

캡슐 고정화 *S. cerevisiae*를 이용한 납 회수

김용표 · 박종곤[†]

경북대학교 화학공학과

(1997년 8월 25일 접수, 1997년 12월 23일 채택)

Recovery of Lead using Encapsulated *S. cerevisiae*

Yong-Biao Jin and Joong-Kon Park[†]

Department of Chemical Engineering, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

(Received 25 August 1997; accepted 23 December 1997)

요 약

고농도로 미생물을 배양할 수 있는 캡슐고정화법을 이용하여 용액으로부터 분리가 용이하고 재사용 가능한 중금속흡착용 미생물 고정화 캡슐을 개발하였다. 캡슐제조시 효모를 접종하고 36시간 배양하여 건조중량이 250 g/L이 되도록 미생물을 캡슐내부에 고정화하였다. 캡슐 고정화 효모의 중금속 흡착 능력은 100 ppm의 납용액에서 30 mg/g biosorbent이었다. 1 M의 염산용액으로 흡착량의 98 % 이상을 탈착시킬 수 있었으며 0.1 M의 염산용액으로도 85 % 이상을 탈착시킬 수 있었다. 캡슐 고정화 효모를 이용한 납 흡착의 최적 pH는 6이었으며 흡착등온식은 기존의 Freundlich 식을 잘 따르고 있었다. 납을 흡탈착하는 공정에 효모 고정화 캡슐을 50회 반복사용한 이후의 흡착용량은 처음과 동일하게 유지되었다.

Abstract— We prepared a capsule containing *Saccharomyces cerevisiae* cells for the removal of lead(II) ion. *Saccharomyces cerevisiae* cells were encapsulated and cultured in the growth medium for 36 hrs. The cells grew in the capsule during cultivation and did not leak through the capsule membrane. The dried cell density reached 250 g/l on the basis of the inner volume of the capsule. The capsule was cross-linked using triethylene tetramine and glutaric dialdehyde solutions. The optimum pH of the lead uptake using encapsulated *S. cerevisiae* was found to be 6. The Freundlich model showed a little better fit to adsorption data than the Langmuir model. The lead uptake of the encapsulated *S. cerevisiae* was about 30 mg Pb/g biomass. The 95 percent of leads adsorbed on the encapsulated biosorbents was desorbed by the 1 M HCl solution. The capsule was reused 50 batches without losing the metal uptake capacity. And the mechanical strength of the cross-linked capsule was retained after 50 trials.

Key words: Biosorption, Capsule, Lead, *Saccharomyces cerevisiae*, Heavy Metal

1. 서 론

인체에 유해한 중금속에 의한 환경오염이 심각해 지고 있다. 중금속을 제거 또는 회수하기 위하여 화학침전법, 응집, 이온교환, 착염화, 여과 막 분리 등의 여러 기술들이 개발되었다. 그러나 이들 공정들은 비교적 낮은 금속농도에서는 비효율적이고 비용이 아주 비싼 단점이 있다. 때문에 효율증대와 비용감소를 위해 생물 흡착제를 이용한 중금속 처리기술이 개발되기 시작하였다. 새로운 흡착제로서 미생물은 저렴한 가격으로 다량 얻을 수 있고 미생물을 이용하여 수 용액으로부터 중금속을 분리하면 중금속의 흡수와 탈착이 비교적 빠른 시간내에 이루어지며 중금속의 선택적 분리가 용이하므로 기존의 중금속 처리 방법보다 더 효율적일 수 있다. 그러나 이러한 생물 흡착제를 이용하여 큰 규모로 중금속을 처리하고자 할 경우 중금속의 제거가 신속하여야 하며 용액으로부터 생물흡착제의 분리 회수가

쉬워야 하고 생물흡착제의 재사용이 가능하여야 한다. 이를 위하여 생물흡착제는 고정화되어야 한다. 여러 가지 고정화법 중 가장 보편적인 것은 미생물을 bead에 고정화하는 것이다. 그러나 미생물을 bead에 고정화하게 되면 미생물이 bead의 가장자리에 몰려서 성장하게 되고 또한 bead의 기계적 강도때문에 bead체적의 25 % 이상 고정화할 수가 없다[1]. 이를 보완하기 위하여 최근 Cheong 등이 calcium alginate capsule내에 미생물을 고농도로 고정화하는 법을 개발하였다 [2]. Calcium alginate 캡슐 제조시 균주를 캡슐내에 접종하고 다시 성장배지내에서 배양하여 캡슐내부에 미생물을 고농도로 배양 축적시켰다. 캡슐 내부의 미생물 농도는 *Saccharomyces cerevisiae*의 경우 내부건조 중량이 300 g/L에 달하였고 배양 중 캡슐로부터 배양액으로 미생물이 전혀 새어 나오지 않았다[2]. 박테리아 종류는 배양 중 캡슐로부터 일부의 미생물이 새어 나오기는 하였으나, 배지조성 등 배양조건에 따라 *Corynebacterium glutamicum*의 경우 미생물 건조중량이 200 g/L, *Escherichia coli*는 100 g/L에 달하였다[3, 4]. 캡슐내에 미생물을 고농도로 축적시키는 이 방법은 최근 1단계 전세포

