

Original Article

한국 인공어초 관련 연구 현황과 과제

이문옥¹ · 김종규^{2,†}

¹전남대학교 조선해양공학과 명예교수

²전남대학교 조선해양공학과 교수

The Current Status of Artificial Reefs (ARs) Research in Korea and Its Future Task

Moon Ock Lee¹ and Jong Kyu Kim^{2,†}

¹*Emeritus Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

²*Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

요 약

본 연구에서는 국내의 인공어초 연구와 관련하여 한국학술지인용색인(Korea Citation Index; KCI)에 등재된 40여편의 논문을 연구주제별로 분석하고, 앞으로의 연구 과제에 관하여 검토하였다. 그 결과, 지금까지의 연구는 주로 어초의 배치에 따른 어획효과나 설치 후 어초의 관리 상태, 예를 들면 어초 기반의 세굴이나 침하와 관련한 연구가 많은 것으로 나타났다. 이들 연구에서는 SSS(side scan sonar)나 어군탐지기, 또는 잠수조사 등을 통해 어초 어장에서의 CPUE(catch per unit effort)가 어초가 설치(또는 배치)되지 않은 해역이나 또는 자연초 어장에 비해 더 많다는 사실이 확인되었다. 어초 설치시 또는 설치 후 발생한 어초의 침하나 매몰, 또는 기반의 세굴과 관련한 연구는 단순히 현장조사에 의한 사실 확인으로 그친 경우가 많아, 물리적 기구 해명을 위한 연구가 필요할 것으로 판단되었다. 어초의 후류역과 관련한 연구에서는 어초 배치시 후류역(wake)을 확대할 수 있는 방안에 초점을 맞추고 있으나, 후류역에 영양염류를 공급하는 물질수송 기구인 용승류에 관한 연구가 결여되어 있어서 앞으로 해야 할 연구 과제의 하나로 생각되었다. 어초의 경제성 평가에서는 어초 설치에 어업에 긍정적인 영향을 준 것으로 나타났으나, 앞으로는 이러한 어초의 경제적 효과를 포함하여 생물학적 효과나 사회적 효과도 함께 평가하는 연구가 수행되어야 할 것으로 생각되었다. 마지막으로, 인공어초 시설사업이 1970년대에 시작한 이래 50년이 경과하여 어초(설계수명 30년)로서의 기능을 제대로 발휘하지 못하는 어초 어장이 상당수 있을 것으로 생각되므로, 앞으로의 인공어초 사업은 새로운 어초 어장의 개발과 함께 기존의 노후화된 어초 어장의 유지 관리가 중요한 과제로 판단되었다.

Abstract – We reviewed papers of more than forty published in the KCI (Korea Citation Index) in relation to artificial reefs (ARs) and discussed research issues we need in the future. The majority of studies appeared to be done for identifying the catch performance in terms of ARs or management situation such as foundation scour and subsidence after the deployment of ARs. These studies proved that CPUE (catch per unit effort) in the ARs' fishing ground surpassed those in non-ARs' fishing ground or natural reefs' fishing ground by means of SSS(side scan sonar), echo sounder, or scientific divers. However, they just ended up in finding the fact that the foundation scour or subsidence of ARs happened so that it seemed like to have to explain about a certain physical mechanism. On the other hand, studies on the wake region of ARs came up with some ideas how to expand it, but they did not elucidate a transport mechanism, such as an upwelling flow to supply nutrients from the bottom otherwise fishes do not gather. In addition, the existing studies did not deal with objectives of ARs aiming for recovery (or restoration) to sound marine ecosystems, and they also did not handle the social effects or biological effects. Therefore, we will have to study on the upwelling flow concerned with a wake region as well as the evaluation of ARs from the biological and social points of view in

[†]Corresponding author: kimjk@jnu.ac.kr

the future. Finally, it is judged that the maintenance and management of superannuated ARs' fishing grounds will have to be one of the major issues in the future because they already passed their design life (thirty years) since the 1970s.

Keywords: 인공어초(artificial reefs; ARs), 어초성(affinity), 바다목장(marine ranching), 후류역(wake), 용승류(upwelling flow)

1. 서 론

인공어초(Artificial reefs; ARs)란 수산생물의 보호와 배양, 어업의 효율화를 목적으로 수중에 인공적으로 시설하는 각종 구조물을 말한다(FIRA[2023]). 또한, Pickering[1996]에 의하면, 인공어초는 어류를 유인하고 모이게 하여 연안 생태계를 향상하고 회복시키기 위해 바다에 건설된 구조물로 정의하고 있다. 오늘날 인공어초(ARs)는 어업생산 향상, 생물다양성 보전, 서식처 회복과 보호, 바다숲 조성, 해상양식, 불법어업 방지, 잠수, 여가낚시, 연안보호, 관광 등과 같은 다양한 목적을 가지고 전 세계적으로 건설되고 있다(Lee *et al.*[2018]). 특히, 한국에서는 수산자원관리법 제 2조(정의)에서 “수산자원조성”이란 일정한 수역에 어초, 해조장 등 수산생물의 번식에 유리한 시설을 설치하거나 수산 종자를 풀어놓는 행위 등 인공적으로 수산자원을 풍부하게 만드는 행위를 말한다고 규정하고 있다. 또한 동 법 제 41조에 따르면, 수산자원조성사업은 1.인공어초의 설치사업, 2. 바다목장의 설치사업, 3. 바다숲의 설치사업, 4. 수산 종자의 방류사업, 5. 해양환경이 개선사업, 6. 친환경 수산생물 산란장 조성사업, 7. 그 밖에 수산자원조성을 위해 필요한 사업으로서 해양수산부장관이 정하는 사업으로 규정하고 있다. 국내에서는 1971년 저인망어업 등에 의한 불법어업방지와 어업인 소득증대를 위해 처음으로 인공어초사업이 실시되었고(Kim[2006]; Kim and Lee[2007]), 2023년 현재 사각형어초를 비롯하여 폴리곤어초에 이르기까지 97종의 일반 어초가 개발되어 전국 11개시도에 시설된 면적과 시설량은 Table 1과 같다.

Table 1. Current condition of ARs installation for each region (FIRA [2023])

Region	Area (ha)	Amount (ea)	Cost (million won)
Busan	3,382	15,053	23,607
Incheon	12,052	70,104	90,716
Ulsan	2,670	20,477	18,623
Gyeonggi-do	6,238	43,970	68,665
Gwangju	23,927	131,582	122,520
Chungcheong-do	19,174	96,879	119,357
Jeollabuk-do	17,749	70,997	92,024
Jeollanam-do	46,149	305,747	233,832
Gyeongsangbuk-do	24,118	178,534	128,687
Gyeongsangnam-do	38,761	258,990	193,267
Jeju-do	38,201	259,784	253,910
Total	232,421	1,452,117	1,345,208

한편, 정부에서는 1999년부터 연안어장의 환경악화에 대응하고 과도한 어획으로 인해 감소한 수산자원회복을 위해 바다목장(marine ranching)사업을 시행하였다(Lee and Nam[2020]). 이 사업은 기존의 남획형 어업에서 벗어나 수산자원의 자율갱신성과 어장환경의 회복을 통해 기르는 어업으로 전환함으로써 지속가능한 수산업을 실현하기 위해 도입되었다. 1999년부터 2006년까지 시범바다목장 사업을 추진하였고, 이후에는 연안바다목장사업을 실시하여 현재 전국에 50개소가 시설되었다. 연안바다목장은 수산생물의 보호·육성장, 수산자원의 생산거점, 수산체험관광의 기반 마련, 이용관리 체계의 구축 등을 목표로 하고 있다. 또한 이와 병행하여 바다숲(marine afforestation) 조성사업이 2009년부터 시행되었으며, 이는 갯녹음(또는 백화현상; urchin barren)으로 해조류(seaweed)가 소실되어가는 해역에 인위적으로 바닷말 군락을 조성하고 지속적 관리를 통해 바다숲의 기능을 복원시켜 해역 생태계의 건강성을 회복하는 데 그 목적을 두고 있다. 이러한 바다숲은 수산생물의 서식처 제공 뿐만 아니라 온실가스(CO₂)의 저감, 청정 바이오에너지원, 오염물질의 정화, 웰빙식품, 유용 기능성 물질의 공급 등 여섯 가지의 기능을 가지고 있다. 2022년 현재 동해, 서해, 남해, 제주 등 4개 해역 238개소에 29,180 ha의 바다숲이 조성되어 있으며, 2030년까지 바다숲 54,000 ha를 조성할 목표를 가지고 계속 추진 중이다.

