

간행물 등록번호
NNIBR-2021-0000249-10

기후위기·환경교란 대응 담수생물다양성 보전전략 마련
(2단계 1차년도)

Freshwater Biodiversity Conservation Strategy in response to
Climate Crisis and Environmental Disturbance

다양성연구팀

국립낙동강생물자원관

기후위기·환경교란 대응 담수생물다양성 보전전략 마련 (2단계 1차년도)

담수생물연구본부 동식물연구실 다양성연구팀

Freshwater Biodiversity Conservation Strategy in response to Climate Crisis and Environmental Disturbance

Biodiversity Research Team
Freshwater Biodiversity Research Bureau
Nakdonggang National Institute of Biological Resources

[참여 연구진 및 담당 업무]

구분	소속	직급	성명(영문)	담당업무
연구 책임자	다양성연구팀	선임급	배미정 (Mi-Jung Bae)	- 사업 총괄 - 국내외 생물다양성 평가기법 적합성 검토 - 담수생물·서식지 모델링 분석 - 저서성대형무척추동물 다양성 집중조사 및 분석 - 담수생물 생육정보 확보(2종) - 낙동강 생물길5 제작(저서성대형무척추동물 원고 작성, 화상자료 확보) - SCI(E)논문 1편, 국내논문 1편, 보도자료 1건 - 담수생물 표본 확보(920점)
내부 참여연구원	다양성연구팀	선임급 (팀장)	유정남 (Jeong-Nam Yu)	- 대외 업무 지원
	다양성연구팀	선임급	김선유 (Sun-Yu Kim)	- 낙동강 생물길5 제작 총괄 - 담수식물 표본 확보(1,000점) - 담수서식지 평가 지원(식물) - 보도자료 1건
	다양성연구팀	전임급	이치우 (Chi-Woo Lee)	- 담수생물 다양성 조사 및 분석 - 담수생물 생육정보 확보(2종) - 낙동강 생물길5 제작(하천소개자료 작성 및 화상자료 확보) - 국내논문 1편 - 담수생물 표본 확보(500점)
	다양성연구팀	전임급	이승현 (Seunghyun Lee)	- 담수어류 다양성 조사 및 분석 - 담수어류 다양성 평가기법 사례 조사
	조류연구팀	전임급	윤석민 (Seukmin Yoon)	- 부착돌말류다양성 조사 및 평가
	조류연구팀	전임급	권대률 (Daeryul Kwon)	- 부착돌말류다양성 조사 및 평가
	원핵생물연구팀	선임급	한지혜 (Ji-Hye Han)	- 담수생물종 생육정보 확보
	다양성연구팀	공무직	함성남 (Seung-nam Ham)	- 담수생물다양성 집중조사 지원 - 낙동강 생물길5 제작 지원 - 담수생물 표본 제작 지원
	다양성연구팀	기간제	김소은 (So-En Kim)	- 담수생물 개체분리 및 담수생물 표본 제작 지원
	다양성연구팀	기간제	유소라 (So-Ra Yoo)	- 담수생물 개체분리 및 담수생물 표본 제작 지원
외부 참여연구원	(주)한반도생태 연구소	소장	오현경 (Hyun-Kyung Oh)	- 수변·수생식물 조사 및 평가 - 담수식물 표본 확보(50점)
	(주)한반도생태 연구소	연구원	김은옥 (Eun Ok Kim)	- 수변·수생식물 조사 및 분석
	(주)에코플렉스	전문위원	전영철 (Young-Chul Jun)	- 저서성대형무척추동물 조사 및 분석 - 저서성대형무척추동물 표본 확보(300점)
	안동대학교	박사과정	한승철 (Seungchul Han)	- 저서성대형무척추동물 조사 및 분석
	연구협동조합 이엔이	대표	이흥헌 (Heung Heon Lee)	- 담수어류 다양성 조사 및 분석
	연구협동조합 이엔이	연구원	설미라 (Mi Ra Sul)	- 담수어류 다양성 조사 및 분석

목 차

목차.....	i
초록.....	iv
I. 서론.....	1
II. 연구방법.....	2
1. 담수 현안 문제 해결을 위한 담수생물·서식지 분석.....	2
2. 담수생물종 보전·복원 방향 설정을 위한 생육정보 확보.....	4
3. 담수생물다양성 평가·관리 체계 마련을 위한 모델링 연구.....	4
가. RIVPACS-type predictive models.....	4
나. 베타생물다양성(Beta diversity) 기반 생물다양성 평가.....	6
다. 담수생물 네트워크 평가.....	6
라. 생물학적 특성(Biological Trait: BT) 평가를 위한 DB 구축.....	6
III. 결과 및 고찰.....	7
1. 담수 현안 문제 해결을 위한 담수생물·서식지 분석.....	7
가. 황지천의 담수생물다양성 조사 및 분석.....	7
나. 북천의 담수생물다양성 조사 및 분석.....	8
다. 반변천 유역의 담수생물다양성 조사 및 분석.....	10
2. 담수생물종 보전·복원 방향 설정을 위한 생육정보 확보.....	12
가. 문헌조사·현장조사를 통한 담수생물종의 분포 범위 예측.....	12
3. 담수생물다양성 평가·관리 체계 마련을 위한 모델링 연구.....	13
가. (전국·권역·지역 단위 평가) RIVPACS-type predictive models.....	13
나. 베타생물다양성(Beta diversity) 기반 생물다양성 평가.....	15
다. 담수생물 네트워크 평가.....	16
라. 기능적 다양성 평가를 위한 생물학적 특성(Biological Trait: BT) DB 구축.....	18
마. 기능적 다양성 정보 포함 담수생물 네트워크 평가.....	21
IV. 결론.....	24
V. 연구결과 활용 방안.....	26
VI. 참고문헌.....	27
VII. 부록.....	31

표 목차

표 1. 낙동강 권역 집중조사 지점 조사 항목	2
표 2. 담수생물·서식지 분석을 위한 담수생물다양성 집중조사 지점	2
표 3. 분류군별 조사 및 분석 방법	3
표 4. 국내 미적용 평가법의 시범 적용 지역	6
표 5. 강도래류 11종의 서식가능한 온도 범위(연평균 기온 기준)	12
표 6. RIVPACS-type predictive model 주요 변경 내용	14
표 7. RIVPACS-type 기반 예측 결과	15
표 8. 하천별 주요 특징	17
표 9. 네트워크 분석을 통한 참조하천과 폐석탄광산 인근하천간의 복잡성 비교	18
표 10. 생물학적 특성 목록	19
표 11. 국내 미적용 생물다양성 평가법 비교	23

그림 목차

그림 1. 강도래목 생존 가능범위 분석에 이용된 조사지점	4
그림 2. RIVPACS-type predictive model 분석 절차도	5
그림 3. 황지천의 서식환경 및 조사지점별 담수생물다양성 변화	7
그림 4. 황지천의 갯내수 처리시설 및 특이사항	8
그림 5. 북천의 기초 환경 및 담수생물 종수·개체수 변화	9
그림 6. 반변천의 기초 환경 및 담수생물 종수·개체수 변화	11
그림 7. 저서성대형무척추동물의 생존 가능 온도 범위 예측(강도래류)	13
그림 8. RIVPACS-type predictive model 시범 적용 결과	15
그림 9. 베타생물다양성 평가 시범 적용 결과	15
그림 10. 네트워크 분석 및 자기조직화 맵 시범 적용	18
그림 11. 강도래목의 생물학적 특성 DB 구축(예시)	20
그림 12. 조사지점별 담수생물 네트워크 분석 예시(대상하천: 황지천)	21

초 록

본 연구는 기후위기·환경교란에 가장 민감한 담수서식지에 대한 선제적인 담수생물다양성 보전·관리 전략을 마련하고, 소하천·지류·지천을 포함하여 담수생물다양성을 통합적으로 평가·예측할 수 있는 기술을 개발하는 것을 목적으로 세 개의 과제가 수행되었다. 첫째, 담수 현안 문제 해결을 위한 담수생물·서식지 분석에서는 낙동강의 발원지이자 폐석탄광산 인근하천인 황지천, 하천 상류에는 하천정비공사가 수행되고 있으며 하류 구간에는 생태공원이 조성되어 있는 북천, 상습 범람 지역에 포함되어 기후변화에 따른 홍수 피해 발생이 증가될 것으로 예상되는 반변천을 대상으로 수변·수생식물, 담수어류, 저서성대형무척추동물, 부착돌말류(미세조류) 및 서식 환경을 조사하였다. 분석 결과 황지천은 하류 구간에 멸종위기야생생물 2종(얼룩새코미꾸리, 열목어)의 서식이 확인되었으며 적화현상 관찰 구간인 H2~H4 지점에서 저서성대형무척추동물의 종수 및 개체수가 감소하다가 H5지점부터 증가하는 것을 확인하였다. 북천의 경우 담수어류, 부착돌말류는 하류로 갈수록 증가한 반면 저서성대형무척추동물의 경우 BC5지점에서 붉은색 깔따구류의 높은 밀도가 확인되었다. 또한, 인위적으로 여울이 조성되어 있는 일부 구간에서만 줄날도래류, 납작하루살이류와 같은 유수성종의 제한적 분포가 확인되었다. 반변천의 경우 멸종위기야생생물인 얼룩새코미꾸리 1종의 출현이 확인되었으며, 임하호 유입 구간을 제외하고 담수어류, 부착돌말류는 하류로 갈수록 저서성대형무척추동물은 상류방향으로 갈수록 높은 종다양성을 보였다.

둘째, 담수생물 생존 범위 분석에서는 기후변화에 민감한 강도래목을 대상으로 기존에 수행된 강도래목 분포 자료를 정리하고 optimum-tolerance 분석을 이용하여 서식 가능 온도 범위를 산출하였다. 전국 대상 약 700개의 지점에서 강도래목의 위치정보와 개체수 정보를 확보하였으며, 분석 결과 큰등그물강도래KUa, 한국강도래는 선호서식지의 온도가 각각 6.05 ~ 7.90 °C, 6.40 ~ 8.40 °C로 다른 강도래류에 비해 낮은 온도 범위에서 서식하는 것이 확인되어 기후변화에 따른 수온 상승에 취약할 것으로 여겨진다.

셋째, 담수생물다양성 평가·관리 체계 마련을 위한 모델링 연구에서는 국내 적용되지 않은 다양한 담수생물다양성 평가법에 대한 적용가능성을 검토하고 기 조사된 자료를 이용하여 시범 적용하였다. 분석 결과 RIVPACS-type predictive model의 경우 예측에 이용되는 참조하천에 대한 기준 확립과 충분한 수의 참조하천 정보가 확보된다면 모델의 예측력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또한 저서성대형무척추동물 이외에 다양한 분류군으로 확대 적용이 가능하여 추후 통합된 평가가 가능하다는 장점을 가지고 있었다. 베타생물다양성(Beta diversity) 평가의 경우 분류군과 관계없이 출현종 정보만 있으면 적용이 가능한 장점을 가지고 있으며 특정 유역에 대한 베타생물다양성의 지속적인 평가는 유역·지역별로 기후변화 또는 환경교란에 대한 추적이 가능하며, 유역·지역 단위의 생물다양성 관리가 가능하다는 잠재성을 가지고 있었다. 담수생물 네트워크 분석의 경우 분석하고자 하는 대상지역에 대한 충분한 수의 조사 지점만 확보된다면 구조적·기능적 다양성을 모두 고려할 수 있는 특징을 가지므로 담수생물다양성을 종합적으로 평가할 수 있는 장점을 가지고 있다. 마지막으로 생물학적 특성(Biological trait) 기반 기능적 다양성 평가는 국내·외에 혼재 되어 있는 생물학적 특성에 대한 DB구축만 완료 되면 기존에 수행된 종수, 개체수 기반의 구조적 다양성 평가를 보완해 줄 수 있는 평가가 가능할 것으로 여겨진다.

I. 서론

기온 증가, 강수량, 강수 빈도 변화 등에 따른 생물종의 분포, 생물계절 등 생물다양성 전반에 걸쳐 변화 관측되고 있다(환경부, 2020). 지난 106년간(1912~2017) 동안 우리나라의 연평균기온은 두 배 이상 증가(전지구 평균 기온: 0.85℃, 우리나라 평균 기온: 1.8℃)하였으며, 여름철 강수량 또한 뚜렷한 증가 경향을 보였다(+11.6mm/10년)(기상청, 2020). 또한 여름철 집중호우 및 태풍의 빈도가 증가하고 있으며 가뭄이 심화되고, 이러한 현상은 지역별 편차가 점차 증가하고 있다. 우리나라 전국 집중호우 횟수는 1980년대 60회/년에서 2011년에 133회/년으로 증가하였으며 한반도 주변 태풍 빈도와 강도 모두 증가('77-'94: 73.9m/s, 22회 → '95-'12: 76.0m/s, 26회) 추세에 있다(국토교통부, 2016). 이로 인해 육상 또는 해양생물의 군집구조 변화, 식물의 생육개시일, 생물의 분포 경계 변화 등이 예상되고 있으나, 담수서식지·생물다양성과 관련하여 밝혀진 내용은 극히 제한적이다.

이와 더불어, 휴·폐탄광, 중·횡적 연결성 훼손 등 담수생물다양성을 위협하는 다양한 현안 문제들이 지속적으로 발생함에 따라 담수 환경과 담수서식지에 대한 개선 요구가 증대되고 있다. 자연성이 높은 산림(산림면적: '81년 8,568천 ha → '15년 6,335천 ha), 습지(내륙습지: '03년 5,076 km² → '17년 735 km²) 등이 지속적으로 감소하고 있으며 전국토 면적 대비 도시비율이 점차 확대될 것으로 예상되고 있다(충청남도, 2019). 또한, 농업용 보 등 횡단구조물로 인해 담수생물의 이동이 제한되고, 퇴적물이 증가하는 등 담수생물의 서식조건이 지속적으로 악화되고 있다(국토교통부, 2019). 이로 인해 2050년 전세계 평균 중 풍부도는 2010년 대비 10% 감소할 전망이다, 한국과 일본의 경우 36%나 감소할 것으로 전망하고 있다(제3차 자연환경보전 기본계획, '16~'25).

