

인공어초의 구조적 복잡성

Structural Complexity of Artificial Reefs

구조적 복잡성이 인공어초(artificial reef)의 기능에 어떤 영향을 미칠까 하는 의문을 가지고 있다. 수자원을 활용하는 생물에게 서식지 또는 서식지 복잡성이 왜 중요한지 그리고 이를 모방하는 인공어초의 구조적 복잡성이 왜 고려되어야 하는지 살펴보고자 한다. 논의를 위해 인공 물웅덩이와 인공어초, 서식지 복잡성, 인공어초의 구조적 복잡성 가설, 우리나라 인공어초, 연구 주제를 간략하게 소개한다.

1. 인공 물웅덩이와 인공어초

세렝게티(Serengeti), 아프리카 탄자니아와 케냐에 걸쳐 있는 경상도 크기(약 3만 제곱킬로미터)의 야생동물 서식지이다. 이곳에 서식하는 야생동물은 3월부터 5월까지 이어지는 우기에 번식하고 성장하며, 건기가 찾아오면 풀과 물을 찾아 이동한다. 우리에게 사자와 하이에나가 각축하는 장소로 익숙한 이곳도 전 지구적으로 진행되는 지구 온난화를 비켜 가지 못한다. 지구 온난화가 사바나 생태계에 내리는 비의 시기와 강도에 영향을 미치고, 이미 가혹한 건기를 더욱 잔인하게 만들고 있다.¹⁾

물이 점점 부족해지는 아프리카 사바나 야생동물 서식지, 이를 조금이라도 온전하게 보존하기 위해 인공 물웅덩이(artificial waterholes)가 설치되고 있다.¹⁻³⁾ 이 프로젝트는 물을 보충함으로써 연중 동물의 개체 밀도를 관리하고, 관광객에게 야생동물 관찰 기회를 제공하는 역할을 한다. 많은 동물이 적어도 하루에 한 번 물에 접근해야 하므로 해당 종들이 가능한 많은 지역에 접근할 수 있게 하는 체계적인 수자원 네트워크가 구축되고, 보호 구역 전체에 인공적인 물웅덩이가 설치되고 있다.

새로운 수자원을 제공하는 프로젝트의 청사진과 파급효과는 곳곳에서 찾아볼 수 있다. 일례로 음위바 야생동물 보호구역(Mwiba Wildlife Reserve)에 설치된 인공 물웅덩이는 보호 구역 내에 야생동물과 가축 간의 경쟁을 완화할 수 있으며, 야생동물이 밀렵꾼과 사람에게서 멀리 떨어지게 할 수 있다. 또한 루아하 국립공원(Ruaha National Park)에 설치된 인공 물웅덩이는 인간이 초래한 물 부족의 영향을 완화하여 야생동물 개체군을 보호하고 있다.

이런 성과에도 불구하고, 물웅덩이 효과를 연구하는 학자들은 생태계에 대한 광범위한 이해 없이 추진된 물웅덩이 프로젝트가 치명적인 역효과를 일으킬 수



나 원 배

부경대학교 해양공학과 교수

있다고 경고한다.¹⁾ 이는 일부 지역에 설치된 물웅덩이가 취약한 야생동물 개체군에 심각한 피해를 주며 서식지를 오히려 악화하는 결과를 초래했기 때문이다. 따라서 학자들은 인공 물웅덩이를 보존 도구로 사용하는 다양한 방법을 지속해서 검토하고 있으며, 아프리카 사바나에서 인공 물웅덩이가 생명에 미치는 역할을 자세히 이해하고자 한다.¹⁻³⁾

이처럼 야생동물이 처한 다양한 문제를 해결하고, 궁극적으로 종을 보전하려는 인간의 간섭은 인간이 초래한 기후변화, 그어 놓은 경계, 변경한 서식지 문제에 기인한다. 육상 서식지의 보전을 위한 관찰 및 간섭 행위는 해양 서식지보다 비교적 쉬운데, 이는 바다에서의 관찰 행위에 많은 제약이 있기 때문이다. 해양이 가지고 있는 특수한 환경 요인으로 인해 많은 학자는 아직도 인류가 해양의 5% 정도를 이해하고,⁴⁾ 해양저서 생태계의 1%만 이해하고 있다고 주장한다.⁵⁾

해양생물(marine life)은 인간이 그어 놓은 경계에 개의치 않고, 이를 넘나든다. 대다수 해양생물은 우리가 잘 알 수 없는 물 아래에 존재하며 잘 모르는 무엇인가에 따라 움직이고 변화한다. 해양생물 특히 수산자원(fishery resources)은 인간의 직접적인 개입의 결과뿐만 아니라 크고 작은 환경변화에 따라 극적으로 변화한다. 즉, 수산자원은 환경변화는 물론 인간 사회의 크고 작은 사회적 경제적 조건의 변화에도 크게 영향을 받는다.

