

직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에 의한 생활하수 처리

서정윤⁺

창원대학교 환경공학과

Evaluation of Combined Vertical and Horizontal Flow Zeolite-Filled Reed Bed with Intermittent Feeding for Sewage Treatment

Jeoung-Yoon Seo⁺

Dept. of Environmental Engineering, College of Engineering, Changwon National University, 20, Changwondaehak-ro, Changwon-si, Uichang-gu, Gyeongsangnam-do, Seoul 641-773 Korea

요약

본 연구의 목적은 직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에 생활하수를 간헐적으로 주입하였을 때 처리 효율을 조사하는 것이다. 각 항목별 유입수에 대한 평균 처리효율은 수직 흐름 인공습지 유출수에서 BOD 92.42%, COD_{Cr} 79.02%, COD_{Mn} 80.62%, SS 98.33%, T-N 37.06%, NH₄⁺-N 99.45%, T-P 57.96%이었으며 수평 흐름 인공습지 유출수에서 BOD 95.56%, COD_{Cr} 91.02%, COD_{Mn} 87.78%, SS 99.22%, T-N 45.87%, NH₄⁺-N 99.88%, T-P 71.17%이었다. 최종 유출수 중 T-N은 대부분이 NO₃⁻-N이었으며 NO₂⁻-N은 평균 0.04mg/L 이하이었다. 특히, 갈대 제올라이트 인공습지는 SS와 NH₄⁺-N의 처리에 탁월하였다.

핵심용어 : 갈대 제올라이트 인공습지, 직렬연결 수직 및 수평흐름, 하수처리

Abstract

A sewage was treated using serially combined vertical and horizontal 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 L/m²·day. The reed bed depth was 100cm and the zeolite mixture was filled in the reed bed. The mixture consisted of the same volume of two types of zeolite ; 0.5~1mm and 1~3mm in diameter. pH value decreased in vertical bed, while it increased in horizontal bed. But DO concentration in the effluent of both beds was higher than that in the influent. Average removal efficiencies of the entire treatment system were 99.22% SS, 95.56% BOD, 91.02% COD_{Cr}, 87.78% COD_{Mn}, 45.87% T-N, 99.88% NH₄⁺-N and 71.17% T-P. Most of T-N in the effluent was NO₃⁻-N. However, the concentration of NO₂⁻-N in the effluent was lower than 0.04 mg/L. All removal efficiencies did not show a remarkable seasonal change.

Keywords : Combined vertical and horizontal flow, sewage treatment, zeolite reed bed

1. 서론

하수처리 시스템은 집중식과 분산식으로 구분할 수 있다. 집중식은 인구 밀도가 높은 지역에서 많은 양의 하수를 처리할 때 이용하는 방법으로 주로 대규모 하수처리장에서 처리하는 방법이다. 이와 달리 분산식은 농촌지역과 같이 소규모 마을들이 분산 분포되어 있어 한곳에 모아 처리하는 것이 비효율적인 지역의 하수처리에 활용되고 있다.

인공습지는 적절한 부지의 확보가 가능하고 습지 매질을 쉽게 구할 수 있는 중·소규모 분산식 하수 처리에 적절한 처리방법이다. 또한 인공습지는 자연 친화적인 공법으로 건설, 운전 및 유지비용이 여타 하·폐수시설에 비하여 저렴하여 세계적으로 많이 이용되고 있다(Babatunde et al., 2008; Drizo et al., 1999; Merlin et al., 2002). 인공습지는 자유수면형 (free water surface flow)과 수평 및 수직 지하흐름형 (subsurface flow)으로 나눌 수 있다. 수평 및 수직 지하

⁺ Corresponding author : syseo@changwon.ac.kr

흐름형 인공습지에서 사용되는 매질은 매질이 사용되지 않는 자유수면형 인공습지에 비해 이용 가능한 비표면적이 넓어 같은 하수를 처리할 때 처리속도가 빠르다(Park, 2009).

초기의 인공습지에 사용된 매질은 모래나 자갈 등이었다(Verhoeven et al., 1999; Vymazal, 2002). Sakadenvan et al.(1998)은 인공습지에서 인을 제거하기 위하여 토양, 슬래그와 제올라이트의 인 흡착 특성을 조사하였다. 인 흡착력은 슬래그>토양>제올라이트 순이었다. Drizo et al.(1999)은 보크사이트, 혈암(shale), 태운 석유 혈암(burnt oil shale), 석회암, 제올라이트, 광 팽창 점토 집합체(light expanded clay aggregates), 플라이 애쉬(fly ash) 7 가지 매질에 대한 인의 흡착력을 비교한 결과 플라이애쉬>석회암>혈암>보크사이트>태운 석유 혈암>제올라이트>광 팽창 점토 집합체 순이었다고 보고하였다. Heo et al.(2003)은 농촌마을의 하수처리를 위한 인공습지의 매질 입경은 호기성조에서 2~4 mm 그리고 혐기성조에서는 0.1~4 mm가 가장 좋다고 하였다. 이와 같이 인공습지의 매질은 그 목적에 따라 다양한 것들이 이용되었다.

