KJEE 55(1): 35-48 (2022)
https://doi.org/10.11614/KSL.2022.55.1.035
ISSN: 2288-1115 (Print), 2288-1123 (Online)

Original article

한반도 하구의 어류군집 구조 및 다양성

박상현 · 백승호 · 김정희* · 김동환[1] · 장민호[2] · 원두희[3] · 박배경[4] · 문정숙[4]

주식회사 에코리서치, [1]국립생태원 환경영향평가팀, [2]공주대학교 생물교육과,
[3](주)생태조사단 부설 두희생태연구소, [4]국립환경과학원 물환경공학연구과

Fish Community Structure and Biodiversity of the Korean Peninsula Estuaries. *Sang-Hyeon Park* (0000-0001-6036-8489), *Seung-Ho Baek* (0000-0002-8280-8665), *Jeong-Hui Kim** (0000-0003-2331-4232), *Dong-Hwan Kim*[1] (0000-0003-2339-4420), *Min-Ho Jang*[2] (0000-0003-2331-4232), *Doo-Hee Won*[3] (0000-0002-1435-7743), *Bae-Kyung Park*[4] (0000-0003-4589-7782) *and Jeong-Suk Moon*[4] (0000-0003-1448-5945), (*EcoResearch Incorporated, Gongju 32588, Republic of Korea;* [1]*Environment Impact Assessment Team, National Institute of Ecology, Seocheon 33657, Republic of Korea;* [2]*Department of Biology Education, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea;* [3]*Doohee Institute of Ecological Research, Korea Ecosystem Service Inc., Ansan 15426, Republic of Korea;* [4]*Water Environmental Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea*)

Abstract Fish assemblage of total 325 of Korean peninsula estuaries were surveyed to analyze the characteristics of community structure and diversity by sea areas for three years from 2016 to 2018. The scale (stream width) of Korean estuaries were various (14~3,356 m), and 68.9% of all estuaries showed salinity of less than 2 psu. Total 149 species classified into 52 families of fish were identified, and the dominant and sub-dominant species were *Tribolodon hakonensis* (relative abundance, RA, 12.5%) and *Mugil cephalus* (RA, 9.5%), respectively. The estuary of the Korean Peninsula had different physical and chemical habitat environments depending on the sea area, and accordingly, fish community structure also showed statistically significant differences (PERMANOVA, Pseudo-F=26.69, P=0.001). In addition, the NMDS (nonmetric multidimensional scaling) results showed the patterns that indicating fish community difference by sea areas, even though low community similarity within sea area (SIMPER, 21.79~26.39%). The estuaries of east sea areas were distinguished from the others in the aspects of which, the higher importance of migratory fishes and endangered species, and that of brackish species were characterized at south sea estuaries. However, the estuaries of west sea showed higher importance of species that have a relation with freshwater (primary freshwater species, exotic species), which is the result that associating with the lower salinity of west sea estuaries because of the high ratio of closed estuaries (78.2%). The SIMPER analysis, scoring the contribution rates of species to community similarity, also showed results corresponding to the tendency of different fish community structures according to each sea area. So far, In Korea, most studies on fish communities in estuaries have been conducted in a single estuary unit, which made it difficult to understand the characteristics of estuaries at the national level, which are prerequisite for policy establishment. In present study, we are

Manuscript received 10 March 2022, revised 16 March 2022,
revision accepted 17 March 2022
* Corresponding author: Tel: +82-41-853-3018, Fax: +82-41-853-3019
E-mail: ragman-k@hanmail.net

ⓒ 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.

providing fish community structure characteristics of Korean estuaries in a national scale, including diversity index, habitat salinity ranges of major species, distribution of migratory species. We are expecting that our results could be utilized as baseline information for establishing management policies or further study of Korean estuaries.

Key words: river mouth, brackish water, assemblage similarity, biodiversity indices, salinity distribution, migratory fish, life cycle type

서 론

하구는 지리적으로 하천의 끝단에 위치하여 하천의 담수와 바다의 해수가 섞이는 지역으로(Pritchard, 1967), 하구의 범위는 염도를 기준으로 0.5~30 psu를 유지하는 염분 혼합 수역인 기수역과 하천 구간 중 조석의 영향이 미치는 구역을 포함한다(Venice System, 1958). 이처럼 하구는 담수와 해수의 혼합과정에 의해 수체의 염분 변화가 발생하며, 조석의 영향을 받는 역동적인 환경조건을 갖추고 있어 생물 다양성이 높게 나타난다(Fairbridge, 1968). 또한 하구는 육상 기원의 퇴적물 및 오염물질이 분해되는 장소이며, 육상·수생태계 생물의 주요 서식지 및 산란지로서의 가치가 매우 높은 지역으로 보고되어 있다(Costanza *et al.*, 1997). 어류에 있어서 하구는 담수에 서식하는 어종, 기수성 어종, 해양성 어종 등 다양한 어종이 공존하는 서식지이며, 하천과 바다를 잇는 회유성 어종의 이동 통로이다(Claridge *et al.*, 1986). 또한, 하구의 얕은 수심과 높은 탁도는 어류의 생존율을 높이는 데 도움을 주는 훌륭한 산란장 및 서식처를 제공한다(McLusky, 1989; Daan *et al.*, 1990).

하구의 보호 및 복원을 위한 기초자료를 확보하기 위해서, 국가 단위로 다양한 노력을 실시하고 있다. 미국에서의 국립하구프로그램(National Estuary Program, NEP)을 통해 1987년부터 하구 연구를 수행하고 있다(EPA, 2022). 유럽에서는 Water Framework Directive (WFD)를 통해 2000년부터 수중 생태계 악화 방지, 수역 보호 및 복원, 평가 및 관리 목표 제시 등을 목적으로 하구를 포함한 다양한 수체에서 연구를 수행하고 있다(WFD, 2022). 호주에서는 Aquatic Ecosystems Toolkit에 따라 하구를 포함한 생태학적 가치가 높은 수생태계를 발굴하고, 국가적으로 상태를 평가하며, 이에 대한 가이드라인을 제공하고 있다(AG/DAWE, 2017). 이와 같은 국가적 차원에서의 하구 연구 및 자료 수집은 하구의 현황 확인, 평가뿐만 아니라, 보전 및 복원을 위한 자료를 제공하며, 이는 하구 관리를 위한 정책에 활발하게 활용되어지고 있다.

2000년대 중반까지 한국의 하구 어류군집 연구는 주로 국가적인 관심이 크게 나타나는 대형 하구(Lee, 1992; Park and Lee, 1997; Kim *et al.*, 2001; Hwang *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2007; Baek *et al.*, 2013; Park *et al.*, 2013; Byeon, 2014; Lee *et al.*, 2017)와 일부 소형 하구(Kim and Lee, 1993; Son and Song, 1998; Song *et al.*, 2005; Chae and Yoon, 2007) 등 단일 하구를 중심으로 이루어졌다. 단일 하구에 대한 연구결과는 각 하구의 어류상 변동에 대한 상세한 정보를 제공해 주지만, 국내 하구의 전반적인 경향성을 제시하지 못하는 단점을 가지고 있다. 이에, 환경부는 국내 하구 관리를 위한 통합적인 자료를 확보하고 하구 관리 정책에 활용하고자 2008년부터 "하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가(MOE/NIER, 2008~2021)"를 통해 국내 전체 하구를 대상으로 어류군집을 지속적으로 모니터링하고 있으며, 이는 국가 하구 관련 정책 마련에 활용되고 있다.

한반도는 3면이 바다와 접하여 있으며, 해안(동해, 남해, 서해)에 따라 환경 특성의 차이가 있다. 동해안은 해안선이 단조롭고 해안선에서부터 수심이 급격하게 낮아지며, 조차가 매우 작아 파식대가 발달하였다(Yoon *et al.*, 2003). 남해안은 서해안과 동해안의 중간의 특성을 나타내며 리아스식 지형의 특성을 나타낸다(Lee *et al.*, 2019). 서해안은 대조차 환경으로 넓은 간석지가 발달되어 있으며, 사주나 사주섬이 없이 외해에 연결되는 특징을 가지고 있다(Wells *et al.*, 1990). 이러한 해역별 환경의 차이는 각 해안과 인접한 하구의 서식환경 특성을 다르게 하여, 어류군집 구성에 영향을 미칠 수 있다.

2008년에 시작되어 2016년부터 국가 생물측정망에 포함되어 지속적으로 이루어지고 있는 "하구 수생태계 현황 조사 및 평가(MOE/NIER, 2008~2021)"는 국내 전체 하구(대규모 하구, 도서 지역, 하구호 제외)를 대상으로 다수의 연구자들이 동시에 조사를 수행하는 대규모 국가 프로젝트로 총 3년 단위로 325개 하구가 조사된다. 이를 통해 도출된 결과는 한반도 하구의 어류군집 현황과 특성 이해에 도움이 될 뿐만 아니라, 하구의 보전 및 복원을 위한 훌륭한 자료로 활용될 수 있다. 따라서, 본 연구는 가장 최근에 이루어진 2016년~2018년의 한반도 325개 하구의 어

류조사 결과를 활용하여 한반도 하구의 어류군집 현황과 특성에 대한 종합적인 분석 자료와 함께, 해역별 어류군집의 특성 및 주요종의 서식환경 및 분포에 대한 정보를 제공하였다.

