

석탄회 조립물이 혼합된 하구 오염 퇴적물의 환경 및 미생물 구조 변화에 관한 연구

김헌태* · 우희은** · 김종오*** · 김경희****†

*, **** 부경대학교 해양공학과 교수, ** 부경대학교 해양공학과 대학원생,

*** 부경대학교 해양생명과학연구소 전임연구원

A Study on Changes of the Benthic Environment and Microbial Community in Estuarine Polluted Sediments by Mixing Granulated Coal Ash

Heontae Kim* · Hee-Eun Woo** · Jong-Oh Kim*** · Kyunghoi Kim****†

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

** Graduate Student, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

*** Associate Researcher, Institute of Marine Biotechnology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

요 약 : 육상으로부터 각종 오염물질이 유입되는 하구역은 오염관리에 주의를 기울일 필요가 있다. 본 연구에서는 석탄회 조립물과 하구의 오염 퇴적물을 혼합하여 저서 환경 개선 효과 및 저서 미생물의 군집 구조 변화를 조사하였다. 하구 퇴적물과 석탄회 조립물을 7:3의 비율로 혼합하여 1개월 동안 반응시킨 후 환경 및 미생물 군집을 분석하였다. 퇴적물의 환경인자를 분석한 결과, 석탄회 조립물이 혼합된 실험구의 pH는 11까지 증가하였다. 실험구의 DIP 농도는 석탄회 조립물과의 반응을 통해 생성된 인산칼슘으로 인해 대조구 대비 30% 감소하였다. 또한 대조구 대비 실험구에서 증가한 *Gammaproteobacteria* 강은 DIP 감소에 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. DIN 농도는 대조구 대비 실험구에서 2배 이상 증가하였는데, 이는 높은 pH 및 석탄회 조립물에서 용출되는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 영향인 것으로 판단된다. 질소 순환과 관련된 미생물은 대조구 및 실험구 모두에서 확인되지 않았다. 따라서, 석탄회 조립물은 오염된 하구 퇴적물의 DIP 농도 감소에 효과적이며, 저서 미생물 군집이 인의 순환에 영향을 주는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 하구 오염 퇴적물, 석탄회 조립물, 영양염, 미생물 군집, 인 순환

Abstract : In this study, the benthic environmental and microbial community structure were investigated by mixing granulated coal ash(GCA) and contaminated estuary sediments. Estuary sediments and GCA were mixed in a ratio of 8:2 and allowed to interact for 1 month, then sediment environmental factors were investigated. The pH of the experimental sediment was mixed increased to 11. The concentration of DIP(Dissolved inorganic phosphorus) in the experimental case decreased by 30% compared to the control case, and this should be due to formation of calcium phosphate through the chemical reaction of DIP and calcium which diluted from GCA. The high abundance of *Gammaproteobacteria* seen in the experimental sediment compare to the control can affect the DIP reduction. The DIN(Dissolved inorganic nitrogen) concentration increased over two times in the experimental case than the control, and this should be due to the high pH condition and release of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ from the GCA. Microorganisms related to nitrogen circulation were not identified in both the control and experimental cases. It was confirmed that the GCA were effective in reducing the DIP concentration in contaminated estuary sediment, and that benthic microbial communities were shown to influenced the phosphorus circulation.

Key Words : Contaminated estuary sediments, Granulated coal ash, Nutrients, Microbial community, Phosphorus circulation

* First Author : htkim@pknu.ac.kr, 051-629-6584

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

1. 서론

하구역은 강과 해양 사이의 완충지대 역할을 하는 해역으로써 생물 생산성이 높고 물리·화학·생물학적으로 복잡한 환경을 가지고 있다(Paerl, 2006; Yoon et al., 2013). 강은 각종 유기물 및 중금속을 포함한 부유 퇴적물을 하구로 운송시켜 하구 퇴적층 형성에 중요한 역할을 한다(Liu et al., 2014). 강으로부터 유입된 오염물질은 하구역의 퇴적물과 결합하여 수생 생물에 심각한 위협을 초래할 수 있다(Wetzel et al., 2013). 그러므로 수질뿐 아니라 오염 퇴적물의 관리를 통해 하구역의 환경 및 생태계를 개선·보존하여야 한다.

오염된 하구역의 환경을 개선하는데 석탄회를 재활용한 방법을 적용할 수 있다. 석탄 화력 발전소의 부산물인 석탄회는 2018년 기준 국내 발생량이 약 1,000만 톤에 이르고 있으며, 그중 25%가 매립되고 있는 실정이다(Cho, 2020). 석탄회의 재활용은 콘크리트 혼화제, 시멘트 부원료, 성토재 등으로 활용되고 있으며, 재활용률이 100%에 이르도록 노력을 기울이고 있다(Maeng et al., 2014). 석탄회를 재활용하기 위하여 조립화한 석탄회를 오염 퇴적물 개선을 위한 피복재로 활용하는 방안이 실용화되고 있다(Kim et al., 2014b). 석탄회 조립물의 대표적인 환경 개선 성능은 (1) 퇴적물의 산성화 중화(Yamoamoto et al., 2015), (2) 인산염 제거(Asaoka et al., 2009), (3) 황화수소 제거(Asaoka et al., 2015; Asaoka et al., 2018), (3) 투수성 증가(Kim, 2018), (4) 저서생물의 증가(Kim et al., 2014a) 등이 있다. 이처럼 석탄회 조립물의 환경 개선 성능은 이화학적 효과에 집중되어 있으며, 생물학적인 측면에서는 거대 동물에 초점을 맞추고 있다.