제올라이트는 우리나라 영일만에도 분포하고 있다. 그 구조는 다공성 이어서 비표면적, 양이온 교환능력(C.E.C), 암모니아 선택적 흡착능, 수분 흡수력, 가스 흡착력(탈취능)이 크다(Kim et al., 1996). 그러므로 적절한 입자 크기의 제올라이트는 인공습지 여과상의 매질로 활용할 수 있다는 것도 칼럼 및 파일럿실험을 통하여 확인되었다(Seo, 2002; Seo, 2003a; Seo, 2003b; Seo, 2006). 그러나 이들 실험은 모두 1단(1 stage) 수직 또는 수평흐름 여과상에 의한 실험들 이었다. 수직 흐름조는 수평 흐름조보다 산소의 공급이 원활하다. 그러므로 수직 및 수평흐름 여과상을 직렬로 연결(2 stages)된 여과상을 하수처리에 이용한다면 처리 효율을 1단 여과상보다 높일 수 있을 것이다. 따라서 본 연구는 2단 제올라이트 여과상(인공습지)에 생활하수를 주입하면서 각 수질 항목들에 대한 처리효율을 알아보기 위하여 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 제올라이트는 경북 포항에 위치해 있는 Y. 화학에서 제공받은 것으로 화학성분을 살펴보면 Table 1과 같다. 각 성분함량은 SiO₂ 68~72%, Al₂O₃ 9~14%, MgO 2% 이상, CaO, K₂O와 Fe₂O₃가

각각 3% 이상 그리고 Na₂O가 4% 이상이였다.

Table 1. Chemical component of zeolite used for the experiment

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

Y 화학에서는 생산 판매하도 있는 입경 0.5~1mm 와 1~3mm의 두 가지 종류의 제올라이트를 부피 1:1 비율로 혼합하여 시료의 입도 분석 결과는 Table 2에 나타내었다. 0.5 이상의 입경이 99.52% 이었다. 또한, 실험에 사용한 제올라이트의 투수계수는 1.54× 10⁻³ cm/s 이었다.

Table 2. Particle size distribution of the zeolite filled in the reed bed

Diameter(mm)	Weight percent(%)	Accumulative percent(%)
~0.1	0.16	0.16
0.1~0.25	0.12	0.28
0.25~0.5	0.20	0.48
0.5~1.0	2.18	2.66
1.0~2.0	74.8	77.46
2.0~	22.54	100

2.2 하수

창원대학교 학생 기숙사에서 발생하는 생활하수는 오수정화시설에 유입되기 전 저장조에 저장되었다. 이 저장조의 하수를 본 실험에 사용하였다. 저장조의 하수는 송풍기에 의하여 지속적으로 공기가 공급되고 있다.

2.3 실험장치

실험장치는 Fig. 1과 같이 수직(500 mm(width)× 600 mm(length)× 1,200 mm(height)) 및 수평 흐름(300 mm(width)× 1,000 mm(length)× 1,200 mm(height)) 갈대 제올라이트 여과상은 스테인레스로 제작하였으며 생활하수는 수직 흐름 여과상을 먼저 통과하면서 처리된 후에 이 처리수가 다시 수평 흐름 여과상에 유입

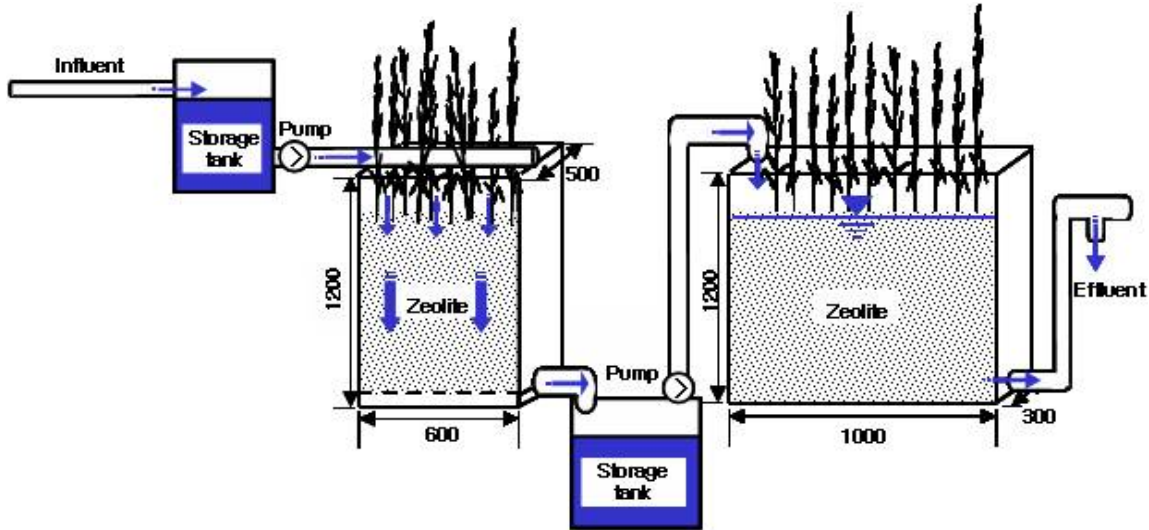


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

되도록 하였다. 수직 및 수평 흐름 실험장치의 충전물은 입경 범위 0.5~3mm의 제올라이트를 사용하였다. 갈대는 이미 실험장치에 심어 2년 동안 단상(1 stage)으로 가동되었기 때문에 충분하게 조성되어 있는 상태이었다.

