량 설정</li> <li>• 유량 지속시간 곡선 활용</li> </ul>
	Texas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 월 중앙유량의 %유량 설정</li> <li>• 하천 생태계 조사결과를 고려하여 설정</li> </ul>
	Basic flow	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 하천 유형에 따른 특성 기저흐름(스페인)</li> <li>• 추가 조사가 필요하며, 실효성이 없을 것으로 평가</li> </ul>
Nature Conservancy	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다양한 접근법이 존재하며 수문학 지표 이용</li> <li>• 수문학적 다양성을 포함하기 때문에 변동성이 크며, 이로 인해 추가적인 조사와 표준적 필요</li> </ul>	
계략 수리계산법	Wetted perimeter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 윤변과 유량 관계곡선 위의 변곡점 설정</li> <li>• 점중적이지 않으며, 관계곡선은 하도형상에 영향을 받지만 수심 및 시계열을 반영할 수 없음</li> <li>• 산란기 유량 설정에 활용될 수 있으나 PHABSIM에 비해 신뢰성이 낮음</li> </ul>
	ASCE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수리학적 계수를 추정하였으나, 적용성 부족</li> </ul>
	R2 Cross	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 영국에서 여울의 현장 자료를 활용하여 수심과 수위 모의</li> <li>• 단순화시킨 PHABSIM 결과와 유사한 결과 도출</li> <li>• 물리서식처 조건이 제한적일 경우 적용 가능</li> </ul>
전문가판단	Biotopes / functional habitats	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 대상생물보다는 서식처를 기반으로 개발된 접근법</li> <li>• 활용성 입증되지 않음</li> <li>• 개발 진행 중으로, 다양한 방법론과 현장자료를 바탕으로 방법론 보완 필요</li> </ul>
	Holistic approach /Building	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 원지, 하도, 수변역, 홍수터, 지하수, 습지, 그리고 하구를 포함하는 유역 전반에 걸쳐 생태계를 평가하는 방법</li> <li>• 하천 본래의 계절 및 유량 변화를 발생시킬 수 있는 자연성이 유지되어야 함</li> <li>• 보다 세부적인 연구 필요</li> </ul>
	block ExpertPanel Assessment Method	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현장 조사와 다학제간 전문가 의견을 기반으로 함</li> </ul>

표 2. 하천 생태유량 산정 기법(건설교통부, 2007) (계속)

방법론		내 용
8IFIM기반 서식처해석법	PHABSIM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 미국 USGS에서 개발되었으며, 모형의 한계가 존재하지만, 세계적으로 가장 적용성이 검증된 방법</li> <li>• IFIM개념을 이용하고 있으며, 가장가용면적과 유량과의 관계를 도출하여,수자원 계획 수립에 있어 의사결정 수단으로 활용 가능</li> </ul>
	RHABSIM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thomas R. Payne에 의해 수정된 PHABSIM의 상업적 버전</li> </ul>
	FRC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 하천 물리서식처 시계열을 반영하여 최저, 평균, 최적 유량을 설정하기 위한 모형(캐나다)</li> </ul>
	RYHABSIM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PHABSIM의 뉴질랜드 버전</li> </ul>
	RSS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 서식처 모의 모형으로 수리해석은 HEC-2를 사용하며, 서식처 모의를 위한 BIORIV와 HABITAT 활용(노르웨이)</li> </ul>
	EVHA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PHABSIM을 개선한 모형(프랑스)</li> </ul>
	CASIMIR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 독일에서 개발한 모형으로 전단응력을 기반으로 모의</li> <li>• 영국 등에서 활용성 검토</li> </ul>
	Fleckinger	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PHABSIM을 개선한 모형(마드리드 지역)</li> </ul>
	RCHARC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 하천의 군집 생물군을 고려하여 서식처를 평가하기 위한 방법</li> <li>• 대안을 가진 대조구간의 서식처 수리해석을 비교하기 위해 사용</li> </ul>
다변량통계법	RIVPACS / HABSCORE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Darent지역에 대한 생태 허용 가능 유량을 설정하기 위해 Brown 등 (1991)에의해 적용</li> </ul>
	Basque	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uses hydraulic for lowland reaches and data on invertebrate-low relationships in uplands</li> <li>• A relatively coherent system for a relatively narrow range of river ecotypes</li> <li>• Potential for further investigation</li> </ul>
	HQI / OTHC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HABSCORE와 유사한 다변량 회귀 모형</li> <li>• 생물량 예측에 사용</li> </ul>

주를 이루어왔으며, 최근 들어 Parasiewicz(2001), Lamouroux 등(1998) 등에 의해 중형서식처에 대한 연구가 진행 중에 있다.

