

다공질 파일을 이용한 점토질 갯벌의 저질환경개선 Remediation of Muddy Tidal Flat using Porous Pile

김경희* · 이인철* · 강윤구** · Hibino Tadashi***

Kyunghoi Kim*, In-Cheol Lee*, Yoon-Koo Kang** and Tadashi Hibino***

요지 : 본 연구에서는 일본 히로시마시 텐마강 하구에 위치한 점토질 갯벌을 대상으로 투수성이 높은 다공질 파일을 설치하여 갯벌 내부에서의 지하수 흐름 형성여부를 확인하고 그에 따른 저질의 성상변화를 조사하였다. 하천의 수위가 변할 때 하천수가 다공질 파일의 하부 및 상부를 통해 공급되면서 갯벌 내부에서 지하수의 흐름이 형성되는 것이 확인되었다. 지하수의 흐름을 통해 다공질 파일내의 DO 농도가 최대 4 mg/L까지 증가하였다. 다공질 파일 내부의 DO 농도의 증가는 저질내의 환원물질과 유기물량을 감소시키는데 효과적이었으며, 지하수의 흐름은 퇴적된 점토질 입자의 재부상을 촉진시키는 것으로 조사되었다. 이상의 결과로부터 점토질 갯벌 내에 다공질 파일을 설치함으로써 점토질 갯벌의 저질 환경을 효과적으로 개선할 수 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 다공질 파일, 점토질 갯벌, 지하수, 환경개선

Abstract : Field experiment were carried out to investigate the formation of ground water flow and remediation of muddy tidal flat by installation of porous pile at the tidal flat of brackish river located in Hiroshima City, Japan. After the installation of porous pile, the concentrations of Dissolved Oxygen (DO) in the interstitial water in the porous pile increased with maximum concentration of 4 mg/L due to a formation of groundwater flow. It was observed that a increase in Oxidation Reduction Potential (ORP) and a decrease in Ignition Loss (IL) in the porous pile site and these must be caused by the increase of dissolved oxygen in the interstitial water. From these results obtained above, it is concluded that the porous pile is an effective technology for remediation of muddy tidal flats.

Keywords : Porous pile, muddy tidal flat, groundwater, remediation

1. 서 론

일본 최대의 내만인 세토내해(海)의 서부에 위치한 히로시마시(島市)에는 5개의 하천이 관통하여 흐르고 있으며, 이 주변은 편리한 교통, 풍부한 수산자원으로 인해 오래전부터 시민의 생활터전으로 이용되어 왔다 (Fig. 1). 하지만 일본의 고도경제성장기에 산업단지의 조성을 위해 하구역을 중심으로 실시된 매립과 홍수피해를 줄이기 위해 하천 상류에 설치한 유량 조절용 수문으로 인해 하천 및 하구역의 수리 환경이 크게 변화하게 되었다 (Nakashita et al., 2007). 또한 지진피해를 줄이기 위해 하천 제방을 따라 지반 내에 설치한 시트파일 하천 갯벌 내부의 지하수 흐름을 차단하면서 모래층 위에 점토질 입자가 수십 cm정도 퇴적되어 점토질 갯벌이 넓게 형성되게 되었다 (Fujiwara et al., 2008). 이러한 점토질 갯벌은 유기물 함량이 높고 강한 환원 상태가 되어 악취문제가 심하게 발생하고, 지반강도가 낮아 시민들의 접근이 어려

워져 수변공간으로서의 역할을 하지 못하고 있다.

점토질 갯벌은 일반적으로 투수계수가 매우 낮아서 대기와 수층과의 물질교환이 어려워 산소공급이 억제되고 환원물질이 축적되는 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 점토질 갯벌의 투수성을 향상시켜 점토질 갯벌 지반 내에 지하수의 흐름 형성이 필요하다.

