

재순환 효율지수를 이용한 인공어초 후류역의 흐름 특성 분석

차우 탄 반 · 나원배[†]
국립부경대학교(학생) · [†]국립부경대학교(교수)

Flow Characteristics Analysis of Artificial Reef Wake Region Using Recirculating Efficiency Index

Than Van CHAU · Won-Bae NA[†]
Pukyong National University(student) · [†]Pukyong National University(professor)

Abstract

A wake region is a recirculating water flow zone formed behind an artificial reef (AR). The region is richer in nutrients and organic matter than the surrounding water mass, and has lower water flow, which helps promote the feeding and resting activities of marine organisms. Studies on the artificial reef wake region have mainly focused on its size. However, the performance of the wake region cannot be limited to the size, and the velocity of the recirculating flow should be also evaluated as an important factor. Thus, we proposed a recirculating efficiency index of a cube-type AR and examined ways to increase the efficiency index by modifying the geometric characteristics of the reef. When considering seven variations of the basic design (AR1) of the reef, the inclination of the corner members or the increase in the overall thickness of the members due to the reduction of the perforated area did not improve the efficiency index. On the other hand, in the design plan that maintained the thickness of the basic but reduced the perforated area or increased the area of the structural element that blocks the inflow, the efficiency index increased by more than 40%. This is because the flow-blocking function of the design plan was strengthened, generating a relatively low-speed recirculating flow inside and at the rear of the AR. Thus, it can be said that increasing the volume of the reef as small as possible while increasing the area of the structural element that blocks the flow into the reef is beneficial for improving the recirculating efficiency.

Key words : Artificial reef, Recirculating water flow, Wake region, Recirculating efficiency index

I. 서론

후류역(wake region)은 인공어초(artificial reef) 후면에 생성되는 재순환 흐름(recirculating water flow) 영역으로 주변 수괴(water mass)보다 영양분과 유기물이 풍부하고, 유속이 작아서 해양 생물의 먹이 및 휴식 활동을 촉진하는 기능을 한다(Hixon and Beets, 1989; Einbinder et al., 2006;

Leitão et al., 2008; Kim and Na, 2019). 또한, 후류역에 발생하는 재순환 흐름은 영양소, 이산화탄소, 산소 공급, 폐기물 제거, 유생 정착 등에 유리한 조건을 제공할 수 있고(Crisp, 1955; Pickering and Whitmarsh, 1997), 재순환 속도가 주변 유속보다 상대적으로 느리면 수생생물이 정착하고, 에너지 비용을 줄이는 데 도움이 된다(Beal et al., 2006; Bradford and Heinonen, 2008; Hockley

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

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2023년)에 의하여 연구되었음.

et al., 2014). 하지만 재순환 흐름의 속도가 너무 높거나 낮으면 해양 생물에게 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 먼저, 극단적인 재순환 유속에서는 해양 생물이 기질에서 분리될 수 있고, 먹이 섭취가 감소하거나 중단될 수 있으며, 유생이 제대로 정착하지 못할 수 있다(Baynes and Szmant, 1989). 반면, 물 순환 속도가 너무 낮으면 침전 수준이 높아져서 질식, 생리적 기능 방해 등을 통해 정착성 저서생물에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다. 이런 환경이 평평한 지반에 놓여 있는 인공어초에 지속되면 퇴적물이 지속해서 집적되고, 저서생물은 더 큰 퇴적 스트레스에 노출되게 된다(Pickering and Whitmarsh, 1997). 따라서 인공어초 후류역에 발생하는 재순환 흐름의 유속은 적정 수준으로 유지될 필요가 있다.

이와 같은 후류역의 기능에 착안하여 후류역의 크기를 정량적으로 평가하는 연구가 수행되었고(Liu and Su, 2013; Liu et al., 2013; Kim et al., 2014; Kim et al., 2016b; Jung and Na, 2018; Na, 2023), 주변 흐름 및 인공어초 특성을 후류역과 연계하는 다양한 성능 지수가 개발되었다(Kim et al., 2016a, Kim et al., 2016c; Jung et al., 2022; Kim et al., 2023). 특히 후류역의 크기를 3차원으로 정량화한 후류체적(wake volume)은 다양한 인공어초 성능을 평가하는 데 사용되고 있다(Woo et al., 2018; Le et al., 2020). 후류역 성능평가에 관한 연구는 최근 전산유체역학과 유동 분석용 소프트웨어의 개발로 가속화되는 경향을 나타낸다(Kim et al., 2021; Chau et al., 2024; Kim et al., 2024). 수치 시뮬레이션은 축소된 모형실험보다 상대적으로 적은 노력으로 인공어초 주변의 유동장을 시각화할 수 있게 한다.

