

Desulfovibrio Desulfuricans과 제올라이트를 이용한 해양 내의 Zn, As 제거용 미생물 담체 개발

김인화¹, 최진하¹, 주정옥², 오병근^{1,2*}

Development of Microbe Carrier for Bioremediation of Zn, As by using Desulfovibrio Desulfuricans and Zeolite in Artificial Sea Water

In Hwa Kim¹, Jin-Ha Choi¹, Jeong Ock Joo², and Byung-Keun Oh^{1,2*}

Received: 27 April 2015 / Revised: 20 May 2015 / Accepted: 5 June 2015

© 2015 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: In this study, we have developed a microbe-carrier that combined Desulfovibrio desulfuricans and zeolite for removal of Zn and As in contaminated seawater. Desulfovibrio desulfuricans, one of the sulfate-reducing bacteria (SRB) microorganism was exhibited stable growth characteristics in highly salted water and strong resistance to Zn and As contaminated seawater. Moreover, zeolites are one of the most useful carrier to remove heavy metals from wastewaters. The results showed that SRB immobilized zeolite carrier can enhance removal ratio of Zn and As. In addition, heavy metals tended to be better removed in medium at conditions of 37 °C. In case of heavy metal concentration, they were effectively removed ranging from 50 to 100 ppm. These results show that SRB-zeolite carriers hold great potential to remove cationic heavy metal species from industrial wastewater in marine environment.

Keywords: Desulfovibrio desulfuricans, Zeolite, Microbe carrier, Cation exchange, Heavy metal, Bioremediation, Marine environment

¹서강대학교 화공생명공학과

¹Department of Chemical & Biomolecular Engineering, Sogang University, Seoul 121-741, Korea

Tel: +82-2-705-8478, Fax: +82-2-717-7008

e-mail: bkoh@sogang.ac.kr

²서강대학교 바이오융합기술

²Interdisciplinary Program of Integrated Biotechnology, Sogang University, Seoul 121-741, Korea

1. INTRODUCTION

해양은 외부에서 유입되는 다양한 오염물의 최종 집결지이며 다양한 경로를 통해 유입된 해양 오염물질은 해수의 순환을 통해 해양 오염효과를 증대시킨다 [1]. 특히 최근 산업화와 도시화로 인해 인체에 매우 해로운 중금속 배출이 급격히 증가하고 있어 이를 효율적으로 제거하기 위한 다양한 처리법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 중금속 처리 방법에는 화학적 침전 및 흡착, 이온 교환 방법 등 여러 가지가 있는데 대부분 전처리가 필요하다는 단점이 있다. 따라서 기존의 중금속 제거 공법을 대체 할 수 있는 연구들이 많이 진행되고 있으며, 특히 비용 대비 중금속 제거 효율이 높은 미생물을 이용한 중금속 처리 연구가 각광받고 있다 [2].

환경 오염을 야기시키는 중금속 중 아연 (Zn)은 건전지, 전기 산업, 도금, 살충제 및 폭발물 제조 등 많은 산업에 이용된다. 그에 따라 Zn은 광산 폐수, 도금 공장, 안료 제조 폐수에서 높은 농도로 배출되며 이는 심각한 해수 오염을 유발한다 [3]. 아세닉 (As)은 자연 풍화 반응, 생물학적 활성, 화학적 반응, 화산 폭발 등에 의해 생성되며 매우 많은 양의 As가 토양 침식과 침출 및 해수에 용해되거나 부유 상태로 존재한다 [4]. 이와 같은 중금속은 강한 독성을 가지고 있으며, 체내에 축적되어 암과 당뇨병 및 심혈관계 질환을 유발한다고 알려져 있다 [5,6].

