

# 저온 소성 굴 패각의 피복에 의한 연안 오염 퇴적물의 성상 변화에 관한 연구

김형철\* · 우희은\*\* · 정일원\*\* · 오석진\*\*\* · 이성호\*\*\*\* · 김경희\*\*\*

\* 국립수산과학원 어장환경과, \*\* 부경대학교 해양공학과, \*\*\* 부경대학교 해양학과, \*\*\*\* (주)생태기술

## Changes in Sediment Properties Caused by a Covering of Oyster Shells Pyrolyzed at a Low Temperature

Hyung-Chul Kim\* · Hee-Eun Woo\*\* · Ilwon Jeong\*\* · Seok-Jin Oh\*\*\* · Seong-Ho Lee\*\*\*\* · Kyunghoi Kim\*\*\*†

\* Marine Environment Research Division, National Institute of Fisheries Science, Busan, Korea

\*\* Department of Ocean Engineering Pukyong National University, Busan 48513, Korea

\*\*\* Department of Oceanography, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

\*\*\*\* Eco Technology, Busan, Korea

**요약** : 본 연구에서는 저온 소성 굴 패각의 재활용을 위한 기초적 연구로서 메조코즘 실험을 통해 저온 소성 굴 패각의 피복에 따른 연안 오염 퇴적물의 성상 변화를 조사하였다. 이를 위해 350 °C에서 소성시킨 굴 패각을 연안 오염 퇴적물에 피복하여 직상수와 간극수의 성상변화를 분석하는 메조코즘 실험을 수행하였다. 실험 결과, 굴 패각의 피복에 의해 수층과 퇴적층이 분리되었기 때문에 직상수의 산화 환원전위(ORP) 증가 및 DIN 중의 NH<sub>3</sub>-N의 비율의 감소가 실험구에서 관측되었다. 실험구의 DIP의 농도는 대조구와 비교하여 유의한 차이를 확인하기 어려웠다. 굴 패각의 피복에 의한 퇴적물의 총유기탄소(TOC)는 감소하였으며, 산화발성황화물(AVS)은 저온 소성 굴 패각의 황화물 흡착 능력으로 인해 최대 50%까지 감소한 것으로 확인되었다. 본 연구의 결과로부터 저온 소성 굴 패각은 연안 오염 퇴적물의 정화를 위해 이용될 수 있는 재료인 것으로 결론 지을 수 있다.

**핵심용어** : 굴 패각, 저온 소성, 피복, 연안 퇴적물, 영양염, 산화발성황화물, 총유기탄소

**Abstract** : In this study, pyrolyzed oyster shells at a low temperature (350 °C) were applied for a mesocosm experiment to confirm resulting changes in the properties of sediment. After creating a covering of oyster shells, an increase in ORP and decrease in ammonia in the overlying water was observed in an experimental case. The decrease of TOC in this experiment was due to the dilution of organic matter due to the addition of inorganic matter (pyrolyzed oyster shells). The decrease in the concentration of AVS was observed due to the adsorption of AVS by the surface of the oyster shells. From the results obtained in this experiment, it has been concluded that pyrolyzed oyster shells at a low temperature can be used for remediation of polluted sediment.

**Key Words** : Oyster shells, Pyrolysis at low temperature, Covering, Coastal sediment, Nutrients, AVS, TOC

### 1. 서론

우리나라는 1970년대 산업화 및 도시화가 활발하게 진행됨에 따라 육상기원의 오폐수 유입이 증가하였으며, 유입된 오폐수는 불완전 처리된 상태로 배출되면서 고농도의 유기

물로 인한 수계의 오염이 가중되고 있다. 우리나라는 반폐쇄성 해역이 많은 지형적 특성을 가지고 있기 때문에 연안의 해수교환율이 낮다. 즉, 유입된 오염원은 외해로 확산되기 어려우며, 이로 인해 연안 오염이 심화된다.

유기물 기원의 오염물질은 수질을 직접적으로 오염시킬 뿐 아니라, 연안 저서에 퇴적되어 유기물의 재부상 및 지속적인 영양염 용출을 발생시켜 연안 오염원 중 하나로 작용

\* First Author : hckim072@korea.kr, 051-720-2523

† Corresponding Author : hoikim@pknu.ac.kr, 051-629-6583

한다(Cho et al., 2010). 연안 퇴적물 내의 축적된 고농도의 유기물은 분해과정에서 산소를 소비하여 강한 환원 환경을 조성한다. 환원성 퇴적물 중의 유기물은 혐기성 박테리아에 의해 분해되며, 분해과정에서 황화수소와 암모니아와 같은 산소소비물질(Oxygen Demend Unit; ODU)를 생성시킨다. 퇴적물에서 용출된 ODU는 해수 내의 용존산소를 빠르게 소모하여 빈산소수괴를 발생시킬수 있기 때문에 건강한 연안 생태계 및 수산자원을 지키기 위해서는 연안 퇴적물의 관리가 필요하다. 즉, 연안환경의 개선을 위해서는 수질환경과 저서환경을 동시에 관리해야 할 필요가 있다(Kim et al., 2018).

