



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년03월26일

(11) 등록번호 10-1506094

(24) 등록일자 2015년03월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

B01J 20/24 (2006.01) *B01J 20/28* (2006.01)

(21) 출원번호 10-2013-0130570

(22) 출원일자 2013년10월30일

심사청구일자 2013년10월30일

(56) 선행기술조사문헌

KR1019990057014 A*

Xuan-Huong Do외 5인, 2013년 한국대기환경학회 정기학술대회 발표논문집, 141쪽*

Jin Hee Park외 4인, Plant Soil (2011), 348권, 439-451쪽*

Minh-Viet Nguyn외 2인, 2013년 한국대기환경학회 정기학술대회 발표논문집, 142쪽*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

기술이전 희망 : 기술양도, 실시권허여, 기술지도

(73) 특허권자

울산대학교 산학협력단

울산광역시 남구 대학로 93

(72) 발명자

이병규

울산광역시 남구 문수로335번길 27, 102동 1604호(옥동, 롯데인벤스로얌)

(74) 대리인

위병갑

전체 청구항 수 : 총 12 항

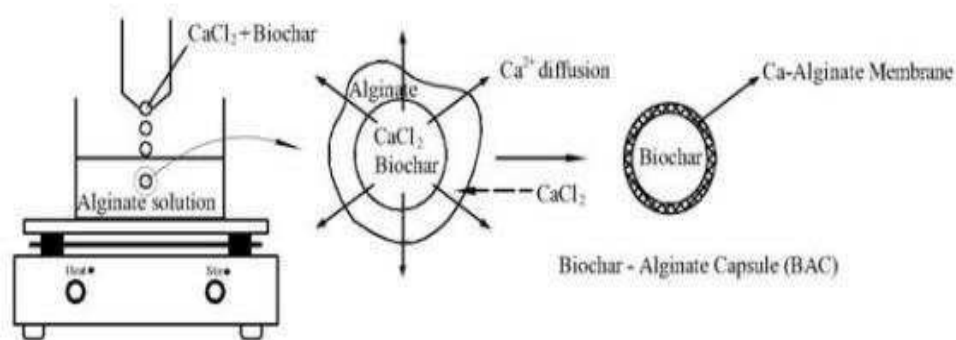
심사관 : 박함용

(54) 발명의 명칭 바이오숯-알긴산 캡슐을 이용한 중금속 흡착제, 이의 제조 방법 및 이를 이용한 수용액 중의 중금속 제거방법

(57) 요약

본 발명은 바이오숯-알긴산 캡슐을 이용한 중금속 흡착제, 이의 제조 방법 및 이를 이용한 수용액 중의 중금속 제거방법에 관한 것으로서, 보다 구체적으로는 코어의 바이오숯 외면을 알긴산 겔의 매트릭스가 가교결합에 의해 감싸고 있는 코어셸 구조의 바이오숯-알긴산 캡슐을 제공한다. 본 발명에 따르면, 우수한 흡착능을 가지며, 기존의 고가의 흡착제인 활성탄이나 알긴산 흡착제보다 훨씬 저렴한 비용으로 흡착 캡슐의 제조가 가능할 뿐 아니라, 재생하여 반복재사용 할 수 있어서 경제성이 더욱 우수하다.

대표도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

수용액 중의 중금속을 흡착하여 제거하기 위한 흡착제로서, 코어의 바이오숏 외면을 알긴산 겔의 매트릭스가 감싸고 있는 코어셸 구조를 갖는 바이오숏-알긴산 캡슐을 포함하는 중금속 흡착제에 있어서, 상기 바이오숏-알긴산 캡슐은 구형이고 직경이 2 내지 5 mm이며 BET 표면적이 300 내지 350 m^2/g 이고 수분함량이 94-96%이며, 바이오숏(BC)과 알긴산(AG)의 중량비는 BC:AG = 8:1인 것을 특징으로 하는 중금속 흡착제.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 중금속은 납인 것을 특징으로 하는, 중금속 흡착제.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 바이오숏은, 계분(chicken manure)을 450℃의 온도에서 30분간 열분해하여 수득하고, 상기 알긴산은 β -D-만유로닉산과 α -L-글루코닉산이 혼합된 헤테로 다당류이며, 상기 코어의 바이오숏 외면을 알긴산 겔의 매트릭스가 가교결합에 의해 감싸고 있는 것을 특징으로 하는, 중금속 흡착제.

청구항 4

삭제

청구항 5

삭제

청구항 6

수용액에 제1항에 따른 중금속 흡착제를 포함하는 중금속 제거용 혼합용액을 투입하여 중금속과 바이오숏-알긴산 캡슐을 접촉시키는 흡착공정을 포함하는 수용액 중의 중금속 제거 방법에 있어서, 상기 바이오숏-알긴산 캡슐은 구형이고 직경이 2 내지 5 mm이며 BET 표면적이 300 내지 350 m^2/g 이고 수분함량이 94-96%인 것을 특징으로 하는 수용액 중의 중금속 제거 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

중금속 제거용 혼합용액의 pH 값은 5.0인 것을 특징으로 하는, 수용액 중의 중금속 제거 방법.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 중금속 제거용 혼합용액의 접촉시간은 90분 내지 150분 것을 특징으로 하는, 수용액의 중금속 제거 방법.

청구항 9

제6항에 있어서,

흡착공정; 및 흡착공정에 의해 중금속이 흡착된 바이오숏-알긴산 캡슐은 탈착제를 함유하는 용액과 접촉시켜 중금속을 탈착시키는 탈착공정을 포함하는 재생공정을 반복하여 수행하는 것을 특징으로 하는, 수용액의 중금속 제거 방법.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 탈착제는 HCl, HNO_3 , 및 EDTA 중 선택된 것을 특징으로 하는, 수용액의 중금속 제거 방법.

청구항 11

제9항에 있어서,

상기 재생공정을 10회 수행한 후 바이오숯-알긴산 캡슐의 흡착용량은 최초 흡착용량 대비 70% 이상인 것을 특징으로 하는, 수용액의 중금속 제거 방법.

청구항 12

농업 잔류물을 300℃ 내지 500℃에서 20분 내지 1시간 동안 열분해한 후 부가적 산화를 통한 산화적 활성화를 수행하여 바이오숯을 제조하는 단계; 및

상기 제조된 바이오숯과 금속성 이가 양이온의 혼합 용액을 알긴산염 함유 용액에 적가하여 바이오숯의 외면에 알긴산 겔의 멤브레인을 형성하는 단계;를 포함하는, 바이오숯-알긴산 캡슐의 제조방법에 있어서, 상기 바이오숯과 금속성 이가 양이온의 혼합 용액에는 잔탄검이 더욱 포함되고 상기 알긴산염 함유 용액에는 계면활성제가 더욱 포함되는 것을 특징으로 하는 바이오숯-알긴산 캡슐의 제조방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 부가적 산화는 30℃ 내지 50℃에서 4시간 동안 5.0M H_3PO_4 로 활성화하여 수행되는 것을 특징으로 하는, 바이오숯-알긴산 캡슐의 제조방법.

청구항 14

제12항에 있어서,

상기 알긴산염은 알긴산나트륨이고, 상기 금속성 이가 양이온은 $CaCl_2$, $SrCl_2$, $BaCl_2$ 및 $AlCl_3$ 중 선택되는 것을 특징으로 하는, 바이오숯-알긴산 캡슐의 제조방법.

청구항 15

삭제

명세서

기술분야

[0001]

본 발명은 바이오숯-알긴산 캡슐을 이용한 중금속 흡착제, 이의 제조 방법 및 이를 이용한 수용액 중의 중금속 제거방법과 이의 재생방법에 관한 것으로, 보다 구체적으로는 기존의 고가인 활성탄이나 알긴산 흡착제보다 훨씬 저렴한 비용으로 흡착 캡슐의 제조가 가능하고, 바이오숯 보다 훨씬 우수한 흡착능을 갖는 코어-셸 구조의 중금속 흡착제에 관한 것이다.

