

잔교식 돌핀 구조물의 수평 지지력에 세굴이 미치는 영향 검토 Scour Impact on the Horizontal Bearing Capacity of Pier-Type Dolphin Structures

정태영* · 강수원** · 김규원*** · 원종화**** · 김찬주*****

Tae Young Jeong*, Su Won Kang**, Kyu Won Kim***, Jong Hwa Won**** and Chan Joo Kim*****

요지 : 국내 해양 환경에서 설치되는 잔교식 돌핀 구조물의 세굴 영향 검토를 위해 수치 해석적 기법을 활용한 연구를 수행하여, 세굴이 수평지지력에 미치는 영향을 검토하였다. 본 연구에서는 대상 해역의 환경 및 지반 조건을 고려하여 집안 구조물을 설계하였으며, 예측되는 세굴 영역을 산정한 후 해당 영역의 지반 요소를 제거하여 안정성 평가를 수행하였다. 세굴 깊이의 증가는 기초와 맞닿은 지반의 유실로 인해 직접적인 수평 지지력의 감소를 유발시키고, 이는 수평 변위를 증가시키는 관계를 확인하였다. 하지만 연구 대상 구조물과 같이 안전율이 반영되어 설계 하중을 버틸 수 있도록 설계된 기초에서는 발생 가능한 세굴에 의해 형성된 수평 변위의 증가량이 크지 않아 기초의 수평지지 성능에 지배적인 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 추후 다양한 지반 조건, 구조 형식으로 설치된 해상 기초 및 잔교식 구조물의 세굴 안전성 평가를 위하여, 각 인자의 영향을 분석하고 평가 및 설계 기법의 정형화를 위한 연구가 요구된다.

핵심용어 : 잔교식 돌핀, 세굴, 해상 기초, 수평 지지력, 수평 변위

Abstract : A study using numerical analysis techniques was conducted to examine the scour effect of pier-type dolphin structures installed in the domestic marine environment, and the effect of scour on horizontal bearing capacity was examined. In this study, we designed the berthing structures, taking into account the environmental and ground conditions of the target maritime area, and after calculating the predicted scour area, stability evaluation was performed by removing the ground elements of the area. The increase in scour depth was found to induce a direct decrease in horizontal bearing capacity due to soil loss in contact with the foundation, establishing a relationship that increases horizontal displacement. However, in the foundation designed to withstand the design load by reflecting the safety rate, the increase in horizontal displacement formed by possible scour is not large, which did not have a dominant effect on the horizontal bearing capacity of the foundation. In the future, research is required to analyze the impact of each factor and formalize evaluation and design techniques to evaluate the scour safety of marine foundations and pier-type structures installed in various ground conditions and structural formats.

Keywords : pier-type dolphin, scour, offshore-foundation, horizontal bearing capacity, horizontal displacement

1. 서 론

잔교식 돌핀 구조물은 말뚝을 기초로 하는 항만 구조물로서, 해상 물류의 선적 및 하역을 위한 안벽으로서의 역할을 수행한다. 최근들어 규모가 큰 선박뿐만 아니라 원유 생산 시설 및 해양 시설 등의 건설이 증가하고, 구조물의 하부 기초를 형성하는 강관의 대구경 생산이 가능해짐에 따라 말뚝을 적용한 잔교식 돌핀 구조물의 시공이 증가하였다. 그에 따라 해당 구조물에 대한 활용 및 연구가 꾸준히 증가하고 있으며, 최근 국내에서는 내진 설계에 관련한 연구를 중심으로 확장

되고 있다. 하지만 말뚝 기초에서 발생하는 세굴의 영향 또한 구조물의 안전성에 영향을 미치는 중요한 요소로서 많은 연구가 필요하나, 현장에서는 단순한 설계기준으로 적용하는 수준에 그치고 있다. Fig. 1과 같이 해상 환경에서 원형 기초를 가지는 구조물의 세굴은 빈번하게 발생하여, 방치될 경우 이는 구조물의 안전성에 치명적인 영향을 미치게 된다.

이와 같은 세굴의 발생은 구조물 기초의 수직 및 수평 지지력을 감소시켜, 구조물의 운영 능력을 상실시키거나 파손에까지 이를 수 있으므로, 인명 및 비용에 큰 피해를 초래할 수 있는 해양 구조물의 세굴 영향 검토는 필수적으로 수행 되

*포어시스 매니저(Manager, FORESYS)

**포어시스 책임매니저(Senior Manager, FORESYS)

***포어시스 이사(Corresponding author: Kyu-Won Kim, Technical Director, FORESYS, 3rd Floor, 18, Dogmak-ro 9-gil, Mapo-gu, Seoul 04048, Korea, Tel: +82-2-6959-0898, Fax: +82-70-8277-0858, kyuwon.kim@frss.co.kr)

****포어시스 대표(CEO, FORESYS)

*****인하대학교 조선해양공학과 박사과정(Ph.D. Student, Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University)

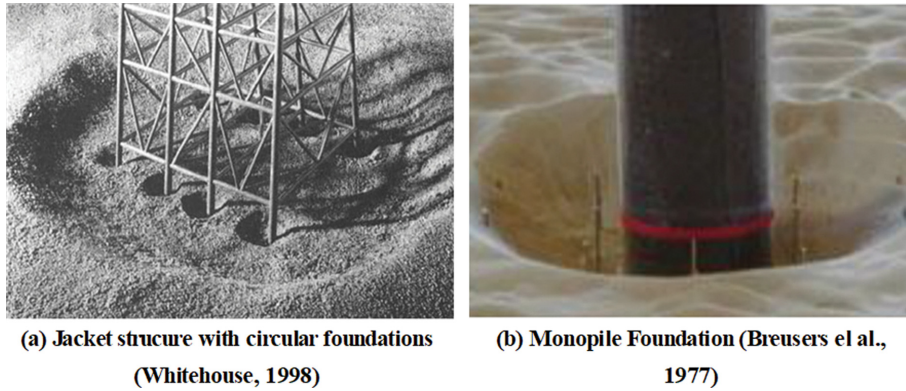


Fig. 1. Example of scour in structures with circular foundations in marine environment.

