

사각형 어초로 구성된 인공어초 군의 후류 및 용승 영역 특성 평가

김민주 · 정소미* · 나원배†
국립부경대학교(학생 · *연구원 · †교수)

Evaluation of Wake and Upwelling Regions of Artificial Reef Sets Composed of Cube-type Reefs

Minju KIM · Somi JUNG* · Won-Bae NA†
Pukyong National University(student · *researcher · †professor)

Abstract

Artificial reefs (ARs) are pivotal underwater structures designed to protect marine ecosystems and enhance fishery resources; however, quantifying their functional benefits, such as wake and upwelling effects, remains challenging due to the complexity of hierarchical hydrodynamic interactions. This study evaluates the hydrodynamic performance of six different AR set configurations—categorized into three idealized models (Hexa, Rect, and Pyra) and three practical models reflecting field placement (Tri, Tetra, and Penta)—using an element-based finite volume method with ANSYS-CFX. Each set comprised 100 cube-type AR units to satisfy the South Korean regulation requiring a minimum facility volume of 800 m³. The numerical results demonstrated significant variations in wake area (WA) and upwelling area (UA) across the configurations, revealing that WA was predominantly developed near the seabed due to structural resistance, while UA reached its peak near the top of the structures before diffusing upward. Notably, the practical models (Tri, Tetra, and Penta) exhibited superior performance compared to idealized models, as their higher geometric complexity effectively induced flow separation and vertical deflection, resulting in more extensive WA and UA despite having relatively lower heights. From an ecological perspective, the extensive WA in practical models provides optimal habitats for Type A (demersal) fish, while the robust upwelling flows support Type B (reef-associated) and Type C (migratory) species by enhancing nutrient transport to the upper water column. These findings suggest that radial, scattered placement strategies are more effective for multi-species resource enhancement than simple dense stacking, providing essential quantitative data for establishing scientific guidelines for the strategic placement of artificial reefs.

Key words : Artificial reef, Wake region, Upwelling region, Hydrodynamic performance, Optimal habitats

I. 서론

인공어초(artificial reefs)는 수산 자원의 보존 및
증강, 서식처 복원, 해안선 보호, 레저 활성화 등

을 목적으로 특정 해역에 인위적으로 설치하는
수중 구조물이다(Kim et al., 2020). 일반적으로
인공어초는 개별 단위(module)에서 시작하여 어
초 군(set), 어초 집단(group), 어초 단지(complex)

† Corresponding author: 051-629-6588, wna@pknu.ac.kr

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의하여 연구되었음.

로 확장되는 위계적 구조를 형성한다(Yoon et al., 2016). 그러나 이러한 공간적 위계에 따른 목표 달성 여부를 판정하고 경제적 편익을 정량적으로 평가하는 것은 분석의 복잡성으로 인해 매우 까다로운 과제이다(Na, 2023). 특히 인공어초 사업의 목적이 다변화되거나 모호하게 설정될 경우, 성과 측정이 가지는 한계와 불확실성은 더욱 가중된다.

이러한 한계는 주로 대상 생물 자원과 인공어초 간의 생태적 상호작용에 대한 이해 부족에서 기인한다(Bortone, 1998). 이에 따라 인공어초가 단순히 어류를 모으는 것인지(attraction) 혹은 실질적인 생물량을 증가시키는 것인지(production)에 대한 ‘유인-생산 가설’ 논쟁이 촉발되었다. 많은 연구자는 이 논쟁의 실체를 규명하고자 노력하는 한편, 불확실성에 대응하기 위한 관리적 대안으로 금어기 설정, 인공어초 보호 구역 또는 해양 보호 구역(MPA) 지정 등을 제시해 왔다(Claudet and Pelletier, 2004; Pitcher and Seaman, 2000).

유인-생산 논쟁에 대한 결정적인 결론은 아직 미지수지만, 대상 어종의 생활사, 크기, 성별 및 체반 생태적 요인에 따라 생산 증대나 유인 효과가 독립적으로 발생하거나 두 기작이 동시에 작용할 수 있음을 지지하는 과학적 증거들이 지속적으로 보고되고 있다(Bohnsack et al., 1994; Bombace et al., 1994; Charbonnel et al., 2002; Grossman et al., 1997; Pickering and Whitmarsh, 1997).

유인 또는 생산 기작의 발현 여부와 무관하게, 인공어초의 핵심적인 물리적 특성 중 하나는 주변 유동과의 상호작용으로 형성되는 후류 영역(wake region)이다. 후류 영역은 영양염류 및 유기현탁물의 침전과 집적이 용이한 환경을 조성함으로써, 어류를 비롯한 해양 생물의 위집 가능성을 직·간접적으로 증대시킨다(Sawaragi, 1995; Takeuchi, 1991; Miller et al., 2002; Falcão et al., 2007; Prairie et al., 2012).

또한, 주류 방향에 배치된 대형 인공어초 단위나 군집은 국부적으로 유의미한 규모의 용승류

(upwelling flows)를 유도하며, 이는 저층의 영양염류를 유광대(해수면 근처)로 수송하는 역할을 한다(Aure et al., 2007). 이러한 수직 혼합과 물질 수송은 일차 생산력을 높여 해양 생물의 위집을 촉진하는 주요 기작으로 작용한다(Otake et al., 1991; Yanagi and Nakajima, 1991; Kim and Shimasaki, 2013). 결과적으로 후류 및 용승 영역의 수리학적 특성은 인공어초의 공학적 설계와 최적 어장 조성 범위(fishing ground area) 산정을 위한 핵심 지표로 간주된다.

비록 이러한 지표 정립은 중요한 학술적 토대를 마련하였으나, 인공어초 군의 배치 모델에 따른 후류 및 용승 영역의 정량적 특성 평가에 관한 연구는 여전히 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Kim et al.(2009b)의 현장 조사 데이터를 기반으로 후류 및 용승 특성을 명확히 규명하고자 하였다. 이를 위해 국내에서 가장 범용적으로 활용되는 사각형 어초(cube-type AR)로 구성된 6종의 배치 모델을 설정하고, 각 모델에 따른 후류 및 용승 영역의 수리학적 특성을 비교·평가하였다.

인공어초 군의 특성 평가 방법은 다음과 같다. 첫째, 배치 형태에 따라 육면체, 직사각형, 피라미드 형태의 가상적 모델(정형화된 기하 구조 적층)과 삼각형, 사각형, 오각형 형태의 실무적 배치 모델(3층 대칭 구조) 등 총 6가지 유형으로 분류하였다. 둘째, 어초 군 주변의 유동 특성을 분석하고자 요소 기반 유한체적법(EbFVM)을 적용하여 수치 해석을 수행하였다. 셋째, 주요 유동 성분 분석을 통해 수식화된 유동 특성을 정량화하였으며, 최종적으로 모델별 후류 및 용승 영역의 규모와 공간적 분포를 기반으로 배치 모델을 특성화하였다.

본 연구의 수치 해석 및 평가를 위해 수립한 기본 가정은 다음과 같다. 첫째, 후류 및 용승 영역 산정 시 어초 군 내부를 포함한 주변 영향권 전체를 해석 도메인(domain)으로 설정하였다. 둘째, 용승 환경의 특성을 고려하여 파랑의 영향은

배제하고 정상 상태(steady state)의 유동만을 경계 조건으로 고려하였다. 셋째, 대상 생물종의 생태적 특성은 Nakamura(1985)가 제시한 A, B, C 유형의 분류 체계를 따르는 것으로 전제하였다. 넷째, 국부 용승 영역은 유입 경계 조건의 기준 유속(2.0 m/s) 대비 수직 상향 유속이 5% 이상 발생하는 구간으로 정의하였다. 이를 바탕으로 인공어초가 생물량 및 중 생산성 증대에 기여한다는 전제하에, 각 배치 모델별 후류 및 용승 영역의 기능적 특성을 최종 평가하였다.

II. 연구 방법

1. 인공어초의 공간적 배치 모델

가. 인공어초 군에 대한 기초개념

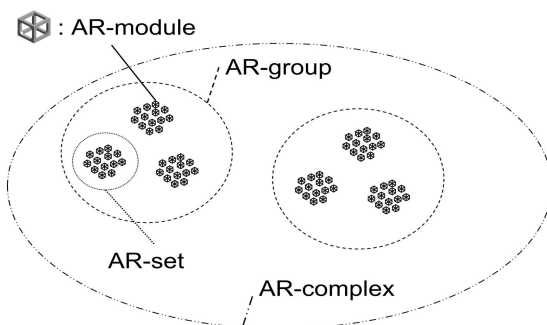
[Fig. 1]은 공간적 위계에 따른 인공어초의 분류 체계를 도식화한 결과이다(Grove and Sonu, 1985). ‘어초 군(AR set)’은 기능적 효율을 극대화하기 위해 다수의 개별 단위(module)로 구성되며, 이러한 어초 군들이 모여 상위 단계인 ‘어초 집단(group)’을 형성한다. 단계별 시설 규모와 배치 간격은 지역별 환경 특성 및 국가별 기준에 따라 다르게 적용된다. 일례로 한국의 경우, 어류 서식처 조성 효과를 확보하기 위해 최소 800m³ 이상의 규모로 어초 군을 설치하도록 규정하고 있다.

인공어초 군 또는 집단의 평면적 형상은 대상

해역을 점유하는 공간 배치 전략에 따라 결정된다. 이에 근거하여 집중형, 분산형, O자형, Y자형 등 다양한 배치 모델이 제안된 바 있으나(Jung et al., 2016; Yoon, 2018), 선행 연구의 부족과 분석 체계의 복잡성으로 인해 과학적 근거를 갖춘 최적 배치 권고안은 여전히 미흡한 실정이다. 특히 일부 소형 어초의 경우 중력에 의한 자유 낙하 방식으로 투하됨에 따라, 최종적으로 형성된 어초 군은 매우 불규칙하고 복잡한 3차원적 기하구조를 나타낸다. 이러한 구조적 비정형성은 인공어초와 연계된 실질적 어장 영향 범위를 정량화하는 데 있어 주요한 제약 요인으로 작용한다(Kim et al., 2017, 2024).

