



후류역 효율성 증대를 위한 해중림초 배치 모델

정소미 · 나원배[†]
(부경대학교)

Placement Models of Marine Forest Artificial Reefs to Increase Wake Region Efficiency

Somi JUNG · Won-Bae NA[†]
(Pukyong National University)

Abstract

This study presents placement models for marine forest artificial reefs (MFARs) to increase their wake region efficiency. For the purpose, first, ten line placement models are considered to investigate the effect of height difference between neighboring reefs on wake volumes. Second, seven single type placement models and eight mixed placement models are constructed. Third, wake volume of each placement model is calculated using the so-called element-based finite volume method. Finally, efficiency and unit propagation indices are estimated using the corresponding wake volumes and geometric characteristics of ARs. From the analysis results, it is shown a strong positive linear correlation between the efficiency indices and the height differences of the neighboring ARs. In addition, it is found that the mixed placement model with R1s (half-ball type reefs) improved both indices in comparison with the results of the single type placement models. Thus, a mixed placement model can be an alternative to improve the efficiency of wake region.

Key words : Marine forest artificial reef, Wake region, Line placement model, Mixed placement model

I. 서론

해중림초(marine forest artificial reef, artificial reef for marine seaweed)는 해중림 조성을 목적으로 해조류 및 패류의 부착, 서식 및 확산을 위해 해저에 설치된 해조류 및 패조류용 어초를 말한다. 갯녹음 발생에 대응하기 위한 방법의 일환으로 해중림 조성이 이뤄지고 있으며, 해중림 조성을 통하여 연안 생태계의 복원과 수산 자원의 확보를 기대할 수 있다(Park et al., 2016; Yoon et

al., 2016).

유동장(flow field)에 설치된 인공어초는 압력 차 및 난류로 인하여 구조물의 내부와 주변에 후류역(wake region)이 발생한다. 후류역에서는 물질 교환이 활발하고, 유속이 감소하는 효과가 있다(Oh, 2004; Kim et al., 2014a). 이러한 유체역학적 자극들은 각종 유기물 및 해양 생물을 위집시키는 역할을 한다. 따라서 후류역은 어초의 설계 및 배치에 있어서 중요한 평가 요소이다(Kim et al., 2016; Kim et al., 2017).

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

* 이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

인공어초는 해양수산부 훈령 제 388호 인공어초 설치사업집행 및 관리 규정에 따라 설계, 설치 및 배치된다. 기존의 해중림초는 4ha당 평면투영면적 500m² 이상을 설치해왔다. 그러나 최근에는 해중림초 설치 대상지의 규모가 4ha에서 2ha로 조정되었다. 이는 결과적으로 인공어초간의 간격이 더 조밀해져야함을 의미한다. 그러나 인공어초간의 배치 간격에 대한 규정은 별도로 존재하지 않는다. 이에 따라 해중림초의 설치에서 배치 간격을 포함한 배치 모델의 중요성이 대두되고 있다.

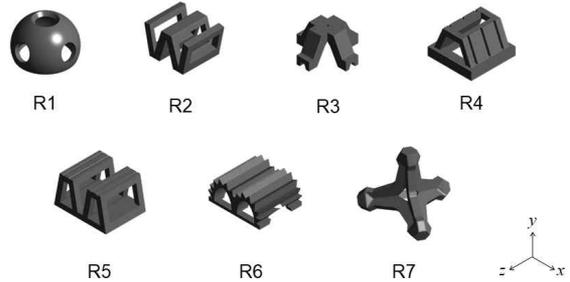
본 연구는 해중림초의 배치 모델에 따른 후류역의 효율성을 분석하고자 하였다. 이를 위해 1971년 이래로 대한민국의 연안 해역에 설치된 해중림초의 현황을 고려하여 반구형 어초를 포함한 총 7종의 해중림초를 선택하였다. 이들 어초는 일반적으로 1단 평면으로 분산되어 설치됨으로 선 배치 모델(line placement model)과 평면 배치 모델(plane placement model)을 고려하였다. 이들 배치 모델의 후류역을 정량화하기 위해 전산유체 해석(computational fluid dynamics)을 사용하여 후류체적(wake volume)을 산정하였다. 산정된 후류체적과 어초의 기하학적 특성을 사용하여 효율지수(efficiency index) 및 단위전파지수(unit propagation index)를 계산하였다. 이들은 후류역의 효율성을 평가하는 지표로 사용되었다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 어초

대상 어초는 [Fig. 1]에 나타난 7개의 해중림초이다. R1은 반구형 어초(half-ball type reef), R2는 요철형 어초(rugged-type reef), R3은 육교형 어초(bridge-type reef), R4는 방가로형 어초(bungalow-type reef), R5는 신요철형 어초(improved rugged-type reef), R6는 아치형 어초(arch-type reef), R7은 테트라형 어초(tetrahedron-type reef)이다. 이들 재

원은 <Table 1>과 같다. 여기서 B, L, H, V_m, V_w, 그리고 WL은 각각 어초의 폭, 길이, 높이, 모듈의 체적, 후류체적과 후류길이(wake length)를 의미한다. 후류체적 및 후류길이는 각 어초 모듈에 대해 전산유체해석을 수행하여 얻은 값이다(Jung, 2017). 이때 후류길이는 바닥면을 기준으로 산정하였다.



[Fig. 1] Target Marine Forest Artificial Reefs: R1, R2, R3, R4, R5, R6, and R7.

