

석탄회 조립물을 이용한 잘피군락 구성에 관한 연구

김경희*† · 현예진** · Tadashi Hibino***

* 부경대학교 해양공학과, ** 한국수산자원관리공단 생태복원실, *** 일본히로시마대학 공학연구과

Creating Eelgrass Beds Using Granulated Coal Ash

Kyunghoi Kim*† · Yejin Hyeon** · Tadashi Hibino***

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

** Ecology & Restoration Division, Korea Fisheries Resources Agency, Busan 48058, Korea

*** Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashi-Hiroshima 739-0046, Japan

요 약 : 산업부산물인 석탄회를 이용하여 잘피군락의 조성 가능성을 평가하기 위한 현장실험을 실시하였다. 오염된 점토질 해저면에 석탄회 조립물을 이용하여 인공지반을 조성하고 잘피를 이식한 후 모니터링을 실시하였다. 이식된 잘피는 조성된 지반에서 성공적으로 정착하였으며, 이식 후 24개월 이후부터는 이식된 잘피의 개체길이의 증가 및 영양번식을 통한 잘피의 밀도의 빠른 증가가 확인되었다. 또한 조성된 잘피군락 및 그 주변에서 저서생물 및 미세조류의 종수가 증가하여 자연잘피군락과 동일하게 연안역의 생물다양성 향상에 도움이 되는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 결과로부터 석탄회 조립물은 잘피군락 구성에 적합한 재료임을 확인하였다.

핵심용어 : 잘피, 인공지반, 복원, 이식, 석탄회 조립물

Abstract : In order to utilize coal ash for eelgrass beds, a pilot plant experiment was carried out. Eelgrass was transplanted to on artificial bed made of granulated coal ash. Successful settlement of eelgrass was achieved and the density of the eelgrass increased at an exponential rate through vegetative propagation after 24 months. An increase in biodiversity in and around the artificial eelgrass bed was observed after the transplant took place. From the results of this experiment, it can be concluded that granulated coal ash is a suitable material for creating eelgrass beds.

Key Words : Eelgrass, Artificial bed, Restoration, Transplant, Granulated coal ash

1. 서 론

세토내해(Seto Inland Sea)는 일본 서부에 위치한 일본 최대의 폐쇄성 내만으로 깨끗한 수질 및 풍부한 수산자원, 긴 해안선, 편리한 교통으로 인해 오래전부터 주민들의 생활공간으로 자리 잡고 있었다. 하지만, 1950년대 이후, 좋은 교통여건과 적은 자연재해, 온화한 기후 및 매립의 용이함 등의 양호한 입지조건과 일본의 산업화 정책이 맞물려 세토내해에 공장 및 인구밀도가 급속도로 증가하게 되었다. 그 결과, 오페수의 유입량이 증가하게 되었고 이는 부영양화를 가속화시켜 적조 및 빈산소수위가 빈번하게 발생되었다. 이에 1973년에 세토내해 환경보전임시조치법(COD 배출총량규제, 1979년 이후 TP, 1996년 이후 TN 포함)이 제정되어 최근까지 수

질개선을 위한 노력이 계속되어왔다. 그 결과 수질이 빠르게 개선되어 최근의 적조발생빈도는 1976년과 비교하여 약 1/3 정도 수준으로 감소하였다. 하지만 최근까지도 바지락, 정어리 등의 어획량이 감소하는 종래의 부영양화와는 다른 형태의 어업피해가 나타나고 있는 것으로 보고되고 있다(Yamamoto et al., 2003).

갯벌은 매우 높은 생산력을 가지고 있으므로 많은 양의 유기물을 소비하며, 잘피군락은 산란장 및 치어의 서식지로 연안생태계의 일부를 차지하고 있다(Mcroy and McMillan, 1977; Fonseca and Fisher, 1986; Lee and Dunton, 1999). 하지만 세토내해에서도 산업화와 함께 갯벌의 약 50%, 잘피군락의 약 70%가 소멸되었다(Figs. 1 and 2). 갯벌 및 잘피군락의 감소는 연안 생태계를 파괴시켰고, 이로 인해 육역기원의 유기물이 소비되지 못하고 해역으로 유입되고 있으며, 이는 세토내해 어업생산량 감소의 주된 원인 중 하나인 것으로 보고되고