본 연구에서는 두 가지 중금속을 효과적으로 제거하기 위해 제올라이트로 구성된 담체에 미생물을 흡착하여 이를 중금속 제거제로 사용하였다. 본 연구에서 사용한 미생물은 황산염환원균 (sulfate reducing bacteria, SRB)으로써 이를 이용

하면 중금속의 생물학적 흡착 이외에도 산화 환원 방법에 의한 중금속 제거가 가능하다. 미생물의 중금속 흡착 메커니즘은 크게 대사 비의존형과 대사 의존형 두 가지로 나뉘는데 이 중 대사 비의존형은 음전하를 띠는 미생물 표면에 양이온성 중금속이 흡착하는 방식이다. 이와 달리 대사 의존형 방법은 중금속의 미생물 안으로의 능동수송과 황 환원작용으로 인한 금속 침전물 형성 유도법을 이용한 중금속 제거가 가능하다. 특히 황산염환원균의 경우 황산염 (sulfate)을 황화물 (sulfide)로 환원 함으로써 금속이온과 결합하여 금속 황화물을 형성하여 침전 제거가 가능하다. 이러한 대사 의존형 방법은 표면 흡착보다 상대적으로 긴 시간을 필요로 하나 중금속을 지속적으로, 더 많이 제거할 수 있다는 특징이 있으며, 또한 이를 통해 양이온성 중금속 이외에도 비양이온성 중금속의 제거도 가능하다는 장점이 있다 [1,7]. 그러나 미생물을 이용한 최근 중금속 제거 연구에 따르면, 황산염환원균은 고농도의 중금속이 존재할 경우 환원력이 감소되는 한계점을 노출하였다 [8-10].

이와 더불어 본 연구에서 담체로 사용한 제올라이트는 $[\text{SiO}_4]^{4-}$ 와 $[\text{AlO}_4]^{5-}$ 로 구성된 정사면체 단위가 산소 가교를 통해 연결되어 있는 다공성 3차원 입체구조의 규산 알루미늄 결정체이다. 제올라이트는 구조적으로 알루미늄 (Al)이 있는 곳에 음전하를 한 개씩 수용하고 있으며 이를 상쇄하기 위해 주변에 양이온들이 존재하게 된다. 또한 제올라이트 세공에서 양이온의 이동도가 좋아 다른 양이온들과 쉽게 교환되는 특성이 있다 [7,11]. 이러한 제올라이트의 양이온 교환 특성을 이용하여 중금속 흡착 제거가 가능하며 흡착은 표면에서만 일어나는 것이 아닌 내부 공간에서도 가능하다고 알려져 있어 효과적인 중금속 제거가 가능하다 [12]. 또한 제올라이트는 가격이 저렴하고 국내에서 대량 생산되기 때문에 중금속 흡착제로서 많이 사용하고 있다.

본 연구에서는 중금속 제거에 탁월한 효과를 보이는 황산염환원균과 제올라이트 담체를 결합하여 기존의 단일 방법을 이용한 중금속 제거 보다 효율적으로 중금속을 제거하는 방안을 마련하고자 하였다. 따라서 제올라이트의 표면을 개질하여 황산염환원균 중 하나인 *Desulfovibrio desulfuricans*을 효율적으로 부착할 수 있는 방안을 찾았으며 이를 이용하여 인공 해양 환경에서의 Zn과 As를 효율적으로 제거하고자 했다.

2. MATERIALS AND METHOD

2.1. 황산염환원균의 배양

미생물로는 *Desulfovibrio desulfuricans* (KCTC 5768)를 사용하였으며 액체배지에 동결 건조 상태의 균을 활성화시켜 사용하였다. 균 배양 배지는 K_2HPO_4 0.5 g/L, NH_4Cl 1 g/L, resazurin 1 mg/L, yeast extract 1 g/L, 'DL'-sodium lactate 2 g/L, Na_2SO_4 1 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2 g/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L, sodium thioglycolate 0.1 g/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.5 g/L 조성으로 제

조하였다. 배지는 용존산소를 최대한 제거하기 위해 질소 가스로 치환하여 121°C에서 멸균하여 사용하였다. 균은 배지에 접종하여 37°C에서 48시간 배양하여 이용하였다.

2.2. 제올라이트의 양이온 교환 특성을 이용한 미생물 담체 제작

제올라이트는 분쇄하여 180~500 μm 크기로 균일화하여 이용하였다. 불순물을 제거하기 위해 증류수로 10회 세척하여 오븐에서 24시간 건조하였다. 제올라이트의 양이온 교환 특성을 이용해 표면 전하를 변화시켜 주기 위해 0.1 M CaCl_2 용액을 제조한 후 준비한 제올라이트 100 g을 용액과 함께 120 rpm으로 24시간 동안 교반하였다. 이를 다시 증류수로 2회 세척한 후 오븐에서 24시간 건조하여 이용하였다. 이 담체를 멸균하여 48시간 배양한 미생물과 함께 일주일간 배양하여 미생물 담체를 제작하였다.

