

바닷모래 채취에 따른 퇴적물 입도 조성 변화에 대한 적정지표 타당성 검토

우준식¹ · 김태하² · 이효진³ · 김성은⁴ · 여정원⁵ · 손규희^{6,†}

¹주지오시스템리서치 환경화학부 선임

²주지오시스템리서치 환경화학부 책임

³주지오시스템리서치 수석

⁴주아라종합기술 대표

⁵해양환경공단 골재단지관리처 차장

⁶해양환경공단 미래성장처 처장

Feasibility Study of Appropriate Indicator for Sediments Composition Changes Due to Marine Sand Mining

Junsik Woo¹, Taeha Kim², Hyojin Lee³, Sungeun Kim⁴, Jungwon Yeo⁵ and Kyuhee Son^{6,†}

¹Senior Engineer, Department of Environmental Chemistry, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi 15807, Korea

²Principal Engineer, Department of Environmental Chemistry, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi 15807, Korea

³Executive Director, Geosystem Research Corporation, Gunpo, Gyeonggi 15807, Korea

⁴CEO, ARA Consulting & Technology, Incheon 21990, Korea

⁵Senior Researcher, Aggregate Resources Management Dept., Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul 05718, Korea

⁶Team Manager, Future Business Development Dept., Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul 05718, Korea

요 약

남해와 서해 EEZ 골재채취 해역에서 바닷모래 채취에 따른 퇴적물 입도 조성 변화를 파악하여 적합한 적정지표를 산정하였다. 남해 EEZ 골재채취 해역의 퇴적물 입도 조성 분포는 대조구의 경우 일정한 구성비를 유지하고 있으며, 채취 광구에서는 펄(Mud : silt+clay) 함량이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 자연적인 영향보다는 바닷모래 채취와 같은 인위적 행위의 영향으로 판단된다. 서해 EEZ 골재채취 해역의 퇴적물 입도 조성 분포는 대조구 및 채취광구에서 급격한 조립화 또는 세립화가 나타나지 않았으며, 전 지역에서 모래함량이 85% 이상으로 변화 없이 유지되었다. 대조구와 채취광구의 퇴적물 입도 조성 변화에 대한 적정지표 설정을 위해 마할라노비스 분석을 통해 유사도를 파악하였다. 남해 EEZ 골재채취 해역의 유사도 분석 결과 채취 기간과 휴지기에 상관없이 낮은 유사도를 보이며, 이는 바닷모래 채취로 인해 변경된 해저퇴적물 입도 조성이 회복되지 않고 있음을 의미한다. 서해 EEZ 골재채취 해역의 유사도 분석 결과 바닷모래 채취 기간 및 휴지기에서도 유사한 퇴적물 입도 조성으로 잔존되어 분포하는 것으로 나타났다.

Abstract – The appropriate indicator was calculated by identifying changes in the composition of sediment due to marine sand mining in the Western and Southern Sea EEZ marine sand mining areas. In the Southern EEZ area, the sediment composition was maintained at a constant composition ratio in the control sites, and the mud content was found to increase in the mining sites. This seems to be caused by anthropogenic activities such as marine sand mining rather than having influenced by a natural effect. In the Western EEZ area, sediment composition did not show rapid granulation or fine-graining in the control sites and mining sites, and the sand content remained unchanged at over 85% in all areas. To establish an indicator for changes in the sediment composition of the control sites and mining sites, the degree of similarity was identified through Mahalanobis analysis. As a result of the similarity analysis in the Southern EEZ area, the similarity is low regardless of the mining period and resting period, which means the composition of the sediments changed by the marine sand mining is not being restored. As a result of the simi-

[†]Corresponding author: scuba89@koem.or.kr

larity analysis in the Western EEZ area, it was found that the sediments remained and distributed in a similar composition even during the marine sand mining period and the resting period.

Key words: Marine Sand Mining(바닷모래 채취), Marine Environmental Impact Survey(해양환경영향조사), Sediment composition change(퇴적물 구성비 변화), Mahalanobis(마할라노비스)

1. 서 론

우리나라의 바닷모래 채취는 서해 연안해역에서 1984년부터 시작되었으며, 육상골재 자원의 고갈 및 채취 비용의 상대적 우위 등 여러 가지 요인으로 1990년 이후 바닷모래에 대한 수요가 꾸준히 증가하였다(Jo and Jang[2003]). 그러나 무분별한 채취로 인해 2000년대 초반 연안해역에서 바닷모래 채취가 대부분 중단되었고, 이후 골재 수급 문제로 인해 2002년 골재채취법을 개정하여 배타적 경제수역(Exclusive Economic Zone, EEZ)에서 바닷모래 채취를 허용하였다(Kim *et al.*[2005]). 이에 따라 2004년 남해(육지도 남방 50 km)와 서해(어청도 외해 40 km) EEZ 해역에서 바닷모래 채취가 시작되었으며, 2020년 바닷모래 채취단지 지정 만료로 인해 남해 EEZ 바닷모래 채취가 종료되어 현재 서해 EEZ만 신규단지 지정을 통해 바닷모래 채취가 지속되고 있다.

바닷모래 채취는 안정적인 골재 자원 수급이라는 순기능이 있지만, 해양환경 측면에서는 부정적 영향을 미칠 수 있다. 우리나라보다 수십 년 앞서 바닷모래를 채취하고 있는 유럽, 미국, 일본 등에서는 다양한 해양분야별 영향을 종합적으로 연계하여, 해양환경 및 생태계에 대한 영향들에 대해 민·관 연구소와 학계에서 지속적인 관측과 감시 활동, 그리고 효율적인 사후 관리를 모색하고 있다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs[2009]).

바닷모래 채취로 인한 물리적 및 생물학적 특성의 직접적인 영향은 해저퇴적물 제거, 부유퇴적물 플룸 증가 및 채취과정에서의 해저면 파괴(Le Bot *et al.*[2010]; Duclos[2012])로 비롯된 것이며, 간접적인 영향은 월류수 배출로 인한 세립퇴적물 퇴적에 의한 저서생물 질식(Desprez *et al.*[2010]), 유해물질 배출(Newell *et al.*[1999]) 및 수중소음 증가(Cefas[2003]) 등이다. 이러한 영향은 채취구역을 포함한 주변 지역의 수층과 해저뿐만 아니라 어류, 조류 및 포유류의 먹이 풍부도와 어류 치어의 이동에 영향을 미치는, 보다 넓은 해역의 서식처 질이나 생태계 기능에 영향을 미칠 수 있다(Newell *et al.*[1998]; Van Dalfsen *et al.*[2000]; Boyd *et al.*[2005]; Pearce[2008]; Daskalov *et al.*[2011]; Desprez *et al.*[2014]).

또한 국내에서도 지속적으로 과도한 바닷모래 채취로 인한 문제점들이 야기되고 있으며, 해저지형 구조의 변형(Kim *et al.*[2005]; Kum *et al.*[2010]), 퇴적상 변화로 인한 저서생물 군집 교란 및 생태계의 건강성 저하(Min[2004]; Yu *et al.*[2006]; Son and Han[2007]), 유용수산자원 감소(Cho and Chang[2003]), 연안 침식(KMI[2006]; Choi *et al.*[2012])등의 현상은 이미 빈번하게 보고되고 있는 피해 사례들이며, 해양 수질에 대한 영향에 대해서도 연구가 진행된 바 있다(Yang *et al.*[2008]).

특히 남해와 서해 EEZ 골재채취 해역은 과거 고하천에 의해 형성된 퇴적층이며, 오랜 기간에 걸쳐 퇴적된 유한자원으로 2000년대 초반 모래의 안정적 공급을 위하여 최근까지 많은 양의 바닷모래 채취가 장기적으로 이루어져 왔다. Hitchcock and Steve[2004]에 따르면 EEZ 해역의 바닷모래 채취 방식인 고정식 준설 방식(Static or Anchor dredging)은 불규칙적이고 굴곡이 많은 옹덩이를 생성하고 하부 기질의 교란 가능성이 증가하여 저서생물의 회복 기회가 줄어 든다고 보고하고 있다. 이러한 저서 환경의 변화는 육지로부터의 퇴적물 공급이 중단된 EEZ 해역의 특성상 원상태로 회복할 가능성이 매우 낮아 문제라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 바닷모래 채취로 인해 저서생태계 변화에 영향을 미치는 남해와 서해 EEZ 골재채취 해역의 퇴적물 조성 변화를 분석하고, 퇴적물 입도 조성 변화를 객관적으로 파악할 수 있는 정적지표를 산정하는 방안을 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구의 범위

본 연구에서 사용된 자료는 남해와 서해 EEZ 골재채취 해역에서 수행된 문헌을 수집하였으며 각 해역별 수집된 문헌 자료는 Table 1에 제시하였다. 간략히 설명하면 남해와 서해 EEZ 골재채취 해역의 자료는 2013년 6월부터 2017년 11월까지 조사한 자료이며, 조사 정점 중 시계열 분석이 가능한 정점을 선택하여 각 정점이 지닌 특성을 파악한 후 분석을 수행하였다.

