

## 연안 저질 개선을 위한 석탄회 조립물의 활용

김경희<sup>1</sup> · 이인철<sup>2,†</sup> · 류성훈<sup>2</sup> · 齊藤直<sup>3</sup> · 日比野忠史<sup>1</sup>

<sup>1</sup>일본히로시마대학 공학연구원

<sup>2</sup>부경대학교 해양공학과

<sup>3</sup>일본 중국전력주식회사

# Application of Granulated Coal Ash for Remediation of Coastal Sediment

Kyunghoi Kim<sup>1</sup>, In-Cheol Lee<sup>2,†</sup>, Sung-Hoon Ryu<sup>2</sup>, Tadashi Saito<sup>3</sup> and Tadashi Hibino<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Japan

<sup>2</sup>Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Korea

<sup>3</sup>The Chugoku Electric Power Co., Inc.

### 요 약

본 논문에서는 석탄회 조립물을 이용한 저질개선 기술의 안전성 및 저질개선기구에 대해 논하고, 일본 카이타만 석탄회 조립물 피복구간에서의 저질개선효과에 대해 검토하였다. 석탄회 조립물의 중금속 농도 및 용출량은 일본의 환경기준을 만족하는 것으로 조사되었으며, 석탄회 조립물의 저질개선기능은 다음과 같이 요약할 수 있다. (1) 인산염 및 황화수소의 제거 (2) 산성 저질의 중화 (3) 투수성의 증가 및 이로 인한 환원상태 저질의 개선 (5) 지반강도의 증가 (6) 부착성 조류의 서식 기반. 일본 카이타만에서 실시한 현장실증실험 결과로부터 연안저질의 pH중화, 인산염 및 황화수소 농도 감소 등 석탄회 조립물의 저질개선효과가 검증되었으며, 이에 따른 저서생물의 증가가 확인되었다. 석탄회 조립물을 이용한 연안저질의 개선기술이 실용화 된다면 오염저질의 정화에 소요되는 비용의 절감은 물론 산업부산물인 석탄회의 재활용에 기여할 것으로 기대된다.

**Abstract** – This paper aims to explain the safety assessment and remediation mechanism of Granulated Coal Ash (GCA) as a material for the remediation of coastal sediments and to evaluate the improvement of the sediment in Kaita Bay, where GCA was applied. The concentrations of heavy metal contained in GCA and the dissolved amounts of heavy metal from GCA satisfied the criteria for soil and water pollution in Japan. The mechanisms on the remediation of coastal sediments using GCA is summarized as follows; (1) removal of phosphate and hydrogen sulfide (2) neutralization of acidic sediment (3) oxidation of reductive sediment (4) increase of water permeability (5) increase of soil strength (6) material for a base of seagrass. From the results obtained from the field experiment carried out in Kaita Bay, it was clarified that GCA is a promising material for remediation of coastal sediment. This remediation technology can contribute to promote waste reduction in society and to decrease cost of coastal sediment remediation by applying GCA in other polluted coastal areas.

**Keywords:** Granulated Coal Ash(석탄회조립물), Remediation of Coastal Sediment(연안저질개선), Hydrogen Sulfide(황화수소), Phosphate(인산염)

### 1. 서 론

1970년대 이후 개발 중심의 산업발전으로 인해 1987년부터 2008년까지 약 714 km<sup>2</sup>의 갯벌이 소실되었다(국토해양부, 2008). 수질 정

화능력을 갖춘 갯벌의 소실은 육역에서 유입되는 다량의 유기물의 퇴적을 불러왔다. 연안저질의 유기물 농도는 그 환경적 특성으로 인해 해수중의 농도에 비해 작게는 수배에서 많게는 수십배 정도 높아져(Chapman[1986]), 저질내에 퇴적되어 있는 유기물의 재부상 및 고농도의 영양염 용출은 부영양화, 적조, 빈산소수괴 등의 발생에 중요한 영향인자 중 하나로 작용하고 있다(Ali and Lemckert[2009]).

<sup>†</sup>Corresponding author: ilee@pknu.ac.kr

또한 고농도의 유기물이 퇴적되어 있는 혐기성 상태의 저질에서는 유기물의 혐기성 분해과정 중 황산화원균의 활동에 의해 황화수소가 발생한다. 황화수소는 독성이 강하고 용존산소를 소비할 뿐만 아니라, 청조의 원인이 되어 저생생태계의 파괴를 촉진하는 것으로 알려져 있다(Richard and Morse[2005]).

이러한 연안환경 문제들을 해결하기 위해, 오염 저질의 정화사업이 많은 곳에서 실시되고 있다. 하지만 준설, 모래 복토 등 종래의 저질 정화방법은 정화사업의 실시 후 신생퇴적물의 퇴적으로 인해 그 효과가 장기간 지속되지 못하여 유지, 관리 비용이 지속적으로 발생한다. 또한, 모래 복토의 경우 해사 채취 금지로 인해 모래의 확보에 어려움이 있는 점 등 해결해야 할 문제점이 많다. 이에 많은 연구에서 새로운 저질개선 기술개발이 시도되고 있다(Yamamoto *et al.*[2012]; Kim *et al.*[2012]).