[†]E-mail : parkjk@bh.kyungpook.ac.kr

효소 고정화 기술로 이용되고 있다[4-6].

생흡착제로 이용되는 미생물은 조류, 곰팡이, 세균 등 다양하다. 미생물 자신이 흡착하는 경우와 미생물 및 미생물 자신이 분비하는 exopolymer가 중금속을 흡착하는 경우가 있다. 미생물 자신이 분비하는 exopolymer로서는 *Zoogreoa ramigera* 균주가 생산하는 zooglan과 *Aureobasidium pullulans*이 생산하는 pullulan이 있다[7]. 또한 미생물이 중금속을 흡착하는 mechanism은 미생물이 중금속을 자신의 체표면에 흡착하는 경우와 자신의 몸에 축적 내지는 몸표면에 흡착하는 경우로 두 가지가 있다. *Saccharomyces cerevisiae*는 납의 흡착에 특이성이 있고 자신의 체내에 중금속을 축적내지 흡착하는 특성을 지니고 있다[8-10]. 금속 중 카드뮴, 수은, 납은 인체에 가장 해가 큰 3대 중금속으로 알려져 있다. 오염물질로서의 중금속은 인체내의 단백질과 아미노기, 카복실기 등을 매개하여 chelate결합을 형성하며 단백질의 입체구조나 효소의 활성발현에 중요한 영향을 끼친다.

본 연구에서는 현재까지 알려진 가장 독성이 강한 3대 중금속 납, 카드뮴, 수은 중의 하나인 납에 특이성이 있고 배양 중 capsule 내부로부터 배양액으로 새어 나가지 않는 *S. cerevisiae*를 캡슐에 고정화하여 중금속 흡착특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험

2-1. 균주 및 배지

본 연구에서는 균주는 *Saccharomyces cerevisiae*(ATCC 24858)를 사용하였다. 성장배지조성은 Table 1과 같다.

2-2. 캡슐 고정화 미생물 제조

Cheong[2]의 calcium-alginate 캡슐 고정화법을 이용하여 미생물을 캡슐내부에 고정화시켰다. 진탕배양기에서 8시간 배양한 배양액 10 ml를 2,000 rpm으로 원심분리하여 얻은 균주를 1.3%(w/v)의 calcium chloride 용액 100 ml에 섞었다. 용액 liter당 2.6 g의 xanthan gum과 0.5 g의 surfactant를 더 첨가한 calcium chloride용액을 잘 회전하고 있는 0.6%(w/v) sodium alginate 용액에 방울방울 떨어 뜨려 완전구형의 캡슐을 제조하였다. 제조된 캡슐을 진탕배지 증류수에서 10분 세척한 후 캡슐을 HEPES 완충용액(pH 7.2)에서 10분간 수축시켰다. 균주가 접종된 캡슐 400개를 성장배지 100 ml에 투입하고 27 °C, 200 rpm에서 36시간 배양하였다. 배양도중 용액내의 glucose 농도는 glucose kit(Sigma, catalog No. 510-A)를 이용하여 측정하였다. 미생물을 접종하여 제조된 직후의 빈 캡슐과 미생물이 배양 충전된 캡슐을 각각 80 °C의 항온건조기에서 더 이상 무게의 변화가 없을 때까지 3일 이상 건조시켜 각각의 무게차이를 캡슐내부의 미생물 건조중량으로 하였다.

2-3. 캡슐의 가교결합

미생물로 충전된 고정화 캡슐로 폐수 중의 중금속을 제거하고자 할 경우 폐수 중에는 chelating agent 등이 존재할 수 있다. 이 경우 calcium alginate capsule은 폐수 중에서 녹을 수 있다. 또한 calcium alginate membrane은 공유결합이 아닌 이온결합이므로 수용액속에서 장

시간 사용하면 membrane에 swelling 현상이 일어날 수 있다. 따라서 chelating agent가 존재하는 폐수 중에서도 capsule이 녹지 않고 swelling이 일어나지 않도록 capsule의 기계적 강도를 높이기 위하여 캡슐 표면을 가교결합하였다. 미생물로 충전된 캡슐을 1% triethylene tetramine 용액에 18시간 그리고 1% glutaric dialdehyde용액에 12시간 동안 200 rpm으로 진탕시켜 가교결합하였다.

