

## 해양 공사시 환경영향평가 지표인 부유사 가중 농도 산정에 관한 연구

윤한삼<sup>†</sup>

국립부경대학교 학부대학 교수

## A Study on Estimation of Weighted Suspended Sediment Concentration as an Indicator in Environmental Impact Assessment for Marine Construction Projects

Han-Sam Yoon<sup>†</sup>

Professor, College of Liberal Arts, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

## 요 약

본 연구는 현재 우리나라 해양 공사시 환경영향평가 지표로 사용되는 부유사 가중 농도 산정 방법의 현주소와 실제 해양 현장에서 산출된 결과들을 수집하여 비교함으로써 그 문제점을 살펴보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다. (1) 현재 우리나라 해양환경영향평가 및 어업피해조사 분야에서 적용하는 부유사 가중 농도 산정 방법은 공사 해양 현장의 부유사 평균 농도의 5% 또는 해양환경 변화가 일정 임계값(임계환경변화량)을 초과하는 경우를 피해 기준으로 적용하는 것이 일반적이다. (2) 2022년부터 2025년까지 총 84건의 해양환경영향평가 보고서에 제시된 평균 SS 배경농도의 5%를 부유사 가중 농도(기준치)라고 가정할 경우, 동해는 0.31 mg/L, 남해는 0.79 mg/L, 서해는 2.61 mg/L에 해당하였다. (3) 부산 해역의 경우 평균 부유사 가중 농도(임계환경변화량)는 0.3~0.5 mg/L 범위내의 값을 가지며 공간적으로 다소 차이를 가지는데 낙동강 하구역 해역이 높고 다음으로 기장해역, 부산항 해역의 순으로 줄어드는 것으로 평가된다. (4) 최종적으로 이상의 결과를 통해 각 해역은 물리적, 생태적 특성이 다르기 때문에 해역별로 부유사 가중 농도에 대한 임계치를 고정된 정량 값으로 부여하는 것은 적합하지 않다고 판단된다.

**Abstract** – This study examined the current status of the suspended sediment weighted concentration calculation method, which is currently used as an environmental impact assessment indicator for marine construction projects in Korea, and compared it with the results obtained from actual offshore sites to examine its problems. The results are summarized as follows. The suspended sediment weighted concentration calculation method currently applied in the fields of marine environmental impact assessment and fishery damage investigation in Korea generally applies damage criteria when the average suspended sediment concentration in the construction site exceeds 5% or when the marine environment change exceeds a certain threshold (Critical Environmental Variation Quantum). If it is assumed that the weighted suspended sediment concentration(reference value) is 5% of the average background suspended sediment concentration presented in a total of 84 marine environmental impact assessment reports from 2022 to 2025, the corresponding value are 0.31 mg/L in the East Sea, 0.79 mg/L in the South Sea, and 2.61 mg/L in the West Sea. In the case of the Busan waters, the average weighted suspended sediment concentration (Critical Environmental Variation Quantum) is in the range of 0.3 to 0.5 mg/L and has some spatial differences, with the Nakdong River estuary waters being the highest, followed by the Gijang waters and Busan Port waters, decreasing in that order. Ultimately, based on the above results, it is judged that it is not appropriate to assign a fixed quantitative value as a threshold for weighted suspended sediment concentration to each sea area because each sea area has different physical and ecological characteristics.

**Keywords:** Marine construction project(해양 공사), Environmental impact assessment(환경영향평가), Damage criteria(피해기준), Critical environmental variation quantum(임계환경변화량), Weighted suspended sediment concentration(부유사 가중 농도)

<sup>†</sup>Corresponding author: yoonhans@pknu.ac.kr

## 1. 서 론

해안과 항만 등 연안해역에서 해상 공사시 발생하는 해수유동, 수질 및 저질, 해저지형 등의 물리·화학적 변화는 주변 해양환경에 직·간접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 이러한 변화들에 대한 영향을 사전 평가하는 것은 해양환경 변화를 정도 높게 예측하는데 있어 매우 중요한 연구과제이고, 연안환경과 생태계에 미치는 영향은 간과될 수 없으며 이에 대한 적절한 관리가 요구되고 있다(Baek[2004], Lee[2015]). 특히 공사에 따른 부유사(Suspended Sediment, SS) 확산은 수중의 투명도를 낮추고, 어류의 호흡과 섭식 활동을 방해하며, 산란장 및 서식지를 훼손하는 등 해양환경의 물리·화학적 변화를 일으켜 어업활동에 직·간접적인 피해를 유발할 수 있는 가장 대표적이고 빈번하게 발생하는 피해영향 요인이다(KEI[2003], MOF[2002]).

해상 공사시 발생하는 부유사는 일반적으로 시·공간에 따라서 변화하는데 공사 현장에서 농도가 가장 크고, 거리가 멀어질수록 작아진다. 물론 평상시 해수내 부유물질 농도와 같은 환경 인자가 공사 실시 이전에도 평형점을 중심으로 상하로 변동하고 공사로 인한 경미한 환경변화는 해양생태계 및 어업생산에 크게 영향을 주지 않는다는 주장도 있지만 그 환경변화가 ‘일정 수준’을 넘게 되면 환경 및 어업피해를 유발하게 된다. 이때 해양환경영향평가 및 어업피해조사 분야에서는 이러한 ‘일정 수준’을 공사 현장으로부터 퍼져간 거리 또는 농도로 정의하고 부유사 등량(농도)선으로 표현한다(본 논문은 ‘부유사 가중 농도(Weighted Suspended Sediment Concentration)’로 통칭함).

해양환경영향평가 및 어업피해조사 분야에서는 부유사 가중 농도(또는 임계환경변화량)에 대한 임계치의 필요성과 그 역할에 대한 중요성이 부각되고 있고, 오염 물질의 영향이 모호하므로 과학적 데이터를 기반으로 한 임계치 설정의 중요성도 강조되어 왔다(Jeong *et al.*[2017]).

하지만 현재는 평가자에 따라 임의적 요소가 너무 많아 확산 결과가 큰 차이를 보이고 있는 것이 사실이고, 이에 따른 갈등과 사회·경제적 손실이 야기되고 있는 상황이다(Jeong *et al.*[2017]). 특히 우리나라 해역별로 수·저질, 동·식물상마다 부유사 확산에 따른 영향의 정도와 범위가 다르기 때문에 해역별로 임계치 산정 방법 및 산출 결과가 다를 것이며 이에 해양환경 변화에 미치는 영향도 다르게 나타날 수 있다. 따라서 일률적으로 모든 해역에 고정된 정량적인 기준을 부여하는 것은 부적합하며 부유사 가중 농도에 대한 정량적이거나 정성적인 범위의 결과를 제시하고 이에 대한 계산 과정 및 결론에 대한 명확한 근거가 제시될 필요가 있다.

본 연구는 현재 우리나라 해양환경영향평가 및 어업피해조사 분야에서 해상 공사시 환경영향평가 지표인 부유사 가중 농도의 산정 방법, 실제 현장에서 산출된 산정 결과 사례들을 수집하여 비교하고자 하였다. 이를 위해 기존 사업 평가서 및 연구논문에서 제시된 수치값, 2022년부터 2025년까지 총 84건의 해역이용협의 및 환경영향평가 보고서에 제시된 현장 부유사 배경농도 관측값, 국가해양

정보 관측망을 통해 얻어진 부산연안 해역의 표·저층 부유사 현장 관측값 등을 수집하여 해역별로 부유사 가중 농도를 산정하고 이들 값들을 비교 분석하였다.