그러나 생태계의 생지화학적 순환은 생태계 전반에 서식하고 있는 미생물 군집에 의해 주도된다(Hicks et al., 2018; Mayor et al., 2012). 저서 미생물은 대사활동을 통해 생지화학적 물질 순환을 주도하여 오염물질의 분해 및 순환과 밀접한 관련이 있다(Jeon et al., 2018). 그러므로 하구역에서 발생하는 생태학적 현상을 보다 명확히 이해하기 위하여 미생물 분석에 대한 해석이 요구된다(Cho et al., 2004). 이에 본 논문에서는 석탄회 조립물을 혼합하여 하구 오염 퇴적물에 적용한 후 환경 및 미생물 구조 변화를 살펴보았다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험 재료

실험에 사용된 오염 퇴적물은 2017년 7월에 낙동강 하구에 위치한 진우도(35°45.7'N 128°52'56.5"E)에서 주상퇴적물 채집기(Φ5 cm × H 20 cm)를 이용하여 채취하였다. Table 1에 채취한 퇴적물의 기본 특성을 나타내었다.

석탄회 조립물은 시멘트에 일본 중부발전소의 비산회(fly ash)를 10~15% 혼합하여 직경 5~40 mm의 구체로 조립화한 것이다. 석탄회 조립물의 주요 성분은 SiO₂, CO₃²⁻, Al₂O₃, CaO 등으로 구성된다(Asaoka et al., 2008).

실험구는 원통형 플라스틱 1L 용기에 채취한 낙동강 하구 퇴적물과 석탄회 조립물을 7:3의 비율로 혼합하여 제작하였다(Lee et al., 2018b). 대조구는 실험구와 동일한 크기의 용기를 퇴적물만 채워 준비하였다. 실험케이스는 약 상온에서 밀폐 보관하여 각각 1개월 후의 실험구 및 대조구를 개봉하여 분석을 진행하였다.

Table 1. Sediment properties of Nakdong River Estuary

Parameter	Value	SD
pH	7.00	0.07
ORP (mV)	-212.56	18.46
Water content (%)	38.4	0.9
Ignition loss (%)	3.13	0.12
Phosphate phosphorus (mgL ⁻¹)	0.92	0.12
Ammonia nitrogen (mgL ⁻¹)	1.24	0.07

2.2 화학적 특성 분석

1개월 후 실험구 및 대조구 시료의 pH 및 ORP는 pH ion meter(f-73, LAQUA)를 사용하여 측정하였으며, ORP는 Wolkersdorfer(2008)에 따라 보정하였다. 시료의 함수율은 100℃에서 6시간 건조 후 측정하였으며, 강열감량은 100℃에 6시간 건조 후 600℃에서 4시간 가열하여 측정하였다. 원심분리기를 사용하여 퇴적물의 간극수를 추출하였고, 추출한 간극수로 영양염 분석을 수행하였다. 용존 무기인(Dissolved inorganic phosphorus; DIP), 용존 무기질소(Dissolved inorganic nitrogen; DIN) 농도는 분광광도계(DR3900, Hach)를 사용하여 3회 반복 측정하였다.

2.3 미생물 군집 분석

낙동강 하구 퇴적물의 미생물 다양성은 16S rRNA 유전자 서열분석을 통해 분석하였다. 16S rRNA 유전자 서열분석은 해양 퇴적물에서 미생물 군집을 특성화하는데 널리 사용된다(Webster et al., 2010). 총 DNA는 100 mg의 퇴적물 시료에서 제조업체의 지침에 따라 PowerSoil DNA isolation kit(Qiagen)를 사용하여 추출하였다. V3에서 V4 영역을 표적으로 하는 16S rRNA 유전자 염기서열 라이브러리는 제조업체의 프로토콜(Illumina, San Diego, CA)에 따라 프라이머 337F 및 805R로 증폭되었다. 준비된 라이브러리의 시퀀싱은 ㈜쓰리비즈(수원)에서 Illumina MiSeq 플랫폼을 사용하여 300 bp를 양쪽