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

석탄회 조립물을 이용한 잘피군락 구성에 관한 연구

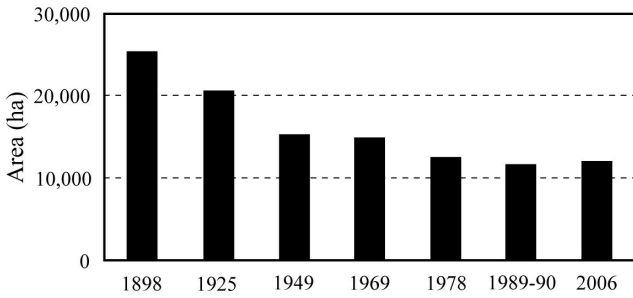


Fig. 1. Variations in area of tidal flat in Seto Inland Sea (Seto Inland Sea Environmental Information Center).

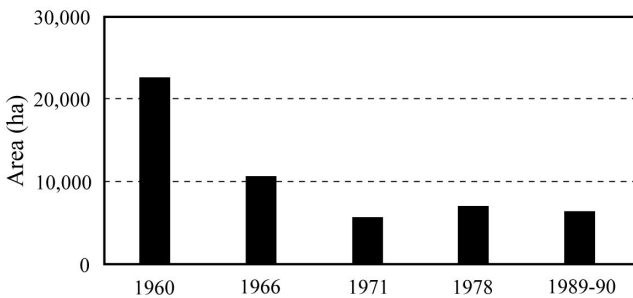


Fig. 2. Variations in area of eelgrass bed in Seto Inland Sea (Seto Inland Sea Environmental Information Center).

있다(Yamamoto et al., 2003). 근래에 들어 수산생산량의 회복 및 건전한 해양생태계의 구축을 위해서 갯벌 및 해조장을 복원하고자 하는 움직임이 활발해 지고 있다.

석탄화력발전소에서 발생하는 석탄회는 산업폐기물로 지정되어 재활용되지 못하고 매립되어져 왔다. 일본에서는 2007년 기준 연간 약 1200만톤 가량 발생하고 있는 석탄회를 재활용하기 위해 많은 노력을 기울여 왔다(Japan Coal Energy Center, 2009). 1990년대에는 석탄회 생산량의 약 70%를 시멘트 원료로 이용해 왔으나, 2000년대 이후 시멘트의 생산량이 감소하면서 석탄회를 도로 건설 재료 및 콘크리트 골재로 이용하기 위한 기술을 개발하였다. 건설 분야에서의 석탄회 이용량 증가에도 불구하고 생산되는 석탄회 전체의 소비에는 한계가 있었으며, 현재도 석탄회의 이용방안을 다각화하기 위한 노력이 계속되고 있다.

연안 생태공간을 조성하기 위한 재료로 모래가 주로 사용되어 왔지만 연안생태계의 파괴와 해안 침식 등의 문제가 발생함에 따라 해사채취가 금지되었다. 최근 석탄회 조립물을 저서환경 개선재 및 해사의 대체재로 이용하기 위한 많은 노력이 시도되고 있다(Tamai et al., 2012; Yamamoto et al., 2013; Kim et al., 2014a). 이에 본 논문에서는 오염된 점토질 지반 상부에 석탄회 조립물로 잘피 서식을 위한 지반을 조성한 후 잘피를 이식하여 석탄회 조립물의 연안 생태계 복원을 위한 친환경 재료로의 이용 가능성을 검토하였다.

