

Original article

국내 하구 수생태계 현황 및 건강성 조사의 성과와 하구 생태계의 국외 연구동향

원두희¹ · 임성호^{1,2} · 박지형³ · 문정숙³ · 도윤호^{2,*}

¹(주)생태조사단 부설 두희생태연구소, ²공주대학교 생명과학과, ³국립환경과학원 물환경공학연구과

Research Trend of Estuarine Ecosystem Monitoring and Assessment. Doo-Hee Won¹ (0000-0002-1435-7743), Sung-Ho Lim^{1,2} (0000-0002-4365-9695), Jihyung Park³ (0000-0002-1786-4652), Jeong-Suk Moon³ (0000-0003-1448-5945) and Yuno Do^{2,*} (0000-0001-7910-9751) (¹Doohee Institute of Ecological Research, Korea Ecosystem Service Inc., Ansan 15426, Republic of Korea; ²Department of Biological Sciences, Kongju National University, Gongju 32588, Republic of Korea; ³Water Environmental Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Republic of Korea)

Abstract An estuary is an area where a freshwater river or stream meets the ocean. Even before the importance of the value of estuaries was recognized, the estuary was lost because of large-scale conversion by draining, filling, damming, and dredging. In South Korea, 643 estuaries are located, and the total area is 3,248,300 ha, accounting for 32.5% of the total area of South Korea. Over 35% of Korean estuaries are closed estuaries which are only temporally connected with the sea, either permanently or periodically. Since 2008, in order to preserve the estuary ecosystem and solve major issues in the estuary by accumulating knowledge about the estuarine ecosystem, the Ministry of Environment of Republic of Korea has been conducting the “Estuarine Ecosystem Monitoring and Assessment Project”. At 668 sites of 325 estuaries, epilithic diatom, benthic macroinvertebrate, fish, and vegetation are investigated, and the habitat condition of each site is evaluated using the newly developed biotic index. More than 100 researchers annually record 2,097 species of estuaries according to the standardized survey guidelines over the past 14 years and provide strictly managed data necessary for establishing estuaries conservation policies. As a result of bibliometric analysis of 1,195 research articles related to the monitoring and assessment of the estuarine ecosystem, research on pollutants such as heavy metals and sediment control have recently been conducted. “Estuarine Ecosystem Monitoring and Assessment Project” is an ecological monitoring type of long-term mandated monitoring that is usually focused on identifying trends. Although it is difficult to identify the mechanism influencing a change in an ecosystem through long-term mandated monitoring, providing empirical data for supporting evidence-based policy, decision-making, and the management of ecosystems. In order to increase the efficiency of the project, research to investigate the relationship between sediments and pollutants and organisms can be conducted at specific estuaries or sites to compensate for the shortcomings of mandatory monitoring.

Key words: estuarine ecosystem, assessment, monitoring, mandated monitoring, estuary conservation

Manuscript received 14 March 2022, revised 18 March 2022,
revision accepted 18 March 2022

* Corresponding author: Tel: +82-41-850-8501, Fax: +82-41-850-8501
E-mail: doy@kongju.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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

서 론

하구는 하천과 개방해역이 만나는 곳으로 담수와 해수의 순환에 의한 수체의 염분 변화와 조석의 영향을 받는 역동적인 생태계이다. 하구는 자연 정화지로서의 역할을 할 뿐만 아니라, 야생생물의 주요 서식지 및 산란지로서의 생태적 가치가 매우 높은 지역이다(Costanza *et al.*, 1997). 우리나라에는 총 463개의 하구가 위치해 있고 총 면적이 3,248,300 ha로 우리나라 전체 면적의 32.5%를 차지한다(Rho and Lee 2014). 이 중 228개 하구는 하구둑과 같은 인공구조물이 건설되어 자연적인 하구 순환이 차단되어 있거나 매립으로 인해 면적이 축소되었다. 하구의 훼손은 개발 중심의 하구정책과 하구의 생태적 가치에 대한 인식부족, 외래종 침입, 하구에 대한 조사와 연구 자료의 부족, 하구 환경의 특성을 고려한 공간단위의 관리개념의 부재 등 복합적 요인에 기인한다(Lotze *et al.*, 2006).

우리나라에서는 2008년 이후 하구 환경에 대한 지식기반을 강화하기 위해 하구에 대한 기초연구사업이 진행되었다. 하구역 연구사업이 하구관리를 지원하는 실효적 수단이 되기 위해서는 하구의 주요 현안을 해결하고 다양한 하구 이해당사자의 이해를 증진시키며 이를 위한 과학적 자료를 제공할 수 있어야 한다(Pethick, 2002). 반면, 국내에서 진행된 하구관련 연구사업은 대부분 수질관련 현황조사가 대부분이며, 이외 유동, 퇴적 모델에 대한 연구가 일부 진행되었다. 2000년대 초반까지 하구에 서식하는 생물과 생태계는 대규모 하구를 중심으로 사회적 문제가 제기된 일부 하구에서 조사되었다(Lim *et al.*, 2020). 중소규모 하구에 대한 생물과 생태계 조사는 전무할 정도로 하구에 대한 이해가 부족했었다.

환경부는 물환경 관리목표를 ‘이화학적 수질(BOD 등)’에서 ‘수생태계 건강성’으로 확대하고 2008년부터 하천 및 하구의 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가를 실시하고 있다. 부착돌말류, 저서성 대형무척추동물, 어류를 이용한 하구 수생태계 건강성 평가와 관련한 생물학적 물환경 평가 기법을 최초로 개발하였다. 현재는 325개 하구(하구호, 도서지역 하구 제외)에 대한 모니터링과 건강성 평가가 진행되어 국내 전체 하구에 대한 전반적인 생물상 자료를 확보했고 생물을 기반으로 하구의 건강성 정도를 평가했다.