남해 EEZ 골재채취 해역에서 시계열 파악이 가능한 정점은 6개 정점이며, 이 중 1개 정점은 채취로 인한 영향을 받지 않은 대조구 해역, 5개 정점은 채취로 인한 영향을 받는 영향해역으로 설정하였다(Fig. 1). 대조구 정점으로 선정한 C-1은 채취단지 서쪽에 위치하고 있으며, 5개의 영향해역 정점 중 S-1, S-2는 4E광구에 포함되며 S-3, S-4는 4G광구에 속하는 정점으로 2008년에 채취를 시작하여 홀수 연도에 휴지기(Resting period), S-5는 3I광구에 속하는 정점으로 2010년 후반부터 채취를 시작하여 짝수 연도에 휴지기를 갖는 특징을 보였다(Table 2).

서해 EEZ 골재채취 해역에서 시계열 파악이 가능한 정점은 10개 정점이며, 이 중 3개 정점은 바닷모래 채취로 인한 영향을 받지 않은 대조구 해역, 7개 정점은 채취로 인한 영향을 받는 영향해역으로 설정하였다(Fig. 2). 대조구 정점으로 선정한 C-1은 채취단지 서쪽, C-2는 채취단지 북쪽, C-3은 채취단지 동쪽에 위치하고 있다. 7개의 영향해역 정점 중 W-2, W-7, W-9는 2011년에 채취를 시작하여 짝수 연도에 휴지기, W-3, W-6은 2010년에 채취를 시작하여 홀수

Table 1. List of literature used in this study

Division	Report	Reference	Survey Year
Southern EEZ Area	Southern EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(1st)	K-water(2014)	2013(06.08,11,12)
	Southern EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(2st)	K-water(2014)	2014(03.05,09,11)
	Southern EEZ Marine Sand Mining Designation Change(3rd) Sea Area Utilization-Impact Assessment	K-water(2015)	2014(03.05,09,11) 2015(01)
	Southern EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(2015)	K-water(2016)	2015(01,05,08,11)
	Southern EEZ Marine Sand Mining Designation Change(4th) Sea Area Utilization-Impact Assessment	K-water(2016)	2014(05,09,11) 2015(01,11)
	Southern EEZ Marine Sand Mining Marine Environmental Impact Survey(3st)	K-water(2017)	2016(03,05,09,11)
	Southern EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(2017)	K-water(2017)	2017(03,07,08,11)
	Western EEZ Area	Western EEZ Marine Sand Mining Post Marine Environmental Impact Survey(2013)	K-water(2013)
Western EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(2013)		K-water(2013)	2013(06,08,11,12)
Western EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(2014)		K-water(2014)	2014(02,05,08,11)
Western EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(2015)		K-water(2015)	2015(03,05,08,11)
Western EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(2016)		K-water(2016)	2016(02,05,08,11)
Western EEZ Marine Sand Mining(2nd extension) Marine Environmental Impact Survey(2017)		K-water(2017)	2017(02,06,08,11)

Table 2. Sampling sites in the southern EEZ marine sand mining area

Division	C-1	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5
	Marine sand mining block					
Characteristic	Control block	4E		4G		3I
	2008yr start Sand mining (odd year resting period)			2010yr start Sand mining (Even year resting period)		

Table 3. Sampling sites in the western EEZ marine sand mining area

Division	C-1,C-2,C-3	W-2	W-7	W-9	W-3	W-6	W-GA	W-NA
	Marine sand mining block							
Characteristic	Control block	2	7	9	3	6	GA	NA
		2011yr Start mining (Even year resting period)		2010yr Start mining (Odd year resting period)		2013yr Start mining (Even year resting period)		2014yr Start mining (Odd year resting period)

연도에 휴지기, W-(가)는 2013년에 채취를 시작하여 짝수 연도에 휴지기, W-(나)는 2014년에 채취를 시작하여 홀수 연도에 휴지기를 갖는 특징을 보였다(Table 3).

2.2 분석 방법

바닷모래 채취로 인한 해저퇴적물 입도 조성의 변화 양상 파악을 위해 2013년부터 2017년까지 대조구와 채취광구의 해저퇴적물 입도 조성(자갈(Gravel), 모래(Sand), 펄(Mud : Silt+Clay))과 채취 이력에 대한 시계열 변화 분석을 수행하였고, box-whisker plot을 이용하여 채취구역과 대조구의 퇴적물 입도 조성 변화를 비교 분석하였다.

또한 1 Φ 간격의 퇴적물 누적분포를 이용하여 주요 퇴적물 입도

조성비(남해 EEZ : 자갈, 조립사(Coarse sand), 중사(Medium sand), 세립사(Fine sand), 펄(Mud)/서해 EEZ : 자갈, 모래, 펄)를 개별 시료에 대해 계산한 후 채취구역과 대조구 퇴적물 입도 조성에 대한 유사도 분석을 수행하였다.

유사도 평가는 통계적인 의미에서 대조구와 비교하여 바다골재 채취로 인해 채취구역의 퇴적물 입도 조성에서 더 넓은 분포 범위를 가질 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 유사도 분석은 다변량 정규성을 가정하고 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance)를 적용하여 대조구 퇴적물 입도 조성비에 대한 평균과 공분산을 산정한 후 z-score 기법을 이용하여 채취구역 퇴적물 입도 조성비가 신뢰 구간 95% 내에 분포하면 유사(Accept)한 것으로, 이 외에 분포하면 기각(No accept)으로 평가하였다. 마할라노비스 거리는 군집분

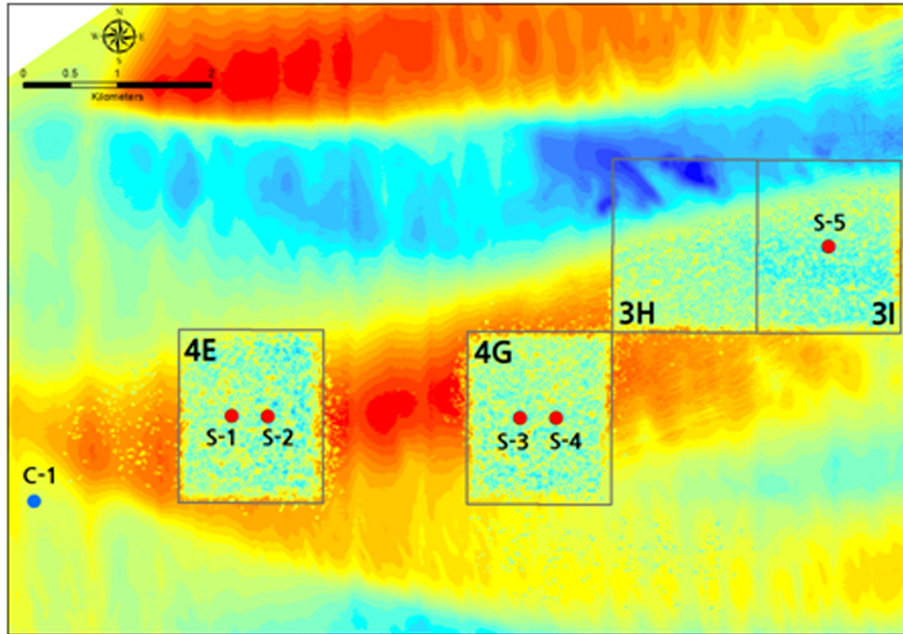


Fig. 1. Sampling sites and sand mining block in southern EEZ marine sand mining.

