

Research Paper

국내 자연형 어도 설계 기준 마련을 위한 고찰 - 자연형 어도 표준 모형안의 문제점과 개선방안을 중심으로 -

황성원* · 김진오**

고려대학교 화공생명공학과*, 경희대학교 환경조경디자인학과**

Study on Design Standards for Nature-like Fishway in Korea

Sung-Won Hwang* · Jin-Oh Kim**

Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University*

Department of Landscape Architecture, Kyung Hee University**

요약 : 현재 우리나라에 설치된 어도의 90% 이상이 콘크리트 인공 어도로 되어있으나, 최근 자연적인 재료를 이용하여 소하천의 형태로 설치하는 자연형 어도가 많이 설치되고 있다. 이에 따라 국내 정부산하 공기업과 대학에서는 자연형 어도에 대한 설계 기준에 등록할 목적으로 '자연형 어도 표준모형 형식(안)'을 제안하였다.

본 연구에서는 기존에 제안된 형식안을 검토해보고 보완, 개선되어야 할 사항을 제시해보았다. 연구 결과, 지금까지 국내에서 어도 설계와 관련하여 진행되었던 연구가 매우 부족해 적절한 기준을 마련하는데 한계가 있었던 것으로 판단된다. 특히 우회수로형 자연형 어도에서의 구조 유지 방안이나 내부 돌 설치 방법, 또는 자연 재료에 대한 연구가 부족한 것으로 판단되었는데, 이는 해외에서 진행되었던 연구사례에 비춰볼 때 국내에서도 국내 상황에 맞는 설계 연구가 보다 적극적으로 진행되어야 할 것으로 보인다. 또한 경사도와 폭에 대한 설계기준 역시 주로 이미 설치되어 있는 국내의 자연형 어도들을 근거로 제시되고 있는데, 이는 어종 특성은 물론 어도에 대한 수리학적, 생물학적 연구를 바탕으로 각 지역 조건에 맞는 설계 기준이 새롭게 마련되어야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 자연형 어도, 우회수로형 인공 어도, 어도 설계 기준, 설계 요소

Abstract : While over 90 percent of fishways are made up with concrete material, nature-like fishways are started to be established as a form of small stream using natural materials. Recently, the central government in collaboration with a university has proposed a 'Standard Model of Nature-like Fishway' with a purpose to provide as a national design standard of nature-like fishway.

This study aims to criticize the proposed design model of nature-like fishway and to propose

First Author: Sung-Won Hwang, Department of Chemical and Biological Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea, Tel : +82-2-3290-4948, E-mail: 7321sw@naver.com

Corresponding Author: Jin-Oh Kim, Department of Landscape Architecture, Kyung Hee University, Yongin 17104, Korea, Tel: +82-31-2664, Email: jokim@khu.ac.kr

Received : 10 March, 2017. Revised : 5 June, 2017. Accepted : 6 June, 2017.

improvements by examining other international cases. As a result, we found problems and limitations of the proposed design model due to the lack of research and experience about making nature-like fishway in Korea. Especially, for designing bypass nature-like fishway we found the lack of studies about structure management strategies, establishment of rocks or pebbles inside the stream, and natural materials. In this sense, more studies about nature-like fishway design adaptable to our environment need to be conducted. In addition, since the proposed design standard for nature-like fishway has been created based on the limited examination of existing domestic cases, it is desirable to improve the design standard on the basis of hydrological and biological research so that they could be adapted effectively to regional and local contexts.

Keywords : nature-like fishway, bypass channel fishway, fishway design standard, design factor

I. 서론

20세기에 등장한 보와 댐은, 수자원을 효율적으로 이용하고 관리하기 위해 전 세계에 걸쳐 널리 확산되었으며 우리나라의 경우에는 국토 및 기상 여건상 전체 용수공급량의 약 55%를 댐에 의존하고 있다(Wei et al. 2009; World Commission on Dams 2000; Ministry of Land, Infrastructure, and Transport 2016). 그러나 이러한 하천 시설물은 수자원 확보, 홍수 예방, 에너지 생산 등의 다양한 목적을 충족시켜주는 동시에 심각한 환경생태적 손실을 가져올 수 있다 (Pohl 2004). 특히 댐이나 보의 설치는 하천의 연속성을 파괴하고 다양한 수생생물과 생태계의 주요 고리인 어류의 이동을 단절시키며 이는 일부 어종의 멸종으로 이어지기도 한다(Nehlsen et al. 1991; Slaney et al. 1996; Sheer & Steel 2006).

이러한 문제를 해결하기 위해 개발된 것이 ‘어도’(魚道)로 댐이나 보 등을 물고기가 거슬러 올라갈 수 있도록 설치한 인공통로 구조물을 가리킨다. 일반적으로 하천 상류로 소상하는 물고기는 바다에서부터 소상하는 회유성 어류라고 알려져 있으나 실제로는 하천에 서식하는 모든 어종이 산란시기뿐만 아니라 연중 소상하는 특성을 갖는다(KWRA & MLTMA 2009). 1909년에 처음 등장한 데닐(Denil)식 어도를 시작으로 다양한 어도 형식들이 개발되었는데, 이들은 대부분 콘크리트, 금속 등의 재료를 사용하여 비교적 간단한 인공적인 구조로 만들어졌다(Katopodis 1992; Clay 1995). 이후 1970년대 말 유럽에서, 이러한 기존의 형식들과는 다른 “자연형 어도”가 개발되

었다. 자연형 어도는 콘크리트 대신 큰 나무 조각, 바위, 수생 식물 등의 자연적인 재료를 이용하여 어도의 하상과 수변부를 조성한 것이다(Parasiewicz et al. 1998; Breton et al. 2013). 이렇게 자연적으로 조성된 자연형 어도는 다양한 유속과 수심을 제공해 줄 수 있어, 작은 어류 및 수생생물의 이동이 가능하다는 장점이 있다(Aarestrup et al. 2003). 또한 이는 주변의 경관과 자연스럽게 어우러지며 다양한 생물의 서식처 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Gustafsson 2012; Pander et al. 2013).

자연형 어도는 크게 두 형태로 분류될 수 있는데, 하나는 보를 우회하여 이동을 하도록 하는 우회수로형 어도(Bypass channel)이고, 또 하나는 보 등의 시설물 자체를 경사로의 형태로 조성하는 램프형 어도(Bottom ramp and slope)이다. 램프형 어도는 하천 전체 폭에 걸쳐 설치하는 형태와, 일부 폭에만 조성하는 부분 램프형(Fish ramp) 어도로 나뉜다(FAO & DVWK 2002). 국내 하천설계기준에서는 이 중 우회수로형 어도만을 자연형 어도로 여겨 “인공하도식 어도”로 표현하고 있으며 현재 국내에 설치된 자연형 어도는 모두 우회수로형 어도 형태에 해당한다고 볼 수 있다. 우리나라에는 현재 국가하천과 지방하천에 33,000개가 넘는 보가 설치되어 있는데, 이 중 약 15%에만 어도가 설치되어 있으며 설치된 어도의 형식은 도벽식 (28.7%), 수로식 (25.4%), 계단식 (20.1%) 순으로 높은 비율을 차지한다. 자연형 어도를 의미하는 ‘인공하도식 어도’는 2010년부터 설치가 시작되어 전국에 총 12개가 설치되어 있으며 이는

전체 설치된 어도의 약 0.2%에 해당한다(NFIS 2017).