재료 및 방법

1. 조사 대상지 및 조사 시기

국내에 위치한 463개 하구 중 대규모 하구(한강, 낙동강, 금강), 제주도와 울릉도에 위치한 하구, 하구호, 현장 조사가 불가능한 하구를 제외한 총 325개 하구를 대상으로 어류군집을 조사하였다(Fig. 1). 하구별 하천이 유입되는 해역을 기준으로 동해가 87개, 남해가 151개, 서해가 87개로 구분된다. 해역의 구분은 동해와 남해의 경계를 부산광역시 남구 승두말(오륙도 인근), 서해와 남해의 경계를 전라남도 해남 반도의 남쪽 끝으로 구분하였다(Kim and Kim, 2015). 현장 조사는 2016부터 2018년까지 3년 동안 이루어졌다. 2016년 95개 하구, 2017년 108개 하구, 2018년 122개 하구를 조사하였으며, 연도별 총 2회(1차 4~5월, 2차 9~10월)씩 조사하였다.

2. 현장 조사

현장 조사는 하구에서 최대한 다양한 어종을 확인할 수 있게 Lee *et al.* (2011)의 기준에 따라 인공구조물의 유무에 따라 열린하구와 닫힌하구로 구분하고, 유형별 환경 차이에 따라 어구를 다르게 적용하였다. 하구 말단에 인공구조물이 없어 자연스럽게 연결된 하구에서는 투망, 족대, 일각망을 활용하였으며, 하굿둑, 방조제 등 인공구조물이 위치하여 흐름이 단절된 하구에서는 자망을 추가로 설치하여 조사하였다. 투망(망목 7×7 mm)은 조사 구간 내 10회, 족대(망목 5×5 mm)는 30분 동안 조사하였으며, 일각망(유도망 양쪽 5 m 이상, 높이 1 m 이상, 망목 5×5 mm)과 자망(길이 20 m 이상)은 간조시 설치하고 다음 간조시 수거하여(최소 1회의 만조에 대한 어류 이동을 반영), 최소 12시간 경과 후 포획된 개체를 확인하였다. 이 외, 세부 방법은 "생물측정망 조사 및 평가지침 개정(NIER, 2016)"을 따랐다. 채집된 어류는 Kim and Park (2002), Choi *et al.* (2002)을 이용하여 동정하였으며, Nelson (2016)의 분류체계를 따라 정리하였다.

물리적 요인 중 하구의 규모는 현장에서 하구별 말단부 하폭(stream width)과 수폭(wetted width)을 측정하였으며, 조사 지점의 하상 구조는 Cummins (1962)의 방법을 따라 현장에서 조사하였다. 현장에서 조사된 하상 구조는 Silt와 Sand, Coarser than sand (gravel+pebble+cobble+boulder)의 3개 단계로 재조합하여 분석에 활용하였다.

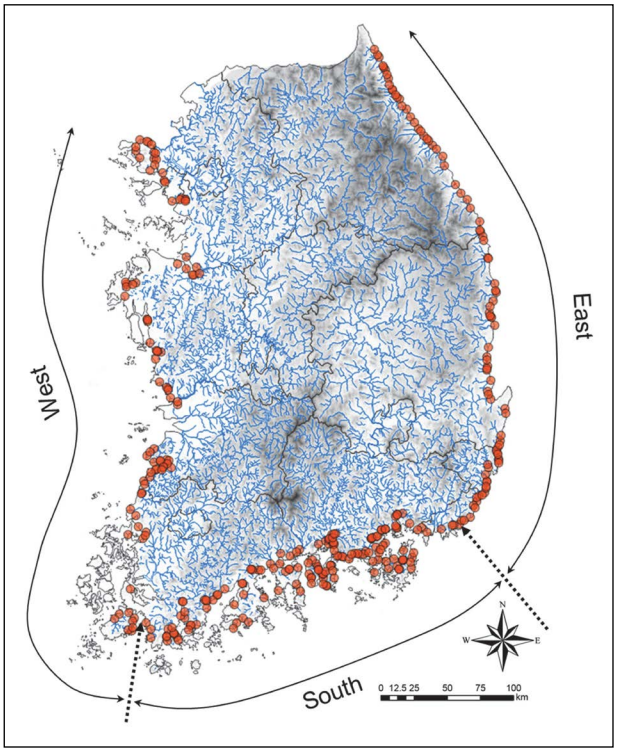

Fig. 1. Map showing the location of each 325 estuaries (the edge of each sea areas is marked by doted arrows; the number of estuaries for each sea areas are followed: East Sea, 87; South Sea, 151; West Sea, 87).

화학적 요인 중 수온, 용존산소(dissolved oxygen, DO), pH, 전기전도도(condectivity), 탁도(turbidity), 염도(salinity)는 어류 조사와 동일한 시점에 현장에서 다항목수질측정기(YSI Professional Plus, YSI Incorporated, USA)를 활용하여 조사하였으며, 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 총질소(total nitrogen, T-N), 총인(total phosphorus, T-P)은 채수 후 "수질오염공정시험기준(MOE, 2017)"의 일반항목의 측정 방법에 따라 분석되었다.

3. 분석방법

분석을 위한 어류군집 자료는 하구별 말단부(mouth)에 위치한 지점의 결과만을 활용하였으며, 하구의 서식처 환경 및 어류군집은 해역별로 구분하여 수행하였다. 서식처 환경은 물리적 요인으로 하천 규모(하폭, 수폭)와 하상구조, 화학적 요인으로 수온, DO, pH, 전기전도도, 탁도, 염

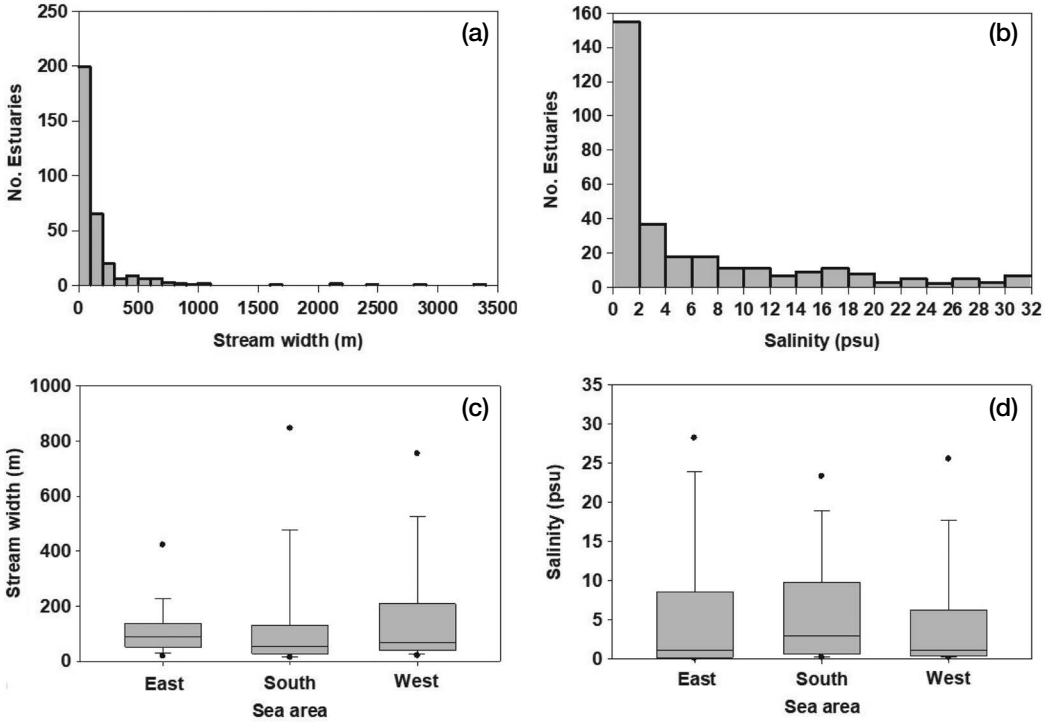

Fig. 2. Estuary frequency analysis by stream width and salinity (a, b), and box plots describing stream width and salinity of Korean estuaries by sea areas (c, d).

