

수산양식 부산물을 이용한 퇴적물 개선 및 효율 평가

김상수[†] · 황성자^{*} · 조아영^{*} · 김평중^{**}
국립수산과학원(*연구사, *연구원, **연구관)

Efficiency Assessment of Aquaculture By-product as Sediment Remediation Material

Sang-Soo KIM[†] · Seoung-Ja HWANG^{*} · A-Young CHO^{*} · Pyoung-Joong KIM^{**}

National Institute of Fisheries Science([†]researcher, ^{*}research assistant, ^{**}senior researcher)

Abstract

This study was carried out to evaluate aquaculture by-products, abalone and oyster shell, as sediment amendments and compare their efficiency with those of commercially available products. It was revealed that four remediation materials could effectively lower the COD and AVS of organically enriched sediment mainly by dilution effect. Moreover, remediation materials made of abalone or oyster shell showed as similar remediation efficiency as compared with commercial amendments. It also suggested that in order to reduce COD and AVS to the level of 90% of original concentration, any of four remediation materials could be applied with the amount of 10~40 kg to square meter of organically enriched sediments.

Key words : Sediment remediation, Aquaculture by-product, Abalone shell, Oyster shell, Commercial amendment

I. 서론

양식장 하부의 퇴적층은 양식생물의 분변, 폐사체, 잉여 사료의 유입 등 외부로부터 다양한 유기물이 유입되어 대부분 유기물 집적도가 높다. 퇴적된 유기물이 혐기상태에서 분해되면 황화수소와 같은 유독가스가 발생하게 되어 양식생물에 생육을 저해하게 된다(NFRDI, 2003).

그러므로 유기물 퇴적이 높고 황화수소와 같은 유해한 가스 발생이 우려되는 양식장의 퇴적환경을 개선하고 복원하기 위한 사후 관리방법 개발이 지속적으로 요구되고 있으며, 현재까지 알려진 사후 관리방법으로는 준설과 해저경운(MLTMA, 2010) 등과 같은 물리적 방법과 황토

(Oh, 2003), 모래(Murakami et al., 1998; Kang et al., 2016), 패각(Asaoka et al., 2009a; Park et al., 2011), 수산화 마그네슘(NFRDI, 2003), 제강슬래그(Asaoka and Yamamoto, 2010; Kim et al., 2010; Park, 2011; Shin and Kim, 2014), 석탄재(Asaoka et al., 2009b; Kim et al., 2014), zeolite(Kim and Kim, 2004) 등과 같은 물질을 살포하는 화학적 방법, 그리고 퇴적 유기물을 분해할 수 있는 미생물을 이용한 생물학적 방법(Bae, 2011; Choi and Park, 2007; Jang, 2006) 등이 보고되어 있다.

그러나 준설, 해저경운 같은 물리적 방법은 현장에서 적용하고자 할 때에는 양식장이 장애물로 작용할 뿐만 아니라 조류 소탕 등과 같은 물리적 제한요인 때문에 적용하기가 용이하지 않을 뿐만

[†] Corresponding author : 061-690-8960, kim31683@korea.kr

* 이 논문은 국립수산과학원 수산과학연구소사업(R2019026)과 완도군 지원으로 수행되었음

아니라 퇴적물 재부유와 준설된 퇴적물의 사후 처리가 문제점으로 지적되고 있다.

이와는 달리 노후 퇴적물 개선을 위한 화학물질과 미생물을 이용하는 생물화학적 처리방법은 준설이나 해저경운과 같은 방법에 비해 현장적용이 비교적 쉽고 작은 비용이 소요되는 장점이 있으나 기존에 보고된 퇴적물 개선물질과 미생물은 종류에 따라 퇴적환경 개선 효과의 차이가 클 뿐만 아니라 살포된 개선물질이 해저 생태계에 영향을 줄 수 있다는 우려가 있다. 이러한 측면에서 생태계에 주는 영향이 적은 친환경적인 개선물질의 개발이 지속적으로 요구되고 있는 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 유기물 퇴적이 높은 양식장의 퇴적 환경을 효과적으로 개선할 수 있는 개선물질로서 대량 발생되고 있는 수산양식 부산물인 전복과 굴의 폐각을 이용하여 노후 퇴적물의 개선 가능성과 효율성을 평가하고자 하였으며, 현재 노후 퇴적물 개선제로 시판되고 있는 제품과 비교하여 퇴적물 개선효과를 검증하고, 개선 효율을 경제적으로 달성할 수 있는 최적 사용량을 도출하고자 한다.

