

어도 생태수리실험에 의한 회유성 어류의 소상능력 평가 (II)

- 계단식 어도 -

Assessment of Ascending Capacity of Migratory Fish in Fishways by Eco-hydraulic Experiments (II)

- Pool and Weir Type Fishway -

박 상 덕*

Park, Sang Deog

Abstract

This is to evaluate the ascending capacity of migratory fish in the pool and weir type fishways. Ascending environment of the migratory fish in rivers is analyzed through eco-hydraulic experiments using sweetfish, *Plecoglossus altivelis*, trout, *Oncorhynchus mykiss*, and surveying the fall height of existing pool and weir type fishways. When the fall height is less than 16.0cm, the ascending capacity of sweetfish in the pool and weir type fishways is greater than trout. On the other hand when the fall height is over 20.0 cm, the ascending capacity of trout is greater than sweetfish. A sweetfish may prefer to jump for upward moving than trout. And its endurance after upward jumping over weir is greater than that of sweetfish. Because of high fall height of existing pool and weir type fishways the migratory environment in rivers is so poor. When the pool and weir type fishways are designed and constructed in river the fall height of weir must be considered for the variety of migratory fish living in river and the fall height of weir less than 20.0cm is suggested.

keywords : Pool and weir type fishway, Eco-hydraulic experiment, Ascending capacity,
Migratory fish, Ecological river environment, Fall height

요 지

본 연구는 어도 생태수리실험에 의하여 계단식 어도에서 회유성 어류의 소상능력을 평가하기 위한 것으로서 은어와 송어를 대상으로 실험하였으며, 기존 계단식 어도 설치 하천의 회유성 어류 이동생태환경을 분석하였다. 계단식 어도에서 은어의 소상능력은 낙차가 16.0 cm미만으로 작을 때는 송어보다 크고, 20.0 cm이상으로 낙차가 클 때는 송어의 소상능력이 은어보다 크다. 은어는 송어보다 도약을 선호하며 도약 후의 지구력은 송어가 은어에 비하여 크다. 수계별 기존 설치된 계단식 어도의 낙차가 매우 크기 때문에 은어와 송어의 이동에 관한 생태환경이 매우 불량하다. 본 연구 결과를 통하여 볼 때 고전적인 계단식 어도의 설치는 하천에 서식하는 회유성 어종의 다양성 측면을 고려하여야 하며 설계시 어도내 상류와 하류 웅덩이간 낙차는 20 cm 미만으로 하여야 할 것이다.

핵심용어 : 계단식 어도, 생태수리실험, 소상능력, 회유성 어류, 하천생태환경, 낙차

* 강릉대학교 토목공학과 부교수

Associate Professor, Department of Civil Engineering, Kangnung National University, Kangnung, Kangwon, 210-702, Korea (E-mail : sdpark@kangnung.ac.kr)

1. 서 론

댐이나 보와 같은 하천횡단 수공구조물의 건설에 따라 차단된 어류의 이동환경을 보전하기 위하여 어도를 설치하고 있으며 수산자원보호령 제12조 2항으로 소하 어류의 통로를 확보하도록 규정하고 있다. 어도설치에 관한 연구가 현재 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있으며 다양한 형태의 어도가 제안되거나 설치되고 있는 추세이다.

계단식 어도는 가장 고전적인 어도의 형태라고 할 수 있으며 1960년대 초에는 계단식 어도의 가장 발전된 형태인 Ice Harbor식이 나타났다. Landmark에 의하여 전통적인 계단식 어도가 개선된 바 있으며 이는 vertical slot식 어도로 발전되었다(Clay, 1995; Katopodis, 1982). 이 어도는 전형적인 계단식 어도의 약점이 되는 어도의 유량변화에 대한 어도기능의 부적응성 문제를 해결하고 있다. 어도의 형태는 廣瀨과 中村(1991) 및 中村(1995)에 의해 수리학적 구조의 차이에 따라서 분류된 바 있으며 이들의 어도분류에서 계단식 어도라는 명칭은 형태학적인 측면이 강조된 것이다. 회유성 어류소상에 적절한 어도의 형태에 관한 연구는 많으나 어도형태에 따른 회유성 어류의 소상에 관한 연구는 빈약한 실정이다.

우리나라에서 계단식 어도에 관한 연구는 김진홍 및 김철(1994)이 수리모형실험을 실시하여 어족소상에 바람직한 계단식 어도의 흐름은 표면류이며 잠공설치는 신중을 기하여야 한다고 하였다. 황중서와 허혈(2000)은 양양남대천의 계단식 어도설치 지점과 들망태식 어도가 설치된 영덕 오십천의 어도 상류 및 하류지역에서 회유성 어류를 조사하여 어도의 어류소상효과를 간접적으로 평가하였다. 그러나 어도를 대상으로 직접적인 방법에 의하여 계단식 어도의 회유성 어류소상 효과를 조사한 연구는 거의 없는 실정이다. 이는 기존 어도시설의 유지관리를 위한 기본자료의 부재를 의미하는 것이며 수계별 회유성 어류의 이동생태환경에 대한 실태파악을 위한 조사연구가 시급함을 나타내는 것이라고 할 수 있다.

