

해양 공사에서 발생하는 부유사 확산 현황 분석에 관한 연구

이효진 · 윤한삼* · 정용현†

국립수산과학원(연구사) · *†국립부경대학교(교수)

A Study on the Analysis of Suspended Solids Dispersion during Marine Construction Activities

Hyo-Jin LEE · Han-Sam YOON* · Yong-Hyun CHUNG†

National Institute of Fisheries Science(senior researcher) · *†Pukyong National University(professor)

Abstract

This study analyzed the current status of 84 marine environmental impact assessment reports for development projects from 2022 to 2025. Key parameters, including construction volume, generation of suspended solids (SS), the spatial range(area) of SS diffusion under various marine conditions, applicable numerical models, and primary input conditions, were evaluated. Furthermore, the relationships between construction volume, SS generation, and the calculated diffusion area were compared using a weighted concentration threshold of 1 mg/L. The results indicate that while the total amount of SS generally increases with construction volume, this relationship is not consistent across different sea areas. The ratio (A/B) of average construction volume (A) to SS generation (B) was highest in the East Sea (137.8), followed by the South Sea (121.3) and the West Sea (101.6), demonstrating that SS generation and diffusion area are not strictly proportional to construction volume. Finally, no significant correlations were observed between physical marine factors—such as the tidal spring range, tidal form number, and observed maximum surface current velocity during spring tides—and the mean background SS concentration.

Key words : Marine development project, Sea area utilization consultation and impact assessment, Marine environmental condition, Suspended solids diffusion

I. 서론

일반적으로 해양 매립이나 준설, 방파제 설치 공사 등 해양 공사 시 다량의 현탁물질이 발생하며, 공사 작업별로 부유사(SS, Suspended Solids) 발생량도 다르고 대규모 일수록 발생량도 많다. 아울러 부유사로 인한 영향 범위도 공사 규모 및 부유사 농도와 밀접한 연관을 갖는 것으로 알려져 있다(Kang et al., 2007). 즉, 공사 규모, 부유사

발생량, 부유사 확산 면적은 그 해역의 해양환경 물리특성에 따라 다소 달라질 수 있지만, 대부분 비례관계를 갖고 있다.

Kang et al.(2009)은 항만공사 사례에서 부유토사 발생원에서 멀어질수록 농도가 감소하며, 발생량/공사물량이 많을수록 같은 기준농도(예: 1mg/L)에 도달하는 해역의 면적과 거리가 늘어나는 것을 확인하였다. 또한 Kim et al.(2000)은 부유사의 해역 내 확산 범위는 단순히 발생량뿐만 아니

† Corresponding author : 051-629-6543, chungyh@pknu.ac.kr

* 이 논문은 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2025년)에 의해 연구되었음.

라 해수유동(조류, 바람), 투기·준설 방식, 수질오염방지막 등 저감시설 유무, 현장 해저지형 등 다양한 요인의 영향을 받으나 동일한 해양조건이라면 공사물량이 많을수록(부유물질 배출원이 클수록) 확산영역도 크다고 보고한 바 있다.

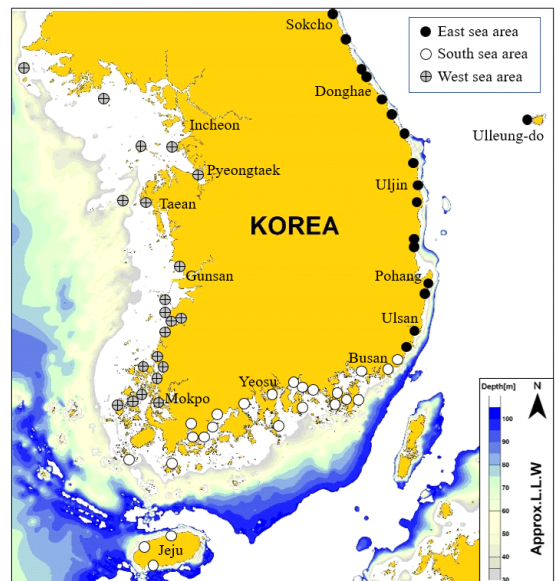
하지만 Jeong et al.(2017)이 2012년부터 2014년까지 해역이용영향평가센터에서 검토된 총 64건의 평가서를 통해 동일 해역에서 유사한 사업 유형임에도 불구하고 부유사 발생량 및 확산 면적이 매우 큰 차이를 보이거나 공사 규모, 부유사 발생량 및 확산 면적 간에 연관성이 나타나지 않는 등 현재 해양이용협의 및 환경영향평가 단계에서 부유사 확산 예측 결과의 재현성 및 신뢰성이 상당히 낮음을 지적한 바 있다. 이는 부유사 발생량 원단위의 임의적 사용, 입경 및 침강 속도의 고려 여부, 수치모델 결과의 검증 과정 미흡 그리고 확산 결과가 사업 규모와 특성을 반영하지 못하는 점 때문이라고 밝히고 있다. 그럼에도 불구하고 부유사 확산은 공유수면 매립과 준설 등 해양개발 사업으로 인한 해양환경영향을 평가하는 해양이용영향평가 제도의 중점 평가사항이며, 피해영향 및 어업피해 조사에서도 보상과 직접적으로 관련된 중요한 평가 수단이다.

현재 대표적인 부유사 확산 예측 방법으로는 현장 조사, 수치 모델링, 실험실 혹은 현장 모형 실험 등이 있다. 이는 해양이용영향평가 및 공사관리 차원에서 필수적이거나, 현재 예측 방식에는 원단위 산정, 수치모델 정확도 등에서 한계가 있고 기존 평가의 부정확성(공사물량·부유물질 산정의 불명확성, 해수유동 반영 부족 등)의 개선이 요구되고 있다(KEI, 2003). 세부적으로 각 평가 과정에 대한 상세 지침이 규정화되어 있지 않고, 현황 조사의 미흡으로 인한 기초 자료의 부실, 국지적인 현장 관측 및 기존 문헌자료의 획일적 사용으로 인한 대상 해역 특성의 대표성 문제, 부유사 발생량 산정 및 침강 속도 등에 대한 고려 여부, 그리고 모델 선정 및 격자 구성, 검증, 예측 과정의 불합리한 수행 등이 개선점으로 제

시된 바 있다.

