
폐 활성슬러지를 이용한 납과 크롬의 생체흡착 및 부상

Biosorption and Flotation of Lead and Chromium using Waste Activated Sludge

이창한
부산가톨릭대학교 환경공학과

Chang-Han Lee(chlee@cup.ac.kr)

요약

본 연구는 폐 활성슬러지를 이용하여 Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 의 생체흡착속도 및 평형을 도출하였으며, 가압부상법이 이용하여 A/S 비에 따른 폐슬러지의 분리효율을 비교하였다. 흡착량 및 접촉시간은 흡착평형과 동역학 모델식을 이용하여 모사하였다. 폐 활성슬러지상에서 Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 의 흡착평형은 Langmuir와 Redlich-Peterson식에 의해 잘 예측될 수 있었다. 흡착속도는 유사 1차 반응식보다는 유사 2차 반응식에 의해 더 잘 예측되었다. 가압부상법을 이용한 폐 활성슬러지의 분리효율은 90%이상 유지하는 것이 가능하였다.

■ 중심어 : 생체흡착 | 중금속 | 납 | 크롬 | DAF | 폐슬러지 |

Abstract

We have investigated biosorption kinetics and equilibrium of Pb^{2+} and Cr^{2+} using waste sludge, and separation efficiency of waste sludge by dissolved air flotation was evaluated in the various A/S ratio. The biosorption capacity and contact time were shown as a simulation of biosorption equilibrium and kinetics models. Biosorption equilibrium of the Pb^{2+} and Cr^{2+} onto the waste sludge could be fitted by the Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson, and Koble-Corrigan equation. The kinetics could be fitted by a pseudo-second-order rate equation more than a pseudo-first-order rate equation. The separation efficiency of waste sludge using DAF was kept above 90%.

■ keyword : Biosorption | Heavy Metal | Pb | Cr | DAF | Waste Sludge |

I. 서론

유기금속 및 중금속은 금속, 조선, 염료와 같은 여러 산업분야에서 다양하게 사용되고 있다. 그러나 제조공정의 효율상의 한계성 때문에 미량의 중금속이 배출되어 이로 인해 생태계의 치명적인 위협요인으로 부각되고 있다.

배출되는 중금속 폐수를 제거하는데 사용되는 중화

침전법, 이온교환법, 활성탄 흡착법, 및 생체흡착법 등이 널리 이용되고 있다[1]. 이 방법 중 효과적인 제거법은 중화침전법 및 이온교환수지가 일반적으로 이용되어 왔지만 저가의 생체물질을 이용한 생체흡착(biosorption)의 효용성에 대한 연구도 다양하게 이루어지고 있다 [2][3]. 생물학적 처리공정에서 발생하는 폐 활성슬러지는 다종의 미생물들로 구성되며, 다공성 플록으로 표면에 extracellular polymer(ECP) 등의 생체고분자물질이

존재하여 생체흡착제로서의 활용 가능성이 높다. Neufield와 Herman[4]은 폐 활성슬러지를 이용하여 중금속 흡착제거 특성을 평가하였다. 또한, *Laminaria ochroleuca*를 이용하여 중금속의 흡착량은 Langmuir와 Koble-Corrigan 식에 잘 예측할 수 있다고 보고한 바 있다[5]. Gulnaz[6]는 활성슬러지를 이용하여 염료의 생체흡착속도를 Lagergen의 유사 1, 2차 흡착속도식에 의해 모사된 예측치와 실험치가 일치한다고 보고한 바 있다.

본 연구에서는 폐 활성슬러지를 중금속 흡착제로의 사용 가능성을 조사하고, Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 의 흡착성능 및 폐 활성슬러지의 고액분리성능을 평가하고자 한다. 폐 활성슬러지의 흡착량과 흡착속도는 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 흡착 등온식과 Lagergen의 유사 1, 2차 흡착속도식을 적용하여 모델에 관련된 상수를 구하고 실험치와 예측치가 일치하는 정도를 비교하였다. 흡착된 폐슬러지를 효율적으로 분리하기 위해서 용존부상법(DAF)을 사용하여 중금속 농도 및 A/S 비에 따른 고액분리효율을 비교하였다.

