

Zoogloea ramigera 115와 Zoogloea ramigera 115SLR의 중금속 흡착능 비교

이한기 · 배우철 · 진 욱 · 정욱진¹ · 이삼빈² · 정병철*
명지대학교 생명과학과, ¹명지대학교 화학공학과, ²계명대학교 식품가공학과

Heavy Metal Adsorption Capacity of Zoogloea ramigera 115 and Zoogloea ramigera 115SLR.
Lee, Han-Ki, Woo-Chul Bae, Wook Jin, Wook-Jin Jung¹, Sam-Pin Lee² and Byeong-Chul Jeong*.
Department of Biological Science, ¹Department of Chemical Engineering, Myong-Ji University, Yongin 449-728, Korea, ²Department of Food Science and Technology, Keimyung University, Taegu 704-701, Korea - Heavy metal removal by *Z. ramigera* 115 and soluble slime polymer producing mutant *Z. ramigera* 115SLR was investigated. Both strains showed similar tolerance against Cd²⁺, Co²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺ and Fe²⁺. When cells were cultivated in the presence of 500 ppm Cd²⁺, the mutant strain removed 1.5 fold more metal than the wild type did at same biomass. Metal adsorption capacities were in the order of *Z. ramigera* 115SLR polymer > *Z. ramigera* 115 polymer > *Z. ramigera* 115 cell > *Z. ramigera* 115SLR cell. The optimum pH for metal adsorption was 7.5. Langmuir and Freundlich isotherms indicated that *Q*_{max} and 1/*n* of *Z. ramigera* 115SLR polymer were 164.2 mg Cd²⁺/g dw and 0.496, respectively. These results showed that the polymer of *Z. ramigera* 115SLR could be used as an effective metal adsorbate

Key words: *Zoogloea ramigera* 115, *Zoogloea ramigera* 115SLR, polymer, heavy metal, biosorption

산업 발전에 따라 다양한 종류의 오염원들이 자연계로 배출되고 있으며 특히 중금속은 단백질과 결합하여 입체 구조를 변화시킴으로써 효소의 생화학적 활성과 물질 전달계를 억제하고, 또한 생물농축과정을 통하여 사람에게 까지 축적되기 때문에 큰 문제가 되고 있다. 이러한 중금속을 처리하는 방법으로는 산화, 환원, 침전, 여과, 수분 증발, 이온교환수지등의 물리화학적 방법들이 이용되고 있으나 고비용과 저효율의 문제가 있는 반면, 미생물을 이용한 방법은 흡착능이 높고 선택적인 중금속 흡착이 가능하고 가격이 저렴하다는 장점이 있어서 최근 미생물을 이용하는 다양한 방법이 개발, 이용되고 있다.

미생물을 이용하여 중금속을 제거하는 방법으로는 중금속이 미생물 세포벽 성분에 결합하거나 세포의 exopolymer에 결합하는 흡착과, methallothionein, sideropore 등이 관여하는 대사에 의하여 중금속을 제거하는 방법이 있다. 이 중 미생물이 생산하는 exopolymer는 capsule, 또는 slime 형태로 중금속과의 결합능이 높아서 많은 관심을 받아왔다. 이들 exopolymer는 polysaccharide와 glycoprotein 그리고 lipopolysaccharide로 구성되어 있고[16] exopolymer를 내는 미생물중 Friedman 등[6]에 의해 활성 슬러지로부터 분리된 *Zoogloea ramigera*는 그람음성, 의무적 호기성 박테리아로서 polymer를 생산하여 중금속 흡착에 높은 효율을 보이고 있다.

*Zoogloea*에 의하여 생성되는 polymer는 polysaccharide로서 약산성, 음전하를 띠는 물질로 zooglan이라 불리며 glucose, galactose를 주축으로 하고 pyruvyl, acetyl, succinyl그룹의 치환잔기로 구성된 구조[10]로서 양이온성 heavy metal과 높은 친화력을 보이고 있다. 또한 분자량은 2.5~9×10⁶이고 노란색을 띠며 폐수처리시 flocculation을 일으키는 주요한 인자인 pH, 열, 기계적 전단 능력에 대하여 매우 안정한 것으로 알려져 있다[3].