으로 읽어(paired-end) 832,242개의 원 데이터(raw read)를 생성하였다. 바코드, 링커 및 프라이머 서열을 제거한 리드(read)는 FLASH v1.2.11을 사용하여 한 쌍의 리드(paired-end reads)를 병합하였다. 품질 점수(평균 점수 20)가 낮거나 300 bp 미만의 리드(read)는 제거하였다. 조작 분류 단위(OTU)의 수는 QIIME 소프트웨어(v1.8.0)를 사용하여 97% 시퀀스 동일성 컷오프로 시퀀스를 de novo 클러스터링하여 결정되었다. OTU의 상대 풍부도는 신뢰임계값 0.8을 사용하여 RDP 분류기 v1.1로 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 낙동강 하구 퇴적물의 화학적 특성 변화

퇴적물의 pH 및 ORP 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 초기 pH가 7.00에서 대조구 및 실험구 각각 약 7.34와 10.85로 증가하였다. 1개월 후 대조구와 실험구 퇴적물의 ORP는 각각 약 -167.2 mV와 -163.2 mV로 초기(-212.6 mV) 대비 감소한 것으로 나타났다. 실험구에서의 급격한 pH 증가는 석탄회 조립물에 포함된 CaO의 가수 분해에 의한 영향인 것으로 보인다(Kim et al., 2014b). 다만, pH가 급격하게 증가할 경우 저서생물 등에 부정적인 영향을 미칠 수 있어 적정용량을 조절할 필요가 있는 것으로 판단된다. ORP의 경우 대조구와 실험구의 유의미한 차이가 나타나지 않았다. 석탄회 조립물의 CaO에서 용출되는 Ca²⁺은 퇴적물의 투수성을 향상시켜 산소공급량이 증가할 수 있다(Park et al., 2019). 그러나 본 연구에서는 실험 용기의 상부를 밀폐하여 산소 공급을 차단하였기 때문에 대조구와 실험구의 ORP 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

하구 퇴적물의 함수율 및 강열감량의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 퇴적물의 함수율은 초기 38.4%에서 1개월 후 대조구와 실험구 각각 약 33.8%와 31.6%로 나타났다. 강열감량은 초기 3.13%에서 대조구 실험구 약 3.12%와 3.05%로 각각 나타났다. 실험구의 낮은 함수율은 석탄회 조립물의 혼합으로 인해 퇴적물의 압밀이 촉진되었기 때문으로 판단된다. 강열감량의 경우 실험구에서 소폭 감소하였으나 대조구와 비교하였을 때 유의미한 차이는 나타나지 않았다(p>0.05).

퇴적물에서 추출한 간극수의 DIP 및 DIN 농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 초기 DIP 농도는 0.92 mgL⁻¹에서 1개월 후 대조구와 실험구 각각 약 0.65 mgL⁻¹와 0.45 mgL⁻¹로 감소하였다. 실험구에서의 DIP 농도 감소는 석탄회 조립물에서 용출된 CaO, SiO₂ 등의 성분과 간극수 내 DIP와의 화학적 반응으로 인산칼슘이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다(Jeong and Kim, 2019). DIN 농도는 초기 1.3 mgL⁻¹에서 1개월 후 대조구와 실험구 각각 약 20.2 mgL⁻¹와 43.3 mgL⁻¹로 증가하였다.

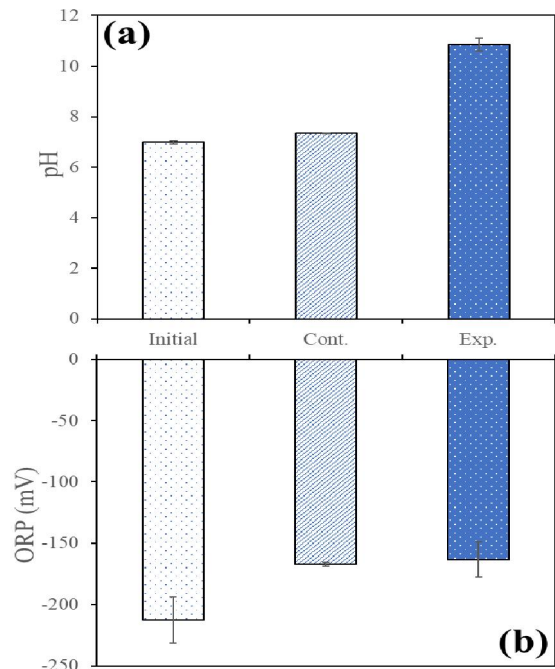


Fig. 1. Changes of pH (a) and ORP (b) of sediment.