II. 이론

1. 생체흡착 동역학 및 등온흡착 모델

1.1 동역학 모델

본 연구에서는 생체흡착의 메커니즘과 율속단계에 대한 연구를 위하여 Lagergen 동역학적 모델을 사용하였다. 유사 1차 반응식은 용액중의 피흡착제 농도가 세 포표면의 피흡착제 농도와 동일하다는 가정을 포함하고 있다[7].

1차 반응식은 시간에 따른 중금속의 흡착량과 평형상태의 흡착량을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq}{dt} = k_{1.ad}(q_e - q) \quad (1)$$

경계조건을 $t=0$ 에서 $t=t$, $q=0$ 에서 $q=q$ 로 하여 적분하면 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$\log(q_e - q) = \log q_e - \frac{k_{1.ad}}{2.303} t \quad (2)$$

여기에서, q 와 $k_{1.ad}$ 는 흡착시간, t 에 따른 흡착량과 1차 반응속도상수이다. 식(2)에 제시된 모델의 $\log(q_{eq} - q)$ 와 t 의 관계로부터 $k_{1.ad}$ 를 구할 수 있다.

또한, 유사 2차 반응속도식은 q 와 t 의 관계로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq}{dt} = k_{2.ad}(q_e - q)^2 \quad (3)$$

1차 반응과 동일한 경계조건에서 적분하면 식(3)은 식(4)과 같이 된다.

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_{2.ad}q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (4)$$

동역학적 모델이 2차 반응이라면 식(4)에 t/q 와 t 의 관계로부터 q_e 와 $k_{2.ad}$ 를 구할 수 있다.

다양한 바이오매스를 이용한 중금속과 염료의 생체 흡착은 흡착제와 피흡착물의 특성, 반응온도, 그리고 pH에 따라 달라진다고 하였다[5-9].

1.2 등온흡착모델

폐 슬러지와 중금속 용액을 혼합하면 일정한 온도에서 폐 활성슬러지에 흡착된 중금속 양은 용액의 중금속 농도와 평형을 이룬다. 이러한 흡착평형은 중금속 농도와 흡착제 량의 관계로부터 중금속의 흡착량(capacity) 및 친화도(affinity)를 알 수 있다. 본 실험에서는 생체 흡착공정의 기초설계인자를 도출하기 위하여 일반적으로 알려진 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 모델식을 사용하였다[7].

Langmuir 흡착등온식은 일정한 흡착점(site)에 단층 흡착(monolayer adsorption)이 된다고 가정하면 다음 식과 같이 표현된다.

$$q_e = \frac{q_{max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (5)$$

여기에서, q_{max} 와 b 는 단층흡착시 최대흡착량과 흡착 결합에너지를 나타내는 Langmuir 상수이다.

균일한 표면에서 단층흡착을 한다는 Langmuir 흡착등온식에 비해 Freundlich 흡착등온모델은 다양한 흡착점과 다층흡착을 가정하고 있으며, 다음과 같이 표현된다.

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (6)$$

여기에서, K_F 와 n 은 흡착량과 흡착강도를 나타내는 Freundlich 상수이다.

Redlich-Peterson 모델은 Langmuir와 Freundlich 흡착등온식을 개선한 경험식으로서 다음과 같이 표현된다.

$$q_e = \frac{K_{RP} C_e}{1 + a_{RP} C_e^\beta} \quad (7)$$

여기에서, K_{RP} , a_{RP} 와 β 는 Redlich-Peterson 상수이다. β 는 0에서 1사이의 값을 가지며, $\beta=1$ 이면 Langmuir 흡착등온식과 동일하게 된다.

Koble-Corrigan(Langmuir-Freundlich) 모델은 균일한 표면과 흡착된 물질간의 상호작용이 발생한다는 가정을 포함하고 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_e = \frac{q_{max} b C_e^{1/n}}{1 + b C_e^{1/n}} \quad (8)$$

