

수저 퇴적물 오염 개선을 위한 제강슬래그 복토정화법의 활용



박 광 석
(재)포항산업과학연구원
ksparkrist@rist.re.kr

1. 서론

오염이 심한 연안역이나 담수호의 경우 수질보다도 저질의 상태가 훨씬 오염되어 있는 경우가 많다. 이는 수체 안팎의 수괴 교환이 원활히 이루어지지 못할 뿐 아니라 오염 물질의 지속적인 수체 내 유입으로 인해 저층이 심하게 부패되기 때문이다. 이러한 저층 퇴적물에서는 이매패류 등과 같은 저서생물의 생존이 거의 불가능하며, 퇴적물로부터 용출되어 나오는 오염물질에 의해 수질 또한 지속적으로 오염되어 간다. 오염 퇴적물 층의 pH 감소, 수체 내 저층의 용존산소(DO) 감소 및 영양염류(인산염, 용존 무기질소 등)와 H₂S 등의 급격한 증가는 전반적으로 수질의 부영양화를 가속화시키고, 결국 적조나 녹조, 청조 발생의 원인이 된다.

우리나라 남해안은 그 동안 피조개, 진주담치, 참굴 등을 대량으로 양식해 왔으며, 매년 양식 어장을 확대하면서 막대한 생산을 거두어 어업인 소득증대에 지대한 역할을 해왔던 해역이다. 그러나 1990년대 초부터 양식

생산량이 점차 감소했을 뿐 아니라 종묘 생산량 또한 부진하기 시작하여 최근에는 이들의 종묘 생산과 양식 생산량이 현저히 급감한 실정이다. 참굴의 경우에는 이웃 일본과 중국으로부터 치패를 수입해 오는 지경에 이르렀다. 이와 같은 생산 부진의 근본적인 이유로는 양식어장의 증가와 밀식에 의한 양식장의 노후화 및 황폐화를 들 수 있다. 굴의 주 양식 구역인 남해안 일대가 산업화와 도시화의 급속한 진전에 따른 오염 부하량의 증대로 부영양화가 진행되면서 일부 해역에서는 빈산소 층이 형성되고 적조가 발생하는 등 서식 환경이 날로 악화되고 있는 것이다.

일본의 경우 1950년~1960년에 나타난 양식 생물의 생산량 감소와 대량 폐사에 대하여 해수 교환이 취약한 만 구석에까지 양식 시설이 증가함으로써 만 내외간 해수 교환의 약화, 해저에 퇴적된 유기물의 부패로 인한 저층의 무산소화와 황화수소의 대량 발생을 그 원인으로 지적한 바 있다(일본수산화회, 1977).

미국에서도 수질 오염의 주된 원인으로 하천, 호소,

연안역의 오염된 퇴적물이 지적되어 왔다. 미 환경청 (US EPA)에서 운영 중인 환경복원을 위한 슈퍼펀드 (Superfund) 프로그램의 “우선순위목록”(National Priority List: NPL) 개소들 중 1/8~1/4 가량이 수저의 퇴적물 오염 문제를 안고 있으며, 퇴적물 내 오염 물질 들은 주로 산업 활동, 농업 배수, 도시 배수 등에서 기인 한 것으로 파악되고 있다. 이러한 수저 퇴적물 기인 오염 물질의 수층 및 생태계 먹이 사슬 내로의 유입을 차단하기 위해 사용하는 방법으로는 오염된 퇴적물의 물리적 제거(준설 후 투기 또는 재활용 등), 오염된 퇴적층을 교란시키지 않은 상태로 물리적 방벽을 설치하는 등의 고립, 차단(*in-situ containment*), 오염되지 않은 토양, 암석 또는 인공적 재료 등을 피복하여 퇴적물 내 오염물질의 수층 내 유입을 차단시키는 복토정화법(*in-situ capping*), 퇴적물 내 오염물질에 대한 화학적, 생물학적 처리 또는 고정(*in-situ treatment*), 그리고 오

염물질의 자연적인 생물 분해 작용 등을 이용하는 무조치(*natural recovery/restoration, no action*) 방안 등이 있다(그림 1). 이들 중 복토정화법은 직접 현장에서 오염된 퇴적 환경을 개선하는 데에 있어서 다른 방법들에 비해 간편하면서도 효과적이며 경제적인 방안으로 꼽을 수 있다.

이와 같이 오염된 수저 퇴적 환경의 개선 없이는 안전한 수질과 건강한 저서생태계의 확보나 연안역의 생산성 증대를 기대할 수 없는 바, 본 기고에서는 일관 제철 공정에서 발생하는 부산물인 “전로 제강슬래그”(이하 제강슬래그)를 복토정화용 재료로 활용해 오염된 퇴적 환경을 정화/복원하는 방법에 관하여 소개하고자 한다. 이를 통해 현재 국내에서 주로 시행 중인 준설 위주의 오염 퇴적물 처리 프로그램에서 벗어나 적용 환경에 따라 보다 경제적이면서 효과적일 수 있는 복토정화 방안과 새로운 복토정화용 재료에 대한 이해를 돕고자 한다.