2-4. 납이온의 흡탈착

수용액 중의 납이온 농도는 AA(Atomic Absorption Spectrophotometer, Shimadzu AA680)기를 이용하여 측정하였다. AA기의 분석조건은 wavelength 283.3 nm, HC lamp current 5 mA, fuel gas의 flow rate는 2.0 l/min이었다. 미생물 흡착제로 수용액에서 납을 흡착한 후 생흡착제의 비흡착량은 다음과 같이 계산되었다.

$$q = \frac{V(C_i - C_f)}{M}$$

q : 미생물 단위질량에 대한 중금속이온의 흡착량(mg/g dry weight)

v : 중금속 용액의 부피(l)

C_i : 중금속이온의 초기농도(mg/l)

C_f : 잔류중금속이온의 농도(mg/l)

M : 미생물의 건조무게(g)

생흡착제에 흡착된 납이온은 캡슐을 일정한 농도의 염산용액에 투입하고 27 °C, 200 rpm으로 진탕시켜 탈착하였다. 납이온을 탈착시킨 캡슐은 증류수와 0.5%의 calcium chloride 용액에 각각 세척한 후 재사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Free Cell에 의한 납흡착

S. cerevisiae 균주의 성장배지에서의 성장양태를 조사하기 위하여 시간에 따른 미생물 건조중량 변화와 glucose 소모량을 측정하였다. 미생물을 충분히 계대배양한 후 미생물이 성장하고 있는 배지용액을 10 ml 취하여 성장배지에 접종시키고 27 °C, 200 rpm에서 배양시켰다. 일정한 시간이 지나면 균액을 취하고 glucose의 농도를 측정하였다. 8시간이 지나면 glucose의 농도가 처음의 20 g/l로부터 0.5 g/l까지 현저히 감소하고 미생물의 건조중량도 14시간후부터 24시간후까지 큰 증가가 없었다. 또한 미생물의 건조중량은 배지내의 glucose가 완전히 고갈된 이후에도 빠른 시간내에 lysis가 일어나지 않고 있음을 알 수 있었다. 미생물의 건조중량은 배양 16시간후에 3.6 g/l로서 최대점에 도달하지만 glucose는 9시간이 지나면 이미 고갈되므로 배양 16시간 경과후에는 사멸된 균주도 함유되어 있을 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 *S. cerevisiae*를 free culture시킬 때 미생물의 성장이 가장 활발한 대수기를 거쳐 정지기에 도달하기전까지, 즉 8시간만 성장시킨 후 미생물을 회수하여 흡착실험에 사용하였다. 이때의 용액 중 미생물 건조중량은 약 3 g/l에 달하였다.

성장배지에서 8시간 배양시킨 *S. cerevisiae* 균액 100 ml를 원심분리한 후 얻은 미생물 생체를 100 ppm의 납용액 100 ml에 넣고 27 °C, 200 rpm에서 흡착실험을 진행하였다. 시간에 따른 효모균의 비흡착량은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 흡착시간 10분 후 납흡착량은 평형상태에서의 흡착량과 거의 같으며 약 12 mg/g cell에 달한다. 본 연구에서의 자유배양된 *S. cerevisiae*에 의하여 흡착된 중금속량은 다른 연구자들의 흡착량[10]보다 크다. 그러나 이들의 결과에 의하면 중금속용액에 미생물을 투입한 직후 용액 중의 중금속 20%가 흡착되고 이후 약 120분에 걸쳐 나머지 60%가 서서히 흡착되었다고 보고되어 있다. 그러나 본 연구에서는 용액에 미생물을 투입한 후 중

Table 1. Composition of growth medium for *Saccharomyces cerevisiae* (ATCC 24858)

Composition	g/L
Glucose	20
Yeast extract	3
Bacto peptone	5
Malt extract	3

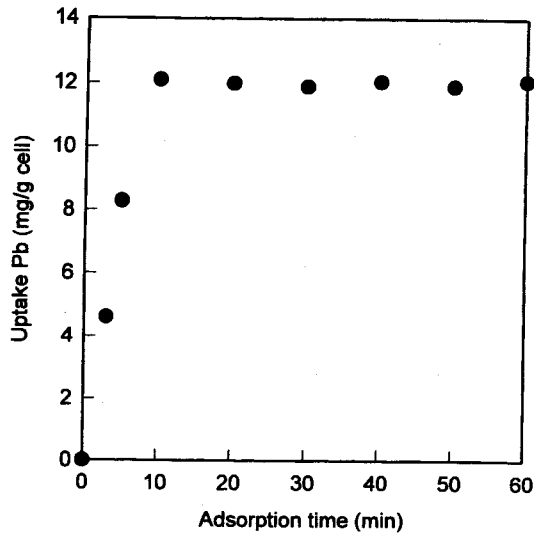


Fig. 1. Time course of Pb uptake by the free cultured *S. cerevisiae*.

