

폐굴껍질에 의한 합성폐수 중의 인 제거

정오진 · 최형일 · 정경훈[†]
조선대학교 환경공학부

Phosphorus Removal from Synthetic Wastewater by Waste Oyster Shells

Oh Jin Jung, Hyung Il Choi and Kyung Hoon Cheong[†]

Division of Environmental Engineering, Chosun University
(Received 18 July 2000 ; Accepted 21 August 2000)

ABSTRACT

A laboratory experiments were performed to investigate the effects of several factors on the phosphorus removal by waste oyster shells. The waste oyster shells used in this experiments were crushed particle, calcined particle and extracted solution. A higher efficiencies of phosphorus removal were observed, when a particle size of crushed and calcined particle were smaller. The effluent concentration of phosphorus was around 1.6 mg/l in continuous column experiment which packed with crushed particle of waste oyster shell at the influent concentration of $PO_4\text{-P}$ of 10 mg/l. But the clogging of column occurred with increasing of throughput volume of influent. The efficiency of phosphorus removal increased with increasing of dosage amount of crushed, calcined particle and extracted solution. When the calcined particle which contained only about 1/10 ~ 1/100 of crushed particle was used, the efficiency of phosphorus removal was correspondingly equivalent to the removal efficiency obtained from crushed particle. The efficiency of phosphorus removal by calcined particle after 9 runs repeated use was decreased about 21.5% as that of the first run. The removal efficiency of 100% could have been achieved at the HRT of 18 hours during the continuous treatment of phosphorus by the solution extracted from calcined particle.

Keywords : Waste oyster shell, Phosphorus removal, Calcined particle, Extractedsolution, Continuous treatment

I. 서 론

최근 문제가 되고 있는 폐쇄성 수역에서의 부영양화의 진행은 그 대부분이 생활하수, 산업폐수 등의 인위적인 영양염류의 공급에 의한 것으로서 이들에 함유되어 있는 질소와 인을 제거할 필요가 있다. 이 때 질소와 인 모두를 제거할 수 있다면 이상적이겠지만 일부 남조류는 대기중의 질소를 고정하여 수역에의 질소 공급과는 관계없이 증식할 수 있기 때문에 부영양화를 방지하기 위해서는 하수 및 폐수 중의 인을 제거하는 것이 매우 중요한 것으로 알려져 있다.¹⁾

이전부터 부영양화 방지를 위해 검토되고 있는 인 제거법은 크게 생물학적 처리법과 물리화학적 처리법으로 나눌 수 있다. 생물학적 처리법으로는 혐기 · 호기

의 활성슬러지법에 의한 인 제거법이 있다. 이러한 생물 탈인법은 약품을 사용하지 않는 등의 잇점이 있으나 지속적이고 안정적인 처리가 곤란하며 운전조건이 까다로우며 조작 및 유지관리에 고도의 기술이 요구되는 등 많은 문제점이 지적되어 왔다.²⁾

물리화학적 처리법에는 알루미늄염, 철염, 또는 석회 등의 칼슘염과 인을 반응시켜 제거하는 응집침전법,^{3,4)} 활성 알루미늄의 충전층에 통과시켜 제거하는 흡착법, 음이온 교환수지에 의한 이온교환법 등이 있다. 그러나 석회 및 금속염 등에 의한 응집침전법의 경우 약품비용이 많이 들고, 슬러지의 생성량이 많으며, 또한 슬러지의 농축성 및 탈수성이 불량하여 처리 · 처분 등에 어려움이 있다.³⁾

이러한 문제점을 보완하기 위한 새로운 인 제거법으로서 정석탈인법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 방법은 하수 중의 인산이온이 칼슘이온과 반응하며 난용성인 인회석(Hydroxyapatite, $Ca_5(OH)(PO_4)_3$)을 생성하는 원리로서 석회응집침전법에 의한 반응과 동

[†]Corresponding author : Division of Environmental Engineering, Chosun University
Tel: 062-230-6628, Fax: 062-230-6628
E-mail: khjung@mail.chosun.ac.kr

일하지만 슬러지 발생이 거의 없는 것이 특징이다.⁴⁾

上甲 등^{5,6)}은 슬러지를 발생시키지 않고 하수의 2차 처리수 중의 인을 제거할 목적으로 인산칼슘의 정석현상을 이용한 인 제거법에 대하여 기초실험과 실용화를 위한 검토를 수행한 결과 정석탈인법이 인 제거에 효율적임을 확인하였으며, 김 등⁷⁾은 정석탈인공정의 정석 재료로서 폐굴껍질의 효용성을 나타낸 바 있고, 中川⁸⁾은 골탄 역시 탈인재료로서 효과가 있음을 나타내었다.