도, COD, T-N, T-P를 포함하였다. 어류군집 요인은 총 출현 종수 및 개체수, 생태형(회유성 어종, 기수성 어종, 해양성 어종 1차 담수어), 특이종(외래종, 고유종, 보호종)을 포함하였으며, 이 중 어종별 생태형은 "생물측정망 조사 및 평가지침 개정(NIER, 2016)"의 어류 종 목록을 기준으로 구분하였다. 화학적 요인과 어류군집 요인은 ANOVA test를 통해 해역에 따른 통계적 차이를 확인하였으며, 분석 결과 유의한 차이가 확인되는 요인에 대해서 Tukey HSD 사후분석을 통해 해역별 차이를 확인하였다(SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

해역별 어류군집의 차이를 확인하기 위해 PERMANOVA (permutational multivariate analysis of variance) 분석을 실시하였으며, SIMPER (similarity percentage) 분석을 통해서 해역별 하구의 어류군집 유사도 및 어류군집에 큰 영향을 미치는 주요종을 파악하였다. 전체 하구의 어류군집 자료를 활용하여 NMDS (nonmetric multidimensional scaling) 분석을 통해 하구별 군집 유사도를 확인하였다. NMDS 분석은 similarity matrix의 지점들 간 최적의 관계를 나타낼 수 있는 two-dimensional ordination을 이용하였다(Field *et al.*, 1982). Similarity matrix는 하구별 채집된 개체수를 square-root-transforming 하고 각 pairwise assemblage에 대한 Bray-Curtis similarity index를 산정하였다. Ordination의 robustness는 stress value에 의해 표시되며, 범위에 따라 <0.2 (보통), <0.05 (우수)로 해석된다(Clarke and Warwick, 1994). PERMANOVA, SIMPER, NMDS는 모두 Primer 6 (Primer-E Ltd. Plymouth, UK)를 이용하여 분석하였다.

하구별 군집 지수는 각 하구에 대한 회차별 조사 결과를 활용하여 우점도(Simpson, 1949), 다양도(Pielou, 1966), 균등도(Pielou, 1975), 풍부도(Margalef, 1958)를 산출하였으며, 해역과 전체 하구를 기준으로 각 지수별 백분위수(10 percentile 단위) 결과를 제시하였다. 종별 서식처 염도 분포를 분석하기 위해서 하구 조사에서 상대풍부도가 가장 높은 상위 30종을 대상으로 종별 채집 지점의 염도를 분석하였으며, 한반도 하구에서 채집된 6종의 회유성 어종에 대해서 채집 지점을 확인하고 지도를 이용하여 상세 분포 현황을 제시하였다(단일 지점에서 출현한 회유성 어종 큰가시고기, 웅어 제외).

결 과

본 연구가 이루어진 한반도 325개 하구의 규모(하폭)는 하구별 최소 14 m에서 최대 3,356 m로 편차가 크며, 하폭

Table 1. Fish assemblage structure of Korean Peninsula estuaries by sea areas.

Fish assemblage			Sea area			Total (n = 325)
			East (n = 87)	South (n = 151)	West (n = 87)	
Total		No. families	41	40	23	52
		No. species	94	92	82	149
		No. individuals	38,899	30,076	37,971	106,946
Dominant species		Species name	*Tribolodon hakonensis*	*Mugil cephalus*	*Hemiculter eigenmanni*	*Tribolodon hakonensis*
		RA (%)	34.0	12.4	21.1	12.5
Subdominant species		Species name	*Mugil cephalus*	*Chelon haematocheilus*	*Carassius auratus*	*Mugil cephalus*
		RA (%)	11.1	9.8	14.5	9.5
Life cycle type	Migratory species	No. species	7	3	3	8
		RA (%)	43.1	1.3	0.3	16.2
	Brackish species	No. species	27	33	31	41
		RA (%)	34.7	75.4	32.1	45.3
	Marine species	No. species	20	26	5	39
		RA (%)	1.4	1.4	5.0	2.7
	Primary freshwater species	No. species	40	30	43	61
		RA (%)	20.8	21.9	62.5	35.9
Exotic species		No. species	2	4	5	5
		RA (%)	0.8	1.1	2.5	1.5
Endemic species		No. species	12	7	10	21
		RA (%)	2.7	0.8	2.8	2.2
Endangered species		No. species	2	0	0	2
		RA (%)	3.1	0.0	0.0	1.1

n, number of estuaries; RA, relative abundance

이 100 m 이하인 소규모 하구가 전체의 61.2%를 차지하고 있다(Fig. 2a). 하구에 가장 중요한 환경요인 중 하나인 염도는 하구별 최소 0.1 psu에서 최대 31.5 psu 범위이며, 전체 하구의 68.9%가 2 psu 이하로 확인되어 국내 하구의 많은 수가 저염도 환경으로 유지되고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 2b). 총 325개 하구에서 채집된 어류는 52과 149종이며, 우점종은 황어(relative abundance, RA, 12.5%), 아우점종은 숭어(RA, 9.5)로 나타났다(Table 1). 생태형 구성은 1차 담수어(61종)와 기수성 어종(41종), 해양성 어종(39종) 위주로 이루어져 있었으며, 회유성 어종(8종)은 그 수가 많지 않지만 출현 개체의 상대풍부도(16.2%)가 비교적 높게 나타났다. 해역별 비교에서 합산 종수는 차이를 보이지 않으나, 우점종과 아우점종은 모두 다르게 나타났다. 동해와 남해에서는 회유성 어종 또는 기수성 어종이, 서해에서는 1차 담수어가 우점종 및 아우점종으로 확인되었다. 생태형 구성 비교에서 동해는 회유성 어종, 남해는 기수성 어종, 서해는 1차 담수어의 상대풍부도가 높았다.

해역별 하구 단위 환경 특성을 분석한 결과, 서해 하구의 규모가 다른 해역과 비교하여 크고 염도가 낮은 특성을 보였으며(Fig. 2c, d), 이는 용수 활용을 위해 수문, 방조제 등으로 막혀있는 하구(닫힌하구)가 많은 서해 하구의 특성을 잘 반영하는 결과이다. 또한, 하상의 구성에서도 동해 하구는 sand, 남해는 sand보다 큰 조립질 입자, 서해는 silt와 같은 세립질 입자가 주를 이루는 등 차이를 보였다(Fig. 3). 화학적 요인에 대한 통계분석 결과 해역별 유의한 차이(ANOVA test, $P < 0.01$)를 보이는 대부분의 요인(DO,

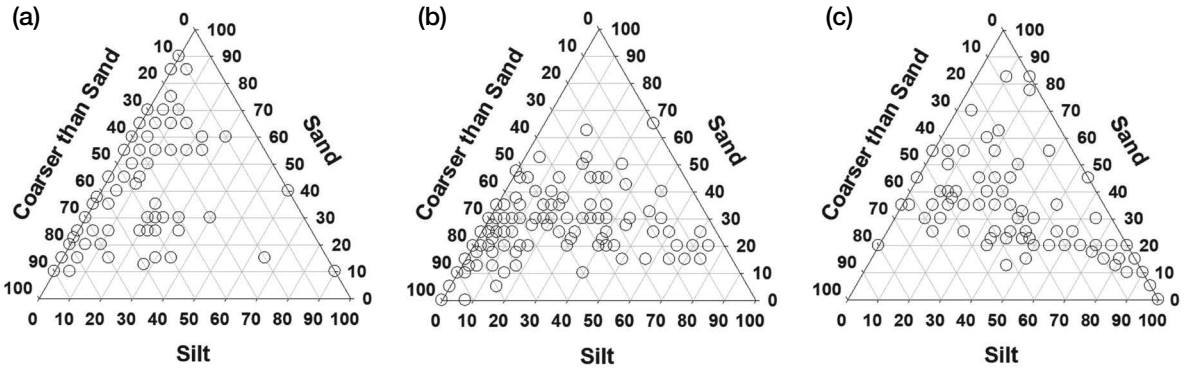

Fig. 3. Streambed substrate characteristics of Korean estuaries by sea areas (a, East; b, South; c, West).

Turbidity, COD, T-N, T-P)이 동해, 남해 하구 그룹과 서해 하구 그룹으로 구분되는 특성을 보였다(Turkey HSD). 동해, 남해 하구 그룹과 서해 하구 그룹으로 구분된 수질 항목들의 평균 비교시, 서해 하구가 용존산소량(DO)은 더 낮고, 탁도(Turbidity), 화학적산소요구량(COD), 총질소(T-N), 총인(T-P)은 더 높게 나타났다. 하구 단위 어류군집을 확인한 결과 평균 9.4종의 어류가 채집되었으며, 기수성 어종의 종수(5.2종) 및 상대풍부도(60.2%)가 가장 높았다(Table 2). 해역별로 평균 출현 종수는 유사하게 나타났으나, 그 종을 구성하는 어류군집은 통계적으로 유의한 차이를 보였다(PERMANOVA, Pseudo-F=26.69, P=0.001). 이는 Fig. 4의 NMDS 분석 결과에서도 동일 해역의 하구 어류군집이 유사도가 높게 나타남을 확인할 수 있다. 어류군집 요인별 분석에서도 해양성 어종 상대풍부도(P=0.500), 외래종 상대풍부도(P=0.151)를 제외한 모든 요인이 해역별 차이를 나타냈다(P<0.01) (Table 2). 사후분석 결과 각 해역에 대해서 동해에서 회유성 어종, 해양성 어종, 보호종, 남해에서 종수, 개체수, 기수성 어종, 고유종, 서해에서 1차 담수어, 외래종이 다른 해역과 차이를 보여 특징적인 구성을 나타냄을 확인하였다. 해역별 어류군집 유사도에 기여하는 종을 확인하기 위해 SIMPER 분석을 실시한 결과, 동해에서는 숭어(species contribution, SC, 25.04%)와 황어(SC, 22.19%), 남해에서는 숭어(SC, 18.19%)와 민물검정망둑(SC, 17.17%), 서해에서는 붕어(SC, 31.60%)와 가숭어(SC, 12.47%)가 해역별 어류군집 유사도에 가장 큰 기여를 하는 것으로 확인되었다(Table 3).

