Flow-3D 모형을 이용한 인공어초 설치 지반의 입경에 따른 세굴 특성 분석

Flow-3D Analysis on the Scour Characteristics of Artificial Reef-Installed Soils with Various Particle Sizes

윤대호* · 김정태** · 윤한삼*** · 나원배**** · 김윤태*****

Yun, Dae-Ho*, Kim, Jeong-Tae**, Yoon, Han-Sam***, Na, Won-Bae****, and Kim, Yun-Tae*****

Abstract

Artificial reef-installed seabeds may have significantly different scouring patterns depending on the ground conditions, such as the soil particle size, even though the flow velocity and water depth are similar. In this study, the scour characteristics of the ground were determined using Flow-3D to evaluate the geotechnical stability of artificial reefs installed on various seabeds, such as sand, silt, and clay. The analysis results indicated that the smaller the particle size of the soil, the larger the amount of scour that occurs around the artificial reef and the longer it takes to reach an equilibrium state. However, eroded soil particles were deposited on the rear part of the artificial reef as the soil particle size increased. The maximum scour depth and average particle size showed a non-linear relationship. In particular, the maximum scour depth increased significantly in fine-grained soils.

Key words : Artificial Reef, Flow-3D, Soil Particle Size, Scour, Maximum Scour Depth

요 지

해저 지반에 설치되는 인공어초는 유속 및 수심이 동일한 경우라도 지반 조건에 따라 세굴 패턴이 크게 차이 나는 경우가 있다. 따라서 본 연구에서는 모래, 실트 및 점토 등과 같이 다양한 해저 지반에 설치하는 인공어초의 지반공학적인 안정성을 평가하고자 Flow-3D를 이용하여 세굴 해석을 수행하였다. 수치해석 결과 지반 입경이 작을수록 인공어초 주변에서 발생하는 세굴량이 커지며, 평형상태에 도달하는 시간이 더 오래 걸리는 결과를 보였다. 반면 입경이 커질수록 세굴량이 작아지며, 세굴된 지반 입자가 인공어초 후면부에 퇴적되는 결과를 보였다. 또한 최대 세굴심도와 입경은 비선형적인 관계를 나타내었다. 특히 세립토에서 최대 세굴심도가 크게 증가하였다.

핵심용어 : 인공어초, Flow-3D, 지반 입경, 세굴, 최대 세굴심도

1. 서 론

항만, 공단, 주거 등을 위한 무분별한 도시 개발로 인해

우리나라 연안해역의 해양 환경은 점점 악화되고 있다. 이로 인해 어획량의 감소, 수산 생태계 파괴 등 어업 생산의 손실이 막대하다. 특히 해양 환경은 오염이 한번 발생할 경우 다양한

*정회원, 부경대학교 스마트인프라기술연구소 전임연구원(E-mail: dhjj413@naver.com)

Member, Associate Researcher, Smart Infra-Structure Technology Institute, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

**정회원, 부경대학교 해양공학과 교수, 공학박사(E-mail: idis@pknu.ac.kr)

Member, Professor, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

***부경대학교 생태공학과 교수, 공학박사(E-mail: yoonhans@pknu.ac.kr)

Professor, Dept. of Ecological Engineering, Pukyong National University

****정회원, 부경대학교 해양공학과 교수, 공학박사(E-mail: wna@pknu.ac.kr)

Member, Professor, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

*****교신저자, 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수(Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6590, E-mail: yuntkim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

수산생물에게 영향을 미치므로 중·장기적으로 피해가 계속된다고 볼 수 있다(Park et al., 2003). 이러한 문제를 해결하기 위해 정부에서는 해중립조성사업, 종묘방류사업, 바다목장사업 등 다양한 자원회복사업을 실시하고 있으며, 그 중 1971년부터 시작된 인공어초 시설사업이 예산면에서 규모가 가장 크다.

