

Original article

대하천 보에 설치된 어도의 어류 이용 현황 및 효과 분석

김정희 · 박상현 · 백승호 · 이남주¹ · 장민호² · 윤주덕^{3,*}

주식회사 에코리서치, ¹경성대학교, ²공주대학교, ³국립생태원 멸종위기종복원센터

Analysis of Fish Utilization and Effectiveness of Fishways Installed at Weirs in Large Rivers. Jeong-Hui Kim (0000-0003-2331-4232), Sang-Hyeon Park (0000-0001-6036-8489), Seung-Ho Baek (0000-0002-8280-8665), Namjoo Lee¹ (0000-0003-1599-846X), Min-Ho Jang² (0000-0003-2331-4232), Ju-Duk Yoon^{3,*} (0000-0003-1667-327x) (EcoResearch incorporated, Gongju 32588, Republic of Korea; ¹Kyungsung University, Busan 48434, Republic of Korea; ²Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea; ³Research Center for Endangered Species, National Institute of Ecology, Yeongyang 36531, Republic of Korea)

Abstract This study analyzed the monitoring results of fishways at 16 weirs constructed on four large Rivers to provide data helpful for the operation and management of fishways. The average utilization rate of the fishways at the weirs was confirmed to be 64.9%. When comparing the dominant species in the mainstream and fishway monitoring results, differences were observed in 9 weirs (56.3%). This indicated that the species prevalent in the mainstream were not necessarily the ones most frequently using the fishways. The average number of individuals using the fishways per day was 336. When classifying the fish species using the fishway by life type, 92.3% were primary freshwater fish, and migratory species accounted for only 5.6%. Analysis based on the season of fishway usage revealed that an average or higher number of fish species used the fishways from May to October, with the highest number of individual users occurring from June to August. Between May and July, 80% of the fish species using the fishways were in their spawning period, while during other season, less than 40% were species that move during the spawning period. The fishways that showed a significant alignment between the spawning period and the fishway passage period were *Rhinogobius brunneus*, *Leiocassis nitidus*, *Squalidus chankaensis tsuchigae*, *Pseudogobio esocinus*, *Acheilognathus rhombeus*, and *Pungtungia herzi*, in that order. When comparing the fishway monitoring results of the Gangjeong-Goryeong Weir and the Dalseong Weir with the upper part water level of the weir, both the number of fish species and individuals using the fishway showed positive correlations with the upper part water level of the weir. This suggests that a higher water level of the weir increases the inflow discharge within the fishway, leading to increased use by fish (number of individuals in Gangjeong-Goryeong Weir, $P < 0.001$; number of species in Dalseong Weir, $P < 0.05$). This study summarized and analyzed the results of fishway monitoring at 16 weirs built on four large Rivers, considering fishway efficiency, operation and management, monitoring period, and regulation of water level in

Manuscript received 8 November 2023, revised 5 December 2023,
revision accepted 8 December 2023

* Corresponding author: Tel: +82-54-680-7360, Fax: +82-54-680-7329
E-mail: grandblue@nie.re.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

the upper part of the weir. It is thought that this will help understand the status of fish use in fishways on large River and aid the construction, operation, and management of fishways in the future.

Key words: fishway management, fishway operation, fishway monitoring, fishway efficiency, monitoring period, migratory fish, spawning period

서 론

인간은 오랜 기간 동안 수자원을 활용하기 위해 강과 하천에 인공구조물을 다수 건설하였으며, 이러한 과정을 통해 전 세계적으로 약 280만 개의 댐이 건설되었다(Grill *et al.*, 2019). 강과 하천을 가로지르는 인공구조물의 건설은 수체의 물리적 형태를 변형시키고, 물의 흐름을 느리게 만들어 수질에 영향을 미치며, 종적 연결성을 감소시켜 수생 생물에 부정적인 영향을 미친다(Liermann *et al.*, 2012). 이는 어류의 상류로의 이동을 저해하고 상·하류 개체군의 유전적 단절을 야기하는 등 부정적인 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다(Yammamoto *et al.*, 2004).

한국에서 2009년부터 2012년까지 기후변화에 따른 극한의 가뭄, 홍수 예방, 수질 및 수생태계 개선, 레저문화 공간 확충, 경제 위기 극복 등을 목적으로 하여 한강, 낙동강, 금강, 영산강 등 대하천에 16개의 보를 건설하였다. 보의 건설 이후 단절된 연결성을 확보하기 위해 각 보마다 1~2 개소의 어도를 건설하여 운영하고 있다.

어도의 설치 후 어도 이용 어류 모니터링은 어도의 효율 검증과 함께 해당 어도의 운영을 위한 효과적인 자료로 이용될 수 있다(Bunt *et al.*, 2012). 어도의 모니터링은 대부분 채집을 통한 직접 모니터링(trap법)과 원격측정법을 활용한 간접 모니터링(PIT telemetry)으로 이루어지고 있다(Cada, 1998; Lucas and Baras, 2001). 대부분의 연구가 예 산 및 연구의 전문성 등의 문제로 인하여 trap을 이용한 직접 모니터링을 수행하고 있으며, 이를 통해 어도 이용 어종, 어도 주요 이용 시기, 어도 주요 이용 개체 크기 등에 대한 정보를 제공하고 있다. 한강, 낙동강, 금강, 영산강에 건설된 16개 보에 설치된 모든 어도가 1년 이상의 trap 모니터링이 이루어졌으나, 그 효과를 종합적으로 분석된 사례가 없다. 일부 보에 대해서 어도 효율분석을 통해 적정 수위 및 유입 유량에 대한 문제점을 제시하였지만(Kim *et al.*, 2015a, 2015b), 해당 결과를 관리 방안으로 활용하지 않고 있다. 이렇듯 대부분의 국내 어도 모니터링이 대부분 현황을 제시하는 데 그치고 있어, 결과를 활용한 종합 분석 및 어도 운영 및 관리에 대한 활용은 미진한 실정이다. 이러한 문제에 대해서 국제적으로는 어도 모니터링 결과를 분석하여, 설치된 어도를 보다 효율적으로 활용할 수

있는 방법에 대한 연구가 진행되고 있다(van Leeuwen *et al.*, 2016).

본 연구는 현장조사와 문헌연구를 통해 국내 대하천의 16개 보에 건설된 어도의 결과를 종합적으로 분석하였다. 이를 통해 대하천에 건설되어 운영 중인 어도별 효과를 파악하고, 시기별 어도 이용 현황을 분석하였다. 또한, 낙동강 강정고령보와 달성보의 현장조사를 통해 해당 어도의 효율적인 운영방안 마련 및 국내 어도 모니터링 방법의 개선점에 대해서 고찰하였다. 이러한 결과는 대하천에서의 어도 건설 및 운영, 모니터링 계획 수립에 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 대하천 보 어도 모니터링 문헌조사

2012년에 준공된 대하천(한강, 낙동강, 금강, 영산강) 16개 보(Fig. 1)의 어도는 2012년부터 2017년까지 최소 1회 이상의 모니터링이 실시되었다(Table 1). 대하천 16개 보의 어도 모니터링 관련 보고서(Appendix 1)의 데이터를 취합하여, 보별, 조사 시기별 어도 이용 현황을 취합 후 정리하였다. 또한, 어도 모니터링 결과 이외, 보 인근에서 조사된 본류의 어류 채집 자료를 취합하여 분석에 활용하였다.