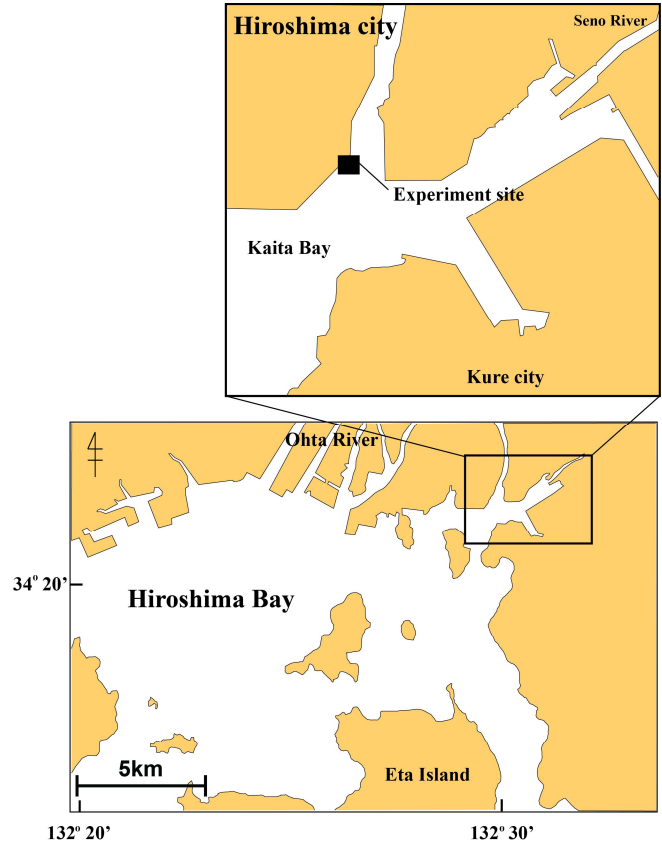


Fig. 3. Location of Experiment site for restoration of eelgrass bed.

2. 재료 및 방법

2.1 석탄회 조립물

잘피군락의 조성을 위해 사용된 석탄회 조립물은 화력발전소에서 발생하는 비산재에 10~15%의 시멘트를 접착제로 첨가하여 5~40 mm의 크기로 조립화한 것이다. 석탄회 조립물의 주성분은 SiO_2 , CO_3^{2-} , Al_2O_3 , CaO 등이며 각각의 농도는 약 395, 133, 126, 55.4 g/kg인 것으로 알려져 있다(Yamamoto et al., 2013). 석탄회 조립물의 중금속 용출량은 일본의 수질기준을 만족하고 있으며, 중금속의 생물 축적량 또한 안전한 것으로 보고되고 있다(Asaoka et al., 2008; Saito et al., 2011).

2.2 잘피군락 복원 현장실험

잘피군락 복원을 위한 인공지반은 2010년 3월 일본 히로시마시 카이타 만의 사니질 지반위에 조성하였다(Fig. 3). 조성 해역은 잘피군락이 존재했었으나, 선착장의 건설로 인해 잘피군락의 면적이 크게 감소한 곳이다. 인공지반의 면적은 3.2×2.8 m로, 모래주머니로 틀을 만들고 석탄회 조립물로 내부를 채웠다(Fig. 4). 조성된 인공지반에 2010년 4월 평균 개

체길이 약 36 cm의 113개체의 잘피(거머리말)를 이식하였다. 이식에는 해수를 채운 실외수조에서 생산된 종묘를 이용하였으며, 유전자 교란을 막기위해 히로시마만에서 채집된 종자로 종묘생산 하였다. 잘피는 석탄회 조립물을 가득 채운 500 ml의 망 내부 중앙에 지하부를 고정시킨 후, 잘피를 고정된 망을 조성된 지반의 상부에 거치하였다(Fig. 5).

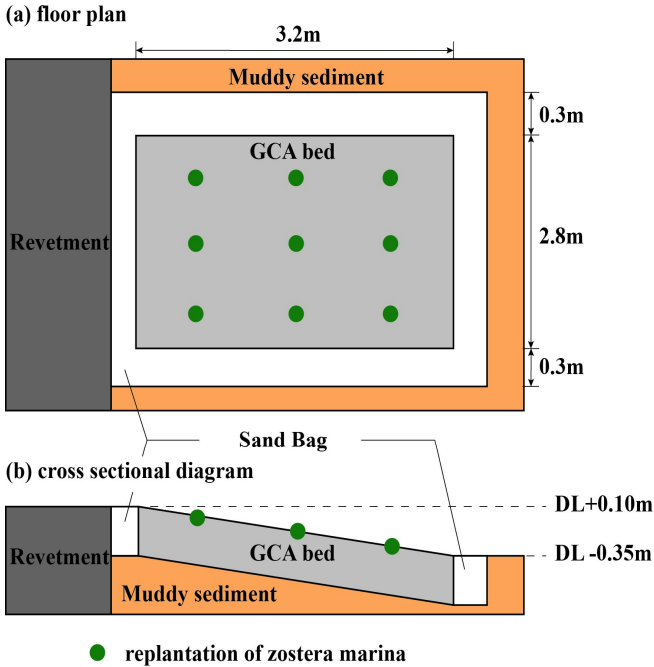


Fig. 4. Conceptual diagram of restoration of eelgrass bed.