배경기술

[0002]

수질 오염원의 하나인 중금속에 의한 피해는 그 심각성이 오래 전부터 잘 알려져 왔다. 중금속은 비록 소량일지라도 생태계의 먹이사슬을 통해 인체내에 유입되면 배출되지 않고 계속해서 축적되기 때문에 인체 내의 생리 작용에 여러 가지 악영향을 미친다.

[0003]

특히 잘 알려진 중금속 중 하나인 납은 많은 산업 분야에서 널리 이용되고 있으나, 적절한 처리 없이 물이나 폐수 시스템으로 배출되고 있다. 따라서, 폐수 중의 납 이온 농도를 줄이기 위한 노력이 행해지고 있다. 수용액 중에서 납 이온을 제거하기 위한 방법은 예를 들어, 화학적 침전법, 증발법, 이온교환법, 흡착법, 교결작용(cementation), 전기분해, 역삼투압법 등을 들 수 있다.

[0004]

그러나 화학적 침전법을 사용할 때는 처리 후 발생하는 많은 양의 슬러지가 이차적인 오염원으로 작용하고 낮은 농도의 중금속은 제거하지 못하는 문제점이 있으며, 이온교환수지나 분리막은 고형의 오염 물질을 다량 함유하는 오염수의 처리가 힘들고 비용이 많이 드는 문제점이 있다.

[0005]

이 중 흡착법이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있고, 한국특허공개 제1995-17756호는 알긴산 염의 중금속 흡착

특성을 이용하여 중금속을 처리하는 것을 내용으로 하고 있다. 하지만 알긴산을 이용하는 데에는 비용이 많이 들뿐 아니라 대량의 수처리에는 현실적으로 사용하기 어렵다. 또한 알긴산 나트륨은 흡습성이 매우 크기 때문에 수처리 공정 중 처리수를 흡수하여 처리수의 점성을 증가시켜 분리 공정 자체에 어려움이 따를 수 있다. 이와 같이 흡착법 역시 광범위하게 이용되기에는 흡착제의 구입 및 재사용 비용이 높아 한계가 있었다. 이러한 한계를 해결하기 위해 값싸고 친환경적인 흡착제를 개발하고 이를 이용하여 납이온을 효율적으로 높은 흡착용량으로 제거할 필요가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0006] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 제2005-0078461호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 상술한 문제점을 해결하기 위하여, 저렴한 바이오솜과 흡착효율이 우수한 알긴산이 코어셸 구조를 이루는 캡슐을 이용하여 저렴하고 높은 흡착용량을 갖는 친환경적 흡착제를 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0008] 또한, 본 발명은 바이오솜-알긴산 캡슐을 이용하여 오염수 중의 중금속을 효과적으로 제거하기 위한 방법과 중금속이 흡착된 바이오솜-알긴산 캡슐로부터 중금속을 탈착하여 재생 및 반복사용하는 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

[0009] 또한, 본 발명은 중금속을 흡착 및 탈착하기 용이한 구조로 바이오솜-알긴산 캡슐을 제조하는 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0010] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명은 오염수 중의 중금속을 흡착하여 제거하기 위한 흡착제로서, 코어의 바이오솜 외면을 알긴산 겔의 매트릭스가 감싸고 있는 코어셸 구조의 바이오솜-알긴산 캡슐을 포함한다.

[0011] 상기 바이오솜은 넓은 비표면적과 미세기공 구조를 가지며, 활성 관능기와 높은 pH를 나타내지만 충분한 흡착용량을 나타내지 못하는 단점이 있다. 이에 본 발명에서는 알긴산이 겔을 형성하는 특성과 중금속을 흡착하고 제거하는 특성을 동시에 가졌다는 사실에 착안하여 바이오솜의 표면을 알긴산겔로 둘러싸 코어셸을 형성한 바이오솜-알긴산 캡슐을 개발하기에 이른 것이다.

[0012] 본 발명에 따른 바이오솜-알긴산 캡슐은 납, 카드뮴, 구리, 아연, 비소, 수은, 니켈 등 다양한 중금속을 흡착하여 제거하는데 유용하게 사용될 수 있으며 특히 납 이온의 제거에 효과적이다.

[0013] 상기 바이오솜은 바이오매스(biomass)가 산소결핍상태에서 고온에 노출될 때 열분해되어 만들어지는 솜이다. 일부 바이오솜 형태는 납이온 제거에 충분히 효과적이지 않으나, 이는 파우더 형태의 바이오솜을 수집하고 복구시키기가 쉽지 않기 때문이다. 이에 본 발명에서는 계분(chicken manure) 등 가금 폐기물 등의 농업 잔류물을 저속열분해하여 얻어지는 바이오솜을 이용하여 높은 흡착용량을 갖는다.

[0014] 상기 알긴산은 베타-D-만유로닉산과 알파-L-글유로닉산이 혼합된 헤테로 다당류로서 화학적으로는 탄수화물에 속하지만 전분 섬유소들과는 달리 카르복실기를 갖는 천연 고분자로서 음전하를 가지고 있기 때문에 Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , 및 Cr^{3+} 등 양전하를 갖는 중금속 이온의 제거용으로 사용될 수 있다. 이에 부족한 바이오솜의 납이온 제거능을 개선하고 중금속이 흡착된 흡착제를 쉽게 재생하기 위해 연구되었다. 이러한 알긴산의 효능을 발휘하기 위해 본 발명에서는 바이오솜의 표면을 알긴산 겔로 감싸는 코어셸 구조를 갖는 캡슐을 개발하였다.

[0015] 본 발명에 따른 바이오솜-알긴산 캡슐은 코어셸 구조를 이루고 있으며 외부의 알긴산 겔 멤브레인과 내부의 바이오솜은 금속성 이가 양이온에 의해 가교결합을 형성함으로써 계란 박스 모델의 형태로 형성된다. 이와 같은 코어셸 구조로 인해 높은 비표면적과 함께 표면 알긴산겔에 의해 흡착과 탈착이 용이한 구조로 되어 흡착제의 반복재생성을 높였다.