어도설계 기준은 2002년에 처음으로 하천설계기준에 도입되었으며 이들 대부분은 보의 부대시설로써의 어도 측면에서 다루졌다. 이후 2005년 하천설계기준 개정으로 어도편이 따로 마련되었고, 현재 운용되고 있는 기준은 2009년에 개정된 내용이다. 2002년 기준에서 현 기준으로 개정되면서 대상 어종이 어류에서 모든 어종 및 소동물로 확대되었고, 경사도가 1/10 이하에서 1/20 이하로 완화되었으며 이에 따른 보다 구체적인 설계 기준도 마련되었다(Kim et al. 2015). 다만 여기서 구체적인 기준은 표준모형으로 등록된 계단식, 아이스하버식, 버티컬슬롯식, 도벽식 어도에 한정되어 마련되어 있으며 자연형 어도를 의미하는 ‘인공하도식 어도’는 표준형식에서 제외되어 설계 기준이 없는 실정이다. 자연형 어도가 표준형식에서 제외된 이유는 이를 조성할 때 하천변의 여유 공간이 필요하고 조성비용이 다른 형식들에 비해 높아 국내 조성에 어려움이 많은데 주로 기인하고 있다(KWRA & MLTMA 2009). 이러한 표준형식 및 설계기준의 부재에도 불구하고 국내에는 이미 12개의 인공하도식 자연형 어도가 설치, 운영되고 있으며 그 수는 앞으로도 더욱 증가할 것으로 예상된다. 설계 기준이 정립되지 않은 경우, 오직 경험에만 의존하거나 국내 상황에서 검증되지 않은 해외 기준들을 적용하는 경우가 많은데, 이렇게 설계된 어도들은 자칫 본래 기능을 제대로 수행하지 못할 수 있다. 특히, 어도에 대한 설계기준이 없던 과거에는 외국의 어도를 그대로 모방해오는 사례가 많았는데, 한국의 경우 유럽이나 미국에 비해 소형 어류가 많이 서식하고 있어 연어와 같은 대형 어류를 대상으로 설계한 외국의 어도를 적용하는데 여러 가지 문제점이 제기되어 왔다(Choi & Lee 2004). 이렇듯 체계적인 설계기준의 부재속에서도 자연형 어도의 수가 증가하는 가운데, 이러한 어도들이 제 기능을 수행하지 못할 수 있다는 우려로 인해 최근 자연형 어도 설계 기준 마련에 대한 정부차원의 관심이 높아지고 있다. 특히한 농어촌공사(Korea Rural Community Corporation, KRC)와 국립금오공과대학교(Kumoh

National Institute of Technology, KIT)에서 2012년 12월에 발간한 “자연형 어도(우회수로형) 모형개발” 연구보고서와 이를 통해 도출된 ‘자연형 어도 표준 모형 형식(안)’은 자연형 어도에 대한 새로운 설계 기준을 마련하고자 제안되었다.

본 연구에서는 국내에서 제안된 ‘자연형 어도 표준 모형 형식(안)’에 대한 연구결과와 해외에서 제안된 다양한 자연형 어도 설계기준을 비판적으로 비교 분석하여 국내 실정에 적합한 자연형 어도 설계 개선방안을 제안하고자 한다.

II. 연구 방법

자연형 어도에 대한 설계 기준은 해외 선진국들을 중심으로 일부 정립되어 있으며 이를 근거로 어도가 설치 운영되고 있다. 국내에서는 한국농어촌공사(KRC)가 2012년 12월에 발간한 “자연형 어도(우회수로형) 모형개발” 연구보고서에서 ‘자연형 어도 표준모형 형식(안)’을 제시하였고, 이를 2013년도 “어도설계기준 및 사후관리제도정비” 보고서에서 하천설계기준으로의 편입 필요성을 제안하기도 했다. 본 연구에서는 기존 연구에서 제시된 자연형 어도 설계 모형의 구체적인 근거와 문제점 등을 검토하고, 이를 해외의 자연형 어도 설계 기준들과 비교, 분석하여 향후 개선 대안을 제시하고자 한다. 본 연구에서 비교할 해외 어도 기준은 2002년 유엔식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)와 독일 수리경제·농사개량연합회(Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., DVWK)가 공동으로 발간한 “Fish Passes Design, Dimensions and Monitoring” 그리고 2007년 미국 농무부(The U.S. Department of Agriculture, USDA)에서 발간한 “Fish Passage and Screening Design”이다. 또한, 본 연구에서는 이 두 설계기준 이외에도 비표준형식으로 등록된 영국과 중국의 자연형 어도 설계기준을 추가로 검토하여 향후 국내 자연형 어도 설계기준 마련 시 어떤 내용이 보완 개선되고 추가적으로 연구되어야 할지에 대해 제안하고자 한다.

Table 1. Proposal of nature-like fishway standard model (KRC 2013)

Classification		Fish ramp type (Integrated in weir)	Bypass channel type (outside of the weir)
Material		Natural materials (concrete can be used for stabilization)	Natural materials (flow controller can be used for structure stabilization)
Slope		Gentler than 1:100	Gentler than 1:200
Width		10 % of weir length	Wider than 6 m
Entrance	Structure	Open-shaped. Equipment for attraction current is needed.	
	Velocity	Keep under 0.8 m/s	
Exit	Structure	Flow rates should be naturally or artificially maintained (by using flow control devices)	
	Velocity	Keep under 0.8 m/s	
Inside	Structure	Rapids: 70 %, Pools: 30 %	Rapids: 50 %, Pools: 50 %
	Velocity, Depth	Rapids: under 0.8 m/s, above 30 cm, Pools: under 0.5 m/s, above 50 cm	

III. 국내외 어도 설계 기준 비교

일반적으로 어도 설계시에는 이용 대상이 되는 어종의 생태학적 특성, 선호유속, 수심 등과 해당 하천의 유량 등 다양한 요소들을 복합적으로 고려해야 하는데, 설계 기준에서는 통상적으로 각 요소별로 구체적인 허용 범위 등을 수치로 제시해 주는 경우가 많다. 농어촌공사에서 발간한 “어도설계기준 및 사후관리제도정비”(2013) 연구보고서에서는 각 요소별 수치에 대해 Table 1과 같이 제안하고 있으며 이에 대한 구체적인 설명은 앞서 발간된 “자연형 어도(우회수로형) 모형개발”(2012)에서 상세하게 제시하고 있다.

이와 같이 설계 기준을 제시할 때 일반적으로 각 설계 요소별로 구체적인 수치를 제시하고 세부적인 설명을 덧붙이는데, 주로 고려되는 설계 요소의 종류로는 기본 설계 모델, 구조, 재료, 경사도, 폭, 수심, 유속, 입구, 출구 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 이 중에서도 보완되어야 할 사항이 있다고 판단되는 기본 설계 모델, 구조, 재료, 경사도, 폭, 유속, 입구에 대한 내용을 중심으로 국내에서 제안된 기준과 해외에서 개발 적용 중인 기준을 각각 비교 분석하였다.