Friedman 등[5]에 의해 *Z. ramigera*는 구리, 코발트, 니켈, 아연, 철 등에 대하여 높은 흡착능력이 있다는 결과를 얻었고 최근 Norberg 등[14-16]은 *Z. ramigera*의 생물고분자를 이용한 중금속의 흡착특성을 조사하였고 연이은 실험에서 중금속 제거용 연속공정 개발결과를 발표하였다. Sag 등[2, 17-19]은 납, 크롬, 구리, 카드뮴 등의 금속에 대하여 *Z. ramigera*가 높은 흡착능이 있다는 결과를 발표하였고 고정화 방법에 의한 중금속 제거 실험을 실시하여 높은 효율을 보고하였다. 중금속이온과 높은 친화성을 보이는 polymer의 성분조사 결과[9] ketal-linked pyruvic acid의 carboxyl group이 주요 중금속 흡착부위일 가능성이 제시되었고, 수용성 slime polymer를 생산하는 변이주인 *Z. ramigera* 115SLR에서 glucose를 pyruvate로 전환하는 pyruvyl transferase gene이 cloning되었다[12]. *Z. ramigera* 115SLR의 polymer는 17%의 pyruvate를 함유한 것으로 보고되어 [21] *Z. ramigera* 115의 10.5% 보다 높은 pyruvate함량을 갖기 때문에 중금속 흡착에도 높은 효율을 나타낼 것

*Corresponding author
Tel. 82-335-30-6196, Fax. 82-335-35-8249
E-mail: bcjeong@bioserver.myongji.ac.kr

으로 추측된다. 이에 본 실험에서는 *Z. ramigera* 115와 *Z. ramigera* 115SLR의 균체와 polymer에 대한 금속 흡착능을 상호비교하여 *Z. ramigera* 115SLR의 흡착제로서의 가능성을 조사하였다.

재료 및 방법

균주

Z. ramigera 115(ATCC 25935)와 rifampicin 저항성을 나타내며 수용성 slime polymer를 생산하는 변이주인 *Z. ramigera* 115SLR[4]을 사용하였다.

배지 조성 및 배양 조건

Z. ramigera 115와 *Z. ramigera* 115SLR의 배양에는 glucose 25 g, KH_2PO_4 1 g, K_2HPO_4 2 g, NH_4Cl 1 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2 g, yeast extract 0.01 g을 증류수 1 L에 녹여 사용하였고 glucose와 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 는 침전을 방지하기 위하여 따로 멸균하여 식힌 후 첨가하였다. 보존용 배지로는 Tryptic Soy Broth(Difco Co.)를 이용하였고 *Z. ramigera* 115SLR의 경우 rifampicin(최종 농도 50 $\mu\text{g}/\text{ml}$)을 첨가하였다. 본 배양은 중균을 10%(v/v) 접종하여 25 $^\circ\text{C}$, 200 rpm, 최대 10일간 진탕 배양하였다. 발효조를 이용한 회분배양은 5 l Jar Fermentor(한국 발효기)를 이용하여 25 $^\circ\text{C}$ 에서 air 0.5 vvm, 300 rpm으로 10일간 교반 배양하였고 균의 생육은 배양액의 흡광도를 600 nm에서 분광광도계(Pharmacia Co.)로 측정하였다.

중금속 정량

중금속 정량은 Waters innovative method for ion analysis[7]의 금속 분석방법을 응용하여 실시하였다. 정량에 이용된 0.2 mM PAR(4-(2-pyridylazo) resorcinol) 용액은 0.026 g의 PAR(Aldrich Co.)에 3 mM ammonium hydroxide 103 ml, 3차 증류수 100 ml을 넣고 교반시켜 녹인 후 1 M acetic acid 29 ml을 더한 후 최종 부피 1 l로 맞추고 0.45 μm filter로 여과하여 사용하였다. 각 금속 별로 검정선의 범위까지 증류수로 희석한 시료 0.8 ml과 PAR용액 0.5 ml을 반응시킨 후 500 nm에서 흡광도를 측정하였다.

최고성장저해농도 측정과 성장별 중금속 제거

중금속 내성 측정은 5종류($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)의 중금속 속염으로 최고 2000 ppm까지 조성한 TSB 평판배지에 균을 도말하여 7일간 배양한 후 생육정도를 육안으로 관찰하였다. 중금속 용액을 포함한 액체배지에서 균의 성장과 중금속 제거량 측정을 위하여 Cd^{2+} 과 Co^{2+} 를 최종 500 ppm이 되도록 첨가하고 중금속의 침전을 고려하여

초기 pH를 6이 되도록 조절하였다. 배양액을 취하여 제거된 중금속양과 생육을 측정하였다.