어야 한다. 국내에서는 Kim et al.(2020)이 세굴에 의한 해상 풍력터빈 지지구조물의 위험도 평가 기법을 제안하였고, Song et al.(2019)은 CFD-DEM 연계 기법을 활용하여 해양 구조물의 모노파일 주위 세굴에 대한 수치 해석을 진행하였으며, Oh and Lee(2022)는 파랑에 의한 이중 파일 주변부의 국부 세굴의 특성을 무차원 변수로서 KC 수를 산정하고 파일 간격과 흐름의 크기에 따른 상관성 검토를 통해 분석하였다. 국외에서는 Wang(2021)이 해양 환경에서 세굴심 깊이에 따른 말뚝 기초의 연직 방향 지지력에 대해 수치해석 프로그램을 활용하여 분석하였고, Qi et al.(2016)은 사질토 지반에서 얇게 매립된 기초 강관의 세굴 영향을 검토하였으며, Periku and Yardim(2012)는 실제 교량에 설치된 말뚝 구조의 현장 계측을 통해 세굴에 의한 지지력 영향을 평가하는 등 실제 세굴 사례에 관련한 연구가 빈번하게 이루어지고 있다. 최근 연구 사례들과 같이 해양 구조물에 대한 수요 증가에 따라 해상 기초 세굴 영향에 대한 수치해석적 연구들이 증가하는 추

세로서, 본 연구에서는 국내 해양 환경을 고려한 해양 구조물의 세굴 영향을 좀 더 심도 있게 고찰하고자 하였다.

본 연구에서는 실제 국내 해양 환경 상황에서의 세굴심 발생에 따른 잔교식 돌핀 구조물의 수평지지력 검토를 목적으로 국내 실해역 환경 조건하에서 운영 가능한 잔교식 돌핀 구조물을 구성하고, 설계 기준에 따른 운영 상황에서의 외력 조건을 적용한 수치해석을 통해 잔교식 돌핀의 운영하에서 세굴심에 따른 수평지지력의 영향을 검토하였다.

2. 세굴 영향 검토를 위한 구조물 선정

본 연구의 세굴 평가를 위해 국내 도서지방 실해역에서 담수화플랜트선박의 안벽 기능을 수행할 수 있는 잔교식 돌핀 구조물을 설계하였다. 구조물의 설치 위치는 전남 여수 대두라도 인근 해역이며, 해당 지역의 환경 조건을 검토하였다. Fig. 2 및 Table 1은 각각 잔교식 돌핀 구조물의 설치 위치

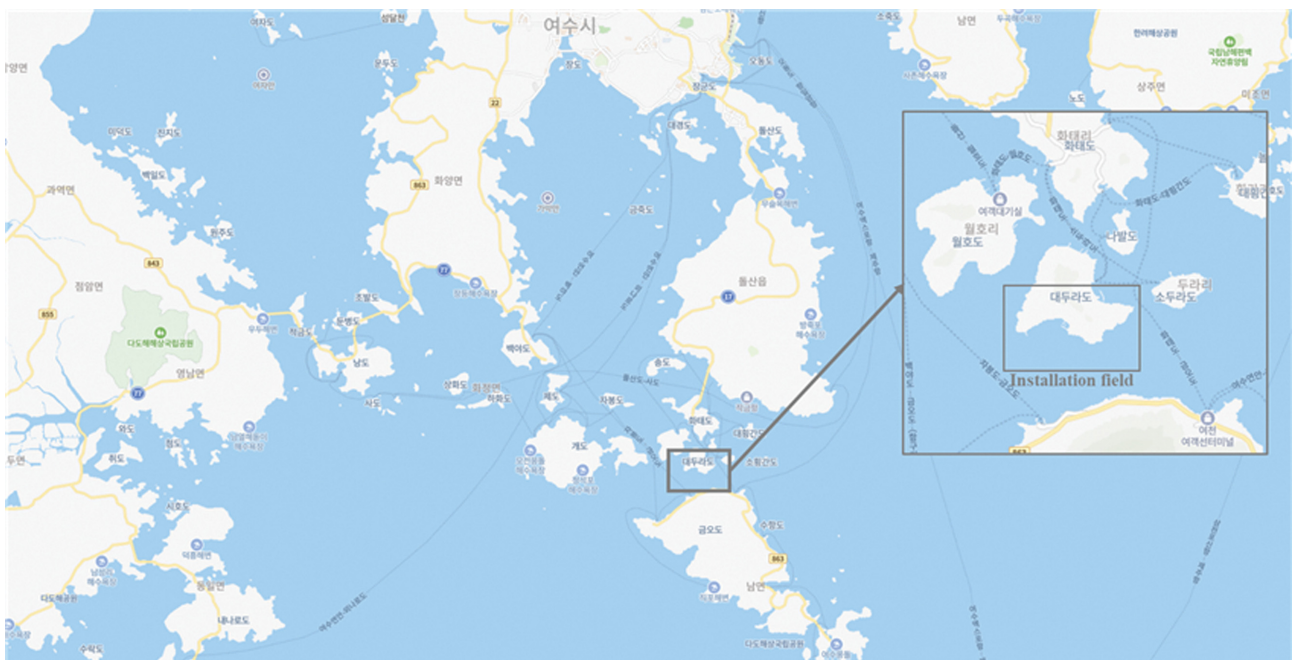


Fig. 2. Installation field (Yeosu Daedurado).