본 연구에서는 지금까지 수행된 국내 인공어초와 관련한 연구의 광범위한 리뷰를 통해, 어초 연구의 특징과 현황을 조사하였다. 또한 기존의 어초 연구가 인공어초의 설치 목적인 수산생물의 보호와 배양, 연안생태계의 회복, 생물다양성 보전, 불법어업 방지, 관광 등과 같은 다양한 주제를 다루고 있는지를 살펴봄으로써 앞으로 지속가능하고 건전한 해양생태계의 창조를 위해 필요한 어초 연구의 방향을 제시하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 국내의 인공어초 연구와 관련하여 한국학술지인 용색인(Korea Citation Index; KCI)에 등재된 43편의 논문을 수집하고 이들 자료를 연구주제별로 분석하였다. 이들 자료는 Table 2에서 보는 바와 같이, 지금까지 어초와 관련하여 수행된 연구분야는 어초의 시설(또는 배치) 효과에 관한 연구가 가장 많았고, 다음으로 설치후의 어초의 관리 상태와 관련하여 세굴, 흐름(후류역), 안정성(활동, 전도)에 관한 연구가 많았다. 이하에서는 이들 연구 주제와 관련하여 수행된 내용을 구체적으로 검토하고 앞으로의 연구과제에 관하여 고찰하였다.

Table 2. Research themes in relation to ARs in Korea

Year	Deployment Effectiveness (Affinity)	Management condition (Scour/Burying/ Subsidence)	Flow Characteristics (Wake)	Stability (Sliding/Turnover)	Material of ARs	Economic Effectiveness	Others	Total
1994	1							1
1995								
1996								
1997								
1998						1		2
1999	1							1
2000	1							1
2001	1						2	3
2002								
2003	1				1			2
2004	1							
2005		1					1	2
2006								
2007	1	1		1	1			4
2008	1	1						2
2009				1			2	3
2010						1	1	2
2011	1							1
2012								
2013	2					1	1	4
2014	1			1			1	3
2015							1	1
2016	1		2				1	4
2017	1	2						3
2018				1				1
2019	1	2						3
Total	15	7	2	4	2	3	10	43

3. 결 과

3.1 어초 시설 효과(어초성; Affinity)와 관련한 연구

어초가 해역에 설치되면 어류는 어중에 따라 각기 다른 반응을 보이며 어초 주위로 모여들게 되는데, 이때 어초에 대한 어류의 친밀도를 어초성(affinity)이라고 한다(Yamaguchi *et al.*[2006]). 따라서, 어초의 시설(또는 배치) 효과는 어류가 어초에 대해 정위(定位)하는 행동, 즉 위집의 패턴에 의해 결정된다. 또한 어초의 시설과 더불어 시간이 경과하면 해조류(海藻類)나 다른 생물도 부착하게 되는데 이러한 생물량(biomass)도 포함하여 어초의 효과로 정의할 수 있다.

Lee and Kang[1994]은 한국 연안을 6개 해역으로 나누어 각 해역별, 어초 모형(사각형 어초, 반구형 어초, 원통형 어초)별 어종의 친화성과 해역별 최대효과를 가져올 수 있는 적정어초 모형에 관하여 고찰하였다. 이를 위해 그들은 1988년 4회(5, 7, 9, 11월)에 걸쳐 삼중자망으로 어획조사를 실시하여 어획된 어류는 종별로 분류·계수하였다. 그 결과, 출현한 어종은 총 45종으로, 이 중 사각형 어초가 38종, 반구형 어초가 18종, 원통형 어초가 31종이었다. 한편,

사각형 어초에서는 회유성어류, 반구형 어초에서는 저서성어류 또는 부착생물을 먹이로 하는 어류의 조성률이 높았다. 또한 중부 연안을 제외한 전 해역에 걸쳐 사각형 어초 어장에서의 어획량이 가장 높게 나타났으며, 어류의 군집상도 어초형태에 따라 차이를 보였다. Ahn *et al.*[1999]은 1993년부터 1997년에 걸쳐 제주 연안에 조성된 패조류용 인공어초 어장에서 수중로봇카메라(ROV)와 잠수조사를 통해 어초가 자원조성과 생산에 미친 효과를 조사한 결과, 어초 어장에 출현종은 패류가 6종, 생물량은 490-3,683 g·m⁻³로 나타났다. 또한 부착생물은 해조류가 10종이었고, 생물량은 3,556-10,550 g·m⁻³이었다. 결과적으로 어초 어장의 어획량은 천연초 어장에 비해 3.5-4.4배, 비시설 어장에 비해서는 10.5-21.4배가 더 많았다.

Park *et al.*[2000]은 1994년부터 1997년에 걸쳐 군산시 어청도와 말도, 부안군 대리 해역에 시설된 어초 어장에서 1998년 11월부터 1999년 8월까지 삼중자망, 통발, 연승, 잠수조사를 실시하였다. 그 결과, 어초의 시설상태는 전반적으로 양호하였으나 일부는 매몰되었고, 지반이 패여 있음을 확인하였다. 한편, 어류는 20종이 어획되었으나 잠수조사시 관찰된 종은 10종이었다. 또한 부착생물로서 5종의 식물과 5종의 동물이 관찰되었다. 어초 어장에서의 단위노력

당 어획량(Catch Per Unit Effort; CPUE)는 어초가 시설되지 않은 대조구에 비해 약 2배 정도로 나타나 어초 효과가 있는 것으로 판단되었다. Park *et al.*[2001]은 보령군 농도해역에 1995년부터 1999년에 걸쳐 시설된 인공어초(사각형 어초와 잠보형 어초)어장을 대상으로 2000년 5월부터 6월까지 어장환경(수온, 염분, 투명도) 조사와 잠수조사를 실시하였다. 그 결과, 일부 어초는 매몰(30-40 cm 정도) 또는 패인 지반이 발견되었으나 어초 상태는 대체로 양호하였다. 또한 부착생물은 식물이 6종, 동물이 5종 관찰되었고, 어류는 어초 어장에서 17종, 어초가 시설되지 않은 대조구에서 10종이 각각 관찰되었다. 한편, CPUE는 어초 어장에서 대조구에 비해 2-3배 정도 더 많이 어획되어 어초 효과가 확인되었다. Park *et al.*[2003]은 1998년부터 2001년에 걸쳐 SSS, 어군탐지기(이하에서는 어탐), 수질측정기 등을 사용하여 보령군 횡건도 해역에서 잠보형 어초, 자연초 및 대조구 어장에서 해양환경, 어획효과, 어초상태를 조사하였다. 그 결과, 잠보형 어초 어장에서는 대조구 어장에 비해 어류개체수에서는 2배, 어획 중량으로는 2.7배가 더 많이 어획하였다. 또한 통발에 의한 어획시험에서는 어초 어장이 대조구 어장에 비해 개체수에서는 3.2배, 중량으로는 5.0배가 더 많이 어획되었다. 한편, 어초 어장과 대조구 어장에서 어획된 도다리를 비교한 결과, 그들은 어초 어장이 소형어의 성육장 역할을 하고 있는 것으로 추정하였다. Hwang *et al.*[2004]은 계량어탐(DT-5000, BioSonics)를 사용하여 모형 어초를 설치한 수조 실험과 통영(미륵도) 연안바다목장에 시설된 어초 부근에서의 어군 행동을 조사하였다. 그 결과, 높은 분해능을 가진 어탐을 사용하면 어업생물에 미치는 어초 효과와 어군량을 정도 높게 파악할 수 있음을 입증하였다. 그러나 어초 주변에 서식하는 어류의 생태와 어종 파악을 위해서는 어탐과 동시에 잠수 조사나 수중 비디오카메라(ROV)와 같은 다른 모니터링 방법도 필요하다고 이들은 주장하였다. Cho *et al.*[2007]은 2003년 3월부터 2005년 11월까지 국립수산과학원이 개발한 다공질 반투명 인공어초를 제주 서귀포 강정리와 북제주군 비양도 연안해역에 시설하여 해조류 부착효과 및 바다숲 조성 가능성을 조사하였다. 그 결과, 켈생이모자반(*Sargassum horneri*)와 감태(*Ecklonia cava*)를 비롯한 유용한 수산자원 25종 이상이 어초 기질에 부착하고 있음을 확인하였다. 또한 실 모양의 조류로부터 다년생 조류로의 천이도 관찰되었다. 한편, 어초에서의 최대 생물량은 2005년 10월 비양 해역에서 1,990 g·m⁻²로 나타나, 어초에 기질이 조성되면 군집과 바다숲은 1년 이내에 그 절정에 달할 것으로 판단되었다. Choi[2008]는 1999년 2월부터 2000년 8월까지 일본 에히메현 이카타(Ikata) 연안의 어초 어장에서 ROV와 잠수 조사에 의해 어초 주변에 군집하고 있는 생물 우점종의 계절변화와 동물상을 조사하였다. 그 결과, 어초당 5-20개체의 밀도를 가진 패류 37종을 발견하였으며, 어류는 콘크리트 어초에 비해 철제 어초에서 더 많이 관찰되었다. 그는 이것을 철제 어초가 콘크리트 어초보다 내부 공간이 더 넓고 또한 지붕 그늘을 어류의 주거지로서 제공하고 있기 때문으로 판단하였다.

