하천 어류 서식 환경의 평가

김 규 호 (한국건설기술연구원 수자원환경연구부 선임연구원)

1. 머리말

물은 우리 인류와 지구상의 생물이 공존하는데 있어 없어서는 안될 가장 중요한 요소들 중 하나다. 물은 그 동안 생활 · 공업 · 농업 · 발전용수로 다양하게 이용되어 왔고, 동시에 하천은 자원 활용의 공간으로 큰 역할을 담당하고 있다. 이러한 경제적 가치와 함께 하천은 하천생태계의 고유 공간뿐만 아니라 인간의 정서 함양 공간으로 인식되어 왔으며, 특히 전통적으로 인간과 가장 친밀하여 생활의 지표로서 인식되는 어류가 서식하는 공간으로서 가장 중요한 위상을 차지하고 있다(Odum, 1993; Allan, 1995). 이와 같은 하천의 다양한 혜택에도 불구하고, 하천 개발 사업, 하천 취수량의 증가, 각종 오염원의 유입으로 하천수질 악화, 그리고 하천 구조 개선 등에 따른 수량과 수질, 서식 구조 측면에서 하천 생태계의 위협과 파괴가 이루어지고 있다. 최근에 보다 쾌적하고 자연에 가까운 하천 생태계의 서식 공간을 보전하고자 하는 노력이 증대하고 있다.

하천 생태계에서 어류를 보전하고 복원하기 위해서는 일반적으로 세 가지 기본적인 조건, 즉 수질, 수리, 하도 구조 조건, 다시 말하면 좋은 수질, 충분한 수량, 그리고 서식을 위한 안정된 물리적 구조가 필요하다(Gore, 1985). 인위적으로 악화되는 하천 수질 개선, 여울과 웅덩이가 반복되는 하도의 어류 서식처(또는 서식지)를 제공하기 위해서는 어류 서식 환경을 보호하고 유지하는데 필요한 적정유량으로 흐름 영역을 확보하여야 한다(Gore 등, 1989).

환경이 중요시 될 21세기 새 천년의 시대적 요청과 함께 역동하는 하천을 보전하기 위해 하천 환경과 직접 관계가 있는 하천 어류 생태 환경을 보전하고 복원할 수 있는 노력을 기울여야 나가야 한다. 이를 위해 수리 및 수질 조건 등을 포함한 하천 어류 서식 환경에 대한 평가 방법을 알아보고자 한다.

2. 어류 서식 환경과 평가 성분

수중 생태계는 자연, 원시적 조건 아래에서 가장 잘 보전된다. 그러나 하천 유역 개발 사업과 같은 인간 활동에 의해 하천흐름 영역과 수질이 변경되면 하천내 서식처 여건이 변화되어 곧바로 생물상의 변화를 초래한다. 어류의 산란처와 피난처, 그리고 성장 단계별 서식 조건과 같은 조직의 특성이 변화되면 어류상의 변화가 발생한다. 그리고, 자연 유량이 아닌 조절된 유량과 유사이송 영역의 변화 또는 직강화 같은 하도 개수에 따른 하천 지형학적 변화는 하도의 수리학적 특성(수심, 유속, 그리고 소류력의 분포), 하상 재료 특성, 그리고 가용한 공간과 피난처를 변화시킨다(Bovee, 1982; Calow와 Petts, 1994; Allan, 1995).

2.1 생물학적 통합 지표(IBI)

어류 서식 환경의 변화는 대체적으로 하나의 생물학적 통합 지표(IBI : Index of Biological Integrity)로 나타낼 수도 있다. 생물학적 통합 지표는 "어떤 (수생)시스템이 가지고 있는 능력으로서 그 시스템에 적응력을 가진 생물상을 유지하고 지원하려고 하는 힘을 나타내는 지표"라고 정의된다(Karr

과 Dudley, 1981; Karr과 Chu, 1999). 이는 인간 활동이 하천유역 환경에 어떻게 영향을 주는가를 정량화하기 위해 시스템내 모든 성분을 고려한 생물학적 지표를 말하고, 어류를 포함한 수생 생물의 서식환경을 평가하기 위한 행렬 방법이다. 이 방법의 다중행렬지수가 낮게 되면, 인간활동으로 말미암아 환경 변화가 초래되어 서식 어종이 줄어들고, 반대로 높게 되면, 사라진 어종의 복원이 가능하다는 개념이다.

생물학적 통합 지표는 담수 수생 생태계를 모니터링하고 평가하는 것이 주된 목적이다. Karr과 Dudley(1981)는 해당 하천에서 조사된 고유종 군집의 특성에 바탕을 둔 수생 자원의 질과 조건, 즉 종 구성, 영양물질 구성, 그리고 어류의 건강도(health)와 풍부도의 3가지 범주를 평가하기 위해 종 군집 행렬 방법을 이용하여 어류의 생물학적 통합 지표를 구상하였다. 그림 1.은 수자원 개발 사업 등에서 생물학적 통합 지표를 이용한 수생 시스템의 변수들과 이들의 변화 요인을 나타낸 것이다(Karr, 1991). 특히, Karr 등(1986)은 생물학적 통합 지표를 개발하는 과정에 인간 활동으로 인해 하천 시스템에서 유발된 영향을 5 가지, 즉 흐름 영역, 서식처 구조, 수질, 먹이 공급원, 그리고 생물 상호 작용으로 구분하여 제안하였다.

이들은 어류 서식 환경에 미친 5가지 영향을 기준으로 하나 또는 그 이상의 방해 경로를 통해 유발되는 잠재된 충격을 동정하고자 할 때 고려하기 위한 인자들이다. 하천 어류 서식 환경에 대한 구성 성분을 평가하고 적합한 서식 조건을 제공하기 위해서는 이 역학 관계를 고려할 필요가 있다. 실제로 유량 점증 방법론(다음에 설명하는 Instream Flow Incremental Methodology : IFIM을 필자가 한글화한 것임)과 같은 어류 서식 환경 평가 방법은 하천 시스템에 미치는 충격을 바라보는 관점에서 큰 영향을 받아왔고, 이 패러다임에 맞추어 개발되고 있다. 따라서, 하천의 자연 환경을 복원하고 지속시키기 위해서는 하천 유량 및 구조의 변화가 초래될 정도로 개발사업이 이루어졌거나, 앞으로 개발될 하천에서 어류 서식 환경을 위한 하천 구조, 필요 유량을 평가하고 결정하여야 한다.

2.2 어류 서식 환경의 평가 성분

어류 서식 환경의 구성 성분은 각각 분리해서 생각할 수 없는 인자들로서 항상 복합적으로 작용하는 시스템의 구성 요소라 할 수 있다(Karr, 1991). 이와 같은 복합적인 시스템의 문제를 파악하여 대책을 수립하기가 그렇게 쉬운 일은 아니다. 따라서 하천 어류 서식처 환경이라는 복합적인 시스템에서 각 성분

