

복층여재 갈대 인공습지에 의한 생활하수 처리

서정윤⁺

창원대학교 환경공학과

Sewage Treatment Using a Double Media Reed Constructed Wetland

Jeoung-Yoon Seo⁺

Department of Environmental Engineering, Changwon National University, Changwon, Korea

요 약

본 연구는 2단(수직 및 수평 흐름) 복층여재(모래와 제올라이트 그리고 모래와 굴 껍질) 갈대 인공습지에 생활하수를 간헐적으로 주입하였을 때 각 수질항목별 처리효율 평가이다. 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. 그 결과 유출수의 pH는 수평 흐름 인공습지 굴 껍질 층의 높이에 크게 영향을 받았으며 굴 껍질 층의 높이가 200 mm일 때 pH 6.24를 보였다. DO(oxygen demand)는 유입수(0.19 mg/L)보다 수직 흐름 인공습지 유출수(7.65 mg/L)에서 높았다가 수평 흐름 인공습지 유출수(6.49 mg/L)에서는 다시 낮아졌다. 그리고 여름보다 겨울에 높았다. 또한 OTR(oxygen transfer rate)은 수직 흐름 인공습지 57.15 g O₂/m²·day 그리고 수평 흐름 인공습지 5.65 g O₂/m²·day로 나타났다. NH₄⁺-N의 처리효율은 80.17% (유출수 농도 6.01 mg/L)로 전부를 제올라이트로 충전하였을 경우(타 연구)와 비교하여 낮았지만 수직 흐름 인공습지 제올라이트 300 mm 충전 층으로도 하수처리에서 요구되는 방류수질의 T-N 농도(20 mg/L)까지 안전성 있게 처리할 수 있을 것으로 예측된다. 각 항목별 평균 처리효율은 유출수에서 SS 88.09%, BOD 88.12%, COD_{Cr} 83.11%, COD_{Mn} 85.58%, T-N 57.21%, NH₄⁺-N 80.17%, T-P 86.73%를 보였다. NO₃⁻-N의 농도는 수직 흐름 인공습지 유출수에서 보다 수평 흐름 인공습지 유출수에서 감소하였다. 유출수 중 T-N의 반 이상이 NO₃⁻-N(7.92 mg/L)으로 잔존하였으며 NO₂⁻-N은 평균 0.90mg/L이었다. T-P의 처리효율은 굴 껍질 층의 충전 층 높이가 800 mm에서 93.24%, 500 mm에서 86.30% 그리고 200 mm에서 55.44%로 굴 껍질 충전 층의 높이에 비례하였다.

핵심용어 : 수직 및 수평 흐름, 복층 여재, 간헐적 주입, 갈대 인공습지, 생활하수 처리, 2단

Abstract

A sewage was treated using a serially combined vertical(VFCW) and horizontal flow double media (sand and zeolite for VFCW and sand and waste oyster-shell for HFCW) reed constructed wetland(HFCW) with intermittent feeding (see Fig. 1). The sewage was fed into the reed constructed wetland for 10 minutes every 6 hours at the hydraulic load of 314 L/m²·day. The summarized results were as follows: pH values in the effluent depended very heavily on oyster-shell height filled in the HFCW. They were maintained at less than pH 6.24 when the height of the oyster-shell layer was 200 mm. Influent DO(oxygen demand) values(average 0.19 mg/L) were increased in the VFCW(average 7.65 mg/L) and decreased again in the HFCW(average 6.49 mg/L). They were higher in the winter than in the summer. The OTR(oxygen transfer rate) was 57.15 g O₂/m²·day in the VFCW and 5.65 g O₂/m²·day in the HFCW. The removal efficiency of NH₄⁺-N was 80.17%(6.01 NH₄⁺-N mg/L in the effluent). It was lower than that in the case where only zeolite was filled in the reed constructed wetland. But it was expected that treated sewage effluent using a double media reed constructed wetland with 300 mm zeolite layer could stably meet the Korean treated sewage effluent standard(20 mg T-N/L). Average removal efficiencies were SS 88.09%, BOD 88.12%, COD_{Cr} 83.11%, COD_{Mn} 85.58%, T-N 57.21%, NH₄⁺-N 80.17%, T-P 86.73%. Nearly, The concentration of NO₃⁻-N in the effluent of the VFCW was decreased in that of the HFCW. More than half of T-N in the effluent was NO₃⁻-N(7.92 mg/L) but the concentration of NO₂⁻-N in the effluent was average 0.90 mg/L. The removal efficiencies of T-P were 93.24%, 86.30% and 55.44% at the height of the oyster-shell-filled constructed wetland of 800 mm, 500 mm and 200 mm, respectively and therefore, they were proportional to oyster-shell height filled in the HFCW.

Keywords : Combined vertical and horizontal flow, double media, Intermittent feeding, reed constructed wetland, sewage treatment, two-stage

⁺ Corresponding author : syseo@changwon.ac.kr

1. 서론

저 에너지 소비, 낮은 운영비, 저 탄소배출량 등의 이점 때문에 인공습지는 폐수처리에 지속적으로 활용되고 있다(Hegemann, 1992, 1996; Huang, 2013). 이러한 인공습지는 특히 공장이 없고 넓은 지역에 소규모로 산재해 있는 가옥수가 얼마 되지 않는 시골 농촌의 하수를 처리하는데 적당한 방법이다(Seo, 2006, 2007). 인공습지에서 처리된 하수는 SS와 BOD의 유출수 기준 농도 이하로 안정적으로 처리된다. 질산화도 잘 이루어진다. 그러나 소규모 처리시설에서 인의 처리는 더욱 개선이 필요하다(Brix et al., 2001).

