

수리분과

취수보에 설치된 어도의 수리실험
(Hydraulic Experiments of Fishways
on Head Works)

책임연구원 : 박 상 덕

(강릉대학교 토목공학과 교수)

1. 서론

급격한 산업화 과정에서 그동안 소홀하게 취급되어 왔던 하천생태환경에 대한 최근의 고조되고 있는 관심은 우리나라의 경제성장과 생활수준의 향상에 따른 것이라고 할 수 있다. 하천의 기능은 수량, 수질, 생태가 서로 최적의 조건을 이룰 때 잘 발휘될 것이다. 우리나라의 하천은 제내지에 펼쳐진 농경지에 용수를 공급하기 위하여 설치된 취수보로 인하여 많은 변화를 겪어 왔다. 취수보로 인한 홍수시 수위증가와 취수보 상하류 하천의 하상변동이 그 대표적인 예라 할 수 있다. 이는 또한 하천의 어류생태환경의 변화를 초래하였고 그동안 우리나라에서는 이에 대한 관심이나 연구가 미흡한 실정이다.

우리나라에서 1987년 까지 설치된 취수보 현황을 보면 19,962개소 중에 강원지역이 5,114개소로서 25.6%를 차지하고 있고, 경상북도 지역이 3,199개소로 16.0% 이며 다음으로는 경남, 충북, 충남의 순으로 되어 있다. 이는 각 지역 하천구역의 지형적인 특성에 기인한 것이다.

강원도 동해안 지역 하천 중하류 유역은 퇴적지형으로서 비교적 완경사인 저평지이다. 이 지역에는 하천 좌우에 산재한 중소규모의 농경지에 필요한 농업용수를 공급하기 위하여 하천에 취수보가 많이 설치되어 있다. 이 취수보들은 대체로 보의 높이가 큰 편이다. 이러한 취수용 보와 같은 수공구조물의 건설은 필연적으로 하천의 상하류간 수생태환경 교란을 초래하게 된다. 즉 회유성 어류의 소상이 거의 불가능해질 뿐 만 아니라 어류의 산란을 위한 이동환경 파괴로 어류의 개체수가 감소하거나 멸종될 수도 있다. 따라서 하천 수생태 환경의 파괴를 최소화 하기 위하여 하천 횡단 수공구조물 건설시 어도설치를 법으로 규정하고 있다. 그러나 아직도 어도의 중요성이 수산자원의 보호라고 하는 경제적인 측면에서 뿐 만아니라 하천환경 보전이라고 하는 환경측면에서도 크게 인식되지 못하였던 것이 현 실정이다.

따라서 본 연구에서는 어도에 대한 수리실험을 고찰하기 위하여 우리나라 어도의 대부분이 설치되어 있는 동해안 지역 취수보의 어도시설을 대상으로 실시된 수리실험을 중심으로 하였다.

2. 기존의 어도실태

동해안 지역에 설치된 어도의 개소를 보면 표 1과 같이 83개소의 보에 130개의 어도시설이 있다. 현장조사를 통하여 파악된 어도의 문제점을 정리하면 표 2와 같이 분류할 수 있다. 동해안지역에서 조사된 어도형태는 사다리식, 계단식, 계단-돌망태식, 기타로 분류하였다. 기존의 국내외에 설치된 어도형태는 크게 분류하면 수로식, 계단식, 혼합식, operation 식으로 나눌 수 있다. 여기서 사다리식은 도류벽식 또는 도벽식이라고도 한다. 계단식 어도는 어떤 간격으로 설치된 웨어와 이로 인하여 형성된 pool로 이루어진 어도이다. 계단-돌망태식은 계단식에서 어도 내 몇 개의 pool을 제외한 나머지를 돌망태로 채워 자연수로처럼 물이 흐르게 한 것이다. 기타는 대부분 사다리식이나 계단식을 서로 결합하거나 각각을 조금씩 변형한 형태의 어도이다. 동해안지역에 설치된 계단식 어도는 모두 전면 월류형 계단식 어도라고 할 수 있다.

어도시설에 대한 현장조사 결과 어도의 기능상실 혹은 기능저하에 영향을 미치는 주요 원인은 구조적인 문제와 관리상의 문제로 대별할 수 있다. 구조적인 문제는 설계나 시공상의 부적절성을 들 수 있고 관리상의 문제는 어도출구부 폐쇄나 어도내 퇴적물 방치 등을 들 수 있다. 설계 부적절성의 대부분은 사다리식의 경우 취수보와 하상이 만나는 지점의 어도부분 경사가 너무 급격하게 설계되어 유속이 매우 크고 흐름이 거세어 어류의 소상이 어렵게 설계되어 있고, 계단식의 경우에는 격벽간의 낙차가 너무 커서 어류의 도약에 의한 상류로의 이동이 불가능하게 설계된 것을 들 수 있다. 관리상의 문제로서는 취수보 하류부의 하상저하가 발생하여 어도 입구부 낙차가 매우 커 어류의 어도내 진입이 곤란하게 되거나, 보의 배사구는 개방하고 어도 출구부는 폐쇄한 경우 또는 수리권자가 더 많은 취수를 위하여 어도 출구를 막아 어도내로 유량이 충분히 공급되지 않는 경우등이다.

어도입구나 어도출구는 어도를 이용하여 소상하는 어류의 입장에서 붙여진 용어로서, 어도 입구부는 하류의 어류가 상류로 이동하기 위하여 진입하는 어도 하단부이고, 어도출구는 어도내에 있는 어류가 어도를 빠져나가 취수보 상류의 저수지로 진입하는 어도 상단부를 의미한다.