## 2. 부유사(SS) 가중 농도

### 2.1 부유사(SS) 가중 농도의 의미

현재 우리나라 해양환경영향평가 및 어업피해조사 분야에서 해상 공사에 따른 부유사 확산 수치모형실험 결과를 표현하는 임계치인 부유사 등량(농도)선을 정의하고 표현하는 형식은 연구자들마다 조금씩 차이를 보인다.

Jeong *et al.*[2017]은 부유사 가중 농도(SS weighted concentration), KEI[2003]와 Nam *et al.*[2023], Yeo *et al.*[2020]은 부유사 최대 확산 범위, Kang *et al.*[2004]은 부유사 임계환경변화량(Critical Environmental Variation Quantum), Park *et al.*[2022]은 부유사 영향 농도(Threshold/effective concentration affected by the suspended sediment) 등으로 표기하고 있다.

여기서 부유사 가중 농도, 최대 확산 거리 및 영향 농도는 해수, 하천 등에서 부유 입자(주로 실트·점토 등 미세 토사)의 특정 조건(공사, 강우 등)에서 일시적으로 증가하는 단위 부피당 농도를 의미한다. 또한 임계환경변화량은 특정 해양환경 요인이 일정 수준 이상 변화하면 어업생물의 산란·섭식·회유 등에 부정적인 영향을 미쳐 어업생산성이 유의미하게 감소하기 시작하는 최소 환경변화량을 의미한다. 이 개념은 어민이 극복할 수 없을 정도의 어업생산 감소를 초래하는 최소의 환경변화량으로 1992년 인천국제공항 건설 피해조사에서 최초로 도입된 이후, 다양한 해역 개발 사례에서 보완·적용되어 왔다(Kang *et al.*[2004], Jo[2025]).

환경성 평가 조사와 관련하여 부유사 확산 실험시 임계치인 부유사 가중 농도(또는 임계환경변화량 등) 기준 및 산정방식 등은 현재 명확히 제시되어 있지 못한 실정이다(Jeong *et al.*[2017]). 그러나 이에 대한 연구는 KEI[2003], Lee *et al.*[2003] 등 주로 해양환경영향평가 분야에 한정되어 다루어져 왔다.

하지만 이와 같은 부유사 가중 농도는 해역이용협의 및 환경영향평가 과정에서 공공사업이나 민간사업 추진을 위하여 매립, 간척, 교량, 해안도로, 해상공항 건설 등의 행정적으로 공사의 인허가, 어업피해가 예상되거나 발생 시 공사에 따른 피해 손실보상금 등과 밀접하게 관련될 수 있는 부분이기 때문에 그 중요성이 높다고 할 수 있다(Kim[2018]).

먼저, 해양환경관리법 등 관련 법령에 따라 해양환경영향평가지 환경영향 최소화를 위해 기술적 기준을 요구하고 부유사 가중 농도와 같은 임계치는 법적 요건을 충족하기 위한 정량적 지표로 작용하며, 사업 승인 여부를 판단하는 핵심 데이터가 된다. 예로 들어서 임계치 초과인 경우 추가적인 수질오염방지막 시설 설치나 공사기간 조정 등의 조치가 의무화될 수 있다.

다음으로 해상 공사에 따른 어업피해조사 과정에서 어업권자, 주민, 환경단체, 공공기관 등 이해관계자 간 갈등을 해소하려면 객관

적 수치를 기반으로 한 평가가 필수적이다. 이때 임계치는 ‘허용 가능한 피해 수준’을 명시함으로써 분쟁 해결의 기준점으로 작용하는데 어민들이 주장하는 어업 피해와 공사 업체의 방어 논리 사이에서 중립적 판단 자료가 된다.

## 2.2 부유사(SS) 가중 농도 산정법 제문제

해상 공사에 앞서 해역이용협의서 작성규정에서 제시하고 있는 부유사 확산관련 예측에선 해수유동모델의 유속정보를 입력자료로 하여 수치실험을 수행하고, 대·소조기별 부유사의 최대 확산거리 및 확산농도를 계산토록 규정하고 있다. 예측결과는 대·소조기별의 부유사 확산농도 및 확산범위를 제시하고 발생원 산정 과정과 모델에서 부유사 방류조건을 제시토록 규정하고 있다(MOF[2008]).

하지만 부유사로 인한 피해를 저감하기 위해서는 부유사 확산예측을 위한 세부수행 절차나 평가 기법과 같은 가이드라인이 필요하나, 해역이용협의에서 이루어지는 부유사 확산 평가항목별 작성 방법에는 예측기법을 비롯한 표준 절차에 관한 상세한 내용이 없다(MOF[2008]). 또한 실제 해양환경에서는 조류와 해양파랑 등 해양환경조건, 부유사 입자 크기 및 침강 속도, 해수교환 환경변화 등 다양한 해양물리적 요인이 복합적으로 작용하여 확산 패턴이 달라질 수 있으며 이들 요인 간 상호작용이 현장별로 달라 부유사 거동 특성도 차이를 나타낼 것이다. 이로 인해 평가자의 경험과 숙련도에 따라 부유사의 확산범위와 양상이 달라진다(Tac *et al.*[2022]).

그리고 부유사 확산예측을 위해서는 예측기법에 따라 그에 맞는 정보가 필요하나, 해역이용협의 과정에서는 이와 관련한 해수 유동, 입자의 침강속도, 부유사 발생량, 부유사 시계열 변화 등의 정보를 제시하지 않는 경우가 많다. 특히, 부유사는 해수 유동의 크기와 방향에 따라 확산하는 방향과 범위가 다르게 평가될 수 있으므로, 무엇보다 해수 유동 예측결과의 신뢰도가 중요하나 이에 대한 검증이 부족한 것은 부유사 확산 예측결과를 더욱 신뢰할 수 없게 만든다(Tac *et al.*[2015]).

또한 어업피해조사에서 피해 요인의 발생 정도를 산정하는 방식은 수치 시뮬레이션을 통해 동일하게 적용된다. 다만, 부유사 가중 농도(또는 임계환경변화량)의 설정은 조사해역의 특성에 따라 약간의 차이가 있을 수 있다. 그러나 대부분의 경우, 인근에서 수행된 선행 사업의 적용 결과를 참고하여 부유사 가중 농도를 설정하므로 실질적으로 큰 차이가 발생하지 않는 경우가 많다(Jo[2025]).

이처럼 부유사 가중 농도 산정에 있어 이론적 방법이 있음에도 불구하고 기존 선행 보고서의 값을 인용하는 사례는, 유사지역 내에서 이루어지는 연속적인 사업들의 연계성을 고려한 결과로 해석될 수 있다. 예로 들어 현재 해역이용협의나 환경영향평가단계에서 부유사 확산 영향의 가중 농도(Weighted concentration)에 대한 명확한 기준이 없어 대부분 1 mg/L의 가중 농도를 기준으로 부유사의 확산 거리 및 면적을 제시하고 있다. 이는 사업간의 차이를 최소화하고, 일관된 기준을 유지하여 보상의 형평성을 고려한 조치로 볼 수 있다.

