

자연현상을 이용한 질산화-탈질공정에 의한 하수처리장 유출수의 질소제거

김영철[†] · 정팔진* · 안익성**

한서대학교 환경공학과 · *전북대학교 환경공학과 · **주) 롯데건설

(2004년 10월 14일 접수, 2005년 3월 9일 채택)

Reduction of the Nitrogen in the Secondary Effluent by the Hybrid Sequential Aerobic-Anoxic Natural System

Youngchul Kim[†] · Paul-Gene Chung* · Ik-Sung An**

Department of Environmental Engineering, Hanseo University

*Department of Environmental Engineering, Chonbuk National University · **Lotte Engineering & Construction

ABSTRACT : In this paper, performance of a hybrid sequential aerobic-anaerobic natural system was investigated. Continuous aerobic and anoxic conditions were created by alternatively placing waste stabilization pond (WSP) and water hyacinth pond (WHP). Two pilot-scale treatment lines were built and operated; The first consists of WSP integrated with WHP and the second of WSP connected with Dark Pond(DP), namely control system ponds which were used to examine the effects of water hyacinth on nitrification and de-nitrification. The overall performance in nitrogen was 86% reduction in WSP-WHP and 36% in WSP-control pond system. Nitrogen was mostly removed by nitrification and de-nitrification which simultaneously occurred in the same water hyacinth ponds. For the de-nitrification, benthic layer was found out to be adequate support as a carbon source. In addition, WSP-WHP system was very effective in reducing phosphorus. Overall P removal efficiency in WSP-WHP is 81%, while it is only 16% in WSP-control. Difference in phosphorus reduction between those two systems is thought to be caused by the plants and probably their roots producing extra-cellular materials, but these aspects need to be further studied.

Key Words : De-Nitrification, Nitrification, Water Hyacinth Ponds, Waste Stabilization Ponds

요약 : 본 논문은 호기-혐기 조건이 연속적으로 반복 운영되는 자연정화시스템의 질소제거에 관하여 연구하였다. 조류 광합성 활동을 극대화한 산화지(WSP: Waste Stabilization Pond)에서 호기조건을, 부레옥잠 잎과 줄기에 의해 태양광이 차단되어 산화지로부터 유입된 조류의 내호흡과 뿌리에 부착된 미생물 호흡에 의해 혐기조건이 형성되는 WHP(Water Hyacinth Pond)를 조합하여 운전하였다. Pilot plant는 2개 계열로 구성하여 운전하였다. 첫번째는 WHPs와 WSPs로 조합하였고, 두번째는 WSP와 질산화와 탈질화에 대한 식물의효과를 평가하기위해 대조반응조로 태양광을 차단한 반응조(DPs: Dark Ponds)를 조합하였다. 연구결과에 따르면 질소에 대한 전체적인 제거능력은 WSP-WHP에서 발휘되었으며 약 86%가 감소되었고 대조반응조 WSP-DP에서는 36%가 감소되었다. 대부분 질소는 WSP에서 질산화 된 후 WHP에서 탈질에 의해 제거되었다. 탈질이 원활히 수행될려면 외부탄소원이 필요한데 수생식물 조 하부 수층에서 조류의 부패로 탄소원이 공급되었다. 그리고 WSP-WHP 시스템은 인 제거에도 매우 효과적이었다. WSP-WHP에서 인 제거율은 81%인 반면에 WSP-DPs에서는 단지 16%에 불과했다. 이들 두 시스템간의 인 제거율의 차이는 아마도 식물증식과 식물 뿌리에서 생산된 Extra-cellular 물질에 기인한다고 여겨지며 이러한 부분에 대해서는 향후 심도 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

주제어 : 탈질화, 질산화, 수생 부레옥잠지조, 산화지

1. 서 론

생물학적 질소제거를 위한 두 가지 주요 메커니즘은 질산화-탈질화이다. 질산화-탈질화에 있어서 질소의 감소는 두 변환 단계에 의해서 이루어지며, 첫 단계에서 NH₃가 NO₃⁻로 질산화 되고, 두 번째 단계에서 NO₃⁻가 N₂(gas)로 전환되어 수층에서 대기 중으로 방출된다. 질산화가 이루어

지기 위해서는 이론적으로 NH₃ 1 g당 4.57 g의 산소가 필요하고, 알칼리도는 질소 1 g당 7.14 g이 필요하다. *Pseudomonas*, *Micrococcus*, *Achromobactor*, *Bacillus* 등의 미생물은 무산소 조건에서 결합산소를 최종적인 전자수용체로 이용하는데 이러한 탈질소화 미생물은 종속영양생물체로 전자공여체로 탄소원이 필요하다. 이론적으로 세포합성을 무시할 때 양론적으로 NO₃⁻ 1 g을 질소가스로 전환시키기 위해서는 2.86 g이 필요하다. 질산화-탈질화를 수행하기 위해서는 호기성 조건에서는 충분한 산소공급이 이루어져야 하고, 혐기성 조건에서는 충분한 탄소원이 공급되어야 한다.¹⁾

