

Research Paper

## 준설 기원 부유물질이 해산 규조류(*Skeletonema costatum*)의 성장에 미치는 영향

강지운 · 이정준 · 이권섭 · 김성준

전남대학교 환경에너지공학과

### Effects of Dredging-Derived Suspended Solids on the Growth of the Marine Diatom (*Skeletonema costatum*)

JiUn Kang · JungJun Lee · KwonSeob Lee · SeongJun Kim

Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University

**요약:** 준설 및 항만 개발 과정에서 발생하는 부유물질은 해양 생태계에 영향을 미칠 수 있으며, 환경영향평가에서는 주로 부유물질 농도 변화가 핵심 평가 지표로 활용되어 왔다. 그러나 이러한 접근은 실제 생물학적 반응과의 정량적 연계가 제한적이라는 한계를 가진다. 본 연구에서는 준설 기원 부유물질에 노출된 해산 규조류 *Skeletonema costatum*의 성장 반응을 평가하여, 부유물질 농도와 생물학적 반응 간의 관계를 정량적으로 분석하였다. 강진만과 광양만에서 채취한 해저퇴적물 유래 부유물질을 대상으로 72시간 성장저해시험을 수행하였으며, 성장률 자료를 기반으로 독성지표를 산출하였다. 두 해역 모두에서 부유물질 농도 증가에 따라 조류 성장 저해가 관찰되었고, probit 분석 결과 광양만 시료의 EC50 값이 강진만 시료보다 낮게 나타나 해역별 민감도 차이가 확인되었다. 또한 해저퇴적물의 물리·화학적 특성과 금속 성상을 함께 분석한 결과, 광양만 시료는 더 세립하고 환원적인 퇴적환경 특성을 보였으며, 두 해역의 금속 농도는 전반적으로 국내 해저퇴적물 해양환경기준의 관리기준 이하 수준이었다. 본 연구에서 제시한 농도-반응 관계와 독성지표는 준설 공사 시 예측되는 부유물질 농도와 비교하여 생물학적 영향 가능성을 평가하는 참고자료로 활용될 수 있다. 특히 환경영향평가에서 상대적으로 충분히 다루어지지 않았던 1차 생산자에 대한 정량적 독성자료를 제시하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 항만개발사업의 정량적 영향평가를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

**주요어:** 준설, 부유물질, 독성금속, 생태독성평가, 해양환경영향평가

**Abstract:** Dredging and port development generate suspended solids (SS) that may affect marine ecosystems, while environmental impact assessments have largely relied on SS concentration changes as a key indicator. However, this approach provides limited quantitative linkage to biological responses. Here, we evaluated the growth response of the marine diatom *Skeletonema costatum* exposed to

First Author: JiUn Kang, Tel: +82-62-530-1864, E-mail: jiun7066@naver.com, ORCID: 0009-0001-1905-0898

Corresponding Author: SeongJun Kim, Tel: +82-62-530-1864, E-mail: seongjun@jnu.ac.kr, ORCID: 0009-0002-1018-7174

Co-Authors: JungJun Lee, Tel: +82-62-530-1864, E-mail: anehd1@naver.com, ORCID: 0009-0001-5808-4927

KwonSeob Lee, Tel: +82-62-530-1864, E-mail: lks0620@hanmail.net, ORCID: 0000-0001-5453-4620

Received: 6 February, 2026. Revised: 9 March, 2026. Accepted: 24 March, 2026.

dredging-derived SS to quantify concentration-response relationships. SS prepared from seafloor sediments collected in Gangjin Bay and Gwangyang Bay were tested using a 72-h algal growth inhibition assay, and toxicity indicators were derived from relative growth rate data. Growth inhibition increased with SS concentration in both regions. Probit analysis showed a lower EC<sub>50</sub> for Gwangyang Bay SS than for Gangjin Bay SS, indicating regional differences in sensitivity. In addition, analyses of sediment physicochemical properties and metal composition indicated that the Gwangyang Bay sample was finer and showed more reductive sediment characteristics than the Gangjin Bay sample, whereas metal concentrations in both regions were generally below the domestic marine sediment quality guideline level. The concentration-response relationships and toxicity indicators presented here can support evaluation of potential biological effects by comparison with SS concentrations predicted during dredging. By providing quantitative response data for suspended-phase exposure, particularly for primary producers, this study offers baseline information to strengthen marine environmental impact assessment.

*Keywords: Dredging, Suspended solids, Toxic metals, Ecotoxicological assessment, Marine environmental impact assessment*

## I. 서론

국내 연안 환경에서는 항만 개발, 항로 유지준설, 매립사업, 방파제 및 해저구조물 설치 등 다양한 인위적 개발 활동이 지속적으로 수행되고 있다(Lee et al., 2009). 이러한 개발사업 중 준설 및 매립 공정은 해저퇴적물의 물리적 교란을 직접 유발하며, 그 결과 해수 중 suspended solids (SS) 농도를 단기간에 증가시키는 주요 요인으로 작용한다(Lee et al., 2003; Sipelgas, 2011). 특히 국내 무역항 및 연안항을 중심으로 항만시설의 유지관리와 신규 항만 건설이 계속됨에 따라, 준설 활동에 따른 SS 발생의 빈도와 강도가 점진적으로 증가하는 경향이 보고되고 있다(Kim et al., 2013; Ministry of Oceans and Fisheries, 2020). 한편 준설로 인해 증가한 SS는 장비·공법, 저질 특성, 그리고 조류·파랑 등 수리 환경 조건에 따라 해역 내에서 공간적으로 확산되어 일정한 영향 범위를 형성할 수 있다. Todd et al. (2015)는 기존 현장 연구를 종합하여, 발생원 인근 수십~수백 m 범위에서 상층 80-340 mg/L, 하층 480-611 mg/L 수준의 SS가 보고된 사례를 제시하였으며, 근거리에서 수십~수백 mg/L 수준의 단기 고농도 노출이 가능함을 보여주었다. 또한 Hitchcock and Bell (2004) 역시 준설기 근접 구간에서 높은 SS가 관측된 뒤 거리 증가에 따라 감소하는 양상을 보고하여, 준설 유발 SS가 근거리 고

농도와 원거리 확산이라는 공간적 특성을 동시에 가질 수 있음을 시사한다.

부유물질은 일반적으로 해저퇴적물에서 유래한 입경 63 µm 이하의 미세 입자로 정의되며(Waters, 1995), 해양 환경에서 부유물질 농도의 증가는 수층의 탁도를 증가시켜 광 투과를 제한하고, 수중 광환경 변화를 통해 해양 생태계의 1차 생산 과정에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Munawar and Munawar, 1987; Guenther and Bozelli, 2004; Erfteimeijer and Lewis, 2006; Swift et al., 2006). 그러나 기존 환경영향평가에서는 주로 SS 농도의 변화량이나 확산 범위를 제시하는 데 초점이 맞추어져 있어, 특정 농도 수준에서 실제 생물학적 반응이 어느 정도 나타나는지에 대한 정량적 자료는 상대적으로 제한적으로 축적되어 왔다. 특히 Wilber and Clarke (2001)는 준설 관련 부유퇴적물의 영향이 노출 농도뿐 아니라 노출시간에 따라 달라질 수 있음을 정리하면서, 농도-반응 관계에 기반한 생물학적 해석의 필요성을 제시하였다. 따라서 현장 준설 시 보고되는 수십~수백 mg/L 수준의 SS 노출 범위를 고려할 때, 이를 포괄할 수 있는 시험 농도 구간에서 생물반응 자료를 확보하는 것은 환경영향평가의 해석 근거를 보완하는 데 의미가 있다. 이에 본 연구에서는 해산 규조류 (*Skeletonema costatum*)을 대상으로 준설 기원 SS의 농도-반응 관계를 평가하고, EC<sub>50</sub>, NOEC 및 LOEC와 같

은 독성지표를 제시함으로써 기존의 SS 농도 중심 평가를 보완할 수 있는 정량적 생물반응 근거를 제공하고자 하였다.

