

어류용 어초의 전과정평가 기법을 이용한 환경성 평가

황보윤지 · 김동선* · 정용현†
부경대학교(학생) · **부경대학교(교수)

Environmental impacts Assessment of Artificial reefs for Fish Using Life Cycle Analysis

Yun-Ji HWANGBO · Dong-Sun KIM* · Yong-Hyun CHUNG†
Pukyong National University(student) · **Pukyong National University(professor)

Abstract

A life cycle assessment (LCA) was performed to evaluate the potential environmental impact on the producing process of artificial reefs which are structure used for increasing fisheries resources. A cube-type artificial reef and a jumbo-type artificial reef were selected and evaluated to compare the potential environmental impact assessments. A total of 8 impact categories were selected for life cycle impact assessment (LCIA). MiLCA, IDEA and LIME 2 were employed for the LCA program, life cycle inventory database and LCIA methodology, respectively. As a result of life cycle inventory analysis, a total of 132 kinds of inflows and 69 kinds of outflows were derived. And it was found that a cube-type artificial reef had potentially greater influence than a jumbo-type artificial reef in 8 environmental impact categories.

Key words : Artificial reefs, Producing process, LCA, LCIA, MiLCA

I. 서론

국내에서는 수산자원 증대를 위하여 인공어초 설치사업, 수산 종자 관리사업, 수산 종자 방류사업, 연안 바다목장 조성사업, 바다숲 조성관리사업 등 다양한 사업을 추진하여 자원을 조성하고 있다(FIRA, 2021). 대부분의 수자원 조성사업에 사용되고 있는 인공어초(artificial reef)는 대상 해양 생물을 정착시키거나 끌어모으며 생물을 보호하고 배양하는 것을 목적으로 해저에 설치하는 인공 구조물이다(FIRA, 2021). 인공어초는 해양 생물의 성장단계에 따라 먹이장, 휴식장, 산란장, 서식장으로 이용되거나 수중 레저용 장소로 사용

된다(Lee, 2000; FIRA, 2017). 이와 같이 다양한 기능과 서비스를 제공하는 인공어초는 인간에 의해 인공적으로 만들어진 후 해양에 투입되기 때문에 환경에 대한 영향을 배제할 수 없다는 한계를 가진다. 인공어초로 인한 부정적인 환경영향 사례에는 페타이어로 만들어진 인공어초의 파손으로 인한 오염, 인공어초 난파선의 독성 화학물질 침출, 인공어초 제작에 사용되는 물질로 인한 환경 오염 등이 있다(Na, 2019). 이러한 사례들과 같이 인공어초는 사용 과정에서 다양한 환경 문제를 발생시킨다. 뿐만 아니라 원료 채취, 제작, 운송, 폐기 과정에서도 환경문제가 발생되기 때문에 인공어초의 전 과정에 대한 환경영향 평가가

† Corresponding author : 051-629-6543, chungyh@pknu.ac.kr

* 이 논문은 국립 부경대학교 자율창의학술연구비(2021년)에 의해 연구되었음.

필수적이다.

제품과 서비스의 전 과정에 걸쳐 환경영향을 평가하는 방법에는 국제표준화기구(international organization for standardization, ISO)에서 국제 표준으로 공표한 환경 전과정평가(life cycle assessment, LCA)가 있다. 전과정평가는 총 4단계로 목표 및 범위 정의(goal and scope definition), 전과정 목록분석(life cycle inventory analysis), 전과정 영향평가(life cycle impact assessment, LCIA), 전과정 해석(life cycle interpretation)으로 구성되며, 각 구성 단계 사이의 반복적인 과정을 통해 신뢰성 있는 결과를 도출해 내는 환경평가 도구이다(Lee et al., 1998).

