

## *Saccharomyces cerevisiae*와 *Aureobasidium pullulans*의 수은 제거 모델

서정호·서명교\*·강신목\*·이국의\*\*·최윤찬\*\*\*·조정구\*\*\*\*·김의용\*\*\*\*\*  
부산대학교 공과대학 화학공학과\*, 부산 동의공업전문대학 \*환경공업과, \*\*화학공업과  
\*\*\*연세대학교 환경공해연구소, \*\*\*\*부산시 보건환경연구원  
\*\*\*\*\*서울시립대학교 공과대학 화학공학과

## Biosorption Model of Mercury by *Saccharomyces Cerevisiae* and *Aureobasidium Pullulans*

Jung Ho Suh, Myung Gyo Suh\*, Shin Mook Kang\*, Kook Eui Lee\*\*,  
Yoon Chan Choi\*\*\*, Jeong Goo Cho\*\*\*\* and Eui Yong Kim\*\*\*\*\*

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Pusan Nat. Univ., Pusan

\*Dept. of Environ. Eng., \*\*Dept of Chem. Eng., Donggeui Technical Junior College, Pusan

\*\*\*Institute for Environ. Research, Yonsei Univ., Seoul

\*\*\*\*Pusan, Institute of Health and Environment

\*\*\*\*\*Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Seoul City Univ., Seoul

### ABSTRACT

A study on the removal of mercury by *Saccharomyces cerevisiae* and *Aureobasidium pullulans* was done, in which the model of adsorption isotherm and adsorption rate was proposed. The adsorption isotherm of mercury by *S. cerevisiae* was accorded with Langmuir model but *A. pullulans* was followed to Freundlich model. The amount of mercury removed by *A. pullulans* was higher than that of *S. cerevisiae*, but the adsorption rate of mercury by *A. pullulans* was slower than that of *S. cerevisiae*. In a rapid adsorption process, therefore, it is more useful to use *S. cerevisiae* as a biosorbent.

**Keywords** : Mercury, Biosorption model, *Saccharomyces cerevisiae*, *Aureobasidium pullulans*

### I. 서 론

하천이나 강으로 배출되는 일반하수, 산업폐수, 각종 폐기물의 매립 및 농약살포 등의 다양한 오염물질의 배출로 인해 지구 환경이 파괴되고 있을 뿐만 아니라 인류의 건강까지도 위협당하고 있다. 특히 생산활동의 과정에서 배출되는 산업폐수는 유해 중금속을 다량 함유하고 있어 적절한 처리없이 배출될 경우 생태계의 먹이사슬에 의한 농축효과(biomagnification)로 인해 그 피해가 급격히 확산될 수 있으므로 중금속의 제거와 회수는 인류의 미래를 대비한 매우 중요한 과제로 많은 관심과 연구가 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup>

중금속 특히 수은은 1956년 이후 수년간 일본 미

나마타 지역에서 어패류에 농축된 methylmercury에 중독되어 656명이 사망한 미나마타병으로 유명하며, 온도계, 기압계, 형광등, 전지 등 우리 생활과 밀접히 관련되어 있으나 이러한 물건들을 사용하는 대부분의 사람들은 거의 주의를 기울이지 않고 있다. 현재 배출되고 있는 수은은 대부분 액체상이며 이것을 처리하는데 가열증발법, 습식산화 흡수법, 건식 흡착법, 킬레이트 수지법 등 다양한 기술이 이용되고 있으나, 그 처리공정이 대단히 복잡하거나 이차오염이 발생하며 경제적으로 비싼 단점이 있다.