어도시설의 회유성 어류 소상효과를 하천에 설치된 기존 어도들을 대상으로 하여 실효성 있는 결과를 얻는 것은 그 설치 조건이 매우 다양하기 때문에 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 우리나라에 설치된 주요 어도 형태의 하나인 계단식 어도에 대하여 어도 생태 수리실험을 실시하고 계단식 어도의 회유성 어류에 대

한 소상능력을 평가하는 데 목적이 있다.

2. 계단식 어도의 실태

계단식 어도는 1996년 현재 강원도에 약 65개가 설치되어 있다(해양수산부와 강릉대학교, 1999). 강원지역의 계단식 어도는 14개 하천 52개소의 보에 설치되어 있으며 총 어도설치 보의 약 45.6%를 차지하고 있다. 전체 어도에 대한 계단식 어도의 수는 약 37.8%를 점유하고 있다. 영동과 영서지역으로 구분하여 비교하면 어도설치 보나 어도의 수에 대한 사다리식 어도의 점유율 및 어도의 규모는 동해안 지역과 영서지역 사이에 큰 차이는 없다. 동해안지역의 하천별 계단식 어도는 평균길이 19.1 m, 평균폭 2.6 m이며 영서지역은 평균길이 16.7 m, 평균폭 2.8 m를 나타내고 있다. 이는 본 연구발표 I에 있는 바와 같이 사다리식 어도의 규모가 동해안지역과 영서지역 사이에 큰 차이가 있는 것과는 대조를 보이고 있는 것이며 이는 기존에 설치된 계단식 어도가 사다리식 어도에 비하여 하천규모의 특성을 잘 반영하고 있지 않다는 것을 나타낸다.

계단식 어도의 어류 소상기능을 좌우할 수 있는 주요소는 각 계단 월류격벽의 높이이다. 강원지역에 설치된 모든 계단식 어도는 잠공이나 월류부홈이 없는 가장 단순한 형태의 어도이기 때문에 어류가 이를 이용하여 하천 상류로 이동하는 방법은 대부분 도약에 의존할 수밖에 없다. 이러한 어도에서 회유성 어류 소상기능을 좌우하는 핵심요소는 월류격벽의 높이와 동시에 어도 유량이라고 할 수 있다. 계단식 어도에서 유량이 증가하면 월류격벽 상하류간 수위차는 줄어들게 되고 역으로 유량의 감소는 수위차를 증대시킨다. 기존의 강원지역 계단식 어도는 대부분 은어의 소상시기가 속해 있는 4월부터 6월 사이에 보 관리자들에 의하여 어도 출구부가 막히거나 어도유량을 감소시키는 경우가 많다(박상덕 1996, 1998a, 1998c).

기존 설치되어 있는 계단식 어도의 소상기능을 분석하기 위하여 강원도 동해안지역 주요하천의 하구에 가까운 계단식 어도의 낙차를 표 1과 같이 조사하였다(박상덕, 1998b). 표 1에서 하단부 낙차의 음수 값은 보 하류부 수면이 어도 입구부 바닥보다 높은 것을 나타낸다. 조사된 계단식 어도의 낙차는 동일한 어도에서 10.8~39.0 cm의 차이를 나타내고 있다. 양양남대천의 범부보에 있는 계단식 어도는 최소낙차가 17.3 cm, 최대낙차가 46.5 cm로서 동일 어도에서 29.2 cm의 편차를 보이고 있다. 이는 어도설치 당시의 시공상의

표 1. 영동지역 주요하천 하류부의 기존 계단식 어도의 낙차 (1996년 현재)

구분 수계명	유역면적 (km ²)	본류연장 (km)	어도설치 보	어도별 낙차 (m)			
				최소	최대	낙차범위	어도입구부
신리천	42.0	15.5	매맥이보	0.150	0.295	0.145	0.221
연곡천	163.8	27.0	송림보	0.271	0.436	0.165	
			서당보	0.086	0.278	0.192	-0.038
양양 남대천	474.8	54.0	용천보	0.060	0.356	0.296	
				0.047	0.385	0.338	
			임천보	0.264	0.475	0.211	-0.233
				0.160	0.348	0.188	-0.054
			범부보	0.173	0.465	0.292	
마음천	149.3	29.5	재동보	0.005	0.395	0.390	

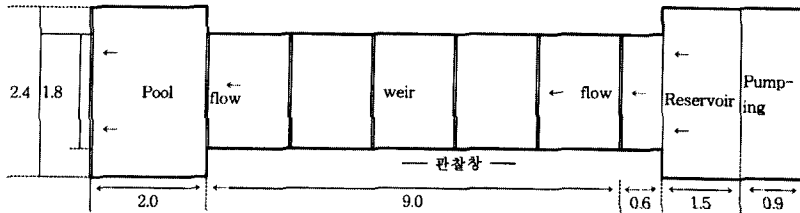


그림 1. 계단식 어도의 생태수리실험 장치 (단위는 m)