Kang *et al.*[2011]은 1955년부터 1997년에 걸쳐 일본 시모노세키 키타무라 연안에 조성된 어초 어장 주변에서 2001년 6월 SSS,

어탐, CTD를 사용하여 현장조사를 실시하였다. 그 결과, 어군은 대체로 어초로부터의 거리가 800 m 이내이고, 모래나 작은 자갈로 된 저질, 콘크리트나 석재로 된 어초, 그리고 수심 5-10 m 이내에 분포하는 것으로 드러났다. Lee[2013a]는 1989년부터 1998년에 걸쳐 콘크리트 사각형 어초를 시설한 부산 남구와 해운대구의 어초 어장에서 2006년 8월부터 9월까지 SSS, split beam echo sounder, 수중 CCTV camera 시스템을 사용하여 어초의 시설 상태와 어초를 둘러싼 생물상을 조사하였다. 그 결과, 어초에 반응하는 어군에 관한 유용한 정보를 획득하였으나, 그는 천연초와 인공초를 포함한 지역에서의 어군 행동과 지리적 분포의 차이를 확인하기 위해서는 추가 조사의 필요성을 언급하였다. Lee[2013b]는 1989년 부산시가 수영만에 콘크리트 사각형 어초를 집중 투하한 어초 어장에서 2006년 8월 SSS, imaging sonar, split beam echo sounder를 사용하여 어군의 유영 패턴을 정량적으로 조사하였다. 이를 위해 그는 어초에 반응하여 유영하는 어군의 행동을 추적하기 위한 알고리즘을 개발하였다. 그 결과, 어군 중 제1 그룹은 어초 바로 위에 떠서 중층에 남아 있는 반면, 제2 그룹은 해저 가까이서 어초 주변을 유영하고 있었다. 이때 평균 유영속도는 중층 어군의 경우 0.4 m·s⁻¹, 어초 가까이를 유영하는 어군의 경우는 0.17 m·s⁻¹로 각각 추정되었다. 따라서, 해저 부근의 어초 가까이를 통과하는 어군은 중층에서 어초 바로 위를 부유하고 있는 어군에 비해 다소 느리게 유영하고 있는 것으로 판단하였다. Yoo *et al.*[2014]은 한국 연안에 시설된 인공어초의 기능도(function index(FI); 군집구조의 안정성과 생산성의 추정)와 성숙도(maturity index(MI); 자연초 생물학적 매개변수와 비교)를 평가할 수 있는 복수의 생태학적 지수(ecological index)로 구성된 시스템을 개발하였다. 그들은 이 개발된 시스템(생태계모델)을 서해안 연안바다목장 5개소의 자연초와 인공어초 및 어초시설 예정지(자연초)에 적용하였다. 그 결과, FI는 지역별로 평균 31.6-72.5%, MI는 53.1-76.9%의 범위를 나타내었다. 또한 인공어초의 FI와 MI는 태안에서 가장 양호하였고, 인접한 인공어초와 자연초 사이의 FI는 유의한 선형관계를 갖는 것으로 나타났다. 이것은 그 해역의 생물군집의 상태가 어초의 FI를 결정하는 데 있어서 중요한 요인으로 작용할 수 있음을 의미하였다. Lee *et al.*[2016]은 2003년 포항 연안에 시설된 빨삼각형 어초를 대상으로 2009년 2월부터 2011년 8월까지 총 4회에 걸쳐 어초에 부착된 저서동물군집을 조사하였다. 그 결과, 우점종은 연체동물인 바다방석고둥이었으나, 대부분의 출현종은 시공간적으로 변화하는 것으로 나타났다. Hwang *et al.*[2017]은 2014년 10월 제주 북촌리 연안해역에 투하된 하우스형 어초 어장에서 어탐을 이용하여 2015년 4월부터 2016년 10월까지 8회에 걸쳐 생물생산량 조사를 실시하였다. 그 결과, 자망(刺網; gill net) 폭당의 CPUE는 어초 어장에서 1,339.5 g, 천연초 어장에서 2,348.9 g, 대조구 어장에서 1,055.3 g으로, 천연초 어장이 가장 높았다. 또한 어초에 부착한 저서동물은 자포동물 2종, 태형동물 7종, 성구동물 1종, 환형동물 4종, 연체동물 7종, 정지동물 14종, 극피동물 4종 등 총 81종이 출현하였다. 한편, 어초에 부착한 해조류는 녹조류가 6종, 갈조류가 3종, 홍조류가 31종 등 총 40종

이었고, 우점종은 감태(*Ecklonia cava*)였다. 따라서 어초 시설 후 16개월이 경과한 지금 감태에 의한 바다숲이 양호하게 조성되어 있어서, 어초에 의한 자원조성효과가 큰 것으로 판단하였다. Kang *et al.*[2019]은 제주 북촌 앞바다에 조성된 어초 어장에서 어탐을 사용하여 2018년 4월과 6월 2회에 걸쳐 transect line 음향조사를 수행하였다. 그 결과, 어류 전체의 수직분포인 음향생물량(NASC; Nautical Area Scattering Coefficient; NASC(해리면적당 산란계수 ($m^2 \cdot nm^{-2}$)))은 4월과 6월에 각각 31.6, 61.3이었고, 어군과 어초와의 거리는 750-3,250 m로 나타났다. Lee and Choi[2019]는 2016년 강원도 양양군 및 포항시 구룡포 연안에 시설한 인공어초를 대상으로 2017년 4회(2, 5, 8, 11월)에 걸쳐 scuba diving으로 해조류 군집의 변화를 관찰하였다. 그 결과, 녹조류 11종, 갈조류 15종, 홍조류 68종을 포함하여 총 94종(양양 66종; 녹조류 8종, 갈조류 9종, 홍조류 49종), 포항 65종; 녹조류 7종, 갈조류 9종, 홍조류 49종)을 동정하였다. 양양은 다시마(*Saccharina japonica*)와 구멍갈파래(*Ulva australis*)가, 포항은 불레기말(*Colpomenia sinuosa*)과 우뚝가사리(*Gelidium elegans*)가 각각 우점하였다. 결과적으로, 두 해역 모두 어초 시설 초기에 각각 파래류, 불레기말이 착생하였으나, 이후 다시마, 감태, 우뚝가사리 등 다년생 해조가 생육·우점하는 것으로 확인하였다.

3.2 어초 관리상태와 관련한 연구

3.2.1 어초 침하와 매몰

Kim *et al.*[2005]은 탄성과 탐사기와 SSS, 증력시추기를 사용하여 연약 지반인 통영 및 장승포 연안에 설치된 인공어초의 침하상태를 조사하였다. 그 결과, 조사지역 퇴적물의 입도는 통영이 5-8 Φ , 장승포가 8-9 Φ 로, 니질(泥質; silt 또는 mud) 함량이 높았다. 또한 어초의 침하는 전단강도가 2-3 kPa 이상인 지반에서는 거의 발생하지 않거나 아주 느리게 일어나고 있는 것으로 판단되었다. Seo *et al.*[2007]은 1992년부터 1996년에 걸쳐 전남 연안의 10개 해역에 시설한 인공어초에 대하여 1997년부터 1998년까지 1년 동안 어탐과 잠수조사에 의해 어초의 보존상태와 어획효과를 조사하였다. 그 결과, 당 해역에는 대형강제어초가 시설되어 있어서 전 수층에 걸쳐 어류의 위집과 어구 형성이 가능하며, 자체 중량 또한 비교적 가벼워 어초의 침하가 작아 장기간 어초 기능을 유지할 수 있을 것으로 판단되었다. 특히, 강제어초는 해수 중 부식속도가 초기에는 0.1-0.16 mm·y⁻¹이지만, 5년 후는 초기의 1/2, 30년 후는 약 1/10로 줄어들어 큰크리트 어초에 비해 내구성이 뛰어나고, 또한 환경친화적인 철이온이 부착생물의 착생을 용이하게 하고 있는 것으로 판단되었다. Kim *et al.*[2008]은 2003년 11월 동해안 강릉 삼곡리 사질 지반의 연안에 3종의 인공어초(세라믹 어초 45개, 반원 가지형 어초 5개, 신요철형 어초 10개)를 분산 설치하여, SSS, 잠수조사, 다중빔음향측심기(multi-beam ech sounder: MBES)에 의해 어초 종류에 따른 매몰 특성을 조사하였다. 그 결과, 해저 지반 접지압이 가장 낮은 세라믹 어초는 60-150 cm, 신요철형 어초는 130-145 cm, 접지압이 가장 높은 반원가지형 어초는 265 cm가 각각 매몰