2. 강정고령보, 달성보 어도 모니터링 현장조사

대하천 16개 어도의 유입 유량은 보의 상류 수위에 의해 조절되며, 따라서 보별 관리수위에서 어도의 적정 운영 수심 및 유속이 유지될 수 있게 설계되었다. 어도가 만들어진 2012년~2017년은 모든 시기에 관리수위가 유지되었으며, 2018년 이후 일부 보의 운영으로 인해 보 상류 수위의 변동이 이루어졌다. 이에 본 연구에서는 보의 상류 수위와 어도 이용 효율 간 상관성을 분석하기 위해서 어도 운영에 따라 수위 변동이 이루어진 강정고령보 아이스하버식 어도와 달성보 인공하도식 어도를 대상으로 2020년~2021년 현장 모니터링을 수행하였다(Fig. 1). 현장조사는 보의 운영에 따라 보 상류 수위 변동이 발생한 2020년(5회)과 2021년(5회) 5월과 6월에 실시하였다. 강정고령보 아이스하버식 어도는 동일한 규격의 trap(가로 1m, 세로 1m, 폭

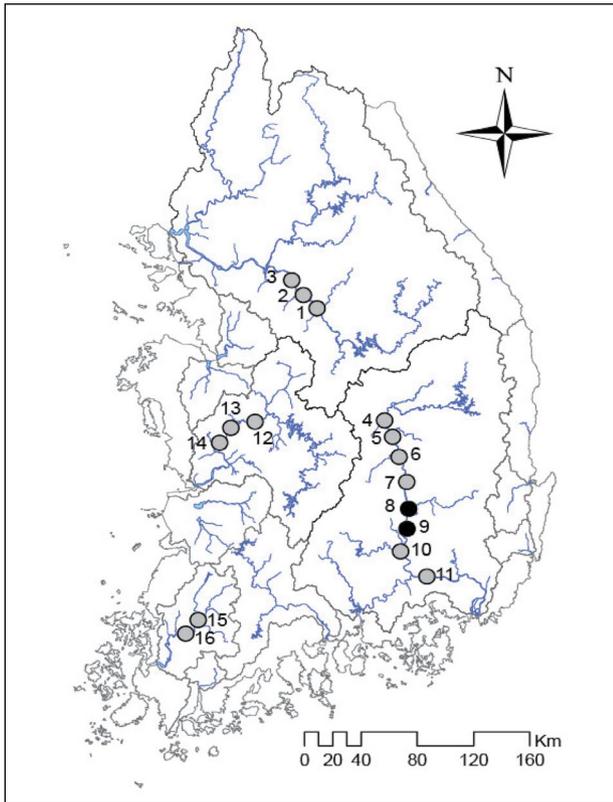


Fig. 1. Locations of 16 weirs in four major Rivers (black circle, field survey, gray circle, literature survey). 1, Gangcheon Weir; 2, Yeosu Weir; 3, Ipo Weir; 4, Sangju Weir; 5, Nagdan Weir; 6, Gumi Weir; 7, Chilgog Weir; 8, Gangjeong-Goryeong Weir; 9, Dalseong Weir; 10, Habcheon-Changnyeong Weir; 11, Changnyeong-Haman Weir; 12, Sejong Weir; 13, Gongju Weir; 14, Baegje Weir; 15, Seungchon Weir; 16, Jugsan Weir.

0.7 m, 망목 5 mm)을 어도의 폭에 맞추어 출구부에 설치하였으며, 달성보 인공하도식 어도는 일각망(유인어망 길이 10m, 높이 1.5 m, 망목 5 mm)을 출구부에 설치하여 소상 어류를 모니터링하였다. 모니터링은 trap 및 일각망 설치 이후 24시간 주기로 실시하였으며, trap과 일각망에 포획된 어류는 어도를 이용한 어류로 해석하였다. 포획된 어류는 Kim and Park (2002)을 이용하여 동정하였으며, 동정된 어류는 어도 상류에 즉시 방류하여 재포획과 폐사를 방지하였다.

어도 이용 현황과 보 상류 수위 간 상관성을 분석하기 위해 낙동강 홍수통제소 (<http://www.nakdongriver.go.kr>)에서 제공하는 강정고령보와 달성보의 상류 수위 자료(강정고령보, 달성보 어도 모니터링 시점)를 다운로드하여 분석에 활용하였다.

3. 자료분석

보별 어도 이용 현황을 파악하기 위해서 본류에서 채집된 어종과 어도에서 모니터링된 어종을 합산하여 “총 출현 어종수”를 구하였으며, 이 중 어도에서 채집된 어종수의 비율을 통해 보별 “어도 이용률”을 구하였다. 또한, 본류와 어도에서 채집된 어종 중 가장 많은 개체가 확인된 우점종을 확인하였다. 보별 모니터링 결과를 분석하여, 보별 출현 종수 및 개체수를 분석하였으며, 추가로 어도의 효과(이동량)를 확인하기 위해서 보별 어도에 대한 “1일 이용 개체수(총 개체수/모니터링 횟수)”를 산정하였다. 어도 이용 어종의 생태형(일차담수어, 회유어, 주연어)을 구분하여, 생태형에 따른 출현 종수 및 비율을 산정하였다.

대하천 16개 보에 대한 어도 모니터링 결과를 합산하여 대하천 어도에 대한 시기별 어도 이용 현황(종수 및 개체수)을 분석하였다. 시기별 어도 이용에서 산란시기 어도 이용 현황을 분석하기 위해서 Chae *et al.* (2019), Kim and Park (2002), Song (2017), Lee and Rho (2007)의 문헌 연구를 활용하여 전체 출현 어종에 대한 산란시기를 정리하였다. 어종별 산란을 목적으로 하는 어도 이용(산란 이동)을 확인하기 위해서는 어도를 이용한 개체의 성적 성숙에 대한 확인과 더불어 산란 이동 추적에 대한 연구를 추가로 수행하여야 하지만, 어도 모니터링에서 해당 연구를 추가로 수행하기에는 어려움이 있다. 따라서, 어종별 산란시기로 알려져 있는 기간 동안의 어도 이용 현황과, 그 외 기간에 대한 어도 이용 현황을 구분하여 월별 어도 이용 현황(종수 및 상대풍부도)을 제시하였다. 이는 어종별 산란을 고려한 개별 어도 운영이 아닌, 대하천 전체 어도에 적용할 수 있는 보편적인 어도의 운영 체계(운영 및 모니터링 시기)를 마련하는 데 있어서 도움을 줄 수 있을 것이다.

보의 상류 수위와 어도 이용 효율 간 상관성을 확인하기 위해서 강정고령보 아이스하버식 어도와 달성보 인공하도식 어도의 현장조사 결과를 활용하였다. 모니터링 시점의 보 상류 수위(24시간 평균)와 모니터링 결과(종수 및 개체수)에 대한 상관성을 확인하기 위해서 Spearman rank correlation 분석을 실시하였다. 통계 분석은 SPSS 18.0 (SPSS Inc., Chicago, Illinois, USA)을 이용하였다.

결 과

1. 보별 어도 이용 현황 및 효과

보별 서식 어종의 어도 이용률은 평균 64.9%로 서식 어종의 과반수 이상이 어도를 이용하였으며, 수계에 따른 이

Table 1. Type of fishway installation 16 weirs in four major Rivers and number of monitoring (The references by survey year can be found in Appendix 1).