- [0016] 상기 캡슐은 구형이고 직경이 2 내지 5 mm으로 수집 및 복구에 용이하고, BET 표면적이 300 내지 350 m^2/g 로서 알긴산 비드나 알긴-활성탄 비드보다 높은 표면적을 나타냄으로써 우수한 흡착용량을 갖는다. 또한, 수분함량이 94-96%이므로 처리수 중의 수분 흡수가 거의 일어나지 않는다.
- [0017] 상기 바이오솜-알긴산 캡슐에서 바이오솜(BC)의 비율이 높으면 충분한 흡착용량을 달성할 수 없고, 알긴산(AG)의 비율이 높으면 비용증가가 유발되는바, 기존의 바이오솜이나 활성탄 흡착제에 비해 훨씬 우수한 성능을 가지면서도 경제성을 달성할 수 있는 바이오솜-알긴산 캡슐의 바람직한 함량비는 BC:AG = 8:1(중량비)이다.
- [0018] 본 발명은 또한, 상기 바이오솜-알긴산 캡슐을 중금속 흡착제로서 이용하여 수용액중의 중금속 제거 방법을 제공한다.
- [0019] 본 발명의 중금속 제거 방법은 수용액에 바이오솜-알긴산 캡슐의 중금속 흡착제를 포함하는 중금속 제거용 혼합용액을 투입하여 수용액 중의 중금속과 바이오솜-알긴산 캡슐을 접촉시켜 흡착시키는 흡착공정을 포함한다.
- [0020] 상기 중금속 제거용 혼합용액의 pH 값은 5.0인 것이 바람직하고, 이보다 높거나 낮으면 흡착용량이 감소하는바 이는 pH 변화에 의한 표면 전하의 변화에 의한 것이다.
- [0021] 상기 중금속 제거용 혼합용액의 접촉시간은 중금속의 흡착 평형이 이루어질 때까지 수행되는 것이 바람직하고 흡착평형에 이르는 시간은 예를 들어 90분 내지 150분 정도일 수 있다.
- [0022] 본 발명은 또한 상기 바이오솜-알긴산 캡슐을 중금속 흡착 및 탈착 과정을 통해 재생하여 반복사용하는 기술을 제공한다. 이에 따르면 상기의 흡착 공정을 통해 중금속이 흡착된 바이오솜-알긴산 캡슐을 탈착제를 함유하는 용액과 접촉시켜 중금속을 탈착시키는 탈착공정을 수행한다.
- [0023] 상기 탈착제는 특별히 제한되지 않으며 등의 중금속의 종류와 비용을 고려하여 다양한 용리제 중에서 적절히 선택될 수 있는바, 예를 들어 HCl, HNO₃, 및 EDTA 등을 들 수 있고, 바람직한 예에서 Pb²⁺를 제거하기 위한 바람직한 탈착제는 HNO₃일 수 있다. 상기 탈착공정의 효율성은 통상 탈착제의 농도증가에 따라 증가하지만, 일정 농도 이상에서는 추가적인 증가가 발생하지 않고 오히려 활성사이트에 대한 양이온간 경쟁 작용으로 탈착 효율이 떨어지게 된다.
- [0024] 본 발명에 따른 바이오솜-알긴산 캡슐은 재생 성능이 매우 우수하며 구체적으로 상기 흡착과 탈착 공정 사이클인 재생공정을 10회 수행한 후 바이오솜-알긴산 캡슐의 탈착 효율은 바람직하게는 80% 이상, 또는 90% 이상이고, 흡착용량은 초기 흡착용량 대비 바람직하게는 70% 이상이다. 이와 같이 우수한 재생 효과로 낮은 비용으로 효과적인 중금속 제거가 가능하다.
- [0025] 본 발명은 또한, 하기 단계들을 포함하는 상기 바이오솜-알긴산 캡슐을 제조하는 방법을 제공한다.
- [0026] 농업 잔류물을 300℃ 내지 500℃에서 20분 내지 1시간 동안 저속 열분해한 후 부가적 산화를 통한 산화적 활성화를 수행하여 바이오솜을 제조하는 단계; 상기 제조된 바이오솜과 금속성 이가 양이온의 혼합 용액을 알긴산염 함유 용액에 적가하여 바이오솜의 외면에 알긴산 겔의 멤브레인을 형성하는 단계;를 포함하고, 먼저 바이오솜을 제조한 후 이를 알긴산과 반응시켜 알긴산 겔의 멤브레인이 바이오솜 코어의 외면을 감싸는 코어셸 구조의 바이오솜-알긴산 캡슐을 제조한다.
- [0027] 상기 바이오솜은 계분과 같은 농업 잔류물 등의 바이오매스를 저속 열분해하여 얻어지며 부가적 산화를 통한 산화적 활성화 과정을 통해 바이오솜의 표면적을 높일 수 있다. 상기 부가적 산화는 예를 들어, 30℃ 내지 50℃에서 4시간 동안 5.0M H₃PO₄로 활성화하여 수행될 수 있다.
- [0028] 다음으로 바이오솜을 CaCl₂, SrCl₂, BaCl₂ 및 AlCl₃과 같은 금속성 이가 양이온과 혼합하여 혼합 용액을 만든다. 상기 혼합용액에는 바람직하게는 잔탄검이 더욱 포함될 수 있다. 한편으로 알긴산 나트륨 등의 알긴산염을 함유한 용액을 만들어 여기에 상기 혼합 용액을 적가한다. 상기 알긴산염 함유 용액에는 계면활성제가 더욱 포함될 수 있다. 이와 같이 캡슐의 제조과정에서 잔탄검과 계면활성제를 첨가하여 서로 엉겨붙지 않는 구형의 캡슐을 제조할 수 있다. 상기 잔탄검은 고분자량의 다당류로 두 개의 글루코즈(D-glucose)와 두 개의 만노즈(D-mannose)가 주된 6탄당 단위체로 구성되고, 하나의 글루쿠론산이 연결되어 총 다섯 개의 당기가 반복적으로 연결되어 있는 구조로서, 보통 안정제, 현탁화제, 점증제로 사용되며, 무독성이며 광범위한 pH나 온도 범위에서도 안정한 특징이 있다. 상기 계면 활성제는 친수기와 친유기를 동시에 가지고 있어 묽은 용액 속에서 계면에 흡착하여 그 표면장력을 감소시키고, 물질간의 침투, 분산, 유화, 기포 등의 작용을 하는 물질을 의미한다. 계면 활

성제 중 수용액에서 이온으로 해리하는 기를 가지고 있지 않는 계면활성제를 비이온성 계면 활성제라 하며, 트윈(TWEEN)계가 대표적이다.

[0029] 본 발명에 따른 방법을 이용하여 바이오솜-알긴산 캡슐을 제조하면 거의 완벽한 구형의 코어셸 캡슐을 얻을 수 있고 응집이 거의 일어나지 않아 넓은 표면적으로 인해 흡착효율을 높이고 이용상의 편리성과 재수집의 용이성을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

발명의 효과

[0030] 상술한 바와 같은 본 발명의 바이오솜-알긴산 캡슐은 바이오솜이나 알긴산이 가교결합을 이루는 코어셸 구조로서 단지 두 재료를 합한 효과 이상으로 우수한 흡착능을 가지며, 기존의 고가의 흡착제인 활성탄이나 알긴산 흡착제보다 훨씬 저렴한 비용으로 흡착 캡슐의 제조가 가능할 뿐 아니라, 재생하여 반복재사용 할 수 있고 재생시 흡착능의 저하가 낮아서 경제성이 더욱 우수하다.

[0031] 또한, 본 발명의 바이오솜-알긴산 캡슐을 이용하여 수용액 중의 중금속을 제조하는 방법은 친환경 소재인 바이오솜과 높은 중금속 흡착용량을 갖고 무독성의 천연 고분자인 알긴산을 이용하고 있어서 매우 친환경적이고 효율적으로 중금속을 제거할 수 있다.

[0032] 또한, 본 발명의 바이오솜-알긴산 캡슐 제조방법에 의하면 거의 완벽한 구형의 코어셸 캡슐을 얻을 수 있고 응집이 거의 일어나지 않아 넓은 표면적으로 인해 흡착효율을 높이고 이용상의 편리성과 재수집의 용이성을 확보할 수 있다는 장점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0033] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 바이오솜-알긴산 캡슐의 제조과정의 모식도이다;
 도 2는 젖은 BAC 의 형상 (A), 건조된 BAC의 SEM 이미지 (B), 및 BAC의 표면 형상(C) 의 사진이다;
 도3 은 Pb^{2+} 흡착에 대한 용액 pH의 영향을 측정한 그래프이다;
 도 4는 Pb^{2+} 흡착에 대한 접촉 시간의 영향을 나타낸 그래프이다;
 도 5는 BAC 상에 흡착된 Pb^{2+} 의 랭뮤어 등온식이다;
 도 6은 BAC 상에 흡착된 Pb^{2+} 의 프리드리히 등온식이다;
 도 7은 랭뮤어 등온식에 대한 평형상수 (R) 값이다;
 도 8은 BAC 상의 Pb^{2+} 흡착에 대한 유사 2차 동역학 그래프이다;
 도 9는 BAC의 Pb^{2+} 탈착에 대한 HNO_3 농도의 효과를 나타낸 그래프이다;
 도 10은 반복된 Pb^{2+} 흡착-탈착에 따른 BAC 흡착제의 재생효율을 나타낸 그래프이다;
 도 11은 Pb^{2+} 제거에 사용된 흡착제의 흡착 비용을 나타낸 그래프이다;

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0034] 이하 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 이에 앞서, 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이거나 사전적인 의미로 한정해서 해석되어서는 아니되며, 발명자는 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있다는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합하는 의미와 개념으로 해석되어야만 한다.

[0035] 따라서, 본 명세서에 기재된 도면 및 실시예에 도시된 구성은 본 발명의 가장 바람직한 일 실시예에 불과할 뿐이고 본 발명의 기술적 사상을 모두 대변하는 것은 아니므로, 본 출원시점에 있어서 이들을 대체할 수 있는 다양한 균등물과 변형예들이 있을 수 있음을 이해하여야 한다.