우리나라에서는 해상 공사 유형에 따라서 공사 규모를 반영하여 해양이용협의 및 환경영향평가 과정에서 공사에 따른 예상 부유사 발생량 산정 및 부유사 확산 수치실험을 요구하고 있다. 하지만 해양이용협의 시 부유사 확산 영향평가에 대한 작성 실태 진단, 문제점 파악 및 개선 방안 강구에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구는 해상 공사 규모, 부유사 발생량 그리고 공사에 따른 확산 면적은 해당 해역의 해양물리환경, 수치실험 수행자의 전문기술 능력 등 다양한 변수에 의해 달라질 수 있는지, 상호 비례관계가 있는지 확인하고자, 2022년부터 2025년까지 [Fig. 1]에 제시된 총 84건의 해양이용협의 및 환경영향평가서를 바탕으로 부유사 확산 요인을 분석하였다. 이는 공사 유형 및 규모, 부유사 발생량, 해양환경 조건 등에 따른 부유사 확산 범위, 적용 수치모형 및 주요 입력 조건 등의 현황을 파악하였으며, 일정 부유사 가중 농도



[Fig. 1] Locations of 84 marine development projects (reclamation, dredging, structure construction, etc.) in coastal areas of Korea covered in this paper.

(1mg/L)를 기준으로 공사 규모, 부유사 발생량 그리고 그 확산 면적 결과 등을 분석하였다.

II. 연구 방법

1. 해상 공사와 부유사 확산

일반적으로 부유물질의 농도와 확산 범위 간에는 물질 농도 기울기에 따른 확산이론인 픽의 제 1법칙(Fick's first law)에 따른다. 이는 물질의 확산 속도(C)가 x 축 방향의 농도 기울기($\partial C/\partial x$)에 비례하며, 확산 계수(D)와 거리의 곱으로 표현된다. 즉, 물질은 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 자연스럽게 확산되며, 이때 확산 속도와 범위는 농도 기울기에 의해 결정됨을 의미한다.

따라서 물질 농도 차이가 클수록 부유물질은 더 활발하게 움직여 넓은 범위로 확산된다. 따라서 해상 공사 시 부유사로 인한 영향 범위는 공사 규모 및 부유사 발생 농도와 밀접한 연관을 갖는다. 공사물량이 많을수록 부유사의 해역 내 확산 범위 및 영향도 증가하지만, 그 상관관계는 공사 내용(공사 유형과 물량, 토사의 특성, 공사 방법 그리고 저감시설 등)과 관련된 복합적 요인에 의해 달라질 수 있다.

다음으로 공사시 부유사 발생 농도가 증가하면 그 부유사가 주변 해역으로 보다 넓게 확산될 가능성이 높다. 실제 해양환경에서는 조류와 해양 파랑 등 해양환경, 부유사 입자 크기 및 침강 속도, 해수교환 환경 변화 등 현장별로 다양한 해양물리적 요인이 복합적으로 작용하고 이들 요인 간 상호작용이 달라 부유사 거동 특성 및 확산 패턴이 차이를 나타낼 것으로 판단된다.

2. 부유사 확산 요인 분석

해상 공사로 인한 부유사 확산 면적(A_{SS}) 결정에 영향을 미치는 요인은 전술한 바와 같이 공사 유형과 물량, 해양환경 조건, 부유물질 특성, 공사 방법 및 저감시설 그리고 해수교환 환경 변화

등 복합적인 요인에 의해 결정된다. 이를 본 연구에서는 다음 식(1)과 같이 새로운 개념으로 정의하였다.

$$A_{SS} = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + eX_5 + fX_6 + \dots \quad (1)$$

여기서, X_1 은 공사 유형(규모, 공종 등)과 공사 물량 등 공사 개요와 관련된 것, X_2 는 공사 현장 주변 해역의 수심, 조차, 해양 파랑 등 해양환경 조건, X_3 은 공사시 발생하는 부유물질의 입자 크기, 밀도, 침강 속도 등의 특성, X_4 는 공사 방법 및 저감조치 등의 여부, X_5 는 해안 지형 특성 등 해수교환 정도와 관련된 것, X_6 는 부유사 확산 예측 방법인 수치모델의 실험 조건을 의미하며, a, b, c, d, e, f 는 0과 1사이 값을 갖는 각 X 에 대한 가중치 상수라고 정의하였다.

식 (1)에 제시된 각 X 에 대한 특징들을 살펴보면, X_1 인 공사 유형과 공사물량은 매립, 준설, 방파제, 호안공사 등 공사 유형에 따라 공사물량이 많을수록 산술적으로 부유물질 발생량도 증가한다. X_2 의 경우 해양환경 조건 중 해수유동(조류, 파랑 등)의 방향과 세기, 해저지형 등이 부유물질 확산 경로와 속도에 큰 영향을 주고 계절에 따라서도 확산 범위가 달라질 수 있다. X_3 의 경우 부유물질의 입자 크기, 밀도, 침강 속도 등 물리화학적 특성이 부유사 확산과 농도 유지에 영향을 미치는데 미세한 부유물질은 오랫동안 수중에 떠 있어 넓은 범위로 확산될 수 있다. X_4 의 경우 공사 방법(매립·준설, 공사 시기 및 기간) 및 저감조치(수질오염방지막 설치 여부 및 위치) 등에 따라 부유사 확산 범위가 달라질 수 있다. X_5 의 경우 폐쇄성 내만, 좁은 수로, 급격한 해저 경사, 조석 간만차 및 조류 속도, 복잡한 해안선 등 지형적 특징은 해역의 해수교환율과 퇴적물 분포 양상에 영향을 미치고 공사로 인한 구조물 설치가 해양 내 해수교환율을 감소시키거나 변화시키

면 부유물질의 확산과 퇴적 양상에 영향을 준다. 마지막으로 X_6 의 경우 부유사 확산 예측 방법인 수치모델의 실험 조건에 의해서 관측치와 모델 예측값의 차이가 발생할 수 있다.