국내 전체 하구에 대한 어류 조사 결과는 어류군집 지수의 참조 기준, 종의 생태 특성 이해, 주요종의 서식 분포 확인에 도움이 된다. Table 4에서 해역별 어류군집 지수를 백분위수 값(10 percentile 단위)으로 제시하였으며, 이는 향후 하구 조사에서 도출되는 어류군집 지수의 비교 및 해석에 있어서 참조 기준으로 활용될 수 있다.

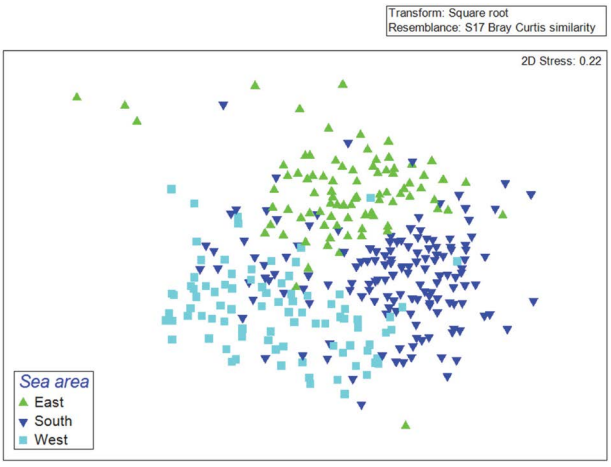

Fig. 4. NMDS (non-metric multidimensional scaling) result of the Korean estuaries fish assemblage grouped by sea areas.

전체 하구 조사 결과의 상대풍부도를 기준으로 상위 30종에 대해서 서식처 염도 분포를 확인한 결과, 1차 담수어로 구분되는 붕어, 참붕어, 피라미, 치리, 송사리, 가시고기, 대륙송사리, 블루길, 버들치가 주로 5 psu 이하(<75 percentile)를 주요 서식처로 활용하고 있으며, 주연성 어종 및 해양성 어종은 보다 넓은 범위의 염도를 서식처로 활용하는 것으로 확인되었다(Fig. 5). 하구 조사에서 출현한 회유성 어종의 분포를 확인한 결과, 은어와 황어는 동해 하구 및 남해 하구 일부 구간, 뱀장어는 동해, 남해, 서해 하구, 대황어, 빙어, 연어는 동해 하구에서만 확인되는 등 회유성 어종의 출현(소상) 구간이 뚜렷하게 구분되었다(Fig. 6).

고 찰

하구는 담수와 해수가 혼합되는 지역이며, 하구의 가장

Table 2. Habitat characteristics and fish assemblage differences of Korean estuaries by sea areas.

Factor		Total (n = 325)	East (n = 87)	South (n = 151)	West (n = 87)	ANOVA test (P-value)
		Average (± SD)	Average (± SD)	Average (± SD)	Average (± SD)	
Physical factor						
Estuary size	Stream width (m)	178.2 (367.3)	122.0 (128.5)	184.5 (394.4)	223.6 (463.7)	–
	Wetted width (m)	143.3 (353.1)	88.8 (118.7)	154.0 (378.5)	179.1 (448.6)	–
Substrates (%)	Silt (0.004~0.06 mm)	22.4 (24.1)	10.8 (15.8)	19.7 (20.3)	38.6 (28.5)	–
	Sand (0.06~2 mm)	30.5 (16.3)	36.8 (20.5)	26.1 (10.9)	31.7 (17.1)	–
	Coarser than sand	47.1 (25.1)	52.3 (23.7)	54.2 (23.5)	29.7 (20.6)	–
Chemical factor						
Water temperature (°C)		22.5 (2.2)	20.7 (2.2)	23.3 (1.9)	22.7 (1.5)	0.432
DO (mg L^{-1})		7.5 (1.9)	7.6 (2.1)^{a}	7.8 (1.6)^{a}	6.8 (1.8)^{b}	**< 0.001**
pH		8.1 (0.8)	8.4 (1.1)^{a}	7.8 (0.6)^{b}	8.3 (0.6)^{a}	**< 0.001**
Conductivity (μS cm^{-1})		9801.4 (13187.0)	9667.7 (14976.7)	11158.6 (13007.4)	7595.2 (11293.0)	0.133
Turbidity (NTU)		54.0 (100.7)	25.5 (37.6)^{a}	48.3 (100.6)^{a}	92.1 (129.2)^{b}	**< 0.001**
Salinity (psu)		6.0 (8.1)	6.0 (9.0)	6.4 (7.5)	5.3 (8.0)	0.580
COD (mg L^{-1})		4.75 (3.00)	4.18 (2.07)^{a}	4.14 (2.24)^{a}	6.38 (4.14)^{b}	**< 0.001**
Total Nitrogen (mg L^{-1})		2.85 (2.47)	1.99 (2.51)^{a}	2.52 (1.88)^{a}	4.27 (2.73)^{b}	**< 0.001**
Total Phosphorus (mg L^{-1})		0.14 (0.30)	0.09 (0.12)^{a}	0.12 (0.29)^{a}	0.23 (0.41)^{b}	**< 0.01**
Fish assemblage						
No. species		9.4 (3.8)	10.3 (4.8)^{a}	8.5 (3.3)^{b}	10.1 (3.0)^{a}	**< 0.001**
No. individuals		329.1 (515.1)	447.1 (855.9)^{a}	199.2 (189.2)^{b}	436.4 (386.3)^{a}	**< 0.001**
Migratory species	No. species	0.6 (0.9)	1.6 (1.1)^{a}	0.3 (0.5)^{b}	0.2 (0.4)^{b}	**< 0.001**
	RA (%)	7.5 (15.9)	24.4 (22.1)^{a}	1.8 (5.7)^{b}	0.3 (1.4)^{b}	**< 0.001**
Brackish species	No. species	5.2 (3.2)	4.7 (2.8)^{a}	6.3 (3.1)^{b}	3.8 (3.2)^{a}	**< 0.001**
	RA (%)	60.2 (37.0)	45.9 (28.9)^{a}	79.4 (30.3)^{b}	41.7 (38.9)^{a}	**< 0.001**
Marine species	No. species	0.4 (0.9)	0.7 (1.2)^{a}	0.4 (0.9)^{b}	0.1 (0.4)^{b}	**< 0.001**
	RA (%)	2.3 (9.4)	3.3 (11.1)	2.2 (8.4)	1.6 (9.2)	0.500
Primary freshwater species	No. species	3.2 (3.5)	3.3 (2.7)^{a}	1.5 (2.5)^{b}	6.0 (4.0)^{c}	**< 0.001**
	RA (%)	30.0 (36.7)	26.4 (27.8)^{a}	16.5 (30.6)^{a}	56.4 (40.1)^{b}	**< 0.001**
Exotic species	No. species	0.2 (0.5)	0.1 (0.4)^{a}	0.1 (0.4)^{a}	0.4 (0.7)^{b}	**< 0.001**
	RA (%)	1.6 (7.7)	1.4 (7.0)	0.9 (7.5)	2.9 (8.6)	0.151
Endemic species	No. species	0.3 (0.6)	0.5 (0.8)^{a}	0.1 (0.3)^{b}	0.4 (0.6)^{a}	**< 0.001**
	RA (%)	1.4 (4.7)	2.1 (5.1)^{a,b}	0.6 (2.8)^{a}	2.3 (6.4)^{b}	**< 0.01**
Endangered species	No. species	0.1 (0.3)	0.2 (0.5)^{a}	0.0 (0.0)^{b}	0.0 (0.0)^{b}	**< 0.001**
	RA (%)	0.9 (5.4)	3.3 (10.0)^{a}	0.0 (0.0)^{b}	0.0 (0.0)^{b}	**< 0.001**

ANOVA test performed; post-hoc Tukey HSD test result is marked as superscript a,b,c; N, number of estuaries; SD, standard deviation; RA, relative abundance

대표적인 환경 특성은 염분도의 기울기라고 할 수 있다. 따라서 전통적으로 하구를 구분하고 유형화하는데 염분도를 기준으로 수행되었으며 (Venice system, 1958; Dionne, 1963; Pritchard, 1967; Kinne, 1971), Mclusky (1993)는 하구의 지리학적 위치를 고려하여 하구 유형을 정의하여 각 하구 유형에서 나타나는 염분도의 범위를 정리하였다.

Table 3. Fish assemblage similarity within each sea areas, and major species representing each sea areas according to species contribution from SIMPER analysis (only species over 5% of contribution are given).