<Table 1> Dimensions of Target Marine Forest Artificial Reefs

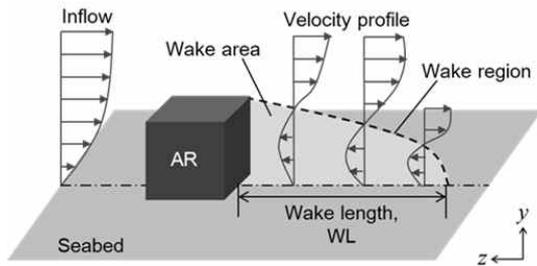
Type	B (m)	L (m)	H (m)	V _m (m ³)	V _w (m ³)	WL (m)
R1	2.00	2.00	1.30	0.94	2.70	3.00
R2	2.50	2.00	1.50	2.37	5.50	3.25
R3	2.40	2.40	1.20	1.35	3.38	3.80
R4	2.20	2.20	1.40	2.26	2.58	2.50
R5	2.60	2.00	1.50	2.62	3.86	3.40
R6	2.90	2.40	1.40	3.09	3.07	2.20
R7	2.90	2.90	2.50	1.59	6.40	2.00

2. 후류역

후류역은 [Fig. 2]와 같이 어초의 주변, 특히 후면부에서 와류로 인한 주류방향(-z방향)과 역방향(z방향)의 흐름이 생성되는 영역으로 정의된다(Sheng, 2000; Oh et al., 2011). 이러한 흐름은 상대적으로 유속이 느리기 때문에 해조류의 포자가 어초에 부착될 가능성을 높여준다. 또한, 해양 생물의 먹이활동, 휴식 및 산란 활동 등이 이루어지는 서식처의 역할을 한다(Takeuchi, 1991;

Sheng, 2000; Oh et al., 2011).

어초의 크기와 형상이 다양해짐에 따라 후류길이 등으로 어초의 후류역을 정량화하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Kim et al. (2014a)이 제안한 후류체적 개념을 사용하여 후류역을 정량화하였다. 후류체적은 주류방향의 역방향 유속을 가지는 유한체적의 합산이다. 이를 사용하면 후류역을 3차원으로 시각화할 수 있으며 스칼라 양으로 평가할 수 있다.



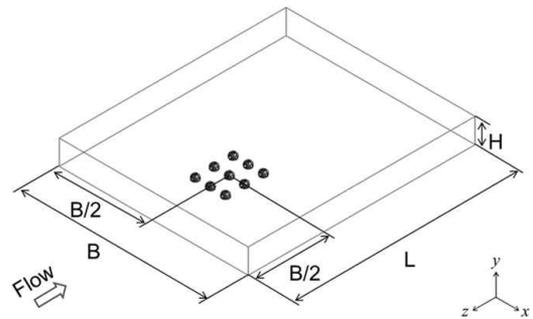
[Fig. 2] Definition of Wake Region, Wake Area, and Wake Length

3. 전산 유체 해석

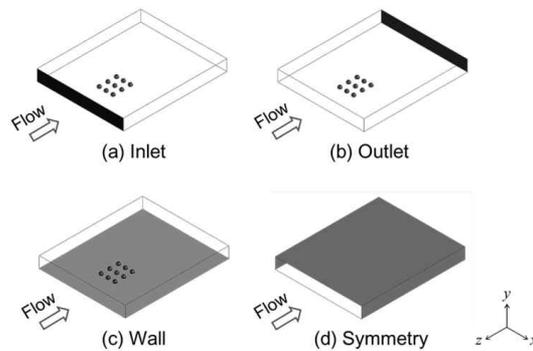
본 연구는 후류체적을 산정하기 위해 요소기반 유한체적법(Element-based Finite Volume Method, EbFVM)을 기반으로 한 ANSYS-CFX 소프트웨어를 사용하여 전산 유체 해석을 수행하였다. Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 해석을 위해 유체는 비압축성(incompressible), 점성(viscous), 뉴턴 유체(Newton fluid), 정상 상태(steady state)의 물로 가정하였고, Standard k-epsilon 난류모델을 사용하였다.

[Fig. 3]은 전산 유체 해석을 위한 유동 공간(flow domain)을 나타낸다. 유동 공간의 폭(B), 길이(L) 및 높이(H)는 후류역을 충분히 나타낼 수 있도록 그 값을 각각 50m, 60m, 7.5m로 결정하였다. 경계조건(boundary condition)은 [Fig. 4]와 같이 직육면체의 전면부를 설계유속 2m/s의 흐름이 생성되어 유동 공간으로 흘러 들어오는 입구

(inlet) 조건으로, 후면부는 압력경사가 0으로 유동장의 흐름이 빠져나가는 출구(outlet) 조건으로 설정하였다. 선행 연구에 따르면, 유속은 후류체적과 직접적인 연관성이 없는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2014a). 따라서 본 연구에서는 유속을 변수로 고려하지 않고, 한국수자원관리공단이 제시한 설계유속인 2m/s로 고정하였다. 이는 어초의 수리학적 특성 분석에 자주 사용되는 유속이다. 바닥면은 미끄러짐이 없는 벽(no-slip wall) 조건으로 바닥면에서 유속이 0임을 의미한다. 나머지 표면(상단, 우측 및 좌측)은 대칭(symmetry) 경계 조건으로 해석에 영향을 미치지 않도록 설정하였다.