II. 재료 및 방법

1. 중금속의 생체흡착

생체흡착제는 부산광역시에 소재하는 S하수처리장의 2차 침전지에서 반송되는 폐 활성슬러지를 채취하여 사용하였다. 폐 활성슬러지는 150mesh의 체를 이용하여 헹잡물을 제거하고 폐수 중에 존재하는 금속이온의 영향을 줄이기 위하여 탈이온수로 3회 세척하여 원심분리 후 실험에 사용하였다. 폐 활성슬러지 농도는 105℃에서 건조하여 데시게이터에서 1시간 동안 방냉한 후 건조중량을 측정하였다. 중금속 용액은 시약급 $Pb(NO_3)_2$ 와 $Cr(NO_3)_3$ 를 일정한 농도의 용액으로 제조한 후 희석하여 사용하였다. 흡착 실험은 폐 슬러지 현탁액, 50mL와 중금속용액, 50mL를 각각 원하는 농도의 2배가 되도록 준비하여 300mL의 삼각플라스크에서 부피비로 혼합한 후 진탕배양기에서 100rpm으로 교반하면서 온도, 30℃에서 중금속과 폐슬러지 농도를 각각 125 ~ 1000 mg/L와 500 ~ 3000 mg/L로 변화시키면서 생체흡착실험을 수행하였다. 일정시간마다 적당량의 시료를 채취하여 3000rpm에서 5분간 원심분리하여

상등액을 채취한 후 희석하여 원자흡광광도계(Shimadzu AA-670)로서 중금속 농도를 측정하였다.

2. 폐슬러지의 부상분리

폐슬러지의 가압부상분리 실험은 DAF-jar tester(ECE engineering Co., Ltd)를 사용하여 회분식으로 수행하였다. 중금속이 흡착된 폐슬러지는 중금속 혼합용액 1L에 가압수를 0.2L 주입하여 가압부상분리하였다. 가압부상조건은 실온으로 교반강도 182.6 sec⁻¹인 조건에서 일정시간 동안 생체흡착을 시켰다. 중금속이 흡착된 폐슬러지는 5 ~ 6 kgf/cm²로 가압된 가압수를 주입하여 부상시켰다. 폐슬러지와 용액이 분리된 것을 확인한 후 부상조 하부에서 시료를 채취하여 탁도와 고형물 농도를 측정하여 부상분리효율을 비교하였다.

III. 결과 및 토론

1. 생체흡착 속도 예측

중금속의 생체흡착 실험에서 흡착평형 도달 시간은 폐 활성슬러지의 농도를 1.0 g/L, 중금속 농도를 500 mg/L로 하여 흡착시간에 따른 흡착량(q)을 비교하여 [그림 1]에 나타내었다. 흡착 평형은 30분이내에 도달하였다.

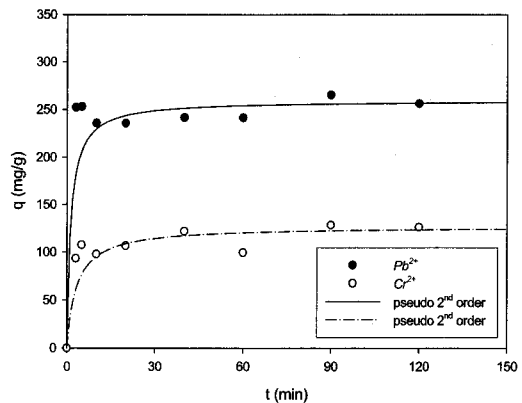


그림 1. 폐슬러지에 의한 Pb²⁺와 Cr²⁺의 생체흡착속도

표 1. 유사 1차와 2차 흡착속도식에 의한 Pb²⁺와 Cr²⁺의 흡착속도상수

Heavy Metal	$q_{e,exp}$ [mg/g]	$k_{1,ad}$ [min ⁻¹]	$q_{e,cal}$ [mg/g]	r^2	$k_{2,ad}$ [mg ⁻¹ min ⁻¹]	$q_{e,cal}$ [mg/g]	r^2
Pb ²⁺	265.05	0.0114	35.49	0.9888	0.0029	259.37	0.9979
Cr ²⁺	128.30	0.0227	29.05	0.8910	0.0024	126.78	0.9839

생체흡착속도를 파악하기 위하여 [그림 1]의 실험자료를 Lagergen 동역학적 모델에 적용하였다. Pb²⁺와 Cr²⁺의 생체흡착속도는 Lagergen이 제시한 유사 1차 및 2차 반응속도식을 사용하였으며, 실험자료를 식(2)의 log(q_e - q) 대 t의 관계로부터 기울기와 절편을 구하여 유사 1차 반응의 속도상수, k_{1,ad}와 예측치, q_{e,cal} 값을 결정하였다. 식(4)을 이용하여 t/q 대 t의 관계로부터 기울기와 절편으로 유사 2차 반응의 속도상수 k_{2,ad}와 예측치, q_{e,cal} 값을 결정하였다.