II. 연구 방법

1. 퇴적물 개선물질

수산양식 부산물인 전복 폐각(abalone shell)과 굴 폐각(oyster shell)으로 조제한 개선물질과 시판 중인 개선물질인 클린라이트(Cleanlite)와 EM흙공(EM soil ball)을 이용하여 퇴적물 개선효과를 시험하고 효율을 비교하였다.

시험에 사용한 전복폐각은 완도군 보길면 백도리 현지에서 수거하여 먼저 이물질들을 제거하기 위해 폐각을 수돗물로 세척하고 그늘에서 건조한 다음, 폐각에 서식할 가능성이 있는 다모류(polydora)를 사멸시키기 위해 회화로(450 °C)에서 1시간동안 가열처리하였다. 열처리한 폐각은 막

자사발(mortar)로 분쇄하여 0.5~2 mm 입자를 시료로 사용하였다.

굴 폐각 분말(oyster shell powder), 클린라이트와 EM흙공은 시판되는 제품을 구입하여 사용하였으며 클린라이트와 EM흙공은 각각 제오라이트(zeolite)와 황토(yellow soil)에 유기물 분해 미생물을 흡착 혼합하여 판매되는 제품이며 성상은 [Fig. 1]과 같다.



[Fig. 1] Appearance of remediation materials; (A) Abalone shell powder, (B) Oyster shell powder, (C) Cleanlite, (D) EM soil ball.

굴 폐각 분말과 클린라이트의 성상은 입경이 2 mm 이하의 입자 형태이었으나 EM흙공은 지름이 약 9 cm인 구형 제품으로서 무게 측정의 편의성을 위해 막자사발(mortar)로 거칠게 분쇄한 후 2 mm 체(sieve)를 이용하여 체가름한 후 0.5~2 mm 입자를 사용하였다. 개선물질 4종과 퇴적물의 화학적 특성은 <Table 1>과 같다.

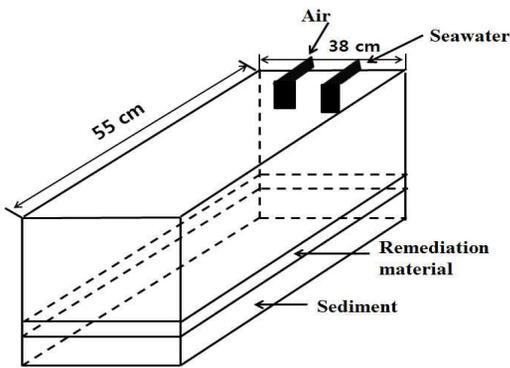
2. 개선효과 및 살포량 산정

퇴적물 개선 효과와 최소 살포량을 산정하기 위하여 [Fig. 2]와 같이 사각 수조(55D×38W×30H cm, 평면적 약 0.2 m²)에 해저퇴적물과 해수를 채운 후, 실제 현장 적용방법을 고려하여 각 개선물질을 수면에서 살포하는 방식으로 퇴적물 표면에 균일하게 살포하여 실내에서 30일 동안 퇴적물의 화학적 변화를 조사하였다.

<Table 1> Chemical properties of remediation materials and sediment

Material	Water content (%)	Chemical oxygen demand (COD) (mgO ₂ /g-dw)	Acid volatile sulfide (AVS) (mgS/g-dw)	Ignition loss(IL) (%)
Abalone shell powder	0.0	1.1	0.00	0.1
Oyster shell powder	0.4	7.1	0.00	6.8
Cleanlite™*	20.3	1.5	0.00	4.8
EM soil ball™	5.3	5.6	0.00	4.1
Sediment	59.1	28.0	1.09	6.2

* Trade mark



[Fig. 2] Scheme of overflow-type water bath for efficiency test of remediation material.

수조에 투입한 퇴적물은 유기물 함량이 높은 것으로 보고(Noh et al., 2006; Yoon et al., 2007) 된 여수 가막만 북부의 가막섬 인근 해역에서 Van veen grab으로 채취하였다. 채취된 퇴적물(상층부 7 cm)을 망목(mesh) 2 mm 체를 사용하여 거대 입자를 제거하고 혼합하여 균질화한 다음, 사각형 수조에 퇴적물 깊이가 15±1 cm가 되도록 조절하여 넣고, 퇴적물 재부유가 발생하지 않도록 해수와 공기를 overflow방식으로 주입하면서 10일간 안정화시켰다. 이 때 상층부 해수의 교환 속도는 1일 2회, 공기 주입량은 용존산소(dissolved oxygen)가 6 mg/L 이상으로 유지되도록 조절하였으며 수온은 16±1 °C로 조절하였다.

