

환경 DNA 기법을 활용한 광고호수공원 일대의 시기 및 수환경 특성별 어류상 분석

원수연¹⁾ · 강유진²⁾ · 송영근³⁾

¹⁾서울대학교 협동과정조경학·스마트 글로벌 융합전공 학생 · ²⁾서울대학교 협동과정조경학 학생 ·

³⁾서울대학교 환경대학원 환경조경학과 교수

Analysis of the characteristics of the environment and fish community in the Gwanggyo Lake Park area using the environmental DNA technique

Won, Su-Yeon¹⁾ · Kang, Yu-Jin²⁾ and Song, Young-Keun³⁾

¹⁾Dept. of Interdisciplinary Program in Landscape Architecture·Transdisciplinary Program in Smart City Global Convergence, Seoul National University, Student,

²⁾Dept. of Interdisciplinary Program in Landscape Architecture, Seoul National University, Student,

³⁾Dept. of Landscape Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Professor.

ABSTRACT

This study aims to understand the relationship between the distribution of fish species in the two water ecosystems and the habitat factors according to the survey period targeting Gwanggyo Lake Park in the city. There are studies on the appearance and distribution of species by applying eDNA to freshwater ecosystems. However, in the domestic, streams are the target, and studies on the relationship between species distribution and habitat environment in two water environments are lacking. We conducted to analyze the species list and relationship with habitat factors using eDNA research in May and October at 21 points in Gwanggyo Lake Park, Suwon City, which were connected to lakes and streams. As a result, there was no species difference in the water environment according to the survey

* 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다.(2019002760001)

First author : Won, Su-Yeon, Dept. of Interdisciplinary Program in Landscape Architecture·Transdisciplinary Program in Smart City Global Convergence, Seoul National University, Student, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea,
Tel: +82-2-880-8860, E-mail: wsy5216@snu.ac.kr

Corresponding author : Song, Young-Keun, Dept. of Landscape Architecture, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Professor, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, Korea,
Tel: +82-2-880-8860, E-mail: songyoung@snu.ac.kr

Received : 29 September, 2022. **Revised** : 28 October, 2022. **Accepted** : 28 October, 2022.

period. However, the total number of reads during the spawning season(May) was 3,126,482, which was more than double that after the spawning season(October). Tolerant species appeared in Woncheon Lake with a slow or stagnant flow, but there was no significant correlation between species and habitat factors depending on the survey period. On the other hand, intermediate and sensitive species appeared in the Woncheon stream with high flow. There was a significant correlation between the low temperature during the spawning season and the high dissolved oxygen content after the spawning season($P < 0.001$, Tem.: $20.7 \pm 2.6^\circ\text{C}$, DO: 8.6 ± 1.7). It is expected that environmental DNA will be used to survey species and suggest monitoring methods according to the survey period.

Key Words: *eDNA, freshwater ecosystem, water environments, urban lake park, Metabarcoding*

I. 서론

도시 내 존재하는 수환경은 도시 기후의 조절, 자연 정화 기능, 생물종의 서식처 제공 등의 중요한 역할을 하고 있다(Leem et al., 2005). 도시 내 하천과 저수지는 생활용수 및 농업용수를 제공하고 육상생태계와 수생태계를 연결하는 곳으로서 생물다양성이 높은 곳으로 인식되고 있다(Koo et al., 2011). 그러나, 현재 개발로 인해 도시 내 수환경이 단절되고 건천화 등이 진행됨으로써 생물종의 서식에 혼란을 일으켜 먹이사슬의 교란, 외래종 증가 등의 수생태계 문제가 발생하고 있다(Choi et al., 2019). 이에 대한 대응으로 도시 내 수공간으로 크고 작은 하천형과 저수지형 및 하구형 호수를 함께 조성함으로써 생물다양성을 높이고 교란을 최소화하기 위한 노력이 이뤄지고 있다.

담수 어류종은 환경 변화에 쉽게 영향을 받으며, 수환경에 따라 종 출현이 상이하게 나타난다(Jones et al., 2005; Han et al., 2009). 하천에서는 유수역 환경을 선호하는 종인 피라미, 참갈겨니 등이 우점적으로 출현하며(Yoon et al., 2011; Kim et al., 2018), 호수에서는 하천에 비해 용존산소량이 적고 자정작용도 활발하지 않아 블루길, 큰입배스 등인 생태계 교란종의 출현율이 높다(Lee, 2021). 수환경에 따른 서식 생물종 차이로 인하여 하천과 호수 내 어류종의

서식환경 요소를 고려한 시공간적 지속적인 모니터링과 관리가 필수적이다(Hughes and Noss, 1992; Chong et al., 2010). Na et al.(2018)은 8년간의 장기모니터링을 통해 만경강 본류의 담수 어류상을 내성 특성에 따라 분류하고, 이화학적 인 수질 및 담수 어류상의 변화를 살펴보았다. Lee et al.(2017)은 한강, 낙동상, 금강 등 담수생태계의 하천차수에 따라 내성종인 피라미(*Zacco platypus*)와 민감종인 참갈겨니(*Nipponocypris koreanus*)를 대상으로하여 2008년부터 8년간 5~6월, 9~10월 조사를 하였고, 하천차수에 따른 종 분포 차이 및 경쟁관계를 밝혔다. Park et al.(2020)은 영산강과 섬진강 유역에 위치한 16개 호소를 대상으로 2018~2019년의 5~6월, 9~10월 조사를 통해 내성 길드에 따른 어류군집을 조사하였고, 호소 규모가 커질수록 출현종수가 증가하는 경향을 밝혀냈다.

