

어도와 어류 역학

박상덕 (강릉대학교 토목공학과 부교수)

1. 서론

유역의 생태환경에 지대한 영향을 미치는 인자인 하천은 급격한 산업화와 경제성장 과정을 거치는 동안 그 기능변화와 생태환경 파괴를 경험하고 있다. 하천이 지니고 있는 본래의 기능은 풍부한 수량, 깨끗한 수질, 하천에 의지하여 살아가는 다양한 생물이 서로 조화를 이룰 때 잘 발휘될 수 있다. 댐이나 취수용 보와 같은 대부분의 하천횡단 수공구조물은 하천의 수생태환경 교란과 파괴를 초래하고 있다. 즉 이러한 수공구조물은 하천에 서식하는 회유성 어류가 생존을 위하여 산란장으로 이동하거나 성장을 위하여 먹이가 풍부한 서식처에 접근하기 어렵게 함으로써 하천에서 어류의 개체수를 급격히 감소시키거나 자취를 감추게 하는 역할을 한다. 하천개발에 따라 부수적으로 나타날 수 있는 하천생태계 교란과 파괴를 최소화하거나 폭포나 급류와 같이 어류의 이동에 대한 장애물을 극복하게 하여 하천에서 어종의 보존이나 어류분포의 확산을 조장할 수 있도록 어류의 이동통로를 인위적으로 개설한 하천생태환경 수공시설물(hydraulic structures)을 어도(fishway)라고 한다.

최근 어도에 관한 연구는 현대 수리학과 어류학이 비약적으로 발전한데 힘입어 크게 발전하고 있으나 아직도 어류의 생물학적 요구조건을 바탕으로 한 어류역학에 대한 이해의 부족으로 인한 한계를 지니고 있는 실정이다.

2. 어도의 종류와 수리학

2.1 어도의 종류

하천에서 어류의 이동에 대한 장애물을 극복할 수 있도록 인공적인 시설을 한 현대적 의미의 어도에 관한 과학적인 조사가 19세기 중엽에 이루어졌다. Katopodis(1982)는 그 후 어도의 형식을 계단식(pool and weir) 어도, vertical slot식 어도, Denil식 어도로 분류하고 있다. 이중에 계단식 어도가 가장 고전적인 어도의 형태라고 할 수 있다. 이러한 어도의 형태는 잠공(orifices)이나 경사로(chute)가 추가되는 형태로 발전하였다. 즉 전면월류 격벽의 중앙 하단에 잠공이 설치된 잠공식 어도와 월류격벽 상단 측면에 물 흐름을 안정적으로 유도하는 경사로를 설치한 chute식 어도로 발전하였다. 1960년대 초에는 계단식 어도의 가장 발전된 형태인 Ice Harbor식으로 발전되었다. Landmark는 전통적인 계단식 어도를 변형하여 월류격벽의 일부를 흐름방향으로 비스듬하게 경사지도록 배치하고 기존의 월류격벽과 경사방향 월류격벽사이에 개구부(slot)을 두는 형태를 고안하였다. 이는 vertical slot식 어도로 발전하였으며 이 어도는 전형적인 계단식 어도의 약점이 되는 어도내 유량 변화에 대한 어도기능의 적응성이 대단히 높다. Denil식 어도는 1908년경 Denil에 의하여 제안되어 그 수리학적인 장점으로 인하여 널리 사용되고 있다. 이 어도는 어도내에서 에너지 감소를 크게 높이고, 어도내 유량변화의 범위와 어도의 경사를 매우 크게 할 수 있는 특징이 있다. Katopodis가 분류한 어도형식은 독창적으로 제안된 대표적인 형태

를 바탕으로 한 것이라고 할 수 있다.

廣瀨利雄과 中村中六(1991년)를 대표저자로 하는 어도의 설계라는 저서에서는 어도의 목적, 어도의 수리학적 기구, 어도의 형상, 어도 설치장소에 따른 어도 종류의 분류를 시도하고 있다. 어도의 목적에 따른 어도의 종류는 소상용 어도, 강하용 어도, 채포용 어도, 선별용 어도, 관찰용 어도로 구분된다. 수리학적 기구에 따라서는 pool식, 수로식, 갑문식, 엘리베이터식, 기타 어도로 구분된다. pool식 어도는 계단식어도, 잠공식어도, vertical slot 식 어도가 있으며 계단식은 격벽식이라고도 하며 vertical slot식 어도는 깊은 도류벽식 어도라고도 한다. 수로식 어도는 환경사 전환수로, 조석부침경사로 어도, 도류벽식 어도 Denil식 어도, 암거식 어도가 포함되고 갑문식은 갑문형 어도, 엘리베이터 형태의 어도가 있다. 여기서 Denil식은 역류식이라고도 한다. 어도형상에 따른 분류는 선형 혹은 나선형으로 어도가 배치되었는지에 따른 것이고 설치장소별 분류는 사방댐, 보, 댐, 하구언 등과 같이 하천횡단 수공구조물의 종류에 따른 것이다.

中村俊六(1995)은 수리구조의 차이에 따라서 pool식, 수로식, 운영조작식, 기타 어도로 크게 분류하고 있다. pool식 어도는 전면월류형, 부분월류형, vertical slot식, 잠공식 어도가 있으며 부분월류형어도는 Ice Harbor형과 노르웨이형이 있다. 수로식 어도는 Denil식 어도, 조석불입 경사곡면식 어도, 도류벽식 어도, 인공하도식 어도가 있다. 운영조작식 어도에는 리프트/엘리베이터식, 갑문식, 펌프식 등이 있다. 갑문식은 순수한 갑문식 어도와 Borland식 어도가 있다. 기타 어도에는 병용식과 혼합식 등의 어도가 있다.