이와 같은 인간의 간섭은 인간이 수렵, 채집, 고기잡이라는 기회주의 활동에서 벗어난 후 시작된 가파른 인구증가와 거대한 도시출현과 함께 본격화된다. 산업혁명 이후 기선(steamboat)과 어구(fishing gear)의 발달로 인해 고기잡이는 대규모 국제산업으로 성장하였고, 세계 인구가 증가하면서 고기잡이에 대한 부담도 점차 커지고 있다.⁶⁾ 이와 같은 산업화와 도시화 등 인간 사회의 크고 작은 사회적 경제적 변화는 연안과 해양환경에 영향을 미쳤고, 생물학적으로 지속 가능한 수준의 어류 축적량은 감소하는 추세를 보인다.⁷⁾

대양과 연안에서의 수산자원 감소는 기르는 어업의 역할을 강화했고, 이는 이미 잡는 어업의 생산량을 넘어섰다. 따라서 인공어초는 연안해역의 수산자원을 좀 더 안정적으로 확보해 보자는 의도에서 꾸준히 연안에 설치되고 있다. 특히, 수산물이 중요한 단백질 공급원인 아시아 국가에서 인공어초의 기능은 수산생물의 증식과 안정적인 확보를 촉진하는 것으로 한정될 수 있다. 여기서 수산생물은 어류, 조류, 패류 등을 포함하여, 대상 생물의 종류에

따라 인공어초의 기하학적인 형태, 구조, 크기, 설치장소도 달라진다.

앞서 서술한 인공 물웅덩이보다 더 격렬한 논쟁이 인공어초 설치와 관련하여 존재한다. 이는 인공어초의 궁극적인 기능과 관련되며, 잘못 설치된 인공어초의 부정적인 영향에 기인한다. 또한 이는 해저에 설치된 인공어초의 선순환적인 기능에 대한 불확실성과 인공어초가 해양 서식지와 해양환경에 미치는 영향을 알아내고자 하는 장기적인 모니터링의 어려움과 관련된다. 즉, 인간의 해양저서 서식지에 대해 아는 정도가 아직도 매우 미흡하다는 것이다. 이는 해양생물의 서식지 복잡성을 이해하고, 인간의 간섭으로 이를 개선하고자 하는 행위의 어려움을 의미한다.

2. 서식지 복잡성

서식지 복잡성(habitat complexity)은 서식지의 특성을 규정하는 물리적 구조(배열)의 이질성(heterogeneity)으로 정의되며, 동물의 생태, 생리, 행동, 뇌의 구조와 기능에 중요한 역할을 한다. 서식지 이질성 가설(habitat heterogeneity hypothesis)은 구조적으로 복잡한 서식지가 환경자원을 활용하는 많은 틈새와 다양한 방법을 제공하고, 종 다양성(species diversity)을 증가시킬 수 있다고 가정한다.

서식지 이질성 가설을 검증하기 위해 생태학자들은 공간의 이질성이 종 다양성에 미치는 영향을 조사하고, 서식지 복잡성에 대한 다양한 척도를 고안하였으며, 그 척도를 종 다양성과 연관시키려고 시도해 왔다. 이러한 척도는 수직면뿐만 아니라 수평 구성 요소에서도 서식지의 복잡성을 정량화한다. 결과적으로 나무, 곤충, 설치류, 도마뱀, 새를 포함한 많은 육상 생물 군계(biome)와 분류군(taxa)에서 중요한 상관관계가 발견되었다.

해양 서식지 또는 수생 서식지의 기질 복잡성을 정량화하기 위한 연구도 꾸준히 시도되었고(예: 그림 1), 서식지 복잡성(또는 기질 다양성)과 연체동물의 종 풍부도(또는 종 다양성) 간에 양의 상관관계가 발견되었다.⁸⁻¹⁴⁾ 어류(fish)에 대한 일부 정량적인 연구는 서식지 복잡성이 모집과 생존, 서식지 범위와 영역의 크기, 포식 및 포식자 회피 전략, 형태학적 특성에 영향을 미친다는 결과를 나타내었다. 여기서 주목해야 할 점은 수생 환경의 3차원 구조와 입자 섭식(particle feeding) 특성은 서식지 복잡성의 중요성을 더욱 부각한다는 것이다.

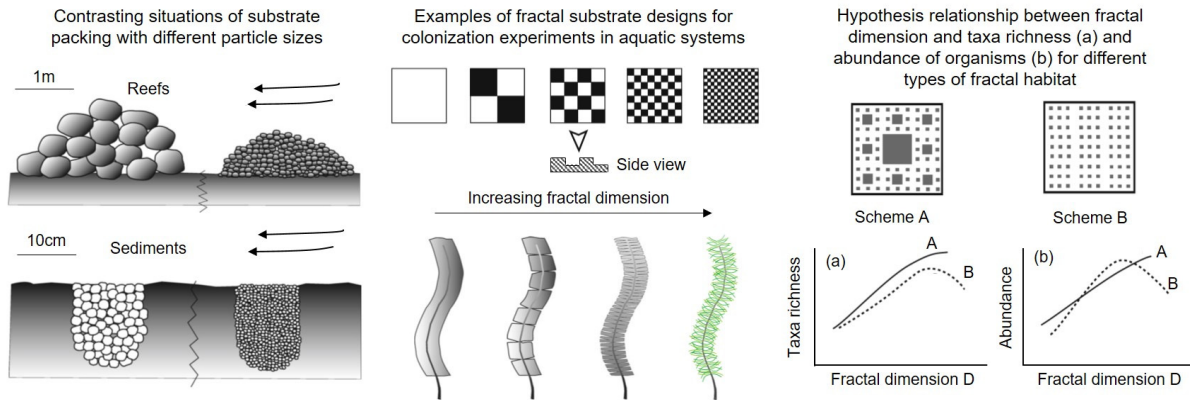


그림 1 해양 서식지 또는 수생 서식지의 기질 복잡성을 정량화 연구에서 제안된 개념도 예시. 서식지 복잡성(또는 기질 다양성)과 종(또는 군) 풍부도(또는 다양성) 간에 양의 상관관계가 발견되었다.⁸⁻¹⁴⁾