연안저질오염 문제를 해결하기 위한 신기술로서, 화력발전 공정에서 발생하는 부산물인 '석탄회'를 조립화하여 재활용한 '석탄회 조립물'을 오염저질에 피복하는 방법이 실용화되고 있다. 이에 본 논문에서는 문헌조사를 통해 석탄회 조립물의 물성 및 저질개선기구 그리고 안전성을 정리하였다. 동시에 일본 카이타만(海田灣)에서 실시한 석탄회 조립물을 이용한 현장시험 결과로부터 실험 규모에서의 석탄회 조립물의 저질정화 효과에 대해서 검토하였다.

## 2. 석탄회 조립물의 특성 및 저질개선 기능

### 2.1 석탄회 조립물

석탄회는 석탄화력발전의 산업부산물로서, 2006년 일본에서는 천 백만톤 가량 발생하였다. 석탄회의 재활용을 위해 화력발전소에서 발생하는 플라이애쉬에 시멘트를 약 10~15% 첨가하여 조립화한 석탄회 조립물이 개발되었다. 입경은 5~40 mm 이며 중앙입경은 약 20 mm 이다. 다공질로 비중이 가벼워 건조밀도는 0.8~1.1 t/m<sup>3</sup>, 습윤밀도는 1.0~1.4 t/m<sup>3</sup>이며 비표면적은 21.1 m<sup>2</sup>/g이다. Yamamoto 등(2013)에 의하면 석탄회 조립물의 주성분은 SiO<sub>2</sub>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, C, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>등이며 각각의 농도는 약 395, 133, 126, 55.4, 27.4, 22.5 g/kg이다(Table 1). 종래에는 도로의 지반재료 및 콘크리트 골재로 사용되었으나, 최근 저질개선재료로서의 이용 가능성이 제기되고 있다(Asaoka *et al.*[2012]).

석탄회 조립물은 비중이 가벼워서 함수비 수백 퍼센트 정도의 연약한 점토질 저질층 위에 피복해도 저질대로 침강하지 않는다. 또한 입경이 커서 수층으로부터 침강하는 신생퇴적물이 피복층 위에 퇴적되지 않고 피복층의 간극사이로 침강하여 다른 저질 개선재 보다 저질 개선효과의 지속기간이 긴 것으로 보고되고 있다(Tamai *et al.*[2012]).

### 2.2 석탄회 조립물의 저질개선 기능

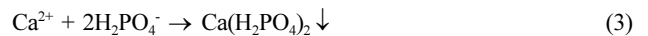
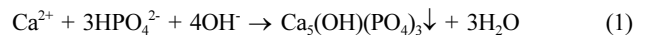
#### 2.2.1 인산 및 황화수소의 흡착

석탄회 조립물에서 용출되는 칼슘이온은 저질 간극수 중의 인산염과 반응하여 수산화 아파타이트 또는 인산칼슘을 형성한다(식 (1))

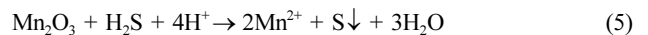
**Table 1.** Chemical composition of Granulated Coal Ash(GCA; Yamamoto *et al.*[2013])

Main elements (g/kg dw)		Trace elements			
SiO <sub>2</sub>	395.3	Ba	397	Rb	28.8
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	133	MnO	329	Co	28.6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	125.5	Zr	298	Cr	27.2
CaO	55.4	N	200	Ga	20.6
C	27.4	V	111	Nb	34.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.5	Zn	88.9	Sc	14.5
MgO	8.11	Ce	69.7	Th	12.7
K <sub>2</sub> O	6.09	Cu	58.9	Hf	6.7
H	5.2	Y	52.6	W	5.2
TiO <sub>2</sub>	5.68	Nd	34.4	U	4.2
Na <sub>2</sub> O	2.5	La	34.2	Yb	3.9
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.86	Pb	29.3	Cs	3.2
Sr	0.4	Ni	29.2		

~(4)). 이 반응을 통해 저질 간극수 중의 인을 고정하여 인산염의 해수층으로의 용출을 억제할 수 있다. 실제 일본 세토내해에 위치한 강한 폐쇄성 내만으로 굴 양식 시설의 밀집으로 인해 저질의 유기물 함량이 높으며 저질로부터의 영양염 용출로 인해 적조가 빈번히 발생하고 있는 키리쿠시(切串)의 저질에 석탄회 조립물을 피복한 결과, 인산염의 용출량이 약 1/10 이하로 줄어든 것이 보고되어 있다(Yamamoto *et al.*[2012]).



혐기성 상태에서 발생하는 황화수소는 식 (5)와 같이 석탄회 조립물에 포함된 산화망간과 반응하여 S<sup>0</sup>의 형태로 침전된다(Asaoka *et al.*[2012]). S<sup>0</sup>는 안정된 형태로 독성이 없어 저생생물의 서식환경 개선에 효과가 있다.



석탄회 조립물에는 약 55.4 g/kg의 산화칼슘이 포함되어 있다. 산화칼슘은 해수 또는 저니의 간극수와 반응하여 가수분해를 일으키며(식 (6)), 이는 유기물의 혐기성 분해로 인해 산성상태인 저니를 중화시키는 효과가 있다.