부주의 또는 설계미흡으로 발생된 것으로 판단된다. 신리천의 가장 하류에 있는 매맥이보는 계단식 어도와 어도 하류부 웅덩이 수면간의 차이가 22.1 cm를 나타내고 있어 어류가 어도에 진입하기 위해서는 어도 하류부 웅덩이에서 도약을 시도하여야 한다. 이와 같은 문제가 기 설치된 어도에서 종종 나타나고 있으며 이는 보 하류부 하상저하의 진행에 따라 더욱 심화될 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 기존 설치된 계단식 어도는 어도 입구부 낙차와 어도 내 월류격벽 상하류부 수면차 및 어도 유량에 의하여 어도의 회유성 어류소상 기능이 달라진다. 따라서 본 연구에서는 이러한 변수를 고려한 계단식 어도의 생태수리실험을 실시하여 우리나라의 기 설치 주요 어도일 뿐 만 아니라 가장 고전적인 형태인 계단식 어도의 회유성 어류소상 특성을 파악하고자 하였다.

3. 어도의 생태수리실험

3.1 실험장치

어도의 유량, 낙차, 회유성 어류의 종류에 따른 계단식 어도의 어류소상능력을 실험적 방법으로 평가하기 위한 어도 생태수리실험장치는 그림 1과 사진 1에서 볼 수 있는 바와 같이 사다리식 어도의 경우와 동일한 어도, 고수조, 저수조, 유량공급시설 등으로 구성되었다. 계단식 어도의 설치장소, 재료, 유량공급시스템은 사다리식 어도와 같다. 실험어도의 길이는 9.0 m, 폭은 1.8 m이며 월류격벽에 의하여 조성되는 웅덩이의 수는 5개로서 폭 1.8 m, 길이 1.68 m이고 격벽의 두께는 12 cm, 높이는 0.45 m 이다. 계단식 어도 격벽의 월류부 하류측 모서리는 흐름의 박리현상을 줄이기 위하여 3cm 너비로 절취하였다.

계단식 어도의 소상기능을 좌우할 수 있는 가장 중요한 요소인 월류격벽 상하류 수면간 낙차 어도경사의 조절에 의하여 변화를 주었으며 어도경사의 크기는



사진 1. 계단식 어도 실험 전경

0.75/9.0, 1.0/9.0, 1.5/9.0의 3단계로 구분하고 격벽의 월류수심 변화는 유량의 크기를 조절하여 이루어졌다.

3.2 실험조건 및 방법

어도 생태수리실험의 실험조건은 실험어류의 생태특성을 고려하여 설정되어야 한다. 본 연구의 실험에서는 우리나라 동해안지역의 대표적인 냉수성 회유어류인 은어(*Plecoglossus altivelis*)와 무지개송어(*Oncorhynchus mykiss*)를 사용하였으며(정문기, 1977) 무지개송어는 편의상 송어라고 하였다. 실험기간이 하계이기 때문에 실험어류에게 적합한 수온을 유

지하기 위하여 지하수를 이용하였다. 실험유량의 수온은 표 2의 생태적 실험조건에 있는 바와 같이 14.0~16.0 °C를 나타내었다. 실험유량은 0.0146~0.0538 m³/sec로서 4단계로 구분하였다. 실험조건은 어도경사 변화에 따라 각각 유량, 상하류 웅덩이간의 낙차, 어종, 실험시간 등의 변화로 이루어졌으며, 실험유량의 공급체계 및 배수계통은 본 연구발표 제1부의 사다리식 어도와 동일하다. 실험시간은 야간을 포함한 장기간 실험과 주간에만 실시되는 단기간 실험으로 구분하였다. 실험어류 약 300마리를 어도 하류부 웅덩이에 투입하고 일정시간이 경과한 후 어도 상류부 저류지에 소상한 어류와 어도내 각 웅덩이에 체류중인 어류를 채포하여 각 어류 개체의 중량, 체장, 전장을 조사하였다.

본 연구의 각 실험단계는 표3과 같이 실험준비단계, 실험어류 투입단계, 소상어류 조사단계로 이루어졌다. 실험준비단계는 실험의 수리조건을 갖추고 월류수심, 낙차, 수온 등을 조사하며, 실험어류 투입단계는 별도의 옥외에 설치된 수조에서 일광조건에 순치시킨 실험어류 300마리를 채포하여 어도 하류부 웅덩이에 투입한다. 이때 주의할 점은 실험어류의 채포과정에서 어류가 스트레스를 적게 받도록 신속하게 진행되어야 한다. 제 3단계의 소상어류 조사단계는 어도공급 유량을 차단하고 어도를 거슬러서 어도상류부 웅덩이에 올라간 어류와 어도내 각 웅덩이에 체류중인 각 어류의 개체수를 확인하고 채포하여 어류의 중량, 체장, 전장을 조사한다. 이 과정에서 실험어류가 손상되는 것을 줄이기 위하여 실험어류를 마취하여 어류특성을 계속하였다.