본 연구에서는 지난 14년간 진행된 “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 사업의 성과에 대해 논하고 하구 생태계 현황조사와 관련된 국외학술연구 동향을 파악해 국내 “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 사업의 방향을 제안하고자 한다.

재료 및 방법

1. 사업관련 정보수집

2008년부터 2021년까지 진행된 “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” D/B를 이용해 부착돌말류, 저서성 대형무척추동물, 어류의 총 기록 종수를 계산했다. 식생의 경우 2021년부터 분류계급과 학명을 정리하고 있어 2008년부터 2020년까지의 자료만을 이용해 총 기록 종수를 산정했다. 조사 대상 하구와 지점 수는 각 연도별 사업 계획 당시 제시된 숫자를 기준으로 산출했다. 참여연구원의 정보는 각 연도별 사업 종료 시기에 등록된 정보를 기준으로 정리했다.

2. 문헌조사 및 분석방법

Web of Science (WOS, <https://www.webofscience.com>) 핵심 컬렉션(core collection)에서 “estuary”, “estuary AND monitoring”, “estuary AND assessment”를 검색어로 활용해 1960년부터 2021년 사이에 출판된 국외학술자료 중 논문(article)만 분류해 수집했다. “estuary”로 검색된 국외학술논문은 3,7477건이며 “estuary AND monitoring”으로 검색된 국외학술논문은 4,664건, “estuary AND assessment”로 검색된 국외학술논문은 5,163건이었다. 이들 자료 중 각 검색에 중복으로 수집된 1,195건의 국외학술논문을 이용해 계량서지학(bibliometrics) 분석방법을 이용해 핵심 단어와 연구주제를 추출했다(Fig. 1). 하구와 관련된 국외학술논문 수의 규모를 비교하기 위해 생태계 유형인 “습지 wetland”, “하천 river”, “숲 forest”, “해양 marine”을 대상으로 하구의 학술논문 수집방법과 동일하게 “생태계 유형 AND monitoring”과 “생태계 유형 AND assessment”를 검색어로 자료를 수집하고 “생태계 유형”, “생태계 유형 AND monitoring”과 “생태계 유형 AND assessment”

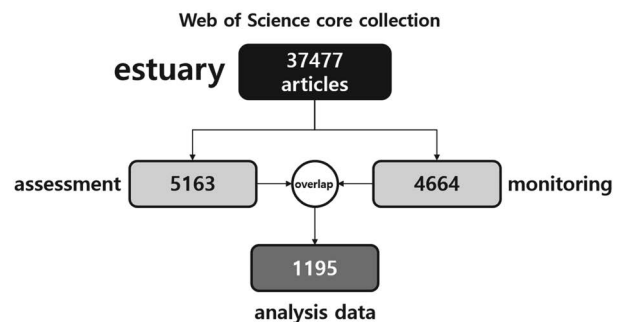


Fig. 1. Collecting research articles on estuarine ecosystem assessment and monitoring from Web of Science core collection.

에서 수집된 자료 중 중복된 자료 수를 산출했다. 계량서지학 분석은 오픈 소프트웨어 환경인 R (3.3 버전)의 bibliometrix 패키지를 이용했다(Aria and Cuccurullo, 2017). 단어의 개념구조 (conceptual structure map)는 Metric Multidimensional Scaling (MDS) 방법을 이용해 키워드와 제목, 초록에서 추출된 단어의 이분법 네트워크 (bipartite network)를 통해 시각화했다.

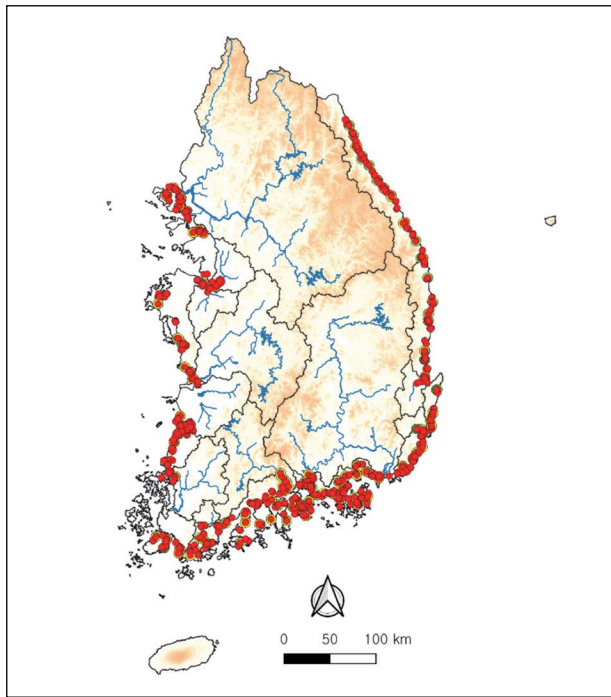


Fig. 2. Survey sites of estuarine ecosystem health assessment project of Ministry of Environment, Republic of Korea.

