생태유량 산정을 위한 어류 모니터링 가이드라인 및 적용사례

- 3. 조사결과의 정리 및 평가 -

허 준 욱 |
생물모니터링센터 대표이사
junwhur@hanmail.net

김 정 곤 |
K-water연구원 수석연구원
jkkim@kwater.or.kr

1. 조사결과 정리

사전조사와 현장조사를 통해 작성한 조사표의 정리를 통해 어류군집 및 수환경 분석을 위한 기초 자료를 작성한다. 현장에서 작성한 양식에 따라 문서화 하며 작성한 사전조사표, 현장조사표, 어류방류조사표, 조사지점 위치도, 보호종 서식환경 기록표 등의 양식은 색인 작성 후 각 조사별로 정리한다.

1.1 사전조사 양식

가. 사전조사표 작성

사전 조사를 통해 수집한 정보는 현장 조사의 효율성을 높이는데 도움이 된다. 사전 조사표는 현장조사 시 필히 지참하도록 하며 포획 예상 어종을 파악하여 군집 특성 파악시 참고하도록 한다.

나. 치어 및 성어 방류 조사표 작성

국내에서 인공댐 건설에 의해 조성된 호소의 경우 어업권이 허가되어 어업협회가 결성되고 어업활동이 이루어지고 있다. 따라서 어업활동의 경제성을 높이기 위한 잉어, 붕어, 은어, 쏘가리 등의 경제성 어종의 방류 사업이 진행됨에 따라 댐의 방류 및 여수로를 통해 방류 어종이 댐 하류지역으로 유입되는 경우가 있어 어류 조사 시 참고하여야 한다. 또한 최근 생태복원에 대한 사회적 관심이 높아지면서 보호종의 개체 증식을 위한 보호종 방류사업이 이루어지고 있어 사전조사를 통해 보호종의 방류여부를 확인하도록 한다. 어류 방류 조사표에는 방류사업 실시기관, 방류 종명, 방류 장소 등을 기록하여 자료정리 및 고찰 시 참고하도록 한다.

1.2 현장조사 양식

가. 현장 조사표의 작성

현장 조사표는 조사 실시 후 각 조사지점의 어류군집의 특성을 포함한 물리 · 화학적 특성 등의 조사지점의 수환경 전반적인 특성을 보여줌으로 현장조사 시 가능한 다양한 특성을 기록하며 하천 내 교란요인의 발생, 수리구조물의 유 · 무 등을 기록한다.

나. 보호종 서식 환경 기록표의 작성

사전 문헌 조사와 현장조사를 통해 보호종의 서식이 확인된 경우 서식환경, 유속, 수심 등의 서식 특성을 파악함으로서 종의 복원 및 개체수 유지를 위한 기초자료로 확인할 수 있다.

다. 동정문헌 기록표

어류 동정의 근거로 사용한 문서(보고서, 연구논문) 및 도감을 기록하여 동정 근거를 명확히 한다. 동정문헌 기록표는 앞서 나타낸 어류도감에 자세하게 나타나 있어 참고하여 기록하는 것이 좋다.

라. 사진의 정리

(1) 조사지역 사진 및 조사방법

조사지역의 개황을 파악하기 위해 촬영한 사진은 현장 조사표와 함께 보관하도록 하며 보관 시 조사명, 행정명, 조사일 등을 기록한다. 조사방법 사진도 현장 조사표에 첨부하여 조사방법에 따른 어류상의 차이를 확인하는 기초자료로 활용한다.

(2) 어류사진

어류사진은 표본색인과 함께 보관한다. 포르말린에 장기간 노출할 경우 표본이 탈색되어 채색을 잃기 때문에 색인과 함께 촬영한 사진을 보관하여 차후 활용 시 참고한다.

1.3 채집 어류의 정리

가. 어류상 및 상대풍부도

현장조사를 통해 현장조사표에 기록한 결과를 이용하여 조사 대상지역의 전체 어류상 목록을 작성한다. 각 지점별로 포획된 어종을 기록해주며 총 개체수에 대한 과(family)별 어류의 구성비, 출현빈도 및 상대풍부도를 표시해 줌으로서 우점종 및 아우점종을 파악한다(그림 1~2, 표 1~2). 또한 조사를 통해 확인된 멸종위기 어류는 대문자-E (endangered species), 한국고유종-K (Korean endemic species), 외래어종-Ex (exotic species)로 표시 한다.

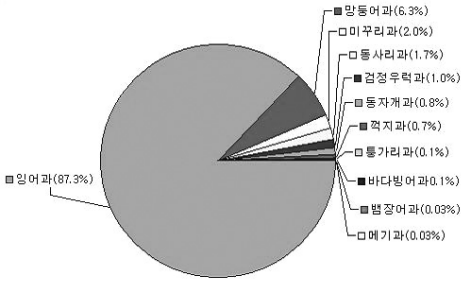


그림 1. 과(family)별 어종 구성비(예 : 금강수계)

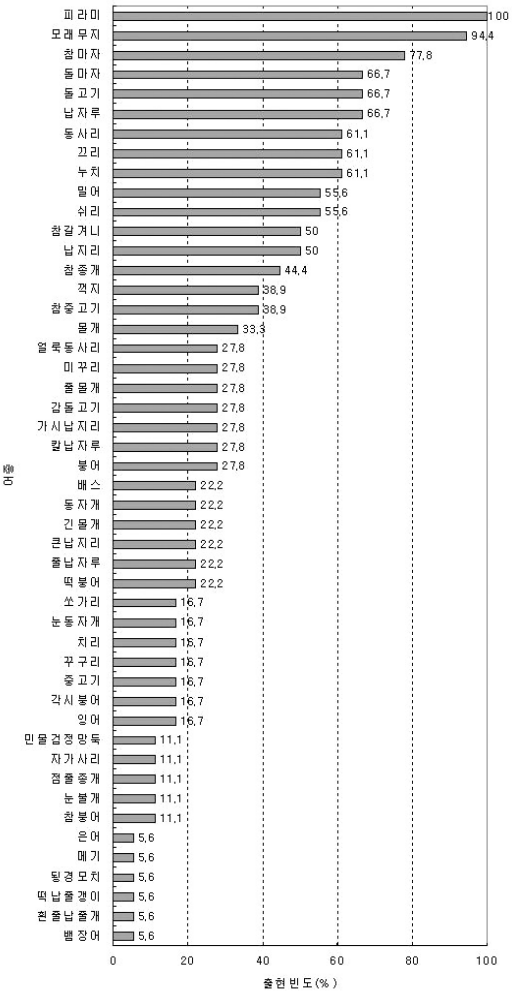


그림 2. 전체 어류의 출현빈도(예 : 금강수계)

표 1. 어류상(예 : 금강수계)

