한국항해항만학회지 제38권 제3호
J. Navig. Port Res. Vol. 38, No. 3 : 239-246, June 2014 (ISSN:1598-5725(Print)/ISSN:2093-8470(Online))
DOI : http://dx.doi.org/10.5394/KINPR.2014.38.3.239

오염된 연안저질의 현장생물정화를 위한 미생물활성촉진제의 용출특성 연구

우정희* · † 송영채 · 센틸쿠마르**

* 한국해양대학교 원전기자재연구센터 연구교수
† 한국해양대학교 환경공학과 교수
**인도 페리알대학교 교수

Study on the elution of biostimulant for in-situ bioremediation of contaminated coastal sediment

Jung-Hui Woo · † Young-Chae Song · Palaninaicker Senthilkumar***

**Nuclear Power Equipment Research Center, Korea Maritime and Oean University, Pusan 606-791, Korea*
† Department of Environmental Engineering, Korea Maritime and Oean University, Pusan 606-791, Korea
***Department of Environmental Science, Periyar University, India*

요 약 : 자생하는 미생물의 활성을 촉진시킴으로써 오염된 연안퇴적물을 현장생물정화하기 위하여 사용하는 미생물활성촉진제의 용출특성에 대한 연구를 수행하였다. 미생물의 생리활성을 촉진하는 황산염, 질산염을 오염되지 않은 연안퇴적물과 혼합하였으며, 혼합물을 볼 형태로 만든 뒤 셀룰로스 아세테이트 및 폴리설펀으로 각각 표면을 코팅하여 볼 형태의 미생물활성촉진제 2종을 제작하였다. 또한, 황산염과 질산염이 용해된 생리활성물질 용액에 입상활성탄을 침지시켜 입자상 미생물활성촉진제를 별도로 준비하였다. 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 미생물활성촉진제를 전자현미경으로 관찰한 결과 코팅층 내부는 다소 큰 공극이 불규칙적으로 존재하였으나 코팅층 외부는 촘촘한 벌집모양의 공극들이 분포되어있었다. 폴리설펀으로 코팅한 미생물활성촉진제의 경우는 코팅층의 내부와 외부 모두 공극이 없는 치밀한 구조를 보였다. 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 미생물활성촉진제의 생리활성물질 용출율은 폴리설펀으로 코팅한 미생물활성촉진제에 비해 증류수와 해수에서 모두 높았으며, 입자상 미생물활성촉진제로부터의 생리활성물질의 용출율은 폴리설펀으로 코팅한 미생물활성촉진제에 비해 약 9배 이상 높았다. 미생물활성촉진제로부터 생리활성물질들의 용출속도는 정체조건에 비해 난류조건에서 약 3배 이상 빠른 것으로 평가되었으며, 생리활성물질들 중에서 질산염은 황산염에 비해 빠르게 용출되는 특성을 보였다.

핵심용어 : 미생물활성촉진제, 해양저질, 고분자코팅, 용출율

Abstract : *A study on the elution characteristics of biostimulating agents (sulfate and nitrate) from biostimulants which are used for in-situ bioremediation for the coastal sediment contaminated with organic matter was performed. The biostimulating agents were mixed with the coastal sediment, and then massed the mixture into ball. Two kinds of ball type biostimulant were prepared by coating the ball surface with two different polymers, cellulose acetate and polysulfone. A granular type biostimulant (GTB) was also prepared by impregnating a granular activated carbon in the biostimulating agent solution. The image of scanning electron microscopy for the biostimulant coated with cellulose acetate (CAB) showed that the inner side of the coating layer consisted of irregular and bigger size of pores, and the surface layer had tight structure like beehive. For the biostimulant coated with polyfulfone (PSB), the whole coating layer had a fine structure without pore. The elution rate of the biostimulating agents for the CAB was higher than that for the PSB, and the elution rate for the GTB was considerably higher than that for the PSB in distilled water as well as in sea water. The elution rate of the biostimulating agents in turbulent water flow was about 3 times higher than that in standing water, and the elution rate of nitrate was higher than that of sulfate from the stimulating agents.*

Key words : *Biostimulating agent, Coastal sediment, Polymer coating, elution rate*

1. 서 론

우리나라 주요도시 인근의 연안저질은 유기 및 무기오염물질들에 의하여 크게 오염되어 있으며, 이러한 오염물질들이 해수로 재부상하는 경우 수중으로 확산되어 하계에 빈번

* 연회원, sky-woo@hanmail.net 051)410-4977
† Corresponding author : 종신회원, soyc@kmou.ac.kr 051)410-4417
** 연회원, pskumares@gmail.com, +91-9042636533
(주) 이 논문은 "생물활성촉진제의 용출율 제어를 위한 폴리머 코팅"이란 제목으로 "2013년도 추계학술대회 논문집(한국해양수산연수원, 2013.10.23.-25, pp. 46-47)"에 발표되었음.