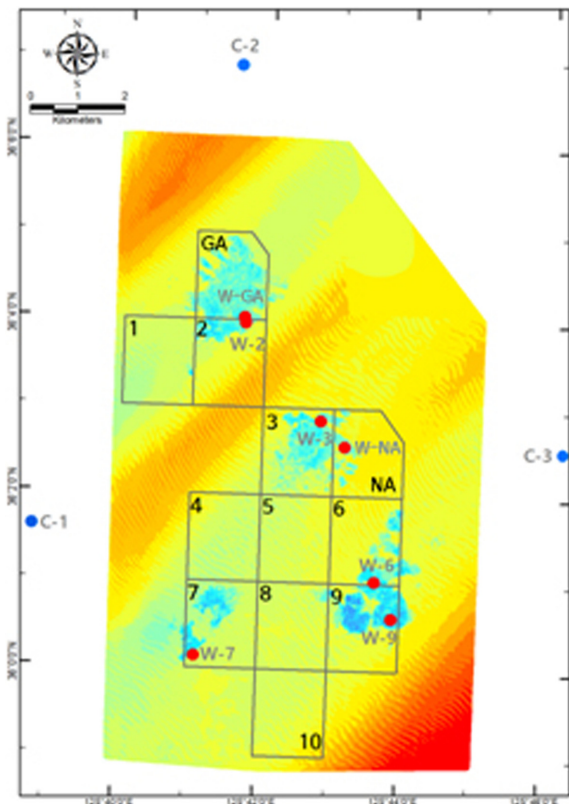


Fig. 2. Sampling sites and sand mining block in western EEZ marine sand mining.

석에서 가장 많이 사용되는 거리개념으로 두 지점의 거리뿐만 아니라 변수의 표준편차와 상관계수가 함께 고려된다는 특징을 가지고 있다. 데이터의 평균과 공분산을 μ 와 Σ 라 할 때, 중심 μ 에서 한 점

$X_R = (x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_p)$ 까지의 마할라노비스 거리는 다음과 같이 정의하였다.

$$d = (X - \mu)' \Sigma^{-1} (X - \mu)$$

여기서 X_R 는 대조구 퇴적물 입도 조성비 자료, μ 는 평균, Σ 는 공분산이다. 유사도 평가에 이용된 z-score의 방정식은 다음과 같이 재배열시켜 계산되었다.

$$X_D = \mu \pm (z \times \sigma)$$

여기서 X_D 는 채취광구 퇴적물 입도 조성비의 개별 원시 점수(95% 신뢰 구간의 상한 또는 하한에 기반), μ 는 평균, σ 는 표준 편차, z 는 정규분포의 97.5 퍼센트 지점에 해당되는 수(=1.96)로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바닷모래 채취에 따른 시계열 변화

남해 EEZ 골재채취단지 대조구 퇴적물의 평균입도(Mean grain size) 범위는 1.91~4.26 Φ (평균 2.59 Φ)로 나타났다. 퇴적물 입도 조성은 모래가 우세한 것으로 나타났으며, 모래 함량은 67.57~91.07% 범위로 평균 77.53%이며, 펄 함량은 8.93~32.43%로 평균 22.4%를 보였다. 대조구와 채취광구를 비교해보면 평균입경에서는 유의할만한 변화가 없으며 모래 함량의 평균은 대조구보다 채취광구에서 약 10% 이상 큰 것으로 나타났다. 하지만 채취광구 정점 간의 최대/최소 모래 함량 및 펄 함량이 같은 광구 내 정점일지라도 다소 큰 차이를 보이는 것은 모래 채취로 인한 영향으로 판단되며, Cooper *et al.*[2007]은 바닷모래 채취지역 퇴적물 입도 조성비의 변동 폭이 증가하는 것을 보고한 바 있다.

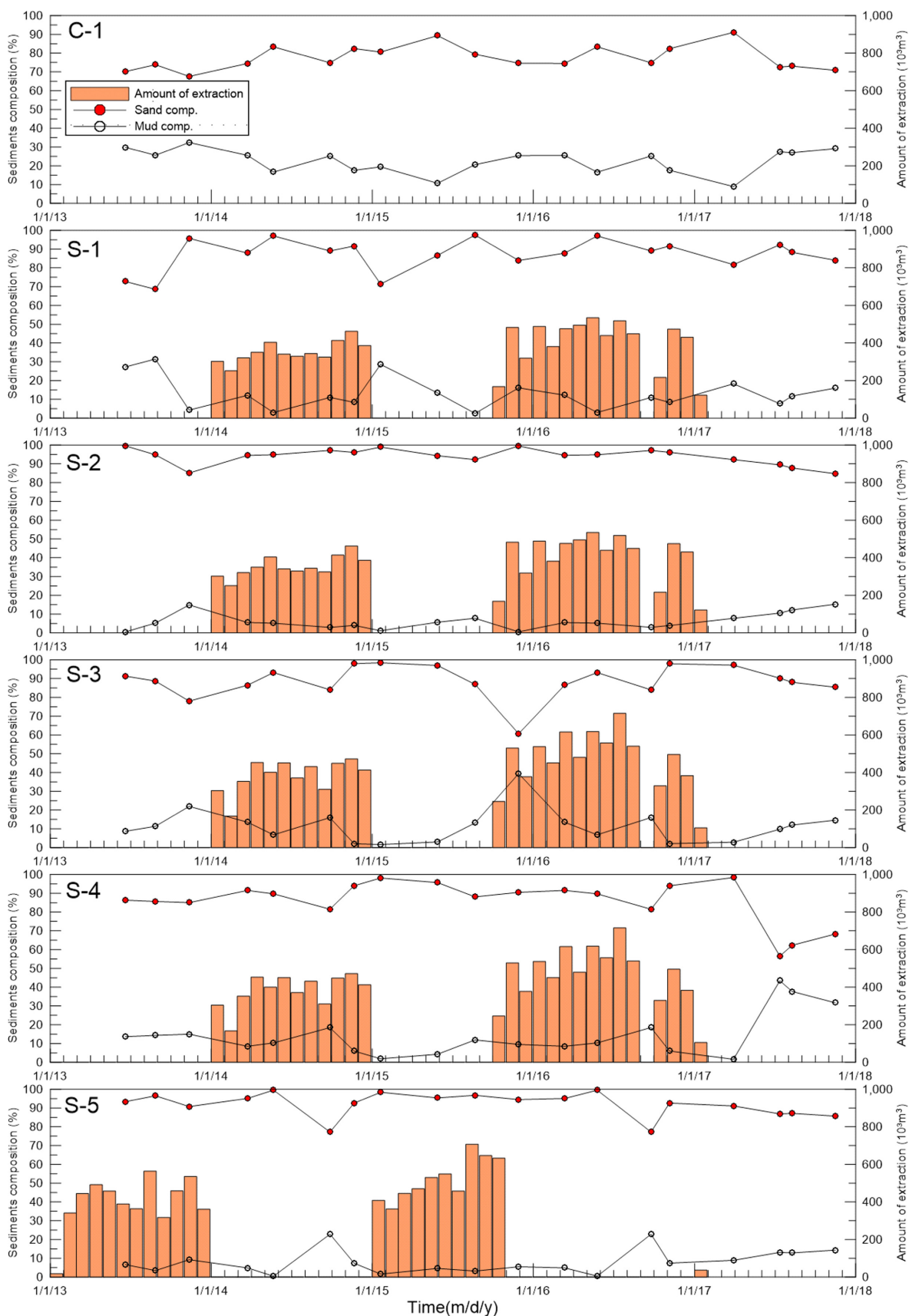


Fig. 3. Long-term variation of sediment composition in control block (red dash line) and mining block at southern EEZ marine sand mining (2013~2017).

