

낙동강하구의 어류 이동성 향상을 위한 수문운영 방안 제안^{1a}

정석일² · 한정호^{3*} · 이지영⁴ · 김화영⁵

The Gate Operation for Bolstering up Fish Migration in the Nakdong River Estuary^{1a}

Seokil Jeong², Jeong-Ho Han^{3*}, Ji-Young Lee⁴, Hwa-Young Kim⁵

요약

낙동강하굿둑의 건설로 원활한 용수 공급이 이루어졌으나, 하구 수생태계의 종적 연결성을 단절시켰다. 이에 낙동강 하굿둑 개방에 대한 사회적 요구가 지속적으로 제기되어 왔으며, 2017년부터 낙동강하구역 기수생태계 복원을 위한 노력이 본격화되었다. 낙동강 하구에는 다양한 어종이 서식해 왔으며, 이들의 서식·이동 특성은 상이하므로 이를 고려한 수문운영은 기수생태계 복원에 필수적이다. 이에 본 연구에서는 낙동강하구에 서식·이동하는 어류를 모니터링을 통해 확인하였으며, 방류 시 수문운영 형태별, 개도별 평균 유속을 산출하여, 어종에 따른 원활한 소상 가능성을 분석하였다. 또한 대상어종을 선정하고, 주 분포 수심에 따른 수문운영 형태를 제시하는 등 낙동강 하구역의 기수생태계 복원을 적극적으로 수행하기 위한 수문운영 방안을 제시하였다.

주요어: 낙동강하구, 수생태계, 복원, 수문운영

ABSTRACT

Although the construction of the Nakdong River Estuary Barrage (NEB) improved the water supply in the region, it cut off the longitudinal connectivity of the estuary aquatic ecosystem. Thus, the social demands for opening the NEB have been continuously raised, and the efforts to restore the aquatic ecosystem of the Nakdong River estuary began in 2017. Many fish species have inhabited the Nakdong River estuary. Since their habitat and migration characteristics vary widely, the sluice gate operation considering them is essential for the restoration of the aquatic ecosystem. Therefore, in this study, we monitored the fish species living and migrating in the Nakdong River estuary and analyzed the possibility of smooth movement of for each fish species by calculating the average flow velocity according to the type and the height of the gate opening. Moreover, we

1 접수 2022년 7월 13일, 수정 (1차: 2022년 9월 16일), 게재확정 2022년 9월 28일

Received 13 July 2022; Revised (1st: 16 September 2022); Accepted 28 September 2022

2 K-water 낙동강유역관리처 선임연구원 Dept. of Nakdonggang River Basin Management, K-water, 167, Dongdeok-ro, Jung-gu, Daegu, Korea (si.j@kwater.or.kr)

3 K-water 물환경개선처 선임연구원 Dept. of Water Environmental Improvement, Kwater, 125, Yuseong-daero 1689beon-gil, Yuseong-gu, Daejeon, Korea (jhhan19@kwater.or.kr)

4 K-water 부산권지사 차장 Busan office, K-water, 92, Nakdongnam-ro 1233beon-gil, Saha-gu, Busan, Korea (jylee01@kwater.or.kr)

5 K-water 부산권지사 지사장 Busan office, K-water, 92, Nakdongnam-ro 1233beon-gil, Saha-gu, Busan, Korea (hwayoung.kim@kwater.or.kr)

a 이 논문은 환경부에서 지원하는 낙동강하구 수질 및 수생태계 모니터링에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author. jhhan19@kwater.or.kr

selected the target fish species for each month and suggested the sluice gate operation according to the depth of the main habitat to present the measures that are ideal for optimal restoration of the aquatic ecosystem in the Nakdong River estuary area.

KEY WORDS: NAKDONG RIVER ESTUARY, AQUATIC ECO SYSTEM, RESTORATION, GATE OPERATION

서론

하천횡단구조물은 물의 흐름을 감소시키고, 체류시간을 증가시켜 탁도나 침전속도 등 물리적인 특성을 변화시켜 생물군집에 서식환경을 변화시킨다(Allan, 1997; Moss, 1998; Cowx and Welcomme, 1998; Kang et al., 2012). 또한 어류에 있어서는 직접적으로 이동을 차단함으로써 생활사를 불안정하게 하며 개체군의 급감 혹은 멸종의 위협을 초래할 수 있다(Lucas and Baras, 2001; Gehrke, et al., 2002; Katano et al., 2006; Muelleret al., 2011). 변화된 환경은 큰입배스 등 외래종 번성에 기회를 제공하는 반면, 국내종 감소에 영향을 주며(Jang et al. 2001), 특히 기수역(담수와 해수가 섞이는 지역)에서는 생태계 측면에서 막대한 피해를 주기 때문에 미국과 같은 환경선진국에서는 이미 하천횡단 구조물의 환경에 미치는 영향에 대한 많은 연구가 진행되었고(Clay, 1995; Jackson and Marmulla, 2001; McAlister et al., 2001; Han et al., 2008), 기능적으로 역할이 상실된 하천횡단구조물들을 철거하고 있다(Birnie-Gauvin et al., 2017; Silva et al., 2018; Sun et al., 2021). 국내에서도 어류의 이동을 확보해주기 위해 기능을 상실한 소규모 보 및 댐의 철거에 대한 관심이 높아지고 있지만(Kil et al., 2007; Ahn et al., 2008), 낙동강하굿둑과 같은 대규모 수공구조물의 철거는 현실적으로 어려운 상황이다.

낙동강하굿둑(Nakdong River Estuary Barrage, NEB)은 내수면 수자원의 보호와 용수 활용하기 위한 사업의 일환으로 1983년에 기수역이던 낙동강 하구에 인공제방 축조를 시작으로 1987년에 완공되었다(Yang et al., 2001; Kwak and Hur, 2003). 하굿둑 건설로 인하여 어류 이동통로의 차단(Kang et al., 2012), 부유물질에 의한 탁도의 증가(Jang and Ahn, 2012), 유량 및 유속의 변화(Kim et al., 2020), 침식 및 퇴적(Kim and Jang, 2009), 수질의 물리화학적 성질과 먹이생물의 변화(Park et al., 2016) 등의 직접적인 영향으로 인하여 하구 생태계는 급격하게 변화(Loneragan et al. 1986; Yang et al., 2001; Lee, 1996; Seo and Kim, 2009)하였다. 또한 하굿둑 건설 후에는 하구둑을 중심으로 상류의 담수생태계와 하류의 해양생태계로 구분되면서 과거에 염분의 농도 구배에 따라 자연스럽게 형성되던 하구의 폭넓은 기수생태계가 상실되었다(Joo, 2005; Jang and Kim, 1992;

Hong et al., 1994). 낙동강 하구둑에는 양쪽 가장자리에 회유성 어류의 원활한 이동을 위해 길이 24 m의 어도를 설치하여 상하류의 연결성은 확보하고 있으나, 하굿둑의 시설규모 대비 어도의 규격이 작아 회유성 어류의 이동에 한계가 있다(Yang et al. 2001). 결국 기수생태계의 활성화 및 원활한 복원을 위해서는 낙동강하굿둑의 수문을 통해 하구 생태계의 소통 능력을 높이는 방안이 필요하다고 사료된다.

따라서 본 연구에서는 낙동강하굿둑의 어류상을 분석하여, 낙동강 기수역에 서식 또는 이동하는 어류를 파악하고, 각 어종별 유영특성 및 소상시기를 직접조사와 Kang et al.(2012)의 연구를 참고하여 분석하였다. 또한 방류 시의 유속을 어류의 돌진속도와 비교하여 수문 개도에 따른 어류의 소상 가능성을 분석함으로써 낙동강하굿둑 수문운영 방법의 개선을 통한 하구역에 서식 또는 이동하는 어류의 소상 효과를 높이는데 기여하고자 한다.

연구방법

1. 담수 방류 시 유속 계산

기존의 낙동강하굿둑의 방류량 산정은 수면곡선과 물수지에 기반을 두고 계산되어 왔다. 그러나 낙동강하굿둑 시범개방(2021)을 통해 더욱 정밀한 방류량 산정의 필요성이 제기되어, ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 이용하여 실측하였다. ADCP는 Telehyne RDI사의 RiverPro 제품으로 최대 ± 9.0 m/s 범위를 0.25% 오차로 유속측정이 가능하다. 방류량은 해당수 밀도차에 의하여 하류부에서는 상승류가 발생하므로, 수문을 기준으로 상류에서 측정하는 것이 비교적 정확하고 효율적이다. 이에 Figure 1과 같이 선박과 크레인을 이용하여 담수측에서 유량을 측정하였다.