초기의 인공습지에 사용된 여재 물질은 모래나 자갈 등이었으나(Verhoeven and Meuleman, 1999; Vymazal, 2002) 최근에는 인위적으로 조제하거나, 부산물 그리고 천연재료들을 활용하려는 시도도 되고 있다. 인공습지의 여재 물질을 선택할 때는 여재 물질이 가지고 있는 물리·화학적 특성들도 고려되어야 한다(Li, 2013).

여러 가지 인공 여재 물질인 경량 팽창 점토(light-weight expanded clay aggregates: LECA), 입자상 라테라이트, 셰일(shale), 분쇄된 대리석(crushed marble)에 대한 현장 실험 결과 인의 제거 능력이 있다는 것이 확인되었다(Brix et al., 2001).

Wang et al.(2013)은 인공습지의 여재 물질로 굴 껍질을 이용하면 폐수에 함유된 인을 제거할 수 있다고 하였다. 굴 껍질은 우리나라 남해안에서 굴 양식 부산물로 많은 양이 발생되며 악취 및 수질 오염의 대상이 되고 있다. 그러므로 인공습지의 여재 물질로 굴 껍질이 활용된다면 자원순환에 기여하게 될 것이다.

또한 Cyrus and Reddy(2011) 그리고 Reddy et al.(2013)은 제올라이트는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 흡착능이 크기 때문에 인공습지의 여재 물질로 사용되면 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 을 제거할 수 있을 것으로 보고하였다. Seo(2007)도 제올라이트를 여재 물질로 한 실험실 규모의 인공습지에서 생활하수를 처리한 결과 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 97.1%가 제거된다고 하였다. 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). 이와 같은 인공습지 여재물질로서 제올라이트의 장점에도 불구하고 가격이 비싼 것이 단점이다.

제올라이트와 굴 껍질은 질소와 인을 제거하는데 효과적이라는 것은 앞에서 언급되었다. 그러므로 이

들 여재 물질들로 조성된 인공습지에 의한 하수 처리도 질소와 인의 수계 방류량을 줄이는데 기여하게 될 것이다. 그러나 모래와는 달리 인공습지의 여재 물질로서 제올라이트 사용량이 증가할수록 인공습지의 조성비용이 증가하게 되기 때문에 가능한 제올라이트 사용량을 줄이는 것이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 제올라이트 양을 줄이기 위하여 일반적으로 인공습지에서 여재 물질로 많이 사용되는 모래와 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 흡착능이 뛰어난 제올라이트 그리고 인 제거를 위한 굴 껍질을 여재 물질로 충전된 복층여재 갈대 인공습지에 생활하수를 간헐적으로 주입하면서 각 수질 항목들에 대한 처리효율을 알아보기 위하여 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 실험재료 및 하수

이 실험에 사용된 제올라이트는 경북 포항에 위치하고 있는 Y. 화학에서 제공받았으며 굴 껍질은 남해안의 해안가에 무단 방치되고 있는 것을 수거하여 분쇄하여 판매하는 D 회사의 것을 사용하였다. 제올라이트, 굴 껍질과 모래의 화학적 성분을 살펴보면 Table 1과 같다. SiO_2 를 제외하면 제올라이트와 모래는 Al_2O_3 그리고 굴 껍질은 CaO의 함량이 가장 높았다. 본 실험에는 경상대학교 내 오수정화시설의 저류조에 유입되는 생활하수를 사용하였다.

Table 1. Chemical characteristics of the zeolite and the oyster-shell filled in the reed constructed wetland

Chemical component	Content (%)		
	Zeolite	Oyster-shell	Sand
SiO_2	68.0 ~ 72.0	-	-
Al_2O_3	9.0 ~ 14.0	2.37	15.9
CaO	> 3.0	55.43	2.98
MgO	> 2.0	0.48	0.12
K_2O	> 3.0	0.42	0.15
Na_2O	> 4.0	1.35	0.12
Fe_2O_3	> 3.0	0.38	3.10

2.2 실험장치

이 연구에 사용된 2단(수직 및 수평 흐름) 복층여재 갈대 인공습지는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 스테인레스로 제작하였으며 수직 흐름 갈대 인공습지(500 mm(W)×600 mm(L)×1,200 mm(H))와 수평 흐름 인공습지(300 mm(W)×2,000 mm(L)×1,200 mm(H))로 구성

되어 있다. 수직 흐름 인공습지의 상부 300 mm는 제올라이트로 나머지 700 mm는 1~3 mm 입경의 모래로 채웠다. 그리고 수평 흐름 인공습지는 Fig. 1과 같이 4개의 부분으로 구분되었다. 유입부에서 3번째까지는 모두 1~3 mm 입경의 모래로 채웠다. 출구 쪽 마지막 부분은 실험 초기에는 바닥에서 800 mm까지,

실험 기간의 중간에는 500 mm 그리고 그 이후에는 200 mm까지 3~5 mm 입경의 굴 껍질로 채우고 나머지 윗부분은 모래로 채웠다. 갈대는 수직 흐름 인공습지에 하천에서 자라는 갈대 12 포기 그리고 수평 흐름 인공습지에 구분된 4개 부분에 24 포기(각 6 포기)를 옮겨 심었다.