Jeong *et al.*[2017]은 사업 유형과 해역별 특성이 다름에도 불구하고

일률적으로 기준을 설정하는 현실적 문제를 이해하면서도, 한편으로는 보다 객관적이고 다양한 접근을 요구하는 사례가 증가하고 있다고 밝히면서 부유사 확산에 대해서는 우선 평가 농도별 확산 거리와 면적을 제시하고(3차원 모델링시에는 층별 포함), 이때 가중 농도에 대한 대표 기준을 다양화할 것을 강조한 바 있다(예를 들면, 0.1 mg/L, 0.5 mg/L, 1.0 mg/L 그리고 2.0 mg/L 등). 여기서 대표 기준에 대해서는 공사 지역과 해역마다 부유사 거동의 특성이 다르므로 대상 해역의 배경 농도를 고려한 가중 농도를 기준으로 설정할 것을 제안하였다.

이와 같은 해역별 부유사 가중 농도 차이는 각 해역의 고유한 환경적 특성, 인접 산업 활동, 그리고 조사기관의 산정 기준에 따라 나타난 것으로 볼 수 있다. 이러한 차이는 어업피해를 산정에 직접적인 영향을 미치며, 부유사 가중 농도를 산정할 때 각 해역의 특성을 신중하게 고려해야 함을 시사한다.

## 3. 부유사(SS) 가중 농도 산정방법 비교

### 3.1 기존 사업보고서에 제시된 산정 방법

현재 실제 부유사 가중 농도에 대한 기준이 지침으로 수립되어 있지 않으나(KEI[2003]) 환경영향평가 실무에서는 ‘1 mg/L’와 같은 환경기준 농도를 기준으로 공사별 예상 최대 확산 범위를 제시할 것을 요구하고 있다.

해역이용협의서 또는 어업피해조사 결과에서도 부유사 확산 면적을 결정하기 위한 부유사 가중 농도는 해역이나 사업에 따라 다르게 적용되고 있으나 모든 해역에서 1 mg/L이 가장 많이 적용된 바 있다(Jeong *et al.*[2017], Jo[2025]). 또한 Park *et al.*[2022]은 부유사가 유영생물에 미치는 생물영향 연구에서 표영성 어류인 줄농어 성어의 산소소비율이 1 mg/L이었고 치사에 치명적인 영향을 미치지 않지만 저서성 어류에 비해 부유사에 내성이 없기 때문에 주의가 필요하다고 주장한 바 있다.

실제 해상 공사 현장에 적용된 부유사의 배경농도(Background Suspended Sediment Concentration,  $SS_b$ )와 임계환경변화량( $d_c$ ) 데이터를 분석한 Jo[2025]의 연구 결과인 Table 1을 살펴보면 부유사 가중 농도를 산정하는 방법은 기존 연구 및 선행 보고서에서 제시된 값을 그대로 인용하여 적용하는 경우와 현장 조사 데이터를 기반으로 해역 특성을 반영한 값을 산정하는 경우의 2가지로 구분된다.

예를 들어, 서해안 해역의 인천과 고창 지역 사업에서는 선행보고서를 인용하여 임계환경변화량( $d_c$ )을 1.0 mg/L로 적용하였다. 부산 해역 사업 중 사례 8번을 제외한 사례 3, 5, 6번 역시 동일한 조사기관에 의해 수행된 조사들로, 사례 8번에서 산정된 값을 인용하여 적용한 것으로 보인다. 이에 반해 남해안 해역의 임계환경변화량의 경우 부산 지역은 0.42 mg/L, 마산 지역은 0.30 mg/L로 산정되었다. 더불어서 서해안 해역의 임계환경변화량은 1.0 mg/L로 다른 해역보다 상대적으로 높게 산정된 것을 확인할 수 있는데 이는 서해안 해역의 조수간만의 차가 크고 다양한 연안 활동으로 인해 부유물질 농도가 증가하는 경향이 반영된 결과로 해석된다. 이러한

결과는 남해안 해역이 전반적으로 부유물질 농도가 낮고, 연안 활동이 서해보다 적다는 점을 반영한 것으로 볼 수 있다. 반면, 동해안 해역은 상대적으로 가장 낮은 임계환경변화량을 보이는데 이는 동해안 해역이 자연적으로 부유물질 농도가 낮으며, 연안 활동(해상 공사 등)이 서해안이나 남해안에 비해 적다는 점이 그 원인으로 분석된다.

### 3.2 현장 부유사(SS) 평균 농도의 5%

일반적으로 부유사 확산 면적을 결정하기 위한 부유사 기중 농도(또는 임계환경변화량)는 해역이나 사업에 따라 다르게 적용되는데 서울대 해양연구소(RIO[1996])가 영일만 신항 건설 사업 해역의 20년(1975-1994)간 수온 변화의 평균 폭(연평균 수온의 절대평균편차가 평균치의 약 5%)을 토대로 부유사의 인위적인 증가로 인한 영향에 대해 현장의 부유사 평균 농도의 5%를 피해 기준으로 적용한 바 있다(Jeong *et al.*[2017]). 이를 식으로 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$d_c = SS_{ave} \times 0.05 \quad (1)$$

하지만 여기서 변화율 5%는 통계학적으로 변동계수에 가깝고 수온, 부유사 및 유속의 변동계수가 동일하다는 것을 가정하고 수온에 대해 설정한 기준 5%를 부유사와 유속의 평균치에 적용하여 피해범위가 설정된 것으로 이 가정은 전혀 검증되지 않았다(Kang *et al.*[2004]; Jo[2025]).

앞서 Jo[2025]가 제시한 Table 1에서 부산 해역의 경우는 모두 5가지(NO.3, NO.5, NO.6, NO.8, NO.10)인데 이들 제시된 해역별 배경농도의 평균값을 계산하면 6.706 mg/L이고 이 값의 5%는 0.3353 mg/L에 해당한다. 이는 NO.6, NO.8의 임계환경변화량보다는 크고 나머지 경우보다는 작은 값을 나타낸다.

본 연구는 2022년부터 2025년까지 해역이용영향검토기관인 국립수산과학원 해역이용영향평가센터에서 검토 완료된 사업 평가 보고서 총 84건을 대상으로 우리나라 해역별 해상 공사시 부유사 현장 관측 자료를 수집 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. 1에 제시된 바와 같다. 사업 유형별로 구분해 보면 연안 정비사업(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. 그리고 평가서는 협의 대상 및 주요 사업 내용에 따라 공유수면 매립, 준설 그리고 방파제와 같은 구조물 설치 사업으로 인해 발생 부유사가 중점 평가사항인 보고서 중에서 랜덤하게 선택하였다. 평가서에서 부유사 발생 주요 공종은 기초굴착, 사석/피복석 투하·제거·고르기, 항로박지 및 항내 준설, 골재채취, 교량 등 파일공, 여수토, 가호안 설치 등을 포함하고 있다. 한편, 평가서에 일부 항목 data 값