금속 제거량은 초기 10분에 걸쳐 선형적으로 증가하였다.

미생물을 이용한 중금속의 흡착 mechanism은 현재까지 잘 알려져 있지 않다. 뿐만 아니라 미생물의 중금속의 흡착 등온곡선은 기존의 Freundlich 등온식이나 Langmuir 등온식에 잘 맞지 않을 수 있으며 적절한 흡착등온식을 각 경우에 대하여 실험에 의존하여 밝혀낼 수밖에 없다[8]. 성장배지에서 8시간 배양시킨 *S. cerevisiae* 균액 100 ml을 원심분리한 후 얻은 침전물을 농도가 각각 50, 100, 200, 300, 400, 450 ppm인 납용액 100 ml에 넣어 흡착 실험을 진행하고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 납용액의 농도가 증가함에 따라 미생물의 단위건조중량당 흡착량도 증가하였으며 300 ppm의 용액에서 비흡착량은 약 20 mg/g cell에 달하였다. 그 결과를 Freundlich 흡착등온식과 Langmuir 흡착등온식에 적용시켜 비선형회귀를 하여 본 결과를 Table 2에 나타내었으며 큰 차이는 없으나 상관계수의 크기를 비교하면 Freundlich 흡착등온식에 더 잘 들어 맞았다. Ahn과 Suh[9]는 선형회귀를 하여 *S. cerevisiae*의 납에 대한 흡착등온을 Langmuir 나 Freundlich 흡착등온식과 비슷한 상관관계가 있다고 밝혔다. Kuyucak과 Volesky[11]는 *S. cerevisiae*에 의한 아연, 카드뮴, 구리의 흡착이 Freundlich 흡착등온식에 잘 들어 맞음을 밝혔다.

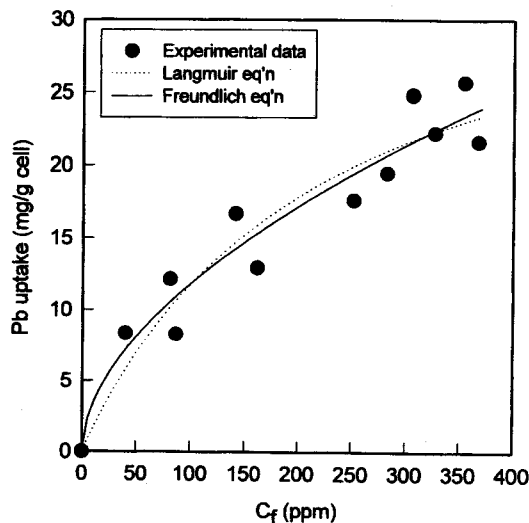


Fig. 2. Freundlich and Langmuir isotherms for the adsorption of free cultured *S. cerevisiae*.

Table 2. Freundlich and Langmuir isotherm constants for Pb adsorption using biomass

	Free cell			Encapsulated cell		
Langmuir	q_m	b	R^2	q_m	b	R^2
$q = \frac{q_m b C_f}{(1 + b C_f)}$	36.83	0.0047	0.9661	77.78	0.0038	0.9688
Freundlich	k	1/n	R^2	k	1/n	R^2
$q = k C_f^{1/n}$	0.9829	0.5401	0.9932	3.3658	0.4367	0.9910