2.3. 해수 환경에서 미생물 담체를 이용한 중금속 제거

해수 환경에서 미생물 담체를 이용한 중금속 제거 특성을 실험하기 위해 인공 바닷물을 NaCl 24 g/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 12 g/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 g/L, KCl 0.75 g/L, NaNO_3 0.04 g/L, K_2HPO_4 0.001 g/L, Na_2EDTA 12 mg/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2 mg, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 1 mg/L, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.5 mg/L, tris-[hydroxymethyl]-aminomethane 1 g/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.2 mg/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 2 mg/L, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2 $\mu\text{g/L}$, thamine hydrochloride 300 $\mu\text{g/L}$, p-animo benzoate 20 $\mu\text{g/L}$, calcium pantothenate 10 $\mu\text{g/L}$, cyanocobalamin 4 $\mu\text{g/L}$, yeast extract 10 g/L의 조성으로 제조하였다 [13]. 1 M HCl 과 NaOH 를 이용하여 최종적으로 pH 8로 맞추었으며, 용존산소를 제거하기 위해 질소 가스로 치환하여 121°C에서 멸균하여 사용하였다. 미생물 담체는 부유하는 균과 기존 미생물 배양 배지를 제거하기 위해 인공바닷물 배지로 2회 세척하여 사용하였다. Zn과 As 용액은 증류수에 각각 $\text{N}_2\text{O}_6\text{Zn} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 와 As_2O_3 를 용해한 후 질소 가스로 치환한 뒤 121°C에서 멸균하여 사용하였다. 중금속을 포함한 해수에 미생물 담체를 포함시켜 7일 경과 후 Inductively coupled plasma optical emission spectrometer (ICP-OES) (OPTIMA 8300, Perkin Elmer, USA)를 통해 분석하였다.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. 제올라이트 표면 개질을 통한 미생물 부착율 증가

본 연구에서는 미생물과 제올라이트의 장점을 살려 기존 담체 대비 중금속 제거 효율을 상승시키고자 미생물 담체 제작을 시도하였다. 미생물 담체 제작에 있어서 중요한 점은 다량의 미생물을 제올라이트에 효과적으로 부착하여 중금속 제거율을 높이는 데에 있다. 일반적으로 미생물의 표면이 음전하를 띠고 [14,15] 제올라이트 자체도 전반적으로 음전하를 띠는 것으로 알려져 있기 때문에 [7,11] 같은 음전하를 띠는 미생물과 제올라이트를 효율적으로 부착하는 것이 어렵

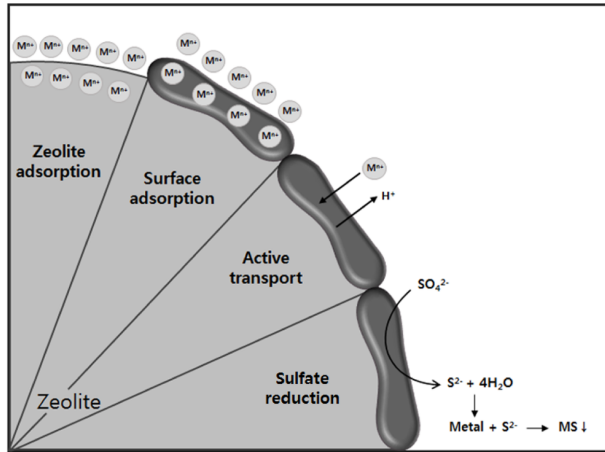


Fig. 1. Schematic diagram for elimination process of heavy metal by using microbe-zeolite carrier.

