

## 연안어장 준설퇴적물을 이용한 *Cochlodinium polykrikoides* 제거 Removal of *Cochlodinium polykrikoides* using the Dredged Sediment from a Coastal Fishery

선영철 · 김명진\*, † · 송영채\* · 고성정\*\* · 황응주\*\*\* · 조규태\*\*\*\*

Young Chul Sun · Myoung-Jin Kim\*, † · Young-Chae Song\* · Seong-Jeong Ko\*\* · Eung-Ju Hwang\*\*\* · Qtae Jo\*\*\*\*

아이피케이 · \*한국해양대학교 건설환경공학부 · \*\*한국해양수산연수원 · \*\*\*대구대학교 환경공학과 · \*\*\*\*동해수산연구소

International Paint Korea · \*Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University

\*\*Fisheries Education Team, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology

\*\*\*Department of Environmental Engineering, Daegu University · \*\*\*\*East Sea Fisheries Research Institute

(2009년 6월 17일 접수, 2009년 12월 28일 채택)

**ABSTRACT** : In the present study, experiments have been performed to investigate the possibility of removing *Cochlodinium polykrikoides* using the dredged sediment from a coastal fishery and then to derive the optimal conditions; the amount and particle size of dredged sediment besprinkled into water, the thermal treatment, the types and amounts of additives, and the depth profile of *Cochlodinium polykrikoides*. Results showed that the optimal amount of dredged sediment besprinkled into water was 6~10 g/L, and the removal efficiency of *Cochlodinium polykrikoides* after the reaction time for 60 min was 73~93%. Note that, in the real sea water, it is necessary to besprinkle 6~10 kg/m<sup>3</sup> of dry dredged sediment on a unit area (1 m<sup>2</sup>). With decreasing particle size, *Cochlodinium polykrikoides* could be more efficiently removed. The removal efficiency was 93% with the dredged sediment smaller than 100 μm, whereas it was 51% with that of 100 μm < f < 200 μm. Since most of dredged sediment (over 90%) was smaller than 100 μm, high efficiency could be obtained by besprinkling only the dredged sediment without pre-treatment. CaO was found to be an effective additive in promoting the removal efficiency (up to 99%). The optimal amount of additive was 5~10%, however, it was necessary to use as small amount of an additive as possible in order to avoid the sharp increase in pH. The removal efficiency increased with increasing depth profile of *Cochlodinium polykrikoides*. The removal efficiency was 83% at 5 cm depth, whereas it was 93% at 50 cm depth. In the sea water, red tide occurred within 3 m depth, and furthermore most *Cochlodinium polykrikoides* existed within 1 m depth. It was, therefore, expected that higher removal efficiency of *Cochlodinium polykrikoides* could be obtained when the dredged sediment was besprinkled into the sea water. The removal efficiency of *Cochlodinium polykrikoides* was up to 93% when the dredged sediment (<100 μm) was besprinkled into water at the ratio of 10 g/L. This result was comparable to that obtained with loess (90~97%). All the results in the present study indicated that the dredged sediment from a coastal fishery could be successfully used as a substitute of loess for removing the red tide alga.

**Key words** : Red Tide Alga, *Cochlodinium polykrikoides*, Dredged Sediment, Coastal Fishery, CaO

**요약** : 본 연구에서는 연안어장 준설퇴적물을 이용하여 적조생물인 *Cochlodinium polykrikoides*을 제거하는 실험을 수행하였다. 최적의 적조제거 조건을 도출하기 위해 준설퇴적물의 투입량 및 입자크기, 열처리, 첨가제 종류 및 함량, 적조 분포 깊이 등의 인자를 조절하였다. 준설퇴적물의 적정 투입량은 6~10 g/L 정도였으며, 이를 살포했을 때 제거율은 60분 후 73~93%이었다. 실제 바다에 투입시 단위면적당(1 m<sup>2</sup>) 건조한 준설퇴적물 기준으로 6~10 kg/m<sup>3</sup>를 살포하는 것이 필요하다. 준설퇴적물의 입자크기가 작을수록 적조제거율이 증가했다. 입자크기가 <100 μm일 때 제거율이 93%로 100 μm < f < 200 μm 입자의 경우(51%)보다 훨씬 높았다. 준설퇴적물의 90% 이상이 100 μm 이하의 크기를 차지하므로 준설퇴적물을 별다른 처리없이 살포했을 때 상당한 효과를 거두리라고 본다. 준설퇴적물에 첨가제(CaO)를 넣어서 적조제거에 높은 효율(99%)을 얻었다. 첨가제의 적정량은 5~10%이지만 pH 상승을 고려해서 가능한 소량 투입하는 것이 적합하다. 적조 분포 깊이가 깊을수록 제거효율은 증가했다. 깊이가 5 cm 일 때 제거효율이 83%이었고 50 cm 깊이에서는 93%이었다. 바다에서 적조가 발생하는 깊이는 3 m 이 내이고, *Cochlodinium polykrikoides* 대부분이 1 m 이내의 깊이에 존재한다. 이 실험결과를 통해 실제 바다에 준설퇴적물을 적용하면 더 높은 적조 제거효율을 얻을 수 있으리라고 기대한다. 연안어장 준설퇴적물(<100 μm) 10 g/L을 투입하여 적조를 최대 93%까지 제거할 수 있었으며, 이 결과는 황토를 이용한 결과(90~97%)와 비슷했다. 본 연구결과는 연안어장 준설퇴적물 살포법이 기존의 황토살포법을 대체할 수 있을 정도로 처리효율이 뛰어난을 보여주었다.

