

한국 연안 퇴적물에서 유기물의 분포 특성 및 대표지시자 선정

우준식^{1,†} · 최만식² · 박종규³ · 김태하⁴ · 이효진⁵

¹(주)지오시스템리서치 환경화학부 상무이사

²충남대학교 해양환경과학과 교수

³(주)지오시스템리서치 환경화학부 선임

⁴(주)지오시스템리서치 환경화학부 상무이사

⁵(주)지오시스템리서치 부사장

Distribution of Organic Matter Parameters and Selection of Representative Indicators in Coastal Sediments of Korea

Junsik Woo^{1,†}, Mansik Choi², Jongkyu Park³, Taeha Kim⁴, and Hyojin Lee⁵

¹Managing Director, Department of Environmental Chemistry, Geosystem Research Corporation, Gyeonggi 15807, Korea

²Professor, Department of Ocean Environmental Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea.

³Senior Engineer, Department of Environmental Chemistry, Geosystem Research Corporation, Gyeonggi 15807, Korea

⁴Managing Director, Department of Environmental Chemistry, Geosystem Research Corporation, Gyeonggi 15807, Korea

⁵Senior Executive Vice President, Geosystem Research Corporation, Gyeonggi 15807, Korea

요 약

본 연구에서는 국내 연안 퇴적물에서 유기물을 나타내기 위해 분석되고 있는 강열감량(Ignition loss), 화학적산소요구량(Chemical oxygen demand) 및 총유기탄소(Total organic carbon)의 시공간적인 분포 특성을 파악하고, 이 중 대표지시자를 선정하였다. 이를 위해 국내 연안의 다양한 환경 조건과 인위적인 영향을 파악할 수 있는 해양환경측정망과 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사)의 자료를 이용하였다. 국내 연안 퇴적물에서 유기물의 분포 특성을 조사한 결과, 퇴적물의 입자 크기와 양호한 상관관계를 보였으나, 그 기울기는 지역적으로 차이를 보였다. 또한 최근 일부 해역에서 퇴적물 입자 크기의 변동에 비해 유기물 농도가 증가하는 경향이 나타났다. 각각의 유기물 항목별 상관성을 확인하였으나, 이 상관관계는 대체로 낮았기에 퍼센타일(Persentile, 백분위 수) 방법을 사용하여 각 항목별 변환식을 제시하였다. 분석 방법의 신뢰성과 유기물의 기원을 정확히 파악할 필요성을 고려하여 해양퇴적물에서 유기물 항목의 대표지시자로 총유기탄소(TOC)가 적합하다고 판단되었으며, 육상 환경 관리 체계의 일관성을 위해 동일한 항목을 사용하는 것이 적절하다고 결론지었다. 국내 연안 해양퇴적물에서 유기물의 분포는 시공간적으로 변동하고 있으며, 저서생태계에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되어, 해양에서 유기물의 저장고 역할을 하는 하는 해양퇴적물의 변화에 관한 추가적인 연구가 필요하다.

Abstract – This study established representative indicators of ignition loss (IL), chemical oxygen demand (COD), and total organic carbon (TOC), which were analyzed in coastal marine sediments, and presented the spatio-temporal distribution characteristics of the representative indicators. Accordingly, this study used Marine Environment Monitoring as well as National Marine Ecosystem Monitoring Program(coastal ecological survey) data that are reliable and can identify various environmental conditions and anthropogenic impacts. Generally, organic matter in marine sediments off the coast of Korea was strongly correlated with the sediment grain size, but the slope between them showed regional differences. Moreover, the concentration of organic matter has recently shown a higher tendency to increase compared to the size of sediment particles in some sea areas. As the correlation between organic matter items was low, the conversion formula used for each item was presented in percentiles. Considering the reliability of the analysis method and the appropriateness of identifying the origin of organic matter, it was determined that total organic carbon was a suitable representative indicator of organic matter in marine sediments and that it was appropriate to use the same

[†]Corresponding author: jswoo@geosr.com

data for the continuity of terrestrial environment management systems. The distribution of organic matter in marine sediments off the coast of Korea showed spatio-temporal characteristics, and further studies on benthic ecosystems are required because changes in marine sediments, which act as a repository of organic matter in the ocean, would have a significant impact on benthic ecosystems.

Keywords: Total organic carbon(총유기탄소), Chemical oxygen demand(화학적산소요구량), Ignition Loss(강열감량), Organic matter indicator(유기물 대표지시자), Coastal marine sediments(연안 해양퇴적물)

1. 서 론

해양으로 공급되는 유기물(organic matter)은 육상 또는 대기로부터 유입되는 외부기원(allochthonous)과 해역 자체에서 생성되는 자생기원(autochthonous)으로 구분되며(Wu *et al.*[2004]; Michaelis *et al.*[2006]; Noh *et al.*[2006a]), 해양으로 유입된 유기물은 생물에 의해 이용되거나, 침강, 확산, 분해되는 과정을 거치면서 여러 무기물질로 분해되고 일부는 퇴적물로 퇴적된다(Noh *et al.*[2006b]). 퇴적된 유기물은 퇴적물 내 서식하는 생물과 미생물의 먹이로 재순환되고, 분해과정을 거치면서 무기물질의 형태로 다시 수층에 공급된다. 이러한 물질순환 과정에서 최종적으로 이용되지 않은 유기물 일부가 지각으로 영원히 묻히게 된다(Kim *et al.*[2006]). 해양퇴적물 내 유기물 환경을 파악하는 것은 해양환경의 장기적인 변화 과정을 추적하기에 매우 효과적이며, 생물학적으로 퇴적물에 포함된 유기물은 저서생태계에서 먹이원이 되는 등 저서생물 군집의 분포에 대해 밀접하게 연관되어 있다(Berner[1981]; Saetre *et al.*[1997]). 이처럼 해양퇴적물은 해양생태계의 생태학적 균형을 유지하는데 중요한 역할을 하며, 해양환경의 생지화학적 순환에서 유기물의 저장고 역할을 하고 있다.

1960년대 이후 전 세계적으로 연안해역은 공업단지 및 신도시 건설과 같은 활용도가 증가함에 따라 인위적인 오염이 증가하고 있으며(Woo *et al.*[1999]), 우리나라 연안해역은 해안선이 길며 해역별 특성이 뚜렷하여, 다양한 유기물 오염 분포 특성과 다양한 해양생태계를 보유하고 있다. 서해안 지역은 대규모 하천이 존재하며 하구역이라는 환경적인 특성을 가지고 있어, 한강 하구역(Kim *et al.*[2013]), 영산강 하구역(Woo *et al.*[2014]), 천수만(Kim *et al.*[2014]), 대천항(Shin *et al.*[2014]), 새만금 주변 해역(Park *et al.*[2002]) 등에서 연구가 진행되었으며, 육상 유기물의 유입 관점에서 유기물의 거동 기작에 대한 다양한 연구가 주로 수행되었다. 남해안 지역은 해안선이 복잡하고 해수 유동이 제한적인 반폐쇄적인 내만이 존재하는 지역으로, 특히 인간 활동으로 인한 해역 이용 증가와 오폐수로 인한 다량의 유기물 유입으로 인해 부영양화 및 빈산소 수괴 등 다양한 환경 문제가 나타나고 있다. 이 지역에서는 주로 가막만(Noh *et al.*[2006]), 마산만(Hwang *et al.*[2006]), 통영거제연안(Hwang *et al.*[2021]; Yang *et al.*[2016]), 자란만(Hwang *et al.*[2018])과 같은 지역에서 유기물 분포 특성에 대한 연구가 수행되었다. 동해안 지역은

대규모 하천이 적고, 수심이 깊은 대양의 특성을 갖추고 있으며, 주로 퇴적물 내 유기물의 기원을 파악하는 연구들이 주로 수행되었다. 이 지역에서는 주로 영일만(Lee *et al.*[2008]), 울산만(Hwang *et al.*[2014]), 독도 주변 해역(Jun *et al.*[2013]), 후포 분지(Kim *et al.*[2010]), 울릉 분지(Kim *et al.*[2004]; Park *et al.* 2002)와 같은 지역에서 연구가 수행되었다. 이와 같이 다양한 환경에서 저서환경의 유기물을 나타내는 지표는 각 연구자마다 강열감량(IL : Ignition Loss), 화학적 산소 요구량(COD: Chemical Oxygen Demand), 총유기탄소(TOC : Total Organic Carbon)등을 사용하였으며(Kang *et al.*[1993]; Hwang *et al.*[2014]; Noh *et al.*[2006b]), 최근 연구 동향으로는 주로 총유기탄소가 선호되고 있다(Kim *et al.*[2022]; Walinsky *et al.*[2009]; Lee *et al.*[2020]; Zhou *et al.*[2018]). 더구나 육상 환경에서도 유기물을 평가하는 지표로서 총유기탄소가 주로 이용되고 있다(Ministry of Environment[2019]; Woo *et al.*[2023]).

해양퇴적물 내 유기물에 대한 대부분의 연구가 특정 지역의 분포 특성을 파악하는데 초점을 두고 있어, 국내 연안 퇴적물 내 유기물의 전반적인 시공간적 분포 특성에 대해서는 파악되지 않은 것이 실정이다. 따라서 이 연구에서는 국내 연안 퇴적물에서 유기물의 분포 특성을 파악하고, 연안해역에서 장기간 조사된 자료를 바탕으로 강열감량, 화학적산소요구량 및 총유기탄소의 관계를 정립하여, 국내 연안 퇴적물의 대표적인 유기물 지표를 선정하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구 방법

본 연구에서 사용된 자료는 해양수산부의 ‘해양환경측정망(Marine Environment Monitoring)’과 ‘국가해양생태계종합조사-연안생태조사(National Marine Ecosystem Monitoring Program-Coastal ecological survey)’에서 얻어진 결과이며 조사 및 분석 방법은 ‘해양환경공정시험기준(National Institute of Fisheries Science[2023])’과 ‘국가해양생태계 종합조사 지침서(Ministry of Oceans and Fisheries[2022])’에 따라 수행되었다(Fig. 1).