일부 아시아 국가 등에서 활용되는 인공어초는 기존의 인공어초보다 크고 더 복잡한 구조 특성을 갖는다(Yoon et al., 2016; Han et al., 2020). 따라서 비교적 복잡하고 대형인 인공어초의 후류역을 증대시키기 위해 인공어초의 기하학적 인자(인공어초 높이)와 환경인자(유속)를 고려하여 후

류역을 개선하는 연구가 수행되었다(Kim et al., 2020). 해당 연구는 후류역을 확보하기 위해서는 인공어초 구조 요소의 두께와 면적이 중요하며, 만일 인공어초가 얇은 강철 프레임으로만 구성되면 후류역이 생성되지 않음을 확인하였다. 이는 후류역 생성을 위해서는 흐름을 막아주는 인공어초 구조 요소의 기능이 중요함을 의미한다. 또한, 해당 연구는 후류역이 발생하는 인공어초의 경우 크기(높이)와 후류역의 크기는 유의한 양의 상관관계를 가지며, 후면부에 와류(wake)가 충분히 발생하면 유입 유속의 증가에 따른 후류체적의 변동은 적음을 확인하였다. 해당 연구에 따르면 후류역을 증가시키기 위해서는 인공어초 크기뿐만 아니라 인공어초를 구성하는 구조 요소의 두께와 면적이 중요한 역할을 한다고 할 수 있다.

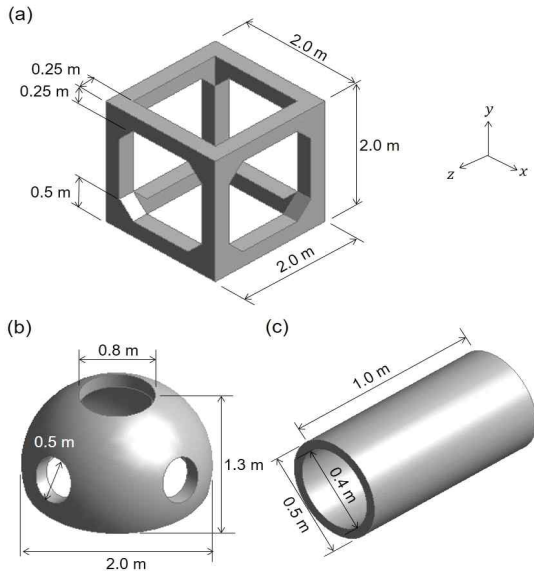
이처럼 후류역을 확보하거나 증가시키는 방안에 대한 고찰은 인공어초의 설계 및 성능평가에 활용될 수 있다. 하지만, 후류역의 성능은 후류역의 크기에만 한정될 수 없고, 후류역에 발생하는 재순환 흐름의 유속 또한 중요한 요소로 평가되어야 한다(Kim et al., 2016c; Kim et al., 2019; Lee et al., 2020). 따라서 본 연구에서는 기하학적 특성이 구별되는 인공어초를 대상 구조물로 설정하고, 후류역에 발생하는 재순환 흐름의 유속 특성을 분석하였다. 이를 위해서 본 연구는 인공어초의 체적과 연계하여 후류역 유속 특성을 평가하는 재순환 효율지수(recirculating efficiency index; REI)를 제안하고, 해당 지수를 일정 수준으로 증가하는 설계 방안을 제시하였다.

II. 연구 방법

1. 대상 인공어초

[Fig. 1]은 본 연구에서 고려한 기하학적 특성이 뚜렷이 구별되는 세 가지 인공어초를 나타낸다. 여기서 ‘AR’은 ‘인공어초’를 의미하며 숫자는 식별 번호이다. 즉, AR1, AR2, AR3은 사각형 어

초(cube-type AR), 반구형 어초(hemisphere-type AR), 원통형 어초(cylindrical-type AR)를 각각 뜻한다.



[Fig. 1] Target ARs: (a) cube-type AR (AR1), (b) hemisphere-type AR (AR2), and (c) cylindrical-type AR (AR2).

이들 어초는 우리나라 인공어초 모형의 기하학적 특성에 따라 분류하면 상자(box), 돔(dome), 터널(tunnel)에 각각 속한다(Woo et al., 2014). 기존 연구에 따르면 특정 인공어초에 대한 생물 종의 선호도는 다양하며, 인공어초 구조와 어획량 간의 유의한 상관관계를 일부 발견할 수 있다(Pickering and Whitmarsh, 1997). 예를 들면, 우리나라 해역에서 사각형 어초는 볼락(rock fish)이 선호하고, 반구형 어초는 저서 어류가 선호하는 경향을 나타낸다(Lee and Kang, 1994). 또한, 원통형 어초에서는 어류의 높은 종 다양성이 나타났는데, 이는 은신처로서의 유효성, 속이 빈 내부 공간, 빛에 대한 그림자 확보, 높은 표면적 등이 그 원인으로 분석되었다(Kim et al., 1994; Marinaro, 1995). 또한, 사각형 어초와 반구형 어초는 우리나라 해역에 가장 많이 설치된 어초 모

형이다(Yoon et al., 2016; Kim and Na, 2019; Kim et al., 2019). 따라서 본 연구에서는 우리나라 인공어초를 대표할 수 있는 사각형, 반구형, 원통형 어초를 연구 대상으로 고려하였다.