**주제어** : 적조, *Cochlodinium polykrikoides*, 준설퇴적물, 연안어장, 산화칼슘

## 1. 서론

국내 남서해 연안은 지난 수십 년간 생산 위주의 양식정책에 의한 자가오염과 연안도시로부터 배출되는 육상오염부하의 증가로 인해 연안 생태계의 파괴정도가 심각한 상태이며, 연안 양식장으로서의 가치를 점차 상실해가고 있어 시급한 대책이 필요한 시점이다. 오염물질의 유입에 따른 해역의 오염, 사료의 주입으로 인한 양식장 자체오염으로 결국 해저퇴적물의 오염을 야기하고 있다. 현재 오염도가 심한 연안지역의 정화를 위해 준설이 시행되고 있으며, 이는 오염해역의 수질과 해저퇴적물을 동시에 개선할 수 있는 방법이라고 평가된다.

국내에서는 준설퇴적물을 매립하거나 응집제를 투입하여 응집·침전 후 탈수하여 처리하고 있다. 그러나 매립지의 남용, 운송비 부담, 응집제 등의 화학약품 첨가에 의한 과도한 슬러지 발생의 문제로 새로운 처리·처분 방법의 필요성이 대두되고 있다. 국외에서는 일반 준설토를 육상, 연안, 해상지역으로 구분하여 육상준설토는 제방, 복토재료, 인공토 개발에 의한 공원용·농업용 재료 혹은 건축용 재료로 사용하고 있다. 연안준설토는 저습지 개발, 지오택스타일 재료, 침식조절용 재료, 방파제 안정용 재료로 사용하며, 해상 준설토는 어류의 생식을 위한 구조물 재료 등으로 다양하게 활용하고 있다.<sup>1~3)</sup>

지금까지 연안어장 준설퇴적물을 이용한 국외 연구사례는 거의 찾아볼 수 없고, 국내에서 양식장 퇴적물을 이용한 비료화 가능성 연구가 진행된 적은 있다.<sup>4)</sup> 그러나 본 연구에서와 같이 연안어장 준설퇴적물을 적조제거에 재활용했던 적은 없다.

최근 우리나라 적조발생 원인종은 대부분 편조류로서, 이 중에서 *Cochlodinium polykrikoides* 적조생물은 우리나라 연안에서 1982년 최초로 발견된 이래 거의 매년 발생하고 있다.<sup>5)</sup> 1990년대 이후부터 *Cochlodinium polykrikoides* 발생해역이 광역화되고, 발생기간이 장기화되고 고밀도화되어 어장환경과 수산생물에 막대한 피해를 일으키고 있다. *Cochlodinium polykrikoides*에 의한 유해적조의 최대 밀도는 계속 증가하고 있으며, 최근에 10,000 cell/mL 이상의 고밀도 적조가 진행되고 있고 1999년에는 43,000 cell/mL의 최고밀도를 기록하였다. *Cochlodinium polykrikoides*는 다량의 점액질 또는 패류독을 가지면서 수산생물을 치사시키거나 유독화시키는 종으로 알려져있다. 주간에는 무리를 이루고, 한낮에는 90% 이상이 표층으로부터 3 m 이내에 분포한다.<sup>5)</sup>

적조를 제거하기위해 개발된 방법은 황토살포<sup>6,7)</sup>, 미세스크린과 오존 이용<sup>8)</sup>, 전해수 이용<sup>9)</sup>, 응집제 이용<sup>10)</sup>, 정수슬러지

이용방법<sup>11)</sup> 등 다양하다. 황토 또는 점토를 이용한 적조생물의 제거에 영향을 미치는 요인으로는 토양 입자 크기, 적조생물의 점액질 분비유무 등을 들 수 있다. 현재 실제 현장에서 사용하는 거의 유일한 방법은 황토살포인데, 이는 황토를 손쉽게 얻을 수 있고, 가격이 저렴하며 적조제거 효과가 뛰어나기 때문이다.<sup>5)</sup> 그러나 황토는 강한 산성과 점액질 특성으로 인해 해양퇴적층이 산성화되고 퇴적물 표층의 피막으로 산소공급이 차단되는 등 저서생태계에 치명적인 영향과 2차 오염을 유발할 수 있다. 또한 황토에는 영양원인 인이 많이 함유되어 식물플랑크톤의 재생산을 촉진시켜 악순환이 발생할 수 있다는 주장이 있다.<sup>5,12)</sup> 그리고 황토는 유한한 천연자원이며, 다른 분야에서 그 효과가 밝혀지면서 고부가가치를 창출하는데 사용하는 것이 바람직하여 대체물질의 개발이 시급하다.

본 연구에서는 연안어장 준설퇴적물의 높은 칼슘함량과 작은 입자크기가 적조제거에 효과가 있으리라는 기대를 갖고, 물리적으로 준설퇴적물의 크기를 조절하거나 칼슘이 포함된 물질을 첨가해서 효율적으로 적조를 제어하는 기술을 개발하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료 채취

본 연구에 사용한 준설퇴적물은 진해의 연안 어장에서 준설선을 이용하여 채취하였다(Fig. 1). 이 지역 어장은 약 20년 동안 피조개 주요산지로 사용되어왔으며, 해저에 사료찌꺼기와 배설물이 쌓여 오염이 심한 상태였다. 황토는 고창(K황토)



Fig. 1. Map showing sampling sites (Jinhae Bay). The sites of sampling are designated by the symbol (●).