Fig. 5. Transplanted eelgrass on the artificial bed (Kim et al., 2014b).

2.3 현장 모니터링

이식한 잘피의 정착 상태를 확인하기 위해 잘피의 개체수 및 개체 길이를 2010년 4월부터 2013년 1월까지 33개월간 13회 측정하였다. 또한 잘피군락 지반 상부의 유속(compact EM, JFE advantech) 및 조위(compact TD, JFE advantech)를 모니터링 하였으며, 체분석을 통해 잘피군락 지반의 입경분포를 확인 하였다. 조성된 잘피군락과 주변 자연잘피군락 지반의 pH(D-52, HORIBA) 및 강열감량의 모니터링을 통해 조성된 잘피군락의 저서환경 특성을 조사하였으며, 잘피군락 조성에 따른 생물다양성 변화를 살펴보기 위해 조성된 잘피군락에 서식하는 저서생물 및 저서미세조류의 종수를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조성된 잘피군락 주변의 물리환경 특성

조성된 잘피군락 주변의 수심은 대조기 만조시에 4~5 m, 간조시에 0.5 m였다(Fig. 6). 유속은 대체로 20 cm/s 이하였으며, 소조기보다는 대조기에 커지는 경향을 보였다. 간조시에 순간적으로 빠른 유속이 관측되었으며, 최대유속은 약 66 cm/s로 조사되었다. 모니터링 기간 동안 채우는 재료로 사용된 석탄회 조립물의 유실은 관측되지 않아, 조성된 지반은 약 60 cm/s 정도의 유속에서 안정한 것으로 판단할 수 있었다.

3.2 이식된 잘피의 정착

이식된 잘피의 밀도 및 개체 길이의 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 잘피 이식 후 4~6개월 사이의 하계에 28℃를 초과하는 고수온에 의한 잘피 밀도의 급격한 감소가 확인되었으며, 실험의 지속을 위해 20개체의 잘피를 추가로 이식하였다. 하계 평균수온이 28℃ 이하로 유지된 이식 2년째부터 잘피 밀도는 200개체/m²까지 증가하였으며, 잘피 개체 길이는 80 cm까지 성장하였다. 잘피는 3년째부터 580개체/m² 이상까지 급격히 증가하였으며, 수온이 높은 하계에도 평균 개체 길이의 감소는 확인되었으나 개체밀도는 감소하지 않았다. 잘피 이식 33개월 후의 잘피에 의한 지반 피복율은 50% 이상으로 조사되었다. 잘피 밀도의 급격한 증가는 자연 잘피보다 낮은 밀도로의 이식으로 인한 잘피 개체간의 광량과 영양염 등의 경쟁감소로 인해 나타난 것으로 판단된다(Enriquez et al., 2002; Peralta et al., 2002).

일반적으로 잘피의 생육한계는 28℃로 알려져 있다(Kawasaki et al., 1988; Lee et al., 2003; Lee et al., 2005). 수온이 높아지는 하계에는 잘피가 생리적으로 심한 스트레스를 받으며, 호흡량이 급격하게 증가하여 생물량 및 생산성이 감소하는 것으로 보고되고 있다(Wetzel and Penhale, 1983; Orth and Moore, 1986). 연구기간 중 고수온에 의해 잘피 개체수가 감소한 기