정해진 비율 이상의 퇴적물 개선효과가 나타날 수 있도록 개선물질의 살포량을 결정하기 위하여 동일한 조건으로 제작한 수조에 4종의 개선물질

을 각각 평방미터(m²) 당 2.5 kg과 10 kg의 비율이 되도록 살포하여 30일간 예비실험을 실시한 결과, 개선 효율은 대부분 10% 미만으로 나타나(결과 미제시) 이 결과를 참고하여 개선물질 살포량을 평방미터(m²) 당 20 kg과 40 kg의 비율이 되도록 설정하였다.

예비실험과 동일한 방법으로 개선효율 시험 수조를 제작하여 30일 동안 개선물질을 살포하지 않은 대조구와 개선물질 살포 수조에서 일정한 시간 간격으로 퇴적물의 화학적 변화를 조사하기 위한 시료를 채취하였다. 시료 채취 방법은 지름 5 cm의 원통형 PVC 파이프를 퇴적물이 부유되지 않도록 주의하면서 퇴적물의 수직방향으로 삽입하여 단면적 12.5 cm², 높이 15±1 cm 크기의 개선효과 지표 성분 분석용 시료를 채취하였다.

개선효과 평가를 위한 퇴적물의 화학적 지표성분(target compound)으로서 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD), 산취발성 황화물(acid volatile sulfide, AVS), 강열감량(ignition loss, IL)을 선정하여 채취된 시료를 해양환경공정시험기준(MOF, 2014)에 준하여 분석하였으며 시료의 함수량(water content)을 측정하여 건조 중량의 농도로 환산하였다.

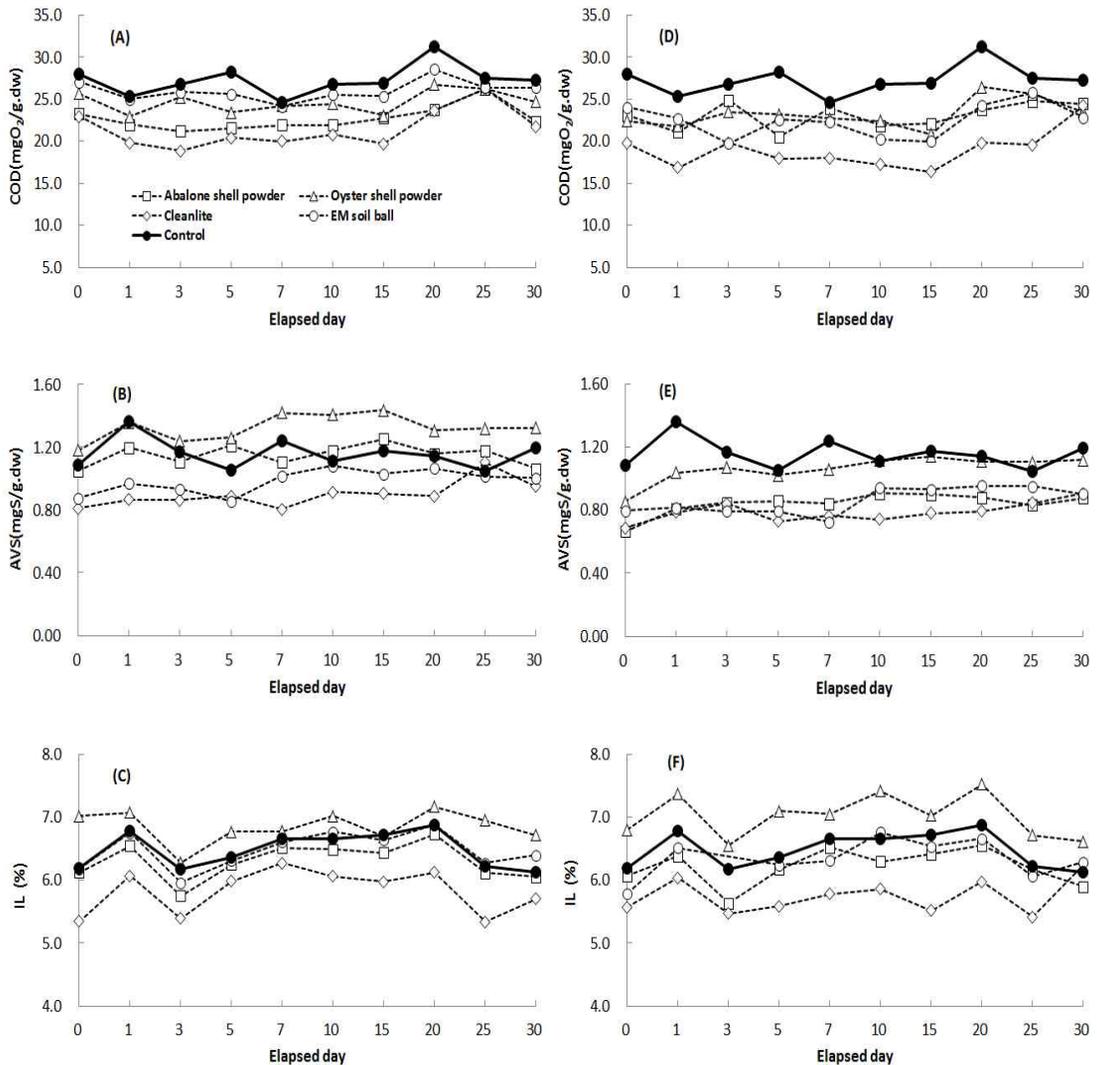
그리고 개선물질의 효율은 MOF(2015)가 제안한(식1)을 이용하여 계산하였으며 대조구와 살포구간의 농도 차이는 분산분석(ANOVA)을 이용하여 5%의 유의수준에서 검증하였다(p<0.05).