이동형 ADCP 특성상 바닥부는 직접적인 측정이 불가능하여, Simpson and Olmann(1990)이 제안한 지수 공식에 의해 바닥 유속을 외삽(extrapolation)하여, 전체 통과 방류량을 산정하였다. 다음은 저층부 미세측 지역의 유속 외삽 공식이다.

$$\frac{u}{u^*} = 9.5 \times \left(\frac{z}{z_o} \right)^b \quad (1)$$



Figure 1. Measuring discharge through gate using ADCP.

여기서, u 는 바닥으로부터 $z(m)$ 위치에서의 유속(m/s), u^* 는 전단유속(m/s), z_o 는 바닥 조고(m)이고, b 는 상수로 일반적으로 Chen(1991)이 제안한 실험값으로 1/6의 값을 사용한다.

낙동강하굿둑은 저류(underflow)와 월류(overflow) 두 가지 형태로 방류가 가능하다. 월류는 다시 잠수월류(submerged overflow)와 완전월류(perfect overflow)로 분류된다. 잠수월류는 월류 수리특성(유속, 유량 등)이 하류 수위의 영향을 받는 형태이며, 완전월류는 월류하는 수맥 전체가 대기압에 노출되는 경우로 하류 수위의 영향을 받지 않는다. 실제 낙동강하굿둑 운영 시 완전월류 형태의 방류는 발생 빈도가 많지 않으며, 수문에 작용하는 외력이 상대적으로 커 수문 안전성을 저하시킬 가능성이 있다. 또한 이 형태의 수문 방류 시 어류는 도약하여 구조물을 넘을 수밖에 없으므로, 돌진속도를 이용한 소상과는 다른 영역이라 판단하여, 본 연구에서는 제외하였다. 유속의 계산은 Eqs.(3), (6)와 같이 일반적인 유량공식을 이용하였으며, 유량계수의 산정은 저류시에는 ADCP 실측 data를 회귀분석하였고, 월류시에는 선행연구들을 참고하여 결정하였다. 또한, 기수역에서의 해수와 담수의 유통은 두 수체 간 염분도가 상이하며, 이로 인하여 밀도 차이가 발생한다. 밀도 차이는 동일 수심에서도 정수압(hydrostatic pressure)의 차이를 발생시키므로, 유량 산정시 반드시 고려해야 하는 요소이다. 이에 본 연구에서는 Jeong et al.(2022)이 제시한 낙동강하굿둑 염분 밀도 보정식을 적용하여 방류 시 유속 산정식을 완성하였다.

2. 기수어종 분석 및 돌진속도

1) 기수 어종 분석

본 연구에서는 2021년 4월부터 11월까지 4회 시범개발 전·후를 구분하여 총 6회 모니터링된 어류조사 data를 이용하여 기수 어종을 분석하였다. [생물측정망 조사 및 평가지

침(NIER, 2017)]에 수록된 ‘보 구간’ 편의 어류 조사 관련 내용을 참고하여, 수변부와 중앙부를 중심으로 채집하였으며, 수변부는 투망과 족대를 이용하고, 중앙부는 정치망, 자망을 이용하였다. 어류 조사는 대상지를 기준으로 상·하류 100 m, 총 200 m 구간을 대상으로, 어류 채집에 대한 전문적 훈련을 받았거나 현장 경험이 최소 3년 이상인 전문가를 1인 이상 포함 3인 1조로 수행되었다. 수변부 조사는 투망과 족대를 이용하였고, 중앙부 조사는 정치망(통발 3개), 삼중자망(4절) 및 삼중자망(12절)을 이용하였다.

수변부 어류조사는 망목 6.0 ~ 6.5 mm의 빙어용 투망을 사용하여 조사지점당 총 10회씩 실시하였으며, 수초와 큰 돌 및 자갈이 있는 지역은 족대(망목 4×4 mm)를 사용하여 2인 1조를 이뤄 약 20~30분 동안 채집을 실시하였다. 중앙부 어류조사는 정치망(삼각망, 유도망 : 20 m, 높이 : 2 m, 망목 : 4 mm / 일각망, 유도망 : 10 m, 높이 : 1 m, 망목 : 4 mm)과 삼중자망(4절, 망목 : 45×45 mm, 높이 : 2 m, 길이 : 50 m / 12절, 망목 : 12×12 mm, 높이 : 1 m, 길이 : 50 m 50 m)을 이용하여 어류채집을 실시하였다. 정치망의 설치기간은 일출 2회, 일몰 2회를 포함한 48시간을 기준으로 하였으며, 삼중자망은 일출과 일몰을 각 1회씩 포함한 12시간 이상을 설치하였다.

채집 어류의 분류 및 동정은 현장에서 Kim and Park (2002), Son and Song (2006)에 따라 동정 및 계수 후 바로 풀어주는 것을 원칙으로 하되 현장에서 동정이 모호한 종은 10% 포르말린 용액으로 고정하여 실험실로 옮긴 후 동정하였다. 채집된 어류의 개체수 산정에서 어류 체장의 길이가 20 mm 이하의 동정이 불가능한 치어의 경우 제외하였으며, 비정상어종이 채집되었을 경우에는 감별 방식은 Sanders et al.(1999)의 방법에 따라 기형 (Deformity, DE), 지느러미 손상 (Erosion, EF), 피부손상 (Lesions, LE) 및 종양 (Tumors, TU)의 내용을 비정상성 유형을 감별하여 어류 야장에 기록하였다.

어류에 대한 조사시기는 Table 1에 정리하였으며, 어류

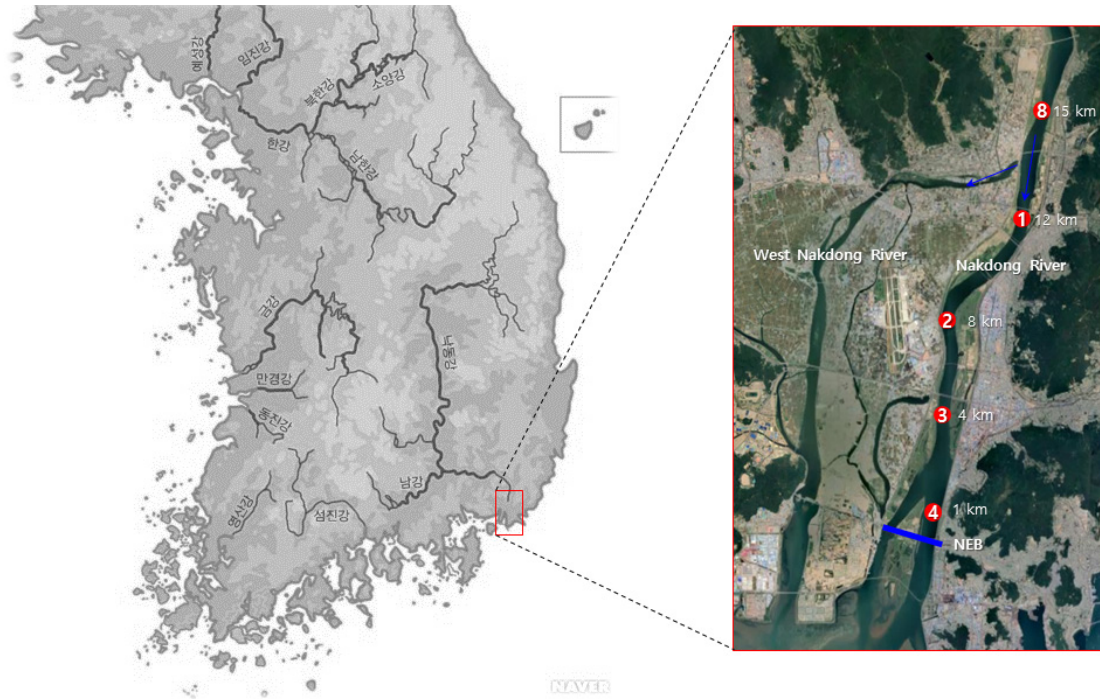


Figure 2. The points of fish monitoring.

Table 1. The monitoring time

Pilot test		date
1st	before	4/23 ~ 4/25
	after	5/08 ~ 5/10
2nd	before	6/17 ~ 6/19
	after	7/26 ~ 7/28
3rd	before	8/16 ~ 8/18
	after	9/14 ~ 9/16
4th	before	10/11 ~ 10/13
	after	11/24 ~ 11/26

조사대상지는 Figure 2에 도시한 바와 같이, 낙동강하굿둑을 기준으로 상류 방향으로 ①~④지점과 ⑧지점을 포함하여 최대 15 km 까지 조사하였다.

