



A review of estuary research over the past 20 years (2001-2023) and suggestions for future research

Lee, Saem^{a*}

^aDepartment of Spatial & Environmental Planning, ChungNam Institute, Gongju, Korea

Paper number: 24-014

Received: 7 March 2024; Revised: 25 September 2024; Accepted: 27 September 2024

Abstract

The purpose of this study is to review estuary-related research conducted in South Korea over the past 20 years and is to suggest future research directions for the major rivers in South Korea. By analyzing studies published in domestic academic journals since 2001, we classified and organized research related to the estuaries of major rivers. Existing research has primarily focused on defining estuaries, assessing their physical conditions, and examining water resource conservation measures in terms of water flow, supply, and quality. Future research might need to explore legal, social, economic, and environmental approaches for integrated water management. This study highlights the importance of integrated estuary management and provides fundamental data for sustainable water management.

Keywords: Estuary, Integrated water management, Sustainable water management

최근 20년간 하구 연구(2001-2023)와 향후 연구 방향

이샘^{a*}

^a충남연구원 공간환경연구실, 책임연구원

요 지

본 연구는 2001년부터 2023년까지 국내 주요 학술논문집에 수록된 하구 관련 연구를 분석하여, 낙동강, 한강, 금강, 영산강, 섬진강 하구를 중심으로 연구 동향을 파악하고 향후 연구 방향을 제시하였다. 기존 연구는 하구의 물리적, 화학적, 생태학적 특성 변화와 관리, 생물학적 특성과 생태 모델, 하구 생태계와 철새 서식지, 하구역 환경 관리 및 개발, 지속 가능성, 하구 생태계서비스의 경제적 가치 평가, 하구 관리의 법·제도적 측면과 통합적 접근을 다루었다. 이를 바탕으로 균형잡힌 하구 관리를 위해 법적, 사회적, 경제적, 환경적, 기술적 접근에 대한 시사점을 도출하였다. 본 연구는 하구의 지속 가능한 관리와 균형 잡힌 개발을 위한 통합적 접근 방안 및 향후 연구 방향을 제시한 점에서 그 의의가 있다

핵심용어: 하구, 하구 통합적 접근, 지속가능한 관리

1. 서 론

2022년 9월, 허리케인 이언으로 미국 플로리다의 템파 베이와 칼루사하치 강 하구에서는 심각한 홍수가 발생해 많은 사망자와 경제적 손실을 초래했다(Hauptman *et al.*, 2024). 2023년 5월, 74년 만에 최악의 가뭄으로 우루과이는 물 부족

비상사태를 선포하고, 강 하구의 염분 높은 물을 식수로 활용하는 방안을 마련했다(Newstree, 2023). 최근 극단적인 기후 변화로 인해 풍수해 위험이 점차 증가하고 있으며, 하천과 하구에서 발생하는 홍수와 가뭄 문제는 지속 가능한 수자원 관리의 필요성을 더욱 부각시키고 있다. 또한, 예측하기 어려운 기후 변화로 인해 하천에 유입되는 쓰레기와 오염물질의 양이 증가하고 있어, 이를 해결하기 위한 지속 가능한 하구 관리 대책이 요구되는 시점이다.

하구는 육상과 해양생태계가 만나는 복합적이고 역동적인

*Corresponding Author. Tel: +82-41-840-1159
E-mail: sl.saemlee@gmail.com (Lee, Saem)

환경으로, 물리적·화학적·생물학적 특성이 교차해 독특한 생태계를 형성한다. 그러나 과거 급격한 산업화와 도시 확장으로 낙동강, 한강, 금강, 영산강, 섬진강 하구의 생태적 건강성이 크게 훼손되었다. 이를 해결하기 위해 지난 20여 년간 하구의 물리적·화학적 변화, 생물학적 특성, 철새 서식지 보호와 환경 관리에 대한 다양한 연구가 이루어졌으며, 이를 기반으로 하구 복원, 수질 개선, 생태적 연결성 회복을 목표로 한 국내 정책과 사업들이 시행되고 있다.

국내 하구는 총 463개로, 이 중 228개, 약 49%는 하구둑 설치로 인해 물 순환이 차단된 닫힌 하구로 분류된다. 닫힌 하구는 전국적으로 다양한 지역에 분포하며, 홍수 방지와 농업용수 확보 등 여러 이점이 있지만, 물 순환이 차단됨에 따라 수질 악화, 생태계 파괴, 물 이용의 비효율성 등 하구의 자연적 흐름 제한으로 인해 생태계 건강성과 지역 간 물 자원 분배에 부정적인 영향을 미치고 있다. 한편, 2000년대 이후, 하구 관리의 패러다임은 개발 중심에서 생태계 보호 중심으로 전환되면서 생태계서비스의 중요성이 강조되었고, 경제 개발뿐만 아니라 자연 생태계의 유지와 보호가 장기적으로 사회적 이익을 가져온다는 인식이 확산되었다. 이에 따라 하구를 자연 자원으로 인식하고 생태적 기능 보존 관리 방안이 중요하게 강조되고 있다. 더불어 지속 가능한 관리와 복원이 하구 관리의 주요 과제로 부각되었으며, 하구 생태계 회복과 지속 가능한 관리를 위한 연구와 투자의 필요성이 제기되고 있다.

더욱이, 하구 생태계는 수문학적, 생태학적, 화학적, 지형적 연계를 통해 주변 환경과 밀접하게 연결되며, 유역, 하천, 연안 간의 다층적인 상호작용을 포함한다. 이러한 상호작용은 생태계서비스 혜택, 자원의 흐름, 경제적 상호의존성과 얽혀 있어 관리가 매우 복잡하며, 해결이 필요한 중요한 과제이다. 다양한 이해관계자와 행정 기관이 참여하는 다원화된 국내 하구 관리 체계의 한계점이 지적됨에 따라 하구 관련 법제도를 재검토하고, 통합적 하구관리 방안을 마련하는 연구의 중요성이 더욱 강조되고 있다.

따라서, 본 연구는 국내 주요 하구를 대상으로 지난 20여 년간 진행된 연구를 종합적으로 분석하고, 향후 연구와 관리 방향을 제시하고자 한다. 이를 위해 하구의 물리·화학적 특성 변화, 생물학적 특성 및 생태 모델, 하구 생태계와 철새 서식지, 하구역 환경관리와 개발, 지속가능성과 하구 생태계서비스 경제적 가치 평가, 하구 관리의 법·제도적 측면과 통합적 접근으로 구분하여 기존 연구를 검토하였다.

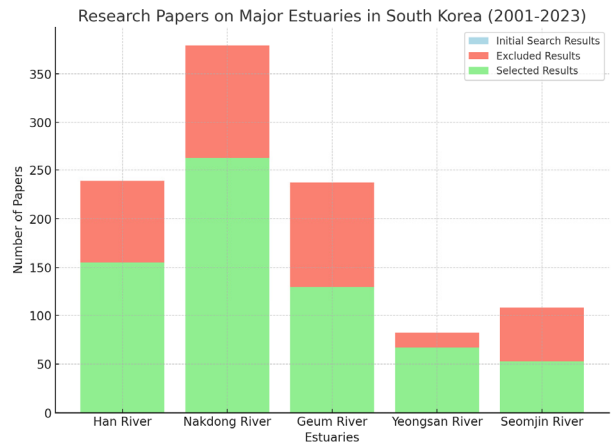


Fig. 1. Research papers on major estuaries in South Korea (2001-2023) from DBpia

2. 연구 방법

본 연구는 국내 학술논문집에서 하구를 키워드로 기존 연구의 주요 내용을 검토하였다. 이를 위해 DBpia (<http://www.dbpia.co.kr>)에 수록된 국내 학술논문집을 분석하여, 주요 대표 강 하구에 대한 연구 동향을 살펴보았다. 검색 기간은 2001년부터 2023년 12월까지로, 낙동강 하구, 한강 하구, 금강 하구, 영산강 하구, 섬진강 하구를 검색어로 논문을 찾았으며, 연구 내용의 명확성과 타당성을 확보하기 위해 학술대회 발표집, 심포지엄 초록, 연구보고서 등은 제외하였다.

구체적인 검색 결과를 보면, 낙동강 하구는 총 379건 중 학술대회 자료 101건, 전문 잡지 9건, 연구보고서 7건을 제외하였다. 한강 하구는 239건 중 학술대회 자료 48건, 연구보고서 26건, 전문 잡지 9건, 동향 자료 1건을 제외하였다. 금강 하구는 237건 중 학술대회 자료 60건, 학위논문 40건, 연구보고서 2건, 전문 잡지 1건, 기타 4건을 제외하였다. 영산강 하구는 82건 중 학술대회 자료 15건을, 섬진강 하구는 91건 중 학술대회 자료 38건, 학위논문 17건을 제외하였다.