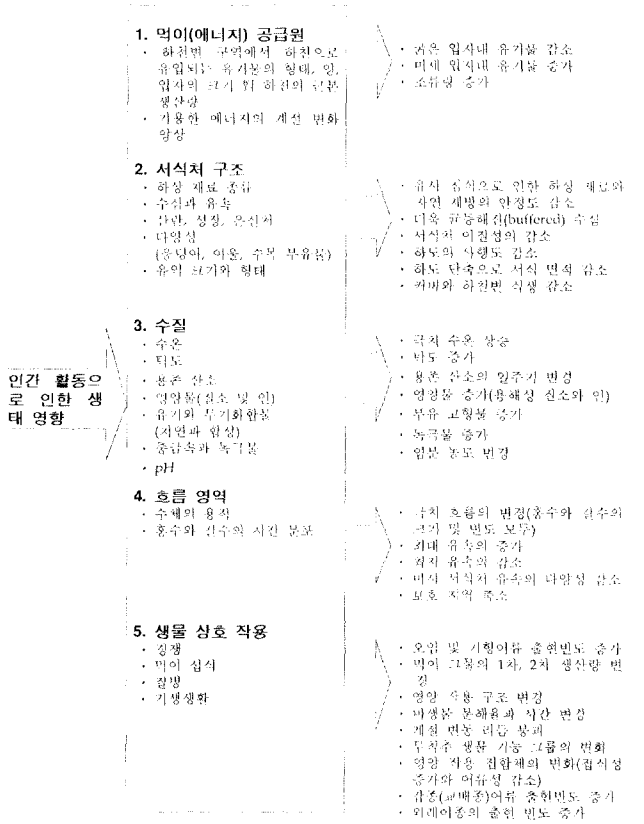


그림 1. 수생 시스템에서 서식 환경 변수들의 변화 요인 (Karr, 1991)

에 대한 최적 조건을 추정하여 이들을 조합함으로써 최적의 시스템 에너지를 찾아내야 한다. 현재까지 이를 위한 가장 중요한 어류 서식처 환경 고려 요소는 크게 하도 구조, 수리학적 특성, 수질, 그리고 휴식과 은신처 등이다.

먼저, 하천에서 어류 섭식과 생활을 위한 공간상의 하도 구조는 그림 2.에 나타낸 바와 같이 하천의 지형학적 특성상 웅덩이와 여울의 연속적인 형태(pool-riffle sequence)로 나타난다. 이 공간에서 어류 서식 환경 평가를 위한 인자는 유속, 수심, 그리고 하상 재료 등이다. 하천의 지질 특성과 인위적으로 변경된 하천 구조 등에 따라 다르지만, 대체적으로 여울은 수리학적 흐름 양상이 하천의 평균 유속보다는 크고, 평균 수심보다는 적으며 자갈과 같은 하상 재료로 구성되는 특성을 갖는다. 반면에 웅덩이는 평균 유속보다 적고, 수심은 더 깊으며 하상 재료는 가는 모래와 실트 등으로 구성되거나 피복되는 특성을 갖는다(Keller와 Melhorn, 1978; Knighton, 1984). 여울은 Froude수가 0.1 이상이고 웅덩이는 0.1 이하를 갖으나 주로 수심에 변화한다(Gordon 등, 1993). 따라서 여울은 수심이 깊지 않기 때문에 그림 2.에서 보는 바와 같이 유량 규모에 따라 나타나는 현상으로 하천 유량 변화에 가장 민감한 서식 공간이라고 할 수 있다(Miller와 Wezel, 1985; Brookes, 1988; Gore와 Petts, 1989; Calow와 Petts, 1994; Allan, 1995).

두 번째는 산란과 부화를 위한 공간은 수리학적 성분, 하상 재료의 물리적 성분, 그리고 수질과 같은 화학적 성분이 중요하다. 특히 부화를 위한 수질 조건, 주로 어란이 부화하기 위한 수온과 용존 산소는 대단히 중요한 조건이다. 대체적으로 수온이 올라가면 부화 진행 속도가 증가한다. 또한, 이 공간 환경은 하상 재료, 웅덩이와 여울의 반복 형태, 그리고 지하수 침투 정도가 포함된다.

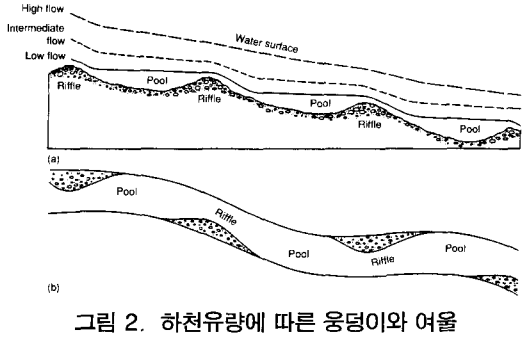


그림 2. 하천유량에 따른 웅덩이와 여울 연속 형태(Allan, 1995)

하천 어류가 서식할 수 있을 정도의 하천 수질에는 섭식을 위한 유기물과 적합한 서식을 위한 수온 등 환경 요소가 중요한 성분이다. 이 수질 성분은 다른 성분과 직접적으로 관련되어 있지만, 어류는 선호하는 수질을 찾아가게 되고 항상 생존과 관계가 높은 서식 조건이다.

마지막으로 Cover, 즉 어류의 휴식과 피난을 위한 은신처이다. 어류는 유속이 빨라 이동에 장애가 되거나 포식자가 나타나게 되면 그 곳을 피하여 숨어야 생존할 수 있다. 이 휴식과 은신처는 주로 수면에 걸친 식생, 아래가 잘려나간 강둑(under-cutting), 수중 식생, 수중 물체(나뭇가지, 통나무, 뿌리, 암석 등), 부유 물질, 그리고 표면 난류 등에 의해 제공될 수 있다. 이와 같은 서식처 구성 성분은 한 시스템에서 복합적으로 작용하게 된다. 물의 흐름 시스템에 따라 활동 순환 과정을 완성해 나가는 어류와 기타 수중 생물의 종과 생물량은 그들이 이용할 수 있는 활동 공간의 질과 양 두 측면이 어떻게 변화되느냐에 따라 달라진다. 서식 공간의 변화는 시간과 공간에 따라 달라지고, 대체적으로 과거와 현재가 연속되는 흐름으로 특성화 할 수 있다. 이 시간과 공간상의 흐름은 서식처에 대한 수리 모의를 통해 정량화 되고 특성을 찾을 수가 있다.

3. 어류 서식 환경 평가 방법

지금까지 북미와 유럽, 호주 등에서는 하천유지유량의 산정 및 추천치를 개발하고 결정하기 위해 과거 많은 어류 서식 환경 평가 기법이 개발되어 왔다. 이 기법들은 특정 어종, 주로 냉수성 하천에서 송어나 연어의 서식처를 보전하는데 중점을 두어 왔다. 처음에 개발된 방법은 생태학자들의 경험적인 판단을 바

탕으로 이루어졌으나, 곧이어 조절되지 않은 자연 상태 유량을 배경으로 간단한 유량 산정 방법이 개발되었다. 이 후, 수문 및 생태 서식 환경의 계절 변화가 중요한 변수임을 알고, 수문 사상의 시계열과 같이 수시로 변하는 유량에 따라 하천수리의 변화 양상과 서로 다른 성장단계 및 계절에 맞는 어종의 서식처 요구조건을 고려하는 방법이 개발되었다.

이러한 기법을 재검토하고 평가한 결과에 따르면 (Jowett, 1997; Bovee 등, 1998), 하천 어류 서식처 제공에 필요한 유량을 결정하고 평가하는 방법은 크게 3가지 범주로 나눌 수 있다. 즉, 과거 관측 유량에 따라 일정 유량 비율을 산정하는 방법, 하도의 기하 특성치를 이용한 수리학적 방법, 그리고 생태학적 서식 조건을 이용하여 컴퓨터로 어류 서식처를 모의하는 방법이 그것이다.

3.1 일정 유량 비율법

관측된 유량만을 이용하는 방법으로 관측지점에서 측정된 유량의 비율을 책정하여 유지유량을 추천한다. 가장 간단한 형태는 최소유량을 계산하는 방법이다. 예를 들면, 10년 빈도 7일 저수량이 가끔 수질 기준치를 유지하는 데 필요한 최소유량으로 일부에서 보고된 바 있으나(Stalnaker, 1979), 어류의 서식을 위한 유량으로는 너무 적다는 것이 밝혀졌다 (Bovee, 1982; Orth와 Leonard, 1990).

