

오염하천 수질개선을 위한 Hybrid형 인공습지의 적용

김승준^{*,**} · 최용수^{*,†} · 배우근^{**}

^{*}한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

^{**}한양대학교 토목환경공학과

Application of Hybrid Constructed Wetland System for Stream Water Quality Improvement

Seung-jun Kim^{*,**} · Yong-su Choi^{*,†} · Woo-keun Bae^{**}

^{*}Water Environment and Remediation Research Center, Korea Institute of Science and Technology

^{**}Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

(Received 4 July 2005, Accepted 11 January 2006)

Abstract

The purpose of this study is to improve the stream water quality by the experimental hybrid constructed wetland system. It consisted of the water layer, sand bed planted reeds, irises and roses, gravel bed, yellow-soil media bed and a flow shifter (FS) which can reverse top and bottom flow in the middle of the wetland. The organic compounds and nitrogen removal efficiencies varied with the seasons, namely temperature change. In summer, the mean efficiencies of COD and TN in the outflow from this wetland system were 63.4 and 48.0% and shown the highest, respectively, whereas, the suspended solids and phosphorus removal efficiencies seemed to be less affected by temperature. As a result of inspecting the decreasing trend of pollutants, nitrification-denitrification in the wetland was the major removal mechanism for nitrogen, the nitrogen reduction was especially enhanced by the application of a FS in the wetland, and phosphorus reduction was mainly occurred as a consequence of adsorption of the yellow-soil media.

keywords : Flow shifter, Hybrid constructed wetland system, Stream, Yellow-soil media

1. 서론

산업발달, 인구증가 및 밀집화, 생활수준 향상에 따른 오염물질 배출량의 증가, 농업생산성 제고를 위한 농약 및 비료사용량의 증가 등으로 인하여 수질오염이 점차 심화되고 있으며, 심각하게는 국지적으로 수자원으로서의 가치를 상실한 하천이 나타나고 있다. 산업폐수, 축산폐수 및 생활하수 등으로부터 발생하는 오염물질은 수질환경보전법과 폐기물관리법에 의하여 폐수처리시설이나 하수종말처리시설을 거쳐서 일정농도 이하로 처리하여 배출하도록 되어있으나 배출허용기준 이하로 처리된 폐수 중에도 상당량의 오염물질이 잔류하고 있으며, 미설치 지역의 하수 및 폐수 유입으로 인하여 하천은 오염물질에 쉽게 노출되어 있을 뿐만 아니라 논, 밭, 산림 등으로부터 발생특성에 따라 수계로 유입을 차단하기 어려운 비점오염원 등으로 인하여 하천의 오염현상이 더욱 심화되고 있다. 하천을 오염시키는 점오염원 및 비점오염원을 저감하기 위한 가장 최선의 방법은 하천으로의 오염원 유입을 완벽하게 차단하는 것이지만 자연환경 내에서 이는 불가능한 일이며, 한번 오염된

하천을 복구하기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구된다 (Stone et al., 2003). 본 연구의 목적은 인공습지를 이용하여 오염하천을 정화하는 것으로서, 특히 점오염원 및 비점오염원으로 인하여 질소의 오염 부하가 상대적으로 높은 하천을 대상으로 실시하였으며, (1) 지표층(Surface layer)과 지하층(Subsurface layer)을 동시에 활용한 인공습지의 효율 평가, (2) Flow shifter (FS)를 이용한 인공습지내 오염물 거동 파악, (3) 인공습지의 적정 운전 조건의 도출, 그리고 (4) 자연친화적인 인공습지 시스템의 구성 및 운전 방법 등의 특성을 규명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

하천수질 정화를 위한 파일럿 규모의 인공습지 시스템은 경기도 용인시 모현면 소재의 경안천에 설치하여 운전하였으며, 운전 기간은 2003년 10월부터 2005년 1월 말까지 16개월간 실시하였다.

인공습지 시스템은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 폭 1 m, 길이 19 m, 높이 0.9 m의 규모로서 실내에 설치하였으며, 지표층과 지하층을 동시에 활용한 수로형 인공습지 형태이

