



Original Article

2017년 가막만 북서내만해역 표층 해저퇴적물의 부영양화 현황 및 정화·복원 방향

정희호¹ · 강수동² · 정현지¹ · 정다진¹ · 오주혜¹ · 최성민² · 안운근³ · 추효상⁴ · 최상덕⁴ · 김상수⁵ ·
김평중⁶ · 이원찬⁷ · 조현서^{4,†}

¹전남대학교 환경해양학과 대학원생

²전남대학교 수산과학과 대학원생

³전남대학교 수산과학과 연구원

⁴전남대학교 수산해양대학 해양기술학부 교수

⁵국립수산과학원 남해수산연구소 연구사

⁶국립수산과학원 남해수산연구소 연구관

⁷국립수산과학원 남해수산연구소 자원환경과 과장

The Current Status of Eutrophication and Suggestions of the Purification & Restoration on Surface Sediment in the Northwestern Gamak bay, Korea, 2017

Huiho Jeong¹, Soodong Kang², Hyeonji Jung¹, Dajin Jeong¹, Juhye Oh¹, Seongmin Choi², Yunkeun An³,
Hyosang Choo⁴, Sangduk Choi⁴, Sangsoo Kim⁵, Pyoungjoong Kim⁶, Wonchan Lee⁷, and Hyeonsoo Cho^{4,†}

¹Graduated student, Department of Environmental Oceanography, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

²Graduated student, Department of Aqualife Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

³Researcher, Department of Aqualife Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

⁴Professor, Faculty of Marine Technology, College of Fisheries & Ocean Science, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea

⁵Researcher, Southwest Sea Fishery Research Institute, National Fishery Research and Development Institute, Yeosu 59780, Korea

⁶Senior researcher, Southwest Sea Fishery Research Institute, National Fishery Research and Development Institute, Yeosu 59780, Korea

⁷Research manager, Fisheries resources and environment division, Southwest Sea Fishery Research Institute, National Fishery Research and Development Institute, Yeosu 59780, Korea

요 약

전남 여수시 가막만은 패류 양식장 등의 수산자원의 보호를 위해 환경보전해역으로 선정되었다. 그러나 가막만 북서내만해역은 매년 부영양화와 관련하여 해양환경에 대한 악영향이 지속되어 온 해역이다. 이에 여수시는 과거 가막만 선소 내측과 북서내만해역에서 해양오염퇴적물의 정화·복원사업을 실시하여, 해양환경이 개선된 것이 보고 된 바 있다. 그러나 근래에는 빈산소수괴, 황화수소 등의 악영향이 되풀이되고 있는 실정이다. 이러한 원인으로는 해당 사업이 유기물의 유입원에 대한 충분한 조사 없이 진행되었기 때문으로 판단된다. 한편, 2013년부터 해양수산부는 정화지수를 적용하여 정화·복원사업의 범위를 산정하도록 규정하고 있다. 이에 본 연구는 가막만 북서내만해역의 해저퇴적물 중 유기물 항목들에 대해 정화·복원지수(CIET)를 적용하여 해양오염퇴적물 범위를 산정하고, carbon/nitrogen 비와 과거 문헌조사를 통해 유기물 유입원에 대해 토의하여 향후 개선방안을 논의해보고자 한다. CIET 및 C/N 비 적용결과, 해저퇴적물 중 점오염원/비점오염원의 영향을 받은 선소 내측해역과 식물플랑크톤과 양식장으로부터의 영향을 받은 장도남측, 호도리 측, 북서내만해역 중앙 측에서 정화·복원이 필요할 것으로 사료된다. 외부오염원 개선을 위해 가막만 인근의 하수관거 개선이 제안되었으며, 내부오염원 개선을 위해 준설 및 해저퇴적물 개선제 사용, 양식 어장의 휴식이 제안되었다.

†Corresponding author: hscho@chonnam.ac.kr

Abstract – The Gamak bay was designated as the environmental preservation sea area for conservation of fishery resources such as bivalves farming by the Korean government. However, the northwestern Gamak bay was affected from eutrophication on the marine environment every year, thereby the Yeosu city carried out various purification & restoration programs to improve polluted sediments. Nevertheless, recently the adverse effects such as hypoxia, hydrogen sulfide formation are reoccurring in the area. This phenomena are caused by the programs overlooked sources of organic matter. The Ministry of Oceans and Fisheries of Korea (MOF) required the Clean-up Index of Eutrophication (CIET) for estimating a range of the purification & restoration service on polluted sediment from 2013. In this study, the range of CIET in the northwestern Gamak bay is calculated by the eutrophication parameters such as IL, COD, AVS, and we review the sources of organic matter with carbon/nitrogen ratio to discuss future improvement programs. According to the results, the purification & restoration service will be needed in the internal areas of Sunso (affected by the point/non-point sources) and the southern sides of Jang island, nearby areas of Hodo-ri, and the middle parts of the bay (affected by the phytoplankton and fishery farming). Therefore, not only the re-arrangement of a sewerage system (for external sources) but also dredging, sediment improvement agents, and the rest of fisheries (for internal sources) are suggested.

Keywords: CIET(부영양화 정화복원지수), Gamak bay(가막만), Eutrophication(부영양화), Sources of organic matter(유기물 유입원), Surface sediment(해저퇴적물)

1. 서 론

전남 여수시 가막만의 양식어업은 대부분 패류 양식장으로서, 전남지역 전체 참굴 생산량의 대부분을 차지하는 해역으로 수산자원으로서 중요한 의미를 갖는다(Yeosu City[2018]). 가막만은 해양환경관리법 제 15조에 의거하여 수산자원의 보호 및 육성을 위해 해양환경보전해역으로 선정되었다(KOEM[2013]).

가막만 북서내만해역은 많은 일사량, 반폐쇄성 해역, 옴막한 해저지형, 담수 유입의 영향을 받으며 느린 반시계방향의 외류가 형성되는 해역으로 알려져 있다(Park *et al.*[1999]). 특히, 해당 해역은 불량한 해수교환, 수괴의 성층화, 유기물 분해 등에 의해 빈산소수괴가 과거 약 100년 전에도 발생하였을 것으로 추정된 바 있다(KHOA[2017]; Kim *et al.*[2006]; Kim *et al.*[2010a]; Lee[2015]; NIFS[2017]). 또한, 빈산소수괴 및 부영양화 관련 항목뿐만 아니라 PCBs, PAHs, TBT, 중금속 등 유해화학물질이 도시하수 및 불량한 해수 교환의 영향을 받아 지속적으로 유입 또는 잔류하는 것으로 보고되었다(Kim[2006]; Kim *et al.*[2010b]; Kim *et al.*[2012]; MOF[1999]).