Group (Sea area)	Group similarity (%)	Species	Average abundance (%)	Average similarity (%)	Ratio similarity/ standard deviation	Species contribution (%)	Cumulative contribution (%)
East	26.39	*Mugil cephalus*	5.59	6.61	0.99	25.04	25.04
		Tribolodon hakonensis	7.14	5.86	0.92	22.19	47.23
		Chaenogobius urotaenia	3.16	2.58	0.63	9.78	57.01
		Plecoglossus altivelis altivelis	3.85	2.30	0.51	8.70	65.71
		Tridentiger brevispinis	2.20	1.49	0.51	5.65	71.36
South	21.79	*Mugil cephalus*	3.36	3.96	0.66	18.19	18.19
		Tridentiger brevispinis	2.77	3.74	0.63	17.17	35.36
		Acanthogobius flavimanus	2.22	2.55	0.67	11.71	47.07
		Lateolabrax maculatus	1.80	2.14	0.57	9.81	56.88
		Tridentiger obscurus	1.66	1.30	0.34	5.98	62.86
		Chelon haematocheilus	2.06	1.28	0.35	5.88	68.74
West	23.10	*Carassius auratus*	6.28	7.30	1.23	31.60	31.60
		Chelon haematocheilus	4.27	2.88	0.52	12.47	44.07
		Pseudorasbora parva	3.87	2.82	0.60	12.20	56.28
		Mugil cephalus	2.63	1.46	0.35	6.34	62.61

Table 4. Percentiles of biodiversity indices of fish assemblage from Korean estuaries by sea areas.

Biodiversity indices	Percentile	Sea area			Total	Biodiversity indices	Percentile	Sea area			Total
		East	South	West				East	South	West	
Dominance (Simpson, 1949)	10	0.16	0.20	0.19	0.19	Diversity (Pielou, 1966)	10	0.69	0.78	0.73	0.73
	20	0.20	0.23	0.23	0.22		20	0.93	0.99	0.97	0.98
	30	0.22	0.26	0.25	0.24		30	1.22	1.15	1.15	1.15
	40	0.25	0.29	0.29	0.28		40	1.40	1.23	1.28	1.27
	50 (median)	0.28	0.32	0.32	0.31		50 (median)	1.53	1.33	1.37	1.37
	60	0.34	0.36	0.35	0.35		60	1.59	1.41	1.47	1.46
	70	0.40	0.39	0.40	0.40		70	1.68	1.49	1.58	1.57
	80	0.49	0.45	0.46	0.46		80	1.78	1.60	1.66	1.67
	90	0.66	0.58	0.61	0.60		90	1.95	1.73	1.80	1.82
Evenness (Pielou, 1975)	10	0.53	0.55	0.49	0.53	Richness (Margalef, 1958)	10	0.56	0.62	0.63	0.61
	20	0.62	0.65	0.58	0.62		20	0.83	0.83	0.81	0.82
	30	0.68	0.69	0.65	0.68		30	1.01	0.97	0.96	0.98
	40	0.72	0.73	0.69	0.72		40	1.14	1.10	1.07	1.11
	50 (median)	0.76	0.77	0.75	0.76		50 (median)	1.28	1.21	1.19	1.21
	60	0.80	0.81	0.77	0.79		60	1.38	1.30	1.31	1.32
	70	0.84	0.84	0.80	0.83		70	1.54	1.44	1.43	1.46
	80	0.87	0.87	0.83	0.86		80	1.72	1.60	1.57	1.63
	90	0.90	0.91	0.86	0.90		90	2.06	1.78	1.79	1.84

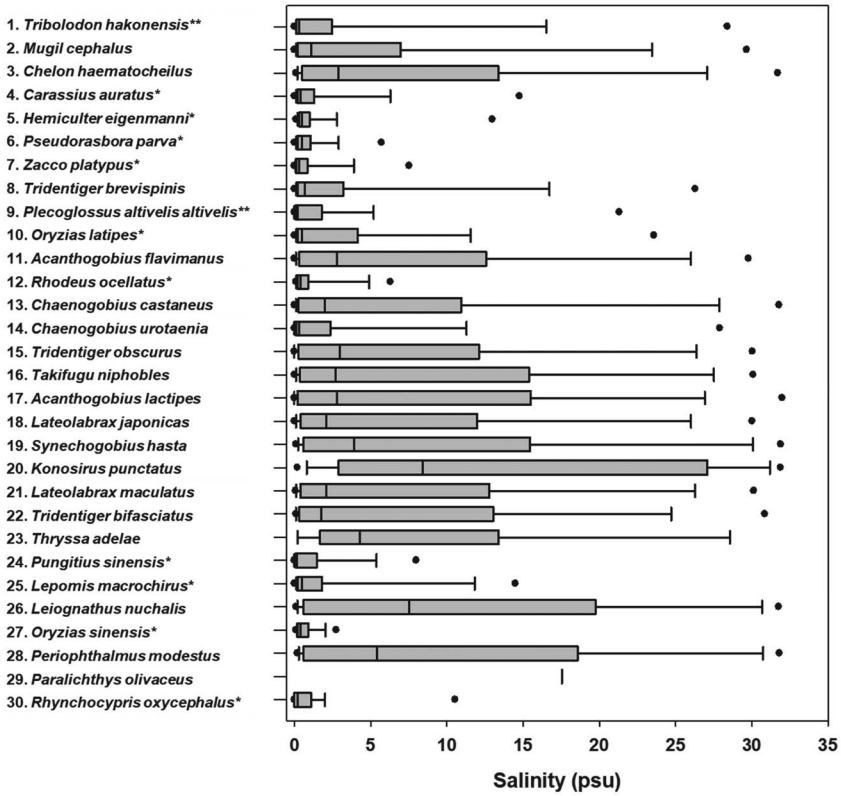

Fig. 5. Box plots presenting salinity range of habitats for each major 30 fish species inhabiting Korean estuaries (major 30 fish species were selected in the order of abundance; black circle, 5th and 95th percentile; *, Primary freshwater fish species, **, migratory fish species).

본 연구에서 각 하구별 지점 위치를 고려할 때(Mouth~Lower), 전체 하구의 68.9%가 2 psu 이하로 나타나는 것은(Fig. 2b), Mclusky (1993)의 구분에서 <Oligohaline으로 확인된다. 이러한 결과는 인공구조물(배수갑문, 하굿둑 등)의 건설과 사주의 발생 등으로 인하여 하구 순환이 차단된 하구가 국내에 다수 존재하기 때문으로 판단된다(Lee *et al.*, 2011). Lee *et al.* (2011)은 인공구조물로 인한 하구 순환의 차단 여부에 따라 국내의 하구를 열린하구와 닫힌하구(인위적으로 훼손된 하구의 복원을 고려하여, 자연적으로 생성되는 사주로 인해 순환이 차단된 하구는 닫힌하구에 미 포함)로 구분하였는데, 본 연구의 조사 지점을 기준으로 닫힌하구의 비율이 38.2%로 확인되었다. 해역별로 닫힌하구의 비율을 비교해 보면 동해 8.0%, 남해 32.5%, 서해 78.2%로, 서해 하구에서 닫힌하구 비율이 가장 높으며, 이는 농업 위주의 인근 토지 이용 현황(농업 용수의 공급 및 염해방지를 위해 인공구조물 다수 설치)과 관련되어 나타난다. 본 연구에서 각 해역별 어류군집 구조 분석 결과, 서해 하구의 우점종과 아우점종은 각각 치리(RA, 21.1%)와 붕어(RA, 14.5%)로 모두 1차 담수어이며, 1차 담수어의 비율 또한 서해 하구에서 62.5%로 가장 높았다. 이러한 결과들은 서해 하구에서 하구 순환이 차단된 닫힌하구의 비율이 상대적으로 높다는 점을 반영하는 것으로 판단된다. 하구는 담수와 해수가 혼합되는 지역으로 정의된다는 점을 고려할 때, 하구 순환이 차단된 닫힌하구를 하구로 구분하는 것은 사전적인 의미에서 논란의 여지가 있을 수 있다. 하지만 Lee *et al.* (2011)과 Lee *et al.* (2012)은 닫힌하구에서도 수문 개방 등 인공적인 조작에 따라 하구 순환이 일시적으로 가능할 수 있다는 점, 향후 복원 여부에 따라 하구 순환을 회복할 수 있다는 정책적인 측면에서, 닫힌하구를 독립적인 하구의 유형으로 인정하고 연구 범위 내에 포함시켰다. 본 연구결과에서는 닫힌하구를 하구의 유형으로 구분하기보다는, 하구 어류군집 구조에 영향을 줄 수 있는 하나의 교란요인으로 해석하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 앞선 기술과 같이, 본 연구에서 대부분의 하구에서 저염분도 상태가 유지되는 것과, 서해 하구에서 1차 담수어의 출현 비율이 높다는 결과는, 한반도의 하구(특히, 서해 하구)가 하구 순환 차단을 유발하는 교란요인이 다수 존재하기 때문으로 해석할 수 있다.