Species		조사지점							총개체수	상대풍부도(%)	출현빈도(%)	비 고
		1	2	3	4	5	6	7				
	Anguillidae 뱀장어과											
뱀장어	*Anguilla japonica*							1	1	0.03	5.6	
	Cyprinidae 잉어과											
잉어	*Cyprinus carpio*				3				6	0.17	16.7	
붕어	*Carassius auratus*				6			2	13	0.37	27.8	
떡붕어	*Carassius cuvieri*				2		12	19	34	0.98	22.2	Ex
흰줄납줄개	*Rhodeus ocellatus*				2				2	0.06	5.6	
각시붕어	*Rbodeus uyekii*		1	2	2				5	0.14	16.7	K
떡납줄갱이	*Rbodeus notatus*				8				8	0.23	5.6	
납자루	*Acheilognathus lanceolatus*		6	16	4	2	8	3	108	3.10	66.7	
칼납자루	*Acheilognathus koreensis*			9					22	0.63	27.8	K
돌고기	*Pungtungia herzi*		15	11		10			113	3.24	66.7	
감돌고기	*Pseudopungtungia nigra*					1			87	2.50	27.8	K,E
쉬리	*Coreoleuciscus splendidus*		45			1			267	7.66	55.6	K
참중고기	*Sarcocheilichthys variegatus wakiyae*		1	5					29	0.83	38.9	K
중고기	*Sarcocheilichthysnigripinnis mori*								6	0.17	16.7	K
줄몰개	*Gnathopogon strigatus*	1						1	10	0.29	27.8	
긴몰개	*Squalidusgracilismajimae*			2		1	3		8	0.23	22.2	K
몰개	*Squalidus japonicus coreanus*	3					1	5	35	1.00	33.3	
누치	*Hamibarbus labeo*	4	6	9			4	42	115	3.30	61.1	
참마자	*Hamibarbus longirostris*	2	12	23		1		8	134	3.85	77.8	
모래무지	*Pseudogobio esocinus*	7	19	25	24		4	38	255	7.32	94.4	
꾸구리	*Gobiobotia macrocephala*							27	0	77	16.7	K,E
돌마자	*Microphysogobio yaluensis*	2	9	73	5				184	5.28	66.7	K
경모치	*Microphysogobio jeoni*	3							3	0.09	5.6	K
참갈겨니	*Zacco koreanus*					53			187	5.37	50.0	K
피라미	*Zacco platypus*	16	62	95	119	42	64	134	1246	35.75	100	
끄리	*Opsariichthys uncirostris amurensis*	3	1	8	1		1	3	42	1.21	61.1	
눈불개	*Squaliobarbus curriculus*	1		1					2	0.06	11.1	
치리	*Hemiculter eigenmanni*				3		3	1	7	0.20	16.7	K
	Cobitidae 미꾸리과											
미꾸리	*Misgurnus anguillicaudatus*				7			6	22	0.63	27.8	
점줄종개	*Cobitis lutheri*								2	0.06	11.1	
참종개	*Iksookimia koreensis*		16	5					44	1.26	44.4	K
	Bagridae 동자개과											
동자개	*Pseudobagrus fulvidraco*		2						7	0.20	22.2	
눈동자개	*Pseudobagrus koreanus*		16	3		2			21	0.60	16.7	K
	Siluridea 메기과											
메기	*Silurus asotus*			1					1	0.03	5.6	
	Amblycipitidae 퉁가리과											
자가사리	*Liobagrus mediadiposalis*			2					3	0.09	11.1	K
	Osmeridae 바다빙어과											
은어	*Plecoglossus altivelis*								3	0.09	5.6	
	Centropomidae 꺽지과											
쏘가리	*Siniperca scherzeri*		2						4	0.11	16.7	
꺽지	*Coreoperca herzi*					1			20	0.57	38.9	K
	Odontobutidae 동사리과											
동사리	*Odontobutis platycephala*		15	3	4	3	2		50	1.43	61.1	K
얼룩동사리	*Odontobutis interrupta*				5	1			9	0.26	27.8	K
	Gobiidae 망둥어과											
밀어	*Rhinogobius brunneus*	2		56	44			1	132	3.79	55.6	
민물검정망둑	*Tridentiger brevispinis*		1						88	2.53	11.1	
	Centracbidae 검정우럭과											
배스	*Micropterus salmoides*		18					14	35	1.00	22.2	Ex
	Number of family	2	6	7	4	4	2	5	11			
	Number of species	11	20	22	20	13	13	15	48			
	Number of individual	44	249	361	244	124	107	278	3485			

E : 멸종위기야생동 · 식물, K : 한국고유종, Ex : 외래도입종

표 2. 어류의 우점종 및 아우점종(예 : 금강수계)

조사지점	우점종			아우점종		
	국 명	학 명	상대풍부도(%)	국 명	학 명	상대풍부도(%)
1	돌마자	*Microphysogobio yaluensis*	49.3	피라미	*Z. platypus*	21.3
2	쉬리	*Coreoleuciscus splendidus*	23.7	피라미	*Zacco platypus*	17.9
3	감돌고기	*Pseudopungtungia nigra*	21.1	피라미	*Z. platypus*	18.3
4	피라미	*Zacco platypus*	34.9	쉬리	*C. splendidus*	25.1
5	피라미	*Z. platypus*	36.7	쉬리	*C. splendidus*	23.6
6	피라미	*Z. platypus*	29.3	참마자	*Hamibarbus longirostris*	19.7
7	피라미	*Z. platypus*	41.4	모래무지	*Pseudogobio esocinus*	13.1
8	피라미	*Z. platypus*	35.2	피라미	*Z. platypus*	33.6
9	피라미		51.0	모래무지	*P. esocinus*	8.0
10	피라미	*Z. platypus*	35.1	모래무지	*P. esocinus*	33.0

1.4 건강성 평가를 위한 결과 정리

가. 생물다양도

생물다양도(Bio-diversity)를 알 수 있는 어류 군집구조의 분석은 출현개체수, 우점종 및 군집지수 등을 이용하여 환경의 변화가 악화될수록 특정 종의 우세를 나타내는 지표인 우점도 지수(dominance index, McNaughton, 1967), 군집분석 시 가장 많이 쓰이고 있으며, 풍부성을 지닌 종 뿐만 아니라 보다 희귀성을 지닌 종까지 가치를 부여하는 지표인 종다양도지수(diversity index, Pielou, 1975), 균등도 지수는 군집 내 모든 종의 개체 수가 동일할 때가 최대가 되므로 결국 균등도 지수는 군집 내 종 구성의 정도를 나타내는 지표인 균등도 지수(evenness index, Pielou, 1975) 및 군집 내에 존재하는 종의 수에 근거한 종의 밀도 지표인 풍부도 지수(richness index, Margalef, 1968)를 표 3에 제시한 식에 의하여 산출한다. 표 4는 생물다양도 분석결과이다.

나. 군집유사도

각 채집지점의 군집간의 유사도를 조사하기 위하여 각종과 개체를 활용하여 산출한다. 군집유사도 공식은 다음과 같다.

$$2C/(A+B)$$

A : 표본 A에 포함되는 종수, B : 표본 B에 포함되는 종수, C : 표본 A와 B의 공통 종수.

