

폐 활성슬러지의 화학적 개질을 통한 비소의 생물흡착 특성

이상민 · 김동욱*

공주대학교 환경공학과

Biosorption Characteristics of Arsenate by Chemically Modified Activated Sludge

Sang Min Lee and Dong Wook Kim*

Department of Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan 330-717, Korea

Cheap and environmental sound biosorbent was made for the adsorption of arsenate using an waste activated sludge. The biosorbents were methylated in 9hours and 24 hours respectively for the better adsorption of arsenate. The amount adsorbed of arsenate(V) increased with increasing methylation time. The specific arsenate adsorption was 0.06 mmol As(V)/g biomass when the biosorbent was methylated in 24 hours. The methylated biosorbents were also studied with pH 5, 7, and 9. The pH of the solution affect the amount of adsorption of arsenate of the biosorbent even though it was methylated. The specific arsenate adsorption of the biosorbent at pH 5 was best and it was three times greater than the amount of arsenate adsorbed at pH 9.

Key words : biosorption, activated sludge, impregnation, arsenate, methylation

비소를 제거하기 위한 경제적이고 친환경적인 생물흡착제 제조를 위해 폐 활성슬러지를 사용하여 생물흡착제로서의 적용성을 검토하였다. 생물흡착제로 사용된 폐 활성슬러지는 비소 흡착능 향상을 위해 각각 9시간과 24시간 메틸화(methylation) 되었고 흡착된 비소는 24시간 메틸화한 활성슬러지가 9시간보다 향상된 결과를 나타내었다. 24시간 메틸화한 활성슬러지의 비비소흡착량(specific As adsorption)은 0.06 mmol As(V)/g biomass이고 용액의 pH가 비소에 미치는 영향은 생물흡착제로 사용된 활성슬러지가 메틸화된 후에도 지속되었다. 비소 제거에 대한 pH 영향은 5, 7, 9 세가지 경우에 대해서 조사되었고 이중 pH 5일때 비비소흡착량(specific As adsorption)이 pH 9인 경우보다 3 배 큰 비흡착량을 나타내었다.

주요어 : 생물흡착, 활성슬러지, 표면개질, 비소, 메틸화

1. 서 론

오염토양을 정화하거나 복원하는 기술은 오염물질의 종류에 따라 토양증기추출법(Fann *et al.*, 1998), 초임계유체추출법(Montero *et al.*, 1997), 화학적 산화법, 소각법(한국지하수토양환경학회, 2003), 미생물분해법(Dugan and Pickrun, 1972) 등이 있다. 그러나 상기 기술이 적용되는 것은 주로 유기 오염물질을 처리하는 기술들이고 폐광산에서 발생하는 Pb, As, Cr, Cd, Zn 와 같은 중금속은 상기 기술로는 적정처리가 불가능하

다. 중금속에 대한 처리방법으로는 현재 불용화법이 활발히 연구되고 있는데(정익재 등, 1998) 알카리 상태에서 서도 용출이 가능한 As의 경우 재용출의 문제점을 갖고 있다.

비소를 비롯한 중금속의 생물흡착에 관한 연구는 환경복원과 자원보존이라는 관점으로 볼 때 매우 흥미로운 연구이고, 생물 흡착제는 무기 흡착제나 합성수지 흡착제보다 환경적으로 안전하고 값싸며 대량공급이 용이한 흡착재료로 평가되고 있다. 또한 무기 흡착제나 합성수지 흡착제는 비용이 많이 들어 대규모 수량을

*Corresponding author: dwkim@kongju.ac.kr

처리하는데 적합하지 않으며 흡착 처리 후 2차 부산물의 처리가 용이하지 않다는 단점이 있다. 생물흡착은 무기 흡착제에 비해 저렴한 비용으로 수행이 가능하고 응집 침전공정에 비해 흡착 성능이 우수하여 처리수의 수질을 보장할 수 있다는 특징을 가지고 있으며 처리 후 소각을 통해 쉽게 부산물을 처리할 수 있다는 장점이 있다. 특히 특정 미생물의 경우는 중금속에 대해 선택성을 보이는 경우도 있다. 이와 같은 경우는 수중에 알카리 금속이 존재하여도 중금속만을 선택적으로 제거할 수 있는 특징이 있으며 적절한 고정화 기술과 결합시키면 생물흡착제의 재생과 재이용도 가능하다 (Esposito *et al.*, 2001).