모든 배치 모델의 설계에 있어 어장 형성 효율성에 대한 고려는 필수적이다(Jung and Na, 2018; Kim et al., 2019; Le et al., 2020). 선행 연구(Kim et al., 2009a, 2009b)는 어초 군의 기능을 정량화하기 위한 지표로 시설 용적 개념을 제안한 바 있다. 해당 연구는 기설치된 인공어초 군에 대한 현장 조사를 토대로 유효 가용 용적 비율을 의미하는 시설 용적 계수(0.753) 산출식을 도출하였으며, 이 계수가 시설물의 경과 연수와 통계적으로 유의미한 상관관계가 없음을 입증하였다. 비록 이러한 지표 정립은 중요한 학술적 진전을 이루었으나, 연구 범위가 물리적 용적 산출에 국한되어 인공어초의 핵심 기능인 후류 및 용승 영역과의 연계 분석이 부족하다는 한계가 있다.

후류 영역 추정과 관련하여, 선행 연구(Sawaragi, 1995; Nakamura, 1985; Oh et al., 2011)에서 제시된 후류 길이(wake length) 지표를 활용해 한국의 24종 일반 인공어초에 대한 특성 분석이 수행된 바 있다(Kim et al., 2014b). 후류 길이는 분석의 편의성을 제공하나, 대표 길이를 정의하는 기준의 다양성으로 인해 후류 영역의 공간적 특성 전체를 반영하기에는 한계가 존재한다. 이러한 문제를 보완하기 위해 Kim et al.(2014a)은 요소 기반 유한체적법(EbFVM)을 적용하여 단일 어초 주위의 전체 후류 공간을 정량화하는 후류



[Fig. 1] Hierarchy of artificial reefs by scale: module, set, group, and complex.

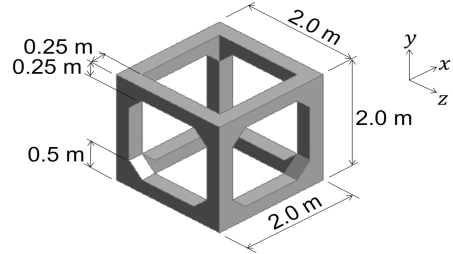
체적(wake volume) 개념을 제안하였다. 이후 다양한 어초 군 배치 모델의 효율성 평가를 위해 후류 길이 대신 후류 체적의 크기와 공간적 분포를 기준으로 어초의 특성을 규명하는 연구들이 지속적으로 수행되었다(Jung et al., 2022; Kim et al., 2016a, 2016b, 2016c; Lee et al., 2020). 동일한 맥락에서 용승 영역 역시 후류 체적과 유사한 정량화 과정을 통해 용승 체적(upwelling volume)으로 산출될 수 있다(Kim et al., 2017).

나. 사각형 어초 군의 3차원 모델

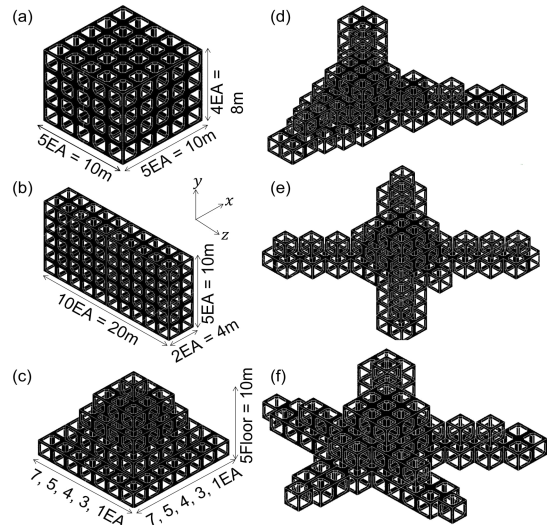
국내에는 90여 종의 일반 인공어초가 등록되어 있으며, 해양수산부의 승인 절차를 거쳐 그 종류는 지속적으로 확대되는 추세이다(Lee and Kim, 2024; Woo et al., 2014). 본 연구에서 채택한 사각형 어초([Fig. 2], 이하 AR1)는 기하학적 단순성, 우수한 시공성, 경제적 이점 등으로 인해 국내에서 가장 범용적으로 활용되는 유형이다. 특히 AR1은 높은 공극률을 보유하여 회유성 어종의 서식처 제공 및 보호에 효과적이며, 어업 관리 측면에서도 그 효율성을 인정받고 있다. AR1은 철근 콘크리트 구조물로서 외형 규격 $2 \times 2 \times 2\text{m}$, 겉보기 부피 8m^3 , 중량 3.4ton 의 제원을 갖는다. 1971년부터 2024년까지 국내에 조성된 AR1의 총 면적은 약 $141,761\text{ha}$ 로 추산되며, 이는 전체 인공어초 설치 면적의 61.7%를 차지한다(FIRA, 2025).

국내 인공어초 설치 규정에 따르면, 단일 어초 군은 800m^3 이상의 시설 용적을 확보해야 한다(Yoon et al., 2016). 이를 기준으로 외형 부피가 8m^3 인 AR1을 활용할 경우, 하나의 어초 군을 형성하기 위해 최소 100개의 단위 어초가 요구된다. 본 연구에서는 이러한 규격 지침을 준수하여 총 6종의 배치 모델을 설계하였다. 먼저, 기하학적 정형성을 갖춘 가상 모델로서 육면체(Hexa), 직사각형(Rect), 피라미드(Pyra)를 설정하였다. [Fig. 3a]는 $5 \times 5 \times 4$ 로 배열된 Hexa 모델을, [Fig. 3b]는 $10 \times 2 \times 5$ 로 배열의 Rect 모델을 나타내며, [Fig. 3c]는 각 층을 7×7 , 5×5 , 4×4 , 3×3 , 1×1 배열

로 단계적으로 적층한 Pyra 모델을 나타낸다.



[Fig. 2] Target AR: AR1.



[Fig. 3] Placement models of AR sets: (a) Hexa, (b) Rect, (c) Pyra, (d) Tri, (e) Tetra, and (f) Penta.

아울러, <Table 1>에 명시된 부산 연안의 실제 설치 사례 및 침하 현황을 반영하여 삼각형(Tri), 사각형(Tetra), 오각형(Penta) 형태의 실무형 배치 모델 3종을 추가로 구성하였다([Fig. 3d-3f]). 이들 모델은 상부로 갈수록 축소되는 3층 구조(5×5 , 4×4 , 3×3 ; 총 높이 6m)를 공통으로 유지하되, 평면 확장 형태(arm configuration)를 3방향(Tri), 4방향(Tetra), 5방향(Penta)으로 차별화함으로써 외형의 기하학적 특성에 따른 유동 변화를 정밀하게 분석할 수 있도록 설계되었다.

<Table 1> Information of surveyed ARs.

Loc.	AR (EA)	Confir. by Diver (EA)	Settl. depth (m)	V_e (%)	Deployed Condition	
					Type	Layer
HC	100	99	0.1	82	Dispersion	3
HC	100	100	0.5	90	Concent.	3
NY	100	100	1.0	75	Concent.	3
HC	100	100	0.0	91	Concent.	2
HC	100	100	0.1	98	Concent.	3
GS	100	100	1.0	98	Concent.	3
GW	85	94	1.0	64	Concent.	3
GY	100	97	0.3	89	Concent.	3
GY	95	91	0.0	90	Concent.	3

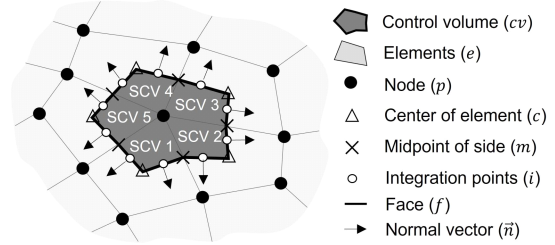
HC = Haeundae Chengsapo, NY = Namgu Yongho,
GS = Gijang Silangri, GW = Gijang Wolane,
GY = Gijang Yeonwha

다. 요소 기반 유한체적법

유체 유동의 운동량, 열 및 물질 전달 기작은 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes equations)으로 기술되며, 이는 전산유체역학(CFD) 기법을 통해 수치적으로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 요소 기반 유한체적법(Element-Based Finite Volume Method, EbFVM) 알고리즘이 탑재된 상용 소프트웨어 ANSYS-CFX를 활용하여 유동 해석을 수행하였다.

전통적인 유한체적법(FVM)이 격자 셀과 제어 체적이 일치하는 셀 중심 정식화(cell-centered formulation)를 기반으로 지배 방정식을 이산화하는 반면, EbFVM은 해석 격자 요소를 제어 체적 구성을 위한 보조 기하학적 개체로 활용하는 셀 정점 정식화(cell-vertex formulation)를 채택한다(Profito et al., 2015). 이에 따라 개별 제어 체적은 물리적 유량의 국부적 보존이 엄격히 강제되는 이차 격자 체계로 구축된다.

[Fig. 4]에 도시된 바와 같이, 임의의 절점(p)에 할당된 제어 체적(cv)은 인접 요소들로부터 분할된 하위 제어 체적(scv)들의 조합으로 구성된다. 개별 제어 체적은 인접한 각 요소의 중심(Δ)과



[Fig. 4] Geometric entities defined in the EbFVM.

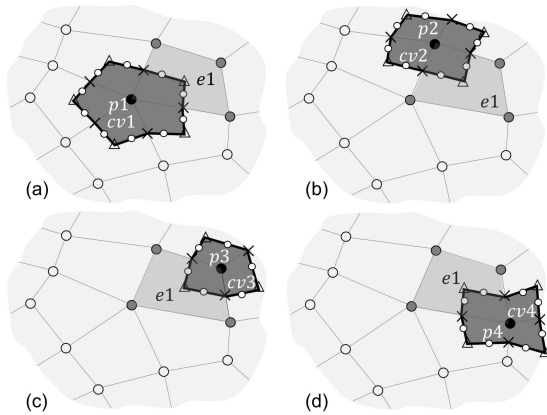
해당 절점을 공유하는 인접 모서리의 중점($\times$)을 연결하여 형성된 분할 면($-$)에 의해 구획된다. 이러한 분할 면들은 이산화된 지배 방정식에서 물리적 유량을 국부적으로 산출하는 핵심적인 기하학적 단위가 된다.