이를 살펴보면, 첫째, 물은 공기보다 점성과 밀도가 높은 매체로서 유기체를 포함한 물체에 큰 항력을 가한다. 따라서 수생 생물이 피난처를 찾고, 흐름(water flow)에 따른 형태와 행동 적응을 얻는 것은 중요하다. 이런 관점에서 유기체가 항력이 높은 환경에서 효과적으로 자신을 보호하기 위해서는 기질 표면 특성을 포함한 서식지의 물리적 구조가 중요하다. 이러한 서식지는 높은 항력 매체에서도 우수한 이동성을 가진 포식자로부터의 보호 기능도 포함한다. 이와 같은 수생 생물의 노출은 위험하고 에너지가 많이 소모되는 상태지만 물질 수송(즉, 식량 자원 및 기체 교환)이라는 관점에서는 이로온 환경이다. 따라서 종의 다양성과 공존을 향상하는데 수생 생태계의 3차원 구조는 매우 중요하다(그림 2).¹⁵⁾ 수생 생태계는 많은 유기체에 보호된 서식지 공간을 제공하는 것으로 알려져 있으며, 호수와 강의 거대 식물, 얕은 연안 해역의 해초와 거대 조류(macro algae), 조간대(intertidal zone) 서식지의 홍합, 열대와 아열대 해역의 조초산호 군체(hermatypic coral colony), 차가운 온대 해역의 다시마 숲을 포함하는 생물 다양성을 증가하는데 도움이 된다고 알려져 있다.¹⁴⁾

둘째, 입자 섭식자(현탁물 섭식자, 퇴적물 섭식자, 미세 조류 초식자 등)는 수생 환경에서 우세하지만, 지상에서는 입자 섭식이 거의 발생하지 않는다. 제한된 범위의 식량 자원을 가진 많은 육상 소비자에게 서식지 선택은 서식지 자체의 물리적 특성보다는 먹이의 발생 여부에 더욱 큰 영향을 받는다. 반면에 수생 환경에서 기질의 물리적 구조는 종종 유기체의 정착, 이동성, 입자성 먹이의 가용성에 중요하다. 대표적인 예로 고착 현탁물 섭식자(sessile suspension feeder)를 들 수 있으며, 이는 모든 유형의 해양 서식지에 일반적으로 존재하고, 종종 다른 유기체의 중요한 2차 서식지를 형성한다. 따라서 식민지화, 성장, 먹이 획득, 포식자 회피, 번식과 관련하여 저서생물에 직접적인 영향을 미치는 것은 표면 구조(surface structures), 즉 물과 기질 사이의 경계면이다.

3. 인공어초의 구조적 복잡성 가설

해양저서 생태계의 자연 초(natural reef)를 흉내 내는 인

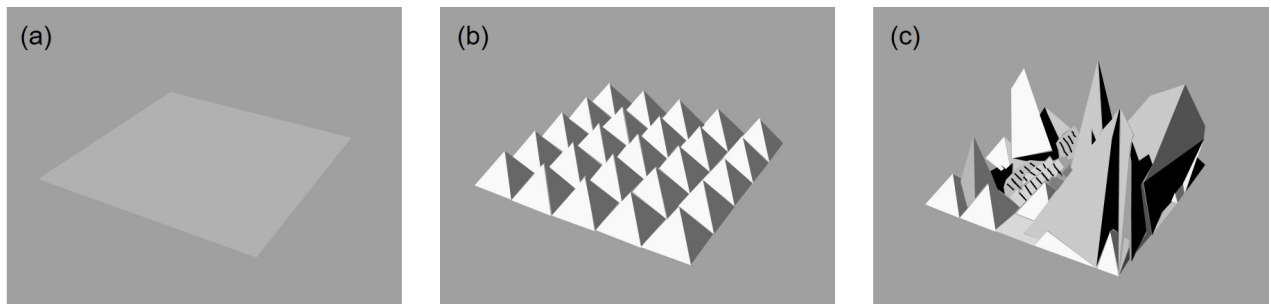


그림 2 수생 생태계의 3차원 구조: 왼쪽(a)에서 오른쪽(c)으로 갈수록 수생 생태계의 구조적 복잡성이 커진다.¹⁵⁾

공어초의 설계와 설치 기준은 대상 저서생물의 생활사(life cycle)와 밀접한 관련이 있다. 그러나 우리는 저서 생태계를 잘 알지 못하며, 이들 생활사는 인간의 직접적인 개입(가입 등)뿐 아니라 크고 작은 환경 변화에 따라 극적으로 변화한다. 이런 관점에서 인공어초는 집적된 과학적 고찰을 바탕으로 설계되고 설치되어야 한다. 즉, 서식지 복잡성 또는 이를 구성하는 자연 초의 구조적 복잡성(structural complexity)은 인공어초에 적용되어야 하며, 따라서 이를 적용하고, 규명하는 체계적인 연구가 수행되어야 한다.