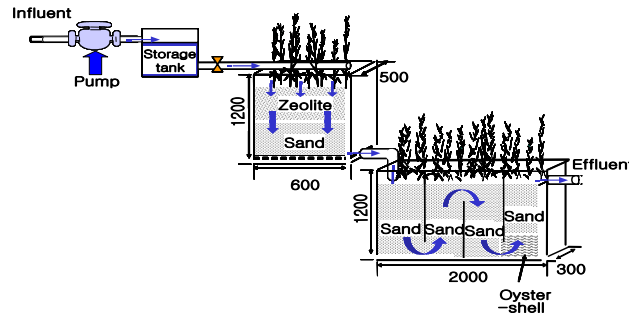


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

2.3 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.

2.4 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 공정 시험법(Donghwa Technology, 1999)에 의하여 분석하였다. COD_{Cr}은 Standard Methods(APHA et al., 1989)에 준하여 실험하였다.

수직 및 수평 흐름 인공습지의 유기물 분해와 질산화에 필요한 OD는 Platzer(1999)의 식 (1)에 의하여 계산하고 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.

$$OD(g O_2/m^2 \cdot day) = 0.85 \cdot 0.7 \cdot COD_{influent}(g O_2/m^2 \cdot day) + 4.3 TKN_{influent}(g O_2/m^2 \cdot day) - 0.1 \cdot 2.9 TKN_{effluent}(g O_2/m^2 \cdot day) \quad (1)$$

수질분석은 2011년 7월부터 2012년 2월까지 총 33

회 실시하였다. 실험 여건상 식생에 의한 오염물질의 제거율은 5-10% 정도로 이미 알려져 있고 이전 실험에서도 식생의 상태는 오염물질의 처리효율에 별 영향을 미치지 않았기 때문에 본 실험에서는 식생에 대한 조사는 실시하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 pH 변화

Fig. 2에서 유입수의 평균 pH는 7.21이었다. 수직 흐름 인공습지 유출수의 평균 pH는 7.19 그리고 최종 유출수의 pH는 9월 25일까지 11.23(굴 껍질층: 800 mm)을 초과하였다. 그 후 2월 4일까지는 8.21~9.49(굴 껍질 층: 500 mm) 범위였으며 2월 5일 이후에는 6.24(굴 껍질 층: 200 mm) 이하를 유지하였다. 이렇게 최종 유출수의 pH가 차이를 보인 것은 수평 흐름 여재 층에 충전한 굴 껍질의 영향으로 가동기간 동안 여재 층의 굴 껍질 충전 높이를 800, 500, 200 mm로 변경하였기 때문이다. 그러므로 수평 흐름 인공습지에서 유출수의 적정 pH 5.8~8.6(우리나라 방류수질 기준)을 유지하기 위해서는 굴 껍질의 충전 층 높이를 500 mm 이하로 하여야 할 것으로 생각된다.

일반적으로 수처리에 있어서 굴 껍질을 첨가할 경우 다음 반응식과 같이 CO₂를 포함하고 있는 물과 반응하여 알칼리를 생성하므로 pH가 상승하는 것으로 알려져 있다(Lee, 1990). 굴 껍질(CaCO₃) + H₂O

→ 굴 껍질(CaCO_3) + Ca^{2+} + CO_3^{2-} 그리고 다시 CO_3^{2-} + H_2O → HCO_3^- + OH^- 로 된다.

또한, 굴 껍질은 Ca, Mg, Na 등의 알칼리 생성물질을 함유하고 있으므로 수중에서 CO_3^{2-} 의 흡착, 이온교환반응 등의 표면화학적 작용과 pH 상승효과가 탁월한 것으로 알려져 있다(Lee, 1990). Chung(2002)에 의하면 수직 흐름 인공습지에서 유입된 암모니아성 질소가 산화되고 그리고 유기물이 미생물에 의해 분해되면서 이산화탄소나 유기산이 증가되기 때문에 유출수의 pH가 유입수에 비하여 낮다고 하였다.

가동 초기 수평 흐름 인공습지 유출수의 pH가 높았음에도 불구하고 갈대의 성장에는 별 영향을 미치지 않았다.

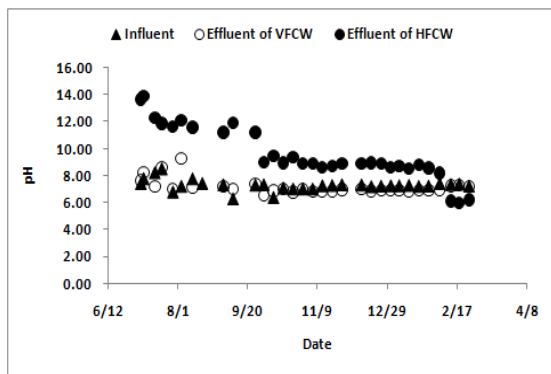


Fig. 2. Variations of pH in vertical(VFCW) and horizontal flow constructed wetland(HFCW)