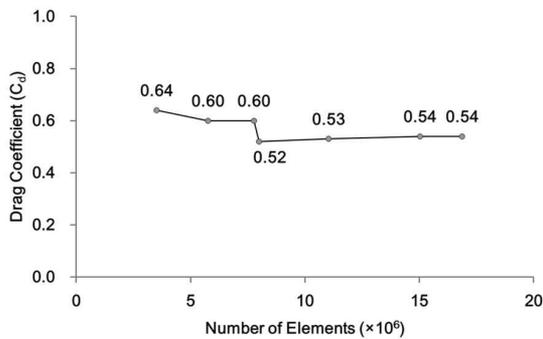
[Fig. 3] Computational Flow Domain



[Fig. 4] Boundary Conditions

해석 결과에 영향을 미치는 격자의존도를 확인하기 위해 격자 요소의 개수에 따른 항력계수(drag coefficient)의 수렴성을 평가하였다. [Fig. 5]

는 요소 개수에 따른 R1의 항력계수를 나타낸 것이며, 항력계수가 0.54로 수렴하는 것을 알 수 있다. 사용된 격자의 종류는 <Table 2>와 같으며 해석결과로부터 기준격자를 Mesh6으로 결정하였고, 사면체(4절점)와 썰기(6절점)의 요소로 천오백만 개 이상의 격자를 생성하였다. 이 때 격자의 길이는 0.04m로, R1의 대표길이인 2m에 대한 비로 나타내면 0.02이다. 즉, 격자의 길이를 구조물 대표길이의 2%로 결정하였다. R1의 대표길이가 7종의 어초 가운데 가장 작기 때문에 가장 보수적인 결과이다. 따라서 나머지 6종 어초에 대해서도 격자 길이 0.04m인 Mesh6으로 격자를 생성하였다.



[Fig. 5] Drag Coefficient of R1-module according to Number of Elements

<Table 2> Drag Coefficient of R1-module according to Number of Elements

Type	Shape of element	Number of elements	Drag coefficient
Mesh1	Hexahedron	3,519,485	0.64
Mesh2	Hexahedron	5,763,238	0.60
Mesh3	Hexahedron	7,770,962	0.60
Mesh4	Tetrahedron, wedge	8,002,851	0.52
Mesh5	Hexahedron	11,036,546	0.53
Mesh6	Tetrahedron, wedge	15,031,768	0.54
Mesh7	Hexahedron	16,877,563	0.54

4. 배치 시나리오

해중립초는 해양수산부 훈령 제 388호 인공어초 설치사업집행 및 관리 규정에 근거하여 1단 평면으로 설치한다. 이는 한 곳에 집중적으로 산적하는 것보다 1단 평면으로 분산하여 설치하는 것이 상부 표면적이 넓어 어초에 포자가 부착되기 유리하기 때문이다.

가. 선 배치 모델

선 배치 모델은 [Fig. 6]과 같이 두 가지 경우로 분류된다. 첫 번째(LM1)는 R1-2-1, R1-4-1, R1-5-1, R1-6-1, R1-7-1과 같이 낮은 높이의 어초, 높은 높이 혹은 중간 높이의 어초와 낮은 높이의 어초 순으로 배열된다. 반대로 두 번째(LM2)는 R2-1-2, R4-1-4, R5-1-5, R6-1-6, R7-1-7과 같이 높은 높이 혹은 중간 높이의 어초, 낮은 높이의 어초, 높은 높이 혹은 중간 높이의 어초 순으로 배열된다. 10개의 선 배치 모델은 이웃하는 어초간의 높이 차이에 따른 후류체적의 영향을 조사하기 위하여 고려되었다. 선 배치 모델의 이웃하는 어초간의 높이 차이(ΔH) 및 R1에 대한 어초 높이 차의 비율(%)은 <Table 3>에 나타났다.

나. 평면 배치 모델

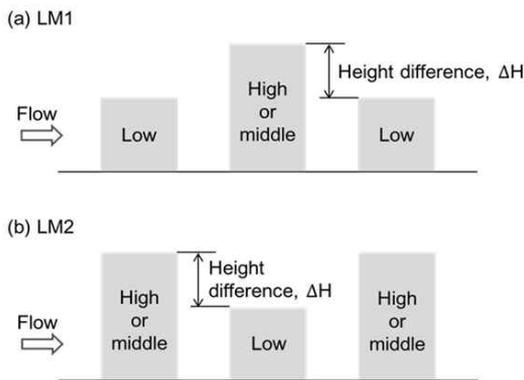
[Fig. 7]과 같이 3×3 평면 분산 배치 모델을 고려하였다. 평면 배치 모델의 경우 단일 종류 평면 분산 배치 모델(이하 단일 배치 모델, single type flatly distributed placement model)과 혼합 평면 분산 배치 모델(이하 혼합 배치 모델, mixed flatly distributed placement model)로 분류하였다. 3×3을 이루는 총 9개의 어초를 한 종류로 배치하는 경우를 단일 배치 모델, 두 종류 이상으로 배치하는 경우를 혼합 배치 모델로 명명하였다. 예를 들어, R6모듈 9개를 평면 분산 배치한 모델은 단일 배치 모델이다. 또한, R1모듈과 R6모듈을 섞어서 배치한 모델은 혼합 배치 모델이며 R1-6로 표현하였다. 본 연구에서 혼합 배치 모델은 [Fig. 8]과 같이 두 종류의 어초를 혼합한 경우만 다루었으며, 배치 패턴에 따라 세 가지 유형으로 분

류하였다.

단일 배치 모델을 통하여 어초 집합의 각 어초 모듈이 후류역의 효율을 제대로 전파하고 있는지를 분석하였으며, 혼합 배치모델은 단일 배치 모델과 비교하여 후류역의 효율성을 분석하였다. 여기서 혼합 배치 모델은 단일 배치 모델의 후류역의 효율성을 개선하기 위한 대안으로 제안하였다. 이를 위해 단일 배치모델의 효율지수가 높은 R1을 이용하였는데, 이는 1971년 이래로 우리나라에 가장 많이 설치된 해중립초이다.

혼합 유형 1은 [Fig. 8 (a)]와 같이 R1(AR1)과 다른 종류의 어초(AR2)를 지그재그로 배치하였으며, R1-2, R1-3, R1-4, R1-5, R1-6, R1-7의 6개 모델을 대상으로 한다. 혼합 유형 2 [Fig. 8 (b)]와 혼합 유형 3 [Fig. 8 (c)]의 경우에는 R1(AR1)과 R6(AR2)의 조합만 다루었다.

