

생체흡착, 탈착 및 회화를 이용한 시안 용액으로부터 금의 회수

배민아, 객인섭,[†] 원성욱, 윤영상*

전북대학교 반도체·화학공학부,
516-765 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

[†]전북대학교 BIN융합공학과
516-765 전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

(2010년 3월 6일 접수; 2010년 5월 28일 수정본 접수; 2010년 6월 1일 채택)

Gold Recovery from Cyanide Solution through Biosorption, Desorption and Incineration with Waste Biomass of *Corynebacterium glutamicum* as Biosorbent

Min A Bae, In-Seob Kwak,[†] Sung Wook Won, and Yeoung-Sang Yun*

School of Semiconductor and Chemical Engineering, Chonbuk National University
664-14 Deokjin-1-dong, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea

[†]Department of BIN Fusion Technology, Chonbuk National University
664-14 Deokjin-1-dong, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received for review March 6, 2010; Revision received May 28, 2010; Accepted June 1, 2010)

요 약

본 연구에서는 Au(I) 이온을 함유한 시안 용액으로부터 다른 형태의 금을 회수하기 위하여 생체흡착 후 탈착하는 방법과 생체흡착 후 회화하는 방법을 제안하였다. 생체흡착제로는 아미노산 발효 공정에서 발생하는 균체 폐기물(*Corynebacterium glutamicum*)을 사용하였다. 바이오매스의 흡착 특성을 알아 보기 위하여 pH edge 실험을 수행하였으며, 그 결과 흡착성능은 pH 2-3 부근에서 우수한 결과를 보였다. 또한, 등온 흡착 실험 결과를 Langmuir 모델에 적용한 결과 Au(I)의 최대 흡착량은 pH 2.5에서 35.15 mg/g이었다. 흡착 속도론 실험을 통해 흡착 평형은 60분 이내의 짧은 시간 내에 이루어지는 것을 확인하였다. Au(I)을 회수하기 위하여 바이오매스에 흡착된 Au(I)을 탈이온수를 이용하여 탈착을 시켰으며, 탈착효율은 91%로 평가되었다. 이 결과는 바이오매스를 이용하여 흡착과 탈착을 통해 1가 금을 효과적으로 회수할 수 있음을 보여준다. 영가 형태로 회수하기 위하여, 금을 흡착하고 있는 생체흡착체를 회화하여 환원된 형태의 금을 성공적으로 회수하였으며, 회분 중 금의 순도는 85% 이상이었다. 따라서 본 연구에서 제시한 생체흡착 후 탈착(1가 형태) 공정과 생체흡착 후 회화(영가 형태) 공정은 회수하고자 하는 금의 산화수에 따라 선택하여 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 생체흡착, 금, 회수, 탈착, 회화

Abstract : In this study, we propose two methods able to recover different type of gold from gold-cyanide solutions: biosorption and desorption process for mono-valent gold recovery and biosorption and incineration process for zero-valent gold recovery. The waste bacterial biomass of *Corynebacterium glutamicum* generated from amino acid fermentation industry was used as a biosorbent. The pH edge experiments indicated that the optimal pH range was pH 2 - 3. From isothermal experiment and its fitting with Langmuir equation, the maximum uptake capacity of Au(I) at pH 2.5 were determined to be 35.15 mg/g. Kinetic tests evidenced that the process is very fast so that biosorption equilibrium was completed within the 60 min. To recover Au(I), the gold

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: ysyun@jbnu.ac.kr

ions were able to be successfully eluted from the Au-loaded biosorbent by changing the pH to pH 7 and the desorption efficiency was 91%. This indicates that the combined process of biosorption and desorption would be effective for the recovery of Au(I). In order to recover zero-valent gold, the Au-loaded biosorbents were incinerated. The content of zero-valent gold in the incineration ash was as high as 85%. Therefore, we claim on the basis of the results that two suggested combined processes could be useful to recover gold from cyanide solutions and chosen according to the type of gold to be recovered.

Keywords: Biosorption, Gold, Recovery, Desorption, Incineration

1. 서 론

금(gold), 은(silver), 백금(platinum), 팔라듐(palladium), 로듐(rhodium)과 같은 유가금속(precious metal)은 독특한 화학적, 물리적, 전기적 특성으로 인해 화학촉매, 센서, 전자장비 등 다양한 산업분야에서 이용되고 있으며 이들의 사용량도 증가하는 추세에 있다[1]. 하지만 우리나라의 경우, 천연 부존 자원이 부족하여 유가금속 관련 산업원료들은 거의 대부분 수입에 의존하고 있는 상황이기 때문에 이런 유가금속 자원을 효과적으로 회수할 수 있는 기술이 절실히 필요하다.