인공어초란 수산생물의 번식, 보호, 배양 및 어업의 효율화를 위해 수중에 인공적으로 설치하는 구조물이다. 해조류, 패류, 어류 등과 같은 수산동식물에게 먹이장, 서식장 및 도피처와 같은 서식 환경 제공 등을 통해 어업 자원의 증식과 해양생태계의 회복을 유도한다. 이를 통한 어업 종사자의 소득 증대와 더불어, 해양관광산업을 위한 인프라 구축을 기대할 수 있다(Lee et al., 2016). 인공어초 시설사업은 1971년부터 시작하여 2020년까지 1.29조 원의 비용을 투입하여 약 23만 ha의 인공어초 어장을 조성하였으며, 현재에도 지속적으로 인공어초 설치를 위해 예산이 투입되고 있다. 인공어초를 설치할 경우 비시설지에 비해 시간이 지남에 따라 어획량 증가, 저서동물 및 해조류의 생산량이 크게 증가하는 효과가 있다(Hwang et al., 2017; Yoon, 2018).

이렇게 많은 비용을 들여 설치되는 인공어초는 장기간 그 기능을 유지해야 하나 설치된 지역의 파랑과 조류의 영향을 받게 되며, 특히 인공어초가 설치되는 지반 조건 등에 의해 시간이 지남에 따라 세굴 및 매몰 현상이 발생하여 그 기능이 점차적으로 감소하는 경우가 종종 확인되었다(Lee et al., 2009; Kim et al., 2010; Suh et al., 2007; Cho et al., 2010; Lee et al., 2010). Kim et al. (2008)은 강원도 해역에 설치년도에 따른 인공어초의 상태를 측면주사 음향탐지기(side scan sonar, SSS)를 이용하여 조사한 결과 설치 기간과 보존 상태는 큰 상관성이 없으나, 인공어초의 안정성은 설치한 지반의 조건(모래층, 실트층 등)에 따라 안정성에 더 많은 영향을 받는다는 연구 결과를 밝힌 바 있다.

우리나라는 지리적 특성상 3면이 바다로 둘러싸여 있으며 동해, 서해 및 남해 등 조사 지역에 따라 모래, 실트 및 점토가 다양하게 분포되어 있는 특성이 있다. 2020년 기준 우리나라 인공어초 전체 설치량의 약 60%가 분포되어 있는 전라남도, 제주도 및 경상남도 해역에 인공어초가 설치된 해저지반에 대하여 입도 분석을 실시한 결과 50% 이상이 주로 모래와 실트 성분으로 구성된 지반이 넓게 분포되어 있는 것으로 조사되었다(Youn et al., 2006; Kim et al., 2009). 특히 점토 등과 같은 세립질 지반에 비해 모래 및 실트와 같은 지반에서 세굴 현상이 더 많이 발생하게 된다. 모래 및 실트 지반은 점토 지반에 비해 흡입자간의 점착력이 없거나 미소하여 조류 발생으로 인한 해수 유동과 더불어 태풍에 따른 급격한 유속의 변화 및 흐름 특성에 따라 인공어초와 같은 해중구조물 주변에 국부적인 세굴 등 표사 이동이 발생할 수 있다(Kim et al., 2019).

Choi et al. (2009)는 남해 및 서해 해역에 설치된 3.8만개의

인공어초를 조사한 결과 약 1,600개의 인공어초가 기능을 완전 상실하였으며, 약 7천개의 인공어초의 경우 일부 기능을 상실한 상태인 것으로 확인하였다. 특히 모래 지반에서 세굴 등에 의한 매몰 현상이 더 크게 나타났다는 연구 결과를 밝힌 바 있다. 이와 같이 유속 및 수심이 동일한 경우라도 지반 조건에 따라 세굴의 발생 특성이 다양하게 나타나므로 수리학적 조건 뿐만 아니라 다양한 지반공학적인 조건을 고려하여 인공어초 적지선정을 수행하여야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 모래, 실트 및 점토 등 다양한 입경 범위를 가지는 해저 지반에 설치되는 인공어초 주변의 세굴 패턴을 알아보기 위해 수치해석 프로그램인 Flow-3D를 이용하여 세굴 해석을 수행하였다. 입경에 따른 세굴 발생 패턴, 최대 세굴심도와 세굴 발생 범위 등을 통해 인공어초의 안정성을 평가할 수 있으며, 향후 인공어초의 적지선정 평가 시 지반공학 특성을 고려하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 수치해석기법