이상에서와 같이 廣瀨과 中村이나 中村俊六이 수리학적 기구에 따라 어도 종류를 분류한 것은 어도내 흐름의 특성을 충분히 고려하지 못한 것으로 보인다. 어도내의 대표적인 흐름분류는 낙하류(plunging flow), 천이류(transient flow), 표면류(streaming flow)라고 할 수 있다. pool식 어도는 격벽에 의하여 어도 내에 pool이

형성되고 이 격벽을 월류하여 물이 낙하하며, 수로식 어도는 어도의 흐름방향으로 연속성을 갖는 표면류가 형성된다고 할 수 있다. 廣瀨과 中村이나 中村俊六에 의하여 pool식 어도로 분류된 vertical slot식 어도는 표면류만 존재하기 때문에 pool식 어도가 아닌 수로식 어도에 포함시켜야 한다. 또한 혼합식은 pool 식이나 수로식 또는 운영조작식 어도의 특징이 두 가지 이상 혼합된 것으로서 평상시 흐름에서 이와 같은 복합적인 흐름특성이 존재하는 경우로 정의한다. Katopodis의 어도종류 구분과 비교하면 계단식은 pool식 어도에 속하고 vertical slot식 어도와 Denil식 어도는 수로식 어도에 속한다고 할 수 있다.

2.2 어도의 수리

어도는 다양한 형태를 갖는 수공구조물이기 때문에 일반적인 방법으로 수리현상을 설명하는 것은 매우 어렵다고 할 수 있다. 어도 내의 흐름은 앞에서도 언급한 바와 같이 낙하류, 천이류, 표면류로 구분될

표 1. 어도의 분류

어도구분	어도명칭	주요특징
pool식	계단식 어도 전면월류식 어도 부분월류식어도 Ice Harbor식 어도 잠공식 어도	격벽에 의하여 pool이 형성되고 평상시 흐름은 낙하류 상태임
수로식	사다리식어도 vertical slot식 어도 Denil식 어도 culvert식 어도 계단돌망태식 어도 평면수로식 어도 황구배 돌볼입식 어도 인공하도식 어도	유량에 관계없이 표면류 흐름상태가 수로를 따라 존재하고 그 연속성이 유지됨
운영조작식	엘리베이터식 어도 갑문식 어도 fish pump식 어도 Borland식 어도	인위적인 장치나 시설의 작동으로 어류가 소상
혼합식	기능혼합식 어도 기능불변형 어도 표준어도 남경수리학 연구소식 기능변화형 zig-zig형 혼합식 어도 병렬배치식 어도 사다리-계단식 어도	pool식, 수로식, 운영조작식 어도의 중요한 특징이 2가지 이상 혼합되어 있음

수 있다. 낙하류는 월류격벽에서 물이 낙하하고 그 흐름의 형태가 월류격벽 상하류간에 불연속되어 있는 경우이고, 표면류는 수로방향을 통하여 일반 수로와 같이 연속적인 흐름을 유지한다. 천이류는 낙하류와 표면류 사이의 흐름영역이다. 계단식 어도는 평상시에는 낙하상태를 보이지만 유량이 많이 증가하면 천이상태를 거쳐 표면류로 바뀔 수가 있다. 이때의 표면류는 격벽으로 분할된 pool내의 흐름과 월류부상단의 흐름이 서로 별개로 작용하고 마치 바닥의 조도가 매우 높은 일반 수로의 흐름과 같게 된다.

어도의 수리특성 중에 중요한 것은 유량과 유속분포라고 할 수 있다. 이들은 어도의 어류이동기능을 충분히 발휘할 수 있는가를 좌우하는 가장 중요한 변수이다. 어도를 이용하는 어류의 이동방법, 이동능력, 어류의 체장과 체고 등에 따라서 적절한 유속의 범위와 유수단면적이 달라질 수 있다. 따라서 유속과 어류의 생태학적 특성간의 관계를 밝히는 연구가 필요하다. 실험에 의하면 은어 치어의 유영능력은 유속이 0.5~0.6m/sec에서 최대를 나타내는 것으로 알려져 있다. 그림 1은 vertical slot식 어도의 slot에서의 유속분포를 나타내는 것으로서 일반적인 개수로의 유속분포와는 달리 어도의 바닥 근처에서 가장 유속이 크고 표면으로 갈수록 유속이 작아진다. 따라서 어류가 이 단면을 통과할 때에는 자기가 좋아하는 유속영역을 나타내는 수심으로 유영하여 상류로 이동하게 된다. 어도내 어떤 단면에서 유속분포의 다양성이 존재하는 어도가 이를 이용하려는 어류의 다양성을 충족시킬 수 있는 가능성이 높아진다. 어도의 유량은 많을수록 좋다. 그 이유는 회유성 어류가 어도 입구를 쉽게 찾는데 도움이 되기 때문이다. 수로식 어도의 유속은 Manning의 평균유속공식이나 Chezy의 평균유속공식을 적용하여 구할 수 있으나 어도형태에 따른 조도계수에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 실물규모인 사다리식 어도에 대하여 필자가 실험한 결과에 의하면 조도계수는 유량이 증가하거나 어도의 경사가 증가하면 커지는 것으로 나타났다. Katopodis(1992)에 의하면 vertical slot식 어도의 유량은 다음과 같은 식 (1)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{Q}{\sqrt{gS_0}b_0^5} = a\left(\frac{y_0}{b_0}\right) + \beta \quad (1)$$

여기서 Q는 어도유량, g는 중력가속도, S₀는 어도의 바닥경사, b₀는 slot의 폭, y₀는 수심, α와 β는 계수이다. 낙하류가 존재하는 계단식 어도의 월류격벽을 통과하는 유량공식은 웨어공식으로부터 구할 수 있으며 Katopodis(1992)에 의하면 흐름상태에 따라 다음 식 (2)~(4)와 같이 된다.