해양환경측정망 자료는 동해 해역 38개 정점, 남해 해역 83개 정점, 서해 해역 47개 정점에서 2015년부터 2022년까지 조사된 평균입도(Mean grain size)와 강열감량, 화학적산소요구량, 산화발성황화물(AVS : Acid Volatile Sulfide)자료를 이용하였다.

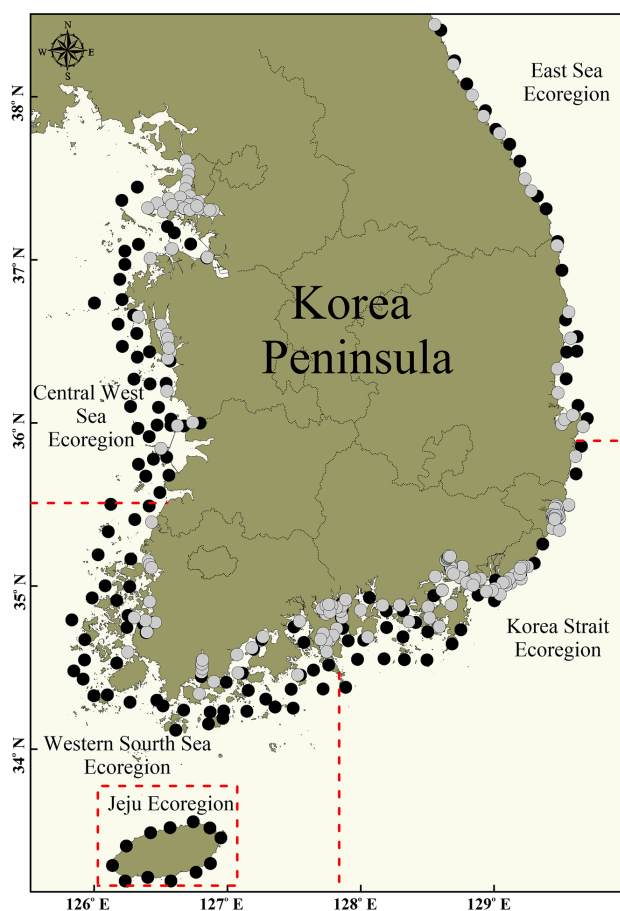


Fig. 1. A map showing the sampling locations in Marine Environment Monitoring (●) and National Marine Ecosystem Monitoring Program (●).

그리고 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사) 자료는 동해 해역 23개 정점, 남해 해역 61개 정점, 서해 해역 71개 정점에서 2015년부터 2022년까지 조사된 평균입도, 강열감량, 총유기탄소, 총질소(TN : Total Nitrogen) 자료를 이용하였다.

2.2 분석 방법

퇴적물의 입도 분석은 습시료를 4Φ체를 이용하여 습식체질(wet sieving) 하여 조립질과 세립질 부분으로 구분하였다. 4Φ 이하 조립질 퇴적물은 건식체질(dry sieving)을 이용하고, 4Φ 이상 세립질 퇴적물은 피펫팅 또는 기기분석(Mastersize2000, Malvern, UK)을 통해 시료를 1Φ 간격으로 분석 한 후, Folk and Ward(1957)의 그래픽 방법에 따라 조직변수를 산출하였다.

강열감량은 건조된 퇴적물을 회화로에 넣고 550℃에서 4시간 동안 회화시킨 후 무게차이를 이용하여 측정하였다. 화학적 산소요구량은 티오황산나트륨($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)을 적정을 통한 알카리성 과망간산칼륨(KMnO_4)법을 이용하였으며, 소비된 과망간산칼륨량으로부터 이에 해당하는 산소의 양을 측정하였다. 산화발성황화물은 습식퇴적물 약 2 g을 기체발생관에 넣고

황산을 첨가한 발생되는 황화수소를 검지관에 흡수시켜 황의 양을 정량하는 황검지관법으로 분석하였다.

총유기탄소와 총질소는 분말화된 퇴적물 시료 10 mg을 은(Ag) 용기에 넣고 1M 염산으로 반응시켜 탄산칼슘(CaCO_3)를 제거한 후, 원소분석기(Automatic Elemental Analyzer, Flash EA 1112 series)를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 연안 퇴적물에서 퇴적상 및 유기물의 공간적인 분포 특성

해양환경측정망에서 관측된 평균입도, 강열감량, 화학적 산소요구량, 산화발성황화물 자료와 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사)의 평균입도, 강열감량, 총유기탄소 총질소 자료를 이용하였으며, 2015년부터 2022년까지 공간적인 평균값을 Fig. 2에 제시하였다.

국내 연안 퇴적물의 평균입도는 서해 북부 및 중부 해역에서 주로 0~4Φ의 값을 보이며, 서해 남부 해역과 남해 서부 해역에서는 대부분 4~6Φ로 나타났다. 남해 동부 해역에서는 6~8Φ로 가장 세립한 평균입도를 보였으며, 동해와 제주에서는 0~6Φ의 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 평균입도의 분포 특성은 해양환경측정망 및 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사) 결과에서 일관성 있게 나타났으며, 이러한 퇴적환경의 공간적인 분포 특성을 기반으로 서해 중부, 서남해역, 대한해협, 동해 및 제주로 구분하였다. Rho *et al.*[2012]이 국내 연안해역을 지형적 특성, 수심, 해류 특성, 조석의 영향 등에 따라 5개의 생태구(서해중부, 서남해역, 대한해협, 동해 및 제주 생태구)로 구분하여 제시하였으며, 본 연구에서 퇴적상을 기반으로 한 해역 구분과 동일한 양상을 보여 유기물의 분포 특성을 5개의 생태구로 구분하여 제시하였다.

해양환경측정망과 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사)에서 강열감량은 서해중부 생태구의 경우 1.09~5.42%(평균 2.72%), 0.53~7.73%(평균 2.71%), 서남해 생태구의 경우 2.24~7.60%(평균 4.17%), 1.25~9.77%(평균 5.23%), 대한해협 생태구의 경우 2.18~12.57%(평균 6.82%), 5.44~14.37%(평균 10.40%), 동해 생태구의 경우 2.26~8.04%(평균 4.26%), 3.51~10.56%(평균 6.81%)의 범위를 보였다. 서남해 생태구에서 두 자료 간의 차이는 정점의 수와 정점 위치의 차이로 인해 나타났지만, 대부분의 생태구에서는 유사한 농도 수준을 가지는 것으로 조사되었다. 강열감량의 공간적인 분포 특성은 서해중부 생태구에서 가장 낮고 대한해협 생태구에서 가장 높았으며, 동해 생태구와 서남해역 생태구에서는 그 사이의 농도 수준을 보였다. Kang *et al.*[1993]에 따르면 서해중부 생태구인 경기만, 아산만, 천수만, 군산연안의 강열감량은 1.4~5.7%(평균 4.0%)이며, 대한해협 생태구인 한산-거제연안, 진해만, 부산연안의 강열감량은 10.6~10.8%(평균 10.7%)로 금회 결과

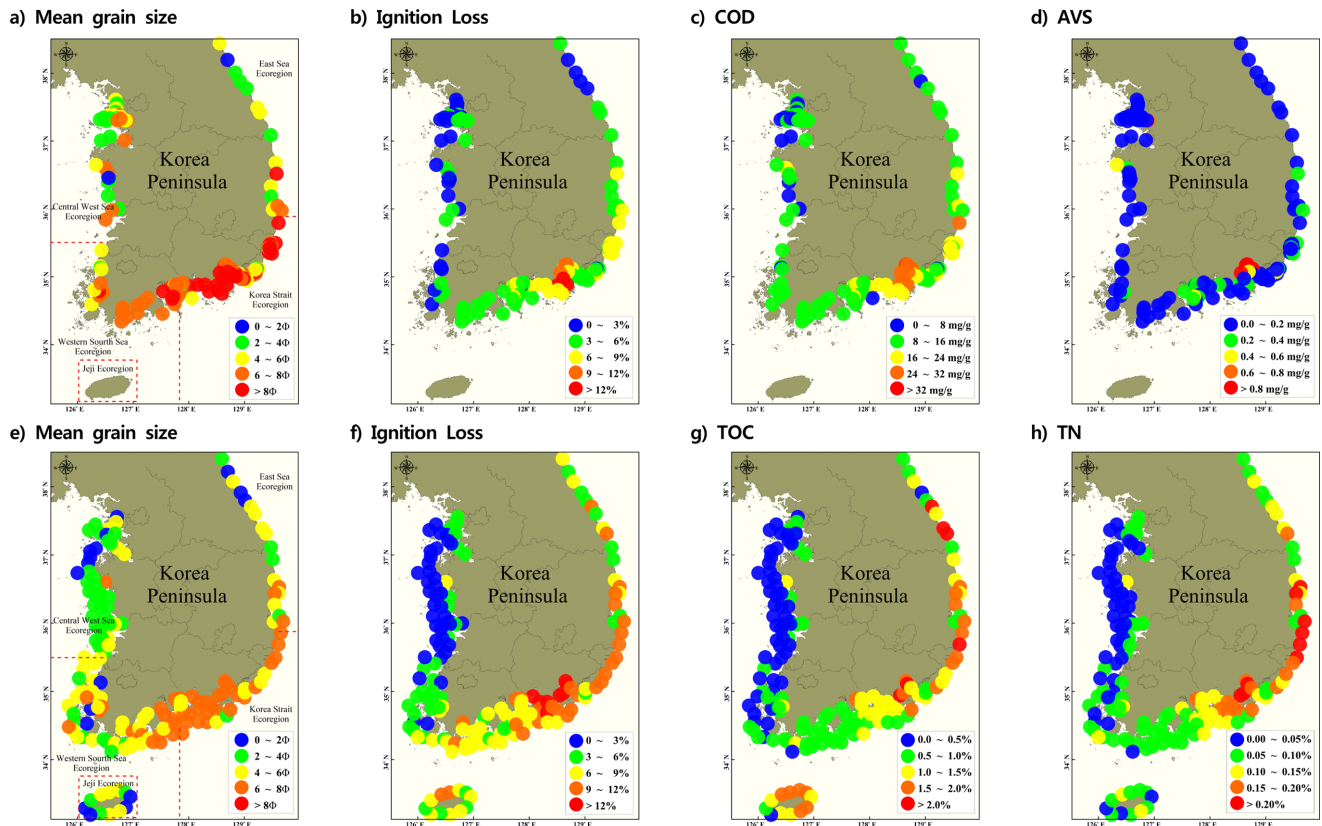


Fig. 2. Spatial distribution of mean grain size(a), Ignition loss(b), COD(c), AVS(d) concentrations in surface sediments of Marine Environment Monitoring and mean grain size(e), Ignition loss(f), TOC(g), TN(h) concentrations in surface sediments of National Marine Ecosystem Monitoring Program.