[†] To whom correspondence should be addressed.
yschoi@kist.re.kr

다. 습지내 구성은 수직방향으로 수층, 왕모래, 쇠석(Ø 25~40 mm), 그리고 환경친화적 소재인 황토여재(Ø 80 mm)로 구성된 하향 공극 확대 구조로 설계하였으며, 수층의 높이는 0.1 m, 각 층별 높이는 0.2 m로 균등하게 하였고, 습지내 유체의 흐름이 용이하도록 하기 위하여 0.3%의 경사를 두었다. 유입 단계에는 하천수의 유량 조정 및 고형물의 1차 제거를 위하여 5 m³ 규모의 전처리조를 설치하였다. 습지 전단부에는 지표층에서 지하층까지 균일한 유입을 위하여 균일한 크기의 황토여재로 충전하였으며, 다공판 격벽을 이용하여 습지와 구분되게 하였다. 또한 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 지표층과 지하층의 유체이동 경로를 교차시키기 위하여 2 m 길이의 FS를 설치하였으며, 전단부와 후단부의 길이는 각각 7 m와 11 m로서 2단처리 형태로 구성하였고, 습지식물은 전단부에 성장한 갈대 200 주, 후단부에는 노랑꽃창포 120 주와 수경 재배용 장미 120 주를 식재하였다.

2.2. 실험조건

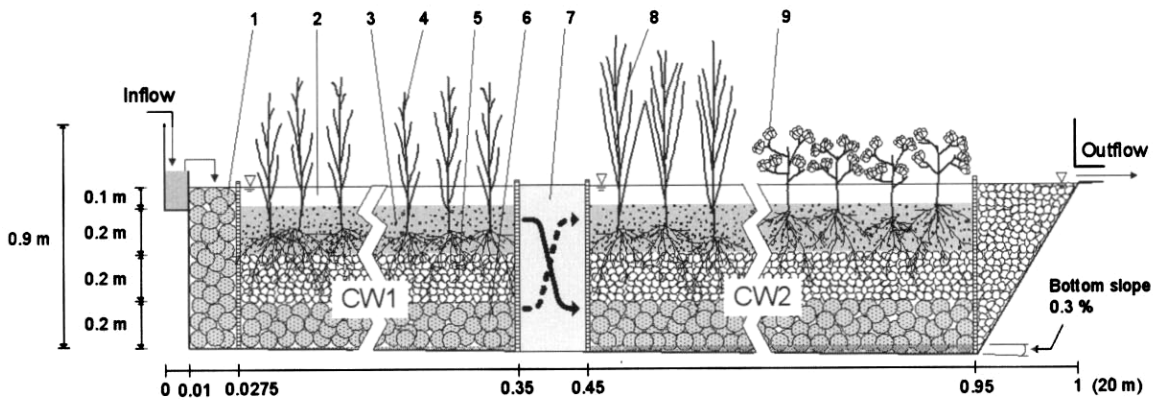
Table 1에 나타낸 바와 같이 하천수 유입량은 정량펌프를 이용하여 44 m³/d로 일정하게 유지하였으며, Hydraulic loading rate(HLR)은 222 cm/d로 매우 높게 운전하였다. 또한 인공습지의 평균 체류시간(HRT) 도출은 Lithium chlo-

Table 1. Operating conditions for the hybrid constructed wetland system

| Parameter | Value |
|---|--------|
| Inflow (Q), m ³ /day | 44 |
| Hydraulic loading rate (HLR; q), cm/day | 222 |
| Hydraulic retention time (HRT), hr | 5.02 |
| Porosity of wetland, v/v | 0.6637 |
| Total volume of wetland (V _w), m ³ | 13.86 |
| Void volume of wetland (V _p), m ³ | 9.20 |

ride 110.8 g으로 펄스 실험(Pulse experiment)을 통하여 체류시간분포(Residence time distribution; RTD) 분석에 의하여 얻었으며(USEPA, 1999), 그 결과 공극율(Porosity)은 0.6637이었고, 따라서 평균 체류시간은 5.02 hr로 매우 짧게 운전하였다.

연구기간동안 유입 하천수의 특성은 Table 2에 나타낸 바와 같이 평균 BOD₅/COD비는 0.517이었으며, BOD₅(COD)/TN비는 0.663(1.282)로서 하천내 유기물에 비하여 질소의 농도가 상대적으로 높았고, TKN/TN비와 NO_x-N/TN비는 각각 0.731과 0.291로서 하천수내 NO_x-N의 비율이 매우 높았다. 또한 하천수의 pH와 수온은 각각 6.8-8.2, 5.3-24.6°C로 측정되었다.



- 1. Inlet zone with yellow-soil media
- 2. Water layer
- 3. Sand beds
- 4. Reeds
- 5. Crushed stone beds
- 6. Yellow-soil media
- 7. Flow shifter
- 8. Irises
- 9. Roses

Fig. 1. Schematic of the hybrid constructed wetland system.