과거에는 보석세공산업, 치과재료산업 그리고 제조공정에서 발생하는 귀금속 함량이 높은 폐기물을 대상으로 유가 금속의 회수가 이루어 졌으나 최근에는 석유화학 폐촉매, 전자 스크랩 및 폐전자기기 등과 같이 각각에 들어있는 유가금속의 양은 적으나 발생량이 많은 폐기물로 확대되고 있다.

폐기물로부터 유가 금속을 회수하는 공정은 크게 선별, 추출, 분리정제 등으로 구성되며 기계적 분리기술과 습식분리기술, 고온분리기술 등의 기술이 많이 이용되고 있다. 습식분리기술은 적절한 추출액을 이용하여 선택적으로 용해시킨 후 여러 단계의 정련과정을 통해 순도 높은 금속을 얻어내는 방법이며, 고온분리기술은 높은 열을 가해 금속들간의 용융점 차이를 이용하여 분리하는 기술이다. 하지만 이 두 공정은 많은 양의 에너지가 요구되고, 2차 폐수의 발생, 복잡한 정제과정, 긴 처리시간 등으로 경제성이 떨어지는 단점을 가지고 있다[2-4].

반면, 생체흡착기술은 사멸된 미생물의 표면에 존재하는 작용기와 금속 이온 간의 물리적 결합을 이용하여 대상물질을 제거하는 기술로서 최근 많은 연구가 진행되고 있다[5-7]. 생체흡착제의 원료로 사용되는 바이오매스는 곰팡이[8], 박테리아[9], 조류[10,11], 효모[12], 등이 있으며 발효폐기물, 농업부산물도 이용되고 있다. 생체흡착을 이용한 금속제거 기술은 산업현장에서 대량으로 발생하고 있는 유기성 폐기물을 재활용할 수 있다는 장점이 있으며, 물리적 흡착을 바탕으로 금속을 제거하기 때문에 공정이 간단하다. 뿐만 아니라, 저농도의 금속을 함유한 폐액에서도 금속을 흡착할 수 있고, 흡착과 탈착의 반복적인 사용을 통해 재사용이 가능하다는 장점도 가지고 있다[13, 14].

따라서 본 연구에서는 발효폐기물인 *Corynebacterium glutamicum* 바이오매스를 이용하여 시안 용액에 포함되어 있는 Au(I) 이온에 대한 생체흡착 성능을 평가하고 바이오매스에

흡착된 금을 회수하기 위한 2가지 방법 즉, 생체흡착 후 탈착하는 방법과 생체흡착 후 회화하는 방법을 비교 평가하고자 한다.

2. 실험

2.1. 실험재료

본 실험에서 사용된 바이오매스는 L-알기닌 생산 후에 대량으로 발생하는 발효부산물로서 대부분이 *C. glutamicum* 균체로 이루어져 있다. 이 발효폐기물은 건조된 분말상태로 (주)대상(군산공장)에서 제공받았으며 테시케이터 안에서 보관하였다. Au(I) 수용액은 Kojima Chemicals Co. Ltd. (Japan)에서 구매된 potassium dicyanoaurate(I)을 이용하여 제조하였다. 그 외 다른 시약은 분석용 등급을 사용하였다.

2.2. 접촉시간의 영향

흡착 평형에 도달하는 시간을 확인하기 위하여 접촉시간에 따라 흡착 성능을 평가하였다. 실험은 250 mL 삼각플라스크에 70 mg/L의 Au(I) 수용액 90 mL과 바이오매스 1 g/L를 반응시키는 시점을 시작으로 일정한 시간 간격으로 샘플링을 하여 접촉시간에 따른 바이오매스의 Au(I) 흡착 성능을 관찰하였다. 실험이 진행되는 동안 현탁액의 pH는 1N HCl과 1N NaOH을 이용하여 2.5로 일정하게 유지시켜 주었다. 각 샘플은 원심분리 후 증류수로 적절히 희석하여 Au(I)의 농도를 분석하였다.

2.3. pH의 영향

생체흡착이 이루어질 때 pH 조건에 따른 흡착 성능 변화를 알아보기 위하여 Au(I) 흡착량과 최종 pH의 평형 관계를 알아보는 실험을 수행하였다. 실험은 여러 개의 50 mL 튜브에 80 mg/L의 Au(I) 수용액 30mL과 바이오매스 1 g/L씩을 각 튜브에 넣고 1N NaOH 또는 1N HCl를 이용하여 pH를 1에서 7까지 다르게 조정하였다. pH가 조정된 튜브는 24시간 동안 160 rpm, 25±2°C에서 교반시켰다. 흡착이 평형에 도달한 후 최종 pH를 측정 하였으며, 액상에 남아 있는 Au(I)의 농도는 원심분리 후 Inductively Coupled Plasma(ICP-7500, Shimadzu, Japan)를 이용하여 측정하였다. 측정된 값을 이용하여 바이오매스에 흡착된 Au(I)의 양(q, mg/g)을 계산하였으며 그 계산식은 식 (1)과 같다.