[†]Corresponding author
E-mail: ykim@hanseo.ac.kr
Tel: 041-660-1432

Fax: 041-660-1119

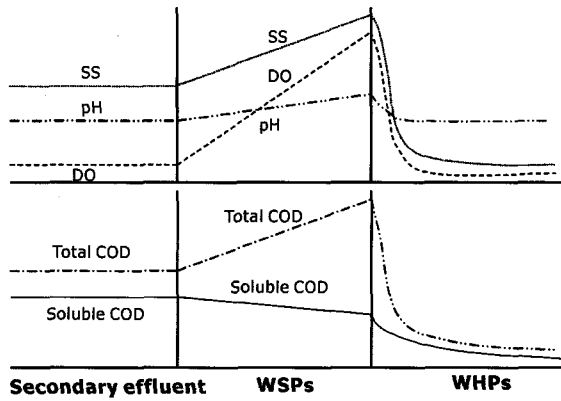


Fig. 1. Conceptual diagram of the interactions between WSPs and WHPs.

미국, 남미, 남부유럽과 동남아시아의 많은 국가에서는 저렴한 유지비와 운전조작의 간편성 때문에 소규모 폐수처리시스템으로 산화지법(WSPs, waste stabilization ponds)이 널리 이용되고 있다.²⁾ WSPs의 장점은 조류의 광합성 활동에 의해 산소를 공급할 수 있으나 여름철 과도한 조류증식과 이로 인한 조류 유실로 인하여 방류수 수질기준을 준수하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 처리수의 유기물질과 부유물질, 영양소 농도를 저감시키기 위해서는 필연적으로 처리수에 함유된 조류를 회수하여야 한다. 미국의 Wolverton 등은³⁾ 이러한 문제점에 대한 흥미로운 해결방안으로 임의성 산화지 유출부에 수처리 효율 향상을 위한 수생 히아신스(일명 부레옥잠) 지(WHPs, water hyacinth ponds)를 설치하여 히아신스의 뿌리에 의해 조류가 회수되도록 하였다. Dinges⁴⁾는 WSPs 처리수에 함유된 조류와 부유물질을 효과적으로 제거하기 위하여 수심이 낮은 히아신스 지를 설치운전하였다. Kim⁵⁾은 실험플랜트 처리실험을 통하여 부레옥잠 뿌리의 성장 특성과 뿌리에 의해 분리되는 조류분리기에 관한 연구를 수행하였다. 연구에 따르면 히아신스 지(WHPs)의 뿌리공극에서 일어나는 중력침전과 뿌리층에 의한 여과작용은 거의 비슷한 수준으로 조류제거에 기여하는 것으로 나타났다. 또한 히아신스의 잎과 줄기에 의해 제공되는 햇빛차단효과는 조류증식을 억제하는데도 매우 효과적인 것으로 나타났다.

Kim 등은⁶⁾ 히아신스 뿌리에 의한 조류분리 제거에 영향을 미치는 몇 개의 물리·화학적 변수들을 밝혀내고 조류제거를 최적화 할 수 있는 경험적인 Scale-up 모델을 제안하였다. WSPs와 WHPs간의 상호작용을 개념적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.⁷⁾ 앞서 논의한 바와 같이 WSPs의 유출수에는 조류 성장에 기인하여 부유물질 농도가 증가하나 WHPs를 통과하면서 히아신스 뿌리 매트에 의해 분리되어 감소한다. WSPs에서 조류증식은 유기물질(Total COD)의 증가를 초래하지만 WHPs에서 자연적으로 조류가 회수됨으로써 유기물질 농도는 감소하게 된다.

WSPs에서 조류의 증식으로 풍부한 용존산소농도는 WHPs 뿌리층에 억류된 조류와 각종 미생물의 활동으로 인하여

유입부에서부터 현저하게 감소하여 유출부로 갈수록 매우 낮아지며 국부적으로 질산화-탈질화 반응에 매우 유리한 조건이 형성된다. WHP에서 억류된 조류는 탈질을 위한 탄소원으로 작용할 수 있다. 2차 처리수를 대상으로 수행된 실험에서 WHPs 산소 물질수지에 따르면⁷⁾ 산화지로부터 유입된 산소의 40~60%까지는 뿌리에서의 질산화와 연관되어 감소하고, 나머지는 세포합성이나 조류의 호흡에 의하여 감소하는 것으로 밝혀졌다. 또한 질소에 대한 물질수지 결과 생물학적 질산화와 탈질화공정을 통해 총 질소가 75% 감소되고 약 25%는 식물의 성장과 연관된 것으로 보고하고 있다.

이와 같은 연구결과는 기계적으로 가능한 생물학적 질소 제거 분위기를 자연현상을 이용해서도 모사 할 수 있음을 시사하고 있다. 본 연구에서는 WSP-WHP 시스템을 확장 발전시켜 WSP와 WHP를 연속적으로 교차 연결하여 호기성-혐기성/무산소 조건이 반복되도록 배치하여 자연적인 생물학적 질소 제거 잠재성을 평가분석하였다. 동시에 히아신스의 잎과 줄기에 의한 광차단 효과와 유사하게 태양광을 차단한 대조반응조(DPs: Dark Ponds)를 운전하여 히아신스의 뿌리가 질소 제거에 미치는 영향에 대해서도 연구하였다.