### 3.2 미소 서식처 적합도 지수

서식처 적합도 지수(HSI: Habitat Suitability

Index)는 수생 서식처 모델링에 이용되는 물리적 환경과 생물군의 연결고리 역할을 한다. 즉, 서식처 적합도 지수(또는 서식처 요건, 선호도 데이터, 적합성 기준)는 물리적 서식처 특성과 이에 대한 대상 종의 선호도와의 연계성을 정량적으로 표현한 것을 의미한다. 서식처 적합도 지수에 대한 일반적인 예는 그림 1과 같이 3가지 방법이 통용되고 있으며, 그림 1에서

표 3. 서식처 공간 규모에 따른 서식처 분류

구분	미소서식처	중형서식처	대형서식처
크기	cm부터 m까지 예, 현장, 개체군 크기	10m부터 수백 m 예, 여울, 소, 수로	100m부터 수 km 예, 범람원, 저수지, 유역
인자	수심, 유속, 하상재료 등	강폭, 수심, 유속, 하천지형 등	수온, 물리적 수로특성, 흐름영역 등

새로측인 적합도 지수 SI의 값이 1에 가까울 수록 서식처에 적합한 수심 및 유속이 된다. 그림 1(a)는 적합도가 1(최적 적합)과 0(부적합)인 경우만 있는 이분법에 의한 적합도 지수를 나타낸다. 즉, 특정 어류 종에 대한 최적의 수심 및 유속치만을 제시하고, 나머지의 값에 대해서는 적합도 0을 부여하는 방식이다. 이는 선호하는 서식 조건의 폭이 매우 작은 경우에 적용된다. 그림 1(b)는 이분법 보다 좀 더 넓은 범위의 수심 및 유속 조건에 대한 적합도를 제시할 수 있는 방법이다. 이와 같은 그림 1(a)와 1(b)는 단일 유속 혹은 단일 수심에 대한 적합도를 제시하는 것으로서 이를 다변량 적합도 지수라 하고, 그림 1(c)와 같이 수심과 유속 조건을 동시에 고려하여 나타낸 곡선을 다변량 적합도 지수라 한다. 이와 같은 서식처 규모별 서식처 적합도 지수에 대한 자료는 대상 어종에 대한 물리 서식처 모의를 수행하기 위해 반드시 필요한 데이터이다. 그러나 서식처 적합도 지수를 산정하기 위해서는 하천 내 다양하고 복잡한 인자들에 대한 많은 수의 현장 측정 자료 및 기존 문헌, 전문가의 판단 등이 필요하게 된다.

### 3.2.1 단변량 기준

단변량은 독립변수가 1개인 경우로 유속, 수심 등의 물리적인 단일 인자가 사용된다. 단변량 기준은 물리서식처모의(PHABSIM: Physical HABitat

SIMulation) 모형에서 사용되는 적합도 기준이다. PHABSIM 모형은 Bovee(1982, 1986)에 의해 개발된 모형으로 미소서식처 규모에서 전 세계적으로 서식처 모델링의 약 90% 이상 사용되는 모형이다 (Jorde, 2006). 단변량 기준으로 특정 종의 서식처 적합도 지수를 산정하는 방법에는 다음과 같은 3가지가 있다.

- ◇ Category I (전문가 판단): 문헌 검토나 자체 전문가의 경험을 통해 산정되며, 현장 데이터는 필요없음
- ◇ Category II (서식처 이용 곡선): 서식처의 특정 인자(수심 및 유속 등)에 대한 일정 범위에서 관측된 빈도를 이용
- ◇ Category III (서식처 선호도 곡선): 관측 빈도를 토대로 특정 서식처 유형의 가용성을 고려, 즉 가중치 부여

### 3.2.2 다변량 기준

앞에서 언급한 단변량 기준과 같이 서식처 인자를 독자적으로 고려하는 것은 복잡한 자연 하천의 조건을 적절하게 표현할 수 없는 단점이 있어 서식처 특성의 복잡성을 반영할 수 없다(Haggenes, 1996). 따라서 서식처에 영향을 주는 여러 인자들을 함께 고려하는 다변량 기준이 필요하며, 이를 위한 통계적 방법으로 다음과 같은 2가지의 방법이 제시되어있다.

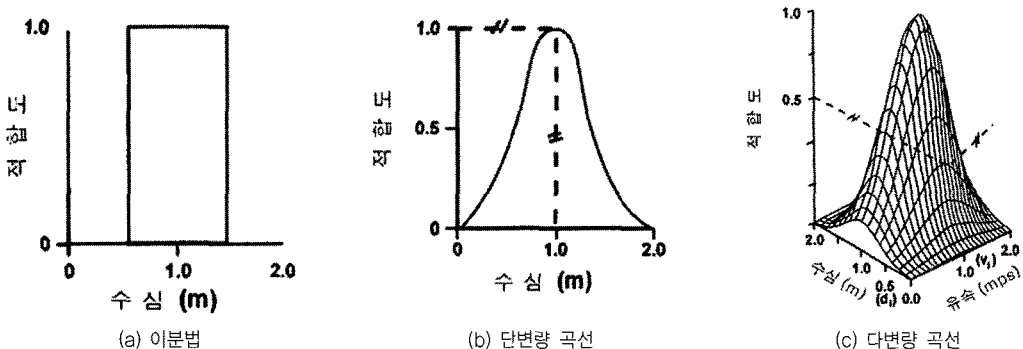


그림 1. 서식처 적합도 지수의 예(김규호, 2000)

◇ 선호도 합산: 단변량 선호도를 합산하는 방법으로서 Nakamura(1989)가 제시한 선호도 수치  $P_{comb}$  는 다음과 같다.

$$P_{comb} = \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad (1)$$

여기서  $P_i$  는 속성  $i$  에 관한 선호도를 나타내며,  $W_i$  는 속성  $i$  에 제공되는 가중치를 나타낸다.  $P_i$  는 개별 적합성 지수  $SI$  와 유사한 0과 1 사이로 정의된다.

