

Article

<https://doi.org/10.7850/jkso.2024.29.2.116>
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

‘해양교란유해종’의 영향 평가: 환경 및 사회경제적 평가를 위한 준정량 도구 및 프로토콜

김광용*

전남대학교 자연과학대학 해양학과 교수

Assessing the Impact of ‘Marine Invasive and Harmful Species’: A Semi-Quantitative Tool and Protocol for Environmental and Socio-Economic Evaluation

KWANG YOUNG KIM*

Professor, Department of Oceanography, College of Natural Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

*Corresponding author: kykim@chonnam.ac.kr

Editor Dong Sung Kim

Received 22 December 2023; Revised 20 April 2024; Accepted 3 May 2024

ABSTRACT

본 연구는 ‘해양교란유해종’이 해양 환경과 사회경제적 측면에 미치는 영향을 평가하기 위한 새로운 도구와 프로토콜을 제시한다. 한국의 해양생태계 보전 및 관리법에서 발견된 한계점을 보완하기 위해, 본 연구는 해양 환경과 사회경제 그룹(영역)으로 나누어진 영향 평가 프레임워크를 도입하였다. 각 그룹은 6개의 영향 평가 카테고리(범주)로 구성되어 있으며, 준정량적인 5단계 척도를 사용하여 생태계의 교란에서 건강과 재산에 대한 영향에 이르는 폭넓은 이슈들을 다루는 유연한 방식을 제공한다. 이 영향평가 도구의 실행은 델파이 방법을 기반으로 한 체계적인 5단계 프로세스를 통해 진행된다. 이 접근법은 다양한 전문가와 이해관계자 간의 협력을 촉진하며, 다양한 관점을 통합하는 포괄적인 평가를 가능하게 한다. 또한 이 연구는 불확실성을 효과적으로 관리하고 결과의 일관성을 향상시키는 전략도 모색되었다. 본 평가 프로토콜의 적용은 ‘해양교란유해종’에 의한 생태학적 피해의 정도를 계량화하고 관리 대상 및 예방 조치의 우선순위를 정립하는 데 결정적인 역할을 할 것으로 기대된다. 평가 과정의 궁극적인 목표는 의사결정자가 해양생태계 보전과 사회경제적 영향을 완화하기 위한 전략을 수립하도록 지원하는 것이다.

This study presents a new tool and protocol to assess the impact of ‘Marine Invasive and Harmful Species’ (MIHS) on marine environments and socio-economic aspects. It addresses shortcomings in the Marine Ecosystems Conservation and Management Act in South Korea by proposing an impact assessment framework divided into marine environmental and socio-economic groups. Six distinct evaluation categories are included in each group, and a semi-quantitative five-step scale is utilized to provide a flexible approach, addressing a variety of issues from ecological disturbances to effects on health and property. The assessment tool is applied through a systematic five-stage process based on the Delphi method. This approach fosters collaboration among a diverse sets of experts and stakeholders, enabling a comprehensive evaluation that incorporates various perspectives. The study also examines strategies to effectively manage uncertainties and improve the consistency of the outcomes. The application of this assessment protocol is expected to be crucial in quantifying the ecological damage caused by MIHS and in identifying management and prevention priorities. The ultimate aim of this evaluation process is to aid decision-makers in developing strategies to preserve the marine ecosystem and mitigate socio-economic impacts.

Keywords: Decision-makers, Delphi method, Impact assessment, Marine environments, ‘Marine Invasive and Harmful Species’, Socio-economic, Uncertainty

1. 서론

해양 생태계의 효과적인 관리는 해양 환경 보호, 자원의 지속 가능한 사용, 그리고 사회 경제적 잠재력의 극대화를 가능케 한다. 특히, 국내 생태계를 위협하거나 우리의 건강과 재산에 피해를 입히는 해양생물을 식별하고 그들의 영향을 평가하는 능력은 국가적인 중요 과제이다. 이와 관련하여 우리나라의 「해양생태계 보전 및 관리에 관한 법률」 제2조 12호에서는 ‘해양 생태계교란생물’, 13호에서는 ‘유해해양생물’을 정의하고 있으며, 동 법률 제 23조와 제24조에서는 각각의 관리에 대해 규정하고 있다.

국내 법률에서 ‘해양생태계교란생물’은 유전적 변형을 통해 생성된 유전자 변형 생물체를 포함, 외국에서 인위적 또는 자연적으로 도입되어 해양 생태계의 균형을 교란할 가능성이 있는 생물로 정의되고 있다. 이는 보전생물학 및 국제기구에서 정의하는 외래 침입종(*invasive alien species*) 범주에 속한다(Richardson *et al.*, 2000; Blackburn *et al.*, 2011). 따라서 ‘해양생태계교란생물’은 해양 침입종으로 간주될 수 있다. 한편, ‘유해해양생물’은 사람의 생명이나 재산에 피해를 주는 해양생물로 해양수산부령에 의해 지정된 종이다. 현재 해양수산부는 15종의 ‘유해해양생물’(이하 유해생물 또는 유해종)과 1종의 ‘해양생태계교란생물’(이하 교란생물 또는 교란종)을 지정하여 관리하고 있다(해양환경정보포털, 2023). 작은상자해파리(*Carybdea brevipedalia*)와 커튼원양해파리(*Chrysaora pacifica*)는 인간에게 쏘임 사고를 일으키는 위험이 있으며, 유령멍게(*Ciona robusta*)는 양식 시설에 피해를 주어 생산량을 감소시키기 때문에 최근에 지정되었다. 또한, 이전에 지정된 식물플랑크톤 관리 종은 전국의 해안에서 적조를 유발하고 있으며, 이로 인한 사회경제적 피해와 해양 생태계의 교란이 계속되고 있다(Kim *et al.*, 2019).

교란종과 유해종의 법률적인 정의도 명확하지 않지만, 생태계, 인간의 건강, 사회경제적 영향이 겹치는 경우가 많다. 특정 종의 영향을 평가하는 과정은 시간과 지역에 따라 다양할 수 있다. 일부 교란종은 시간이 지나면서 새로운 환경에 통합되어 중요한 역할을 수행할 수 있으며, 반면에, 일부 유해종은 특정 조건에서만 위협이 될 수 있다. 이러한 복잡성 때문에 두 카테고리 고리를 명확하게 구분하는 것은 어렵다(Finch *et al.*, 2021). 어떤 종이 두 카테고리에 걸릴 경우, 관리가 혼란스러워 질 수 있다. 따라서 통합관리와 새로운 분류 체계 및 법률 개정이 필요하다는 주장이 제기되었다(KOEM, 2015). 한편, 「생물다양성 보전 및 이용에 관한 법률」 제2조 제8호에 정의된 육상의 ‘생태계교란 생물’은 해양에서의 이 두 카테고리를 개념적으로 포괄한다. 그러나 「야생생물 보호 및 관리에 관한 법률」 시행규칙 [별표 3]에 정의된 “유해야생동물”은 해양의 유해생물에 대한 입법 취지와는 다르다.

교란종과 유해종(이하 ‘교란유해종’ 또는 ‘해양교란유해종’)에 대한 사전 예방, 조기 발견, 신속 대응 등 단계별 관리기술은 해양 생태계의 교란을 줄이고, 토착 생물의 생존을 위협하는 다양한 요소를 방지하며, 우리의 건강과 재산을 보호하는 데 필요하다(Kim *et al.*, 2019). 이러한 맥락에서 ‘교란유해종’의 계획적인 관리를 위한 영향평가 시스템을 도입해야 한다. 현재 관리 종은 해양수산부 고시에 따라 지정되고 있지만, 영향평가 기준과 방법이 체계적이지 않고 주관적인 판단에 의존한다. 이를 개선하기 위해, 해양 환경과 사회경제 상황을 고려하고, 국제 협약 준수에 적합한 ‘해양교란유해종’의 영향평가 기준 개발과 평가 도구의 도입이 필요하다. 이 도구는 학문적 근거를 바탕으로 장기 사용을 고려한 설계가 필요하며, 전문가 간의 합의를 원활하게 이루는 단계적 실행 프로세스를 포함해야 한다. 이를 통해 더 객관적이고 신뢰할 수 있는 평가 결과를 도출할 수 있다.

지난 수십 년 동안, 국제 과학계는 외래 침입종의 지역 생태계에 미치는 영향을 평가하기 위한 여러 평가 도구를 개발하였다. 이 도구들은 다양한 종에 걸쳐 생태계 악화 및 위험 시나리오를 표준화하고 비교할 수 있는 다양한 프레임워크를 제공하고 있다(Roy *et al.*, 2018; Bernardo-Madrid *et al.*, 2022). 이 분야의 중요한 발전 중 하나는 Blackburn *et al.*(2014)이 EICAT (Environmental Impact Classification for Alien Taxa)을 도입한 것이다. EICAT는 IUCN (International Union for Con-

ervation of Nature) 적색 목록(Red List)의 개념적 토대를 제공하였다. 적색 목록은 종의 세계적 보전 상태를 분류하고 문서화하며, 멸종 위기에 처한 종을 식별하기 위한 체계적인 접근 방식이다(IUCN, 2016). 적색 목록이 발표된 이후, IUCN은 무척추동물, 양서류, 조류, 포유류, 해양 어류 및 식물을 포함한 다양한 외래종의 환경 영향을 평가하기 위해 EICAT 프로토콜을 공식적으로 채택하였다(Hawkins *et al.*, 2015; IUCN 2020a, 2020b; Probert *et al.*, 2020). 동시에 외래종의 사회경제적 영향을 평가하는 도구인 SEICAT (Socio-Economic Impact Classification of Alien Taxa)가 도입되었고, 최근에는 EICAT 수정 버전으로 무척추동물과 포유류가 인간 활동과 복지에 미치는 영향을 평가하였다(Bacher *et al.*, 2018; Probert *et al.*, 2020).

외래 침입종의 관리 우선순위를 결정하기 위한 영향평가 도구는 ‘프레임워크’, ‘프로토콜’, ‘키트’, ‘체계’, ‘시스템’, ‘인덱스’ 등 다양하게 불린다(Srèbaliené *et al.*, 2019). 이러한 도구들은 예방 조치를 선택하고, 대상 목록을 작성하며, 환경 영향을 평가하는 등 의사결정을 지원한다. 이를 위해 EU 규정(1143/2014) 및 다양한 국제 협약(세계무역기구, 생물다양성협약, 국제식물보호협약)에 부합하는지 검토하며 기준을 설정한다(Roy *et al.*, 2018). 이 기준에는 종의 기본 정보, 침입 가능성 평가, 분포 및 확산과 영향 평가, 도입 경로 평가, 생물 다양성 및 생태계 서비스에 대한 영향 평가가 포함된다. 또한, 사회경제적 영향 평가, 멸종 위기종이나 보호 대상 서식지의 상태를 고려한 기후 변화 영향 분석, 제한된 정보로도 평가할 수 있는 능력도 고려된다. 이 기준은 정보의 출처를 문서화하고, 불확실성 포함하여 평가하고, 일관성을 유지하며, 간결한 형식으로 해석 가능한 요약을 제공하고, 품질 보증을 포함하는 것의 중요성을 강조한다.

