

바다골재 채취과정에서 발생하는 부유사플룸의 농도 측정법 리뷰

서준영¹ · 최선민¹ · 이성호² · 김수인² · 하호경^{3,†}¹인하대학교 해양과학과 대학원생²인하대학교 해양과학과 학부생³인하대학교 해양과학과 교수

Reviews on Methods for Measuring the Concentration of Plume Generated by Sand Mining

Jun Young Seo¹, Sun Min Choi¹, Seong Ho Lee², Su In Kim², and Ho Kyung Ha^{3,†}¹Graduate Student, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea²Undergraduate Student, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea³Professor, Department of Ocean Sciences, Inha University, Incheon 22212, Korea

요 약

바다골재 채취과정에서 발생하는 고농도 부유사플룸(plume)은 해류를 따라 확산되며 수층의 광투과량을 감소시키고 해양먹이사슬을 파괴하는 등 주변 해역 생태환경에 영향을 미친다. 부유사플룸은 부유퇴적물의 입자크기, 밀도, 침강속도 등에 영향을 받을 뿐만 아니라 준설선의 종류, 대상해역의 수심, 유속 등 물리적 조건에 따라 높은 시·공간적 변동성을 보인다. 부유사플룸의 확산 범위를 규명하거나 환경영향에 대한 객관적인 연관성을 파악하기 위해서 장기적이고 연속적인 현장관측의 필요성이 요구되고 있다. 본 연구에서는 바다골재 채취과정에서 발생하는 부유사플룸의 확산 형태와 농도를 측정하기 위한 4가지 관측방법(직접채수, 광학, 음향, 원격탐사)에 대하여 (1) 채수자료의 필요성, (2) 광학장비의 높은 정확성과 부유입자 특성 변화에 따른 왜곡, (3) 음향장비의 높은 시·공간 해상도와 부유입자가 음향신호에 미치는 영향, (4) 위성관측의 광역성과 표층영역에 대한 장점과 한계점을 리뷰하였다. 각각의 관측방법은 시·공간 변동성이 높은 부유사플룸 감지하는데 분명한 제한점이 있으나, 연구목적에 적합하고 신뢰구간과 포화범위에 관한 약점을 상호 보완할 수 있도록 ‘표층-중층-저층’을 아우르는 다층(multi-layer) 관측연구를 수행한다면 연구결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에 제시된 측정장비 별 관측기준은 바다골재 채취의 저감방안 실효성과 부유사플룸이 해양환경에 미치는 영향을 평가하는 기초자료로 활용될 수 있다.

Abstract – High-concentration plume generated by sand mining spread over several kilometers at water surface by current. The plume can temporarily block the sunlight and destruct the food chain, seriously affecting the ocean ecosystem. This is not only affected by the size, density, and settling velocity of suspended sediments, but also has high spatial-temporal variability depending on the dredger types and physical conditions (e.g., water depth and current velocity). To identify the dispersion patterns of plume and reveal its impact on the water column, long-term field observations is required. In this study, four observation methods (direct sampling, optic, acoustic, and remote sensing) for estimating the dispersion patterns and suspended sediment concentration of the plume generated by sand mining were reviewed: (1) necessity of water sampling, (2) high accuracy of optic instrument and distortion by changes in suspended particles, (3) high spatial and temporal resolution of acoustic instruments and effects of suspended particles on backscatter strength, and (4) large spatial scale of remote sensing and limitation. Each method has limitation in detecting the plume with high spatial and temporal variability. However, the reliability on results can be improved if a multi-layer observation is performed that is suitable for objective of each research and complements the weakness among the methods. It is expected that the observation standards presented in this study will serve as a solid basis to assess the sand mining and its impacts on the marine environments.

Keywords: Sand mining(골재채취), Plume(플룸), Direct sampling(직접채수), Optic backscatter(광학산란), Acoustic backscatter(음향산란), Remote sensing(원격탐사)

[†]Corresponding author: hahk@inha.ac.kr

1. 서 론

골재는 하천, 산림, 공유수면에 부존된 암석 또는 모래로써 시멘트 및 철근과 더불어 필수적인 건설자재 중 하나이며(Hong *et al.*[2015]), 자연상태로부터 이를 캐거나 들어내어 분리하는 행위를 골재채취라고 한다. 이러한 골재채취는 경제성장을 통해 건설 수요가 기하급수적으로 증가함에 따라 함께 증가하고 있는 추세이며, 수요를 충족하기 위해 4대 골재원(하천, 바다, 산림, 육상)에서 지속적인 채취작업이 수행되어 오고 있다. 특히, 바다골재는 수요를 안정적으로 충족할 수 있는 대표적인 골재원으로써(Lee *et al.*[2010]) 전체 골재 공급원 중 약 10~30%(2011~2020년)의 구성비를 차지하고 있으며(Ministry of Land, Infrastructure and Transport[2021]) (Table 1), 배타적경제수역(EEZ)의 지정된 골재채취단지에서 수행되고 있다. 바다골재채취는 그 규모에 따라 [해양환경관리법]의 해역이용협의와 해역이용영향평가제도에서 대상사업으로 규정되어 있으며(Lee *et al.*[2010]), 골재채취 허가권자(골재채취법 제22조)만이 채취를 수행할 수 있다.

바다골재 채취과정에서 발생하는 고농도 부유사플룸(plume)은 인근 해양생태계를 교란시키기 때문에 조업활동을 저해시킬 수 있다. 골재채취에 대한 민원은 수산업계로부터 지속적으로 제기되고 있으며 어업인 간의 갈등 또한 심해지고 있다(Lee *et al.*[2010]). 실제로, 골재채취는 주변 해저지형을 변화시켜 저서해양생물 군집과 서식지를 파괴하고, 어장·인공어초의 훼손, 수산자원의 감소, 해안

침식을 야기하는 문제점이 있다. 또한, 고농도 부유사플룸은 수층 광투과량을 감소시키고, 식물플랑크톤의 이동과 일차생산을 변화시켜 해양먹이사슬을 파괴시키기도 한다. 이러한 해양생태계 교란을 비롯한 환경문제는 국내 뿐만 아니라 전세계 다양한 해역에서 발생되고 있다(Rogers[1990]; Cho[2006]; Erftemeijer and Lewis[2006]; Suedel *et al.*[2008]; Lee *et al.*[2010]; Jeong *et al.*[2017]).

부유사플룸은 퇴적물의 입경, 밀도, 침강속도뿐만 아니라 준설선의 종류, 대상해역의 수심, 수온, 염분, 유속 등의 물리적 조건에 많은 영향을 받으며(Nichols *et al.*[1990]), 시·공간적 변동성이 높은 확산 형태를 나타낸다. 이러한 이유로, 최근 부유사플룸 확산에 대한 연구에는 수치모형을 기반으로 한 예측모델이 주로 활용되고 있으며, 예측 정확도를 향상시키기 위해 음향, 광학, 위성 등을 통한 장기적이고 연속적인 현장관측이 수행되고 있다. 본 논문에서는 바다골재 채취과정에서 발생하는 고농도 부유사플룸의 농도를 관측하는 방법(직접채수, 광학, 음향, 원격탐사)에 대한 장·단점을 비교·평가하였으며, 세부적으로 현장 채수자료의 필요성, 부유물질 특성이 광학 및 음향장비 결과에 미치는 영향, 위성관측의 광역성 및 한계성을 리뷰하였다.

2. 부유사플룸의 확산 형태

바다골재 채취에는 이동식과 고정식 흡입방식의 채취선이 널리 사용되고 있다. 두가지 모두 직경 약 1m의 흡입관(suction pipe)을

Table 1. The percentage of sand mining by source (Ministry of Land, Infrastructure and Transport[2021])

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
River	2.9	2.7	2.0	2.0	1.0	2.0	3.0	2.1	1.6	0.8
Ocean	29.3	30.2	29.9	38.0	26.0	33.0	25.0	12.5	1.7	12.6
Forest	62.5	62.1	63.2	55.0	70.0	60.0	68.0	80.3	89.7	80.0
Land	5.3	5.0	4.9	5.0	3.0	5.0	4.0	5.1	7.0	6.6
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

unit: %

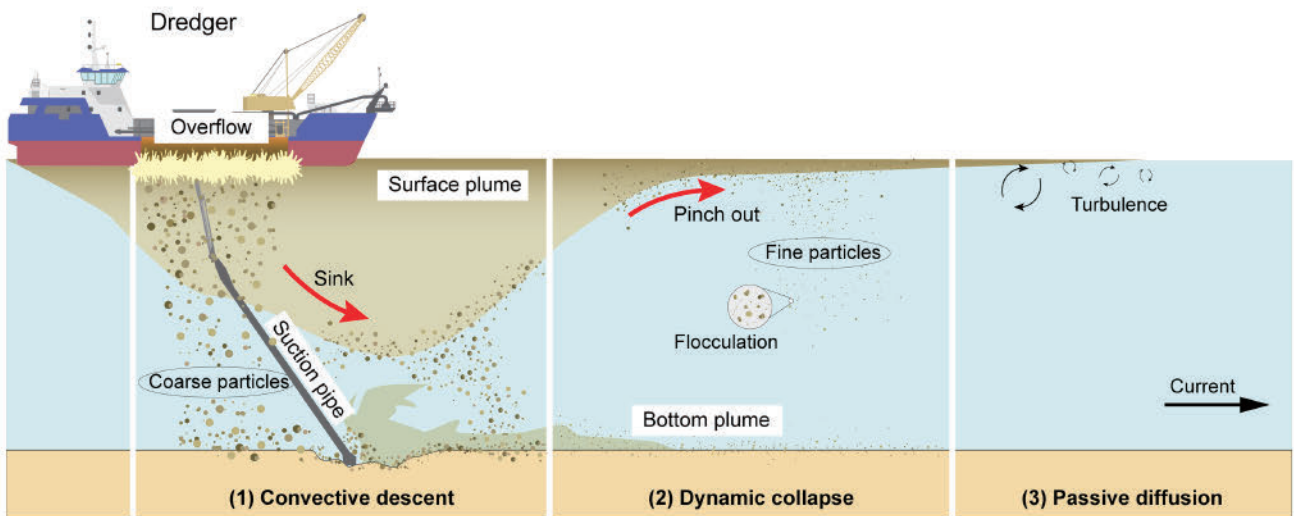


Fig. 1. Diagram of plume dispersion generated by sand mining (modified after Nichols *et al.*[1990]).