[표 1]은 생체흡착 속도상수(k_{1,ad} 및 k_{2,ad}) 및 예측치, q_{e,cal}를 나타내었다. Pb²⁺와 Cr²⁺의 생체흡착속도는 유사 1차 반응속도에 의한 모델링은 결정계수(r²)가 0.9888과 0.8910으로 반응 초기의 60분까지 실험치, q_{e,exp}와 예측치, q_{e,cal}가 상당한 차이를 보였다. 그러나 유사 2차 반응에 의한 예측은 상관계수가 각각 0.9979와 0.9839로서 유사 1차 반응속도보다 정확한 모사가 가능하였다. Aksu[10] 등은 sugar beet pulp를 이용한 Cu²⁺의 생체흡착에서 유사 1차(k_{1,ad})와 2차 반응속도상수(k_{2,ad})가 각각 0.0686과 0.0042를 나타내며 상관계수(r²)가 1에 근접하여 이론적 예측치와 실험치가 매우 높은 상관성을 보인다고 하였다. 하지만, Davis 등[11]의 갈조류를 이용한 생체흡착은 유사 1차 반응속도식 보다 유사 2차 반응속도식에서 높은 상관성을 가진다고 제시하였으며, 생체흡착속도가 화학흡착에 의해 반응속도 단계를 결정된다고 제안한 바 있다.

본 실험에서도 Pb²⁺와 Cr²⁺의 생체흡착이 유사 1차 반응속도 보다는 유사 2차 반응속도 모델에 잘 일치하였으며, Pb²⁺와 Cr²⁺의 생체흡착이 화학흡착이 속도단계로 작용한 것으로 판단되었다.

2. 흡착등온 모델

Pb²⁺와 Cr²⁺의 농도와 흡착제 량의 관계는 흡착제와 피흡착제 간의 흡착량(capacity) 및 친화도(affinity)를 나타낸다. 흡착량의 예측은 운전조건에 따른 흡착공정의 최적화 및 기초설계인자로 활용이 가능하다. 본 실험은 평형상태의 생체흡착량을 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 모델식을 사용하여 계산하였다[7].

[그림 2]와 [그림 3]은 식(5)-(8)을 사용하여 Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 흡착등온식에 의해 Pb²⁺와 Cr²⁺의 흡착량을 예측한 것이다. Redlich-Peterson 식과 Koble-Corrigan 식에 의해 Pb²⁺와 Cr²⁺의 흡착량을 예측하기 위한 상수 β와 1/n을 시행오차법으로서 계산하였다.

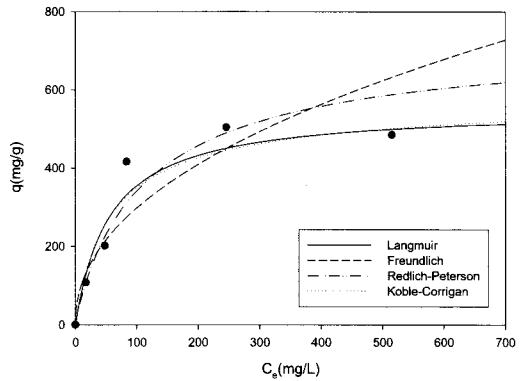


그림 2. 폐슬러지에 의한 Pb²⁺의 생체흡착량 예측.

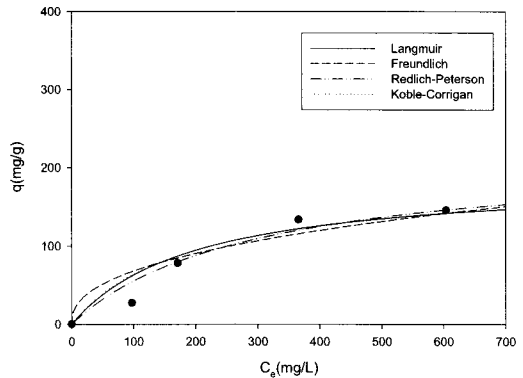


그림 3. 폐슬러지에 의한 Cr²⁺의 생체흡착량 예측.