표 1. 하천별 어도설치 보와 어도현황 (1996년 현재)

하천명	어도설치 보의 수	어도의 수				계
		계단식	사다리식	계단- 돌망태식	기타	
양양남대천	21	19	10		2	31
삼척오십천	5		7	1		8
강릉남대천	4	5				5
연곡천	6	6	4		2	12
신리천	7	7				7
사천천	2	1	1			2
주수천	1		2			2
화상천	2	2				2
북천	7	3	7	1	5	16
남천	5		12			12
천진천	2		2			2
문암천	2		2			2
배봉천	1	1				1
용촌천	1		1			1
전천	3		5			5
마읍천	4	2	3	1		6
가곡천	6		9	1		10
추천	1		1			1
호산천	3		5			5
계	83	46	71	4	9	130

표 2 어도시설의 기능상실 및 기능저하 원인조사

구분	원 인	어도개소
구조적인 문제	1) 어도설계 및 시공 미흡	29
	2) 어도 위치 부적절	1
	3) 어도내 유량부족	2
관리상의 문제	1) 취수보 하류부 하상저하 발생	17
	2) 어도로의 어류유인을 위한 어도하류부 저수로 불명확	3
	3) 어도입구 하상 pool 미흡	7
	4) 어도유실 및 파손	4
	5) 보의 유지관리 불량	14
	6) 어도내 토사퇴적	5
	7) 보시설파괴 및 결함	3
	8) 어도 유입구 폐쇄	3
	9) 어도출구부 보내측의 토사퇴적	5

3. 어도수리실험

3.1 수리실험시 고려사항

취수보에 설치되는 어도에 관한 수리실험은 어도에서 발생하는 실제의 수리 현상을 다양한 조건하에서 재현하므로써 그 수리학적 기능 혹은 특성을 조사하여 어도형상의 타당성을 판단하기 위하여 실시된다. 수리실험은 복잡한 수리 현상을 실제로 눈으로 보고 확인할 수 있다고 하는 장점을 가지고 있다. 특히 수리현상이 너무 복잡하거나 아직 규명되지 않은 경우에 선택할 수 있는 수리현상파악을 위한 방법이 될 수 있다. 그럼에도 불구하고 수리실험은 많은 비용이 필요하게 되는 단점이 있다.

취수보에 설치되는 어도가 그 기능을 잘 발휘하기 위해서는 어도에 대한 수리실험에서 특별히 다음 사항을 주의깊게 고려하여야 한다.

1) 취수보 및 하천특성

- ① 보의 형상 및 규모
- ② 취수량 및 취수시기 : 어도규모 및 형상 결정에 필요
- ③ 유역면적, 하천경사
- ④ 하천유황
- ⑤ 경년적 하상변동 및 장래 하상변동예측
- ⑥ 하천에 서식하는 회유성 어류의 종류 및 생태

2) 어도특성

- ① 어도구조 및 형상 : 대상 어류가 이용 가능한 흐름상태가 되도록 함.
- ② 어도길이 : 어도길이는 취수보 하류부 하상에서 예상되는 하상변동에 대하여 기능을 유지할 수 있도록 충분한 길이가 되어야 하며, 어류의 생태특성에 맞는 어도내 흐름을 위하여 가급적 완경사 어도가 되도록 함.
- ③ 보에서 어도의 배치
- ④ 어도재질
- ⑤ 어도내 유량
- ⑥ 어도 이용 주요 어류특성 - 어류생태특성

3) 실험방법

어도에 관한 실험은 공간이나 장소의 제약을 받는 경우 기하학적 상사를 우선 만족시켜야 한다. 즉 취수보의 배치문제를 다룰 때 특히 필요하며, 어도의 형상을 결정하고자 할 때는 취수보에서 어도만을 떼어내 모형실험을 실시하여야 한다. 이때 모형의 축적은 대상으로 하는 수리현상의 재현성, 시설의 규모, 측정기기의 정밀도 등을 고려하여 설정하여야 한다. 어도부분의 수리실험에서는 역학적상사 법칙으로서 Froude 상사법칙을 만족하도록 하여야 한다. 어도는 대상으로 하는 어류의 특성을 수리학적으로 상사시키기가 곤란하기 때문에, 즉 임의 축척 어도 모형실험에 있어서 어떤 크기의 어류를 사용할 것인가를 판단하기가 어렵다. 따라서 지금까지 수리모형실험은 모형에서 측정된 유속이나 수심

등과 같은 수리량을 원형으로 환산하여 이 흐름상태가 어류의 습성이나 유영력 등과 같은 생태학적 특성에 적합한지 여부를 판단하는 것이 대부분이고 실제 모형에 대상어류를 실험어류로 투입하는 실험은 그 사례가 매우 적다. 본 연구에서는 실물 규모의 모형에서 실험어류를 투입하는 수리실험을 대상으로 한다.

3.2 어도모형

취수보에 설치된 어도의 특징은 그 유량을 수리권자가 임의로 조절하는데 있으며 취수보에 설치된 어도의 전형적인 형태를 나타내면 그림 1과 같다. 소하성 어류의 어도 이용과정은 하천 하류부에 있는 소하성 어류가 저수로를 통하여 어류하단에 형성된 웅덩이에 이르러 휴식을 취한 후 어도 입구로 돌진하여 어도내로 진입한다. 진입한 어류는 어도의 출구를 통하여 취수보 상류의 저수지로 들어감으로써 어도를 이용한 상류이동을 하게 된다.

본 연구에서는 우리나라의 취수보에 설치된 어도형태를 고려하여 그림 2와 같이 계단식 어도와 사다리식 어도를 실험대상 어도형태로 설정하였다. 어도모형의 크기는 기존에 설치된 어도규모를 감안하여 실제규모와 거의 같도록 폭 1.8m, 길이 9.0m로 하였으며, 계단식 어도는 길이 1.8m인 5개의 pool을 두고 사다리식 어도는 80 cm 간격으로 9개의 격벽을 두었다. 사다리식 어도의 격벽 두께는 10 cm 로 하고 계단식 어도의 격벽두께는 12cm로 하였다. 계단식 어도의 격벽 윗류부 하류측 모서리는 흐름의 박리현상을 줄이기 위하여 3cm 너비로 깎아 내었다. 어도모형의 재료는 목재로 하고 물과 접촉하는 부분은 12mm 방수합판을 사용하여 어도를 제작하였다. 수리실험 어도모형 설치장소는 일광조건 하의 야외에 설치하였다. 그림 2와 같이 어도의 상류에는 저수지를 두고 하류부에는 폭 2.4 m, 길이 2.0 m의 웅덩이 즉 pool을 설치하여 실험어를 이 pool에 투입할 수 있도록 하였다. 사다리식 어도의 출구부에는 가로 60cm, 세로 60cm의 유수단면 축소부를 두어 어류의 소상에 필요한 수심을 확보할 수 있도록 하였다.