2. 연구방법

실험장치는 Fig. 2와 같이 2개의 계열로 구성하였다. 첫 번째는 WHPs와 WSPs를 연속적으로 교차 연결하였으며 두 번째는 WSPs와 DP(Dark Ponds; Control Ponds)를 연속적으로 교차 연결하였다. DP 표면은 WHPs에서 히아신스 줄기와 잎에 의해 태양광의 투과가 차단되는 것과 유사한 조건을 형성하기 위하여 나무판넬로 수표면을 차단하였다. 이러한 실험장치 구성은 WHPs와 DP를 유사한 환경 조건에서 운전하고 그 결과를 상호 비교하여 히아신스와 뿌리의 기능을 규명하기 위한 것이다(Photo 1).

실험장치는 수심 0.29 m, 길이 1.85 m, 폭 0.88 m 반응조에 격벽을 설치하여 WSP와 WHP(DPs 포함)를 한조로 각 계열별로 3조를 연결하여 설치하였다. 하수처리장 2차 처리수를 일일 0.157 m³ 주입하여 WSP에서 2일, WHP(DP 포함)에서 1일로 하여 반응조 한조당 수리학적 체류시간을 3일로 운전하였다(계열별 총 9일의 수리학적 체류시간).

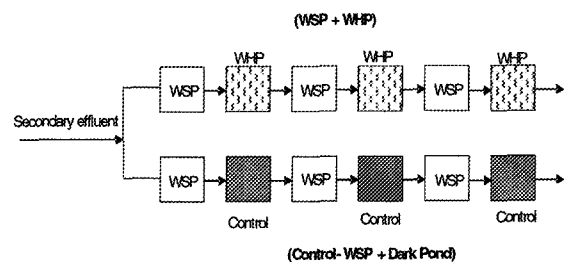


Fig. 2. Experimental line-up of the pilot plant.



Photo. 1. Lay-out of the pilot scale natural system.

Table 1. Yearly statistical distribution of the secondary effluent used for this study

Statistics	DO (mg/L)	pH	Alkalinity (mg/L)	SS (mg/L)	TCOD (mg/L)	SCOD (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	TP (mg/L)
P ₁₀	4.1	6.3	20	2.5	16.6	12.5	13.38	0.95	1.23
P ₅₀	6.6	6.6	36	5.3	25.9	16.6	16.08	1.96	1.75
P ₈₀	8.5	6.7	54	6.4	33.2	21.6	18.77	2.48	1.99
Min	3.4	5.81	14	1.3	16.6	10.4	11.46	0.18	0.97
Max	9.8	6.98	98	9	51.9	29	23.56	2.79	3.6
Std	2.04	0.25	21	1.93	8.26	5	3.28	0.73	0.52

*P represent a value corresponding to 10%, 50%, and 80% from cumulative probability graph

유입수는 표준 활성슬러지법으로 운전되는 우리나라 서남부 K시 하수처리장 2차처리수를 이용하였다. Table 1에는 1년 동안 분석한 현장 2차 처리수 수질의 통계학적 분포를 나타내었다. 2차 유출수의 질소 구성을 살펴보면 일부는 질산화가 수행되었지만 대부분의 질소는 TKN 형태로 존재하였음을 보여주고 있다.

본 연구는 2003년 7월 21일에 시작하였다. 실험에 앞서 히아신스 뿌리에 미생물이 부착 증식 될 수 있도록 총 3개월 동안 K시 하수처리장 2차 처리수에서 재배한 후 WHP #1,2,3에 약 1.4 kg씩 식종하였고, 히아신스 생체증식량을 측정하기 위하여 WHP에 바스켓을 설치하여 주기적으로 증식량을 측정하였다. 운전조건을 모니터링 하기 위하여 일일 측정항목으로 온도, pH, 알칼리도와 DO를 측정하였으

며, 생물학적 질소능력을 평가하기 위하여 주 1~2회 간격으로 각 구성 반응조별로 질소 형태를 측정하였다. 모든 주요 수질인자는 Standard Methods에 의하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 부유물질(조류증식)

실험 기간동안 2차 처리수의 평균 SS 농도는 5.3 mg/L (1.6~8.8 mg/L)이었다. 조류증식을 극대화하기 위하여 낮은 수심으로 WSP를 설치하였으며, 고착 및 사상성 조류로 증식하였기 때문에 극히 제한된 양만이 다음 반응조 WHP로 유출되었다. WSP에서 조류는 2.5 mg/L 이하로 유출되었고 WHP를 통과 하면서 일부는 침전되고 일부는 부레오잠 뿌리에 포착되어 1~2 mg/L 미만으로 감소되어 유출되었다. 대조 반응조(DPs)에서 고형물과 조류가 단지 중력침전에 의해서만 제거되었는데 유출수 청정도는 WHP와 거의 비슷한 수준을 보였다.