$$\text{개선효율(remediation efficiency, \%)} = \frac{(\text{대조구 평균 농도} - \text{살포구 평균 농도})}{\text{대조구 평균 농도}} \times 100 \dots (\text{식1})$$

개선물질을 평방미터(m²)당 20 kg과 40 kg으로 각각 살포하고 30일 동안 살포구와 대조구(0 kg)의 화학적 산소요구량(COD), 강열감량(IL)과 산취 발생 황화물(AVS) 변화를 조사한 결과는 [Fig. 3]과 같이 나타났으며 결과를 요약하면 <Table 2>와 같다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 살포량에 따른 개선 효과



[Fig. 3] Temporal variation of COD, AVS and IL by the application of remediation materials (A), (B), (C) at 20 kg/m² and (D), (E), (F) at 40 kg/m² rate.

<Table 2> Variation of target compounds in the sediment applied with remediation material for 30 days

Applicaton rate (kg/m ²)	Target compound		Abalone shell powder	Oyster shell powder	Cleanlite	EM soil ball	Control (0 kg/m ²)
20	COD (mgO ₂ /g.dw)	Range	21.2~26.3	23.0~26.7	18.9~26.2	24.2~28.6	24.6~31.2
		Mean±SD	22.7±1.5	24.7±1.3	21.4±2.3	26.0±1.2	27.3±1.8
	AVS (mgS/g.dw)	Range	1.05~1.25	1.18~1.43	0.80~1.10	0.86~1.08	1.05~1.36
		Mean±SD	1.15±0.07	1.32±0.08	0.90±0.08	0.98±0.08	1.16±0.10
	IL (%)	Range	5.8~6.7	6.3~7.2	5.3~6.3	6.0~6.9	6.1~6.9
		Mean±SD	6.3±0.3	6.8±0.3	5.8±0.4	6.5±0.3	6.5±0.3
40	COD (mgO ₂ /g.dw)	Range	20.6~24.9	20.9~26.4	16.4~24.3	19.8~25.8	24.6~31.2
		Mean±SD	23.1±1.6	23.3±1.7	19.0±2.3	22.5±2.0	27.3±1.8
	AVS (mgS/g.dw)	Range	0.67~0.91	0.86~1.14	0.69~0.91	0.73~0.96	1.05~1.36
		Mean±SD	0.84±0.07	1.06±0.08	0.79±0.06	0.86±0.08	1.16±0.10
	IL (%)	Range	5.6~6.6	6.6~7.5	5.4~6.3	5.8~10.2	6.1~6.9
		Mean±SD	6.2±0.3	7.0±0.3	5.75±0.3	6.7±1.2	6.5±0.3

대조구와 개선물질을 각각 20 kg/m²과 40 kg/m²을 살포한 시험구에서 30일 동안 COD의 변화는 대조구의 경우 24.6~31.2 mg/g.dw의 범위를 보였으며, 20 kg/m² 살포구의 COD는 전복패각의 경우 21.2~26.3 mg/g.dw, 굴패각은 23.0~26.7 mg/g.dw, 클린라이트는 18.9~26.2 mg/g.dw, EM흡공은 24.2~28.6 mg/g.dw의 범위를 각각 보였다.

40 kg/m² 살포구의 COD는 전복패각의 경우 20.58~24.88 mg/g.dw, 굴패각 20.85~26.44 mg/g.dw, 클린라이트 16.39~24.25 mg/g.dw, EM흡공 19.77~25.81 mg/g.dw의 범위를 각각 보였다.