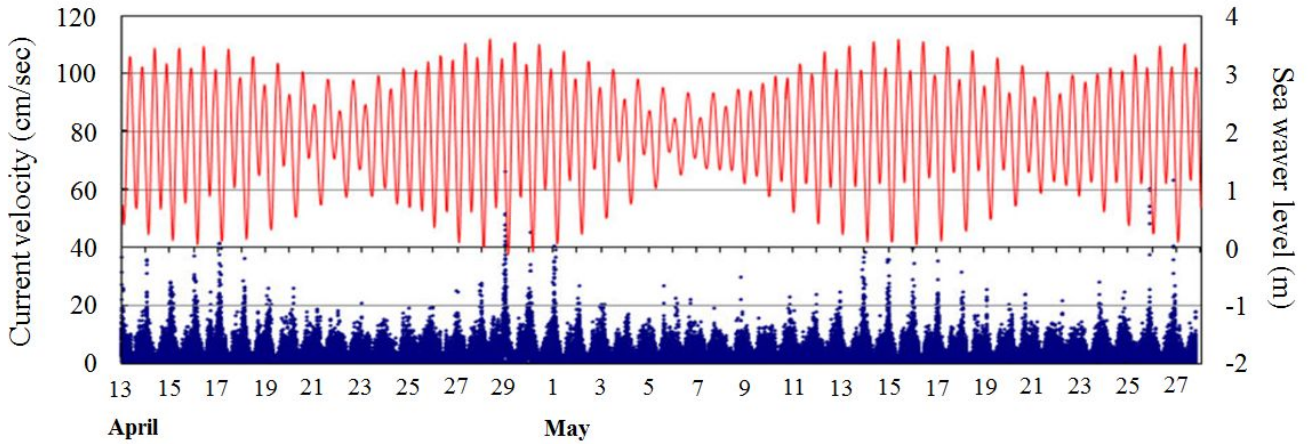


Fig. 6. Variations in current velocity and sea water level in restored eelgrass bed.

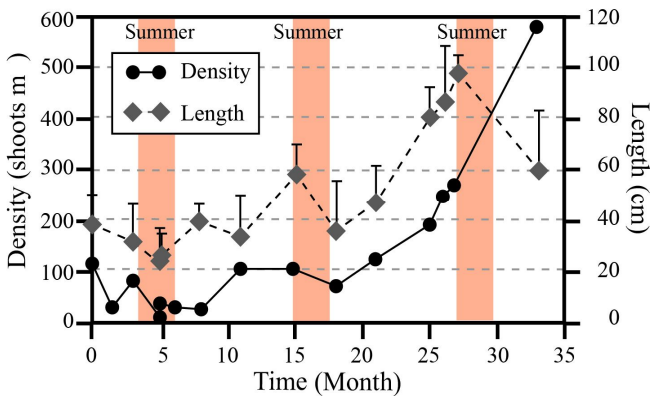


Fig. 7. Shoot density and length of *Zostera marina* restored on granulated coal ash bed.

간의 평균수온은 28.1℃로 평년의 26.1℃를 크게 넘어섰다. 이러한 고수온은 약 10년 주기로 발생하고 있기 때문에, 잘피 이식 시 고수온의 대책 마련이 필요하다. 일본 오카야마에서 성장한 잘피를 수온 29℃의 조건에서 1개월간 노출시켰을 경우 충분한 광량이 확보된다면 잘피생존율이 50%를 넘어서는 것으로 보고되고 있다(Fujisawa et al., 2002). 즉 하계에 나타나는 28℃ 이상의 고수온 환경에서도 잘피의 이식 개체수를 늘리고, 지반 높이를 조절하여 광량을 충분히 확보할 수 있다면, 인공 잘피군락 구성에 효과적일 수 있다.

잘피 군락의 이식을 위한 인공지반의 설치 및 잘피의 이식은 조성된 잘피군락의 유속을 일반적으로 느려지게 만들며, 그 결과 조성 잘피군락 지반에 신생 퇴적층이 형성된 것으로 판단된다 (Figs. 8 (a) and (b)). Fig. 9에 나타난 바와 같이 잘피가 양호하게 정착하기 시작한 이후 잘피군락 지반의 표면에는 신생 퇴적층이 약 2.3 cm의 두께로 형성되었으며, 석탄회 조립물은 점토층 하부에 약 2.3 cm에 위치하고 있었다.

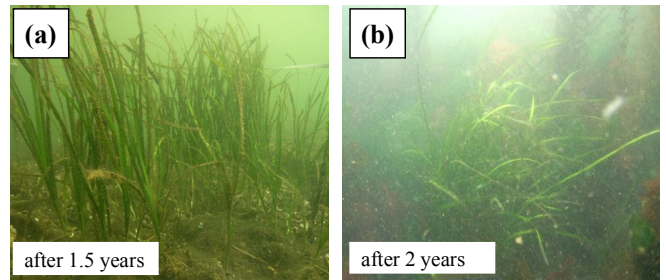


Fig. 8. Picture of the transplanted eelgrass on the restored eelgrass beds (Kim et al., 2014b).