2.4 운전조건

유입하수는 수리학적 부하량 314 L/m²·day를 하루 4회(10분 동안 주입 후 5시간 50분 동안 중단) 균등하게 주입하였다. 이 부하량은 Heo et al.(2003)이 주입한 부하량 222 L/m²·day 보다 크다.

2.5 수질 분석 및 투수계수 측정방법

실험은 2011년 7월부터 2011년 3월까지 실시하였으며 이 기간 동안에 시료는 처리시설의 유입수와 수직 및 수평 흐름조 유출수에서 총 29회 채취하였다. 채취한 시료는 채취 후 즉시 실험실로 옮겨 분석하였다. 단 1월에는 고장난 펌프 교체 때문에 시료를 채취하지 못하였다. pH와 DO는 Multi-Analyzer 815PDC (Istek, Inc.)를 이용하여 현장에서 직접 측정하였으며 SS, BOD, COD_{Mn}, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, T-N과 T-P는 수질오염공정시험법(Dongwha Technology, 1999)에 준하여 분석하였다. 그리고 COD_{Cr}은 Standard Methods APHA, 1989)에 준하여 분석하였으며 투수계수는 토질시험법(Park et al., 1996)에 준하여 측정하였다. 실험 여건상 식생에 의한 오염물질의 제거율은 5-10% 정도로 이미 알려져 있기 때문에 이 실험에서는 이에 대한 실험은 실시하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기온 변화

Fig. 2는 실험기간 내 창원시 일평균 대기온도 변화를 나타내고 있다. 계절적으로 대기온도 변화가 뚜렷한 것을 알 수 있으며 최저온도가 영하로 떨어지는 않았지만 이것은 채수 동안의 경우이며 때때로 기온의 변화가 심하게 낮을 때는 보온시설에도 불구하고 오수관이나 펌프가 동결되어 그 보수로 인해 일시적으로 실험이 중단되기도 하였다. 인공습지 실험시설에서 겨울에 유입수가 동결되지 않도록 관리하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 동결방지를 위하여 최소한의 보온조치를 하였다.

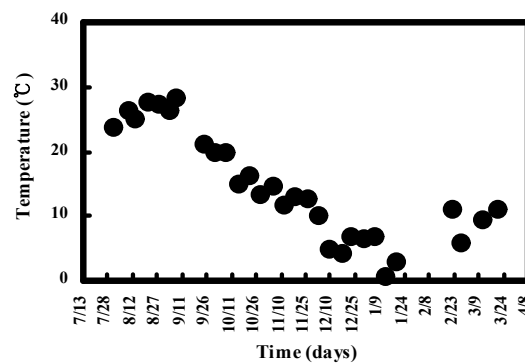


Fig. 2. Variations of atmosphere temperature in Changwon City for experimental period of July 2011 to March 2012

3.2 pH 변화

Fig. 3은 직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라

이트 인공습지에서의 시간 경과에 따른 pH 변화를 나타내고 있다. 전 실험기간에 걸쳐 그다지 큰 변화는 없었으며 수직 및 수평조의 유출수 평균 pH는 각각 5.54와 5.95로써 유입수의 평균 pH 6.89 보다 낮았다.

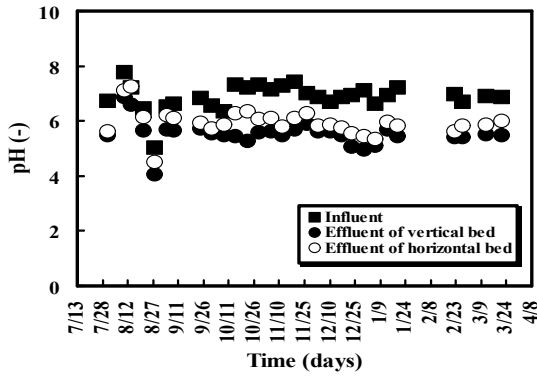


Fig. 3. Variations of pH in zeolite-filled reed bed for experimental period of July 2011 to March 2012

수직조 유출수의 pH가 유입수의 pH 보다 낮은 것은 하수 중에 유기물이 미생물에 의하여 분해되면서 CO₂와 유기산이 증가되었거나(Chung, 2002) 암모니아가 휘발성 가스 상태로 대기 중으로 날아가고 암모늄 이온(NH₄⁺)이 호기성 미생물(질산화균)의 질산화 작용(Nitrification)으로 NO₂와 NO₃로 바뀌는 등 처리조의 완충기능 때문(Yoon, 1999)으로 여겨진다. 그러나 수평조에서는 유기산의 분해, 탈질작용 그리고 인공습지식물에 의한 이용으로 NO₂-N과 NO₃-N가 감소되었기 때문에(참조 Fig. 8) 다시 pH가 증가한 것으로 추정된다.

3.3 DO 변화

Fig. 4는 직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서의 시간 경과에 따른 DO 변화를

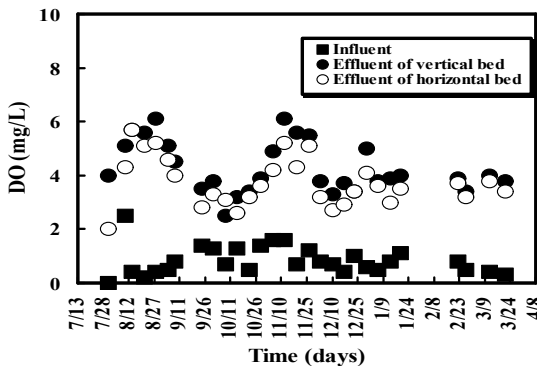


Fig. 4. Variations of DO in zeolite-filled reed bed for experimental period of July 2011 to March 2012

나타내고 있다. 유입수에서 평균 DO는 저류조 내에서 미생물이 유기물을 분해하는 과정에서 DO를 소모하였기 때문에 0.84 mg/L로 아주 낮은 반면에 수직 및 수평조 유출수의 평균 DO는 각각 4.29와 3.75 mg/L로써 오히려 유입수에 비하여 높았다.