와 동일한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 화학적산소요구량은 서해중부 생태구에서 3.80~16.45 mg/g(평균 9.49 mg/g), 서남해 생태구에서 7.59~19.34 mg/g(평균 10.75 mg/g), 대한해협 생태구에서 4.88~34.74 mg/g(평균 18.46 mg/g), 동해 생태구

에서 7.73~20.65 mg/g(평균 11.13 mg/g)으로 나타났다. 일반적으로 퇴적물 속 황화수소 함량이 해양생물에 큰 영향을 미치기 때문에 퇴적물에서 산화발성황화물의 농도가 퇴적환경 악화 지표로 이용되고 있다(Lee[2011]). 산화발성황화물은 서해

Table 1. Sediment properties of the studied area during 2015~2022.

Study region		Year	Mean grain size (Φ)	Ignition Loss (%)	COD (mg/g)	TOC (%)
Marine Environment Monitoring	Centra West Sea Ecoregion (n=311)	2015~2022	4.37~5.13 (4.64)	2.17~3.57 (2.74)	5.09~22.31 (9.50)	-
	Western South Sea Ecoregion (n=174)	2015~2022	6.22~7.19 (6.83)	1.26~6.17 (2.74)	7.58~19.41	-
	Korea Strait Ecoregion (n=759)	2015~2022	7.40~7.80 (7.63)	3.13~9.83 (6.69)	10.63~25.23 (18.14)	-
	East Sea Ecoregion (n=128)	2015~2022	3.00~5.74 (4.67)	1.23~7.28 (4.26)	5.31~16.87 (11.13)	-
National Marine Ecosystem Monitoring	Centra West Sea Ecoregion (n=280)	2015~2022	2.73~3.39 (3.16)	2.04~3.03 (2.57)	-	0.25~0.45 (0.34)
	Western South Sea Ecoregion (n=498)	2015~2022	4.17~5.21 (4.72)	4.97~7.26 (5.61)	-	0.43~0.84 (0.59)
	Jeju Sea Ecoregion (n=104)	2015~2022	1.99~4.03 (3.39)	5.79~8.37 (7.07)	-	0.64~2.50 (1.42)
	Korea Strait Ecoregion (n=304)	2015~2022	5.90~8.28 (6.53)	10.50~11.79 (6.53)	-	1.04~1.86 (1.43)
	East Sea Ecoregion (n=162)	2015~2022	3.69~4.55 (4.18)	5.82~7.88 (6.86)	-	0.89~1.87 (1.31)

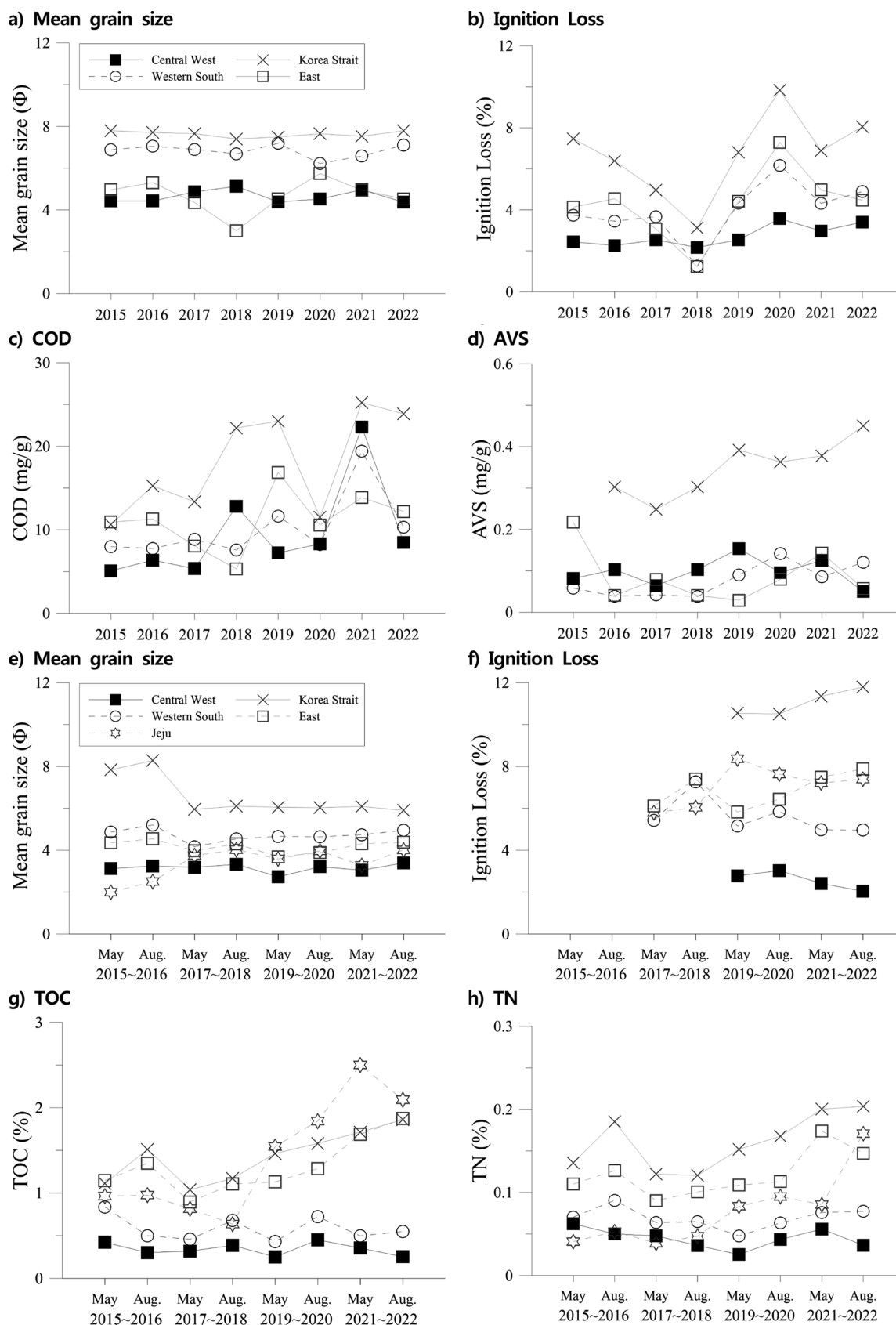


Fig. 3. Seasonal variations of mean grain size(a), Ignition loss(b), COD(c), AVS(d) concentrations in surface sediments of Marine Environment Monitoring and mean grain size(e), Ignition loss(e), TOC(f), TN(h) concentrations in surface sediments of National Marine Ecosystem Monitoring Program during 2015~2022.

중부 생태구에서 N.D~0.60 mg/g(평균 0.10 mg/g), 서남해역 생태구에서 N.D~0.45 mg/g(평균 0.10 mg/g), 대한해협 생태구에서 N.D~2.16 mg/g(평균 0.37 mg/g), 동해 생태구에서 0.02~0.28 mg/g(평균 0.09 mg/g)로 나타났다. 산화발성황화물은 대부분의 해역에서 0.2 mg/g 이하로 조사되었으나, 일부 연안에 가까운 해역과 반폐쇄성만에서 높은 특징을 보였다. 국내 화학적산소요구량과 산화발성황화물의 환경기준은 제시되지 않아 일본의 해저퇴적물 기준(COD : 20 mg/g, AVS : 0.2 mg/g, Yokoyama[2000])과 비교 하였을 때 주로 마산만 및 진해만등 반폐쇄성만이 존재하는 해역에서 기준을 초과하였다. 유기물 항목의 분포 특성은 평균입도의 분포 특성과 유사하게 나타났으며, 5개의 생태구별로 유기물의 분포가 특징적으로 구분되었다.

3.2 연안 퇴적물에서 퇴적상 및 유기물의 시간적인 변동 특성

해양환경측정망과 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사)의 2015년부터 2022년까지 5개 생태구별 평균 시계열 자료를 Table 1과 Fig. 3에 제시하였다. 해양환경측정망은 매년 2월 조사를 수행하였으며, 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사)는 홀수년도에는 서해중부 및 서남해 생태구를, 짝수년도에는 제주, 대한해협 및 동해 생태구를 5월과 8월에 수행하였다.

평균입도는 모든 자료에서 각 생태구별로 유사한 수준을 유지하고 있으며, 급격한 증감을 보이지 않았다. 단, 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사)에서 동해 생태구의 2015~2016년과 이후 자료는 급격한 변화를 보이고 있으며, 이는 입도분석의 세립질 부분에 대한 분석이 침강법(2015~2016년)과 레이

저회절법(2017~2022년)의 차이로 판명되었다. Jung *et al.*[1993]과 Choi *et al.*[1999]에 따르면 침강법은 레이저회절법에 비해 세립한 입자를 과다하게 측정하는 경향이 있다고 알려져 있다. 평균입도는 대한해협 생태구에서 가장 세립한 특징을 보이며, 서해 중부 생태구에서 가장 조립한 특징을 보였다. 강열감량은 대부분의 생태구에서 2018년 이후 증감을 보이지만 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며, 특히 대한해협 생태구에서는 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 화학적산소요구량은 2017년 이후 꾸준히 증가하는 경향을 보이며, 연도별 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 산화발성황화물은 대한해협 생태구에서는 0.2~0.5 mg/g의 범위에서 변동하는 것으로 나타났으며, 2017년 이후 꾸준히 증가하고 있다. 나머지 생태구에서는 0.2 mg/g 이하의 수준에서 변동하는 것으로 나타났다. 총유기탄소는 서해 중부 및 서남해 생태구에서는 1% 이하의 농도 수준 이내에서 변동하며, 큰 변화 없이 일정한 수준을 보이는 것으로 나타났다. 하지만 동해, 제주, 및 대한해협 생태구에서는 2017~2018년 조사 이후 꾸준히 증가 경향을 보이며, 최근에는 약 2%의 농도 수준으로 나타났다. 총질소도 총유기탄소와 유사한 변동 특성을 보이는 것으로 조사되었다.