전과정평가를 통하여 잠재적인 환경영향을 정량화하고, 결과를 기반으로 환경영향을 개선할 수 있기 때문에 국내에서는 탄산음료의 탄소배출량 평가(Kim et al., 2021), 유리병 재사용에 대한 환경영향 평가(Kim et al., 2009)와 같은 제품과 서비스에 대한 평가뿐만 아니라 소화형 바이오가스 시설(Nam et al., 2008)과 고도 하수처리장(Pyo et al., 2014)과 같은 인프라 시설(infrastructure)에 대한 평가 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. 하지만 국내 인공어초 생산 과정의 전 과정에 대한 환경영향을 평가하는 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 인공어초 제작과정에서 발생할 수 있는 잠재적인 환경영향을 평가하기 위하여 인공어초 제작과정이 환경에 미치는 영향을 정량화하고 연구 결과를 향후 환경성을 고려한 인공어초 개발 및 연구에 활용할 수 있는 참고 자료로 제공하는 것을 목적으로 전과정평가를 활용하여 인공어초 제작과정에 대한 환경영향을 평가하였다.

II. 연구 방법

1. 전과정평가

전과정평가는 총 4단계로 진행되며 첫 번째 단계인

목적 및 범위 정의 단계는 전과정평가 연구 결과의 이용을 고려하여 목적을 설정하고 목적을 달성하기 위한 타당한 범위를 설정하는 단계로 연구 범위에는 시스템의 기능, 기능단위, 시스템 경계, 데이터 요건, 방법론 등이 포함된다(Lee et al., 1998).

전과정평가의 두 번째 단계인 전과정 목록분석 단계는 연구에서 설정한 시스템을 대상으로 데이터를 수집하여 시스템의 투입물과 배출물의 종류와 양을 목록화하고 설정한 기능단위와 기준흐름을 기준으로 환경부하를 산출, 파악하는 단계이다(Lee et al., 1998).

세 번째 전과정 영향평가는 전과정 목록분석 결과를 기반으로 잠재적인 환경영향을 평가하는 단계이며 분류화, 특성화, 정규화, 가중치 부여로 총 4가지 항목으로 분류된다(Lee et al., 1998).

마지막 전과정 해석 단계는 전과정 목록분석과 전과정 영향평가에서 얻은 결과를 정의된 목적과 범위에 부합하도록 해석하는 과정이며 발견된 사항들은 연구의 결론이나 의사결정에 반영되므로 객관적인 해석이 매우 중요한 단계이다(Lee et al., 1998).

2. 연구 목적 및 범위 설정

가. 연구 목적

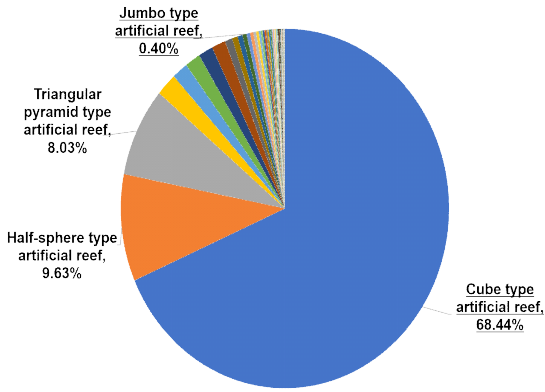
본 연구를 위하여 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 대표적인 인공어초의 제작과정에 대한 전과정평가를 수행하여 인공어초 제작과정이 환경에 미치는 영향을 정량화하고 환경영향을 평가하는 것을 목적으로 연구를 수행하였다.

나. 연구 대상

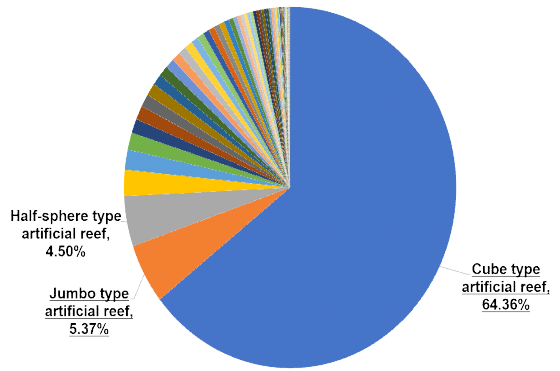
연구 대상은 한국수산자원공단의 인공어초 시설 통계에서 1971년부터 2020년까지의 국내 인공어초 총 설치 용적 및 설치량을 기준으로 가장 큰 비율을 차지하고 있는 사각형어초를 선정하였다(FIRA, 2021; [Figs. 1 and 2]). 또한, 사각형어초와의 잠재적 환경영향을 비교 평가하기 위하여 사각형어초와 용도가 같은 인공어초 중 사각형어초

다음으로 많이 이용되는 잠보형어초를 선정하여 평가를 수행하였다.