된 것을 확인하였다. 그들은 동해안 사질지반에 시설된 어초의 매몰은 외해로부터 연안쪽으로 진행되는 높은 파도가 침성이 낮은 사질지반을 교란·부유시켜 생긴 결과라고 추론하였다. Kim *et al.*[2009a]은 MBES, SSS를 사용하여 1987년부터 2007년까지 부산 연안에 투하한 인공어초의 시설현황을 분석한 결과, 1997년부터 2004년 사이에 시설된 단위어초수와 시설면적 등은 큰 폭의 변동을 보였으며, 시설물량은 2003년 이후 급격히 감소한 것으로 나타났다. 또한 이들 어초는 대부분 상태가 양호하였으나, 지반에 따라서는 침하, 이탈, 망실 등으로 약 15%의 손실이 발생한 것으로 조사되었다. Cho *et al.*[2010]은 1981년부터 2004년에 걸쳐 포항 연안해역에 시설된 사각형 어초를 2006년 6월부터 2007년 12월까지 DGPS와 연계한 SSS, 잠수조사 등을 통해 어초의 매몰, 세굴, 파손 상태를 조사하였다. 그 결과, 어초 기능에 영향을 미치고 있는 것으로 판단되는 0.5 m 이상의 매몰과 세굴은 각각 4개소(세굴심 0.5-1.2 m; 2.9%)와 3개소(세굴심 0.5 m; 2.2%)로 나타났다. 또한 파손된 어초는 전체 어초 중 183개(1.7%)로, 나머지 어초의 상태는 비교적 안정적인 것으로 판단되었다. Kim *et al.*[2010]은 1983년 고흥 연안의 니질과 사니질 지반에 시설된 사각형 어초를 대상으로 2007년 두 해역간의 어초의 침하상태를 조사한 결과, 사니질 지반에 시설된 어초는 2.4 m가 침하한 반면, 니질 지반에 시설된 어초는 1.9 m가 침하한 것을 확인하였다. 따라서 연성 저질에 시설된 사각형 어초는 시설 후 20년 이상이 경과하여 그 기능이 50% 이상 감소한 것으로 나타났다.

3.2.2 어초 주변의 지반 세굴

Kim *et al.*[2009]은 조류가 강한 전남 고흥의 거금수로에 시설된 사각형 어초의 세굴을 조사하기 위해 2008년 3월 인공어초 시설해역 내에서 15일간 연속 측류를 실시하였다. 그 결과, 어초의 전면과 후면에서는 조류의 주방향에 서로 달라 지속적인 세굴과 침식이 발생하여 서로 다른 저질이 분포하고 있는 것을 확인하였다. Suh *et al.*[2010]는 전남 연안의 4개 정점에서 잠수조사와 저질 시료의 채취분석을 통해 점성토 및 사질 지반에 시설된 인공어초의 침하 세굴 등에 의한 기능저하 요인을 조사하였다. 이들은 저질조성 및 유속에 따른 세굴량을 조사하고, SCORIS(scour rate in cohesive soils) 방법에 의해 어초의 시설규모(다섯 가지의 다른 폭)를 가정한 세굴량을 산정하였다. 그 결과, 점성토 지반에서는 유속 1.0 m·s⁻¹까지는 세굴심의 변화가 유사하였으나, 그 이상에서는 시설폭에 따라 세굴심에 차이를 나타내었다. 반면, 사질토 지반에서는 시설폭이 증가할수록 세굴심도 증가하였다. 따라서, 점성토 지반은 작은 유속에서는 지반의 세굴에 대한 저항능력이 커서 단기간의 세굴량은 작을 것으로 판단되었다.

Ha and Kim[2015]은 관입시험과 실내 대형토조실험을 통해 모래와 점성토 지반에서 토목섬유의 표면 포설면적에 따른 어초의 침하효과를 분석하였다. 그 결과, 지오그리드(geogrid)와 같은 토목섬유를 인공어초 하부에 포설하면 지지력이 증가하여 침하가 감소하는 것을 확인하였다. 또한 Yun and Kim[2017a]은 사각형 어초의 해

저 지반의 보강에 따른 침하 거동을 파악하기 위해 모래, 실트, 점토지반을 조성하고 실내에서 관입실험과 침하실험을 실시하였다. 이때 그들은 무보강(unreinforced), 지오그리드 보강 및 하이브리드 대나무 매트(hybrid bamboo mat; HBM)보강 등 세 가지 종류의 보강과 조강재의 면적에 따른 특성을 검토하였다. 그 결과, 보강재의 면적이 증가할수록 보강 효과는 증가하였고, HBM이 지오그리드 단일보강에 비해서는 더 좋은 보강효과를 보였다. Yun and Kim [2017b]는 전남 고창 연안에서 채취한 지반시료(주로 실트로 구성된)에 패조류용 사각형 어초를 배치한 대형수조에서 어초의 배치 형태에 따른 침하실험과 2차원 흐름수조실험을 수행하였다. 그 결과, 어초의 침하 및 세굴심은 무보강된 인공어초에 비해 지오그리드가 보강된 인공어초의 경우가 훨씬 감소하였다. 또한 어초를 흐름방향으로 일직선으로 배치한 경우가 지그재그로 배치한 경우에 비해 세굴심과 유속이 감소하는 경향을 나타내었다. Yun and Kim [2019a]는 모래와 실트 지반에 놓여진 사각형 어초를 상정하여 2차원 실내실험과 수치해석을 통해 무보강 및 보강조건에 따른 인공어초의 세굴 특성을 조사하였다. 그 결과, 실내실험과 수치해석 모두 무보강 지반보다 보강재를 설치한 어초 지반의 세굴이 더 작았다. 또한 Yun and Kim [2019b]는 한국 서해안, 동해안 및 남해안에서 채취한 퇴적물인 모래, 실트 및 점토 구성된 해저 지반을 사용하여 인공어초의 지지력, 대형수조에서의 침하, 2차원 흐름수조에서의 세굴 실험을 행하였다. 그 결과, 모래나 실트 지반에 비해 점토 지반과 같은 연약지반에서의 보강효과가 더 큰 것으로 나타났다.

3.3 어초 주변의 흐름 특성(후류 또는 후류역)과 관련한 연구

Kim *et al.* [2016]은 평균후류체적 개념을 도입하여 기하학적으로 형상이 서로 다른 여섯 가지의 인공어초(요철형, 육교형, 반구형, 반원가지형, 신요철형, 어패류용 세라믹 어초)에 대하여 후류체적 변동에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위해 그들은 요소기반 유한체적법을 사용하였다. 그 결과, 어초의 기하학적 특성(크기 및 구조형식)에 따라 후류체적선도의 특성이 다르게 나타났다. 특히 평균 후류체적과 후류체적 변동이 모두 큰 경우에는 어초설치 시 후류체적 확보각을 고려하여 어초를 설치해야만 일정수준(즉, 평균 후류체적) 이상의 후류체적을 확보할 수 있음을 확인하였다. 따라서, 인공어초 설치시 후류역 확보를 위해서는 후류체적선도, 평균 후류체적, 후류체적 확보각도, 기본대칭각(45° 또는 90°), 주방향 등이 고려해야 할 중요한 인자로 판단되었다. Jung *et al.* [2016]은 어초와 어초 사이를 어초협곡(artificial reef canyon)이라는 개념을 도입하여, 어초협곡의 기하학적인 크기가 어초의 후류역에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해 그들은 Sawaragi [1995]의 후류길이(wake length)의 단점을 보완하고 후류영역을 명확히 제시하는 Kim *et al.* [2014]이 제안한 후류체적(wake volume) 개념을 도입하여 후류영역을 산정하였다. 후류영역의 산정에는 요소기반 유한체적법(element-based finite volume method)을 사용하였고, 또한 외력조건은 한국 어초설계기준 유속인 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 를, 대상어초는 사각형 어초를 각각 상정하였다. 그 결과, 최대후류체적은 흐름방향과 동일한 중

방향 간격(횡방향 어초협곡의 폭)을 사각형 어초의 종방향 길이(2 m)의 3배(6 m), 그리고 횡방향 간격(종방향 어초협곡의 폭)을 0으로 설정하였을 경우 발생하였다. 또한 횡방향 간격이 0인 경우를 제외하면, 종방향 간격이 모두 6 m인 경우 최대후류체적이 발생하였다. 따라서, 그들은 후류역을 극대화하기 위해서는 사각형 어초를 횡방향으로 집중배치하거나 집중산적하여 배치하는 것이 바람직하다고 결론지었다.