점토질 갯벌 내부에 지하수의 흐름을 형성하기 위해 석탄회 조립물을 이용한 방법이 적용되고 있다. 석탄회 조립물은 화력발전소의 산업부산물인 석탄회를 시멘트와 혼합하여 조립화한 것으로, 최근 연안역의 저질환경 개선재료로 주목받고 있다 (Asaoka et al., 2009; Yamamoto et al., 2013). 석탄회 조립물의 입경은 수 mm에서 수 cm의 다공질성 재료이다. 이러한 석탄회 조립물을 샌드파일(Sand pile) 형태 (다공질 파일)로 점토질 갯벌에 적용할 경우, 갯벌 지반 내부의 투수성을 향상시킬 수 있다.

본 연구에서는 점토질 입자가 퇴적되어 시민들의 이용이 어

*부경대학교 해양공학과 (Corresponding author : Kyunghoi Kim, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University, 45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 608-737, Korea, Tel: +82-51-629-6583, Fax: +82-51-629-6590, hoikim@pknu.ac.kr)

**삼성물산(주) 건설부문 Civil사업부 (14, Seocho-daero 74-gil, Seocho-gu, Seoul, 137-956, Korea)

***Graduate school of engineering, Hiroshima University (1-4-1 Kayamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima, 739-8527, Japan)

려워진 히로시마시 텐마강(天川)에 위치한 점토질 갯벌을 대상으로 석탄화 조립물을 이용한 다공질 파일을 현장에 설치하여 점토질 갯벌에서의 지하수 흐름 형성여부를 살펴보고, 그에 따른 점토질 지반의 성상변화를 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 다공질 파일 설치

다공질 파일은 2007년 3월, 히로시마시 텐마강의 하구로부터 약 3 km 상류 지점에 위치한 갯벌에 설치하였다 (Fig. 1). 당시 대상 갯벌은 원지반인 모래층 위에 점토층이 약 50 cm의 두께로 퇴적되어 있었다 (Fig. 2). 이에 길이 50 cm, 직경 16 cm인 다공질 파일은 가로 4.5 m, 세로 9 m 구역에 1.5 m 간격으로 총 18개를 설치하였다. 본 실험에서 다공질 파일 형성에 이용한 석탄화 조립물을 The Chugoku Electric Power

Co., Lnc.에서 상용화한 직경 5-50 mm의 조립물이다. 다공질 파일의 설치 후의 사진은 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 계측 및 조사

수위, 염분 및 용존산소는 다공질 파일의 하부에 설치한 메모리식 수온수위계 (JEF Advantech Co. Ltd; ATD-HR), 메모리식 수온염분계 (JEF Advantech Co. Ltd; ACT-HR) 및 메모리식 용존산소계 (JEF Advantech Co. Ltd; ADOW-CMP)를 이용하여 2008년 8월부터 10월까지 측정하였다.

산화환원전위와 지반강도는 현장에서 산화환원전위계(ORP; PS-112C, RM1; TOA Electronics, Ltd., Tokyo, Japan)와 야마나카식 토양경도계(Fujiwara Scientific Company Co., LTD., Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였다. 강열감량(IL)은 100°C로 건조한 저질을 600°C로 6시간 연소 후의 감소중량을 이용하여 계산하였으며, 입도분포의 측정은 회절식 입도