과 밀양(M황토)에서 60 cm 깊이 이하의 시료를 채취하였다. 각 시료를 그늘지고 통풍이 잘되는 곳에서 상온 건조하여 2 mm 체로 거른 후 잘 섞어서 균질화하였다.

## 2.2. 준설퇴적물과 황토의 특성 파악

실험에 사용한 준설퇴적물과 황토의 pH와 전기전도도를 다음 방법으로 측정했다. 먼저, 토양 시료와 초순수의 비율이 1:10(질량:질량)이 되도록 혼합하여 1시간동안 진탕(200 rpm)해서 5,000 rpm으로 원심분리했다. 상등액을 0.45 μm membrane filter로 거른 다음 각 값을 측정하였다. 양이온교환능력(Cation Exchange Capacity, CEC)은 unbuffered salt extraction 방법으로 측정하였다.<sup>13,14</sup> 수분함량, 강열감량(Loss on Ignition, LOI)을 측정하였고, 100 μm, 200 μm, 2 mm의 체를 이용하여 토양시료의 입경분포를 알아보았다.

토양시료의 pH<sub>PZC</sub>는 potentiometric titration 방법으로 측정했고, 실험 과정은 다음과 같다.<sup>15</sup> 토양시료 2.5 g을 pH와 이온강도를 조절한 용액 25 mL와 함께 50 mL 원심분리관에 넣어 4시간 동안 진탕하고, 원심분리하여 상층액의 pH를 측정하였다. 용액의 pH는 0.005 M HCl이나 0.005 M NaOH로 조절하였으며, 이온강도는 0.005, 0.01, 0.05 M NaCl 용액을 만들어서 조절하였다. 토양시료를 첨가하지 않은 바탕시료(blank solution)에 대해서도 위와 같은 과정을 반복했다. 이산화탄소의 영향을 배제하기 위하여 용액에 질소를 계속 주입(bubbling)하였다.

토양의 중금속 총합량 분석에는 EPA 6010 방법을 이용하였다.<sup>16</sup> 이 방법은 HNO<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/HCl을 이용한 강산 분해방법이다. 시료와 동일한 방법으로 바탕분석(blank analysis)과 표준물질(Standard Reference Material, 2711, Montana Soil Moderately Elevated Traces) 분석을 동시에 실시했다. 용출된 중금속(As, Cd, Cu, Cr, Pb, Fe, Mn, Zn)을 원자흡수분광광도계(Atomic Absorption Spectrophotometer, AAS, Perkin Elmer, AAnalyst 200)로 분석하였다.

표면특성을 알아보기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, JEOL Co., JSM-5301LV), X-선 회절(X-ray Diffraction, XRD, Mac Science Co., M03XHF22) 분석을 수행하였다.

## 2.3. *Cochlodinium polykrikoides* 배양

모든 실험에 사용한 적조생물은 국내에서 적조문제를 일으키는 대표적인 유해 플랑크톤인 *Cochlodinium polykrikoides* 이었으며, 국립수산과학원에서 순수종만 협조 받았고, f/2배지

**Table 1.** Culture condition of *Cochlodinium polykrikoides*

Controlling factor	Condition
Temperature	23℃
Illumination	over 5000 lux
Salinity	33‰
pH	8
Light:Dark	14L:10D

에서<sup>17</sup> Table 1과 같은 조건으로 배양한 후 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 *Cochlodinium polykrikoides*의 개체수는 3,000~3,500 cell/ml이었다.

## 2.4. 적조제거 실험

최적의 적조제거 조건을 도출하기 위해 실험을 다음 일곱 부분으로 나누어서 실시하였고, 각 인자가 적조제거율에 미치는 영향을 비교분석하였다. 1) 토양 투입량, 2) 토양 입자 크기, 3) 토양의 열처리, 4) 첨가제 종류, 5) 칼슘함유 첨가제, 6) 첨가제(CaO) 함량, 7) 적조 분포 깊이. 황토를 가지고 동일한 실험을 해서 준설퇴적물 결과와 비교했다.

각 토양시료는 건조 후 분말상태에서 100 μm, 200 μm, 2 mm 체로 걸러서 사용하였고 실험실 온도를 23℃ 이상으로 유지하였으며, 같은 과정을 세 번 이상 다른 날 반복해서 재현성 있는 결과를 얻으려했다.

### 2.4.1. 토양 투입량

준설퇴적물의 투입량이 적조제거효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 투입량을 4~10 g/L로 변화시키면서 실험했다. 100 μm 이하의 준설퇴적물과 황토(K, M)를 준비했다. 배양한 *Cochlodinium polykrikoides*를 4개의 비커에 100 ml씩 각각 넣고 S/R(Sedgwick-R after) Chamber에 4회 분취하여 실험 전 *Cochlodinium polykrikoides*의 개체수(cell/ml)를 확인하였다. 준설퇴적물의 투입량을 4 g/L, 6 g/L, 7 g/L, 10 g/L로 변화시키면서 실험했다. 10분, 30분, 60분 후에 4회 분취하여 적조생물의 운동성과 침강성을 관찰하고 Lugol용액으로 고정 및 염색<sup>18</sup> 후 *Cochlodinium polykrikoides*의 개체수(cell/ml)를 확인하였다. 황토를 가지고 동일한 실험을 실시했다.