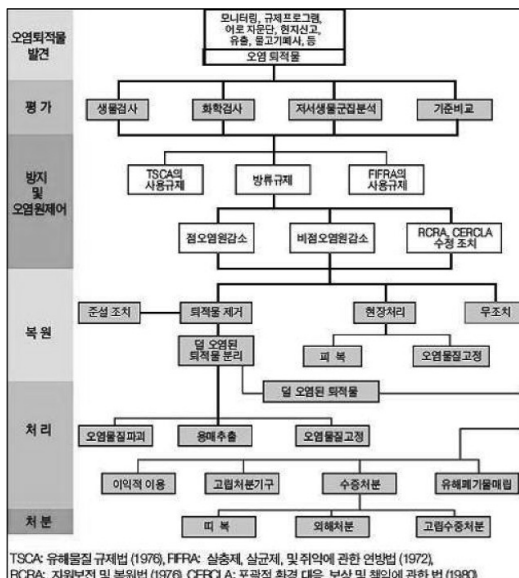


그림 1. 미국의 오염퇴적물 관리체계도

2. 이론적 배경

가. 수저 퇴적물 복토정화법(*in-situ sediment capping*)의 개요

일반적으로 퇴적물 내 오염물질은 오랜 기간 동안 퇴적물 입자와 결합된 형태로 퇴적층 내에 존재할 수 있으나 다음과 같은 여러 가지 작용들에 의해 수층으로 유입될 수 있다.

- 오염된 퇴적물 입자의 수층 내 재부유
- 저서생물에 의한 퇴적층 교란(*bioturbation*)
- 퇴적층을 통과하는 지하수 흐름
- 오염물질의 퇴적물-수층 간 농도 확산

복토정화법(*in-situ capping*)은 오염된 퇴적층 위에 비오염 층을 설치함으로써 물리적, 화학적으로 퇴적물 내 오염물질이 주변 수체로 유입되는 것을 차단하는 방법을 일컫는다. 이 때, 오염 퇴적물의 상부 복토는 모래(sand), 실트(silt), 암석(rock) 또는 토목용 섬유(geotextile fabric) 등으로 이루어진 단일 혹은 복수의 층으로 시설되어 왔다. 복토층의 두께는 여러 가지 환경인자(오염 물질, 오염 정도, 물리적 환경 등)에 따라 달라질 수 있는데, 상기 복토 재료들의 경우 30~150cm 수준이 일반적으로 적용되고 있다. 복토정화법은 퇴적물의 제거나 이동, 전처리 등이 필요 없는 단일 단계의 처리 방안으로서 복잡하지 않고 비용 면에서 경제적인 복원 방법으로 알려져 있다. 복토정화법은 2002년 현재 미국 내 81개소의 하천, 호수, 항만 등 연안역을 포함해 일본, 유럽 등 세계적으로 109개소에 적용된 바 있다.

복토정화법은 복토층에 의한 오염물질의 화학적 흡착, 물리적 고립/차단, 생물교란 작용의 감소, 자연 회복의 촉진 등을 통해 퇴적층 내 오염물질의 수층 내 용출을 억제시킬 수 있다. 따라서 복토정화법을 적용할 경우 오염퇴적층의 고립 및 주변수와의 반응 차단, 생물에 의한 교란 방지, 건강한 저서 생태계의 회복 등을 고려하여야 한다. 최근 들어 오염물질에 대한 흡착능이 강한 반응성 복토재(active capping material)가 개발되면서 기존의 복토용 재료들에 비해 오염 개선 효과를 높일 수 있게 되었는데, 이러한 재료들을 사용할 경우 이론적으로 또는 실험실적 수준의 테스트 상으로 볼 때 복토층의 두께를 수 mm 수준까지도 줄일 수 있다. 재료별 오염물질 제거 기능은 다음과 같다.

· Aquablok® ; 퇴적물로부터의 오염물질 확산 및 이

류 유입 제어

- Zero-valent iron(Fe(0)) ; Dechlorination 및 중금속 환원 촉진
- Phosphate mineral(Apatite) ; 중금속 흡착 촉진
- Cokes ; 흡착 관련 반응 촉진
- BionSoil® ; 유기오염물질 분해 촉진
- Natural organic sorbent ; 흡착 관련 반응 촉진
- 전로 제강슬래그(BOFS) ; 인산염/황화수소 및 중금속 흡착 촉진

이들 중 특히 본 기고에서 소개하고자 하는 제강슬래그는 일관 제철 공정에서 발생하는 부산물로서 오염물질에 대한 우수한 흡착능으로 수처리 공정 등에서 흡착 재료로 이미 활용되고 있다. 또한, 화학적/물리적으로 안정하면서 입도 분별 등 비교적 간단한 부가 공정을 통해 생산이 가능하므로 경제성을 담보할 수 있으며, 제철 공정의 특성상 안정적이고 지속적인 제품 공급이 가능하다는 장점을 갖고 있다.

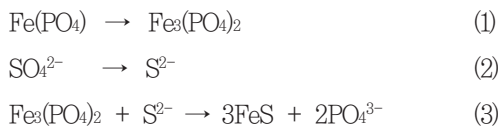
한편, 복토정화법은 이미 오염이 심각하게 진행되어 생물상이 빈약하고, 건강한 저서 생태계 조성을 위해 퇴적층 기질의 변화가 요구되는 수역에서 효과적인 것으로 알려져 있다. 복토정화법 적용 후 생물에 대한 서식지 변동 영향을 고찰한 결과 환경 개선에 의해 수개월~수년에 걸쳐 새로운 저서생물상이 정착함으로써 종 다양성, 영양수준, 생체량, 성장 면에서 긍정적인 증가 경향이 확인되었다(US Washington State Department of Ecology, 1997). 복토 후의 퇴적상이 원래의 상태로 안정화되면서 기존 세립 기질과 복토한 조립 기질에 적합한 종들이 정착함으로써 종 다양성이 높아진 것이다.