[0036] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 바이오솜-알긴산 캡슐의 제조과정에 대한 모식도이다. 도 1을 참고하여 본 발명의 바람직한 일실시예에 따른 바이오솜-알긴산 캡슐을 제조하는 과정을 설명하도록 한다. 이하, 설명의 편의를 위해 경우에 따라 바이오솜은 'BC' 로 약칭하고 알긴산은 'AG' 로 약칭하며, 바이오솜-알긴산 캡슐은 'BAC' 로 약칭한다.

[0037] 이하, 본 발명을 실시예에 의해 상세히 설명하기로 한다. 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 상세하게 후술되어 있는 실시예들을 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 이들 실시예들은 본 발명을 구체적으로 설명하기 위한 것으로서, 본 발명의 범위가 이들 실시예에 한정되는 것은 아니다.

[0038] **[실시예 1] 바이오솜-알긴산 캡슐의 제조**

[0039] 재료 및 방법

[0040] 갈조류로부터 추출한 파우더 형태의 알긴산 나트륨(중점도) (Sigma-Aldrich Co., USA)를 추가로 정제하지 않고 이용하였다. 납(II) 질산염((주)대정화금), 칼슘 염화물, 인산, 질산((주)오리엔트화학), 잔탄검, 및 Tween 20 (Sigma-Aldrich Co., USA) 등 사용된 모든 화학물은 시약등급이다.

[0041] 바이오솜의 제조

[0042] 본 발명에 사용된 바이오솜은 울산의 한 양계장으로부터 수득한 계분의 저속 열분해법으로 제조하였다. 규정된 온도 450℃와 시간 30분에서 저속 열분해 후, 열분해물을 20℃ 부근의 실온에서 24시간 동안 자연 냉각하였다. 냉각된 열분해물로부터 얻어진 바이오솜을 40℃로 가열하면서 4시간 동안 5.0 M 로 활성화한 후 0.1 M NaOH의 혼합물로 세척하고, 세척용액의 pH가 5.0이 될 때까지 증류수를 첨가하였다. 세척한 바이오솜 샘플을 70℃의 드라이오븐에서 12시간 동안 건조하였다. 바이오솜 샘플의 표면적을 증가시키기 위한 H₃PO₄의 처리는 부가적 산화를 통한 산화적 활성화 과정을 통해 수행하였다.

[0043] 바이오솜-알긴산 캡슐의 제조

[0044] 도 1에 나타난 것과 같이, 바이오솜-알긴산 캡슐(BAC) 샘플은 5% (w/v)의 바이오솜, 1% (w/v)의 CaCl₂, 및 0.15% (w/v)의 잔탄검의 혼합용액을 교반 중인 0.1% (v/v) Tween 20 함유 0.6% (w/v)의 알긴산 나트륨 용액에 적가하여 얻었다(도 1).

[0045] CaCl₂와 BC 혼합용액의 액적을 AG 용액과 접촉하도록 넣을 때 알긴산 겔의 캡슐 멤브레인이 즉시 형성되고, BC는 멤브레인 내부에 고정된다. 칼슘 양이온의 크기가 알긴산 고분자 분자의 크기보다 작기 때문에 칼슘 양이온은 알긴산 용액으로 확산될 수 있다. 따라서, 외부의 알긴산 멤브레인과 내부의 BC가 계란 박스 모델의 형태로 형성되고, BC는 칼슘이온이 있는 내면의 알긴산 분자와 가교결합을 형성한다. 자석교반기를 사용하여 제조된 캡슐의 응집을 방지하였다. 잔탄검과 트윈20을 이용하여 깨끗한 구형의 코어셸 구조 캡슐을 형성하였고 황색 피펫 팁으로 압출되어 캡슐의 직경은 3.0 ± 0.2 mm였으며, 증류수로 세척한 다음 1% (w/v) CaCl₂ 용액에서 30분간 교반하면서 경화되었다. 캡슐을 증류수로 세척하고 흡착실험에 사용시까지 증류수에 넣어 냉장고에 보관하였다.

[0046] **[실험예]**

[0047] 분석방법

[0048] Pb²⁺의 농도는 원자흡광 분광광도계 (AAS, model VARIAN AA240)를 사용하여 210nm에서 측정하였다. 분광광도계의 관측한계는 Pb²⁺이온에 대해 0.125 µg/mL이다. 물 샘플 중의 납 농도를 결정하는 데 있어서 보고된 AAS의 정확도는 99.8%이다 (). 모든 분석은 3회 수행하였고, 납 이온 농도에 대한 반복분석의 상대 표준 편차(RSD)는 기 조제된 대조물질의 표준 용액을 사용하여 측정하였고, 5%를 초과하지 않았다.

[0049] 동일한 두 샘플 간 납 이온 농도 차이 또한 5%를 넘지 않았다. 또한, 대조군 실험은 유리용기나 필터 시스템

중 어느 것에도 흡착이 일어나지 않았음을 보여준다. 실험 결과들은 모든 분석이 높은 신뢰도 수준을 유지하고 있음을 의미한다. BAC의 표면 물폴로지는 Hitachi S-4700 주사전자현미경을 사용하여 조사하였고, 비표면적은 Brunauner-Emmett-Teller (BET) analyzer (ASAP 2020, Micromeritics Instrument Co., Norcross, GA, USA) 를 이용하여 측정하였다.

[0050] 흡착실험

[0051] Pb^{2+} 의 표준용액(1000 mg/L)을 납(II) 질화물을 두 배의 정류수에 용해하여 준비하였다. 상기 표준용액을 희석하여 희석액을 제조하였다. 흡착 실험은 흡착 혼합액에 2시간 동안 접촉시켜 수행하였다. 이 혼합액은 흡착제 함량(0.025 g)과 25 mL의 Pb^{2+} 흡착액을 50 내지 1000 mg/L 범위로 포함하고, 온도 제어된 방 27°C에서 120 rpm으로 흔들었다. pH 값은 수산화나트륨과 염산으로 조절하였다. Pb^{2+} 제거량은 흡착실험 전 후의 농도차를 측정함으로써 결정하였다.

[0052] 탈착실험

[0053] BAC의 재생성을 평가하기 위해 연속적 흡착-탈착 사이클을 이용하였다. 연속 사이클 동안 동일한 BAC를 사용하여 반복적으로 흡착 실험을 실시하였다. 일련의 흡착 실험에서 각각의 흡착 과정 후 BAC를 탈착제(25 mL의 0.2 M HNO_3 용액)로 2시간 동안 흔들었다. 각각의 탈착 사이클 후, HNO_3 용액에서 BAC를 꺼내 정류수로 세척한 후 흡착 과정에 재사용하였다. 흡착, 탈착, 및 세척 과정을 포함한 사이클을 수행한 BAC는 25 mL의 200 mg/L Pb^{2+} 용액에 넣고 120 rpm으로 2시간 동안 흔들어 다시 흡착 실험에 이용한다. Pb^{2+} 의 농도는 각각의 흡착-탈착 사이클 후 용액을 분석하여 결정하였다. 흡착제의 흡착-탈착 테스트를 10 회 이상의 사이클을 연속적으로 반복하였다. 동일한 실험 조건 하에서 실험을 3회 반복하였고, 흡착 또는 탈착 특성을 추가적으로 조사하기 위해 결과를 평균하였다.

[0054] [실험예 1] BAC 흡착제의 물리적 특성

[0055] 표 1에 BAC 흡착제의 물리적 특성이 나타나 있다. BAC의 수분함량을 70°C의 드라이 오븐에서 24시간 건조하기 전과 후의 중량차를 통해 확인하였다. BAC의 수분 함유량은 94-96% 범위에 있었다. BAC는 거의 구형의 형태로서 직경이 3 ± 0.2 mm 였다(도 2A). BET법으로 측정한 BAC의 표면적은 $314.54 \text{ m}^2/\text{g}$ (3회 분석의 평균값)이고, 이는 보고된 알긴-활성탄 비드의 표면적인 $281.4 \text{ m}^2/\text{g}$ 보다 높은 값이며, 알긴산 비드의 표면적 $6.25 \text{ m}^2/\text{g}$ 에 비해서는 훨씬 높은 값이다.