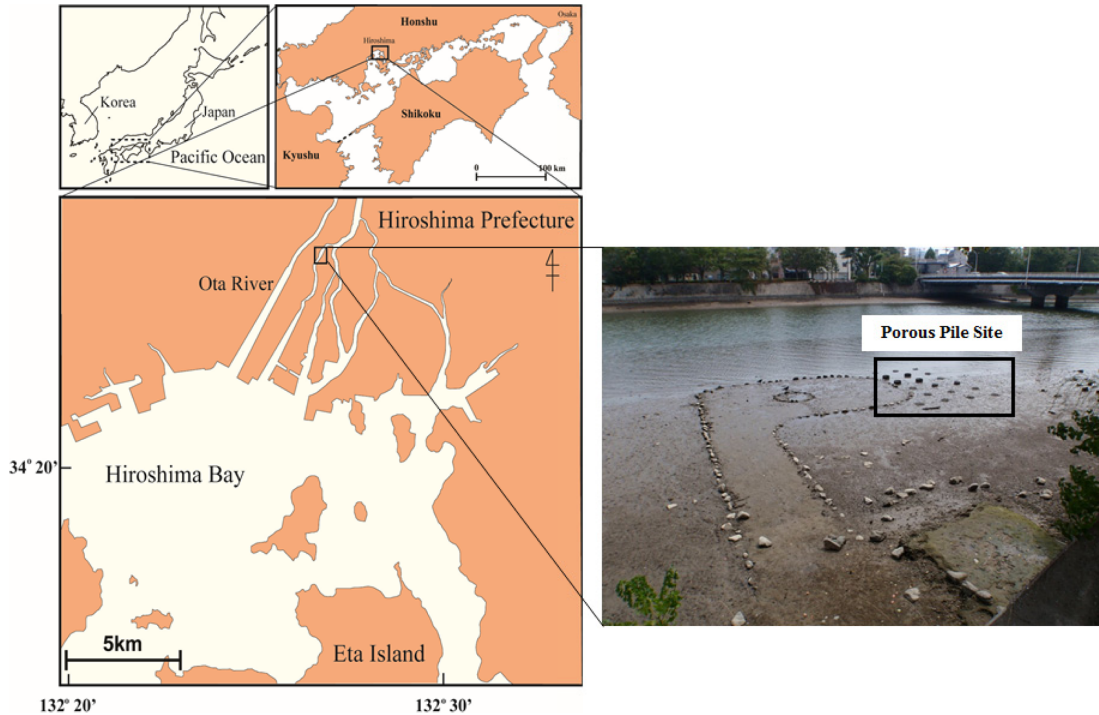


Fig. 1. Location of study area and picture of experimental site after the installation of porous pile.

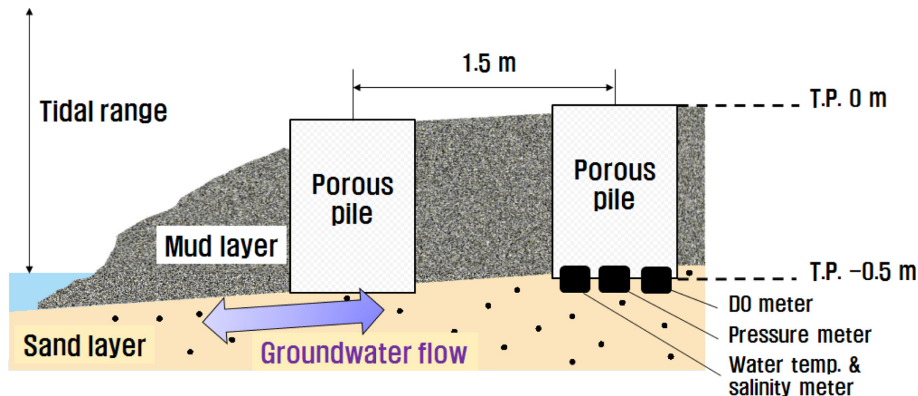


Fig. 2. Conceptual sectional diagram after installation of porous pile in mud layer of the tidal flat.

분포 측정장치(SALD 3000; Shimadzu, Kyoto, Japan)를 이용하였다.

