

간헐 주입 2단(수직 및 수평 흐름) 모래 갈대 인공습지에 의한 생활하수 처리

서정윤⁺

창원대학교 환경공학과

Evaluation of Combined Vertical and Horizontal Flow Sand-Filled Reed Constructed Wetland with Intermittent Feeding for Sewage Treatment

Jeoung-Yoon Seo⁺

Dept. of Environmental Engineering, Changwon National University, Changwon-si, Korea

요 약

본 연구의 목적은 직렬연결 2단 수직 및 수평 모래 갈대 인공습지에 생활하수를 간헐적으로 주입하였을 때 각 수질항목별 처리효율을 평가하는 것이다. 하수는 수리학적 부하량 314 L/m²·day(수직 흐름 인공습지 기준)를 하루 4(10분 동안 주입 후 5시간 50분 동안 중단)회 균등하게 간헐적으로 주입하였다. 평가 결과 pH는 유입수(7.27)보다 수직 흐름 인공습지 유출수(5.81)에서 감소하였다가 수평 흐름 인공습지 유출수(6.40)에서 다시 증가하였다. DO의 농도는 유입수에 비하여 유출수에서 높았으며 겨울로 갈수록 증가하였다. 수직 흐름 인공습지의 산소 전달율(oxygen transfer rate: OTR)은 58.72 g O₂/m²·day 그리고 수평 흐름 인공습지의 OTR은 7.72 g O₂/m²·day이었다. 각 항목별 평균 처리효율은 SS 94.80%, BOD 90.77%, COD_{Cr} 85.87%, COD_{Mn} 87.72%, T-N 64.74%, NH₄⁺-N 86.44%, T-P 87.70%이었다. 유출수 중 T-N의 반 정도는 NO₃⁻-N(7.21 mg/L)이었으며 NO₂⁻-N은 평균 0.64 mg/L이었다.

핵심용어 : 간헐적 주입, 모래 갈대 인공습지, 생활하수 처리, 직렬연결 2단

Abstract

A sewage was treated using serially combined vertical(VFCW)and horizontal flow sand-filled reed constructed wetland(HFCW) with intermittent feeding. The sand had 1~3 mm diameter. The sewage entering the sewage treatment plant of Gyeongsang National University was fed into the reed constructed wetland bed for 10 minutes every 6 hours at the hydraulic load of 314 L/m²·day based on the surface area of the VFCW. In the VFCW effluent pH values were lower than those of the influent, whereas they were higher than those of the influent in the HFCW. DO values were increased in VFCW, but they were decreased in the HFCW. The OTR was 58.72 g O₂/m²·day in the VFCW and 7.72 g O₂/m²·day in the HFCW. Average removal efficiencies were SS 94.80%, BOD 90.77%, COD_{Cr} 85.87%, COD_{Mn} 87.72%, T-N 64.74%, NH₄⁺-N 86.44%, T-P 87.70%. Nearly, half of T-N in the effluent was NO₃⁻-N but the concentration of NO₂⁻-N in the effluent was less than 0.64 mg/L

Keywords : Combined vertical and horizontal flow, Intermittent feeding, reed bed, sand, sewage treatment

1. 서 론

인공습지는 적절한 부지의 확보가 가능하고 습지 여재 물질을 쉽게 구할 수 있는 중·소규모 분산식 하수처리에 적절한 처리방법이다. 또한 인공습지는 자연친화적인 공법으로 건설, 운전 및 유지비용이 여

타 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 지하 흐름형(subsurface flow)으로 나눌 수 있다. 지하 흐름형 인공습지에서 사용되는 여재 물질은 여재 물

⁺Corresponding author : syseo@changwon.ac.kr

질이 사용되지 않는 자유수면형 인공습지에 비해 이용 가능한 비표면적이 넓어 하수를 처리할 때 처리속도가 빠르다(Park, 2009). 지하 흐름형 인공습지는 다시 수직과 수평 흐름형 인공습지로 구분되고 수직 흐름형은 상향류(up-flow), 하향류(down-flow)와 주기적 수위가 변동하는(tidal) 인공습지로 분류된다.