#### 2.2.2 지반의 투수성 및 강도의 향상

점토질 저질에서는 투수성이 낮아짐에 따라 간극수의 흐름이 약해지고 환원화가 촉진된다. 일본 히로시마의 투수성이 매우 낮은 점토질 하안갯벌에 석탄회 조립물을 이용한 침투주(Infiltration - Pillar; f = 30 cm, H = 50 cm)를 점토층 하부에 위치한 모래층까지 도달하도록 설치한 결과 침투주 및 그 주변 지반의 투수성을 향상시키는 것이 가능해 졌다. 갯벌 저질의 투수성의 향상은 감소하천의

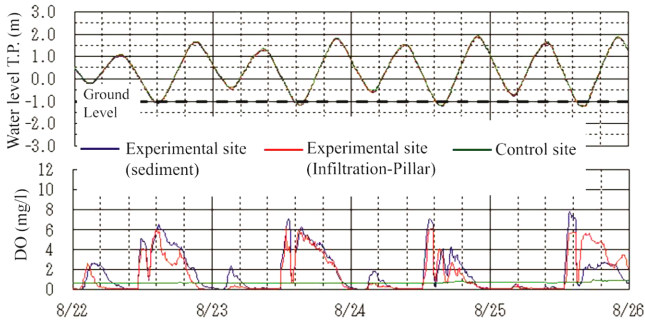


Fig. 1. Temporal changes in water level and DO in and around GCA infiltration-pillar and in control site (Hibino *et al.*[2011]).

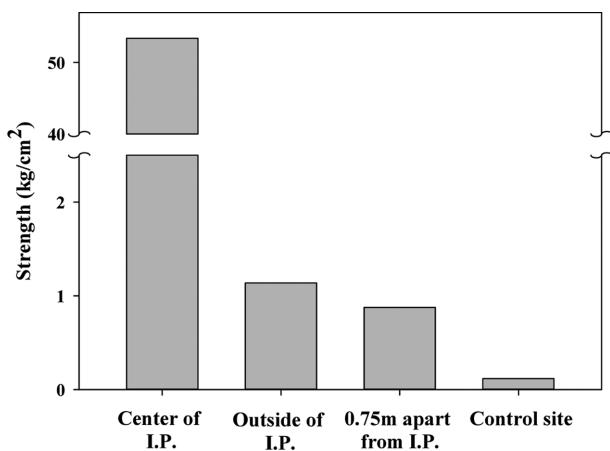
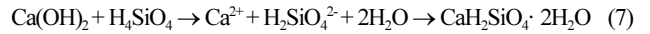


Fig. 2. Changes in soil strength by application of GCA (infiltration-pillar (I.P.); Hibino *et al.*[2011]).

수위변화에 따라 갯벌지반 내의 간극수(지하수) 흐름을 원활히 하여, 결과적으로 간극수의 용존산소 농도를 증가시키는 것으로 조사되었다.

석탄회 조립물을 혼합하여 저질 강도를 증가시키는 것이 가능하다. 히로시마 오타가와(太田川)의 점토질 갯벌은 강도가 약 0.1 kg/cm<sup>2</sup> 정도로 사람의 보행이 불가능했으나, 입경 2 mm 이하의 석탄회 조립물을 원지반과 50% 비율로 혼합한 결과 강도가 약 50 kg/cm<sup>2</sup> 까지 증가하여 사람의 보행이 가능해졌다(Fig. 2). 이는 게가 서식을

위한 굴을 만들 수 있는 범위의 강도로, 석탄회 조립물의 혼합은 저서생물의 서식환경을 악화시키지 않는 범위 내에서 지반강도를 증가시키는 것으로 조사되었다. 석탄회 조립물의 혼합에 의한 지반강도 증가는 석탄회 조립물에 존재하는 CaO, SiO<sub>2</sub> 등의 포졸란 반응에 의한 것으로 판단된다(식 (7)).



### 2.2.3 조류 서식지로서의 기능

석탄회 조립물의 SiO<sub>2</sub> 함유량은 약 40%이며(Table 1), 규소의 용출은 이를 영양소로 사용하는 부착성 조류의 증식을 촉진시키는 것으로 보고되고 있다(Asaoka *et al.*[2008]). 부착성 조류의 증가는 저질 내 영양염 농도의 저하 및 부착성 조류의 광합성에 의한 산소의 공급량 증가로 이어진다. 뿐만 아니라 부착성 조류를 먹이로 하는 저서생물이 증가하여 저질의 생물 교란(bio-turbation)이 활발해지는 효과가 있다(Yamamoto *et al.*[2008]).

일본 우지나의 해안가에 조성한 석탄회 조립물 지반에 잘피를 이식한 결과 잘피의 성장이 양호한 것으로 조사되었다(Fig. 3). 즉 석탄회 조립물 지반은 치어의 서식지로 이용되는 해조류 서식지로서의 기능도 할 수 있다(Hibino *et al.*[2011]).