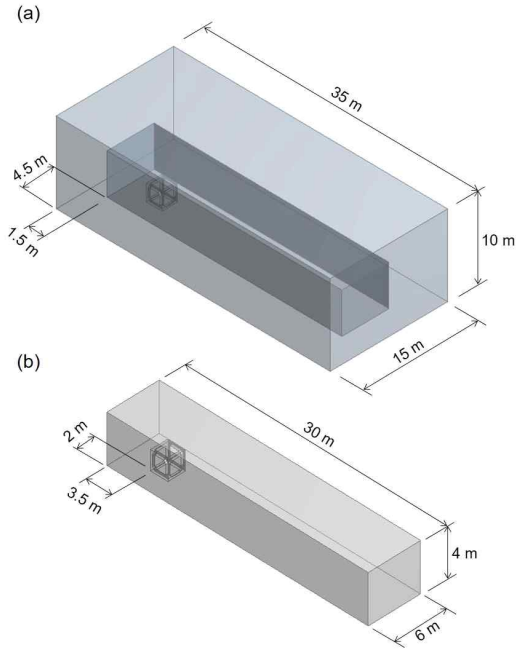
2. 해석방법

본 연구에서는 압력 기반 유한체적법(finite volume method)을 탑재한 유동 해석 전용 소프트웨어인 ‘ANSYS-Fluent’가 사용되었다(ANSYS Inc., 2020). 지배 방정식은 질량과 운동량 보존에 대한 적분 방정식이며, ‘Reynolds Stress Model’이 난류 모델(turbulence model)로 사용되었다. 해당 모델은 인공어초의 후류역 특성 평가에 우수한 성능을 발휘하는 것으로 평가되었다(Kim et al., 2021).

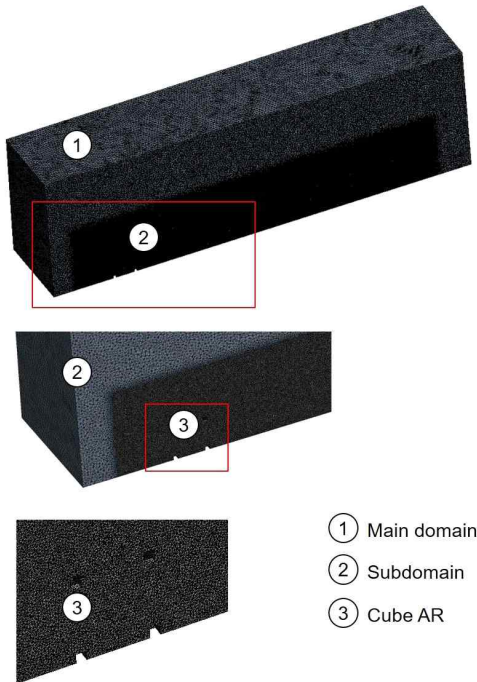
흐름 해석 과정은 다음과 같다. 첫째, 유한 체적을 사용하여 해석 영역을 35m×15m×10m의 직육면체로 모형화하였다([Fig. 2]). 유동장을 2개 영역으로 나누어 대상 인공어초 주변을 더욱 조밀하게 모형화하였다([Fig. 2], [Fig. 3]). 유체는 연속체인 물로 가정하였고, 물의 물성값은 <Table 1>과 같이 설정하였다. 둘째, 직육면체 유동장의 앞면과 뒷면은 각각 흐름의 입구(inlet)와 출구(outlet)로 설정되었고, 입구에서 초기 유속(inlet velocity)을 <Table 1>과 같이 설정하였다.

<Table 1> Material properties of water, inlet velocities, analysis conditions, the dimensions of flow domain, and the number of elements

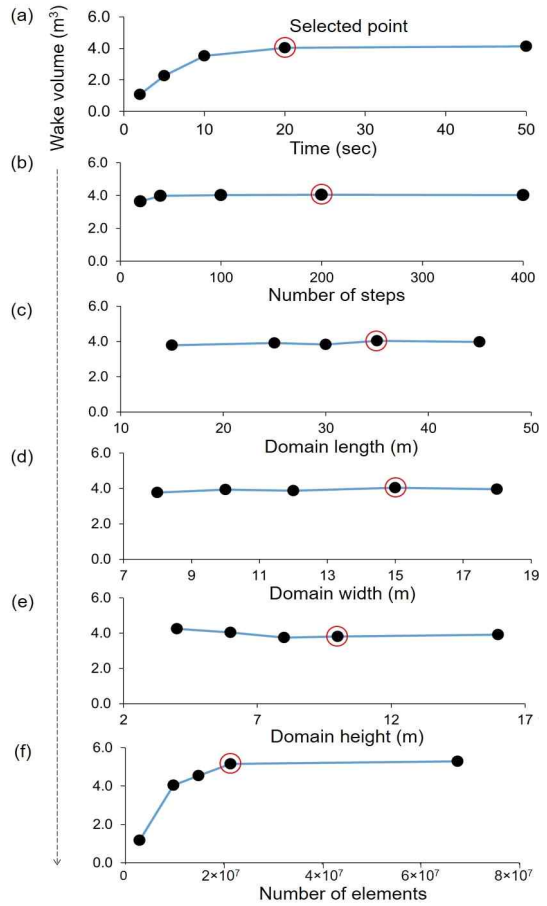
Property	Value
Density (ρ)	998.2kg·m ⁻³
Dynamic viscosity (μ)	1.003×10 ⁻³ kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹
Inlet velocities	0.5, 1.0, 1.5 or 2m·s ⁻¹
Analysis time and step	20sec, 200
Flow domain	L35m, W15m, H10m,
Number of elements	> 2×10 ⁷