2) 어종별 돌진속도

낙동강하굿둑의 수문개방이 월류와 저류 방식 모두 가능하므로, 어떤 형태의 수문개방이 어종별로 유리할 것인지 판단하기 위해 주요 서식 수심을 정리하였다. 또한 하굿둑 주변의 수리 현황 및 수문운영에 따라 어류의 원활한 소상 환경이 제공될 수 있는지에 대한 분석을 위해 어류의 돌진속도(Burst speed)를 분석하였다. 돌진속도는 물고기가 순간적으로 낼 수 있는 속도(MLIT, 2011)로 [수생태계 연속성 조사 및 평가 등에 관한 지침(NIER, 2020)]에 제시된 최대유영속도를 참고하였으며, 문헌에 제시되지 않은 어종

의 돌진속도는 다음의 공식(Videler, 1993)을 참고하여 산정하였다. Eq.(2)는 최대유영속도를 산정하는 식이다.

$$fU_{max} = 0.4 + 7.4TL \quad (2)$$

여기서, fU_{max} 는 최대유영속도(m/s)이고, TL 은 어종의 전장(m)으로 어류 머리부분 끝부터 꼬리부분 끝까지의 길이를 말한다.

결과 및 고찰

1. 낙동강하굿둑 방류 유속 산정식

1) 저류 방류 시

낙동강하굿둑의 저류 방류 시 유량공식을 도출하기 위하여 실측 data를 이용하여 유량계수를 산정하였다. 유량계수는 이론적인 유속과 실제 유속과의 보정계수 의미를 갖는다. 기본적인 유속 공식은 Eq.(3)과 같다.

$$V_u = C_u \sqrt{2g(h_f - H_s)} \quad (3)$$

여기서, C_u 는 저류 시 유량계수, $H_s = h_s + \Delta h$ 로 상대적으로 고밀도의 해수를 담수의 밀도로 치환하였을 때의

가상의 수위이며, Δh 는 정수압 보정 값(m)이다. Δh 는 낙동강하굿둑의 구조적인 특성을 고려하여 도출한 값으로 Jeong et al.(2022)이 제시하였다.

$$\Delta h = \frac{\gamma_s h_s - \beta a (\gamma_s - \gamma_f)}{\gamma_f} - h_s \quad (4)$$

h_s 는 해수측 수위(EL.m), h_f 는 내측 수위(EL.m), γ_s 와 γ_f 는 각각 해수와 담수의 단위중량(kg/m³)이며, β 는 바닥에서부터 보정된 정수압선과 실제 정수압 선의 교차점까지의 거리로 보정 전 유량과 보정 후 유량이 동일하게 되는 지점이 교차점이 된다. β 는 계산에 의하여 구할 수 있지만 ($1/3 < \beta < 1/2$), 계측기 및 기상의 불확실성을 고려한 보정계수의 의미를 부여하였다. Jeong et al.(2022)은 해수측에서 담수측으로 해수가 유입되는 상황에서 유입량 식을 제시하면서, γ_s 와 γ_f 값을 미지수로 제시한 반면, 본 연구에서는 하굿둑을 통과하는 유속을 도출해야 하므로 두 값을 각각 1,010 kg/m³와 1,015 kg/m³로 부여하였다. 이는 염분

농도가 낮은 담수가 해수측으로 방류되면서 수문 주변의 해수측 밀도가 작아지는 것을 고려한 것이다.

유량계수인 C_u 값은 ADCP 실측 유량값과 이론적인 유량값인 Eq.(2)의 비(ratio)를 이용하여 도출하고, 회귀분석하여 얻었다. 회귀분석 시 사용된 매개변수는 많은 연구들에서 sluice gate 또는 radial gate의 잠류(submerged flow) 시 유량계수를 상류수심과 개도고의 비(a/h_f)와 밀접한 관계가 있다고 제시하고 있으며(Clemmens et al.(2003); Shayan and Farhoudi(2014); Henry(1950); Swamee(1992); Wahl(2005); Belaud et al.(2009) 등), 이러한 선행연구들을 참고하여 a/h_f 로 결정하였다. 그러나 일반적인 경우 담수측은 관리수위로 유지되어 $1/h_f$ 의 변화가 크지 않았고($0.145 < 0.149$), 실무적으로 이용하기에 a/h_f 의 변화폭이 작아 a 를 이용하여 유량계수 회귀분석 식을 제시하였다. Figure 4는 a 와 유량계수와의 관계를 보여주며, 이 관계를 Eq.(5)에서 식으로 정리하였다.

$$C_u = -0.05612a^2 + 0.49756a - 0.04900 \quad (5)$$

($0.5 \leq a \leq 3.0$)

위의 공식들을 이용하여 낙동강하굿둑 저류 방류 시 수문 개도고에 따른 평균유속을 산정할 수 있었다.

2) 잠수월류 방류 시

월류의 형태는 크게 완전월류(perfect overflow)와 잠수월류(submerged overflow)로 구분할 수 있다. 완전월류는 월류하는 수맥이 온전하게 대기압을 받는 경우이며, 잠수월류는 그렇지 않은 경우의 형태이다. 낙동강하굿둑에서 완전월류로 방류될 경우, 도약을 제외한 어류의 소상이 실질적으로 제한되므로, 본 연구에서는 잠수월류 형태의 방류만을 고려하였다. 잠수월류 형태로 방류 시 유속산정은 다양한 조건에서 측정된 data가 충분하지 않다고 판단하여 Figure 5와 같이 일반적인 잠수월류 상황을 바탕으로 이론적으로 접근하였다. Eq.(4)와 같은 Bernoulli 방정식에서 도출된 평

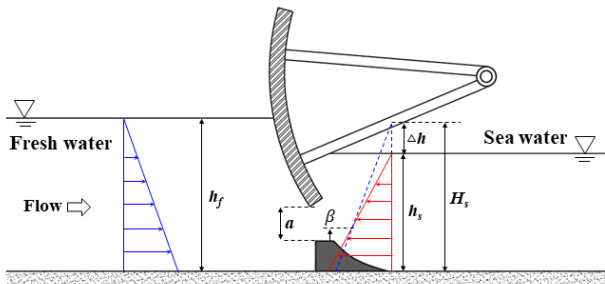


Figure 3. Conceptual diagram for calibration of sea-water statistic pressure.

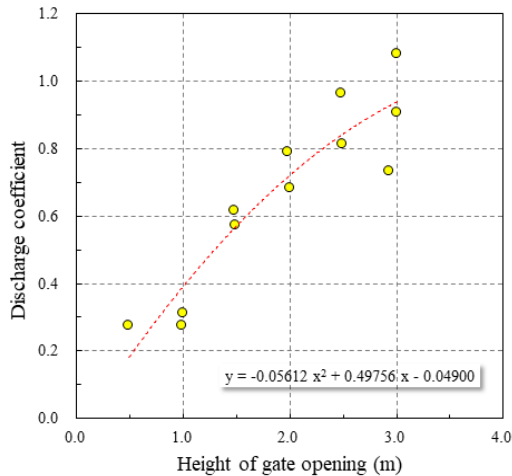


Figure 4. Regression analysis for discharge coefficient.

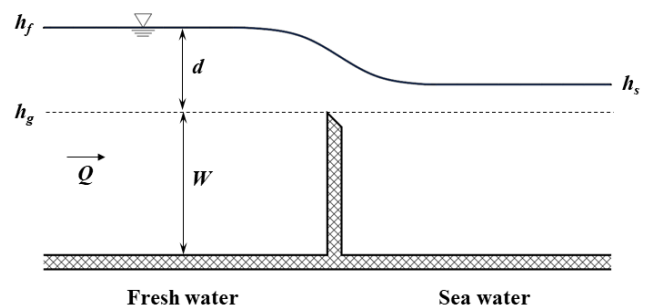


Figure 5. Conceptual diagram of Submerged overflow.