최근 이러한 문제점을 해결하고자 용액중의 수은을 제거하는데 미생물흡착(biosorption) 공정이 적용되고 있다.<sup>3,4)</sup> 미생물흡착이란 살아있는 미생물 또는 죽은 미생물을 이용하여 용액중의 중금속과 방사

성 물질 등을 세포벽, 세포막, 세포질 및 세포외 고분자물질 등에 흡착 또는 축적시키는 것을 말한다.<sup>3)</sup> Yeast, bacteria, fungi 및 algae와 같은 미생물이 중금속을 잘 제거할 수 있다는 것은 오래전부터 보고 되어 왔다.<sup>4,5)</sup> 그 이유는 다당류, 단백질 및 지방질로 구성된 미생물 세포벽에 존재하는 carboxylate, hydroxyl, sulphate, phosphate 및 amino 리간드에 중금속이 잘 흡착될 수 있기 때문이다. 또한 이러한 미생물 흡착제로는 발효공정이나 폐수처리장에서 발생하는 폐 biomass를 이용하기 때문에 손쉽게 구할 수 있고, 가격이 저렴하며, 폐자원을 가공 처리없이 그대로 이용할 수 있어 경제적이며, 미생물의 종류에 따라 특정 중금속을 선택적으로 흡착하는 성질을 가지고 있어 산업폐수 내 함유된 독성 중금속의 처리 및 고가의 중금속 회수에도 사용 가능하다.

본 연구는 용액중에 존재하는 독성 중금속인 수은을 *Saccharomyces cerevisiae*와 *Aureobasidium pullulans*를 이용하여 제거할 때 두 미생물에 의한 수은의 흡착동온모델과 흡착속도모델에 대해 고찰하였다.

## II. 실험 및 방법

### 1. 미생물 및 중금속

본 연구에 사용된 미생물은 효모인 *Saccharomyces cerevisiae* KCTC 1199와 불완전균류인 *Aureobasidium pullulans* KFCC 10245이다.

두 미생물의 성장배지를 Table 1에 나타내었으며, 300 ml 용량의 마개달린 플라스크에 배양액 부피를 100 ml로 하여 균체를 1.5 ml 접종시킨후 shaking incubator에서 교반속도를 150 rpm으로 하고 30°C를 유지시키면서 48시간 배양하였다. 진탕배양 완료

**Table 1.** Compositions of growth medium for *S. cerevisiae* and *A. pullulans*

Composition	(unit : g/l)	
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	<i>Aureobasidium pullulans</i>
Glucose	2.5	
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>		5
NH <sub>4</sub> Cl	0.33	
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.03	2
yeast extract	2	20
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.01	
NaNO <sub>3</sub>		15

후 3000 rpm에서 15분 동안 원심분리시키고 증류수로 세척하는 과정을 세 번 반복하여 균체를 회수하였다. 회수된 균체는 흡착 실험에 사용되기 전까지 4°C에서 냉장보관시켰다.

본 실험에 사용된 수은은 Hg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O로 3차 증류수에 적정농도로 용해시켜 사용하였다.

### 2. 흡착 실험

중금속 흡착실험은 300 ml Erlenmeyer flask에 Hg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O의 표준용액을 증류수에 희석시켜 원하는 농도의 두배로 조절된 수은 용액과 균체 용액을 1:1로 섞은 후 shaking incubator에서 30°C, 150 rpm으로 실시하였다. 일정한 시간이 지난 다음 약 1.8 ml의 샘플을 채취하여 원심분리한 후 상등액을 희석하여 잔류 수은 농도를 atomic absorption spectrophotometer(Perkin Elmer model 3300)로 측정하였다. 균체건조부게는 균체 용액의 optical density를 측정하여 구하였으며, 구해진 잔류 수은 농도와 초기 수은 농도의 차이를 균체건조부게로 나누어 흡착된 수은의 양을 계산하였다.

### 3. 흡착속도 실험

수은의 초기 농도를 40-200 mg/l로 바꾸어 가며 각 중금속 농도에서 일정시간(10 min) 동안 흡착된 수은의 양을 구하여 초기속도법으로<sup>10)</sup> 흡착속도( $r_{ad}$ )를 구한 다음 식(6)의 기울기와 절편으로 부터 최대 흡착속도와 흡착속도상수를 구하였다.

