

# 폐금속광산 광미와 토양내 카드뮴의 생물흡착 처리의 적용 가능성

박진희 · 이진수 · 전효택<sup>1)</sup>

## 1. 서론

중금속에 대한 생물학적 처리는 유기화합물과는 달리 미생물에 의해 분해되는 것이 아니라 금속이나 금속화합물이 변형되거나 고정화·무독화되는 것이다(Alexander, 1999). 생물흡착과정은 음이온으로 하전된 미생물 자체의 특성을 이용하여 이온교환수지나 활성탄처럼 미생물을 흡착공정의 흡착제로 사용 가능한 방법이며 다당류, 단백질 및 지방질로 구성된 미생물 세포벽의 carboxylate, hydroxyl, sulfate, phosphate 및 amino기가 중금속을 흡착할 수 있다. 생물 흡착의 효율은 미생물의 종류 및 중금속의 종류에 따라 다르다. 특히, 효모(Yeasts), 세균(bacteria), 곰팡이(fungi) 및 조류(algae)와 같은 미생물이 어떤 다른 물질보다 중금속을 잘 축적할 수 있다(Kefala *et al.*, 1998). 생물흡착 과정은 미생물의 특성, 오염물의 성질 그리고 환경적 요인들에 의해 영향을 받는다. 미생물의 특성에는 미생물 균체량, 미생물 종류, 미생물의 생육 단계, 미생물의 오염 환경에 대한 순응정도 등이 있으며 오염물의 성질로는 오염물질의 양, 오염물질의 상태 등이 있다. 환경적 요인에는 미생물의 성장이나 중금속의 형태에 영향을 미칠 수 있는 인자들이 포함되는데 온도, pH, 산소, 물, 영양분(N, P), 토양의 특성 등이 있다.

본 연구에서는 중금속으로 오염된 토양에서 카드뮴 흡착에 활성을 나타내는 미생물을 분리하였고 분리한 미생물의 흡착 특성과 카드뮴의 흡착에 영향을 미치는 미생물의 생존여부, 흡착 시간, pH, 온도, 용액에 같이 존재하는 다른 중금속들의 영향과 미생물 생육 단계에 따른 영향을 알아보기 위해 실험을 수행하였다.

## 2. 생물흡착 적용을 위한 실험방법

Cd에 대해 내성을 갖는 미생물을 분리하기 위해 옥동광산(Cu-Pb-Zn) 및 형제광산(Au-Ag-Cu-Pb-Zn)의 토양시료에서 미생물을 분리한 후 대량 배양하여 흡착 실험에 사용하였다. Cd 흡착에 활성을 나타내는 균을 선택하기 위하여 5 ppm, 20 ppm의 Cd 용액과 0.5 g/L의 세균 혼탁액을 1시간 동안 25°C 150 rpm에서 교반시킨 후 각각 4000 rpm으로 원심분리하여 세균을 가라앉힌 후 상등액을 취해 Perkin-Elmer사의 AAS로 Cd의 함량을 분석하였다. 여러 가지 환경 조건에 따른 영향을 알아보기 위하여 살아있는 미생물과 죽은 미생물의 시간에 따른 흡착실험에서는 살아있는 미생물의 경우, 미생물을 24시간 배양하고 증류수로 두 번 씻은 후 증류수를 첨가하여 농도가 0.5 g/L가 되도록 하였고 죽은 미생물의 경우, 24시간 배양한 미생물을 멸균하고 증류수로 두 번 씻은 후 농도가 0.5 g/L가 되도록 증류수를 첨가한 후 위와 마찬가지로 반응시켜 분석하였다. pH에 따른 제거 효율 실험에서는 용액의 pH를 각각 3, 5, 7, 9로 조절하였으며 온도에 따른 제거효율 실험에서는 용액의 온도를 25°C와 35°C로 각각 맞추었다. Cd 이외의 다른 중금속에 대한 흡착 특성 실험에서는

---

주요어: 생물흡착, Cd, 제거 효율

1) 서울대학교 지구환경시스템공학부(parkjh7@snu.ac.kr)

Cd, Pb, Zn의 혼합용액과 각각의 단일 용액에 대해 제거효율을 조사하였다. 미생물 성장 단계에 따른 제거 효율을 알아보기 위해 각각 8, 10, 14 그리고 24 시간 배양한 세균에 대해 실험을 수행하였다.