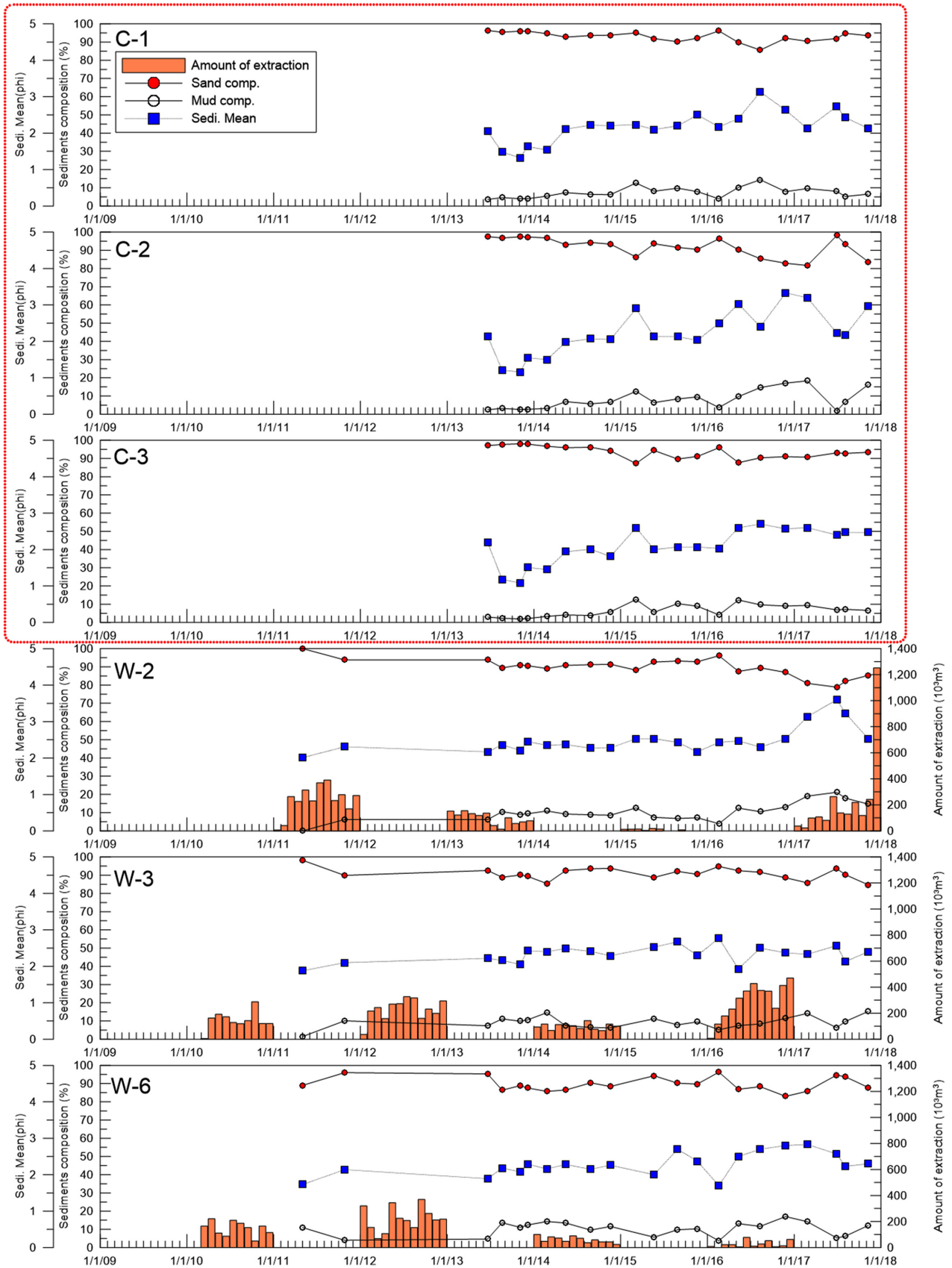


Fig. 4. Long-term variation of sediment composition in control block (red dash line) and mining block at western EEZ marine sand mining (2009-2017).

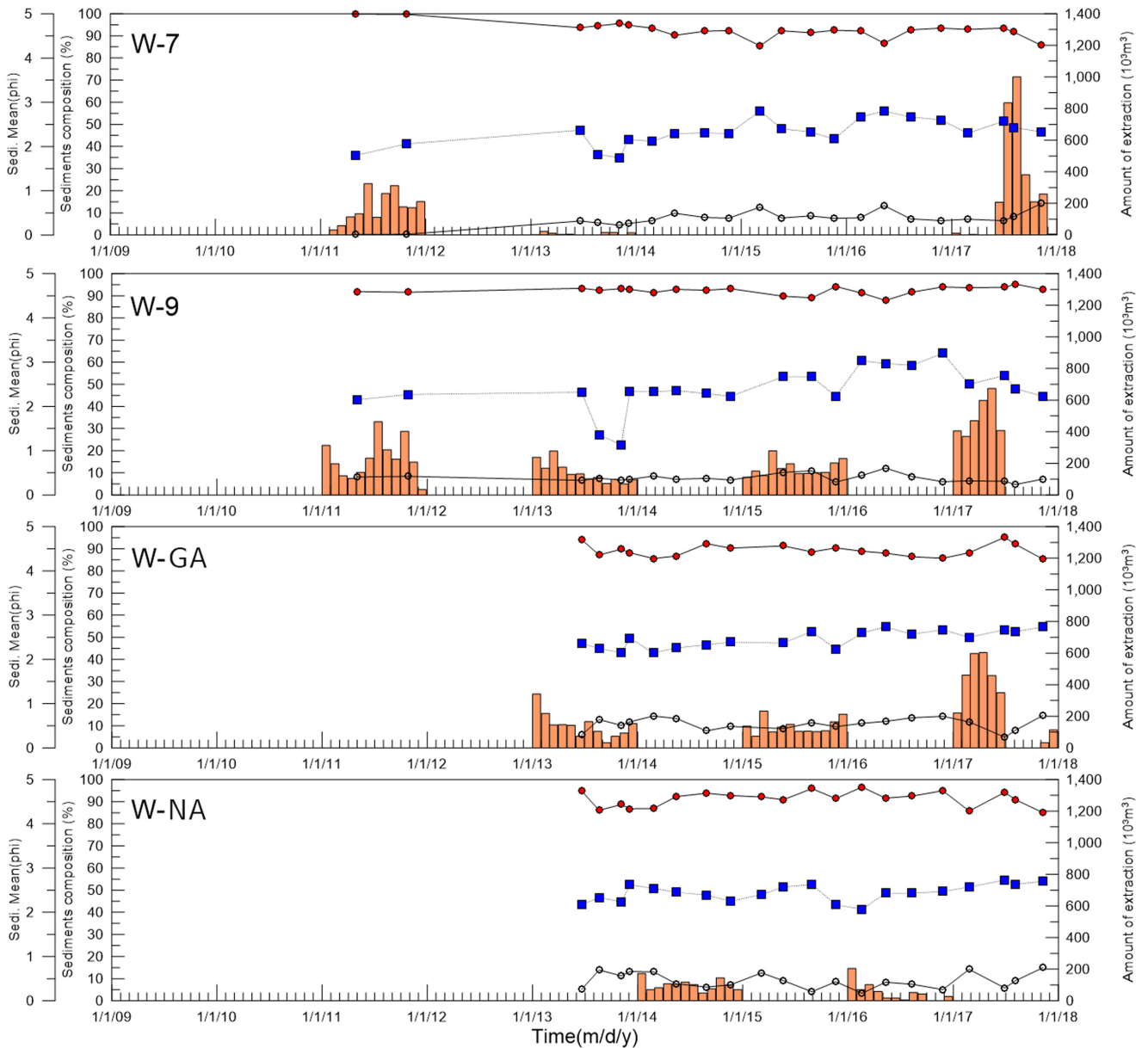


Fig. 4. (continued).

4E광구와 4G광구에서는 2015년 10~12월을 제외하면 짝수년도인 2014년과 2016년에 월별로 바닷모래 채취가 실시되었다. 4E광구의 연간 채취량은 2014년 4,227,545m³, 2015년 968,691m³, 2016년 4,903,046m³이고 4G광구는 2014년 4,574,825m³, 2015년 1,152,782m³, 2016년 5,721,359m³로 나타났다. 3I광구 경우 홀수년도에 월별로 골채채취가 이루어졌으며 연간 채취량은 2013년 4,742,791m³, 2015년 5,209,228m³로 나타났다.

퇴적물 입도 조성의 시계열 변화에서 자갈 함량은 거의 없으므로 분석에서 제외하였다. 대조구 정점 C-1의 모래 함량과 펄 함량을 비교하면 급격한 조립화 또는 세립화 없이 일정하게 유지되었다. 채취단지 퇴적물은 4E광구 정점 S-1의 휴지기인 2013년 8월과 2015년 1월에 펄 함량이 증가 되었으나, 다른 시기에는 퇴적물의 급격

한 변화가 나타나지 않았다. 또한 동일 광구의 인근 정점인 S-2에서는 채취기간과 휴지기 상관없이 퇴적물의 입도 조성이 일정하게 나타났다. 4G광구의 퇴적물 입도 조성에서 펄 함량 증가는 정점 S-3의 채취기간인 2015년 11월과 정점 S-4의 채취종료 후인 2017년 7월, 8월, 11월에 나타났으며, 이를 제외한 시기에는 모래와 펄의 입도 조성비가 일정하게 유지되었다. 3I광구의 퇴적물 입도 조성 시계열 변화를 살펴보면 펄 함량의 증가는 휴지기인 2014년 9월과 2016년 9월에 나타나고, 다른 시기에는 유사한 구성비의 퇴적물이 분포하는 것으로 나타났다.