(1) Tennant 방법

일명 Montana Method라고도 하며, 연평균유량(average annual discharge)의 비율을 바탕으로 하천유지유량을 지정하는 것으로 겨울과 여름의 비율이 다르게 산정된다(표 1. 참조). 이 방법에 따른 추천값들은 Tennant(1976)가 미국 Montana, Wyoming, 그리고 Nebraska 주 11개 하천에서 관측된 유량에 따라 하폭, 수심과 유속이 어떻게 변화하는 지를 관찰하여 얻은 결과이다.

(2) Hoppe 방법

Hoppe(1975)가 미국 Colorado의 Frying Pan River에서 송어 서식에 필요한 유량을 측정하여 추정한 것으로서 추천유량은 표 2.에 나타낸 바와 같다. 이 방법은 적절한 유량기록(20년 이상)의 자료가 필요하며, 주로 일 유량으로 유황곡선을 작성한다. 이 방법은 자료 수집 시간과 비용을 드리지 않고, 관측 유량 자료만 있으면 결과를 바로 얻을 수 있다. 그러나, 특정한 구간과 어종에 대해서만 적용이 가능하고, 서식처-유량 관계가 유사한 곳이어야만 적용할 수 있다.

3.2 수리학적 방법

어떤 하천구간에서 하나 또는 그 이상의 조사구간(transect)을 선정하여 수리 및 수문 자료를 수집하고, 윤변, 수심 및 유속과 같은 수리학적 변수와 유량 간의 관계를 개발하는 방법이다. 전형적으로, 자료는 유량을 유지하기가 가장 한계 상태인 곳(주로 여울과 같은 곳)에서 수집한다. 예를 들면, 수심과 유속이 어떤 한계를 벗어나면 어류가 이동하는데 지장을 받게 될 수 있는 곳이다. 수심이 얕은 여울구간은 유량이

표 1. Tennant 방법에 제시된 하천유지유량 추천값(Tennant, 1976)

관련 유량 항목	유량영역에 기초한 추천 유지유량	
	겨울(10월-3월)	여름(8월-9월)
씻어내기 또는 최대 유량	연평균유량의 200%	
최적 범위 유량	연평균유량의 60-100%	
현저하게 좋은 유량	40%	60%
아주 양호한 유량	30%	50%
양호한 유량	20%	40%
적정 또는 적은 유량	10%	30%
빈약한 또는 최소 유량	10%	10%
심각하게 위험한 유량	연평균유량의 10%미만	

표 2. Hoppe(1975) 방법에 의해 제시된 추천 유지유량

유량 항목	같거나 초과하는 시간유량의 백분율(%)
씻어내기 유량	17
산란에 필요한 유량	40
홍수 발생 및 Cover 형성 유량	80

(주) 씻어내기 유량(또는 세척유량, flushing flow) : 퇴적된 미세한 하상 재료에서 자갈까지 씻어내기 위해 48시간 유지되는 유량을 말하는 것으로 실제는 하도의 유지와 어류의 서식처 회복을 위해 흘러야할 유량이다.

변함에 따라 제일 먼저 영향을 받고, 여울을 유지하면 적절한 웅덩이도 유지할 수 있기 때문에 여울이 주로 분석 대상이 된다.

(1) Idaho Method

Cochnauer(1976)가 걸어서 건널 수 없을 정도로 큰 하천, 특히 미국 Idaho주의 Snake River에 적용하여 개발한 것이다. 이들은 3종의 온수성 어종에 대해 모의한 서식처 조건과 기지의 서식 요구조건을 비교하여 어류의 이동, 산란, 그리고 성장기에 필요한 최소흐름의 추천 유량을 개발하였다. 여기서, 이동을 위한 흐름은 최소한으로 요구되는 수심을 바탕으로 하였고, 산란을 위한 흐름은 산란을 위해 최대 하폭을 제공할 수 있도록 최소로 지속되는 유량을 결정하는 지침으로 이용되었다.

(2) Washington Department of Fisheries Method

Collings(1972)가 주로 연어를 대상으로 개발한 방법이다. 이 기법은 유량 범위에 따라 산란과 성장(먹이 생산) 단계별 서식처 양을 결정하기 위해 하천 구간을 도시하는 방법(mapping)을 이용한다. 이 방법을 적용하기 위해서는 관심 있는 어종의 서식 수심과 유속의 범위에 따라 가용한(usable) 영역과 가용하지 않은(unusable) 영역의 기준을 미리 알아야 한다. 필요한 자료는 각 조사 구간마다 측정한 수심과 유속이고, 유량별로 측정하여야 한다.

이 방법의 장점은 단순히 하나의 값보다 유량에 따른 서식처의 변화를 그림으로 나타낼 수 있다는 것이다. 따라 서식처에 대한 대체 흐름영역(지정되지 않은 가용한 흐름 영역)이 미치는 영향을 평가할 수 있다. 이 방법은 유량 규모별로 수리 및 수문 자료를 수집해야 하고, 그 결과를 직접 도식화하는 절차가 필요하다. 단지, 유량에 따른 현장을 관찰하는 정도만으로는 하천과 그 서식 생물이 유량 변동에 따라 어떻게 대응하는 지를 평가할 수 없다.

이에 대한 대안으로 윤변 방법(wetted-perimeter method)을 이용하여 특성화 할 수 있다. 이 방법은 몇 개의 대표 여울을 조사 구간으로 선정하고, 최소한 5개 이상의 유량 규모별로 수심과 유속을 측정한다. 그림 3.과 같이 유량 대 윤변 길이를 도시하여 이 곡선에서 맨 처음 경사가 꺾이는 점(변곡점)을 최적 유량으로 잡는다. 이 점에서는 유량이 증가하여도 윤변 길이는 점점 적게 변화한다는 것을 의미한다. 이 기법은 유량 변화에 따른 윤변 경사의 변곡점에서 어류가 좋아하는 최대의 서식 공간을 제공한다는 점을 전제로 한다.

3.3 서식처 모의 방법

유량에 따른 물리적 서식처의 변동을 고려할 뿐만 아니라 하천유량 범위에 걸쳐 가용한 서식처의 양을 결정하기 위해 주어진 어종이 선호하는 생태학적 서식처 선호도를 결합하여 모의하는 방법이다. 모의 결과는 가용한 서식처 면적과 하천유량 사이의 관계가 곡선형태로 나타내진다. 이 곡선에서 개별 어종에 대한 최적 유량을 산정하여 추천 하천유지유량으로 사용한다.

이 방법은 수리학적 방법에 자연 상태의 어류 서식처 특성을 확장하여 생태학적 특성을 반영한 방법이다. 즉 수리학적 매개변수 자체보다 특정한 생물학적 요구에 맞춘 수리 조건을 바탕으로 요구되는 유량을 평가하는 것이 큰 차이점이다. 하도 구간내 수심과 유속을 모의하여 대상 어종의 서식에 적합한 면적을 산정하기 위해 서식처 적합도 기준을 이용한다. 그리고 수심, 유속, 하상 재료 등의 수리 조건에 따른 서식처 적합도 기준을 조합하여 유량 크기별로 적합한

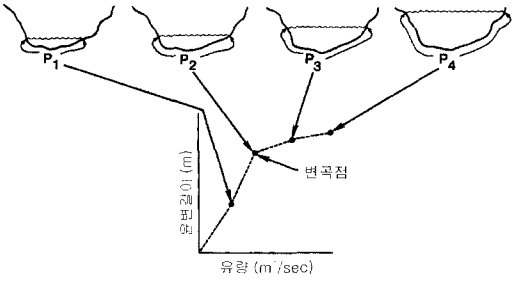


그림 3. 윤변과 유량간의 관계 이용법 (wetted-perimeter method)

서식처 면적이 어떻게 변하는 지를 파악한다.

