

# 바이오산업폐수처리수의 재이용을 위한 hybrid 인공습지 시스템의 적용가능성 연구

신재석\* / 김성철\*\* / 조광주\*\*\* / 최충호\*\*\*\* / 최인욱\*\*\*\*\* /  
박정자\*\*\*\*\* / 박구현\*\*\*\*\*

## Application of the Hybrid Constructed Wetland for a Reuse of the Effluent from Bio-industrial Wastewater Treatment Plant

Shin, Jae-Suk\*\* / Kim, Sung-Chul\*\* / Cho, Kwang-Ju\*\*\* / Choi, Choong-Ho\*\*\*\* /  
Choi, In-Wook\*\*\*\*\* / Park, Jeong-Ja\*\*\*\*\* / Park, Goo-Hyeon\*\*\*\*\*

**요약** : 생물산업 연구단지에서 발생하는 폐수를 처리하기 위해 건설된 폐수처리장의 3차 처리시설로 hybrid 인공습지 시스템을 적용하여 최종 방류수의 재이용가능성을 평가하였다. 폐수처리를 위한 1차 처리공정은 화학적 처리(약품 응집)이며, 2차 처리공정은 생물학적 처리(표준활성슬러지법)로 구성되어 있다. 3차 처리시설로서 hybrid 인공습지는 자연통풍시스템이 구비된 호기성 인공습지와 혐기/무산소성 인공습지가 순차적으로 연결된 시스템이다. Hybrid 인공습지로 유입되는 2차 생물학적 처리공정의 처리수 농도는 BOD, SS, T-N 및 T-P의 평균 농도가 각각 53mg/L, 48mg/L, 34mg/L 및 3mg/L로 나타났으며, hybrid 인공습지에서의 최종방류수의 BOD, SS, T-N 및 T-P의 평균농도는 각각 2.3mg/L, 1.2mg/L, 7.95mg/L 및 0.83mg/L로 나타나 하수처리수의 재이용권고수질기준과 비교할 때 조경용수나 세척용수 등의 용도로 직접 재이용이 가능한 수질이 확보될 수 있었다. Hybrid 인공습지는 반응조를 호기 및 혐기/무산소 조건으로 기능화 함으로서 높은 효율로 오염물질이 제거될 수 있었으며, 이러한 결과로부터 다양한 하수 및 폐수의 3차 처리시설로서 활용이 가능한 것으로 평가되었다.

**핵심용어** : hybrid 인공습지, 방류수 재이용

**Abstract** : The hybrid constructed wetland(HCW) as tertiary treatment process of a bio industrial wastewater treatment plant was employed to estimate applications for the reuse of final effluent. Raw wastewater was sequently treated through chemical and biological treatment processes and the biologically treated water was flowed into the HCW. The HCW system was composed of two constructed wetlands connected in series; The one is the aerobic constructed wetland with natural air draft system whose driving force for air supply was the difference between the temperature of the air inside the wetland and the ambient air, and the other is the anaerobic/anoxic constructed wetland. Average influent concentrations of BOD, SS, T-N and T-P in the HCW were 53mg/L, 48mg/L, 34mg/L and 3mg/L, respectively. After being treated at HCW, final effluent concentrations of BOD, SS, T-N and T-P were 2.3mg/L, 1.2mg/L, 7.95mg/L and 0.83mg/L, respectively. Referring to a reuse standard for a sewage wastewater, final effluent could sufficiently be reuse as landscaping, washing or agriculture water. HCW system with the

+ Corresponding author : gust033@lycos.co.kr  
\* (주)성일엔텍 · 이학석사  
\*\* (주)성일엔텍 · 공학박사  
\*\*\* (주)성일엔텍 · 공학석사  
\*\*\*\* (주)성일엔텍 · 공학석사  
\*\*\*\*\* (주)성일엔텍 · 공학석사  
\*\*\*\*\* (주)성일엔텍 · 공학석사  
\*\*\*\*\* (주)성일엔텍

aerobic/anaerobic combined constructed wetland could be achieved a high removal efficiency because each constructed wetland was functionalized to be removed efficiently organics, nitrogen and phosphorus. HCW system could be estimated to be successful application as tertiary treatment process of a various industrial and municipal wastewater.