최근 생물흡착제를 이용한 중금속의 제거에 관련된 연구는 게 껍질에서 추출한 chitosan을 이용한 구리, 크롬 및 비소의 제거(Kartal and Imamura, 2005), 조류(algae)를 이용한 중금속의 제거(Gupta *et al.*, 2001), 균류(fungal biomass)를 이용한 As(V)의 제거(Loukidou *et al.*, 2003) 등의 연구가 있으나 많은 연구들이 생물흡착제가 비소나 크롬과 같은 산화음이온을 흡착할 때 흡착능이 pH 3이상에서 감소하기 때문에 강산조건과 같은 한정된 pH 조건에서 흡착실험을 수행하였다. 이러한 흡착조건은 생물흡착제를 범용적으로 사용하기에 큰 장벽으로 작용한다. 왜냐하면 소규모 유량이 발생하는 산업폐수의 경우는 pH조정이 가능하겠지만 대규모 유량이 발생하는 폐수나, 하수 혹은 오염도양의 복원과 같은 경우 pH를 조정하는 것은 현실적으로 적합하지 않다. 따라서 비소의 생물흡착에서 pH가 미치는 영향이나 중성 pH 영역에서 비소의 생물흡착에 대한 연구는 미진한 실정이다. 최근에 이러한 단점을 보완하기 위해 균류의 일종인 효모(yeast biomass)를 메틸화시켜 이용한 비소와 크롬의 흡착(Seki *et al.*, 2005)에 대한 연구가 보고된 정도이며 산업폐기물인 활성슬러지를 이용한 비소의 제거에 대한 연구는 극히 미미한 실정이다.

중금속의 생물흡착에 관한 연구는 주로 효모(Seki *et al.*, 2005)나 진균류(fungi)(Loukidou *et al.*, 2003) 혹은 특정 단일세균(Esposito *et al.*, 2001)을 이용하여 연구되었고 활성슬러지를 이용한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 활성슬러지가 생물흡착제로 각광을 받지 못한 이유는 상기 언급한 미생물들은 단일종으로 성상이 균일하기 때문에 흡착제로서의 화학적 특징을 쉽게 파악할 수 있는 반면 활성슬러지는 수많은 세균들이 비균일상으로 구성되어 있기 때문에 이들의 생물 흡착을 위한 화학적 특성을 파악하는 것이 용이하지 않았기 때문이다. 그러나 잉여슬러지로 발생하는 활성슬러

지의 양이 해마다 증가하고 기존의 처리방법인 해양투기와 매립이 제한됨에 따라 활성슬러지를 이용한 생물흡착제의 개발은 매우 경제적인 흡착제의 활용가능성과 동시에 폐기물 처리라는 두 가지 기능을 동시에 만족할 수 있다.

국내 하수처리장에서 발생하는 슬러지량은 2002년 기준으로 볼때 연간 207만톤으로 이중 80%가 매립(9%)과 해양투기(72%)에 의존하고 있다(수자원교육원, 2005). 또한 하수처리시설의 지속적인 증가로 해마다 슬러지 발생량이 증가하고 있으며 슬러지의 해양투기가 어려워지고 있어 정부는 향후 슬러지의 처리를 재활용과 소각으로 방향을 조정하고 있는 실정이다(차호영, 2004). 본 연구는 하수처리장의 활성슬러지 공정에서 발생하는 폐슬러지를 이용하여 비소의 생물흡착에 대한 적용성을 조사했고 아울러 폐슬러지의 표면을 메틸화(methylation)시켜서 표면전하를 변경함으로써 중성 pH에서 비소의 폐슬러지의 생물흡착 특성 및 pH, 비소농도 그리고 표면개질에 따른 메틸화도에 따른 폐슬러지의 비소 흡착 특성을 조사하였다.