그리고 강열감량은 대조구의 경우 6.12~6.87%의 범위를 나타내었으며, 4종 개선물질 20 kg/m² 살포구 중 전복패각은 5.75~6.73%, 굴패각은 6.28~ 7.17%, 클린라이트는 5.34~6.27%, EM흡공은 5.96~ 6.88% 인 것으로 각각 나타났다. 40 kg/m² 살포구 중 전복패각은 5.64~6.55%, 굴패각은 6.55~7.52%, 클린라이트는 5.41~6.25%, EM흡공은 5.79~10.15%의 범위를 각각 보였다.

그리고 AVS의 변화는 대조구에서 1.05~1.36 mg/g.dw의 범위였으며, 20 kg/m² 살포구 중 전복패각은 1.05~1.25 mg/g.dw, 굴패각은 1.18~1.43

mg/g.dw, 클린라이트는 0.80~1.10 mg/g.dw, EM흡공은 0.86~1.08 mg/g.dw의 범위를 보였다. 40 kg/m² 살포구에서는 전복패각의 경우 0.67~0.91 mg/g.dw, 굴패각은 0.86~1.14 mg/g.dw, 클린라이트는 0.69~0.91 mg/g.dw, EM흡공은 0.73~0.96 mg/g.dw의 범위에서 변동하는 것으로 각각 나타났다.

30일 동안 COD 변화를 조사한 결과 대조구와 4종의 개선물질을 살포한 시험구 간의 차이는 유의한 것으로 나타났다(p<0.05). 강열감량의 변화를 조사한 결과에서는 EM흡공을 20 kg/m² 및 40 kg/m²의 비율로 살포한 시험구는 대조구와 유의한 차이를 보이지 않았으나(p>0.05), 그 밖의 개선물질 살포구는 모두 유의한 차이를 보였다(p<0.05).

AVS는 전복패각 20 kg/m² 살포구와 굴패각 40 kg/m² 살포구는 대조구와 비교하여 유의한 차이를 보이지 않았으나, 그 밖의 개선물질을 살포한 시험구는 모두 유의한 차이를 보였다(p<0.05).

이와 같이 대부분 살포구의 화학적 산소요구량(COD)과 강열감량(IL)은 시간이 경과함에 따라 변동을 보였고 분산분석에서 나타난 결과처럼 일

부 살포구에서 대조구와 차이를 보였으나 지표 성분의 뚜렷한 감소 경향은 보이지 않는 것으로 판단되었다.

이처럼 대조구와 비교하여 개선물질 살포구의 COD, 강열감량 및 AVS가 뚜렷한 감소 경향을 보이지 않으면서 대조구와 비교하여 차이가 나타난 것은 본 연구에서 사용한 개선물질에 의해 퇴적물에 포함된 유기물과 황화합물이 분해되어 제거되었을 가능성보다 퇴적물에 비해 상대적으로 유기물과 황 함유량이 낮은 개선물질을 살포함에 따른 희석효과(dilution effect) 때문인 것으로 판단되었으며(Kim et al., 2013) 살포된 개선제를 배제한 상태에서 순수한 퇴적물의 개선효과 평가 지표 성분을 분석할 수 있는 방법의 개발이 필요한 것으로 판단되었다.

2 개선효율 평가 및 최소 살포량 선정

퇴적환경을 개선하기 위한 개선제 효율의 평가는 개선제 살포를 통해 제거 또는 저감하고자 하는 대상 물질(유기물, 중금속 등)의 종류에 따라 차이가 있을 수 있으나 유기물 저감을 위한 개선물질의 사용은 개선물질을 살포한 퇴적물의 화학적 산소요구량(COD), 총유기탄소(TOC)함량, 산화발성 황화물(AVS) 함량의 변화를 조사하여 평가하는 방법이 알려져 있다(MOF, 2015).

그러나 퇴적환경 개선물질의 사용에 따른 조사 결과로만 개선효율을 평가하기는 쉽지 않을 뿐만 아니라 개선제 종류 및 퇴적물의 초기 성상과 평가 방법 등에 따라 상이한 결과를 초래할 가능성을 내포하고 있다.

MOF (2015)는 어장 퇴적물에 대한 개선제 효율 평가를 위해 퇴적물에 개선제를 살포한 후 15일간 시간 경과에 따라 퇴적물의 총유기탄소(TOC)와 산화발성 황화물(AVS)를 측정하고 그 결과의 평균값을 대조구와 비교하는 ‘평균 계산법’(식(1) 참조)을 이용하여 개선효율을 평가하는

방법을 제안하였으며, 이 때 평가할 수 있는 개선효율의 최소값을 10 % 이상인 것으로 보고하였다.