[Fig. 2] Flow domains: (a) the main domain and (b) sub domain.



[Fig. 3] Discretization of flow domain.



[Fig. 4] Independence test results.

고려된 입구 유속의 하나인 $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 는 인공어초의 안정성 설계에서 주로 사용되는 유속이다. 출구에서는 유입된 유체가 출구를 통해 유출되도록 압력 경사를 설정하였다. 유동장의 좌측, 우측, 상부 면은 대칭 평면으로 가정되었는데, 이는 대칭 평면 경계에서 거울효과(mirror effect)로 유동장이 확장되는 것을 뜻한다. 바닥과 인공어초와 유체의 경계는 매끄러운 면으로 가정되었다.

셋째, 더욱 정확한 해석 결과를 구하기 위해 해석 시간, 해석 단계, 유동장 길이, 폭, 높이, 그리고 요소 수의 독립성 테스트를 수행하고, 후류체적의 수렴성을 [Fig. 4]와 같이 확인하였다. 이를 통해 <Table 1>과 같이 수렴 단계의 수치들

해석에 적용하였다.

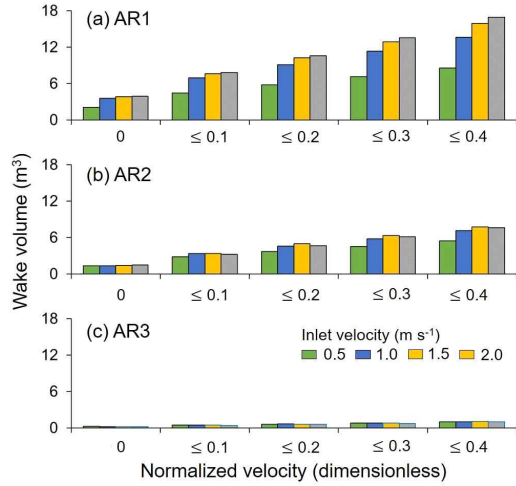
본 연구에서는 후류역 재순환 흐름의 유속을 인공어초의 기하학적 특성과 연관하여 평가하기 위해 재순환 효율지수를 제안하였다. 이는 특정 재순환 유속에 해당하는 후류체적을 인공어초의 체적으로 나눈 것으로 무차원이다. 또한, 정규화된 재순환 유속(v_{nr})이 사용되었는데, 이는 해당 후류체적에서의 재순환 유속을 입구 유속으로 정규화한 것을 말한다.

III. 연구 결과

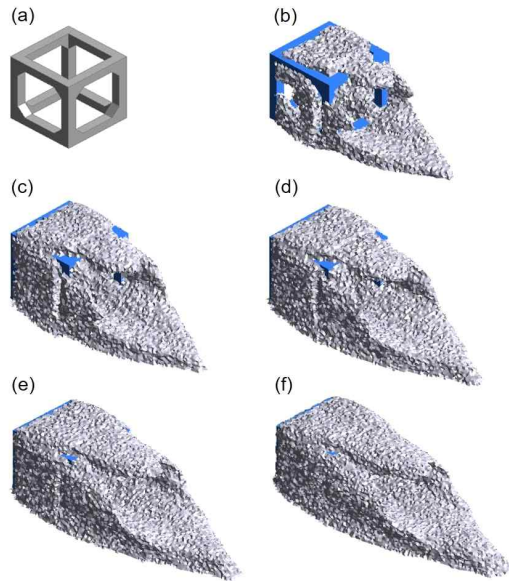
<Table 2>는 입구 유속이 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m·s⁻¹ 일 때 후류체적을 정규화된 재순환 유속 범위로 분류한 것이다. <Table 2>를 [Fig. 5]에 시각화하면, AR1의 경우 입구 유속이 커질수록 재순환 유속 범위에 해당하는 후류역이 일정한 비율로 증가함을 알 수 있다.