어초간의 배치 간격을 결정하기 위하여 3×3 R1-단일 배치 모델의 횡 간격(transverse interval)과 종 간격(longitudinal interval)의 변화에 따른 후류체적의 변화를 분석하였고, 그 결과는 [Fig. 9]와 같다. 후류체적은 종 간격의 변화에 민감하며, 횡 간격에는 상대적으로 변화가 크지 않다. 따라서 본 논문에서 사용된 7종 어초의 폭과 길이가 약 2-3m임을 고려하여, 횡 간격을 2m(R1의 대표 길이)로 설정하였다.

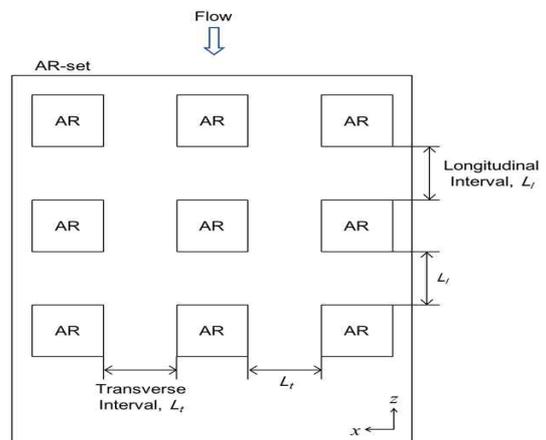


[Fig. 6] Conceptual Layout of Line Placement Models

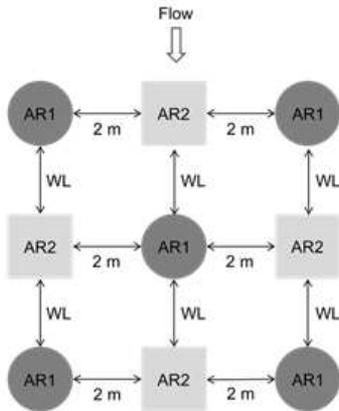
<Table 3> Height Difference between ARs of Line Placement Models

Type	Height difference (m) between ARs (ΔH)	The ratio of the height difference w.r.t. R1 (%)
LM1	R1-2-1	0.2
	R1-4-1	0.1
	R1-5-1	0.2
	R1-6-1	0.1
	R1-7-1	1.2
LM2	R2-1-2	0.2
	R4-1-4	0.1
	R5-1-5	0.2
	R6-1-6	0.1
	R7-1-7	1.2

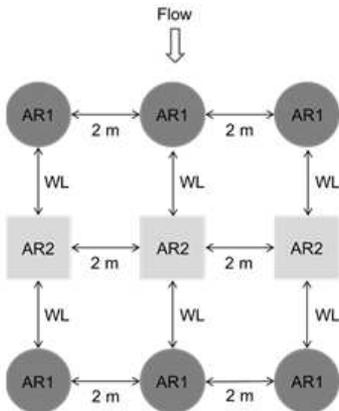
또한, 후류역이 인접한 어초에 전파되기 위해서는 어초 간의 종 간격을 적절하게 결정해야한다. 따라서 본 논문에서는 후류역의 전파성을 고려하여, 종 간격을 각 어초의 후류길이로 결정하였다. 혼합 배치 모델의 배치 간격도 단일 배치 모델과 마찬가지로, 횡 간격을 2m로, 종 간격을 후류 길이로 결정하였다. 이 때, 후류 길이는 R1과 혼합된 나머지 어초의 후류길이를 비교하여 보다 긴 후류 길이를 선택하였다.



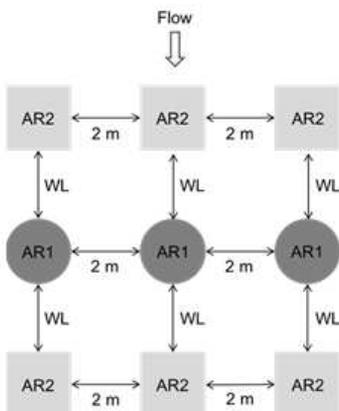
[Fig. 7] Plan View of a Flatly Distributed Placement Model Showing the Longitudinal and Transverse Intervals



(a) Mixed type 1

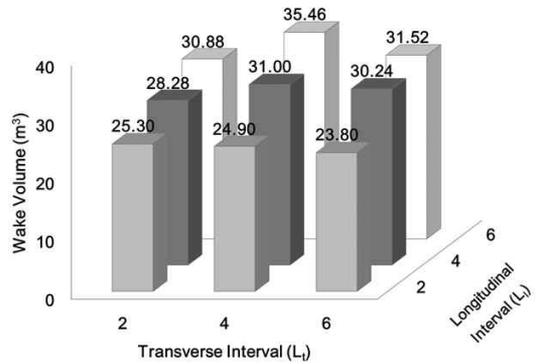


(b) Mixed type 2



(c) Mixed type 3

[Fig. 8] Conceptual Layouts of Mixed Placement Models (continued)



[Fig. 9] Effects of longitudinal and/or transverse Intervals on Wake Volumes

5. 효율지수 및 단위전파지수

후류역의 특성을 나타낼 수 있는 다양한 지표가 있다. 본 연구에서는 효율지수 및 단위전파지수를 사용하여 후류역의 특성을 분석하였다.

가. 효율지수

효율지수는 후류체적의 효율성을 평가하기 위하여 Kim et al., (2016)이 제안하였다. 인공어초 모듈의 효율지수는 식 (1)과 같이 어초 모듈의 체적에 대한 후류체적의 비로 정의된다. 여기서, $V_{w,m}$, V_m 은 각각 어초 모듈의 후류체적과 어초 모듈의 체적이다.