### 3. 결과 및 토의

분리된 미생물을 이용하여 Cd 흡착 활성에 대해 실험한 결과 대부분의 종들은 50% 이하의 제거 효율을 보였으나, 옥동광산과 형제광산의 토양에서 분리한 미생물의 효율이 비교적 높아 그것을 각각 ods2와 hjs2로 명명하고 여러 가지 환경 조건에 대한 실험을 수행하였다. 특히, ods2의 경우 5ppm의 Cd 용액과 반응시켰을 때 제거 효율은 99%로 매우 높았으며, 20ppm의 Cd 용액과 반응시켰을 때도 효율이 88%로 매우 높았다. 살아있는 미생물과 죽은 미생물의 흡착 실험 결과, ods2와 hjs2의 경우 모두 죽어있는 세포를 가지고 실험했을 때 Cd의 제거 효율이 더 높은 것을 볼 수 있다. 특히, hjs2의 경우 죽어있는 세포의 제거 효율은 87%였으나 살아있는 세포는 64%로 제거 효율에 많은 차이를 보였다(Fig. 1). 이는 살아있는 세포의 경우 중금속에 대한 저항성 메커니즘이 작용하여 미생물 체외로 중금속을 배출하기 때문에 미생물 세포에 흡착되는 양이 감소한 것으로 보인다. 시간에 따른 Cd의 제거량을 보면 30분 이내에 최대 제거량에 도달하는 것으로 보아 중금속의 생물체로의 흡착은 빠른 시간 내에 이루어짐을 알 수 있다(Fig. 1). 대부분 금속의 생물흡착은 용액과 흡착제로 접촉 후 5-15분내에 일어나고 어떤 경우에는 잔류되어 있거나 훨씬 느린 부가적인 금속침전이 일어나는 경우도 있으나 이것은 다른 이차적인 메커니즘일 것으로 추정된다. pH에 따른 제거 효율 실험 결과, pH 3에서는 제거 효율이 매우 낮았으며 hjs2의 경우 제거가 일어나지 않았다. 이는 세균은 산성 조건에 민감하기 때문이며 낮은 pH 조건에서는  $H^+$ 와  $H_3O^+$ 가 금속 결합 부위에 대해서 금속과 경쟁하기 때문인 것으로 사료된다(Puranik and Paknikar, 1999). Cd의 제거 효율은 pH가 증가할수록 증가하다가 pH 7 정도에서 최대를 나타내며 pH가 더 올라가게 되면 오히려 제거효율이 약간 감소하였다(Fig. 2). 높은 pH에서 제거 효율이 감소한 이유는 Cd의 용해도가 감소하기 때문이다. 온도에 따른 Cd의 제거율은 온도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. Cd 이외의 다른 중금속에 대한 흡착 특성은 하나의 중금속이 존재할 때보다 여러 가지 중금속이 혼합되어 있을 때 그 흡착 효율이 더 낮았다. Cd의 제거에 있어서도 Cd이 단일 원소로 존재할 때는 ods2에 의한 제거 효율이 99%에 달한 것에 반해 혼합된 형태로 존재했을 때는 제거 효율이 28%에 머물렀다. 이는 여러 중금속 이온이 함께 존재하는 상황에서는 특정한 이온에 대한 흡착만 일어나는 것이 아니라 다양한 중금속 이온에 대한 흡착이 함께 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 여러 가지 양이온이 존재하는 상태에서 특정 중금속은 미생물 세포벽의 결합 자리에 대해 다른 양이온과 경쟁하기 때문이다. 두 균주 모두 Zn에 대한 제거 효율은 40% 이하로 매우 낮아 Zn의 제거에는 부적합함을 알 수 있다. 두 균주 모두 Cd과 Pb에 대해 선택적 흡착현상을 나타내었다(Fig. 3). 미생물 생육 단계에 따른 제거 효율은 생육 단계가 높아질수록 제거 효율이 좋았으며 세포의 생육이 가장 활발한 단계인 10 시간에서의 제거 효율이 가장 낮았다(Fig. 4). 미생물의 단위 질량당 금속이온의 흡착량을 알아보기 위해 Langmuir Isotherm을 적용한 결과, 최대 흡착량은 34.48mg/g biomass였다.