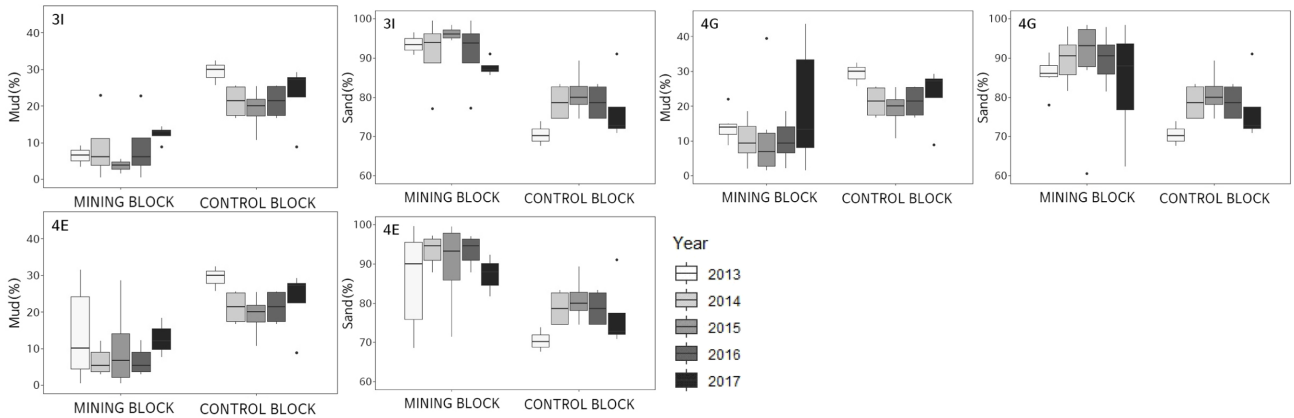
분석기간(2013~2017년) 동안 퇴적물 입도 조성에서 대조구의 경우 일정한 구성비를 유지하였으며 바닷모래 채취로 인한 영향은 크지 않는 것으로 판단된다. 하지만 비록 일부 시기이지만 채취광구에서

필 함량이 증가하는 것은 유의해서 판단할 필요가 있다. 먼저, 우리나라의 EEZ 해역은 먼 바다로서 연안 또는 하구로부터의 세립퇴적물의 퇴적 가능성과 대조구 퇴적물 입도 조성 시계열에서 계절적 영향이 나타나지 않는 것으로 보아 계절적인 영향 가능성은 배제하는 것이 타당하다. 두 번째 가능성은 바닷모래 채취로 인한 영향으로 채취된 바닷모래를 채취선에 적재하는 과정에서 유출되는 월류수(Overflow)에 의해 채취구역 내 국지적인 세립질 퇴적이 발생하게 된다. 또한 2008년 이후 본격적으로 시행된 EEZ 골재채취 방식은 다수의 웅덩이를 생성시키며 웅덩이 내 굴곡 사이로 세립퇴적물이

이동될 가능성이 있다.

서해 EEZ 골재채취 해역 대조구의 퇴적물 평균입경 범위는 1.08~3.33 Φ 로 평균은 2.17 Φ 이며 모래함량은 모두 80% 이상(C-1 : 85.63~96.40%, C-2 : 81.67~98.11%, C-3 : 87.20~98.10%)으로 나타났다. 선정된 채취광구 정점들의 평균입경 변동 폭은 대조구와 유사하며, 정점 W-2의 2017년 6월(모래 함량, 78.84%)을 제외하면 모래 함량 역시 80% 이상으로 유지되었다. 서해 EEZ 채취광구는 남해 EEZ 채취광구와 달리 모래 채취로 인한 퇴적물 입도 조성의 변화가 나타나지 않았다(Fig. 4).

(a) Southern EEZ Stations



(b) Western EEZ Stations

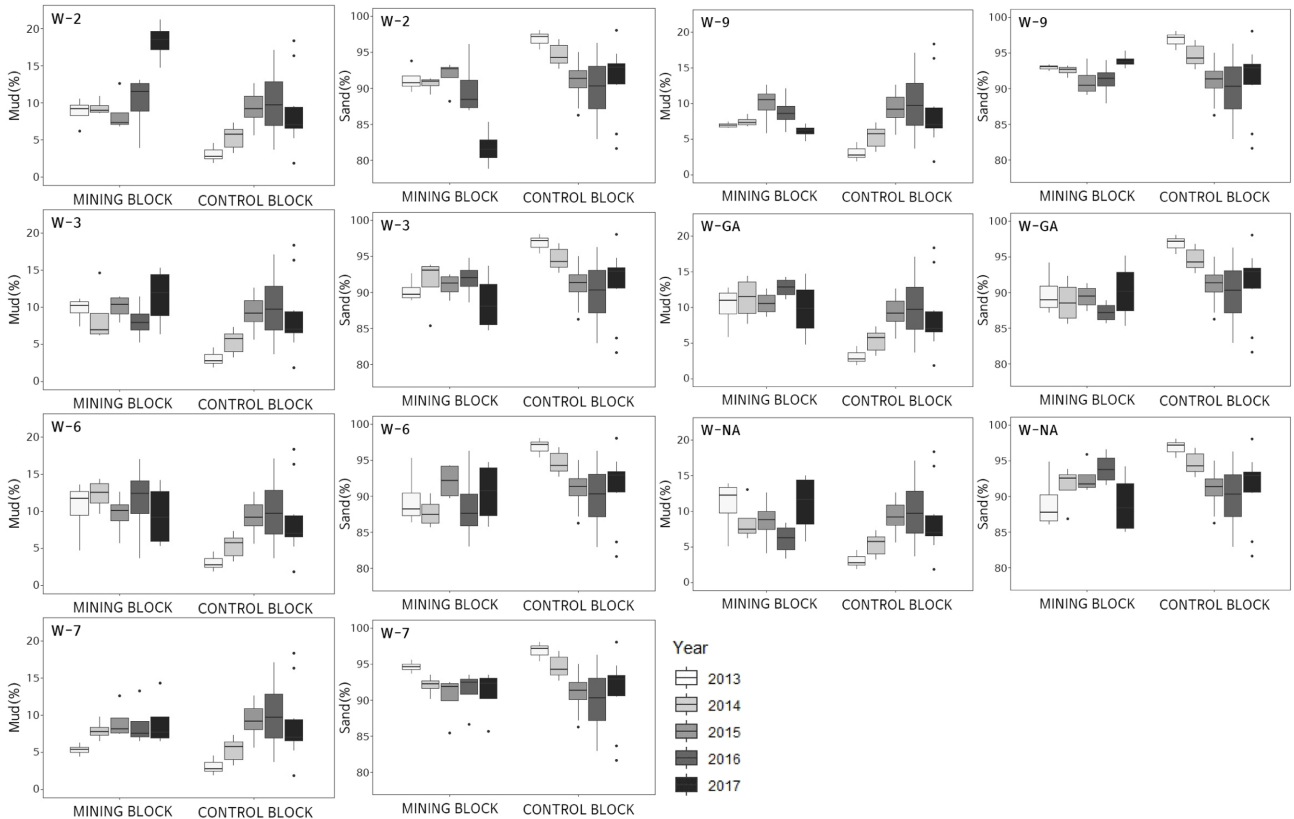


Fig. 5. Sediment composition of control block and mining block using box-whisker plot comparison in Southern (a) and Western (b) EEZ marine sand mining (2013~2017).

분석기간(2011~2017년) 동안의 광구별 채취량을 살펴보면 2광구에서 4,042,204m³, 3광구에서 4,697,486m³, 6광구에서 1,034,000m³, 7광구에서 1,996,896m³, 9광구에서 6,415,518m³, 가광구에서 3,319,997m³, 나광구에서 1,797,047m³으로 나타났다. 퇴적물 입도 조성 시계열 변화에서 자갈 함량은 거의 없으므로 분석에서 제외하였다. 대조구 정점들의 모래와 펄 구성비를 비교하면 급격한 조립화 또는 세립화되지 않았고 변화 없이 유지되었다. 채취구역 퇴적물의 입도 조성 시계열에서 2광구의 정점 W-2에서만 2017년 채취기간 동안 모래 함량이 약간 감소하는 반면 나머지 채취광구에서는 모래와 펄 구성비가 큰 변동 없이 유지되었다.

3.2 Box-Whisker plot을 이용한 채취광구와 대조구 변화

2013년부터 2017년까지 남해와 서해 EEZ 골재채취 해역 채취광구와 대조구의 모래 및 펄 함량에 대한 연변화를 box-whisker plot을 이용하여 제시하였다(Fig. 5). 입도 조성 특성상 모래 함량이 증가/감소하면 펄 함량은 반대로 감소/증가하므로 모래 함량의 변동 폭이 크면 펄 함량 변동 폭 역시 크게 나타난다.