우리나라 연안에서는 대규모의 굴 양식 사업이 활발하게 이루어지고 있으며, 연간 약 30만 톤이 생산되고 있다(Korea Maritime Institute, 2017). 굴 폐각은 굴의 전체 중량 중 약 93%를 차지하고 있기 때문에 연간 약 28만 톤의 굴 폐각 폐기물이 생산되고 있다. 굴 폐각은 폐기물관리법상 폐기물로 지정되어 있어서 단 10%만이 폐화석 비료나 공업원료로 재활용되고 있으며, 나머지는 대부분 매립(39%)되거나 해안에 불법으로 야적(51%)되고 있다(Lee, 2004). 매립 및 야적된 굴 폐각은 악취를 발생시키고 주변경관을 훼손시킬 우려가 있다. 또한 굴 폐각에 잔존해있는 유기물과 중금속 등이 침출수를 통해 지반 및 연안으로 유입될 경우, 수질오염의 오염원이 된다(Sung and Kim, 2010).

과거부터 굴 폐각의 재활용을 위한 다양한 연구사례가 보고되고 있다. 대표적인 굴 폐각의 재활용 방안은 CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 등의 가스제거(Jung et al., 2007; Huh et al., 2016), 오폐수의 수질 개선(Kwon et al., 2003), 중금속 흡착(Hsu, 2009; Moon et al., 2015), 건설재료(Zhong et al., 2012) 등이 제안되었다. 칼슘화합물로서의 굴 폐각에 대한 연구는 800 °C 이상의 고온에서 소성시켜 산화칼슘 형태로 제조하여 이용하는 연구가 주를 이루고 있다(Chen et al., 2013; Lee et al., 2009; Yu et al., 2010). 그러나 이러한 연구는 소성 비용의 문제로 대부분 굴 폐각을 소량으로 재사용하는데 그치고 있으며, 국내에는 굴 폐각을 대량으로 소성 처리하는 장치 역시 아직 마련되지 않은 실정이다. 저온 소성은 고온 소성에 비해 산화칼슘 비율이 낮으나, 이전 연구에 따르면 저온 소성 굴 폐각은 인산염 및 황화수소 제거에 우수한 효과가 있는 것으로 보고되었다(Kim et al., 1997; Yamamoto et al., 2012). 이러한 특성은 고온 소성과 크게 다르지 않은 효과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 저온 소성 굴 폐각의 재활용을 위한 기초적 연구로써 저온 소성 굴 폐각의 피복에 따른 연안 퇴적물의 성상변화를 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 저온 소성 굴 폐각

경상남도 통영에서 생산된 굴 폐각을 실험에 사용하였으며 화학적 구성성분을 Table 1에 나타내었다. 굴 폐각은 주성분이 칼슘으로 구성된 칼슘계 폐기물이며, 굴 폐각의 칼슘은 대부분 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)의 형태로 존재한다(Yoon et al., 2003). 본 연구에서는 굴 폐각의 열처리 온도에 따른 변화를 확인하기 위하여 Thermogravimetry/Differential Thermal Analysis (TG-DTA) 분석을 수행하였다. 그 결과, CaCO<sub>3</sub>의 열분해가 발생하는 경계 온도(약 650 °C)의 전후를 각각 저온 소성과 고온 소성으로 구분하였으며, 실험에는 4 mm 이하로 파쇄하여 350 °C에서 4시간 동안 소성시킨 굴 폐각을 이용하였다(Fig. 1).

Table 1. Chemical composition of oyster shells

Composition	Ratio (%)	Composition	Ratio (%)
CaO	95.20	SrO	0.15
Na <sub>2</sub> O	1.18	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.11
MgO	0.82	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19
Cl	0.46	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.22
SO <sub>3</sub>	0.95	K <sub>2</sub> O	0.05
SiO <sub>2</sub>	0.64		

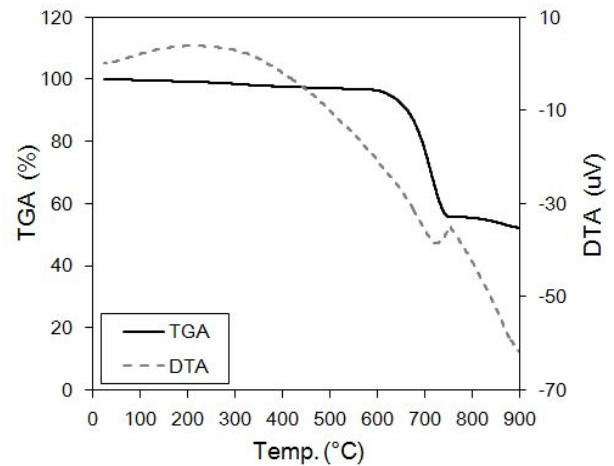


Fig. 1. The analysis of TG-DTA.