2.1 Flow-3D 모형

본 연구에서 사용한 수치해석 프로그램인 Flow-3D는 Flow Science, Inc에서 개발한 상용프로그램이다. Flow-3D는 자유수면, 열 전달, 3차원 수리특성과 퇴적물 이동 등을 모의할 수 있는 범용 CFD프로그램으로 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열 유동 해석에 사용하고 있다. 또한 유체와 유체, 또는 유체와 퇴적물 간의 경계면 추적에 위해 유체체적법(volume of fluid, VOF) 방법을 사용하고 있으며, 유한차분식 경계면의 오차를 방지하고 계산 영역 내 두 유체 사이의 복잡한 경계를 표현하기 위하여 fractional area/volume obstacle representation (FAVOR) 방법을 사용한다.

복잡한 유체의 난류를 모사하기 위하여 혼합 길이 모형(prandtl mixing length model), 난류 에너지 모형(turbulence energy model), $k-\varepsilon$ 모형, renormalized group (RNG) 모형, large eddy simulation (LES) 모형 등을 제공한다. 본 연구에서는 LES 모형을 사용하였다. LES 모형은 수치해석시 격자 크기 이상의 와류(eddy)는 직접 계산하고 그 이하 크기의 와류(vortex)는 통계적 처리를 통한 기법을 통해 비등방성인 난류의 특징을 구현할 수 있는 모형이다. 또한 흐름에 의해 구조물 주변에서 발생하는 세굴은 일정한 시간이 경과한 후에는 증가되지 않고 평형 상태에 도달한다(Shin, 2011; Park and Kim, 2017). 반면 RNG 모형은 통계적 기법을 통해 얻은 수정된 모형상수를 적용하여 Navier-Stokes 방정식에 미치는 영향을 고려하므로 흐름을 등방성 난류로 가정하여 해석한다. 이로 인해 구조물 뒤쪽에 발생하는 말굽 와류(Horseshoe vortex) 및 후류(Wake vortex) 등의 모의가 잘 나타나지 않는다(Yang and Choi, 2002).

Flow-3D의 세굴 모형은 부유사(suspended sediment) 및 고형퇴적물(packed sediment)의 공간적인 농도분포를 이용하여 세굴 및 퇴적 거동을 재현한다. 부유사는 국지적인 압력경사의 영향으로 인해 유체와 함께 이송되며, 경계에서 유입되거나 고형퇴적물의 침식(erosion)에 의해 발생한다. 고형퇴적물은 이송되지 않으며, 주변 퇴적물의 입자와 결합되어 있는 퇴적물로서 셀(cell) 내에 퇴적물이 차지하는 부피의 비율이 임계압축값(critical packing fraction)보다 크거나 같으며, 유체와의 경계면에서 유체에 의해 부유사 형태로 침식이 일어날 때만 움직인다.

2.2 해석조건

해석에 사용된 인공어초는 2020년 인공어초 통계 조사 결과 우리나라에 설치된 인공어초 중 약 62% 가량을 차지하고 있는 사각형어초($2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$)이다. 인공어초 주변의 유동특성 및 세굴 패턴을 예측하기 위하여 구성된 3차원 격자망과 경계조건(boundary condition)은 Fig. 1과 같다. 본 해석에서 사용한 좌표계는 X, Y, Z를 축으로 하는 직교좌

표계를 사용하였다. 이때 흐름 방향은 X축이며, 벽면마찰 등에 따른 영향을 최소화하기 위하여 Y축 경계면은 대칭(symmetry) 조건으로 하였다.

격자망은 정밀한 세굴 패턴을 확인하기 위해 인공어초가 설치된 부분을 중심으로 조밀한 간격으로 구성하였다. 이때 총 격자망의 수는 504,000개($120 \times 60 \times 70$)이며, 각 축에 대한 해석 영역 범위 및 격자망의 수는 Table 1에 나타내었다. 이때 구조물의 자유경계표면은 No-slip 경계 조건을 적용하여, 안정적인 수치 해석을 위해 유체가 동일 시간 스텝에서 교차하여 흐르지 않도록 하였다.