<Table 2> Wake volumes of AR1, AR2, and AR3, classified by v_{nr} ranging 0.0, ≤ 0.1 , ≤ 0.2 , ≤ 0.3 , and ≤ 0.4 , respectively, when the inlet velocity is 0.5, 1.0, 1.5, or 2.0 m·s⁻¹

Inlet velocity (m·s ⁻¹)	AR	Wake volumes (m ³) at normalized recirculating velocities				
		0.0	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.3	≤ 0.4
0.5	AR1	2.12	4.47	5.83	7.16	8.58
	AR2	1.39	2.87	3.75	4.55	5.47
	AR3	0.25	0.51	0.65	0.81	1.01
1.0	AR1	3.58	6.99	9.15	11.34	13.67
	AR2	1.37	3.36	4.62	5.81	7.14
	AR3	0.24	0.51	0.66	0.83	1.03
1.5	AR1	3.85	7.66	10.25	12.90	15.90
	AR2	1.45	3.42	5.00	6.34	7.74
	AR3	0.22	0.46	0.63	0.82	1.06
2.0	AR1	3.96	7.83	10.60	13.54	16.96
	AR2	1.52	3.22	4.69	6.18	7.67
	AR3	0.22	0.45	0.61	0.78	1.01



[Fig. 5] Wake volumes of AR1, AR2, and AR3 considering v_{nr} ranges of 0.0, ≤ 0.1 , ≤ 0.2 , ≤ 0.3 , and ≤ 0.4 , respectively, when the inlet velocity is 0.5, 1.0, 1.5, or 2.0 m·s⁻¹.



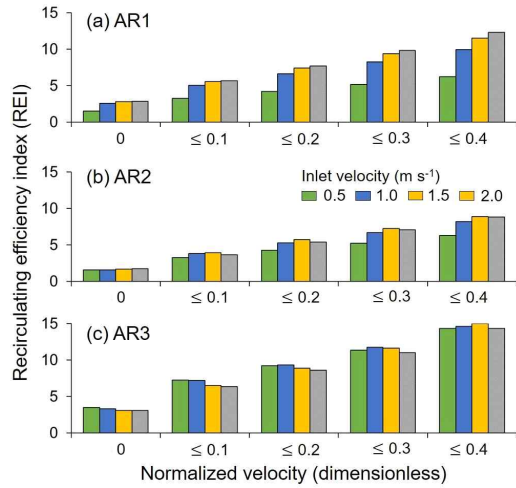
[Fig. 6] Visualization of wake volumes of AR1 when the normalized recirculating velocity ranges are: (a) 0.0, (b) ≤ 0.1 , (c) ≤ 0.2 , (d) ≤ 0.3 , and (e) ≤ 0.4 , respectively. In this case, the inlet velocity is 1 m·s⁻¹.

반면, AR2와 AR3에서는 증가 현상이 덜 명확하다. 따라서 사각형 어초(AR1)의 경우 재순환 흐름의 유속이 입구 유속에 민감하게 반응함을 알 수 있다. [Fig. 6]은 입구 유속이 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 일 때 AR1의 후류체적을 정규화된 역순환 흐름의 유속에 따라 나타낸 것이다. 후류역이 인공어초 후면에 주로 형성됨을 알 수 있다.

<Table 3>은 세 가지 인공어초의 재순환 효율지수를 나타낸다. 재순환 효율지수를 산정하기 위해 고려된 인공어초 체적은 1.375m^3 (AR01), $7.069\times 10^{-2}\text{m}^3$ (AR02), $8.704\times 10^{-1}\text{m}^3$ (AR03)이다. 재순환 효율지수를 [Fig. 7]에 나타내면 AR3의 재순환 효율지수가 높고, AR1, AR2 순으로 재순환 효율지수가 낮음을 알 수 있다. AR2의 경우 후류역의 특성을 변화하기 위해 인공어초를 기하학적으로 변형하기 어려운 구조형식이다. 따라서, 본 연구에서는 AR1을 기하학적으로 변형하여 재순환 효율지수를 향상하고자 하였다.

<Table 3> Recirculating efficiency indices (REI) of AR1, AR2, and AR3, classified by v_{nr} ranging 0.0, ≤ 0.1 , ≤ 0.2 , ≤ 0.3 , and ≤ 0.4 , respectively, when the inlet velocity is 0.5, 1.0, 1.5, or $2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