### 2.2 시료 채취

실험에 사용된 퇴적물 및 해수는 경남 고성군 삼산면 두포리 인근의 내만에서 채취하였다(Fig. 2). 고성만은 반폐쇄성 내만으로 주변 육상의 지속적인 개발로 소규모 하천을

통한 오염물질 유입이 증가하고 있다. 또한 양식에 적합한 자연조건을 갖추고 있어 예로부터 굴과 진주담치 등과 같은 패류 양식이 성행하였으나, 어장의 과밀화로 인해 연안의 환경오염이 발생하고 있는 해역이다(Lee et al., 2017). 고성만 퇴적물의 초기 성상은 Table 2에 나타내었다.

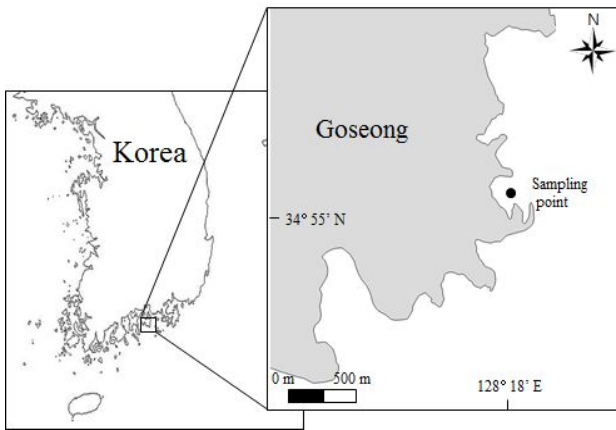


Fig. 2. The sediment sampling site.

Table 2. Initial condition of Goseong sediment

Property	Value	Property	Value
pH	7.82	ORP <sup>a</sup> (mV)	-424.20
AVS <sup>b</sup> (mgS/g-dry)	0.03	TOC <sup>c</sup> (%)	1.40
NH <sub>3</sub> -N (mg/L)	0.50	NO <sub>2</sub> -N+NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	0.31
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	0.10		

\* a : 산화환원전위, Oxidation-Reduction Potential

\* b : 산취발성황화물, Acid Volatile Sulfide

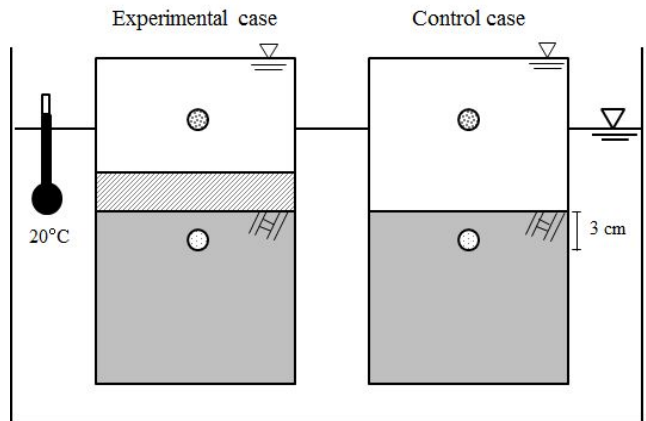
\* c : 총유기탄소, Total Organic Carbon

### 2.3 실험방법

3 L PE용기에 연안 퇴적물 1.5 L를 넣은 후 상부를 해수로 채웠다. 실험구는 150 ml의 굴 패각을 5 cm의 두께로 퇴적물 상부에 피복하였다(Fig. 3). 하계 빈산소수괴 발생 해역을 재현하기 위하여 해수는 N<sub>2</sub> 가스를 퍼지(purge)하여 용존산소 농도를 2 mg/L 이하로 조절하였다. 각 실험케이스는 20 °C의 조건에서 밀폐된 상태로 40일간 보관되었다.