설치 기준량인 사각형어초 100개와 잠보형어초 8개를 제작하는 것으로 설정하였다(FIRA, 2021).



[Fig. 2] Percentage of total installed amount of artificial reefs in Korea

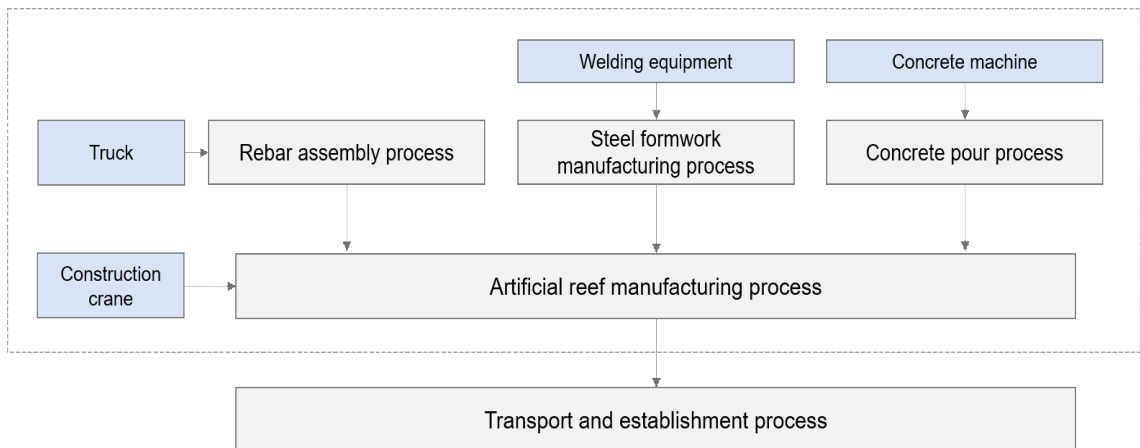


[Fig. 1] Percentage of total installed area of artificial reefs in Korea

다. 기능, 기능단위, 기준흐름
연구 대상의 기능은 인공어초의 용도에 따라 어류의 먹이장, 산란장, 성육장, 휴식장으로 정의하였다. 기능을 고려하여 기능단위는 인공어초 1개 단지로 설정하였으며 기준흐름은 해양수산부 인공어초시설사업집행 및 관리 규정 제20조(시설 기준)에 따라 1개 단지당 최소 용적 800 m³를 기준으로 각각의 인공어초 1개 단지에 설치되는

라. 시스템 경계 설정

시스템 경계는 인공어초 생산을 위해 사용되는 원료의 취득부터 인공어초 제작(cradle to gate, CtG)까지를 인공어초 제작과정으로 설정하였다. 또한, 인공어초는 국내에서 시간제한 없이 제작하는 것으로 설정하였으며 재료의 운송과 제작에 사용한 기기들을 포함하였다. 인공어초의 공정도와 시스템 경계는 [Fig. 3]과 같다.



[Fig. 3] System boundary of artificial reef producing process

마. 데이터 및 전과정평가 도구

연구에서 사용된 데이터는 최근 5년 이내의 데이터를 수집하였으며 현재 인공어초 사업을 진행하고 있는 한국수산자원공단의 데이터를 이용하여 연구를 수행하였다(Cho and Kim, 2018). 본 연구에서 설정한 시스템 경계 내에서 두 인공어초 제작과정에 투입되어 사용되는 재료는 <Table 1> 과 같다.

본 연구에서는 정규화와 가중치 부여로 인한 주관적인 해석을 배제하기 위하여 영향평가의 필수과정인 분류화와 특성화까지만 진행하였다. 또한, 환경영향범주는 6대 환경영향범주의 지구온난화(global warming), 자원 소모(resource consumption), 산성화(acidification), 광화학 산화물(photochemical oxidant), 오존 감소(ozone depleting), 부영양화(eutrophication) 영향범주 6개와 생태독성-수계(ecotoxicity-aquatic), 생태독성-육상계(ecotoxicity -terrestrial) 영향범주 2 개를 포함하여 총 8개의 영향범주를 고려하였다.