담수서식지 중 소하천·지류·지천은 전 세계 하천의 89% 이상을 차지하며(Allen et al., 2018), 국민의 일상적인 활동과 휴식이 이루어지는 공간으로 이곳에서 발생하는 수질 및 생물다양성 손실은 본류까지 영향을 끼칠 수 있다. 또한 기후변화로 인해 소하천 41%에서 물이 흐르는 날(flowing frequency)의 감소가 확인되었으며 증가구간은 한 곳도 없어 생물다양성 유지를 위해 소하천·지류·지천을 포함한 담수서식지의 지속적인 조사·관리가 필요하다(Ward et al., 2020).

이에 본 연구는 소하천~대하천에 이르는 현장중심 연구를 통해 담수생물다양성·서식지의 보전·복원에 활용될 과학적 근거 자료를 구축하고, 담수생물다양성을 객관적이고 정량적으로 판단하기 위한 평가체계를 마련하기 위해 다음과 같은 세 개의 과제를 구성하고 운영하였다. 첫째, 담수 현안 문제 해결을 위한 담수생물·서식지 분석에서는 폐석탄광산, 하천정비공사, 기후변화 취약 지역 등 인위적 교란이 예상되는 하천에서 담수생물다양성과 서식환경을 분석하고자 하였다. 둘째, 담수생물종 보전·복원 방향 설정을 위한 생육정보 확보 연구에서는 기후변화에 민감한 강도래목을 대상으로 서식 가능 범위를 파악하고자 하였다. 셋째, 담수생물다양성 평가·관리 체계 마련을 위한 모델링 연구에서는 국내에 아직 도입되지 않은 담수생물다양성 평가기법에 대한 적용가능성을 검토하였다.

II. 연구방법

1. 담수 현안 문제 해결을 위한 담수생물·서식지 분석

본 연구에서는 총 3개 하천, 28개 지점에서 담수생물 및 서식환경을 분석하였다(표 1, 2). 황지천은 낙동강 발원지이며 폐석탄광산 인근에 위치한 하천으로 지난 2019년 갯내 유출수 처리시설이 완공되어 담수생물다양성이 회복되는지 장기모니터링을 통해 지속적인 점검이 필요한 지역이다. 북천의 경우 상류구간(BC2)에는 하천정비공사가 진행되었으며, 하류구간에는 생태공원(BC5~6)이 조성되어 있다. 또한, 오는 2022년부터 하류구간(BC5~6)에 하천재해 예방사업이 예정되어 있어 담수생물다양성에 미치는 영향 평가가 필요한 하천이다. 마지막으로 반변천은 상습하천 범람 지역에 포함되어 기후변화에 따른 홍수 피해 발생이 증가될 것으로 예상되는 하천으로 장기모니터링을 통한 홍수나 건천화에 따른 생물다양성 변화방향을 예측하고 이에 맞는 관리전략 수립을 위해 담수생물다양성의 조사가 필요한 하천이다.

표 1. 낙동강 권역 집중조사 지점 조사 항목

하천	조사시기	지점 (수)	조사분류군	환경인자(공통)	조사하천특성	최종 목적
황지천	2017~	8	① 담수어류 ② 저서성대형 무척추동물 ③ 수변·수생식물 ④ 미세조류	지리지형학적요인(위·경도, 고도, 하천차수, 발원지로부터의 거리, 경사도), 토지이용도(도심지, 농경지, 나지, 습지, 산림), 하상구성(호박돌, 자갈 등 비율), 유량(수심, 유속), 수질(수온, 용존산소, 전기전도도, pH, 탁도, TN, TP, PO4, NO3-N, NH4-N, BOD)	낙동강 발원지, 2019년 갯내수 처리시설 완공(H2인근)	황지천 생물다양성 관리 가이드라인 구축
북천	2017, 2020~	6			하천정비공사 (BC2) 생태공원조성 (BC5~6)	생물다양성 회복 확인
반변천	2021~	14			기후변화에 따른 홍수 피해 발생 증가 예상 하천 ※ 상습 하천 범람 지역 포함	장기모니터링을 통한 홍수건천화에 따른 생물다양성 변화방향 예측

표 2. 담수생물·서식지 분석을 위한 담수생물다양성 집중조사 지점

연번	유역	지점	세부 주소
1	황지천	NHJ001	강원도 태백시 화전동 323-1
2		NHJ002	강원 태백시 화전동 323-7
3		NHJ003	강원 태백시 화전동 산 47-106
4		NHJ004	강원도 태백시 태백로 576
5		NHJ005	강원 태백시 황지동 621
6		NHJ006	강원 태백시 황지동 164-58
7		NHJ007	강원도 태백시 장성동 110-1
8		NHJ008	경북 봉화군 석포면 석포리 665
9	반변천	NBB001	경북 영양군 일월면 용화리 315-13

10		NBB002	경북 영양군 일월면 용화리 별매교
11		NBB003	경북 영양군 일월면 문암리 홈거리교
12		NBB004	경북 영양군 일월면 칠성리 올평교
13		NBB006	경북 영양군 일월면 섬촌리 섬촌교
14		NBB007	경북 영양군 영양읍 현리 양평교
15		NBB008	경북 영양군 입암면 신사리 청암교
16		NBB009	경북 영양군 입암면 흥구리 514-2
17		NBB010	경북 청송군 진보면 광덕리 광덕교
18		NBB011	경북 청송군 진보면 후평리 진보교
19		NBB012	경북 안동시 임하면 임하리 임하대교
20		NBB013	경북 안동시 남선면 이천리 포진교
21	낙동강	NBB014	경북 안동시 풍산읍 마애리 풍남교
22		NBB015	경북 안동시 풍천면 도양리 광덕교
23	북천	NBC001	경북 상주시 모서면 대포리 724-1
24		NBC002	경북 상주시 내서면 노류리 세월교
25		NBC003	경북 상주시 내서면 평지리 갈방교
26		NBC004	경북 상주시 내서면 능암리 능암교
27		NBC005	경북 상주시 만산동 후천교
28		NBC006	경북 상주시 냉림동 계룡교

※ 조사지점은 하천 길이, 교란정도에 따라 상이하게 선정

현장 조사는 집중호우, 여름 장마, 태풍 등의 영향을 최소화하기 위해 봄과 가을에 수행하였으며, 집중호우 기간에는 집중호우 발생 최소 10일 이후에 조사를 수행하였다. 하천내 생물다양성 및 환경인자 조사항목은 <표 3>과 같다.

표 3. 분류군별 조사 및 분석 방법

분류군	조사방법	분석방법
담수어류	[채집도구] - 족대(4×4 mm, 30분) 투망(6×6 mm, 10회)	[생물지수] - 우점도지수(Dominance Index, DI) - Shannon 종다양도지수(Shannon Diversity Index, H') - 종풍부도지수(Richness Index, RI) - 균등도지수(Evenness Index, EI)
저서성대형 무척추동물	[조사지점] - (황지천) 여울, 흐름, 소, 수변을 포함하여 미소서식지별 3반복 조사 - (북천, 반변천) 여울 3반복 조사 [채집도구] - Surber net (30*30cm, 0.25μm)	[생물지수] - 우점도지수(Dominance Index, DI) - Shannon 종다양도지수(Shannon Diversity Index, H') - 종풍부도지수(Richness Index, RI) - 균등도지수(Evenness Index, EI)

수변·수생 식물	[식물상 조사구간] - 조사정점 중심 100~400m 구간에서 발견되는 식물 [식생 조사구간] - 0.5~1km, 제외지의 재방사 사이 하천 안쪽 무인항공기(DJI Phantom 4 Pro) 활용 조사	[주요 출현종 현황] - 멸종위기야생생물자원, 한국의 고유생물, 국외반출 승인대상 생물자원, 구계학적특정식물, 생태계 교란종 등 [생물지수] - 도시화 지수, 귀화율, 조사지점별 식생비율
부착돌말류	- 지점별 대표 장소 선정(예, 여울 지역) 후 지점당 최소 3개 정점에서 채집 후 분석	[생물지수] - 우점도지수(Dominance Index, DI) - Shannon 종다양도지수(Shannon Diversity Index, H') - 종풍부도지수(Richness Index, RI) - 균등도지수(Evenness Index, EI)
미세조류	- plankton net (100um)를 이용한 지점별 20m netting(약 1.4톤 농축)	[생물지수] - 총 종수, 개체수 등

2. 담수생물종 보전·복원 방향 설정을 위한 생육정보 확보

강도래목 유충들은 대부분 수온이 낮은 산간계류, 계곡에서 주로 서식하기 때문에 기후변화로 인한 소하천의 건천화, 환경교란 등은 이들의 서식에 직접적인 영향을 끼칠 것이다(De Figueroa et al., 2010). 이에, 강도래목 유충들의 온도에 따른 서식 가능 범위를 파악하고자 하였다. 이를 위해, 생물측정망에 공개된 자료, 기존에 수행된 현장조사 자료를 기반으로 총 700개 지점에서 환경변화에 민감한 생물군 중 하나인 강도래목에 속하는 종들의 위치와 개체수의 DB를 구축한 뒤(그림 1), optimum-tolerance 분석을 이용하여 종별 생존가능범위를 산출하였다. 구축된 DB에 포함된 종수는 총 33종이었으나 optimum-tolerance 모델의 정확도 향상을 위해 출현율이 전체 조사지점 수 대비 최소 5%이상인 종을 선별(11종)* 하여 분석을 진행하였다.



* 분석대상종: 총채민강도래, 총채민강도래KUa, 민강도래KUa, 민강도래KUb, 꼬마강도래, 한국큰등그물강도래, 큰등그물강도래KUa, 한국강도래, 두눈강도래, 진강도래, 녹색강도래

그림 1. 강도래목 생존 가능범위 분석에 이용된 조사지점

3. 담수생물다양성 평가·관리 체계 마련을 위한 모델링 연구

가. RIVPACS-type predictive models

River In-Vertebrate Prediction And Classification System (RIVPACS)은 1997년 영국에서 개발된 모델로 참조하천의 환경 인자와 저서성대형무척추동물 군집자료를 이용하여 예측 모델을 구축한 뒤 조사한 지역의 현재상태가 참조하천의 저서성대형무척추동물 다양성(지수)과 얼마나 차이가 나는지를 비교하는 방법이다(Clarke et al., 2003). 이미 여러 국가(캐나다: Canadian aquatic biomonitoring network (CABIN, Reynoldson et al. 2012), 오스트리아: Australian River Assessment System (AUSRIVAS, Parsons et al. 2002), 스페인: MEDiterranean Prediction And Classification System (MEDPACS, Poquet et al. 2009) 등)에서 RIVPACS의 개념을 기반으로 각 국가의 담수생물다양성 및 서식환경 상황에 맞게 RIVPACS-type predictive model을 개발하여 담수서식지의 복원이 필요한 지역을 목록화 및 관리하고 있다. 본 연구에서는 국내 실정에 맞는 RIVPACS-type predictive model의 분석 절차를 수립하고 우리나라에서의 적용가능성을 검토하였다. 시범 대상 지역으로 본류의 길이가 가장 길며 다양한 교란 요인들을 포함하고 있는 낙동강 권역을 선정하였으며, 저서성대형무척추동물 자료 확보를 위해 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>; 접근일: 2021.03.03.)에 공개된 2016년에서 2019년까지 조사하여 공개된 생물측정망 자료를 정리하였다(표 4). RIVPACS-type predictive model 개발을 위한 참조하천의 선정은 ‘수생태계 참조하천 선정 및 활용방안 연구’(환경부, 2017)와 생물측정망에 공개된 수생태계 건강성 지수 등을 고려하여 선정하였다. 자세한 분석 절차는 <그림 2>와 같다.

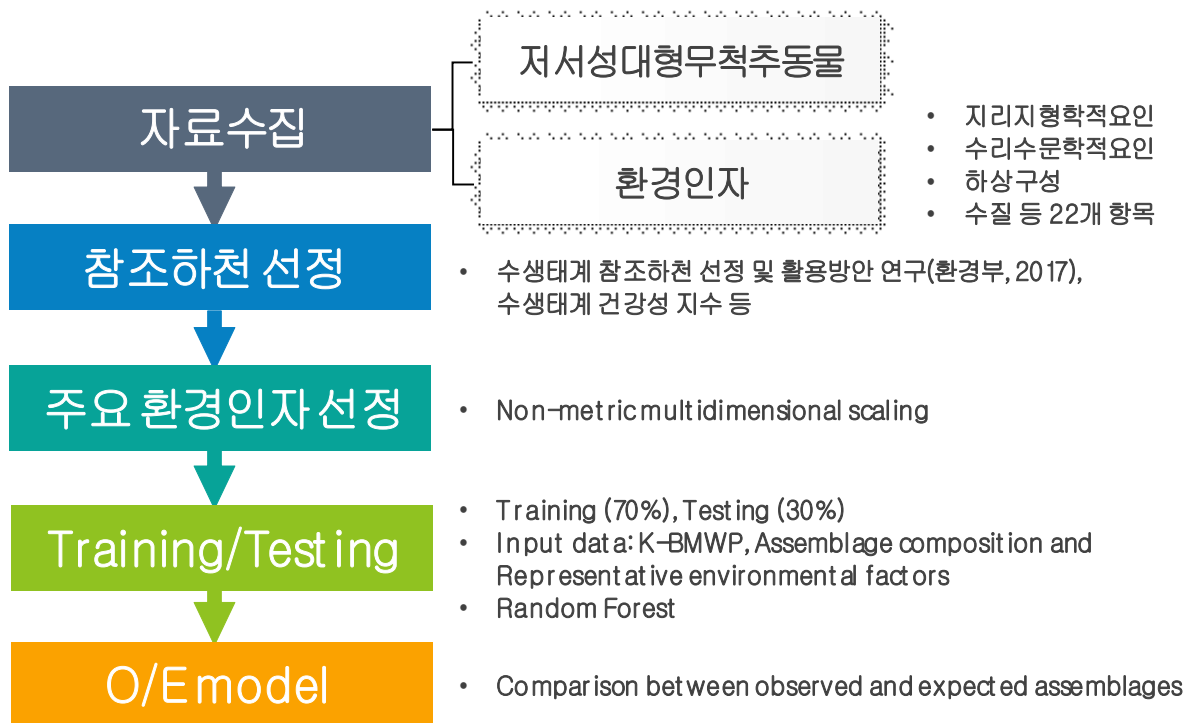


그림 2. RIVPACS-type predictive model 분석 절차도

표 4. 국내 미적용 평가법의 시범 적용 지역

대상지역	RIVPACS-type predictive model	베타생물다양성 평가	네트워크 분석	생물학적 특성 기반 기능적 다양성
시범 적용 지역	권역 낙동강	중권역 금호강, 감천 등 8개	하천/조사지점 황지천, 철암천, 송정리천	하천 황지천

나. 베타생물다양성(Beta diversity) 기반 생물다양성 평가

베타생물다양성은 유역, 권역 또는 지역 단위에서 생물다양성을 평가하는 방법으로 해당 유역에 대한 하나의 생물다양성 지수 값이 산출된다(Legendre and Cáceres, 2013). 또한 유역 내 어떠한 지점 또는 생물종이 해당 유역의 생물다양성을 유지하는데 중요하게 작용하는지를 분석하는 방법이다(Heino and Grönroos, 2017). 본 연구에서는 낙동강 권역내 기존에 수행된 중권역 단위의 저서성대형무척추동물 군집 및 서식환경 자료를 수집 및 정제한 뒤 중권역별 베타생물다양성 지수를 산출하고 앞으로의 적용범위에 대해 검토하였다.