◇ 다변량 선호도 함수: 다변량 함수를 이용하여 정의하는 방법으로서 이 함수는 다항을 지수로 이용하는 지수함수를 통해 정의된다.

$$P_{d,v} = \frac{1}{N} e^{-(a_1 d + a_2 v + a_3 d^2 + a_4 v^2 + a_5 d v)} \quad (2)$$

여기서  $P_{d,v}$  는 수심  $d$  와 유속  $v$  의 적합성 지수나 이용 확률이고,  $a_i$  는 계수를 나타낸다. 다변량 선호도 함수의 단점은 이 함수가 자연에서 발생하지 않는 개별적인 최대치를 보유하고 있다는 점이다. 따라서 다변량 선호도 함수의 적용은 지금까지 제한을 받아 왔다(Bovee 1986).

### 3.2.3 기타 접근법

앞에서 언급된 서식처 적합도 지수를 산정하기 위한 전통적인 방법 이외에 최근에는 로지스틱 회귀법, 인공신경망, 퍼지-로직론에 의한 방법에 의해 서식처 적합도 지수를 산정하는 방안이 시도되고 있다.

#### (1) 로지스틱 회귀

Schmutz 등(1997)은 서식처의 여러 물리적 특성의 조합으로 이루어진 함수로서 서식지의 적합성을 나타낼 수 있는 다중 로지스틱 회귀를 제안하였다. 로지스틱 회귀의 결과는 물리적 특성의 조합을 통하여 대상 개체의 발생 확률을 제시한다. 오스트리아의

특정 하천에서 실시한 어종 발생 확률 시뮬레이션은 관측 데이터와의 상관관계가 우수하다는 것을 나타냈지만 추후 다양한 방법 간의 비교에서 뚜렷한 장점을 보이고 있지는 않다(Jorde, 2006).

#### (2) 인공신경망

인공 신경망은 최근 Brosse와 Lek(2000)에 의해 잉어 서식처 적합도 지수를 예측하는데 사용되었다. 이 방법의 장점은 물리적 환경을 설명하는 입력 인자를 모두 통합할 수 있다는 것이지만, 모델을 개발하거나 교정하기 위해서는 대규모 데이터 세트가 필요하다는 단점이 있다. 개발된 모델은 데이터 중심 블랙박스 모델이다.

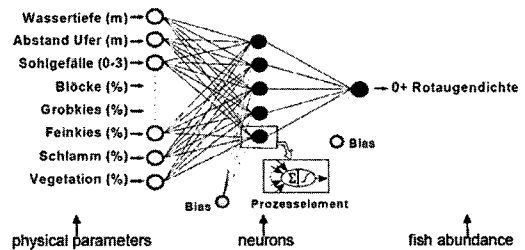


그림 2. 잉어 발생에 대한 인공신경망 모델링 (Brosse와 Lek, 2000)

#### (3) 퍼지-로직 접근법

앞에서 언급된 인공신경망의 단점은 새로운 매개변수를 추가하기 어렵고, 데이터 학습을 위해 많은 수의 정보가 필요하다는 것이다. 그러나 퍼지로직은 소수의 현장 관측 데이터로도 퍼지 규칙을 작성할 수 있고, 새로운 인자를 쉽게 포함시킬 수 있으며, 인자 간의 독립성도 요구하지 않는다. 또한 신경망과 같이 블랙박스 모형이 아니기 때문에 최종 결과에 이르는 경로를 이해할 수 있다. 서식처 적합도 기준을 위한 퍼지로직 접근법은 Schneider(2001)에 의해 제안되

표 4. 알프스 지역 송어의 퍼지 규칙(Jorde, 2006)