남해 EEZ 골재채취 해역 대조구의 퇴적물 입도 조성은 모래의 함량이 2013년 약 70%에서 2014~2016년 사이 80%까지 증가하였다가 2017년 75% 수준으로 감소하였다. 채취광구에서 퇴적물 입도 조성은 동일시기 대조구와 달리 큰 변동 폭을 보이고 있으며, 각 광구별로 4E광구는 2013년, 4G광구는 2017년에 가장 큰 변동 폭이 나타났다. 또 다른 특징은 4E광구를 제외하면 모래 함량의 낮은 정점이 존재하였다. 이 두 가지 특징은 자연적인 영향보다는 바닷모래 채취와 같은 인위적 영향으로 판단된다.

서해 EEZ 골재채취 해역 대조구의 퇴적물은 2013년부터 증가하면서 상대적으로 세립화되는 경향을 나타내며 모래와 펄 함량 변동 폭이 점차 커지는 경향을 보였으며, 모래 함량과 펄 함량의 변동 범위는 10% 내외에서 변동하는 것으로 나타났다. 사분위수 상자의 분포에서 채취광구의 퇴적물은 2광구의 2017년 퇴적물만 다른 연도와 달리 펄 함량이 증가된 반면 나머지 광구들은 퇴적물 입도 조성에서 모래 함량 대비 펄 함량이 10% 내의 변동 폭으로 유지되고 있다. 또한 대조구와 채취광구의 퇴적물 입도 조성에서 2017년 2광구의 퇴적물을 제외하면 대부분 모래 함량이 85% 이상으로 유사하게 분포하였다. 이는 남해 EEZ 골재채취 해역과 달리 서해 EEZ 골재채취 해역의 채취광구에서는 바닷모래 채취 영향으로 인한 퇴적물 입도 조성 변화가 크지 않음을 의미한다.

3.3 대조구와 채취광구 퇴적물 변화를 이용한 적정지표 선정 방법

퇴적물 입도 조성 시계열 변화로부터 바닷모래 채취로 인한 퇴적물 입도 조성 변화를 정성적으로 살펴보았다. 바닷모래 채취에 대한 영향을 보다 정량적으로 파악하기 위하여 대조구와 채취광구 퇴적물에 대한 유사성 평가를 실시하였다.

Boyd *et al.*[2005], Cooper[2012] 및 Waye-Baker *et al.*[2015]는 ANOSIM을, Cooper and Barry[2017]는 마할라노비스 분석을 이용하여 대조구와 채취구역 퇴적물의 유사성을 평가한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 마할라노비스 분석을 이용하였으며, 시계열 변화 분석보다 퇴적물 입도 조성비를 더 세분화하여 유사성을 평가하였다. 분석에 이용된 퇴적물 입도 조성은 남해 EEZ 골재채취 해역의 경우 자갈(>2 mm)함량, 조립사(0.5~2 mm)함량, 중사(0.25 mm)함량, 세립사(0.0625~0.25 mm)함량 및 펄(0.0625 mm)함량이며, 서해 EEZ 골재채취 해역의 경우 자갈(>2 mm)함량, 모래(0.0625~2 mm)함량, 펄(0.0625 mm)함량이며, 기 보고된 자료에서 세분화된 자료가 없었기에 자갈/모래/펄에 마할라노비스 분석을 실시하였다.

남해 EEZ 골재채취 해역에서 대조구와 채취광구의 마할라노비스 분석에 이용된 표본 수는 총 104개로 대조구 19개, 채취구역 95개(정점당 19개)를 이용하였다. 대조구 퇴적물의 구성비 평균과 공분산 행렬값은 세립역질 0.03%, 조립사 2.03%, 중사 37.39%, 세립사 38.12% 및 펄(실트+점토) 22.4%로 나타났다(Table 4).

대조구 기준으로 채취광구의 총 95개 시료에 대한 유사성 평가에서 가장 유사도가 높은 정점은 4E광구의 정점 S-1으로 채택은 14개, 기각은 5개로 분석되었다. 가장 유사도가 낮은 정점은 4E광구의 S-2와 4G광구 S-3로 두 정점 모두 채택은 6개, 기각은 13개로 분석되었다. 대조구 기준 광구별 유사도는 4E광구 36.8%, 4G광구 42.1%, 3I광구 52.6%이며, 채취광구의 평균 유사도는 48.4%로 나타났다. 분석결과 유의 수준은 0.05 미만으로 나타났다(Table 5).

Table 5. Sediments composition and covariance matrix in control block of the western EEZ marine sand mining

	Control block (C-1, C-2, C-3)	Sediments composition(%)		
		Mud	Sand	Gravel
	Mean	7.36	92.62	0.02
Covar. Matrix	Mud	15.07	-	-
	Sand	-15.17	15.29	-
	Gravel	0.09	-0.11	0.02

Table 4. Sediments composition and covariance matrix in control block of the southern EEZ marine sand mining

Control block (C-1)	sediments composition(%)					
	Mud	Fine Sand	Medium Sand	Coarse Sand	Gravel	
Mean	22.44	33.12	37.79	2.03	0.03	
Covar. Matrix	Mud	41.45	-	-	-	-
	fS	15.10	167.53	-	-	-
	mS	-59.40	-170.53	229.43	-	-
	cS	2.66	-11.50	-170.53	8.10	-
	fG	0.11	-0.56	0.12	0.32	0.02

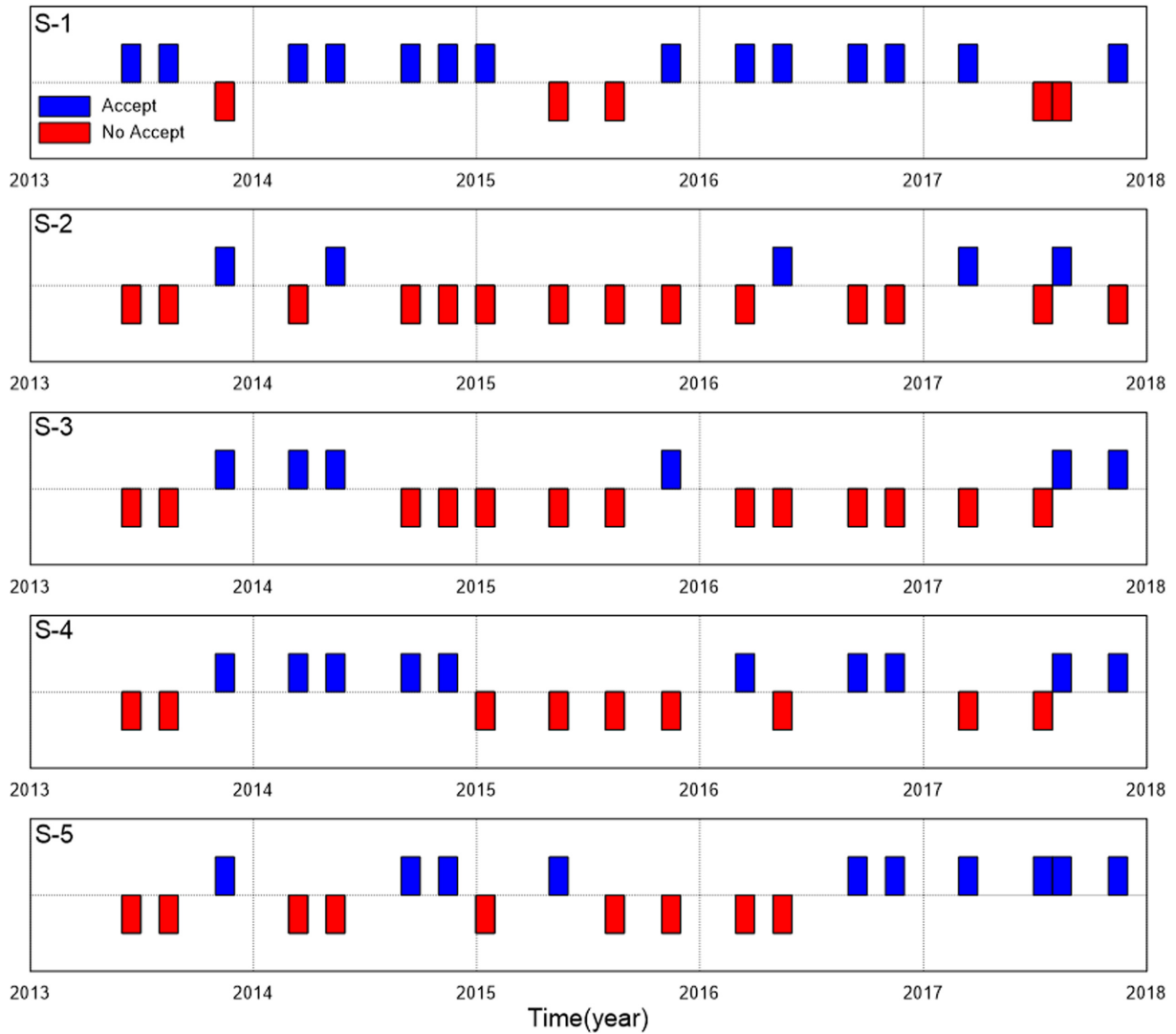


Fig. 6. Sediment composition similarity time series between control block and mining block in southern EEZ marine sand mining (2013~2017).