## III. 결과 및 고찰

*S. cerevisiae*와 *A. pullulans*를 이용하여 용액중에 존재하는 수은을 제거할 때 시간에 따른 제거량의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1에서 보면 *A. pullulans*가 *S. cerevisiae* 보다 수은의 제거량은 높았으나 평형에 도달하는 시간은 오히려 *A. pullulans*가 오래 소요됨을 알 수 있었다. 이것은 수은을 결합할 수 있는 자리(site)는 *A. pullulans*가 많지만 결합의 속도는 느리다는 것을 나타내어 준다.

고체-액체계간의 흡착이 평형상태에 도달하게 되었을 때, 용액 중에 남아있는 용질의 농도(C)와 흡착제 단위질량당 흡착된 용질의 양(X/M)으로 표시한 것을 흡착동온식이라 정의하며<sup>11)</sup>, 미생물 흡착공정에서 사용되는 흡착평형모델도 다른 흡착공정에서 일반적으로 사용되는 Langmuir 모델 또는

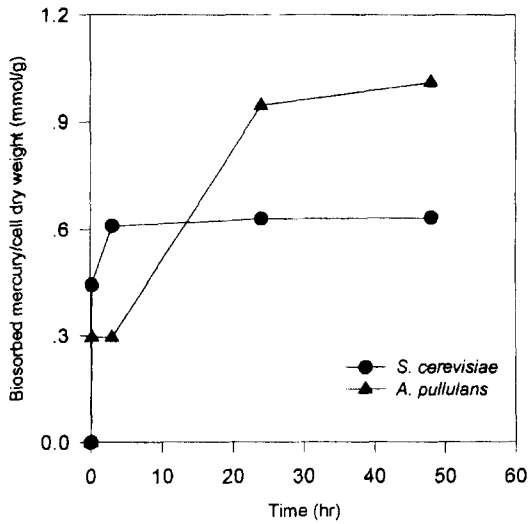


Fig. 1. Biosorption of mercury in its pure solution by *S. cerevisiae* and *A. pullulans*. Initial concentration of each component was 1 mmol/l and cell dry weight was about 0.9 g/l.

Freundlich 모델을 많이 따른다고 알려져 있다.”

Langmuir 모델은 다음식으로 표현된다.

$$q_e = \frac{b C_e q_{max}}{1 + b C_e} \quad (1)$$

여기서  $q_e$ 는 평형상태에서 미생물의 흡착량,  $q_{max}$ 는 미생물에 의한 최대흡착량,  $C_e$ 는 용액중의 평형농도,  $b$ 는 흡착상수이다. 이 식을 선형화하기 위해 역수를 취하면 아래식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max} b C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (2)$$

Freundlich 등온모델은 물리흡착을 나타내는 것으로 다분자층을 형성하며, 비분흡착열이 표면 덮힘 정도에 따라 지수적으로 감소한다는 가정에서 시작하는데 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$q_e = k C_e^{1/n} \quad (3)$$

여기서  $k$ 와  $1/n$ 은 상수이며 (3)식의 양변에 로그를 취하여 다음과 같이 선형화할 수 있다.

$$\ln q_e = \ln k + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4)$$

Langmuir 흡착모델은 흡착제 표면에 용질분자가

단일층으로 포화되고, 표면에 흡착된 용질은 이동이 없다는 기본적인 가정하에 세워진 것이며, 화학흡착에 많이 적용되며, 이에 비해 Freundlich 흡착모델은 표면에너지가 일정하지 않은 경우로 다분자층으로 흡착되며, 물리흡착에 많이 적용된다.

흡착등온모델은 표면의 특성과 흡착제와의 친화성을 나타낼 수 있는 상수로서 표현된다. Langmuir 흡착등온모델에서  $q_{max}$ 는 이론적인 최대 흡착량을 나타내며  $b$ 는 흡착으로 인한 자유도 감소와 에너지 상태의 차이를 반영하는 평형상수로서 흡착이 일어나는 정도를 나타낸다. 또한 Freundlich 모델에서  $1/n$  값이 작아지면 친화도가 더 낮아진다는 것을 의미한다.