[0056] 이와 같이 높은 표면적으로 인해 BAC는 다량의 불순물을 흡착함으로써 수용액으로부터 Pb^{2+} 의 흡착용량을 높인다. 건조된 BAC의 형태와 표면 물폴로지는 SEM 사진에서 확인할 수 있다(도 2B 및 2C). SEM 이미지는 BC와 AG 사이 결합된 계면인 AG 멤브레인 셀의 외면과 BC 내면 사이의 두께는 대략 200-300 였다. (도 2B). 도 2C는 BAC 표면의 무정형 형태의 기공 구조를 나타낸다.

표 1

[0057] BAC 흡착제의 물리적 특성

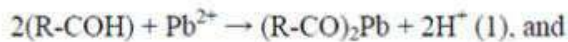
물리적 특성	Characteristic value
지름 (mm)	3.0 ± 0.2
BET 표면적 (m^2/g)	314.54
수분함량(%)	95 ± 1

[0058] [실험예 2] 용액 pH의 영향

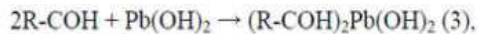
[0059] 본 흡착 실험에서 흡착 혼합 용액의 최초 pH 값은 매우 중요한 파라미터이다. 이는, 흡착제의 표면 전하, 흡착

분자의 이온화도, 및 흡착제의 활성 지점에서 관능기의 탈착 정도가 변화될 수 있기 때문이다. 용액의 pH에 따른 납 흡착 정도를 확인하기 위해, 최초 pH 범위를 3.0 내지 5.5로 하여 조사하였다. 도 3은 흡착 혼합 용액의 최초 pH의 영향으로서 Pb^{2+} 흡착에 대한 용액 pH의 관계를 나타낸다. BAC에 의한 Pb^{2+} 흡착시 용액 pH는 4.0 내지 5.5의 pH 범위에서 크게 벗어나지 않았다. 그러나, 동일한 두 개 샘플에 대한 3회 반복 분석에 기반한 Pb^{2+} 흡수 (uptake) 평균값은 pH 5.0 에서 pH 4.0, 4.5 및 5.5 같은 다른 pH들에 비해 훨씬 더 높았다. 따라서, 흡착용 혼합용액의 최적화된 초기 pH 값은 5.0으로 사료된다. 이러한 pH 결과는 또한 다른 연구에서도 확인할 수 있다 (Liu and Zhang, 2009; Mansour et. al., 2011). 이 pH 값보다 높거나 낮으면 흡착이 감소하는 경향이 관찰되었다. 이러한 흡착에 대한 pH의 영향은 BAC에 포함된 AG와 BC의 표면 전하의 변화로 설명될 수 있다. 낮은 pH 레벨에서는 H^+ 의 증가로 인해 상대적으로 BAC 표면 상에 흡착되기가 훨씬 용이한 반면, Pb^{2+} 의 BAC 표면에 대한 접근성이 상대적으로 감소하게 된다. pH 5.0 보다 낮은 범위에 있는 pH 값이 증가하면, 이온은 이온교환에 따른 수소 결합 메커니즘에 의해 흡착될 수 있고, 그 결과 Pb^{2+} 이온의 제거량이 더 높아지는 것이다. 이러한 이온교환 및 수소 결합 메커니즘은 하기 식 1, 2 및 3에 나타나 있다.

[0060] 이온교환: 식1 및 식2 참조



[0061] 수소 결합: 식3



[0062] 그러나, pH 값이 5.0 보다 더 높아지면 Pb^{2+} 의 흡착량이 감소되는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 교환가능한 형태의 감소에 기인한 Pb^{2+} 이동성의 감소로 설명될 수 있는바, 이는 흡착제와 흡착질 사이의 접촉가능성의 감소로 이어진다 (Chen and Wang, 2007). 따라서, 이하 모든 다른 흡착 실험에서는 Pb^{2+} 최대 제거량을 이끌어내기 위해 최적의 초기 pH인 5.0에서 수행되었다.

[0063] [실험예 3] 접촉시간의 효과

[0064] 평형 시간 역시 Pb^{2+} 흡착 프로세스의 중요한 파라미터 중 하나이다. 도 4는 Pb^{2+} 흡착에 대한 접촉 시간의 효과를 나타내는바, BAC의 초기 농도는 200 mg/l이다. 도 4의 곡선은 Pb^{2+} 흡착 데이터와 잘 맞아 떨어진다($R^2=0.997$). 접촉 시간이 증가하면 흡착 평형에 이를 때까지 Pb^{2+} 제거가 이루어진다. 대부분의 빠른 흡착은 90분 안에 이루어지고, 흡착 용량은 120.8 mg/g 로 나타났다. 그리고 나서 흡착은 느려지고 150분 안에 평형에 거의 다다르게 되며, 흡착 용량은 134.6 mg/g으로 나타났다.

[0065] [실험예 4] 흡착 등온선

[0066] BAC에 대한 Pb^{2+} 의 최대 흡착용량을 추정하고 흡착강도를 평가하기 위해, 랭뮤어와 프리드리히 모델을 사용하여 실험 데이터의 적합성을 측정하였다. 두 모델에 대한 평형식은 하기에 주어진 바와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{원래식} \quad \text{선형식} \\ \text{랭뮤어 모델} \quad q_e &= \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (4) \\ \text{프리드리히 모델} \quad q_e &= k C_e^{1/n} \quad \log q_e = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (5) \end{aligned}$$

여기서, C_e (mg/L)는 평형 농도이고, q_e (mg/g)는 평형상태에서 흡착된 양이며, q_m (mg/g)는 최대 흡착용량이고; b (L/mg)와 k ((mg/g)(L/mg)^{1/n})는 각각 랭뮤어와 프리드리히 모델에서 흡착 평형 상수이며; $1/n$ 는 흡착강도에 대한 프리드리히 상수이다. 상기 $1/n$ 값은 흡착강도 또는 표면 이질성의 수치이고, 0 내지 1의 범위에 있으며, 이질성이 높을수록 그 값은 0에 가까워진다.

특히 랭뮤어 등온식은 무차원의 분리계수 상수 또는 하기 식으로 정의되는 평형 파라미터 R 로 설명될 수 있다:

$$R = \frac{1}{1 + b C_0} \quad (6),$$

여기서, b 는 랭뮤어 상수(L/mg)이고, C_0 는 초기상수이다(mg/L).

R 값은 등온식의 타입이 역상($R > 1$), 선형($R = 1$), 순상($0 < R < 1$), 또는 비가역적($R = 0$)인지 여부를 나타낸다.

BAC에 대한 랭뮤어와 프리드리히 등온식은 도 5와 6에 각각 나타나 있다. 상관계수에 따르면, 두 개의 모델은 BAC에 의한 Pb^{2+} 흡착과 잘 맞아떨어진다. 다만, 랭뮤어 등온식이 프리드리히 등온식보다 더 잘 맞았다(도 5, 6 및 표 2). 도 7에서 Pb^{2+} 의 흡착에 대한 R 값은 0과 1 사이 값으로 나타났고, 이러한 데이터는 흡착 연구에서 랭뮤어 등온식과 합리적으로 잘 맞는다. 본 결과는 단일층의 Pb^{2+} 흡착이 흡착제 표면에서 일어남을 암시한다. 이는 BAC가 높은 표면적을 갖고 있고(표 1 참조), BAC 표면에서 높은 단일층 수착이 일어난다(Ho et al., 2002)는 사실을 통해 설명될 수 있다. 또한, 표 2에 설명된 것과 같이, $1/n$ 의 값은 0.305으로서 이는 BAC의 표면 이질성이 높아질수록 Pb^{2+} 의 흡착에 적합하다는 것을 의미한다.

