



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

전산유체역학을 이용한
굴 어초의 형상 및 성장에 따른
주변 흐름장 특성 예측



2023년 2월

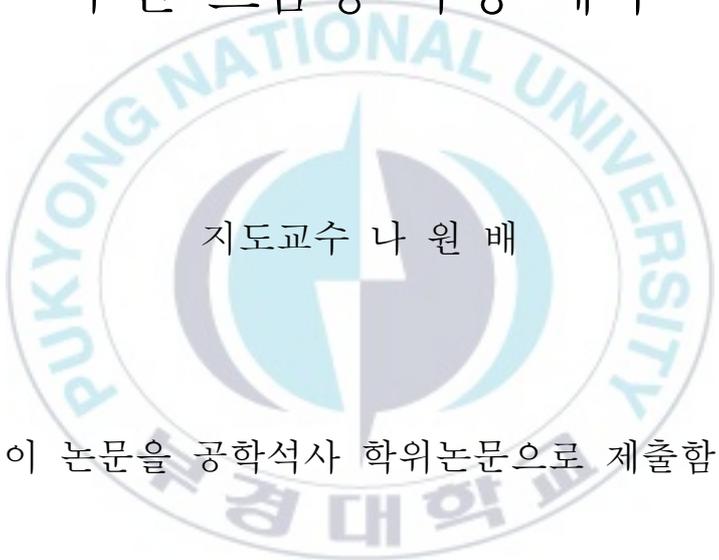
부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 공 학 과

김 민 주

공 학 석 사 학 위 논 문

전산유체역학을 이용한
굴 어초의 형상 및 성장에 따른
주변 흐름장 특성 예측



지도교수 나 원 배

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2023년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

해 양 공 학 과

김 민 주

김민주의 공학석사 학위논문을 인준함.

2023년 2월 17일



위원장 공학박사 김 경 회



위원 공학박사 최 준 명



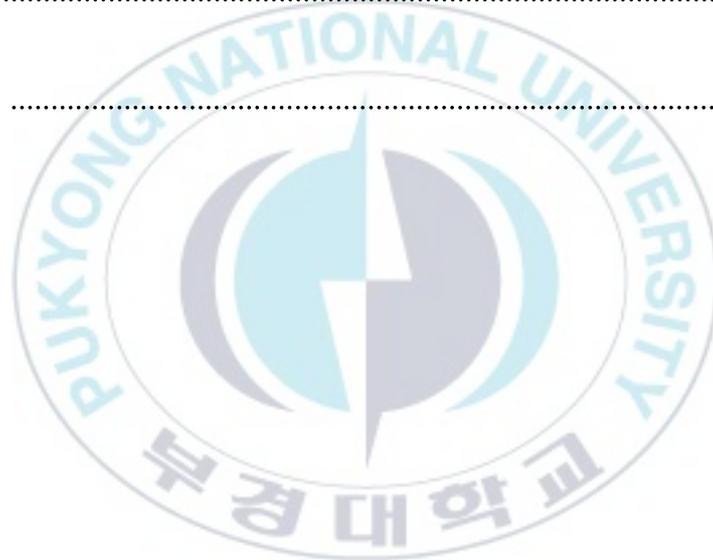
위원 공학박사 나 원 배



목 차

| | |
|-----------------------------|----------|
| LIST OF FIGURES | iii |
| LIST OF TABLES | v |
| ABSTRACT | vii |
| | |
| 1. 서론 | 1 |
| 1.1 연구 배경 | 1 |
| 1.2 연구목적 및 내용 | 3 |
| | |
| 2. 재료 및 방법 | 4 |
| 2.1 대상 굴 어초 | 4 |
| 2.1.1 초기 굴 어초 모델 | 6 |
| 2.1.2 성장에 따른 굴 어초 모델 | 9 |
| 2.2 전산유체역학(CFD) | 15 |
| 2.2.1 지배방정식 및 기본 가정조건 | 16 |
| 2.2.2 유동장 및 격자생성 | 17 |
| 2.2.2.1 유동장 | 17 |
| 2.2.2.2 격자 생성 | 18 |
| 2.3 후류체적 | 25 |
| 2.4 평가지수 | 28 |
| 2.4.1 효율지수 | 28 |
| 2.4.2 향상된 차단지수 | 29 |
| 2.4.3 표면 복잡성 지수 | 30 |

| | |
|--------------------------|----|
| 3. 결과 및 고찰 | 31 |
| 3.1 초기 굴 어초 모델 | 31 |
| 3.2 성장에 따른 굴 어초 모델 | 45 |
| 3.3 정규화된 후류체적 | 53 |
| 3.4 평가지수 | 56 |
| 3.4.1 효율지수 | 56 |
| 3.4.2 향상된 차단지수 | 57 |
| 3.4.3 표면 복잡성 지수 | 58 |
| 4. 결론 | 62 |
| 참고문헌 | 64 |



LIST OF FIGURES

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 2.1 | A schematic diagram of oyster shell..... | 5 |
| Figure 2.2 | Representative models of initial OR in 5×5 arrangement when the penetration of oyster shell is 10%: (a) convex model, (b) concave model 1, (c) mixed model 1, and (d) mixed model 2..... | 8 |
| Figure 2.3 | Representative models of growth OR: (a) growth stage 1, (b) growth stage 2, (c) growth stage 3, (d) growth stage 4, (e) growth stage 5, and (f) growth stage 6. Here, N is the number of oyster shell..... | 10 |
| Figure 2.4 | Flow domain..... | 20 |
| Figure 2.5 | Boundary conditions: (a) inlet, (b) outlet, (c) symmetry, and (d) wall..... | 21 |
| Figure 2.6 | Mesh independence: (a) drag coefficient and (b) wake volume..... | 24 |
| Figure 2.7 | Diagram of wake region in cube model..... | 26 |
| Figure 2.8 | Velocity vectors in the wake region..... | 27 |
| Figure 3.1 | Wake volume in initial ORs: (a) penetration 10% and (b) penetration 50%..... | 33 |
| Figure 3.2 | Wake length in initial ORs: (a) penetration 10% and (b) penetration 50%..... | 34 |
| Figure 3.3 | Wake volume in plate substrate..... | 36 |
| Figure 3.4. | Wake volume of convex model in initial ORs about penetration 10%..... | 37 |
| Figure 3.5 | Wake volume of convex model in initial ORs about penetration 10% (xz plane)..... | 38 |
| Figure 3.6 | Wake volume of concave model in initial ORs about penetration 10%..... | 39 |
| Figure 3.7 | Wake volume of concave model in initial ORs about penetration 10% (xz plane)..... | 40 |
| Figure 3.8 | Wake volume of mixed model 1 in initial ORs about penetration 10%..... | 41 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Figure 3.9 | Wake volume of mixed model 1 in initial ORs about penetration 10% (xz plane)..... | 42 |
| Figure 3.10 | Wake volume of mixed model 2 in initial ORs about penetration 10%..... | 43 |
| Figure 3.11 | Wake volume of mixed model 2 in initial ORs about penetration 10% (xz plane)..... | 44 |
| Figure 3.12 | Wake volume in growth ORs | 49 |
| Figure 3.13 | Wake length in growth ORs | 50 |
| Figure 3.14 | Wake volume in growth ORs: (a) growth stage 4 and (b) growth stage 5..... | 51 |
| Figure 3.15 | Wake volume in growth ORs: (a) growth stage 6 and (b) growth stage 7..... | 52 |
| Figure 3.16 | Correlation between normalized wake volume and number of oyster shell (N) | 54 |
| Figure 3.17 | Correlation between normalized wake volume and volume of oyster reef (OR)..... | 55 |
| Figure 3.18 | Efficiency index based on the number of oyster in OR... | 59 |
| Figure 3.19 | Correlation between improved blocking index and normalized wake volume..... | 60 |
| Figure 3.20 | Correlation between surface complexity index and normalized wake volume..... | 61 |

LIST OF TABLES

| | | |
|-----------|---|----|
| Table 2.1 | Models of initial OR..... | 7 |
| Table 2.2 | Models of growth OR accoring to growth stage..... | 11 |
| Table 2.3 | Criteria in orthogonal quality and skewness for evaluating mesh quality (Ansys-Inc., 2020)..... | 22 |
| Table 2.4 | Mesh independence..... | 23 |
| Table 3.1 | Wake volume (cm ³) in initial ORs about penetration 10%..... | 35 |
| Table 3.2 | Wake volume (cm ³) in initial ORs about penetration 50%..... | 35 |
| Table 3.3 | Wake length (cm) in initial ORs about penetration 50%..... | 35 |
| Table 3.4 | Wake length (cm) in initial ORs about penetration 50%..... | 35 |
| Table 3.5 | Wake volume and wake length of growth OR (Rep.01) | 46 |
| Table 3.6 | Wake volume and wake length of growth OR (Rep.02) | 47 |
| Table 3.7 | Wake volume and wake length of growth OR (Rep.03) | 48 |

Analysis of Flow Characteristics by the Shape and Growth of Oyster Reef Using Computational Fluid Dynamics

MinJu Kim

*Department of Ocean Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

ABSTRACT

Over the past 100 years, ~85% of oysters in the world have been lost due to overfishing, seawater pollution, and climate change. Oyster reefs have many advantages such as stabilizing water quality, protecting shorelines, and providing spawning spaces and shelters for various aquatic creatures. To be a successful oyster restoration project, it is important to figure out the flow characteristics surrounding the oyster reef. However, the structural characteristics of oyster reefs are difficult to predict because they grow in dense spaces and provide excellent attachment surfaces to other organisms. Such difficulties are obstacles in quantifying the structural characteristics of the oyster reef and identifying the characteristics of the surrounding flow field. In this study, I attempted to predict the surrounding flow field and structural characteristics of oyster reefs by assuming the initial models and growth models. To this end, various oyster reefs were modeled and CFD analysis was performed to visualize their three-dimensional wake volumes. Subsequently, the effect of the structural characteristics of oyster reefs on the wake volume was analyzed with proposed indices: efficiency index, improved blocking index, surface complexity index, and

normalized wake volume. As a result, the efficiency index increased as the number of oyster shells increased. Furthermore, the normalized wake volume increased as the improved blocking index and surface complexity index increase. This means that there is a correlation between the wake volume and the proposed index representing the structural characteristics of oyster reef (i.e., volume, substrate surface, projection area).



1. 서론

1.1 연구 배경

굴은 주로 삼각주와 연안 하구에서 발견되며, 일반적으로 바위 같은 딱딱한 기질에 부착하여 군락을 형성하는데, 이를 굴 어초(oyster reef, OR)라고 한다. 이들은 생태학적, 사회경제적으로 많은 이익을 제공한다. 굴 어초는 물을 여과하여 수질을 안정화하고, 파랑에너지를 감소시켜 해안선을 보호하며, 다양한 생물들이 쉬어갈 수 있는 피난처 역할과 산란장소를 마련한다(Dame et al., 1989; Meyer et al., 1997; Coen et al., 2017; Gilby et al., 2018). 실제로 굴 어초 내 생존하는 생물체는 어류, 갑각류, 조개류, 해조류 등으로 다양하다.

지난 100년 동안 미국에서 굴 서식지 공간이 약 63% 감소하였으며, 세계적으로 굴 어초의 약 85%가 소실되었다(Beck et al., 2011; Windle et al., 2022). 수 세기 동안 과도한 포획과 해수 오염, 서식지 파괴, 지구 온난화, 레크레이션 활동 등 여러 원인으로 인해 굴 개체 수가 감소하였다(Wilberg et al., 2011; Beck et al., 2011). 개체 수 감소 문제를 해결하기 위해 현재 호주와 미국에서 인공 굴 어초를 이용한 굴 복원 사업이 활발히 시행되고 있다(Power et al., 2009; Brown et al., 2014; La Peyre et al., 2014). 이는 인공적으로 설치한 굴 어초가 성공적으로 성장하여 자연 굴 어초와 같은 기능을 수행할 수 있다는 과학적인 관찰에 근거하는데, Cannon et al., (2022a, 2022b)에 따르면 인공 굴 어초는 설치 1년 후 자연 굴 어초에서의 흐름 조건과 특성을 동일하게 발휘할 수 있다고 한다.

굴은 틈새 공간에서 성장하고, 따개비와 같은 다른 유기체의 생존을 위한 우수한 부착표면을 제공한다(Wheaton, 2007). 또한, 동일 종(즉, 굴) 내에서 높은 생존력을 가진다는 특성 때문에 밀집한 생태 공간에서 집적적으로 성장한다. 이런 특성을 가진 굴 어초는 틈새 및 기질과 같은 생물체가 서식할 수 있는 다수의 공간을 제공함으로써 다양한 생물체에게

생태계 서비스를 제공할 수 있다. 하지만, 굴 어초 구조물의 특성과 성장 모양을 정량화하는 것은 쉽지 않다.

굴을 복원하기 위해 사용되는 굴 어초의 형태는 다양하다. 주로 굴 어초는 그물 망사 안에 굴 패각 더미를 채워서 생성되거나, 콘크리트 인공어초에 굴 유충을 정착시켜 설치하는 등 여러 방법으로 설치된다(Walles et al., 2016; Chowdhury et al., 2019). 이러한 방법 중, 다량으로 발생한 굴 패각을 효과적으로 활용하기 위해 굴 패각을 재활용하는 방법이 대두되고 있는데, 이와 관련된 굴 어초가 굴 패각 피복 구조물이다(Lee et al., 2021). 이 방법은 굴 패각을 콘크리트 기질 표면에 피복하여 굴 어초의 구조적 복잡성을 증가시켜 해조류와 굴 유충의 착생을 증대시킨다는 장점을 가지고 있다(Cho et al., 2007; Whitman et al., 2012).

일반적으로 구조적 복잡성을 가진 3차원 구조물은 주변 흐름 영역에서 더 큰 난류를 발생시킨다. 발생한 난류는 흐름과 상호작용하여 주변 퇴적물과 영양분의 이동을 촉진시키고, 유기체의 정착에 큰 영향을 미친다(Crimaldi et al., 2002; Reidenbach et al., 2007; Reidenbach et al., 2013). 특히, 발생한 난류로 인해 구조물 배후에 발생하는 역방향 흐름인 후류영역은 농축된 영양염과 먹이 생물이 존재하는 영역으로 다양한 유기체가 존재하는 영역으로 알려져 있다(Oh et al., 2011; Kim et al., 2014; Kim et al., 2016; Jung et al., 2022).

구조적 복잡성은 서식지 복잡성(habitat complexity)으로 설명될 수 있다. 해양 서식지 복잡성은 서식지 이질성 가설(habitat heterogeneity hypothesis)에 근거를 두고 있으며, 이는 구조적으로 복잡한 서식지가 환경 자원을 활용할 수 있는 많은 틈새와 다양한 방법을 제공하고, 종 다양성을 증가시킬 수 있다고 말한다(Kawai and Tokeshi, 2004; Tomaz and Cunha, 2010; Tokeshi and Arakaki, 2012). 특히, 굴 어초는 서식지 복잡성을 가진 대표적인 수생생태계로 분류되고 있다.

1.2 연구목적 및 내용

본 연구에서는 ‘굴 패각의 형상 특성으로 인해 굴 어초 주변에 독특한 흐름장이 형성된다’라는 가설을 수립하였다. 가설을 검증하기 위한 연구 질문은 ‘굴 패각의 모서리 형상이 굴 어초 주변에서 난류 성분을 우세하게 만들어 다수의 후류영역(wake region)을 형성하는가?’이다. 또한, ‘굴 어초가 가지고 있는 구조적 특성이 후류영역과 어떤 연관성을 가지는가?’이다. 여기서 후류영역은 구조물 주변의 하류 흐름 중 재순환흐름(recirculating flow) 영역을 의미하며, 다양한 무기체 및 유기체가 거주하는 공간을 의미한다(Sheng, 2000; Kim et al., 2014; Kim et al., 2016a; Kim et al., 2016b; Jung et al., 2022).

연구 질문에 답하기 위해 본 연구에서는 굴 패각 피복 구조물을 굴 어초 모델로 선정했으며, 굴 패각 특성을 반영하여 초기 굴 어초 모델과 성장에 따른 굴 어초 모델을 설계했다. 흐름해석을 수행하기 위해, 요소기반 유한체적법(Element-based Finite Volume Method, EbFVM)을 기반으로 하는 전산유체해석을 활용하였고, 후류영역을 3차원으로 시각화하였다. 여기서 시각화된 후류영역은 후류체적(wake volume)이라고 명명하였으며, 굴 어초의 구조적 특성을 여러 평가 지수로 정량화하여 후류체적과의 관계성을 파악하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상 굴 어초

본 연구에서 사용된 굴 종은 *Crassostrea virginica*(이하 *C. virginica*)으로 북아메리카와 남아메리카 동부에 서식한다. 특히, 굴 어초 복원 프로젝트가 대규모로 시행되고 있는 미국에서 대표적으로 발견되는 굴 종이다. *C. virginica*는 불규칙한 요철을 가진 날카로운 층 표면으로 형상을 이룬다. Wheaton (2007)에 의하면 굴 패각은 주변 굴이나 다른 장애물을 중심으로 밀집한 공간에서 성장하고, 따개비와 같은 다른 유기체가 부착하기 좋은 우수한 표면을 제공함으로써 매우 다양한 형상을 가진다. 특히, 오랜 기간동안 성장하면서 공간 내 3차원적으로 복잡한 구조물을 형성하는데, 이를 굴 어초라고 한다(Windle et al., 2022).

이런 굴 어초의 불규칙적인 형상을 실제로 모델링하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 본 연구에서는 굴 표면을 단순화하여 매끄러운 표면으로 굴 패각 모델을 설계하였다. *C. virginica*의 최대 성장치수는 최대 길이 14.7 cm, 최대 폭 6.8 cm, 최대 두께 4.3 cm으로(Wheaton, 2007), 이를 토대로 중간 크기의 굴 패각 형상을 모델링하였다. 굴 패각 형상은 꼭짓점을 가진 타원체 모양으로 가정하였으며, 본 연구에 사용된 굴 패각 치수는 Fig. 2.1과 같고, 두께는 1 mm이다.