다. 담수생물 네트워크 평가

담수생물의 네트워크 평가법은 생물종과 생물종사이의 상호관계를 기반으로 특정 생물군집의 복잡성(complexity)을 계산할 수 있는 평가법이다(Berry and Widder, 2014). 네트워크 평가법은 종들을 분리해서 분석하는 기존의 방법들과 비교시 과거에 발견되지 않았던 다양한 생물간 관계들에 대해 이해할 수 있는 장점을 가지고 있다(Bluthgen, 2010). 이미 여러 연구에서 네트워크 평가를 통해 기후의 영향(Araujo et al., 2011), 핵심종 탐색(Berry and Widder, 2014), 건천화에 따른 군집의 안정성 평가(de Vries et al., 2018), 집중호우에 따른 하천 유형별 저서성대형무척추동물의 군집 복잡도(Bae et al., 2020) 등 다양하게 활용되고 있다. 본 연구에서는 하천 또는 지역 단위로 수행된 저서성대형무척추동물 군집과 서식 환경 자료를 수집 및 정제하여 네트워크 분석을 통한 교란 유형별 군집 복잡성을 비교하고자 하였다. 대상하천은 비교적 자연성이 잘 유지되고 있는 송정리천과 폐석탄광산 인근에 위치하고 있는 황지천과 철암천으로 선정하여 분석하였다.

라. 생물학적 특성(Biological Trait: BT) 평가를 위한 DB 구축

생태계는 구조적·기능적 다양성으로 이루어져 있으나 현재까지 종수, 개체수 등이 고려된 구조적 측면에 대한 이해만 강조되어 왔다(Schmera et al., 2017). 기능적 다양성은 종별 또는 개체단위의 생활사, 서식습성, 유영능력 등 다양한 인자들이 고려된 평가법으로 구조적 다양성만 고려했을 때 발견할 수 없는 서식 환경 교란, 담수서식지의 상태, 생물 군집의 교란에 대한 저항능력이나 회복력 등을 제시할 수 있다(Ilg and Castella, 2006). 이러한 기능적 다양성을 산출하기 위해서는 생물종별 생물학적 특성(Biological Trait)에 대한 DB 구축이 가장 먼저 이루어져야 한다. 이를 위해 미국(US EPA), 유럽(<https://www.freshwaterecology.info/>) 등 기 구축

된 생물학적 특성 정보를 확보하여 기능적 다양성 평가에 적합한 항목들을 선정하고 문헌 조사를 통한 국내 종에 대한 기능정보를 DB화하고자 하였다. 올해는 다양한 담수생물 중 기후변화에 민감하며, 청정한 서식환경을 대변하는 생물군인 강도래목을 대상으로 생물학적 특성 평가를 위한 DB를 구축하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. 담수 현안 문제 해결을 위한 담수생물·서식지 분석

가. 황지천의 담수생물다양성 조사 및 분석

산림이 44.4%~99.4%로 높은 비율을 차지하고 있으며 호박돌 이상의 하상구성이 70~80%를 차지하는 등 전형적인 산지형 하천의 특징을 가지고 있다(그림 3). 황지천 상류구간인 H2 인근에는 갯내 유출수를 청정지역 기준에 맞게 정화하여 광산지역의 수환경을 개선하고자 고효율의 폐탄광 유출수 처리시설(사업면적: 17,859 m²; 시설규모: 3,000 m³/일)이 지난 2015년 12월 공사를 시작하여 2019년 6월에 완공되었다(그림 4). 현재 폐석탄광산의 영향으로 조사지점 H2~H4까지 하천 바닥에 적화현상이 관찰된다.

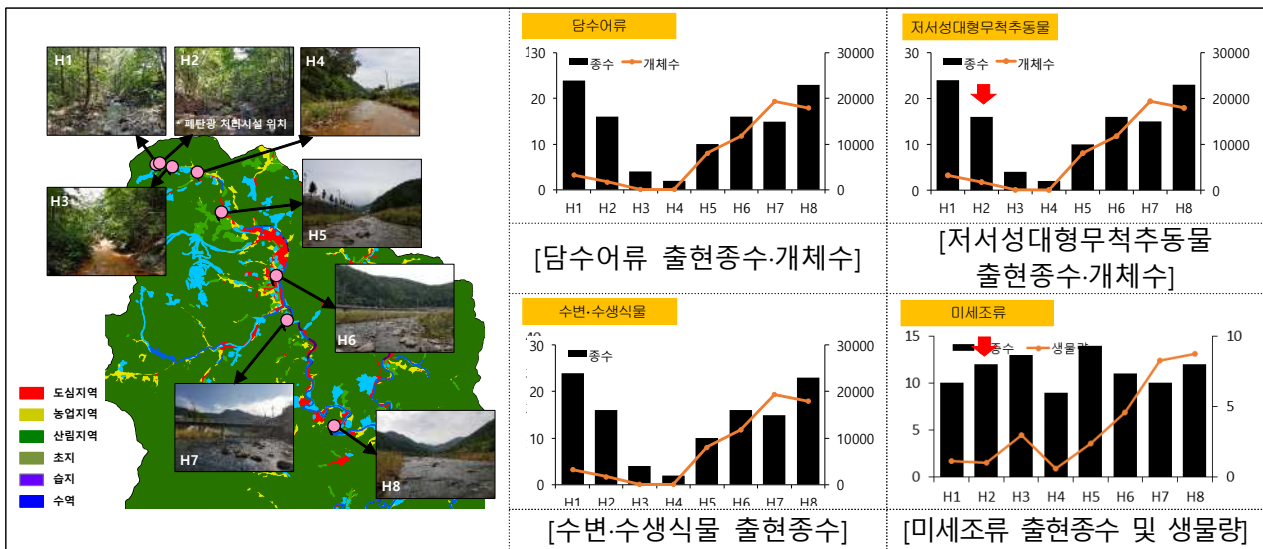


그림 3. 황지천의 서식환경 및 조사지점별 담수생물다양성 변화

수변·수생식물 조사 결과 총 75과 198속 269종 5아종 21변종 2품종으로 총 297분류군의 출현이 확인되었다. 멸종위기야생생물의 출현은 확인되지 않았으며 한국의 고유생물은 5분류군의 출현이 확인되었다, 식물구계학적특정식물종은 총 47분류군으로 IV등급 4분류군, III등급 17분류군, II등급 8분류군, I등급 19분류군이 출현하였다. 수변·수생식물의 귀화율(Naturalized Index) 산출 결과 8.0%으로 산림지역의 평균 귀화율인 4.72%보다 높게 나타났다(NamGung et al., 2019). 담수어류는 총 11종 677개체의 출현이 확인되었으며 이 중 멸종위기야생생물 2종(얼룩새코미꾸리, 열목어), 국외반출승인대상야생생물 및 한국의 고유생물 7종의 출현이 확인되었다. 조사지점별 출현종수 및 개체수는 전반적으로 하류로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며 출

현종수는 1종(H1~H4)~8종(H7), 출현 개체수는 1개체(H3)~130개체(H8)의 범위를 보였다. 저서성대형무척추동물의 경우 총 4문 6강 10목 21과 47종의 출현이 확인되었으며 H1에서 24종으로 가장 높은 종수가 출현하였으며 적화현상이 관찰되는 H2~H4지점으로 갈수록 종수가 2종까지 감소하였다가 H5번 지점부터 하류방향으로 갈수록 종수가 증가하는 경향을 보였다. 멸종위기야생생물의 출현은 확인되지 않았으며, 한국의 고유생물 1종(뿔하루살이), 국외반출승인대상야생생물 5종의 출현이 확인되었다. 미세조류의 경우 총 23 종의 출현이 확인되었으며 상류 구간에는 *Navicula* sp.가 우점하였으며 하류구간에는 *Encyonema* sp.가 우점하였다.

폐석탄광산 지역 인근의 하천에서 담수생물다양성의 감소는 이미 여러 연구를 통해 확인되었다(예, Herbst et al. 2018; Clements et al., 2021). 그러나, 폐석탄광산 운영 전 상태로의 담수생물다양성의 회복은 담수서식지의 상태, 서식지 복원 노력 등에 의존한다. 예를 들어, 미국에 아칸소 강은 폐탄광 처리시설 건설 후, 저서성대형무척추동물 중 청정지역의 담수서식지 상태를 반영하는 하루살이목, 강도래목, 날도래목의 종수가 2년 내에 폐탄광 상류에 위치한 하천의 다양성과 유사하게 회복되었다(Nelson et al., 1996). 또한, 미국 서부권에 광산 영향을 받는 것으로 예상되는 4개의 유역을 20~29년 동안 장기모니터링 한 결과 수질정화활동, 갯내수 처리시설 건설, 수변지역의 재식생 활동 등 다양한 노력을 통해 평균 10.25년 내에 이전 수준의 종수를 회복하였다(Clements et al., 2021). 반면, 1900년대에 광산 활동이 중단된 영국의 Nent 유역의 경우 100년이 지난 지금도 아연이 높은 농도 검출되며 낮은 종수의 서식을 확인된다(Armitage et al., 2007). 황지천의 경우 2019년 H2 지점 인근에 갯내수 처리시설이 완공되어 담수서식지의 회복(수질 향상 등)이 예상되며 이와 더불어 담수생물다양성의 회복이 기대되는 하천이나, 여름철 홍수나 많은 양의 강우는 H2지점 인근에 정화되지 않은 교란물질의 직접적인 유입을 야기할 가능성이 높았다(그림 4). 이에, 지속적인 담수생물다양성의 모니터링을 통하여 담수서식지 및 담수생물다양성이 폐석탄광산의 영향으로부터 회복되었는지 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.



그림 4. 황지천의 갯내수 처리시설 및 특이사항

나. 북천의 담수생물다양성 조사 및 분석

상류 구간은 산지와 농경지를 관류하고 하류는 상주시가지를 관류하는 하천이다(그림 5). 상주시 내서면 능암리에서부터 상주시 연원동에 이르는 중류역은 현재 상수원보호구역으로 지정하여 관리하고 있으며, 상주시가지를 관류하는 하류 구간은 수로가 직강화 되어 있고, 하도

내 인공구조물과 시민이용시설이 조성되어 있어 상대적으로 자연성이 낮다. 조사 지점 중 BC2는 1차 조사 당시 하상평탄화와 수변식생 제거 등 하천정비사업 시행으로 물리적 서식환경 교란이 확인되기도 하였다. 기초 수질 조사 결과 전기전도도는 하류방향으로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며, 하상구성은 상류에서 큰돌과 작은돌의 비율이 높았고 중류역에서는 자갈이, 하류역에는 세립질 입자의 구성비가 증가하였다(그림 5).