### 2.2.4 안전성 평가

저질 개선 재료로서 석탄회 조립물을 이용하기 위해서는 안전성 평가가 반드시 수행되어야 한다. Asaoka *et al.*[2008]에 의하면 석탄회 조립물에 포함되어 있는 극미량의 중금속 농도는 일본의 토양 오염 기준보다 낮으며, 석탄회 조립물을 장기간 해수 중에 노출시킨 중금속 용출실험 결과, 중금속의 용출량 또한 일본의 수질기준을 만족하는 것으로 보고되고 있다(Table 2). 또한 석탄회 조립물로부터 용출된 중금속의 패류체내 축적량 확인을 위해 실시한 실내실험(*Clithon retropictus* 이용) 및 현장실험(*Tapes philippinarum* 이용) 결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 석탄회 조립물에서 용출된 중금속의 패류 체내 축적은 0에 가까우며(Fig. 4), 석탄회 조립물 지반에서 성장한 패류 체내의 중금속 농도는 일반 토양에서 성장한 패류 및 시판 패류와 비교해서 같거나 또는 그 이하인 것으로 보고되어 있다(Fig. 5; Saito *et al.*[2011]).



Eelgrass status at the time of the transplantation



Eelgrass status at 1.5 years after the transplantation

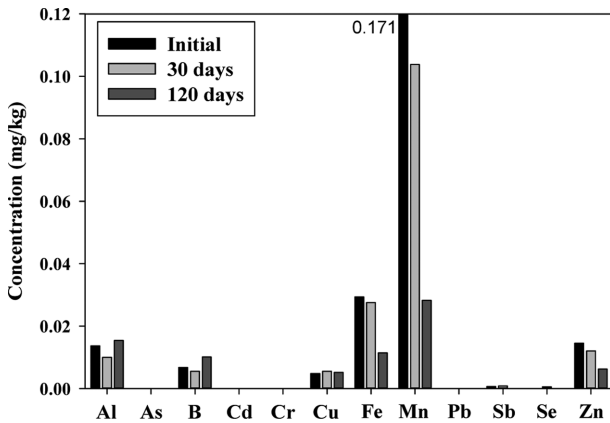
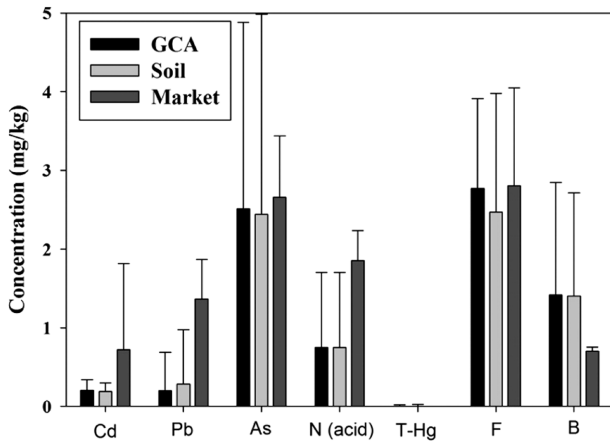


Eelgrass status at 2 years after the transplantation

Fig. 3. Status of transplanted eelgrass in GCA bed (Hibino *et al.*[2011]).

**Table 2.** Dissolution test of environmentally regulated elements from GCA (Asaoka *et al.*[2008])

Element	Conc. ( $\mu\text{g/l}$ )	Criteria ( $<\mu\text{g/l}$ )	Element	Conc. ( $\mu\text{g/l}$ )	Criteria ( $<\mu\text{g/l}$ )
As	<5	10	F	130	800
B	117	1000	Hg	<0.001	0.5
Cd	0.07	10	Ni	12	-
CN	<100	ND	Pb	<0.2	10
Co	0.11	-	Se	<2	10
Cu	0.4	-	Zn	1.6	-
Cr <sup>6+</sup>	<20	50			

**Fig. 4.** Temporal changes in heavy metal concentration in *Clithon retropictus*, grown in GCA bed for 0 day, 30 days and 120 days (Saito *et al.*[2011]).**Fig. 5.** Concentrations of heavy metal in *philippinarum*, grown up in GCA bed and in sand bed and *philippinarum*, sold in market (Saito *et al.*[2011]).

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1 대상해역

본 연구의 대상해역인 카이타만의 일본 히로시마만의 북부에 위치한 폐쇄성 내만이다(Fig. 6). 카이타만을 포함하는 히로시마만의 굴 생산량은 일본 전체 생산량의 50% 이상을 차지한다. 이로 인해 굴 양식이 밀집되어 있으며, 굴 양식시설에서 배출되는 유기물 및 2개의 1급 하천으로부터 유입되는 유기물이 해저면에 고농도로 퇴적

되어 있다. 카이타만의 저질은 강열감량이 10~20%로 유기물 함유량이 매우 높으며, 함수비 또한 100~500% 범위로 강한 환원상태의 저질이 형성되어 있어 황화수소의 발생 또한 보고되고 있다(Hibino *et al.*[2006]). 하계에는 적조 및 빈산소 수괴가 빈번히 발생하며, 빈산소 수괴는 수괴의 성층이 파괴되는 10월까지 이어지는 경향을 보인다. 카이타만의 수질 악화의 원인으로서는 저질의 재부상 및 저질에서의 영양염 용출이 가장 중요한 원인 중 하나로 밝혀져 있다(Hibino *et al.*[2011]).