히 발생하는 적조현상의 원인이 되기도 하며, 종종 연안에서 생산되는 수산물에 농축되어 우리의 먹거리를 위협하기도 한다. 특히, 유기오염물질이 저질에 다량 축적된 경우 이들의 분해과정에서 많은 양의 산소가 필요하기 때문에 해저는 점차 혐기성화 되어 저서생물이 서식하기 어려운 환경으로 바뀌게 되고, 유기오염물질의 혐기성분해과정에서 발생하는 황화수소 및 메탄 등은 또 다른 형태의 2차 환경문제를 유발하기도 한다(Kim et al., 2011). 최근 국내에서는 연안 해역의 환경을 개선하기 위하여 오염물질 유입 저감정책과 더불어 연안해역의 오염된 저질을 정화하기 위한 오염준설 등의 여러 가지 사업을 시행하고 있다(Clack, 1992; Forstner and Apitz, 2007; Mohan et al., 2000; Park and Chun, 2002; US EPA, 2005). 이러한 사업들 중에서 오염된 연안 저질의 준설은 가장 확실한 정화법으로 인식되고 있지만 준설과정이 노동집약적이고 비용이 많이 소요되며, 준설하는 과정에 불가피하게 발생하는 오염물질의 이동과 확산으로 인한 해양생태환경이 교란될 수 있다는 단점이 지적되고 있다(Harmsen et al., 1997; Hughes et al., 1997; Farhadian, et al., 2008). 최근에는 오염된 연안저질의 준설 정화법의 단점을 개선하고자 오염된 연안저질을 이동시키지 않고 현장에서 물리화학적인 또는 생물학적인 방법으로 정화하는 현장정화기술들에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 현장정화기술의 대표적인 방법이 황산염환원균 등과 같이 해양저질에서 자생하는 미생물을 이용한 현장생물정화기술(In-situ bioremediation)이다(Beller et. al., 1992; Edwards and Grbic-Galic, 1992; Flyvbjerg et. al., 1993; Rabus et. al., 1993; Lovley et. al., 1989; Lovley and Lonergan, 1990). 자생미생물을 이용한 현장생물정화기술은 미생물의 성장에 필요한 영양분과 환경조건을 인위적으로 제공해줌으로써 해양 저질 내 자생미생물의 활성을 촉진시키고 이들의 개체수를 증가시켜, 오염물질의 정화기간 단축 및 처리효율을 향상시키는 기술이다. 따라서, 성공적인 현장생물정화기술이 되기 위해서는 오염물 정화능이 뛰어난 미생물의 성장에 필요한 영양물질과 환경조건을 유지시키기 위한 물질들을 지속적으로 공급하는 것이 중요하다. 통상적으로 이러한 물질들은 고체상으로 연안저질에 주입한 뒤 서서히 인근 저질로 확산되어 저질에 자생하는 미생물에 공급되도록 하는 방법들이 사용될 수 있다. 지금까지 고체상 물질로부터 영양염류 등이 용출되어 서서히 확산되도록 하는 연구는 육상에서 식물에 필요한 영양분을 지속적으로 공급을 위하여 수행하여 왔었는데, 고체상 물질로부터 영양분의 급격한 이동을 제한하기 위하여 표면을 고분자물질들로 코팅하는 방법들이 주로 사용되어 왔다(Jarosiwicz and Tomaszewska, 2003, Jacobs et. al., 2005). 이와 같은 고분자 코팅물질에는 왁스, 황 및 폴리올레핀, 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 폴리아크릴아마이드, 폴리설펀, 셀룰로스 아세테이트 등이었다. 연안저질에서 자생하는 미생물의 활성을 촉진시킴으로써 오염된 연안저질을 현장생물정화하기 위해서는 자생하는 미생물의 성장에 필요한 특정 영양물질과 전자수용체, pH 등의 환경조건을 연안저질에 유지시키는 것이 중요하다.

본 연구팀에서 이전에 수행한 실험실 규모의 회분식 실험에서 황산염, 질산성질소, 아세테이트 등의 복합물이 연안저질에 자생하는 미생물의 생리활성을 크게 촉진시킬 수 있는 물질임을 확인하였다(Song, 2013).

본 연구에서는 미생물의 생리활성물질들을 연안저질에 장시간 지속적으로 공급할 수 있는 미생물활성촉진제를 개발하기 위하여 생리활성물질들과 오염되지 않은 저질성분을 혼합하여 소형 볼을 만든 뒤 유기고분자물질인 셀룰로스 아세테이트 또는 폴리설펀으로 표면을 코팅하여 제조한 볼 형태의 미생물활성촉진제와 입상활성탄에 생리활성물질들을 담지 시킨 입자상 미생물활성촉진제를 준비하였으며, 해수 및 증류수 조건에서 이들 미생물활성촉진제들로부터 생리활성물질들의 용출특성을 정체 및 난류 상태에서 평가하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 연안저질 시료의 물리화학적 특성 및 분석방법

B 광역시 준설토 투기장에서 채취한 저질 시료를 실험에 사용하였다. 저질시료의 물리화학적 특성 및 용출실험에 이용된 해수의 염분, DO, pH 등의 초기성상은 Table 1과 같다.

Table 1 Physico-chemical characteristics of the coastal sediment and sea water

Sample	Parameters	B city New Port
Coastal sediment	Sand (%)	12.1
	Silt & clay(%)	87.9
	pH (at 25°C)	8.01
	COD_{Mn} g/kg	11.6
	TKN g/kg	1.59
	TP g/kg	1.08
	Organic matter (%)	3.67
	Water content (%)	42
	Cd(mg/kg)	ND
	Cu(mg/kg)	7.029
	Cr(mg/kg)	2.37
	Pb(mg/kg)	10.51
	Zn(mg/kg)	61.83
	Fe(mg/kg)	20882
	Microbial population (CFU)/g	22±14 $X10^3$
Sea water	Salinity(‰)	32.4
	DO(mg/L)	3.32
	pH	8.08
	TN(mg/L)	0.225
	TP(mg/L)	0.016
	COD(mg/L)	1.34

저질시료의 입도는 건식 체질법으로 분석하였으며, COD는 해양환경공정시험기준에 따라 분석하였다. 저질시료의 TKN, TP, pH 및 용출특성 평가 시 수중의 황산염과 질산염은 Standard Methods(APHA, 2005)에 따라 분석하였다. Cd, Cu, Cr, Pb, Zn 등의 중금속은 Standard Methods(APHA, 2005)의 총량분석방법(nitric acid & perchloric acid digestion)으로 전처리한 후 ICP(Perkin elmer; Optima 5300DV)를 이용하여 분석하였다(Tessier et al., 1979). 저질 시료의 미생물 개체수는 희석평판계수법을 이용하여 계수(CFU/g of sediment)하였고, 저질 시료의 함수율과 유기물함량은 Standard Methods(APHA, 2005)에 따라 분석하였다.