본 연구에서는 전과정평가를 위해 MilCA ver.2 프로그램이 사용되었으며(JEMAI, 2017) 전과정목록(life cycle inventory, LCI) 데이터베이스는 IDEA ver.2.1.3을(AIST and JEMAI, 2017), 전과정 영향평가 방법론은 LIME 2를 사용하였다(JLCA, 2012).

바. 가정 및 제한사항

- (1) 인공어초 제작 방법은 한국수산자원공단의 데이터를 기반으로 구성
- (2) 인공어초 제작으로 인한 환경영향만을 파악하기 위하여 인공어초의 제작에서 이용되는 컨테이너 사무실, 컨테이너 창고, 강관조립말비계(이동식)는 제외
- (3) 인공어초에 사용되는 거푸집은 인공어초 표준설계 및 제작 설치 등에 관한 지침을 기준으로 사각형어초는 2개, 잠보형어초는 1개를 제작하는 것으로 산정(FIRA, 2020)
- (4) 본 연구에서는 현재 국내 전과정목록 데이터베이스에 구축되지 않은 물질들이 많아 일본의 IDEA ver.2.1.3을 사용

Ⅲ. 연구 결과

1. 전과정 목록분석 결과

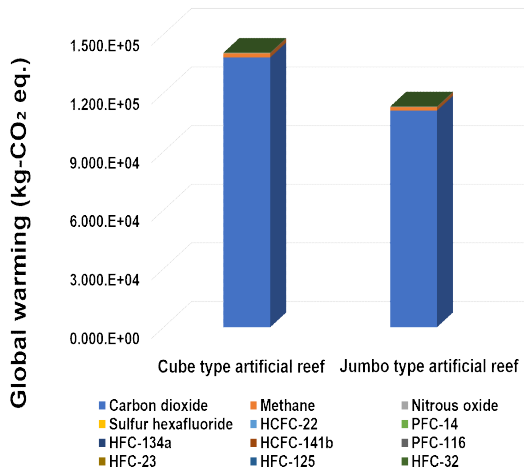
본 연구에서 수집한 인공어초 제작과정에 대한 데이터에 각각의 전과정목록 데이터베이스를 연결하여 전과정 목록분석을 진행하였다. 그 결과 사각형어초와 잠보형어초 제작과정에서 132종의 유입물과 69종의 유출물이 목록항목으로 도출되었다.

<Table 1> Materials used within system boundary

Materials	Cube type artificial reef	Jumbo type artificial reef	Unit
Steel bar	13638.00	1067.12	kg
Steel wire	88.40	8.51	kg
Concrete	142.40	73.69	m ³
Hot rolled steel sheet	1311.37	3248.12	kg
Welding rod	24.48	70.73	kg
Oxygen gas	8.34	24.11	m ³
Dissolved acetylene	3.74	10.81	kg
Heavy oil	22.95	9.10	L

2. 전과정 영향평가 결과

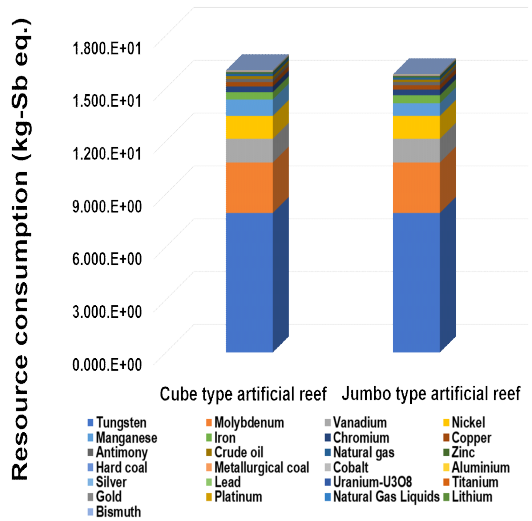
목적 및 범위 정의 단계에서 선정된 8가지의 환경영향범주에 대한 결과를 순서대로 살펴보면 지구온난화(global warming) 영향범주에 대한 결과는 [Fig. 4]와 같이 나타났으며 사각형어초가 잠보형어초에 비해 더 큰 잠재적 환경영향을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 사각형어초 제작과정에서 발생한 물질 중 지구온난화 영향범주에 영향을 미치는 물질은 총 12가지로 그중 이산화탄소(carbon dioxide)에 의한 영향이 약 98.27 %로 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.