Table 1. Biosorption kinetic constants for Au(I) biosorption

Kinetic models	Constants	<i>C. glutamicum</i>
Pseudo-first-order	q_e (mg/g) (exp.)	23.96
	q_i (mg/g)	22.93 (0.327)
	k_1 (L/min)	1.41 (0.168)
	R_2	0.986
	ε (%)	0.91
Pseudo-second-order	q_2 (mg/g)	23.35 (0.27)
	k_2 (g/mg min)	0.13 (0.021)
	R_2	0.992
	ε (%)	0.68

$$q = \frac{V_0 C_0 - V_f C_f}{M} \quad (1)$$

여기서 V_0 와 V_f 는 각각 초기 수용액의 부피(L)와 최종 수용액의 부피(L)를 나타내며, C_0 와 C_f 는 각각 초기 금속의 농도(mg/L)와 최종 금속의 농도(mg/L)이다. M 은 바이오매스의 질량(g)이다.

2.4. 등온흡착 실험

바이오매스의 흡착 성능을 알아보기 위해 수행된 등온흡착(isotherm) 실험은 온도와 pH를 일정하게 유지시키고 다양한 Au(I) 농도에서 Au(I)의 흡착량을 측정하는 실험으로 실험은 다음과 같이 진행되었다. 여러 개의 50 mL 튜브에 바이오매스 1 g/L와 Au(I)의 초기 농도를 5 mg/L에서 250 mg/L로 달린 Au(I) 수용액을 30 mL씩을 넣고 각 튜브의 pH를 2.5로 일정하게 하였다. 각 튜브는 24시간 동안 160 rpm, 25±2°C에서 교반시켰다. 흡착 실험이 진행되는 동안 1N NaOH 또는 1N HCl를 이용하여 수용액의 pH를 일정하게 유지시켰으며, 흡착 평형이 이루어진 후 바이오매스에 흡착된 Au(I)의 양은 pH의 영향을 알아보는 실험에서와 같은 방법으로 식 (1)을 사용하여 계산하였다.

2.5. 탈착 실험

탈착 효율을 평가하기 위하여, Au(I)을 흡착한 바이오매스를 3000 rpm에서 원심분리시킨 후 상등액을 제거하고 바이오매스만을 분리하였다. 분리시킨 바이오매스 0.15 g은 증류수와 왕수가 각각 30 mL씩 들어 있는 튜브에 넣고, 흡착 실험과 동일한 조건에서 교반시켰다. 이때 증류수를 넣은 튜브는 pH를 7로 조정하였다. 바이오매스로부터 탈착된 Au(I)의 농도는 ICP를 이용하여 분석하였으며 탈착 효율(E_D)은 식 (2)를 사용하여 계산하였다. 탈착 실험은 2회 진행되었으며 결과는 평균 값으로 나타내었다.

$$E_D (\%) = \frac{W_f (\text{mg})}{W_0 (\text{mg})} \times 100 \quad (2)$$

여기서 W_0 와 W_f 는 각각 바이오매스에 흡착된 금속의 양과 탈착된 금속의 양을 의미한다.

2.6. 회화 실험

바이오매스에 흡착된 1가 형태의 금을 0가 형태의 금으로의 회수 가능성과 회수된 금의 순도를 확인하기 위하여, 다음과 같은 실험을 수행하였다. 1가 형태의 금을 흡착한 바이오매스의 회화는 탈착 실험에서와 같은 방법으로 바이오매스를 분리한 후 Au(I)을 흡착한 바이오매스를 60°C에서 24시간 동안 건조시킨 후 600°C로 설정된 전기로에서 2시간 동안 회화시켰다. 회화를 통해 회수한 회분 내 금의 함량을 알아보기 위하여 회분을 1% NaCN 용액 10 mL에 충분히 녹여준 후 상등액을 취하여 ICP로 분석하였다. 회분 내 금의 순도는 식 (3)에 따라 계산하였다. 회화 실험은 동일한 방법으로 2회 진행되었으며 결과는 평균 값으로 나타내었다.