본 연구에서는 남해안 일대에서 발생하는 폐굴껍질의 재활용 측면에서 폐굴껍질의 인 제거에 따른 기초 특성과 폐굴껍질의 소성효과 및 용출액에 의한 인 제거 가능성을 검토하였다.

II. 재료 및 방법

1. 분체 폐굴껍질

남해안 일대에서 폐기처분되고 있는 폐굴껍질을 수거하여 수돗물로 세척하여 불순물을 제거하고, 증류수로 행군 다음 충분히 자연 건조시켰다. 건조된 폐굴껍질을 분쇄하여 소입경(0.5~0.85 mm)과 중입경(0.85~1.7 mm)으로 분류한 후에 dry oven에서 약 105°C를 유지하면서 24시간 건조시켰다.

2. 소성 폐굴껍질

폐굴껍질의 분쇄시료를 로타리킬른에서 850°C로 유지하면서 4시간 소성시켰다.

3. 용출시료

분체시료 또는 소성시료 각각 100 g씩을 1 l의 증류수에 넣고, Jar tester에서 150 rpm으로 교반한 후 거름종이로 여과하여 상등수를 실험에 사용하였다.

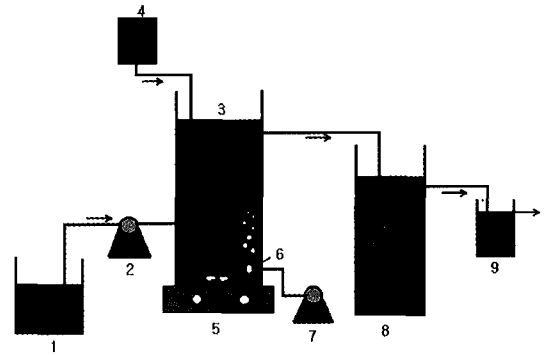
4. 합성폐수

본 실험에 사용한 합성폐수는 증류수에 KH_2PO_4 를 사용하여 표준용액($\text{PO}_4\text{-P}$: 1000 mg/l)를 제조하여 실험에 따라 희석하여 사용하였다.

5. 실험방법

1) 분체 및 소성 폐굴껍질을 사용하여 입경, 첨가량 등의 영향인자에 의한 인 제거 실험은 삼각플라스크(300 ml)에 일정농도(50 mg/l)의 인공시료 200 ml를 넣은 다음 일정량의 분체 및 소성 폐굴껍질을 넣어 진탕기에서 150 rpm으로 진탕하였으며, 시간별로 용액을 분취하여 GF/C로 여과한 것을 검액시료로 하였다.

2) Ca^{2+} 용출실험은 2 l의 비이커에 분체 및 소성 폐



1. Influent tank 2. Peristaltic pump 3. Reactor
4. Extracted solution 5. Stirrer 6. Diffuser
7. Air pump 8. Settling tank 9. Effluent tank

Fig. 1. Schematic diagram of continuous reactor.

굴껍질 1 g씩을 증류수 1 l에 넣은 다음 진탕기에서 150 rpm으로 진탕하면서 시간별로 용액을 분취하여 GF/C로 여과한 후 분석하였다.

3) 컬럼을 통한 인 제거실험에서는 직경 2.5 cm, 길이 23 cm의 컬럼 유리관 아래부분에 탈지면을 깔고 그 위에 모래를 약 3 cm의 두께로 넣은 다음 소입경과 중입경의 분체 폐굴껍질을 충전하였다. 합성폐수는 하향류로 흘러보냈으며, 1분획은 40 ml씩을 채취하였다.

4) 반복용출액에 의한 인 제거실험은 분체 및 소성 폐굴껍질 100 g씩을 1 l의 증류수에 넣어 Jar tester로 24시간 교반하여 상등액을 취한 후 다시 새로운 증류수를 넣어 같은 방법으로 24시간 용출시켜 상등액을 취하는 과정을 3일간 3회 수행하였다. 각각의 용출액 20 ml를 인공시료 180 ml에 넣고 반응시켰다.