전통적인 방법의 현장조사는 지형이나 식생에 따른 물리적인 한계와 함께 조사 시기에 따른 시간적 한계가 있기에 효율적이고 효과적인 모니터링을 위해 환경 DNA 활용이 기대되고 있다(Wang et al., 2016). 환경 DNA란 물, 토양 및 공기와 같은 환경으로부터 추출한 DNA를 말한다. 환경 DNA는 환경 시료에 남아 있는 생물종의 피부, 배설물 등의 유기체에서 유래하는데(Jo et al., 2019), 환경 DNA에는 특정 종이나 개체에 대한 식별 정보가 포함되어 있어 생물종

탐지에 유용하다. 또한, 동일한 수환경 내에서 일정한 간격 샘플링을 통해 전체적인 생물상을 파악할 수 있는 장점이 있다. 현재는 어류종 뿐만 아니라 포유류, 조류 및 양서류까지 범위를 넓히고 있으며, 환경 DNA를 통해 희귀종과 침입종 탐지도 이뤄지고 있다(Eichmiller et al., 2014). Bista et al.(2017)은 호수에서 환경 DNA 지속성을 파악하기 위해 연간 시계열에서 파생된 다른 길이의 두 마커의 메타바코딩 기술을 통해 파리목(Diptera)의 시간적 변화에 따른 분류군 풍부도를 파악하였다. Eichmiller et al. (2014)는 호수 내의 내성종 및 외래종인 잉어(*Cyprinus carpio*)의 분포와 환경 DNA의 검출률 및 농도 간 관계를 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 호수 내에서 떠돌이의 활동이 많은 지역은 환경 DNA 검출 농도가 높아 환경 DNA 검출률은 활동량이 많은 지역의 영향을 크게 받음을 확인하였다. Zhang et al.(2022)는 강에서 호수로 전환되는 대상지 유역에 대한 수환경 변화의 잠재적인 생태적 영향을 파악하기 위해 세균과 식물플랑크톤의 환경 DNA를 분석하여 다른 수환경 간 생물학적 균질화를 밝혀냈다.

국내에서도 수환경에 환경 DNA를 적용하여 종의 출현과 분포를 파악하는 연구들이 지속적으로 이루어지고 있다. Kim et al.(2020)은 담수 생태계에 대한 환경 DNA의 적용가능성을 파악하기 위해 민물고기 생태학습관을 대상으로 국내 대표 담수 어류종을 환경 DNA로 검출할 수 있다는 것을 보여주었다. Kim et al.(2020)은 하천의 어류 다양성을 파악하기 위해 멸종위기종이 서식하는 4개 하천에 환경 DNA를 적용하여 기존 조사와 비교를 실시하고, 현재 민물고기를 검출하기 위한 범용 프라이머에 대한 한계와 멸종위기종에 대한 프라이머 개발의 필요성을 제시하였다. 그러나 국내의 경우 주로 하천을 중심으로 환경 DNA 기술을 적용한 경우가 대부분이며, 동시에 2가지 이상의 수환경을 대상으로 종 분포 및 서식환경과의 관계를 파악한 연

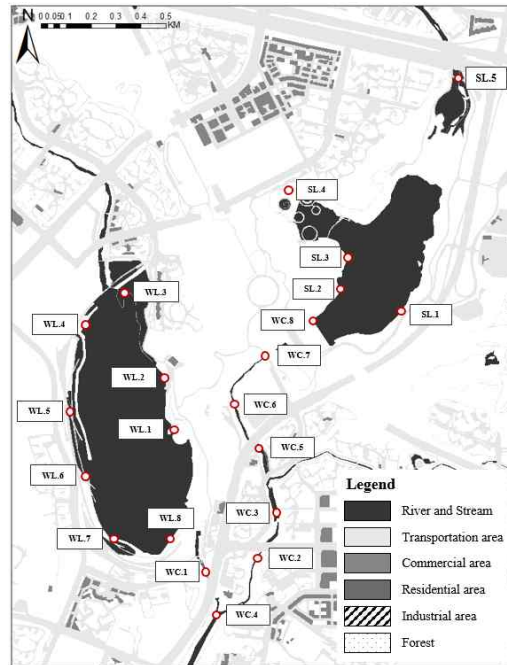


Figure 1. Study sites in Gwangyo Lake Park. The red circle indicates sampling plots

구들은 미진한 상황이다.

본 연구에서는 도시 내 하천과 호수가 연결되어 있으며 물순환시스템에 의해 다양한 수환경 특성을 가지고 있는 광교호수공원을 연구 대상으로 하였다. 본 연구는 환경 DNA를 활용하여 조사 시기에 따른 수환경별 종 분포 차이와 서식 환경 인자 간의 관계를 파악하는 것을 목적으로 한다.

II. 연구 내용 및 방법

1. 대상지 개요

본 연구에서는 경기도 수원시에 위치한 광교호수공원(37°28'34.56"N 127°06'58.86"E, area : 2,025,418m²)으로서 신대호수, 원천호수와 두 호수를 연결하는 원천리천을 대상으로 수행되었다 (Figure 1, Sindae Lake area : 279,435m², Woncheon Lake area : area : 373,568m²). 각 대상지의 조사 지점은 동일한 수환경에서도 eDNA 농도 차이를

Table 1. Location by each sampling point

	No.	Location	
Sindae Lake(SL)	1	37°17'04.6"N	127°04'29.9"E
	2	37°17'07.5"N	127°04'19.4"E
	3	37°17'12.1"N	127°04'20.5"E
	4	37°17'19.9"N	127°04'10.0"E
	5	37°17'35.5"N	127°04'38.5"E
Woncheon Stream(WC)	1	37°16'30.4"N	127°03'58.3"E
	2	37°16'33.8"N	127°04'06.7"E
	3	37°16'38.5"N	127°04'09.2"E
	4	37°16'25.7"N	127°03'59.4"E
	5	37°16'47.4"N	127°04'05.8"E
	6	37°16'53.7"N	127°04'02.0"E
	7	37°17'00.6"N	127°04'11.0"E
	8	37°17'04.2"N	127°04'14.4"E
Woncheon Lake(WL)	1	37°16'49.5"N	127°03'51.1"E
	2	37°16'57.2"N	127°03'50.4"E
	3	37°17'07.2"N	127°03'45.9"E
	4	37°17'04.2"N	127°03'40.2"E
	5	37°16'54.1"N	127°03'39.1"E
	6	37°16'40.3"N	127°03'41.3"E
	7	37°16'33.8"N	127°03'47.6"E
	8	37°16'34.4"N	127°03'52.0"E

비교할 수 있도록 100m 간격으로 하교(Hayami et al., 2020) 채수가 가능한 21지점을 선정하였다 (Table 1). 본 대상지는 2013년도에 도시 공원으로 개발되면서 상류쪽인 신대호수와 하류쪽인 원천호수, 두 호수를 연결하는 원천리천으로 구성되어 있다. 광교호수공원은 하천의 건천화를 방지하고 생태적인 건강성 및 생물다양성 유지를 위해 호수의 물을 정화시키고 하천으로 방류하여 순환하는 시스템을 활용하고 있다.

