

볼랜드식 어도 운영을 위한 유지수량 결정

Determination of Flow Rate for Operation of the Borland Fishlock

천 만 복*, 박 상 현**
Chun, Man Bok, Park, Sang Hyun

Abstract

The purpose of this study is to determine flow rate for operation system of the Borland fishlock.

The fish ladder is usually constructed at the diversion weir crossing the river.

But, at the place of the high dam, the fish ladder is very difficult to keep the compatible slope of the water surface, so that fish move upstream easily.

In this case, Borland fishlock can be used. Through this study using the hydraulic model test, the flow rate for operation of the Borland fishlock was determined.

I. 서론

취입보와 댐 등 하천을 횡단하여 설치하는 수리구조물은 어류의 소상에 지장을 초래하는 경우가 많기 때문에, 어류의 보호를 위해 어도 구조물이 설치되어 왔다. 구조물의 높이가 낮은 하천 보 등에는 계단식 어도를 설치하여 물고기의 이동을 도울 수 있으나, 높은 댐에서는 어도의 계단이 길어져서 공사비가 많이 소요되고 어류의 이동 거리가 길어짐으로써 새로운 형태의 어도가 요구되고 있다. 본 연구는 강원도 남대천에 건설되는 양양 양수발전소 댐 구역으로 소상하는 어류의 이동을 조장하기 위하여 영국에서 개발한 볼랜드 어도의 운영을 위한 유지수량의 결정을 수리모형실험을

통해 검증한 후 설계와 운영에 필요한 자료를 도출하였다.

II. 볼랜드 어도의 운영 특성

볼랜드식 어도에서 하천 하류의 어류는 저수지를 통과하여 상류하천으로 이동하는 경로로 하류 하천에서 계단식어도와 하부 Pool, Shaft, 상부 Pool, Adjustable weir를 거쳐서 저수지에 유입된 후 상류하천으로 이동한다.

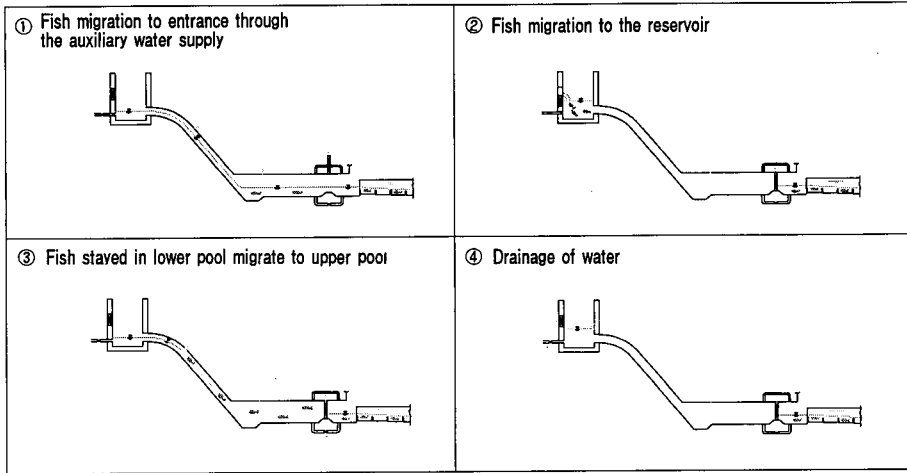
이동 경로에 따른 어류의 유도를 위한 어도 작동의 각 단계는 다음과 같다.

1. 저수지 Bypass관 작동 : 저수지와 상부 Pool 사이에 연결된 유인수 공급관을 통해 유

* 농업기반공사 농어촌연구원

** 농업기반공사 김제지역사무소

키워드: 볼랜드식 어도, 유지수량, 하부 Pool, Shaft, 상부 Pool



< Fig. 1 > Operation system of borland fishlock

인수를 공급하여 어류가 하천에서 계단식 어도를 유영하여 하부 Pool로 이동

2. 하부 Pool 수문 닫음 : 하부 pool로 이동한 어류의 소상 대기 및 하부 Pool에 충수 준비

3. 상부 Pool의 Adjustable weir 가동 및 상부 Pool의 Bypass관 작동 중지 : 하부 Pool과 Shaft, 상부 Pool에 충수 및 상부 Pool의 Bypass관 작동 중지