3-2. 캡슐고정화된 cell을 이용한 납흡착

캡슐막은 칼슘이온과 알지네이트 이온이 이온결합을 하여 형성된 칼슘알지네이트 막이므로 캡슐 고정화 *S. cerevisiae*를 성장배지용액에서 배양하면 캡슐은 swelling이 일어난다. 따라서 본 실험에서는 Cheong 등[2]의 제안에 따라 배지용액에 liter 당 5g의 $CaCl_2$ 를 첨가하여 미생물을 배양하는 동안 캡슐의 swelling을 방지할 수 있었다. 미생물이 접종된 캡슐을 성장배지에서 배양할 때 시간에 따른 캡슐 내부의 단위체적당 건조중량의 변화를 측정하였다. 캡슐 400개를 성장배지 100 ml에 넣고 27 °C, 200 rpm에서 성장시키고 일정한 시간마다 건조중량을 측정하였다. 결과는 Fig. 3과 같이 free cell의 배양에서와 비교하여 지연기가 매우 길어짐을 알 수 있었다. 이는 free cell 배양의 경우에 비하여 캡슐속에서는 캡슐막을 통한 기질, 산소 등의 전달저항이 더 크므로 비교적 성장여건이 열악하여 지연기가 더 길어진 것으로 사료된다. 그러나 약 36시간이 지나면 캡슐속 미생물의 건조중량이 250 g/l이 되고 직경이 2.2 mm 되는 캡슐이 얻어진다. 자유배양의 경우와 비교하여 캡슐내부의 미생물 농도는 70배 증가하였다.

중금속 제거를 위한 효율적 생물흡착제로 사용하기 위해서는 재사용할 수 있어야 한다. 여러번의 재사용에도 캡슐이 swelling되지 않고 캡슐의 흡착능을 유지시키기 위해서는 캡슐막의 기계적 강도를 증가시킬 필요가 있다. Triethylene tetramine과 glutaric dialdehyde용액을 이용하여 capsule membrane을 가교결합시켰다. 가교결합후 캡슐은 수축되어 캡슐의 직경은 약 10 % 정도 감소된 2 mm이었고 캡슐의 표면은 비교적 거칠어졌다. 이렇게 가교결합된 캡슐은 Ha[7]의 보고에서와 같이 수용액에서 swelling이 없었을 뿐만 아니라 chelating agent인 0.1 %의 nitrilotriacetic acid trisodium salt monohydrate

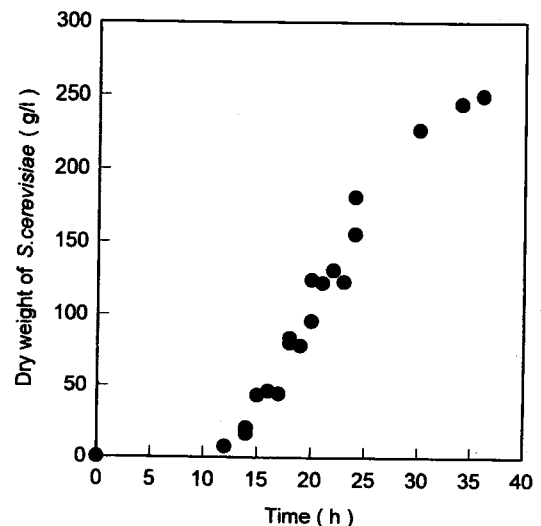


Fig. 3. The increase of dry weight of encapsulated *S. cerevisiae* according to the culturing time.

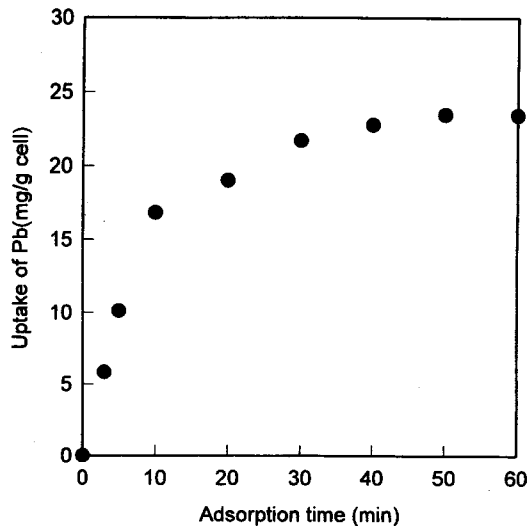


Fig. 4. Time course of Pb uptake by the crosslinked capsules containing *S. cerevisiae* cells.

(NTA) 용액에 6일간 보관하여도 용해되지 않았다.

납용액내에서 가교결합된 캡슐에 의하여 흡착되는 납의 양을 시간별로 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. 가교결합시킨 캡슐 100개를 100 ppm의 납용액 100 ml에 넣고 27 °C 200 rpm에서 흡착실험을 진행한 바 10분이 경과하면 최대흡착량의 약 60%가 흡착이 되며 50분이 지나면 흡착이 평형에 도달하였다. Free cell이 흡착평형에 이르는 시간보다 매우 길어졌으며 이는 캡슐막과 캡슐내부의 고농도 미생물을 통과하는데 따른 확산저항의 결과로 사료된다. 즉 고농도의 미생물층을 통과하는 동안 캡슐외벽 부분의 미생물에 먼저 흡착이 되고 난 후 캡슐내부에 채워진 미생물로 확산되면서 흡착이 진행되므로 평형도달시간이 길어지는 것으로 사료된다.