영향 평가 척도는 다양한 양적, 질적 및 구조화된 데이터를 이용하고 다른 종들 간의 영향을 비교할 수 있어야 한다(Kumschick and Richardson, 2013). 이러한 목적으로 최근에 개발된 외래 침입종의 영향 평가 방법(예, Blackburn *et al.*, 2014; Nentwig *et al.*, 2016; Bacher *et al.*, 2018)에서 영감을 받아 ‘해양교란유해종’ 영향평가 도구를 제안한다. 이 도구는 다양한 서식지와 분류군에 적용 가능하며, 지역 해양 환경 및 사회경제적 영향을 준정량적으로 평가할 수 있다. 이 도구는 영향 수준의 척도를 활용하여 관리 종을 지정하고, 관리 우선순위를 정하며, ‘해양교란유해종’ 후보를 발굴하고, 외래종 목록 생성하는 등의 다양한 목적으로 이용될 수 있다. 이 도구는 ‘교란유해종’에 대한 대응뿐만 아니라 전체 해양생물 관리 업무에 파급 효과를 줄 수 있는 예방 기술로 사용될 수 있다. 또한 전문가나 관리자가 이 도구를 효과적으로 사용할 수 있도록 다음과 같은 실행 프로세스도 제안되었다.

2. 영향평가 도구 및 실행 프로세스

2.1 ‘해양교란유해종’ 영향평가 도구

‘해양교란유해종’ 영향평가 도구는 환경 영향과 사회경제적 영향을 다루는 두 가지 영역(그룹 A와 B)으로 구성되어 있다. 각 그룹은 6개의 서로 다른 영향 범주(카테고리)로 이루어져 있다(Table 1, Supplementary Table 1). 환경 영향(A)은 다음과 같은 카테고리로 분류된다: (1) 해조류/식생에 대한 초식성 영향(알레로파시 포함), (2) 해양 동물(무척추동물 및 어류)에 대한 포식성, 기생성 및 독성 영향, (3) 토착종과의 중간 경쟁, (4) 토착종에 대한 질병/기생충 전파, (5) 교잡 영향, (6) 전반적인 생태계 변화. 또한 사회경제적 영향(B)은 다음과 같은 카테고리로 분류된다: (1) 해조류 양식 산업에 미치는 영향, (2) 어패류 양식에 미치는 영향, (3) 해양 생물 자원 분야에 미치는 영향, (4) 인프라 및 경제 활동 차질, (5) 인체 건강에 미치는 영향, (6) 사회생활 및 지역사회에 미치는 영향. 이러한 12가지 영향 카테고리 내에서 영향 수준이 0(영향이 알려지거나 감지되지 않음)에서 5(현장에서 가능한 최대 영향)까지의 6가지 준정량적 척도를 사용하여 평가된다. 일반적으로, 충분한 데이터가 있는 종에 대해서도 올바른 평가에 대한 불확실성이 존재할 수 있다. 이런 이유로, 모든 항목의 불확실 정도를 추정하고 그에 따른 신뢰성 점수를 명시하는 것이 중요하다. 불확실성을 분류하는 다양한 방법이 있지만, 실용적인 목적을 위해 IPCC (Inter-

Table 1. Classification and impact assessment categories for Marine Invasive and Harmful Species. Comprehensive explanations of each category and the corresponding criteria for impact-scoring can be found in the main text

Group A: Marine Environmental Impacts Category	
A1	Herbivory effects on seaweeds/vegetation (including allelopathy)
A2	Predatory, parasitic, and toxic effects on marine animals (invertebrates and fish)
A3	Interspecific competition with native species
A4	Disease/parasite transmission to native species
A5	Hybridization impacts
A6	Overall ecosystem alterations
Group B: Socio-economic Impacts Category	
B1	Effects on seaweed farming industry
B2	Impacts on fish and shellfish aquaculture
B3	Influence on marine biological resources sector
B4	Infrastructure and economic activity disruptions
B5	Consequences for human health
B6	Social life and community impacts

Table 2. Confidence levels in individual impact categories using Marine Invasive and Harmful Species frameworks. The guidelines provide probabilities to assist assessors in categorizing their confidence levels into one of three qualitative categories: high, medium, or low

Confidence level	Approximate probability of the impact being accurate	Basis for confidence in impact assessment
High (3)	~80% (At least 8 out of 10 likelihood)	Supported by robust objective evidence or corroborated by the evaluator’s own research experience.
Medium (2)	~40 – 70% (Approximately 5 out of 10 likelihood)	Underpinned by a moderate amount of objective evidence.
Low (1)	~30% (Less than 3 out of 10 likelihood)	Lacks direct objective evidence, yet the impact is plausible based on indirect indications or expert judgment.

governmental Panel on Climate Change)의 접근 방식을 기반으로 하여 불확실성을 ‘높은 신뢰’, ‘중간 신뢰’, ‘낮은 신뢰’로 분류하는 것을 제안한다(Table 2). 각 영향 카테고리 수준은 특정 시나리오를 통해 명확하게 정의하고 설명함으로써 평가자의 혼란을 최소화하였다. 문헌에서 발견된 모든 영향은 아래에 설명된 채점 도구를 사용하여 평가된다. 평가자는 평가 목적에 따라 특정 그룹이나 카테고리를 선택하고 가중치를 부여할 수 있다. 또한, 분류군과 지역에 따른 변화를 수용하기 위해 척도 및 신뢰 수준을 조정할 수 있다.

● **그룹 A: 해양 환경 영향**

A1: 해조류/식생에 대한 초식성 영향(알레로파시 포함)

‘교란유해종’의 초식 압력은 장기간에 걸쳐 안정화된 해조류 군집의 생태적 균형을 파괴하며, 이로 인해 해조류 바이오매스 감소와 생태계의 일차생산성 저하를 초래할 수 있다. 과도한 초식은 해조류의 생존에 심각한 위협이 되며, 결국 토착 해조류의 소멸로 이어질 수 있다. 일부 ‘교란유해종’이 분비하는 알레로파시 화합물은 해조류의 발아 및 성장에 악영향을 미치며, 이는 해양 생태계에서 종의 다양성과 복잡한 먹이망의 안정성에 중대한 영향을 끼칠 수 있다. 이 카테고리는 주로 암반 해안 생태계에서 해조류의 정착과 번식을 방해하고, 먹이망의 불안정화를 초래하는 ‘교란유해종’과 해조류 간의 직접적인 상호작용

용에 의한 부정적인 영향을 평가하는 데 초점을 맞춘다. 중간 경쟁 메커니즘에 의한 영향은 카테고리 A3에서 따로 다루며, 생태계 수준에서의 영향은 카테고리 A6에서 평가한다. 해조류 양식장 및 유사한 환경에서 발생하는 영향은 카테고리 B1에서 평가한다.

• A1 척도 (0-5)

0 영향은 알려지지 않았거나 감지되지 않음.

- 1 지역 식생 내에서 우점하는 해조류에 대해 초식성 ‘교란유해종’이 미미한 영향을 미침.
- 2 지역 식생 내에서 초식성 ‘교란유해종’이 우점하는 해조류의 수도 감소와 함께 몇몇 해조류에 미미한 영향이 나타남.
- 3 아생태지역¹⁾ 규모의 여러 지역의 식생에서 초식성 ‘교란유해종’에 의한 종 다양성 및 우점종과 일부 해조류의 수도가 감소함.
- 4 아생태지역 규모에서 초식성 ‘교란유해종’에 의해 몇몇 식생이 소규모로 파괴되며, 「해양보호생물」²⁾로 지정된 해조류의 현저한 수도 감소가 발생함. 그러나 이러한 식생 변화는 되돌릴 수 있음.
- 5 생물다양성에 심각한 위협이 있으며, 초식성 ‘교란유해종’에 의해 다수의 아생태지역에서 식생이 파괴되고, ‘교란유해종’ 제거 후에도 군집 구조는 원래의 식생으로 복구될 수 없음. 「해양보호생물」로 지정된 해조류의 지역적 소멸이 발생함.

• 신뢰 수준 (1-3)

- 1 객관적 증거는 없지만 가능성이 있는 것으로 보임.
- 2 일부 객관적인 증거가 존재함.
- 3 객관적인 증거가 충분하거나, 평가자의 연구 경험으로 확신할 수 있음.

A2: 해양 동물(무척추동물 및 어류)에 대한 포식성, 기생성 및 독성 영향

‘교란유해종’은 포식, 기생, 독소를 통해 무척추동물과 어류의 번식률, 성장, 개체군 크기에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 개체군은 먹이사슬 그룹이나 생태 기능 그룹도 포함된다. 만약 ‘교란유해종’이 식물일 경우, 이를 먹이로 하는 무척추동물이나 어류의 먹이 선호도와 소화 가능성에 변화가 생길 수 있으며, 식물 독성의 이차 대사산물에 노출될 가능성도 있다. 이 카테고리는 ‘교란유해종’과 동물 군집 간의 직접적인 상호작용으로 인해 저서 및 표영 생태계 내 토착 동물 개체군의 감소 또는 국지적 소멸 가능성을 평가한다. 생태계 수준의 영향과 양식에서 발생하는 부정적인 영향은 각각 카테고리 A6 및 B2에서 평가한다.

• A2 척도 (0-5)

0 영향은 알려지지 않았거나 감지되지 않음.

- 1 지역 저서동물 또는 표영동물 군집 내에서 ‘교란유해종’에 의한 우점종에 대한 영향이 미미함.
- 2 지역 저서동물 또는 표영동물 군집 내에서 우점종의 수도 감소와 함께 몇몇 종에 미미한 영향이 나타남.
- 3 아생태지역¹⁾ 규모의 여러 지역 저서동물 또는 표영동물 군집에서 ‘교란유해종’에 의한 종의 다양성 및 우점종과 일부 종의 수도 감소가 발생함.

1) 생태지역과 아생태지역의 정의는 Supplementary Fig. 1을 참조

2) 해양수산부는 2006년 「해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률(타법개정 2011. 07. 29. 법률 제 109776호)」을 제정하여 관리기반을 확보하였으며, 특히 생존을 위협받거나 보호해야 할 가치가 높은 해양생물 91종을 현재 「해양보호생물」로 지정하여 관리하고 있다(해양환경정보포털, 2023).

- 4 아생태지역 규모에서 '교란유해종'에 의해 몇몇 저서동물 또는 표영동물 군집이 소규모로 파괴되며, 여러 지역 군집에서 관심종의 수도 감소가 발생함. 그러나 이러한 동물군집의 변화는 되돌릴 수 있음.
- 5 생물다양성에 심각한 위협이 있으며, 다수의 아생태지역에서 저서동물 또는 표영동물 군집이 파괴되고, 「해양보호생물」²로 지정된 동물의 지역적 소멸이 발생함. '교란유해종' 제거 후에도 군집 구조는 원래의 생태계로 복구될 수 없음.

• 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

A3: 토착종과의 중간 경쟁

영양염, 먹이, 서식지와 같은 자원을 두고 벌어지는 경쟁에서 '교란유해종'은 토착종을 압도하고 토착종의 번식률(예: 해조류 포자, 무척추동물 유생)을 떨어뜨릴 수 있다. '교란유해종'은 환경 조건을 변화시켜 서식지를 토착종에게 적합하지 않게 만들며, 번식력, 저항력, 수명 및 성장 측면에서 토착종을 능가함으로써 서식지 적합성에 영향을 미친다. 이러한 영향은 처음에는 뚜렷하지 않을 수 있지만, 생물량의 변화를 통해 진행되면 결국 지역적 또는 광역적 소멸로 이어질 수 있다. '교란유해종'은 경쟁 압력을 통해 생태학적으로 토착종을 배제하며, 이는 생태계 내 생물 다양성을 감소시킨다. 이 카테고리에서는 중간 경쟁으로 인해 생태계 내 종의 교체와 그에 따른 생물학적 균형의 변화를 평가한다.