인공습지는 처리효율을 높이기 위하여 산소의 주입이 원활하도록 하여야 한다. 인공습지에서 산소 농도는 유기물 부하, 폐수 주입 방법(배치식 (batch feeding), 연속(continuous feeding) 또는 간헐적 (intermittent feeding)), 수초의 종류와 성장 상태 그리고 폐수의 수심 등의 영향을 받는다. 이들 중 폐수의 주입 방법을 통하여 폐수와 여재 물질의 산소 농도를 쉽게 개선할 수 있다 (Sasikala et al., 2010). 특히 폐수로 포화되지 않은 수직 흐름 인공습지가 여러 종류의 폐수처리에 보다 효과적이라고 하였다(Li et al., 2013; Pedescoll et al., 2011). Lie et al. (2013)도 수직 상향류 인공습지에서 COD_{Cr}/N 비율이 5와 10일 때 간헐적으로 폐수를 주입하는 것이 연속적으로 주입하는 것보다 질소 처리효율이 높았다고 보고하였다. BOD의 처리와 동시에 질산화에 필요한 인공습지의 면적은 수평 보다 수직 흐름조가 작다(Brix et al., 2005). 그러므로 수직 흐름 인공습지에 폐수를 간헐적으로 주입한다면 산소 공급을 원활하게 하여 유기물 처리와 질산화를 효과적으로 달성할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 산소 공급이 보다 원활한 수직 흐름 및 수평 흐름 인공습지가 직렬로 연결된 처리장치에 간헐적으로 생활하수를 주입하면서 각종 수질 항목들의 처리효율을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료

본 실험에 사용된 여재물질인 모래는 K 0.12%, Al 7.95%, Ca 2.13%, Mg 0.09%, Na 0.07%, Fe 2.17%를 함유하고 있었다. 입경은 1~3 mm이었다.

2.2 하수

본 실험에는 경상대학교 내 오수정화시설의 저류조에 유입되는 생활하수를 사용하였다.

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)) 모래 갈대 인공습지는 스테인레스로 제작하였으며 생활하수는 수직 흐름 인공습지를 먼저 통과하면서 처리된 후에 이 처리수가 다시 수평 흐름 인공습지에 유입되도록 하였다. 수직 및 수평 흐름 실험장치의 여재물질은 모래를 사용하였다. 갈대는 수직 및 수평 흐름 인공습지에 각각 하천에서 자라는 갈대 12 포기씩 옮겨 심었다.

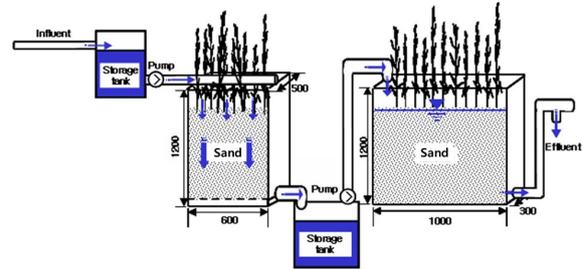


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

2.4 운전조건

하수는 수리학적 부하량 314 L/m²·day(수직 흐름 인공습지 기준)를 하루 4회(10분 동안 주입 후 5시간 50분 동안 중단) 균등하게 간헐적으로 주입하였다.

2.5 시료 채취 및 분석방법

수질분석용 시료는 처리장치에 생활하수가 유입되는 동안 유입수와 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수에서 채취하여 즉시 실험실로 옮겼다. 각 시료에 대하여 pH와 DO는 pH & DO meter(Thermo Scientific Orion 4-Star Plus Portable pH/DO Multiparameter Meter: O 7035-2)로 측정하였다. BOD, COD_{Mn}, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, T-N과 T-P는 수질오염 공정시험법(Dongwha Technology, 1999)에 의거하여 분석하였다. COD_{Cr}은 Standard Methods(APHA et al., 1989)에 준하여 실험하였다. 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유기물 분해와 질산화에 필요한 산소 요구량(oxygen demand: OD)은 Platzer(1999)의 공식에 의하여 계산하였으며 이렇게 계산된 수직 및 수평 흐름 인공습지의 OD에 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유입수와 유출수 중 DO 농도 차를 가감하여 두 흐름 인공습지에서의 OTR을 계산하였다. 수질분석은 2011년 7월부터 2012년 2월까지 총 33회 실시하였다. 실험 여건상 식생에 의한 오염물질의 제거율은 5-10% 정도로 이미 알려져 있고 이전 실험에서도 식생의 상태는 오염물질의 처리효율에 별 영향을 미치지 않았

기 때문에 본 실험에서는 식생에 대한 조사는 생략하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 pH 변화

유입수의 평균 pH는 7.27이었다. 수직 흐름 인공습지 유출수의 평균 pH는 5.81 그리고 최종 유출수의 pH는 6.40이었다(Fig. 2).