와 운영 및 극한 조건에서의 환경 변수를 나타내며, 선정된 환경 조건은 심해설계과 산출보고서(Ministry of Oceans and Fisheries, 2019), 국립해양관측소, 환경영향평가정보지원시스템(EIASS) 및 기상청 자료 등을 활용하여 선정하였다.

환경 조건 선정 기준으로 최대 파고, H (Maximum wave height) 및 파주기, T (Wave period)의 경우 심해설계과 산출보고서의 50년 빈도 데이터를 바탕으로 운영 및 극한 조건

에 대해 비태풍시와 태풍시의 최대 파고 및 파주기를 고려하였고, 조류 속도, V_c (Current velocity)는 환경영향평가정보지원시스템의 설치 대상지 인근 지역 환경영향평가자료의 표층 평균 조류 속도 및 최대 조류 속도를 고려하였다. 풍속, V_w (Wind velocity)은 기상청 및 심해설계과 산출보고서 평균 최대 풍속을 고려하였고, 수심, h (Water depth)의 경우 운영 및 극한 조건에 대한 기준을 정의할 수 없으므로 인근 지역

Table 1. Environmental conditions

Condition	Maximum wave height, H (m)	Wave period, T (sec)	Current velocity, V_c (cm/s)	Wind velocity, V_w (m/s)	Water depth, h (m)
Operation	4.3	9.6	35.8	17.9	29.6
Extreme	10.3	16.5	121	26.6	29.6

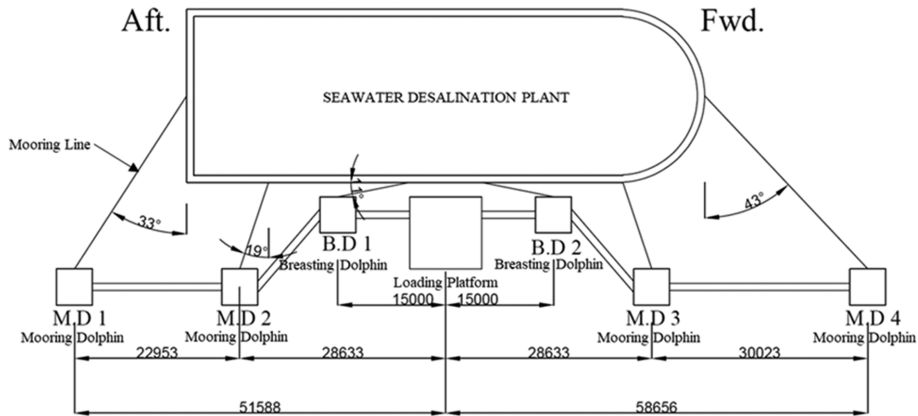


Fig. 3. Berthing facility layout for seawater desalination plant.

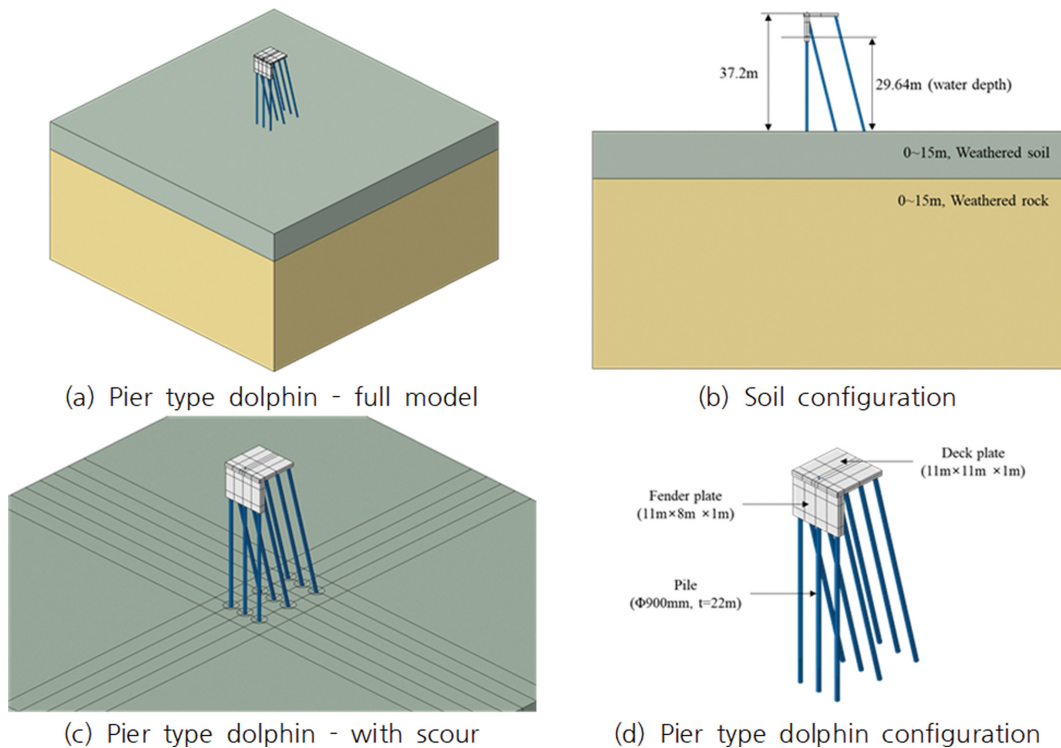


Fig. 4. Configuration of pier-type dolphin structure.

환경영향평가 자료의 수심 및 조위를 고려하여 설치 지역 내 최대 수심으로 선정하였다. 연구 대상 구조물의 지반 구성은 설치 대상지 주변 시추주상도(국토지반정보 포털 시스템)를 활용하여 선정하였고, 해당 환경 조건하에서 전장 70 m, 1,800 GT급 규모의 담수화플랜트선박의 접안 에너지 검토, 계류 및 구조 해석을 통해 전체 접안 시설을 Fig. 3과 같이 구성하였다.