배양액으로부터 cell과 polymer의 회수

배양액을 sonicator(Fisher Co.)로 ultrasonication(20초, 3회)후 원심분리(11,000 rpm, 30분, 4 $^\circ\text{C}$)하여 cell을 분리하였으며, polymer는 상층액에 1% KOH(wt/v)와 배양액 부피의 2배의 propanol을 첨가하여 4 $^\circ\text{C}$ 에서 한 시간 동안 보관 후 원심분리하여 회수하였다. cell과 polymer 모두 80 $^\circ\text{C}$ 건조로(NAP Co.)에서 24시간 건조시킨 후 막자사발에 갈아 100 mesh 이하의 분말을 얻어 증류수에 현탁하였다.

Cell과 polymer에 의한 중금속 흡착

중금속 흡착반응은 cell과 polymer를 0.5~1 mg/ml로 현탁하여 28 $^\circ\text{C}$ 에서 200 rpm으로 진탕하면서 흡착평형에 도달하는 2~4시간 동안 실시하였다. pH에 따른 금속의 흡착을 살피기 위하여 2.5부터 8.5까지 0.5의 간격으로, 흡착등온식을 얻기 위하여 농도를 조성한 금속용액(25, 50, 75, 100, 150, 200 mg/l)에 대하여 같은 조건으로 실험을 실시하였다.

중금속 흡착량 계산 및 흡착 등온식 분석

고체 액체간의 흡착이 평형상태에 도달하게 되었을 때, 고체와 액체사이에서 이루어지는 용질의 분배비는 흡착과정의 평형점을 정하는 척도가 된다. 또한 이러한 분배상태를 일정온도의 평형상태에서 용액중에 남아있는 용질의 농도와 흡착제 단위질량당 흡착된 용질의 양으로 표시한 것을 흡착등온식이라 정의하며 미생물 흡착 공정에서 사용되는 흡착평형모델은 다른 흡착공정에서 일반적으로 사용되는 Freundlich 및 Langmuir 흡착등온식을 따른다고 한다[20].

중금속 흡착량(q)은 다음의 식으로 정의된다.

$$q = V(C_i - C_f) / 1000 M$$

q는 중금속 흡착량(mg metal/g biomass), V는 반응 금속용액의 부피(ml), C_i 는 초기 금속농도(mg/l), C_f 는 최종중금속농도(mg/l), M은 균체량(g)이다.

Freundlich 흡착등온식은 다음과 같이 표현된다.

$$q = K \cdot C_{eq}^{1/n}$$

이 식의 양변에 Log를 취하면 선형화된다.

$$\text{Log } q = (1/n)\text{Log } C_{eq} + \text{Log } K$$

여기서 C_{eq} 는 잔류 중금속 이온의 질량(mg/l), K와 1/n은 흡착제의 특성에 따라 결정되는 매개변수이다.

Langmuir 흡착등온식은 단분자 흡착, 표면에 흡착된

용질의 이동은 없고, 표면의 흡착 에너지는 일정하다는 가정하에서 얻어진 식으로

$$q = \frac{Q_{max}bC_{eq}}{1+bC_{eq}}$$

이 식의 양변에 역수를 취하면 선형화된다.

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{Q_{max}b} \frac{1}{C_{eq}} + \frac{1}{Q_{max}}$$

여기서 b는 흡착관련 에너지 상수이고 Q_{max} 는 최대 중금속 흡착량이다.

결과 및 고찰

최소생장저해농도 측정과 성장별 중금속 제거

Z. ramigera 115와 *Z. ramigera* 115SLR에 대한 최소 성장저해농도 측정결과(Table 1) 5종의 금속에 대하여 큰 차이를 보이지 않아서 Cd^{2+} 750 ppm, Co^{2+} 750 ppm, Cu^{2+} 500 ppm, Ni^{2+} 1250 ppm으로 동일하게 나타났고 Fe^{2+} 에 대해서만 *Z. ramigera* 115는 1000 ppm, *Z. ramigera* 115SLR은 750 ppm으로 나타났다.

중금속이 포함되지 않은 액체배지와 중금속이 첨가된 배지에서의 성장(Fig. 1)을 비교한 결과 *Z. ramigera* 115SLR와 *Z. ramigera* 115이 192시간에 각각 OD₆₀₀이 2.44와 4.15로 나타나서 *Z. ramigera* 115이 보다 많은 양의 균체를 생산하였고 Cd^{2+} 500 ppm을 각각 첨가한 경우 *Z. ramigera* 115SLR이 1.17, *Z. ramigera* 115이 0.98로, Co^{2+} 500 ppm의 경우 각각 1.08, 0.62로 나타나서 금속이온의 첨가에 따라 최대 균체량이 떨어지고 성장속도도 현저히 느려지는 것으로 나타났고 이 두 종류의 금속이 균의 신진대사작용을 억제한다고 생각된다. 특히 Cd^{2+} 의 경우 동량의 균체량에 대하여 *Z. ramigera* 115SLR가 352 ppm을 제거하여 *Z. ramigera* 115의 273 ppm보다 높은 제거능을 보였다.

