

굴 폐각과 제올라이트를 이용한 P 및 NH₄⁺-N 제거

이방희[†] · 문병현* · 조인철
경남보건환경연구원, *창원대학교

Application of Oyster Shells and Zeolites for P and NH₄⁺-N Removal

Bang-Hee Lee[†], Byung-Hyun Moon*, and In-Chul Cho

Kyungsang-namdo Health & Environment Research, *Changwon National University

In this study, we investigated the phosphorus removal using oyster shell and the ammonia removal using zeolite. Following results were obtained in this study. The removed amount of phosphorus using raw, thermal pre-treatment of oyster shell at 550°C, and at 800°C were 4.1 mg/g, 6.0 mg/g, and 47.0 mg/g, respectively. Freundlich equations for oyster shell and zeolite were $X/M = 0.000159 Ce^{1.051}$ and $X/M = 0.000159 Ce^{1.4237}$. We performed the same experiment to activated sludge batch reactor to evaluate the effectiveness of oyster shell and zeolite powder in activated sludge process. The highest settling rate and the best removal efficiency of T-P with the oyster shell reactor were obtained. The zeolite added reactor was the most effective in the removal of T-N

Key words : Phosphorus, Ammonium, Oyster shell, Zeolite, Adsorption

1. 서 론

우리 나라 남해안의 양식장에서 발생하는 폐각의 양은 매년 약 22만톤이 발생된다고 추정되며 이 중의 50% 가량만이 굴 종패용과 비료 등으로 활용되며 나머지 50%가량이 처리되지 못하고 야적되거나 공유수면에 무단 투기되고 있는 실정이다. 이렇게 폐기되는 굴 폐각은 해가 갈수록 누적되어 처리하기에 매우 어려운 실정이다.^{1,2)}

굴폐각의 주요 성분은 탄산칼슘이므로 비료, 양계용 사료로 사용되고있다. 또한 제철의 용융점 강화, 탈황 불순물 제거에 이용될 수 있고 폐수 정화시 불순물 제거나 산성 중화에도 이용될 수 있으며 카바이트 제조, 유리 제조시 용융점 강화, 기포나 불순물 제거에 이용될 수 있다. 그 외 치약 제조, 화력 발전의 배연 탈황제, 도로포장의 경화제, 농약 제조, 제당, 식품 첨가물 등에 사용할 수 있다.

그러나 굴껍질을 칼슘원으로 활용하려면 많은 경제적 투자가 필요하고 상품의 질과 경쟁력 및 소비량을

고려하면 활용 가능한 양에는 한계가 있기 때문에 대량으로 처리할 수 있는 방법이 필요하다.^{3,4)}

폐수나 하수로부터 유입되는 인과 질소는 조류의 필수 영양원으로 부영양화나 적조를 예방하는데 반드시 제거되어야 하는 물질이다.

한편, 국내에서는 적조로 인한 연안 양식장의 심각한 폐해와 내륙 호소의 조류 발생으로 인한 수질 악화가 점점 가속화되어 1996년부터 하수종말처리장 방류수 기준이 총인을 8 mg/l 이하로 규제하였고 분뇨종말처리장의 경우는 16 mg/l 이하로 규제하였으며 앞으로는 선진국 수준으로 더욱 강화될 것으로 예견되고 있다.

질소의 제거방법에는 Breakpoint Chlorination, Ammonia Stripping, Ion Exchange, 생물학적처리방법 등이 있고, 인의 제거 방법에는 물리화학적 처리 방법으로서 활성알루미나 또는 황산알루미늄 흡착법, 정석 탈인법, 철착탈인법, 가압부상분리법 등이 있고 1970년대부터는 각종 탈인 고도처리시스템 설계에도 응용할 수 있는 수준에 이르렀다.⁵⁾

[†]To whom correspondence should be addressed.

이에 본 연구에서는 공유 수면에 무단 투기 또는 야적되고 있는 굴폐각과 저렴한 천연 제올라이트를 이용하여 인과 암모니아성 질소를 효과적으로 제거하기 위해 등온흡착식에 적용시켜 흡착능을 조사하였다. 또한 굴폐각 분말과 제올라이트 분말을 활성슬러지의 회분 식조에 투입하여 생물학적 폐수처리에 여재로서의 가능성뿐만 아니고 반응조내에서 질소-인을 처리할 수 있는가를 조사하였다.

2. 실험 재료 및 분석 방법

2.1. 실험장치

흡착 실험에 사용한 장치는 6구형 Jar-Tester를 사용하였으며 회전속도는 200 rpm으로 일정하게 운전하였고 수온은 15°C의 실내온도에서 실험하였고 반응기의 크기는 21 비이커를 사용하였다.