5) 용출액에 의한 연속 인 제거실험은 Fig. 1과 같이 4 l의 반응조를 사용하여 초기 수리학적 체류시간(HRT) 12시간에서 운전하였다. 반응조 아랫부분에 교반기를 설치하였으며, 또한 혼합을 위해 diffuser로 폭기하였다.

6. 분석방법

$\text{PO}_4\text{-P}$ 는 수질오염공정시험법에 따라 측정하였으며, Ca^{2+} 은 ICP(Inductively Coupled Plasma, Jobin-Yvon Co.)로, pH는 pH meter(TOA Co.)를 사용하여 측정 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. Ca^{2+} 용출농도 및 pH 변화

정석 탈인법에서 안정적인 인 제거효율을 얻기 위해서는 Hydroxyapatite의 용해도 곡선부근에 Ca^{2+} 와 pH

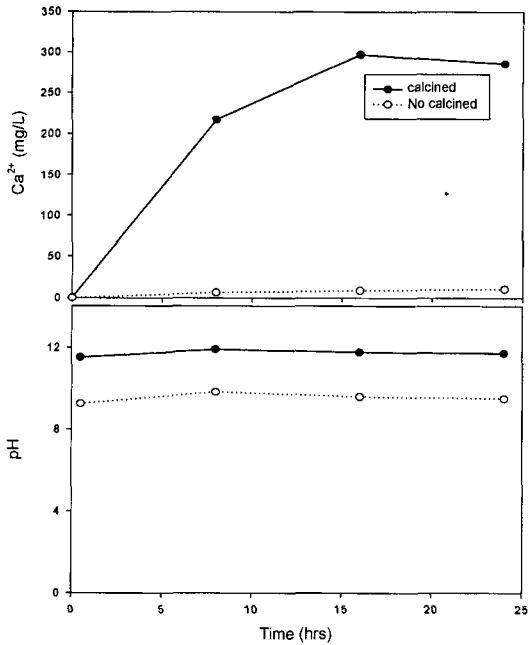


Fig. 2. Variations of Ca²⁺ concentration and pH change by crushed waste and calcined oyster shells.

를 조절하는 것이 바람직하며 이들의 값은 정석 탈인 반응의 중요한 인자들이다.⁴⁾

Fig. 2에는 분체 및 소성 폐굴껍질의 Ca²⁺농도와 pH의 변화를 나타내었다. 소성 폐굴껍질인 경우 반응 16시간째의 Ca²⁺ 농도는 297 mg/l로 가장 높은 농도값을 나타내었으나 그 이후에는 거의 평형상태를 유지하였으며, 분체 폐굴껍질인 경우에는 반응시간에 따라 약간씩 증가하는 경향을 보이고 있으나 반응 24시간째에는 10.6 mg/l 정도를 나타내었다. 소성한 폐굴껍질에서 용출되는 Ca²⁺은 분체 폐굴껍질로부터의 용출량보다 약 28배나 더 높았다. 정 등⁹⁾은 소성전 폐굴껍질의 성분이 CaCO₃가 대부분이었으나, 소성후 CaO로 전환됨을 밝혔듯이 본 실험에서도 폐굴껍질을 소성함으로써 폐굴껍질의 구성성분이 CaO로 전환되어 수중에 Ca²⁺이 쉽게 용출되기 때문인 것으로 사료된다.

이에 따라 수중의 pH 역시 반응전 pH 6.0에서 급격히 증가하여 분체 폐굴껍질인 경우에는 pH 9.3~9.8을 나타내었고 소성 폐굴껍질인 경우에는 이 보다 높은 pH 11.5~11.7 정도를 나타내었다.