**Keywords** : Hybrid constructed wetland, reuse of the effluent

## 1. 서 론

물은 어떠한 물질로도 대체할 수 없는 자원이며 생명의 근원이자 인간 생활에 가장 필요한 요소 중 하나이다. 이러한 물이 도시화와 산업화에 따라 물의 양적·질적 부족으로 인해 앞으로 물 공급에 큰 차질이 예상되며, 다가올 물 부족에 대해 인식의 개선과 대책이 시급하다 할 수 있다. 그 대책으로 환경과피를 최소화하고 대체 수자원을 확보하기 위해 방류수의 재이용이 세계적으로 관심을 불러 일으켰으며, 방류수 재이용에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

현재 방류수 재이용은 급속여과법, 활성탄 흡착법, MF/NF/UF/RO와 같은 막분리법, 소독시설이 주를 이루고 있다. 하지만 이들 대부분은 유입유량의 급격한 변화와 기온 등 주변 환경 변화, 유기물 증가 및 감소에 따라 일시적으로 방류수질이 급격하게 나빠지는 문제가 있고, 유입수질의 특성에 따라 방류수 역시 급격한 변화를 나타나게 된다. 또한 재이용 목적으로 볼 때, 초기투자비 및 유지관리비가 상대적으로 고가여서 투자비 회수기간에 상당시간이 소요되고, 재이용의 활성화를 어렵게 만드는 요인이 되고 있다.

인공습지는 수질을 정화하기 위해 인위적으로 조성한 환경 친화적 처리시설을 말하며, 인공습지를 이용한 처리시설은 처리비용 및 유지관리 비용이 적게 든다는 장점과 처리과정이 친환경적이며 습지표면에 갈대, 부들, 창포 등을 식재하여 자연 친화적이며 오염물질 또한 효과적으로 제어하기 때문에 다양한 방법으로 연구가 진행되어 왔다.(Seidel, K. und. Happel, H., 1983; Geller, G. and Thum, R., 1999) 인공습지에 관한 연구는 1970년대부터 소규모의 하수처리에 적용하기

시작한 독일을 비롯한 유럽이 가장 활발하게 진행되고 있으며(Luedritz, V., 2001) 미국의 경우 1990년대 이후 EPA에서 인공습지의 설계에 관한 다양한 보고서가 출간되었고, 이후 오염물질 제거 기작, 흑한지역에서의 인공습지 적용 등에 관한 다양한 연구결과가 발표되었다. 인공습지에 관한 연구는 현재 전 세계적인 관심의 대상이 되고 있으며, 여전히 질소와 인과 같은 영양염류의 제거 기작 및 처리효율 향상과 관련한 연구결과들이 발표되고 있고, 국내에서도 1990년 대 후반부터 다양한 연구가 진행되고 있다.(U.S. EPA, 1994 and 1999; Verhoeven, J.T.A. and Meuleman, A.F.M., 1999)

인공습지는 생활하수나 공장폐수, 축산폐수, 광산폐수 등의 점오염원과 강우유출수, 하천정화와 같은 비점오염원의 처리에도 대단히 효과적인 기술로서 알려져 있다.(Department of land and Water Conservation (DLWC), 1998) 특히, 미국의 경우 하수 및 폐수처리수의 추가적인 3차 처리시설로서 다양한 인공습지 적용결과로부터 인근 하천수질 보전에 큰 기여를 하는 것으로 보고하고 있다. 하지만, 이들 시설의 대부분은 상당히 넓은 부지면적을 소요하는 전형적인 자연습지의 형태를 갖추고 있어 국내의 실정에는 맞지 않는 것이 현실이다.(정동양, 2002; Kaldec, R.H. and Knight, R.L, 1996; 농림부 농업기반공사, 2004)