다고 판단하여 담체의 양이온 교환 능력을 이용해 강한 음전하를 띠는 제올라이트의 표면을 약 음전하로 개질하였다. 표면 개질을 위해 미생물 배지 안에 인위적으로 0.1 M CaCl₂를 첨가하여 제올라이트 표면에 붙을 수 있는 양이온을 제공하였으며 이를 통해 제올라이트 표면을 약 음전하로 치환하여 미생물이 상대적으로 잘 흡착할 수 있는 조건을 확립하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 미생물 담체의 중금속 제거 메커니즘에 대한 개략도이다. 개략도에서 볼 수 있듯이, 미생물 담체는 총 4가지의 과정을 통해 중금속을 효과적으로 제거할 수 있다. 먼저 미생물이 흡착되지 않은 제올라이트의 표면에 중금속이 흡착될 수 있으며, 제올라이트에 흡착된 미생물의 표면에도 중금속의 흡착이 가능하다. 또한 미생물 대사과정에 의한 중금속 이온의 능동수송을 통한 제거가 가능하며, 마지막으로 황산염환원균 고유의 기능인 황 환원으로 인한 중금속과의 침전물 형성을 통한 제거가 이루어진다.

Fig. 2는 제올라이트에 실제 미생물 부착 정도를 파악하기 위해 SEM을 통해 미생물 담체 표면을 관찰하였다. 본 사진은 미생물과 제올라이트를 반응시킨 후 여러 번의 세척과정을 거쳐 얻은 데이터로, 이를 통해 표면 개질된 제올라이트에 본 연구에서 사용되는 황산염환원균이 효율적으로 부착된 것을 확인할 수 있었다. 이는 CaCl₂를 이용한 제올라이트 표면 개질을 통한 표면 전하 변화가 미생물 담체 제작에 효과적으로 작용한다는 것을 보여준다.

3.2. 제올라이트 담체와 미생물 담체의 중금속 제거율 비교

제올라이트 담체와 미생물 담체의 제거율을 비교하기 위해 담체와 미생물 담체 모두 37°C에서 일주일간 중금속 제거를 진행하여 비교하였다. Zn의 경우 담체의 중금속 제거율은 17.9%, 미생물 담체의 중금속 제거율은 95.8%로 77.9%의 제거율 상승을 보였다. 또한 As는 담체의 제거율이 10.5%, 미생물 담체의 As 제거율은 99.5%로 89%의 제거율 상승을 보였다. 동일한 조건 (37°C, 100 ppm)에서 실험했을 때 미생물

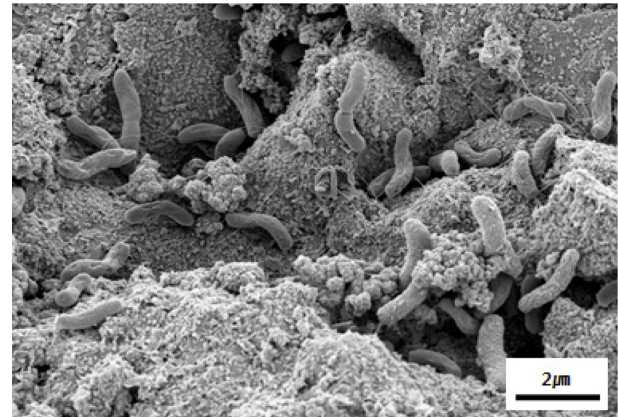


Fig. 2. SEM image of microorganism-attached zeolite.

담체의 제거율은 담체의 제거율에 비해 효율이 월등히 높은 것으로 나타났다. Erdem [16]의 연구에 따르면 제올라이트를 이용한 100 ppm의 Cu, Zn, Co의 제거율은 약 45%, 40% 70%로 나타났으며, Elizalde-Gonzalez [17]의 연구에서는 As 제거율이 약 30~45%로 나타났다. 이와 비교할 때에도 본 연구에서 이용한 미생물 담체는 기존 제올라이트에 비해 중금속 제거 효율이 매우 높은 것으로 판단되며 따라서 해양 중금속 정화에 효과적으로 사용 가능할 것으로 예상된다.