이로써 낙동강 하구 262편, 한강 하구 155편, 금강 하구 130편, 영산강 하구 67편, 섬진강 하구 53편으로 총 667편의 논문을 검토하였고, 이 중 사회, 경제, 환경적 측면을 고려해 총 125편을 선정하여 연구 동향을 분석하였다(Fig. 1).

3. 국내 하구 관련 연구 동향

3.1 국내 주요 하구

낙동강, 한강, 금강, 영산강, 섬진강 하구는 각기 다른 사회

적, 경제적, 문화적 배경에 따라 다양한 관리 방식이 적용되고 있다. 각 하구는 농업, 어업, 생태 보전, 관광 등 다양한 사회적 가치를 지니고 있으며, 이러한 가치들이 복합적으로 얽혀 지역 발전과 환경 보존 간의 균형을 맞추는 것이 핵심 과제로 떠오르고 있다. 하천 상류에 건설된 댐과 보, 주요 하구에 설치된 하굿둑으로 인해 물 흐름이 제한되면서 하구 생태계와 수질이 변화하였고, 이에 따른 경제 이익 구조 변화로 다양한 이해관계자가 나타났다. 하굿둑 건설로 농업용수 확보와 홍수 예방 등 경제적 이익에 기여했지만, 어족 자원 감소와 수질 악화 등 생태계에 부정적인 변화도 초래되었다. 이로 인해 환경 보전과 경제 개발 간의 이해관계가 충돌하면서, 지역 사회 내에서 지속적인 갈등이 발생하고 있다.

낙동강 하구는 경상남도 창원시와 부산시에 걸쳐 있으며, 다른 하구와 달리 최근 일부 수문이 시범적으로 개방되어 생태계 회복과 수질 개선을 위한 연구 및 정책 논의가 진행 중이다. 특히 낙동강 하굿둑 수문 개방 시도는 하구 생태계 복원과 지역 경제 및 환경 보전의 균형을 찾기 위한 중요한 이슈로 부각되고 있다. 한강 하구는 서울, 경기, 인천을 포함한 수도권의 중심지로서 남북한을 연결하는 지정학적 중요성이 크며, 남북 관계와 관련하여 그 중요성이 더욱 강조된다. 금강 하구는 전라북도 군산시와 충청남도 서천군을 경계로 하며, 군산항과 서천 연안의 경제 활동과 밀접하게 연관되어 있다. 국내 주요 하구 관리 프로젝트 중 하나였던 금강 하굿둑은 농업용수 확보와 홍수 조절에 긍정적인 역할을 했지만, 어족 자원 감소와 수질 악화 등 환경 문제를 야기했다. 이러한 문제는 지역 생태계에 부정적인 영향을 미치며, 농업과 환경 보전 간의 갈등이 지속되고 있어 해결책이 필요하다. 영산강 하구는 전라남도 목포, 무안, 신안 지역을 중심으로 하굿둑 건설로 인해 감소하천의 특성이 사라지면서 자연 생태계가 크게 변화했다. 이로 인해 수질 악화와 어족 자원 감소, 수질 오염 문제가 심각해졌으며, 지역 주민들의 생활과 밀접하게 연관된 갈등이 존재하고 있다. 반면, 섬진강 하구는 전라남도 광양, 전라북도 순천, 경상남도 하동 지역에 걸쳐 있으며, 하굿둑이 설치되지 않아 비교적 양호한 생태계를 유지하고 있다.

3.2 물리·화학·생태학적 특성 변화와 관리

산업화, 도시화, 하천 정비, 수자원 개발 등 인간 활동은 하구 자연환경에 변화를 일으켜 물리·화학·생태학적 측면에 영향을 미쳤다. 이로 인해 수질, 수량, 염분 농도, 퇴적물 이동 등에 대한 연구가 활발히 이루어졌으며, 단한 하구에서는 퇴적물 축적, 생물다양성 감소, 조류 서식지 감소 등 하구 생태계 변화가 관찰되었다(Kim and Lee, 2007).

낙동강 하구와 주변 연안에 대한 연구는 표층 퇴적상과 퇴적환경 변화를 다루고 있다. 예를 들어, 낙동강 하구 갯벌의 사질 퇴적물에서 생지화학적 유기 탄소 순환을 분석하거나, 해양 퇴적토의 중금속 농도를 측정해 오염도를 평가하는 연구들이 있다(Kim and Ha, 2001; Lee *et al.*, 2007b; Park and Ock, 2017; Lee *et al.*, 2020; Shin, 2017). 낙동강 하구에서는 하굿둑 방류가 수질에 미치는 영향에 대한 연구가 지속적으로 이루어졌으며, 방류로 인해 해수질의 시공간적 변화가 관찰되었다(Yoon *et al.*, 2008). 또한, CCHE2D 모형을 이용해 낙동강 하류 유사 특성과 유사량 공식 및 하상변동의 수치모델의 결과를 분석한 연구도 있다(Ji *et al.*, 2008). 하굿둑 방류에 따른 해저 변화를 연구하거나(Kim and Kim, 2021), GPS와 위성영상을 이용해 낙동강 하구 사주섬의 식생대를 비교하는 연구도 진행되었다(Lee *et al.*, 2021). 이 외에도 위성영상과 GIS를 활용해 지형 변화와 해안선 변화를 탐지하는 다양한 연구가 있다(Jeon *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2017; Oh *et al.*, 2010; Yoon *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2005; Lee *et al.*, 2011a).

한강 하구 관련 연구는 연안과 경기만의 물리적 특성, 조위 불확실성, 퇴적물의 생태·화학적 반응 등을 다루고 있다(Yoon and Woo, 2012; Kim *et al.*, 2008). 한강 하구역의 수질 및 퇴적물 특성의 공간적 분포를 분석하고, 오염물질 유입 위치와 계절적 요인이 수질에 미치는 영향을 조사한 연구도 있다(Lee and Kim, 2008). 또한, 조석파 전파 특성과 소류사 이동 특성을 분석한 연구가 조사되었고, GIS 기반 통합 수질 모델 시스템을 이용해 한강과 경기만의 수질을 예측하는 연구가 나타났다(Kang and Moon, 2001; Lee and Kim, 2008). QGIS와 LANDSAT 위성사진을 활용해 한강 하구의 하안선 변화를 연구하거나(Youn *et al.*, 2021), 기후 변화와 개발로 인한 하상 구조 변화와 습지 형성을 조사한 연구도 진행되었다(Lee and Youn, 2022). 국내 연안 하구역의 지형적 특성을 분석하거나(Shin *et al.*, 2006), 하구연 수문 작동에 따른 물리적 환경 변화를 다룬 연구도 있다(Lee *et al.*, 2001). 금강 하구에서는 GIS 기법으로 수심 변화와 인공구조물이 수심 및 유속에 미치는 영향을 분석한 연구와 HF 레이더를 이용해 연안 표층 해류 유속을 분석한 연구가 이루어졌다(Hwang *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2007c; Park *et al.*, 2012a; Lee and Um, 2007).

영산강 하구 관련 연구로는 3차원 수치모델(EFDC)을 이용해 여름철 퇴적물 이동 양상을 분석한 연구와 생태·환경 관리를 위한 GIS 기반 통합 DB 관리 시스템 개발 연구가 있다(Bang *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2014a). 하구호와 퇴적물 내 인의 생지화학적 특성을 나타내고 탄소와 질소 안정 동위원소를 비교한 연구도 진행되었다(Choi *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2013b).

섬진강 하구에서는 여름과 겨울철 부유 퇴적물 농도 변화, 부유 퇴적물 특성, 하상 변동 예측 연구가 이루어졌으며, 염분 분포가 부영양화와 수질 변화에 미치는 영향을 다룬 연구도 지속적으로 진행되었다(Kim *et al.*, 2015c; Kim and Lee, 2004; Ceon and Kim, 2009; Noh *et al.*, 2011).