$$P (\%) = \frac{W_m (\text{mg})}{W_a (\text{mg})} \times 100 \quad (3)$$

여기서 P 는 회분 내 금속의 순도(%)를 나타내며 W_a 와 W_m 는 각각 회화 후 얻은 회분의 양과 회분 내 금속의 양을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 접촉시간의 영향

흡착속도는 흡착효율을 평가하는데 있어 중요한 특성 중의 하나로 흡착과정의 메커니즘 규명과 흡착설비 설계에 중요한 정보를 제공한다[15]. 시간에 따라 바이오매스에 Au(I)이 흡착되는 형태는 Figure 1과 같다. 흡착은 반응 초기에 빠르게 진행되어 5분 이내에 흡착률이 90% 이상이었으며, 흡착평형에 도달하는데 소요된 시간은 60분 이내였다.

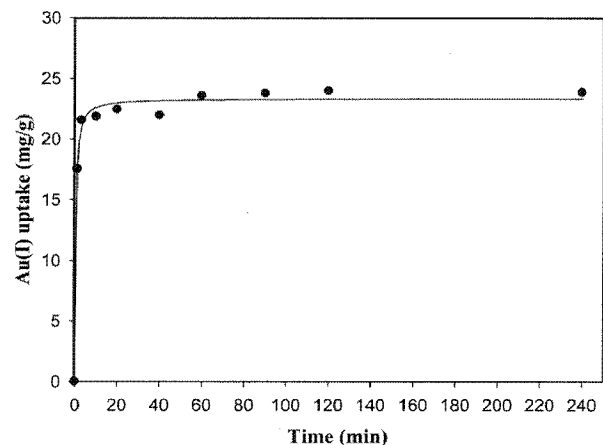


Figure 1. Au(I) biosorption kinetics at pH 2.5. The curve is the predicted by the pseudo-second-order model.

실험에서 얻은 결과 데이터는 다양한 흡착속도 모델들 중 일반적으로 많이 사용되는 Pseudo-first-order와 pseudo-second-order 모델을 적용하여 묘사하였다. 두 모델의 모델식은 식 (4)와 식 (5)에 나타내었다[16,17].

$$\text{Pseudo-first-order : } q_t = q_1(1 - \exp(-k_1 t)) \quad (4)$$

$$\text{Pseudo-second-order : } q_t = \frac{q_2^2 k_2 t}{1 + q_2 k_2 t} \quad (5)$$

여기서 q_1 과 q_2 는 금속의 평형 흡착량(mg/g)이고, q_t 는 시간 t 에 이르는 시간동안 흡착된 금속의 양(mg/g)이다. k_1 과 k_2 는 pseudo-first-order와 pseudo-second-order 모델의 각각의 속도 상수를 의미한다.

실제 결과 값과 모델식에 의해 계산된 값 사이의 오차 범위는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\varepsilon(\%) = \frac{\sum_{i=1}^N |q_{\text{exp}, i} - q_{\text{cal}, i}|}{N} \times 100 \quad (6)$$

여기서 N 은 측정 횟수를 나타내며, q_{exp} 와 q_{cal} 은 각각 실험과 계산을 통해 얻은 금속의 흡착량을 의미한다. 각 모델의 속도 상수와 평형 흡착량, 상관관계 계수, 오차 범위는 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 알 수 있듯이, pseudo-second-order 모델의 R^2 값은 0.992로 0.986인 pseudo-first-order 보다 높게 평가되었으며 오차 범위는 0.68%로 낮게 평가되었다. 이를 통해 바이오매스의 흡착속도 평가 실험을 묘사하는데 pseudo-second-order 모델을 이용하는 것이 더 적합한 것으로 평가되었다.

3.2. pH의 영향

바이오매스의 Au(I) 흡착에 있어 수용액의 pH 영향에 대한 실험결과는 Figure 2에 나타내었다. 바이오매스는 pH 1-2 영역에서는 점차적으로 흡착량이 증가하였으며, pH 2-3 부근에

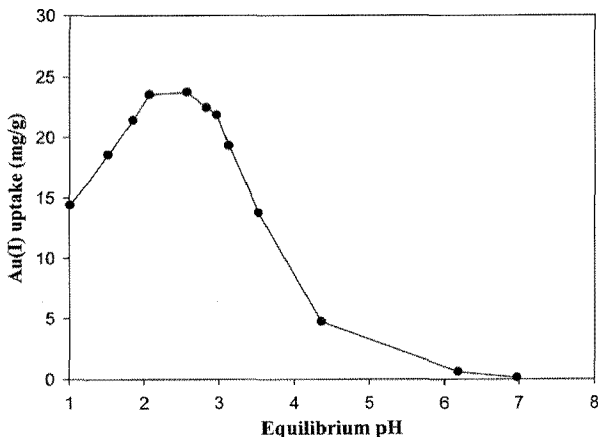


Figure 2. The effect of solution pH on Au(I) biosorption.

