

## 수직 흐름 제올라이트 갈대 여과상에 의한 생활하수 처리

서 정 윤

창원대학교 환경공학과

(접수 : 2007. 4. 6., 게재승인 : 2007. 4. 24.)

## Vertical Flow Zeolite-Filled Reed Bed with Intermittent Feeding for Sewage Treatment

Jeoung-Yoon Seo

Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Changwon National University,  
Sarim-Dong 9, Changwon, Gyeongnam 641-773, Korea

(Received : 2007. 4. 6., Accepted : 2007. 4. 24.)

A sewage was treated using a vertical flow zeolite-filled reed bed. The sewage from the student dormitory of Changwon National University was fed into the reed bed for 10 minutes every 6 hours at the hydraulic load of  $314 \text{ L/m}^2 \cdot \text{day}$ . The filtering height of the reed bed was 100 cm and the zeolite mixture was filled in the reed bed. The mixture consisted of the same volume of two types of zeolite ; 0.5~1 mm and 1~3 mm in diameter. Annual average removal efficiency was SS 89.9%,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  86.1%,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  81.2%, T-N 34.0%,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  97.3% and T-P 34.6%. T-N of effluent was mostly  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  and the concentration of  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  in effluent was lower than 0.1 mg/L. All removal efficiencies did not show a remarkable seasonal change. The ranking of phosphorous fractions fixed to the zeolite in column test was Ca-P > Fe-P > reductant soluble Fe-P > occluded P > saloid P > Al-P at all depths of the filter. All phosphorous fractions except for Al-P reduced at deeper filter layer, while their content ratios increased at deeper filter layer. Organic matter content was the highest at the highest layer (0~5 cm from the top of the filter) and only small differences were observed at the deeper filter layer than 5 cm from the top. Organic matter content increased at all depths of the filter with the operating time.

**Key Words** : Vertical flow, zeolite reed bed, sewage treatment, intermittent feeding

### 서 론

인공습지는 화학적, 물리적 그리고 생물적 처리기작들이 모두 복합된 자연적인 폐수정화시스템이다(1). 습지에서의 중금속들은 흡착, 착화합물형성, 화학적 침전 및 식물체에 의한 흡수작용들에 의하여 제거된다(2). 암모니아는 질산화, 식물흡수, 그리고 휘발에 의하여 제거되며 주요한 영양물질들은 미생물에 의한 탈질(1) 그리고 토양에 존재하는 Fe 및 Al(3)과 이탄(4)에 의한 P의 흡착 등에 의하여 제거된다.

Kartin von Feld 등(5)은 식물이 없는 토양여과상에서 처리수를 간헐적으로 주입하여 수직방향으로 처리수를 흐르

게 하였을 때 COD 및 암모니아태 질소를 90% 이상 제거할 수 있었다. Guenter 등(6)은 식물이 성장하는 토양여과상에서 BOD 및 암모니아태 질소를 제거하기 위해서는 처리수의 수리학적 부하가 중요하지 않고 오염물질의 부하가 더욱 중요하다고 하였다.

현재 도시하수를 처리하기 위하여 설치되어 있는 생물적 종말하수처리장들은 대체적으로 방류수의 수질을 잘 만족시키고 있다. 그러나 이러한 처리장을 운영하는 데는 운전비, 에너지 및 인건비 그리고 발생하는 많은 양의 슬러지 (찌꺼기)를 처리하기 위한 비용이 대단히 높다. 이러한 많은 비용을 충분히 조달할 수 없어, 전문인력이 충분하지 못한 대규모 처리장에서는 즉시 알 수 없는 문제점이나 고장이 발생했을 때 수질의 악화를 초래하게 된다. 또한 소규모 처리장에서는 관리와 방류수의 수질에 대한 불안을 가지게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 독일에서는 두 가지 방법을 모색하고 있다. 하나는 주위의 하수를 한 장소로 모아 대규모로 처리하며, 또 다른 한 방법은 고도의 기술을 사용하지 않아, 고장이 자주 발생하지

† Corresponding Author : Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Changwon National University, Changwon, Gyeongnam 641-773, Korea

Tel : +82-55-279-7562, Fax : +82-55-281-3011

E-mail : syseo@sarim.changwon.ac.kr

않는 자연정화방법을 이용하고 있다(7).

최신 종말하수처리장과 비슷한 처리효율을 가지고 있으면서 운전비 및 관리비용이 대단히 저렴한 생활하수 처리방법이 인공습지를 이용한 생활하수 처리방법이다(8, 9). 70년대 초기부터 습지에 의하여 폐수를 처리하였으며(10) 80년대 초기에 많은 연구가 이루어지면서 습지에 의한 처리장이 많이 건설되었다(8). 이러한 습지는 특히 공장이 없고 넓은 지역에 소규모로 산재해 있는 가옥수가 얼마 되지 않는 시골 농촌의 하수를 처리하는데 적당한 방법이다.

인공습지를 건설할 때 여과상의 여재는 지금까지 주로 토양, 모래 등이 사용되었으나 최근에는 인위적으로 조제하거나 다른 천연재료들을 활용하려는 시도도 되고 있다.

특히, 제올라이트는 우리나라의 영일만 부근을 비롯하여 America 대륙, Europe Russia, 일본 등에 널리 분포하고 있다. 제올라이트는 결정수 함량이 높고, 다공성 구조로 되어있으며, 알칼리(토)금속을 함유하고 있고, 비표면적, 양이온 교환용량 (C.E.C), 암모니아의 선택적 흡착능, 수분흡수력, 가스 흡착력 (탈취능)이 크다. 제올라이트의 주요 용도를 보면 환경정화용 (악취제거, 중금속 흡착, 정수 및 폐수 처리)이나 가스 흡착제, 미생물 흡착제 등 사용범위가 광범위하다(2). 적절한 입자 크기의 제올라이트는 인공습지 여과상의 여재로 활용할 수 있다는 것도 칼럼실험 및 파일럿실험을 통하여 확인되었다(11-13).

본 연구에서는 우리나라에서 많이 생산되고 있는 제올라이트를 여재로 사용하여 제작된 수직 흐름 갈대 여과상에 실제 생활하수를 주입하면서 처리효율을 조사하였다.

**재료 및 방법**

**실험재료**

본 실험에 사용된 제올라이트는 경북 포항에 위치하고 있는 Y 화학에서 제공받은 것으로 화학성분을 살펴보면 Table 1과 같다. 각 성분함량은 SiO<sub>2</sub> 68~72%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 9.0~14%, MgO 2% 이상, CaO, K<sub>2</sub>O와 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 각각 3% 이상 그리고 Na<sub>2</sub>O가 4% 이상이었다.

**Table 1.** Chemical component of zeolite used for the experiment

Chemical component	Content (%)
SiO <sub>2</sub>	68.0~72.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.0~14.0
CaO	> 3.0
MgO	> 2.0
K <sub>2</sub> O	> 3.0
Na <sub>2</sub> O	> 4.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	> 3.0

Y 회사에서는 입경 0.5~1 mm와 1~3 mm의 두 가지 종류를 생산 판매하였다. 본 실험에서는 이 두 가지의 제올라이트를 혼합하여 여재로 사용하였으며 두 종류의 제올라이트를 부피비 1 : 1로 혼합하였을 때 시료의 입도 분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 0.5~1.7 mm의 입경이 62.54%를 차지하였다. 실험에 사용한 혼합 제올라이트의

투수계수는  $1.54 \times 10^{-3}$  cm/sec이었다.