제어 체적 표면의 면적 적분은 일반적으로 중점 법칙을 통해 근사화되므로, 각 분할 면의 중심은 적분점(o)으로 정의되며 해당 지점의 법선 벡터($\vec{n}$)로 표기된다. 특정 적분점에서의 유량은 해당 점이 포함된 개별 요소의 형상 함수 및 노드 데이터를 기반으로 산출된다. 해석 대상의 종속 변수들은 각 절점에서 정의 및 근사화되며, 제어 체적은 계산 도메인 내의 모든 절점을 중심으로 생성되어 물리량의 보존성을 확보한다.

특정 요소가 유한(finite) 후류 체적에 포함되는 지를 판정하는 수치적 알고리즘은 다음과 같다. 우선 [Fig. 5]에 도시된 바와 같이, 요소(e_1)를 구성하는 네 개 국부 절점(p_1, p_2, p_3, p_4)을 정의한다. 이후, 각 절점과 연동된 4개의 하위 제어 체적(cv_1, cv_2, cv_3, cv_4)을 구축하며, 개별 제어 체적 내부의 유동 물리량은 해당 절점의 이산화된 유속 값을 통해 산출된다. 일례로 [Fig. 5a]와 같이 절점 p_1 은 제어 체적 cv_1 과 대응하며, 해당 지점의 유동 특성치가 계산된다. 이러한 정량화 과정은 나머지 절점(p_2, p_3, p_4)에서도 동일한 기작으로 수행된다([Fig. 5b-5d]).

최종적으로, 개별 요소를 구성하는 4개 절점의 유동이 모두 재순환 영역에 해당하는 경우에만

해당 요소를 유한 후류 체적의 구성 성분으로 판정한다. 즉, 각 절점에서 산출된 유속 벡터의 주된 유속 방향 성분이 음의 유속($u < 0$)을 나타내는 재순환 유동일 때만 해당 요소를 후류 영역에 포함한다. 이러한 조건은 단 하나의 절점이라도 판정 기준을 충족하지 못하면 해당 요소를 분석 대상에서 배제하도록 설계되어, 후류 영역 산정의 보수성과 엄격성을 확보한다. 결과적으로 인공어초 군의 전체 후류 체적은 상기 기준을 만족하는 개별 요소들의 체적을 도메인 전체에 대해 적분 및 합산하여 도출된다.



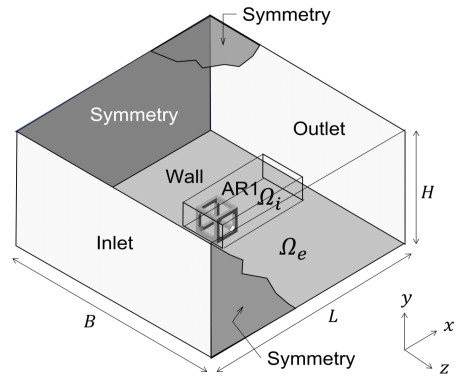
[Fig. 5] Scheme to determine whether an element is identified as a finite wake volume.

라. 격자 품질 제어

일반적으로 수치 유동 해석은 해석 도메인의 설정에서 시작되며, 도메인의 형상과 규모는 물리적 문제의 특성에 따라 결정된다. 특히 수치 해석의 정밀도는 도메인 내에 구축된 격자의 해상도, 형태, 배열 상태에 직접적인 영향을 받는다. 인공어초처럼 복잡한 기하 구조를 갖는 경우, 사면체, 육면체, 췌기형 등 다양한 요소로 공간을 이산화하는 과정에서 과도한 가로세로비를 가진 불규칙한 격자가 생성될 가능성이 존재한다. 이러한 격자의 비정형성은 수치 해의 정확도 저하 및 수렴 지연의 원인이 되므로, 해석 결과에 대

한 격자 의존성 검증이 수반되어야 한다.

격자 품질을 체계적으로 제어하기 위해, 평행 육면체 형태의 계산 도메인을 내부 영역(Ω_i)과 외부 영역(Ω_e)으로 이원화하였다([Fig. 6]). 수치 해석의 정밀도가 요구되는 내부 영역은 조밀한 격자로 구성하였으며, 외부 영역은 경계 효과를 억제하면서도 계산 효율성을 극대화하기 위해 상대적으로 저해상도의 격자를 배치하였다. 이러한 도메인 구성을 바탕으로 (1) 격자 품질 지표, (2) 내·외부 하위 영역의 규모, (3) 전체 요소 수를 활용하여 격자 품질을 최적화하였다.



[Fig. 6] Computational fluid domain and its boundary conditions.

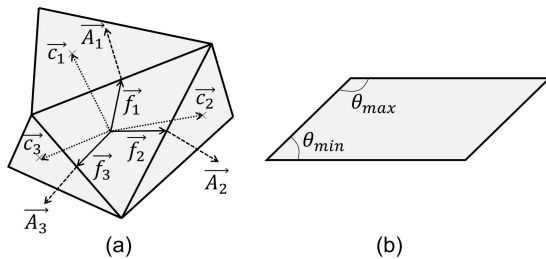
첫째, 격자 품질은 격자의 직교성(orthogonality; Q)과 왜도(skewness; Skw) 지표를 산출하여 평가하였다(ANSYS Inc., 2009; Kim et al., 2023). 각 지표를 산정하기 위해 [Fig. 7]에 도시된 바와 같이 벡터 및 내각을 변수로 하는 다음 두 방정식을 활용하였다.

$$Q = \min \left(\frac{\vec{A}_i \cdot \vec{f}_i}{\|\vec{A}_i\| \|\vec{f}_i\|}, \frac{\vec{A}_i \cdot \vec{c}_i}{\|\vec{A}_i\| \|\vec{c}_i\|} \right) \dots\dots\dots (1)$$

$$Skw = \max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180 - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right] \dots\dots\dots (2)$$

[Fig. 7a] 및 식(1)에서 기술된 바와 같이, $\vec{f}_i$ 는

요소의 중심과 각 면의 중심을 연결하는 벡터, $\vec{A}_i$ 는 각 면의 외향 법선 벡터, 그리고 $\vec{c}_i$ 는 인접 요소의 도심 간을 연결하는 벡터를 의미한다. 또한 [Fig. 7b]와 식(2)에서 $\theta_{\max}$ 와 $\theta_{\min}$ 는 각각 요소 내의 최대 및 최소 내각을 의미하며, θ_e 는 해당 요소 형상에 따른 등각 기준값(예: 삼각형 60°, 사각형 90°)을 지칭한다.



[Fig. 7] Mesh quality metrics: (a) orthogonal quality and (b) skewness.

둘째, 국부 용승 높이의 수렴성을 검증하기 위해 육면체(Hexa) 어초 군을 대상으로 외부 영역 높이(H_e)를 20m 간격(35~95m)으로 증가하여 민감도를 분석하였다. H_e 가 55m에서 75m로 증가할 때 용승 영역의 높이는 각각 22.3m와 23.2m로 산출되었으며, 이때의 변화율은 4.0% 수준으로 수렴 양상을 보였다. 이를 근거로 외부(H_e)와 내부(H_i) 영역의 높이를 각각 55m와 25m로 확정하였다.

동일한 방식으로 외부 및 내부 영역의 길이 또한 60, 80, 100m로 가변 설정하여 후류 길이의

<Table 2> Dimension of each flow field.

Model	Width (m)		Length (m)		Height (m)	
	B_i	B_e	L_i	L_e	H_i	H_e
Hexa	20	100	65	200	25	55
Rect	30	100	45	200	25	50
Pyra	30	100	55	200	25	50
Tri	50	120	60	250	25	50
Tetra	50	120	60	250	25	50
Penta	50	120	60	250	25	50

변화율이 3.0% 이내임을 확인하였다. 이러한 최적화 절차를 모든 배치 모델에 적용하여 하위 영역의 규모를 결정하였으며, 전체 유동장(B , L , H)은 난류 현상 및 핵심 지표(후류 및 용승 체적)를 충분히 관찰할 수 있도록 어초 군 주변의 여유 공간을 확보하여 설정하였다(<Table 2>).

마. 경계 조건 및 모형화 과정

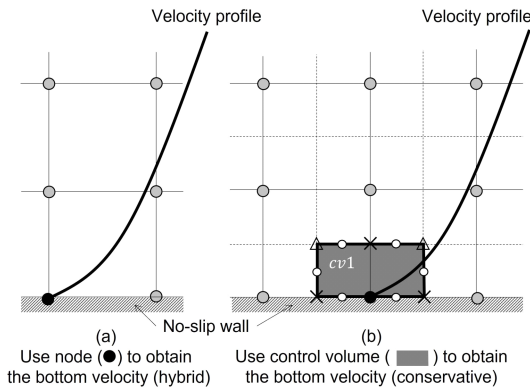
인공어초 군의 초기 가설 용적은 지반 특성, 투하 방식, 침하 및 세굴 등 물리적 환경 요인에 의해 변동될 수 있다(Chau et al., 2021; Han et al., 2020; Kim and Na, 2019). 이에 따라 선행 연구(Kim et al., 2009a, 2009b; Yoon et al., 2016)가 제안한 유효 가용 용적 개념의 적용을 검토할 필요가 있다. 다만, 본 연구에서는 배치 형태에 따른 유동 특성 규명이라는 본질적 목적에 집중하고자, 지반 침하 등의 외부 변수를 배제한 이상적인 설치 조건을 가정하였다.

또한, [Fig. 6]에 도시된 바와 같이, 유입구(inlet) 경계 조건을 통해 유동을 공급하였으며, 유출구(outlet)는 압력 구배를 '0'으로 설정하는 유출 조건(static pressure outlet)을 적용하여 계산 도메인 외부로 흐름이 자연스럽게 빠져나가도록 설정하였다. 바닥(bottom)은 점성 효과에 의해 벽면 유속이 '0'이 되는 점착 조건(no-slip wall condition)을 부여하였다. 측면과 상부 경계면에는 대칭(symmetry) 조건을 적용하여 거울 효과(mirror effect)를 유도하였는데, 이는 경계면을 기준으로 대칭적인 유동장이 형성됨을 가정하여 계산 영역의 물리적 연속성을 확보하기 위함이다.

벽면 유속의 산출 방식은 해저면 근처의 유동 특성을 결정짓는 중요한 변수이다. [Fig. 8a]에 도시된 혼합 방식(hybrid method)은 절점(node) 데이터를 직접 참조하여 바닥 유속을 산출하는데, 이 경우 점착(no-slip) 벽면 조건에 의해 유속이 0으로 고정되는 특성을 갖는다. 반면, [Fig. 8b]의 보존적 방식(conservative method)은 바닥 면에서 절점을 포함하는 제어 체적(control volume) 내의 물

리량을 평균하여 유속을 도출한다. 본 연구에서는 해저면 유속 분포를 더욱 정밀하게 분석하고 물리적인 바닥 후류 영역(bed wake region)을 규명하기 위해 보존적 방식을 채택하였다.