이와 같은 연구의 근간이 되는 두 가지 가설은 ①서식지 이질성 가설(habitat heterogeneity hypothesis)과 ②인공어초의 유인-생산 가설(attraction vs production hypothesis)이라고 필자는 생각한다.

첫 번째 가설은 앞에서 서술한 바와 같이 구조적으로 복잡한 서식지가 환경자원을 활용하는 많은 틈새와 다양한 방법을 제공하고, 종 다양성을 증가시킬 수 있다고 가정한다.¹⁶⁾ 이와 같은 가설을 검증하기 위해 생태학자들은 공간의 이질성이 종 다양성에 미치는 영향을 조사하고, 서식지 복잡성에 대한 다양한 척도를 고안하여 이를 종 다양성과 연관시키려고 시도해 왔다. 결과적으로 육상 및 수생 생물 군계와 분류군에서 중요한 상관관계가 발견되었다.

두 번째 가설은 인공어초가 해양생물을 일시적으로 유인하기도 하고, 해양생물의 증식 및 다양성에 장기적으로 영향을 미쳐서 해양 생산을 증대시키기도 한다고 가정한다(그림 3).¹⁷⁾ 이와 같은 가설을 검증하기 위해 보호초(protected reef), 해양보호구역, 집어 금지 구역 등으로 어로행위(fishing)를 제어하고, 구체적인 증거를 수집해 왔다. 현재는 집적된 과학적 고찰에 근거하여 인공어초가 해양생물의 유인과 생산에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 간주하고 있다.

“인공어초의 구조적 복잡성”은 위의 두 가지 가설과 밀접한 관계가 있다. 즉, 이 두 가지 가설을 연결하면 “복잡한 구조를 갖는 인공어초가 환경자원을 활용하는 많은 틈새와 다양한 방법을 제공하고, 종 다양성을 증가시킬 수 있다”라고 가정할 수 있다. 이는 “유인-생산 가설”로 인공어초를 “서식지”로 가정하고, “서식지 이질성 가설”로 인공어초의 “구조적 복잡성의 긍정적인 효과”를 가정한다. 필자는 이를 “인공어초의 구조적 복잡성 가설(AR’s structural complexity hypothesis)”로 제안한다.

제안된 “인공어초의 구조적 복잡성 가설”을 검증하기 위한 첫 번째 방법은 해양환경에 다양한 구조적 복잡성을 갖는 인공어초를 설치하고, 장기간에 걸쳐 인공어초를 서식지, 피난처, 먹이장 등으로 활용하는 해양생물의 생활사를 관찰하는 것이다. 하지만 이 방법은 설계, 설치, 관찰이라는 고비용의 연구 활동을 전제하므로 이를 실현하기 쉽지 않다. 물론 실험실 규모의 수조(water tank)에 다양한 인공어초 모델을 설치하고, 특정 생활사 단계의 어류를 투입하여 이들 어류의 행동을 관찰함으로써 적정 인공어초를 추출하는 연구가 가능하지만, 이러한 방법으로는 추출 자료의 신뢰성 확보가 어려울 것이다. 두 번째 방법은 기존에 설치된 인공어초를 지속해서 관찰하는 방법이다. 이 방법 또한 특정 해역에 설치된 인공어초 시설의 구조적 복잡성이 제한적이고, 고비용의 연구 활동이라는 단점이 있다.

따라서 인공어초의 기능을 고려하고, 이를 대표할 수 있는 “물리적 인자”를 설정하여 인공어초의 구조적 복잡성과 대표 인자와의 상관성을 도출하는 연구가 하나의 대안이라고 필자는 생각한다. 이를 위해 물리적 인자로는 인공어초의 흐름 특성을 대표하고, 해양생물의 서식처, 피난처, 먹이장 등으로 활용되는 후류역(wake region)을 고려할 수

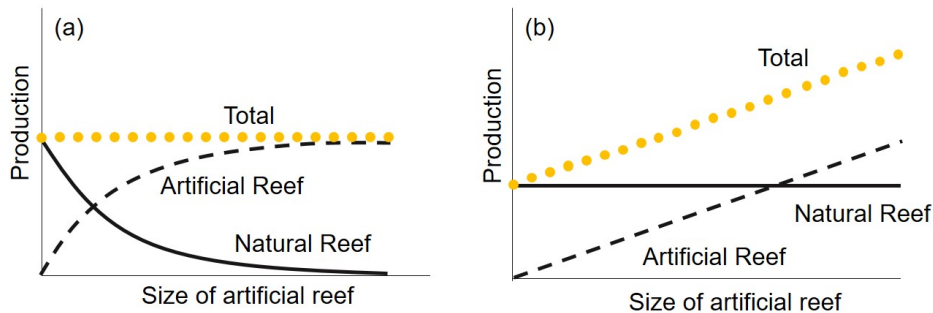


그림 3 인공어초의 유인-생산 가설: (a) 유인가설은 인공어초가 설치되면 자연초에 있는 해양생물이 인공어초로 단지 유인될 뿐이고 총생산량은 같다고 가정한다, (b) 생산가설은 인공어초가 설치가 증가하면 자연초를 포함한 전체 어초의 규모(크기)가 증가하고, 이로 인해 총생산량이 증대된다고 가정한다.

