

해상 인공구조물 주변 국지세굴 감지 및 예측 기술: 현황과 제언

Review on Techniques for Monitoring and Prediction of Local Scour Around Marine Artificial Structures

정성운* · 전병진** · 하호경***

Seong Woon Jeong · Byeong Jin Jeon · Ho Kyung Ha

요약 해상 인공구조물의 설치에 따른 저층의 퇴적환경과 수층의 물리환경을 교란시켜 심각한 국지세굴을 일으킨다. 국지세굴은 구조물 자체의 안정성을 저하시킬 뿐만 아니라, 바닥퇴적물을 침식 혹은 재부유시켜 주변 해저지형을 변화시키고 부유퇴적물농도를 증가시킨다. 하부구조물 종류와 발달 단계에 따라 다양한 형태의 세굴이 발생할 수 있다. 국지세굴 프로세스의 주된 원인과 전반적인 프로세스를 이해하기 위해서는 지속가능한 현장관측이 필수적이다. 본 연구에서는 현재까지 진행된 국내·외 국지세굴 현장관측 사례를 크게 네 가지 유형으로 분류하였다: (1) 음향, (2) 광학, (3) 압력, (4) 전자기장. 각 관측장비의 운용원리와 현장 적용시 예상되는 장·단점을 종합적으로 리뷰하였다. 또한, 국지세굴 예측사례를 수치모델과 실내수조실험으로 분류하여 향후 개선사항을 제언하였다. 특히, 높은 시·공간 해상도의 관측자료 획득 방법을 제시하고, 세굴발달 양상을 파악하기 위해 정량적 지표(깊이, 면적, 체적)를 새롭게 제안하였다. 본 연구에서 제안된 국지세굴지표는 수치모델과 실내수조실험 초기설정 값으로 향후 활용될 수 있다.

키워드 인공구조물, 국지세굴, 현장관측, 3차원 관측, 세굴지표

Abstract Installation of marine artificial structures would cause local scouring by disturbing hydrodynamic characteristics as well as sediment bed conditions. Local scouring affects not only the structure itself but also increases the suspended sediment concentrations by erosion and resuspension. The forms of local scour vary depending on the substructure and development stage. In-situ observation and continuous monitoring with high spatial and temporal resolution are necessary to reveal main causes and general scouring processes. In this paper, various measuring instruments used in many countries were classified into four types: (1) acoustic, (2) optic, (3) pressure, and (4) electromagnetic. The operation principles and the pros and cons of each instrument were comprehensively reviewed. In addition, local scour prediction technologies were classified into two types: numerical model and laboratory experiment, and the new suggestions for analytical improvements were addressed. In particular, in-situ observation method with high spatial and temporal resolution and necessity of estimating the quantitative scour indices (scour depth, scour area, and scour volume) were proposed to evaluate the developing stage of local scour. In-situ observation method and data analysis proposed in this paper could be used for determining the scouring indices, input parameters for numerical models, and settings for laboratory experiments.

Key words Artificial Structure, Local Scour, In-Situ Observation, Three-Dimensional Observation, Scour Index

Received: 2023.03.14, Revised: 2023.05.06, Accepted: 2023.05.06

* 인하대학교 해양과학과 박사과정 대학원생(Ph.D student, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea, idiq1922@gmail.com)(주저자)

** 인하대학교 해양과학과 석사과정 대학원생(M.S. student, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea, bj30105@naver.com)

*** 인하대학교 해양과학과 교수(Professor, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea, hahk@inha.ac.kr)(교신저자)

1. 서론

인간 활동의 증가에 따라 연안과 해상에 설치되는 인공구조물(예, 교량, 하굿둑, 해상풍력발전기)은 수층 물리환경과 바닥퇴적물에 가해지는 에너지를 크게 변화시키며, 구조물 주변에 예상치 못한 국지세굴이나 퇴적을 유발한다(김 외, 2005; 김 외, 2020; 이 외, 2006). 이러한 현상들의 발달 과정에서 부유퇴적물이 수층 내에서 이동하며 탁도 증가, 오염 물질 배출과 같은 해양환경 문제점이 야기된다(김민석, 2020; Zhao and Wang, 2009). 또한, 지형 변화 자체가 구조물의 하부 안정도에 큰 영향을 미치기 때문에, 지형 변화 속도와 그 양상에 대한 지속적이고 정량적인 모니터링이 중요하다(Yao et al., 2016).

우리나라의 서해 연안은 큰 조수간만의 차, 강으로부터의 담수 유입, 복잡한 해안선으로 인해 돌제, 하굿둑, 교량과 같은 인공구조물이 많고, 먼 바다에서는 신재생에너지 개발을 위한 해상풍력단지 건설이 추진되고 있다(경 외, 2003; 서 외, 2007; 이현희와 엄정섭, 2007; 장동호와 류주현, 2018). 서해 연안은 얕은 수심과 세립질 바닥퇴적물로 인해 약한 외부 강제력에도 쉽게 침식이 발생한다. 조석 방향을 따라 이동한 부유퇴적물은 항만, 하굿둑과 같은 연안 인공구조물 인근의 퇴적물 집적 현상을 야기하며, 그에 따른 정기적인 준설 사업이 실시되고 있다(윤양호, 2020; 장 외, 2015).

갯벌, 염습지와 같은 노출 환경에서의 지형 변화는 인공위성, 항공기, GPS, 드론 등을 활용한 높은 사공간 해상도를 가지는 이미지 분석이 가능하나, 해저 환경에서는 관측방법의 사공간 해상도가 낮고 1차원 점 관측에 불과하다(김 외, 2018; 서 외, 2010; 윤대호와 김윤태, 2019; 최 외, 2016). 서해와 같이 조석 에너지가 강한 지역은 현장관측을 통한 바닥 지형 변화를 정량적으로 파악하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 국내·외에서 국지세굴을 포함한 바닥 지형 변화 관측 사례를 조사하고 각 관측방법의 장단점을 비교하였다. 또한, 각 관측결과의 사공간 해상도 정량화를 통해 세굴지표(깊이, 면적, 체적)와 해상구조물 안정도 평가를 위한 관측방법을 제시하였다.

2. 국지세굴 개념

국지세굴이란 연안 혹은 해상에 설치되는 인공구조물로 인해 유체의 유속과 방향이 교란되어 바닥퇴적물을 과도하게 침식시키는 현상이다(Fig. 1)(이 외, 2005). 국지세굴은 해상구조물의 안정성을 저하시키며

로 세굴 지역을 포함한 주변 해저지형에 대한 지속적인 모니터링이 필요하지만, 기존 관측방법은 1차원 점 관측, 혹은 단발성 관측이 대부분이다(Briaud, 2015; Chiew, 1991; Khassaf and Rashak, 2021; Pandey et al., 2021).

