

# 생체흡착의 개요

2014년도 연구 IP (개인)

원성욱(경상대학교)

생체흡착기술(Biosorption Technology)은 1980년대부터 주로 중금속폐수의 처리를 목적으로 개발되었으며, 특히 다양한 종류의 바이오매스를 이용한 중금속폐수 처리용 생체흡착소재의 제조기술이 전세계적으로 연구되었다. 1990년에는 캐나다 B.V. Sorbex사에서 박테리아 바이오매스를 가교시킨 생체흡착소재 AlgaSORB™을 개발하여 상용화 연구에 박차를 가하였다. 또한 Advanced Mineral Technologies사도 BioCLAIM™이라는 과립형태의 생체흡착소재를 상용화하였다. 이 흡착소재는 저농도의 금속이온을 99% 이상 효과적으로 처리할 수 있는 우수한 흡착성능을 지닌 것으로 알려져 있다. 이런 생체흡착소재들은 2차 슬러지의 발생문제가 없고 값비싼 이온교환수지와 유사한 흡착성능을 보이며, 운전비용이 저렴한 것으로 평가되고 있다. 생체흡착소재는 중금속 처리 외에도 염색폐수에 포함되어 있는 색도유발 물질인 염료를 효과적으로 처리할 수 있다는 사실이 알려지면서 현재까지도 많은 국제적인 관심을 받고 있다. 2003년도에 국제학술지인 Chemosphere에 키토산을 고정화하여 1kg의 흡착소재 당 최고 1,840g의 반응성 염료를 흡착할 수 있다는 사실이 보고되었다[1]. 또한 다양한 미생물군을 PVA에 고정화할 경우, 연속운전(HRT = 10시간)에서 아조염료를 90% 이상 제거할 수 있다는 사실도 보고되었다[2]. 그리고 일본의 鈴木産業(株)는 고베여자대학교와 공동으로 염색폐수의 탈색에 이용할 수 있는 셀룰로오스계 염료흡착소재를 개발해 본격 시판을 서두르고 있다는 외신기사가 보고되기도 하였다.

## 1. 생체흡착 기술

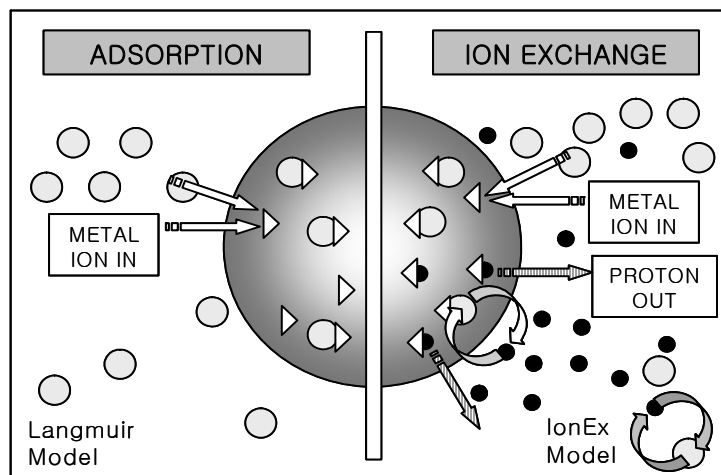
생체흡착(Biosorption)이란 살아있는 또는 죽은 미생물을 이온교환수지처럼 이용하여 수계에 녹아져 있는 이온성 오염물질(예, 중금속, 염료, 희유금속)을 제거 또는 회수하는 기술을 말한다. 최근 들어 이온교환수지의 특성 및 성능을 지니면서 양이 풍부하며 값싸게 얻을 수 있는 바이오매스를 이용하여 주로 중금속을 제거하는 기술이 개발되어 전 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 생체흡착소재의 원료로 사용되는 바이오매스는 미세조류, 박테리아, 곰팡이, 식물 등이 있으며, 산업부산물인 활성슬러지와 발효폐기물

과 같은 고품질의 유기성 폐기물도 훌륭한 원료로 사용되고 있다. 특히 해조류와 미생물의 경우 중금속 제거능력이 대단히 우수하며 특정 종류의 바이오매스는 상용화 소재인 활성탄 또는 이온교환수지에 비해 유사하거나 우수한 성능을 가진 것으로 보고되고 있다. 이런 바이오매스가 응용 가능성이 높은 생체흡착소재로 이용되기 위해서는 아래와 같이 5가지의 조건을 만족할 필요가 있다.