전체 접안 시설 중 설계 외력에 가장 지배적인 영향을 보인 하역 플랫폼(Loading platform)을 본 연구의 세굴 영향 검토 대상 구조물로 선정하였다. 선정된 하역 플랫폼은 잔교식 구조물의 형태로서 상부는 콘크리트 재질의 상판(Deck plate) 및 하판(Fender plate)로 구성되어 있고, 하부 기초는 9기의 강관 말뚝($D=900\text{ mm}$)이 군말뚝의 영향을 받지 않도록 구성되었다. Fig. 4는 본 연구에서 선정된 설치 대상지 지반 및 잔교식 돌핀 구조물의 구성을 나타낸다.

3. 잔교식 돌핀 구조물의 세굴영역 검토

3.1 세굴 영역 산정 기준

세굴은 유체력에 의해 해저에 발생하는 전단응력이 토사 이송 능력을 초과하여 발생한다. 세굴을 발생시키는 전단응력은 구조물과 흐름, 파와 조류의 혼합, 퇴적층 간의 복잡한 상호관계 등 다양한 인자들의 상호 작용을 통해 이루어지므로 세굴정도를 판단하는 것이 어렵다. 따라서 경험식과 수리 및 수치 모형 실험을 통하여 세굴 심도를 예측하게 된다. Fig. 5는 원형 기초에 대한 일반적인 세굴 발생의 원리를 나타낸다.

세굴 영역 계산에 필요한 중요 특성으로는 기초 하상 지반의 특성, 기초의 크기 및 형상, 수심, 유체 특성, 배치 형태, 교각 형태 및 군말뚝 효과 등 다양한 특성들이 존재하며 해당 특성에 따른 여러 경험식들이 이용된다. 일반적으로 세굴에 대한 연구는 교각 세굴에 대한 연구가 오랜 시간 광범위하게

검토되어 왔으며, Shen et al.(1965), Chiew and Melville (1987), Richardson and Davis(1995), Melville and Coleman (2000) 등에 의해 세굴심 계산을 위한 많은 경험식들이 제안되었다. 교각 세굴에서 제안 되어진 세굴심 산정식과는 다르게 해양 환경에서는 파도와 조류 등에 대한 특성들도 고려된다. Breusers et al.(1977)은 해상 구조물의 형태를 고려하여 원형 기초의 국부세굴에 대한 경험식을 제안하였고, Summer et al.(1992)는 파에 대한 주요 특성인 KC수와 관련한 세굴 실험을 통해 계산식을 제안하였다. 이후 해양 환경 하에서 발생하는 세굴 영역 선정의 기본적인 계산식들이 Hoffmans and Verheij (1997), Whitehouse(1998), Sumer and Fredsoe(2002) 등의 연구자들에 의해 확립되었다.

3.2 세굴심 산정

본 연구에서 대상으로 하는 구조물의 하부 기초는 해양 환경 상태에서의 원형 기초 구조물로서 Sumer and Fredsoe (2002) 등의 연구자들이 제안한 세굴 영향 산정식이 반영되어있는 해상풍력발전 설계에 대한 DNV 코드인 DNV-OS-J101(Design of offshore wind turbine structures, DNV, 2014) 내 단일 파일 구조물의 세굴에 대한 기준에 따라 검토하였다. 본 연구의 잔교식 돌핀 구조물의 경우 하부 기초가 원형 파일 형태로 지반에 관입되어 해수면 위 상부 구조물을 지지하고 있다. 설계 기준에 따르면 사질토 지반 하에서 무한한 돌출 높이를 가지는 원형 기초의 세굴심 산정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{S}{D} = 1.3[1 - \exp - 0.03(KC - 6)] \quad \text{for } KC \geq 6 \quad (1)$$

$$\frac{S}{D} = 0 \quad \text{for } KC < 6 \quad (2)$$

여기서, S = 세굴심, D = 말뚝 직경, KC = Keulegan-Carpenter number(이하 KC수)이다. KC수는 파도를 고려하는 경우, 말굽형 와류 및 와류 흘림 정도에 관한 지표로서, 실험 및 사례 검토를 통해 KC수 6 이하에서는 세굴이 거의 발생하지 않는 것으로 조사되었고, 일반적으로 KC 값 6 초과에서 세굴심 검토가 진행된다. KC 는 다음 식에 의해 계산된다.

$$KC = \frac{u_{\max} \times T}{D} \quad (3)$$

여기서, T = 파도 주기, u_{\max} = 저면에서의 최대 궤도 속도 (Orbital velocity)이며, 다음 식과 같다.

$$u_{\max} = \frac{\pi \times H}{T \times \sinh(kh)} \quad (4)$$

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = gk \tanh(kh) \quad (5)$$

여기서, H = 파고, h = 수심, k = wave number, g = 중력가속

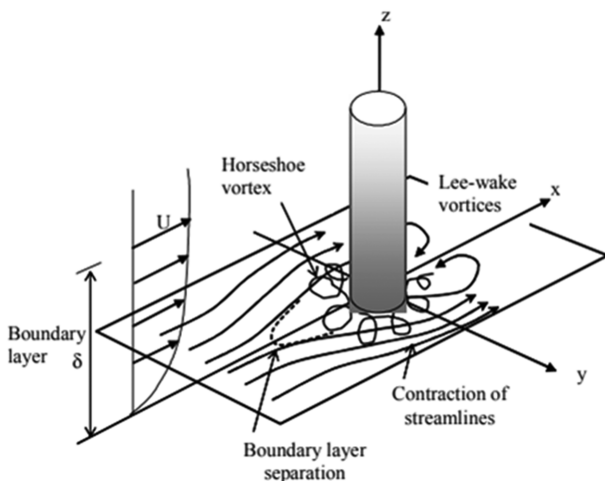


Fig. 5. Fluid flow around a structure with a circular cross section (DNV-OS-J101).