다. 생물보전지수

생물보전지수(index of biological integrity, IBI)는 다양한 지표를 활용하여 하천의 건강성을 평가하는데 이용된다. IBI 값을 산정하기 위해 Karr (1981)이 제시한 자료를 기초로 하여 생태지표 4개, 먹이습성지표 3개 및 풍부도 및 건강성지표 3개로 구성된 총 10개의 지표를 사용하였다(표 5). 10개의 지표점수를 합계하여 점수분포에 따라 최적상태(excellent) : 47～50, E-G : 43～46, 양호상태(good) : 38～42, G-F : 35～37, 보통상태(fair) : 29～34, F-P : 26～28, 악화상태(poor) : 18～25, P-VP : 14～17, 최악상태(very poor) : 13 이하로 분류하였다(표 6).

표 3. 생물다양도 분석 식

	Formula
Dominance index	ni/N×100
Diversity index	$-\Sigma Pi \times Ln(Pi)$
Evenness index	DI/Ln(S)
Richness index	(S-1)/Ln(N)

(N : 총개체수, ni : 제 i 번째 종의 개체 수, Pi : ni/N,
DI : 다양도지수(diversity index), S : 전체 종 수)

표 4. 지점별 생물다양도 분석결과(예 : 금강수계)

지점	우점도 (Dominance)	다양도 (Diversity)	균등도 (Evenness)	풍부도 (Richness)
1	0.71	1.54	0.70	1.63
2	0.42	2.31	0.77	3.51
3	0.39	2.20	0.86	2.56
4	0.60	1.75	0.68	2.20
5	0.60	2.13	0.66	4.30
6	0.49	2.17	0.78	2.86
7	0.54	2.05	0.67	3.66
8	0.69	1.57	0.63	2.00
9	0.59	1.95	0.65	3.41
10	0.68	1.69	0.70	2.19

표 5. 생물보전지수 평가표

Category	Metrics (10)	Scoring criteria			
		하천차수	1	3	5
Species richness and composition (생태지표)	Total number of native species, 한국고유종수	1	0-1	2	〉2
		2	0-2	3-5	〉5
		3	0-4	5-8	〉8
		4	0-5	6-11	〉11
		5	0-7	8-14	〉14
		6	0-9	10-18	〉18
	Total number of riffle-benthic species, 여울성-저서종수	1	0	1	〉1
		2	0-1	2	〉2
		3	0-1	2-3	〉3
		4	0-2	3-5	〉5
		5	0-3	4-6	〉6
		6	0-4	5-8	〉8
	Total number of sensitive species, 민감성종수	1	0-1	1	〉1
		2	0-1	2-3	〉3
		3	0-2	3-4	〉4
		4	0-3	4-6	〉6
		5	0-4	5-8	〉8
		6	0-5	6-9	〉9
	Proportion of tolerant species, 내성종의 상대빈도	1-6	〉2	05-20	〈5
Trophic composition (먹이습성)	Proportion of omnivore species, 잡식성의 상대빈도	1-6	〉45	20-45	〈20
	Proportion of carnivore species, 육식종의 상대빈도	1-6	〈1	1-5	〉5
	Proportion of insectivores species, 충식종의 상대빈도(초식성+플랑크톤)	1-6	〈20	20-45	〉45
Fish abundance and condition (풍부도 및 건강성)	Total number of individual, 한국고유어종의 총 개체수	1-6	〈33	33-67	〉67
	Proportion as a number of exotics species, 외래도입의 상대빈도	1-6	〉1	0-1	0
	Proportion as a number of abnormal individual, 비정상개체 상대빈도	1-6	〉1	0-1	0

표 6. 생물보전지수 평가기준

Class	Index number
Excellent (E)	47~50
E-G	43~46
Good (G)	38~42
G-F	35~37
Fair (F)	29~34
F-P	26~38
Poor (P)	18~25
P-VP	14~17
Very Poor (VP)	〈13

라. 생물학적 건강성 평가를 위한 결과

조사지점에서 높은 출현비율을 보이는 우점종 및 아우점종을 대상으로 해부학적 평가를 실시하여 길이-무게의 상관관계를 확인한다. 어류의 전장과 체중을 이용한 개체군의 평가 시 사용되는 유용한 식은 다음과 같다.

$$W = aL^b$$

(W = total weight (gram), L = total length (mm), a 와 b = parameters)

b ⇒ 비대하지 않음 〈 3.0 〈 비대 함

매개변수인 a 와 b는 위의 식 양변에 logarithms (base 10)를 취함으로서 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\text{Log } W = \text{Log } a + b \text{ Log } L$$

반면에 index of well-being에 해당하는 fulton-type의 비만도(condition factor, K 또는 CF)와 상대적 비만도(relative condition factor, Kn)는 길이-무게 상관관계에서 a와 b보다 좀 더 쉽게 설명되고 비교되는데 식은 다음과 같다.

$$K \text{ 또는 } CF = W/L^3 \times 10^5$$

$$Kn = W/aL^b$$

위의 두 수식을 통해 특정종의 개체별 비만도를 size별로 다른 수계 및 하천과 비교하고 이를 통해 어류의 건강성평가를 할 수 있다. 또한 포획한 어류들의 해부를 통해 생식소무게지수(gonadosomatic index, GSI), 간무게지수(hepatosomatic index, HSI)를 비교하여, 조사시기별 어류의 해부학적 특징을 파악하도록 한다(그림 3).

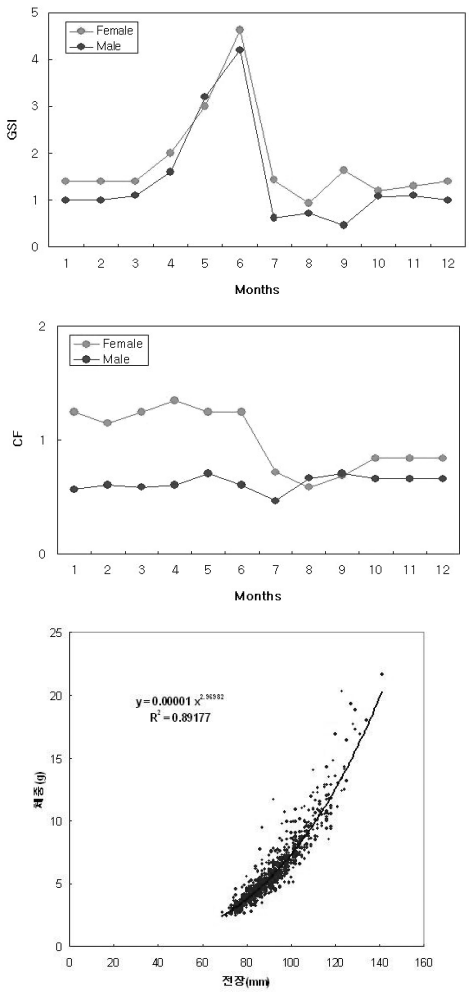


그림 3. 어류를 이용한 건강도 평가 (예 : 금강수계 초강천지점)

GSI (생식소 무게/체중×100)는 피라미와 참갈겨니 같은 종류는 산란기에 수컷에게 추성이나 혼인색이 나타나 구별되기도 한다. 그러나 겉으로 암수 구분이 잘되지 않는 경우에는 복강을 절개하여 생식소의 정소와 난소를 구분하면 쉽게 알 수 있는데, 산란기에는 더욱 잘 구분된다. 그리고 매월 성숙한 개체 10마리 정도를 택하여 체중을 측정한 후 그들의 난소와 정소를 적출하여 각각 무게를 측정하여 GSI를 조사한다. 1년 동안 조사한 이 기록을 분석하면 생식소 성숙지수가 가장 높게 나타나는 시기가 있는데 그때가 산란 시기이다. 동시에 그 시기에 암컷 1마리가 지니고 있는 알의 수를 계수하여 평균포란 수를 알 수 있고, 또 알의 지름도 dial caliper를 이용하여 측정한다. 개체군을 월별로 채집하여 체장을 측정 기록한 자료를 분석하면 연령구조와 성장정도를 알 수 있다.