본 연구에서는 격자 수의 최적화 및 계산 효율성 제고를 위해 각 배치 모델의 대칭성을 활용하여 전체 영역의 절반만을 수치 모형화하였다. 해석에 사용된 유체는 비압축성 점성 유체이자 뉴턴 유체로 가정하였으며, 수온 25°C 조건에서 밀도 997 kg m^{-3} , 동점성 계수 $8.999 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 을 적용하였다. 난류 모델로는 계산 효율성 대비 후류 영역 묘사에 적합한 k-epsilon 모델(Kim et al., 2021)을 채택하였고, 유입 경계의 유속은 국내 인공어초 설계 지침을 준거로 하여 2 m s^{-1} 로 설정하였다. 제어 체적은 8개 절점을 보유한 육면체 형상으로 구성하였으며, 해석의 정밀도 확보를 위해 최대 격자 크기를 0.2m 이하로 제한하여 격자 수렴성을 강화하였다.

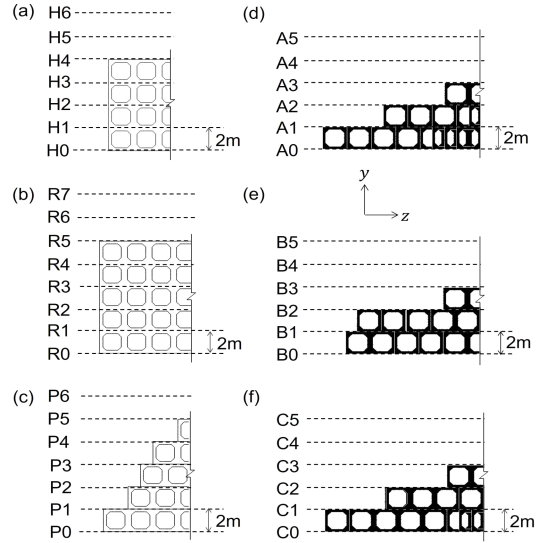


[Fig. 8] Scheme to obtain the bottom velocity: (a) hybrid method and (b) conservative method.

바. 기준면 설정

후류 및 용승 영역의 공간적 특성을 정량화하기 위해, 각 배치 모델별로 [Fig. 9]와 같은 기준면(reference plane)을 설정하였다. 해당 기준면은 개별 어초 군의 후류 면적(WA) 및 용승 면적

(UA)을 산출하고 비교·분석하기 위한 지표 평면으로 활용되었다.

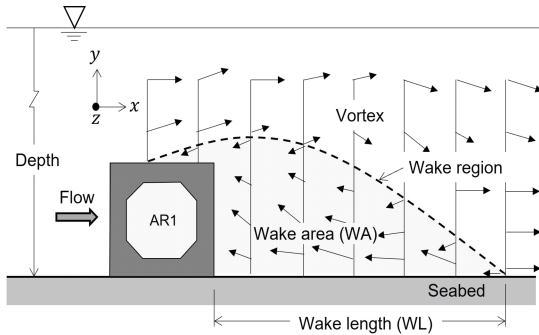


[Fig. 9] Schematic of reference planes for different AR-set configuration: (a) Hexa, (b) Rect, (c) Pyra, (d) Tri, (e) Tetra, and (f) Penta.

2. 후류 · 용승 영역과 잠재적 유인 효과

가. 후류 영역

인공어초 연구에서 후류 영역(wake region)은 주류와 구조물 간의 수리학적 상호작용으로 인해 발생하는 와류(vortex) 및 역류 영역(counter-flow region)을 지칭한다(Wolanski and Hamner, 1988). 이는 [Fig. 10]의 점선 구역과 같이 어초 직후방에 발달하는 재순환 유동(recirculating flow)의 공간적 점유 범위를 나타낸다(Oh et al., 2011; Sheng, 2000; Woo et al., 2018). 생태학적 관점에서 후류 영역은 해양 생물에게 은신처, 산란장 및 섭이처를 제공하여 어류의 위집을 유도하는 핵심적인 공간 기작을 수행한다(Sheng, 2000). 따라서 인공어초의 기능을 평가할 때는 후류 영역의 공간적 규모와 내부 유속 분포 특성을 종합적으로 분석하는 것이 필수적이다(Chau and Na, 2024; Kim et al., 2014a).



[Fig. 10] Definitions of wake region, wake length, and wake area.

인공어초의 유동 특성을 고찰하기 위한 정량적 지표로는 후류 길이(WL)와 후류 면적(WA)이 사용되고 있다. Kim et al.(2014a)이 제안한 후류 체적(WV)은 인공어초가 생성하는 후류 공간을 하나의 스칼라값으로 정량화함으로써 기존의 길이 및 면적 지표가 가졌던 평면 선택의 의존성 문제를 극복하고 복잡한 3차원적 후류 특성을 대변할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 후류 및 용승 영역의 특정 방향에 따른 점진적인 흐름 변화를 면밀하게 관찰하기에는 공간적 분포를 단면별로 추적할 수 있는 후류 면적의 산정이 더욱 유용하다. 따라서 본 연구에서는 [Fig. 9]에 정의된 수리학적 기준면을 바탕으로 개별 어초 군의 후류 면적을 단면별로 산출함으로써, 후류 영역의 공간적 변동 특성을 정밀하게 분석하였다.

나. 용승 영역

용승(upwelling)은 해수의 연직 운동으로, 하층의 고밀도·저온 영양염 풍부수가 표층으로 부상하는 현상을 의미한다. 용승은 발생 원인과 지형적 위치에 따라 연안 용승(coastal upwelling), 적도 용승(equatorial upwelling), 와류 용승(whirl upwelling), 지형 용승(topographical upwelling)으로 크게 분류된다. 특히 지형 용승은 해저 지형의 급격한 변화에 기인하여 발생하는 현상으로, 일년 내내 같은 장소에서 지속적으로 유지되는 수리학적 특성이 있다.

용승류는 상층의 고온·빈영양층(nutrient-depleted layer)에 영양염을 공급함으로써 식물성 플랑크톤 등 기초 생산자의 증식을 촉진한다. 이러한 물리·생물학적 특성으로 인해 용승 해역은 주변에 비해 저온의 해수면 온도(SST)와 고농도의 엽록소(chlorophyll-a) 분포를 나타내는 특징이 있다 (Anderson and Prell, 1993; Sarhan et al., 2000). 용승 해역의 영양염 가용성 증대는 기초 생산력 제고를 거쳐 궁극적으로 어업 생산량 증대로 직결된다. 실제로 전 세계 해역의 약 5%에 불과한 주요 용승 지역에서 총 어획량의 25%가 산출되는 등(Jennings et al., 2001), 연안류나 외해 발산에 의한 용승 현상은 글로벌 어업 수확량 확보에 결정적인 역할을 수행한다(Mann and Lazier, 2006).

국지적으로 설치된 인공 구조물 또한 인공 용승(artificial upwelling)을 유도할 수 있으며, 이는 지형 용승과 물리적으로 동일한 기작을 공유한다. 즉, 수평 유동이 인공 구조물과 마주할 때 운동 에너지가 연직 운동 에너지로 전환되며, 유동이 구조물의 전면 경사면을 따라 강제 상승하는 운동량 변화 기반의 용승이 발생한다. 비록 인공 용승과 지형 용승의 역학적 기작은 동일하나, 그 공간적 발생 스케일에는 뚜렷한 차이가 존재한다. 자연 지형 용승은 수십에서 수백 킬로미터 크기의 대륙붕이나 해산(seamount)에 의해 유발되어 거대한 규모를 형성하는 반면, 인공 구조물(인공어초, 용승 구조물 등)에 의한 인공 용승은 수십 미터 직경 내의 국소적인 범위에서 발달한다.

1991년 일본의 인공 용승 구조물 설치 사례(폭 45m, 높이 10m)에서는 조류 속도 변화와 영양염 공급 확대에 의해 표층 동물성 플랑크톤 개체수가 약 2배 급증한 바 있으며(Yanagi and Nakajima, 1991), 1995년의 대규모 프로젝트를 통해서도 생물량 증가와 생물 다양성 확장이 실증되었다(Kim and Hwang, 2006).

국내에서도 대형 콘크리트 적층형 인공어초에 의한 연직류(vertical flow) 형성과 이에 따른 수층 내 물리적 특성 변화가 보고된 바 있다(Kim and

Shimasaki, 2013). 본 연구는 이러한 기작을 정량화하기 위해, 국지적 용승 영역을 유입 유속(2 m s⁻¹) 대비 5% 이상의 연직 유속 성분을 보유한 공간으로 정의하고, 기준면별 용승 면적(UA)을 고찰하였다.

다. 후류 영역과 용승 영역의 상관관계

인공 구조물 주변에서 발생하는 후류 영역과 용승 영역은 유동의 역학적 변화에 의해 상호 의존적이며 긴밀한 인과관계를 형성한다.

첫째, 유동 박리에 의한 압력 강하와 용승·후류의 상호유도가 나타난다. 유동이 구조물의 상단 표면을 따라 연직 상향할 때, 정점부(crest) 끝단에서 흐름이 떨어져 나가는 유동 박리(flow separation) 현상이 발생한다(Fox et al., 2004). 이 강한 상승 흐름은 구조물 후면에 부압(negative pressure)을 형성하여 강한 재순환 와류를 발달시키며, 이 와류의 중심 압력 강하가 저층수를 상향으로 흡입하는 2차 용승을 유도하게 된다.

둘째, 후류 영역과 용승 영역은 공간적으로 연속적인 발달 구조를 갖는다. 용승 영역은 주로 구조물의 전면 경사부와 최상단 부근에 집중되어 연직 방향으로 높게 발달하는 반면, 후류 영역은 구조물의 하류 배후면에 수평 방향으로 길게 발달한다(Kim et al., 2017). 그러나 이 두 영역은 물리적으로 단절된 공간이 아니며, 상부 용승류의 전단층(shear layer)이 후류 영역의 와류와 유기적으로 맞물리면서 하나의 복합적인 유동장을 형성한다.