국내에서도 장기 양식에 따른 퇴적물 오염을 막기 위

해 지금까지 시행하고 있는 방법으로 어장 수용력을 산정하여 어장보전적 양식을 시도하는 방법과 경운, 해저 폭기, 해수 교환량 증대, 준설, 점토(황토) 살포 등이 있는데, 현재 이들 중 점토(황토) 살포 후 경운이나 객토를 실시하는 방법이 가장 널리 이용되고 있다. 이 역시 복토정화법의 일종으로서 일찍부터 농업 분야에서 토질 개량을 위해 적용해 왔고, 수산 분야에서도 피조개 양식장을 중심으로 수년 전부터 시도되어 왔다. 일본의 경우 오염된 저질 개선을 위해 점토를 살포한 결과 저질에 의한 용존 산소 소비가 약 40%, 인산염 용출은 50~90%가 억제되는 것으로 보고 된 바 있다.

점토(황토)와 달리 전로 제강슬래그 복토정화법의 경우 적용하는 슬래그 입도를 적절히 조절할 수 있고 이를 통해 점토(황토) 살포시 발생할 수 있는 부유물질 확산에 의한 2차적 오염 영향을 방지할 수 있다. 또한 적용 가능 환경에 있어서도 퇴적물 표층에서 서식하는 바지락, 피조개 등 패류 양식장의 저질(주로 세립질의 연성 저질)뿐만 아니라 주로 수층 내에서 양식하는 굴, 우렁챙이 등의 양식장 저질(배개 등이 혼입된 경성 저질 또는 사질 기반) 환경 개선에 모두 적합한 것으로 판단된다.

나. 제강슬래그 복토정화법을 통한 오염 개선 기구
무산소 환경에 해당하는 폐쇄성 내만역과 오염된 내수면의 퇴적층 내에서 황화수소와 인산염은 다음과 같은 반응을 통해 주변 수역 내로 용출된다(K. Sugawara *et al.*, 1957).



그러나, 제강슬래그 복토를 통해 슬래그 내의 Fe, Mn 등 금속 성분이 황화물을 형성하여 황화수소 용출을 억제시키게 되며(반응 (4)), 이어서 위의 반응 (3)이 일어나지 않게 되어 인산염의 수층 내 유입을 차단하게 된다(그림 2).

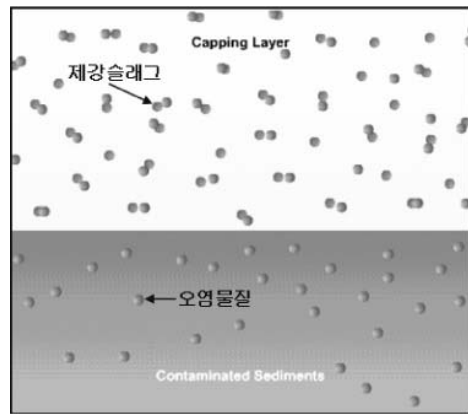
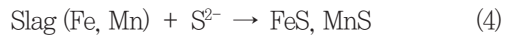
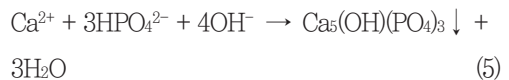


그림 2. 제강슬래그 복토정화법의 모식도

또한, 제강슬래그의 경우 슬래그 내에 존재하는 칼슘 성분(Free CaO)이 수층 내 존재하는 인산염과 반응하여 다음과 같이 난용성의 수산화아파타이트(Hydroxy-Apatite)를 형성한다. 따라서 이 반응을 통해 퇴적층으로부터 용출되어서는 인산염의 수중 용존 농도 증가를 억제할 수 있다.



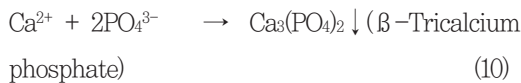
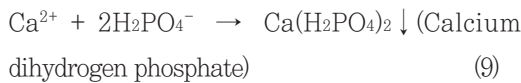
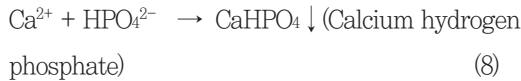
제강슬래그 복토시 물리적 용출 억제 효과는 약 50%, 흡착에 의한 제거 효과는 약 40%, 그리고 화학적 반응에 의한 효과는 약 10%로 추정된다(H. Yamada *et al.*,

1987).

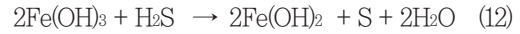
한편, 제강슬래그 복토에 의해 복토층 상부 저층수 중의 인산염과 황화수소는 다음 반응들을 통해서도 그 농도가 저감되는 것으로 설명할 수 있는데, 먼저 철 이온에 의한 인산염 제거는 다음을 통해 가능하다.



또한, 위의 반응 (5)외에도 제강슬래그로부터 유리된 칼슘 이온은 아래의 반응들을 통해서도 인산염의 제거가 가능하다.



오염된 저질로부터 발생하는 H_2S 는 다음과 같이 슬래그로부터 용출되는 철 성분과 반응하여 황화철의 고형물 형태로 제거되고 황 성분만 유리됨으로써 더 이상 독성 작용을 나타내지 않게 된다. 오염이 심각해진 퇴적층 내에서는 유기물 분해에 의해 pH6 전후의 낮은 값을 나타내고 황화물의 대부분이 H_2S 형태를 취하게 되는데, 여기에 제강슬래그를 복토함으로써 제강슬래그중의 FeO_x 성분과 오염된 저질 중의 H_2S 가 아래 반응들을 통해 수층으로의 용출을 저감할 수 있다.