1. 기본 설계 모델

국내 우회수로형 어도에 대한 기본 설계 모델로는 사행1회 어도와 사행2회 어도가 제시되었으나 (Figure 1) 형태에 대한 구체적인 지시사항은 없고

내부 구조에 여울과 소를 각각 50%씩 배치할 것을 제안하고 있다(Table 1, Bypass channel type 참고). 이러한 기본 설계 모델은 수치모의를 통해 전체적으로 1.0m/sec 이하의 유속 분포를 보이고, 여울 구간의 경우 0.5~1.0m/sec 범위, 그리고 소 구간의 경우 0.5 m/sec 이하의 유속 범위를 갖는 것으로 조사되었다(KRC & KIT 2012). 또한 기존 연구에서 제시된 두 도면(Figure 1)은 완만한 곡선 형태로 이루어져 있지만, 일정하고 규칙적인 폭과 대칭적인 모양 등으로 인해 인위적이고 경직된 외관을 보여주고 있다. Breton et al.(2013)에 따르면 자연형 어도는 실제 자연 소하천의 불규칙한 형태와 폭을 모방하는 것이 중요하며 이를 통해 어도 내부의 다양한 서식환경이나 유속 범위 등을 제공해 줄 수 있다.

이에 반해 FAO & DVWK(2002)에서 제시한 기본 모델(Figure 2)은 자연형 어도의 불규칙한 외형적 특성을 효과적으로 반영내고 있다. 기본 모델의 설계 내용에서는 수로의 형태를 조성할 때 여울과 소로 구성된 구불구불한 형태를 강조할 것을 명시하고 있으며 어도의 형태는 설치될 지역의 공간적 특성에 맞추어 일부는 직선이거나 혹은 180도 까지도 굽을 수 있도록 제안하고 있다. FAO & DVWK(2002)와 USDA(2007)에서 제시한 도면(Figure 2, 3)에 나타난 어도의 형태를 보면, 수로의 폭이 균일하지 않고 곡선 형태 또한 불규칙한 자연적인 모습임을 알 수 있다. 또한 이들 설계기준은 국내에서 제안된 형태와

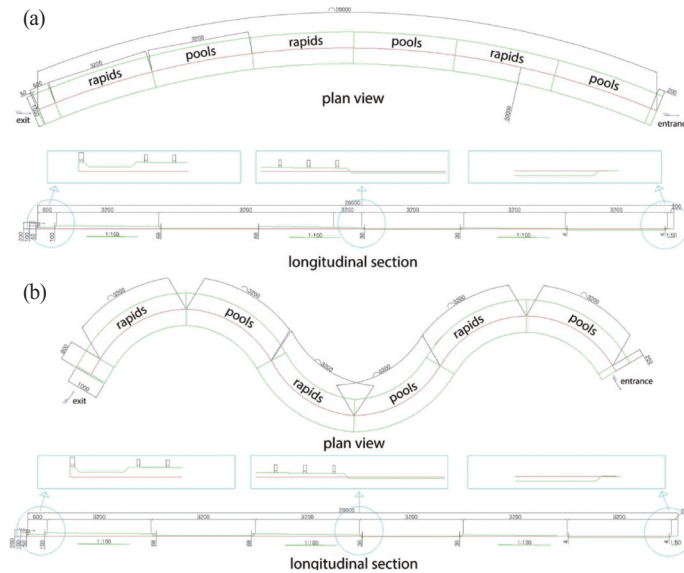


Figure 1. Plan of nature-like fishway (KRC 2013)

((a) Single-curved plan, (b) Twice-curved plan)

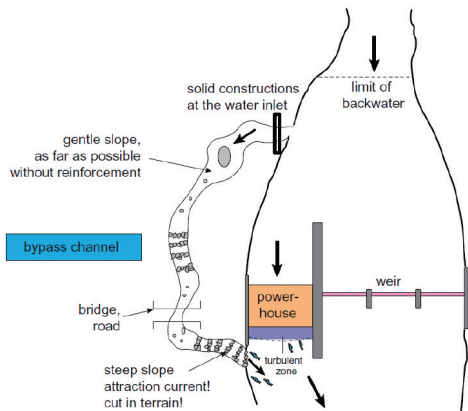


Figure 2. Bypass channel design (FAO & DWVK 2002)

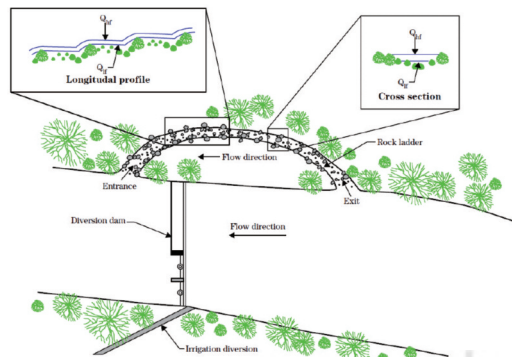


Figure 3 Plan view of rock channel fishway (USDA 2007)

는 달리 어도의 수로가 보와 댐과 같은 하천시설물에 어떤 모습으로 연결될 것인지를 중요하게 생각하고 있으며 이를 설계기준 도면에서 명확히 반영하고 있다. 따라서 국내에서의 자연형 어도 설계기준 수립시에도 수치모의를 통한 유속 분석을 토대로 자연형 형태를 반영하기 위한 구체적 모형 제시와 형태, 폭, 깊이, 그리고 하천시설물의 연결방법에 대한 지침과 설계 사례 등을 제시할 필요가 있다.

2. 구조

국내에서 제안된 기존의 자연형 어도설계 기준에서는 내부 구조 설계시 어도 내에 여울과 소를 각각 50%씩 번갈아가며 배치하도록 명시하고 있으나 더 이상의 구체적인 기준 설정은 미흡한 실정이다. 반면, FAO & DVWVK(2002)에서는 저서 무척추동물 등이 서식처로 이용할 수 있도록 다양한 내부 구조를 형성할 것을 제시하고 있으며 내부 공간의 자연스러운 연결을 강조하며 바닥면은 가능한 한 자연 상태 그대로가 될 것을 권장하고 있다. 또한 내부 구조 설계 기준에서는 내부 구조 형태를 유지시키는 방안이나 어도 내부에 돌을 설치하는 방안 등을 자세하게

제시하고 있다.