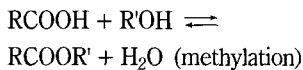
2. 비소의 특성과 제거방법

비소는 존재 형태에 따라 다양한 구조를 나타내는데 대표적인 것으로는 유비철석(arsenopyrite, FeAsS), 코발타이트(cobaltite, CoAsS), 테난타이트(tennantite, $Cu_{12}As_4S_{13}$), 니콜라이트(nicolite, NiAsS) 등이 있다. 또한 용액상에 이온 형태로 존재하는 비소는 arsenite (H_3AsO_3 , $H_2AsO_3^-$, $HAsO_3^{2-}$), arsenate (H_3AsO_4 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$), methylarsonic acid ($H_2AsO_3CH_3$), 수소화비소(arsine, AsH_3), dimethylarsinic acid ($AsO_2H(CH_3)_2$), dimethylarsine ($HAs(CH_3)_2$)와 trimethylarsine ($As(CH_3)_3$)으로 존재하며 주로 -3, 0, +3, +5의 산화 상태를 지닌다. 비소는 산화조건인 pH 2 이하에서 H_3AsO_4 형태로 존재하며, pH 2~11에서는 $H_2AsO_4^-$ 와 $HAsO_4^{2-}$ 로 존재한다. 환원조건에서는 H_3AsO_3 로 존재하나 pH의 증가에 따라 H_2AsO_3 로 전이된다. 그리고 pH가 12 이상인 경우에만 $HAsO_3^{2-}$ 형태로 존재한다.

비소는 합금, 유리, 흑매 제조 등에 사용되며, 대부분은 살충제 및 제초제 제조공정에서 사용된다. 비소는 피부, 신장, 위장, 신경, 간장 장애 등을 유발하며, 급성중독 시 사망에 이르게 하는 치명적 독성을 가지고 있다. 또한 음용수 내에 0.2 mg As/L 존재 시 피부암 발생률이 5%를 나타내어 비소 제거의 필요성이

절실한 상황이다(김정배, 2003). 자연적인 비소의 제거는 다음과 같은 주요한 세 가지 기작에 의해 이루어진다. 1) 철과 알루미늄의 수화된 산화물, 점토 및 탄산염에 의한 흡착 2) 철 산화물과의 공침 3) 광물질내의 인산과의 동종치환(isomorphic substitution)이 있으며 인위적인 비소의 제거 방법으로는 알루미늄이나 점토와 같은 무기 흡착제를 이용하여 제거하는 방법이 있으나 무기흡착제 가격이 비싸다는 단점이 있다. 카올리나이트(kaolinite)와 몬토릴로나이트(montmorillonite)에 대한 비소(VI)의 최대 흡착능은 pH 5에서 일어나며, 비소(III)는 5 이상의 pH에서 흡착능이 점차 증가하여 pH 8에서는 비소(III)의 흡착능이 비소(VI)의 흡착능보다 큰 결과를 보이고 있다. 비소의 흡착능은 다양한 환경조건에 의해 영향을 받으며, 저니에 흡착된 비소(VI)는 비소(III)로 환원되기에 충분한 조건이 주어지면 다시 재이동하며, 알카리 조건하에서 이동성이 증가하는 특성이 있다.

메틸화는 카르복실기(COO⁻)에 메틸기(CH₃⁺)가 결합하여 RCOOCH₃ 형태로 변환시켜 산화음이온(Oxyanion) 형태를 가진 As(V) (비산이온, arsenate)와 정전기적 반발력을 감소시켜 비소와의 결합력을 증가시키려는 조작이다. 메틸화는 이론적으로 카르복시산과 알코올이 서로 혼합되어 있는 경우 촉매로서 황산(H₂SO₄)이나 염산(HCl)이 첨가되면 두성분이 평형상태에서 에스테르화 반응쪽으로 이동하여 에스테르와 물을 만든다.



미생물표면에는 음이온 그룹들이 존재하며, 이중 카르복실기(carboxyl group)의 수소이온을 메틸기(CH₃⁺)로 치환하여 표면에 존재하는 음전하특성을 제거함으로써 산화음이온인 비산이온(arsenate)과 미생물과의 정전기적 반발력을 감소시킴으로써 비소에 대한 생물흡착능을 향상시키는 것이다.

3. 실험방법 및 재료

3.1. 재료

비소 흡착실험을 위해 Na₂HAsO₄ (Sodium arsenate dibasic heptahydrate)가 비소원으로 사용되었으며 비소 흡착실험을 위해 비소농도는 0.25, 1.0, 2.0 mM로 달리하여 준비하였고 이온강도 조절을 위해 NaNO₃을 사용하였다. 흡착제로 사용된 활성슬러지는 C하수종말처리장의 반송 슬러지를 채취해서 사용하였으며 활성슬

러지의 표면개질을 위해 사용된 용매는 메탄올을 사용하였다.