이상의 새로운 개념으로 정의함에 있어서 유의할 점이 있다. 해상 공사로 인한 부유사 확산 범위는 $X_1 \sim X_6$ 의 복합적인 요인에 의해 결정되지만 현재 상황에서는 이들 각각의 차이가 부유사 발생 상황에 어느 정도 관계하는지는 명확하게 알 수 없다. 식에서 단순 합산은 요인 간의 독립성이 완전할 경우에만 성립하지만 그러하지 못한 경우가 많다. 따라서 환경요인을 별개로 취급하기 보다는 해양환경에 영향을 미치는 n 개 요인의 분포를 n 차원 공간에서 검토하는 다변량 해석의 기법을 적용하여 산출하는 것이 이상적인 방법이라 할 수 있다.

또한 동일 해역에서 유사한 규모의 해상 공사 일지라도 부유사 확산 범위가 달라질 수 있다는 것은 $X_1 \sim X_6$ 보다는 0과 1사이 값을 갖는 각 요인 X 에 대한 가중치 상수 a, b, c, d, e, f 에 의한 결과로 발생할 수 있다. 이러한 해석 방법 개발에 대해서는 향후 연구가 필요함을 강조할 수 있다.

3. 부유사 확산 실험 보고서

해상 공사시 발생하는 부유사 발생 상황 및 규모는 전술한 바와 같이 토사 종류와 양, 투입 방법, 수심, 유동, 해저면 상태 등 여러 가지 요인에

기인하나, 이들 각각의 차이가 부유사 발생 상황에 어느 정도 관계하는지는 명확하지 않다. 따라서 부유사 발생에 대해서는 수치모형실험에 의해 어느 정도 예측하는 수밖에 없다(KEI, 2003).

본 연구는 2022년부터 2025년까지 해양이용영향검토기관인 해역이용영향평가센터에서 검토 완료된 사업 평가서 총 84건을 대상으로 해상 공사시 공사물량 대비 부유사 확산 예측 면적에 대한 평가 실태를 분석하였다.

총 84건 사업 평가서의 발행년도는 2022년 6건(7.1%), 2023년 39건(46.4%), 2024년 38건(45.2%), 2025년 1건(1.2%)에 해당하고 해역별로는 동해 20건, 남해 42건, 서해 22건이었으며 각 사업 지점은 [Fig. 1]에 제시된 바와 같다. 또한 사업 유형별로 구분해 보면 연안정비사업(재해, 취약지역 등) 14건(16.7%), 어촌뉴딜사업 관련 21건(25.0%), 골재채취 1건(1.2%), 항만공사(부두, 방파제, 제작장 등) 20건(23.8%), 어항공사 및 정비사업 28건(33.3%)으로 구분된다(<Table 1>).

그리고 평가서는 협의 대상 및 사업 내용에 따라 공유수면 매립, 준설 그리고 방파제와 같은 구조물 설치 사업으로 부유사 발생이 중점 평가 사항인 협의 및 평가서를 중에서 랜덤하게 선택하였다. 평가서 분석 결과, 부유사 발생 주요 공종은 기초굴착, 사석/피복석 투하/제거 및 고르기, 항로/박지 및 항내 준설, 골재채취, 교량 설치, 파일공, 여수토, 가호안 설치 등을 포함하고 있다.

<Table 1> Status of marine development projects by sea presented in the Sea Area Utilization Consultation of this study

Development type	Sea			Total sum
	East	South	West	No. of data / %
Coastal improvement project	7	4	3	14/16.7
Fishing village new deal project	3	10	8	21/25.0
Marine sand mining			1	1/1.2
Harbor construction	4	15	1	20/23.8
Fishing port construction	6	14	8	28/33.3
Total sum(data/%)	20/23.8	42/50.0	22/26.2	84/100

본 연구는 평가서를 공사 유형 및 규모, 부유사 발생량, 해양환경 조건 등에 따른 부유사 확산 범위, 적용 수치모형 및 주요 입력 조건 등 현황 분석하였다. 여기서, 부유사 확산 범위(면적)에 적용된 기준 부유사 가중 농도는 1mg/L를 대상으로 하였다. 실제 부유사 가중 농도에 대한 기준이 지침으로 수립되어 있지 않으나(KEI, 2003) 환경영향평가 실무에서는 '1mg/L'와 같은 환경기준 농도를 기준으로, 공사별 예상 최대 확산 범위를 제시하고 있으며, 민감한 해양생물(예: 갯벌, 어장 등) 보호를 위해 저감조치 필요성을 명시하고 있다. 또한 Jeong et al.(2017)의 연구 결과에서도 부유사 확산 면적을 결정하기 위한 부유사 가중 농도는 해역이나 사업에 따라 다르게 적용되고 있으나 모든 해역에서 1mg/L이 가장 많이 적용된 바 있다. Park et al.(2022)은 부유사가 유영생물에 미치는 생물 영향 연구에서 표영성 어류인 줄농어 성어의 산소소비율이 1mg/L이었고 치사에 치명적인 영향을 미치지 않는 반면 저서성 어류에 비해 부유사에 내성이 없기 때문에 주의가 필요하다고 주장한 바 있다.

한편, 평가서에 일부 항목 data 값이 누락되어

있어 완전한 분석에 한계가 있다고 할지라도 그 경향을 살펴본다는 점에서 누락된 data가 크게 문제가 되지 않는다고 판단하였다.

III. 연구 결과

1. 적용 수치모형 및 실험 조건 실태

해상 공사에 따른 부유사 확산 결과 도출은 일반적으로 수치실험에 기반하기에, 수치실험 모형의 선택, 경계 및 입력 조건의 설정, 검증 절차 등의 신뢰도는 매우 중요한 요인이다. 따라서 평가서에는 수치실험에 대한 세부 내용을 제시하고 있다. 이에 총 84건 사업 평가서의 부유사 확산 실험의 주요 실험 조건 및 입력 자료(수치모형, 조석 경계조건, 격자 크기, 층별 레이어(Layer), 계산 스텝)에 대한 분석 결과를 <Table 2>에 정리하였다.

먼저 부유사 확산 수치실험에 사용된 수치모델은 해역이나 공사 유형에 상관없이 대부분 EFDC(Environmental Fluid Dynamics Code)가 사용되고 있었다.