국지세굴은 비선형 곡선 형태로 발달하며, 초기 10%의 짧은 기간동안 전체 세굴깊이의 70%까지 침식된다(Fig. 1b)(Ben Meftah et al., 2019; Yusoff et al., 2016). 이후 수평방향으로의 세굴은 지속적으로 발생하고, 이는 하부구조물 안정도에 영향을 미친다. 따라서, 수직·수평 모든 방향으로의 변화를 고려한 세부적인 발달과정을 산정하여야 한다(Hoffmans and Pilarczyk, 1993). 수심대비 세굴깊이로 산정한 국지세굴의 발달 과정은 (1) 초기(intitial), (2) 발달(development), (3) 안정화(stabilization), (4) 평형(equilibrium)의 네 단계로 구분될 수 있다(Fig. 1). <초기단계>는 유체가 하부구조물에 충돌, 아래 방향으로 발생하는 흐름이 세굴의 주된 원인이 된다(Fig. 1a)(Akhlaghi et al., 2020). 해당 단계에서는 세립질 바닥퇴적물이 극심하게 재부유되어 유향을 따라 이동한다(Hoffmans and Verheij,

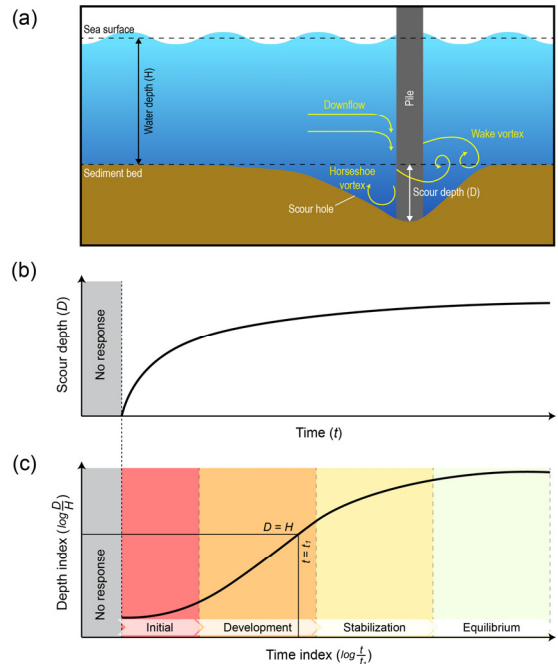


Figure 1. (a) Schematic diagram for explaining the local scour. Developing stages defined by (b) scour depth and (c) scour index. t_1 stands for initial scour moment. Modified after Hoffmans and Pilarczyk (1993) and Mohammadi Givshad et al. (2020)

1997). <발달단계>에서는 구조물 기초 주변의 좁은 영역에서 발생하는 말발굽 와류(horseshoe vortex)에 의해 세굴이 진행되며, 전체 세굴깊이의 90%까지 침식된다(Fig. 1a)(Akhlaghi et al., 2020; Hoffmans and Verheij, 1997). 이 단계에서는 수평방향의 변화보다는 세굴깊이의 증가가 특징적으로 나타난다(Hoffmans and Verheij, 1997; Khalifa and Zahra, 2014; Yusoff et al., 2016). <안정화단계>에서는 세굴깊이가 더이상 증가하지 않고, 세굴공이 원형의 형태를 유지하며 수평방향으로 증가한다(Hoffmans and Verheij, 1997; Khalifa and Zahra, 2014). <평형단계>는 시간에 따른 세굴의 변화가 일어나지 않는 시기로 정의된다(Franzetti et al., 1982).

국지세굴은 내부의 퇴적 발생 유무에 따라 정적세굴과 동적세굴로 구분된다(김 외, 2021a; Chiew and Melville, 1987). 정적세굴은 세굴공 내부에서 침식만이 발생하며, 그에 따라 <평형단계>는 세굴깊이가 더이상 증가하지 않는 시기를 의미한다(이철웅, 2001;

Akhlaghi et al., 2020). 반면, 동적세굴은 침식과 퇴적 현상이 모두 발생하며, 세굴깊이의 증감이 반복적으로 나타난다(이철웅, 2001; Akhlaghi et al., 2020). 동적세굴에서 <평형단계>는 동일 시간 평균 퇴적물의 유출량과 유입량이 같아지는 시기로 정의하며, 정적세굴과 비교할 때, 상대적으로 짧은 시간에 도달하고 최대세굴깊이가 비교적 얇은 것이 특징이다(Akhlaghi et al., 2020; Hoffmans and Verheij, 1997).

3. 국내 기술수준 진단 및 평가

3.1 국지세굴 관측기술

본 연구에서는 국지세굴 관측방법을 음향, 광학, 압력, 전자기장의 네 가지 관측 원리로 분류하였다(Fig. 2). 각 관측 원리를 대표할 수 있는 장비의 장·단점을 비교하여 Table 1에 요약하였고, 관측자료를 바탕으로 세굴지표(깊이, 면적, 체적)의 산정 가능 여부를 제시하였다.

Table 1. Comparison between instruments for monitoring the local scour

관측원리	관측장비	연속 관측	관측 자원 (깊이/면적/체적)	장점	단점	참고 문헌
음향	Multibeam Sonar	N	Y/Y/Y	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 관측 가능 광범위한 지형도 획득 가능 현장 환경 비교란 	<ul style="list-style-type: none"> 단발성 관측 구조물로 인한 음영대 발생 고비용 용선 필수 	Summers et al. (2022) Hoffmann et al. (2022) Meredyk et al. (2020)
	Sonar Profiler	Y	Y/Y/Y	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 관측 가능 사공간 고해상도 세굴지표 산정 가능 현장 환경 비교란 	<ul style="list-style-type: none"> 구조물로 인한 음영대 발생 생물부착시 성능 저하 	Dixen et al. (2012) Scully et al. (2018) Voulgaris and Morin (2008)
광학	Green-Laser Technology	N	Y/Y/Y	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 관측 가능 현장 환경 비교란 수중 작업 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> 높은 탁도 환경 관측 불가능 획득 자료 후처리 필요 	Poggi and Kudryavtseva (2019) Raju et al. (2022)
	Turbidimeter	Y	Y/N/N	<ul style="list-style-type: none"> 관측자가 수직해상도 결정 가능 침식 퇴적물의 입도 분포 파악 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 1차원 정점 관측 높은 탁도 환경 관측 불가능 생물부착시 성능 저하 	Matos et al. (2020) Michalis et al. (2013) Rasheduzzaman et al. (2007) Szatten et al. (2019)
압력	Fiber Bragg Grating	Y	Y/N/N	<ul style="list-style-type: none"> 기기 설치 안정도 높음 높은 탁도 환경 관측 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 1차원 정점 관측 유속에 대한 부수적인 관측 필요 	Ding et al. (2018) Liang et al. (2021) Lin et al. (2005)
	Vibrating Wire Piezometer	Y	Y/N/N	<ul style="list-style-type: none"> 하부구조물 안정도 평가 가능 		Chen et al. (2012)
전자기장	Ground-Penetrating Radar	N	Y/Y/Y	<ul style="list-style-type: none"> 3차원 관측 가능 광범위한 지형도 획득 가능 수중 작업 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> 단발성 관측 구조물로 인한 음영대 발생 고염분 환경 사용불가 	Anderson et al. (2007) Huber et al. (2018) Sambuelli and Bava (2012)
	Magnetic Sliding Collar	Y	Y/N/N	<ul style="list-style-type: none"> 높은 시간 해상도 설치 난이도가 낮음 	<ul style="list-style-type: none"> 1차원 정점 관측 퇴적에 의한 장비 매몰 생물부착시 성능 저하 	Lu et al. (2008)