따라서 본 연구는 J시 바이오센터에서 발생하는 폐수의 재이용을 위해 호기성 인공습지와 혐기/무산소성 인공습지가 조합된 hybrid형 인공습지를 이용하여 재이용시설로서의 적용가능성을 평가하였다. 처리시설의 용량은 50m<sup>3</sup>/일 규모였으며, 기존 인공습지 기술에 비해 부지면적은 약 1/3이 축소된 형태로 국내 실정에 적합하도록 설계되었

으며, 최종방류수는 하수처리수의 재이용권고수질 기준을 적용하여 재이용수로의 활용가능성을 평가하였다.

## 2. 실험 및 방법

본 연구 대상의 폐수처리시설은 용존 유기물질과 일부 영양염류를 제거할 수 있는 시설로 이루어져 있다. 1차 처리시설은 응집침전 및 pH 조절의 화학적 반응을 수반하는 화학처리 공정이며, 2차 처리시설은 표준활성슬러지 공법으로 1차 처리를 거친 오염물질을 생물학적으로 처리한다. 1·2차 처리까지 거친 처리수는 추가적인 유기물과 영양염류 제거를 위해 3차 처리시설인 ‘호기/혐기 조합형 hybrid 인공습지’ 시스템을 거쳐 최종방류가 이루어진다.(Fig. 1)

1차 처리시설에서 사용된 응집제는 Aluminium sulfate였으며, 보조제로 Polymer를 사용하였다. 사용된 약품량은 Jar Test에 의하여 결정되었으며, 응집 후 pH는 NaOH로 조절하여 이후에 침전조에서 고액분리가 되도록 설계되었다. 2차 처리시설인 표준활성슬러지 공정은 제1 및 제2포기조를 거쳐 오염물질을 제거한 후 2차 침전조에서 분리된 상등수가 3차 처리시설인 호기/혐기 조합형 hybrid 인공습지로 직접 유입되도록 하였다.

3차 처리시설로서 hybrid 인공습지는 호기성 인공습지와 혐기/무산소성 인공습지가 순차적으로 연결되어 유입수가 차례대로 흐르도록 되어 있다. 호기성 인공습지는 수직 및 수평 통기관의

자연통풍시스템이 설치되어 반응조 내부와 외부 기온과의 온도차에 의한 대류현상으로 공기가 공급되도록 설치되었다. 호기조의 상부면적은 210m<sup>2</sup>, 깊이 1.2m로 설치되었으며, 내부에는 굵기가 다른 골재 및 여과사(15~25mm:0.4m, 8~15mm:0.2m, 2~5mm:0.6m)로 채워져 있으며, 표층의 공극 폐색을 막기 위해 2개열로 구분하여 일정주기로 교호운전을 실시하였다. 또한 호기조로 유입되는 2차 처리수는 유입수의 균등분배를 위해 설치된 분배관을 통해 호기조 표면으로 공급되며, 수직흐름방식에 의해 처리되어 유기물의 제거, 질산화(nitrification)와 인의 제거가 가능하도록 되어 있다.

호기조 후단부의 혐기/무산소성 인공습지는 추가적인 오염물질 제거와 질산성질소의 탈질이 주로 일어나도록 설계되었으며, 제1혐기/무산소조는 상부면적 150m<sup>2</sup>, 깊이 2.0m 제2혐기/무산소성 인공습지는 상부면적 70m<sup>2</sup>, 깊이 0.6m로 전체 수평흐름방식에 의해 처리되도록 하였다.(성일엔텍, 2003)

본 연구 대상 시설은 J시 바이오센터 내 폐수처리시설의 후처리 시설로 시공된 실증 시설이며, 혐기/무산소성 인공습지의 최종방류수로 후처리시설 성능 및 재이용 가능성을 판단하였다(Fig. 2). 2008년 1월부터 2008년 12월까지 12개월간 각 단계별로 BOD, COD, T-N, T-P, 대장균군은 1회/주, pH, DO, SS, 탁도, 냄새는 매일, ABS는 1회/월 수질오염 공정시험법 및 먹는 물 수질공정