규칙	유속	수심	하층토	은신처	적합도
1	높음	높음	조립	0	낮음
2	중간	중간	조립	0	
3	높음	낮음	조립	0	낮음

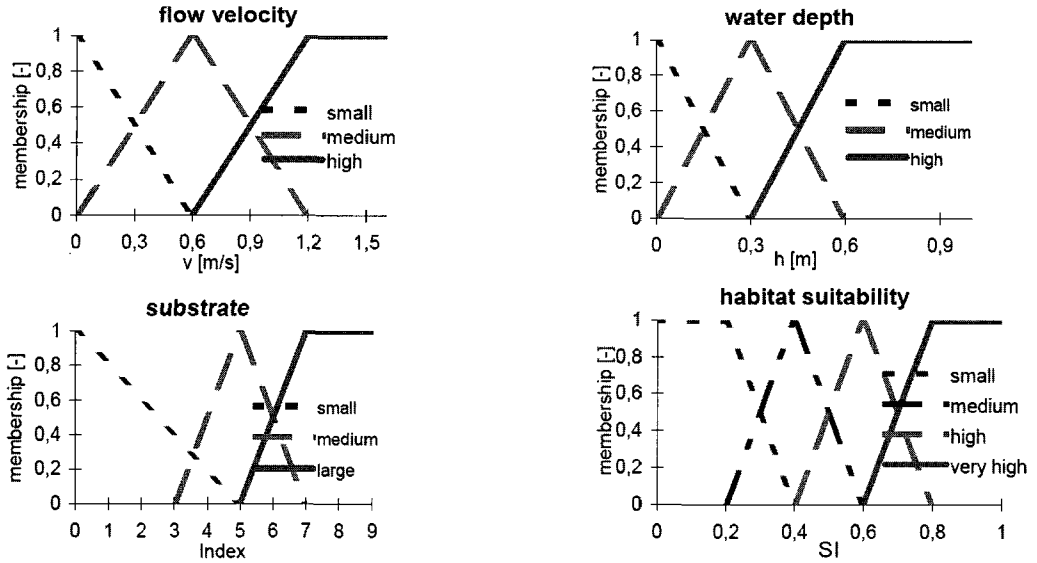


그림 3. 입력(유속, 수심, 하층토)과 출력(적합성 지수)에 대한 멤버십 등급(Jorde, 2006)

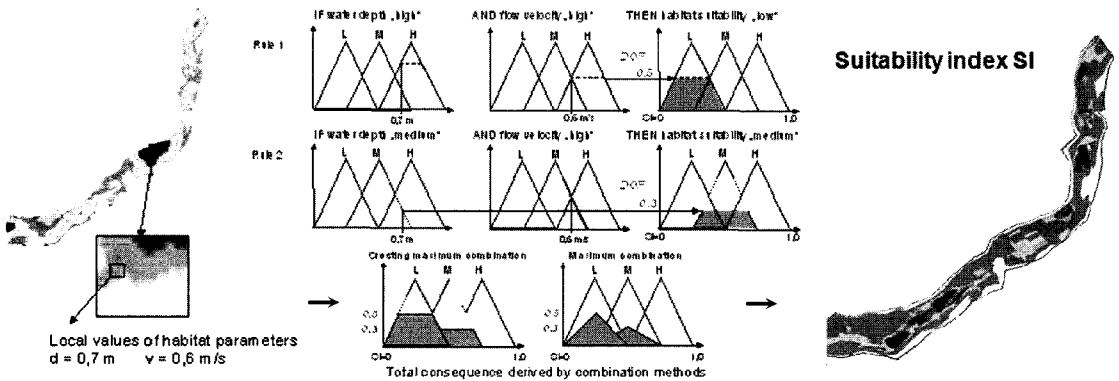


그림 4. 퍼지로지 모형의 기본 원리

있으며, 현재 이를 이용한 연구 사례는 극히 드물다.

퍼지로직은 기존의 현장 자료 및 전문가의 판단에 의해 대상 어종에 대한 물리적 환경 조건 및 서식지

적합도에 대해 높음, 중간, 낮음의 형태로 몇 가지의 규칙을 설정한다. 표 4는 알프스 지역 송어의 퍼지 규칙에 대한 한 예이다. 이와 같은 퍼지 규칙 및 적절한



멤버십 함수(membership function)를 이용하여 그림 3과 같은 퍼지 세트를 구성한다. 멤버십 함수는 0에서 1까지의 범위를 갖는 삼각형 및 종 모양 등의 다양한 형태가 존재하며, 높음에서 낮음에 대한 유속 및 수심 등의 범위는 전문가의 판단 및 기존 문헌, 현장 관측 자료 등을 통해 설정될 수 있다. 한편, 대상 하천에서 수심, 유속 등의 입력 자료와 퍼지 세트를 근거로 서식지 적합도를 계산하게 된다(그림 4). 이에 대해서는 몇 가지 절차가 있는데, 자세한 언급은 생략한다.

### 3.3 국내외 연구 동향

표 5는 국내외 서식처 적합도 지수와 관련된 일부 연구 동향을 정리한 것이다. 표 3을 보면 전통적인 서식처 적합도 지수에 대한 연구가 하천으로부터 최근에는 호수 및 하구 지역에 까지 확장되고 있음을 볼 수 있다(Luz와 Loucks, 2003; Vinagre 등, 2006).

또한 식생에 의한 하천 생태계의 서식처 변화에 대한 평가도 최근에 연구하고 있는 것으로 나타났다(Fukuda 등, 2007). 그러나 국내의 경우, 관련 연구 동향은 매우 저조하며 김규호 등(2000), 강정원 등(2004), 이주현 등(2006)에 의한 연구가 있는데, 이들 연구는 단지 하천에만 국한되어 있다.