• A3 척도 (0-5)

- 0 영향은 알려지지 않았거나 감지되지 않음.
- 1 '교란유해종'과 일부 토착종 간에 자원 착취 경쟁이 발생하지만, 그 수준은 매우 낮음.
- 2 '교란유해종'과 여러 토착종 간의 자원 착취 경쟁이 발생하며, 이로 인해 일부 토착종의 개체수 감소가 발생함.
- 3 '교란유해종'과 여러 토착종 간의 먹이 및/또는 서식 공간을 두고 발생하는 간접 경쟁으로 인해 일부 토착종의 개체수 감소가 발생함.
- 4 '교란유해종'과 여러 토착종 간의 먹이 및/또는 서식 공간에 대한 자원 착취 및 간접 경쟁으로 인해 여러 토착종의 개체군 크기가 감소하며, 경쟁에서 밀린 토착종의 행동 변화가 관찰됨.
- 5 '교란유해종'과의 경쟁으로 인해 「해양보호생물」²로 지정된 종의 개체수가 크게 감소하거나 종의 대체 또는 지역적 소멸이 발생함.

• 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

A4: 토착종에 대한 질병/기생충 전파

토착종은 내생 또는 외생 질병에 감염될 수 있으며, 이는 바이러스, 곰팡이, 원생동물 및 기타 병원체를 포함하고, 기생충의 숙주나 매개체가 될 수 있다. 이러한 상황은 질병과 사망을 초래할 수 있다. 기생성 편모충은 이러한 병원체의 한 예이다. 병원체의 도입은 생물안전(biosafety)과 생물보안(biosecurity) 문제를 야기할 수 있으며, 이는 생태계와 인간 건강에 직접적인 위협이 된다. 이 카테고리는 기생충 및 병원체의 확산이 토착종의 면역력 감소, 사망률 증가, 번식력 저하와 같은 직접적인 영향을 평가하며, 이를 통해 생태계 내 질병 역학 변화를 이해하는 데 기여한다.

• A4 척도 (0-5)

0 영향은 알려지지 않았거나 감지되지 않음.

- 1 ‘교란유해종’이 비특이적 기생충이나 병원체의 숙주로서 간헐적으로 토착종에게 낮은 위험성을 가진 질병을 전파하지만, 토착종의 생물량에는 영향을 미치지 않음.
- 2 ‘교란유해종’에 의해 낮은 위험성을 가진 병원체가 가끔 토착종에 전파되어 여러 토착종이 영향을 받지만, 토착종의 생물량 감소는 없거나 미미함.
- 3 ‘교란유해종’에 의해 낮은 위험성을 가진 병원체가 자주 토착종에 전파되어 많은 토착종에 영향을 미치거나, 적어도 한 종의 토착종에게 유해한 병원체가 전파되었지만, 이 종의 생물량 감소는 경미함.
- 4 ‘교란유해종’에 의해 유해한 병원체가 다양한 토착종에 전파되어 일정 수준의 생물량 감소를 초래함. 「해양보호생물」²에 이 병원체가 전파됨.
- 5 ‘교란유해종’이 토착종에게 유해한 병원체를 직접 전파하며, 「해양보호생물」에 이 병원체를 통해 생물량 감소가 발생함. 「해양보호생물」 대신에 IUCN의 취약(vulnerable), 멸종 위기(endangered or critically endangered) 종으로 교체 가능함.

• 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

A5: 교잡 영향

‘교란유해종’은 경쟁과 포식을 통해 토착종을 밀어내고, 토착종과의 교배를 통해 잡종을 형성하여 토착종의 유전적 무결성을 위협하며, 이로 인해 잡종 개체군이 확산된다. 불임 또는 다산의 잡종이 우세해지면 토착종의 번식 기회를 감소시키고, 그들의 유전적 고유성을 저해하며, 유전적 표류를 촉진할 수 있다. 이런 과정은 생태계 내 토착종의 유전적 다양성과 적응 능력을 약화시킬 수 있다. 이 카테고리는 잡종 개체군의 형성과 그 결과로 생태계 내 유전적 다양성 및 진화 가능성의 변화를 평가한다.

• A5 척도 (0-5)

0 영향이 알려지지 않았거나 감지할 수 없음.

- 1 인공적 환경(예: 관상용 사육, 양식장)에서는 ‘교란유해종’과 토착종 간의 잡종 형성이 가능하지만, 야생에서는 잡종 형성이 없거나 매우 드물게 발생함.
- 2 야생에서 ‘교란유해종’과 토착종 간의 잡종 형성이 더 흔하게 발생하며, 잡종 자손은 존재하지만 생식력이 제한적임.
- 3 야생에서 ‘교란유해종’과 토착종 간의 잡종 형성이 자주 발생하며, 잡종 자손은 존재하지만 불임의 특성을 보임.
- 4 잡종 자손이 생식력을 가지고 있으며, ‘교란유해종’과 토착종 간의 잡종 형성이 자주 발생하여 잡종 개체군이 증가함.
- 5 생식력을 가진 잡종 자손이 존재하며, 우세한 잡종 개체군이 형성되고, 토착종의 유전적 정체성 상실과 국지적 멸종이 흔하게 발생함.

• 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

A6: 전반적인 생태계 변화

이 카테고리는 생태계 구조(종 구성, 먹이망), 기능(생산성, 소비, 물질 순환), 영양 상태(영양염 농도, 영양염 플럭스, 질소 고정 세균)에 대한 영향을 다룬다. 또한 해역의 환경 특성(염분, pH, 탄소와 질소 비율, 유기 물질의 양, 퇴적물 조성 등), 교란

수준(식생의 취약성, 해수 흐름의 변화, 침식)에 미치는 영향도 평가한다. '교란유해종'의 확산은 토착종에 필요한 서식지 적합성(예: 은신처)을 감소시키고, 생존과 번식을 위한 생태적 지위(niches)를 변형시켜 서식지 범위를 축소시키고 소멸 위험을 증가시킬 수 있다. 생태계에 대한 영향을 제어하기 위한 물리적 또는 화학적 방제 활동은 종종 비표적 종에게 부작용을 일으킬 수 있으며, 추가적인 생태계 교란을 초래할 수 있다. 이 카테고리는 '교란유해종'에 의해 초래된 생태계 수준의 변화와 그로 인한 생태계 기능 및 서비스의 손상을 평가한다.

• A6 척도 (0-5)

0 영향이 알려지지 않았거나 감지할 수 없음.

1 지역 규모에서 일부 토착종의 생물량 감소 및 종 다양성이 약간 감소함.

2 지역 규모에서 생태계 구조 및 기능에 미약한 변화가 발생함.

3 아생태지역¹ 규모에서 생태계 구조 및 기능에 변화가 발생하며, 보전지구에서 생태계 서비스 기능 저하가 관찰됨.

4 다수의 아생태지역에서 생태계 구조 및 기능에 변화가 발생하며, 「해양보호생물」²로 지정된 일부 종의 생물량 감소가 관찰됨. 보전지구에서는 방제가 필요한 수준임.

5 생태지역¹ 규모에서 생태계 구조 및 기능의 변화가 발생하며, 지역 규모에서 「해양보호생물」로 지정된 일부 종의 소멸이 발생함. 보전지구에서는 심각한 생태계 훼손이 발생함.

• 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

● 그룹 B: 사회경제적 영향

B1: 해조류 양식에 미치는 영향

'교란유해종'은 김, 미역, 다시마, 툇과 같은 해조류 양식에 심각한 피해를 입힐 수 있다. 이들은 양식, 자연 채취, 종묘 생산 및 가공에도 부정적인 영향을 미친다. 이들은 해조류를 먹어 치우는 섭식 흔적을 남기며, 이는 제품의 가치를 떨어뜨리고 해조류 양식장을 파괴하여 큰 경제적 손실을 초래할 수 있다. '교란유해종'과의 경쟁으로 해조류 수확량은 줄어들고, 해조류 표면의 직접적인 손상이나 오염 생물의 축적은 가공 효율과 제품 품질을 크게 감소시킨다. 이 카테고리의 영향에는 해조류 양식 과정에서 발생하는 비용과 상품 가치 하락이 포함되며, 이에에는 제초제, 질병 방제제, 성장 촉진제의 비용이 포함된다. 이러한 대책과 활동은 경제적 손실로 이어진다.

• B1 척도 (0-5)

0 영향이 알려지지 않았거나 감지할 수 없음.

1 해조류 양식장에서 '교란유해종'에 의해 발생하는 경미한 피해가 가끔 관찰됨.

2 해조류 양식장에서 '교란유해종'에 의한 피해가 자주 발생하지만, 경제적 손실은 경미함.

3 '교란유해종'이 해조류 양식장에서 토착 동물의 섭식량을 크게 초과하여 상당한 경제적 손실을 초래함. 이에 따라 피해 방지를 위해 방제가 필요함.

4 '교란유해종'에 의한 양식 해조류의 과도한 소비가 자주 발생하며, 이로 인해 발생하는 경제적 손실이 상당함. 피해 방지를 위한 방제 효과가 크지 않음.

5 '교란유해종'에 의한 양식 해조류의 과도한 소비와 오염으로 인해 양식장이 심각하게 파괴되어, 수확이 불가능한 상태가 됨.

- 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

B2: 어패류 양식에 미치는 영향

‘교란유해종’은 질병과 기생충을 퍼뜨려 어류 및 패류 양식의 대량 폐사를 초래하여 생산량을 감소시킨다. 감염되거나 독소에 오염된 양식 어종은 맛이 변하고 악취가 발생하여 시장 가치와 선호도가 떨어진다. ‘교란유해종’의 대규모 발생은 어류 및 패류 양식장에서 사료와 배설물 오염과 같은 유기성 쇄설물을 증가시켜 자연 서식지 환경을 악화시킨다. 양식 최적 조건은 먹이와 번식지의 접근성을 보장해야 하지만, 이러한 조건은 ‘교란유해종’에 의해 훼손될 수 있다. 이 카테고리의 경제적 영향은 항생제, 살균제, 살충제와 같은 잡종 양식을 사육하기 위해 사용되는 약품의 비용과 이러한 화학물질 사용으로 인한 상품 가치 하락이 포함되며, 이러한 대응 조치 대부분은 경제적 손실을 가져온다.

- B2 척도 (0-5)

0 영향이 알려지지 않았거나 감지할 수 없음.

- 1 ‘교란유해종’은 양식 어패류에 경미한 경쟁적 영향을 미치며, 경제적 손실은 미미함.
- 2 양식 어패류에 대한 경쟁 및 질병 전파로 인해 경미한 경제적 손실이 발생함.
- 3 양식 어패류에 대한 경쟁이 빈번하고, 낮은 감염율의 질병 전파로 상당한 경제적 손실이 발생하여 방제가 필요함.
- 4 경제적으로 중요한 양식 어패류 사이에서 질병 전파나 잡종 형성으로 인한 상당한 경제적 손실이 발생함.
- 5 양식 어패류에게 유해한 질병의 전파나 어패류와의 잡종 형성으로 인해 수확이 불가능한 상태가 됨.

- 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

B3: 해양 생물 자원 분야에 미치는 영향

해양 생물은 제약, 바이오 식품, 화학 제품, 바이오 에너지, 환경오염 정화 등 해양생명공학 산업에서 필수적인 원료로 사용된다. 병원균과 기생충을 옮기는 침입성 유해종은 먹이와 포식 압력을 악화시켜 토착종의 생산성, 가입 및 분산 능력을 감소시킨다. 이로 인해 무성한 해초 숲과 영양분이 풍부한 갯벌을 포함한 해양 숲과 연안 습지가 훼손되어 해양 생물의 서식지가 축소된다. 이는 연안의 갯녹음이나 육지화 현상으로 나타나며, 이러한 악화는 해양 생물자원의 지속 가능한 이용을 방해하고 큰 경제적 손실을 초래한다. 따라서 ‘교란유해종’ 퇴치 비용과 해양 조림 또는 해안 생태계 복원 프로젝트에 대한 투자는 경제적 손실로 간주되어야 한다.