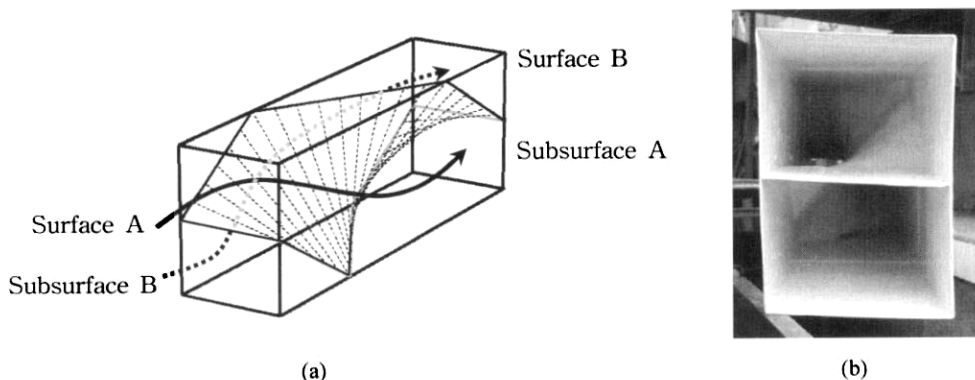


Fig. 2. Schematic diagram (a) and inside view of the flow shifter (b).

Table 2. Pollutant loading rate for the hybrid constructed wetland over the period of operation

| Constituent | Pollutant Loading Rate (kg/ha/day) | | |
|--------------------|------------------------------------|------|-------|
| | Min | Mean | Max |
| BOD ₅ | 101 | 301 | 504 |
| COD | 154 | 582 | 2,716 |
| SS | 51 | 344 | 1,473 |
| TN | 195 | 454 | 789 |
| TKN | 71 | 322 | 651 |
| NO _x -N | 43 | 132 | 278 |
| TP | 2.7 | 17.5 | 50.2 |

2.3. 실험방법

연구기간 동안 유입 및 유출수에 대한 수질분석은 주 2-3회 간격으로 시료를 채취하여 분석하였고, FS에 의한 지표층과 지하층의 수질변화를 관찰하기 위하여 습지내 약 1 m 간격으로 각각 시료 채취하였으며, 지하층의 경우 PVC관을 수직으로 설치하여 시료채취가 용이하도록 하였다. 시료의 분석은 Standard Methods 20th edition(APHA, 1998)에 제시된 방법에 따라 분석하였다.

3. 연구결과

3.1. 인공습지 공정효율

본 연구 기간동안 하천수의 계절별 평균 수온은 겨울철 5.3°C, 봄과 가을철 14.7°C, 그리고 여름철에 24.6°C이었다. 파일렛 규모의 인공습지 운전 기간동안 BOD₅의 제거효율은 68.7%였으며, 유출수의 농도는 평균 5.0 mg/L이하로서 비교적 안정적인 상태를 유지하였다. Table 3은 COD, SS, TN, TP의 유입 및 유출수의 농도 및 계절별 평균 제

거효율 경향 나타낸 것이다. 실험초기인 2003년 10월 가을철부터 2004년 2월까지의 5개월은 적응단계 및 겨울철로서 식재한 식물의 성장이 둔화되고 있었으며, 황토여재 및 기타 여재에 미생물 부착도가 낮은 상태였고, 특히 낮은 수온으로 인하여 습지내 미생물의 활성도가 현저히 저하되어 있는 상태였다. 이후의 운전기간 중 마지막 겨울철을 제외한 COD와 TN의 평균 제거효율은 각각 57.9 ± 5.5%와 40.6 ± 7.4%로 나타났으며, 여름철에 가장 높은 효율을 보였고, 이는 온도에 따른 영향으로 판단된다. SS의 경우는 계절별 뚜렷한 제거효율의 경향을 보이지 않았으며, 평균 유출수 농도는 3.5 mg/L이었고, 평균 제거효율은 73.6%로서 안정적인 효율을 보였다. TP의 경우는 SS 제거 경향과 마찬가지로 온도에 따른 영향은 보이지 않았으나, 초기 적응단계 기간동안의 TP 제거효율은 15.6 ± 0.5%로 매우 낮은 상태였다. 그러나 이후의 운전기간동안 평균 유출수 농도는 0.4 mg/L이었고, 제거효율은 42.4 ± 11.7%로서 다소의 변화를 보였다.

따라서, COD와 TN의 경우, 계절별 온도의 영향에 따라 효율의 차이를 보이는 것으로 보아 인공습지내 미생물의 활성도와 관련이 큰 것으로 판단되고, SS와 TP의 경우 인공습지내 조성된 각 여재들에 의한 여과 및 흡착 현상에 의한 것으로 판단된다.