한반도 325개 하구에서 채집된 어류는 총 52과 149종으로, Yoon *et al.* (2018)이 보고한 한반도 하천의 조사결과

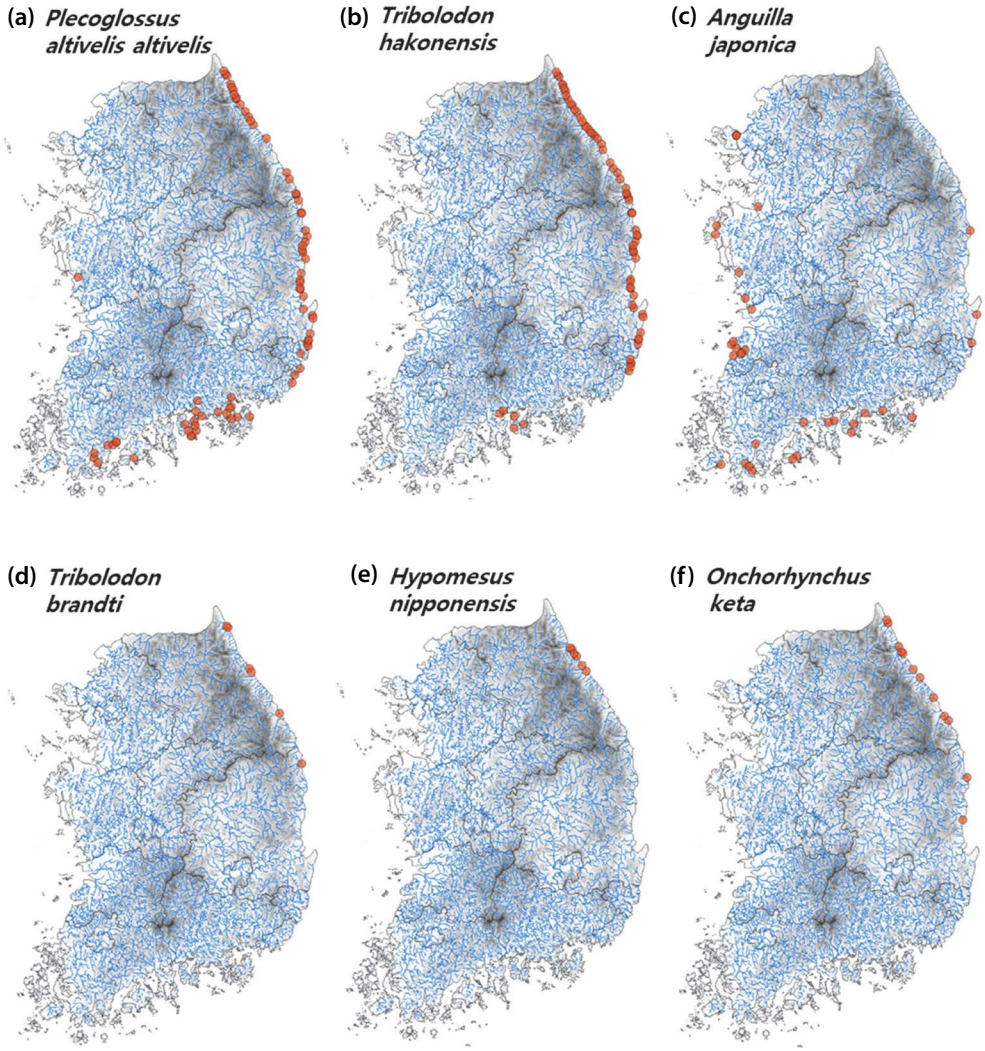

Fig. 6. Distribution of major 6 migratory fish species of Korean estuaries.

(28과 130종)와 비교하여 다양성이 높게 나타났다. 이러한 특성은 출현종의 생활사 구성과 관련성이 크게 나타난다. 순수 담수역을 포함하는 하천은 일생을 담수에서만 보내는 1차 담수어의 구성이 가장 높게 나타나지만(82.3%), 공간적으로 하천과 바다의 사이에 위치한 하구는 1차 담수어, 기수성 어종, 해양성 어종 등 다양한 생활사를 가진 어종이 공존하며(Claridge *et al.*, 1986), 본 연구에서도 하천과 달리 특정 생활사에 포함된 어류가 우점하지 않고, 다양한 생활사 유형이 종수(회유성 어종, 5.3%; 기수성 어종, 27.3%; 해양성 어종 26.0%; 1차 담수어 41.3%) 및 개체수(회유성 어종, 16.2%; 기수성 어종, 45.3%; 해양성 어종 2.7%; 1차 담수어 35.9%) 측면에서 모두 고르게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 특히, 회유성 어종은 종수의 비율보다 개체수의 비율이 상대적으로 높게 나타났으며, 반대로 해양성 어종은 종수의 비율에 비해 개체수 비율이 낮게 나타나는 특성을 보였다. 국내에서 기록된 외래종은 147종(MOE, 2007) 중, 하천 환경에서는 떡붕어, 이스라엘잉어, 배스, 블루길, 나일틸라피아가 주요 서식 외래종으로 알려져 있다(Kim and Park, 2002; Yoon *et al.*, 2011, 2018). 한반도 하구 역시 하천의 연장선으로 하천과 동일한 5종의 주요 외래종의 서식이 확인되었으나, 개체수 비율은 전체의 1.5%로 매우 낮았다. 이는 국내 자연환경에 분포하는 대부분의 외래종이 1차 담수어로(Chae *et al.*, 2019), 염도가 높게 나타나는 하구에 대해서 서식처로 활용하기에 어려움이 있기 때문이며, 따라서 닫힌하구의 증가와 같이 인위적으로 염도의 감소에 영향을 주는 요인은 외래종의 개체수 증가에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 환경부에서 보호종인 멸종위기야생생물 담수어류 27종 중, 2

종(가시고기, 한둑중개)이 동해 하구에서 서식하는 것으로 확인되었다. 동해 해안 하구의 보호종 서식은 파랑으로 형성된 사주로 인해 해수유통이 잘 이루어지지 않아 염도가 낮게 형성되어 있기 때문으로 판단되며, 1차 담수어인 보호종의 관리 및 보호를 고려하여 하구 관리를 위한 해수유통 전략을 고민할 필요가 있다.

한반도 하구는 해역에 따라 물리적, 화학적 환경의 차이가 나타나며, 이에 따라 해역별 어류군집도 차이(PERMANOVA, Pseudo-F = 26.69, P = 0.001)가 확인되었다. 해역 단위 하구의 어류군집 유사도가 21.79%~26.39%로 높지 않지만(Table 3), NMDS 분석 결과 지점들의 어류군집이 해역별로 뚜렷하게 구분됨을 확인하였다(Fig. 4). 해역별 분석에서 동해 하구는 sand 위주의 하상을 구성하고 있으며(Fig. 3a), 파랑에 의해 사주가 형성되어 염도가 낮게 나타난다. 이에 따라 담수 환경에서 서식하는 보호종이 동해 해안의 하구에서 출현하는 특징을 보였다. 또한 동해 하구는 다른 해역과 달리 회유성 어종이 하구의 어류군집에 차지하는 비율이 높게 나타나고 있으며(지점 평균 1.6종, RA 평균 24.4%), 이는 통계적으로도 다른 해역과 구분된다. 동해 하구 전체의 우점종 역시 회유성 어종인 황어(RA, 34.0)이며, 군집 유사도에 기여하는 종을 확인하는 SIMPER 분석 결과 황어(SC, 22.19%)와 은어(SC, 8.70%) 등 회유성 어종의 기여도가 높게 나타나고 있다. 남해 하구는 기수성 어종의 종수(6.3종) 및 개체수 비율(79.4%)이 높게 나타나는 특성을 보였다. 전체 남해 하구의 우점종은 숭어와 가숭어로 기수성 어종으로 확인되었으며, 군집 유사도에 기여하는 대부분의 종들(누적 기여도 > 50%)이 기수성 어종으로 확인되었다. 서해 하구의 환경 특성은 염도가 낮으며 silt 위주의 하상으로 구성되어 타 해역과 차이를 보인다. 이는 Lee *et al.* (2012)의 하구 유형 구분에서 서해 하구에 닫힌하구가 다수 포함되기 때문으로 해석된다. 인공 구조물로 인하여 해수의 자연스러운 유통이 차단되면, 환경 변화(특히, 염도)에 따라 어류군집의 구성이 변화된다(Kim *et al.*, 2020a). 염도는 하구의 어류군집 구조에 영향을 미치는 가장 중요한 요인으로 보고되어 있다(Bulger *et al.*, 1993; Thiel *et al.*, 1995; Marshall and Elliott, 1998; Whitfield, 1999). 서해 하구는 용수의 공급을 위해 오랜 시간 닫힌하구로 유지되어 왔으며, 이에 따라 하구의 어류군집 구성이 낮은 염도에 적응한 1차 담수어 위주(지점 평균 6.0종, RA 평균 56.4%)로 나타났다(1차 담수어인 외래종의 출현율이 높음, 지점 평균 0.4종, RA 평균 2.9%). 서해 하구 전체의 우점종 역시 1차 담수어인 치리와 붕어로 나타났으며, 군집 유사도 기여종 분석에서도 붕어(SC, 31.60%)와 참붕어(SC, 12.20%)의 기여도가 높게 나타나고 있다.