- B3 척도 (0-5)

0 알려진 영향이 없거나 감지할 수 없음

- 1 지역 규모에서 토착종에 미치는 영향은 경미하며 경제적 손실은 무시할 수 있는 수준임.
- 2 지역 규모에서 토착종에 미치는 영향이 중요하며 경제적 손실이 발생함.
- 3 아생태지역¹ 규모에서 가끔 발생하며 상당한 경제적 손실로 인해 방제가 필요함.
- 4 아생태지역 규모에서 자주(매년) 발생하며 중대한 경제적 손실을 초래하고 복원 프로젝트가 필요함.
- 5 서식지가 거의 파괴되어 생물자원으로 사용할 수 있는 종이 거의 없음.

- 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

B4: 인프라 및 경제 활동 차질

해안 지역은 항구와 발전소와 같은 중요한 산업 시설을 수용하는 데 핵심 역할을 한다. 그러나 항로, 계류시설, 선회지점, 방파제와 같은 구조물에 서식하는 ‘교란유해종’은 이러한 시설의 수명을 단축시키고, 구조적 안전성을 손상시켜 경제적 손실을 초래하고, 근로자의 안전 위험을 증가시킬 수 있다. 선박과 해양 구조물의 표면에 생물학적 오염이 발생하면 운영 및 유지 보수 비용이 증가한다. 예를 들어, 대규모 해파리 떼가 발전소의 취수구를 막을 경우, 발전소가동이 중단될 수 있다. 또한, 해파리의 과도한 증식은 항해 및 어업 활동을 방해하며, 선박 프로펠러에 얽히는 등의 문제가 발생할 수 있다. 신속한 대응이 이루어지지 않을 경우 양식 시설의 고장 및 양식 생물의 손상과 같은 추가적인 피해를 유발할 수 있다. 이 카테고리의 경제적 영향은 직접적이며, 화학적 처리 비용, 방제 프로그램, 관리 기술 개발 및 피해 완화 연구에 드는 비용도 평가에 고려되어야 한다.

- B4 척도 (0-5)

0 알려진 영향이 없거나 감지할 수 없음

- 1 지역 규모에서 토착종에 미치는 영향은 경미하며 경제적 손실은 무시할 수 있는 수준임.
- 2 지역 규모에서 토착종에 미치는 영향이 중요하며 경제적 손실이 발생함.
- 3 아생태지역¹ 규모에서 가끔 발생하며 상당한 경제적 손실로 인해 방제가 필요함.
- 4 아생태지역 규모에서 자주(매년) 발생하며 중대한 경제적 손실이 발생
- 5 인프라 및 시설 운영의 중단으로 인해 엄청난 경제적 손실이 발생

- 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

B5: 인체 건강에 미치는 영향

‘교란유해종’은 물립, 쏘임, 긁힘, 발진 및 감염을 통해 인간에게 직접적인 신체적 피해를 입힐 수 있다. 또한, 독성 물질은 해수, 퇴적물, 해산물, 폐기물에 생물학적으로 축적되어 생명과 안전에 위협이 될 수 있다. 독소나 알레르기 유발 물질과 같은 이차 화합물의 섭취나 접촉은 단순한 불편함에서 사망에 이르기까지 심각한 건강 위협을 초래할 수 있다. 낮은 농도와 잔류량에도 ‘교란유해종’을 퇴치하기 위해 사용되는 살충제 및 기타 화학물질은 인간 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 이는 근절 및 치료 비용에 포함되어야 한다.

- B5 척도 (0-5)

0 알려지거나 감지할 수 있는 영향이 없음.

- 1 인간에게 무해하지만 감염 가능성이 있는 질병의 숙주로서, 아직까지 피해 사례는 없음.
- 2 여러 무해한 질병의 숙주로서, 간접적 또는 직접적 전파 가능성이 있으며, 배설물로 인한 해양 오염을 통해 건강을 위협함.
- 3 무해하지만 다양한 질병에 직접 감염된 사례가 발생함. 때때로 물립이나 기타 공격을 통해 건강을 위협함. 질병 퇴치 및 독소 제거 프로그램이 필요함.
- 4 오염된 식품으로 인한 감염이 흔하며, 많은 질병이 자주 발생하여 직접적 전파, 물립 또는 기타 공격을 통해 건강을 위협함. 그러나 치명적인 사례는 드물고 경제적 비용이 발생함.

5 인간에게 해로운 질병을 자주 전파하는 매개체로서, 물림이나 기타 부상이 종종 치명적이며 건강 위험을 초래함. 경제적 비용이 상당함.

- 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

B6: 사회생활 및 지역사회에 미치는 영향

문화 생태계 서비스의 관점에서 해양의 미적 및 경관적 가치는 관광, 레크리에이션, 휴식의 공간으로서 점점 더 인정받고 있다. 그러나 야생 동물의 폐사와 부영양화 악화 등 ‘교란유해종’의 직접적 또는 간접적 영향으로 인해 해양 레저 및 문화 공간에 대한 공공 접근이 제한된다. 질병 전파 위험 또는 구조물 손상으로 인한 사고 위험 증가는 대중 보호를 위해 관광 접근 제한을 위한 법적 조치가 필요해 진다. 이 카테고리에서 고려해야 할 영향에는 시민들의 레크리에이션 및 문화 유산을 즐기는 권리에 대한 제한으로 인한 손실과 지역 서비스 제공업체의 고용 기회 감소가 포함된다. 이러한 영향의 평가에는 사회적 복지의 잠재적 감소와 자연 및 문화적 해양 공간의 본질적 가치를 반영해야 한다.

- B6 척도 (0-5)

0 알려지거나 감지할 수 있는 영향이 없음.

1 지역적으로만 경미한 영향이 있으며 경제적 손실은 미미함.

2 야생태지역¹ 규모에서 약간 오염과 피해로 인한 경미한 경제적 손실이 발생.

3 야생태지역 규모에서 오염과 피해가 발생하며, 경제적 손실을 줄이기 위한 조치가 필요함.

4 여러 야생태지역 규모에서 자주 발생하거나 특정 지역의 레크리에이션 가치에 상당한 피해를 입혀 경제적 손실이 큼.

5 레저 가치가 완전히 상실되어 사람들의 접근이 제한되고 엄청난 경제적 손실을 초래함.

- 신뢰 수준(1-3)은 A1에서 정의된 대로 적용

2.2 단계적 실행 프로세스

‘해양교란유해종’의 영향 평가를 위한 체계적인 실행 과정은 델파이기법에 기초하여 다음의 5단계를 포함한다(Fig. 1).

1단계: 평가 목적 및 범위 설정

첫번째 단계에서는 평가의 목적과 범위를 명확히 설정한다. 이 과정은 평가할 대상종과 그 필요성을 정의하는 과정이다. 예를 들어, 해양수산부는 법령으로 관리 대상을 지정한 ‘교란유해종’을 대상으로 정기적인 영향 평가를 수행하고 이를 통해 관리 전략의 적절성을 평가하고 있다. 또한, 법적 관리가 필요한 수준에 이르기 전의 영향을 측정하여 후보 종을 선발하고, 잠재적으로 위험한 종을 사전에 식별하여 잠재 종 목록을 작성하고 있다. 이러한 업무를 수행하기 위해서는 다음과 같이 그 목적과 필요성을 설정해야 한다.

- 평가 목표와 필요성 설정
- 관리 종 영향 평가: 법적으로 관리 대상인 종의 환경 및 사회경제적 영향을 정기적으로 평가하여 관리 전략의 효율성을 평가하고 개선한다. 이는 ‘교란유해종’ 관리의 지속성을 확보하고 해양 환경을 보호하는데 기여한다.

■ Step-by-step Execution Process

1. **Setting Goals and Scope**



- Establish a document or database to outline the purpose and scope of the assessment.
- Periodic assessment of legally managed species.
- Pre-impact assessment of candidate species and compile a list of potential species.

2. **Formation and Role Allocation of Expert Committee**



- Form a committee with diverse expertise.
- Assign roles and responsibilities to each member.
- Plan regular meetings for comprehensive evaluations.

3. **Setting Evaluation Items and Criteria**



- Develop a framework for assessing marine environmental and socio-economic impacts.
- Differentiate criteria for invasive and harmful species.
- Create a standardized evaluation form or tool.

4. **Assessment and Consensus Building**



- Conduct assessments using the established criteria.
- Use a scoring system for each species.
- Document uncertainties and discuss potential solutions.

5. **Finalizing and Publishing Assessment Results**



- Organize workshops to discuss and finalize species rankings.
- Prepare a report or publication of the assessment results.
- Plan for the dissemination of the findings to relevant stakeholders

Fig. 1. Workflow diagram of a systematic impact-scoring system for Marine Invasive and Harmful Species.

- 후보 종 영향 평가: 아직 법적 관리 기준에 도달하지 않은 종들의 영향을 평가하여, 이들의 관리 지정 필요성을 판단한다. 이를 통해 ‘교란유해종’에 대한 조기 대응과 해양 환경 관리를 지원한다.
- 잠재 종 목록 작성: 미래에 문제를 일으킬 가능성이 있는 종을 선제적으로 식별하고 관련 정보를 수집하여 조기 대응 전략을 개발한다. 이를 통해 기후 변화와 같은 미래의 도전에 대비하고 국내 해역의 생태계 및 사회경제적 피해를 최소화 한다.

2단계: 전문가 위원회 구성 및 역할 분담

평가 목적에 부합하는 전문가 위원회를 구성하고 역할을 명확히 분담한다. 전문가 위원회는 다양한 분야의 전문가로 구성되어야 하며, 분류군, 기능군, 서식지와 관련된 균형 잡힌 전문성을 대표해야 한다. 다음은 전문가 위원회 구성 및 역할 분담의 예이다.

- 전문가 위원회 구성에 필요한 전문 분야
 - 분류군: 원생생물, 해조류, 무척추동물, 척추동물 등의 다양한 생물 분류군의 전문가
 - 기능군: 일차생산자, 초식자, 포식자 등 다양한 생태 기능을 연구한 경험이 있는 전문가
 - 서식지: 플랑크톤, 저서생물, 유영생물 등 다양한 해양 서식지와 환경을 이해하는 전문가

특히 후보 종의 영향을 평가하고 잠재 종 목록을 작성하는 것을 목표로 하는 전문가 위원회는 각 분류군별 전문가 수를 균등하게 배치하여 전문성을 확보하고 편향을 방지해야 한다.

· 전문가 위원회 구성원의 역할

위원들은 자신의 전문성을 바탕으로 조사하고 관련 정보를 수집한 다음, 이 정보를 다른 전문가들과 공유하고 교환한다. 수집된 정보를 종합적으로 평가하고 각 평가 기준에 따라 불확실성 수준을 명확히 표현하여 종의 영향을 과학적으로 분석하고 결정한다.

3단계: 평가 항목 및 기준 설정

‘교란유해종’의 해양 환경과 사회경제적 영향을 평가하기 위해 다음 절차를 통해 평가 항목과 기준을 설정한다.