다양한 지반의 입도 특성에 따른 인공어초 설치 지반의 세굴 특성을 분석하기 위해 우리나라 주변 해역의 지반 특성을 고려하여 평균입경(average particle size, D_{50})의 범위를 결정하였다. Fig. 2는 우리나라 동해안, 서해안 및 남해안에서 채취된 시료의 입도분포시험 결과와 기존 연구자들이 조사한 평균입경의 분포를 나타낸다. 입도분포 시험 결과 채취한 지역에 따라 모래, 실트 및 점토 등과 같이 지역적 특성을 가지는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과를 반영하여

Fig. 1. 3D Mesh and Boundary Condition

Table 1. Numerical Modeling Conditions

Type			Value
Modeling size & Number of mesh	x - dimension	Length (m)	100
		Number of mesh	120
	y - dimension	Width (m)	40
		Number of mesh	60
	z - dimension	Height (m)	20
		Number of mesh	70
Modeling	Water depth (m)		15
	Velocity (m/s)		1.0
	Average particle size, D_{50} (mm)		0.01, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3
Artificial reef	Size (m)		$2 \times 2 \times 2$
	Thickness (m)		0.25

Fig. 2. Particle Size Distribution

수치해석에 적용한 평균입경의 크기는 0.01 mm~0.3 mm의 범위로 결정하였다(Table 1).

3. 해석결과

3.1 수치해석 모형의 검증

수치해석 모형을 검증하기 위해 Yun and Kim (2019)이 수행한 인공어초 세굴 실험 결과를 이용하였다. Yun and Kim (2019)은 길이 1,100 cm, 폭 30 cm, 높이 60 cm의 2차원 수조에 인공어초 모형을 설치한 후 세굴 발생 현상을 실내실험을 통해 관측하였다. 이때 실험에 사용된 지반의 조건은 실트(silt)와 모래(sand)로 평균 입경의 크기는 각각 0.085 mm, 0.47 mm이다. 수치해석시 유속, 수심, 지반 조건 등 해석 모형을 실내실험과 동일한 조건으로 모델링하였다.

Fig. 3은 실내실험 결과(experiment)와 수치해석 결과(numerical)를 비교한 것이다. 수치해석에서 모사된 세굴의 발생은 실내실험과 유사하게 인공어초의 전면부에서 가장 크게 나타났으며, 세굴에 의해 이동한 지반 입자는 인공어초 측면에 퇴적되는 결과를 보였다. 또한 각 지반 조건에 따른 세굴 형상은 전반적으로 잘 일치함을 볼 수 있다. 최대 세굴심도(maximum scour depth)는 모든 지반 조건에서 실내실험 결과가 더 크게 나왔다. 이는 수치해석의 경우 인공어초 모델이 고정상으로 세굴 발생에 따른 인공어초 거동의 변화가 없는 반면, 실내실험에서는 세굴이 진행됨에 따라 인공어초가 기울어지면서 흐름에 영향을 미쳐 나타난 결과로 판단된다.

3.2 입경에 따른 세굴 패턴

Fig. 4는 입경이 0.1 mm인 인공어초 설치 지반의 세굴 패턴을 시간 경과에 따라 나타낸 것이다. 여기서 붉은색 사각으로 표기된 부분은 인공어초가 설치된 위치로, 인공어초가 설치된 지반에서 발생하는 세굴 패턴을 명확히 확인하

Fig. 3. Experimental and Numerical Results of Scour Pattern

기 위해 모델링된 인공어초 위치를 표기하였다. 흐름이 진행됨에 따라 인공어초 전면부 가장자리에서부터 세굴 발생이 가장 먼저 발생하였으며, 흐름 방향으로 세굴 진행이 나타나는 형태를 띄었다. 또한 Figs. 4(d)~4(f)에 나타난 바와 같이 최대 세굴심도에 근접한 이후 세굴의 형태는 점차 완만한 형태를 보이며 세굴 발생이 점차 주변 지역으로 퍼지는 경향을 보였다.