생분해 회분식 실험에 사용한 장치는 실 용적을 2 l로 하였고 온도를 20°C로 유지하면서 F/M비에 따라 표준활성슬러지에 굴폐각과 제올라이트를 각각 3 g을 투입하여 24시간 뒤의 결과를 SVI, COD, BOD, T-N, T-P에 대해 비교하였다.

2.2. 실험재료

굴폐각은 마산시 진동만 주변에 야적되어 있는 껍질을 수거하여 지하수에 깨끗이 세척한 다음 이 물질을 제거하여 자연상태에서 건조하여 사용하였으며 흡착제로서의 성능을 파악하기 위해서 자연상태 굴폐각 분말과 550°C 전기회화로에서 10분간 회화시킨 굴폐각 분말 및 800°C 전기회화로에서 10분간 회화시킨 굴폐각 분말 3종을 사용하였다. 입경별로는 550°C에서 전처리된 굴폐각 분말 355 μm 이하, 355~500 μm , 500~600 μm , 600~800 μm 등 4종을 사용하였다. 110°C에서 건조시킨 굴폐각의 화학적 구성은 아래와 같다.

Table 1. Composition of metals in the oyster shells⁶⁾

Components	Composition(%)
CaCO ₃	93.88
CaSO ₄	0.48
MgCO ₃	0.88
SiO ₂	1.40
Al ₂	0.32
Cl as NaCl	0.27
Na ₂ O	0.46
1g loss(500°C)	1.60

이 표에서 나타난 바와 같이 굴폐각의 주성분은 CaCO₃로 93.9%였으며, 다음은 SiO₂로 나타났다. 또한 500°C에서 감량된 양은 1.6%로 매우 적었다.

T-P 흡착에 사용된 시료 용액은 KH₂PO₄를 증류수에 용해시켜 초기농도 50 mg/l를 사용하였고 pH는 6.0으로 하였다. 또한 NH₄⁺-N 흡착에 사용된 시료용액은 NH₄Cl를 증류수에 용해시켜 초기농도 50 mg/l를 사용하였고 pH는 6.0으로 하였다.

회분식 생분해 실험에 사용된 원수는 실제 수산물 가공 업체인 D공장에서 배출되는 폐수로 오염물질의 농도는 COD_{Mn} 540 mg/l, BOD 1238.8 mg/l, T-N 137 mg/l, T-P 25.4 mg/l였다.

제올라이트는 경북 포항시 남구 동해면 상정동, 포항시 남구 구룡읍 매석산 등지에 분포되어 있는 천연 제올라이트로 45 μm 이하의 입경의 것을 사용하였고, 이 화학적 조성 결과는 SiO₂ 64.23%, Al₂O₃가 23.35%로 주성분을 이루고 있었으며, 제올라이트의 이화학적 구성은 Table 2와 같다.

2.3. 실험 및 분석 방법

총인 흡착 실험은 T-P표준용액(50 mg/l)을 2 l 비이커에 1 l를 분취하여 일정량의 굴폐각 분말을 넣고 실내온도 15°C에서 Jar-Tester로 2시간 동안 교반시키면서 30분 간격으로 시료를 분취하였다. 분취된 용액은 5B(0.10 mg/circle) 여지로 여과시킨 후 용액의 농도를 분석하였다.

NH₄⁺-N 흡착실험은 10 mg/l NH₄⁺-N용액을 2 l 비이커에 1 l씩 분취한 후 일정량의 제올라이트 분말을 넣고 실내온도 15°C에서 Jar-Tester로 2시간 동안 교반시키면서 30분 간격으로 시료를 분취하였다. 분취된 용액은 5B(0.1 mg/circle) 여지로 여과시킨 후 용액의 농도를 분석하였다. 총인(T-P)성분은 수질오염공정시험방법의 아스크로빈산 환원법을 이용한 자외선/가시광선

Table 2. Chemical composition of korea natural zeolites (%)⁷⁾

Components	Composition(%)
SiO ₂	64.23
Al ₂ O ₃	23.35
CaCO ₃	1.01
Na ₂ O	1.55
K ₂ O	2.50
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	4.68
1 g loss (500°C)	9.68

흡광광도계를 이용하였고⁸⁾, 암모니아성 질소성분(NH₄⁺-N)은 수질오염공정시험법의 인도페놀법에 따라 자외선/가시광선 흡광광도법을 이용하였다⁹⁾. 사용된 자외선/가시광선 흡광광도기는 UVIKON 941 PLUS Spectrophotometer이다. pH 분석은 디지털 유리전극 pH meter를 이용하였으며 기종은 오리온 960A을 사용하였다. Ca²⁺ 분석은 유도결합플라즈마 발광광도계(JY 138 Ultrace)를 이용하여 분석하였다.