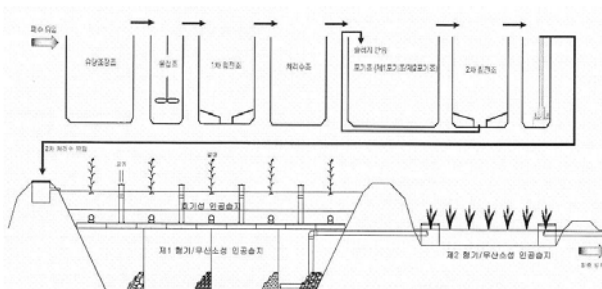


Fig. 1. A schematic diagram of the wastewater treatment plant.



Fig. 2. Photograph of the bio-industry wastewater treatment plant.

Table 1. Changes in concentrations at a each treatment unit process

	BOD(mg/l)	SS(mg/l)	T-N(mg/l)	T-P(mg/l)
Raw wastewater	517 (75.6~2426.0)	335 (78.2~976.5)	86.58 (17.216~426.354)	20.90 (7.161~67.932)
After chemical treatment	211 (65.4~368.7)	134 (60.6~210.8)	68.29 (16.954~105.786)	5.91 (1.698~11.032)
After biological treatment (influent of hybrid C.W.)	53 (32.4~108.5)	48 (18.0~89.4)	33.92 (10.261~61.484)	3.30 (1.517~8.016)
Effluent of hybrid C.W.	2.3 (1.0~3.5)	1.2 (0.6~2.2)	7.95 (3.978~15.842)	0.83 (0.401~1.254)

시험법에 따라 수질분석을 실시하였으며 재이용 가능성은 ‘용도별 하수처리수 재이용 수질권고기준’을 판단 기준으로 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

본 실증시설의 평가기간 중 유입유량은 0~82.2m<sup>3</sup>/day로 나타났다. 폐수처리시설로 유입되는 J시 바이오센터의 입주업체의 특성상 지속적인 제품생산보다 주문 또는 시제품 생산이 많아 설비 가동시간이 제한적 일 수밖에 없기 때문에 유량 및 부하변동이 극심한 것으로 판단되었다.

Table 1에 나타난 바와 같이 폐수처리시설로 유입되는 원 폐수의 평균농도는 BOD 517mg/l, COD 378mg/l, SS 335mg/l, T-N 86.58mg/l 및 T-P 20.90mg/l로 나타났다. 특히, 운전기간 동안 건강기능성 식품이나 의약품 기초원료 제조시에는 일시적으로 고농도의 폐수가 유입되었으나, 유량 조정조가 충격부하를 완충해줄 수 있는 것으로 나

타나 일반적인 폐수처리시설에서와 같이 충분한 유량조정조의 확보가 필요한 것으로 나타났다. 또한, 1차 처리공정인 화학처리에서의 오염물질 제거는 과도한 농도변화에 따른 2차의 생물학적 처리공정에 미칠 수 있는 영향을 최소화시켜 줄 수 있는 것으로 나타나 전반적인 처리시설의 운영안정성에 매우 중요한 것으로 평가되었다. 특히, 응집처리로부터 고농도의 인이 높은 효율로 제거될 수 있어 영양염류의 처리에 있어서도 효율성을 제 공하였다. 표준활성슬러지 공정을 거친 처리수의 BOD 농도는 53mg/L로 1차 및 2차 처리를 통해 89.7%가 제거될 수 있었으며, COD, SS의 제거효율은 각각 81.9%, 85.6%였고, T-N, T-P의 제거효율은 각각 60.8%, 84.1%로 나타났다. Table 1에서 나타난 바와 같이 방류수질은 직접 배출하기에는 높은 수질로 추가적인 처리가 필요한 것으로 판단되었고, 본 연구에서는 3차 처리로 호기/혐기 조합형 hybrid 인공습지에서 추가로 처리하여 최종방류수의 수질을 평가하였다.