4. 하부 Pool bypass관 작동에 의하여 계단식 어도에서 유영중인 어류에 대한 물공급

5. 하부 Pool bypass 유량 증가 : 상부 Pool까지 충수되어 물고기가 저수지로 소상할 때 상부 Pool의 수위를 유지시키기 위해 하부 Pool bypass관을 통해 Adjustable weir 유입유량 배수

6. Adjustable weir 차단 및 배수 : 어류가 저수지로 소상 완료 후, Adjustable weir 차단

7. 하부 Pool bypass관을 통해 수문 Sill 표고수위까지 배수후 수문 개방하여 잔여물 배수

< Fig. 1 >은 볼랜드 어도의 작동 과정을 나타낸 것이다.

Ⅲ. 수리모형실험

1. 상사법칙 및 모형재료

어도 구조물 내의 흐름은 자유 수면의 형태로서 중력에 의해 지배되므로 모형실험에서 상사법칙은 Froude 상사율을 적용하였다.

$$F_{rp} = F_{rm} \text{ 또는 } \frac{v_p}{\sqrt{g_p h_p}} = \frac{v_m}{\sqrt{g_m h_m}} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 p는 원형, m은 모형의 인자들을 나타내는 기호이다. 원형과 모형에서 중력가속도는 같으므로 $g_p = g_m$ 이다. 원형과 모형사이의 길이의 축척비를 $L_R = L_m / L_p$ 라고 하면, 식 (1)에서 $(V_m / V_p)^2 = L_m / L_p$ 가 된다. 이에 따라서 유속과 유량은 시간과 길이의 인자로 나타낼 수 있다.

본 모형실험에서 원형 값에 대한 모형의 축척 비(L_R)는 1:10으로 정하였으며, 이를 식 (2)에 적용하면 모형에서 유속과 유량은 원형의 값에 비하여 다음과 같이 축소된다.

$$V_R = T_R = L_R^{1/2} = \frac{1}{3.16} \dots\dots\dots (2)$$

$$Q_R = V_R A_R = L_R^{1/2} L_R^2 = L_R^{5/2} = \frac{1}{316} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 L_R = 길이 축척, V_R = 유속 축척,
 T_R = 시간 축척
 A_R = 면적 축척
 Q_R = 유량 축척

모형제작 재료의 결정을 위하여 먼저 설계 조도계수에 대한 모형의 조도계수를 모형축척 비에 따라 구한 다음 이러한 조도계수를 갖는 재료를 선택하여야 한다.

콘크리트의 조도계수는 $n = 0.013$ (기본설계)이며, 본 수리모형은 정상모형이므로 원형에서와 동일한 수면경사를 갖는다. 따라서 길이 축척 1/10을 적용한 모형의 조도계수는 $n_m = n_p L_r^{1/6}$ 에서 0.0088이 된다. 따라서 n 값이 0.0088에 해당하고 수류의 관찰이 가능한 재료로서 아크릴과 PVC를 선택하여 모형을 제작하였다.

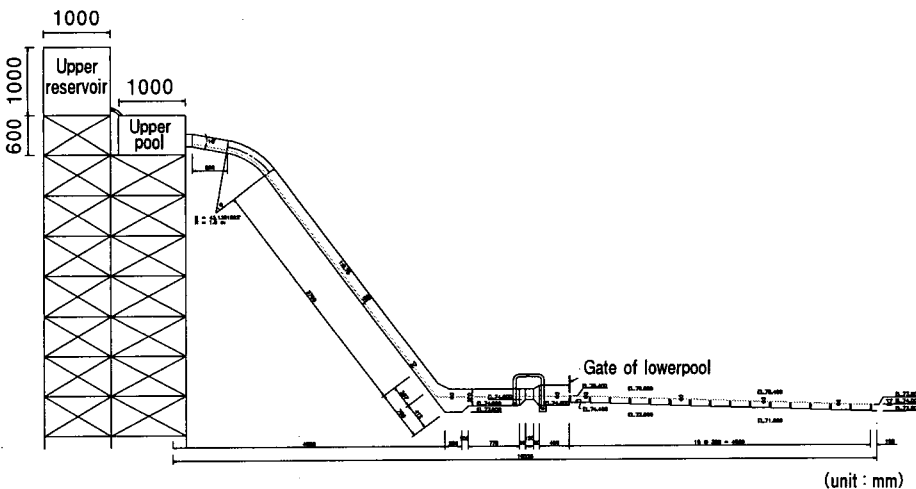
2. 실험장치

본 실험은 농업기반공사 농어촌연구원 수리 실험장에서 수행되었다. <Fig. 2>는 설치된 모형의 단면도를 나타내며 모형의 길이는 약 13m이다. <Fig. 3>은 모형실험 용수의 순환 계통을 나타내며, 모형은 여수로 방류부, 계단식 어도, 하부 Pool 수문, 하부 Pool bypass관, 하부 Pool, Shaft, 상부 Pool, 유량 공급 밸브, 저수지로 구성되어 있다.