**Table 2.** Particle size distribution of the zeolite mixture filled with in the reed bed. The mixture consisted of the same volume of two types of zeolite; 0.5~1 mm and 1~3 mm in diameter

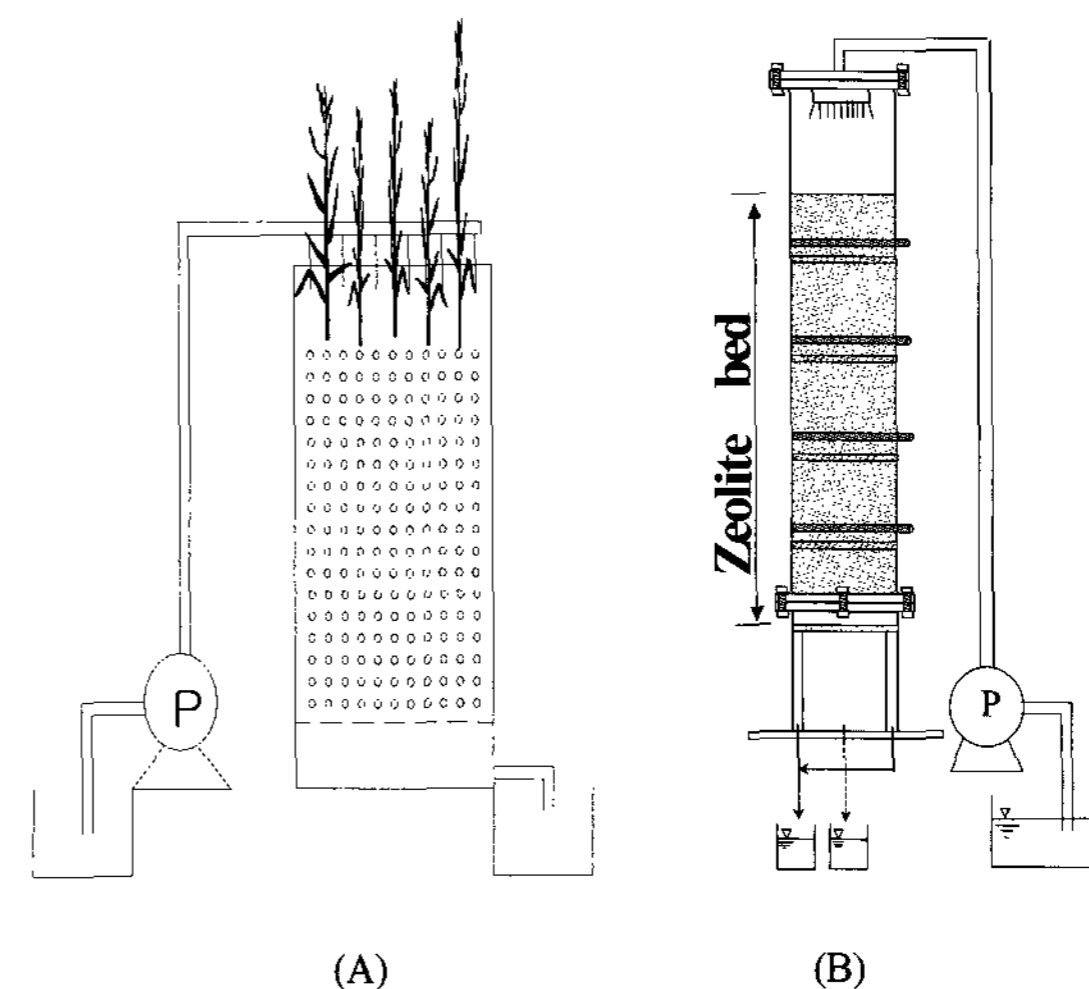
Diameter (mm)	< 0.3	0.3~0.5	0.5~0.85	0.85~1.7	1.7 <
Weight (g)	206	193	813	1,090	741
Weight (%)	6.77	6.34	26.72	35.82	24.35
Cumulative (%)	6.77	13.11	39.83	75.65	100

**하수**

본 실험에는 창원대학교 학생 기숙사에서 발생하는 생활하수를 처리하는 오수정화시설의 유입 하수 저장조의 하수를 사용하였다. 이 저장조의 하수에는 송풍기에 의하여 계속적으로 공기가 공급되고 있었다.

**실험장치**

실험장치는 Fig. 1(A)와 같이 수직 흐름 (500 cm × 600 cm (length) × 1,200 cm (height)) 갈대 여과상으로서 스테인레스로 제작하였다. 본 장치는 제올라이트 여재를 1m 높이로 충전한 후 하천에서 자라는 갈대 6 포기를 옮겨 심어 1년간 인공하수로 실험을 실시한 갈대 제올라이트 여과상을 그대로 사용하였다. 그러므로 새로운 제올라이트를 사용함으로써 충전물 자체의 흡착력에 의하여 제거되는 효율은 배제되었다. Fig 1(B) 칼럼은 두께 8 mm, 내경 184 mm, 높이 1,300 mm로 제작되었다. 칼럼의 상부 10 cm는 폐수의 분산을 위하여, 하부 20 cm는 폐수의 유출 수를 채취하기 위하여 빈 공간으로 남겨두었다. 그리고 하부의 경우 칼럼 벽면을 타고 흘러내리는 폐수를 분리하기 위하여 바깥쪽 1.5 cm를 구별분리하였다. 그리고 칼럼 내의 빛에 의한 조류 생성을 방지하기 위하여 알루미늄 호일로 칼럼을 싸서 빛을 차단하였다. 여재는 1 m 높이로 충전하였다.



**Figure 1.** Schematic diagram of experimental apparatus ((A): Vertical flow zeolite -filled reed bed, (B): Column test for phosphorus adsorption and organic matter distribution measurement).

**운전조건**

하수는 수리학적 부하량 314 L/m<sup>2</sup>·day를 하루 4회 (10분 동안 주입 후 5시간 50분 동안 중단) 균등하게 주입하였다.

**수질 분석 및 투수계수 측정방법**

수질분석은 장치의 유입수 (원수) 및 유출수를 채취하여 pH, DO, SS, BOD, COD<sub>Mn</sub>, COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, T-N, T-P 항목을 분석하였다. BOD와 COD<sub>Mn</sub>는 공정시험법, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 공정시험법의 인도페놀법, T-N와 T-P는 과황산칼륨으로 전처리 후 자외선 흡광광도법으로 흡광도를 측정하여 정량하였다(14). COD<sub>Cr</sub>은 Standard Methods(15) 그리고 여재 중 인산의 분별정량은 토양화학분석법(16)에 준하여 분석하였다. 투수계수 측정은 토질시험법(17)에 의하여 실시하였다.

**결과 및 고찰**

**pH 변화**

Fig. 2에는 처리장치의 유입 및 유출수의 pH 변화를 나타내었다. 연 평균 pH는 유입수 6.90 그리고 수직 흐름 유출수 5.64이었다. 유출수의 pH는 월별 뚜렷한 경향을 보였으며, 유출수의 pH가 유입수의 pH보다 약간 낮았다. 이것은 유입된 암모니아성 질소가 산화되고 그리고 유기물이 미생물에 의해 분해되면서 이산화탄소나 유기산이 증가되어(18) 유출수의 pH가 감소된 것으로 생각된다.

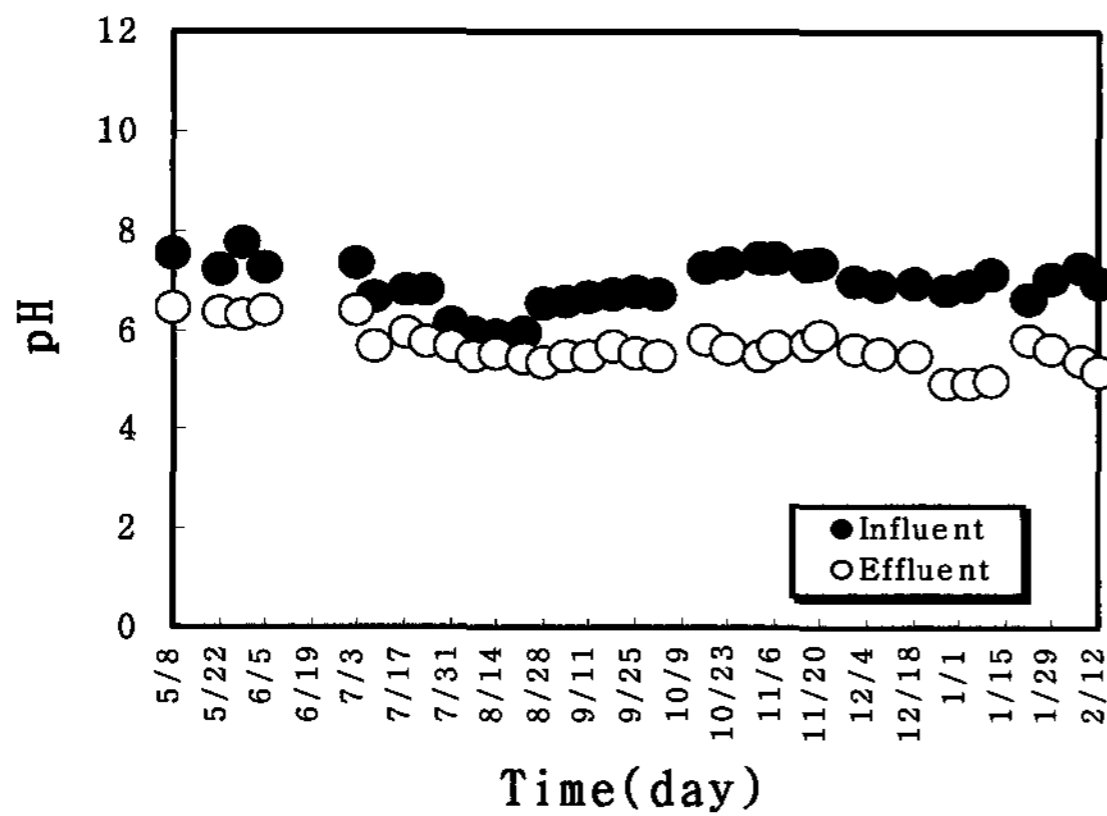


Figure 2. pH variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

**DO 변화**

Fig. 3에는 제올라이트 갈대 여과상에서의 시간경과에 따른 유입 및 유출수의 DO 변화를 나타내었다. 연 평균 용존산소는 유입수 2.9 mg/L, 유출수 DO 농도는 4.1 mg/L로 유입수보다 대체적으로 높았다. 이것으로 갈대 또는 여과상에 의하여 산소 공급(19, 20)이 이루어진다는 것을 입증할 수 있었다. 유입 폐수 중의 용존산소 농도가 높았던 것은 집수조에서 송풍기에 의하여 계속 폭기가 이루어졌기

때문이다.