3.2. 용존산소

Fig. 3은 WSP-WHP와 WSP-DPs 각 반응조 유출부에서 DO를 측정하여 그 농도 패턴을 반응조별로 도시한 것이다. 두 계열에서 DO는 WSP에서 광합성 활동으로 증가하고, 생물학적 질산화, 조류의 내호흡, 2차 처리수에 함유된 유기물질 생분해에 의해 소모된다. Fig. 3에서 DO 변화를 살펴보면 식물뿌리의 영향(뿌리에 부착 증식되는 미생물의 영향)으로 DP에 비해 WHP에서 훨씬 많은 양의 산소가 소모된 것으로 나타났다. Fig. 3에 따르면 운전기간동안 WHP에서 DO는 약 4 mg/L 이하를 나타내었다. 그러나 운전여건이 성숙되면 용존산소는 감소하여 2 mg/L 이하를 보였다. 각각의 지에서 용존산소의 측정지점은 각각의 지 사이에 설치된 시료채취구에서 수행되었다. 실제 수생식물대(WHP)를 흐르는 물의 수리학적 균일성이 매우 불량하므로 동일한 지내에서도 국부적인 Aerobic/Anoxic Zone이 물의 흐름에 따라 경계면을 형성하였을 것으로 추정된다. 다만 지의 선단 유입부에서는 Aerobic Zone이 폭넓게 분포하였을 가능성이 높고 반대로 후단에서는 Anoxic Zone이 지배적이었을 것으로 판단된다.

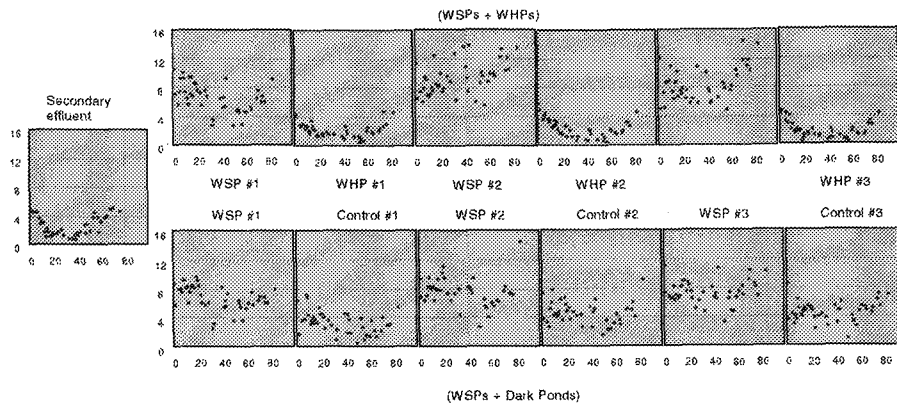


Fig. 3. Change of the dissolved oxygen concentration at each unit process in treatment line (X-axis is operation day, Y-axis is DO as mg/L).

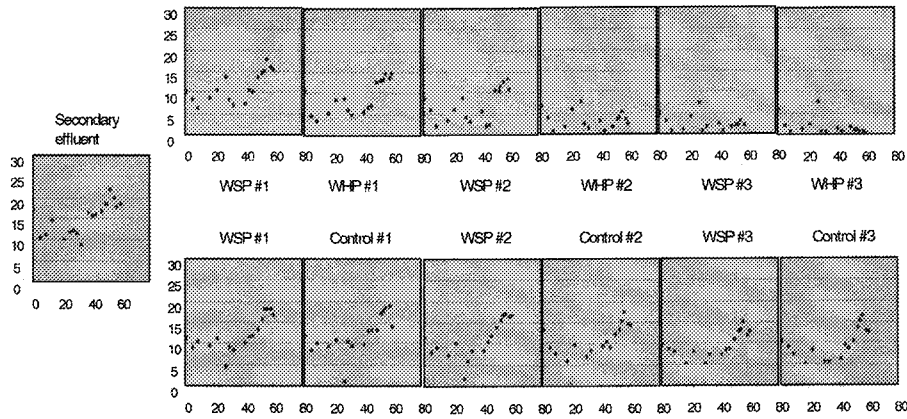


Fig. 4. Changes of the TKN concentration at each unit process in treatment line (X-axis is operation day, Y-axis is TKN as mg/L).

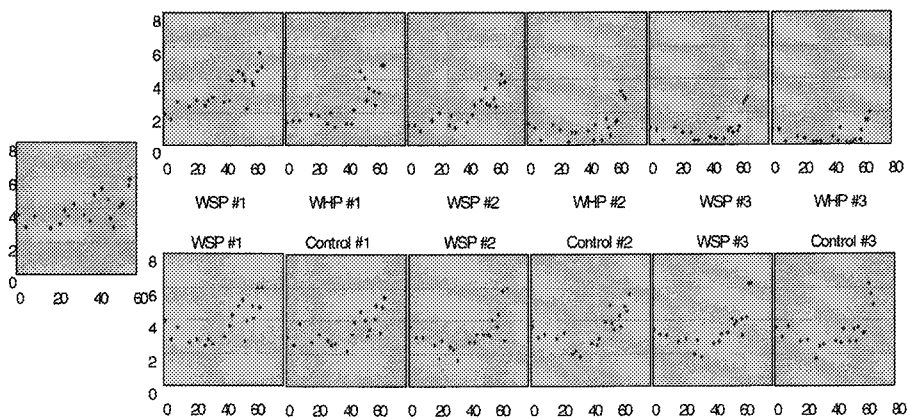


Fig. 5. Changes of the nitrate concentration at each unit process in treatment (X-axis is operation day, Y-axis is NO₃-N as mg/L).