**Table 1.** Background Suspended Sediment Concentration and Critical Environmental Variation Quantum by Case(Jo[2025])

NO.	Report title	Year of Completion	Project Area	Sea Area	$SS_B$ (mg/L)	$d_c$ (mg/L)	Note
1	Fisheries Damage Assessment for the Construction of the 00 Mooring Facility	2020	Yangyang	East	3.36	0.23	
2	Fisheries Damage Survey for the 00 Sewage Maintenance Project	2023	Jeju Island		3.22	0.47	
3	Fisheries Damage Survey for the 00 Submarine Cable Installation Project	2019	Busan		5.03	0.42	Reference to Previous Reports
4	Fisheries Damage Survey for the 00 Power Plant Construction Project	2023	Jeju Island		5.24	0.56	
5	Fisheries Damage Survey for the 00 Typhoon Damage Restoration Project	2020	Busan		5.69	0.42	Reference to Previous Reports
6	Fisheries Damage Survey for the Construction and Reinforcement of the 00 Breakwater	2017	Busan	South	6.68	0.30	Reference to Previous Reports
7	Final report on fisheries damage and impact assessment for the 00 construction project	2014	Masan		6.76	0.42	Reference to Previous Reports
8	Fisheries Damage Survey for the 00 Breakwater Construction Project	2013	Busan		6.95	0.16	
9	Fisheries damage survey related to the 00 development project	2023	Jeju Island		7.05	0.50	
10	Fisheries Damage Survey for the 00 Development Project and Anchorage Designation	2011	Busan		9.18	1.0	Reference to Previous Reports
11	Fisheries Damage Survey for the Revetment Construction at the 00 Reclamation Site	2020	Incheon		10.67	1.0	Reference to Previous Reports
12	Fisheries Damage Survey for the 00 Fairway Dredging Project	2018	Incheon		12.37	1.0	Reference to Previous Reports
13	Fisheries Damage Survey for the Construction of the 00 Bridge and Connecting Structures	2020	Incheon	West	23.85	1.0	Reference to Previous Reports
14	Fisheries Damage Survey for the Construction and Operation of the 00 Power Plant	2011	Dangjin		28.77	1.48	
15	Final Report on Fisheries Damage Assessment for the 00 Offshore Wind Farm Project	2022	Gochang		38.32	1.0	Reference to Previous Reports

※ $SS_B$ : Background Suspended Sediment Concentration,  $d_c$ : Critical Environmental Variation Quantum of Suspended Sediment

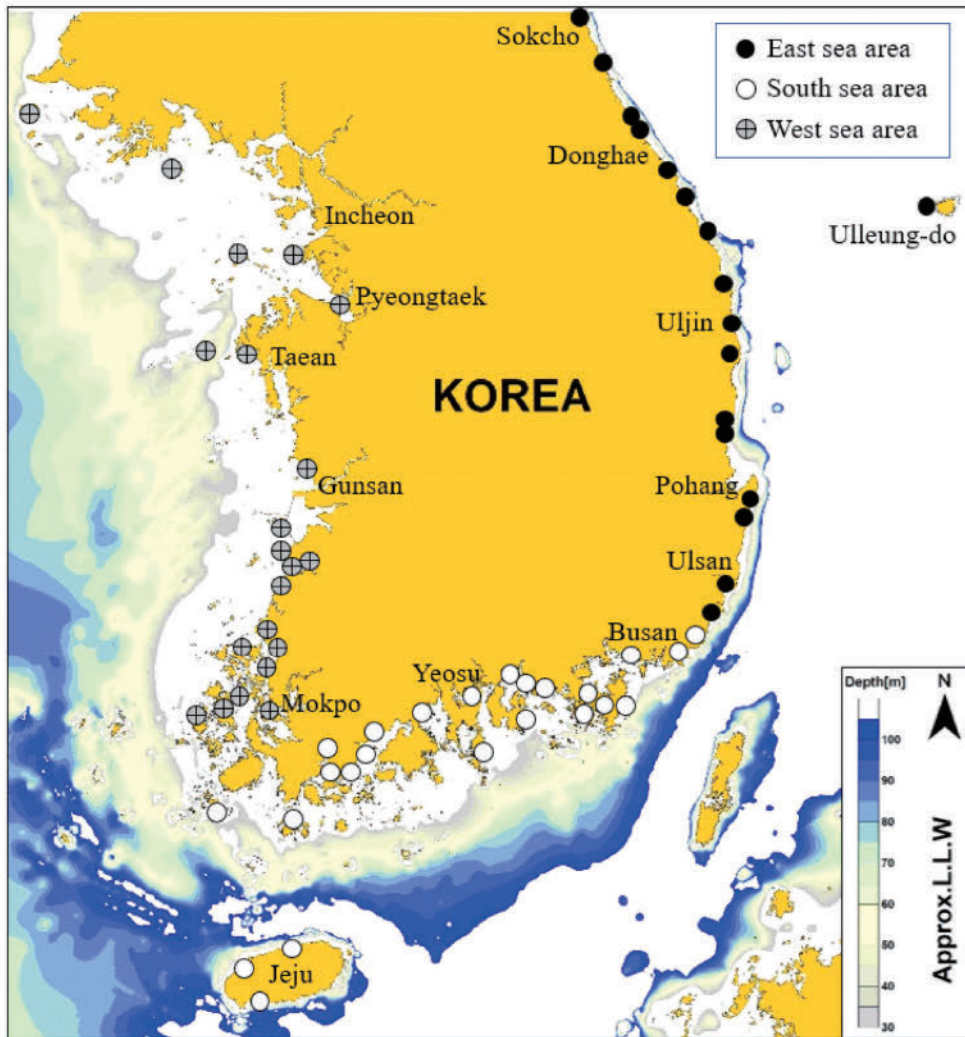


Fig. 1. Locations of 84 marine development projects (reclamation, dredging, structure construction, etc.) in coastal areas of Korea covered in this paper.

Table 2. 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)
	N	Range	SS <sub>M</sub> (A)	SS <sub>5%M</sub> (5%)	N	Range	SS <sub>M</sub> (B)	SS <sub>5%M</sub> (5%)	
East	16	4.40~31.67	10.19	0.51	15	2.57~9.77	6.29	0.31	1.70
South	37	3.30~110.50	29.44	1.47	36	4.10~59.40	15.83	0.79	2.19
West	19	11.17~453.80	92.57	4.63	19	8.94~189.60	52.29	2.61	1.62

※ SS<sub>M</sub>: Maximum background Suspended Sediment concentration, SS<sub>5%M</sub>: Weighted Suspended Sediment Concentration (5% of average background SS concentration)

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

결과적으로 Table 2 및 Fig. 2는 해역별 해수면 표층·저층에서 현장 관측된 해수에서의 SS 배경농도의 최대 및 평균값을 정리한 결과이다. 표에서 최대(A) 및 평균(B) SS 배경농도는 모두 서해, 남해, 동해의 순으로 나타났다. 최대 SS 배경농도는 평균치보다(=A/B) 남해는 2.19배, 동해 1.70배, 서해 1.62배 크게 나타났다.

서울대 해양연구소(RIO[1996])의 부유사 가중 농도 산정 방식에 적용하여 Table 2에 제시된 해역별 최대 및 평균 SS 배경농도를 바탕으로 공사로 인해 가중되는 해역별 부유사 가중 농도(또는 임계 환경변화량)를 추정할 수 있다.