퇴적물의 성상 분석은 실험 시작 후 0, 3, 10, 20, 40일째에 실시하였다. 분석 항목은 직상수 및 퇴적물 간극수의 ORP, DIN(Dissolved Inorganic Nitrogen; NH<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N+NO<sub>3</sub>-N), DIP(Dissolved Inorganic Phosphate; PO<sub>4</sub>-P)와 퇴적물의 AVS와 TOC를 측정하였다. 퇴적물은 표층에서부터 3 cm 깊이까지

채니하여 원심분리(LABOGEN 416, LABOGEN, Korea)하여 간극수를 추출하였으며, 직상수와 간극수는 0.45 µm syringe filter(Millex, Millipore)로 필터링 후 분석하였다. pH 및 ORP는 LAQUA F-73으로 측정하였으며, DIN과 DIP 농도 측정에는 분광광도계(DR/890, HATCH, USA)를 사용하였다. AVS 및 TOC의 분석은 해양환경공정시험기준(Ministry of Oceans and Fisheries, 2013)에 의거하여 수행되었으며, 모든 측정은 3회 반복 수행되었다.



● Sampling point of overlying water    ● Sampling point of pore water  
 ▨ Oyster shell    ■ Sediment

Fig. 3. Schematic figure of the Mesocosm experiment.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 시간에 따른 퇴적물의 성상 변화

ORP는 Nernst 식을 이용하여 pH 7로 보정한 값을 이용하였다(Fig. 4). 직상수의 초기 ORP는 -2.1 mV이었으며 대조구에서는 -17.5 ~ -0.6 mV의 범위로 감소한 반면, 실험구에서는 0.6 ~ -6.1 mV의 범위로 상대적으로 높게 유지되었다(p<0.05). 이는 굴 패각의 피복에 의해 퇴적층과 수층이 분리되어 수층이 퇴적층의 영향을 상대적으로 적게 받았기 때문인 것으로 판단된다.

간극수의 초기 ORP는 -424.2 mV였으며 이후 대조구에서는 -463.0 ~ -300.7 mV, 실험구에서는 -472.6 ~ -236.1 mV의 범위로 나타났다. 전 실험구간에 걸쳐 ORP는 감소하는 경향을 보였으며, 40일 경과 후 실험구 및 대조구간의 유의한 변화는 나타나지 않았다(p>0.05). 모래와 같은 종래의 피복재료는 물리적 차단효과에 의해 퇴적물을 수층으로부터 고립시켜 퇴적물의 환원성을 증가시킬 우려가 있다(Kim et al., 2006). 저온 소성 굴 패각은 재료 내 산화화합물이 전자 수용체로 작용하여 환원반응을 억제시키는데 기여할 가능성이 있다.

저온 소성 굴 껍질의 피복에 의한 연안 오염 퇴적물의 정상 변화에 관한 연구

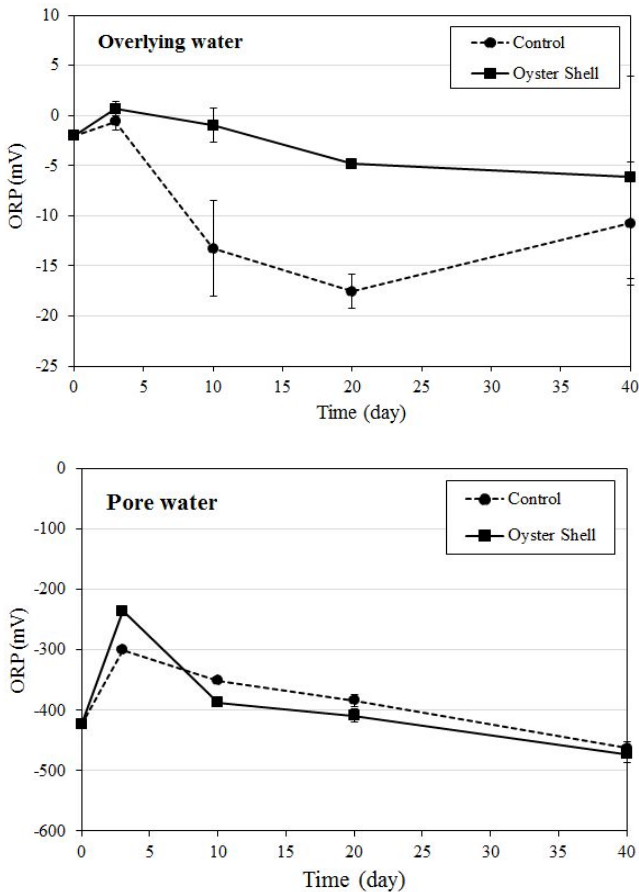


Fig. 4. Variation of ORP in overlying water and pore water.