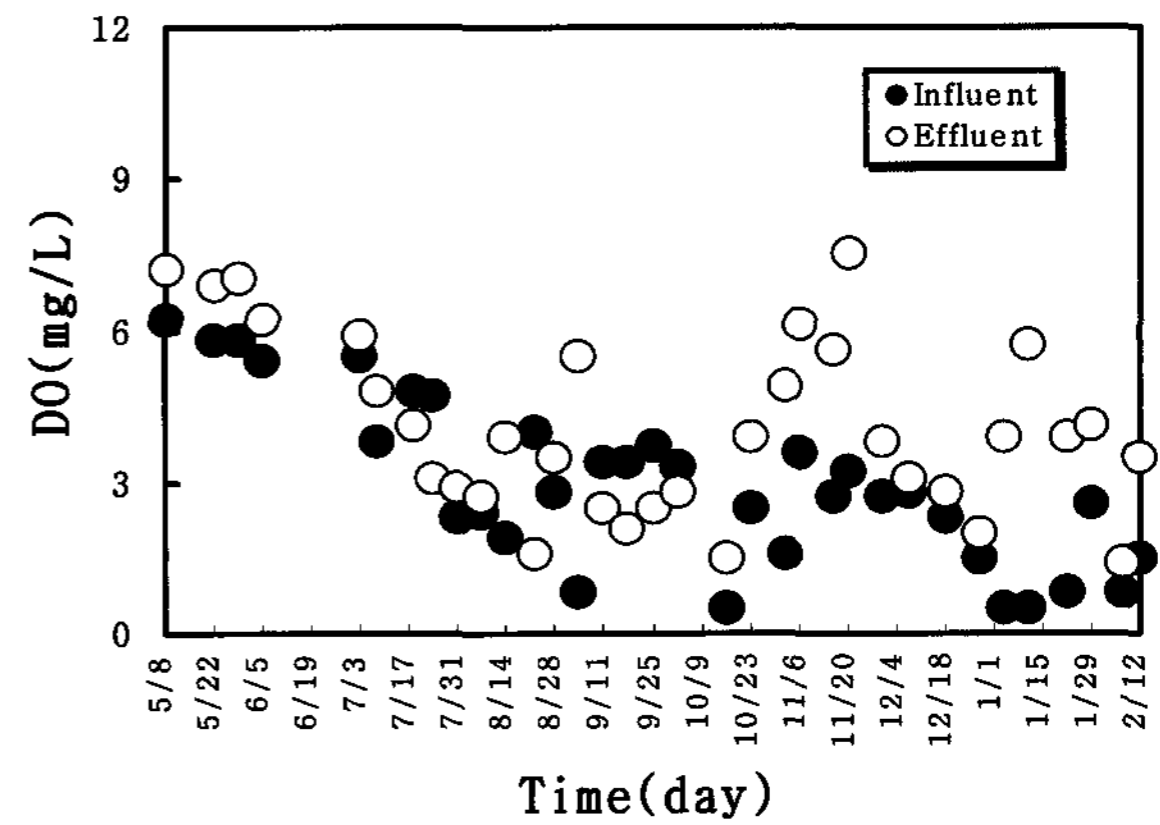


Figure 3. DO variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

**SS 변화**

Fig. 4에서 여과상 유출수의 부유물 농도는 가동 초기에는 상당히 높았으나 시간이 경과함에 따라 처리효율이 약간 증가하였다. 가동 3개월 후부터는 몇몇 경우를 제외하고는 10 mg/L 이하를 유지하였다. 가동 후반에 부유물질의 제거효율이 증가한 것은 미생물 수의 증가와 유입되는 부유물질들에 의하여 여과상의 공극이 감소하였기 때문으로 생각된다. 연 평균 부유물질은 유입수 94.1 mg/L 그리고 유출수 10.4 mg/L (처리효율 89.9%)이었다.

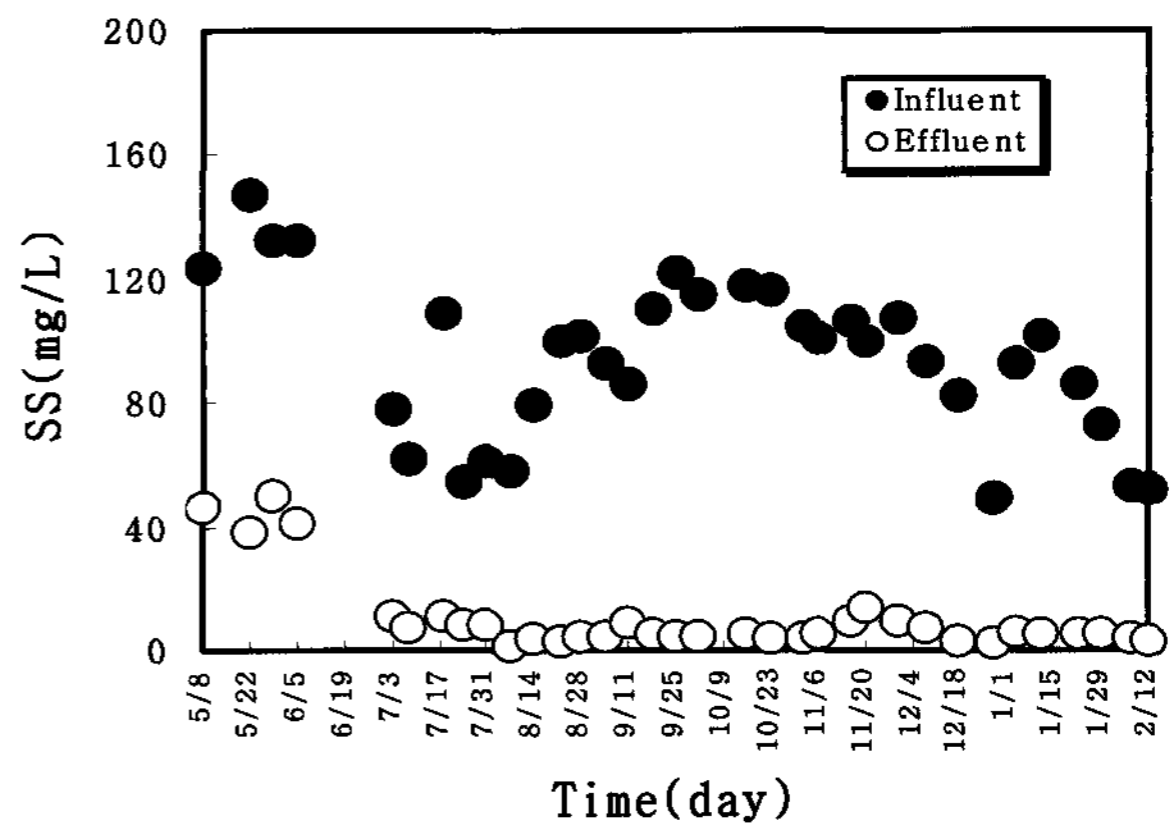


Figure 4. SS variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

**COD 변화**

Fig. 5과 6의 COD<sub>Cr</sub> 및 COD<sub>Mn</sub>에서도 유출수 중의 농도가 경우에 따라서 우리나라의 하수종말처리장 방류수 수질 기준을 초과하였다. 그렇지만 처리효율은 상당히 높았다. 이것은 폐수가 유입되는 10분 동안에는 많은 유기물들이 제올라이트에 흡착 내지는 여과작용에 의하여 여재층에 머물다가 350분 동안 폐수 주입이 중단되는 동안 여재층에 존재하는 미생물들에 의하여 분해됨으로써(3) 이 기