<Table 2> Current status of numerical experimental conditions and input values for SS diffusion presented in the Sea Area Utilization Consultation of this study

Items		Computational conditions and input values								
Numerical model	EFDC model					Delft3D model			None	
	51(60.7)					24(28.6)			9(10.7)	
Tidal component	4		5		6	Real obs. value			None	
	60(71.4)		14(16.7)		2(2.4)	3(3.6)			5(6.0)	
min.	5	10	15	20	25	30	100	200	None	
	(m)	5(6.0)	46(54.8)	1(1.2)	21(25.0)	1(1.2)	3(3.6)	2(2.4)	1(1.2)	4(4.8)
Mesh	50	100	200	230	300	320	360	400	460	500
	max.	1(1.2)	7(8.3)	13(15.5)	1(1.2)	6(7.1)	1(1.2)	1(1.2)	4(4.8)	1(1.2)
	(m)	600	640	800	1,000	1,280	1,500	2,000	3,000	None
		5(6.0)	6(7.1)	4(4.8)	8(9.5)	5(6.0)	3(3.6)	2(2.4)	1(1.2)	5(6.0)
Layer(ea)	1			3			5		None	
	5(6.0)			11(13.1)			21(25.0)		47(56.0)	
Time step (△t, sec)	0.2	0.4	0.5	0.8	1.0	1.2	2	3	6	None
	1(1.2)	2(2.4)	10(11.9)	1(1.2)	27(32.1)	3(3.6)	9(10.7)	4(4.8)	3(3.6)	24(28.6)

EFDC 모델이 51건(60.7%), 네덜란드 Deltares에서 개발된 Delft3D 모델이 24건(28.6%) 그리고 평가서에 사용 모델이 제시되지 않는 경우도 9건(10.7%)이었다. 그리고 수치실험의 경계조건인 적용 조석 분조는 주요 4대 분조(M_2, S_2, K_1, O_1)만을 사용한 경우는 60건(71.4%), 다음으로 5개 분조(4대 분조+ N_2)를 사용한 경우가 14건(16.7%), 실시간 관측 조위를 적용한 경우가 3건(3.6%)이었다.

다음으로 부유사 확산 실험을 수행함에 있어 수평 및 수직 격자 크기는 부유사가 수평·수직적으로 어느 정도 확산이 되는가를 현실적으로 재현하는가 뿐만 아니라 검증 및 결과를 도출하는 과정에서도 공간적인(수평·수직) 부유사 분포 정도를 나타내는 측면에서 중요하다. 즉, 격자 크기는 매립, 준설, 교량과 같은 구조물 등 해당 공사의 특성(공사 규모 등)에 따라 현장에서의 충분한 공간적 재현이 가능하도록 최소화시킬 필요가 있다. 동일한 입력 변수 조건을 가정한 상태에서, 격자 크기에 따라 예측 결과는 영향을 받는 것으로 알려져 있다(KEI, 2003).

부유사 확산 수치실험에 사용된 해수면 수평 공간에서의 최소 격자의 경우는 10m가 46건(54.8%)으로 가장 많고 20m가 21건(25%), 5m가 5건(6%)의 순으로 나타났다. 또한 최대 격자의 경우는 200m가 13건(15.5%)로 가장 많고 500m가 10건(11.9%), 1000m가 8건(9.5%)의 순이었다. 또한 해수면 수직 공간 격자에 해당하는 층별 레이어(Layer)의 경우 약 56%에 해당하는 47건의 평가서가 적용 수직층을 제시하지 않고 있었다. 다음으로 21건(25%)에서 5개 층, 11건(13.1%)에서 3개 층을 사용하였다. 심지어 5건(6.0%)의 경우에는 1개 층의 수직층을 사용하였는데 대상 공사의 특성이 낮은 수심이라서 수직층 구분이 필요 없는 경우도 있겠으나 이는 사용 모델이 3차원 모델임을 감안할 때 평가서 작성에 다소 이해가 되지 않는 부분에 해당한다.

마지막으로 수치실험 계산 스텝(Time step,

Δt)은 1sec가 27건(32.1%)로 가장 많고 0.5sec가 10건(11.9%), 2sec가 9건(10.7%)의 순으로 나타났다. 그리고 약 28.6%에 해당하는 24건의 평가서에서 적용 계산 스텝을 제시하지 않았다.

이상의 총 84건 사업 평가서의 부유사 확산 수치실험 조건 분석 결과를 정리한다면 ‘EFDC 모델을 이용하여 주요 4대 분조를 경계조건으로 적용하고 수평 최소 격자 10m, 수직의 수심 방향으로 5개 층(Layer), 계산 스텝으로는 1sec를 적용’하는 것이 가장 평균적인 부유사 확산 실험 방법으로 분석되었다. 하지만 이것이 일반적이고 보편적인 설정이라고 판단할 수는 없다.

마지막으로 부유사 확산 실험에서 모델 결과와 현장 관측 자료의 비교를 통한 모델 검증은 매우 중요한 내용이지만 해역별로 검증을 수행한 건수만을 살펴보면 동해의 경우 조위 검증 12건(60.0%), 조류 검증 10건(50.0%)이었으며 남해의 경우 조위 검증 29건(69.1%), 조류 23건(54.8%)이었고 서해의 경우 조위 검증 15건(68.2%), 조류 검증 15건(68.2%)에 해당하였다. 이와 관련된 보다 자세한 내용은 본 연구에서는 다루지 않고 차후 연구과제로 진행하고자 한다.

2. 공사물량과 부유사 확산 범위

부유사 확산 실험에서 가장 기본적인 중요한 요소 중 하나는 부유사 발생량 산정이다. 일반적으로 공사에 따른 부유사 발생량 산정시 부유사 발생 원단위, 공사 물량 그리고 공사 기간 등이 고려된다. 이 중에서 사업 계획 시 공사의 규모와 기간은 명확히 제시되므로, 결국 부유사 발생 원단위가 부유사 발생량을 결정하는데 매우 중요한 요인이 된다. 하지만 KEI(2003)에 따르면 현재 우리나라 연안 공사에 적합한 원단위 산정에 대한 연구가 매우 미흡하여 기존의 원단위를 적용할 수밖에 없는 실정이고 그 적용 근거 및 방법에 대한 문제점이 있음을 지적하고 있다.