#### 3.2 석탄회 조립물 피복 및 현장 모니터링

카이타만 남부에 위치한 폐쇄성 해역에 저질개선을 목적으로 2010년 6월 석탄회 조립물을 이용한 피복을 실시하였다(Fig. 6의 GCA site). 각 실험구(St. 1, St. 2, St. 3)의 면적은 100\*200 m이며, 석탄회 조립물의 피복 두께는 만 입구에 위치한 St. 3 주변은 20 cm, St. 2 주변은 10 cm, St. 1 주변은 5 cm가 되도록 조절하였다.

석탄회 조립물 피복 후 St. 1~St. 7에서 모니터링을 실시하였다. 각 지점에서 에크만 채니기 또는 다이버에 의해 채취된 저질은 현장에서 pH와 ORP(HORIBA, D-53)를 측정 후, 냉장 보관하여 운반한 후, 저질내의 간극수는 원심분리(3000 rpm, 20 min)로 분리하였다. 간극수 중의 인산염은 standard method(American Public Health Association[1989])로 auto analyzer(SWATT, BLTEC)를 이용하여 분석하였다. 또한 간극수 중의 황화수소의 농도는 가스 크로마토그래피법(가스크로: SIMADSU, GC14B, 검출관: FPD, 칼럼: B'B'-ODPN(3.2 mmID, 3.1 m))으로 분석하였다. 저서생물조사는 St. 2에서 실시하였으며, 캔코어(0.025 m<sup>2</sup>)를 이용하여 채취한 저지를 1 mm 체로 걸러낸 후 개체수 및 중수를 조사하였다. 현장 모니터링은 2009년부터 2011년까지, 황화수소 농도의 측정은 2010년부터 2011년까지 하계(8월) 및 동계(12월) 연 2회 실시하였다. 또한 저서생물조사는 2008년 및 2010년 하계 및 동계에 실시하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 저질성상변화

모니터링 결과는 Fig. 7에 나타내었다. 대조구의 pH는 7.3~7.9의 범위로 해수(약 8.2)에 비해 낮은 반면, 실험구에서는 석탄회 조립물 피복이후 pH가 7.9~8.6의 범위로 증가하여 해수의 pH에 가까운 값을 보였다(Fig. 7(a)). 석탄회 조립물 피복이후, 실험구의 pH는 8.6

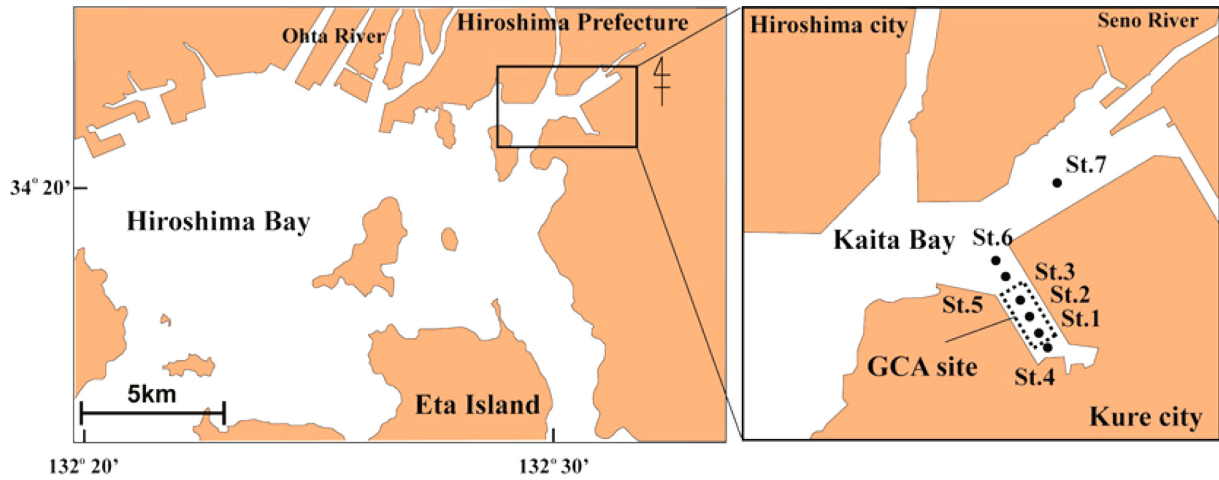


Fig. 6. Map showing Kaita Bay and the location of the experimental site.