간 동안에 여과상의 유기물 흡착능이 다시 회복되는 이와 같은 과정이 반복되기 때문에 처리효율은 계속적으로 유지될 것으로 예상된다. 본 실험에서는 수직 흐름 여과상만의 유출수 농도이기 때문에 수직과 수평 두 흐름의 여과상을 직렬 연결된 경우와는 비교가 불가능하였다. 따라서 수직 및 수평 흐름 여과상을 직렬 연결한 경우에 대한 연구가 차후에 진행되어야 할 것으로 생각된다. 수초 여과상에서 용존 유기물질은 여과상에 채워진 충전물질의 표면에 서식하는 미생물과 주입되는 하수에 존재하는 미생물들에 의하여 분해, 산화, 환원, 합성 등 그리고 비 용해성 유기물질의 일부는 여과상의 여과작용에 의하여 제거된다(21). 또한 미생물에 의하여 하수가 처리되는 과정에서 호기성 미생물은 산소를 표층과 수초의 뿌리를 통하여 공급 받는다. 뿌리공간에는 산소가 빈약한 곳이 있을 수 있다. 이런 경우에 하수는 혐기성 상태에서 처리된다. 수초와 수초뿌리의 밀도에 따라 다를 수 있지만 뿌리가 엉겨진 경우와 그렇지 않은 경우 토양에 있는 미생물은 그 밀도가 작게는 10배에서 많게는 1,000배 이상 차이가 난다. 따라서 수초 여과상에서는 많은 종류의 미생물들 상호작용에 의한 시너지효과가 나타난다는 것이 중요하다(18). 연 평균 COD<sub>Cr</sub>은 유입수 145.7 mg/L 그리고 유출수 19.7 mg/L (처리 효율 86.1%)이었다. COD<sub>Mn</sub>은 유입수 58.1 mg/L 그리고 유출수 10.4 mg/L로 처리효율은 81.2%이었다.

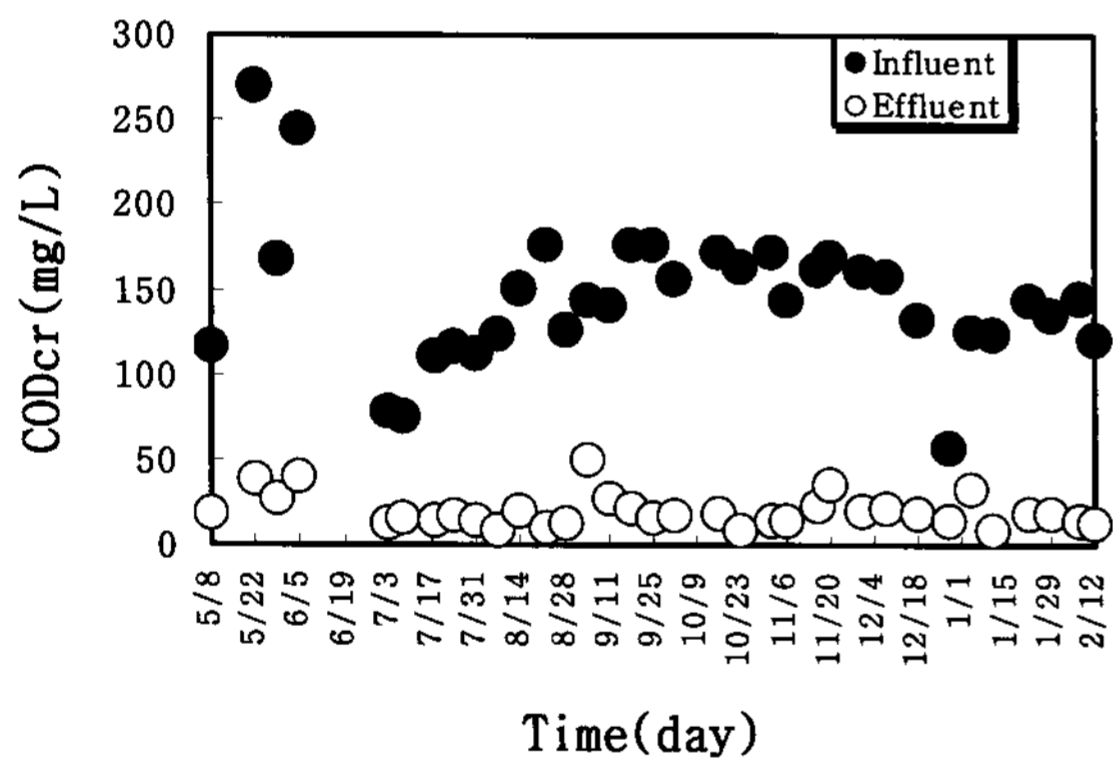


Figure 5. COD<sub>Cr</sub> variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

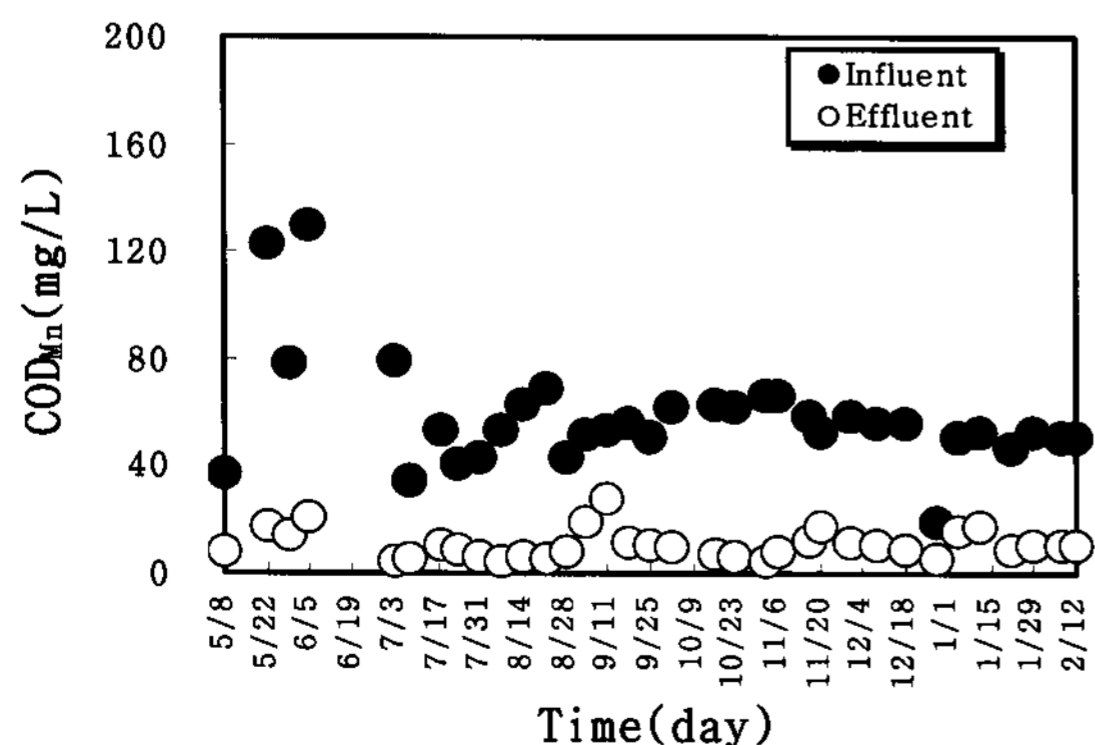


Figure 6. COD<sub>Mn</sub> variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

**BOD 변화**

Fig. 7에서 보면 유출수 중의 연 평균 BOD는 유입수 81.4 mg/L 그리고 유출수 5.3 mg/L (처리효율 93.3%)이었다. 서 등(22)이 같은 유입수를 주입하였을 때 수평흐름 제올라이트 갈대 여과상에서 유출수 4.7 mg/L (처리효율 93.9%)로 수직 흐름 여과상 농도가 수평 흐름 여과상의 농도보다 높았다. 일반적으로 수직 흐름 여과상에서 수평 흐름 (여재가 거의 처리수로 침적되어 있음) 여과상보다 유기물 분해가 잘 되는 것으로 알려져 있으나(11) 여기서는 반대의 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 수평 흐름 여과상의 여과층 전체가 유입되는 유입수에 의하여 완전히 채워진 상태에서 이동되지 않고 여재 층을 통과한 처리수가 바닥에서 바로 유출되어 수평 흐름 여과상에서 한쪽 부위에 유입수가 주입되는 것 외에는 두 흐름 여과상의 차이가 거의 없었기 때문으로 생각된다.