### 2.4.2. 토양 입자 크기

토양의 입자크기가 적조제거율에 미치는 영향을 알아보기 위해 두 가지 입자크기(<100 μm, 100 μm < f < 200 μm)의 준설퇴적물과 황토(K, M)를 준비했다. 배양한 *Cochlodinium polykrikoides*를 4개의 비커에 100 mL씩 각각 넣고

S/R(Sedgwick-R after) Chamber에 4회 분취하여 실험 전 *Cochlodinium polykrikoides*의 개체수(cell/ml)를 확인하였다. 준설퇴적물과 황토의 투입량은 100 mL에 1 g(1%)으로 하였다. 3개의 비커에 준설퇴적물, K황토, M황토를 각각 1 g씩 주입하고 하나의 비커에는 아무것도 넣지 않았다. 10분, 30분, 60분 후에 4회 분취하여 적조생물의 운동성과 침강성을 관찰하고, Lugol용액으로 고정 및 염색 후 *Cochlodinium polykrikoides*의 개체수(cell/ml)를 확인하였다.

#### 2.4.3. 토양의 열처리

두 가지 크기(100  $\mu\text{m}$  이하, 100  $\mu\text{m}$  < f < 200  $\mu\text{m}$ )의 열처리하지 않은 준설퇴적물과 전기로(900 $^{\circ}\text{C}$ )에서 1시간동안 열처리한 준설퇴적물을 가지고 2.4.2에서와 같은 방법으로 적조제거실험을 실시했다.

#### 2.4.4. 첨가제 종류

첨가제 혼합이 적조제거 효율에 미치는 영향을 알아보기 위해 CaO와 MgO를 첨가제로 사용해서 실험했다. 100  $\mu\text{m}$  이하의 준설퇴적물을 사용했고, 각 첨가제와 준설퇴적물을 일정비율(1:4, 질량비)로 혼합해서 적조제거실험에 사용했다. 적조제거물질 투입량은 10 g/L이었다. 첨가제를 사용하지 않은 준설퇴적물을 가지고 동일한 실험을 실시했다. 실험방법은 2.4.2 실험과 동일했다.

#### 2.4.5. 칼슘함유 첨가제

칼슘이 함유된 물질이 적조제거에 효과가 있음을 확인한 후, 세 가지 칼슘함유 물질[CaO, CaCO<sub>3</sub>, Ca(OH)<sub>2</sub>]을 가지고 적조제거실험을 실시했다. *Cochlodinium polykrikoides*의 밀도는 4,600~6,800 cell/mL, 칼슘함유 첨가제의 함량은 10%, 적조제거물질 투입량은 6 g/L이었다. 효율을 비교하기 위해 첨가제를 넣지 않은 준설퇴적물과 황토를 가지고 동일한 실험을 실시했다. 실험방법은 2.4.2 실험과 동일했다.

#### 2.4.6. 첨가제(CaO) 함량

CaO를 사용해서 적조제거 효율이 높게 나타난 결과를 바탕으로 CaO의 최적함량을 찾는 실험을 실시했다. CaO 함량을 5%, 10%, 20%로 변화시키면서 적조제거실험을 실시했다. 100  $\mu\text{m}$  이하의 준설퇴적물을 가지고 실험을 실시했고, 투입량은 6 g/L로 고정시켰다. 실험방법은 2.4.2 실험과 동일했다.

#### 2.4.7. 적조 분포 깊이

적조 분포 깊이에 따른 적조제거효율의 차이를 알아보기 위하여 직경이 5.5 cm이고 깊이가 각각 5 cm, 25 cm, 50 cm인 용기를 준비하여 배양한 적조생물을 용기의 정해진 부피만큼 넣었다. 100  $\mu\text{m}$  이하의 준설퇴적물과 황토를 사용했고 투입량은 10 g/L로 고정시켰다. 실험방법은 2.4.2 실험과 동일했다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 준설퇴적물과 황토의 특성

연안어장 준설퇴적물의 물리화학적 특성을 Table 2에 나타내었으며, 비교를 위해 황토 분석결과도 함께 나타내었다. 준설퇴적물의 입자크기가 대부분(92%) 100  $\mu\text{m}$  이하이고, 함수율은 70% 정도였다. pH는 8.3으로 약 알칼리성을 띠었고, 양이온 교환능력은 15.36으로 일반 토양보다 높았으며 유기물함량 또한 높았다. 준설퇴적물은 황토보다 입자가 작고, pH가 높으며, 양이온 교환능력이 뛰어났다. 준설퇴적물의 대부분 중금속 농도가 황토보다 높았으며, 특히 Cu, Cr, Zn 농도가 황토의 두 배 정도로 높았다.

표면분석 결과, Fig. 2에 나타난 것처럼 준설퇴적물의 표면

Table 2. Physical and chemical properties of dredged sediment and loess

Property	Unit	Value	
		Dredged sediment	Loess
Soil size distribution			
<100 $\mu\text{m}$	%	92.1	73.0
100 $\mu\text{m}$ < f < 200 $\mu\text{m}$	%	2.1	4.3
200 $\mu\text{m}$ < f < 2 mm	%	3.7	8.0
> 2 mm	%	2.1	14.7
Water content	%	70	25
pH <sup>a</sup>		8.30	6.53
Conductivity <sup>a</sup>	$\mu\text{S}/\text{cm}$	4482	64.6
CEC	meq/100 g	15.36	8.65
pHpzc		5.1	4.4
LOI <sup>b</sup>	%	11.3	8.0
Major metal <sup>c</sup>			
As	mg/kg	ND <sup>d</sup>	ND <sup>d</sup>
Cd	mg/kg	1.3	0.8
Cu	mg/kg	44.4	20.3
Cr	mg/kg	32.0	17.9
Pb	mg/kg	39.0	34.5
Fe	mg/kg	40,350	38,385
Mn	mg/kg	9,700	8,420
Zn	mg/kg	135	70

