

남해 EEZ 골재채취 해역의 부유사 발생 및 확산 특성

방기영¹ · 조창우¹ · 정정민² · 손규희^{3,†}¹(주)지오시스템리서치 부설연구소 책임²(주)지오시스템리서치 부설연구소 선임³해양환경공단 미래성장처 처장

Characteristics of Suspended Sediment Generation and Dispersion during Dredging Operation around the EEZ Sand Mining Zone in South Sea of Korea

Ki-Young Bang¹, Chang Woo Cho¹, Jeongmin Jeong², and Kyuhee Son^{3,†}¹Principal Engineer, Research and Development Institute, GeoSystem Research Corporation, Gunpo 15807, Korea²Senior Engineer, Research and Development Institute, GeoSystem Research Corporation, Gunpo 15807, Korea³Team Manager, Future Business Development Dept., Korea Marine Environment Management Corporation, Seoul 05718, Korea

요 약

본 연구에서는 남해 EEZ 골재채취 해역의 부유사 발생 및 확산 특성을 파악하기 위하여 2013년부터 2016년까지 수행된 월류수 및 부유사추적 조사 결과와 2011년부터 2016년까지 촬영된 위성영상 자료(GOCI)를 수집·분석하였다. 골재 채취시 표층으로 유출되는 월류수 부유사농도는 656-36,094 g/m³를 나타냈으며, 골재채취 작업강도가 증가할수록 부유사농도가 증가하는 양상을 나타냈다. 부유사추적 조사와 위성영상 자료(GOCI)를 통해서 분석된 부유사 확산 양상에 의하면, 연중 북동향하는 대마난류의 영향으로 대부분의 부유사 플룸이 북동향하였으며, 월류수 부유사에 의해서 골재채취 구역 인근 표층에서 상대적으로 높은 농도를 나타내고, 채취지역으로부터 멀어질수록 표·중·저층의 농도가 유사해지는 양상을 보였다. 대마난류의 영향이 약해지는 대조기 창조시에는 부유사 플룸이 상대적으로 좁은 범위로 서향하였으며, 표층에서 고농도의 범위가 증가하는 양상을 보였다. 위성영상 자료(GOCI)의 중첩 결과에 의하면, 골재채취 중 부유사가 북동향으로 최대 약 58 km까지 확산되는 분포를 보였다. 골재채취 부유사 발생 및 확산 특성은 골재채취선 작업 조건과 대상해역의 흐름과 바람 조건에 의해서 좌우되므로 골재채취 중 발생하는 부유사에 의한 환경영향 최소화 측면에서 골재채취 작업강도의 완화와 적절 골재채취 시기 선정에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

Abstract – To understand the characteristics of the suspended sediment (SS) generation and dispersion patterns during dredging operation around the EEZ sand mining zone in southern sea of Korea, the previous survey results about the overflow SS as well the SS tracking from 2013 to 2016, and the satellite images were collected and analyzed. The concentration of SS flowing out to the sea surface during dredging was 656-36,094 mg/L, and this concentration increased as the dredging capacity increased. According to the spreading pattern of SS by SS tracking survey results and satellite image data (GOCI), most of SS plumes headed northeast in the direction of ebb due to the influence of Tsushima Warm Current (TWC). A relatively high concentration was observed in the surface layer near the dredging vessels due to the out flowing of SS to the sea surface, and far away from the dredging area, the concentrations in the surface, middle, and low layers became similar. When the influence of TWC was weakened during flood at spring tide, SS plumes headed west following the direction of flood, and the high concentration range was increased. According to the overlapping results of satellite image data (GOCI), SS spreaded up to 58-km northeast during the dredging process. Since the characteristics of the SS generation and dispersion patterns depend on the dredging condition, as well as the specific ocean current and wind circumstances in the area, therefore in

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

order to minimizing the environmental impacts caused by dredging, it is necessary to review the mitigation of dredging capacity and appropriate operation timing.

Keywords: Overflow suspended sediment(월류수 부유사), Suspended sediment dispersion(부유사 확산), EEZ sand mining zone(EEZ 골재채취구역), GOCI satellite image(GOCI 위성영상 이미지), Dredging(골재채취)

1. 서 론

해양골재채취는 19세기 중반 이후부터 시작되었으며, 우리나라는 1970년대부터 건설산업의 급격한 증가로 인해 내륙의 골재수요가 증가하게 되었고 육상 골재 공급량이 부족해짐에 따라 1980년대부터 해양 골재로 그 부족분을 충당하게 되었다(K-Water[2014]). 우리나라 남해와 서해 배타적경제수역(EEZ)에서는 2004년부터 골재 채취가 시작되었으며(Cho[2006]; Kim and Lim[2009]; Lee et al.[2010a]), 안정적인 골재수급을 위해 2008년에 해역별 골재채취 단지가 지정·운영되었다(Yoon et al.[2017]). 남해 EEZ 골재채취 단지는 2008년 9월부터 2020년 8월까지 지정·운영되어 총 채취량은 $64,400 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며, 현재 골재채취단지가 지정·해제되어 채취가 종료된 상태이다. 서해 EEZ 해역에서는 2008년 3월부터 2018년 12월까지 2차례에 걸쳐 골재채취단지가 지정·운영되어 총 채취량은 $58,500 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며, 신규 지정 골재채취단지에 대해서 2020년 11월부터 골재채취가 진행 중에 있다.

해양골재채취는 골재자원의 수급안정이라는 긍정적인 측면이 있는 반면, 해양환경 문제 유발이라는 상충되는 양면성을 지니고 있다. 해양골재채취로 인해서 해저지형의 변화(Kim et al.[2005]; Kum et al.[2010]), 저면 퇴적환경 변화에 기인한 저서생물 군집 교란 및 생태계 건강성 저하(Min[2004]; Yu et al.[2006]; Son and Han[2007]), 유용수산자원 감소(Cho and Chang[2003]) 등의 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 해양골재채취로 인한 해저면의 환경변화는 채취지역의 국지적인 범위 내에서 장기적으로 발생하며, 부유사에 의한 수층 환경변화는 광역적인 범위에 대해 채취 중에 집중되어 단기적으로 발생하나 반복적인 골재채취 과정 중 발생하는 누적 환경영향이 진단되고 있다(Lee et al.[2009]; Lee et al.[2010b]).

해양에서 골재채취에 대한 영향 평가는 통상 수치모델링을 이용한 부유사 확산범위 예측을 통해서 이루어지고 있으므로, 보다 현실적인 부유사 확산범위 예측의 필요성이 지속적으로 요구되고 있으며(Jeong et al.[2017]), 이를 위해서는 관측 자료 기반의 부유사 발생 및 확산 특성의 파악이 선행되어야 한다. 해양 골재채취와 같은 준설 과정에서 발생하는 부유사의 거동 양상은 채취공법, 채취되는 퇴적물의 특성 등에 의해서 좌우되며(Pennekamp et al.[1996]; Fettweis et al.[2011]; Manap and Voulvoulis[2015]), 조석, 조류, 바람 등에 의해서 수십 km까지 확산될 수 있으며(Pennekamp et al.[1996]; Teeter[2000]), 열·염 성층의 계절적인 변화에 의해서 다른 부유사 확산 양상을 나타낸다(Seo et al.[2018]).

해양골재채취에 따른 영향 검토의 목적으로 사전환경성검토, 해양환경영향조사, 해역이용영향평가 등의 용역이 수행되고 있으며,

일부 용역에서 골재채취 중 월류수 부유사 조사, 부유사 추적 조사 등을 통해 부유사 발생 및 거동 특성 파악을 위한 접근을 시도하고 있다. 그러나 대부분 단기 조사결과 중심의 협력적 분석만 수행되어 골재채취 대상해역의 부유사 발생 및 확산 특성을 파악하는데 어려움이 따른다.

남해 EEZ 골재채취단지는 2020년 8월 이후 골재채취단지가 지정·해제되어 채취가 종료된 상태이나, 서해 EEZ 해역보다 많은 양의 골재가 채취되었으며 어업인과 골재 수요자 간의 극심한 갈등으로 국내에서 큰 이슈가 되었었다(Yoon et al.[2017]). 본 연구에서는 남해 EEZ 골재채취 해역을 대상으로 수행된 골재채취 중의 월류수 및 부유사추적 조사 결과, 그리고 위성영상 자료(GOCI)를 종합적으로 수집·분석하여 대상 해역의 부유사 발생 및 확산 특성을 파악하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 연구지역 및 분석자료

한반도 남해안의 대륙붕에 위치한 연구지역(경상남도 육지도로 부터 남남서 방향으로 약 50 km 이격)은 조차가 2 m 이내인 반일 주조의 조석 특성을 갖는 해역이다(Fig. 1). 일반적으로 창조류는 남서(SW)향하고 낙조류는 북동(NE)향한다(Kim et al.[2011]). 파랑은 남(S) 또는 남서(SW)측 계열이 우세하고, 평균 유의파고는 0.5에서 1.5 m이다(You and Park[2010]).