2. 분체 폐굴껍질의 입경에 따른 인 제거

소입경과 중입경의 분체 폐굴껍질을 각각 1 g과 5 g씩 투여하였을 때의 입경에 따른 인 제거변화를 Fig. 3

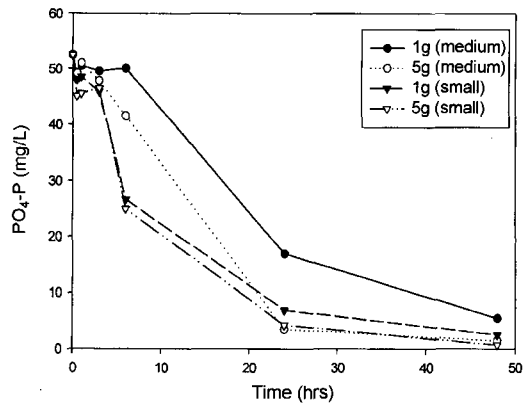


Fig. 3. Effect of particle size of crushed waste oyster shell on the phosphorus removal.

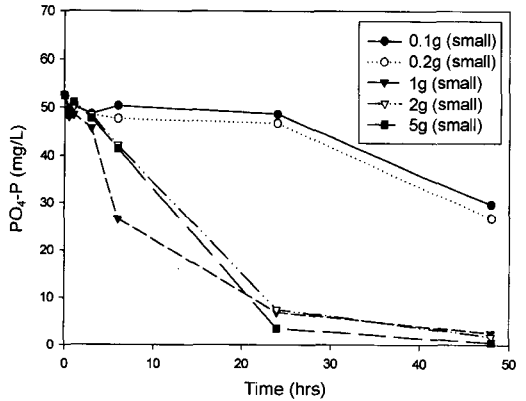


Fig. 4. Effect of dosage of crushed waste oyster shell on the phosphorus removal.

에 나타내었다.

소입경인 경우 반응 48시간을 기준으로 볼 때 1 g과 5 g에서 각각 95.2%(잔류농도 2.5 mg/l)와 98.7%(잔류농도 0.7 mg/l)의 제거율을 보였으나, 중입경인 경우에는 5 g을 투여하였을 때만 97.2%(잔류농도 1.45 mg/l)의 제거율을 나타냈고 1 g을 투여하였을 때에는 89.6%(잔류농도 5.4 mg/l)의 제거율을 나타내었다. 이와 같이 중입경의 폐굴껍질보다 소입경 쪽이 인 제거율이 높은 것은 정 등¹⁰⁾에서와 같이 폐굴껍질의 입경이 작을수록 표면으로부터 Ca²⁺의 용출이 빠르게 발생하는 것과 또한 비표면적이 증가하여 단위면적당 접촉효율이 높아지기 때문인 것으로 사료된다.

3. 분체 폐굴껍질의 첨가량에 따른 인 제거

Fig. 4에는 분체 폐굴껍질의 첨가량에 따른 인 제거변화를 나타내었다. 분체 폐굴껍질 첨가량 0.1, 0.2, 1.0,

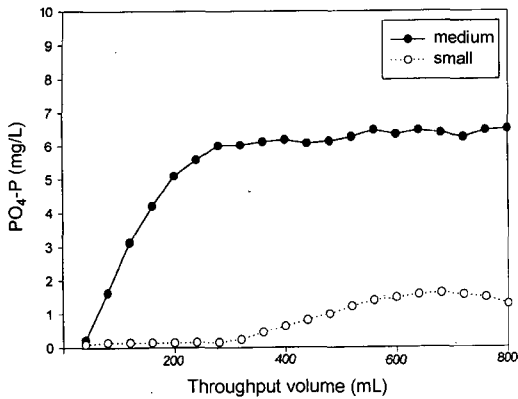


Fig. 5. Breakthrough curve for crushed waste oyster shell with influent concentration of 10 mg/l of $PO_4\text{-P}$.

2.0, 5.0 g일 때, 반응 48시간에서의 인 제거율은 각각 45.0%, 48.9%, 95.2%, 96.8%, 99.1%로써 분체 폐굴껍질의 첨가량이 많을수록 인 제거율이 높았으며, 이는 김 등기의 보고에서와 마찬가지로 분체 폐굴껍질의 첨가량이 많으면 수중의 인산이온과 반응하는 Ca^{2+} 량이 첨가량에 따라 많이 용출되기 때문인 것으로 사료된다. 한편 분체 폐굴껍질 5.0 g을 첨가하였을 때의 수중 잔류 인농도는 0.45 mg/l로써 분체 폐굴껍질 5.0 g 이상이면 1 mg/l 이하로 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 컬럼에 의한 인 제거

Fig. 5에는 소입경과 중입경의 분체 폐굴껍질을 컬럼에 충전하여 합성시료를 통수시켰을 때의 유출수 $PO_4\text{-P}$ 농도를 나타내었다. 유입수의 $PO_4\text{-P}$ 농도는 10 mg/l이다. 중입경의 분체 폐굴껍질을 충전한 컬럼에서는 통수가 시작됨에 따라 유출수의 인 농도가 증가하여, 통수량 280 ml에서 유출수 농도가 약 6 mg/l이 되었으며 이후로는 거의 6~6.5 mg/l을 유지하였다.