Fig. 5는 서로 다른 크기의 평균입경을 가지는 지반에 설치된 인공어초 주변에 발생한 세굴 현상을 나타낸 것이다. 인공어초 주변에서 발생한 세굴 깊이가 차이를 시각적으로 확인하기 위하여 동일한 시간대에서의 결과를 도시하였다. 유속 방향은 왼쪽에서 오른쪽으로 진행되었으며, 흐름 발생 후 20분 뒤의 세굴 발생 결과를 나타낸다. 입경에 따라 세굴 깊이와 발생 범위는 눈에 띄게 큰 차이를 보였다. 또한 입경이 작은 조건에서는 세굴된 지반 입자가 거의 퇴적되지 않고 흐름에 의해 다 쓸려나갔으나, 입경이 커짐에 따라 인공어초 전면부에서 세굴된 지반 입자가 멀리 쓸려가지 않고 인공어초 후면부에 퇴적되는 경향을 보였다.

Fig. 6은 입경이 작은 지반(0.075 mm)과 입경이 큰 지반(0.3 mm)에서 동일한 세굴 깊이에 도달하였을 때 각각 세굴의 발생 패턴을 나타낸 것이다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 세굴 깊이가 동일하더라도 입경이 작은 지반의 경우(Fig. 6(a)) 세굴 발생 범위가 넓고 완만하게 발생하는 반면, 입경이 커지게 되면(Fig. 6(b)) 세굴 발생 범위도 감소하며 일부 지반 입자는 인공어초 후면부에 퇴적되는 것을 알 수 있다.

다양한 평균입경의 크기에 따른 지반 세굴 패턴을 알아보기 위해 Fig. 6(a)의 A-A' 단면과 B-B' 단면에서 세굴 발생 변화를 확인하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 먼저 흐름에 의해 세굴이 가장 먼저 발생하는 인공어초 전면부(A-A' 단면)의 경우(Fig. 7(a)) 평균입경이 큰 조건에서는 인공어초 가장자리에서 세굴이 가장 크게 발생하며 흐름이 관통되는 중간 부분에서는 세굴 발생이 크지 않는 W형의

Fig. 4. Scour Depth with Elapsed Time ($D_{50} = 0.1 \text{ mm}$)

Fig. 5. Local Scour Pattern with Various Particle Sizes

(a) $D_{50} = 0.075 \text{ mm}$

(b) $D_{50} = 0.3 \text{ mm}$

Fig. 6. Scour Pattern in x-y Dimension

(a) A-A' cross section

(b) B-B' cross section

Fig. 7. Distribution of Scour Depth around Artificial Reef

세굴패턴을 띄웠다. 그러나 입경의 크기가 감소할수록 인공어초 중심에서 최대 세굴이 발생하며 전체적으로 완만한 경사를 가지는 U형 세굴패턴을 가진다는 알 수 있다.

유체 흐름 방향에 대한 인공어초의 세굴 경향인 B-B' 단면의 경우(Fig. 7(b)) 평균입경이 작아질수록 세굴 깊이 뿐만 아니라 세굴 발생 거리 또한 점점 더 증가하는 추세를 보였다. 특히 0.01~0.05 mm와 같이 상대적으로 작은 입경의 범위에서는 세굴 발생 거리가 인공어초 높이의 약 2~3배까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이것으로부터 평균입경이 작은 지반에 설치된 인공어초는 주변에 설치된 다른 인공어초의 세굴에 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 인공어초의 설치 간격은 인공어초 높이의 1~2배인 점을 고려해 볼 때, 이러한 결과를 통해 인공어초 설치 간격을 결정할 때 해저 지반의 입경 특성을 고려할 필요가 있다.

Fig. 8은 시간 경과에 따른 세굴 깊이 변화를 나타낸다. 세굴 측정 위치는 세굴이 가장 깊게 발생한 인공어초 전면부

Fig. 8. Scour Depth with Time

가장자리에서 측정하였다. 세굴 발생은 흐름 시작부터 약 20분까지 급격하게 증가하였으며, 이후 세굴 발생의 기울기

Fig. 9. Scour Depth with Various Particle Size

가 점차 완만해지다가 거의 평형 상태에 도달하게 되는 결과를 보였다. 또한 지반 입경이 큰 조건(0.15~0.3 mm)에서 시간 경과에 따른 세굴 발생 경향을 살펴보면 최대 세굴 깊이의 80%까지 도달하는 시간이 대략 30분 내외로 나타났으나, 입경이 작은 조건(0.01~0.075 mm)에서는 시간에 따른 세굴이 지속적으로 발생하여 40분 이상 지나서 최대 세굴 깊이의 80%까지 도달하는 것으로 나타났다. 이를 통해 입자가 작을수록 초기에 세굴이 많이 발생하고 평형상태에 도달하는 시간도 더 오래 걸리는 것을 확인할 수 있다.