마찬가지로, 어초 집합의 효율지수는 식 (2)와 같이 정의된다. 여기서, $V_{w,s}$, $V_{m,i}$ 과 $n_{m,i}$ 은 각각 어초 집합의 후류체적, 어초 모듈의 체적과 어초 모듈의 개수이다. 본 연구에서는 Kim et al., (2016)이 제안한 식 (3)을 효율지수의 평가 기준으로 사용하여 어초 집합의 후류체적이 모든 어초 모듈의 체적의 합보다 두 배 이상이면, 어초 집합의 후류역의 효율성이 좋다고 판단하였다. 효율지수가 높을수록 어초의 경제성이 우수함을 의미한다.

$$\phi_{e,m} = \frac{V_{w,m}}{V_m} \dots \dots \dots (1)$$

$$\phi_{e,s} = \frac{V_{w,s}}{\sum_{i=1}^k n_{m,i} V_{m,i}} \dots\dots\dots (2)$$

$$\phi_{e,s} = \frac{V_{w,s}}{\sum_{i=1}^k n_{m,i} V_{m,i}} \geq 2.0 \dots\dots\dots (3)$$

나. 단위전파지수

Jung et al.(2015)는 어초 집합의 효율을 평가하기 위하여 전파지수(propagation index)와 단위전파지수를 제안하였다. 전파지수는 식 (4)와 같이 어초 모듈의 후류체적에 대한 어초 집합의 후류체적으로 정의된다. 여기서 $V_{w,m}$ 은 혼합 배치 모델에서 식 (5)와 같이 정의할 수 있다. 예를 들어, 두 가지 종류의 어초가 혼합되었을 경우 식 (5)는 식 (6)과 같이 나타낸다. 단위전파지수는 전파지수를 어초 모듈의 개수로 나눠준 것으로 식 (7)과 같이 정의된다. Kim et al., (2016)은 단위전파지수의 평가 기준을 식 (8)로 제안하였다. 식 (8)과 식 (9)에서 볼 수 있듯이 $\phi_{up} \geq 1.0$ 은 어초 집합의 후류체적이 집합을 구성하는 어초 모듈의 총 후류체적과 같거나 그 이상임을 나타낸다. 따라서 단위전파지수가 1.0 이상이면 어초 집합이 어초 모듈의 후류체적을 제대로 전파하고 있음을 의미한다.

$$\phi_p = \frac{V_{w,s}}{V_{w,m}} \dots\dots\dots (4)$$

$$V_{w,m} = \frac{\sum_{i=1}^k n_{m,i} V_{w,m}^i}{\sum_{i=1}^k n_{m,i}} \dots\dots\dots (5)$$

$$V_{w,m} = \frac{(n_{m,1})(V_{w,m}^1) + (n_{m,2})(V_{w,m}^2)}{(n_{m,1} + n_{m,2})} \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi_{up} = \frac{V_{w,s}}{n_m \times V_{w,m}} = \frac{\phi_p}{n_m} \dots\dots\dots (7)$$

$$\phi_{up} = \frac{V_{w,s}}{n_m \times V_{w,m}} \geq 1.0 \dots\dots\dots (8)$$

$$V_{w,s} \geq n_m \times V_{w,m} \dots\dots\dots (9)$$

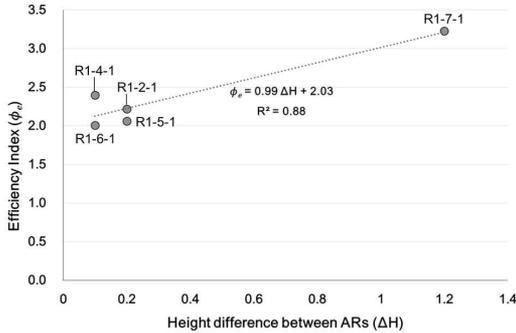
Ⅲ. 해석 결과

1. 선 배치 모델

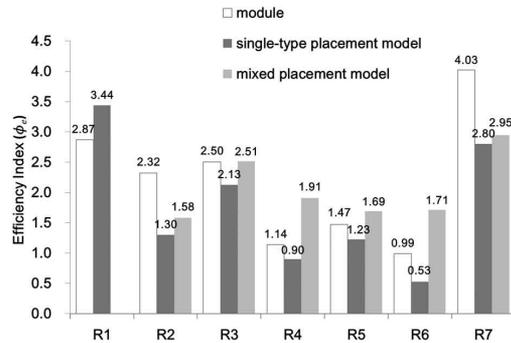
선 배치 모델의 후류체적과 효율지수는 <Table 4>와 같다. [Fig. 10]은 어초 간의 높이 차에 따른 LM1의 효율지수를 나타낸다. $R^2 = 0.88$ 의 강한 양의 선형 상관관계($\phi_e = 0.99\Delta H + 2.03$)가 나타난다. [Fig. 11]은 어초 간의 높이 차에 따른 LM2의 효율지수를 나타낸다. $R^2 = 0.97$ 의 강한 양의 선형 상관관계($\phi_e = 1.93\Delta H + 1.15$)를 보인다. LM1과 LM2의 경우 둘 다, R1과 R7을 혼합하여 배치하였을 때 효율지수가 가장 높게 나오는 것을 볼 수 있다. R1에 대한 R7의 높이 차의 비율은 92.31%이다. 이를 통해 어초 간의 높이 차이가 클수록 흐름을 차단하는 구조가 되며 후류체적의 품질이 향상되는 것을 알 수 있다.