다. 제강슬래그의 특성 및 경제성 평가

1) 제강슬래그의 특성

본 기고에서 제강슬래그는 고로(용광로)에서 제조된 선철을 전로에서 정련할 때 발생하는 전로슬래그를 말한다. 고로에서 생산한 선철을 주원료로 하여 전로에서 주원료인 용융선철과 스크랩, 부원료인 생석회 등을 장입하고, 산소 랜스로 고압의 산소를 불어 넣어 격렬한 산화반응을 일으켜 원료 중의 탄소(C), 규소(Si), 인(P) 및 철(Fe) 등의 일부를 산화시킨다. 이러한 산화물은 CaO와 결합하여 슬래그를 형성하고 생성된 슬래그는 비중이 강보다 낮으므로 강과 분리된다.

제강슬래그는 그 구성에 있어서 CaO-Silicate를 기본으로 하고 있는데, 슬래그의 종류에 따라 표 1의 제강슬래그 조성 예와 같이 알루미늄(Al_2O_3), 마그네시아(MgO), 산화제1철(FeO), 산화망간(MnO) 등을 함유하고 있다. 표2에는 제강슬래그의 광물상을 나타내었다.

이러한 성분은 지구의 지각을 구성하는 주성분이며 또한 제철산업의 원료인 철광석 중에는 구리, 크롬 등의 금속성분은 거의 함유되어 있지 않은 것이 사용된다. 이들 성분은 고로에서 광석으로부터 대부분은 환원되어 금속으로 변해 선철의 미량성분으로 존재하고, 슬래그 중에 함유되지 않으므로 환경적으로 문제가 되는 중금속 등의 유해물질은 표 3에서 보이는 바와 같이 용출되지 않는다.

표 1. 제강슬래그의 화학조성 예(%)

구 분	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	T-Fe	MgO	MnO	S	P ₂ O ₅	TiO ₂
전로	11.2	41.5	1.4	20.0	6.6	5.4	0.08	1.7	1.5
탈류	14.8	55.8	2.1	2.8	0.9	0.7	2.65	0.5	0.5
탈인	22.1	53.2	2.1	6.0	1.4	3.6	0.18	4.8	1.7
Ladle분	9.2	55.0	28.7	0.2	6.2	0.2	0.3	0.03	-
Ladle괴	8.8	42.0	24.2	8.3	5.7	4.5	0.2	0.8	-
연주	13.5	36.4	22.8	10.0	5.6	-	0.07	0.60	-
전기로	14.0	25.0	5.0	27.0	4.5	3-6.5	0.02-0.2	0.3-0.9	0.3-1.0

표 2. 제강슬래그의 광물상과 그 화학조성 예(%)

광물상	구성비	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	CaO	TiO ₂	MnO	FeO, Fe ₂ O ₃
Dicalcium silicate Ca ₂ (SiO ₄ , PO ₄)	30-60	-	-	31-33	1-3	65-66	-	0-1	0-1
Tricalcium silicate (Mg, Ca, Mn, Fe) ₃ SiO ₅	0-30	0.5-1.0	0.4	23-25	0.5	70-73	-	0.5-1.5	2-3
Wustite (Fe, Mg, Ca, Mn)O	10-40	10-20	-	-	-	10-30	-	10-20	45-55
Lime (Ca, Mg, Mn, Fe)O	0-10	1-8	-	-	-	75-90	-	2-10	5-15
Dicalcium ferrite titanates Ca ₂ (Al, Fe) ₂ O ₅ -Ca ₃ Ti ₂ O ₇	5-10	-	5-8	-	-	62-65	10-25	-	5-20
Calcium aluminate 12CaO-7Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-

표 3. 제강슬래그의 유해중금속 용출시험 결과(mg/l)

구 분	Pb	Cu	As	Hg	Cd	Cr ⁶⁺	CN
용출시험 기준	3	3	1.5	0.005	0.3	1.5	1
용출시험 농도	<0.005	<0.01	<0.002	<0.0005	<0.002	<0.005	<0.005
해역 수질 기준	0.01	0.02	0.05	0.0005	0.01	0.05	0.01

제강슬래그는 일반적으로 용융상태에서 슬래그 운반차로 냉각 야드에 운반하여 공냉과 살수를 병행하면서 냉각, 고화되는데 고화된 슬래그는 파쇄, 제거를 공정을 거쳐 소정의 입도로 조정된다. 입도 구분시 철분은 자력

선별을 거쳐 제철원료로 회수 재사용되며 미립의 제강슬래그는 시멘트원료 등으로 활용되고 대형 입도의 것은 도로나 항만, 토목공사 등의 골재로 사용된다(표 4). 제강슬래그는 석회, 이산화규소, 산화철 등이 주성분이

표 4. 제강슬래그의 특성과 용도

구분	특성	용도
전로 제강슬래그	- 경질, 내마모성 - 수경성 - FeO, CaO, SiO ₂ 성분	- 도로용(아스콘골재) - 도로용(노반재) - 시멘트클링커원료 - 비료 및 토양개량제
	- 비료성분(CaO, SiO ₂ , MgO, FeO) - 내부마찰각 큼	- 항만공사용 재료 (sand compaction pile용 재료 등)

며 이들 성분은 대개 지각 또는 천연암석을 구성하는 것으로 골재의 형상은 천연암석과 비슷하다. 주요 특성으로는 밀도가 크고 모서리각이 많아 표면이 거칠며 약한 수경성과 팽창하는 성질이 있고, 용출수는 알칼리성을 나타낸다.

2) 복토정화용 재료로서의 경제성 평가

앞서 소개한 여러 가지 복토정화용 재료들(반응성 재료(active materials) 포함)에 대하여 복토정화 적용시 필요한 복토 두께 및 시설비용을 비교하면 아래의 그림 3과 같다(Carnegie Mellon University, 2003). 이 때 복토 적용 두께는 시설 후 100년간 퇴적층 내 오염물질이 주변 수체로 용출되지 않도록 할 수 있는 양을 모델을 통해 산정한 것이다.