1970~80년대에는 전통적인 서식처 적합도 지수가 서식처 평가에 활용되었으나, 최근에는 현장 모니터링 자료의 축적과 더불어 로지스틱 회귀 등의 다양한 통계적 방법이 적용되는 것으로 나타났다(Green과 Stowe, 1993; Schadt 등, 2002; Inglis 등, 2006; Santos 등, 2006). 또한 단일 변수에 의한 통계분석에서 다변량 통계분석을 수행하고 있으며, 1990년대 들어서 인공신경망이 서식처 적합도 지수 개발 및 서식처 평가에 활용되는 것을 알 수 있다(Lek 등, 1996; Mastorillo 등, 1997; Gozlan 등, 1999; Olden과 Jackson, 2002; Ibarra 등, 2003). 한편, 퍼지이론을 이용한 접근 방법은 2000년대 이

표 5. 서식처 적합도 기준 국내외 연구동향

내용	저자	국내 적용 사례
• 전통적인 서식처 적합도 지수		
Composite HSI / Lake	Luz과 Loucks(2003)	김규호 등(2000)
Category-I / Estuary	Vinagre 등(2006)	강정원 등(2004)
Category-III / Vegetation	Fukuda 등(2007)	이주현 등(2006)
• 로지스틱 회귀		
Logistic regression	Green과 Stowe(1993)	—
Multiple logistic regression	Schadt 등(2002)	
Generlized linear model	Inglis 등(2006)	
Linear least squares multiple regression	Santos 등(2006)	
• 인공신경망		
Backpropagation ANN	Lek 등(1996), Ibarra 등(2003) Mastorillo 등(1997)	—
Garson algorithm	Gozlan 등(1999)	
NID/Garson algorithm	Olden과 Jackson(2002)	
• 퍼지로지식		
Fuzzy logic approach	Jorde 등(2001), Kerle 등(2002) Nedushan 등(2008)	—

후부터 시작되었으며, 대표적인 연구 결과는 Jorde 등(2001), Kerle 등(2002), Nedushan 등(2008)이다. 이와 같이 전통적인 접근법 이외의 최근에 제시된 여러 접근법에 대한 국내 연구 동향은 전무한 것으로 나타났다.

한편, 현재까지 많은 선정기법들이 제시되었음에도 불구하고 상호간 비교연구 성과는 미흡한 것으로 조사되었다. 대부분의 비교연구는 인공신경망과 로지스틱 회귀 등의 회귀 기법간의 비교연구에 치중되어 있으며, 퍼지로지식에 대한 비교 연구는 아직 수행되지 않았다. 특히, 다양한 회귀분석 모형 및 인공신경망에 대해서도 현재까지는 어느 방법이 좀 더 정확한 것인지에 대해서는 명확히 알려지지 않았다. 이에 대해 Ibarra 등(2003)에 의하면, MLR(Multi-Linear Regression)과 GAM(Generalized Addictive Model)과 같은 회귀모델에 비해 인공신경망이 더 뛰어난 결과를 보여주는 것으로 나타났다. 그러나 Olden과 Jackson(2002)의 연구 결과에 의하면 인공신경망의 성능이 다른 회귀 기법에 비해 크게 향상된 결과를 보이지 않는 것으로 나타났다. 따라서 지속적인 현장 모니터링을 통해 앞에서 언급된 다양한 기법에 대한 비교 연구 및 서식처 적합도 기준과 관련된 새로운 기법 개발 연구 역시 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 물리서식처 모형

하천 어류의 서식처 평가를 위해서는 앞에서 언급된 대상 어종에 대한 서식처 적합도 지수와 함께 대상 하천에 대한 유량 별 수심 및 유속과 같은 흐름 데이터가 필요하다. 흐름 데이터 산정을 위해서는 일반적으로 수치모의를 통해 얻어진다. 따라서 물리서식처 모형은 흐름 해석 모형에 따라 영 모형(현장 측정 자료를 이용하며, 흐름 해석은 포함되지 않는 모형), 1차원 및 2, 3차원 모형으로 구분된다.

일반적으로 1차원 물리서식처 모형은 간략화된 방

정식을 바탕으로 수리해석을 실시하므로, 개별 요소의 유속을 정확히 산정할 수 없고, 이로 인해 실제 물리 현상을 정확히 구현할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 가장 단순하면서도 이러한 한계를 극복하기 위한 모형이 준 2차원 모형이다. 준 2차원 모형에서는 하천 횡단면 형태와 조도 변화를 일정부분 반영하여 해석할 수 있다. 이러한 준 2차원 모형은 물리 서식처 평가에 가장 많이 이용되고 있는 PHABSIM 모형에서 채택된 모형이다. PHABSIM 모형에 대한 자세한 설명은 본 학회지의 33권 2호 김규호(2000)에 소개되었다.

#### 4.1 2,3차원 모형

앞서 언급된 PHABSIM 모형은 많은 연구자에 의해 그 적용성이 입증된 모형이다. 그러나 PHABSIM 모형의 가장 큰 단점 중의 하나는 준 2차원 흐름 모형을 사용하기 때문에 하천내 횡방향 흐름이 중요하거나 국부적인 흐름의 영향이 존재할 경우에는 부정확한 예측을 수행한다는 것이다. Shirvell(1989)은 PHABSIM모형을 이용하여 Nechaho강에서의 Chinook 연어의 가용 서식처 크기를 예측하였다. 그 결과 셀의 크기 및 입력 데이터에 따라 산란기 연어의 서식처 크기를 약 210%~600% 정도 과대 산정하는 것으로 나타났다. 이는 PHABSIM모형이 준 2차원 모형이기 때문에 각 셀 내에서의 수심 및 유속이 일정하기 때문이다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위해 최근에는 수심적분된 2차원 모형 및 3차원 모형을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Leclerc 등(1995)은 처음으로 2차원 모형을 이용하여 캐나다 퀘벡의 Moisie 강에서의 어류 서식처를 분석하였다. 또한 Waddle 등(2000)은 2차원 모형인 CDG2D를 이용하여 캐나다Elbow 강을 모의하였으며, Crowder와 Diplas(2000)는 RMA-2모형을 이용하여 캘리포니아의 Feather강에서 거석 주변의 국부적인 흐름이 서식처에 미치는 영향에 대해 분석하