Table 2. Fish species and characteristics monitored in 2011 and 2021

Scientific name (Korean name)	Hab.	Pre.	Cha.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	2011 Total	2021 Total
<i>Elops hawaiiensis</i> (당멸치)	Mid.	Sea	Mar.	0	0	0	25	0	10	23	1	59	0
<i>Anguilla japonica</i> (glass eel) (뱀장어)	Sur.	Fre.	Des.	76	10	0	1	0	0	1	0	6	82
<i>Coilia nasus</i> (옹어)	Sur.	Fre.	Ana.	0	15	200	42	18	12	1	2	285	5
<i>Engraulis japonicus</i> (멸치)	Sur.	Sea	Mar.	0	2	431	774	0	0	0	0	1,207	0
<i>Thryssa kammalensis</i> (참멸)	Sur.	Sea	Mar.	0	1	0	0	0	0	2	0	3	0
<i>Konosirus punctatus</i> (전어)	Mid.	Sea	Bac.	0	1	13	0	21	0	0	0	35	0
<i>Cyprinus carpio</i> (잉어)	Mid.	Fre.	Fre.	0	2	2	3	4	2	1	1	8	7
<i>Cyprinus carpio</i> (이스라엘잉어)	Mid.	Fre.	Fre.	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
<i>Carassius auratus</i> (붕어)	Mid.	Fre.	Fre.	2	7	11	6	11	14	11	7	35	34
<i>Carassius cuvieri</i> (떡붕어)	Mid.	Fre.	Fre.	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0
<i>Acanthorhodeus macropterus</i> (큰납지리)	Mid.	Fre.	Fre.	26	46	22	59	456	110	82	1	619	183
<i>Acanthorhodeus gracilis</i> (가시납지리)	Sur.	Fre.	Fre.	0	0	1	0	2	0	0	0	0	3
<i>Pseudorasbora parva</i> (참붕어)	Sur.	Fre.	Fre.	0	0	2	13	138	87	21	18	0	279
<i>Squalidus chankansis tsuchigae</i> (참물개)	Mid.	Fre.	Fre.	6	5	68	31	88	139	63	129	42	487
<i>Hemibarbus labeo</i> (누치)	Mid.	Fre.	Fre.	10	14	59	539	464	383	43	69	685	896
<i>Hemibarbus longirostris</i> (참마자)	Mid.	Fre.	Fre.	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
<i>Pseudogobio esocinus</i> (모래무지)	Bot.	Fre.	Fre.	3	25	26	17	29	8	12	4	59	65
<i>Microphysogobio jeoni</i> (뿔경모치)	Bot.	Fre.	Fre.	2	0	2	27	4	122	26	1	2	182
<i>Zacco platypus</i> (피라미)	Mid.	Fre.	Fre.	0	5	78	7	90	26	3	25	22	212
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i> (끄리)	Mid.	Fre.	Fre.	44	595	470	175	679	387	153	90	2109	484
<i>Erythroculter erythropterus</i> (강준치)	Mid.	Fre.	Fre.	263	105	242	255	1,587	2,120	415	258	1,700	3,545
<i>Culter brevicauda</i> (백조어)	Mid.	Fre.	Fre.	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3
<i>Hemiculter eigenmanni</i> (치리)	Mid.	Fre.	Fre.	1	39	39	63	862	387	294	162	64	1,783
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i> (미꾸리)	Bot.	Fre.	Fre.	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
<i>Misgurnus mizolepis</i> (미꾸라지)	Bot.	Fre.	Fre.	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i> (동자개)	Bot.	Fre.	Fre.	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0
<i>Pseudobagrus koreanus</i> (눈동자개)	Bot.	Fre.	Fre.	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Leiocassis nitidus</i> (밀자개)	Bot.	Fre.	Fre.	0	1	28	9	10	18	6	0	22	50
<i>Silurus asotus</i> (메기)	Bot.	Fre.	Fre.	0	0	0	2	0	2	2	0	1	5
<i>Hypomesus nipponensis</i> (빙어)	Sur.	Fre.	Ana.	0	0	1	5	1	0	0	0	7	0
<i>Plecoglossus altivelis altivelis</i> (은어)	Mid.	Fre.	Bi-Mig.	3	2	0	0	0	0	0	0	5	0
<i>Neosalanx andersoni</i> (도화뱅어)	Sur.	Sea	Ana.	0	0	0	0	0	0	0	11	11	0
<i>Oncorhynchus keta</i> (연어)	Mid.	Fre.	Ana.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Chelon affinis</i> (등줄송어)	Sur.	Sea	Bac.	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
<i>Mugil cephalus</i> (송어)	Sur.	Sea	Bac.	0	178	266	194	188	98	60	81	265	800
<i>Strongylura anastomella</i> (동갈치)	Bot.	Sea	Mar.	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
<i>Hyporhamphus intermedius</i> (줄공치)	Sur.	Sea	Bac.	0	34	26	27	0	0	0	0	78	9
<i>Cyprinus carpio</i> (학공치)	Sur.	Sea	Bac.	0	4	12	0	0	0	0	0	16	0
<i>Hippocampus trimaculatus</i> (산호해마)	Bot.	Sea	Mar.	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
<i>Platycephalus indicus</i> (양태)	Bot.	Sea	Mar.	0	1	1	0	0	0	0	0	2	0
<i>Lateolabrax japonicus</i> (농어)	Mid.	Sea	Bac.	0	0	4	0	0	0	0	0	4	0
<i>Lateolabrax maculatus</i> (점농어)	Mid.	Sea	Bac.	4	1	10	4	10	2	4	5	5	35
<i>Lepomis macrochirus</i> (파랑볼우럭)	Mid.	Fre.	Fre.	18	31	60	170	2,699	123	244	219	158	3,406
<i>Micropterus salmoides</i> (큰입배스)	Mid.	Fre.	Fre.	0	8	121	73	36	31	33	16	71	247
<i>Scomber japonicus</i> (고등어)	Bot.	Sea	Mar.	0	0	3	0	0	0	0	0	3	0
<i>Leiognathus nuchalis</i> (주둥치)	Mid.	Sea	Bac.	0	5	48	0	0	0	1	0	54	0
<i>Acanthopagrus schlegeli</i> (감성돔)	Bot.	Sea	Mar.	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
<i>Pjolis nebulosa</i> (베도라치)	Bot.	Sea	Mar.	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Acanthogobius flavimanus</i> (문절망둑)	Bot.	Sea	Bac.	0	0	4	2	3	1	6	0	3	13
<i>Cyprinus carpio</i> (흰발망둑)	Bot.	Sea	Bac.	0	36	2	0	2	0	0	0	40	0
<i>Favonigobius gymnauchen</i> (날개망둑)	Bot.	Sea	Bac.	0	0	5	0	0	0	0	0	5	0
<i>Rhinogobius brunneus</i> (밀어)	Bot.	Fre.	Fre.	0	0	125	77	53	10	8	5	1	277
<i>Rhinogobius giurinus</i> (갈문망둑)	Bot.	Fre.	Ana.	0	0	7	6	0	4	4	21	0	42
<i>Tridentiger bifasciatus</i> (민물두줄망둑)	Bot.	Fre.	Bac.	0	21	11	5	10	1	0	0	48	0
<i>Tridentiger brevispinis</i> (민물검정망둑)	Bot.	Fre.	Fre.	0	0	272	146	192	59	121	39	77	752
<i>Channa argus</i> (가물치)	Sur.	Fre.	Fre.	2	0	0	1	15	0	0	0	1	17
<i>Takifugu niphobles</i> (복섬)	Mid.	Sea	Bac.	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
종수				14	29	37	32	31	26	28	23	50	29
개체수				385	1,192	2,674	2,760	7,677	4,157	1,643	1,166	7,831	13,823

Sur. : Surface Bot. : Bottom Mid. : Middle Fre. : Freshwater Hab. : Habitat depth
 Sea. : Sea water Ana. : Anadromous Mar. : Marine Bac. : Backish Pre. : Preference
 Des. : Descent Cha. : Characteristics Bi-Mig. : Bilateral Migratory

균유속 공식을 적용하였고, 유량계수는 Henderson(1966)의 예언위어 유량 공식을 참고하였다. Henderson(1966) 실험 data를 분석하여 Eq.(5)와 같은 유량계수를 도출하였으며, Lee et al.(2016)은 Eq.(5)를 적용한 계산값과 이론값의 차이가 크지 않다는 것을 확인하였다.

$$V_o = C_o \sqrt{2g(h_f - h_s)} \quad (6)$$

$$C_o = 0.611 + 0.08 \frac{d}{W} \quad (7)$$

담수와 해수의 경계부를 월류하는 유량 또는 유속의 계산은 잠수월류와 같이 해수, 담수의 밀도차 영향을 받으나, 낙동강하굿둑의 실제 운영 data를 확인한 결과 h_g 와 h_s 의 차이가 크지 않아 밀도차에 의한 정수압 보정 결과가 수 mm로 계산되었다. 이에 본 연구에서는 월류시 해수, 담수 밀도차를 고려하지 않았다. 또한 낙동강하굿둑 운영메뉴얼에는 overflow 방류 시의 수문 상단고 범위를 EL.0.76~(-)0.74m 범위로 규정하고 있다. 운영 가능한 수문 상단고와 관리수위를 고려하였을 때, Eq.(7)의 유량계수의 범위는 0.61~0.63으로 유속계산에서 유의미한 차이를 보이기 어렵다고 판단하여 일괄적으로 0.62의 유량계수를 적용하여, 낙동강하굿둑 월류 방류시 유속을 산정하였다.