3.3. TKN 농도의 변화

일반적으로 TKN 감소 또는 감소율은 생물학적 공정에서 질산화 정도를 파악하는데 유용하다. Fig. 4를 보면 두 계열 모두 WSP #1에서 TKN이 감소한다. 이러한 원인은 고형물 침전과 pH 상승에 따른 암모니아 탈기량 증가로 인해 감소한다고 추측할 수 있다. 그러나 후속단으로 진행할수록 WSP-WHP 계열의 WHP에서 TKN이 꾸준히 감소하지만 대조반응조 계열의 DP에서는 거의 변화가 일어나지 않음을 알 수 있다. 각각의 WHP와 DP에서 TKN 농도의 차이는 뿌리의 Media 작용에 의해 제공되는 질산화뿐만 아니라 식물의 흡수에 기인하므로 질산화에 관해 논의하는 것은 아직 이르다. 전체적인 TKN 제거율은 WSP-WHP에서 약 83.5%, WSP-DPs에서 19.5%로 히아신스 식물에 의해 약 4배 정도의 향상을 보였다. 특히 WSP #2의 유출수가 WHP #2를 통과하면서 TKN 제거율이 높은 것으로 나타났다. 본 실험은 표준활성슬러지법에 의해 2차 처리된 처리수를 원수로 이용하였기 때문에 원수내 질소 형태 중 암모니아성 질소(NH₃-N)는 대부분 산화되었고, 잔존 암모니아(NH₃-N)에 대한 질소(T-N) 분을 평균값은 약 1.8%에 불과하였기에 식물흡수와 관련된 암모니아 영향은 크지 않을 것으로 판단되어 검토하지 않았다.

3.4. NO₃-N 농도의 변화

실험기간동안 각 계열별 NO₃-N 변화는 Fig. 5와 같았다. 대조반응조로 운전된 WSP-DP의 경우 NO₃-N 감소는 미미하였으나 이에 반하여 WSP-WHP 계열에서는 WHPs#3 유출수의 평균 NO₃-N 농도는 0.6 mg/L 이하로 감소하였다. 이러한 제거특성 차이는 WSP-WHP 계열의 경우 WHP의 호기성 영역에서 TKN 형태의 질소가 질산화되고, 무산소 조건이 형성되는 영역에서 고효율 탈질이 수행되었기 때문으로 볼 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5의 결과를 살펴보면 WHP에서 질산화와 탈질이 동시에 일어남을 것을 확인 할 수 있다. 질산화 미생물은 히아신스 뿌리표면에 부착 증식하며 이들 미생물은 선행처리단계인 WSP와 히아신스 자체에서 생산 공급되는 산소를 이용한다. WSP 유출수가 가장 먼저 접촉이 일어나는 WHP 선단지역을 통과하면서 대부분의 질산화와 조류의 내호흡 등으로 용존산소가 소비되고, 후속방향으로 진행함에 뿌리의 후면과 중첩부분을 따라 넓은 무산소 조건이 형성되는 것으로 판단된다. 앞서 제시한 Fig. 3은 이러한 추론을 반증해주고 있으며 히아신스에 의해 자연적으로 무산소 조건을 유도하여 질소제거 능력을 향상시킬 수 있다는 증거로 볼 수 있다. 본 연구에서 채택한 낮은 수심은

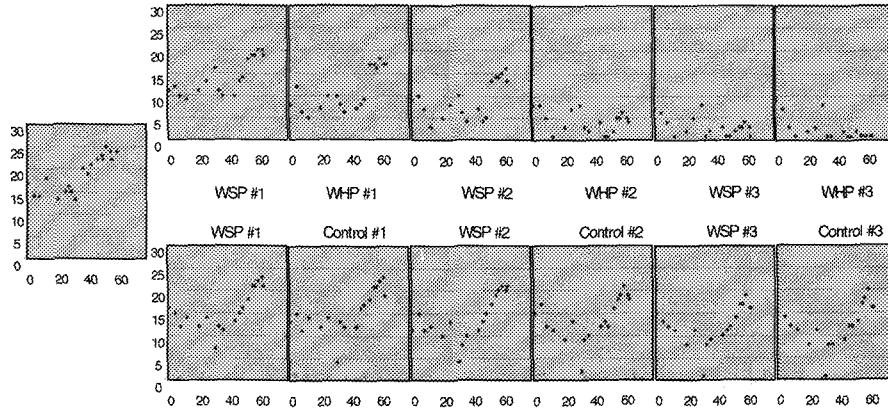


Fig. 6. Changes of the total nitrogen concentration at each unit process in treatment line (X-axis is operation day, Y-axis is TN as mg/L).

반응조를 통하는 수류가 히아신스 뿌리와의 접촉기회를 크게 향상시켰을 것으로 판단된다.

탈질을 위해서는 본질적으로 탄소원이 필요한데, 하수처리장 2차 처리수는 생물학적 분해 가능한 유기물질 대부분이 이전의 1, 2차 처리공정에서 제거되었기 때문에 잔존 유기물질만으로는 탈질을 위한 탄소원으로 미흡하다. 따라서 WSP-WHP 시스템의 탈질을 논리적으로 설명하기 위해서는 탄소원에 대한 논의가 필요한데 본 논문의 후반부에서 제시하기로 하겠다.