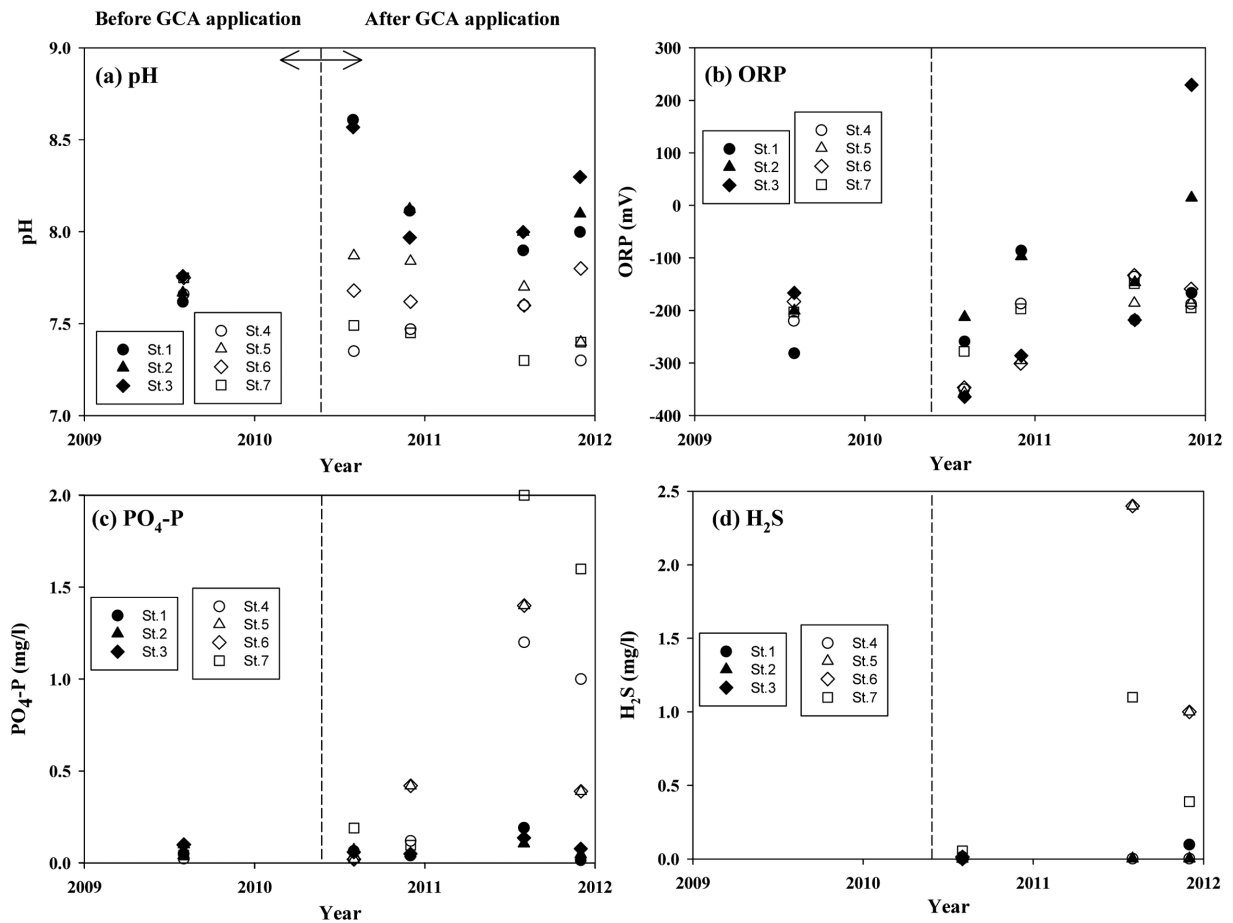


Fig. 7. Temporal changes in (a) pH, (b) ORP, (c) PO<sub>4</sub>-P and (d) H<sub>2</sub>S after application of GCA.

까지 급격히 증가하였으나, 2010년 12월에 8.1까지 낮아졌으며, 이후 8.4 이하로 유지되었다. pH는 석탄회 조립물에 포함되어 있는 CaO의 가수분해에 의해 높아졌으며, 본 모니터링 결과를 통해 석탄회 조립물의 저질 pH의 중화 효과는 2년 이상 지속되고 있는 것을 알 수 있다.

ORP는 하계에는 실험구와 대조구의 차이가 없었으나 동계에는

실험구에서 크게 증가하여 St. 2 및 St. 3에서는 양의 값을 보였다. 이는 석탄회 조립물의 피복에 의한 저질내의 투수성 증가 및 이에 따른 용존산소 공급, 석탄회 조립물로부터의 산화물질의 용출 및 석탄회 조립물로의 흡착에 따른 환원물질의 감소로 인한 결과로 사료된다(Fig. 7(b)). 실험구의 pH, ORP의 증가는 석탄회 조립물의 피복량에 의존하는 경향을 보였으며, 피복량이 가장 많은 St. 3에서 가

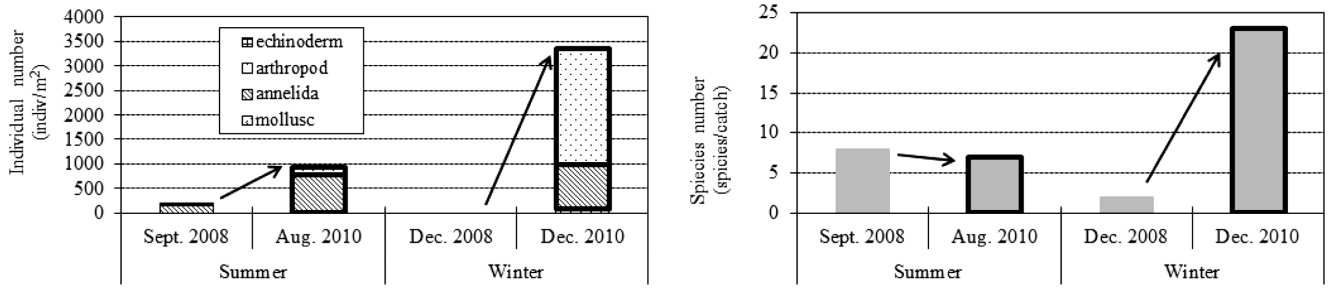


Fig. 8. Temporal changes in (a) individual number and (b) species number of benthos.