두 종류의 미생물을 사용하여 수은을 흡착시킬 때 잘 적용될 수 있는 흡착등온모델을 찾기 위하여 Fig. 2와 3에 수은에 대하여 Langmuir와 Freundlich 두 흡착등온모델을 적용한 결과를 나타내었으며 여기서 구한 상수들을 Table 2에 나타내었다.

Table 2에서 *S. cerevisiae*는 Langmuir 모델에 *A.*

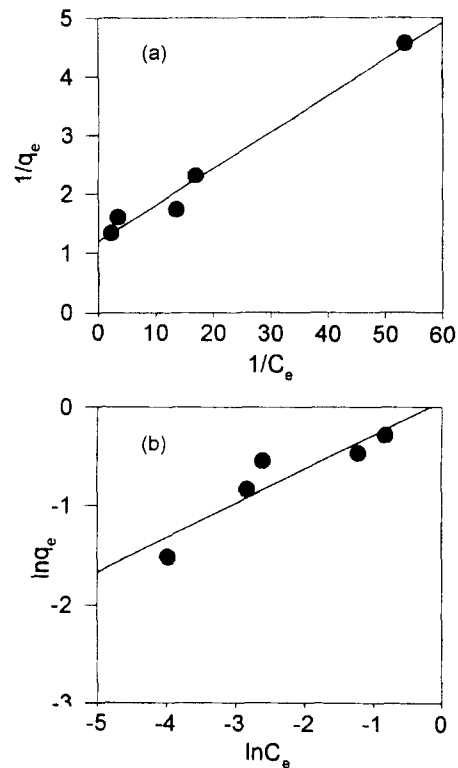


Fig. 2. The linear form of Langmuir and Freundlich equilibrium isotherm of mercury for *S. cerevisiae* [(a) Langmuir, (b) Freundlich].

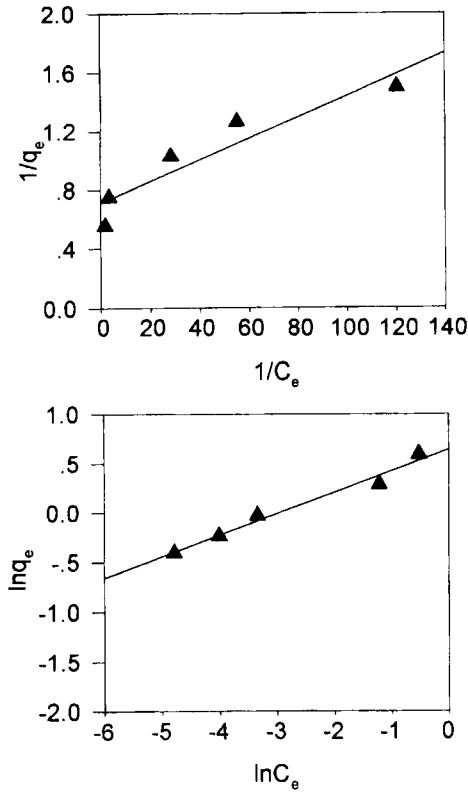


Fig. 3. The linear form of Langmuir and Freundlich equilibrium isotherm of mercury for *A. pullulans* [(a) Langmuir, (b) Freundlich].

*pullulans*는 Freundlich 모델에 잘 적용된다는 것을 알 수 있었다. 이렇게 적용되는 모델이 다른 것은 흡착 특성이 다르다는 것을 의미하므로 동일한 중금속이라도 흡착제로 사용되는 미생물의 종에 따라 흡착 특성이 달라진다는 것을 알 수 있었다. Fig. 4는 *S. cerevisiae*와 *A. pullulans*를 이용하여 수은을 제거할 때 흡착등온 실험값과 선택된 적절한 모델에서 구한