1) 구조 유지 방안

기존의 국내 연구에서 제안된 기준(KRC & KIT 2012)에서는 어도 구조를 유지시키기 위해 ‘어도 내 퇴적 방지 방안’을 제시하고 있는데 이는 구체적으로 격벽 하단부에 구멍을 뚫어 ‘잠공’을 설치하거나 어도 출구에 유량을 조절하기 위한 장치로 ‘각낙’을 설치할 것을 제안하고 있다. 잠공과 각낙은 주로 기존 콘크리트 어도 형식에 설치하는 것으로 자연 수로식 어도에는 격벽이 설치되지 않는 것이 일반적이므로 이러한 방법을 자연형 어도에 적용시키기에는 다소 무리가 있다. 또한, 자연형 어도의 경우 수변부가 주로 자연재료로 조성되기 때문에 콘크리트로 지어진 어도에 비해 세굴에 약하므로 이에 대한 보완 방안이 필요하다. 따라서 FAO & DVWK(2002)에서는 바닥과 사면을 유지시키기 위해 생물공학적인 방법을 제시하고 있는데 이는 먼저 바닥구조를 안정시키는 방안으로 토목섬유의 지반 위에 굵은 자갈 또는 돌을 배치시키는 것이다. 또한, 사면을 안정시키기 위한 방안은 그림으로 도식화 하였는데 이는 a) 돌과 버드나무 꺾꽂이 하는 방법, b) 나무 지지대를 세우고 보강한 뒤, 버드나무 가지 층을 형성하는 방법, c) 큰 바위를 배치하고 나무를 식재하는 방법으로 제시되어 있다(Figure 4).

USDA(2007)에서는 구조 유지 방안으로 어도로 유입되는 유량을 조절하고 홍수로부터 구조를 보호하기 위해 출구부에 유량조절장치를 필수적으로 설치할 것을 명시하고 있으며, 어도 내부 흐름에 의해 돌이 떠내려가지 않도록 유속에 적합한 돌 직경을 결정하는 공식 등을 제시하고 있다.

2) 돌 설치 방법

국내에서는 지금까지 콘크리트 어도 내부에 돌을 설치하는 방법(Kim & Kim 2001)과 램프형 자연형 어도 내부에 돌을 설치하는 방법(CAUIACF 2011)에 대한 연구가 진행되었으나, 우회수로형 자연형 어도에서의 내부 돌 설치 방법에 대한 연구는 아직 미흡하다. 자연 수로식 어도에서는 경사가 급한 경우 내부에 큰 바위들을 일정 간격으로 배치하여 유속을 감소시켜 줄 수 있고, 돌 설치를 통해 어류에게 다양한 내부 구조를 만들어 줄 수도 있다. 또한 어류의 소상에 있어서도 바위는 중요한 역할을 하는데, 어류는 일반적으로 바위의 뒷편에서 어느 정도 휴식을 취하다가 소상하는 것으로 알려져 있다(FAO & DVWK 2002). 이를 바탕으로 해외에서는 돌 설치 기준에 대한 연구가 상대적으로 활발히 진행되었다. 자연형 어도에서의 돌 설치 방법은 해외 기준에서는 크게 두 가지로 제시되는데, 하나는 큰 호박돌(boulder)을 일정 간격으로 떨어뜨려 배치하는 방법이고, 두 번째는

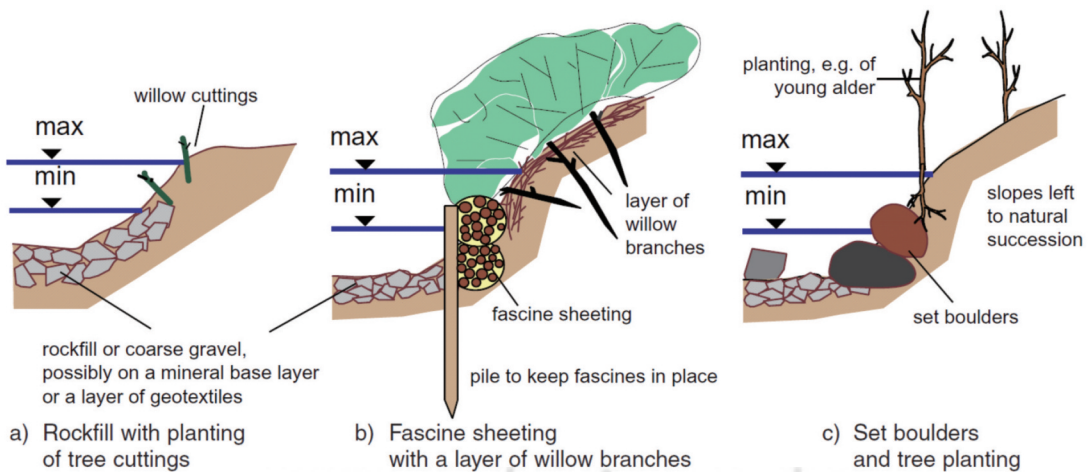


Figure 4. Examples for securing bottom and banks of bypass channels (FAO & DVWK 2002)

어도 내부의 유속을 감소시키기 위해 호박돌을 이용해 계단식(cascade) 보 형태를 만드는 방법이다 (FAO & DVWK 2002). FAO & DVWK(2002)에서는 이 두 가지 방법을 모두 제시하고 있으며, 먼저 돌을 일정간격으로 떨어뜨려 배치시키는 방법을 도식화한 후(Figure 5) 다음과 같은 공식을 제시하였다.

$$a_x = a_y = 2 \sim 3d_s$$

(a_x, a_y : 돌 중심 간의 간격, d_s : 돌의 직경)

제시된 공식에 따르면 돌 중심 간의 수직, 수평 간격이 돌 직경의 2~3배가 되어야 하며 돌 간격은 최소 0.3~0.4m가 넘어야 한다. 또한 돌을 설치하는 방법도 구체적으로 제시하였는데, 돌 직경의

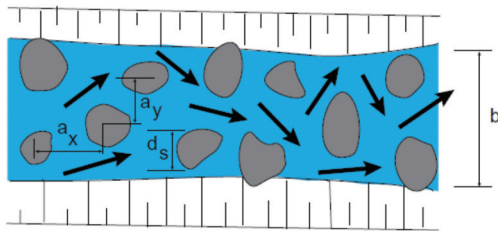


Figure 5. A bypass channel in which perturbation boulders have been placed (FAO & DVWK 2002)

1/3~1/2를 바닥에 묻어서 쉽게 움직이지 않도록 해야 한다는 것이다. FAO & DVWK(2002)에서 제시한 두 번째 방법은 호박돌로 계단식 보를 만들어주는 방법이다. 큰 돌들을 물 흐름의 직각 방향으로 묻으면 형성되는 돌 무리가 보의 형태로 될 수 있고, 이를 계단식으로 반복 설치하면 그 사이에는 소(pool)가 형성된다 (Figure 6). 소의 크기는 최소 1.5m는 되어야 하고 이러한 보 간의 높이차는 20cm가 넘어서는 안 되며 시공에서의 부정확성 등을 고려할 때 높이차는 10~15cm가 적절하다고 제시하고 있다.

USDA(2007)에서는 호박돌로 계단식 보를 만드는 두 번째 방법만을 기본 모델로 선정하여 이에 대한 설계 기준을 제시하였다. 이는 FAO & DVWK(2002)에서 제안한 방법에 비해 좀 더 공학적으로 개선되었다는 장점을 보여주고 있으며 이를 통해 물이 통과하는 면적(Figure 7에서 L의 합)과 호박돌 보에 대한 흐름을 보정한 유량공식(Chow 1959)을 새롭게 제시하였고, 이를 이용하여 소의 길이와 소의 깊이 (Figure 8)를 구하는 공식을 제시해주고 있다.