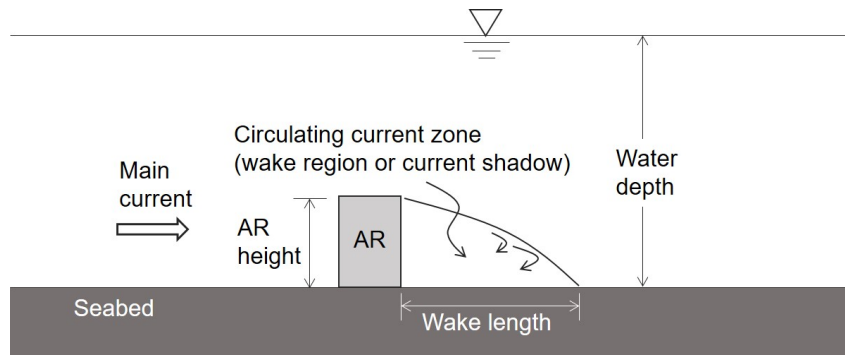


그림 4 인공어초 후면부에 생성되는 후류역 개념도.

있다(그림 4). 즉, “인공어초의 구조적 복잡성 가설”을 검증하기 위한 “물리적 현상”으로 인공어초 주변의 “흐름 특성”을 설정하고, 이를 대표하는 “후류역 특성과 인공어초의 구조적 복잡성의 상관성”을 검증하는 대안 연구가 제안되었다. 이는 인공어초가 활용할 수 있는 빛에너지, 생성할 수 있는 국부용승(local upwelling) 영양염, 제공할 수 있는 흐름(예: 후류역) 특성을 아우르는 연구로 확장될 수 있다.¹⁸⁾

여기서 후류역은 인공어초 후면부 또는 내부에 발생하는 소용돌이 형태의 역방향 흐름(후류)이 차지하는 공간을 말한다. 이 역방향 흐름은 물속에 고정된 물체에 흐름이 작용할 때 박리점 이후 유체입자가 떨어져 나가면 생기는 역압력구배(adverse pressure gradient) 때문에 발생한다. 유동박리는 압력이 점점 높아져서 발생하므로 이때 발생하는 항력(drag)을 압력항력(pressure drag) 또는 형상항력(form drag)이라 한다. 따라서 마찰항력(frictional drag)보다 압력항력이 지배적인 뭉툭한 인공어초가 비교적 큰 후류역을 생성하지만, 후류역 체적이 단지 압력항력의 크기와 유의한 양의 상관관계를 나타내는 것은 아니다. 이는 인공어초가 매우 다양한 구조적 복잡성을 가지고 있기 때문이다.¹⁹⁾

4. 우리나라 인공어초

우리나라 인공어초 설치 사업은 1970년대 이후 고갈되는 수산자원의 증식을 위해 본격적으로 시작되었다. 이후 우리나라 인공어초 설치 사업은 주변 국가(일본, 중국, 대만, 태국, 필리핀 등)의 인공어초 설치 사업과 비슷한 양상을 가진다. 학술적인 관점에서 인공어초 연구 현황을 살펴보면 일본 학자들이 국내 학회를 중심으로 관련 연구 결과

를 발표한다면, 한국과 중국 등의 학자들은 국제학술지에 꾸준히 연구 결과를 발표하고 있다.⁶⁾

인공어초에 관한 문헌을 조사해 보면 저자들의 국가에 따라서 논문의 주제가 다소 다르다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 유럽, 북미, 호주 등에서는 인공어초가 가지는 생태학적 기능의 과학적 근거를 밝히는데 주안점을 두고 있지만, 한국, 중국 등 아시아 지역에서는 인공어초의 해석, 설계, 그리고 설치에 필요한 공학적인 문제를 해결하는데 집중하고 있다. 이런 관점에서 우리나라를 포함한 아시아 국가들의 학자들은 인공어초의 긍정적인 기능을 바탕으로 이 ‘긍정적인’ 기능을 어떻게 하면 극대화할지에 초점을 두고 있음을 알 수 있다.