마. 정량적 서식지 평가(qualitative habitat evaluation index, QHEI)

정량적 서식지 평가는 전체 12개 항목중 10개를 선택하여 적용하였다(표 7). 각 변수는 최적, 보통, 미진 및 나쁜 상태로 구분하였으며, 각 10개의 점수를 합산하여 하천의 건강도를 평가하였다. 평가 점수는 최적(200~162), 양호(148~104), 보통(90~46) 및 약화(32이하)로 구분하였다.

1.5 생태유량 산정을 위한 결과 정리

가. 서식특성(유속 및 수심) DB 정리

국내 어류 조사의 경우 어류군집 분석 위주의 조사가 주류를 이루어 왔기 때문에 종별 서식특성(유속, 수심) 기초자료는 미비한 실정이다. 본 조사의 경우 어류군집 분석 외에도 현장에서 획득한 유속 및 수심 등의 기초 자료를 통해 종별 서식 특성을 파악한다. 정리할 항목으로는 종별 출현빈도, 최대유속, 최소수심 등을 정리 한다(표 8~9).

표 7. 정량적 서식지 평가(QHEI) 기준

지점명				Optimal	Suboptimal	Marginal	Poor
1	하상구조/서식처피복도	자갈, 전석 및 나무가지 등 %(어류 및 생물이 보호될 수 있는 호조건의 장소)	High gradient	70% 이상	40–70	20–40	20% 이하
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
			Low gradient	50% 이상	30–50	10–30	10% 이하
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
2	하상매몰도	침전물에의해 자갈, 호박돌 및 전석 등이 매몰된 % (서식처 감소)	H	0–25	25–50	50–75	75% 이상
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
3	유속/수심	4개조건(slow–deep, slow–shallow, fast–deep, fast–shallow), Slow : 유속 〈0.3m/s, Deep : 〉0.5 m	H	4개 조건 모두 존재	3개 조건 (f–s가 없다면 낮은 점수 부여)	2개 조건(f–s 또는 s–s가 없다면 낮은 점수 부여	1개 조건 지배 (일반적으로 s–d)
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
4	유사축적도	침적물퇴적으로 하중도 유무, 유사축적에 의해 영향을 받는 하천바닥의 비율(%)	H	–하중도,사주없음 –유사축적 5% 이내 영향	–하중도 일부생성 –5–30%	–기존하중도+ 다시축적 –30–50%	–하중도 대부분 (소가없음) –50%이상
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
			L	–하중도,사주없음 –유사축적 20% 이내 영향	–하중도 일부생성 –20–50%	–기존하중도+ 다시축적 –50–80%	–하중도 대부분 (소가없음) –80%이상
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
5	하도유량상태	댐, 가뭄 등으로 유량이 감소되어 여울, 전석 및 나무뿌리, 제방(하도) 등이 노출	H/L	–하도가 최소한 으로 노출(물이 차있음)	–하도가 25%노출	–하도에 25–75% 노출 –여울이 노출	매우 적은 물이 흐르고 대부분 소(pool)
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
6	수로변경도	치수목적으로 직선화 및 콘크리트 구조물에 의해 변화	H/L	수로화나 준설이 없거나 최소변화, 일반적인 자연하천	–약간의 수로화 –교량 인접 –과거 하도준설	–수로화(40–80%) 제방에 구조물	–수로화(80%이상) –돌망태, 시멘트로 덮여있고 –하도서식처가 변형되고 없어짐
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
7	여울빈도	하천폭에 대한 여울의 수 및 존재	H	하폭:여울=1:7	하폭:여울=1:7–15	하폭:여울=1:15–25	하폭:여울=1:25이상
				20 19 18 17 16	15 14 13 12 11	10 9 8 7 6	5 4 3 2 1
8	제방안정도	제방이 침식 또는 파손 된 정도	H/L	–침식, 파손이 최소 또는 없음 –5%이하	–약간 침식 –5–30%	–30–60% –홍수시 위험	–60–100% –많은부분 침식
				10 9.5 9 8.5 8	7.5 7 6.5 6 5.5	5 4.5 4 3.5 3	2.5 2 1.5 1 0.5
				10 9.5 9 8.5 8	7.5 7 6.5 6 5.5	5 4.5 4 3.5 3	2.5 2 1.5 1 0.5
9	제방식생 보호도	제방에 있는 식생에 의해 제방의 안정 시키는 %(하류에서 바라보는 시점)	H/L	제방의 90% 이상 식생이 존재 (5 cm이하 제외)	70–90%	50–70	50% 이하
				10 9.5 9 8.5 8	7.5 7 6.5 6 5.5	5 4.5 4 3.5 3	2.5 2 1.5 1 0.5
				10 9.5 9 8.5 8	7.5 7 6.5 6 5.5	5 4.5 4 3.5 3	2.5 2 1.5 1 0.5
10	천변식생 대의 폭	하천제방의 가장자리로부터 수변구역의 자연식생 폭	H/L	–18 m 이상 –친수구역 없음 –주차, 도로, 잔디 등	–12–18 m –친수구역 약간 있음	–6–12 m로 –대부분 친수구역	–6 m 이하 –친수에 의해 식물 없음
				10 9.5 9 8.5 8	7.5 7 6.5 6 5.5	5 4.5 4 3.5 3	2.5 2 1.5 1 0.5
				10 9.5 9 8.5 8	7.5 7 6.5 6 5.5	5 4.5 4 3.5 3	2.5 2 1.5 1 0.5
총 점							
기타 의견							

표 8. 어류의 종별 유속 및 수심의 물리적 특성(예 : 금강수계)