Rivers	Divisions		Number of monitoring (*, field survey)								Total
	Weirs	Fishway types	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2020	2021	
Hangang River	Gangcheon Weir	Ice-Habor	3	6							9
		Nature-like	4	8							12
	Yeoju Weir	Ice-Habor	5	3							8
		Nature-like	5	4							9
	Ipo Weir	Nature-like	4	4							8
	Sangju Weir	Nature-like	6	9			4	3			22
Nakdonggang River	Nagdan Weir	Complex	2	9		5		3			19
	Gumi Weir	Ice-Habor	2	9		5		4			20
	Chilgog Weir	Complex	5	9		5		4			23
	Gangjeong-Goryeong Weir	Ice-Habor					5	1	5*	5*	16
		Nature-like					5	1			6
	Dalseong Weir	Ice-Habor					5	1			6
		Nature-like					5	1	5*	5*	16
	Habcheon-Changnyeong Weir	Complex				4	4	4			12
	Changnyeong-Haman Weir	Pool and weir	2	8		4	4	4			22
		Ice-Habor	3	8		4	4	4			23
Geumgang River	Sejong Weir	Nature-like	8	10	8	12	5				43
	Gongju Weir	Complex	3	15	8	12	5				43
		Ice-Habor	5	14	8	12	5				44
	Baegje Weir	Nature-like	2	17	6	14					39
Yeongsangang River	Seungchon Weir	Ice-Habor	3	8		5					16
	Jugsan Weir	Ice-Habor	3				5				8

용률의 차이는 확인되지 않았다. 죽산보(42.1%)와 합천창녕보(45.5%)에서 50% 미만의 낮은 이용률을 나타냈으며, 여주보와 세종보에서 최대 92%의 높은 이용률을 나타냈다(Table 2). 본류와 어도 모니터링 결과에서 확인된 우점종을 비교한 결과, 총 7개의 보(43.7%)에서 동일하게 나타났고 나머지 9개(56.3%)의 보에서 차이를 보였다. 이를 통해 본류에 다수 서식하는 종이 어도를 다수 이용하는 것은 아닌 것으로 확인되었다. 한강에서 어도를 가장 많이 이용한 어종(보별 우점종)은 피라미, 밀어로 확인되었으며, 낙

동강은 꼬리, 강준치, 금강은 물개, 누치, 꼬리, 영산강은 누치, 참물개로 확인되었다.

보별 어도 이용 효과를 확인한 결과, 보별 평균 7,047개체가 어도에서 모니터링되었다(Table 3). 이를 모니터링 횟수(24시간 단위)로 나누어서 일(day) 당 어도 이용 개체수를 환산한 결과, 1일 평균 336개체가 어도를 이용하였다. 보별 구분 시 여주보에서 1일 2,883개체로 가장 많았으며, 이는 밀어의 산란기 이동으로 인하여 어도 모니터링에서 다수 확인되었기 때문이다. 이외 칠곡보(27개체), 강정고

Table 2. Occurrences and dominant species of fish in the area of weir placement. The fish collected in the main channel and fishway were differentiated, and the proportion of total occurring species by weir was calculated.

Divisions			Species		Dominant species	
Rivers	Weirs	Sites	Numbers	Ratio of total species (%)	Scientific name	RA (%)
Hangang River	Gangcheon Weir	Main channel	31	–	<i>Zacco platypus</i>	36.7
		Fishway	37	84.1	<i>Zacco platypus</i>	32.2
		Total	44	–	<i>Zacco platypus</i>	33.8
	Yeoju Weir	Main channel	21	–	<i>Zacco platypus</i>	48.1
		Fishway	39	92.9	<i>Rhinogobius brunneus</i>	84.2
		Total	42	–	<i>Rhinogobius brunneus</i>	82.3
	Ipo Weir	Main channel	30	–	<i>Zacco platypus</i>	44.8
		Fishway	24	68.6	<i>Zacco platypus</i>	42.6
		Total	35	–	<i>Zacco platypus</i>	43.7
Nakdonggang River	Sangju Weir	Main channel	41	–	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	20.5
		Fishway	26	60.5	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	31.8
		Total	43	–	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	25.8
	Nagdan Weir	Main channel	33	–	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	38.5
		Fishway	20	57.1	<i>Erythroculter erythropterus</i>	63.9
		Total	35	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	36.7
	Gumi Weir	Main channel	32	–	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	47.0
		Fishway	19	59.4	<i>Erythroculter erythropterus</i>	44.0
		Total	32	–	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	40.7
Chilgog Weir	Main channel	28	–	<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i>	31.0	
	Fishway	14	50.0	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	38.0	
	Total	28	–	<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i>	28.6	
Gangjeong-Goryeong Weir	Main channel	21	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	29.0	
	Fishway	17	70.8	<i>Erythroculter erythropterus</i>	50.0	
	Total	24	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	37.7	
Dalseong Weir	Main channel	23	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	46.5	
	Fishway	15	60.0	<i>Erythroculter erythropterus</i>	62.8	
	Total	25	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	55.2	
Habcheon-Changnyeong Weir	Main channel	32	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	43.3	
	Fishway	15	45.5	<i>Erythroculter erythropterus</i>	66.2	
	Total	33	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	48.7	
Changnyeong-Haman Weir	Main channel	32	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	34.9	
	Fishway	25	75.8	<i>Erythroculter erythropterus</i>	51.5	
	Total	33	–	<i>Erythroculter erythropterus</i>	47.1	
Geumgang River	Sejong Weir	Main channel	42	–	<i>Hemibarbus labeo</i>	18.4
		Fishway	46	92.0	<i>Squalidus japonicus coreanus</i>	20.6
		Total	50	–	<i>Squalidus japonicus coreanus</i>	19.2

Table 2. Continued.

Divisions			Species		Dominant species	
Rivers	Weirs	Sites	Numbers	Ratio of total species (%)	Scientific name	RA (%)
Geumgang River	Gongju Weir	Main channel	45	-	<i>Squalidus japonicus coreanus</i>	33.5
		Fishway	34	73.9	<i>Hemibarbus labeo</i>	34.3
		Total	46	-	<i>Squalidus japonicus coreanus</i>	21.4
	Baegje Weir	Main channel	42	-	<i>Microphysogobio jeoni</i>	28.8
		Fishway	22	50.0	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	61.2
		Total	44	-	<i>Microphysogobio jeoni</i>	26.0
Yeongsangang River	Seungchon Weir	Main channel	43	-	<i>Lepomis macrochirus</i>	22.6
		Fishway	25	55.6	<i>Hemibarbus labeo</i>	29.6
		Total	45	-	<i>Lepomis macrochirus</i>	19.0
	Jugsan Weir	Main channel	38	-	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	25.5
		Fishway	16	42.1	<i>Squalidus chankaensis tsuchigae</i>	30.9
		Total	38	-	<i>Opsariichthys uncirostris amurensis</i>	22.3

RA, relative abundance

령보 (35개체), 달성보 (87개체), 합천창녕보 (85개체) 등 낙동강 중·하류에 위치한 보와 금강의 백제보 (98개체)에서 1일 어도 이용 개체가 100개체 이하로 낮게 나타났다.

대하천에서 어도를 이용하는 어종(보별 평균)은 일차담수어 92.3%로 가장 많았다. 회유성 어종은 총 8개 보에서 보별 최소 1종에서 최대 3종까지 어도를 이용하였다. 구체적으로 한강의 강천보, 여주보에서 뱀장어, 빙어, 은어, 낙동강의 달성보, 합천창녕보, 창녕함안보에서 뱀장어, 은어, 금강의 세종보, 백제보에서 뱀장어, 빙어, 영산강의 승촌보에서 뱀장어가 어도를 이용하였다. 주연어는 꼭저구, 민물검정망둑, 가숭어, 송어를 포함한 4종이 어도를 이용하였다.

2. 어도 이용 시기

대하천에 서식하는 어류는 3월부터 11월까지 월 평균 38종의 어류가 어도를 이용하였다. 월별 비교시 대부분의 시기에서 33종 이상의 어류가 어도를 이용하였으며, 11월에는 가장 적은 9종이 어도를 이용하였고, 6월에 가장 많은 51종이 어도를 이용하였다(Fig. 2A). 월별 일 평균 어도 이용 개체수 패턴을 분석한 결과 종수와는 다르게 7월을 기준으로 정규분포를 이루는 것을 확인하였다. 수온이 낮은 3월과 11월의 경우 일 평균 어도 이용 개체수가 30개체 내외로 낮은 값을 보였다(Fig. 2B).