3.2. 활성 슬러지를 이용한 생물 흡착제 제조

채취한 활성슬러지는 원심분리기를 사용하여 3,300 rpm 속도로 15분간 원심분리 후 상정액을 버리고 침전 고형물을 수거하여 냉동건조기를 이용하여 24시간 건조시켰다. 건조 후 막자사발을 이용하여 분말로 제조하고 120번 체(직경 125 μm)를 이용하여 체 거름하여 통과된 분말만 비소 흡착실험에 사용하였고 통과하지 못한 분말은 제거하였다.

위에서 준비된 분말 활성 슬러지 50 g을 0.01 M NaOH 용액 0.5 L에 분산시키고 2시간 동안 교반시킨다. 교반 후 3,300 rpm으로 30분간 원심 분리하여 상정액을 버리고 증류수로 씻어주는 작업을 2회 반복한다. 0.5 L 메탄올에 분산시킨 후 24시간 동안 교반하고 24시간 후 3,300 rpm으로 30분간 원심분리 후 상정수를 버리고 냉동 건조시킨다. 냉동건조 후 발생한 펠렛을 막자로 갈아 분말로 만들고 120번 체로 체 거름하여 통과한 가루만 취하였다(이후 ASP로 칭함).

3.3. 활성 슬러지의 메틸화

위에서 제조한 ASP중 10g을 1L 메탄올(0.1M HCl) 용액에서 교반시키면서 메틸화를 수행하였다. 9시간과 24시간 각각 교반시켜 활성슬러지 표면의 carboxyl group의 양성자와 메틸기와의 치환을 도모하였다. Seki 등(2005)에 의하면 효모를 9시간 메틸화 시 메틸화도가 64%이고 24시간 메틸화 시 94%로 보고되고 있다. 이를 기준으로 활성슬러지를 시료 9시간과 24시간 메틸화를 수행하였다. 메틸화 후 3,300 rpm에서 20분간 원심분리 후 상정액을 버리고 증류수로 씻어주었다. 남은 펠렛은 냉동건조 시킨 후 막자로 분말제조 후 120번 체로 체 거름하여 desiccator 속에 건조 보관하였다(이후 MEASP로 칭함).

3.4. 비소 흡착실험

비소 흡착실험은 위에서 제조한 생물흡착제(ASP와 MEASP)를 0.01 M NaNO₃ 용액에 분산시킨 후 0.1 M NaOH 용액과 0.1 M HNO₃ 용액을 이용하여 각각 pH 5, 7, 9 세가지 형태로 준비하였다. 비소 흡착을 위해 사용되는 생물흡착제는 공히 1 g/L를 사용하고 비소용액의 농도를 0.25, 1.0 2.0 mM로 변화 시키면서 실험을 수행하였다.

생물흡착제 1g (ASP, 9hr MEASP, 24hr MEASP)

을 각각 0.01 M NaNO₃ 용액 1 L에 넣고 혼합한 후, 위에서 제조한 ASP, 9 hr MEASP, 24 hr MEASP 용액을 각각 325 mL씩 500 mL 비이커에 담고 pH를 0.1 N HNO₃ 및 0.1 N NaOH로 5, 7, 9로 조절하였다. 위에서 제조한 0.5, 2.0, 4.0 mM 비소용액 25 mL와 생물흡착제 용액(ASP, 9 hr MEASP, 24 hr MEASP) 25 mL를 혼합하여 1시간 동안 교반기에서 교반하였다. 평형에 도달한 후 용액을 3,300 rpm에서 20분간 원심분리한 후 상정액을 다른 튜브에 옮긴 후 pH를 분석한 후 비소분석을 수행하였다. 비소 분석은 환원기화장치가 연결된 원자흡광분석기(HG-AAS; Hydride-Generator Atomic Absorption Spectrometer, Perkin Elmer ZL 5100)로 분석하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 비소의 존재형태

Fig. 1은 산화조건에서 수용액의 pH에 따른 비소이온 존재형태를 나타낸 것이며 Table 1은 비소의 안정도 상수(stability constant)를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보여주듯이 pH가 4 이하로 낮아지면 비소의 형태는 H₃AsO₄와 H₂AsO₄가 주종을 이루며 pH가 알칼리성으로 증가하면 HAsO₄²⁻나 AsO₄³⁻와 같은 음이온성이 강한 비소화합물이 주종을 이루게 된다. 또한 pH의