본 연구에서 평가한 개선물질 4종에 포함되어 있는 COD, AVS와 강열감량의 농도는 개선효과 평가를 위해 사용된 퇴적물의 농도보다 매우 낮다(<Table 1>). 수조에 퇴적물을 투입한 후 각각의 개선물질을 살포하여 일정 시간이 경과함에 따라 농도 변화를 조사하기 위한 시료를 수조의 퇴적물로부터 채취하는 과정에서 상대적으로 효율 평가 지표성분의 농도가 낮은 개선물질이 투입됨에 따른 희석효과(dilution effect)를 배제하고 평가할 수 있는 과학적인 방법이 보고되어 있지 않으며 이러한 원인 때문에 본 연구 결과에도 필연적으로 희석효과가 포함되어 있을 것으로 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 MOF(2015)가 제시한 ‘평균 계산법(mean-based calculation method)’을 이용하여 희석효과를 배제하지 않고 개선효율을 계산하였으며 결과는 <Table 3>과 같다.

본 연구에서 사용한 퇴적물 개선물질 4종에 의한 COD의 개선효율은 20 kg/m² 살포구에서는 4.6~21.4 %의 범위를 보였으며, 40 kg/m² 살포구에서는 14.7~30.4 %의 범위인 것으로 나타났다.

강열감량의 개선효율은 20 kg/m² 살포구에서는 -5.7~10.0 %의 범위를 보였으며, 40 kg/m² 살포구에서는 -8.4~11.2 %의 범위인 것으로 나타났다.

개선물질 4종에 의한 AVS 개선효율은 20 kg/m² 살포구에서는 -14.2~22.5 %의 범위를 보였으며, 40 kg/m² 살포구에서는 8.2~32.0 %의 범위인 것으로 나타났다. 굴 패각 분말을 살포한 시험구에서 AVS와 IL의 개선효율이 (-)값을 보이고 농도가 증가한 것으로 나타난 것은 <Table 1>에서 나타낸 결과처럼 굴 패각 분말에 잔존하는 황성분과 유기물 함량이 높았기 때문인 것으로 판단되었다.

<Table 3> Efficiency of remediation material by the mean-based calculation method(refer to equation 1)

Target compound	Application rate (kg/m ²)	Remediation efficiency (%)			
		Abalone shell powder	Oyster shell powder	Cleanlite	EM soil ball
COD	20	16.7	9.4	21.4	4.6
	40	15.4	14.7	30.4	17.6
AVS	20	1.0	-14.2	22.5	15.2
	40	27.3	8.2	32.0	25.7
IL	20	2.7	-5.7	10.0	0.0
	40	4.1	-8.4	11.2	-4.0

<Table 4> Optimal application quantity(Q) required for 10% efficiency of the remediation materials (unit: per square meter)

Target compound	Abalone shell powder	Oyster shell powder	Cleanlite	EM soil ball
COD	10 < Q < 20 kg	Q ≈ 20 kg	10 < Q < 20 kg	20 < Q < 40 kg
AVS	20 < Q < 40 kg	Q > 40 kg	10 < Q < 20 kg	10 < Q < 20 kg
IL	Not achievable with ≤40 kg application	Not achievable with ≤40 kg application	Q ≥ 20 kg	Not achievable with ≤40 kg application

평균 계산법을 이용한 개선효율 결과를 이용하여 각 개선물질별로 10% 이상의 개선효율을 달성하기 위해 살포해야할 개선물질의 최소량을 산정하고 결과를 <Table 4>에 나타내었다.

퇴적 유기물 양의 지표인 화학적 산소요구량(COD)을 10% 이상 감소시키기 위하여 전복 폐각은 퇴적물 평방미터(m²)에 10~20 kg, 굴 폐각은 20 kg 이상, 클린라이트는 10~20 kg 그리고 EM 흡공은 20~40 kg 을 살포하면 개선 효과가 나타날 것으로 판단되었다.

그리고 강열감량은 클린라이트를 평방미터(m²)에 10~20 kg 살포하여야 10%의 개선효과가 나타날 것으로 판단되었으나, 그 밖의 개선물질은 평방미터(m²)당 40 kg 이하의 양을 살포하면 개선 효과가 나타나지 않을 것으로 판단되었다.