이러한 결과는 수직조에서는 유입수와 충전물의 공극에 존재하는 공기와의 접촉으로 인하여 산소가 수증으로 이동하였거나 갈대의 뿌리와 여과상을 통한 산소 공급도 DO의 증가에 역할을 하였기 때문인 것으로 여겨지며 Choi(2003), Kraft(1987)와 Wissing(1995)의 연구결과와 일치하였다. 수평 흐름조에서 DO의 농도가 수직 흐름조 유출수보다 낮은 것은 지속적인 유기물 분해와 질산화에 의하여 DO가 소비되었기 때문으로 여겨진다(참조 Fig. 6과 8).

3.4 BOD 및 COD 변화

Fig. 5에는 직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서의 시간 경과에 따른 BOD 변화를 나타내었다. 유입수에서 평균 BOD는 75.03 mg/L 이었으나 수직 및 수평조 유출수의 평균 BOD는 각각 5.68과 3.33 mg/L이었다. 각 조에서의 평균 처리효율은 각각 92.42와 95.56%이었으며 대부분의 BOD는 수직 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서 처리되었다.

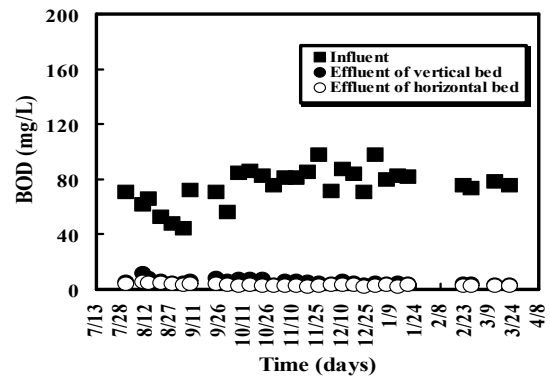


Fig. 5. Variations of BOD in zeolite-filled reed bed for experimental period of July 2011 to March 2012

제올라이트에 의한 여과 및 흡착과 더불어 미생물의 분해활동이나 갈대의 성장이 왕성한 여름에 갈대의 뿌리로부터 산소공급이 원활해지면서 처리효율이 가장 높을 것으로 예상되었으나 겨울철의 낮은 온도에도 불구하고 BOD의 제거에는 뚜렷한 영향은 없었다.

Fig. 6에는 직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서의 시간 경과에 따른 COD 변화를 나타내었다. 수직 및 수평조 유입수의 평균 COD_{Cr}

과 COD_{Mn}은 각각 102.36과 52.28 mg/L이었다. 각 조의 유출수 평균 COD_{Cr}은 각각 21.47과 9.19 mg/L로써 평균 처리효율은 각각 79.02와 91.02%이었고 평균 COD_{Mn}은 각각 10.13과 6.39 mg/L로써 평균 처리효율은 각각 80.62와 87.78%를 나타내었다. 모두 수직 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서 높은 처리효율을 보였으며 BOD와 같은 처리 경향을 나타내었다. 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서 처리효율이 낮은 원인은 수직 흐름 조에서 제거되지 못한 분해되기 어려운 잔여 물질들이 수평조에 유입되기 때문이다.

수초 여과상에서 용존 유기물질은 여과상에 채워

진 제올라이트 표면에 서식하는 미생물과 주입되는 하수에 존재하는 미생물들에 의하여 분해, 산화, 환원, 합성 등 그리고 비용해성 유기물질의 일부는 여과상의 여과작용에 의하여 제거되는(Gesellschaft zur Foederung der Abwassertechnik e. V., 1989) 것으로 여겨진다. 또한, 미생물에 의하여 하수가 처리되는 과정에 호기성 미생물은 산소를 표층과 갈대의 뿌리를 통하여 공급을 받게 된다. 그러나 뿌리 공간에는 산소가 빈약한 곳이 있을 수 있다. 이러한 경우에 하수는 혐기성 상태에서 처리된다 (Seo 2003b).