생분해 회분식 실험에 사용된 장치는 실용적을 2 로 하였고 온도를 20°C로 유지하면서 F/M비에 따라서 표준환성슬러지조와 굴폐각과 제올라이트 투입조에 대하여 24시간후의 결과를 SVI, BOD, COD, T-N, T-P를 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 굴 폐각의 열 분해 온도별 인 제거량

생굴 폐각과 550°C 열처리 폐각, 800°C 열처리 폐각을 각각 1 g씩 T-P표준용액(50 mg/l) 1 l에 2시간 동안 흡착한 결과를 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 흡착은 30분 이내에 대부분 이루어지며 이후 120분까지는 아주 미미한 증가를 나타내고 있다.

김¹⁰⁾의 흡탈착 실험에서도 NH₄⁺-N 및 PO₄³⁻-P는 약 30분 이내에 흡착 평행에 도달하였으며 서¹¹⁾ 등의 굴 폐각 분말을 이용한 중금속 흡착에서도 흡착 평행은 20분 이내에 이루어져 본 실험결과와 비슷하였다.

Fig. 1에서 나타난 바와 같이 생굴 폐각의 1g당 인 제거량은 4.6 mg/g으로 나타났고 550°C 열처리 폐각은 6.0 mg/g, 800°C 열처리 폐각은 47.0 mg/g으로 800°C 열처리 폐각의 제거효율이 매우 우수하였다.

김¹²⁾ 등의 굴껍질 칼럼 통수 실험에서는 생 굴껍질 1g당 인 흡착량이 0.8 mg에서 3.5 mg이었고 김¹⁰⁾의 폐각 분말을 이용한 PO₄³⁻-P흡착 실험에서는 굴껍질 1g당 PO₄³⁻-P 12.0 mg까지 흡착된 것으로 보고하고 있다. 이러한 차이는 흡착 실험의 온도, pH, 입경등 조건에 따라 상이한 결과가 나타난 것으로 사료된다. 김¹³⁾ 등은 분말 전기로 슬래그를 탈인제로 사용하였을 시 수온 35°C에서 99.8%의 높은 제거율을 보였고 5°C의 경우 57.2%로 나타나 온도에 따른 변화가 특히 큰 것으로 나타나 온도가 흡착에 큰영향을 주는 것으로 보인다.

본 실험과 다른 연구자들과의 흡착량 차이는 온도에 의한 실험조건의 상이로 나타난 것으로 판단된다. 본 실험에서 나타난 결과를 보면 굴껍질 성분중의 CaCO₃

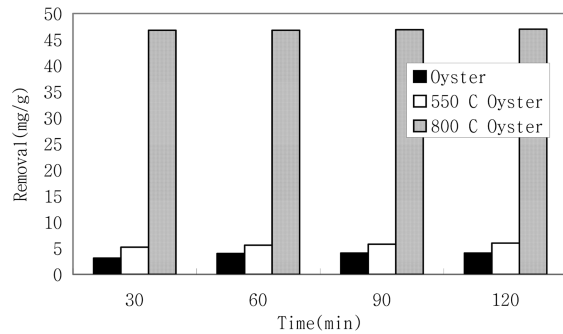


Fig. 1. Variations of the phosphate removal according to thermal pretreated oyster shell (addition of 1g oyster shell to the 1l solution of T-P 50 mg/l concentration).

가 550°C보다 800°C에서 뛰어난 흡착력을 가진 것으로 나타났다. 이것은 전처리 온도의 상승으로 CaCO₃가 CaO로 변하는 양의 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

3.2. 굴폐각의 열 분해 온도별 pH 변화

Fig. 2은 T-P표준액 50 mg/l를 1 l에 1 g을 투입했을 시 열처리된 굴폐각 종류별 pH의 변화를 시간별로 살펴보았다. 이 결과 시간이 경과됨에 따라 pH가 증가되었으며 2시간 흡착실험 후 생굴 폐각은 pH 8.2, 550°C 열처리 폐각은 pH 8.5, 그리고 800°C 열처리 폐각은 pH 12.9로 나타나 800°C 열처리 폐각의 pH가 가장 높게 나타났다. 이렇게 열처리된 굴폐각 종류별 온도에 따른 pH농도가 현저한 차이를 보이고 있는 것은 폐각중의 CaCO₃가 온도에 따라 CaO로 형성되는 양의 차이로 나타나는 현상이라고 판단된다. 또한 생굴 폐각이 시간의 경과에 따라 pH 8.2까지 증가하는 것은 CaCO₃의 용해에 의해 CO₃²⁻로 인한 것으로 추정된다.