장 높은 증가량을 보였다.

인산염은 실험구에서 석탄회 조립물을 피복한 후 감소하여 0.25 mg/l 이하의 농도를 유지한데 비해, 대조구에서는 최대 2.0 mg/l로 실험구에 비해 약 8배 정도 높은 값을 가졌다. 대조구에서도 특히 St. 7에서 높은 농도를 보였는데, 이는 Seno River에서 유입된 유기물이 St. 7 주변에 고농도로 퇴적됨으로 인한 결과로 보인다. 실험구에서 인산염 농도의 감소는 인산염의 칼슘이온과의 결합에 의한 수산화 아파타이트 또는 인산칼슘의 형성으로 인한 것으로 사료되며, 간극수 중의 인산염 농도 감소는 저질에서 해수층으로 용출되는 인산염 플럭스를 감소시킬 것으로 예측된다.

황화수소 농도는 실험구에서 최대 약 0.3 mg/l로 최대농도 2.4 mg/l의 대조구와 비교하여 큰 폭으로 감소한 것이 확인되었다. 실험구에서의 황화수소 농도는 석탄회 조립물에 의한 황화수소의 흡착 및 pH 증가로 인한 황산환원균의 활동억제에 의한 것으로 사료된다. 황화수소를 발생시키는 황산환원균은 pH가 5.5~8.5 범위에서 활동하는 것으로 알려져 있다(Mongensen *et al.*[2005]; Haouaria *et al.*[2008]; Santana[2008]). 따라서 석탄회 조립물에 의한 저질 내 pH 상승은 황산환원균의 활동을 약화시켜 황화수소의 발생을 억제할 수 있다. 2011년 동계에는 St. 1에서 황화수소의 농도가 약 0.1 mg/l로 증가한 것이 확인되었다. 이는 석탄회 조립물의 피복량이 적은 St. 1에서는 다른 실험구에 비해 흡착량이 적으며, 또한 pH, ORP가 낮아짐으로 인해 황산환원균이 활동하기 좋은 환경으로 변한 것이 그 원인으로 추측된다.

#### 4.2 저서생물

저서생물조사 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 하계 및 동계의 저서생물의 개체수는 각각 200개체 및 30개체였으나, 석탄회 조립물의 피복한 이후에는 각각 약 1,000개체 및 2,500개체로 증가하였다. 저서생물의 종수는 석탄회 조립물 피복이후 하계에는 8종에서 7종으로 큰 변화가 없었으나, 동계에는 2종에서 23종으로 큰 폭으로 증가하였다. 석탄회 조립물의 피복이후, 저서생물의 개체수 및 종수가 증가한 것은 저질 황화수소 농도 감소, 영양염 용출 억제에 의한 적조발생빈도의 감소 및 빈산소수괴 발생의 감소 등에 의한 결과로 추정되며, 이상의 결과로부터 석탄회 조립물의 피복은 연안역의 저생생태계 복원에 효과적인 것으로 판단된다.

또한 석탄회 조립물의 피복이후 pH가 급격히 증가하였으나 피복

3개월 후 저서생물 개체수의 증가가 확인되어, 석탄회 조립물의 피복에 의한 pH의 증가는 저서생물의 서식환경에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 보인다.

### 5. 요약 및 결론

본 논문에서는 최근 주목받고 있는 저질 개선방법인 석탄회 조립물 피복기술의 안전성 및 저질개선기구에 대한 논하고, 일본 카이타만에서 실시한 석탄회 조립물 피복구간의 저질개선효과에 대해 검토하였다.

석탄회 조립물의 중금속 함량 및 용출량은 일본의 토양 및 수질 기준을 만족하였으며, 폐류 체내의 중금속 축적량은 시판중의 폐류에 비해 낮은 것으로 보고되었다. 석탄회 조립물의 저질개선기능은 인산염 및 황화수소의 제거, 산성저질의 중화, 투수성의 증가 및 이로 인한 환원상태 저질의 개선, 지반강도의 증가, 부착성 조류 및 해조류 서식 기반으로서의 역할 등으로 요약할 수 있다.

일본 카이타만에서 실시된 석탄회 조립물의 이용한 저질 개선실험의 결과로부터, 인산염 및 황화수소의 제거, 산성 토양의 pH 증가, ORP의 증가 등 저질의 개선효과 및 저서생물의 증가를 확인 할 수 있었다.

이상의 결과로부터, 석탄회 조립물 피복기술은 저질의 개선에 효과적인 것으로 드러났다. 본 기술이 실용화되면 오염저질의 개선에 소요되는 막대한 비용의 절감은 물론, 석탄회의 자원화에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

본 논문의 일부분은 2011년 부산에 개최된 한국해양환경공학회 춘계학술대회에서 발표된 논문을 근거로 하고 있음을 밝힙니다.