3.2. 인공습지 공정 평가

Fig. 3은 인공습지에서의 COD, SS, TN, TP 부하율(Mass loading rate: MLR)에 대한 제거율(Mass removal rate: MRR) 및 유출수 농도의 상관관계를 나타낸 것이다. COD의 경우 MLR이 286 kg/ha/day 이하일 때 50% 이상의 제거효율을 보이고, 유출수의 농도가 7.8 mg/L 이하를 유지하는 것으로 분석되었다(P<0.0001). SS의 경우는 MLR이

Table 3. The average concentrations of COD, SS, TN and TP in and out of the hybrid constructed wetland and removal efficiencies with the seasons

| | COD | | | SS | | | TN | | | TP | | |
|-------------------------------|-------------------|-----------------|----------|------------------|----------------|----------|------------------|------------------|----------|---------------|----------------|----------|
| | In (mg/L) | Out (mg/L) | Rem. (%) | In (mg/L) | Out (mg/L) | Rem. (%) | In (mg/L) | Out (mg/L) | Rem. (%) | In (mg/L) | Out (mg/L) | Rem. (%) |
| Autumn (2003/10/1-2003/11/30) | 18.5 (10.1-37.3) | 11.6 (6.1-18.8) | 37.5 | 5.0 (2.3-9.0) | 1.9 (0.2-4.0) | 61.3 | 15.2 (12.0-17.6) | 13.9 (11.9-16.2) | 8.1 | 0.9 (0.5-2.0) | 0.7 (0.4-1.3) | 16.1 |
| Winter (2003/12/1-2004/2/29) | 29.5 (14.6-57.6) | 18.2 (7.3-39.1) | 38.4 | 6.0 (2.7-11.8) | 1.8 (0.7-3.0) | 69.5 | 20.6 (17.4-27.5) | 17.6 (12.2-22.4) | 14.7 | 1.2 (0.7-1.5) | 1.0 (0.6-1.2) | 15.1 |
| Spring (2004/3/1-2004/5/31) | 27.3 (13.2-38.4) | 13.0 (5.9-19.2) | 52.4 | 24.5 (15.0-40.5) | 4.1 (1.3-11.5) | 83.1 | 23.4 (9.9-32.9) | 15.7 (6.2-21.9) | 33.1 | 1.4 (0.6-2.3) | 0.7 (0.1-1.3) | 46.8 |
| Summer (2004/6/1-2004/8/31) | 21.5 (6.9-39.0) | 7.9 (2.5-13.8) | 63.4 | 22.8 (6.7-66.3) | 5.9 (1.5-18.3) | 74.3 | 17.4 (8.8-27.3) | 9.1 (2.4-19.5) | 48.0 | 0.6 (0.1-1.9) | 0.4 (0.04-1.0) | 42.8 |
| Autumn (2004/9/1-2004/11/30) | 35.0 (17.6-122.2) | 16.0 (6.3-34.3) | 54.4 | 23.0 (2.6-58.3) | 2.9 (0.4-7.0) | 87.3 | 23.8 (15.8-35.5) | 15.7 (10.1-24.1) | 34.1 | 0.5 (0.3-0.8) | 0.3 (0.01-0.6) | 30.5 |
| Winter (2004/12/1-2005/1/31) | 27.3 (10.5-53.5) | 19.2 (6.8-30.4) | 29.7 | 12.1 (2.6-52.0) | 4.1 (0.4-24.4) | 66.3 | 22.1 (15.4-29.7) | 18.6 (12.5-22.7) | 15.9 | 0.6 (0.2-1.3) | 0.3 (0.1-0.6) | 53.9 |