- 대상물질에 대해 높은 친화도(affinity)와 최대흡착량( $q_{max}$ )을 가져야 한다.
- 저비용으로 재생이 가능해야 한다.
- 탈착이 용이하여 반복적인 재사용이 가능해야 한다.
- 폐수의 성상(pH, 온도, 염도 등)에 따른 영향이 적어야 한다.
- 다양한 오염물질들에 이용될 수 있어야 한다.

## 2. 주요 결합 메커니즘

이온성 오염물질 중, 중금속 이온에 대한 생체흡착소재의 결합 메커니즘에 대해 살펴보고자 한다. 중금속 이온이 바이오매스에 결합하는 메커니즘은 중금속의 형태 및 바이오매스의 종류에 따라 이온교환, 흡착, 표면침전, 착화 등 다양하지만, 이온교환과 흡착이 대표적인 결합 메커니즘으로 알려져 있다. 이온교환과 흡착 메커니즘을 그림으로 표현하면 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 이온교환과 흡착 메커니즘을 나타내는 모식도.

이온교환에 의해 중금속 이온이 결합하는 경우, 탈착이 용이하여 고농도의 중금속 용액을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 바이오매스의 재사용이 가능한 장점을 가진다. 또한 바이오매스 표면에는 다양한 종류의 작용기들이 존재하

며, 중금속 결합에 관여하는 대표적인 표면기는 카르복실기(carboxyl group), 인산기(phosphate group), 술폰산기(sulfonate group), 수산기(hydroxyl group) 등을 들 수 있다.

### 3. 생체흡착 기술의 장점

생체흡착 기술의 장점은 ① 무엇보다도 생체흡착제의 가격이 저렴하다는 것이다. [표 1]에서 보듯이 발효부산물이나 활성슬러지를 원료로 생체흡착소재를 제조할 경우, 활성탄이나 이온교환수지에 비하여 가격경쟁력이 탁월하다고 알려져 있다. ② 또한 저농도의 중금속을 효과적으로 제거할 수 있다는 특징이 있어 향후 강화되고 있는 중금속 규제에 대응할 수 있는 기술이다. ③ 이온교환 메커니즘에 의해 중금속을 결합하는 생체흡착소재는 적절한 상대이온(H, Ca, Na 등)을 사용하여 재생이 가능하므로 반복적인 사용이 가능하다는 장점이 있다. ④ 생체흡착소재는 천연 바이오매스를 원료로 사용하므로 생분해성을 갖는다. 즉, 흡착능력을 상실한 이후 매립할 경우 합성 이온교환수지와는 달리 자연계에서 쉽게 분해될 수 있는 친환경적인 소재이다.

[표 1] 생체흡착소재 및 기타 흡착소재간의 가격 비교[3]

흡착소재 유형	원료물질	가격
생체흡착소재	발효부산물	0
	활성슬러지	0
	배양된 바이오매스(예, 효모, 곰팡이)	\$1~\$5/kg
	대형조류	\$1~\$2/kg
	미세조류	\$7~\$8/kg
상용화 흡착소재	이온교환수지	\$7~\$14/kg
	활성탄	\$1~\$2/kg

### 4. 생체흡착소재의 연구동향

생체흡착 관련 분야를 주제로 하는 국제학술지 논문의 게재 빈도와 생체흡착 분야의 각국 전문가들과의 의견교환을 바탕으로 생체흡착소재에 관한 연구동향을 정리하면 다음과 같다.