표 2. 어도 생태수리실험의 실험조건

구분		실험조건	비고
수리적 조건	유량(m ³ /sec)	0.0146~0.0538	
	낙차(cm)	3.5~26.5	
	월류수심(cm)	1.3~4.3	
생태적 조건	어종	은어, 송어	
	투입어수(마리)	300	
	수온(°C)	14.0~16.0	기온 : 15.5~30
실험어류 특성	은어	체장(cm)	6.5~13.9
		중량(g)	3.7~36.6
	송어	체장(cm)	7.0~14.4
		중량(g)	5.1~53.2
실험시간(hr)	단시간	2.0~5.8	
	장시간	15.5~23.3	
실험기간		1996. 7. 27~8. 18	

표 3. 계단식 어도의 어류생태실험단계

실험단계		주요내용
1단계	실험준비	① 어도의 경사조절을 통한 어도 내 웅덩이간의 낙차조정 ② 펌프에 의하여 실험유량을 어도에 공급 ③ 월류격벽의 수심, 낙차 및 수온 조사
2단계	실험어류 투입	① 순치 수조에서 실험어류를 신속히 채포 ② 실험어류 300마리를 어도 하류부 하상의 웅덩이에 투입
3단계	소상어류 조사	① 실험어류투입후 일정한 시간 경과 후 실험유량 차단 ② 어도의 각 웅덩이와 어도 상류부 저류지로 올라온 어류를 계수하고 각각 채포 ③ 각 소상어류의 전장, 체장, 중량조사

3.3 실험결과

계단식 어도에 대한 회유성 어류의 생태수리실험에서 실험시간의 장단과 실험어류 중량이나 전장과 같은 어류크기에 따라 발생할 수 있는 어류소상 결과의 차이를 배제하고 소상특성을 보다 객관적으로 평가하기 위하여 식 (1)과 식(2)와 같이 소상율과 소상능력을 사용하였다.

$$M_r = \frac{n}{T} \quad (1)$$

$$M_c = \frac{n}{WT} \quad (2)$$

여기서 n 는 실험어종의 소상어 개체수(마리), T 는 실험어류를 투입한 후의 실험소요시간(hr), M_r 는 소상율(마리/hr), W 는 소상한 어류의 평균중량(g), M_c 는 소상능력(마리/hr/g)을 나타낸다. 소상율은 어도에서 단위시간당 소상한 어류의 개체수를 나타내고 소상능력은 단위시간당 실험어류의 단위중량당 소상어 개체수를 의미하며 어류의 유영능력의 특성을 잘 나타낼 수 있는 지표라고 할 수 있다.

계단식 어도에 대한 어류의 생태수리실험 결과는 표 4에 제시된 바와 같다. 여기서 입구부 낙차는 어도입구부 격벽과 하상 웅덩이 사이의 낙차를 나타낸다. 월류격벽 최대낙차는 어도내의 월류격벽에서 발생한 낙차 중에 최대치를 나타내며, 이는 어도격벽 설치간격의 차이로부터 발생하였고 최상류격벽 또는 최하류단 격

표 4. 계단식 어도의 생태수리실험 결과

실험번호	실험시간 (hr)	유량 (m/sec)	수온 (°C)	어종	입구부 낙차 (m)	월류격벽 최대낙차 (m)	소상 (마리)	어도내 체류 (마리)	소상어 특성			어도진입 어류		
									평균 중량 (g)	평균 체장 (cm)	소상율 (마리/hr)	평균 중량 (g)	평균 체장 (cm)	소상율 (마리/hr)
1	16	0.0298	14.0	송어	0.200	0.265	3	2	15.5	9.5	0.188	18.4	10.1	0.313
2	2	0.0146	14.0	송어	0.205	0.265	0	11	-	-	0	14.7	10.0	5.500
3	16:45	0.0379	14.0	송어	0.185	0.245	39	11	17.3	10.7	2.328	16.3	10.2	2.985
4	2	0.0379	16.0	은어	0.147	0.250	0	30	-	-	0	10.1	9.1	15.000
5	15:30	0.0298	14.5	은어	0.185	0.185	0	0	-	-	0	-	-	0
6	5:45	0.0305	15.7	은어	0.105	0.168	0	31	-	-	0	17.2	10.8	5.391
7	15:30	0.0538	15.0	은어	0.055	0.145	29	102	16.0	10.5	1.871	16.0	10.8	8.452
8	23:20	0.0298	15.3	송어	0.128	0.183	3	1	18.0	10.1	0.129	16.1	10.1	0.171
9	11:30	0.0538	14.0	송어	0.130	0.145	2	7	24.3	11.4	0.174	22.1	11.2	0.783
10	15:10	0.0298	14.0	송어	0.135	0.135	4	4	16.7	9.7	0.263	17.1	9.8	0.527
11	3:10	0.0538	15.0	송어	0.090	0.110	8	8	21.5	10.8	2.500	25.8	10.5	5.054
12	17:30	0.0299	15.0	은어	0.060	0.135	1	73	21.8	12.4	0.057	23.0	12.1	4.229
13	2	0.0538	15.0	은어	0.103	0.107	0	0	-	-	0	-	-	0

벽에서 얻어졌다. 낙차의 계측은 하류부 웅덩이수면에
서 상류격벽 하류측단까지의 연직거리로 하여 이루어
졌다. 표 4에서 소상은 어도 하류부 하상웅덩이에 투
입한 어류가 어도의 월류격벽을 넘어 상류 저류지로
올라온 개체수를 나타내고, 어도 내 체류는 실험종료
후 어도 내 웅덩이에 체류중인 모든 개체수를 나타낸
다. 어도진입 어류의 평균중량은 어도를 통하여 상류
저류지로 올라간 어류와 실험종료후 각 웅덩이에 체류
중인 모든 개체의 중량을 평균한 것이다.