$$\text{낙하류} : Q_w = 0.16\sqrt{gBh^{1.5}} \quad (2)$$

$$\text{천이류} : Q_w = 0.25\sqrt{gBS_0L^{1.5}} \quad (3)$$

$$\text{표면류} : Q_w = 1.5\sqrt{gL/dBh^{1.5}} \quad (4)$$

여기서 h는 월류격벽의 월류수심, B는 월류격벽의 폭, L은 월류격벽간의 거리, d는 월류격벽상단을 기준으로 한 표면류의 수심이다. 잠공이 있는 경우에는 잠공을 통과하는 유량은 기본적으로 식 (1)과 같은 형태로 표현될 수 있으며 여기서 b₀는 잠공의 폭, z₀는 잠공의 높이, y₀는 잠공바닥을 기준으로 한 수심이다. 수면이 잠공의 높이보다 높지 않으면 vertical slot식 어도의 유량공식과 같게 된다. 잠공의 높이보다 수면이 높으면 수중젓의 흐름이 되고 Katopodis의 실험영역에서는 α=0, β=2.25이다. Denil 식 어도에서 유량은 다음 식 (5)와 같이 상대수심 y₀/b₀에 대한 멱함수형태로 된다. 여기서 b₀는 어도내 측벽에 붙은 저류관 사이의 어도내경이다.

$$\frac{Q}{\sqrt{gS_0}b_0^5} = a\left(\frac{y_0}{b_0}\right)^2 \quad (5)$$

culvert식 어도의 유량도 식 (5)와 같은 형태이나 상대수심의 b₀는 culvert의 내경이다. 어도내 최대유속의 크기를 보면 vertical slot식 어도에서는 slot에서 발생하고 그 크기는 접근유속의 영향이 작다고 할 때 근사적으로 $\sqrt{2gh}$ 가 된다.

어도의 경사는 어도의 유속과 수심에 밀접한 관계

가 있으며 경사가 급하면 어도의 길이가 짧아져 경제적이거나 유속이 크고 통수단면의 수심이 작아 지게 되어, 어도의 어류이동기능이 나빠지게 된다. 어도 내의 흐름은 강한 난류에 의한 에너지 소산이 발생하게 되는데 이러한 점을 특히 강조하여 흐름을 약화시켜 어류의 소상이 용이하게 되도록 고안된 것이 Denil 식 어도이다. 즉 어도내 바닥이나 측벽에 부착된 저류판 때문에 경계층의 두께가 커지고 이 내부에서 소상중에 있는 어류가 휴식을 취하기도 한다. 이 어도는 표면유속이 일반적으로 빠른 특징을 지니고 있다.

어도의 형태가 매우 다양하고 어도내에 설치된 격벽의 크기가 다르기 때문에 수리학적 특성을 파악하는 것이 용이하지 않다. 따라서 어도수리모형실험을 실시하게 된다. 어도수리모형 실험에서는 기하학적 상사법칙과 Froude 상사법칙을 적용하여 모형과 원형을 상사시켜 수리특성을 파악하게 된다. 그러나 어류를 대상으로 하는 수리학적 특성의 이해와 동시에 결국에는 그 어도의 어류 소상기능이 어느 정도인지를 판단해야 할 필요가 많기 때문에 어류를 상사시키지 않은 단순한 수리모형실험으로는 충분하지 않다. 어류를 포함한 수리모형은 사실상 불가능하기 때문에 필요한 경우에는 원형규모의 어도에서 다양한 크기의 어류를 대상으로 소상실험을 병행하여야 한다.

2.3 어도기능의 비교

어도의 기능에서 가장 중요한 점은 하류에서 상류로의 소상기능이라고 할 수 있다. 어류의 소상기능은 어도를 이용할 어종의 다양성, 어도기능유지를 위한 유량의 크기와 하천의 유량변화에 대한 다양성, 홍수 및 갈수시의 안정성, 하천경관과의 조화, 어도의 유지관리와 건설비용 경제성을 종합적으로 고려하여 판단되어야 한다. 표 2.는 각 어도의 장단점을 비교한 것으로써

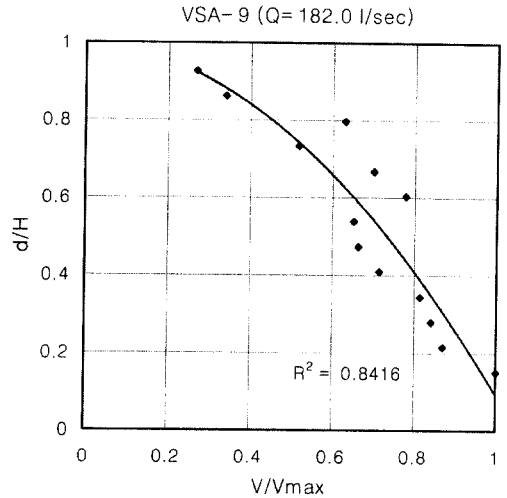


그림 1. vertical slot식 어도의 유속분포 (해양수산부, 1999)

계단식어도는 유량이 많고 경사가 급하여 수위차가 큰 경우에 양호하고 vertical slot식 어도는 어종의 다양성과 어도유량 및 유속분포 측면에서 양호하며, 자연형 전환수로는 많은 분야에서 비교적 우수하나 소요면적이 크다는 것이 단점이다. 따라서 하천부지 또는 인근에 충분한 공간이 확보될 수 있다면 자연형 전환수로식 어도를 설치하는 것이 친자연적 측면에서도 바람직하다고 할 수 있다.