표 2

랭뮤어와 프리드리히 등온식 모델에 대한 흡착 상수

흡착제	랭뮤어 상수			프리드리히 상수		
	q_e (mg/g)	b (L/mg)	R^2	k ((mg/g)(L/mg) ^{1/n})	$1/n$	R^2
BAC	263.158	0.026	0.997	37.818	0.305	0.984
R^2 = 상관계수						

랭뮤어 방정식으로 계산한 BAC 흡착제에 의한 Pb^{2+} 의 최대흡착용량은 263.158 mg/g이고, 이는 고가의 알긴산 겔의 Pb^{2+} 흡착용량(526.0 mg/g)에 비해서는 낮은 값이다. 즉, BAC에서 AG와 BC를 결합(BC:AG = 8:1 중량비)함으로써 Pb^{2+} 흡착용량이 100% AG에서 측정된 흡착용량에 비해 50% 감소되었다. BAC는 저가의 BC가 과량(89%) 포함되고 고가의 AG는 소량(11%) 포함되어 있다. 그러나, BAC의 흡착 용량은 다른 바이오솜과 활성탄의 흡착용량(30.9~195.2 mg/g)에 비해서는 훨씬 높다(표 3). Pb^{2+} 제거 또는 흡착의 비용을 대략적으로 추정하여 비교한

결과가 하기 3.4에 설명되어 있다. 이러한 사실들을 기반으로 볼 때, 상대적으로 고가의 AG와

저가의 BC를 혼합하여 제조한 BAC는 에 대한 매우 높은 Pb^{2+} 흡착용량을 갖는다고 할 수 있다. 따라서, BAC는 수 용액으로부터 Pb^{2+} 제거를 위한 저렴한 대안적 흡착제로서 활용될 수 있다.

표 3

다양한 흡착제들의 Pb^{2+} 에 대한 흡착용량의 비교

흡착제	q_e (mg/g)	한계	참조문헌
알긴산젤	526.0	고비용	(Park et al., 2007)
황겨 바이오숯 (Hydrothermal liquefaction method)	2.40	낮은 흡착용량	(Liu and Zhang, 2009)
소나무 바이오숯 (Hydrothermal liquefaction method)	4.25	낮은 흡착용량	(Liu and Zhang, 2009)
솔러지 유래 바이오숯	30.9	낮은 흡착용량	(Lu et al., 2012)
팜 껍질 활성탄	95.2	낮은 흡착용량	(Mansour et al., 2011)
땅콩껍질 활성탄	195.2	복합 기술	(Wilson et al., 2006)
다공벽 카본 나노튜브가 증착된 은 나노입자	104.28	Complex technology	(Chen and Wang, 2007)
바이오숯-알긴산 캡슐 (8:1)	263.2		This study

[실험예 5] 흡착 동역학

유사 1차 반응 및 유사 2차 반응을 사용하여 BAC에 대한 납의 흡착 메커니즘을 연구하였다. 선형 유사1차 방정식(식 7)과 유사 2차 방정식(식 8)은 하기와 같다;

$$\log (q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad (7), \text{ and}$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (8),$$

여기서, q_e 및 q_t (mg/g)는 평형상태에서 시간 t (min)에 따른 흡착된 납의 양이고, k_1 (1/min) 및 k_2 (g/(mg min))는 각각 유사1차 흡착 및 유사 2차 흡착 동역학의 속도 상수이다.

상기 유사1차 동역학의 k_1 및 q_e 값은 t 대비 $\log (q_e - q_t)$ 그래프의 기울기와 절편을 이용하여 계산할 수 있다(표 4). 상기 2차 동역학 모델에 대한 상관계수인 $R^2=0.812$ 는 충분히 높지 않다. 또한, 유사 1차 모델로부터 계산된 q_e 값은 실험 데이터보다 낮다. 이러한 결과는 BAC에 대한 Pb^{2+} 흡착이 유사 1차 동역학을 따르지 않는다는 것을 의미한다.

[0086]

표 4

BAC 상의 Pb^{2+} 흡착에 대한 유사 1차 및 유사 2차 동역학 파라미터

흡착제	유사1차모델			유사2차모델		
	q_e (mg/g)	k_1 (1/min)	R^2	q_e (mg/g)	k_2 (g/mg min)	R^2
BAC	130.377	0.0039	0.812	151.515	0.0003	0.997

R^2 = 상관계수

[0087]

[0088]

t^0 대비 t/q_t^0 그래프의 기울기와 절편을 사용하여 2차 속도 상수 k_2 및 q_e 를 계산하였다(도 8, 표 4). t^0 대비 t/q_t^0 그래프에서 직선은 실험데이터가 BAC 흡착제에 대한 납 흡착에 대한 유사 2차 동역학 모델 데이터와 잘 맞는 것으로 나타났다.

[0089]

[실험예 6] BAC 흡착제의 재생

[0090]

흡착제의 재사용에 대한 재생 또는 회복 특성은 중금속의 제거용으로 활용될 흡착제의 경제적 효율성을 결정하는데 매우 중요한 특징이다. 다양한 화학작용제들을 용리제로 사용하여 BAC 표면에 흡착된 Pb^{2+} 를 제거하였다. HCl, HNO_3 , 및 EDTA가 Pb^{2+} 이온을 제거하는데 효과적인 반면 KCl 및 $CaCl_2$ 는 효과적으로 제거하지 못했다. H_2SO_4 는 SO_4^{2-} 는 Pb^{2+} 와 침전물을 형성하기 때문에 표면에 Pb가 로딩된 BAC로부터 Pb^{2+} 를 제거하기 위한 용리제 후보군에서 제외되었다. 본 연구에서, HNO_3 는 Pb-로딩된 BAC의 재생 실험용 용리제로 테스트하였다. BAC 흡착제의 재생성을 체크하기 위해 선택된 산성 용리제들의 농도를 변화시켜 다양한 농도의 HNO_3 에서 조사하였다(도 9). 흡착된 Pb^{2+} 의 탈착효율은 HNO_3 농도 증가에 따라 증가하였다. 이러한 결과는 H^+ 이온의 이용성 증가에 따른 H^+ 와 Pb^{2+} 간의 이온교환 때문이라고 할 수 있다. Pb^{2+} 의 93%는 0.2 M HNO_3 에서 탈착되었다. HNO_3 농도가 0.5 M까지 증가시 Pb-loaded BAC로부터 Pb^{2+} 의 제거 효율의 증가는 동일한 2개 샘플에 대한 3회 반복실험 결과 거의 무시할 정도의 수준인 1.2%였다. 세척과정 후 남아있는 H^+ 는 흡착 또는 활성 사이트에 대해 Pb^{2+} 과 경쟁을 할 수 있기 때문에 더 높은 농도의 H^+ 이온에서의 재생은 오히려 반대로 Pb^{2+} 의 흡착 효과를 나타내는 것 같다. 따라서, 0.2 M HNO_3 가 높은 탈착 효율을 나타내는 한편 H^+ 의 농도는 낮게 유지시키기 때문에 본 연구에서 흡착제로서 재사용 또는 재생되는 Pb-loaded BAC의 재생성을 연구하기 위해 선택하였다.

[0091]

도 10은 일련의 복구(흡착-탈착 사이클)를 10회 반복한 후의 탈착 효율과 BAC 흡착제의 Pb^{2+} 흡착 용량을 나타낸다. 심지어 10 사이클 후에도 Pb^{2+} 의 탈착효율은 거의 90%에 가까웠고 이는 충분히 안정적이고 높은 결과이다. 제1 사이클에서 Pb^{2+} 의 흡착용량은 135.3 mg/g 이고 제2 사이클에서는 10.9% 감소되었다. 연속적인 사이클 동안에 흡착 용량은 천천히 감소되었으며, 이에 따라 10 사이클 후 흡착 용량의 전체 손실은 단지 30.7%였다. 따라서, 본 발명의 흡착제는 10회 재생된 후에도 여전히 초기 흡착 용량의 거의 70%를 나타낸다. BAC 흡착제의 유리한 특성으로서 낮은 비용 효과와 함께 Pb의 로딩과 제거(흡착과 탈착) 사이클의 반복을 고려하면, 본 발명의 흡착제는 수용액으로부터 Pb^{2+} 의 효과적인 제거에 대해 저렴한 흡착제 후보군이 될 수 있다.