3.2 DO 변화

Fig. 3에서 평균 용존산소는 유입수 0.19 mg/L 그리고 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유출수는 7.65과 6.49 mg/L로 유입수보다 유출수에서 높았다. 이러한 결과는 대기와의 접촉면으로 부터 유입된 산소가 처리수로 용이하게 이동하거나 갈대의 뿌리와 폐수가 유입되지 않을 때(간헐적 주입이기 때문에) 수직 흐름 인공습지의 여재 사이에 공기가 채워져 이를 통한 산소 공급(Kraft, 1987; Wissing, 1995)이 이루어져 DO가 증가된 것으로 여겨진다. 그러나 수직 흐름 인공습지 유출수 중 DO 농도보다 수평 흐름 인공습지 유출수 DO의 농도는 낮았다. 이것은 수평 흐름 인공습지보다 수직 흐름 인공습지에서 산소의 공급이 잘 이루어지고 있다는 것을 의미한다. 여름에서 겨울로 갈수록 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유출수 중 DO 농도가 높았는데 이것은 온도가 낮아 용해될 수 있는 산소량의 증가와 미생물 활동 저하로 산소 소비가 감소되었기 때문으로 추정되나 정확한 이유는 알 수가 없다. 또한 가동 초기에는 옅게 심은 갈대가 완전히

게 조성되지 않았고 겨울은 갈대의 성장기가 아니기 때문에 갈대의 뿌리에 의한 산소 공급도 제한적이다. 그럼에도 불구하고 수평 흐름 인공습지에서 DO 농도가 6.49 mg/L로 유지된 것은 산소 공급이 원활하게 이루어지거나 또는 유기물 분해에 요구되는 산소량이 적어 수직 흐름 인공습지에서 이미 공급된 산소가 많이 소모되지 않고 남아있는 것으로 사료된다.

유기물 분해와 질산화에 필요한 OD와 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유입과 유출수 중 DO 농도 차만을 고려한 두 흐름 인공습지에서의 산소 전달율은 수직 흐름 인공습지 57.15 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 그리고 수평 흐름 인공습지 5.65g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 수직 흐름 인공습지의 OTR이 수평 흐름 인공습지보다 10배 이상 월등하게 높다는 것을 확인할 수 있었다. 수평 흐름 인공습지에서 유기물 분해와 질소 산화에 필요한 총 OD 8.67 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 중 2.84 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ (32.76%)는 탈질 그리고 0.18 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ (2.08%)는 유입수 중의 산소에 의하여 공급되었기 때문에 실제 외부로부터 공급되어야 될 필요 OD는 5.65 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 이다. 반면에 수직 인공습지에서는 유기물 분해와 질소 산화에 필요한 총 OD 57.90 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 중 3.09(5.34%)g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 만 탈질에 의하여 공급되어 실제 외부로부터 공급되어야 될 OD는 54.81 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 로 수평 흐름 인공습지보다 9배 이상 크다. 그러므로 수직 흐름 인공습지의 이러한 높은 OD가 OTR을 높이는 원인이 되었을 것이다. 또한 수직 흐름 인공습지 유입수의 DO 농도는 매우 낮아 포화농도까지 용해될 수 있는 산소의 양이 많다. 따라서 수직 흐름조에서 OTR은 실제 외부로부터 공급되어야 될 필요 OD 54.81 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 에 DO 농도 차에 의한 산소량 2.34 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 를 합한 57.15 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 가 되며 이것은 Cooper(1999)가 수직 흐름 인공습지에서 측정한 OTR 23~64 g $\text{O}_2/\text{m}^2 \cdot \text{day}$ 의 높은 값에 해당된다.

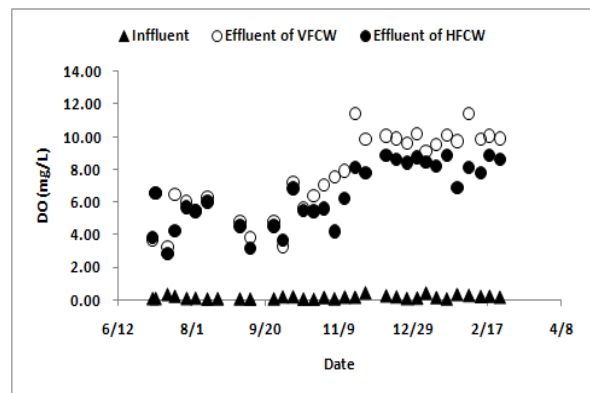


Fig. 3. Variations of DO in VFCW and HFCW

3.3 SS 변화

유입수에서 평균 SS 농도는 86.50 mg/L을 보였다 (Fig. 4). 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수 SS 농도는 각각 평균 18.0(7월 5일과 7일을 제외한 평균)과 10.30 mg/L로 각 인공습지의 평균 처리효율은 각각 79.19와 88.09%이었다. Fig. 4에는 표시하지 않았지만 가동 초기(7월 7일까지)에 유입수의 SS 농도가 낮았음에도 불구하고 수직 흐름 인공습지 유출수 중 SS 농도가 대단히 높았다. 이러한 원인은 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 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 특성을 나타내었다.

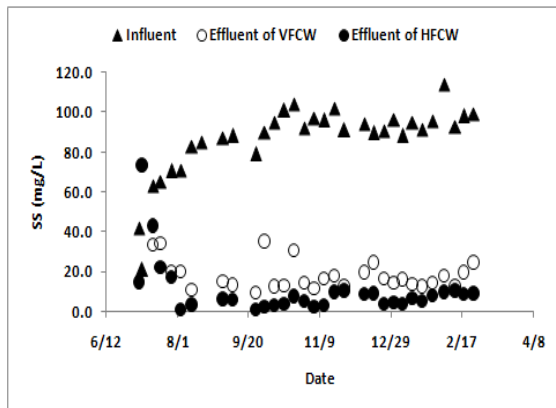


Fig. 4. Variations of SS in VFCW and HFCW

3.4 BOD 및 COD 변화

Fig. 5에서 평균 BOD는 유입수 46.70 mg/L 그리고 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유출수 중 농도는 각각 11.84(처리효율: 74.65%)과 5.55 mg/L(처리효율: 88.12%)이었다. BOD의 제거는 여재물질에 의한 여과 및 흡착과 더불어 미생물의 분해활동이나 갈대의 뿌리로 부터 산소 공급이 원활해지면서 높은 처리효율을 나타낸 것으로 여겨진다.