종 명	유 속(m/s)			수 심(m)			개체수
	최 소	최 대	평 균	최 소	최 대	평 균	
뱀장어	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	1
잉어	0	0.3	>0.1	0.4	0.8	0.5	6
붕어	0	0.3	0.1	0.4	1.0	0.6	13
떡붕어	0	0.5	0.2	0.4	1.0	0.6	34
흰줄납줄개	0	0	0	0.4	0.4	0.4	2
각시붕어	0	0.1	>0.1	0.3	0.4	0.4	5
참붕어	>0.1	>0.1	>0.1	0.7	0.7	0.7	3
돌고기	0	1.2	0.3	0.1	1.2	0.5	125
감돌고기	>0.1	0.9	0.4	0.3	0.9	0.5	93
쉬리	0	2.0	0.6	0.2	1.5	0.4	311
참중고기	0	0.8	0.3	0.4	1.0	0.6	29
중고기	0.4	0.9	0.7	0.3	0.8	0.6	6
줄몰개	0	0.4	0.1	0.5	1.5	0.7	10
긴몰개	0	0.3	0.1	0.4	1.0	0.6	10
몰개	0	0.7	0.3	>0.1	0.8	0.5	35
누치	0	1.6	0.5	>0.1	1.4	0.6	115
경모치	>0.1	0.1	0.1	0.6	0.6	0.6	3
참갈겨니	0	1.5	0.4	0.2	1.5	0.6	352
피라미	0	2.0	0.4	>0.1	1.5	0.5	1299
끄리	0	0.9	0.3	0.2	0.8	0.5	42
눈불개	>0.1	0.1	0.1	0.4	0.8	0.6	2
치리	0	0.2	0.1	0.5	1.0	0.8	7
쏘가리	0.3	1.7	1.0	0.6	0.8	0.7	4
꺽지	0	0.8	0.3	0.2	1.2	0.6	26
동사리	0	0.7	0.2	0.2	1.5	0.5	51
얼룩동사리	0	0.4	0.1	0.6	0.7	0.6	9
밀어	0	1.0	0.3	0.1	0.8	0.4	150
민물검정망둑	0	0.9	0.3	>0.1	0.9	0.5	87
배스	0	0.7	0.1	0.4	1.0	0.8	17

표 9. 어종별 하상 및 서식형태의 물리적 조건(예 : 금강수계)

종 명	하 상	서식형태	서식형태 및 특징
뱀장어	모	R	저서성, 소하성, 3급수
잉어	모, 자, 호	P	중부성, 정수성, 3급수
붕어	모, 자	P	중부성, 정수성, 3급수
떡붕어	모, 자	P, R	중부성, 정수성, 3급수
흰줄납줄개	실, 모	P	중부성, 정수성
각시붕어	모, 자	P, R	중부성, 정수성
떡납줄갱이	모	P, R	중부성, 정수성
납자루	모, 자, 호	P, R	중부성, 정수+계류성
칼납자루	실, 모, 자	P, R	중부성, 정수성
줄납자루	자, 호, 전	P, R	중부성, 정수+계류성
납지리	모, 자, 호	P	중부성, 정수성
큰납지리	모, 자, 호	P	저서+중부성, 정수성
가시납지리	실, 모	P	중부성, 정수성
참붕어	실, 모	P	중부성, 정수성, 3급수
돌고기	자, 호	R	중부성, 계류+정수성, 2급수
감돌고기	모, 자, 호	R	중부성, 계류+정수성, 2급수
쉬리	모, 자, 호	R, R1, R2	중부성, 정수성, 2급수
참중고기	모, 자	R	중부성, 계류+정수성
중고기	모, 자, 호	R	중부성, 계류+정수성

표 9. 어종별 하상 및 서식형태의 물리적 조건(예 : 금강수계) (계속)

종 명	하 상	서식형태	서식형태 및 특징
줄몰개	모, 자	P	중부성, 정수성
긴몰개	모, 자	P	중부성, 정수성
몰개	모, 자, 호	P	중부성, 정수성, 3급수
누치	자, 자, 모	R, R1	중부성, 정수성, 3급수
참마자	모, 자, 호	P, R	중부성, 정수성, 2급수
모래무지	모, 자	P, R	저서성, 정수성
꾸구리	모, 자	P	저서성, 정수성
돌마자	모, 자, 호	R, R1	저서성, 정수성
경모치	모	P	저서성, 정수성
참갈겨니	자, 호	R, R1	중부성, 계류성, 2급수
피라미	모, 자, 호	P, R, R1	중부성, 계류+정수성
끄리	모, 자, 호	R	중부성, 정수성
눈불개	자, 호	P, R	중부성, 정수성
치리	실, 모, 자	P, R	중부성, 정수성
미꾸리	모, 자, 호	P, R	저서성, 정수성, 3급수
점줄종개	모, 자, 호	P, R	저서성, 정수성
참종개	모, 자, 호	P, R	저서성, 정수성
동자개	모, 자	P	저서성, 정수성
눈동자개	자, 호	P, R	저서성, 정수성
자가사리	호, 전	R	저서성, 정수성
은어	모, 자, 호	R	중부성, 정수성, 2급수
쏘가리	모, 호	P, R	중부성, 정수성
꺽지	자, 호, 전	R	저서성(야행성), 정수성
동사리	모, 자, 호	P, R	저서성, 정수성
얼룩동사리	모, 자, 호	P, R	저서성, 정수성
밀어	모, 자, 호	P, R	저서성, 정수성
민물검정망둑	자, 호	P, R	저서성, 정수성
배스	실, 모, 자	P	중부성, 정수성

주) 실 : 실트, 모 : 모래, 자 : 자갈, 호 : 호박돌, 전 : 전석, P : pool, R : Run, R1 : riffle, R2 : rapids.

나. 서식처적합도 지수 산정 방법

(1) 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 곡선 형태로 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 서식처 면적이 어떻게 변하는 지를 파악한다.

(가) The Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)

IFIM(유량점증방법)은 서식처의 시간과 공간 양상을 평가하기 위해 해석 절차를 연결한 일종의 라이브러리이다(그림 4). IFIM의 독특한 특성 중에서 하나는 시간과 공간에 따른 어류 서식처의 변동성을 동시에 해석할 수 있다는 점이다. IFIM은 연구계획의 구성과 현재 여건의 서술에서 시작하여 문제의 해에 대한 최종적인 타협을 통해 수행할 수 있

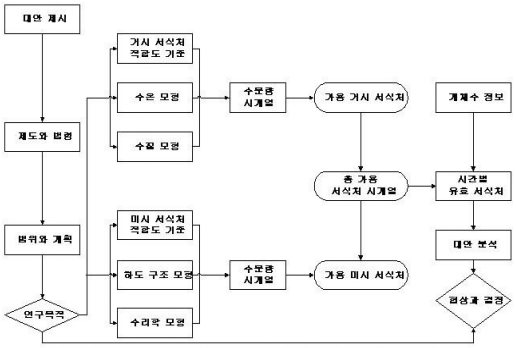


그림 4. IFIM (유량 점증 방법론)의 구성 성분과 모형 연결에 대한 개념도

는 하나의 완전한 시스템을 생각하고 판단하는 과정이다. 여기서 "Incremental"은 문제의 해를 찾을 때까지 유량을 약간씩 증가하면서 수정하거나 문제를 전망 또는 예상하는 것을 의미한다. IFIM의 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.

IFIM의 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 수천 km^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 IFIM에서 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. 중간 서식처는 미시 서식처 성분으로 나누어지며 1에서 수 km^2 이하의 면적에 걸쳐있다. 미시 서식처는 수심, 유속, 하상 재료, 그리고 Cover인 휴식과 은신처 조건이 상대적으로 동질한 국지적인 하도 구역으로 정의된다.