낙동강 하구에서는 머신러닝을 이용한 염분 농도 예측 연구가 진행되었고, 한강 하구에서는 염분 분포와 생태 환경적 특성을 다룬 연구와 수위 관측을 통한 하구 특성 분석과 염분, 유속 분포 연구가 진행되었다(Han *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2010; Shin and Yoon, 2005; Yoon and Woo, 2011). MIKE21 확산 모형을 통해 경기만과 한강 하구의 염분, COD 농도 분포를 예측하고 불확실성을 분석하는 연구도 이루어졌다. 영산강 하구에서는 담수 방류 후 수질 변화를 분석한 연구가 나타났고(Kim and Jin, 2019; Kim and Shin, 2020), 섬진강 하구에서는 3차원 수치모형을 이용해 순환 구조와 염수 침입 특성을 분석한 연구가 나타났다(Kang *et al.*, 2015). 장기적인 영양염류 유출량 변화와 방류량 증가로 인한 염수 침입 저감 효과를 분석한 연구도 진행되었다(Park *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2012b). 이처럼 다양한 연구들이 주요 하구의 물리적·생태적 특성을 기반으로 환경 변화를 조사했으나, 미래 예측을 위한 기초 데이터 구축이 여전히 필요한 상황이다. 기존 연구들은 생태, 물리, 화학적 요소 등 각각 집중된 개별 분석이 많아, 통합적이고 지속 가능한 하구 관리 전략을 제시하는 데 한계가 있다(Lim *et al.*, 2020). 더욱이 홍수와 가뭄 등 재해재난 대응과 기후 변화 시나리오를 기반으로 한 하구 수질 변화와 하구 생태계에 미치는 영향에 관한 연구가 상대적으로 부족한 것으로 판단된다.

3.3 생물학적 특성과 생태 모델

하구는 바닷물과 강물이 만나는 특수한 생태적 교차점으로, 염도, 수온, 영양염류 농도가 급격히 변해 플랑크톤 연구에 적합한 지역이다. 농업 활동에서 유입된 영양염류와 산업 폐수는 수질 오염을 일으켜 플랑크톤 군집 분포에 영향을 미치며, 플랑크톤 변화는 하구의 수질과 생태계 건강성을 평가하는 중요한 지표가 된다. 낙동강 하구 기존 연구로는 상류 지역 건설 사업 이후 식물 플랑크톤의 시·공간적 분포를 분석했고, 평수기와 태풍 통과 후 동물 플랑크톤 군집 분포를 비교한 연구가 이루어졌다(Yu *et al.*, 2014; Ryu *et al.*, 2016). 하굿둑 축조 전후의 어류상 변화, 환경적 변화와 계절적 영향을 고려한 생태계 반응 연구도 진행되었다(Ji and An, 2008). 한강 하구에서는 동물 플랑크톤의 행동 양상, 식물 플랑크톤 생체량, 수질 변화를 조사했으며(Sin *et al.*, 2005), 조석에 따른 물리적 환경 변화와 식물 플랑크톤 크기 구조 변동, 여름철 담수 방류

시 Chlorophyll a 농도 변화를 다룬 연구가 나타났다(Yoon *et al.*, 2013; Park and Sin, 2022). 이외에도 생태 하천 복원사업 우선순위를 선정하기 위해 하천의 물리적·화학적·수생태계 건강성 평가지수를 산정한 연구도 진행되었다(Baek *et al.*, 2023). 금강 하구에서는 담수 식물 플랑크톤을 활용해 수생태계 건강성을 평가하고, 하굿둑 부근 미생물 군집 특성을 조사한 연구가 있다(Kim *et al.*, 2018a; Park *et al.*, 2017; Bae *et al.*, 2005). 영산강과 섬진강 하구에서는 식물 플랑크톤 기원 색소 분포 변동 및 식물 플랑크톤과 박테리아 간 관계를 분석한 연구들이 진행되었다(Lee *et al.*, 2017; Shin and Yu, 2018; Min *et al.*, 2012; Na *et al.*, 2012; Shin and Yoon, 2011; Kim and Shin, 2020). 영산강과 섬진강 하구에서는 수달 서식지 이용과 생태계 교란 식물 분포를 다룬 연구(Ha *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019), 잘피 서식지의 해양 환경 특성과 계절에 따른 거머리말의 탄소·질소 성분 변화 분석(Ji *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2012), 주요 어종의 개체군 생태를 조사한 연구도 이루어졌다(Yang *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2013). 어류 군집 특성에 관한 연구로는 영산강과 섬진강 유역에서 저수지 크기에 따른 어류 군집 특성을 분석한 연구가 있다(Park *et al.*, 2020; Lee *et al.*, 2013a).

주요 하구에서 동·식물 플랑크톤 군집과 물리적 환경, 수생태계 건강성 간의 연관성을 연구했지만, 복잡한 생물학적 상호작용을 설명하는 데 한계가 있었다. 이를 보완하기 위해 해양-연안-하구가 연계된 정교한 생태 모델 개발과 생물학적 특성을 반영한 연구가 필요하며(Kim *et al.*, 2015b), 하구 생태계의 복잡성과 생물학적 특성을 반영한 연구가 지속적으로 축적될 수 있도록, 현장 조사를 기반으로 한 지역별 연구의 통합적 관리가 필요하다고 판단된다.

3.4 하구 생태계와 철새 서식지

하구는 철새 이동 경로의 중요한 중간 기착지이자 조류의 생태 서식지로, 개발과 간척사업으로 인해 갯벌과 습지 서식지가 축소되었다. 이에 따라 낙동강 하구에서는 천연기념물 조류의 분포, 민물가마우지와 꿩갈매기의 장기적 이동 현황, 지역별 조류 특성을 분석한 연구들이 수행되었다(Hong, 2005, 2004; Hong and Hong, 2023). 특히, 4대강 사업 이전 철새 도래지 현황과 수면성 오리류, 물떼새류, 백로류, 쇠제비갈매기의 이동을 장기 모니터링하여 번식지 변화와 중간 기착지로서의 역할을 파악한 연구가 주목받았다(Kim *et al.*, 2015a; Hong and Lee, 2010).

한강 하구는 재두루미의 주요 월동지이자 중간 기착지로, 재두루미 개체군 감소가 서식지에 미치는 영향을 분석하고,

하구 습지 훼손과 서식지 이용 현황을 다룬 연구들이 있었다(Kim and Lee, 2008). 또한, 한강 하구의 습지 공간 분포와 보호 지역에서 새섬매자기 개체군 감소 원인을 분석하고 복원 방안을 제시한 연구도 진행되었다(Yoo, 2008). 금강 하구에서는 조류 군집 특성, 보호·관리 방안에 대한 연구가 나타났다. 또한 충남 내 철새 도래지로 중요 지역인 유부도 갯벌의 지형적 특성을 나타낸 연구가 조사되었고, 드론과 디지털 표고 모델(DEM)을 활용해 분석한 연구도 수행되었다(Lee *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2014b; Kang *et al.*, 2022).

최근 위성과 드론을 활용한 모니터링 연구가 활발히 진행되었으며, 갯벌 생태계와 철새의 상호작용을 분석한 연구도 수행되었다. 이러한 연구들은 기후 변화가 갯벌의 물리적 구조와 생태계에 미치는 영향을 파악하고, 갯벌 복원과 새로운 서식지 조성의 필요성을 강조하고 있다. 또한, 갯벌 환경을 지속적으로 유지하기 위한 식생 복원과 침식 방지 기술의 중요성도 나타났다. 철새의 갯벌 이용 데이터를 바탕으로 보호구역 설정하고, 이를 지역 및 국가 계획에 반영할 수 있도록 하는 연구와 개발과 환경의 균형점을 찾기 위해 지역 사회의 협력을 이끌어내는 연구가 필요하다.

3.5 하구역 환경관리와 개발

주요 하구별로 하구 지역 개발과 보전에 관한 연구는 다양하게 진행되었다. 낙동강 하구에서는 항만시설 개발 방안과 서부산권 보전지역 이용 방안에 대한 연구가 진행되었다. 법정보호지역과 비오톱 보전가치 평가를 통해 효율적인 보전과 개발 방안도 모색되었다(Choi *et al.*, 2006; Cha *et al.*, 2010). 또한, 4대강 사업이 하구에 끼친 부정적 영향, 이를 해결하기 위한 통합적 유역 관리 시스템 구축 연구의 필요성도 나타났다(Kim, 2021; Ahn, 2017). 한강 하구는 다른 주요 강과 달리 횡단구조물이 없는 열린 자연 하구로, 남북한 접경지역에 위치한 지리적 특징을 가지고 있다(Youn, 2021; Park, 2004). 이로 인해 주로 남북 관계에서의 한강 하구의 역할을 살펴보고, 남북 공동의 평화적 하구 활용 방안과 협력 방안에 대한 연구가 진행되었다(Park and Kim, 2019; Woo and Mo, 2009; Choi and Han, 2022). 한강 하구 통합 관리 정책의 우선순위와 실행 전략에 대한 연구도 이루어졌다(Park *et al.*, 2022). 수자원 보전과 통합 환경 관리 방안, 친환경적 취수시설의 필요성, 수질과 수량 보전 연구도 중요한 주제로 다루어졌다(Kim *et al.*, 2018b). 한강 하구의 통합 관리와 공간적 디자인의 효율성을 평가하는 연구도 이루어졌으며, 프랙탈 이론을 적용한 양적 평가 분석이 수행되었다(Seo and Maeng, 2016). 영산강 하구에서는 GIS 기반의 통합 데이터 관리 시스템 개발과 관련된 연

구가 진행되었고(Lee *et al.*, 2011b), 섬진강 하구와 인근 해양 정보로 모바일 해양지리정보시스템(MGIS) 구축 연구도 이루어졌다(Park *et al.*, 2016). 이러한 연구들은 하구의 물 관리, 생태계 보호, 오염원 관리 등을 전체적으로 운영할 수 있는 통합 시스템 구축의 필요성을 시사한다. 또한, 기후 변화로 인한 해수면 상승과 해안 침식이 하구 생태계에 미치는 영향을 예측하고 대응하기 위한 방법론 개발이 필요하다고 판단된다.