대상 해역은 대마난류와 한국연안류 그리고 아시아 몬순에 의한 계절풍의 영향을 크게 받는다(Oscar[1982]). 봄철에는 북동향하는 대마난류가 강해짐에도 불구하고 수온은 차갑고 염분은 낮기 때문에 강한 성층이 발달하기 시작한다. 반면 가을철에는 북서풍에 의해 한국연안류가 확장되면서 성층이 약해지고 혼합층이 깊어진다(Oscar[1982]; Lee et al.[2007]; Kim et al.[2014]; Lee and Choi[2015]). 저면 표층퇴적물은 주로 모래로 구성되어 있는데, 입경의 크기는 먼 바다로 갈수록 조립해지는 특성을 보인다(Cho et al.[1999]; Chough et al.[2000]; Lee et al.[2008]; Jung et al.[2012]; K-Water[2013a]).

남해 EEZ 골재채취단지의 총 골재채취량은 2008년 9월부터 2020년 8월까지 $64,400 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이며, 주로 3H, 3I, 4E, 4G 광구를 대상으로 골재채취가 이루어졌다(Fig. 1, Fig. 2). 2010년 10월부터 채취 종료 시까지 3H·3I 광구와 4E·4G 광구에서 격년제로 골재채취가 이루어졌으며, 4G 광구의 총 골재채취량은 $21,354 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로 채취광구 중 가장 많은 양이 나타냈다(전체 골재채취량의 33%). 그 외 3F, 3H, 4D, 5G, 5H 광구에서 3개월 이하의 제한적인 골재채취

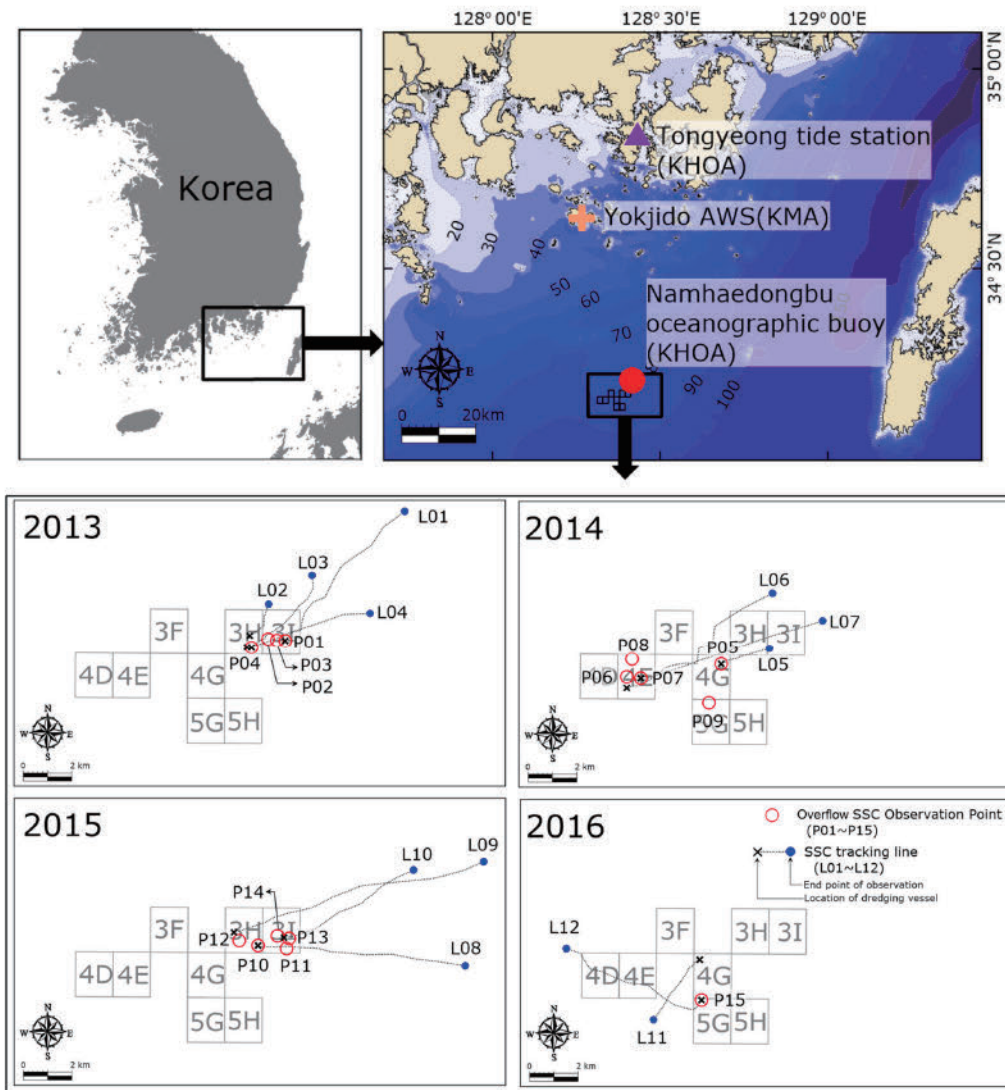


Fig. 1. Map showing the study area with bathymetry, annual field observation locations, and dredging complexes(3F, 3H, 3I, 4D, 4E, 4G, 5G, and 5H).

Table 1. List of review reference and data

Reference	Observation date of overflow SSC for review (data no.)	Observation date of SSC tracking for review (data no.)
K-Water [2013b]	·August 27, 2013(P01) ·December 25, 2013(P04)	·August 27, 2013(L01) ·August 28, 2013(L02) ·December 25, 2013(L03, L04)*
Chonnam National University [2015]	·December 5, 2013(P02, P03)* ·August 24, 2014(P06) ·December 27, 2014(P08, P09)* ·March 14, 2015(P11, P12)* ·June 22, 2015(P13, P14)*	·August 24, 2014(L06) ·March 14, 2015(L09)
K-Water [2015]	·March 24, 2014(P05) ·September 27, 2014(P07)	·March 24, 2014(L05) ·September 27, 2014(L07)
K-Water [2016]	·March 7, 2015(P10)	·March 7, 2015(L08) ·September 20, 2015(L10)
K-Water [2017]	·September 24, 2016(P15)	·March 12, 2016(L11) ·September 24, 2016(L12)

*Indicates that the observation was conducted twice a day

가 이루어졌다. 환경단체 및 어민들의 반대로 2017년 2월부터 2019년 6월까지 골재채취가 중단되었으며, 해당 시기를 기준으로 월 평균 골재채취량은 골재채취 중단전에는 $638 \times 10^3 \text{ m}^3$ 이었으나 골재채취 재개 후에는 $173 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로 중단전의 27%로 감소하였다.

본 연구에서는 남해 EEZ 골재채취 해역에서 수행된 사전환경성 검토, 해양환경영향조사, 해역이용영향평가 등의 사업에서 도출된 문헌자료를 전수 조사하였으며, 골재채취에 따른 부유사 발생 및 확산 특성을 도출할 수 있는 2013년부터 2016년까지의 자료를 선

별하여 정리·분석하였다(Table 1). 이를 통해 골재채취에 따른 부유사 발생특성 및 골재채취선 인근의 부유사 확산 특성을 파악하고자 하였다. 또한, 해양위성센터에서 자료를 제공하는 2011년부터 2016년까지 위성영상 자료(GOCI)를 이용하여, 골재채취에 광역적인 부유사 확산 양상을 분석하였다. 본 연구의 검토 기간은 2011년부터 2016년까지 약 6년이며, 해당 기간의 골재채취량은 $48,437 \times 10^3 \text{ m}^3$ 로, 전체 골재채취량의 75%에 해당된다(Fig. 2).