그 중, 가막만의 해저퇴적물 중 유기물은 빈산소수괴의 주원인이 되며, 저서생태계에 악영향을 미치고, 종래에는 인간에게까지 영향을 미친 사례가 있다. 과거 2001~2005년에는 가막만 선소 내측 해저퇴적물 중 유기물로부터의 황화수소, 암모니아에 기인한 악취 등의 영향으로 인근 지역 주민들의 집단 민원 발생, 관광객의 기피 현상, 그에 의한 어가 소득 감소가 발생하였고, 이에 해저퇴적물 정화·복원사업이 수행되었다(Yeosu City[2001]). 또한, 연안 오염의 증가로 가막만 양식 어장에서 고부가가치의 패류 양식이 불가능할 정도에 이르자, 2004년에 특별관리어장으로 지정되어 어망, 양식 쓰레기 및 침적 폐기물 수거, 경운, 객토 등이 실시되었다(Na[2004]). 이러한 노력으로 단기간에 유기물 오염, 악취, 저서생태계의 개선 등이 보고되었다(Jung[2006]; Paeng[2003]; Park[2007]). 그러나 해당 정화·복원 사업들은 유기물의 재유입을 고려하지 않은

채 실시되어, 근래에는 부영양화에 따른 대형저서다모류 군집구조의 변화, 빈산소수괴 및 어패류의 폐사, 환원환경에서의 영양염 용출, 황화수소 발생 등의 악영향이 재발생하고 있다(Jang and Shin [2016]; Kim *et al.*[2010a]; NIFS[2010]; NIFS[2017]; Yoon *et al.*[2008]).

따라서, 지속적인 유기물의 유입이 이루어지는 한, 가막만 북서내만해역의 해저퇴적물 중 부영양화가 악화될 가능성이 있어 이에 관한 모니터링은 중요한 의미가 있다. 과거에도 가막만의 해저퇴적물 중 부영양화 항목의 연구들이 진행되었으나 최근 분포 경향까지 대표한다고 판단하기는 어려우며, 근래에는 주로 저서생태계에 영향을 미치는 원인 파악을 위한 유기물의 수평분포에 대해 다뤄지고 있을 뿐, 유기물의 유입원과 관련한 고찰은 미진한 편이다(Jang and Shin[2016]; Na[2004]; Noh[2003]; Paeng[2003]). 또한, 현재 해양수산부는 2013년부터 인간의 건강 또는 해양생태계에 위해를 가하는 퇴적물을 해양오염퇴적물로 정의하고, 정화·복원을 위해 정화지수(clean up index)를 이용하여 그 범위를 산정하도록 규정하고 있다(MOF[2018a]). 이에 본 연구는 2017년 가막만 해저퇴적물 중 유기물 항목들에 대해 분석하여, 정화복원지수를 적용하고 해양오염퇴적물 범위를 산정하고자 한다. 또한, 선행 연구된 유기물의 유입원에 대해 고찰하여 향후 개선 방향을 논의 후, 가막만 해역에 대해 정화·복원사업 추진을 위한 기본 자료로써 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

부영양화가 심각한 것으로 알려진 가막만 북서내만해역을 중심으로 10개 정점을 선정하였다(Fig. 1). 2017년 5월부터 월 1회 조사를 기본으로 실시하였으며, 7월과 8월에는 자세한 유기물 분포 특성 파악을 위하여 월 2회 조사하였다. 조사 일자에는 2017년 5월 26일, 6월 26일, 7월 12일, 7월 19일, 8월 8일, 8월 16일, 9월 13일, 10월 13일로 총 8회 실시하였다. 추가로, 점오염원에 대한 영향을

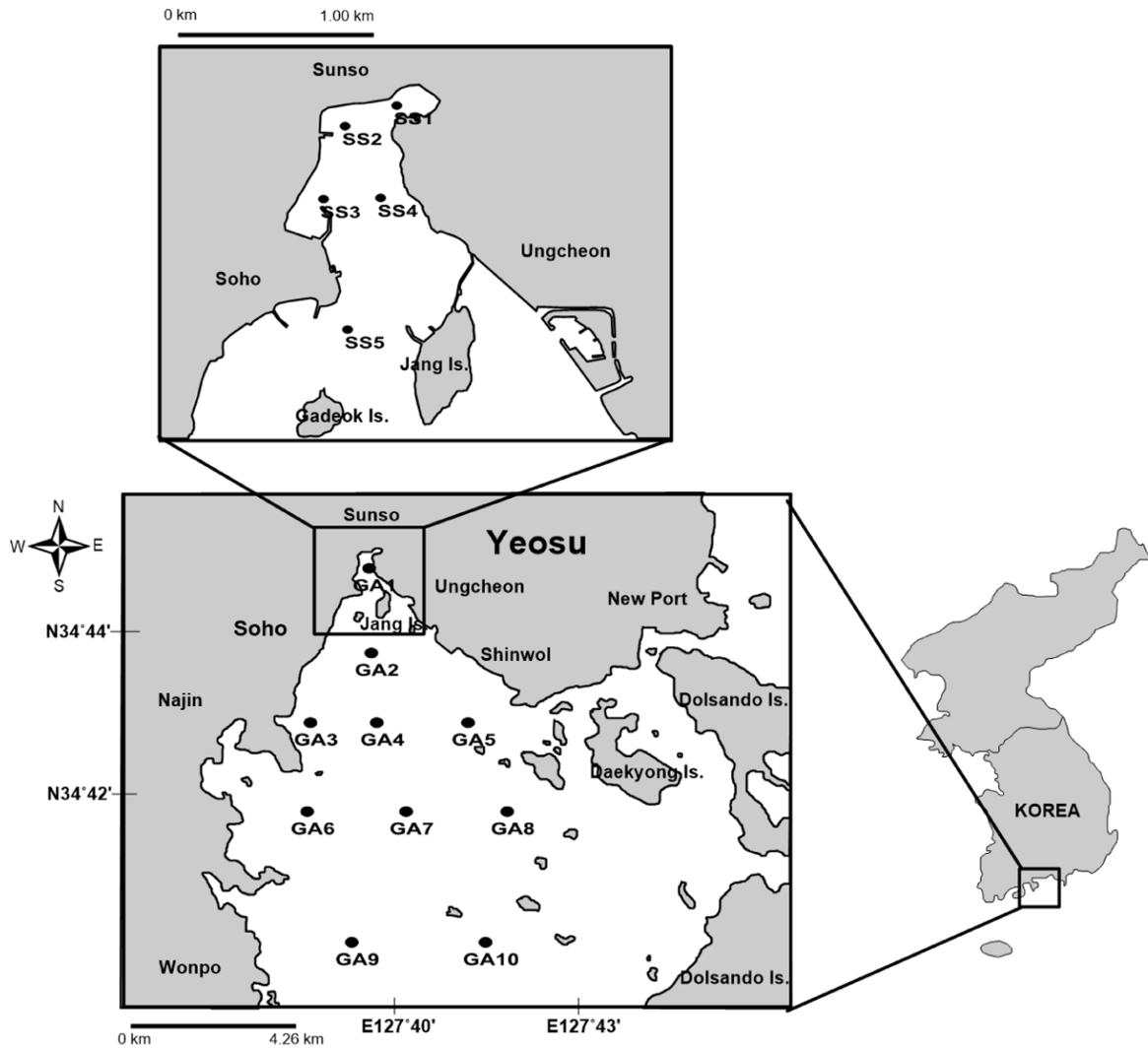


Fig. 1. Map showing surface sediment sampling stations (Sunso; n = 5, Gamak bay; n = 10).

파악하기 위해 6월 26일에 선소 내측에 대해 5개 정점을 추가로 조사하였다(Fig. 1).