소입경을 충전한 컬럼에 있어서는 280 ml의 통수량까지는 유출수 $PO_4\text{-P}$ 농도가 0.15 mg/l 유지되다 점차 증가하였으나 1.2~1.6 mg/l 사이에서 유출되었다. 이와 같이 중입경의 분체 폐굴껍질보다 소입경의 분체 폐굴껍질을 충전하였을 때 인 제거가 잘 됨을 알 수 있었다. 그러나 통수량 400 ml부터 유출이 느려지기 시작하여 800 ml를 통수할 때에는 40 ml를 통수시키는데 약 2시간 정도 소요되었다. 이것은 컬럼에 충전된 분체 폐굴껍질이 통수량이 증가함에 따라 굳어져 막히기 때문이며, 이와 같은 이유 때문에 분체 폐굴껍질을 컬럼에 충전하여 연속적으로 인을 제거하기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다.

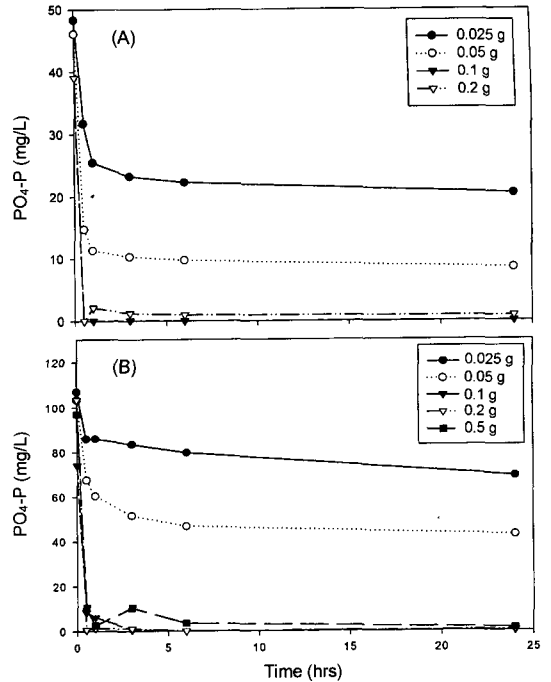


Fig. 6. Effect of dosage of calcined waste oyster shell on the phosphorus removal. (A) : 50 mg/l of $PO_4\text{-P}$, (B) : 100 mg/l of $PO_4\text{-P}$.

5. 소성 폐굴껍질의 첨가량에 따른 인 제거

Fig. 6은 소성 폐굴껍질의 첨가량에 따른 인 제거를 나타낸 것으로 (A)는 초기 인 농도 50 mg/l에서 (B)는 100 mg/l에 관한 그림이다. Fig. 6의 (A)에서 보면 소성 폐굴껍질 0.1 g과 0.2 g을 첨가하였을 경우 반응 30분만에 용액 중의 $PO_4\text{-P}$ 농도가 처음 50 mg/l에서 2 mg/l까지 낮아졌고 반응 24시간 후에는 거의 제거되었다. 그러나, 소성 폐굴껍질 0.025 g을 첨가한 경우에는 반응시간 24시간 후 수중 잔류 인 농도가 약 20.5 mg/l로서 57.6%만 제거되었다.