직상수 및 간극수에서의 DIN 농도는 Fig. 5에 나타내었다. 직상수의 경우  $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도는 초기 0.30 mg/L였으며, 실험 기간 동안 대조구 및 실험구의  $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도는 각각 0.36~4.35 mg/L와 0.36~3.33 mg/L의 범위로 나타났다. 직상수의  $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$  농도는 초기 0.05 mg/L였으며 이후 대조구 및 실험구에서 각각 0.31~3.35 mg/L와 0.36~3.40 mg/L의 범위로 증가하였다.  $\text{NH}_3\text{-N}$ 은 시간에 따라 증가하는 경향이 나타나는데, 이는 차폐된 상태로 진행된 실험의 특성상 산소공급이 어려워 실험 케이스 내부에서 혐기성 분해로 인해  $\text{NH}_3\text{-N}$  농도가 증가하였기 때문인 것으로 추측된다. DIN 중  $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 비율은 시간 경과에 따라 감소하는 경향을 보였다. 20일 차를 제외한 모든 측정시기에서 실험구는 대조구 대비  $\text{NH}_3\text{-N}$  비율이 낮았으며, 40일 경과 후 대조구 및 실험구에서의  $\text{NH}_3\text{-N}$  비율은 각각 53%와 58%로 나타났다. 이는 실험구에서 피복에 따른  $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 용출 억제 및 높은 ORP에 의한 질산화 과정에 의한 영향인 것으로 추측된다.

간극수의  $\text{NH}_3\text{-N}$  농도는 대조구와 실험구의 각각 1.59~6.29 mg/L 및 3.29~6.48 mg/L의 범위로 나타났다.  $\text{NO}_2\text{-N}+\text{NO}_3\text{-N}$

농도는 대조구에서 0.10~0.41 mg/L, 실험구에서 0.06~0.57 mg/L로 조사되었으며,  $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 비율은 대조구에서 89~98%, 실험구에서는 91~99%의 범위로 나타났다. 이는 굴 껍질의 피복에 의해  $\text{NH}_3\text{-N}$ 가 수층으로 용출되지 못하며, 수층에서 퇴적층으로의 용존산소 공급 또한 제한되기 때문으로 판단된다.

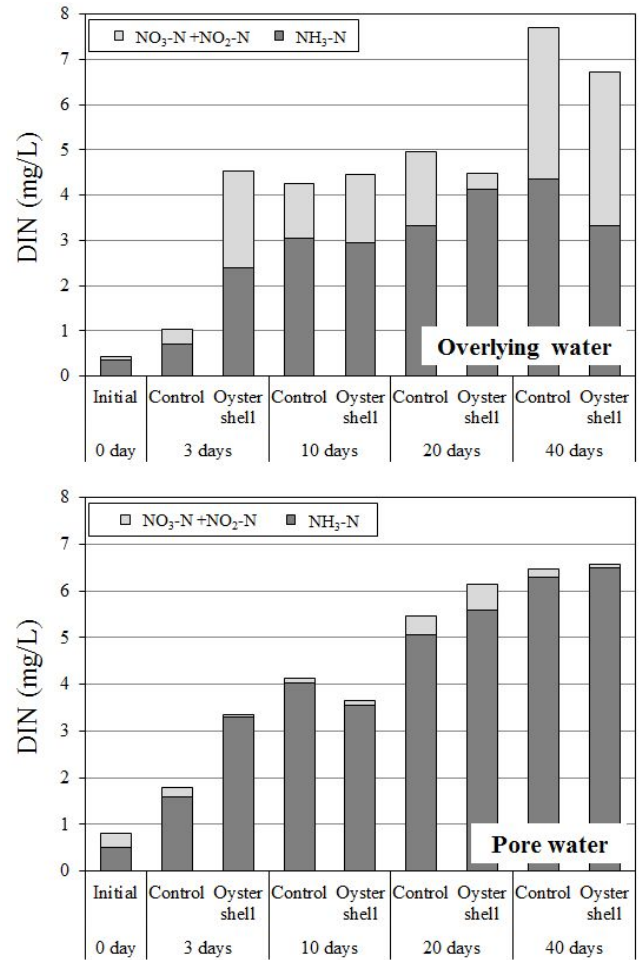


Fig. 5. Variation of DIN in overlying water and pore water.