*Y: 관측 가능; N: 관측 불가

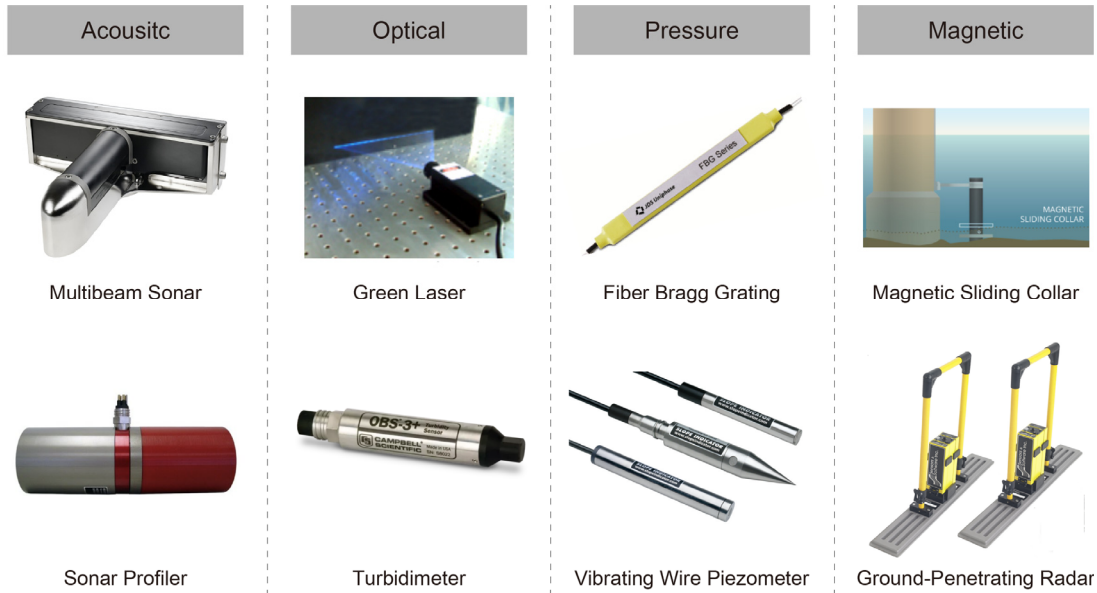


Figure 2. Representative instruments related to techniques for monitoring the local scour

3.1.1 음향

음향장비는 수층으로 송출, 바다에 반사된 음파를 감지하며, 해저지형 파악과 수심 측량의 목적으로 사용되어 왔다(Summers et al., 2022; Tang et al., 2021). 선박에 장착하여 넓은 범위의 세굴 양상을 파악하거나, 구조물에 고정하여 같은 지점에 대한 높은 시간 해상도 세굴자료를 획득할 수 있다(Dixen et al., 2012; Lacy et al., 2005). 음향장비는 비교란 원격관측이 가능해 현재 국지세굴 관측장비로 가장 많이 사용된다. ‘멀티빔소나(multibeam Sonar)’는 음파를 부채꼴 형태

로 송출하여 해저지형을 관측하며 선박에 장착되어 넓은 범위의 자료를 획득할 수 있다. 멀티빔소나는 주파수 조절을 통해 바다퇴적물 입도분포에 제한받지 않고, 3차원 자료를 제공하기 때문에 국지세굴의 정량적 평가를 위한 세굴지표를 산정할 수 있다(Fig. 3a)(Tang et al., 2021). 그러나, 선박 운용으로 인해 관측 비용이 높고, 한 지점에 대한 연속관측이 불가능하다는 단점이 있다(Chen et al., 2012). 최근에는 이러한 단점을 해결하기 위해 범지구위성항법시스템(global navigation satellite system)을 활용한 무인 수상정에 멀티빔소나

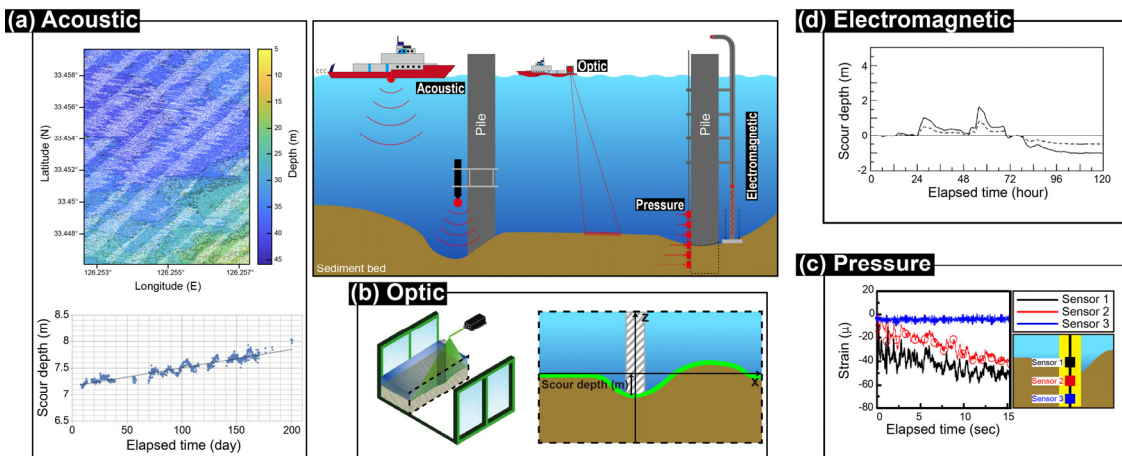


Figure 3. Operation principles and measurement examples of representative instruments for monitoring the local scour: (a) acoustic (multibeam Sonar and Sonar profiler after Dixen et al. (2020)); (b) optic (green-laser technology, after Poggi and Kudryavtseva (2019)); (c) pressure (fiber bragg grating, after Lin et al. (2005)); and (d) electromagnetic (magnetic sliding collar, after Lu et al. (2008))