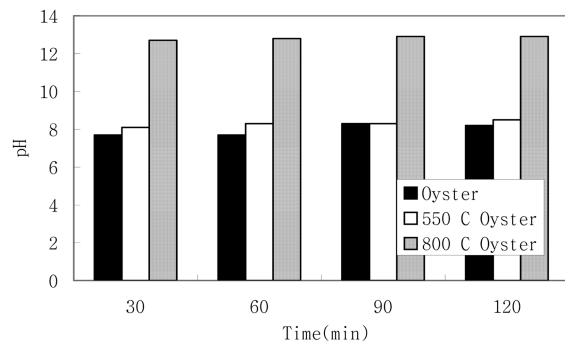
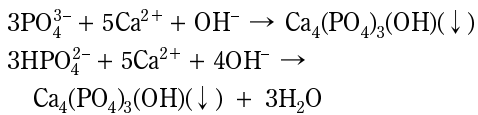


Fig. 2. Variations of the pH according to thermal pretreated oyster shell (addition of 1g oyster shell to the 1l solution of T-P 50 mg/l concentration).

3.3. 550°C 열처리 폐각의 pH변화에 따른 Ca²⁺ 용출량 및 인 제거량

550°C 열처리 폐각을 T-P 50 mg/l 1 l에 1 g 투입하여 pH의 변화와 Ca²⁺ 용출량과의 관계 및 T-P 흡착량을 살펴보았다. 이 결과 pH 농도가 7.0에서 11.0으로 상승함에 따라 굴폐각 1 g당 인 제거량은 3.0 mg/g에서 9.5 mg/g으로 증가하였다. 또한 인 흡착에 따른 Ca²⁺의 용출량은 24.6 ppm에서 13.0 ppm으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3, Fig. 4).

이 결과 인산이온(PO₄³⁻)이 수산화물이온의 존재하에서 칼슘이온과 다음과 같이 반응하여 난용성 인산칼슘으로 침전되어 나타나는 것이라 생각된다.¹⁴⁾



3.4. 550°C 열 분해 폐각의 입경별 제거효율

550°C 열 분해 폐각의 입경별 제거효율은 T-P 표준 용액으로 50 mg/l인 1 l 용액에 각 입경별로 1 g씩 투입하여 T-P 제거량을 살펴보았다. 이 결과를 보면 입경

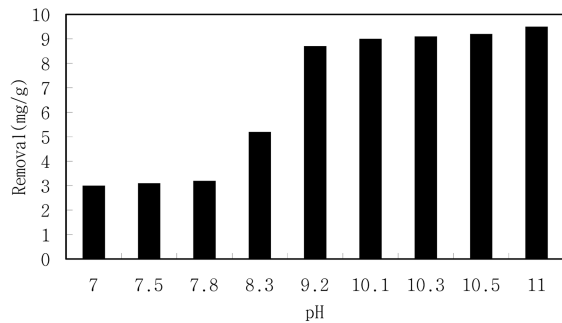


Fig. 3. Variation of Phosphate removal according to pH (550°C oyster shell).

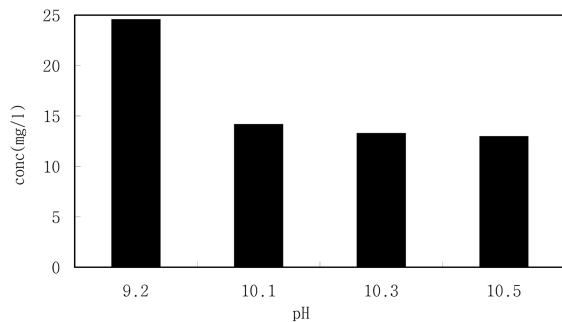


Fig. 4. Concentration of Ca²⁺ vs. pH change (550°C oyster shell).

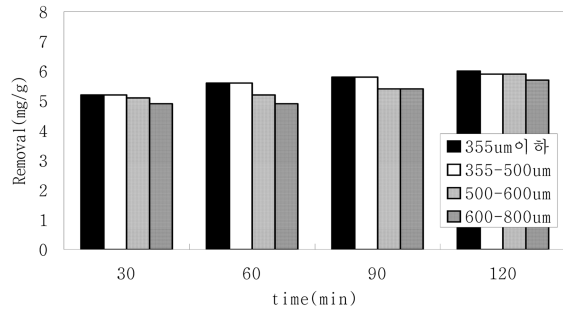


Fig. 5. Phosphate removal vs. 550°C Oyster shell particle size.

의 크기와 제거량은 Fig. 5와 같이 355 μm이하의 입경은 6.0 mg/g, 355~500 μm 입경에서는 5.9 mg/g, 500~600 μm 입경에서는 5.7 mg/g으로 나타났으나 큰 차이는 보이지 않았으나 입경이 적을수록 제거량이 증가하였다.