기존에 보고된 각 해역별 자료는 각 생태구별로 구분하여 Table 2에 제시하였다. 서해중부 생태구 지역인 경기만, 군산 연안, 웅진군 연안 및 천수만에서 평균입도는 4.2~5.1Φ, 강열감량은 1.29~4.30%, 화학적산소요구량은 2.68~4.19 mg/g, 총유기탄소는 0.19~0.53%의 범위로 제시되었다(Kang *et al.*[1993]; Part *et al.*[2002]; Kim *et al.*[2013]; Kim *et al.*[2014]). 서남해

Table 2. Mean of mean grain size, ignition loss, COD and TOC concentration in Korea coastal sediments.

Study region		Year	Mean grain size (Φ)	Ignition Loss (%)	COD (mg/g)	TOC (%)	Reference
Central West Sea Ecoregion	Kyeonggi Bay	1993		4.30	4.05	0.53	Kang <i>et al.</i> [1993]
	Gunsan Coast	2001	-	1.29	2.68	0.22	Park <i>et al.</i> [2002]
	Ougjin-gun Coast	2011	4.20	1.92	3.37	0.19	Kim <i>et al.</i> [2013]
	Cheonsu Bay	2012	5.10	4.09	4.19	0.48	Kim <i>et al.</i> [2014]
Western South sea Ecoregion	Deukryang bay	1993		6.40	12.90	0.61	Kang <i>et al.</i> [1993]
	Yeoja Bay	1993		6.80	14.53	0.79	Kang <i>et al.</i> [1993]
	Yeoja Bay	2011				0.84	Choi <i>et al.</i> [2013]
	Doam bay	2009~2011	-	-	-	0.90	Cho and Cho[2015]
Jeju Sea Ecoregion	Jeju western coast	2007	5.84	-	-	0.66	Youn and Kim[2008]
Korea strait Ecoregion	Busan Harbor	1992	-	-	17.45	2.49	Park <i>et al.</i> [1995]
	Gamak Bay	2000	-	7.10	30.98	1.03	Noh <i>et al.</i> [2006a]
	Masan Harbor	2005	7.20	11.20		2.30	Hwang <i>et al.</i> [2006]
	Ulsan Bay	2011	7.20	7.00	9.70	1.07	Hwang <i>et al.</i> [2014]
	Goseng Bay	2014	9.19	-	-	1.83	Lee <i>et al.</i> [2017]
	Jaran bay	2014	9.30	-	-	1.74	Hwang <i>et al.</i> [2018]
	Tongyoung Coast	2015	-	-	-	1.10	Yang <i>et al.</i> [2016]
	Gwangyang Bay	2001~2002	7.06	-	-	0.89	Hyun <i>et al.</i> [2003]
	Geoje Coast	2014~2015	-	-	-	2.27	Hwang <i>et al.</i> [2021]
	Central Part	2022~2023	-	8.02	27.21	0.91	Noh <i>et al.</i> [2006b]
	Youngil Bay	1993		6.40	20.75	1.23	Kang <i>et al.</i> [1993]
	Youngil Bay	2001~2002	3.80	-	-	1.00	Lee <i>et al.</i> [2008]

역 생태구 지역인 득량만, 여자만 및 도암만에서 강열감량은 6.40~6.80%, 화학적산소요구량은 12.90~14.53 mg/g, 총유기탄소는 0.61~0.90%의 범위로 조사되었다(Kang *et al.*[1993]; Choi *et al.*[2013]; Cho and Cho[2015]). Youn and Kim[2008]에 따르면 제주 해역에서 평균입도는 5.84Φ, 총유기탄소는 0.66%로 제시되었다. 대한해협 생태구의 경우 부산항, 가막만, 마산항, 울산만, 고성만, 자란만, 통영 연안, 광양만, 거제 연안 및 남해 중부 해역에서 평균입도는 7.06~9.30Φ, 강열감량은 7.00~11.20%, 화학적산소요구량 9.70~30.98 mg/g, 총유기탄소 0.89~2.49%의 범위로 조사되었다(Park *et al.*[1995]; Noh *et al.*[2006a]; Hwang *et al.*[2006]; Lee *et al.*[2017]; Hwang *et al.*[2018]; Yang *et al.*[2016]; Hyun *et al.*[2003]; Hwang *et al.*[2021]; Noh *et al.*[2006b]). 동해 생태구인 영일만의 평균입도는 3.80Φ, 강열감량은 6.40%, 화학적산소요구량은 20.75 mg/g, 총유기탄소는 1.00~1.23%로 나타났다(Kang *et al.*[1993]; Lee *et al.*[2008]). 국내 연안 퇴적물에서 기존에 보고된 자료와 본 연구 자료를 비교한 결과, 모든 항목에서 유사한 수준으로 나타났다. 다만, 본 연구에서는 최근 유기물 항목이 증가하는 경향을 제시하였으나, 기존 문헌 자료에서는 이러한 경향을 파악하지 못한 것으로 나타났다. 이는 기존 문헌 조사가 지역적인 특성 파악에 주로 중점을 두었으며, 연속된 조사 정점과 시기가 아니기 때문에 해당 경향을 파악하지 못했을 가능성이 있다. 반면에 본 연구에서는 국내 연안 전지역을 동일한 조사 지점과 시기에 정기적으로 조사하여 해당 경향을 파악할 수 있었다.

3.3 연안 퇴적물에서 유기물의 대표 지시자 설정

해양퇴적물에서 유기물은 다양한 존재와 형태를 존재하며, 그 공급원 역시 다양하여 유기물을 정량적으로 측정하는 방법은 매우 중요하다. 이에 따라 해퇴적물 내 유기물 함량을 정확히 분석하기 위해 다양한 분석 방법들이 개발되어 왔다(Kim *et al.*[2006]). 보통 해양퇴적물의 유기물을 정량하는 방법으로는 다음과 같은 방법이 사용된다. 강열감량 분석법은 퇴적물을 고온으로 가열하여 무게 변화를 측정하며, 화학적산소요구량 분석법은 강한 산화제를 이용하여 탄소화합물을 선택적으로 산화시켜 그 무게를 측정한다. 총유기탄소 분석법은 특정시약과 반응시킨 후 퇴적물로부터 나오는 이산화탄소를 측정하고 있다.

강열감량은 다른 방법에 비해 상대적으로 간편하게 시험할 수 있는 장점이 있으며, 다양한 종류의 퇴적물에 일반적으로 적용할 수 있는 특징을 가지고 있다. 하지만 이 방법은 고온에서 광물격자 내부의 수분 및 약한 화합물들이 산화될 수 있어 오차를 발생시킬 수 있는 단점이 있다(National Institute of Fisheries Science[2023]; Bisuti *et al.*[2004]). 화학적산소요구량은 퇴적물 내 유기물을 간접적으로 측정하는 방법으로, 유기물이 산화될 때 소비되는 산소량을 측정한다. 이 방법은 유기물의 양을 산소로 추정하는데 사용되며, 환원 환경의 퇴적물에서는

과대평가 될 수 있는 단점이 있다. 또한 산화 환경이나 난분해성 유기물이 함유된 경우 유기물의 양이 과소평가 될 가능성이 있다(Froelich[1980]).

총유기탄소의 분석에 있어서는 고온연소법(high temperature combustion)을 사용하는 원소분석기(CHN analyzer)를 권장하고 있다. 이 방법은 1000℃ 이상의 고온에서 산소를 이용하여 퇴적물 내 유기탄소를 산화시키는 것으로, 생/난분해성 유기