그리고 4종의 개선물질 효능 실험에서 산 휘발

성 황화물(AVS)의 개선은 개선물질의 살포량 증가에 따라 뚜렷한 증감의 패턴이 관찰되지 않았다. 이처럼 AVS의 개선효과 시험에서 살포량 별로 일정한 패턴을 보이지 않은 이유는 각 수조별로 퇴적물을 담아 시험을 시작하기 전에 퇴적물의 초기 성상을 균일화하기 위한 균질화 단계에서의 문제와 각 개선물질을 수조 퇴적물 표면에 살포할 때 발생한 불균일 살포 때문으로 추정되며, 이러한 결과는 <Table 5>에 나타낸 것처럼 기존에 보고된 연구에서도 동일한 실험조건에서 본 연구와 유사한 편차가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 결과를 감안하여 본 연구에서의 AVS의 개선효율을 개략적으로 평가해 보면, 전복 폐각과 굴 폐각은 평방미터(m²)당 40 kg 이상을 살포하여야 할 것으로 판단되며, 클린라이트와 EM

흡공은 평방미터(m²) 당 10~20 kg 의 양을 살포하면 개선 효과가 나타날 수 있을 것으로 판단되었다.

이상의 결과를 요약하면 본 연구에서 사용한 개선물질을 이용하여 10% 이상의 퇴적환경 개선 효율을 달성하기 위해서는 퇴적물 평방미터(m²) 당 약 10~40 kg 을 살포하여야 COD와 AVS의 개선효과가 나타나며, IL의 개선효과는 클린라이트를 제외한 그 밖의 개선물질은 평방미터(m²) 당 40 kg 이하로 살포할 경우에는 10% 이상의 개선 효과가 나타나지 않을 것으로 평가되었다.

그리고 본 연구결과에서 나타난 바와 같이 수산양식 과정에서 발생한 부산물인 전복 폐각과 굴 폐각을 이용하여 조제한 개선물질은 기존에 판매되고 있는 개선물질과 퇴적환경 개선효율을

비교하여 볼 때 퇴적물의 강열감량(IL)의 개선에는 다소 저조한 성능을 보이는 것으로 나타났지만 COD와 AVS의 저감효과는 판매 제품과 비교하여도 유사한 성능을 나타낸 것으로 판단되며 더욱이 전복과 굴 폐각을 이용한 개선물질의 제조에는 원료 구입에 필요한 비용이 다른 제품에 비해 상대적으로 낮은 장점이 있어 개선물질로서 활용이 가능할 것으로 판단되었다.

그러나 본 연구에서 도출된 최적 살포량은 실내 실험결과에 기초하여 평가된 결과이므로 현장 적용 효과 시험이 요구되며, 이러한 개선물질을 퇴적물에 효과적으로 살포하기 위하여 잠수 살포 또는 살포 후 경운 등의 방법에 대한 검증과 살포된 개선물질 유실 가능성을 고려한 살포 프로그램 개발이 필요할 것으로 판단된다.

<Table 5> Efficiency of sediment remediation materials for reduction of AVS(retrieved from MOF, 2015)

Remediation material	Exp. period (month)	Application size(m)	Application rate(kg/m ²)	Remediation efficiency(%)	Reference
Biogranule	11	10×10	0.0025	15	Jang, 2006
Bio-colony	6	5×5, 10×10	0.32	56.3	Kim <i>et al.</i> , 2010
CaO ₂ +microbial material	2	10×10	0.05	10.1	Bae, 2011
Yellow soil	1	5.8×5.8	8.9 13.4	NE* 13.2	Oh, 2003
Mg(OH) ₂	8	200×400	1	NE	NFRDI, 2003
MgO+CaO +SiO ₂ +Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃ mixture	4	**	0.2	35.7	Choi and Park, 2007
Oyster shell	21	-	1000 1000	26.9 46.5	Goh, 2014
Oyster shell	23	30×32	~20	NE (deteriorated)	Park <i>et al.</i> , 2011
Abalone shell powder	1	0.55×0.38	20 40	1.0 27.3	This study
Oyster shell powder	1	0.55×0.38	20 40	NE 8.2	