3.4 어초의 안정성(전도, 활동)과 관련한 연구

Jeong and Kim [2007]은 유한차분 수치모형(Flow-3D)을 사용한 정상 흐름(steady flow)에서 통영시 장사도 연안 어초 어장의 해역 조건(저질과 수심)을 고려하여 사각형 어초 주변의 흐름과 작용 유체력, 초기 세굴 패턴을 고찰하였다. 그 결과, 어초 내부 회전류의 최대 유속은 배후에 비해 약 1.2-1.3배가 더 컸으나, Reynolds수가 11,000-12,000사이에서는 최대 유속이 다소 감소하였다. 또한 어초는 전단응력이 가장 큰 양끝단에서 먼저 세굴이 발생하였고, 단면 중심부에서는 어초 내부의 세굴 패턴에 주로 영향을 미치는 회전류에 의한 전단응력이 발생하였다. 그러나 그 크기가 어초 전면에 비해 상대적으로 작아 어초 내부의 저면에서 발생하는 세굴은 크지 않았다. 또한 어초 주변에서의 최대 세굴심은 Shields수가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. Kim *et al.* [2009]은 2차원 수치파동수로를 이용하여 실제로 어초의 전도와 활동이 일어나는 강원도 삼척 임원 연안역에 시설된 요철형 어초의 유체력에 대한 단면특성(항력 계수와 투영면적과의 곱)을 비교하였다. 그 결과, 흐름의 주방향에 대하여 어초가 45° 로 놓인 경우가 90° 로 놓인 경우에 비하여 40-46%정도 큰 단면특성값을 나타내었으며, 또한 수립자속도에 대한 해저면의 영향은 수심이 얕아질수록 증가하였다.

Baek *et al.* [2014]은 2차원 수리모형실험을 통해 개발한 패조류용 요철형 인공어초의 설치수심에 따른 재현파고, 주기, 흐름 등의 외력을 변화시켜 어초의 안정조건인 한계치를 구하고, 설계외력(파랑, 흐름)의 안정성에 대해 검토하였다. 그 결과, 설치 수심 15 m 내에서는 실험파랑(파고, 주기)에 대하여 어초의 전도와 활동은 발생하지 않았다. 그러나 주기 12초인 파랑이 내습하는 방향(1열)에 설치된 어초 하단에서 발생하는 사련(砂漣, sand ripple)에 의해 일부 기울어짐이 발생하였으나, 이것은 긴 주기의 파랑 내습에 따른 전면 세굴의 영향으로 판단되었다. 따라서, 본 연구에서 개발된 인공어초는 설치 수심에 따른 외력조건(파랑)은 물론, 어초의 배열형식에서도 충분히 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단되었다. Jeon *et al.* [2018]은 어초의 안정성 평가를 위해 Morrison식을 기반으로 하는 델파(Delphi; 미국 Borland에서 object Pascal 언어의 기능을 향상시켜 개발된 응용 프로그램 언어, Hodges [2014]) 코드 및 그래픽 사용자 인터페이스(graphic user interface; GUI) 방식을 적용한 전산프로그램(SCAR program)을 개발하였다. 이들은 새로 개발된 SCAR 프로그램이 기존의 엑셀 프로그램을 이용한 어초의 안정성 해석 방식에 비해 사용자가 이용하기 편리하며 어초의 안정성 평가에도 큰 문제가 없음을 주장하였다.

3.5 어초 재료와 관련한 연구

Hong *et al.*[2003]은 폐콘크리트를 재활용한 재생골재 콘크리트 인공어초 제조를 목적으로, 재생골재 콘크리트의 역학적 성질을 연구하였다. 그 결과, 다공성 콘크리트의 단위용적중량 범위는 1.85-2.24 t·m⁻³이며, 천연 굵은 골재 혼입률이 높을수록 단위용적중량이 증가하였다 (보통 콘크리트의 단위용적중량은 2.25-2.29 t·m⁻³임). 또한 내부밀도 파악을 위한 초음파속도는 다공성 콘크리트의 경우 3.38-4.61 km·s⁻¹로 나타났으며, 쇄석골재의 혼입률 증가에 따라 초음파속도는 증가하였다 (보통 콘크리트의 초음파속도는 4.31-4.64 km·s⁻¹임). 한편, 다공성 콘크리트의 pH 범위는 9.6-10.6이었다(보통 콘크리트의 pH는 11.5-11.8임). 결과적으로, 다공성 콘크리트는 어초는 해조류 부착에 유리한 조건을 갖추고 있는 것으로 판단되었다.

Park *et al.*[2007]은 바다목장화와 해중림에 적합한 어초 개발을 목표로 유황콘크리트 시편과 공시체, 어초를 제작하여 울진군 석호항내에 어초를 설치하고 어초로서의 기능검증을 위한 실증시험을 행하였다. 그 결과, 유황콘크리트는 인공어초에 대한 강도를 충족하였고, 장기내구성에 대한 동결융해 저항성 또한 문제가 없어, 어류패류를 대상으로 하는 어초의 재질로서의 사용에 적합한 것으로 판단되었다. 특히, 유황콘크리트는 거친 표면을 가지고 있어서 해양생물의 부착 기질로서 유리한 것을 확인하였다. 반면, 해수환경에서 유황콘크리트의 강도가 일부 저하되어, 추가적 시험과 검토가 필요한 것으로 사료되었다.

3.6 어초 설치에 따른 경제성 평가

Ryu *et al.*[1998]은 통영의 수우도 앞바다에 조성된(사각형) 어초 어장의 어업 및 어업의 효과에 대하여 정량적·정성적으로 분석하고, 이들 시설에 투자된 비용의 회수가능년수를 추정, 경제성 평가를 시도하였다. 그 결과, 수우도 어초어장은 1988년 시설 투자후 13년(즉, 2001년)이 되어 순어업효과가 나타나는 것으로 분석되었다. 또한 어초로 인한 어업의 효과는 유어인구의 증가, 어촌관광 활성화, 어촌정주권 유지, 불법어업방지, 해양환경개선, 고급수산물 공급의 증대 등으로 다양하게 나타나고 있는 것으로 조사되었다. 또한, Kim *et al.*[2010]은 인공어초 등을 이용한 수산자원조성사업의 실태와 사업평가체제의 문제점을 분석하고 객관적으로 표준화된 평가시스템 도입방안을 연구하였다. 이들은 사전평가(유무분석)를 실시하여 사후평가와의 비교분석을 통해 그 효과가 검증된다면 사업의 경제성에 대한 논란을 불식시키고 투명성을 제고할 수 있다고 주장하였다. Choi[2013]은 비용·편익분석(coat-benefit analysis)기법을 이용하여 지난 12년(2002-2013)간 시행된 태안시범바다목장사업 중 인공어초사업의 경제적 효과(투자대비 경제성 여부)를 분석하였다. 그 결과, 2012년 기준 연간 전체 인공어초 증분 어업 편익은 2,381백만원의 효과가 발생하였으며, 또한 B/C 비율이 2.66, 내부수익률(IRR)은 22.8%로, 분석기법 모두에서 인공어초시설의 설치에 대하여 경제성이 있는 것으로 나타났다.

3.7 기타

Kim and Shin[2001]은 연안어장 관리에 필요한 GIS정보망 구축을 위해 정밀음향측심시스템(public-DGPS 수신기, 싱글빔 음향측심기, 측량용 소프트웨어로 구성)을 연구하였다. 그들은 구축된 정밀음향측심시스템으로 2000년 1월 경남 고성 자란만의 정치망 어장의 해저지형과 인공어초 투입해역에서의 해저지형을 분석하는 현장실험을 수행하여 그 유용성을 확인하였다. Kim and Lee[2013]는 어초의 사후관리와 성능평가를 개선하기 위해 IT 정보기기를 융합하여 인공어초를 설계·구현하는 어초종합정보시스템을 구축하였으며, Kim *et al.*[2015]은 인공어초 시설 적지 선정을 위해 원격탐사로 획득한 자료(해저질, 수심, 클로로필_a, 수온, DO 등)를 바탕으로 GIS를 활용한 데이터베이스 수립에 관한 연구를 수행하였다. Jo *et al.*[2001]은 Landsat TM 영상(1999년 5월 7일 촬영)과 NOAA AVHRR에 의한 수온 및 클로로필_a 농도자료, GIS를 이용한 현지관측자료 등을 이용하여 남해안 통영만 해역을 대상으로 인공어초 시설 적지를 선정하기 위한 연구를 수행하였다. Shin *et al.*[2005]은 통영 연안바다목장에서 2003년 3월과 10월 2회에 걸쳐 (양식산 및 자연산의) 조피볼락(*Sebastes schlegeli*)을 방류한 후 telemetry 기법으로 이들의 이동범위와 일주행동을 추적하였다. 그 결과, 자연산과 양식산 조피볼락의 일주행동 사이에 현저한 차이는 없었으나, 이들의 이동범위는 밤 동안이 낮 동안에 비해 더 넓은 것으로 나타났다. Shin *et al.*[2009]은 전남 연안의 사각형 어초가 분포하는 해역에서 SSS와 SBP(sub-bottom profiler)를 이용하여 획득한 자료를 함께 시각화하는 방법을 통해 인공어초의 상태, 퇴적물의 종류와 분포, 두께 등을 파악하였다. Kim *et al.*[2009b]는 MBES, SSS를 사용하여 부산 연안에 시설된 9개 해역에 사각형 어초로 조성된 어초 어장을 조사하여, 단위어초의 평균 체적계수(또는 유효공용적률) k 는 0.753이며, 또한 k 값과 어초의 시설결과연수(year, yr) 사이에는 $k = 0.0023yr + 0.725$ 의 관계가 있다고 추정하였다. 그러나, 이들 양자간의 상관계수는 0.32로 낮았는데, 이것은 해역의 지반(즉, 저질)이나 어초 초기 시설 당시의 설치조건 등이 유효공용적률의 감소에 초래했기 때문으로 판단하였다. Lee[2010]는 투명아크릴 수조에서 split beam echo sounder를 사용하여 부산 용호만에 시설된 인공어초 주변해역에서 어획된 돌돔, 성대, 전어 등 3종의 어종을 대상으로 음향반사강도의 체장 의존성을 조사하여 어종별 음향반사강도와 체장, 주파수(파장) 사이의 관계식을 제시하였다.