### 참고문헌

- [1] American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, 1989, "Standard Method for Examination of Water and WasteWater, seventeenth ed", APHA, Washington D.C.
- [2] Ayub Ali and Chariles J. Lemckert, 2009. "A traversing system

- to measure bottom boundary layer hydraulic properties”, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 83, pp. 425-433.
- [3] Chapman, P.M., 1986, “Sediment quality criteria from the sediment quality triad and example”, *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 5, pp. 957-964.
- [4] D. Richard and J.W. Morse, 2005, “Acid volatile sulfide(AVS)”, *Marine Chemistry* Vol. 97, pp. 141-197.
- [5] K. Tamai, H. Nishino, Y. Izuro, T. Hibino, A. Suto, M. Nishidoi, 2012, “Empirical study of sustainability for sediment environmental improvement through covering on seabed with fly ash beans”, *Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean*, Vol. 68, pp. 1145-1150 (in Japanese with English abstract).
- [6] K.H. Kim, Satoshi Asaoka, Tamiji Yamamoto, Shinjiro Hayakawa, Kazuhiko Takeda, Misaki Katayama and Takasumi Onoue, 2012, “Mechanisms of Hydrogen Sulfide Removal with Steel Making Slag”, *Environmental Science and Technology* Vol. 46, pp. 10169-10174.
- [7] M. Santana, 2008, “Presence and expression of terminal oxygen reductases in strictly anaerobic sulfate-reducing bacteria isolated from salt-marsh sediments”, *Anaerobe* Vol. 14, pp. 145-156.
- [8] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2008, Report on the outcome of land use map of foreshore, p. 34.
- [9] Mogensen, G.L., Kjeldsen, K.U., Ingvorsen, K., 2005, “*Desulfovibrio aerotolerans* sp. nov and oxygen tolerant sulphate reducing bacterium isolated from activated sludge”, *Anaerobe* Vol. 11, pp. 339-349.
- [10] Pape, O.L., Jean, F., Menesguen, A., 1999, “Pelagic and benthic trophic chain coupling in a semi-enclosed coastal system, the Bay of Brest (France): a modeling approach”, *Marine Ecology Progress Series* Vol. 189, pp. 135-147.
- [11] S. Asaoka, T. Yamamoto, K. Yamamoto, 2008, “A preliminary study of coastal sediment amendment with granulated coal ash e nutrient elution test and experiment on *Skeletonema costatum* growth” *J. Jpn. Soc. Water Environ.* Vol. 31, pp. 455-462 (in Japanese with English abstract).
- [12] S. Asaoka, S. Hayakawa, K. H. Kim, K. Takeda, M. Katayama, T. Yamamoto, 2012, “Combined adsorption and oxidation mechanisms of hydrogen sulfide on granulated coal ash”, *Journal of Colloid and Interface science* Vol. 377, pp. 284-290.
- [13] T. Hibino, N. Touch, T. Saito, 2011, “The properties of granulated coal ash and its effects on sludge purification”, *Proceedings of the Sixth International Conference on Asian and Pacific Coasts(APAC 2011)*, CD.
- [14] T. Hibino, H. Matsumoto, 2006, “Characteristic of fluid mud and its seasonal variation in Hiroshima Bay”, *Journal of Japan Society of Civil Engineering*, Vol. 62, No.4, pp. 348-359 (in Japanese).
- [15] T. Hibino, N. Touch, M. Imagawa, M. Kimura, T. Saito, 2011, “Thermal gradient formed by large pore layer on the sea bottom and estimation of diffusivity coefficient”, *Annual Journal of Coastal Engineering*, Vol. 67, No. 2, pp. 856-860(in Japanese with English abstract).
- [16] T. Saito, T. Yamamoto, T. Hibino, T. Kuwabara and K. Hanaoka, 2011, “Safety assessment of granulated fly ash on benthic animals”, *Annual Journal of Coastal Engineering*, Vol. 67 No. 2, pp. 1111-1115 (in Japanese with English abstract).
- [17] T. Yamamoto, K. Harada, K.H. Kim, S. Asaoka and I. Yoshioka, 2013, “Suppression of phosphate release from coastal sediments using granulated coal ash. *Estuarine*”, *Coastal and Shelf Science* Vol. 116, pp. 41-49.
- [18] T. Yamamoto, I. Goto, O. Kawaguchi, K. Minagawa, E. Ariyoshi and O. Matsuda, 2008, “Phytoremediation of shallow organically enriched marine sediments using benthic microalgae”, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 57, pp. 108-115.
- [19] T. Yamamoto, S. Kondo, K.H. Kim, S. Asaoka, H. Yamamoto, M. Tokuoka and, T. Hibino, 2012, “Remediation of muddy tidal flat sediments using hot air-dried crushed oyster shell”, *Marine Pollution Bulletin* Vol. 64, pp. 2428-2434.
- [20] S.H. Ryu, I.C. Lee, K.H. Kim, T. Hibino, T. SAITO, 2011, “Remediation of Organic Enriched Sediment by using Granulated Coal Ash”, *Proceedings of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Busan, Korea.

---

2013년 8월 26일 원고접수

2013년 11월 12일(1차), 2014년 1월 14일(2차) 심사수정일자

2014년 1월 16일 게재확정일자