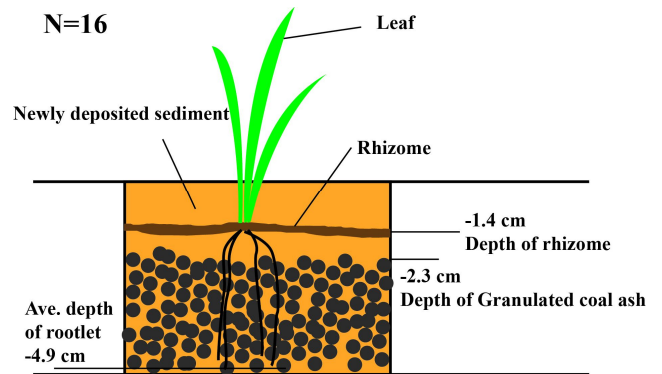


Fig. 9. Depth of rhizome, granulated coal ash and rootlet of transplanted *Zostera marina*.

지하경은 점토층 약 1.4 cm 아래에 존재하고 있었으며, 지하경에서 뻗어나온 뿌리는 석탄회 조립물이 있는 약 5 cm 아래까지 확장해 있는 것으로 확인되었다. 즉 이식한 잘피 밀도의 증가는 잘피의 지하부가 신생퇴적층에 고정된 후, 지하경 마디에서 새로운 측지(lateral shoots)가 발생하는 영양번식에 의한 결과임을 확인할 수 있었다(Martins et al., 2005).

3.3 조성된 잘피군락의 저서환경 특성

자연 잘피군락 지반에서는 0.075~0.425 mm 범위의 입경이 50%를 차지한 반면 조성된 잘피군락에서는 0.475 mm 이상의 입경이 40% 이상을 차지하였다(Fig. 10). 이는 조성된 잘피군락에서 채우는 재료로 사용된 5-40 mm 입경의 석탄회 조립물의 영향이 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

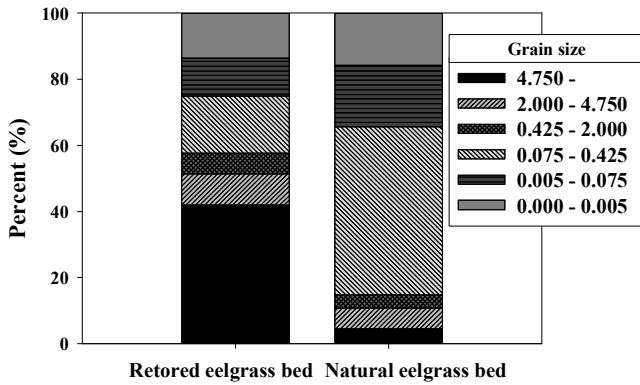


Fig. 10. Grain size distribution in restored eelgrass bed and natural eelgrass bed.

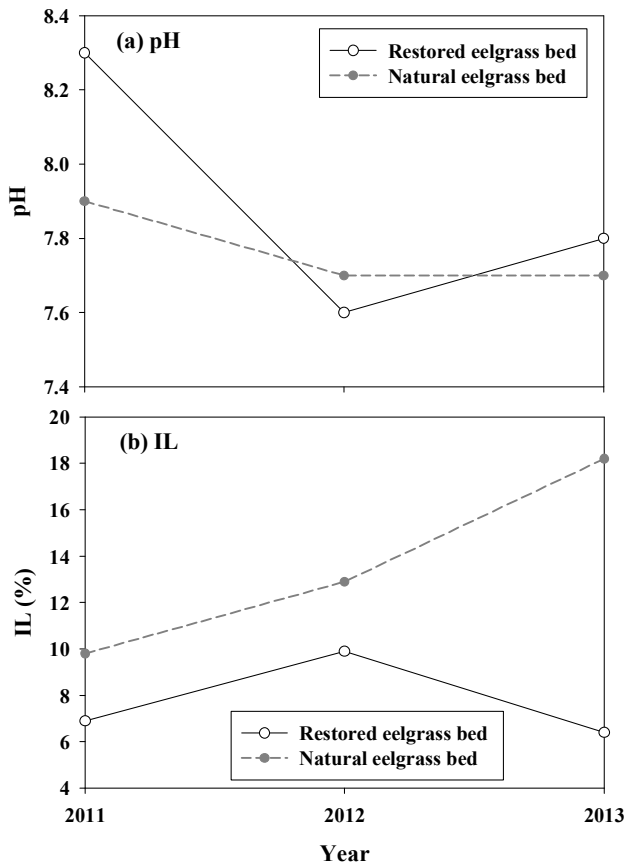


Fig. 11. Variations of benthic environment in the restored eelgrass bed and the natural eelgrass bed.