Kim and Lee[2013]는 인공어초 사후관리와 성능평가를 개선하기 위해 IT 정보기기를 융합하여 인공어초를 설계·구현하는 어초종합정보시스템을 구축하였다. Lee *et al.*[2016]은 1972년부터 2016년까지 한국을 비롯한 동아시아의 인공어초와 이들 사업과 관련하여 수행된 각종 학술자료를 광범위하게 수집하여 이를 체계적으로 분석하였다. 이들은 수집된 자료 분석을 통해 인공어초의 목적, 어초의 위집 효과, 어초의 배치, 어초 주변의 세굴, 어초의 설치효과 등에 관하여 논의하였다. 또한 Kim and Choi[2014]는 기존에 설치되어 있는 사각형 어초에 대하여 MBES와 SSS를 사용하여 체적을 구하고, 이 체적으로부터 투하한 어초 개수를 산정할 수 있는 방안을

제안하였다. 이들은 기존의 k 를 사용한 산적어초의 개수 산정방식은 시설연도 및 해저 저질에 따른 침하가 발생하였을 경우 문제가 있음을 지적하였다.

4. 고 찰

전술한 Table 2에 나타난 바와 같이, 지금까지 어초와 관련하여 어초의 시설(또는 배치) 효과에 관한 연구가 가장 많았고, 다음으로 설치 후의 어초의 관리 상태와 관련하여 세굴, 흐름(후류역), 안정성(활동, 전도)에 관한 연구가 많았다.

우선 어초 시설의 배치 효과와 관련한 연구에서는 SSS나 어탐 또는 잠수조사 등 다양한 방법을 통해 어초 어장에서 CPUE가 어초가 설치(또는 배치)되지 않은 해역이나 또는 자연초 어장에 비해 더 많다는 사실을 확인하였다. 이것은 어류가 새로 투하된 어초에 대하여 호기심을 가지고 정위(定位) 행동을 한 결과로서, 분명 어초 배치에 따른 어류의 위집효과로 볼 수 있다. 또한 어업인의 입장에 있어서도, 어초 어장에 가면 반드시 어류가 있다는 믿음을 주어 어획효과를 높일 수 있기 때문에 어초 시설은 필요하다. 그러나, 어류는 스스로 유영하여 한 곳에 머무르지 않고 또 다른 곳으로 이동하기 때문에, 어느 어초 어장에서의 어획량이 많다고 하여 실제 대상 어종의 자원량이 늘어난 증거는 아니다. 또한, 어초 어장에서의 위집이나 어획효과는 주위 환경에 따라 변할 수 있으며, 항상 안정하고 일정한 어획효과가 나타나지는 않는다. 이런 이유 때문에, 어초 시설효과는 보다 객관적이고 합리적인 방법, 예를 들면 어초 효과 진단시스템(FIDEC, <http://www.fidec.or.jp>), 어초성 지수(reef affinity index[Yamaguchi *et al.*[2006]], 서식장 적성지수(habitat suitability index; HSI[Miura *et al.*[2010] 등의 개념을 도입하여 평가하는 것이 바람직하다고 생각된다.

다음으로는 어초 설치시 또는 설치 후 발생한 어초의 침하나 매물, 파손 또는 지반의 세굴에 관한 연구인데, 여기서는 대부분 단순히 현장조사에 의한 확인에만 그쳐, 왜 이와 같은 현상이 발생하였는지, 즉 물리적 기구(외력) 해명을 위한 연구가 결여되어 있었다. 물론 전술한 Ha and Kim[2015], Yun and Kim[2017a; 2017b; 2019a; 2019b] 등이 지오그리드(geogrid)나 대나무 매트(HBM)를 사용하여 어초 지반을 보강하여 침하를 저지하는 방안을 연구한 사례도 있으나, 어초 침하나 지반의 세굴 원인을 논의하지는 않았다. 또한 Jeong and Kim[2007]이 유한차분 수치모형(Flow-3D)을 사용한 정상 흐름(steady flow)에서 밝힌 어초 지반의 양끝단에서의 세굴이나, Baek *et al.*[2014]이 2차원 수리모형실험을 통해 밝힌 파랑 내습에 의한 어초 전면 세굴의 연구결과는 실제 해역에서 발생하는 어초의 세굴은 물론, 침하나 매물, 또는 전도나 활동 등의 제반 현상을 설명하는 데 한계가 있다고 생각된다. 일반적으로, 어초를 투하하여 해저에 착지할 경우는 어초에 의한 충격력으로 지반반력이 작용하게 되는데, 이때 지반 반력이 어초 충격력을 능가하지 않으면 어초는 침하한다. 또한 어초는 설계 조건상 흐름이나 파랑에 의한 이동, 전도가 발생하지 않아야 하며, 부재가 파손되지 않아야

한다. 특히, 사질 지반에서는 어초 투하 후 시간경과와 함께 지반의 액상화(液狀化; liquefaction)가 진행되어 어초가 침하한다. 따라서, 연안바다목장을 비롯한 어초 어장이나 바다숲 조성시는 사전에 어초 자체는 물론, 어초 지반과 외력에 대한 면밀한 사전 조사가 필요하다.

한편, Kim *et al.*[2014], Kim *et al.*[2016], Jung *et al.*[2016] 등이 행한 어초 후류역과 관련한 연구에서는 어초 배치를 가급적 후류역(wake)을 확대할 수 있는 방안을 제안하였다. 그러나, 단순히 어초 후류역을 확대한다고 하여 어류의 위집효과가 향상되지는 않는다. 후류역이란 흐름의 정체역(dead zone)으로서, 어류가 이곳에 머물러 있을 수는 있으나, 어업생산성과 연결되기 위해서는 이곳으로 영양염류가 공급되어야 한다. 이를 위해서는 후류역을 형성하고 있는 와류에 의해 해저로부터의 영양염류가 휘말려 들어가는 현상, 즉 연행(連行, entrainment)이 있어야 한다. 즉 어초 후류역은 용승류(湧昇流; upwelling flow)에 의해 저층으로부터 영양염류가 공급되어야만 어류의 위집은 물론 생물량(biomass)의 증대에 기여할 수 있다(Oh *et al.*[2011]; Shim and Park[1986]). 따라서, 어초 후류역과 관련한 연구에서는 용승류의 형성 여부도 다루어야 할 과제의 하나로 생각된다.

한편, 어초 설치의 주요 목표 중의 하나는 인공적으로 생태계를 회복시키는 데 있으나, 기존 연구에서는 생태계 회복이나 복원과 관련한 연구는 이루어지지 않았다. 또한, Choi[2013]와 Ryu *et al.*[1998] 등에 의한 어초의 경제성(B/C) 평가에서는 어초 설치가 어업 또는 어업의 분야에 긍정적인 효과를 준 것으로 나타났으나, 어초의 생물학적 효과(생물다양성, 서식처, 바다숲)를 포함한 사회적 효과(불법 어업, 여가 낚시, 관광)나 경제적 효과(어업생산)에 관한 구체적인 연구는 미흡하였다. 따라서, 앞으로는 이들 효과를 종합적이고도 정량적으로 평가하는 연구가 함께 수행되어야 할 것으로 생각된다. 또한, 일반 어초의 시설에는 막대한 비용이 들기 때문에 부어초(浮魚礁; floating ARs) – 주로 표층이나 중층어류를 대상으로 하지만 – 도 하나의 대안이 될 수 있으므로 이에 대한 연구도 필요하다고 생각된다(Nakamura[1991]).

한편, 어초 설치 후의 안정성이나 어초 재료와 관련한 연구는 상대적으로 적은데, 이것은 일반적으로 어초 주변에서 발생하는 지반의 세굴현상과는 달리, 실제 해역에서 어초 자체의 활동(sliding)이나 전도(turnover) 등을 직접 현장조사를 통해 확인하기가 현실적으로 매우 어렵기 때문이라 생각된다. 또한 어초 재료에 대해서는 어초의 강도(strength)나 설치 후 해역내에서 발생하는 열화(설계수명과 관련이 있음)를 방지하기 위한 재료의 개발, 또는 어초에 적합한 새로운 재료의 개발(예를 들면 친환경적이고 생물에 위해를 가하지 않는 재료)이 앞으로의 과제로 생각된다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내의 인공어초 연구와 관련하여 한국학술지인용색인(Korea Citation Index; KCI)에 등재된 43편의 논문을 수집하여 이들 자료를 연구주제별로 분석하였고, 앞으로의 연구 과제에

관하여 검토하였다.