<Table 4> Wake Volumes and Efficiency Indices of Line Placement Models

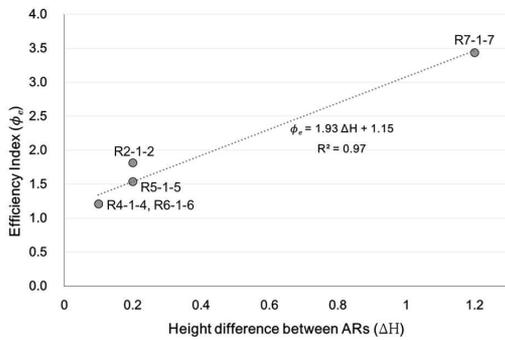
Type		Wake volume (m ³)	Efficiency index (ϕ_e)
LM1	R1-2-1	9.42	2.22
	R1-4-1	9.94	2.40
	R1-5-1	9.26	2.06
	R1-6-1	9.98	2.01
	R1-7-1	11.20	3.23
LM2	R2-1-2	10.34	1.82
	R4-1-4	6.58	1.21
	R5-1-5	9.54	1.54
	R6-1-6	8.62	1.21
	R7-1-7	14.16	3.44



[Fig. 10] Efficiency Indices of Line Placement Models (LM1) according to Height Difference between ARs



[Fig. 12] Efficiency Indices of the Six Modules, Single Type and Mixed Type Placement Models

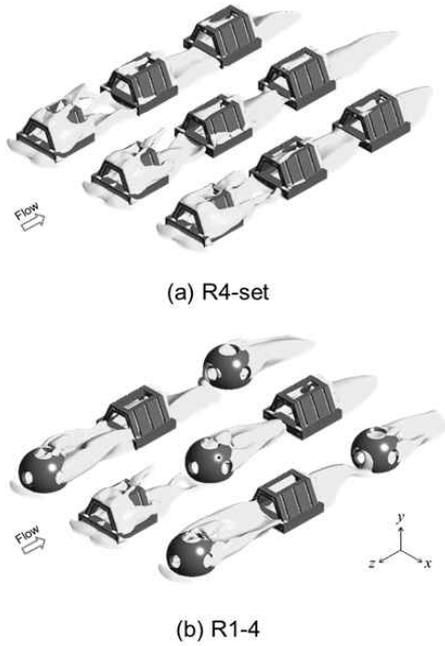


[Fig. 11] Efficiency Indices of Line Placement Models (LM2) according to Height Difference between ARs

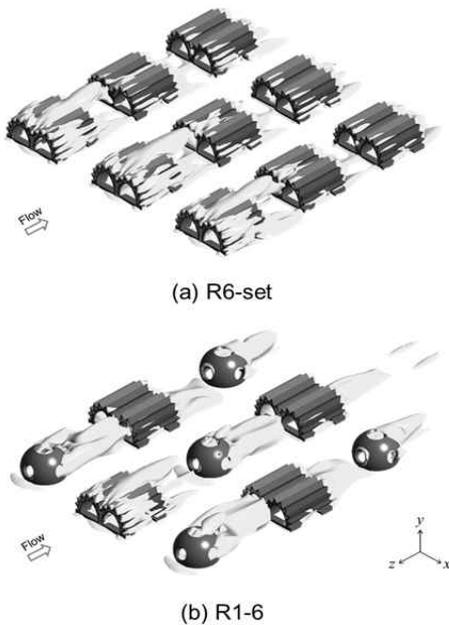
2. 단일 배치 모델과 혼합 배치 모델

[Fig. 12]는 각 모듈과 단일 배치 모델, 혼합 배치 모델의 효율지수를 나타낸다. 이 때 혼합 배치 모델은 혼합 유형 1만을 고려하였다. 단일 배치 모델의 경우 R1을 제외한 모든 어초 집합에서 각 모듈의 후류역의 효율을 제대로 전파하지 못함을 알 수 있다. R1의 경우 효율지수가 2.0 이상으로 비교적 높은 효율성을 가진다. 따라서 R1을 다른 어초와 혼합하여 다른 어초 집합의 효율지수를 개선하고자 하였다. R1과 혼합한 배치 모델의 경우 모든 어초 집합에서 단일 배치 모델보다 효율지수가 증가한 것을 볼 수 있다.

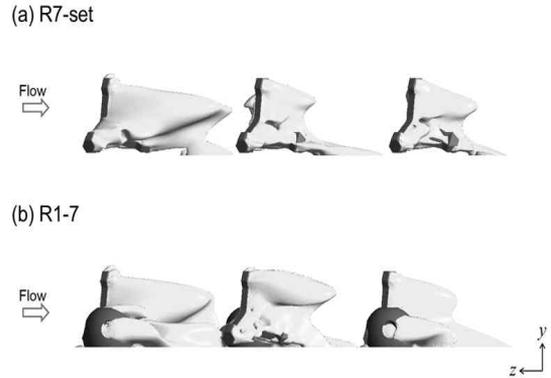
각각의 혼합 배치 모델은 단일 배치 모델과 비교하여 효율지수가 각각 21.54% (R1-2), 17.84% (R1-3), 112.22% (R1-4), 37.54% (R1-5), 222.64% (R1-6), 5.36% (R1-7) 증가하였다. 이 가운데 R1-4 모델과 R1-6 모델은 다른 혼합 배치 모델뿐 아니라 각각 R4모듈, R6모듈과 비교하였을 때도 높은 향상을 보인다. R4와 R6는 기하학적 형상(터널 모양)으로 인해 모듈 혹은 단일 종류로 배치하였을 때, 흐름을 차단하지 못하고 대부분 통과시킨다([Fig. 13 (a), Fig. 14 (a)]). 일반적으로 후류역은 구조물이 흐름을 차단할수록 크게 나타난다. 그러나 이들 어초를 R1과 함께 혼합하여 배치하면 흐름을 차단하여 정체하는 구간이 생겨 후류역을 증가시킨다([Fig. 13 (b), Fig. 14 (b)]). 따라서 혼합 배치 모델에 있어서 흐름을 차단하여 정체 구간을 만드는 것이 중요한 요소가 된다. 한편, R1-7 모델을 다른 모델과 비교하였을 때, 효율지수의 크기는 가장 크지만 개선도는 가장 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 R7의 후류길이를 배치하였을 때, 어초 간의 후류역이 충분히 연결되지 못하기 때문인 것으로 보인다([Fig. 15]). 후류길이는 대표 평면을 어떻게 설정하는가에 따라 그 값이 크게 달라진다(Kim et al., 2014b). 따라서 어초 간의 후류역이 연결될 수 있도록 후류역이 충분히 발달한 평면에서 후류길이를 산정할 필요가 있다.