- **항목 우선순위 설정:** 해양 환경 및 사회경제적 영향을 평가하기 위한 항목과 기준을 설정할 때, 다양한 항목을 고려하되, 특정 평가 목적에 따라 12개 카테고리 중 평가 항목을 선택하고, 특정 항목을 우선시하거나 제외할 수 있다.
- **교란 및 유해종 별도 평가:** 필요할 경우, 교란 종과 유해종을 별도로 평가할 수 있다. 교란 종은 주로 해양 환경에 미치는 영향을, 유해종은 사회경제적 영향을 중요하게 다룬다.
- **영향 그룹 간 비교 분석:** 관리 종 및 후보 종에 대해 모든 영향 카테고리를 평가하여 장기적인 비교 분석을 가능하게 한다. 이는 영향에 대한 전체적인 이해를 제공하고 환경 및 사회경제적 영향 그룹 간의 공정성을 보장한다.
- **잠재 종 식별 기준:** 잠재적으로 문제가 될 수 있는 종을 식별하기 위해 다음 기준이 적용된다: (1) 국내 생물다양성, 생태계 서비스 및 사회경제에 영향을 미친 이력이 있는 종. (2) 우리나라와 직접 또는 간접적으로 연결된 주변 국가 및 생태지역에서 생태 교란 및 피해를 일으킨 종. (3) 우리나라와 기후 조건이 비슷한 지역에 출현하여 우리나라 해역에 정착할 가능성이 있는 종. (4) 활발한 해상 교역을 통해 우리나라로 유입될 수 있는 종.

4단계: 평가 및 합의 형성

이 단계에서는 체계적이고 투명한 평가 과정을 통해 신뢰할 수 있는 결과를 도출하고 전문가 간의 합의를 이룬다.

- **점수 척도 사용:** 각 평가 카테고리는 0(최소)에서 5(최대)까지의 점수 척도를 사용하여 평가되며, 사례를 기반으로 영향을 측정한다.
- **정보의 한계 인정:** 기존 정보의 세부사항에서 나타나는 변동성을 인정하면서도, 정보의 한계로 인한 사회경제적 영향은 부차적으로 고려한다. 그러나 주된 평가 항목은 환경 영향으로 한다.
- **핵심 정보 목록화:** 전문가들은 데이터베이스, 문헌, 전문가 지식을 활용하여 각 종의 계통 분류, 기능적 역할, 국내외 분포, 잠재적 유입 경로와 같은 핵심 정보를 목록화 한다.
- **점수 목록 제공:** 평가를 위한 일관된 점수 목록이 전문가들에게 제공되며, 필요에 따라 평가 그룹 내에서 체계적인 검토와 점수 조정을 위해 델파이 방법을 적용된다.
- **평가 결과의 요약 및 합의 단계:** 그룹 리더는 계산된 점수를 집계하여 평균 또는 중앙값으로 점수를 요약하고 그룹 내 합의 수준도 표시한다.
- **불확실성 처리:** 평가의 복잡성과 미래 문제 예측에 내재된 불확실성을 인식하고, 엄격한 수학적 방법보다는 유연한 접근 방식을 권장한다. 불확실성에 대해서는 그룹 내에서 토론하고 해결한다.

5단계: 평가 결과 확인 및 공개

다음 단계를 수행하여 평가 결과를 확인하고 공개한다.

- **워크숍 개최:** 모든 이해관계자 그룹이 모여 워크숍을 개최하고, 사전에 합의된 점수 체계를 사용하여 종을 순위화 한다.
- **순위 근거 제시:** 각 그룹의 리더는 그룹 내 종의 순위를 명확히 설명하고 이를 뒷받침하는 증거를 제공하는 책임이 있다.
- **우선순위 목록 생성:** 의장은 그룹 리더들과 협력하여 공유된 합의를 반영한 우선 순위 목록을 작성한다. 이 목록은 지속적으로 검토되고 개선된다.
- **결과 발표:** 합의에 도달하면, 평가 과정에서 도출된 모든 관련 메타데이터를 포함한 최종 순위 목록을 게시하여 의사 결정 정보를 전파한다.
- **신원 공개:** 평가 과정에 적극적으로 참여한 모든 연구자의 신원을 공개함으로써 투명성을 유지한다.
- **검토 위원회 고려:** 관리 종 평가와 새로운 종 목록 포함에 대한 지속적인 전문가 의견을 확보하기 위해 추가로 검토 위원회 개최를 고려한다. 이는 단계적 실행 과정에 대한 신뢰를 높이는 데 도움이 된다.
- **온라인 평가 시스템 구축:** 동적이고 지속적인 종 평가를 촉진하기 위해 영구적이고 쉽게 접근할 수 있는 온라인 평가 시스템을 구축한다. 이는 이해관계자의 적극적인 참여를 장려한다.

이 접근 방식을 통해 다양한 전문가와 이해관계자가 협력하여 '교란유해종'의 영향을 평가하고 관리하며, 다양한 의견과 관점이 반영된 포괄적이고 포용적인 방식으로 과정을 수행한다. 또한, 이해관계자 간의 합의와 이해를 중시하며 지속적인 관리와 검토를 통해 정보와 결과를 개선하고 발전시킬 수 있는 시스템을 제공한다.

2.3 영향평가 도구의 활용

전남대학교 해양학과 4학년 '연안보전생태학' 수강생을 대상으로 2020년부터 2022년까지 '해양교란유해종' 영향평가 도구 활용한 설문조사가 실시되었다. 참여한 학생들은 해양학과의 필수 전공 과목을 이수하였으며, '생물해양학' 및 '해양생태학' 등을 통해 '해양교란유해종'에 대한 기본적인 지식을 습득했다고 확인되었다. 이들에게는 환경적 및 사회경제적 영향을 평가하는 데 도움을 주기 위해 최근 관련 프로젝트 보고서(Kim *et al.*, 2019)가 제공되었고, 학술 논문, 기타 보고서, 미디어 보도 등의 정보 활용이 권장되었다. 환경 영향과 사회경제적 영향은 각각 6개의 카테고리로 구성되어 있으며, 각 카테고리는 6단계 척도를 통해 영향의 강도를 평가하였다(Supplementary Table 1). 영향 점수는 각 카테고리에서 기록된 영향 점수와 신뢰도 수준을 고려하는 이차원 영향 매트릭스를 사용하여 결정되었다(Fig. 2, Supplementary Table 2).

이 설문에는 총 75명이 참여하였으며, 22종의 해양 생물이 평가되었다(Supplementary Table 2). 이 중에서 15종은 관리 대상으로 분류된 종이다. 나머지 종은 최소한 한 개의 영향 카테고리에 기록되었다(Supplementary Table 3). 환경적 영향의 카테고리에서 가장 많은 종에 영향을 미친 것은 포식(A2)이었고, 사회경제적 영향 카테고리에서는 해조류 양식(B1)과 어패류 양식(B2)이었다(Fig. 3). 영향 점수가 있는 종 중에서 사회경제적 영향의 사회생활(B6) 카테고리를 제외한 모든 카테고리에서 영향 수준 3 이상의 비율이 최소 50% 이상이었다. 그러나 환경 영향은 초식(A1)을 제외하고는 대략 20%를 넘지 않았다(Fig. 3). 이러한 영향의 심각성에 관계없이 환경 영향 카테고리에서 포식(A2), 생태계(A6), 경쟁(A3), 초식(A1)은 각각 22종 중 86%, 77%, 59%, 55%로 평가되었다. 그러나 영향 수준 3 이상인 카테고리에서는 초식(A1), 포식(A2), 경쟁(A3) 순으로 나타났다(Fig. 3).

Impact level	5	3	4	5
	4	2	3	4
	3	1	2	3
	2	0	1	2
	1	0	0	1
		1	2	3
		Confidence level		

Fig. 2. A two-dimensional impact matrix. In the process of impact assessment, species are assigned scores ranging from 1 to 5 for both environmental and socio-economic effects, utilizing the numerical thresholds described in the main text. The impact score of an invasive or harmful species escalates as the confidence level (x-axis) and impact level (y-axis) increase, ultimately falling into one of six impact categories, ranging from 0 to 5.

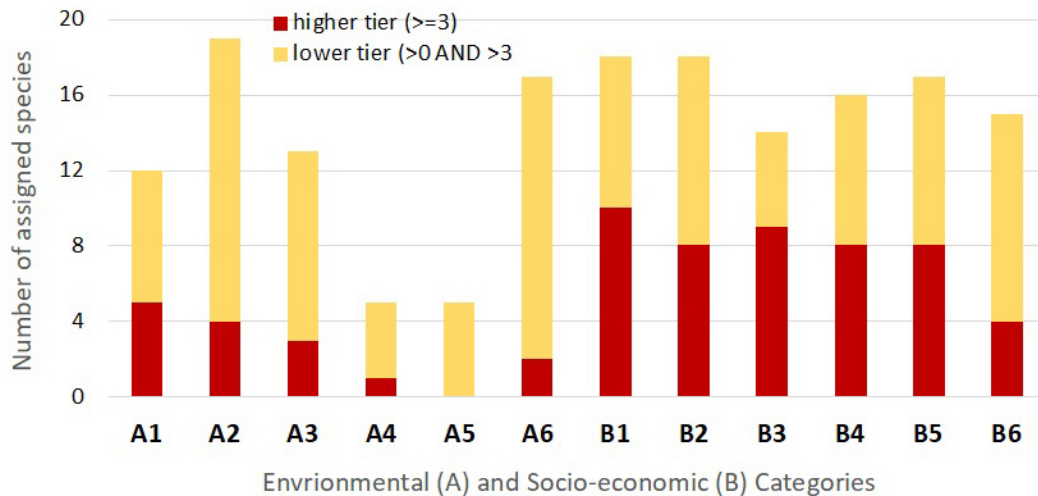


Fig. 3. The number of Marine Invasive and Harmful Species assigned to each impact category: A1, herbivory; A2, predation; A3, competition; A4, disease; A5, hybridization; A6, ecosystem; B1, seaweed farming; B2, animal aquaculture; B3, biological resources; B4, infrastructure; B5, human health; B6, social life. The different colors indicate the severity of impact mechanisms.

관리 대상 종(15종)과 비관리 대상 종(7종) 사이에는 영향 평가 점수에서 차이가 있었다. 관리 대상 종의 환경적 영향 점수는 3.0에서 12.3 사이였고, 사회경제적 영향 점수는 4.0에서 26.0 사이였다. 관리 대상 종의 환경 및 사회경제적 영향 카테고리의 평균 점수는 각각 7.3과 15.3이었으며, 비관리 대상 종의 평균 점수는 각각 3.5와 6.9로 관리 대상 종보다 낮았다.

7종의 식물플랑크톤의 환경 및 사회경제적 영향 카테고리의 평균값은 각각 5.5와 10.0이었으며, 10종의 저서동물의 경우 각각 6.5와 11.1이었다. 그러나 자포동물인 해파리류의 평균값은 각각 6.1과 19.5로 훨씬 높았다.

평가된 ‘해양교란유해종’ 중 약 80%는 환경 영향보다 사회경제적 영향이 큰 것으로 평가되었다. 가장 큰 영향을 미친 5종은 코클로디니움 폴리크리코이데스(*Cochlodinium polykrikoides*), 자주빛이끼벌레(*Watersipora subovoidea*), 작은상자해파리(*Carybdea brevipedalia*), 보름달물해파리(*Aurelia aurita*), 커튼원양해파리(*Chrysaora pacifica*)로, 이들의 전체 영향 카테고리 합계는 25 이상이었다. 그러나 환경 카테고리 그룹과 사회경제적 카테고리 그룹 간의 차이가 크고 표준화가 어려운 관

계로 각 그룹을 별도로 비교하는 것이 적절하다고 판단된다. 따라서 환경 그룹에서는 총 영향 점수가 10 이상인 종으로 *Cochlodinium polykrikoides*, *Carybdea brevipedalia*, 분홍멍게(*Herdmania momus*), 유령멍게(*Ciona robusta*), *Watersipora subovoidea*가 있으며, *Aurelia aurita*는 약간 낮은 9.8이었다. *Herdmania momus*는 비관리 종이다. 관리 종인 식물플랑크톤 알렉산드리움(*Alexandrium* spp.)과 *Chrysaora pacifica*는 낮은 3.0의 값을 기록했다. 사회경제 그룹의 평가 점수는 대체로 환경 그룹의 두 배 이상이었다. *Carybdea brevipedalia*, *Cochlodinium polykrikoides*, *Watersipora subovoidea*, 관막이끼벌레(*Membranipora tuberculata*)는 전체 사회경제적 카테고리에서 20점 이상을 기록했으며, 별불가사리(*Asterina pectinifera*)와 유령해파리(*Cyanea nozakii*)는 관리 대상 종이 아님에도 불구하고 19점을 기록했다. 반면에 관리 종인 식물플랑크톤 디노피시스(*Dinophysis* spp.) 및 태형동물 세방가시이끼벌레(*Tricellaria occidentalis*)는 낮은 4.0의 점수로 평가되었다.