이는 굴껍질 세공내의 공극에 침전이나 흡착작용에 의해서 인이 제거되는 것으로 생각된다. 이후 흡착실험은 24시간 더 진행되었으나 더 이상의 흡착은 일어나지 않았고 탈착현상도 보이지 않음에 따라 폐각에 의한 인 흡착은 비가역적 흡착으로 보인다.¹⁵⁾ 또한 입경의 크기에 따른 제거량의 차이가 크지 않음에 따라 실제 활성오니조의 여재(media)로서의 사용은 플록의 침강성, 슬러지의 탈수성등 운전조건에 따라 폐각의 입경을 다양하게 선택하여 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

3.5. 550°C 열처리 폐각의 투입량별 인 제거량

T-P 50 mg/l 농도로 제조된 1 l 용액에 550°C 열처리 폐각(355 μm 이하)을 0.1 g, 0.5 g, 1 g, 2 g, 4 g, 8 g 투입하여 2시간 동안 흡착 실험한 결과가 Fig. 6에서 보는바와 같이 0.1 g 투입시 제거량이 8.4 mg/g 이었고 0.5 g 투입 시 6.8 mg/g, 1g 투입 시 6.0 mg/g, 2 g 투입 시 4.7 mg/g, 4 g 투입 시 2.8 mg/g, 8 g 투입 시 1.4 mg/g으로 나타나 투입량에 따른 제거량의 차이는 현저하였다.

이러한 투입량에 따른 제거량의 차이는 피흡착제의 용액 내 잔존 농도와 흡착제 표면에서의 농도가 평형에 도달할 때까지 진행되며, 이 때 액체상 및 고체상의 피흡착제의 농도 및 용액의 성질에 따라 달라진다고¹⁶⁾ 보고되고 있는 것과 관계 있다고 생각된다.

실험 결과를 Langmuir 흡착식과 Freundlich 흡착식에 각각 적용해본 결과 Langmuir 흡착식에서는 일정한

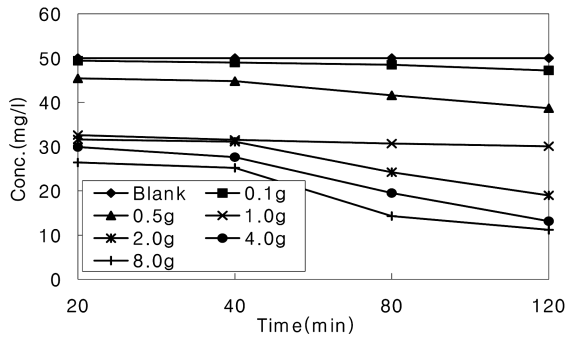


Fig. 6. Reaction rate curve of phosphate removal for addition of 550°C oyster shell powder.

관계가 나타나지 않아 적용할 수가 없었으나 Freundlich 흡착식은 본 연구의 흡착실험에 잘 적용되어 Fig. 7과 같이 $q = 0.000159Ce^{1.051}$ 로 나타났다. 여기서, q : 흡착제 단위 무게당 흡착된 피흡착제의 양 (mg/mg)

Ce : 흡착제의 흡착후의 평행농도(mg/l)

3.6. 천연 제올라이트 투입량에 따른 NH₄⁺-N의 제거량

폐수중의 질소성분은 유기물 분해에 의해 생성되는 NH₄⁺-N가 대부분이라 생각되어 제올라이트를 사용한 NH₄⁺-N제거 실험을 하였다. 여기에 사용된 제올라이트는 45 μm 이하의 입경을 사용하였고 암모니아성 질소 농도 10 mg/l의 시료 1 l에 제올라이트를 0.1 g, 0.5 g, 1 g, 2 g, 4 g을 각각 투입하여 제거량을 측정하고 결과 Fig. 9와 같이 0.1 g 투입 시 NH₄⁺-N 제거량은 6.5 mg/g이었고 0.5 g 투입 시 3.6 mg/g, 1 g 투입 시 2.3 mg/g, 2 g 투입 시 1.2 mg/g, 4 g 투입 시 0.6 mg/g의 제거량을 보였다. 이 결과를 Freundlich흡

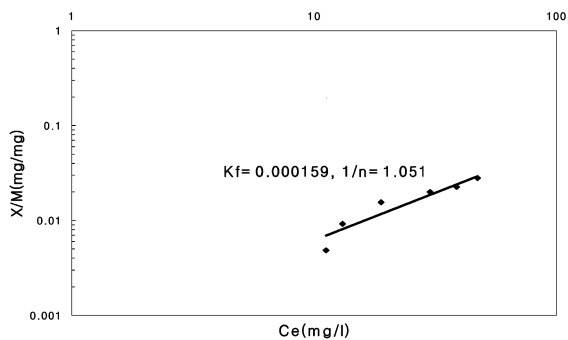


Fig. 7. Freundlich Isotherm Adsorption curve (550°C oyster shell).

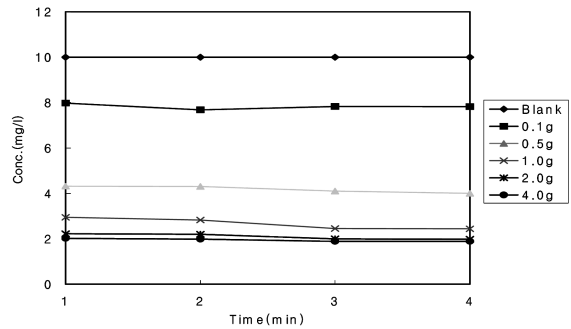


Fig. 8. Reaction rate curve of NH₄⁺-N removal using zeolite powder.