또한 USDA(2007)는 설치할 돌의 직경을 결정하는 공식을 제시하였는데, 이는 돌이 어도 내에서 안

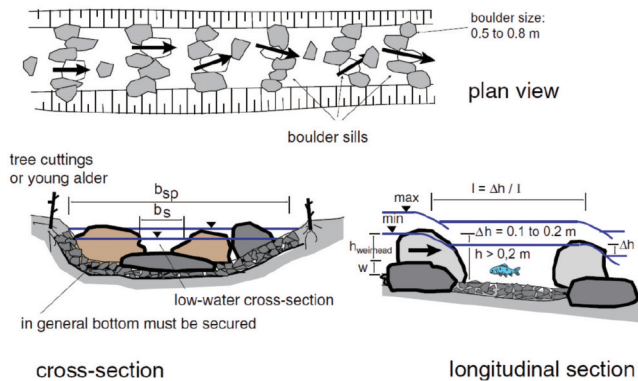


Figure 6. Boulder sills for breaking the slope in a bypass channel (FAO & DVWK 2002)

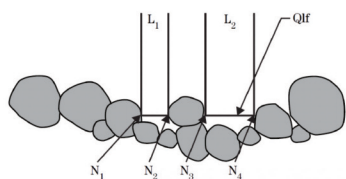


Figure 7. Boulder weir cross section (USDA 2007)

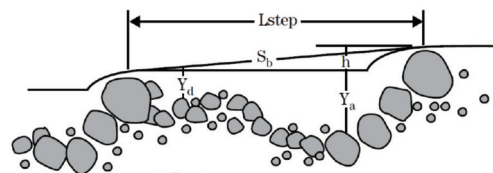


Figure 8. Boulder step-pool profile (USDA 2007)

Table 2. Incipient motion thresholds for rock sizes (Fischenich 2000)

Class name	Median diameter (in)	Critical velocity (ft/s)
Large boulder	>40	19
Medium boulder	>20	14
Small boulder	>10	10
Large cobble	>5	7
Small cobble	>2.5	5
Very coarse gravel	>1.25	3

정되기 위해서는 돌의 무게와 마찰저항을 합한 힘이 물이 돌을 밀어내는 힘 보다 커야만 한다는 것이다. 따라서 이를 고려한 최소 돌 직경 결정 공식을 제시하고, 돌 직경에 따라 버틸 수 있는 한계 속도를 표로 나타내었다 (Table 2). 특히 USDA(2007)는 경험에 근거한 일반적 법칙도 제시하였는데, 이는 돌로 만들어진 보 간의 높이차보다 돌의 직경이 커야 한다는 것과, 수로의 가장 하단에 위치한 소 부분은 피복층에 묻혀야 한다는 것이다.

지금까지 알려진 자연형 어도의 구조에 관련한 국내 기준안은 매우 단순하고 이와 관련한 연구도 부족하다. 따라서 자연형 어도의 특성상 매우 중요하게 여겨지는 내부 구조 유지 방안이나 내부 돌 설치 기준에 대한 연구가 보다 적극적으로 진행되어야 할 것이며 이에 따른 구체적 설계기준 또한 해외의 기준과 같이 별도로 마련되어야 할 필요가 있다.

3. 재료

국내의 설계 기준으로 제안된 기준 표준모형 형식 안에서는 '재료' 항목에서 '자연적인 재료 이용'으로만 기술되어 있으며 재료에 대한 구체적인 조사나 연구는 부족한 실정이다. 반면, FAO & DVWK(2002)에서는 실제 강에서 발견되는 재료를 이용하거나, 각 해당 지역에서 쉽게 구할 수 있는 재료만을 사용할 것을 강조하고 있다. 또한 어도 구조를 유지시키는 방안에서 토목섬유, 버드나무, 나무 지지대 등의 재료를 사용할 것을 제안하고, 호박돌에 대한 구체적인 설치 기준 등을 명시하고 있다. 그러나 재료만을 다

룬 연구가 부족해 재료에 대한 특별한 기준은 제시되지 않고 있으며 USDA(2007) 역시 재료에 대해서는 구체적 내용이 명시되지 않고 있다. 자연형 어도가 기존 콘크리트 어도와 비교했을 때 갖는 가장 큰 차이점 중 하나가 자연 재료를 이용한다는 것이며 자연형 어도가 다양한 어류의 서식처 역할을 한다는 점에서 자연 재료의 역할은 매우 중요하다. 현재 국내 어도 중에는 수변부가 콘크리트로 조성되었음에도 자연형 어도로 등록되어 있는 사례가 적지 않은 만큼, 자연형 어도가 그 특성을 잘 반영하여 설계될 수 있도록 자연재료에 대한 기준이 보다 명확히 정립되고, 구체적으로 어떤 종류의 재료를 어떤 방법으로 조성해야 하는지에 대한 구체적 기준이나 예시가 마련될 필요가 있다.

자연형 어도의 구성에 있어 재료 뿐만 아니라 수변부의 식생 또한 보다 구체적이고 명확한 설계기준의 정립이 필요하다. FAO & DVWK(2002)에 따르면 수변부의 나무나 덩굴 설치로 인한 그늘 형성은 어류에게 휴식 공간, 피난처의 역할을 할 수 있다. 또한 어도는 다면적 생태통로의 기능을 수행하므로 사면의 식생이 야생동물 서식처의 기능에 맞게 고려되어야 하며 수변부 사면의 경사와 기질, 퇴적 영향 등의 지형적 특성에 맞는 식생이 조성되어야 한다(ME & KRC 2004). 이외에도 자연형 어도의 수변부를 조성하는 과정에서 다양한 재료를 사용할 때 화학적 처리 등을 하지 못하도록 하여 어도 내에서 화학 오염물질이 유출되지 않도록 하는 것도 중요하다(ME & KRC 2004).

4. 경사도

국내에서 제안된 우회수로형 자연형 어도의 경사도에 대한 설계 기준은 1/200로, 이는 국내에 이미 조성되어 있는 자연형 어도들의 약 70%가 1/100~1/200 범위에 있다는 것을 근거로 제시되었다. 이에 반해 FAO & DVWK(2002)에서는 1/100~1/200 까지 보다 큰 경사 범위를 제시하고 있으며 무엇보다 강의 특성에 부합하도록 설계할 것을 제안한다. 또한 충분한 공간이 확보된다면 급경사 구간은 최소한으

로 조성하여야 하며 급경사 구간을 설치해야 할 경우 이를 입구 부분에 설치하면 보다 유인효과를 기대할 수 있다고 제시되어 있다. 영국환경청(2010)에서도 자연형 수로식 어도의 경사를 '2.5% 이하'로만 제시하고 있어 보다 유연한 접근이 필요함을 시사하고 있다. 따라서 국내에서도 우선 수리학적 연구를 근거로 타당한 경사 허용 범위를 제시하고, 각 지역 조건에 맞는 탄력적인 설계기준을 제안할 필요가 있다.