직상수 및 간극수에서의 DIP 농도는 Fig. 6에 나타내었다. 직상수에서의 DIP 농도는 대조구에서 0.11~1.11 mg/L, 실험구에서는 0.11~0.98 mg/L의 범위로 나타났다. 간극수의 DIP 농도는 대조구에서 0.10~0.96 mg/L의 범위로, 실험구에서는 0.10~1.31 mg/L의 범위로 나타났다. DIP는 산화갈슘과의 반응에 의해 감소될 수 있으므로 패류(Oladoja et al., 2015), 석탄재(Hermassi et al., 2017) 등 반응성 재료를 이용한 연구가 다수 수행되어왔다. Kim et al.(1997)에 따르면, 굴 껍질은 단순 건조(100°C) 상태에서 오페수의 DIP를 감소시키는 효과가 있는 것으로 조사되었으나, 본 실험 결과 DIP의 감소가 나타

나지 않았다. 또한 굴 폐각은 소성 온도가 600 °C 이상이 될 때 CaCO<sub>3</sub>가 CaO로 열분해되어 DIP 제거율이 급격하게 증가하는 것으로 보고되고 있다(Woo et al., 2018). 즉, 350 °C의 저온 소성 굴 폐각은 열분해에 의해 CaO가 생성되지 않아서 간극수 중의 인산염 제거효율이 매우 낮은 것으로 판단된다.

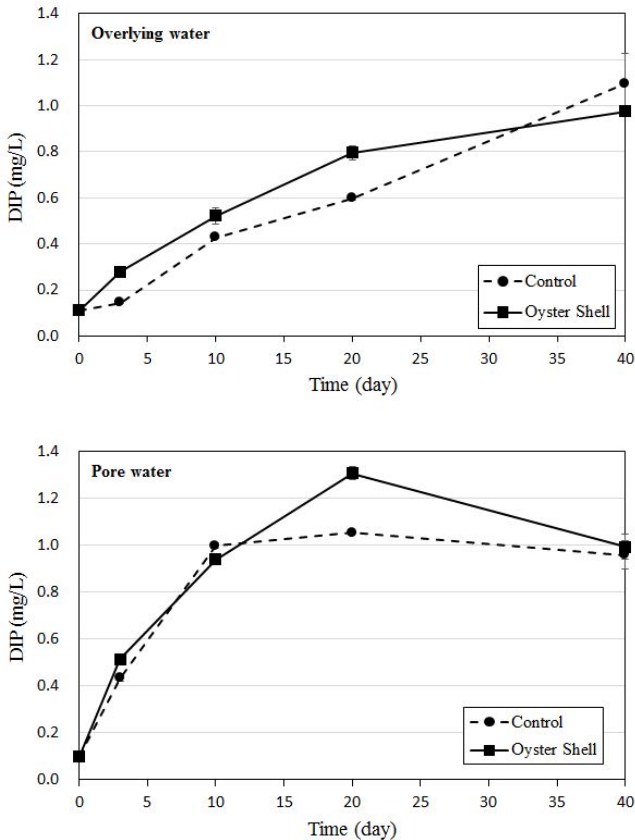


Fig. 6. Variation of DIP in overlying and pore water.

연안 퇴적물의 TOC와 AVS 분석 결과는 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었고, Table 3에 요약하였다. 초기 TOC는 0.95 %였으나, 이후 대조구에서는 0.98~1.71%의 범위로, 실험구에서는 0.98~1.58%의 범위로 증가하였다. 실험 시작 후 40일차를 제외한 실험기간 동안 TOC는 대조구에 비해 실험구에서는 유의하게 낮게 나타났다(p<0.05). 저온 소성 굴 폐각은 주성분이 무기물(CaCO<sub>3</sub>)로 실험구에서 굴폐각의 혼합에 의한 TOC의 희석효과가 나타났기 때문인 것으로 판단된다.

AVS는 초기 0.03 mgS/g-dry였으며, 대조구에서는 0.10~0.33 mgS/g-dry, 실험구에서는 0.02~0.18 mgS/g-dry의 범위로 증가하였다. 일반적으로 유기물의 농도가 높을수록 초기 황화물 생성량도 급격하게 증가하고, 황산염 환원율(Sulfate Reduction Rates; SRR)도 급격하게 증가한다(Park, 2008). TOC 결과에 미

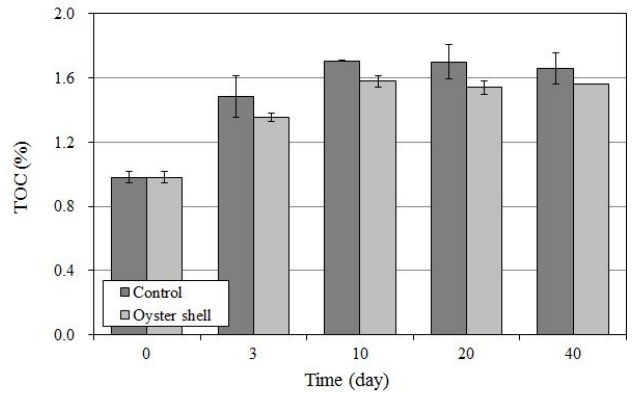


Fig. 7. Variation of TOC in sediment.