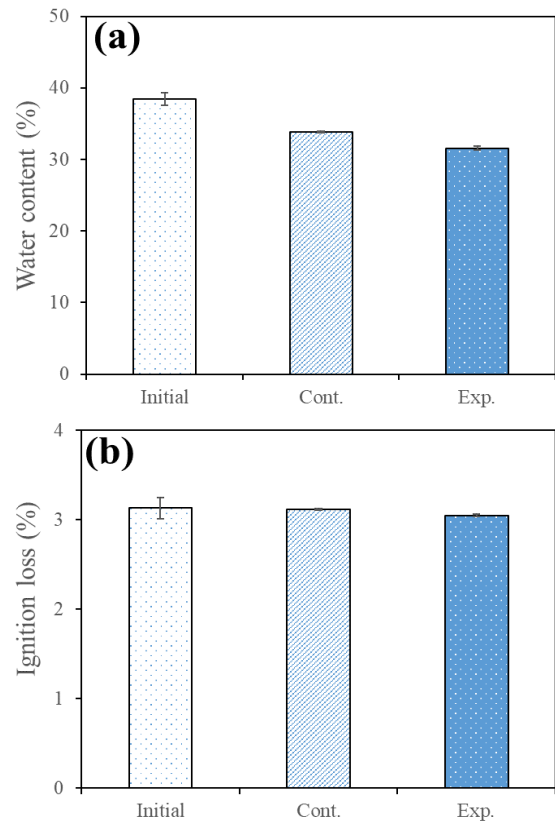


Fig. 2. Changes of water content (a) and ignition loss (b) of sediment.

DIN은 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 을 포함하고 있으나, $\text{NH}_3\text{-N}$ 가 DIN의 98% 이상을 차지하였다. $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도는 초기 약 1.2 mgL^{-1} 에서 1개월 후 대조구와 실험구에서 각각 약 19.9 mgL^{-1} 과 43.0 mgL^{-1} 로 나타났다. 초기 농도 대비 1개월 후 대조구 및 실험구에서의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 농도의 급증은 밀폐된 용기 내에서 온도 상승으로 인해 유기물 분해가 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다(Jeong et al., 2020). Asaoka et al.(2008)와 Yamamoto et al.(2015)에 따르면 석탄회 조립물에서는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 가 용출될 수 있으나 이는 NO_x 제거에 활용된다고 보고하였다. 또한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 $\text{NH}_3\text{-N}$ 로 존재하는 암모니아는 pH 9.5보다 높으면 $\text{NH}_3\text{-N}$ 가 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 보다 더 많아진다(Kim et al., 2010). 이러한 원인으로 실험구의 $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도가 대조구보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

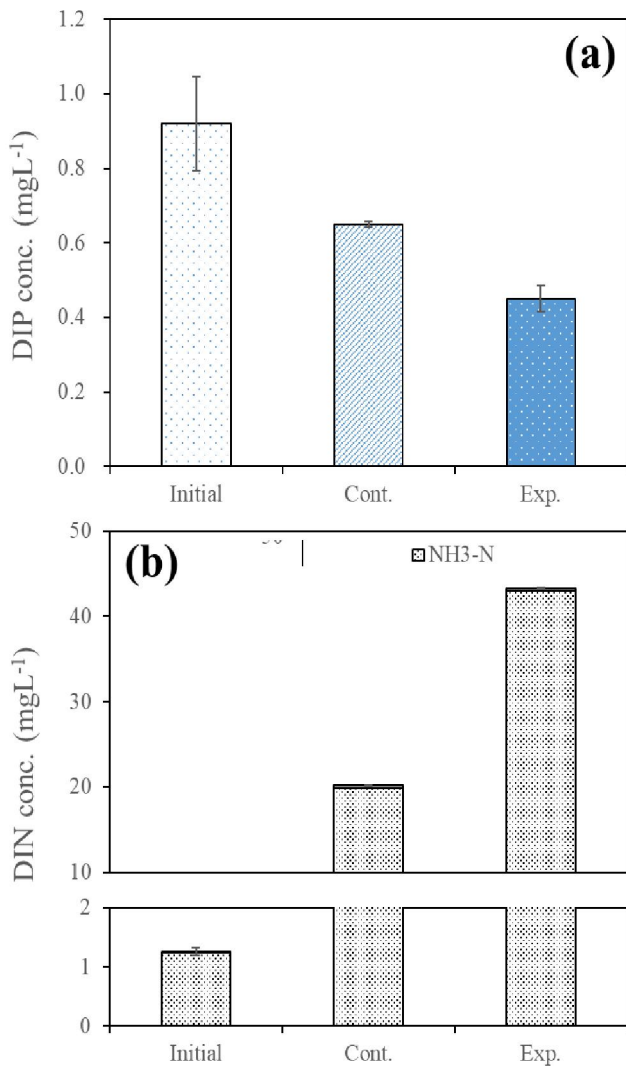


Fig. 3. Changes of DIP (a) and DIN (b) concentrations in pore water of sediment.