를 설치하여 일정 구역에 대한 해저지형 및 수심측량을 실시하고 있다(Jung et al., 2020; Zwolak et al., 2020). 그러나, 국지세굴 프로세스를 이해하기 위해서는 고정점에 설치되어 얻은 높은 시간해상도 자료가 필수적이다. ‘소나프로파일러(Sonar profiler)’는 구조물에 직접 설치하여, 높은 시간 해상도 자료를 안정적으로 얻을 수 있다. ‘Imagenex 881A’는 기기를 회전시켜 주는 ‘Azimuth drive’와 함께 운용될 시, 3차원 관측결과를 얻을 수 있어 세굴지표를 산정할 수 있을 뿐만 아니라, 시간에 따른 발달 과정을 파악할 수 있다(Voulgaris and Morin, 2008). 또한, 배터리와 저장 공간으로 활용되는 ‘Iris link’가 외장으로 운용되어, 반영구적인 자료 획득이 가능하다. 소나프로파일러를 활용하여 세굴지표를 산정하기 위해 인천 무의도에서 현장관측을 실시하였다(Fig. 4). 소나프로파일러 관측결

과, 인천 무의도 해상다리 하부구조물에 의한 최대 세굴깊이는 약 0.2 m, 세굴면적과 체적은 각각 최소 3.60 m², 0.0748 m³로 산정되었다(Fig. 5).

3.1.2 광학

광학장비는 수층을 투과하는 광선을 통해 해저지형을 파악하는 장비와, 세굴에 의한 탁도 증감을 분석하는 장비로 구분된다. 전자는 500 nm 파장 인근의 청색광(녹색광)을 송출하여 해저면을 감지할 수 있으며, 이를 통해 3차원 세굴자료를 얻을 수 있다(Fig. 3b). 또한, 관측 시 별도의 수중 작업을 요하지 않고, 비교란 원격 관측이 가능하다(Poggi and Kudryavtseva, 2019; Raju et al., 2022). 그러나, 장비 구축비용이 높고, 대기-수층 간 매질 변화에 따른 자료 후처리 과정이 필요하다는 단점이 있다(Raju et al., 2022). 또한, 높은 탁도가 유지되는 환경에서는 정밀한 관측이 어렵거나 사용이 불가능하다. 탁도 센서는 세굴 지역에 직접 설치하는 수직 정렬된 여러 센서들 중 하나로 포함되어 세굴 관측에 활용된다. 세굴발생 시 탁도 센서의 출력값이 증감하는 원리를 사용하며, 센서의 배치가 관측 자료의 수직해상도를 결정한다. 따라서, 세굴발생 지역의 특성에 따라 관측자가 수직해상도를 결정할 수 있는 장점이 존재하지만, 1차원 점 관측에 불과하며, 고해상도 관측 시 비용이 높다(Matoss et al., 2020; Michalis et al., 2013; Rasheduzzaman et al., 2007; Szatten et al., 2019).

3.1.3 압력

압력 센서는 수평방향의 수압과 퇴적물 내에서 깊이에 따라 증가하는 수평 토압을 측정하여 국지세굴을 관측한다(Huang et al., 2009; Lin et al., 2005). 원격 관측과 달리 탁도가 높은 환경에서도 안정적으로 관측이 가능하고, 하부구조물에 고정되기 때문에 태풍, 홍

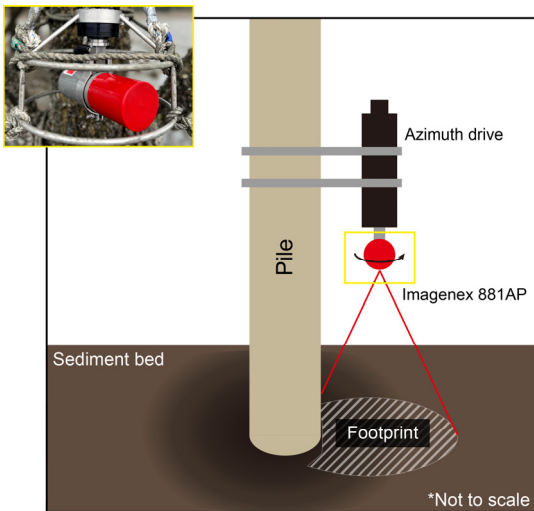


Figure 4. Schematic diagram on the operation of Sonar profiler (Imagenex 881AP)

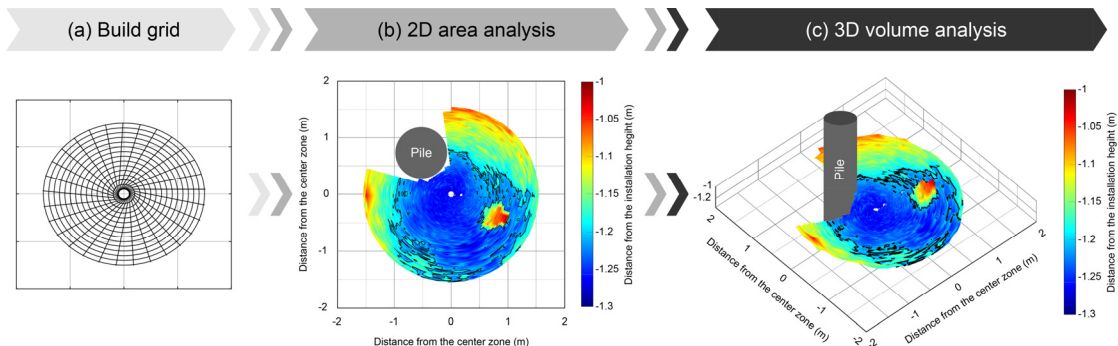


Figure 5. Procedures for estimating scour indices by Sonar profiler (Imagenex 881AP): (a) build spiral grid over the scanning area of azimuth driver, (b) determine the scour area and (c) volume based on changes in bed height

수와 같은 강한 외부강제력 조건에서도 기기의 안정성이 보장된다(Fig. 3c). 또한, 수평 토압 증감을 통해 세굴이 하부구조물 안정도에 미치는 영향을 직접적으로 관측할 수 있다. 그러나, 1차원 점 관측이기 때문에 세굴깊이 외 지표를 산정할 수 없고, 이미 세굴이 진행된 구조물에서는 더 이상의 변화를 관측할 수 없는 단점이 있다(Soman, 2020). 또한, 간헐적 유속증가로 인한 수평방향의 수압 증가를 자료 처리 과정에서 보정해야 하기 때문에, 관측지점의 유속변화를 반드시 측정해야 하는 단점이 있다(Lin et al., 2005).