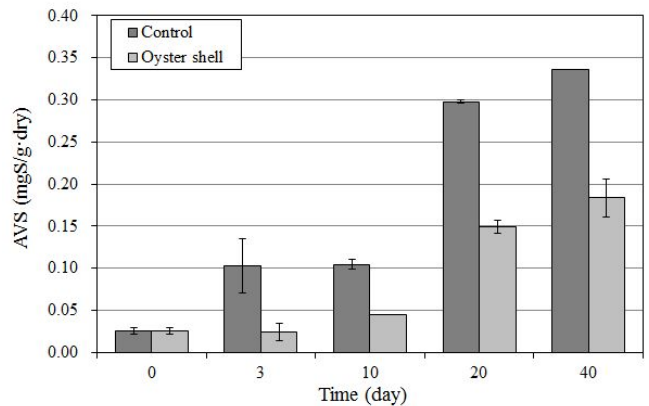


Fig. 8. Variation of AVS in sediment.

Table 3. Summary of TOC and AVS in control and experimental cases

days	Control		Oyster shell		
	Average	Standard Deviation	Average	Standard Deviation	
TOC	0	0.98	±0.035	0.98	±0.035
	3	1.49	±0.131	1.36	±0.025
	10	1.71	±0.004	1.58	±0.035
	20	1.70	±0.095	1.54	±0.042
	40	1.66	±0.066	1.57	±0.001
AVS	0	0.03	±0.004	0.03	±0.004
	3	0.10	±0.023	0.02	±0.008
	10	0.10	±0.004	0.05	±0.001
	20	0.30	±0.002	0.15	±0.006
	40	0.34	±0.001	0.17	±0.015

루어 보아 무기물의 혼합에 따른 유기물 농도의 감소가 실험구의 AVS 농도를 감소시킨 것으로 추측된다. 또한 저온 소성 굴 패각에 의한 황화물의 흡착이 황화물 농도 감소에 기여한 것으로 판단된다(Yamamoto et al., 2012). 특히 400 °C에서 소성된 굴 패각은 비표면적의 증가로 인해 황화수소를 흡착하는 능력이 우수한 것으로 보고되고 있다(Asaoka et al., 2009). 이상의 결과로부터 저온 소성 굴 패각은 AVS 감소에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 저온 소성 굴 패각을 활용하기 위한 기초 연구로 연안 오염 퇴적물에 350 °C에서 소성시킨 굴 패각을 피복하여 퇴적물의 성상을 조사하였다. 저온 소성 굴 패각의 피복에 의해 퇴적층 용출이 차단되면서 연안 퇴적물의 환원성을 감소시키는 것으로 조사되었다. 350 °C에서 소성된 굴 패각은 직상수 및 간극수의 DIP 농도를 저감시킬 만큼 충분한 산화칼슘이 생성되지 않은 것으로 판단된다. TOC의 감소는 무기물인 굴 패각의 희석효과에 의한 것으로 판단되며, 저온 소성 굴 패각은 퇴적물 내의 AVS를 감소시키는 능력이 우수한 것으로 나타났다. 이상의 결과를 통해 350 °C의 저온에서 소성된 굴 패각은 물리적 차단 효과 및 황화물의 흡착능이 우수한 재료임을 확인하였다.

#### 사 사

위 논문은 2019년도 국립수산물과학원 수산시험연구사업(R2019048)의 지원으로 수행된 연구임. 또한 위 논문의 일부분은 2018년도 정부(해양수산부) 재원으로 영남씨그랜트센터의 지원을 받아 수행된 연구임.

#### References

[1] Asaoka, S., T. Yamamoto, S. Kondo and S. Hayakawa(2009), Removal of hydrogen sulfide using crushed oyster shell from pore water to remediation organically enriched coastal marine sediments, *Bioresource Technology*, Vol. 100, pp. 4127-4132.

[2] Chen, J., Y. Cai, M. Clack and Y. Yu(2013), Equilibrium and kinetic studies of phosphate removal from solution onto a hydrothermally modified oyster shell material, *Material Science Forum*, Vol. 787, pp. 128-134.

[3] Cho, D., H. J. Bae, J. Y. Lee and S. H. Kwon(2010), Environmental change and its enhancement of a bay sediment by using microbial and chemical treatments, *Journal of the*

*Environmental Sciences*, Vol. 19, No. 11, pp. 1355-1362.

[4] Hermassi, M., C. Valderrama, N. Moreno, O. Font, X. Querol, N. H. Batis and J. L. Cortina(2017), Fly ash as reactive sorbent for phosphate removal from treated waste water as a potential slow release fertilizer, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 5, pp. 160-169.