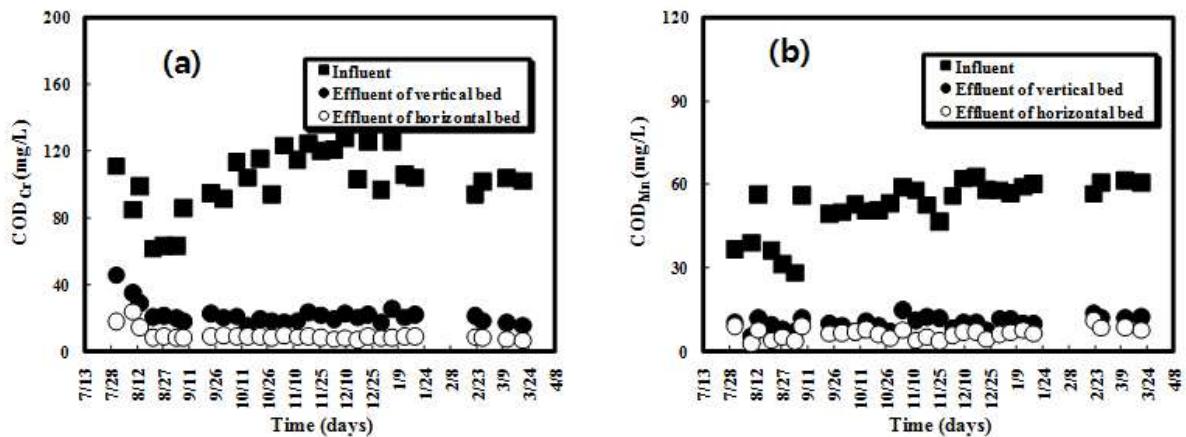


Fig. 6. Variations of COD_{Cr} (a) and COD_{Mn} (b) in zeolite-filled reed bed for experimental period of July 2011 to march 2012

3.5 SS 변화

Fig. 7은 직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서의 시간 경과에 따른 SS 변화를 나타내고 있다. 유입수에서 평균 SS는 92.66 mg/L이었다. 수직 및 수평조 유출수 평균 SS는 각각 1.55와 0.72 mg/L로 낮아져 각 조의 유출수 평균 처리효율은

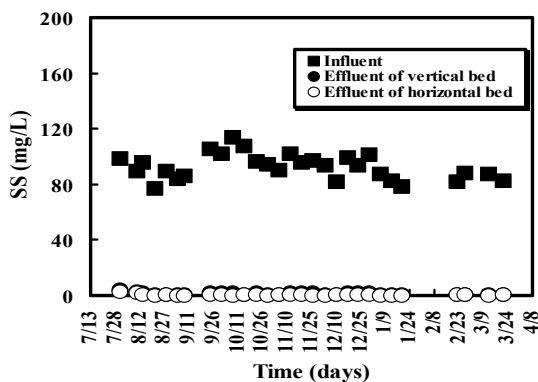


Fig. 7. Variations of SS in zeolite-filled reed bed for experimental period of July 2011 to march 2012

각각 98.33과 99.22%를 나타내었으며 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서 처리효율이 높은 것을 알 수 있었다.

Yoon(1999)에 의하면 인공습지에서 SS 제거의 주된 원리는 여과 및 침전에 의하여 이루어지지만 미생물에 의한 분해도 상당히 기여한다고 하였다. 따라서 이 연구에서 이용된 인공습지에서도 이와 같은 기능으로 인해 처리효율이 탁월하였던 것으로 여겨질 뿐만 아니라 낮은 온도에서도 크게 영향을 받지 않았음을 알 수 있었으며 Kim(1997)의 연구결과와 유사한 결과를 보였다.

3.6 각종 질소 변화

Fig. 8은 직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서의 시간 경과에 따른 각종 형태의 질소에 대한 변화를 나타내고 있다. 수직 및 수평 흐름조 유입수 평균 T-N, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N과 NO₃⁻-N의 농도는 각각 39.42, 25.48, 0.08과 0.15 mg/L이었다. 각 흐름조 유출수의 평균 T-N 농도는 각각 24.81과 21.34

mg/L로써 평균 처리효율은 각각 37.06과 45.87% 그리고 평균 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 농도는 각각 0.14와 0.03 mg/L로써 평균 처리효율은 각각 99.45와 99.88%이었다. 모두 수직 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서 처리효율이 높은 것을 알 수 있었다. 또한, 각 흐름조 유출수의 평균 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 농도는 각각 0.04와 0.03 mg/L 그리고 평균 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 농도는 각각 16.85와 13.46 mg/L이었다. Sharma et al.(2013)에 의한 인공습지에서 착유실 폐수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 처리효율은 62.9~85.3%이었다. 그러나 이 실험에서 유출수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 평균 농도는 0.03 mg/L(처리효율 99.88%)로 갈대 제올라이트 인공습지가 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 를 감소시키는 기능이 탁월함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 pH 6인 경우에 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 처리효율이 가장 좋으며 pH 4~8에서 최적의 이온교환이 일어난다고 보고되고 있으며(Kaufman, 1975) Fig. 3에 의하면 거의 중성을 유지하고 있기 때문에 (-)로 하전된 인공습지 충전물인 제올라이트에 의한 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 흡착이 탁월하였으며, 또한 식물 및 미생물에 의한 흡수 분해, 질산화작용에 의한 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 으로의 변화가 쉽게 일어났기 때문인 것으로 여겨진다. Peng et al.(2012)에 의하면 제올라이트가 매질로 사용된 인

공습지에서 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 제거에는 제올라이트에 흡착된 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 으로부터 산화된 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 과 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 큰 역할을 한다고 하였다.