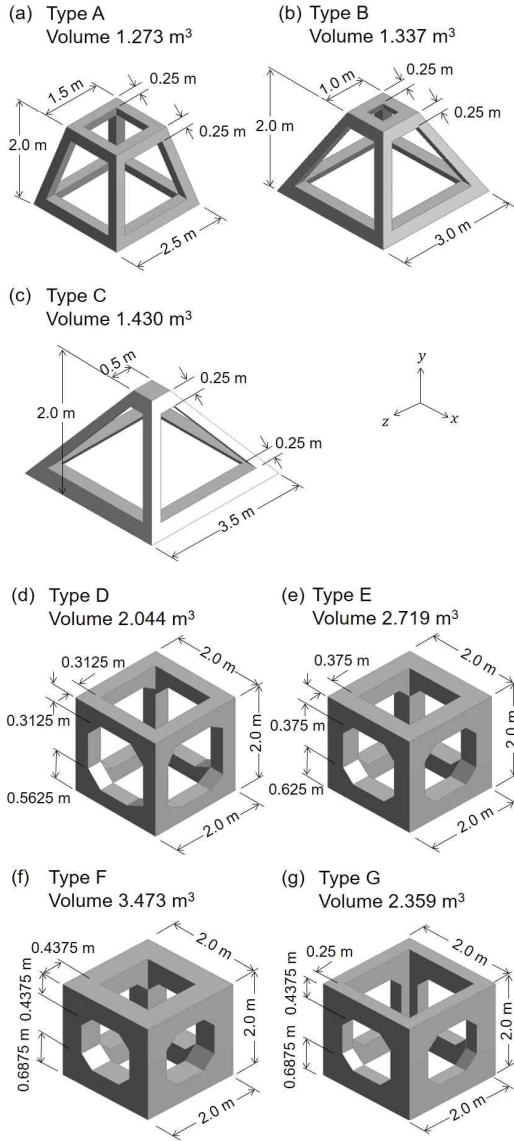
Inlet velocity ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	AR	Recirculating efficiency index (REI) at normalized recirculating velocities				
		0.0	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.3	≤ 0.4
0.5	AR1	1.54	3.25	4.24	5.21	6.24
	AR2	1.59	3.30	4.31	5.23	6.28
	AR3	3.51	7.26	9.23	11.39	14.32
1.0	AR1	2.61	5.08	6.65	8.25	9.94
	AR2	1.57	3.86	5.31	6.68	8.20
	AR3	3.34	7.18	9.36	11.74	14.60
1.5	AR1	2.80	5.57	7.45	9.38	11.56
	AR2	1.67	3.93	5.74	7.29	8.90
	AR3	3.10	6.54	8.92	11.62	15.03
2.0	AR1	2.88	5.69	7.71	9.85	12.33
	AR2	1.75	3.69	5.39	7.10	8.81
	AR3	3.09	6.35	8.60	11.03	14.33



[Fig. 7] Recirculating efficiency indices of AR1, AR2, and AR3 considering v_{nr} ranges of 0.0, ≤ 0.1 , ≤ 0.2 , ≤ 0.3 , and ≤ 0.4 , respectively, when the inlet velocity is 0.5, 1.0, 1.5, or $2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

[Fig. 8]은 AR1의 재순환 효율지수를 개선하기 위해 고려된 7가지 인공어초 모형을 나타낸다. [Fig. 8]에서 고려한 7가지 인공어초 모형과 AR1의 후류체적을 [Fig. 9]에 나타내었다. 유입 유속은 $2.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 고려하였다. Type A, B, C를 비교했을 때 인공어초 경사길이(모퉁이 부재의 기울기)가 클수록 후류체적이 작아짐을 알 수 있다. Type D, E, F를 비교했을 때 유공 면적이 작아질수록(인공어초의 체적이 커질수록) 후류체적이 커짐을 알 수 있다. 이는 유공 면적이 작아지면 흐름을 막아주는 인공어초 구조 요소의 기능이 커지기 때문이다. 따라서 Type D, E, F의 후류체적이 AR1보다 크다. 또한, Type G(Type F에서 벽 두께를 0.4375m 에서 0.25m 로 감소시킨 모형)는 Type F보다 후류체적이 증가하였다. 이는 두께 감소로 인한 내부 공간이 증가하여 후류체적이 증가했기 때문이다. [Fig. 9]의 후류체적과 해당 모형의 체적을 고려하여 재순환 효율지수를 [Fig. 10]에 나타내었다. Type A, B, C를 비교했을 때 인공어초 경사길이(모퉁이 부재의 기울기)가 클

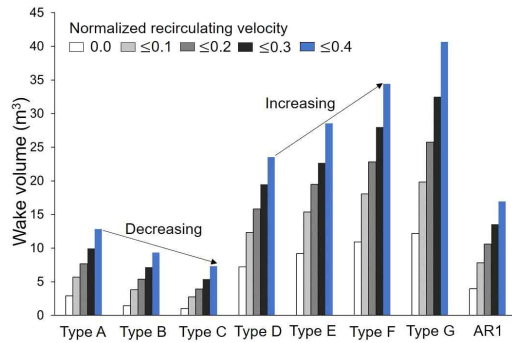
수록 재순환 효율지수가 작아짐을 알 수 있다.



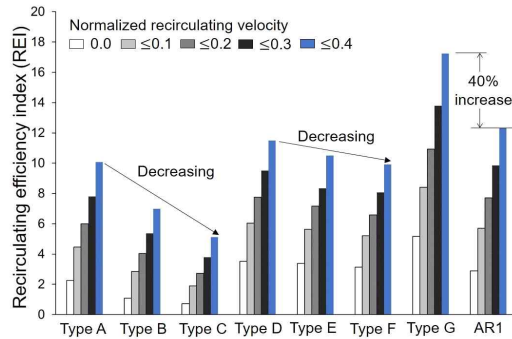
[Fig. 8] AR models, considered to improve recirculating efficiency indices: (a) Type A, (b) Type B, (c) Type C, (d) Type D, (e) Type E, (f) Type F, and (d) Type G.