셋째, 이들 영역은 영양염 수송과 생물 서식처 제공 측면에서 기능적 상관관계를 맺는다. 용승 영역이 심층의 풍부한 영양염류를 유광대(euphotic zone)로 수송하는 일차적인 공급원 역할을 수행한다면(Rykaczewski and Checkley, 2008), 후류 영역은 유속이 감소된 재순환 유동 덕분에 플랑크톤이 집적되고 어류가 휴식 및 섭이 활동할 수 있는 물리적 기반을 제공한다(Kim et al., 2017). 결과적으로 용승 영역의 규모가 확장될수

록 후류 영역으로 유입되는 유기 현탁물 및 먹이 생물의 총량이 증가하여 실질적인 어장 조성 효과가 극대화된다.

라. 어초 서식지에 따른 어류의 분류 및 유동 영역의 연계

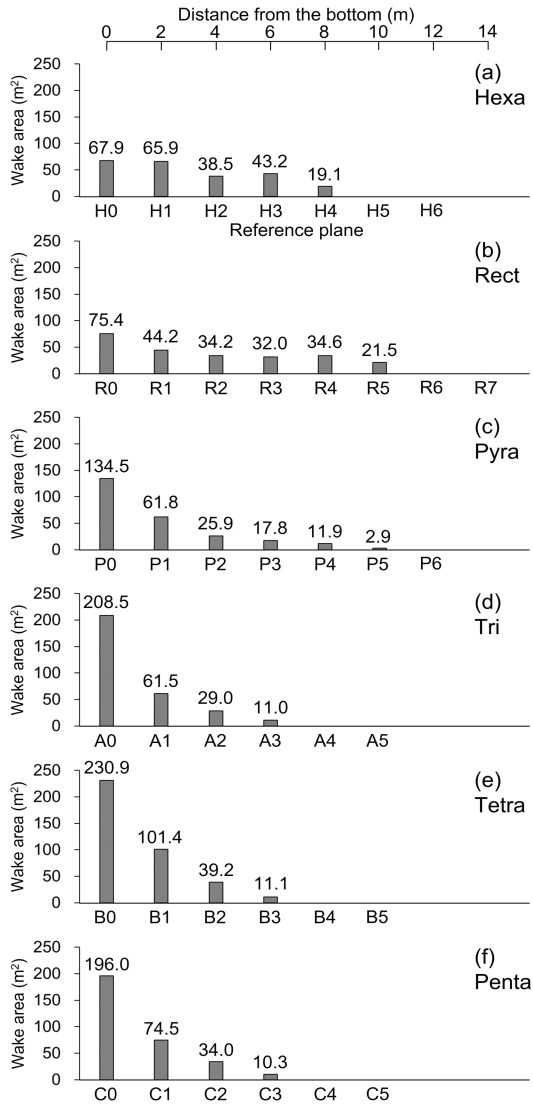
대상 생물의 인공어초에 대한 상대적 의존도 및 정착 특성에 따라 어류를 세 가지 유형으로 분류할 수 있다(Nakamura, 1985). A형은 어초 구조물과 직접 접촉하거나 내부의 틈새와 공동(void)을 주된 점유지로 활용하는 저서성 어류(demersal fish)를 포함한다. B형은 어초와 밀접한 거리를 유지하며 주변 수역에 서식하되 구조물과 직접 접촉하지 않는 근접 서식성 어종을 지칭한다. C형은 어초 상부의 중·표층 영역에 체류하는 회유성 생물군으로 구성된다(Bortone et al., 2000).

이러한 생태학적 분류는 본 연구에서 도출한 후류 및 용승 영역의 물리적 공간 메커니즘과 유기적으로 결합한다. 구체적으로, 주류의 감속과 와류에 의해 유기물 및 플랑크톤이 집적되는 후류 영역은 조류의 저항을 피하고 에너지를 보존하려는 B형 어종에게 최적의 휴식처 및 섭이 공간을 제공한다. 반면, 저층의 영양염류를 상층 유광대로 연직 수송하여 기초 생산력을 촉진하는 용승 영역은 대규모 먹이 사슬을 형성함으로써 어초 상부 및 전면부에 체류하는 C형 회유성 어종의 위집을 유도하는 핵심 동력이 된다. 따라서 본 연구에서는 후류 체적 및 용승 체적의 공간적 분포 양상을 바탕으로, 6개 배치 모델이 각 어종 유형(Type A, B, C)에 미치는 잠재적 유인 효율성을 다각도로 고찰하고자 한다.

III. 연구 결과

1. 후류 영역의 공간적 특성

각 어초 군의 기준면별로 단면 후류 영역 형성 양상을 [Fig. 11]에 도시하였다. Hexa 배치 모델의 경우, 후류 영역은 기저면(H0)에서 H4 지점까지



[Fig. 11] Wake areas at each reference plane for the AR-sets: (a) Hexa, (b) Rect, (c) Pyra, (d) Tri, (e) Tetra, and (f) Penta.

뚜렷하게 관찰되었으나, H5 및 H6 지점에서는 소멸하는 경향을 보였다([Fig. 11a], [Fig. 12a]). 수직 분석 지점이 어초로부터 원거리로 이동함에 따라 후류 영역은 점진적으로 감소하였으며, 대부분의 후류는 어초 내부 및 직후방 공간에서 집중적으로 발달하였다([Fig. 12a]).

Rect, Pyra, Tri, Tetra, Penta 배치 모델 역시 기저면에서 멀어질수록 후류 영역이 축소되는 공통적인 경향을 나타내었다([Fig. 11b-11f]). 이는 해저면 인접 구간에서 어초 구조물에 의한 유동 저항과 역류 기작이 가장 활발하게 발생하기 때문이다([Fig. 12b-12f]). 특히 각 배치 모델의 기저단면(H0~C0)에서 발생한 후류 면적은 전체의 28.9%~67.3%를 차지하는 것으로 분석되었다. 이는 기저 면적이 넓고 구조적 안정성이 높은 배치 모델일수록 저층부에서의 후류 발달이 지배적임을 시사한다.

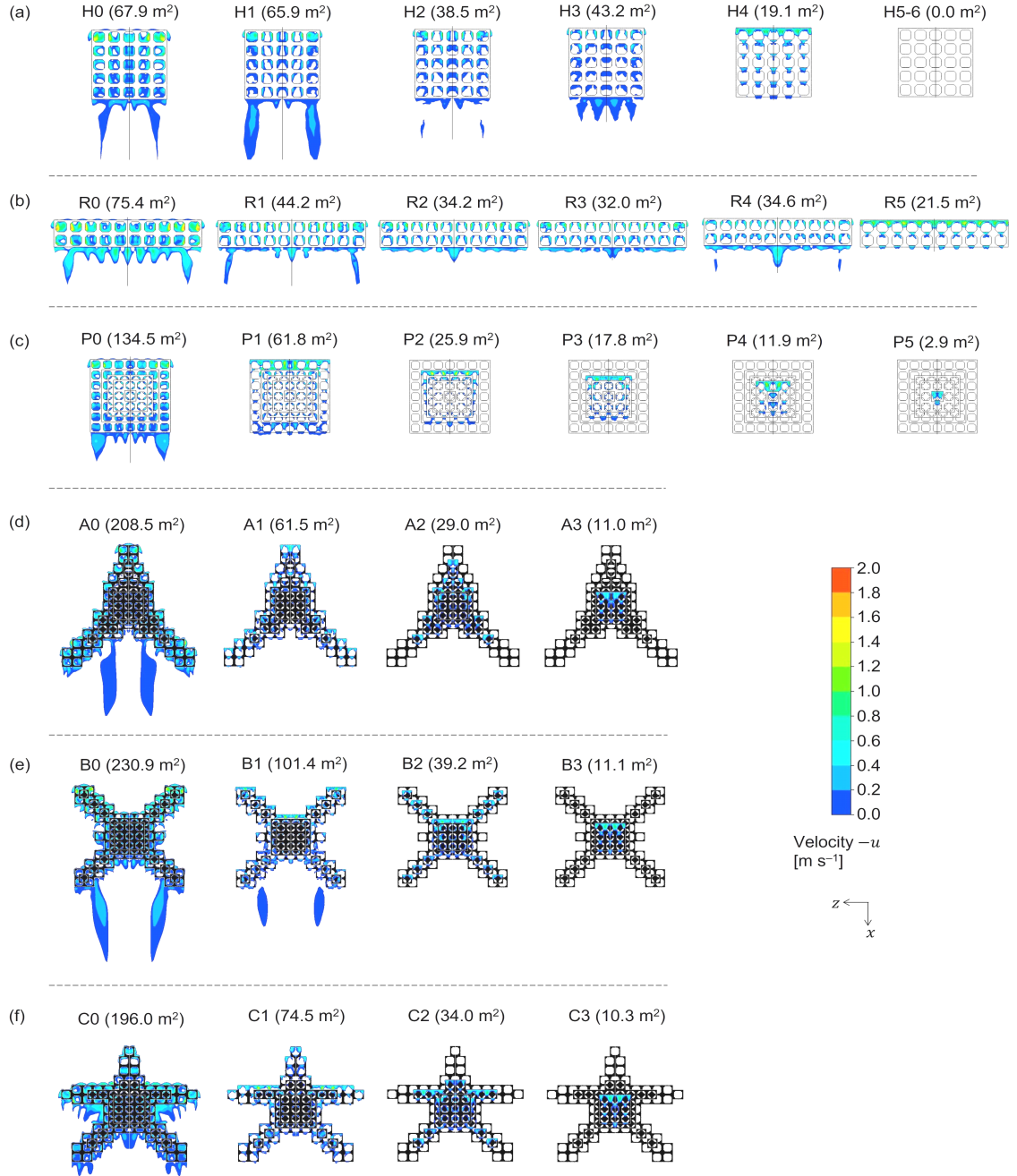
후류 영역이 어초 군 후방에서 강하게 발달하는 특성은 Hexa, Tri, Tetra 모델에서 확인되었으며, 중앙 분리선을 중심으로 두 개의 독립된 영역으로 분리되는 독특한 패턴이 관찰되었다. 이는 해당 모델들의 상대적으로 낮은 시설 높이와 유체 역학적 간섭에 기인한 결과로 판단된다. 또한 어초 군 내부의 미세 후류는 단위 어초인 사각형 어초 본체의 공극을 통해 형성되었다([Fig. 12]). 종합적으로, 정형화된 가상 모델(Hexa, Rect, Pyra) 대비 실무적 배치를 반영한 모델(Tri, Tetra, Penta)에서 후류 영역의 공간적 확장이 더욱 뚜렷하게 나타났다.