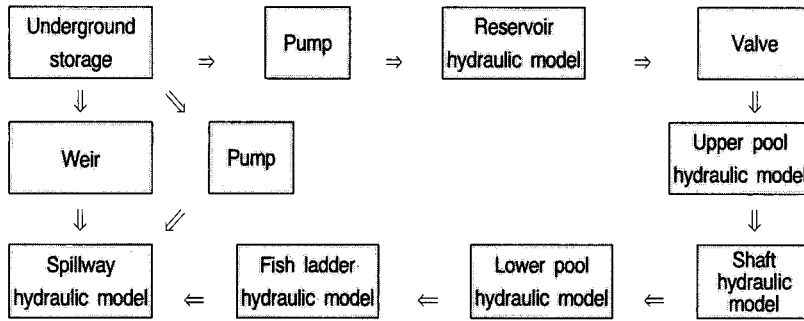
모형에서, 저수지와 상부 Pool은 Adjustable weir 실험에서 제작한 동일한 규모와 형식의 유색 아크릴로 제작하여 이용하였다. Shaft는 원형 규격($\phi 1,800\text{mm}$)에 대한 상사율(1/10)에 따라 $\phi 180\text{mm}$ 의 투명 아크릴로 제작하여 내부 흐름의 관찰이 용이하도록 하였다.

하부 Pool은 하부 Pool 실험에서 결정된 형태로 폭 4.0m, 길이 12.1m 크기의 원형에 대하여 상사율(1/10)에 따라 20mm 두께의 아크릴로 제작하였으며, 어도 운영 실험시 Shaft의 수위가 높아짐에 따른 수압의 증가에 대비하여 둘레에 보강대를 설치하였다.

하부 Pool의 bypass관은 하부 Pool과 계단식



<Fig. 2> Section of hydraulic model



〈Fig. 3〉 Circulation of testing flow in the model

어도 사이에서 어도 작동시 하부 Pool 수문을 닫은 후, 계단식 어도에서 유명하고 있는 어류에 대한 물 공급을 위한 시설로서 $\phi 40\text{mm}$ 의 PVC관으로 제작하였으며, 하부 Pool의 수압에 따라 작동되며 유량의 조절을 위해 가운데에 밸브를 부착하였다. 하부 Pool의 수문은 하부 Pool에 물을 충만과 배제를 위한 개폐시설로서 상사율(1/10)에 따라 $0.2 \times 0.16\text{m}$ 의 크기에 20mm 두께의 투명 아크릴로 제작하였다. 부착 여부에 따라 개폐되는 형태로써 수압에 따른 누수를 방지하기 위하여 수문의 둘레에 고무판을 부착하였다.

또한, 계단식 어도의 모형은 20mm 두께의 투명 아크릴로 제작하여 어도 내부의 물 흐름에 대한 관찰이 용이하도록 하였다. 실험유량 공급은 〈Fig. 3〉의 모형실험 물 순환 계통도에 나

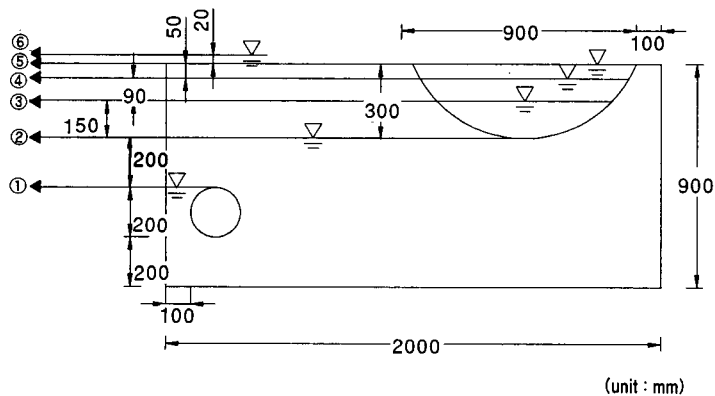
타낸 것과 같이 지하 저수조로부터 저수지에 공급하는 펌프와 별도의 펌프를 이용하여 상사에 따라 공급할 수 있도록 하였다.