생물조사는 0.0625 m³의 저서생물 채집용 용기를 이용하여 실시하였다. 채취한 저질을 1 mm 체를 이용하여 생물과 저니를 분리한 후 개체수 및 종수를 파악하였다. 저질 성상 및 생물조사는 2007년부터 2009년까지 매년 9월에 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 지하수 흐름 형성

Fig. 3 에는 소조기(a)와 대조기(b)에 대해 하천과 다공질 파일 내의 수위변화(a-1, b-1)와 다공질 파일 내의 염분 및 용존산소 농도의 변화(a-2, b-2)를 나타내었다. 대조기의 하천 수위변화 최대 진폭은 약 3 m이며, 다공질 파일 내부의 수위는 하천 수위에 의존하여 변화하였다. T.P. -0.7 m 이하의 저조 시에는 다공질 파일 내부의 수위변화가 나타나지 않았는데, 이는 다공질 파일 내의 지하수위가 수위계측 기기보다 낮아졌기 때문이다 (Fig. 3(a-2), (b-2)의 검정부분).

먼저 대조기(b)에 대해 살펴보면, 다공질 파일 내의 염분은 저조에서 약 15 PSU였으며, 수위 상승과 함께 최대 26 PSU 까지 증가한 후, 만조 이후 서서히 감소하는 경향을 보였다. 이는 창조류시에 수위상승과 함께 하천으로 유입된 고염분수가 점토층 하부의 모래층을 통하여 유입되고, 수위가 점토질의 지반고보다 높아진 후에는 다공질 파일의 상부로부터 계속 유입되기 때문이다.

하천수가 상승하여 하천수위가 다공질 파일보다 높아지게

되면, 하천과 다공질 파일 사이에 수위차가 없어지게 되고, 그 결과 다공질 파일 내부의 지하수 흐름은 매우 약해지게 된다.

형성된 지하수 흐름은 DO의 공급을 증가시켜 다공질 파일내의 DO를 최대 약 4 mg/L까지 증가시켰다. 지하수 흐름이 약해지는 만조 이후 DO가 감소하기 시작하여 간조에 이르러서는 0 mg/L까지 감소하였다. 이는 지하수 흐름이 약해진 후에 다공질 파일 내에서 유기물의 분해 및 환원물질의 산화로 인해 소비되는 DO가 많아지기 때문으로 판단된다.

소조기에도 대조기보다는 변동 폭은 작지만 유사한 변화가 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 수질 변화는 매 조석 사이 클마다 반복되고 있다. 이상의 결과로부터 점토질 갯벌 내부에 설치한 다공질 파일을 통해 하천 수위변화에 따라 지하수의 흐름이 형성되고, 지반 내에 용존산소를 효과적으로 공급하는 것을 알 수 있다.

3.2 저질 성상변화

Fig. 4에는 다공질 파일 설치구역(이하 설치구역)과 미설치구역(이하 미설치구역)에서의 ORP, IL, 지반강도 및 입도분포를 나타내었다.

ORP는 설치구역에서 70 mV 이상을 유지한데 비해, 미설치구역에서는 -60 ~ 60 mV의 범위로 변동 폭이 컸다. 이는 설치구역에서 다공질 파일의 설치 이후, DO가 공급됨에 따라 암모니아, 황화수소를 포함하는 환원물질이 산화되어 환원물질의 농도가 낮아졌기 때문으로 판단된다.