Fig 9는 지반 입경의 크기에 따른 최대 세굴심도의 분포를 나타낸다. 지반 입경과 최대 세굴심도와는 S자형의 비선형적인 커브 형태를 보이며, 입경이 커짐에 따라 최대 세굴심도의 기울기가 점차 완만해지는 특성을 보였다. 특히 지반 입경이 약 0.25 mm 이상이면 최대 세굴심도는 약 0.4 m에 수렴한다. 그러나 지반 입경이 0.15 mm~0.075 mm로 작아질 때 최대 세굴심도는 크게 증가하였으며, 입경이 0.075 mm 이하로 줄어들게 되면 세굴의 발생 깊이가 인공어초 높이(2 m)의 약 50% 이상이다. 이러한 세굴은 인공어초의 기능과 안정성에 큰 영향을 초래할 수 있다. 지반 입경 0.075 mm은 USCS 분류법에서 조립토와 세립토를 나누는 기준인 200번 체의 크기로서 모래질 지반과 실트질 지반을 구분하는 입경으로 볼 수 있다. 실트질 지반에 인공어초를 설치하게 될 경우 지반 세굴 때문에 인공어초 기능 저하가 더 크게 발생할 것으로 판단된다.

본 연구는 인공어초 설치 지반의 입경에 따른 세굴 특성을 분석하기 위해 수치해석 프로그램인 Flow-3D를 이용하여 해석 조건을 단순화하여 얻은 결과이므로 해저의 다양한 유속, 수심, 지반 특성을 고려하지 못했기 때문에 일반화하기에는 한계가 있다. 특히 입경이 매우 작은 범위의 점토 지반의 경우 일반적으로 점착력에 의하여 세굴에 저항할 수 있으나, 본 연구에서는 점착력 특성이 고려되지 않았다. 점착력을 가지는 지반의 세굴 특성은 본 연구의 결과와 차이를 보일

수 있다. 따라서 추후 다양한 지반특성, 수리학적 조건, 인공어초 형상 등 다양한 해석과 이를 뒷받침할 수 있는 수리모형 실험 및 현장관측을 통해 보다 정밀한 검토를 수행할 필요가 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 해저 지반에 설치되는 인공어초의 안정성을 지반공학적인 관점에서 평가하기 위해 모래, 실트 및 점토 등과 같이 다양한 입경에 따른 인공어초 주변의 세굴 패턴을 Flow-3D 수치해석을 통해 분석하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 평균입경이 큰 지반의 경우 인공어초 전면부에서 세굴된 지반 입자는 인공어초 후면부에 퇴적되는 경향을 보였다. 반면 입경이 작은 지반에서는 세굴된 입자의 퇴적 현상이 발생하지 않고 대부분 다 쓸려 나가는 현상을 보였다.
- (2) 평균입경이 큰 지반에서는 인공어초 가장자리에서 세굴이 가장 크게 발생하는 W형 세굴패턴을 가지나, 평균입경이 감소할수록 인공어초 중심에서 최대 세굴이 발생하는 U형 세굴패턴을 가진다.
- (3) 시간에 따른 세굴 발생은 초기 약 30~40분까지 급격하게 증가하다가 이후 완만한 커브를 그리며 점차 수렴하는 경향을 보였다. 또한 지반 입경이 작을수록 초기 세굴량이 크고 평형상태에 도달하는 시간이 더 크게 소요되는 것으로 나타났다.
- (4) 세굴 발생 폭과 거리는 입경이 작을수록 증가하였으며, 특히 입경이 매우 작은 조건(0.01~0.05 mm)에서는 인공어초 높이의 약 2~3배까지 세굴이 발생하는 것으로 나타났다. 지반 입경과 최대 세굴심도의 관계는 S자형 커브 형태를 보이며, 특히 세립토의 경우 최대 세굴심도가 크게 증가하였다.