Fig. 6의 (B)에서는 소성 폐굴껍질 0.1 g 이상일 때 반응시간 30분에서 91.6%의 제거율을 보였으며 반응 24시간에는 수중에 인이 잔류하지 않았다. 소성 폐굴껍질 0.05 g과 0.025 g을 첨가한 경우에는 반응 24시간 후를 기준으로 보면 각각 64.7%와 20%가 제거되어, Fig. 6의 (A)에서 마찬가지로 소성 폐굴껍질의 첨가량이 많을수록 인 제거율이 높음을 알 수 있었다. 또한 Fig. 4의 분체 폐굴껍질 첨가량에 따른 실험결과와 비교해 보면 소성 폐굴껍질을 사용하였을 경우 폐굴껍질을 소성하는 데에는 경제적으로 부담이 될 수도 있으나 분체 폐굴껍질보다 1/10~1/100정도의 적은량으로도

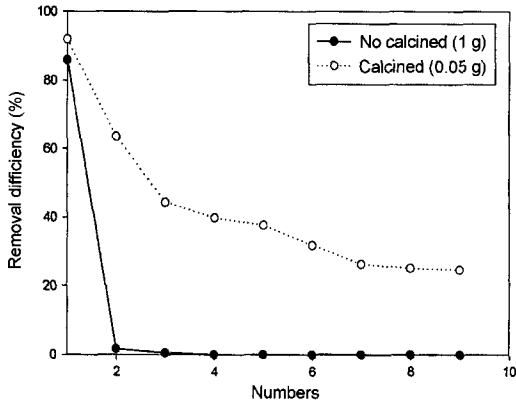


Fig. 7. Effect of repeated reactions on the phosphorus removal efficiency by crushed waste oyster shell and calcined waste oyster shell.

수중의 인을 효율적으로 제거할 수 있다고 판단된다. 이것은 Fig. 2에서와 같이 폐굴껍질을 소성하면 폐굴껍질의 구성성분인 CaCO_3 가 CaO 로 전환되어 수중에 Ca^{2+} 을 쉽게 용출하기 때문인 것으로 사료된다.

6. 분체 및 소성 폐굴껍질 반복 사용에 따른 인 제거율

Fig. 7은 분체 및 소성 폐굴껍질을 반복하여 사용하였을 때의 인 제거변화를 나타낸 것이다. 초기 인농도는 50 mg/l이며, 제거율은 반응 24시간째를 기준으로 나타내었다. 분체 폐굴껍질(1 g)인 경우 1회 사용시에는 85.9%의 제거율을 나타내었으나 2회, 3회 사용시에는 제거율이 각각 1.63%, 0.54%로서 2회 이후에는 거의 제거되지 않았다. 소성 폐굴껍질(0.05 g)을 사용한 경우에는 1회 반응시 91.9%의 높은 제거율을 보였으나 반복사용함에 따라 제거율이 점차 낮아져 9회째 반응시에는 25.2%까지 낮아졌다. 이와같이 분체 폐굴껍질은 한번 밖에 사용할 수 없었으나 소성 폐굴껍질을 사용하는 경우에는 적어도 4번째까지 사용하더라도 인 제거율이 35%이상이었다.

7. 용출액에 의한 인 제거

Fig. 5에서와 같이 폐굴껍질의 분체시료를 컬럼에 충전하여 사용하다 보면 적은량의 통수량에서도 딱딱하게 굳어버려 합성폐수가 통수되지 않는 현상이 발생하였다. 데이터로서 나타내지는 않았지만 소성 폐굴껍질인 경우에는 이에 처음부터 합성폐수를 통수시킬 수 없었다.

폐굴껍질을 사용하면 정석반응에 의해 수중의 인을 효율적으로 제거할 수 있음에도 불구하고 폐굴껍질을

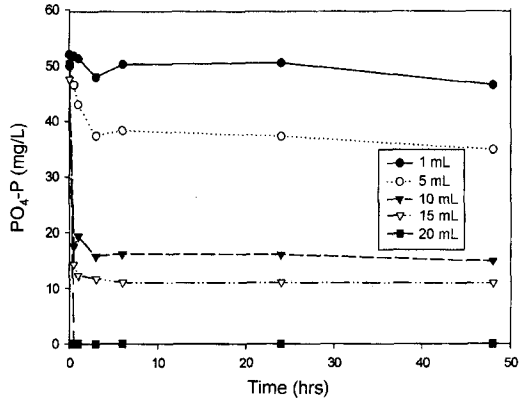


Fig. 8. Effect of the amount of solution extracted from calcined waste oyster shell on the phosphorus removal.