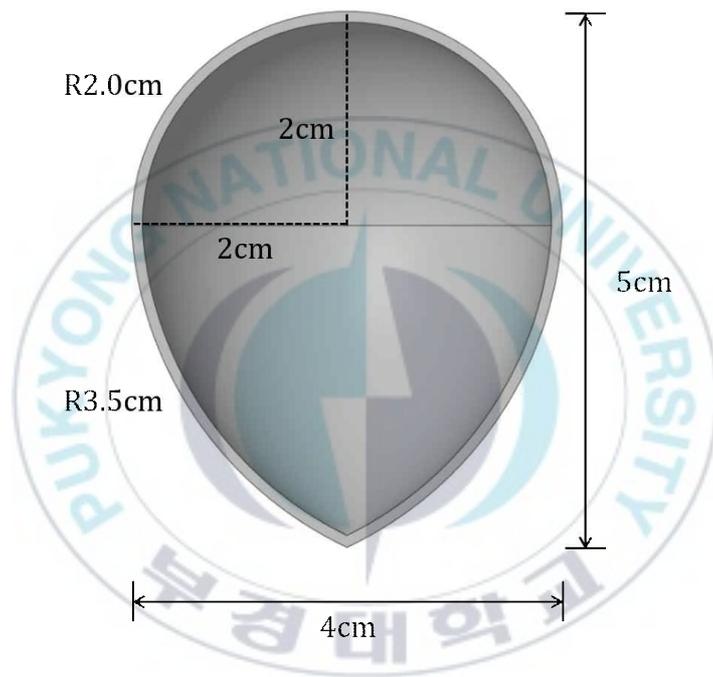


Fig. 2.1. A schematic diagram of oyster shell.

2.1.1 초기 굴 어초 모델

먼저 본 연구에서는 굴 패각 피복 구조물의 초기 형상을 설계하였고, 굴 어초 초기 모델(Initial oyster reef model; Initial OR)이라고 명명하였다. 굴은 일반적으로 진흙 바닥에서 서식할 때, 가장 빠르게 성장하지만 강도가 약하여 쉽게 파괴될 수 있다(Wheaton, 2007). 따라서, 본 연구에서는 굴 패각을 평판 기질에 고정하는 형상으로 연구 모델을 설계하였다. 사용된 평판 기질의 치수는 0.3 m (W) × 0.3 m (L) × 0.05 m (h)이다.

본 연구에서 굴 패각이 가지고 있는 형상 특징 중, 타원형 모양과 얇은 두께로 생성된 날카로운 가장자리가 흐름에 크게 영향을 미칠 것이라고 예상하였다. 따라서, 굴 패각 방향을 변수로 하여 굴 패각이 오목하게 배치되어 있는 형상은 Concave model, 그와 반대의 형상으로 배치되어 있는 것을 Convex model이라고 명명하였고, 추가적으로 혼합 모델(mixed model 1, mixed model 2)을 설정함으로써 크게 4가지 모델을 설계하였다. 더불어, 배치된 굴 패각의 배열($A \times B$)을 다르게 하여, 굴 어초의 패각 개수에 따른 후류체적 변화 양상을 파악하고자 하였다. 추가적으로 굴 패각의 삽입 비율(10%, 50%)에 따른 후류체적을 검토하였다. 연구에 사용된 초기 굴 어초 모델의 제원은 Table 2.1과 같으며, 대표적으로 5×5 배열을 가진 초기 굴 어초 모델 형상을 Fig. 2.2에 나타내었다.

Table 2.1. Models of initial oyster reef

| Model case | Number of oysters perpendicular to flow direction A (interval) | Number of oysters in flow direction B (interval) |
|---------------|--|--|
| Only plate | - | - |
| Convex model | 5 (6 cm) | 5 (6 cm) |
| | 5 (6 cm) | 3 (12 cm) |
| | 5 (6 cm) | 1 (-) |
| | 3 (12 cm) | 5 (6 cm) |
| | 3 (12 cm) | 3 (12 cm) |
| | 3 (12 cm) | 1 (-) |
| Concave model | 5 (6 cm) | 5 (6 cm) |
| | 5 (6 cm) | 3 (12 cm) |
| | 5 (6 cm) | 1 (-) |
| | 3 (12 cm) | 5 (6 cm) |
| | 3 (12 cm) | 3 (12 cm) |
| | 3 (12 cm) | 1 (-) |
| Mixed model 1 | 5 (6 cm) | 5 (6 cm) |
| | 5 (6 cm) | 3 (12 cm) |
| | 5 (6 cm) | 1 (-) |
| | 3 (12 cm) | 5 (6 cm) |
| | 3 (12 cm) | 3 (12 cm) |
| | 3 (12 cm) | 1 (-) |
| Mixed model 2 | 5 (6 cm) | 5 (6 cm) |
| | 5 (6 cm) | 3 (12 cm) |
| | 5 (6 cm) | 1 (-) |
| | 3 (12 cm) | 5 (6 cm) |
| | 3 (12 cm) | 3 (12 cm) |
| | 3 (12 cm) | 1 (-) |

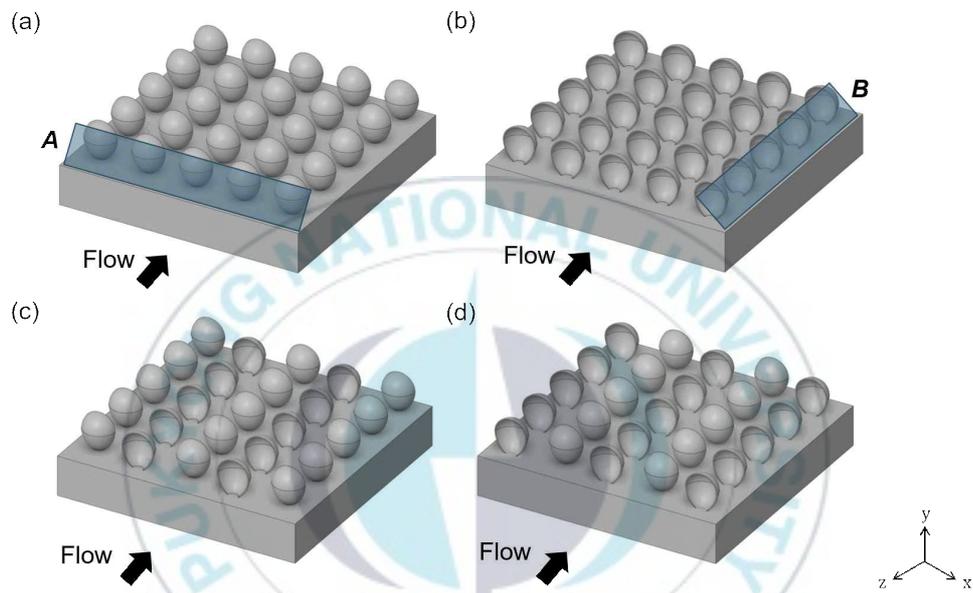


Fig. 2.2. Representative models of initial OR in 5×5 arrangement when the penetration of oyster shells is 10%: (a) convex model, (b) concave model, (c) mixed model 1, and (d) mixed model 2.

2.1.2 성장에 따른 굴 어초 모델

다음은 성장에 따른 굴 어초 모델(Growth oyster reef model; Growth OR)이다. 굴은 밀집한 생태 공간에서 집적하여 성장한다. 이와 같은 특성으로 굴 어초 내부에 틈새가 다수 형성되어 유충이 정착할 수 있는 기질이 증가한다. 또한, 틈새 내 유속이 외부 유동 공간에 비해 매우 작아 유기체와 무기체가 거주할 수 있는 생존 공간을 제공한다. 하지만, 규칙성을 가지지 않고 성장하는 굴 어초의 특성 때문에 이러한 형상과 특성을 정량화하기 쉽지 않다.

따라서, 본 연구에서는 굴 어초 성장 형상을 단순화하여, 성장 모델을 단계별로 설정하였다. 여기서, 변수는 굴 패각의 개수로, 굴 어초의 성장을 굴 패각의 개수(N)로 나타내었다. 성장에 따른 굴 어초 모델의 대표적인 형상은 Fig. 2.3과 같다.

굴은 힌지(hinge)를 시작점으로 하여 동일 생물종(즉, 굴)에 영구적으로 부착하여 성장한다(Hitzegrad et al., 2022). 해석 모델의 설계 시 이러한 특성을 반영하여 굴의 힌지를 나타내는 굴 패각 모서리를 굴 어초의 부착 지점으로 설정하여 배치하였다. 또한, 본 연구에서는 각 성장 단계의 굴 어초 모델을 여러 개 설계하여 연구 결과의 보편성을 확보하고자 하였다. 따라서 성장 단계마다 동일한 굴 패각의 개수를 가지면서, 배치 형상이 다른 모델을 3개씩 설계하였다(즉, Rep.01, Rep.02, Rep.03). 총 48개의 성장에 따른 굴 어초 모델이 설계되었으며, 모델의 제원은 Table 2.2와 같다.

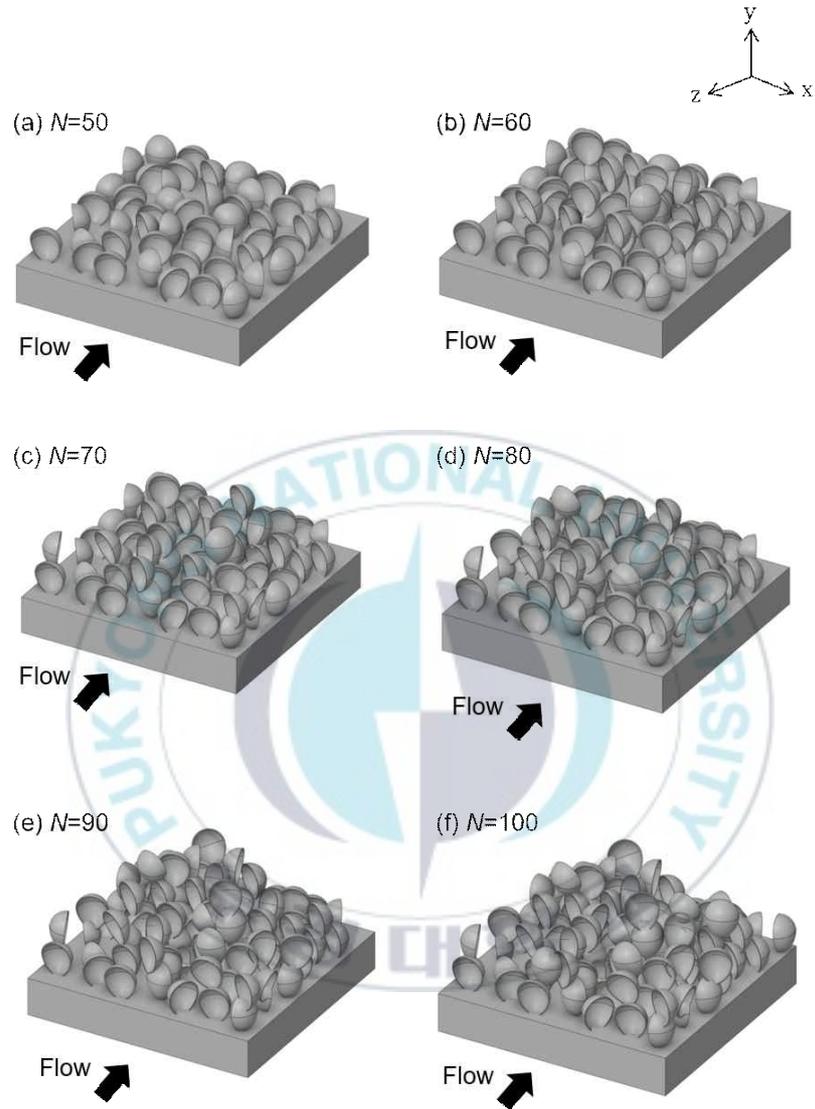


Fig. 2.3. Representative models of growth OR: (a) growth stage 1, (b) growth stage 2, (c) growth stage 3, (d) growth stage 4, (e) growth stage 5, and (f) growth stage 6. Here, N is the number of oyster shell.

Table 2.2 Models of growth OR according to growth stage, to be continued.

| Growth stage | | Number of oyster shell (N) | Width W (cm) | Length L (cm) | Height h (cm) | Volume (cm ³) | Total surface area (cm ²) | Projection area (cm ²) |
|----------------|--------|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
| Growth stage 1 | Rep.01 | 50 | 30.66 | 30.55 | 9.97 | 4,623.37 | 4,906.79 | 279.60 |
| | Rep.02 | 50 | 30.35 | 30.00 | 9.8 | 4,626.75 | 4,978.35 | 281.46 |
| | Rep.03 | 50 | 30.00 | 30.23 | 8.87 | 4,590.10 | 4,206.49 | 241.82 |
| Growth stage 2 | Rep.01 | 60 | 30.66 | 30.55 | 13.45 | 4,649.25 | 5,225.37 | 355.33 |
| | Rep.02 | 60 | 30.35 | 30.00 | 14.50 | 4,652.93 | 5,511.11 | 358.63 |
| | Rep.03 | 60 | 30.40 | 30.42 | 12.10 | 4,613.75 | 4,678.59 | 276.62 |
| Growth stage 3 | Rep.01 | 70 | 30.66 | 30.78 | 13.45 | 4,674.13 | 5,926.94 | 360.21 |
| | Rep.02 | 70 | 30.69 | 30.00 | 14.50 | 4,678.69 | 6,035.90 | 383.25 |
| | Rep.03 | 70 | 30.40 | 30.42 | 12.12 | 4,646.65 | 5,156.80 | 315.48 |
| Growth stage 4 | Rep.01 | 80 | 30.66 | 30.78 | 16.40 | 4,694.84 | 6,344.33 | 389.63 |
| | Rep.02 | 80 | 31.51 | 30.00 | 17.50 | 4,704.36 | 6,553.99 | 425.60 |
| | Rep.03 | 80 | 30.63 | 30.42 | 12.12 | 4,671.32 | 5,646.30 | 339.27 |

Table 2.2. Continued.

| | | Number of oyster shell (N) | Width W (cm) | Length L (cm) | Height h (cm) | Volume (cm ³) | Total surface area (cm ²) | Projection area (cm ²) |
|-------------------|--------|--------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|---|---------------------------------------|
| Growth stage 5 | Rep.01 | 90 | 30.94 | 31.24 | 16.80 | 4,720.66 | 6,862.75 | 417.85 |
| | Rep.02 | 90 | 31.51 | 31.84 | 17.69 | 4,730.41 | 7,075.31 | 436.84 |
| | Rep.03 | 90 | 32.51 | 30.42 | 12.83 | 4,697.92 | 6,181.34 | 362.12 |
| Growth stage 6 | Rep.01 | 100 | 30.94 | 33.37 | 18.42 | 4,744.21 | 7,339.73 | 443.11 |
| | Rep.02 | 100 | 31.51 | 31.84 | 17.71 | 4,756.25 | 7,594.81 | 463.90 |
| | Rep.03 | 100 | 32.51 | 31.47 | 12.83 | 4,725.18 | 6,672.37 | 364.56 |
| Growth stage 7 | Rep.01 | 110 | 32.42 | 33.37 | 19.29 | 4,770.46 | 7,863.62 | 482.67 |
| | Rep.02 | 110 | 31.51 | 32.34 | 20.05 | 4,781.96 | 8,113.50 | 503.89 |
| | Rep.03 | 110 | 32.51 | 31.90 | 16.01 | 4,751.47 | 7,201.67 | 386.06 |
| Growth stage 8 | Rep.01 | 120 | 32.42 | 33.37 | 21.81 | 4,796.22 | 8,383.68 | 529.98 |
| | Rep.02 | 120 | 31.51 | 32.34 | 22.07 | 4,808.13 | 8,644.26 | 517.64 |
| | Rep.03 | 120 | 32.73 | 34.51 | 16.01 | 4,778.98 | 7,706.13 | 397.70 |

Table 2.2. Continued.

| | | Number of oyster shell (N) | Width W (cm) | Length L (cm) | Height h (cm) | Volume (cm ³) | Total surface area (cm ²) | Projection area (cm ²) |
|-----------------------|--------|--------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|---|---------------------------------------|
| Growth stage 9 | Rep.01 | 130 | 32.42 | 33.37 | 21.81 | 4,820.80 | 8,891.89 | 530.86 |
| | Rep.02 | 130 | 31.51 | 32.34 | 22.07 | 4,833.87 | 9,156.26 | 545.31 |
| | Rep.03 | 130 | 32.73 | 34.51 | 16.06 | 4,805.34 | 8,234.50 | 419.21 |
| Growth stage 10 | Rep.01 | 140 | 33.87 | 33.37 | 21.81 | 4,846.33 | 9,401.96 | 538.54 |
| | Rep.02 | 140 | 32.15 | 34.55 | 22.07 | 4,859.06 | 9,666.91 | 560.63 |
| | Rep.03 | 140 | 32.73 | 34.51 | 16.06 | 4,835.33 | 8,680.43 | 440.96 |
| Growth stage 11 | Rep.01 | 150 | 33.87 | 34.52 | 21.81 | 4,870.18 | 9,875.24 | 552.31 |
| | Rep.02 | 150 | 32.15 | 35.80 | 22.07 | 4,882.69 | 10,134.06 | 572.38 |
| | Rep.03 | 150 | 32.73 | 34.76 | 19.40 | 4,862.30 | 9,217.09 | 471.87 |
| Growth stage 12 | Rep.01 | 160 | 33.87 | 34.52 | 21.81 | 4,896.19 | 10,397.32 | 561.01 |
| | Rep.02 | 160 | 32.43 | 35.80 | 22.07 | 4,908.55 | 10,655.81 | 581.27 |
| | Rep.03 | 160 | 32.73 | 34.76 | 19.40 | 4,892.84 | 9,702.75 | 502.82 |

Table 2.2. Continued.

| | | Number of oyster shell (N) | Width W (cm) | Length L (cm) | Height h (cm) | Volume (cm ³) | Total surface area (cm ²) | Projection area (cm ²) |
|-----------------------|--------|--------------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|------------------------------|---|---------------------------------------|
| Growth stage 13 | Rep.01 | 170 | 33.87 | 35.42 | 21.81 | 4,922.08 | 10,910.30 | 573.46 |
| | Rep.02 | 170 | 32.43 | 35.80 | 22.07 | 4,934.32 | 11,171.07 | 593.24 |
| | Rep.03 | 170 | 33.61 | 36.36 | 19.67 | 4,919.47 | 10,241.49 | 530.95 |
| Growth stage 14 | Rep.01 | 180 | 33.87 | 35.70 | 21.81 | 4,947.57 | 11,420.00 | 592.16 |
| | Rep.02 | 180 | 32.43 | 35.80 | 23.78 | 4,959.01 | 11,666.11 | 613.22 |
| | Rep.03 | 180 | 33.61 | 37.47 | 22.52 | 4,950.13 | 10,738.68 | 564.82 |
| Growth stage 15 | Rep.01 | 190 | 33.99 | 35.70 | 22.69 | 4,972.73 | 11,923.42 | 613.67 |
| | Rep.02 | 190 | 33.94 | 35.80 | 26.25 | 4,984.80 | 12,188.37 | 658.90 |
| | Rep.03 | 190 | 33.97 | 37.47 | 22.52 | 4,976.82 | 11,272.94 | 589.31 |
| Growth stage 16 | Rep.01 | 200 | 35.07 | 35.70 | 22.69 | 4,998.45 | 12,440.46 | 643.39 |
| | Rep.02 | 200 | 33.94 | 35.80 | 26.25 | 5,010.37 | 12,705.07 | 666.88 |
| | Rep.03 | 200 | 33.97 | 37.47 | 24.59 | 5,006.37 | 11,768.37 | 620.63 |

2.2 전산유체역학(CFD)

전산유체역학(Computational Fluid Dynamic, CFD)은 유체 유동, 화학 반응, 열 및 상변화와 같은 현상과 시스템을 컴퓨터를 기반으로 하여 해석하는 것을 의미한다(ANSYS-Inc, 2020).