5. 폭

국내에서 제안된 자연형 어도의 폭에 대한 기준은 6m 이상으로, 이는 어류가 이동할 때 꼬리의 진동 폭이 체장의 1/2를 넘지 않는다는 연구결과(Kim 2004)를 근거로 제시되었다. 자연형 어도 설계기준에 관한 기존 연구에 따르면 폭에 대한 구체적인 기준 설정을 위해 우리나라 하천에 설치된 어도를 이용하는 어류 약 27,000개체를 조사한 후, 여기에서 최대어인 620mm의 누치를 기준으로 이의 0.5배인 310mm를 제시하였다(KRC & KIT 2012). 그러나 제안된 최종 기준은 '6m 이상'으로, 이는 국내에 설치된 자연형 어도들을 참고하여 제시한 것으로 판단된다. 물론 어도를 조성하는 하천의 크기에 따라 어도 폭이 달라질 수 있으므로, 일괄적으로 6m를 적용시키기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 실제로 국내와 해외에서 현재 운영되고 있는 자연형 어도 중에는 폭이 6m보다 작은 것이 더 많다(NFIS 2017). FAO & DVWK (2002)에서는 바닥 폭이 최소 80cm 이상 될 것을 제안하고 있으며 수로의 폭은 가능한 한 다양하게 줄이거나 넓히면서 자연적인 형태로 조성할 것을 제안한다. 또한, 급경사 구간에서는 폭을 넓혀주어 유속을 줄이도록 하고 있다. 현재 국내에 제안된 자연형 어

도 폭의 기준은 너무 크므로 조정이 필요하며 정확한 수치의 폭을 제안하기 보다는 해외의 기준처럼 최소 폭을 제시하고 다양한 폭의 변화를 주면서 수로를 조성하도록 제안할 필요가 있다.

6. 유속

국내에서 제안된 자연형 어도의 유속에 대한 기준은 입구, 출구, 내부를 모두 0.8m/s 이하로 조성하고 소 구간만 0.5m/s 이하로 조성하는 것이다. 소 구간의 특성 상 0.5m/s로 유속을 낮춘 것을 제외하고는 기본으로 제시한 0.8m/s는 주요 어종 별 돌진속도를 기준으로 설정된 값이다. 그러나 Kim et al. (2015)에 따르면 어도 설계시 어도 내 최대 유속은 대상 어류의 돌진 속도보다 작아야 한다. 어류는 어도 내의 유속을 거슬러 올라야하기 때문에 어류의 이동 속도가 어도의 설계 속도를 넘어야만 이동해 오를 수 있는 것이다. 그런데 국내 주요 어종의 돌진 속도(Table 3)에 따르면, 금강에서 우점종으로 출현하는 긴물개 (*Squalidus gracilis majimae*)나 날망둑 (*Chaenogobius castaneus*)의 돌진속도는 각각 0.8 m/s와 0.7m/s로, 어도 내의 유속이 0.8m/s로 설계될 경우 소상에 어려움이 있을 것으로 판단된다.

또한, 어류는 일반적으로 습격, 도피 또는 급류에서의 이동과 같은 비상시를 제외하고는 돌진속도로 이동하지 않고 가능하면 순항속도로 이동하려고 하는데 이는 돌진속도로 계속 이동하면 쉽게 피로를 느껴 지칠 수 있기 때문이다(Kim 2004). 실제로 어도 구조물 설계 시에는 돌진속도가 아닌 순항속도를 고려해야 한다는 연구 결과가 있으므로(Kim 2004) 기존에 제시된 유속은 어류의 순항속도를 기준으로 수정되어야 할 것이다. 이 외에도, 영국의 어도 설계기

Table 3. Fish burst speed (Lee & Kim 2011)

Species	Burst speed (m/s)	Species	Burst speed (m/s)
<i>Coilia nasus</i>	2.5	<i>Osmeriformes</i>	1.2
<i>Cyprinus carpio</i>	1.5	<i>Carassius carassius</i>	1.1
<i>Hemibarbus labeo</i>	2.0	<i>Chaenogobius castaneus</i>	0.7
<i>Squalidus gracilis majimae</i>	0.8	<i>Acanthogobius flavimanus</i>	1.5
<i>Plecoglossus altivelis</i>	1.8	<i>Leiognathidae</i>	1.4

준(2010)에 따르면 자연형 어도에서의 유속 설정 시 유영력이 가장 약한 어종을 고려하여 설계하도록 명시하고 있는데 이는 작은 치어들까지도 어도를 이용할 수 있다는 자연형 어도만의 특성을 고려한 것이다. 따라서 순항속도가 고려되어 설계 유속이 제시될 때에도, 실제로는 평균 유속 보다 더 느린 유속이 고려되어야 할 것이다.

7. 입구

국내에서 제안된 자연형 어도의 입구 구조는 오픈수로 형태로, 어류 유인수 공급 장치 또는 구조물을 설치하는데 중점을 두고 있다. 또한 이외의 사항은 하천설계기준(2009)의 콘크리트 어도에 대한 공통 지침을 고려할 것으로 제시되고 있는데 특히 입구에 대한 공통 설계지침은 다음과 같다.

- 물고기의 주 이동로를 고려하여 어도 입구를 유심에 연결한다.
- 수리시설물이 하천의 직각 방향이 아니라면 수리시설물의 상류부 가장자리 쪽에 설치한다.
- 수리시설물의 방류구(배수구)를 유인수로로 활용 검토한다.
- 수리시설물 하부와 어도 입구의 연결을 우선 고려하고 방류유속이 강한 경우에는 떨어뜨린다.
- 어류 이동경로를 사전 조사하여 입구위치를 결정한다.

일반적으로 어류는 물길을 거슬러 올라가려 하고, 이중에서도 유속이 가장 빠른 부분을 향해 나아가려는 습성이 있다. 따라서 보와 댐과 같은 시설물에서 방류되는 물의 유속보다 어도에서 나오는 흐름의 유속이 빨라야 물고기가 어도의 입구를 찾아가는 것이다(Kim 2004). 만일 방류 흐름이 어도에서의 흐름보다 유속이 크면 어류는 어도가 아닌 보와 댐 바로 아래 몰려 결국 올라갈 수 없게 된다(Kim 2004). 자연형 어도설계 기준마련을 위한 기존 연구(2012)에서는 유인수 공급 장치 설치를 권장하고 있으나 제시된 표준모델 도면(Figure 1)에서는 이러한 점이 충분히 고려되지 못했음을 확인할 수 있다. 즉, 제시된 표준모델 평면도에서 입구 부분의 내부 구조는 유속이

느리고 정체되는 구간인 소 구간이 배치되어 있다. 이는 입구 쪽이 유속이 센 여울 형태로 조성되어야 물고기들이 유인수를 따라오다가 입구로 완전히 들어갈 수 있는데, 이곳에 소 구간이 배치될 경우 유속이 급격히 감소하여 물고기는 방향을 잃고 다시 어도 밖으로 나갈 위험이 있음을 의미한다(Kim 2008). FAO & DVWK(2002)에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 충분한 유인 흐름을 만들어주고자 어도 입구 부분의 경사를 가파르게 하거나, 폭을 줄여 유속을 빠르게 할 것을 설계기준으로 제시하고 있다. 이는 앞서 언급된 표준모델(Figure 2)에서도 잘 표현되고 있는데 향후 국내에서도 표준모델 제안시 입구 구간의 유속을 빠르게 하는 방안으로 소 대신 여울을 설치하도록 명시할 필요가 있다. 이 외에도 FAO & DVWK(2002)에서는 자연형 어도 설계시 댐이나 보 바로 아래에서 일어나는 세굴 등의 영향을 받지 않도록 어도의 입구를 충분히 단단하게 고정하고, 어도의 바닥이 강의 바닥 부분과 맞닿아 있도록 조성하도록 명시하고 있다. 이는 세굴에 의해 어도의 입구와 강의 바닥에 격차가 발생하면 어류가 어도를 제대로 찾아들어가기 힘들다는 국내 연구 결과(Kim 2008)와도 일치하는 부분이다.