한편, 항만 및 연안 지역에서 발생하는 부유물질은 단순한 물리적 입자에 그치지 않고, 퇴적물의 생성 기원과 주변 환경 특성에 따라 다양한 오염물질을 함유할 가능성이 있다(Islam and Tanaka, 2004; Zeng et al., 2022). 미세 입자 형태의 부유물질은 표면적이 커 독성 금속과 같은 유해 물질의 흡착 가능성이 높으며, 이러한 물질은 수중 환경에서 용출되거나 생물과의 접촉을 통해 생태계에 잠재적인 독성 영향을 미칠 수 있다(Eggleton and Thomas, 2004; Yang et al., 2008; Huang et al., 2020). 따라서 연안 환경에서 발생하는 부유물질의 생태학적 영향은 단순한 탁도 증가 효과뿐만 아니라, 퇴적물 기원 물질의 화학적 성상까지 함께 고려할 필요가 있다.

식물플랑크톤을 대상으로 한 기존 연구에서는 부유물질 농도 증가에 따라 종별로 상이한 성장 저해 반응이 나타나는 것으로 보고되었으며, 부유물질의 농도 및 특성에 따라 입계 농도가 다르게 나타나는 것으로 확인되었다(Quinn et al., 1992; Liu et al., 2013). 특히 해산 규조류 *S. costatum*은 국내 연안에서 연중 우점하는 대표적인 종으로, 국제 표준화기구(ISO)에서 해양 생태독성 시험종으로 지정된 바 있다(ISO, 2006). 선행 연구에서는 *S. costatum*을 이용한 급성 독성 시험에서 부유물질 고농도 조건에서 성장률 저해 현상이 관찰된 바 있으나(Zheng et al., 2015), 국내 연안 퇴적물 기원 부유물질을 대상으로 지역별 특성을 비교한 정량적 연구는 제한적인 실정이다. 또한 기존의 부유물질 관련 연구는 수산자원 또는 저서성 생물을 중심으로 수행된 사례가 많았으며(Yoon and Park, 2011; Lee, 2015; Maeng et al., 2021; Seok et al., 2022), 해양 생태계의 1차 생산자를 대상으로 부유물질의 독성 영향을 체계적으로 평가한 연구는 상대적으로 부족하다. 특히 준설 유래 부유물질의 지역적 차이와 퇴적물 성상에 따른 생물학적 반응 차이를 함께 고려한 연구는 국내에서 미흡한 실정이다(Park et al., 2022; Yoon et al., 2022).

따라서 본 연구는 국내 연안 항만지역에서 발생하는 준설 유래 부유물질이 해양 생태계의 1차 생산자인 해

산규조류 *S. costatum*의 성장에 미치는 영향을 평가하고, 농도-반응 관계 및 독성지표(EC<sub>50</sub>, NOEC, LOEC)를 제시함으로써 기존의 부유물질 농도 중심 환경영향평가를 보완할 수 있는 정량적 생물반응 근거를 제공하는데 목적이 있다. 이를 위해 지역별 해저퇴적물에서 유래한 부유물질을 대상으로 농도 증가에 따른 개체군 성장률 저해 반응을 분석하고, 동일 시료에 대한 금속 성상 분석 결과를 함께 제시하여 해역 간 반응 차이를 해석하기 위한 배경 자료로 활용하고자 하였다.

## II. 연구방법

### 1. 조사해역 선정 및 퇴적물 채취

본 연구에 사용된 해저퇴적물 시료는 2024년 5월과 6월에 국내 연안 지역인 강진만(34°32'8"N, 126°47'13"E)과 광양만(34°51'56"N, 127°39'34"E)에서 채취하였다. 조사해역 중 광양만 지역은 항만 개발 및 산업 활동이 활발한 지역으로, 준설에 따른 인위적 영향이 상대적으로 큰 해역으로 판단하였다. 반면 강진만은 광양만에 비해 대규모 산업단지 및 항만 개발이 상대적으로 제한적인 해역으로 인위적 영향이 적은 지역으로 판단되어 대조 지역으로 선정하였다. 각 지역에서 퇴적물은 van veen Grab을 이용하여 채취되었으며, 채취된 퇴적물은 냉동보관하여 실험실로 운반하였다. 해저퇴적물의 이물질 제거 후 동결건조(Model: FDCF-12012)하여 전처리 및 보관하였으며, 시료의 물리·화학적 특성 변화를 최소화하도록 관리하였다.

### 2. 시험생물 및 배양조건

시험생물로는 해양 생태독성 평가에 널리 활용되는 해산규조류 *S. costatum*을 사용하였다. 시험생물은 해양시료도서관에서 배양주(LIMS-PS-0848)를 분양받았으며, 독성시험에 앞서 최소 3개월 이상 안정화 계대배양을 수행하였다. 배양에는 여과 및 멸균 처리된 자연 해수를 사용하였고, Guillard's F/2 배지를 첨가하여 영양 조건을 유지하였다. 배양 조건은 수온 20 ± 1°C, 염분 30 ± 5 psu로 유지하였으며, 광주기는 10 h light: 14 h dark, 조도는 약 7,000-9,000 lux로 설정하였다. 독성 시험에는 지수성장기에 있는 개체를 사용하였으며, 실

험 전 정도관리실험을 통해 시험생물의 적합성을 확인하였다. 그 외 배양 및 실험방법은 해양환경공정시험기준의 [별표 3] 해양생물공정시험기준(해산규조류편)(2023)을 참고하였다.