서 24 mg/g의 최대흡착량을 보였다. pH 3이상부터는 흡착 성능이 급격히 감소하여 pH 7에서는 Au(I)이 거의 흡착되지 않는 것으로 평가되었다.

pH에 따른 Au(I)의 흡착 성능은 바이오매스의 작용기와 pH의 관계, 바이오매스 작용기와 Au(I)의 관계로부터 이해할 수 있다. 대부분의 바이오매스는 대표적으로 아민 그룹, 카르복실 그룹, 인산 그룹 등의 작용기를 가지고 있는 것으로 알려져 있다[18-20]. 본 연구에서 흡착제로 사용된 *C. glutamicum* 바이오매스에 아민 그룹, 카르복실 그룹, 인산 그룹 등의 작용기들이 존재하는지 확인하기 위하여 FT-IR 분석을 수행하였다. FT-IR은 원소들의 결합 형태에 따라 흡수하는 파장이 다른 원리를 이용하는 분석법으로 시료 내 원소들의 존재와 존재 형태를 분석하는데 많이 사용된다. Figure 3을 보면 여러 피크가 나타나 있는데 3500-3000, 1538, 1384 cm^{-1} 피크는 아민 그룹을 의미하고 3600-3200, 1652, 1233 cm^{-1} 은 카르복실 그룹을 나타낸다. 인산 그룹은 1157 cm^{-1} (P=O stretching), 1078 cm^{-1} (P-OH stretching) 피크를 통해 확인할 수 있다[21].

수용액 상에서 금은 $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ 의 형태로 음전하를 띠고 있으므로 바이오매스에 양전하를 띠는 작용기가 존재한다면 정전기적 인력에 의해서 결합이 이루어질 수 있다. 아민 그룹의 pKa 값은 8-11로 알려져 있으므로 pH 8 이하에서는 양전하를 띠고 있어 Au(I)와 결합할 수 있다[22]. 하지만 Figure 2를 보면 pH 3부터 흡착량이 급격하게 감소하고 있다. 그 원인은 다음과 같이 설명될 수 있다. 카르복실 그룹과 인산 그룹의 pKa 값은 각각 약 4와 6.1-6.8로 알려져 있다[5,21]. 이는 pH 4 이상에서 카르복실 그룹이 음전하로 존재하게 되며 pH 6 이상에서는 인산 그룹도 음전하로 존재하게 됨을 의미한다. 따라서 pH가 증가할수록 Au(I)과 바이오매스간에 반발력이 증가하게 되고 그에 따라서 흡착량이 감소하게 되어 pH 7 이상에서는 거의 흡착이 이루어지지 않게 되는 것으로 사료된다.

또한 Figure 2를 보면 pH 1-2 사이에서 pH가 감소할수록 흡착량도 감소하는 현상이 나타나고 있다. 이는 Shin-ichi 등 [23]이 보고한 달걀 껍질 막을 이용하여 금 도금 폐액으로부터

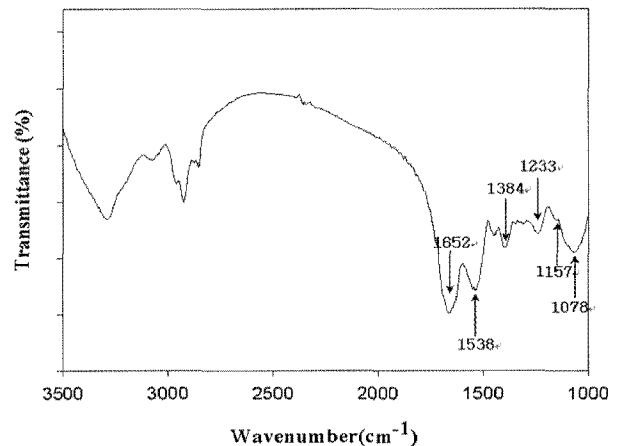


Figure 3. Fourier transform infrared absorption spectra (FT-IR) of the waste *Corynebacterium glutamicum* biomass.