해저면까지 내려 모래 또는 자갈을 해수와 함께 선상으로 끌어올리는 방식이다(Manap and Voulvoulis[2015]; Garel *et al.*[2018]) (Fig. 1). 흡입관 내부는 주변보다 압력이 낮기 때문에 해저면에 느슨하게 퇴적되어 있는 골재는 관 안쪽으로 쉽게 이동되게 된다. 흡입된 골재 중 큰 입자(> 0.1 mm)는 침전과정을 통해 바지(barge)에 적재되고, 약 10%(부피기준)의 부유퇴적물은 흡입과정에서 발생하는 난류에 의해 월류수(overflow)의 형태로 해수와 함께 주변 해역으로 배출된다(Kim and Lim[2009]). 월류수는 주로 입자 크기가 작은 실트와 점토 퇴적물(< 0.063 mm)로 구성되어 있으며, 바다로 배출되는 과정에서 고농도 부유사플룸을 형성한다. 부유사플룸은 지역적 조건(예, 퇴적물 조성, 유속, 난류강도)과 준설방법에 따라 확산 범위와 규모가 결정된다(Table 2). 일반적으로 3단계의 발달과정을 통해 광범위하게 확산된다(Nichols *et al.*[1990]) (Fig. 1). (1) 대류성 하강단계(convective descent): 월류수는 고염분의 저층수와 고농도 부유퇴적물로 구성되어 있기 때문에, 표층수에 비해 상대적으로 밀도가 높다. 월류수 배출은 채취선 주변해역(100~200 m 이내)에 두꺼운 플룸층(수 십 m 이상)을 형성시킨다(Seo *et al.*[2018]). 바다골재 채취가 진행되는 동안 채취선 주변 농도는 일시적으로 수 백에서 수 천 mg l⁻¹까지 증가하기도 한다. (2) 동력상실단계(dynamic collapse): 월류수 배출과 함께 밀도가 큰 입자들은 채취지점 인근에서 대부분 침전되고, 채취지점으로부터 멀어질수록 배경수층과 동일한 밀도의 작은 입자들만 부유상태를 유지한다. 부유사플룸의 두께는 약 5 m 미만으로 크게 감소한다. (3) 수동확산단계(passive diffusion): 부유사플룸이 자체 동력을 상실하면, 수층안정도와 외부강제력(예, 조석, 바람)의 영향을 받아 확산 또는 침강된다(Kim *et al.*[2018]). 성층이 잘 발달된 경우, 표층을 따라 수 백 m에서 수 십 km까지 확산되기도 한다. 실제로, 남해 EEZ 골재채취단지에서 발생한 부유사플룸의 경우, 성층이 발달된 봄철에 쓰시마 해류를 따라 표층에서 약 40 km까지 확산되었으나, 혼합층이 발달된 가을철에는 표층 아래로 침강되어 확산범위가 10 km 미만으로 대폭 축소되었다(Seo *et al.*[2018]). 부유사플룸이 확산 또는 침강됨에 따라 농도는 1시간 내 약 1/20수준까지 빠르게 감소하며 배경농도와 비슷해진다(Nichols *et al.*[1990]).

3. 부유사플룸의 관측방법의 분류와 장·단점

부유사플룸을 정의할 때, 부유입자물질(suspended particulate matter, SPM) 농도를 사용하여 배경농도(background concentration)와 구분한다. 부유입자물질 농도는 단위 체적 내 포함되어 있는 부유물질의 무게 합을 의미하며, 퇴적물, 유기물, 플랑크톤 등 모든 부유물질을 포함한다. 골재채취단지에서 발생하는 부유사플룸과 같이 부유퇴적물 입자의 비율이 절대적으로 우세한 경우, 부유입자물질 농도는 부유퇴적물에 대한 질량농도를 일컫는 부유사농도와 혼용하여 사용하기도 한다. 부유사농도는 질량을 기준으로 하는 절대값으로써 부유입자의 물리적 특성(예, 크기와 모양)에 영향을 받지 않기 때문에, 지역적 특성(예, 퇴적물 조성, 유속)이 다른 환경에서 발생하는 부유사플룸과 농도 비교가 가능하다. 많은 연구자들이 다양한 환경에서 발생하는 부유사플룸의 특성을 비교하기 위해 직·간접적으로 이들의 농도를 산출하고 있으며, 이것의 농도를 측정하는 방법은 관측원리를 기준으로 다음과 같이 크게 4가지(직접채수, 광학, 음향, 원격탐사)로 분류된다(Fig. 2) (Table 3).

3.1 직접채수

해양에서 널리 활용되는 직접채수 방식에는 니스킨 채수기(Niskin water sampler)와 펌프호스(pump hose)가 있다. PVC 재질의 니스킨 채수기(체적: 1.2~30 l)는 상·하단부에 라텍스 고무가 연결된 스프링 닫힘 장치가 설치되어 있다(Fig. 2a). 채수기의 닫힘 장치가 개봉된 상태에서 목표수심으로 투하된 뒤, 로프를 따라 수직낙하하는 메신저(무게추)에 의해 닫힘 장치가 작동되는 원리이다. 정확한 수심을 파악하기 위해 니스킨 채수기 본체에 압력센서를 부착하기도 하며, 대형조사선의 경우 다수의 니스킨 채수기로 구성된 로제트 샘플러(Rosette water sampling system)를 통해 여러 수심에서 샘플을 채취하기도 한다(Fig. 2a). 니스킨 채수기는 해수면에서부터 심해까지 사용가능하며, 목표수심에서 정확하게 채수할 수 있다는 장점이 있다(Table 3). 한편, 펌프호스는 선상에서 목표수심까지 호스를 내려 진공압력으로 샘플을 채취하는 방식으로써, 니스킨 채수기와 비교했을 때, 다량의 샘플을 신속하게 채취할 수 있다는 장점

Table 2. Characteristics of plume generated by dredging

References	Dredger	Study area	Bed sediment diameter [μm]	Water depth [m]	Characteristics of dredging plume		
					Length [km]	Thickness [m]	SPM [mg l ⁻¹]
Mikkelsen and Pejrup [2000]	-	Øresund area between Denmark and Sweden	-	9	2	-	7-24
Clarke <i>et al.</i> [2007]	Static dredger (Cable arm)	Newark Bay	-	1-14	0.35-0.62	-	20-300
Islam <i>et al.</i> [2007]	-	Port of Hay Point	-	< 5	3.75-4.9	-	5-80
Martinelli <i>et al.</i> [2007]	Trailing suction hopper dredger	Adriatic Sea	-	-	0.6-0.7	-	2.5-100
Smith and Friedrichs [2011]	Trailing suction hopper dredger	West coast of U.S.	40-250	15	-	-	5-250
Roman-Sierra <i>et al.</i> [2011]	Trailing suction hopper dredger	Meca Sandbank	-	15-20	< 400	-	< 2
Duclos <i>et al.</i> [2013]	Trailing suction hopper dredger	Bay of Seine	63-330	20-23	0.8-6.5	12.5	10-100
Spearman [2015]	Trailing suction hopper dredger	East coast of U.K.	-	14-46	1.2-2.5	2-18	411-5518
Kim <i>et al.</i> [2018]	Static suction hopper dredger	South coast of Korea	> 2000	> 80	1.9-8.1	20-60	0-30
Seo <i>et al.</i> [2018]	Static suction hopper dredger	South coast of Korea	> 2000	> 72-95	0-39.5	5-33	> 8

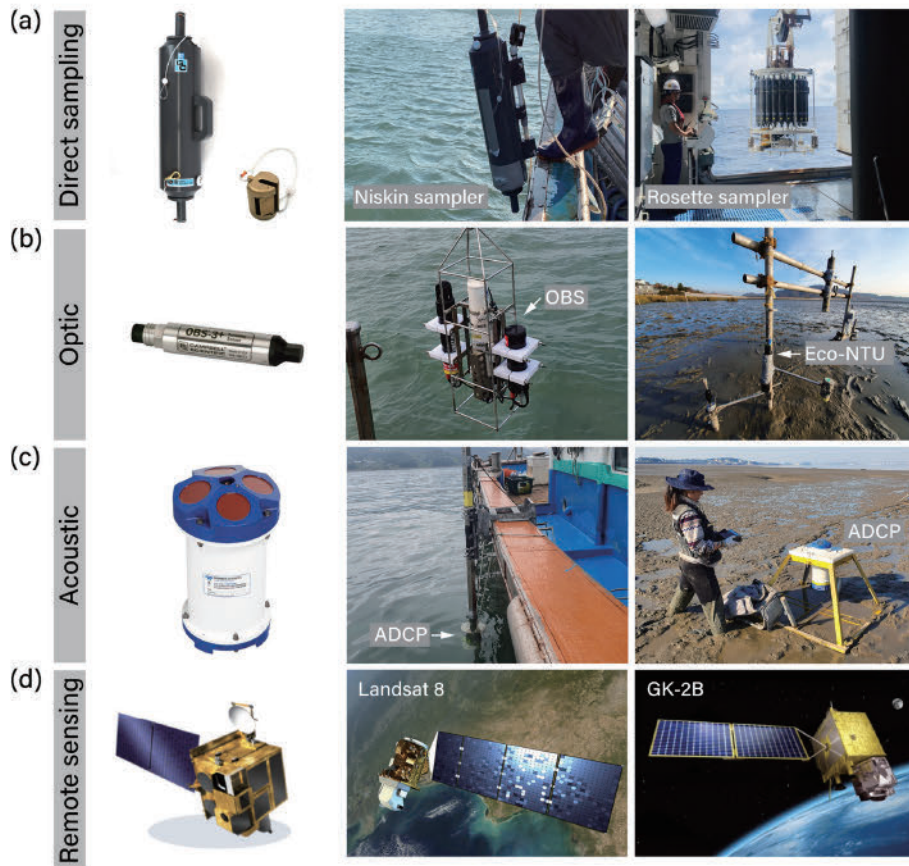


Fig. 2. Image of instruments used for measuring the suspended sediment concentration of plume. Images were downloaded from the official websites of manufacturers and operators: Satellites (NASA and Korea Meteorological Administration).