Pb²⁺는 C_e가 48.4 mg/L까지 흡착량이 빠르게 증가하지만, C_e가 83.9 mg/L 이상에서는 거의 평형에 도달하였다. Pb²⁺는 Langmuir(r²=0.9818)>Redlich-Peterson(r²=0.9788)>Koble-Corrigan(r²=0.9728)>Freundlich(r²=0.8329) 흡착등온식의 순으로 평형흡착량과 농도의 상관계수가 높았다. Cr²⁺는 Langmuir(r²=0.9796)>Redlich-Peterson(r²=0.9771)>Koble-Corrigan(r²=0.9577)>Freundlich(r²=0.8670) 흡착등온식의 순이었다. Pb²⁺와 Cr²⁺의 생체흡착량은 Freundlich와 Koble-Corrigan 흡착등온식 보다는 Langmuir와 Redlich-Peterson 흡착등온식으로 예측하는 것이 상관성이 더 높게 나타났다. 이는 Pb²⁺와 Cr²⁺의 흡착이 이온교환과 같은 화학반응에 의한 화학흡착에 의해 진행되는 것으로 사료된다.

Langmuir와 Redlich-Peterson 흡착등온식이 Pb²⁺와 Cr²⁺의 생체흡착량의 예측에 적합하였다. Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson 및 Koble-Corrigan 흡착등온식으로부터 구한 모델 상수는 [표 2]과 [표 3]에 나타내었다.

표 2. Langmuir와 Freundlich 흡착등온식에서 도출된 Pb²⁺와 Cr²⁺의 모델 상수

Heavy Metal	Langmuir			Freundlich		
	q _{max} , mgg ⁻¹	b	r ²	1/n	K _c	r ²
Pb ²⁺	553.57	0.018	0.9818	0.459	35.819	0.8329
Cr ²⁺	188.61	0.005	0.9796	0.406	10.539	0.8670

표 3. Redlich-Peterson와 Koble-Corrigan 흡착등온식에서 도출된 Pb²⁺와 Cr²⁺의 모델 상수

Heavy Metal	Redlich-Peterson				Koble-Corrigan			
	K _{RP}	a _{RP}	β	r ²	q _{max} , mgg ⁻¹	b	1/n	r ²
Pb ²⁺	10.884	0.025	0.96	0.9788	740.41	0.012	0.92	0.9728
Cr ²⁺	1.035	0.007	0.94	0.9771	221.24	0.004	0.98	0.9577

Pb²⁺의 경우 C_e가 83.9 mg/L 이상의 농도 영역에서 Langmuir와 Koble-Corrigan 식의 예측치와 실험치가 차이를 보였다. Freundlich와 Redlich-Peterson 식은 C_e가 48.4 mg/L 이하의 영역에서는 예측치와 실험치가 근

접한 결과를 나타내지만, 최대흡착량의 예측에 있어서는 실험치와 상당한 차이를 보였다. Cr²⁺의 경우 C_e가 97.8 mg/L 구간을 포함한 영역에서 Freundlich와 Koble-Corrigan 식에서 실험치와 예측치가 상당한 차이를 보였다. Durson[12] 등은 Langmuir, Freundlich, 및 Redlich-Peterson의 흡착등온식을 이용하여 Aspergillus niger의 Pb²⁺ 생체흡착 특성 및 모델상수를 도출하였으며, 이 결과에서 본 연구결과와 유사하게 Freundlich식에 비해 Langmuir와 Redlich-Peterson식에 의해 모사한 예측치가 실험치에 더 잘 일치한다고 제시하였다.

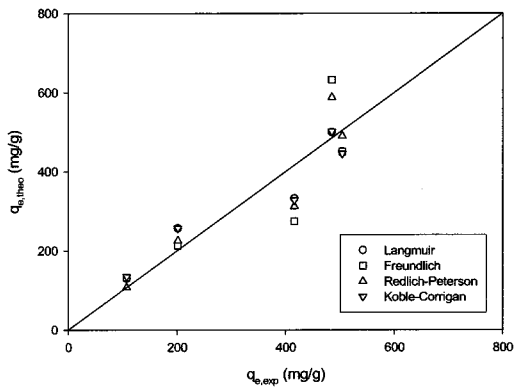


그림 4. Pb²⁺의 평형흡착량에 대한 실험치와 예측치의 비교.