문헌을 분석하여 대하천 본류 및 어도에서 확인된 80종

의 산란시기 분포를 확인한 결과, 1월에서 12월까지 모든 시기에 1종 이상의 어류 산란시기를 포함하며, 그중 4월부터 7월까지가 산란시기가 집중되는 주요 산란시기로 분석되었다(Fig. 3A). 특히 5월과 6월은 각각 65종, 70종의 많은 어류에 대한 산란시기가 포함되었다. 어도 모니터링이 이루어진 3월~11월을 기준으로 산란시기에 포함되는 어류의 어도 이용은 11월을 제외한 모든 시기에서 확인되었다(Fig. 3B, C). 다만 3월~4월, 8월~10월은 산란시기에 포함되는 어종의 개체수 비율이 40% 이하로 나타났으며, 이외 5월~7월까지가 산란시기 포함 어종의 개체수 비율이 80% 이상으로 높게 나타났다. 산란시기와 어도 이용 시기가 크게 일치하는 어류는 밀어 (98.9%), 밀자개 (89.7%), 참물개 (88.2%), 모래무지 (85.4%), 납지리 (84.2%), 돌고기 (82.2%) 순서로 나타났으며, 총 30종의 어류가 산란시기 내 어도의 이용률이 높게 나타났다(Fig. 4).

생활사 유형에 따른 어도 이용 시기를 분석한 결과, 전체 조사기간의 일차담수어 상대풍부도가 99.3%로 가장 높게 나타났다(Fig. 5). 회유어는 이동이 확인된 3월~10월 중, 5월(2.2%)에 가장 높은 비율로 어도를 이용하였다. 주연어는 이동이 확인된 3월~10월 중, 3월(4.6%)과 9월(3.8%)에 어도를 많이 이용하였다.

3. 보 상류 수위 변화에 따른 어도 이용 (강정고령보, 달성보)

현장조사 결과 강정보 아이스하버식 어도는 일평균

Table 3. Results of trap monitoring by 16 weirs and classification of fishway usage fish by life cycle type (marine fish were absent, so they were excluded from the life cycle type).

Rivers	Divisions	Fishway monitoring results										Life cycle types				
		Weirs	Number of monitoring	Family	Species	Individuals	Individuals/1day	Species number	RA (%)	Primary Freshwater fish	Species number	RA (%)	Migratory species	Species number	RA (%)	Peripheral freshwater species
Hangang River	Gangcheon Weir	21	10	37	4,991	238	34	91.9	2	5.4	1	2.7				
	Yeoju Weir	17	9	39	49,007	2,883	34	87.2	3	7.7	2	5.1				
	Ipo Weir	8	4	24	1,865	233	23	95.8	-	-	1	4.2				
Nakdonggang River	Sangju Weir	22	6	26	4,206	191	25	96.2	-	-	1	3.8				
	Nagdan Weir	19	6	20	3,356	177	19	95.0	-	-	1	5.0				
	Gumi Weir	20	6	19	5,268	263	18	94.7	-	-	1	5.3				
	Chilgog Weir	23	4	14	615	27	13	92.9	-	-	1	7.1				
	Gangjeong-Goryeong Weir	22	4	17	779	35	15	88.2	-	-	2	11.8				
	Dalseong Weir	22	6	15	1,911	87	14	93.3	1	6.7	-	-				
	Habecheon-Changnyeong Weir	12	7	15	1,019	85	13	86.7	1	6.7	1	6.7				
	Changnyeong-Haman Weir	45	8	25	12,401	276	21	84.0	2	8.0	2	8.0				
	Geumgang River	Sejong Weir	43	10	46	8,497	198	43	93.5	1	2.2	2	4.3			
		Gongju Weir	87	7	34	9,017	104	33	97.1	-	-	1	2.9			
Baegje Weir		39	6	22	3,815	98	20	90.9	1	4.5	1	4.5				
Yeongsangang River	Seungchon Weir	16	8	25	4,337	271	24	96.0	1	4.0	-	-				
	Jugsan Weir	8	5	16	1,671	209	15	93.8	-	-	1	6.3				
Average (standard deviation)		-	7 (2)	25 (10)	7,047 (11,666)	336 (684)	23 (9)	92.3 (3.9)	2 (1)	5.6 (3.2)	1 (1)	5.6 (2.9)				

RA, relative abundance

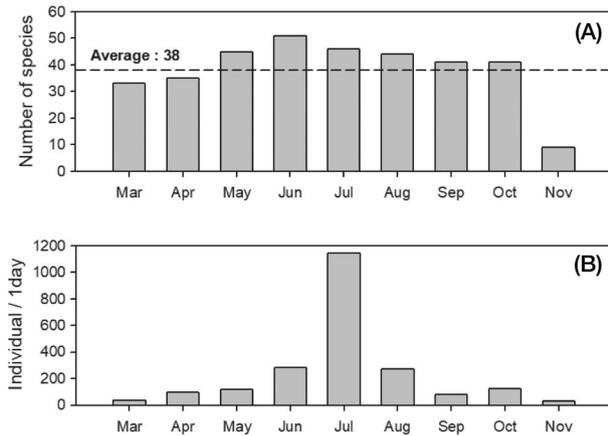


Fig. 2. Fishway utilization status of fish according to the monitoring period. (A) Total number of fish species utilizing the fishway each month. (B) Average daily count of fish utilizing the fishway each month.

20.6개체의 어류가 어도를 이용하였으며, 달성보 인공하도 식 어도는 일평균 20.5개체의 어류가 어도를 이용하였다. 보 상류 수위 조건에 따라 적게는 2개체, 많게는 75개체가 하루에 어도를 이용하는 것으로 확인되어 편차를 확인할 수 있었다. 강정고령보와 달성보의 상류 수위와 어도 이용 종수 및 개체수간 상관성을 분석한 결과, 두개 보의 어도 이용 종수와 개체수 모두가 보의 상류 수위와 양의 상관성을 나타냈다(Fig. 6). Spearman correlation 분석 결과 강정고령보의 경우 개체수($r=0.915, P<0.001$), 달성보의 경우 종수($r=0.702, P<0.05$)가 통계적으로 유의미한 상관관계를 보였다. 이러한 결과를 통해 보 상류의 수위가 증가할수록 어도 내 유입 유량 증가에 따라 어류의 어도 이용이 증가하는 것으로 확인되었다.

고 찰

국제적으로 어도의 건설은 대부분 경제적으로 가치가 높은 회유성 어종인 연어, 송어, 뱀장어 등과 같은 어류의 이동을 위해 이루어져 왔으나(Lucas and Baras, 2001; Fjeldstad *et al.*, 2018; Twardek *et al.*, 2023), 우리나라는 하천에 서식하는 모든 종의 이동을 위해 어도를 건설하여 하천 생태계 연결성을 확보하고 종다양성을 확보하는 것을 목적으로 어도를 건설하고 있다(Lee *et al.*, 2015). 이에 따라, 하천설계기준에서 어도의 기초 설계조건을 국내 서식하는 중·소형 어류가 통과할 수 있게 유속 $0.5\sim 1.0\text{ m s}^{-1}$ 로 제한하고 있으며(MLIT, 2018), 이러한 종다양성 확보를 목적으로 한 어도 설계기준의 적용을 통해 어도 이용률

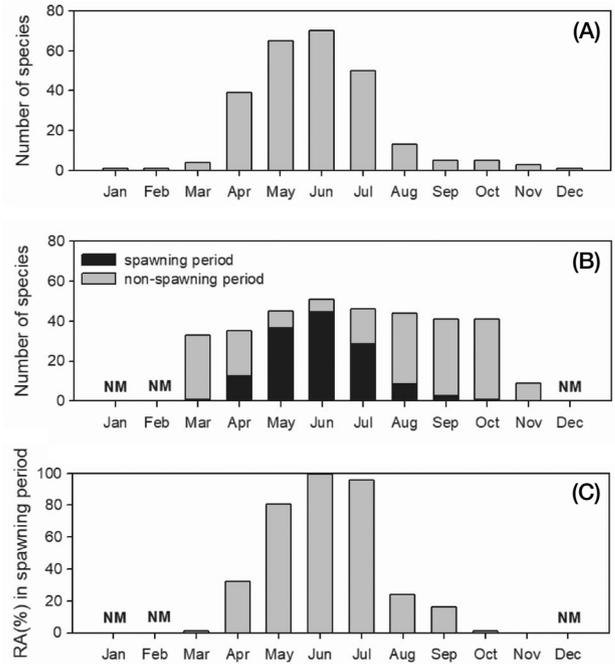


Fig. 3. Fishway utilization patterns of fish during spawning and non-spawning period (NM means no monitoring was conducted). (A) Status of spawning periods of 80 species collected from the mainstream and fishways (each species having a spawning period ranging from a minimum of 2 months to a maximum of 4 months, analyzed using 4 references). (B) Number of fish species among monthly fishway users during spawning periods. (C) The relative abundance of fish species during the spawning period.