a: measured in supernatant of soil suspension (soil:solution=1:10 by mass)

b: Loss On Ignition

c: by total digestion

d: Not Detected

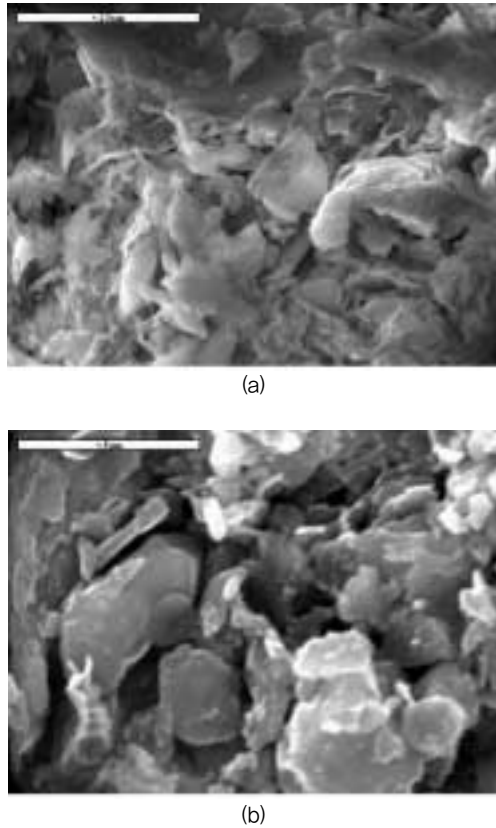


Fig. 2. SEM images of (a) dredged sediment and (b) loess.

은 거칠고 다공질이었다. 주성분 함량은 Si(27%), Al(12%), Ca(26%)로 Al과 Ca의 함량이 높은 편이었다. 또한 SiO<sub>2</sub>가 주성분이고 Al, Si, Fe, Na를 포함하는 Mg<sub>3</sub>Fe(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, KFeO<sub>2</sub>, FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>ZnSiO<sub>4</sub>, NaAlSiO<sub>4</sub> 등의 다양한 광물질이 존재할 가능성이 있음을 알았다. 황토의 경우는 준설퇴적물보다 더 다공질이었고, Si-59%, Al-28%이었다. 연안어장 준설퇴적물의 특성상, Ca성분의 함량이 높게 나왔는데 이것은 저질토 및 해수로부터 인(P), 철(Fe) 등의 용출을 억제하고 적조예방 및 제어효과를 높이는데 영향을 미치리라고 사료된다.<sup>19)</sup>

준설퇴적물과 황토를 900°C에서 열처리하면 CEC, pH, 전기전도도 값이 달라졌다(Table 3). 특히 열처리를 하면 모든 토양의 CEC 값이 급격히 감소했다.

Table 3. Change of soil properties after the thermal treatment for 1 hr at 900°C

Soil	Thermal treatment	CEC(meq/100 g)	pH	Conductivity(μS/cm)
Dredged sediment	No	15.4	8.45	4363
	Yes	2.00	6.83	397
Loess K	No	8.65	6.53	65
	Yes	1.95	6.61	69
Loess M	No	6.75	6.66	40
	Yes	1.20	6.68	44

### 3.2. 적조제거 실험결과

연안어장 준설퇴적물이 *Cochlodinium polykrikoides*을 효과적으로 제거할 수 있는 최적조건을 알아내는 실험을 통해 다음 결과를 얻었다. 제거효율을 황토에서의 결과와 비교했다. 각 과정을 세 번 이상 반복해서 얻은 실험결과의 표준편차는 10% 이내이었다.

#### 3.2.1. 토양 투입량

Table 4의 실험결과에 나타난 것처럼 준설퇴적물의 투입량이 증가할수록 적조제거율은 큰 차이를 보이면서 증가했다. 준설퇴적물의 투입량이 6 g/L 이상일 경우 *Cochlodinium polykrikoides*의 제거효율이 60분 후 73~93%로 상당히 높았다. 이 결과는 황토를 가지고 동일실험을 했을 때의 제거효율인 61~90%(M황토) 혹은 71~97%(K황토)와 비슷하였다. 준설퇴적물을 투입한 후 현미경 관찰 결과, *Cochlodinium polykrikoides*이 분해된 흔적이 많이 있었고 유영하는 생물은 시간이 지남에 따라 점차 움직임이 느려졌다.

#### 3.2.2. 토양 입자 크기

Fig. 3에 나타난 실험결과에 의하면 준설퇴적물의 입자크기가 작을수록 적조제거율이 높게 나타났다.<sup>7)</sup> 100 μm 이하의 준설퇴적물을 사용해서 최고 93%의 제거율을 얻었는데, 이 결과는 황토의 제거율(90~97%)과 큰 차이가 없었다. 또한 반응시간이 길어질수록 제거율은 증가했다. 준설퇴적물과 황토는 투입 후 빨리 가라앉았으며 *Cochlodinium polykrikoides*의 움직임은 토양투입 후 점차 느려졌다. 토양을 투입하지 않고 가만히 둔 비커에 들어있던 *Cochlodinium polykrikoides*은 20% 정도 가라앉았다. 이 실험결과는 황토의 입자크기가 작을수록 적조제거율이 향상했다는 기존 연구결과와 일치하며 다음 적조제거 메커니즘을 뒷받침하는 결과이다.<sup>7)</sup>