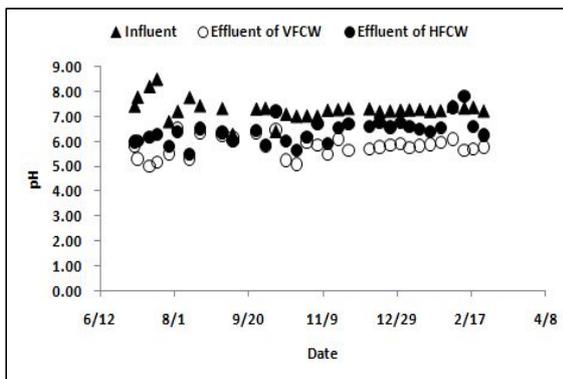


Fig. 2. Variations of pH in VFCW and HFCW.

수직 흐름 인공습지 유출수의 pH가 유입수의 pH보다 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 NO₂⁻와 NO₃⁻로 산화되기 때문으로 여겨진다. 그러나 수평 흐름 인공습지에서는 유기산의 분해, 탈질작용 그리고 인공습지 식물에 의한 이용으로 NO₂⁻-N과 NO₃⁻-N(참조 Fig. 7 (c)와 (d))가 감소되었기 때문에 다시 pH가 증가한 것으로 추정된다.

3.2 DO 변화

Fig. 3에 의하면 평균 DO는 유입수 0.19 mg/L 그리고 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유출수는 7.70과 6.63 mg/L로 유입수보다 유출수에서 높았다. 이러한 결과는 대기와의 접촉면으로부터 유입된 산소가 처리수까지 용이하게 이동하거나 갈대의 뿌리와 인공습지를 통한 산소 공급(Kraft, 1987; Wissing, 1995)이 이루어져 DO의 증가에 역할을 하였기 때문인 것으로 여겨진다. 겨울철로 갈수록 유출수 중 DO 농도가 높았는데 이것은 온도가 낮아 용해될 수 있는 산소량의

증가와 미생물 활동 저하로 산소 소비가 감소되었기 때문으로 예상이 되기는 하지만 정확한 이유는 알 수가 없었다. 이 시기는 갈대의 성장기가 아니므로 갈대의 뿌리에 의한 산소 공급이 크지 않을 것이다. 수평 흐름 인공습지의 유입수 DO 농도가 유출수 농도보다 높았으나 그 차이는 아주 미미하였다. 가동기간 동안 2 번 수평 흐름 인공습지의 DO 농도가 수직 흐름조 농도보다 높았는데 그 원인은 밝혀지 못하였다.

두 흐름 인공습지에서의 OTR은 수직 흐름 인공습지 58.72 g O₂/m³ · day 그리고 수평 흐름 인공습지 7.72 g O₂/m³ · day로 수직 흐름 인공습지의 OTR이 수평 흐름 인공습지보다 7배 이상 월등하게 높다는 것을 확인할 수 있었다. 수평 흐름 인공습지에서 유기물 분해와 질소 산화에 필요한 총 OD 12.53 g O₂/m³ · day 중 4.47 g O₂/m³ · day(35.67%)는 탈질 그리고 0.34 g O₂/m³ · day(2.71%)는 유입수 중의 산소에 의하여 자체 공급되었기 때문에 외부로부터 공급되어야 될 필요 OD는 7.72 g O₂/m³ · day로 적다. 반면에 수직 흐름 인공습지에서는 총 OD 59.45 g O₂/m³ · day 중 3.09 g O₂/m³ · day(5.20%)만 탈질에 의하여 공급되므로 실제 외부로부터 공급되어야 될 필요 OD는 56.36 g O₂/m³ · day로 이것 또한 수평 흐름 인공습지보다 7배 이상 크다. 그러므로 수직 흐름 인공습지의 이러한 높은 OD가 OTR을 높이는 원인이 되었을 것이다. 또한 수직 흐름 인공습지 유입수의 DO 농도가 매우 낮아 포화농도까지 용해될 수 있는 산소의 양이 많다. 따라서 수직 흐름조에서 OTR은 외부로부터 공급되어야 될 필요 OD 56.36 g O₂/m³ · day에 유입 및 유출수의 DO 농도 차에 의한 산소량 2.36 g O₂/m³ · day를 합한 58.72 g O₂/m³ · day가 되며 이것은 Cooper(1999)가 측정된 OTR 23~64 g O₂/m³ · day의 높은 값에 해당된다.