<Table 3> Comparison of project construction volumes and amount of SS by sea as presented in the Sea Area Utilization Consultation of this study

Sea	Construction volume(m ³)			Amount of suspended solids(kg/hr)			Ratio (A/B)
	Data(ca)	Range	Mean(A)	Data(ca)	Range	Mean(B)	
East	19	573.0~2,022,911.0	128,532.6	20	20.1~7,544.8	932.9	137.8
South	42	151.0~4,532,244.0	222,835.5	42	1.1~17,037.8	1,837.7	121.3
West	22	1,877.0~896,000.0	97,862.3	22	12.83~3,506.7	962.8	101.6

<Table 3>은 총 84건 사업 평가서에 제시된 해역별 평균 공사물량(A)과 부유사 발생량(B)을 제시하고 그 비율을 정리한 결과이다. 표에서 알 수 있듯이 평균 공사물량(A)은 남해, 동해, 서해의 순으로 많았으며 평균 부유사 발생량(B)은 남해, 서해, 동해의 순으로 나타났다. 평균 공사물량(A)과 부유사 발생량(B)의 비(=A/B)는 동해(137.8), 남해(121.3), 서해(101.6)의 순서로 산정되었는데 이는 공사물량이 많다고 해서 부유사 발생량도 이에 비례하지 않는다는 것을 나타낸다. 이러한 차이는 전술한 바와 같이 부유사 발생 원

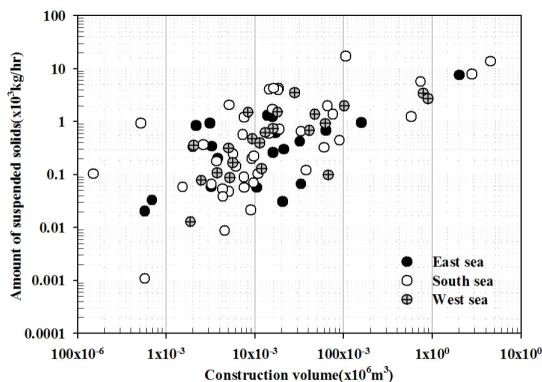
단위, 공사 기간 등에 의해서 차이를 나타낼 수 있기 때문이다.

그리고 <Table 4>는 평가서에 제시된 해상 공사에 따른 수질오염방지막 저감 효율을 반영한 저감 전·후의 해역별 부유사 확산 면적을 나타낸 것이다. 저감전 부유사 확산 면적의 평균값을 살펴보면 남해(2.4183km²), 서해(0.7671km²), 동해(0.1421km²)의 순이었다.

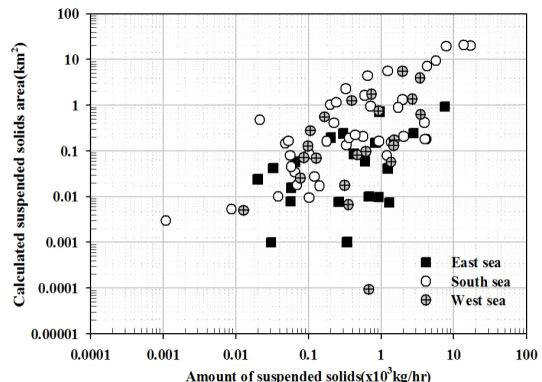
[Fig. 2]에 공사물량과 부유사 발생량과의 관계를 나타내었다. 그림에서 전반적으로 공사물량이 증가할수록 부유사 발생량도 증가하는 경향을

<Table 4> Comparison of calculated suspended solid area before and after reduction by Performance of silt protector(screens)

Sea	Calculated suspended solids area(km ²)						Ratio (B/A,%)
	Before reduction			After reduction			
	Data(ea)	Range	Mean(A)	Data(ea)	Range	Mean(B)	
East	20	0.001~0.922	0.1421	20	0.0005~0.630	0.0750	52.78
South	41	0.003~20.531	2.4183	38	0.001~15.377	1.8203	75.27
West	22	0.0001~5.510	0.7671	20	0.003~2.080	0.3442	44.87



[Fig. 2] Relationship between construction volume and amount of SS generation.



[Fig. 3] Relationship between the amount of SS generation and the calculated SS area.

보이고 있으나 해역별로 그 차이점은 크지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 [Fig. 3]은 부유사 발생량과 확산 면적과의 관계를 나타내었다. 이는 부유사 발생량이 클수록 그 확산 면적도 상대적으로 커지는 경향을 보이고 있으나 동해의 경우 다른 해역과 달리 확산 면적이 다소 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

3. 수질오염방지막 효율

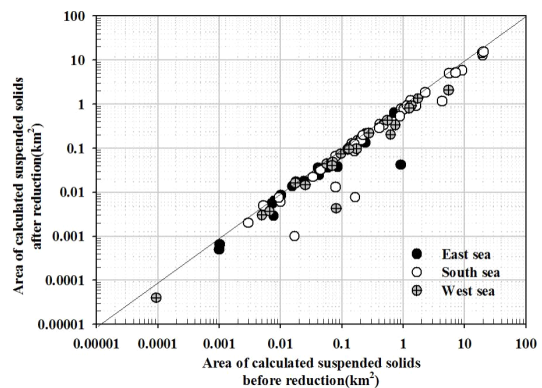
해상 공사에 따른 부유사 확산을 저감하기 위한 대표적인 방법 중 하나는 공사 구역 주변에 수질오염방지막을 설치하는 것이다. MOF(2002)는 수질오염방지막 1개의 효율은 약 20% 이상이나 유속이 30cm/s 이상이 되면 그 효율이 급격히 감소하며, 또한 Maeng et al.(2006)은 수질오염방지막의 종류 및 재질, 관리 정도 등도 수질오염방지막의 효율에 영향을 미치는 것으로 보고한 바 있다.

본 연구의 총 84건 사업 평가서에 제시된 수질오염방지막 저감 효율 현황을 <Table 5>에 나타내었다. 수질오염방지막 저감 효율로 25%를 적용한 사례가 45건(53.6%)으로 가장 많고 다음으로 30%를 적용한 것이 18건(21.4%), 20%를 적용한 것이 7건(8.3%)의 순이었으며 50%를 적용한 사례는 3건(3.6%)에 불과하였다.

기존 Jeong et al.(2017)의 연구에서는 수질오염방지막의 저감 효율은 수질오염방지막의 설치 개수에 따라 25%, 50% 그리고 75%를 적용하고 있었지만, 대부분의 사업들에서 해역이나 공사 유형에 관계없이 50%를 일률적으로 적용하고 있다고 하였다. 이 결과는 공사 유형을 공유수면 매

립, 준설 그리고 구조물 설치 사업에 한정된 경우임에 반해 본 연구는 연안정비사업, 어촌뉴딜사업, 골재채취, 항만공사(부두, 방파제, 제작장 등), 어항공사 및 정비사업 등을 포함하기 때문에 나타나는 차이로 판단하였다.