3.6 지속 가능성과 하구 생태계서비스 경제적 가치 평가

시대적 패러다임이 지속 가능한 물 관리 정책으로 전환되고, 국내에서 물 관리 일원화 정책이 도입되면서 하구의 지속 가능성과 생태계서비스 가치를 경제적으로 평가하는 연구들이 나타났다. 에머지(Emergy) 방법을 활용해 한강, 금강, 영산강, 섬진강 유역의 자연환경과 사회경제 활동에 대한 평가가 이루어졌으며(Lee, 2018; Kang, 2013, 2007), 사회·경제적 활동으로 인한 개발 압력이 높은 지역, 특히 인구 밀도와 산업 집중도가 높은 지역에서 지속 가능성이 낮게 평가되었다. 다양한 개발 계획이 생태계 보전을 위협할 수 있으며, 환경 수용력을 반영한 정책 수립과 하구 보호가 중요함을 강조하였다. 더불어 지속 가능한 하구 이용을 위해 사전 관리와 예방 조치의 필요성도 제기되었다. 에머지 방법을 통해 한강 하구는 인근 개발 계획과 구상들이 생태계 보전에 위협이 될 수 있음을 확인하였고, 환경 수용력을 고려한 정책과 사전 예방적 접근이 필요함을 시사했다. 또한 경기만 한강 하구역의 지속 가능 발전 지표를 선정하고, 국내·외 사례를 조사한 연구도 나타났다(Kang *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2007). 이외에도 DPSIR 모형을 통해 금강 유역의 조기 경보 지수를 분석한 연구도 진행되었다(Kim and Min, 2017; Kim, 2017; Kang *et al.*, 2007).

2000년대 이후, 국내 하구 생태계 관리에서 재자연화가 중요한 주제로 떠오르며, 하구의 생태적 가치와 더불어 경제적 가치를 평가하는 연구가 일시적으로 활발히 진행되었다. 비시장 가치 평가법을 활용해 낙동강 하구의 경제적 가치를 이중 경제 스파이크 모형을 통해 산출한 바 있으며(Yoo, 2007b), 한강 하구는 남북 공동 이용과 협력으로 인한 경제적 가치를 강조한 연구들이 이루어졌다(Kwon *et al.*, 2013; Kwak *et al.*, 2006). 금강 하구 환경가치 평가를 위해 하구 인근 지역인 전북과 충남 지역 주민들을 대상으로 지불 의사액을 추정하였고, 이중 양분 선택형 설문조사를 통해 유산 가치, 존재 가치, 선택 가치, 대리 소비 가치로 구분해 추정한 연구가 있었다(Kwon *et al.*, 2013; Sin *et al.*, 2017). 또한, 영산강과 섬진강 하구의 경제적 가치와 갯벌 보존 가치를 평가한 연구도 진행되었다(Yoo, 2007a; Yoo *et al.*, 2011; Pyo *et al.*, 2001). 이러한 연구들은 하구 생태계

복원을 강조하고, 경제적 이익간의 균형이 필요함을 제시했다. 한편, 기존연구들이 2000년대 초반에 집중되어 있어 최근 연구가 부족하다는 한계가 드러났으며, 이를 보완하기 위해 방법론적 측면에서 개선된 하구 생태계 서비스 가치 평가 연구가 더 많이 필요하다고 판단된다. 공간적·시간적 변동성, 사회·문화적 가치를 반영하고, 장기적 관점에서 생태계 편익을 추정하는 새로운 환경성 평가 방법론의 개발이 필요하다.

3.7 하구 관리의 법·제도적 측면과 통합적 접근

기존 법·제도 관련 연구들은 하구 생태계 보전과 관리를 위해 법제도 재정비의 필요성(Shim, 2017), 지역 간 갈등 해결, 의사결정 지원 시스템 설계, 주민 참여와 제도적 배려의 중요성을 강조하였다. 낙동강 하구 인근의 경우, 개발 압력으로 인해 논 습지 보전과 생태관광지 지정과 관련된 연구가 진행되었으며, 이를 통해 법적 재정비의 필요성이 제기되었다(Im *et al.*, 2010; Shim, 2017, 2018; Kong, 2012). 하구 관리와 보호에 관한 법적 정의와 법률 간의 일관성 부족, 환경적 측면에서의 법적 보호 장치의 필요성을 강조한 연구들도 있었다. 예를 들어, 낙동강 하구 인근에서는 보전법에 따른 규제로 주민 생활이 제한되지만, 보상과 지원이 부족해 주민 참여와 제도적 배려의 필요성이 제기되었다(Kong, 2010). 금강 하구는 물의 이용에 있어 전북과 충남 지역 간 수자원 이용과 수질 확보에 대한 이해가 달라 갈등이 심화되는 문제점이 드러났다. 이를 해결하기 위해 미국의 하구 복원 사례를 제시하며, 법·제도적 측면에서 하구 구역 설정의 한계점을 지적하였다. 또한, 금강 하구역의 환경 변화로 인한 주민 간의 갈등 요인을 분석하고, 이를 해결하기 위한 의사결정 지원 시스템을 제시한 연구도 나타났다(Park *et al.*, 2017; Rhew *et al.*, 2018).

게다가, 환경부, 해양수산부, 농림축산식품부, 국토교통부 등 여러 부처가 동시에 하구와 연안 관리를 함에 따라, 역할 분담 과정에서 발생하는 비효율성 문제가 지적되었다. 하구 인근에 산재된 환경 이슈, 지역별 산발적인 하구 환경정보를 주요 현안으로 다루었다(Lee *et al.*, 2018; Sim, 2018). 또한, 하구 인근의 습지 보호지역 지정과 환경 규제 설정지역의 필요성, 국내 하구의 법적 범위 설정, 전국 하구 관리를 위한 법·제도 간 위계성 확보가 필요하다는 점도 강조되었다(Lee *et al.*, 2007a).

4. 결론 및 제언

본 연구는 2000년부터 2023년까지의 기존 연구를 검토하여, 국내 주요 하구의 물리·화학·생물학적 특성, 생태계와 철

새 서식지, 환경 관리와 개발, 지속 가능성, 생태계서비스의 경제적 가치 평가, 하구 관리의 법·제도적 측면을 반영한 연구들을 종합적으로 분석하였다. 이를 통해 하구의 지속 가능한 관리와 균형 잡힌 개발을 위한 다양한 측면이 확인되었다. 하구 통합 관리 기구의 필요성이 제기되었고, 하구 공간 단위의 재정립도 중요하게 다루어졌다. 생태계 기반 접근법과 하구 생태계 가치 평가법 개발이 강조되었다. 이에 따라 다음과 같이 제언 하고자 한다.

첫째, 지역별 하구의 특수성을 반영한 법적 지위를 정립하고, 지역 특성에 부합하는 유연한 하구 정의와 범위 설정이 요구된다. 이를 위해 기존 법률과 제도를 포괄적이고 탄력적으로 재정비할 필요가 있다. 특히, 하구를 단일 공간 개념으로 정의하기보다는 유역, 하천, 연안 지역 간의 연동성을 반영하여 공간적 범위를 설정하는 방안이 논의되어야 한다. 현재 하구 관리의 비일관성은 부처 간의 해석 차이와 법적 지위 부족으로 나타나고 있어 제도적 개선이 요구된다. 국내 하구 관리는 다원화된 구조로, 하구 역할과 중요성을 부처마다 다르게 해석하고 있어, 일관된 정책 수립과 실행 저해 요인으로 작용하고 있다. 주요 강에 맞는 보호지구 지정과 운영 제도 개선, 부처 간 협업을 통해 통합적 관리 체계를 구축하는 것이 필요하다.