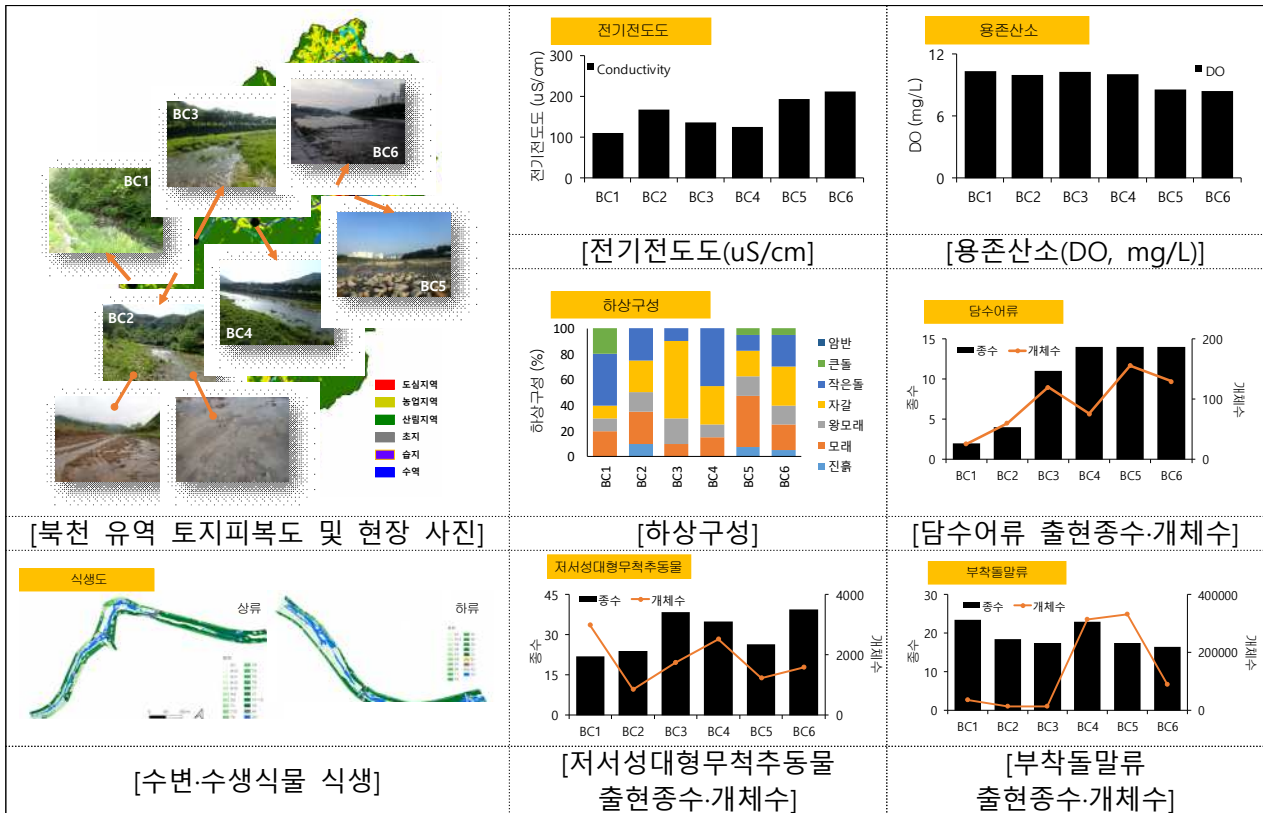


그림 5. 북천의 기초 환경 및 담수생물 종수·개체수 변화

담수생물다양성 조사 결과 수변·수생식물은 총 53과 107속 126종 8변종 1품종 135분류군이 확인되었다. 멸종위기야생생물의 출현은 확인되지 않았으며, 한국의고유생물 1분류군, 국외반출승인대상야생생물 5분류군의 출현이 확인되었다. 또한, IUCN평가기준 위기종(EN) 1분류군, 약관심종(LC) 1분류군의 출현이 확인되었으며, 특산식물 2분류군, 외래식물 27분류군이 확인되었다. 식생 조사 결과 초본식생이 가장 넓게 분포하였던 전년도 조사 결과와 달리 상~중류 구간은 덩굴식생(주요종: 환삼덩굴)이 40.9%, 32.8%로 가장 넓은 면적을 차지하였다. 하류 구간은 도시를 관류하여 개방수면이 35.9%로 가장 큰 면적비율을 보였으며 상~중류 구간과는 달리 친수공간이 넓게 조성되어 있어 불투수 나지 면적이 매우 넓게 분포하고 있었다. 또한, 저수로에 형성된 마름군락을 제외하면 자연식생은 거의 형성되어 있지 않았다. 초본식생은 조성된 잔디밭이 대부분의 면적을 차지하였으며 저수로 내부 마름군락과 함께 하천변으로 흰여뀌, 달뿌리풀, 줄, 부들군락 등이 소규모로 산재하여 분포하였다. 담수어류 조사 결과 총 3목 8과 24종 1,135개체의 출현이 확인되었다. 멸종위기야생생물의 출현은 확인되지 않았고 국외반

출승인대상야생생물 12종, 한국의고유생물 9종, 외래도입종 2종(배스, 블루길)의 출현이 확인되었다. 황지천과 유사하게 하류방향으로 갈수록 종수 및 개체수가 증가하는 경향을 보였다.

저서성대형무척추동물은 총 4문 6강 22목 57과 96종이 확인되었다. 멸종위기야생생물은 출현이 확인되지 않았으며, 한국의 고유생물 3종, 국외반출승인대상야생생물 37종, IUCN 평가 기준 준위협(NT) 3종의 출현이 확인되었다. 청정한 수환경 상태를 대표하는 지표생물군에 해당하는 하루살이목, 강도래목, 날도래목(EPT)의 세 분류군의 종수 비율은 총 48종(50.0%)을 차지하였으며 개체수의 경우 76.7%를 차지하였다. 발원지와 인접한 BC1의 경우 유량이 적고 암반이 많아 상대적으로 낮은 종수(22종)를 보였으며, BC2는 1차 조사당시 하천정비공사로 인해 하상이 평탄화 되고 수변식생이 제거되는 등 서식처 교란이 나타나 18종으로 BC1보다 종수가 크게 감소하였으나 공사 완료 후 하천생태계가 회복됨에 따라 2차 조사에서는 출현종수가 30종으로 증가하였다. BC6지점은 도심 구간을 관류함에도 미소서식환경이 상대적으로 다양하였으며, 특히 수변식물이 풍부한 수변서식처를 중심으로 정수성 곤충류와 연체동물의 다양성이 높았다. 부착돌말류의 경우 총 2목 3아목 8과 25속 4변종 1품종 67종 출현되었으며, 땅콩돌말속(*Achnanthes convergens*), 반달돌말속(*Cymbella turgidula*) 등 호청수성종 20종, 등침돌말속(*Nitzschia palea*), 쪽배돌말속(*Navicula minima*) 등 호오탁성종 6종의 출현 확인되었다.

북천의 담수생물다양성과 서식 환경 조사 결과 BC5, BC6 두 구간은 상주시내를 관류하는 지점으로 하도 내 다양한 친수시설이 조성되어 있으며, 수변 식생대가 빈약하고 하천사업으로 서식처 교란이 높았다(Bae et al. 2020). 특히, BC5 지점의 경우 유속이 거의 없는 구간에서는 오염 수역의 대표적인 지표생물로 알려진 붉은색 깔따구류를 포함한 내성종의 개체밀도가 높았으며 인위적으로 여울이 조성된 돌보에서만 납작하루살이류 및 줄날도래류 등의 곤충류가 제한적으로 서식하였다. 상주시는 2022년부터 BC5~BC6 지점에 북천지구 하천재해 예방 사업이 진행될 계획이다. 이에, 하천재해 예방 사업 후 하천의 구조적 개선과 함께 다양한 생물서식공간의 확보여부와 담수생물다양성의 회복을 확인하기 위해 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

다. 반변천 유역의 담수생물다양성 조사 및 분석

반변천은 상습 하천 범람 지역에 포함되며 특히 하류 구간의 경우 하천 치수 관련 설계 기준 이하로 관리되고 있어 홍수피해가 높은 곳으로 지목되기도 하였다(Lee and Kim, 2020). 이에, 홍수, 강수량 변화에 따른 담수생물다양성의 추적이 필요한 곳이나 상류에서 하류에 이르는 연속적인 모니터링이 이루어지고 있지 않다. 반변천의 서식환경 조사 결과 임하댐 하류 구간인 BB11부터 모래의 비율이 25%~40%로 점차 증가하였으며, 전기전도도는 중류인 BB7에서 239.0uS/cm로 가장 높게 나타났다(그림 6).

수변·수생식물 조사 결과 57과 149속 183종 2아종 11변종 2품종으로 198분류군의 출현이 확인되었다. 멸종위기야생생물은 출현이 확인되지 않았으며, 한국의고유생물 2종, 국외반출승인대상야생생물 6종의 출현이 확인되었다. IUCN평가기준 약관심종(LC)은 1분류군이 확인되었고, 특산식물 4분류군, 외래식물 55종의 출현이 확인되었다. 식생 조사 결과 상~하류의 구분 없이

대표 식생은 달뿌리군락으로 환삼덩굴과 함께 출현하였으며, 특히, 하류 구간의 경우 덩굴식생인 가시박과 환삼덩굴이 하천 제방면에서 다른 식생 피압하고 있었다(그림 6). 담수어류 조사 결과 총 3목 7과 27종 1,981개체의 출현이 확인되었으며, 멸종위기야생생물 1종(얼룩새코미꾸리), 국외반출승인대상야생생물 및 한국의 고유생물 13종, 외래도입종 2종(배스, 블루길)의 출현이 확인되었다. 중수 및 출현 개체수는 중류로 갈수록 높아지는 경향을 보였다.

저서성대형무척추동물은 총 5문 7강 20목 72과 134종이 확인되었다. 멸종위기야생생물의 출현은 확인되지 않았으며, 한국의 고유생물 7종, 국외반출승인대상야생생물 44종, IUCN 평가 기준 준위협(NT) 2종의 출현이 확인되었다. 청정한 수환경 상태를 대표하는 지표생물군에 해당하는 하루살이목, 강도래목, 날도래목(EPT)의 세 분류군의 중수 비율은 총 73종(54.5%)을 차지하였으며 개체수의 경우 93.0%를 차지하였다. 또한 BB12를 제외하고 상~중류 구간(BB1~BB7)에서는 평균 44.4종이 출현한 반면 모래 중심의 세립질 입자의 구성비가 증가하였던 중~하류구간(BB10~BB14)에서는 평균 35.4종으로 상대적으로 낮은 중수가 확인되었다. 2차 조사에서 개체수는 대부분의 조사지점에서 하절기 장마의 영향으로 인하여 감소하였으며 이는 상·중류 지점에서 더욱 두드러졌다. 부착돌말류는 총 2목 3아목 7과 19속 6변종 1품종 69종의 출현이 확인되었으며, 땅콩돌말속(*Achnanthes convergens*), 반달돌말속(*Cymbella turgidula*) 등 호청수성종 20종, 등침돌말속(*Nitzschia palea*), 쪽배돌말속(*Navicula minima*) 등 호오탁성종 6종의 출현이 확인되었다. 전반적으로 하류로 갈수록 호청수성정과 호오탁성종의 구분 없이 개체수(세포밀도)가 증가하는 경향을 보였다.

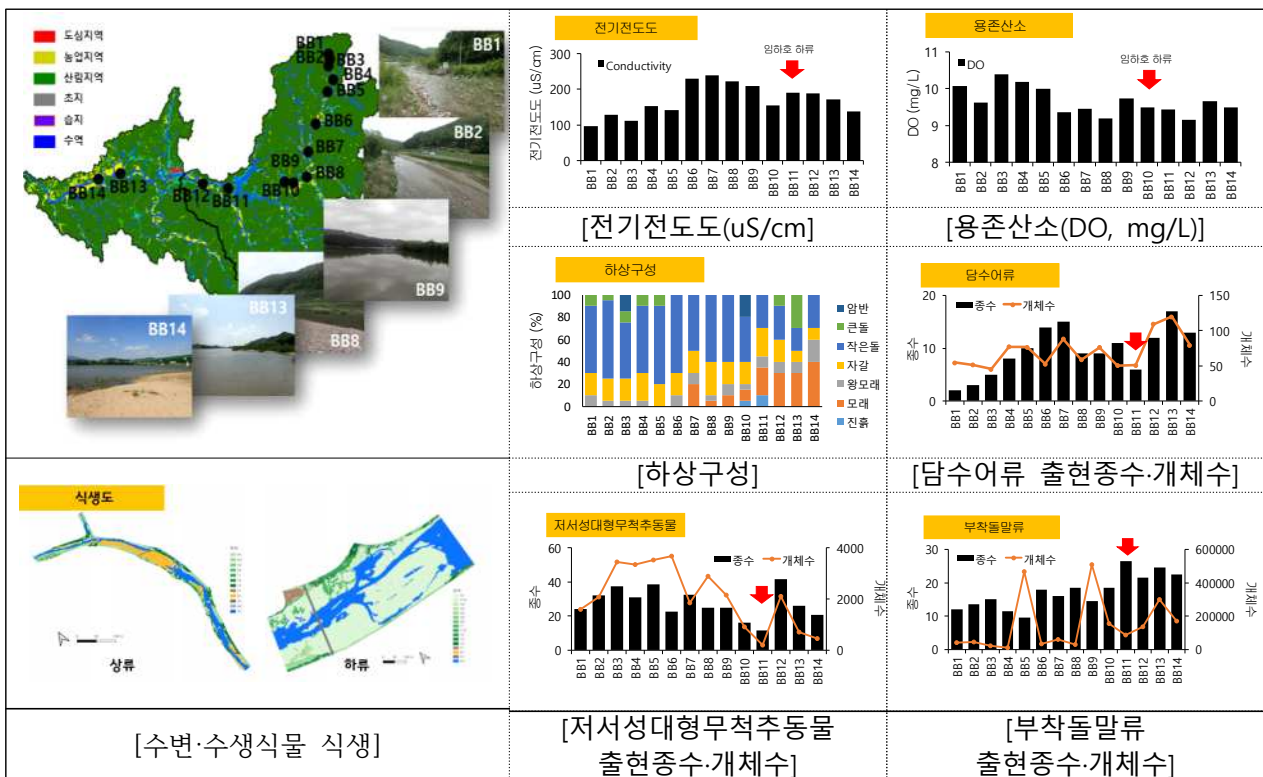


그림 6. 반변천의 기초 환경 및 담수생물 중수·개체수 변화

반변천의 담수생물다양성 및 서식환경 조사 결과 BB12 지점은 미소서식처가 다양하였는데, 작은돌과 자갈의 조립질 입자를 중심으로 한 여울 구간과 풍부한 수변식생은 담수어류, 저서성대형무척추동물의 높은 종수의 기반이 된 것으로 판단된다. 반면 임하댐 하류에 위치하는 BB11의 경우 조정지댐에 의하여 정체수역이 형성되면서 수변식물이 활착한 수변공간을 제외하면 서식환경이 단조로웠으며, BB11에 출현한 전체 19종의 저서성대형무척추동물 중 여울을 선호하는 대상종은 확인되지 않았다. 지난 2020년 환경부에서 수행한 ‘기후변화에 따른 강수량 변화와 홍수 발생 예측’ 결과에 의하면 “기후변화가 계속되면 100년 설계빈도 기준으로 일부 댐·하천 제방이 3.7년에 1번 범람할 수도 있다”고 하였다(Lee와 Kim, 2020). 이와 더불어 2050년 홍수량이 현재보다 11.8%까지 증가할 수 있으며, 낙동강의 경우 27%까지 증가하는 것으로 예측되었다. 반변천의 경우 현행 하천설계기준에 의해 하류구간은 100년 설계빈도 이상으로 치수대책을 세우도록 되어 있으나, 오래전부터 국가하천으로 관리되어 온 탓에 전체가 50년 기준으로 설계된 것으로 나타나 기후변화에 따른 홍수 및 집중호우에 영향이 높은 곳이다. 이에, 반변천의 서식환경 및 담수생물다양성의 지속적인 조사를 통해 조사지점간의 담수생물의 전환율, 환경의 유사도 비교 등의 연결성 평가가 필요하다.