평가서에 제시된 해상 공사에 따른 수질오염방지막 저감 효율을 반영한 저감전·후 부유사 확산 면적을 [Fig. 4]에 나타내었고, 계산되어진 부유사 확산 면적이 어느 범위에 분포하는지를 살펴보기 위해 <Table 6>과 같이 지점들을 개수로 정리하여 나타내었다. 표에서 저감전 부유사 확산 면적이 1km²보다 크게 나온 경우는 남해의 경우에 12곳(=3+9), 서해의 경우 5곳에 해당하였다. 그림에서 살펴보면 수질오염방지막 효율 저감전·후 부유사 확산 면적은 대체적으로 선형적으로 나타나는 경향을 보이고 있다. 또한 앞서 <Table 4>에서와 같이 해역별로 살펴보면 동해는 약 66.01%,



[Fig. 4] Comparison of SS diffusion area before and after reduction using performance of silt protector(screens).

<Table 5> Performance of silt protector(screens) for each sea presented in the Sea Area Utilization Consultation of this study

Sea	Silt protector ratio(%)								None
	20	25	30	43	43.8	50	56.3	75	
East	1	9	6		1				3
South	5	23	9	1	1	2			1
West	1	13	3		1	1	1	1	1
Total(%)	7(8.3)	45(53.6)	18(21.4)	1(1.2)	3(3.6)	3(3.6)	1(1.2)	1(1.2)	5(6.0)

<Table 6> Cases of SS area calculated before/after reduction by silt protector(screens)

Sea	Calculated suspended solids area(A, km ²)							Sum (ea)
	A ≥ 10	≥ 1	≥ 0.1	≥ 0.01	≥ 0.001	≥ 0.0001	≥ 0.00001	
East	0/0	0/0	6/6	9/8	6/5	0/2	0/0	21/21
South	3/3	9/6	17/17	9/6	3/6	0/0	0/0	41/38
West	0/0	5/2	7/6	7/9	2/3	0/0	1/0	22/20

남해는 약 75.27%, 서해는 약 44.87%만큼 부유사 확산 면적이 감소되었음을 나타내고 있다. 이상의 총 84건 사업 평가서 결과를 통해 적용사례가 가장 많았던 수질오염방지막 저감 효율 25%를 적용할 경우 해상 공사에 따른 부유사 확산 면적은 약 45~75%(평균 57.6%)로 줄어드는 것으로 파악되었다.

4. 해양환경 조건과 부유사 확산 범위

본 연구에는 총 84건 사업 평가서에 제시된 해역별 대조위, 조석형태수, 최강 창조 유속, 현장 관측된 해수에서의 부유사 배경농도와 평가서에 산출된 수질오염방지막 효율 저감전의 부유사 확산 면적과의 상관관계를 살펴보고자 하였다. 평가서에 제시된 대조위와 조석수는 대체로 문헌자료에 근거한 경우가 대부분임에 반해 최강 창조 유속과 현장 부유사 배경농도는 주로 직접 현장에서 관측된 결과에 해당하였다. 일부 data가 누락된 경우는 제외하였다.

결과적으로 [Fig. 5]~[Fig. 8]은 각각 부유사 확산 면적과 대조차, 조석형태수, 대조기 최강 창조 유속, 현장 관측된 해수의 부유사 배경농도와의 관계를 나타내었다. 각 그림에서 가로축은 각각

대조차, 조석형태수, 대조기 최강 창조 유속, 현장 관측된 해수에서의 부유사 배경농도로서 검토 요인에 따라 변하지만 세로축 값은 앞서 <Table 4>에 제시된 바와 같이 저감전 부유사 확산 면적이므로 고정된 값이라 할 수 있다.

먼저, <Table 7>은 해역별 대조차 및 대조기 최강 창조 유속의 범위 및 평균값을 제시하였다. 해역별 대조차의 평균값은 동해의 경우 22.01cm, 남해 219.06cm, 서해 495.49cm이었으며 대조기 최강 창조 유속의 평균값은 동해의 경우 56.78cm/s, 남해 57.92cm/s, 서해 99.44cm/s이었다. 또한 <Table 8>은 해역별 해수면 표·중·저층에서 현장 관측된 해수의 부유사 배경농도의 최대 및 평균값을 정리한 결과로 최대(A) 및 평균(B) 부유사 배경농도는 모두 서해, 남해, 동해의 순으로 나타났다. 최대 부유사 배경농도는 평균치보다 (=A/B) 남해는 2.19배, 동해 1.70배, 서해 1.62배 크게 나타났다.

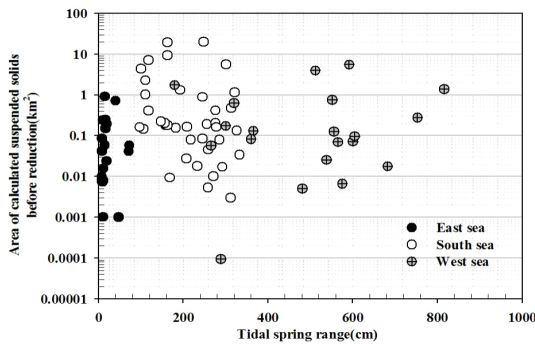
[Fig. 5]는 대조차와 부유사 확산 면적과의 관계를 나타내었다. 간조(저조)와 만조(고조)의 높이 차이인 대조차(Tidal spring range)는 해역의 흐름 특성뿐만 아니라 퇴적물 이송 측면에서 매우 중요한 인자이다. 예로 들어 우리나라 서남해안에

<Table 7> Comparison of marine environmental conditions observed in each sea presented in the Sea Area Utilization Consultation of this study

Sea	Marine environmental conditions					
	Tidal spring range(cm)			Obs. max. Current vel.(cm/s)		
	Data(ea)	Range	Mean	Data(ea)	Range	Mean
East	19	7.4~72.6	22.01	19	16.2~123.8	56.78
South	39	97.0~333.0	219.06	33	16~126.1	57.92
West	20	179.7~816.0	495.49	21	26.7~211.0	99.44