Table 2. The reuse standard of effluent from sewage treatment plant.(환경부, 2007)

	pH	SS (mg/l)	BOD (mg/l)	DO (mg/l)	탁도 (NTU)	냄새	색도	대장균 군수(개/100ml)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	ABS (mg/l)
Amenity water	5.8~8.5	<6	<3	>2		미불쾌	<5	불검출	<10	<1	<1
Maintenance Water	5.8~8.5			<2		미불쾌	<20	<1000		<1	<1
washing water	5.8~8.5				<2	미불쾌	<20	불검출			

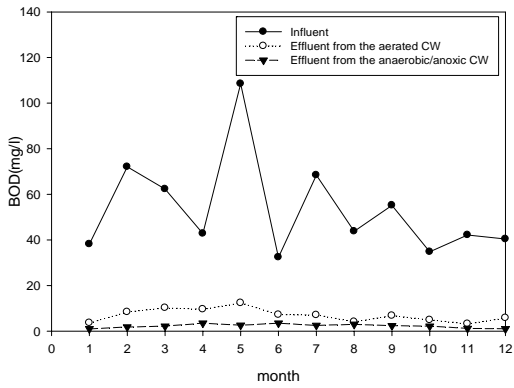


Fig. 3. Changes in BOD5 concentration in the hybrid constructed wetland

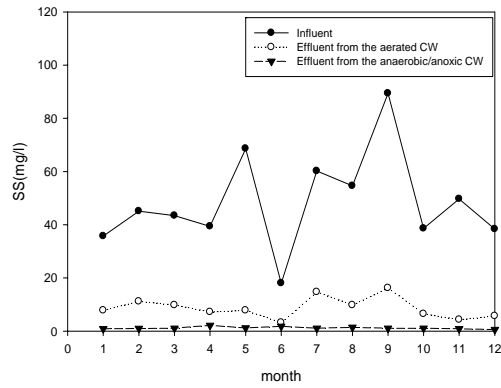


Fig. 4. Changes in SS concentration in the hybrid constructed wetland

Fig. 3 및 Fig. 4는 hybrid 인공습지에서의 BOD 및 SS의 농도변화를 나타낸 것이다. 유기물의 제거는 호기성 인공습지에서 주로 일어난 것으로 평가되었는데, 이는 자연통풍시스템에 의한 공기공급이 원활하게 일어나 생물학적 처리가 주로 진행되었음을 확인시켜주는 결과였다. 실제 평가 결과 2차 처리수의 DO 농도는 평균 1.0mg/L 수준이었으며, 호기조 처리수의 DO 농도는 1.8~3.9mg/L로 나타났으며, 유기물의 생물학적 산화에 필요한 산소가 충분히 공급될 수 있는 것으로 평가되었다. 본 호기성 인공습지에서의 유기물 제거는 주로 생물학적 산화와 여과 및 흡착공정의 물리적 처리과정에 의해 제거되어지는 것이었으

며, BOD 및 SS의 제거효율은 평균 87.0 % 및 82.1 %였다.

호기성 인공습지를 거친 폐수는 순차적으로 호기조 하단부에 위치한 제1혐기/무산소성 인공습지로 유입되어지는데, 이 때 잔류되어 있는 유기물은 혐기/무산소성 인공습지에서의 생물학적 탈질을 위한 탄소원으로 이용되는 등 추가적인 유기물의 제거가 진행되어진다. 전체 hybrid 인공습지를 거친 최종 방류수의 BOD 및 SS의 평균 농도는 각각 2.2mg/L 및 1.2mg/L로 운전기간 동안 안정적인 방류수질을 확보할 수 있었으며, 다양한 용도로의 재이용이 가능한 재이용수가 확보될 수 있음이 확인되었다.