표 2. 주요 어도형식별 장단점 비교 (Eric Pasche and Martin Blank, 1995)

구 분	pool식 어도		수로식 어도		운영조작식 어도
	계단식	Denil식	자연형 전환수로	vertical slot식	엘리베이터식
어도 이용가능 어종 다양성	보통	불량	양호	양호	양호
무척추동물의 어도 이용	보통	불량	양호	보통	불량
소요유량	양호	보통	보통	양호	양호
총 수위차	양호	보통	양호	보통	양호
속도분포의 다양성	불량	불량	양호	보통	보통
과다유량에 대한 수리학적 민감도	양호	양호	보통	양호	양호
소요면적	양호	양호	불량	양호	보통
홍수에 대한 안정성	양호	양호	보통	양호	양호
하천 경관과의 조화	불량	불량	양호	불량	불량
건설비	양호	양호	보통	양호	불량
유지관리비	보통	보통	양호	보통	불량

3. 어도설계

3.1 어도설계 일반사항

어도설계의 성패는 어도형태에 따른 수리학적인 특성과 이를 이용할 어류의 유영특성 및 하천의 거동을 얼마나 잘 파악하는가에 달려 있다고 할 수 있다. 어도의 수리학적인 특성은 결국 수리모형실험을 통하여 확인되어야 하고, 어류의 유영특성으로는 하천에 서식하는 회유성 어류의 종류와 회유시기, 어도내의 선호하는 흐름조건, 어류의 크기 등과 같은 어류의 생태학적 특성을 파악하여야 한다. 기능이 충분히 발휘되지 못하는 어도의 문제는 구조적인 결함과 관리상의 결함으로 분류할 수 있다. 이 중에서 구조적인 문제는 주로 어도 형태의 부적합성으로부터 발생하고 관리상의 문제는 홍수전후 하천상황의 변화와 밀접한 관계가 있다. 따라서 이와 같은 문제가 발생하는 것을 미리 상정하여 설계 당시부터 이를 고려하여야 한다. 예를 들어 홍수가 지나간 후의 어도주변 하상이 크게 변화하였거나 어도내에 유목이나 토사가 다량으로 퇴적되어 있는 경우 어도기능이 저하될 가능성이 많다. 따라서 어도설계시에 어도의 설치로 인한 하상저하를 예상하여 고려하여야 하고 어도내의 구조가 너무 복잡하여 홍수후에 유목이나 토사가 쉽게 퇴적되지 않도록 하여야 한다. 대하천이나 댐에 설치하는 어도에 대해서는 어류가 어도 입구를 찾는 것이 어려울 수도 있기 때문에 회유성 어류를 유인할 수 있는 조건을 미리 염두에 두고 설계하여야 한다.

예를 들어 Denil식 어도는 표면유속이 대단히 크기 때문에 어도 입구부 하천의 유속이 크게 되고 이는 어류를 이곳으로 유인하는 효과를 가져올 수도 있다.

3.2 어도설계절차

어도설계는 하천의 특성이 일관되지 않고 시간적으로나 공간적으로 변화하기 때문에 매우 어려운 문제가 아닐 수 없다. 따라서 하천에 서식하는 다양한 어류가 이용할 수 있는 어도를 실제 하천에 대하여 설계하기 위해서는 다음과 같은 점이 신중히 고려되

어야 한다.

- 1) 어도설치 하천의 유황과 하상의 변동
- 2) 어도를 이용할 어류의 생태
- 3) 어도내 유속분포와 소상 어류의 휴식공간

첫째, 어도설치 하천의 유황은 어도설계에서 가장 기본적인 자료인 어도의 설계유량을 설정하는 데 필수적인 요소이다. 하상변동은 어도설치 후 발생할 홍수에 따른 어도 하류부 하상저하로 인하여 어도입구와 하상사이에 심한 낙차가 발생되거나 하천에서 회유성 어류의 소상경로인 저수로 위치가 변화될 수도 있기 때문에 어도설치 위치결정 및 어도와 저수로부의 연결구간 설계에 고려되어야 할 중요한 사항이다.

둘째, 어도를 이용할 어류의 생태는 하천에 서식하는 회유성 어류의 종류, 회유시기, 회유시기 어류의 크기 및 유영력, 선호하는 소상방법 등과 같은 특성이 달라지기 때문에 어도의 형식선정과 설계유량 결정에 큰 영향을 미친다.

셋째, 어도내의 유속과 휴식공간은 어류의 종류에 따라 돌진속도나 순항속도 같은 유영력이 달라지므로 다양한 형태의 유속분포와 소상중에 있는 어류가 완전한 휴식을 취할 수 있는 공간이 어도설계에 충분히 반영되어야 한다.

이상과 같은 기본적으로 고려하여야 할 사항을 바탕으로 하여 어도설계의 절차를 단계별로 정리하면 표 3.에서처럼 5단계로 요약될 수 있다. 즉, 어도설계의 주요 절차는 기본자료의 수집 및 분석, 어도설계조건 설정, 어도기본설계, 어도상세설계, 어도시설 유지관리계획 설계로 대별할 수 있다. 아무리 어도를 잘 설계한다 하더라도 하천의 회유성 어류에게 어도는 극복해야 할 어려운 관문이 될 수밖에 없다. 따라서 어도를 만들기 이전에 어도설치의 필요성이 생기지 않도록 하천의 개발방법에 대한 치밀한 연구와 검토가 필요하다.