* No effect

** Application area was not specified.

References

- Asaoka, S and Yamamoto T(2010). Blast Furnace Slag can Effectively Remediate Coastal Marine Sediments Affected by Organic Enrichment. *Mar Pollut Bull* 60(4), 573~578.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.11.007>
- Asaoka, S, Yamamoto T, Kondo S and Hayakawa S(2009a). Removal of Hydrogen Sulfide Using Crushed Oyster Shell from Pore Water to Remediate Organically Enriched Ccoastal Marine Sediments. *Biores Tech* 100(18), 4127~4132.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.075>
- Asaoka, S, Yamamoto T, Yoshioka I and Tanaka H(2009b). Remediation of Coastal Marine Sediments using Granulated Coal Ash. *J Hazard. Mater* 172(1), 92~98.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.140>
- Bae HJ(2011). Environmental Change and Its Enhancement of a Marine Sediment by Using Useful Micorbial and Chemical Treatments. Masters dissertation. Kyungsang university, Jinju. 1~130.
- Choi BY and Park SY(2007). An Aid for Environmental Improvement for Shellfish Farm. Registered Patent of Korea 10-0766968.
- Goh GD(2014). The Impact of Spreading Oyster Shells on Tideland Environments. Masters dissertation. Chonnam university, Yeosu. 1~77.
- Jang JD(2006). Development and Effects of Biogranule for the Improvement of Sediment Quality of Manila Clam *Ruditapes philippinarum* Culture Bed. Ph. D. dissertation, Kyungsang university, Jinju. 1~129.
- Kang K, Kim YK and Park SJ(2016). Natural Zeolite and Sand Capping Treatment for Interrupting the Release of Cd, Cr, Cu, and Zn from Marine Contaminated Sediment and Stabilizing the Heavy Metals. *J Korean Soc Environ Eng* 38(3), 135~143.
<https://doi.org/10.4491/KSEE.2016.38.3.135>
- Kim JW, Seo JB, Kang MG, Kim ID and Oh KJ(2010). A Study on Phosphate Removal Characteristic of EAF Slag for Submarine Cover Material. *CLEAN TECHNOLOGY* 16(4), 258~264.
- Kim KH., Lee IC, Ryu SH, Saito T and Hibino T(2014). Application of Granulated Coal Ash for Remediation of Coastal Sediment. *J Kor Soc Mar Environ Energy* 17(1), 1~7.
<https://doi.org/10.7846/JKOSMEE.2014.17.1.1>
- Kim NG, Choi JD and Jang JG(2010). Effect of Sediment Quality Improvement Material (bio-colony) Applied to Fish Farm. *Proceedings Kor Fish Sci Academic conference(Spring)*, 55~56.
- Kim PJ, Park SY, Kim SS, Jang SJ, Jeon SB and Ju JS(2013). Biogeochemistry of Alkaline and Alkaline Earth Elements in the Surface Sediment of the Gamak Bay. *J Kor Soc of Mar Environ and Safety* 18(1). 1~13.
- Kim WH and Kim DH(2004). Assessment for Effect of Water Environment by Addition of Improvement Agents on Sediments. *J Kor Soc Mar Environ and Safety* 10(1), 69~73.
- MLTMA (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs)(2010). Development of Treatment Plan and Technologies for Marine Polluted Sediment[III]. 1~515.
- MOF (Ministry of Oceans and Fisheries)(2014). Official Standard Method for the Analysis of Marine Environment. 1~490.
- MOF(2015). Establishment of Certification System for Remediation Material and Equipment of Aquaculture Ground, 13~140.
- Murakami K, Hosokawa Y and Talano S(1998). Monitoring on Bottom Sediment Quality Improvement by Sand Capping in Mikawa Bay. *Bull Coastal Oceanogr* 36(1), 83~89.
- NFRDI(2003). Studies on the Development of Remediation Technologies for the Polluted Sediments in Aged Aquaculture Grounds. 1~295.
- Noh IH, Yoon YH, Kim DI and Park JS(2006). The Spatio-temporal Distribution of Organic Matter on the Surface Sediment and Its Origin in Gamak Bay Korea. *J Kor Soc Mar Environ & Energy* 9(1), 1~13.
- Oh HG(2003). A Study on the Improvement Effect of Sediment Quality by Using the Improvement Material. Masters dissertation. Yeosu university. 1~108.
- Park GS(2011). Application of Steel-making(BOF) Slag for In-Situ Remediation of Subaqueous Contaminated Sediments. *Mag Kor Soc Agri Eng* 53(4), 22~33.

Park KJ, Yoon SP, Song JH, Han HS and O HC, (2011). Improvement of Manila Clam (*Ruditapes philippinarum*) Habitat Condition by Adding Crushed Oyster (*Crassostrea gigas*) Shells to the Substratum. Kor J Maracol 27(4), 291~297.
<https://doi.org/10.9710/kjm.2011.27.4.291>

Shin WS and Kim YK(2014). Stabilization of Mixed Heavy Metals in Contaminated Marine Sediment Using Steel Slag, J Navig Port Res 38(3), 269~275.
<https://doi.org/10.5394/KINPR.2014.38.3.269>

Yoon SP, Jung RH, Kim SS, Lee JS, Park JS, Lee WC, Choi WJ, and Kim YJ.(2007). Characteristics of Benthic Environment and Polychaete Communities of Gamak Bay, Korea. The Sea 12(4), 287~304.

-
- Received : 07 February, 2020
 - Revised : 16 March, 2020
 - Accepted : 26 March, 2020