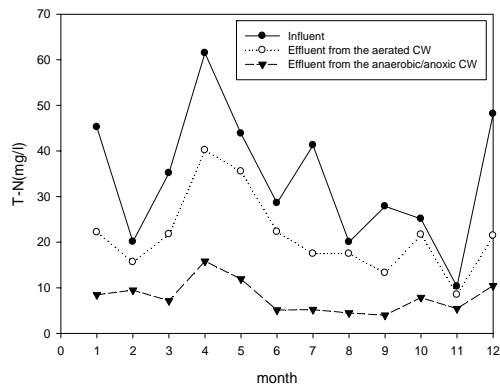


Fig. 5. Changes in T-N concentration in the hybrid constructed wetland

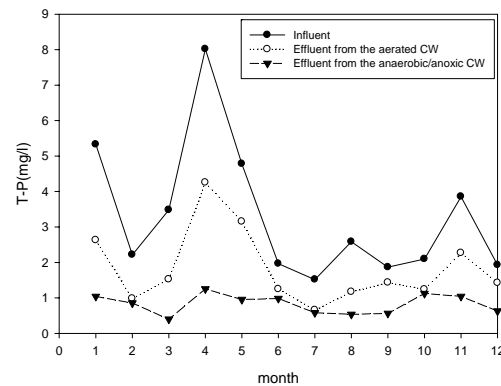


Fig. 6. Changes in T-P concentration in the hybrid constructed wetland

Fig. 5는 hybrid 인공습지에서의 T-N 농도변화를 나타낸 것으로, 유입수의 T-N 농도는 10.261~61.484mg/L(평균 33.92mg/L)이다. 주목할 점은 호기성 인공습지에서 약 20~30% 수준의 T-N 제거가 일어났다는 것인데, 이는 호기성 인공습지의 부분적인 무산소 영역에서의 생물학적 탈질과 함께 유입수 중에 포함된 암모니아성 질소 및 질산성 질소의 식물에 의한 직접 흡수나 골재에 의한 흡착 등에 의한 것으로 판단된다. 추가적으로, 혐기/무산소성 인공습지에서는 호기성 인공습지 처리수 중의 잔류 유기물과 운전초기에 흡착된 유기물 및 제2혐기/무산소성 인공습지 상부에 식재된 식물의 고사과정에서 유입되는 다양한 유기물을 탄소원으로 이용하여 생물학적 탈질 반응이 진행되어 최종방류수의 T-N 평균 농도는 7.95mg/L로 나타났다.

T-P의 경우 3.30mg/L의 농도로 유입되어 평균 0.83mg/L의 농도로 최종 방류되어 74.9%의 제거효율을 나타내었다(Fig. 6). 유입수 중의 T-P 성분은 골재에 의한 여과 및 흡착에 의해 일부 제거되어지고 골재 중에 포함된 양이온( $Ca^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ )과의 화학적 결합에 의하여 불용성 염을 형성하는 과정으로 인해 제거되어진다.

T-N과 T-P의 경우 일부 방류수에서는 하수처리수 재이용권고기준(Table 2)인 10.0mg/L 및 1.0mg/L를 초과하는 경우도 나타났으나, 단순한 추가처리공정만으로도 거의 대부분의 재이용수에 사용가능한 것으로 나타났다. 또한, 현재 방류수 질로서도 청소용수, 세척용수 등은 충분히 재이용할 수 있을 것으로 판단되었으며, 농업용수의 경우 추가적으로 중금속 분석이 필요하였다.

그래프에는 나타내지 않았지만, 탁도는 평균 0.8NTU로 나타났으며 하수처리수 재이용권고기준인 2NTU를 초과하는 경우는 없었으며, ABS는 평균적으로 유효측정농도인 0.02mg/l 이하로 측정되었다. 또한, 본 처리시설에서는 대장균군의 제거를 위한 소독시설은 설치되지 않았지만, 연구기간 동안 대장균군은 30개/mL 이하로 불검출에 가까운 수준을 유지할 수 있었다. 대장균군의 제

한을 받게 되는 재이용수의 경우에는 자외선 소독 시설이나 전해소독시설과 같은 소독설비의 추가공정을 통해 양질의 방류수 확보가 가능할 것이다.