4. 어도설계를 위한 어류생태

4.1 소상어류의 유영정리

어도가 하천의 수공구조물에 의하여 발생된 수생

표 3 어도의 설계절차

제1단계 : 기본자료의 수집 및 분석

- 1) 어도설치 대상 수공구조물에 관한 자료
- 2) 하천의 수문량 및 수리량
- 3) 하천의 수생동물 자료
- 4) 어도설치 지점의 하천이용 및 기타

제2단계 : 어도의 설계조건 설정

- 1) 하천생태유지 기본유량
- 2) 어도의 설계유량 및 어도의 수
- 3) 수공구조물 하류부의 어도설계 기본하상고
- 4) 수공구조물 상류부 및 하류부의 어도설계 기본수위
- 5) 회유성 수생동물의 한계유영속도
- 6) 어도 건설비용

제3단계 : 어도기본설계

- 1) 어도의 기본형식 선정
- 2) 어도의 평면배치 설정
- 3) 어도의 입구부 및 출구부 설계
- 4) 어도 제원의 개략 설계

제4단계 : 어도상세설계

제5단계 : 어도시설 유지관리계획 설계

동물의 이동생태 환경교란을 최소한으로 경감시키기 위한 시설이기 때문에 어도의 설계는 하천의 수리·수문학적 특성 및 생태학적 특성과 어도의 수리학적 특성에 관한 지식을 필요로 한다. 하천의 수리·수문학적 특성은 하천의 수위, 유량, 유사량, 하상구성재료, 취수 및 하천개발 등과 관련된 것이고 하천의 생태학적 특성은 하천에 서식하는 회유성 수생동물의 종류와 크기, 회유의 시기와 조건, 성장과 산란조건 등에 관한 것이다. 어도의 수리학적 특성은 어도내의 수심, 유속, 유수단면적, 어도경사, 유량 등에 관련된 것이다. 결국 어도설계는 수리학적 현상과 생태학적 현상이 결합된 문제라고 할 수 있기 때문에 매우 어려우며 현재까지 발전단계에 있는 분야라고 할 수 있다. 어도와 관련된 수리학적 현상에 대해서는 비교적 많은 연구가 이루어져 왔으나 어도의 기능을 좌우할 수 있는 어류의 생태학적 특성에 관한 연구는 매우 빈약한 실정이다. 따라서 어도설계 문제는 어류의 생태현상에 가장 곤란한 점이 내포되어 있고 할 수 있다. 中村(1995)은 어도설계와 관련하여 소상어의 유영에 관한 3개의 정리와 보조정리를 표 3과 같이 제시함으로써 어도설계에 하천의 생태현상을 고려하도록 하고 있다.

표 4. 소상어의 유영에 관한 정리 (中村俊六, 1995)

- 1) 제1정리 : 물고기는 그 체장에 상당하는 길이밖에 흐름을 인식하지 못한다.
 - 보조정리 - 따라서 충분히 크지 않은 순환에 대해서는 그것을 순환이라고 인식하는 것이 곤란하다.
- 2) 제2정리 : 물고기는 공격·도피·급류소상 등의 긴급시기 이외에는 보통근을 사용하지 않는다.
 - 보조정리 - 순항속도 (혈합근 사용) = 2~4BL/초(질진 속도 (보통근 사용) = 10BL/초
- 3) 제3정리 : 물고기가 꼬리치는 폭은 체장의 반을 넘지 못한다.
 - 보조정리 - 따라서 체장의 1/2폭의 통로가 있으면 충분하다.

제1정리에서는 물고기가 횡 방향의 흐름에 무기력하기 때문에 평소에 흐름방향으로 방향을 잡게된다는 것을 설명하고 있다. 어류는 산소의 공급이 계속되는 한 운동을 계속할 수 있는 혈합근과 산소의 공급이 없이 운동하지만 사용하면 할수록 유산과 같은 독소가 발생하여 체내에 축적되는 보통근을 가지고 있다. 따라서 제2정리에서와 같이 특별한 경우 이외에는 물고기가 보통근을 사용하려고 하지 않는다. 제3정리는 물고기가 꼬리치는 진폭은 보통근을 사용하여 왕성한 기운으로 헤엄칠 때조차 체장의 1/2를 넘지 않기 때문에 어류소상에 필요한 어도내 최소한의 통로는 체장의 1/2정도보다 큰 폭이어야 한다는 것을 설명하고 있다. 中村은 이상과 같은 정리를 어도 설계문제에 적용함으로써 각 정리와 보조정리의 타당성을 입증하였다.

여기에서 BL은 어류의 체장이다. 어류는 하천의 흐름이 자신의 순항속도에 맞는 곳을 찾아 유선에 평행하게 유영한다. 따라서 어도의 위치는 인근에 순환류가 발생되지 않고 유선이 복잡하지 않으며 유속이 순항속도에 어느 정도 부합하는 곳에 잡는 것이 좋다. 순환류가 인근에 있어서 어류가 순환류 속에 빠져들면 헤어나기 어렵고, 유속이 너무 느린 곳에서는 어류가 소상하려는 의욕을 상실할 수도 있다. 어도내에 작은 규모라 하더라도 어류가 소상할 수 있는 확실한 통로의 확보가 필요하고 휴식장소를 소상통로와 분리하여 확보할 수 있는 어도규모가 되어야 한다. 어도 내의 휴식공간은 넓이와 같은 규모의 문제보다도 확실히 안전하게 휴식을 취할 수 있는 곳이어

야 한다. 소상통로에서 흐름이 매우 복잡해도 이를 통과한 어류가 안전하게 휴식할 최소한의 공간이 주어진다면 어류가 소상할 수 있는 여도가 될 것이다. 휴식공간의 규모는 어류의 크기에 따라 달라질 것이다. 따라서 소형어류의 종류가 중요하게 된다.