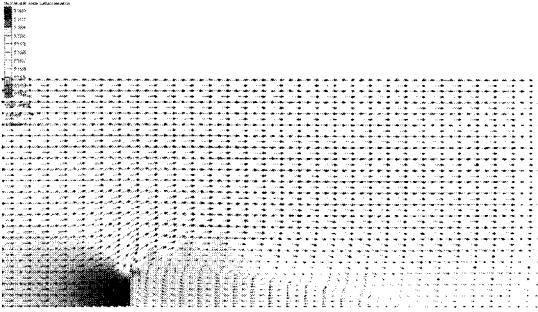


그림 5. 2차원 모형을 이용한 수제 주변 흐름 모의

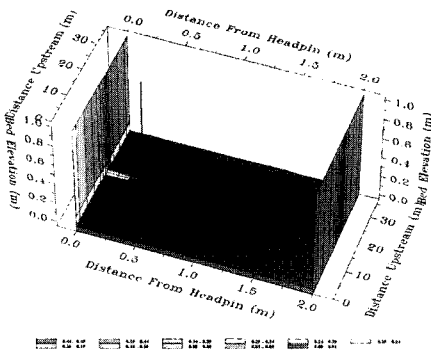
였다. 한편, Booker(2002)는 서식처 분석에 대한 3차원 흐름 모형의 적용성에 대해 언급하였으며, Shen과 Diplas(2008)은 수심적분된 2차원 모형과 3차원 모형을 이용하여 거석 주변의 흐름 특성을 예측하고, 서식처 평가에 대한 모형 비교를 수행하였다.

#### 4.2 각 차원별 서식처 모형의 적용성

각각의 모형에 대한 몇 가지 적용 사례는 다음과 같다.

##### 4.2.1 1차원(준2차원) 및 2차원 모형

그림 5는 RMA-2 모형을 이용하여 수제 주변에서

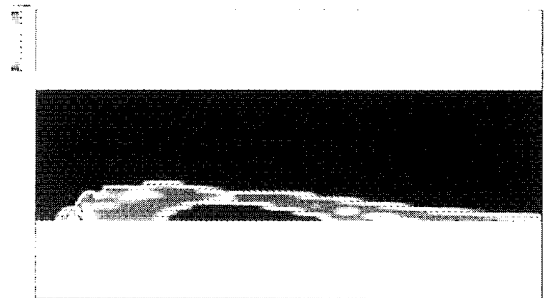


(a) 1차원(준 2차원) 모형

의 수위 및 유속 변화를 모의한 결과이다. 그림을 살펴보면, 수제에 의해 수제 상류측에서는 수위가 상승되고, 수제로 인해 재순환 영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 준 2차원 모형으로는 그림 5와 같은 흐름 특성을 모의할 수 없기 때문에, 서식처 분석 결과 역시 매우 부정확할 것으로 예상된다. 그림 6은 준 2차원 및 2차원 모형을 이용하여 물리서식처를 분석한 결과이며, 그림에서 붉은색으로 표시된 부분일수록 서식처에 적합한 영역을 의미한다. 그림 6(a)의 준 2차원 모형은 PHABSIM 모형을 이용하였다. 그림 6(a)를 보면, 앞에서 예상된 바와 같이, 준 2차원 모형에서는 구조물 주변에서의 흐름 특성을 정확히 반영할 수 없기 때문에 수제 주변에서만 서식처가 형성되고, 그 이외의 전 구간에서는 서식처가 형성되지 않는 것으로 나타났다. 반면에 그림 6(b)에서는 수제에서 하류 방향으로 넓은 영역에 대해 서식처가 형성되는 것을 볼 수 있다.

##### 4.2.2 2차원 및 3차원 모형

그림 7은 거석 주변 흐름에 대한 2차원 및 3차원 모형의 계산 결과를 비교한 것이다. 그림 7은 거석이 수면에 잠겨 있는 경우에 대한 유속벡터도이다. 그림 7(a)는 2차원 모형의 결과이고 그림 7(b)와 7(c)는 3



(b) 2차원 모형

그림 6. 준 2차원과 2차원 모형에 의한 수제 주변에서의 물리 서식처 평가 비교

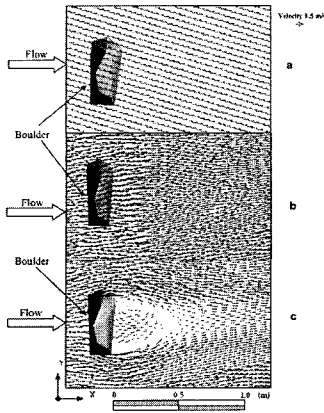


그림 7. 2차원 및 3차원 모형에 의한 거석 주변 흐름 모의 비교(Shen과 Diplas, 2008)