### 3. 해산규조류 성장저해시험

*S. costatum*의 성장 저해 시험은 총 72시간 동안 수행하였다. 시험에 사용된 자연해수는 채수 후 고압증기 멸균기(autoclave)를 이용하여 멸균 처리하였으며, 실험 과정 중 외부 오염을 방지하기 위해 모든 시험 용기와 기구는 사전에 멸균하였다. 부유물질 시료는 동결 건조된 퇴적물 시료를 멸균된 자연해수에 현탁시켜 제조하였으며, 시험 농도별로 조정하였다. 시험 농도는 10, 25, 50, 100, 200 및 400 mg/L로 설정하였으며, 각 처리구는 동일 조건에서 반복하여 수행하였다. 시험 기간 동안 부유물질의 균일한 분산과 침강 방지를 위해 교반 배양기를 사용하였고, 내벽에 배플이 형성된 삼각 플라스크를 이용하여 교반 시 부유물질의 현탁이 형성되도록 하였다. 성장저해시험에서 조류의 초기 접종 농도는 약 5,000 cells/mL로 설정하였으며, 대조구를 포함한 모든 처리구는 3회 반복으로 구성하였다. 시험 기간 동안 지속적인 교반 조건하에서 배양을 유지하였으며, 조류 성장은 시험 시작 시와 종료 시의 세포 밀도를 비교하여 평가하였다. 세포수는 Lugol 용액으로 고정된 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경(Nikon 80i)으로 계수하였다. 조류의 평균 성장률( $r$ )은 다음 식을 이용하여 산출하였다.

$$r = \frac{\ln N_t - \ln N_0}{t}$$

여기서  $N_0$ 는 시험 시작 시 세포 밀도,  $N_t$ 는 시험 종료 시 세포 밀도,  $t$ 는 시험 기간(시간)을 의미한다. 시험의 적합성은 대조구의 평균 성장률이 시간당 0.04 이상일 경우 유효한 시험으로 판단하였다. 시험 결과를 기반으로 통계적 기법을 이용하여 무영향관찰농도(No Observed Effect Concentration, NOEC), 최저영향관찰농도(Lowest Observed Effect Concentration, LOEC) 및 반수영향농도(Median Effective Concentration,  $EC_{50}$ )를 산출하였다.  $EC_{50}$  값은 probit 분석을 적용하여 산출하

였으며, 해당 분석 결과를 바탕으로 농도-반응 곡선을 도식화하였다. 생태독성 지표의 통계분석 및 계산은 ToxCalc 5.0 Program (Tidalpool scientific software, USA)을 이용하여 수행하였다.

### 4. 해저퇴적물 시료의 물리·화학적 특성 및 ICP-MS 분석

해저퇴적물 시료의 물리·화학적 특성 분석을 위해 입도, 함수율, 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산 휘발성 황화물(AVS) 항목을 분석하였다. 금속 성분 분석은 해양환경공정시험기준 고시의 [별표 2] 해양퇴적물공정시험기준(2023)의 항목별 시험방법에 따라 전처리 및 분석이 수행되었으며, 분석기기는 유도결합 플라즈마 질량분석기(ICP-MS, Model: NexION2000 (PerkinElmer))를 이용하였다. 분석 항목은 Cr, As, Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Li, Co, Mn이며, 분석의 신뢰도 평가를 위해 캐나다 국립연구소(National Research Council Canada, NRC)의 인증표준물질(Certified reference materials, CRM) MESS-4를 시료와 함께 전처리 및 분석하였고, 기기분석조건에서 3회 이상 분석결과와 평균치로 결과값 및 상대표준편차(RSD)를 도출하였다. 금속물질 농도는 mg/kg 단위로 표기하였다. 회수율은 인증표준물질(MESS-4)의 분석값과 인증값을 비교하여 산정하였으며, 금속분석에 대한 EPA 품질관리 회수율 범위(70-130%)를 기준으로 해석하였다.

## III. 결과

### 1. 부유물질 노출에 따른 *S. costatum* 성장률 변화

강진만과 광양만에서 채취한 퇴적물 유래 부유물질에 노출된 *S. costatum*의 성장률은 부유물질 농도가 증가함에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 나타냈으며, 그 농도-반응 양상은 Figure 1에 제시하였다. 대조구에서는 시험 기간 동안 정상적인 지수성장이 관찰되었으며, 모든 시험구는 ISO 10253에서 제시하는 시험 유효성 기준을 충족하였다. 강진만 부유물질에 노출된 시험에서는 25 mg/L 처리구에서 대조구와 비교하여 유의한 성장률 차이가 나타나지 않았으나, 50 mg/L 이상에서는 성장률이 뚜렷하게 감소하였다. 특히 100

Table 1. Summary of toxicity endpoints (NOEC, LOEC, and EC<sub>50</sub>) for *S. costatum* exposed to suspended solids derived from Gangjin Bay and Gwangyang Bay for 72h.

| Category | Gangjin Bay (mg/L) | Gwangyang Bay (mg/L) |
|----------|--------------------|----------------------|
| SS range | 25-400             | 25-400               |
| NOEC     | 25                 | <25                  |
| LOEC     | 50                 | 25                   |
| EC50     | 66.2               | 50.1                 |

Notes: EC<sub>50</sub> values were estimated using Probit analysis (ToxCalc) based on 72h growth inhibition. NOEC/LOEC were determined at p<0.05.

Table 2. Physicochemical properties of sediments collected from Gangjin Bay and Gwangyang Bay.

| Parameter                               | Gangjin Bay | Gwangyang Bay |
|---|-------------|---------------|
| Mean grain size (Φ)                     | 7.4         | 8.6           |
| Water content (%)                       | 54.0        | 61.8          |
| Acid volatile sulfide (AVS) (mg/g·wet)  | 0.147       | 0.365         |
| Chemical oxygen demand (COD) (mg/g·wet) | 7.92        | 21.47         |
| Ignition loss (IL) (%)                  | 8.92        | 4.49          |

mg/L 이상의 농도에서는 성장 저해가 명확하게 관찰되었으며, 200 mg/L 이상에서는 성장률이 현저히 제한되는 양상을 보였다. 광양만 부유물질 노출 시험에서는 25 mg/L 처리구에서도 성장률 감소 경향이 관찰되었으며, 50 mg/L 이상에서 성장 저해가 보다 뚜렷하게 나타났다. 고농도 처리구에서는 전반적으로 강진만 부유물질에 비해 낮은 성장률을 보였다.

부유물질 농도별 성장률 자료를 기반으로 *S. costatum*의 독성지표를 산출하고 농도-반응 관계를 분석한 결과, 강진만과 광양만 부유물질 간 독성 민감도의 차이가 확인되었으며, EC<sub>50</sub>, NOEC 및 LOEC 값은 Table 1에 요약하였다. Probit 분석을 통해 산출된 EC<sub>50</sub> 값은 강진만 부유물질에서 66.2 mg/L로 나타났으며, 광양만 부유물질의 EC<sub>50</sub> 값은 50.1 mg/L로 상대적으로 낮았다. 이는 동일한 부유물질 농도 조건에서 광양만 시료가 *S. costatum*의 성장에 보다 민감한 반응을 유도함을 시사한다. NOEC 및 LOEC 값 또한 두 해역 간 차이를 보였다. 강진만 부유물질의 경우 NOEC는 25 mg/L, LOEC는 50 mg/L로 산출되었으나, 광양만 부유물질에서는 25 mg/L 미만에서도 성장 저해 경향이 관찰되어 NOEC는 25 mg/L 미만, LOEC는 25 mg/L로 판단되었다. 부유물질 농도 증가에 따른 성장 저해 반응은 두 해역 모두에서 S자형 농도-반응 곡선을 나타냈으며, probit 모델

을 적용한 결과 실험값은 sigmoid 형태의 농도-반응 관계를 적절히 설명하는 것으로 나타났다.