[5] Hsu, T. C.(2009), Experimental assessment of adsorption of Cu<sup>2+</sup> and Ni<sup>2+</sup> from aqueous solution by oyster shell powder, *Hazardous Material*, Vol. 171, pp. 995-1000.

[6] Huh, J. H., Y. H. Choi, C. Ramakrishna, S. H. Cheong and J. W. Ahn(2016), Use of calcined oyster shell powders as CO<sub>2</sub> adsorbent in algae-containing water, *Korean Ceramic Society*, Vol. 53, No. 4, pp. 429-434.

[7] Jung, J. H., K. S. Yoo, H. M. Kim and H. K. Lee(2007), Reuse of waste oyster shell as a SO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> removal adsorbent, *Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 13, No. 4, pp. 512-517.

[8] Kim, E. H., N. C. Sung and S. H. Jang(1997), A study on recycling of waste oyster shells as seed crystals in phosphorous crystallization process, *Korean Journal of Environmental Health Society*, Vol. 23, No. 4, pp. 133-138.

[9] Kim, G., W. Jeong and S. Choe(2006), Sand capping for controlling phosphorus release from lake sediments, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 26, pp. 125-130.

[10] Kim, K., K. Kim, I. C. Lee and T. Hibino(2018), Changes in performance of granulated coal ash on remediation of coastal sediment, *Journal of Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 21, No. 1, pp. 40-45.

[11] Korea Maritime Institute Fisheries Outlook Center(2017), <http://www.foc.re.kr/web/obstats/stats.do?rbsIdx=87>.

[12] Kwon, H. B., C. W. Lee, B. S. Jun, J. D. Yun, S. Y. Weon and B. Koopman(2003), Recycling waste oyster shell for eutrophication control, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 41, pp. 75-82.

[13] Lee, C. W., H. B. Kwon, H. P. Jeon and B. Koopman(2009), A new recycling material for removing phosphorus from water, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, pp. 683-687.

[14] Lee, G., D. W. Hwang, H. Hwang, J. H. Park, H. C. Kim and J. N. Kwon(2017), Distribution and pollution status of organic matter and heavy metals in surface sediment around Goseong Bay, a shellfish farming area, Korea, *Journal of Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 23, No. 6, pp. 699-709.

[15] Lee, H. S.(2004), A study on characteristics of Corbicula



- japonica and *Ostrea virginica*, Journal of Environmental Health Sciences, Vol. 30, No. 5, pp. 427-431.
- [16] Ministry of Oceans and Fisheries(2013), Republic of Korea, <http://www.mof.go.kr/article/view.do?articleKey=24046&boardKey=35>
- [17] Moon, D. H., M. Wazne, K. H. Cheong, Y. Y. Chang, K. Baek, Y. S. Ok and J. H. Park(2015), Stabilization of As-, Pb-, and Cu-contaminated soil using calcined oyster shells and steel slag, Environmental Science And Pollution Research International, Vol. 22, No. 14, pp. 11162-11171.
- [18] Oladoja, N. A., R. O. A. Adelagun, A. L. Ahmad and I. A. Ololade(2015), Phosphorus recovery from aquaculture wastewater using thermally treated gastropod shell, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 98, pp. 296-308.
- [19] Park, S. Y.(2008), The characteristics of acid volatile sulfide formation in the sediment of Seonakdong river, Master Dissertation, Busan University.
- [20] Sung, C. Y. and Y. I. Kim(2010), Strength and Durability Properties of Polymer Concrete Utilizing Oyster Shell Powder as a Filler, Journal of the Korean Society of Agriculture Engineers, Vol. 52, No. 6, pp. 125-134.
- [21] Woo, H. E., K. Kim, I. C. Lee and K. Kim(2018), A study on phosphate removal efficiency by pre-treatment conditioning of oyster shells, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 2, pp. 196-202.
- [22] Yamamoto, T., 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, No. 11, pp. 2428-2431.
- [23] Yoon, G. L., B. T. Kim, B. O. Kim and S. H. Han(2003), Waste Management, Vol. 23, pp. 825-834.
- [24] Yu, Y., R. Wu and M. Clark(2010), Phosphate removal by hydrothermally modified fumed silica and pulverized oyster shell, Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 350, pp. 538-543.
- [25] Zhong, B. Y., C. F. Zhou and Y. Yu(2012), Structure and property characterization of oyster shell cementing material, Structural Chemistry, Vol. 31, No. 1, pp. 85-92.

---

Received : 2018. 12. 31.

Revised : 2019. 01. 17.

Accepted : 2019. 02. 25.