중금속이온의 흡착은 주위환경의 제약을 많이 받으며 pH도 민감한 변수 중의 하나이다. 캡슐 100개를 pH가 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10이고 농도가 100 ppm인 납용액 100 ml에 넣고 50분 동안 흡착시키고 그 흡착량을 Fig. 5에 나타내었다. pH 7 이상에서는 침전이 발생하였으므로 pH 7이상에서의 흡착량은 침전물이 가라 앉은 이후 캡슐에 흡착된 중금속의 양을 나타내며 pH가 증가함에 따라 흡착되는

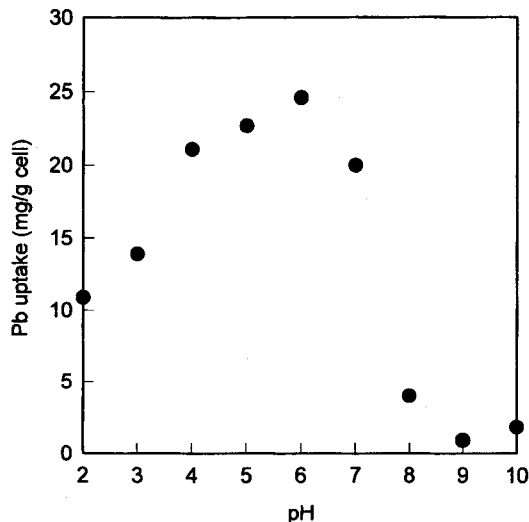


Fig. 5. Effect of pH on the adsorption capacity of crosslinked capsules containing *S. cerevisiae* cells.

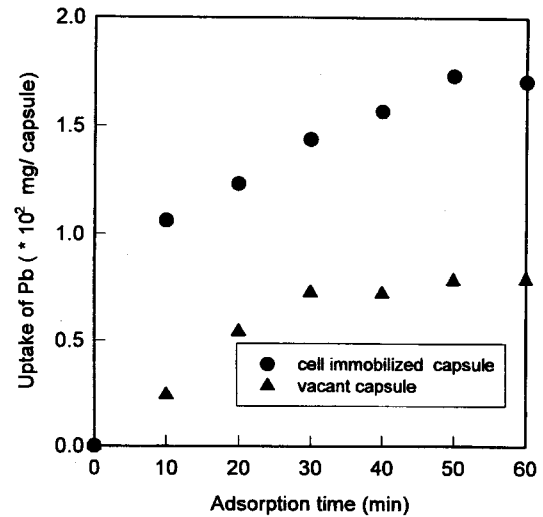


Fig. 6. Time course of Pb uptake by the cell immobilized capsules and vacant capsule.

중금속의 양은 감소하였다. 산성범위에서는 pH가 낮아질수록 흡착량이 감소하므로 pH 6에서 최대흡착량을 나타내었다.

캡슐 고정화 효모의 납에 대한 비흡착량은 자유 효모의 비흡착량보다 매우 크게 나타났다. 이는 일차적으로 캡슐을 구성하고 있는 칼슘 알지네이트 막도 중금속에 대한 흡착능을 가지고 있기 때문으로 사료된다. 효모를 접종한 직후의 속이 빈 캡슐에 의한 납의 흡착량을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. 빈 캡슐에 의하여 흡착된 납의 양은 효모고정화 캡슐에 의하여 흡착된 납 양의 약 40-50%에 달하고 있다. 두 값의 차이 즉, 효모 고정화 캡슐에 의하여 흡착된 납량의 50-60%는 캡슐에 고정화되어 있는 효모에 의하여 흡착된 납의 양으로 간주될 수 있다. 이를 미생물 단위질량당의 비흡착량으로 환산하면 자유효모의 비흡착량과 거의 비슷하며 다만 흡착평형에 도달하는 시간만이 다를 뿐이다. 그러나 한편으로는 캡슐내부에 고밀도로 존재하는 효모의 단위질량당의 납의 비흡착량과 용액 중의 자유 효모에 의한 비흡착량이 같을 수 있을까 하는 의문이 있을 수 있다. 이는 캡슐고정화 생흡착제의 중금속 비흡착량이 bead고정화 생흡착제의 비흡착량보다 매우 크다[7]는 사실과 생흡착제에 의한 금속