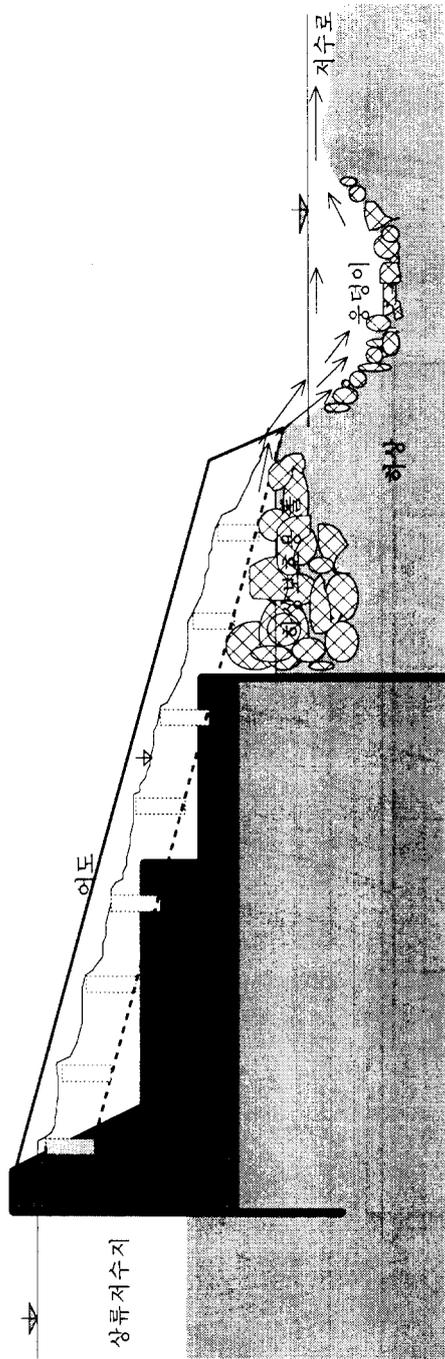
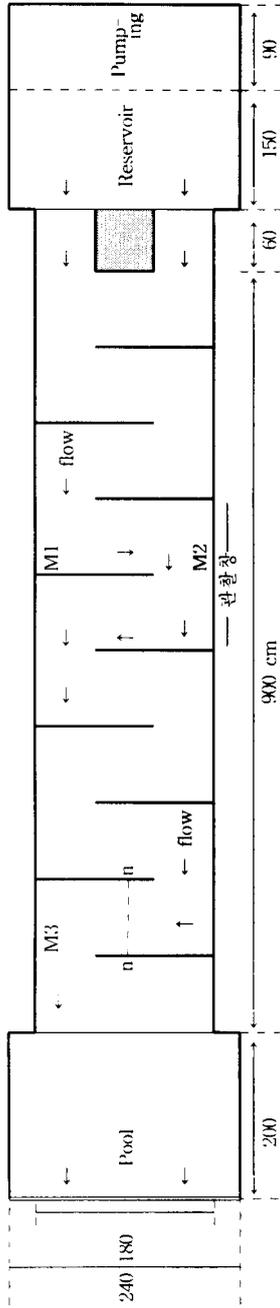
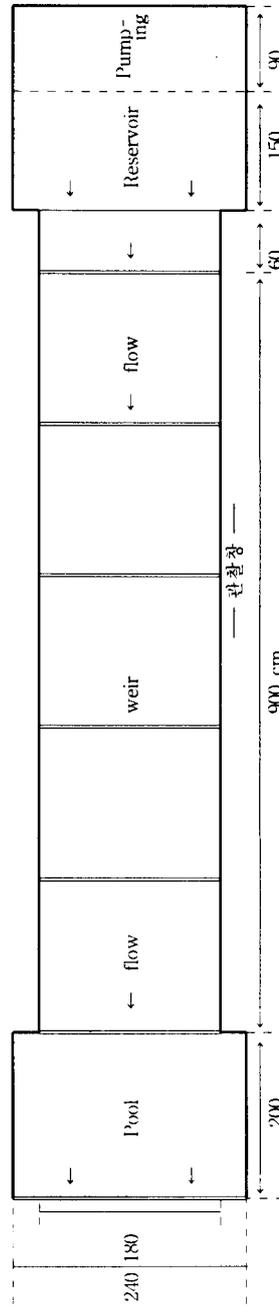


그림 1. 취수보 및 어도시설



(1) 사다리식 어도



(2) 계단식 어도

그림 2. 수리실험 어도모형

3.3 실험조건

어도수리실험은 가급적 실제 상황에 근접하게 하는 것이 바람직하나 여러 가지 제약 때문에 이것이 곤란한 경우에는 실험어류의 이동특성에 영향을 미칠 수 있는 다음과 같은 항목에 특히 주의를 기울여 각종 수리량 및 어도의 조건을 변화시켜가면서 실험을 하여야한다.

- ① 수온 : 실험어류의 생리상태 좌우함
- ② 조명 및 일광조건
- ③ 소음 및 진동 : 실험어도와 어도에 실험유량 공급을 위한 펌프간 거리
- ④ 어도의 색상 : 어류가 선호하거나 싫어하는 색상여부
- ⑤ 어류의 행동에 영향을 미치는 사람이나 기타 동물의 실험장 접근성.

본 연구에서 실험조건은 표3에 제시된 바와 같이 유량은 14.6 - 53.8 l/sec, 어도경사는 0.1/9.0 - 1.5/9.0 로 변화시켜가면서 실험하였다. 유량은 4대의 펌프로 공급하였으며 각 펌프별 유량은 유속계와 삼각형 웨어에 의하여 결정하였다. 각 펌프에서 공급되는 유량을 일정하게 하기 위하여 공급수조의 수위를 일정하게 유지하였다. 유량규모는 은어와 송어가 소상하는 시기에 하천 유량이 저수시 혹은 갈수기에 해당되는 점을 감안하여 결정하였다. 어도경사는 완경사에서부터 급경사에 이르기까지 4단계로 구분하여 경사변화에 따른 유속, 수심, 및 낙차의 변화를 꾀하였다. 실험어류는 소화성 어류로서 강원지역 하천에 서식하고 있는 냉수성 어류인 은어와 송어를 사용하였다. 은어와 송어는 인공부화한 후 일정기간 동안 일광조건에 적응시킨 다음 실험에 사용하였다.

표 3. 어도 수리실험 실험조건

어도형태		사다리식	계단식	
유량 (l/sec)		14.6, 29.9, 37.9, 53.8		
어도경사		1.0/9.0, 0.5/9.0 1.0/9.0, 1.5/9.0	0.75/9.0, 1.0/9.0 1.5/9.0	
실험어류	은어	전장 (cm)	4.8 ~ 13.4	7.5 ~ 16.7
		체장 (cm)	5.1 ~ 11.5	6.5 ~ 13.9
		중량 (g)	1.1 ~ 18.2	3.7 ~ 36.6
	송어	전장 (cm)	7.6 ~ 13.9	8.1 ~ 16.2
		체장 (cm)	6.3 ~ 12.4	7.0 ~ 14.4
		중량 (g)	4.1 ~ 29.6	5.1 ~ 53.2
투입어수 (마리)		300		
수온 (°C)		11.2 ~ 15.0	14.0 ~ 16.0	
실험시간 (hr)		2.0 ~ 43.3	2.0 ~ 23.2	
실험기간		'96.6.19. ~ 7.24.	'96.7.27. ~ 8.18.	