적조제거제를 적조가 발생된 해수에 살포할 경우 다음과 같

Table 4. Removal efficiencies of *Cochlodinium polykrikoides* according to the dosage of dredged sediment and loess

Soil	Reaction time (min)	Removal efficiency (%)			
		4 g/L	6 g/L	7 g/L	10 g/L
Dredged sediment	10	56	60	72	77
	30	60	70	83	83
	60	62	73	88	93
Loess M	10	45	55	66	72
	30	49	59	75	85
	60	51	61	84	90
Loess K	10	53	64	81	81
	30	55	70	85	91
	60	60	71	92	97

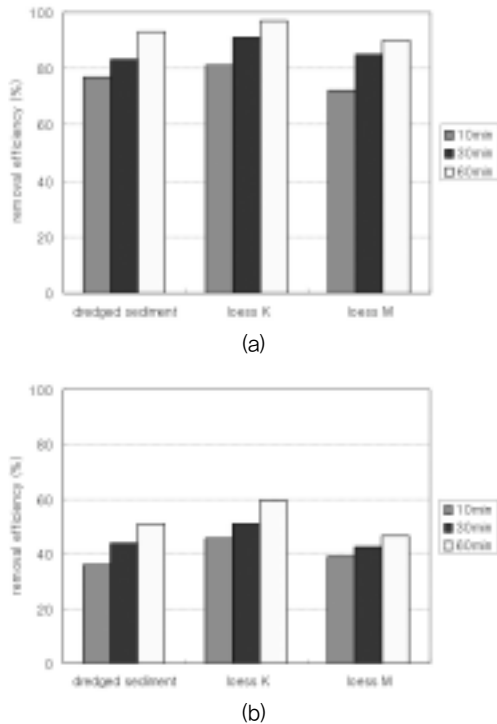


Fig. 3. Removal efficiencies of *Cochlodinium polykrioides* according to the size of dredged sediment and loess: (a) <100 μm, (b) 100 μm <f<200 μm

은 원리에 의해 적조가 제거된다. 적조생물층의 깊이가 3 m 내외되는 해수에 입자크기가 작고 표면적이 넓은 준설퇴적물이 살포되면 가볍기 때문에 빠르게 침강하기보다는 부유분산하며 적조생물과 충분히 충돌하고 준설퇴적물의 표면 혹은 다공질층에 적조생물이 흡착되어 제거된다. 해수중 적조생물은 준설퇴적물에 응집·침전되어 제거되고, 광합성을 못하게되어 결국 죽게된다.<sup>20,21)</sup>

### 3.2.3. 토양의 열처리

칼슘이 주요성분인 굴폐각과 조개가 많이 포함된 연안어장 준설퇴적물을 750℃ 이상에서 열처리하면 CaCO<sub>3</sub>이 CaO로 변하고 적조제거 효과를 높일 수 있다고 판단되어 대량 준설퇴적물의 일부를 900℃에서 열처리해서 실험했다. 이는 황토에 석회를 첨가하여 적조제거에 사용하면서 열처리했던 기존 연구결과를 참고한 것이다.<sup>19)</sup>

Table 5에서 보는 바와 같이, 준설퇴적물의 열처리가 적조제거율에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 나타나 이후 실험에서는 열처리한 준설퇴적물을 사용하지 않았다. Table 3에서 보듯이 준설퇴적물을 900℃에서 열처리하면 CEC가 매우 감소했고 전기전도도 또한 감소했다. 즉, 토양표면이 적조생물을 흡착하기 어렵게 변형되어 CaO가 생성되더라도 전체적으로는 제거효율이 증가하지 않았다고 사료된다.

Table 5. Removal efficiencies of *Cochlodinium polykrioides* by the thermal treatment of dredged sediment

Soil	Reaction time (min)	Removal efficiency (%)	
		<100 μm	100 μm <f<200 μm
Dredged sediment	10	72	36
	30	77	44
	60	85	51
Dredged sediment with thermal treatment at 900℃	10	70	33
	30	75	41
	60	87	48

Table 6. Removal efficiencies of *Cochlodinium polykrioides* by besprinkling the dredged sediment containing 20% MgO or 20% CaO additives

Reaction time (min)	Removal efficiency (%)		
	without additive	CaO additive	MgO additive
10	77	90	69
30	83	98	75
60	93	99	91

### 3.2.4. 첨가제 종류

첨가제 혼합에 따른 적조제거효율의 차이는 Table 6에 정리되어있다. 준설퇴적물에 CaO를 첨가하면 적조제거율이 10분 후에 90%, 1시간 후에 99%까지 증가했다. 그러나 MgO를 첨가하면 오히려 제거율이 감소했다. CaO를 첨가한 실험에서는 시간이 지남에 따라 적조생물의 움직임이 매우 느려지며 활발하게 유포하는 생물이 드물었다. 특히 분해된 흔적이 많이 보였다. 또한 pH가 8.6~9.5 정도까지 올라갔다. MgO를 첨가했을 때의 pH는 8.6~10.0까지 올라가서 CaO 경우보다 더 높았다. 다른 연구자의 결과에 의하면 황토에 CaO를 첨가해서 사용했을 때 제거효율이 향상되었고 MgO는 석회로 인해 저질토가 경화되는 결점을 해소하였다.<sup>19)</sup> 본 연구결과는 황토에 CaO를 첨가해서 사용한 기존 연구결과와 일치했다.