2.2 미생물활성촉진제의 제조

미생물활성촉진제는 볼과 입자상 두 가지 형태로 준비하였다 (Fig. 1). 볼 형태로 제작한 미생물활성촉진제는 저질시료 1kg에 미생물의 생리활성을 촉진하는 물질인 황산염, 질산염을 각각 48g 및 62g을 첨가하여 완전 혼합한 후 실온에서 약 48시간 동안 부분 건조하여 수작업으로 작은 볼의 형태로 만들었으며, 60℃에서 48hr 동안 건조시킨 후 고분자 물질인 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 미생물활성촉진제(CAB)와 폴리설펀으로 코팅하여 미생물활성촉진제(PSB)를 각각 완성하였다. 이때 볼 형태 미생물활성촉진제의 직경은 약 1~1.5cm 였으며, 무게는 약 1g 이었다. 입자상의 미생물활성촉진제(GTB)는 입상활성탄(granular activated charcoal; Samchun chemicals, Korea)을 1mm 체로 거른 후 남는 입자를 사용하였다. 체거름한 입상활성탄 1kg에 생리활성물질인 황산염 71g, 질산성질소 101g을 혼합하였으며, 회전증발농축기를 이용하여 100℃에서 24hr 반응시켜 생리활성물질이 활성탄에 담지되도록 하였으며, 60℃에서 48hr 건조하여 완성하였다.

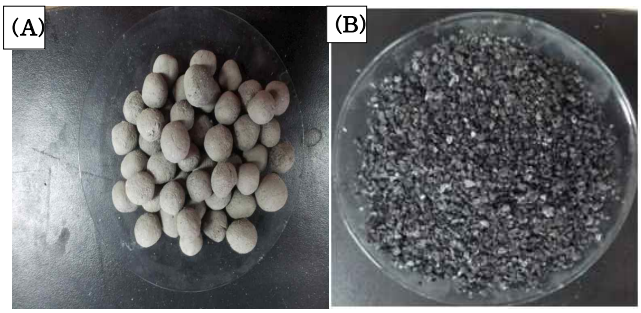

Fig. 1 Photos of ball type biostimulant before polymer coating (A) and granular type biostimulant (B)

2.3 미생물활성촉진볼의 코팅

볼 형태로 제작한 미생물활성촉진제는 고분자물질인 셀룰로스 아세테이트(BDH chemicals, England)와 폴리설펀(Sigma-Aldrich chemicals, USA) 용액에 침지시킨 후 칼럼 형태의 수욕조에 침지시켜 코팅을 완성하였다. 고분자 코팅은 고분자 용액이 수분과 접촉 시 필름형태의 고체상으로 바뀌는 성질을 이용한 것이다(Tomaszewska and Jarosiesicz, 2003; Jarosiesicz and Tomaszewska, 2003). 셀룰로스 아세테이트 용액은 셀룰로스 아세테이트 15%wt를 아세톤(85%wt)에 용해시켜 준비하였으며, 폴리설펀 용액은 폴리설펀 10%wt에 N,N-dimethyl acetamide(90%wt)와 혼합하여 준비하였다. 수욕조의 높이는 1m 로서 볼 형태의 미생물활성촉진제 표면에 덮인 고분자 용액이 교화되기 위한 시간을 충분히 제공하였으며, 수온은 약 25℃ 로 유지하였다. 볼 형태의 미생물활성촉진제 표면에 상기의 고분자 코팅을 2회 반복하였으며, 코팅이 완성된 생물활성촉진볼은 60℃에서 건조하여 실험에 이용하였다. Fig. 2는 폴리설펀으로 코팅하여 완성된 미생물활성촉진제와 셀룰로스 아세테이트로 코팅하여 완성된 미생물활성촉진제를 각각 보여준다.

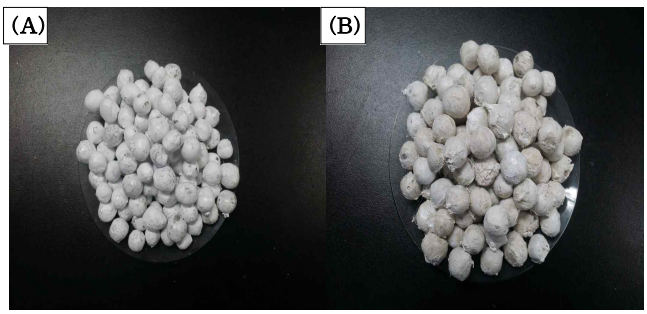

Fig. 2 Biostimulants coated with polysulfone (A) and cellulose acetate (B)

2.4 미생물활성촉진제의 형태특성분석

볼 및 입자상 형태의 미생물활성촉진제의 표면과 코팅층의 계면형상은 전자현미경(Scanning electron microscope; MIRA-3, Tescan, Czech)으로 관찰하였다. 전자현미경으로 관찰하기 위한 생물활성제의 시편은 먼저 액체질소로 표면을 동결건조 하였으며, 고분자 코팅 층은 단면을 잘라 백금코팅한 후에 계면형상을 관찰하였다.