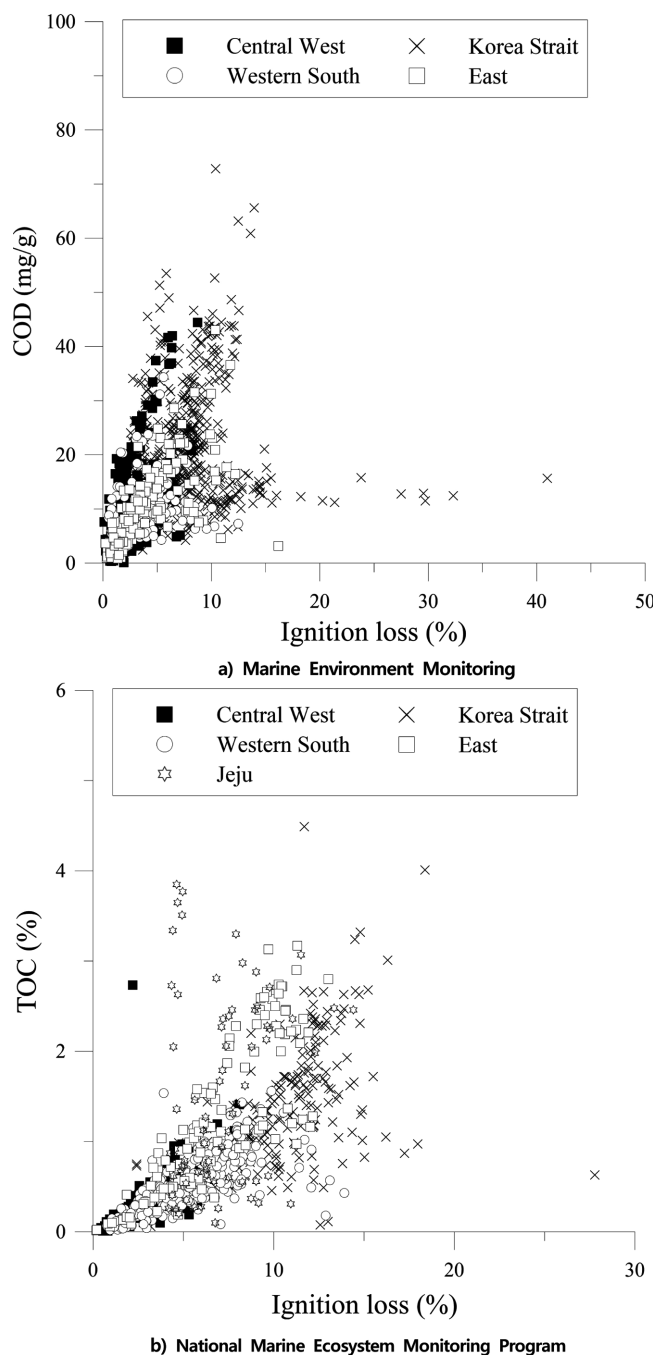


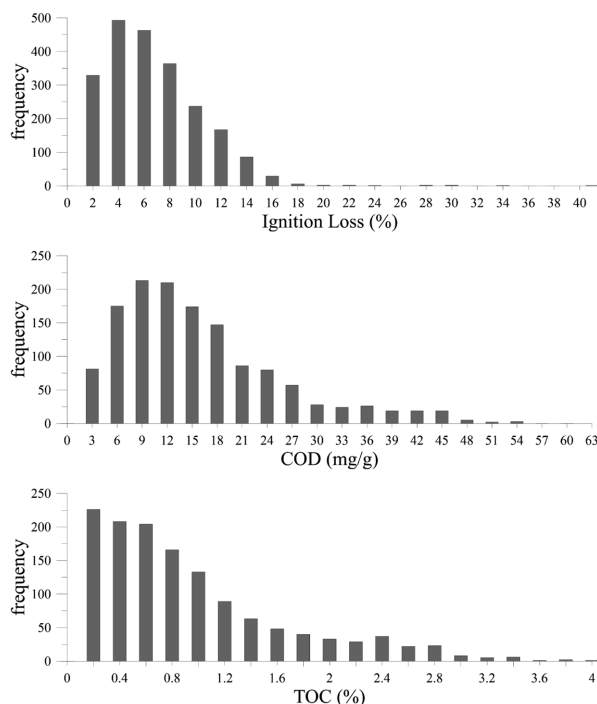
Fig. 4. Correlation of IL vs. COD in surface sediments of Marine Environment Monitoring(a) and Correlation of IL vs. TOC in surface sediments of National Marine Ecosystem Monitoring Program(b).

물을 모두 산화시킬 수 있어 가장 신뢰성이 높은 방법으로 알려져 있다(Monedero *et al.*[1996]; Richelle *et al.*[1997]; King *et al.*[1998]; Kim *et al.*[2006]). 분석 방법론적으로 봤을 때, 해양퇴적물 내 유기물을 분석할 때 강열감량이나 화학적산소요구량

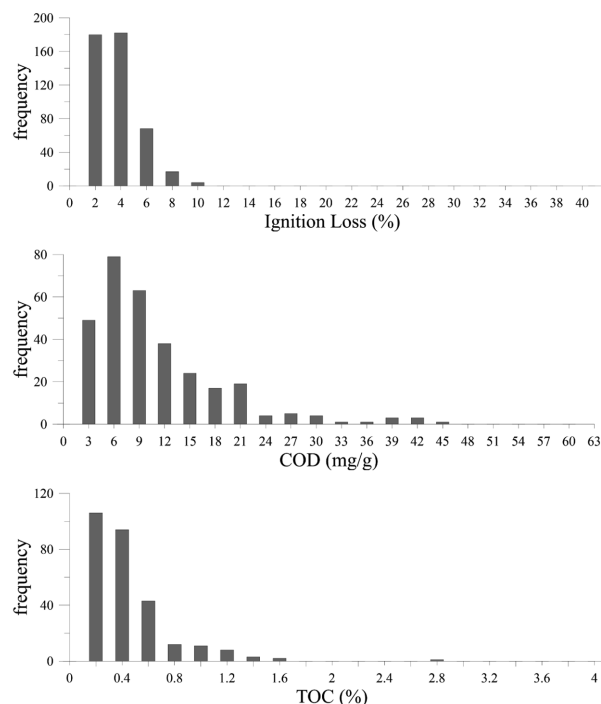
보다 총유기탄소가 더 적합한 선택지로 여겨지고 있다.

최근 연구에서는 유기물 항목을 모두 포함하여 제시하는 경향이 있지만, 과거의 자료들은 일부 항목만 제시하는 경우가 있었으며, 또한 해양오염퇴적물 조사 및 정화 복원 범위 등에

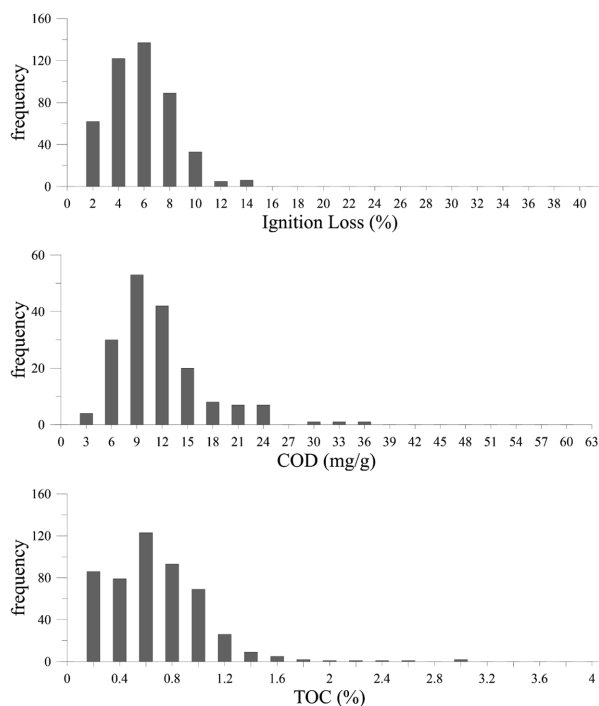
a) Korea coastal



b) Central West sea Ecoregion



c) Western South sea Ecoregion



d) Jeju sea Ecoregion

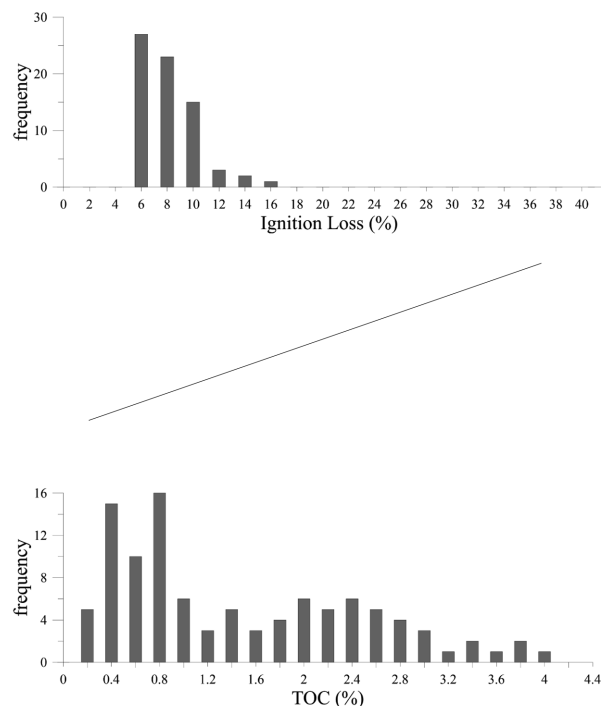


Fig. 5. Distribution of IL, COD and TOC by Korea coastal, Central West sea Ecoregion, Western South sea Ecoregion, Jeju sea Ecoregion, Korea Strait Ecoregion, and East sea Ecoregion.

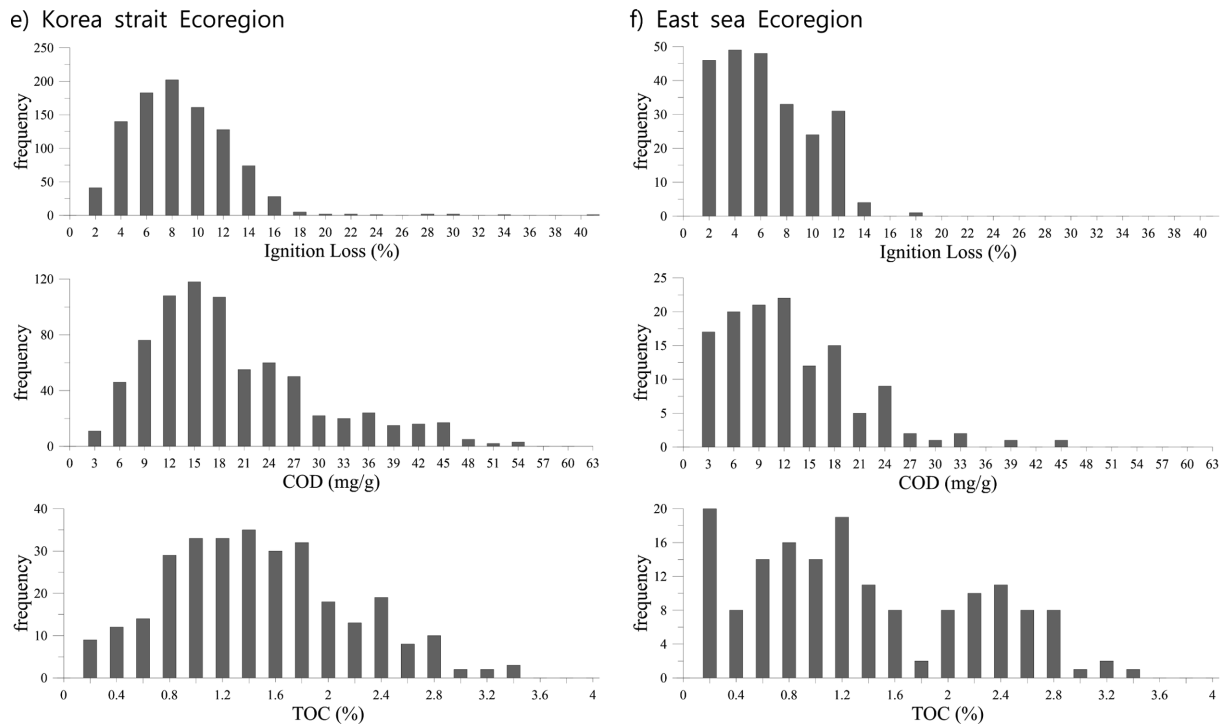


Fig. 5. (continued)

관한 규정(Ministry of Oceans and Fisheries[2018])에 따르면 별표 2의 '부영양화 관련 평가 항목, 기준농도 및 평가점수' 항목으로 강열감량, 화학적산소요구량, 산화발성황화물로 규정되어 있다. 이러한 과거 자료의 활용 가능성과 해양오염퇴적물의 평가 항목에 대한 정보를 상호 보완적인 자료로서 활용하기 위해, 본 연구에서는 각 유기물 항목의 상관관계를 파악하여 항목별 전환식을 제시하였다.