3.1.4 전자기장

자기장/전자기장 센서는 해저면에 위치한 자성체의 자력, 혹은 바닥퇴적물에 의해 반사된 송출 전자기파를 탐지하는 원리를 통해 국지세굴을 관측한다(이 외, 2019). 자기장 센서인 ‘magnetic sliding collar (MSC)’는 측정부와 감지부로 나뉘며, 측정부의 자성을 띠는 원형 추는 하부의 퇴적물 침식과 함께 하강한다. 감지부는 하강하는 원형추의 자력을 감지하여 세굴깊이를 측정한다(Fig. 3d)(윤 외, 1996). MSC는 최초 설치 이후에는 장비 보수 이외의 추가적인 작업이 없어, 관측이 쉽고 수직해상도가 높다(윤 외, 1996; Lagasse et al., 1998). 그러나, 부착 생물에 의해 하강하는 원형추가 방해 받을 수 있고, 장비 매몰 시 더이상 관측을 수행할 수 없다(Lagasse et al., 1998; Lefter, 1993; Lu et al., 2006; Zarafshan et al., 2012). 전자기장 센서인 지표투과 레이더(ground-penetrating radar)는 80-800 MHz 범위의 전자기파를 송출하여 반사된 신호의 특성을 분석하여 세굴을 감지한다(윤 외, 1996; Michalis et al., 2015). 조사지역 비교란 원격관측이 가능하며 선박에 설치 후 이동하며 운용할 수 있다(Forde et al., 1999; Webb et al., 2000). 그러나, 관측 비용이 높고 한 지점에 대한 연속관측이 불가능한 단점이 있다. 또한, 지반의 전기적 성질과 수심과 같은 관측 환경을 고려한 사전 조사와 숙련된 장비운영자가 요구된다(윤 외, 1996).

3.2 국지세굴 예측기술

국지세굴 예측기술은 수치모형을 활용한 세굴모의와 실내수조실험으로 분류하였다. 각 기술의 장·단점은 아래에 요약하였다.

3.2.1 수치모형

퇴적물 이동 해석을 위한 수치모형은 대부분의 연안 해역에서 널리 활용되고 있는 기법 중 하나이다(방 외, 2013; 이 외, 2007; 정 외, 2006). 수치모형은 현장관측이 불가능한 지역에 대한 전반적인 국지세굴을 모의할

수 있고, 현상 재현 시간이 현저히 줄어든다는 장점이 있다(김 외, 2021b). 수치모형을 활용한 국지세굴 모의는 주로 입자에 주목한 개별요소법(discrete element method)과, 난류구조에 주목한 전산유체역학(computational fluid dynamics)으로 나뉜다(고 외, 2015; 김 외, 2017; 김 외, 2021b; 송성진과 박선호, 2020; 허동수와 전호성, 2011; Song et al., 2019). 개별요소법은 해상구조물 주변 유체의 흐름으로 인한 퇴적물의 침식 현상을 입자 단위로 모의하여 국지세굴을 재현 및 예측한다(최 외, 2018; 허동수와 전호성, 2011). 그러나, 개별요소법은 점착성 퇴적물의 특징인 응집현상(flocculation)을 재현하기 힘들어 정확한 입자 크기를 수치모형에 적용하는 데 어려움이 있다(Winterwerp et al., 2006). 전산유체역학은 유체의 흐름 속에서 바닥 퇴적물의 침식 여부와 최초침식한계전단응력(initial critical shear stress for erosion)을 산정하는 데 주로 사용된다(임 외, 2010). 하지만, 전산유체역학은 조석, 파랑과 같은 주기성 에너지는 재현이 가능하지만, 태풍, 홍수와 같은 비주기성 에너지는 재현이 불가능하다(허동수와 전호성, 2011). 최근에는 두 방법을 동시에 활용하여 구조물 주변 유체의 변화와 바닥퇴적물의 거동을 복합적으로 모의하는 사례가 증가하고 있다(송성진과 박선호, 2010; 허동수와 전호성, 2011). 더불어, 수치모형을 활용할 때에는 현장관측을 동반하여 입력값에 대한 정확도를 높이고, 관측결과와의 비교 분석이 필수적이다(곽 외, 2004).

3.2.2 실내수조실험

실내실험을 활용한 국지세굴발달 양상 파악은 관측 장비, 수치모형의 부재 시 사용해오던 방법이다. 실내실험은 실험자가 하부구조물의 형태, 유체의 흐름, 바닥퇴적물 특성과 같은 실험 환경을 제어하여, 다양한 조건 하에 국지세굴발달 양상을 파악할 수 있는 장점이 있다(이 외, 2008). 또한, 세굴방지공과 같은 인공구조물의 세굴방지 효과를 실험을 통해 쉽게 파악할 수 있다(서 외, 2010; 안상진과 김용용, 1998; 여 외, 2008; 윤태훈과 신용진, 2000; 최 외, 2000). 실내실험을 통한 국지세굴 양상 파악 후, 결과를 수치모형의 입력값으로 활용한다(윤대호와 김운태, 2019). 그러나, 실내실험은 현장 조건을 그대로 반영할 수 없고, 설치되는 실험구조물 또한 실제 구조물의 축소판이기 때문에, 결과는 현상에 대한 예측에 불과하다(여 외, 2006; 최 외, 1997). 실내실험 설계 시, 목표하고자 하는 현장의 수층물리환경과 바닥퇴적물 분포에 대한 선행 현장관측이 필수적이고, 실험구조물이라는 점을 염두에 둔 결과에 대한 해석이 필요하다.

4. 결론 및 제언

본 연구에서는 현재까지 진행된 국내·외 국지세굴 현장관측 사례를 크게 네 가지 유형으로 분류하였다. 각 관측장비의 운용원리와 장·단점은 아래와 같이 요약할 수 있다.

- (1) 음향장비는 3차원 관측을 통한 세굴지표의 산정이 가능하며, 세굴과정을 비교란 상태로 관측할 수 있다. 그러나, 장비 특성 상 구조물 하부는 음파가 투과할 수 없어 음영대가 발생한다.
- (2) 광학장비는 3차원 관측이 가능하고, 기기에 따라 관측자가 수직해상도를 결정할 수 있다. 그러나, 탁도 센서는 1차원 점 관측에 불과하고 높은 탁도가 유지되는 환경에서는 관측자료의 정확도가 감소한다.
- (3) 압력 감지장비는 구조물에 직접 부착하는 방식으로 설치된 장비의 안정도가 높고 탁도 증감에 영향을 받지 않는 시간 해상도 자료를 획득할 수 있다. 그러나, 1차원 점 관측에 불과하고 세굴발생 지역에 직접 장비를 매설하기 때문에 현장 교란이 발생할 수 있다.
- (4) 전자기장 센서는 3차원 관측이 가능하며 넓은 범위의 해저지형을 관측할 수 있지만, 단발성 관측에 불과하며 고염분 환경에서 사용이 불과하다. 자기장 센서는 높은 시간 해상도 자료를 얻을 수 있지만, 1차원 점 관측에 불과하다. 또한, 장비 매몰 시 더이상의 관측이 불가능하다.