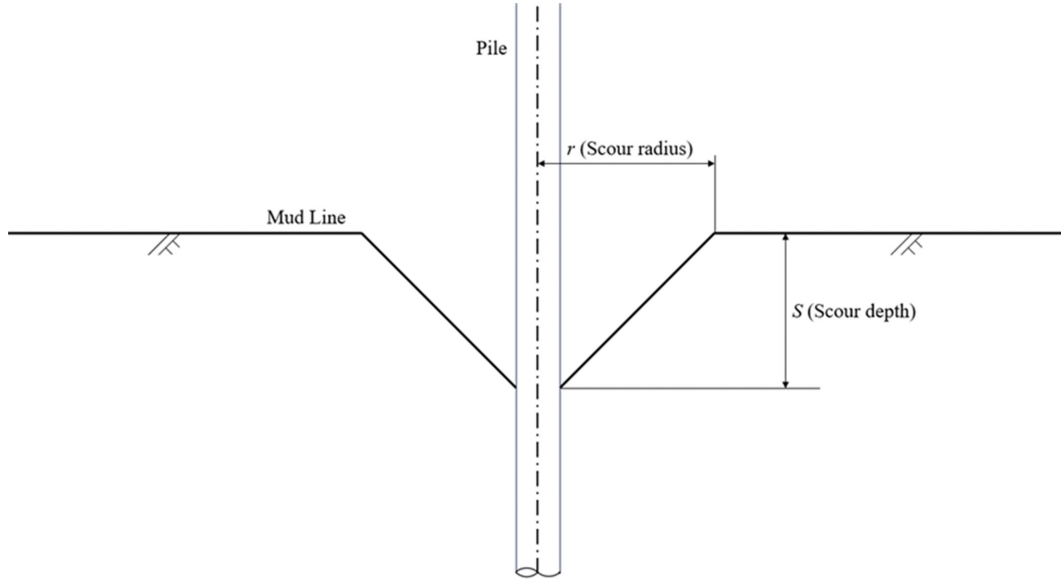


Fig. 6. Shape of scour area around pile foundation.

Table 2. Scour calculation results

Condition	Scour depth, S (m)	Scour radius, r (m)
Operation	0.39	1.12
Extreme	0.82	1.87

Table 3. Material parameters

Material Type	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	ν
Weathered Soil	1,800	3,000	0.40
Weathered Rock	2,000	6,000	0.35
Steel	7,850	200,000	0.30
Concrete	2,450	30,000	0.20

도이며, k 는 식(5)의 관계에 의해 정리된다.

3.3 세굴폭 산정

세굴 영역의 폭은 지반 입자의 내부마찰각으로 계산되며, 세굴 영역이 초기 지반과 이루는 각도는 지반 입자의 내부마찰각과 동일한 것으로 간주된다. 설계 기준에서 제안하는 산정식은 식(6)과 같으며, 세굴심 및 세굴폭을 고려한 말뚝 기초 주변의 세굴 영역 발생 형태는 Fig. 6과 같다.

$$r = \frac{D}{2} + \frac{S}{\tan \phi} \tag{6}$$

여기서, r = 세굴 영역 반지름, ϕ = 지반 내부마찰각이다.

Table 1의 설치 대상지 환경 조건을 고려하여, 세굴 영역 산정식 식(1) 및 식(6)에 따라 계산된 잔교식 돌핀 구조물의 세굴 영역은 Table 2와 같다.

4. 수치해석을 활용한 세굴 영향 검토

4.1 수치해석 모델

본 연구에서는 상용 유한요소 프로그램인 Abaqus 6.18을 이용하여 수치해석을 진행하였다. 검토 구조물, 환경 조건 및 세굴심 산정 결과를 바탕으로 유한요소모델을 형성하였으며, 전체 해석 모델은 Fig. 7과 같다.

지반의 크기는 경계면이 구조물의 거동에 영향을 미치지 않도록 형성하였고, 지반면은 경사 없는 평평한 면으로 가정하

였다. 구조물의 상부 상판(Deck plate), 하판(Fender plate) 및 지반은 8절점 저감 적분 고체 요소(8-nodes quadratic brick element with reduced integration, C3D8R), 하부 기초 강관 파이프는 2절점 선형 보 요소(2-node linear beam, B31)를 사용하여 구성하였고, 적용된 재료 물성은 Table 3과 같다.

4.3 초기 및 경계 조건

세굴 영역에 대한 수평 지지력 검토를 목적으로, 지반 및 구조물은 탄성거동 범위에서 검토 하였으며, 관입된 강관 말뚝과 지반은 완전 부착되어 일체 거동하도록 간소화하였다. 지반의 바닥 및 측면 경계면은 롤러 조건으로 구속하였고, 수중 단위 중량을 고려하여 초기 지중 응력을 적용하였다.

본 연구에서 구조물의 설계 외력은 운영 시 환경 조건 하에서 안벽계류해석을 통해 산출한 가장 불리한 외력 조건으로 한정하였고, 잔교식 돌핀 구조물의 운영 상황에 따른 하중 조합을 적용하기 위하여 해양 구조물의 설계 지침에 관한 영국표준기준(British standard: BS)인 BS 6349(British Standard Institution, 2019)의 하역 플랫폼 사용 한계 상태 하중 조합(Serviceability Limit State)에 따른 설계 하중을 부여하였다. 수치해석 시 적용한 설계 하중의 종류는 Table 4와 같다.