Fig. 6에는 2단(수직 및 수평 흐름) 복층여재 갈대 인공습지에서의 시간 경과에 따른 유입 및 유출수의

COD 변화를 나타내었다. 평균 COD_{Cr}은 유입수 81.29 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지의 유출수는 26.61 (처리효율: 67.27%)과 13.73 mg/L(처리효율: 83.11%)이었으며 COD_{Mn}은 유입수 44.80 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수는 13.46(처리효율: 69.96%)과 6.46 mg/L(처리효율: 85.58%)로 처리효율은 높았다. 이것은 폐수가 유입되는 10분 동안에는 많은 유기물들이 여재 물질에 흡착 또는 여과작용에 의하여 여재층에 머물다가 350분 동안 폐수 주입이 중단되는 동안 여재층에 존재하는 미생물들에 의하여 분해됨으로써(Yoo, 1997) 이 기간 동안에 인공습지 여재의 유기물 흡착능이 다시 회복되는 이와 같은 과정이 반복되기 때문에 처리효율은 계속적으로 유지될 것으로 예상된다. 수초 인공습지에서 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 수 표면에서 외부 공기 중 산소의 확산과 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 인공습지에서는 많은 종류의 미생물들의 상호작용에 의한 시너지효과가 나타난다는 것이 중요하다(Chung, 2002).

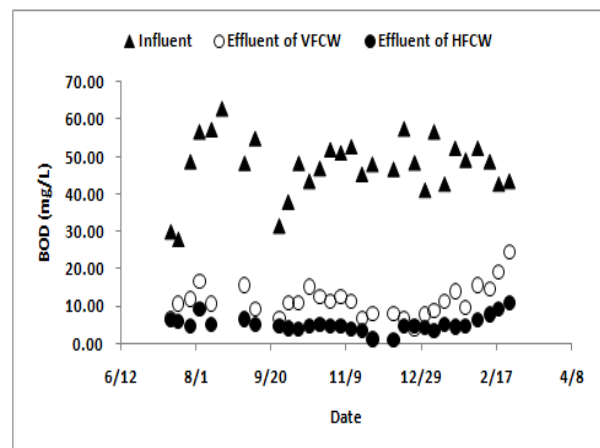


Fig. 5. Variations of BOD in VFCW and HFCW

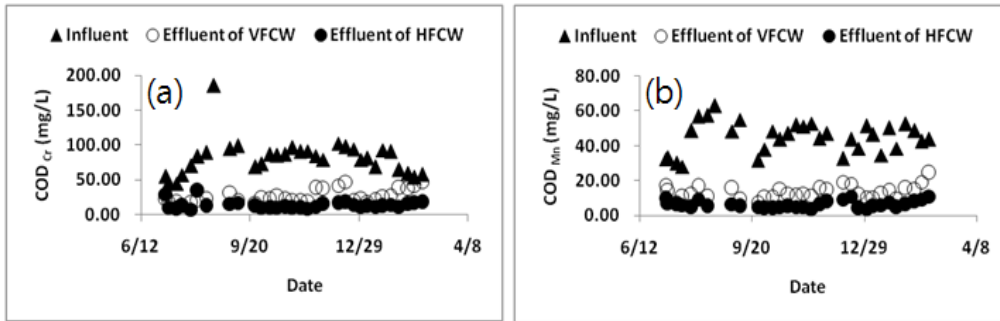


Fig. 6. Variations of COD_{Cr} (a) and COD_{Mn} (b) in VFCW and HFCW

3.5 각종 질소 변화

Fig. 7에는 2단 (수직 및 수평 흐름) 복층여재 갈대 인공습지에서 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 26.30 (처리효율: 27.49%)과 15.52 mg/L (처리효율: 57.21%)이었다. NH₄⁺-N(b)의 농도는 유입수 30.30 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수 8.64 (처리효율: 71.49%)와 6.01 mg/L (처리효율: 80.17%)이었다. 평균 NO₂⁻-N(c)의 농도는 유입수 0.73 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수 0.80과 0.90 mg/L이었다. 그리고 가동 초반기에 NO₂⁻-N의 농도가 상당히 높았는데 그 이유는 밝히지 못하였다. NO₃⁻-N(d)의 농도는 유입수 1.55 mg/L, 수직 및 수평 흐름 인공습지 유출수 13.17과 7.92 mg/L이었다. T-N의 제거효율은 높지 않았으며 방류수 중 T-N의 반 정도가 질산성 질소이었다. 암모니아성 질소는 약 80.17% 정도로 처리효율이 높았으며 암모니아성 질소는 여재 물질에 흡착 그리고 산화에 의하여 질산성 또는 아질산성 질소로 되거나 질산화된 질소가 탈질에 의하여 제거된 것으로 볼 수 있다. 또한 미미 하지만 갈대에 의한 흡수도 질소 제거에 기여하였을 것이다.