다른 재료들과 비교할 때 제강슬래그는 복토 두께에

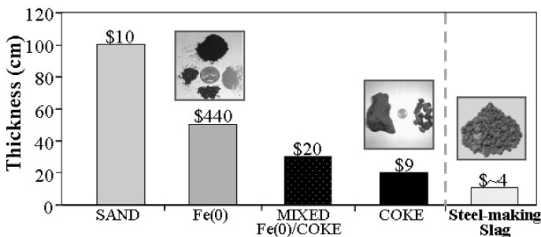


그림 3. 복토정화법에 사용되는 반응성 재료들의 적용 두께 및 경제성 비교

있어서도 10cm 이하로 그 양을 줄일 수 있으면서 시설비 역시 타 재료들에 비해 최소한 절반 이하로 절감할 수 있는 장점을 갖는다. 또한, 생산 공정을 통해 적용 환경에 적합한 입도 선별이 가능하므로 일반 모래에 비해 품질 관리가 용이하고 범용적일 수 있다는 부분도 그 장점으로 꼽을 수 있다.

라. 환경 개선을 위한 제강슬래그 활용 연구 동향

연안 환경을 포함한 수권 환경 내에서 퇴적물 오염 개선에 제강슬래그를 이용하려는 연구는 일본과 호주 등지에서 이미 실용화 단계에 있다. 일본의 경우 연안어장 정비개발법(74 제정)에서 정하고 있는 어장보전사업 내용 중 복토법(살포식)과 경운법에 있어서 5mm 이하 입도의 제강슬래그를 복토, 경운하는 방안을 그 적용 분야로 예시하고 있다. 오염이 심화된 폐쇄성 내만역의 퇴적물 상부에 제강슬래그를 복토함으로써 해서 퇴적물에 농축된 황화수소나 인산염의 용출을 억제하여 적조나 청조 발생을 방지하기 위한 연구는 주로 일본철강협회 산하 “철강슬래그의 기초와 응용연구회”를 중심으로 90년대에 그 기초가 이루어졌다. 이에 따르면 제강슬래그를 복토재로 활용한 실험실적 실험 및 양식장 적용 실험 결과 황화수소 용출이 억제되고, 저서 생물에 대한 악영향이 나타나지 않는 등 양호한 효과를 보고하고 있다. 또한, 저서생물에 대한 pH 영향 실험 결과에 있어서도 해수 유동에 의해 그 영향이 매우 미미하였고, 유해물질 용출 실험 결과도 해서복토재 사용 기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 이를 통해 동경만, 오사카만 등의 유기오염 퇴적층 오염 개선 사업에 본격적인 적용을 준비하고 있다(沼田哲始 등, 2001). 위 연구회에서는 산성비에 의해 파괴된 수목 및 호소 생태계를 복원하기 위한

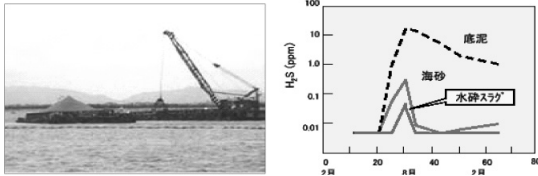


그림 4. 일본 中海 슬래그 복토 공사 전경 및 황화수소 발생 억제 효과

중화제로 제강슬래그를 사용하는 가능성도 제시하고 있다(일본철강협회, 1997).

한편, 일본 국토교통성 주관으로 시행된 시마네 현의 중해정화복사공사에서는 고로 수재슬래그를 오염 퇴적층에 복토함으로써 황화수소의 용출을 99% 이상 억제하고 저서생물의 종수 및 개체수, 습중량에 있어 기존 저질이나 해사(海砂)에 비해 우수한 생육 효과가 보고된 바 있다(주)JFE, 2001.9). 이밖에 연안역의 오염된 준설토를 처리함에 있어서 기존의 준설 후 공해상 투기 방법 대신 준설토의 연안 투기 및 제강슬래그 복토를 통한 용출 억제 방법을 도입하여 사업비 절감과 연안 친수 공간의 확보를 동시에 추구하려는 연구도 실용화 단계에 있다. 또한, 해양 식물플랑크톤의 대변식을 통해 대기 중 이산화탄소를 저감하기 위해 국제적으로 연구되고 있는 철 화합물의 투입 대신 제강슬래그 미분말을 철 공급원으로 주입하려는 연구 역시 일본 동북대를 중심으로 활발히 진행 중에 있다.

호주, 뉴질랜드 등에서는 주로 인공습지(CWS; Constructed Wetland System)와 강, 하천의 저층 복토재나 기반재로 제강슬래그를 이용함으로써 인 제거 효과를 노리는 응용 연구(Mann and Bavor, 1993)와 맹그로브 숲의 복원을 위해 제강슬래그를 부착 기질로 활용하려는 시도가 진행 중에 있다.

국내에서도 최근에는 제강슬래그를 포함한 산업 부산

물을 활용해 제작한 구조체를 해저에 산맥처럼 설치하여 인공적으로 용승류 어장을 조성하기 위한 정부 사업이 진행된 바 있다(해양수산부, 2005). 또한, 제강슬래그 구조체가 해조류 부착과 성장에 우수한 효과가 입증됨에 따라 갯녹음(백화현상) 등으로 사막화되고 있는 연안생태계를 복원하기 위한 바다숲 조성사업에 남해안 및 동해안을 중심으로 슬래그계 해중립초의 적용이 확대되고 있다(농림수산식품부, 2010~).

