

## 어장정화·정비 방법에 따른 어장환경 개선효과 분석 및 정책 제언

이대인<sup>1,†</sup> · 김형철<sup>2</sup> · 이원찬<sup>3</sup>

<sup>1</sup>국립수산과학원 어장환경과 연구사

<sup>2</sup>국립수산과학원 연구기획과 연구관

<sup>3</sup>국립수산과학원 어장환경과 과장

# Analysis of Environmental Improvement and the Policy Proposal according to Mariculture Sediment Purification and Maintenance Projects

Dae In Lee<sup>1,†</sup>, Hyung Chul Kim<sup>2</sup>, and Won Chan Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Scientific Officer, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

<sup>2</sup>Senior Scientific Officer, Research and Development Planning Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

<sup>3</sup>Director, Marine Environmental Management Division, National Institute of Fisheries Science, Busan 46083, Korea

### 요 약

어장정화·정비사업의 4가지 유형인 해저 퇴적물 준설, 해저 경운, 어장개선물질 살포 및 어장재배치(휴식)에 따른 퇴적물의 환경개선효과를 현장 실증실험을 통해 비교 분석하였고, 정책 활용성 제고를 위한 방안을 제시하였다. 총유기탄소의 단기적(60일) 저감은 준설과 개선물질의 살포를 통해서 가장 높았고, 산화발성황화물은 준설에 의해 많이 개선되었다. 특히, 인위적인 준설 및 개선장비가 필요하지 않은 약 11개월간의 어장휴식은 총유기탄소와 산화발성황화물의 저감효과를 상당히 높이는 것으로 평가되었다. 산화발성황화물이 유기탄소보다는 초기 반응이 빠르고 개선효과가 상대적으로 더 컸다. 초기 농도가 매우 오염된 지역에서의 준설 및 어장재배치 효과는 상대적으로 명확하게 나타나는 반면, 초기 농도가 낮거나 어장환경기준을 만족한 곳에서는 정화·정비사업에 대한 효과는 뚜렷하지 않은 것으로 평가되었다. 유기물의 개선 측면에서 어장휴식, 개선물질 살포와 준설 등이 약 10~30%의 효과를 나타내었지만, 비용 소모와 현장 적용성 및 2차 환경오염 가능성을 고려하면 자연정화능력을 활용한 어장재배치에 따른 휴식이 효과적일 것이다. 향후 정책적 고려사항으로 바다 자체가 갖고 있는 자연정화능력을 활용하는 어장재배치에 따른 양식품종 및 지역별로 회복지표와 회복기간을 산정하여 어장휴식에 대한 근거 마련과 휴식년제 적극 도입, 각 오염원인 인자별 기여도 평가를 위한 안정동위원소 조사 등의 강화로 오염원과 오염물질 관리체계 구축, 준설물질과 굴 폐각의 어장환경개선 등 활용목적에 따라 보다 차별된 기준 정립, 어장정화·정비사업에 따른 효과 분석과 지속적 관리체계를 위한 모니터링과 통합 정보시스템(플랫폼) 구축을 지속적으로 추진해야 할 것이다.

**Abstract** – This paper analyzed short-term environmental improvements of the sediment quality (organic pollution) and proposed several methods for management policy according to the four types of purification and maintenance projects in the marine aquaculture farms such as sediment dredging, plowing, coating the improving material (in-situ capping), and farm relocation (rest for a period). The decrease of TOC (Total Organic Carbon) concentration was shown the highest through the sediment dredging and capping, while that of AVS (Acid Volatile Sulfide) was improved by dredging. Especially, the initial concentration of TOC and AVS reduced considerably in the farm relocated during 11 months. AVS had more rapid initial response and better improvement than TOC relatively. It was assessed that the dredging and the relocation in the area which had high contamination of sediment had distinct improvements. On the other hand, the results observed in the area which had low contamination and satisfy-

<sup>†</sup>Corresponding author: dilee70@korea.kr

ing environmental standards were insignificant. In the aspect of the organic pollution improvement, resting, dredging, and coating the material were diagnosed to have about 10~30% improvement. But considering the expense, field applicability, and the probability of the second pollution impact, the resting by marine self-purification will be more effective. Henceforth, as for the policy consideration, it is necessary to implement measures as follows: obtaining the reasonable evidence for the natural recovery concerning restoration index and period by farming species and region, enhancing the systematic pollutant management and the contribution assessment by each pollution source, setting further differentiated guideline according to its purposes such as environmental improvement for the dredging material and seashell, and establishing a monitoring and information system (platform) to share and analyze the effects of purification and maintenance projects.

**Keywords:** Environmental Improvement(환경개선), Sediment(퇴적물), Marine Aquaculture Farm(어장), Purification and Maintenance Project(정화·정비사업), TOC(총유기탄소), AVS(산화발성황화물)

## 1. 서 론

연안 해역은 육상으로부터 오염부하, 공유수면 매립과 구조물 설치 등의 해역이용·개발 행위 및 양식장의 자가 오염 등 다양한 요인에 따라 수질과 퇴적물 환경이 영향을 받고 있으며, 일부 지역은 오염이 진행되거나 심화되고 있다. 특히 우리나라는 대부분의 양식장이 해수교환이 좋지 않는 내만 역에 집중되어 있고, 장기적이고 밀식형태의 수면 이용 및 노후화 등에 따라 어장환경상태가 양호하지 못한 특성을 보이거나, 양식생물 먹이질의 변동 및 생산성 저하가 발생하고 있다(Oceans and Fisheries Policy Institute[2020]).

연안 어장 중 어류가두리 양식장에서는 섭이되지 않은 과잉 사료와 양식생물의 배설물들이 해저로 침강하여 양식장 아래 퇴적층에 유기물이 과도하게 축적되고 있다(Hargrave *et al.*[1993]; Holmer and Kristensen[1992]). 패류 양식장 또한 주요 먹이원이 식물플랑크톤이지만 무기물, 유기물 형태의 배설물이 해저로 공급될 수 있다(Troell *et al.*[2003]). 이처럼 양식종은 다르지만 다양한 형태의 양식어장은 자체의 환경부하와 외부의 영향에 의해서 양식활동이 없는 다른 수면에 비해 상대적으로 퇴적물 환경이 악화될 수 있다. 연안 양식장은 양식을 하지 않는 지역보다 퇴적물 내 유기물 농도는 약 10배 정도 높다고 알려져 있다(Holmer and Kristensen[1992]). 이렇게 양식장 퇴적물에 공급되는 유기물은 수층에서 용해되어 부영양화를 초래하거나, 호기성 분해에 의해 과도한 산소소모를 유발하여 저층수에 빈산소수괴를 발생시키기도 하고, 혐기성 분해에 의해 독성을 지닌 황화수소를 발생하여, 저서생물 뿐만 아니라 양식생물에도 직접적인 위협을 일으킬 수도 있다(Giles[2008]; Hall *et al.*[1990]; Hargrave *et al.*[2008]).

우리나라에서 양식장이 밀집한 남해안 주요 내만의 어장환경모니터링(NIFS, 2020)을 통한 연도별 퇴적물의 환경상태를 진단해보면, 유기물 함량의 지표인 COD가 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, 진해만과 마산만은 일본의 양식장 부영양화기준인 20 mg/g-dry를 초과하였다(Fig. 1). 또한, 황화물 지표인 AVS도 대체로 증가하는 양상이고 마산만과 진해만은 우리나라 어장환경기준인 0.5 mg/g-dry를 초과하는 경우도 나타나고 있다. 물론 서해안과 동해안은 다른 양상을 보일 수 있지만, 폐쇄성이 강하거나 양식장이 밀집한 곳은 지역 분포 특성을 고려하더라도 대체적으로 오염도가

상대적으로 증가하는 양상이 나타나고 있다.