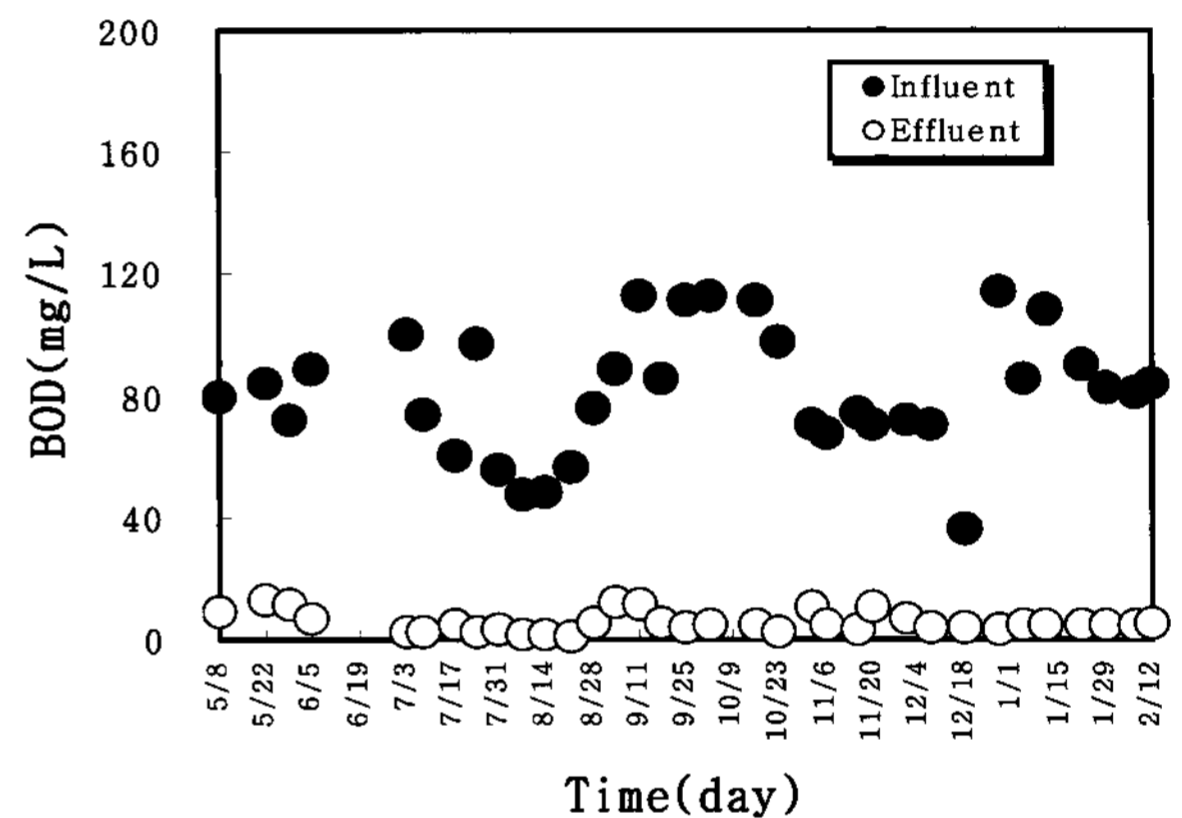


Figure 7. BOD variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

**여과상 높이별 유기물 함량 변화**

Table 3에는 제올라이트 여과상의 높이별 유기물 함량을 나타내었다. 여과상의 맨 위 0~5 cm 부위 제올라이트의 유기물 함량이 가장 높았다. 또한 가동 기간이 경과함에 따라 여과상의 충전물인 제올라이트 중 유기물 함량이 현저하게 증가하였다. 서에 의하면 수직 흐름 제올라이트 칼럼 실험에서 칼럼의 상부 하수 유입부 20 cm 여재 높이에서 유입 COD<sub>Cr</sub>의 91.05%가 감소되었으며 유기물의 함량도 가장 높았다(11). 이것은 그 곳에 유기물이 가장 많이 공급되어 미생물들이 가장 빠르게 성장하기(20, 23) 때문이라고 하였다. 본 실험에서 SS가 함유된 실제 하수가 유입되었기 때문에 유기물 함량 전부가 미생물에서 유래된 것으로 보기는 어려우나 서의 연구로부터 칼럼의 상부 하수 유입부분의 미생물 수가 그 아래 부분의 미생물 수보다 많을 것으로 보아도 무난할 것으로 여겨진다. 가동 기간에 따른 제올라이트 중 유기물 함량 증가는 일정 기간까지 증가될 미생물 수의 증가와 유입되는 SS의 축적에 의한 것으로 해석된다. 그러나 SS나 미생물 증식에 의한 여과상의 막힘 현상은 발생되지 않았으며 이것은 갈대의 뿌리가 성장하면서 여재를 부풀게 하고, 혹은 바람에 줄기가 흔들려 표

면층을 움직이게 하여 투수가 용이하게 하는 작용을 하게 된다. 여과상의 가동시간이 경과되면서 발생하는 후생동물들도 누적되는 SS 및 미생물을 이용하여 생존하기 때문에 이들이 지나치게 누적되지 않도록 하여 투수가 계속 가능하도록 하는데 공헌하게 된다(11). 그러나 3개월 가동 후 여과상 맨 위 (0~5 cm)층을 제외한 아래층들 중 60~80 cm에서 유리물 함량이 가장 높았다. 그렇지만 7개월 후에는 20~40 cm에서 가장 낮았고 그 이하의 층들에서 높아졌다. 이러한 이유에 대하여는 차후 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 여겨진다.

Table 3. Organic matter variation with the depth from the top of column during the operating time (%)

Operating time (Month)	Depth from top of column (cm)					
	0-5	5-20	20-40	40-60	60-80	80-100
3	5.0	4.4	4.4	4.4	4.5	4.4
7	12.6	11.4	8.6	10.0	10.3	10.0