Cell과 Polymer의 중금속 흡착 비교

주요 중금속 흡착부위를 파악하기 위하여 cell과 polymer를 분리하여 각각 중금속 흡착능을 조사해본 결과 (Table 2) 중금속 별로 *Z. ramigera* 115SLR polymer와

Table 1. Minimal inhibitory concentration (MIC) of various metals on the cell growth of *Z. ramigera* 115 and *Z. ramigera* 115SLR

Strain	MIC (mg/l)				
	Cd ²⁺	Co ²⁺	Cu ²⁺	Ni ²⁺	Fe ²⁺
<i>Z. ramigera</i> 115	750	750	500	1250	1000
<i>Z. ramigera</i> 115SLR	750	750	500	1250	750

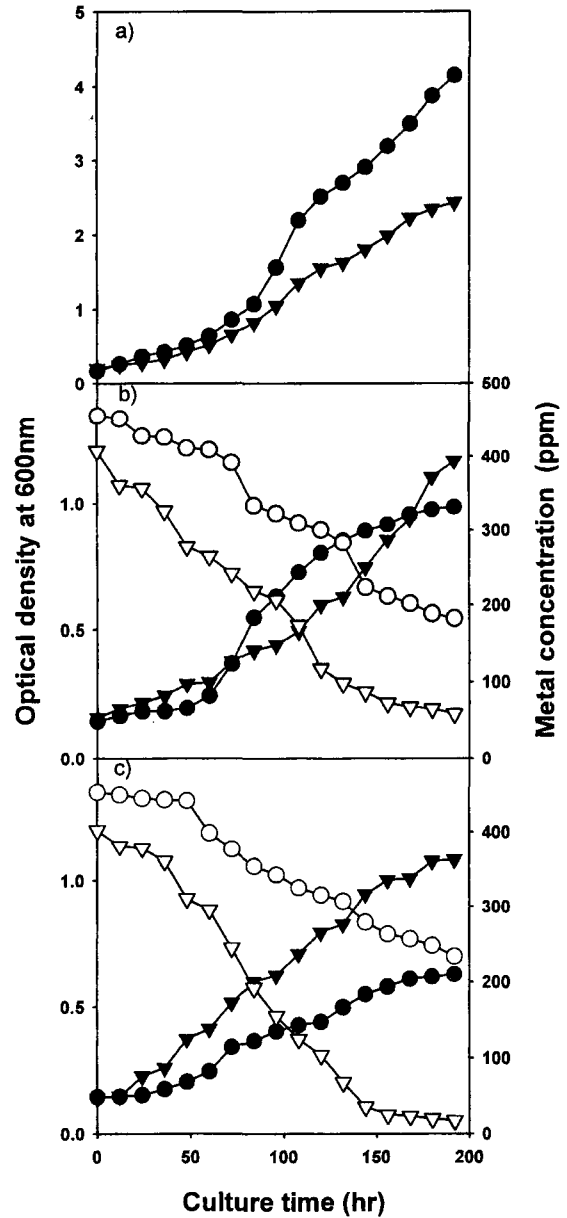


Fig. 1. Cell growth and metal removal of *Z. ramigera*. *Z. ramigera* 115(●: OD, ○: metal concentration) *Z. ramigera* 115SLR(▼: OD, ▽: metal concentration) (a) No metal, (b) Cd^{2+} 500 ppm, (c) Co^{2+} 500 ppm.

Table 2. Metal adsorption by cell and polymer

	q^{100^*} (mg metal adsorbed/g dry biomass)		
	Cd ²⁺	Co ²⁺	Zn ²⁺
<i>Z. ramigera</i> 115 cell	19.06	9.83	28.01
<i>Z. ramigera</i> 115 polymer	57.58	14.4	39.67
<i>Z. ramigera</i> 115SLR cell	11.66	6.64	10.58
<i>Z. ramigera</i> 115SLR polymer	76.82	19.04	67.23

*Initial metal concentration of the reaction mixture was 100 ppm.