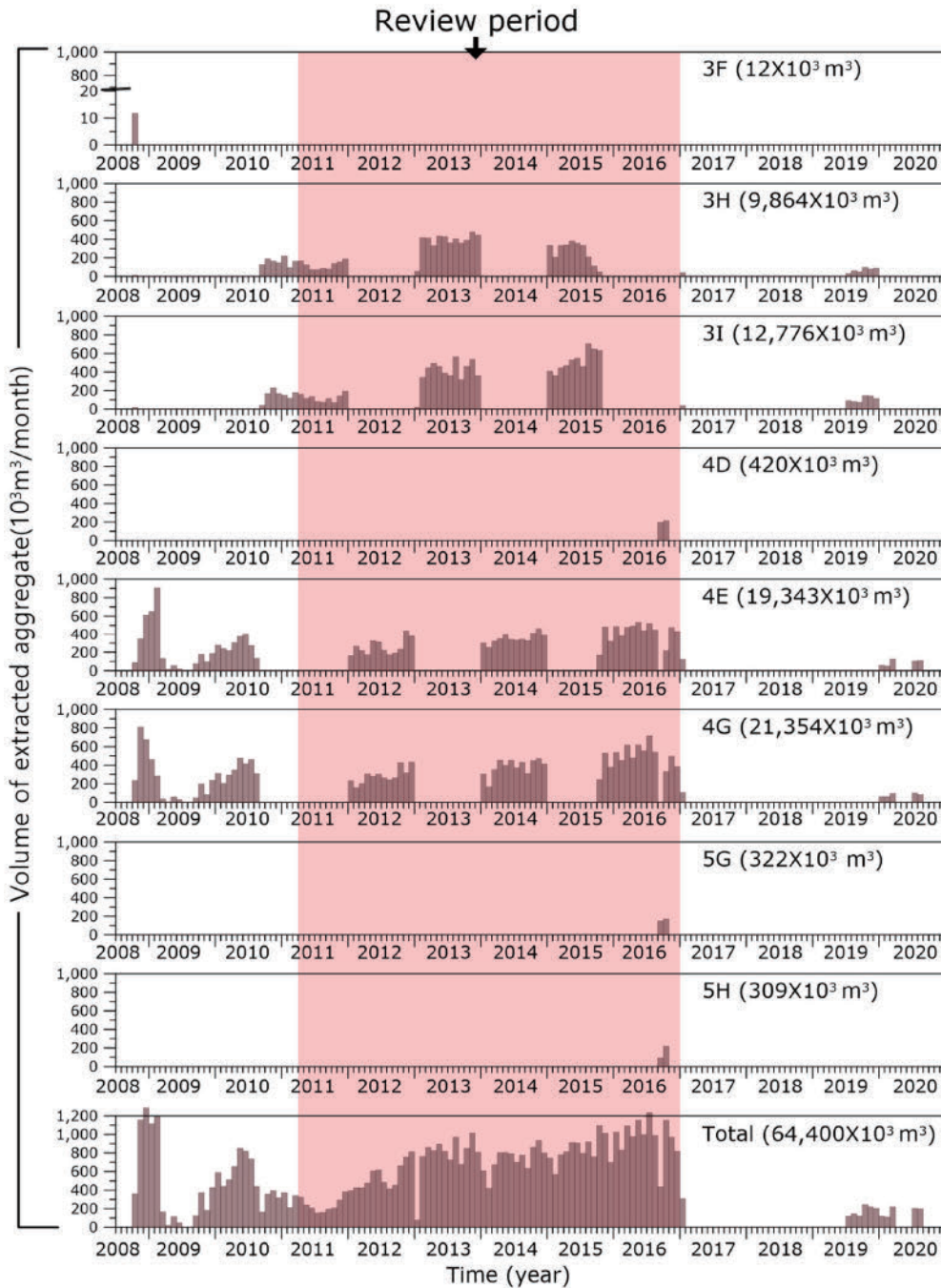


Fig. 2. History of marine aggregate extraction in dredging complexes of study area. 3F, 3H, 3I, 4D, 4E, 4G, 5G, and 5H represent dredging complexes (see Fig. 1). Light red shading means the review period.

2.2 골재채취 중 부유사 발생 특성

EEZ 해역의 골재채취는 골재채취선이 고정된 상태에서 해저에 흡입관을 안착시킨 후 펌프로 해수와 골재를 동시에 채취하는 방식으로 수행된다. 이때 저층 교란과 표층 월류에 의해서 부유사가 발생한다. 저층 교란은 골재 펌핑시 해저 퇴적물 교란에 의한 부유사 발생을 의미하고, 표층 월류는 골재와 함께 채취된 해수가 골재 채취선을 거쳐서 부유사를 함유한 상태로 표층에서 배출되는 것을 의미한다. 배출된 월류수 부유사는 주변 해수에 의해서 희석과 침강 과정을 거치면서 월류수와 다른 입도와 농도 특성을 가지게 된다. 따라서 해수 중으로 유출된 부유사 자료로 발생 특성을 파악하는데 어려움이 따른다.

본 연구에서는 골재채취 중 부유사 발생 특성을 파악하기 위하여, 해수로 유출되기 전, 즉 희석되기 전 상태의 월류수 부유사 자료에 대한 농도와 입도를 검토하였다. 월류수 부유사 조사는 2013년부터 2016년까지 총 21회 수행되었으며, 이중 골재채취 정보(월류수 조사가 수행된 채취선박, 채취위치, 채취시간, 채취량)가 확보된 15개 자료에 대해서 분석을 수행하였다(Table 1).

2.3 골재채취선 부근의 부유사 확산 특성

부유사 추적조사는 골재 채취시 채취선박에서 발생하는 유출 월류수로 인한 부유사 플룸을 목측으로 확인하고 추적하면서 채수 및 필터링을 통해 수층의 부유사 농도를 조사하는 관측방법이다. 본 연구에서는 골재채취시 채취선박을 기준으로 부유사의 수평 및 수직 확산 특성을 통계적 자료에 기초하여 정량적으로 파악하기 위하여 2013년부터 2016년까지 총 12회에 걸쳐 수행된 부유사 추적조사 자료를 수집하였다(Table 1). 대상해역의 수심은 약 80-90 m의 범위이며, 부유사 추적조사시 부유사농도 분석은 2013년 조사를 제외하면 층별(해면하 1, 5, 10, 20, 40, 70 m)로 수행되었다. 부유사 추적 1회 조사시 소요시간은 최소 50분에서 최대 5시간 10분으로 확인되었다.

부유사 추적조사는 골재 채취시 발생하는 부유사의 플룸을 관측자의 목측에 의존하기 때문에 시야 확보가 매우 중요하다. 기상 조건으로 플룸의 시야 확보가 어려우면 정확한 추적 조사가 불가하고 수층으로 침강된 부유사의 확산방향을 고려할 수 없는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 골재채취 중 채취 위치 부근의 부유사 거

Table 2. Summary of overflow SSC observation results during dredging

Data no.	Observation date	Dredging information				Overflow SS								Ref.*
		Area	Dredging amount [m ³]	Dredging time [hour]	Dredging capacity [m ³ /hour]	Concentration			Ave. composition					
						Min.	Ave.	Max.	Num. of samples	Sand	Silt	Clay	Num. of samples	
P01	Aug. 27, 2013	3I	3,477	3.22	1,080	3,950	6,319	9,095	14	60	35	5	3	①
P02	Dec. 5, 2013	3H	3,311	2.94	1,126	4,144	4,569	5,176	3	<1	61	39	3	②
P03	Dec. 5, 2013	3H	3,782	3.21	1,178	1,387	4,374	7,360	2	<1	61	39	2	②
P04	Dec. 25, 2013	3H	3,477	4.64	749	2,629	4,237	6,631	23	18	68	14	4	①
P05	Mar. 24, 2014	4G	4,147	4.39	945	925	3,420	5,124	26	19	74	7	4	③
P06	Aug. 24, 2014	4E	3,782	3.32	1,139	4,194	4,385	4,680	3	<1	59	41	3	②
P07	Sep. 27, 2014	4E	3,689	5.02	735	3,069	5,021	8,198	26	20	64	16	4	③
P08	Dec. 27, 2014	4E	3,205	3.10	1,034	3,574	4,789	6,745	5	<1	60	40	5	②
P09	Dec. 27, 2014	4G	3,477	4.71	738	3,434	4,456	5,909	5	<1	61	39	5	②
P10	Mar. 7, 2015	3H	2,120	3.27	648	830	3,345	5,646	17	5	77	18	3	④
P11	Mar. 14, 2015	3H	4,410	6.84	645	2,498	2,623	2,796	3	<1	77	23	3	②
P12	Mar. 14, 2015	4G	3,574	4.34	824	656	725	762	3	<1	67	33	3	②
P13	Jun. 22, 2015	3I	3,574	4.76	751	2,349	3,172	4,382	3	<1	60	40	3	②
P14	Jun. 22, 2015	3I	2,977	3.86	771	2,125	3,011	3,612	3	<1	60	40	3	②
P15	Sep. 24, 2016	5G	3,954	2.26	1,750	2,304	23,260	36,094	14	10	59	31	14	⑤

*Reference (see Table 1) : ① K-Water [2013b], ② Chonnam National University [2015], ③ K-Water [2015], ④ K-Water [2016], ⑤ K-Water [2017]