전산유체역학은 크게 3가지 단계로 나뉜다; 전처리(pre-processing), 해석(simulation), 후처리(post-processing).

첫 번째는 전처리(pre-processing)로 연구 대상의 기하학적 형상을 모델링하고, 수치해석을 위한 격자를 생성하는 작업으로, 해석에 소요되는 비용(즉, 해석에 필요한 컴퓨터 하드웨어의 사양, 계산 시간 등)을 고려하여 최적의 격자를 생성하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 격자의 수가 많을수록 해의 정밀도가 향상된다.

두 번째는 해석(simulation)으로 해석을 진행할 대상에 적용할 다양한 수치해석적 방법을 고르고, 실제 흐름장과 유사하게 유동장의 경계 및 초기 조건을 설정하는 것을 의미한다. 여기서, 다양한 수치해석적 방법으로는 유한차분법, 유한체적법, 유한요소법 등이 있다. 본 논문은 요소기반 유한체적법(Element-based Finite Volume Method, EbFVM)을 사용하였다.

마지막으로 후처리(post-processing)는 해석 결과를 확인 및 가공하는 작업을 의미한다. 이 과정에서는 데이터를 추출할 뿐만 아니라 해석 결과를 가시화하고, 분석할 수 있다.

2.2.1 지배방정식 및 기본 가정조건

본 연구에서는 요소기반 유한체적법(EbFVM)을 기반으로 한 흐름 해석 전용 소프트웨어인 ANSYS-CFX를 사용하여(ANSYS-Inc, 2020) 흐름 해석을 수행하였다. 흐름에서 사용한 유체는 비압축성(incompressible), 점성(viscous), 정상상태(steady state fluid)의 물이다. *C. virginica*는 6~32°C의 해수에서 생존하며, 특히 25°C에서 가장 높은 성장 속도를 가진다(Coen et al., 2000). 이에 따라 해석 시 유체 온도를 생존 가능 온도의 평균값인 15°C로 설정하였다.

EbFVM은 유한요소법에서 사용한 요소의 개념을 유한체적법에 도입시킨 방법이다. 이 방법은 해석 영역을 하위 영역으로 분할하고, 지배방정식을 대수방정식으로 변환하여 수치적 해를 찾으며, 후류체적을 산정하는 방법으로 사용되고 있다.(Kim et al., 2014; Kim et al., 2016a; Kim et al., 2016b; Jung et al., 2022). 또한, 이 방법은 격자 생성이 상대적으로 용이하다는 장점을 가지고 있다(Versteeg and Malalasekera, 2007)

지배방정식은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식을 난류방정식은 Shear Stress Transport(SST) 난류 모델을 사용하였다. 여기서, SST 난류모델은 $k-\omega$ 난류 모델과 $k-\epsilon$ 난류 모델의 단점을 보완하여 개발된 모델로, 매끄러운 표면에서의 유동 박리 현상에 대한 예측성을 향상시키고, 와 점성(eddy viscosity)의 과도한 예측을 방지할 수 있다. 또한, 역 압력구배가 발생하는 곳에서의 흐름 분리의 시작과 양에 대해 정확한 예측을 제공한다는 장점을 가지고 있다(Menter, 2009).

2.2.2 유동장 및 격자 생성

2.2.2.1 유동장

해석 모델의 외부 유동장 크기는 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 로, 유동장 경계면에 압력구배가 발생하지 않는 충분한 크기로 설정하여 실제 환경과 유사한 공간으로 형상화하였다(Fig. 2.4). 유동장의 경계조건은 다음과 같다. 유동장의 전면부를 입구(inlet) 조건으로 단위 유속 1 m/s 의 흐름이 흐르도록 하였으며(Fig. 2.5a), 후면부는 출구(outlet) 조건으로 정압력(static pressure)을 영으로 설정하여 유동 공간에 들어온 유체가 모두 빠져나갈 수 있도록 설정하였다(Fig. 2.5b). 유동장의 좌·우측면과 상단면을 대칭(symmetry) 조건으로 설정하여 해석에 영향을 미치지 않도록 하였다(Fig. 2.5c). 마지막으로 유동장의 바닥면과 굴 어초 구조물의 표면을 미끄러짐이 없는 벽(no-slip wall)으로 설정하였다(Fig. 2.5d).

2.2.2.2 격자 생성

본 논문의 연구 모델은 곡면 형상과 날카로운 모서리를 가지며, 불규칙적인 표면을 가진다. 이런 특징에 구애받지 않고 격자를 형성하기 위해 유동장의 모든 격자를 사면체(tetrahedron)로 생성하였다. 사면체 격자는 다른 격자 형상 조건에 비해 복잡한 형상을 가진 구조물에서도 격자를 수월하게 생성할 수 있으며, 향상된 격자 품질을 만족시킬 수 있다.

흐름 해석의 정확도를 높이기 위해 격자 품질을 검토하여 최적의 격자를 생성하였으며, 격자 독립성을 만족시키는 흐름 해석을 수행하였다. 먼저 격자 품질을 고려하기 위해 직교 품질(orthogonal quality; 최소 0.15)과 왜도(skewness; 최대 0.94)를 사용하였고, 사용된 격자 품질 조건은 Table 2.3과 같다.

초기 굴 어초 모델의 경우 격자 품질 조건을 모두 만족하였다. 하지만, 굴 어초의 성장 모델에서는 굴 어초 사이에 발생하는 다양한 모양의 틈새로 인해 격자 품질이 저하되는 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 전체 격자 대비 격자 품질을 만족하지 못하는 격자 비율을 최소 0.005% 내로 유지하여, 저하된 격자 품질로 인해 발생한 오차값을 최대한 감소시키고자 하였다.

또한, 격자 독립성을 검토하였다. 일반적으로, 격자 수가 증가할수록 해석 값의 정확성 또한 증가한다. 하지만, 해석 컴퓨터의 하드웨어 사양 및 해석 시간 등으로 인해 무한정 격자를 증가시키기는 매우 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 해석 결과값이 격자로부터 의존성을 가지지 않도록, 격자와 해석값 사이의 독립성을 검토하였다.

격자 독립성을 검토하기 위해 굴 어초 모델의 기반이 되는 평판 기질을 대상 모델로 사용하였으며, 유동장은 모든 해석 유동장과 $3\text{ m} \times 3\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 로 동일하게 설정하였다(Fig. 2.4). 격자 크기를 조절하여 유동장의 전체 요소 수를 검토하였고, 항력계수와 후류체적을 인자로 선택하여 격자 독립성을 확인하였다. 격자 독립성을 만족시키기 위해 본 연구에서 검토한 격자 품질은 Table 2.4와 같다. Fig. 2.6에서 확인할 수 있듯이, 항력계수는

평균 0.792으로 요소 개수가 20,000,000개 이상일 때 수렴하였고, 후류체적은 요소 개수가 40,000,000개 이상일 때 1472.37 cm³으로 수렴하였다. 본 연구의 주된 관심사는 굴 어초 모델 주변에 형성되는 흐름특성 중 후류체적을 파악하는 것이므로, 모든 흐름 해석에서 요소 개수를 40,000,000개 이상 만족하도록 해석을 수행하였다.



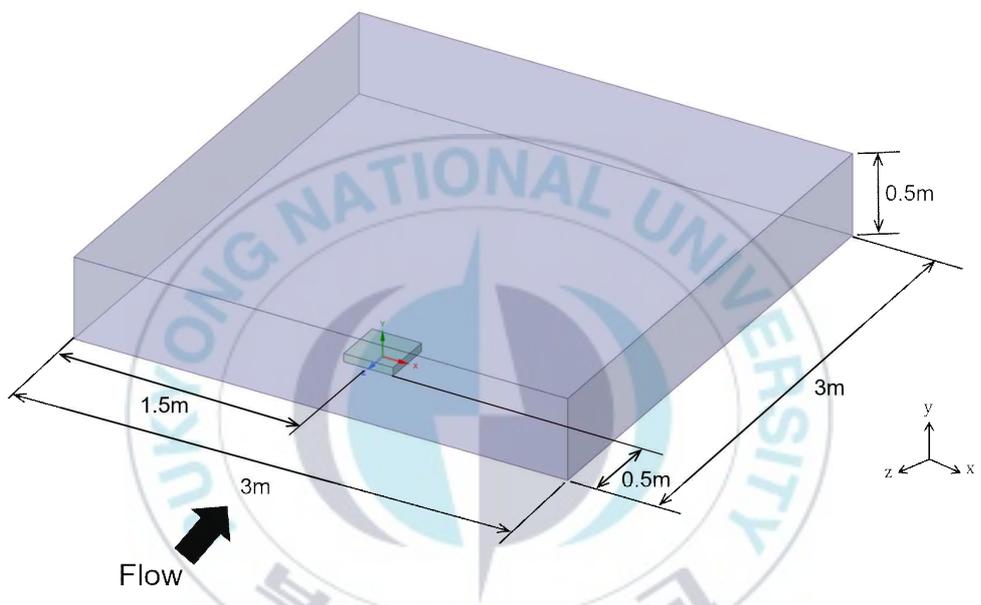


Fig. 2.4. Flow domain.

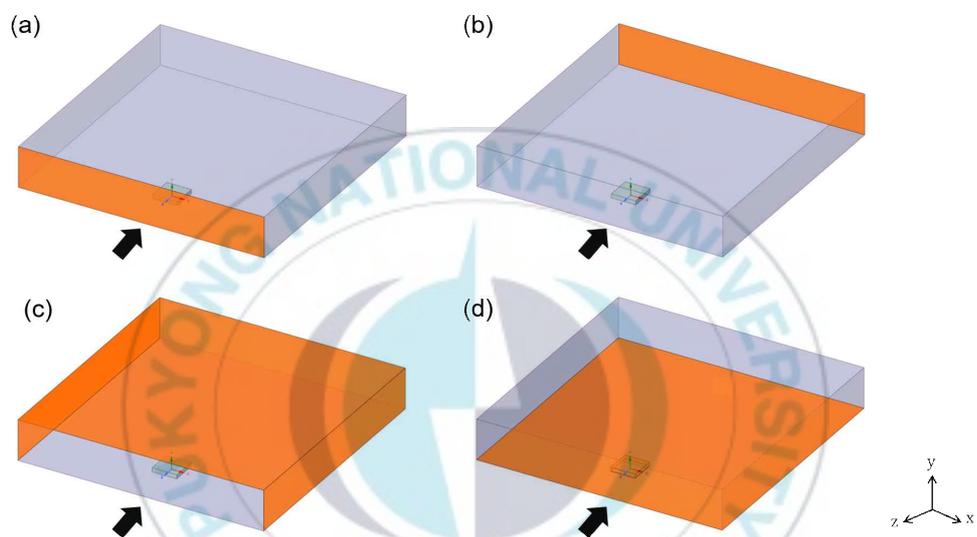


Fig. 2.5. Boundary conditions: (a) inlet, (b) outlet, (c) symmetry, and (d) wall.

Table 2.3 Criteria in orthogonal quality and skewness for evaluating mesh quality (ANSYS-Inc., 2020)

| | Unacceptable | Bad | Acceptable | Good | Very good | Excellent |
|--------------------|--------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Orthogonal quality | 0.00-0.001 | 0.001-0.14 | 0.15-0.20 | 0.20-0.69 | 0.70-0.95 | 0.95-1.00 |
| Skewness | 1.00-0.98 | 0.97-0.95 | 0.94-0.80 | 0.80-0.50 | 0.50-0.25 | 0.25-0.00 |

Table 2.4. Mesh independence

| Number of Element | Orthogonal quality | | | Skewness | | |
|-------------------|--------------------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | Min. | Max. | Ave. | Min. | Max. | Ave. |
| 2,465,539 | 0.201 | 0.996 | 0.796 | 3.07E-04 | 0.799 | 0.203 |
| 3,610,664 | 0.200 | 0.998 | 0.797 | 1.82E-04 | 0.800 | 0.202 |
| 4,805,645 | 0.201 | 0.97 | 0.797 | 8.54E-05 | 0.799 | 0.202 |
| 6,581,585 | 0.200 | 0.997 | 0.798 | 1.38E-04 | 0.800 | 0.201 |
| 7,808,890 | 0.200 | 0.997 | 0.798 | 1.57E-04 | 0.800 | 0.201 |
| 9,360,305 | 0.201 | 0.998 | 0.798 | 9.58E-05 | 0.799 | 0.201 |
| 10,303,583 | 0.200 | 0.998 | 0.799 | 4.72E-05 | 0.800 | 0.200 |
| 11,369,139 | 0.201 | 0.997 | 0.799 | 1.64E-04 | 0.799 | 0.200 |
| 13,974,821 | 0.200 | 0.998 | 0.799 | 6.42E-06 | 0.800 | 0.200 |
| 22,183,821 | 0.200 | 0.998 | 0.799 | 1.47E-04 | 0.800 | 0.199 |
| 28,787,119 | 0.200 | 0.998 | 0.800 | 4.34E-07 | 0.800 | 0.199 |
| 33,103,071 | 0.200 | 0.999 | 0.800 | 5.75E-05 | 0.800 | 0.199 |
| 38,297,464 | 0.200 | 0.998 | 0.800 | 3.05E-05 | 0.800 | 0.199 |
| 40,693,000 | 0.200 | 0.998 | 0.800 | 3.16E-05 | 0.800 | 0.199 |
| 44,669,852 | 0.200 | 0.999 | 0.801 | 3.85E-05 | 0.800 | 0.198 |
| 52,513,370 | 0.200 | 0.999 | 0.801 | 2.43E-05 | 0.800 | 0.198 |
| 56,175,193 | 0.200 | 0.998 | 0.801 | 5.59E-05 | 0.800 | 0.198 |
| 62,337,554 | 0.200 | 0.999 | 0.801 | 2.10E-05 | 0.800 | 0.198 |
| 64,592,123 | 0.200 | 0.998 | 0.801 | 6.73E-05 | 0.800 | 0.198 |

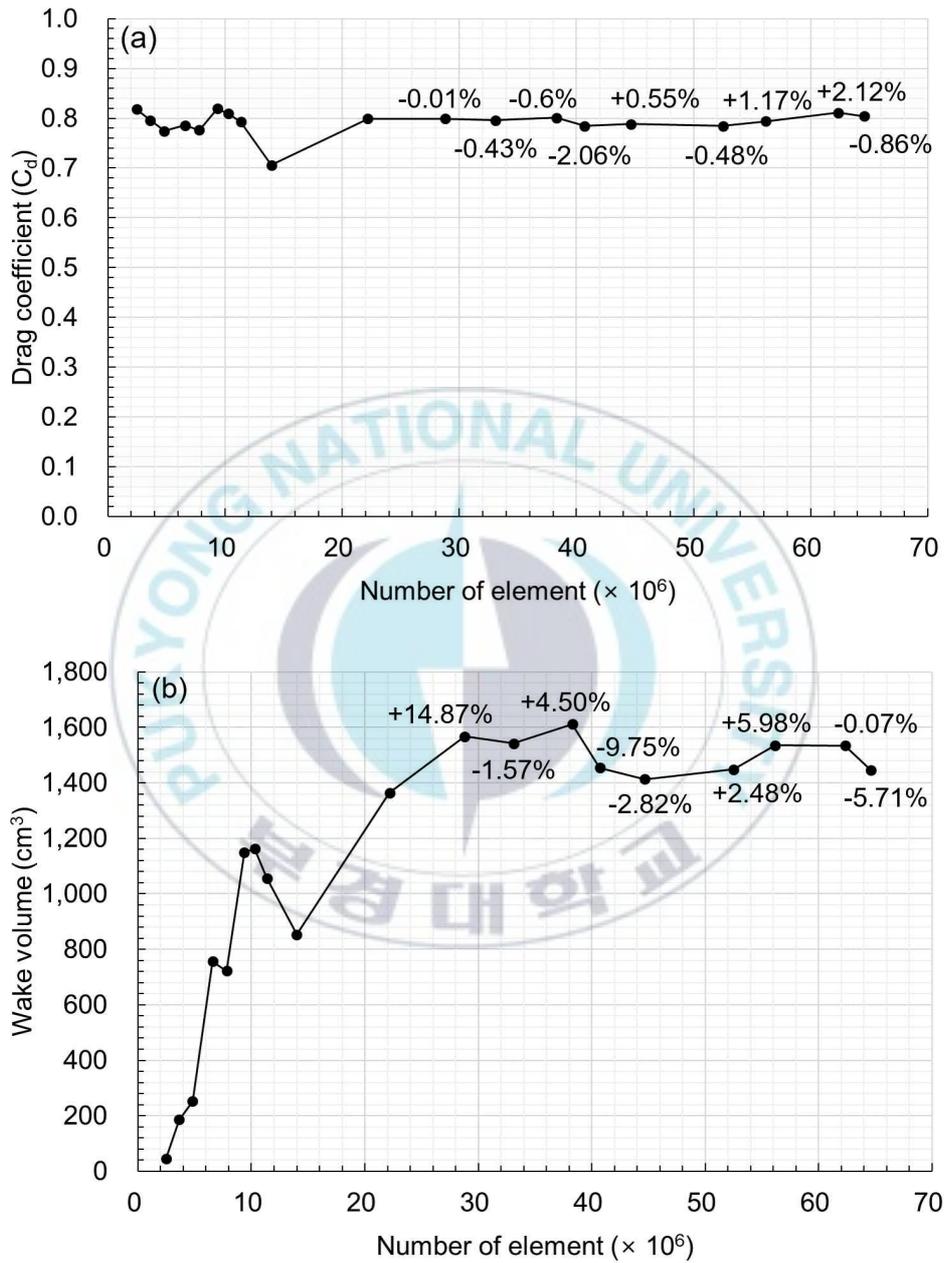


Fig. 2.6. Mesh independence:
 (a) drag coefficient and (b) wake volume.