Table 2. Biosorption isotherm constants

Isotherm models	Constants	<i>Corynebacterium glutamicum</i>
Langmuir	q_{max} (mg/g)	35.15 (1.081)
	b (L/mg)	0.024 (0.002)
	R_2	0.995
	ϵ (%)	0.83
Freundlich	K_F (L/g)	3.53 (0.779)
	n	2.45 (0.282)
	R_2	0.957
	ϵ (%)	2.32

금을 흡착 회수할 때 Cl⁻ 이온이 용액 내 많이 존재할수록 흡착량이 줄어드는 결과와 같은 현상으로, pH 조절을 위해 쓰인 HCl의 Cl⁻ 이온이 Au(I)과 경쟁관계를 형성하여 Au(I)과 아민 그룹의 흡착을 방해하여 나타나는 현상으로 판단된다. 낮은 pH일수록 많은 양의 HCl이 첨가되고 그에 따라 용액내 존재하는 Cl⁻ 이온이 증가하게 되어 낮은 흡착 성능을 보이는 것으로 사료된다.

3.3. 생체흡착 등온곡선

생물흡착평형 등온곡선은 흡착 공정을 설계하는데 중요한 요인이다. Langmuir와 Freundlich 모델은 생물흡착평형을 묘사하는데 많이 이용된다. 이들 모델은 흡착현상에 대한 메커니즘을 확인할 수는 없지만 실험데이터로부터 최대 흡착량을 쉽게 예상할 수 있어 흡착성능평가에 많이 사용된다. 바이오매스의 Au(I) 흡착평형 등온곡선은 Figure 4에 나타내었다. Langmuir 모델을 적용한 등온곡선은 Au(I)의 초기농도가 높을수록 남아 있는 Au(I) 농도에 비하여 흡착된 Au(I)의 농도의 비율이 낮아지는 현상을 보이며 오펜한 형태의 L형 곡선을 이루었다[24]. 이는 Au(I)을 흡착할 수 있는 바이오매스의 작용기가 제한되어 있어 흡착량의 한계가 나타나기 때문으로 판단된다.

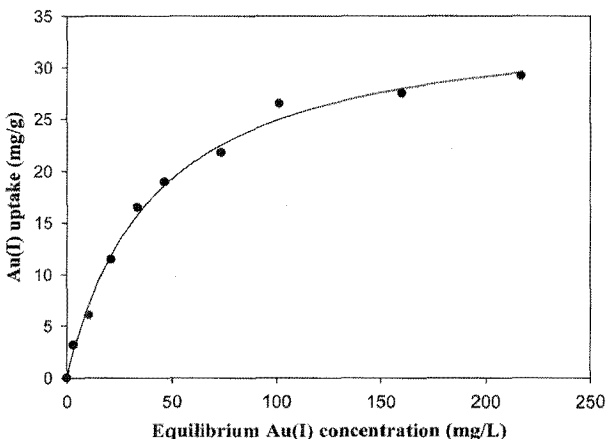


Figure 4. Au(I) biosorption isotherms at pH 2.5 and 25°C. The curves is the predicted by the Langmuir model.

실험 데이터를 이용하여 등온곡선을 묘사하기 위해 사용된 Langmuir 모델과 Freundlich 모델의 모델식은 다음과 같다.

$$\text{Langmuir model : } q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (6)$$

$$\text{Freundlich model : } q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (7)$$

여기서 q_e 는 흡착제에 흡착된 금속의 평형 흡착량이고, C_e 는 용액에 존재하는 금속의 평형 농도이다. q_{max} 는 최대 흡착량을 나타내며 b 은 Langmuir 상수를, K_F 와 n 은 Freundlich 상수를 의미한다.

각 모델의 계산된 매개변수들은 Table 2에 나타내었다. Langmuir 모델과 Freundlich 모델의 R^2 값은 각각 0.995와 0.957으로 Langmuir 모델이 더 높은 신뢰도를 보였다. Langmuir 모델식에 의해 계산된 바이오매스의 Au(I) 최대 흡착량은 pH 2.5 영역에서 35.15 mg/g으로 평가되었다.

3.4. 탈착 실험

본 연구에서 Au(I)을 흡착하기 위해 사용된 *C. glutamicum*은 왕수와 증류수를 이용하여 탈착실험을 진행한 결과 증류수를 이용했을 때 91%의 탈착효율을 보이며 더 효과적으로 탈착이 이루어짐을 Figure 5를 통하여 확인하였다. 이는 pH 영향에 대한 실험에서 확인하였듯이 pH 7에서 바이오매스의 표면에 존재하는 인산 그룹과 카르복실 그룹이 음전하를 띠게 되어 아민 그룹에 물리적으로 결합되어 있는 Au(I)을 탈착시킴으로써 나타나는 결과로 판단된다. 이와 같이 증류수를 이용한 간단한 탈착 공정을 통해 1가 형태의 금을 회수할 수 있다는 점은 *C. glutamicum* 바이오매스의 큰 장점이라고 할 수 있겠다.