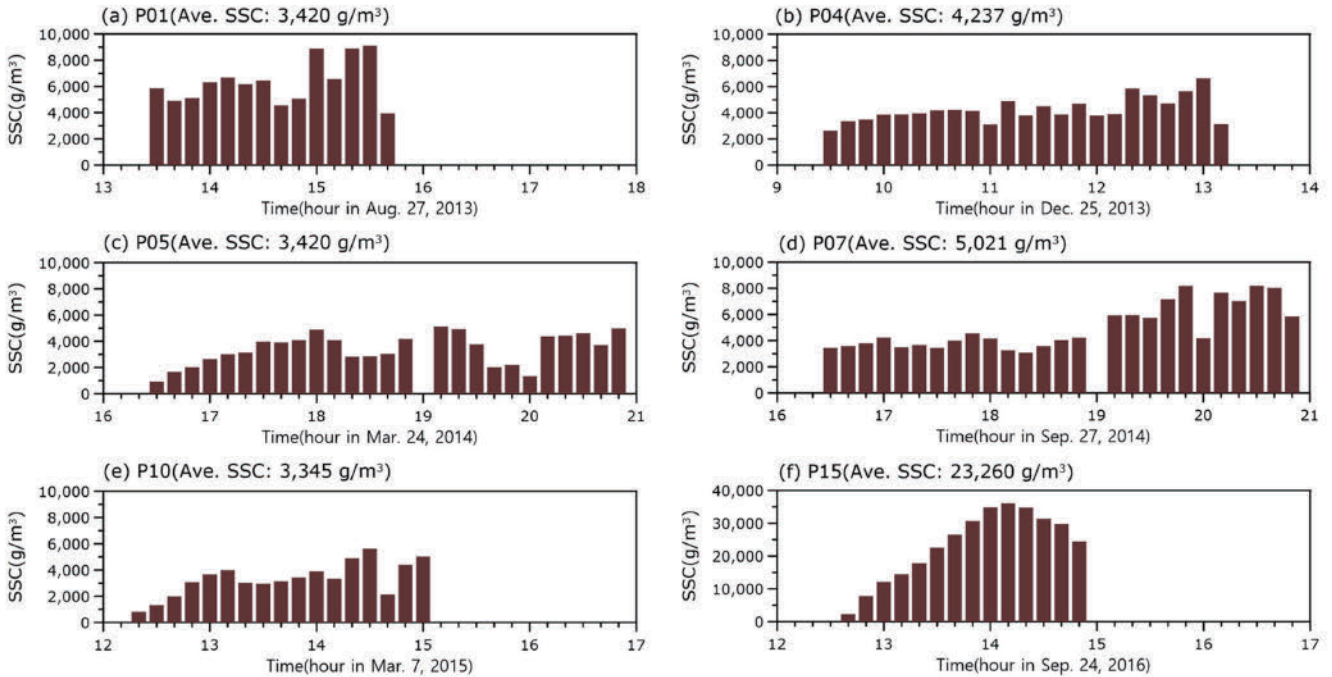


Fig. 3. Time-series of overflow SSC.

동 특성을 파악하기 위하여 부유사 추적조사를 통해 관측된 층별 부유사농도 분포를 분석하였다.

2.4 광역적 부유사 확산 특성

골재채취에 의해서 발생하는 부유사의 확산 특성을 파악하기 위해서는 부유사가 발생하는 골재채취 구역 부근의 부유사 거동 양상에 대한 조사와 부유사 확산범위를 고려한 광역적인 부유사 거동 양상에 대한 검토가 필요하다. 부유사 추적조사, 공간부유사 조사 등과 같은 현장조사는 골재채취 인근의 국지적인 부유사 확산 양상을 파악하는데 효과적이지만, 현장 여건과 기술적인 문제로 인해 전체적인 부유사 확산 특성을 파악하는데 한계가 있다. 골재채취 구역에서 발생하는 부유사의 광역적인 확산 특성과 범위에 대한 파악은 골재채취에 의한 영향범위를 평가하는데 매우 중요한 요소이나, 대부분의 경우 수치모델링을 이용한 예측 결과에 의존하고 있다.

본 연구에서는 골재채취 중 발생하는 부유사의 광역적 확산 특성을 검토하기 위해 한국해양위성센터(<http://kosc.kiost.ac.kr/>)에서 제공하는 위성영상 자료(GOCI)를 검토하였다. GOCI는 2010년 6월에 발사된 대한민국 천리안 위성에 탑재된 해양 관측위성으로 세계최초 정지궤도 해양관측위성으로, 500 m의 공간해상도로 2,500 km×2,500 km 영역의 한반도를 포함한 동중국해와 일본을 관측하고 있다. GOCI는 8개의 밴드(412, 443, 490, 555, 660, 680, 745, 865 nm)로 오전 9시부터 오후 4시까지 매시간 촬영하여 반사도, 용존유기물, 엽록소, 총 부유물질, 적조지수 등 다양한 산출물들을 제공하고 있다. 본 연구에서는 한국해양위성센터가 자료를 제공하

기 시작한 2011년 4월 1일부터 2016년 12월 31일까지 총 16,816 개의 GOCI LB1 영상을 검토하였다. 천리안 해양관측위성 자료처리시스템(GOCI Data Processing System, GDPS)를 통해 총 부유물질(L2A_TSS) 자료를 산출하여 남해 EEZ 골재채취 해역의 부유사농도 공간분포를 확인하였으며, 구름이 상대적으로 적어 대상해역 표층 해수의 부유사농도 식별이 가능하고 골재채취에 의한 부유사 확산 양상이 뚜렷한 위성 영상을 선별하여 골재채취 중 부유사 플룸 발생 형태를 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 골재채취 중 부유사 발생 특성

2013년부터 2016년까지 총 21회 조사된 월류수 부유사농도 자료 중 골재채취 정보(월류수 조사가 수행된 채취선박, 채취위치, 채취시간, 채취량)가 확보된 15개 자료를 선별하여 골재채취 작업강도와 월류수 부유사농도 간의 관계를 검토하였다.

월류수 부유사농도 분석은 월류수 조사별로 최소 2회, 최대 26회에 걸쳐 수행되었다. 관측된 월류수 부유사농도는 656-36,094 g/m³의 범위로, 평균치는 5,989 g/m³이다(Table 2). 골재채취 초반에는 상대적으로 낮은 농도를 나타내며, 중반부로 갈수록 증가하고 중·후반부로 갈수록 감소하는 양상을 보인다(Fig. 3). 월류수의 퇴적물 입도 조성은 2013년 8월 27일의 관측자료(P01)을 제외하면, 모래 함량은 대부분 20% 이하를 나타내며, 평균적인 모래, 실트, 점토 함량은 각각 9, 62, 29%로, 실트가 가장 높은 함량을 나타냈다(Table 2).

월류수 부유사 관측시의 1척당 골재채취량은 2,120-4,410 m³, 작

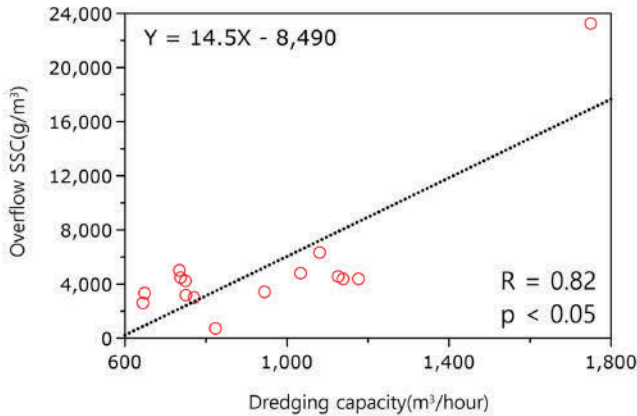


Fig. 4. The relationship between dredging capacity and overflow SSC.

업시간은 2.26-6.84시간이며, 채취량을 채취시간으로 나누어 산정한 작업강도는 644-1,750 m³/hr의 범위를 나타냈다(Table 2).

골재채취 작업강도와 월류수 부유사농도 간의 상관관계 분석 결과에 의하면(Fig. 4), 골재채취 작업강도가 600 m³/hr 이상일 때 95% 신뢰구간에서 상관계수 0.82의 상관성을 가지며 채취강도가 증가함에 따라 월류수 부유사농도가 증가하는 양상을 나타냈다.