2. 기수어류 이동 특성

1) 기수어종 및 서식 수심

2021년 4번의 시범운영 전·후 기간에 수행된 어류 모니터링 결과와 2011년 조사된 어류 모니터링 결과(Kang et al., 2012)를 종합하여 Table 2에 정리하였다. Kang et al.(2012)의 연구는 본 연구와 조사시기가 매우 유사(4~11월)하며, 본 연구에서 수행하지 않은 어도 모니터링 결과가 포함되어 있다. 이에 본 연구의 모니터링 결과를 보완할 수 있는 data라 판단하여 금회 수행된 결과에 더하여 낙동강하구에 서식 또는 이동하는 어종을 분석하였다.

2011년과 2021년에 포획된 어종은 25과 56종이었으며, 해수어종과 담수어종이 혼합되어 있다. 2021년에 포획된 어종 중 강준치와 파랑볼우럭이 가장 많았으며, 누치, 송어, 민물검정망둑, 참물개, 끄리 순으로 개체수가 많이 포획되었다. 이 중 기수어종인 송어를 제외한 나머지 어종은 담수어종이었다.

주로 분포하는 수심은 어류가 주로 서식하는 수심을 말하는 것으로, 어류도감 및 관련 문헌 등을 참고하여 본 연구에서는 표층, 중층, 저층으로 구분하였다. 실배장어는 기수역에서 횡단구조물로 막혀있는 경우 유영능력이 떨어져 낮에

는 바닥에 붙어있다가 해가 지고 고조 시기가 되면 물의 움직임을 따라 강 상류 방향으로 올라가는 특성이 있으므로 (Tesch and White, 2008), 소상 가능성을 판단하는 본 연구에서는 표층으로 분류하였다.

2) 어종별 돌진속도

낙동강하굿둑 수문 방류 시 소상 가능한 어종을 판단하기 위하여 어종별 돌진속도(최대유영속도)는 Table 3에 정리하였다. 어류가 강력한 수류를 거슬러 소상할 때, 유영과 도약을 이용하지만 연어, 송어 등 일부 종을 제외한 나머지 어종은 도약 높이가 매우 낮거나 (은어, 피라미), 도약을 하지 않기 때문에 도약으로 인한 소상 가능성은 본 연구에서 배제하였다.

돌진속도는 동일한 어종일지라도 체장에 따라 차이를 보일 수 있는데, Table 3에 정리된 돌진속도는 어종별 평균체장을 고려한 것이다. 낙동강하굿둑을 통과하는 어종 중 연어의 돌진속도가 가장 빨랐으며, 다음으로는 송어 순으로 나타났다. 대부분의 어종은 1.0 ~ 2.0 m/s 사이의 돌진속도를 갖고 있어 현행과 같은 일반적인 방류 시 하굿둑을 통한 원활한 소상은 쉽지 않을 것으로 판단되며, 이는 기수생태계 조성에 있어서 수생태계의 원활한 종적 연결성을 확보할 수 있는 적절한 하굿둑의 운영이 매우 중요한 요소임을 의미한다.

Table 3. Burst speed of representative fish

Fish name	Burst speed (m/s)
<i>Anguilla japonica</i> (glass eel)	0.6
<i>Coilia nasus</i>	2.2
<i>Plecoglossus altivelis altivelis</i>	1.4
<i>Hypomesus nipponensis</i>	1.0
<i>Hyporhamphus intermedius</i>	1.2
<i>Cyprinus carpio</i>	1.9
<i>Erythroculter erythropterus</i>	2.5
<i>Engraulis japonicus</i>	1.1
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	1.0
<i>Mugil cephalus</i>	3.1
<i>Konosirus punctatus</i>	1.5
<i>Opsarichthys uncirostris amurensis</i>	1.5
<i>Tridentiger brevispinis</i>	1.0
<i>Hemibarbus labeo</i>	1.7
<i>Oncorhynchus keta</i>	4.9
<i>Hemiculter eigenmanni</i>	1.4
<i>Acanthorhodeus macropterus</i>	1.2
<i>Neosalanx andersoni</i>	1.1

3. 방류 시 어류의 원활한 소상 분석

도출된 낙동강하굿둑 방류시 평균 유속 공식과 낙동강 하구에 서식 또는 이동하는 어종의 돌진속도를 비교하여, 낙동강하굿둑 수문운영에 따른 어종의 원활한 소상 가능성을 파악하였다.

1) 저류 방류 시

낙동강하굿둑의 관리수위는 EL.0.51 ~ 1.01 m(일반적으로 EL.0.78 m 유지)이며, 2021년 조위와 관리수위 변화를 비교하였을 때, 담수와 해수의 최대 수위차는 약 1.5 m인 것으로 파악되었다. 이에 수위차 0 ~ 1.5 m를 범위로 저류 방류시의 유속 Eq.(3)과 낙동강 하구 서식 및 이동 어종의 돌진속도를 비교하여 Figure 6에 도식화하였다.

Figure 6에서 어류의 돌진속도와 유속 곡선이 만나는 지점의 수위차가 해당 개도에 대한 어류의 원활한 소상 가능 한계조건(threshold condition)이며, 교점의 수위차를 기준으로 왼쪽이 ‘소상 가능 구간’, 오른쪽이 ‘소상 불가능 구간’으로 해석된다. 낙동강하굿둑 수문운영매뉴얼에는 저류방류 시 해수와 담수의 밀도차로 인한 방류 불가 구간을 0 ~ 20 cm로 설정하고 있으므로, 이 구간에 대한 data는 본 분석에서 제외하였다. 개도가 커짐에 따라 구조물에 따른 저항 및 에너지 감쇄가 감소하므로, 개도 0.5 ~ 3.0 m를

별도로 계산하여 도식화하였다.

실뱀장어를 제외한 대부분의 기수역 어종이 원활하게 소상할 수 있는 조건은 개도 0.5 m로 분석되었으며, 소조기의 조위 변화 범위가 EL.±0.2 m임을 감안할 때, 수문을 1.0 m 이하로 개방한다면, 대부분 어종의 원활한 소상이 예상된다. 다만, 대조기의 경우 최대 수위차가 약 1.5 m 이상 발생할 수 있으며, 이 때는 연어, 송어를 제외한 대부분의 어종이 소상 불가능할 것으로 판단된다. 돌진속도만 비교하였을 때, 실뱀장어는 개도 0.5 m, 수위차 0.4m 이하에서 소상이 가능하지만 개체의 서식 특성 및 크기를 생각했을 때, 담수역으로 완전히 소상하기까지 지속적인 돌진속도를 낼 수 없으므로, 방류 시 소상은 사실상 불가능할 것으로 판단된다.

송어는 개도 1.5 m 이하, 연어의 경우 3.0 m 이하, 은어는 개도 1.0 m, 수위차 0.6 m 이하에서 원활한 소상이 가능할 것으로 확인되었다.

2) 잠수월류 방류 시

잠수월류 형태 방류 시 유속 곡선은 상술한 바와 같이 몇 가지 가정을 통해 단일 곡선으로 표현하였다. 수위차 범위는 저류 시와 동일하게 설정하였다. 낙동강하굿둑 운영 매뉴얼 상 월류시에도 20 cm의 해수와 담수의 밀도차로 인한 방류 금지 구간을 설정하지만, 본 연구에서는 해수와 담수의 밀도차를 무시하였고, 향후 지속적인 해수 유통을