우리나라 인공어초는 목적과 운용 단계에 따라 일반어초, 시험어초, 연구어초로 분류된다. 일반어초는 시험어초 또는 연구어초 중 어초의 시설 효과가 중앙어초관리위원회를 통해 입증되어 사업 대상 어초로 선정된 어초를 말한다. 시험어초는 특정인이 어초를 개발하여 특허권 또는 실용신안권을 확보한 후 중앙어초관리위원회에서 시험어초로 선정한 어초를 말한다. 연구어초는 시·도지사 또는 한국수산자원관리공단 이사장이 새로운 어초 모형 개발과 자원 조성 사업 추진을 위하여 시험 및 연구가 필요하다고 인정한 어초를 말한다. 이는 인공어초 설치사업, 바다목장, 바다숲 등 정부의 수산자원 조성사업 추진과정에서 개발하는 어초를 포함한다.²⁰⁾

현재 우리나라에는 총 89종의 일반어초가 있으며(등록 취소 2종을 제외하면 87종), 이들 중 41종은 철근콘크리트, 3종은 콘크리트, 20종은 강재, 25종은 복합소재로 제작된다. 또한 인공어초는 기능에 따라 어류용, 패·조류용, 어패류용, 해중림용(그림 5), 기타로 구분되며, 구조 형태별로는 면구조형(면 구조가 우세하여 표면적인 넓은 형태), 테구조형(테 구조가 우세하여 골격구조를 가진 형

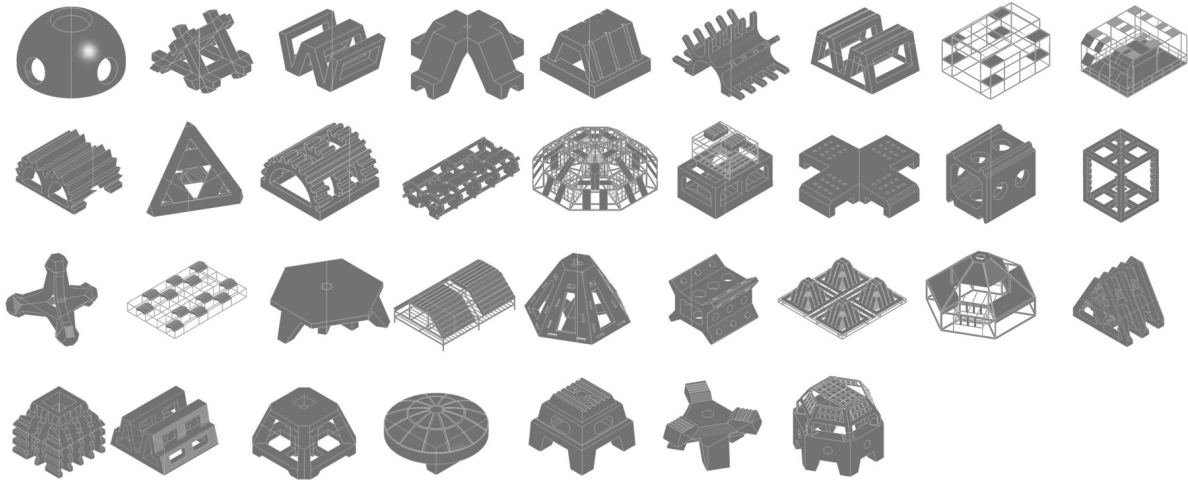


그림 5 우리나라 일반어초 중 해중림초 모형. 여기서 해중림(marine forest)은 산란 서식장 조성 및 난치어 보호와 어패류의 먹이 공급 등을 위해 일정 수심 지역에 인위적으로 조성된 모자반과 대형 해조류 군락을 말한다.

태)으로 분류된다. 따라서 재료로는 철근콘크리트가 우세하며, 구조형식으로는 면과 테가 활용되고 있음을 알 수 있다.

여기서 주목할 것은 새롭게 개발되는 인공어초는 기존 인공어초보다 구조적 복잡성이 증대되고 대형화되고 있다는 것이다. 따라서 인공어초 개별 단가도 점점 증가하고 있다. 인공어초 구조형식은 상자(box), 터널(tunnel), 아치(arch), 돔(dome), 다리(leg), 복잡(complex)으로 좀 더 세밀하게 분류할 수 있는데, 일련의 연구는 이와 같은 분류법을 활용하여 인공어초의 항력계수를 예측하는 방법을 제안하였다.²¹⁾ 일반적으로 대형이고 복잡한 인공어초는 인공어초를 시설할 때 어초 간의 간격이 넓고, 중소형 어초는 어초 간의 설치 간격이 좁다. 따라서 이들 인공어초를 설치할 때는 어초의 배열과 간격을 결정하는 배치모델(placement model)이 중요하다.²²⁾ 예를 들면 그림 6은 수

치 시뮬레이션으로 획득한 네 가지 해중림초의 배치모델에 따른 후류체적을 나타낸다.¹⁷⁾ 배치모델에 따라서 후류체적이 변동하는 것을 알 수 있다.

5. 연구 주제

앞서 서술한 인공어초의 구조적 복잡성과 후류역의 상관관계를 밝히기 위해서, 즉 인공어초의 구조적 복잡성 가설을 검증하기 위해서는 어떤 연구가 필요한 것일까? 연구 범위를 상관성 규명을 위한 정량화 기법의 제안, 개발, 적용 및 검증으로 한정하면, 연구 주제는 다음과 같이 요약될 수 있다.