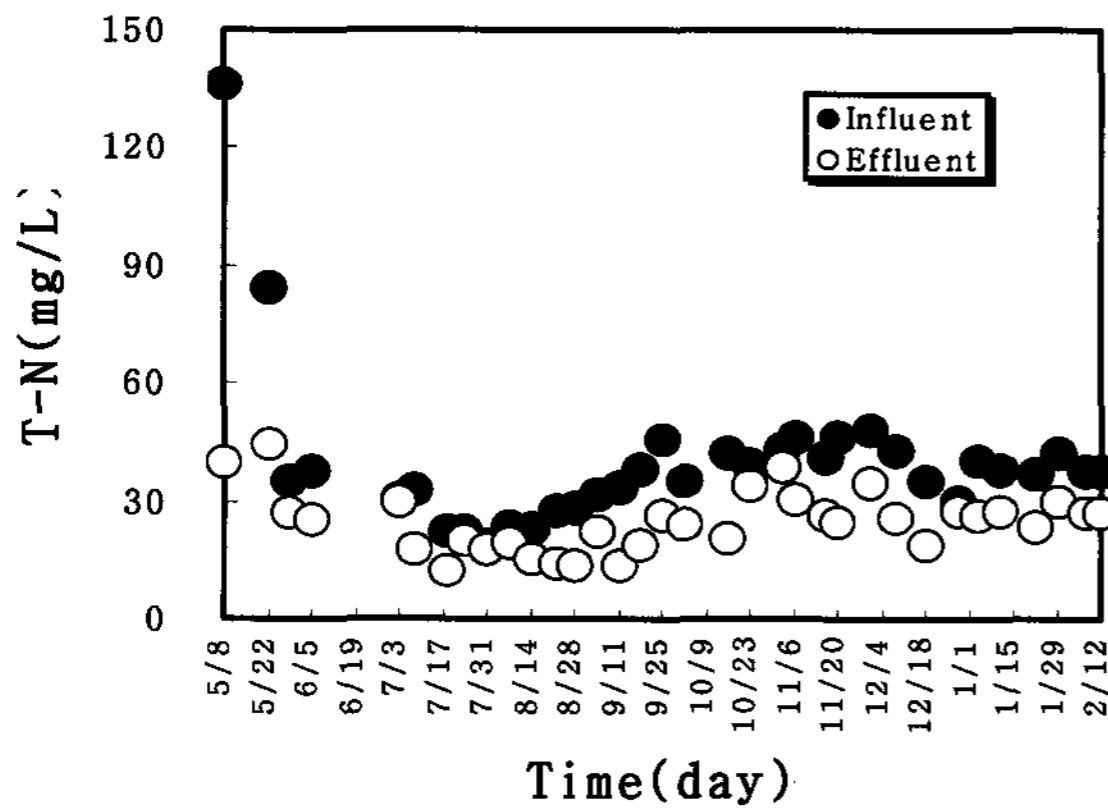


Figure 8. T-N variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

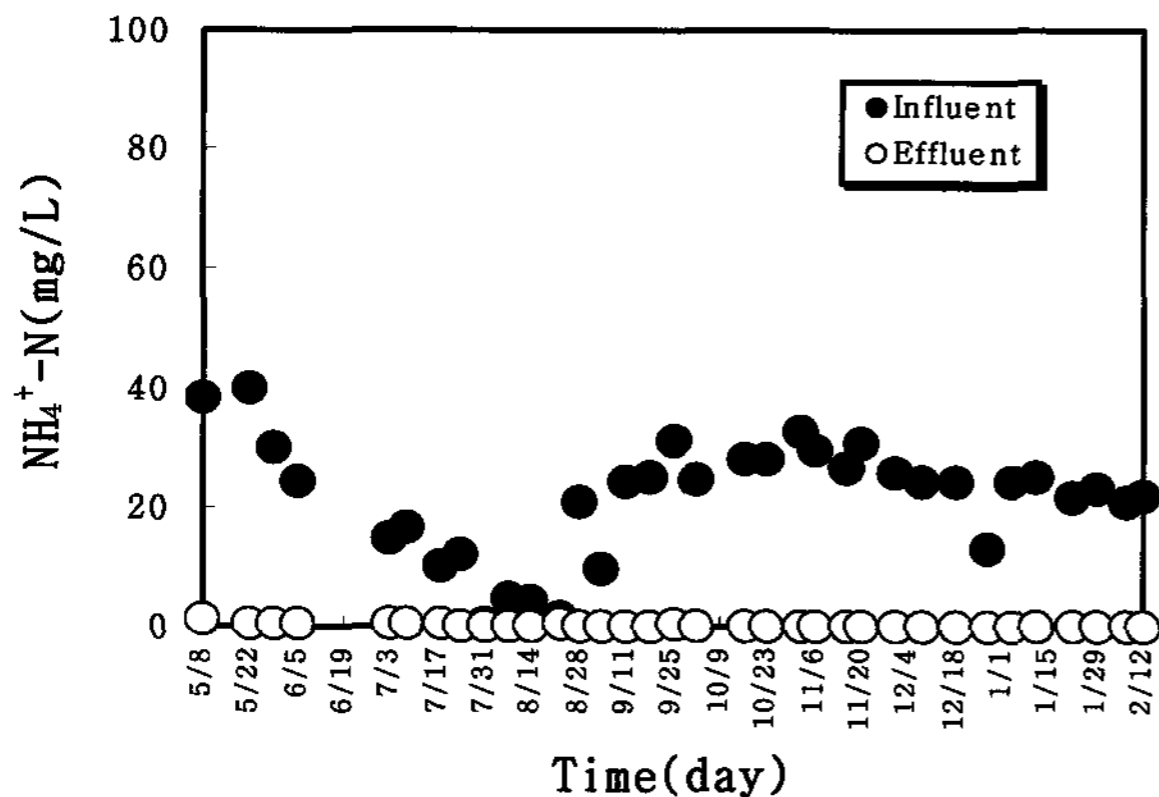


Figure 9.  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

질소 변화

Fig. 8, 9, 10 및 11에는 각종 형태의 질소에 대한 처리 효율을 나타내었다. 연 평균 T-N 농도는 유입수 39.7 mg/L,

그리고 유출수 24.6 mg/L (처리효율 34.0%)이었으며  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  농도는 유입수 21.42 mg/L, 유출수 0.19 mg/L (처리효율 97.3%)이었다. 연 평균  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 의 농도는 유입수 1.97 mg/L, 유출수 0.10 mg/L 그리고  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 농도는 유입수 0.63 mg/L, 유출수 20.59 mg/L이었다. T-N의 제거효율은 높지 않았다.