일반적으로 각각의 유기물 항목은 상관관계가 높은 것으로 알려져 있으며, Ouyang and Lee[2020]에 따르면 강열감량과 총유기탄소의 전환식은 맹그로브(mangrove) 조간대에서 $Y(\text{TOC}) = 0.21X(\text{IL})^{1.12}$ ($R^2 = 0.86$), 염습지(saltmarsh)에서 $Y(\text{TOC}) = 0.52X(\text{IL}) - 1.17$ ($R^2 = 0.99$)로 제시되어 있으며, 육상 토양의 경우 총유기탄소와 강열감량의 비를 Van Bemmelen factor($\text{TOC}/\text{IL} : 0.58$)로 정의하고 있다(Minasny *et al.*[2020]). 하지만 본 연구에서는 해역별 및 시기별 차이로 인해 상관관계를 통한 직접적인 전환식을 도출하기 어려운 상황으로 판단되었다(Fig. 4). 이러한 문제를 해결하기 위해 퍼센타일 분석 방법을 적용하였으며, 퍼센타일 분석은 규정된 집단 내에서 특정값의 상대적 위치를 백분위 수로 나타내어, 전체자료의 분포 특성과 적절성을 파악하는데 활용되고 있다(Woo *et al.*[2023]). 강열감량, 화학적산소요구량 및 총유기탄소의 분포는 비정규분포로 나타났으며, 각 생태구별로 최대 빈도 농도의 구간이 서로 다르게 나타나 지역적인 배경농도의 차이로 설명된다(Fig. 5).

퍼센타일 분석에 사용된 자료는 연안 전체 2,185개, 서해중

부 생태구 451개, 서남해역 생태구 454개, 제주 생태구 71개, 대한해협 생태구 973개, 동해 생태구 236개를 이용하였다(Table 3). 퍼센타일로 분석된 강열감량과 화학적산소요구량 및 총유기탄소의 관계는 중앙값을 기준으로 국내 연안 전체 자료에서는 5.11%, 12.11 mg/g, 0.64%이며, 서해 중부 생태구에서 7.02%, 15.61 mg/g, 1.34%로, 서남해역 생태구에서 4.51%, 8.99 mg/g, 0.53%로, 대한해협 생태구에서 7.02%, 15.61 mg/g, 1.34%로, 동해 생태구에서는 5.02%, 9.70 mg/g, 1.12%로 나타났다. 제주 생태구에서는 화학적산소요구량의 관측 자료가 없어 강열감량과 총유기탄소만 제시하였으며, 중앙값을 기준으로 6.83%, 0.98%로 제시되었다. 국내 연안 전체 자료의 강열감량에 대한 총유기탄소의 전환식은 $Y(\text{TOC}) = 0.151X(\text{IL}) - 0.1013$ ($R^2 = 0.99$)로 나타났으며, 화학적산소요구량에 대한 총유기탄소는 $Y(\text{TOC}) = 0.0651X(\text{COD}) - 0.1272$ ($R^2 = 0.98$)의 전환식을 보였다. 각 생태구에 대한 강열감량과 화학적산소요구량에 대한 총유기탄소의 전환식은 Table 4에 제시하였다. 단, 제주 생태구의 경우 자료의 수가 적어서 유기물 항목의 분포 특성이 명확하게 파악되지 않아서 전환식을 제시하지 않았다. 총질소는 총유기탄소 분석과 동일한 분석장비인 원소분석기를 사용하여 동등한 수준의 신뢰성을 가지는 분석이 가능하다. 일반적으로 총유기탄소와 총질소의 비율을 이용하여 육상 기원 유기물과 해양 기원 유기물을 구분할 수 있다. 이는 육상에서 유입된 유기물과 해양 내에서 생성된 유기물 간의 화학적인 특성 차이를 이용하여 유기물의 기원을 추정하는 유용한 방법 중 하나이다.

Table 3. Percentile of IL, COD and TOC by Korea coastal, Central West sea Ecoregion, Western South sea Ecoregion, Jeju sea Ecoregion, Korea Strait Ecoregion, and East sea Ecoregion.

Area		100%	95%	90%	85%	80%	75%	70%	65%	60%	median	average
Korea coastal	IL	0.11	1.05	1.62	2.00	2.36	2.88	3.35	3.77	4.16	5.11	5.73
	COD	0.12	2.79	4.34	5.35	6.28	7.17	8.14	9.14	10.10	12.11	14.53
	TOC	0.01	0.07	0.13	0.19	0.25	0.31	0.37	0.44	0.50	0.64	0.86
Central West sea Ecoregion	IL	0.11	0.68	0.87	1.06	1.28	1.49	1.68	1.84	2.02	2.33	2.68
	COD	0.12	1.68	2.34	2.92	3.71	4.41	4.91	5.25	5.91	7.08	9.49
	TOC	0.01	0.03	0.04	0.07	0.10	0.14	0.15	0.19	0.22	0.27	0.34
Western South sea Ecoregion	IL	0.53	1.18	1.73	2.11	2.57	2.99	3.35	3.71	3.98	4.51	4.80
	COD	2.08	4.35	5.12	5.55	6.03	6.43	7.10	7.59	8.13	8.99	10.25
	TOC	0.02	0.10	0.14	0.18	0.23	0.30	0.37	0.42	0.45	0.53	0.58
Jeju sea Ecoregion	IL	4.18	4.39	4.46	4.62	4.75	4.94	5.15	5.72	6.16	6.83	7.07
	COD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TOC	0.08	0.21	0.27	0.34	0.44	0.56	0.61	0.66	0.73	0.98	1.36
Korea strait Ecoregion	IL	0.15	2.12	2.89	3.65	4.10	4.61	5.20	5.72	6.22	7.02	7.54
	COD	0.98	5.35	6.89	8.29	9.60	10.94	11.66	12.64	13.51	15.61	18.14
	TOC	0.06	0.32	0.56	0.68	0.77	0.86	0.99	1.06	1.15	1.34	1.40
East sea Ecoregion	IL	0.18	0.76	1.15	1.67	2.03	2.49	2.98	3.48	3.99	5.02	5.45
	COD	0.85	1.24	2.19	3.47	4.01	5.12	6.41	7.13	7.84	9.70	11.13
	TOC	0.02	0.07	0.16	0.33	0.48	0.59	0.70	0.78	0.93	1.12	1.27

Table 4. Total Organic Carbon(TOC) conversion formula by Korea coastal, Central West sea Ecoregion, Western South sea Ecoregion, Jeju sea Ecoregion, Korea Strait Ecoregion, and East sea Ecoregion.

Area		Slope	coefficient (R^2)
Korea coastal	IL	$y=0.151x - 0.1013$	0.9888
	COD	$y=0.065x - 0.1272$	0.9829
Central West sea Ecoregion	IL	$y=0.137x - 0.0582$	0.9819
	COD	$y=0.039x - 0.0271$	0.9853
Western South sea Ecoregion	IL	$y=0.136x - 0.0856$	0.9947
	COD	$y=0.085x - 0.2408$	0.9789
Korea strait Ecoregion	IL	$y=0.186x - 0.0045$	0.9970
	COD	$y=0.084x - 0.0232$	0.9887
East sea Ecoregion	IL	$y=0.252x - 0.0889$	0.9877
	COD	$y=0.131x - 0.1164$	0.9899

해양퇴적물 내 유기물의 정량적 분석에 있어서, 총유기탄소 분석 방법이 가장 신뢰성이 높다고 알려져 있으며(Kim *et al.*[2006]), 유기물의 기원 파악이 가능한 총유기탄소가 유기물의 대표지표로 설정되었다. 더불어 기존의 강열감량과 화학적 산소요구량 자료를 활용하기 위해 퍼센타일 방법을 도입하여 전환식을 제시하였다. 이 과정에서 사용된 자료의 모수에 따라서 결과에 차이가 있을 수 있음을 고려하였으며, 앞으로 자료가 축적된다면 결과의 신뢰성 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

3.4 대표지시자를 활용한 유기물의 기원 추적

총유기탄소와 총질소의 C/N비(C/N ratio)는 해양퇴적물 내 보존되어 있는 유기물질의 기원을 밝히는 추적자로 사용되고 있으며(Park *et al.*[1995]), 공급되는 물질의 특성이나 기원에 따라 다른값을 보인다(Meyers *et al.*[1996]). 일반적으로 유기물 중 12 이상의 높은 C/N 비는 육상 기원 유기물을 나타내고(Greaves and Schwartz[1952]), 셀룰로오스와 리그닌이 풍부한 육상 식물에 기원한 육상 유기물의 경우 15 이상의 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Webster and Meyer[1997]). 6~9는 해양의 식물플랑크톤의 C/N비 범위이며(Holligan *et al.*[1984]), 5~12의 C/N비를 가지는 경우 해양기원 유기물을 의미한다(Stein, 1991). 본 연구에서 C/N비는 다양한 생태구에서 다음과 같이 나타났다. 서해중부 생태구에서는 5.9~19.2의 범위, 서남해역 생태구에서 6.7~16.6의 범위, 제주 생태구에서 17.6~28.2의 범위, 대한해협 생태구에서 8.0~10.0의 범위, 동해 생태구에서 9.9~12.6의 범위로 나타났다(Fig. 6). 대부분의 생태구에서 5~12의 범위를 보여 해양 유기물의 특징을 반영하였으며, 일부 하구역 인근 해역 및 육상에 인접한 해역에서 육상 유기물의 영향을 받아 더 높은 C/N비를 가지는 것으로 나타났다. 그러나 제주 생태구의 경우 C/N비가 15 이상으로 나타났으며, 이는 유기물이 주로 육상식물에 기원한 것을 의미한다. 육상식물의 유입 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 탄소 및 질소 안정동위원소를 이용하여 보다 정밀한 기원 추정이 필요하다. 기존 문헌에 따르면 다양한 해역에서 C/N비가 다음과 같이 보고되었으며, 진주만에