표층 해저퇴적물 시료는 van Veen grab sampler를 사용하여 채취하였고, 표층 퇴적물(0~2 cm)만을 stainless spoon으로 채취하였다. 채취된 시료는 얼음 및 드라이아이스와 함께 아이스박스에 보관한 후, 실험실로 운반하여 즉시 분석에 사용하였다. 분석 후 남은 시료는 영하 20 °C 이하에서 냉동보관 후, 추후 분석 시 해동하여 사용하였다(MOF[2018b]). 분석 항목 및 분석법으로 강열감량(ignition loss, IL)은 강열법, 화학적산소요구량(chemical oxygen demand, COD)은 알칼리과망간산칼륨법, 산휘발성황화물(acid volatile sulfide, AVS)은 황검지관법, 총 유기탄소(total organic carbon, TOC) 및 총 질소(total nitrogen, TN)는 1N 염산 용액을 통해 탄산염을 제거하고, 증류수로 중화시켜 건조시킨 후 원소분석기(vario MACRO cube, Germany)를 이용해 분석하였다(MOF[2018b]).

3. 가막만 북서내만해역 해저퇴적물 중 유기물 분포 특성

해저퇴적물 중 유기물 지표인 IL, AVS, COD, TOC, TN의 분포 범위와 평균값을 Table 1에 나타내었다. 일본 수산자원보호협회에서는 수산용수 기준으로서, 해저퇴적물 중 COD 20 mgO₂/g-dw., AVS 0.2 mg S/g-dw. 이하를 기준으로 산정하였고, 캐나다 온타리오 주는 해저퇴적물 중 TOC 1.0%를 ‘최저 영향 기준(the lowest effect level, LEL); 퇴적물에서 서식하는 생물 중 대다수가 견딜 수 있는 오염 수준’, 10.0%를 ‘심각한 영향 기준(the severe effect level, SEL); 퇴적물에서 서식하는 대다수 생물에게 유해할 것으로 예상되는 오염 수준’으로 산정하였다(Canada Ontario[2016]; JFRCA[2013]).

IL의 분포는 5월 26일을 제외한 모든 조사기간 중 내만 측에서 외양 측보다 높은 농도를 나타내었다(Fig. 2). COD, AVS 및 TOC의 분포는 내만 측에서 일본 수산용수 기준 및 LEL 기준 이상의 농도를

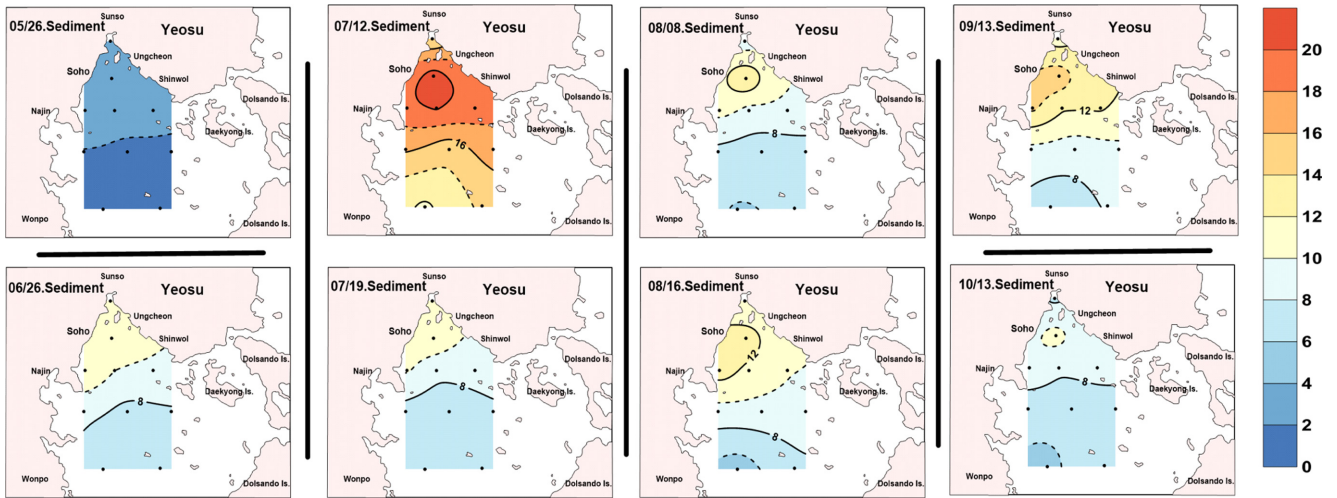


Fig. 2. Spatial distribution of ignition loss (%) from May 26th to September 13rd in surface sediment in Gamak bay.

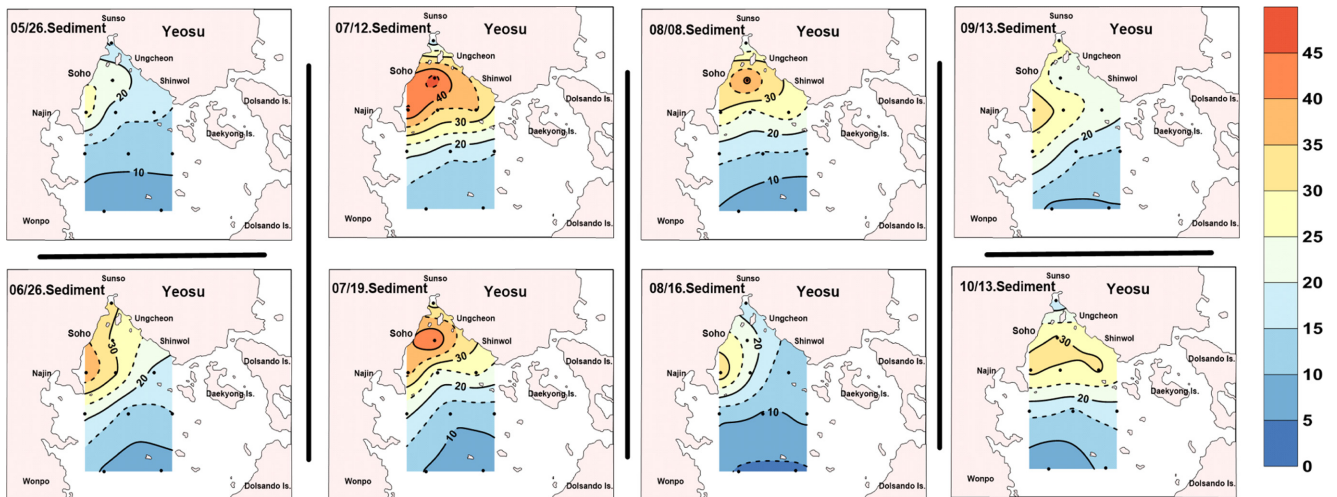


Fig. 3. Spatial distribution of chemical oxygen demand ($\text{mg O}_2/\text{g-dw.}$) from May 26th to September 13rd in surface sediment in Gamak bay.