차원 모형의 결과인데, 그림 7(b)는 수면 근처에서의 유속 벡터도, 그림 7(c)는 바닥 근처에서의 결과이다. 그림을 살펴보면, 그림 7(a)의 2차원 모형 결과와 그림 7(b)의 3차원 모형에 대한 수면 근처에서의 결과가 서로 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 그림 7(c)의 바닥 근처에서의 유속 벡터도를 살펴보면 거석 하류부에서의 유속 벡터 크기가 감소되고, 흐름 특성 역시 변화되는 것을 볼 수 있다. 만약 2차원 모형에 의한 유속의 크기가 특정 어종의 적합 유속 보다 더 클 경우, 서식처는 거의 없는 것으로 평가 될 것이다. 그러나 실제로는 그림 7(c)와 같이 거석 하류부의 바닥 근처에서 더 작은 유속이 형성되므로, 서식처 분석 결과는 2차원 모형과는 다른 양상을 보일 것이다.

### 5. 맺음말

본 고에서는 하천 생태유량 산정 기법에 대해 소개하고, 이중 가장 많이 적용되고 있는 서식처 해석법에서 기술적인 부분, 즉 서식처 적합도 기준 및 물리 서식처 모의기법에 대한 내용에 대해 소개하였다. 서식처 적합도 기준을 산정하기 위해서는 대상 어종 별

로 시·공간적인 분포 및 다양한 서식 환경 인자에 대한 자료 구축이 필요하다. 이를 위해서는 수많은 시간과 노력이 필요할 것이다. 미국을 비롯한 선진 유럽국에서는 지난 수십년에 걸쳐 다양한 어종에 대한 서식처 적합도 지수를 이미 구축하였고, 지속적인 연구 및 현장 모니터링을 통해 전통적인 서식처 적합도 지수 산정 이외에 새로운 접근법을 개발 중에 있다. 또한 자국에서 개발한 물리서식처모의 시스템을 서식처 평가에 사용하고 있다. 반면, 국내의 경우에는 어류 물리서식처에 대한 연구가 이제 시작되었다고 해도 과언이 아닐 것이다. 국내의 연구 수준은 서식처 적합도 지수에 대한 전통적인 방법을 이용한 몇 가지 사례가 전부이고, 미국 및 유럽에서 수행하고 있는 새로운 접근법은 아직 시도조차 못하고 있는 실정이다. 더욱이 대상 어종에 대한 서식처 적합도 분석을 위한 기본 데이터 구축 역시 미미한 상황이다. 따라서 국내 어종에 대한 지속적인 모니터링 및 데이터 구축과 함께 서식처 적합도 지수를 산정하고, 더 나아가 좀 더 신뢰할 수 있는 새로운 접근법의 개발은 앞으로 우리가 해야 할 과제일 것이다.

### 감사의 글

본 학술기사는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업(06건설핵심B01)인 “ECORIVER21 자연과 함께하는 하천복원 기술개발 연구단”에서 수행된 연구 내용의 일부이며, 연구비지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

강정훈, 이은태, 이주현, 이도훈 (2004). “어류의 서식처 조건을 고려한 하천의 필요유량 산정에 관한 연구.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 37(11), 915-927.

- 건설교통부 (2007). 하천 생태유량 확보 기술, Ecoriver21 사업단 기술보고서.
- 이주현, 정상만, 이명호, 이용수 (2006). "유지유량 증분 방법론(IFIM)에 의한 한강수계 주요 지류에서의 어류서식 필요유량 산정." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 26(2B), 153-160.
- 김규호(2000). 하천 어류 서식 환경의 평가. 한국수자원학회지, 33(2),10-23.
- 김규호, 조원철, 전병호 (2000). "수량, 수질 모의치를 이용한 이류 서식 조건유지에 필요한 적정 유량 산정." 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 33(1), 3-14.
- Booker, D.J. (2002). "Hydraulic modeling of fish habitat in urban rivers during high flows." *Hydrological Process*, 17, 577-599.
- Bovee, K.D. (1982). *A guide to stream habitat analysis using the instream flow analysis incremental methodology*. US Fish and Wildlife Service, Fort Collins.
- Bovee, K.D. (1986). Development and evaluation of habitat suitability criteria for use in the instream flow incremental methodology. *Biologic Report 86(7)*, US Fish and Wildlife Service, Fort Collins.
- Brosse, S. and Lek, S. (2000). "Modelling roach (*rutilus rutilus*) microhabitats using linear and nonlinear techniques." *Freshwater Biology*, 44, 441-452.
- Brown, R.P.C., Ironside, N. and Johnson, S.(1991). "Defining an environmentally acceptable flow regime for the river Darent, Kent." 3rd *National Hydrology Symposium*, Outhampton.
- Crowder, D.W. and Diplas, P. (2000). "Using two-dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance." *Journal of Hydrology*, 230, 172-191.
- Gozlan, R.E., Mastrorillo, S., Copp, O.G.H., and Lek, S. (1999). "Predicting the structure and diversity of young-of-the-year fish assemblages in large river." *Freshwater Biology*, 41, 809-820.
- Green, R.E. and Stowe, T.J. (1993). "The decline of the corncrake *Crex crex* in Britain and Ireland in relation to habitat change." *Journal of Applied Ecology*, 30, 689-695.
- Haggnes, J. (1996). "Habitat selection by brown trout and young Atlantic Salmon in streams: static and dynamic hydraulic modelling." *Regulated Rivers: Research and Management*, 12, 155-169.
- Ibarra, A.A., Gevrey, M., Park, Y.S., Lim, P., and Lek S. (2003). "Modelling the factors that influence fish guilds composition using a back-propagation network." *Ecological Modelling*, 160, 281-290.
- Inglis, G., Hurren, H., Oldman, J., and Haskew, R. (2006). "Using habitat suitability index and particle dispersion models for early detection of marine invaders." *Ecological Applications*, 16(4), 1377-1390.
- Johnson, N., Revenga, C., and Echeverria, J. (2001). "Managing water for people and nature." *Science*, 292, 1071-1072.
- Jorde K. (2006). *Aquatic habitat modeling* Lecture Note CE 526, University of Idaho, USA.
- Jorde, K., Schneider, M., Peter, A., and Zoellner, F. (2001). "Fuzzy based models for the evaluation of fish habitat quality and instream flow assessment." *Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics*, Tempe, AZ.