어도 운영 단계별 필요수량은 계단식 어도의 유지수심을 기준으로 정하였으며, 실험의 결과를 모형 축척에 따른 원형으로 환산한 값으로 나타내었다.

〈Fig. 4〉는 계단식 어도의 수심 유지를 위한 필요수량을 측정한 어도의 수심(원형)을, 〈Table 1〉은 실험을 통해 측정된 어도의 유지수심별 필요수량(원형)을 나타내었다.

실험에서 필요수량은 필요 유지수심이 10분 이상 지속되는 상태에서의 유량을 계측기를 이용하여 측정된 결과로써 결정되었다.

〈Fig. 4〉에서 ①의 수심은 격벽 하단 저층



〈Fig. 4〉 Water depth of downstream fish ladder

(Table 1) Flow rate of fish ladder at each flowdepth

Item Position	Flow rate (m ³ /s)	Cross sectional area of flow (m ²)	With of flow(m)
①	0.026	-	-
②	0.043	-	-
③	0.132	0.073	0.70
④	0.163	0.143	0.84
⑤	0.220	0.195	0.90
⑥	0.393	0.399	2.00

수의 순환과 계단식 어도에서 유영중인 어류에 대한 최소 유지수심이다.

IV. 어도 운영 단계별 필요수량

어도를 운영 하는데 필요한 적정유량의 공급은 어도의 기능이 제대로 수행되는데 직접적인 영향을 가진다.

어도에 필요수량을 공급하는 방법은 구조물에 따라 상부 Pool bypass관, Adjustable weir, 하부 Pool bypass관이 있다.

Adjustable weir를 통한 공급은 Weir의 상하 작동으로 월류심을 조절하여 유량조절이 가능토록 되어 있어, 필요수량에 따른 웨어 개방도를 저수지 수위와 웨어 상단의 표고 차로 나타내었다.

상부 Pool과 하부 Pool의 Bypass관을 통한 유량공급은 수위차의 변화에 관계없이 필요유량이 일정하게 공급되는 시스템으로 가정하여 실험을 수행하였다.

어도 운영 각 단계별 필요수량은 계단식 어도의 유지수심을 기준으로 하여 실험을 통해 정한 <Table 1>의 값을 이용하였다.

1. 초기 유인수량

어도작동 초기에 하류하천의 어류가 계단식 어도를 경유하여 하부 Pool로 이동하는데 필

요한 유지수심 유량으로써 저수지에 연결된 상부 Pool bypass 관을 통하여 공급된다.

<Fig. 4>의 ⑥에 해당하는 수심유지에 필요한 유량으로써 실험에 의해 0.393m³/s로 측정되었다.

초기 유인수량의 공급을 위한 상부 Pool bypass관의 작동은 어류가 계단식 어도를 유영하여 하부 Pool에 모인 후, 충수를 위해 하류측에 있는 수문을 닫고 Adjustable weir를 통해 유량이 공급되면 즉시 중단된다.

2. 하부 Pool 수문 차단후 Bypass 유량

하류하천의 어류가 하부 Pool로 이동한 후 하부 Pool의 수문을 차단하고 물을 충수 시킬 때 하부 Pool에서 계단식 어도로 연결된 Bypass관을 통해 계단식 어도로 공급해 주는 유량이다.

이 유량은 계단식 어도에서 유영중인 어류에 대한 공급수가 되며, 하부 Pool과 Shaft에 물을 충수시킬 때 Shaft내에 흐름유속이 발생되어 주류성 어류가 상부 Pool로 이동하게 하며, 충수가 완료되어 Adjustable weir를 통해 어류가 저수지로 소상할 때는 유입유량을 배수하여 상부 Pool의 수위를 일정하게 유지시키는 기능을 가진다.

Bypass 유량은 1) 하부 Pool의 수문을 차단된 상태에서 Adjustable weir를 통해 공급되는 충수 유량이 상부 Pool의 Adjustable weir까지 수위가 도달할 때까지와 2) 하부 Pool의 수문을 차단된 상태에서 Adjustable weir를 통해 공급되는 충수 유량이 상부 Pool의 Adjustable weir까지 수위가 도달된 후의 유량으로 구분되어 작동된다.