IL은 설치구역과 미설치구역에서 모두 감소하는 경향을 보였으나, 감소속도는 설치구역에서 2배 이상 빨랐다. 이러한 현

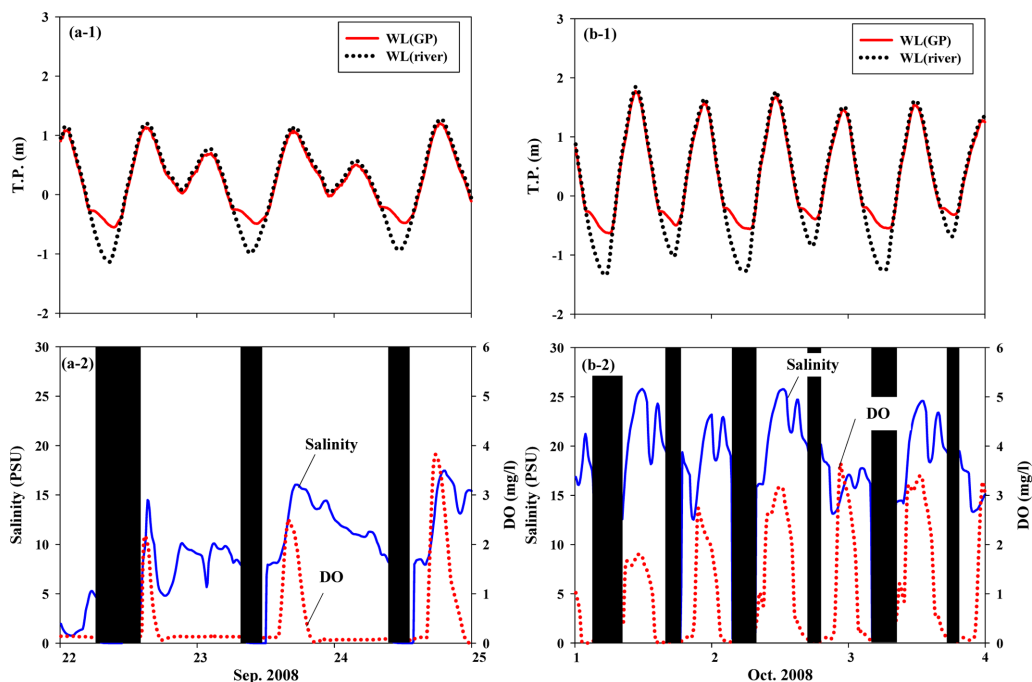


Fig. 3. Temporal variations in (a-1) pore water level in the porous pile and river water level, (a-2) salinity and dissolved oxygen (DO) of pore water in the porous pile during neap tide and (b-1) pore water level in the porous pile and river water level and (b-2) salinity and dissolved oxygen (DO) of pore water in the porous pile during spring tide.

상은 유기물의 호기성 분해가 혐기성 분해에 비해 3배 이상 빠르다(Pereira et al., 1994)는 현상과 결부하여 판단 할 수 있다. 즉 다공질 파일 설치 후 용존산소 공급이 활발해져 설치구역에서 호기성 분해가 활발해져 IL이 급격히 감소한 것으로 판단 할 수 있다. 하지만 2009년 이후 설치구역에서 IL이 감소하지 않고 있는데 이는 2009년까지 이분해성 유기물의 분해가 대부분 끝나고 남아있는 IL에는 분해속도가 느린 난분해성 유기물이 높은 비율로 함유되어 있기 때문으로 생각된다.

미설치구역에서는 입경분포의 변화가 미미한데 비해, 설치구역에서는 0.1 mm이상 입경의 비율이 2년간 약 2배 정도 늘어났다. Kim et al.(2009)에 의하면 지하수 흐름이 존재하는 연안역 저니에서는 4 cm/s 이하의 낮은 저면 유속에도 세립자의 재부상이 활발해지는 것으로 보고되고 있다. 즉 다공질 파일의 설치에 의해 지하수 흐름이 형성되고 이로 인해 점토

질 성분의 재부상이 활발해졌음을 알 수 있다.

지반강도는 설치구역에서 $0.4 \sim 0.9 \text{ kg/cm}^2$, 미설치구역에서 $0.1 \sim 0.2 \text{ kg/cm}^2$ 의 범위로, 설치구역에서 4배 이상 높은 것으로 조사되었다. 이러한 현상은 Fig. 4(d)의 입경변화와 결부하여 알 수 있다. 또한 Kim et al.(2009)의 연구성과인 유기물의 농도가 높을수록 그리고 이분해성 유기물의 함량이 많을수록 점토질 지반의 함수비가 높아지는 현상과도 연계해보면 IL의 감소로 인해 설치구역의 함수비가 낮아지면서 지반강도가 높아진 것으로도 판단된다.