[Fig. 4] Characterization results of the global warming environmental impact category

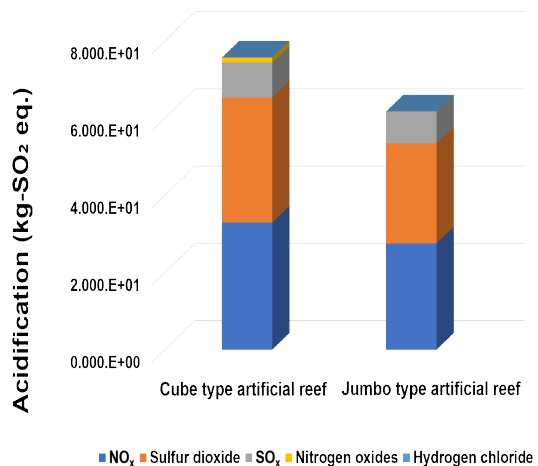
자원 소모(resource consumption) 영향범주에 대한 두 인공어초의 결과는 [Fig. 5]와 같이 사각형어초의 잠재적 환경영향이 잠보형어초에 비해 큰 것으로 나타났다. 또한, 사각형어초의 제작과정에서 발생한 물질 중 자원 소모 영향범주에 영향을 미치는 물질은 총 25가지로 나타났으며 텅스텐(tungsten)과 몰리브데넘(molybdenum)에 의한 영향이 각각 약 49.50 %와 17.86 %로 자원 소모 범주에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

산성화(acidification) 영향범주에 대한 두 인공어초의 결과는 [Fig. 6]과 같이 사각형어초가 잠



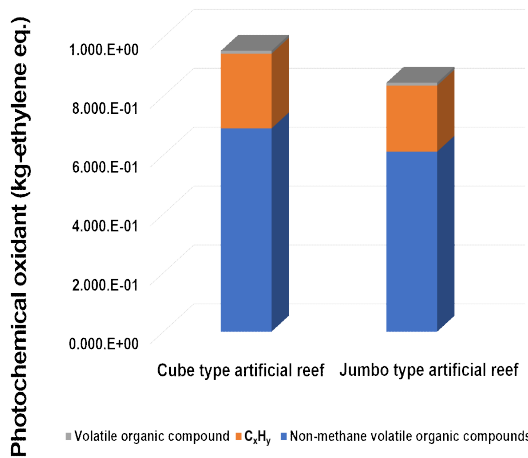
[Fig. 5] Characterization results of the resource consumption environmental impact category

보형어초에 비해 잠재적 환경영향이 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 사각형어초의 제작과정에서 발생한 물질 중 산성화 영향범주에 영향을 미치는 물질은 총 5가지 물질로 그중 질소산화물(NO_x)과 이산화황(sulfur dioxide)에 의한 영향이 각각 약 43.51 %와 42.78 %의 가장 큰 비율로 환경에 영향을 미치는 것으로 확인되었다.



[Fig. 6] Characterization results of the acidification environmental impact category

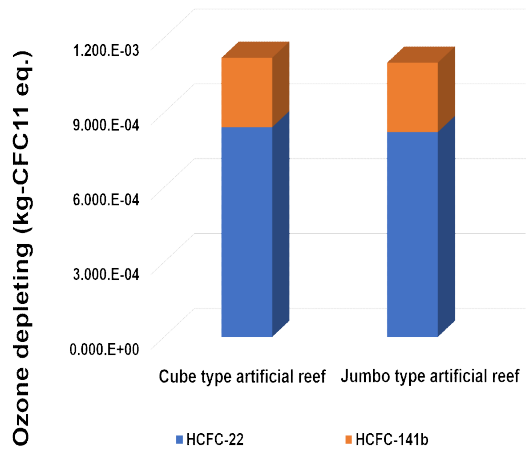
광화학 산화물(photochemical oxidant) 영향범주에 대한 두 인공어초의 결과는 [Fig. 7]과 같이 사각형어초가 잠보형어초에 비해 더 큰 잠재적 환경영향을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 사각형어초의 제작과정에서 발생한 물질 중 3가지 물질이 광화학 산화물 영향범주에 영향을 미치며 그중 비메탄 휘발성 유기화합물(non-methane volatile organic compounds)과 탄화수소(C_xH_y)에 의한 영향이 각각 약 72.40 %와 26.57 %로 광화학 산화물 범주에서 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.