$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 은 간헐적으로 유출수가 유입수에 비하여 높거나 같은 경우가 있었는데, 이러한 결과는 하수 중에 함유되어 있는 암모니아성 질소가 산소부족으로 인한 질산화작용이 충분하게 일어나지 못한 상태로 인공습지를 통과하는 동안에 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 으로 질산화되는 속도와 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 이 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 으로 질산화되는 속도의 차이에 기인한 것으로 여겨지며 Yoon(1997)에 의하면 일반적으로 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 으로 질산화 되는 속도에 비하여 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 이 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 으로 질산화 되는 속도가 빠르다고 보고하고 있다. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 경우에 유입수에 비하여 유출수에서 높은 것을 알 수 있는데, 이러한 결과는 인공습지 내에 산소의 공급이 원활하여 호기성 상태가 유지되었기 때문에 혐기성 상태에서 일어나는 탈질화작용이 잘 일어나지 않아 인공습지 내에 잔존해 있던 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 이 유출수에 용해되어 유출되었기 때문으로 여겨진다. 즉, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 (-)이온으로서 같은 (-)이온을 띠고 있는 입자와의 사이에는 반발력으로 인하여 흡착율이 낮고 유출되는 동안에

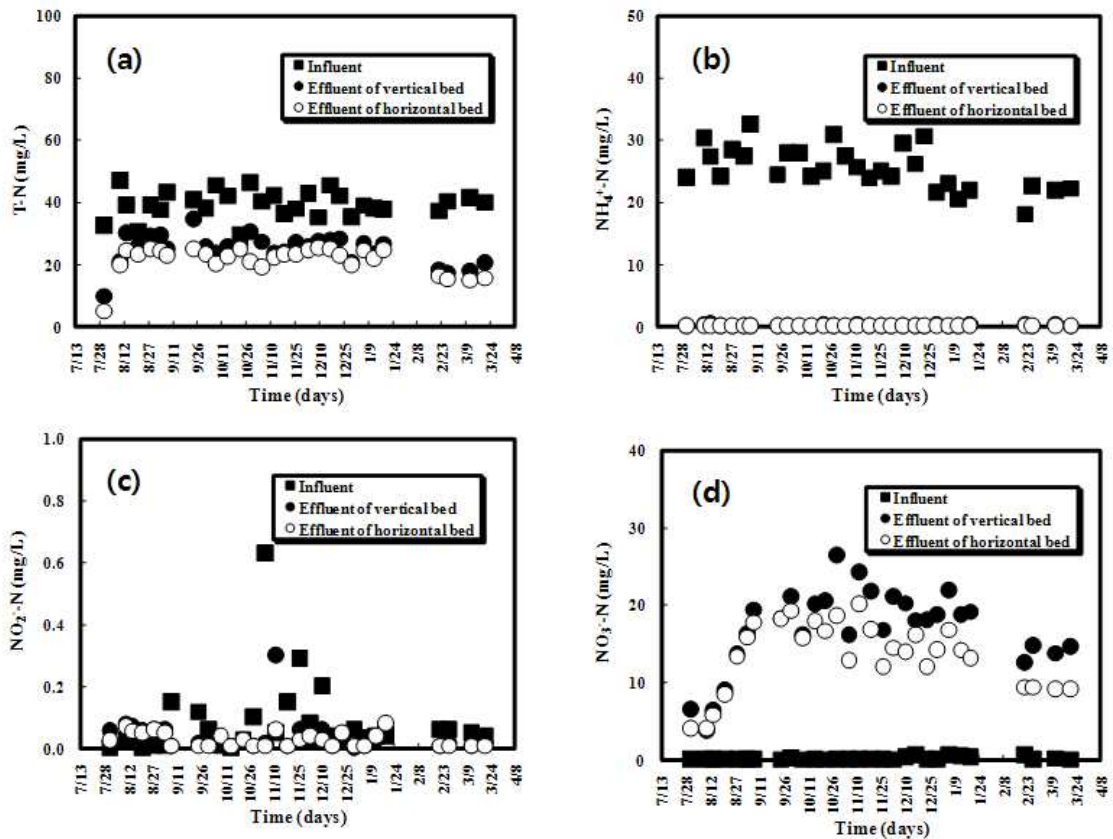


Fig. 8. Variations of T-N (a), $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (b), $\text{NO}_2^-\text{-N}$ (c) and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (d) in zeolite-filled reed bed for experimental period of July 2011 to March 2012

NH₄⁺-N과 NO₂⁻-N이 NO₃⁻-N으로 질산화되고 이것이 물에 용해되어 유출되기 때문에 유출수에서 NO₃⁻-N이 월등하게 높은 것으로 판단된다. 이와 같이 제올라이트에 흡착, 습지식물에 이용, 또는 휘발되지 않은 NH₄⁺-N과 NO₂⁻-N이 NO₃⁻-N으로 전환되어 유출수에 잔존하기 때문에 이번 실험의 인공습지에서는 T-N의 처리효율이 낮은 것으로 나타났으며 이의 개선을 위해서는 NO₂⁻-N 및 NO₃⁻-N이 탈질작용을 통하여 N₂로 환원 제거되도록 개선이 필요할 것으로 여겨진다.

3.7 T-P 변화

Fig. 9는 직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서의 시간 경과에 따른 T-P 변화를 나타내고 있다. 수직 흐름조 유입수의 평균 T-P는 3.33 mg/L 그리고 각 흐름조 유출수의 평균 T-P는 각각 1.40과 0.96 mg/L이었다. 각 흐름조의 평균 처리효율은 각각 57.96과 71.17%이었었으며 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에서 처리효율이 높았다. Bahlo(1997)에 의하면 T-P는 수직형 모래여과상에서 51.9% 제거되었으며 Fehr and Schette(1990)에 의하면 T-P는 식재한 토양여과상에서 53-56% 제거되었다고 하는 바, 본 연구에서의 수직 흐름 갈대 제올라이트 인공습지의 처리효율과는 비슷함을 알 수 있으나 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지의 처리효율은 약간 낮았다.