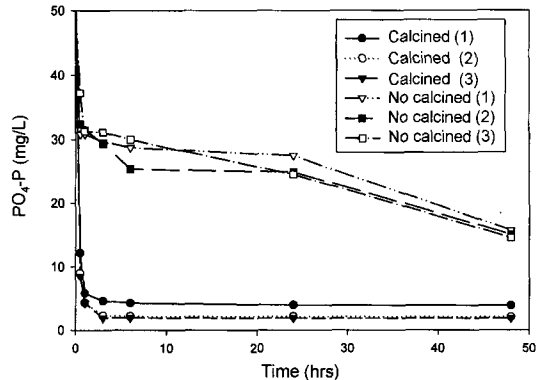


Fig. 9. Effect of repeated extractions on the phosphorus removal with extracted solution from calcined oyster shell. Numbers indicate the number of repeated reactions.

컬럼에 충전하여 사용하는 경우에는 오랫동안 사용하지 못할 뿐만 아니라 연속적으로 인을 제거할 수 없게 된다. 따라서 본 실험에서는 연속적인 인 제거실험을 수행하기 위하여 우선 소성 폐굴껍질로부터 용출시킨 용액을 사용하였다.

Fig. 8은 소성 폐굴껍질을 증류수에 용해시킨 후 그 상등액의 용량에 따른 인 제거를 나타낸 것이다. 반응에 사용한 용출액의 양은 1~20 ml이다. 용액 1 ml를 첨가하였을 때에는 수중의 인은 거의 제거되지 않았으나, 첨가량이 5, 10, 15 ml인 경우에는 반응 48시간 후 수중에 잔존하는 인 농도가 각각 34.7, 14.8, 10.6 mg/l로써 제거율은 각각 30.5%, 71.3%, 78.3%였다. 용출액 20 ml를 첨가하였을 때에는 반응 30분만에 수중 인이 완전히 제거되었으며, 이와 같이 소성 폐굴껍

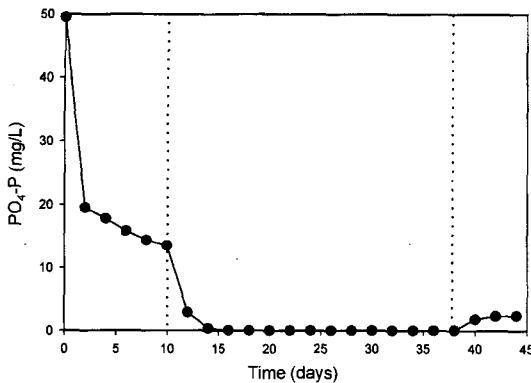


Fig. 10. Change of effluent PO₄-P concentration with solution extracted from calcined waste oyster shell during continuous reaction.

질로부터 용출된 용액을 사용하면 충분히 인이 제거될 수 있음을 알 수 있었다.

8. 반복 용출액에 의한 인 제거

Fig. 9에는 소성 폐굴껍질과 분체 폐굴껍질을 증류수에 반복하여 용출시킨 용출액에 의한 인 제거변화를 나타내었다. 소성 폐굴껍질인 경우 처음(1회) 용출액에 의한 인 제거율은 반응 48시간 후 약 96.2%이었으나, 2회와 3회째의 용출액에 의한 인 제거율은 각각 95.8%과 92.2%로 적어도 3회까지는 재용출시켜 사용하더라도 90%이상의 인을 제거할 수 있었다.

한편 분체 폐굴껍질을 사용한 경우에는 1회, 2회, 3회째의 용출액에 의한 인 제거율은 각각 70.9%, 69.9%, 70.9%였으며, 소성 폐굴껍질로부터 용출액을 사용하는 쪽이 인 제거율이 높았다.

9. 용출액에 의한 연속적 인 제거

소성 폐굴껍질로부터 용출시킨 용출액을 사용하여 연속적으로 인을 제거하기 위한 실험을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 10과 같다.