3.3. 미생물 담체의 Zn과 As 농도에 따른 제거율

미생물 담체의 중금속 농도에 따른 제거율을 확인하기 위해 Zn과 As의 농도를 50, 100, 200 ppm으로 변화를 주어 중금속 제거율을 비교해 보았다. 중금속을 함유한 인공배달물 배지 내에서 미생물 담체의 중금속 제거율을 분석한 결과 Zn은 50, 100, 200 ppm에서 거의 100%에 가까운 제거율을 보였다 (Fig. 4). Li [18]의 연구 결과에 따르면, 본 연구에서 사용되는 황산염환원균이 Zn의 초기농도가 73.7~196.8 ppm의 범위에서 높은 활성을 나타냈으며, 그보다 비교적 높은 농도인 초기농도 262.97 ppm에서 황산염 환원 균의 활성이 현저히 억제된 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서 진행한 Zn 제

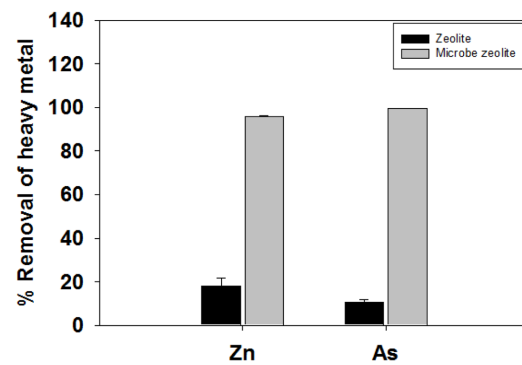


Fig. 3. Comparison of the removal efficiency of zeolite and microbe-zeolite complex.

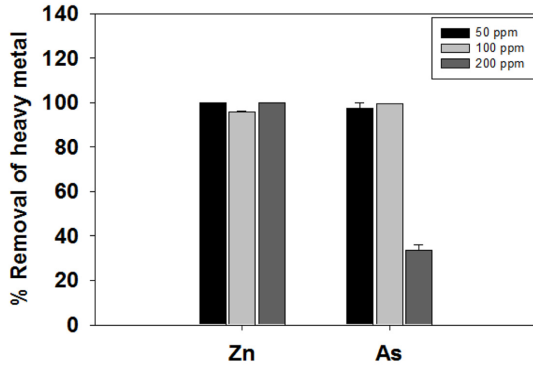


Fig. 4. Comparison of the removal efficiency by the concentration.

겨울과 비슷한 경향으로 볼 수 있으며, Zn의 농도가 260 ppm 이상일 때 미생물의 활성이 감소하여 제거율에도 영향을 미칠 것으로 예상된다 [18,19]. 따라서 미생물 담체를 직접 적용했을 때 200 ppm 정도의 고농도 Zn이 존재하는 해역에서도 효율적으로 중금속 제거가 가능할 것으로 보인다. As의 경우 미생물 담체의 제거율은 50 ppm에서 97.3%, 100 ppm에서는 99.5%, 200 ppm에서는 33.7%로 나타났다. As는 Zn과 달리 200 ppm의 제거율이 급격히 감소하였는데, 이는 As의 농도에 따른 미생물의 활성 및 내성과 관계가 있을 것으로 예상된다. 또한 미생물 담체의 중금속 제거율 측면에서 볼 때, 미생물 담체가 제거 가능한 As 농도의 한계가 100 ppm 정도일 것으로 예상되며, 이를 통해 개발된 미생물 담체는 As 100 ppm 이하의 농도인 해역에 적용 가능할 것으로 보인다.

3.4. 미생물 담체의 온도에 따른 제거율

제작된 미생물 담체는 살아있는 미생물을 이용하기 때문에 주변 온도에 따라 중금속 제거율이 민감하게 변화할 것이라 예상할 수 있다. 이를 구체적으로 확인하기 위해 미생물 담체가 함유된 배지에 Zn과 As를 접종한 후 5, 15, 25, 37°C에서 7일간 반응한 뒤 중금속 제거율을 비교해 보았다. Zn의 경우 5°C에서 63.6%, 15°C에서 61.9%, 25°C에서 87%, 37°C에서 95.8%의 제거율을 보였다. 황산염환원균의 최대 활성을 띠는 온도는 37°C로 알려져 있으며, 이는 37°C에서 100%에 가까운 제거율을 보이는 본 실험 결과와 일치한다고 볼 수 있다. Zhang 등 [20,21]에 따르면 대부분의 황산염환원균은 20~30°C의 온도를 선호한다고 알려졌으며, 이는 상대적으로 25~에서 중금속의 제거율이 상승한 것과 관련이 있다. 이와 비슷한 경향으로 Zn 제거율은 25°C에서도 87%의 비교적 높은 제거율을 보였다. 그러나 5°C와 15°C에서는 상대적으로 제거 효율이 떨어지는 것으로 나타났으며, 이는 미생물의 최대 활성 온도와의 차이에 의한 결과라고 볼 수 있다. As의 경우 5°C에서 53.7%, 15°C에서 55.3%, 25°C에서 57.2%로 비슷하게 제거되는 경향을 보였다. 그러나 미생물 최대 활성 온도인 37°C에서 99.5%의 제거율로 큰 폭 상승하였다. As의