하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가사업성과

1. 전국 단위 하구 생태계 조사

하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가사업에서는 현재 국내 전체 463개 하구 중 84개의 하구호, 대규모 하구 5개 및 제주도에 위치한 35개 하구, 울릉도에 위치한 2개 하구를 제외한 325개 하구를 조사 우선 대상 하구로 선정하고 현장조사를 통해 조사가 불가능한 닫힌하구(10개소)와 일부 교량이 없는 도서지역의 하구(1개소)를 제외한 총 325개 하구를 대상으로 조사를 실시하고 있다(Fig. 2). 2008년부터 2015년까지는 생물 측정망 하구의 68.8% (열린하구 192개소, 닫힌하구 39개소)를 조사하였고 2016년 미조사된 하구에 대한 추가조사가 실시되어 전체 하구에 대한 기초 조사와 평가가 완료됨에 따라 현재의 조사지점이 선별되었고 3년 주기로 조사 및 평가를 실시하고 있다. 2017년부터는 전국 325곳 하구 668개 지점에 대한 수질, 생물 서식현황 등 하구 수생태계 현황을 3년 주기로 조사하고 있고 2021년 기준 각 조사지점을 2회 이상 조사하였다. 2017년부터 연간 약 100여 개의 하구의 200여 개 지점에서 조사가 진행되었고 지난 14년 평균 63개 하구(Fig. 3a)의 123개 지점(Fig. 3b)에서 조사를 실시하였다.

2. 하구 생물상 기록

325곳 하구 668개 지점에서 2008년부터 2021년(식생 2020년까지)까지 부착돌말류(634종), 저서성 대형무척추동물(658종), 어류(220종), 식생(585종)에 속한 총 2,097종의 하구 생물이 기록되었다. 습지보전법(법률 제17844호)에 의해 5년마다 습지의 생태계 현황에 대해 조사하는 습

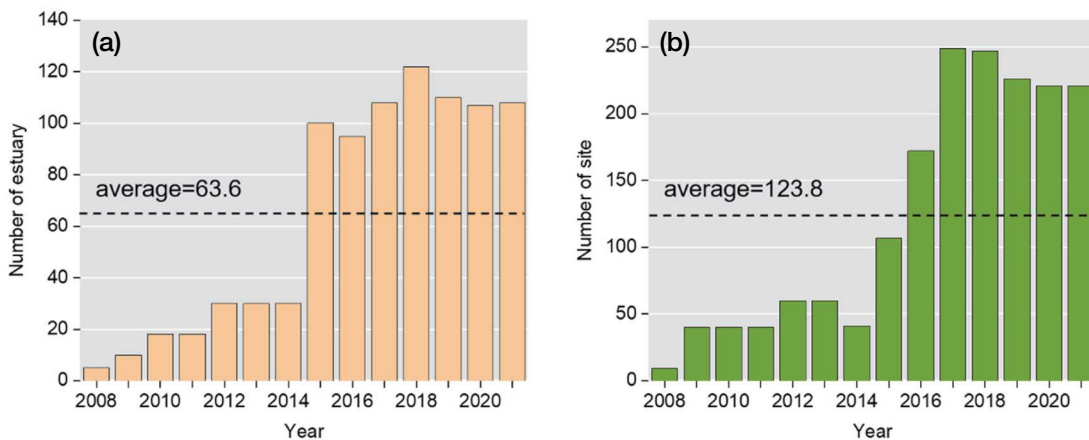


Fig. 3. Changes in the number of survey estuaries (a) and sites (b) for estuarine ecosystem health assessment project of Ministry of Environment, Republic of Korea.

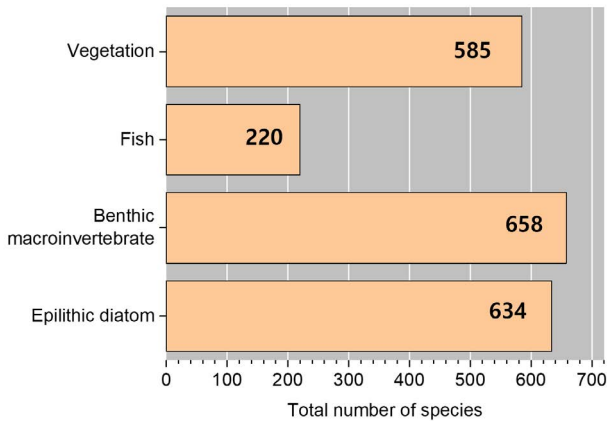


Fig. 4. The number of species recorded in estuarine ecosystem health assessment project.

지보호지역 정밀조사에서 하구습지로 분류되는 낙동강하구와 한강하구에서 기록된 저서성 대형무척추동물과 어류, 식생에 속한 종수가 약 400여 종에서 600여 종인 것을 감안하면 전국 단위 하구 생태계 조사의 의미를 이해할 수 있다(Fig. 4).

3. 참여인력 확대

지난 14년간 연평균 76여 명의 연구원이 하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가사업에 참여했다(Fig. 5). 100여 개 지점을 조사하기 시작한 2015년 이후부터는 약 100여 명 이상의 연구원이 사업에 참여하고 있다. 조사항목에 따라 책임연구원(Principal researcher, 기업 및 연구기관 등의 대학 이상 과정 이수 후 해당 분야 경력 12년 이상, 석사학위 취득 후 해당 분야 경력 8년 이상, 박사학위 또는 기술사자격 취득 후 해당 분야 경력 4년 이상, 대학의 조교수 이상)은 조사분야에 따라 4명 내지 6명으로 지난 14년간 큰 변화가 없었다.

연구원(Senior researcher, 기업 및 연구기관 등의 대학 이상 과정 이수 후 해당 분야 경력 7년 이상, 석사학위 취득 후 해당 분야 경력 5년 이상, 박사학위 또는 기술사 자격 취득자, 대학의 박사후 연구원), 연구보조원(Research assistant, 기업 및 연구기관 등의 전문대학 이상의 과정 이수자, 대학의 석·박사과정 재학생), 보조원(Assistant, 단순 업무보조, 고등학교이상 과정 수료자) 수는 2015년 이후 크게 증가하였다.