Z. ramigera 115 polymer는 cell의 3~7 배의 효율을 나타내서 *Z. ramigera* 115와 *Z. ramigera* 115SLR의 주된 중금속 흡착부위는 polymer인 것으로 생각된다. 중금속 100 ppm에 대하여 *Z. ramigera* 115SLR polymer > *Z. ramigera* 115 polymer > *Z. ramigera* 115 cell > *Z. ramigera* 115SLR cell의 흡착능 순서가 나타나서 *Z. ramigera* 115SLR이 *Z. ramigera* 115보다 좋은 흡착제로 쓰일 가능성을 보였고 두 종 모두 Cd²⁺에 대하여 가장 높은 흡착능을 보였고 Co²⁺에 대하여 가장 낮은 흡착능을 보였다.

Z. ramigera 115 polymer의 중금속결합능은 ketal linked pyruvate의 carboxyl group에 기인하는 것으로 추측되었다[9]. *Z. ramigera* 115SLR polymer가 *Z. ramigera* 115 polymer 보다 높은 흡착능을 보이는 이유는 다당류 생합성에서 side chain의 glucose잔기에 pyruvate를 치환하는데 관여하는 ketal pyruvyl transferase에 의해 많은 양의 pyruvate를 포함하기 때문일 것으로 사료된다.

pH에 따른 중금속의 흡착

중금속 흡착에 있어서 pH는 균체의 흡착부위와 금속이온간의 물리, 화학적인 상호관계에 영향을 끼치기 때문에 각 금속별 최적 흡착 pH는 다양하게 나타날 수 있다. Cd²⁺, Co²⁺, Zn²⁺에 대하여 흡착능을 조사한 결과(Fig. 2) 세 금속 모두 pH 6.0에서부터 흡착량의 증가가 일어나서 pH 7.5에서 최고 효율을 나타냈고 pH 8.0부터는 중금속의 침전이 일어나서 흡착량을 측정할 수 없었다. 높은 pH에서의 이러한 침전은 수산 이온이 증가하여 중금속이 수산화물 형태로 형성돼서 침전되는 것으로 보인다.

흡착능과 pH의 관계에 대하여 Kuycak 등[11]은 수용액 내의 수소 이온이 흡착제의 결합부위에 대하여 중금속 이온과 경쟁관계이고, 중금속 이온의 강도를 변화시켜서 흡착제의 활성에 영향을 끼치고, 또한 수소이온은 중금속 이온에 비하여 흡착제의 결합부위와 친화력이 크기 때문에 중금속을 탈착시키는 역할을 하여 중금속 흡착을 저해한다고 보고하였다. *Z. ramigera*의 경우 cell 표면의 carboxylate, phosphate, amino group과 polymer가 음전하를 띠다가 pH가 등전점 이하로 낮아지면 양전하를 띠게 되어서 양이온인 중금속들과 결합이 어려워져서 낮은 pH에서는 흡착량이 줄어드는 것으로 생각된다.

흡착 등온식 분석

25~200 ppm의 Cd²⁺, Co²⁺, Zn²⁺에 대한 흡착등온식을 살펴본 결과(Fig. 3) *Z. ramigera* 115SLR polymer가 가장 높은 흡착능을 나타내었다. Cd²⁺의 경우 *Z. ramigera* 115SLR polymer와 *Z. ramigera* 115 polymer는 각각 116(mg/g dw), 60(mg/g dw)까지 급격한 증가를 보