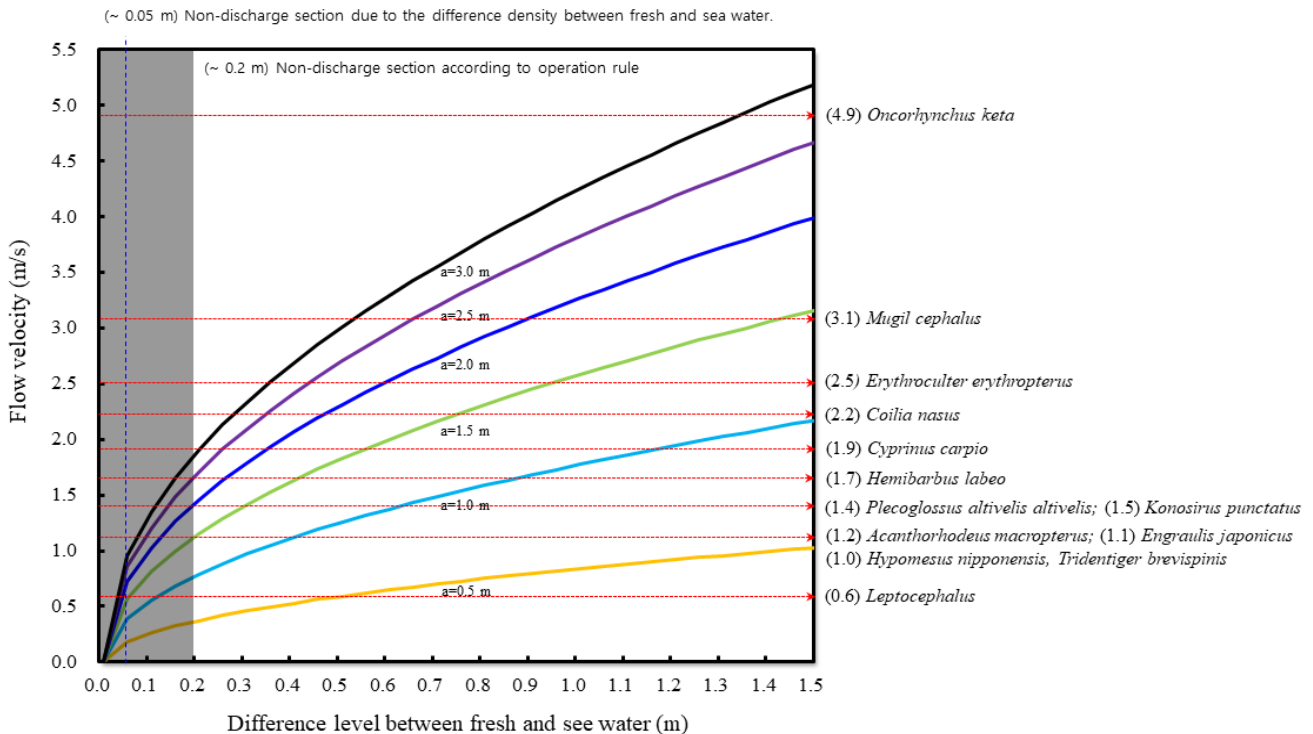


Figure 6. Averaged velocity in underflow and burst speed.

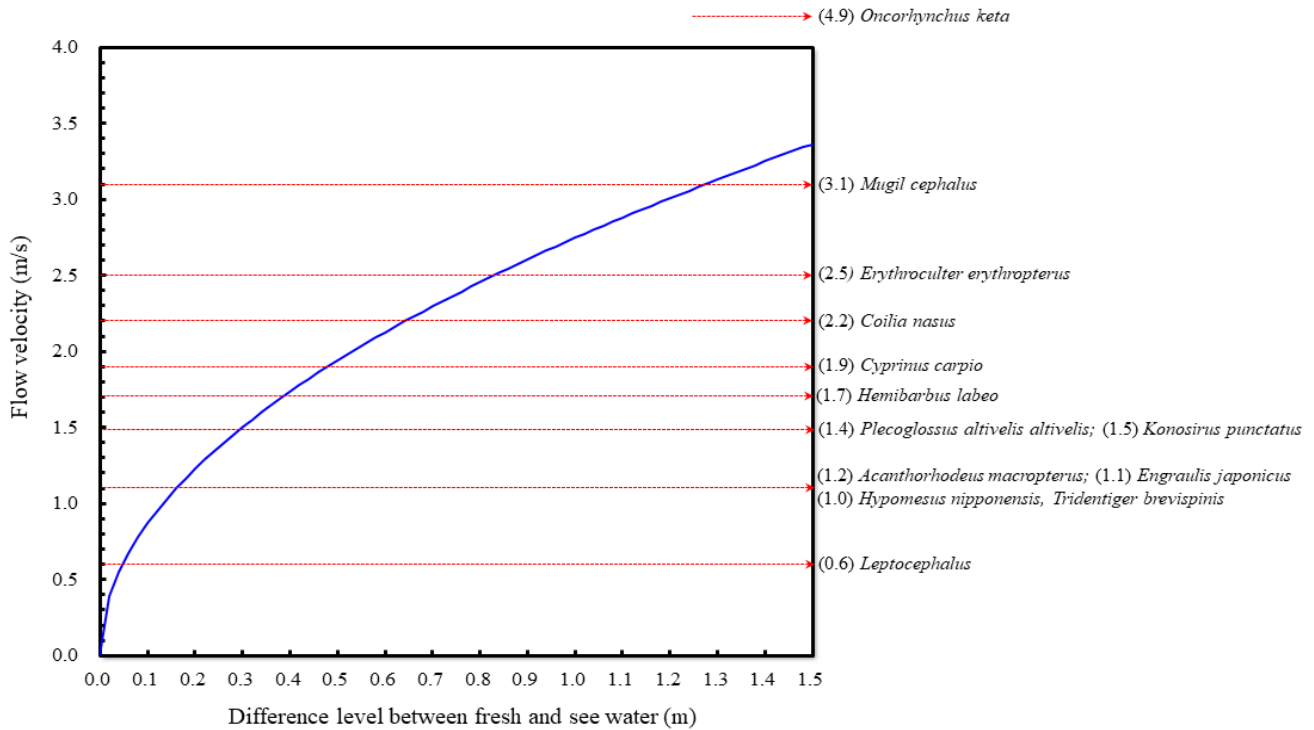


Figure 7. Averaged velocity in submerged overflow and burst speed.

계획하고 있으므로 운영상 불가능한 구간을 별도로 설정하지 않았다. Figure 7의 잠수월류 시 유속곡선과 어류의 돌진속도를 도시한 것이다.

유속곡선은 저류 방류시에 비하여 수위차에 따른 유속의 기울기가 상대적으로 더 큰 것으로 나타났다. 이는 동일한 수위차라 할지라도 저류 방류시에는 담수측과 해수측의 수심으로 인한 정수압 차이에 의해서 유속이 결정되는 반면, 잠수월류 시의 수위차는 해수역의 정수압 영향이 없기 때문이다. 이에 따라 실뱀장어의 경우 수위차 5 cm 미만에서 돌진으로 인한 소상이 가능할 것으로 확인되며, 실뱀장어를 제외한 대부분의 어종은 수위차 17 cm 이상에서 원활한 소상이 불가능할 것으로 판단된다. 반면 송어, 연어와 같은 대형 어종의 경우 대부분 원활한 소상이 가능할 것으로 확인되었다.

4. 낙동강하굿둑 수문운영 방안

본 연구에서 도출된 낙동강하굿둑 방류시 수문운영에 따른 평균유속과 조사된 어종에 대한 돌진속도를 이용하여, 수문 개방 형태, 개도고, 내·외 수위차에 따른 기수역에 서식 또는 이동하는 어종의 원활한 소상 가능성을 분석하였다. Table 4는 이러한 연구 결과를 정리한 것이다.

저류 시 대부분의 어종이 개도 0.5 m, 수위차 0.4 m 이내

에서 원활한 소상이 가능한 것으로 분석되었으나, 개도고가 높아지고, 수위차가 커짐에 따라 소상할 수 있는 어종이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 단일 유속 곡선으로 도출된 월류 시에도 수위차에 따라 원활히 소상 가능한 어종이 확연하게 구분되었다. 이러한 분석은 수문운영이 어류의 소상에 큰 영향을 줄 수 있으며, 낙동강 하구 기수역 조성을 위해서는 적절한 수문의 운영이 수행되어야 함을 의미한다. 다만 도출된 돌진속도 이하의 유속을 발생시키기 위해서는 낙동강하구의 관리 수위를 탄력적으로 운영할 필요가 있다. 조위는 지속적으로 변화되는 상황에서 일정한 관리 수위 유지를 위해 수문이 운영되므로 길지 않은 시간 동안만 어류의 원활한 소상이 가능하다. 이에 특정 조위 구간을 설정하고, 그 시기에 수문 개도 폭을 좁게하여 소상 가능성을 높이고, 그 외 기간 동안에는 수위 유지를 위해 방류량을 크게 하는 방안이 어류 소통 측면에서 유리한 환경을 제공할 수 있을 것이라 사료된다.