3. 토 의

3.1 '해양교란유해종' 영향평가 및 관리 프레임워크

'교란유해종'은 생태계의 구조, 기능 또는 역학을 변경함으로써 환경에 부정적인 영향을 미친다. 이들의 영향을 정량적으로 비교하고 순위를 매기는 방법으로 다양한 프레임워크가 개발되었지만 표준화된 방법론의 결여는 여전하다(Nentwig *et al.*, 2016; Bacher *et al.*, 2018). 이 연구에서 제안된 평가 도구와 단계별 실행 과정(Supplementary Table 1, Fig. 1)은 이 문제에 대한 실질적인 해결책을 제공할 능력이 있다. 또한, 멸종 위험성 분류를 위해 널리 사용되는 적색 목록 접근법과 유사함으로써, 이는 국제 정책 및 실행에 빠르게 통합될 수 있는 이점을 가진다. 이 프레임워크는 표준화된 지표 및 방법의 부재를 해결하고, 준정량적 시나리오와 결합하여 영향의 메커니즘을 식별하고 순위를 매긴다. 비록 특정 '교란유해종'의 영향에 대한 불확실성이 존재하지만, 제안된 평가 도구를 통해 그 영향을 충분히 평가할 수 있다. 불확실성 추정과 신뢰 수준을 포함하는 것(Supplementary Table 1)은 '교란유해종'에 대한 신뢰할 수 있는 지침을 제공하며 중요한 추세 지표 역할을 할 수 있다. 관리 대상 종 중 영향력이 큰 종을 우선순위에 두어 한정된 재정 자원의 효율적 배분하는 것은 관리 종의 효율적 관리에 필수적이다. 관리 대상 종의 전반적인 영향을 요약하고 비교하는 것은 다양한 환경에서 다른 유형과 규모의 영향을 미치는 다양한 종들 때문에 복잡한 과정이다. 그럼에도 불구하고, 영향 평가 시스템은 예방, 조기 경고, 효율적 관리를 위한 비용 효율적이고 신속한 스크린 도구를 제공함으로써 제한된 자원을 최상으로 활용할 수 있도록 도움을 준다. 이러한 접근 방식은 생태계 관리와 보전 노력에 집중할 수 있게 한다.

3.2 용어에 대한 이해

'해양생태계교란생물'의 법적인 정의와 지정 의도를 이해하기 위해서는 외래 침입종(*invasive alien species*)에 대한 이해가 필요하다. 이 개념을 이해하려면 먼저 특정 지역에서 처음 발견되는 종을 외래종(*alien, exotic non-indigenous, non-native species*) 또는 도입종(*introduced species*)으로 분류한다. 이는 토착종(*endemic species*), 고유종(*native species*), 자생종(*indigenous species*)과 대비되는 개념이다. 이 경우 '지역'은 정치적으로는 국가를 기준으로 하며, 생물 지리학적으로는 생태지역(*ecoregion*) 또는 하위 생태지역(*sub-ecoregion*)을 기준으로 한다(Supplementary Fig. 1). 이러한 종의 도입은 의도적(예: 애완동물로서 사육)이거나 비의도적(예: 선박 평형수 처리의 일부)일 수 있다. 외래종은 다양한 경로를 통해 새로운 지역으로 지속적으로 도입되며, 생물의 분포 이동은 중요한 도입 과정 중 하나이다(Blackburn *et al.*, 2011). 시간이 지나면서 이러한 외래 또는 도입종은 정착종(*established species*) 또는 귀화종(*naturalized species*)으로 변할 수 있으며, 널리 퍼지고 생

태계에 영향을 미칠 때만 침입종으로 분류된다. 토착종이 아닌 경우 이들은 외래 침입종으로 간주된다. 우리 정부는 이러한 외래 침입종을 ‘해양생태계교란생물’로 지정하여 「해양생태계의 보전 및 관리에 관한 법률」에 따라 관리한다. 즉, ‘해양생태계교란생물’은 국내 법률에서 사용되는 용어로서, 국제 협약을 준수하는 국가에서 외래 침입종을 포괄하는 개념으로 이해해야 한다. 외래종과 교란종을 동일하게 간주할 경우, 관리해야 할 종의 수가 증가하여 실질적인 관리가 어려워질 수 있으므로, 이런 용어와 개념을 자세히 구분하는 것이 중요하다. 또한, 외래종이 새로운 환경에 정착하여 번식하는 경우도 있지만, 환경 변화로 인한 종 간의 번식 및 확산 능력의 변화가 생태계 교란의 주요 원인이 될 수 있음을 인식하는 것이 중요하다. 따라서, 다른 지역에서 도입되거나 기존 생태지역에서 급격히 증가하는 종은 교란종으로 분류되어 관리해야 한다. 예를 들어, 과거에는 제주항에서만 발견되던 유령명게(*Ciona robusta*)가 최근 10년 동안 울산항 등의 새로운 지역에서 대량으로 출현하여 생태계에 피해를 주고 있다(Kim *et al.*, 2019). 이러한 이유로 이 종은 ‘해양생태계교란생물’로 지정되어 관리되고 있다.

3.3 불확실성 관리

영향 평가에서 지식 불확실성은 관찰과 측정에서 비롯되며, 연구 설계의 시간적 및 공간적 범위에 따른 자연 변동성을 반영한다(Christie *et al.*, 2019). 이로 인해 측정 오류, 체계적 오류, 모델 불확실성, 주관적 판단 등 다양한 불확실성 요소를 고려해야 한다. 특히, ‘교란유해종’을 평가할 때 다양한 정보원이 사용되며, 이 정보는 각 영향 평가마다 다르게 적용될 수 있다. 평가자의 선택이나 배제로 인한 체계적 오류는 평가 과정을 복잡하게 만든다. 실험실 실험 및 메조코즘 실험의 포함 여부는 평가자의 재량에 달려 있다. 이런 실험들은 ‘교란유해종’의 영향 메커니즘을 이해하는 데 도움이 되지만, 반드시 자연 환경을 완벽하게 반영하는 것은 아니다. 불확실한 언어 표현으로 인한 지식 불확실성 역시 중요하며, 이는 나중에 수정하기 어려울 수 있다(Hawkins *et al.*, 2015; Bacher *et al.*, 2018).

평가 과정에서의 불확실성 관리는 평가자가 보고서를 분석하여 주요 원인을 파악하고 신뢰도 수준을 부여하는 과정을 포함한다(Table 2). 이 단계에서 언어적 불확실성은 중요한 요소이며, 이로 인한 정보 해석에 미치는 영향을 인식해야 한다. 불확실성의 방향성은 영향 평가에서 중요한 통찰을 제공할 수 있으며, 평가자는 영향의 크기가 낮거나 높을 수 있는 모든 가능성을 고려해야 한다(Hawkins *et al.*, 2015; Bacher *et al.*, 2018). 데이터의 편향이 종 간 또는 종 내에서 발생할 수 있으며, 연구 환경의 변화나 연구 지연으로 인해 특정 종에 대한 데이터가 부족할 수 있다(Evans and Blackburn, 2020; Canavan *et al.*, 2019). 데이터 수집의 편향은 일관성을 보장하기 위한 특정한 방법론이 필요하며, 평가 시스템과 평가자 간의 일관성 부족은 평가 결과에 영향을 미칠 수 있다(González-Moreno *et al.*, 2019). 따라서 프로토콜을 개선하고 지침의 후속 버전을 개발하는 것이 중요하다.

불확실성의 종류와 표현 방법은 완벽한 체계적 지식의 부재와 정보 부족에서 발생하며, 모든 과학 연구에 내재되어 있다. 추가 정보를 수집함으로써 불확실성을 최소화할 수 있지만, 완전히 제거할 수는 없다(van der Bles *et al.*, 2019). 따라서, 불확실성을 정량적으로 표현하고 증거 해석에 미칠 수 있는 잠재적 영향을 인정하는 것이 중요하다(Fischhoff and Davis 2014). 과학에서 일반적으로 사용되는 불확실성 표현 방법은 신뢰 구간, 표준 편차, 확률 분포 등의 정량적 용어를 통해 전달된다. 언어적 불확실성은 언어의 정확성 부족과 용어의 일관성 부재에서 비롯되며, ‘교란유해종’의 영향을 평가할 때 흔하다(Blackburn *et al.*, 2011).

불확실성 명확히 지정하는 것은 영향의 크기를 명시할 때 충분히 고려하지 않으면 부적절한 결정으로 이어질 수 있으며, 이는 관리 접근 방식의 부적절한 우선 순위 결정으로 이어질 것이다. 관리 대상 종을 선정하고 후보 종 목록을 개발하는 과정에서 불확실성을 완전히 제거할 수는 없지만, 불확실성의 기원, 성격 및 크기를 명확하게 이해하고 가능한 한 구체적인 조치를

제공해야 한다(McGeoch *et al.*, 2016). 불확실성이 충분히 해결되지 않으며, 향후 관리 프로그램이 대상 종에 대한 오해로 인해 복잡해질 수 있다. 또한, 불확실성이 효과적으로 식별되고 전달되지 않으면, 부적절한 결정을 초래하고 관리 목표를 저해할 수 있다(Novoa *et al.*, 2017; Shackleton *et al.*, 2019).

3.4 일관성 향상과 실용성 확보

‘교란유해종’ 관리에서 제한된 자원을 효율적으로 배분하고 우선 순위를 정하기 위해 영향 평가를 실시하는 것이 유용하다. 그러나 이 도구의 유용성은 평가 결과의 재현성, 즉 추정된 영향의 일관성에 따라 달라진다(Volery *et al.*, 2021). 유럽에서 7가지 프로토콜(EICAT, EPPO, EPPO-Prioritisation, GABLIS, GB-NNRA, GISS, Harmonia⁺)을 사용하여 60여 종의 육상, 담수 및 해양의 식물, 무척추동물, 척추동물에 대한 영향 평가가 수행되었는데, 여기서 평가의 일관성에 영향을 미치는 요인이 확인되었다(Bernardo-Madrid *et al.*, 2022, 프로토콜에 대한 자세한 내용은 González-Moreno *et al.*, 2019 참조). 이 프로토콜들은 환경, 생물다양성, 토착종 상호작용, 잡종화, 경제적 손실, 인체 건강 등 다양한 영향 카테고리에 대한 질문을 포함하고 있다. 평가의 일관성은 영향 정보의 양이나 종의 정체성보다는 프로토콜에서 사용된 영향카테고리 및 언어적 불확실성에 의해 결정되었다(Bernardo-Madrid *et al.*, 2022). 생태계와 인체 건강에 대한 질문에 대한 응답에서 가장 높은 일관성이 나타났으며, 외래종과 토착종 간의 생물학적 상호작용에 대한 질문에 대한 응답에서 가장 낮은 일관성이 나타났다. Harmonia⁺와 GISS는 가장 높은 일관성을 보였고, EPPO는 가장 낮았다. 일관성의 차이는 단일 요인보다는 여러 요인에 의해 발생하는 것으로 보인다. 일관성을 높이기 위해 영향 평가 지침을 개선하고 합의 평가를 실시하는 등 다양한 보완 조치를 통해 일관성을 높일 수 있다.