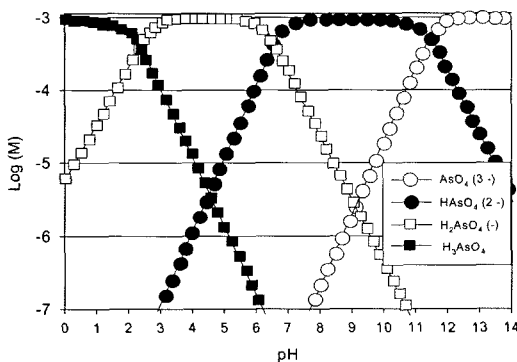


Fig. 1. Speciation diagram of As(V) predicted by MINEQL (Loukidou *et al.*, 2003).

Table 1. Stability constants of As(V) species (Seki, 2005).

Equilibrium formula	pKs
$H_3AsO_4 \leftrightarrow H_2AsO_4^- + H^+$	2.19
$H_2AsO_4^- \leftrightarrow HAsO_4^{2-} + H^+$	6.94
$HAsO_4^{2-} \leftrightarrow AsO_4^{3-} + H^+$	11.50

변화는 세포표면의 전하특성과도 밀접한 관계를 가지고 있다. pH가 낮아질수록 세포표면의 전하는 음이온성이 약화되고 심지어 양이온성을 나타내기도 한다 (Kefala *et al.*, 2000; Loukidou *et al.*, 2003). 미생물 세포표면에 존재하는 amino group과 carboxyl group은 낮은 pH 조건에서 protonation이 일어나서 세포표면의 겉보기 전하(overall charge)를 양이온화 하려는 경향이 커지며 이러한 특성은 음전하로 하전된 중금속의 흡착능을 증가시킬 수 있다(Loukidou *et al.*, 2003).

4.2. pH 영향

Fig. 2는 24시간 메틸화시킨 활성슬러지를 이용하여 비소 흡착 시 pH의 영향을 조사한 것으로 X축은 비소의 평형농도(Equilibrium concentration of As(V): Ce)이고 Y축은 비소의 비흡착량을 나타낸다. pH 9의 경우 비소의 비 흡착곡선은 전형적인 Langmuir 흡착식과 유사하게 나타난다. 그러나 pH 5와 pH 7의 경우는 비 흡착량 곡선이 변곡점을 나타내고 있지 않다. 이는 비소의 비 흡착량이 주입 비소 농도가 증가함에 따라 더 큰 값을 나타냄을 의미한다. pH 7과 pH 9에서 비교해 보면 비소가 고농도로 주입되었을 때 비 흡착량의 차이가 뚜렷이 나타났지만 저농도 비소 주입 농도 영역에서는 비 흡착량이 크게 차이가 나지 않았다. 그러나 pH 5의 경우는 저농도 영역에서부터 비소의 비 흡착량의 차이를 나타내었다. Seki 등(2005)의 연구에 의하면 24시간 메틸화된 효모의 경우 비 흡착량이 0.1 mmol As/g biomass를 나타내어 본 연구에서 나타난 생물흡착제로 사용된 활성슬러지 시료의 비 흡착량 0.06 mmol As/g biomass 보다 높다. 이러한

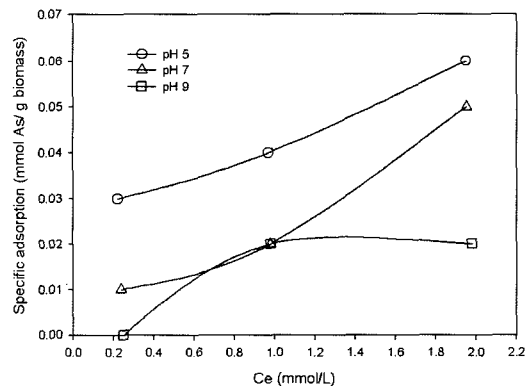


Fig. 2. As biosorption of activated sludge: Effect of the pH at a constant biomass concentration: 1 g/L of biosorbent, 24 hours of methylation time and Ce (equilibrium concentration of As(V)).