3.5. 질소제거 성능

총질소 농도의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 하수처리장 2차처리수를 WSP-WHP로 처리한 경우 평균 86%의 제거율을 보였으며, 대조반응조로 운전된 WSP-DPs의 경우 WSPs에서 단지 36%만 제거되었다. 이와 같은 실험결과로 볼 때 WHPs에서 순수한 식물효과에 의한 TN 제거율은 약 50%에 이르는 것으로 나타났다.

3.6. 식물증식

Fig. 7에는 각각의 WHP에서 식물의 성장곡선을 나타내었다. 식물성장은 8월부터 9월 중순까지 빠르게 성장하여 한계밀도 까지 증식하였다. 식물의 성장 패턴은 질소농도에 따라 큰 차이를 보였으며 (특히 WHP #1과 WHP #3), 이는 각 단별 질소의 영양수준과 일치하였다. 식물체의 함수율은 약 95%였으며, 식물체의 세포조직과 뿌리에 함유된 질소는 건조무게 기준으로 1.35~1.89%로 문헌에 보고된 값과 비슷하였다.

WSP-WHP의 질소 물질수지는 유입질소량, 유출질소량 그리고 식물체로 전환된 질소량으로부터 구할 수 있다. 운전기간 동안 히아신스의 순증식량과 히아신스 생체의 질소 함량을 이용하여 TN 양으로 환산하여 Table 2에 정리하였다. 질산화-탈질기작에 의해서 제거된 부분은 총질소 제거량에서 식물 흡수량을 제한 값으로 보았다. WHP #1, WHP #2에서 제거된 TN 중에 식물흡수(질산화-탈질없이)에 의한

제거율은 17~27%로 나타났다. 이는 본 연구 이전에 하수처리장 2차 처리수로 좀 더 규모가 큰 실증플랜트(Single WSP-WHP 시스템)로 수행되었던 연구 결과와 근사한 값이었다. WHP #3에서 TN 제거량 중에 식물흡수에 의한 질소 제거율이 86%로 매우 높게 증가하였는데 이는 WHP #3에 유입되기 이전에 대부분의 질소가 제거되어 낮은 농도로 유입되었기 때문으로 판단된다.

본 연구의 착안점 중 하나는 식물은 영양상태가 열악할수록 식물체는 영양소 획득을 위해 뿌리의 길이가 커진다는 점이었다(미생물 부착 표면적의 증가). 히아신스의 줄기와 잎과 뿌리의 증량비는 이러한 관점에서 중요한 의미를 갖는다. WHP #1,2,3에서 (줄기+잎)/뿌리 증량비는 각각 4.27, 2.73, 1.7 비율로 큰 폭으로 감소하였다. 이러한 감소 원인

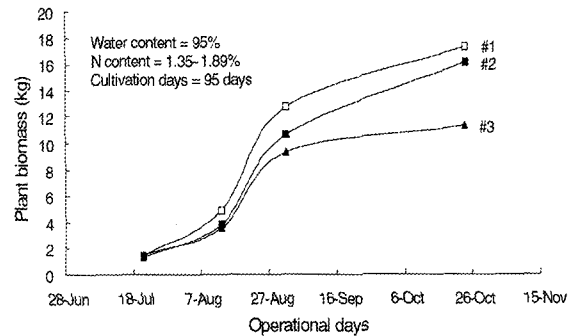


Fig. 7. Growth curves of the water hyacinth biomass during 95 days of the operational period.

Table 2. Nitrogen balance in water hyacinth ponds

No. of WHP	△ Wet plant biomass(kg)	△ Dry plant biomass(g)	Nitrogen removal by plant uptake(g)	*Total removed nitrogen(g)	% Ratio between plant uptake/total
WHP #1	15.9	795	12.72	47.2	27
WHP #2	14.8	740	11.84	70.4	17
WHP #3	7.8	490	7.84	9.1	86

*only in water hyacinth ponds

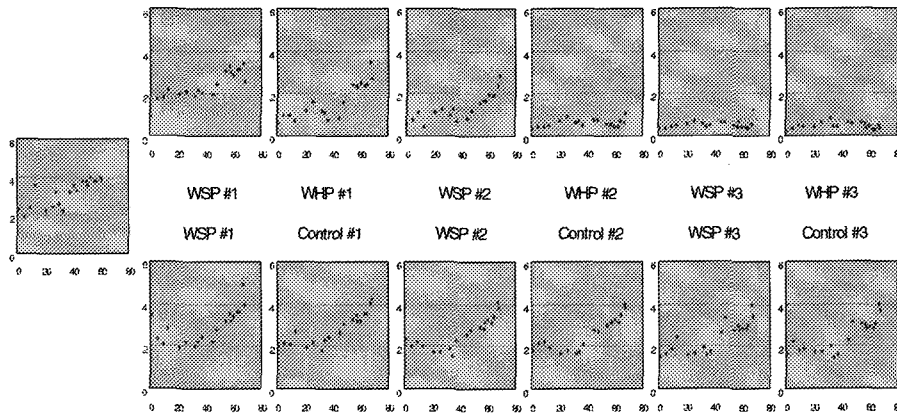


Fig. 8. Changes of the total phosphorus concentration at each unit process in treatment line(x-axis is operational days, y-axis is TP as mg/L).