본 실험에서는 하수가 연속적으로 주입되는 것이 아니라 간헐적으로 주입되었기 때문에 하수와 함께 유입된 암모니아성 질소가 먼저 복층여재 (제올라이트와 모래)에 흡착되고, 하수가 주입되지 않는 350분 동안 복층여재에 흡착된 암모니아성 질소가 생물학적 재생에 의하여 탈착 및 질산화 되어 원래의 복층여재 흡착능이 회복되었기 때문에 여재에 암모니아성 질소의 흡착능은 지속적으로 유지될 수 있다(Gesellschaft zur Foederung der Abwassertechnik e. V., 1989).

Seo(2002)에 의하면 수리학적 부하 314 L/m²·day로 10분 주입 5시간 50분 정지한 상태로 실시한 칼럼

실험에서 제올라이트 높이 200과 400 mm에서 NH₄⁺-N의 처리효율은 65.54와 77.44%이었으며 이 실험에서도 수직 흐름 인공습지(제올라이트 300 mm 그리고 모래 700 mm)에서 NH₄⁺-N의 처리효율이 71.49%로 거의 유사하였다.

이상의 결과로 보아 수직 흐름 인공습지의 제올라이트 300 mm 충전 층으로도 하수처리에서 요구되는 방류수질의 총 질소 농도(20 mg/L)까지 안전성 있게 처리할 수 있을 것으로 예측된다. 아질산성 질소의 방류수 농도는 대단히 낮았다. Fig. 7 (d)에서 수직 흐름 조의 NO₃⁻-N의 농도가 1 월과 2 월의 낮은 기온에도 불구하고 9 월과 10 월에 비교하여 거의 비슷하다. 이것은 낮은 기온에서도 질산화가 활발하게 진행되었음을 의미한다(Brix et al., 2002). 그러므로 온도가 10 °C 이하로 떨어지면 암모니움 산화율이 심각하게 저해된다는 Xie et al.(2003)의 주장과는 다르다. 그리고 수평 흐름 인공습지 유출수의 DO 농도가 6.79 mg/L이었음에도 불구하고 NO₃⁻-N의 농도가 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. 그러나 수평 흐름 인공습지에서 NO₃⁻-N의 탈질에 의한 감소(42.21%)는 크지 않았는데 그 원인은 DO의 농도가 높았던 것 외에 COD_{Cr}/N(24.91 mg/L/25.23 mg/L=0.99) 비율이 낮아 탈질에 필요한 탄소원이 부족하였을 것으로 생각된다(Liu et al., 2013). 그러므로 수평 흐름 인공습지 유출수에 잔존하는 7.92 mg/L의 NO₃⁻-N를 탈질하기 위해서는 유출수를 원수 저장조로 재순환시키는 방법을 통하여 최종 유출수의 T-N 함량을 더욱 줄일 수 있을 것이다. 또한 아질산성 질소로 전환된 질소가 빠른 속도로 질산성 질소로 전환되었거나 생성된 아질산성 질소와 암모니아가 반응하여 탈질이 이루어진 것으로도 여겨진다(Platzer, 1997).

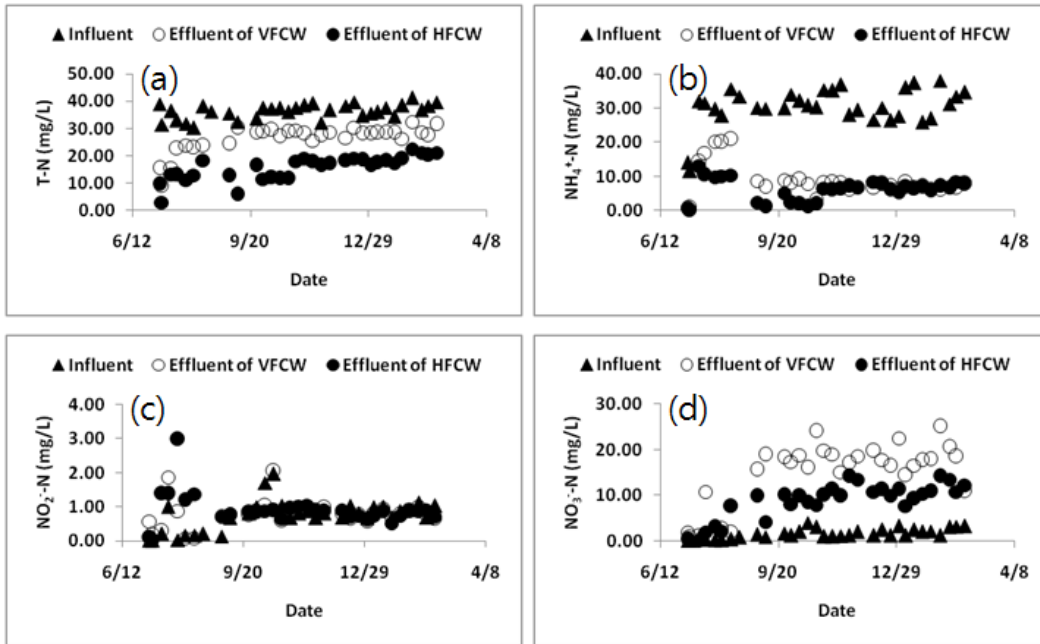


Fig. 7. Variations of T-N (a), NH₄⁺-N (b), NO₂⁻-N (c) and NO₃⁻-N (d) in VFCW and HFCW

3.6 T-P 변화

Fig. 8에서 평균 T-P는 유입수 8.29 mg/L, 유출수 1.10 mg/L(처리효율 86.73%)로써 Bahlo(1997)는 수직 흐름 모래 인공습지에서 T-P 제거효율이 51.9% 그리고 Fehr and Schette(1990)는 식재한 토양 인공습지에서 T-P 제거효율이 53~56%이었다고 보고한 연구결과에 비하여 높은 것을 알 수 있다. T-P의 처리효율은 굴 껍질층의 층진 층 높이가 800 mm에서 93.24%, 500 mm에서 86.30% 그리고 200 mm에서 55.44%로 굴 껍질층진 층의 높이에 비례하였다. 그러므로 가능한 T-P의 처리효율을 높이고 우리나라 방류수질의 pH 기준도 만족시킬 수 있는 굴 껍질층진 층의 높이는 500 mm 이하이어야 될 것으로 생각된다.