<Table 8> Comparison of maximum and average background SS concentrations observed in each sea presented in the Sea Area Utilization Consultation of this study

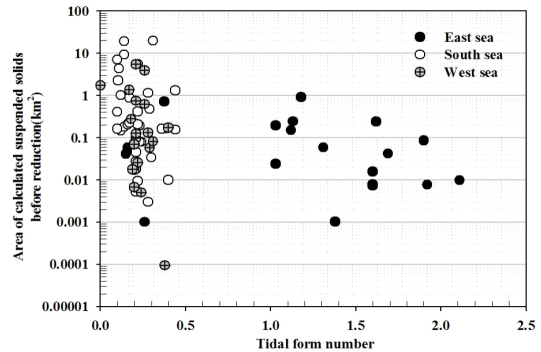
Sea	Max. SS(mg/L)			Ave. SS(mg/L)			Ratio (A/B)
	Data(ea)	Range	Mean(A)	Data(ea)	Range	Mean(B)	
East	16	4.40~31.67	10.19	15	2.57~9.77	6.29	1.70
South	37	3.30~110.50	29.44	36	4.10~59.40	15.83	2.19
West	19	11.17~453.80	92.57	19	8.94~189.60	52.29	1.62



[Fig. 5] Relationship between tidal spring range and area of calculated SS before reduction.

널리 분포해있는 세립질 퇴적물에서 흐름 전단응력의 크기가 증가할수록 평형 부유사 농도 또한 증가하는 양상을 보인다(Jung et al., 2012). 그림에서 해역별 대조차에 따라서 부유사 확산 면적이 $0.001 \sim 10 \text{ km}^2$ 이내에 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다. 앞서 <Table 6>에서 살펴보았듯이 저감전 부유사 확산 면적이 1 km^2 보다 크게 나온 장소는 남해 경우 12곳(=3+9), 서해 경우 5곳에 해당하였으며, 나머지 모든 사업 평가 해역이 저감전 부유사 확산 면적이 1 km^2 이하임을 알 수 있다.

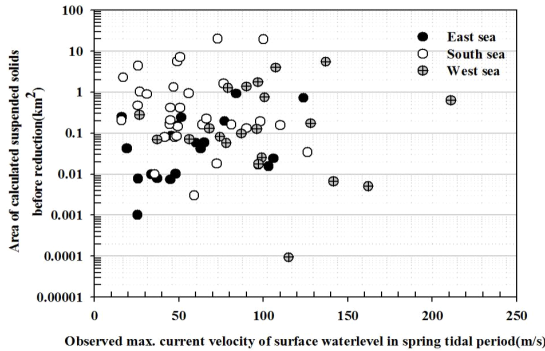
그리고 [Fig. 6]은 조석형태수(Tidal form factor)와 부유사 확산 면적과의 관계를 나타내었다. 여기서 조석형태수는 일주조(K_1 분조와 O_1)와 반일주조(M_2 분조와 S_2 분조)의 진폭비($F = (H_K + H_0) / (H_M + H_S)$)로 정의된다. 일반적으로 조석형태수에 따라서 반일주조형 조석($F=0.00 \sim 0.25$), 반일주조가 우세한 혼합형 조석($F=0.25 \sim 1.50$), 일주조가 우세한 혼합형 조석($F=1.50 \sim 3.00$), 일주조형 조석



[Fig. 6] Relationship between Tidal form number and area of calculated SS before reduction.

($F > 3.00$)으로 조석 특성이 분류된다(Pugh, 1987). 참고로 우리나라 서해 중부와 북부 연안해역에서는 반일주조형 조석, 서해 남부와 남해 서부 그리고 제주도 인근해역에서는 반일주조가 우세한 혼합형 조석, 남해 동부에서는 반일주조형 조석, 동해 연안해역에서는 전반적으로 일주조의 진폭이 반일주조의 진폭보다 큰 일주조가 우세한 혼합형 조석 특성을 보인다(Jung, 2017). 그림에서 총 84건 평가서의 모든 경우가 조석형태수 2.1 미만이었으며 특이하게도 0.5~1.0 사이의 값을 가지는 경우는 없었다.

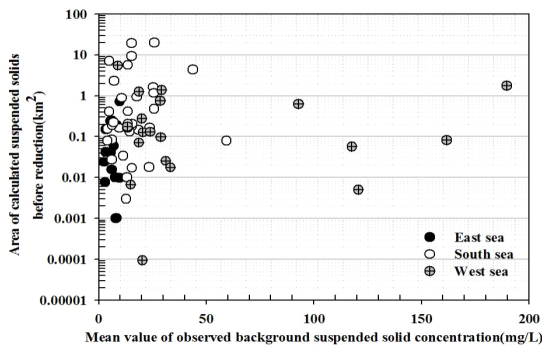
[Fig. 7]은 대조기 최강 창조 유속과 부유사 확산 면적과의 관계를 나타내었다. 앞서 [Fig. 5]와 [Fig. 6]에서 대조차 및 조석형태수와 부유사 확산 면적과의 관계를 살펴보면 대체적으로 해역별로 군집을 이루는 것으로 보인다. 하지만 [Fig. 7]의 대조기 최강 창조 유속과 부유사 확산 면적과의 관계에서는 전체적으로 혼재되어 나타나고 있



[Fig. 7] Relationship between observed maximum current velocity of surface water level in spring tidal period and area of calculated SS before reduction.

음을 알 수 있다. 이와 같은 내용은 해상 공사시 발생하는 부유사 확산 면적은 대조차, 조석형태수, 대조기 최강 창조 유속과 같은 요인과는 크게 상관성이 없다는 점으로 판단될 수 있다.

마지막으로 [Fig. 8]은 현장 평균 부유사 배경 농도와 공사시 발생하는 부유사 확산 면적과의 관계를 나타내었다. 그림에서 서해 5곳, 남해 1곳을 제외하고 모든 사업 평가 해역이 현장 평균 부유사 배경농도가 약 50mg/L 이하이었다. 서해 5곳은 목포, 신안 주변 해역이었으며 남해 1곳은 광양항 내부 해역에 해당하였다. 앞서 논의된 바와 마찬가지로 현장 평균 부유사 배경농도가 큰 경우라고 해도 부유사의 확산 면적이 크다고 할



[Fig. 8] Relationship between mean value of observed background SS concentration and area of calculated SS before reduction.