2013년부터 2017년까지의 대조구와 채취광구의 유사도 시계열을 분석한 결과 채취기간과 휴지기에 상관없이 낮은 유사도를 보이는 것으로 나타났으며(Fig. 6), 이는 바닷모래 채취로 인한 퇴적물 입도 조성이 변화된 이후 회복되지 않기 때문이라고 판단된다.

서해 EEZ 골재채취 해역에서 대조구와 채취광구의 마할라노비스 분석에 이용된 표본 수는 총 202개로 대조구(정점 C-1, C-2, C-3) 68개, 채취단지 143개(가와 나 광구는 정점당 19개, 나머지 5개 광구는 정점당 21개)를 이용하였다. 마할라노비스 분석 결과 대조구

Table 6. Evaluation of the similarity of sediment composition between control block and mining block in southern EEZ marine sand mining (2013~2017)

Mining block	Station	Similarity		Sample size	Similarity percent
		accept	no accept		
4E	S-1	14	5	38	36.8%
	S-2	6	13		
4G	S-3	6	13	38	42.1%
	S-4	10	9		
3I	S-5	10	9	19	52.6%
Sum		46	49	95	48.4%

(P<0.05)

Table 7. Evaluation of the similarity of sediment composition between control block and mining block in Western EEZ Marine Sand mining (2013~2017)

Mining block	Station	Similarity		Sample size	Similarity percent
		accept	no accept		
W-2	W-2	18	3	21	85.7 %
W-3	W-3	20	1	21	95.2 %
W-6	W-6	21	-	21	100 %
W-7	W-7	21	-	21	100 %
W-9	W-9	21	-	21	100 %
W-GA	W-GA	19	-	19	100 %
W-NA	W-NA	19	-	19	100 %
Sum		139	4	143	97.2 %

(P<0.05)

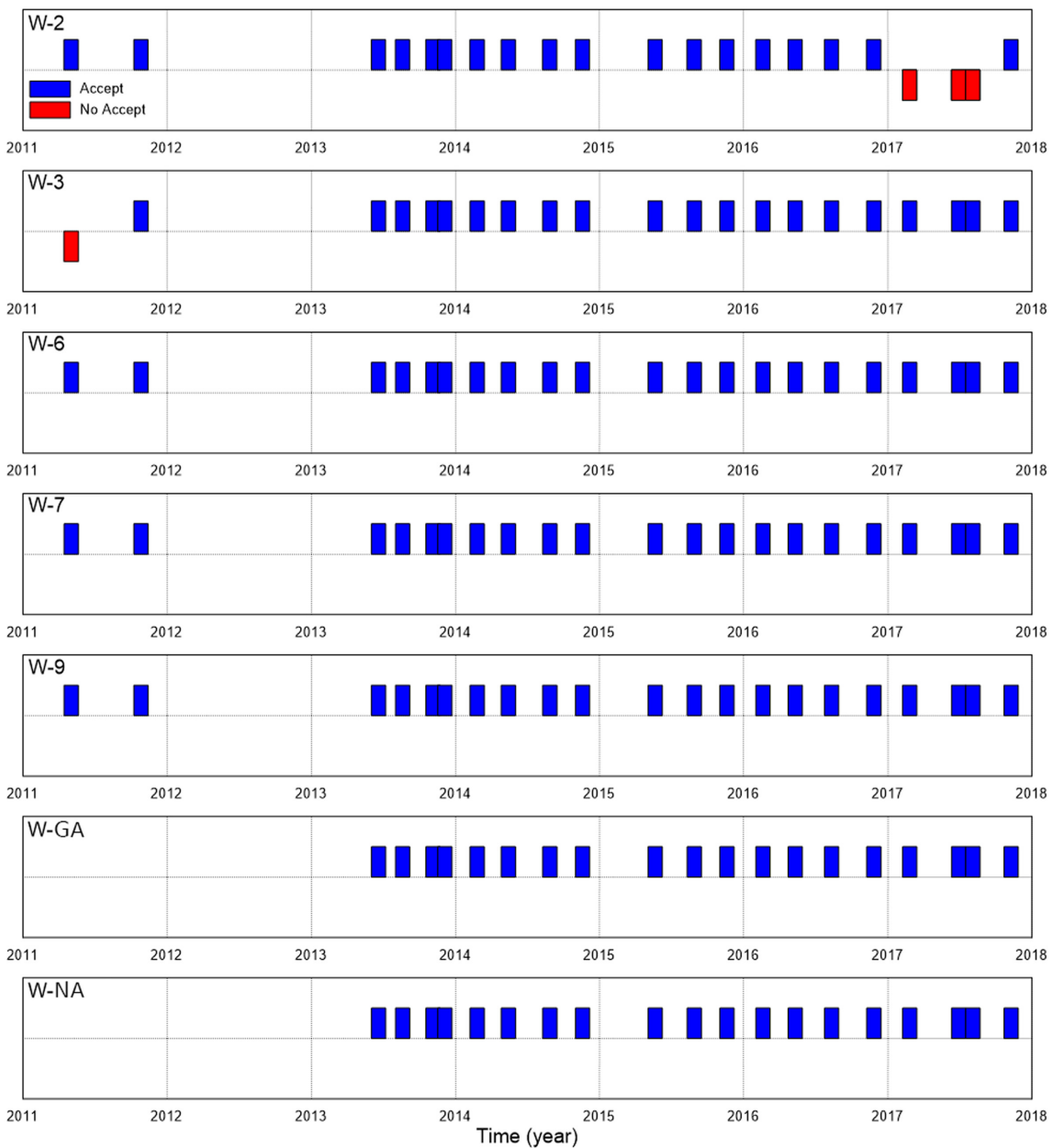


Fig. 7. Sediment composition similarity time series between control block and mining block in western EEZ marine sand mining (2011~2017).

퇴적물에 대한 구성비 평균과 공분산 행렬값은 평균은 자갈 0.02%, 모래 92.62% 및 펄 7.36%로 나타났다(Table 6).

대조구 기준으로 채취광구의 총 143개 시료에 대한 유사성 평가에서 2광구와 3광구에서만 기각이 발생하였으며, 각각 2광구는 3개, 3광구는 1개로 나타났다. 이 외에 나머지 채취광구에서는 대조구와 유사한 퇴적물 입도 조성을 가지는 것으로 나타났다. 분석결과 유의 수준은 0.05 미만으로 나타났다.

남해 EEZ 골재채취 해역에서는 낮은 유사도를 보인 반면, 서해 EEZ 골재채취 해역에서는 97.2%의 높은 유사도를 보였다(Table 7). 대조구와 채취광구의 유사도 시계열을 분석한 결과 정점 W-2의 2017년 대부분과 정점 W-3의 2011년 초반 퇴적물에서 낮은 유사도가 나타났으나, 대부분의 정점에서 바닷모래 채취 기간 및 휴지기 동안 유사한 퇴적물 입도 조성을 가지는 것으로 조사되었다(Fig. 7).

남해와 서해 EEZ 골재채취 해역에서 채취광구와 대조구의 유사도 평가를 수행한 결과 남해 EEZ 골재채취 해역의 경우 유사도가 낮고, 서해 EEZ 골재채취 해역의 경우 유사도가 높은 것을 마할라노비스 분석을 통해 파악하였다. 마할라노비스 분석은 채취광구와 대조구의 퇴적물 변화 양상을 객관적으로 파악하는데 적합한 방법으로 나타났다. 다만 서해 EEZ 골재채취 해역의 경우 입도 구성비를 세분화하여 유사도 평가를 하지 않았기에 모래 내에서의 변화를 파악하기는 부족한 실정이다. 입도 구성비를 세분화하면 유사도 평가의 기준이 되는 값이 많아짐으로 보다 정밀한 평가를 실시할 수 있다. 금회 서해 EEZ 골재채취 해역의 경우 자료 수집이 불가능하여, 제시된 자료로만 유사도 평가를 하였으나 차후 연구에서는 입도 구성을 세분화하여 정밀한 평가가 될 수 있도록 개선되어야 한다.