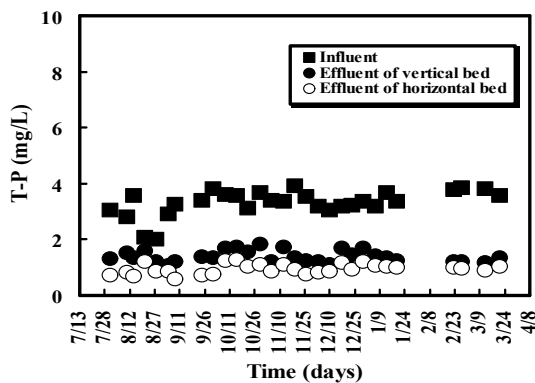


Fig. 9. Variations of T-P in zeolite-filled reed bed for experimental period of July 2011 to March 2012

Nichols(1983)에 의하면 습지에서의 인은 흡착과 침전에 의하여 제거되며 Conley et al.(1991)에 의하면 습지에서 인 제거는 인산염 인의 침전, 기질의 흡착, 수생식물에 의한 흡수, 조류와 세균에 의한 흡수 등이며 이중에 식물 흡수에 의한 제거가 전체의 5-10% 정도에 불과하다고 하였다. 이상과 같이 갈대

여과상에서 인은 여재 표면에 증식하는 미생물의 합성에 의하여 제거되거나 갈대에 의하여 부분적으로 흡수 제거되지만 충전물인 제올라이트에 함유되어 있는 Ca, Fe 및 Al과 화학적으로 결합하여 불용성 물질로 되어 여재에 축적되면서 인공습지 내에 잔류 누적될 수 있기 때문에 인공습지의 제거용량이 초과하면 처리효율이 저조해질 수 있다. 인의 제거용량이 초과하여 제올라이트를 교체하는 경우 농지에 사용하여도 아무런 문제가 발생되지 않고 오히려 작물에 좋은 영양분을 공급할 수 있기 때문에 여재물질의 교체에 의한 폐기물 문제는 발생하지 않을 것이다.

4. 결론

직렬연결 수직 및 수평 흐름 갈대 제올라이트 인공습지에 생활하수를 간헐적으로 주입하면서 처리효율을 조사하였다. 수직 및 수평조의 유출수 pH는 각각 5.54와 5.95로써 유입수의 평균 pH 6.89 보다 낮았다. 유입수에서 평균 DO는 저류조 내에서 미생물이 유기물을 분해하는 과정에서 DO를 소모하였기 때문에 0.84 mg/L로 아주 낮은 반면에 수직 및 수평조 유출수의 평균 DO는 각각 4.29와 3.75 mg/L로써 오히려 유입수에 비하여 높았다. 각 항목별 유입수에 대한 평균 처리효율은 수직 흐름 인공습지 유출수에서 BOD 92.42%, COD_{Cr} 79.02%, COD_{Mn} 80.62%, SS 98.33%, T-N 37.06%, NH₄⁺-N 99.45%, T-P 57.96%이었으며 수평 흐름 인공습지 유출수에서 BOD 95.56%, COD_{Cr} 91.02%, COD_{Mn} 87.78%, SS 99.22%, T-N 45.87%, NH₄⁺-N 99.88%, T-P 71.17%이었다. 두 습지에서 유출수 중 T-N의 63.07%(13.46 mg/L)가 NO₃⁻-N이었으며 NO₂⁻-N은 평균 0.04 mg/L 이하이었다. 그러므로 수평 흐름조의 유출수를 원수 저장조로 재순환시키는 방법을 통하여 탈질이 되도록 한다면 최종 유출수의 T-N 농도를 더욱 낮출 수 있을 것이다

감사의 글

이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

APHA, AWWA and WPCF (1989). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 17th ed., American Public Health Association, Washington,