2. 환경 DNA 채취 및 서식환경 요소 측정

조사 시기에 따른 차이를 살펴보기 위해 어류종의 산란기 이후인 2020년 10월 6일과 산란기 시기인 2021년 5월 19일, 두 번에 걸쳐 각 조사지점에 대한 정수 샘플을 채취하였다. 시료 채취 시 발생할 수 있는 오염을 최소화하기 위해 멸균 팩과 일회용품들을 사용하였으며, 각 샘플링 지점마다 장갑, 주사기, 보존팩들을 교체하였다. 각 지점별

로 채취된 샘플들은 일회용 주사기를 이용하여 약 8~10회에 걸쳐 200~500ml의 용량을 0.45 μ m 카트리지가 필터지에 필터링하였고, 이를 2번 반복 진행하였다. DNA에 미칠 수 있는 외부의 영향을 최소화 하기 위하여 필터링이 완료된 시료 샘플들은 즉시 아이스 박스에 보관하였다. 서식환경요소는 화학적인 요소로서 수질측정기 YSI Proplus Water quality multiparameter를 이용하여 수온, 용존산소량, pH 3가지 항목을 측정하였다.

3. 환경 DNA NGS 분석 및 종 목록 확인

채취된 시료들은 NGS(Next Generation Sequencing) 분석을 진행하였고, 분석을 통해 구축된 생물종 정보와 총 리드 수(Total reads) 등을 활용하였다. NGS는 유전체를 많은 조각으로 나뉜 염기서열로 조합하여 유전체를 해독하는 기법으로, 이를 통해 환경 DNA에 존재하는 생물종을 검출할 수 있다(Lee et al., 2014). 분석을 위한 프라이머는 선행연구를 참고하여 MiFish을 활용하였다(Ushio et al., 2017). NGS 분석 이후, MiFish 파이프라인(pipeline)을 통해 파이프라인 내의 생물종 유전자 정보 매칭으로 유사도 97% 이상의 분류군 군집, 종, 총 리드수 등의 결과를 활용하였다. 기존 MiFish에 구축된 담수어종의 데이터를 출현종 목록으로 활용하였으나, 국내에 서식하는 담수어종을 중심으로 정제 과정을 수행하였다.

4. 조사 시기에 따른 출현종과 서식환경간의 관계

종 분류는 MOE(2017)와 국립과학원에서 명시한 분류 기준을 참고하여 내성종, 중간종, 민감종으로 구분하였다. 조사 시기에 따라 영향을 받는 서식환경 요소 간의 관계를 파악하기 위하여 R CRAN 패키지(R version 4.4.7)를 활용하여 다중회귀분석을 실시하였다. 다중회귀분석에서 활용한 총 리드수는 수환경에 남아있는 생물 정보량으로서 개체수 추정을 위해 이를 log 값으로 변환하였다(Thomas et al., 2019).

Table 2. Species detected using environmental DNA by survey period in sites.

Order	Family	Species	Guild	Study sites																				
				SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	WC1	WC2	WC3	WC4	WC5	WC6	WC7	WC8	WL1	WL2	WL3	WL4	WL5	WL6	WL7	WL8
Anabanniformes	Channidae	<i>Channa argus</i>	TS	●	●	●	●		○	●	○	●	●	●	●	◆	●	●	○	●	○		○	
Belontiiformes	Adrianiichthyidae	<i>Oryzias latipes</i>	TS	●	◆	●	◆		○	◆					◆								◆	
Centrarchiiformes	Centrarchidae	<i>Micropterus salmoides</i>	TS				◆		●	○	○	●	○	○	◆	●	●	●	●	●	●	●	●	
		<i>Lepomis macrochirus</i>	TS						○	◆	◆	●	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	
Cobitiidae	Cobitidae	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS					○	○	○	○	◆	◆											
		<i>Misgurnus nelsoni</i>	TS					●	○	●	●	●		●					●	○				○
Cypriniformes	Cyprinidae	<i>Carassius auratus</i>	TS						○			○	○			◆	◆	◆	●	●	●	◆	◆	●
		<i>Cyprinus carpio</i>	TS				○		●	●	○	○	○	○		●	●	◆	○	○	○			◆
		<i>Cyprinus megalophthalmus</i>	TS						○	○	○	○	○							○	○	○		
		<i>Carassius cuvieri</i>	TS	○	○	○	○	○	●	●	●	●	○	●	◆	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	<i>Carassius sp.</i>	TS	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	<i>Zacco platypus</i>	TS	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●		◆				○
	Gobionidae	<i>Gnathopogon polytaenia</i>	IS												○									
		<i>Gnathopogon strigatus</i>	SS							○	●	○	●	●	○	●								
	Leuciscidae	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	SS							◆	●	○	●						●		◆	◆		
Gobiiformes	Gobiidae	<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS				◆	◆	○		○		◆		◆	◆								
	Odontobutidae	<i>Odontobutis interrupta</i>	IS					●	○	●	●	●	●	●	●									
	Oxudercidae	<i>Rhinogobius giurinus</i>	TS	●	●	●	●	◆	●		●	●	●	●	●	●	◆	○		●	◆	◆	◆	○
		<i>Rhinogobius sp.</i>	TS	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	◆	◆	◆
Mugiliformes	Mugilidae	<i>Liza haematocheila</i>	TS						○													○		
Siluriformes	Bagridae	<i>Tachysurus fulvidraco</i>	TS						○					◆	●									
Total number of species observed				8	8	8	11	10	21	16	16	17	17	16	12	12	10	10	12	12	13	11	10	11