4.2 회유어류의 분류

하천에 서식하는 어류의 분류는 계통분류법과 생태학적 분류법으로 크게 나눌 수 있다. 계통분류법은 전통적인 생물분류법으로서 진화상의 친인척 관계를 바탕으로 하여 속, 과, 목 등으로 표시한다. 생태학적 분류법은 어류의 생활방식에 착안한 것으로서 遊泳魚와 底生魚, 肉食魚·藻食魚·雜食魚 등과 같이 분류하는 것이다.

회유어는 생태학적 분류방법에 의한 구분이며 그림 2와 같이 회유의 방향 또는 목적에 따라 구분한다. 이외에도 회유어는 담수나 해수와 같은 물의 종류나 그곳에서의 체류나 통과 등에 따라서도 분류될 수 있다. Myers(1949)에 의하면 회유방향에 따라서는 降河性 회유어, 溯河性 회유어, 兩側性 회유어로 분류한다. 여기서 회유방향은 호수 또는 바다와 하천을 정기적으로 오가는 것을 의미한다. 강하성 회유어는 일생의 대부분을 하천에서 보내고 산란을 위하여 하천을 따라 내려가 호수나 바다로 들어가는 어류이다. 소하성 회유어는 이와는 반대로 산란을 위하여 호수나 바다에서 하천을 따라 올라가는 어류이며, 양측성 회유어는 산란과는 무관하게 성어가 이전에 하천과 바다 또는 호수 사이를 왕복하는 어류이다. 後藤(1987)은 소하성 회유어를 I, II, III의 3가지 형으로 세분하였다. I형은 회유성 어류가 산란기에 하천으로 올라와 산란하여 부화한 치어가 바로 하천에서 바다로 내려가는 어류이고, II형은 성어가 산란기에 하천으로 올라와 산란하여 부화한 유치가 일정기간을 담수역에서 지낸 후 바다로 들어가는 어류이며, 제 III형은 산란기 이전의 미성숙한 회유성 어류가 하천으로 소상하여 성장한 후 산란하여 부화한 치어가 일정기간 담수에서 생활한 후에 바다로 들어가

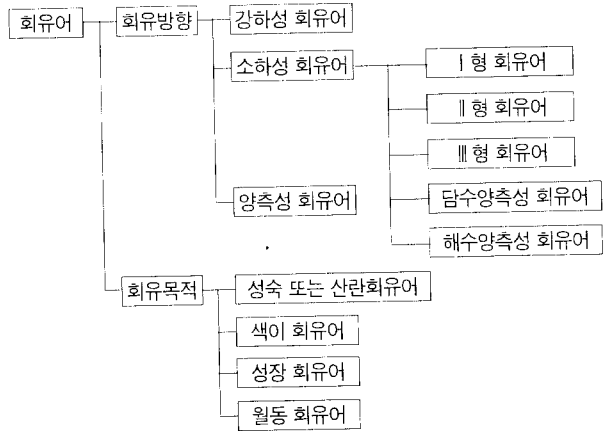


그림 2. 우회유성 어류의 생태학적 분류

는 어류이다. McDowall(1990)은 양측성 회유어를 담수양측성 회유어와 해수양측성 회유어로 세분하고 있다. 산란장이 담수역에 있는 것을 담수양측성이라고 하고 해수양측성 회유어는 해수역이나 기수역에 산란장이 있는 것을 가리킨다.

회유어는 회유의 목적에 따라 성숙 또는 산란 회유어, 색이 회유어, 성장 회유어 및 월동 회유어 등으로 구분할 수 있다. 성숙 또는 산란 회유어는 회유성 어류가 성어가 되어 산란을 위해 산란장으로 이동하는 어류이다. 대표적인 산란 회유어는 은어, 연어, 뱀장어, 황어 및 송어 등이다. 색이 회유어는 먹이가 풍부한 지역을 찾아 이동하는 어류이다. 성장 회유어는 산란장에서 부화된 치어가 성장하기에 적합한 곳으로 이동하는 어류이며, 월동 회유어는 하천에서 부화한지 얼마 되지 않은 은어 유치어가 동절기를 보내기 위해 수심이 깊고 수온이 적당한 기수역 또는 해안으로 이동하는 것과 같은 어류를 말한다. 현재 우리나라에 서식하는 회유성 어류 중 바다와 하천을 오가는 해수성 회유어 대해서는 대부분 밝혀져 있으나 호수와 하천을 오가는 담수성 회유어에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다.

4.3 어류의 이동과 유영환경

하천에 서식하는 어류는 어종에 따라 어느 한 곳에 정착하는 토착어종과 여러 가지 목적에 따라 필요로

하는 곳을 왕래하는 회유성 어류로 분류할 수 있다. 종에 따라서는 회유성 어류이던 것이 토착어종으로 바뀌는 경우도 있다. 예를 들어 산천어는 송어와 같이 바다와 하천을 왕래하는 해수성 회유어이었으나 陸封化된 토착어로 변화했다. 하천에 서식하는 어류의 이동은 그 이동방법이 대체로 다음과 같이 3가지로 분류될 수 있다.