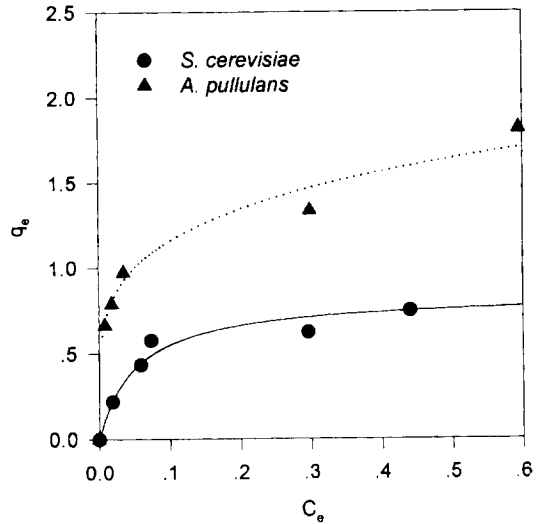


Fig. 4. The equilibrium isotherm of mercury by *S. cerevisiae* and *A. pullulans*.

수식의 결과를 나타낸 것이다. 제안된 모델에 잘 적용되었으며 최대 제거량은 *A. pullulans*가 *S. cerevisiae* 보다 더 높음을 알 수 있었다.

흡착등온모델은 중금속과 미생물에 따라 흡착평형에 도달했을 때의 제거 가능한 최대 흡착량과 중금속에 대한 친화도는 제공하지만, 흡착과정을 공정에서 적용하고자 할 경우 장치나 운영비에 직접적인 영향을 미치는 접촉시간 및 반응기의 크기를 결정하는데 필요한 단위 시간 당 단위 미생물당 중금속 제거량의 자료를 제공해 주지는 못한다. 그러므로 미생물 흡착공정에 사용될 흡착제로 적절한 미생물을 선택할 때 선택 기준으로 흡착속도를 측정하는 것은 필수적인 자료가 된다. 본 연구에서는 *S. cerevisiae*와 *A. pullulans*에 의한 수은의 제거 실험 결과 흡착속도가 낮은 농도에서는 급격히 증가하다가 높은 농도에서는 일정하게 나타나는 것으로 보아 일반형을 다음과 같이 나타내었다.

Table 2. The constants of langmuir and freundlich model

Model type		<i>S. cerevisiae</i>	<i>A. pullulans</i>
Langmuir	$q_{max}$	0.8365	1.3996
	$b$	19.2196	98.2792
	$r^2$	0.9800	0.8754
Freundlich	$k$	1.0569	1.9054
	$1/n$	0.3444	0.2167
	$r^2$	0.8392	0.9760

$$r_{ad} = \frac{r_{max} C_0}{\alpha + C_0} \tag{5}$$

위 식은 선형화시켜 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며 이 식의 기울기와 절편으로 최대흡착속도( $r_{max}$ )와 흡착속도상수( $\alpha$ )를 구한다.

$$\frac{1}{r_{ad}} = \frac{1}{r_{max}} + \frac{\alpha}{r_{max} C_0} \tag{6}$$

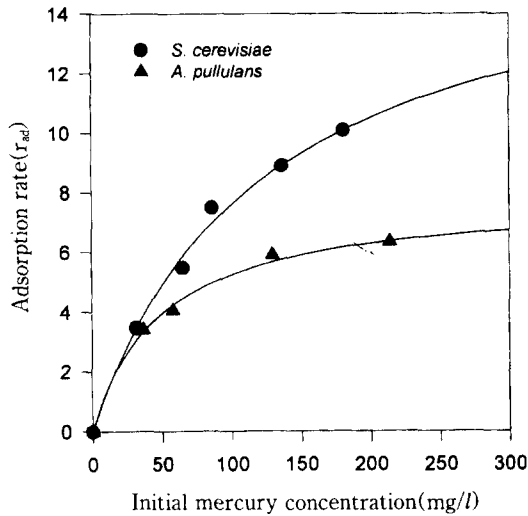


Fig. 5. The adsorption rate of mercury by *S. cerevisiae*.