4. 수리특성과 어류소상

4.1 계단식 어도의 수리특성

계단식 어도에서 흐름상태는 유량의 크기에 따라서
낙하류(plunging flow), 천이류(transient flow),
표면류(streaming flow)로 분류된다(Rajaratnam 등,
1992). 계단식 어도에서 낙하류 상태는 유량이 적어
격벽 정부에서 낙하류가 형성되어 웅덩이 내로 잠입하
는 상황에 해당하며, 표면류 상태는 유량이 매우 많아
어도내 각 격벽 정부를 연결한 선 상부에 하류방향으
로 흐름이 형성되는 경우이다. 천이류는 낙하류 상태와
표면류 상태가 공존하는 경우이다. 우리나라 어도의 대
부분은 어류소상 시기가 하천의 유황이 저수기 혹은
갈수기에 해당하므로 유량이 작아 계단식 어도는 낙하
류 상태가 많으나 이 시기에 천이류 상태도 발견되고
있다. 본 연구에서는 계단식 어도의 흐름이 낙하류 상
태를 나타내었다. 낙하류 하부 웅덩이에서는 거품이 발
생하였으며 이는 어류의 소상 생태에 영향을 미치는
것을 확인할 수 있었다.

계단식 어도의 월류부 유량은 Katopodis(廣瀨과
中村, 1991)에 의하면 다음 식 (3)과 같이 무차원값
 \hat{Q}_i 으로 표현되며, 월류부 수심과 격벽두께의 비가 2
이상인 경우에는 0.22~0.31의 좁은 범위에 있다고 하
였다.

$$\hat{Q}_i = \frac{Q}{b\Delta h\sqrt{gL}} \quad (3)$$

여기서 Q 는 유량(m^3/sec), b 는 수로폭(m), Δh 는
월류수심(m), L 는 웅덩이 길이(m), g 는 중력가속도
(m/sec^2)이다. 계단식 어도에서 낙하류 상태의 월류유
량은 다음 식 (4)와 같은 위어공식으로부터 구할 수
있다.

표 5. 계단식 어도 실험의 흐름특성

어도경사	유량 (m^3/sec)	웨어수심 (m)	무차원유량	흐름영역
0.75/9.0	0.0298	0.0185	0.213	낙하류
	0.0538	0.0415	0.171	
1.0/9.0	0.0298	0.0185	0.213	
	0.0538	0.0430	0.165	
1.5/9.0	0.0146	0.0130	0.149	
	0.0298	0.0250	0.158	
	0.0379	0.0260	0.193	

$$Q = 0.61\sqrt{g b \Delta h}^{3/2} \quad (4)$$

여기서 Δh 는 월류수심이다. 본 연구의 계단식 어도
에서 흐름특성은 표 5와 같고, 무차원 유량 \hat{Q}_i 가
0.149~0.213의 범위에 있었으며 어도내 웅덩이에서
흐름은 매우 안정한 상태를 나타내었다. 즉 어도 내의
상하류 웅덩이 간 흐름은 서로 간섭하지 않았다. 이는
어도 규모에 비하여 실험유량이 작기 때문인 것으로
판단된다. Katopodis(廣瀨과 中村, 1991)에 의하면
낙하류 상태에서는 \hat{Q}_i 가 0.25보다 작을 때 흐름이 안
정하다고 하였다. 김진홍과 김철(1994)의 계단식 어도
에 대한 수리모형실험에 따르면 낙하류 상태의 무차원
유량 \hat{Q}_i 는 0.110~0.219의 범위에 있어 본 연구에
서 실험한 계단식 어도의 흐름상태와 비슷한 실험 범
위에 있음을 알 수 있다.

4.2 은어의 소상능력

본 연구의 계단식 어도실험은 낙하류 흐름상태를 보
이고 있기 때문에 본 연구의 계단식 실험어도를 이용
한 어류의 소상은 회유성 어류의 도약능력에 크게 좌
우된다. 따라서 본 연구에서는 어도 하류부 웅덩이와
계단식 어도 사이의 낙차에 변화를 주어 실험하였다.