오염된 어장환경을 개선하기 위해서는 다양한 방법이 있을 수 있지만, 많은 시간과 예산이 필요할 뿐만 아니라 광범위한 해역특성에 맞는 효율적이고 현장 적용성이 타당한 기술이 요구되어 쉽게 구체적인 방법론적으로 접근하기 어려운 것도 사실이다. 육상에서의 하수도 정비 등 육상오염부하량을 사전 예방적으로 저감하는 방안도 필요하고, 어장환경에 영향을 미치지 않는 범위에서 양식 개체수 조절 및 생산을 도모하는 적정 수용력 산정도 필요해지고 있다. 한편, 사후 어장환경관리측면에서도 오염된 퇴적물 등 환경을 개선하거나 회복시키는 방안이 지속적으로 강구되고 있지만, 이에 대한 구체적인 연구조사결과도 부족할 뿐만 아니라 체계적인 조사가 이루어지지 않았다. 어장정화사업은 「어장관리법」에 근거를 두고 있으며, 어장환경을 개선하기 위해 양식어장 정화사업, 연안 어장 환경개선사업, 해양쓰레기 수거사업 등 다양한 사업이 추진되고 있으나, 긍정적 효과에 대하여 명확하게 밝혀진 것이 부족하고 예산확보 어려움 등으로 실적이 저조한 것으로 보고되었다(KMI[2004]). 특히, 사업 전후 생산성 뿐만 아니라 어장환경 개선에 대한 효과 분석은 거의 이루어지지 않았다. 남해안 가막만, 득량만, 고성만 등 일부 지역에서 어장정화사업의 효과로 인해 용존산소의 증가와 COD의 감소가 나타나고, 어업생산성이 증가되었다는 자료가 일부 발표되었지만(KMI[2014]), 환경개선 지표로 고려되고 있는 퇴적물에 대한 개선은 평가되지 않았다. 최근에 추진 중인 ‘청정어장 재생사업’은 어장이 밀집된 곳의 오염된 퇴적물 등을 정화하여 어장을 건강하게 만들고 생산성 향상을 도모하는 목적으로 효과 분석에 관심을 두고 있다.

한편, 「해양환경관리법」 제18조(해양환경개선조치)에 근거한 오염퇴적물 정화사업(오염된 해저퇴적물의 수거 및 수거물의 처리, 처분 또는 피복 등)은 1988년 마산만을 시작으로 해양퇴적물의 오염도가 높은 해역에 대해 준설 등의 정화사업을 지속적으로 수립·추진하고 있고, 2020년까지 15개 해역의 정화사업을 통해 약 5,406 천 m<sup>3</sup>의 오염퇴적물을 수거·처리하였다. 그러나, 여전히 다수 해역에 오염퇴적물이 잔존하고 있는 것으로 보고되고 있다(KIOST[2016]). 이러한 정화사업은 대부분 축산항, 주문진항, 청초호, 목호항, 여수선소 및 구항·신항, 영일만항, 부산 용호만, 다대포항 및 남항, 울산 방어진항과 장생포항, 진해 행암만 등 주요 항만구역 주변에 집중

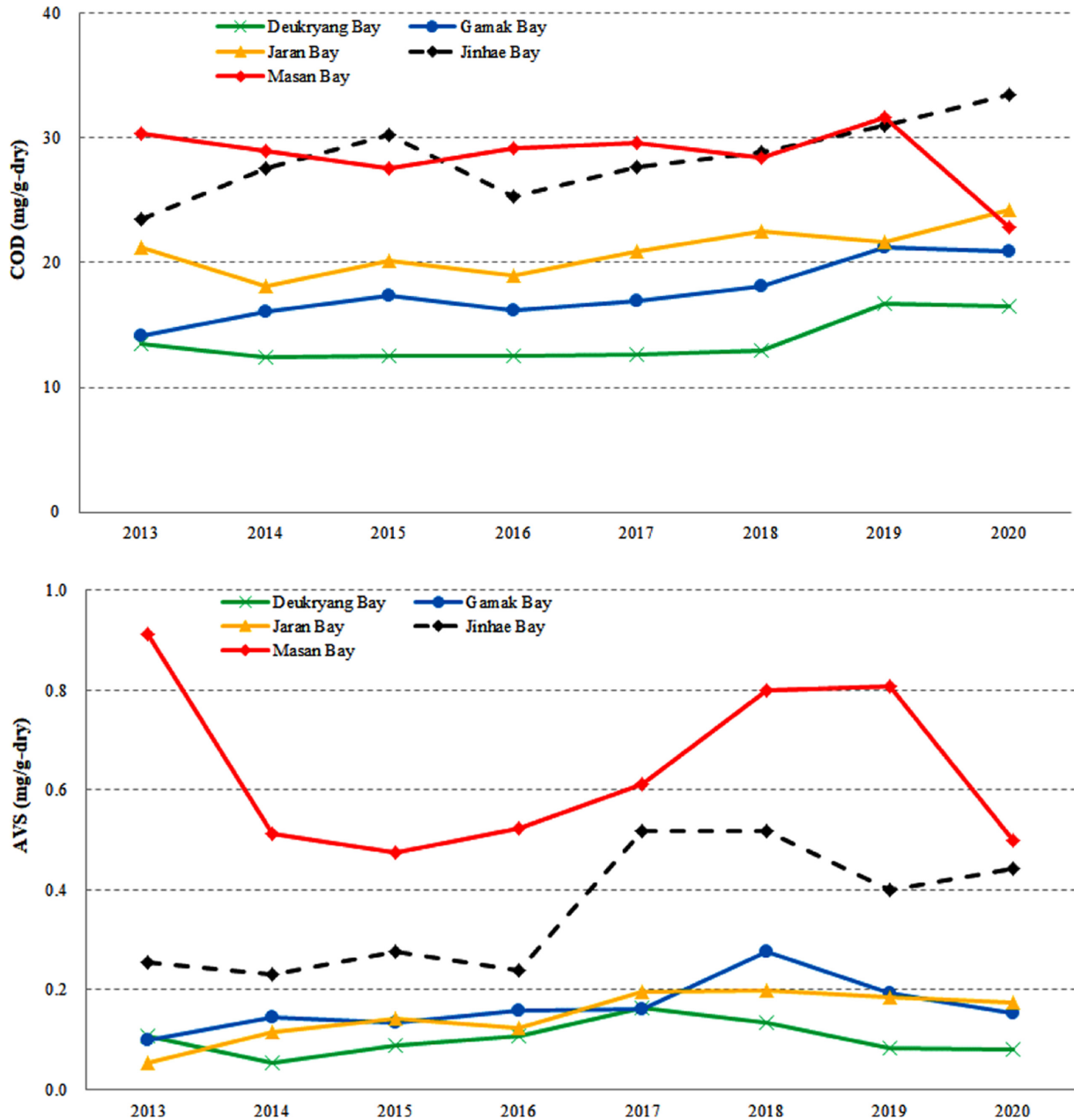


Fig. 1. The annual changes of sediment pollution indicators of the major aquaculture farms in the south coast of Korea.

하고 있고, 타당성조사, 실시설계, 정화사업 수행, 해양환경모니터링(5년 원칙)의 절차를 거쳐 시행하고 있는데 일부 지역에서는 개선효과가 나타나고 있지만, 그 외 다른 지역은 큰 변화가 없는 것으로 알려져 있다. 정화사업 후 환경개선에 대한 모니터링 결과의 체계적 분석 및 추가적인 이행조치에는 미흡한 부분도 나타나고 있다.

연안해역의 오염퇴적물에 대한 개선은 상기에서 언급한 바와 같이 대부분 주요 항만구역 주변에서 지속적으로 준설사업을 추진하고 있지만, 어장구역에 대한 실질적인 개선책은 미흡한 상황이다. 현행 「어장관리법」에 따른 어장정화·정비는 “어장의 퇴적물이나 어장에 버려진 폐기물을 수거하거나 처리하는 일”, “어장의 바닥을

갈거나 어장의 바닥에 흙이나 모래를 새로 까는 일” 그리고 “어장에 설치된 시설물을 다시 배치하는 일”로 규정되어 있다. 즉, 어장청소, 해저경운, 개선물질 피복과 어장재배치에 따른 휴식의 개념이 포함될 수 있다. 현재 면허 등을 받은 어장에 대해서는 어업인에게 청소의무가 부여되어 있으며, 대부분은 페어구 등 쓰레기를 수거하는 상황이고, 지방자치단체에서 실시하는 어장정화·정비사업 또한 제한된 구역에서 제한된 방법(준설 등)을 실시하고 있지만, 효과에 대한 불확실성과 함께 모니터링 자체가 이루어지지 않고 있는 상황이다.