결정된 잔교식 돌핀 구조물 및 경계조건 하에서 세굴 영역을 변수로 하여 수평지지력을 검토하였다. 세굴심 선정 시 보

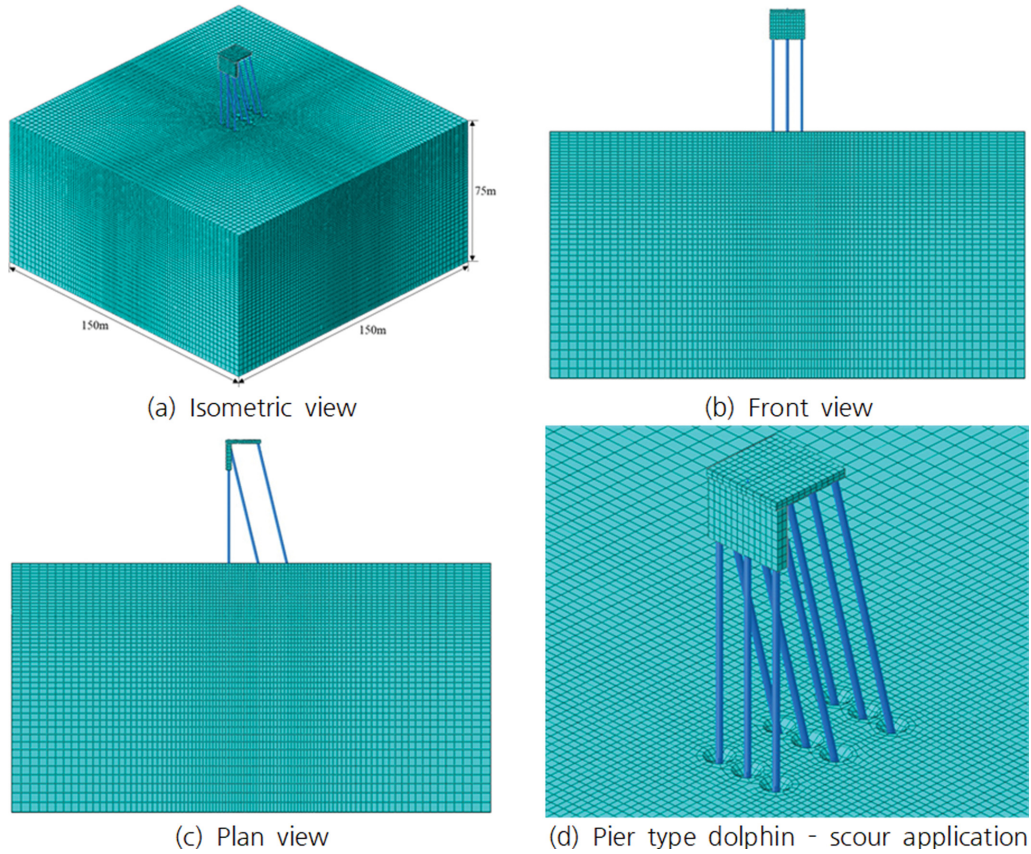


Fig. 7. Finite element model of pier-type dolphin structure.

Table 4. Load boundary condition

Design Load	Loading Condition
Birthing	Apply concentrated load to fender position
Static	Gravity application
Dynamic	Apply pressure load to the upper deck plate
Buoyancy	Considering the unit weight of seawater
Wave	Applied as a distributed load to the structure Use the Aqua function (airy wave) in ABAQUS
Wind	
Current	

Table 5. Analysis conditions

	Pile Embedded Depth, D_E (m)	Scour Depth, S (m)	Scour Radius, r (m)
Case 1		0	0
Case 2	5 m	0.5	1.32
Case 3		1.0	2.18
Case 4		1.5	3.05
Case 5		0	0
Case 6	10 m	0.5	1.32
Case 7		1.0	2.18
Case 8		1.5	3.05
Case 9		0	0
Case 10	15 m	0.5	1.32
Case 11		1.0	2.18
Case 12		1.5	3.05

수적인 영향 평가를 위해 검토한 세굴심 발생 범위(0.39~0.82 m) 이상의 깊이까지 세굴심 범위를 선정하였고, 추가로 하부 강관 말뚝의 지반 근입 깊이를 달리하여 세굴심과의 상관관계를 검토하였다. 세굴폭 적용 시 지반면 강관을 중심으로 원형 형태의 세굴이 발생한다고 가정하였다. 본 연구의 세굴 영향 검토를 위한 수치해석 전체 조건은 Table 5와 같다.

4.3 수치 해석 결과

항만 시설의 수평 지지력은 기초 구조물의 변위 검토를 통해 이루어지며, 본 연구에서는 항만 및 어항 설계 기준 해설 (Ministry of Oceans and Fishery, 2016)의 운영 시 변위 한계 기준에 따른 돌핀 구조물 기초 강관 최상단에서의 수평 변위 결과를 토대로 수평지지력을 검증하였다. 해당 설계 기준

Table 6. Horizontal displacement results of pier-type dolphin

		Pile Embedded Depth, D_E (m)		
		5	10	15
Scour Depth, S (m)	0	33.58 mm	33.53 mm	33.53 mm
	0.5	34.69 mm	34.60 mm	34.60 mm
	1.0	35.52 mm	35.42 mm	35.41 mm
	1.5	36.05 mm	35.92 mm	35.91 mm

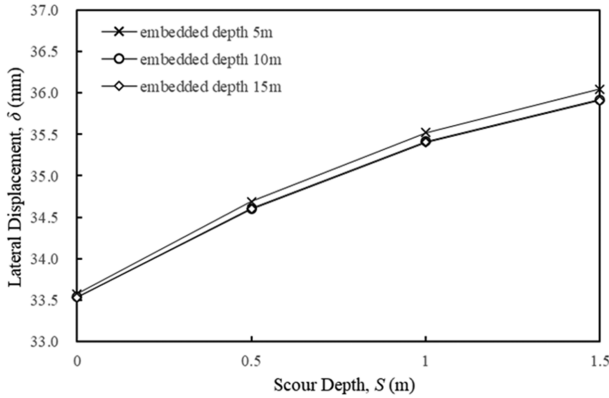


Fig. 8. Lateral displacement of pier-type dolphin according to scour depth.