Type D, E, F를 비교했을 때 후류체적과 달리 인공어초의 체적이 클수록 재순환 효율지수가 작

아짐을 알 수 있다. 이는 재순환 효율지수에 인공어초의 기하학적 체적이 고려되기 때문이다. 이들 6가지 인공어초의 재순환 효율지수는 AR1과 유사하거나(예: Type D), AR1보다 작다(예: Type E, Type F). 반면 정규화된 재순환 유속이 $0, \leq 0.1, \leq 0.2, \leq 0.3, \leq 0.4$ 인 경우에 Type G의 재순환 효율지수가 AR1보다 79%, 48%, 42%, 40%, 40% 증가하였다. 이는 Type G의 경우처럼 AR1과 같은 벽 두께를 가지지만, AR1보다 작은 유공을 가질 때 재순환 효율지수가 증가한다는 것을 뜻한다.



[Fig. 9] Wake volume of seven ARs (Types A, B, C, D, E, F, and G) and AR1.



[Fig. 10] Recirculating efficiency index (REI) of seven ARs (Types A, B, C, D, E, F, and G) and AR1.

Type G가 AR1보다 후류체적과 재순환 효율지수가 큰 이유는 사각형 어초의 형상과도 매우 밀

접한 관련이 있다. 이를 설명하기 위해서는 유체와 물체의 상호작용을 살펴볼 필요가 있다. 첫째, 유체가 물체표면 위를 지나게 되면 유체와 물체 사이에 마찰이 발생한다. 마찰이 발생하게 되면 물체표면과 접해 있는 유체의 속도는 0이 되는데 이 상태를 노슬립 조건(no-slip condition)이라 한다. 이처럼 마찰이 발생하는 이유는 유체가 점성을 가지고 있기 때문이며, 유체의 점성 효과가 확연히 나타나는 영역을 경계층(boundary layer)이라고 한다. 둘째, 유체가 물체표면 위를 흐를수록 경계층의 두께는 점점 커진다. 경계층이 성장하면 물체표면에 전단응력이 발생하고, 이는 마찰항력(friction drag)을 유발한다. 이는 물체표면에 인접한 유동속도를 점점 감소시키고, 압력을 증가시켜 결국 유동을 멈추게 한다, 이처럼 유동박리(flow separation)가 발생하면 역방향 흐름과 소용돌이 형태의 후류(wake)가 발생한다. 셋째, 압력이 높아져서 발생하는 유동박리는 항력을 증가시킨다. 이처럼 유동박리로 인한 항력을 압력항력(pressure drag)이라 한다. 넷째, 사각형 어초는 흐름 방향으로 비교적 작은 기하학적 크기를 가지고 있어 상기에서 서술한 마찰항력을 발생시키는 데 불리한 형상을 지니고 있다. 이는 상대적으로 유속과 수직 방향에 놓여 있는 전면 면적이 항력을 발생시키는 데 중요한 역할을 함을 뜻한다. 따라서 사각형 어초의 경우 벽 두께보다 전면 면적의 크기가 후류체적의 크기에 미치는 영향이 크고, 이는 AR1보다 Type G의 후류체적과 재순환 효율지수가 큰 이유이다.

본 연구의 범위(재순환 효율지수를 이용한 인공어초 후류역에 발생하는 재순환 흐름의 유속 특성 분석)에 따른 제한점은 다음과 같다. 첫째, 재순환 흐름의 특성 중 하나인 유향은 본 연구에서 고려되지 않았다. 따라서 향후 유향에 따른 후류역의 유속 특성을 연구할 필요가 있다. 이를 위해서 기존에 제안된 후류체적선도(wake volume diagram; Kim et al., 2016b)와 효율지수선도(efficiency index diagram; Kim et al., 2016a)의 개

념을 확장할 필요가 있다. 둘째, 본 연구에서는 유체의 점성을 하나의 값으로 고정하여 재순환 효율지수를 산정하였다. 따라서 향후 유체의 점성 변화가 재순환 효율지수에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다. 셋째, 본 연구에서는 재순환 효율지수 산정에 해저의 지반 특성과 수심의 영향을 고려하지 않았다. 따라서 향후 이들 인자가 인공어초 후류역의 유속에 미치는 영향을 고려할 필요가 있다. 넷째, 본 연구는 재순환 흐름이 해양 생물의 서식에 미치는 구체적인 생태학적 영향을 규명하지 않았다. 이는 서론에서 언급한 것과 같이 해양 생물의 종과 성장 단계 등에 따라 재순환 흐름과 상호 작용하는 방식이 달라서 이를 특정하기가 쉽지 않기 때문이다. 또한, 기존의 연구는 특정 수생생물 종과 수생 환경에 한정되므로 이를 일반화하기에는 부족한 부분이 있다. 따라서 재순환 흐름과 해양 생물의 생태학적 영향의 상관관계를 구체적으로 규명하기 위해서는 별도의 연구가 필요하다.