이러한 오염된 어장환경을 개선하기 위해서는 자연적인 방법, 인

위적인 개선물질·장비를 고려하는 외과적인 방안 등 다양한 방법들이 시도되고 있고(Asaoka and Yamamoto[2010]; Bae[2011]; KIMST[2017]; Park *et al.*[2011]), 일부 실내 실험이나 소규모 현장에서 실험을 통해서 유기물, 중금속, 영양염류의 개선효과가 나타난다고 제시하고 있지만, 전술한 바와 같이 광범위한 실제 어장에 대한 현장 적용성, 부유사 등 2차 오염물질 유발, 대규모의 시간 및 비용 소모 측면에서 효과적인 방법을 선택하기가 쉽지 않다는 점이다. 특히, 어장에 대한 실증적인 조사가 거의 이루어지지 않고 있다. 최근에는 오염된 퇴적물을 준설하는 방식에서 벗어나 퇴적물을 현장에서 정화하는 환경 친화적인 기술 개발 및 자연정화능력을 활용한 어장휴식에 대한 관심이 높아지고 있다.

이러한 배경하에서, 본 논문은 국내 처음으로 어장정화·정비사업의 개념에 포함된 4가지 어장환경개선사업 유형을 거의 동일한 조사기간 내에 현장 실증조사를 통해 어장환경개선 효과를 비교·분석하였다. 즉, 어장개선물질 투입, 해저 경운, 해저 퇴적물 준설 및 어장재배치에 따른 어장휴식에 의한 해저퇴적물의 환경변화와 개선 정도를 평가하였다. 이를 통해 각 개선사업의 장·단점, 효과 및 향후 정책 활용성 제고를 위한 방안을 제시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 조사 지역 및 정화·정비 방법

어장정화·정비사업의 4가지 유형에 따른 어장환경개선 효과를 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 4곳에서 현장 실증조사를 실시하였다.

A 지역은 퇴적물 준설 구역으로 경남 창원시 진해항(행암만) 내측의 유압식 준설현장이다. 이곳은 수심이 5~7 m로 2015년부터 해양환경공단의 “행암만 오염퇴적물 정화사업”에 의해 준설이 진행된 지역으로 현장조사는 해양수산부와 해양환경공단의 협조를 구해 2017년 9월 25일부터 11월 24일까지 실시하였다. 준설이 진행되고 있는 준설 중심부에 실험구를, 외측에 대조구를 설정하였고, 준설 전과 준설 중일 때, 그리고 준설 후 30일과 60일이 경과한 시점에 시료를 채취하였다.

B 지역은 어장 재배치(이동)에 따른 어장휴식지역으로 경남 통영시 용남면의 수도와 경남 거제시 사등면의 가조도 사이에 위치한 수하식 굴양식장이다. 기존 어장은 면적이 2.8ha로 20년간 운영되다가 생산량 저하 등의 이유로 2016년 6월 30일 대체어장이 개발되어 철거된 곳이다. 조사해역의 수심은 13~16 m 범위로 기존 어장지역에 실험구를, 외측에 대조구를 설정하여 2016년 7월부터 2017년 12월까지 휴식 경과시간에 따른 시료를 채취하였다.

C 지역은 어장환경 개선물질 살포 지역으로 경남 고성군 삼산면 두포리 인근 해상이고, 실험구와 대조구를 설정하여 2017년 5월 12일부터 7월 3일까지 조사를 진행하였다. 본 연구에 사용된 개선물질(C-1 type)은 주로  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 로 구성된 물질이다. 조사에는 5 m×5 m 규모의 방형구를 5 m 간격으로 설치하여 개선물질 A를 각각 1 kg/m<sup>2</sup>, 5 kg/m<sup>2</sup>, 10 kg/m<sup>2</sup>, 15 kg/m<sup>2</sup> 살포하였다. 개선물질 살포 전, 살포 후를 구분하여 10일 간격으로 50일의 시간 경과에 따른 변화를 분석하였다.

D 지역은 해저경운장비를 이용한 지역으로 충남 태안반도의 천

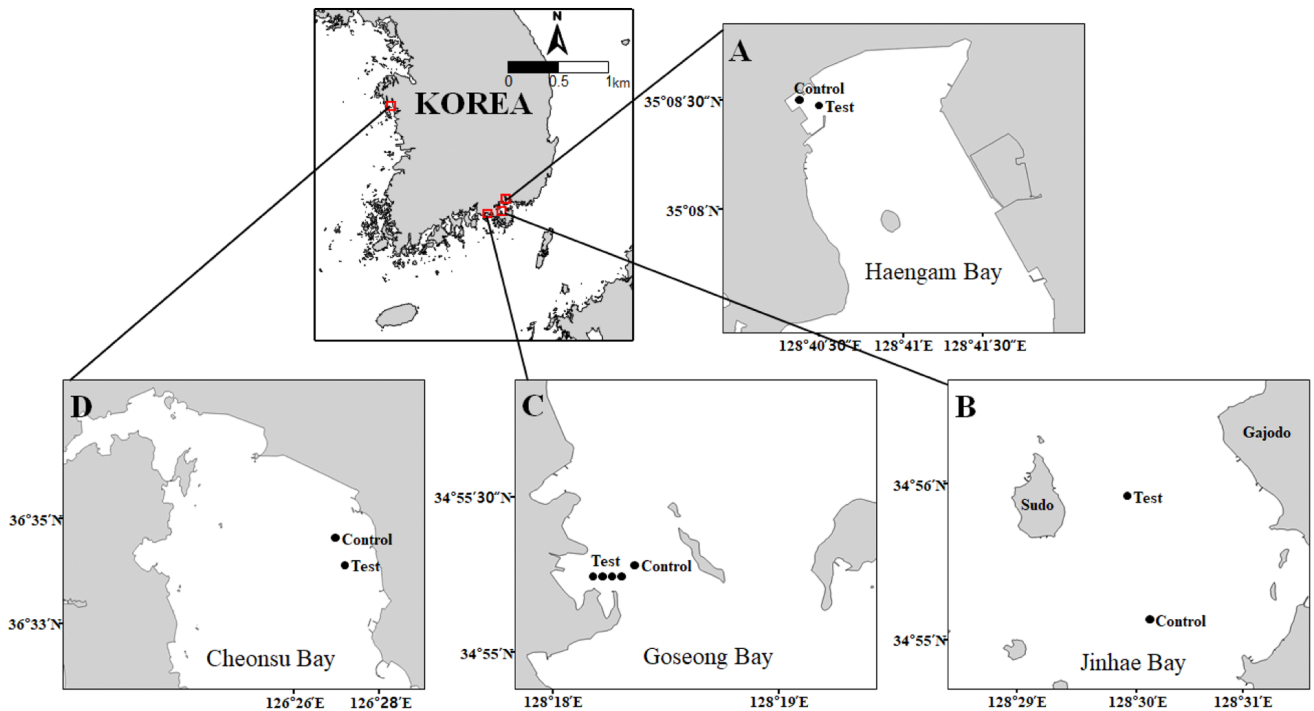


Fig. 2. The study area of purification and maintenance projects in marine aquaculture farms of Korea (A: sediment dredging, B: farm relocation (rest), C: coating the improving material, D: sediment plowing).

수만에 위치한 홍성군 상황리 연안이다. 조사해역은 만조 시 수심 4~5 m로 만내에서는 각종 양식어업과 어선어업을 하고 있었으며, 육역에는 서산방조제와 공원, 휴양시설이 함께 위치하고 있다. 현장조사는 2017년 8월 19일부터 10월 18일까지 진행하였다. 경운 작업이 진행되는 지역의 중심부를 설정하고, 경운 장비의 작업 전과 작업 중일 때, 그리고 작업 후 30일과 60일이 경과한 시점에 시료를 채취하였다.

2.2 시료채취 및 분석방법

퇴적물 시료는 표면적 0.05 m<sup>2</sup>의 채니기(Van veen grab sampler)를 이용하여 표층퇴적물(<2 cm)을 채취하였으며, 채취된 시료는 현장에서 냉동 보관하여 실험실로 운반하였다. 분석항목은 어장환경기준인 총유기탄소(Total Organic Carbon) 및 산휘발성황화물(Acid Volatile Sulphide)로 해양환경공정시험기준(MOF[2015])에 따라 분석하였다. TOC 분석은 고온으로 산화시켜 분해된 유기물의 탄소량을 측정하는 방법으로 본 연구에서는 동결건조시킨 시료를 염산으로 산화시킨 다음 TOC Analyzer로 분석하였고, AVS 측정 시 황검지방법은 검지관에 흡수되는 황의 양을 읽어 정량하는 방법이다. 한편, 해양오염퇴적물의 정화·복원에서 사용하는 정화지수는 부영양화지수(CIET)와 유해화학물질 정화지수(CIHC)가 있는데, 부영양화지수는 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), AVS가 포함되고, 유해화학물질 정화지수는 중금속, PAHs, PCBs, DDT 등이 활용되고 있다. 본 논문에서는 다양한 분석항목마다 시간에 따른 변화와 개선효과가 다를 수 있으므로 비교 항목을 단순화시켰고, 특히 어장환경개선이 초점이므로 「어장관리법」에 따른 퇴적물의 어장환경기준을 적용하였다.