비 흡착량의 차이는 비소를 흡착하거나 이온 교환할 수 있는 활성부위(active sites)의 수가 활성슬러지의 경우가 더 적음을 의미하는 것이다. 활성슬러지와 효모의 비소흡착량 차이는 크게 두 가지 제한요소가 있다. 첫째는 활성슬러지는 다양한 미생물들로 구성된 비 균 일체이고 따라서 세균의 표면 전하특성이 일정하지 않다는 점이고 둘째는 활성슬러지는 효모에 비해 세포외 고분자물질이 많다는 것이다. 일반적으로 미생물이 분비하는 세포외 고분자물질은 단백질과 다당류가 주류를 이룬다고 알려져 있으며 이들 물질의 화학적 구조와 물리적 성질은 매우 다양하고 carboxylate, hydroxyl 및 phosphate와 같은 이온화된 그룹을 가지고 있으며 자연 조건에서 음전하를 나타내어 양이온을 나타내는 카드뮴, 납 및 수은 같은 중금속의 흡착에 유리하다(Dugan and Pickrun, 1972; Bitton and Freihofer, 1978).

Fig. 3은 9시간 메틸화시킨 활성슬러지를 이용하여 비소 흡착 시 pH의 영향을 조사한 것이다. 메틸화도의 차이로 인해 비소의 비 흡착량이 24시간과 큰 차이를 나타낼 것이라고 예측한 것에 비해서는 작지만 9시간과 24시간 메틸화 조건에서의 비소의 비 흡착량은 분명한 차이를 나타내었다. pH를 5, 7, 그리고 9로 변화시키면서 흡착실험을 수행한 결과는 초기 비소 농도가 2 mM 이고 pH 7의 경우 비 흡착능이 0.03 mmol As(V)/g biomass로서 24시간 메틸화시 비 비소 흡착량(specific As adsorption) 0.05 mmol As(V)/g biomass 보다 작은 비소 흡착량을 나타내었다. pH 9의 경우는 외부환경이 수산화이온(OH⁻)과 같은 음이온이 많기 때문에 세포벽의 표면전하도 음이온으로 하전 되기 용이하며 이러한 전하적 특성은 생물흡착제로 사용된 세포와 산화음이

온 형태의 비소와 정전기적 반발력을 유발시켜 메틸화의 효과가 뚜렷이 나타나지 않았다. 초기 비소의 농도가 높을수록 비소의 비 흡착량이 커짐을 알 수 있다. 이것은 일반적인 흡착제의 거동과 동일한 결과로서, 용액 속에 존재하는 비소의 농도가 높을수록 생물흡착제에 존재하는 평형 흡착량이 증가하게 된다는 것을 의미하며, 실제 비소를 함유한 폐수를 처리할 때 비소 농도에 따른 중요한 정보, 즉 제거율과 잔류농도의 예측을 가능하게 한다.

4.3. 메틸화 시간이 비소 흡착에 미치는 영향

Fig. 4~6은 메틸화 시간에 따른 비소의 비 흡착량을 나타낸 것이다. Fig. 4는 pH 5에서 비소 비 흡착량을 나타낸 것으로서 9시간 메틸화한 흡착제의 흡착능은 0.05 mmol As/g biomass를 나타내었고 24시간

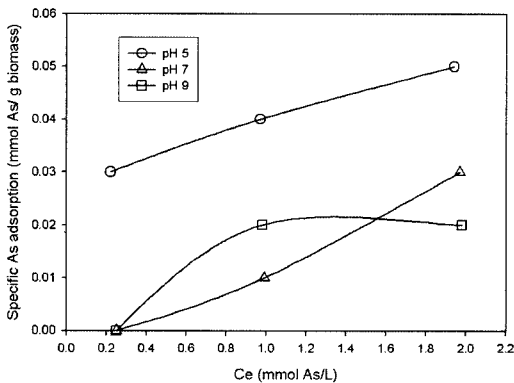


Fig. 3. As biosorption of activated sludge: Effect of the pH at a constant biomass concentration: 1 g/L of biosorbent, 9 hours of methylation time and Ce (equilibrium concentration of As(V)).

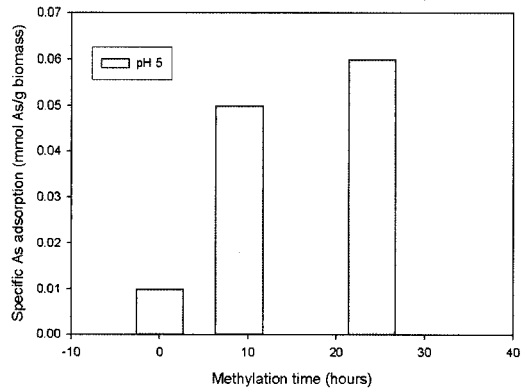


Fig. 4. As(V) biosorption of activated sludge: Effect of the methylation time at a constant biomass concentration and pH (X=1 g/L, pH 5 and initial As(V) conc. 2.0 mM).