4. 표준화된 조사 및 자료관리

하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가는 2017년부터 「물환경보전법」(이하 “법”이라 한다) 제9조의 3(수생태계

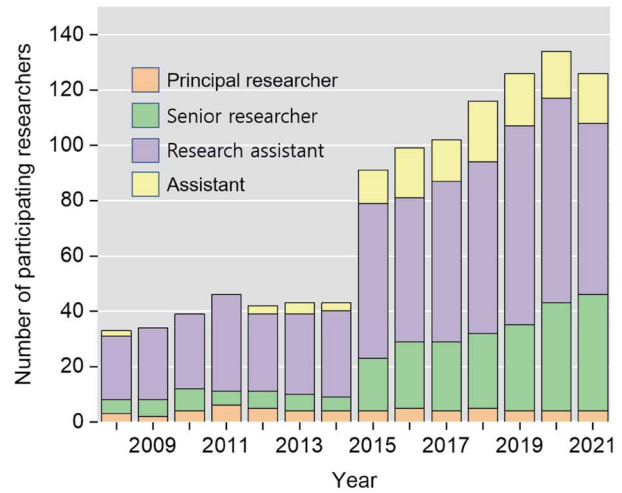


Fig. 5. Changes in the number of participating researchers per year in estuarine ecosystem health assessment project.

현황 조사 및 건강성 평가), 같은 법 시행규칙(이하 “시행규칙”이라 한다) 제24조의 2(수생태계 현황 조사), 제24조의 3(수생태계 건강성 평가)에 따라 진행되고 있다. 하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가는 자연환경보전법 제30조의 규정에 의거한 자연환경조사와 습지보전법 제4조의 규정에 의거한 습지조사와 더불어 법정조사에 속한다. 다른 법정조사에 비해 늦게 시작된 조사이지만 기존의 법정조사와는 달리 하구부착돌말류평가지수(KETDI), 하구저서성 대형무척추동물 평가지수(KEBMI), 하구어류평가지수(KEFAI), 하구수변식생평가지수(KERVI) 등을 활용하여 조사 대상지를 등급화하고 있다(Fig. 6).

하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가는 표준화된 조사지침(수생태계 현황 조사 및 건강성 평가 방법 등에 관한 지침)에 따라 실시하고 있어 조사결과의 신뢰성과 안정성을 확보하고 있다. 조사지침도 조사결과와 조사지 현장 상황을 반영하여 변경해 장기생태연구의 일반적인 단점을 보완하고 있다.

국외 연구동향

1. 하구 생태연구 정보량

하구의 생태계 조사 및 평가와 관련된 국외학술논문은 총 1,195편이었는데 주요 생태계 유형에서 진행된 생태계 조사 및 평가와 관련된 연구량과 비교하면 적은 편이다. 습지 생태계 조사 및 평가 관련 국외학술논문량은 994편(1992년부터 2021년), 하천은 7,087편(1989년부터