: Korean endemic species
 : Exotic species
 ● : Species detected in May and Oct.
 ○ : Species detected in May
 ◆ : Species detected in October
 * TS : Tolerance Species, IS : Intermediate Species, SS : Sensitive Species

III. 결과 및 고찰

1. 조사시기에 따른 도시 내 수환경 어류상 특성 결과
 환경 DNA를 통해 출현종을 분석한 결과, 전체 출현종은 총 12과 22종이며, 신대호수에서 14종, 원천리천에서 21종, 원천호수에서 16종이 검출되었다. 주요 출현종은 Cyprinidae과의 잉어속(*Carassius sp.*), 참붕어(*Pseudorasbora parva*), Oxudercidae과의 갈문망둑(*Rhinogobius giurinus*) 등으로 나타났다(Table 2). 내성 특성

에 따라 분류한 결과에 따르면 오염 물질에 민감하게 반응하지 않는 내성종으로 Centrarchidae과의 큰입배스(*Micropterus salmoides*), 블루길(*Lepomis macrochirus*), Cyprinidae과의 떡붕어(*Carassius cuvieri*) 등 16종이 출현하였으며, 중간종은 Gobionidae과의 모래무지(*Gnathopogon polytaenia*), Gobiidae과의 밀어(*Rhinogobius brunneus*), Odontobutidae과의 얼룩동사리(*Odontobutis interrupta*)의 3종이 출현하였고, 수질오염 등 수환경 질적저하에 민감하게 반응

Table 3. The total reads of species by survey period in sites.

Order	Family	Species	Guild	Study sites										
				May					October					
				SL	WC	WL	TRS	(%)	SL	WC	WL	TRS	(%)	
Anabaniiformes	Channidae	<i>Channa argus</i>	TS	24,111	12,582	18,798	55,490	1.8%	47,389	11,287	650	59,326	4.0%	
Belontiiformes	Adrianiichthyoidae	<i>Oryzias sinensis</i>	TS	4,995	42,934	-	47,929	1.5%	33,655	88	629	34,372	2.3%	
Centrarchiiformes	Centrarchidae	<i>Micropterus salmoides*</i>	TS	-	46,450	159,677	206,127	6.6%	15	3,549	108,094	111,658	7.5%	
		<i>Lepomis macrochirus*</i>	TS	-	943	81,756	82,699	2.6%	-	27,899	65,181	93,080	6.2%	
	Cobitidae	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	TS	146	39,618	-	39,764	1.3%	-	183	-	183	0.0%	
		<i>Misgurnus mizolepis</i>	TS	482	5,709	1,605	7,796	0.2%	393	397	201	991	0.1%	
		<i>Carassius auratus</i>	TS	-	2,418	27,537	29,956	1.0%	-	503	8,247	8,750	0.6%	
	Cypriniformes	Cyprinidae	<i>Cyprinus carpio</i>	TS	14	2,014	66,540	68,568	2.2%	-	844	2,027	2,871	0.2%
<i>Cyprinus megalophthalmus</i>			TS	-	2,584	15,110	17,694	0.6%	-	-	-	-	-	
<i>Carassius cuvieri*</i>			TS	83	23,305	544,111	567,499	18.2%	-	15,017	80,885	95,902	6.4%	
Gobiiformes		Oxudercidae	<i>Carassius sp.</i>	TS	623	1,030	41,803	43,455	1.4%	907	1,349	5,891	8,147	0.5%
			<i>Pseudorasbora parva</i>	TS	555,970	508,033	231,542	1,295,545	41.4%	49,210	101,589	42,270	193,069	13.0%
			<i>Zacco platypus</i>	TS	122,438	158,171	4,703	285,312	9.1%	26,167	151,753	3,228	181,148	12.2%
Gobiiformes	Oxudercidae	<i>Rhinogobius giurinus</i>	TS	-	-	-	-	-	61,537	112,924	4,014	178,475	12.0%	
		<i>Rhinogobius sp.</i>	TS	20,157	230,622	48,064	298,843	9.6%	123,542	320,366	43,253	487,161	32.7%	
Mugiliformes	Mugilidae	<i>Liza haematocheila</i>	TS	-	966	48	1,014	0.0%	-	-	-	-	-	
Siluriformes	Bagridae	<i>Tachysurus fulvidraco</i>	TS	-	579	-	579	0.0%	-	128	-	128	0.0%	
Sum of the total reads				729,019	1,077,958	1,241,294	3,048,270	97.5%	342,515	747,876	364,570	1,455,261	97.7%	
Cypriniformes	Gobiionidae	<i>Gnathopogon polytaenia</i>	IS	-	26	-	26	0.0%	-	-	-	-	-	
Gobiiformes	Gobiidae	<i>Rhinogobius brunneus</i>	IS	-	946	-	946	0.0%	50	48	-	98	0.0%	
		<i>Odontobutis interrupta*</i>	IS	4,634	53,223	-	57,857	1.9%	3,651	20,860	-	24,511	1.6%	
Sum of the total reads				4,634	54,195	-	58,829	1.9%	3,701	20,908	-	24,609	1.7%	
Cypriniformes	Gobiionidae	<i>Gnathopogon strigatus</i>	SS	-	15,913	-	15,913	0.5%	-	3,544	-	3,544	0.2%	
Cypriniformes	Leuciscidae	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	SS	-	1,743	1,731	3,474	0.1%	-	2,818	3,392	6,210	0.4%	
Sum of the total reads				-	17,656	1,731	19,387	0.6%	-	6,362	3,392	9,754	0.7%	
The total number of reads				733,653	1,149,809	1,243,025	3,126,486	100.0%	346,516	775,146	367,962	1,489,624	100.0%	

TS=Tolerance Species, IS=Intermediate Species, SS=Sensitive Species, TRS=Total reads of species, *= Exotic species, +=Korean endemic species

하는 민감종은 Gobiionidae과의 줄몰개 (*Gnathopogon strigatus*), Cyprinidae과의 버들치 (*Rhynchocypris oxycephalus*) 2종이 출현하였다.