3.5. 회화 실험

바이오매스에 흡착된 Au(I)을 1가 형태의 이온으로 회수하는 방법 외에 0가 형태로 회수하기 위해서 Au(I)을 흡착한 바

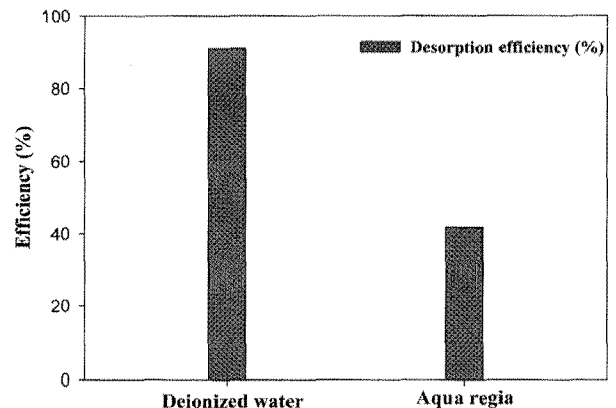


Figure 5. Efficiency of desorption of Au(I) with D.W. at pH 7 and aqua regia.

Table 3. Purity of Au(I) by incineration of gold loaded biomass at 600°C for 2 hr

Gold uptake (mg/g)	Crude Ash Contents (%)	Purity (%)
0	7.89	0
7.02	2.58	27.25
10.23	1.18	86.94

이오매스를 600°C에서 2시간 동안 회화시켰으며, 그 결과는 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 알 수 있듯이 바이오매스에 흡착된 Au(I)의 흡착량이 증가할수록 회화 후 회수된 회분의 양은 줄어들었으며, 회분 내 금의 함량은 증가하였다. 이는 바이오매스 구성성분은 높은 온도에서 산화되는데 이때 Au(I)이 존재하면 Au(I)이 환원되면서 산화를 돕는 것으로 사료된다. 흡착된 Au(I)의 양이 많을수록 회화하는 동안 산화 환원이 활발하게 이루어지며, 더 많은 양의 유기물이 산화되어 제거되기 때문에 회분의 양이 줄어들는 것으로 보인다. 또한 바이오매스의 유기물이 효과적으로 제거 될수록 회분 내 금의 비율이 높아지게 됨으로 Au(I)의 흡착량이 높을수록 더 높은 순도의 금을 회수 할 수 있었으며, 최대 85%이상의 순도를 가지는 금을 회수 할 수 있었다.

4. 결 론

발효폐기물인 *C. glutamicum* 바이오매스를 Au(I)의 생체 흡착제로 이용하여 흡착 및 탈착, 회화 성능을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) FT-IR 분석을 통해 바이오매스 표면의 주요 작용기는 아민 그룹, 카복실 그룹, 인산 그룹임을 알 수 있었으며 pH에 따른 작용기들 전하 형태에 따라 Au(I)의 흡착 성능이 변화하는 것으로 평가되었다.
- 2) 바이오매스의 Au(I) 흡착은 반응 초기에 빠르게 진행되어 5분내에 90% 이상이 흡착되었으며 60분 내에 흡착평형에 도달했다.
- 3) Langmuir 모델에 의해 계산된 바이오매스는 최대흡착량은 pH 2.5에서 35.15 mg/g 이다.
- 4) 바이오매스에 흡착된 Au(I) 이온은 pH 조절만으로 90% 이상 탈착(1가 금)되었으며, 600°C에서 2시간 동안의 회화과정을 통하여 순도 85% 이상의 0가 금으로 회수 되었다.

위의 결과를 통해 발효폐기물인 *C. glutamicum*을 이용한 간단한 흡착, 탈착, 회화 공정은 이온형 및 금속형 유기금속을 친환경적으로 회수하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감 사