둘째, 기후 변화가 하구 생태계에 미치는 영향을 예측하고 대응하기 위해 통합적 생태 모델 개발이 요구된다. 국내 주요 하구 연구는 퇴적 환경, 염분 분포, 생물학적 특성 등 개별적으로 각 요소 분석에 집중되어, 복잡한 상호작용을 통합적으로 이해하는 접근이 부족하다. 이를 극복하기 위해 다학제적 접근을 통한 통합적 생태 모델을 개발하고, 갯벌 복원과 서식지 관리 방안이 요구된다. 장기적 관리 전략을 수립하고, 기후 변화 시나리오를 반영한 GIS 기반의 통합 수질 모의 시스템과 복합성을 반영한 생태 모델을 고도화해야 한다. 또한 철새 서식지 보호를 위한 데이터 기반 정책 수립과 지역 사회와 다양한 이해관계자 간의 협력 모델이 필요하다.

셋째, 하구 생태계 가치를 극대화하기 위해서는 생태계서비스 가치 평가를 위한 새로운 방법론의 개발이 필요하다. 하구의 생물다양성 보존, 탄소 흡수, 수질 정화 등 다양한 생태계 서비스 가치를 인식하고 이를 경제적으로 평가하려는 연구들이 시도되었으나, 하구 생태계의 복잡성, 비시장적 특성, 시공간적 변동성, 사회·문화적 가치 등을 종합적으로 고려한 평가 방법은 여전히 부족한 상황이다. 기존의 하구 생태계서비스 가치 평가 방법론은 하구 생태계의 특수성을 반영하는 데 한계점을 가진다. 따라서 수질 정화, 탄소 흡수, 생물다양성 유지, 홍수 조절 등 다양한 기능을 생태계 기능별로 세분화하여 평가하고, 반영한 환경적 편익 분석이 요구된다. 더불어, 하구

생태계의 서비스 가치를 극대화하기 위해 자연기반해법을 통한 통합적 관리 전략이 필요할 것으로 판단된다.

넷째, 지속 가능하고 효율적인 하구 관리를 위해 기술적 접근과 연구의 강화가 요구된다. 하구의 물리적, 화학적, 생태적 특성을 종합적으로 분석하고, 기후 변화 시나리오를 기반으로 한 예측 모델을 개발하여 장기적 대응 전략을 마련하는 것이 중요하다. 이를 지원하기 위해서는 통합 데이터 관리와 시뮬레이션 기술이 요구되며, 자동화된 감시 체계와 오염물질 실시간 추적 및 제거 기술이 요구된다. 더욱이, 하구 지역에 중금속, 영양염류, 해양쓰레기로 인한 환경 문제가 나타나고 있어, 효율적 관리를 위해 고도화된 GIS 기반 통합 수질 관리 시스템이 필요하다. 비점오염원 관리 전략과 저영향 개발(LID) 기법을 지역 특성에 맞게 구체화하여, 농업, 산업, 생활 오염원의 하구 유입을 최소화하는 연구도 필요할 것이다. 기후 변화로 인한 해수면 상승, 강수 패턴 변화, 예상치 못한 태풍과 홍수 빈도 증가는 하구의 물리적 구조와 생태계에 영향을 미치고 있다. 이에 대비하여 해수면 상승과 해안 침식에 따른 하구 생태계 변화를 예측하고, 이러한 변화에 적응할 수 있는 복원과 보호 기술 연구도 요구된다. 드론, 위성영상, 고해상도 DEM 등 최신 모니터링 기법을 도입해 기후 변화에 따른 서식지 변화와 생태적 복원의 필요성을 지역별로 진단할 필요가 있다. 또한, GIS 빅데이터와 AI 기술을 활용한 실시간 모니터링 및 시뮬레이션 시스템을 통해 하구 생태계 변화에 대한 예측과 대응 연구가 지속적으로 필요하다고 판단된다.

본 연구는 기존 연구의 이론과 방법론적 모순점을 충분히 해결하지 못했으며, 국외 관련 하구 사례를 포함하지 않은 한계점을 가지고 있다. 향후 연구에서는 과학적 기초 데이터를 기반으로 통합적 측면의 시사점을 제시하고, 국내·외 하구 관련 연구의 이론적 통합과 방법론적 한계를 분석하여 정책적 측면을 제시할 필요가 있다. 게다가, 하구 환경계획과 국토계획을 연계하여 상호보완적으로 설계하고 실행할 수 있는 통합 관리 시스템 구축 연구가 필요하며, 하구 주변의 개발 가능 지역과 보전지역을 체계적으로 조사하여 최적의 토지 이용 계획을 제시하는 연구가 요구된다. 또한, 물 관리 위험 요소와 수질과 관련된 비점오염원의 중첩 지점을 분석할 필요가 있다. 주변 환경시설과 개발 사업 현황을 고려한 장기적 관점의 다학제적 융복합 연구도 필요하다. 지역개발사업과 연계하여 하구 인접 지역의 공간 변화를 예측하고, 장기적인 하구 관리 방안을 모색할 필요가 있다. 게다가, 하구의 생태계서비스 가치 평가법을 개발하는 연구와 더불어 예비타당성조사 환경성 부문 평가법과 연계 시킨 연구가 기대 된다. 기후위기로 인한 예측 불가능한 홍수, 태풍 등 하구 주변 지역의 잠재 재해 위험성을

을 분석하고, 국토-환경계획 단계에서 이를 반영한 방재 계획을 수립하는 연구도 요구된다. 인구 감소와 지역 쇠퇴가 수자원 수요와 공급에 미치는 영향을 분석하고, 하구 주변 지역의 수자원 관리 취약점을 조사하는 연구도 필요할 것이다. 더불어, 해양쓰레기와 같은 하구-연안 생태계에 부정적 영향을 미치는 폐기물 처리 문제, 미래 예측이 연계된 물(하구)-에너지-식량 연계(Water-Energy-Food Nexus) 연구에 대한 논의가 향후 중요한 연구 주제로 기대되는 바이다.

감사의 글

이 논문은 충남연구원의 과제 일부로 지원받아 연구되었습니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Ahn, H.K. (2017). "Future agenda of the four major rivers restoration project: Toward an integrated watershed management system." *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 454-461.
- Bae, M.S., Park, S.H., Choi, G.G., Lee, K.K., and Lee, G.H. (2005). "Characteristics of heterotrophic bacterial population in the artificial Lake Geumgang near estuary." *The Korean Journal of Ecology*, Vol. 28, No. 3, pp. 129-134.
- Baek, S.N., Lee, J.H., Lee, S.M., Lee, H.E., Kim, H.S., and Kim, S.J. (2023). "Priority determination of the projects for ecological restoration of the stream: Case study for Han River estuary." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 25, No. 1, pp.64-73.
- Bang, K.Y., Kim, T.I., Song, Y.S., Lee, J.H., Kim, S.W., Cho, J.G., Kim, J.W., Woo, S.B., and Oh, J.K. (2013). "Numerical modeling of sediment transport during the 2011 summer flood in the Youngsan River estuary, Korea." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 25, No. 2, pp. 76-93.
- Ceon, I.K., and Kim, M.H. (2009). "The prediction and analysis of bed changes characteristics in the Seomjin River Downstream." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 1, pp. 115-121.
- Cha, M.J., Kim, S.H., and Yi, G.C. (2010). "Wise use through establishing conservation area in Nakdong River estuary." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 12, No. 1, pp. 83-94.