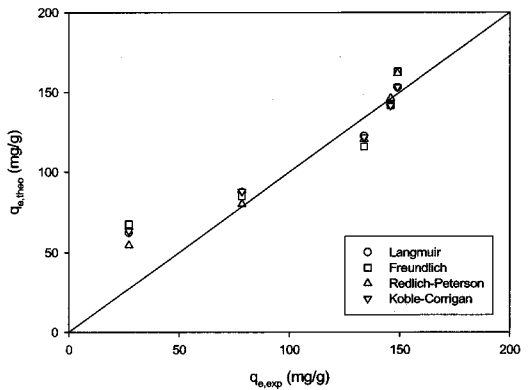


그림 5. Cr²⁺의 평형흡착량에 대한 실험치와 예측치의 비교.

[그림 4]와 [그림 5]는 Pb²⁺와 Cr²⁺의 평형농도와 흡착량에서 상기의 4가지 모델에 의한 예측치와 실험치를

비교한 것이다. [그림 4]에서 Pb^{2+} 는 $q_{e,exp}$ 와 $q_{e,cal}$ 가 약 400.0 mg/L이상의 고농도 영역에서 예측치와 실험치가 큰 차이를 보였다. 실험치($q_{e,exp}$)가 485.0 mg/g인 조건에서 Langmuir와 Koble-Corrigan 식에 의한 예측치($q_{e,cal}$)는 각각 499.2과 501.3 mg/g로서 Freudlich와 Redlich-Peterson 식에 의한 예측치($q_{e,cal}$)는 632.4와 588.1 mg/g보다 실험치에 근접하였다. [그림 5]에서 Cr^{2+} 는 $q_{e,exp}$ 와 $q_{e,cal}$ 가 약 100.0 mg/L이하의 영역에서 예측치와 실험치가 차이를 보였다.

이 결과를 비교해 보았을 때 Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 의 생체흡착은 다양한 흡착점과 다층흡착을 가정한 Freudlich와 Redlich-Peterson 식에 비해 일정한 흡착점(site)에 단층흡착(monolayer adsorption)이 된다고 가정한 Langmuir 식과 이 식을 수정한 Koble-Corrigan식($1/n \approx 1$)에 의해 예측에 근접하였다. 그러나 Cr^{2+} 의 경우, 저농도 영역에서 예측치와 실험치가 차이를 보인 것은 활성슬러지의 구조가 2가 양이온과 체외고분자물질의 관능기가 가교로 형성[13]되어 있어 중금속의 생체흡착과 이온교환이 가역적으로 이루어지기 때문인 것으로 사료되었다.

3. 폐 활성슬러지의 고액분리

폐 활성슬러지를 이용한 생체흡착에서 평형흡착량 및 흡착속도에 대한 예측도 중요하지만, 중금속이 흡착된 폐 생체흡착체를 효율적으로 고액분리 및 탈수도 중요한 문제이다.

[그림 6]은 Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 가 폐 활성슬러지의 A/S 비에 따른 고액분리효율을 나타낸 것이다. 중금속 흡착 후 부상시간을 10분으로 고정하여 실험하였다. 중금속의 흡착되지 않은 폐 활성슬러지의 고액분리효율은 A/S 비가 0.008 mL/mg 이상이었을 때 94.3% 이상이었다. Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 가 흡착된 폐 활성슬러지는 A/S 비가 0.008 mL/mg인 조건에서 고액분리효율이 각각 91.3%와 93.8%로 나타났다. 이 결과는 고액분리에 있어 중금속이 흡착된 폐 활성슬러지의 경우 플록의 밀도가 높아져 고액분리효율이 낮아진 것으로 판단되었다. 하지만 A/S 비가 0.01 mL/mg 이상이면 90% 이상의 고액분리효율을 얻을 수 있었다.

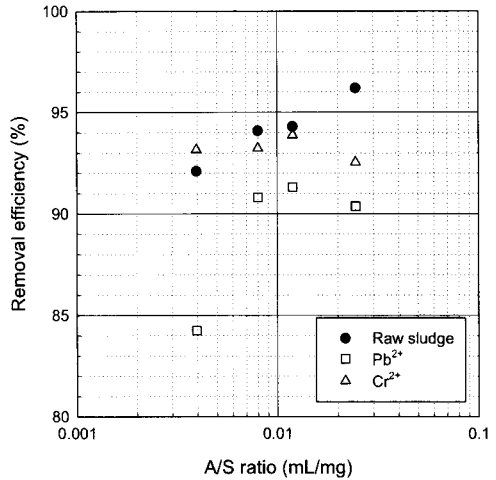


그림 6. A/S 비에 따른 폐 활성슬러지의 부상효율

IV. 결론

본 연구는 폐 활성슬러지를 이용한 Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 의 생체흡착성능(흡착속도식와 흡착등온식)과 폐슬러지의 고액분리효율을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