그림 2는 계단식 어도 입구부 낙차와 은어의 어도진
입 관계를 나타낸 것이고 그림 3은 계단식 어도 내 웅
덩이 사이의 최대 낙차와 은어의 소상 관계를 나타낸
것이다. 그림 2에서 가로축의 팔호 안의 값은 유량(m^3
/sec)을 나타내는 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와
같이 은어는 낙차를 기준으로 보면 16.8 cm 이상의
낙차에서는 상류로의 진입이 곤란한 것을 알 수 있다.

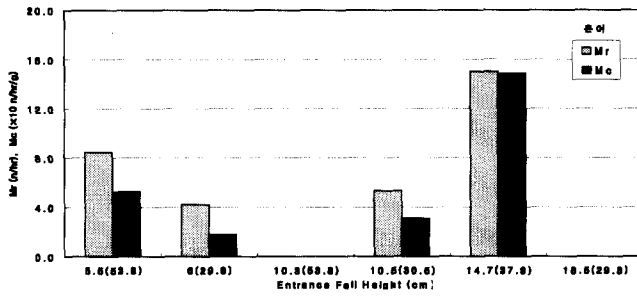


그림 2. 계단식 어도 입구부 낙차와 은어의 어도진입

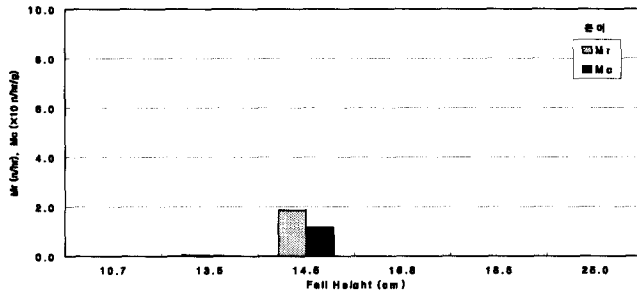


그림 3. 계단식 어도 낙차와 은어의 소상

여기서 낙차관 웅덩이의 수면에서 상류측 월류격벽 하류단의 높이를 나타낸 것이다. 따라서 낙차를 어도내 상류와 하류 웅덩이 사이의 수면차이로 정의하면 이보다 1.3~4.3 cm 정도 높아진다.

그림 2와 3을 비교하여 보면 어류가 하류부 웅덩이에서 어도로 진입하여도 상류 저류지로 소상하는 것은 시간의 장단을 고려한다고 하더라도 상당히 차이가 나는 것을 알 수 있다. 도약하여 어도에 진입하는 것보다 상류 웅덩이로 지속적인 이동이 쉽지 않음을 나타낸다. 여기서 알 수 있는 것은 은어는 도약을 선호하고 있으며 계단식 어도를 통하여 상류로 이동하는 지구력은 약한 것으로 판단된다.

4.3 송어의 소상능력

그림 4는 계단식 어도 입구부 낙차와 어도에 진입한 송어의 관계를 나타내는 것이다. 가로축은 낙차로서 하상 웅덩이의 수면에서 월류격벽 하류단측까지 높이를 나타내며 괄호 안의 값은 실험유량(m/sec)이다. 입구 낙차의 변화에 따른 송어의 진입은 낙차가 20.5cm이고 유량이 0.0146 m/sec에서 최대를 보이고 있다. 낙차가 12.8 cm에서부터 대체로 증가하는 경향을 보이

고 있다. 그림 5는 계단식 어도 낙차에 따른 송어의 소상을 나타낸 것이다. 송어의 도약이 낙차가 26.5 cm에서도 가능함을 여기서 확인할 수 있다. 최대 소상은 24.5 cm에서 얻어졌으며 11.0 cm 낙차를 제외하면 도약의 경우에 비하여 소상이 미미한 편이다. 그림 4와 그림 5를 비교하여 보면 송어는 도약 후에도 상류로 상당히 소상하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 송어가 도약 후에도 상당한 지구력을 나타내는 것이라고 할 수 있다.

4.4 은어와 송어의 도약특성 비교

본 연구에서 실험에 사용한 은어(*Plecoglossus altivelis*)는 송어(*Oncorhynchus mykiss*)에 비하여 도약을 선호하는 것을 알 수 있다. 그림 2와 그림 4를 비교하면 낙차가 작을 때 은어는 송어에 비하여 훨씬 큰 도약 능력을 나타내고 있다. 그러나 도약의 높이는 은어보다 송어가 훨씬 높게 나타나고 있다. 그림 2에서 그림 5까지의 모든 결과를 통하여 볼 때 송어는 높이 26.5 cm까지도 도약하고 있으며, 은어는 16.8 cm 미만의 도약 높이를 나타내고 있다. 이러한 도약 높이는 어도 하류부 하상 웅덩이의 수면에서 상류의 월류