3. 결 과

3.1 퇴적물 준설에 따른 환경변화

행암만 내의 준설 전후 60일간의 표층 퇴적물 오염도의 변화를

Fig. 3에 제시하였다. 준설을 실시한 구역의 총유기탄소(TOC)는 준설 전 19.34 mg/g<sub>dry</sub>에서 준설 중에는 15.59 mg/g<sub>dry</sub>로 상당히 감소하였고, 그 이후 60일간은 14.81~15.30 mg/g<sub>dry</sub> 정도로 일정한 상태를 나타내었다. 반면, 준설구역에서 이격된 대조구는 준설 전 19.70 mg/g<sub>dry</sub>였고, 준설 및 준설 이후는 다소 농도가 증가하다가 일정한 양상(20.80~21.44 mg/g<sub>dry</sub>)을 보였다.

산휘발성황화물(AVS)은 전반적으로 총유기탄소와 비교해서 유사한 경향을 보였다. 다만, 변화의 폭이 상대적으로 컸다. 즉, 준설 구역에서는 준설 전 1.48 mg/g<sub>dry</sub>, 준설 중에는 0.32 mg/g<sub>dry</sub> 정도로 대폭 감소하였고, 그 이후 점차 감소하다가 일정한 수준(0.06 mg/g<sub>dry</sub>)을 나타냈다. 대조구도 초기 값은 준설구역과 유사하였지만, 준설 이후에는 농도가 대체적으로 감소하지 않고 증가(1.79~2.10 mg/g<sub>dry</sub>)한 특성을 보였다.

3.2 어장 재배치(이동)에 따른 환경변화

진해만 내 수도 인근에서 운영 중이던 패류(굴) 양식장을 재배치(이동)시킨 후 기존 어장구역에서의 17개월 동안 표층 퇴적물에서의 오염도의 변화를 Fig. 4에 제시하였다. 총유기탄소(TOC)는 이동 전 35.00 mg/g<sub>dry</sub>에서 이동 후 한 달 기간에 24.80 mg/g<sub>dry</sub>로 대폭 감소하였다. 그 이후 증감(24.75~32.65 mg/g<sub>dry</sub>)을 반복하다가 1년 이후 다시 점차 증가하였지만, 초기 값보다는 낮았다. 대조구는 실험구보다는 농도가 낮았고, 증감패턴은 실험구와 유사한 경향을 보였다. 특히, 이동 전 초기 농도가 60일 후 약 31.75 mg/g<sub>dry</sub>으로 단기적 감소가 나타났다.

산휘발성황화물(AVS)의 변화는 총유기탄소와 비교해서 어장 이동 후 농도 감소가 뚜렷하였다. 어장 이동 전 0.80 mg/g<sub>dry</sub>에서 한 달 후 0.40 mg/g<sub>dry</sub> 정도로 급격하게 감소한 후 다소의 증감은 있지만 8개월까지 느린 속도로 감소경향을 보이다가 다시 점차 증가하는 양상을 나타내었다. 그러나, 그 증가한 농도의 값은 초기 값에 비해 상당히 낮았다. 대조구에서는 뚜렷한 감소경향은 나타나지 않고 증감 패턴을 보이다가 어장을 이동시킨 구역과 유사하게 다시

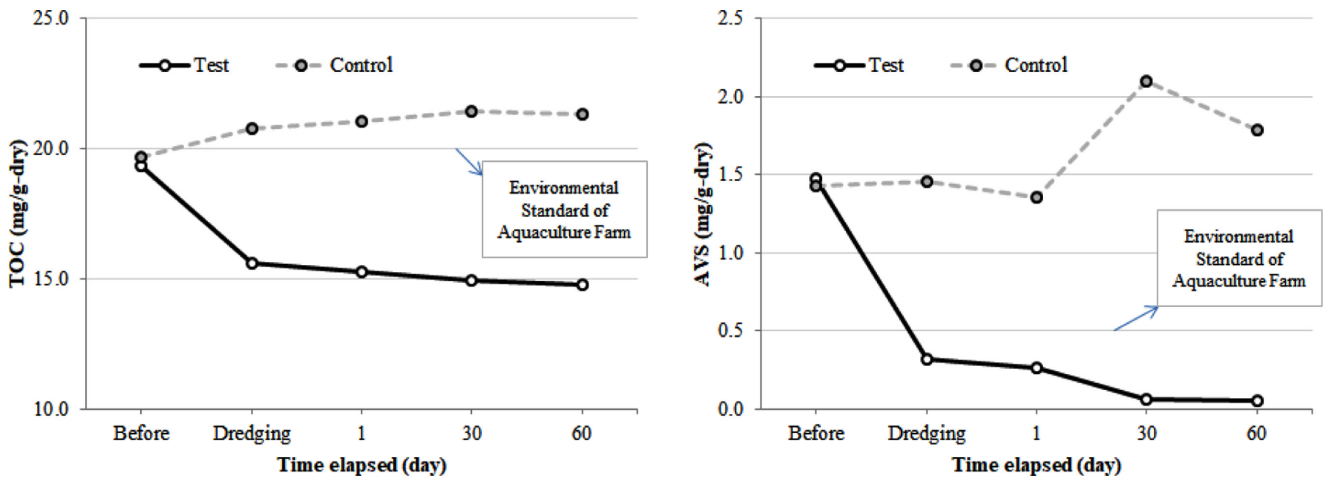


Fig. 3. The temporal changes of sediment pollution by sediment dredging in Haengam Bay.

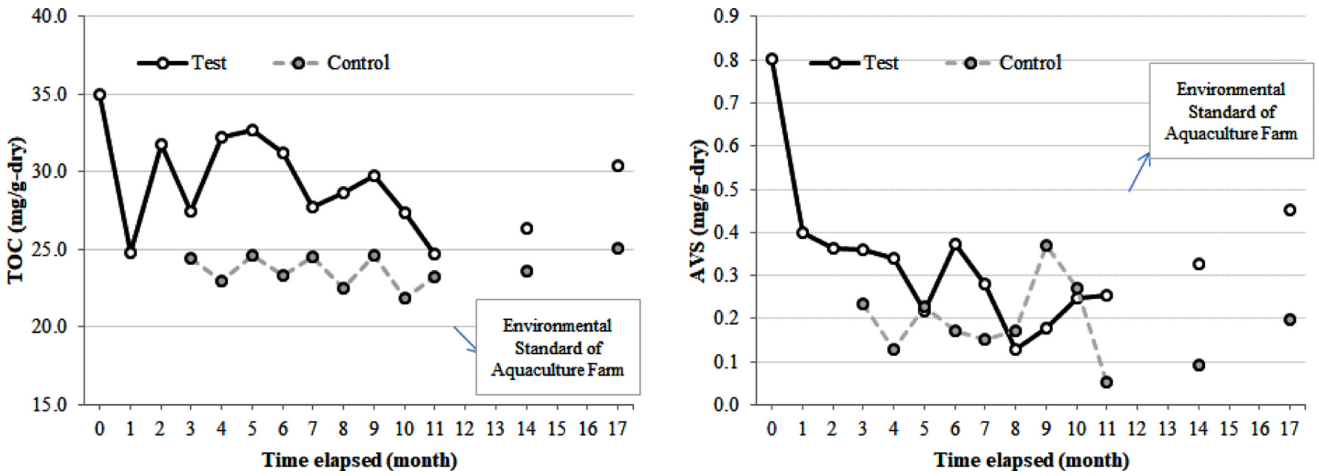


Fig. 4. The temporal changes of sediment pollution by shellfish farm relocation (temporary break) in Jinhae Bay.

점차 증가하는 특성을 나타내었다. 약 60일간의 변화를 살펴보면 초기 농도 0.80 mg/g<sub>dry</sub>에서 0.36 mg/g<sub>dry</sub>으로 상당히 감소된 것으로 평가되었다.