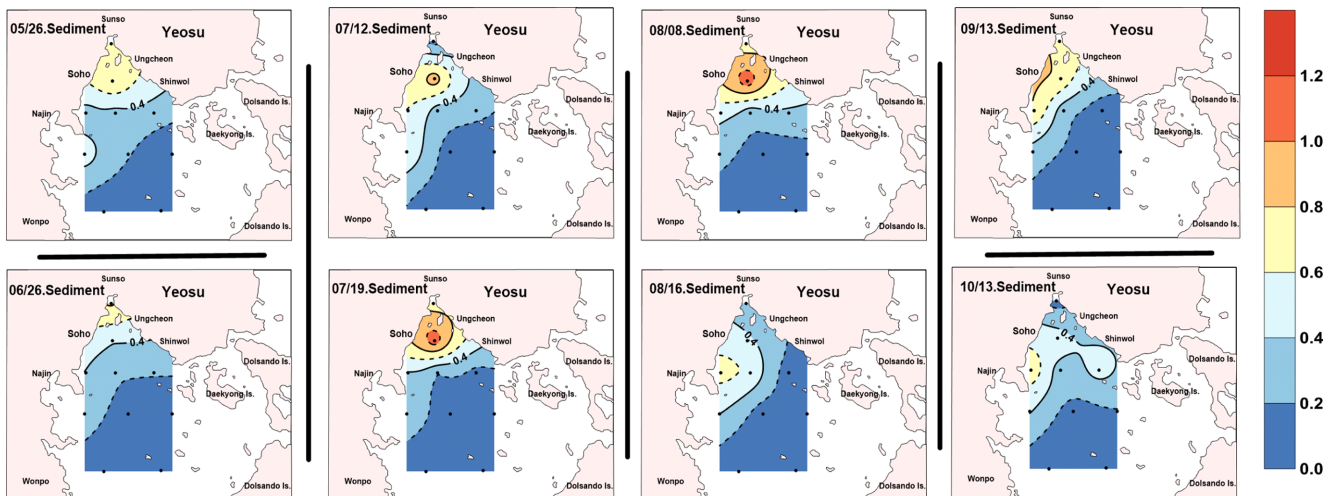


Fig. 4. Spatial distribution of acid volatile sulfide (mg S/g-dw.) from May 26th to September 13rd in surface sediment in Gamak bay.

나타내었으며, 그 중 장도 남측(GA2), 호도리 측(GA3)에서 주변
해역보다 높은 농도를 나타내었다(Fig. 3, Fig. 4). 퇴적물 중 유기물 지

표들은 대부분의 조사 시기에서 국외기준을 초과하여 개선이 필요
할 것으로 판단된다.

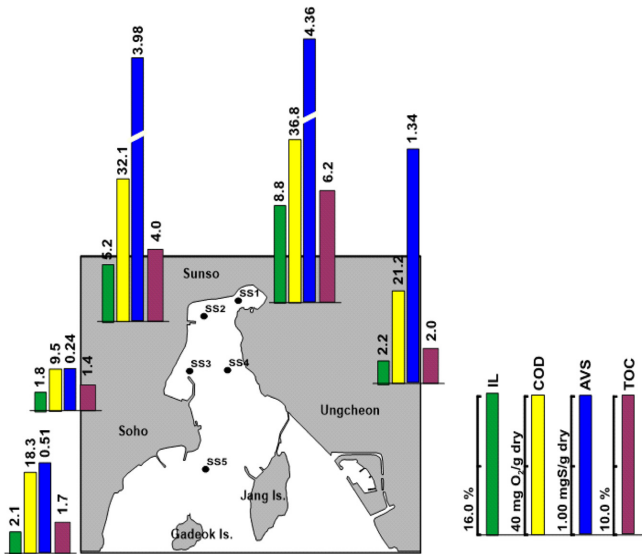


Fig. 5. Spatial distribution of ignition loss, chemical oxygen demand, acid volatile sulfide, and total organic carbon on June 26th on surface sediment in Sunso sea area.

특히, 6월 선소 내측 해저퇴적물 중 IL, COD은 가막만 북서내만해역보다 낮거나 유사한 농도를 나타내었으나, AVS, TOC는 점오염원과 인접한 SS1, SS2에서 주변해역에 비해 월등히 높은 농도를 나타내어, 심각한 부영양화가 우려된다(Fig. 5).

해저퇴적물 중 유기물 항목들의 농도를 각 조사 시기별로 Spearman 상관관계 분석한 결과, 각 조사 시기에서 유기물 항목들은 상호 간

통계적으로 유의한 양의 상관성을 나타내었다($p < 0.05$). 이는 각각의 항목들이 정점별로 유사한 수평분포를 나타내며, 상호 간에 영향을 받는 것으로 판단된다.

4. 고찰

가막만 북서내만해역의 해저퇴적물 중 유기물 분석결과를 타 해역과 비교하여 Table 1에 나타내었다. 비교 대상 해역들로는 비교적 저서생태계가 양호한 해역으로 알려진 서해 고창 연안, 과거 해양오염퇴적물 정화·복원이 실시되기 전의 진해 행암만, 부산 남항, 울산 방어진항, 부산 다대포항의 결과를 선정하였다. 가막만 북서

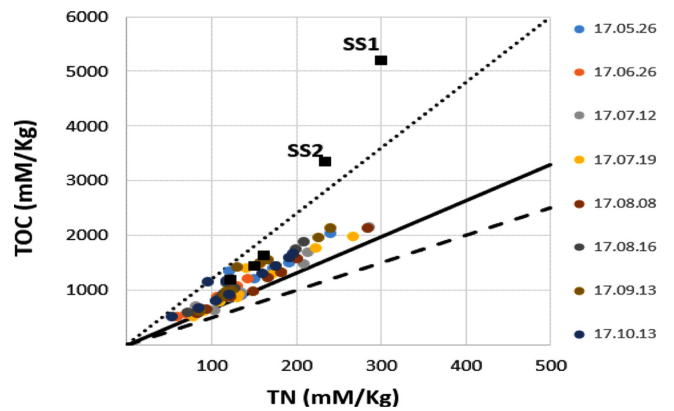


Fig. 6. Distribution of carbon/nitrogen ratio on surface sediment in Sunso and Gamak bay.

Table 1. The result of minimum-maximum (average) of organic matter on surface sediment in Sunso and Gamak bay and the comparison with other studies