그러나 낙동강 하구에 서식하는 모든 어종에게 하굿둑의 원활한 이동 환경을 제공하는 것은 현실적으로 불가능하다. 낙동강하굿둑 인근에 서식 또는 이동하는 어종은 크기, 서식 수심, 생활 습성 등과 같은 물리·생태적 특성이 모두 다르고, 어종에 따라 이동 가능한 수문운영이 상이하며, 시기별 우점종이 다르게 나타난다. 이에 불특정 다수의 어종을 대상으로 한 수문운영 보다는 특정 어종을 시기별로 선정하

Table 4. Gate operation for smooth movement of fish

		Opening height(m) - Underflow					Overflow
		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	
Δh (m)	0.0	-	-	-	-	-	-
	0.2	<i>Leptocephalus</i> <i>Hypomesusnipponensis</i> <i>Tridentigerbrevispinis</i> <i>Acanthorhodeus macropterus</i> <i>Engraulisjaponicus</i> <i>Plecoglossusaltivelisaltivelis</i> <i>Konosiruspunctatus</i> <i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Hypomesusnipponensis</i> <i>Tridentigerbrevispinis</i> <i>Acanthorhodeus macropterus</i> <i>Engraulisjaponicus</i> <i>Plecoglossusaltivelisaltivelis</i> <i>Konosiruspunctatus</i> <i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Engraulisjaponicus</i> <i>Plecoglossusaltivelisaltivelis</i> <i>Konosiruspunctatus</i> <i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Konosiruspunctatus</i> <i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Plecoglossusaltivelisaltivelis</i> <i>Konosiruspunctatus</i> <i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>
	0.4	<i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Plecoglossusaltivelisaltivelis</i> <i>Konosiruspunctatus</i> <i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i>	<i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>
	0.6	<i>Hypomesusnipponensis</i> <i>Tridentigerbrevispinis</i> <i>Acanthorhodeus macropterus</i> <i>Engraulisjaponicus</i> <i>Plecoglossusaltivelisaltivelis</i> <i>Konosiruspunctatus</i> <i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>
	0.8	<i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Engraulisjaponicus</i> <i>Plecoglossusaltivelisaltivelis</i> <i>Konosiruspunctatus</i> <i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Hemibarbuslabeo</i> <i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>
	1.0	<i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Cyprinus carpio</i> <i>Coilanasus</i> <i>Erythrocultererythropterus</i> <i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>	<i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>			<i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>
	1.2						
	1.4		<i>Mugilcephalus</i> <i>Oncorhynchus keta</i>		<i>Oncorhynchus keta</i>		<i>Oncorhynchus keta</i>
1.6							

Table 5. The monthly plan for gate operation type

Month	Target species	Opening type	Smooth movement condition
Jan.	-	Underflow*	-
Feb.	<i>Anguilla japonica</i> (glass eel)	Underflow(day)	-
Mar.		Overflow(night)	
Apr.			
May	<i>Coilia nasus, Mugil cephalus</i>	Overflow	$\Delta h < 0.6 \text{ m}$ ($V_{\max}=2.1 \text{ m/s}$)
Jun.	<i>Coilia nasus, Mugil cephalus</i>	Overflow	$\Delta h < 0.6 \text{ m}$ ($V_{\max}=2.1 \text{ m/s}$)
Jul.	<i>Coilia nasus, Mugil cephalus</i>	Overflow	$\Delta h < 0.6 \text{ m}$ ($V_{\max}=2.1 \text{ m/s}$)
Aug.	<i>Mugil cephalus</i>	Overflow	$\Delta h < 1.2 \text{ m}$ ($V_{\max}=3.0 \text{ m/s}$)
Sep.	<i>Mugil cephalus</i>	Overflow	$\Delta h < 1.2 \text{ m}$ ($V_{\max}=3.0 \text{ m/s}$)
Oct.	<i>Oncorhynchus keta</i>	Overflow	-
Nov.	<i>Oncorhynchus keta</i>	Overflow	-
Dec.	-	Underflow*	-

* In winter, fish migration is not active due to wintering, and most of them live in deep water

여 소상에 유리한 환경을 조성해 주는 것이 현실적인 방안이라 사료된다. 또한 서식하는 수심에 따라 수문 운영의 형태(월류 또는 저류)도 어류의 소상 가능성을 높이는 주요 원인이라 판단된다. Table 5는 기 조사된 어류 자료를 바탕으로 개체수, 중요도 등을 고려하여 월별 대상 어종 선정 및 이들에게 유리한 수문 운영 형태를 정리하고, 원활한 소상을 위한 적절한 수문개도 및 수위차를 정리한 것이다. 다만, 성체 뱀장어의 원활한 강하를 위한 수문운영은 고려하지 않았는데, 이는 방류 시 흐름 방향을 따라 담수층에서 해수층으로 이동이 가능하기에, 수문운영 형태에 따른 강하 효율은 큰 차이가 없을 것이라 판단했기 때문이다.

실뱀장어와 연어는 낙동강하굿둑의 깃대종(flagship species)으로 기수생태계 복원의 상징성이 높으며, 승어는 해수역과 기수역을 드나드는 어종으로 연중 이동하는 개체수가 많다는 특징이 있다. 은어는 연어와 함께 회유성 어종(소하성)의 대표적인 종으로 최근의 조사에서 다수 포획되지 않았지만 과거 낙동강 하구역 복원을 판단할 수 있는 중요한 어종이라 판단하였다. 웅어는 소하성 어종 중 개체수가 가장 많아 선정하였다. 이러한 어종들은 대부분 표층에서 서식하거나 먹이활동을 하므로, 방류시 수문운영 형태는 저류보다는 월류가 낫다고 판단된다. 그 외 소하성, 기수성 어종 대부분도 주 서식층이 표층 또는 중층이므로 다양한 어종의 기수역 조성에 월류 형태의 수문운영이 보다 유리할 것으로 판단되었다. 다만 실뱀장어의 경우 앞서 기술한 바와 같이 낮에는 돌 틈과 같은 바닥에 숨어 있다가, 밤이 되면 표층으로 올라와 이동하기 때문에, 낮 동안에는 저류 방류, 밤 시간에는 월류 방류가 실뱀장어 소상에 유리하다고 판단되었으며, 주간에는 저류, 야간에는 월류의 수문운영 방법이 적절한 것으로 사료되었다. 연어의 경우 중층에 주로 서식하지만, 도약능력이 뛰어나(평균 1.23 m) 저류보다는 월류 방류가 연어 소상에 더 적합한 환경이라고 판단하였다. 월별 수문운영은 1월과 12월은 동절기로 대부분의 어종들이 깊은 수심에 위치하고 있고, 어류가 상류로 이동 시 일반적으로 유속의 발생원을 향해 소상하는 특징을 가지고 있으므로(MOF, 215), 어류의 유인을 위해 저류 형태의 방류가 유리하다고 판단하였다. 2 ~ 4월은 실뱀장어를 대상으로하여, 낮에는 저류를 통해 유인하고, 밤에는 월류 방류를 통해 유인한 후, 월류 형태의 해수유입을 통해 실뱀장어를 유입시키는 것이 효율적이라 판단된다. 5 ~ 7월은 웅어와 승어를 대상으로 월류형태로 수위차 0.6 m이하를 유지하면 대상어종의 소통이 자유로울 것으로 확인되었으며, 10 ~ 11월 연어 소상기에는 월류 형태 방류 시 어떠한 수위조건에서도 연어 소상이 가능한 것으로 나타났다.