2.5 미생물활성촉진제의 용출특성 평가를 위한 회분식 실험

미생물활성촉진제의 종류와 표면 코팅에 사용된 고분자물질에 따른 생리활성물질(황산염, 질산염)의 용출특성평가는 증류수 및 해수를 이용하여 정체조건과 난류조건에서 각각 수행하였다. 정체조건 실험은 볼 형태의 미생물활성촉진제 3g 또는 입자상 미생물활성촉진제 1g에 100mL의 해수 또는 증류수와 혼합한 뒤 밀폐용기에 각각 담아 실온에서 교반없이 용출실험을 수행하였다. 난류조건 실험은 정체조건 실험과 같은 방법으로 준비하여 150rpm으로 교반하는 조건에서 생리활성물질의 용출율을 평가하였다. 약 10일간의 용출실험을 수행하는 동안 시간에 따른 용출율을 평가하기 위하여 매

24시간 마다 1mL씩 시료를 채취하였으며, 채취한 시료에 용출된 생리활성물질을 분석하였으며, 모든 실험은 3반복으로 수행하였다. 용출율은 미생물활성촉진제에 함유된 초기 생리활성물질의 질량에 대한 용출시간에 따라 용출된 수중의 생리활성물질의 질량의 백분율로 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미생물활성촉진제의 표면특성

볼 형태의 미생물활성촉진제 표면에 형성된 코팅층의 특성을 살펴보기 위하여 전자현미경으로 관찰한 결과, 셀룰로스 아세테이트 및 폴리설펀으로 코팅된 미생물활성촉진제의 표면 코팅두께는 약 1~3um 이하로서 볼의 표면에 코팅층이 얇게 형성된 것으로 나타났다. Fig. 3은 셀룰로스 아세테이트로 코팅된 볼 형태의 미생물활성촉진제에 대한 전자현미경 사진이다. 셀룰로스 아세테이트로 코팅된 볼의 경우, 코팅층 내부는 다소 큰 공극이 분포하였으며, 코팅층의 외부 표면은 촘촘한 벌집모양의 공극이 분포하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 폴리설펀으로 코팅된 볼의 경우, 코팅층의 내부와 외부의 형태가 비슷하였으며, 셀룰로스 아세테이트와 같은 형태의 공극층은 보이지 않았다 (Fig. 4). 코팅물질의 물리화학적 특성과 더불어 코팅층 두께와 코팅층에 형성된 공극의 구조 및 형태들은 미생물활성촉진제에 포함된 생리활성물질의 용출속도와 용출시간에 영향을 미치는 인자들이다.

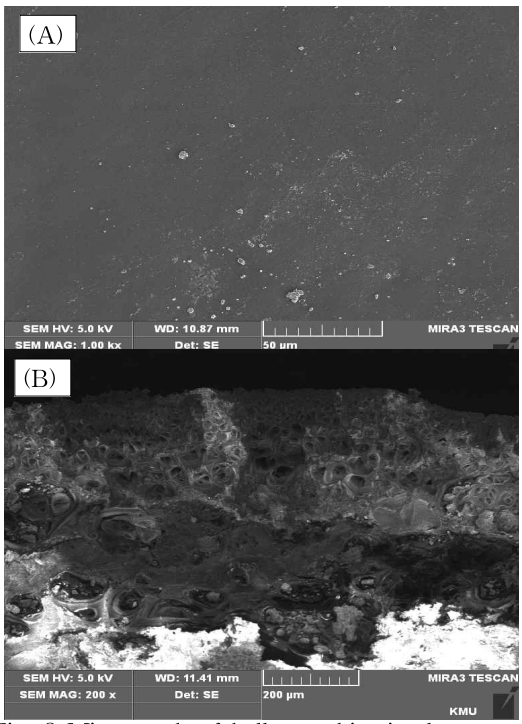

Fig. 3 Micrograph of ball type biostimulant coated with cellulose acetate (CAB) : the surface (A) and the cross section (B) of coating layer

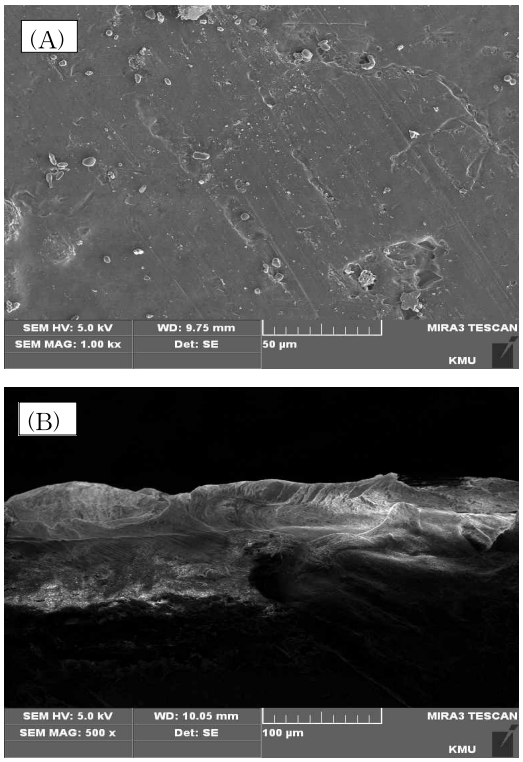

Fig. 4 Micrograph of ball type biostimulant coated with polysulfone (PSB): the surface (A) and the cross section (B) of coating layer

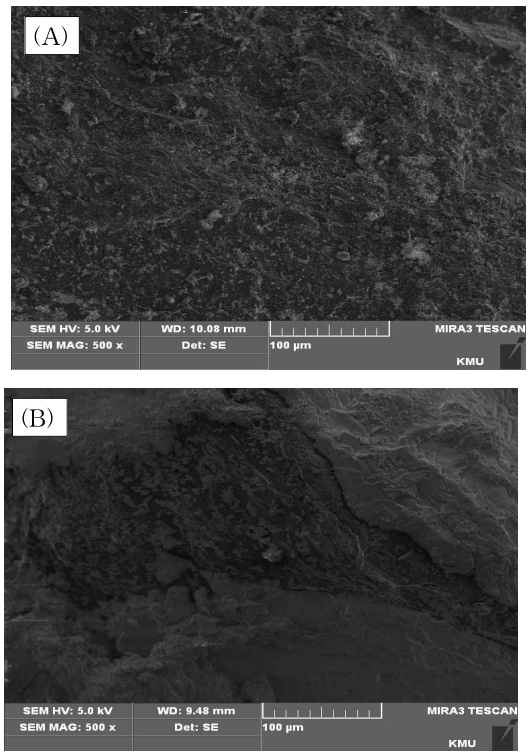

Fig. 5 Micrograph of raw granular activated carbon(A) and granular type biostimulant (GTB) (B)

Fig. 5는 입자상 미생물활성촉진제의 제조에 사용된 입상 활성탄과 생리활성물질을 담지한 입자상 활성탄의 전자현미경 사진이다. 생리활성물질을 담지한 입상활성탄은 표면에 생리활성물질이 표면에 덮여져 있는 것으로 확인되었다.