이 평균 64.9%로 서식 어종의 과반수 이상으로 높게 나타났다. 결과적으로 다양한 종이 서식하고 있는 하천에 어도를 건설할 때는 다양한 크기와 유형 능력을 가지고 있는 많은 종들을 수용할 수 있어야 하며(Webb, 1998; Mallen-Cooper and Stuart, 2007), 국내 대하천 어도는 이에 부합하는 결과로 확인되었다.

많은 어종에게 하천 내에서의 자연적인 이동은 다양한 생활단계(life cycle)에서 필요한 공간적으로 분리된 자원을 활용할 수 있도록 하는 중요한 요소이다(Lennox *et al.*, 2019). 따라서 일차담수어 경우도 종별 먹이와 산란을 위한 서식지를 찾아 이동하며, 이는 각 종의 생존, 성장 및 성공적인 번식에 필수적인 역할을 한다(Lucas and Baras, 2001). 대하천에서 어도를 이용하는 어종의 92.3%가 일차담수어로 확인되었다. 그동안 대부분의 어도에 대한 관심이 회유성 어종의 이동을 보조하는 역할에 집중되었으나, 일차담수어 역시 생존을 위해서는 이동이 요구되며 이를 위해서 어도가 반드시 필요함을 확인할 수 있다. 반면, 조사가 이루어진 모든 대하천의 하류에 하구둑(낙동강, 금강, 영산강) 또는 댐(한강)이 건설되어 있어서 바다에서 소

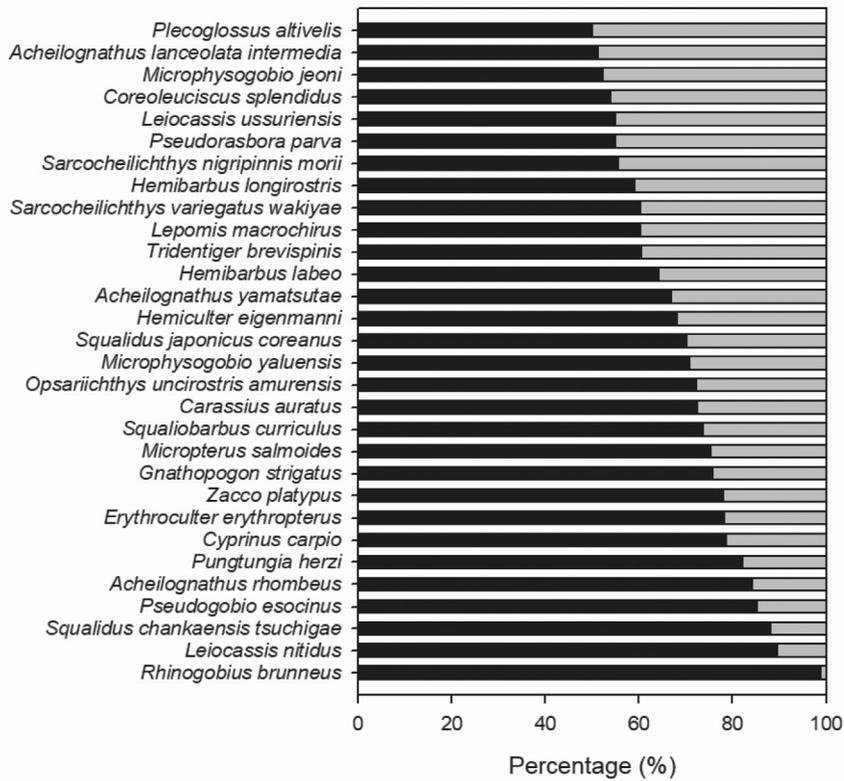


Fig. 4. Results of the analysis of the proportion of individuals in spawning period among the top 30 fish species utilizing fishways the most (black indicates spawning period).

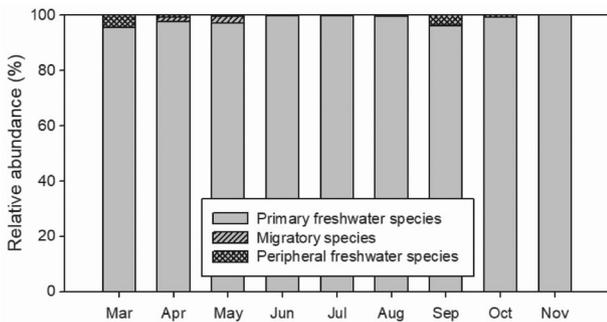


Fig. 5. Analyzing the fishway monitoring results, presenting the monthly proportions by fish life cycle types (primary freshwater species, migratory species, peripheral freshwater species) utilizing the fishway (marine fish were excluded from the analysis as they were not present).

상하는 회유어 및 주연어의 출현비율이 낮게 나타난 것으로 판단된다. 어도를 이용하는 회유어 중 뱀장어는 성체의 이동(비 산란기 이동)으로 확인되었으며, 은어와 빙어는 낙동강 하류 일부 지역(창녕함안보)을 제외하고 육봉화된 개체의 이동으로 확인되었다. 향후, 하구의 개방으로 인하여 바다와 하천간의 연결성이 확보된다면 회유어 및 주연

어의 이동 비율이 높아질 것으로 판단되며, 이 경우 해당 어종의 소상시기에 맞춘 어도 운영을 고려해야 할 것이다.

어도의 모니터링 결과를 확인하는 것은 해당 어도의 운영 및 관리에 있어서 중요한 요소이다. 본 연구에서는 일(day) 당 어도 이용 개체수를 환산하여 보별 어도의 효율을 파악하였으며, 대하천 어도의 경우 1일 평균 336개체가 어도를 이용하는 것을 확인하였다. 어도는 설치 위치 및 어도의 형식에 따라서 효율의 차이가 발생하기 때문에 어도 간 효율을 직접적으로 비교하기 어렵다(Bunt *et al.*, 2002). 본 연구 역시 4개의 대하천을 대상으로 다양한 어도에 대한 모니터링 결과를 분석하였기 때문에 어도 효율에 대한 평균값을 절대적인 기준으로 활용할 수는 없지만, 어도 관리를 위한 상대 비교를 위한 기준으로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 예로써, 낙동강 칠곡보(일평균 27개체)와 강정고령보(35개체)의 경우 일 평균 30개체 내외의 어류가 어도를 이용하였으며, 이는 평균의 10분의 1 정도 되는 수치로 효율이 매우 낮음을 확인할 수 있다. 이러한 부분을 통해서 칠곡보, 강정고령보 어도의 설계, 운영, 관리상의 문제점을 확인하고 효율을 높일 수 있는 방안을 마련하는 정책이 마련될 수 있다. 이후 추가 모니터링과의