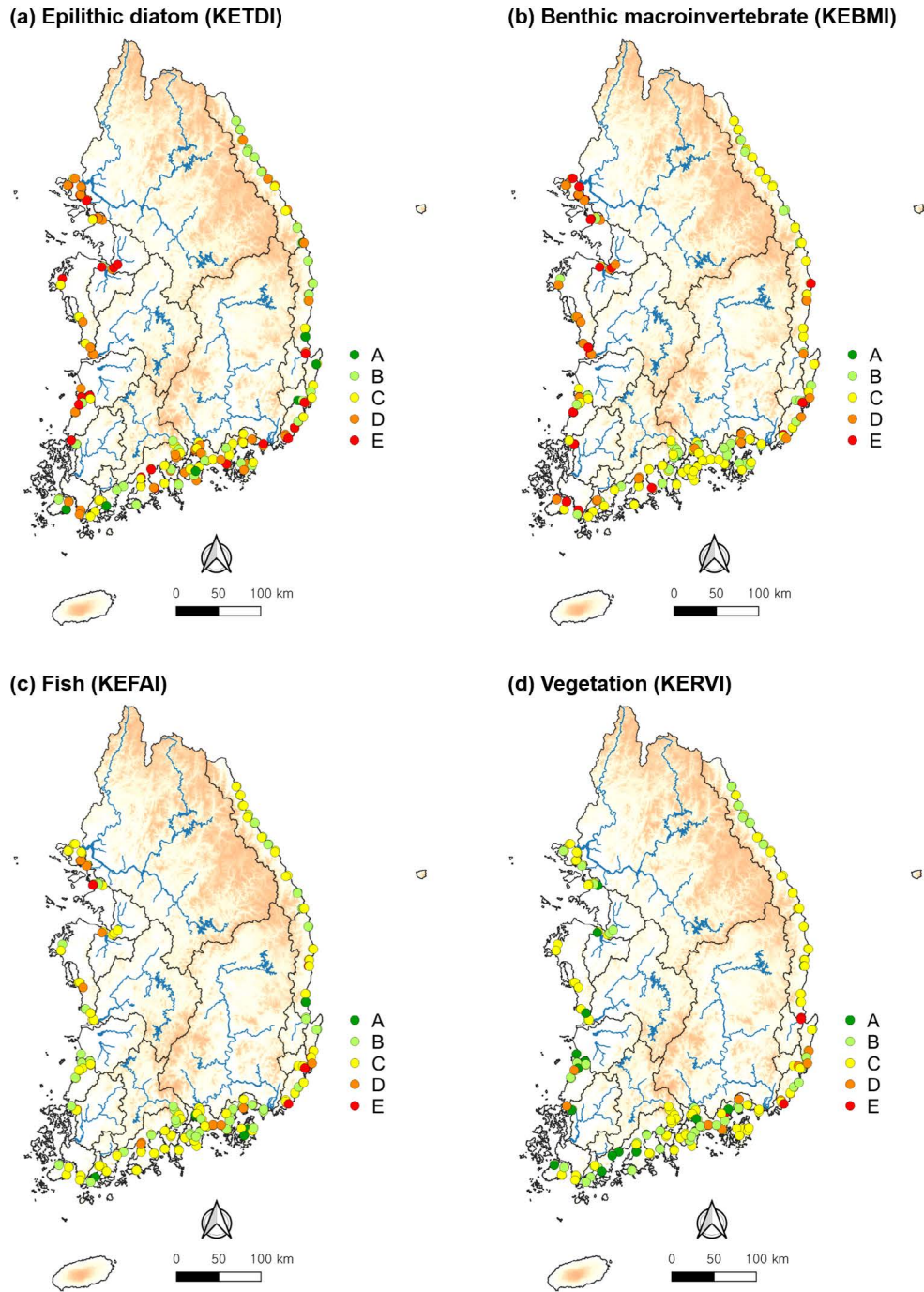


Fig. 6. The result of estuarine assessment using biotic index.

2021년), 숲은 4,643편(1992년부터 2021년), 해양은 622편(1990년부터 2021년)이었다.

하구에 대한 연구는 오래전부터 진행되었지만 하구 생태계 모니터링과 하구 생태계 평가와 관련된 연구는 2012년부터 본격적으로 진행된 것으로 보인다(Fig. 7a). 2012년

부터 2021년까지 5.55% 연간 성장률(CAGR)을 보였고 연평균 120여 편의 학술논문이 출판되었다.

학술논문의 교신저자의 국적으로 국가별 하구생태계 모니터링과 평가 관련 연구동향을 살펴보면 중국이 264편으로 가장 많은 연구가 진행되었고 미국(165편), 인도(112

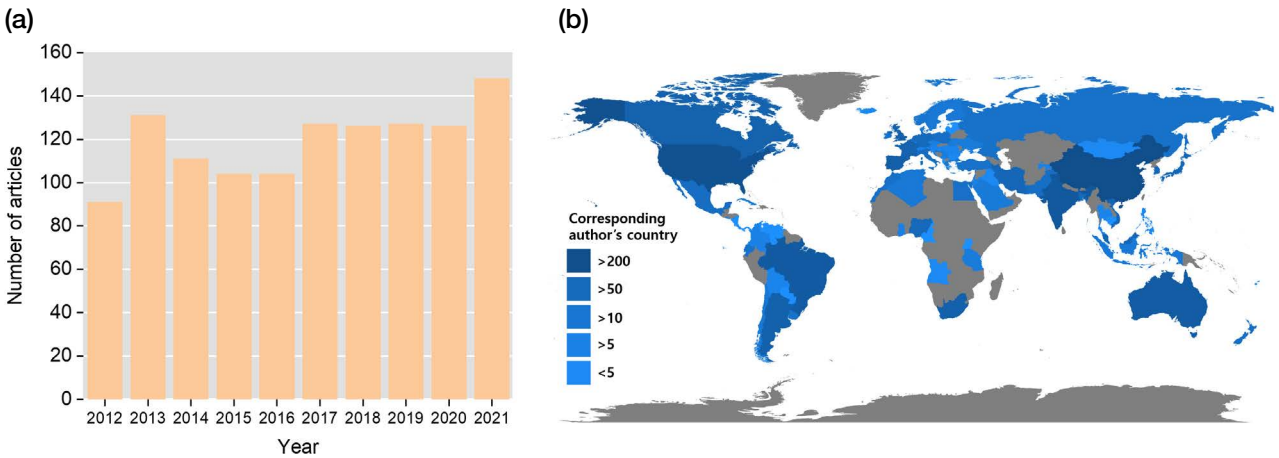


Fig. 7. The number of research articles related to estuarine ecosystem assessment and monitoring (a, the number of articles by year; b, the number of articles by country).

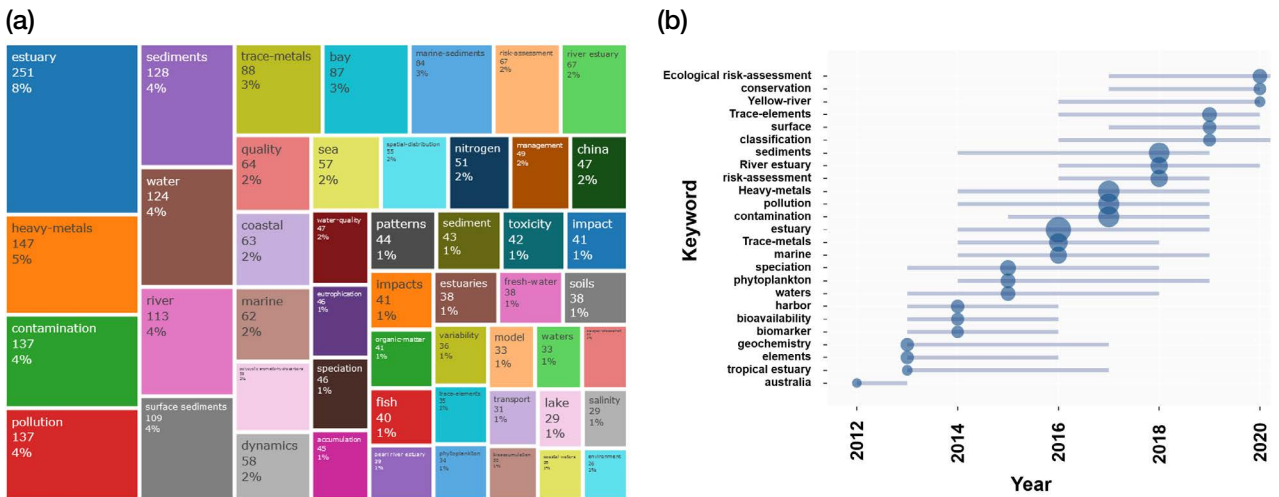


Fig. 8. Keywords related to estuarine ecosystem assessment and monitoring (a, keyword frequency; b, research topic by period).