[Fig. 7] Characterization results of the photochemical oxidant environmental impact category.

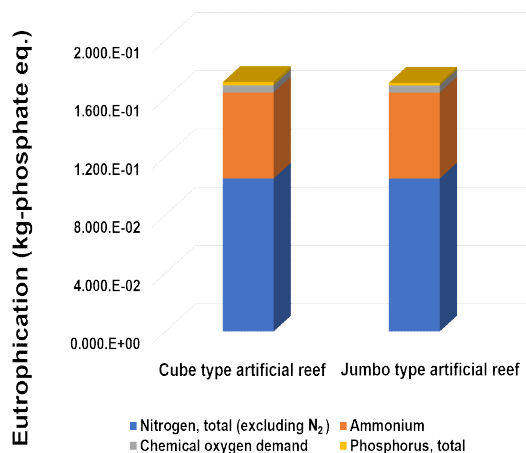
오존 감소(ozone depleting) 영향범주에 대한 결과는 [Fig. 8]과 같이 사각형어초의 잠재적 환경영향이 잠보형어초에 비해 큰 것으로 나타났다. 사각형어초의 제작과정에서 발생한 물질 중에서 오존 감소 영향범주에 영향을 미치는 물질은 1,1-디클로로-1-플루오로에탄(HCFC-141b)과 클로로디플루오로메탄(HCFC-22)으로, 클로로디플루오로메탄에 의한 영향이 약 76.16 %로 1,1-디클로로-1-플루오로에탄보다 큰 잠재적 환경영향을 가지는 것으로 확인되었다.

부영양화(eutrophication) 영향범주에 대한 두 인공어초의 결과는 [Fig. 9]와 같이 사각형어초가



[Fig. 8] Characterization results of the ozone depleting environmental impact category.

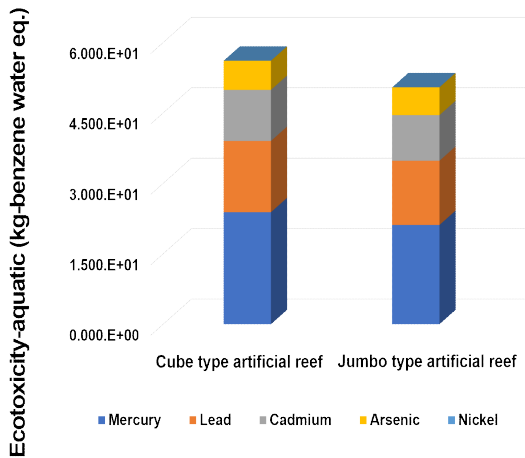
잠보형어초에 비해 환경에 미칠 수 있는 영향이 큰 것으로 나타났다. 사각형어초의 제작과정에서 발생한 물질 중에서 4가지 물질이 부영양화 영향범주에 영향을 미치며 그중 질소(nitrogen, total excluding N₂)와 암모늄 이온(ammonium)에 의한 영향이 각각 약 61.37 %와 34.45 %로 부영양화 범주에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.



[Fig. 9] Characterization results of the eutrophication environmental impact category.

생태계 독성-수계(ecotoxicity-aquatic) 영향범주에 대한 두 인공어초의 결과는 [Fig. 10]과 같이

사각형어초 제작과정에서 발생하는 환경영향이 더 큰 것으로 나타났다. 사각형어초의 제작과정에서 발생한 물질 중 생태계 독성-수계 범주에 영향을 미치는 물질은 5가지로 수은(mercury)과 납(lead)에 의한 영향이 각각 약 42.54 %와 27.02 %로 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.