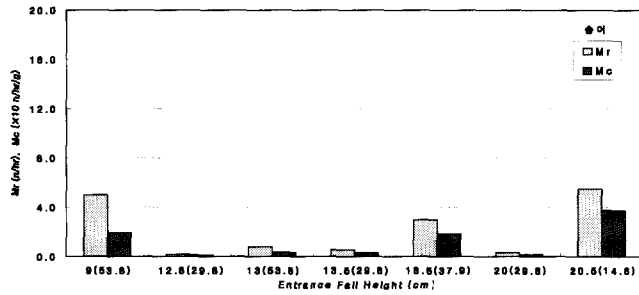


그림 4. 계단식 어도 입구부 낙차와 송어의 어도진입

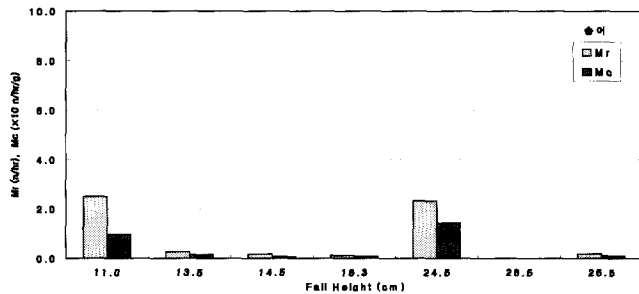


그림 5. 계단식 어도 낙차와 송어의 소상

격벽 정부의 하류 측단까지의 높이를 나타내는 것이며, 상하류 웅덩이 사이의 낙차를 고려하면 이보다 1.3~4.3 cm 정도 더 높게 된다. 본 연구에서 알 수 있는 것은 계단식 어도의 낙차가 약 16 cm 미만으로 작은 경우에는 은어의 소상능력이 송어에 비하여 크고 낙차가 20.0 cm 이상으로 크면 송어가 은어보다 소상능력이 크게 된다는 점이다. 즉 어종에 따라서 계단식 어도의 소상능력에 차이가 발생한다. 이는 하천에 서식하는 어종의 생태학적인 특성이 어도의 소상기능과 밀접한 관계가 있으므로 계단식 어도설계에 충분히 반영되어야 함을 의미한다.

4.5 기존 계단식 어도의 소상기능

표 1의 최대 낙차를 보면 송어가 도약할 수 있는 한계낙차로서 30.0 cm를 고려할 때 이를 넘는 것이 조사한 어도의 70%를 차지하고 있고, 은어가 도약할 수 있는 한계낙차로서 20 cm를 고려하면 조사된 모든 어도가 은어의 소상이 불가능하게 되는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로 볼 때 유량이 적은 갈수시 기존의 계단식 어도는 은어 및 송어와 같이 회유성 어류의 소상에 대단히 불리하며 따라서 수계별 회유성 어류의 생태환경이 극도로 나쁜 것을 알 수 있다.

황중서와 허협(2000)에 의하면 계단식 어도가 설치된 양양 남대천의 임천보, 범부보, 재궁보의 상류와 하류에서 1998년 7월부터 1999년 10월까지 회유성 어류의 분포를 조사하여 어도의 어류 소상효과를 간접적으로 평가하였다. 이 결과에 의하면 임천보 하류에서 8개체가 채포된 연어는 임천보 상류에서 전혀 채포되지 않았으며, 은어는 모든 조사지점에서 채포되었고 황어는 범부보 하류에서 3개체가 채포되었으나 상류에서는 전혀 채포되지 않았다. 이는 본 연구의 표 1에서 임천보와 범부보의 최대낙차가 34.8~46.5 cm인 것을 감안하면 예상이 가능한 결과라고 할 수 있다.

그러나 은어의 경우에는 모든 조사지점에서 8개체 이상 채포되어 다소 의외의 결과라고 할 수 있으나, 하천에서 풍수시 어도의 유량이 증가하여 어도의 흐름이 표면류가 되면 김진홍과 김철(1994)이 어류소상에 유리한 계단식 어도의 흐름은 표면류라고 지적한 것을 통하여 볼 때 가능하다고 할 수 있다. 하천에서 회유성 어류의 소상시기가 대부분 갈수 혹은 저수인 점을 고려할 때 본 연구에서와 같이 계단식 어도의 소상능력 평가는 표면류 상태가 아닌 낙하류 상태에서 이루어져야 할 것으로 생각된다.

5. 고 찰

계단식 어도를 이용하여 회유성 어류가 상류로 소상하기 위해서는 낙하류의 경우 도약을 하여야 한다. 기존에 설치된 우리나라의 대부분 계단식 어도는 회유성 어류가 이동하는 시기에 낙하류 상태를 보이는 경우가 많기 때문에 은어를 제외한 어류에게는 어류소상 기능 면에서 만족스럽지 못하다고 할 수 있다. 어도시설의 현장조사에서 파악된 바에 의하면 계단식 어도의 입구 부에서부터 회유성 어류가 도약에 의하여 어도로 진입하여야 하는 경우가 많고 동일한 어도에서 계단의 낙차 또한 편차가 많기 때문에 어도시설의 유지관리나 시공에 세밀한 주의를 하지 않는 것으로 판단되었다. 본 연구에서 실험한 유량조건은 0.0146~0.0538 m³/sec이었으며 이에 따른 무차원 유량계수 또한 0.25보다 적은 값으로 낙하류 상태를 보였다. 따라서 유량을 증가시켜 무차원 유량계수가 0.25 이상의 표면류에 이르기까지의 계단식 어도에서 회유성 어류소상에 대한 실험적인 연구가 필요한 것으로 생각된다.