3.2 정체조건에서의 생리활성물질 용출특성

유기성 고분자물질인 셀룰로스 아세테이트와 폴리설펀으로 코팅된 볼 형태의 미생물활성촉진제와 입자상 미생물활성촉진제에 대한 생리활성물질인 황산염과 질산염의 용출특성을 물의 유동이 없는 정체조건에서 평가하였다 (Fig. 6, Fig. 7). 증류수에서 셀룰로스 아세테이트로 코팅된 볼 형태의 미생물활성촉진제로부터 생리활성물질인 황산염 및 질산염의 용출율은 30일 후 각각 54.3% 및 63.5%였다. 반면에 해수조건에서의 황산염 및 질산염의 용출율은 실험시작 30일 후 각각 59% 및 70.2%로서 증류수에 비하여 약간 빨랐다.

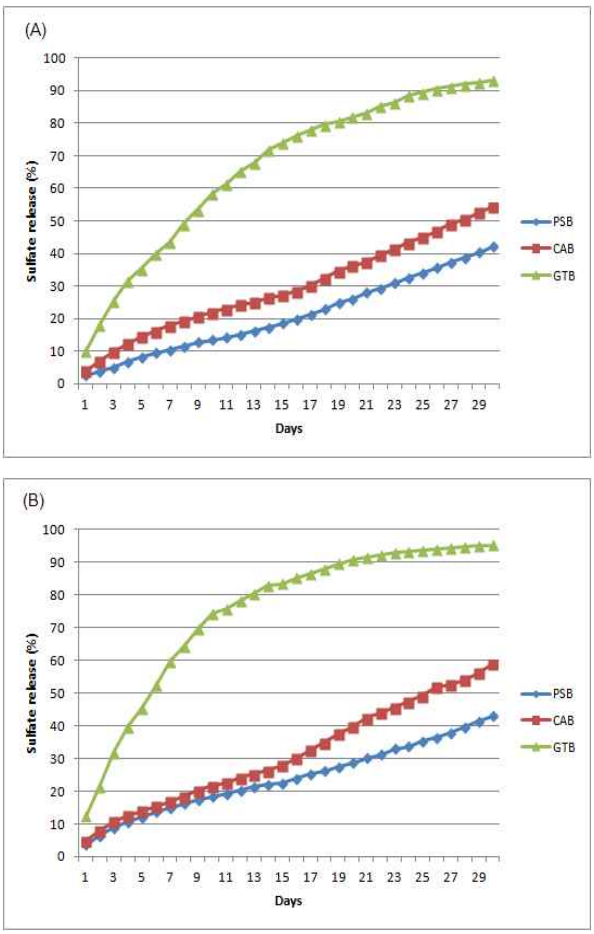

Fig. 6 Sulfate release in distilled water(A) and sea water(B) at standing water condition from biostimulants coated with cellulose acetate(CAB) and polysulfone(PSB) and granular type biostimulant(GTB)

폴리설펀으로 코팅된 볼 형태의 미생물활성촉진제로부터 생리활성물질인 황산염 및 질산염의 용출율은 증류수 및 해수에서 실험시작 30일 후 각각 42.1% 및 43%와 54.3% 및 65.4%으로 나타났다. 셀룰로스 아세테이트와 폴리설펀으로 코팅한 볼 형태의 미생물활성촉진제에서 생리활성물질인 황산염과 질산염의 용출율은 폴리설펀으로 코팅된 경우가 약 10~20% 낮았다. 전자현미경 사진에서 보는 바와 같이 폴리설펀 코팅 층은 셀룰로스 아세테이트 코팅 층에 비해 매우 치밀하게 이루어져 있다(Fig. 4). 따라서, 폴리설펀으로 코팅된 미생물활성촉진제의 용출율이 셀룰로스 아세테이트로 코팅된 경우에 비해 낮은 것은 미생물활성촉진제 내부에 함유된 활성물질들의 확산 및 용출이 폴리설펀 코팅 층의 치밀한 구조에 의해 제한되기 때문으로 여겨진다.

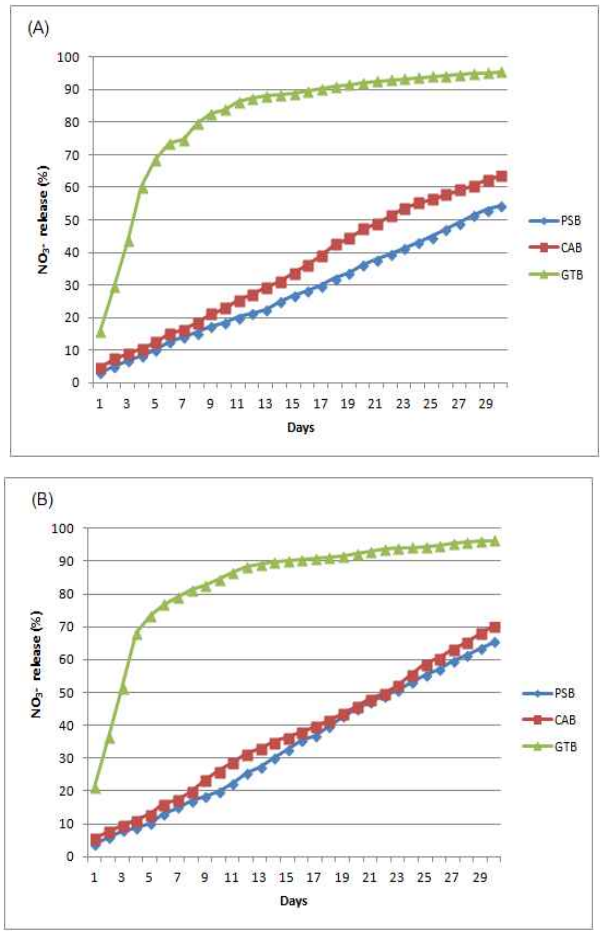

Fig. 7 Nitrate release in distilled water(A) and sea water(B) at standing water condition from biostimulants coated with cellulose acetate(CAB) and polysulfone(PSB) and granular type biostimulant(GTB)