2.3 후류체적(Wake volume)

후류영역(wake region)은 인공어초에 있어서 중요한 흐름 특성으로, 인공어초의 하류 영역에서 흐름 유속의 역방향 흐름이 발생하는 공간을 의미한다(Fig. 2.7). 이 영역은 외부 유동장보다 현저히 감소된 유속을 가지며, 정체된 재순환 흐름공간으로써 해저면으로부터 유입되는 영양분을 다량으로 함유한다. 이와 같은 이유로, 많은 해양 생물들이 후류 영역을 휴식장, 산란장, 먹이장 등으로 활용하고 있다(Takeuchi, 1991; Miller et al., 2002; Yoon et al., 2016; Rouse et al., 2020). Fig. 2.8은 정육면체 구조물 배후에 발생한 후류영역의 속도 벡터를 나타낸다.

후류영역을 정량화하기 위해 후류평면(wake plane), 후류길이(wake length)와 같은 다양한 방법이 사용된다. 하지만 이와 같은 방법은 후류영역을 3차원적으로 검토할 수 없고, 관찰자가 설정한 기준 평면이나 위치에 따라 다양한 값을 가질 수 있다는 한계를 가진다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해, 본 연구에서는 Kim et al., (2014)이 제안한 후류체적 개념을 도입하였다. 여기서 후류체적은 요소기반 유한체적법(EbFVM)을 사용하여 산정되었다.

본 논문에서는 굴 어초 모델에서 발생한 후류체적을 정규화하였다. 정규화된 후류체적(\overline{WV})은 Eq. 2.6과 같다. 여기서, WV_{OR} 은 굴 어초 모델에서 발생한 후류체적을 의미하고, WV_{plate} 는 굴 패각이 존재하지 않는 평판 기질에서 발생한 후류체적을 의미한다.

$$\overline{WV} = \frac{WV_{OR}}{WV_{plate}} \quad (2.6)$$

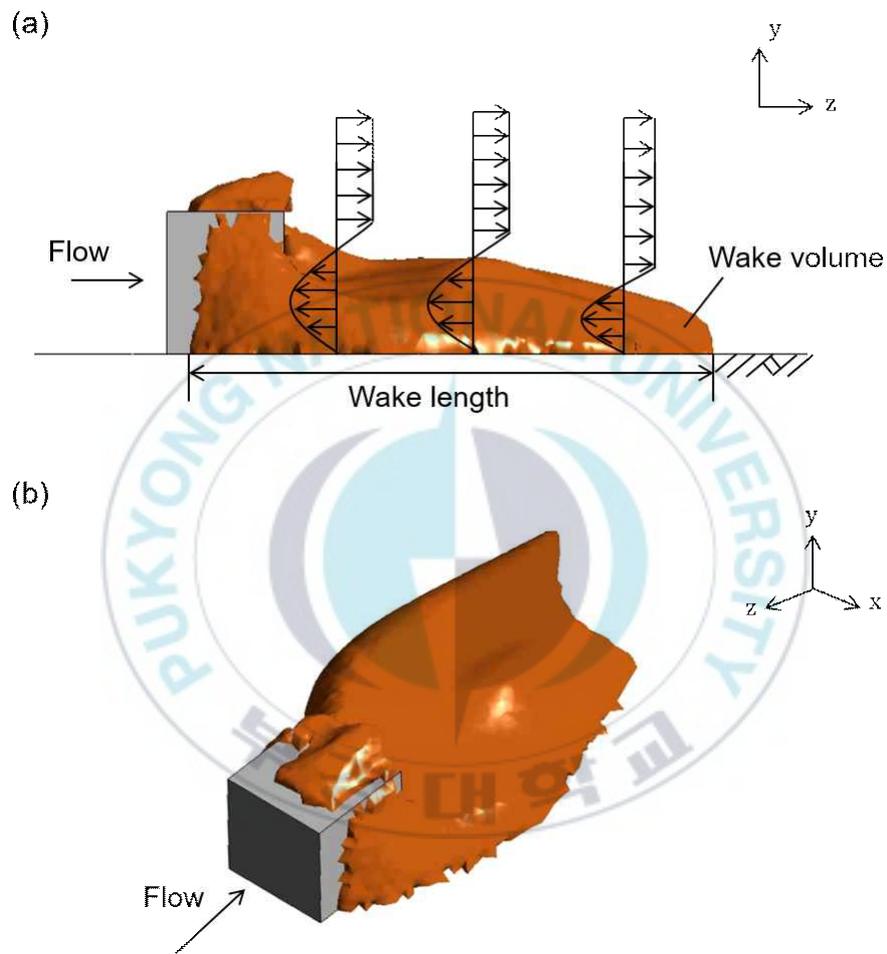


Fig. 2.7. Diagram of wake region in cube model.

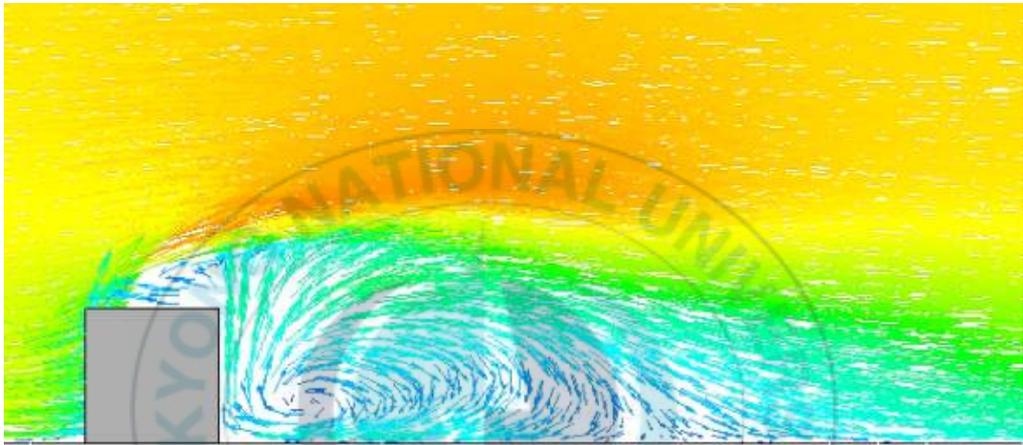


Fig. 2.8. Velocity vectors in the wake region.

2.4 평가지수

해저에 위치한 구조물의 구조적 특성은 구조물 주변의 흐름 특성에 영향을 미친다(Styles, 2015; Cannon et al., 2022b). 따라서, 굴 어초의 구조적 특성을 정량화하여 구조물 주변의 흐름장(즉, 후류체적)과의 관계를 파악하고자 하였다. 이를 위해, 평가지수를 다음과 같이 설정하였다.

2.4.1 효율지수(Efficiency index, EI)

굴 어초에서 발생하는 후류체적 효과를 정량화하기 위해 Kim et al., (2016b)이 제안한 효율지수(ϕ_e)를 도입하였다. 효율지수는 굴 어초의 체적 대비 발생한 후류체적의 비로 정의된다(Eq. 2.7).

$$\phi_e = \frac{V_{WV}}{V_{OR}} \quad (2.7)$$

여기서, V_{WV} 는 굴 어초에 발생한 후류체적을, V_{OR} 은 굴 어초 모델의 체적을 의미한다. 효율지수를 제안한 Kim et al., (2016b)에 따르면 효율지수가 ≥ 2.0 일 때, 설치한 어초의 후류체적 효율이 뛰어나다고 명시하고 있으며, 이는 형성된 후류체적이 설치한 구조물 체적의 2배 이상임을 의미한다.

2.4.2 향상된 차단지수(Improved blocking index, BI)

후류영역은 해저 구조물 배후에 형성되고, 구조물의 형상에 따라 각기 다른 모양을 가진다. 특히, Kim et al., (2016b)에 따르면, 주된 흐름을 막을 수 있는 넓은 표면적이 구조물에 존재할 때 더 큰 후류영역을 생성한다고 한다. 또한, Jung et al., (2022)은 구조물 전면부와 후류체적의 관계를 파악하기 위해 차단지수를 검토하였다(Eq. 2.8).

본 논문에서는 유체와 가장 먼저 마주하는 굴 어초의 전면부 특성이 후류체적 형성에 영향을 미칠 것이라고 판단하였다. 따라서 구조물의 형상에 구애받지 않고 흐름장에 대한 차단영역을 검토할 수 있도록 Jung et al., (2022)이 제시한 차단지수를 활용하여 향상된 차단지수(BI)를 제안하였다(Eq. 2.9).

$$\phi_b = \frac{A_a}{A_b} \quad (2.8)$$

$$\phi_{I,b} = \frac{A_p}{A_f} \quad (2.9)$$

$$A_f = W \times H \quad (2.9a)$$

Eq. 2.8에서 A_a 는 실제 구조물의 전면부 면적을 의미하고, A_b 는 구조물의 전면부가 완전히 막혀있다고 가정한 면적을 의미한다. 하지만, 굴 어초의 형상 특징(즉, 굴 폐각의 집적 형상 및 불규칙적인 틈새)에 따라 본 논문에서 Eq. 2.8을 사용하는 것은 한계가 존재하므로, 향상된 차단지수 공식을 제안하였다(Eq. 2.9). 향상된 차단지수(BI) 식의 A_f 는 구조물의 폭과 유동장의 수심을 곱한 값으로, 굴 어초가 존재하는 부분의 수심면적을 의미하고(Eq. 2.9a), 여기서 수심은 유동장의 최대 높이인 0.5 m를 사용하였다. A_p 는 유체가 작용하는 방향의 구조물 투영면적을 의미한다.

2.4.3 표면 복잡성 지수(Surface complexity index, SI)

굴은 자연적으로 또는 인공적으로 조성된 생태 공간에서 성장하면서 복잡한 3차원 구조를 생성한다(Wheaton, 2007; Schulte, 2017). 다양한 천연구조물(예. 산호초, 등)의 3차원 구조에 관한 연구가 비교적 활발히 진행되고 있지만(Commito and Rusignuolo, 2000), 굴은 착생하여 성장하고, 다른 유기체의 생존에 효과적인 부착 표면을 제공하면서 규모가 커지기 때문에 굴 어초의 구조적 복잡성을 정량화하기 쉽지 않다. 일반적으로 표면 복잡성(surface complexity)을 사용하여 구조적 복잡성을 정량화하기도 하는데, 이와 같은 방법으로는 프랙탈 방법, chain-tape 방법 등이 있다(Risk, 1972; Luckhurst and Luckhurst 1978). 여기서 chain-tape 방법은 1차원적인 방법으로 3차원적 구조물의 표면 복잡성을 정량화하기 어렵다는 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 표면 복잡성 지수를 Eq. 2.10와 같이 정의하였다.

$$\phi_s = \frac{A_{OR}}{A_b} \quad (2.10)$$

$$A_b = W \times L \quad (2.10a)$$

여기서, A_{OR} 은 굴 어초 모델의 전체 표면적을 의미하고, A_b 는 굴 어초의 바닥 투영면적을 의미한다(Eq. 2.10a). 여기서 굴 어초의 바닥 투영면적은 직사각형으로 가정하여 구조물의 폭(W)과 길이(L)를 곱한 값이다. 이와 같은 식을 사용한다면, 3차원 구조물에 대한 표면 복잡성 지수를 손쉽게 파악할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 초기 굴 어초 모델

초기 굴 어초 모델(Initial OR)은 크게 4가지로 모델로 구성되며, 굴 패각 배열 개수를 변화시켜 각 모델 당 6개씩 흐름 해석이 진행되었다. 또한, 굴 패각의 삽입 비율(10%, 50%)을 고려하였다. 따라서, 총 48개의 초기 굴 어초 모델의 주변 흐름장이 해석되었다.

굴 패각 삽입 비율 10%의 초기 굴 어초 모델에서 생성된 후류체적은 Fig. 3.1(a)와 같다. 여기서 삽입 비율 10%는 굴 패각이 평판 기질에 0.5 cm 삽입된 것을 의미한다. 발생한 후류체적 최대값과 최소값, 평균값은 Table. 3.1과 같다. 흐름해석 결과에 따르면, 평균 후류체적은 5310.41 cm³이고, 최소 2,663.91 cm³에서 최대 9,943.28 cm³의 값을 보였다. 또한, 굴 패각을 삽입하지 않은 평판 기질의 후류체적은 1,454.80 cm³으로, 굴 패각이 존재하는 굴 어초 모델은 최소 1.83배에서 최대 6.83배 높은 후류체적을 가졌다.

굴 패각 삽입 비율 50%의 굴 어초 모델에서 생성된 후류체적은 Fig. 3.1(b)와 같다. 형성된 후류체적의 최대값과 최소값, 평균값은 Table 3.2와 같다. 평균 후류체적은 3,430.99 cm³이고, 최소 2,035.63 cm³에서 최대 5203.53 cm³의 값을 가졌다. 이는 굴 패각이 존재하지 않는 평판 기질에 발생한 후류체적에 비해 1.40배에서 최대 3.58배 높은 후류체적을 가진다. 이를 통해 단순한 구조물이 아닌 복잡한 형상을 가진 굴 어초가 후류체적 형성에 이득을 가져옴을 확인할 수 있었다.

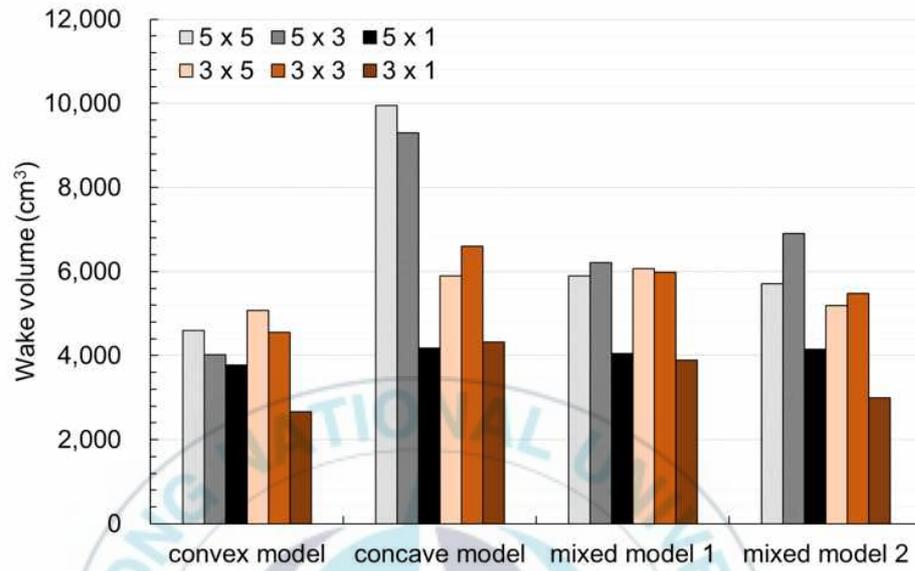
굴 패각 배열에 따른 굴 어초 모델의 후류체적을 비교하면, 굴 패각 비율 10%일 때, 5×5 배열 모델과 5×3 배열 모델이 가장 우수한 후류체적을 보였다(각각 5,242.33 cm³, 5,512.78 cm³). 반면, 5×1 배열 모델과 3×1 배열 모델이 가장 작은 후류체적을 가졌으며(각각 4,039.70 cm³, 3,466.26 cm³), 굴 패각 비율이 50%인 경우, 3×3 배열 모델과 3×1 배열 모델이 가장 작은 후류체적을 가졌다(각각 2,740.00 cm³, 2,832.18

cm³). 이와 같은 케이스는 모두 굴 패각 개수가 10개 이하인 경우이므로, 초기 굴 어초를 설치할 때 구조물의 후류체적을 극대화하기 위해서는 굴 패각 개수를 증가시키는 것이 효율적이라고 판단된다.

Fig. 3.2는 초기 굴 어초 모델의 후류길이를 나타낸다. 여기서 후류길이는 유동장의 바닥면을 기준으로 발생한 후류체적의 최대 길이를 선정하였다. 삽입비율 10%일 때 발생한 평균 후류길이는 59.95 cm이고, 최소값 51.41 cm, 최대값 70.01 cm을 가졌다(Table. 3.3). 또한, 삽입비율 50%일 때 발생한 평균 후류길이는 51.91 cm이고, 최소값 39.51 cm, 최대값 56.89 cm을 가졌다(Table. 3.4). 초기 굴어초 모델의 평균 후류길이는 55.93 cm이며, 이는 굴 어초 모델의 길이(L) 대비 1.86배의 후류길이가 형성됨을 의미한다. 다시 말하자면, 해당 범위에 존재하는 주변 영양염 및 먹이입자가 굴 어초로 유입될 수 있음을 의미한다.

Fig. 3.3~3.11은 굴 패각 삽입 비율 10%일 때의 초기 굴 어초 모델에 발생한 후류체적을 나타내었다. 회색 체적은 초기 굴어초 모델을 의미하고, 주황색 체적은 구조물에 발생한 후류체적을 나타낸다.

(a)



(b)

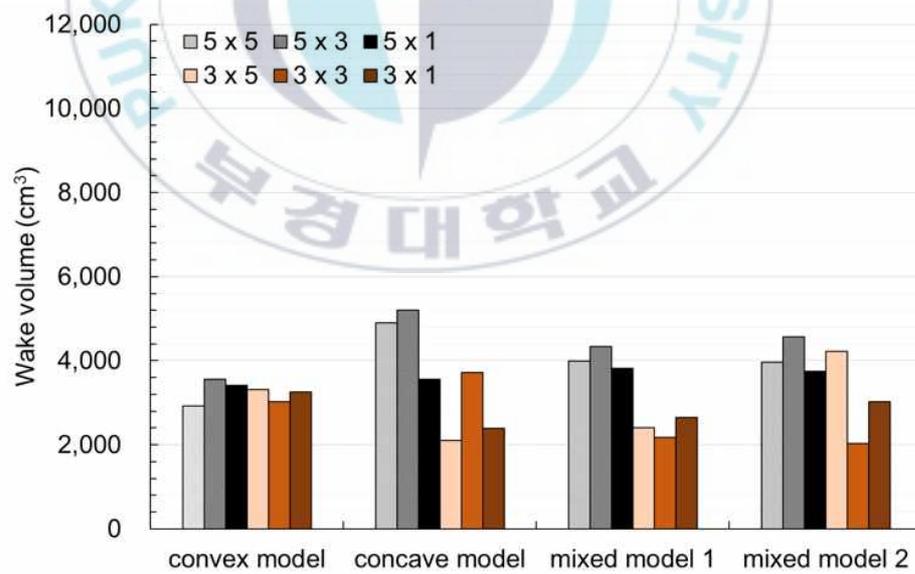


Fig. 3.1. Wake volume in initial ORs: (a) penetration 10% and (b) penetration 50%.