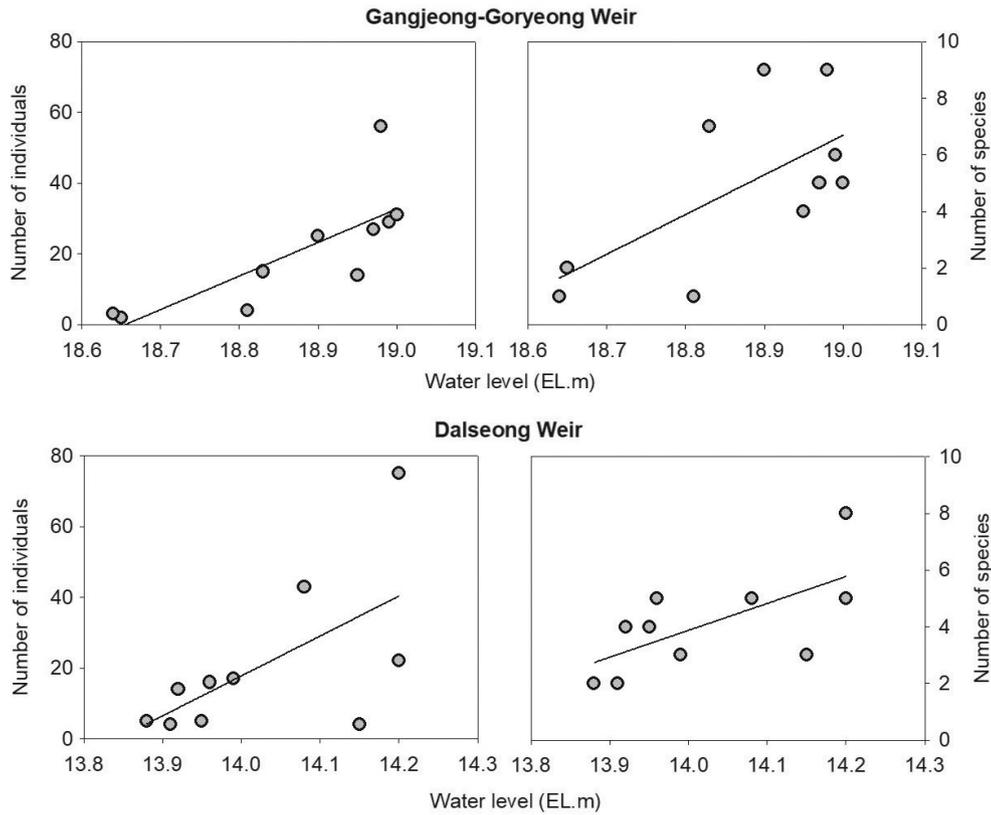


Fig. 6. Changes of fish species and individual numbers according to water level of upper part at Gangjeong-Goryeong and Dalseong Weirs.

결과 비교를 통해서 운영의 변화에 따른 어도의 효율 증감을 확인하는 데 활용할 수 있다.

현재 어도의 운영에 대한 시기적인 기준은 확립되지 않은 상태이며, 어도의 이용 효율 평가는 “어류가 주로 회유하는 3월~10월을 기준으로 하되, 산란시기에 추가 조사”하는 것으로 하천철계기준에서 제시하고 있다(MLIT, 2018). 국내 하천에서 PIT telemetry를 활용하여 수온에 따른 어도의 감지 현황을 분석한 결과 수온이 4°C 이상에서만 어도 내 감지가 이루어지는 것으로 보고되었다(Kim *et al.*, 2015b). 본 연구에서 월별 어도 이용 현황을 분석한 결과 출현 종수를 기준으로 3월~11월까지 어도를 이용하였으며, 그 중 3월~10월의 이용 종수가 비교적 높게 나타났다. 이용 개체수 측면에서 6월~8월이 어도를 가장 적극적으로 이용하는 시기로 확인되었다. 어류의 산란시기를 기준으로 어도 이용현황을 분석한 결과 5월~7월까지가 산란시기에 포함된 어종의 개체수 비율이 80% 이상으로 높게 나타났다. 어도 모니터링이 산란에 참여 가능한 성어 이외의 치어를 포함하여 결과를 기록하였고, 산란기 이동에 대한 추가 연구가 이루어지지 않았기 때문에 산란시기에 어도에서 채집되었다고 해서 모든 어류가 산란을 위한 이

동을 했다고 추정할 수는 없다. 또한, 일부 어종들에 대해서는 산란을 위한 이동에서 어도가 불필요한 요소일 수 있다. 그럼에도 불구하고, 일부 시기의 경우 산란기에 해당하는 종의 상대풍부도가 높게 나타나고 있어서 이는 어도의 이용 효율에 산란시기에 영향을 미치고 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. 이러한 결과를 통해 “어도의 운영 시기는 어도가 기능을 하는 3월~11월로 하며, 어도의 이용 효율 모니터링은 다양한 종이 어도를 이용하는 3월~10월로 함”으로 어도 운영 시기를 마련, 보완할 필요가 있다. 다만, 산란시기 추가조사에 대해서는 해당 하천의 어종을 미리 파악하고, 종별 산란시기를 확인하여 추가조사 일정을 마련하는 것이 필요하다. 어도 모니터링 문헌 분석 결과를 토대로 산란시기 추가조사에 대한 현황을 확인한 결과, 3월~6월을 주요 산란시기로 하여 월 2회 조사(이외 시기 월 1회 조사)가 이루어지고 있음을 확인하였다. 이처럼 모니터링 대상 하천에 대한 어류상 정보가 없거나, 서식 어종의 산란시기에 대한 정보가 충분히 확인되지 않는 경우에 본 연구 결과를 활용하여 산란시기 포함 어종의 어도 이용 현황이 높게 나타나는 5월~7월에 대한 모니터링을 추가할 수 있다.

보 상류의 수위는 어도로 유입되는 유량을 결정한다. 어도의 유량은 직접적으로 어도 내에서 어류가 상류로 이동할 수 있는 공간과 유속을 결정하는 요인으로 작용한다. 따라서 유량이 너무 적으면 어류가 물리적 구조물을 통과하기 어려우며, 유량이 너무 많으면 유속이 빨라져서 어도를 통과하기 어려워지기 때문에, 어도 운영에서 적합한 유량을 조절하는 것은 매우 중요하다(Lee *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2015a, 2015b). 본 연구에서 강정고령보와 달성보의 수위가 증가함에 따라 어도를 이용하는 종수 및 개체수가 유의미하게 증가하였다. 강정고령보와 달성보의 상류 관리수위는 각각 19.5 EL.m와 14.0 EL.m이며, 관리수위에서 어도 내 유입 유량이 가장 적절하게 유입될 수 있게 설계되었다. 어도 모니터링시 강정고령보의 상류 수위는 최대 19.0 EL.m로 관리수위보다 0.5 m 낮으며, 달성보의 상류 수위는 최대 14.2 EL.m로 관리수위 보다 0.2m 높게 나타났다. 본 연구 결과에 따르면 강정고령보 아이스하버식 어도는 관리수위로 증가함에 따라 어도의 효율(이용 어종 및 개체수)이 증가하였으며, 향후 관리수위보다 상승할 경우 유입 유량 증가에 따른 유속 조건에 따라서 어도의 효율이 낮아질 가능성이 존재한다. 반면, 달성보 인공하도식 어도는 관리수위보다 더 높은 수위에서 어도의 효율이 증가하는 것으로 확인되었으며, 이는 어도의 유형과 관련이 있을 것으로 판단된다. 인공하도식 어도는 경사가 완만하여 유속이 느리게 형성되어 있으며, 어도의 단면에 따라서 수심과 유속이 차이가 발생하기 때문에(Bretón *et al.*, 2013), 표준(관리) 유량보다 증가하여도 어종별로 적절한 수심 및 유속대를 찾아서 이동할 수 있다(Eberstaller *et al.*, 1998; Kim *et al.*, 2016). 또한, 인공하도식 어도의 완만한 경사는 입구부 유속을 느리게 하여 어도의 유인율을 낮추는 문제점을 가지고 있다(Moser *et al.*, 2000; Bunt *et al.*, 2012). 따라서 달성보 인공하도식 어도의 유량 증가는 어도의 유인율을 높여주는 요인으로 작용했을 가능성이 높으며, 이는 낙동강 상주보 인공하도식 어도의 수위에 따른 어도 효율 분석 결과에서도 동일한 경향을 보였다(Kim *et al.*, 2015b).