1)에 해당되는 유량은 계단식 어도에서 유영중인 어류에 대한 공급수로서 <Fig. 4>의 ②에 해당되는 수심의 유지유량으로 실험에서 0.043m³/s로 측정되었다

2)에 해당되는 유량은 상부 Pool에서 저수지로 어류가 소상하는 동안 상부 Pool의 수위를 유지시키기 위해 Adjustable weir를 통해 공급

되는 유량을 계단식 어도쪽으로 배제시키는 유량이므로 Adjustable weir를 통해 공급되는 유량과 동일한 0.393m³/s이다

이때 Shaft 내 하류방향의 흐름유속은 Bypass 유량 / Shaft 단면적으로 계산되어질 수 있다. 따라서 1)의 유량에서는 $0.043\text{m}^3/\text{s} \div (\pi 1.80^2/4)\text{m}^2 = 0.02\text{m}/\text{s}$ 의 작은 유속이 발생되며, 2)의 유량에서는 $0.393\text{m}^3/\text{s} \div (\pi 1.80^2/4)\text{m}^2 = 0.155\text{m}/\text{s}$ 의 유속이 발생하여 주류성인 물고기가 상부 Pool로 이동하게 된다.

3. 충수 유량

하부 Pool로 이동한 어류를 상부 Pool로 이동시키기 위해 하부 Pool 수문을 닫은 후, 초기 유인수량으로 유지되는 수위(E.L74.900) 이상의 하부 Pool 공간과 상부 Pool 및 Shaft를 충수시키는데 필요한 유량이다.

어류를 저수지로 소상시키기 위해 충수해야 할 총체적은 ① E.L74.900 이상의 하부 Pool 공간과 ② Shaft 체적 ③ 상부 Pool 체적의 합으로 계산되어진다.

①과② 체적의 합은 약 245m³이며 ③의 상부 Pool 충수체적은 저수지 수위가 저수위(E.L116.000)일때는 상부 Pool에 연결된 Shaft 하단표고(E.L113.086)와 저수지 수위사이의 체적으로써 89.46m³이며 고수위(E.L121.000) 일때는 238.56m³으로 계산되었다.

따라서 총 충수체적은 저수지 수위가 고수위일 때와 저수위일 때의 범위로써 483.7m³~334.6m³가 된다.

어도운영의 충수에 필요한 물의 공급은 상부 Pool의 Adjustable weir를 통해 이루어진다.

4. 상부 Pool의 Adjustable Weir 월류유량

어도에 충수되는 양은 상부 Pool의 Adjus-

table weir를 통해 유입되는 유량에서 하부 Pool에 연결된 Bypass 관을 통해 계단식 어도로 공급되는 유량(0.043m³/s)을 뺀 유량이다.

즉, 어도의 충수 유량(Q) = 상부 Pool의 Adjustable weir를 월류한 유량 - 하부 Pool에 연결된 Bypass관을 통해 계단식 어도로 공급되는 유량(0.043m³/s)로 표현된다.

본 실험 대상인 양양 양수발전소 어도의 운영 시스템은 어도의 충수시에는 상부 Bypass 관을 닫고 Adjustable weir로만 충수하도록 되어 있어, Weir 월류량을 상부 Bypass관에 의해 공급되는 초기 유인수량과 동일한 0.393m³/s으로 정하였다.

따라서, $Q = 0.393\text{m}^3/\text{s} - 0.043\text{m}^3/\text{s}$ 에서 0.350 m³/s이 된다.

Adjustable weir를 월류하는 유량(q)는 월류수심 즉, 저수지의 수위와 Weir 상단의 표고 차이에 의해 결정되어 진다.

다음의 웨어 유량공식을 이용하여 Adjustable weir 월류유량(q)는

$$q = C B H^{3/2} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 , C = 유량계수 (기본설계;2.2)

B = 웨어 폭

H = 웨어월류수심(저수지 수위 - 웨어 상단표고) 의 관계식에서 구해질 수있다.