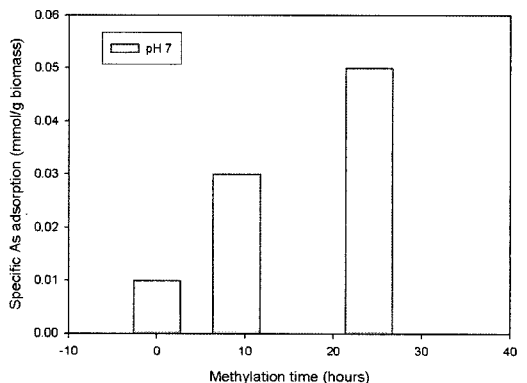


Fig. 5. As(V) biosorption of activated sludge: Effect of the methylation time at a constant biomass concentration and pH (X=1 g/L, pH 7 and initial As(V) conc. 2.0 mM).

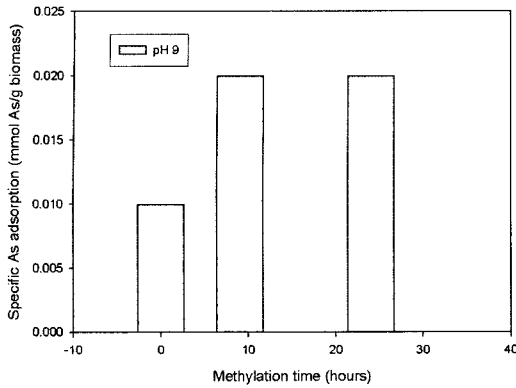


Fig. 6. As(V) biosorption of activated sludge: Effect of the methylation time at a constant biomass concentration and pH ($X=1$ g/L, pH 9 and initial As(V) conc. 2.0 mM).

메틸화한 생물흡착제 경우 비소 흡착능은 0.06 mmol As/g biomass를 나타내었다. Fig. 5는 pH 7에서 비소 비 흡착량을 나타낸 것으로 9시간 메틸화한 생물흡착제는 0.03 mmol As/g biomass의 흡착능을 나타내었고 24시간 메틸화한 생물흡착제는 0.05 mmol As/g biomass를 흡착함으로써 메틸화시간이 증가함에 따라 흡착도가 증가하였다. Fig. 6은 pH 9에서 비소 비 흡착량을 나타낸 결과로서 9시간 메틸화한 생물흡착제는 0.02 mmol As/g biomass의 흡착능을 보였으며 24시간 메틸화한 생물흡착제는 0.02 mmol As/g biomass의 결과를 나타내어 메틸화 시간의 변화에 따른 비소의 비 흡착량은 작지만 분명한 차이를 나타내었다.

활성슬러지를 메틸화하여 생물 흡착하는 경우 메틸화하지 않은 경우에 비해 pH 5의 경우 최대 6배의 비 흡착량 증가(Fig. 4)를 나타내었고 pH 7 경우 5배 그리고 pH 9의 경우 2배 차이를 나타내었다. 균일계가 아닌 활성슬러지 경우도 메틸화가 비소 흡착을 위한 표면 특성을 변화시켰음을 알 수 있고 이러한 비소의 생물흡착능은 흡착 시 용액의 pH에 민감한 영향을 받고 있음을 알 수 있는데 pH가 5에서 가장 높은 비 흡착능을 나타냈었고 pH 9에서 가장 낮은 비 흡착능을 나타내었다. 이는 높은 pH에서는 OH⁻ 이온이 음이온을 나타내는 비소화합물과 경쟁적 위치에 있기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

잉여 활성슬러지를 이용하여 산화음이온 형태의 비소화합물을 제거하는 생물흡착제를 제조하여 비소의 비 흡착량을 평가하였으며 활성슬러지의 표면을 화학적으