폐 활성슬러지에 Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 가 생체흡착될 때 흡착속도는 유사 1차 반응속도 보다는 유사 2차 반응속도식에 잘 일치하였다. Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 의 생체흡착량은 Freudlich와 Koble-Corrigan 보다는 Langmuir와 Redlich-Peterson 흡착등온식이 예측하는 것이 상관성이 더 높게 나타났다. 중금속의 흡착되지 않은 폐 활성슬러지의 고액분리효율은 A/S 비가 0.008 mL/mg에서 94.3%이었다. Pb^{2+} 와 Cr^{2+} 가 흡착된 폐 활성슬러지는 A/S 비가 0.008 mL/mg인 조건에서 고액분리효율이 각각 91.3%와 93.8%로 나타났다.

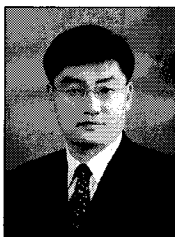
참고 문헌

- [1] N. S. Wei, *Removal of heavy metals from wastewaters*, B&L Information Services, 1980.
- [2] Betül Arıcan et al, "Mechanistics of nickel sorption by activated sludge," *Process Biochem.*, Vol.37, No.11, pp.1307-1315, 2002.
- [3] F. Eric and R. Jean-Claude, "Heavy biosorption by fungal mycelial by-products : mechanisms and influence of pH," *Appl. Microbiol. & Biotech.*, Vol.37, pp.399-403, 1992.
- [4] R. D. Neufeld and E. R. Herman, "Heavy metal removal by activated sludge," *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, Vol.47, pp.310-329, 1975.
- [5] C. Aldrich and D. Feng, "Removal of heavy metals from wastewater effluents by biosorptive flotation," *Mine. Eng.*, Vol.13, No.10-11, pp.1129-1138, 2000.
- [6] O. Gulnaz, A. Kaya, F. Matyar, and B. Arıkan, "Sorption of basic dyes from aqueous solution by activated sludge," *J. Hazardous Materials*, Vol.108, pp.183-188, 2004.
- [7] Z. Aksu, "Biosorption of reactive dyes by dried activated sludge : equilibrium and kinetic modelling," *Biochem. Eng. J.*, Vol.7, No.1, pp.79-84, 2001.
- [8] Y. Göksungur, S. Üren, and U. Güvenç, "Biosorption of cadmium and lead ions by ethanol treated waste baker's yeast biomass," *Bioresour. Tech.*, Vol.96, No.1, pp.103-109, 2005.
- [9] J. P. Chen, W. R. Chen, and R. C. Hsu, "Biosorption of copper from aqueous solutions by plant root tissues," *J. of Ferm. & Bioeng.*, Vol.81, No.5, pp.458-463, 1996.
- [10] Z. Aksu and I. Alper, "Removal of copper(II) ions from aqueous solution by biosorption onto agricultural waste sugar beet pulp," *Process Biochemistry*, Vol.40, No.9, pp.3031-3044, 2005.
- [11] T. A. Davis, B. Volesky, and A. Mucci, "A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae," *Wat. Res.*, Vol.37, No.18, pp.4311-4330, 2003.
- [12] A. Y. Dursun, "A comparative study on determination of the equilibrium, kinetic and thermodynamic parameters of biosorption of copper(II) and lead(II) ions onto pretreated *Aspergillus niger*," *Biochemical Engineering Journal*, Vol.28, No.2, pp.187-195, 2006.
- [13] J. H. Bruus, P. H. Nielsen, and K. Keiding, "On the stability of activated sludge flocs with dewatering," *Wat. Res.*, Vol.26, No.3, 1597-1604, 1992.

저자 소개

이창한(Chang-Han Lee)

정회원



- 1996년 2월 : 대구대학교 생물공학(공학사)
- 1998년 2월 : 부산대학교 화학공학(공학석사)
- 2002년 8월 : 부산대학교 화학공학(공학박사)

• 2007년 3월 ~ : 부산가톨릭대학교 환경공학과(전임강사)

<관심분야>: 수질환경, 폐기물처리