### 3.2.5. 칼슘함유 첨가제

Fig. 4에서 보는 바와 같이 칼슘함유 물질 중 CaO나 Ca(OH)<sub>2</sub>를 준설퇴적물에 첨가한 경우, 적조제거효율이 높았다. CaCO<sub>3</sub>를 첨가한 경우에는 준설퇴적물만 사용했을 때의 결과와 비슷했다. 반응시간이 10분일때는 칼슘첨가제 유무에 상관없이 적조제거율이 비슷했으나 30분 후에는 CaO와 Ca(OH)<sub>2</sub>를 첨가한 준설퇴적물이 적조제거에 효과를 나타내기 시작했다. 특히, Ca(OH)<sub>2</sub>를 첨가한 준설퇴적물을 사용했을 때의 효율이 급속하게 증가하였다. 반응시작 60분 후 CaO와 Ca(OH)<sub>2</sub>를 첨가한 준설퇴적물에 의한 적조제거율이 90%가 넘었다. 현미경 관찰 결과, CaO와 Ca(OH)<sub>2</sub>를 투입한 용기에서는 시간이 지남에 따라 생물의 움직임이 점차 느려지고 60분 후에는 적조생물이 분해된 흔적이 많이 보였다.

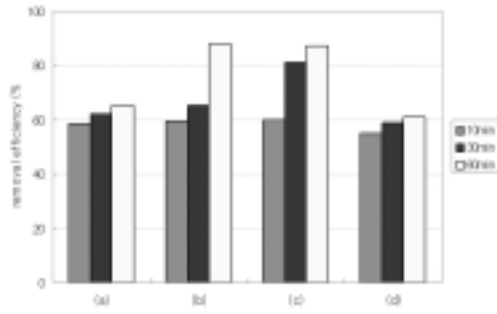


Fig. 4. Removal efficiencies of *Cochlodinium polykrioides* using dredged sediment mixed with 10% CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>, and CaCO<sub>3</sub>: (a) dredged sediment, (b) dredged sediment + CaO, (c) dredged sediment + Ca(OH)<sub>2</sub>, (d) dredged sediment + CaCO<sub>3</sub>

Table 7. Removal efficiencies of *Cochlodinium polykrioides* according to the amount of CaO added into dredged sediment

Soil	Reaction time (min)	Removal efficiency (%)		
		5% CaO	10% CaO	20% CaO
Dredged sediment	10	78	83	86
	30	81	89	99
	60	90	95	99
Loess	10	75	81	99
	30	81	88	99
	60	88	94	99

### 3.2.6. 첨가제(CaO) 함량

Table 7의 실험결과에서 보는 것처럼 첨가제인 CaO의 함량을 5%, 10%, 20%로 증가시키면 적조제거율은 증가했다. 그러나 CaO 함량이 너무 높은 준설퇴적물을 적조발생 지역에 사용한다면 급격한 pH 상승 우려가 있기 때문에 CaO를 20% 이하로 첨가하는 것이 필요하다. 황토의 경우도 CaO 첨가제의 함량을 증가시키면 적조제거율이 증가했다.

### 3.2.7. 적조 분포 깊이

Fig. 5의 실험결과에서 보는 바와 같이 *Cochlodinium polykrioides* 이 존재하는 깊이가 깊어질수록 적조제거효율은 증가했다. 바다에서 적조가 발생하는 깊이는 3 m 내외이고, *Cochlodinium polykrioides* 대부분이 1 m 깊이 이내에 존재한다. 이 실험결과는 실제 바다에서 적조를 제어할 때 실험실에서의 결과와 같거나 혹은 더 나은 제거효율을 얻을 수 있음을 보여준다. 적조제거시 준설퇴적물 투입량에 관한 실험에서 적정 투입량이 6~10 g/L 정도이었으므로, 실제 바다에서 투입시 단위면적당(1 m<sup>2</sup>) 건조한 준설퇴적물 기준으로 6~10 kg/m<sup>3</sup> 정도를 살포하는 것이 적당하다.

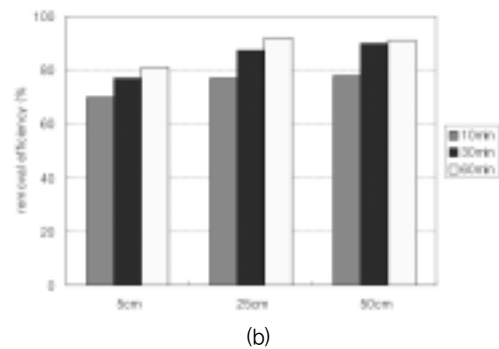
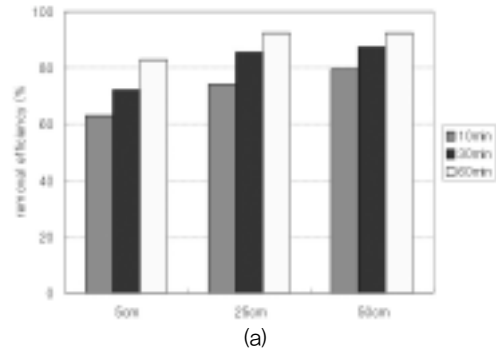


Fig. 5. Removal efficiencies of *Cochlodinium polykrioides* according to the depth profile of *Cochlodinium polykrioides*: (a) dredged sediment, (b) loess M

## 4. 결론

본 연구는 양식장으로서의 기능을 상실한 연안어장 준설퇴적물을 적조제거에 재활용하기 위한 것이다. 즉 버려지는 준설퇴적물을 활용하여 수질개선용 황토 대체물질을 개발하고자한다. 연안어장 준설퇴적물은 대부분이 100 μm 이하일 정도로 입자크기가 작고, 알루미늄, 칼슘, 철과 같은 물질을 다량 함유하고 있어서 유해적조생물인 *Cochlodinium polykrioides*을 제거하는데 효과적이었다.