Table 3. Measurement techniques of suspended sediment concentration of plume

Technology	Operation principle	Strength	Weakness	Examples
Direct sampling	Sediment-laden overflow is sampled by bottle or pumping hose, and then filtered to measure mass concentration ($mg\ l^{-1}$).	Reliable No calibration required Provide ground truth	Intrusive Poor spatial and temporal resolution Labor intensive	Niskin bottle (General Oceanics) Rosette sampler Pumping hose
Optic	Backscatter or transmission of light within sampling volume by suspended particles is measured (in Volt, NTU, or FTU).	Intrusive High accuracy Good temporal resolution	Necessary for conversion to SPM Sensitive to particle size Limited measurement range	OBS 3+ (Campbell Sci.) ASM (Argus) ECO-NTU (WET Lab)
Acoustic	The strength of acoustic backscatter by suspended particles is measured (in dB or count).	Non-intrusive Good spatial and temporal resolution	Necessary for conversion to SPM Sensitive to particle size Limited measurement range	ADCP (RD Instruments) Aquadopp profiler (Nortek) ADV (Sontek)
Remote sensing	Characteristics of reflected lights from the multi-sensor and satellite images are measured through the different frequencies and resolutions.	Good spatial and temporal resolution Easy to access data	Flow intrusive (cloud) Limited measurement range (surface) Necessary for conversion to TSS and SPM	COMS GK-2B Landsat 8 Aqua

이 있다. 하지만, 채취가능수심이 펌프용량에 의해 제한되고, 샘플의 호스 통과시간을 고려하여야 정확한 채수를 할 수 있는 단점이 있다.

직접채수 방식으로 채취된 샘플은 해양환경공정시험기준(해양수산부고시 제2013-230호)을 따라 단위부피별 부유사 무게농도가 산정된다. 시험기준은 식 (1)과 같이 미리 무게를 측정된 유리섬유여과지(GF/F)를 여과장치에 부착하여 일정량의 샘플시료를 여과시킨

후, 건조된 여과지와의 전·후 무게차를 통해 부유사농도를 산정하는 방법이다.

$$SPM(mg\ l^{-1}) = (b - a) \times \frac{1}{V} \quad (1)$$

여기서, a 는 여과 전 유리섬유여과지 무게(mg), b 는 여과 후 유리섬유여과지 무게(mg), V 는 시료 부피(l)이다.

직접채수는 1990년대 초반까지 농도 분석을 통해 부유사플룸을 파악하는 용도로 많이 활용되어 왔다(McLellan *et al.*[1989]). 그러나, 직접채수 과정에 소요되는 시간이 부유사플룸의 시·공간적 변동성보다 상대적으로 크기 때문에, 정확한 부유사플룸의 확산 패턴을 파악하는 것은 매우 어렵다(Smith and Friedrichs[2011]). 최근 연구에서는 농도보정을 효과적으로 수행하기 위해 광학 또는 음향 관측장비를 함께 사용하고 있다(Tubman *et al.*[1994]; Land and Bray[1998]; Mikkelsen and Pejrup[2000]; Shafer *et al.*[2016]). 예를 들면, 음향도플러유속계(acoustic Doppler current profiler, ADCP)로 후방산란강도(echo intensity or backscatter strength, in count)를 실시간으로 모니터링하여 부유사플룸의 위치를 감지하고, 니스킨 채수기 또는 펌프호스로 부유사플룸의 다양한 농도영역을 동시 관측한다(Martinelli *et al.*[2007]; Wood and Boye[2007]). 현장에서 채취된 샘플은 광학 또는 음향장비에서 관측된 신호를 정밀하게 보정하는 데 사용된다(Mikkelsen and Pejrup[2000]).

3.2 광학장비

해양에서 탁도는 물의 흐림 정도를 나타내며, 수층 내 빛의 통과를 억제하여 가시성을 낮추는 부유입자의 양을 의미한다. 탁도 측정을 위해 활용되는 광학장비에는 입자에 의한 산란강도를 측정하는 후방산란광도계(optic backscatter system, OBS)와 투과도를 측정하는 투과율계(transmissometer)가 있으며, 이들을 탁도계(turbidimeter)라고 통칭한다. 탁도계는 1980년대 초부터 개발되었으며, ECO-NTU(WetLabs), OBS(Campbell Scientific), Hyperion Turbidity (Valeport), Argus Suspension Meter(Argus) 등 많은 장비가 현재 상용시장에 출시되어 있다(Fig. 2b). 이들은 센서표면 0.5~30 cm 앞 방향으로 적외선(442~671 nm)을 주사하여 부유입자에 의한 산란강도 또는 굴절각을 측정하고(Downing *et al.*[1981]; Hatcher *et al.*[2000]; Ruhl *et al.*[2001]), 노이즈를 최소화하기 위해 샘플링 체적(sampling volume)에서 공간평균된 값을 사용한다(Downing[2006]; Ha *et al.*[2009]). 제조사와 모델별로 각기 다른 관측항목(예, 산란강도, 굴절각, 흡수도)과 단위(예, Volt, NTU, FTU)를 제공하기 때문에, 측정된 탁도는 상대적인 값이다. 따라서, 농도 비교를 위해서는 직접채수를 통해 획득된 현장시료를 이용하여 보정해야한다(Maa *et al.*[1992]; Clarke *et al.*[2007]; Fearn *et al.*[2017]; Campbell Scientific[2018]).

탁도관측(정점 또는 계류)과 직접채수를 함께 병행할 경우, 부유사농도의 시·공간 해상도를 획기적으로 향상시킬 수 있다(Downing[2006]) (Table 3). 적정 농도범위에서의 탁도는 부유사농도와 선형 관계(산란율은 비례, 투과율은 반비례)를 가지기 때문에, 탁도를 높은 시·공간 해상도의 부유사농도로 변환할 수 있다. 탁도계의 후방산란강도는 햇빛이나 기타 입자들의 영향에 미미하므로, 수 천 mg l⁻¹ 까지 정확한 부유사농도를 산출할 수 있다(Downing[2006]). 이러한 광학장비의 활용은 부유사플룸 확산에 대한 상세한 해석을 가능하게 만들었다. Fettweis *et al.*[2011]은 준설지점 인근해역에 탁도계를 계류함으로써 조류에 의한 부유사플룸의 확산과 농도 변동성 간의

상관성을 확인하였고, Capello *et al.*[2014]는 탁도계의 정점관측으로 수층 부유사농도의 수직 변동성을 산정함으로써, 모델로 구현된 부유사플룸 내 입자의 퇴적률을 비교·검증하였다. 또한, Seo *et al.*[2018]은 탁도계를 활용한 추적조사를 통해 수층안정도 차이에 따른 부유사플룸의 침강 현상을 규명하였다. 탁도계는 관측방법에 따라 부유사플룸의 확산 양상을 다양한 관점에서 해석할 수 있다. 그러나, 광학장비가 부유사농도 측정에 높은 정확성을 지니고 있는 만큼 부유입자의 특성(농도, 크기, 형태, 흡수도)에 민감도가 높다(Battisto *et al.*[1999]). 따라서, 부유사플룸의 농도를 보정하는 과정에서 다음 두 가지 요인을 고려해야 한다.

첫째, 탁도는 부유사농도 범위에 따라 다른 변동성을 보인다(Baker and Lavell[1984]; Gibbs and Wolanski[1992]; Fugate and Friedrichs[2002]). 적외선이 부유입자에 주사된 후 다시 탁도계의 검출기(detector)로 돌아올 때, 부유입자들 사이에서 흡수와 산란 과정이 발생한다. 흡수는 주로 적외선을 열로 변환하는 반면 산란은 파장을 변화시키지 않고 전달방향(굴절각)을 변경한다(Downing[2006]). 흡수도는 주로 저농도 환경에서 탁도에 영향을 미치며, 수층 내 용해되어 있는 물질의 종류(예, 광산 폐수, 농업용수)에 따라 그 영향범위가 달라지게 된다. 수층의 농도가 증가하게 되면, 탁도는 흡수도보다 산란강도에 많은 영향을 받게 된다(Buiteveld *et al.*[1994]; Downing[2006]; Shao and Maa[2017]). 이 때, 수층의 부유사농도 증가에 따른 탁도계의 반응은 크게 3 단계 “(1) 탁도와 부유사농도 간의 선형관계, (2) 탁도계의 포화상태 도달, (3) 부유사농도 증가로 인한 탁도 유지 또는 감소”로 구분되며, 장비 제조사와 모델에 따라 포화도의 범위가 결정된다(Downing[2006]; Ha *et al.*[2009]; Vousdoukas *et al.*[2011]; Lin *et al.*[2020]) (Fig. 3a). 예를 들면, Bunt *et al.*[1999]의 연구에서는 OBS가 약 10~30 g l⁻¹ 범위에서 포화된 뒤, 산란강도 감쇄에 의해 부유사농도의 증가에도 불구하고 탁도가 감소되는 경향을 보였다. 반면, Lin *et al.*[2020] 연구에서 ASM은 포화상태에 도달하게 되면 뚜렷한 감소없이 일정한 탁도를 유지함을 보였다(Fig. 3a). 그 결과, 농도보정 과정에서 ASM은 측정 가능한 농도의 범위를 특정 지을 수 있으나, OBS는 실제 농도와 포화농도 간 차이를 판별하는데 어려움이 있다. 계류과정에서 이러한 탁도계의 포화는 고농도의 부유사플룸에 의해 빈번하게 발생되며, 과학적 해석의 오류를 야기한다. 실제로, Fettweis *et al.*[2011; 2016]는 준설과정에서 발생한 부유사플룸에 의해 포화된 OBS의 탁도를 그대로 활용할 경우, 평균농도의 과소평가(underestimation)가 발생할 수 있음을 강조하였고, Lin *et al.*[2020]은 광학장비별 포화범위의 차이가 실제 부유사농도 변동성 파악에 혼란을 야기할 수 있음을 보였다.