4. 실험결과 및 분석

4.1 흐름특성

어도수리실험에서 측정할 수리특성 항목은 유량, 유속, 수심, 흐름의 안정도등이며 어도를 이용하는 어류가 어도내에서 이동할 것으로 예상되거나 실제로 이동경로의 주요 부분에서 위의 항목을 조사하여야 한다.

4.1.1 사다리식 어도

사다리식 어도의 흐름분포를 보면 그림 3과 같이 격벽 사이에 형성된 pool에서 회전류가 발생하고 수면이 상승한다.

어도 입구에서 최대유속은 유량이 14.6 l/sec, 어도경사가 0.1/9.0 인 경우를 제외하면 모두 1.0 m/sec를 넘고 그 발생 위치는 좌측벽 5 cm 부터 10 cm 사

이에서 발생하였다. 최대수심은 그림 4에서도 알 수 있는 바와 같이 어도 좌측 벽에서 주로 발생하였다. 어도출구 및 입구의 수심은 어도경사가 증가함에 따라 감소하였으며, 어도하류부 격벽 사이의 n-n 단면에서 조도계수를 구하여 보면 대체로 유량증가에 따라 증가하고 있으나 어도경사에 따라서는 대체로 증가하는 경향을 띠는 것으로 판단된다. 그러나 이에 대한 좀더 정확한 실험이 필요한 것으로 판단된다. 표4에 제시된 어도에서 조도계수는 정확하게 추정하는 것이 어려우나 개수로에 적용하는 Manning의 평균유속공식 (1)을 적용하여 구하였다.

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (1)$$

여기서 V : 단면평균유속 (m/sec)

n : 조도계수 (sec/m^{1/3})

R : 경심 (m)

S : 어도경사

여기서 조도계수 n은 Cowan(1956)에 의하면 다음 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (2)$$

여기서 n₀ : 직선수로상에 작용하는 조도계수

n₁ : 표면불안정에 따른 보정조도

n₂ : 수로단면형상크기에 따른 보정조도

n₃ : 수로내 장애물에 따른 보정조도

n₄ : 식생에 따른 보정조도

m : 사행에 따른 보정조도

그림 4에서 보면 pool내의 최대수심은 그림2의 M1과 같이 격벽 안쪽 상류부 모서리 부근에서 발생하며 격벽의 끝단 맞은편 어도벽에서 수심이 또한 크다 (그림 2의 M2, M3와 같은 지점).

표 4의 조도계수는 그림 2에서 알 수 있는 바와 같이 어도 입구부 n-n 단면에서 구한 것으로 유량의 증가에 따라 대체로 증가하고 있다. 그 원인은 격벽이 흐름의 방향을 바꾸고 수심의 증가를 초래하고 있기 때문이다. 유량의 증가에

따른 조도계수의 변화에 어도경사와 격벽의 수도 관계한다.

표 4. 사다리식 어도의 흐름특성

어도경사	유량 (l/sec)	어도내 수심 (cm)			어도 하단부				조도계수
		M1	M2	M3	유수단 면적 (cm ²)	유속 (m/sec)		최대 수심 (cm)	
						평균	최대		
0.1/9.0	14.6		9.0		204.0	0.71	0.75	3.5	
	29.9	13.8	11.3	9.2	300.9	0.99	1.08	5.5	0.0584
	53.8		23.0	13.5	498.0	1.08	1.24	8.0	
0.5/9.0	14.6	11.0		6.5	159.0	0.92	1.23	3.0	
	29.9				319.0	0.94	1.42	6.5	
	37.9	22.0	16.0	12.5	315.0	1.20	1.53	7.0	0.0836
	53.8	28.0	23.0	14.0	426.0	1.26	1.74	9.5	0.0877
1.0/9.0	14.6	14.0	7.0	7.0	135.0	1.08	1.40	3.0	0.0620
	29.9	20.0	12.0	12.0	240.0	1.24	1.68	5.5	0.0524
	37.9	22.0	13.0	12.5	288.0	1.32	1.64	6.5	0.0598
	53.8	27.0	17.0	16.5	345.0	1.56	1.92	7.5	0.0727
1.5/9.0	14.6	15.0	8.0	7.5	105.0	1.39	1.63	3.0	0.0786
	29.9	24.0	13.0	12.0	210.0	1.42	1.94	4.5	0.1030
	37.9	28.0	15.0	15.0	250.0	1.52	1.96	6.5	0.1030
	53.8	31.0	17.0	17.0	285.0	1.89	2.13	7.0	0.1096

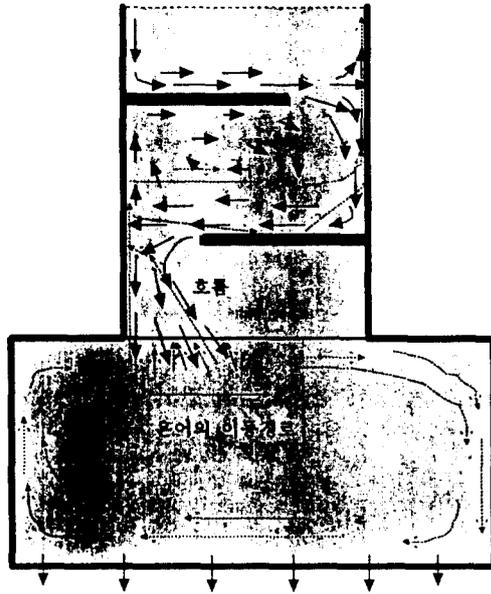


그림 3. 사다리식 어도의 흐름분포와 어류의 이동경로

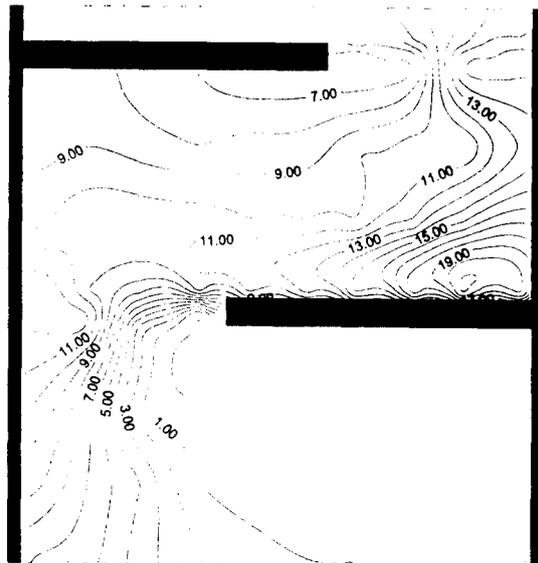


그림 4. 사다리식 어도내 입구부 수심분포
(유량 37.9 l/sec, 어도경사 0.5/9.0)