여기서 평균 SS 배경농도의 5%(SS<sub>5%M</sub>)는 ‘해당 해역의 평상시 상태’를 대표하는 값으로 피해기준을 정하는 것이다. 부유사나 수질영향 관련 연구에서는 배경농도와 영양농도를 함께 보며, 영양농

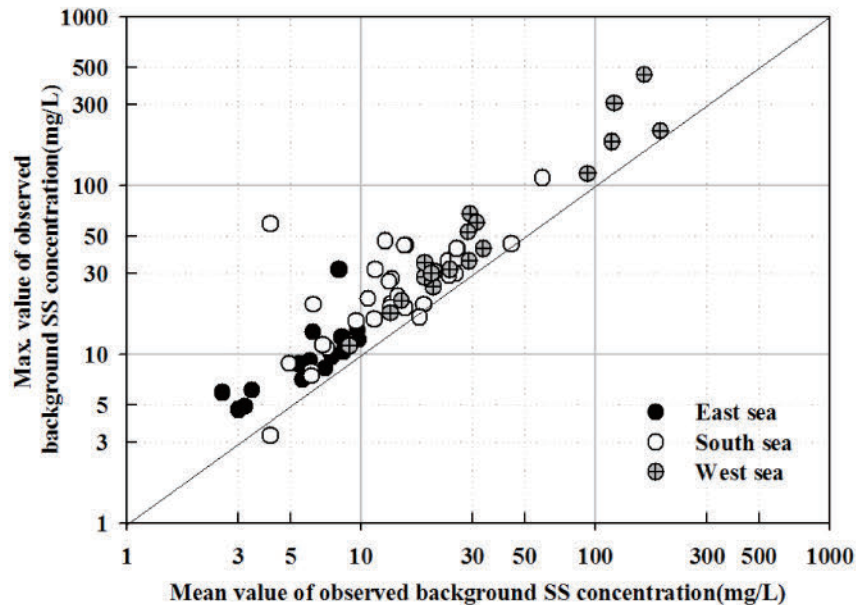


Fig. 2. Relationship between observed maximum and average background SS concentrations.

도는 생물종·노출기간·입자특성에 따라 달라지기 때문에 단일 절대 값보다 해역별 배경 수준을 기준으로 판단하는 일반적인 접근이라 할 수 있다. 이에 반해 최대 SS 배경농도( $SS_M$ )는 평균보다 국지적 고농도 구역, 조류 정체, 저층 재부유, 계절 변동같은 조건을 더 잘 드러내는데 이는 평균 기준으로는 낮아 보이더라도 실제 현장에서는 반복 노출이 일어날 수 있는 구간을 포착하는 데 유리하다. 이런 맥락에서 평균 SS 배경농도의 5%( $SS_{5\%M}$ )는 전체 해역의 전형적 수준에서 피해가 시작되는 실무적 절사값으로 이해할 수 있고 최대 SS 배경농도( $SS_M$ )는 평균값이 놓칠 수 있는 최악의 시나리오, 국지적 고농도 상태와 민감 구간을 반영하기 위한 보조적·보수적 지표로 해석될 필요가 있다.

만약 평균 SS 배경농도의 5%( $SS_{5\%M}$ )를 해역별 부유사 가중 농도(기준치)라고 가정할 경우 동해의 경우 0.31 mg/L, 남해의 경우 0.79 mg/L, 서해의 경우 2.61 mg/L에 해당한다. 이는 현재 어업피해조사 시 SS 가중 농도를 해역 구분없이 0.5~1.0 mg/L로 설정하는 것보다 해역별로 차이를 두고 적용하여야 함을 의미한다.

부유사 확산에 따른 부유사 가중 농도(또는 임계환경변화량) 산정 및 결정 방식에서도 사례별로 차이가 존재하였다. Table 1에서 전술한 바와 같이 일부 사례에서는 기존 연구 및 선행 보고서에서 제시된 값을 그대로 인용하여 적용하는 경우, 현장 조사 데이터를 기반으로 해역 특성을 반영한 값을 산정하는 경우가 있다. 이러한 차이는 조사 기관별 접근 방식의 차이에서 기인한 것으로 보이며, 동일한 해역에서도 서로 다른 기준이 적용될 가능성을 내포하고 있다.

다음으로 해역별 부유사 가중 농도에 차이가 있음을 알 수 있다. 서해 해역에서는 높은 조석 간만의 차와 다양한 연안 활동으로 인해 부유사 배경농도가 상대적으로 높은 반면, 동해와 남해 해역은 자연 상태의 부유물질 농도가 낮다. 이러한 차이는 해역별 해양환경 특성을 반영한 결과로 해석되므로 공사로 인한 피해범위 및 피해를

산정 시 해역별 특성을 보다 정밀하게 고려할 필요가 있음을 시사한다.

### 3.3 임계환경변화량 산정법 적용

Kang *et al.*[2004]의 임계환경변화량(Critical Environmental Variation Quantum)은 '어업자가 극복할 수 없을 정도로 어업생산 감소를 초래하는 최소의 환경변화량'으로 정의되며 해양환경 변화가 일정 임계값(임계환경변화량)을 초과할 경우, 어업생산에 비선형적인 피해가 발생한다는 전제에 기반한다. 즉, 작은 환경변화는 영향이 미미하지만, 임계값을 넘으면 어업생산 감소가 급격히 증가하는 특성을 보인다는 것이다.

이 이론은 생물분포의 통계적 방법론을 적용하여 공공사업으로 인한 어업피해 범위와 어업피해정도로서 연안어업생산감소율을 추정하는 이론과 방법을 제안한 것이다(Kang *et al.*[2006]). 이는 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$d_c = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

여기서, 표본의 크기를 의도적으로 크게 하여 표준오차를 작게 하고 임계환경변화량을 낮추려 한다면 조사가 엄정하다고 할 수 없다. 표본크기는 신뢰계수와 표본오차의 허용한도  $E$ 에 의해 결정된다.

$$n = \frac{1}{2} \left( \frac{z_a}{(s - \sigma)/\sigma} \right)^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{z_a}{E} \right)^2 \quad (3)$$

Kang *et al.*[2004]은 신뢰계수와 표본오차의 허용한도를 각각 99%와 20%로 설정하는 경우(즉,  $z_a=2.576$ ,  $E=0.20$ )와 각각 95%와 10%로 설정하는 경우(즉,  $z_a=1.960$ ,  $E=0.10$ )를 생각하여  $n=90\sim 200$ 의 범위로 제안하였다.