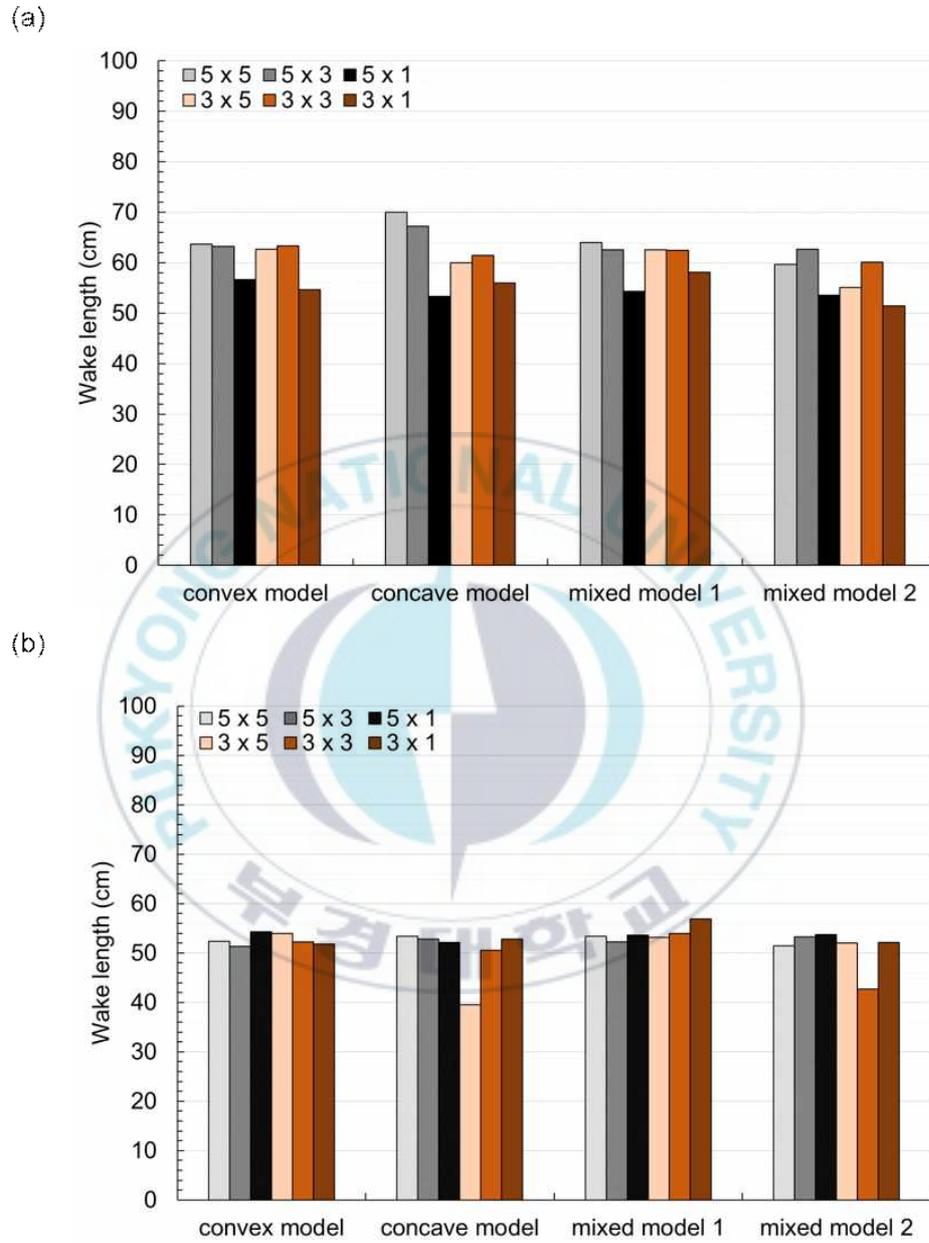


Fig. 3.2. Wake length in initial ORs: (a) penetration 10% and (b) penetration 50%.

Table. 3.1 Wake volume (cm³) in initial ORs about penetraion 10%

| | Convex model | Concave model | Mixed model 1 | Mixed model 2 |
|------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Max. | 5,076.61 | 9,943.28 | 6,208.32 | 6,902.07 |
| Min. | 2,663.91 | 4,180.08 | 3,885.95 | 2,992.69 |
| Ave. | 4,115.44 | 6,706.78 | 5,347.11 | 5,072.31 |

Table. 3.2 Wake volume (cm³) in initial ORs about penetration 50%

| | Convex model | Concave model | Mixed model 1 | Mixed model 2 |
|------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Max. | 3,556.07 | 5,203.53 | 4,332.99 | 4,574.95 |
| Min. | 2,928.79 | 2,105.34 | 2,174.82 | 2,035.63 |
| Ave. | 3,250.75 | 3,646.30 | 3,230.52 | 3,596.38 |

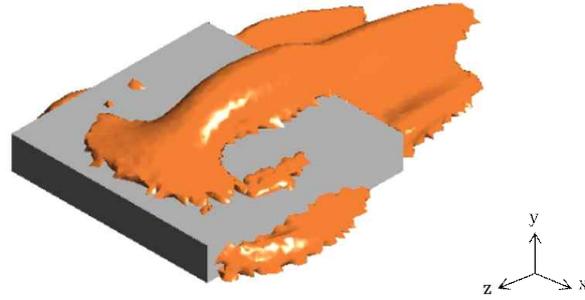
Table. 3.3 Wake length (cm) in initial ORs about penetration 10%

| | Convex model | Concave model | Mixed model 1 | Mixed model 2 |
|------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Max. | 63.65 | 70.01 | 64.03 | 62.62 |
| Min. | 54.66 | 53.35 | 54.34 | 51.41 |
| Ave. | 60.71 | 61.33 | 60.67 | 57.08 |

Table. 3.4 Wake length (cm) in initial ORs about penetration 50%

| | Convex model | Concave model | Mixed model 1 | Mixed model 2 |
|------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Max. | 54.27 | 53.41 | 56.89 | 53.67 |
| Min. | 51.36 | 39.51 | 52.22 | 42.71 |
| Ave. | 52.67 | 50.22 | 53.88 | 50.87 |

(a)



(b)



Fig. 3.3. Wake volume in plate substrate.

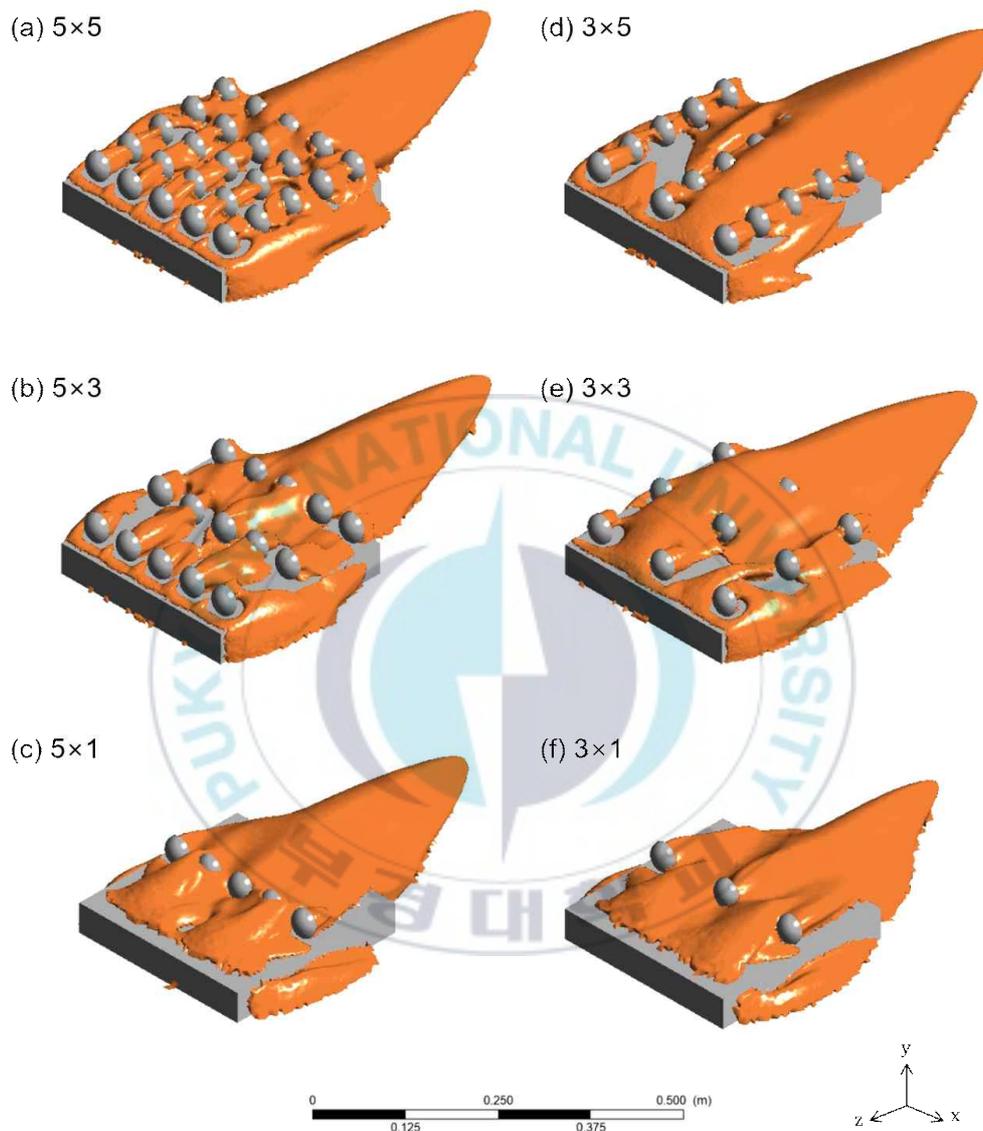


Fig. 3.4. Wake volume of convex model in initial ORs about penetration 10%.

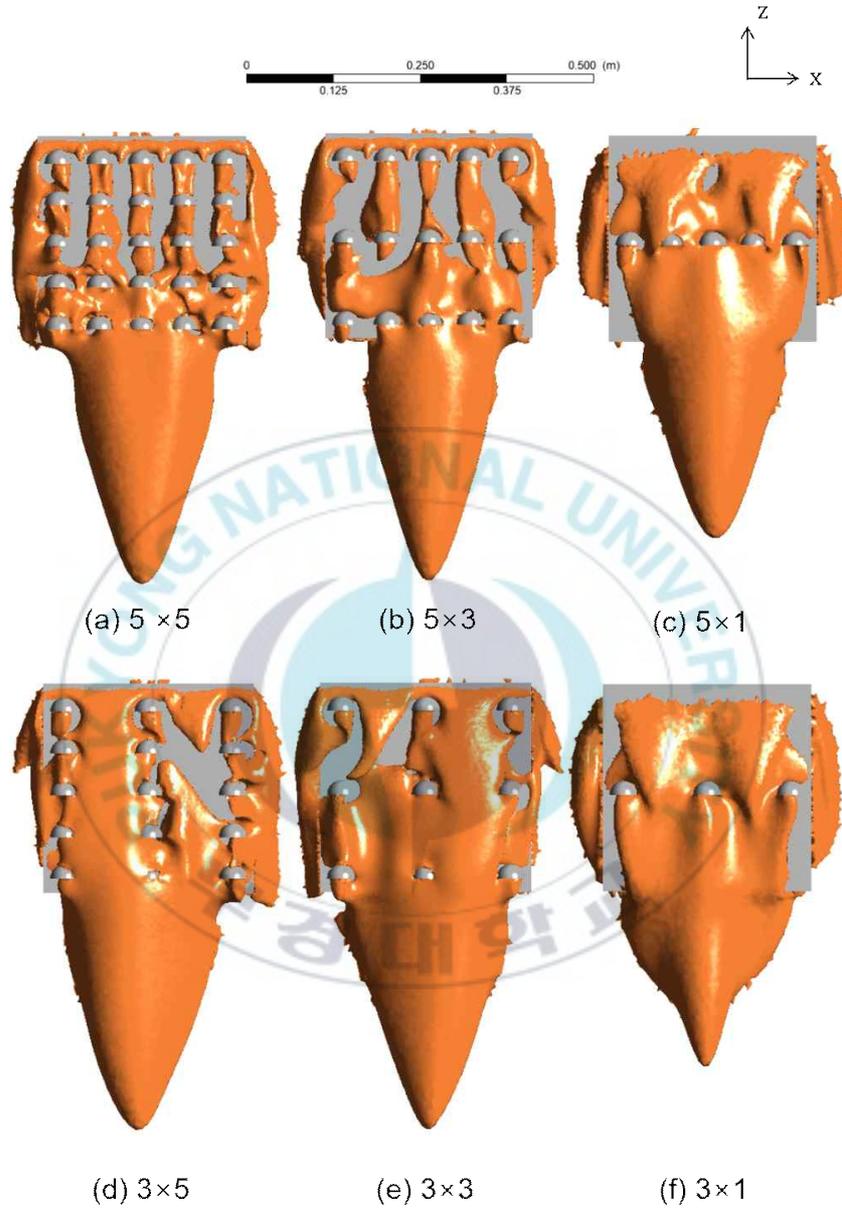


Fig. 3.5. Wake volume of convex model in initial ORs about penetration 10% (xz plane).

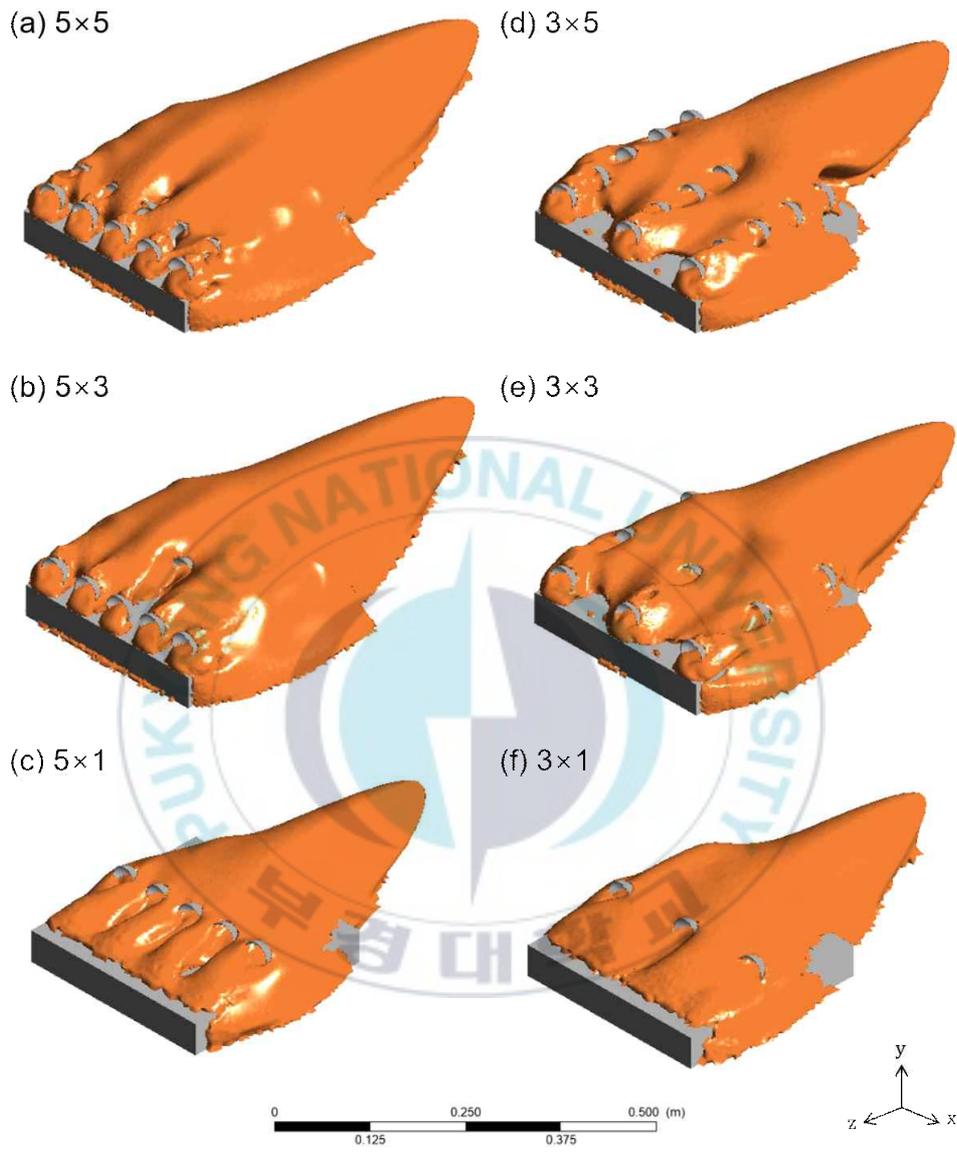


Fig. 3.6. Wake volume of concave model in initial ORs about penetration 10%.

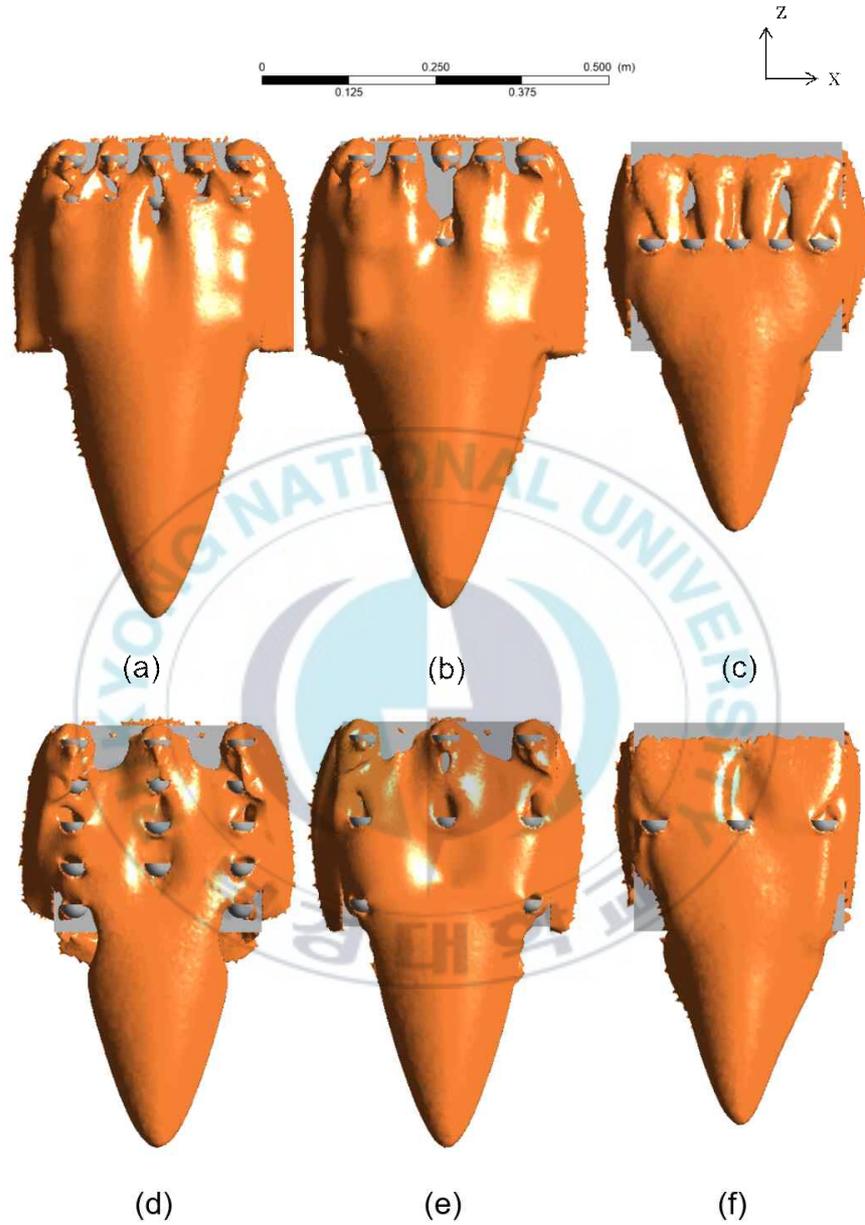


Fig. 3.7. Wake volume of concave model in initial ORs about penetration 10% (xz plane).