(1) The Instream Flow Incremental Methodology(IFIM)

유량 점증 방법론, 즉 IFIM은 그림 4.에 나타낸 바와 같이 서식처의 시간과 공간 양상을 평가하기 위해 해석 절차를 연결한 일종의 라이브러리이다. 이 방법은, 관련 자료가 충분히 구비된다면, 그림 1.에 제시된 하천의 생태계 변화 요인을 포함한 어떤 문제라도 해결할 수 있는 방법론이다. 유량 점증 방법론의 독특한 특성 중에서 하나는 시간과 공간에 따른 어류 서식처의 변동성을 동시에 해석할 수 있다는 점이다. 유량 점증 방법론은 연구계획의 구성과 현재 여건의 서술에서 시작하여 문제의 해에 대한 최종적인 타협을 통해 수행할 수 있는 하나의 완전한 시스템을 생각하고 판단하는 과정이다. 여기서 "Incremental"은 문제의 해를 찾을 때까지 유량을 약간씩 증가하면서 수정하거나 문제를 전망 또는 예상하는 것을 의미한다(Bovee, 1982; Bovee 등, 1998).

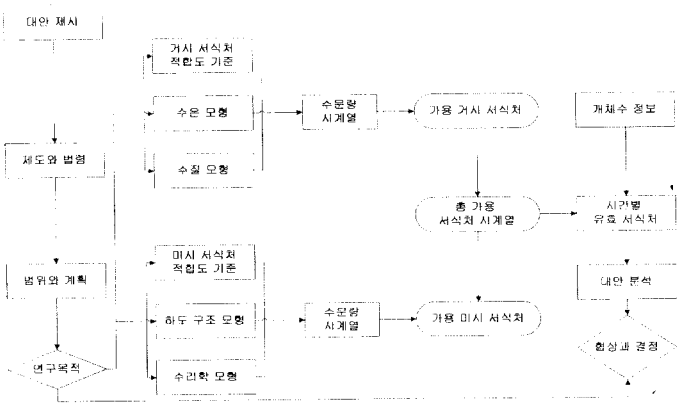


그림 4. 유량 점증 방법론의 구성 성분과 모형 연결에 대한 개념도

그림 4.에서 보는 바와 같이 유량 점증 방법론의 절차는 크게 하천 개발 사업 전후에 대한 제도 분석, 분석 전략 및 계획 수립, 그리고 연구 목적을 결정하는 과정이 있다. 그 다음은 어류 서식처에 대한 거시 서식처(하도 특성, 수온과 수질)와 미시 서식처(유기체의 활동 공간을 구성하는 수리학적, 구조적 특징) 해석, 서식처 적합도 기준 도출, 그리고 수문량의 시변성을 고려한 물리적 서식처 모의 과정이며, 이는 다음에 설명하는 물리적 서식처 모의 시스템이 여기에 해당된다. 마지막으로 서식처 모의 결과에 대한 대안을 비교 · 검토하여 의사 결정자와 주민 등의 의견을 반영하는 합의 과정이 고려되고, 합의가 원만히 이루어질 때까지 위 과정을 반복할 수 있다.

유량 점증 방법론의 해석 대상은 유역 전체(drainage basin), 대표 소유역(network), 그리고 분할 하도 구간(segment)이라는 3가지 거시 서식처 수준의 계층 구조를 이용할 수 있다. 가장 큰 서식처 단위는 수십에서 수천km^2의 크기에 걸친 전체 유역이다. 대표 소유역은 둘 또는 그 이상의 소유역으로 구성하되, 해석 결과가 유역 전체를 망라할 수 있어야 한다. 마지막으로 분할 하도 구간은 가장 작은 서식처 하부 구조로서 유량 점증 방법론에서 설정할 수 있는 기본적인 서식처 해석 대상이다.

이보다 더 적은 서식처 단위는 중간 서식처(mesohabitat)이다. 중간 서식처는 미시 서식처로 구성되나 통상적인 하천 경사, 하도 형태, 그리고 하천 구조의 형태를 갖는다. 웅덩이와 여울은 전형적인 중간 서식처이다. 이 서식처의 길이는 대체적으로 하폭과 같은 크기를 갖는다. 중간 서식처는 미시 서식처 성분으로 나누어지며 1에서 수km^2 이하의 면적에 걸쳐있다. 미시 서식처는 수심, 유속, 하상 재료, 그리고 Cover인 휴식과 은신처 조건이 상대적으로 동질한 국지적인 하도 구역으로 정의된다.

(2) PHABSIM(Physical HABitat SIMulation system)

물리적 서식처 모의 시스템, 즉 PHABSIM은 유량 점증 방법론의 주요 성분을 구성하는 계산 과정이다. PHABSIM의 주된 가정은 수중 생물이 수리학적 환경 변동에 따라 직접 반응한다는 것이다. 개별 유기체는 가장 좋아하는 유지 조건을 선택하는 경향이

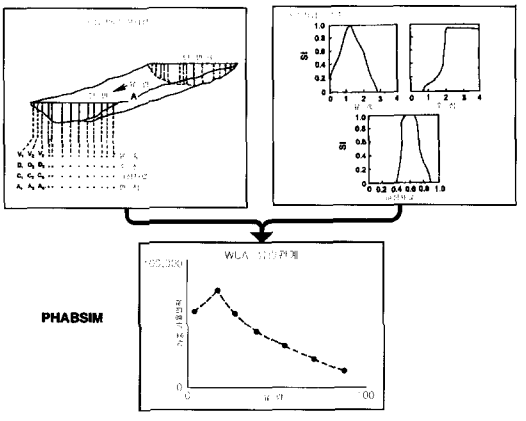


그림 5. PHABSIM 과정의 개념(Milhous 등, 1989 ; Bovee 등, 1998)

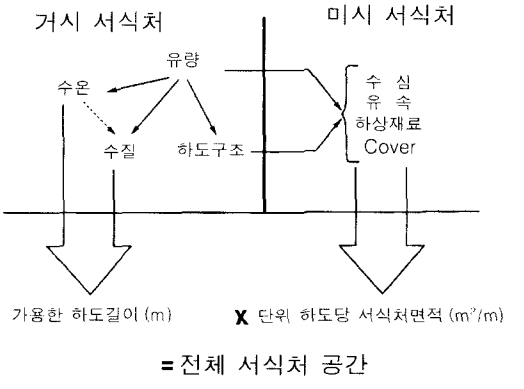


그림 6. PHABSIM의 구성 성분과 모의 흐름도(Bovee 등, 1998)

있어서, 유지 조건이 점점 나빠짐으로써 서식처 선호도가 감소하여 이용할 수 있는 조건이 점점 적어진다고 하는 전제를 배경으로 한다(Stalnaker, 1979, Milhous 등, 1989).

어류가 이용하기에 적합한 물리적 서식처의 양은 유량에 따라 변하고, PHABSIM은 바로 이 가용 서식처-유량간의 관계를 구한다. PHABSIM에서는 유량에 따른 수면표고와 유속의 변동을 수리학적으로 모형화 할 수 있고, 서식처-유량 관계를 만들기 위해 서식처-적합도 곡선과 이 관계를 결합한다. 그리고 거시 서식처 차원에서 유량에 따른 수온과 용존 산소를 모형화 할 수 있고, 이를 수리학적 모의와 결합할 수 있도록 개발되고 있다(Bovee 등, 1998). 이 과정을 개념적으로 나타내면 그림 5.와 같고 이를 보다 상세하게 나타내면 그림 6.과 같다.