위에 언급한 관측장비를 활용한 기존연구들은 단발성 관측을 통한 세굴깊이 변화를 주로 다루고 있으며, 1차원 점 관측이 대부분이다. 그러나, 국지세굴은 시간에 따라 발달양상이 달라지며, <안정화단계>에서는 수평변화(세굴면적)가 더 큰 비중을 차지한다. 세굴깊이 변화는 세굴 초기에 발생하여 일찍 종료되지만, 세굴면적과 체적은 시간에 따라 지속적으로 변화하며 하부구조물의 안정도에 큰 영향을 미친다. 특히, 서해와 같은 해양환경에서는 높은 조차와 강한 조류로 인해 세굴공의 형태가 수직 뿐만 아니라 수평방향으로 길고 넓게 발달한다. 해상풍력단지과 같이 좁은 간격으로 여러 하부구조물이 밀집 설치된 환경에서는 상대적으로 넓은 영역의 세굴이 발생한다.

향후 해상구조물 주변 국지세굴 프로세스의 원인을 규명하기 위해서는 멀티빔소나와 소나프로파일러를 활용한 지속가능한 현장관측이 필수적이다. 세굴영역 전체를 포함하는 높은 시·공간 해상도 3차원 세굴자료를 장기관측을 통해 획득하고, 세굴깊이, 세굴면적, 세

굴체적의 시간에 따른 변화 분석을 통해 세굴발달 단계를 결정하고 구조물의 안정성을 평가해야한다. 또한, 세굴의 완료여부를 판단하기 위해서는 높은 시간해상도 현장관측이 필수적이다. 소나프로파일러로 획득한 높은 시간해상도 자료를 통해 24시간 이내 퇴적물 고도 변화가 일정하게 유지되는 <평형단계>로의 진입을 정량적으로 평가해야한다. 본 연구에서 제안된 국지세굴지표(깊이, 면적, 체적)는 수치모델과 실내수조실험 초기 설정 값으로 향후 활용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원 (과학기술기반 해역이용영향평가 기술개발, 20210427)과 한국전력공사의 사외공모 기초연구의 지원을 받아 수행하였습니다(과제번호: R22XO05-12).

참고문헌

1. 경남호, 윤정은, 장문석, 장동순, 2003. 한반도해역의 해상 풍력 자원 평가. 한국태양에너지학회 논문집, 23(2):35-41.
2. 고동휘, 정신택, 오남선, 2015. FLOW-3D를 이용한 해상 자켓구조물 주변의 세굴 수치모의 실험. 한국해양·해양공학학회논문집, 27(6):373-381.
3. 광기석, 정문경, 이주형, 박재현, 2004. 지반의 침식특성을 이용한 교각세굴 사례 연구. 한국지반공학학회논문집, 20(3):67-74.
4. 김경호, 김홍훈, 오현식, 연주흠, 2005. 파랑에 의한 해저 매설관로 주변의 국부세굴특성. 한국해양·해양공학학회논문집, 17(2):106-118.
5. 김광수, 정동규, 김용도, 박용성, 2021. 고유속 흐름에서 하상재료의 입도특성에 따른 안정성 평가 연구. 대한토목학회논문집, 41(4):365-376.
6. 김민석, 2020. 장기 환경 모니터링 시스템을 통한 해상풍력 산업 활성화. 대한토목학회지, 68(11): 20-21.
7. 김선민, 김종규, 김용관, 서성호, 2017. 모노파일 기초 주변의 세굴방지 효과에 관한 연구. 한국해양환경·에너지학회지, 20(2):84-90.
8. 김영진, 이대용, 김동현, 2020. 세굴을 고려한 해상풍력터빈 지지구조물 위험도 평가. 한국해양·해양공학학회논문집, 32(6):524-530.
9. 김지환, 신동빈, 변제윤, 주영석, 2021. ISPH-CGDEM을 활용한 제트류에 의한 3차원 세굴 수