## 2. 해저퇴적물 시료의 물리·화학적 특성 및 ICP-MS 분석 결과

강진만과 광양만에서 채취한 해저퇴적물 시료의 물리·화학적 특성을 비교한 결과, 광양만 시료는 평균입도(mean φ)가 8.6으로 강진만(7.4)보다 더 세립하였고, 함수율도 61.8%로 강진만(54.0%)보다 높게 나타났다. 또한 황화수소 발생 가능성을 반영하는 AVS는 광양만에서 0.365 mg/g·wet로 강진만(0.147 mg/g·wet)보다 높았으며, 화학적산소요구량(COD) 역시 광양만에서 21.47 mg/g·wet로 강진만(7.92 mg/g·wet)에 비해 높은 수준을 보였다. 반면 강열감량(IL)은 강진만에서 8.92%로 광양만(4.49%)보다 높게 나타났다(Table 2). 이와 함께 두 시료의 금속 조성을 비교하기 위해 ICP-MS 분석을 수행하였으며, 분석 결과는 Table 3에 제시하였다. 모든 금속 농도는 건중량 기준(mg/kg)으로 환산하여 표현하였다. 광양만 퇴적물 시료에서는 리튬(Li), 아연(Zn), 니켈(Ni), 구리(Cu)의 농도가 강진만에 비해 상대적으로 높게 나타났다. Li 농도는 광양만에서 112.09 mg/kg, 강진만에서 64.43 mg/kg로 측정되었으며, Zn은 각각 96.58 mg/kg와 81.62 mg/kg로 나타났다. Ni와 Cu

Table 3. Concentrations of heavy metals in suspended solid samples derived from sediments collected in Gangjin Bay and Gwangyang Bay, determined by ICP-MS analysis.

| Metals | Gangjin Bay           |              | Gwangyang Bay         |              |
|--------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|
|        | Concentration (mg/kg) | Mean RSD (%) | Concentration (mg/kg) | Mean RSD (%) |
| Cr     | 43.617                | 4.6          | 52.359                | 4.4          |
| As     | 9.899                 | 3.8          | 10.020                | 4.3          |
| Cd     | 0.188                 | 7.3          | 0.194                 | 7.1          |
| Pb     | 32.660                | 8.8          | 29.929                | 9.1          |
| Zn     | 81.617                | 4.8          | 96.578                | 4.7          |
| Cu     | 21.186                | 4.4          | 22.109                | 4.3          |
| Ni     | 21.879                | 4.6          | 26.878                | 4.9          |
| Li     | 64.426                | 6.6          | 112.087               | 6.0          |
| Co     | 13.418                | 5.0          | 9.446                 | 5.0          |
| Mn     | 588.549               | 3.3          | 539.315               | 2.7          |

Table 4. Analytical results and recovery rates of certified reference material (MESS-4, NRC, Canada) for quality assurance of sediment heavy metal analysis.

| Category                | Cr    | As    | Cd    | Pb    | Zn     | Cu    | Ni    | Li    | Co    | Mn     |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Analysis result (mg/kg) | 76.51 | 23.40 | 0.31  | 25.49 | 121.33 | 31.08 | 42.41 | 79.05 | 10.21 | 222.81 |
| Certified value (mg/kg) | 94.3  | 21.7  | 0.28  | 21.5  | 147    | 32.9  | 42.8  | 65.3  | 13    | 298    |
| Recovery (%)            | 80.4  | 106.9 | 109.3 | 117.5 | 81.8   | 93.6  | 98.2  | 120.0 | 77.9  | 74.1   |

Notes. Recovery rates were interpreted with reference to the EPA quality-control recovery range for metal analysis (70-130%).

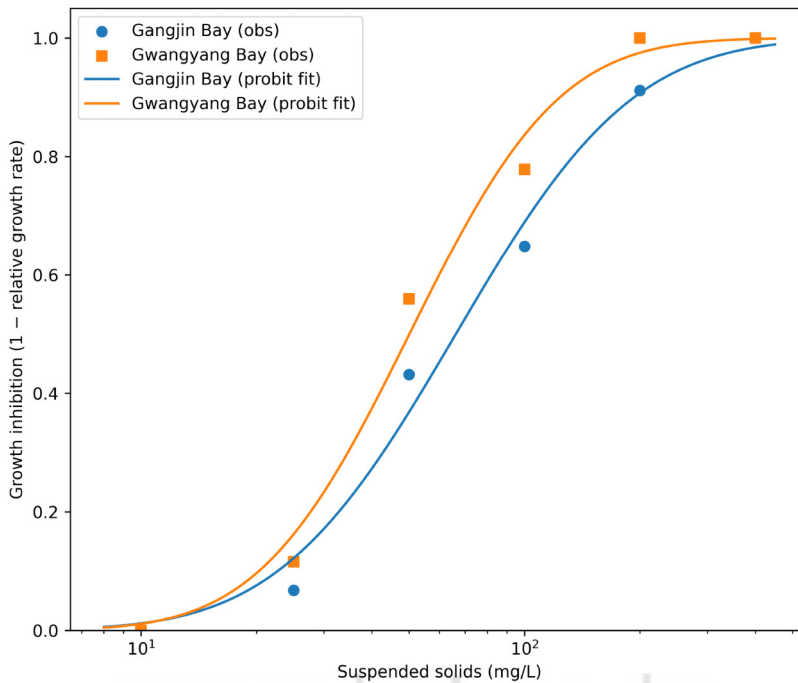


Figure 1. Concentration-response relationships for growth inhibition of the marine diatom *S. costatum* exposed to suspended solids derived from dredged sediments collected from Gangjin Bay and Gwangyang Bay.

또한 광양만에서 각각 26.88 mg/kg와 22.11 mg/kg로 측정되어, 강진만의 21.88 mg/kg 및 21.19 mg/kg에 비해 다소 높은 수준을 보였다. 반면, 크롬(Cr), 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(Pb)의 농도는 두 해역 간 큰 차이를 보이지 않았다. 카드뮴은 두 지역 모두에서 1 mg/kg 미만의 낮은 농도로 검출되었으며, 비소 또한 유사한 농도 범위 내에서 측정되었다. 코발트(Co)의 경우 강진만 퇴적물 시료에서 13.42 mg/kg로 측정되어 광양만의 9.45 mg/kg보다 다소 높은 값을 보였다. 망간(Mn)은 두 해역 모두에서 상대적으로 높은 농도로 검출되었으며, 강진만에서는 588.55 mg/kg, 광양만에서는 539.31 mg/kg로 나타났다(Table 3). 한편, 금속 분석 결과의 신뢰성을 확인하기 위해 인증표준물질(MESS-4, NRC, Canada)을 이용한 품질관리 분석을 수행하였으며, 그 결과는 Table 4에 제시하였다. 인증표준물질 분석 결과, Co와 Mn의 회수율은 74-77% 수준으로, EPA 금속분석 품질관리 범위를 참고할 때 분석 결과의 활용은 가능하나 해석 시 주의가 필요한 수준으로 판단되었다. 따라서 해당 항목은 절대적 정량값의 판정보다는 해역 간 상대적 경향 비교를 위한 참고자료로 활용하였다.