4. 결 론

2013년부터 2017년까지 남해와 서해 EEZ 골재채취 해역에서 수행된 조사 결과를 바탕으로, 바닷모래 채취 후 시간에 따른 퇴적물 입도 조성 변화를 파악하였다. 또한 대조구와 채취광구의 퇴적물 입도 조성 변화를 바탕으로 적합한 적정지표를 산정하는 방법을 제시하였다.

남해 EEZ 골재채취 해역에서 퇴적물 입도 조성은 대조구의 경우 일정한 입도 조성을 유지하고 있는 것으로 나타났고, 채취광구에서는 비록 일부 시기이지만 펄 함량이 증가한 것으로 나타났다. 채취광구의 퇴적물은 대조구와는 달리 큰 변동 폭을 보이고 있으며, 대조구와 채취광구의 유사도 시계열 분석 결과 채취기간과 휴지기에 상관없이 낮은 유사도를 보이는 것이 특징으로 나타났다. 이는 바닷모래 채취로 인한 인위적인 영향으로 채취광구와 대조구가 차이를 보이는 것으로 판단된다.

서해 EEZ 골재채취 해역에서 퇴적물 입도 조성은 대조구와 채취광구 정점들에서 모래와 펄 구성비를 비교하면 급격한 조립화 또는 세립화 되지 않고 변화 없이 유지되고 있으며, 대부분의 정점에서

모래 함량이 85% 이상으로 분포하였다. 대조구와 채취광구의 유사도 시계열 분석 결과 거의 모든 시기에 높은 유사도를 보여, 바닷모래 채취 이후에도 유사한 퇴적물 입도 조성으로 분포하고 있음을 나타내고 있다.

남해와 서해 EEZ 골재채취 해역에서의 유사도 분석 결과 마할라노비스 분석은 채취 행위에 의한 퇴적 환경 영향을 판단할 수 있는 지표로 활용될 수 있을 것으로 생각되며, 입도 구성비를 세분화하여 분석할 경우 바다 모래 채취의 영향을 평가하는 데 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2021년 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원- 과학기술기반 해역이용영향평가 기술개발 사업 지원을 받아 수행되었습니다(KIMST-20210427).

References

- [1] Boyd, S.E., Limpenny, D.S., Rees, H.L., and Cooper, K.M., 2005, The effects of marine sand and gravel extraction on the macrobenthos at a commercial dredging site (results 6 years postdredging). *ICES J. Mar. Sci.*, 62, 145-162.
- [2] Cefas., 2003, Preliminary investigation of the sensitivity of fish to sound generated by aggregate dredging and marine construction. Defra project AE0914.
- [3] Cho, D.H., and Chang, H.B., 2003, The Demand-Supply Situation and Management Plan for Marine Sand, Report of KMI (Korea Maritime Institute), 40-92.
- [4] Choi, J.H., Choi, J.Y. and Cho, Y.K., 2012, Study on erosion cause analysis and implication, *KCID J.*, 19(1), 3-18.
- [5] Cooper, K.M., 2012, Setting limits for acceptable change in sediment particle size composition following marine aggregate dredging. *Marine Pollution Bulletin*, 64, 1667-1677
- [6] Cooper, K.M and Barry, J., 2017, A big data approach to macrofaunal baseline assessment, monitoring and sustainable exploitation of the seabed. *Scientific Reports* 7.
- [7] Cooper, K.M., Boyd, S.E., Eggleton, J.E., Limpenny, D.S., Rees, H.R., and Vanstaen, K., 2007, Recovery of the seabed following marine aggregate dredging on the Hastings Shingle Bank. *Estuar Coast Shelf Sci* 75, 547-558
- [8] Daskalov, G.M., Mackinson, S., and Mulligan, B., 2011, Modelling possible food-effects of aggregate dredging in the Eastern English Channel. *MEPF-MALSF Project 08-P37*. Cefas, Lowestoft. 65.
- [9] Desprez, M., Pearce, B., and Le Bot, S., 2010, Biological impact of overflowing sands around a marine aggregate extraction site: Dieppe (eastern English Channel). *ICES J. Mar. Sci.*, 67, 270-277.
- [10] Desprez, M., Le Bot, S., Duclos, P.A., De Roton, G., Villanueva,

- M., Ernande, B., and Lafite, R., 2014, Suivi des impacts de l'extraction de granulats marins. Synthèse des connaissances 2012 (GIS SIEGMA). Ed. PURH, University of Rouen. 43.
- [11] Duclos, P.A., 2012, Impacts morpho-sédimentaires de l'extraction de granulats sur les fonds marins de la Manche orientale. University de Rouen. 266.
- [12] Hitchcock, D.R., and Steve Bell., 2004, Physical Impacts of Marine Aggregate Dredging on Seabed Resources in Coastal Deposits. *J. Coastal. Res.*, 20(1), 101-114.
- [13] Jo, D.O. and Jang, H.B., 2003, A study on the current status of marine sand supply and demand and management plan, Korea Maritime Institute.
- [14] Kim, B.O., Lee, S.H., and Yang, J.S., 2005, Bathymetric Change of a Sand Mining Site within EEZ, West Sea of Korea, *J. Korean Earth Sci. Society*, 26(8), 836-843.
- [15] KMI, 2006, Korea Maritime Institute, Estimates of the Economic Cost to Coastal Erosion due to Marine Sand Extraction, 20-26.
- [16] Kum, B.C., Shin, D.H., Jung, S.K., Jang, S., Jang, N. D., and Oh, J.K., 2010, Morphological features of bedforms and their changes due to marine sand mining in southern Gyeonggi Bay, *Ocean and Polar Research*, 32(4), 337-350.
- [17] Le Bot, S., Lafite, R., Fournier, M., Baltzer, A., and Desprez, M., 2010, Morphological and sedimentary impacts and recovery on a mixed sandy to pebbly seabed exposed to marine aggregate extraction (Eastern English Channel, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89, 221-233.
- [18] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009, Study for Environment-friendly Management Plan of Marine Sand Extraction Areas. Final Report, 26-41.
- [19] Min, G.O., 2004, Impacts of sand mining activity on the marine environment and fishery resources in Kyeonggi Bay, Korea, Master's thesis, Inha University, Incheon, Korea
- [20] Newell, R.C., Hitchcock, D.R. and Seiderer, L.J., 1999, Organic enrichment associated with outwash from marine aggregates dredging: A probable explanation for surface sheens and enhanced benthic production in the vicinity of dredging operations. *Marine Pollution Bulletin*, 38(9), 809-818.
- [21] Newell, R.C., Seiderer, L.J., and Hitchcock, D.R., 1998, The impact of dredging works in coastal waters: A review of the sensitivity to disturbance and subsequent recovery of biological resources on the sea bed. In *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 36, 127-178.
- [22] Pearce, B., 2008, The significance of benthic communities for higher levels of the marine foodweb at aggregate dredge sites using the ecosystem approach. *Marine Ecological Surveys Limited*, 24a Monmouth Place, Bath, BA1 2AY,70.
- [23] Son, K.H., and Han, K.N., 2007, The fluctuation of biological communities as an effect of marine sand mining in the Gyeonggi Bay, *Ocean and Polar Research*, 29(3), 205-216.
- [24] Van Dalssen, J.A., Essink, K., Toxvig Madsen, H., Birklund, J., Romero, J. and Manzanera, M., 2000, Differential response of macrozoobenthos to marine sand extraction in the North Sea and the Western Mediterranean. *ICES J. Mar. Sci.*, 57, 1439-1445.
- [25] Waye-Barker, G.A., McIlwaine, P., Lozach S., Cooper, K.M., 2015, The effects of marine sand and gravel extraction on the sediment composition and macrofaunal community of a commercial dredging site (15 years post-dredging). *Marine Pollution Bulletin*, 99, 207-215.
- [26] Yang, J.S., Jeong, Y.H., and Ji, K.H., 2008, Changes in the sensitive chemical parameters of the seawater in EEZ, Yellow Sea during and after the sand mining operation, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 13(1), 1-14.
- [27] Yu, O.H., Lee, H.G., Lee, J. H., and Kim, D.S., 2006, Impacts of sand mining on the macrobenthic community in Gyeonggi Bay, Korea, *Ocean and Polar Research*, 28(2), 129-144.

Received 6 October 2021

1st Revised 10 November 2021, 2nd Revised 22 August 2022

Accepted 22 August 2022