Sea area	Investigation date	n	IL	COD	AVS	TOC	TN
			%	mgO ₂ /g-dw.	mgS/g-dw.	%	%
Yeosu Northwestern Gamak bay	1998.Mar. ¹⁾	16	7.3-14.1(11.6)	4.1-57.9(30.6)	-	-	-
	2003.Aug. ²⁾	3	16.1-32.8(18.5)	18.3-40.2(30.5)	2.560-17.480(9.227)	-	-
	2005.Jan. ³⁾	5	6.4-9.2(8.2)	-	0.300-0.540(0.398)	-	-
	2009.Aug. ⁴⁾	3	10.3-10.3(10.3)	26.1-36.9(30.6)	0.243-1.806(1.081)	-	-
	May26 th *	10	1.3-3.3(2.2)	7.2-27.4(14.9)	0.008-0.796(0.320)	0.7-2.4(1.4)	0.1-0.3(0.2)
	Jun.26 th *	10	6.9-11.9(9.2)	7.9-39.3(21.5)	0.010-0.825(0.262)	0.6-1.9(1.2)	0.1-0.3(0.2)
Yeosu Sunso	Jun.26 th *	5	1.8-8.8(4.0)	9.5-36.8(23.6)	0.240-4.362(2.085)	1.4-6.2(3.1)	0.2-0.4(0.3)
Yeosu Northwestern Gamak bay	Jul.12 th *	10	11.6-21.0(16.8)	10.4-47.1(25.5)	0.008-0.908(0.304)	0.7-2.6(1.4)	0.1-0.4(0.2)
	Jul.19 th *	10	6.1-11.3(8.3)	9.2-45.0(22.1)	0.002-1.114(0.317)	0.6-2.4(1.4)	0.1-0.4(0.2)
	Aug.8 th *	10	5.9-13.6(8.6)	5.2-41.7(20.0)	0.011-1.125(0.347)	0.7-2.6(1.4)	0.1-0.4(0.2)
	Aug.16 th *	10	4.8-13.0(9.7)	4.1-33.9(14.6)	0.010-0.660(0.267)	0.7-2.3(1.4)	0.1-0.4(0.2)
	Sep.13 rd *	10	7.0-15.0(10.8)	8.5-33.2(21.1)	0.029-0.792(0.328)	0.8-2.6(1.5)	0.1-0.3(0.2)
	Oct.13 rd *	10	7.0-15.0(10.8)	6.1-31.6(20.3)	0.016-0.749(0.287)	0.6-2.0(1.4)	0.1-0.3(0.2)
Jinhae Haengam bay	2006.Nov. ⁵⁾	15	6.5-14.9(11.3)	5.3-41.4(25.7)	0.079-0.609(0.378)	-	-
Busan Southern port	2008. ⁶⁾	8	3.2-9.5(6.1)	2.2-27.3(14.1)	-	-	-
Ulsan Bangeujin port	2011.Jun. ⁷⁾	10	9.1-19.5(13.4)	7.3-32.0(20.2)	0.027-0.875(0.415)	-	-
Busan Tadaepo port	2014.Jun. ⁸⁾	15	1.9-4.8(3.2)	10.1-33.4(19.2)	0.156-2.539(0.938)	-	-
Gochang coastal sea	2016.Aug. ⁹⁾	13	2.7-7.6(3.9)	0.7-7.0(2.0)	0.001-0.352(0.048)	-	-

¹⁾MOF[1999], ²⁾Paeng[2003], ³⁾Yoon *et al.*[2008], ⁴⁾NIFS[2010], ⁵⁾Jinhae City[2007] ⁶⁾Busan Regional Office of Oceans and Fisheries[2008]

⁷⁾KOEM[2011], ⁸⁾KOEM[2015], ⁹⁾Cho[unpublished]

-: There has no data. *: This study

내만해역 중 IL, COD, AVS 농도의 평균값은 고창 연안에 비해 높은 농도를 나타내었으나, 대부분의 정화·복원 전의 타 해역과 유사하거나 낮은 경향을 나타내었다. 그러나, 선소 내측 중 점오염원과 인접한 SS1, SS2의 AVS, TOC 농도는 타 해역에 비해 월등히 높은 농도를 나타내어 우려할 만한 수준으로 판단된다.

또한, 본 연구 결과와 과거 가막만 북서내만해역의 정화·복원 전을 비교하고자 하였으며, 인용된 연구들의 조사 정점들 중 과거 정화·복원사업의 범위에 포함된 정점만을 선정하여 비교하였다(Table 1). 당시 선소 내측에는 준설을 통해 해양오염퇴적물을 수거하였으며, 가막만 북서내만해역은 경운, 황토살포 등이 이루어져, 해저퇴적물 중 부영양화가 일부 개선된 것으로 보고된 바가 있다(Park [2007]; Na[2004]). IL, COD는 정화복원 전과 비교하여 유사한 경향을 나타내었고, AVS는 정화복원 이후 크게 감소하였으나 선소 내측 SS1, SS2에서 과거 북서내만해역과 유사한 농도를 나타내었다.

가막만에 대하여 육상기원 유기물의 영향이 미치는 범위를 간접적으로 파악하기 위해 해저퇴적물 중 C/N 비(carbon/nitrogen ratio)를 계산하여 Fig. 6에 나타내었다. C/N 비 12 이상은 육상기원(terrestrial) 유기물의 기여를 나타내고, 6~9 범위는 식물플랑크톤 유래 유기물의 범위이며, 5~12 범위는 해역 자체 생물에 의한 해양기원(oceanic) 유기물을 의미하는 것으로 알려져 있다(Holligan *et al.* [1984]; Kim *et al.*[2012]; Kukul[1971]; Müller[1977]; Stein[1991]). 모든 조사 시기의 가막만 북서내만해역은 주로 해양기원의 유기물의 범위를 나타내었으나, 6월 26일 선소 내측 중에서는 점오염원과 가장 인접한 SS1, SS2 해역에서 주로 육상기원 유기물의 범위를 나타내었다.

한편, 현재 해양오염퇴적물 정화·복원 사업은 2013년부터 해양수산부가 고시한 '해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정'에 의거하여 진행되어야 한다(MOF[2018a]). 그 중, 부영