이상에서의 연구결과와 같이 바이오산업에서 발생하는 폐수의 후처리 시설로서 호기/혐기 조합형 hybrid 인공습지는 후처리시설 또는 재이용처리시설로서 충분한 적용가능성이 있는 것으로 나타났다. 유입원수의 특성이나 1차 및 2차 처리시설의 공정선택에 의해 범용적인 적용가능성에 대해서는 이견이 있을 수 있으나, 기존의 인공습지보다 고효율의 처리가 가능한 hybrid 인공습지는 오염물질의 고도처리를 위한 각 반응조의 기능이 세분화 되어 있고, 비교적 긴 수리학적 체류시간(HRT)의 확보를 통해 부하변동에 보다 안정적으로 대처할 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

#### 4. 결 론

바이오산업 폐수처리장의 후처리 시설로 호기/혐기 조합형 hybrid 인공습지 시스템을 적용하여 재이용가능성을 평가하였다. 최종방류수의 BOD, SS, T-N 및 T-P의 평균농도는 각각 2.3mg/L, 1.2mg/L, 7.95mg/L 및 0.83mg/L로 하수처리수의 재이용권고수질기준과 비교할 때 조경용수나 세척용수 등 다양한 용도로의 재이용이 가능한 수질의 확보가 가능하였다.

친수용수, 유지용수 등의 목적을 위한 재이용수는 T-N 및 T-P의 기준이 각각 10.0mg/L 및 1.0mg/L로서 전체 운전기간 중 대부분의 기간에 별도의 추가처리 없이 만족할 수 있는 것으로 나타났다. 일부 기준이 초과하는 경우도 발생하여 상시 안정적인 재이용을 위해서는 추가 처리공정을 고려해야 할 것으로 나타났다.

본 연구의 호기/혐기 조합형 hybrid 인공습지는 유기물 및 영양염의 고도처리를 위해 인공습지를 기능화함으로써 고효율의 처리가 가능한 것으로 나타나 다른 폐수처리수나 하수처리수의 재이용시설로도 활용이 가능한 것으로 평가되었다.

## 참 고 문 헌

1. (주)성일엔텍, 자연친화형 무동력 농어촌 하수처리장의 상용화 기술개발. 환경부, pp. 97-98, 2003.
2. Seidel, K. und. Happel, H., Limlogiein Stichworten(IV), Kleine Pflanzenkläranlagen. Wasserkalender, 17, jg. Erich-Schmidt-Verlag, Berlin, 1983.
3. U.S. EPA, Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: A technology assessment, Report EPA/832-R/93/001, Washington, D.C., 1994.
4. Kaldec, R.H. and Knight, R.L., Treatment wetlands, 1996.
5. Geller, G. and Thum, R., Langzeitbetrieb von Pflanzenkläranlagen: Stoffanreicherung und Betriebsstabilität, Wasser Boden vol. 51, pp. 39-43, 1999.
6. Verhoeven, J.T.A. and Meuleman, A.F.M., Wetlands for wastewater treatment: Opportunities and limitations, Ecological Engineering, vol. 12, pp. 5-12, 1999.
7. U.S. EPA, Free water surface wetlands for wastewater treatment, 1999.
8. Department of land and Water Conservation (DLWC), The constructed wetlands manual, New South Wales, Australia, 1998.
9. 정동양, 자연친화형 농어촌수초-골재 하수처리장 모델개발, G-7 환경공학기술개발사업 최종보고서, 환경부, 2002.
10. 농림부 농업기반공사, 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계관리요령, 2004.
11. Luedritz, V., Eckert, E., Lange-Webber, M., Lange, A. and Gersberg, R.M., Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical and horizontal flow constructed wetlands, Ecological Engineering, vol. 18, pp. 157-171, 2001.
12. 환경부, 하수처리수 재이용 가이드 북, 2007.