#### IV. 고찰

준설 및 항만 공사 과정에서 발생하는 부유물질은 탁도 상승과 광 투과도 감소를 유발하며, 입자 자체의 물리적 자극(예: 세포·아가미 표면 접촉, 입자 부착)까지 포함한 복합 경로로 수생 생물에 영향을 줄 수 있다(Newcombe and Jensen, 1996; Wilber and Clarke, 2001; Cloern et al., 2014). 국내·외 준설 관련 환경영향평가에서는 부유물질 농도 또는 탁도 변화가 핵심 관리지표로 활용되는 경우가 많으나, 특정 농도에서 실제 생물학적 반응이 어느 수준으로 나타나는지에 대한 정량적 근거는 제한적으로 제시되어 왔다. 이러한 한계를 보완하기 위해, 물리·화학적 지표만으로 생물학적 반응을 직접 연결하기 어려운 경우 독성시험 자료를 보조 근거로 포함하여 종합적으로 해석하는 통합평가 방법이 지속적으로 제안되어 왔다(Chapman and Hollert, 2006; Birch, 2018). 이러한 점에서 본 연구는 준설 기원 SS의 단순 농도 증가를 제시하는 데 그치지 않고, 1차

생산자 수준에서 실제 생물반응을 정량화한 농도-반응 자료를 제시함으로써 기존 환경영향평가의 해석 근거를 보완하고자 하였다.

해양환경영향평가에서는 공사 전·후 suspended solids (SS) 농도 변화가 주요 판단 지표로 활용되어 왔으나, 농도 변화 자체만으로는 실제 생물학적 반응을 정량적으로 설명하기 어려워 영향이 정성적으로 언급되는 경우가 많았다(Chapman and Hollert, 2006). 본 연구는 해산 규조류 *S. costatum*에 대한 성장저해시험을 통해 SS 농도-반응 관계를 도출하고, EC<sub>50</sub>, NOEC 및 LOEC와 같은 독성지표를 함께 제시함으로써, 기존의 SS 농도 중심 평가를 보완할 수 있는 정량적 생물반응 자료를 제공하였다. 특히 EC<sub>50</sub>은 농도-반응 자료 전체를 반영하는 지표로서, 단일 농도 또는 최대 농도 비교보다 생물 반응을 곡선 수준에서 종합적으로 해석하는데 유리하다(Cairns and Mount, 1990). 또한 선행연구에 따르면 준설 작업 인근에서는 수십-수백 mg/L 수준의 SS 노출이 보고된 사례가 제시되어 왔으며(Todd et al., 2015; Hitchcock and Bell, 2004), 본 연구의 시험 농도 범위(10-400 mg/L)는 이러한 현장 근거리 노출 가능 범위를 포괄하여 농도-반응 관계를 도출하기 위한 설정으로 이해될 수 있다. 본 연구에서 도출된 EC<sub>50</sub> 범위(50.1-66.2 mg/L)는 선행연구에서 보고된 준설 작업 인근의 수십-수백 mg/L 수준의 SS 노출 범위 안에 위치하므로, 실제 공사 시 예측되는 부유물질 농도와 비교하여 1차 생산자 수준의 생물영향 가능성을 검토하는 참고자료로 활용될 수 있다. 더불어 준설 유래 퇴적물 노출 조건은 현장에서 시간적·공간적으로 변동할 수 있으므로(Jones et al., 2016), 본 연구에서 제시한 독성지표는 공사 중 예측되는 SS 농도 범위와 비교하여 잠재적 생물학적 반응 가능성을 검토하는 참고자료로 활용될 수 있다. 다만 본 연구에서 제시한 EC<sub>50</sub>은 72시간 단기간 노출 조건에서 도출된 농도-반응 지표로서, 현장 생태계의 장기 영향을 직접 판단하는 기준값이라기보다, 준설 시 예측되는 SS 농도 범위와 비교하여 생물학적 반응 가능성을 검토하는 참고지표로 해석하는 것이 적절하다. 따라서 본 연구의 독성지표는 관리기준을 직접 제안하기 위한 값이라기보다, 기존의 SS 농도 또는 확산 범위 중심 평가에 생물반응 정보를 추가하여 환

경영향평가의 해석 근거를 보완하는 정량적 자료로서 의미를 가진다.

부유물질의 기원물질인 해저퇴적물은 다양한 금속 성분과 유기물질을 포함하고 있으며, 준설과 같은 물리적 교란에 의해 재부유될 경우 이러한 성분들이 수중에 노출되어 생물학적 반응에 영향을 미칠 수 있다 (Luoma and Rainbow, 2008). 또한 재부유된 입자에 흡착된 금속은 입자 자체의 물리적 영향과 함께 부유물질의 잠재 독성 특성을 형성하는 화학적 배경요인으로 작용할 수 있으며, 재부유 과정에서 오염물질의 이동성과 이용 가능성이 변화하고 독성 반응이 나타날 수 있음이 보고된 바 있다 (Fetters et al., 2016; de Freitas et al., 2019). 본 연구의 해저퇴적물 분석 결과, 두 해역 시료는 물리·화학적 특성과 금속 성상에서 차이를 보였으며, 이러한 차이는 해역별 퇴적환경과 배경 오염 특성이 서로 다를 수 있음을 시사한다. 특히 광양만 시료는 강진만에 비해 보다 세립하고 환원적인 퇴적환경 특성을 보여, 동일한 SS 농도 조건에서도 입자 특성에 따른 물리적 영향과 퇴적물 성상에 따른 화학적 배경 영향이 상대적으로 더 크게 작용하였을 가능성이 있다. 한편 금속 총농도는 전반적으로 국내 해양환경기준의 관리기준 이하였고, 한반도 연안 퇴적물의 배경농도와 비교하였을 때에도 크게 벗어나지 않는 수준으로 나타났다 (Woo et al., 2019). 또한 Purbonegoro et al. (2018)은 해양구조류를 대상으로 퇴적물 오염 수준을 TEL/PEL과 비교하고 성장저해 반응을 함께 해석한 바 있어, 본 연구와 같이 퇴적물 성상과 구조류 반응을 연계하여 해석하는 접근의 타당성을 뒷받침한다. 이러한 점을 종합하면 본 연구의 퇴적물 물리·화학적 특성 및 금속 분석 결과는 구조류 성장저해를 직접 설명하는 고농도 오염 수준으로 단정하기보다, 해역별 배경 오염 수준과 퇴적물 특성 차이를 해석하기 위한 보조 자료로 이해하는 것이 적절하다. 특히 광양만은 산업시설과 항만 활동의 영향을 받는 해역으로 보고된 바 있어 (Jeong et al., 2020), 본 연구에서 수행한 금속 분석은 이러한 배경농도 차이를 해석하는 데 필요한 자료로 판단된다. 한편, 광양만 퇴적물 시료에서 Li 농도가 상대적으로 높게 나타났으나, 본 연구의 분석은 퇴적물 총농도 기반 비교이므로 이 차이는 직접적인 독성 영향

보다는, 입도 차이와 연관된 퇴적물의 광물학적 특성 차이에 기인한 것으로 판단된다. Li는 산업적 이용 확대와 함께 수환경에서 관심이 증가하고 있는 신형 금속성 오염물질로 논의되고 있으므로 (Bolan et al., 2021; Mrozik et al., 2021; Kang et al., 2024; Markich et al., 2025), 향후에는 광물학적 배경과 더불어 산업적 영향 가능성도 함께 검토할 필요가 있다. 또한 선행연구에 따르면 항만 개발, 산업단지 조성, 물류 및 제조시설이 인접한 해역에서는 퇴적물 내 금속 농도가 상대적으로 높거나 공간적 이질성이 크게 나타나는 경향이 보고되어 왔다 (Hyun et al., 2003; Jung et al., 2020). 한편, 개별 금속 성분과 구조류 성장저해 간의 관계는 금속의 화학적 형태, 입자와의 결합 특성, 그리고 생물의 생리적 상태 등 다양한 요인에 의해 복합적으로 조절되는 것으로 알려져 있다 (Sunda and Huntsman, 1998; Franklin et al., 2002). 이러한 점에서 본 연구의 퇴적물 금속 성상 분석 결과는 특정 금속의 직접적인 독성 효과를 입증하기 위한 자료라기보다, 부유물질 독성 반응을 이해하기 위한 환경적 배경 정보를 제공하는 데 의의가 있다.