첫째, 기존의 구조적 복잡성을 나타내는 척도를 분석하고, 인공어초 현장에 적용할 수 있는 이상적인 복잡성 지

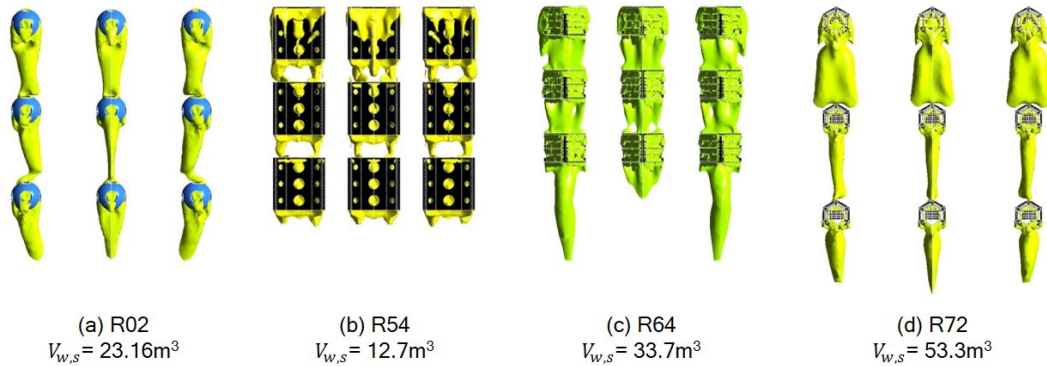


그림 6 해중림초의 배치모델에 따른 후류체적 산정 예시.¹⁷⁾

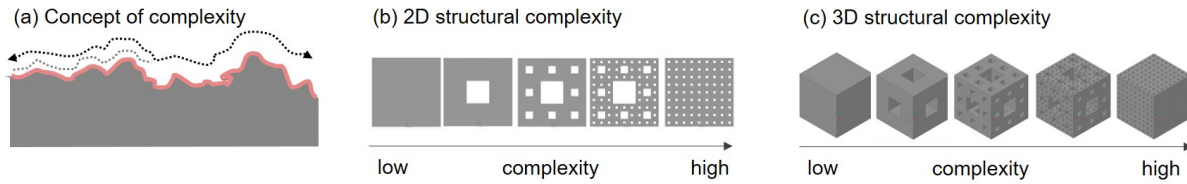


그림 7 해양생태계의 대표적 구조적 복잡성 추출에 기반을 둔 2D, 3D 구조적 복잡성 모델 구축 개념도.

수를 결정해야 한다. 이를 위해 해저 서식지의 대표적 기하학적 형식의 추출이 중요한데, 이는 일반어초의 주요 구조형식인 면과 테에 적용할 수 있어야 한다. 또한, 인공어초의 조도(roughness), 센티미터 크기의 구조적 복잡성, 쉽게 탈부착이 가능한 타일(tile) 구조형식을 고려하는 것도 필요하다. 여기서 구조적 복잡성 척도는 현장에서 쉽게 적용할 수 있어야 한다.

둘째, 선정된 복잡성 지수와 인공어초의 후류역과의 상관성을 밝혀야 한다. 2차원 및 3차원 구조의 복잡성(그림 7)에 대한 다양한 실험이 수행되어야 하며, 이는 수리모형 실험과 수치 시뮬레이션을 포함한다. 예를 들면, 대표적인 흐름 분석 도구인 입자 영상 유속계(particle image velocimetry)는 전산유체역학 결과를 상호 검증하는데 활용될 수 있다. 여기서 수치 기법에 따른 후류역의 민감도 해석이 수행되어야 한다.

셋째, 더욱 완전한 가설 검증을 위해서 우리나라 일반어초의 구조적 복잡성 척도를 파악하고, 이를 설치된 인공어초의 효율성 자료와 비교·분석해야 한다. 물론 이 단계는 현장 관측된 인공어초의 효율성 자료가 제한적이라는 한계를 가지고 있다. 따라서 더욱 온전한 연구 성과를 창출하기 위해서는 보다 체계적인 연구계획과 학제 간의 협력이 필요하다. 이 협업의 주체는 해양생물학자(또는 생태학자), 연안 수산자원관리 주체, 컴퓨터 시뮬레이션 및 수리 실험 전문가, 인공어초 개발자 등을 포함한다.

6. 맺음말

해양 서식지의 표면 구조(surface structures), 즉 물과 기질 사이의 경계면은 저서생물의 식민지화, 성장, 먹이 획득, 포식자 회피, 번식에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 해양 서식지 또는 수생 서식지의 기질 복잡성을 정량화하기 위한 연구가 시도되었고, 서식지 복잡성(또는 기질 다양성)과 연체동물의 종 풍부도(또는 종 다양성) 간에 양의

상관관계가 발견되었다. 또한, 어류에 대한 일부 정량적인 연구는 서식지 복잡성이 모집과 생존, 서식지 범위와 영역의 크기, 포식 및 포식자 회피 전략, 그리고 형태학적 특성에 영향을 미친다는 결과를 나타낸다. 인공어초는 자연초의 환경적 기능을 흉내 내도록 설치되지만, 인공어초의 구조적 복잡성을 체계적으로 정량화하고 이를 인공어초 설계에 적용하는 연구가 부족한 실정이다. 인공어초가 수생 생태계에서 서식지 공간을 제공하고, 서식지 표면 구조가 저서생물에 직접적인 영향을 미친다면, 주변 흐름과 인공어초의 구조적(표면 또는 3차원) 특성 간의 상관성으로 인공어초의 구조적 복잡성 가설을 검증하는 것은 매우 의미 있는 연구라고 생각한다. 이를 위해서는 보다 체계적인 연구계획과 학제 간의 협력이 필요하며, 전산 해석의 역할 또한 기대된다.