[Fig. 13] Wake Volume of R4-set and R1-4 model



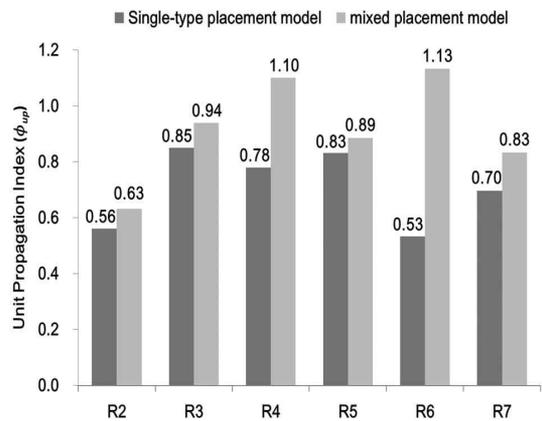
[Fig. 14] Wake Volume of R6-set and R1-6 model



[Fig. 15] Wake Volume of R7-set and R1-7 model (side view)

이렇게 산정한 후류길이를 재배치하여 후류역의 전파성을 높이면 R1-7모델의 효율지수 개선도가 증가할 것으로 예측된다.

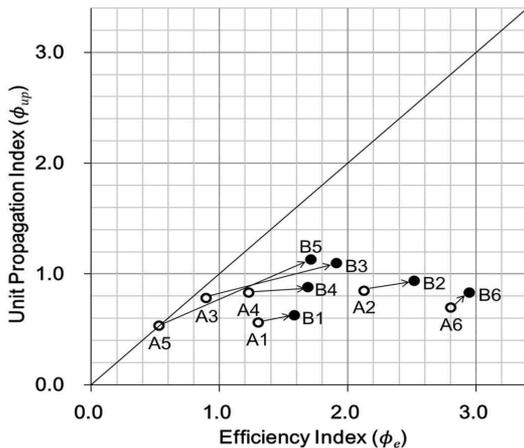
[Fig. 16]은 단일 배치 모델과 혼합 배치 모델의 단위전파지수를 나타낸다. 여기서도 [Fig. 12]와 마찬가지로 혼합 배치 모델은 혼합 유형 1만을 고려하였다. 각각의 혼합 배치 모델의 단위전파지수는 해당하는 단일 배치 모델에 비해 각각 14.29% (R1-2), 14.12% (R1-3), 41.03% (R1-4), 9.64% (R1-5), 113.21% (R1-6), 21.43% (R1-7) 상승하였다.



[Fig. 16] Unit Propagation Indices of the Six Modules, Single and Mixed Type Placement Models

따라서 모든 대상 어초 집합이 R1과 혼합 배치하였을 때, 단일 배치 모델보다 효율지수 및 단위전파지수가 개선되는 것을 관찰할 수 있다. 이 때, R1-6모델이 두 지표에서 가장 높은 개선도를 보인다.

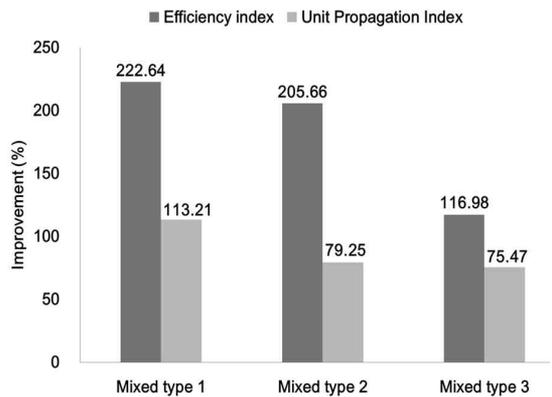
[Fig. 17]은 단일 배치 모델과 혼합 배치 모델의 효율지수와 단위전파지수의 관계를 나타낸다. 여기서, R1을 제외한 6개의 단일 배치 모델은 문자 A로 표시되고, 혼합 배치 모델은 문자 B로 표시된다. 1부터 6까지의 숫자는 차례로 R2, R3, R4, R5, R6과 R7을 나타낸다. 예를 들어, A5는 R6로 구성된 단일 배치 모델이고, B5는 R1과 R6의 혼합 배치 모델이다. 화살표는 길이가 길고, 기울기가 클수록 두 지표에서 개선도가 좋음을 나타낸다. 가장 눈에 띄는 개선은 A5와 B5점을 연결하는 화살표임을 알 수 있다.



[Fig. 17] Efficiency and Unit Propagation Indices of Single and Mixed Placement Models. The Single ones are indicated with the Letter 'A', the Mixed ones are indicated with the Letter 'B', and the following Number stands for each Model

혼합 배치 모델 가운데 가장 높은 개선도를 보이는 R1-6모델을 사용하여 혼합 배치 모델의 세 가지 유형에 따른 효율지수 및 단위전파지수의

개선도를 분석하였다. 첫 번째 혼합 유형[Fig. 8 (a)]은 5개의 R1모델과 4개의 R6모델로 구성되었으며, 두 번째 혼합 유형[Fig. 8 (b)]은 6개의 R1모델과 3개의 R6모델로 구성되었다. 마지막으로 세 번째 혼합 유형[Fig. 8 (c)]은 3개의 R1모델과 6개의 R6모델로 구성되었다. [Fig. 18]은 각 혼합 유형을 R6-단일 배치 모델과 비교할 때 효율지수 및 단위전파지수의 개선도를 나타낸 것이다.