‘해양교란유해종’ 영향평가 도구는 해조류, 무척추동물, 어류 등 다양한 분류군에 적용될 수 있으며, 12가지 영향 카테고리 및 다양한 메커니즘을 고려하여 0에서 5까지의 척도로 영향을 평가한다. 이를 통해 다양한 영향의 크기를 직접적이고 일관되며 투명하게 비교할 수 있다(Supplementary Table 1). 이 평가 도구와 함께 제안된 절차적 실행 프로세스는 ‘교란유해종’ 관리 순위 결정하거나, 후보 종 식별하는 데 사용될 수 있다(Fig. 1). 이 도구의 점수 체계는 영향의 크기에 대한 정보를 제공한다(Supplementary Table 3). 이는 관리 방법과 수준을 결정하는 유용한 기준을 제공하고 관리 비용을 효과적으로 배분하는 데 도움이 될 것이다.

우선순위 결정은 ‘교란유해종’의 영향을 순위화하는 과정으로, 생물 침입 문제에 대한 국제 정책 행동에 기여할 수 있다(McGeoch *et al.*, 2016). 또한, 생물다양성협약(CBD)의 2020 생물다양성 전략 계획 및 관련 아이치 목표 9와 같은 주요 국제 정책 행동에도 기여할 수 있다(UNEP, 2010). 이 도구는 IMO, EU 규정, IUCN과 같은 다양한 국제 협약의 이행에 사용될 수 있으며, 전문가와 관리자가 신속하게 대응하고 합리적인 합의 근거를 제공하는 데 도움이 된다.

이 평가 도구는 다양한 해양 환경 및 분류군에 적용 가능한 수많은 영향 카테고리를 포함하고 있다. 이를 통해 관리자는 목적에 맞게 특정 영향 카테고리를 선택하고, 그 중요성을 반영하여 가중치를 부여해 평가할 수 있다. 또한 정량적 영향 평가는 자원이 부족한 기관이나 연구자들이 자원을 효과적으로 활용하고, 관리 활동을 위한 자원 배분을 합리적으로 결정하는 데 도움이 될 것이다.

3.5 영향평가도구의 활용

영향 평가 도구는 종에 미치는 다양한 유형의 영향을 이해하고 예측하는 데 유용하며, 환경적 또는 사회경제적 영향을 미치는 종의 특성을 파악할 수 있다(Milanović *et al.*, 2020). 그러나 이 연구에서 제안한 ‘해양교란유해종’ 영향평가 도구는 초

기 단계에 있어 전문가들에게 아직 익숙하지 않으며, 기대 효과를 판단하기에는 아직 이르다. 먼저 해양학 전공 학생들을 대상으로 한 설문조사 결과를 바탕으로 일련의 문제를 탐구해 보았다.

최근 발표된 해양생태계 교란 및 유해해양종 관리기술 보고서(Kim *et al.*, 2019)를 기반으로 22종에 대한 설문조사 결과이다. 영향 평가의 정확성을 향상시키고 지식 격차를 줄이는 것이 중요하지만, 현재 이 보고서 외에는 종합적인 정보가 제한적이다. 이는 정보 생산 및 공개의 시급성을 확인시켜준다. 특히, 데이터 부족으로 기록되지 않은 질병이나 토착종과의 교잡 같은 영향은 과소평가될 수 있으므로 신중한 분석이 요구된다.

환경 영향 카테고리만을 고려했을 때, 식물플랑크톤 카레니아(*Karenia*), 유령해파리(*Cyanea nozakii*), 캘리포니아이끼벌레(*Bugulina californica*), 파란고리문어(*Hapalochlaena maculosa*)는 총 영향 점수가 1 미만으로 환경에 무해한 종으로 분류된다(Supplementary Table 3). 그러나 *Cyanea nozakii*는 사회경제적 영향 카테고리에서 상당히 높은 점수를 받았으므로, 평가 카테고리를 선택할 때 신중하고 목적 있는 접근이 필요하다. 학생들의 응답에 의한 과소평가 가능성이 있지만, 사회경제적 카테고리에 대한 평가는 전문정보보다는 신뢰할 수 있는 데이터 공개에 중점을 두므로, 이는 단순히 학생들의 이해 수준 때문이라고 할 수 없다.

관리 종과 비관리 종 간의 영향 평가 점수에 상당한 차이가 있었다. 관리 종은 환경 영향에 대해 3.0에서 12.3, 사회경제적 영향에 대해 4.0에서 26.0의 점수를 받았으며, 평균은 각각 7.3과 15.3이었다. 반면 비관리 종은 각각 3.5와 6.9의 낮은 평균값을 보였다(Supplementary Table 3). 그러나 일부 관리 종이 비관리 종보다 현저히 낮은 점수를 받은 것은 관리 종의 지정 기준과 정보 신뢰성을 재평가할 필요가 있음을 시사한다. 동일한 종의 환경적 및 사회경제적 영향 간에 유의미한 상관관계가 없다는 것은 두 그룹의 영향이 서로 독립적임을 나타낸다. 관리 종이나 잠재적 우려종에 대한 보고서와 언론 기사들은 대체로 사회경제적 피해 사례에 집중되어 있다. 또한, 해양수산부는 현재까지 ‘해양생태계교란생물’로 1종, ‘유해해양생물’로 15종을 지정하였는데, 이는 해양 환경 및 생태계 교란의 영향보다는 인간 건강과 재산 피해에 대한 사회경제적 영향 정보에 중점을 두고 있음을 보여 준다. 결과적으로, 사회경제적 영향이 환경적 영향보다 크게 평가된 것으로 보인다(Fig. 3, Supplementary Table 3).

비록 결과가 학생 설문조사에 기반하였지만, 총 영향 점수 및 최대 환경적 또는 사회경제적 영향 점수에 따라 종을 순위화하는 중요한 근거를 제공한다. 특히 관리 종인 *Cochlodinium polykrikoides*, *Watersipora subovoidea*, *Carybdea brevipedalia*, *Aurelia aurita*, *Chrysaora pacifica*는 주요 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 환경적 영향 점수가 10 이상이고 사회경제적 영향 점수가 20 이상인 종은 현재 관리 종으로 지정되지 않은 종들을 포함하여 관리 우선순위가 되어야 한다. 그러나 이 분석은 그룹 간 큰 차이와 표준화의 어려움을 드러냈다. 이는 개별 종의 점수가 그룹 내의 각 영향 카테고리에서 의미 있는 차이를 보인다는 것을 나타내며, 영향평가 도구를 통한 정량적 접근이 이러한 종에 대한 관리 및 정책 결정에 유용할 수 있음을 시사한다.

설문 조사 결과를 해석할 때, 응답자의 전문성 수준, 제공된 정보의 충실도, 평가에 사용된 문헌 및 자료의 한계를 신중히 고려해야 한다. 학생들의 제한된 지식과 편향된 정보 접근이 분석 결과에 영향을 미쳤을 수 있기 때문에, ‘교란유해종’ 영향 평가 도구를 사용한 사례 분석에 너무 큰 의미를 두지는 않았다. 그러나 이 도구를 사용한 결과가 ‘교란유해종’의 영향을 합리적으로 평가하고 순위화하는데 기여할 수 있다는 것은 분명하다. 그러나 이 분석이 실질적인 정책 결정과 관리 전략 수립에 사용되기 위해서는 전문가에 의한 영향 평가와 그에 따른 검증이 필요하다. 따라서 향후 연구와 분석은 다양한 전문가를 참여시켜 ‘교란유해종’ 영향평가 도구의 신뢰성을 높이는 데 초점을 맞춰야 한다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 ‘해양교란유해종’의 영향을 정량화하고 비교할 수 있는 평가 도구와 이를 활용하기 위한 프로토콜을 제안

하였다. 또한 사례 연구를 통해 그 가치와 예상할 수 있는 문제점을 논의하였다. '해양교란유해종' 영향 평가 시스템은 과학적 증거에 바탕으로 이들의 환경적 및 사회경제적 영향을 분석한다. 이 시스템은 총 12개의 영향 카테고리들을 다루며, 각 카테고리별 영향 수준을 6단계 척도로 측정한다. 이 평가 시스템은 종의 특성과 생태 기능에 근거하여 잠재적 영향을 예측하는 데 유용하다. 이를 통해 국내외 '교란유해종'의 분포와 기능을 파악하고 국제 협약의 이행에 기여할 수 있다. 또한, 관심있는 분류군의 환경적 및 사회경제적 영향을 평가할 때 목적에 따라 선택적 카테고리를 사용함으로써 재원의 배분과 관리의 효율성을 높일 수 있다.

평가도구의 성능을 향상을 위해 지속적인 개선이 필요하다. 이 과정은 가이드라인을 개선하고, 시스템의 정확성과 유용성을 향상시키는 것을 목표로 해야 한다. 새로운 가이드라인을 제안할 때 주요 변경 사항과 그 이유를 상세히 설명하여 평가자들이 일관되게 프레임워크를 사용할 수 있도록 지원해야 한다.

평가 시스템의 사용도를 높이기 위한 추가 개선 사항은 다음과 같다. 첫째, 각 카테고리에 대한 영향 점수를 명확히 설정하는 것이 중요하다. 이를 위해 출판된 증거와 전문가의 지식을 결합하여 데이터의 가용성과 품질을 향상시킨다. 둘째, 평가의 신뢰성을 높이기 위해 평가 요소를 설정하고 합의 형성 프로토콜을 개발하며, 다양한 영향 카테고리의 가치 차이와 총 영향 점수에 미치는 영향을 분석한다. 셋째, 다양한 분류군과 지역의 영향을 종합적으로 고려할 수 있는 평가 시스템을 탐구하고, 지역 관리자와 정부에 구체적인 정보를 제공한다. 마지막으로, 이 시스템을 통해 시간에 따른 영향 추세를 모니터링하고 관리 전략의 효과를 분석하며, '교란유해종'의 영향을 지속적으로 개선하는 중요한 도구로 활용한다.

개선 계획에는 반드시 불확실성을 고려한 조치가 포함되어야 한다. 가이드라인에서는 불확실성을 고려한 사항을 구체적으로 명시하는 것이 중요하다. 오류를 줄이기 위해 측정 및 관측 과정에서 표준 프로토콜을 개발해야 하며, 일관성과 신뢰성을 보장하기 위해 주관적 판단의 투명성과 문서화를 강화해야 한다. 데이터 수집과 접근성을 향상시켜 편향을 줄이고 영향 평가 보고서의 유용성을 높일 수 있다. 용어 표준화를 통해 언어적 불확실성을 줄이고, 새로운 피드백과 통찰을 반영하며 예상치 못한 불확실성을 처리하는 것이 중요하다. 또한 영향 카테고리를 개선하는 등의 영향 평가 시스템을 정기적으로 업데이트해야 한다.

'교란유해종'의 영향을 평가하는 도구는 다양한 데이터를 통합하고 비교할 수 있어야 한다. 이는 환경적 및 사회경제적 영향의 강도뿐만 아니라 공간과 시간에 따른 변화, 지속성, 가역성에 대한 정보도 고려해야 한다. 생태계 서비스의 영향을 평가할 필요성이 커지고 있지만, 일부 복잡한 생태계 서비스는 전 지구적 규모(예: 기후 변화 규제)나 주관적 가치와 규범(예: 문화 서비스)에 의존하기 때문에 정량화가 어렵다. 이에 대한 과학적 평가를 다루는 논문은 부족하며, 이는 '교란유해종'에 대한 영향 평가에도 적용된다. 이러한 연구들은 소수 종에만 집중되어 연구 정보의 불균형을 초래한다(Essl *et al.*, 2018). 이는 높은 불확실성을 가진 종과 영향 유형을 식별하고 추가 연구가 필요함을 보여준다. 따라서 향후 연구는 이러한 측면에 중점을 두고 더 많은 정보와 통찰을 제공하는 것이 필요하다.