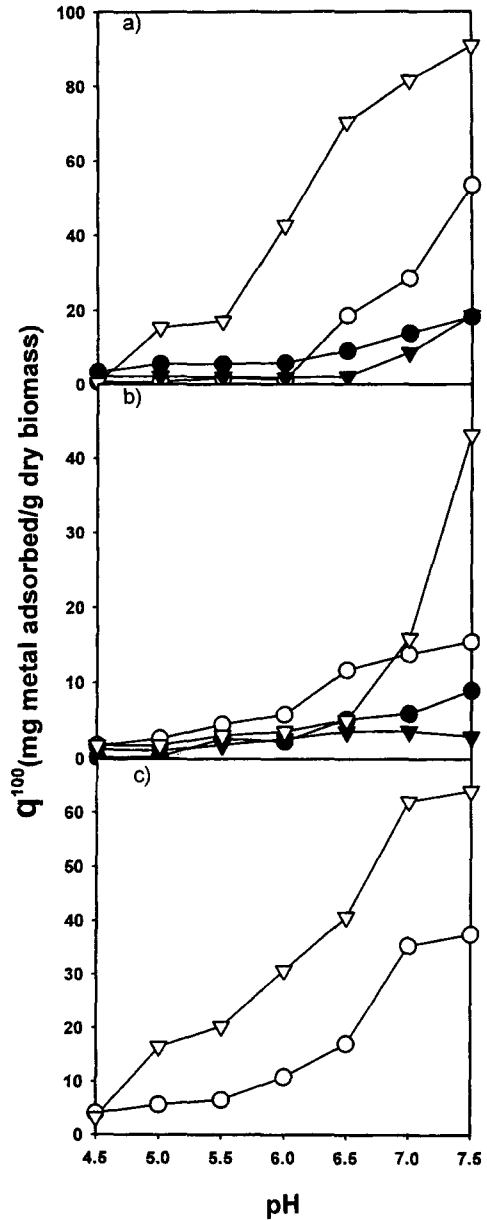


Fig. 2. The Effect of reaction pH on metal adsorption.
Z. ramigera 115(●: cell, ○: polymer)
Z. ramigera 115SLR(▼: cell, ▽: polymer)
 (a) Cd²⁺, (b) Co²⁺, (c) Zn²⁺.

다 굽은 반면 *Z. ramigera* 115 cell과 *Z. ramigera* 115SLR cell은 10(mg/g dw)부터 X축과 평행선을 긋고 더 이상의 흡착량의 증가가 관찰되지 않았다. Co²⁺에 대해서 각각 Cd²⁺ 흡착량과 비교하면 1/4 정도의 값을 보여서 Cd²⁺ 제거에 더 효율적인 것으로 나타났다. 초기 Co²⁺량 증가에 따른 흡착량 증가는 크지 않아서 *Z. ramigera* 115SLR polymer는 34(mg/g dw), *Z. ramigera* 115 polymer가 20(mg/g dw)에서 굽었다. Zn²⁺에 대해서는 *Z. ramigera* 115SLR polymer는 66(mg/g dw), *Z.*

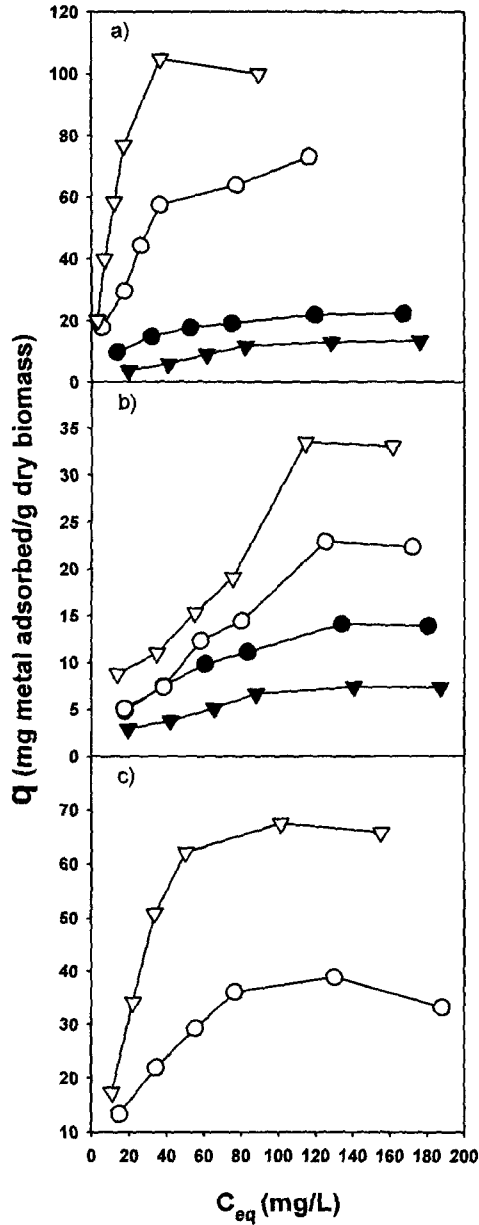


Fig. 3. Metal adsorption isotherms.
Z. ramigera 115(●: cell, ○: polymer)
Z. ramigera 115SLR(▼: cell, ▽: polymer)
 (a) Cd²⁺, (b) Co²⁺, (c) Zn²⁺
 C_{eq}: Final concentration of metal in the solution.

ramigera 115 polymer는 33(mg/g dw)에서 급었다. *Z. ramigera* 115는 capsule을 이루어서 S(BET)형 흡착등온식을 형성하고 다층흡착으로 보고[13]되었으나 세포와 polymer를 분리한 이번 실험의 결과 각각 L형 흡착등온식을 이루어서 *Z. ramigera* 115SLR의 cell과 polymer 자체는 단층흡착임을 나타냈고, 또한 수용성 polymer를 생산하는 특성을 갖기 때문에 polymer의 분리가 용이하여 대량생산시 분리과정이 효율적이고 경제적인 것으로 예상된다.