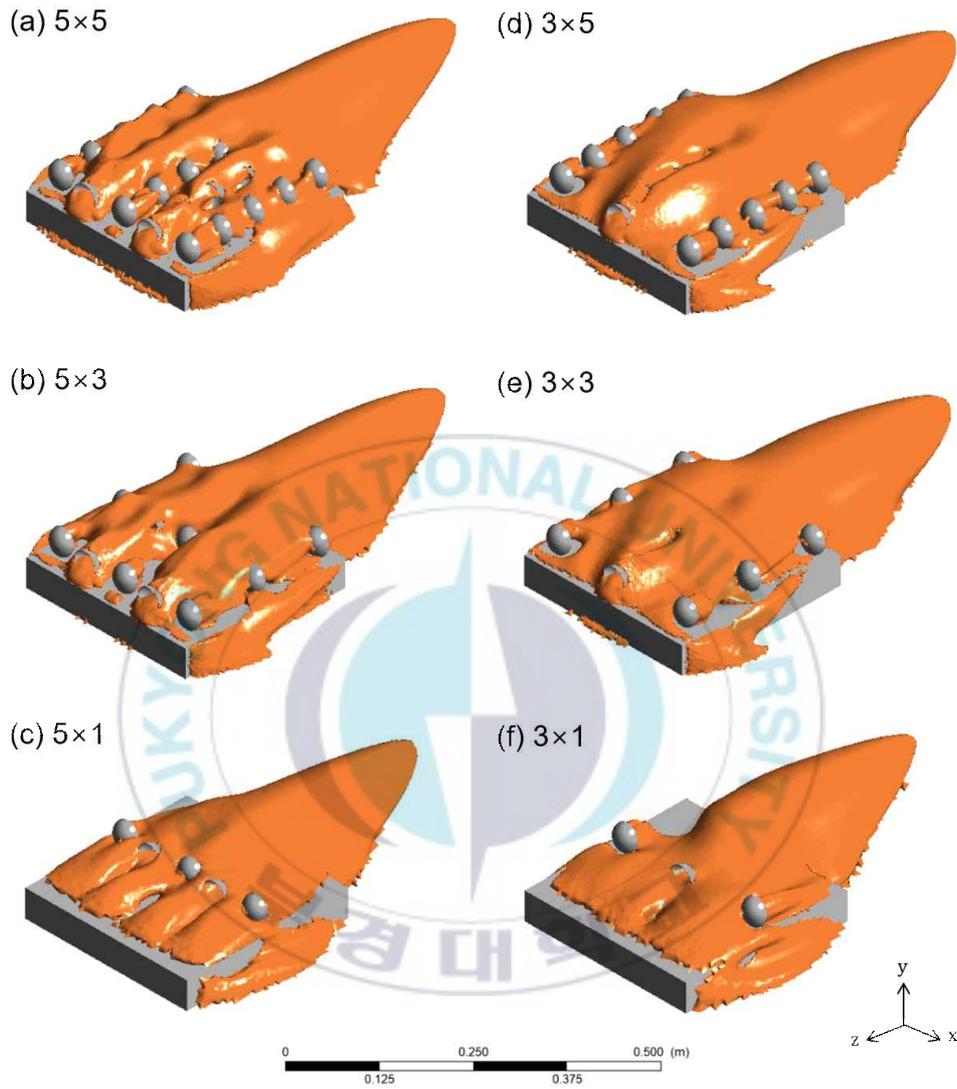


Fig. 3.8. Wake volume of mixed model 1 in initial ORs about penetration 10%.

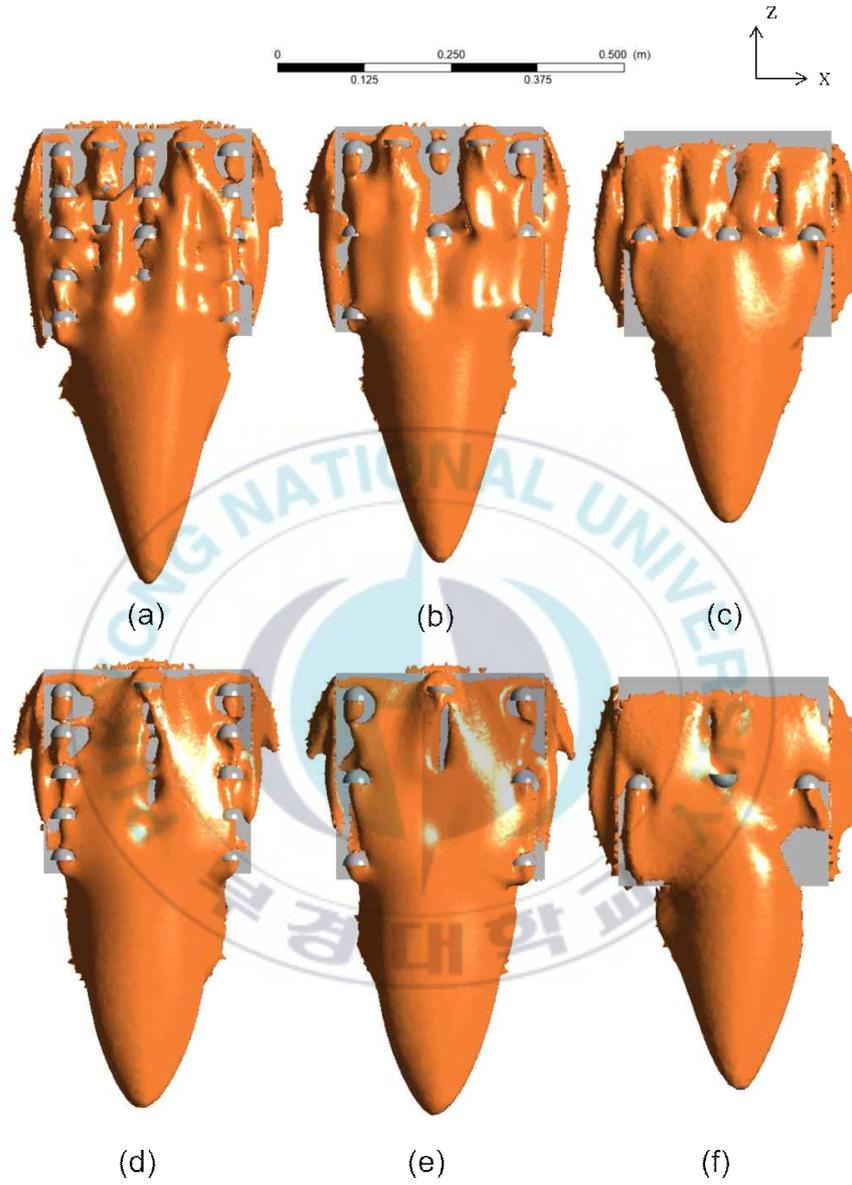


Fig. 3.9. Wake volume of mixed model 1 in initial ORs about penetration 10% (xz plane).

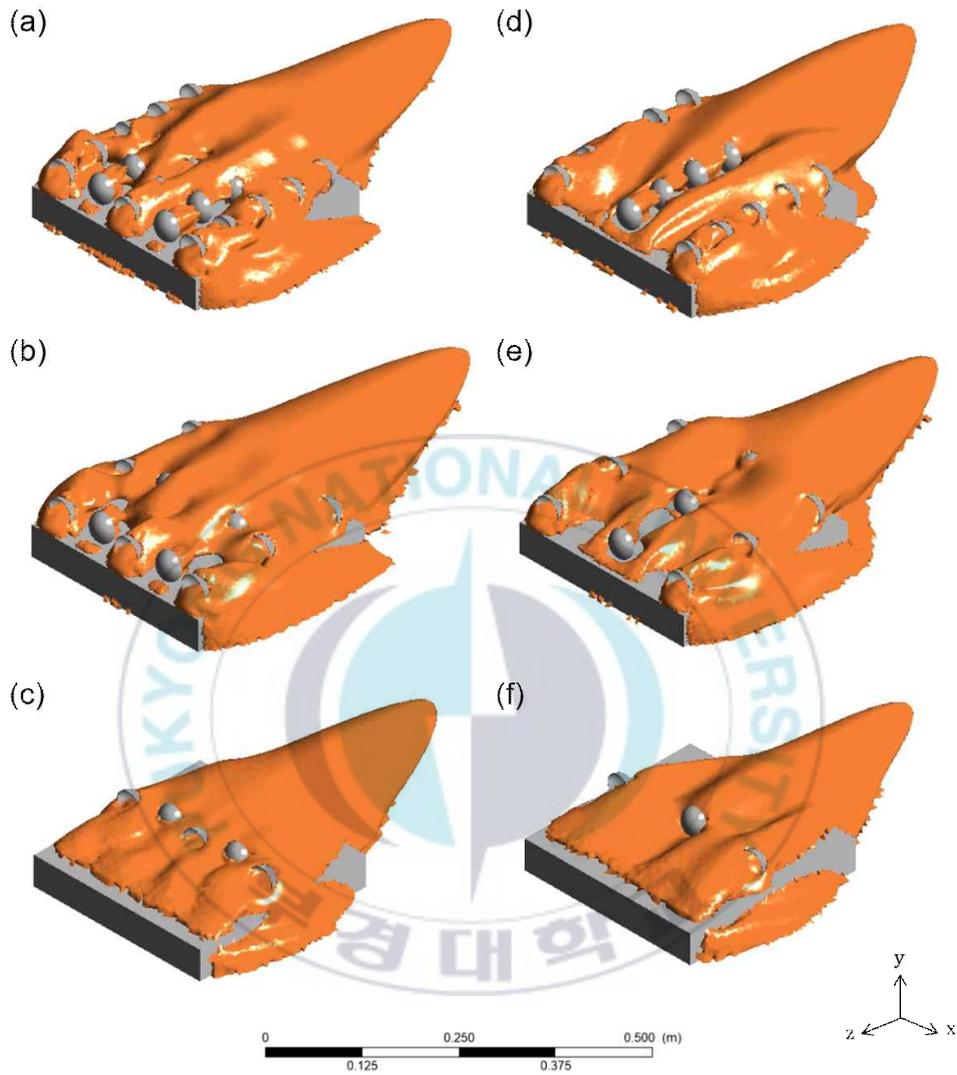


Fig. 3.10. Wake volume of mixed model 2 in initial ORs about penetration 10%.



Fig. 3.11. Wake volume of mixed model 2 in initial ORs about penetration 10% (xz plane).

3.2 성장에 따른 굴 어초 모델

다음은 성장에 따른 굴 어초 모델(Growth OR)이다. 굴 어초 모델의 성장은 성장 단계(growth stage)로 표현되었으며, 각 성장 단계에서 굴 어초를 구성하는 굴 패각 개수는 동일하다. 여기서, 굴 어초 성장 모델의 보편성을 확보하기 위해 각 성장 단계마다 세 가지 모델(Rep.01, Rep.02, Rep.03)을 설계하였다. 성장에 따른 굴 어초 모델에서 발생한 후류체적과 후류길이는 Table 3.5~3.7와 같다.

Fig. 3.12는 굴 어초 모델의 성장 단계와 구조물에 생성된 후류체적의 관계를 나타낸다. 성장 단계가 증가할수록 굴 어초에 발생한 후류체적은 증가하였다. 성장 1단계의 굴 어초 모델에서 발생한 후류체적은 평균 $9,063.08 \text{ cm}^3$ 값을 가지고, 성장 16단계의 굴 어초 모델에서 발생한 후류체적은 평균 $32,226.37 \text{ cm}^3$ 값으로 3.06배 이상 증가하는 값을 가졌다. 여기서 성장 1단계의 굴 어초 모델은 50개의 굴 패각이, 성장 16단계의 굴 어초 모델은 200개의 굴 패각으로 형성되었다.

Fig. 3.13는 굴 어초 모델의 성장 단계에 따른 후류길이를 나타낸다. 여기서, 후류길이는 유동장 바닥면을 기준으로 형성된 최대 후류길이를 의미한다. 성장 1단계의 후류길이는 76.82 cm 이고, 성장 16단계의 후류길이는 108.88 cm 으로 약 1.42배 증가하였다. 굴 어초의 성장 단계가 증가할수록 후류길이가 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 3.14와 Fig. 3.15는 성장에 따른 굴 어초 모델에 발생된 후류체적을 대표적으로 나타낸다. Fig. 3.14는 성장 4단계와 성장 5단계로 각각 굴 패각 개수(N) 80개, 90개로 구성되어있는 모델을 의미하고, Fig. 3.15는 성장 6단계와 7단계로 각각 굴 패각 개수(N) 100개와 110개로 구성된다. 여기서, 회색 체적은 성장에 따른 굴 어초 모델을, 주황색 체적은 굴 어초 모델에 발생된 후류체적이다.

Table 3.5. Wake volume and wake length of growth OR (Rep.01)

| - | Number of oyster (<i>N</i>) | Wake volume (cm ³) | Wake length (cm) |
|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------|
| Growth stage 1 | 50 | 12,903.40 | 83.60 |
| Growth stage 2 | 60 | 15,072.20 | 87.16 |
| Growth stage 3 | 70 | 15,574.80 | 81.50 |
| Growth stage 4 | 80 | 20,137.80 | 98.26 |
| Growth stage 5 | 90 | 21,088.40 | 97.72 |
| Growth stage 6 | 100 | 18,837.30 | 89.91 |
| Growth stage 7 | 110 | 21,602.90 | 94.03 |
| Growth stage 8 | 120 | 30,979.60 | 116.43 |
| Growth stage 9 | 130 | 30,832.90 | 101.47 |
| Growth stage 10 | 140 | 29,984.20 | 118.55 |
| Growth stage 11 | 150 | 32,420.80 | 119.40 |
| Growth stage 12 | 160 | 29,883.30 | 105.27 |
| Growth stage 13 | 170 | 31,052.70 | 100.48 |
| Growth stage 14 | 180 | 29,766.00 | 102.69 |
| Growth stage 15 | 190 | 32,378.60 | 102.60 |
| Growth stage 16 | 200 | 36,045.20 | 113.22 |

Table 3.6. Wake volume and wake length of growth OR (Rep.02)

| - | Number of oyster (N) | Wake volume (cm ³) | Wake length (cm) |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------|------------------|
| Growth stage 1 | 50 | 8,783.73 | 87.06 |
| Growth stage 2 | 60 | 13,016.70 | 87.56 |
| Growth stage 3 | 70 | 13,776.80 | 7970 |
| Growth stage 4 | 80 | 20,137.70 | 100.28 |
| Growth stage 5 | 90 | 19,380.70 | 96.66 |
| Growth stage 6 | 100 | 20,384.80 | 96.02 |
| Growth stage 7 | 110 | 23,412.30 | 102.52 |
| Growth stage 8 | 120 | 19,337.90 | 90.74 |
| Growth stage 9 | 130 | 21,650.89 | 92.88 |
| Growth stage 10 | 140 | 24,704.20 | 102.80 |
| Growth stage 11 | 150 | 26,880.40 | 100.58 |
| Growth stage 12 | 160 | 26,220.50 | 102.80 |
| Growth stage 13 | 170 | 32,366.60 | 111.45 |
| Growth stage 14 | 180 | 27,905.10 | 132.15 |
| Growth stage 15 | 190 | 35,151.20 | 115.43 |
| Growth stage 16 | 200 | 30,912.80 | 104.77 |

Table 3.7. Wake volume and wake length of growth OR (Rep.03)

| - | Number of oyster (N) | Wake volume (cm ³) | Wake length (cm) |
|-----------------|-------------------------|--------------------------------|------------------|
| Growth stage 1 | 50 | 5,502.11 | 60.81 |
| Growth stage 2 | 60 | 5,428.58 | 58.08 |
| Growth stage 3 | 70 | 8,863.74 | 69.49 |
| Growth stage 4 | 80 | 7,539.87 | 66.43 |
| Growth stage 5 | 90 | 10,249.10 | 69.43 |
| Growth stage 6 | 100 | 11,612.70 | 79.96 |
| Growth stage 7 | 110 | 12,724.90 | 75.82 |
| Growth stage 8 | 120 | 15,074.30 | 83.23 |
| Growth stage 9 | 130 | 13,974.60 | 82.16 |
| Growth stage 10 | 140 | 17,870.30 | 93.08 |
| Growth stage 11 | 150 | 18,141.02 | 90.59 |
| Growth stage 12 | 160 | 24,438.20 | 110.73 |
| Growth stage 13 | 170 | 24,721.40 | 109.10 |
| Growth stage 14 | 180 | 24,354.40 | 109.56 |
| Growth stage 15 | 190 | 25,273.80 | 97.72 |
| Growth stage 16 | 200 | 29,721.10 | 108.66 |

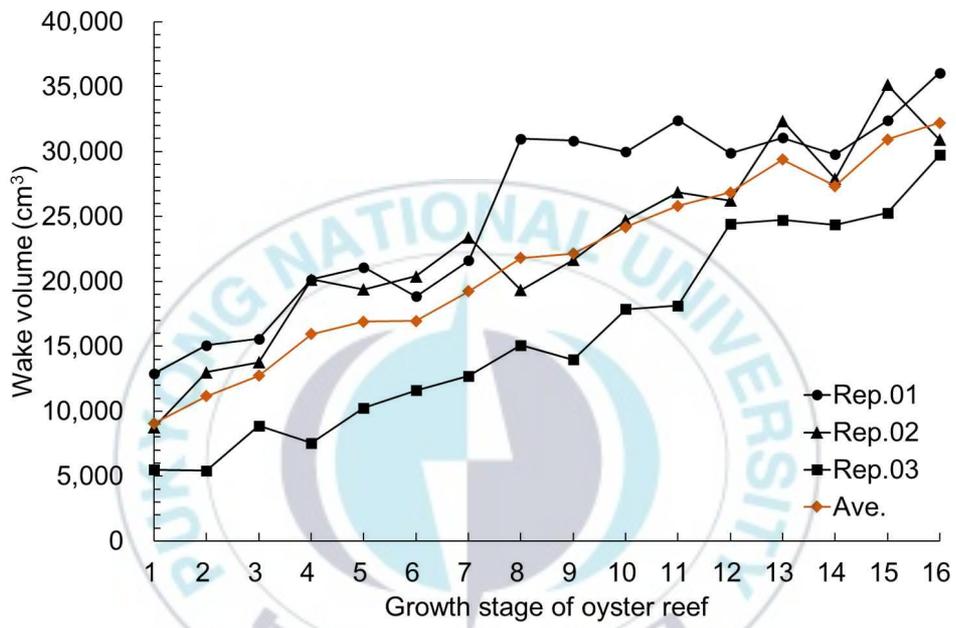


Fig. 3.12. Wake volume in growth ORs.