IV. 결론

본 연구에서는 인공어초의 재순환 효율지수를 제안하고, 사각형 어초의 기하학적 특성을 변형하여 재순환 효율지수를 증가하는 방안을 검토하였다. 사각형 어초의 기본 설계(AR1)의 7가지 변형 모형을 고려할 때, 모퉁이 부재의 기울임과 유공 면적 감소로 인한 전반적인 부재 두께의 증가는 재순환 효율지수를 향상하지 못했다. 반면 부재 두께는 기본 설계와 같이 유지하되 유공 면적을 감소시킨(또는 유입되는 흐름을 막아주는 구조 요소의 면적을 증가시킨) 모형에서는 재순환 효율지수가 40% 이상 증가하였다. 이는 해당 모형의 흐름을 막아주는 기능이 강화되어 인공어초 내부와 후면부에 비교적 저속의 재순환 흐름을 생성하기 때문이다. 따라서 인공어초의 기하학적 체적을 가능한 한 작게 증가시키면서 인공어초로 유입하는 흐름을 막아주는 구조 요소의

면적을 증가시키는 것이 재순환 효율지수 향상에 유익하다고 할 수 있다.

References

- ANSYS Inc.(2020). ANSYS Fluent User's Guide Release 2020 R1. ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA.
- Baynes TW and Szmant AM(1989). Effect of current on the sessile benthic community structure of an artificial reef. *Bulletin of Marine Science*, 44(2), 545~566.
- Beal DN, Hover FS, Triantafyllou MS, Liao JC and Lauder GV(2006). Passive propulsion in vortex wakes. *Journal of Fluid Mechanics*, 549, 385~402. <https://doi.org/10.1017/S0022112005007925>
- Bradford MJ and Heinonen JS(2008). Low flows, instream flow needs and fish ecology in small streams. *Canadian Water Resources Journal*, 33(2), 165~180. <https://doi.org/10.4296/cwrj3302165>
- Chau TV, Jung S, Kim M and Na WB(2024). Analysis of the bending height of flexible marine vegetation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(7), 1054. <https://doi.org/10.3390/jmse12071054>
- Crips DJ(1955). The behaviour of barnacle cyprids in relation to water movement over a surface. *Journal of Experimental Biology*, 32(3), 569~590. <https://doi.org/10.1242/jeb.32.3.569>
- Einbinder S, Perelberg A, Ben-Shaprut O, Foucart MH and Shashar N(2006). Effect of artificial reefs on fish grazing in their vicinity: Evidence from algae presentation experiments. *Marine Environment Research*, 61(1), 110~119. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2005.07.001>
- 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>
- Hixon MA and Beets JP(1989). Shelter characteristics and Caribbean fish assemblages: experiments with artificial reefs. *Bulletin of Marine Science*, 44(2), 666~680.
- Hockley FA, Wilson CAME, Brew A and Cable J(2014). Fish response to flow velocity and turbulence in relation to size, sex and parasite load. *Journal of the Royal Society Interface*, 11(91), 20130814. <https://doi.org/10.1098/rsif.2013.0814>
- 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>
- 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>
- Kim CG, Lee JW, Park JS(1994). Artificial reef design for Korean coastal waters. *Bulletin of Marine Science*, 55(2-3), 858~866.
- 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, 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, 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. <https://doi.org/10.13000/JFMSE.2016.28.4.1042>
- 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, Woo J, Yoon HS and Na WB(2014). 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 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>
- 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>
- 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 JW and Kang YS(1994). Variation of fish community and fish density on artificial reefs. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 27(5), 535~548.
- 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>
- Leitão F, Santos MN, Erzini K and Monteiro CC(2008). The effect of predation on artificial reef juvenile demersal fish species. *Marine Biology*, 153, 1233~1244. <https://doi.org/10.1007/s00227-007-0898-3>
- Liu TL and Su DT(2013). Numerical analysis of the influence of reef arrangements on artificial reef flow fields. *Ocean Engineering*, 74, 81~89. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.09.006>
- Liu Y, Zhao Y, Dong G, Guan C, Cui Y and Xu TJ(2013). A Study of the flow field characteristics around star-shaped artificial reefs. *Journal of Fluids and Structures*, 39, 27~40. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.02.018>
- Marinaro JY(1995). Artificial reefs in the French Mediterranean: a crucial assessment of previous experiments and a proposition in favour of a new reef planning policy. *Biologia Marina Méditerranea*, 2, 65~76.
- Na WB(2023). Artificial reefs research. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1), 166. <https://doi.org/10.3390/jmse11010166>
- Pickering H and Whitmarsh D(1997). Artificial reefs and fisheries exploitation: a review of the 'attraction versus 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)
- 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>
- 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>
- 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 : 28 August, 2024
 - Revised : 28 October, 2024
 - Accepted : 04 November, 2024