3.2 미생물 군집 변화

문(Phylum) 수준에서의 박테리아 군집을 Table 2에 나타내었다. Fig. 4는 문 수준의 박테리아 군집 중 풍부도 1% 이상을 나타내었으며, 그중에서도 *Proteobacteria* 문과 *Bacteroidetes* 문을 강(Class) 수준에서 분류하여 나타내었다. 초기 퇴적물 시료에서 높은 비율을 차지하는 상위 5종 문은 *Proteobacteria* (40.8%), *Patescibacteria* (8.3%), *Epsilonbacteraeota* (7.4%), *Bacteroidetes* (6.6%), *Kiritimatiellaeota* (3.7%) 순으로 나타났다. 대조구 시료의 경우, *Bacteroidetes* (22.4%), *Proteobacteria* (21.4%), *Firmicutes* (18.5%), *Fusobacteria* (10.0%), *Tenericutes* (3.6%) 순으로 나타났다. 반면, 실험구의 우점종은 *Proteobacteria* (30.0%), *Bacteroidetes*

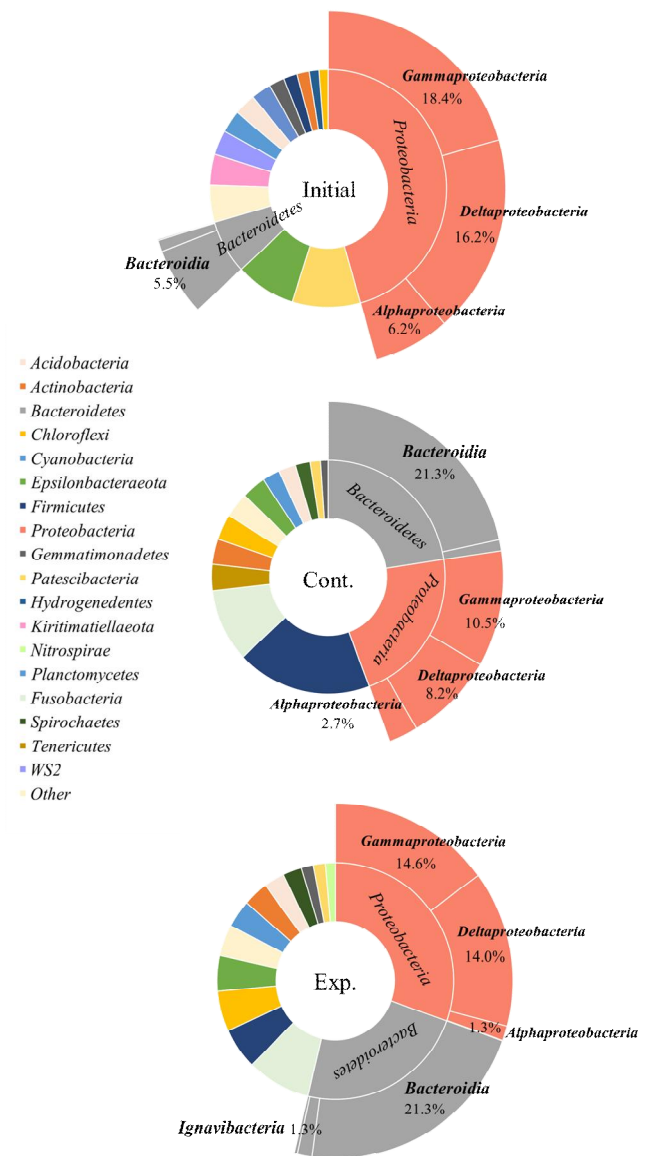


Fig. 4. Relative bacteria abundance ratio (>1%) at phylum (inner) and at class (outer) levels.

Table 2. Relative bacteria abundance ratio (phylum level) in estuary sediment

Bacteria	Initial	Cont.	Exp.	Bacteria	Initial	Cont.	Exp.
<i>Acidobacteria</i>	2.631	2.364	2.733	<i>Marinimicrobia</i>	0.082	0.034	0.078
<i>Actinobacteria</i>	1.508	3.509	3.393	<i>Modulibacteria</i>	0.015	0.016	0.030
<i>BRC1</i>	0.107	0.009	0.017	<i>Nitrospinae</i>	0.369	0.153	0.250
<i>Bacteroidetes</i>	6.566	22.360	22.898	<i>Nitrospirae</i>	0.545	0.895	1.332
<i>Calditrichaeota</i>	0.018	0.210	0.804	<i>Omnitrophicaeota</i>	0.079	0.003	0.021
<i>Chlamydiae</i>	0.695	0.012	0.014	<i>Patescibacteria</i>	8.293	1.408	1.631
<i>Chloroflexi</i>	1.105	3.504	5.422	<i>Planctomycetes</i>	2.450	0.437	0.524
<i>Cloacimonetes</i>	0.023	0.026	0.041	<i>Proteobacteria</i>	40.823	21.424	30.028
<i>Cyanobacteria</i>	2.737	2.394	3.745	<i>Schekmanbacteria</i>	0.047	0.008	0.010
<i>Dadabacteria</i>	0.034	0.029	0.040	<i>Spirochaetes</i>	0.686	2.032	2.567
<i>Epsilonbacteraeota</i>	7.350	3.290	4.811	<i>Synergistetes</i>	0.000	0.302	0.279
<i>FBP</i>	0.503	0.000	0.005	<i>TA06</i>	0.004	0.011	0.030
<i>Firmicutes</i>	1.669	18.535	5.499	<i>Tenericutes</i>	0.005	3.594	0.196
<i>Fusobacteria</i>	0.240	9.955	8.572	<i>Verrucomicrobia</i>	0.839	0.396	0.586
<i>Gemmatimonadetes</i>	1.886	1.061	1.632	<i>WPS-2</i>	0.171	0.004	0.003
<i>Hydrogenedentes</i>	1.190	0.037	0.048	<i>WS2</i>	3.029	0.030	0.060
<i>Kiritimatiellaeota</i>	3.732	0.416	0.624	<i>Zixibacteria</i>	0.000	0.031	0.030
<i>LCP-89</i>	0.031	0.010	0.020	Other	0.022	0.030	0.030
<i>Latescibacteria</i>	0.018	0.333	0.482				