Table 3. Freundlich and Langmuir constants for various metal adsorption by *Z. ramigera* 115 and *Z. ramigera* 115SLR

			Cd ²⁺	Co ²⁺	Zn ²⁺
<i>Z. ramigera</i> 115 cell	Freundlich	1/n	0.327	0.473	
		K	0.654	0.119	
	Langmuir	Q _{max}	25.000	17.211	
		r ²	0.997	0.994	
<i>Z. ramigera</i> 115 polymer	Freundlich	1/n	0.479	0.710	0.398
		K	0.918	-0.194	0.720
	Langmuir	Q _{max}	78.740	30.674	58.823
		r ²	0.958	0.958	0.971
<i>Z. ramigera</i> 115SLR cell	Freundlich	1/n	0.619	0.456	
		K	-0.197	-0.126	
	Langmuir	Q _{max}	22.123	8.802	
		r ²	0.982	0.940	
<i>Z. ramigera</i> 115SLR polymer	Freundlich	1/n	0.496	0.598	0.491
		K	1.166	0.194	0.851
	Langmuir	Q _{max}	164.203	29.940	125.140
		r ²	0.992	0.823	0.968

r²: Correlation coefficient.

Freundlich 흡착등온식으로부터 1/n의 값이 0.1~0.5 사이에 있어야 중금속의 농도에 큰 영향을 받지 않는 좋은 흡착제라고 보고[1] 되었는데 본 실험에서는 Freundlich 흡착등온식 분석결과(Table 3) *Z. ramigera* 115SLR polymer와 *Z. ramigera* 115 polymer가 Cd²⁺에 대하여 각각 0.496, 0.479로 아연에 대하여 0.491, 0.398로 나타나서 흡착제로서 적합하였고 Langmuir 흡착등온식의 결과(Table 3) 최대 중금속 흡착량(Q_{max})은 Cd²⁺에 대하여 *Z. ramigera* 115SLR polymer와 *Z. ramigera* 115 polymer는 각각 164.2 mg/g, 78.7 mg/g로 이온교환수지인 Duolite GT-73의 67 mg/g, Amberlite IRA-400의 56 mg/g[8]보다 높은 값을 나타냈고 Zn²⁺에 대하여 125.1 mg/g, 58.8 mg/g 나타났는데 반하여 *Z. ramigera* 115 cell, *Z. ramigera* 115SLR cell은 두종류의 중금속에 대하여 낮은 값을 나타냈고 Co²⁺에 대해서는 polymer, cell 모두 30 mg/g이하의 낮은 최대흡착량을 나타냈다.

현재 *Z. ramigera* 115를 생물흡착제로 이용하고 있으나 회수가 용이하고 중금속 흡착능이 높은 *Z. ramigera* 115SLR polymer를 생물흡착제로 이용하면 중금속 제거에 보다 효과적일 것으로 예상되고, 이후 다양한 고정화 기술을 응용한 반응기의 개발로 현장에서 중금속을 제거

하는 효과가 기대된다.

요 약

Capsular polymer인 zooglan을 생산하는 *Z. ramigera* 115와 수용성 slime polymer 생산 변이주인 *Z. ramigera* 115SLR의 중금속 제거능을 비교하였다. 중금속 5종(Cd^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Fe^{2+})의 최저 성장저해농도는 두 균주 모두 유사하였다. Cd^{2+} 을 첨가하지 않은 경우에 비해 Cd^{2+} 500 ppm을 첨가한 액체 배지에서의 생체량은 *Z. ramigera* 115는 24%, *Z. ramigera* 115SLR은 50%로 감소하였고 동일한 생체량에 대하여 *Z. ramigera* 115 SLR이 *Z. ramigera* 115보다 Cd^{2+} 을 1.5배 더 제거하였다. 세포와 polymer를 분리하여 중금속 흡착능을 비교한 결과 polymer가 세포보다 높은 흡착량을 나타냈으며 최적 중금속 흡착 pH는 7.5였다. Langmuir 흡착등온선과 Freundlich 흡착등온선을 분석한 결과 Cd^{2+} 에 대하여 *Z. ramigera* 115SLR polymer는 *Z. ramigera* 115 및 이온 교환 수치보다 높은 최대흡착량과 흡착안정성을 보여서 흡착제로서 유용할 것으로 판단된다.