은 WSP-WHP 시스템으로 영양염류 제거가 원활히 수행되어 식물생육에 필요한 영양소가 감소하였기 때문이다. 본 연구에서 구상한 WSP-WHP 배열모형에서 WSP는 자연적인 산소공급원의 기능을 수행하고 WHP는 WSP에서 유입된 조류의 회수 및 질산화-탈질소화를 유도한다는 취지와 일치하였다.

3.7. 탄소원

반복적인 WSP-WHP 시스템에서 2차 처리수에 원래 포함된 NO₃-N과 TKN으로부터 질산화된 양을 합하여 운전기간 동안 평균 약 9.7 mg/L의 NO₃-N(식물세포로 흡수된 25%를 제외하고)가 탈질된 것으로 분석되었다. 탈질에 필요한 탄소원으로는 두가지 가능성이 있다. 첫 번째로 조류, 2차 처리수와 함께 유실된 활성 슬러지 플러와 식물체의 사체와 같은 저층 물질이 WHP의 혐기조건에서 분해되어 탈질에 필요한 탄소원을 방출하며, 두 번째로는 무산소 조건과 혐기성 조건이 형성되는 WHP에서 COD 물질이 완벽하게 생물학적으로 분해가능한 물질로 전환되어 탈질에 필요한 탄소원으로 작용했을 가능성이 있다. 그러나 WSP-WHP 시스템의 경우 일반 기계적인 처리공법과 달리 조류형태의 신생유기물질이 생성되고 동시에 분해되므로 원래 하수처리장 2차 처리수에 존재했던 유기물질과 구분지어 설명하는 것은 어렵다. 운전기간 동안 2차 처리수와 WSP-WHP 공정 최종유출수의 COD에는 차이가 없었다. 따라서 WHP 내부에서 제공되는 혼합액 물질이 탄소원으로 작용했을 가능성이 매우 컸을 것으로 판단된다.

본 처리실험을 종료할 무렵 WHP #1, 2에서 식물체를 회수한 후 WHP 반응조를 혼합한 후 혼합액의 SS를 측정하였으며, WHP #1, 2의 SS 농도는 각각 1,130과 450 mg/L로 나타났다. 혼합액의 구성성분은 조류사체와 활성슬러지, 식물의 뿌리였다. WHP에 존재하는 혼합액 SS 물질이 공급할 수 있는 COD 양을 평가하기 위하여 SS 2 g(건조무게)을 채취하여 20℃ 인큐베이터에서 용출실험을 수행하였다. 이러한 용출실험은 WSP-WHP 내부 생성물에서 공급되는 탄소원으로 탈질이 수행될 수 있는가에 대한 잠재성을

알아보기 위하여 수행되었기에 SS조건(전단력, 입자크기, 종류 등)에 대한 고려는 하지 않았다. COD를 측정된 결과 SS 1 g당 1.85 mg COD/hr의 속도로 용출되었다. COD물질 용출속도를 바탕으로 하루동안 공급 할 수 있는 COD양을 계산한 결과 약 11 g이었다(= 1.85 mg COD/hr × 24 hr/day × 2(WHP) × 0.154 m³ × 790 mg/L(평균 SS) × g/1,000 mg).

한편 WHP #1, 2에서 일일 탈질된 NO₃-N의 양은 1.53 g(= 9.7 mg/L × 0.157 m³/day)으로 내부적으로 공급된 11 g의 탄소가 전량 탈질에 이용되었다고 가정하면 탄소원과 질소의 비율(COD/N = 11/1.53)은 약 7.2이다. 이 수치는 일반 생물학적 질소제거공정과 더욱이 부착성장공정에 가까운 본 연구대상 처리공정을 생각하면 매우 큰 값이다. 이렇게 큰 수치를 나타낸 이유는 WHP에서 내부 공급탄소원을 이용하는 호기성/혐기성 분해와 같은 다른 소비요소를 감안하지 않았기 때문일 것이다.

WHP에서 미생물의 순증식량(YN)을 검토하기 위하여 세포내 10% 질소함유를 가정한 COD/N = 2.86/(1 - 1.134YN) 관계를 이용하여 산출해보았다. WHP에서 미생물의 순증식량 YN을 계산한 결과 0.53이었다. 마찬가지로 이 수치도 일반적인 범위를 벗어나는 다소 큰 수치로 그 이유는 앞서 설명한 바와 같이 같이 큰 COD/N값 때문이다.

단순한 COD 생성량과 요구량의 비교이지만 WSP-WHP 처리시스템은 외부 탄소원 공급 없이 자체적으로 발생하는 탄소원으로 충분히 탈질을 수행 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.8. 인

인의 농도변화는 Fig. 8과 같았다. 두 계열의 반응조에서 인의 거동은 분명한 차이를 보여주고 있는데 WSP-WHP에서 총제거율은 81%이었던 반면에 WSP-DPs에서는 16%에 불과하였다. 이는 WSP-WHS를 통하여 질소, 인 모두를 처리 할 수 있음을 나타낸다.