또한, 셀룰로스 아세테이트는 비대칭막(asymmetric membrane) 제조에 주로 사용되는 물질로서 친수성이고 저온에서 저항성이 있으며, pH에 민감하고 생분해도가 큰 특징을 가지고 있다(Cheryan, 1998). 이에 반해 폴리설펀 폴리머는 산에 내성이 강하고, 온도나 pH변화에 다소 안정적이

라고 알려져 있다(Jarosiewicz and Tomaszewska, 2003). 따라서, 셀룰로스 아세테이트 코팅 층은 수중에서 폴리설펀에 비해 상대적으로 빠르게 붕괴될수 있을 것으로 평가된다. 이러한 셀룰로스 아세테이트 코팅층의 빠른 붕괴는 미생물활성촉진제로부터 생리활성물질의 용출을 크게 촉진시킬 것으로 여겨진다.

또한, 해수에서 생리활성물질의 용출율이 증류수에서 보다 큰 것은 8.0 이상의 높은 해수의 pH와 높은 염분함량으로 폴리머코팅 층이 상대적으로 빠르게 붕괴되기 때문으로 평가된다(OCP, 2014; Liang et al., 2007). 유기고분자 물질로 코팅된 볼 형태의 미생물활성촉진제에서 생리활성물질들의 용출현상은 (1) 미생물활성촉진제의 내부로 수분의 확산, (2) 내부로 확산된 수분에 의한 생리활성물질의 용해 (3) 코팅층 내외부의 해수교환 및 농도차에 의한 생리활성물질의 확산 등의 기작으로 설명할 수 있다. 따라서, 코팅층의 공극율 및 구조적 안정성에 따라 생리활성물질의 용출율은 크게 달라질 수 있다.

생리활성물질을 담지한 입자상 미생물활성촉진제의 경우 증류수 및 해수조건에서 생리활성물질인 황산염의 용출율은 실험시작 약 8.5일 및 5.5일 후 50%가 용출되었으며, 질산염의 경우 50%가 용출되는 시간이 약 3.5일 및 2.5일로 증류수 조건에서보다 해수조건에서 다소 빨랐다. 또한, 황산염이 90%이상 용출되는 시간은 증류수 및 해수조건에서 각각 실험시작 26일 후 및 20일로 평가되었으며, 질산성질소의 경우에는 각각 17일 및 15일 후로 평가되어 질산성질소의 용출속도가 황산염에 비해 다소 빨랐다. 입자상 미생물활성촉진제로부터 생리활성물질의 약 50%가 용출되는 시간의 경우, 고분자 코팅한 미생물활성촉진제 중 폴리설펀의 경우와 비교할 때 최대 약 9배 이상 빠른 것으로 평가되었다.

4.3 난류조건에서 생리활성물질의 용출특성

난류조건에서의 용출실험은 150rpm의 진탕배양기에서 수행하였으며, 해수 및 증류수 조건에서 시간에 따른 생리활성물질의 용출특성은 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다. 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 볼 형태 미생물활성촉진제의 경우 실험시작 5일 후 황산염의 용출율은 증류수와 해수조건에서 각각 27.3% 및 32.1%이었다. 그러나, 폴리설펀으로 코팅한 미생물활성촉진제의 경우 증류수와 해수조건에서 황산염의 용출율은 각각 19.5% 및 26.5%로서 정체조건에서의 용출실험결과와 같이 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 경우에 비하여 약간 낮았다. 실험시작 5일 후 질산성질소 용출율은 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 경우 증류수조건과 해수조건에서 각각 35.2% 및 42.6%로 평가되었으나, 폴리설펀의 경우, 각각 32.1% 및 33.4%로서 황산염의 경우와 같이 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 경우에 비하여 약간 낮았다. 질산성질소의 용출율이 황산염의 용출율보다 모든 조건에서 다소 빠른 것은 은 두 성분의 확산계수 차이 때문으로 평가되었다. 수중에서 질산성질소의 확산계수는 약 2.12×10^{-5} cm^2/sec이며, 황산염의 확산계수는 약 1.47×10^{-5} cm^2/sec로 알려지고 있다(AwwaRF, 2004; Hill, 1984).

입자상 미생물활성촉진제의 경우 난류조건에서 생리활성물질인 황산염과 질산염은 실험시작 4일후 약 90%이상 용출되어 용출율이 정체조건에서보다 3배 이상 큰 것으로 평가되었다. 또한, 유기성 고분자로 코팅한 볼 형태 미생물활성촉진제의 경우에도 생리활성물질인 질산염과 황산염의 용출율은 정체조건에 비해 난류조건에서 약 50% 이상 높았다. 난류조건에서 미생물활성촉진제로부터 황산염 및 질산염의 용출율이 정체조건에 비하여 높은 것은 상대적으로 큰 이류 및 확산속도 때문으로 평가된다.