- Choi, H.A., and Han, D.U. (2022). "The direction of inter-Korean cooperation on ecological conservation along the Han and Imjin Rivers confluence: Focusing on conservation of migratory species." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 24, No. 3, pp. 155-160.
- Choi, J.H., An, S.U., Kim, S.H., Shin, J.H., Lee, H.J., Hyun, J.H., and Mok, J.S. (2020). "Biogeochemical properties of phosphorus during summer in the sediment of Yeongsan River, lake and estuary." *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 23, No. 4, pp. 286-296.
- Choi, N.Y., Yoon, B.I., Kim, J.W., Song, J.I., Lim, E.P., and Woo, S.B. (2012). "The relation of cross-sectional residual current and stratification during spring and neap tidal cycle at Seokmo channel, Han River estuary located at South Korea." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 24, No. 3, pp. 149-158.
- Choi, Y.S., Choi, S.H., and Yang, C.H. (2006). "A study on the development alternatives for the port facility in the Han River estuary." *Journal of Korean Navigation and Port Research*, Vol. 30, No. 8, pp. 699-709.
- Ha, J.W., Ahn, K.H., Bae, Y.S., Kim, H.H., Shin, H.Y., and Song, S.K. (2020). "The analysis of habitat using character of otter at a Yeongsan River watershed otters habitat usage at a Yeongsan River watershed." *The Journal of Korean Island*, Vol. 32, No. 4, pp. 253-267.
- Han, C.S., Park, S.K., Jung, S.W., and Roh, T.Y. (2011). "The study of salinity distribution at Nakdong River estuary." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 1, pp. 101-108.
- Hauptman, L., Mitsova, D., and Briggs, T.R. (2024). "Hurricane Ian damage assessment using aerial imagery and LiDAR: A case study of Estero Island, Florida." *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 12, No. 4, 668. doi: 10.3390/jmse12040668.
- Hong, S.B. (2004). "Original research: Regional characteristics of bird community in Nakdong River basin." *Journal of Ecology and Environment*, Vol. 27, No. 5, pp. 269-281.
- Hong, S.B. (2005). "Original research: A research for shorebirds on the southernmost of Nakdong estuary." *Journal of Ecology and Environment*, Vol. 28, No. 4, pp. 199-206.
- Hong, S.B., and Hong, J.P. (2023). "Regional distribution characteristics of swans (*Cygnus* spp.) in the Nakdong River downstream from October 2008 to September 2013." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 32, No. 8, pp. 533-542.
- Hong, S.B., and Lee, I.S. (2010). "Understanding the visitation aspect of egrets *egretta* spp. in the long period at Nakdong Estuary, Busan, Republic of Korea." *The Korean Journal of Ornithology*, Vol. 17, No. 3, pp. 227-237.
- Hwang, J.A., Lee, S.H., Choi, B.J., and Kim, C.S. (2011). "Application of objective mapping to surface currents observed by HF radar off the Keum River estuary." *The Sea: Journal of the Korean of Oceanography*, Vol. 16, No. 1, pp. 14-26.
- Im, J.H., Choi, J.H., Kim, J.H., Yoon, H.S., and Ryu, C.R. (2010). "A study on the development of integrated utilization considering multi functions of urban estuarine area." *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 22, No. 4, pp. 589-603.
- Jeon, H.L., Lee, H.Y., Yang, D.S., and Kim, S. (2021). "Geochemical characteristics and pollution assessment of surface sediments in the Nakdong River estuary." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 30, No. 6, pp. 487-500.
- Ji, H.S., Seo, H.J., Kim, M.W., Lee, M.O., and Kim, J.K. (2014). "Marine environmental characteristics of seagrass habitat in Seomjin River estuary." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 28, No. 3, pp. 236-244.
- Ji, J.W., and An, K.G. (2008). "Characteristics of fish compositions and longitudinal distribution in Yeongsan River watershed." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 41, No. 3, pp. 301-310.
- Ji, U., Julien Pierre, Y., Park, S.K., and Kim, B.D. (2008). "Numerical modeling for sedimentation characteristics of the lower Nakong River and sediment dredging effects at the Nakdong River estuary barrage." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 4, pp. 405-411.
- Kang, B.S., Park, H.B., and Kim, J.K. (2015). "Saltwater intrusion characteristics in Seomjin River estuary using EFDC." *The Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 27, No. 6, pp. 1842-1853.
- Kang, D.H., Park, S.J., and Choi, Y.J. (2007). "Sustainability indicators for the Han River estuary." *Journal of Environmental Management*, Vol. 45, No. 3, pp. 120-135.
- Kang, D.S. (2007). "Emergy evaluation overview of the natural environment and economy of the Han River basin in Korea." *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 10, No. 3, pp. 138-147.
- Kang, D.S. (2013). "Emergy-based value of the contributions of the Youngsan River estuary ecosystem to the Korean economy." *The Sea*, Vol. 18, No. 1, pp. 13-20.
- Kang, D.S., Nam, J.H., and Chung, Y.H. (2005). "Sustainability indicators for the Han River estuarine area of Kyeong-gi Bay in Korea." *Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 17, No. 2, pp. 155-170.
- Kang, J.H., Ock, G.Y., Park, J.G., and Yoo, S.M. (2022). "The morphological characteristics and boundary changes in the intertidal area around Yubudo Island, Geumgang River estuary." *Journal of The Korean Geomorphological Association*, Vol. 29, No. 2, pp. 65-77.
- Kang, J.W., and Moon S.R. (2001). "Tidal propagation characteristics in the estuary which shows significant shallow tides." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 13, No. 1, pp. 56-60.
- Kim, B.O., Khim, B.K., and Lee, S.R. (2005). "Development of mosaic aerial photographs for shoreline change study in Nakdong estuary." *Ocean and Polar Research*, Vol. 27, No. 4, pp. 497-507.
- Kim, B.S., Yeo, Oh, U.S., D.H., and Sung, K.J. (2015a). "Status of birds in the Nakdong River estuary bird sanctuary before the

- four major rivers project." Korean Wetlands Society, Vol. 17, No. 3, pp. 264-272.
- Kim, D., and Min, D. (2017). "A study on converting DPSIR sustainability indicators into an index with analysis of application on data for Geumgang estuary." *Journal of Environmental Policy and Administration. Korea Environmental Policy and Administration Society*, Vol. 25, pp. 241-272.
- Kim, D.H., and Jin, D.H. (2019). "Sea water quality depending on as time passed after inflow of freshwater from Yeongsan River barrage on summer around Mokpo." *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 22, No. 2, pp. 77-83.
- Kim, H.C., Kim, O.H., Chang, W.K., and Ryu, J.S. (2015b). "Technical reviews on ecosystem modeling approach and its applicability in ecosystem-based coastal management in Saemangeum offshore and Geum River estuary." *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 18, No. 3, pp. 233-244.
- Kim, H.D., Cho, Y.J., and Kwak, S.R. (2019). "Management plan and distribution of ecosystem disturbed plants in the lower Yeongsan River area." *The Journal of Korean Island*, Vol. 31, No. 1, pp. 257-276.
- Kim, H.W., and Lee, H.Y. (2007). "The differences of zooplankton dynamics in river ecosystems with and without estuary dam in river mouth." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 40, No. 2, pp. 273-284.
- Kim, J., and Jin, S. (2019). "Water quality changes after freshwater discharge in the Yeongsan River estuary." *Journal of Environmental Studies*, Vol. 42, No. 3, pp. 215-230.
- Kim, J., Choi, C., Kim, B.S., Kim, S.Y., Jang, K., and Park, J.G. (2018a). "Appearance state of freshwater phytoplankton in the Geumgang estuary and growth characteristics of dominant species with salinity gradient." *The Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 21, No. 4, pp. 361-367.
- Kim, J.B., Park, J.I., Lee, W.C., and Lee, K.S. (2012). "Seasonal changes in the carbon and nitrogen contents of zosteria marina populations in the intertidal and subtidal zones of the Seomjin Estuary, Korea." *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 45, No. 1, pp. 65-75.
- Kim, J.B., Park, J.I., Lee, W.C., and Lee, K.S. (2015c). "Growth and population dynamics of zosteria marina due to changes in sediment composition in the Seomjin estuary, Korea." *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 20, No. 1, pp. 43-52.
- Kim, J.D., Jeong, S.T., Cho, H.Y., and Kim, T.H. (2010). "Uncertainty analysis of the net flow discharge and diffusion model in Gyeonggi Bay and Han River estuary." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 22, No. 5, pp. 344-351.
- Kim, J.H. (2017). "DPSIR models and early warning systems for Geum River Basin." *Korean Journal of Environmental Monitoring*, Vol. 52, No. 4, pp. 321-338.
- Kim, J.H., Yoon, J.D., Kim, J.H., Lee, H.J., Choi, K.R., and Jang, M.H. (2013). "Characteristics of fish community in the Seomjin River and brackish area." *The Korean Journal of Environment Biology*, Vol. 31, No. 4, pp. 402-410.
- Kim, J.U., Ju, H.J., and Kim, H.S. (2018b). "Plans for conserving and utilizing water resources in the Han River Estuary." *Water and Future Journal of the Korean Society of Water Resources*, Vol. 51, No. 4, pp. 39-49.
- Kim, K.C., and Kim, S.B. (2021). "Bathymetric changes in the Nakdong River estuary owing to discharge from the Nakdong River barrier and environmental factors." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 30, No. 7, pp. 507-517.
- Kim, S., Ahn, J., Jung, K., Lee, K., Kwon, H., Shin, D., and Yang, D. (2017). "Contamination assessment of heavy metals in river sediments (For the surface sediments from Nakdong River)." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 33, No. 4, pp. 460-473.
- Kim, S.H., and Shin, Y.S. (2020). "Daily variation of size-fractionated chlorophyll a concentrations and water conditions associated with freshwater discharge during summer in the Yeongsan River estuary." *Journal of Marine Life Science*, Vol. 5, No. 2, pp. 72-80.
- Kim, S.H., Lee, J.Y., and Park, G.Y. (2008). "Water quality assessment and environmental impact on estuaries in Korea." *Journal of Water Resources*, Vol. 32, No. 2, pp. 230-245.
- Kim, S.O., and Lee, S.D. (2008). "Comparison of white-naped crane habitat use pattern with land-coverage map in the Han-River estuary and DMZ." *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 17, No. 4, pp. 255-262.
- Kim, S.Y., and Ha, J.S. (2001). "Sedimentary facies and environmental changes of the Nakdong River estuary and adjacent coastal area." *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 34, No. 3, pp. 268-278.
- Kim, S.Y., and Lee, B.K. (2004). "In situ particle size and volume concentration of suspended sediment in Seomjin River estuary, determined by an optical instrument, 'LISST-100'." *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 37, No. 4, pp. 323-329.
- Kim, Y.K. (2021). "Study of effectiveness problem of water quality indicators for the evaluation of the project saving the four major rivers: An example of Nakdong River." *Korea Environmental Policy And Administration Society*, Vol. 29, No. 2, pp. 235-257.
- Kong, R.K. (2010). "A study on the public aid program for residents of Nakdong River estuary." *Maritime Law Review*, Vol. 22, No. 2, pp. 191-222.
- Kong, R.K. (2012). "A study on improving the regulations for effective management of Nakdong River estuary." *Maritime Law Review*, Vol. 24, No. 2, pp. 135-162.
- Kwak, S.J., Yoo, S.H., and Chang, E.I. (2006). "Valuing the Han-River estuary: Using conjoint analysis." *The Korean Economic Review*, Vol. 54, No. 4, pp. 141-161.
- Kwon, Y.J., Yoo, S.H., and Park, S.H. (2013). "Assessment of the