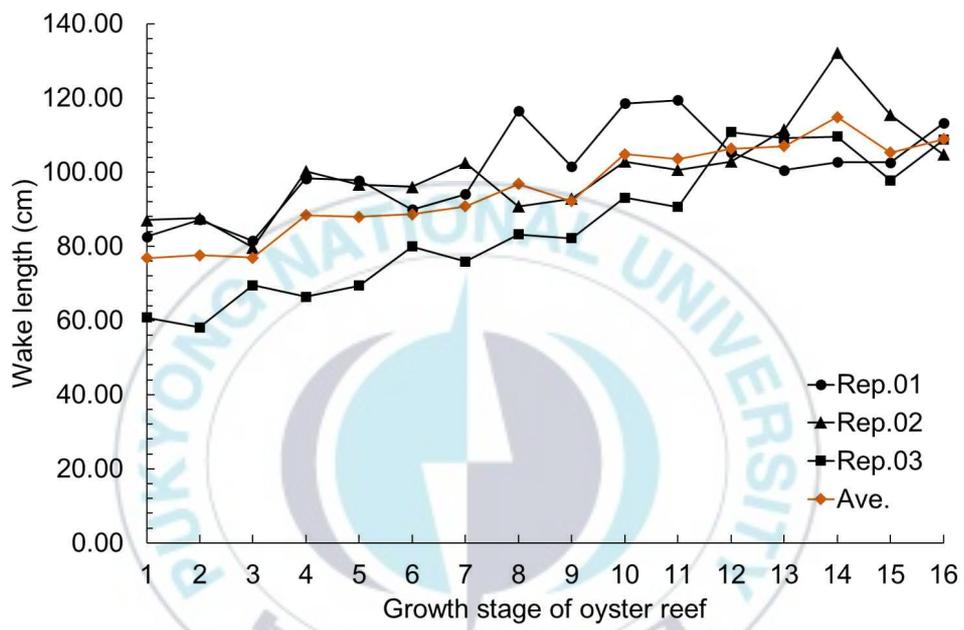


Fig. 3.13. Wake length in growth ORs.



Fig. 3.14. Wake volume in growth ORs: (a) growth stage 4 and (b) growth stage 5.

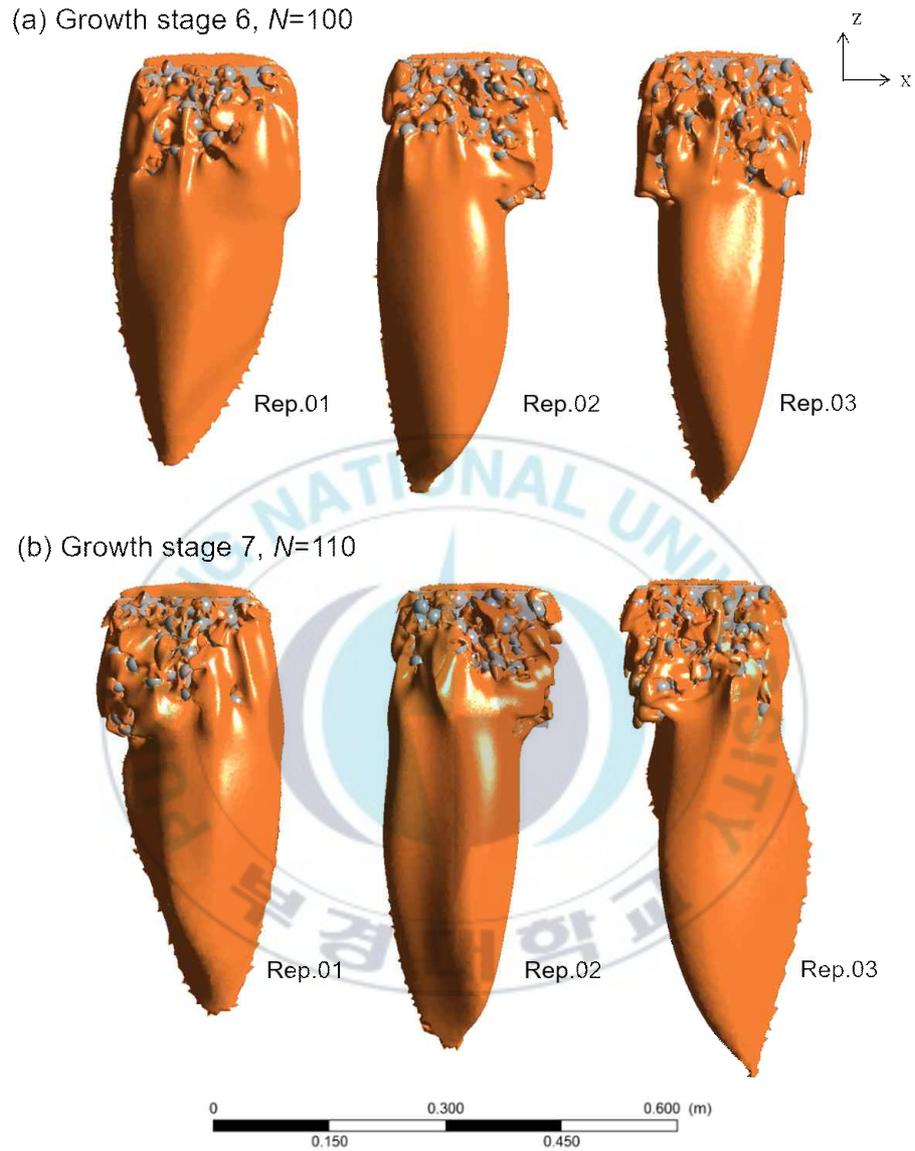


Fig. 3.15. Wake volume in growth ORs: (a) growth stage 6 and (b) growth stage 7.

3.3. 정규화된 후류체적

다음은 정규화된 후류체적이다. 여기서 정규화된 후류체적은 굴 어초 모델에 발생한 후류체적과 굴 패각이 존재하지 않는 평판 기질에서 발생한 후류체적의 비율을 의미한다. 정규화된 후류체적은 최소 1.40에서 최대 24.78의 값을 가졌으며(Fig. 3.16과 Fig. 3.17), 이는 굴 패각이 존재하지 않는 평판 기질에 비해 굴 패각이 존재하는 굴 어초 모델에서 후류체적이 적어도 1.40배 이상 발생할 수 있음을 의미한다.

Fig. 3.16은 굴 어초를 구성하는 굴 패각 개수(N)와 정규화된 후류체적 간의 관계를 나타낸다. 굴 어초 모델을 구성하는 굴 패각 개수가 증가할수록 정규화된 후류체적이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 3.17는 굴 어초의 체적과 정규화된 후류체적 간의 관계를 의미한다. 굴 어초 모델의 부피가 증가할수록 정규화된 후류체적 또한 증가하였다. 여기서 한 가지 주목할 점은, 굴 어초 모델의 부피가 1.11배 증가한 것이 비해, 정규화된 후류체적은 17.70배 증가한 것이다. 이는 굴 패각이 작은 부피를 가졌음에도 불구하고, 굴 패각의 날카로운 형상 특징이 후류체적의 증대와 형성에 큰 영향을 미쳤음을 의미한다.

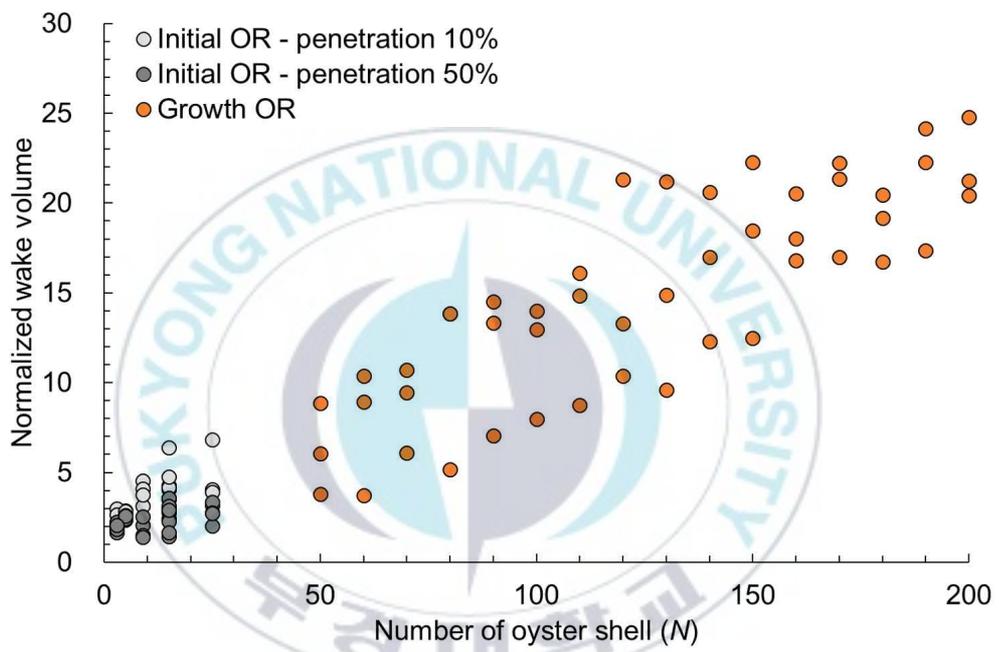


Fig. 3.16. Correlation between normalized wake volume and number of oyster shell (N).

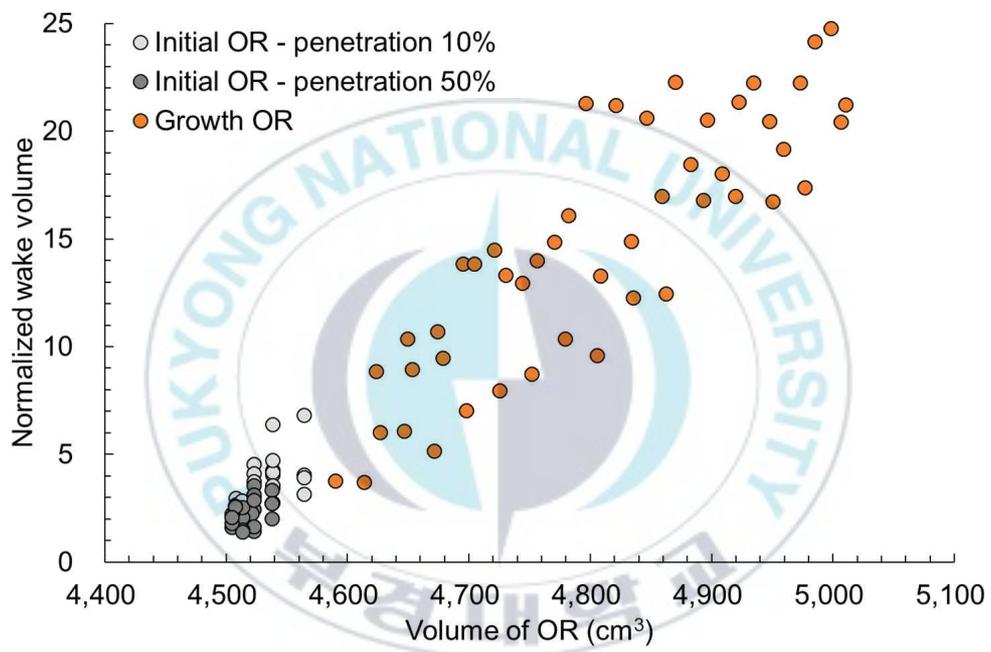


Fig. 3.17. Correlation between normalized wake volume and volume of oyster reef (OR).

3.4 평가지수

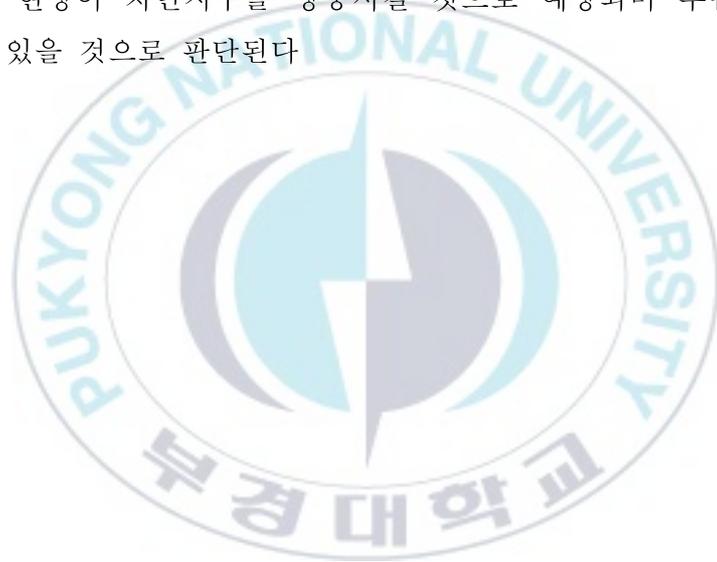
3.4.1 효율지수(Efficiency index, EI)

Fig. 3.18은 굴 어초 모델을 구성하는 굴 패각 개수에 따른 굴 어초의 효율지수(EI)를 나타낸다. 여기서 연회색 원형점은 굴 패각 삽입 비율이 10%인 초기 굴 어초 모델을, 진회색 원형점은 굴 패각 삽입 비율이 50%인 초기 굴 어초 모델을, 주황색 원형점은 성장에 따른 굴 어초 모델을 의미한다. 흐름해석에 사용된 굴 어초 모델의 효율지수는 0.45에서 7.21의 값을 가졌다. 또, 굴 패각의 개수가 증가할수록 후류체적의 효율지수가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 굴 어초의 성장이 후류체적 발달에 강한 양의 상관관계를 가짐을 의미한다.

Kim et al., (2016b)에 따르면 우리나라의 대표적인 인공어초 34종에서 형성된 후류체적의 단 26%만이 효율지수 2.0을 만족하였다고 말하고 있다. 이를 근거로, 효율적인 후류체적 형성을 판단하기 위해 해저 구조물의 효율지수가 2.0 이상의 값을 만족할 것을 권장하고 있다. 여기서, 효율지수가 ≥ 2.0 인 경우, 구조물에 발생한 후류체적이 구조물의 체적의 2배 이상임을 의미한다. 이처럼 굴 어초 구조물의 효율지수를 검토한다면 굴 어초에서 발생하는 후류체적의 효과성을 파악할 수 있을 것이라고 생각된다.

3.4.2 향상된 차단지수(Improved blocking index, BI)

Fig. 3.19은 향상된 차단지수(BI)와 정규화된 후류체적의 관계를 나타낸다. Jung et al., (2022)에서 제안한 차단지수와 유사하게 향상된 차단지수가 증가할수록 구조물에 발생하는 후류체적이 증가하였다. 이는 유체 흐름과 직접적으로 대면하는 구조물의 구조적 특성(즉, 여기서는 유동장 입구 면에 투영된 굴 어초의 면적)이 후류체적의 생성에 도움을 줄 수 있다고 판단된다. 또한, 실제 해저면에서는 시간이 지남에 따라 굴 어초 주변의 유체 흐름활동으로 인해 내부에 집적되는 퇴적물이 발생하는데, 이와 같은 현상이 차단지수를 상승시킬 것으로 예상되며 후류체적 또한 증가할 수 있을 것으로 판단된다



3.4.3 표면 복잡성 지수(Surface complexity index, SI)

Fig. 3.20은 표면 복잡성 지수(SI)와 정규화된 후류체적의 관계를 나타낸다. 초기 굴어초 모델의 표면 복잡성 지수는 $2.77 \leq SI \leq 4.11$ 의 범위에 속하고, 성장에 따른 굴어초 모델의 표면 복잡성 지수는 $4.64 \leq SI \leq 10.46$ 의 범위에 존재하였다.

표면 복잡성 지수(SI)가 증가할수록 후류체적 또한 증가하였다. 표면 복잡성 지수를 구성하고 있는 굴어초의 표면적은 해양 생물체가 활용할 수 있는 장소를 의미한다. 따라서 이와 같은 결과는 구조물 기질의 표면적 증가와 배후에 발생한 후류체적의 증가가 함께 발생하면서, 해저 생물체들이 이용할 수 있는 공간적 시너지를 불러일으킬 수 있다고 말할 수 있다.



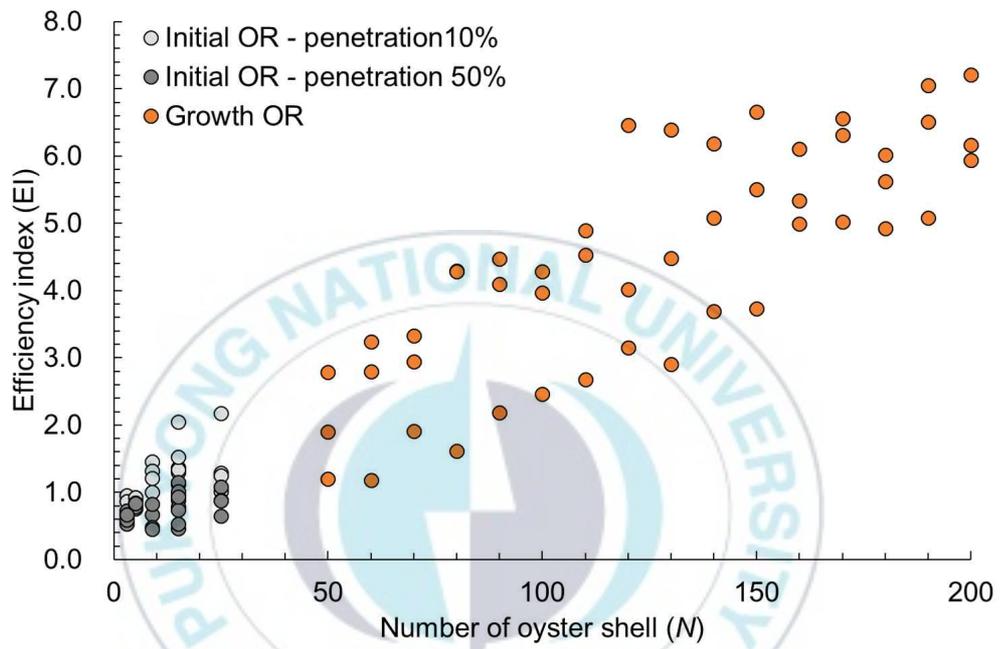


Fig. 3.18. Efficiency index based on the number of oyster in OR.