편), 호주(65편), 포르투갈(64편), 브라질(57편), 스페인(46편), 영국(33편), 남아프리카공화국(30편) 순이었다(Fig. 7b). 한국은 15편으로 69개 국가 중 15위였다.

2. 연구주제

하구 생태계 모니터링과 하구 생태계 평가와 관련된 학술논문에서 가장 많이 사용된 단어는 하구(estuary, 251회, 8%)였고 중금속(heavy metal, 147회, 5%), 오염(contamination, 137회, 4%), 오염(pollution, 137회, 4%), 퇴적물(sediment, 128회, 4%), 물(water, 124회, 4%) 순이었다(Fig. 8a). 각 단어별 사용빈도를 연도에 따라 구분하면 최

근에는 생태계 위해요소평가(ecological risk-assessment)나 보전(conservation), 퇴적물(sediment)과 관련된 연구가 진행되고 있다(Fig. 8b).

각 문헌정보에서 사용된 단어의 사용빈도를 이용해 요인분석을 실시한 결과 크게 세 가지의 연구주제로 구분되었다. 생태계 특성(ecological characteristics)과 관련된 연구에서는 수질과 관련된 연구를 중심으로 식물플랑크톤, 염분, 영양염류와 관련된 연구가 포함되어 있다(Fig. 9). 오염물(pollution)과 관련된 연구에서는 생물농축(bioaccumulation), 중금속(heavy metals), 퇴적물(sediment)을 주제로 한 연구가 포함되어 있다. 위해요소평가와 관련된 연구는 일부 국가에서 진행된 위해요소를 도

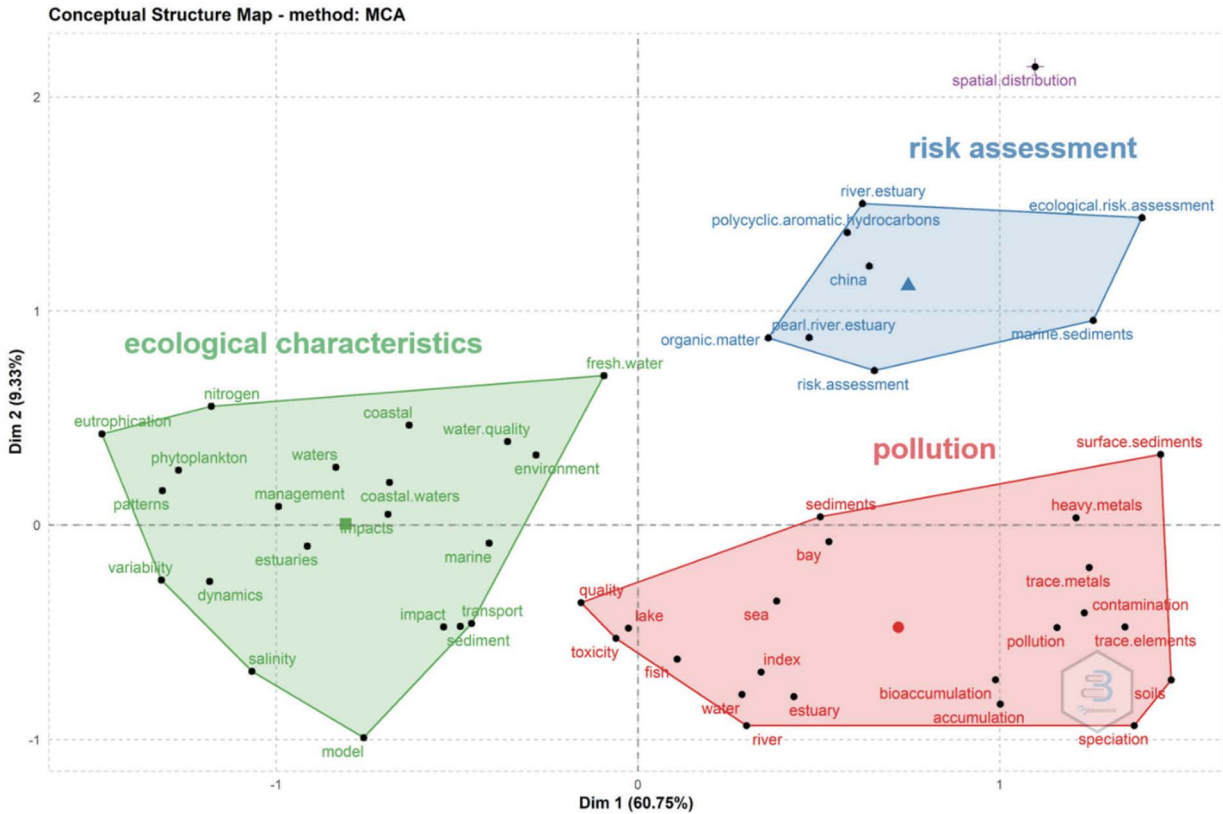


Fig. 9. Keyword cluster and research topics on estuarine ecosystem assessment and monitoring.

출하고 시나리오에 따른 하구 생태계 변화를 예측한 연구가 포함되어 있다.