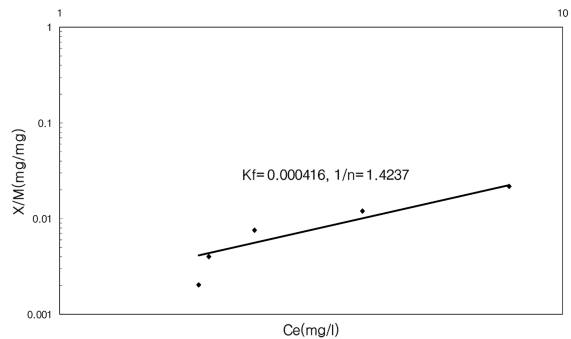


Fig. 9. Freundlich Isotherm Adsorption curve (zeolite)

착식에 적용시켜 본 결과 Kf값은 0.000416이었고 1/n=1.4237이었다(Fig. 8).

$$q = 0.000416Ce^{1.4237}$$

여기서, q : 흡착제 단위 무게 당 흡착된 피흡착제의 양(mg/mg)

Ce : 흡착제의 흡착후의 평행농도(mg/l)

일반적으로 Freundlich 흡착식에 있어서 1/n의 값이 0.1~0.5 범위에서는 흡착이 잘 일어나고 2 이상이면 흡착이 어렵다고 알려져 있다.¹⁷⁾

이러한 NH₄⁺-N의 흡착과 관계되는 이온교환용량은 제올라이트의 구조상 알루미늄의 실리콘에 대한 치환 함수이다. 알루미늄의 치환량이 클수록 전하의 부족량이 많아지고 전하의 부족량이 클수록 전기적 중화에 필요한 양이온의 수가 증가하게 된다. 그러나 실제 이온 교환에 미치는 인자는 제올라이트의 양이온 교환특성과 용액상의 양이온 농도 및 제올라이트의 구조상의 특성 등에 있다고 한다.¹⁸⁾

제올라이트의 NH₄⁺-N에 대한 선택성은 Ca²⁺, Mg²⁺ 등의 2가 양이온보다 높다고 알려져 있는데 이것은 제

올라이트의 내부골격을 이루는 링보다 큰 이온이나 분자는 제올라이트 내부로 들어오지 못하기 때문이라고 한다.¹⁹⁾ 따라서 실제 폐수중의 2가 양이온이 공존하여도 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 제거효율은 큰 영향을 받지 않는 것으로 예상할 수 있다.

3.7. 굴폐각과 제올라이트분말을 투입한 활성슬러지법 회분식 생분해 실험

실험에 사용된 굴폐각은 인의 등온흡착식에서 사용하였던 550°C 열처리 폐각으로 입경이 355 μm 이하의 입경을 사용하였다. 제올라이트는 상수도 정수용으로 사용되고 있는 입경 45 μm 이하 제품을 사용하였다. 실험에 사용한 원수는 실제 수산물 가공업체인 D공장에서 배출되는 폐수로 실험기간 동안 사용한 폐수의 농도는 평균 CODMn 540 mg/l, 평균 BOD 1238.3 mg/l, 평균 T-N 137 mg/l, 평균 T-P 25.4 mg/l였고 3배 희석하여 생분해 회분식 실험에 사용하였다.

회분식 실험에 사용한 장치는 실용적용 2로 하였고 온도를 20°C로 유지하면서 F/M비에 따라서 표준 활성슬러지와 굴폐각과 제올라이트를 각각 3 g씩 투입하여 24시간 뒤에 SVI, COD, BOD, T-N, T-P에 대해 비교하였다.

굴폐각을 투입한 반응조의 SVI는 Fig. 10과 같이 44에서 117 범위로 가장 낮았고 그 다음으로 제올라이트 투입 반응조, Control조였으며 전체적으로 F/M비가 높을수록 SVI는 낮은 추세를 보였다. 이결과는 굴폐각에 부착한 미생물 덩어리가 굴폐각의 무게로 인해 빨리 침강한 것으로 사료된다.

BOD 제거효율은 Fig. 11과 같이 F/M비가 높을수록 Control조는 감소하는 경향이 있는 반면, 굴폐각과 제올라이트는 일정하게 나타났으며 유출수의 농도는

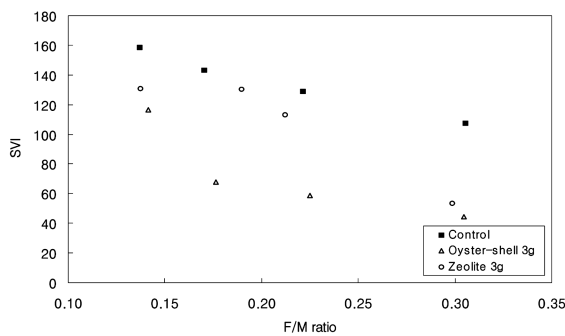


Fig. 10. SVI vs. F/M ratio.