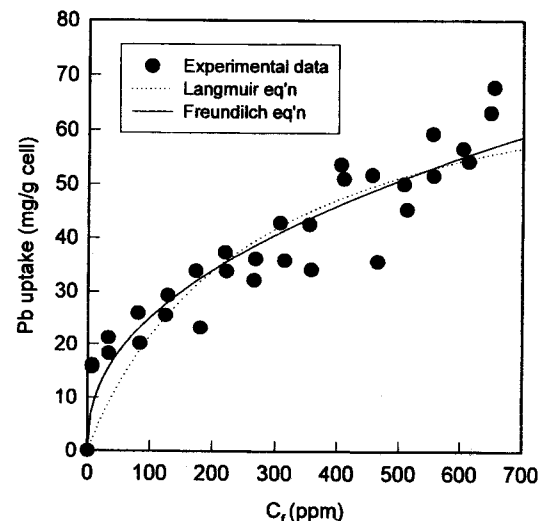


Fig. 7. Freundlich and Langmuir isotherms for the adsorption of encapsulated *S. cerevisiae*.

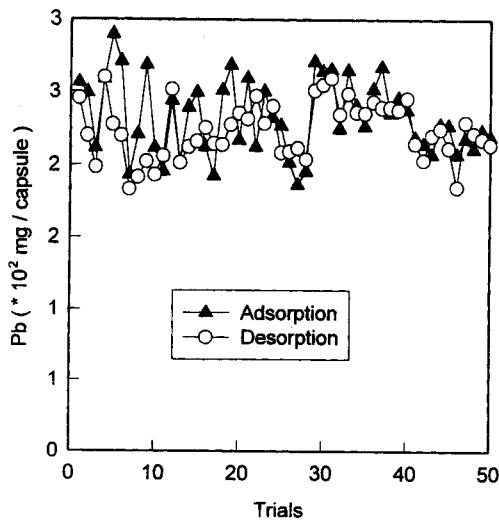


Fig. 8. Reusability of crosslinked capsules containing biomass in adsorption-desorption process.

의 흡착과정이 처음에는 미생물의 체표면에 흡착이 일어나고 곧이어 그 위에 금속의 침착이 일어나는 현상[8]으로 설명될 수도 있을 것이다. 이러한 생흡착제의 흡착 mechanism에 대하여는 더 연구가 진행되어야 할 것이며 본 연구실에서는 생흡착제 표면에서의 금속 흡착현상을 SEM 촬영을 통하여 계속 연구를 진행하고 있는 중이다.

각 농도의 납 용액 100ml에 효모 고정화 캡슐 100개를 넣고 50분간 흡착시킨 후의 흡착량이 Fig. 8에 나타나 있다. 흡착평형에 도달한 미생물의 비흡착량과 잔류중금속의 평형농도로 흡착등온식을 검토하였다. 비선형회귀법에 의한 Freundlich 등온식과 Langmuir 등온식을 평형등온 실험자료에 적용하여 보았다. 결과는 Fig. 7과 Table 2에 나타난 바처럼 free cell의 경우와 유사하게 큰 차이는 없지만 상관계수의 크기를 비교하면 Freundlich 식에 더욱 잘 접근하였다.

3-3. 캡슐 고정화 효모의 재사용

흡착에 사용된 캡슐을 재사용하기 위하여 탈착과정이 필요하다. 또한 실제공정에 적용하려면 탈착과정의 시간도 짧은 것이 유리하다. 미생물에 흡착된 중금속을 탈착하는데에는 NTA와 같은 chelating agent와 HNO_3 , H_2SO_4 , HCl 등이 사용될 수 있다. 이 중 chelating agent는 가격이 비싸고 H_2SO_4 와 HNO_3 는 황과 질소 성분이 미생물에 큰 영향을 미치므로 HCl 이 비교적 선호된다. 따라서 값이 저렴한 염산용액으로 탈착을 시도하였다. 효모고정화 캡슐 100개를 100 ppm의 납용액 100ml에서 50분간 흡착시킨 후, 염산용액에서의 탈착은 약 10분이 경과하면 최대탈착량을 보였으며 각 염산의 농도에서 10분간 탈착시킨 탈착효율은 Table 3과 같다. 염산의 농도가 1 M일 때 흡착된 양의 97% 이상이 탈착되었으며 0.05 M의 염산용액으로도 78%이상의 탈착효과를 볼 수 있었다.