본 연구는 준설로 인해 발생할 수 있는 부유물질에 노출된 해산구조류의 성장 반응을 평가하여, 부유물질 농도와 생물학적 반응 간의 관계를 정량적으로 제시하였다. 기존 국내 연구가 부유물질의 영향 범위 또는 임계농도에 대한 고찰과 방법론 정리에 주로 초점을 두었다면 (Park et al., 2022; Yoon et al., 2022), 본 연구는 실제 국내 연안 퇴적물 유래 부유물질을 대상으로 해산구조류 *S. costatum*의 농도-반응 관계와  $EC_{50}$ , NOEC, LOEC를 제시하였다는 점에서 차별성이 있다. 이를 통해 기존 환경영향평가에서 주로 활용되어 온 부유물질 농도 변화 중심의 평가에 비해, 생물학적 반응을 함께 고려할 수 있는 해석의 가능성을 제시하였다. 다만 부유물질에 대한 생물학적 반응은 농도 요인뿐만 아니라, 퇴적물의 화학적 성상, 금속의 결합 형태, 그리고 해역별 지화학적 환경에 따라 달라질 수 있으며 (Zhang et al., 2014), 이러한 점에서 부유물질 영향에 대한 환경영향평가는 부유물질 농도의 절대적인 증가 여부만을 기준으로 판단하기보다는, 대상 해역의 배경 환경과 특성을 함께 고려한 해석이 필요하다. 상대적으로 인위적 영향이 제한적인 해역에서는 단기간의 부유물질

노출에 따른 생물학적 반응이 전체 생태계에 미치는 영향이 제한적일 수 있는 반면, 산업 활동과 항만 개발의 누적 영향을 받은 해역에서는 동일한 수준의 부유물질 노출이라 하더라도 보다 민감한 생물학적 반응이 나타날 가능성을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 제시한 조류 성장 반응 기반 독성 평가는 이러한 해역별 특성을 반영한 영향 해석을 수행하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 준설 및 항만 개발 사업에 대한 환경영향평가 과정에서 부유물질 영향 평가의 합리성과 과학성을 보완하는 데 기여할 것으로 기대된다.

## V. 결론

본 연구에서는 준설로 인해 발생할 수 있는 부유물질에 노출된 해산규조류(*S. costatum*)의 성장 반응을 평가하여, 부유물질 농도와 생물학적 반응 간의 관계를 정량적으로 제시하였다. 강진만과 광양만에서 채취한 해저퇴적물 유래 부유물질을 대상으로 성장 저해 시험을 수행한 결과, 두 해역 모두에서 부유물질 농도 증가에 따라 조류의 성장 저해가 관찰되었으며, probit 분석을 통해 산출된 EC<sub>50</sub> 값은 해역별로 차이를 나타냈다. 본 연구에서 제시한 EC<sub>50</sub>, NOEC, LOEC와 같은 독성지표는 준설 공사 과정에서 예측되는 부유물질 농도 범위와 비교함으로써, 부유물질 노출에 따른 생물학적 반응 가능성을 보다 체계적으로 검토하는 데 활용될 수 있다. 이는 기존 환경영향평가에서 주로 농도 변화 중심으로 이루어지던 평가 방식에 비해, 생물학적 반응을 함께 고려할 수 있는 정량적 해석의 가능성을 제시한다.

한편, 부유물질에 대한 생물학적 반응은 농도 요인 뿐만 아니라 퇴적물의 화학적 성상, 금속의 결합 형태, 그리고 해역별 환경 조건에 따라 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서 도출된 독성지표는 일반적인 기준 값으로 해석하기보다는, 대상 해역의 배경 환경과 특성을 고려한 환경영향평가 과정에서 생물학적 반응을 판단하기 위한 참고자료로 활용하는 것이 바람직하다. 종합하면, 본 연구에서 제시한 농도-반응 관계와 독성지표는 준설 공사 중 예측되는 SS 농도 범위와 생물반응을 연결하는 정량자료로 활용될 수 있다. 이는 관리

기준을 직접 제시하기 위한 것이 아니라, 기존의 부유물질 농도 중심 환경영향평가를 보완하는 생물반응 근거를 제공한다는 점에서 의의가 있다.

## 사사

본 연구는 2025년 환경부 주관 「화학물질 안전관리 전문 인력 양성사업」의 화학물질 특성화대학원 지원 사업을 통한 성과물임을 밝힙니다.

## References

- 강지운, 김우중, 양동효, 이정준, 허상열, 이권섭, 김성준. (2024). 이차전지 제조공정에서 배출되는 중금속 물질 (Li, Ni, Co, Mn) 의 생물노출평가. 한국도시환경학회지, 24(3), 77-85.
- Kang, J. U., Kim, W. J., Yang, D. H., Lee, J. J., Heo, S. Y., Lee, K. S., & Kim, S. J. (2024). Biological exposure assessment of heavy metals (Li, Ni, Co, Mn) emissions from secondary battery manufacturing processes. *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, 24(3), 77-85. <https://doi.org/10.33768/ksue.2024.24.3.77>
- 김영태, 김귀영, 전경암, 이대인, 유준, 김희정, 김인철, 엄기혁. (2013). 연안준설 사업에 따른 해양수질 및 퇴적물 영향평가 개선 방안. 해양환경안전학회지, 19(2), 119-128.
- Kim, Y. T., Kim, G. Y., Jeon, K. A., Lee, D. I., Yu, J., Kim, H. J., Kim, I. C., & Eom, K. H. (2013). Improvements in the environmental impact assessment on seawater and sediment qualities for coastal dredging projects. *Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety*, 19(2), 119-128. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2013.19.2.119>
- 맹준호, 김선동, 박창욱, 성찬경. (2021). 생물검정법을 통한 부유사의 해양생물 영향평가. 한국해양환경.에너지학회지, 24(4), 300-311.
- Maeng, J. H., Kim, S. D., Park, C. W., & Sung, C. G. (2021). Evaluation of marine organisms effects