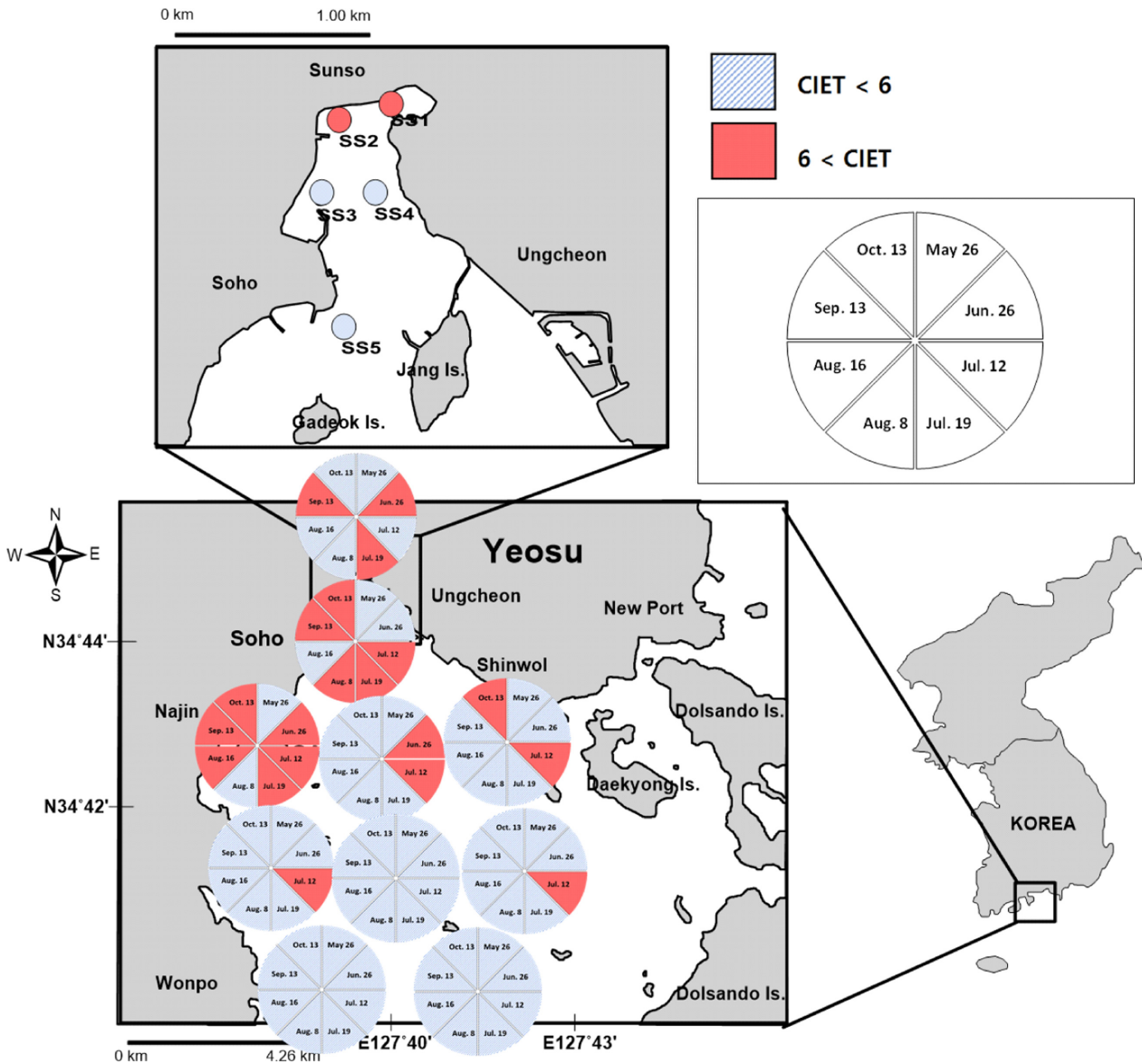


Fig. 7. The result of applying clean up index of eutrophication (CIET) in Sunso (June 26th) and the Gamak bay (from May 26th to September 13rd).

양화 정화지수(CIET)는 해저퇴적물 중 IL, COD, AVS 항목들로부터 각각 산출하고, 그 지수의 합계가 6 이상인 구역을 정화·복원 범위로 한다(MOF[2018a]). 본 연구에서 조사 시기별 CIET를 산출한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 6월 전소 내측에서는 점오염원과 인접한 SS1, SS2에서 CIET 기준 이상을 나타내었으며, 가막만 북서내만해역은 주로 수심이 주변 해역보다 다소 깊은 장도 남측(GA2), 호도리 측(GA3), 북서내만해역 중앙 측(GA4)에서 CIET 기준 이상을 나타내었다. 또한, 내만 측에서 조사 시기별로 기준 이상을 나타내는 반면에 외양 측에서는 모든 조사시기에서 기준 이하를 나타내어, 내만 측에 대한 부영양화에 대한 정화복원이 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 해양으로 유입되는 유기물은 외부유입원(external source)과 내부유입원(internal source)으로부터 기인하고 있다. 외부유입원은 점오염원(point source) 또는 비점오염원(non-point source)을 통해 육상기원 유기물이 해양으로 유입되는 것을 의미한다. 비점오염원은 시기별로 배출량의 변화가 크고 예측 및 정량화가 어려워 관리가 힘든 반면에, 점오염원은 배출원 및 배출단위가 쉽게 파악이 가능하여 과거에서부터 수질 관리를 위한 개선의 주 대상이 되어왔다(Son[2016]). 이에, 여수시는 가막만 인근 점오염원의 배출량 감소를 위해 2005년부터 여수하수종말처리장을 운용하여 2015년 기준 72,416ton/day를 처리하고 있다(WRMIS[2016]). 이러한 노력에도 불구하고, 2010년 가막만 인근 22개소 하천수 중 화학적산소요구량, 총 질소, 총 인 등의 일일 부하량 추정결과, 전소 내측의 점오염원이 여타 정점에 비해 많은 양이 부하되고 있어 부영양화에 대한 우려가 언급된 바 있다(NIFS[2010]).

또한, 국립수산과학원은 2017년 가막만 북서내만해역 인근 9개 점오염원 조사결과로부터, 비강우시기와 강우 일일의 유량에는 큰 차이가 나타나지 않았으나, 초기강우 시 화학적산소요구량, 총 질소, 총 인, 총 유기탄소 등의 유기물이 다량으로 유입되는 것을 보고한 바 있다(NIFS[2017]). 이러한 경향은 울산 태화강의 비점오염원의 초기강우시기 중 유입특성과 유사하였다(Son[2016]).

이와 유사한 사례로, 여수시 수정동 소재 신항 해역의 정화·복원 사업을 들 수 있다. 여수 신항해역은 인근 배후 도시로부터 유입되는 생활하수에 의해 해양수질 및 해저퇴적물환경에 대해 부영양화뿐만 아니라 중금속, PAHs 등 유해화학물질까지 영향을 받는 것으로 보고된 바 있다(Yu[2010]). 이후, 2011년에 여수 신항해역 중 내부유입원인 7개 하수관거를 전부 신항 외측으로 배수시킨 후 준설작업이 실시되었다. 그 후 2012~2015년 동안 일부 선박 활동 및 준설공사에 의해 영향을 받는 항목을 제외하고서 해양환경이 악화되지 않는 것이 보고되었다(KOEM[2015b]). 이러한 여수 신항해역의 모니터링 결과는 되풀이되는 가막만의 부영양화 방지를 위한 하수관거 개선의 필요성을 보여주는 사례로 사료된다. 게다가, 가막만의 내부 유입원의 개선은 부영양화뿐만 아니라 외부오염원 기인의 가능성이 있는 유해화학물질(PAHs, dibutyltin, zinc, lead, copper, mercury)의 개선도 기대가 된다(Kang[2018]).

반면에, 외부유입원 이외의 다른 유입원으로는 내부유입원을 들 수

있으며, C/N 비 결과를 보면, 가막만 북서내만해역의 유기물은 주로 해양기원의 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한 CIET 적용 결과에서는, 가막만 북서내만해역에서 조사 시기에 따라 유기물의 분포에 차이가 나타났으며, 특히 7월 및 8월에는 7일간의 짧은 조사 간격임에도 CIET 경향성에는 차이가 나타났다. 그중에서 7월 12일 조사시기에서 가장 많은 해역에서 CIET 기준 이상을 나타내었다. 이는 2017년 가막만 빈산소수괴가 가장 강하게 발생하였던 시기와 일치하였는데, 이러한 퇴적된 유기물과 빈산소수괴 발생은 밀접한 상호연관이 있는 것으로 언급된 바 있다(NIFS[2017]). 가막만 북서내만해역은 타 해역에 비해 상대적으로 얇은 수심으로 기상조건의 영향을 많이 받는 해역으로, 퇴적된 유기물의 분해 및 성층 형성이 원인으로 빈산소수괴가 발생한다(NIFS[2017]; Park *et al.*[1999]). 이에 환원환경이 되면 해저퇴적물로부터 무기영양염이 저층수 중으로 용출되고, 불량한 해수 교환으로 해저까지 일사량이 도달하여 저층에서도 식물플랑크톤 증식(bloom)이 가능한 것으로 알려져 있다(Kim *et al.*[2006]; Lee *et al.*[2003]; NIFS[2017]; Noh[2003]). 또한, 생활하수로부터 용존무기영양염을 공급받아 표층에서 증식한 식물플랑크톤이 최종적으로 해저퇴적물 중으로 퇴적되는 것이 토의되기도 하였다(Kim *et al.*[2006]).