조성된 잘피군락에서 조성 초기 pH가 8.3 정도로 자연잘피군락에 비해서 높았으나, 2012년부터 자연잘피군락 수준인 7.7 정도로 감소하였다(Fig. 11(a)). pH의 증가는 석탄회 조립물에 함유된 산화칼슘의 가수변화에 의한 것이며, pH 증가는 지반조성 초기에 일시적으로 나타나는 것을 알 수 있었다(Yamamoto et al., 2015). 칼슘은 잘피의 성장에 필요한 영양소 중의 하나이며, 석탄회 조립물에서 용출되는 칼슘은 이식 잘피의 정착에 도움을 주는 것으로 판단된다(Demarte and Gartman, 1974).

조성된 잘피군락 지반의 IL은 6~10%의 범위로 자연잘피군락에 비해서 3% 정도 낮았으나, 2013년 자연잘피군락 지반의 IL이 18%로 급격하게 높아졌다(Fig. 11(b)). 조성된 잘피군락에서 유기물 함량의 지표인 IL이 감소한 것은 무기물로 구성된 석탄회 조립물의 혼합에 의한 것으로 판단된다.

3.4 조성된 잘피군락의 생물다양성

조성된 잘피군락에서 발견된 미세조류 및 저서생물의 종수변화를 Fig. 12에 나타내었다. 2011년에 관측된 미세조류는 2종에 불과했지만, 잘피군락 조성이후 매년 증가하여 2013년에는 18종의 미세조류가 출현하였다. 관찰된 저서생물도

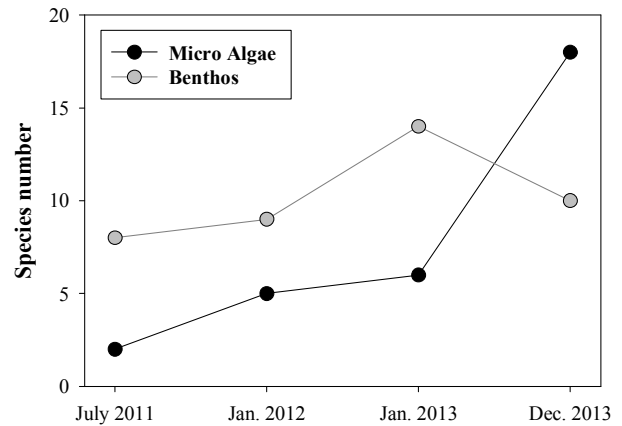


Fig. 12. Variations of species number of micro algae and benthos in the restored eelgrass bed.



Fig. 13. Pictures of seaweed and sea cucumber around and on the restored eelgrass bed.

2011년에는 8종에 불과했지만 2013년에는 14종까지 증가하였다. 잘피군락 주변에서도 해조류 및 저서생물이 다수 발견되었다(Fig. 13). 이상의 결과로부터 복원된 잘피군락에서도 자연 잘피군락과 동일하게 생물다양성 회복 기능을 가지고 있는 것이 확인되었다.