(나) 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. 어류가 이용하기에 적합한 물리적 서식처의 양은 유량에 따라 변하고, PHABSIM은 바로 이 가용 서식처-유량간의 관계를 구한다. PHABSIM에서는 유량에 따른 수면표고와 유속의 변동을 수리학적으로 모형화할 수 있고, 서식처-유량 관계를 만들기 위해 서식처-적합도 곡선과 이 관계를 결합한다. 그리고 거시 서식처 차원에서 유량에 따른 수온과 용존 산소를 모형화할 수 있고, 이를 수리학적 모의와 결합할 수 있도록 개발되고 있다(그림5).

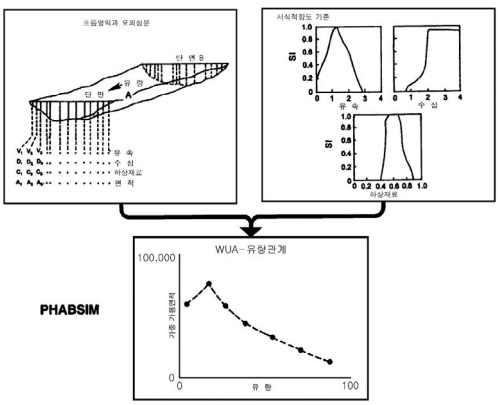


그림 5. PHABSIM 과정의 개념

그림 5의 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 서식조건을 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.

◎ 수리 모의(Hydraulic simulation)

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

- 각 하도 단면에서 측정된 유량으로 작성된 수위-유량 관계.
- Manning 공식(또는 사양으로 Chezy공식)과 같은 평균 유속공식.
- 표준축차법에 의한 수면형 계산. 비교적 널리 사용되는 미국 육군공병단 수문연구소의 수면형 계산 프로그램, 즉 HEC-2를 PHABSIM과 상호 교환할 수 있게 되어 있다.
- 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, 그리고 서식처의 분할 하도 구간이 종횡단으로 변동이 심하여 상하류 동질성이 없는 하천을 대상으로 적용되고 있다.

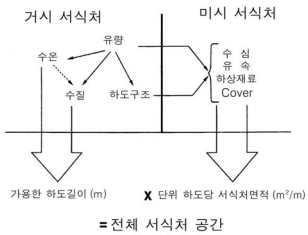


그림 6. PHABSIM의 구성 성분과 모의 흐름도

◎ 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 아래 식과 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.

$$WUA_{i,k} = \sum_{i=1}^{n} s_{i,k} \times a_i$$

여기서 S_{ik}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 있다.

- 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.
- 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.

- 최소치 방법 : s_i=최소치[$f(v)_i$, $f(d)_i$, $f(s)_i$]. 이것은 서식처가 가장 나쁜 성분보다 더 이상 좋아지지 않는다는 것이다.
- 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 가용 면적(WUA)을 구한다. 수질 인자 변화를 하도 단위길이(보통 1 km)내 일정하게 곱하는 방법과 부분 변화까지의 적합도를 구하는 방법이 있다.

◎ 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 물 배분 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.

(2) 서식 환경과 서식처 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. 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 개체수를 대상으로 한다.

(가) 서식처 범위와 조사

하천 생태 환경에 따라 서식하고 있는 생물은 수역에는 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.

◎ 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.

어류 관리 측면은 그 선호도에 따라 멸종위기어종, 여가 활동 또는 상업성 어종, 또는 어종과 조류 등의 먹이 공급을 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.

◎ 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 크기이다. 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.

◎ 서식 환경 변수의 범위

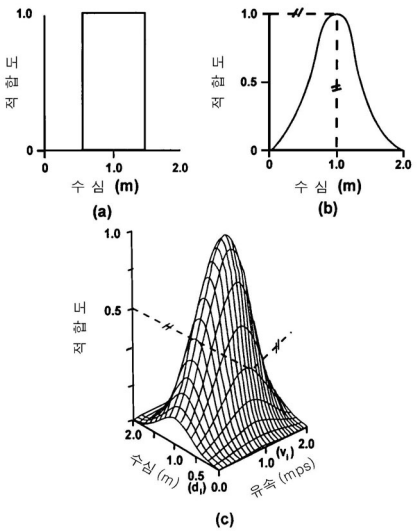
서식처 적합도 기준(곡선 또는 지수)의 조사 연구는 대부분이 어류 성장 단계, 개체의 출현 빈도수, 수리 조건인 수심, 유속, 하상 재료 또는 cover, 수질 조건인 수온과 용존 산소 등을 대상으로 한다. 미시 수리 조건에서 수심은 어류 수심으로 하상에서 어류까지의 깊이를 말한다. 유속은 통상 평균 유속(mean column velocity)과 수심 방향의 점 유속(nose velocity)이 이용되며 어종의 서식 위치에 따라 달라진다. 수변 가장자리의 천수역 유속이 중요한 어종도 있다. 하상 재료는 입도 분포를 기준으로 지배 입자(dominant 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 대상 여울 구간에서 실측한 값을 선택할 수 있다.

(나) 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 7과 같이 크게 3가지 방법이 통용되고 있다. 먼저 그림 7(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 7(b)에 나타낸 바와 같이 이분법보다 더 유연하게 어류 서식처 적합도를 나타낼 수 있다. PHABSIM에서는 서식의 전체 범위를 잡아 상하 꼬리 부분까지 연장하고, 비교적 폭이 좁은 첨두 부분을 최적으로 본다.

마지막은 단일 변량 형태의 문제점을 극복한 다변량 형태로서 그림 7(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. 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. PHABSIM에서 고려하는



(a) 이분법, (b) 단일 변량 곡선, (c) 다변량 응답 평면

그림 7. PHABSIM 등에서 이용할 수 있는 서식처 적합도 기준의 형태

Cover, 즉 휴식과 은신처의 적합도 기준은 조사 구간에 어류가 쉬거나 숨을 수 있는 그늘을 조사하여 X축의 휴식과 은신처에 대해 Y축을 4 단계(또는 세분화한 단계)로 구분하여, 즉 없을 경우는 0.0, 호박돌 등 은신을 위한 통나무와 호박돌 등의 물체가 있으면 0.5, 식생이 덮혀 그늘져 있으면 0.5, 그리고 물체와 식생이 함께 있으면 최적으로 1.0을 부여한다. 수온과 용존 산소 등의 수질 조건은 최적에서 서식에 적합하지 않은 범위와 생존까지 고려한 적합도 곡선을 사용하나 어류 서식 기준에 하천 수질이 만족하면 고려하지 않는다.

(다) 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. 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 대

상 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(히스토그램 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 편의 될 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 et al., 1998).