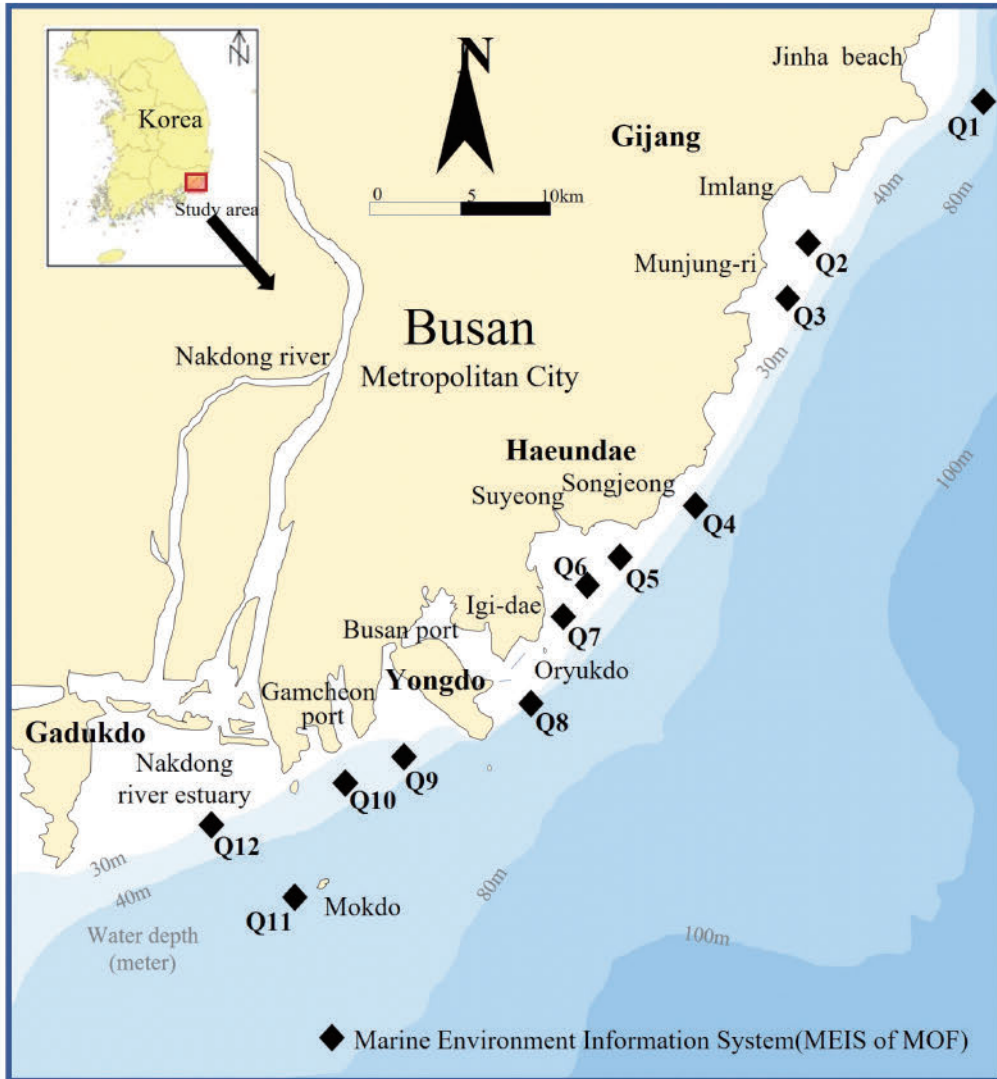


Fig. 3. Location of sampling stations of suspended sediment in the Busan coast.

본 연구에서는 최근 Yoon and Kang[2026]의 논문에 제시된 부산 연안 12개 정점(Fig. 3)에서 관측된 해양환경측정망 데이터를 바탕으로 부산연안 SS 가중 농도를 산정하고자 하였다. 관측망 데이터는 해양수산부 해양환경정보포털(MOF[2025])에서 제공하는 자료로서 수집된 데이터는 표층 부유물질(Surface Suspended Sediment, SFSS) 및 저층 부유물질(SeaBed Suspended Sediment, SBSS), 수심(Depth)이다. 수집된 자료는 연도별, 관측정점별로 다소 차이는 있으나, 2009년 2월부터 2023년 11월까지 매 분기별(2, 5, 8, 11월)의 15년 동안의 총 672개의 자료이다. Fig. 3에 제시된 관측정점에서 부유물질의 표층 및 저층의 경년변동을 살펴보기 위해 Fig. 4와 같이 대표적으로 4개 정점에 해당하는 Q1(기장 해역), Q6(수영만 해역), Q9(부산 남항 해역), Q12(낙동강 하구역)에 대해 표층과 저층의 경년변화 시계열 및 상관관계 분포도를 제시하였다.

결과적으로 Table 3은 12개 정점에서 수집된 자료에 대한 해수 중 부유물질의 표층( $C_s$ ) 및 저층( $C_b$ )의 최대값, 최소값, 평균값을 산

정하여 제시한 것이다. 전체 데이터의 평균값은 표층에서 6.97 mg/L, 저층에서 11.65 mg/L이었는데 표층에서 부유물질 농도 평균값이 가장 큰 곳은 낙동강 하구역 정점인 Q12에서 9.4 mg/L, 저층에서는 가장 해역 정점인 Q1에서 15.9 mg/L이었다. 그리고 표층( $C_s$ )과 저층( $C_b$ )의 편차( $\Delta$ )가 가장 큰 곳은 정점 Q1에서 10.6 mg/L, 가장 작은 곳은 정점 Q6에서 0.3 mg/L이었다.

앞서 부산 연안 해수의 부유물질 관측정점 12개소의 표층 및 저층의 부유물질 관측자료를 이용하여 부산연안 SS 가중 농도를 산정하고자 하였다. 적용된 방법은 Kang *et al.*[2004]의 임계환경변화량(Critical Environmental Variation Quantum) 이론을 적용하였다. 특히 본 연구에서는 제시된 표본의 크기(데이터 개수에 따른 영향), 표층과 저층간에 얼마나 차이가 있는가에 대해서 중점적으로 살펴보고자 하였다. 표층과 저층의 차이 영향에 대해서는 Lee *et al.*[2003]에 따르면 항만공사시 발생하는 부유토사는 표층의 경우 취송류의 영향을 많이 받고 저층의 경우 조류의 영향을 받으며 부유토사의