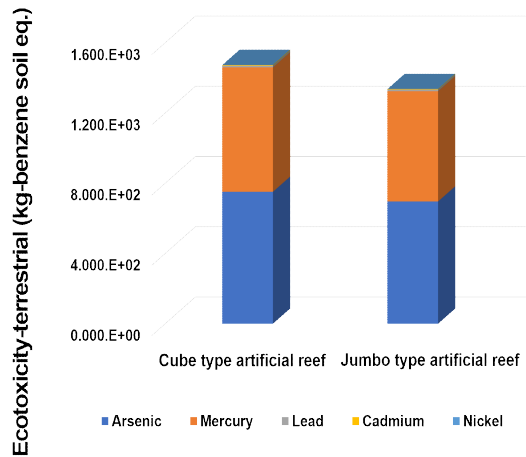
[Fig. 10] Characterization results of the ecotoxicity -aquatic environmental impact category.

생태계 독성-육상계(ecotoxicity-terrestrial) 영향 범주에 관한 결과는 [Fig. 11]과 같이 사각형어초의 잠재적 환경영향이 더 큰 것을 알 수 있었으며 사각형어초의 제작과정에서 발생한 물질 중 생태계 독성-육상계 영향범주에 영향을 미치는 물질은 총 5가지로 그중 비소(arsenic)와 수은(mercury)에 의한 영향이 각각 약 51.01 %와 48.06 %로 생태계 독성-육상계 범주에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

3. 결과 해석

연구 결과, 연구에서 선정한 총 8개의 환경영향범주에 대하여 잠보형어초 제작과정보다 사각형어초 제작과정에서 발생하는 잠재적 환경영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

지구온난화 영향범주에서 사각형어초가 잠보형



[Fig. 11] Characterization results of the ecotoxicity -terrestrial environmental impact category.

어초에 비하여 약 1.24배 더 큰 값의 잠재적 환경영향을 가지는 것을 알 수 있었으며 이는 이산화탄소에 의해 기인한 것으로 나타났고 두 인공어초 모두 이산화탄소에 의한 환경영향이 가장 큰 비율을 차지하는 것으로 확인되었다. 산성화 영향범주에서는 사각형어초의 잠재적 환경영향이 잠보형어초에 비하여 약 1.23배 더 큰 것으로 나타났으며 이는 제작과정에서 배출되는 질소산화물과 이산화황에 의한 차이로 나타났다. 광화학 산화물 영향범주 또한, 사각형어초 제작과정에서 약 1.13배 더 큰 잠재적 환경영향이 발생하며 두 인공어초의 잠재적인 환경영향의 차이는 대부분 비메탄계 휘발성유기화합물에 의한 것으로 확인되었다. 생태계 독성-수계, 생태계 독성-육상계 영향범주에서는 사각형어초가 잠보형어초보다 약 1.10배 이상의 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 이러한 차이는 두 환경영향범주 모두 수은에 의해 기인하는 것으로 확인되었다. 오존 감소, 자원 소모, 부영양화 영향범주에 대한 영향평가 결과, 두 인공어초의 잠재적 환경영향의 차이는 약 3 % 미만으로 다른 환경영향범주에 비하여 잠재적 환경영향의 차이가 작은 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 국내에서 가장 많이 이용하고 있는 사각형어초의 제작과정에 대하여 환경영향을 평가하고 사각형어초의 환경영향 비교를 위하여 용도가 같은 잠보형어초를 선정하여 전과정 평가를 수행하였다.

전과정 목록분석 결과 사각형어초와 잠보형어초의 제작과정에서 총 132종의 유입물과 69종의 유출물이 목록항목으로 도출되었으며 전과정 목록 분석 결과를 바탕으로 총 8가지 영향범주를 대상으로 전과정 영향평가를 진행하였다. 그 결과 8가지 환경영향범주 모두 사각형어초가 잠보형어초보다 큰 잠재적 환경영향을 가지는 것으로 나타났다. 특히 지구온난화 영향범주와 산성화 영향범주에서 각각 약 21.72 %와 20.29 %의 차이를 보였으며, 다음으로는 광화학 산화물(약 12.04 %), 생태계 독성-수계(약 10.60 %) 순으로 차이가 나는 것으로 확인되었다.