반응 초기의 HRT를 12시간으로 하여 유입수 인 농도 50 mg/l를 흘려 보냈으며, 이때의 유출수의 인 농도는 떨어지는 경향을 보이고 있으나 반응 10일째에는 72.6%밖에 인이 제거되지 않았다. 11일째부터 HRT를 18시간으로 하고 동시에 반응조내에 정석반응의 결정핵의 역할을 할 수 있도록 분체시료 5 g을 넣어 반응시켰다. 그 결과 유출수의 인 농도는 거의 0에 가깝게 되어 100%의 제거율을 나타내었다. 반응 38일째부터 HRT를 다시 12시간으로 짧게 하였으나 유출수의 인 농도는 1.81 mg/l이며, 제거율은 96.3%로 높게 나타내

었다. 실험초기와 똑같이 HRT를 12시간으로 하였음에도 불구하고 인 제거율이 높게 나타나는 이유에 대해서는 실험 중간에 폐굴껍질 5 g을 투여했기 때문인지 아직 확실히 규명하지 못하고 있다. 본 실험의 조건에서는 HRT를 18시간으로 하여 연속처리하면 유입수 인 농도 50 mg/l를 거의 100% 제거할 수 있음을 알 수 있었다.

IV. 결 론

폐굴껍질을 탈인재로 사용하여 합성폐수 중의 인 제거를 위하여 분체 및 소성 폐굴껍질과 이들로부터의 용출액에 의한 인 제거 특성을 검토하였다.

1. 분체 폐굴껍질의 입경이 작은 쪽이, 또한 첨가량이 많을수록 인 제거효율이 높았다.

2. 분체 폐굴껍질을 충전한 인 제거 실험에서는 소입경의 폐굴껍질을 사용한 경우 원수 인농도 10 mg/l일 때 통수량 280 ml까지는 유출수 농도 1.6 mg/l 이하로 유지되었으나 이후의 통수량부터는 컬럼의 막힘 현상이 일어났다.

3. 소성 폐굴껍질을 사용하면 분체 폐굴껍질의 1/10 ~ 1/100의 양만으로도 분체 폐굴껍질의 인 제거율과 거의 비슷한 수준이었다.

4. 소성 폐굴껍질을 반복사용하는 경우 9회 반복사용시 인 제거율은 처음의 25%까지 낮아졌다.

5. 소성 폐굴껍질로부터의 용출액을 사용한 실험에서는 용출량이 많을수록 인 제거율이 높았으며, 용출액 20 ml를 첨가한 경우에는 반응 30분만에 인이 100% 제거되었다.

6. 용출액에 의한 연속 인 제거에서는 HRT 18시간일 때 100%의 제거율을 얻을 수 있었다.

감사의 말씀

본 연구는 1998년도 조선대학교 교내 학술연구비의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 稻森悠平 : 高橋滿治, 富土元英二, 石屋昇: 生物化學的 同時處理法によるリン除去, 下水道協會誌, **12**(135), 9-24, 1995.
- 2) 辻幸男 : リンの化學的除去法, PPM, **6**, 72-81, 1994.
- 3) 辻幸男 : リンの化學的除去法, PPM, **5**, 86-94, 1994.
- 4) 岡田和男, 星野滂生, 島田和天 : 接觸膜リン法による水中のリン除去に關する研究(II), 下水道協會誌, **18**(204),

- 12-21, 1981.
- 5) 上甲勳, 小泉求, 渡邊敦, 安部 偕 : 晶析法による下水中のリンの除去に関する研究 (第 1報), 一晶析反應條件の検討一, 下水道協會誌, **17**(197), 43-49, 1980.
 - 6) 上甲勳, 小泉求, 渡邊敦, 安部 偕 : 晶析法による下水中のリンの除去に関する研究 (第 2報), 一固定層方式における處理條件の検討一, 下水道協會誌, **18**(200), 2-11, 1981.
 - 7) 김은호, 성낙창, 강성호 : 정석탈인공정의 정석재로써 폐굴껍질의 재활용에 관한 연구, 한국환경위생학회지, **23**(4), 133-138, 1997.
 - 8) 中川四郎 : 骨炭を用いた2次處理水の晶析脱リン法に関する研究(I), 下水協會誌, **20**(231), 19-27, 1983.
 - 9) 정중현, 조상원, 김영식, 이형근, 오광중 : 폐기물 소각로와 배연탈황공정에 이용하기 위한 흡수제 수화반응 측정, 한국환경위생학회지, **25**(1), 10-21, 1999.
 - 10) 정유진, 신남철, 박현전, 윤태경, 성낙창 : 폐굴껍질 연속흡착탑을 이용한 피혁폐수 중의 인 제거 특성, 한국환경위생학회지, **26**(1), 45-48, 2000.