2. 담수생물종 보전·복원 방향 설정을 위한 생육정보 확보

가. 문헌조사·현장조사를 통한 담수생물종의 분포 범위 예측

강도래목 유충은 대부분 청정한 담수서식지에서 서식하기 때문에 담수서식지의 상태를 진단하는 생물지표종으로서 널리 이용되고 있다(Törnblom et al., 2011). 또한 강도래목 유충들은 대부분 수온이 낮은 산간계류, 계곡에서 주로 서식하기 때문에 기후변화로 인한 소하천의 건천화, 환경교란 등은 이들의 서식에 직접적인 영향을 끼칠 것이다. 이에, 본 연구에서는 환경변화에 민감한 생물군 중 하나인 강도래목에 속하는 종 중 국내에 출현비율이 상대적으로 높았던 11종을 대상으로 생존 가능 온도 범위를 산출하였다. 분석 결과 큰등그물강도래 KUa (6.05 ~ 7.9°C), 한국강도래(6.4 ~ 8.4°C)는 다른 강도래류에 비해 가장 낮은 온도 범위에서 서식하는 것이 확인되었다(표 5. 그림 7).

담수생물은 기후변화·환경교란에 가장 민감한 생물군 중 하나로 다양한 환경인자에 대한 담수생물의 서식 가능범위 정보 확보는 추후 분포 범위를 예측 할 수 있는 기초적인 자료로 활용가능하다. 본 연구에서는 다양한 기후변화·환경교란 요인 중 연평균 온도에 따른 강도래목 11종의 서식 가능범위를 확인하였으나 연평균 최고 온도, 연평균 최저 온도 등 다양한 기후인자에 따른 선호 온도범위 파악 및 기후변화 시나리오에 따른 분포 범위 예측을 통해 담수생물 다양성 변화방향 추적 및 중별 관리방안 마련에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

표 5. 강도래류 11종의 서식가능한 온도 범위(연평균 기온 기준)

학명	국명	서식가능 최소 온도	서식가능 최대 온도
<i>Amphinemura coreana</i>	충채민강도래	8.60	9.10
<i>Amphinemura</i> KUa	충채민강도래 KUa	6.30	8.10

<i>Nemoura</i> KUa	민강도래 KUa	6.30	8.65
<i>Nemoura</i> KUb	민강도래 KUb	6.05	9.70
<i>Rhopalopsole mahunkai</i>	꼬마강도래	6.50	8.40
<i>Pteronarcys macra</i>	한국큰그물강도래	6.10	9.50
<i>Archynopteryx</i> KUa	큰등그물강도래 KUa	6.05	7.90
<i>Kamimuria coreana</i>	한국강도래	6.40	8.40
<i>Kiotinade corata</i>	무늬강도래	9.00	10.90
<i>Neoperla coreensis</i>	두눈강도래	9.50	11.35
<i>Oyamia coreana</i>	진강도래	6.20	9.70
<i>Sweltsa nikkoensis</i>	녹색강도래	6.20	9.60

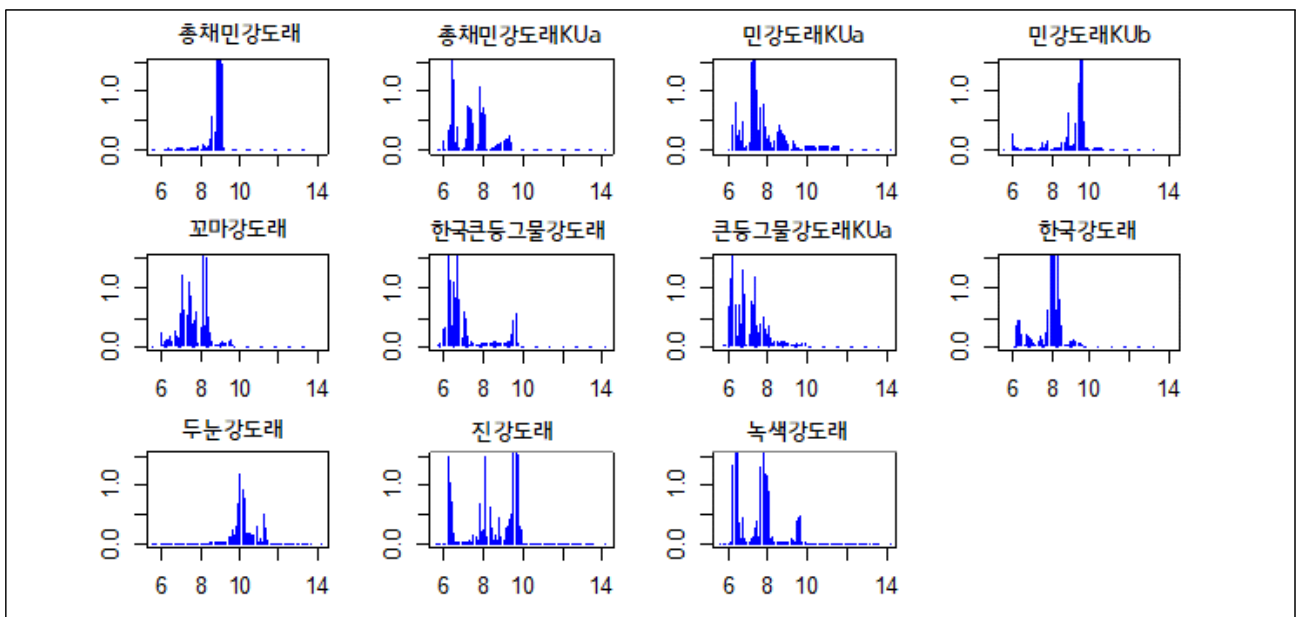


그림 7. 저서성대형무척추동물의 생존 가능 온도 범위 예측(강도래류)

3. 담수생물다양성 평가·관리 체계 마련을 위한 모델링 연구

가. (전국·권역·지역 단위 평가) RIVPACS-type predictive models

본 연구에서는 RIVPACS의 개념 이해와 우리나라의 실정에 맞는 RIVPACS-type predictive models의 적용 가능성 검토를 위해 낙동강 권역을 대상으로 저서성대형무척추동물 군집자료를 시범 적용하였다.

RIVPACS-type predictive model 개발을 위해서 캐나다, 스페인 등은 RIVPACS의 분석 절차는 준용하되 각 국가의 환경·생물특성에 맞게 분석 방법을 변형하였다. 본 연구에서도 우리나라 실정에 맞는 RIVPACS-type predictive models의 개발을 위해 RIVPACS 분석 절차는

준용하되 분석방법, 예측 지수 등을 변경하였다(그림 2, 표 6). 또한 RIVPACS-type predictive model의 적용을 위해서는 무엇보다 모델 생성에 기준이 되는 참조하천의 선정이 중요하다. 본 연구에서는 “수생태계 참조하천 선정 및 활용방안 연구”(환경부, 2017)에서 제시한 기준 및 수생태계 건강성 지수 등을 기준으로 참조하천을 선정하였다. RIVPACS-type predictive model 생성을 위해 분석자의 목적에 맞게 분석 코드 변경이 가능하도록 무료 소프트웨어인 R-program 기반 코드를 생성하였으며, 예측 지수는 우리나라에서 발견되는 종들 기반으로 구성된 K-BMWP (Korean Biological Monitoring Working Party)의 DB (환경부, 2009)를 반영하여 K-BMWP와 K-ASPT (Korean Average Score Per Taxon) 지수를 산출하였다. 본 분석에 적용할 환경 인자는 낙동강 권역의 저서성대형무척추동물 군집에 영향을 끼칠 것으로 예상되는 다양한 환경인자(지리지형학적 요인, 토지이용도, 수리수문학적 요인, 하상구성, 기초 수질 인자 등)들 중 우선순위가 높은 인자들을 선별하기 위하여 비계량 다차원 척도법(Non-metric multidimensional scaling, NMDS) 분석을 이용하여 주요 환경인자를 추출하였다. 분석 결과 고도, 농업비율(%), 산림비율(%), 유속, 수폭, 호박돌의 비율(%) 등이 낙동강 권역의 저서성대형무척추동물의 군집에 영향력 있는 인자로 선정되어 RIVPACS 분석에 이용되었다. 예측 모델의 경우 예측률이 높다고 알려진 자료기반모델 중 랜덤포레스트 모델을 적용하여 분석하였다.

표 6. RIVPACS-type predictive model 주요 변경 내용

주요 변경 항목	세부 내용
분석 방법	무료 소프트웨어인 R-program기반 코드 생성 → 분석자의 목적에 맞게 분석 방법 변경 가능
예측 지수	우리나라에서 발견되는 종들 기반으로 구성된 K-BMWP DB 반영을 통한 K-BMWP*, K-ASPT** 산출 *Biological monitoring working party, **Average Score Per Taxon
환경 인자	낙동강 권역 군집에 영향을 끼치는 환경인자 코드 반영
예측 모델	예측률이 높다고 알려진 자료기반모델(랜덤포레스트) 적용

분석결과 참조하천에 해당하는 조사지점 수는 87개 지점이 선정되었으며 RIVPACS 모델 구축을 위해 이 중 training을 위한 데이터를 전체 지점 중 70%, RIVPACS 모델의 정확도 판단을 위한 testing 데이터를 30%로 구분하여 분석하였다. RIVPACS-type predictive model 적용 결과 K-ASPT와 K-BMWP에서 나쁨 상태에 해당되는 지점이 각각 35, 122개 지점으로 나타났다. 이 두 지수 모두 E등급에 해당하는 지점은 총 32개 지점으로 주로 낙동강 본류구간 또는 일부 남쪽에 위치한 하천들이 포함되었다(표 7, 그림 8). 그러나 현재 예측률은 약 62%로 RIVPACS-type predictive model의 구축을 위해서는 무엇보다 예측의 “기준”이 되는 충분한 수의 참조하천 자료가 필요한 것을 확인할 수 있었다. “수생태계 참조하천 선정 및 활용방안 연구(II)”에서는 총 216개의 후보 참조하천을 제안하였으며, 본 연구에서는 이 중 확보가 가능한 일부 자료만을 이용하여 RIVPACS 분석에 시범 적용하였기 때문에, 추후 참조하천 지점수

가 충분히 충족되는 분석 조건에서 RIVPACS-type predictive model은 보다 예측률이 높은 결과를 도출할 수 있을 것으로 여겨진다. 또한 본 모델은 저서성대형무척추동물 이외에도 담수어류, 부착돌말류 등 다른 담수생물에도 적용할 수 있는 확장성을 가지고 있으므로 본 분석에서 예측하였던 K-ASPT, K-BMWP 이외에도 담수생물종수, 기능적 다양성 등 여러 분류군에 대한 예측 지수의 확대 적용이 기대된다.

표 7. RIVPACS-type 기반 예측 결과

상태	등급	K-ASPT	K-BMWP
↑ ↓	A	935	940
	B	320	133
	C	128	160
	D	76	139
나쁨	E	35	122

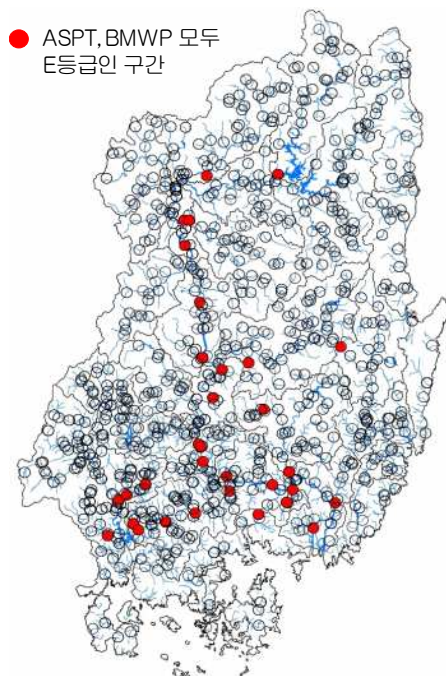


그림 8. RIVPACS-type predictive model 시범 적용 결과

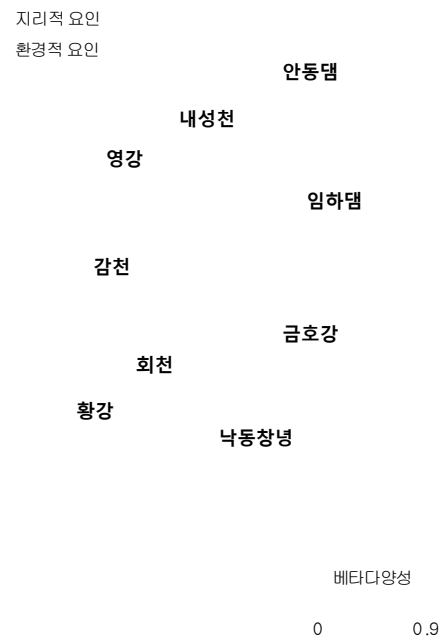


그림 9. 베타생물다양성 평가 시범 적용 결과

나. 베타생물다양성(Beta diversity) 기반 생물다양성 평가

베타생물다양성은 유역, 권역, 지역내에서 조사된 여러 지점의 담수생물다양성 자료를 이용하여 하나의 값의 지수로 산출하는 방법이다(Baselga and Orme, 2012; Cardoso et al., 2015;

Baselga et al. 2017). 본 연구에서는 낙동강 권역내 중권역 단위에서 조사된 저서성대형무척추동물 다양성 자료를 이용하여 베타생물다양성을 시범적용 하였다. 낙동강에 직접적으로 유입되는 권역 총 22개의 중권역 중 기존에 조사된 저서성대형무척추동물 군집 자료 및 환경인자 자료가 확보된 금호강, 감천 등 8개의 중권역을 대상으로 분석을 수행하였다. 분석 결과 베타생물다양성은 0.48(임하댐)~0.86(낙동창녕)의 범위를 나타내었으며, 중권역에 따라 베타생물다양성을 결정하는데 중요하게 작용하는 인자들이 상이한 것을 확인할 수 있었다(그림 9). 예를 들어, 감천, 낙동창녕, 내성천 권역의 경우 발원지부터 거리 등과 같은 지리적 요인이, 회천, 황강, 금호강 등은 전기전도도, 하천 인근의 농업화 비율 등 환경적 요인이 해당 중권역의 베타생물다양성을 결정하는데 상대적으로 더 중요한 요인으로 선정되었다.

베타생물다양성은 유역·권역·지역 간의 단년도의 베타생물다양성 비교보다는 해당 지역을 연차별·계절별로 지속적인 조사를 수행하여 베타생물다양성이 급변하는 시기에서의 지리적·환경적 변화 등의 훼손정도나 기후변화의 영향 등을 파악하는데 적절한 방법인 것으로 판단된다(Tisseuil et al. 2012; Nascimbene et al. 2017). 베타생물다양성은 해당 유역내 조사지점간의 종의 중복 정도, 종 조성의 차이 등을 기반으로 산정되기 때문에(Baselga et al. 2017), 유역, 지역간의 베타생물다양성의 단순한 비교를 통한 일률적인 순위화와 관리 유역 선정은 해당 유역 또는 지역의 지리적 또는 환경적 특성(예, 공단 지역, 농업화 비율이 높은 유역)이 고려되지 않기 때문에 주의하여야 한다.