4. 결론

산업부산물인 석탄회의 잘피군락 조성 재료로서의 이용 가능성을 평가하기 위하여 현장실험을 실시하였다. 석탄회 조립물을 이용하여 기반을 조성하고 잘피를 이식한 결과, 잘피는 성공적으로 정착하는 것을 확인하였다. 또한 조성된 잘피군락 및 그 주변에서는 생물다양성이 증가하였다. 이상의 결과로부터 석탄회 조립물은 연안역의 소실된 잘피군락 복원에 기여할 수 있는 재료임을 확인하였다. 또한 개발된 기술이 실용화 된다면 석탄회의 재활용 분야도 다양화되어 자원순환형 사회의 구축에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] 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 Water Environment*, Vol. 31, 455-462 (in Japanese with English abstract).
- [2] Demarte, J. A. and R. T. Hartman(1974), Studies on absorption of ^{32}P , ^{59}Fe , and ^{45}Ca by water milfoil (*Myriophyllum exalbescens* Fernald), *Ecology*, Vol. 55, 188-194.
- [3] Enriquez, S., M. Merino and R. Iglesias-Prieto(2002), Variations in the photosynthetic performance along the leaves of the tropical seagrass *Thalassia testudinum*, *Marine Biology*, Vol. 140, pp. 891-900.
- [4] Fonseca, M. S. and J. S. Fisher(1986), A comparison of canopy friction and sediment movement between four species of seagrass with reference to their ecology and restoration, *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 29, pp. 5-22.
- [5] Fujisawa, K., H. Hayashi, K. Kobayashi and H. Komiyama(2002), Effects of high water temperature and light intensity on growth and survival of transplanted eelgrass, *Report of Okayama experimental laboratory*, Vol. 17, pp. 41-45 (in Japanese with English abstract).
- [6] Japan Coal Energy Center(2009), http://www.jcoal.or.jp/coalash/pdf/CoalAsh_H18productiondata.
- [7] Kawasaki, Y., T. Iituka, H. Goto, T. Terawaki, Y. Watanabe and K. Kikuti(1988), Study on the technique for *Zostera* bed creation, *Report of Central Research Institute of Electric Power Industry*, p. 231 (in Japanese with English abstract).
- [9] Kim, K., T. Hibino, T. Yamamoto, S. Hayakawa, Y. Mito, K. Nakamoto and I. C. Lee(2014a), Field experiments on remediation of coastal sediments using granulated coal ash, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 83, pp. 132-137.
- [8] Kim, K., I. C. Lee, S. H. Ryu, T. Saito and T. Hibino(2014b), Application of Granulated Coal Ash for Remediation of Coastal Sediment, *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, Vol. 17, pp. 1-7.
- [10] Lee, K. S., C. K. Kang and Y. S. Kim(2003) Seasonal dynamics of the seagrass *Zostera marina* on the south coast of the Korean Peninsula, *Journal of Korean Society of Oceanography*, Vol. 38, pp. 68-79.
- [11] Lee, K. S., S. R. Park and J. B. Kim(2005), Production dynamics of the eelgrass, *Zostera marina* in two bay systems on the south coast of the Korean Peninsula, *Marine Biology*, Vol. 147, pp. 1091-1108.
- [12] Lee, K. S. and K. H. Dunton(1999), Influence of sediment nitrogen availability on carbon and nitrogen dynamics in the seagrass *Thalassia testudinum*, *Marine Biology*, Vol. 134, pp. 217-226.
- [13] Martins, I., J. M. Neto, M. G. Fontes, J. C. Marques and M. A. Pardal(2005), Seasonal variation in short-term survival of *Zostera noltii* transplants in a declining meadow in Portugal, *Aquatic Botany*, Vol. 82, pp. 132-142.
- [14] McRoy, C. P. and C. McMillan(1977), Production and ecology and Physiology of seagrasses In: *Seagrass Ecosystems: A Scientific Perspective*, edited by McRoy C. P. and P. Helfferich, Dekker, Newyork, pp. 53-88.
- [15] Orth, R. J. and K. A. Moore(1986), Seasonal and year-to-year variations in the growth of *Zostera marina* L. (eelgrass) in the lower Chesapeake Bay, *Aquatic Botany*, Vol. 24, pp. 335-341.
- [16] Peralta, G., J. L. Pererz-Llorens, I. Hernandez and J. J. Vergara(2002), Effects of light availability on growth,

architecture and nutrient content of the seagrass *Zostera noltii* Hornem, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Vol. 269, pp. 9-26.

- [17] Saito, T., 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).
- [18] Tamai, K., H. Nishino, Y. Izuro, T. Hibino, A. Suto and 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).
- [19] Wetzel, R. G. and P. A. Penhale(1983), Production ecology of seagrass communities in the lower Chesapeake Bay, Marine Technology Society Journal, Vol. 17, pp. 22-31.
- [20] Yamamoto, T., 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.
- [21] 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, pp. 54-59.

Received : 2016. 10. 06.

Revised : 2016. 12. 05. (1st)

: 2016. 12. 21. (2nd)

Accepted : 2016. 12. 28.