둘째, 부유입자의 크기 감소와 형태의 불규칙성은 산란강도를 증가시킨다(Gibbs[1978]; Black and Rosenberg[1994]; Sutherland *et al.*[2000]; Downing[2006]). Section 2에서 언급한 바와 같이, 월류수가 해상으로 배출되면 채취선 인근해역의 모래입자는 바로 침강되거나 세립입자는 수 시간을 부유되어 확산된다(Riemann and Hoffmann[1991]). 이는 부유사플룸 내 입자의 크기가 공간적으로

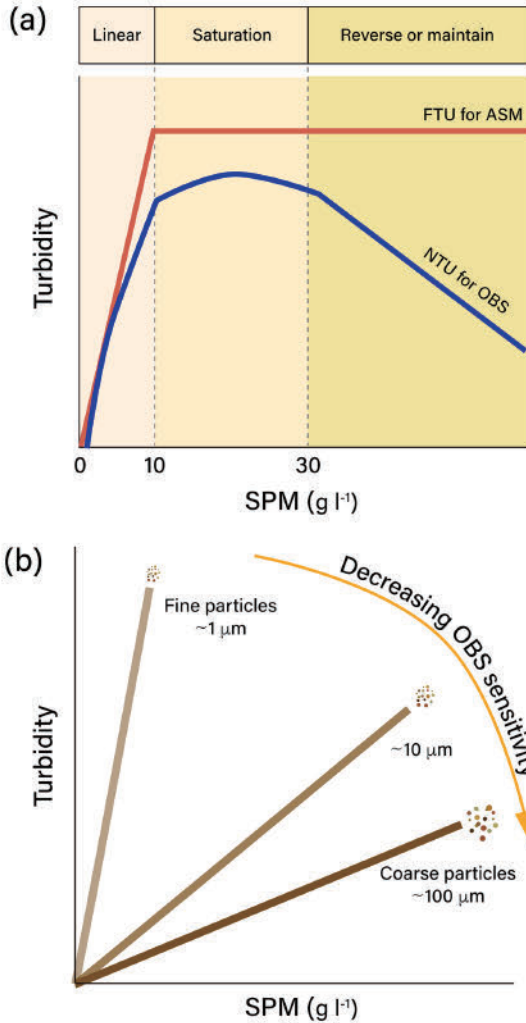


Fig. 3. (a) Turbidity vs. SPM over the useful concentration ranges of instrument (modified after Bunt *et al.*[1999]; Lin *et al.*[2020]). (b) Turbidity vs. SPM for suspended particle with different particle size (modified after Bunt *et al.*[1999]). Note that negative relationship between turbidity and particle size for a given SPM.

다르다는 것을 의미한다. 일반적으로 임의의 입자크기에서 부유사 농도와 탁도는 대체로 높은 상관성으로 양의 비례관계를 갖는다. 그러나, 입자크기가 증가할수록 탁도는 오히려 감소하는 현상이 나타난다(Fig. 3b). 동일한 농도 조건일 때, OBS는 100 μm의 모래 성분에서 약 2 μm의 점토 성분에서 보다 약 50배 낮은 민감도를 보인다(Battisto *et al.*[1999]). 이는 부유사 입자의 크기가 탁도계로부터 주사된 적외선의 파장보다 약 1~1000배 크기 때문에 파장의 감쇄율에 비례하여 산란도가 증가하는 것이다(Downing[2006]). 여기서, 입자의 크기 증가는 조립질 성분으로의 변화만을 의미하지 않으며, 세립한 입자(점토, 실트)간의 응집으로 형성된 플록(floc)의 발달 또한 포함한다. 점토질 입자는 대체로 판상(plate) 형태로서 구형에 비해 약 8배 높은 산란강도를 유발한다. 그러나, 이들이 구형 플록으로 응집되어 크기가 증가함에 따라 산란강도는 감소하게 된다. 더불어 세립퇴적물의 응집과정은 난류강도, 부유사농도, 유

기물 함량 등에 영향을 받기 때문에 외부조건에 의해 산란강도의 변동성이 발생할 수 있다.

3.3. 음향장비

지난 수십 년 동안 음향관측분야에서 다양한 기술과 장비(예, ADCP(RDI), Aquadopp(Nortek), HydroSurveyor(Sontek))들이 개발되어 왔다(Wren *et al.*[2000]; Thorne and Hanes[2002]). 특히, 해양관측분야에서 대중적으로 사용되는 ‘ADCP’는 퇴적역학분야 발전에 많은 기여를 하였다. ADCP는 계류(mooring) 또는 측선관측으로 3차원 유속성분의 시·공간 변동성을 측정하는 장비이다(Fugate and Friedrichs[2002]) (Fig. 2c). 주파수에 따라서 관측범위가 수 백 m에 달하며 유체의 흐름을 방해하지 않는 특징으로 자료의 신뢰성이 높다(Lin *et al.*[2020]) (Table 3). 유속은 수중에 송출된 고유한 주파수의 음파가 부유입자에 의해 후방산란될 때 발생하는 파장변화를 통해 측정된다. 따라서, 유속과 더불어 산란강도의 상대적 비율인 후방산란강도가 함께 측정되어 부유사농도를 간접적으로 추정할 수 있다(Lin *et al.*[2020]; Son *et al.*[2021]).

수중에 송출된 음파는 물(α_w) 또는 부유입자(α_s)에 의한 감쇄효과 때문에, 그 에너지가 거리에 비례하여 감소한다(Deines[1999]; Kim *et al.*[2004]; Ha *et al.*[2011]; Guerrero *et al.*[2012]; Son *et al.*[2021]). 감쇄효과를 적절하게 보정하지 않을 경우, ADCP에서 관측된 부유사농도는 실제 농도보다 과소 혹은 과대평가될 수 있다. 따라서 식(2) 소나방정식을 이용하여 후방산란강도를 보정해 주어야 한다(Deines[1999]).

$$S_v = C + 10 \cdot \log_{10}((T_x + 273.16)R^2) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha_w R + K_C(E - E_r) \quad (2)$$

여기서, S_v 는 평균체적 후방산란강도(mean volume backscattering strength, MVBS)(dB), C 와 K_C 는 트랜스듀스의 고유보정상수, T_x 는 온도(°C), R 은 음파송출거리(m), L_{DBM} 과 P_{DBW} 는 송출펄스길이(transmit pulse length)와 송출전력(transmit power), α_w 는 물에 의한 감쇄계수, E 와 E_r 은 후방산란강도와 배경후방산란강도를 의미한다. 소나방정식을 통해 산출되는 평균체적 후방산란강도는 송출 거리에 따른 음파의 왜곡을 최소화함으로써 부유사플룸의 분포를 명확하게 나타낸다. 그러나, 평균체적 후방산란강도는 특정 주파수를 기반으로 하는 산란강도이기 때문에, 주파수가 다른 ADCP로부터 산출된 평균체적 후방산란강도와와의 비교가 제한된다. 예를 들면, 600 kHz와 1200 kHz ADCP로 동시에 부유사플룸 관측을 수행하였을 때, 평균체적 후방산란강도의 변동성은 유사하지만 절대값은 고주파 ADCP에서 더 높게 나타난다(Deines[1999]). 부유사농도를 비교하기 위해서는 식 (3~5)와 같이 직접채수와 광학장비를 활용한 추가 보정이 필요하다(Deines[1999]; Kim *et al.*[2004]).

$$S_v = 10 \cdot \log_{10}(SPM_{OBS}) - 10 \cdot \log_{10}R^2 - 2 \cdot (\alpha_w + \alpha_s) \cdot R + L_{DBM} + P_{DBW} \quad (3)$$

$$S_v = K_C \cdot (E - E_r) + C \tag{4}$$

$$SPM_{ADCP} = 10 \cdot \exp\left(\frac{C + 20 \cdot \log_{10} R + 2 \cdot \alpha \cdot R - L_{DBM} - P_{DBW} + K_C \cdot (E - E_r)}{10}\right) \tag{5}$$

여기서, SPM_{OBS} 는 직접채수와 광학장비로 획득된 SPM , α_s 는 부유 입자에 의한 감쇄계수, K_C 와 C 는 S_v 와 후방산란강도(E)의 관계에서 계산되는 보정 상수, SPM_{ADCP} 는 ADCP 후방산란강도에서 변환된 부유사농도를 의미한다. 일반적으로, SPM_{ADCP} 는 표층과 저층의 약 10% 영역을 제외하고 SPM_{OBS} 와 유사하게 산출되며 부유 퇴적물의 분포를 잘 반영한다(Kim *et al.*[2004]). 특히, SPM_{ADCP} 는 유속과 동시에 측정되기 때문에, 부유사플룸의 형태와 확산속도, 침강속도, 수송량 등을 계산함으로써 이들의 영향범위를 평가하는데 활용될 수 있다(Clarke *et al.*[2005]; Wood and Boye[2007]). 예를 들면, de Wit *et al.*[2014]는 ADCP 측선관측을 통해서 준설선으로부터 배출된 율류수의 확산 및 침전 패턴과 수송량의 변동성을 측정하였고, Haimann *et al.*[2018]은 ADCP로부터 산출된 농도의 공간분포를 비교·평가함으로써 인위적 또는 자연적으로 발생한 부유사플룸의 영향범위를 구분하였다. ADCP를 활용하여 부유사플룸에 대한 정확한 정보를 획득하기 위해서는 아래 두가지 사항을 고려해야 한다.

첫째, ADCP는 장비의 특성상 “측정불가구간”이 있다. 트랜스듀스에 인접한 공백거리(blanking distance)와 매질이 다른 경계면(표층 또는 저층경계면) 주변에 신호오염구간이 존재한다(RD Instrument[2011]; Shin *et al.*[2014]; Mueller[2015]) (Fig. 4). 공백거리는 설치 깊이, 음파속도, ADCP 관측모드, 셀 크기(cell size), 주파수, 빔 각도에 의해 결정되고, 트랜스듀스로부터 수 cm에서 수십 cm 범위이다(Kim *et al.*[2015]; Chen *et al.*[2016]). 신호오염구간은 사이드로브(side lobe)에 의한 간섭현상에서 기인하며, 경계면으로부터 1~2 m 구간은 심한 노이즈를 포함한다(Park *et al.*[2001]; Shin *et al.*[2014]). 트랜스듀스는 20~30° 경사각(slant angle)을 이루며 음파를 송출하기 때문에, 매질이 다른 경계면에 메인로브(main lobe)보다 사이드로브가 먼저 도달하게 된다(Fig. 4). 이 경계면은 전달된 음파를 강하게 반향시켜 메인로브의 약 6~15% 구간 신호를 오염시키기 때문에, 유속과 후방산란강도의 정확도를 저감시킨다. 이러한 공백거리와 신호오염구간의 존재는 표층 또는 저층경계면에서 발생하는 고농도 부유사플룸을 관측하는데 있어 방해요소로 작용된다(de Wit *et al.*[2014]). 따라서, 음향관측장비의 종류와 설정값 조정을 통해 측정불가구간을 최소화해야 한다.