3. 국내 연안역 오염퇴적물 개선을 위한 적용 사례

제강슬래그 복토정화법 개발을 위해 실시한 실험실 규모의 시험으로부터 오염된 해저 퇴적물로부터 오염물질 용출을 억제하는 제강슬래그의 복토정화 효과가 매우 우수한 것으로 평가되었다(한기현 외, 1999). 국내에서 제강슬래그를 활용하여 복토정화재로서의 적용 가능성을 평가한 것은 상기 연구가 유일하다.

적정 복토 입도 및 복토량 산정을 위한 실험실적 시험 결과 입도 5~10mm인 경우 가장 우수한 오염 개선 효과를 나타냈는데, 이 때 인산염에 대한 용출 억제 효과는 99% 이상이었다. 이러한 결과는 실제 해역에서 제강슬래그를 복토할 경우 가장 먼저 고려해야 할 사항인 복토 과정에서의 부유물질(suspended solids; SS) 확산에 의한 2차적 오염을 최소화할 수 있음을 의미한다. 또한, 상기 입도로 단위 면적당 100kg/m² 이상 복토할 경우(복토 두께 ~4 cm에 해당) 97% 이상의 인산염 용출 억제 효과를 거둘 수 있었다. 현실적으로는 실제 수역에서 복토시 공극을 최소화하고, 현장 작업 여건 및 효율 등을 고려할 때 5~10cm 정도의 두께가 적절하다고 판

단된다. 전반적으로 상기 입도로 10cm 수준의 복토 두께만 유지한다면 대조구에 비해 97% 이상의 오염물질 용출 억제 효과를 얻을 수 있다.

현장에서 복토 시설 후 복토 재료의 고른 포설과 분포를 만들기 위해서는 형망작업을 통한 편평화 또는 바다갈이를 실시하는 것이 안전하다. 형망의 무게를 적절히 조절함으로써 부분적으로 생길 수 있는 시설 지역 내 둔덕을 평활하게 하는 후속 작업이 필요하며, 특히 저서성 패류(바지락, 피조개 등) 양식장의 경우 바다갈이를 병행함으로써 패류의 퇴적물 잠입성을 원활하게 해 줄 필요가 있다. 본 고에서도 저서성 패류 양식장의 경우 제강슬래그 복토 시설 후 형망선을 이용해 바다갈이를 실시한 바 있다.

가. Pilot 규모 시험 (주문진항 내)

제강슬래그를 이용한 복토정화 실시 전 주문진항 저층수의 초기 인산염 농도는 0.04~0.05ppm 수준으로 부영양화가 심각한 상태였으며, 수층 내에 적조 원인종들의 출현이 있었다. 실효역 적용 가능성 평가를 위해 제강슬래그 복토 시험구는 2m x 2m 크기의 소규모 방형구 안에 약 10cm 두께로 시설하였고, 시설 후 효과 검증을 위해 아래의 그림 5에서와 같이 제강슬래그 복토 지역과 비복토 지역의 퇴적층 상부에 아크릴 상자(sediment chamber)를 설치하고 주기적으로 수질 분석을 실시하였다. 이하 본 고에서 기술하는 모든 적용해역에 대하여 이러한 sediment chamber를 설치해 효과를 평가하였다.

두 시험구 간의 chamber 내부 인산염 농도는 복토법 적용 후 약 8일이 경과하면서 뚜렷해지기 시작하였는데, 비복토 지역의 경우 2개월 경과 후 초기 농도 0.04

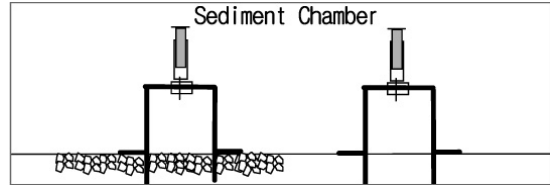


그림 5. 제강슬래그 복토정화법 적용 효과 분석을 위한 sediment chamber 설치 예

ppm 대비 2.4 ppm으로 약 60 배의 농도 증가를 기록한 반면 제강슬래그 복토 지역에서는 인 농도가 초기 농도 대비 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 이는 제강슬래그 복토에 의해 저층 퇴적물로부터의 인 용출이 상당히 억제되고 있음을 지시하는 것이다. 대조구인 비복토 지역과 비교하여 복토 지역의 인 농도 저감 효과는 2개월 기준으로 볼 때 95% 이상으로 나타났다.

이러한 복토 효과는 황화수소의 농도 변화에서 더욱 뚜렷하였는데, 2개월 경과 후 비복토 지역의 황화수소 농도는 초기 농도 0.01ppm 이하 대비 25ppm 수준으로 약 250배 이상 증가한 반면, 복토 지역의 경우는 초기 0.01ppm 이하의 농도가 거의 변화 없이 유지되었다. 이는 제강슬래그 복토 후 오염 퇴적물로부터의 황화수소 용출이 99% 이상 억제되었음을 지시한다. 기타 수질 및 저서생물 영향을 정리하면 표 5와 같고, 이를 통해 실효역 적용에 대한 충분한 가능성을 확보하였다.