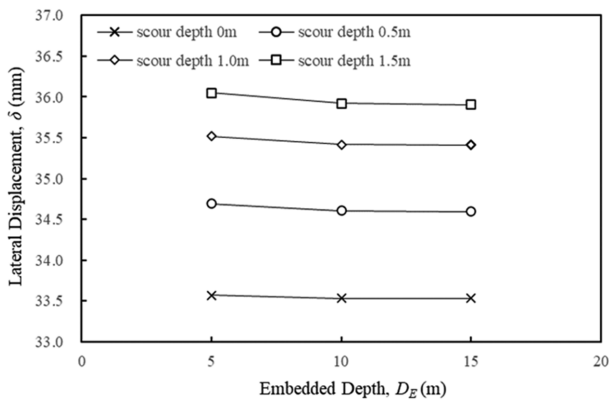


Fig. 9. Lateral displacement of pier-type dolphin according to pile embedded depth.

에 따른 최대 변위 허용량은 100 mm이며, 본 연구 대상 구조물의 변위 검토 결과 세굴 미발생 조건에서 약 33.58 mm의 수평 변위가 발생하며, 2.98의 안전율을 가지는 것으로 확인하였다. 경계 조건하에서 세굴 깊이 및 기초 관입 깊이에 따른 수평 변위 결과는 Table 6에 정리하였다.

Fig. 8은 세굴 깊이(S)에 따른 수평 변위(δ) 결과 그래프이며, 세굴 미발생 조건 결과와 비교하여 세굴 깊이가 깊어질수록 수평 변위가 증가하는 경향을 보이며, 단위 세굴 깊이당 수평 변위 증가율은 감소하는 형태를 보인다.

Fig. 9는 말뚝의 근입 깊이(D_E)에 따른 수평 변위(δ) 결과 그래프이다. 특정 세굴심에서 말뚝 근입 깊이가 증가할수록 수평 변위가 감소하는 경향을 보이는데, 이는 말뚝 길이가 길어짐에 따라 향상된 수평 저항 성능에서 기인한다. 근입깊이

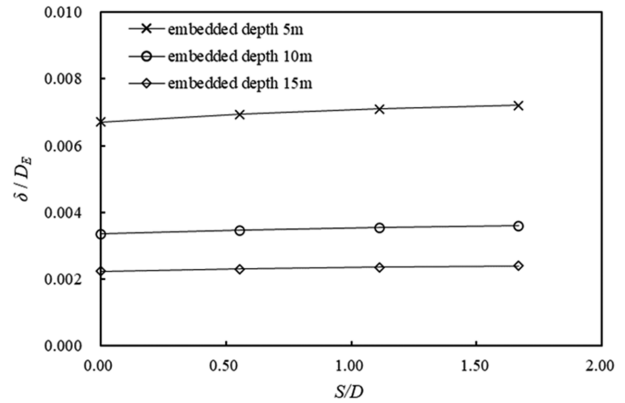


Fig. 10. Correlation analysis of numerical analysis parameters.

에 따른 수평 변위의 변화량은 세굴이 증가할수록 커지는 경향을 보인다.

세굴 깊이(S)는 말뚝의 직경(D)의 함수이고 식(1)과 같이 1차원적 반비례 관계를 갖는다. 또한 수평 변위(δ) 역시 말뚝의 근입 깊이(D_E)와 반비례 관계를 갖는다. 이에 세굴 깊이-말뚝의 직경, 그리고 수평 변위-말뚝의 근입 깊이 간의 상관관계를 확인하고자 Fig. 10에 무차원화하여 나타내었다. 본 연구에서 S/D 는 말뚝 직경 D 가 900 mm로 고정되어 있으므로 세굴심의 상대변화로 인식할 수 있다. Fig 10에서 확인할 수 있는 바와 같이 S/D 의 뚜렷한 증가에도 불구하고 δ/D_E 값은 변동폭은 미세하게 증가하고 있는 것으로 확인하였다. Fig. 8과 Fig. 9에서와 같이 세굴 깊이 S 는 말뚝 안정성 저해를 나타내는 지표인 측방향 변위, δ 의 증가요소이고, 말뚝의 근입 깊이, D_E 는 δ 의 명확한 저감 요소임을 확인할 수 있다. 이들 요소를 무차원화한 Fig. 10에서는 세굴에 의한 측방향 변위에 말뚝 근입 깊이, D_E 가 가장 지배적인 영향을 미치고, S 가 증가할수록, D 가 감소할수록 미세하게 δ 가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 세굴에 대응하기 위해서는 말뚝의 근입 깊이를 확보하는 것이 가장 우선적인 조치임을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 도서지역에서 설치 및 운영이 가능한 잔교식 돌핀 구조물을 선정하여, 실제 해양 환경 조건에 따라 발생가능한 세굴 영역을 검토하고, 세굴에 따른 수평 지지력의 영향을 구조물 수평 변위 결과를 통해 분석하였다. 여수 대두라도 지역을 대상으로 설계된 잔교식 돌핀구조물의 운영 시 거동을 모사하기 위해 실험해역 환경 조건에서의 안벽 계류 해석 결과와 국내의 안벽 설계 기준에 따른 구조물 구성 및 하중 조합을 적용하였고, 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 6.18을 사용하여 수치해석을 실시하였다. 잔교식 돌핀 구조물의 세굴 영향 검토 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구 대상 구조물의 하부 원형 기초 파일(직경 900 mm)에 대한 세굴 영역을 검토하였다. 국내 여수 지역 해양

조건을 기준으로 운영 시 환경조건에서는 세굴심 0.39 m(파일 직경의 0.43배), 세굴폭 2.24 m(파일 직경의 2.49배)이며, 극한 환경조건에서는 세굴심 0.82 m(파일 직경의 0.91배), 세굴폭 3.74 m(파일 직경의 4.16배)이 산정되었다. 이와 같이 예상되는 세굴 발생 범위를 일반화하여 세굴심 0~1.5 m 영역에 대한 영향을 검토하였다.