지금까지 수행된 연구는 어초의 시설(또는 배치) 효과에 관한 연구가 가장 많았고, 다음으로 설치 후 어초의 관리 상태와 관련하여 세굴이나 침하, 후류역, 또는 안정성에 관한 연구가 많았다. 이들 연구에서는 SSS나 어탐 또는 잠수조사 등 다양한 방법을 통해 어초 어장에서 CPUE가 어초가 설치(또는 배치)되지 않은 해역이나 또는 자연초 어장에 비해 더 많다는 사실을 확인하였다. 그러나, 어초 어장에서의 어획효과는 주위 환경에 따라 변할 수 있기 때문에, 어초효과 진단시스템이나 어초성 지수, 또는 서식장 적성지수와 같은 보다 합리적인 방법에 의해 평가하는 것이 바람직하다고 판단된다.

한편, 어초 설치시 또는 설치 후 발생한 어초의 침하나 매몰, 파손 또는 지반의 세굴에 대해서는 단순히 현장조사에 의한 확인에만 그칠 것이 아니라, 이와 같은 현상을 발생시킨 물리적 기구(외력)의 규명을 위한 연구가 필요하다. 따라서, 어초를 이용하여 어초 어장, 연안바다목장, 바다숲을 조성할 경우에는 사전에 어초 자체는 물론, 어초 지반과 외력에 대한 면밀한 사전 조사가 필요하다고 생각된다.

또한, 어초 후류역과 관련한 연구에서는 어초 배치시 후류역(wake)을 확대할 수 있는 방안을 제안하고 있으나, 반드시 어초 후류역을 확대한다고 하여 어류의 위집효과가 향상되지는 않는다. 왜냐하면 어류는 먹이가 있어야 모이게 되는데, 이를 위해서는 후류역으로 영양염류를 공급하는 물질수송 기구, 즉 용승류가 필요하다. 따라서 어초 후류역과 관련하여 용승류의 형성에 관한 연구도 앞으로 해야 할 과제의 하나로 생각된다.

한편, 어초 설치의 주요 목표 중의 하나는 인공적으로 생태계를 회복시키는 데 있으나, 기존 연구에서는 생태계 회복이나 복원과 관련한 연구는 이루어지지 않았다. 또한 어초의 경제성 평가에서는 어초 설치가 어업 또는 어업의 분야에 긍정적인 영향을 준 것으로 나타났으나, 앞으로는 이러한 어초의 경제적 효과를 포함하여 생물학적 효과나 사회적 효과를 객관적이고 정량적으로 평가하는 연구가 함께 수행되어야 할 것으로 생각된다. 끝으로 우리나라에서의 인공어초 시설사업은 1970년대에 시작한 이래 50년이 경과하여 이미 어초(설계수명 30년)로서의 기능을 제대로 발휘하지 못하는 어초 어장도 상당수 있을 것으로 생각된다. 따라서, 앞으로의 어초 사업은 새로운 어초 어장의 개발도 중요하지만 동시에 조성된 기존의 노후화된 어초 어장의 유지 관리도 중요하다는 점을 강조하고자 한다.

References

- [1] Ahn, Y., Rho, H., Kim, S., Jeong, D., Kim, M., 1999, "Studies on the improvement of the fish gathering effects of artificial reefs in the coastal area of Cheju Island", *J. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 11(1), 59-68.
- [2] Baek, S.H., Shin, B., Kim, K., 2014, "Hydraulic model test for corrugated artificial reef stability", *J. Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, 15(8), 5327-5332.
- [3] Cho, S., Choi, C.G., Choa, J., 2007, "Restoration of the seaweed forest and algal succession on a porous type (shaped half saw teeth) artificial reef", *J. Korean Fish. Soc.*, 40(4), 220-225.
- [4] Cho, Y., Kim, W., Lee, C., Kim, N., 2010, "Investigation of dice artificial reef stability installed (1981-2004) on Pohang coast of the East Sea", *J. Korean Soc. Mar. Engineering*, 34(1), 177-182.
- [5] Choi, C.G., 2008, "Marine communities around artificial reefs located in Ikata, Shikoku, Japan", *J. Korean Fish. Soc.*, 41(3), 208-214.
- [6] Choi, J., 2013, "A study on the economic effectiveness of the artificial fish reef project in the Tae-an marine ranching", *J. Fish. Bus. Adm.*, 44(3), 103-109.
- [7] Fisheries Infrastructure Development Center(FIDEC), <http://www.fidec.or.jp> (accessed 2024. 7. 30).
- [8] FIRA, 2023, "Artificial reefs installation statistics (Appendix: Artificial reefs information(2022))", Ministry of Oceans and Fisheries, Korea Fisheries Resources Agency, 1-178.
- [9] Ha, Y., Kim, Y., 2015, "An experimental study on settlement reduction of artificial reef using geosynthetics", *J. Korean Geosynthetics Soc.*, 14(3), 21-29.
- [10] Hodges, N., 2014, "Coding in Delphi", Nepeta Enterprises, Gilbertsville, PA., USA.
- [11] Hong, C., Kim, M., Woo, K., 2003, "An experimental study on recycled aggregate concrete for artificial fishing reefs", *J. Ocean Engineering and Technology*, 17(4), 16-22.
- [12] Hwang, D.J., Park, J.S., Lee, Y.W., 2004, "Estimation of fish school abundance by using an echo sounder in an artificial reef area", *J. Korean Fish. Soc.*, 37(3), 249-254.
- [13] Hwang, S., Kim, D., Sung, B., Jun, S., Bae, J., 2017, "The effect on enhancement of fisheries resources by the house-type artificial reef of Bukchon, Jeju Island", *J. Fish. Mar. Sci. Engineering*, 29(6), 1903-1912.
- [14] Jeon, Y., Park, J., Yoon, H., 2018, "Development of a program for analyzing the stability of artificial reefs -Application of a computer coding system-", *J. Korean Soc. Mar. Environ. & Safety*, 24(5), 537-544.
- [15] Jeong, C., Kim, H., 2007, "Numerical analysis of the flow around artificial reefs", *J. Korean Fish. Soc.*, 40(1), 31-38.
- [16] Jo, M., Kim, B., Suh, Y., 2001, "A study on suitability mapping for artificial reef facility using satellite remotely sensed imagery and GIS", *J. Korean Soc. Remote Sensing*, 17(1), 99-109.
- [17] Jung, S., Kim, D., Na, W., 2016, "Wake volume characteristics considering artificial reef canyon intervals constructed by flatly distributed artificial reef set", *J. Ocean Engineering and Tech.*, 30(3), 169-176.
- [18] Kang, M., Nakamura, T., Hamano A., 2011, "The application of GIS in analyzing acoustical and multi-dimensional data related to artificial reefs ground", *J. Korean Soc. Fish. Technol.*, 47(3), 222-233.
- [19] Kang, M., Fajaryanti, R., Jung, B., Yoon, E., Min, E., Lee, K., Oh, W., Park, G., Shin, Y., Choi, Y., Yi, B., Hwang, D., 2019, "Fishes distribution and their connection to artificial reefs off