사 사

본 논문은 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(해양환경기술개발사업: 해양생태계 교란생물과 유해해양생물의 관리기술개발).

Supplementary Information

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.7850/jkso.2024.29.2.116>.

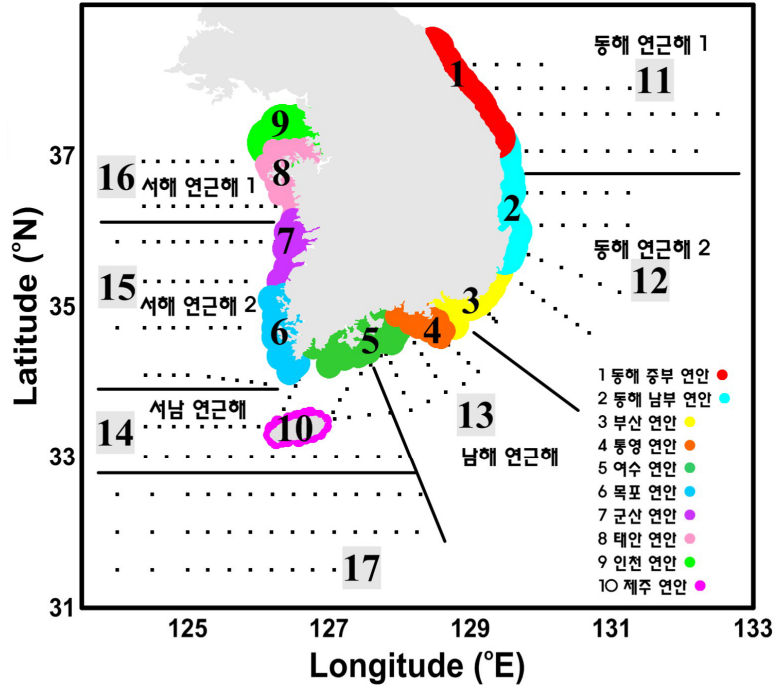
참고문헌(References)

- 해양환경정보포털, 2023. Available at: <https://meis.go.kr/mes/marineLife/protection/view1.do>, Accessed: 15 December 2023.
- Korea Marine Environment Management Corporation (KOEM), 2015. 외래해양생물 및 유해해양생물의 관리체계 개선방안 연구. 해양수산부. 137 pp. Available at: <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201700005032>.
- Bacher, S., T.M. Blackburn, F. Essl, P. Genovesi, J. Heikkilä, J.M. Jeschke, G. Jones, R. Keller, M. Kenis, C. Kueffer and A.F. Martinou, 2018. Socio-economic impact classification of alien taxa (SEICAT). *Methods Ecol. Evol.*, **9**: 159-168.
- Bernardo-Madrid, R., P. González-Moreno, B. Gallardo, S. Bacher and M. Vilà, 2022. Consistency in impact assessments of invasive species is generally high and depends on protocols and impact types. *NeoBiota*, **76**: 163-190.
- Blackburn, T.M., F. Essl, T. Evans, P.E. Hulme, J.M. Jeschke, I. Kühn, S. Kumschick, Z. Marková, A. Mrugała, W. Nentwig and J. Pergl, 2014. A unified classification of alien species based on the magnitude of their environmental impacts. *PLoS Bio.*, **12**: e1001850.
- Blackburn, T.M., P. Pyšek, S. Bacher, J.T. Carlton, R.P. Duncan, V. Jarošík, J.R. Wilson and D.M. Richardson, 2011. A proposed unified framework for biological invasions. *Trends Ecol. Evol.*, **26**: 333-339.
- Canavan, S., L.A. Meyerson, J.G. Packer, P. Pyšek, N. Maurel, V. Lozano, D.M. Richardson, G. Brundu, K. Canavan, A. Cicitelli and J. Čuda, 2019. Tall-statured grasses: a useful functional group for invasion science. *Biol. Invasions*, **21**: 37-58.
- Christie, A.P., T. Amano, P.A. Martin, G.E. Shackelford, B.I. Simmons and W.J. Sutherland, 2019. Simple study designs in ecology produce inaccurate estimates of biodiversity responses. *J. Appl. Ecol.*, **56**: 2742-2754.
- Essl, F., S. Bacher, P. Genovesi, P.E. Hulme, J.M. Jeschke, S. Katsanevakis, I. Kowarik, I. Kühn, P. Pyšek, W. Rabitsch and S. Schindler, 2018. Which taxa are alien? Criteria, applications, and uncertainties. *BioScience*, **68**: 496-509.
- Evans, T. and T.M. Blackburn, 2020. Global variation in the availability of data on the environmental impacts of alien birds. *Biol. Invasions*, **22**: 1027-1036.
- Finch, D.M., J.L. Butler, J.B. Runyon, C.J. Fettig, F.F. Kilkenny, S. Jose, S.J. Frankel, S.A. Cushman, R.C. Cobb, J.S. Dukes and J.A. Hicke, 2021. Effects of climate change on invasive species. Pollard *et al.* (Eds), *Invasive Species in Forests and Rangelands of the United States: a Comprehensive Science Synthesis for the United States Forest Sector*, Springer, Berlin (2021), pp.57-83.
- Fischhoff, B. and A.L. Davis, 2014. Communicating scientific uncertainty. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **111**: 13664-13671.
- González-Moreno, P., L. Lazzaro, M. Vilà, C. Preda, T. Adriaens, S. Bacher, G. Brundu, G.H. Copp, F. Essl, E. García-Berthou and S. Katsanevakis, 2019. Consistency of impact assessment protocols for non-native species. *NeoBiota*, **44**: 1-25.
- Hawkins, C.L., S. Bacher, F. Essl, P.E. Hulme, J.M. Jeschke, I. Kühn, S. Kumschick, W. Nentwig, J. Pergl, P. Pyšek and W. Rabitsch, 2015. Framework and guidelines for implementing the proposed IUCN Environmental Impact Classification for Alien Taxa (EICAT). *Divers. Distrib.*, **21**: 1360-1363.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN), 2016. Rules of procedure for IUCN Red List assessments 2017 – 2020, version 3.0. Approved by the IUCN SSC Steering Committee in September 2016.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN), 2020a. IUCN EICAT Categories and Criteria. The Environmental Impact Classification for Alien Taxa (EICAT): First edition. Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN. DOI: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.05.en>.

- International Union for Conservation of Nature (IUCN), 2020b. Guidelines for using the IUCN Environmental Impact Classification for Alien Taxa (EICAT) Categories and Criteria): First edition. Version 1.1. Gland, Switzerland and Cambridge, UK: IUCN.
- Kim, K.Y., J.Y. Park, J.H. Chae and S. Sin, 2019. Development of the methods for controlling and managing the marine ecosystem disturbing and harmful organisms (Report No R&D 2013-0265). Chonnam National University, Korea. 959 pp. Available at: (in Korean) <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO202000031207&dbt=TRKO&m=>.
- Kumschick, S. and D.M. Richardson, 2013. Species-based risk assessments for biological invasions: advances and challenges. *Divers. Distrib.*, **19**: 1095-1105.
- McGeoch, M.A., P. Genovesi, P.J. Bellingham, M.J. Costello, C. McGrannachan and A. Sheppard, 2016. Prioritizing species, pathways, and sites to achieve conservation targets for biological invasion. *Biol. Invasions*, **18**: 299-314.
- Milanović, M., S. Knapp, P. Pyšek and I. Kühn, 2020. Trait – environment relationships of plant species at different stages of the introduction process. *NeoBiota*, **58**: 55-74.
- Nentwig, W., S. Bacher, P. Pyšek, M. Vilà and S. Kumschick, 2016. The generic impact scoring system (GISS): a standardized tool to quantify the impacts of alien species. *Environ. Monit. Assess.*, **188**: 1-13.
- Novoa, A., K. Dehnen-Schmutz, J. Fried and G. Vimercati, 2017. Does public awareness increase support for invasive species management? Promising evidence across taxa and landscape types. *Biol. Invasions*, **19**: 3691-3705.
- Probert, A.F., L. Volery, S. Kumschick, G. Vimercati and S. Bacher, 2020. Understanding uncertainty in the Impact Classification for Alien Taxa (ICAT) assessments. *NeoBiota*, **62**: 387-405.
- Richardson, D.M., P. Pyšek, M. Rejmanek, M.G. Barbour, F.D. Panetta and C.J. West, 2000. Naturalization and invasion of alien plants: concepts and definitions. *Divers. Distrib.*, **6**: 93-107.
- Roy, H.E., W. Rabitsch, R. Scalera, A. Stewart, B. Gallardo, P. Genovesi, F. Essl, T. Adriaens, S. Bacher, O. Booy and E. Branquart, 2018. Developing a framework of minimum standards for the risk assessment of alien species. *J. Appl. Ecol.*, **55**: 526-538.
- Shackleton, R.T., D.M. Richardson, C.M. Shackleton, B. Bennett, S.L. Crowley, K. Dehnen-Schmutz, R.A. Estévez, A. Fischer, C. Kueffer, C.A. Kull, and E. Marchante, 2019. Explaining people's perceptions of invasive alien species: A conceptual framework. *J. Environ. Manage.*, **229**: 10-26.
- Spalding, M.D., H.E. Fox, G.R. Allen, N. Davidson, Z.A. Ferdaña, M.A.X. Finlayson, B.S. Halpern, M.A. Jorge, A.L. Lombana, S.A. Lourie and K.D. Martin, 2007. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. *BioScience*, **57**: 573-583.
- Srèbalienė, G., S. Olenin, D. Minchin and A. Narščiū, 2019. A comparison of impact and risk assessment methods based on the IMO Guidelines and EU invasive alien species risk assessment frameworks. *PeerJ*, **7**: e6965.
- United Nations Development Programme (UNEP), 2010. Strategic plan for biodiversity 2011 – 2020 and the Aichi targets. In Report of the Tenth Meeting of the Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity.
- Van Der Bles, A.M., S. Van Der Linden, A.L. Freeman, J. Mitchell, A.B. Galvao, L. Zaval and D.J. Spiegelhalter, 2019. Communicating uncertainty about facts, numbers and science. *R. Soc. Open Sci.*, **6**: 181870.
- Volery, L., D. Jatavallabhula, L. Scillitani, S. Bertolino and S. Bacher, 2021. Ranking alien species based on their risks of causing environmental impacts: A global assessment of alien ungulates. *Glob. Change Biol.*, **27**: 1003-1016.

부 록(Appendix)

Supplementary Fig. 1. Sub-ecoregion of the Korean waters, including 10 coastal (1-10) and 7 offshore sub-ecoregions (11-17).



- Explanation of scale: The ecoregions of Korean waters include the East Sea (49), Yellow Sea (50), and East China Sea (52). These are part of the Marine Ecoregions of the World, also known as MEOW, which is a nested system composed of 12 realms, 62 provinces, and 232 ecoregions (Spalding *et al.*, 2007).

- Temperate Northern Pacific
- 8. Cold Temperate Northwest Pacific
- 45. Sea of Okhotsk
- 46. Kamchatka Shelf and Coast
- 47. Oyashio Current
- 48. Northeastern Honshu
- 49. East Sea (Sea of Japan)
- 50. Yellow Sea
- 9. Warm Temperate Northwest Pacific
- 51. Central Kuroshio Current
- 52. East China Sea
- 10. Cold Temperate Northeast