4.1.2 계단식 어도

계단식 어도에서 흐름상태는 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 1) 낙하류 (plunging flow)
- 2) 천이류 (transient flow)
- 3) 표면류(streaming flow)

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 계단식 어도에서 낙하류 상태는 유량이 적어 웨어 정부에서 낙하류가 형성되어 pool내로 잠입하는 상황에 해당하며, 표면류 상태는 유량이 매우 많아 어도내 각 웨어 정부를 연결한 선 상부에 하류방향으로 흐름이 형성되는 경우이다. 천이류는 낙하류 상태와 표면류 상태가 공존하는 경우이다. 우리나라 어도의 대부분은 어류소상 시기가 하천내 흐름이 저수기 혹은 갈수기에 해당하므로 유량이 작아 계단식 어도는 낙하류 상태가 많으나 이 시기에 천이류 상태도 발견된다. 천이류 상태는 어도가 설치된 보에서 어도로 충분한 유량이 흐를 수 있도록 잘 관리한 경우에 해당한다. 본 연구에서는 계단식 어도의 흐름이 낙하류 상태로서 경사의 변화에 따른 격벽간 낙차와 어도입구부 낙차를 변화시키면서 실험하였다. 낙하류 하부 pool에서는 거품이 발생하였으며 이는 어류의 소상상태에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

계단식 어도의 월류부 유량은 Katopodis 에 의하면 다음 식 (3)과 같이 무차원값으로 표현되며, 월류부 수심과 웨어두께의 비가 2이상인 경우에는 0.22~0.31의 범위에 있다고 하였다. 낙하류 상태에서는 \overline{Q}_i 가 0.25보다 작을 때 안정하며 본 연구에서는 무차원 유량 \overline{Q}_i 가 다음 표 5와 같이 0.22보다 작은 값으로 되었다. pool내의 흐름은 매우 안정한 상태였다. 즉 상하류 pool간의 흐름은 서로 간섭하지 않았다. 이는 유량이 어도규모에 비하여 작기 때문인 것으로 판단된다.

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

여기서 b 는 수로폭 (m), S 는 어도경사, L 는 pool길이 (m), g 는 중력가속도 (m/sec) 이다.

계단식 어도에서 낙하류 상태의 월류유량은 다음 식 (4)와 같은 웨어공식으로 부터 구할 수 있다.

$$Q = 0.61\sqrt{gbh^3} \quad (4)$$

여기서 h는 월류부수심이다.

표 5. 계단식 어도의 흐름특성

어도경사	유량 (l/sec)	웨어수심 (cm)	무차원유량
0.75/9.0	29.8	1.85	0.213
	53.8	4.15	0.171
1.0/9.0	29.8	1.85	0.213
	53.8	4.30	0.165
1.5/9.0	14.6	1.30	0.149
	29.8	2.50	0.158
	37.9	2.60	0.193

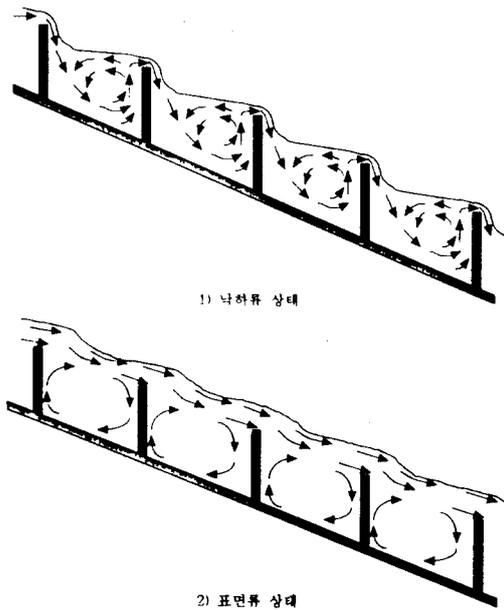


그림 5. 계단식 어도의 흐름상태

4.2 어류소상특성

어도실험에 있어 어류특성 조사 항목은 소상 어류의 전장, 체장, 중량, 체고, 어류의 이동경로, 어도 내에서의 체류시간, 어도를 이용한 어류 개체수 등으로서 어도기능 분석에 반드시 필요하다

본 연구에서는 중소하천의 취수보에 설치된 어도의 수리실험을 위하여 소하성 어류인 은어와 송어의 치어를 어도모형 하류부 저류지에 투입하여 일정시간 경과후 어도 상류부의 저수지까지 소상한 어류의 개체수와 전장, 체장, 중량을 각각 측정하였다. 각 어도형상에 대한 어류의 소상능력을 파악하기 위하여 소상율과 소상능력을 다음 식 (5) 및 (6)으로부터 구하여 분석에 사용하였다.

$$Mr = \frac{n}{T} \quad (5)$$

$$Mc = \frac{n}{WT} \quad (6)$$

여기서 n : 실험어종의 소상 마리 수

T : 실험에 소용된 시간 (hr)

W : 소상한 어류의 평균중량 (g)

Mr : 소상율 (n/hr)

Mc : 소상능력 (n/hr/g)

소상율은 식 (5)와 같이 단위시간당 소상한 어류 개체수로 정의 하였으며, 어종간 소상특성 비교를 위해서 식 (6) 과 같이 소상한 어류의 평균 중량당 소상율로 소상능력을 정의하였다.

4.2.1 사다리식 어도

사다리식 어도에서 각 은어와 송어의 소상 경로는 그림 3과 같이 유속이 약하고 적당한 흐름이 있는 곳을 이용하여 상류로 이동하였다.