결론

지난 14년 동안 전국 단위로 진행된 “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 사업은 물환경보전법(법률 제17893호)에 의해 수행되는 제도화된 생태계 조사(mandated monitoring)이고 10년 이상 반복되는 현장 기반의 실증적 측정치를 지속적으로 수집하는 장기생태조사(long-term ecological research)에 속한다(Lindenmayer *et al.*, 2012). 제도화된 생태계 조사는 환경조건이 개선되거나 악화되고 있는지 일반적인 추세를 파악하기 위해 수행된다. 제도화된 생태계 조사는 생태계 또는 개체의 변화에 영향을 미치는 요인과 원리를 파악하는 것을 목표로 조사를 수행하지 않는다. 이러한 이유로 장기적으로 진행되는 제도화된 생태계 조사를 과학적 연구라기보다 관리 활동이라고 주장하기도 한다(Nichols and Williams, 2006; Hellawell, 2012). 하지만 제도화된 생태계 조사는 환경 변

화에 대한 생태학적 반응을 정량화하고 장기간에 걸쳐 발생하는 복잡한 생태계 현상을 이해하는데 도움이 된다.

제도화된 생태계 조사를 통해 생태계를 파악하고 현상에 대한 이론개발의 기초를 제공하기 위해서는 자료의 엄격한 품질 보증이 중요하다. 자료의 품질이 보장될 때 장기간에 걸쳐 수집된 고품질 생태정보를 통해 생태계 변화를 통찰할 수 있다(Caughlan and Oakley, 2001; Lindenmayer and Likens, 2010). “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 사업은 표준화된 조사지침(국립환경과학원고시 제2019-51호)에 따라 조사된 결과를 기반으로 자료를 추적하고 있고 생태전문가 및 행정전문가가 복수로 검토해 자료의 품질을 관리하고 있다. “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 사업에서는 정도관리 지침을 마련해 현장조사와 실내분석에서 발생할 수 있는 오류를 방지하고 있다(국립환경과학원 예규 제775호). 특히, 단순 생물종목록 작성을 목표로 한 다른 제도화된 생태계 조사와는 달리 각 조사지점의 상태를 생물지수를 이용해 평가해 하구 생태계의 건강성 추세를 파악하고 있어 제도화된 생태계 조사의 목적을 달성하고 있다.

제도화된 생태계 조사의 실패요인으로 꼽히는 핵심인력

손실 문제도 지난 14년간 진행된 “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 사업에서는 발생하지 않는 것으로 판단된다. 연간 100여 명의 전문연구인력이 사업에 참여하고 있어 공동 연구의 플랫폼 역할을 수행해 다학문 연구를 촉진시키고 생태분야 전문인력양성에 기여하고 있다.

현장조사가 중심인 생태계 조사는 때로 ‘신데렐라 과학’이라고 불릴 정도로 자금을 지원하는 기관이나 연구자에게조차도 그 가치를 인정받지 못하기도 한다(Nisbet, 2007). 또한 열악한 실험설계를 기반으로 너무 많은 항목이나 대상을 조사해 자료의 활용성이 낮은 경우가 많다(Nichols and Williams, 2006; Likens and David, 2018). 최근에는 증거기반 정책이나 의사결정을 지원하기 위해 정보를 제공하는 데 있어 핵심적이고 실용적인 정보를 효과적으로 전달하지 못하는 연구자도 제도화된 생태계 조사의 당위성을 낮춘다는 의견이 있다(Lindenmayer *et al.*, 2013). 현장 중심의 제도화된 생태계 조사의 가치를 향상시키기 위해서는 개념적 모델이 적용되어야 하고 엄격한 연구설계가 뒷받침되어야 한다(Carpenter *et al.*, 1995; Lindenmayer and Likens, 2009). 특정 분류군 또는 지점에는 우리가 알고자 하는 질문에 대해 구체적이고 가설을 검증할 수 있는 연구를 진행해 제도화된 생태계 조사의 단점을 보완할 수 있다. 또한 이러한 연구를 통해 생태계 변화를 예측할 수 있어 연구자뿐만 아니라 의사결정자와 생태계 관리자가 필요한 정보를 제공할 수 있다(Lindenmayer and Likens, 2009).

국외학술논문 분석을 통해 하구 생태계 조사에서 오염물과 퇴적물에 대한 연구가 비교적 최근에 활발히 진행되는 것을 확인했다. 하구 순환이 원활하지 않은 하구가 다수 분포하는 우리나라의 경우 하천에서 유입되는 유기물 또는 오염물이 퇴적되어 생물에 직간접적으로 영향을 끼칠 가능성은 매우 높다(Sun *et al.*, 2012). 하지만 “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 사업에서는 오염물이나 퇴적물과 생물 간의 관계를 규명하는 연구는 포함되어 있지 않다. 2012년부터 환경부는 퇴적물측정망을 운영하고 있지만 하구에 위치한 측정망의 수가 부족해 생물과 상관관계를 파악하기에는 무리가 있다. “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 조사 대상지와 퇴적물측정망이 중첩되는 일부 장소에 한해서라도 중금속 또는 오염물의 생물 농축과 생리반응과 같은 특정연구가 진행될 필요가 있다.

Lindenmayer와 Likens (2010)은 제도화된 생태계 조사가 효과적으로 유지되기 위해 몇 가지 중요한 사안을 제시했다. 먼저, 상호 보완적인 기술을 가진 사람들 간의 파트너십을 강조하였다. 정부 및 비정부조직, 대학, 연구기관의 생태학자와 통계학자, 정책입안자, 관리자가 파트너십을

구축해 생태계 조사 사업을 김정하고 조사결과의 확산에 기여할 수 있다. 연구자들은 정책입안자와 관리자가 제기하는 다양한 질문에 대답할 수 있는 사안과 대답할 수 없는 사안을 상대방이 이해할 수 있게 설명해야 한다(Pielke, 2007). 현재까지 “하구 수생태계 현황 조사 및 건강성 평가” 사업은 생물조사 중심의 사업이었지만 사업의 효용성 확대를 위해서는 자료의 활용을 위해 현장기반 연구자와 통계학자, 생태모델링 전문가, 생태이론학자 등 다양한 분야의 연구자가 공동으로 수행할 수 있는 사업분야의 발굴도 필요해 보인다(Reichman *et al.*, 2011).