2012년부터 2016년까지의 골재채취 작업일지 분석 결과에 의하면(Fig. 5), 골재채취 작업은 7시간 이내에 이루어졌고 1회 골재채취량은 1,500-4,500 m³ 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 채취시간과 채취량의 특징적인 관계는 확인할 수 없었으며, 이는 골재채취선 마다 펌프 효율과 적재용적이 다르고 채취시기마다 현장여건의 차이가 있기 때문으로 판단된다. 골재채취 작업강도는 200-2,400 m³/hr 범위로, 700-1,000 m³/hr에서 가장 높은 비율을 나타냈으며, 기존 관측자료에서 확인되지 않은 1,200-1,600 m³/hr의 비율은 약 13%를, 1,800 m³/hr 이상의 비율은 약 3%에 해당되는 것으로 나타났다. 이를 비추어볼 때, 골재채취시 평균적으로 5,000 g/m³의 월

류수 부유사가 유출되었고, 기존 관측을 통해 확인된 농도보다 높은 농도의 월류수 부유사가 발생하였을 것으로 판단된다.

3.2 골재채취선 부근의 부유사 확산 특성

부유사 추적조사는 대상 골재채취선을 기준으로 반경 10 km 내외 범위에서 수행되었으며, 이때 부유사 농도 측정은 대상 골재채취선 인근을 시작점을 기준으로 10분 내외의 간격으로 이루어졌다. 부유사 추적조사는 대상해역을 통과하는 연중 북동향하는 대마난류 특성과 유사하게 대부분이 북동-동남동향 방향으로 수행되었다(Table 3, Fig. 6). 단, 2016년 3월과 9월(L11, L12)의 부유사는 대부분의 조사 결과와는 다소 다른 결과를 보이는데, 이는 조사 당시 일시적인 남서 또는 서남서향하는 해수 흐름 상태를 반영한 것으로 판단된다.

분석 결과 최대관측거리는 1.6-10.6 km, 최대관측거리에서의 관측 농도는 0.7-14.0 g/m³, 관측 최고농도는 34.8-262.5 g/m³ 범위로, 채취량 또는 단위 채취량과는 뚜렷한 상관관계가 나타나지는 않았다(Table 3). 이는 부유사의 확산 범위는 조사 당시 조류, 해류 등과 같은 해황에 따른 이류 및 확산에 영향을 받으며, 추적조사의 방향이 목적에 기반한 표층 확산 양상에 의해서 정해져 중·저층에서의 부유사 이동양상을 반영할 수 없기 때문으로 판단된다. 조사 자료 중에서는 2015년 3월(L08, L09)에 최대 관측거리가 8 km 이상으로 타 조사 시기에 비해 길게 나타났으며, 이때의 관측 농도도 높게 나타났다(Table 3, Fig. 6).

부유사는 수평적으로는 해류에 따라 이동하며 시간이 지남에 따라 중·저층으로 침강하기 때문에 표층 월류가 이루어지는 골재채취선 인근에서 부유사 농도는 일반적으로 표층에서 높고, 저층에서 상대적으로 낮으며, 준설위치로부터 멀어질수록 표·중·저층의 부유사 농도가 유사해지는 양상을 보인다(Table 3, Fig. 6).

12회의 부유사 조사 자료 중에서 2014년 8월(L06), 2015년 3월(L09), 2016년 9월(L12) 시기를 선정하여 부유사 단면분포와 조사

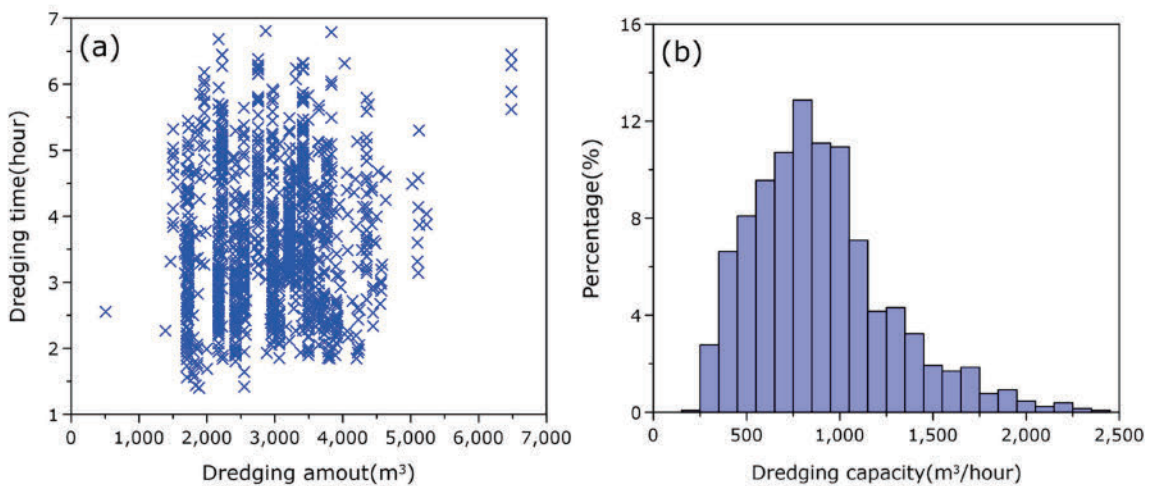


Fig. 5. The relationship between dredging amount and time(a), and percentage of dredging capacity(b).

Table 3. Summary of SS tracking survey results

Data no.	Observation date (time)	Dredging information					Survey results				Ref.***
		Area*	Dredging amount [10 ³ m ³]	Num. of Dredging	Survey Dir.	Max. dist. [km]	SSC at the point of max dist. [g/m ³]**			Observed Max. SSC [g/m ³]	
							Sur.	Mid	Bot.		
L01	Aug. 27, 2013 (15:50-16:40)	3H, <u>3I</u>	16	5	NE	7.2	1.6	-	-	34.8	①
L02	Aug. 28, 2013 (10:40-11:30)	<u>3H</u> , 3I	26	7	NNE	1.6	1.7	-	-	262.5	②
L03	Dec. 25, 2013 (12:00-14:00)	3H	22	7	NE	3.9	2.8	-	-	60.7	②
L04	Dec. 25, 2013 (16:20-17:40)	3H	22	7	ENE	5.3	0.7	-	-	230.7	①
L05	Mar. 24, 2014 (17:10-18:50)	4E, <u>4G</u>	11	3	ENE	2.1	2.9	3.5	-	64.0	③
L06	Aug. 24, 2014 (06:50-11:30)	<u>4E</u> , 4G	33	11	NE	7.2	3.4	4.1	3.5	82.8	②
L07	Sep. 27, 2014 (12:10-16:20)	<u>4E</u> , 4G	30	10	ENE	7.8	2.7	4.2	4.1	46.4	③
L08	Mar. 7, 2015 (13:20-17:40)	<u>3H</u> , 3I	18	7	ESE	8.5	4.5	4.4	4.1	51.1	②
L09	Mar. 14, 2015 (12:30-17:20)	<u>3H</u> , 3I	28	10	ENE	10.6	14.0	11.6	13.5	128.1	②
L10	Sep. 20, 2015 (08:00-13:10)	3I	18	7	NE	6.0	3.5	3.0	3.0	42.3	④
L11	Mar. 12, 2016 (09:40-14:10)	4E, <u>4G</u>	37	11	SW	3.9	1.6	5.5	3.8	44.1	②
L12	Sep. 24, 2016 (12:40-17:40)	4D, <u>5G</u> , 5H	49	15	WNW	7.2	3.2	3.3	3.9	46.7	②

*The underline is the location of the reference dredging ship for calculating maximum distance.

**Sur, mid, and bot mean 1, 40, and 70 m below the water surface, respectively.

***Reference (see Table 1): ① K-Water [2013b], ② Chonnam National University [2015], ③ K-Water [2015], ④ K-Water [2016], ⑤ K-Water [2017]

기간 중의 바람, 조위, 해류의 변화를 검토하였다(Fig. 7). 단면 부유사 농도 분포에 의하면, 골재채취선 인접 위치에서 80 g/m³ 이상의 농도가 발생하고 급격하게 농도가 감소한 후 선형적인 감소 경향을 나타내고 있으며, 낙조 방향인 동향 흐름이 우세한 2014년 8월(L06)과 2015년 3월(L09)에는 골재채취선 기준으로 2 km 이상 떨어진 거리에서는 표·중·저층의 농도가 유사하게 나타낸다(Fig. 7(a), Fig. 7(b)). 하지만, 창조 방향인 서북서향으로 관측이 수행된 2016년 9월(L12)에는 서향 흐름이 우세하게 나타났으며, 골재채취선 기준으로 4 km 지점까지 표층 농도가 상대적으로 중·저층보다 높게 유지되는 양상을 보였다(Fig. 7(c)). 이는 대마난류의 영향으로 창조 시간이 짧아 서측으로 부유사가 확산되지 않아 정체되기 때문으로 판단된다.