그림 5.의 마지막 부분에서 보는 바와 같이 PHABSIM을 통해 최종적으로 얻어지는 곡선은 유량에 따른 복합 성분 인자(서식처 조건의 조합에 하도 평면적을 곱함), 즉 가중된 가용 면적(WUA: Weighted Usable Area)-유량간의 관계이다. 이 가중된 가용 면적(WUA)은 하천내 하도 공간상의 물리적 서식처로서 어떤 어종의 성장단계별 서식 조건을 각각 가중한 하도 면적이다. 가중된 가용 면적(WUA)은 어떤 어종이 특정 성장단계별로 주어진 구간을 이용할 수 있는 순수 적합도(net suitability)에 대한 하나의 지표이다.

이 모의 시스템에는 기본적인 두 가지 성분, 즉 수리 모의와 서식처 모의가 있고, 최근에는 하도 구간 전체에 대한 거시 서식처 개념의 수질모의가 추가되고 있다. 이 모의는 하도에서 평균 수심과 유속(mean column velocity) 조건을 이용하거나 하도 구간을 물리적 서식처의 분포를 보다 정밀하게 서술할 수 있는 작은 면적의 사각형 셀(cells)로 나누어 부분적으로 실행된다.

가. 수리 모의(Hydraulic simulation)

PHABSIM 개념에 따라 수심(수면표고)과 유속을 계산하기 위해서는 다음과 같은 몇 가지 사양을 선택할 수 있다.

① 각 하도 단면에서 측정된 유량으로 작성된 수위-유량 관계.

② Manning 공식(또는 사양으로 Chezy 공식)과 같은 평균 유속공식.

③ 표준축차법에 의한 수면형 계산. 비교적 널리 사용되는 미국 육군공병단 수문연구소의 수면형 계산 프로그램, 즉 HEC-2를 PHABSIM과 상호 교환할 수 있게 되어 있다.

④ 하도가 매끄럽지 않고 다양하게 변하는 서식처에서 보다 정확한 수심과 유속을 모의하기 위해 2차원 수리 모의가 진행되고 있다. 이는 평균 유속보다

점 유속 또는 부분 유속이 요구되는 어류 산란기의 산란처 수심과 유속 조건(Leclerc 등, 1996), 그리고 서식처의 분할 하도 구간이 종횡단으로 변동이 심하여 상하류 동질성이 없는 하천을 대상으로 적용되고 있다.

나. 서식처 모의(Habitat simulation)

서식처 모의는 주어진 어종과 성장단계별 또는 활동을 위해 하천 구간에서 물리적 서식처의 공간 면적을 양적으로 계산할 수 있는 과정이다. 서식처 모의에서는 수심, 유속 및 하도 지수(각각 유속 $f(v)$, 수심 $f(d)$, 하도 지수 $f(s)$의 서식처 적합도 곡선을 이용한다. 이 인자들은 식 (1)과 같이 서식처 적합도 지수에 의한 가중치를 부여하고, 각 셀에 대한 가중된 가용 면적(WUA)은 이 가중된 선호도 인자를 각 셀 면적에 곱함으로써 계산할 수 있다.

$$WHA_{ik} = \sum_{i=1}^{n} s_{i,k} \times a_i \qquad (1)$$

여기서 $s_{i,k}$는 어떤 대상 어종의 k 성장단계에서 각 서식처 조건의 적합도 지수를 다음 방법으로 구한 복합 서식처 지수(composite suitability index)이다. A_i는 하도 구간에서 분할된 i 셀의 거리와 폭을 곱한 면적이다.

성장단계별 복합 서식처 지수 s_i를 총합하여(aggregating) 결정하는 방법은 다음과 같은 세 가지가 있고(Bovee, 1982; Gordon 등, 1993), 최근에는 마지막 방법을 Leclerc 등(1996)이 적용한 바 있다.

① 곱셈 방법 : $s_i = f(v)_i \times f(d)_i \times f(s)_i$ 이것은 시스템내 각 성분간의 에너지를 최상으로 하는 상호작용을 의미하는 것으로서 최적 서식처는 모든 변수가 최적(적합도 지수가 1.0일 때)일 때만 존재한다(Palmer와 Snyder, 1985).

② 기하평균 방법 : $s_i = [f(v)_i \times f(d)_i \times f(s)_i]^{1/3}$ 이것은 시스템내 성분간의 보상효과를 의미하는 것으로서 두 인자가 최적 범위에 있으면, 제 3의 인자는 0이 되지 않는 이 인자에만 영향을 받는다.

③ 최소치 방법: s_i = 최소치$[f(v)_i \times f(d)_i \times f(s)_i]$ 이것은 서식처가 가장 나쁜 성분보다 더 이상 좋아지지 않는다는 것이다.

④ 가중치 방법: $s_i = f(v)_i^a \times f(d)_i^b \times f(s)_i^c$, $a+b+c = 1$. 이는 각 성분을 가지고 주성분 분석을 통해 서식처 적합도 지수에 대한 가중치를 부여한 것이다.

거시 서식 조건인 수온과 수질의 적합도 기준이 개발되면, 유속, 수심 및 하상 재료, 그리고 수온 및 수질은 복합 서식처 지수의 추가 인자로 볼 수 있다. 수온과 수질 인자는 거시 서식처 성분이므로 각 셀이 아닌 여울과 같은 조사 구간, 즉 적합한 어류 서식처의 전구간에 대한 적합도 지수를 곱해 가중된 가용면적(WUA)을 구한다. 수질 인자 변화를 하도 단위 길이(보통 1㎞)내 일정하게 곱하는 방법과 부분 변화까지의 적합도를 구하는 방법이 있다(Bovee 등, 1998).

다. 시계열 모의(Time series simulation) 및 계절 변동성

유량 점증 방법론은 문자 그대로 0의 유량에서 점차 일정하게 유량을 증가시켜가면서 수리 및 수질 조건을 모의하게 된다. 유량 점증 방법론은 모의 대상 하도의 유량 수문 곡선(여기서는 일, 순, 월, 계절 등 지속기간별 대상 유량의 시계열을 말함)을 이용하여 어류 서식처의 변동성을 파악할 수 있다. 즉, 특정 기간, 월 또는 일 단위의 계절적 변동성을 고려한 서식처 시계열과 서식처 곡선(habitat duration curve)을 얻기 위해 유량 계열자료와 결합할 수 있다. 선정된 일 또는 월에 대해 유황곡선-서식처 곡선을 합성한다. 주어진 어종에 대해 성장단계별로 월, 계절, 또는 연 서식처 시계열을 만들어 낼 수 있다.

서식처 시계열은 하천 개발 사업 전후의 서식처 가용성을 비교하는 데 유용하다. 서식처 곡선은 최상의 대안을 선정하는 데 도움을 주기 위해 서로 다른 물배분 규칙에 따라 개발될 수 있다. 각 어종과 성장단계를 위한 서식처 가용성을 개발함으로써 주어진 성장단계 동안 어종이 생존하는 한계기간을 구별할 수 있다. 서로 다른 어종은 수리학적 특성 변동에 서로 다르게 반응하므로, 이 정보는 중복된 어종에 따른

잠재 변화를 평가하는 데 특히 유용하다(Stalnaker, 1979; Milhous 등, 1989).