2. 용승 영역의 공간적 특성

[Fig. 13a]는 Hexa 모델의 분석 단면별 용승 영역 형성 양상을 보여준다. 용승 영역은 저층부인 H0 및 H1 구간에서는 미미하였으나, H3~H5 구간에서 집중적으로 발달하며 전체 용승 영역의 68.8%를 점유하였다. Rect 모델([Fig. 13b]) 또한 기저면(R0)에서 발생량은 낮았으나, 상층부인 R4~R6(8~12m) 구간이 전체의 65.1%를 차지하며 주된 용승 영역을 형성하였다. 반면, Pyra 모델([Fig. 13c])은 P2~P4(4~8m) 구간에서 전체 용승의 61.6%가 발생하는 특성을 보였다.

수직 단면이 일정한 적층형 모델(Hexa, Rect)의 경우, 최대 용승 영역은 구조체 최상단보다 2m

사각형 어초로 구성된 인공어초 군의 후류 및 용승 영역 특성 평가

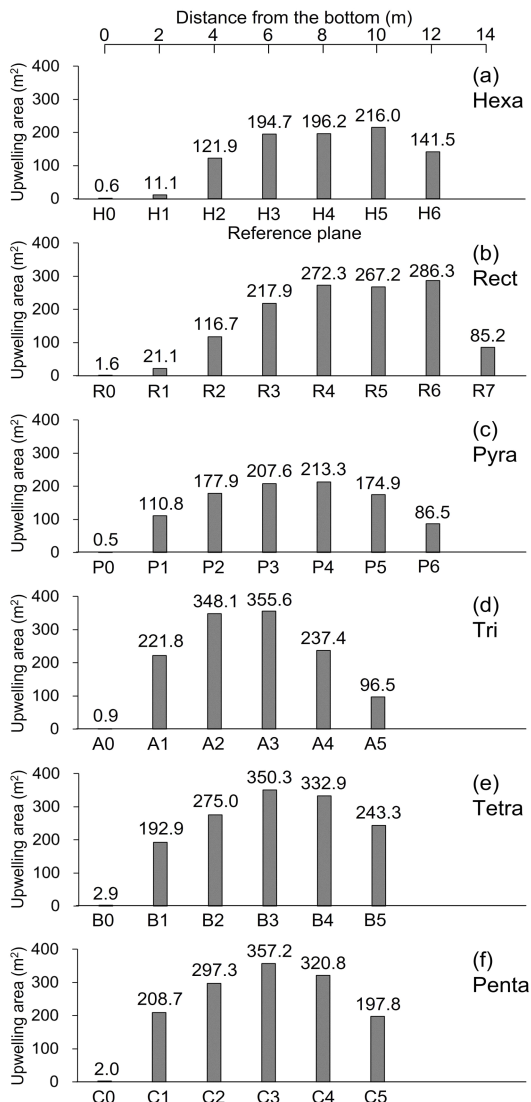


[Fig. 12] Wake area contours at each reference plane for the AR-sets: (a) Hexa, (b) Rect, (c) Pyra, (d) Tri, (e) Tetra, and (f) Penta.

상부 지점(H5, R6)에서 형성된 후 점차 감소하는 경향을 나타냈다([Fig. 13a, 13b]). 이와 대조적으

로, 기저면이 넓은 안정형 구조인 Pyra 모델은 최상단보다 2m 낮은 지점(P4)에서 용승 면적이 극

대화되었으며, 고도가 높아질수록 영역이 축소되었다. 이러한 경향은 실제 배치 상태를 반영한 실무형 모델(Tri, Tetra, Penta)에서도 유사하게 관찰된다([Fig. 13d-13f]). 해당 모델들의 최대 용승 영역은 최상부 단면(A3, B3, C3)에서 정점을 기록한 후 다시 감소하였다.



[Fig. 13] Upwelling areas at each reference plane for the AR-sets: (a) Hexa, (b) Rect, (c) Pyra, (d) Tri, (e) Tetra, and (f) Penta.

이러한 수직적 발달 양상은 용승 영역 가시화 자료인 [Fig. 14]를 통해 더욱 명확해진다. 균일 단면 모델(Hexa, Rect)은 고도가 상승함에 따라 용승 영역이 점진적으로 확장되어 최상부 상단에서 최대치를 기록한다([Fig. 14a, 14b]). 반면, 안정형 구조 모델(Pyra, Tri, Tetra, Penta)은 상층부(A3, B3, C3) 또는 그 직전 단계(P4)에서 최대 용승 영역을 형성하는 패턴을 보였다([Fig. 14c-14f]).

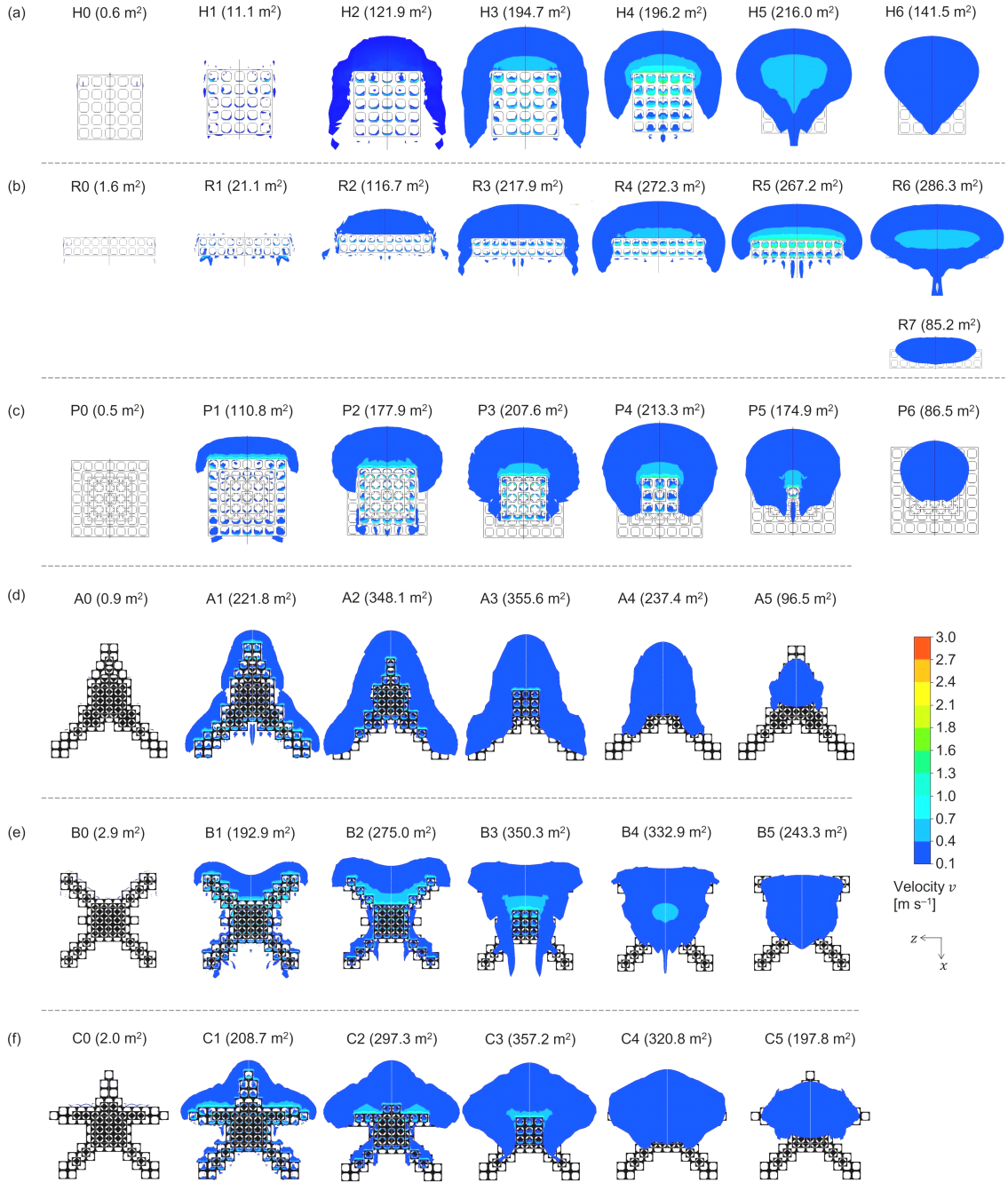
결과적으로 정형화된 가상 모델보다 실무적 배치를 고려한 모델에서 용승 영역이 더욱 발달하였으며([Fig. 13, 14]), 이는 시설 높이가 상대적으로 낮더라도 기하학적 복잡성이 높은 구조가 용승류 유도에 효과적임을 시사한다. 즉, 단위 어초를 집적 또는 분산 배치하여 어초 군을 형성할 때, 3~5개 방사형(팔 모양) 구조를 갖는 Tri, Tetra, Penta 모델에서 용승 기작이 더욱 활발히 발달함을 확인하였다. 이러한 모델들은 후류 영역 또한 상대적으로 넓게 형성하므로, 기능성을 극대화한 어초 군 설계를 위해 해당 배치 방식의 도입을 적극적으로 검토할 필요가 있다.

3. 후류 체적과 용승 체적의 수리 통계적 상관관계

개별 배치 모델이 형성하는 후류 체적과 용승 체적은 구조물 배후의 압력 강하 및 유동 박리 강도에 의해 결정되므로, 두 물리량 사이에는 밀접한 수리 역학적 상관성이 존재한다. 일반적으로 구조물의 전면 투영 면적이 증가하거나 유동 차단 효과가 강해질수록 연직 방향의 유동 박리가 격렬해지며, 이는 용승 체적의 확장을 야기한다. 동시에 정점부에서 박리된 전단층(shear layer)은 배후면에 더 거대한 부압 영역을 형성하여 후류 체적을 함께 증가시키는 동력으로 작용한다.