둘째, 입자의 특성 변화에 의해 부유사플룸의 농도가 왜곡될 수 있다. 식 (2~5)과 같이 평균체적 후방산란강도 또는 SPM_{ADCP} 를 계산할 때, 물과 부유입자에 의한 점성흡수(viscous absorption) 또는

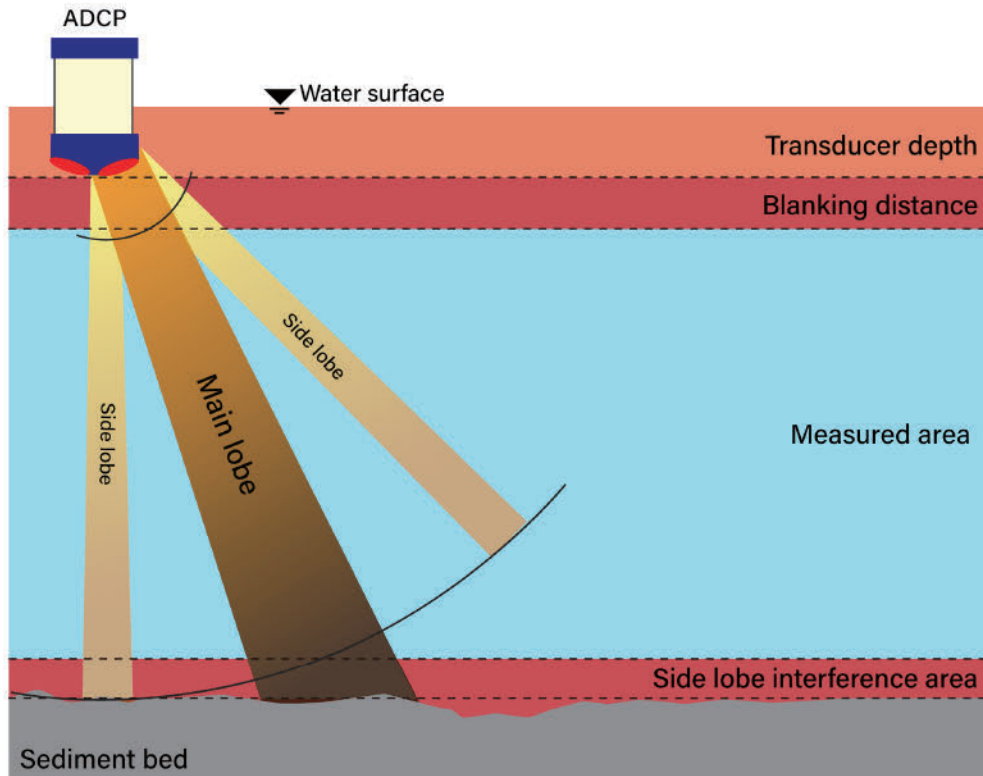


Fig. 4. Conceptual diagram for describing the beam pattern (brown) of down-looking acoustic Doppler current profiler (ADCP). The transducer depth (light red) is from the water surface to ADCP transducer. The blanking distance is unmeasured area that corresponds to electronics and transducer recovery time. The interference area indicates the contaminated area caused by the reflection of a vertical side lobe from the sediment bed.

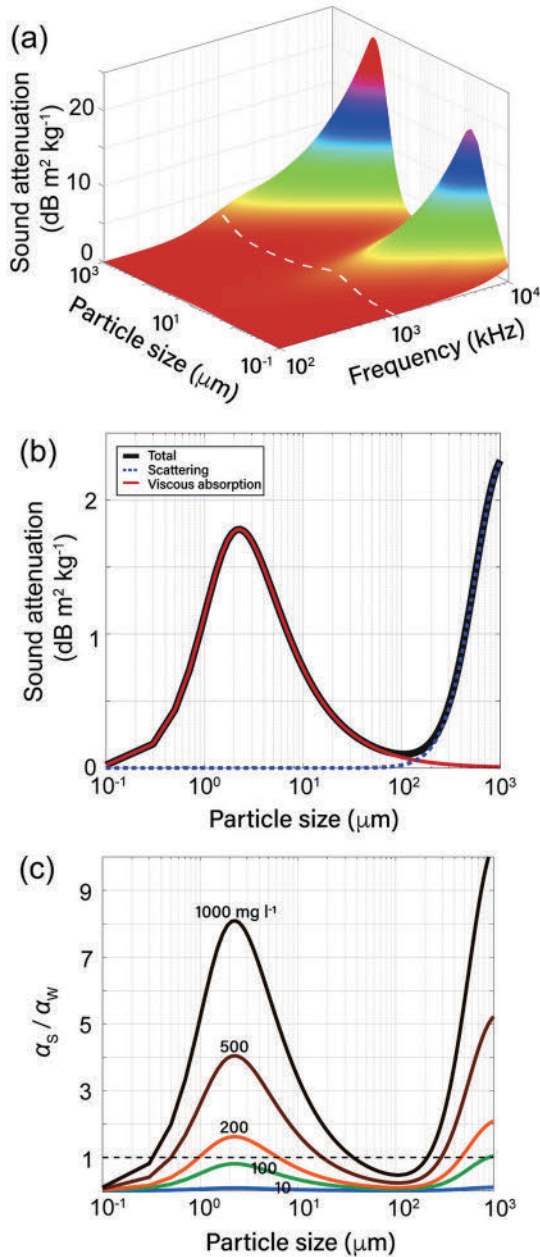


Fig. 5. (a) Sound attenuation by frequency and particle size. (b) Attenuation caused by viscous absorption for fine particles and by scattering for coarse particles at 1000 kHz. (c) The ratio of α_s to α_w with different particle size and sediment concentration at 1000 kHz.

산란효과를 고려해야한다(Fisher and Simmons[1977]; Richards *et al.*[1996]; Thorne *et al.*[1991]; Thorne and Hanes[2002]). 이 때, α_w 와 α_s 의 상대적 비는 부유입자의 농도와 크기에 따라 결정된다(Ha *et al.*[2011]) (Fig. 5). 수층의 농도가 약 100 mg l⁻¹ 미만의 맑은 환경(1000 kHz 기준)에서는 부유입자가 거의 없기 때문에, α_s 는 무시 가능 할 만큼 작고 α_w 의 영향이 지배적이다(Kim *et al.*[2004]). α_w 는 주파수가 증가함에 따라 증가하며, 염분, 온도, 압력의 조건에 따라 상대적 크기 차이가 발생한다(Francois and Garrison[1982a,

1982b]; Park and Lee[2016]). 예를 들면, 1000 kHz 보다 큰 주파수에서는 담수와 해수 사이에 α_w 는 거의 유사하지만, 1000 kHz 보다 낮은 주파수에서는 황산마그네슘(MgSO₄) 이온의 이완으로 인해 해수에서 α_w 가 더 크게 작용한다(Urick[1983]). 한편, 채취선에 인접한 고농도 영역(약 200 mg l⁻¹ 이상)에서는 $\alpha_s/\alpha_w > 1$ (1000 kHz 기준)으로 α_s 에 의한 감쇄효과가 우세해진다. α_s 는 입자크기에 따라 점성흡수와 산란효과로 구분된다. 미세점착성입자(평균입자크기 ≈ 2 μm)일 경우, 입자와 주변 유체 사이에 밀도 차이가 존재하게 된다. 이 때, 점성흡수에 의해 관성력이 발생되고, 이는 차례로 입자와 유체 사이에 속도구배를 초래한다(Kim *et al.*[2004]). 둘 사이의 상대운동은 주위에 경계층을 형성하고, 결론적으로 입자 운동을 감쇄시키게 된다(Urick[1948]; Richards[2003]). 반면, 조립입자(평균입자크기 ≈ 800 μm)의 경우, 파장과 입자의 상대적 크기에 의해 산란방향이 결정된다. 파장이 입자크기보다 작을 경우, 산란 패턴의 절반은 전방으로 전파되지만, 입자가 파장보다 더 클 경우에는 산란패턴이 대부분 후방으로 전파된다(Kim *et al.*[2004]). 특히, 농도가 약 1000 mg l⁻¹에 달할 경우, $\alpha_s/\alpha_w > 8$ 로 부유입자의 감쇄효과는 더욱 크게 향상된다. 이러한 부유사농도와 입자크기에 의한 α_s/α_w 의 차이는 부유사플룸 내에서 SPM_{ADCP}가 과대 혹은 과소평가 될 수 있음을 의미한다.

3.4 원격탐사

원격탐사는 물리적인 접촉 없이 지표면, 해양, 대기로부터 반사·복사되는 전자파 에너지를 감지하여 원격리에 있는 대상의 물리적 성질을 측정하는 기술이다. 위성은 광범위한 지역에서 동시 관측된 산출물을 연속적으로 제공할 수 있다는 점에서 대상의 변화를 감지하고 예측하는데 많은 이점을 제공한다(Table 3). 바다로부터의 태양광 반사스펙트럼을 측정하는 해색위성은 관측궤도(정지 또는 이동)와 센서(GOCI, MODIS, OLI, TIRS, ETM+)의 종류에 따라 각기 다른 시·공간 해상도의 산출물을 제공한다(Table 4). 정지궤도위성은 지구와 동일한 자전 및 공전주기로 회전하며 고정된 지역을 연속적으로 관측하는 방식이고, 이동위성은 정지궤도위성보다 낮은 높이에서 지구의 자전속도보다 빠르게 회전하며 넓은 범위를 관측하는 방식을 의미한다. 해색위성은 탑재된 센서의 파장대(예, 가시광선, 근적외선 파장 영역)에서 수집된 전자파 에너지를 보정(예, 복사보정, 기하보정, 대기보정)한 뒤, 클로로필(chl-*a*), 용존유기물, 부유사 등 해수에 포함되어 있는 생지화학적 정보를 제공한다. 부유사농도 산출물의 경우, 가시광선 중 적색광의 반사도가 부유입자의 산란과 잘 구분되기 때문에(Yang *et al.*[2013]), 각 위성 센서에서 400~850 nm 범위에 해당하는 채널을 사용하며 연안해역에서 발생하는 부유사플룸의 농도 및 확산 범위 규정에 활용되고 있다.

해양에서 부유사를 관측하기 위해서는 10~100 nm의 분광해상도, 10 km × 10 km 이상의 촬영가능 영역과 약 300 m × 300 m의 공간해상도 조건을 충족해야한다(Yang *et al.*[2013]). 위 조건을 충족하는 대표적인 위성으로 Aqua-MODIS와 Landsat 8-OLI가 있다.