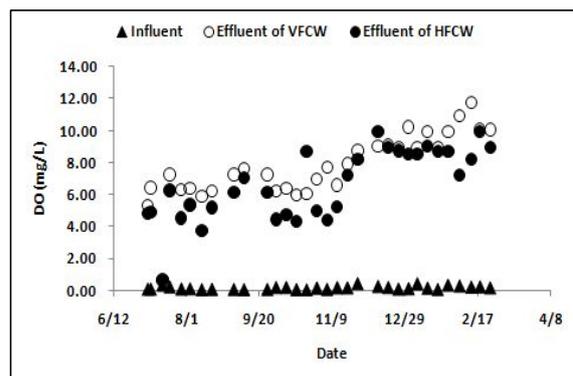


Fig. 3. Variations of DO in VFCW and HFCW.

3.3 SS 변화

Fig. 4의 2단(수직 및 수평 흐름) 모래 갈대 인공 습지에서 시간 경과에 따른 SS 변화를 보면 유입수에서 평균 SS 농도는 86.50 mg/L이었다. 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수 SS 농도는 평균 각각 13.90과 4.50 mg/L로 각 유출수의 평균 처리효율은 각각 83.93과 94.80%이었다. 가동 초기에 유입수의 SS 농도가 낮았음에도 불구하고 수직 흐름 인공습지 유출수 중 SS 농도가 높았던 것(Fig. 4에 제시되지 않았음)은 수직 흐름 인공습지의 여재에 포함되어 있던 미세 입자들이 유출되었기 때문으로 사료된다.

Kraft(1987)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 있었다. 이것은 Kim(1997)의 연구결과와 유사한 특성을 나타내었다.

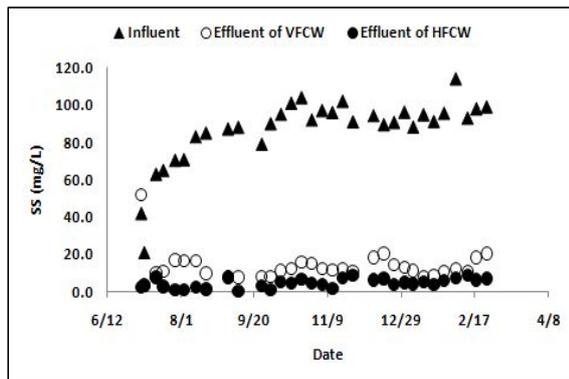


Fig. 4. Variations of SS in VFCW and HFCW.

3.4 BOD 및 COD 변화

유입수 중의 평균 BOD는 농도는 46.70 mg/L 그리고 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유출수 중 농도는 각각 9.42(처리율: 79.83%)와 4.31 mg/L(처리율: 90.77%)이었다(Fig. 5). BOD의 제거는 여재물질에 의한 여과 및 흡착과 더불어 미생물의 분해활동이나 갈대의 뿌리로 부터 산소공급이 원활해지면서(Fig. 3 참조) 높은 처리효율을 나타낸 것으로 여겨진다.

Fig. 6의 COD_{Cr}(a) 및 COD_{Mn}(b)에서 가동 초기부터 유출수 중의 COD 농도가 안정적으로 유지되었

다. 평균 COD_{Cr}은 유입수 81.29 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유출수는 19.58(처리율: 75.91%)과 11.49 mg/L(처리율: 85.87%)이었으며 COD_{Mn}은 유입수 44.80 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수는 10.96(처리율: 75.54)과 5.50 mg/L(처리율: 87.72%)로 처리효율은 높았다. 이것은 폐수가 유입되는 10분 동안에 많은 유기물들이 여재 물질에 흡착 또는 여과작용에 의하여 여재층에 머물다가 350분 폐수 주입이 중단되는 동안 여재층에 존재하는 미생물들에 의하여 분해됨으로써(Yoo, 1997) 이 기간 동안에 여과상의 유기물 흡착능이 다시 회복되는 이와 같은 과정이 반복되기 때문에 처리효율은 계속적으로 유지될 것으로 예상된다. 수초 여과상에서 용존 유기물질은 인공습지에 채워진 여재물질의 표면에 서식하는 미생물과 주입되는 하수에 존재하는 미생물들에 의하여 분해, 산화, 환원, 합성 등 그리고 비용해성 유기물질의 일부는 인공습지의 여과작용에 의하여 제거된다(Gesellschaft zur Foederung der Abwassertechnik e. V., 1989). 또한, 미생물에 의하여 하수가 처리되는 과정에서 호기성 미생물은 산소를 표층과 수초의 뿌리를 통하여 공급받는다. 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 여재에 있는 미생물은 그 밀도가 작게는 10배에서 많게는 1,000배 이상 차이가 난다. 따라서 수초 여과상에서는 많은 종류 미생물들의 상호작용에 의한 시너지효과가 나타난다는 것이 중요하다(Chung, 2002).