그동안 국내 어도 모니터링 결과 분석은 개별적인 보, 하천을 대상으로 이루어졌으며, 따라서 전체를 대변할 수 있는 어도의 효율, 운영 기준 등을 제시하기에 어려움이 있었다. 본 연구에서는 대하천에 건설된 16개 보의 어도 모니터링에 결과를 정리 및 분석하여, 어도의 효율, 일차담수어 대상 어도 운영의 필요성, 어도 운영 및 모니터링 시기 제안, 어도 운영을 위한 수위 조절 등을 고찰하였다. 이러한 자료는 대하천 어도 운영 및 관리에 대한 기준 마련에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후에는

지방하천 및 소하천을 대상으로 범위를 넓혀 국내 하천의 어도에 대한 통합적인 운영 및 관리에 대한 기준 마련 연구가 이루어져야 할 것이다.

적 요

본 연구는 대하천에 건설된 16개 보의 어도 모니터링 결과를 분석하여, 어도의 운영 및 관리에 도움이 되는 자료를 제공하고자 하였다. 보별 어도 이용률은 평균 64.9%로 확인되었으며, 본류와 어도 모니터링 결과의 우점종을 비교한 결과 총 9개(56.3%)의 보에서 차이를 보였다. 이를 통해 본류에 다수 서식하는 종이 어도를 다수 이용하는 것은 아닌 것으로 확인되었다. 어류의 하루 어도 이용 개체수는 평균 336개체로 확인되었다. 어도 이용 어종을 생태형으로 구분한 결과 92.3%가 일차담수어였으며, 회유성 어종은 5.6%로 높지 않다. 어도 이용 시기에 따른 분석에서 5월부터 10월까지 평균 이상의 어류가 어도를 이용하였으며, 그중 이용 개체수는 6월~8월이 가장 많았다. 5월~7월까지 어도 이용 어종의 80%가 산란시기에 포함되었으며, 이외 시기는 산란시기 포함 어종이 40% 이하로 나타났다. 산란시기와 어도 이용 시기가 크게 일치하는 어류는 밀어, 밀자개, 참물개, 모래무지, 납지리, 돌고기 순서로 확인되었다. 강정고령보와 달성보의 어도 모니터링 결과로 보의 수위와 비교한 결과, 어도 이용 종수 및 개체수 모두 보의 상류 수위와 양의 상관성을 보였으며, 이를 통해 수위가 높을수록 어도 내 유입 유량이 증가하여 어도의 어류 이용(강정고령보 개체수, $P < 0.001$; 달성보 종수, $P < 0.05$)이 증가하는 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 대하천에 건설된 16개 보의 어도 모니터링에 결과를 정리 및 분석하여, 어도의 효율, 어도 운영 및 모니터링 시기 제안, 어도 운영을 위한 수위 조절 등을 고찰하였다. 이는 대하천 어도의 어류 이용 현황에 대한 이해와 더불어, 향후 국내 어도의 설치, 운영, 모니터링 등 관리에 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

저자정보 김정희(주식회사 에코리서치 대표이사), 박상현(주식회사 에코리서치 이사), 백승호(주식회사 에코리서치 이사), 이남주(경성대학교 교수), 장민호(공주대학교 교수), 윤주덕(국립생태원 멸종위기종복원센터 책임연구원)

저자기여도 개념설정: 김정희, 이남주, 장민호, 자료수집: 김정희, 박상현, 백승호, 분석: 김정희, 윤주덕, 원고작성: 김정희, 윤주덕

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

연구비 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2020003050002).

REFERENCES

- Bretón, F., A.B. Baki, O. Link, D.Z. Zhu and N. Rajaratnam. 2013. Flow in nature-like fishway and its relation to fish behaviour. *Canadian Journal of Civil Engineering* **40**(6): 567-573.
- Bunt, C.M., T. Castro-Santos and A. Haro. 2012. Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration. *River Research and Applications* **28**: 457-478.
- Cada, F.G. 1998. Fish passage migration at hydroelectric power projects in the United States, p. 208-219. *In: Migration and fish bypasses* (Jungwirth, M., S. Schmutz and S. Weiss, eds.). Fishing News Books, Oxford.
- Chae, B.S., H.B. Song, J.Y. Park and K.H. Cho. 2019. A field guide to the freshwater fishes of Korea. LG Evergreen Foundation, Seoul.
- Daelim. 2013. The results of fishway utilization efficiency assessment survey. Daelim, Seoul.
- Daewoo E&C. 2013a. Fishway utilization efficiency assessment monitoring report-Sejong Weir. Daewoo E&C, Seoul.
- Daewoo E&C. 2013b. Nakdonggang River restoration project phase 24 on-site construction: evaluation of Chilgok Weir fishway utilization efficiency. Daewoo E&C, Seoul.
- Doosan E&C. 2013. Fishway utilization efficiency assessment monitoring report-Nagdan Weir. Doosan E&C, Seoul.
- Eberstaller, J., M. Hinterhofer and P. Parasiewicz. 1998. The effectiveness of two nature-like bypass channels in an upland Austrian river, p. 363-383. *In: Migration and fish bypasses* (Jungwirth, M., S. Schmutz and S. Weiss, eds.). Fishing News Books, Oxford.
- Fjeldstad, H.P., U. Pulg and T. Forseth. 2018. Safe two-way migration for salmonids and eel past hydropower structures in Europe: a review and recommendations for best-practice solutions. *Marine and Freshwater Research* **69**(12): 1834-1847.
- Grill, G., B. Lehner, M. Thieme, B. Geenen, D. Tickner, F. Antonelli, S. Babu, P. Borrelli, L. Cheng, H. Crochetiere and H. Ehalt Macedo. 2019. Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature* **569**(7755): 215-221.
- GS E&C. 2013. The results of fishway utilization efficiency assessment survey. GS E&C, Seoul.
- Hanyang. 2013. The results of fishway utilization efficiency assessment survey. Hanyang, Seoul.
- Hyundai Development Company. 2013. Assessment of the efficiency of natural fishway Installed in Sangju Weir. Hyundai Development Company, Seoul.
- Hyundai E&C. 2013. The results of fishway utilization efficiency assessment survey. Hyundai engineering & construction, Seoul.
- Kim, I.S. and J.Y. Park. 2002. Freshwater fishes of Korea. Kyohak Publishing Co., Seoul.
- Kim, J.H., J.D. Yoon, S.H. Baek and M.H. Jang. 2016. Estimation of optimal ecological flowrates for fish habitats in a nature-like fishway of a large river. *Journal of Ecology and Environment* **39**(1): 43-49.
- Kim, J.H., J.D. Yoon, S.H. Park, J.W. Lee, S.H. Baek and M.H. Jang. 2015a. Characteristics of fish utilization of the nature-like fishway installed at the Beakjae weir. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**: 212-218.
- Kim, J.H., J.D. Yoon, S.H. Baek, S.H. Park, J.W. Lee, J.A. Lee and M.H. Jang. 2015b. An efficiency analysis of a nature-like fishway for freshwater fish ascending a large Korean river. *Water* **8**(1).
- K-water. 2015. multi-purpose weir fishway utilization monitoring. K-water, Daejeon.
- K-water. 2016. 2016 multi-purpose weir fishway utilization monitoring. K-water, Daejeon.
- K-water. 2017. 2017 multi-purpose weir fishway utilization monitoring. K-water, Daejeon.
- Lee, W.O. and S.Y. Rho. 2007. Korean Peninsula freshwater fishes by characterization: color book. Jiseongsa, Seoul.
- Lee, J.W., J.D. Yoon, J.H. Kim, S.H. Park, S.H. Baek, J.H. Yoon and M.H. Jang. 2015. Efficiency analysis of the ice harbor type fishway installed at the Gongju Weir on the Geum River using traps. *Korean Journal of Environmental Biology* **33**: 75-82.
- Lennox, R.J., C.P. Paukert, K. Aarestrup, M. Auger-Méthé, L. Baumgartner, K. Birnie-Gauvin, K. Bøe, K. Brink, J.W. Brownscombe, Y. Chen, J.G. Davidsen, E.J. Eliason, A. Filous, B.M. Gillanders, I.P. Helland, A.Z. Horodysky, S.R. Januchowski-Hartley, S.K. Lowerre-Barbieri, M.C. Lucas, E.G. Martins, K.J. Murchie, P.S. Pompeu, M. Power, R. Raghavan, F.J. Rahel, D. Secor, J.D. Thiem, E.B. Thorstad, H. Ueda, F.G. Whoriskey and S.J. Cooke. 2019. One hundred pressing questions on the future of global fish migration science, conservation, and policy. *Frontiers in Ecology and Evolution* **2019**(7): 286.
- Liermann, C., C. Nilsson, J. Robertson and R.Y. Ng. 2012. Implications of dam obstruction for global freshwater fish diversity. *Bioscience* **62**: 539-548.
- Lucas, M.C. and E. Baras. 2001. Migration of Freshwater Fishes. Blackwell Science, Oxford.
- Mallen-Cooper, M. and I.G. Stuart. 2007. Optimising Denil fishways for passage of small and large fishes. *Fisheries Management and Ecology* **14**: 61-71.
- MLIT. 2018. Korean design standard. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong.
- Moser, M.L., A.M. Darazsdi and J.R. Hall. 2000. Improving