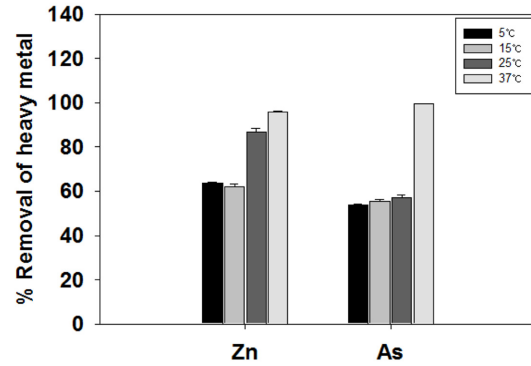


Fig. 5. Comparison of the removal efficiency by the temperature.

경우 Zn에 비하여 25°C에서 미생물 제거율의 차이를 보이는데 이는 As 제거시 Zn보다 미생물 담체가 온도에 민감하게 작용한 것으로 판단된다. 또한 Fig. 3의 제올라이트 담체 단독으로 사용했을 경우와 비교했을 때, 5°C에서의 미생물 담체의 경우 Zn은 45.7%, As은 45.8% 증가한 것으로 나타났다. 따라서 온도가 낮은 겨울철 해양에 직접 적용할 경우에도 미생물 담체는 담체 단독 사용에 비해 보다 효과적으로 중금속 제거가 가능할 것으로 예상된다.

4. CONCLUSION

본 연구에서는 황산염환원균인 *Desulfovibrio desulfuricans*과 제올라이트를 이용하여 해양환경에서의 Zn과 As 제거에 관한 연구를 진행하였다. 미생물의 중금속 제거 능력과 제올라이트의 중금속 흡착 성능을 이용하여 보다 높은 중금속 제거 효율을 이끌어 내고자 미생물과 제올라이트를 결합한 미생물 담체를 제작하였다. 이 과정에서 미생물 담체를 효율적으로 생산하기 위한 방안들을 모색했으며 제올라이트의 양이 온 교환 능력이 뛰어나다는 것을 이용해 0.1 M CaCl₂를 이용하여 표면 전하에 영향을 주어 미생물 담체를 효과적으로 제작할 수 있었다.

37°C, 100 ppm의 동일한 조건에서 비교했을 때 미생물 담체의 Zn과 As 제거율을 기존 담체 대비 각각 77.9%와 89% 증가하여 미생물 담체의 중금속 제거 효율이 매우 높은 것으로 나타났다. 중금속 농도에 따른 제거율을 비교하였을 때 Zn의 경우 50, 100, 200 ppm에서 모두 100%에 가까운 제거율을 보였다. As의 경우 50, 100 ppm에서는 100%에 가까운 제거율을 보인 반면 200 ppm에서 33.7%로 제거율이 절반 이상 감소한 것을 볼 수 있다. 이로써 As의 농도 100 ppm 이상에서 미생물 담체가 제거율의 한계에 다다른 것으로 판단된다.

온도 변화에 따른 제거율을 비교 하였을 때 Zn과 As 모두 37°C에서 100%에 가까운 제거율을 보였다. 이는 37°C가 황산염 환원 균의 최대 활성 온도이기 때문에 미생물 담체의

활성 또한 가장 우수하여 도출된 결과로 볼 수 있다. Zn의 경우 25°C에서도 87%의 제거율로 높은 효율을 보이거나, 5°C와 15°C에서는 63.6%와 61.9%로 비교적 낮은 수준의 제거를 보인다. 또한 As의 경우 5, 15, 25°C에서 모두 55% 내외의 비교적 낮은 수준의 제거율을 보였다. 그러나 5°C에서 미생물 담체의 효율을 기존 담체의 중금속 제거율과 비교했을 때 55% 내외도 결코 낮은 수준의 제거율이 아니다. 따라서 담체만을 이용한 방법 대비 미생물 담체를 이용할 경우 해양의 온도가 낮은 겨울에도 효과적으로 중금속을 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

이 논문은 2014년도 서강대학교 교내연구비 지원과 2011년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (지속가능 해양오염퇴적물 정화기술 개발).