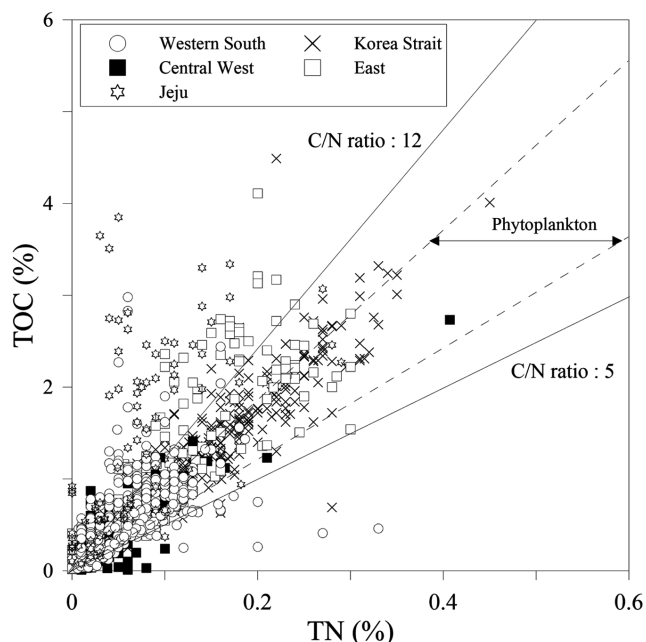


Fig. 6. Total Organic Carbon (TOC) and Total Nitrogen (TN) in the surface sediments, C/N ratios of terrigenous (12<) and Oceanic (5~12) origin organic matters are shown in solid line.

서 5.7~8.0의 범위(Lee *et al.*[2020]), 통영 연안에서는 6.0~7.8의 범위(Hwang *et al.*[2021]), 영산강 하구역에서는 8.8~9.9의 범위(Woo *et al.*[2014]), 마산항에서는 10.3~13.8의 범위(Hwang *et al.*[2006])등으로 나타났다. 이전 연구들의 결과에서는 하구역 및 육상 인근 해역에서 8.8~13.8의 범위로 육상 유입 기원 유기물과 해양 자생 기원 유기물의 혼합으로 나타났으며, 육상의 영향이 작은 일반적인 해역에서는 5.7~8.2의 범위를 보여 해양 자생 기원 유기물이 주를 이루는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 유기물의 기원과 해역별 특성을 이해하는 데 있어 중요한 정보를 제공하고 있다. 최근 들어 총유기탄소와 총질소의 농도가 증가하였지만, C/N비는 유사한 수준을 유지하고 있는 것으로 나타났으며, 이는 유기물의 유입이 증가하였지만 유입되는 유기물의 기원이 크게 변하지 않았음을 시사한다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 연안 해양퇴적물에서 강열감량, 화학적 산소요구량 및 총유기탄소의 시공간적인 분포 특성을 조사하고, 유기물 항목의 대표지시자를 제시하기 위해 해양환경측정망 및 국가해양생태계 종합조사(연안생태조사) 자료를 활용하여 결과를 도출하였다.

국내 연안 해양퇴적물은 저서환경의 대표 지시자인 평균입도의 공간적인 분포 특성을 기반으로 기존에 제시된 5개의 생태구로 구분하여 제시하였다. 시공간적인 분석을 통해 최근에는 유기물 항목의 농도가 증가하는 경향을 확인할 수 있었으

며, 그중에서 반폐쇄성만이 존재하는 대한해협 생태구에서 가장 높고, 서해중부 생태구에서 가장 낮은 농도 분포 특성을 보였다. 분석 방법의 신뢰성 및 유기물의 기원을 파악할 수 있는 적절성을 고려하였을 때, 해양퇴적물에서 유기물 항목의 대표지시자로 총유기탄소가 적합하며, 육상 환경의 관리체계 연속성을 위해 동일한 항목을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단되었다. 과거 자료를 활용하는 측면과 해양오염퇴적물의 평가 항목에 대한 상호 보완적인 자료를 생산하기 위해, 본 연구에서는 각 유기물 항목 간의 상관성을 파악하여 항목별 전환식을 제시하고자 하였다. 일반적으로 각 유기물 항목 간에는 높은 상관관계가 나타나지만, 본 연구에서는 해역별 및 시기별 차이로 인해 상관관계를 통한 직접적인 전환식을 도출하기에 어려웠다. 이 문제를 해결하기 위해 퍼센타일 분석 방법을 도입하여 총유기탄소로의 전환식을 제시하였다. 유기물의 기원을 파악하기 위해 C/N비로 유기물의 기원을 추정한 결과, 대부분의 생태구에서 주로 해양 기원의 유기물로 나타났으며, 하구역 및 육상 인근 해역에서 육상과 해양 기원이 혼합된 모습을 보였다.

국내 연안 해양퇴적물에서 유기물의 대표지시자로는 분석 방법론적 및 기원 추정이 가능한 총유기탄소가 적절하였으며, 기존의 자료를 활용하기 위해서 퍼센타일 방법으로 전환식을 제시하였다. 앞으로 보다 정밀한 전환식을 제시하기 위해서는 강열감량, 화학적산소요구량, 총유기탄소의 자료가 축적되어야 하며, 지속적인 연구가 진행되어야 한다. 또한 국내 연안 퇴적물에서 유기물 분포는 시공간적인 차이를 보여 저서 생태계에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다. 이에 따라 해양에서 유기물의 저장고 역할을 하는 해양퇴적물의 변화에 관한 추가적인 연구가 필요하며, 이러한 연구는 해양생태계의 건강과 지속가능성을 확보하기 위한 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2023년 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원-해양유해물질오염원 추적기법개발 사업 지원을 받아 수행되었습니다(KIMST-20220534). 또한 본 연구에서 사용한 자료를 제공해 준 해양환경공단(KOEM)에 감사를 드립니다.

References

- [1] Berner, R.A., 1981, Early diagenesis, Princeton Univ. Press, N, J., 241.
- [2] Bisutii, I., Hilke, I., and Raessler, M., 2004, Determination of total organic carbon-an overview of current methods, Trends in Analy. Chem., 23(10-11), 716-726.
- [3] Cho, H.C., and Cho, Y.G., 2015, Heavy metals in Surface Sediments from Doam Bay, Southwestern Coast of Korea, J. Kor. Soc. Oceanogr., 20(4), 159-168.