3.4 광역적 부유사 확산 특성

2011년 4월 1일부터 2016년 12월 31일까지 총 16,816개의 GOCI 위성영상 자료에서 골재채취에 의한 부유사의 확산 양상이 뚜렷한 82개 위성영상을 선별하였다. 선별된 GOCI 위성영상 중 서향의 부유사 확산 특성을 나타내는 2012년 9월 6일과, 동향의 부유사 확

산 특성을 나타내는 2013년 7월 21일과 2015년 5월 25일의 위성영상을 검토하였다(Fig. 8). 2012년 9월 6일의 위성영상에 의하면, 북풍과 서향류(창조류)에 의해서 부유사가 좁은 범위로 서향-북서향으로 확산되는 양상을 나타냈다(Fig. 8(a)). 2013년 7월 21일에는 지속되는 남풍과 강한 동향류에 의해서 북서향으로 띠 형태로 길게 확산되는 양상을 나타냈으며, 골재채취 단지 북서측으로의 부유사 확산 흔적도 확인되었다(Fig. 8(b)). 2013년 7월 21일과 비교할 때 동향류가 약한 2015년 5월 25일에는 부유사가 사행하며 서향하는 양상을 나타냈다(Fig. 8(c)). 부유사 이동양상의 차이를 발생시키는 주요한 요인은 대마난류와 대마난류와 창·낙조류와의 중첩효과에 의한 것으로 판단되며, 이로 인해 창조시에는 좁게 서측으로 확산되고 낙조시 넓게 동측으로 확산되었다. 특히 대조기의 낙조시에 가장 먼 거리까지 부유사가 확산되는 양상을 보였다. 대상해역 영향을 미치는 대마난류의 세력은 가을에 가장 강하며, 겨울에 가장 약한 것으로 알려져 있으나(Miita and Ogawa[1984]; Egawa *et al.*[1993]), 부유사 확산 양상을 확인할 수 있는 영상자료는 5월과 9월 사이 일부기간에 국한되어 연간 대마난류 세력 변화에 따른 부유사 확산 양상의 변화를 확인할 수 없었다.

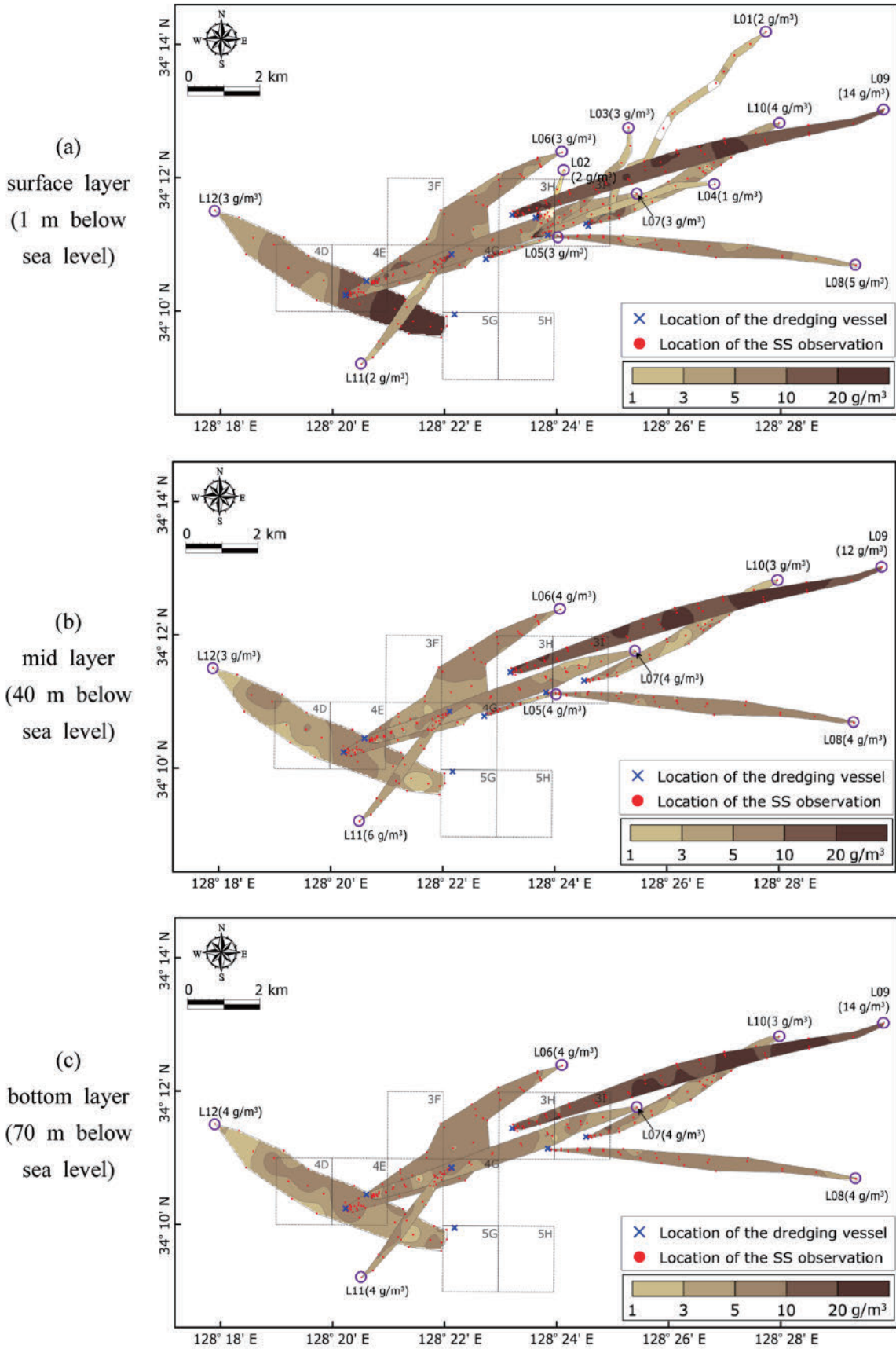


Fig. 6. Horizontal distribution of SSC by SS tracking surveys.