3.3 개선물질 살포에 따른 환경변화

경남 고성군 연안에서 어장퇴적물 오염도를 개선하기 위해 개발된 물질을 살포하고, 50일간의 표층 퇴적물 오염도의 변화를 Fig. 5에 제시하였다. 살포 전후 총유기탄소(TOC)의 뚜렷한 감소는 나타나지 않았다. 1~10 kg/m<sup>2</sup> 정도의 개선물질 살포로 인해 초기 값에 비해 다소 증가하는 양상을 보였다. 다만, 살포량이 많으면 많을수록 농도 값은 더 작게 나타난 특성을 나타내었다. 특히 15 kg/m<sup>2</sup> 살포 시에는 초기 값이 10.23 mg/g<sub>dry</sub>이었고, 50일 후에는 약 7.63 mg/g<sub>dry</sub>로 감소하는 특성을 보였다. 대조구는 초기 값 11.15 mg/g<sub>dry</sub>에서 50일까지 다소 증가(15.09 mg/g<sub>dry</sub>)하였다.

산취발성황화물(AVS)은 총유기탄소와 비교해서 다소 다른 패턴을 보였는데, 5~15 kg/m<sup>2</sup> 정도의 개선물질 살포로 인해 농도가 점차 감소하였다. 물론 살포량이 많으면 많을수록 감소경향이 뚜렷하였

다. 즉, 15 kg/m<sup>2</sup> 살포 시에는 초기 값이 0.10 mg/g<sub>dry</sub>이었고, 50일 후에는 약 0.02 mg/g<sub>dry</sub>로 감소하였다. 1 kg/m<sup>2</sup> 살포 시에는 농도 변화 폭이 컸고, 살포 후 50일에는 초기 값에 비해 농도가 더 높게 나타났다.

3.4 퇴적물 경우에 따른 환경변화

천수만 내의 퇴적물 경우 전후 60일간의 표층 퇴적물 오염도의 변화를 Fig. 6에 제시하였다. 경운구역의 총유기탄소(TOC)는 경운 전 5.36 mg/g<sub>dry</sub>에서 경운 중에는 4.07 mg/g<sub>dry</sub>로 감소하였고, 그 이후 다소 증가하다가(4.47 mg/g<sub>dry</sub>) 60일간은 평형상태를 나타내었다. 대조구는 경운 전 5.91 mg/g<sub>dry</sub>였고, 그 이후의 변화양상은 실험구와 유사하였다.

산취발성황화물(AVS)은 뚜렷한 감소경향이 나타나지 않았다. 실험구에서 경운 전에는 0.003 mg/g<sub>dry</sub>를 보이다가 그 이후 오히려 급격하게 증가(0.01 mg/g<sub>dry</sub>)하였다. 대조구는 초기 값이 0.006 mg/g<sub>dry</sub>로 경운 지역보다 높았지만 그 이후의 변화는 경운 지역과 유사한 경향을 나타내었다.

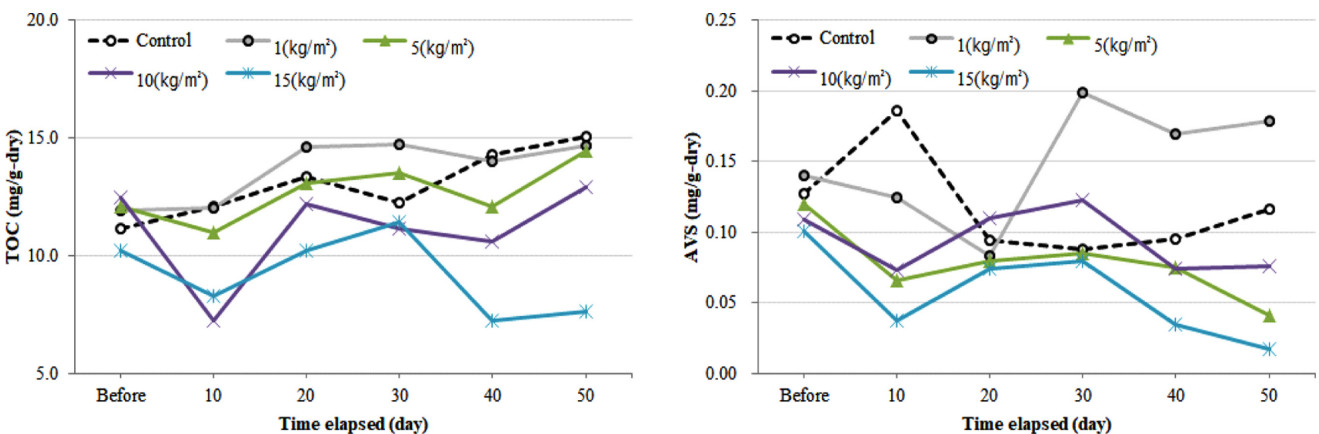


Fig. 5. The temporal changes of sediment pollution by coating the improving material (in-situ capping) in Goseong Bay.

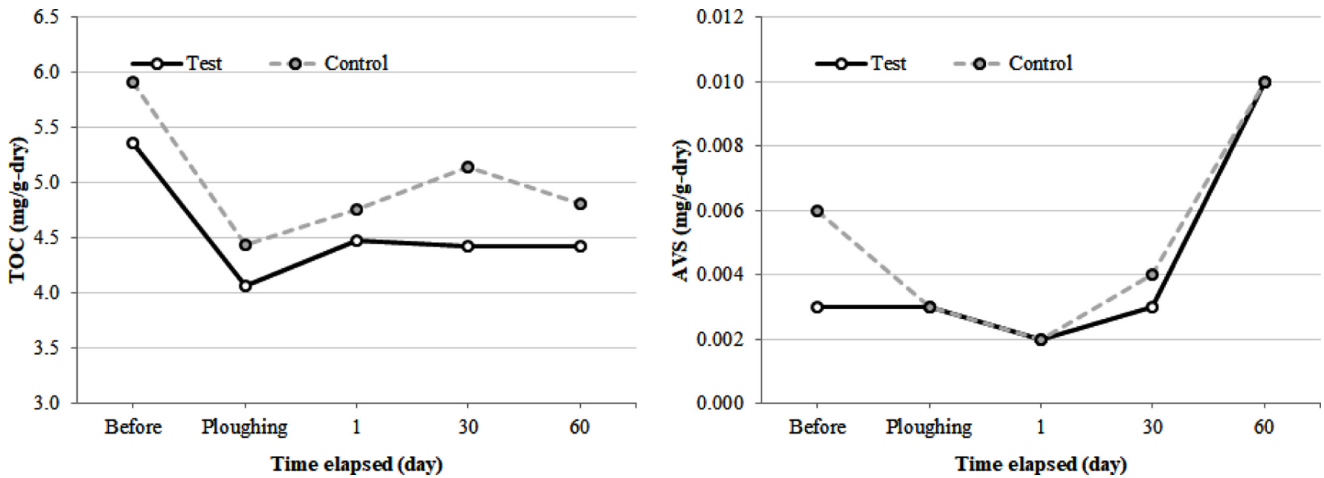


Fig. 6. The temporal changes of sediment pollution by sediment plowing in Cheonsu Bay.

## 4. 고 찰

### 4.1 어장환경(퇴적물) 개선효과 비교

어장 정화·정비 4가지 유형에 따른 어장환경(퇴적물)의 개선효과를 비교·분석한 결과를 Table 1에 제시하였다. 조사지역과 조사기간이 차이가 있지만, 기본적인 배경농도의 차이, 조사방법의 적용성 및 비용적 측면 등을 고려하여 2017년 한 해에 동시적으로 사업 전후 조사된 결과를 비교하는 점은 의미가 있을 것이다. 공통적으로 준설, 경운, 개선물질 살포 및 어장휴식은 약 60일 이내의 변화를 해석하였고, 또한 추가적으로 재배치에 따른 어장휴식 효과는 17개월간의 변화를 검토하였다.