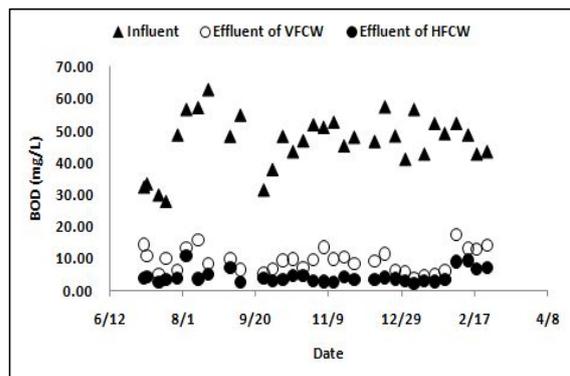


Fig. 5 Variations of BOD in VFCW and HFCW.

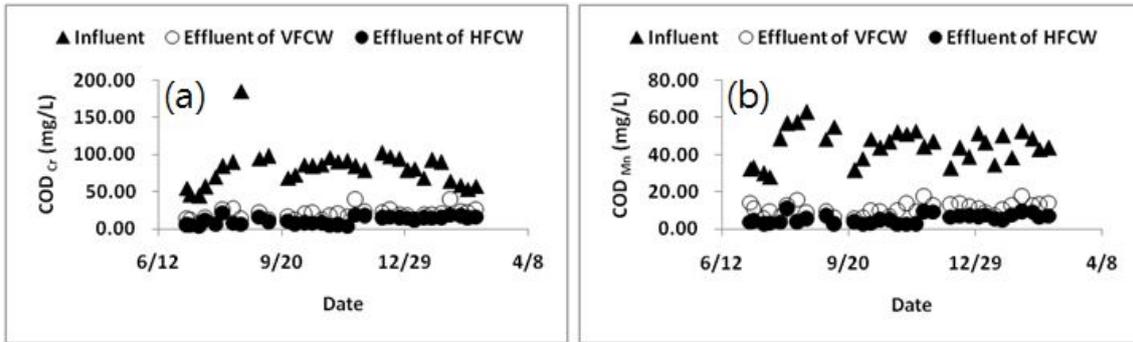


Fig. 6. Variations of COD_{Cr}(a) and COD_{Mn}(b) in VFCW and HFCW.

3.5 각종 질소 변화

Fig. 7에는 2단(수직 및 수평 흐름) 모래 갈대 인공 습지에서 시간 경과에 따른 유입 및 유출수에서 각종 형태의 질소에 대한 변화를 나타내었다. 평균 T-N(a)의 농도는 유입수 36.27 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수는 20.79(처리율: 42.68 %)과 12.79mg/L(처리율: 64.74%)이었다. NH₄⁺-N(b)의 농도는 유입수 30.38 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수는 6.35(처리율: 77.10%)와 4.12 mg/L (처리율: 86.44%)이었다. 평균 NO₂⁻-N(c)의 농도는 유입수

0.73 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수는 0.70과 0.64 mg/L이었다. NO₃⁻-N(d)의 농도는 유입수 1.55 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수는 12.12와 7.21 mg/L이었다. T-N의 제거효율은 높지 않았으며 방류수 중 질소의 반 정도가 NO₃⁻-N이었다. 암모니아성 질소는 약 86.44% 정도로 처리효율이 높았다. 이것은 여재 물질에 흡착 그리고 산화에 의하여 NO₃⁻-N 또는 NO₂⁻-N으로 되거나 질산화 된 질소가 탈질에 의하여 제거된 것으로 볼 수 있다. 또한 미미 하지만 갈대에 의한 흡수도 질소 제거에 기여하였을 것이다.