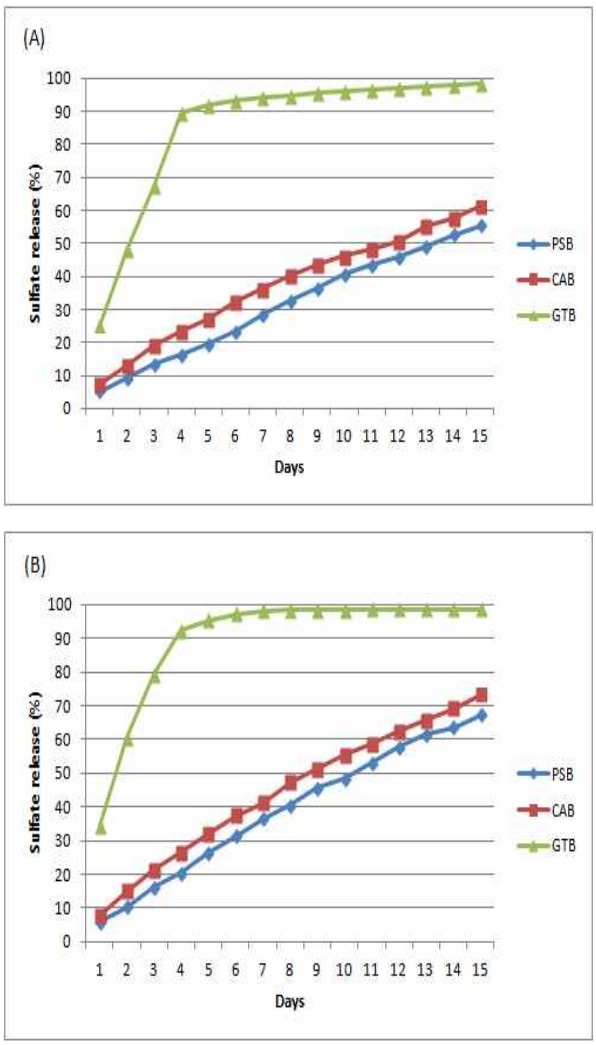

Fig. 8 Sulfate release in distilled water(A) and sea water(B) at turbulent flow condition from biostimulants coated with cellulose acetate(CAB), polysulfone(PSB) and granular type biostimulant(GTB)

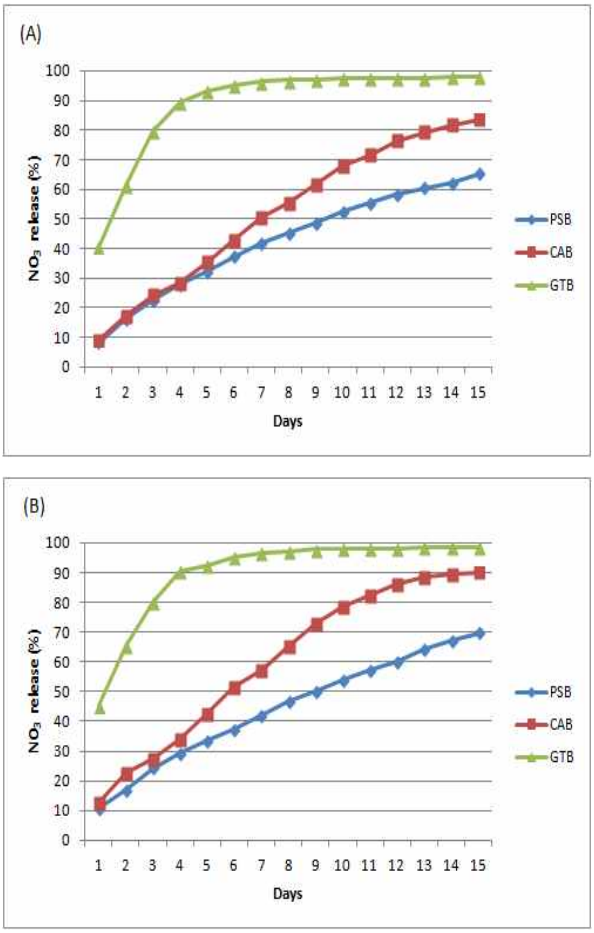

Fig. 9 Nitrate release in distilled water(A) and sea water(B) at turbulent flow condition from biostimulants coated with cellulose acetate(CAB), polysulfone(PSB) and granular type biostimulant(GTB)

5. 결론

해수 및 증류수 조건에서 미생물활성촉진제로부터 생리활성촉진물질인 황산염 및 질산염의 용출특성을 물의 유동이 없는 정체조건 및 난류조건에서 각각 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 셀룰로스 아세테이트로 코팅한 미생물활성촉진제의 코팅층 내부는 다소 큰 공극들이 불규칙적으로 존재하였으나 코팅층의 외부 표면은 균일하고 작은 공극들로 구성되었으며, 폴리설펀으로 코팅한 미생물활성촉진제의 경우 코팅층은 보다 치밀한 구조를 보였다.

2. 미생물활성촉진제로부터 생리활물질인 황산염 및 질산염의 용출속도는 입자상 미생물활성촉진제, 셀룰로스 아세테이트 코팅 미생물활성촉진제, 폴리설펀으로 코팅한 미생물활성촉진제 순이었다.

3. 미생물활성촉진제에서 생리활성물질인 질산염은 황산염에 비하여 빠르게 용출되었으며, 난류조건의 경우 물의 유동이 없는 정체조건에 비하여 약 3배 이상 용출속도가 빨랐다.

4. 폴리설펀으로 코팅된 미생물활성촉진제는 연안저질에 존재하는 자생미생물에게 장기간 지속적으로 생리활성물질을 공급할 수 있는 현장생물정화촉진제로 평가되었다.

감사의 글

이 논문은 2011년 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (지속가능 해양오염 퇴적물 정화기술 개발)

References

[1] APHA(American Public Health Association). (2005), Standard methods for the examination of waste and wastewater, 21th ed. Washington, DC: APHA, AWWA, PP. 2-56.