준설에 따라 60일간의 총유기탄소와 산화발성황화물의 개선효과는 각각 23.5%, 96.1%로 나타났고, 황화물의 농도저하가 더 컸다. 경운의 경우(60일간)에는 총유기탄소의 개선은 17.5%였지만, 산화발성황화물은 오히려 2배 이상 증가한 것으로 분석되었다. 개선물질의 살포로 인해 총유기탄소는 50일 후 25.4%, 산화발성황화물은 83.2%가 개선되어 준설과 비교하여 총유기탄소는 다소 크게 감소되었고 산화발성황화물의 저감효과는 낮았다. 어장휴식기간동안(60일)의 총유기탄소와 산화발성황화물의 개선은 각각 약 9.3%, 54.9%로 나타났고, 총 11개월간의 개선효과는 총유기탄소가 약 29.3%, 산화발성황화물은 약 68.2%로 나타나서 산화발성황화물의 저감이 더 큰 것으로 평가되었다.

현재까지의 연구를 종합하면, 약 60일간의 총유기탄소의 저감은 준설과 개선물질의 살포를 통해서 가장 높게 나타났고, 산화발성황화물은 준설을 통해서 가장 많이 개선되었다. 특히, 인위적인 준설

및 개선장비가 필요하지 않은 약 11개월간의 어장휴식은 총유기탄소와 산화발성황화물의 저감효과를 상당히 높이는 것으로 평가되었다. 이러한 어장환경개선을 위한 방법론에서 중요하게 고려해야 할 요소는 실제 해역에 투입할 수 있는 적용성일 것이다. 즉, 일부 연구 목적으로 접근하는 소규모 실험이 아닌 광범위하게 오염된 지역을 실제 사업을 통해 지속적으로 현장에 적용할 수 있는 수단이 되어야 하고, 특히 투입장비와 인력을 고려한 경제성일 것이다. 이러한 측면에서 유기물의 단기적 개선에는 어장휴식, 개선물질 살포와 준설 등이 약 10~30%의 효과를 나타내었지만, 비용과 적용성 측면을 고려하면 가장 효율적으로 판단되는 것이 자연정화능력을 활용한 어장재배치에 따른 휴식이라 판단된다. 또한, 산화발성황화물이 유기탄소보다는 초기 반응이 빠르고 개선효과가 더 크게 나타났는데, 준설과 개선물질 살포는 부유사확산, 생태적 반응의 불확실성으로 단정할 수 없지만 2차 오염에 대한 가능성이 제기될 수 있을 것이다. 이러한 측면을 고려하면 어장휴식에 따라 산화발성황화물의 약 55%가 개선될 수 있는 사항은 중요한 의미를 부여할 수 있을 것이다.

어장관리법에 따른 어장환경기준은 현재 TOC 20 mg/g<sub>dry</sub> 이하, AVS는 0.5 mg/g<sub>dry</sub> 이하로 설정되어 있다. 어장환경 개선물질을 살포한 지역인 고성 연안과 퇴적물 경운 지역인 천수만에서 조사한 지역은 두 기준을 모두 만족한 상태였다. 이 지역에서의 환경개선은 뚜렷하게 나타나지 않거나 오히려 증가하는 등 유의미한 변화를 찾기 힘들었다. 그러나, 준설구역인 행암만 지역에서는 준설 전의 농도가 거의 어장환경기준에 근접하거나 크게 초과된 상태를 보이다가 시간에 따라 농도 감소가 뚜렷한 경향을 보였다. 또

Table 1. The comparison of sediment quality improvement by purification and maintenance projects of marine aquaculture farms

Assessment items		Sediment dredging	Sediment plowing	Coating the improving material	Farm resting
		(Haengam Bay)	(Cheonsu Bay)	with 15 kg/m <sup>2</sup> (Goseong Bay)	(Jinhae Bay)
Improving effect, %	TOC	23.5 (60 days)	17.5 (60 days)	25.4 (50 days)	9.3 (60 days) 29.3 (11 months)
(comparison period)	AVS	96.1 (60 days)	-233.3 (60 days)	83.2 (50 days)	54.9 (60 days) 68.2 (11 months)

한, 어장이동을 실시한 진해만 지역에서도 초기 농도는 모두 어장환경기준을 초과한 상태였고, 시간에 따라 농도감소가 이루어지면서 산화발성황화물의 경우에는 어장환경기준을 만족하였고, 유기물의 농도는 거의 대조구 수준으로 회복되는 양상을 보였다. 즉, 초기 농도가 매우 오염된 지역에서의 준설 및 어장재배치 효과는 상대적으로 명확하게 나타나는 반면, 초기 농도가 낮거나 어장환경기준을 만족한 곳에서는 개선사업에 대한 효과는 명확하지 않은 것으로 판단되었다.

특히, 어장휴식에 따라 유기물의 농도는 초기 1년 동안 빠르게 감소하는 회복양상을 보인 후 대조구 수준에서 평형을 이루었다. 하지만 하계 빈산소 발생에 따라 퇴적층 내 혐기성분해가 나타나고, 산화발성황화물 등의 농도는 다시 증가하는 계절적 변화 양상을 보일 수 있으므로 용존산소의 거동과 밀접한 관련을 갖는다고 판단된다.

어장정화·정비에 따른 퇴적물의 환경개선과 유사한 사업은 다양하게 추진되고 있지만, 그 효과가 명확하거나 지속적인 사례는 많지 않다. 대부분 제한적인 효과를 나타내거나, 조사방법과 기간 및 항목 등의 측면에서 직접적인 비교가 어려운 사례가 많다. 어장관리 의무인 어장청소는 대부분 저층에 쌓인 페어구 등 쓰레기를 수거하는 실정으로 실질적인 어장환경개선과 연계시키기에는 한계가 있을 것이다. 다만, 1998~2002년에 어장정화사업이 집중 실시된 고성만, 가막만, 고현만, 득량만의 경우 COD(화학적산소요구량)가 낮아져 오염지수가 점차 개선되었지만, 일부 항목인 용존산소, 총질소와 총인은 오히려 증가하는 것도 나타나서(KMI[2004]) 수질 개선효과에 대해서는 명확한 판단을 내리기가 어려운 실정이다. 이 보고서에 따르면 정화사업 실시 후 주요 품종별 생산량이 7~4% 증가한 것으로 분석되었고, 전남·경남지역에 대한 어장정화사업의 직·간접 총 효과를 투자비용 대비 149%라 제시하였다. 그러나, 수질 환경 개선 및 어장생산성 향상에 대한 근거가 매우 제한적으로 나타나 있어 보다 객관적인 자료가 필요할 것으로 판단된다. 즉, 정화사업 전후 환경의 개선이 나타나는 퇴적물 환경에 대한 평가가 결여되어 있고, 어업행위가 동일하거나 어장생산성에 영향을 미치는 기타 요인에 변화가 없어야 어장생산성 향상에 대한 비교가 정확할 수 있으므로, 보고서에 나타난 결론을 단정하기에는 현실적으로 어렵다고 판단된다. 따라서, 향후 이러한 어장정화·정비사업에 따른 효과를 지속적으로 분석할 수 있는 방안이 필요할 것이다.

한편, 해양오염퇴적물 정화복원 사업 중 마산만 정화사업(총 2,111,29 m<sup>3</sup> 준설)에 따라 수거 전후 8개 중금속 평균농도의 감소율이 51.6%로서 마산만 내만의 함량이 감소되었다고 보고된 바 있다(Kim[2018]). 여수 신항 해역에서는 강열감량, AVS, COD, 중금속 등 10개 항목에서 개선효과가 나타났으며, 선소해역에서는 강열감량, AVS, COD 등 6개 항목에서 개선효과를 보였지만, 소수의 데이터, 비정규성 등으로 추후 정밀 모니터링을 실시해야 한다고 제시하였다(Kang[2018]). 즉, 일부 기간은 감소경향이 나타나지만 그 개선효과는 미미하고, 장기모니터링에 대한 개선을 제기하고 있다. 본 조사지구에도 포함된 진해 행암만에서 실시한 오염퇴적물의

정화·복원사업 후 2년차 사후모니터링을 평가한 결과, 오염물질의 지속적인 유입 등으로 인해 정화·복원구역이 재오염되거나 개선효과가 감소되어 추가적인 조치가 필요로 하는 상황도 나타나고 있다(KOEM[2017]). 즉, 계절적인 변화 및 빈산소수괴의 영향 등으로 수질의 변동성이 크고, 수질평가지수가 뚜렷하게 개선되지 못한 상황이다. 퇴적물의 부영양화 관련(IL, AVS, COD) 정화복원 지수에서도 지속적인 감소보다는 평가항목별로 시기적으로도 다소의 변동성을 가지는 것으로 나타나고 있다. 이는 오염퇴적물 정화사업의 미 시행 구간 및 육상오염원 유입 등 다양한 영향으로 인해 효과분석을 어렵게 하는 것으로 판단된다.