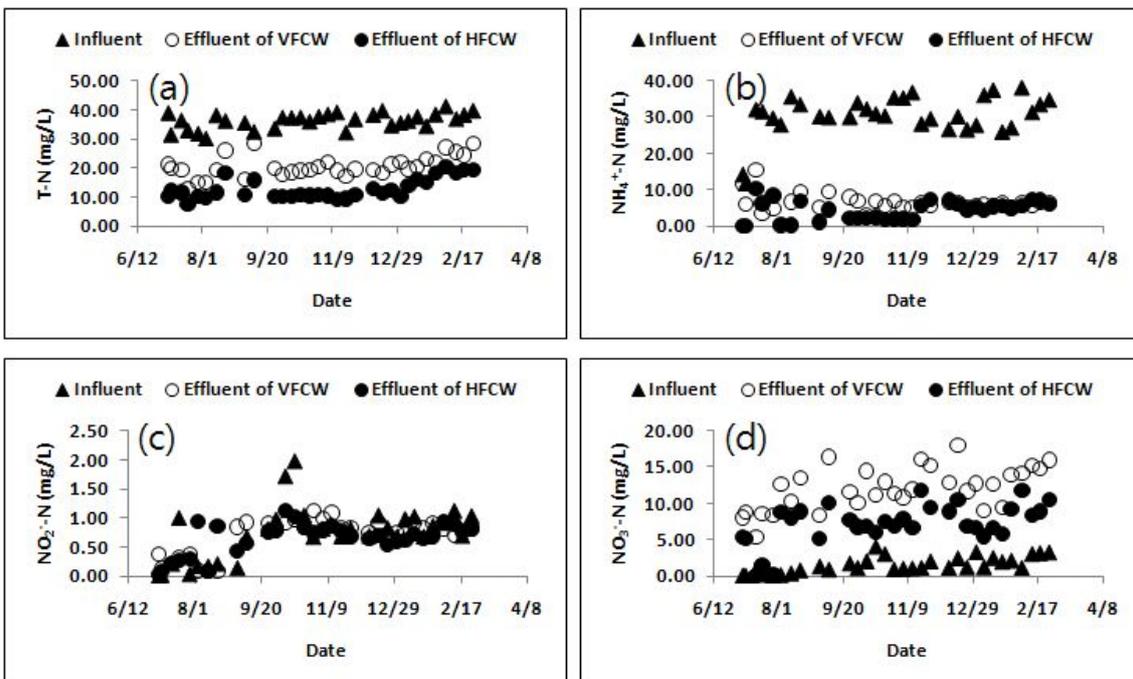


Fig. 7. Variations of T-N(a), NH₄⁺-N(b), NO₂⁻-N(c) and NO₃⁻-N(d) in VFCW and HFCW.

본 실험에서는 하수가 연속적으로 주입되는 것이 아니라 간헐적으로 주입되었기 때문에 하수에 유입된

암모니아성 질소가 먼저 모래 여재에 흡착되고, 하수가 주입되지 않는 350분 동안 모래 여재에 흡착된 암

모니아성 질소가 생물학적 재생에 의하여 탈착 및 질산화 되어 원래의 모래 여재 흡착능이 회복되기 때문 (Platzer, 1997)에 모래 여재의 암모니아성 질소 흡착능은 지속적으로 유지될 수 있을 것이다.

수평 흐름 인공습지 유출수의 DO 농도가 6.33 mg/L이었음에도 불구하고 NO₃-N의 농도(Fig. 7 (d) 참조)가 수평 흐름 인공습지에서 감소한 것은 부분적으로 존재할 수 있는 혐기적 조건에서 탈질에 의하여 감소되었거나 식물에 의한 흡수에 의하여 감소될 수 있지만 식물이 자라지 않는 시기에도 지속적으로 감소된 것을 고려할 때 탈질에 의하여 감소되었다는 것을 추정할 수 있다. 수직 흐름 인공습지에서 NO₃-N으로의 산화가 연 중 활발하게 일어났고 오히려 기온이 낮은 겨울에 더욱 활발하게 이루어졌다. 이것은 온도가 10 °C 이하로 떨어지면 암모니움 산화율이 심각하게 저해된다는 Xie et al.(2003)의 주장과는 다르다. 수평 흐름 인공습지에서 탈질이 왕성하지 못했던 것은 산소의 농도가 상당히 높았던 것 외에 COD_{Cr}/N의 비율이 너무 낮아 탈질에 필요한 탄소원이 부족했던 것도 하나의 원인이 되었을 것이다(Lie et al., 2013). 그러므로 수평 흐름 인공습지 유출수에 잔존하는 7.21 mg/L의 NO₃-N를 탈질하기 위해서는 유출수를 처리 원수 저장조로 재순환시키는 방법을 통하여 최종 유출수의 T-N 함량을 더 줄일 수 있을 것이다. 또한 아질산성 질소로 전환된 질소가 빠른 속도로 질산성 질소로 전환되었거나 생성된 아질산성 질소와 암모니아가 반응하여 탈질이 이루어진 것으로도 여겨진다(Seo, 2002).