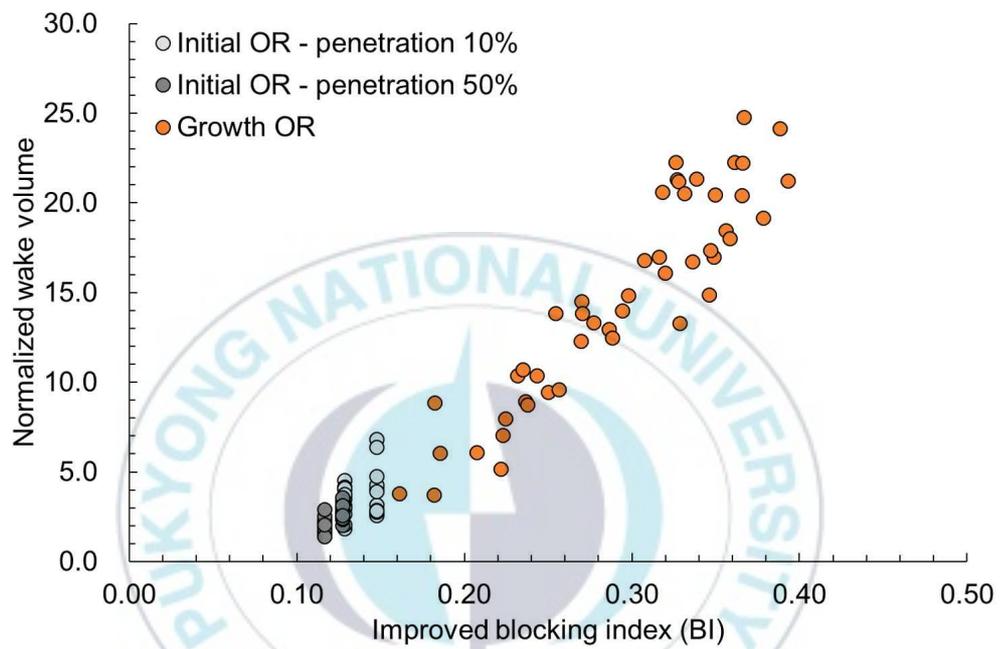


Fig. 3.19. Correlation between improved blocking index and normalized wake volume.

4. 결론

본 연구에서는 굴 패각에 존재하는 날카로운 모서리 및 타원형 형상으로 인해 굴 어초 주변에 독특한 흐름장이 형성될 것이라고 가정하였다. 가설을 검증하기 위해 굴 패각이 굴 어초 주변에 난류 성분을 우세하게 하여 다수의 후류영역(wake region)을 형성하는지 확인하였으며, 굴 어초의 구조적 특성이 후류영역과 어떤 연관성을 가지는지 확인하였다. 여기서, 3차원으로 시각화된 후류영역을 후류체적이라고 명명하였으며, 굴 어초의 구조적 특성을 여러 평가지수로 정량화하여 후류체적과의 관계성을 파악하였다. 결론은 다음과 같이 요약된다.

(1) 굴 어초 구조물의 배후에 모두 후류체적이 발생하였다. 굴 패각이 존재하지 않는 평판 기질에서도 후류체적이 발생하였지만, 이와 비교했을 시 굴 어초 구조물은 최소 1.40배에서 최대 24.78배까지 증가된 후류체적을 보유하고 있다. 이는 굴 패각이 후류체적 형성에 크게 영향을 끼쳤음을 확인할 수 있다.

(2) 초기 굴 어초 모델에서 굴 패각의 배열 형상과 배치 개수에 따라 다양한 크기를 가진 후류체적이 형성되었다. 하지만, 후류길이는 변동이 크게 존재하지 않았다. 성장에 따른 굴 어초 모델에서는 굴 패각 개수가 증가할수록(즉, 성장단계가 증가할수록), 후류체적과 후류길이 모두 선형적으로 증가하였다.

(3) 정규화된 후류체적 개념을 도입하여 후류체적을 무차원화하였다. 굴 패각 개수와 굴 어초의 체적이 증가할수록 정규화된 후류체적이 증가하였다. 여기서 주목할 점은, 상대적으로 매우 작은 체적을 가진 굴 패각에 비해 굴 어초 구조물에 상당한 크기의 후류체적이 발생하였다. 이는 굴 패각이 후류체적 생성과 증대에 크게 이바지할 수 있음을

의미한다.

(4) 굴 어초 모델을 구성하는 굴 패각 개수가 증가할수록 효율지수는 선형적으로 증가하였으며, 모두 굴 어초 체적 이상의 후류체적을 생성하였다.

(5) 유체와 직접적으로 대면하는 굴 어초 구조물의 구조적 특성을 검토하기 위해 차단지수를 도입하였다. 굴 패각 개수가 증가할수록 차단지수가 증가하였으며, 차단지수가 증가할수록 정규화된 후류체적 또한, 선형적으로 증가하였다. 이 경우, 본 논문에서 해저 지반 상태는 고려하지 않았는데, 실제 해저면에서는 시간이 경과함에 따라 굴 어초 내부에 퇴적물이 누적되므로, 이와 같은 특징이 차단지수를 증가시켜 추후 후류체적이 더욱 더 증가할 것으로 판단된다.

(6) 마지막으로, 표면 복잡성 지수는 여러 해양 생물체가 활용할 수 있는 기질의 복잡성을 의미한다. 굴 패각이 증가할수록 표면 복잡성 지수는 증가하였으며, 이는 굴 어초가 성장할수록 증가하는 표면 복잡성 지수가 반영되도록 해석 모델의 설계가 적절했음을 의미한다. 표면 복잡성 지수가 증가할수록 정규화된 후류체적은 선형적으로 증가하였다. 따라서, 굴 어초 구조물의 전체 표면적 증가와 배후에 발생된 후류체적의 증가가 함께 발생하면서 해양 생물체들이 활용할 수 있는 공간적 시너지를 불러일으킬 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- ANSYS Inc., 2020. ANSYS CFX, Release 12.1 ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA
- Beck, M. W., Brumbaugh, R. D., Airoidi, L., Carranza, A., Coen, L. D., Crawford, C., ... and Guo, X., 2011, Oyster reefs at risk and recommendations for conservation, restoration, and management. *Bioscience*, 61(2), 107–116.
- Brown, L. A., Furlong, J. N., Brown, K. M., and La Peyre, M. K., 2014, Oyster reef restoration in the northern Gulf of Mexico: effect of artificial substrate and age on nekton and benthic macroinvertebrate assemblage use. *Restoration ecology*, 22(2), 214–222.
- Cannon, D., Kibler, K., Walters, L., and Chambers, L., 2022a, Hydrodynamic and biogeochemical evolution of a restored intertidal oyster (*Crassostrea virginica*) reef. *Science of The Total Environment*, 831, 154879.
- Cannon, D., Kibler, K. M., Kitsikoudis, V., Medeiros, S. C., and Walters, L. J., 2022b, Variation of mean flow and turbulence characteristics within canopies of restored intertidal oyster reefs as a function of restoration age. *Ecological Engineering*, 180, 106678.
- Chowdhury, M. S. N., Walles, B., Sharifuzzaman, S. M., Shahadat Hossain, M., Ysebaert, T., & Smaal, A. C. 2019. Oyster breakwater reefs promote adjacent mudflat stability and salt marsh growth in a monsoon dominated subtropical coast. *Scientific reports*, 9(1), 1–12.
- Cho, S. H., Choi, C. G., & Choa, J. H. 2007. Restoration of the seaweed forest and algal succession on a porous type (shaped half saw teeth) artificial reef. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(4), 220–225.
- Coen, L. D., and Luckenbach, M. W., 2000, Developing success criteria and goals for evaluating oyster reef restoration:

- ecological function or resource exploitation?. *Ecological engineering*, 15(3-4), 323-343.
- Coen, L.D. and Humphries, A. T., 2017, Oyster-generated marine habitats: their services, enhancement, restoration and monitoring. In *Routledge handbook*
- Commito, J. A., & Rusignuolo, B. R. 2000. Structural complexity in mussel beds: the fractal geometry of surface topography. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 255(2), 133-152.
- Crimaldi, J. P., Thompson, J. K., Rosman, J. H., Lowe, R. J., & Koseff, J. R. 2002. Hydrodynamics of larval settlement: the influence of turbulent stress events at potential recruitment sites. *Limnology and Oceanography*, 47(4), 1137-1151.
- Dame, R. F., Spurrier, J.D& Wolaver, T.G. Carbon., 1989 Nitrogen and Phosphorus processing by an oyster reef. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 54, 249-256
- Gilby, B. L., Olds, A. D., Peterson, C. H., Connolly, R. M., Voss, C. M., Bishop, M. J., ... and Schlacher, T. A., 2018, Maximizing the benefits of oyster reef restoration for finfish and their fisheries. *Fish and Fisheries*, 19(5), 931-947.
- Hitzegrad, J., Brohmann, L., Pfennings, K., Hoffmann, T. K., Eilrich, A. K., Paul, M., ... and Goseberg, N., 2022, Oyster Reef Surfaces in the Central Wadden Sea: Intra-Reef Classification and Comprehensive Statistical Description. *Frontiers in Marine Science*, 9.
- Jackson, J. B., 2008, Ecological extinction and evolution in the brave new ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(supplement_1), 11458-11465.
- Jung, S., Na, W. B., and Kim, D., 2022, Rugosity and blocking indices of artificial reefs and their correlations with wake volume. *Ocean Engineering*, 261, 112204.
- Kawai, T., Tokeshi, M., 2004. Variable modes of facilitation in the upper intertidal: goose barnacles and mussels. *Marine Ecology*

Progress Series, 272, 203–213

- Kim, D., Woo, J., Yoon, H. S., & Na, W. B. 2014. Wake lengths and structural responses of Korean general artificial reefs. *Ocean Engineering*, 92, 83–91.
- Kim, D., Jung S., Na W. B., 2016a., Wake region estimation of artificial reefs using wake volume diagrams. *JFMSE*. 28.4: 1042–1056.
- Kim. D., Woo, J., Yoon, H.S., Na, W.B., 2016b. Efficiency, tranquillity and stability indices to evaluate performance in the artificial reef wake region. *Ocean Eng.* 122, 253–261
- La Peyre, M. K., Humphries, A. T., Casas, S. M., and La Peyre, J. F., 2014, Temporal variation in development of ecosystem services from oyster reef restoration. *Ecological Engineering*, 63, 34–44.
- Lee. I., Park. S., Woo. H., Jung., I., Choi. C., Kim. K. 2021. A study on Macroalgae Establishment on Concrete Substratum Covered by Oyster Shells. *The Korean Society of Marine Environment & Safety*, 27(5), 639–646.
- Luckhurst, B.E., Luckhurst, K., 1978. Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities. *Marine Biology*, 49(4), 317–323.
- Menter, F. R., 2009, Review of the shear–stress transport turbulence model experience from an industrial perspective. *International journal of computational fluid dynamics*, 23(4), 305–316.
- Meyer, D. L., Townsend, E. C. & Thayer, G. W., 1997. Stabilization and erosion control value of oyster cultch for intertidal marsh. *Restor. Ecol.* 5, 93–99.
- Miller, D.C., Norkko., A., Pilditch, C.A., 2002. Influence of diet on dispersal of horse mussel *Atrina zelandica* biodeposits. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 242, 153–167.
- Oh, T.G., Otake, S., Lee, M.O., 2011. Estimating the effective wake region (current shadow) of artificial reefs. In: Bortone, S.A.,

- Brandini, F.P., Fabi, G., Otake, S.(Eds)., Artificial Reefs in Fisheries Management. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 279–295.
- Powers, S. P., Peterson, C. H., Grabowski, J. H., and Lenihan, H. S., 2009, Success of constructed oyster reefs in no-harvest sanctuaries: implications for restoration. *Marine Ecology Progress Series*, 389, 159–170.
- Reidenbach, M. A., Koseff, J.R., Monismith, S.G., 2007. Laboratory experiments of fine-scale mixing and mass transport within a coral canopy. *Phys. Fluids* 19, 075107.
- Reidenbach, M. A., Berg, P., Hume, A., Hansen, J.C.R., Whitman, E.R., 2013. Hydrodynamics of intertidal oyster reefs: the influence of boundary layer flow processes on sediment and oxygen exchange. *Limno. Oceanogr. Fluids Environ.* 3, 225–239.
- Risk, M.J., 1972. Fish diversity on a coral reef in the Virgin Islands. *Atoll Reserach Bulletin*.
- Rouse, S., Porter, J.S., Wilding, T.A., 2020. Artificial reef design affects benthic secondary productivity and provision of functinoal habitat. *Ecol. Evol.* 10, 2122–2130.
- Schulte DM. 2017. History of the *Virginica* oyster fishery, Chesapeake Bay, USA. *Front Mar Sci* 4: 127.
- Sheng, Y.P. 2000. Physical characteristics and engineering at reef sites. In: Seaman, J. (Ed.), *Arificial Reef Evaluation with Application to Natural Marine Habitats*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 51–94.
- Styles, R., 2015, Flow and turbulence over an oyster reef. *Journal of Coastal Research*, 31(4), 978–985.
- Salewski, E. A., 2021, Architectural Complexity of Oyster Reefs: Evaluating the Relationship between Interstitial Spaces and Macroinvertebrates (Doctoral dissertation, University of South Florida).
- Takeuchi, T., 1991. Design of artificial reefs in consideration of

- environmental characteristics. In: Proceeding of Japan–US Symposium on Artificial Habitats for Fisheries, Tokyo, Japan, pp. 195–203.
- Thomaz, S.M., Cunha, E.R.D., 2010. The role of macrophytes in habitat structuring in aquatic ecosystems: methods of measurement, causes and consequences on animal assemblages' composition and biodiversity. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 22(2), 218–236.
- Tokeshi, M., Arakaki, S., 2012. Habitat complexity in aquatic systems: fractals and beyond. *Hydrobiologia*, 685(1), 27–47.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007. *An Introduction of Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Harlow, UK: Longman Scientific.
- Walles, B., Troost, K., van den Ende, D., Nieuwhof, S., Smaal, A. C., & Ysebaert, T. 2016. From artificial structures to self-sustaining oyster reefs. *Journal of Sea Research*, 108, 1–9.
- Wheaton, F., 2007, Review of the properties of Eastern oysters, *Crassostrea virginica*: Part I. Physical properties. *Aquacultural engineering*, 37(1), 3–13.
- Whitman, E. R., & Reidenbach, M. A. 2012. Benthic flow environments affect recruitment of *Crassostrea virginica* larvae to an intertidal oyster reef. *Marine Ecology Progress Series*, 463, 177–191.
- Wilberg, M. J., Livings, M. E., Barkman, J. S., Morris, B. T., and Robinson, J. M., 2011, Overfishing, disease, habitat loss, and potential extirpation of oysters in upper Chesapeake Bay. *Marine Ecology Progress Series*, 436, 131–144.
- Windle, A. E., Puckett, B., Huebert, K. B., Knorek, Z., Johnston, D. W., and Ridge, J., T., 2022, Estimation of Intertidal Oyster Reef Density Using Spectral and Structural Characteristics Derived from Unoccupied Aircraft Systems and Structure from Motion Photogrammetry. *Remote Sensing*, 14(9), 2163.

Yoon, H. S., Kim, D., Na. W.B., 2016. Estimation of effective useable and burial volumes of artificial reefs and the prediction of cost-effective management. Ocean Coast Manag. 120, 135-147.



ACKNOWLEDGEMENT

석사 과정을 시작하고, 2년이라는 시간동안 고민과 걱정도 많았지만 많은 배움과 인연을 만날 수 있었던 뜻깊은 시간이었습니다. 저의 졸업논문은 많은 분들의 도움 하에 이루어낼 수 있었던 결실이었기에 지면을 빌어 감사의 말을 전하고자 합니다.

먼저 부족함이 많았던 저를 이끌어주신 나원배 지도 교수님께 대단히 감사드립니다. 아울러 저의 졸업논문에 많은 관심을 가지고 지도해주신 심사위원 김경희 교수님과 최준명 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

항상 열정을 가지시고 연구에 대한 자세를 가르쳐 주시며, 학업의 고충을 덜어주시려고 학생들에게 지원을 아끼지 않으신 김정태 교수님, 나원배 교수님, 이진호 교수님, 최준명 교수님께도 감사의 말을 전합니다. 이 논문을 작성하는데 많은 도움과 끊임없는 조언을 주신 정소미 박사님에게도 진심으로 감사의 말을 전합니다. 선배 덕분에 길을 잃지 않고 무사히 석사 과정을 무사히 마칠 수 있었다고 생각합니다. 항상 옆자리에서 웃으시면서 긍정적으로 저의 연구를 이끌어 주셔서 감사합니다. 함께 졸업논문을 준비하면서 많은 질문과 걱정을 함께 해결하고, 도와주신 우희은 박사님에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 항상 친절하게 자세하고 쉬운 설명으로 학업에 도움을 준 연구실 선배님인 Chau Van Than에게도 감사의 말을 전합니다. 동시간 대에 응용역학연구실에 몸담았던 모든 사람들에게 좋은 일만 있기를 기원합니다.

마지막으로 저를 항상 걱정하지만 아낌없는 지원 항상 보내주신 저의 아버지, 어머니, 동생에게 이 지면을 빌어 감사의 말씀을 전합니다. 하고 싶은 일을 할 수 있도록 아낌없는 조언과 관심뿐만 아니라 물심양면으로 지원을 아끼지 않고 믿어주신 부모님께 감사드리며 2년 간의 결실인 이 논문을 바칩니다.

마지막으로 제가 그리하였듯, 언젠가 얼굴 모르는 저의 후배가 이 논문이 좋은 이정표가 되었으면 하는 바람으로 이 글을 마칩니다.