Fig. 5는 *S. cerevisiae*와 *A. pullulans*의 수은 흡착 속도를 나타낸 것이다. 두 미생물 다 본 연구에서 제안한 속도식에 잘 일치함을 알 수 있었다. *S. cerevisiae*와 *A. pullulans*의 흡착속도에서 최대흡착속도 ( $r_{max}$ : mmol/g min)는 각각 0.085, 0.039 이었고, 최대흡착속도의 1/2일때의 수은용액의 초기농도는 각각 0.606, 0.2454 mmol/l 이었다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$S. cerevisiae \quad r_{ad} = \frac{0.085 C_0}{0.616 + C_0} \quad r^2 = 0.9895$$

$$A. pullulans \quad r_{ad} = \frac{0.039 C_0}{0.2454 + C_0} \quad r^2 = 0.9826$$

*S. cerevisiae*와 *A. pullulans*를 수은의 흡착제로써 흡착등온모델과 흡착속도모델을 사용하여 비교해 보면, 최대흡착량은 *A. pullulans*가 더 많았지만 흡착속도는 *S. cerevisiae*가 더 빠름을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 1의 결과에서와 같이 초기의 흡착은 *S. cerevisiae*가 훨씬 빨리 일어나지만, 시간이 진행되어 감에 따라 *A. pullulans*는 계속 흡착이 진행되어 최종 흡착량은 훨씬 더 많아지는 것으로 볼 수 있으므로, 실제 공정에서 빠른 수은의 제거를 요구할때는 *S. cerevisiae*를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

## IV. 결 론

발효산업에 많이 사용되는 *S. cerevisiae*와 *A. pullulans*를 이용하여 독성 중금속인 수은을 제거하는 연구를 수행하여 두 미생물에 의한 수은의 흡착등온 모델과 흡착속도모델을 제시하였다. 두 미생물을 이용하여 수은을 제거할 때 *S. cerevisiae*는 Langmuir 모델에 *A. pullulans*는 Freundlich에 잘 적용되었다. 본 실험의 범위에서 최대 수은 흡착량은 *A. pullulans*가 더 많았으나 단위 시간당 제거량을 나타내는 흡착속도는 *S. cerevisiae*가 *A. pullulans* 보다 더 빨라 빠른 흡착을 요구하는 공정에서는 *S. cerevisiae*가 더 유리할 것으로 판단되었다. 따라서 흡착에 소요되는 시간을 감안하여 적절한 미생물 흡착제를 선택하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 1) EPA/600/S2-91/041, Recovery of metals from sludge and wastewaters, Sept., 1991.
- 2) 이종은: 천연고령토의 폐수 중 납 흡착에 관한 연구, 한국환경위생학회지, 21(3), 77-86, 1995.
- 3) Holger, H., Ralf, E. and Rolf-Kieter, W.: Accumulation of mercury and methylmercury by microbial biofilms, Water Research, 27(2), 237-242, 1993.
- 4) Fischer, R.G., Rapsomanikis, S. and Andreae, M.O.: Bioaccumulation of methylmercury and transformation of inorganic mercury by macrofungi, Environ. Sci. Technol., 29(4), 993-999, 1995.
- 5) Gadd, G.M.: In Biotechnology, Vol. 6b: Special Microbial Processes, (ed) H.J. Rehm, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 401-433, 1988.
- 6) Volesky, B.: Biosorption of Heavy Metals, CRC Press, 21, 1990.
- 7) Rudd, T., Sterritt, T.M. and Lester, J.N.: Complexation of heavy metals by extracellular polymers in the activated sludge process, WPCF, 56(12), 1260-1268, 1984.
- 8) Pighi, L., Pumpel, T. and Schinner, F.: Selective accumulation of silver by fungi, Biotech. Lett., 11(4), 275-280, 1989.
- 9) Volesky, B., May, H. and Holan, Z. R.: Cadmium biosorption by *Saccharomyces cerevisiae*, Biotechnol. Bioeng., 41, 826-829, 1993.
- 10) Fogler, H.S.: Elements of chemical reaction engineering, 2nd ed., PTR prentice Hall, 205-207, 1992.