계단식 어도의 낙차에 따른 은어와 송어의 소상능력은 어도의 낙차가 16 cm 미만으로 작을 때에는 은어가 우수하나 20 cm 이상으로 클 때에는 송어가 우수한 것으로 미루어 볼 때 어종별 특성에 따라서 소상결과가 크게 다를 수 있었다. 특히 본 연구의 실험에서 어도 내에 체류하고 있는 어류의 개체수와 그 특성조사 결과를 바탕으로 보면 계단식 어도에서 회유성 어류가 소상 중에 어도 내에 체류하는 시간이 매우 긴 것을 알 수 있다. 이는 어도 내의 웅덩이가 어류의 어도 내 체류시간 증가에 기여하는 것이라고 할 수 있다. 따라서 계단식 어도의 웅덩이의 수와 회유성 어류의 체류시간의 관계에 대한 추후 조사연구가 필요한 것으로 판단된다. 또한 회유성 어류의 정수상태에서의 도약능력, 낙하류를 거슬러 도약하는 높이, 낙하류 수심의 크기에 따른 어류의 도약능력 발휘분석을 위한 조사연구도 필요한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 어류생태 수리실험을 통하여 계단식 어도에 대한 회유성 어류의 소상능력을 평가하기 위한 것으로서 냉수성 회유어류인 은어와 송어를 대상으로 실험하였다. 또한 수계별로 이미 설치되어 있는 계단식 어도의 낙차를 조사하고 이를 실험결과와 비교하여 회유성 어류 이동생태환경을 분석하였다. 본 연구를 통하

여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 계단식 어도에서 은어의 소상능력은 낙차가 16 cm 미만으로 작을 때 송어보다 크고 20 cm 이상으로 낙차가 클 때는 송어의 소상능력이 은어보다 크다.
2. 계단식 어도에서 은어는 송어보다 도약을 선호하며 도약 후 상류로 소상하는 데 관련된 지구력은 송어가 은어에 비하여 크다.
3. 수계별 하류지역에 설치된 기존 계단식 어도의 낙차가 20 cm 이상으로 매우 크며 동일 어도에서 월류격벽 낙차간의 차이 또한 매우 크기 때문에 은어와 송어의 이동에 관한 하천생태환경이 매우 불량하다.
4. 본 연구 결과를 통하여 볼 때 고전적인 계단식 어도의 설치에 하천에 서식하는 회유성 어류의 다양성 측면을 고려할 때 지양되어야 하며, 낙하류가 있는 어도의 설계시에 상하류 웅덩이간 낙차는 20 cm 미만으로 하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 1995년도 수산특정연구개발사업 지원에 의해 수행된 연구성과 중 일부이며 이에 감사드립니다. 실험을 할 수 있도록 시설을 지원해준 국립수산진흥원 양양내수면연구소와 당시 배국기 소장님께 감사를 드리며 실험을 도와준 강릉대학교 김진열 군에게도 감사합니다.

참 고 문 헌

- 김진홍, 김철 (1994). "어족 소상을 위한 계단식 어도 수리특성에 관한 연구." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제27권, 2호, pp. 63~72.
- 박상덕 (1996). "수리실험에 의한 어도의 기능분석." 학술발표회논문집 (III), 대한토목학회 pp. 51~54.
- 박상덕 (1998a). "취수보에 설치된 어도의 수리실험." 한국수자원학회 '97분과별 연구과업 보고서, 한국수자원학회, pp. 2-1~2-26.
- 박상덕 (1998b). "동해안지역 어도시설 실태 및 기능." 동해안지역 회유성 어류를 위한 하천 생태환경 보전 심포지움, 강릉대학교 동해안 지역연구소, pp. 5-1~5-40.
- 박상덕 (1998c). "동해안지역 어도시설 및 관리." 한국수자원학회지, 제31권, 4호, pp. 28~33.
- 정문기 (1977). 한국어도보. 일지사, pp. 124~133.
- 해양수산부, 강릉대학교 (1999). 어도시설 표준모형

- 개발에 관한 연구.
- 황종서, 허협 (2000). “양양남대천과 영덕오십천의 어도 및 어류의 소상.” 한국농공학회지, 제42권, 제5호, pp. 70~77.
- 広瀬利雄, 中村中六 (1991). 魚道の設計. 山海堂.
- 中村俊六 (1995). 魚道のはなし-魚道設計のためのガイドライン. 山海堂.
- Clay, C. H. (1995). Design of Fishways and Other Fish Facilities. 2nd Ed. Lewis Pub.
- Katopodis, C. (1982). *A Study of the Hydraulics of Denil Fishways*. M.Sc. Thesis, The University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada, pp.1~11.
- Rajaratnam, N., Katopodis, C. and Mainali, A. (1992). “Plunging and Streaming Flows in Pool and Weir Fishways.” *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE Vol. 114, No.8, pp. 939~944.
- (논문번호:01-030/접수:2001.04.04/심사완료:2001.07.09)