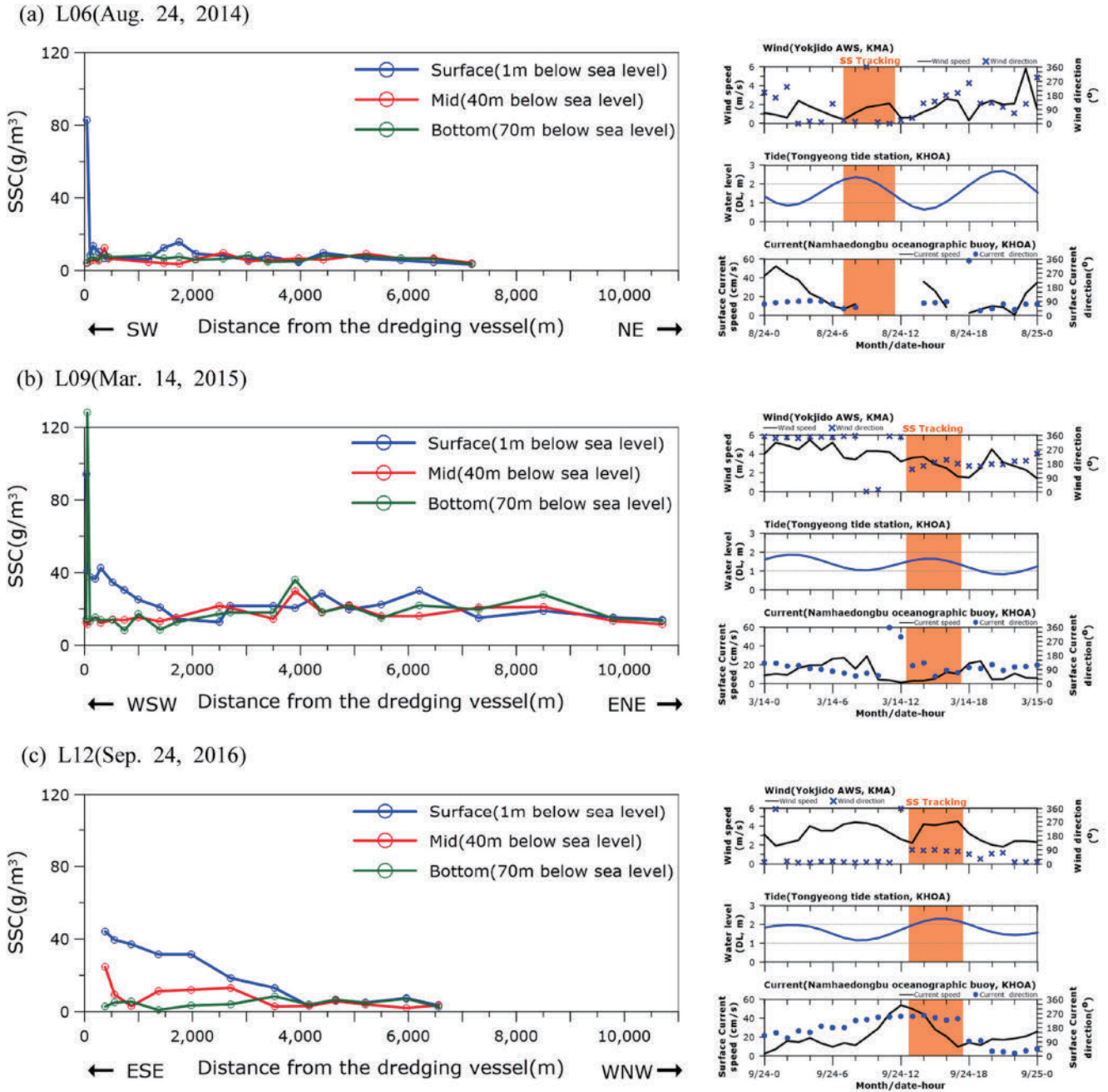


Fig. 7. Cross-sectional distribution of SSC by tracking surveys with wind, tide, and current time-series. The location of wind, tide, and current observation points are presented in Figure 1. On August 24, 2014, some of the current data were missing.

선별된 82개 위성 영상에 대해서 골재채취에 의한 영향범위를 설정한 후 해당 범위내각 격자에서 배경농도를 뺀 최대치를 산출하고, 이를 중첩한 최대 영향범위를 산출하였다(Fig. 9). 위성영상 자료(GOCI)에 의한 최대 부유사영향 범위에 의하면, 골재채취 중 부유사가 동북동-동남동향으로 확산되는 양상이 뚜렷하게 나타났으며, 동북동향으로 최대 약 58 km(2013년 7월 21일 11시), 북북동향으로 최대 약 17 km(2013년 7월 21일 9시)까지 부유사가 확산되는 양상을 나타냈다.

4. 결 론

남해 EEZ 골재채취 해역의 부유사 발생 및 확산 특성을 파악하기 위하여 2013년부터 2016년까지 수행된 월류수 및 부유사추적 조사 결과와 2011년부터 2016년까지 촬영된 위성영상 자료(GOCI)를 수집·분석하였다. 골재채취 중 표층 월류로 유출되는 부유사 농도는 작업 강도가 증가함에 따라 증가하는 것으로 분석되었으며, 이는 작업강도가 골재채취 중의 부유사 발생량에 기여함을 의미한

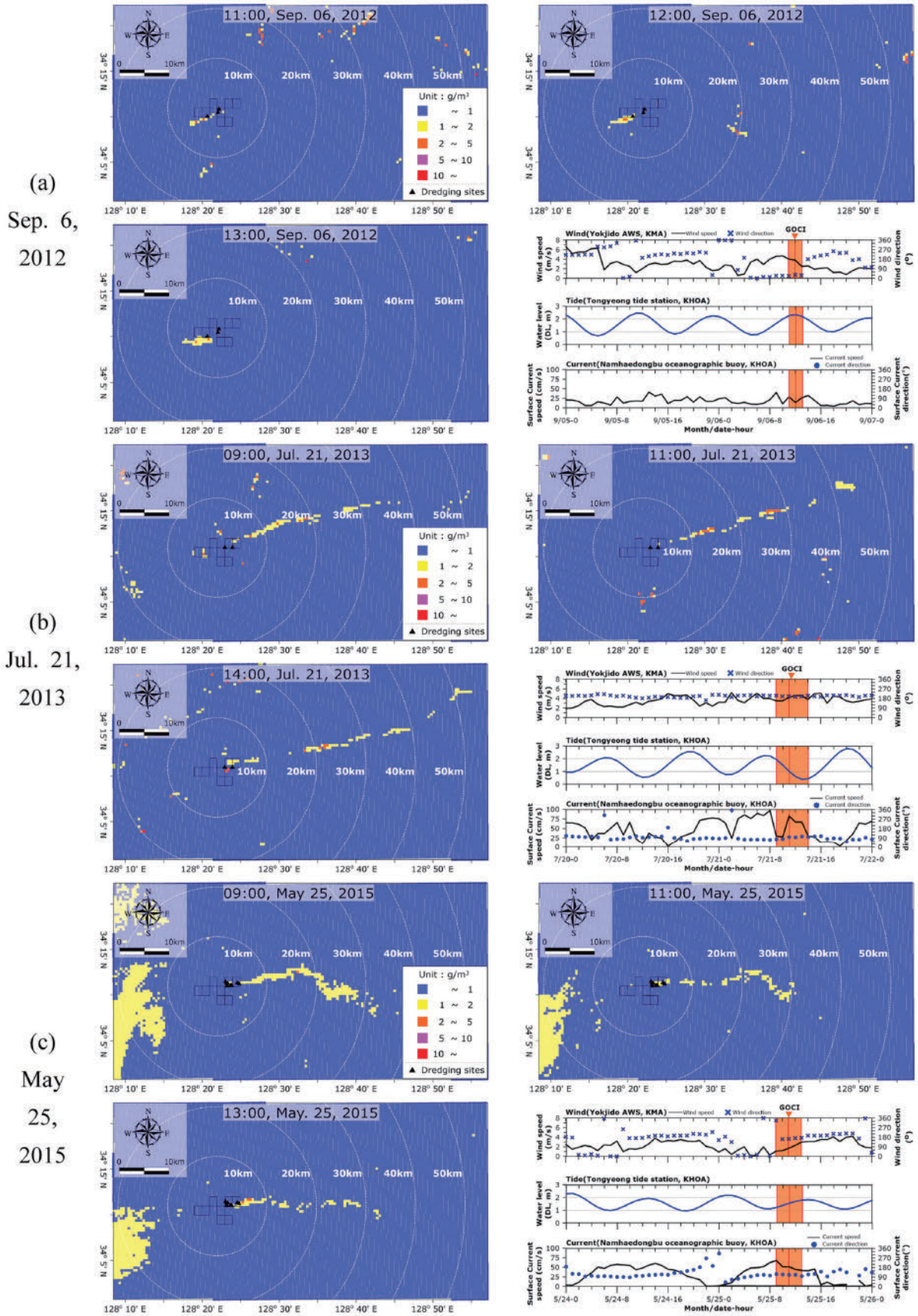


Fig. 8. Dispersion patterns of dredging plumes captured by the GOCI with wind, tide, and current time-series. The location of wind, tide, and current observation points are presented in Figure 1. The current direction of (a) September 6, 2012 was not observed.

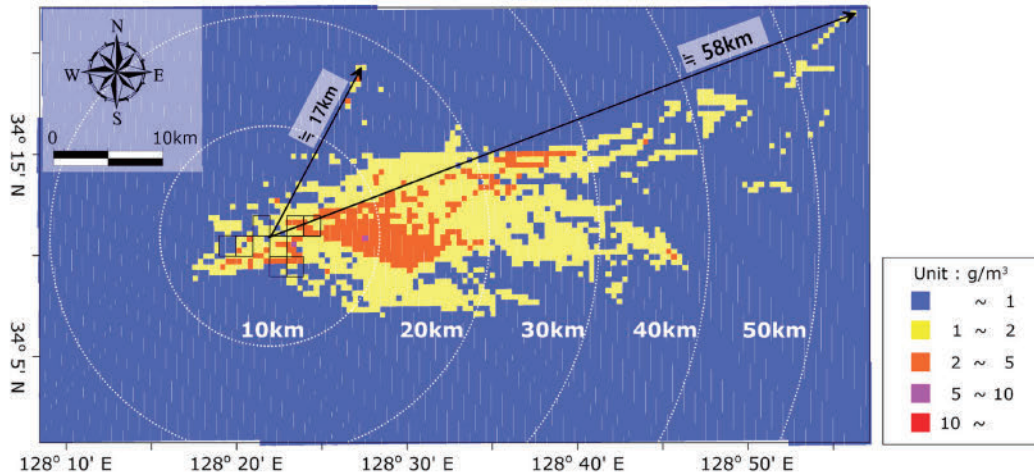


Fig. 9. Cumulative dispersion patterns of dredging plumes captured by the GOCI.