IV. 개선방안

지금까지의 내용을 종합하여 보완되어야 할 사항으로 선정하였던 7가지 설계기준 항목(기본 설계 모델, 구조, 재료, 경사도, 폭, 유속, 입구)에 대해 각각 분석 내용을 정리하고 다음과 같이 설계 기준에 대해 개선 방안을 제시해보았다.

1. 기본 설계 모델: 기본 설계 모델 항목에서 제시하는 그림은 FAO & DVWK(2002)에서 제시한 Figure 2의 모델을 수용하거나 이와 유사한 자연적인 형태의 모델을 활용할 것을 제안한다. 여기서 중요한 것은 Figure 1과 같이 어도만 별도로 제안하기 보다는 반드시 어도의 수로가 보와 댐과 같은 하천시설물에 어떤 모습으로 연결될 것인지를 명확히 보여 주도록 할 필요가 있다. 또한 어도의 전체 형태가 대칭형과 같이 인위적이지 않아야 하며, 수로의 폭을

가능한 범위 내에서 다양하게 표현하여 내부적으로 유동적인 구조를 이룰 수 있도록 한다.

2. 구조: 구조 설계 기준에서는 자연형 어도 특성 상 세굴에 취약할 수 있다는 점을 고려하여 내부 구조 유지방안을 수립해야 하고 저서생물들이 어도 내부로 서식처로 이용할 수 있도록 내부 구조를 형성시켜 주어야 한다. 먼저, 구조 유지방안에서는 국내의 연구가 아직 미흡하므로 FAO & DVWK(2002)에서 제안한 생물공학적인 유지방안을 따를 필요가 있다. 이는 바닥의 토목섬유 지반 위에 자갈이나 돌을 깔아 토양의 유실을 막고, 사면이 무너지지 않도록 지지대를 세우며 비탈면에 버드나무 등을 식재하는 방법이다. 다양한 내부 구조를 만들 때에는 큰 호박돌을 일정 간격으로 어도 내부에 설치하거나, 유속이 빠를 경우 이를 줄일 수 있도록 계단식 보의 형태로 돌을 나열하여 설치할 필요가 있다. 어도 내부에 설치될 돌 간의 간격 등은 국내 어류가 이동할 수 있는 최소 폭인 310mm 보다(KRC & KIT 2012)는 커야 한다. 또한 돌 직경의 1/3~1/2이상을 바닥에 묻히도록 하여 떨어져 나가지 않도록 하며 해당 유속에 쓸려 내려가지 않을 수 있는 돌 직경 결정 공식(USDA 2007)을 따르는 것이 바람직하다.

3. 재료: 재료를 선정할 때에는 실제 강에서 발견되는 재료를 이용하거나, 각 해당 지역에서 쉽게 구할 수 있는 재료를 이용하도록 한다(FAO & DVWK 2002). 재료 중 식생에 관해서는 해당 수변부의 생태적 특성을 우선적으로 고려해야 하는데, 수변부의 나무나 덩굴 설치는 어류를 포함한 다양한 생물들에게 그늘을 제공해주어 휴식 공간 및 피난처의 역할을 할 수 있다. 이 외에 각 재료별 특성에 따라 설치하는 구체적 방법에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이므로 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

4. 경사도: 경사도는 어도가 설치될 구간의 유량과 유속 등 강의 특성을 고려하여 어도의 적정 유속이 유지되도록 설계한다. 경사도에 대한 구체적인 수치를 제시하기에는 지금까지 진행되어온 국내 연구가 매우 부족한 실정이다. 농어촌공사에서 제안한 '1/200 이상' 기준에 대해서는 보다 명확한 수리학적 근거가 뒷받침 되어야 할 것이며 이를 근거로 향후

구체적 수치의 경사도 범위가 정해져야 한다. 경사도에 대해서는 특히 해외의 경사도 범위를 그대로 사용하기가 어려운데, 이는 경사도의 경우 유속과 직결되므로, 대형 어류를 대상으로 설계한 외국의 어도기준을 그대로 사용하 경우 국내의 소형 어류들이 이용할 수 없기 때문이다(Choi & Lee 2004).

5. 폭: 농어촌공사(2012)의 연구 결과에 따르면 국내에 서식하는 어종들이 지나갈 수 있는 최소 통로 길이는 310mm이다. 따라서 폭에 대한 기준은 '310mm 이상'으로 설정하되, 내부에 돌이 설치되었을 때의 이동 통로를 감안하여 폭을 더 넓게 설계하도록 할 필요가 있다. 또한 수로의 폭은 가능한 한 다양한 방법으로 줄이거나 넓히면서 자연적인 형태로 조성하는 것이 바람직하다.

6. 유속: 앞서 제시한대로, 유속의 기준은 어류의 돌진속도가 아닌 순항속도를 기준으로 고려되어야 한다. 어종에 따라 다르긴 하나, 일반적으로 체장을 BL이라 할 때 순항속도는 2~4BL/s이며 돌진속도는 10BL/s로 알려져 있다(Park et al. 2011). 따라서 어도를 설치할 때 그 구간에 서식하는 어종과 그 체장을 조사하여 가장 작은 어종의 순항속도를 그 어도의 설계 기준으로 해야 한다. 예를 들어 국내에 서식하는 주요 어종 중 느린 돌진 속도를 가진 우점 출현종인 긴물개(*Squalidus gracilis majimae*)나 날망둑(*Chaenogobius castaneus*)을 기준으로 했을 때 각 돌진속도는 0.8m/s와 0.7m/s이므로 설계 유속은 순항속도를 고려하여 0.4m/s 정도로 결정해야 할 것이다.

7. 입구: 기본적으로는 하천설계기준(2009)에서 정한 입구에 대한 설계 사항을 따르고, 이 외에 추가로 어류가 입구를 잘 찾아가기 위한 사항을 고려할 필요가 있다. 보와 댐과 같은 시설물에서 방류되는 물의 유속보다 어도에서 나오는 흐름의 유속이 빨라야 어류가 어도의 입구를 잘 찾아 들어갈 수 있다. 따라서 방류 유속이 지나치게 빠른 경우에는 어도의 입구가 이로부터 충분히 멀리 떨어질 수 있도록 설계한다. 또한 어도의 입구에는 유인수를 설치하거나 입구의 경사도를 크게 하거나 폭을 줄여 유속이 빨라질 수 유도할 필요가 있다.