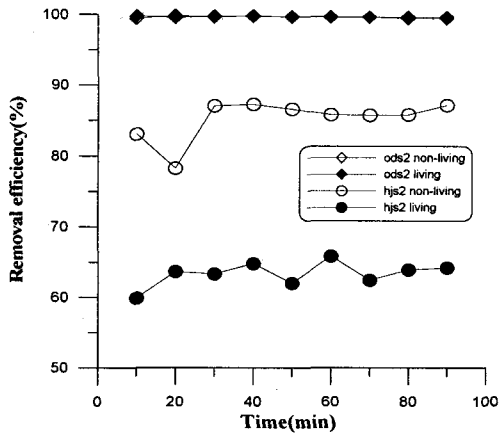


Fig. 1. Bioremoval efficiency of Cd using living and non-living ods2 and hjs2 with time.

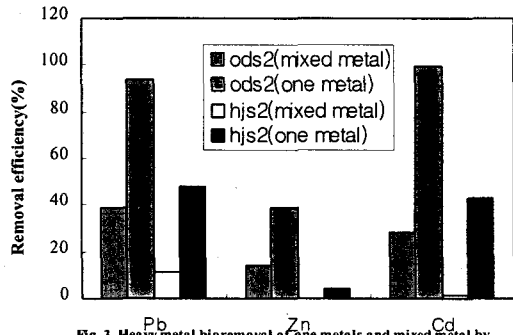


Fig. 3. Heavy metal bioremoval of one metals and mixed metal by ods2 and hjs2

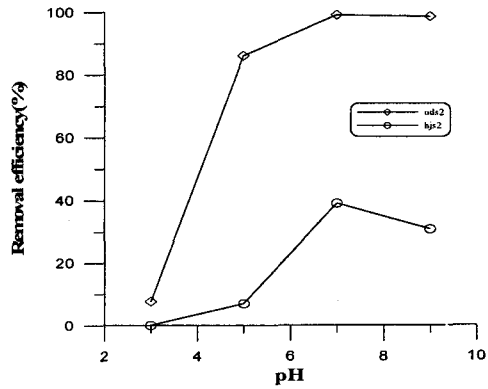


Fig. 2. Effect of pH on Cd bioremoval by ods2 and hjs2

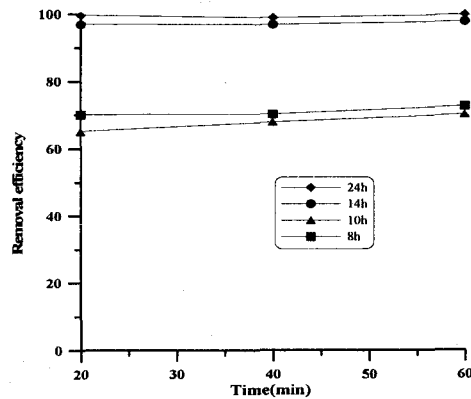


Fig. 4. Effect of culture age on Cd bioremoval by ods2

#### 4. 결론

생물흡착 실험 결과, Cd 흡착활성을 갖는 세균인 ods2를 이용한 용액에서의 Cd 제거 효율은 90% 이상으로 높은 제거율을 보였고 살아있는 미생물 보다 죽은 미생물의 제거 효율이 더 좋았으며 흡착은 30분 이내에 완료되었다. 미생물에 의한 Cd의 제거 효율은 pH 7에서 가장 좋았으며 Cd, Pb, Zn이 함께 존재하는 용액에서의 제거 효율은 하나의 중금속이 존재하는 용액에서의 제거 효율에 비해 낮았고 ods2는 Cd에 대해 hjs2는 Pb에 대해 선택적 흡착현상을 나타냈다. 미생물의 생육 단계에 따른 제거율은 24시간 배양시 가장 좋았으며 이러한 결과를 바탕으로 광미나 토양에서의 생물흡착 처리 적용시 환경 조건을 결정할 수 있을 것이다.

#### 5. 참고문헌

- Alexander, M., 1999, Biodegradation and bioremediation, second ed., Academic Press, p.378-384.
- Kefala, M.I., Zouboulis, A.I. and Matis, K.A., 1999, Biosorption of cadmium ions by *Actinomycetes* and separation by flotation, *Environmental Pollution*, v.104, p.283-289.
- Puranik, P.R. and Pakniker, K.M., 1999, Biosorption of lead, cadmium, and zinc by *Citrobacter* strain MCM B-181: Characterization Studies, *Biotechnol. Prog.*, v.15, p.228-237.