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(Wissing, 1995).

그러나, 이 중에 갈대에 의한 제거와 여재 표면에 미생물의 증식에 의한 생물학적 제거보다는 여재 물질에 함유되어 있는 칼슘 및 철과 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). 특히, 인은 높은 pH 영역에서 굴

껍질의 주성분인 Ca²⁺와 반응하여 Hydroxyapatite (Ca₁₀(OH)₂(PO₄)₆; 이하 HAP라고 칭함) 형태의 불용성 화합물을 형성하게 된다(Zoltek, 1974). 다음 식은 HAP를 생성하는 반응을 나타내고 있다(Anderson and Rubin, 1981); $10Ca^{2+} + 6PO_4^{3-} + 2OH^- \rightarrow Ca_{10}(OH)_2(PO_4)_6 \downarrow$.

본 실험에서 사용된 여재들은 인공습지의 가동 기간이 경과함에 따라 인의 흡착능이 감소하여 교체되어야 할 것이다. 생활하수 중 중금속 등 유해물질이 존재하지 않거나 존재하더라도 그 농도가 낮아 교체된 여재물질은 농업에 유용하게 사용할 수 있어 여재물질의 교체로 인한 처리문제는 발생하지 않을 것이다.

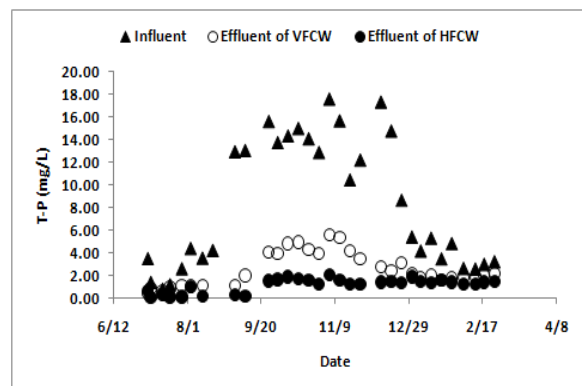


Fig. 8. Variations of T-P in VFCW and HFCW

4. 결론

본 연구에서는 2단(수직 및 수평 흐름) 복층여재(모래, 제올라이트와 굴 껍질) 갈대 인공습지에 생활하수를 간헐적으로 주입하면서 처리효율을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

인공습지 유출수의 pH는 균등하게 나누어진 수평 흐름 인공습지의 4 칸 중 출구 쪽 마지막 칸(300 mm W× 500 mm L× 1,000 mm H)에 충전된 굴 껍질의 높이가 800 mm에서 11.23 이상, 500 mm에서 8.21~9.49 그리고 200 mm에서 6.24 이하로 충전량에 크게 영향을 받았다.

DO는 유입수(0.19 mg/L)보다 수직 흐름 인공습지 유출수(7.65 mg/L)에서 높았다가 수평 흐름 인공습지 유출수 (6.49 mg/L)에서는 다시 낮아졌다. 그리고 여름보다 겨울에 높았다. 또한 OTR은 수직 흐름 인공습지 57.15 g O₂/m³·day 그리고 수평 흐름 인공습지 5.65 g O₂/m³·day이었다.

각 항목별 평균 처리효율은 수직 흐름 인공습지 유출수에서 SS 79.19%, BOD 74.65%, COD_{Cr} 67.27%, COD_{Mn} 69.96%, T-N 27.49%, NH₄⁺-N 71.49%, T-P 51.90% 그리고 수평 흐름 인공습지 유출수에서 SS 88.09%, BOD 88.12%, COD_{Cr} 83.11%, COD_{Mn} 85.58%, T-N 57.21%, NH₄⁺-N 80.17%, T-P 86.73%이었다.

수평 흐름 인공습지에 굴 껍질 충전으로 인하여 T-P의 처리효율은 높일 수 있었다. T-P의 처리효율은 굴 껍질의 충전 층 높이가 800 mm에서 93.24%, 500 mm에서 86.30% 그리고 200 mm에서 55.44%로 굴 껍질 충전 층의 높이에 비례하였다. 그러므로 가능한 T-P의 처리효율을 높이고 우리나라 방류수질의 pH 기준(5.8~8.6)도 만족시킬 수 있는 굴 껍질 충전 층의 높이는 500 mm 이하이어야 될 것으로 생각된다.