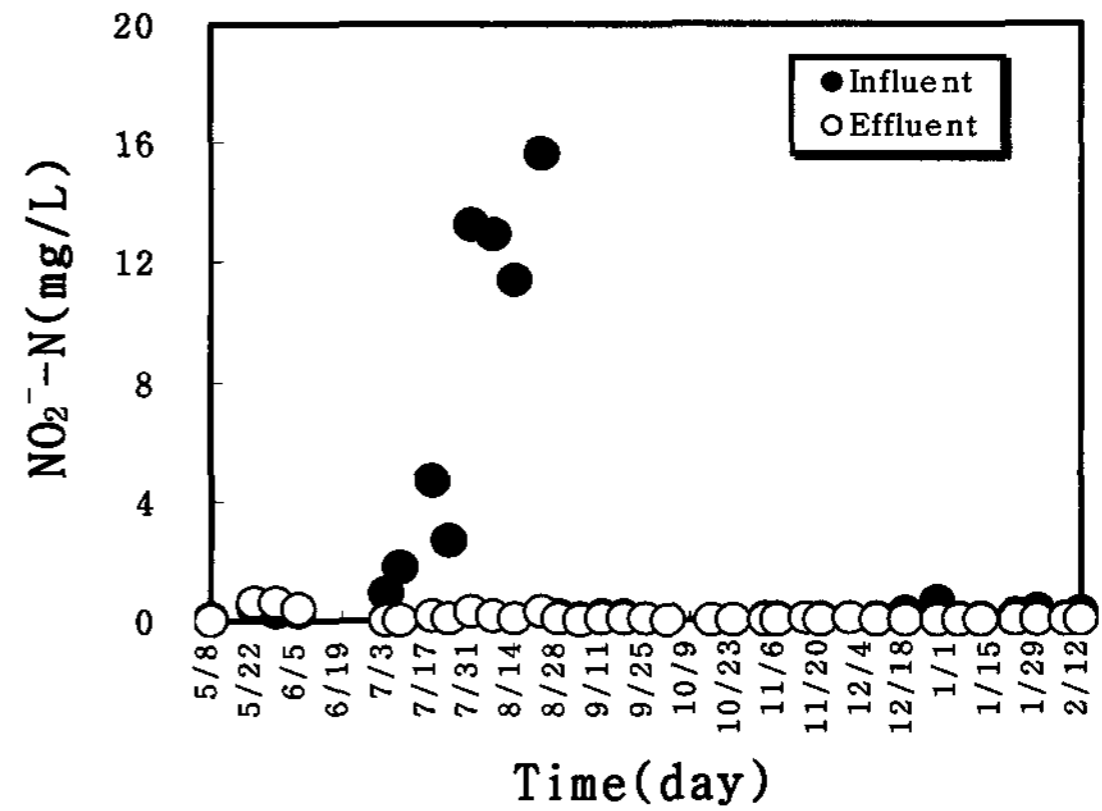


Figure 10.  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

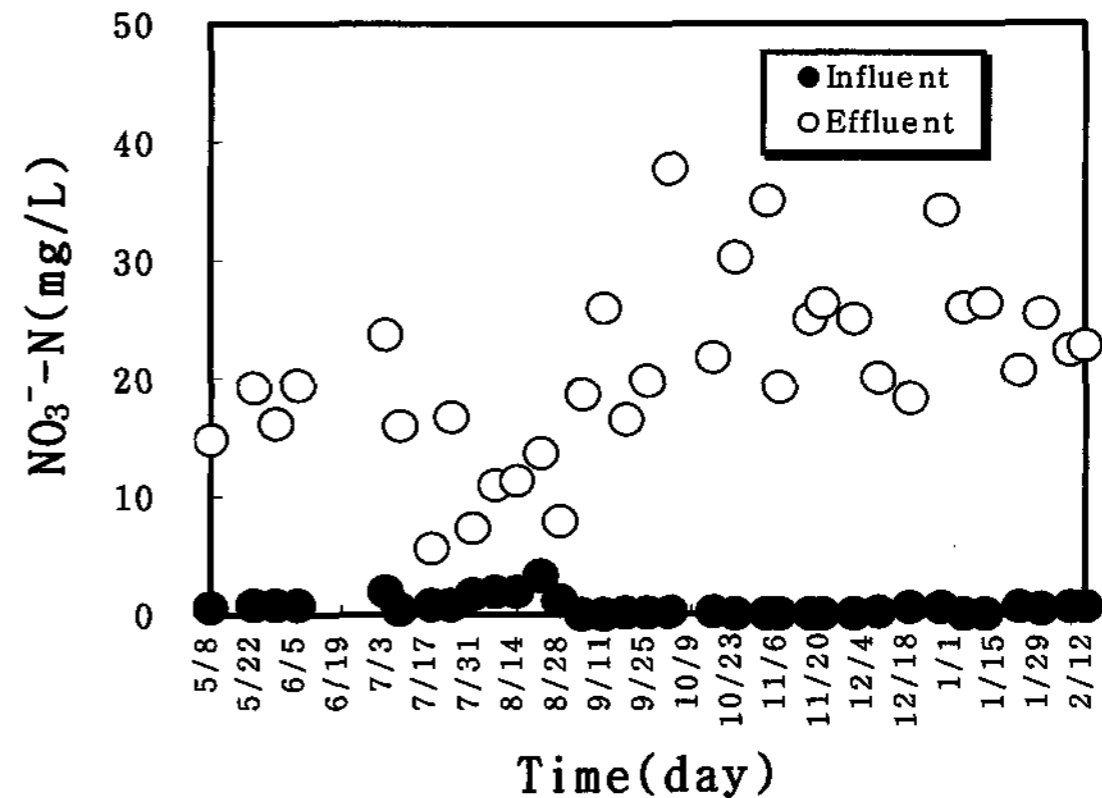


Figure 11.  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed

그러나 방류수 중 질소의 대부분은 질산성 질소로 산화되었다. 암모니아성 질소는 97% 이상으로 처리효율이 대단히 높았다. 사용된 제올라이트가 1년 이상 하수처리에 사용된 것이기 때문에 흡착능력 한계를 고려한다면 흡착만에 의하여 제거된 것으로는 보기 어렵다. 그러므로 암모니아성 질소는 산화에 의하여 질산태 또는 아질산태로 되거나 질산화된 질소가 탈질에 의하여 제거된 것으로 볼 수 있다. 즉 하수가 연속적으로 주입되는 것이 아니라 간헐적으로 주입되었기 때문에 하수와 함께 유입된 암모니아성 질소가 먼저 양이온 치환용량이 대단히 높은 제올라이트에 흡착되고, 하수가 주입되지 않는 350분 동안 제올라이트에 흡착된 암모니아성 질소가 생물학적 재생에 의하여 탈착 및 질산화되어 원래의 제올라이트 흡착능이 회복되었기 때문이다(2). 이것으로 보아 제올라이트를 이용하

여 폐수를 처리할 때 암모니아성 질소의 제거가 가능할 것으로 예측된다. 아질산태 질소의 방류수 농도도 대단히 낮았다. 이것은 아질산태 질소로 전환된 질소가 빠른 속도로 질산태 질소로 전환되었거나 생성된 아질산태 질소와 암모니아가 반응하여 탈질이 이루어진 것으로 예상된다 (24). 유출수 중의 T-N과 각 질소형태별 질소와 비교할 때 유출수 중 유기성 질소가 부유물 형태로 상당히 존재함을 알 수 있었다. 따라서 T-N의 처리효율이 낮았던 것은 부유물에 존재하는 질소가 부유물과 같이 상당량 방출된 것에서도 원인을 찾을 수 있었다.

**T-P 변화**

Fig. 12에는 T-P의 제거효율을 나타내었다. 연 평균 T-P는 유입수 3.5 mg/L 그리고 유출수 2.1 mg/L (처리효율 34.6%)이었다. 일반적으로 갈대 여과상에서 인은 갈대에 의하여 흡수, 여재에 함유되어 있는 Ca, Fe 및 Al과 화학적으로 결합하여 불용성 물질로 되어 여재에 축적과 여재 표면에 증식하는 미생물체의 합성에 의하여 이루어진다 (20). 그 중 갈대에 의하여 제거되는 양은 미미하기 때문에 제올라이트에 함유되어 있는 칼슘 및 철과 반응하여 불용성 물질의 생성에 의한 제거와 표면에서 미생물의 증식에 의한 생물학적 제거가 모두 가능하리라 예상된다. Klaus Bahlo(25)는 수직형 모래여과상에서 T-P 51.9% 그리고 G. Fehr, et al.(26)은 식재한 토양여과상에서 53~56%이었다고 보고하였다. 이들과 비교할 때 제올라이트의 T-P 제거효율은 상당히 낮았다. 따라서 본 여과상을 하수처리에 활용하기 위해서는 T-P의 제거효율을 증가시킬 수 있는 방법이 모색되어야 할 것으로 생각된다.

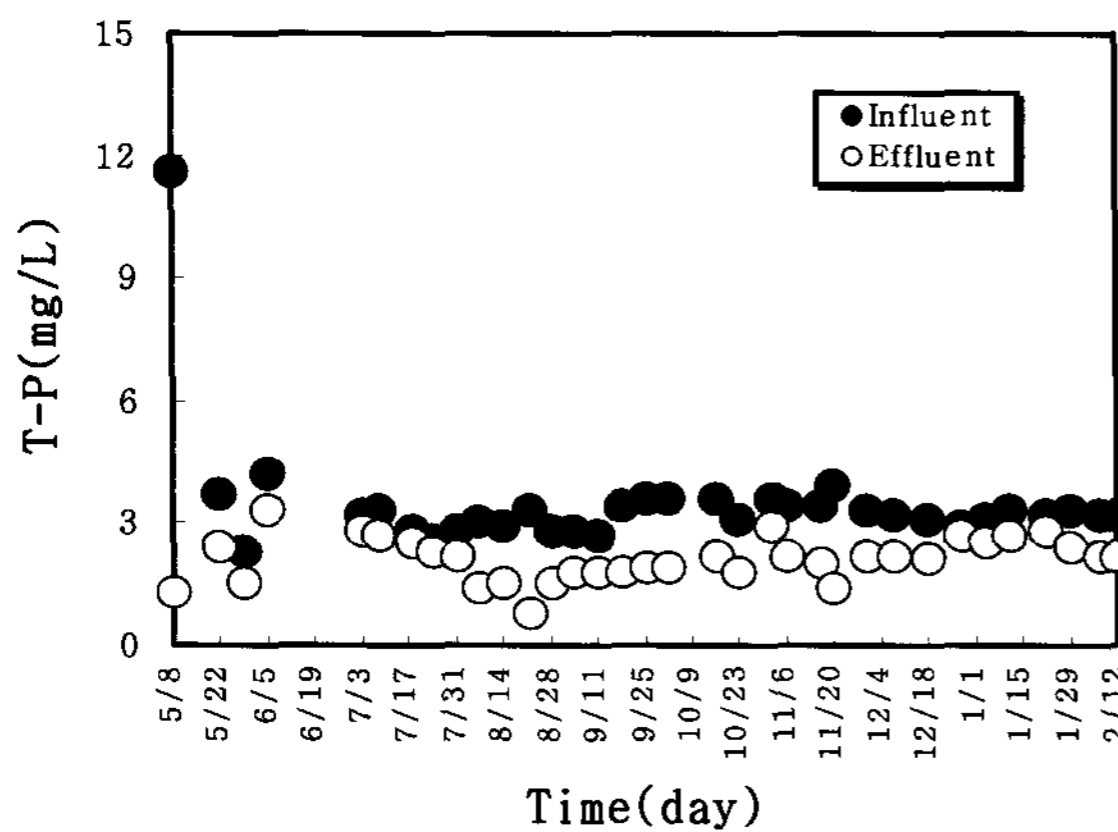


Figure 12. T-P variations of influent and effluent in zeolite-filled reed bed.

**여과층에 흡착된 형태별 인의 함량 변화**

Table 4에 의하면 칼럼실험에서 여재인 제올라이트에 흡착된 인의 형태별 함량은 모든 깊이에서 Ca-P > Fe-P > 환원가용성 Fe-P > Occluded p > Saloid P > Al-P 순이었다. 여과상 깊이별 Al-P를 제외한 모든 종류의 인화합물의 함량은 위층일수록 높았으며, 함량 비율은 깊이가 깊을수록 높아지는 경향이였다. 이러한 경향은 위층일수록 유입되는

유입수 중 인의 총량이 많아 농도 평형에 의해 많은 인이 흡착될 수 있고, 아래층에서 무기성 인의 함량비율이 높았던 것은 위층에 상대적으로 유기물 함량이 증가하여 유기성 인의 함량 비율이 높아졌기 때문으로 생각된다.