- environmental value of the Geum-River estuary.” *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 19, pp. 417-429.
- Lee, C.H., Shim, Y.G., Nam, J.H, Kang, D.S., and Rho, B.H. (2007a). “Management system improvement strategies for supporting an integrated estuary environmental management.” *Ocean Policy Research*, Vol. 22, No. 2, pp. 89-122.
- Lee, C.Y., and Kim, K.H. (2008). “Development of GIS based water quality simulation system for Han River and Kyeonggi Bay area.” *Journal of Korea Spatial Information System Society*, Vol. 10, No. 4, pp. 77-88.
- Lee, D., Park, G., Lee, C., and Shin, Y. (2017). “Assessment of ecosystem health during the freshwater discharge in the Youngsan River estuary.” *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 50, No. 1, pp. 46-56.
- Lee, H.H., and Um, J.S. (2007). “Water depth change caused by artificial structures in Geum River estuary: Spatio-temporal evaluation based on GIS.” *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 42, No. 1, pp. 121-132.
- Lee, H.S., Park, Y.J., and Kim, B.H. (2018). “Emergy evaluation of water resources in the Han River Basin.” *Journal of Environmental Economics*, Vol. 27, No. 1, pp. 58-76.
- Lee, J., Han, J.H., Lim, B.J., Park, J.H., and Shin, J.K. (2013a). “Comparative analysis of fish fauna and community structures before and after the artificial weir construction in the main-streams and tributaries of Yeongsan River watershed.” *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 46, No.1, pp. 103-115.
- Lee, J.H., Yang, C.G., Han, K.S., and Lee, T.Y. (2020). “Estimation of heavy metal contamination level in Masan Bay and Nakdong estuary sediments.” *Journal of the Korean GEO-environmental Society*, Vol. 21, No. 3, pp. 13-21.
- Lee, J.O., Song, Y.J., Kim, Y.S., and Park, H.J. (2011a). “Analysis of quantitative topographical change in Eulsuk-Island using aerial images.” *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 29, No. 5, pp. 527-534.
- Lee, J.S., An, S.M., Kim, S.G., Kim, S.S., Jung, R.H., Park, J.S. Park, M.O., and Jin, H.K. (2007b). “Biogeochemical organic carbon cycles in the intertidal sandy sediment of Nakdong estuary.” *The Sea: The Journal of the Korean Society of Oceanography*, Vol. 12, No. 4, pp. 349-358.
- Lee, M.S., Park, G.A., and Kim, S.J. (2007c). “Analysis of geomorphological characteristics of Gum River basin using GIS.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 5, pp. 647-655.
- Lee, S.H., and Youn, S.Z. (2022). “Mechanism of wetland formation according to interaction of river bed fluctuation and plant success in the Hangang River estuary.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 320-330.
- Lee, S.H., Kim, W.S., Park, J.W., Jo, H.B., Lee, W.O., Yu, T.S., Kim, H.G., Ji, C.W., and Kwak, I.S. (2022). “Spatio-temporal variation of fish communities in open estuary, Seomjin River estuary and Gwangyang bay coast.” *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 55, No. 2, pp. 132-144.
- Lee, S.H., Yoon, H.S., Kim, M.S., and Jang, S.C. (2021). “A comparative study on vegetation frontline at deltaic barrier island in the Nakdong River estuary using GPS and satellite image data.” *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 24, No. 2, pp. 80-89.
- Lee, S.J. (2018). “Emergy-based sustainability assessment of Geum River watershed.” *Korea Environmental Policy And Administration Society*, Vol. 26, No. 4, pp. 71-103.
- Lee, S.J., Kim, K.H., and Seo, J.T. (2011b) “A study on the development of GIS based integrated DB management system for ecological environmental management of Yeongsan estuary.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 593-602.
- Lee, S.J., Kim, K.H., Park, Y.G., Lee, G.H., and Yoo, J.H. (2014a). “A study on the development of GIS based integrated information system for water quality management of Yeongsan River estuary.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 16, No. 1, pp. 73-83.
- Lee, S.K., Choi, M.S., Seo, Y.I., and Lee, J.B. (2014b). “Seasonal species composition and cluster analysis of catches by shrimp beam trawl in the Geum River estuary.” *Journal of the Korean Society of Fisheries Technology*, Vol. 50, No. 4, pp. 455-466.
- Lee, W.S., Park, C.R., Lim, S.J., and Heo, W.H. (2001). “Characteristics, protection and management of bird community in Geum River estuary.” *The Korean Journal of Ecology*, Vol. 24, No. 3, pp. 181-189.
- Lee, Y.J., Jeong, B.K., Shin, Y.S., Kim, S.H., and Shin, K.H. (2013b). “Determination of the origin of particulate organic matter at the estuary of Youngsan River using stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$).” *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 46, No. 2, pp.175-184.
- Lim, J.-C., Ahn, K., Choi, B.-K., and Lee, G.-Y. (2020). “Investigation plan to strengthen the conservation and management of estuary ecosystems.” *The Korean Association of Island*, Vol. 32, No. 4, pp. 317-334.
- Min, J.O., Ha, S.Y. Chung, M.H., Choi, B.H., Lee, Y.J., Youn, S.H., Yoon, W.D., Lee, J.S., and Shin, K.H. (2012). “Seasonal variation of primary productivity and pigment of phytoplankton community structure in the Seomjin estuary.” *Korean Journal of Limnology*, Vol. 45, No. 2, pp. 139-149.
- Na, J.E., Jung, M.H., Cho, I.S., Park, Jo.H., Hwang, K.S., Song, H.J., Lim, B.J., La, G.H., Kim, H.W., and Lee, H.Y. (2012). “Phytoplankton community in reservoirs of Yeongsan and Seomjin River basins, Korea.” *The Korean Journal of Environment Biology*, Vol. 30, No.1, pp. 39-46.
- Newstree (2023). Uruguay declares water shortage emergency amid worst drought in 74 years. Newstree, accessed 11 September 2024, <<https://www.newstree.kr/newsView/ntr202312280006>>.
- Noh, J.W., Lee, J.W., and Shin, J.K. (2011). “Analysis of saltwater intrusion by flushing discharge in the Seomjin River estuary.” *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 20, No. 3, pp. 325-335.