효모 고정화 캡슐을 납흡탈착 공정에 반복 사용하여 캡슐의 흡착능 유지와 기계적 강도를 시험하였다. 캡슐 100개를 100 ppm의 납

용액 100 ml에서 50분간 흡착시키고 0.1 M 염산용액 100 ml에 넣고 10분간 탈착시키는 과정을 50회 반복하였다. 흡탈착 과정에 50회 반복 사용하여도 Fig. 8에 나타난 바와 같이 흡착용량에는 변화가 없었다. 그러나 30회 이상 사용하게 되면 캡슐이 약간씩 찌그러 들기 시작하였으나 캡슐막의 기계적 강도는 육안으로 관찰하여 그대로 유지되었다. 사용 초기의 캡슐내부 미생물 건조중량이 300 g/L이었으므로 미생물의 수분함유율을 70%로 가정하면 캡슐내부에 공극물이 거의 없을 정도로 미생물이 채워져 있음을 의미한다. 그러므로 캡슐의 사용 중 30회 이상부터 캡슐이 찌그러 들기 시작한다는 것은 캡슐내부의 미생물에 lysis가 진행되어 반복사용 중 미생물의 감소가 일어나고 있다는 것을 의미한다. 그러나 50회까지 사용하여도 흡착능이 일정하게 유지되는 이유는 두 가지의 가능성이 있다. 첫째로 캡슐내부의 고농도 미생물이 모두 흡착에 참여하지 못하므로, 특히 캡슐 중심부의 미생물, 캡슐내부의 미생물이 일부 감소되어도 실질적으로 흡착에 관여하는 미생물의 양은 줄지 않았을 수 있다는 것이다. 둘째로는 캡슐이 반복 사용되어 짐에 따라 효모 체표면에서의 금속이 침착되거나 또는 효모 내부로 축적되어짐[12]으로 인하여 미생물 단위질량당의 흡착능이 증가하였을 수가 있다. 이에 대한 구체적인 명확한 해석을 위하여 앞절에서 언급한 바와 같이 캡슐내부의 생흡착제 표면에서의 금속 흡착현상에 관한 연구가 계속 진행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

효모를 용액으로부터 쉽게 회수할 수 있고 회수한 효모를 간단한 탈착과정을 거친 후 재사용할 수 있는 생흡착제 고정화 캡슐을 개발하였다. 캡슐내의 효모는 건조중량이 250 g/L에 달하였고 100 ppm의 납용액에서 비흡착량은 30 mg/g cell 정도이었다. 1 M의 염산용액을 이용하여 흡착량의 97% 이상을 탈착시킬 수 있으며 0.1 M의 염산용액으로도 85%이상 탈착시킬 수 있었다. 캡슐 고정화 효모의 납흡착에 관한 흡착등온식은 Freundlich식과 잘 일치하였다. 흡탈착 과정에 50회 이상 반복사용하여도 흡착능은 초기와 같으며 캡슐막의 기계적 강도도 유지되었으나 30회 이상부터 캡슐의 내부 충전물이 감소하기 시작하였다.

감 사

본 연구는 교육부의 과학기술 기초사업의 생물화학공학 연구비의 지원에 의하여 수행된 연구 중 일부입니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Buchholz, K.: "Characterization of Immobilized Biocatalysts. In: Dechema Monographs, vol. 84", Verlag Chemie, Weinheim(1979).
2. Cheong, S. H., Park, J. K., Kim, B. S. and Chang, H. N.: *Biotechnol. Techniq.*, **7**, 879(1993).
3. Cheong, S. H., Lee, T. J., Park, J. K. and Chang, H. N.: *HWAHAK KONGHAK*, **33**, 105(1995).
4. Park, J. K., Cheong, K. S. and Chang, H. N.: *Bioprocess Engineering*, **17**, 197(1997).
5. Lee, B. H. and Park, J. K.: *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.*, **11**, 398 (1996).
6. Chang, H. N., Seong, G. H., Yoo, I. K., Park, J. K. and Seo, J. H.: *Biotechnol. Bioeng.*, **51**, 157(1996).

Table 3. Desorption of Pb from crosslinked capsules containing *S. cerevisiae* cells

HCl(M)	Desorption(%)
0.05	77
0.1	83.2
0.5	92.3
1.0	97

7. Ha, T. W.: "Biosorption of Heavy Metals using Encapsulated Whole Cell Exopolysaccharide", Kyungpook Nat. Univ., MS Thesis(1995).
8. Volesky, B.: "Biosorption of Heavy Metals", CRC Press, Ann Arbor(1990).
9. Ahn, K. H. and Suh, K. H.: *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.*, **11**, 173 (1996).
10. Brady, D. and Duncan, J. R.: *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **41**, 149(1994).
11. Kuyucak, K. and Volesky, B.: *Biotechnol. Lett.*, **10**, 137(1988).
12. Song, S. K., Oh, S. J., Kang, M. Y. and Suh, J. H.: *Current Biochemical Engineering II*, 285(1997).