군집지수는 생물 다양성과 군집구조의 특성을 해석하기 위한 지수이며, 대상 생물군집의 군집 구조와 다양성을 수치로 직관적으로 해석할 수 있다는 점에서 큰 강점을 가져 널리 활용되고 있다. 반면, 채집 노력의 정도나(Bady *et al.*, 2005), 도구(Kim *et al.*, 2020b)의 차이에 따라 군집지수가 다르게 나타나기 때문에, 단일 지점의 군집지수를 해석하는데 어려움이 있다. 따라서, 특정 유형 및 단위에 대한 군집지수의 분포 현황 자료는 해당 유형 및 단위의 단일 지점 군집지수 해석에 기준으로 활용될 수 있다(Wilhm, 1970). 본 연구에서 국내 하구를 대표할 수 있는 325개 하구를 대상으로 군집지수의 다양한 백분위수를 제시하였으며(Table 4), 이는 향후 하구 어류군집 연구의 군집지수 해석에 기초 자료(단, 동일 방법 조사)로 활용될 수 있다. 그 예로, 동일 방법을 이용한 하구 어류조사를 통해 나타난 특정 하구의 어류 군집지수가 Table 4의 어느 범위(percentile)에 위치하는지를 확인할 수 있으며, 이를 통해 전체 하구를 기준으로 군집지수의 상대적인 위치를 제시할 수 있을 것이다.

어류는 생활사에 따른 서식처 활용에 따라서 1차 담수어, 기수성 어종, 해양성 어종, 회유성 어종 등의 유형으로 구분되며, 이 중 1차 담수어의 경우 염도가 종의 분포에 제한요인으로 작용한다. 대표적인 1차 담수어인 잉어과 어류를 대상으로 한 Nazneen and Begum (1981)의 연구에 의하면 종별로 8.4~17.2 psu의 염도에 대한 내성이 있는 것으로 보고되었다. 본 연구에서도 기수역으로 대변되는 하구에서 1차 담수어가 어류군집 구조에 차지하는 비율(RA)이 35.9%로 높게 나타났으며, 종별 서식처 염도 분포를 확인한 결과에서도 1차 담수어로 구분되는 붕어, 치리, 참붕어 등의 어류가 5 psu 이하(< 75 percentile)를 주요 서식처로 활용하고 있음을 확인하였다. 또한 아직까지 국내에서 서식하는 종에 대한 염도 내성 범위가 제시되어 있지 않기 때문에, 본 연구의 종별 염도 분포 범위는 해당 종의 생태 해석에 도움을 줄 수 있는 중요한 정보로 판단된다.

본 연구에서 국내에서 다수 확인되는 회유성 어종(은어, 황어, 뱀장어, 대황어, 빙어, 연어)의 대부분이 동해로 유입되는 하천을 서식처 및 산란장으로 활용하며, 일부 어종들만이 남해(은어, 황어, 뱀장어)와 서해(뱀장어)의 하천을 서식처 및 산란장으로 활용하는 것을 확인하였다(Fig. 6). 이들 종 중 뱀장어, 연어, 은어, 빙어 등은 대표적인 내수면 어획자원으로 그 가치가 매우 높다(MOF, 2017). 따라서, 회유성 어종의 서식이 확인된 이들 하구에 대해서 생물다양성 및 자원으로서의 가치가 지속적으로 유지될 수 있게 관심 및 관리가 요구된다. 특히, 생활사에 따라 해수와 담

수를 이동하는 회유성 어종에 있어서 연결성 확보가 가장 필요하며(Yun *et al.*, 2021), 이를 위해 닫힌하구(전체 하구의 38.2%)에 대한 연결성의 복원이 이루어질 필요가 있다.

한반도 325개 하구에 대해 이루어진 본 연구는 공간적 범위에서 대해서 국가 단위 규모의 연구이며, 이를 통해 나타난 어류군집 특성은 한반도 하구의 현황과 특성을 이해하고 관리하는 것에 있어서 좋은 자료로 활용될 수 있다. 반면, 하구는 서식처와 산란처로서의 활용을 위해서 바다와 담수 사이를 이동하는 어류의 계절적인 이동이 빈번하게 나타나기 때문에(Maes *et al.*, 1998), 어류군집의 시간적 변화에 대한 이해가 필요하다. 따라서, 향후 연구에서는 연중 시기에 따른 하구의 어류군집 변화를 확인할 필요가 있으며, 이러한 정보는 한반도 하구의 어류군집을 보다 정확하게 이해하고 관리 방안을 마련하는 것에 도움이 될 수 있을 것이다.

적 요

한반도 하구의 어류군집 구조 및 다양성을 확인하고 해역에 따른 특성을 분석하기 위해서 2016년부터 2018년까지 3년간 총 325개 하구에 대해 어류군집을 조사하였다. 전체 하구의 규모(하폭)는 하구별 편차가 크게 나타났으며(14~3,356 m), 염도 2 psu 이하의 저염도 하구가 68.9%로 다수 분포하였다. 한반도 하구의 전체 출현종은 52과 149종이며, 우점종은 황어(relative abundance, RA, 12.5%), 아우점종은 숭어(RA, 9.5)로 나타났다. 한반도 하구는 해역에 따른 물리적, 화학적 서식 환경이 다르게 구성되어 있었으며, 이에 따라 어류군집도 통계적으로 유의한 차이를 보였다(PERMANOVA, Pseudo-F=26.69, P=0.001). 또한, 해역별 낮은 어류군집 유사도(SIMPER, 21.79~26.39%)에서도, NMDS 분석 결과 해역별로 유사한 어류군집을 가지고 있음을 확인하였다. 동해 하구의 어류군집은 타 해역과 비교하여 회유성 어종과 보호종의 중요성이 높게 나타나며, 남해 하구는 기수성 어종의 중요성이 높게 나타난다. 서해 하구의 어류군집은 담수와 관련 있는 요인(1차 담수어, 외래종)의 중요성이 크게 나타나는데, 이는 서해 하구의 많은 수가 닫힌하구(78.2%)로 구성되어 염도가 낮게 나타나는 것과 관련이 있다. 이러한 해역별 어류군집 특성은 SIMPER 분석의 군집 유사도 기여종 분석에서도 유사한 결과를 보였다. 국내에서 하구의 어류군집 관련 연구는 대부분 단일하구 단위로 이루어져서 국가 단위의 하구 특성을 이해하고, 정책을 마련하는데 어려움이 있었다. 본 연구는 국가 단위의 하구 어류군집 구조의 현황 및 특성에 대한 자료를 제공할 뿐만 아니라, 군집지수의 분포, 주요 출현종의 서식처 염도 범위, 회유성 어종의 주요 소상 지점 등의 추가 자료를 제시하였다. 이러한 정보는 향후 한반도 하구의 관리를 위한 자료 및 연구에서의 참조 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

저자정보 박상현(주식회사 에코리서치 이사), 백승호(주식회사 에코리서치 이사), 김정희(주식회사 에코리서치 대표이사), 김동환(국립생태원 연구원), 장민호(공주대학교 교수), 원두희((주)생태조사단 대표이사), 박배경(국립환경과학원 연구관), 문정숙(국립환경과학원 연구사)

저자기여도 개념설정: 박상현, 김정희, 장민호, 현장조사: 박상현, 백승호, 김정희, 장민호, 자료분석: 박상현, 김정희, 김동환, 장민호, 원두희, 박배경, 문정숙, 원고작성: 박상현, 백승호, 김정희

이해관계 본 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없음.

연구비 본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2020-04-02-009).

REFERENCES

AG/DAWE. 2017. Integrated Ecosystem Condition Assessment Framework: Guidance Manual. Australian Government/Department of Agriculture, Water and the Environment. Australian.

Bady, P., S. Dolédec, C. Fesl, S. Gayraud, M. Bacchi and F. Schöll. 2005. Use of invertebrate traits for the biomonitoring of European large rivers: the effects of sampling effort on genus richness and functional diversity. *Freshwater Biology* **50**: 159-173.

Baek, S.H., J.D. Yoon, J.H. Kim, H.J. Lee, K.R. Choi and M.H. Jang. 2013. Characteristics of fish community in the Seomjin River and brackish area. *Korean Journal of Environmental Biology* **31**: 402-410.

Bulger, A.J., B.P. Hayden, M.E. Monaco, D.M. Nelson and G.M. McCormick-Ray. 1993. Biologically-based estuarine salinity zones derived from a multivariate analysis. *Estuaries* **16**: 311-322.

Byeon, H.K. 2014. Fish community and upstream of Glass eels (*Anguilla japonica*) in the Imjin River Estuary, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 31-38.

Chae, B.S. and H.N. Yoon. 2007. Freshwater fish fauna of the Yeosu peninsula and Geumo Islands, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **19**: 225-235.

Chae, B.S., H.B. Song and J.Y. Park. 2019. Freshwater fishes of Korea. LG foundation all rights reserved, Seoul, Korea.

Choi, Y., J.H. Kim and J.Y. Park. 2002. Marine fishes of Korea. Kyohak Publishing, Seoul, Korea.