[Fig. 18] Improvement of Efficiency and Unit Propagation Indices of Three Types of Mixed Placement Models with Respect to Those of R6-set

각각의 효율지수는 222.64% (Mixed type 1), 205.64% (Mixed type 2)와 116.98% (Mixed type 3) 상승하였으며, 단위전파지수는 113.21% (Mixed type 1), 79.25% (Mixed type 2)와 75.47% (Mixed type 3) 상승하였다. 효율지수 및 단위전파지수는 모든 혼합 유형에서 단일 배치 모델보다 현저히 향상되는 것을 알 수 있다. 두 지수 모두 혼합 유형 1이 가장 높은 개선도를 보였다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 배치 모델에 따른 후류역의 효율성을 평가하기 위하여 7개의 해중림초, 10개의 선 배치 모델, 7개의 단일 배치 모델과 8개의 혼

합 배치 모델의 후류 체적과 효율지수 및 단위전과지수를 산정하였다. 이를 위해 요소기반 유한 체적법을 기반으로 전산 유체 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

첫째, 10개의 선 배치 모델은 모두 이웃하는 어초 간의 높이 차와 효율지수 사이에 강한 양의 선형 상관관계가 있음을 알 수 있다.

둘째, 7개의 단일 배치 모델의 효율지수를 통하여 R1을 제외한 모든 어초 집합이 어초 모듈의 후류역 효율을 제대로 전과하지 못함을 알 수 있다. R1집합의 효율지수는 2.0 이상으로 비교적 높다.

셋째, R1과 혼합한 6개의 혼합 배치 모델은 단일 배치 모델의 결과와 비교하였을 때 효율지수와 단위전과지수를 모두 향상시켰다. 이 가운데 R1-4모델($\phi_e = 1.91$, $\phi_{up} = 1.10$)과 R1-6모델($\phi_e = 1.71$, $\phi_{up} = 1.13$)의 효율지수는 각각 112.22%, 222.64% 상승, 단위전과지수는 각각 41.03%, 113.21% 상승으로 높은 개선도를 보였다. 이는 R4 및 R6을 R1과 혼합하여 배치하였을 때 흐름을 차단하는 정체 구간이 생기기 때문이며, 후류역 평가에 있어 흐름을 차단할 수 있는 배치가 중요함을 알 수 있다.

마지막으로 R1-6모델은 혼합 유형 1(5개의 R1, 4개의 R6)과 혼합 유형 2(6개의 R1, 3개의 R6), 혼합 유형 3(3개의 R1, 6개의 R6) 모두 효율지수 및 단위전과지수가 향상되었다, 특히 혼합 유형 1은 두 가지 지수 모두 가장 많이 개선되었다.

따라서 단일 배치 모델이 후류체적의 품질을 보장하지 않을 경우, 그에 따른 지표를 개선하기 위한 대안으로 R1(혹은 단일 배치 모델의 후류체적의 품질이 좋은 어초)과의 혼합 배치 모델을 사용하여 후류역의 효율성을 높일 수 있다. 이때 혼합 배치하는 방식은 혼합 유형 1과 같이 서로 다른 어초를 지그재그로 배열하는 것이 바람직하다.

References

- Jung, S.(2017). Mixed placement models of marine forest artificial reefs considering efficiency and unit propagation indices of wake volumes, Master Thesis, Pukyong National University.
- Jung, S. · Yoon, H. S. & Na, W. B.(2015). Unit propagation indices of wake volumes to characterize wake regions of artificial reef canyons. The 14th International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE 2015).
- Kim, D. · Woo, J. · Na, W. B. & Yoon, H. S.(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.
- Kim, D. · Woo, J. · Na, W. B.(2017). Intensively stacked placement models of artificial reef sets characterized by wake and upwelling regions, Marine Technology Society Journal, 51(3), 60~70.
- Kim, D. · Woo, J. · Yoon, H. S. & Na, W. B. (2014b) Wake lengths and structural responses of Korean general artificial reefs, Ocean Engineering, 92, 83~91.
- Kim, D. · Woo, J. · Yoon, H. S. & Na, W. B.(2016). Efficiency, tranquility and stability indices to evaluate performance in the artificial reef wake region, Ocean Engineering, 122, 253~261.
- Oh, T. G.(2004). A fundamental study on the hydrodynamical characteristics and material exchange rate at the wake region of artificial reefs, Master Thesis, Chonnam National University.
- Oh, T. G. · Otake, S. & Lee, M. O.(2011). Estimating the effective wake region (current shadow) of artificial reefs, In: Artificial Reefs in Fisheries Management, S. Otake (Ed.), CRS Press, Boca Raton, FL, USA, 279~295.
- Park, K. I. · Hong, H. S. & Kim, D. H.(2016). An economic analysis of the marine afforestation project in Gangneung region, Republic of Korea, The Journal of Fisheries and Marine Sciences Education, 28(3), 727~737.
- Sheng, Y. P.(2000). Physical characteristics and engineering at reef sites, In: Artificial Reef Evaluation with Application to Natural Marine

- Habitats, Edited by Seaman, J., 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, Edited by M. Nakamura, R. S. Grove, and C. J. Sonu, Southern California Edison Co., Rosemead, CA, USA, 195~203.
- 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 & Coastal Management, 120, 135~147.
-
- Received : 25 October, 2017
 - Revised : 15 November, 2017
 - Accepted : 22 December, 2017