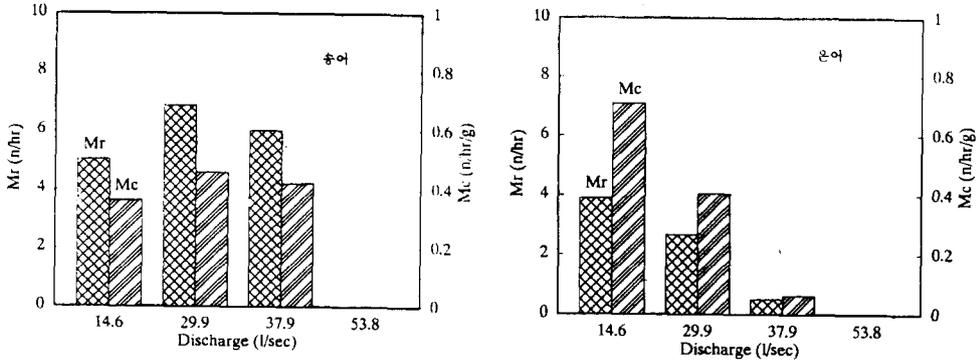
그림 6과 7은 사다리식 어도에서 어도하단부 즉 입구부와 하류부 pool사이의 낙차가 없을 때 유량과 어도경사에 따른 은어와 송어의 소상특성을 나타낸 것으로서 어도경사가 0.5/9.0 인 경우에 은어는 유량이 증가하면 소상능력은 현저하게 감소하고 송어의 소상능력은 약간씩 커지는 경향을 보이고 있다. 이는 유

량 증가에 따른 유속 증가 때문이다. 어도경사가 1.0/9.0, 1.5/9.0 일 때 은어는 유량의 크기에 관계 없이 한 마리도 소상하지 않았으나 오히려 송어는 유량의 증가시 어도경사가 작을 때보다도 어도경사가 큰 경우에서 현저하게 증가하는 추세를 보여주고 있다. 여기서 알 수 있는 것은 사다리식 어도에서 은어는 경사와 유량이 증가하면 소상이 어려워지고 송어는 경사가 증가하고 유량이 감소하면 소상이 곤란하게 된다는 사실이다. 유량과 경사가 증가하면 유속이 증가하게 되므로 은어나 송어는 유속이 커지면 그림 7에서도 알 수 있는 바와 같이 소상율이 떨어지게 된다. 특히 은어는 이에 민감한 반면 송어는 약간 둔감한 편이다. 이는 송어는 지속적인 힘이 좋은 반면 은어는 순간적인 힘이 좋기 때문인 것으로 판단된다.

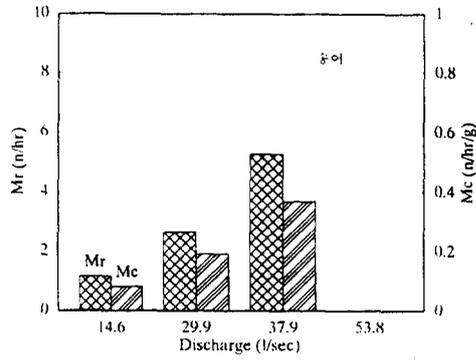
경사에 따른 은어와 송어의 소상을 보면 그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 은어는 경사가 1.0/9.0 이상인 경우에는 소상하지 않았으며, 송어는 어도경사가 커짐에 따라 소상율이 줄어드나 유량이 증가함에 따라 같은 어도경사에서 유량이 크면 소상율이 증가하는 것으로 나타났다.

그림 8은 어도 하단부와 하상 pool사이의 낙차에 따른 은어의 소상을 나타내는 것으로서 송어는 소상하지 못하고 있다. 낙차가 커지면 소상이 어려워지고 유량이 증가하면 소상율이 약간 증가하는 것으로 보인다. 따라서 사다리식 어도 하단부에서 낙차가 발생하면 은어보다는 송어가 소상이 곤란해지고 은어도 소상에 어려움을 겪게 된다.

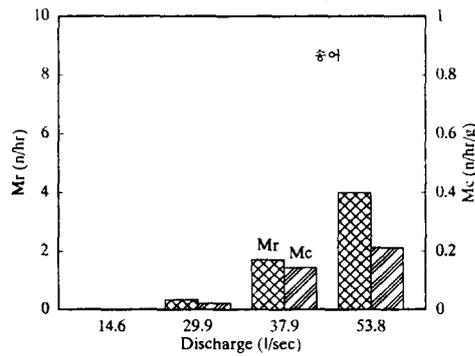
이상의 결과를 통하여 볼 때 사다리식 어도에서 은어는 유량이 증가하면 소상이 어렵고, 송어는 유량 감소에 따라 소상이 어려운 반면 은어나 송어 모두 어도경사가 증가함에 따라 소상이 어려워지나 송어보다는 은어가 어도경사의 증가에 더 곤란함을 느끼게 된다. 오히려 송어는 어도경사가 증가하더라도 유량이 증가하면 소상율이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 취수보 하류부 하상저하나 세굴에 의하여 어도 하단부에 낙차가 발생하면 은어나 송어 모두 소상이 어려워 지지만 특히 송어는 이에 대하여 매우 취약해 보인다.