- Bukchon, Jehu Island using geographic information system”, J. Korean Soc. Fish. Ocean Technol., 55(2), 121-128.
- [20] Kim, B., Hwang, D., Yoon, H., Seo, W., 2015, “A study on sustainability selection of artificial reef by GIS”, J. Korea Institute of Electronic Communication Sciences, 10(5), 629-636.
- [21] Kim, C., Oh, T., Suh, S., Kim, D., Kim, B., Choi, Y., 2009, “Review of stability calculation of an artificial reef in the breaking wave zone of coastal waters”, J. Korean Soc. Mar. Engineering, 33(6), 965-974.
- [22] Kim, D., 2006, “Current status and implications of artificial fish reef in Japan”, Monthly Ocean and Fisheries, Korea Maritime Institute, 267, 6-20.
- [23] Kim, D., Jung, S., Na, W., 2016, “Wake region estimation of artificial reefs using wake volume diagrams”, J. Fish. Mar. Sci. Education, 28(4), 1042-1056.
- [24] Kim, D., Kim, W., Son, Y., Yoon, J., Gong, Y., Kim, Y., Lee, J., 2008, “Settlement characteristics of three type of artificial reefs on sandy bottom in the eastern coast of Korea”, J. Korean Soc. Mar. Environ., 32(2), 359-364.
- [25] Kim, D., Lee, J., 2007, “Current status and implications of Korean artificial reef project”, Monthly Ocean and Fisheries, Korea Maritime Institute, 284, 23-45.
- [26] Kim, D., Lee, J., Suh, S., Kim, C., Cho, J., Cha, B., 2009, “Scouring and accumulation by tidal currents around cubic artificial reefs installed at Geogeo waterway”, J. Korean Soc. Mar. Engineering, 33(8), 1275-1280.
- [27] Kim, D., Ryu, J., Lee, J., 2010, “A study on the evaluation system of the stock enhancement program”, J. Fish. Bus. Adm., 41(1), 1-24.
- [28] Kim, D., Suh, S., Cho, J., Kim, C., Choi, I., Kim, B., 2010, “Settlement characteristics of square reefs installed on soft seafloor ground”, J. Korean Soc. Mar. Engineering, 34(1), 163-167.
- [29] Kim, D., Woo, J., Na, W., Yoon, H.S., 2014, “Structural response characteristics of a box-type artificial reef”, J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers, 26(3), 113-119.
- [30] Kim, D., Woo, J., Yoon, H.S., Na, W.B., 2014, “Flow and structural response characteristics of a box-type artificial reef”, J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers, 26(3), 113-119.
- [31] Kim, H., Kim, C., Seo, Y., Kim, G., 2005, “Subsidence characteristics of artificial reefs using sediment grain size and shear strength”, Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 41(1), 2005.
- [32] Kim, H.S., Lee, J.W., Kim, J.R., Yoon, H.S., 2009b, “Estimation of countermeasures and efficient use of volume of artificial reefs deployed in fishing grounds”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineering, 12(3), 181-187.
- [33] Kim, H.S., Lee, J.W., Won, S., Kim, J.R., Yoon, H.S., 2009a, “Estimation of efficient use of volume and facility volume distribution of artificial reefs deployed in the Busan sea region”, J. Korean Soc. Mar. Environ. Engineering, 12(4), 255-263.
- [34] Kim, S.C., Shin, H.O., 2001, “Research on the geographic characteristics of the sea bed and the distribution of artificial reefs in Jaran Bay”, Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 37(3), 214-222.
- [35] Kim, W., Lee, Y., 2013, “Design and implementation of artificial fish-reef combined with IT devices”, J. Korea Info. Electron Communication Tech., 6(3), 141-147.
- [36] Kim, Y.J., Choi, H., 2014, “Calculation of the coefficient of artificial reef according to the coefficient of volume”, J. Korea Institute Info. Communication Engineering, 18(9), 2307-2312.
- [37] Lee, D., 2010, “Fish length dependence of target strength for striped *beakperch*, bluefin *searobin* and *konoshiro gizzard shad* caught in the artificial reef ground of Yongho Man, Busan”, J. Korean Soc. Fish. Tech., 46(3), 239-247.
- [38] Lee, D., 2013a, “Monitoring of fish aggregations responding to artificial reefs using a split-beam echo sounder, side-scan sonar, and an underwater CCTV camera system at Suyeong Man, Busan, Korea”, Korean J. Fish. Aquat. Sci., 46(3), 266-272.
- [39] Lee, D., 2013b, “Acoustic tracking of fish movements in an artificial reef area using a split-beam echo sounder, side-scan and imaging sonars at Suyeong Man, Busan, Korea”, Korean J. Fish. Aquat. Sci., 46(3), 273-281.
- [40] Lee, H.J., Choi, C.G., 2019, “A study of algal succession and community structure on artificial reef at Yangyang-gun and Pohang-si, Korea”, J. Mar. Life Sci., 4(2), 81-85.
- [41] Lee, J., Kang, Y., 1994, “Variations of fish community and fish density on artificial reefs”, Bull. Korean Fish. Soc., 27(5), 535-548.
- [42] Lee, J., Kim, W., Son, Y., Park, K., Yoon, J., Lee, C., 2016, “Studies on temporal variabilities of community structure of benthic marine organisms on horn triangle artificial reefs along the Jangkil-ri coast of Pohang, South Korea”, Korean J. Environ. Ecol., 30(1), 104-109.
- [43] Lee, M., Kim, J., Kim, B., 2016, “A review-status of development and research of artificial reefs in the East Asian countries-”, J. Fish. Mar. Sci. Edu., 28(3), 630-644.
- [44] Lee, M.O., Otake, S., Kim, J.K., 2018, “Transition of artificial reefs (ARs) research and its prospects”, Ocean and Coastal Management, 154, 55-65.
- [45] Miura, M. *et al.*, 2010, “Habitat suitability index model for four different algae”, Report of Japanese Marine Organism Environment Institute, 13, 1-50.
- [46] Nakamura, M., 1991, “Fisheries civil engineering”, Kogyojijit-sushinsha, 1-561.
- [47] Oh, N.S., Choi, I.C., Kim, D.G., Jeong, S.T., 2011, “The simulation of upwelling flow using FLOW-3D”, J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers, 23(6), 451-457.
- [48] Park, H., Shin, J.K., Kim, J., Park, S., Kim, H., Lim, D.H., Park, Y.C., Cho, S.H., Hong, S.H., Lee, J., Ahn, B., 2003, “An effect on fisheries resources enhancement of hollow jumbo structure and a sesrach for artificial reefs by side scan sonar in the western sea of Korea”, Bull. Korean Soc. Fish. Tech., 39(3), 230-238.
- [49] Park, J., Seo, M., Kim, J., 2000, “Effect of artificial fish reefs in the coastal area of Jeonbuk Province”, J. Fish. Mar. Sci. Edu.,

- 12(1), 11-21.
- [50] Park, J., Seo, M., Kim, J., 2001, "A study on the research condition and efficiency of artificial reefs of Rokdo sea region of Chungnam Province", *J. Fish. Mar. Sci. Edu.*, 13(1), 87-98.
- [51] Park, S., Hong, C., Kim, S., Kim, K., 2007, "Experimental study on development of artificial fishing reefs using environment-friendly sulfur concrete", *J. Ocean Eng. Tech.*, 21(3), 58-64.
- [52] Pickering, H., 1996, "Artificial reefs of bulk waste materials: a scientific and legal review of the suitability of using the cement stabilised by-products of coal-fired power stations", *Mar. Pol.*, 30(6), 483-497.
- [53] Ryu, J., Lee, S., Hwang, J., 1998, "A study on the economic effects of artificial reefs – In case of Suwoo-do artificial reefs –", *J. Fish. Bus. Adm.*, 29(2), 177-197.
- [54] Sawaragi, T., 1995, "Coastal engineering-waves, beaches, wave-structure interactions", Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands.
- [55] Seo, S., Lee, Y.K., Lee, I., Kim, D., 2007, "Field investigation on the efficiency of the artificial steel reefs", *J. Korean Soc. Ocean Engineering and Tech.*, 21(5), 61-67.
- [56] Shim, J.H., Park, Y.C., 1986, "Primary productivity measurement using carbon-14 and nitrogenous nutrient dynamics in the southern sea of Korea", *J. Oceanol. Soc. Korea*, 21(1), 13-24.
- [57] Shin, H., Tae, J., Kang, K., 2005, "Acoustic telemetry measurement of the movement range and diurnal behavior of rockfish (*Sebastes schlegelii*)", 38(2), 129-136.
- [58] Shin, S., Lim, M., Jang, W., Lim, J., Yoon, J., Lee, S., 2009, "Processing of side scan sonar and SBP data for the artificial reef area", *Jigu-Mulli-wa-Mulli-Tamsa*, 12(2), 192-198.
- [59] Suh, S., Lee, Y.K., Kim, C., Kim, D., Park, S., 2010, "A study on the scour characteristics around artificial reefs", *J. Korean Soc. Mar. Engineering*, 34(4), 567-574.
- [60] Yamaguchi, *et al.*, "Quantification of the reef affinity based on the results of fish catch experiments", *Fisheries Engineering*, 43(2), 151-159.
- [61] Yoo, J., Hong, H., Hwang, J., Lee, M., Lee, Y., Lee, C., Hwang, S., 2014, "A study on the ecological indices for the assessment of the function and maturity of artificial reefs", *J. Korean Soc. Oceanography*, 19(1), 8-34.
- [62] Yun, D., Kim, Y., 2017a, "An experimental study of settlement behavior of artificial reef according to reinforcement characteristics", *J. Korean Geosynthetics Soc.*, 16(1), 53-61.
- [63] Yun, D., Kim, Y., 2017b, "Characteristics of settlement and scour of square-shaped hybrid reef according to placement types" *J. Korean Geosynthetics Soc.*, 16(2), 1-10.
- [64] Yun, D., Kim, Y., 2019a, "Scour characteristics of artificial reef through experiment and numerical analysis", *J. Korean Geosynthetics Soc.*, 18(3), 23-32.
- [65] Yun, D., Kim, Y., 2019b, "Behaviors of artificial reef reinforced with settlement reduction reinforcement", *J. Korean Geosynthetics Soc.*, 18(1), 1-9.

Received 7 August 2024

Revised 7 September 2024

Accepted 11 September 2024