조사 시기에 따라 출현종의 차이는 존재하지 않았으나 총 리드수는 5월이 10월보다 거의 2배 정도 높게 나타났다(Table 3, May: 3,126,482, Oct.: 1,489,311). 특히, 내성 특성으로 보았을 때 내성종의 총 리드수는 3,048,267로 다른 종보다 조사 시기별 차이가 크게 나타났다. 이는 산란기인 5월에 내성종의 환경 DNA에 해당하는 알, 비늘 등의 정보량이 10월보다 더 많이 검

출된다는 것을 의미한다.

조사 시기에 따라 수환경에 대한 내성특성 총 리드수 비율의 차이가 존재하였다. 특히, 내성종은 산란기인 5월에 원천호수를 중심으로 총 리드수 비율이 높게 나타났으며(Table 3, 1,241,293/3,048,267, 41%) 10월엔 하천에서 총 리드수 비율이 원천호수보다 2배 이상 높게 나타났(Table 3, 747,871/1,454,951, 51%). 반면에 중간종과 민감종은 조사 시기에 상관없이 하천을 중심으로 총 리드수 비율이 높게 나타났으며(May: 71,851, Oct.: 27,270) 원천호수에서 가장 낮게 나타났

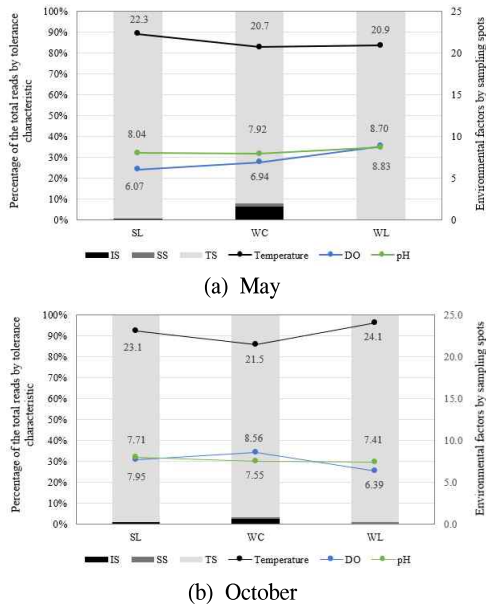


Figure 2. The ratio of the total reads by each site to total reads of all the sites by tolerance characteristics (The line and the bar graph represent the environmental factor and the ratio of the total reads by each site to total reads of all the 21 sites)

(May: 1,731, Oct.: 3,392). 중간종은 하천에서 얼룩동사리가 5월과 10월 모두 85% 이상으로 높게 출현했으며(*Odontobutis interrupta*, May: 53,223/58,829, Oct.: 20,860/24,609) 민감종은 줄물개가 5월에 82%, 10월에 36%로 높게 출현했다(Table 3, *Gnathopogon polytaenia*, May : 15,913, Oct.: 3,544).

2. 조사 시기에 따른 출현종과 서식환경 간의 관계

조사 시기에 따른 수환경 별 서식환경 인자와 출현종 간의 상관관계 분석 결과, 내성종은 조사 시기에 상관 없이 수환경 별 특정 서식환경 인자와의 상관관계가 존재하지 않았다. 그러나, 중간종과 민감종은 조사 시기에 따라 출현종과 온도, 용존산소량 등 일부 수환경 인자 간의 유의한 상관관계를 나타냈으며($p < 0.05$), 수환경 별 영향을 받는 서식환경 인자에 차이가 존재하

였다(Table 4).

내성종의 경우, 조사 시기에 따라 신대호수, 원천리천, 원천호수에서 출현종의 총 리드수와 온도, 용존산소량, pH간 유의미한 상관관계를 나타내지 않았다.

반면에, 중간종과 민감종은 출현종의 총 리드수와 서식환경 인자 간 유의미한 상관관계를 나타냈다($p < 0.05$). 특히, 중간종은 총 리드수가 높게 나타난 하천에서 5월에 온도와 유의미한 음의 상관관계가 존재하였으며, 10월에는 용존산소량과 pH간 유의한 양의 상관관계가 존재하였다(Table 4, $p < 0.001$). 동시에 수질 측정 결과로, 조사 시기에 상관없이 온도는 가장 낮았으며 (Figure 2, May: 20.7°C, Oct.: 21.5°C) 10월엔 용존산소량이 가장 높게 나타난 것을 볼 수 있었다(Figure 2-b, Oct. DO : 8.56mg/L).

한편, 민감종은 하천에서 유의한 상관관계를 나타내지 않았다. 그러나 총 리드 수가 낮게 나타난 원천호수에서는 10월에 온도와 유의한 음의 상관관계가 존재하였으며 용존산소량과 양의 상관관계가 존재하였다(Table 5). 동시에 수질 측정 결과, 원천호수에서는 10월에 온도가 가장 높았고 용존산소량이 가장 낮게 나타났다 (Figure 2-b, Tem. : 24.1°C, pH : 7.41, DO : 6.39mg/L).

내성종은 온도, 용존산소량, pH 인자에는 큰 제약을 받지 않았다. 중간종과 민감종은 높은 용존산소량의 범위(최소 6.0 mg/L 이상)와 낮은 BOD의 범위(최대 1.0 mg/L 이하)에서 출현하는데(Seo et al., 2008), 본 연구에서는 5월보다 10월에 용존산소량과 유의미한 상관관계를 확인하였다. 이를 통해 조사 시기별 eDNA 총 리드수 비율에 영향을 끼치는 서식환경 인자에 차이가 존재한다는 것을 확인하였다.