REFERENCES

- Lim, D. I. (2007) Natural background level analysis of heavy metal concentration in Korean coastal sediments. *Ocean and Polar Research* 29: 379-389.
- Kim, I. B. (2001) Biosorption process for removing heavy metals in aqueous solution (II). *J. Korean Soc. Environ. Administration* 7: 77-85.
- Muyzer, G. and A. J. M. Stams (2008) The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria. *Nat. Rev. Microbiol.* 6: 441-454.
- Mohan, D. (2007) Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents-a critical review. *J. Hazardous Mater.* 142: 1-53.
- Abernathy, C. O. (1999) Arsenic: Health effects, mechanisms of actions, and research issues. *Environ. Health Perspectives* 107: 593-597.
- Bae, O. N. (2006) Potential risk to human health by arsenic and its metabolite. *J. Environ. Toxicol.* 21: 1-11.
- Shim, S. K. (2000) Adsorption properties of heavy metal elements using zeolite. *Analytical Sci. Technol.* 13: 96-100.
- Utgikar, V. P., S. M. Harmon, N. Chaudhary, H. H. Tabak, R. Govind, and J. R. Haines (2002) Inhibition of sulphate-reducing bacteria by metal sulphide formation in bioremediation of acid mine drainage. *Environ. Toxicol.* 17: 40-48.
- Hao, O. J., L. Huang, J. M. Chen, and R. L. Buglass (1994) Effects of metal additions on sulphate reduction activity in wastewaters. *Toxicol. Environ. Chem.* 46: 197-212.
- Cabrera, G. (2006) Toxic effects of dissolved heavy metals on *Desulfovibrio vulgaris* and *Desulfovibrio* sp. strains. *J. Hazardous Mater.* 135: 40-46.
- Lee, S. H. (2008) Simultaneous removal of ammonium and nitrate by natural zeolite and bacteria. *Korean Chem. Eng. Res.* 46: 971-976.
- Ali, A. A. H. and R. El-Bishtawi (1997) Removal of lead and nickel ions using zeolite tuff. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 69: 27-34.
- Kim, S. J., K. W. Park, and B. K. Hur (2000) Characteristics of linoleic acid production by marine fungi in sea water media. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* 15: 195-200.
- Kim, S. H. (2009) Biosorption of Pb and Cd by indigenous bacteria isolated from soil contaminated with oil and heavy metal. *Econ. Environ. Geol.* 42: 427-434.
- Gavrilescu, M. (2004) Removal of heavy metals from environment by biosorption. *Eng. Life Sci.* 4: 219-232.
- Erdem, E., N. Karapinar, and R. Domat (2004) The removal of heavy metal cations by natural zeolites. *J. Colloid and Interface Sci.* 280: 309-314.
- Elizalde-González, M. P., J. Mattusch, W. D. Einicke, and R. Wernrich (2001) Sorption on natural solids for removal. *Chem. Eng. J.* 81: 187-195.
- Li, S. J., T. H. Chen, and Y. F. Zhou (2012) Effect of Zn (II) on microbial activity in anaerobic acid mine drainage treatment system with biomass as carbon source. *Environ. Sci.* 33: 293-298.
- Chen, W. T., H. G. Zhang, D. G. Luo, and Y. H. Chen (2014) Research on treating acid wastewater containing heavy metals by sulfate-reducing bacteria. *International Conference on Materials Environmental Engineering*, 112-115.
- Zhang, C., F. Wen, and Y. Cao (2011) Progress in research of corrosion and protection by sulfate-reducing bacteria. *Procedure Environ. Sci.* 10: 1177-1182.
- Ismail, M., N. N. Noor, N. Yahaya, A. Abdullah, R. M. Rasol, and A. S. A. Rashid (2014) The effect of pH and temperature on corrosion of steel subject to sulphate-reducing bacteria. *J. Environ. Sci. Technol.* 7: 209-217.