- passage efficiency of adult American shad at low-elevation dams with navigation locks. *North American Journal of Fisheries Management* **20**: 376-385.
- National Institute of Environmental Research (Geumgang River). 2012. Passage route survey of migratory fishes before and after the construction of weirs and the fishway's effects. National institute of environmental research (Geumgang River), Okcheon.
- National Institute of Environmental Research (Geumgang River). 2015. Evaluation and improvement of fishway efficiency. National institute of environmental research (Geumgang River), Okcheon.
- National Institute of Environmental Research (Nakdonggang river). 2012. Investigations of migration pattern on migratory and freshwater fish (II). National institute of environmental research (Nakdonggang river), Goryeong.
- National Institute of Environmental Research (Youngsangang River). 2012. Passage route survey of migratory fishes before and after the construction of weirs and the fishway's effects. National institute of environmental research (Youngsangang River), Gwangju.
- National Institute of Environmental Research (Youngsangang River). 2013. Efficiency evaluations of fish passage and the management strategies. National institute of environmental research (Youngsangang River), Gwangju.
- Posco E&C. 2013. Nakdonggang River restoration project phase 30 fishway efficiency assessment. Posco E&C, Pohang.
- Samsung C&T. 2013. The results of fishway utilization efficiency assessment survey. Samsung C&T, Seoul.
- SK ecoplant. 2013. Fishway utilization efficiency assessment monitoring report-Gongju Weir. SK ecoplant, Seoul.
- Song, H.B. 2017. Arrow freshwater fish color book. Nature and Ecology, Seoul.
- Twardek, W.M., S.J. Cooke and N.W.R. Lapointe. 2023. Fishway performance of adult Chinook salmon completing one of the world's longest inland salmon migrations to the upper Yukon River. *Ecological Engineering* **187**: 106846.
- van Leeuwen, C.H., J. Museth, O.T. Sandlund, T. Qvenild and L.A. Vøllestad. 2016. Mismatch between fishway operation and timing of fish movements: a risk for cascading effects in partial migration systems. *Ecology and Evolution* **6**(8): 2414-2425.
- Webb, P.W. 1998. Entrainment by river chub *Nocomis biguttatus* and smallmouth bass *Micropterus dolomieu* on cyprinids. *The Journal of Experimental Biology* **201**: 2403-2412.
- Yamamoto, S., K. Morita, I. Koizumi and K. Maekawa. 2004. Genetic differentiation of white-spotted charr (*Salvelinus leucomaenis*) populations after habitat fragmentation: spatial-temporal changes in gene frequencies. *Conservation Genetics* **5**(4): 529-538.

Appendix 1. References of fishway monitoring constructed at 16 weirs in four major Rivers.

Rivers	Weirs	Fishway types	Years	Fishway monitoring	Main channel monitoring	References
Hangang River	Gangcheon Weir	Ice-Habor	2012~2013	○	○	Hyundai E&C, 2013
		Nature-like	2012~2013	○	○	Hyundai E&C, 2013
	Yeoju Weir	Ice-Habor	2012~2013	○	○	Samsung C&T, 2013
		Nature-like	2012~2013	○	○	Samsung C&T, 2013
Ipo Weir	Nature-like	2012~2013	○	○	Daelim, 2013	
Nakdonggang River	Sangju Weir	Nature-like	2012	○	○	National institute of environmental research (Nakdonggang river), 2012
			2012~2013	○	○	Hyundai Development Company, 2013
			2016	○	○	K-water, 2016
			2017	○	○	K-water, 2017
	Nagdan Weir	Complex	2012~2013	○	○	Doosan E&C, 2013
			2015	○	○	K-water, 2015
			2017	○	○	K-water, 2017
	Gumi Weir	Ice-Habor	2012~2013	○	○	Posco E&C, 2013
			2015	○	○	K-water, 2015
			2017	○	○	K-water, 2017
	Chilgog Weir	Complex	2012~2013	○	○	Daewoo E&C, 2013b
			2015	○	○	K-water, 2015
			2017	○	○	K-water, 2017
	Gangjeong-Goryeong Weir	Ice-Habor	2016	○	○	K-water, 2016
2017			○	○	K-water, 2017	
Nature-like		2016	○	○	K-water, 2016	
		2017	○	○	K-water, 2017	
Dalseong Weir	Ice-Habor	2016	○	○	K-water, 2016	
		2017	○	○	K-water, 2017	
	Nature-like	2016	○	○	K-water, 2016	
		2017	○	○	K-water, 2017	
Habcheon-Changnyeong Weir	Complex	2015	○	○	K-water, 2015	
		2016	○	○	K-water, 2016	
		2017	○	○	K-water, 2017	
Changnyeong-Haman Weir	Pool and weir	2012	○	○	National institute of environmental research (Nakdonggang river), 2012	
		2013	○	○	GS E&C, 2013	
		2015	○	○	K-water, 2015	
		2016	○	○	K-water, 2016	
		2017	○	○	K-water, 2017	
	Ice-Habor	2012	○	○	National institute of environmental research (Nakdonggang river), 2012	
		2013	○	○	GS E&C, 2013	
		2015	○	○	K-water, 2015	
		2016	○	○	K-water, 2016	
		2017	○	○	K-water, 2017	

Appendix 1. Continued.

Rivers	Weirs	Fishway types	Years	Fishway monitoring	Main channel monitoring	References
Geumgang River	Sejong Weir	Nature-like	2012	○	–	National institute of environmental research (Geumgang River), 2012
			2013	○	○	Daewoo E&C, 2013a
			2013~2015	○	○	National institute of environmental research (Geumgang River), 2015
			2016	○	○	K-water, 2016
	Gongju Weir	Complex	2012	○	–	National institute of environmental research (Geumgang River), 2012
			2013	○	–	SK ecoplant, 2013
			2013~2015	○	○	National institute of environmental research (Geumgang River), 2015
			2016	○	○	K-water, 2016
	Baegje Weir	Ice-Habor	2012	○	–	National institute of environmental research (Geumgang River), 2012
			2013	○	–	SK ecoplant, 2013
			2013~2015	○	○	National institute of environmental research (Geumgang River), 2015
			2016	○	○	K-water, 2016
	Baegje Weir	Nature-like	2013	○	–	SK ecoplant, 2013
			2013~2015	○	○	National institute of environmental research (Geumgang River), 2015
			2015	○	○	K-water, 2015
	Yeongsangang River	Seungchon Weir	Ice-Habor	2012	○	○
2013				○	○	Hanyang, 2013
2013				○	○	National institute of environmental research (Yeongsangang River), 2013
2015		○	○	K-water, 2015		
Jugsan Weir		Ice-Habor	2012	○	○	National institute of environmental research (Yeongsangang River), 2012
			2016	○	○	K-water, 2016