(3) 서식처 적합도 지수 산정

서식처 적합도 지수(habitat suitability index, HSI)는 특정 조사지점이나 구간에서 출현한 어종의 개체수를 기준으로 작성된다. 조사기간 동안 출현한 최대 개체수를 1.0으로 하고, 나머지는 최대 개체수에 대한 상대비율로 설정하였다. 이를 위해서 어류채집 이전에 하천 특성 및 횡단면 정보를 얻고, 본 조사에서는 어류 채집 이전에 각 지점에서 하천 특성과 단면정보를 조사하여 HSI 산정에 이용하였다. HSI를 작성하는 방법으로는 이분법 및 단일변량곡선(univariate curve)을 주로 사용하였다. HSI 기준은 미국 워싱턴 주 어류 및 야생동물국에서 제시한 "Instream flow study guidelines"를 기초로 하여 지수로 산정하였다. HSI는 하천의 수심, 유속 및 하상재료에 대하여 산정하였다(그림 8~9, 표). HSI를 산정하기 위한 조사 전, 후의 순서는 다음과 같다.

첫째, 조사지점을 선정하여 사전 답사 및 조사 위치를 확인한다. 또한 횡단면에 물의 흐름을 방해하는 구조물이 없는 곳으로 선정하고, 여울, 소 및 유수역이 적당히 배열된 장소로 한다.

둘째, 광파기를 통한 하천 횡단면과 하천폭을 측량한다. 측량시 수심과 유속을 조사하여 유량을 산정한다.

셋째, 하천 정보를 컴퓨터로 저장하여 전체면적에 대한 해당 수심, 유속 및 하상재료 범위가 차지하는 면적을 백분율로 산정한다.

넷째, 하천 횡단면 측량 지역에서의 어류 채집을 실시한다. 어류 채집은 상법에 따라 실시하며, 현장에서 즉시 동정, 크기 및 마리수를 계수한다.

다섯째, 각 단면적별 관측기대치를 산정한다.

여섯째, 서식처 적합도 지수를 산정한다. 최종 서식처 적합도 지수는 조사시 마다 이러한 순서를 반복하여 적합도를 산정하고, 다른 연구자의 참고문헌 또한 어류 전문가와 논의를 통해 최종적으로 지수를 산정하는 것이 바람직하다.

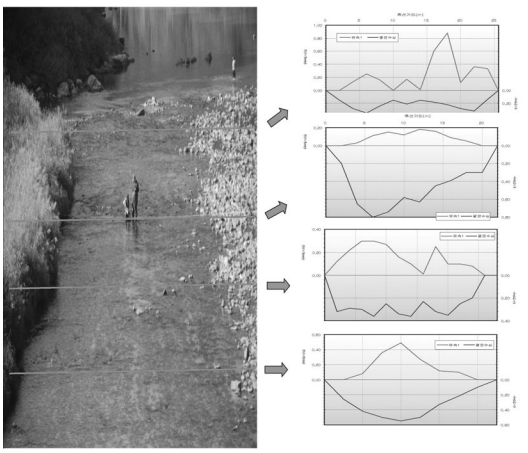


그림 8. 하천단면 측정(예 : 한강수계 내촌천지점)

표 11. 서식처 적합도 지수 산정 방법(예 : 금강 앞섬지점)

수심 범위(cm)	채집 개체수(O)	전체면적에 수심범위 백분율(%)	관측 기대치(E)	관측기대치 5이상이 되도록 조합(5>)	O/E	최대값이 1.0으로 한 적합도지수(P)
0	0	0.23	0.14		0.00	0.00
10	1	0.26	0.16		6.31	0.29
20	3	0.39	0.24		12.61	0.58
30	5	0.38	0.23		21.57	1.00
40	13	3.85	2.35		5.54	0.26
50	10	2.77	1.69		5.92	0.27
60	8	8.97	5.47		1.46	0.07
70	9	5.64	3.44		2.62	0.12
80	5	6.27	3.82		1.31	0.06
90	5	21.77	13.28		0.38	0.02
100	2	49.48	30.18		0.07	0.00

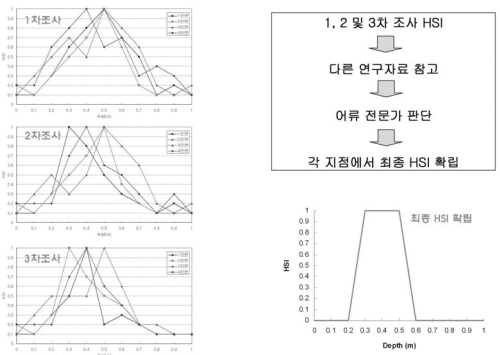


그림 9. 수심에 따른 서식처 적합도 지수(예 : 금강 앞섬지점)

4.6 기존 문헌의 활용

사전 조사를 통해 확인된 어류상과 현장조사를 통해 서식이 확인된 종을 파악하여 표를 만들어 과거부터 현재까지의 어류상 변화를 파악한다. 기록 항목은 어류상 결과표와 동일하며 출현유무는 “+”로 표시해 준다(표 12).

표 12. 기존 문헌조사 및 현장조사를 통한 어류상 결과표(예 : 금강수계)

과	종	학 명	수(1998)	건(1999)	이(2001)	현재조사 (St. 8)
잉어과	잉어	*Cyprinus carpio*		+	+	+
	붕어	*Carassius auratus*		+	+	+
	떡붕어	*Carassius cuvieri*				+
	흰줄납줄개	*Rhodeus ocellatus*			+	
	각시붕어	*Rbodeus uyekii*			+	
	줄납자루	*Acheilognathus yamatsuate*	+			
	칼납자루	*Acheilognathus koreensis*		+	+	
	납자루	*Acheilognathus lanceolatus*	+	+	+	+
	납지리	*Acheilognathus rhombeus*	+		+	+
	가시납지리	*Acheilognathus gracilis*	+			
	참붕어	*Pseudorasbora parva*		+	+	
	누치	*Hamibarbus labeo*	+	+	+	+
	참마자	*Hamibarbus longirostris*	+	+	+	+
	중고기	*Sarcocheilichthys nigripinnis morii*		+		
	참중고기	*Sarcocheilichthys variegatus wakiyae*	+			
	돌고기	*Pungtungia herzi*	+	+	+	+
	감돌고기	*Pseudopungtungia nigra*	+			
	쉬리	*Coreoleuciscus splendidus*	+	+		+
	참몰개	*Squalidus chankaensis*	+	+	+	
	몰개	*Squalidus japonicus coreanus*	+			
	긴몰개	*Squalidus gracilis majimae*		+	+	
	줄몰개	*Gnathopogon strigatus*		+	+	

표 12. 기존 문헌조사 및 현장조사를 통한 어류상 결과표(예 : 금강수계) (계속)