- Kerle, F., Zollner, F., Schneider, M., Kappus, B., and Baptist, M.J. (2002). "Modelling of long-term fish habitat changes in restored secondary floodplain channels of the River Rhine." *Fourth International Ecohydraulics Symposium*, Cape Town, South Africa.
- Lamouroux, N., Capra, H., and Pouilly, M. (1998). "Predicting habitat suitability for lotic fish: linking statistical hydraulic models with multivariate habitat use models." *Regulated Rivers: Research and Management*, 1-11.
- Leclerc, M., Boudreault, A., Bechara, J., and Corfa, G. (1995). "Two dimensional hydrodynamic modeling: a neglected tool in the stream flow incremental methodology." *Trans. Am. fisheries Soc.*, 124(5), 645-662.
- Lek, S., Delacoste, M., Brarn, P., Dimopoulos, I., Lauga, J., and Aulagnier, S. (1996). "Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology." *Ecological Modelling*, 90, 39-52.
- Luz, L. and Loucks, D. (2003). "Developing habitat suitability criteria for winter management: A case study." *International Journal of River Basin Management*, 1(4), 283-295.
- Mastorillo, S., Dauba, F., Oberdorff, T., Guega, J.F., and Lek, S. (1997). "Predicting local fish species richness in the Garonne River basin." *Academie des Science*, 321, 423-428.
- Olden, J.D. and Jackson, D.A. (2002). "Illuminating the black box: understanding variable contributions in artificial neural networks." *Ecological modelling*, 154, 135-150.
- Palau, A. and Alcazar, J. (1996). "The BasicFlow: an alternative approach to calculate minimum environmental instream flows." *2nd International Symposium on Habitat Hydraulics*.
- Parasiewicz, O. (2001). "MesoHABSIM: A concept for application for instream flow models in river restoration planning." *Fisheries*, 26, 6-13.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Wigington, R., and Braun, D.P. (1997). "How much water does a river need?" *Freshwater Biology*, 37(1), 231-249.
- Santos, K.C., Tague, C., Alberts, A., and Franklin, J. (2006). "Sea turtle nesting habitat on the US Naval Station, Guantanamo bay, Cuba: A comparison of habitat suitability index model." *Chelonian Conservation and Biology*, 5(2), 175-187.
- Schadt, S., Revilla, E., Wiegand, T., Knauer, F., Kaczensky, P., Breitenmoser, U., Bufka, L., Cerveny, J., Koubek, P., Huber, T., Stanisa, C., and Trepl, L. (2002). "Assessing the suitability of central European landscapes for the reintroduction of Eurasian lynx." *Journal of Applied Ecology*, 39, 189-203.
- Schmutz, S., Parasiewicz, P., and Parthl, G.A. (1997). Morphometrisch/hydraulische und Fischökologische Nachuntersuchung des KW Alberschwende, Bregenzeraach, Abt. Hydrobiologie, Univ. für Bodenkultur, Wien.
- Schneider, M. (2001). Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen-

- Weiterentwicklung des Simulationsmodells CASIMIR. Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart, Mitteilungen 106, Dissertation.
- Shen, Y. and Diplis, P. (2008). "Application of two- and three-dimensional computational fluid dynamics models to complex ecological stream flows." *Journal of Hydrology*, 348, 195-214.
- Shirvell, C.S. (1989). "Ability of PHABSIM to predict Chinook salmon spawning habitat." *Regulated Rivers: Research and Management*, 3, 277-289.
- Vinagre, C., Franca, S., and Cabral, H.N. (2006). "Diel and semilunar patterns in the use of an intertidal mudflat by juveniles of Senegalese sole." *Solea senegalensis. Est. Coast. Shelf Sci.*, 69(1-2), 246-254.
- Waddle, T., Steffler, P., Ghanem, A., Katopodis, C., and Locke, A. (2000). "Comparison of one and two-dimensional open-channel flow models for a small habitat stream." *Rivers*, 7, 205-220. ☞