2. 본 연구에서 검토된 잔교식 안벽 구조물의 형태에서는 세굴 깊이가 0.5 m 발생 시 수평 변위는 3.23%(1.11 mm), 1 m 발생 시 5.78%(1.94 mm), 1.5 m 발생 시 약 7.24%(2.47 mm)의 수평 변위 증가량을 확인 하였다. 세굴 깊이의 증가는 기초와 지반 사이의 직접적인 수평 반력의 감소로 인해 수평 지지력 저하를 유발하여 구조물 수평 변위의 증가로 이어 지지만, 본 연구대상 구조물과 같이 기존 설계기준을 바탕으로 안전율이 반영되어 설계하중을 버틸 수 있도록 설계된 기초에서는 발생 가능한 세굴에 의해 형성된 수평 변위의 증가량이 크지 않아 기초의 수평 지지력에 지배적인 영향을 미치지 못하는 것으로 판단 된다.

3. 하부 기초 말뚝 근입 깊이의 증가에 따라 수평 변위는 감소하는 경향이 도출되었으나, 근입 깊이 10 m 이상에서는 말뚝의 근입량이 수평 변위 변화량에 유의미한 영향을 주지 못하였다. 따라서 세굴 증가에 따른 근입량 감소로 인해 전체 근입 깊이가 감소한다면 수평 변위의 증가량이 커지게 된다. 따라서 상대적으로 길이가 짧은 마찰 말뚝 및 말뚝의 지지력 상실이 상부 구조물의 성능에 민감한 영향을 미치는 단 말뚝 등을 사용할 경우에는 세굴 발생에 대한 면밀한 검토가 수행되어야 한다.

잔교식 돌핀 구조물의 세굴 발생에 따른 수평 변위를 측정하여 수평 지지력에 미치는 영향을 분석하였다. 추후 다양한 지반 조건, 구조 형식으로 설치된 해상 기초 및 잔교식 구조물의 세굴 안전성 평가를 위하여, 각 인자의 영향을 분석하고 평가 및 설계 기법의 정형화를 위한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 플랜트연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2018-KE000024).

References

Breusers, H.N.C., Nicollet, G. and Shen, H.W. (1977). Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulic Research*, 15, 211-252.

British Standard Institution (2019). *Code of Practice for the Design of Quay Walls, Jetties and Dolphins*, BS 6349-2, London, United Kingdom.

Chiew, Y.M. and Melville, B.W. (1987). Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1), 15-26.

DNV (2014). *Design of offshore wind turbine structures*. DNV-OS-J101, Det Norske Veritas, Norway.

Hoffmans, G.J.C.M. and Verheij, H.J. (1997). *Scour manual*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands.

Kim, Y.J., Lee, D.Y. and Kim, D.H. (2020). Risk assessment of offshore wind turbine support structures considering scouring. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*. 32(6), 524-530 (in Korean).

Melville, B.W. and Coleman, S.E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC, Colorado.

Ministry of Oceans and Fishery. (2016). *Design standards for harbour and fishery port*. KDS 64 00 00 (in Korean).

Ministry of Oceans and Fisheries (2019). *National deep-sea design wave calculation report* (in Korean).

Oh, H.S. and Lee, H.J. (2022). Characteristics of local scour around the double pile in waves. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 34(5), 169-175 (in Korean).

Periku, E. and Yardim, Y. (2012). Effect of Scour on Load Carry Capacity of Piles on Mat Bridge. *International Students' Conference of Civil Engineering, ISCCE 2012*, Epoka University, Tirana, Albania, 10-11.

Qi, W.G., Gao, F.P., Randolph, M.F. and Lehane, B.M. (2016). Scour effects on p-y curves for shallowly embedded piles in sand. *Géotechnique*, 66(8), 648-660.

Richardson, E.V. and Davis, S.R. (1995). *Evaluating scour at bridges*. Rep. No. FHWA-IP-90-017 (HEC 18), Federal Highway Administration, Washington, D.C.

Shen, H.W., Ogawa, Y. and Karaki, S.S. (1965). Time variation of bed deformation near bridge piers. *Proceedings of the 11th IAHR Congress, Leningrad, USSR*, 3, 1-9.

Song, S.J., Jeon, W.Y. and Park, S.H. (2019). Flow and scour analysis around monopole of fixed offshore platform using method that couples computational fluid dynamics and discrete element method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(3), 245-251 (in Korean).

Sumer, B.M., Fredsoe, J. and Christiansen, N. (1992). Scour around vertical pile in waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 118(1), 15-31.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*. World Scientific, London.

Wang, X. (2021). *Research on vertical bearing capacity of pile foundation under wave scouring*. *Open Journal of Modelling and Simulation*, Scientific Research Publishing, 9(2), 124-134.

Whitehouse, R. (1998). *Scour at marine structures*. Thomas Telford Ltd. London, UK.

Received 17 November, 2023
 Revised 19 December, 2023
 Accepted 23 December, 2023