적 요

하구는 이질적인 매질인 하천과 바다가 다양한 환경을 조성하고 각 환경에 적응한 생물이 서식하는 공간이다. 하지만 하구의 생태적 가치를 인식하기 이전에 하구둑 건설이나 매립 등으로 대규모 개발사업으로 인해 하구의 면적이 소실되고 하구의 생태환경도 훼손되었다. 한국에는 총 643개 하구가 위치해 있지만 35% 이상이 하구 순환이 원활하지 않은 닫힌하구이다. 2008년 이후 환경부는 “하구 수생태계 건강성 조사 및 평가” 사업을 통해 하구 생태계에 관한 지식을 축적하고 하구와 관련된 주요 문제를 해결하기 위해 노력하고 있다. 지난 14년간의 사업을 통해 총 2,097종의 하구 생물을 기록하였고 새롭게 개발된 생물지수를 이용해 각 조사지점의 서식환경을 평가하고 있다. “하구 수생태계 건강성 조사 및 평가” 사업은 장기적으로 수행되는 제도화된 생태조사로 생태계의 변화의 원인과 과정 등을 규명하기는 어렵지만 연간 100여 명 이상의 연구원들이 표준화된 조사지침에 따라 획득한 결과를 엄격히 관리해 하구의 보전과 관리 정책을 수립하는데 필요한 경험적 자료를 제공하고 있다. 제도화된 생태조사의 단점을 보완하기 위해 현재 조사 대상지 중 일부에서는 하구의 오염물 또는 퇴적물과 생물과의 관계를 파악하는 연구를 수행해 하구 생태계의 변화의 원인과 과정을 밝힐 수 있다.

저자정보 원두희((주)생태조사단 대표이사), 임성호((주)생태조사단 차장), 박지형(국립환경과학원 과장), 문정숙(국립환경과학원 환경연구사), 도윤호(공주대학교 부교수)

저자기여도 개념설정: 원두희, 박지형, 문정희, 도윤호, 자료수집: 도윤호, 임성호, 분석: 도윤호, 임성호, 원고작성: 원두희, 도윤호, 박지형, 문정숙, 과제관리: 원두희, 연구비 수주: 원두희

이해관계 이 논문에는 이해관계 충돌의 여지가 없습니다.

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

REFERENCES

- Aria, M. and C. Cuccurullo. 2017. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics* **11**: 959-975.
- Carpenter, S.R., S.W. Chisholm, C.J. Krebs, D.W. Schindler and R.F. Wright. 1995. Ecosystem experiments. *Science* **269**: 324-327.
- Caughlan, L. and K.L. Oakley. 2001. Cost considerations for long-term ecological monitoring. *Ecological Indicators* **1**: 123-134.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R.V. O'Neill and J. Paruelo. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* **387**: 253-260.
- Hellawell, J.M. 2012. Development of a rationale for monitoring. p. 1-14. *In: Monitoring for conservation and ecology.* (Goldsmith, F.B., ed.). Springer Science & Business Media, London, UK.
- Likens, G. and L. David. 2018. Effective ecological monitoring. CSIRO publishing, Clayton, Victoria, Australia.
- Lim, J.-C., K.-H. Choi, B.-K. Lee and G.-Y. Lee. 2020. Investigation plan to strengthen the conservation and management of estuary ecosystems. *The Journal of Korean Island* **32**: 317-334.
- Lindenmayer, D.B. and G.E. Likens. 2009. Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in Ecology and Evolution* **24**: 482-486.
- Lindenmayer, D.B. and G.E. Likens. 2010. The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation* **143**: 1317-1328.
- Lindenmayer, D.B., G.E. Likens, A. Andersen, D. Bowman, C.M. Bull, E. Burns, C.R. Dickman, A.A. Hoffmann, D.A. Keith and M.J. Liddell. 2012. Value of long-term ecological studies. *Austral Ecology* **37**: 745-757.
- Lindenmayer, D.B., M.P. Piggott and B.A. Wintle. 2013. Counting the books while the library burns: why conservation monitoring programs need a plan for action. *Frontiers in Ecology and the Environment* **11**: 549-555.
- Lotze, H.K., H.S. Lenihan, B.J. Bourque, R.H. Bradbury, R.G. Cooke, M.C. Kay, S.M. Kidwell, M.X. Kirby, C.H. Peterson and J.B. Jackson. 2006. Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science* **312**: 1806-1809.
- Nichols, J.D. and B.K. Williams. 2006. Monitoring for conservation. *Trends in Ecology and Evolution* **21**: 668-673.
- Nisbet, E. 2007. Cinderella science. *Nature* **450**: 489-890.
- Pethick, J. 2002. Estuarine and tidal wetland restoration in the United Kingdom: policy versus practice. *Restoration Ecology* **10**: 431-437.
- Pielke, J. and A. Roger. 2007. The honest broker: making sense of science in policy and politics. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Reichman, O.J., M.B. Jones and M.P. Schildhauer. 2011. Challenges and opportunities of open data in ecology. *Science* **331**: 703-705.
- Rho, P. and C.-H. Lee. 2014. Spatial distribution and temporal variation of estuarine wetlands by estuary type. *Journal of the Korean Geographical Society* **49**: 321-338.
- Sun, J., M.-H. Wang and Y.-S. Ho. 2012. A historical review and bibliometric analysis of research on estuary pollution. *Marine Pollution Bulletin* **64**: 13-21.