- DC.
- Babatunde, AO, Zhao, YO, O'Neil, M, and O'Sullivan, B (2008). Constructed wetlands for environmental pollution control: A review of developments, research and practice in Ireland, *Environmental International*, 34(1), pp. 116-126.
- Bahlo, K (1997). *Reinigungsleistung und Bemessung von Vertikal Durchstroemten Bodenfiltern mit Abwasserzirkulation*, Ph. D. Dissertation, Fachbereich Bauingenieur und Vermessungswesen der Universitaet Hannover, Hannover, Germany.
- Choi, M-S (2003). *Zeolite-Filled reed bed for sewage of treatment*. Master's Thesis, Changwon National University, Changwon, Korea. [Korean Literature]
- Chung, DY (2002). *Development of an environmentally friendly sewage treatment model with water plant and sand for small communities*, Ministry of Environment (final report). [Korean Literature]
- Conley, L M, Dick, RI, and Lion, LW (1991). An assessment of the root zone method of wastewater treatment, *Research J. of Water Pollution Control Federation*, 63(3), pp. 239-247.
- Dongwha Technology (1999). *Korea Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater*. [Korean Literature]
- Drizo, A, Frost, CA, Grace, J, and Smith, KA (1999). Physico-Chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems, *Water Research*, 33(17), pp. 3595-3602.
- Fehr, G and Schette, H (1990). *Leistungsfahigkeit intermittierend beschickter, bepflanzter Bodenfilter*, In 21, *Wassertechnische Seminar: "Pflanzenklaeranlagen Besser Als Ihr Ruf ?"*. Institut fuer Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der Technischen Hochschule Darmstadt, pp. 197-225.
- Gesellschaft zur Foederung der Abwassertechnik e. V. (1989). *ATV-Regelwerk Abwasser-Abfall, Behandlung von Hauslichem Abwasser in Pflanzenbeeten*, ATV-Hinweisblatt H 262, Druck Center Meckenheim, St. Augustin, Germany.
- Heo, JS, Cho, JS, and Seo, J-Y (2003). *Development of an environmentally friendly sewage treatment system with water plant, pebble and gravel for agricultural village, Final report*, Korean Ministry of Agriculture and Forestry. [Korean Literature]
- Kaufman, WJ (1975). Ammonia removal from municipal wastewaters, *J. of Water Pollution Control Federation*, 47(80), pp. 64-71.
- Kim, HJ (1997). *Small scale wastewater treatment in rural areas using natural systems*, Ph.D. Dissertation, Kon-Kuk University. Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Kim, Y, Kim, D-S, Jang, S-B and Park, S-Y (1996). Studies on the removal of metal ions with domestic Pohang zeolite and synthetic zeolite, *J. of Korean Society of Environmental Engineering*, 18(5), pp. 587-589. [Korean Literature]
- Kraft, H. (1987). *Pflanzenklaeranlagen aus Oekologischer Sicht. ATV-Fortbildungskurs E/5, 18-20.3.1987 in Fulda, Abwasserbeseitigung in Laendlichem Raum*, Fulda, Germany.
- Merlin, G, Pajean, J-L, and Lissolo, T (2002). Performance of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in rural mountainous area, *Hydrobiologia*, 469(1-3), pp. 87-98.
- Nichols, D S (1983). Capacity of natural wetlands to remove nutrients from wastewater, *J. of Water Pollution Control Federation*, 55(5), pp. 495-505.
- Park, CS, Chung, SG, Han, GM, Song, MH, Chun, YB, Choi, YG, Chung, JH, Ok, CN, Jang, SU, Chung, JG, Shin, JB, Lee, MY, and Lee, DM (1996). *Soil Test Methods*, Saeron. [Korean Literature]
- Park, HU (2009). Trends on decentralized sewage and wastewater treatment using constructed wetlands at home and abroad (2009). <http://blog.naver.com/sihwawetland/20066156421>, 2009/04/23 11:09.
- Peng, J, Song, Y, Liu, Z, Gao, H, and Yu, H (2012). Performance of a novel circular-flow corridor wetland toward the treatment of simulated high-strength swine wastewater, *Ecological Engineering*, 49, pp. 1-9.
- Sakadevan, K and Havor, HJ (1998). Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems, *Water Research*, 32(2), pp. 393-399.
- Seo, J-Y (2002). Treatment of artificial sewage using a zeolite column, *Korean J. of Environmental Agriculture*, 21(3), pp. 178-188. [Korean Literature]
- Seo, J-Y (2006). Horizontal flow zeolite-filled reed bed with intermittent feeding for sewage treatment,

- Korean J. of Biotechnology and Bioengineering*, 21(1), pp. 28-33. [Korean Literature]
- Seo, J-Y and Choi, MS (2003a). Horizontal flow zeolite-filled reed bed for treatment of artificial sewage with intermittent feeding, *Korean J. of Biotechnology and Bioengineering*, 18(6), pp. 506-510. [Korean Literature]
- Seo, J-Y, Kim, T-H, and Choi, MS (2003b). Vertical flow zeolite-filled bed for treatment of artificial sewage with intermittent feeding, *Korean J. of Biotechnology and Bioengineering*, 18(2), pp. 140-144. [Korean Literature]
- Sharma, PK, Takashi, IT, Letsugu, KH, Tomita, K, and Nagasawa, T (2013). Effects of load fluctuations on treatment potential of a hybrid sub-surface flow constructed wetland treating milking parlor wastewater, *Ecological Engineering*, 57, pp. 216-225.
- Verhoeven, Jos TA, and Meuleman, Arthur FM (1999). Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations, *Ecological Engineering*, 12(1), pp. 5-12.
- Vymazal, J (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience, *Ecological Engineering*, 18(5), pp. 633-646.
- Wissing, F (1995). *Wasserreinigung mit Pflanzen*, E. U. Verlag Eugen Ulmer, Germany.
- Yoon, CG, Kwun, SK, and Kim, HJ (1997). Change of nutrients and behaviour of total coliforms in the natural treatment of wastewater by surface flow wetland system, *Korean J. of Environmental Agriculture*, 16(3), pp. 249-254. [Korean Literature]
- Yoon, CG, Kwun, SK, Woo, SH, and Kwon, TY (1999). Review of 3-year experimental data from treatment wetland for water quality improvement in rural areas, *J. of Korean Society on Water Environment*, 15(4), pp. 581-589. [Korean Literature]

- 논문접수일 : 2013년 10월 07일
- 심사의뢰일 : 2013년 10월 11일
- 심사완료일 : 2013년 12월 11일