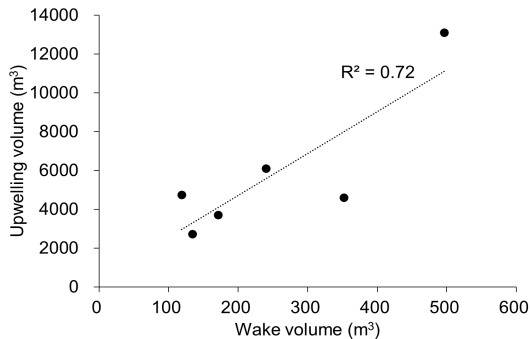
이러한 수리학적 인과관계는 본 연구에서 도출된 6종의 배치 모델별 정량적 체적 데이터 간의 상관분석(correlation analysis)을 통해서도 검증된다.

사각형 어초로 구성된 인공어초 군의 후류 및 용승 영역 특성 평가



[Fig. 14] Upwelling area contours at each reference plane for the AR-sets: (a) Hexa, (b) Rect, (c) Pyra, (d) Tri, (e) Tetra, and (f) Penta.

가상 모델(Hexa, Rect, Pyra)과 실무형 모델(Tri, Tetra, Penta) 전체를 대상으로 두 체적 간의 상관 계수를 산출한 결과, 매우 유의미한 양의 상관관계($R^2 = 0.72$)가 확인되었다(Fig. 15).



[Fig. 15] Correlation between wake volume and upwelling volume.

이는 인공어초 군의 공간 배치 전략을 통해 용승 효율을 증대시키는 설계가 궁극적으로 후류 영역의 공간적 규모 확장을 동시에 견인할 수 있음을 수학적으로 방증한다. 따라서 두 체적 지표의 상호 의존적 거동 특성은 향후 인공어초 군의 다목적 최적 설계(multi-objective optimization)를 위한 정량적 평가지표로 유용하게 활용될 수 있다.

4. 대상 어종별 잠재적 유인 효과 고찰

후류 및 용승 영역의 공간적 분포 특성을 근거로, 6종의 배치 시나리오별 대상 어종에 대한 잠재적 유인 효과를 다음과 같이 분석하였다.

첫째, 실무형 배치 모델(Tri, Tetra, Penta)은 정형화된 모델 대비 후류 영역의 공간적 확장이 뚜렷하며, 특히 해저면 인접 구간에서 광범위한 후류 영역을 형성하였다. 이러한 물리적 특성은 구조물 내부의 공동(void) 및 저층 공간을 주 서식처로 점유하는 A형(저서성) 어종의 정착에 최적의 환경을 제공할 것으로 판단된다.

둘째, Tri와 Tetra 모델은 구조물 후면에 독립적인 두 개의 후류 영역을 형성할 뿐만 아니라, 어초 전면 및 상층부에 유의미한 용승 영역을 조성한다. 이는 구조물 주변 수역에 밀착하여 서식하는 B형(근접 서식성) 어종의 위집 및 먹이원 공급에 효과적임을 시사한다.

셋째, Tri, Tetra, Penta 모델의 용승 기작은 구조물 최상단으로부터 상부 4m 지점까지 활발하게 지속되는 것으로 나타났다. 이러한 연직 유동의 확산은 어초 상부의 중·표층을 이용하는 회유성 생물군인 C형(회유성) 어종에 대해서도 충분한 유인 효과를 제공할 수 있음을 입증한다.

결론적으로, 이상적인 가상 적층 모델보다 실측 데이터를 반영한 실무형 모델이 어류의 생태적 의존도 및 정착 특성을 다각도로 충족시키고 있으며, 결과적으로 세 가지 대상 어종 모두에 대해 우수한 잠재적 유인 효율을 보유하고 있음을 확인하였다.

5. 연구의 한계점

본 연구는 인공어초 배치 모델에 따른 유동 특성을 정량적으로 규명하였으나, 다음과 같은 몇 가지 한계점을 지닌다.

첫째, 본 수치 해석은 조류와 같은 일정한 정상 유동(steady flow)만을 고려하였으며, 파랑(wave)이나 불규칙한 흐름 변화 등 실제 해역의 복잡한 동역학적 외력 조건을 완벽히 재현하지 않았다. 향후 연구에서는 파랑과 흐름이 공존하는 복합 외력 조건에서의 유동 특성 변화를 추가로 검토할 필요가 있다.

둘째, 해석의 효율성을 위해 지반 침하, 세굴, 부착 생물에 의한 조도 변화 등 시간 경과에 따른 물리적 변수를 배제하였다. 실제 해저면에 설치된 인공어초는 장기적으로 구조적 변형이 발생할 수 있으므로, 이러한 경년 변화가 후류 및 용승 면적에 미치는 영향에 관한 실증적 연구가 보완되어야 한다.

셋째, 후류 및 용승 영역에 따른 어류 유인 효과를 Nakamura(1985)의 생태적 분류에 근거하여 정성적으로 고찰하였으나, 이는 실제 어류의 행동 양식이나 생물량(biomass) 증가를 직접적으로 측정된 결과는 아니다. 따라서 본 연구의 수치 해석 결과와 실제 해역에서의 수중 영상 모니터링

링 또는 어획 조사 데이터 간의 상관관계를 검증하는 후속 연구가 필요하다.

마지막으로, 본 연구는 국내에서 가장 범용적인 사각형 어초만을 대상으로 수행되었다. 어초의 형상(공극률, 개구부의 형태 등)에 따라 유동 박리 지점과 연직류 형성 기작이 달라질 수 있으므로, 다양한 형식의 어초 군 배치에 대한 범용적인 분석이 추가로 이루어져야 할 것이다.

IV. 결론

본 연구는 사각형 어초로 구성된 인공어초 군의 가상적 공간 배치 모델이 유동과의 상호작용으로 형성하는 후류 및 용승 영역의 특성을 규명하고, 이를 어종별 생태적 특성과 연계하여 배치 효과를 평가하였다. 주요 연구 결과 및 시사점은 다음과 같다.

첫째, 각 배치 모델의 수직적 분석 단면을 검토한 결과, 후류 면적은 해저면에 인접할수록 지배적으로 발달하였으며, 용승 면적은 구조물의 최상단 부근에서 정점을 기록한 후 상층부로 확산하는 양상을 보였다. 이는 단면별 면적 분석이 어초 군의 수직적 영향 범위를 파악하는 데 유효한 지표임을 시사한다.

둘째, 배치 모델별 비교·분석 결과, 정형화된 가상 모델(Hexa, Rect, Pyra)보다 실제 배치 현황을 반영한 실무형 모델(Tri, Tetra, Penta)에서 후류 및 용승 면적의 확장이 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 특히 기저 면적이 넓고 기하학적 복잡성이 높은 방사형 배치는 시설 높이가 상대적으로 낮더라도 유동의 저항과 연직 편향을 효과적으로 유도하여, 단순 적층 방식보다 넓은 물리적 영향권을 형성함을 입증하였다.

셋째, 대상 어종의 생태적 유형에 따른 유인 효과를 고찰한 결과, 실무형 모델은 저층부의 광범위한 후류 면적을 통해 A형(저서성) 어류에게 유리한 정착 환경을 제공하며, 상층부까지 도달하는 유의미한 용승 면적을 통해 B형(근접 서식

성) 및 C형(회유성) 어종의 활동 영역을 확장하는 것으로 나타났다.

결론적으로, 인공어초 배치 설계 시 단위 어초를 단순히 집적하기보다는 대상 해역의 목표 어종과 수심별 유동 특성을 고려하여 방사형(팔 모양) 분산 배치 전략을 수립하는 것이 수산 자원 조성 효율을 극대화하는 방안이 될 수 있다. 본 연구에서 도출된 단면별 면적 분석 결과와 배치 시나리오별 특성 데이터는 향후 과학적인 인공어초 배치 지침 수립을 위한 실무적 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

References

- Anderson DM and Prell WL(1993). A 300 KYR record of upwelling off Oman during the late Quaternary: evidence of the Asian Southwest Monsoon. *Paleoceanography*, 8(2), 193~208.
<https://doi.org/10.1029/93PA00256>
- ANSYS Inc.(2009). ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 12.1., Canonsburg, PA, USA, 53~98.
- Aure J, Strand Ø, Erga SR and Strohmeier T(2007). Primary production enhancement by artificial upwelling in a western Norwegian fjord. *Marine Ecology Progress Series*, 352, 39~52.
<https://doi.org/10.3354/meps07139>
- Bohnsack JA, Harper DE, McClellan DB and Hulsbeck M(1994). Effects of reef size on colonization and assemblage structure of fishes at artificial reefs off southeastern Florida, U.S.A. *Bulletin of Marine Science*. 55(2-3), 796~823.
- Bombace G, Fabi G, Fiorentini L and Speranza S(1994). Analysis of the efficacy of artificial reefs located in five different areas of the Adriatic Sea. *Bulletin of Marine Science*, 55(2-3), 559~580.
- Bortone SA, Samoilys MA and Francour P(2000). Fish and macroinvertebrate evaluation methods. In: *Artificial Reef Evaluation with Application to Natural Marine Habitats*. Seaman W, ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 127~164.
- Bortone SA(1998). Resolving the attraction-production dilemma in artificial reef research: some yeas and nays. *Fisheries*, 23(3), 6~10.