Claridge, P.N., I.C. Potter and M.W. Hardisty. 1986. Seasonal changes in movements, abundance, size composition and diversity of the fish fauna of the Severn Estuary. *Marine Biological Association of the United Kingdom* **66**: 229-258.

Clarke, K.R. and R.M. Warwick. 1994. Similarity-based testing for community pattern: the two-way layout with no replication. *Marine Biology* **118**: 167-176.

Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill, J. Paruelo, R.G. Gaskin, P. Sutton and M. van den Belt. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* **387**: 253-260.

Cummins, K.W. 1962. An evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. *The American Midland Naturalist* **67**: 477-504.

Daan, N., P.J. Bromley, J.R.G. Hislop and N.A. Nielsen. 1990. Ecology of North sea fish. *Netherlands Journal of Sea Research* **26**: 343-386.

Dionne, J.C. 1963. Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Zeitschrift fur Geomorphologie* **7**: 36-44.

EPA. 2022. https://www.epa.gov/nep/national-results-national-estuary-program.

Fairbridge, R.W. 1968. The Encyclopedia of Geomorphology (ed.), Springer, Berlin, Germany.

Field, J.G., K.R. Clarke and R.M. Warwick. 1982. A practical strategy for analysing multispecies distribution patterns. *Marine Ecology Progress Series* **8**: 37-52.

Hwang, S.W., H.B. Hwang, H.S. Noh and T.W. Lee. 2005. Seasonal variation in species composition of fish collected by a bag net in the Geum River estuary, Korea. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **38**: 39-54.

Kim, I.S. and J.Y. Park. 2002. Freshwater fishes of Korea. Kyohak Publishing, Seoul, Korea.

Kim, I.S. and W.O. Lee. 1993. The fish fauna of the Kokunsan Island, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **5**: 41-52.

Kim, J.H., S.H. Park, S.H. Baek, M.H. Jang and J.D. Yoon. 2020a. Changes in fish assemblages after dike construction in the Saemangeum area. *Ocean Science Journal* **55**: 129-142.

Kim, J.H., S.H. Park, S.H. Baek, M.H. Jang, H.J. Lee and J.D. Yoon. 2020b. Does Different Performance of Sampling Gears (Cast Net versus Gill Net) Bring the Inappropriate Estimation of Freshwater Fish in a Large River? *Korean Journal of Ecology and Environment* **53**: 156-164.

Kim, K.H., J.D. Kum and H.J. Yang. 2001. The fish fauna and migration of the fishes in the fish way of the Nakdong River Mouth Dam. *Korean Journal of Ecology and Environment* **34**: 251-258.

Kim, Y.B. and K. Kim. 2015. Institutional definition instances and necessity of establishment about the geographical scope of the East Sea. *Journal of the Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education* **27**: 1380-1394.

Kinne, O. 1971. Invertebrates. *In*: Marine Ecology. Wiley Interscience, London, United Kingdom.

Lee, C.L. 1992. The variations of the fish community after dam construction of the Kum River estuary. *Korean Journal of Limnology* **25**: 193-204.

Lee, D., G. Park, C. Lee and Y. Shin. 2017. Assessment of ecosystem health during the freshwater discharge in the Youngsan River Estuary. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 46-56.

Lee, J.D., Y.C. Kwon and W.S. Bae. 2019. Estimation of consolidation characteristics of soft ground in major river mouth. *Journal of the Korean GEO-environmental Society* **20**: 69-79.

Lee, K.H., B.H. Rho, H.J. Choi and C.H. Lee. 2011. Estuary classification based on the characteristics of geomorphological features, natural habitat distributions and land uses. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography* **16**: 53-69.

Lee, K.H., H.J. Cho, B.H. Rho and C.H. Lee. 2012. Defining the boundary of estuarine management zone for estuarine environmental management. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography* **17**: 203-224.

Lee, T.W., H.B. Hwang and S.W. Hwang. 2007. Change in fish species composition in the Saemangeum Reservoir after the construction of dike in 2006-2007. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography* **12**: 191-199.

Maes, J., A. Taillieu, P.A. Van Damme, K. Cottenie and F. Ollevier. 1998. Seasonal patterns in the fish and crustacean community of a turbid temperate estuary (Zeeschelde Estuary, Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **47**: 143-151.

Margalef, D.R. 1958. Information theory in ecology. *International Journal of General Systems* **3**: 36-71.

Marshall, S. and M. Elliott. 1998. Environmental influences on the fish assemblage of the Humbert Estuary, UK. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **46**: 175-181.

McLusky, D.S. 1989. The estuarine environment, p. 1-48. *In*: The Estuarine Ecosystem: ecology, threats and management (McLusky D.S. and M. Elliott, eds.). Oxford University Press Inc, New York, USA.

McLusky, D.S. 1993. Marine and estuarine gradients - an overview. *Netherland Journal of Aquatic Ecology* **27**: 489-493.

MOE. 2007. Study of guideline for translocation of animal and plant in wild ecosystem. The Ministry of Environment, Sejong, Korea.

MOE. 2017. Water pollution process test standards. Ministry of Environment, Sejong, Korea.

MOE/NIER. 2008-2021. Survey and assessment of estuary eco-

system. The Ministry of Environment/National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea.

MOF. 2017. The 4th inland fishery promotion basic plan. Ministry of Oceans and Fisheries, Sejong, Korea.

Nazneen, S. and F. Begum. 1981. Salinity tolerance in some freshwater fishes. *Biologia* **27**: 33-38.

Nelson, J.S. 2016. Fishes of the world. Wiley, New York, USA.

NIER. 2016. Biomonitoring survey and assessment manual. National Institute of Environmental Research. Incheon, Korea.

Park, G.S. and Y.C. Lee. 1997. Comparison of water quality and fish community between dry and wet season in the lower Han River, Korea. *Yellow Sea Research* **7**: 43-53.

Park, S.H., J.W. Lee, J.H. Kim, S.H. Baek, J.D. Yoon, K.R. Choi and M.H. Jang. 2013. Fish distribution and salinity in the Saemangeum Reservoir. *Korean Journal of Environmental Biology* **31**: 411-418.

Pielou, E.C. 1966. Shannon's formula as a measure of specific diversity: its use and misuse. *The American Naturalist* **100**: 463-465.

Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. John Wiley-Interscences, New York. USA.

Pritchard, R.W. 1967. What is an estuary? Physical viewpoint, p. 3-5. *In*: Estuaries (Lauff, G.H., ed.). American Association for the Advancement of Science, Washington D.C. USA.

Simpson, E.H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* **163**: 688-688.

Son, Y.M. and H.B. Song. 1998. Freshwater fish fauna and distribution in Kojedo, Korea. *Korean Journal of Ichthyology* **10**: 87-97.

Song, H.B., H.M. Baek and C.W. Lee. 2005. Water environmental assessment by the species biotic index of freshwater fish in the Namdaecheon, Gangneung city. *Journal of Environmental Impact Assessment* **14**: 237-245.

Thiel, R., A. Sepulveda, R. Kafemann and W. Nellen. 1995. Environmental factors as forces structuring the fish community of the Elbe Estuary. *Journal of Fish Biology* **46**: 47-69.

Venice System. 1958. Symposium on the classification of brackish waters, Venice, April 8-14, 1958. archives *Oceanography and Limnology* **11**: 1-248.

Wells, J.T., C.E. Adams, Y.A. Park and E.W. Frankenberg. 1990. Morphology, sedimentology and tidal channel processes on a high-tide-range mudflat, west coast of South Korea. *Marine Geology* **95**: 111-130.

WFD. 2022. https://www.gov.uk/guidance/water-framework-directive-assessment-estuarine-and-coastal-waters.

Whitfield, A.K. 1999. Ichthyofaunal assemblages in estuaries: a South African case study. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* **9**: 151-186.

Wilhm, J.L. 1970. Range of diversity index in benthic macroinvertebrate populations. *Journal (Water Pollution Control Federation)* **1970**: 221-224.

Yoon, J.D., J.H. Kim, M.S. Byeon, H.J. Yang, J.Y. Park, J.H. Shim, H.B. Song, H. Yang and M.H. Jang. 2011. Distribution patterns of fish communities with respect to environmental gradients in Korean streams. *In Annales de Limnologie-International Journal of Limnology* **47**: 63-71.

Yoon, J.D., J.H. Kim, S.H. Park and M.H. Jang. 2018. The distribution and diversity of freshwater fishes in Korean Peninsula. *Korean Journal of Ecology and Environment* **51**: 71-85.

Yoon, S.O., S.I. Hwang and H.K. Ban. 2003. Geomorphic development of marine terraces at Jeongdongjin-Daejin area on the east coast, central part of Korean Peninsula. *Journal of the Korean Geographical Society* **38**: 154-172.

Yun, Y.J., J.Y. Kim, H.J. Kim, D.Y. Bae, G.S. Park, C.D. Nam, K.H. Lim, M.Y. Lee, S.Y. Lee, K.D. Moon, E.H. Lee and K.G. An. 2021. Changes in fish species composition after fishway improvement in Songrim weir, Yeongok stream. *Korean Journal of Environmental Biology* **39**: 195-206.