(Unit: %)

(22.9%), *Fusobacteria* (8.6%), *Firmicutes* (5.5%), *Chloroflexi* (5.4%)로 확인되었다. 초기시료의 우점종은 대조구 및 실험구 시료와 확연한 차이를 보였다.

Proteobacteria 문과 *Bacteroidetes* 문은 국내 해양 생태계에서 우세한 박테리아로 자주 발견되는 미생물종으로, 본 연구의 대조구와 실험구에서도 우점하는 것으로 나타났다(Koh et al., 2016; Lee et al., 2018a; Lee et al., 2020). 단, 대조구와 실험구에서 최우점종은 각각 *Bacteroidetes*와 *Proteobacteria* 문으로 나타났다. *Proteobacteria* 문은 호기성이거나 조건혐기성 미생물(facultative anaerobe)이며 *Bacteroidetes* 문은 호기성 및 혐기성 조건에서 서식한다(Fang et al., 2017). 강 수준에서 *Proteobacteria*를 살펴보면 실험초기, 대조구 및 실험구 모두 *Gamma*-와 *Deltaproteobacteria* 강 순으로 우점하고 있다. *Gammaproteobacteria* 강의 계통발생 그룹은 호기성 혹은 조건 혐기성 미생물이며 *Deltaproteobacteria* 강은 혐기성 미생물이 다수 포함되어 있다(da Silva, 2013; Koh et al., 2016). 특히, *Gammaproteobacteria* 강은 인 순환에 중요한 역할을 하는데 *Gammaproteobacteria* 강이 감소할 경우 DIP 농도는 증가하게 된다(Sebastián and Gasol, 2013; Hicks et al., 2018). 대조구 (10.5%) 대비 실험구(14.6%)의 풍부한 *Gammaproteobacteria* 강은 실험구의 낮은 DIP 농도 변화와 연관됨을 확인하였다

(Fig. 3a). 질소 순환에 주요한 박테리아는 *Betaproteobacteria* 강과 관련된 암모니아 산화 박테리아로(Bernhard et al., 2005), 본 연구의 실험초기, 대조구 및 실험구 시료 모두 관찰되지 않았다. *Betaproteobacteria* 강은 온도가 높을수록 풍부도가 감소하는데(Hicks et al., 2018), 본 실험이 여름철에 수행되어 *Betaproteobacteria* 강이 나타나지 않은 것으로 판단된다. *Bacteroidetes* 문은 초기 유기물 분해에 중요한 역할을 하며, 난분해성 고분자 유기물을 분해한다(Sonthiphand et al., 2019). *Bacteroidia* 강에 속하는 미생물은 해양 생태계의 유기화합물을 혐기적으로 분해하는 역할을 하며 탄소순환에 기여한다(Zhang et al., 2017). 대조구와 실험구의 *Bacteroidia* 강은 모두 약 21.3%로 나타나 석탄회 조립물은 유기물 분해와는 연관성이 낮은 것을 확인하였다. 미생물 군집에서 대조구(18.5%)와 실험구(5.5%)의 차이가 가장 크게 나타나는 *Firmicutes* 문은 대부분이 절대혐기성 생물로 구성되어 있다(Fang et al., 2017).

이처럼 하구 퇴적물과 석탄회 조립물의 혼합 여부에 따라 미생물 군집 구조가 명확하게 변화하는 것으로 보아, 미생물 군집 분석은 석탄회 조립물의 기능을 평가하는 지표로 사용될 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 오염된 하구 퇴적물에 석탄회 조립물을 혼합하여 환경 개선 효과 및 미생물 군집 변화를 분석하였다. 석탄회 조립물과 하구 오염 퇴적물을 혼합하고 1개월 후, 석탄회 조립물이 혼합된 실험구의 pH가 11까지 상승하였다. DIP 농도는 대조구 대비 실험구에서 0.6배로 감소하였다. DIP의 감소는 석탄회 조립물과의 화학적 반응에 의한 인산칼슘 형성에 기인한 것으로 보이며, *Gammaproteobacteria* 강의 풍부도가 대조구 대비 실험구에서 높게 나타난 것으로 확인 할 수 있다. 대조구 대비 실험구의 DIN 농도는 2배 이상 증가하였으나 이는 pH의 증가 및 석탄회 조립물에서 용출되는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 영향으로 판단된다. 다만, 이후 pH 안정화 및 NO_x 제거에 활용됨에 따라 DIN 농도는 감소할 것으로 보인다. 이상의 결과로부터 석탄회 조립물은 오염된 하구역의 DIP 농도 감소에 효과적인 재료임을 확인하였다. 또한, 미생물 군집 분석은 오염 퇴적물의 개선 효과를 평가하는 지표로 사용될 수 있음을 확인하였다.