#### ① 원료 바이오매스의 발굴

다양한 천연 바이오매스에 대한 생체흡착 특성이 데이터베이스화 되어 있지 않기 때문에 값이 싸고 쉽게 확보할 수 있는 천연 바이오매스를 발굴하는 일은 아직까지도 중요한 연구주제이다.

#### ② 바이오매스 표면기의 동정 및 화학적 변형

중금속과 결합하는 바이오매스의 표면기를 동정하는 일은 생체흡착 현상을 이해하기 위한 가장 근본적인 일이다. 이와 같은 표면기를 분석하기 위해서는 주로 FTIR을 사용한다. 중금속과 친화력이 있는 표면기는 바이오매스 종류에 따라 다양하게 존재하지만, 주로 중성 이하의 pH에서는 카르복실기가 가장 일반적인 표면기로 알려져 있다. 특히, 해조류의 경우 알지네이트에 존재하는 카르복실기는 중금속 결합에 90% 이상을 담당하고 나머지 10%는 인산기 또는 술폰산기가 그 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 또한 중금속의 최대 흡착량을 향상시키기 위해서 표면기를 화학적으로 변형하는 방법에 대한 연구가 폭넓게 수행되고 있다. 대표적으로 표면기의 화학적 변형 방법은 carboxylation, phosphorylation, carboxymethylation, sulfonation 등이 있다.

#### ③ 바이오매스의 생체흡착 기능성 강화를 위한 분자생물학적 설계

최근에는 바이오매스 표면기의 화학적 변형뿐만 아니라 유전공학적 설계가 시도되고 있다. 즉, 중금속과 결합력이 큰 펩티드(peptide)를 미생물의 세포 표면에 발현시킴으로써 생체흡착 기능성을 대폭 증대시키는 방법이다. 많은 연구논문에서 이러한 방법을 사용하여 중금속 제거 성능이 획기적으로 향상되는 결과가 얻어지고 있다. 그러나 이러한 논문에서는 유전자 조작된 미생물을 살아있는 상태로 사용한다는 접근방식을 취하고 있어, 유전자 변형 미생물을 자연계에 노출해야 한다는 심각한 단점이 있다. 따라서 유전자 변형 생물의 안전성 우려를 해소하면서 생체흡착 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 방안이 필요하다.

#### ④ 메커니즘 규명 및 mechanistic modeling

생체흡착 현상의 본질을 이해하고 메커니즘에 근거한 모델(mechanistic model)을 개발하는 것은 지적 호기심의 충족뿐만 아니라 생체흡착기술의 실용화를 위한 필수적인 일이다. 일반적으로 생체흡착 성능은 경험적 모델(예, Langmuir 모델 또는 Freundlich 모델)을 사용하여 정량화 되어 왔다. 그러나 이와 같은 경험 모델은 생체흡착 성능에 영향을 미치는 수소이온, 경쟁이온,

이온강도 등의 효과를 예측할 수 없다. 따라서 최근 생체흡착 연구는 많은 부분이 mechanistic model 개발에 집중되고 있다. 그 결과 pH에 대한 영향은 화학평형이론, 표면 착물화 이론, 또는 Donnan 이론을 바탕으로 성공적으로 모델링 되었다. 하지만 다중 중금속계에서의 생체흡착소재의 거동에 대한 연구는 미진한 상태이다.

## 참고문헌

1. M.S. Chiou, H.Y. Li, 2003. Adsorption behavior of reactive dye in aqueous solution on chemical cross-linked chitosan beads, *Chemosphere* 50, 1095-1105.
2. K.-C. Chen, J.-Y. Wu, C.-C. Huang, Y.-M. Liang, S.C.J. Hwang, 2003. Decolorization of azo dye using PVA-immobilized microorganisms, *J. Biotechnol.* 101, 241-252.
3. B. Volesky, 1990. *Biosorption of Heavy Metals*, CRC Press, Boca Raton, Florida.