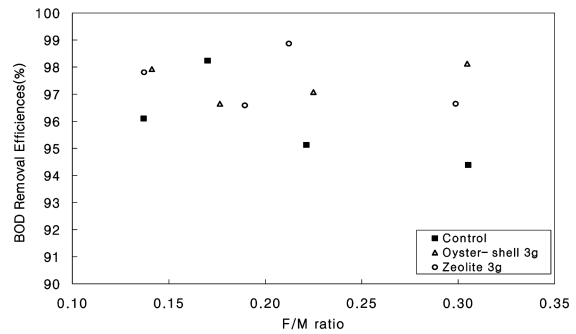


Fig. 11. BOD Removal Efficiencies vs. F/M ratio.

Control조가 최소 22 mg/l, 최대 70 mg/l, 평균 50 mg/l였고 굴폐각은 최소 23 mg/l, 최대 42 mg/l, 평균 32 mg/l였고 제올라이트는 최소 14 mg/l, 최대 42 mg/l, 평균 31 mg/l로 측정되었다.

유입폐수 T-N의 농도는 137 mg/l이며 Fig. 12와 같이 제올라이트를 투입한 경우가 평균 50% 제거되었고 굴폐각을 투입한 반응조와 Control조가 각각 29%, 31% 제거되어 총질소의 제거효율은 제올라이트를 투입한 경우가 가장 제거효율이 높았다.

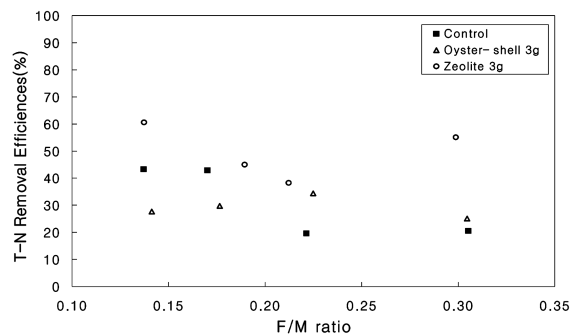


Fig. 12. T-N Removal Efficiencies vs. F/M ratio.

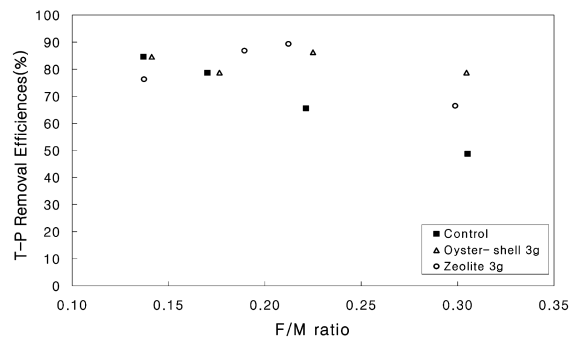


Fig. 13. T-P Removal Efficiencies vs. F/M ratio.

제올라이트 투입조가 효율이 좋은 이유는 제올라이트가 암모니아성 질소를 제거함으로 인하여 효율이 다른 반응조보다 높은 것으로 보인다.²⁰⁻²²⁾

T-P의 제거효율을 보면 유입폐수의 T-P의 농도가 25.4 mg/l였으며 굴폐각을 투여한 반응조가 평균 3.15 mg/l로 평균 88% 제거되어 가장 제거효율이 높았으며 제올라이트를 투여한 반응조가 86%, Control조가 79% 제거되었다. 굴폐각을 투여한 반응조가 효율이 높게 나타난 이유는 다량의 칼슘성분과 인의 결합으로 제거효율이 다른 반응조보다 높은 것으로 사료된다.