다. 대상해역은 연중 북동향하는 대마난류의 영향으로 동북동-동남동향으로의 부유사 확산양상이 뚜렷하게 나타났으며, 골재채취 위치에서는 표층 월류에 의한 영향으로 표층 부유사 농도가 높고 골재채취 위치로부터 멀어질수록 표층·저층의 부유사 농도가 유사하게 나타났다. 상대적으로 대마난류의 세력이 약해지는 대조기 창조시에 부유사가 서쪽으로 확산되지만, 전체적인 확산범위는 좁게 나타났으며 표층 고농도의 범위가 비교적 넓게 나타났다. 위성영상자료(GOCI)에 의한 최대 부유사영향 범위에 의하면, 동북동향으로 최대 약 58 km, 북북동향으로 최대 약 17 km까지 부유사가 확산되는 양상을 나타냈다.

골재채취 시기의 해조류와 바람 조건에 따라 부유사 확산 양상이 다양해지며, 고농도가 좁은 범위에 집중될 수도 넓은 범위에 대해서 저 농도로 확산될 수 있다. 골재채취 중 발생하는 부유사에 의한 환경영향 최소화 측면에서 골재채취 작업장도의 완화뿐만 아니라 해양 골재채취 시 환경영향 최소화 측면에서 해조류와 바람 조건을 고려한 적절 채취 시기 선정에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

해양환경에서 골재채취에 대한 영향 평가는 통상 수치모델링을 이용한 부유사 확산범위 예측을 통해서 이루어지고 있으나, 부유사 발생량 및 입력 계수의 불확실성, 검정 자료의 부족 등의 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 보다 현실적인 부유사확산 범위 예측을 위해서는 체계적이고 지속적인 관측 기반의 자료 확보와 관련 현상에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서 도출된 결과는 이를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2021년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원(과학기술기반 해역이용영향평가 기술개발, 20210427)의 지원을 받아 수행하였습니다.

References

- [1] 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.
- [2] Cho, D.O., 2006, Challenges to sustainable development of marine sand in Korea. *Ocean Coast. Manag.*, 49, 1-21.
- [3] Cho, Y.G., Lee, C.B. and Choi, M.S., 1999, Geochemistry of surface sediments off the southern and western coasts of Korea. *Mar. Geol.*, 159(1), 111-129.
- [4] Chonnam National University, 2015. Final Report on Fishing Damage Investigation due to Marine Aggregate Extraction in EEZ, South Sea of Korea.
- [5] Chough, S.K., Lee, H.J. and Yoon, S.H., 2000, *Marine Geology of Korean Seas*. Elsevier, Amsterdam.
- [6] Egawa, T., Nagata, Y. and Sato, S., 1993, Seasonal variation of the current in the Tsushima Strait deduced from ADCP data of ship-of-opportunity. *J Oceanogr* 49(1), 39-50
- [7] Fettweis, M., Baeye, M., Francken, F., Lauwaert, B., Van den Eynde, D., Van Lancker, V., Martens, C. and Michiels, T., 2011, Monitoring the effects of disposal of fine sediments from maintenance dredging on suspended particulate matter concentration in the Belgian nearshore area (southern North Sea). *Mar. Pollut. Bull.*, 62(2), 258-269.
- [8] 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
- [9] Jung, H.S., Lim, D., Choi, J.Y., Yoo, H.S., Rho, K.C., Lee, H.B., 2012, Rare earth element compositions of core sediments from the shelf of the South Sea, Korea: their controls and origins. *Cont. Shelf Res.*, 48, 75-86.
- [10] 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. Soc., 26(8), 836-843.
- [11] Kim, C.S. and Lim, H.S., 2009, Sediment dispersal and deposition due to sand mining in the coastal waters of Korea, *Cont. Shelf Res.*, 29, 194-204.
- [12] Kim, G.Y., Kim, D.C., Yoo, D.G. and Shin, B.K., 2011, Physical and geoacoustic properties of surface sediments off eastern Geogje Island, South Sea of Korea. *Quat. Int.*, 230(1), 21-33.
- [13] Kim, H.G., Hwang, H.J., Lee, S.H. and Lee, H.W., 2014, Evaluation of SAR wind retrieval algorithms in offshore areas of the Korean Peninsula. *Renew. Energy*, 65, 161-168.
- [14] 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 Polar Res.*, 32(4), 337-350.
- [15] K-Water (Korea Water Resources Corporation), 2013a, Report on the Marine Environmental Impact Assessment of the Marine Sand Mining Zone in the Exclusive Economic Zone of the Southern Sea of Korea. Daejeon.
- [16] K-water (Korea Water Resources Corporation), 2013b, The Marine Environmental Effect Surveys at the EEZ Sand Mining Zone (Second extended period) in South Sea of Korea (1st year/2013).
- [17] K-Water (Korea Water Resources Corporation), 2014, Study on coastal marine ecosystem structures and suspended sediment in the EEZ sand mining zone in South Sea of Korea (1st phase).
- [18] K-water (Korea Water Resources Corporation), 2015, The Marine Environmental Effect Surveys at the EEZ Sand Mining Zone (Second extended period) in South Sea of Korea (2nd year/2014).
- [19] K-water (Korea Water Resources Corporation), 2016, The Marine Environmental Effect Surveys at the EEZ Sand Mining Zone in South Sea of Korea (2015).
- [20] K-water (Korea Water Resources Corporation), 2017, The Marine Environmental Effect Surveys at the EEZ Sand Mining Zone in South Sea of Korea (3rd year/2017).
- [21] Lee, C.I., Koo, D.H., Yun, J.H. and Kim, D.S., 2007, Stratification variation of summer and winter in the South Sea of Korea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.*, 13(2), 119-125.
- [22] Lee, D.I., Eom, K.H., Jeon, K.A. and Kim, G.H., 2010a, Scoping for Environmental Impact and System Improvement of Marine Sand Mining in J. E. I. A., 19(3), 335-345.
- [23] Lee, D.I., Park, D.S., Eom, K.H. and Kim, G.Y. 2010b, Status of marine sand mining and assessment system in Korea, *J. Environ. Impact. Assess.*, 19(3), 357-365.
- [24] Lee, D.I., Park, D.S., Eom, K.H., Kim, G.Y., Cho, H.S., Kim, J.K., Seo, Y.K. and Baek, G.W., 2009, Improvement of the Marine Environmental Assessment for Dredging and Ocean Disposal of Coastal Sediment in Korea, *J. Environ. Impact. Assess.*, 18(3), 131-141.
- [25] Lee, S.H. and Choi, B.J., 2015, Vertical structure and variation of currents observed in autumn in the Korea Strait. *Ocean Sci. J.*, 50(2), 163-182.
- [26] Lee, Y.G., Choi, J.M., Oertel, G.F., 2008, Postglacial sea-level change of the Korean Southern Sea shelf. *J. Coast. Res.*, 24, 118-132.
- [27] Manap, N. and Voulvoulis, N., 2015, Environmental management for dredging sediments – the requirement of developing nations. *J. Environ. Manag.*, 147, 338-348.
- [28] Min, G.O., 2004, Impacts of sand mining activity on the marine environment and fishery resources in Gyeonggi Bay, Korea, M.S., Dept. Ocean Science, Inha University, Incheon, Korea.
- [29] Miita, T. and Ogawa, Y., 1984, Tsushima currents measured with current meters and drifters. In: Elsevier Oceanography Series, Vol 39. Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Seas, Elsevier, Amsterdam, 67-76.
- [30] Oscar, K., 1982, Satellite observations and the annual cycle of surface circulation in the Yellow Sea, East China Sea and Korea Strait. *La Mer*, 20, 210-222.
- [31] Pennekamp, J.G., Epskamp, R.J.C., Rosenbrand, W.F., Mulie, A., Wessel, G.L., Arts, T. and Deibel, I.K., 1996, Turbidity caused by dredging: viewed in perspective. *Terra et Aqua*, 64, 10-17.
- [32] Seo, J.Y., Ha, H.K., Im, J., Hwang, J.H., Choi, S.M., Won, N.-I. and Kim, Y., 2018, Impact of seasonal vertical stratification on the dispersion patterns of dredging plumes off the south coast of Korea. *Mar. Geol.*, 395, 14-21.
- [33] 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 Polar Res.*, 29(3), 205-216.
- [34] Teeter, A.M., 2000, Under Spreading From an Open-water Pipeline Disposal. Technical Note TN-DOER-N7. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1-9.
- [35] Yoon, S.S., Kim, K.S. and Jang, J.I., 2017, Utilization of Sea Sand and Improvement of Management System, Report of KMI (Korea Maritime Institute)
- [36] You, S.H. and Park, J.S., 2010, Research on wind waves characteristics by comparison of regional wind wave prediction system and ocean buoy data. *J. Ocean Eng. Technol.*, 24(6), 7-15.
- [37] 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 Polar Res.*, 28(2), 129-144.

Received 5 October 2021

Revised 18 November 2021

Accepted 22 November 2021