본 연구의 실험결과를 바탕으로 적조가 발생한 해역에 살포할 적조제거 물질의 제조방법을 설명하면 다음과 같다. 연안어장 준설퇴적물 대부분의 크기가 100 μm 이하이면 분급하지 않고 그냥 사용할 수 있다. 만일 그렇지 않다면 분급을 해서 90% 이상이 100 μm 이하인 상태가 되도록해서 사용한다. 적정 입자크기를 만족하는 준설퇴적물에 첨가제[CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>]의 농도가 건조중량기준으로 5~20%가 되도록 혼합하여 제조한다.

본 연구에서 개발한 적조제거제는 해수에 부유분산되어 1 시간 이내에 적조생물을 효율적으로 제거함으로써 해수 생태계를 유지하고 수산생물을 보존하기 위해 고안된 것으로, 준설퇴적물의 입자크기와 칼슘성분의 첨가량 변화에 따른 적조

제거율을 고찰해서 최적의 조건을 도출하고 궁극적으로 효율을 극대화하는 효과가 있다. 연안어장 준설퇴적물 살포법은 기존의 황토살포법을 대체할 수 있을 정도로 처리효율이 뛰어나며 환경친화적인 방법이다. 또한 본 연구에서 사용한 방법은 양식장으로서의 기능을 상실한 연안어장에서 발생하는 준설퇴적물을 재활용해서 경제적인 가치를 창출한다는데 그 의미가 크다.

#### KSEE

## 사 사

본 연구는 2003년도 해양수산부에서 시행한 수산특정연구 개발사업(2003-791-02-001)에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Dubois, V., Abriak, N.E., Zentar, and R., Ballivy, G., "The use of marine sediments as a pavement base material," *Waste Manage.*, **29**(2), 774~782(2009).
- Siham, K., Fabrice, B., Edine, A.N., and Patrick, D., "Marine dredged sediments as new materials resource for road construction," *Waste Manage.*, **28**, 919~928(2008).
- Zentar R., Dubois, V., and Abriak, N.E., "Mechanical behavior and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments," *Resour. Conserv. Recy.*, **52**, 947~954 (2008).
- 김정배, 이필용, 김창숙, 손광태, 김형철, "연안 양식장 퇴적물을 이용한 비료화 가능성 연구," *한국환경과학회지*, **10**(4), 275~280 (2001).
- 류정근, 황기형, 김귀영, 김숙양, 박영태, "적조방제용 황토살포의 효과분석 및 개선방안에 관한 연구," *한국해양수산개발원 기본연구보고서* (2004).
- 박지현, 이병호, "적조방제용 황토살포의 양을 줄일 수 있는 첨가제에 대한 연구," *한국환경과학회지*, **16**(6), 745~750(2007).
- 윤종섭, 김승현, 윤조희, "황토살포에 의한 적조생물 제거," *대한환경공학회지*, **25**(3), 358~368(2003).
- 강성재, 임성일, 이병현, "미세스크린과 오존을 이용한 적조생물 제거," *한국수처리학회지*, **9**(4), 11~17(2001)
- 배헌민, 김창숙, 김숙양, 조용철, 윤성중, "황토의 적조구제효과 및 전해수 혼합에 의한 새로운 적조구제 기술," 2000년도 추계 수산관련학회 공동학술발표회, 143~144(2000).
- 김성재, 조규태, "적조생물의 구제 1. IOSP에 의한 적조생물의 응집제거," *한국수산학회지*, **33**(5), 448~454(2000).
- 이병대, "고화된 정수슬러지를 이용한 적조 제거," *한국폐기물학회지*, **23**(2), 91~96(2006).
- 박지현, 이병호, "적조 방제용 황토살포가 연안 저서생태계에 미치는 영향," *한국환경과학회지*, **15**(11), 1035~1043(2006).
- Sumner, M.E. and Miller, W.P., "Cation exchange capacity and exchange coefficients," *Methods of Soil Analysis. Part3. Chemical Methods*, Soil Sci. Soc. Am. Inc., pp.1201~1229 (1996).
- Grove, J.H., Fowler, C.S., and Sumner, M.E., "Determination of the charge character of selected acid soils," *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **46**, 32~38(1982).
- Zelazny, L.W., He, L., and Vanwormhoudt, A., "Charge analysis of soils and anion exchange," *Methods of Soil Analysis. Part3. Chemical Methods*, Soil Sci. Soc. Am. Inc., pp.1244~1248(1996).
- Keith, L.H., *Compilation of EPAs sampling and Analysis Methods*, 2nd ed., Lewis, pp 99~100(1998)
- Guillard, R.R.L, and Ryther, D., "Studies of marine planktonic diatoms. I. Cyclotellaana Hustedt and Detonula confervacea (Cleve) Gran," *Can. J. Microbiol.*, **8**, 229~239(1962).
- 해양수산부, "해양환경공정시험방법," 275~277(2002).
- 양한춘, "연안바다의 저질토 및 수질 개선제," *국내특허 10-2002-0035715*(2002).
- 김성재, "소성골괘각분말과 황토의 동시 사용에 의한 적조생물에 응집," *한국수산학회지*, **36**(6), 716~722(2003).
- 김성재, "해수 중에서 자연상태 황토입자의 침강특성," *한국수산학회지*, **32**(6), 706~712(1999)