한편, 제강슬래그 자체로부터의 중금속 용출에 의한 수질 영향을 알아보기 위해 sediment chamber 내에서의 중금속 농도 경시 변화를 분석한 결과, Fe, Zn를 제외한 모든 항목이 0.01ppm 이하로 해역 수질 기준을 만족하였다. Fe의 경우 전반적으로 복토 지역의 해수에서 비복토 지역보다 더 낮은 농도를 나타내었는데, 이는 오염 퇴적층의 혐기성 환경에서 용출되는 Fe가 제강슬래

표 5. 주문진항에서의 Pilot 시험 결과

구분	조사 항목	결과 (비복토지역 대비)	비고
오염물질 용출 억제	황화수소	> 99 %	0.86g/m ² · day
	인산염	> 95 %	0.12g/m ² · day
수질 영향	pH	저해 영향 없음	pH 8~8.6
	중금속	악화 영향 없음	해역수질기준 이하
저서 생물 영향	생존률	생존률 우위	패류
	오염지표종	비존재	갯지렁이류 (Polydora ciliate, Polydora ligni 등)

그에 흡착되어 제거되는 기작에 의한 것으로 판단된다 (그림 6). 이러한 양상은 Zn의 농도 변화에서도 비슷하였고, 시간이 경과함에 따라 계속 감소하여 전반적으로 해역 수질 기준인 0.1ppm 이내로 유지됨으로써 Zn 역시 제강슬래그 복토에 따른 중금속 오염 영향은 없는 것으로 확인되었다.

또한, 제강슬래그 복토 후의 저서생물상 변화를 살펴보면 오염지표종(또는 기회종)으로 알려진 갯지렁이류들 중 Polydora ciliate, Polydora ligni 등이 비복토 지역에서 복토 지역에 비해 번성한 것으로 나타났는데, 이는 제강슬래그 복토를 통해 오염된 퇴적물로부터의 오염물질 용출이 억제됨으로써 저질 환경 개선의 효과에 의한 것으로 판단된다.

나. 실효적용 시험 (경남 통영 굴 양식장 내)

실효적용 시험을 통한 효과 평가를 위해 경남 통영의 고성만 내 개인 소유의 굴 양식장 0.5 ha(100m x 50m)를 대상으로 제강슬래그 약 1,300톤을 복토 시설하였다. 황화수소와 인산염 모두 비복토 지역에 비해 복토 지역에서 오염 퇴적물로부터의 용출이 95 % 이상 저감되었다(그림 7). 특히 황화수소 성분의 용출 저감은 오염 퇴적층과 직접적인 접촉을 갖는 수하식 굴 양식장 저층부의 굴 성장에 매우 유리하게 작용할 수 있다는 점에서 중요하다.

또한, 제강슬래그 복토정화에 의해 황화수소 용출이 억제되면서 복토 지역의 pH는 해역수질기준을 만족하는 반면, 비복토 지역에서는 유기물의 분해에 따른 황화수소 발생에 의해 상대적으로 낮은 수준을 나타내었다. 제강슬래그로부터의 중금속 용출 역시 앞서의 주문진항 내 pilot 시험 결과와 마찬가지로 전혀 문제가 되지 않는 것으로 나타났는데, 복토 지역의 chamber내 중금속 농도는 전 항목에 걸쳐 해역수질기준을 만족하였으며, 비복토 지역과 비교해서도 낮은 수준을 유지하였다.

한편, 굴 성장에 대한 영향을 알아보기 위해 시험 해역 내 굴의 각장, 각고, 각폭 및 습중량을 비교 분석한 결과에 따르면 특히 저층에서 전반적으로 제강슬래그 복토 지역 내 굴의 성장이 우세한 것으로 나타났다(그림

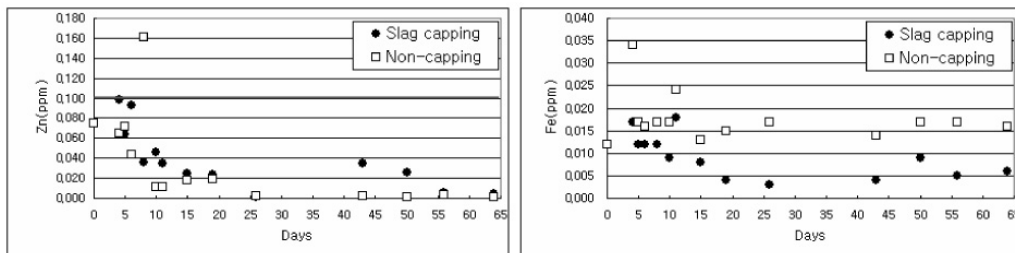


그림 6. 제강슬래그 복토정화법 적용 후 접촉 계면에서의 중금속 농도 변화

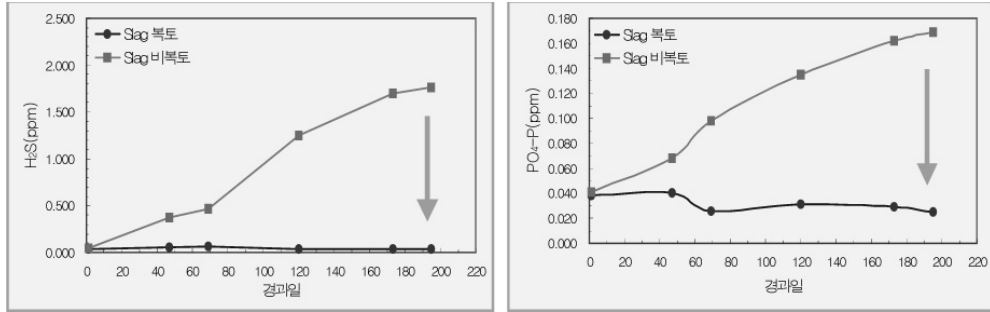


그림 7. 제강슬래그 복토정화법 적용 후 황화수소와 인산염 농도 변화 (고성만 굴 양식장)