로 개질하기 위해 메틸화를 수행한 후 비소에 대한 비 흡착능에 대한 비교 실험을 수행하였다. 본 연구에서 제조한 폐활성슬러지 경우에는 생물흡착제로 주로 사용되는 메틸화한 효모(Seki *et al.*, 2005)의 비 비소 흡착량(specific As(V) adsorption)의 60%에 해당하는 결과를 나타내었지만 저렴하고 친환경적인 생물흡착제로서의 특성을 나타냈다. 비소의 흡착 시 용액의 pH는 세포표면의 전하의 음이온성과 비소이온의 음이온성을 동시에 감소시키는 특성으로 산성일수록 비소의 흡착능이 증가하는 경향을 나타내었으며 이는 활성슬러지를 메틸화한 후에도 지속적으로 영향을 주었다. 또한 활성슬러지의 메틸화는 음이온을 띠고 있는 비소에 대한 흡착능을 증가시켰으며 9시간 메틸화한 활성슬러지의 경우 최초 비소농도가 2 mM인 경우 비 흡착량 0.05 mmol As/g biomass를 나타내었고 24시간 메틸화한 흡착제는 0.06 mmol As/g biomass를 나타내어 메틸화를 수행하지 않은 활성슬러지의 경우보다 최대 6 배 큰 비 흡착량을 나타내었다.

사 사

본 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의해 연구되었으며(KRF 2004-003-D00166), 연구를 수행함에 있어 많은 도움을 주신 광주과학기술원 김경웅 교수님과 강소영 연구원께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 김정배 (2003) 표면개질을 통한 흡착제에 의한 비소 및 셀렌 제거에 관한 연구. 한국수처리기술연구회, v. 11, p. 33-41.
- 손병찬 (1983) 선광공학, p. 27-29.
- 수자원교육원 (2005) 하수설계과정, p. 230-231.
- 정익재, 서보희, 최용수, 박홍목 (1998) 과산화수소를 이용한 광미중에 함유된 비소의 불용화. 대한환경공학회 추계학술대회, p. 7-8.
- 차호영 (2004) 오존분해 기술을 이용한 슬러지 감량화 및 자원화 기술. 유기물자원화, 12권, p. 32-40.
- 한국지하수도양환경학회 (2003) 토양오염. 향문사, p. 222.
- Bitton, G. and Freihofer, V. (1978) Influence of extracellular polysaccharides on the toxicity of copper and cadmium toward *Klebsiella aerogenes*. Microb. Ecol., v. 4, p. 119-125.
- Dugan, P. R. and Pickrun, H. M. (1972) Removal of mineral ions from water by microbially produced polymers. Proc. 27th Ind. Waste Conf., Purdue Univ., Eng. Ext. Ser. No. 141, p. 1019-1038.
- Espósito, A., Pagnanelli, E., Lodi, A., Solisio, C. and Veglio, F. (2001) Biosorption of heavy metal by *Sphaerotilus natans*: an equilibrium study at different pH and

- biomass concentration. *Hydrometallurgy*, v. 60, p. 129-141.
- Fann, D., Pal, D., Lory, E., Karr, L., Mathews, A. P. and Price, P. A. (1998) Hot air vapor extraction of petroleum contaminated sites, Proceeding of the eighth international offshore and polar engineering conference. Montreal, Canada, 24-29, p. 313-321.
- Gupta, V. K., Shrivastava, A. K. and Jain, N. (2001) Biosorption of chromium(VI) from aqueous solution by green algae *spirogyra* species. *Water Res.*, v. 35, p. 4079-4085.
- Seki H, Suzuki A. and Maruyama, H. (2005) Biosorption of chromium(VI) and arsenic(V) onto methylated yeast biomass. *Journal of Colloidal and interface Science*, v. 281, p. 261-266.
- Kartal, S. N. and Imamura, Y. (2005) Removal of copper, chromium, and arsenic from CCA-treated wood onto chitin and chitosan. *Bioresource Technology*, v. 96, p. 389-392.
- Kefala, M., Zoubouli, A. and Matis, K. (2000) Biosorption of cadmium ions by actinomycetes and separation by flotation. *Environ. Pollut.*, v. 104, p. 283-293.
- Loukidou, M. X., Matis K. A. and Zouboulis, A. I. (2003) Removal of As(V) from wastewater by chemically modified fungal biomass. *Water Res.*, v. 37, p. 4544-4552.
- Montero, G. A., Schnells, K. B. and Giorgio, T. D. (1997) Supercritical fluid extraction of contaminated soil. *J. Environ. Health*, v. 32(2), p. 481-495.

2005년 8월 9일 원고접수, 2005년 10월 4일 게재승인.