3.4 서식처 모의를 위한 적합도 기준

가장 효과적이고 성공적인 서식처 모의를 위해서는 어류상과 서식 환경에 대한 정확한 자료를 수집하여 대상 어종(target species, organisms)의 실제에 가까운 서식처 적합도 기준(곡선 또는 지수)을 작성하여 적용하는 것이다(Thomas와 Bovee, 1993; Bovee 등, 1998). 여기서 '실제에 가까운'이라는 의미를 이해하기 위해서는 PHABSIM에서 적용해 온 몇 가지 서식처 적합도 기준 작성 과정을 파악할 필요가 있다. 즉, 각 기준이 어떤 정보와 자료를 바탕으로 하고, 어떤 해석 방법으로 처리되었는지를 알면 분명하게 구분할 수 있다. 현재까지 어류 서식처 적합도 곡선은 어류 상호 작용보다는 특정 어종의 각 서식 조건에 따른 조사 지점의 출현 개체수(population)를 대상으로 한다.

3.4.1 서식처 범위와 조사

하천 생태 환경에 따라 서식하고 있는 생물은 수생역에는 부착조류, 수생 곤충과 어류 등, 육지에는 식물, 육상 곤충과 조류 등이 있다. 또한, 수생역과 육지의 경계 지역에는 여러 동식물이 서식한다. 이와 같은 다양한 하천 생태 환경에서 수생역의 어류 서식 환경 평가와 서식처 모의를 위한 범위와 조사는 다음과 같은 내용으로 수행할 필요가 있다.

(1) 대상 어종 선정

어류 서식 환경 평가와 모의를 위한 대상 어종은 단일 어종 또는 어류 군(guilds)을 선정할 수 있다. 어종은 사회적으로 중요시되는 하천 어류 관리의 관심사와 하천 환경 관리, 서식처 모의 자료의 가용성에 따라 대상 어종을 채택하는 것이 일반적이다(Bovee, 1982, 1986; Bovee 등, 1998).

어류 관리 측면은 그 선호도에 따라 멸종위기어종, 여가 활동 또는 상업성 어종, 또는 어종과 조류 등의 먹이 공급(forage)을 위한 어종으로 구분하여 선정할 수 있다. 특히 사회적 관심이 높고 상징성이 높은 종, 특정한 환경조건을 요구하여 환경의 지표성이 높은 종, 어류 군집의 중요성을 고려한 지표종(indicator species), 멸종의 위험성이 높아 사회적 관심을 유지하기 위한 희귀종, 또는 먹이 연쇄에서 중요한 위상을 갖고 있어서 넓은 서식 공간이 필요한 종 등을 기준으로 선정할 필요가 있다.

하천 환경 관리 측면은 하천 어류의 서식처 분리(segregation) 현상에 따라 담수 구역, 저수와 담수 구역, 그리고 완전 저수 구역에 서식하는 어종으로 구분할 수 있다. 담수 구역에서도 본류의 여울과 웅덩이, 측방 수로, 사행 구간의 분리 수로, 와류 구간, 또는 배수 구간 등을 위주로 서식하는 종을 구분하여 적용할 수 있다. 어류 군은 환경 자원의 등급이 같은 어종의 군집을 말하며, 대체적으로 단일 어종보다는 지형학적 공간이 넓은 서식처 정보를 제공할 수 있다. 여기에는 많은 조사와 서식처 분류가 필요하다.

여울에 서식하는 유영성 어종(swimming species)의 체형은 대체적으로 유선형과 같은 방추형(fusiform)을 띠고 있으며, 대표적인 어종은 버들치, 피라미, 쉬리, 납자루 등이다. 흐름이 완만하거나 여울과 웅덩이가 이어진 곳에는 체고가 높고 체폭이 좁은 측편형(compressiform) 어종이 많이 서식하며, 대표적인 어종은 묵납자루, 줄납자루, 납줄개 등이다. 또한 여울의 하상 가까운 곳에는 체형이 리본형(taeniform)을 띤 어종이 서식하며, 주로 모래무지, 모래주사, 돌마자, 배가사리, 두우쟁이 등이 서식한다(Allan, 1995; 김익수, 1997).

(2) 어류와 서식환경 분류

대상 어종이 선정되면 서식처 이용 양상의 변화를 반영할 수 있도록 어종에 대한 기준을 분류하여야 한다. 가장 일반적인 분류 항목은 개체의 크기, 나이, 또는 성장단계이다. 이밖에도 서식처 이용 정도에서 계절 또는 일주기 변화, 활동 양상, 종의 관련성, 수질 특성, 또는 표본 추출 장비에 따라 분류할 수 있다.

현재까지 가장 보편적으로 이용되고 있는 분류는 어류의 크기(size class)이다. 어류의 나이나 성장단계 분류에는 어류의 크기에 따른 분류가 가장 선호되고 있다. 어류 활동은 계절과 일변화의 영향을 많이

받는다. 대표적인 예가 어류의 이동, 서식처 터전의 이용, 산란, 성장, 그리고 동면과 같은 활동이다. 이를 구체적으로 평가하기 위해서는 계절 변동성을 고려할 필요가 있다. 이동을 위한 서식처 평가는 어류 통과를 위한 수심과 유속을 대상으로 할 수 있다. 그러나 서식 터전 잡기와 산란, 부화 등의 어류 활동은 계절이나 일 변화를 고려하여 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 가장 간단한 계절 구분은 어류 활동이 활발한 여름과 동면기의 겨울로 양분하는 경우이다.

(3) 서식 환경 변수의 범위

서식처 적합도 기준(곡선 또는 지수)의 조사 연구는 대부분이 어류 성장 단계, 개체의 출현 빈도수, 수리 조건인 수심, 유속, 하상 재료 또는 Cover, 수질 조건인 수온과 용존 산소 등을 대상으로 한다.

미시 수리 조건에서 수심은 어류 수심으로 하상에서 어류까지의 깊이를 말한다. 유속은 통상 평균 유속(mean column velocity)과 수심 방향의 점 유속(nose velocity)이 이용되며 어종의 서식 위치에 따라 달라진다. 수변 가장자리의 천수역 유속이 중요한 어종도 있다. 하상 재료는 입도 분포(Bovee, 1986)를 기준으로 지배 입자(dominant particle) 크기, 미세 입자의 비율이나 묻힘 깊이(embeddedness), 그리고 하부지배 입자(subdominant particle) 크기를 설정한다.

입도 분포가 어려우면 수중과 수변 바닥의 겉보기 하상 재료를 설정한다. Cover는 어류 휴식이나 은신을 위한 대상물을 유형별로 구분한다. 예를 들어, 전혀 없는 경우, 크고 작은 호박돌, 수중 통나무, 나무 그늘, 아래가 잘려나간 강둑, 나무뿌리 뭉치 등에 따라 코드를 부여한다.

거시 수질 조건인 수온과 용존 산소는 기본적으로 어종 개체수의 출현 빈도를 고려하지만, 생존(survival)을 위한 최소와 최대 범위, 그리고 최적으로 구분한다. 수리와 수질 조건의 최소 및 최대 범위는 기상 여울 구간에서 실측한 값을 선택할 수 있다.