V. 결론

본 연구에서는 기존에 제안된 ‘자연형 어도 표준 모형 형식(안)’의 문제점들을 해외 설계기준 사례들과 비교 검토를 통해 분석하였으며 이를 바탕으로 보완 개선되어야 할 사항이나 향후 추가로 진행되어야 할 연구 등을 제시하고자 하였다. 이상의 내용을 종합해 볼 때, 국내 자연형 어도의 설계 기준을 확립할 때 국내외 연구결과에 대한 폭넓고 면밀한 분석을 바탕으로 어도구조 유지 방안이나 내부 돌 설치 방법, 자연 재료 등에 대한 보다 실증적 연구와 자료 확보가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 경사도와 폭에 대한 설계기준 역시 이미 설치되어 있는 국내의 자연형 어도들에 의존하기 보다는 수리학적, 생물학적 연구가 선행되고 이를 바탕으로 각 지역 조건에 맞는 설계 기준을 제안하는 것이 바람직하다. 자연형 어도는 콘크리트 형식의 어도에 비해 다양한 내부구조와 유속범위를 제공함으로써, 소형 어류부터 대형 어류까지 다양한 어종이 모두 이용 가능하다는 장점이 있다. 또한 자연적 재료로 조성함으로써 다양한 생물에게 서식처를 제공해 줄 수 있다는 생태적 가치도 크다. 그러나 자연형 어도는 기존의 정형적 형태의 어도 형식에 비해 분명 복잡하고 많은 조건들을 고려해야만 하고 장기적으로는 더 자세한 수리학적 모델 실험을 바탕으로 보다 구체적인 지침 사항이 명시될 필요가 있다.

References

- Aarestrup K, Lucas MC, Hansen JA. 2003. Efficiency of a nature-like bypass channel for sea trout (*Salmo trutta*) ascending a small Danish stream studied by PIT telemetry. *Ecol Freshw Fish*. 12(3): 160-168.
- Bretón F, Baki ABM, Link O, Zhu DZ, Rajaratnam N. 2013. Flow in nature-like fishway and its relation to fish behaviour. *Can J Civil Eng*. 40(6): 567-573.
- Choi JY, Lee KJ. 2004. Fish Ways at Rivers and Dams: Current Status, and Future Installation and Management. Research Report to Korea Environment Institute. 1-144. [Korean Literature]
- Chow VT. 1959. Development of uniform flow and its formulas. *Open-Channel Hydraulics*. 1: 89-127.
- Chung-Ang University Industry Academic Cooperation Foundation (CAUIACF). 2011. Model Development and hydraulic experiment of Nature-Like Fishway. Research Report. [Korean Literature]
- Clay CH. 1994. Design of fishways and other fish facilities. CRC Press.
- Deutscher Verband fur Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (DVWK). 2002. Fish Passes: Design, Dimensions, and Monitoring. Environment Agency. 2010. Fish Pass Manual: Guidance Notes On The Legislation. United Kingdom. Bristol. Rio House.
- Fischenich C. 2000. Impacts of Streambank Stabilization Structures. Wetlands Regulatory Assistance Program (WRAP), Report prepared for US Army Corps of Engineers, Omaha District. Omaha. Nebraska. p. 4.
- Gustafsson S. 2012. The macroinvertebrate community in a nature-like fishway with habitat compensation properties. Doctoral dissertation, University of Karlstads.
- Katopodis C. 1992. Introduction to fishway design. Freshwater Institute, Central and Arctic Region, Department of Fisheries and Oceans.
- Kim JH, Kim C. 2001. Study on Stone Installation Method inside Fishway for Considering Nature Friendly Fishway. Korea Water Resources Association. 1(1):

- pp.17-20. [Korean Literature]
- Kim JH. 2004. Design of Fishway. Korea Water Resources Association. text book for 12th hydraulic engineering work shop. pp.89-131 [Korean Literature]
- Kim JH. 2008. Design of Fishway Considering fish passage efficiency. Korea Water Resources Association. pp. 2000-2004 [Korean Literature]
- Kim YD, Baek KO, Park MH, Ku YH. 2015. Improvements of Design Standards of Fishway. Korea Water Resources Association. 48(4): 65-73. [Korean Literature]
- Korea Rural Community Corporation (KRC), Kumoh National Institute of Technology (KIT). 2012. Model Development of Nature-Like Fishway (Bypass Channel Type). Research Report. [Korean Literature]
- Korea Rural Community Corporation (KRC), Kumoh National Institute of Technology (KIT). 2013. Modification of fishway design criteria and postmanagement system. Research Report. [Korean Literature]
- Korea Water Resources Association(KWRA), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(MLTMA). 2009. Explanation of rivers design standard (of Korea legislation). [Korean Literature]
- Lee JS, Kim MS. 2011. Flow analysis in Nakdong River Barrage fishway using Flow-3d. Journal of the Society of Naval Architects of Korea. 48. 6: 2118-2121 [Korean Literature]
- Ministry of Environment(ME), Korea Rural Community Corporation(KRC). 2004. Development of Fishway as a Ecological Corridor in the channel. Ministry of Environment(ME); p.1-213. [Korean Literature]
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport(MOLIT). 2016. Statistics of Korea Water Resources. Jinhan M&B. p.1-640. [Korean Literature]
- Nehlsen W, Williams JE, Lichatowich JA. 1991. Pacific salmon at the crossroads: stocks at risk from California, Oregon, Idaho, and Washington. Fisheries, 16(2): 4-21.
23. NFIS: National Fishway Information System [Internet]. Rural Research Institute; [cited 2017 Feb 16]. Available from: <http://www.fishway.go.kr>
- Pander J, Mueller M, Geist J. 2013. Ecological functions of fish bypass channels in streams: migration corridor and habitat for rheophilic species. River Res Appli, 29(4): 441-450.
- Parasiewicz P, Eberstaller J, Weiss S, Schmutz S. 1998. Conceptual guidelines for nature-like bypass channels. Fish Migration Fish Bypasses, 348.
- Park SD, Kim HS, Hong JS, Lee SK, Cho JW. 2011. An Experimental Study on Jump of Zacco platypus. In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference. Korea Water Resources Association. 33-33. [Korean Literature]
- Pohl M. 2004. Channel bed mobility downstream from the Elwha dams, Washington. The Professional Geographer, 56(3): 422-431.
- Sheer MB, Steel EA. 2006. Lost watersheds: barriers, aquatic habitat connectivity, and salmon persistence in the Willamette and Lower Columbia River basins. Transactions of the American Fisheries Society, 135(6): 1654-1669.

- Slaney TL, Hyatt KD, Northcote TG, Fielden RJ. 1996. Status of anadromous salmon and trout in British Columbia and Yukon. *Fisheries*. 21(10): 20-35.
- The U.S. Department of Agriculture (USDA). 2007. National Engineering Handbook. Technical Supplement 14N, "Fish Passage and Screening Design".
- Wei G, Yang Z, Cui B, Li B, Chen H, Bai J, Dong S. 2009. Impact of dam construction on water quality and water self-purification capacity of the Lancang River, China. *Water resources management*. 23(9): 1763-1780.
- World Commission on Dams. 2000. Dams and Development: A New Framework for Decision-making: the Report of the World Commission on Dams. Earthscan.