IV. 결 론

환경 DNA 기술은 환경시료에 존재하는 유전

Table 4. Correlation between species and environmental factors according to the tolerance in Gwangyo Lake Park. TS indicates Tolerance Species, IS indicates Intermediate Species and SS indicates Sensitive Species

Sites	Guild		May				Oct.			
			Estimate	SE	t value	p value	Estimate	SE	t value	p value
Sindae Lake	IS	<i>Intercept</i>	3.210	0.006	556.661	<0.001***	3.298	0.006	518.666	<0.001***
		<i>Temp</i>	0.002	0.001	1.388	0.215	-0.011	0.001	-7.717	<0.001***
		<i>DC</i>	-0.002	0.001	-1.288	0.245	0.011	0.001	7.676	<0.001***
		<i>pH</i>	0.004	0.002	1.890	0.108	-0.020	0.002	-9.449	<0.001***
	SS	<i>Intercept</i>	3.560	0.001	5910.295	<0.001***	-	-	-	-
		<i>Temp</i>	0.000	0.000	-3.037	0.023*	-	-	-	-
		<i>DC</i>	0.000	0.000	3.466	0.013*	-	-	-	-
		<i>pH</i>	-0.001	0.000	-2.960	0.025*	-	-	-	-
	TS	<i>Intercept</i>	2.707	0.025	108.197	<0.001***	2.389	0.631	3.785	0.009**
		<i>Temp</i>	0.018	0.006	3.032	0.023*	0.009	0.146	0.064	0.951
		<i>DC</i>	-0.003	0.005	-0.492	0.640	-0.025	0.138	-0.181	0.862
		<i>pH</i>	-0.007	0.008	-0.849	0.428	0.141	0.206	0.685	0.519
Woncheon Stream	IS	<i>Intercept</i>	3.291	0.019	176.190	<0.001***	2.949	0.021	141.643	<0.001***
		<i>Temp</i>	-0.015	0.003	-4.921	<0.001***	0.004	0.003	1.092	0.296
		<i>DC</i>	-0.001	0.001	-0.772	0.455	0.018	0.001	13.638	<0.001***
		<i>pH</i>	0.000	0.003	0.035	0.972	0.063	0.004	17.105	<0.001***
	SS	<i>Intercept</i>	3.542	0.012	293.043	<0.001***	2.579	0.040	64.334	<0.001***
		<i>Temp</i>	0.002	0.002	1.213	0.249	0.019	0.007	2.849	0.015*
		<i>DC</i>	0.001	0.001	0.730	0.480	0.004	0.003	1.658	0.123
		<i>pH</i>	0.001	0.002	0.518	0.614	0.013	0.007	1.786	0.099
	TS	<i>Intercept</i>	2.685	0.049	55.091	<0.001***	3.132	0.391	8.001	<0.001***
		<i>Temp</i>	0.015	0.008	1.912	0.080	0.065	0.064	1.006	0.334
		<i>DC</i>	0.000	0.003	0.109	0.915	-0.070	0.025	-2.850	0.015*
		<i>pH</i>	0.000	0.009	-0.029	0.977	-0.121	0.069	-1.746	0.106
Woncheon Lake	IS	<i>Intercept</i>	3.225	0.015	213.861	<0.001***	-	-	-	-
		<i>Temp</i>	-0.002	0.001	-1.332	0.207	-	-	-	-
		<i>DC</i>	0.000	0.001	-0.522	0.611	-	-	-	-
		<i>pH</i>	0.003	0.005	0.479	0.640	-	-	-	-
	SS	<i>Intercept</i>	3.554	0.008	457.145	<0.001***	3.010	0.050	59.971	<0.001***
		<i>Temp</i>	0.000	0.001	-0.068	0.947	-0.055	0.004	-13.956	<0.001***
		<i>DC</i>	0.000	0.000	-0.634	0.538	0.007	0.003	2.222	0.046*
		<i>pH</i>	0.002	0.003	0.615	0.550	-0.026	0.018	-1.503	0.159
	TS	<i>Intercept</i>	2.321	0.174	13.344	<0.001***	1.365	1.479	0.923	0.374
		<i>Temp</i>	0.022	0.014	1.604	0.135	0.194	0.116	1.669	0.121
		<i>DC</i>	-0.015	0.010	-1.447	0.174	0.070	0.089	0.791	0.444
		<i>pH</i>	0.124	0.061	2.034	0.065	0.117	0.519	0.225	0.825

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$

물질을 통하여 생물종을 조사하는 방법으로 생물종 분포와 다양성 분석 목적으로 여러 담수생태계 유형에 적용되고 있다. 따라서 도시 내 수환경 별 모니터링 및 관리를 위해 조사 시기에 따라 수환경 별 종 분포 및 서식환경을 파악하는 것이 필요하다. 본 연구는 도시 내 위치한 수

환경에 환경 DNA를 적용하여 조사 시기에 따른 종 차이와 서식환경 요소와의 관계를 살펴보고자 하였다.

전체적으로 5월 산란기 때 환경 DNA 총 리드 수 비율이 6,254,000으로 10월보다 2배 이상으로 높게 나타났다. 이는 산란기인 시기에 어

류 활동량이 증가하여 환경 DNA 검출을 또한 높게 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 조사 시기에 따라 수환경에 대한 내성 특성별 총 리드 수 비율의 차이가 존재하였다. 산란기인 5월에 유속이 느리거나 정체된 곳인 호수를 중심으로 내성종의 총 리드수 비율이 높게 나타났다(Byeon, 2015). 내성종에 해당하는 주요 출현종은 참붕어(*P.parva*)와 떡붕어였다(*C.cuvieri*). 10월달에는 하천을 중심으로 내성종이 높게 나타났으며 주요 출현종은 피라미(*Z.platypus*)와 갈문망둑(*R.giurinus*)이었다. 그러나 조사 시기에 따라 수환경에 대한 내성종의 총 리드 수 비율은 서식환경 인자에 큰 영향을 받지 않았다. 따라서 서식환경 인자 이외에도 수심, 주변 식생, 섭식 영향 등의 요소들을 추가적으로 고려해야 할 필요가 있다. 반면에 중간종과 민감종은 유속이 빠른 하천을 중심으로 총 리드 수 비율이 높았으며, 주요 출현종은 얼룩동사리와 줄몰개였다. 이들 종의 환경 DNA 검출률은 산란기인 5월의 낮은 온도와, 산란기 이후인 10월의 높은 용존 산소량과 관련이 있었다(May : $20.7 \pm 2.6^\circ\text{C}$, Oct. : $8.56 \pm 1.73\text{mg/L}$, $p < 0.001$).