- [4] Choi, J.Y., Choi, J.H., and Kim S.Y., 1999, Granulometric Analysis of Sediment: Preliminary Results for Inter-lab Calibration, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 4(3), 246-253.
- [5] Choi, M., Kim, H.C., Hwang, D.W., Lee, I.S., Kim, Y.S., Kim, Y.J., and Choi, H.G., 2013, Organic enrichment and pollution in surface sediments from shellfish farming in Yeosu Bay and Gangjin Bay, Korea, *J. Kor. Fish. Soc.*, 46(4), 424-436.
- [6] Froelich, P.N., 1980, Analysis of organic carbon in marine sediments, *Limnol. Oceanogr.*, 25(3), 564-572.
- [7] Greaves, C., and Schwartz, H., 1952, The chemical utilization of wood. Department of Resource Development, Forest Branch, Ottawa, 28.
- [8] Holligan, P.M., Harris, R.P., Newell, R.C., Harbour, D.S., Head, R.N., Linley E.A.S., Lucas, M.I., Tranter, P.R.G., and Weekley, C.M., 1984, Vertical distribution and partitioning of organic carbon in mixed, frontal and stratified waters of the English Channel, *Mar. Ecol.*, 14(2), 111-127.
- [9] Hwang, D.W., Jin, H.G., Kim, S.S., Kim, J.D., Park, J.S., and Kim, S.G., 2006, Distribution of Organic Matters and Metallic Elements in the Surface Sediments of Masan Harbor, Korea, *J. Kor. Fish. Soc.*, 39(2), 106-117.
- [10] Hwang, D.W., Lee, I.S., Choi, M.K., and Choi, H.G., 2014, Distribution and Pollution Assessment of Organic Matter and Trace Metals in Surface Sediment around Ulsan Harbor, *J. Kor. Soc. Environ. Anal.*, 17(3), 146-160.
- [11] Hwang, H.J., Hwang, D.W., Lee, G.R., Kim, H.C., and Kwon, J.N., 2018, Distribution of Organic Matters and Heavy Metals in the Surface Sediment of Jaran Bay, Korea, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Saf.*, 24(1), 78-91.
- [12] Hwang, D.W., Hwang, H.J., Lee, G.R., Kim, S.Y., Park, S.H., and Yoon, S.P., 2021, Organic matter and Heavy metals Pollution Assessment of Surface Sediment from a Fish Farming Area in Tongyeong-Geoje Coast of Korea, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Saf.*, 27(4), 510-520.
- [13] Hyun, S.M., Lee, T.H., Choi, J.S., Choi, D.L., and Woo, H.J., 2003, Geochemical Characteristics and Heavy Metal Pollutions in the Surface Sediments of Gwangyang and Yeosu Bay, south coast of Korea, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 8(4), 380-391.
- [14] Jun, C.P., Kim, C.H., and Lee, S.J., 2013, Characterization of Clastic and Organic Sediments Near Dokdo, Korea, *J. Miner. Soc. Kor.*, 26(2), 65-80.
- [15] Jung, H.S., Kim, G.S., Shin D.H., and Chi S.B., 1993, Comparison of Two Methods in Grain-size Analysis : Sedigraph and Mastersizer, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 28(1), 72-78.
- [16] Kang, C.K., Lee, P.Y., Park, J.S., and Kim, P.J., 1993, On the Distribution of Organic Matter in the Nearshore Surface Sediment of Korea, *J. Kor. Fish. Soc.*, 26(6), 557-566.
- [17] Kim, I.S., Park, M.H., Ryu, K.M., and Ryu, B.J., 2004, Geochemical Characteristics of Core Sediments from the north-western Ulleung Basin, East Sea: Implications for Paleoenvironmental Changes, *J. Geol. Soc. Kor.*, 40, 1-12.
- [18] Kim, K.H., Son, S.K., Son, J.W., and Ju, S.J., 2006, Methodological Comparison of the Quantification of Total Carbon and Organic Carbon in Marine Sediment, *J. Korean. Soc. Mar. Environ. Energy.*, 9(4), 235-242.
- [19] Kim, J.H., Park, M.H., Kang, M.H., Lee, C.W., and Oh, J.H., 2010, Geochemical Results and Implication of the Organic Matter in the Holocene Sediments from the Hupo Basin. *Econ. Environ. Geol.*, 43, 1-12.
- [20] Kim, S.Y., Kim, H.C., Lee, W.C., Hwang D.W., Hong S.J., Kim J.B., Cho Y.K., and Kim, C.S., 2013, Environmental Characteristics of Seawater and Sediment in Mariculture Management Area in Ongjin-gun, Korea, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Saf.*, 19(6), 570-581.
- [21] Kim, J.G., and Jang, H.S., 2014, Evaluation of Characteristics of Particle Composition and Pollution of Heavy Metals for Bottom Sediments in Cheonsu Bay, Korea-Comparison of the Sediments Environment of Farming Area and Non-farming Area, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Saf.*, 20(4), 358-371.
- [22] Kim, C.S., Kim, S.H., Lee, W.C., and Lee, D.H., 2022, Spatial variability of water quality and sedimentary organic matter during winter season in coastal aquaculture zone of Korea, *Mar. Pollut. Bulle.*, 182, 113991.
- [23] King, P., Kennedy, H., Newton, P.P., Jinkells, T.D., Brand, T., Calvert, S., Cauwet, G., Etcheber, H., Head, B., Khripounoff, A., Manighetti, B. and Miquel, J.C., 1998, Analysis of total and organic particles and marine sediment: an interlaboratory comparison, *Mar. Chem.*, 60, 203-216.
- [24] Lee, M.K., Bae, W.K., Chung, J.W., Jung, H.S., and Shim, H.J., 2008, Seasonal and spatial characteristics of seawater and sediment at Youngil bay, Southeast Coast of Korea, *Mar. Pollut. Bulle.*, 57, 325-334.
- [25] Lee, Y.S., Lim, W., Jung, C.S., and and Park, J.S., 2011, Spatial distributions and monthly variations of water quality in coastal seawater of Tongyeong, Korea, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energy*, 14(3), 154-162.
- [26] Lee, G.R., Hwang, H.J., Kim, J.B., and Hwang, D.W., 2020, Pollution Status of Surface Sediment in Jinju Bay, a Spraying Shellfish Farming Area, Korea, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Saf.*, 26(4), 392-402.
- [27] Lee, G.R., Hwang, D.W., Hwang, H.J., Park, J.H., Kim, H.C., and Kwon, J.N., 2017, Distribution and Pollution Status of Organic Matter and Heavy Metals in Surface Sediment Around Goseong Bay, a Shellfish Farming Area, Korea, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Saf.*, 23(6), 699-709.
- [28] Meyers, P.A., Silliman, J.E., and Shaw T.J., 1996, Effects of turbidity flows on organic matter accumulation, sulfate reduction, and methane generation in deep-sea sediments on the Iberia Abyssal Plain, *Organ. Geochem.*, 25(1-2), 69-78.
- [29] Michaelis, W., Ittekkot, V., and Degens, E.T., 1986, River inputs into oceans, In: Biogeochemical processes at the land-sea boundary, edited by Lasserre, P. and J.-M. Martin. Elsevier.

- Amsterdam, 37-52.
- [30] Minasny, B., McBaratney, A.B., Wadoux, A.M.J., Akoeb E.N., and Sabrina, T., 2020, Precocious 19th century soil carbon science, *Geode. Regio.*, 22(e00306).
- [31] Ministry of Environment, 2019, Enforcement decree and enforcement rules of the water environment Conservation Act, No.18469.
- [32] Ministry of Oceans and Fisheries, 2018, Management of Marine Gabage and Contaminated Marine Sediment Act. No. 18960.
- [33] Ministry of Oceans and Fisheries, 2022, Protocol of National Marine Ecosystem Monitoring Program, 4rd Edition.
- [34] Monedero, M.A.S., Roig, A., Pardo, C.M., Cegarra, J., and Paredes, C., 1996, A microanalysis method for determining total organic carbon in extracts of humic substances. Relationships between total organic carbon and oxidable carbon, *Biore-source Technology*, 57, 291-295.
- [35] National Institute of Fisheries Science, 2023, Standard methods of marine environment in Korea.
- [36] Noh, I.H., Yoon, Y.H., Kim., D.I., and Park J.S., 2006a, The Spatio-temporal Distribution of Organic Matter on the Surface Sediment and Its Origin in Gamak Bay, Korea. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energy.*, 9(1), 1-13.
- [37] Noh, I.H., Yoon, Y.H., Park J.S., Soh, H.Y., and Kim., D.I., 2006b, Spatio-temporal Distribution of Organic Matter in Surface Sediment in the Central Part of the South Sea, Korea. *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energy.*, 9(4), 203-215.
- [38] Ouyang, X., and Lee, S.Y., 2020, Improved estimates on global carbon stock and carbon pool in tidal wetland. *Nat. Commun* 11(317).
- [39] Park, G.S., Park, S.Y., Lee, S.G., and Lee, Y., 2002, Geochemistry and Water Quality in the Tidal Flat of Saemangum Area, West Sea of Korea in Summer, *J. Kor. Wet. Soc.*, 6(1), 133-147.
- [40] Park, M.H., Kim, I.S., and Lee, Y.J., 2002, Characterization of Organic Matter in Upper Jurassic Core Samples Drilled in Southern Germany, *Econ. Environ. Geol.*, 35, 429-436.
- [41] Park, Y.C., Yang, H.S., Lee, P.Y., and Kim, P.J., 1995, Environmental Characteristics of the Seawater and Surface Sediment in the vicinity of Pusan Harbor Area in Winter, *J. Kor. Fish. Soc.*, 28(5), 577-588.
- [42] Rho, T.K., Lee, T.S., Lee, S.R., Choi, M.S., Park, C., Lee, J.H., Lee, J.Y., and Kim, S.S., 2012, Reference Values and Water quality Assessment Based on the Regional Environmental Characteristics, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 17(2), 45-58.
- [43] Richelle, M., King, A., Albanese, C.L., and Martin, J.P., 1997, Discussion of Papers, *Ground Water*, 6, 1107-1109.
- [44] Sætre, M.M.L., Dale, B., Abdullah, M.I., and Sætre G.P., 1997, Dinoflagellate cysts as potential indicators of industrial pollution in a Norwegian Fjord, *Mar. Environ. Res.*, 44, 167-189.
- [45] Shin, W.S., Lim, J.Y., and Yoon, Y.G., 2018, Distribution Characteristics of Organic Matter and Heavy Metal of Sediment in Daecheon Port, *J. Kor. Wat. Treat.*, 26(6), 1-9.
- [46] Stein, R., 1991, Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments. Springer Verlag, Berlin, 1-217.
- [47] Walinsky, S.E., Prahl, F.G., Mix, A.C., Finney, B.P., Jaeger, J.M., and Rosen G.P., 2009, Distribution and Composition of Organic matter in surface sediments of coastal Southeast Alaska, *Cont. Shelf. Res.* 29, 1565-1579.
- [48] Webster J.R., and Meyer, J.L., 1997, Organic Matter Budgets for Streams: A Synthesis, *J. Nor. Amer. Benthological Soc.*, 16(1), 141-161.
- [49] Woo, H.J., Kim, H.Y., and Jeong, K.S., 1999, Response of benthic foraminifera to sedimentary pollution in Masan Bay, Korea, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 4, 144-154.
- [50] Woo, J.S., Choi, H.S., Lee, H.J., and Kim, T.H., 2014, Organic Matter in the Sediments of Youngsan River Estuary : Distribution and Sources, *J. Environ. Sci. Int.*, 23(7), 1375-1383.
- [51] Woo, J.S., Kim, T.H., Park, M.O., Kim, H.M., Lee, Y.W., Kim, S.G., and Lee, H.J., 2023, Applicability of Total Organic Carbon(TOC) as a Organic Pollutant Management Indicator in Marine Environments, *J. Kor. Soc. Mar. Environ. Energy.*, 26(1), 34-48.
- [52] Wu, Y., Zhang, J., Cho, K.W., Hong, G.H., and Chung, C.C., 2004, Origin and transport of sedimentary organic matter in the Yalujiang estuary, North China, *Estuaries.*, 27, 583-592.
- [53] Yang, W.H., Lee, H.J., and Kim, G.B., 2016, Distribution of Organic Matters and Trace Metals in Surface Sediments and Ecological Risk Assessment in the Tongyeong Coast, *J. Kor. Soc. Oceanogr.*, 21(4), 125-133.
- [54] Yokoyama, H., 2000, Environmental quality criteria for aquaculture farms in Japanese coastal areas: A new policy and its potential problems, *Bulletin of National Research Institute of Aquaculture, Japan*.
- [55] Zhou, F., Gao, X., Yuan, H., Song, J.M., and Chen, F., 2018, The distribution and seasonal variations of sedimentary organic matter in the East China Sea Shelf, *Mar. Pollut. Bulle.*, 129, 163-171.

Received 7 September 2023

Revised 13 November 2023

Accepted 8 February 2024