Table 4. Variation of phosphorous fractions with the depth from the top of column during operating time

Operating time (Month)	Phosphorus fractions Depth (cm)	T-P	Saloid P	Al-P	Fe-P	Ca-P	Reductant soluble Fe-P	Occluded P
		(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)	(mg/kg)
3	0-5	273.6 (100)	2.5 (0.9)	0.0 (0.0)	40.1 (14.7)	139.8 (51.1)	21.2 (7.7)	8.2 (3.0)
	5-20	237.2 (100)	0.8 (0.3)	1.0 (0.4)	31.9 (13.4)	121.1 (51.1)	22.4 (9.5)	8.1 (3.4)
	20-40	205.4 (100)	0.7 (0.3)	0.5 (0.3)	28.5 (13.9)	107.3 (52.2)	24.3 (11.8)	7.6 (3.7)
	40-60	183.8 (100)	0.7 (0.4)	0.3 (0.1)	26.6 (14.5)	107.3 (58.4)	16.9 (9.2)	7.3 (4.0)
	60-80	152.5 (100)	0.5 (0.3)	2.7 (1.8)	25.6 (16.8)	93.4 (61.2)	16.6 (10.9)	7.4 (4.9)
	80-100	167.3 (100)	1.4 (0.8)	0.6 (0.4)	27.1 (16.2)	103.4 (61.8)	19.3 (11.5)	7.8 (4.7)
7	0-5	669.3 (100)	17.8 (2.7)	0.3 (0.0)	54.1 (8.1)	233.9 (34.9)	27.2 (4.1)	16.7 (2.5)
	5-20	323.9 (100)	14.2 (4.4)	0.8 (0.2)	36.5 (11.3)	164.1 (50.7)	27.4 (8.5)	14.9 (4.6)
	20-40	285.2 (100)	23.2 (8.1)	0.3 (0.1)	34.2 (11.9)	152.2 (53.2)	27.6 (9.6)	15.7 (5.5)
	40-60	236.6 (100)	9.5 (4.0)	0.9 (0.4)	34.6 (14.6)	134.4 (56.8)	27.2 (11.5)	13.5 (5.7)
	60-80	184.5 (100)	7.5 (4.0)	0.7 (0.4)	29.2 (15.8)	98.1 (53.2)	26.9 (14.6)	14.4 (7.8)
	80-100	213.2 (100)	3.7 (1.7)	0.2 (0.1)	33.8 (15.9)	125.5 (58.9)	29.6 (13.9)	13.8 (6.5)

\* Numbers in parenthesis present percentage

**요 약**

제올라이트로 충전된 수직 흐름 갈대 여과상에 인공하수를 주입하면서 처리효율을 조사하였다. 여과상 표면적 m<sup>2</sup>당 1일 314 L의 인공하수가 6시간마다 10분 동안 간헐적으로 주입되었다. 처리수의 pH는 원수보다 감소하였으며, 용존산소 농도는 원수보다 증가하였다. 수직 흐름 여과상에서 각 항목별 연중 평균 처리효율은 SS 89.9%, COD<sub>Cr</sub> 86.1%, COD<sub>Mn</sub> 81.2%, BOD 93.3%, T-N 34.0%, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, 97.3%, T-P 34.6%이었다. 처리수 중 T-N의 대부분은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N이었으며 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N의 농도는 0.10 mg/L 이하이었다. 처리효율의 계절적 차이는 없었다. 수직 흐름 칼럼실험에서 여재인 제올라이트에 흡착된 인의 형태별 함량은 모든 깊이에서 Ca-P > Fe-P > 환원가용성 Fe-P > Occluded p > Saloid P > Al-P 순이었다. 여과상 깊이별 Al-P를 제외한 모든 종류의 인화합물의 함량은 위층일수록 높았으며, 함량 비율은 깊이가 깊을수록 높아지는 경향이였다. 유기물 함량도 상층 (0~5 cm 깊이)에 가장 높았으며, 그 이하의 깊이에서는 별 변화가 없었다. 가동기간이 경과할수록 모든 깊이에서 유기물 함량이 증가하였다.

## REFERENCES

1. An, T. -S. (1997), On the artificial wetland for water quality improvement in golf course, In Research Bulletin, Yongkang Foundation, 345-372.
2. Kim, Y., D. -S. Kim, S. -B. Jang, and S. -Y. Park (1996), Studies on the removal of metal ions with domestic Pohang zeolite and synthetic zeolite, *J. KSEE* 18(5), 587-589.
3. Yoo, S.-U. et al. (1997), Process development for simultaneous removal of nitrogen and phosphorus using natural zeolite, Institute of Samsung Mulsan Construction, Ministry of Environment, Korea.
4. Noh, J. H. and K. U. Kim (1988), Diagenetic alteration of tertiary formation in Kimpo Area, *J. Geol. Soc. Korea* 24(4), 397-416.
5. Noh, J. H. and J. R. Boles (1989), Diagenetic alteration of perlite in Guryongpo area, Republic of Korea, *Clays Clay Miner* 37(1), 47-58.
6. Lee, J. -H., H. -U. Nam, Y. -G. Kim, and T. -J. Park (1998), Characteristics of phosphorus removal from municipal wastewater treatment using a combined fixed film reactor (CFFR) process, *J. KSWQ* 14(2), 129-135.
7. Hegemann, W. (1997), Abwasserentsorgung im Duenn besiedelten Flaechenland Brandenburg, *Arch. fuer Nat.-Land.*, 00, 1-12.
8. Hegemann, W. (1996), Neue Entwicklung in der Klaertechnik - Hightech und oder Einfachverfahren, TU International, Nr. 34/35, 18-20.
9. Alder, P. R., S. T. Summerfelt, D. M. Glenn, and F. Takeda (1996), Evaluation of a wetland system designed to meet stringent phosphorus discharge requirement, *Water Environment Research* 68(5), 836-840
10. Seidel, K. (1967), Ueber die Selbstreinigung natuerlicher Gewaesser, *Naturwissenschaft* 63, 286-291
11. Seo, J. -Y. (2002), Treatment of artificial sewage using a zeolite column, *Korean Journal of Environmental Agriculture* 21(3), 178-188.
12. Seo, J. -Y., T. -H. Kim, and M. S. Choi (2003), Vertical flow zeolite-filled reed bed for treatment of artificial sewage with intermittent feeding, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* 18(2), 140-144.
13. Seo, J. -Y. and M. S. Choi (2003), Horizontal flow zeolite-filled reed bed for treatment of artificial sewage with intermittent feeding, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* 18(6), 506-510.
14. Dongwha Technology (1999), Korea Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater.
15. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Ed., APHA, AWWA, WPCF.
16. National Institute of Agricultural Science and Technology, Rural Development Administration, (1988) Chemical Analysis of Soil.
17. Park, C. S., S. G. Chung, G. M. Han, M. H. Song, Y. B. Chun, Y. G. Choi, J. H. Chung, C. N. Ok, S. U. Jang, J. G. Chung, J. B. Shin, M. Y. Lee, and D. M. Lee (1996), Soil Test Methods, aeron.
18. Chung, D. Y. et al. (2002), Development of an environmentally friendly sewage treatment model with water plant and sand for small communities, Ministry of Environment(final report), Korea.
19. Kraft, H. (1987), Pflanzenklaeranlagen aus Oekologischer Sicht, ATV-Fortbildungskurs E/5, 18. 20.3.1987 in Fulda, Abwasserbe-seitigung in Laendlichem Raum.
20. Wissing, F. (1995), Wasserreinigung mit Pflanzen, E. U., Verlag Eugen Ulmer.
21. ATV-Regelwerk Abwasser-Abfall (1989), Behandlung von hauelichem Abwasser in Pflanzen-beeten, ATV-Hinweisblatt H 262, Gesellschaft zur Foederung der Abwassertechnik e.V..
22. Seo, J. -Y. and E. H. Kim (2006), Horizontal flow zeolite-filled reed bed for sewage treatment with intermittent feeding, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* 18(6), 506-510.
23. Hammer, M. J. (1977), Water and Wastewater Technology, SI Version, John Wiley & Sons Co..
24. Platzer, C. (1997), Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Stickstoffelimination in Pflanzenklaeranlagen, Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 6, Doctorial dissertation of Technical University Berlin.
25. Bahlo, K. (1997), Reinigungsleistung und Bemessung von vertikal durchstroemten Bodenfiltern mit Abwasserzirkulation", Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universitaet Hannover, doctorial dissertation.
26. Fehr, G. and Schuette, H. (1990), Leistungsfahigkeit intermittierend beschickter, bepflanzter Bodenfilter, 21. Wassertechnische Seminar, Pflanzenklaeranlagen - Besser Als Ihr Ruf?, Institut fuer Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der Technischen Hochschule Darmstadt, 197-225.