감사의 말

이 논문은 1995년도 생물화학공학 학술연구조성비(과제번호 E-06)와 명지대학교 천연신기능성소재 연구센터의 지원에 의하여 연구수행되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Ahn, K. H. and K. H. Suh. 1996. Pb biosorption by *Saccharomyces cerevisiae*. *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* **11**: 173-180.
- Aksu, Z., Y. Sag, and T. Kutsal. 1995. The biosorption of copper(II) by *C. vulgaris* and *Z. ramigera*. *Environ. Technol.* **13**: 579-586.
- Brown, M. J. and J. N. Lester. 1979. Metal removal in activated sludge: the role of bacterial extracellular polymer. *Water Res.* **13**: 814-819.
- Easson, D. D. 1987. A recombinant DNA approach to the design and synthesis of novel polysaccharides. MIT Ph. D. Thesis.
- Friedman, B. A. and P. R. Dugan. 1968. Concentration and accumulation of metallic ions by the bacterium *Zoogloea*. *Dev. Ind. Microbiol.* **9**: 381-388.
- Friedman, B. A. and P. R. Dugan. 1968. Identification of *Zoogloea* species and relationship to zoogloea matrix and floc formation. *J. Bacteriol.* **95**: 1903-1909.
- Heckenberg, A. L., P. G. Alden, J. Krol, J. P. Romano, P. E. Jackson, P. Jandik, and W. R. Jones. 1989. *Waters Innovative Method for Ion Analysis*, p. 137. Waters Co.
- Holen, Z. R., B. Volesky, and I. Prasetyo. 1993. Biosorption of cadmium by biomass of marine algae. *Biotechnol. Bioeng.* **41**: 819-824.
- Ikeda, F., H. Shuto, T. Saito, T. Fukui, and K. Tomita. 1982. An extracellular polysaccharide produced by *Zoogloea ramigera* 115. *Eur. J. Biochem.* **123**: 437-445.
- Kim, S. G., I. S. Kong, K. J. Kwon, C. Rha, A. J. Sinskey, and J. Y. Kong. 1994. Exopolysaccharide produced by *Z. ramigera* mutants and analysis of structural change by solution properties. *Biotechnol. Lett.* **16**: 789-794.
- Kuyucak, N. and B. Volesky. 1988. Biosorbents for recovery of metals from industrial solution. *Biotechnol. Lett.* **10**: 137-142.
- Lee, S. P. 1996. Cloning and sequencing of pyruvyl transferase gene involved in exopolysaccharide biosynthesis of *Zoogloea ramigera* 115SLR. *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* **24**: 415-422.
- Macaskie, L. E. and C. R. Dean. 1990. Metal-sequestering biochemicals, pp. 199-248. In B. Volesky(ed), *Biosorption of Heavy Metals*, CRC press, Boca Raton, FL.
- Norberg, A. B. and H. Persson. 1984. Accumulation of heavy metal ions by *Zoogloea ramigera*. *Biotechnol. Bioeng.* **26**: 239-246.
- Norberg, A. B. and S. O. Enfors. 1982. Production of extracellular polysaccharide by *Zoogloea ramigera*. *Appl. Environ. Microbiol.* **44**: 1231-1237.
- Norberg, A. B. and S. Rydin. 1984. Development of a continuous process for metal accumulation by *Zoogloea ramigera*. *Biotechnol. Bioeng.* **26**: 265-268.
- Nourbaksh, M. D., Y. Sag, D. Ozer, Z. Aksu, T. Kutsal, and A. Caglar. 1994. A comparative study of various sorbent for removal of chromium(VI) ions from a industrial waste waters. *Process biochem.* **29**: 1-5.
- Sag, Y., M. D. Nourbaksh, Z. Aksu, and T. Kutsal. 1995. Comparison of Ca-alginate and immobilized *Z. ramigera* as a sorbent for copper(II) removal. *Process biochem.* **30**: 175-181.
- Sag, Y., D. Ozer and T. Kutsal. 1995. A comparative study of the biosorption of lead(II) ions to *Z. ramigera* and *R. arrhizus*. *Process biochem.* **30**: 169-174.
- Suh, J. H., S. J. Oh, Y. S. Park, D. S. Kim, and S. K. Song, 1997. Biosorption of lead to *Saccharomyces cerevisiae* and *Aureobasidium pullulans*. *J. K.S.E.E.* **19**(6): 745-747.
- Troyano, E., S-P Lee, C. Rha, and A. J. Sinskey. 1996. Presence of acetate and succinate groups in the exopolysaccharide from *Zoogloea ramigera* 115SLR. *Carbohydrate Polymers* **31**: 35-40.