사 사

이 논문(또는 저서)은 부경대학교 자율창의학술연구비(2019년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Asaoka, S., T. Yamamoto, I. Yoshioka, and H. Tanaka(2009), Remediation of coastal marine sediments using granulated coal ash, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 172, No. 1, pp. 92-98.
- [2] Asaoka, S., T. Yamamoto, and K. Yamamoto(2008), A preliminary study of coastal sediment amendment with granulated coal ash - nutrient elution test and experiment on *Skeletonema costatum* growth, *Journal of Japan Society on Water Environment*, Vol. 31, No. 8, pp. 455-462 (in Japanese).
- [3] Asaoka, S., T. Yamamoto, H. Yamamoto, H. Okamura, K. Hino, K. Nakamoto, and T. Saito(2015), Estimation of hydrogen sulfide removal efficiency with granulated coal ash applied to eutrophic marine sediment using a simplified simulation model, *Marine pollution bulletin*, Vol. 94, No. 1-2, pp. 55-61.
- [4] Asaoka, S., W. A. Jadoom, T. Ishidu, H. Okamura, T. Oikawa, and K. Nakamoto(2018), Removal of hydrogen sulfide with granulated coal ash under aerobic and anaerobic conditions, *Journal of environmental chemical engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 4665-4670.
- [5] Bernhard, A. E., T. Donn, A. E. Giblin, and D. A. Stahl(2005), Loss of diversity of ammonia oxidizing bacteria correlates with increasing salinity in an estuary system, *Environmental Microbiology*, Vol. 7, No. 9, pp. 1289-1297.
- [6] Cho, H. K.(2020), Verification and status of lightweight aggregate based coal ash, *Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 15, No. 1, pp. 33-38.
- [7] Cho, H. Y., J. H. Lee, and J. H. Hyeon(2004), Bacterial Community Structure and Diversity Using 16S rDNA Analysis in the Intertidal Sediment of Ganghwa Island, *Korean journal of microbiology*, Vol. 40, No. 3, pp. 189-198.
- [8] da Silva, M. A. C., A. Cavalett, A. Spinner, D. C. Rosa, R. B. Jasper, M. C. Quecine, M. L. Bonatelli, A. Pizzirani-Kleiner, G. Corção, and A. O. de Souza Lima(2013), Phylogenetic identification of marine bacteria isolated from deep-sea sediments of the eastern South Atlantic Ocean, *SpringerPlus*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-10.
- [9] Fang, H., Y. Chen, L. Huang, and G. He(2017), Analysis of biofilm bacterial communities under different shear stresses using size-fractionated sediment, *Scientific reports*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-14.
- [10] Hicks, N., X. Liu, R. Gregory, J. Kenny, A. Lucaci, L. Lenzi, M. P. David, and K. R. Duncan(2018), Temperature driven changes in benthic bacterial diversity influences biogeochemical cycling in coastal sediments, *Frontiers in microbiology*, Vol. 9, p. 1730.
- [11] Jeon, W. H., S. Park, J. Y. Lee, J. S. Lee, and Y. J. Cho(2018), Evaluation of the groundwater and stream water interaction using metagenomics analysis in the hyporheic zone, Inje of Gangwon Province, *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 54, No. 3, pp. 293-300.
- [12] Jeong, I. and K. Kim(2019), Changes in benthic environments in polluted coastal sediment using granulated coal ash as a cover, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 25, No. 1, pp. 67-73.
- [13] Jeong, I., H. E. Woo, I. C. Lee and K. Kim(2020), Effects of Particle Size and Pyrolysis Temperature of Oyster Shell on Change of Coastal Benthic Environment, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and safety*, Vol. 26, No. 7, pp. 873-880.