- of suspended sediment through the bioassay. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 24(4), 300-311. <https://doi.org/10.7846/jkosmee.2021.24.4.300>
- 박신영, 권인하, 이정현, 윤서준, 이창근, 김종성. (2022). 부유물질에 의한 해양생물의 생물학적 영향범위 및 임계농도 고찰. *한국해양환경·에너지학회지*, 25(1), 29-40.
- Park, S. Y., Kwon, I., Lee, J., Yoon, S. J., Lee, C., & Khim, J. S. (2022). Range of the Biological Effects and Threshold Concentrations on Marine Organisms by Suspended Solids. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 25(1), 29-40. <https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2022.25.1.29>
- 석형주, 김영윤, 김태원, 황철희, 손민호, 최기영, 김창준. (2022). 폐기물 배출해역 퇴적물의 생물학적 독성평가 연구. *해양환경안전학회지*, 28(1), 1-9.
- Seok, H. J., Kim, Y. R., Kim, T. W., Hwang, C. H., Son, M. H., Choi, K. Y., & Kim, C. J. (2022). Biological toxicity assessment of sediment at an ocean dumping site in Korea. *Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety*, 28(1), 1-9. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2022.28.1.001>
- 우준식, 이효진, 박종규, 박경규, 조동진, 장동준, 박소정, 최만식, 유정규. (2019). 한반도 연안 퇴적물의 중금속 배경농도 및 오염도 평가. *바다(The Sea)*, 24(1), 64-78
- Woo, J. S., Lee, H. J., Park, J. K., Park, K. G., Cho, D. J., Jang, D. J., Park, S. J., Choi, M. S., & Yoo, J. K. (2019). Background concentration and contamination assessment of heavy metals in Korean coastal sediments. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography*, 24(1), 64-78. <https://doi.org/10.7850/jkso.2019.24.1.064>
- 윤성진, 박경수. (2011). 부유물질증가에 따른 저서성 해양생물의 독성평가에 관한 연구. *한국환경과학회지*, 20(11), 1383-1394.
- Yoon, S. J., & Park, G. S. (2011). Ecotoxicological effects of increased suspended solids on marine benthic organism. *Journal of Environmental Sciences*, 20(11), 1383-1394. <https://doi.org/10.5322/JES.2011.20.11.1383>
- 윤서준, 박신영, 이창근, 김종성. (2022). 해양생물에 대한 부유물질 영향평가 방법 및 임계농도에 대한 고찰. *한국해양환경·에너지학회지*, 25(2), 88-102.
- Yoon, S. J., Park, S. Y., Lee, C. K., & Khim, J. S. (2022). A study on the evaluation method of impact of suspended solids and threshold concentration on marine life. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 25(2), 88-102. <https://doi.org/10.7846/jkosmee.2022.25.2.88>
- 이지왕, 맹준호, 조광우, 양권열, 김영섭. (2003). 항만공사시 부유토사의 거동 특성에 관한 연구(II) - 매립 및 준설공사시 -. *한국해양공학학회지*, 6(2), 46-53.
- Lee, J. W., Maeng, J. H., Cho, K. W., Yang, G. W., & Kim, Y. S. (2003). The movement characteristics of suspended solid (SS) in harbor construction (II): The landfill construction and the grab dredging construction. *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, 6(2), 46-53.
- 이대인, 박달수, 엄기혁, 김귀영, 조현서, 김종규, 서영교, 백근욱. (2009). 연안준설 및 준설토 해양투기 해양환경평가 개선방안. *환경영향평가학회지*, 18(3), 131-141.
- Lee, D. I., Park, D. S., Eom, K. H., Kim, G. Y., Cho, H. S., Kim, J. K., Seo, Y. K., & Baeck, G. W. (2009). Improvement of the marine environmental assessment for dredging and ocean disposal of coastal sediment in Korea. *Journal of Environmental Impact Assessment*, 18(3), 131-141.
- 이경선. (2015). 부유물질이 패류, 어류 및 해조류에 미치는 생물학적 영향에 관한 고찰. *해양환경안전학회지*, 21(1), 109-118.
- Lee, K. S. (2015). Review on the biological effects of suspended solids on shellfish, fish, and seaweed.

- Journal of the Korea Society of Marine Environment & Safety*, 21(1), 109-118. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.1.109>
- 정혜령, 최진영, 나공태. (2020) 광양만 내 도로축적퇴적물 및 해양퇴적물의 금속 오염평가. 바다: 한국해양학회지, 25(2), 42-53.
- Jung, H. R., Choi, J. Y., & Ra, K. T. (2020). Assessment of Metal Pollution of Road-Deposited Sediments and Marine Sediments Around Gwangyang Bay, Korea. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography*, 25(2), 42-53. <https://doi.org/10.7850/JKSO.2020.25.2.042>
- 현상민, 이태희, 최진성, 최동립, 우한준. (2003) 광양만 및 여수해만 표층퇴적물의 지화학적 특성과 중금속 오염. 바다: 한국해양학회지, 8(4), 380-391.
- Hyun, S. M., Lee, T. H., Choi, J. S., Choi, D. L., & Woo, H. J. (2003). Geochemical Characteristics and Heavy Metal Pollutions in the Surface Sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea. *The Sea: Journal of the Korean Society of Oceanography*, 8(4), 380-391.
- 해양수산부. (2020). 제4차(2021~2030) 전국 항만기본계획.
- 해양수산부. (2023). 해양퇴적물공정시험기준 제1항 입도(Gravel, Sand, Silt & Clay Percent) ~ 제19항 리튬(Lithium, Li). 18-77.
- 해양수산부. (2023). 해양생물공정시험기준 제20항 해산규조류(*Skeletonema costatum*)를 이용한 해양생태독성 시험방법. 136-144.
- Birch, G. F. (2018). A review of chemical-based sediment quality assessment methodologies for the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 133, 218-232. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.05.039>
- Bolan, N., Hoang, S. A., Tanveer, M., Wang, L., Bolan, S., Sooriyakumar, P., Robinson, B., Wijesekara, H., Wijesooriya, M., Keerthanam, S., Vithanage, M., Markert, B., Fränze, S., Wünschmann, S., Sarkar, B., Vinu, A., Kirkham, M. B., Siddique, K. H. M., & Rinklebe, J. (2021). From mine to mind and mobiles – Lithium contamination and its risk management. *Environmental Pollution*, 290, 118067. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118067>
- Cairns, J. J., & Mount, D. I. (1990). Aquatic toxicology. Part 2. *Environmental Science & Technology*, 24(2), 154-161. <https://doi.org/10.1021/es00072a001>
- Chapman, P. M., & Hollert, H. (2006). Should the sediment quality triad become a tetrad, a pentad, or possibly even a hexad?. *Journal of Soils and Sediments*, 6(1), 4-8. <https://doi.org/10.1065/jss.2006.01.152>
- Cloern, J. E., Foster, S. Q., & Kleckner, A. E. (2014). Phytoplankton primary production in the world's estuarine-coastal ecosystems. *Biogeosciences*, 11(9), 2477-2501. <https://doi.org/10.5194/bg-11-2477-2014>
- De Freitas, A. R., Rodrigues, A. P. de C., Monte, C. do N., Freire, A. S., Santelli, R. E., Machado, W., & Sabadini-Santos, E. (2019). Increase in the bioavailability of trace metals after sediment resuspension. *SN Applied Sciences*, 1, 1288. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1276-8>
- Eggleton, J., & Thomas, K. V. (2004). A review of factors affecting the release and bioavailability of contaminants during sediment disturbance events. *Environment International*, 30(7), 973-980. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.03.001>
- Erfemeijer, P. L. A., & Lewis III, R. R. (2006). Environmental impacts of dredging on seagrasses: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 52(12), 1553-1572. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.09.006>
- Fetters, K. M., Costello, D. M., Hammerschmidt, C. R., & Burton Jr, G. A. (2016). Toxicological effects of short-term resuspension and metal contamination in Great Lakes sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(3), 676-686. <https://doi.org/10.1002/etc.3225>
- Franklin, N. M., Stauber, J. L., Lim, R. P., & Petocz, P.