이렇게 퇴적된 식물플랑크톤은 유기물로 작용하여 부영양화의 악순환이 반복된다. 특히, 본 연구에서는 대부분의 조사 시기 중 장도 남측(GA2), 호도리 측(GA3), 북서내만해역 중앙 측(GA4)에서 CIET 기준 이상을 나타내었다. 해당 해역은 주변해역에 비해 수심이 깊은 오목한 해저지형에 해당되며, 이에 기인한 불량한 해수 순환이 식물플랑크톤의 증식, 퇴적, 분해 과정을 가속시키는 것으로 추정되어왔다(Lee *et al.*[2003]; NIFS[2017]).

또한, 해당 해역들은 수하식 패류 양식어업이 주로 성행하고 있으며, 이에 가막만 북서내만해역의 대규모의 양식장으로부터 유기물이 지속적으로 유입되는 것 또한 문제로 언급되어왔다(Lee *et al.*[2003]; Noh[2003]; Yeosu City[2018]). 다른 연구 결과를 보면, 이들 유기물의 유입은 가막만 양식장의 저서다모류의 종 조성 및 군집구조에 영향을 미쳐 일반 비 양식장 해역과는 그 경향이 상이한 것이 보고된 바 있다(Jang and Shin[2016]).

이렇듯 가막만 내부오염원으로서 작용하는 원인들로는 단일적이 아닌 복합적으로 작용하여, 조사시기별로 가막만 북서내만해역에서는 유기물의 분포에 차이가 나타나는 것으로 판단된다. 그러나 좀 더 구체적인 조사시기별 내부유입원의 유입량 고찰을 위해서는, 내부오염원의 원인들을 조사시기별로 구분하여 유입량을 산정할 필요가 있다. 추후, 빈산소수괴 발생 전/중/후 시기에서, 양식장/비양식장 해역 및 빈산소수괴 발생/비발생 해역에 따른, 용존산소 소모율과 유기탄소의 산화율에 관한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

인위적으로 내부 오염원인 식물플랑크톤 증식을 개선하는 일은 쉬운 일이 아니지만, 퇴적된 유기물 개선과 성층 약화를 통해 빈산소수괴를 완화시키고, 용존무기영양염의 재순환을 저감시키는 것이 개선방안이 될 가능성이 있다. 이를 위한 방법으로는 퇴적물 개

선제, 준설 등을 통한 퇴적물 수거, 물 순환장치 등을 들 수 있다(NIFS[2017]). 또한, 해양수산부는 어장의 환경을 보전 및 개선하고 국민의 건강을 목적으로 어장환경기준을 규정하고 있으며, 기준 이상일 경우 어장관리해역의 대상 지정이 가능하고 어장휴식 계획을 수립할 수 있도록 규정하고 있다(MOF[2017]). 이에 장기적인 모니터링을 통해 기준 이상의 양식 어장에 대한 휴식계획의 수립이 필요하다.

이러한 선행 결과들로부터 고찰된 바와 같이 유기물의 유입원에 대한 고려를 하지 않은 채 정화·복원사업이 진행된다면, 부영양화가 되풀이되며 많은 인력, 시간, 비용을 낭비하게 된다. 또한, 이는 가막만의 고질적인 문제인 빈산소수괴의 지속적인 발생을 의미한다. 동년 빈산소수괴가 가장 강하게 발생한 7월 12일 조사 시기에 본 연구와 동일한 정점에 대해 수행된 저서생물 조사결과, 저서생물 출현량과 AVS, TOC, COD는 빈산소수괴가 발생하였던 장도 남측(GA2, $r^2=0.696$, $p<0.05$), 호도리 측(GA3, $r^2=0.696$, $p<0.05$), 북서내만해역 중앙 측(GA4, $r^2=0.695$, $p<0.05$)에서 유의한 상관성을 나타내었다(NIFS[2017]). 이는 빈산소수괴 및 퇴적된 유기물에 의해 저서생태계 교란이 일어났고, 그 악순환을 해소하지 않는다면 저서생태계의 악영향은 매년 반복될 것으로 판단된다(NIFS[2017]).

그러나, 현재까지 가막만에 대해서는 다방면으로 많은 연구가 진행되었으나, 빈산소수괴 발생 기구 및 부영양화 개선 방향에 관한 연구는 부족하여 이에 대한 체계적인 연구가 필요한 것으로 나타났다.

4. 결 론

전남 여수시 가막만은 패류 양식장으로서 중요한 수산자원의 생산해역에 해당된다. 그러나 매년 부영양화와 함께 빈산소수괴가 발생하여 해양환경에 악영향이 나타나고 있다. 가막만은 과거 해양오염퇴적물의 정화·복원을 통해 해양환경이 개선된 것이 보고되었으나, 유기물의 유입원을 고려하지 않은 채 진행되어 해양환경의 악영향이 반복되고 있다. 해저퇴적물 중 유기물 지표들은 대부분의 조사시기에서 내만 측에서 외양 측보다 높은 농도를 나타내었으며 주로 장도 남측, 호도리 측에서 주변 해역보다 높은 농도를 나타내었다. COD, AVS 및 TOC의 농도는 대부분의 조사 시기에서 국외 기준을 초과하여 개선이 필요할 것으로 판단된다. 해저퇴적물의 CIET 적용결과, 선소 내측의 점오염원과 인접한 해역, 수심이 깊은 장도 남측, 호도리 측, 북서내만해역 중앙 측에서 정화·복원이 필요할 것으로 사료된다. 향후, 점오염원/비점오염원 등의 외부오염원과 양식장, 식물플랑크톤의 증식 등의 내부오염원을 고려한 정화·복원사업이 진행되어야 할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2017년도 국립수산물품질관리원 수산시험연구사업인 남해 연안어업 및 환경생태 조사(R2017032)의 지원으로 수행된 연구입니다. 조사 및 도움을 주신 많은 분들께 감사의 말씀드립니다.