또한 베타생물다양성 평가법은 각 유역별 하나의 지수 산출, 해당 권역의 생물다양성 유지를 위해 필수적으로 고려해야 하는 인자들의 확인과 더불어 분석 방법의 정립 후에는 RIVPACS와 더불어 저서성대형무척추동물 이외에도 타분류군들로 확대 적용(예, Leprieur et al. 2011; Winegardner et al. 2017; Jamoneau et al. 2018; López Delgado et al. 2020)이 가능하여 다양한 분류군들의 베타생물다양성 결과가 반영된 지역단위의 생물다양성 전략 수립에 주요 자료로써 활용될 것으로 기대된다.

다. 담수생물의 네트워크 평가

하천, 지역, 조사지점내 환경교란 정도(도심화, 공단 폐수의 유입, 보나 댐 건설 등), 종간의 상호관계(예, 포식-피식 관계, 경쟁관계, 외래종의 유입 등) 등 담수생물다양성은 다양한 요인에 의해 영향을 받는다(Olden et al. 2004; Clavel et al. 2011). 앞선 분석방법 중 RIVPACS-type predictive model이 생물군집과 환경과의 관계를 이용한 산출법이라면 담수생물의 네트워크 평가법은 생물종사이의 상호관계를 기반으로 특정 생물군집의 복잡성(complexity)을 계산할 수 있는 평가법이다(Freeman et al, 1978; Qu et al. 2019). 네트워크 평가를 통해 6개의 인자(number of nodes, number of edges, average node degree, average path length, transitivity, edge density)가 계산되며 이 각각의 수치들은 해당 하천, 지역 등의 생물의 연결정도를 평가하는 데 기반이 된다.

본 연구에서는 네트워크 평가가 교란지역과 비교란지역의 담수생물다양성을 구분할 수 있는지 확인하고, 생물군집의 유사 정도에 따라 그룹이 결정되는 자기조직화맵 분석(Kohonen

et al. 2001)을 활용하였다. 이를 통해 교란지역과 비교지역의 구분이 가능한지, 교란지역 중 어떠한 지점들을 우선적으로 관리해야 하는지 선별이 가능한지 등을 확인하였다. 시범대상 하천은 폐석탄광산 인근에 위치한 하천인 황지천, 철암천과 비교적 자연형 상태가 잘 유지되고 있는 송정리천이었다(표 8).

표 8. 하천별 주요 특징

하천명	대표사진	조사지점수	하천 특징
황지천		8	- 하천길이: 29.10km - 유역면적: 204.10km ² - 주요특징: 황지천 상류에 14개의 갭구수가 위치, 폐석량 697,915m ³ , 갭내수량 3,765m ³ /day, 적화현상 구간 950m
철암천		7	- 하천길이: 29.10km - 유역면적: 204.10km ² - 주요특징: 총 6개의 갭구수가 위치, 폐석량 13,430m ³ , 갭내수량 173m ³ /day, 적화현상 구간 100m
송정리천		8	- 하천길이: 9.4km - 유역면적: 49.3km ² - 주요특징: 수온이 연중 20미만이며 상대적으로 서식지가 잘 보전되어 있어 멸종위기야생생물중 하나인 열목어 (<i>Brachymystax lenok</i>)의 서식지임

분석 결과 자연형 하천인 송정리천에서 폐석탄광산 인근하천인 황지천, 철암천과 비교시 average node degree, number of edges가 높은 반면 average path length가 낮았다(표 9). 즉, 해당 하천의 경우 생물종간의 연결성이 복잡하여 어느 정도의 인위적 교란에도 금새 회복할 수 있는 높은 생물다양성을 가지고 있음을 의미한다(Bae et al. 2021). 자기조직화맵 분석 결과 저서성대형무척추동물 군집 유사도에 따라 총 5개의 그룹으로 구분되었는데, 이 그룹들은 폐석탄광산의 영향 정도를 뚜렷하게 반영하였다(그림 10). 예를 들어, 송정리천 상류에서 중류 지점(NSJ1~NSJ4)은 그룹 1에, 송정리천 중류에서 하류 지점(NSJ5~NSJ8)은 그룹 5에 모두 속하였다. 또한 갭내수 유입 지역 인근 지점들은 철암천과 황지천의 구분 없이 모두 그룹 4에, 적화현상이 관찰된 구간은 그룹 2에, 저서성대형무척추동물의 회복이 관찰되는 구간은 그룹 3에 속하였다. 이를 통해 특히 그룹 2에 속하는 지점들(황지천: NHJ 4~5, 철암천: NCA 1~4)의 서식지 관리가 우선적으로 필요한 것을 확인할 수 있었다. 여기에서 주목할 만한 점은 적화현상 관찰 구간과 자기조직화맵을 통해 구분되는 그룹간의 차이이다. 황지천의 경우 적화현상은 NHJ2~4번까지의 구간에서만 관찰되어, 단순히 서식환경의 조사 결과로는 NHJ4번까지만 우선 관리가 필요하다고 결론내릴 수 있으나 저서성대형무척추동물 기반 자기조직화 맵분석 결과 생물다양성은 NHJ5번까지 낮음을 확인할 수 있었다. 즉, 담수생물의 다양성 증진을 위해서

NHJ5번까지의 담수서식지 개선이 필요한 것을 암시한다. 이와 같이 네트워크 평가와 자기조직화 맵의 통합 분석은 하천·유역내 담수생물의 연결 정도와 관리해야 하는 지점 선별이 가능하여 담수서식지의 개선 지역 선별 등에 유용할 것으로 생각된다.

표 9. 네트워크 분석을 통한 참조하천과 폐석탄광산 인근하천간의 복잡성 비교

인자	참조하천	폐석탄광산 인근하천	
	송정리천	철암천	황지천
Number of nodes	76	49	55
Number of edges	1635	622	826
Average node degree	38.68	22.94	25.60
Average path length	1.48	1.52	1.53
Transitivity	0.70	0.73	0.78
Edge density	0.52	0.48	0.47

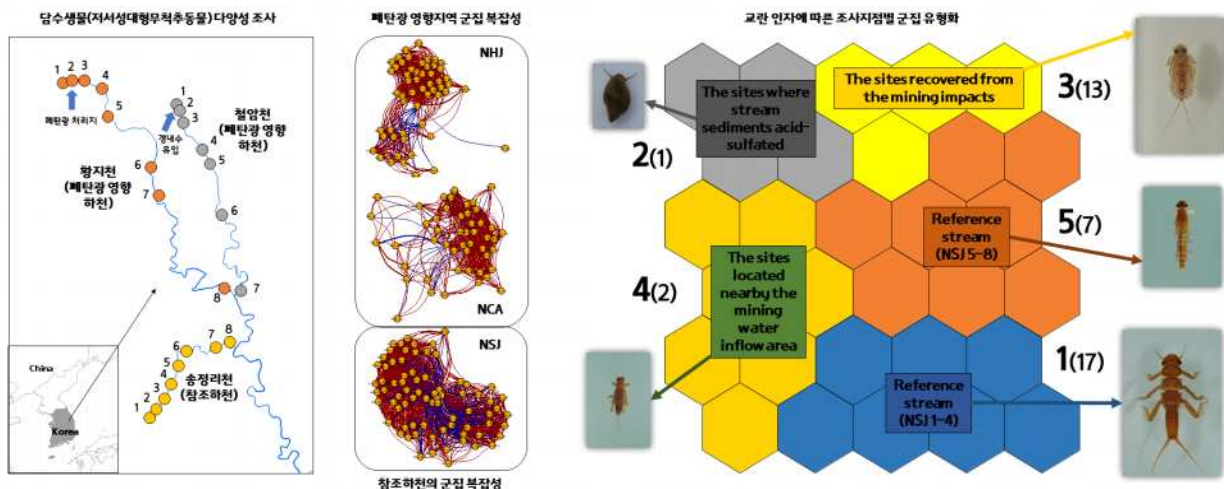


그림 10. 네트워크 분석 및 자기조직화 맵 시범 적용

라. 기능적 다양성 평가를 위한 생물학적 특성(Biological Trait: BT) DB 구축

기능적 다양성은 생물 군집내에 종별(또는 개체별) 형태적, 생리적, 생물계절학적 특성(예, 몸의 크기, 생활사, 섭식 기능군 등)을 반영하는 평가 방법으로 현재까지 적용된 종수, 개체수 등의 개념만을 고려하는 구조적 다양성을 보완해줄 수 있는 새로운 담수생물다양성 평가 방법이다(표 10)(Bonada et al., 2007; Statzner et al., 2007). 기능적 특징은 환경 변화에 따른 특정 개체의 반응을 결정하고 특정 서식지 내의 환경변화에 대한 효과를 결정하기 때문에, 생물 다양성, 생태계 기능, 환경 제약 등을 평가하는데 적용되고 있다(Cadotte et al., 2011; Montoya

et al., 2012). 이에, 미국, 유럽은 기능적 다양성 평가를 위해 기초가 되는 생물학적 특성 (Biological traits)에 대한 정보를 DB화하여 2012년부터 공개하였으며 추가되는 종들에 대해 지속적인 업데이트를 수행 중에 있으나, 우리나라는 아직 관련 DB가 구축되어 있지 않다. 이에, 미국, 유럽에서 구축한 생물학적 특성 DB 및 다양한 문헌정보들을 조사하여 기후변화·환경 교란에 가장 민감한 분류군 중 하나인 강도래목을 대상으로 생물학적 특성 DB를 구축하고자 하였다.

표 10. 생물학적 특성 목록

Trait	Trait state	Trait	Trait state
Life history			None (soft-bodied forms)
Voltinism	Semivoltine (<1 generation/y)	Armoring	Poor (heavily sclerotized)
	Univoltine (1 generation/y)		Good (e.g., some cased caddisflies)
	Bi- or multivoltine (>1 generation/y)		
Development	Fast seasonal	Shape (larvae)	Streamlined (flat, fusiform)
	Slow seasonal		Not streamlined (cylindrical, round, or bluff)
	Nonseasonal	Respiration (larvae)	Tegument=cutaneous
Synchronization of emergence	Poorly synchronized (wk)		Gills
	Well synchronized (d)		Plastron, spiracle (aerial)
Adult life span	Very short (<1 wk)	Size at maturity	Small (<9 mm)
	Short (<1 mo)		Medium (9–16 mm)
	Long (>1 mo)		Large (>16 mm)
Adult ability to exit	Absent (not including emergence)	Ecology	
	Present	Rheophily	Depositional only
Mobility			Depositional and erosional
Female dispersal	Low (<1 km flight before laying eggs)		Erosional
	High (>1 km flight before laying eggs)	Thermal preference	Cold stenothermal or cool eurythermal
Adult flying strength	Weak (e.g., cannot fly into light breeze)		Cool/warm eurythermal
	Strong		Warm eurythermal
Occurrence in drift	Rare (catastrophic only)	Habit	Burrow
	Common (typically observed)		Climb
	Abundant (dominant in drift samples)		Sprawl
Maximum crawling rate	Very low (<10 cm/h)		Cling
	Low (<100 cm/h)		Swim
	High (>100 cm/h)	Trophic habitat	Collector-gatherer
Swimming ability	None		Collector-filterer

마. 기능적 다양성 정보 포함 담수생물 네트워크 평가

조사지점별 여울, 흐름, 소, 수변 등 다양한 미소서식지 조사가 이루어진 폐석탄광산 인근 하천인 황지천을 대상 하천으로 기능적 다양성 정보가 포함된 담수생물 네트워크 평가를 수행하였다. 기능적 다양성은 앞서 <표 10>에서 언급한 것처럼 총 4개의 카테고리, 19개의 생물학적 특성 항목으로 구성되어 있으나 자료가 확보된 섭식기능군 항목을 대상으로 담수생물 네트워크 평가에 대입하였다. 섭식기능군은 먹이자원을 획득하는 방법에 따라 생물종을 구분하는 방법으로 썰어먹는 무리(shredders), 긁어먹는 무리(scrapers), 모아먹는 무리(collectors), 수액 빠는 무리(macrophyte piercer), 잡아먹는 무리(predators), 기생하는 무리(parasites) 등으로 구분된다(Coffman et al., 1996; Heino et al., 2004). 분석 결과 본 시범 대상 하천에서는 적화현상이 관찰되는 구간인 H2-H4지점과 적화현상이 관찰되지 않았지만 H4 지점 하류에 위치한 H5 지점으로 갈수록 구조적·기능적 다양성이 낮아졌으며 특히 H4지점에서 군집 복잡성이 가장 낮았다. 또한 폐탄광 갭내수 처리지 상류 구간(H1)에는 다양한 섭식기능군의 생물이 분포하였으나, 구조적 다양성이 가장 낮았던 H4지점으로 갈수록 기능적 다양성(섭식기능군) 또한 낮아짐을 확인할 수 있었다(그림 12). 이는 H4 지점의 경우 기능적·구조적 다양성 측면에서 연체는 저서성대형무척추동물 다양성이 손실될 수 있음을 의미한다.