3.3 생물상의 변화

Fig. 5는 다공질 파일 설치 이후의 설치구역과 미설치구역에서의 저서생물조사 결과를 나타내고 있다. 설치구역에서의 개체수는 $40 \sim 130 \text{ ind./0.0625 m}^2$ 인데 반해, 미설치구역에서는 $100 \sim 330 \text{ ind./0.0625 m}^2$ 으로 조사되었다. 종수는 설치구

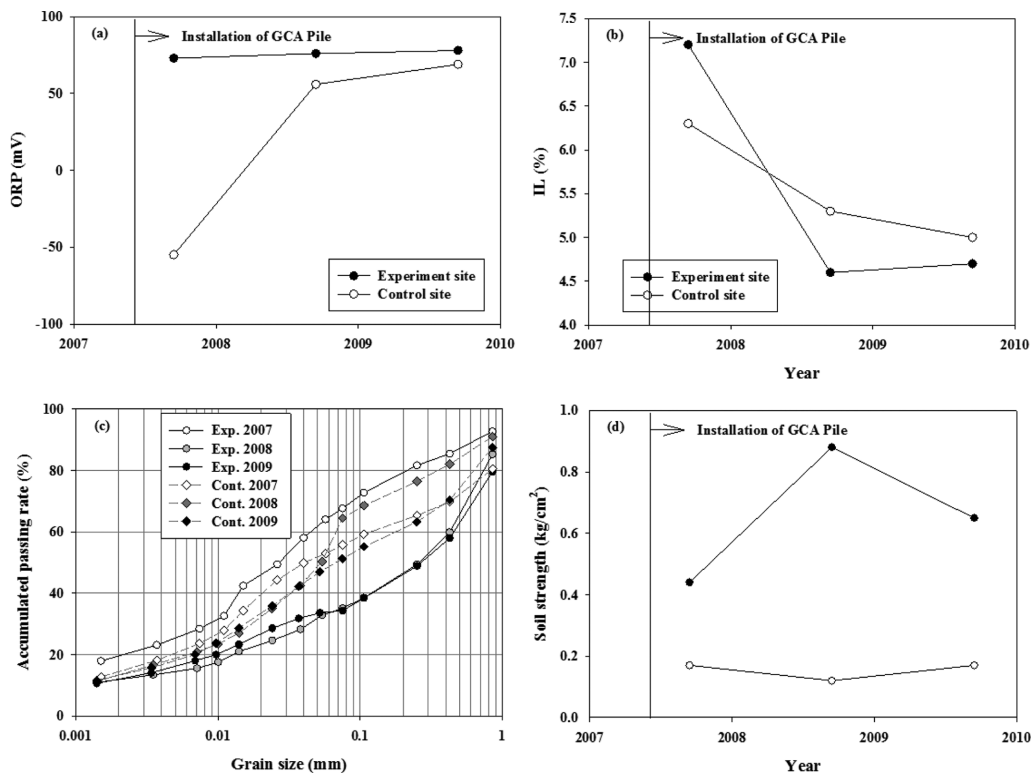


Fig. 4. Annual changes in (a) ORP, (b) IL, (c) grain size distribution and (d) soil strength.

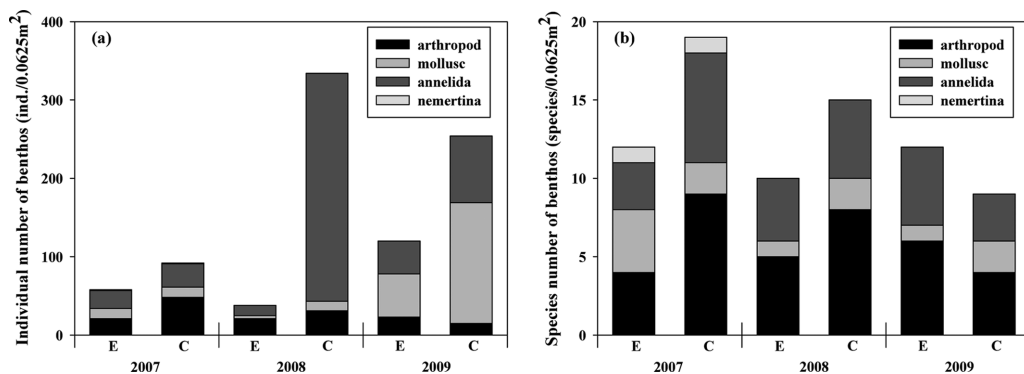


Fig. 5. Annual changes in (a) individual number of benthos and (b) species number of benthos.