[2] AwwaRF(American Water Works Association Research Foundation). (2004), Bioreactor systems for treating perchlorate contaminated water: Bench-scale and Pilot-scale investigations, AwwaRF, PP. 113-133.

[3] Beller, H. R., Grbic-Galic, D. and Reinhard, M. (1992), "Microbial degradation of toluene under sulfate-reducing conditions and the influence of iron on the process", Applied and Environmental Microbiology, Vol. 58, No. 3, pp. 786-793.

[4] Cheryan, M. (1998), Ultrafiltration and microfiltration handbook, Technomic Publishing Co.: Lancaster, PA, pp. 41-50.

[5] Clack R. B. (1992), Metals. Marine Pollution, Oxford University Press, pp. 64-82.

[6] Edwards, E. A. and Grbic-Galic, D. (1992), "Complete mineralization of benzene by aquifer microorganisms under strictly anaerobic conditions", Applied and Environmental Microbiology, Vol. 58, No. 8, pp. 2663-2666.

[7] Farhadian, M., Vachelard, C., Duchez, D. and Larroche, C. (2008), "In situ bioremediation of monoaromatic pollutants in groundwater: A review", Bioresource Technology, Vol. 99, No. 13, pp. 5296-5308.

[8] Forstner, U. and Apitz, S.E. (2007), "Sediment remediation: U.S. Focus on capping and monitored natural recovery", Journal of Soils and Sediments, Vol. 7, No. 6, pp. 351-358.

[9] Flyvbjerg, J., Arivn, E., Jensen, B. K. and Olsen, S. K. (1993), "Microbial degradation of phenols and aromatic hydrocarbons in creosote-contaminated of groundwater of under nitrate-reducing conditions", Journal of

Contaminant Hydrology, Vol. 12, No. 1-2, pp. 133-50.

[10] Harmsen, J., Wieggers, H.J.J., van de Akker, J.J.H. and van Diik-Hooyer, O.M. (1997), "Intensive and extensive treatment of dredged sediments on landfarms". Bioremediation international symposium 4th, Vol. 2, pp. 153-158.

[11] Hill, D. (1984), "Diffusion coefficients of nitrate, chloride, sulphate and water in cracked and uncracked chalk", Journal of soil science, Vol. 35, No. 1, pp. 27-33.

[12] Hughes, J. B., Beckles, D.M., Chandra, S.D., and Ward, C.H. (1997), "Utilization of bioremediation processes for the treatment of PHA contaminated sediments", Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, Vol. 18, pp. 152-160.

[13] Jacobs, D. F., Salifu, K. F. and Seifert, J. R. (2005), "Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting", Forest Ecology and Management, Vol. 214, pp. 28-39.

[14] Jarosiwicz, A. and Tomaszewska, M. (2003), "Controlled-release NPK fertilizer encapsulated by polymeric membranes", Journal of Agricultural and Food Chemistry, Vol. 51, No. 2, pp. 413-417.

[15] Kim, K. R., Kim, S. H., Choi, S. H. and Kim, C. J. (2011), "Case study of monitoring in environmental dredging project", Journal of Korean Environmental Dredging Society, Vol. 1, No. 1, pp. 33-52.

[16] Liang, R., Liu, M., and Wu, L. (2007), "Controlled release NPK compound fertilizer with the function of water retention". Reactive and Functional Polymers, Vol. 67, No. 9, pp. 769-779.

[17] Lovley, D. R., Baedecker, M. J., Lonergan, D. J., Cozzarelli, I. M., Phillips, E. J. P. and Siegel, D. I. (1989), "Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction", Nature, Vol. 339, No. 6222, pp. 297-300.

[18] Lovley, D. R. and Lonergan, D. J. (1990), "Anaerobic oxidation of toluene, phenol, p-cresol by the dissimilatory iron-reducing organism GS-15", Applied and Environmental Microbiology, Vol. 56, No. 6, pp. 1858-1864.

[19] Lovley, D. R. and Coates, D. J. (1995), "Benzene Oxidation Coupled to Sulfate Reduction", Applied and Environmental Microbiology, Vol. 61, No. 3, pp. 953-958.

[20] Mohan, R. K., Brown, M. P. and Barnes, C. R. (2000), "Design criteria and theoretical basis for capping contaminated marine sediments", Applied ocean research, Vol. 22, No. 2, pp. 85-93.

[21] Park, K. S. and Chun, H. D. (2002), "Application of Steel Slag for Suppressing Contaminant Liberationfrom the Sea Sediment", RIST Resercher, Vol. 16, No. 2, pp. 132-139.

[22] Rabus, R., Nordhaus, R., Ludwig, W. and Widdel, F. (1993), "Complete oxidation of toluene under strictly anoxic conditions by a new sulfate-reducing bacterium", Applied and Environmental Microbiology, Vol. 59, No. 5, pp. 1444-1451.

[23] Song, Y. C., Senthilkumar, P. and Woo, J. H. (2013), "Effect of biostimulation on growth of indigenous microorganisms in contaminated marine sediments", The Korean Society for Marine Environment & Energy, pp. 49-50.

[24] Tessier, A., Campbell, P. G. C. and Bisson, M. (1979), "Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals", Analytical Chemistry. Vol. 51 No. 7, pp. 844-851.

[25] Ocean Chemical Processes (2014), Retrieved December 2, http://www.waterencyclopedia.com/Mi-Oc/Ocean-Chemical-Processes.html.

[26] Tomaszewska, M. and Jarosiewicz, A. (2002), "Use of polysulfone in controlled-release NPK fertilizer formulations", Journal of Agriculture and Food Chemistry, Vol. 50, No. 16, pp. 4634-4639.

[27] U.S. EPA (2005), The Contaminated Sediment Remediation Guidance for Hazardous Waste Sites. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC. EPA-540-R-05-012.

원고접수일 : 2013년 12월 17일
심사완료일 : 2014년 5월 7일
원고채택일 : 2014년 5월 12일