- [14] Kim, J., B. P. Lingaraju, R. Rheume, J. Y. Lee, and K. F. Siddiqui(2010), Removal of ammonia from wastewater effluent by *Chlorella vulgaris*, *Tsinghua science and technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 391-396.
- [15] Kim, K.(2018), A study on performance of granulated coal ash on remediation of benthic environment of clayey intertidal zone, Master's thesis, Pukyong National University, pp. 28-47.
- [16] Kim, K., I. C. Lee, S. H. Ryu, T. Saito, and T. Hibino(2014a), Application of granulated coal ash for remediation of coastal sediment, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 17, No. 1, pp. 1-7.
- [17] Kim, K., T. Hibino, T. Yamamoto, S. Hayakawa, Y. Mito, K. Nakamoto, and I. C. Lee(2014b), Field experiments on remediation of coastal sediments using granulated coal ash, *Marine pollution bulletin*, Vol. 83, No. 1, pp. 132-137.
- [18] Koh, H. W., S. Rani, H. B. Hwang, and S. J. Park(2016), Microbial community structure analysis from Jeju marine sediment, *Korean Journal of Microbiology*, Vol. 52, No. 3, pp. 375-379.
- [19] Lee, A. H., J. Lee, J. Noh, C. Lee, S. Hong, B. O. Kwon, J. J. Kim, and J. S. Khim(2020), Characteristics of long-term changes in microbial communities from contaminated sediments along the west coast of South Korea: Ecological assessment with eDNA and physicochemical analyses, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 160, p. 111592.
- [20] Lee, D. W., H. Lee, A. H. Lee, B. O. Kwon, J. S. Khim, U. H. Yim, B. S. Kim, and J. J. Kim(2018), Microbial community composition and PAHs removal potential of indigenous bacteria in oil contaminated sediment of Taean coast, Korea, *Environmental pollution*, Vol. 234, pp. 503-512.
- [21] Lee, I. C., H. E. Woo, K. Kim, J. H. Lee, and K. Kim(2018), A study on changes in pore water quality of polluted sediment due to mixing ratio of granulated coal ash, *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 30(5), pp. 201-206.
- [22] Liu, J., H. Yang, M. Zhao, and X. H. Zhang(2014), Spatial distribution patterns of benthic microbial communities along the Pearl Estuary, China, *Systematic and applied microbiology*, Vol. 37, No. 8, pp. 578-589.
- [23] Maeng, J. H., T. Y. Kim, and D. H. Seo(2014), Minimizing environmental impact in accordance with the thermal power plant ash management (I), *Korea Environment Institute*, Vol. 24, No. 5, pp. 472-486.
- [24] Mayor, D. J., B. Thornton, and A. F. Zuur(2012), Resource quantity affects benthic microbial community structure and growth efficiency in a temperate intertidal mudflat, *PloS one*, Vol. 7, No. 6, pp. e38582.
- [25] Park, S., H. E. Woo, I. C. Lee, D. H. Kim, J. Park, J. Kim, and K. Kim(2019), Variation in the properties of contaminated coastal sediment with the mixing of alkaline industrial by-product, *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*, Vol. 25, No. 7, pp. 914-919.
- [26] Paerl, H. W.(2006), Assessing and managing nutrient-enhanced eutrophication in estuarine and coastal waters: Interactive effects of human and climatic perturbations, *Ecological Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 40-54.
- [27] Sonthiphand, P., S. Ruangroengkulrith, W. Mhuantong, V. Charoensawan, S. Chotpantararat, and S. Boonkaewwan(2019), Metagenomic insights into microbial diversity in a groundwater basin impacted by a variety of anthropogenic activities, *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 26, No. 26, pp. 26765-26781.
- [28] Sebastián, M., and J. M. Gasol(2013), Heterogeneity in the nutrient limitation of different bacterioplankton groups in the Eastern Mediterranean Sea, *The ISME journal*, Vol. 7, No. 8, pp. 1665-1668.
- [29] Yamamoto, T., K. H. Kim, and K. Shirono(2015), A pilot study on remediation of sediments enriched by oyster farming wastes using granulated coal ash, *Marine pollution bulletin*, Vol. 90, No. 1-2, pp. 54-59.
- [30] Yoon, B. B., E. J. Lee, T. A. Kang, and Y. S. Shin(2013), Long-term change of phytoplankton biomass (chlorophyll-a), environmental factors and freshwater Discharge in Youngsan Estuary, *The Korean Society of Limnology*, Vol. 46, No. 2, pp. 205-214.
- [31] Wetzel, M. A., D. S. Wahrendorf, and C. Peter(2013), Sediment pollution in the Elbe estuary and its potential toxicity at different trophic levels, *Science of the Total Environment*, Vol. 449, pp. 199-207.
- [32] Webster, G., J. Rinna, E. G. Roussel, J. C. Fry, A. J. Weightman, and R. J. Parkes(2010), Prokaryotic functional diversity in different biogeochemical depth zones in tidal sediments of the Severn Estuary, UK, revealed by stable-isotope probing. *FEMS microbiology ecology*, Vol. 72, No. 2, pp. 179-197.
- [33] Wolkersdorfer, C.(2008), Water management at abandoned

flooded underground mines: fundamentals, tracer tests, modelling, water treatment. Springer Science & Business Media, p. 465.

- [34] Zhang, J., S. Liu, L. Li, Y. Ren, C. Feng, C. Wei, Y. Li, and Z. Huang(2017), Anaerobic dechlorination of tetrachlorobisphenol a in river sediment and associated changes in bacterial communities. *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 228, No. 2, p. 78.

Received : 2021. 04. 30.

Revised : 2021. 05. 26.

Accepted : 2021. 06. 28.