- (2002). Toxicity of metal mixtures to a tropical freshwater alga (*Chlorella* sp.): the effect of interactions between copper, cadmium, and zinc on metal cell binding and uptake. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(11), 2412-2422. <https://doi.org/10.1002/etc.5620211121>
- Guenther, M., & Bozelli, R. L. (2004). Effects of inorganic turbidity on the phytoplankton of an Amazonian Lake impacted by bauxite tailings. *Hydrobiologia*, 511, 151-159. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000014095.47409.39>
- Hitchcock, D. R., & Bell, S. (2004). Physical impacts of marine aggregate dredging on seabed resources in coastal deposits. *Journal of Coastal Research*, 20(1), 101-114. [https://doi.org/10.2112/1551-5036\(2004\)20%5B101:PIOMAD%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.2112/1551-5036(2004)20%5B101:PIOMAD%5D2.0.CO;2)
- Huang, B., Li, Z., Huang, J., Guo, L., Nie, X., Wang, Y., & Zeng, G. (2020). Effects of soil particle size on the adsorption, distribution, and migration behaviors of heavy metal (loid) s in soil: A review. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(8), 1596-1615. <https://doi.org/10.1039/D0EM00189A>
- Islam, M. S., & Tanaka, M. (2004). Impacts of pollution on coastal and marine ecosystems including coastal and marine fisheries: A review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 48(7-8), 624-649. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2003.12.004>
- ISO (2006). Water quality — Marine algal growth inhibition test with *Skeletonema costatum* and *Phaeodactylum tricornerutum*. ISO 10253.
- Jones, R., Bessell-Browne, P., Fisher, R., Klonowski, W., & Slivkoff, M. (2016). Assessing the impacts of sediments from dredging on corals. *Marine Pollution Bulletin*, 102(1), 9-29. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.10.049>
- Liu, C., Zhang, L., & Huang, L. (2013). Effects of suspended particles on the growth of two dominant phytoplankton species of Bohai Bay, China. *Marine Pollution Bulletin*, 74(1), 220-224. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.06.054>
- Luoma, S. N., & Rainbow, P. S. (2008). Metal contamination in aquatic environments: science and lateral management (Vol. 126). Cambridge: Cambridge University Press.
- Markich, S. J., Hall, J. P., Dorsmann J. M., & Brown, P. L. (2025). Lithium toxicity to marine organisms: Establishing water quality guideline values to protect temperate and tropical marine life. *Chemosphere*, 383, 144487. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144487>
- Mrozik, W., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., & Christensen, P. (2021). Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 14, 6099-6121. <https://doi.org/10.1039/D1EE00691F>
- Munawar, M. U., & Munawar, I. F. (1987). Phytoplankton bioassays for evaluating toxicity of in situ sediment contaminants. *Hydrobiologia*, 149(1), 87-105. <https://doi.org/10.1007/BF00048650>
- Newcombe, C. P., & Jensen, J. O. (1996). Channel suspended sediment and fisheries: a synthesis for quantitative assessment of risk and impact. *North American Journal of Fisheries Management*, 16(4), 693-727. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(1996\)016<0693:CSSAFA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(1996)016<0693:CSSAFA>2.3.CO;2)
- Purbonegoro, T., Cordova, M. R., Puspitasari, R., and Hindarti, D. (2018). Inhibition effects of Jakarta Bay sediments to the growth of marine diatom (*Chaetoceros gracilis*). *Bulletin of the Marine Geology*, 33(2), 77-78. <https://doi.org/10.32693/bomg.33.2.2018.547>
- Quinn, J. M., Davies-Colley, R. J., Hickey, C. W., Vickers, M. L., & Ryan, P. A. (1992). Effects of clay discharges on streams: 2. Benthic invertebrates. *Hydrobiologia*, 248(3), 235-247. <https://doi.org/10.1007/BF00006150>
- Sipelgas, L. (2011). Monitoring the concentration, distribution, origin and size of suspended particles in the

- water column during harbour dredging in Pakri Bay, the Gulf of Finland. *Boreal Environment Research*, 16, 42-48.
- Sunda, W. G., & Huntsman, S. A. (1998). Processes regulating cellular metal accumulation and physiological effects: Phytoplankton as model systems. *Science of the Total Environment*, 219(2-3), 165-181. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00226-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00226-5)
- Swift, T. J., Perez-Losada, J., Schladow, S. G., Reuter, J. E., Jassby, A. D., & Goldman, C. R. (2006). Water clarity modeling in Lake Tahoe: Linking suspended matter characteristics to Secchi depth. *Aquatic Sciences*, 68(1), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00027-005-0798-x>
- Todd, V. L. G., Todd, I. B., Gardiner, J. C., Morrin, E. C. N., MacPherson, N. A., DiMarzio, N. A., & Thomsen, F. (2015). A review of impacts of marine dredging activities on marine mammals. *ICES Journal of Marine Science*, 72(2), 328-340. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsu187>
- Waters, T. F. (1995). Sediment in streams: sources, biological effects, and control. *American Fisheries Society Monograph*, Bethesda, Maryland, 7, 79-118.
- Wilber, D. H., & Clarke, D. G. (2001). Biological effects of suspended sediments: a review of suspended sediment impacts on fish and shellfish with relation to dredging activities in estuaries. *North American Journal of Fisheries Management*, 21(4), 855-875. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(2001\)021<0855:BEOSSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(2001)021<0855:BEOSSA>2.0.CO;2)
- Yang, D., Zheng, Z., Liu, H., Zhu, H., Ke, X., Xu, Y., Wu, D., & Sun, Y. (2008). Layered titanate nanofibers as efficient adsorbents for removal of toxic radioactive and heavy metal ions from water. *The Journal of Physical Chemistry C*, 112(42), 16275-16280. <https://doi.org/10.1021/jp803826g>
- Zeng, J., Han, G., Zhang, S., & Zhang, Q. (2022). Suspended sediments quality assessment in a coastal river: identification of potentially toxic elements. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(7), 4293. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074293>
- Zhang, C., Yu, Z. G., Zeng, G. M., Jiang, M., Yang, Z. Z., Cui, F., Zhu, M. Y., Shen, L. Q., & Hu, L. (2014). Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 73, 270-281. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.010>
- Zheng, L., Yuan, Y., & Zhou, C. Y. (2015). Acute Toxicological Effects of Suspended Solids on the *Skeletonema costatum*. *Applied Mechanics and Materials*, 768, 10-14. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.768.10>