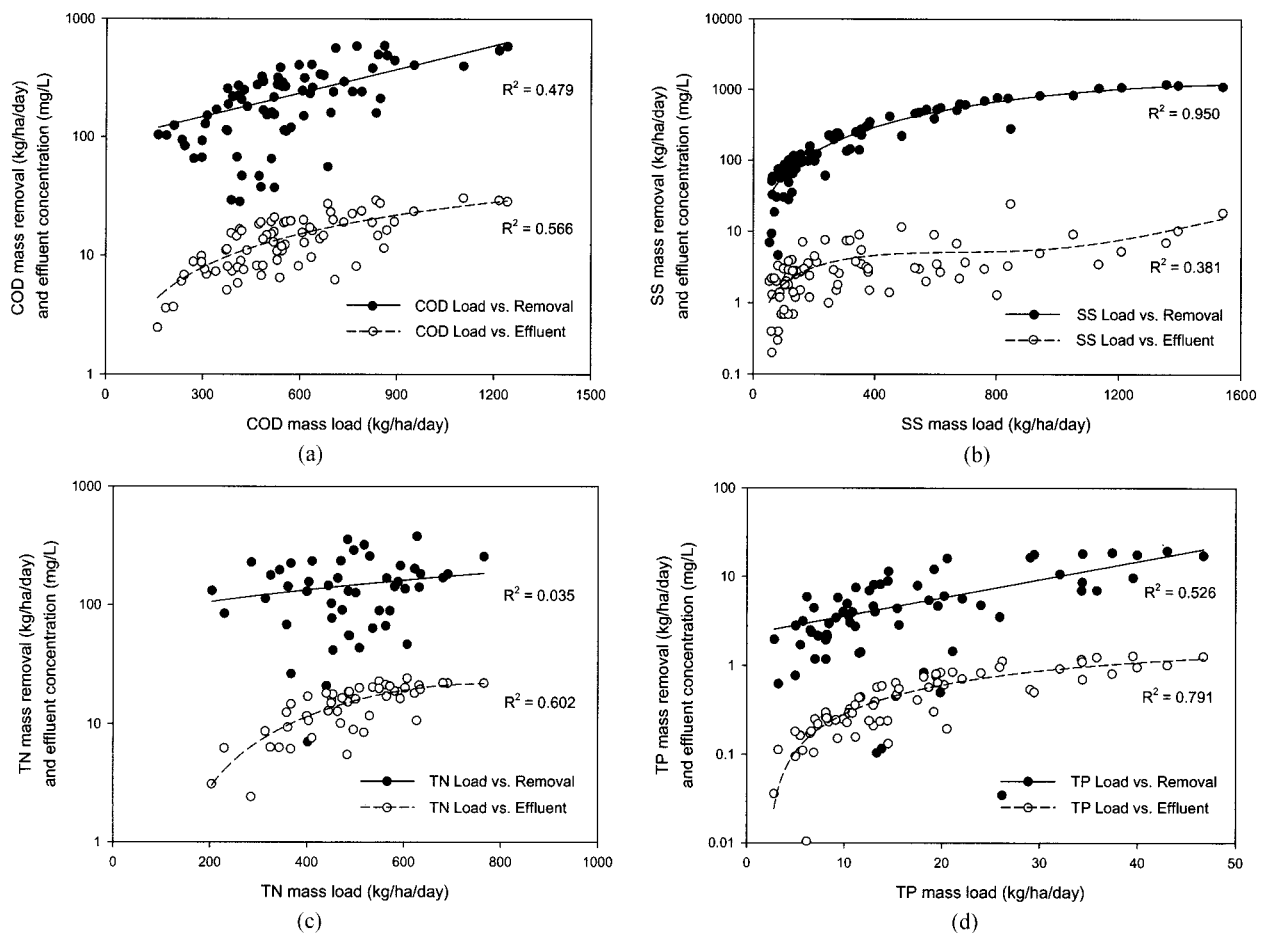


Fig. 3. Plots of the mass removal rate and effluent concentrations versus mass loading rate for COD, SS, TN and TP.

1,035 kg/ha/day 이하일 때 86.3% 이상의 효율을 유지할 수 있고, 유출수의 농도는 6.0 mg/L 이하가 됨을 알 수 있었다($P < 0.0001$). TN의 경우는 MLR과 MRR 사이의 상관도를 나타내는 R^2 값이 0.035로서 너무 낮고, P 값 역시 0.05 이상으로 나타났으므로 상관관계를 추정하기 어려운 것으로 나타났다. 그러나 TN MLR과 유출수 농도와의 상관관계를 통하여 추정한 결과, MLR이 253 kg/ha/day 이하일 경우 유출수 농도는 5 mg/L를 유지할 수 있는 것으로 나타났다 ($P < 0.0001$). 또한 TP의 경우는 MLR이 5.9 kg/ha/day 이하일 때 50% 이상의 제거효율을 보이고, 유출수의 농도가 0.14 mg/L 이하를 유지할 수 있는 것으로 분석되었다 ($P < 0.0001$).

이와 같은 결과를 바탕으로 얻어진 COD, SS, TN, TP의 HLR은 각각 119, 673, 121, 81 cm/day로 계산되었으며, 본 시스템의 제한인자(Limiting factor)는 TP MLR인 것으로 나타났고, 따라서 COD, SS, TN, TP가 50% 이상의 제거효율을 보이기 위한 적정 HRT는 9.7 hr인 것으로 계산되었다.

3.3. 인공습지내 오염물 거동

FS에 의한 습지 내부의 오염물 거동을 분석하기 위하여 Fig. 4에 나타난 바와 같이 약 1 m 간격으로 지표층과 지하층의 시료를 채취하여 분석하였다.