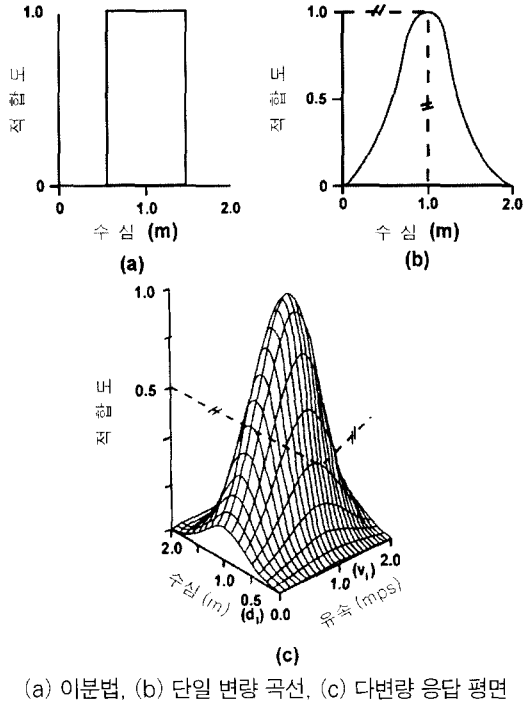
3.4.2 서식처 적합도 곡선 형태

일반적으로 어류 서식처 적합도는 특정한 조사 지점이나 구간에서 출현한 어종의 개체수를 기준으로 작성된다. 즉, 조사 기간 동안 출현한 최대 개체수를 1.0으로 설정하고 나머지는 최대 개체수에 대한 상대적인 비율로 설정된다.

어류 서식처 적합도 곡선의 형태는 그림 6.과 같이 크게 3 가지 방법이 통용되고 있다. 먼저 그림 6.(a)와 같이 서식 조건 범위를 이분법에 따라 최적치(1.0)만을 제시하고, 나머지는 전혀 이용하지 않을 조건은 최소치(0.0)를 부여한다. 이 형태는 선호하는 서식 조건의 범위의 폭이 지극히 좁은 경우에 사용할 수 있는 방법으로 대상 어종에 대한 미시 서식 조건의 질을 명확하게 구분할 수 있을 경우에 적절하다.

두 번째는 그림 6.(b)에 나타낸 바와 같이 Waters(1976)가 맨 처음 개발한 형태로서 이분법보다 더 유연하게 어류 서식처 적합도를 나타낼 수 있다.

PHABSIM에서는 서식의 전체 범위를 잡아 상하 꼬리 부분까지 연장하고, 비교적 폭이 좁은 첨두 부



(a) 이분법, (b) 단일 변량 곡선, (c) 다변량 응답 평면

그림 6. PHABSIM 등에서 이용할 수 있는 서식처 적합도 기준의 형태

분을 최적으로 본다.

마지막은 단일 변량 형태의 문제점을 극복한 다변량 형태로서 그림 6.(c)에서 보는 바와 같이 각 변수간의 독립성과 차별성을 동시에 고려한다. 충분히 조사한 수리 및 수질 서식 조건과 어종 개체수 등의 자료를 바탕으로 다중 회귀식, 또는 정규 분포 등 확률 분포형을 설정하여 적합도를 수리 조건별로 부여한다. 다변량 형태는 현장의 생태학적 특성을 반영할 수 있기 때문에 비교적 정확한 방법이나 다양하게 변동하는 하천 흐름, 즉 부정류나 부등류 등에 대한 수리 조건의 변동을 고려한 현장 조사가 어렵다는 것이 단점으로 지적되고 있다.

한편, Bovee(1986)는 다변량 형태의 각 수리 변수간의 상호 작용은 단순한 함수보다는 생태학적 서식 조건에 대한 기준을 제시하여 다른 조건을 추가로 설정하였다. 예를 들어, 어떤 어종은 커버, 즉 은신처나 서식처를 찾게 되는데, 이 휴식과 은신처가 없으면 수심이 깊은 곳으로 찾아가고, 적절한 휴식과 은신처가 있으면 수심이 얕은 곳으로 이동하여 수심과 유속 관계가 서로 보완된다는 것이다. 그는 수면의 와류에 의한 난류도 마찬가지라고 하였다.

3.4.3 서식처 적합도 곡선 작성

서식처 적합도 기준(곡선 또는 지수) 작성 방법은 크게 3 가지 범주, 즉 전문가 판단 또는 현장 조사 분석, 그리고 서식 환경의 이용도를 고려하여 편의성을 제거하는 방법이 통용되고 있다(Bovee, 1986; Bovee 등, 1998).

먼저, 어류상과 서식환경 조사 자료의 이용 가능성에 따라 현장 조사 자료가 거의 없고, 문헌에만 서식 조건이 언급되어 있을 경우는 전문가 판단에 의존한다. 대개 어류 서식 조건이 어떤 범위, 예를 들어 어떤 대상 어종에 대해 수심은 10-30 cm, 유속은 25-70 cm/sec, 그리고 하상 재료는 잔자갈이나 모래와 같이 특정 범위가 제시되어 있는 경우는 이분법 형태를 적용할 수 있다. 이 서식 조건 범위는 주로 여울이나 웅덩이 같은 중간 서식처에 해당하는 것으로서 전문가의 판단이나 전문가 토론을 통해 결정할 수 있다. 이때 전문가는 대상 어종의 서식 역사와 서식 조건에 익숙한 사람이어야 한다.

두 번째는 현장 조사 자료가 있어 출현 빈도수에 따라 분포 곡선(히스토 그램 또는 분포 함수)을 작성하여 이용하는 방법이다. 대상 어종을 상대로 특정 구간이나 지역에서 측정된 미시 및 거시 서식 조건의 도수 분포를 기준으로 작성한다. 이 방법은 앞 전문가 판단 방법보다 현장 조사 자료를 직접 이용하는 점에서 좋은 방법이나, 특정 대상 어종을 상대로 조사한 결과는 서식 환경의 이용 가능성 측면에서 편의될 수 있다. 특히 조사자가 실측한 서식 조건이 단순히 관용도의 범위에서 최적인지 아니면 최저인지 알 수가 없는 경우가 많다.

세 번째는 서식 환경 이용 가능성을 고려하는 것으로서 두 번째 방법의 결과가 갖는 편의성을 제거하기 위해 선택 또는 선호도 함수(selectivity 또는 preference function)를 이용한다. 이 함수는 먹이 찾는 비율(forage ratio), Ivlev 선택도, 또는 Jacobs 지수가 이용된다(Bovee 등, 1998).

5. 맺는말

지금까지 하천 어류 서식 환경을 평가할 수 있는 방법과 적용에 필요한 기본적인 내용을 살펴보았다. 이와 같은 어류 서식 환경 평가는 하천 구간에서 다양한 어류상 및 서식 환경 자료를 이용하여야 가능하다. 현재까지 국내 어류상과 그에 따른 서식 환경 조사 자료의 부족으로 정통한 생태학적 서식처 평가 방법, 즉 유량 점증 방법론에 의한 물리적 서식처 모의 시스템을 적용하기에는 몇 가지 한계점에 이를 수가 있다. 그러나, 정확한 자료와 방법을 이용하여 보다 설득력 있는 결과를 얻어 효과적인 하천관리에 응용하기 위해서는 다음과 같은 제도적 위상, 충분한 기간과 공간에 걸친 어류상 및 서식 환경 조사, 적용 과정 개발, 수리와 수질 조건의 모의 연구가 시작되어야 할 것이다.

첫 번째는 하천 개발 사업과 취수 허가 등 인위적인 요인이 미치는 영향으로 하천 고유의 서식 환경

변화가 이루어져 왔다. 이와 변화 요인을 고려한 하천 수량 관리에 하천생태계 조사 및 해석과 보전 대책을 추진할 수 있도록 하천 생태계 보전에 대한 제도적인 위상을 부여하여야 할 것이다. 단순히 학술적인 연구 조사 수준을 넘어 실질적이고 조사와 평가를 통해 효과적인 하천 관리 제도를 정착할 필요가 있다.