[0092]

[실험예 7] 흡착비용의 추정

[0093]

BAC 흡착제의 흡착 비용을 AG와 활성탄(AC)의 흡착 비용과 비교하였다. 흡착 비용은 단순히 흡착 용량과 AG 겔

(Park et al., 2007), palm shell AC (Nomanbhay and Palanisamy, 2005), 및 BAC (본 연구에 사용된 것)을 포함한 화합물들(Sigma-Aldrich Co., USA)의 한국에서의 평균 구매가격에 기초하여 평가하였다. 이와 같은 흡착 비용(US \$/g Pb²⁺)은 주어진 수용액 중의 1 그램의 Pb²⁺를 제거하는데 필요한 함량의 흡착제의 구매 비용(US 달러)을 계산하여 하기 식 9에서와 같이 나타낼 수 있다.

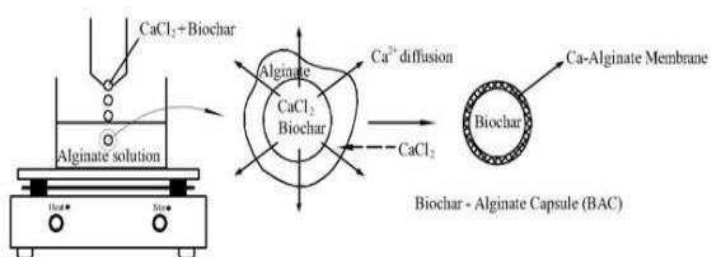
$$\text{Adsorption cost (US \$ / g Pb}^{2+}\text{)} = \frac{\text{Adsorbent purchase price} \left(\frac{\text{\$}}{\text{g}} \right)}{\text{Adsorption capacity} \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) \times 10^{-3} \left(\frac{\text{g}}{\text{mg}} \right)} \quad (9)$$

상기 식에 따라 계산된 BAC(BC:AG = 8:1), AG 및 AC의 흡착 비용은 각각 0.25±0.10, 0.83±0.10, 및 0.95±0.20 US\$/g Pb²⁺였다(도 11). 이와 같이 단순히 평가된 단위 중량의 Pb²⁺를 제거하는데 들어가는 흡착 비용은 BAC가 AG 대비 단지 30.1%로 나타났다. 또한 BAC 흡착제는 10회 재사용될 수 있다. 10회 재사용에 필요한 추가 비용을 대략적으로 계산하면, BAC 상에 로딩된 Pb의 평균 제거 효율이 90%이고 63% HNO₃용액의 구매비용(1.0 US\$/500 ml)이므로 0.22 US\$/g Pb²⁺이다. 본 연구에서는 200 mg/L의 Pb²⁺를 함유한 1톤의 폐수 용액을 처리하는데 필요한 흡착 비용을 배치 반응기를 이용하여 100 kg 용액/배치에 대해 단순 비교하려고 했다. 측정된 흡착 비용은 BAC를 사용한 경우(평균 Pb²⁺ 흡수율 114.6 mg/g (57.3%))로 10회 흡착과 로딩된 Pb의 평균 제거 효율 90%로 9회 재사용시)와 AG를 사용한 경우(10 배치) 각각 대략 49와 166 US\$였다. 200 mg/L의 Pb²⁺를 함유한 1톤의 폐수 용액을 처리하는데 필요한 흡착 비용은 BAC를 10회 반복 재사용 한 경우에 AG를 사용한 경우의 비용 대비 약 29.5% 밖에 되지 않는다. 회사에서 처리해야 할 폐수가 200 mg/L의 Pb²⁺를 함유한 폐수 1 톤/일(365 톤/년)이라고 추정해보자. 만약 회사가 AG 보다 BAC를 적용하면 흡착 비용을 0.24 Million US\$/year 나 절약할 수 있다. 따라서, Pb²⁺ 제거용 BAC의 반복 사용은 납 오염수나 폐수로부터 Pb²⁺를 제거하는데 필요한 흡착비용을 크게 감소시킬 수 있다. 본 실험을 통해 BAC는 수용액으로부터 Pb²⁺를 제거하는 저가의 높은 효율의 흡착제이다.

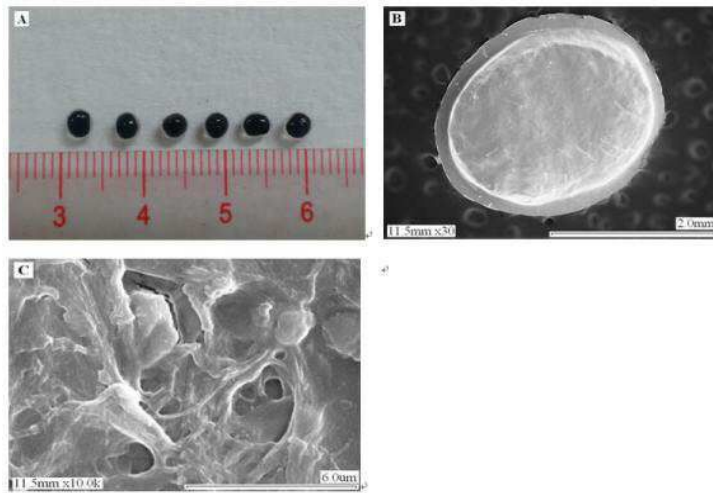
이제까지 본 발명에 대하여 그 바람직한 실시예들을 중심으로 살펴보았다. 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 변형된 형태로 구현될 수 있음을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 개시된 실시예들은 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 한다. 본 발명의 범위는 전술한 설명이 아니라 특허청구범위에 나타나 있으며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 차이점은 본 발명에 포함된 것으로 해석되어야 할 것이다.