본 연구는 한국과학재단의 국가지정연구실사업과 우수연구

센터사업의 연구결과로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Mati, K., Rahmouni, C., Bianchi, D., and Gaillard, F., "Performances and Deactivation of Supported Precious Metal Catalysts in the Oxidation of an Engine Oil Vapour," *Catal. Lett.*, **131**(1-2), 170-178 (2009).
2. Yap, C. Y., and Mohamed, N., "An Electrogenative Process for the Recovery of Gold from Cyanide Solutions," *Chemosphere*, **67**(8), 1502-1510 (2007).
3. Cui, J., and Zhang, L., "Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A Review," *J. Hazard. Mater.*, **158**(2-3), 228-256 (2008).
4. Fleming, C. A., "Hydrometallurgy of Precious Metals Recovery," *Hydrometallurgy*, **30**(1-3), 127-162 (1992).
5. Yun, Y.-S., and Volesky, B., "Modeling of Lithium ion Interference in Cadmium Biosorption," *Environ. Sci. Technol.*, **37**(16), 3601-3608 (2003).
6. Park, D., Yun, Y.-S., Park, J. M., and Volesky, B., "Chromium Biosorption by Thermally Treated Biomass of the Brown Seaweed, *Ecklonia* sp.," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**(26), 8226-8232 (2004).
7. Yun, Y.-S., "Characterization of Functional Groups of Protonated *Sargassum polycystum* Biomass Capable of Binding Protons and Metal Ions," *J. Microbiol. Biotechnol.*, **14**(1), 29-34 (2004).
8. Pakshirajan, K., and Swaminathan, T., "Biosorption of Lead, Copper, and Cadmium by *Phanerochaete chrysosporium* in Ternary Metal Mixtures: Statistical Analysis of Individual and Interaction Effects," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **158**(2), 457-469 (2009).
8. Wang, J., and Chen, C., "Biosorption of Heavy Metals by *Saccharomyces cerevisiae*: A Review," *Biotechnol. Adv.*, **24**(5), 427-451 (2006).
9. Sakaguchi, T., Nakajima, A., and Horikoshi, T., "Studies on the Accumulation of Heavy Metal Elements in Biological Systems: Accumulation of Molybdenum by Green Microalgae," *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **12**(2), 84-89 (1981).
10. Ting, Y. P., Teo, W. K., and Soh, C. Y., "Gold Uptake by *Chlorella vulgaris*," *J. Appl. Phycol.*, **7**(1), 97-100 (1995).
- Can, C., and Jianlong, W., "Removal of Heavy Metal Ions by Waste Biomass of *Saccharomyces cerevisiae*," *J. Envir. Engng.*, **136**(1), 95-102 (2010).
11. Puranik, P. R., and Paknikar, K. M., "Biosorption of Lead and Zinc from Solutions using *Streptoverticillium cinnamomeum* Waste Biomass," *J. Biotechnol.*, **55**(2), 113-124 (1997).
12. Gadd, G. M., "Fungi and Yeasts for Metal Accumulation. In: Ehrlich, H. L. and Brierley, C. L. (Eds.), "Microbial Mineral

- Recovery, McGraw-Hill, New York, pp. 249-275 (1990).
13. Azizian, S., "Kinetic Models of Sorption: a Theoretical Analysis," *J. Colloid Interf. Sci.*, **276**(1), 47-52 (2004).
 14. McKay, G., and Al-Duri, B., "Simplified Model for the Equilibrium Adsorption of Dyes from Mixtures Using Activated Carbon," *Chem. Eng. Prog.*, **22**(3), 145-56 (1987).
 15. Vijayaraghavan, K., and Yun, Y.-S., "Bacterial Biosorbent and Biosorption," *Biotechnol. Adv.*, **26**(3), 266-291 (2008).
 16. Crist, R. H., Oberholser, K., Shank, N., and Nguyen, M., "Nature of Bonding Between Metallic Ions and Algal Cell Walls," *Environ. Sci. Technol.*, **15**(10), 1212-1217 (1981).
 17. Jeon, C., Park, J. Y., and Yoo, Y. J., "Biosorption Model for Binary Adsorption Sites," *J. Microbiol. Biotechnol.*, **11**(5), 781-787 (2001).
 18. Fourest, E., and Volesky, B., "Contribution of Sulfonate Groups and Alginate to Heavy Metal Biosorption by the Dry Biomass of *Sargassum fluitans*," *Environ. Sci. Technol.*, **30**(1), 277-282 (1995).
 19. Won, S. W., Choi, S. B., Chung, B. W., Park, D., Park, J. M., and Yun, Y.-S., "Biosorptive Decolorization of Reactive Orange 16 using Waste Biomass of *Corynebacterium glutamicum*," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**(24), 7865-7869 (2004).
 20. Fu, Y., and Viraraghavan, T., "Dye Biosorption Sites in *Aspergillus niger*," *Bioresour. Technol.*, **82**(2), 139-145 (2002).
 21. Ishikawa, S., Suyama, K., Arihara, K., and Itoh, M., "Uptake and Recovery of Gold Ions from Electroplating Wastes Using Eggshell Membrane," *Bioresour. Technol.*, **81**(3), 201-206 (2002).
 22. Limousin, G., Gaudet, J. P., Charlet, L., Szenknect, S., Barth, V., and Krimissa, M., "Sorption Isotherms: a Review on Physical Bases, Modeling and Measurement," *Appl. Geochem.*, **22**(2), 249-275 (2007).