(a) 어도경사 0.5/9.0

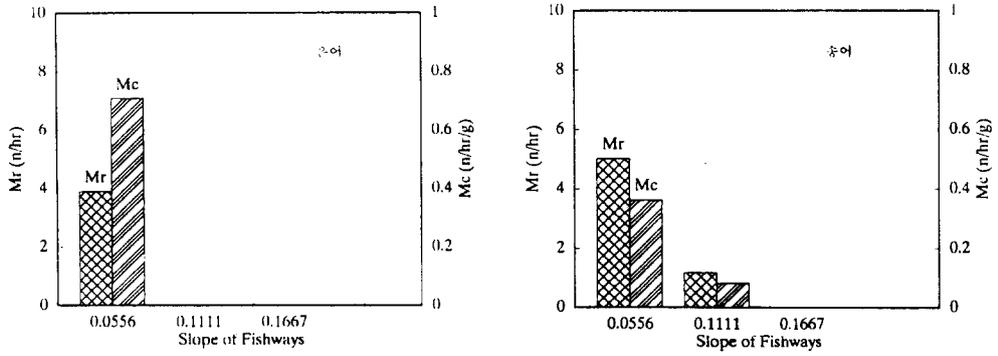


(b) 어도경사 1.0/9.0

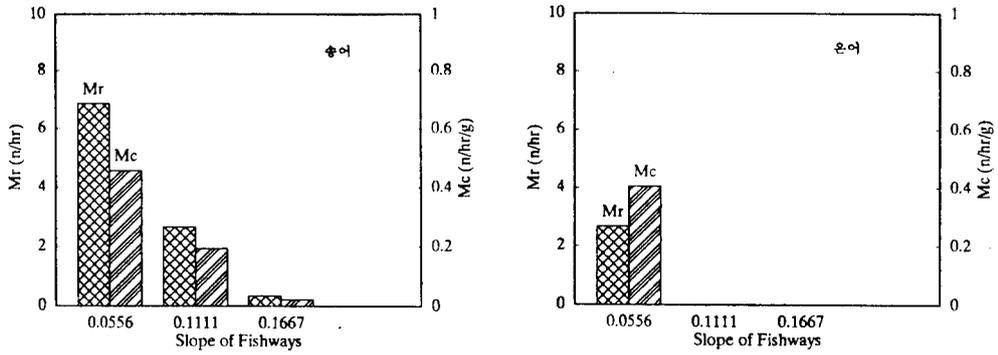


(c) 어도경사 1.5/9.0

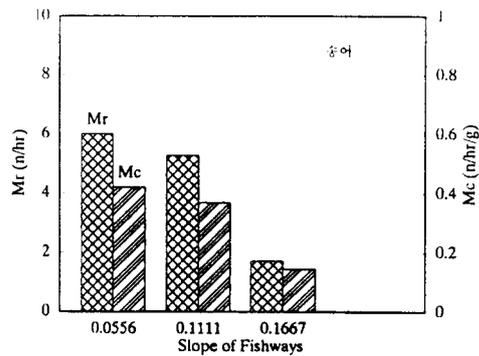
그림 6. 유량의 변화에 따른 소상



(a) 유량 14.6 l/sec

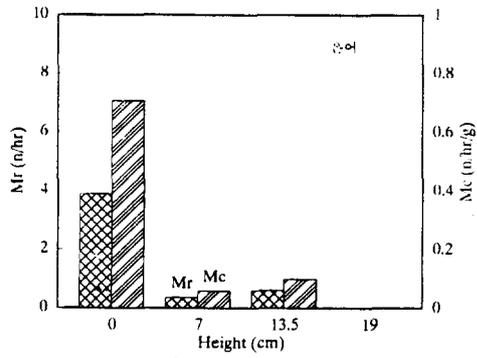


(b) 유량 29.9 l/sec

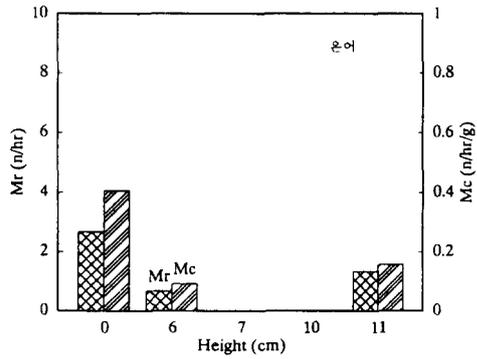


(c) 유량 37.9 l/sec

그림 7. 어도경사의 변화에 따른 소상



(a) 유량 14.6 l/sec



(b) 유량 29.9 l/sec

그림 8. 어도하단 낙차에 따른 소상

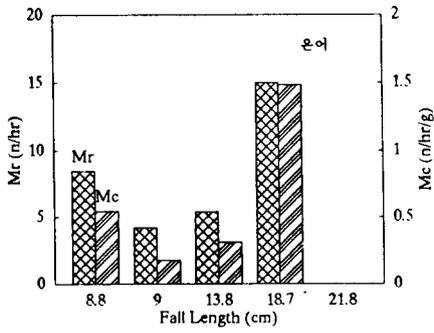
4.2.2. 계단식 어도

본 연구에서는 계단식 어도흐름이 낙하류 상태를 보이고 있기 때문에 계단식 어도를 이용하여 어류가 소상하기 위해서는 기본적으로 소하성 어류의 도약능력이 중요한 변수가 된다. 사다리식 어도에서는 하류부 하상저하 또는 국부세굴에 따른 어도하단의 낙차 발생시 어류가 어도를 이용하여 소상하기 위해서는 어도 하류부 pool에서 어도로의 진입을 위한 도약능력과 동시에 도약이후 어도 입구부의 강한 흐름을 충분히 극복할 수 있는 순간적인 돌파력 및 지구력이 필요하게 된다. 그러나 계단식 어도에서는 단지 도약능력 만이 필요하게 된다. 어도에 진입한 어류가 힘이 부칠 경우에는 어도내 각 pool에서 휴식을 취하여 피로회복을 한 후에 상류의 pool로 이동할 수 있다. 본 연구에서는 어도 하류부의 웅덩이와 계단식 어도 사이의 낙차에 변화를 주어 실험하였으며, 어도로 진입한 경우와 어도를 통하여 상류 저수지로 소상한 경우를 구분하여 정리하면 표 6과 같다.

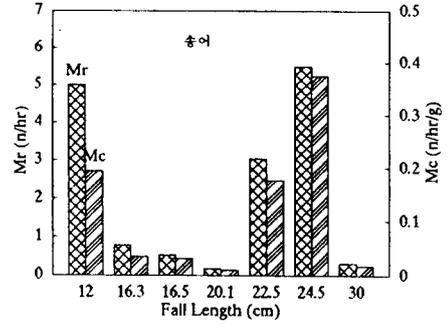
그림 9 (a)는 계단식 어도로 진입한 은어를 나타낸 것으로서 낙차가 18.7cm 유량이 37.9 l/sec일 때 최대를 보이고 있으며, 낙차가 21.8cm 이고 유량이 29.9 l/sec 일 때는 전혀 진입하지 못하고 있다. 그림 9 (b)는 송어의 어도내 진입을 나타내는 것으로서 낙차가 24.5 cm, 유량이 14.6 l/sec 일 때 최대의 어도내 진입특성을 보여주고 있다. 그림 10은 은어와 송어의 소상특성을 나타내는 것으로서 유량이 29.9 l/sec 인 경우 이다. 이상에서도 알 수 있는 바와 같이 계단식 어도에서는 어도내 진입 어류가 모두 상류로 소상한다고 볼 때 은어가 송어에 비하여 강한 소상능력을 보여 주고 있다고 할 수 있다. 그러나 계단식 어도의 낙차가 20 cm 이상으로 클 경우에는 송어가 은어보다 큰 소상능력을 보여 준다.