과	종	학 명	수(1998)	건(1999)	이(2001)	현재조사 (St. 8)
	모래무지	*Pseudogobio esocinus*	+	+	+	+
	돌마자	*Microphysogobio yaluensis*	+	+	+	+
	경모치	*Microphysogobio jeoni*			+	
	버들치	*Rhynchocypris oxycephalus*		+	+	
	왜몰개	*Aphyocypris chinensis*			+	
	피라미	*Zacco platypus*	+	+	+	+
	참갈겨니	Zacco koreanus	+	+	+	
	끄리	*Opsariichthys uncirostris amurensis*	+	+	+	+
기름종개과	미꾸리	*Misgurnus anguillicaudatus*		+	+	
	미꾸라지	*Misgurnus mizolepis*			+	
	점줄종개	*Cobitis lutheri*			+	
	참종개	*Iksookimia koreensis*		+	+	
동자개과	눈동자개	*Pseudobagrus koreanus*		+	+	
메기과	메기	*Silurus asotus*		+	+	
꺽지과	꺽지	*Coreoperca herzi*	+		+	
동사리과	동사리	*Odontobutis platycephala*		+	+	+
	얼룩동사리	*Odontobutis interrupta*				+
망둥어과	갈문망둑	*Rhinogobius giurinus*		+		
	밀어	*Rhinogobius brunneus*		+	+	+
	민물검정망둑	*Tredentiger brevispinis*		+		
가물치과	가물치	*Channa argus*			+	
검정우럭과	배스	Micropterus salmoides				+
전체종합			2과18종	6과27종	8과32종	6과20종

2. 조사결과의 평가 및 고찰

문헌조사 및 현장조사를 통해 확인한 어류군집 및 물리 · 화학적 수환경의 결과를 정리하여 평가 및 고찰한다. 조사 자료의 분석은 하천의 전반적인 건강성 및 특성을 평가하는 작업으로 어류 및 수리 전문가가 실시한 후 취합한다. 각각의 항목에 대한 평가 및 고찰 내용은 다음과 같다.

2.1 사전 문헌조사를 통한 물리 및 화학적 변화

○ 조사지점의 하상구조의 변화
○ 수질오염 및 수온의 변화

2.2 어류상의 특징

○ 과(family)별 어종 구성비
○ 어종별 출현빈도 및 어류상
○ 우점종 및 아우점종
○ 각 지점별 군집유사도

2.3 보호종 및 외래어종의 출현유무

보호종(천연기념물, 멸종위기종) 및 외래어종의 출현 유무를 확인하며, 현장 조사를 통해 수집한 서식특성을 분석한다. 분석할 내용은 아래와 같다.

○ 보호종의 서식환경(유속, 수심, 식생, 하상재료)을 고찰한다.
○ 문헌상의 서식환경 특성과 조사지점 측정을 통해 수집한 서식환경 특성을 분석한다.
○ 문헌상의 분포 수계 외 서식을 확인하였을 경우 보호종을 지정 · 관리하는 기관에 통보하여 보호종의 서식분포에 추가 한다.
○ 외래어종의 출현빈도를 분석한다.

(국내에 분포하는 외래어종 중 배스와 블루길은 육식성 어종으로 개체수 증가 속도가 빨라 보호종을 비롯한 한국 토착어종의 서식에 영향을 끼치는 것으로 알려져 있어, 하천의 평가 시 고려해야 한다.)

2.4 사전조사 시 분포를 확인하였으나 포획하지 못한 종

문헌조사를 통해 수계 및 하천 내 서식을 예상하였으나, 조사에서 확인하지 못한 종에 대해 고찰한다. 어류조사의 경우 조사자의 숙련도에 따라 조사결과가 달라지는 만큼 조사방법에 의해 포획하지 못했는지를 고찰한다. 조사 방법 및 조사 도구에 의한 차이가 없을 경우 수계 내 하천정비, 수리구조물 등의 인위적인 교란요인에 의해 종의 이동 및 절멸이 있었는지 여부를 고찰한다.

2.5 조사하천에서 처음으로 서식이 확인된 종

사전조사(문헌 및 청문조사)를 통해 서식이 확인되지 않았으나 해당 어류 조사에서 처음으로 서식이 확인된 종의 서식환경 및 특성에 대해 분석하고 평가한다.

2.6 조사대상 지역 물리적 · 화학적 수환경의 특징

수질기본항목(5개 항목) 측정을 통해 확인한 화학적 수환경의 특징을 고찰하며, 하폭, 수폭, 수심, 유량, 하상구조 등의 물리적 환경에 대해 고찰한다.

2.7 조사하천의 건강성 평가

조사 결과를 바탕으로 하천의 건강성을 분석한다. 과거 어류 조사의 경우 하천 내 어류 서식현황만을 파악하여 하천의 건강성을 평가하기에 어려웠다. 그러나 최근 들어 하천의 복원 및 건강성 평가에 대한 사회적 관심이 높아지면서 생물종을 이용한 생태학적 건강도 평가법이 도입이 시도되고 있다.

- ㅇ 생물다양도
- ㅇ 생물보전지수
- ㅇ 생물학적 건강성 평가
- ㅇ 해부학적 건강성 평가

2.8 생태유량 산정을 위한 평가

- ㅇ 각 어종별 서식특성 및 DB
- ㅇ 서식처 적합도 지수 산정

3 결론

본 가이드라인은 4단계로 사전조사, 현장조사, 조사결과정리 및 평가로 이루어져 있다. 현재 환경부 전국 자연환경 조사 및 수생태 건강성 조사 등에서 어류 모니터링 지침에 대한 내용은 체계적으로 설정되어 있다. 본 4단계 중 현장조사 가이드라인 부분은 환경부 및 기타 참고문헌을 많이 인용하여 정리를 하였다. 조사결과 및 평가부분은 조사 목적 및 조사자에 따라 달라질 수 있다. 앞서 언급하였듯이 본 가이드라인의 목적은 생물군집 및 서식 현황만을 파악하는 것이 아니라 정부의 토목공사 및 수생태 하천복원 사업 등에 이용할 수 있는 객관적 자료를 구축하여 활용하는데 있다. 구체적으로 국토해양부에서 실시하는 4대 하천 생태유량산정 등에 환경부 자료는 각 지점의 종 서식특성만을 파악할 뿐 객관적으로 요구되는 수심, 유속 및 하상재료에 대한 자세한 자료는 이용하는데 한계가 있다.

본 가이드라인은 이러한 장단점을 취합하여 다학제간 활용할 수 있게 만들어 졌으며, 실제 현장에서 적용하고 보완하여 작성되었다. 아직까지 많은 부분에서 부족하지만 지속적으로 자료를 추가 및 보완할 계획이다. 따라서 본 가이드라인은 이러한 어류생태 모니터링을 통한 서식환경 특성을 파악하여 생태필요유량 산정에 요구되는 객관적인 기초자료를 조사하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 생태 및 수리학적 조사를 지속적이며, 체계적으로 구축하여 생태유량 확보기술 개발 및 국가 수환경 연구 자료로 활용 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Karr, J.R. 1981. Assessment of biotic integrity using fish communites. Fishieries 6: 21-27.
2. Margalef, R. 1968. Perspectives in ecological theory. Chicago. 111pp.
3. McNaughton, S.J. 1967. Relationship among functional properties of California Glassland. Nature. 216: 168-169.
4. Pielou, E.C. 1975. Ecological Diversity. Wiley, New York. 165.pp.
5. 건설교통부 대전지방국토관리청. 1999. 금강수계 하천수 사용실태 조사 및 하천유지유량 산정 보고서. 613pp.
6. 이충렬. 2001. 갑천수계의 어류상과 어류군집. 한국환경생물학회지, 19: 292-301.
7. 한국수자원공사. 1998. 금강유역 수질환경 및 자연생태.