References

- [1] Busan Regional Office of Oceans and Fisheries, 2008, A report of working design service for purification/restoration service on polluted sea area in Busan Southern port, Kunhwa, LTD, Seoul.
- [2] Canada Ontario, Guidelines for identifying, assessing and managing contaminated sediments in Ontario, <https://www.ontario.ca/document/guidelines-identifying-assessing-and-managing-contaminated-sediments-ontario/identification-and-assessment>, 2016 (accessed 2016.11.01).
- [3] Holligan, P.M., Harris, R.P., Newell, R.C., Harbour, D.S., Head, R.N., Linley, E.A.S., Lucas, M.I., Tranter, P.R.G and Weekly, C.M., 1984, Vertical distribution and partitioning of organic carbon in mixed, frontal and stratified waters of the English Channel, Mar. Ecol. Prog. Ser., 14, 111-127.
- [4] Jang, S.Y. and Shin, H.C., 2016, Differences in the community structures of macrobenthic polychaetes from farming grounds and natural habitats in Gamak bay, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 19(4), 297-309.
- [5] JFRCA (Japan Fisheries Resource Conservation Association), 2013, The criteria for fisheries water, JFRCA, Tokyo.
- [6] Jinhae City, 2007, A report of working design service for dredging service on polluted sea area in Haengam bay, Kunhwa, LTD, Seoul.
- [7] Jung, Y.S., 2006, Evaluation of odor pollution from marine sediment before and after dredging, M.S. thesis, Dept. Environ. Eng., Yeosu National Univ., Yeosu, Korea.
- [8] Kang, S.D., 2018, Improvement effect of purification and restoration on sediment from polluted sea area: focusing on the sea areas of Yeosu New port and Sunso, Ph.D. dissertation, Dept. Fish. Sci., Chonnam National Univ., Yeosu, Korea.
- [9] KHOA (Korea Hydrographic and Oceanographic Agency), The numerical analysis of tidal current in coastal sea area of Korea, <http://www.khoa.go.kr/tdnet/>, 2017 (accessed 2017.11.01).
- [10] Kim, J.B., Lee, S.Y., Yu, J., Choi, Y.H., Jung, C.S. and Lee, P.Y., 2006, The characteristics of oxygen deficient water mass in Gamak bay, J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng., 9(4), 216-224.
- [11] Kim, J.B., Park, J.I., Jung, C.G., Choi, W.J., Lee, W.C. and Lee, Y.H., 2010a, Physicochemical characteristics of seawater in Gamak bay for a period hypoxic water mass disappearance, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 16(3), 241-248.
- [12] Kim, J.H., 2006, A study on the distribution of organochlorine compounds in Gwangyang bay and Gamak bay, M.S. thesis, Dept. Fish. Sci., Chonnam National Univ., Yeosu, Korea.
- [13] Kim, P.J., Shon, S.G., Park, S.Y., Kim, S.S., Jang, S.J., Jeon, S.B. and Ju, J.S., 2012, Biogeochemistry of metal and nonmetal elements in the surface sediment of the Gamak bay, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., 18(2), 67-83.
- [14] Kim, Y.H., Choi, M., Jung, R.H., Yoon, S.P. and Yu, J., 2010b, Distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons and fecal sterols in sediment from Gamak bay and their impact on benthic

- community, *J. Korean Soc. Environ. Anal.*, 13(1), 1-10.
- [15] KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2011, A report of working design for purification service on polluted sediment in Ulsan Bangeujin port, Hyein E&C, LTD, Seoul.
- [16] KOEM, 2013, The environmental preservation sea areas (the benthic environment), KOEM, Seoul.
- [17] KOEM, 2015a, A report of working design service for purification service on polluted sediment in Busan Tadaepo port, SEIL Engineering Co., LTD, Seoul.
- [18] KOEM, 2015b, The report on the marine environmental monitoring for purification of polluted sediment in the Yeosu New port (3rd years), Ocean Graphic Company, LTD, Seoul.
- [19] Kukul, Z., 1971, *Geology of recent sediments*, first ed., Academic Press, Czech.
- [20] Lee, J.S., Kim, K.H., Yu, J., Jung, R.H. and Ko, T.S., 2003, Estimation of oxygen consumption rate and organic carbon oxidation rate at the sediment/water interface of coastal sediments in the south sea of Korea using an oxygen microsensor, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 8(4), 392-400.
- [21] Lee, T., 2015, Sediment oxygen consumption rate and hydrogen sulfide release by dissolved oxygen depletion in hypoxic area of the Gamak bay, Korea, *J. Wetl. Res.*, 17(3), 293-302.
- [22] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries of Korea), 1999, Development of monitoring methods for mariculture farm, KIOST, Pusan.
- [23] MOF, Notifications for the fisheries management No. 3, <http://www.law.go.kr/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000092609>, 2017 (accessed 2017.07.21).
- [24] MOF, Regulations of the survey on marine polluted sediment and the range of purification/restoration service No. 2, <http://www.law.go.kr/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000114789>, 2018a (accessed 2018.02.14).
- [25] MOF, The Korean standard methods for marine environment in the marine environmental management No. 4, <http://www.law.go.kr/admRulInfoP.do?admRulSeq=2100000170850>, 2018b (accessed 2018.12.05).
- [26] Müller, P.J., 1977, C/N ratios in Pacific deep-sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays, *Geoch. Cosmochim. Acta*, 41(6), 765-776.
- [27] Na, G.H., 2004, Analysis on effect of the purification service in Chonnam coastal sea area, in *porc. of Chungnam Univ. symposium 12th*, Chungnam, Korea, 53-80.
- [28] NIFS(National Institute of Fishery Science in Korea), 2010, A survey on the actual conditions of fishery farming environment, Chonnam National Univ., Yeosu.
- [29] NIFS, 2017, Study on mass balance and changing benthic ecosystem in hypoxic water area of the Gamak bay, Chonnam National University, Yeosu.
- [30] Noh, I.H., 2003, The distribution of organic matter and its origin in core sediment in Gamak bay, Southern Korea, M.S. thesis, Dept. Fish. Sci., Yeosu National Univ., Yeosu, Korea.
- [31] Paeng, W.H., 2003, A study on the seawater and sediment quality around farm ground in Gamak bay, M.S. thesis, Dept. Mar. Development, Yeosu National Univ., Yeosu, Korea.
- [32] Park, S.E., Cho, K.D., Hong, C.H., Kim, D.S. and Cho K.W., 1999, An effect of wind on circulation in Kamak bay, *J. Korean Fish. Soc.*, 32(5), 674-679.
- [33] Park, S.Y., 2007, Long-term variation of benthic polychaetous community in the north western area of Gamak bay, M.S. thesis, Dept. Fish. Ocean Sci., Chonnam National Univ., Yeosu, Korea.
- [34] Son, Y., 2016, Analysis of nonpoint source pollutants in urban stormwater runoff, *J. Wetl. Res.*, 18(1), 94-99.
- [35] Stein, R., 1991, Accumulation of Organic Carbon in Marine Sediments: Results from the deep sea drilling project/ocean drilling program (DSDP/ODP), Springer Verlag, Berlin.
- [36] WRMIS (Water Resources Management Information System in Korea), The operation data in Yeosu Sewage Treatment Plant (STP), http://www.wamis.go.kr/WKE/WKE_ESTSWMS_LST.aspx?code=41050004&page=WKE_ESTSWAA_LST.aspx&cd=46, 2016 (accessed 2018.04.01).
- [37] Yeosu City, 2001, A report on survey of the pre-marine environmental monitoring according to dredging projects on polluted sea area (Sunso), Yeosu City, Korea.
- [38] Yeosu City, The figure of fishery farming area in the Gamak bay, Yeosu, http://www.yeosu.go.kr/home/site/yeosu/img/sub/view_06.jpg, 2018 (accessed 2018.08.01).
- [39] Yoon, S.P., Kim, Y.J., Jung, R.H., Moon, C.H., Hong, S.J., Lee, W.C. and Park, J.S., 2008, Benthic environments and macrobenthic polychaete community structure in the winter of 2005-2006 in Gamak bay, Korea, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 13(1), 67-82.
- [40] Yu, J.H., 2010, A study on the recent trend of organotin pollutants in surface sediments around Gwangyang bay, M.S. thesis, Dept. Fish. Sci., Chonnam National Univ., Yeosu, Korea.

Received 20 February 2019

Revised 6 March 2019

Accepted 21 May 2019