COD의 경우 1단에서의 지표층과 지하층의 제거 효율은 각각 20.5%와 27.5%로 나타났으며, FS 이후 2단에서의 지표층과 지하층의 제거 효율은 각각 17.4%와 29.1%로 나타났다(Fig. 4(a)). 1단의 경우 2단보다 거리가 짧음에도 불구하고 지표층과 지하층 모두 7 m지점까지 지속적인 COD 감소경향이 나타났으며, 이는 습지 전단부에 생분해성 유기물이 집중되고 있기 때문인 것으로 판단된다. 2단 지표층과 지하층에서는 14.6 m지점부터 더 이상 COD 감소 경향이 나타나지 않았고, 이는 14.6 m지점 이후부터 생분해성 유기물이 기저상태가 되어 난분해성 유기물이 잔존하기 때문인 것으로 판단된다. 1단과 2단 모두 지표층에 비하여 지하층의 제거효율이 다소 높게 나타나고 있는데 이는 지표층의 유기물 산화반응보다 지하층의 탈질반응에 의한 탄소원 소비가 다소 우세하였기 때문인 것으로 판단된다.

SS의 경우 1단과 2단 지표층에서의 제거 현상은 나타나지 않았으나, 지하층의 제거효율은 각각 57.6%와 91.0%로 나타났으며(Fig. 4(b)), 이는 쇄석과 황토여재에 의한 침전 및 여과현상에 의한 것이다(Brix, 1993). 특히, 1단과 2단의 지하층의 초기 제거율이 매우 높게 나타났는데, 1단의 경우 유입부의 황토여재층과 3.2 m지점까지 여재층에 의한 침전 및 여과 현상에 의한 것이며, 2단의 경우 1단 지표층에 잔류되어 있는 SS 성분이 2단 지하층으로 유체의 경로가 변경되어 2단 전단부부터 13.4 m지점까지 여재층에 의