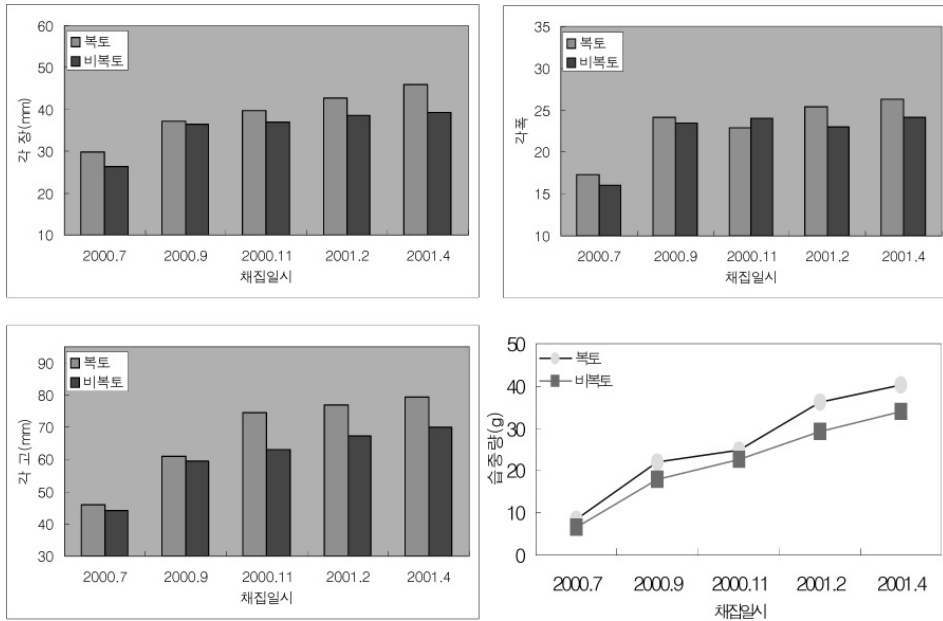


그림 8. 제강슬래그 복토정화법 적용 후 굴 성장의 경시 변화 (굴양식 수하연 저층부)

8). 습중량에 있어서는 비복토 지역 대비 약 20%의 우위를 보이고 있어 저층 퇴적물 환경의 개선을 통해 생산성이 증대된 것으로 판단된다. 이는 굴의 먹이 생물에 해당하는 식물플랑크톤의 개체수가 제강슬래그 복토 지역 저층부에서 비복토 지역에 비해 지속적으로 우위를

점하고 있음을 볼 때 저질 환경의 개선이 식물플랑크톤 밀도의 증가와 생산성 향상으로 이어졌음을 의미한다.

한편, 유용 지방산으로 분류되는 EPA, DHA 등 불포화 지방산의 굴 체내 함량에 있어서도 제강슬래그 복토 지역에서 성장한 굴에서 더 높은 경향을 나타내었는데,

이 역시 제강슬래그 복토에 따른 환경 개선 효과에 의해 먹이 생물(식물 플랑크톤)의 개체수(밀도 증가) 및 성분(지방산 증가)이 변화되어 이들 먹이 생물을 섭취한 굴의 성장과 체 성분에 양호한 효과를 발현시킨 것으로 판단된다.

4. 결론

이상으로 수역 내 오염 퇴적물 환경의 개선 및 정화 방안으로서 제철 공정에서 발생하는 부산물인 전로 제강슬래그를 반응성 복토 재료로 활용하는 복토정화법에 대하여 소개하였다. 여기에 소개된 적용 사례 이외에도 특히 최근 들어 생산성이 격감한 저서성 패류인 피조개 양식장을 대상으로 한 실험적 시험 결과 양식 생산성이 5배 이상 증가한 경우도 있었으며, 패류의 식품안정성에 있어서도 아무런 저해 영향이 없음이 밝혀진 바 있다.

이러한 복토정화법은 기존의 준설 위주의 오염 퇴적물 처리 방법에서 벗어나 보다 경제적이고 간편하면서도 오염 정화 효과를 오랜 동안 지속시킬 수 있는 장점을 지닌다. 아울러 산업 부산물의 환경친화적인 활용이라는 점에서도 중요한 의미를 가지며, 이의 적용을 통해 수질 및 저질 환경을 개선할 경우 수역의 환경개선 뿐만 아니라 건강한 생태계 조성과 양식 생산성의 증대에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 오염된 호소와 내만, 항구 등 연안역이 중앙 정

부와 지방자치단체의 관리 하에 있다는 점에서 이들 지역에 대한 저비용의 환경 정화 및 복원 신기술 적용을 위해서는 정책적 지원과 아울러 관련 기관들의 유기적 협조가 수반되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. 日本水産學會, 1977, 淺海養殖と自家汚染, 水産學シリーズ(21), 恒屋社厚生閣, 日本東京, pp.134
2. 沼田哲始, 宮田康人, 豊田惠聖, 佐藤義夫, 小田靜, 제강슬래그의 底質 개선을 위한 적용성 연구, NKK 기보, 2001.3
3. K. Sugawara et al., 1957, Recovery of precipitated phosphate from lake mud related to sulfate reduction, J. Earth Sci., Vol.5, pp.60-67
4. H. Yamada et al., 1987, Suppression of phosphate liberation from sediment by using iron slag, Water Research, Vol.21, pp.325-333
5. 일본철강협회, 1997, 철강슬래그의 발생량 저감 및 자원화, 철강슬래그의 기초 및 응용연구회 최종보고서
6. R.A. Mann and H.J. Bavor, 1993, Phosphorus removal in constructed wetlands using gravel and industrial waste substrata, Wat. Sci. Tech., Vol.27, pp.107-113.
7. 한기현 외, 1999, 제철 슬래그의 해양활용 용도개발(1), (재)포항산업과학연구원

기획: smk@ksae.re.kr (사무국)