<Table 2>는 식 (4)를 이용하여 계산한 웨

<Table 2> Depth and flow rate over weir (prototype)

Flow depth(m)	Flow rate (m³/s)	Flow depth(m)	Flow rate (m³/s)
0.28	0.328	0.32	0.398
0.29	0.326	0.33	0.417
0.30	0.361	0.34	0.436
0.31	0.380	0.35	0.456

〈Table 3〉 Water supply of fishlock (prototype)

Water level \ Item	Flow rate of weir (m ³ /s)	Water supply (m ³ /s)	Water supply from lower bypass (m ³ /s)	Volume of water supply (m ³)	Supply time of water (min.)
High water level (E.L121.000)	0.393	0.350	0.043	483.7	23 App.
Low water level (E.L116.000)				334.6	16 App.

어 월류심에 따른 월류유량의 관계를 나타낸 것으로, Adjustable weir로 월류시킬 유량 0.39m³/s에 대응하는 웨어 월류수심, 즉 저수지 수위와 웨어상단의 표고 차는 0.32m 내외일 때가 적정운영 시기임을 알 수 있다.

〈Table 3〉은 저수지 수위별 어도에 충수하는 시간에 따른 어도운영의 필요수량을 나타낸 것이다. 〈Table 3〉의 충수시간은 충수체적을 충수유량으로 나눈 것으로 저수지 수위가 고수위, 저수위 사이에서 약 16분~23분이 소요되는 것으로 계산되었다.

V. 결 론

어도 작동시 각 단계별로 공급되어야 할 필요수량의 결정을 위해 수행된 본 실험의 결과는 다음과 같으며, 각 작동단계별 유량은 계단식 어도의 유지수심을 기준으로 정하였다.

1. 저수지에서 연결된 유인수 공급관을 통해 공급하는 어도 작동 초기의 필요한 초기유인수량은 0.393 m³/s으로 나타났다.

2. 어도 충수유량은 0.350 m³/s로 계산되었다.

3. 어도 충수시간은 저수지 수위가 고수위, 저수위 사이에서 약 16분~23분이 소요되는 것으로 계산되었다

4. 하부 Pool 수문 차단후 Bypass 유량은

- 1) 충수를 위해 수문을 닫은후 상부 Pool의 수위가 Adjustable weir에 도달할 때까지 0.043 m³/s
- 2) 충수를 위해 수문을 닫은후 상부 Pool의 수위가 Adjustable weir에 도달후 어류의 소상이 끝

나고 하부 Pool의 물을 배수시까지 0.393 m³/s로 측정되었다.

5. 하부 Pool의 충수를 위해 Adjustable weir를 통해 공급하는 필요수량인 상부 Pool의 Adjustable weir 월류유량은 0.393m³/s로 계산된다.

6. 어도작동시 하부 Pool의 충수를 위한 필요수량인 0.393m³/s을 공급하기 위한 Adjustable weir 월류심은 저수지 수위와 웨어 상단의 표고차 0.32m가 적정한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 농어촌진흥공사, 1991. 새만금지구 수리모형실험.
2. (주)삼안건설기술공사, 1996. 양양양수 발전소 수문검토서.
3. 최기철 외 9인. 1996. 양수발전소 수중생태계 조사. 한전. p.284.
4. 합천군, 1996. 황강첩수로 수리모형실험.
5. 홍관의 외 2인, 1994. 양수발전소 건설에 따른 수산에 미칠 영향조사. 양양내수면 연구소 보고서.
6. Cook, Nathan H. and Ernest Rabinwicz, 1963. Physical Measurement and Analysis pp.195~203
7. Daugherty, Robert L. Joseph B. Franzini, John Finnemore, 1981. Fluid Mechanics Applications, pp.340~350
8. French, Richard H, 1985. Open Channel Hydraulics, pp.163~194
9. Novak and Cabelka, 1981. Models in Hydraulic Engineering, pp.4~29, pp.56~71

10. 田中和浩 外2人, 1994. シャフト式魚道について
研究 建設省 土木研究所 研究報告書, pp.578~
579.
11. 條邊三郎外 4人, 1994. よりよき設計のために
頭首工魚道 設計指針. 農林水産省 構造改善局
建設部 設計課.
12. 中村俊六, 1990. 魚道設計の留意点 ダム技術
30(1): 魚道特輯號 pp.57~65
13. 中村俊六, 1995. 魚道のはなし. 山海堂.
14. 中村中六, 1995. 魚道の設計. 山海堂.