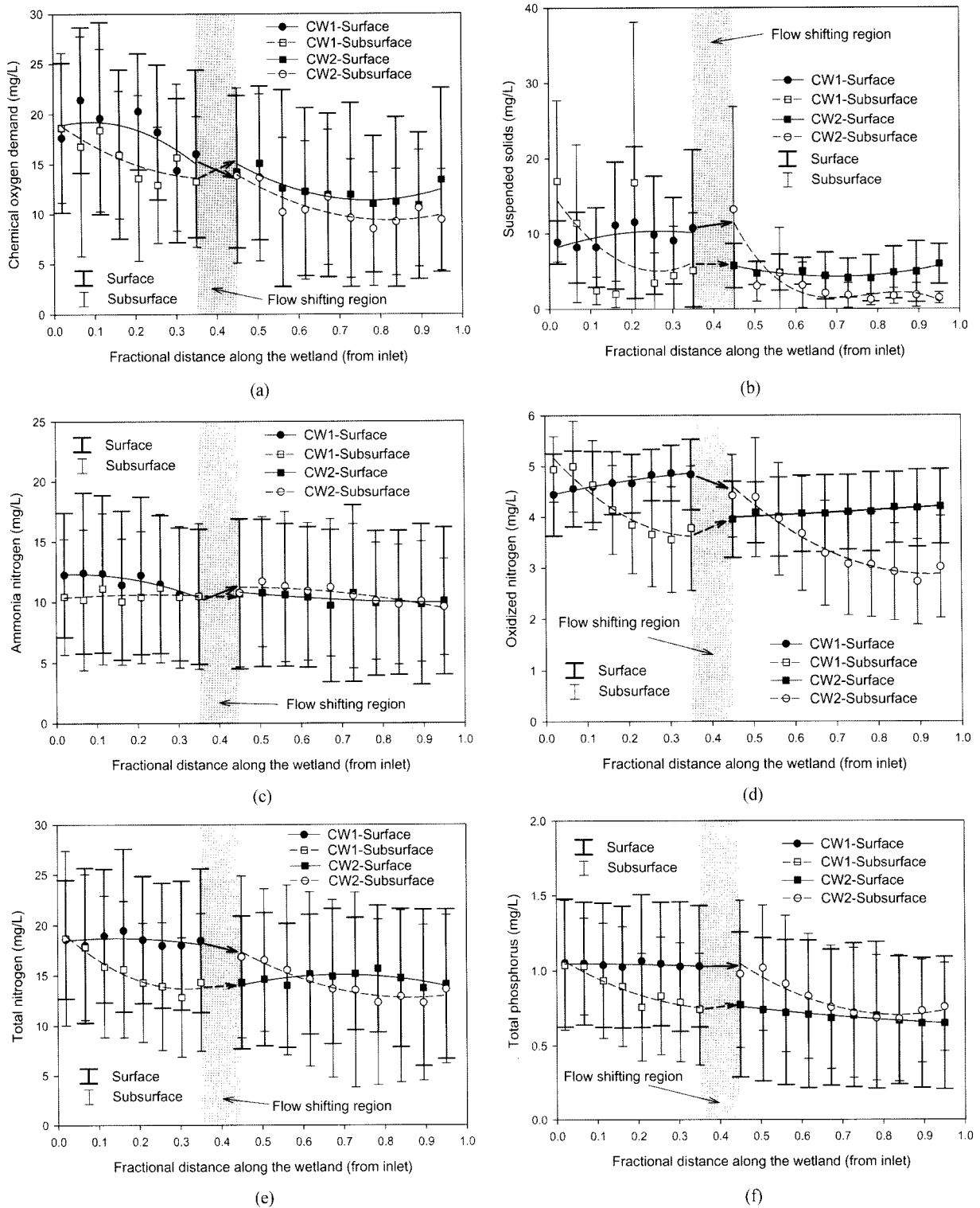


Fig. 4. Plots of mean concentrations of COD, SS, TN and TP at surface and subsurface layers in the hybrid constructed wetland.

한 여과 및 침전 현상에 의하여 높은 제거효율을 보였다. 그러나 SS의 제거효율을 높게 유지하기 위해서는 유입부의 황토여재층에 대한 주기적인 교체 및 관리가 요구되는 것으로 판단되고, 또한 인공습지내 지하층에 축적되는 침전물 혹은 슬러지에 대한 별도의 처리가 요구된다.

질소의 경우 인공습지에서 제거되는 주된 Mechanism은 질산화-탈질 반응으로 알려져 있다(Reddy et al., 1989;

Gersberg et al., 1983). 암모니아성 질소의 경우, 1단과 2단 지표층에서의 제거 효율은 각각 15.6%와 8.0%로 나타났으며, 1단 지하층에서는 거의 변화가 없었고, 2단 지하층에서의 제거효율은 15.7%로 나타났다(Fig. 4(c)). 1단과 2단의 지표층에서의 암모니아 감소는 호기조건이 형성되어 있으므로 질산화 반응에 의한 것이며, Fig. 4(d)에 나타난 바와 같이 NOx-N의 경향에서도 습지 거리에 따라 지속적으로

증가하고 있으므로 질산화 반응에 의한 것이 분명하였다. 그러나 혐기조건이 형성되어 있는 2단 지하층에서의 제거 현상은 지하층에 포설되어 있는 황토여재에 의한 흡착 현상으로 판단된다(Kadlec et al., 1996). 이는 2단의 지하층 황토여재의 biofilm 두께가 1단의 지하층에 있는 여재의 biofilm 두께보다 얇았으며, 또한 2단 지하층의 후단으로 진행될수록 제거율이 차츰 높아지는 경향을 보였기 때문이다. 한편, NO_x-N의 경우, 1단과 2단 지표층에서는 각각 9.3%와 5.5%씩 증가하였으며(Fig. 4(d)), 이는 질산화 반응에 의한 것이고, 2단이 1단보다 습지의 길이가 길지만 1단의 질산화율이 높은 이유는 FS에 의하여 1단 지하층에서 2단 지표층으로 유류가 변경되어 1단보다 2단 지표층의 용존산소 농도가 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다. 또한 1단과 2단 지하층에서의 NO_x-N 제거율은 각각 29.9%와 37.3%로 매우 높게 나타나고 있으며(Fig. 4(d)), 이는 탈질반응에 의한 것이다. 그러나 1단과 2단 지하층의 NO_x-N 제거경향은 다소의 차이가 있다. 1단 지하층의 경우는 유기물이 집중되어 있어서 8 m까지 지속적인 감소경향을 보였으나 2단 지하층의 경우는 14.6 m 이후부터는 감소율이 차츰 둔화되었다. 2단 지하층에서의 이와 같은 경향은 탈질반응에 필요한 탄소원이 부족한데 그 원인이 있다고 할 수 있으나, 2단 지하층의 COD 감소경향과 달리 탈질반응이 지속된 것은 습지 자체로부터 생산되는 biomass로부터 탄소원 공급이 이루어졌기 때문인 것으로 보인다(Gersberg et al., 1983). 따라서 보다 높은 질소 제거 효율을 위해서는 지표층과 지하층을 모두 이용하는 것이 매우 효과적이며, FS를 이용하여 지표층과 지하층을 교차시킴으로써 질산화-탈질반응을 반복시키면 MLR이 높을 경우에도 체류시간을 짧게 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 4(e)에 나타난 바와 같이 인공습지 전체 효율 면에서 질소제거 효율이 다소 낮은 이유는 체류시간을 짧게 유지하였기 때문이며, 또한 지표층의 질산화를 상층을 위해서는 호기조건이 형성될 필요가 있다고 판단된다.