- [https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1998\)023<0006:RTADIA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1998)023<0006:RTADIA>2.0.CO;2)
- Charbonnel E, Serre C, Ruitton S, Harmelin JG and Jensen A(2002). Effects of increased habitat complexity on fish assemblages associated with large artificial reef units (French Mediterranean coast). *ICES Journal of Marine Science*, 59, S208~S213.
<https://doi.org/10.1006/jmsc.2002.1263>
- Chau TV and Na WB(2024). Flow characteristics analysis of artificial reef wake region using recirculating efficiency index. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 36(6), 1084~1093.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2024.12.36.6.1084>
- Chau TV, Jung S and Na WB(2021). Measurement and prediction of the initial settlement of cube-type artificial reef caused by free-fall installation using a laboratory-scale experiment, regression analysis, and numerical collision analysis. *Ocean Engineering*, 223, 108643.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108643>
- Claudet J and Pelletier D(2004). Marine protected areas and artificial reefs: a review of the interaction between management and scientific studies. *Aquatic Living Resources*, 17(2), 129~138.
<https://doi.org/10.1051/alr:2004017>
- Falcão M, Santos MN, Vicente M and Monteiro CC(2007). Biogeochemical processes and nutrient cycling within an artificial reef off southern Portugal. *Marine Environmental Research*, 63(5), 429~444.
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2006.12.001>
- FIRA(2025). 2025 Artificial Reef Installation Statistics (Appendix: Artificial Reef Information Booklet). FIRA, Busan, ROK, 27~37.
- Fox RW, McDonald AT and Pritchard PJ(2004). *Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley & Sonc, Inc., Danvers, MA, USA, 433~446.
- Grossman GD, Jones GP and Seaman WJ(1997). Do artificial reefs increase regional fish production? A review of existing data. *Fisheries*, 22(4), 17~23.
[https://doi.org/10.1577/1548-8446\(1997\)022<0017:DA RIRF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8446(1997)022<0017:DA RIRF>2.0.CO;2)
- Grove RS and Sonu CJ(1985). Fishing reef planning in Japan. In: *Artificial Reefs Marine and Freshwater Applications*. D'Itri FM, ed. Lewis Publishers, Chelsea, MI, USA, 187~251.
- Han S, Jung S and Na WB(2020). Estimation of seabed settlement during initial installation of a box-type artificial reef considering different seabed soil compositions and incident angles. *Ocean Engineering*, 218, 108269.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108269>
- Jennings S, Kaiser MJ and Reynolds JD(2001). *Marine Fishery Ecology*. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK, 1~88.
- Jung S and Na WB(2018). Placement models of marine forest artificial reefs to increase wake region efficiency. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 30(1), 132~143.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.02.30.1.132>
- Jung S, Kim D and Na WB(2016). Wake volume characteristics considering artificial reef canyon intervals constructed by flatly distributed artificial reef set. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(3), 169~176.
<https://doi.org/10.5574/KSOE.2016.30.3.169>
- Jung S, Na WB and Kim D(2022). Rugosity and blocking indices of artificial reefs and their correlation with wake volume. *Ocean Engineering*, 261, 112204.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112204>
- Kim, D, Jeong JY, Jung S and Na WB(2024). Evaluating the particulate organic matter particles distribution characteristics around artificial reefs using computational fluid dynamics. *Ocean Engineering*, 292, 116574.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116574>
- Kim D, Jung S and Na WB(2016a). Efficiency index diagram for wake region evaluation of a artificial reefs facilitated for marine forest creation. *Journal of Advanced Research in Ocean Engineering*. 2(4), 169~178.
<https://doi.org/10.5574/JAROE.2016.2.4.169>
- Kim D, Jung S and Na WB(2016b). Wake region estimation of artificial reefs using wake volume diagrams. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 28(4), 1042~1056.
- Kim D, Jung S and Na WB(2020). Two perspectives for increasing of artificial reef wake region. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 32(6), 1623~1631.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2020.12.32.6.1623>

- Kim D, Jung S and Na WB(2021). Evaluation of turbulence models for estimating the wake region of artificial reefs using particulate image velocimetry and computational fluid dynamics. *Ocean Engineering*, 223, 108673.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108673>
- Kim D, Jung S, Kim J and Na WB(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>
- Kim D, Woo J and Na WB(2017). Intensively stacked placement models of artificial reef sets characterized by wake and upwelling regions. *Marine Technology Society Journal*, 51(3), 60~70.
<https://doi.org/10.4031/MTSJ.51.3.7>
- Kim D, Woo J, Na WB and Yoon HS(2014a). Flow and structural response characteristics of a box-type artificial reef. *Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. 26(3), 113~119.
<https://doi.org/10.9765/KSCOE.2014.26.3.113>
- Kim D, Woo J, Yoon HS and Na WB(2014b). Wake lengths and structural responses of Korean general artificial reefs. *Ocean Engineering*, 92, 83~91.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.09.040>
- Kim D, Woo J, Yoon HS and Na WB(2016c). Efficiency, tranquility and stability indices to evaluate performance in the artificial reef wake region. *Ocean Engineering*, 122, 253~261.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.06.030>
- Kim DS and Hwang SB(2006). Characteristics of oceanographic environment in a sea area for the building of artificial upwelling structure. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, 12(1), 1~8.
- Kim DS and Shimasaki Y(2013). Change in marine environment after artificial reef deployment in the South Sea of Korea. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 58(2), 403~415.
<https://doi.org/10.5109/27373>
- Kim HS, Lee JW, Kim JR and Yoon HS(2009a). Estimation of countermeasures and efficient use of volume of artificial reefs deployed in fishing grounds. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 12(3), 181~187.
- Kim HS, Lee JW, Won SH, Kim JR and Yoon HS(2009b). Estimation of efficient use of volume and facility volume distribution of artificial reefs deployed in the Busan Sea region. *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, 12(4), 255~263.
- Kim M and Na WB(2019). Initial settlement estimation of artificial reefs according to installation condition. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, 31(1), 28~34.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2019.2.31.1.28>
- Kim M, Jung S, Chau TV and Na WB(2023). Correlation of the structural characteristics of an artificial oyster reef with its wake region. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(4), 775.
<https://doi.org/10.3390/jmse11040775>
- Le QTN, Jung S and Na WB(2020). Wake region estimates of artificial reefs in Vietnam: Effects of tropical seawater temperatures and seasonal water flow variation. *Sustainability*, 12(15), 6191.
<https://doi.org/10.3390/su12156191>
- Lee IC, Kim D, Jung S and Na WB(2020). Prediction of primary physical measures for cost-effective management of artificial seaweed reefs. *Marine Technology Society Journal*, 54(1), 25~43.
<https://doi.org/10.4031/MTSJ.54.1.2>
- Lee MO and Kim JK(2024). The current status of artificial reefs (ARs) research in Korea and its future task. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 27(4), 179~189.
<https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2024.27.4.179>
- Mann KH and Lazier JRN(2006). *Dynamic Marine Ecosystems: Biological-physical Interactions in the Oceans*. Blackwell Science Ltd, Oxford, UK, 163~253.
- Miller DC, Norkko A and Pilditch CA(2002). Influence of diet on dispersal of horse mussel *Atrina zelandicabiodeposits*. *Marine Ecological Progress Series*, 242, 153~167.
<https://doi.org/10.3354/meps242153>
- Na WB(2023). Artificial reefs research. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 166.
<https://doi.org/10.3390/jmse11010166>
- Nakamura M(1985). Evolution of artificial fishing reef concepts in Japan. *Bulletin of Marine Science*, 37(1), 271~278.

- Oh TG, Otake S and Lee MO(2011). Estimating the effective wake region (current shadow) of artificial reefs. In: Artificial Reefs in Fisheries Management. Bortone SA, Brandini FP, Fabi, G and Otake S, eds. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 279~296.
- Otake S, Imamura H, Yamamoto H and Kondou K(1991). Physical and biological conditions around an artificial upwelling structure. In: Japan-US Symposium on Artificial Habitats for Fisheries Proceedings. Nakamura M, Grove RS and Sonu CJ, eds. South California Edison Co, Rosemead, CA, USA, 299~310.
- Pickering H and Whitmarsh D(1997). Artificial reefs and fisheries exploitation: a review of the 'attraction and production' debate, the influence of design and its significance for policy. Fisheries Research, 31(1-2), 39~59.
[https://doi.org/10.1016/S0165-7836\(97\)00019-2](https://doi.org/10.1016/S0165-7836(97)00019-2)
- Pitcher TJ and Seaman W(2000). Petrarch's principle: how protected human-made reefs can help the reconstruction of fisheries and marine ecosystems. Fish and Fisheries, 1(1), 73~81.
<https://doi.org/10.1046/j.1467-2979.2000.00010.x>
- Prairie JC, Sutherland KR, Nickols KJ and Kaltenberg AM(2012). Biophysical interactions in the plankton: a cross-scale review. Limnology & Oceanography: Fluids & Environments, 2(1), 121~145.
<https://doi.org/10.1215/21573689-1964713>
- Profito FJ, Giacomini M, Zachariadis DC and Dini D(2015). A general finite volume method for the solution of the Reynolds lubrication equation with a mass conservation cavitation model. Tribology Letters, 60, 18.
<https://doi.org/10.1007/s11249-015-0588-0>
- Ryakczewski R and Checkley DM(2008). Influence of ocean winds on the pelagic ecosystem in upwelling regions. PNAS, 105(6) 1965~1970.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0711777105>
- Sarhan T, Lafuente JG, Vargas M, Vargas JM and Plaza F(2000). Upwelling mechanism in the Northwestern Alboran Sea. Journal of Marine Systems, 23(4), 317~331.
[https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00068-8)
- Sawaragi T(1995). Coastal Engineering - Waves, Beaches, Wave - Structure Interactions. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 432~469.
- Sheng YP(2000). Physical characteristics and engineering at reef sites. In: Artificial Reef Evaluation with Application to Natural Marine Habitats. Seaman J, ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 51~94.
- Takeuchi T(1991). Design of artificial reefs in consideration of environmental characteristics. In: Japan-US symposium on Artificial Habitats for Fisheries proceedings. Nakamura M, Grove RS and Sonu CJ, eds. Southern California Edison Co, Rosemead, CA, USA, 195~203.
- Wolanski E and Hamner WM(1988). Topographically controlled fronts in the ocean and their biological influence. Science, 241(4862), 177~181.
<https://doi.org/10.1126/science.241.4862.177>
- Woo J, Kim D, Yoon HS and Na WB(2018). Efficient placement models of labyrinth-type artificial concrete reefs according to wake volume estimation to support natural submerged vegetation. Bulletin of Marine Science, 94(4), 1259~1272.
<https://doi.org/10.5343/bms.2016.1102>
- Woo J, Kim D, Yoon HS and Na WB(2014). Characterizing Korean general artificial reefs by drag coefficients. Ocean Engineering, 82, 105~114.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.02.025>
- Yanagi T and Nakajima M(1991). Change of oceanic condition by the man-made structure for upwelling. Marine Pollution Bulletin, 23, 131~135.
[https://doi.org/10.1016/0025-326X\(91\)90662-C](https://doi.org/10.1016/0025-326X(91)90662-C)
- Yoon HS(2018). Effective placement models of artificial reefs included the concepts of point, line, and space. Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 30(4), 1367~1381.
<https://doi.org/10.13000/JFMSE.2018.08.30.4.1367>
- Yoon HS, Kim D and Na WB(2016). Estimation of effective usable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management. Ocean & Coastal Management, 120, 135~147.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.12.007>

-
- Received : 12 May, 2026
 - Revised : 04 June, 2026
 - Accepted : 15 June, 2026