수는 없을 것으로 생각된다.

따라서 이상의 결과를 종합하면 수질오염방지막 효율 저감전의 부유사 확산 면적과 대조차, 조석형태수, 대조기 최강 창조 유속, 현장 평균 부유사 배경농도의 해양환경조건과의 상관성을 살펴본 결과에서는 크게 상관성을 찾아볼 수 없었다. 즉, 현장에서 관측되어진 환경변수 요인들과 수치실험에서 계산되어 얻어진 결과 사이에는 직접적인 상호 관련성을 찾기는 힘들다고 사료된다.

IV. 결 론

본 연구는 2022년부터 2025년까지 총 84건의 해양이용협의 및 환경영향평가를 바탕으로 공사 유형 및 규모, 부유사 발생량, 해양 환경 조건 등에 따른 부유사 확산 범위, 적용 수치모형 및 주요 입력 조건 등을 현황 분석하였다. 특히 일정 부유사 가중 농도(1mg/L)를 기준으로 공사 규모, 부유사 발생량 그리고 그 확산 면적 결과를 중점적으로 비교 분석하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구에서는 해상 공사로 인한 부유사 확산 면적(A_{SS})에 영향을 미치는 요인을 $X_1 \sim X_6$ 까지 6가지 정도로 제시하고 이를 추정하기 위한 새로운 개념 식을 제안하였다. 이때 무엇보다도 각 X 에 정확한 입력조건과 아울러 0과 1의 사이 값을 갖는 각 X 에 대한 가중치 상수 a, b, c, d, e, f 에 대한 후속 연구가 필요하다고 판단된다.

(2) 본 연구에 적용된 총 84건 사업 평가서의 부유사 확산 수치실험 조건 분석 결과를 정리한다면 ‘EFDC 모델을 이용하여 주요 4대 분조를 경계조건으로 적용하고 수평 최소 격자 10m, 수직 수심 방향으로 5개의 층(Layer), 계산 스텝으로는 1sec를 적용’하는 것이 가장 평균적인 부유사 확산 실험 방법이라 할 수 있다.

(3) 전반적으로 공사물량이 증가할수록 부유사 발생량도 증가하는 경향을 보이고 있으나 해역별로 그 차이는 크지 않으며, 평균 공사물량(A)과

부유사 발생량(B)의 비($=A/B$)는 동해(137.8), 남해(121.3), 서해(101.6)의 순서로 산정되었다. 이는 공사물량이 많다고 해서 부유사 발생량 및 그 확산 면적도 이에 비례하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

(4) 수질오염방지막 저감 효율로 25%를 적용한 사례가 45건(53.6%)으로 가장 많고 수질오염방지막 효율 저감전·후 부유사 확산 면적은 대체적으로 선형적으로 나타나는 경향을 보이고 있다. 이를 해역별로 살펴보면 동해는 약 52.78%, 남해는 약 75.27%, 서해는 약 44.87%만큼 부유사 확산 면적이 감소되었음을 나타내고 있다.

(5) 해역별 해수면 표·중·저층에서 현장 관측된 해수에서의 부유사 배경농도는 서해, 남해, 동해의 순으로 크게 나타났고 최대 부유사 배경농도는 평균치보다($=A/B$) 남해는 2.19배, 동해 1.70배, 서해 1.62배 크게 나타났다.

(6) 수질오염방지막 효율 저감전의 부유사 확산 면적과 대조차, 조석형태수, 대조기 최강 창조 유속 등의 해양환경조건과의 상관성을 살펴본 결과에서는 크게 상관성을 찾아볼 수 없었다.

References

- Jeong JH, Tac DH, Lim JH and Lee DI(2017). Analysis and Improvement for Impact Assessment of Suspended Solids Diffusion by Marine Development Projects, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 20(3), 160~171.
<https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2017.20.3.160>
- Jung TS(2017). Sea Level Change due to Nonlinear Tides in Coastal Region, J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers, 29(5), 228~238.
<https://doi.org/10.9765/KSCOE.2017.29.5.228>
- Jung ET, Kim YM, Kim DH and Hwang KN(2012). An Experimental Study of Depositional Parameters of Cohesive Sediments in Semi-closed Bay, J. Korean Soc. Coastal and Ocean Engineers, 24(3), 159~165.
 UCI:G704-000422.2012.24.3.001.
- Kang GY, Kim SJ and Cho YS(2007). Analysis of Suspended Load using A Two-Dimensional Advection-Diffusion Equation in Coastal Zone, in Proc. of KSHM conference, 177~180.
- Kang SW, Cho HS, Seo SC and Kim HJ(2009). A Study on transport of suspended sediment arising from construction of Turkmenbashi port, in Proc. of KSCOE, Fall Meeting, Busan, Korea, 136~139.
- KEI(Korea Environmental Institute)(2003). Studies on Improvement of Coastal Flow and Suspended Solid Predictions in the Coastal Zone Developments.
- Kim KY and Chung JY(1998). Diffusion of the suspended matter caused by dredging and the effect of the single silt protector, J. Ocean Engineering and Tech., 12(3), 1~8.
- Kim YW, Kim JI, Yoon HS and Hong DU(2000). Temporal and Spatial Spreading Characteristic of Drift Soil due to the Reclamation in the Pusan Port, in Proc. of KSOE, Fall Meeting, Online, 196~203.
- Maeng JH, Cho KW and Joo YJ(2006). Status and Improvement of the Mitigation Option to the Suspended Sediments in Coastal Development Projects, J.E.I.A., 15(5), 289~297.
- MOF(Ministry of Oceans and Fisheries)(2002). Studies on the Estimation of Turbidity Generated by Dredging and Performance of Silt Screens(III).
- Park SY, Kwon IH, Lee JH, Yoon SJ, Lee CK and Khim JS(2022). Range of the biological effects and threshold concentrations on marine organisms by suspended solids, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 25(1), 29~40.
<https://doi.org/10.7837/kosomes.2015.21.1.109>
- Pugh DT(1987). Tides, surges and mean sea-level: a handbook for engineers and scientists. John Wiley & Sons Ltd., ISBN 9780471915058.

-
- Received : 25 March, 2026
 - Revised : 29 April, 2026
 - Accepted : 07 May, 2026