본 연구 결과로 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 사각형어초는 동일한 용도로 사용되고 있는 잠보형어초보다 총 8개의 영향범주에 대하여 큰 영향을 미치는 것으로 알 수 있었으며 이러한 연구 결과를 고려하여 인공어초를 설치하고 각 영향범주에서 큰 영향을 미치는 물질들의 배출과 소비를 줄인다면 인공어초로 인한 잠재적 환경영향을 줄임으로써 수산자원의 증대와 함께 환경영향 개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 본 연구에서 더 나아가 모든 영향범주에서 동일 용도의 다른 인공어초에 비해 환경에 미치는 영향이 큰 사각형어초의 제작과정의 공정과 투입되는 자재에 따른 전과정평가를 진행하여 인공어초 개발 연구의 기초 자료로 사용한다면 국내에서 가장 많이 이용되고 있는 사각형어초의 잠재적 환경영향을 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 국내 전과정 목록 데이터베이스를 구축하여 데이터의 품질을 높이고, 인공어초의 제작과정뿐

아니라 사용, 설치, 폐기단계를 고려하여 환경적 요인과 경제적 요인을 함께 평가한다면 더욱 신뢰성 있으며 객관적인 평가가 될 것으로 기대된다.

References

- Cho EI and Kim TS(2018). Life Cycle Assessment of Artificial Reefs Production Process. Journal of the Korean Ecological Engineering Society, 6(2), 15~24.
<https://doi.org/10.33214/kees.2018.6.2.15>
- FIRA(2017). Chapter 2 Artificial reef. In: An Introduction to the Creation of Fishery Resources. KOREA FISHERIES RESOURCES AGENCY, 68~69.
- FIRA(2020). Revised Guidelines for Standard Design·Manufacture and Installation ect. of Artificial Reef. 5.
- FIRA(2021). Artificial reefs information book. FIRA-IR-21-002, 8~11.
- FIRA(2021). Definition of Artificial Reef.
<https://www.fira.or.kr/newgis/intro/afir01.do> on May 25.
- FIRA(2021). General management of facilities by artificial reef. FIRA-IR-21-004, 28~54.
- FIRA(2021). Increase of fishery resources.
https://www.fira.or.kr/fira/fira_030201.jsp on May 25.
- Japan Environmental Management Association for Industry (JEMAI)(2017). LCA System MILCA ver.2.
- Kim HJ, Kwon YS, Choi YG, Chung CK, Baek SH and Kim YW(2009). Life Cycle Assessment on the Reuse of Glass Bottles. Clean Technology, 15(3), 224~230.
- Kim JS, Lim NH, Shin YM, Park KW and Han IS(2021). Analysis of Greenhouse Gas Emissions for Carbonated Soft Drinks Using LCA Methodology. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 43(1), 1~9.
<https://doi.org/10.4491/KSEE.2021.43.1.1>
- Lee JW(2000). Future Policy Direction of Artificial Reef Facilities Project. The Korean Society of Fisheries and Aquatic Science, 12(1), 35~76.
- Lee KM, Hur T and Kim SD(1998). Chapter 1 Introduction, In: Theories and Guidelines for Environmental Life Cycle Assessment(LCA). KAB,

- Seoul, Korea, 11~23.
- Life-Cycle Assessment Society of Japan (JLCA)(2012). LIME2 Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling.
- Ministry of Oceans and Fisheries(2020). Regulations for the execution and management of artificial reef facilities. 7.
- Na WB(2019). Artificial Reefs and Their Issues and Scientific Basis. ISSN 2671-4310, 28(2), 77~82. <https://doi.org/10.22714/SFO.2019.28.2.1>
- Nam JJ, Yoon YM, Lee YH, So KH and Kim CH(2008). Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Livestock and Food Wastes Co-digestive Biogas Production System. Korean Journal of Environmental Agriculture, 27(4), 406~412. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2008.27.4.406>
- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) and Japan Environmental Management Association for Industry (JEMAI) (2017). LCI Database IDEA ver.2.1.3.
- Pyo SH, Kim MJ, Lee SC and Yoo CK(2014). Evaluation of Environmental and Economic Impacts of Advanced Wastewater Treatment Plants with Life Cycle Assessment. Korean chemical engineering research, 52(4), 503~515. <https://doi.org/10.9713/kcer.2014.52.4.503>
-
- Received : 16 September, 2022
 - Revised : 07 October, 2022
 - Accepted : 13 October, 2022