본 연구는 환경 DNA 기술을 통해 조사 시기에 따라 수환경에 대한 총 리드 수 비율과 서식환경 인자 간 유의미한 차이가 있는지 밝히고자 하였다. 조사 시기에 따라 수환경별 출현종의 차이는 없었지만, 환경 DNA 총 리드수 비율은 산란기 때 산란기 이후 보다 2배 이상으로 높았다. 또한, 조사 시기에 따라 출현종의 영향을 받는 서식환경 인자와의 유의미한 차이를 확인하였다. 그러나 내성종의 경우, 서식환경 인자와의 관계를 파악하는데에는 한계가 있었다. 내성종은 유기물 오염과 정체수역이 증가할수록 높은 출현율을 나타내는 특성 때문에 수질 오염도를 추정할 수 있는 BOD, COD, TP 등의 환경 인자와 주변 식생, 섭식환경 영향 등의 다양한 요소들에 대한 추가적인 고려도 필요하다(Han et al., 2013). 본 연구는 조사 시기에 따른 종 조사 및

모니터링 방안 제시에 있어 환경 DNA가 향후 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- Aglieri, G. · Baillie, C. · Mariani, S. · Cattano, C. · Calo, A. · Turco, G. · Spatafora, D. · Frianco, A.D. · Lorenzo, M.D. · Guidetti, P. and Milazzo, M. 2020. Environmental DNA effectively captures functional diversity of coastal fish communities. *Molecular Ecology*. 30(13): 3127-3139.
- An KG and Lee DJ. 2018. Ecological Health Assessments, Conservation and Management in Korea Using Fish Multi-Metric. *Korean Journal of Ecological and Environment*. 51(1): 86-95.
- Balashingham, K.D. · Walter, R.P. and Health, D.D. 2017. Residual eDNA detection sensitivity assessed by quantitative real-time PCR in a river ecosystem. *Molecular Ecology Resources*. 17(2017): 523-532.
- Bista, I. · Carvalho, G.R. · Walsh, K. · Seymour, M. · Hajibabaei, M. · Laliils, D. · Christmas, M. and Creer, S. 2017. Annual time-series analysis of aqueous eDNA reveals ecologically relevant dynamics of lake ecosystem biodiversity. *Nature Communications*. 8: 14087.
- Bohmann, K. · Evans, A. · Gilbert, M. T. P. · Carvalho, G. R. · Creer, S. · Knapp, M. · Yu, D. W. and De Bruyn, M. 2014. Environmental DNA for wildlife biology and biodiversity monitoring. *Trends in ecology & evolution*. 29(6): 358-367.
- Byeon HK. 2018. Characteristic of Fish Community in the Stream Flowing into the Han River in Seoul, Korea. 32(3): 261-273.

- Bylemans, J. · Gleeson, D.M. · Duncan, R.P. · Hardy, C.M. and Fulan, E.M. 2019. A performance evaluation of targeted eDNA and eDNA metabarcoding analyses for freshwater fishes. *Environmental DNA*. 1(4): 402-414.
- Carraro, L. · Hartikainen, H. · Jokela, J. · Bertuzzo, E. and Rinaldo, A. 2018. Estimating species distribution and abundance in river networks using environmental DNA. *Biological Sciences*. 115(46): 11724-11729.
- Choi JK · Byeon HK · Kwon YS · Park YK. 2008. Spatial and Temporal Changes of Fish Community in the Cheonggye Stream after the Rehabilitation Project. *Korean Journal of Ecology and Environment*. 3(41): 374-381.
- Eichmiller, J.J. · Bajer, P.G. and Sorensen, P.W. 2014. The Relationship between the Distribution of Common Carp and Their Environmental DNA in a Small Lake. *PLoS ONE*. 9(11): e112611.
- Evans, N.T. · Li, Y. · Renshaw, M.A. · Olds, B. P. · Deiner, K. · Turner, C.R. · Jerde, C.L. · Lodge, D.M. · Lamberti, G.A. and Pfrender, M.E. 2017. Fish community assessment with eDNA metabarcoding: effects of sampling design and bioinformatic filtering. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 74: 1362-1374.
- Ficetola, G. F. · Miaud, C. · Pompanon, F. and Taberlet, P. 2008. Species detection using environmental DNA from water samples. *Biology letters*. 4(4): 423-425.
- Han JH and An GK. 2013. Chemical Water Quality and Fish Community Characteristics in the Mid- to Downstream Reach of Geum River. *Korean Journal of Environmental Biology*. 31(3): 180-188.
- Hayami, K. · Sakata, M.K. · Inagawa, T. · Okitsu, J. · Katano, I. · Doi, H. · Nakai, K. · Ichianagi, H. · Gotoh, R.O. · Miya, M. · Sato, H. · Yamanaka, H. and Minamoto, T. 2020. Effects of sampling seasons and locations on fish environmental DNA metabarcoding in dam reservoirs. *Ecology and Evolution*. 10(12): 5354-5367.
- Hughes, R.M. and Noss, R.F. 1992. Biological Diversity and Biological Integrity: Current Concerns for Lakes and Streams. *Fisher*. 17(3): 11-19.
- Hur JW · In DS · Jang MH · Kang HS and Kang KH. 2011. Assessment of Inhabitation and Species Diversity of Fish to Substrate Size in the Geum River Basin. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 6(2011): 845-856.
- Hur MK · Seo JY and Joo WH. 2012. Community Structure and Species Diversity of Fish across Spatial Scales in the Lower Reach of Seomjin River. *Journal of the Environmental Sciences*. 21(11): 1361-1369.
- Jo, T. · Fukuoka, A. · Uchida, K. · Ushimaru, A. · Minamoto, T. 2020. Multiplex real-time PCR enables the simultaneous detection of environmental DNA from freshwater fishes: a case study of three exotic and three threatened native fishes in Japan. *Biological Invasions*. 22(2020): 455-471.
- Kim GW and Song YG. 2021. Identification of Freshwater Fish Species in Korea Using Environmental DNA Technique - From the Experiment at the Freshwater Fish Ecological Learning Center in Yangpyeong, Gyeonggi Do-. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 30(1): 1-12.