본 연구는 수문 개도 형태와 정도에 따른 발생 유속을 실측 data 기반으로 제시하고, 어류의 돌진속도를 조사하였

다. 유속과 돌진속도의 평균을 이용하여 절대적인 소상 한계조건을 제시한 것이 아닌, 낙동강하굿둑 방류시 원활한 소상 환경 조성에 대한 가능성을 제시하였다. 그러나 현재는 각 생태 요소에 대한 자세한 정보와 장기적인 연구가 부족한 상태이며, 생태계에 대한 자료가 충분하지 않기에 지속적인 생태계에 대한 모니터링이나 조사를 진행하는 것이 중요하다. 향후 생태적 data의 충분한 취득, 계측기기의 고도화 및 이를 바탕으로 한 수리, 수문, 환경 등과의 다학제적 연구의 진행으로 낙동강 하구의 기수역 복원을 완성할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Ahn, H.K., H. Woo, D.S. Rhee and K.H. Kim(2008) Stream eco-corridor restoration by out-aged small dam removal-Focused on Gokreung River Gokreung 2 small dam removal. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 11(2): 40-54. (in Korean with English abstract)
- Allan, J.D.(1997) *Stream ecology*. Chapman and Hall Beamish, F. W. H. Swimming Capacity. In: *Fish physiology*. Springer Nature, pp.101-187.
- Belaud, G., L. Cassan and J.P. Baume(2009) Calculation of contraction coefficient under sluice gates and application to discharge measurement. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 135(2): 1086-1091.
- Birmie-Gauvin, K., K. Aarestrup, T.M.O. Riis, N. Jepsen and A. Koed(2017) Shining a light on the loss of rheophilic fish habitat in lowland rivers as a forgotten consequence of barriers, and its implications for management. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 27(6): 1345-1349.
- Chen, C.L.(1991) Unified theory on power laws for flow resistance. *Journal of Hydraulic Eng. ASCE*. 117(3): 371-389.
- Clay, H.C.(1995) *Design of fishways and other fish facilities*(2nd ed.). Lewis Publishers, 248pp.
- Clemmens, A.J., T.S. Stelkoff and J.A. Replogle(2003) Calibration of submerged radial gates. *Journal of Hydraulic Engineering* 129(9): 680-687.
- Cowx, I.G. and R.L. Welcomme(1998) *Rehabilitation of river for fish*. Food and Agriculture Organization of the United Nations by Fishing News Books.
- Gehrke, P.C., D.M. Gilligan and M. Barwick(2002) Changes in fish communities of the Shoalhaven River 20 years after construction of Tallowa Dam, Australia. *River Research and Applications* 18(3): 265-286.
- Han, M., M. Fukushima, S. Kameyama, T. Fukushima and B. Matsushita(2008) How do dams affect freshwater fish distribution in Japan Statistical analysis of native and nonnative

- species with various life histories. *Ecological Research* 23: 735-743.
- Henderson, F.M.(1966) Open channel flow. MacMillan Co., New York, pp.174-176.
- Henry, R.(1950) Discussion to 'On submerged jets'. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 115: 687-694.
- Hong, S.Y., C.W. Ma and H.S. Lim(1994) A ecological study of benthic macrofauna in Nakdong River estuary. Spring Meeting of the Korean Societies on Fisheries Science, pp.24-25. (in Korean)
- Jackson, D. and G. Marmulla(2001) The influence of dams on river fisheries. Prepared for Thematic Review II. 1: Dams, ecosystem functions and environmental restoration. World Commission on Dams, Environmental Issues, Final Draft, June 30-2000, 187pp.
- Jang, I.K. and C.H. Kim(1992) A study on the changes of the molluscan and crustacean fauna after the construction of the Nakdong Estuary Barrage, *Korean Journal of Fishes and Sciences*, Vol. 25, No. 4, pp. 265-281. (in Korean with English abstract)
- Jang, J.H. and J.H. Ahn (2012) Assessing future climate change impact on hydrologic and water quality components in Nakdong River Basin. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(11): 1121-1130. (in Korean with English abstract)
- Jeong, S.I., S.W. Lee, Y.T. Hur and H.Y. Kim(2022) Development of seawater inflow equations considering density difference between seawater and freshwater at the Nakdong River Estuary. *Journal of Korea Water Resources Association* 55(5): 382-392. (in Korean with English abstract)
- Joo, G.J.(2005) Changes in fish species and assessment of migratory fish before and after the construction of Nakdong river Estuary Barrage. *Nakdong river Researches* 106: 2-14. (in Korean)
- Kang, E.J., H. Yang, H.H. Lee, K. Kim and C. Kim(2012) Characteristics of fish fauna collected from near estuaries bank and fish-way on the bank of Nakdong river. *Korean Journal of Ichthyology* 24(3): 201-219. (in Korean with English abstract)
- Katano, O., T. Nakamura, S. Abe, S. Yamamoto and Y. Baba(2006) Comparison of fish communities between above- and below-dam sections of small streams; Barrier effect to diadromous fishes. *Journal of Fish Biology* 68(3): 767-782.
- Kil, H.K., D.G. Kim, S.W. Jung, I.K. Shin, K.H. Cho, H.S. Woo and Y.J. Bae(2007) Changes of benthic macroinvertebrate communities after a small dam removal from the Gyeongan Stream in Gyeonggi-do, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* 25(4): 385-393. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.J., B.H. Kim and K.Y. Han(2020) 2-D hydrodynamic analysis using EFDC in the Nakdong River-Focused on velocity and arrival time between weirs. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 23(2): 36-52. (in Korean with English abstract)
- Kim, I.S. and J.Y. Park(2002) Freshwater fish of Korea. Korea, Seoul, Kyo-Hak Publishing Co., Ltd., pp.1-465.
- Kim, J. and D.H. Jang(2012) A study on the sedimentary environment in river channel of the lower Geum River basin after construction of estuary barrage. *Journal of the Korean Geomorphological Association* 16(1): 1-15. (in Korean with English abstract)
- Kwak, S.N. and S.H. Hur(2003) Changes in species composition of fishes in Nakdong river estuary. *Journal of the Korean Society of Fisheries and Aquatic Science* 36(2): 129-135. (in Korean with English abstract)
- Lee, T.W.(1996) Change in species composition of fish in Chonsu Bay. *Korean Journal of Fishes and Sciences* 29(1): 71-83. (in Korean with English abstract)
- Loneragan, N.R., I.C. Potter, R.C. Lenanton and N. Caputi(1986) Spatial and seasonal differences in the fish fauna in the shallows of a large Australian estuary. *Mar. Biol.* 92: 575-586.
- Lucas, M.C. and E. Baras(2001) Migration of freshwater fishes. Oxford, England: Blackwell Science Ltd. doi:10.1002/9780470999653
- McAlister, D.E., J.F. Craig, N. Davidson, S. Delany and M. Seddon(2001) Biodiversity impacts of large dams. Background Paper Nr. 1, Prepared for IUCN/UNEP/WCD, 49pp.
- Ministry Land, Infrastructure and Transport(2011) Korean river design criteria. (in Korean)
- Ministry of Ocean and Fisheries(MOF)(2015) Fishway design standard. (in Korean)
- Moss, B.(1998) Ecology of freshwaters. John Wiley & Sons.
- Mueller, M., J. Pander and J. Geist(2011) The effects of weirs on structural stream habitat and biological communities. *Journal of Applied Ecology* 48(6): 1450-1461.
- National Institute of Environmental Research(NIER)(2020) Guidelines for investigation and assessment of the aquatic ecosystem continuity. 17pp. (in Korean)
- Park, S., J. Lee, J.U. Choi, N. Heo and S. An(2016) Study on the long-term changes in water quality and benthic ecology and evaluation on effect of the barrage in Nakdong River Estuary. *Journal of Wetlands Research* 18(1): 58-67. (in Korean with English abstract)
- Sanders, R.E., R.J. Miltner, C.O. Yoder and E.T. Rankin(1999) The use of external Deformities, Erosion, Lesions, and Tumors (DELT anomalies) for characterizing aquatic resources: A case study of Seven Ohio Streams. CRC Press.
- Seo, J.W. and H.S. Kim(2009) A study of fish community on up and

- downstream of Hwabuk Dam under construction in the upper Wie Stream. *Korean Journal of Ecology and Environment* 42(2): 260-269. (in Korean with English abstract)
- Shayan, H.K. and J. Farhoui(2014) Estimation of flow discharge under the sluice and radial gates based on contraction coefficient. *IJST Transactions of Civil Engineering* 38(C2): 449-463.
- Silva, A.T., M.C. Lucas, T. Castro-Santos, C. Katopodis, L.J. Baumgartner and J.D. Thiem(2018) The future of fish passage science, engineering, and practice. *Fish and Fisheries* 19(2): 340-362.
- Simpson, M.R. and R.N. Oltmann(1990) Acoustic Doppler discharge-measurement system. *Hydraulic Engineering-Proceedings of the 1990 National Conference*, pp.903-908.
- Son, Y.M. and H.B. Song(2006) *Freshwater fish of Geum River*. Korea, Seoul, Ji-Sung. Publishing Co., Ltd., pp.1-239.
- Sun, J., S.M. Galib and M.C. Lucas(2021) Rapid response of fish and aquatic habitat to removal of a tidal barrier. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 31: 1802-1816.
- Swamee, P.(1992) Sluice gate discharge equations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 118(1): 56-60.
- Tesch, F.W. and R.J. White(2008) *The ell*. John Wiley & Sons.
- Videler, J.J.(1993) *Fish swimming*. Chapman & Hall, 206pp.
- Wahl, T.L.(2005) Refined energy correction for calibration of submerged radial gates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 131(6): 457-466.
- Yang, H.J., K.H. Kim and J.D. Kum(2001) The fish fauna and migration of the fishes in the fish way of the Nakdong River Mouth Dam. *Korean Journal of Limnology* 34(3): 251-258. (in Korean with English abstract)