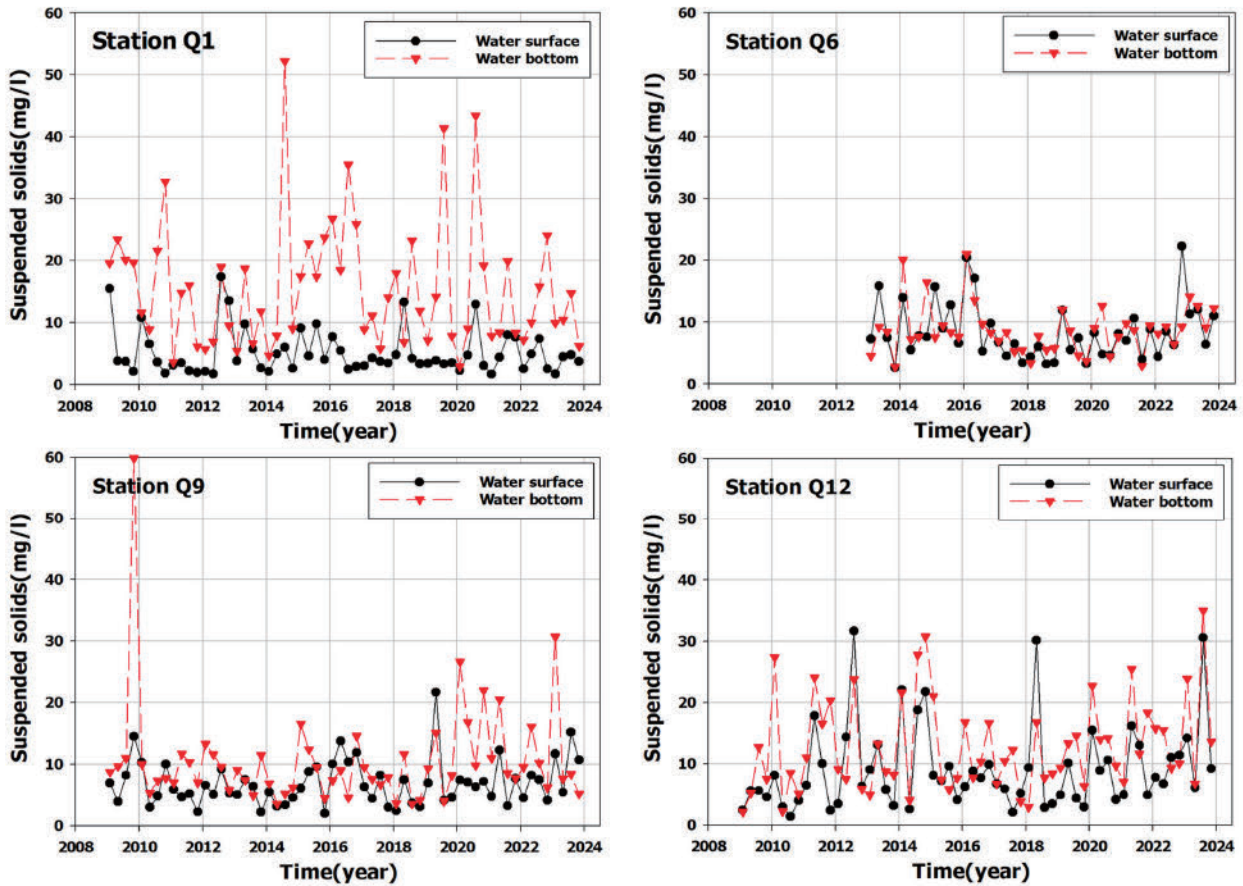


Fig. 4. Time series (left) and correlation (right) between surface and bottom of suspended solids (sediment) at representative 4 survey points.

Table 3. Results of maximum, minimum and average suspended sediment concentrations (mg/L) for each water layer at the survey site

Station	Max. value			Min. value			Ave. value		
	$C_s$	$C_b$	$\Delta$	$C_s$	$C_b$	$\Delta$	$C_s$	$C_b$	$\Delta$
Q1	17.4	52.2	34.8	1.6	2.9	1.3	5.3	15.9	10.6
Q2	34.4	36.4	2.0	0.2	2.3	2.1	6.8	10.7	3.9
Q3	17.8	37.6	19.8	1.6	3.1	1.5	6.4	11.6	5.2
Q4	26.0	40.0	14.0	0.8	2.5	1.7	6.6	12.6	6.0
Q5	27.8	34.0	6.2	0.8	2.5	1.7	7.2	9.3	2.1
Q6	22.3	21.0	-1.3	2.6	2.8	0.2	8.6	8.9	0.3
Q7	19.3	26.1	6.8	1.4	2.3	0.9	7.4	10.8	3.4
Q8	13.7	43.6	29.9	1.3	3.1	1.8	6.5	13.1	6.6
Q9	21.7	59.9	38.2	2.0	3.6	1.6	7.1	11.3	4.2
Q10	34.9	52.0	17.1	1.1	2.8	1.7	8.5	14.4	5.9
Q11	33.4	35.5	2.1	0.3	1.6	1.3	6.7	11.2	4.5
Q12	31.7	35.0	3.3	1.4	2.2	0.8	9.4	13.0	3.6
All data	34.9	59.9	25.0	0.2	1.6	1.4	6.97	11.65	4.68

※  $C_s$  and  $C_b$  represent the suspended sediment concentrations in the surface and bottom layers, respectively. And  $\Delta=C_b-C_s$ .

확산은 표층보다는 저층으로 더 멀리 확산된다고 주장한 바 있기 때문이다.

먼저 데이터 개수에 따른 영향은 앞서 제시된 부산 연안 해수의 부유물질 관측정점 12개소에 대한 매 분기별(2, 5, 8, 11월)의 표층 및 저층의 부유물질 관측자료에서 최근 4년과 전체 15년 데이터를

사용한 경우로 구분하여 식(2)의 임계환경변화량( $d_c$ )을 산정하였다. 또한 표층과 저층의 차이 영향에 대해서는 표층(Surface) 및 저층(Bottom)의 자료와 이를 산술 평균한 값(Mean)으로 구분하여 임계 환경변화량을 산정하였다.

이상의 내용을 반영하여 계산한 결과는 전체 데이터를 계산한 경

**Table 4.** Calculation results of Critical Environmental Variation Quantum of Suspended Sediment in the Busan coast considering sample size and water layer conditions

Case	Division Survey point	Water depth	SS during 4 years (2020.02~2023.11)			SS during 15 years (2009.02~2023.11)			
			$\sigma$ (S.D.)	$n$	$d_c$	$\sigma$ (S.D.)	$n$	$d_c$	
A	Total data /Q1~Q12	Surface	4.9209	192	0.3551	672	4.7973	0.1851	
		Bottom	8.4695		0.6112		7.8595		0.3032
		Mean	5.5719		0.4021		5.2222		0.2015
B1	Q1, Q2, Q3	Surface	5.3537	48	0.7727	180	4.2446	0.3163	
		Bottom	8.6552		1.2493		8.4703		0.6313
		Mean	5.4099		0.7806		5.0427		0.3759
B2	Q5, Q6, Q7, Q8	Surface	3.8551	64	0.4831	192	4.1790	0.3016	
		Bottom	6.6367		0.8296		5.9039		0.4260
		Mean	4.2295		0.5287		4.1433		0.2990
B2-1	Q4, Q5, Q6, Q7, Q8	Surface	3.7114	80	0.4149	252	4.0985	0.2582	
		Bottom	7.2466		0.8102		6.7293		0.4239
		Mean	4.4856		0.5014		4.3750		0.2756
B3	Q9, Q10, Q12	Surface	5.2631	48	0.7597	180	5.6984	0.4247	
		Bottom	9.9492		1.4360		8.9696		0.6686
		Mean	6.5755		0.9461		6.3725		0.4749
B3-1	Q9, Q10, Q11, Q12	Surface	5.7094	64	0.7137	240	5.6775	0.3665	
		Bottom	9.4489		1.1811		8.3982		0.5421
		Mean	6.5953		0.8244		6.0718		0.3919

※ $\sigma$ (S.D.): Standard deviation,  $n$ : Number of data,  $d_c$ : Critical Environmental Variation Quantum of Suspended Sediment (mg/L)

우와 Kang et al.[2004]이 제시한 데이터 개수  $n=200$  범위의 적정 선을 반영한 경우(Case A), 해역별 및 관측정점별로 몇 개씩 구분하여 반영한 경우(Case B)로 나누어서 Table 4와 같이 나타내었다. 여기서 Case B1은 기장 해역을, Case B2는 부산항 해역을, Case B3는 낙동강 하구역 해역을 대표하는 해역으로 생각할 수 있다.

먼저 Case A를 살펴보면 4년간 총 12개 정점의 모든 데이터 ( $n=192$ )를 반영하여 계산한 임계환경변화량( $d_c$ )은 표층이 0.3551, 저층이 0.6112, 평균값이 0.4021이었다. 여기서 계산된 임계환경변화량( $d_c$ ) 평균값은 앞서 Jo[2025]의 Table 1을 통해서 산정한 부산해역의 평균 배경농도를 통해 계산된 0.3353 mg/L와 유사한 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 15년간의 모든 데이터( $n=672$ )를 반영하여 계산한 임계환경변화량( $d_c$ )은 앞서 4년간 자료를 반영한 경우보다 약 1/2정도의 값을 나타내었다. 즉, 표본의 크기가 커짐에 따라서 표준오차가 작아지고 덩달아서 임계환경변화량이 낮아짐을 알 수 있다.