- 치해석. 대한기계학회 춘추학술대회, 207-212.
10. 김효섭, 이승호, 박두훈, 민병욱, 2018. 파랑과 조류에 의한 다중 파일 주변 세굴실험. 한국연안방재학회 학술발표대회 논문집, 142-143.
 11. 방기영, 김태인, 송용식, 이정현, 김신웅, 조재갑, 김종욱, 우승범, 오재경, 2013. 영산강 하구의 2011년 하계 홍수시 퇴적물이동 수치모의. 한국해양안·해양공학학회논문집, 25(2):76-93.
 12. 서성호, 이영권, 김창길, 김대권, 박성욱, 2010. 인공어초 시설지반의 세굴특성 연구. 한국마린엔지니어링학회지, 34(4):567-574.
 13. 서승원, 유경선, 이화영, 2007. 서해연안 돌제구조물 주위의 침퇴적 해석: 실측 및 수동역학 모델에 의한 초기추정. 한국해양안·해양공학학회논문집, 19(4):345-354.
 14. 송성진, 박선호, 2020. CFD-DEM 연계 모델을 이용한 파이프라인 세굴 해석. 한국해양환경에너지학회 학술대회논문집, 1464-1467.
 15. 안상진, 김용용, 김종섭, 김진국, 1998. 세굴방지 시설물에 의한 교각의 국부세굴 방지실험. 한국수자원학회 학술발표회, 461-465.
 16. 여운광, 지운, 김창성, 임종철, 2008. 선박충돌방지공이 설치된 해상교량의 교각 세굴 특성 분석: 인천대교를 대상으로. 한국해양안·해양공학학회 논문집, 20(2):203-211.
 17. 여흥구, 강준구, 노영신, 김성중, 2006. 월류 수계 주변의 국부세굴특성에 관한 실험연구. 한국수자원학회 학술발표회, 1561-1565.
 18. 윤대호, 김운태, 2019. 실내실험 및 수치해석을 이용한 인공어초 세굴 거동 특성 연구. 한국지반신소재학회 논문집, 18(3):23-32.
 19. 윤양호, 2020. 서해 남부, 고창연안해역의 해양환경 및 식물플랑크톤 군집의 사공간 변동특성. 한국산학기술학회 논문지, 21(11):477-493.
 20. 윤태훈, 신용진, 2000. 인공수초에 의한 세굴방지에 대한 연구. 한국수자원학회논문집, 33(1):592-597.
 21. 윤태훈, 윤성범, 제갈선동, 이백, 1996. Development of instrument for measuring scour at bridge piers during flood. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2:87-90.
 22. 이갑용, 최성녕, 최성욱, 박무중, 2008. 교각형상에 따른 국부세굴범위에 대한 실험 연구. 한국방재학회 학술대회, 477-480.
 23. 이상희, 김성보, 정용화, 이영현, 김현도, 김영현, 김진후, 2019. 수중 전자기탐사를 위한 수저면 밀착형 안테나 플랫폼의 현장 적용. 한국마린엔지니어링학회지, 43(7):575-583.
 24. 이양구, 김주철, 김정환, 이현근, 2005. 인천대교 해상교량 세굴평가에 관한 연구. 대한토목학회 학술대회, 4280-4283.
 25. 이양구, 신승현, 김정환, 이현근, 2006. 인천대교 세굴현상 고찰과 세굴방지공 적용에 관한 연구. 대한토목학회 학술대회, 2670-2673.
 26. 이종섭, 탁대호, 우진갑, 2007. 해운대 해수욕장의 계절별 파랑, 해변류 및 퇴적물이동 특성. 한국해양안·해양공학학회논문집, 19(6):574-585.
 27. 이철웅, 2001. 동력학적 신뢰성 모형에 의한 교각 주위의 국부 세굴 해석. 대한토목학회논문집 B, 21(2B):129-138.
 28. 이현희, 엄정섭, 2007. 금강하구에서 인공구조물에 의한 수심 변화: GIS 기반의 사공간 평가. 대한지리학회지, 42(1):121-132.
 29. 임익태, 양수현, 황규남, 2010. 환형수초의 바다전단응력 분포에 대한 수치해석 연구. 대한기계학회 춘추학술대회, 3426-3431.
 30. 장동호, 류주현, 2018. 인공구조물 건설 후 안면도가경주 간석지의 퇴적환경 및 미지형변화 분석. 한국지형학회지, 25(1):31-45.
 31. 장인성, 원덕희, 백원대, 신창주, 이승현, 2015. 국내 주요 항만 인근의 탁도 특성 분석. 한국산학기술학회 논문지, 16(12):8889-8895.
 32. 정태성, 김태식, 정동국, 2006. 목표해역 점착성 퇴적물의 수송에 관한 수치모의. 한국해양환경에너지학회지, 9(1):36-44.
 33. 최계운, 김현태, 권영식, 2000. 교각주위내 세굴검토를 위한 사석보호공에 관한 연구. 한국수자원학회, 33(S1):598-603.
 34. 최계운, 서병하, 곽한범, 1997. 모형실험을 통한 해상교각 주위에서의 세굴예측. 한국수자원학회 학술발표회, 102-107.
 35. 최광희, 공학양, 정성혁, 박성민, 이수용, 2016. 드론 기반 측량을 활용한 강릉 하시동 사빈지형 변화 탐지. 한국지형학회지, 23(4):101-112.
 36. 최순욱, 박병관, 강태호, 장수호, 이철호, 2018. 개별요소법을 이용한 중단면 토압설드 TBM의 수치해석 연구. 한국지반신소재학회 논문집, 17(4):129-139.
 37. 허동수, 전호성, 2011. 불투과 잠재 전면에서 파랑작용 하의 세굴 해석을 위한 수치모델의 개발. 대한토목학회논문집 B, 31(5B):483-489.
 38. Akhlaghi, E., Babarsad, M.S., Derikvand, E., Abedini, M., 2020. Assessment the effects of different parameters to rate scour around single

- piers and pile groups: a review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(1): 183-197.
39. Anderson, N.L., Ismael, A.M., Thitimakorn, T., 2007. Ground-penetrating radar: a tool for monitoring bridge scour. *Environmental & Engineering Geoscience*, 13(1):1-10.
 40. Ben Meftah, M., Mossa, M., 2020. New approach to predicting local scour downstream of grade-control structure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(2):04019058.
 41. Briaud, J.L., 2015. Scour depth at bridges: Method including soil properties. I: Maximum scour depth prediction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(2):04014104.
 42. Chen, S., Sun, Y., Liu, D., 2012. Monitoring technique for local scour around bridge pier. In *Earth and Space 2012: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 914-919.
 43. Chiew, Y.M., 1991. Prediction of maximum scour depth at submarine pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(4):452-466.
 44. Chiew, Y.M., Melville, B.W., 1987. Local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 25(1):15-26.
 45. Ding, Y., Yao, Q., Zhang, Z., Wang, X., Yan, T., Yang, Y., Lv, H., 2018. A new method for scour monitoring based on fiber Bragg grating. *Measurement*, 127:431-435.
 46. Dixen, F.H., Dixen, M., Pedersen, J., Dahl, J.F., 2012. Scour development around offshore wind turbine foundation: field measurement & analysis. In *Proceedings of sixth international conference on scour and erosion*: 1441-1447.
 47. Forde, M.C., McCann, D.M., Clark, M.R., Broughton, K.J., Fenning, P.J., Brown, A., 1999. Radar measurement of bridge scour. *NDT & E International*, 32(8):481-492.
 48. Franzetti, S., Larcan, E., Mignosa, P., 1982. Influence of tests duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers, *Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 304.
 49. Hoffmann, J.J.L., Michaelis, R., Mielck, F., Bartholomä, A., Sander, L., 2022. Multiannual Seafloor Dynamics around a Subtidal Rocky Reef Habitat in the North Sea. *Remote Sensing*, 14(9):2069.
 50. Hoffmans, G.J.C.M., Pilarczyk, K.W., 1993. Local scour downstream of hydraulic structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(4):326-340.
 51. Hoffmans, G.J.C.M., Verheij, H.J., 1997. *Scour Manual*, Routledge, London, 224p.
 52. Huang, A.B., Lee, J.T., Ho, Y.T., Chiu, Y.F., Tsai, T.L., 2009. Field monitoring of pore-water pressure profile in a slope subjected to heavy rainfalls. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 1, 2, 3, and 4:1931-1934.
 53. Huber, E., Anders, B., Huggenberger, P., 2018. Quantifying scour depth in a straightened gravel-bed river with ground-penetrating radar. In *2018 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. IEEE, 1-4.
 54. Jung, J., Park, J., Choi, J., Choi, H.T., 2020. Navigation of unmanned surface vehicles using underwater geophysical sensing. *IEEE Access*, 8:208707-208717.
 55. Khalifa, M.A., Zahra, K.A., 2014. Collective review in particular reference to soil erosion around maritime structures, effects of the angle of wave: Attack on coastal areas formation and variation on transport rates. *American Journal of Marine Science*, 2(1):25-32.
 56. Khassaf, S.I., Rashak, B.M., 2021. Investigation of Local Scour around L-Shape Submerged Groynes in Clearwater Conditions. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 28(3):159-169.
 57. Lacy, J.R., Sherwood, C.R., Wilson, D.J., Chisholm, T.A., Gelfenbaum, G.R., 2005. Estimating hydrodynamic roughness in a wave-dominated environment with a high-resolution acoustic Doppler profiler. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110, C06014.
 58. Lagasse, P.F., Richardson, E.V., Schall, J.D., 1998. Fixed instrumentation for monitoring scour at bridges. *Transportation Research Record*, 1647(1):1-9.
 59. Lefter, J., 1993. Instrumentation for measuring scour at bridge piers and abutments. *NCHRP Research Results Digest*, 189:1-8.
 60. Liang, T.C., Wu, P.T., Huang, H.S., Yang, C.C., 2021. Design a bridge scour monitoring system by pressing the fiber Bragg grating with a rolling