- ① 유영이동 - 순항이동, 돌진이동
- ② 도약이동
- ③ 부착이동

유영 이동성이란 수중에서 유영에 의하여 원하는 장소로 이동하는 것을 말하며 여기에는 中村(1995)의 유영에 관한 제2정리의 보조정리에서 알 수 있는 바와 같이 血合筋을 사용하여 이동하는 것을 말하며 대체로 체장의 2~4배 속도(BL/sec)로 이동하는 순항이동과 긴급시기에 普通筋을 사용하여 체장의 10배 속도(BL/sec)로 이동하는 돌진이동으로 구분할 수 있다. 대부분의 어류가 이와 같은 유영이동을 하며 유영을 위한 추진력은 몸통과 꼬리지느러미를 비틀거나 좌우로 진동시켜 얻게 된다. 도약이동성은 계단식 어도의 월류격벽과 같이 낙하류가 있는 장애물을 만났을 때 도약하여 이동하는 것을 말한다. 어류가 도약하는 것은 이동을 목적으로 하는 경우와 그렇지 않은 경우로 구분할 수 있다. 은어의 경우를 보면 도약이 활발한 경우에는 攝餌가 약해지거 때문에 도약의 대부분은 이동과 밀접한 관련이 있다고 할 수 있다. 따라서 도약을 하나의 유영방법이라고도 할 수 있으나, 여기서는 일반적인 유영과 구분하여 사용하였다. 필자가 1998년 표준어도 모형에 대한 은어의 소상실험을 하면서 관찰한 바에 의하면, 은어는 3단계의 월류격벽을 도약하여 단숨에 소상하는 것이 많았고, slot에서 유영이동에 의한 소상은 시간이 상대적으로 많이 소요되었다. 은어의 이동욕구를 자극하는 유속과 낙하류에서 발생하는 물소리가 이와 같은 결과를 가져온 것이라고 생각된다. 이 실험은 자연일광조건에서 이루어진 것으로 월류격벽은 3개 소상거리 3.6m로 되어 있다. 부착이동은 유수단면의 바닥에 부착하여 이동하는 하천 수생생물로서 참게나 칠

성장어와 같은 것이 이에 속한다고 할 수 있다. 여기서 칠성장어가 반드시 부착이동을 하는 것은 아니지만 유속이 큰 흐름에 거슬러 올라갈 때에 주둥이의 빨판을 이용하여 떠내려가지 않도록 바닥에 붙어 있는 경우가 많다.

어류의 이동환경은 물의 수리학적 특성과 수질 및 수초등과 같은 것이 있다. 수리학적인 특성으로는 유속이 가장 중요한 요인이다. 어류가 몸의 측면에 있는 줄눈을 통하여 흐름과 방향을 인식하기 때문에 흐름을 거슬러 올라가려는 성질이 강한 어류는 그 어류가 선호하는 적당한 유속이 있어야 한다. 따라서 어도하류부에서 어류가 어도의 입구를 쉽게 찾아 어도에 진입할 수 있도록 어도로부터 유출한 물의 흐름이 주변의 유속보다 뚜렷하게 큰 것이 좋다. 어류를 어도로 유인할 수 있는 물을 공급하기 위한 유인수로를 어도에 부착시켜 만드는 경우도 있다. 이는 폭이 넓은 하천이나 댐에 설치된 어도에서 특히 필요한 경우가 많다. 이러한 문제를 어도를 이용하여 동시에 해결하도록 제안된 것이 Denil식 어도이다. 그러나 이 어도는 수위차가 큰 경우에 어도내 유속이 과도하게 크게되는 경우가 많아 신중하게 사용되어야 한다. 어류의 이동환경으로서 중요한 수질요인은 우선 수온을 들 수 있으며 어류마다 선호하는 수온이 있다. 예를 들어 은어, 연어, 송어 등은 냉수성 어류이다. 일광조건 여부, 여울에서와 같이 물이 흐르는 소리, 하천 가장자리에 형성된 수초와 같이 어류가 긴급시에 피난할 수 있는 장소, 수중의 색채와 탁도가 어류의 이동에 영향을 미칠 수 있는 중요한 환경요인이 된다. 따라서 어도 내에서 어류가 어떠한 행동을 할 것인지를 예측하여 이를 어도의 설계에 반영하여야 한다.

5. 어류역학

5.1 유영어류 몸체의 동수력학적 적응과 추진력

어류의 이동에 중요한 영향을 미치는 흐름과 어류의 관계를 규명하는 분야를 어류역학(Ichthyomechanics)이라고 한다. 이 분야는 어류의

생태학적인 특성과 동수력학적인 특성이 상호관계하기 때문에 아직 많은 성과가 제시되어 있지는 않다. 어류가 얼마나 오랫동안 얼마나 멀리 갈 수 있는가 하는 어종의 생태적인 특성과 어도의 수리학적인 특성이 서로 적합하게 되도록하기 위해서는 어도 설계 과정에 어류역학 개념을 충분히 반영하는 것이 필요하다. 어도와 관련된 어류역학의 중요한 분야는 어류의 추진력, 유영지속시간, 유영거리라고 할 수 있다. 이들은 유속 또는 유량과 직접적인 관계가 있다. 몸의 길이에 비하여 체고나 두께가 작은 어류의 대부분은 유선형으로 되어 있다. 이는 어류의 이동을 용이하게 하도록 몸체가 동수력학적으로 적응된 결과이다. 어류역학에 관계있는 기초적인 동수력학적 변수들은 레이놀즈 수, 항력과 항력계수, 경계층이다. 하천의 유영생물은 하천의 물과 그들의 이동에 관련된 기관간의 상호작용에 따른 추진력 또는 돌진력과, 그들의 신체조건에 의하여 일어나는 항력 혹은 저항력을 일으킨다. 즉 일정한 속도를 갖는 지선을 따라 유영하는 정상상태에서는 어류가 몇 번의 움직임으로 일으키는 평균적인 힘은 항력과 같게 되며 이는 어류 이동에 필요한 최소한의 힘이라고 할 수 있다. 수중에서 어류는 적은 힘을 들여 이동할 수 있도록 각 어류의 몸체 특징이 흐름에 적응하여 발달되어 있다. 그 대표적인 것이 유선형이다. 또한 어류가 동수력학적으로 적응하는 현상은 꼬리부분을 이용하여 와류를 일으켜 항력을 줄이는 데서도 나타나고 있다.