또한 Case B를 살펴보면 4년간 각 관측정점의 데이터( $n=48, 64, 80$ )를 반영하여 계산한 임계환경변화량( $d_c$ )은 대체적으로 매우 큰 값을 보이고 있다. 이에 반해 15년간의 모든 데이터를 반영하여 계산한 경우인 Case B1, Case B2, Case B3에서 계산된 임계환경변화량( $d_c$ ) 평균값은 각각 0.3759, 0.2990, 0.4749의 값을 나타내었다. 즉, 이를 통해 부산해역의 경우 평균 임계환경변화량( $d_c$ )은 0.3~0.5 mg/L 범위내의 값을 가지며 공간적으로 다소 차이를 보이는 하지만 낙동강 하구역 해역이 가장 높고 다음으로 기장해역, 부산항해역의 순으로 줄어드는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 현재 우리나라 해양환경영향평가 및 사업피해조사 분야에서 해상 공사시 환경영향평가 지표인 부유사(SS) 가중 농도 산정 방법의 현주소와 실제 현장에서 산출된 산정 결과들을 수집하여 비교하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 현재 영향평가 및 피해조사 분야에서 적용하는 부유사 가중 농도 산정 방법은 공사 현장의 부유사 평균 농도의 5%를 피해 기준으로 적용하거나 해양환경 변화가 일정 임계값(임계환경변화량)을 초과하는 경우가 일반적이다.

(2) 2022년부터 2025년까지 총 84건의 해역별 사업 평가 보고서에 제시된 평균 부유사 배경농도의 5%를 부유사 가중 농도(기준치)라고 가정할 경우, 동해는 0.31 mg/L, 남해는 0.79 mg/L, 서해는 2.61 mg/L에 해당하였다.

(3) 부산해역의 최근 4년간 총 12개 정점의 매 분기별(2, 5, 8, 11 월)의 표층 및 저층의 부유물질 관측자료를 사용하여 계산한 부유사 가중 농도(임계환경변화량)는 표층이 0.3551, 저층이 0.6112, 평균값이 0.4021이었다.

(4) 부산해역의 경우 평균 부유사 가중 농도(임계환경변화량)는 0.3~0.5 mg/L 범위내의 값을 가지며 공간적으로 다소 차이를 가지는데 낙동강 하구역 해역이 높고 다음으로 기장해역, 부산항해역의 순으로 줄어드는 것으로 평가된다.

(5) 15년간 관측자료를 사용하여 계산한 부유사 가중 농도(임계환경변화량)는 4년간 계산 결과보다 약 1/2정도의 작은 값을 나타내었는데, 데이터 표본의 크기가 커짐에 따라서 표준오차가 작아지

고 덩달아서 입계환경변화량이 낮아짐을 알 수 있다.

(6) 최종적으로 이상의 결과를 통해 우리나라 해역은 물리적, 생태적 특성이 다르기 때문에 해역별로 부유사 가중 농도(또는 입계 환경변화량)에 대한 입계치를 고정된 정량 값을 부여하는 것은 적합하지 않다고 판단된다.

이상에서 얻어진 결과는 해양환경영향평가 및 어업피해조사 분야에서 우리나라 해역별 특성을 반영한 현실적이고 타당한 부유사 가중 농도 및 산정 방법을 선택하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 또한 향후 해상 공사시 부유사 확산과 관련한 피해영향 기준 산정 및 피해 산정에 좀 더 객관적인 표준화 및 가이드라인 정립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## References

- [1] Baek, S.W., 2004, A Study on the standardization of the prediction techniques of ocean environmental change due to the construction works in the ocean, M.S. thesis, Dept. Civil Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea.
- [2] Jeong, J.H., Tac, D.H., Lim, J.H. and Lee, D.I., 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.
- [3] Jo, M.K., 2025, Improvement Measures for Estimating Fisheries Damage Rates from Suspended Sediment Dispersion in Coastal Fisheries Damage Assessments, Doctoral thesis, Interdisciplinary Program of Ocean Industrial Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea.
- [4] Kang, Y.J. and Kim, K.S., 2006, The Case Study on the Application of the Standard Method for the Estimation of Range and Degree of Fisheries Damages Caused by Warm Water Drained by Generating Plants, J. Fish. Bus. Adm., 37(1), 73-93.
- [5] Kang, Y.J., Kim, K.S., Zhang, C.I., Park, C.K. and Lee, J.S., 2004, A New Statistical Approach for the Estimation of Range and Degree of Fisheries Damages Caused by Public Undertaking, J. Fish. Bus. Adm., 35(1), 117-132.
- [6] Kim, C.S., 2018, A Case Study on the Distribution of Compensation for Fishery Loss due to the Damage of Fishing Rights, J. Fish. Bus. Adm., 49(4), 083-097.
- [7] KEI(Korea Environmental Institute), 2003, Study on Improvement of Coastal Flow and Suspended Solid Predictions in the Coastal Zone Developments.
- [8] Lee, J.W., Maeng, J.H., Cho, K.W., Yang, G.W. and Kim, Y.S., 2003, The Movement Characteristics of Suspended Solid(SS) in Harbor Construction(I)- In a Riprap Work, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 6(2), 38-45.
- [9] Lee, K.S., 2015, Review on the Biological Effects of Suspended Solids on Shellfish, Fish, and Seaweed, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 21(1), 109-118.
- [10] MOF(Ministry of Oceans and Fisheries), 2002, Studies on the Estimation of Turbidity Generated by Dredging and Performance of Silt Screens(III).
- [11] MOF(Ministry of Oceans and Fisheries), 2008, Regulations regarding the sea area utilization conference.
- [12] MOF(Ministry of Oceans and Fisheries), 2025, Marine Environment Information System(MEIS), <https://www.meis.go.kr/portal/main.do> (Accessed 2025.04.23.)
- [13] Nam, Y.S., Choo, H.G. and Ryu, G.H., 2023, A Study on the Problems and Improvement measures of Investigation of Fishing Damages Caused by Offshore Wind Power Development, J. Fish. Bus. Adm., 54(2), 091-107.
- [14] Park, S.Y., Kwon, I.H., Lee, J.H., Yoon, S.J., Lee, C.K. and Khim, J.S., 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.
- [15] Tac, D.H., Chung, Y.J., Jun, E.J. and Yang, J.Y., 2022, Reliability Evaluation of the Estimation of Suspended Sediment Dispersion, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 28(6), 890-898.
- [16] Tac, D.H., Oh, H.T., Kim, G.Y. and Lee, D.I., 2015, Assessment and Improvement of Documentation Status on the Statement for the Sea Area Utilization Consultation according to the Project of Ports and Fishery Harbors. J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 21(4), 361-371.
- [17] RIO(Research Institute of Oceanography), 1996, A Study on the Compensation for Damages of Common Property Fisheries due to Construction of New Port in Yeoungil Bay, Seoul National University.
- [18] Yeo, M.Y., Kim, J.K. and Lee, D.I., 2020, Analysis and Improvement of Marine Fish and Fishery Resources based on the Environmental Impact Assessment Items by Ocean Developmental Project, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 23(1), 13-22.
- [19] Yoon, H.S. and Kang, T.S., 2026, A Study on Long-term Variation and Spatial Distribution of Suspended Solids along the Busan Coast, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 29(1), 21-29.

Received 17 March 2026

1st Revised 18 April 2026, 2nd Revised 22 April 2026

Accepted 22 April 2026