- Oh, C.Y., Park, S.Y., Choi, C.U., and Jeon, S.W. (2010). "Change detection at the Nakdong estuary delta using satellite image and GIS." *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 21-29.
- Park, G.S. (2004). "Salinity distribution and ecological environment of Han River estuary." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 6, No. 1, pp. 149-166.
- Park, G.Y., and Kim, K.J. (2019). "A study on the promotion of inter-Korean tourism in the Han River estuary." *Food Service Industry Journal*, Vol. 15, No. 3, pp. 129-140.
- Park, H.G., and Ock, G.Y. (2017). "Estimation of the total terrestrial organic carbon flux of large rivers in Korea using the national water quality monitoring system." *The Korean Journal of Environment Biology*, Vol. 35, No. 4, pp. 549-556.
- Park, J.H., Lee, G.S., Yang, J.S., and Kim, S.W. (2012a). "A hydro-meteorological time series analysis of Geum River watershed with GIS data considering climate change." *Korea Spatial Information Society*, Vol. 20, pp. 39-50.
- Park, K., Lee, C., Yeo, H.B., Ju, Y.K., Kim, E., and Mun, S. (2017). "Environmental change and causes of local conflicts in the Geumgang estuary." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 33, No. 2, pp. 149-159.
- Park, K.M. Hong, M.J., and Kim, S.W. (2022). "A study on the priority and implementing strategies of integrated management policy of the Han River estuarine area." *Journal of the Korean Urban Geographical Society*, Vol. 25, No. 2, pp. 137-156.
- Park, M.O., Kim, S.S., Kim, S.G., Kwon, J.N, Lee, S.M., and Lee, Y.W. (2012b). "Factors controlling temporal-spatial variations of marine environment in the Seomjin River estuary through 25-hour continuous monitoring." *The Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 15, pp. 314-322.
- Park, M.O, Lee, J.S, Kim, S.S, Kim, S.G, Lee, S.M, and Lee, Y.W. (2014). "Variations of dissolved inorganic nutrient flux through the Seomjin River estuary." *The Korean Environmental Sciences Society*, Vol. 23, No. 6, pp. 1049-1060.
- Park, S., and Sin, Y. (2022). "Characteristics of water quality and chlorophyll-a in the seawater zone of the Yeongsan River estuary: Long-term (2009-2018), data analysis." *Ocean and Polar Research*, Vol. 44, No. 1, pp. 13-27.
- Park, S.H., Kim, J.H., Baek, S.H., Choi, H.S., Kim, D.W., Ko, E.J., Kim, H.W. (2020). "Characteristics of fish assemblage by reservoir size in Yeongsan-Seomjin River watershed in Korea." *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 53, No. 3, pp. 229-240.
- Park, S.W., Kim, J.H., and Kim, J.K. (2016). "Mobile MGIS study for the Seomjin River estuary." *The Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 28, No. 1, pp. 172-179.
- Pyo, H.D., Yoo, S.H., and Kwak, S.J. (2001). "Estimating the conservation value of coastal wetlands around the Youngsan River: The application of double - bounded dichotomous choice format of the contingent valuation method." *Journal of the Korean Regional Science Association*, Vol. 17, No.1, pp. 37-54.
- Rhew, H., Shin, Y.H., and Lee, C.H. (2018). "The conceptual design of decision support system for the Geumgang estuary management: Focus on facilitating the stakeholder dialogue." *The Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 21, No. 3, pp. 195-206.
- Rho, P.K. (2007). "Spatio-temporal dynamics of estuarine wetlands related to watershed characteristics in the Han River estuary." *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 42, No. 3, pp. 344-354.
- Ryu, H.S., Park, H.K., Lee, H.J., Shin, R.Y., and Cheon, S.U. (2016). "Occurrence and succession pattern of cyanobacteria in the upper region of the Nakdong River: Factors influencing aphanizomenon bloom." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 32, No. 1, pp. 52-59.
- Seo, H.B., and Maeng, H.J., (2016). "Quantitative assessment analysis research applying fractal theory about the Han River estuary's representative waterfront." *Journal of the Korean Society of Design Culture*, Vol. 22, No. 3, pp. 253-264.
- Shim, Y.Y. (2017). "A study on the legislation strategy for the development of integrated estuarine management system." *Journal of Law and Politics Research*, Vol. 17, No. 4, pp. 259-287.
- Shim, Y.Y. (2018). "A study on the legal system for the development of integrated estuarine management system - From a strategic perspective for the establishment of legal institutions -." *Journal of Law and Politics Research*, Vol. 18, No. 4, pp. 309-340.
- Shin, M.S., Bae, K.S., Kang, S.J., and Kim, J.H. (2006). "A study on the topography and current characteristic of the before and after construction at Geum River estuary dike." *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 20, No. 3, pp. 61-66.
- Shin, Y.C. (2017). "Estimating the non-use values of Gum River estuary using contingent valuation method - By Turnbull non-parametric estimation method." *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 11, pp. 479-485.
- Shin, Y.K., and Yoon, K.S. (2005). "The spatial distribution of water quality and sediments characteristics in the Han River estuary." *Journal of the Korean Geomorphological Association*, Vol. 12, No. 4, pp. 13-23.
- Shin, Y.S., and Yoon, B.B. (2011). "Change in taxonomic composition of phytoplankton and environmental factors after construction of dike in Yeongsan River estuary." *Korean Journal of Environmental Biology*, Vol. 29, No. 3, pp. 212-224.
- Shin, Y.S., and Yu, H.S. (2018). "Phytoplankton community and surrounding water conditions in the Youngsan River estuary: weekly variation in the saltwater zone." *Ocean and Polar Research*, Vol. 40, No. 4, pp. 191-202.
- Sim, H. (2018). "Environmental issues and policy approaches for integrated estuary management in South Korea." *Journal of Environmental Policy*, Vol. 25, No. 4, pp. 310-325.
- Sin, V.S., Lee, C.L., Cho, K.A., and Song, E.S. (2005). "Trends of phytoplankton community and water quality and implications for management in estuarine river systems." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 38, No. 2, pp. 160-180.
- Sin, Y.H., Park, J.S., and Yoon, K.W. (2017). "Economic valuation

- of the Geum River estuary ecosystem services." *Environmental Economics and Policy Studies*, Vol. 20, No. 5, pp. 95-114.
- Woo, K., and Mo, S.E. (2009). "The pending problems of the Han River estuary and talks on the further development." *Journal of the Korean Regional Economics*, Vol. 14, pp. 151-170.
- Yang, H.O., Kim, C.H., Kang, E.J., Kim, K.S., and Choi, W.S. (2012). "Characteristics of fish fauna collected from near estuary of Seomjin River and population ecology." *The Korean Journal of Environment Biology*, Vol. 30, No. 4, pp. 319-327.
- Yoo, S.H. (2007a). "Measurement of the environmental value of the Seomjin-River estuary." *Journal of Environmental Policy*, Vol. 6, No. 2, pp. 1-25.
- Yoo, S.H. (2007b). "Using the contingent valuation method based on multi-attribute utility theory to measure the environmental value of the Nakdong-River estuary." *Ocean and Polar Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 69-80.
- Yoo, S.H., and Lee, J.S. (2011). "Assessment of economic value of Youngsan River estuary." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 629-637.
- Yoo, Y.H. (2008). "Population decline cause of *Scirpus planiculmis* and its restoration plan in Han River wetland conservation area, South Korea." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 10, No. 2, pp. 165-172.
- Yoon, B., Lee, E., Kang, T., and Shin, Y. (2013). "Long-term change of phytoplankton biomass (chlorophyll-a), environmental factors and freshwater discharge in Youngsan estuary." *Korean Journal of Limnology*, Vol. 46, No. 2, pp. 205-214.
- Yoon, B.I., and Woo, S.B. (2011). "Study on relationship between geographical convergence and bottom friction at the major waterways in Han River estuary using the tidal wave propagation characteristics." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 23, No. 5, pp. 383-392.
- Yoon, B.I., and Woo, S.B. (2012). "Relation of freshwater discharge and salinity distribution on tidal variation around the Yeomha channel, Han River estuary." *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 24, No. 4, pp. 269-276.
- Yoon, H.S., Park, S., Lee, I.C., and Kim, H.T. (2008). "Spatiotemporal variations of seawater quality due to the inflow of discharge from Nakdong River barrage." *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 78-85.
- Yoon, S.C., Yoon, S.H., and Suh, Y.S. (2017). "The characteristics of spatio-temporal distribution on environmental factors after construction of artificial structure in the Nakdong River estuary." *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-11.
- Youn, S.M. (2021). "Geopolitical and environmental features of the open Han River estuary." *Journal of Estuarine Management*, Vol. 38, No. 2, pp. 145-160.
- Youn, S.Z., Lee, S.H., and Jang, C.H. (2021). "Study of riverline change around Sannam Wetland in the Hangang River estuary using LANDSAT image processing." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 23, No. 2, pp. 154-162.
- Yu, J.J., Lee, H.J., Lee, K.L., Lyu, H.S., Whang, J.W., Shin, L.Y., and Chen, S.U. (2014). "Relationship between distribution of the dominant phytoplankton species and water temperature in the Nakdong River, Korea." *Korean Journal of Ecology and Environment*, Vol. 47, No. 4, pp. 247-257.