인의 농도 변화패턴에 대해서는 다른 생물학적 영양염류 제거공정과 유사한 해석이 가능하다. WHPs와 DP에서 인 제거 특성을 비교해보면 무산소 조건이 형성되는 WHPs에서 PO₄-P가 방출되거나 곧바로 식물에 섭취된다. 그러나 DPs

에서는 PO₄-P가 방출되더라도 이를 흡수할 식물체가 존재하지 않기 때문에 인 제거 능력이 현저히 저하된다. DP에서 인 제거 기작은 단지 WSPs에서 유입된 조류에 의해 일부 섭취되거나 화학적 침전에 의해 제거되는 정도로 WHPs 식물효과와 비교할 때 매우 미미하다. Fig. 8에 도시된 인 제거 특성을 살펴보면 WSP #1에서 미미한 양이 제거되며 WHP #1에서부터 제거되는 특성을 보이는데 이는 WHPs에서 형성되는 무산소 조건이 인 방출에 유용하게 작용한다고 판단된다.

그러나, 식물의 수확이 없이 운영된 WHP에서 81%의 인이 식물흡수 만에 의해 제거된다는 것을 받아들이기에는 어렵다. 이러한 높은 처리효율은 2차처리수를 좀 더 큰 규모로 수행된 단일 WSP-WHP 연구 결과와 잘 부합된다.⁷⁾ 식물흡수 이외의 제거가능 메카니즘은 화학적인 침전과 열악한 영양조건에서 히아신스의 뿌리표면에 형성되는 젤라틴 형태의 Extra-cellular 물질에 의한 흡착을 생각할 수 있다. 이들 물질에 대한 존재는 현미경 사진으로 보고 되었으나,⁵⁾ 이들 물질의 화학적구성, 역할과 기능은 아직 알려지지 않았다. 따라서 장래에 이들 물질에 대한 심도있는 연구가 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 WSP와 WHP를 연속적으로 교차 연결하여 자연시스템에 의해 반복 조성되는 호기성-혐기성 조건에서 생물학적 질소의 제거 가능성과 그 특성에 관한 연구 결과를 제시하였다. WSP는 광합성에 활동에 의한 조류증식과 산소공급의 기능을 담당하였다. 또한 증식된 조류는 후속공정인 WHP에서 무산소 조건의 형성에 기여하면서 그것 자체가 탈질에 필요한 탄소원의 역할을 맡는 것으로 밝혀졌다. 그러나 오염물질의 제거기능은 미미하였다. WHP에서 부레옥잠의 잎과 줄기는 햇빛을 차단하는 기능을 수행하였으며, 산화지 유출수가 유입되는 선단지역과 수류의 중심지역을 제외하고는 국부적으로 광범위한 무산소 조건이 형성된 것으로 판단된다. BNR 공정에서 기계적인 방식으로 가능했던 산소의 조절이 자연적으로도 모의될 수 있음이 입증되었다. 전반적인 질소 제거율은 WSP-WHP에서 86%, WSP-DPs에서 36% 제거되었다. 질소는 대부분 부레옥잠조에서 질산화-탈질이 동시에 수행되면서 제거되었

다. 탈질을 위한 탄소원은 WHP 하부수층의 퇴적물에서 발견되었다. 또한 WSP-WHP에서 인제거 효율은 81%인 반면 WSP-DPs는 단지 16%로 WSP-WHP system이 인 제거에도 매우 효과적이었다.

사 사

본 연구결과는 한국과학재단 목적기초연구(RO2-2001-01270)지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Crities, R., Tchobanoglous, G., "Small and decentralized wastewater management systems," McGraw-Hill(1998).
2. Harrelson, M. E., Cravens, J. B., "Use of microscreens to polish lagoon effluent," *Journal of Water Pollution Control Federation*, **54**(1), 36~42(1982).
3. Wolverson, B. C., McDonald, R. C., "Water hyacinths for upgrading sewage lagoons to meet advanced wastewater treatment standards, part 1." NASATM-X7279. National Space Tech. Lab., National Aeronautics and space Admin., Bay St. Louis, Miss(1979).
4. Digns, R., "Upgrading the stabilization pond effluent by water hyacinth culture," *Journal of Water Pollution Control Federation*, 833~845(1978).
5. Kim, Y., Kim, W., "Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentrations in the effluent from waste stabilization ponds," *Water Res.*, **34**(1), 3285~3294(2000).
6. Kim, Y., Giokas, D., "Design of the water hyacinth ponds for removing algal particles from waste stabilization ponds," *Water Sci. Technol.*, **48**, 11~12, in Pres(2003).
7. Kim, Y., Jeong, H. Y., Lee, J., "Evaluation of the nitrogen reduction in water hyacinth ponds coupled with waste stabilization ponds," *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, **5B**, 23, 425~436(2003).
8. Papadopoulous, A., Parissopoulous, G., Papadopoulous, F., "Proceedings of the 7th International Conference on Environmental Science and Technology," Hermoupolis Syros, 3-6 September, 2001, Vol. C, 369~376.