3.6 T-P 변화

Fig. 8에서 유입수 중 인의 함량은 변화가 크다. 평균 T-P는 유입수 8.29 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수는 1.98(처리율: 76.12%)와 1.02 mg/L(처리효율 87.70%)로써 Bahlo(1997)는 수직 흐름 인공습지에서 T-P 51.9% 그리고 Fehr와 Schette(1990)는 식재한 토양 인공습지에서 53~56%이었다고 보고한 연구결과에 비하여 상당히 높은 것을 알 수 있다. 그러나 처리 기간이 경과되면서 T-P 처리효율은 감소할 것으로 예상된다.

일반적으로 갈대 인공습지에서 인은 갈대에 의하여 흡수, 여재에 함유되어 있는 Ca, Fe 및 Al과 화학적으로 결합하여 불용성 물질로 되어 여재에 축적과 여재 표면에 증식하는 미생물체의 합성에 의하여 이루어진다고 알려져 있다(Platzer, 1997).

그러나, 이 중에 갈대에 의한 제거와 여재 표면에

서 미생물의 증식에 의한 생물학적 제거보다는 여재 물질에 함유되어 있는 칼슘, 철 및 알루미늄과 반응하여 불용성 물질의 생성에 의한 제거가 우세하게 일어났을 것으로 예상된다. 하수에 존재하는 H₂PO₄⁻, HPO₄²⁻, PO₄³⁻ 이온들은 Ca²⁺, Al³⁺, Fe³⁺ 등과 착염 또는 불용성 화합물을 형성함으로써 입자들 사이에 침전하게 된다(Clark et al., 1997).

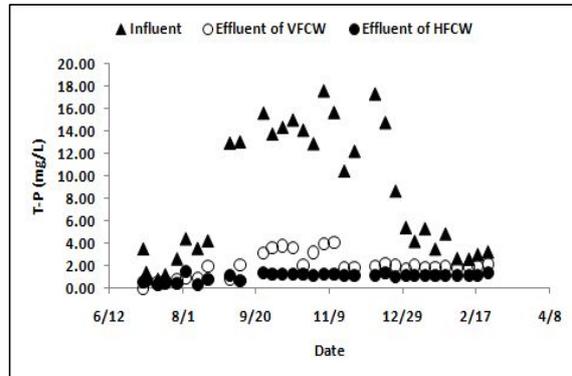


Fig. 8. Variations of T-P in VFCW and HFCW.

4. 결론

본 연구에서는 2단(수직 및 수평 흐름) 모래 갈대 인공습지에 생활하수를 간헐적으로 주입하면서 처리 효율을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 수직 흐름 인공습지 유출수의 pH는 유입수(7.27)보다 수직 흐름 인공습지 유출수(5.81)에서 감소하였다가 다시 수평 흐름 인공습지 유출수(6.40)에서 증가하였다. DO는 유입수(0.19 mg/L)보다 유출수(6.63 mg/L)에서 높았으며 겨울로 갈수록 농도는 증가하였다. 그러나 DO 농도는 수직 흐름 인공습지 유출수(7.70 mg/L)에서 보다 수평 흐름 인공습지 유출수(6.63 mg/L)에서 낮았다. 수직 흐름 인공습지의 OTR은 58.72 g O₂/m³·day 그리고 수평 흐름 인공습지의 OTR은 7.72 g O₂/m³·day이었다. 또한 NO₂-N과 NO₃-N의 농도도 수직 흐름 인공습지 유출수보다 수평 흐름 인공습지 유출수에서 낮았다. 이것은 수평 흐름 인공습지에서는 DO 농도가 6.63 mg/L임에도 불구하고 탈질이 진행되었다는 것을 의미한다. 유출수 중 T-N의 반정도가 NO₃-N(7.21 mg/L)이었으며 NO₂-N은 평균 0.64mg/L이었다. 그러므로 수평 흐름 인공습지의 유출수를 원수 저장조로 재순환시키는 방법을 통하여 탈질이 되도록 한다면 최종 유출수의 T-N 농도를 더욱 낮출 수 있을 것이다. 각 항목별 평균 처리효율은

수직 흐름 인공습지 유출 수에서 SS 83.93%, BOD 79.83%, COD_{Cr} 75.91%, COD_{Mn} 75.54%, T-N 42.68%, NH₄⁺-N 77.10%, T-P 76.12% 그리고 수평 흐름 인공 습지 유출수에서 SS 94.80%, BOD 90.77%, COD_{Cr} 85.87%, COD_{Mn} 87.72%, T-N 64.74%, NH₄⁺-N 86.44%, T-P 87.70%이었다.