TP의 경우는 1단에서의 지표층과 지하층의 제거 효율은 각각 1.7%와 29.2%로 나타났으며, 2단에서의 지표층과 지하층의 제거효율은 각각 14.3%와 29.6%로 나타났다(Fig. 4(e)). 이러한 TP의 감소 경향은 SS의 감소 경향과 매우 유사하게 보이지만, 다소의 차이가 있다. 즉 SS의 감소 경향과 달리 1단과 2단 지하층의 거리에 따라 점차적으로 TP의 감소경향이 나타나고 있는데 이는 지하층의 황토여재에 의한 흡착반응의 결과로 판단된다.

4. 결론

인공습지를 이용한 오염하천 정화시, 유기물 및 질소의 경우 계절별 제거 경향이 뚜렷한 것으로 나타났으며, 이는 온도에 의한 영향으로서 습지내 식물의 근권 미생물과 습지내 조성물(모래, 쇄석, media) 표면의 부착 미생물에 의한 기작으로 제거되었다.

SS의 경우 습지내 조성물에 의한 여과 및 침전 현상으로

제거되었으며, FS에 의하여 지표층과 지하층이 전도되어 1단과 2단 습지의 전단부에서 대부분 제거 되었다. 그러나 유입부에 설치한 황토여재층의 주기적인 관리가 필요하고, 또한 인공습지내 지하층에 축적되는 침전물과 슬러지에 대한 별도의 처리가 요구되는바 인공습지 설계시 지하층에 다공관을 설치하여 역세 및 흡입에 의한 방법으로 제거할 수 있을 것으로 판단된다.

인의 경우 습지내 여재층의 흡착에 의한 기작으로 제거되었으며, 고형물의 제거 기작과 달리 각 습지의 거리에 따라 지속적인 감소 경향을 보였다.

FS는 미생물에 의한 질소제거시 호기조건과 무산소 조건을 효과적으로 제공할 수 있는 역할을 하였으며, 이로 인하여 질소 제거능을 향상시켰고, 습지 상부의 잔류 고형물과 인 성분을 하부로 유도하여 제거할 수 있게 하였다.

본 인공습지 시스템의 제한 인자는 TP MLR로 나타났으며, 전통적인 인공습지에 비하여 본 시스템의 HLR이 4배 이상 높고, 효과적인 오염물 제거능을 가진 것으로 나타났다.

따라서, 중 대규모 하천의 오염을 저감시키기 위하여 먼저 소규모 하천의 오염을 저감시키는 것이 중요하다고 사료되며, 소하천 정화에 있어서 가장 문제시 되는 점은 부지가 협소하고, 수심이 낮으며, 갈수기의 수량 저하 및 유입이 간헐적인 문제를 가지고 있으므로 본 시스템은 매우 효과적인 인공습지로 판단된다. 또한, 본 습지 시스템을 연속으로 연결할 경우 더욱 높은 효율을 기대할 수 있으며, FS를 이용하여 지속적으로 지표층과 지하층의 유체 흐름을 반복 교차함으로써 C/N비가 낮은 하수, 오수, 산업폐수 및 호소의 부영양화 저감 등에 적용이 가능하고, 생태계 복원 및 비점오염원의 제어시 매우 유용할 것으로 사료된다.

참고문헌

- APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition, APHA, Washington D. C. USA (1998).
- Brix, H., *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands: System Design, Removal Processes, Treatment Performance*, IN: *Constructed wetlands for water quality improvement*, G.A. Moshiri (ed.) Lewis Publishers, Chapter 2. (1993).
- Gersberg, R. M., Elkins, B. V. and Goldman, C. R., Nitrogen Removal in Artificial Wetlands, *Water Res.*, **17**(9), pp. 1009-1014 (1983).
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L., *Treatment Wetlands*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida (1996).
- Reddy, K. R., Patrick, W. H. Jr. and Lindau, C. W., Nitrification-Denitrification at the Plant Root-Sediment Interface in Wetlands, *Limnol. Oceanogr.*, **34**(6), pp. 1004-1013 (1989).
- Stone, K. C., Hunt, P. G., Novak, J. M. and Johnson, M. H., In-stream Wetland Design for Non-point Source Pollution Abatement, *Transactions of ASAE*, **19**(2), pp. 171-175 (2003).
- U.S.EPA. Manual - Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters, EPA/625/R-99/010, Cincinnati, Ohio USA (1999).