비록 NH₄⁺-N의 처리효율은 80.17% (유출수 농도 6.01 mg/L)로 전부를 제올라이트로 충전하였을 경우(타 연구)와 비교하여 낮았지만 수직 흐름조의 제올라이트 300 mm 충전 층으로도 하수처리에서 요구되는 방류수질의 T-N 농도(20 mg/L)까지 안전성 있게 처리할 수 있을 것으로 예측된다. NO₃⁻-N의 농도는 수직 흐름 인공습지 유출수에서 보다 수평 흐름 인공습지 유출수에서 감소하였다. 이것으로 수평 흐름 인공습지에서 DO 농도가 6.49 mg/L임에도 불구하고 탈질이 진행되었다는 것을 알 수 있었다. 그럼에도 불구하고 유출수 중 T-N의 반 이상이 NO₃⁻-N(7.92 mg/L)으로 잔존하였으며 NO₂⁻-N은 평균 0.90mg/L이었다. 그러므로 수평 흐름 인공습지의 유출수를 원수 저장

조로 재순환시키는 방법을 통하여 탈질이 되도록 한다면 최종 유출수의 T-N 농도를 더욱 낮출 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 2014~2015년도 창원대학교 교내 연구지원비의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

- Anderson, MA and Rubin, AJ (1981). *Adsorption of Inorganic at Solid-liquid Interfaces*. Ann Arbor Science.
- APHA, AWWA and WPCF (1989). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th ed., American Public Health Association, DC.
- Bahlo, K (1997). *Reinigungsleistung und Bemessung von Vertikal Durchstroemten Bodenfiltern mit Abwasserzirkulation*, Ph.D. Dissertation, Fachbereich Bauingenieurund Vermessungswesen der Universitaet Hannover, Hannover, Germany.
- Brix, H, Aries, CA and del Bubba, M (2001). Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands, *Water, Science and Technology*, 44(11-12), pp. 47-54.
- Brix, H, Arias, CA and Hohansen, NH (2002). BOD and nitrogen removal in an experimental two-stage constructed wetland system: nitrification capacity and effects of recycling on nitrogen removal, *Proceedings of the Eighth International Conference for Water Pollution Control*, Arusha, Tanzania, 16-19 September, pp. 400-410.
- 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 and Technology*, 40(3), pp. 1-9.

- Cyrus, JS and Reddy, GB (2011). Sorption and desorption of ammonium by zeolite: batch and column studies, *J. of Environmental Science and Health*, part A 46, pp. 408-414.
- Dongwha Technology (1999). *Korea Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater*. [Korean Literature]
- 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 Foerderung der Abwassertechnik e. V. (1989). *ATV-Regelwerk Abwasser-Abfall, Behandlung von Hauslichem Abwasser in Pflanzenbeeten*, ATV-Hinweisblatt H 262.
- Hegemann, W. (1992). Abwasserentsorgung im duenn besiedelten Flaechenland Brandenburg, *Arch. fuer Nat.-Land* 00: 1-12.
- Hegemann, W (1996). Neue Entwicklung in der Klaertechnik-Hightech und/oder Einfachtechnik, *TU International*, Nr. 34/35, pp. 18-20.
- Huang, J, Cai, W, Zhong, Q and Wang, S (2013). Influence of temperature on micro-environment, plant eco-physiology and nitrogen removal effect in subsurface flow constructed wetland, *Ecological Engineering*, 60, pp. 242-248.
- 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, DS, Jang, SB and Park, SY (1996). Studies on the removal of metal ions with domestic Pohang zeolite and synthetic zeolite, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 18(5), pp. 587-589. [Korean Literature]
- Kraft, H (1987). *Pflanzenklaerlagen aus Oekologischer Sicht*, ATV-Fort- bildungskurs E/5, 18-20. 3. 1987 in Fulda, Abwasserbeseitigung in Laendlichem Raum.
- Lee, MY (1990). *Biosorption of lead using crab shell*, Master's Thesis. Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea. [Korean Literature]
- Li, H, Li, Y, Gong, Z and Li, X (2013). Performance study of vertical flow constructed wetlands for phosphorus removal with water quenched slag as a substrate, *Ecological Engineering*, 53, pp. 39-45.
- Liu, LX, Zhao, N, Shen, Z, Wang, M, Guo, 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.
- Platzer, C (1997). *Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Stickstoffelimination 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.
- Reddy, GB, Forbes, DA, Phillips, R, Cyrus, JS and Porter, J (2013). Demonstration of technology to treat swine waste using geotextile bag, zeolite bed and constructed wetland, *Ecological Engineering*, 57, pp. 353-360.
- Seo, JY (2002). Treatment of artificial sewage using zeolite column, *Korean J. of Environmental Agriculture*, 21(3), pp. 178-188. [Korean Literature]
- Seo, JY (2007). Vertical flow zeolite-filled reed bed with intermittent feeding for sewage treatment, *Korean J. of Biotechnology and Bioengineering*, 22(2): 102-108. [Korean Literature]
- Seo, JY and Kim, EH (2006). Horizontal flow zeolite-filled reed bed with intermittent feeding for sewage treatment, *Korean J. of Biotechnology and Bioengineering*, 21(1), pp. 102-108. [Korean Literature]
- Verhoeven, JTA and Meuleman, AFM (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.
- Wang, Z, Dong, J, Liu, L, Zhu, G and Liu, C (2013). Screening of phosphorus-removing substrates for use in constructed wetlands treating swine wastewater, *Ecological Engineering*, 54, pp. 57-65.
- Wissing, F (1995). *Wasserreinigung mit Pflanzen*, E. U. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart, Germany.

Xie, SG, Zhang, XJ and 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]

Zoltek, JJ (1974). Phosphorus removal by ortho-phosphate nucleation, *J. of Water Pollution Control Federation*, 46(11), pp. 2498-2520.

○ 논문접수일 : 2014년 05월 26일

○ 심사의뢰일 : 2014년 05월 27일

○ 심사완료일 : 2014년 08월 11일