Table 4. Satellites and sensors used for mapping the suspended sediment concentration

Satellites	Sensors	Spatial resolution	Temporal resolution
Landsat 8	OLI	30 m × 30 m	16 days
Aqua	MODIS	500 m × 500 m	1–2 days
COMS	GOCI	500 m × 500 m	Stationary (8 images per day at 1 hour interval)
GK-2B	GOCI-II	250 m × 250 m	Stationary (10 images per day at 1 hour interval)
SeaStar	SeaWiFS	1100 m × 1100 m (LAC) 4500 m × 4500 m (GAC)	1 days
Sentinel 3	OLC	300 m × 300 m	2–3 days
EnviSAT	MERIS	300 m × 300 m	2–3 days
EnMAP	HIS	30 m × 30 m	4 days
IRS-P6	LISS 4	5.8 m × 5.8 m	5 days
Proba-1	CHRIS	18 m × 18 m	7 days
SPOT 5	HRG	10 m × 10 m	26 days

이들은 이동위성에 탑재되어 광범위한 영역의 부유사농도를 제공하며 연안해역의 부유사플룸 연구에 활용되고 있다. 예를 들면, Barnes *et al.*[2015]은 Aqua-MODIS(공간 해상도: 500 m × 500 m)를 활용하여 반복적인 항만 준설에 의해 발생된 부유사플룸의 확산면적 일변화를 계산하였고, Kim *et al.*[2018]은 Landsat 8-OLI(공간 해상도: 30 m × 30 m)를 활용하여 골재채취에 의해 발생된 부유사플룸이 약 24 km까지 확산된 것을 보고하였다. 이러한 고해상도 센서들은 좁은 영역(수십 km 미만)에서 확산되는 부유사플룸을 관측하기에 매우 효율적이다. 그러나, 공간해상도가 높은 센서는 대부분 시간해상도가 낮다(Yang *et al.*[2013]). 실제로, Aqua는 동일관측지점을 통과하는데 약 1~2일(Schaaf *et al.*[2011]; Vanhellefont *et al.*[2014]), Landsat 8은 16일이 소요된다(Pan *et al.*[2018]). 대형하천으로부터 부유퇴적물이 지속적으로 공급되어 형성되는 하천 기원 부유사플룸과는 달리, 골재채취에 의한 부유사플룸은 채취작업 종료 후 수 시간만에 표층에서 소멸되기도 한다. 따라서, 관측 시간 간격이 긴 이동위성을 이용하여 빠르게 변화하는 부유사플룸의 확산패턴을 관측하기에는 자료가용성의 한계가 있다(Barnes *et al.*[2015]; Kim *et al.*[2018]).

정지궤도위성은 총부유물질농도의 시간 변화를 상세하게 분석할 수 있다. 대표적인 정지궤도위성으로써 천리안 1호(COMS, 2021년 3월 종료)는 Geostationary Ocean Color Imager(GOCI) 센서를 탑재하여 공간해상도 500 m × 500 m 에서 동일한 지점을 매일 8회(1시간 간격) 관측한다(Lee[2013]; Eom *et al.*[2014]). GOCI는 Fig. 6과 같이 골재채취 지점에서 발생된 부유사플룸의 형성, 확산, 소멸되는 과정을 명확하게 보여준다. 특히, 표층에서 총부유물질농도가 증가하여 플룸이 해류를 따라 넓은 영역으로 확산되는 경우, GOCI는 해양환경변화 감시수단으로 활용될 수 있다(Yang *et al.*[2013]). 천리안 1호 종료와 함께, 후속위성으로써 GOCI-II 센서를 탑재한 천리안 위성 2호(GK-2B, 2020년 9월 개시)가 향상된 기능(공간해상도: 250 m × 250 m; 시간 해상도: 매일 10회(1시간 간격))으로 관측임무를 수행하고 있다. GOCI-II는 부유물질의 산란과 흡광 증가에 따라 원격반사도 값이 증가한다는 원리를 기반으로 운영된

다. 별도의 밴드비 없이 단일밴드 620 nm의 원격반사도 값을 기준으로 다음과 같은 세 가지 알고리즘으로 구분되어 표층에서의 총부유물질농도를 산출한다(Korea Ocean Satellite Center of KIOST [2021]):

(1) 낮은 탁도에서 SPM ($R_{rs} 620 < 0.017$):

$$SPM_{LT} = \sum_{i=1}^4 c_i R_{rs}(620 \text{ nm})^i,$$

$$c_i = \{1.067 \times 10^3, -8.36 \times 10^4, 5.95 \times 10^6, -1.88 \times 10^7\} \quad (6)$$

(2) 높은 탁도에서 SPM ($R_{rs} 620 > 0.0245$):

$$SPM_{LT} = \sum_{i=0}^3 c_i R_{rs}(709 \text{ nm})^i,$$

$$c_i = \{3.19 \times 10^1, -1.10 \times 10^3, -7.73 \times 10^3, -9.64 \times 10^6\} \quad (7)$$

(3) 중간 탁도에서 SPM ($0.017 < R_{rs} 620 < 0.0245$, weight 값 적용)

$$SPM_{LT} = \omega_{LT} SPM_{LT} + (1 - \omega_{LT}) SPM_{HT}$$

$$\omega_{LT} = \frac{0.0245 - R_{rs}(620 \text{ nm})}{0.0245 - 0.017} \quad (8)$$

원격탐사(이동과 정지궤도)는 직접채수, 광학, 음향관측과 비교하여 광범위한 해역의 부유사플룸의 농도를 측정할 수 있는 방법이다. 그러나, 위성으로 산출된 부유사플룸의 농도는 표층상부의 관측값임을 유의해야한다. 수층의 성층 유무에 따라 가시광선의 침투깊이(수 mm ~ 수 m)가 변동되지만, 부유입자물질 농도는 주로 해수면의 반사도를 통해 산출된다. Fig. 6와 같이, 월류수 배출에 의해 형성된 부유사플룸이 표층을 따라 확산·소멸되는 과정을 확인할 수 있으나, 제한된 수직관측범위는 부유사플룸의 소멸 원인(월류수 공급 중단 또는 중·저층으로의 플룸 침강) 규명을 어렵게 한다(Fig. 6). 또한, 해수면의 반사도는 구름·안개 입자의 의한 산란(Yang *et al.*[2017])이나 표층탁도에 따라 반사도 비율이 과대 혹은 과소평가될 수 있기 때문에, 정확한 확산 패턴의 파악과 농도 보정을 위해서는 광학·음향관측이 반드시 병행되어야 한다.

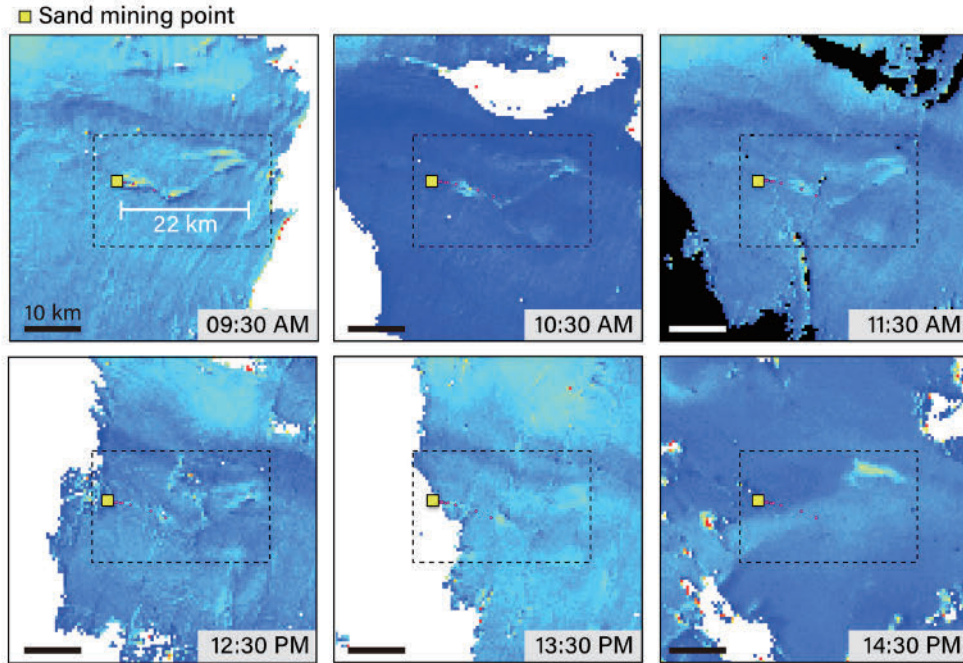


Fig. 6. Temporal variation of plume captured by the COMS (GOCI), near south coast of Korea ($34^{\circ}11.41'N$, $128^{\circ}24.56'E$) on May 19, 2015. The yellow square and dashed box indicate the sand mining complex and dispersed area of plume. The dispersion of plume reached over 22 km at 09:30 AM, and gradually disappeared for 5 hours.

4. 결 론

바다골재 채취단지 지정시 일정 규모 이상의 골재채취 행위가 해양환경에 미치는 영향을 평가하기 위해 시행되고 있는 ‘해양이용영향평가’의 과학적 신뢰성을 확보하기 위해서 부유사플룸의 현장관측의 필요성이 지속적으로 제기되고 있다. 부유사플룸은 부유입자의 이동과 직접적으로 관련된 변수인 퇴적물 조성, 입자크기, 침강속도, 유속 등의 지역적 차이에 따라 확산 범위와 농도가 다르게 나타난다. 현장관측 없이 기존연구자료만을 활용할 경우, 실측된 부유사플룸의 확산 범위와 최대 약 7배까지 차이가 발생하여, 연구결과에 대한 신뢰성이 훼손되었다(Jeong *et al.*[2017]). 이러한 사실은 연구지역 특성에 대한 사전조사를 바탕으로 부유사플룸에 대한 현장관측 방법과 전략을 수립해야함을 의미한다. 본 연구에서는 바다골재 채취과정에서 발생하는 부유사플룸의 확산 형태와 농도를 측정하기 위한 4가지 관측방법(직접채수, 광학, 음향, 원격탐사)에 대하여 (1) 채수자료의 필요성, (2) 광학장비의 높은 정확성과 부유입자 특성 변화에 따른 왜곡, (3) 음향장비의 높은 시-공간 해상도와 부유입자가 음향신호에 미치는 영향, (4) 위성관측의 광역성과 표층영역에 대한 장점과 한계점을 리뷰하였다. 각각의 관측방법은 시-공간 변동성이 높은 부유사플룸 감지하는데 분명한 제한점이 있으나, 연구목적에 적합하고 신뢰구간과 포화범위에 관한 약점을 상호 보완할 수 있도록 ‘표층-중층-저층’을 아우르는 다층(multi-layer) 관측연구를 수행한다면 연구결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서 제시된 측정장비 별 관측기준은 바다골재 채취 사업의 적

정성과 해양환경에 미치는 영향을 평가하는 기초자료로 활용될 수 있다.