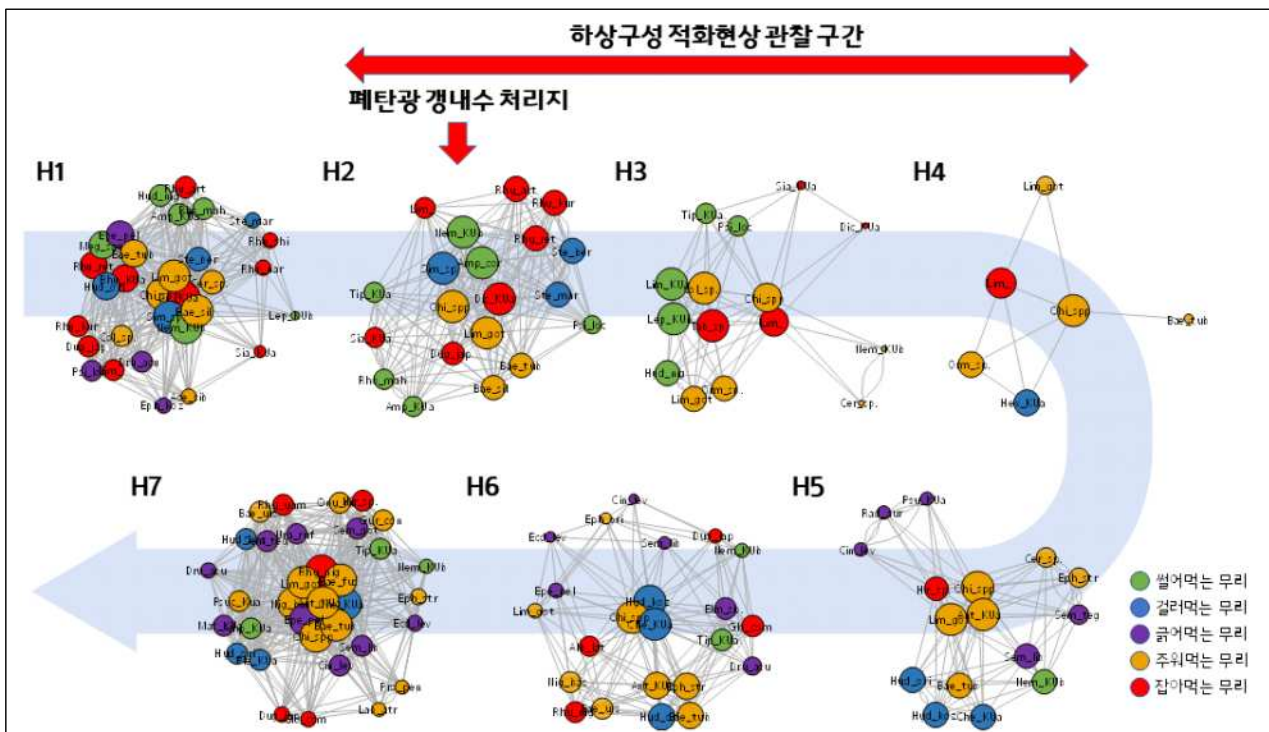


그림 12. 조사지점별 담수생물 네트워크 분석 예시(대상하천: 황지천)

※ 동그라미는 종을 의미하며 연결선은 종과 종의 연결을 의미함. 원의 색깔은 기능적 특성 중 하나인 섭식기능군을 의미함

구조적·기능적 다양성의 동시적인 고려는 우리가 기존에 미처 확인하지 못했던 정보들을 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다(Schmera et al. 2017; Liu et al. 2021). 본 연구에서는 환경교란으로 인해 구조적·기능적 다양성이 동시에 낮아지고, 환경교란 영향에서 멀어질수록 구조적·기능적 다양성이 동시에 회복되는 것을 확인하였으나, 서식환경에 따라 구조적 다양성은 높으나 기능적 다양성이 낮은 곳, 구조적 다양성은 낮으나 기능적 다양성이 높은 곳, 두 다양성이 모두 높거나 낮은 곳 등이 나타날 수 있으며 이는 교란 정도에서 얼마나 빨리 담수생물 다양성이 회복될 수 있는가와 직접적으로 연관되어 있다(Leao-Pires et al. 2018). 이처럼 구조적·기능적 다양성이 통합된 다차원적 담수생물다양성 평가는 다양한 분류군의 생물학적 특성의 DB 구축이 이루어진다면 현재까지 수행된 구조적 다양성의 결과를 보완해 줄 수 있는 지표로써 활용가치가 높을 것이다.

지금까지 국내 적용되지 않았던 담수생물다양성 평가법을 살펴보았다. 여기에서 고려된 담수생물다양성 평가법은 우리나라 실정에 맞는 분석법만 확립된다면 다음과 같은 잠재성을 가지고 있다(표 11). 먼저, RIVPACS-type predictive model의 경우 예측에 이용되는 참조하천에 대한 기준 확립과 충분한 수의 참조하천 정보가 확보가 필요하다. 현재 참조하천에 대한 기준은 “수생태계 참조하천 선정 및 활용방안 연구(I)”(환경부, 2016) 및 “수생태계 참조하천 선정 및 활용방안 연구(II)”(환경부, 2017)에 잘 정리되어 있으며 우리나라 하천 중 총 216개의 후보하천이 선정되어 있다. 이 정보를 기반으로 문헌조사와 현장조사를 기반으로 참조하천 DB만 구축된다면 RIVPACS-type predictive model은 다양한 범위에서 적용될 수 있다. 먼저, 하천 복원시 목표 설정이 가능하다. RIVPACS는 예측하고자 하는 지수, 종수 등을 등급화 할 수 있기 때문에 현재의 생물다양성 상태를 진단하고 해당 하천·유역·권역 등이 앞으로 달성해야 하는 목표 지수를 정책결정자가 결정할 수 있도록 지원하여 담수생물다양성 보전·관리 전략을 마련하는데 기여 할 수 있을 것이다. 또한 RIVPACS의 분석 개념을 기반으로 각 국가별 특성에 맞게 가공이 가능하기 때문에, 우리나라의 경우도 국내 특성을 잘 반영해 줄 수 있는 환경인자의 선택을 통해 RIVPACS의 예측률을 향상 시킬 수 있다. 이와 더불어, 본 연구에서 적용한 저서성대형무척추동물 이외에도 부착돌말류, 담수어류 등 다양한 분류군에 적용할 수 있기 때문에 이들의 정보가 통합된 RIVPACS 평가가 가능하여 다양한 환경교란의 영향과 생물정보가 반영된 종합적인 담수생물다양성 평가가 가능해질 것이다. 둘째, 베타생물다양성 평가의 경우 분류군과 관계없이 출현종 정보만 있으면 적용이 가능한 장점이 있다. 또한 베타생물다양성의 지속적인 평가는 유역·지역별 기후변화 또는 환경교란에 대한 추적이 가능하다. 즉, 베타생물다양성이 급감하거나 급증하는 시기를 찾고, 이를 야기하는 지점 또는 종 선정이 가능하기 때문에 특정 지점의 관리에서부터 유역·지역 단위의 관리가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 생물학적 특성 정보 기반 기능적 다양성 평가에도 적용이 가능하기 때문에 구조적·기능적 다양성을 모두 고려할 수 있다는 특징을 갖는다. 셋째, 담수생물 네트워크 분석의 경우 분석하고자 하는 대상지역에 대한 충분한 수의 조사지점이 필요하나, 여러 분류군의 동시 적용이 가능하기 때문에 시스템 수준의 담수생물다양성 평가가 가능하고, 분석하고자 하는 대상 유역·지역·지점에서 중요한 역할을 하는 핵심종 선정이 가능하기 때문에 정책결정자에게 해당 지역의 담수생

물다양성을 증진시키기 위한 관리대상 우선종 정보를 제공할 수 있다. 또한 앞서 베타생물다양성과 같이 구조적·기능적 다양성 평가를 동시에 수행할 수 있기 때문에 종합적인 담수생물다양성 평가가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 마지막으로 생물학적 특성(Biological trait) 기반 기능적 다양성 평가의 경우 생물학적 특성 정보만 구축된다면 기존까지 적용한 종수, 개체수 기반의 구조적 다양성 평가와 더불어 기능적 특징이 반영된 평가가 가능하므로 앞서 언급한 평가들을 보완한 종합적인 담수생물다양성 평가가 가능할 것이다.

표 11. 국내 미적용 생물다양성 평가법 비교

미적용 평가법	잠재성	필요사항
RIVPACS-type predictive model	- 하천 복원시 목표 설정 가능 - 국내 특성에 맞는 환경인자, 생물인자 반영 - 다양한 담수생물 분류군으로 확장	예측에 이용되는 참조하천에 대한 기준 확립 및 충분한 수의 참조하천 정보 확보
베타생물다양성 평가	- 분류군과 관계없이 출현종 정보만 있으면 적용 가능 - 유역·지역별 기후변화·환경교란에 대한 추적 가능 - 기능적 다양성 평가에도 적용 가능	중요성은 강조되고 있으나 아직 실질적인 적용사례가 없어 추가 연구 필요
담수생물 네트워크 분석	- 구조적·기능적 다양성 평가를 통한 종합적인 생물다양성 평가 - 여러 분류군의 동시 적용이 가능하여 시스템 수준의 담수생물다양성 평가 가능 - 분석 대상 유역·지역·지점에서 중요한 역할을 하는 핵심종 선정 가능	조사지점별 평가를 위해서는 한 지점내 많은 반복수의 조사 필요
생물학적 특성(Biological trait) 기반 기능적 다양성	종수, 개체수 등의 구조적 특징뿐만 아닌 기능적 특징 반영된 종합적인 생물다양성 평가	Biological trait에 대한 정보 구축 필요

IV. 결론

담수 환경은 기후변화·환경교란의 영향에 대해 가장 취약한 서식지 중 하나로 기후위기와 다양한 인위적 교란에 대응하기 위해 소하천~대하천에 이르는 현장 중심의 연구가 필요하며, 이를 통해 담수생물다양성과 서식지의 보전·복원에 활용될 과학적 근거 자료를 구축하고 담수생물다양성을 객관적이고 정량적으로 판단하기 위한 평가체계를 마련할 수 있을 것이다. 이에, 본 연구에서는 낙동강 권역 주요 하천에서의 담수생물다양성 및 서식환경을 분석하고, 주요 담수생물종의 생존 범위에 대한 분석을 수행하였으며, 국내 미적용 평가법의 국내 적용 적합성을 검토하고 보완된 방법을 적용하여 시범 분석 결과를 도출하였다.

올해는 낙동강의 발원지이자 폐석탄 광산 인근에 위치한 황지천을 비롯하여, 하천정비 공사가 수행중인 북천, 그리고 상습 하천 범람 지역에 포함되는 반변천에서 수변·수생식물, 담수어류, 저서성대형무척추동물, 부착돌말류의 분포 및 이들의 서식환경에 대한 조사를 수행하였다. 그 결과 황지천의 경우 적화현상이 일어난 구간인 H2~H4 지점에서 저서성대형무척추동물의 종수 및 개체수의 현저한 감소를 확인하였다. 황지천은 지난 2019년 H2 지점 인근에 갯내수 처리시설이 완공되어 앞으로 수질 개선의 효과로 담수서식지의 회복이 예상되는 하천이지만, 여름철 집중호우시 정화되지 않은 교란물질들이 처리시설을 거치지 않고 그대로 유입될 가능성이 있어 앞으로도 수질과 담수생물다양성에 대한 지속적인 조사 연구가 필요한 곳이다. 북천과 반변천은 담수어류와 부착돌말류가 하류로 갈수록 증가하여 관찰되는 일반적인 경향을 나타냈으며, 북천의 경우 BC5~BC6 지점에서 북천 지구 하천재해 예방사업이 진행 예정으로 사업 전후로 담수생물다양성의 회복 여부에 대한 지속적인 조사가 필요할 것이다. 특히, BC5 지점은 일부 제한된 구간(돌보)에서만 인위적 여울이 조성되어 있어 붉은색의 깔따구류가 높은 밀도로 분포하였으며 줄날도래류, 납작하루살이류 등 유수성 종들이 제한적으로 분포하였다.

주요 담수 생물종 중 하나인 강도래목에 대한 생존 범위 분석 결과 11종의 강도래목 중 큰등그물강도래KUa, 한국강도래는 다른 종들에 비해 서식 가능한 온도 범위가 낮은 것을 확인하였다. 강도래목에 속하는 유충은 청정한 담수서식지에 서식하기 때문에 담수서식지의 상태를 진단하는 생물지표종으로써 널리 이용되고 있으나, 유충들은 대부분 수온이 낮은 산간계류, 계곡에서 주로 서식하므로 기후변화로 인한 소하천의 건천화와 환경교란 등은 이들의 서식에 직접적인 영향을 끼칠 것이다. 특히, 본 연구결과 서식 가능 범위가 좁은 두 종의 경우 주로 소하천·지류·지천에 서식하기 때문에 이들의 분포 범위 변화에 대한 지속적인 조사를 통한 관리방안 마련이 필요하다.

국내 미적용 평가법의 국내 적용 적합성 검토 및 시범 분석을 수행한 결과 우리나라 실정에 맞게 보완 절차를 거쳐 분석법이 확립된다면 여러 방법들이 담수생물다양성을 평가하기 위한 다양한 잠재성을 가지고 있음을 확인하였다. 본 연구에서 검토된 RIVPACS-type predictive model, 베타생물다양성 평가, 네트워크 분석, 생물학적 특성 기반 기능적 다양성 평가법은 다양한 분류군에 대해 확대 적용될 수 있기 때문에 통합적인 담수생물다양성 평가가 가능하다. 예를 들어, RIVPACS-type predictive models의 경우 예측 모델 생성에 기본이 되는

충분한 수의 참조하천 정보만 확보된다면 본 연구에서 시범적으로 적용하였던 저서성대형무척추동물의 K-BMWP, K-ASTP 이외에도 군집 지수, 종수 등으로 확대 적용할 수 있으며 부착돌말류, 담수어류 등 다양한 분류군에 대한 적용이 가능하다. 따라서 이들의 정보가 통합된 RIVPACS 평가를 거쳐 환경교란의 영향이 반영된 종합적인 담수생물다양성 평가가 가능할 것이며 이를 통해 국가~지역 단위의 하천 복원 목표 설정시 과학적인 근거 자료로써 활용이 가능할 것이다. 베타생물다양성의 경우 이와 더불어 유역·지역 단위로 하나의 지수 값이 산출되기 때문에 기후변화 또는 환경교란에 대한 추적이 가능하여 유역·지역별로 관리가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 담수생물네트워크 분석의 경우 분석하고자 하는 대상지역에 대한 충분한 수의 조사지점만 확보되면 담수생물다양성 복잡성 정도를 정량적으로 평가할 수 있어 유역~지점 단위에서의 담수생물 보전 우선순위 도출이 가능해지고, 해당 서식지의 생물다양성을 유지하는데 중요한 역할을 하는 핵심종의 선정이 가능하기 때문에, 정책결정자가 해당 지역에 대한 담수생물다양성을 증진시키기 위한 관리대상 우선종을 선정하기 위한 정보를 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 마지막으로 생물학적 특성 기반 기능적 다양성 평가의 경우 생물학적 특성 정보 데이터베이스만 구축된다면 기존까지 적용한 종수, 개체수 기반의 구조적 다양성 평가와 더불어 기능적 특징이 반영된 평가가 가능하므로 앞서 언급한 평가들을 보완한 종합적인 담수생물다양성 평가법 개발로 이어질 것으로 판단된다.