역에서 10 ~ 12 species/0.0625 m² 이었지만, 미설치구역에서는 9 ~ 19 species/0.0625 m² 로 조사되었다. 개채수와 중수는 설치구역에 비해 미설치구역에서 높은 값을 보였다. 이는 설치구역에서는 다공질 파일을 설치하면서 생물상이 교란되었기 때문으로 판단된다. 파일 설치 후 시간이 경과하면서 개채수가 점차 증가되면서 안정화 과정에 있다고 볼 수 있지만, 생태계 복원에는 많은 시간이 소요되기 때문에 (Burger, 2008; Majone et al., 2015) 보다 안정화 단계에 이르기 위해서는 더 많은 시간이 필요한 것으로 판단된다. 하지만, 미설치구역에서 매년 개채수가 큰 폭으로 변화하고 우점종도 매년 바뀌고 있으며 중수 또한 빠르게 감소하고 있는데 비해, 설치구역에서는 개채수가 서서히 증가하고 있고 여러 종이 고르게 서식하고 있으며 중수 또한 안정되어 가는 경향을 보였다.

4. 결 론

이상의 결과로부터 다공질 파일의 설치를 통해 모래층 상부에 점토층이 존재하는 갯벌에 지하수 흐름을 형성시키는 것이 가능하고, 이는 점토질 갯벌에 용존산소의 농도를 증가시켜 점토질 갯벌의 환경개선에 효과적임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(C-B-2014-0020)에 의하여 연구되었음.

References

Asaoka, S., Yamamoto, T., Yoshioka, I. and Tanaka, H. (2009). Remediation of coastal marine sediments using granulated coal ash. *Journal of Hazardous Materials*, 172, 92-98.

Burger, J. (2008). Environmental management: Integrating ecological evaluation, remediation, restoration, natural resource damage assessment and long-term stewardship on contaminated lands. *Science of the Total Environment* 400, 6-19.

Fujiwara, T., Kim, K., Touch, N. and Hibino, T. (2008). Formation of the Water Circulation by Construction of Infiltration-Pillar in the Riverbank that Sludge Deposits. *Proceedings of the 7th International Conference on Civil and Environmental Engineering*. 52

Kim, K., Abe, M., Komai, K. and Hibino, T. (2009). An effect of pore water infiltration on the re-suspension of sea bottom sediment. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2*. 65, 971-975. (in Japanese with English abstract)

Majone, M., Verdini, R., Aulenta, F., Rossetti, S., Tandoi, V., Kalogerakis, N., Agathos, S., Puig, S., Zanolli, G. and Fava, F. (2015). In situ groundwater and sediment bioremediation: barriers and perspectives at European contaminated sites. *New Biotechnology* 32, 133-146.

Nakashita, S., Hibino, T., Fukuoka, S. and Mizuno, M. (2007). Characteristics of groundwater flow and tidal flat formed by river structure in the estuary. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2*. 63, 1246-1250. (in Japanese with English abstract)

Pereira, A., Tassin, B. and Jørgensen, S. E. (1994). A model for decomposition of the drown vegetation in an Amazonian reservoir. *Ecological Modeling*, 75/76, 447-458.

Yamamoto, T., Harada, K., Kim, K.H., Asaoka, S. and Yoshioka, I. (2013). Suppression of phosphate release from coastal sediments using granulated coal ash. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 116, 41-49.

Received 24 November, 2014

Revised 21 January, 2015

Accepted 3 February, 2015