- Kim HM · Kil JH · Lee EH and An KG. 2013. Distribution Characteristic of Largemouth Bass(*Micropterus salmoides*) as an Exotic Species in Some Medium-to-Large Size Korean Reservoirs and Physico-chemical Water Quality in the Habitats. Korean Journal of Ecology and Environment. 46(4): 541-550.
- Kim JH · Yoon JD · Lm RY · Kim GY and Jo HB. 2018. The Analysis of the Fish Assemblage Characteristics by Wetland Type(River and Lake) of National Wetland Classification System of Wetlands in Gyeongsangnam-do. Korean Journal of Ecological and Environment. 51(2): 149-159.
- Kim JH · Jo HB · Jang MH · Woo SH · Cho YH and Yoon JD. 2020. Application of Environmental DNA for Monitoring of Freshwater Fish in Korea. Korean Journal of Ecological and Environment. 53(1): 63-72.
- Koo, M.K · Lucas, F. · Maharaj, L. · Maharaj, S. · Phillip, D. · Rostant, W. and Maharaj, S.S. 2004. WATER RESOURCES AND AQUATIC BIODIVERSITY CONSERVATION: A ROLE FOR ECOLOGICAL ASSESSMENT OF RIVERS IN TRINIDAD AND TOBAGO. In Caribbean Environmental Forum-2.
- Lee SH. 2013. Impact of Werirs on Fish Community in the Jojong Stream. Master Degree dissertation. Seoul National University. (in Korean)
- Lee SH · Jeong HG · Shin HS · Shin YN · Lee SW and Lee JK. 2017. Comparison on Ecological Index Characteristic between Zacco platypus and Zacco koreanus by Stream order in Korea. Korean Journal of Ecological and Environment. 50(4): 403-410.
- Leem YT and Lee JY. 2005. An Estimation of the Value of Urban Ecological Riverside Park. Journal of The Korean Regional Developmet Association. 17(3): 95-110.
- Na HH · Lee SJ and An KG. 2019. The influence of chemical water quality of fish trophic guilds, pollution tolerance, and multi-metric ecological health in the main streams of Mangyeong River. Korean Journal of Environmental Biology. 37(1): 8-18.
- Noh SY · Choi HL · Park JY · Hwang SJ · Kim SH and Lee JA. 2015. Ecological Health Assessment using Fish for the Han River and Nakdong River in Korea. Journal of Korean Society on Water Environment. 31(3): 319-327.
- Park SH · Kim JH · Baek SH · Choi HS · Kim DW · Ko EJ and Kim HW. 2020. Characteristic of Fish Assemblage by Reservoir Size in Youngsan · Seomjin River Waterland in Korea. Korean Journal of Ecological and Environment. 53(3): 229-240.
- Sato, H. · Sogo, Y. · Doi, H. and Yamanaka, H. 2017. Usefulness and limitations of sample pooling for environmental DNA metabarcoding of freshwater fish communities. Scientific Reports. 7: 14860.
- Seo JW · Lim IS · Kim HJ and Lee HG. 2008. Status of Fish Inhabitation and Distribution of Eight Abundant Species in Relation with Water Quality in Streams and Rivers, Ulsan City. Korean Journal of Limnology. 41(3): 283-293.
- Shin JK · Hwang SJ and Cho KJ. 2003. Assessment of Water Quality In Pyeongtaek Reservoir and Its Main Tributaries. Korean Journal of Limnology. 36(1): 38-47.
- Takahara, T. · Minamoto, T. · Yamanaka, H. · Doi, H. and Kawabata, Z. 2012. Estimation

- of Fish Biomass Using Environmental DNA. PLoS ONE. 7(4): e35868.
- Thomas, A.C. · Tank, S. · Nguyen, P.L. · Ponce, J. · Sinnesael and M. · Goldberg, C.S. 2019. A system for rapid eDNA detection of aquatic invasive species. Environmental DNA. 2(3): 261-270.
- Tucker, A.J. · Chadderton, W.L. · Jerde, C.L. · Renshaw, M.A. · Uy, K. · Gantz, C. · Mahon, A.R. · Bowen, A. · Strakosh, T. · Bossenbroek, J.M. · Sieracki, J.L. · Beletsky, D. · Bergner, J. and Lodge, D.M. 2015. A sensitive environmental DNA(eDNA) assay leads to new insights on Ruffe(*Gymnocephalus cernua*) spread in North America. Biological Invasions. 18: 3205-3222.
- Yang HJ · Kim KH and Kum JD. 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.
- Yoon SJ · Choi JK and Lee HG. 2014. Long-Term Variation of the Fish Community in the Upper Region of the Gapyeong Stream, Korea. Korean Journal of Environment and Ecology. 28(4): 432-441.
- Wang, S. · Yan, Z. · Hanfling, B. · Zheng, X. · Wang, P. · Fan, J. and Li, J. 2021. Methodology of fish eDNA and its applications in ecology and environment. Science of the Total Environment. 755(2): 142622.
- Zhang, L. · Yang, J. · Zhang, Y · Shi, J. · Yu, H. and Zhang, X. 2022. eDNA biomonitoring revealed the ecological effects of water diversion projects between Yangtze River and Tai Lake. Water research. 210(2022) : 117994.
- Zou, K. · Chen, J. · Ruan, H. · Li, Z. · Guo, W. · Li, M. and Liu, L. 2020. eDNA metabarcoding as a promising conservation tool for monitoring fish diversity in a coastal wetland of the Pearl River Estuary compared to bottom trawling. Science of the Total Environment. 702(2020): 134704.