- pulley mechanism. *Microsystem Technologies*, 27:1211-1216.
61. Lin, Y.B., Chen, J.C., Chang, K.C., Chern, J.C., Lai, J.S., 2005. Real-time monitoring of local scour by using fiber Bragg grating sensors. *Smart Materials and Structures*, 14(4):664-670.
 62. Lu, J.Y., Hong, J.H., Li, J.J., Su, C.C., 2006. Unsteady bridge scour monitoring in Taiwan. In *Proceedings 3rd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-3)*, 409-414.
 63. Lu, J.Y., Hong, J.H., Su, C.C., Wang, C.Y., Lai, J.S., 2008. Field measurements and simulation of bridge scour depth variations during floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(6):810-821.
 64. Matos, T., Faria, C.L., Martins, M.S., Henriques, R., Gomes, P.A., Goncalves, L.M., 2020. Design of a multipoint cost-effective optical instrument for continuous in-situ monitoring of turbidity and sediment. *Sensors*, 20(11):3194.
 65. Meredyk, S.P., Edinger, E., Piper, D.J., Huvenne, V.A., Hoy, S., Ruffman, A., 2020. Enigmatic deep-water mounds on the Orphan Knoll, Labrador Sea. *Frontiers in Marine Science*, 6:744.
 66. Michalis, P., Saafi, M., Judd, M., 2013. Capacitive sensors for offshore scour monitoring. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Energy*, 166(4):189-197.
 67. Michalis, P., Tarantino, A., Tachtatzis, C., Judd, M.D., 2015. Wireless monitoring of scour and re-deposited sediment evolution at bridge foundations based on soil electromagnetic properties. *Smart Materials and Structures*, 24(12):125029.
 68. Mohammadi Givshad, S., Ramezani, Y., Khozayemehzhad, H., 2020. Investigation of scour around the dual bridge piers under unsteady flow conditions using experimental model. *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 7(1): 57-63.
 69. Pandey, M., Jamei, M., Karbasi, M., Ahmadianfar, I., Chu, X., 2021. Prediction of maximum scour depth near spur dikes in uniform bed sediment using stacked generalization ensemble tree-based frameworks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(11):04021050.
 70. Poggi, D., Kudryavtseva, N.O., 2019. Non-intrusive underwater measurement of local scour around a bridge pier. *Water*, 11(10):2063.
 71. Raju, R.D., Nagarajan, S., Arockiasamy, M., Castillo, S., 2022. Feasibility of using green laser in monitoring local scour around bridge pier. *Geomatics*, 2(3):355-369.
 72. Rasheduzzaman, M., Nakagawa, H., Zhang, H., Rahman, M., Muto, Y., 2007. Flow and sediment transport around bandals under live-bed scour condition. *PROCEEDINGS OF HYDRAULIC ENGINEERING*, 51:145-150.
 73. Sambuelli, L., Bava, S., 2012. Case study: A GPR survey on a morainic lake in northern Italy for bathymetry, water volume and sediment characterization. *Journal of Applied Geophysics*, 81:48-56.
 74. Scully, M.E., Trowbridge, J.H., Sherwood, C.R., Jones, K.R., Traykovski, P., 2018. Direct measurements of mean Reynolds stress and ripple roughness in the presence of energetic forcing by surface waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(4):2494-2512.
 75. Soman, R., 2020. Semi-automated methodology for damage assessment of a scaled wind turbine tripod using enhanced empirical mode decomposition and statistical analysis. *International Journal of Fatigue*, 134:105475.
 76. Song, S., Jeon, W., Park, S., 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.
 77. Summers, G., Lim, A., Wheeler, A.J., 2022. A Characterisation of Benthic Currents from Seabed Bathymetry: An Object-Based Image Analysis of Cold-Water Coral Mounds. *Remote Sensing*, 14(19):4731.
 78. Szatten, D., Habel, M., Babiński, Z., Obodovskyi, O., 2019. The impact of bridges on the process of water turbidity on the example of large lowland rivers. *Journal of Ecological Engineering*, 20(10): 155-164.
 79. Tang, F., Chen, Y., Tang, Y., Li, Z., Chen, G., 2021. Smart rock technology for local scour monitoring of bridge structures. *Earth and Space* 2021, 455-463.
 80. Voulgaris, G., Morin, J.P., 2008. A long-term real time sea bed morphology evolution system in the

- South Atlantic Bight. In 2008 IEEE/OES 9th Working Conference on Current Measurement Technology, 71-79.
81. Webb, D.J., Anderson, N.L., Newton, T., Cardimona, S., 2000. Bridge scour: Application of ground penetrating radar. In Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical Methodologies and NDT to Transportation Facilities and Infrastructures. St. Louis, MO, USA: Federal Highway Commission and Missouri Department of Transportation.
 82. Winterwerp, J.C., Manning, A.J., Martens, C., De Mulder, T., Vanlede, J., 2006. A heuristic formula for turbulence-induced flocculation of cohesive sediment. *Estuarine, coastal and shelf Science*, 68(1-2):195-207.
 83. Yao, W., An, H., Draper, S., Cheng, L., Zhao, M., Jesudoss, J.S., Tang, G., 2016. Experimental study of local scour around piles in tidal currents. In Proceedings of the 20th Australasian Fluid Mechanics Conference, Perth, Australia, 5-8.
 84. Yusoff, M.A.M., Azamathulla, H.M., Ghani, A.A., 2016. Time variations of scour below submerged skewed pipelines. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 136(1):012071.
 85. Zarafshan, A., Iranmanesh, A., Ansari, F., 2012. Vibration-based method and sensor for monitoring of bridge scour. *Journal of Bridge Engineering*, 17(6):829-838.
 86. Zhao, X., Wang, X., 2009. Simulation of piles in hydraulic model and experiment study on local scour at pile foundation in offshore wind farm. In 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, IEEE, 1-4.
 87. Zwolak, K., Wigley, R., Bohan, A., Zarayskaya, Y., Bazhenova, E., Dorshow, W., Elsaied Abou-Mahmoud, M., 2020. The autonomous underwater vehicle integrated with the unmanned surface vessel mapping the Southern Ionian Sea. The Winning Technology Solution of the Shell Ocean Discovery XPRIZE. *Remote Sensing*, 12 (8):1344.