표 6. 계단식 어도의 어도내 소상특성

어종	낙차 (cm)	유량 (l/sec)	어도내 진입		어도를 통한 소상	
			소상율 (n/hr)	소상능력 (n/hr/g)	소상율 (n/hr)	소상능력 (n/hr/g)
은어	8.8	53.8	8.451	0.545	1.871	0.117
	9	29.9	4.229	0.177	0.057	0.003
	13.8	29.9	5.391	0.313	0	0
	18.7	37.9	15.0	1.485	0	0
	21.8	29.9	0	0	0	0
송어	12.0	53.8	5.0	0.194	2.50	0.116
	16.3	53.8	0.783	0.035	0.174	0.007
	16.5	29.8	0.526	0.031	0.263	0.016
	20.1	29.9	0.172	0.010	0.129	0.008
	22.5	37.9	3.045	0.176	2.328	0.143
	24.5	14.6	5.50	0.374	0	0
	30.5	29.9	0.313	0.017	0.188	0.012



(a) 은어



(b) 송어

그림 9. 계단식 어도에서 낙차에 따른 소상

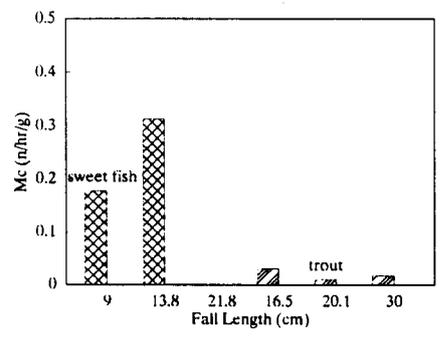


그림 10. 계단식 어도에서 낙차에 따른 은어와 송어의 소상 (유량 29.9 l/sec)

5. 종합 및 결론

어도시설은 하천에 수공구조물의 건설로 인한 생태환경 파괴를 최소화시키기 위한 하천생태 수리시설이라고 할 수 있다. 우리나라의 어도는 하천의 특성이나 어도시설의 수리적 특성을 충분히 파악하지 못하고 건설되어왔다. 특히 대부분의 어도가 우리나라 동해안 지역의 중소하천이라고 하는 하천규모가 작고 극히 제한된 지역에 있어서 하천공학자의 주목을 끌지 못하였다. 최근의 우리나라에서 주목을 받고 있는 하천생태 환경공학 분야에서 어도 및 보와 관련된 다양한 연구가 필요하다.

우리나라의 취수보에 설치된 기존의 어도에 대한 은어와 송어를 투입하여 실시한 수리실험 결과 사다리식 어도와 계단식 어도가 각각 독특한 특성을 지니고 있다. 수로식인 사다리식 어도는 경사면을 통하여 발생하는 흐름의 유속을 완화시키기 위하여 격벽을 설치함으로써 어류의 소상을 가능하게 하는 것으로 유속에 대한 돌진능력과 지구력이 좋은 어류에 적합하다고 할 수 있다. pool과 웨어로 이루어진 계단식 어도는 도약능력있는 어류에게 유리한 어도라고 할 수 있다. 특히 지구력은 약하나 도약을 선호하는 어종에게 적합한 어도가 계단식 어도 이다.

어도의 경사가 크면 사다리식 어도에서는 유속이 크게되고 계단식 어도에서는 웨어간 낙차가 커서 힘이 좋은 송어가 은어보다 유리하다. 또한 하상경사가 작은 경우에는 사다리식 어도에서는 어도로 흐르는 유량이 많아지면 은어보다 송어가 유리하고 유량이 적은 경우에는 송어보다 은어가 유리하다고 할 수 있다. 계단식 어도에서 은어의 도약능력은 18.7cm 에서 21.8cm 사이에서 한계를 보이고 있고 송어는 30cm에서도 도약능력을 보여주고 있어 이에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

본 연구는 인공부화한 실험어류를 일정기간 동안 옥외에서 적응시킨 후 일광 조건하 어도에서 실험한 것으로서 유량이 적은 경우이다. 즉 계단식 어도에서 흐름은 낙하류 상태이고 사다리식 어도에서는 어도 경사가 1.5/9.0 으로 매우 크고 유량이 29.9 l/sec 이하의 경우 어도 바닥 일부가 드러나는 등의 흐름특성을 보여주는 경우에 대한 것이다. 따라서 유량이 매우 많고 급경사인 경우, 계단식 어도의 경우 표면류이고 사다리식 어도의 경우 어도내에 충분한 pool이 형

성되는 조건에 대한 실험도 필요하다.

어도에 대한 수리실험은 실험의 목적이 기존의 어도에 대한 기능분석을 위한 것인지 혹은 새로운 어도형상을 개발하기 위한 것인지에 따라서 모형의 규모를 실제규모와 축소규모로 할 것인지를 판단하여야 한다. 축소규모 어도모형으로 하여야 할 경우에는 어도모형에서 실험어류의 생태특성이 잘 반영될 수 있도록 수리실험의 생태상사를 주의하여 실험을 하여야 한다. 이때에는 실험어류의 돌진속도 또는 순항속도를 실험 어류의 체장과 관련지어 생태학적 상사를 고려할 수 있을 것이다.

또한, 어도의 기능에 영향을 미치는 하천요인으로서의 취수보 하상저하를 충분히 반영할 수 있는 어도설계가 되도록 어도설치 취수보 하류부의 하상변동 또는 어도하류부 국부세굴에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 박상덕, '수리실험에 의한 어도의 기능분석', 대한토목학회 학술발표회 논문집 (II), pp.51-54, 1996.
2. 건설부, 국립건설시험소, 취수보의 수리특성 조사실험 보고서, 기술연구-90-4-8(510)
3. 김진홍, 김철, '어족소상을 위한 계단식어도 수리특성에 관한 연구', 수문학회지, 제27권 제2호, pp.63-72, 1994.
4. 이종남, 신문섭, 수산토목공학, 경문사. pp.375-460, 1987.
5. 廣頼利雄, 中村中六, 魚道の設計, 山海堂, 1991.
6. 中村俊六, 魚道のはなし-魚道設計のためのガイドライン, 山海堂, 1995
7. 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六, 河川生態環境工學, 東京大學出版會, 1995
8. Rajaatnam, N., C. Katopodis, and A. Mainall, 'Plunging and Flows in Pool and Weir Fishways', J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp.939-945, 1988.
9. Rajaatnam, N., G. V. der Vinne, and C. Katopodis, 'Hydraulics of Vertical Slot Fishways', J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 112, No. 10, pp. 909-927, 1986.

10. Clay, C. H., Design of Fishways and Other Fish Facilities, 2nd Ed.,
Lewis Pub., 1995.