4. 결 론

1. 생굴 폐각과 550°C 열처리 폐각 800°C 열처리 폐각 3종에 대한 인(P)흡착실험결과 생굴 폐각의 흡착량이 4.1 mg/g, 550°C 열처리 폐각 6.0 mg/g, 800°C 열처리폐각 47.0 mg/g으로 800°C 열처리 폐각이 뛰어난 흡착능을 보였다.
2. 굴폐각의 열처리 온도별 pH 변화는 생굴 폐각 8.2, 550°C 열처리 폐각 8.5, 800°C 열처리 폐각 12.9로 나타났다.
3. 시료의 투입량을 변화시켜 pH를 측정 한 결과 투입량이 증가할수록 pH의 농도가 증가하였다.
4. pH를 임의로 변화시켜 인(P)의 흡착량을 확인한 결과 pH농도가 상승함에 따라 흡착량은 현저하게 증가하고 있으며 Ca²⁺ 농도는 줄어드는 것으로 나타났다.
5. 입경별 흡착 실험 결과 입경이 적을수록 제거량이 좋았다.
6. 550°C 열처리 폐각의 투입량별 인 흡착량을 Freundlich 흡착등온식에 적용시켜 본 결과 1/n = 1.051, K_f = 0.000159, X/M = 0.000159Ce^{1.051}였다.
7. 제올라이트의 투입량별 NH₄⁺-N 흡착량을 Freundlich 흡착등온식에 적용시켜 본 결과 1/n = 1.4237, K_f = 0.000416, X/M = 0.000416Ce^{1.4237}였다.
8. 활성 슬러지 공법의 회분식 생분해 시험 결과 굴폐각을 투입한 반응조가 침강성이 가장 좋았고 (44~117 범위) 다음이 제올라이트 투입 반응조, Control조 순으로 나타났다.
9. BOD 제거 효율은 F/M비가 높을수록 Control조는 감소하는 반면 굴폐각과 제올라이트 반응조는 일정하게 나타났다.

10. T-N 제거율은 제올라이트 반응조가 50%제거되었고 굴폐각 반응조와 Control조가 각각 29%, 31% 제거되어 제올라이트 반응조가 가장 높았다.
11. T-P 제거율은 굴폐각을 투입한 반응조가 88% 제거되었으며 제올라이트 투입조가 86%, Control 조가 79% 제거되었다.

참고문헌

1. 통영군, “신종지구 폐각 매립지 조성사업 환경 영향 평가서”, 1989.
2. 해양 연구소, “해양 개발 정책 수립을 위한 기초 연구”, 1981.
3. Jain, B. K. “Inorganic Chemical Handbook”, Mcketta, J. J. (Ed), 1993, Marcel Kekker, Inc, New York, pp. 302~309.
4. Marity, A.B. “Inorganic Chemical Handbook”, Mcketta, J. J. (Ed), 1993, Marcel Kekker, Inc, New York, pp. 309~316.
5. Dennis, J.S. and Hayhurst, A.N., Chem. Eng. Sci., 1987, Vol. 42, pp. 2361~2389.
6. 김선근 외4, “굴 폐각의 재활용 방안”, 경상남도보건환경연구원보. Vol. 4, 1996, pp. 226~249.
7. 김양, 김덕수, 장세복, 박상윤, “포항산 천연제올라이트와 합성제올라이트에 의한 금속 이온의 제거” 대한환경공학회지, 1996.
8. 환경처, “수질오염공정시험법”, 1995, 경상남도, pp 205~207.
9. 환경처, “수질오염공정시험법”, 1995, 경상남도. pp 183~186.
10. 김문평, “중금속과 이황산가스 제거를 위한 굴껍질이 활용 방안 연구”, 창원대학교 석사학위 논문, 1997.
11. 서상훈 외4, “흡착 효과에 의한 굴폐각 분말의 수처리 제로서의 응용”, 추계학술연구 발표회 논문초록집, 대한환경공학회지, 1997.
12. 김종석, 유명진, “굴껍질의 정석 반응을 이용하여 하수 중의 인제거”, 추계학술연구 발표회 논문초록집, 대한환경공학회지, 1997.
13. 김우호, 유기상, 조진규, “분말 전로 슬래그를 이용한 고농도 인페수의 처리 특성”, 한국수질보전학회지, 1996.
14. 홍성창, 김상돈, 김영훈, “CaCO₃를 함유한 폐제지 슬러지 이용한 SO₂의 배출제어”, 대한환경공학회지 1996, Vol.18 No.3, pp 349~358.
15. Singer, A. and Bergkant, V, Environ. Sci. Technol., 1995, Vol .29 No. 7, pp 1748~1753.
16. 환경처, 과학기술처. “고도정수처리시스템 개발”, 1993.
17. 橋本昭雄 외. “수처리 기술” Vol.15, pp 37~47, 1974.

18. 하기성, “구산제올라이트의 양이온 교환 특성”, *화학공학*, **1987**, Vol. 25 No. 4, pp 409~417.
19. 남영우 외 3인, “천연 제올라이트에 의한 상하수의 암모니아성 질소 제거에 관한 연구(II)”, *한국폐기물학회지*, **1997**, Vol. 14, No. 7, pp 792~800.
20. 오영민, “*동아논문*” **1979**, Vol. 16, pp. 25~107.
21. 木下雅夫, “下水道協會誌”, **1978**, Vol. 15 pp. 19~28.
22. Barrer, R.M., Rapadopoulos, R. and Rees, L.U.C, *Journal of inorganic Nuclear Chemistry*, **1967**, Vol. 29, pp. 2047.