감사의 글

이 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비와 경남녹색환경지원센터 연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

- APHA, AWWA and WPCF (1989). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th ed., American Public Health Association, 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 Durchstromten Bodenfiltern mit Abwasserzirkulation*, Ph.D. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurund Vermessungswesen der Universitaet Hannover, Hannover, Germany.
- Brix, H and Arias, CA (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: New Danish guidelines, *Ecological Engineering*, 25, pp. 491-500.
- Chung, DY (2002). *Development of an environmentally friendly sewage treatment model with water plant and sand for small communities (Final report)*, Korean Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Clark, T, Stephenson, T and Pearce, PA (1997). Phosphorus removal by chemical precipitation in a biological aerated filter, *Water Research*, 31(10), pp. 2257-2563.
- Cooper, P (1999). A review of the design and performance of vertical-flow and hybrid reed bed treatment systems, *Water Science Technology*, 40(3), pp. 1-9.
- 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). Leistungsfähigkeit intermittierend beschickter, bepflanzter Bodenfilter, In: Institut fuer Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der Technischen Hochschule Darmstadt, *21 Wassertechnische Seminar, Pflanzenklaeranlagen - Besser Als Ihr Ruf?*, 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.
- Kim, HJ (1997). *Small scale wastewater treatment in rural areas using natural systems*, Ph.D. Dissertation, Kon-Kuk University, Seoul, Korea. [Korean Literature]
- Kraft, H (1987). *Pflanzenklaerlagen aus Oekologischer Sicht*, ATV-Fortbildungskurs E/5, 18-20. 3. 1987 in Fulda, Abwasserbeseitigung in Laendlichem Raum, Fulda, Germany.
- Lie, L, Zhao, X, Zhao, N, Shen, Z, Wang, M, Gue, Y and Xu, Y (2013). Effect of aeration modes and influent COD/N ratios on the nitrogen removal performance of vertical flow constructed wetland, *Ecological Engineering*, 57, pp. 10-16.
- Li, HB, Li, YH, Gong, ZQ and Li, XD (2013). Performance study of vertical flow constructed wetlands for phosphorus removal with water quenched slag as a substrate, *Ecological Engineering*, 53, pp. 39-45.
- Merlin, G, Pajeau, 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.
- Park, HU (2009). Trends on decentralized sewage and wastewater treatment using constructed wetlands at home and abroad (2009). <http://blog.naver.com/sihwawetland/20066156421>.
- Pedescoll, A, Corzo, A, Álvarez, E, Puigagut, J and Garcia, J (2011). Contaminant removal efficiency depending on primary treatment and operational

- strategy in horizontal subsurface flow treatment wetlands, *Ecological Engineering*, 37, pp. 372-380.
- Platzer, C (1997). *Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Stick-stoffelimination in Pflanzenklaeranlagen*, Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft Nr. 6, Ph.D. Dissertation, Technical University Berlin, Germany.
- Platzer, C (1999). Design recommendation for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification, *Water Science and Technology*, 40(3), pp. 257-263.
- Sasikala, S, Tanaka, N, Jinadasa, KBSN and Mowjood, MIM (2010). Comparison study of pulsing and continuous flow for improving effluent water quality and plant growth of a constructed wetland to treat domestic wastewater, *Tropical Agricultural Research*, 21(2), pp. 147-156.
- Seo, J -Y (2002). Treatment of artificial sewage using zeolite column, *Korean J. of Environmental Agriculture*. 21(3), pp. 178-188. [Korean Literature]
- Wissing, F (1995). *Wasserreinigung mit Pflanzen*, E. U. Verlag Eugen Ulmer, Germany.
- Xie, SG, Zhang, XJ, Wang, ZS (2003). Temperature effect on aerobic denitrification and nitrification, *J. of Environmental Sciences*, 15(5), pp. 669-673.
- Yoo, SU (1997). *Advanced treatment technology of wastewater, Process development for simultaneous removal of nitrogen and phosphorous using natural zeolite*, Institute of Construction Part of Samsung C&T Corporation, Korean Ministry of Environment. [Korean Literature]

- 논문접수일 : 2014년 01월 07일
- 심사의뢰일 : 2014년 01월 09일
- 심사완료일 : 2014년 03월 14일