감사의 글

이 논문은 2021학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었습니다. 또한 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 창의도전연구기반지원사업(NRF-2021R1I1A1A01060071)으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Cho, Y.C., Kim, W.K., Lee, C.S., and Kim, N.I. (2010). Investigation of dice artificial reef stability installed (1981-2004 years) on pohang coast of the east sea. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 177-182.

- Choi, I.H., Suh, S.H., Kim, D.K., Cho, J.K., Cha, B.Y., and Kim, E.O. (2009). The calculation floor area ratio of artificial reefs at south southwest sea, *Conference of the Korean Society of Marine Engineering*, pp. 487-489.
- Hwang, S.I., Kim, D.K., Sung, B.J., Jun, S.K., and Bae, J.I. (2017). The effect on enhancement of fisheries resources by the house-type artificial reef of bukchon, jeju island. *Journal of Fisheries and Marine Sciences Education*, Vol. 29, No. 6, pp. 1903-1912.
- Kim, D.K., Suh, S.H., Cho, J.K., Kim, C.G., Choi, I.H., and Kim, B.S. (2010). Settlement characteristics of square reefs installed on soft seafloor ground. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 163-167.
- Kim, G.S., Jung, D.G., Kim, Y.D., and Park, Y.S. (2019). Effects of material on scouring under high-velocity flow conditions. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 52, No. 2, pp. 133-139.
- Kim, H.S., Lee, J.W., Won, S.H., Kim, J.R., and Yoon, H.S. (2009). Estimation of efficient use of volume and facility volume distribution of artificial reefs deployed in the busan sea region. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 12, No. 4, pp. 255-263.
- Kim, K.K., Lee, J.H., Kim, D.K., Jo, Q., Ahn, J.M., and Gong, Y.G. (2008). Stability of artificial reefs installed in gangwon coastal waters of the east sea. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 200-205.
- Lee, J.H., Kim, W.K., Ahn, J.M., and Lee, C.S. (2010). Investigation of conservation state of two types artificial reef on physical factors, immersed in gangwon coastal waters of the east sea. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 34, No. 1, pp. 168-176.
- Lee, J.Y., Suh, S.H., Kim, D.K., Kim, C.G., Cho, J.K., and Cha, B.Y. (2009). Characteristic of scouring and accumulation around artificial reefs by tidal current. *Conference of The Korean Society of Marine Engineering*, pp. 493-496.
- Lee, M.O., Kim, J.K., and Kim, B.K. (2016). A review-status of development and research of artificial reefs in the east asian countries. *Journal of the Korean Society Fishies and Sciences Education*, Vol. 28, No. 3, pp. 630-644.
- Park, Y.J., and Kim, T.W. (2017). Analysis of scour phenomenon around offshore wind foundation using flow-3d model. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 18, No. 11, pp. 690-696.
- Park, J.S., Kang, Y.J., and Zhang, C.I. (2003). A quantitative method for estimating damages in fishery production due to artificial environmental deterioration in the tidal flat fishing grounds. *Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, Vol. 36, No. 4, pp. 402-408.
- Shin, C.H. (2011). *A study on local pier scour reduction using 3D numerical simulation*. Master's thesis, Hanyang University, Seoul, pp. 1-36.
- Suh, S.H., Kim, D.K., Kim, C.G., and Cho, J.K. (2007). Field surveying on the scour analysis of square trial artificial reefs at geomoondo. *Conference of The Korean Society of Marine Engineering*, pp. 113-114.
- Yang, W.J., and Choi, S.U. (2002). Three-dimensional numerical simulation of local scour around the bridge pier using large eddy simulation. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 22, No. 4-B, pp. 437-446.
- Yoon, H.S. (2018). Evaluation of fishery resource enhancement by general artificial reefs in South Korea. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 21, No. 2, pp. 116-129.
- Youn, J.S., Byun, J.C., and Kim, Y.S. (2006). Geochemical characteristics of the outer shelf muddy sediments in the east china sea. *Journal of Korean Earth Science Society*, Vol. 27, No. 2, pp. 198-208.
- Yun, D.H., and Kim, Y.T. (2019). Behaviors of artificial reef reinforced with settlement reduction reinforcement. *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 18, No. 1, pp. 1-9.

Received	December 2, 2021
Revised	December 2, 2021
Accepted	December 13, 2021