최근 오염퇴적물의 현장처리 적용기술에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 중금속, 유기물, 부영양물질의 물리·화학적 흡착을 통한 제거를 위해 반응성 피복재(활성탄, 석회석, 제올라이트, 굴 패각, 적니 등) 등이 연구되고 있고, 퇴적물내 총질소, 총인과 유기물의 용출 감소가 보고되고 있지만, 피복물질의 종류와 두께 범위, 수심, 외력에 대한 안정화, 모니터링 등 설계에 많은 고려사항이 요구되어 광범위한 해역에 실제 적용성을 위해서는 좀 더 시간이 요구되는 상황이다. 특히, 비용적인 문제가 클 수 있다. 예를 들면, 오염퇴적물 정화사업에서 해양오염퇴적물 평균 처리단가는 105천 원/m<sup>3</sup>이 소요(부산남항 정화사업)되며, 일반 준설의 경우 약 50천 원/m<sup>3</sup>으로(KIMST[2017]) 전 해역에 대한 퇴적물 개선사업은 막대한 비용과 시간이 소모되므로 중장기적인 계획으로 단계별 접근을 시도해야 할 것이고, 이와 아울러 자연정화능력을 최대한 활용하는 방안도 어장관리기본계획 등 정책에 보다 중요하게 고려해야 할 것이다.

#### 4.2 정책제언

양식생물 생산터전의 관리 및 수산물 안전성 등을 위해서라도 어장환경의 개선을 통해 청정어장을 조성하는 방안은 가장 중요한 어장관리 정책 중 하나일 것이다. 어장환경관리 방법은 그 환경이 오염되기 전에 실시하는 사전예방대책과 오염된 환경을 정화하거나 복원시키는 사후개선대책으로 구분할 수 있다. 양식어장을 사전에 환경평가해서 면허 연장 유무나 어장환경개선 조치를 유도하는 사전예방대책도 강화해야 하지만, 본 논문에서는 사후관리대책 수단으로 어장정화·정비 사업 유형별 현장 적용성 검토를 통해 어장환경개선 효과를 분석한 결과를 바탕으로 다음과 같은 정책제언을 제시하고자 한다.

첫째, 어장정화·정비에 포함된 퇴적물 준설, 경운, 어장개선물질 살포는 현장에 맞는 장비와 물질을 활용하므로 우선적으로 그 비용, 시간, 인력 소모가 많을 뿐만 아니라 광범위한 어장 현장여건에 일률적으로 적용시키기에 한계가 있다고 판단된다. 또한, 그 개선효과도 지역별로 차이가 나고 사업규모에 따라 차이가 날 뿐만 아니라 예상치 못한 2차 환경오염 유발 가능성 등의 문제점이 포함되어 있다. 따라서, 현재 시점에서는 바다가 갖고 있는 자연적인 정화능력을 활용하는 어장재배치(휴식)에 따른 휴식의 방법을 충분히 활용할 필요가 있다. 현재, 어장휴식의 근거는 어장관리법에



다른 어장관리해역에서 2년 동안 일률적으로 실시하도록 되어 있는데, 양식품종별로 지역별로 차이가 나는 현장여건을 고려해서 좀 더 객관적인 기준을 설정해야 할 것이고, 공간적으로도 어장관리해역의 범위에서 벗어나 좀 더 효율적인 방안을 모색해야 할 것이다. 이를 위해서는 지역별, 양식품종별로 어장이동과 휴식에 따른 어장환경개선효과에 대한 연구(회복지표와 회복기간 산정 등)가 지속적으로 이루어질 필요가 있다. 향후 「어장관리법」에 따른 어장환경평가와 관련된 개선조치 또는 「양식산업발전법」에 따라 시행(2025년)되는 양식장 면허 심사·평가에 따른 결과 조치에서 오염이 심화되었거나 평가등급이 낮은 어장에 대해서는 이러한 어장휴식년제를 보다 적극적으로 도입·활용할 필요가 있다고 판단된다.

둘째, 어장환경에 영향을 미치는 오염원 및 오염물질에 대한 종합적인 관리체계 구축이 필요할 것이다. 오염된 퇴적물을 개선할 수 있는 방법은 하나의 사업으로는 달성되기 어려울 것이고 복합적으로 접근해야 한다. 즉 오염원에 대한 근본적 대책, 해수소통에 대한 진단과 더불어 그 해역 특성에 맞는 방법을 강구해야 한다. 퇴적물을 준설하거나, 어장을 재배치하여도 단기간의 효과는 나타날 수 있지만, 다른 요인에 대한 대책이 없으면 중장기적으로는 개선효과가 미미하거나 오히려 오염농도가 증가하는 사례가 나타나고 있다. 따라서, 오염된 어장환경을 개선하기 위해서는 우선적으로 오염된 원인(Sources)을 명확히 파악해서 이에 맞는 대책을 강구해야 할 것이다. 현재 대부분 어장환경이 악화된 원인으로 육상오염원, 해수유통 저하, 과도한 양식시설물 설치와 이에 따른 양식부산물(배설물 등), 빈산소수피 영향 등으로 추정하고 있지만, 각 원인 인자별로 기여에 대한 평가가 거의 없다. 해당 지역의 안정동위원소 조사 등을 통해 퇴적물 환경이 어떤 인자에 의해 영향을 받았는지, 그리고 그 기간이 어느 정도인지를 파악하는 조사를 강화해야 할 것이다. 육상오염원에 따른 오염물질 유입인지, 양식생물의 배설물 또는 잉여 사료인지, 아니면 해수유통에 따른 다른 물질의 영향인지 등을 종합적으로 평가할 필요가 있다. 또한, 오염퇴적층 깊이와 퇴적물 조사를 통해 퇴적환경에 대한 기본 자료를 확보해야 할 것이다.

셋째, 어장환경을 개선시킬 수 있는 물질과 사용 장비(공법)에 대한 보다 명확한 가이드라인이 마련되어야 할 것이다. 즉, 어장 개선물질 및 장비에 대한 환경영향성 등을 통한 현장 타당성 확보, 활용 방법과 인증 기준 등 종합적인 체계 구축을 통한 제도 정비가 필요하다. 특히, 최근에는 다른 사업 등에서 발생하는 준설토와 수산부산물(폐각 등)의 재활용에 대한 관심이 크게 증가되고 있다. 해양오염퇴적물 정화사업 또는 어장 정화·정비사업 등에 따라 수거된 퇴적물의 활용과 관련되어서는 현재 「해양폐기물 및 해양오염퇴적물 관리법」 제18조(준설물질의 활용)가 있고, 중금속을 포함한 ‘활용할 수 있는 준설물질의 오염도 기준’(시행령 별표 3)에 적합한 경우, 해수욕장의 양빈, 습지 조성 및 복원, 인공섬의 조성, 어장정비, 항만시설 또는 어항시설의 공사용 재료, 어장정화를 위한 오염퇴적물의 교체 등으로 활용할 수 있다. 여기서 어장환경개선을 위해 사용할 수 있는 준설물질과 항만시설 등의 공사용 재료로 활용할 수 있는 준설물질에 대한 기준이 동일하게 적용될 수 있다는

문제점이 있다. 따라서 활용목적에 따라 보다 정확하거나 차별된 기준을 정립할 필요가 있다. 또한, 굴 폐각 등 조개류 껍데기도 어장개선재료 등으로 활용할 수 있으므로 향후 수산생물이 서식하는 어장이라는 특성과 어장개선물질의 적응성과 환경성을 고려하면 보다 적합한 기준과 범위가 정해질 필요가 있다고 판단된다.