후 기

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

References

- [1] Baker, E.T. and Lavell, J.W., 1984, The Effect of Particle Size on the Light Attenuation Coefficient of Natural Suspensions, *J. Geophys. Res.*, 89, 8197-820.
- [2] Barnes, B.B., Hu, C., Kovach, C. and Silverstein, R.N., 2015, Sediment Plumes Induced by the Port of Miami Dredging: Analysis and Interpretation Using Landsat and MODIS Data, *Remote Sens. Environ.*, 170, 328-339.
- [3] Battisto, G.M., Friedrichs, C.T., Miller, H.C. and Resio, D.T., 1999, Response of OBS to Mixed Grain-size Suspensions During SandyDuck, in: Kraus, N.C., McDougal, W.G. (Eds.), *Proc. Coastal Sed.*, 297-312.
- [4] Black, K.P. and Rosenberg, M.A., 1994, Suspended Sand Measurements in a Turbulent Environment: Field Comparison of Optical and Pump Sampling Techniques, *Coast. Eng.*, 24(1-2),

- 137-150.
- [5] Buiteveld, H., Hakvoort, J.H.M. and Donze, M., 1994, The Optical Properties of Pure Water, in: Jaffe J.S. (Eds.), *Ocean Optics XII*. in proc. SPIE., 2258, 174-183.
- [6] Bunt, J.A., Larcombe, P., Jago, C.F., 1999, Quantifying the Response of Optical Backscatter Devices and Transmissometers to Variations in Suspended Particulate Matter. *Cont. Shelf Res.*, 19(9), 1199-1220.
- [7] Campbell Scientific Inc., 2018, *Operator's Manual: OBS-3A Turbidity and Temperature Monitoring System*, Campbell Scientific, Inc., Logan, USA, 1-74.
- [8] Capello, M., Cutroneo, L., Ferranti, M.P., Budillon, G., Bertolotto, R.M., Ciappa, A., Cotroneo, Y., Castellano, M., Povero, P. and Tucci, S., 2014, Simulations of Dredged Sediment Spreading on a Posidonia Oceanica Meadow Off the Ligurian Coast, Northwestern Mediterranean. *Mar. Pollut. Bull.*, 79(1-2), 196-204.
- [9] Chen, Z., Wang, Z., Liu, Y., Wang, S. and Leng, C., 2016, Estimating the Flow Velocity and Discharge of ADCP Unmeasured Area in Tidal Reach. *Flow Meas. Instrum.*, 52, 208-218.
- [10] Cho, D.O., 2006, Challenges to Sustainable Development of Marine Sand in Korea, *Ocean Coast Manag.*, 49(1-2), 1-21.
- [11] Clarke, D., Martin, A., Dickerson, C. and Moore, D., 2005, Suspended Sediment Plumes Associated with Mechanical Dredging at the Port of Oakland, California, in proc. of the WEDA. Twenty-fifth Technical Conference and Thirty-Seventh Texas A&M Dredging Seminar, Western Dredging Association, California, USA, 187-202.
- [12] Clarke, D., Reine, K., Dickerson, C., Zappala, S., Pinzon, R., and Gallo, J., 2007, Suspended Sediment Plumes Associated with Navigation Dredging in the Arthur Kill Waterway, New Jersey. in proc. of XVIII World Dredging Congress, WEDA, Lake Buena Vista, Florida, USA, 1135-1154.
- [13] Deines, K.L., 1999, Backscatter Estimation Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers, in proc. of the IEEE Sixth Working Conference on Current Measurement, San Diego, California, USA, 249-253.
- [14] de Wit, L., Talmon, A.M. and Van Rhee, C., 2014, 3D CFD Simulations of Trailing Suction Hopper Dredger Plume Mixing: Comparison with Field Measurements. *Mar. Pollut. Bull.*, 88(1-2), 34-46.
- [15] Downing, J., 2006. Twenty-Five Years with OBS Sensors: the Good, the Bad and the Ugly. *Cont. Shelf Res.*, 26, 2299-2318.
- [16] Downing, J.P., Sternberg, R.W. and Lister, C.R.B., 1981, New Instrumentation for the Investigation of Sediment Suspension Processes in the Shallow Marine Environment. *Mar. Geol.*, 42(1-4), 19-34.
- [17] Duclos, P.A., Lafite, R., Le Bot, S., Rivoalen, E. and Cuvilliez, A., 2013, Dynamics of Turbid Plumes Generated by Marine Aggregate Dredging: An Example of a Macrotidal Environment (the Bay of Seine, France). *J. Coast. Res.*, 29(6a), 25-37.
- [18] Eom, J., Lee, Y.K., Choi, J.K., Moon, J.E., Ryu, J.H. and Won, J.S., 2014, Monitoring of the Suspended Sediments Concentration in Gyeonggi-bay Using COMS/GOCI and Landsat ETM+ Images. *Econ. Environ. Geol.*, 47(1), 39-48.
- [19] Erfemeijer, P.L. and Lewis III, R.R.R., 2006, Environmental Impacts of Dredging on Seagrasses: A Review. *Mar. Pollut. Bull.*, 52(12), 1553-1572.
- [20] Fearn, P., Broomhall, M., and Dorji, P., 2017, *Optical Remote Sensing for Dredge Plume Monitoring: A Review*. Western Australian Marine Science Institution, Perth, Western Australia Report of Theme 3 - Project 3.1.1, 46.
- [21] 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.
- [22] Fettweis, M., Baeye, M., Cardoso, C., Dujardin, A., Lauwaert, B., Van den Eynde, D., Van Hoestenbergh, T., Vanlede, J., Van Poucke, L., Velez, C., Martens, C., 2016, The Impact of Disposal of Fine-grained Sediments from Maintenance Dredging Works on SPM Concentration and Fluid Mud in and outside the Harbor of Zeebrugge, *Ocean. Dyn.*, 66(11), 1497-1516.
- [23] Fisher, F.H. and Simmons, V.P., 1977, Sound Absorption in Sea Water, *J. Acoust. Soc. Am.*, 62(3), 558-564.
- [24] Francois, R.E. and Garrison, G.R., 1982a, Sound Absorption Based on Ocean Measurements: Part I: Pure Water and Magnesium Sulfate Contributions, *J. Acoust. Soc. Am.*, 72(3), 896-907.
- [25] Francois, R.E. and Garrison, G.R., 1982b, Sound Absorption Based on Ocean Measurements. Part II: Boric Acid Contribution and Equation for Total Absorption, *J. Acoust. Soc. Am.*, 72(6), 1879-1890.
- [26] Fugate, D.C. and Friedrichs, C.T., 2002, Determining Concentration and Fall Velocity of Estuarine Particle Populations Using ADV, OBS and LISST, *Cont. Shelf Res.*, 22(11-13), 1867-1886.
- [27] Garel, E., Bonne, W., Collins, M.B. and Peffer, C. 2018. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, third ed., Elsevier, Netherlands.
- [28] Gibbs, R.J., 1978, Light Scattering from Particles of Different Shapes, *J. Geophys. Res.*, 83, 501-502.
- [29] Gibbs, R.J., Wolanski, E., 1992, The Effect of Floccs on Optical Backscattering Measurements of Suspended Material Concentration, *Mar. Geol.*, 107(4), 289-291.
- [30] Guerrero, M., Rütger, N. and Szupiany, R.N., 2012, Laboratory Validation of Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) Techniques for Suspended Sediment Investigations, *Flow Meas. and Instrum.*, 23(1), 40-48.
- [31] Ha, H.K., Hsu, W.Y., Maa, J.Y., Shao, Y.Y. and Holland, C.W., 2009, Using ADV Backscatter Strength for Measuring Suspended Cohesive Sediment Concentration, *Cont. Shelf Res.*, 29(10), 1310-1316.
- [32] Ha, H.K., Maa, J.Y., Park, K. and Kim, Y.H., 2011, Estimation of High-resolution Sediment Concentration Profiles in Bottom