V. 연구결과 활용 방안

가. 담수생물다양성 보전 전략 수립을 위한 과학적인 근거 자료 제공

- 낙동강 권역 주요 하천에 대한 담수생물다양성 정보 구축(3개 하천, 28개 지점)
- 황지천: H3~H4 구간에서 저서성대형무척추동물 다양성의 급감 확인
- 북천: BC5 지점은 상주시내를 관류하는 지점으로 수변 식생대가 빈약하고 유속이 거의 없는 구간에서는 오염 수역의 대표적인 지표생물인 붉은색 깔따구류를 포함한 내성종의 개체밀도가 높았으며 인위적으로 여울이 조성된 돌보에서만 일부 유수성 종의 제한적 분포 확인되어 담수생물다양성 향상을 고려한다면 하천의 구조적 개선과 함께 다양한 생물서식공간 확보 필요

나. 해외 생물다양성 평가법을 활용한 국내 담수생물다양성 평가 가능성 제시

- 본 연구에서 검토한 RIVPACS-type predictive model, 베타생물다양성(beta diversity), 네트워크 기반 담수생물다양성 평가, 생물학적 특성 기반 기능적 다양성 평가법은 다양한 분류군의 담수생물다양성 평가에 적용이 가능
- RIVPACS-type predictive model: 국내 특성에 맞는 환경인자의 반영이 가능하며 참조하천 대비 해당 담수서식지의 차이 정도가 등급화 되기 때문에 정책결정자가 하천 복원 계획을 수립시 기초자료로 활용 가능
- 베타생물다양성 평가: 유역·지역별 기후변화·환경교란에 대한 추적이 가능하며 생물다양성 관리에 중심이 되는 지역, 종선정이 가능하여 유역·지역 단위의 생물다양성 전략 수립에 활용 가능
- 담수생물 네트워크 분석: 구조적·기능적 다양성의 통합 평가가 가능하며 분석 대상 유역~지점에서 생물다양성 유지에 중요한 역할을 하는 핵심종 선정이 가능

다. 기후변화·담수환경 변화에 따른 담수생물다양성 진단시스템 수립 및 국가정책으로 활용

- 환경 변화에 따른 담수생물다양성 사전예측 및 위험최소화를 통한 과학적 생물다양성·서식환경 관리로 지속가능한 국토환경 조성
- 담수서식지·종다양성 위협 지역 집중관리를 통한 국민의 삶의 질 개선
- 권역·유역·지역 실정에 맞는 담수생물다양성 평가법 정립 및 적용

라. 담수생물다양성 연구 결과 지자체·국민 공유를 통한 담수생물다양성 보전 공감 유도

- 조사지역 해당 지자체에 담수생물다양성 평가결과 공유 및 관리·홍보방안 마련
- 본 연구결과를 통해 도출된 결과를 「낙동강 생물길」 소책자를 제작하여 담수생물 홍보 및 시·도 교육청 등 교육자료로 활용함으로써 어린이~어른까지 담수생물다양성 보전·관리 인식 증진

VI. 참고문헌

- 국토교통부. 2016. 수자원장기종합계획(2002~2020). p. 131
- 국토교통부. 2019. 하천공간 복원 기본계획 수립 기술 보고서. p. 390
- 기상청, 2020. 한국 기후변화 평가 보고서 2020. p. 334
- 충청남도. 2019. 제1차 충청남도 습지보전실천계획(2019~2023). p. 280
- 환경부. 2009. 무척추동물 생물지표를 이용한 환경오염물질의 생태영향평가 현장적용기법 개발. p. 244
- 환경부. 2017. 『수생태계 참조하천 선정 및 활용방안 마련 연구[II]』 p. 298
- 환경부. 2020. 제3차 자연환경보전 기본계획, '16~'25. p. 181
- Allen GH, Pavelsky TM, Barefoot EA, Lamb MP, Butman D, Tashie A, et al. 2018. Similarity of stream width distributions across headwater systems. *Nat. Commun.* 9 :610.
- Araújo MB, Rozenfeld A, Rahbek C, Marquet PA, 2011. Using species co-occurrence networks to assess the impacts of climate change. *Ecography* 34: 897 - 908.
- Armitage PD, Bowes MJ, Vincent HM. 2007 Long term changes in macroinvertebrate communities of a heavy metal polluted stream: The river Nent (Cumbria, UK) after 28 years. *River Res. Appl.* 23: 997 - 1015.
- Bae MJ, Park YS. 2019. Evaluation of precipitation impacts on benthic macroinvertebrate communities at three different stream types. *Ecological Indicators*, 102: 446-456.
- Bae MJ, Hong JK, Kim EJ. 2021. Evaluation of the Impacts of Abandoned Mining Areas: A Case Study with Benthic Macroinvertebrate Assemblages. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18: 11132.
- Bae MJ, Park SM, Kim JK, Hong JG, Ryu SH. 2020. The Relationships between Benthic Macroinvertebrate and Environmental Factors in Iancheon and Bukcheon Streams, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment*, 53(1), 22-30.
- Baselga A, Orme CDL. 2012. betapart: an R package for the study of beta diversity. *Methods in ecology and evolution*, 3: 808-812.
- Baselga A, Orme D, Villeger S, De Bortoli J, Leprieur F, Logez M, Henriques-Silva R. 2017. Partitioning beta diversity into turnover and nestedness components. *Package betapart*, Version, 1-4.
- Belmar O, Velasco J, Gutiérrez-Cánovas C, Mellado-Díaz A, Millán A, Wood PJ., 2013. The influence of natural flow regimes on macroinvertebrate assemblages in a semiarid Mediterranean basin. *Ecohydrology* 6: 363 - 379.

- Berry D, Widder S, 2014. Deciphering microbial interactions and detecting keystone species with co-occurrence networks. *Front. Microbiol.* 5: 219.
- Bonada N, Doledec S, Statzner B. 2007. Taxonomic and biological trait differences of stream macroinvertebrate communities between mediterranean and temperate regions: implications for future climatic scenarios. *Global Change Biology*, 13: 1658–1671.
- Cardoso P, Rigal F, Carvalho JC. 2015. BAT - Biodiversity Assessment Tools, an R package for the measurement and estimation of alpha and beta taxon, phylogenetic and functional diversity. *Methods in Ecology and Evolution*, 6: 232–236.
- Clarke RT, Wright JF, Furse MT. 2003. RIVPACS models for predicting the expected macroinvertebrate fauna and assessing the ecological quality of rivers. *Ecological modelling*, 160: 219–233.
- Clavel J, Julliard R, Devictor V. 2011. Worldwide decline of specialist species: toward a global functional homogenization?. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(4), 222–228.
- Clements WH, Herbst DB, Hornberger ML, Mebane CA, Short TM. 2021. Long-term monitoring reveals convergent patterns of recovery from mining contamination across 4 western US watersheds. *Freshw. Sci.* 40: 407–426.
- De Figueroa JT, López-Rodríguez MJ, Lorenz A, Graf W, Schmidt-Kloiber A, Hering D. 2010. Vulnerable taxa of European Plecoptera (Insecta) in the context of climate change. *Biodiversity and conservation*, 19:, 1269–1277.
- de Vries FT, Griffiths RI, Bailey M, Craig H, Girlanda M, Gweon HS, Hallin S, Kaisermann A, Keith AM, Kretzschmar M, Lemanceau P, Lumini E, Mason KE, Oliver A, Ostle,N, Prosser JI, Thion C, Thomson B, Bardgett RD. 2018. Soil bacterial networks are less stable under drought than fungal networks. *Nat.Commun.* 9 : 3033.
- Dufrêne M, Legendre P. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological monographs*, 67: 345–366.
- Freeman LC. 1978. Centrality in social networks conceptual clarification *Soc. Networks*, 1: 215–239.
- Heino J, Grönroos M. 2017. Exploring species and site contributions to beta diversity in stream insect assemblages. *Oecologia*, 183(1), 151–160.
- Heino J, Louhi P, Muotka T. 2004. Identifying the scales of variability in stream macroinvertebrate abundance, functional composition and assemblage structure. *Freshwater Biology*, 49(9), 1230–1239.
- Herbst DB, Medhurst RB, Black NJ. 2018. Long-term effects and recovery of streams from

- acid mine drainage and evaluation of toxic metal threshold ranges for macroinvertebrate community reassembly. *Environ. Toxicol.* 37: 2575–2592.
- Ilg C, Castella E. 2006. Patterns of macroinvertebrate traits along three glacial stream continuums. *Freshwater Biology*, 51(5): 840–853.
- Jamoneau A, Passy SI, Soininen J, Leboucher T, Tison Rosebery J. 2018. Beta diversity of diatom species and ecological guilds: Response to environmental and spatial mechanisms along the stream watercourse. *Freshwater Biology*, 63(1): 62–73.
- Kohonen T. 2012. Self-organizing maps (Vol. 30). Springer Science & Business Media.
- Leao-Pires TA, Luiz AM, Sawaya RJ. 2018. The complex roles of space and environment in structuring functional, taxonomic and phylogenetic beta diversity of frogs in the Atlantic Forest. *PloS one*, 13(4): e0196066.
- Lee OJ, Kim SD. 2020. 기후변화 대비 수자원 적응 기술보고서-강우·불확실성 기술. *Water for future*, 53(10): 6–18.
- Legendre P, De Cáceres M. 2013. Beta diversity as the variance of community data: dissimilarity coefficients and partitioning. *Ecology letters*, 16(8): 951–963.
- Leprieur F, Tedesco PA, Hugueny B, Beauchard O, Dürr HH, Brosse S, Oberdorff T. 2011. Partitioning global patterns of freshwater fish beta diversity reveals contrasting signatures of past climate changes. *Ecology letters*, 14(4): 325–334.
- Liu Z, Li Z, Castro DM, Tan X, Jiang X, Meng, X, et al.. 2021. Effects of different types of land-use on taxonomic and functional diversity of benthic macroinvertebrates in a subtropical river network. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–15.
- López Delgado EO, Winemiller KO, Villa Navarro FA. 2020. Local environmental factors influence beta diversity patterns of tropical fish assemblages more than spatial factors. *Ecology*, 101(2), e02940.
- Margalef R. 1958. Information theory in ecology. *General Systems* 3:36–71.
- Martini S, Larras F, Boyé A, Faure E, Aberle N, Archambault P, et al. 2021. Functional trait based approaches as a common framework for aquatic ecologists. *Limnology and Oceanography*, 66(3): 965–994.
- McNaughton SJ. 1967. Relationship among functional properties of California Grassland. *Nature* 216: 168–169.
- NamGung J, Yoon CY, Ha YH, Kim JH. 2019. The flora of Mt. Papyeong (Gyeonggi-do Prov.) in western area of DMZ, Korea. *Korean Journal of Plant Resources*, 32(4): 355–378.
- Nelson SM, Roline RA. 1996. Recovery of a stream macroinvertebrate community from

- mine drainage disturbance. *Hydrobiologia*. 339: 73 - 84.
- Olden JD, Poff NL, Douglas MR, Douglas ME, Fausch KD. 2004. Ecological and evolutionary consequences of biotic homogenization. *Trends in ecology & evolution*, 19(1): 18-24.
- Parsons M, Thoms M, Norris R. 2002. Australian river assessment system: AusRivAS physical assessment protocol. Monitoring river health initiative technical report, 22.
- Pielou EC. 1969. Shannon's formula as a measure of specific diversity: its use and misuse. *Am. Nat.* 100:463-465.
- Pielou EC. 1975. *Ecological Diversity*. John Wiley and Sons, New York.
- Poquet J.M, et al. The MEDiterranean Prediction And Classification System (MEDPACS): an implementation of the RIVPACS/AUSRIVAS predictive approach for assessing Mediterranean aquatic macroinvertebrate communities. *Hydrobiologia*, 2009, 623.1: 153-171.
- Qu X, Peng W, Liu Y, Zhang M, Ren Z, Wu N, Liu X. 2019. Networks and ordination analyses reveal the stream community structures of fish, macroinvertebrate and benthic algae, and their responses to nutrient enrichment. *Ecol. Indic.* 101: 501 - 511.
- Reynoldson T, et al. 2012. Canadian Aquatic Biomonitoring Network (CABIN) Field Manual: Wadeable Streams. Environment Canada: Dartmouth, NS, Canada
- Schmera D, Heino J, Podani J, Erős T, Dolédec, S. 2017. Functional diversity: a review of methodology and current knowledge in freshwater macroinvertebrate research. *Hydrobiologia*, 787(1): 27-44.
- Statzner B, Bonada N, Dolédec S. 2007. Conservation of taxonomic and biological trait diversity of European stream macroinvertebrate communities: a case for a collective public database. In *Biodiversity and conservation in Europe* (pp. 367-390). Springer, Dordrecht.
- Tisseuil C, Leprieur F, Grenouillet G, Vrac M, Lek, S. 2012. Projected impacts of climate change on spatio temporal patterns of freshwater fish beta diversity: a deconstructing approach. *Global Ecology and Biogeography*, 21(12): 1213-1222.
- Törnblom J, Degerman E, Angelstam, P. 2011. Forest proportion as indicator of ecological integrity in streams using Plecoptera as a proxy. *Ecological Indicators*, 11(5): 1366-1374.
- Ward AS, Wondzell SM, Schmadel NM, Herzog SP. 2020. Climate change causes river network contraction and disconnection in the HJ Andrews Experimental Forest, Oregon, USA. *Frontiers in Water*, 2: 7.

Winegardner AK, Legendre P, Beisner BE, Gregory Eaves I. 2017. Diatom diversity patterns over the past c. 150 years across the conterminous United States of America: Identifying mechanisms behind beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 26(11): 1303–1315.

주 의

1. 이 보고서는 국립낙동강생물자원관에서 시행한 연구과제 결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 국립낙동강생물자원관에서 시행한 연구과제의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.
4. 이 보고서와 관련된 문의사항은 국립낙동강생물자원관 다양성연구팀(전화 054-530-0831)로 문의하시면 됩니다.