넷째, 어장정화·정비사업에 따른 효과 분석과 지속적 사후관리체계를 마련하기 위해 모니터링 및 어장관리시스템(또는 통합 정보 플랫폼)을 종합적으로 구축할 필요가 있다. 해양오염퇴적물 정화사업은 사업시행 후 기본적으로 5년 동안 모니터링을 할 수 있도록 되어 있다. 또한, 어장환경에 대해서는 「어장관리법」에 근거하여 지역별로, 양식품종별로 모니터링을 수행하고 있다. 그러나, 어장에서 이루어지는 정화·정비사업의 실시에 대한 근거는 있지만, 이후 환경변화나 효과를 위한 모니터링은 전혀 이루어지지 않고 있다. 현재 ‘청정어장 재생사업’에 어장환경개선효과를 위한 모니터링이 이루어지고 있는 점을 고려하여 향후 관련 법령에 사후모니터링 또는 효과 평가 내용을 담을 필요가 있고, 나아가서는 어장정화·정비사업의 경제성에 대한 보다 종합적인 분석을 토대로 효율적인 개선방안을 모색할 필요가 있을 것이다. 또한, 모니터링 개선 외에 개선사항을 비교할 수 있는 지표나 기준을 마련해야 할 것이다. 현행 어장관리법에 따른 어장환경기준인 TOC와 AVS는 정확한 유기물 함량 또는 지역 특성 등을 반영하기에 한계가 있고, 여러 가지 지표 항목마다 변동성이 있으므로 이를 최소화할 수 있는 통합지수를 마련할 필요가 있다. 나아가서, 어장에 대한 전반적 요소 즉, 어장분포, 면허정보, 청소 및 정화·정비 실시, 환경모니터링 등에 대한 통합 정보 플랫폼을 구축해서 보다 효율적인 어장관리 방안을 모색해야 할 것이다.

## 5. 결 론

어장정화·정비사업의 4가지 유형인 어장개선물질 투입, 해저 경운, 해저 퇴적물 준설 및 어장재배치(어장휴식)에 따른 해저퇴적물의 환경개선효과를 2017년 같은 시기에 현장 실증조사를 통해 비교 분석하였고, 정책 활용성 제고를 위한 방안을 제시하였다. 준설에 따라 60일간의 총유기탄소와 산화발성황화물의 개선효과는 각각 23.5%, 96.1%로 나타났고, 해저 경운 시 총유기탄소의 개선은 17.5%였지만, 산화발성황화물은 오히려 2배 이상 농도가 증가하였다. 개선물질의 살포로 인해 50일 후 총유기탄소는 25.4%, 산화발성황화물은 83.2%가 개선되어 준설에 의한 효과와 유사하였다. 어장휴식기간동안(60일)의 총유기탄소와 산화발성황화물의 개선은 각각 약 9.3%, 54.9%로 나타났고, 총 11개월간의 개선효과는 총유기탄소가 약 29.3%, 산화발성황화물은 약 68.2%로 나타내서 산화발성황화물의 저감이 더 큰 것으로 평가되었다.

전체적으로 살펴보면, 약 60일간의 총유기탄소의 저감은 준설과 개선물질의 살포를 통해서 가장 높게 나타났고, 산화발성황화물은 준설을 통해서 가장 많이 개선되었다. 특히, 인위적인 준설 및 개선장비가 필요하지 않은 약 11개월간의 어장휴식은 총유기탄소와

산화발성황화물의 저감효과를 상당히 높이는 것으로 평가되었다. 또한, 산화발성황화물이 유기탄소보다는 초기 반응이 빠르고 개선 효과가 더 크게 나타났다. 초기 농도가 매우 오염된 지역에서의 준설 및 어장재배치 효과는 상대적으로 명확하게 나타나는 반면, 초기 농도가 낮거나 어장환경기준을 만족한 곳에서는 개선사업에 대한 효과는 불분명한 것으로 판단되었다.

유기물의 단기적 개선에는 어장휴식, 개선물질 살포와 준설 등이 약 10~30%의 효과를 나타내었지만, 비용 소모, 현장 적용성 및 2차 환경영향 가능성 측면을 고려하면 가장 효율적으로 판단되는 것이 자연정화능력을 활용한 어장재배치에 따른 휴식이라 판단된다. 향후 어장환경개선과 관련된 정책적 고려사항으로 첫째, 바다가 갖고 있는 자연적인 정화능력을 활용하는 어장재배치에 따른 양식품종별로 회복지표와 회복기간을 산정하여 어장휴식에 대한 근거 마련과 휴식년제의 강화, 둘째 어장환경에 영향을 주는 각 오염원인 인자별 기여도 평가를 위한 해당 지역의 안정동위원소와 오염퇴적층 깊이 조사 등 오염물질 종합적 관리체계 구축, 셋째, 준설물질과 폐각의 어장환경개선 등 활용목적에 따라 보다 차별화된 기준 정립, 넷째 어장정화-정비사업에 따른 효과 분석과 지속적 관리체계를 마련하기 위해 모니터링과 통합 정보 플랫폼을 종합적으로 구축할 필요가 있다.

## 후 기

본 논문은 2022년도 국립수산물과학원 수산과학연구사업(R2022054)의 지원으로 수행된 연구입니다. 자료 수집 및 정리에 도움을 주신 정현우, 오승문 연구원님께 감사드립니다.

## References

- [1] Asaoka, S. and Yamamoto, T., 2010, Blast furnace slag can effectively remediate coastal marine sediments affected by organic enrichment. *Mar. Pollut. Bull.*, 60, 57-578.
- [2] Bae, H.J., 2011, Environmental change and its enhancement of a marine sediment by using useful microbial and chemical treatments, M.S. thesis, Dept. of Marine Environmental Engineering, Gyeongsang National Univ., Tongyeong, Korea.
- [3] Giles H., 2008, Using Bayesian networks to examine consistent trends in fish farm benthic impact studies, *Aquaculture*, 274, 181-195.
- [4] Hargrave, B.T., Duplisea, D.E., Pfeiffer, E. and Wildish, D.J., 1993, Seasonal changes in benthic fluxes of dissolved oxygen and ammonium associated with marine cultured Atlantic salmon, *Marine Ecology Progress Series*, 96, 249-257.
- [5] Hargrave B.T., Holmer M., Newcombe C.P., 2008, Toward a classification of organic enrichment in marine sediments based on biogeochemical indicators, *Mar. Pollut. Bull.*, 56, 810-824.
- [6] Hall, P.O.J., Anderson, L.G., Holby, O., Kollberg, S. and Samuelson, M.O., 1990, Chemical fluxes and mass balances in a marine fish cage farm, *I. Carbon. Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 61, 61-73.
- [7] Holmer, M. and Kristensen, E., 1992, Impact of marine fish farming on metabolism and sulphate reduction of underlying sediments, *Marine Ecology Progress Series*, 80, 191-201.
- [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 Seuso, Ph.D. dissertation, Dept. of Fisheries Science, Chonnam National Univ., Yeosu, Korea.
- [9] Kim, K.S., 2018, A study on the treatment of contaminated soil requirements, M.S. thesis, Dept. of Public Administration and Spatial Information, Pukyong National Univ., Busan, Korea.
- [10] KIMST (Korea Institute of Marine Science and Technology), 2017, Development of sustainable remediation technology of contaminated sediment: capping and in-situ treatment technology, *Oceans and Fisheries R&D Report*.
- [11] KIOST (Korea Institute of Ocean Science and Technology), 2016, A study on improvement of management system of contaminated marine sediment, BSPE9936A-10952-4.
- [12] KMI (Korea Maritime Institute), 2004, A study on the progress plan and analysis of effect of mariculture farm purification.
- [13] KMI (Korea Maritime Institute), 2014, Development of assessment guideline and improvement plan on the mariculture farm purification.
- [14] KOEM (Korea Marine Environment Management Corporation), 2017, The current status of cleaning and restoration projects of polluted marine sediment (2004-2016).
- [15] MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2015, Analytical standard methods of marine environment.
- [16] NIFS (National Institute of Fisheries Science), 2020, Integrated monitoring guidelines of coastal farms environment, Using the sedimental data during 2013-2019.
- [17] Oceans and Fisheries Policy Institute, 2020, A study on the establishment of basic plan for renewal project of clean mariculture grounds. Final report.
- [18] Park, K.J., Yoon, S.P., Song, J.H., Han, H.S. and O, H.C., 2011, Improvement of *Manila Clam (Ruditapes philippinarum)* habitat condition by adding crushed oyster (*Crassostrea gigas*) shells to the substratum, *Korean J. Malacol.*, 27(4), 291-297.
- [19] Troell, M., Halling, C., Neori, A., Chopin, T., Buschmann, A.H., Kautsky, N. and Yarich, C., 2003, Intergrated mariculture: asking the right questions, *Aquaculture*, 226, 69-90.

Received 15 October 2021

Revised 29 December 2021

Accepted 26 January 2022