참고문헌

- BBC, 2021. Waterhole Africa's Animal Oasis, BBC. <https://www.bbc.co.uk/programmes/articles/4TZJh9RyxTGJPF3DqH4NrFz/should-we-have-built-a-waterhole>. (accessed 9 August 9 2021).
- Sutherland, K., Ndlovu, M., Pérez-Rodríguez, A., 2018. Use of artificial waterholes by animals in the Southern region of the Kruger National Park, South Africa. *African Journal of Wildlife Research* 48(2), 023003. <https://doi.org/10.3957/056.048.023003>.
- Ndlovu, M., Pérez-Rodríguez, A., Devereux, E., Thomas, M., Colina, A., Molaba, L., 2018. Water for African elephants (*Loxodonta africana*): faecal microbial loads affect use of artificial waterholes. *Biology Letters* 14, 20180360. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2018.0360>.
- Snelgrove, P.V.R., 2010. Discoveries of the census of marine life: making ocean life count. Cambridge University Press,

- Cambridge, UK, pp. 1-45.
5. Snelgrove, P.V.R., 1999. Getting to the bottom of marine biodiversity: sedimentary habitats. *BioScience*, 49 (2), 129-138. <https://doi.org/10.2307/1313538>.
 6. Na, W.B., 2019. Artificial reefs and their issues and scientific basis. *Science of Fisheries and Oceanography* 28 (2), 77-82. <https://doi.org/10.22714/SFO.2019.28.2.1>.
 7. Food and Aquaculture Organization, 2016. The state of world fisheries and aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all. Rome, FAO, United Nation.
 8. McCormick, M.I., 1994. Comparison of field methods for measuring surface topography and their associations with a tropical reef fish assemblage. *Marine Ecology Progress Series*, 112:87-96. <https://www.jstor.org/stable/24847640>.
 9. Mandelbrot, B.B., 1982. The fractal geometry of nature. W.H. Freeman and Co., New York.
 10. Mark, D.M., 1984. Fractal dimension of a coral reef at ecological scales: a discussion. *Marine Ecology Progress Series*, 14:293-294.
 11. Martin-Garin, B., Lathuilière, B., Verrecchia, E.P., Geister, J., 2007. Use of fractal dimensions to quantify coral shape. *Coral Reefs*, 26 (3), 541-550. <https://doi.org/10.1007/s00338-007-0256-4>.
 12. Wilson, M.F., O'Connell, B., Brown, C., Guinan, J.C., Grehan, A.J., 2007. Multiscale terrain analysis of multi-beam bathymetry data for habitat mapping on the continental slope. *Marine Geodesy*, 30 (1-2), 3-35. <https://doi.org/10.1080/01490410701295962>.
 13. Reichert, J., Backers, A.R., Schubert, P., Wilke, T., 2017. The power of 3D fractal dimensions for comparative shape and structural complexity analyses of irregularly shaped organisms. *Methods in Ecology and Evolution*, 32. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12829>.
 14. Tokeshi, M., Arakak, S., 2011. Habitat complexity in aquatic systems: fractals and beyond. *Hydrobiologia*, 685, 27-47. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0832-z>.
 15. Young, G.C., 2017. Three-dimensional modelling of coral reefs for structural complexity analysis. Doctoral Thesis, University of Oxford.
 16. Hamm, M., Drossel, B., 2017. Habitat heterogeneity hypothesis and edge effects in model metacommunities. *Journal of Theoretical Biology* 426, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2017.05.022>.
 17. Kim, D., Jung, S., Kim, J., Na, W.B., 2019. Efficiency and unit propagation indices to characterize wake volumes of marine forest artificial reefs established by flatly distributed placement models. *Ocean Engineering* 175, 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.020>.
 18. Carral, L., Lamas-Galdo, M.I., Barros, J.J.C., López, I., Caballo, R., 2021. Methodology for the definition of an artificial reef module: An ecosystem ecology perspective. *Journal of Environmental Management*, under review.
 19. Jung, S., 2021. Corelation analysis between structural complexity of artificial reef and its wake region characteristics using computational fluid dynamics. Doctoral Thesis, Pukyong National University.
 20. Korean Fisheries Resource Agency, 2021. What is an artificial reef project? https://www.fira.or.kr/english/english_tap_010401.jsp. (accessed 9 August 2021).
 21. Woo, J., Kim, D., Yoon, H.S., Na, W.B., 2014. Characterizing Korean general artificial reefs by drag coefficients. *Ocean Engineering* 82, 105-114. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.02.025>.
 22. Yoon, H.S., Kim, D., Na, W.B., 2016. Estimation of effective usable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management. *Ocean and Coastal Management* 120, 135-147. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.12.007>. 