- Boundary Layer Using Pulse-coherent Acoustic Doppler Current Profilers, *Mar. Geol.*, 279(1-4), 199-209.
- [33] Haimann, M., Hauer, C., Tritthart, M., Prenner, D., Leitner, P., Moog, O. and Habersack, H., 2018, Monitoring and Modelling Concept for Ecological Optimized Harbour Dredging and Fine Sediment Disposal in Large Rivers, *Hydrobiologia*, 814(1), 89-107.
- [34] Hatcher, A., Hill, P., Grant, J. and Macpherson, P., 2000, Spectral Optical Backscatter of Sand in Suspension: Effects of Particle Size, Composition and Colour, *Mar. Geol.*, 168(1-4), 115-128.
- [35] Hong, S.S., Kim, J.Y. and Lee, J.Y., 2015, Trends of Supply and Demand of Aggregate in Korea, *Jour. Petrol. Soc. Korea*, 24(3), 253-272.
- [36] Islam, A., Wang, L., Smith, C., Reddy, R., Lewis, A. and Smith, A., 2007, Evaluation of Satellite Remote Sensing for Operational Monitoring of Sediment Plumes Produced by Dredging at Hay Point, Queensland, Australia, *J. Appl. Remote Sens.*, 1(1), 011506.
- [37] 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.
- [38] 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(1), 194-204.
- [39] Kim, J., Kim, D., Son, G. and Kim, S., 2015, Accuracy Analysis of Velocity and Water Depth Measurement in the Straight Channel Using ADCP, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 48(5), 367-377.
- [40] Kim, H.Y., Gutierrez, B., Nelson, T., Dumars, A., Maza, M., Perales, H., and Voulgaris, G., 2004, Using the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) to Estimate Suspended Sediment Concentration. Technical Report CPSD #04-01, Department of Geological Sciences, University of South Carolina, SC, 20.
- [41] Kim, N.H., Pham, V.S., Hwang, J.H., Won, N.I., Ha, H.K., Im, J. and Kim, Y., 2018, Effects of Seasonal Variations on Sediment-plume Streaks from Dredging Operations. *Mar. Pollut. Bull.*, 129(1), 26-34.
- [42] Korea Ocean Satellite Center of KIOST, 2021, Total Suspended Material Concentration Algorithm for GOCI-II Data, Busan, Republic of Korea, 1-16.
- [43] Land, J. and Bray, R.N., 1998, Acoustic Measurement of Suspended Solids for Monitoring of Dredging and Dredged Material Disposal, *J. Dredging Eng.*, 2(3), 1-17.
- [44] Lee, D.I., Park, D.S., Eom, K.H. and Kim, G.Y., 2010, Status of Marine Sand Mining and Assessment System in Korea, *J. Environ. Impact Assess.*, 19(3), 357-365.
- [45] Lee, K.H., 2013, Creating Atmospheric Scattering Corrected True Color Image from the COMS/GOCI Data, *J. Korean Association Geographic Inf. Stud.*, 16(1), 36-46.
- [46] Lin, J., He, Q., Guo, L., van Prooijen, B.C. and Wang, Z.B., 2020, An Integrated Optic and Acoustic (IOA) Approach for Measuring Suspended Sediment Concentration in Highly Turbid Environments, *Mar. Geol.*, 421, 106062.
- [47] Maa, J.P.Y., Xu, J. and Victor, M., 1992, Notes on the Performance of an Optical Backscatter Sensor for Cohesive Sediments, *Mar. Geol.*, 104(1-4), 215-218.
- [48] Manap, N. and Voulvoulis, N., 2015, Environmental Management for Dredging Sediments—The Requirement of Developing Nations, *J. Environ. Manage.*, 147, 338-348.
- [49] Martinelli, L., Guerrero, M. and Preti, M., 2007, Effect of Off-shore Sand Dredging on Turbidity, in proc. of the 8th International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, Alexandria Egypt, 13-17.
- [50] McLellan, T.N., Havis, R.N., Hayes, D.F. and Raymond, G.L., 1989, Field Studies of Sediment Resuspension Characteristics of Selected Dredges, Technical Report HL-89-9. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- [51] Mikkelsen, O.A. and Pejrup, M., 2000, In Situ Particle Size Spectra and Density of Particle Aggregates in a Dredging Plume, *Mar. Geol.*, 170(3-4), 443-459.
- [52] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021, Annual Aggregate Statistics, https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1223.
- [53] Mueller, D.S., 2015, Velocity Bias Induced by Flow Patterns Around ADCPs and Associated Deployment Platforms, in proc. of IEEE/OES Eleventh Current, Waves and Turbulence Measurement (CWTM). New York, USA, 1-7.
- [54] Nichols, M., Diaz, R.J. and Schaffner, L.C., 1990, Effects of Hopper Dredging and Sediment Dispersion, Chesapeake Bay, *Environ. Geol. Water Sci.*, 15(1), 31-43.
- [55] Pan, Y., Shen, F. and Wei, X., 2018, Fusion of Landsat-8/OLI and GOCI Data for Hourly Mapping of Suspended Particulate Matter at High Spatial Resolution: A Case Study in the Yangtze (Changjiang) Estuary, *Remote Sens.*, 10(2), 158.
- [56] Park, H.B. and Lee, G.H., 2016, Evaluation of ADCP Backscatter Inversion to Suspended Sediment Concentration in Estuarine Environments, *Ocean Sci. J.*, 51(1), 109-125.
- [57] Park, L.H., Cho, Y.K., Cho, C., Sun, Y.J. and Park, K.Y., 2001, Hydrography and Circulation in the Youngsan River Estuary in Summer, 2000, *The Sea: J. Korean Soc. Oceanogr.*, 6(4), 218-224.
- [58] RD Instrument, 2011, Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation A Practical Primer. RD Instruments, San Diego, California, 1-52.
- [59] Richards, S.D., Heathershaw, A.D. and Thorne, P.D., 1996, The Effect of Suspended Particulate Matter on Sound Attenuation in Seawater, *J. Acoust. Soc. Am.*, 100(3), 1447-1450.
- [60] Richards, S.D., Leighton, T.G. and Brown, N.R., 2003, Visco-inertial Absorption in Dilute Suspensions of Irregular Particles, in proc. R. Soc. Lond., A459, 2153-2167.
- [61] Riemann, B. and Hoffmann, E., 1991, Ecological Consequences of Dredging and Bottom Trawling in the Limfjord, Denmark, *Mar. Ecol. Prog. Ser. Oldendorf*, 69(1), 171-178.

- [62] Rogers, C., 1990, Responses of Coral and Reefs and Reef Organisms to Sedimentation, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 62, 185-202.
- [63] Roman-Sierra, J., Navarro, M., Muñoz-Perez, J.J. and Gomez-Pina, G., 2011, Turbidity and Other Effects Resulting from Trafalgar Sandbank Dredging and Palmar Beach Nourishment, *J. Waterw. Port Coast Ocean Eng.*, 137(6), 332-343.
- [64] Ruhl, C.A., Schoellhamer, D.H., Stumpf, R.P. and Lindsay, C.L., 2001, Combined Use of Remote Sensing and Continuous Monitoring to Analyse the Variability of Suspended-Sediment Concentrations in San Francisco Bay, California, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 53(6), 801-812.
- [65] Schaaf, C.L.B., Liu, J., Gao, F. and Strahler, A.H., 2011, MODIS Albedo and Reflectance Anisotropy Products from Aqua and Terra, *Land Remote Sensing and Global Environmental Change: NASA's Earth Observing System and the Science of ASTER and MODIS*, 11, 549-561.
- [66] 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.
- [67] Shafer, D.J., Maglio, C.K., McConnell, D., Beck, T.M. and Pollock, C.E., 2016, Characterizing Seagrass Exposure to Light Attenuation and Turbidity Associated with Dredging Activity in the Gulf Intracoastal Waterway, Sarasota Bay, Florida, *Environmental Laboratory (US)*, 1-12.
- [68] Shin, H.J., Kang, K. and Lee, G.H., 2014, Estimation of the Freshwater Advection Speed by Improvement of ADCP Post-processing Method near the Surface at the Yeongsan Estuary, *The Sea*, 19(3), 180-190.
- [69] Shao, Y. and Maa, J.P.Y., 2017, Comparisons of Different Instruments for Measuring Suspended Cohesive Sediment Concentrations, *Water*, 9(12), 968.
- [70] Smith, S.J. and Friedrichs, C.T., 2011, Size and Settling Velocities of Cohesive Floccs and Suspended Sediment Aggregates in a Trailing Suction Hopper Dredge Plume, *Cont. Shelf. Res.*, 31(10), S50-S63.
- [71] Son, G., Kim, D., Kwak, S., Kim, Y. D. and Lyu, S., 2021, Characterizing Three-Dimensional Mixing Process in River Confluence Using Acoustical Backscatter as Surrogate of Suspended Sediment, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 54(3), 167-179.
- [72] Spearman, J., 2015, A Review of the Physical Impacts of Sediment Dispersion from Aggregate Dredging, *Mar. Pollut. Bull.*, 94(1-2), 260-277.
- [73] Suedel, B.C., Kim, J., Clarke, D.G. and Linkov, I., 2008, A Risk-informed Decision Framework for Setting Environmental Windows for Dredging Projects, *Sci. Total Environ.*, 403(1), 1-11.
- [74] Sutherland, T.F., Lane, P.M., Amos, C.L. and Downing, J., 2000, The Calibration of Optical Backscatter Sensors for Suspended Sediment of Varying Darkness Levels, *Mar. Geol.*, 162(2-4), 587-597.
- [75] Thorne, P.D. and Hanes, D.M., 2002, A Review of Acoustic Measurement of Small-scale Sediment Processes, *Cont. Shelf. Res.*, 22(4), 603-632.
- [76] Thorne, P.D., Vincent, C.E., Hardcastle, P.J., Rehman, S. and Pearson, N., 1991, Measuring Suspended Sediment Concentrations Using Acoustic Backscatter Devices, *Mar. Geol.*, 98 (1), 7-16.
- [77] Tubman, M., Brumley, B. and Puckette, P.T., 1994, Deep-Water Dredged-Material Disposal Monitoring Offshore of San Francisco Using the Plume Measurement System (PLUMES), In: *Dredging'94*. ASCE., 86-95.
- [78] Urick, R.J., 1983, *Principles of Underwater Sound*. McGraw-Hill, New York, USA.
- [79] Urick, R.J., 1948, The Absorption of Sound in Suspensions of Irregular Particles, *J. Acoust. Soc. Am.*, 20, 283-289.
- [80] Wren, D.G., Barkdoll, B.D., Kuhnle, R.A. and Derrow, R.W., 2000, Field Techniques for Suspended-sediment Measurement, *J. Hydraul. Eng.*, 126(2), 97-104.
- [81] Wood, J.D. and Boyé, D., 2007, Monitoring Suspended Sediment Plumes Using an Acoustic Doppler Current Profiler, *Oceans*, 1-7.
- [82] Vanhellemont, Q., Neukermans, G. and Ruddick, K., 2014, Synergy Between Polar-orbiting and Geostationary Sensors: Remote Sensing of the Ocean at High Spatial and High Temporal Resolution, *Remote Sens. Environ.*, 146, 49-62.
- [83] Voutsoukas, M.I., Aleksiadis, S., Grenz, C. and Verney, R., 2011, Comparisons of Acoustic and Optical Sensors for Suspended Sediment Concentration Measurements Under Non-Homogeneous Solutions, *J. Coast. Res.*, 160-164.
- [84] Yang D.B., Hong, G.H., Park, Y., Kim, H.K. and Chung, C.S., 2013, Remote Sensing Imagery for Monitoring Sediment Resuspension during Dredging Operations in Public Waters - A Review, *J. KEDS*, 3(1), 1-11.
- [85] Yang, H., Yoon, S., Han, H.J., Heo, J.M. and Park, Y.J., 2017, Data Processing System for the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI), *KIISE Transactions on Computing Practices*, 23(1), 74-79.

Received 5 October 2021

Revised 2 November 2021

Accepted 15 November 2021