두 번째는 이를 뒷받침할 수 있도록 보다 정확한 방법을 개발하고 좋은 결과를 끌어내기 위한 조사가 필요하다. 기간은 최소한 5년 이상, 하천은 자연 상태 또는 인위적 변화 요인이 있는 국내 하천의 대표 조사 유역, 조사 기간은 어류 연(fish year)을 중심으로 한 최소 단위, 조사 항목은 성장단계별 어류상과 수리 및 수질 조건 등의 서식 환경, 어류의 다양성과 상호 작용, 그리고 기타 수생 생물 등을 정량적으로 조사하여야 한다. 이 조사를 바탕으로 국내 서식 어종에 대한 서식처 적합도 기준 개발과 하천 생태 특성에 맞는 필요유량 산정과 유지 · 관리 방향이 설정되어야 한다. 특히 어류 서식 공간에 대한 생태 수리(ecohydraulics) 해석이 가능하도록 하도에 대한 수리 및 지형, 하도의 안정성, 하도 단면 등을 보다 상세하게 조사하여야 한다.

세 번째는 앞에서 조사된 어류상을 바탕으로 보다 다양한 서식 조건에 대한 모의가 필요하며 이는 시간과 공간 변화를 고려하여야 한다. 공간적으로 하천의 다양한 변화를 고려하기 위해 여울과 웅덩이, 분류수로, 그리고 수심과 횡단 방향에 대한 수리 조건 모의가 필요하다. 특히 하상에 서식하는 어종에 대한 수심 방향에서 경계면 유속과 하상 재료 조건, 하천 구조에 따라 다양하게 변화하는 2차원 평면 수심과 유속, 하상 재료 조건을 이용하여 서식처 조건을 모의할 필요가 있다. 여기에 하천 흐름 방향에 대한 거시 수질조건은 시간 변화를 고려하여야 한다. 특히 하천과 댐 하류 구간의 서식 환경 변화와 생태학적으로 어종과 어종의 상호작용을 고려한 서식처 모의와 최적유량 산정이 중요한 연구 조사 대상이다.

마지막으로, 하천관리 주체인 하천관리청을 중심으로, 어류학, 수리학, 수문학, 지리학, 미생물학, 그리고 하천생태학 등의 전문가들로 구성된 연구 그룹을 구성할 필요가 있다. 이들의 임무는 하천생태 조사와 보전 방향 설정, 하천 어류 서식처 평가 방법 개발, 방법의 적용과 검증, 그리고 운영을 위한 제도와 홍보에 두어야 할 것이다.

〈참 고 문 헌〉

김익수 (1997). 한국동식물도감, 제 37권 동물편(담수어류), 교육부, pp. 21-520.

Allan, J. D. (1995). Stream Ecology : Structure and Function of Running Waters. Chapman & Hall, New York, NY.

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. (1986). Development and Evaluation of Habitat Suitability Criteria for Use in the Instream Flow Incremental Methodology. Instream Flow Information Paper No. 21, U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services, FWS/OBS-86/07, Fort Collins, Colorado.

Bovee, K. D., B. L. Lamb, J. M. Bartholow, C. B. Stalnaker, J. Taylor, and J. Henrikson (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, Fort Collins, Colorado.

Brookes, A. (1988). Channelized Rivers : Perspectives for Environmental Management. John Wiley & Sons Press, New York, NY.

Calow, P. and G. E. Petts (1994). The Rivers Handbook : Vol 2. Hydrological and Ecological Principles. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.

Cochnauer, T. (1976). "Instream flow techniques for large rivers." in Instream Flow Needs(Eds J. F. Orsborn and C. Allman), Vol. II, American Fisheries Society, pp. 387-399.

Collings, M. (1972). "A methodology for determining instream flow requirements for fish." in Proceedings of Instream Flow Methodology Workshop, Washington Department of Ecology, Olympia(as cited by Wesche and Rechard, 1980), pp. 72-86.

Gordon, N. D., T. A. McMahon, and B. L. Finlayson (1993). Stream Hydrology : An Introduction for Ecologists. John Wiley & Sons, New York, NY.

Gore, J. A. (1985). The Restoration of Rivers and Streams: Theories and Experience. An Ann Arbor Science Book, Butterworth Publishers, Stoneham, Miami.

Gore, J. A., J. M. Nestler, and J. B. Layzer (1989). "Instream flow predictions and management options for biota affected by peaking-power hydroelectric operations." Regulated Rivers, Vol.3, pp. 35-48.

Gore, J. A. and G. E. Petts (1989). Alternatives in Regulated River Management. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida.

Hoppe, R. A. (1975). "Minimum streamflows for fish." Papers distributed at Soils Hydrology Workshop, U.S. Forest Services, Montana State University, 26-30 January 1976, Bozeman, Montana(as cited by Wesche and Reschard, 1980).

Jowett, I. G. (1997). "Instream flow methods: a comparison of approaches." Regulated Rivers : Research & Management, Vol. 13, pp. 115-127.

Karr, J. R. (1991). "Biological integrity : a long-neglected aspect of water resources management." Ecological Applications, Vol 1, pp. 66-84.

Karr, J. R. and E. W. Chu (1999). Restoring Life in Running Waters : Better Biological Monitoring. Island Press, Washington, D.C.

Karr, J. R. and D. R. Dudley (1981). "Ecological perspective on water quality of streams." Environmental Management, Vol. 5, pp. 55-68.

Keller, E. A. and W. N. Melhorn (1978). "Rhythmic spacing and origin of pools and riffles." Geological Society of American Bulletin, Vol. 89, pp. 723-730.

Knighton, D. (1984). Fluvial Forms and Processes. Edward Arnold, London, UK.

Leclerc, M., A. Boudreault, J. A. Bechara, and L. Belzile (1996). "Numerical method for modelling spawning habitat dynamics of landlocked salmon, Salmo Salar," Regulated Rivers: Research & Management, Vol. 12, pp. 273-285.

Milhous, R. T., M. A. Updike, and D. M. Schneider (1989). Physical Habitat Simulation System Reference Manual-Version II. Information Paper No. 26. U.S. Fish and Wildlife Service, Office of Biological Services Program, FWS/OBS-89/16, Fort Collins, Colorado.

Miller, B. A. and H. G. Wezel (1985). "Analysis and simulation of low flow hydraulics." Journal of the Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 111, No. 12, pp. 1429-1446.

Odum, E. P. (1993). Ecology and Our Endangered Life-Support Systems, 2nd Edition, Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, Massachusetts.

Orth, D. J. and P. M. Leonard (1990). "Comparison of discharge methods and habitat optimization for recommending instream flows to protect fish habitat." Regulated Rivers, Vol. 5, pp. 129-138.

Palmer, R. N. and R. M. Snyder (1985). "Effects of instream flow requirements on water supply reliability." Water Resources Research, Vol. 21, No. 4, pp. 439-446.

Stalnaker, C. B. (1979). "The use of habitat structure preference for establishing flow regimes necessary for maintenance of fish habitat." in The

Ecology of Regulated Streams (Eds J. V. Ward and J. A. Stanford), pp. 321-337, Plenum Press, New York, NY.

Tennant, D. L. (1976). "Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources." Fisheries, Vol. 1, pp. 6-10.

Thomas, J. A. and K. D. Bovee (1993), "Application and testing of a procedure to evaluate transferability of habitat suitability criteria," Regulated Rivers : Research & Management, Vol 8, pp. 285-294.

Waters, B. F. (1976). "A methodology for evaluating the effects of different stream flows on salmonid habitat." Pages 254-266 in J. F. Orsborn and C. H. Allman(eds), Instream Flow Needs, Special Publication of the American Fisheries Society, Bethesda, Maryland.