도면

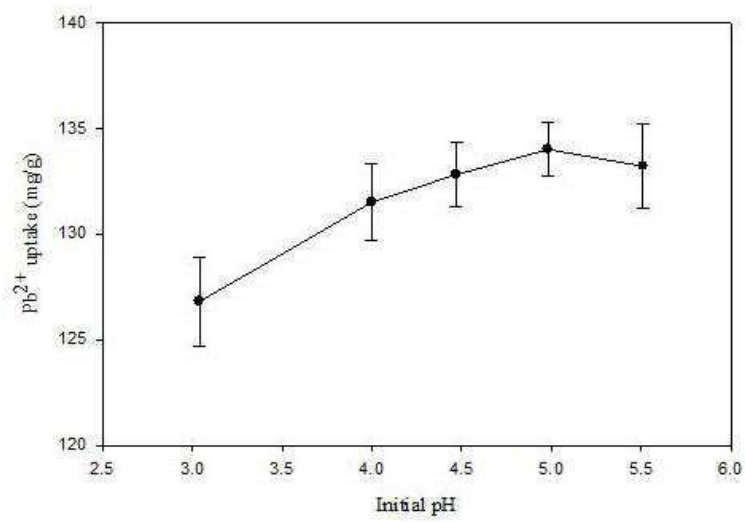
도면1



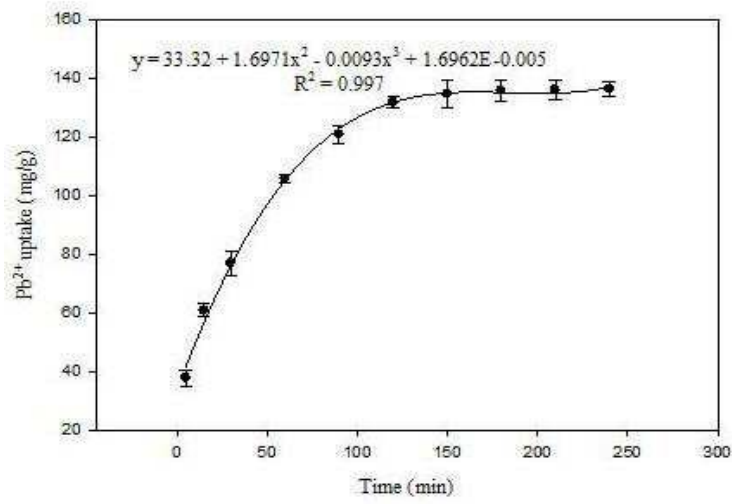
도면2



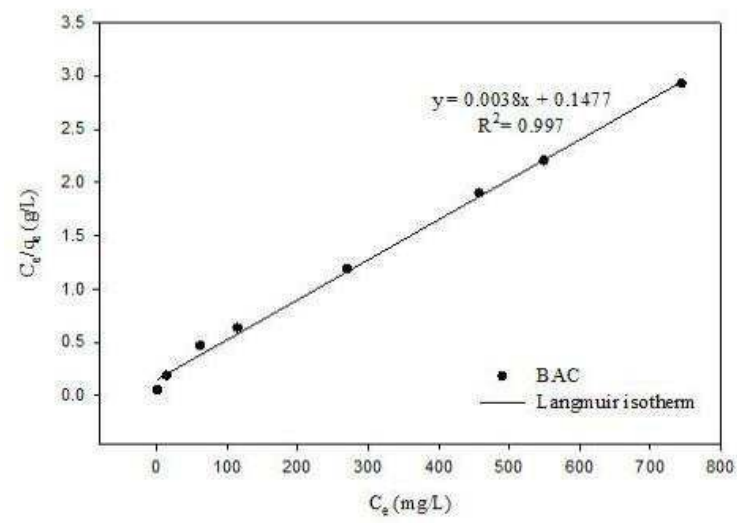
도면3



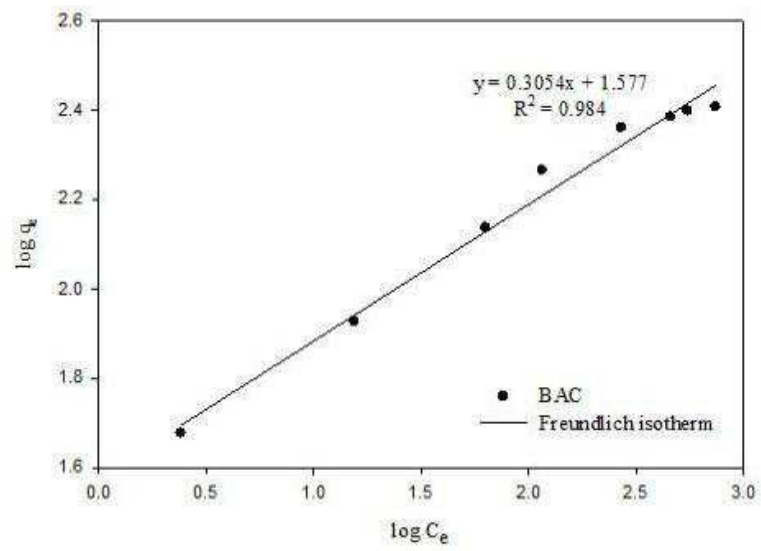
도면4



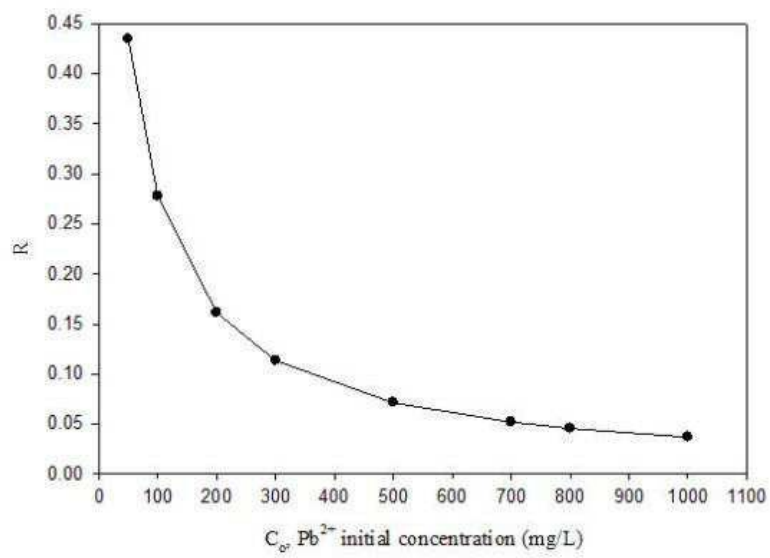
도면5



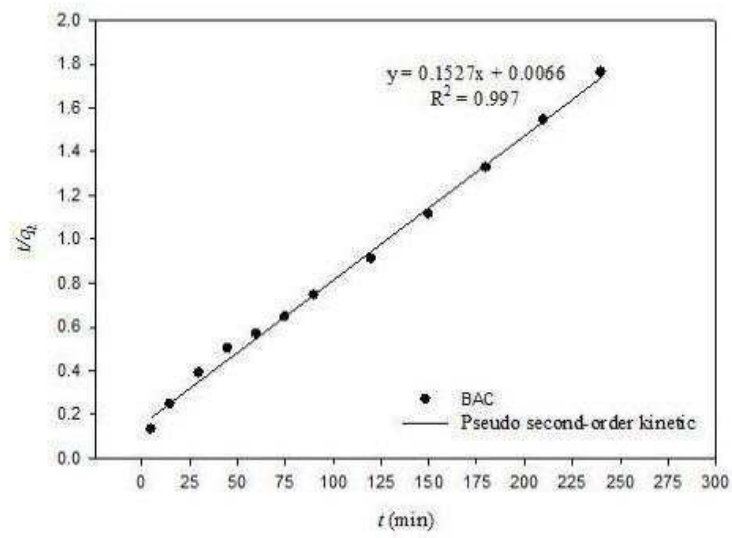
도면6



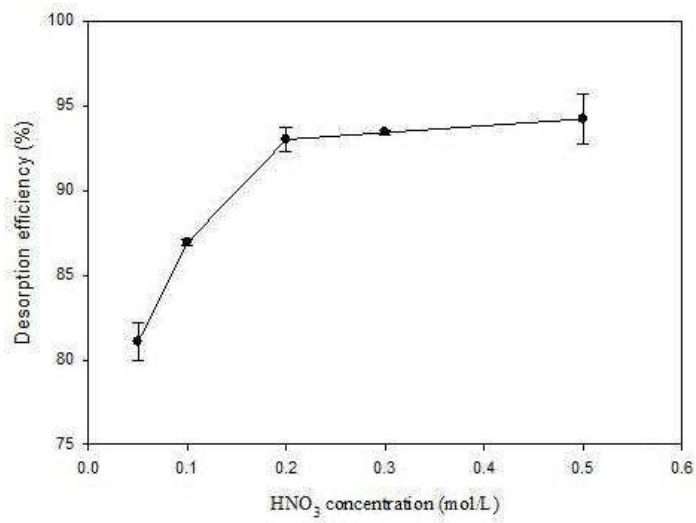
도면7



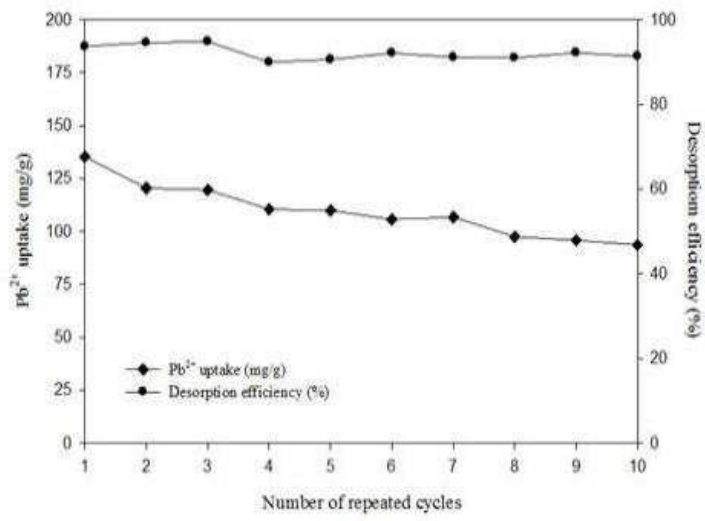
도면8



도면9



도면10



도면11