어류의 추진력은 꼬리지느러미를 좌우로 흔들거나 몸체를 비틀어 얻는다. 즉, 구부림 진동(bending vibration)과 비틀림 진동(twisting vibration)을 결합시켜 양력과 추진력을 얻는다. 이러한 추진력의 크기는 사용하는 근육의 종류, 체장, 체고, 꼬리지느러미의 위치와 크기, 꼬리지느러미의 진동 폭에 따라 달라진다.

5.2 유영지속시간과 유영거리

어류가 어도를 이용하여 상류로 소상하기 위해서는 어떤 흐름에 대하여 지속적인 유영력을 발휘하여야 한다. Katopodis는 어류에 대한 실험 자료를 이

용하여 다음과 같은 어류의 무차원 유영지속시간 곡선을 다음 식 (6)과 같이 유도하였다.

$$F_f = Kt.^\eta \quad (6)$$

여기서 $F_f = U/\sqrt{gl}$, $t. = t\sqrt{gl}$ 이다. 여기서 K 와 η 는 계수이고 U 는 어류의 유영속도, g 는 중력가속도, l 은 어류의 체장, t 는 흐름방향에 역행하여 유영할 수 있는 시간이다. Katopodis에 의하면 전신을 이용하여 유영하는 뱀장어 (*Lota lota*)와 칠성장어 (*Pertromyzon marius*)의 경우에는 $K = 3.006$, $\eta = -0.347$ 이고 그 외 회유성 어류와 담수 10여종에 대해서는 $K = 1.295$, $\eta = -0.124$ 이었다. 이러한 유영지속시간의 파악은 어도내의 휴식공간의 배치를 계획하는데 사용될 수 있다. 유영거리 X 는 유영속도 U 와 유속 V 에 밀접한 관계가 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = (U-V)t \quad (7)$$

이를 이용하여 어류가 주어진 유속에 대항하여 이동할 수 있는 최대거리는 식 (8)과 같이 유도할 수 있다. (Katopodis, 1991)

$$\xi = CF^\lambda \quad (8)$$

여기서 $\xi = X_{\max}/l$, $F = V/\sqrt{gl}$, $\lambda = (1-\eta)/\eta$, $C = \eta(1-\eta)^\eta K l/\eta$ 이다. 또, g 는 중력가속도, l 은 어류의 체장, t 는 흐름방향에 역행하여 유영할 수 있는 시간이다. Katopodis에 의하면 전신을 이용하여 유영하는 뱀장어 (*Lota lota*)와 칠성장어 (*Pertromyzon marius*)의 경우에는 $C = 3.711$, $\eta = -1.882$ 이고 그 외 회유성 어류와 담수 10여종에 대해서는 $C=0.391$, $\eta = -7.065$ 이었다. 식 (6)과 (8)은 어류의 이동특성과 어도의 흐름특성간의 관계를 나타내는 것이다.

6. 결론

하천의 회유성 어류생태 보전에 중요한 역할을 하는 어도와 어류역학에 대하여 살펴보았다. 어도가 어류를 위한 수공시설물이기 때문에 어류의 생태학적인 특성과 어도의 수리학적인 특성이 잘 결합될 수 있도록 어도의 선택과 설계에 신중을 기하여야 한다. 어도의 설치나 연구에 대한 역사는 비교적 오래되었으나 어류의 생태학적인 특성과 어도의 수리학적인 특성 사이의 관계에 대한 연구는 폭이 좁고 매우 미

흡한 실정이다. 최근 이와 같은 관계를 밝히기 위한 어류역학에 관한 연구가 나타나고 있다. 어류의 생태학적인 특성이나 하천의 수리학적인 특성이 지역에 따라 상당히 다르기 때문에 외국에서 연구 발표된 결과들이 어도설계에 직접적으로 적용되기는 어려운 점이 많다. 따라서 우리나라에서도 다양한 어종에 대한 생태실험을 실시하고 어도구조물이 하천의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구들이 절실히 요망된다. 이는 하천생태 환경보전에 관한 최대의 기능을 발휘할 수 있는 어도시설을 위하여 필요하다. ●

〈참고문헌〉

1. 박상덕. (1996). "수리실험에 의한 어도의 기능분석." 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.51-54.
2. 박상덕. (1988). "동해안지역 어도시설 및 관리". 한국수자원학회지, 제31권 4호, pp.28~33.
3. 박상덕. (1998). "취수부에 설치된 어도의 수리실험". 한국수자원학회, 한국수자원학회 '97분과별 연구과업 보고서, pp.2-1~2-26.
4. 이종남. 신문집. (1987). 수산토목공학, 경민사. pp.375~463.
5. 해양수산부. (1999). 어도시설 표준모형 개발에 관한 연구, 최종보고서, p.279.
6. 廣瀬利雄, 中村中六. (1991). 魚道の設計. 山海堂. p.376.
7. 玉井信行, 水野信彦, 中村俊六. (1993). 河川生態環境工學-河川生態と 河川計劃-. 東京大學出版會, p.321.
8. 中村俊六. (1995). 魚道のはなし- 魚道設計のためのカ ト ライソ. 山海堂. p.225.
9. Clay, C. H. (1995). Design of Fishways and Other Fish Facilities, 2nd Ed. Lewis Pub., p.248.
10. Hoppe, W., et al. (1983). Biophysics, Springer Berlag, pp.587~600.
11. Katopodis, C. and R. Gervais. (1991). Ichthyomechanics, Working Document.
12. Katopodis, C. (1992). Inrtoduction to Fishway Design, Working Document, p.68.
13. Pasch, E. (1995). "The Cultural and Environmental Importance of Fisf in Central Europe", Proceedings of International Symposium on Fishways, in Gifu, Japan, Oct. 24-26, pp.25~32.
14. Rajaratnam, N. and Katopodis C. (1986). "Hydraulics of Vertical Slot Fishways.", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.112, No.10, pp.909~927.