

연구논문

강우시 농업 비점오염원 처리를 위한 FWS 인공습지의 적용성 평가

강창국 · 이소영 · 말라 · 김이형

공주대학교 건설환경공학부

(2009년 12월 4일 접수, 2009년 12월 24일 승인)

Application of Free Water Surface Constructed Wetland for Treating the Agricultural Runoff

Kang, Chang Guk · Lee, Soyoung · Marla C. Maniquiz · Kim, Lee-Hyung

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kongju National University, Cheonan, Chungnamdo 331-717, Korea

(Manuscript received 4 December 2009; accepted 24 December 2009)

Abstract

The areas for agricultural purposes in Korea are decreasing every year because of urbanization. However, it is still 17.6% of the total national boundary on 2008. Most of the rice paddy fields are located near the waterbodies which require lots of water during rainy season from May to September. Also lots of nitrate and phosphate chemical fertilizers are spread on the fields every year in order to supply the nutrients for vegetation. The excess nutrients is impairs the water quality of rivers and lakes when it is washed out from the fields. The Korean Ministry of Environment (MOE) adapted the new water quality improvement program, which is the Total Daily Maximum Load, to improve the water quality and to protect the aqua-ecosystems. The constructed wetland is one of the possible ways to treat the agricultural runoff. The constructed wetland on this study area was constructed by MOE in 2007 to evaluate the application of the constructed wetlands. Plant growth continues to increase during the summer until it reaches its highest biomass of 6,032 g/m² in August and September. More researches about sedimentation, vegetation, water balance, etc. were performed to evaluate the removal efficiency, to find the removal mechanisms and to make the guidelines for design and maintenance.

Keywords : Agricultural area, Non-point source, Constructed Wetlands, FWS

1. 서론

국내 4대강 수계에 대한 BOD 오염부하는 2003년 기준으로 42~68%에 이르는 것으로 나타났으며, 하천 및 호소 부영양화의 주 원인물질인 총질소(TN), 총인(TP)을 기준으로 할 경우 그 비율은 훨씬 높아지는 것으로 나타났다(환경부, 2008). 특히 농업지역의 경우 다량의 질소와 인을 작물의 비료로 사용하는 지역으로써 농업지역에 대한 비점오염관리가 필요한 실정이다.

우리나라의 농경지 면적은 1970년 2,298,000 ha였으나, 도시화와 생활수준의 향상으로 인하여 점차 감소하여 2008년 현재 전국 농경지 면적은 1,759,000 ha로 나타났다. 국민 1인당 경지 면적의 경우, 1970년의 7.31아르(are)였으나 2008년에는 3.62아르(are)로 낮아졌다. 전체 국토에 대한 농경지의 비율은 1970년 23.3%에서 2008년 17.6%로 역시 감소하고 있는 추세이다. 이러한 농경지의 감소에도 불구하고 농업지역의 오염부하량은 크게 증가되어 농업용수를 포함한 농촌용수의 수질오염이 가속되고 있다(농업기반공사, 2004). 농촌지역의 오염원은 대부분 비점오염원으로 배출되며, 비교적 저농도이면서 넓은 면적에서 대량으로 유출되는 특성을 보인다(최선화 등, 2006). 우리나라의 경우 전체 농가의 약 40%가 1ha 이하의 경지를 소유하고 있어 경영규모가 매우 영세하나, 제한된 농토에서 생산성을 높이기 위해 많은 노동력과 자본 등을 투입하는 집약적 영농 방식이 행해지고 있다. 이러한 집약적 농업은 종종 수면과 지하수원 오염의 원인이 되며 토양 및 수질의 악화를 야기시키고 있다(Robert and Chevery, 1996; Patoine and Simoneau, 2002). 또한 악화된 토양은 오히려 생산성을 떨어뜨림과 동시에 수계로 탁도 유발물질과 질소(N) 및 인(P)과 같은 영양물질, 병원성미생물 등을 유입시킨다(Troeh *et al.*, 2004). 일반적으로 논에 대한 질소와 인의 표준소비량은 각각 0.9 kg/아르(are), 0.45 kg/아르(are)로 권장하고 있으나 대부분의 농가에서는 고정적인 농사로 인해 토양 내 영양소 고갈, 부정확한 토양검정으로 인한 시비

량의 오차 등과 같은 이유로 과도하게 비료를 사용하고 있다. 특히 논외의 경우 비의 성장을 위해서는 지속적인 물의 공급 및 저류가 필요하므로 대부분의 농경지는 하천 주위에 밀집하고 있으며, 강우 시에 논외의 침수를 막기 위해 물꼬를 뜸으로써 하천으로 영양성분 및 질소, 인과 같은 잉여 영양물질이 하천으로 직접 유입되어 수질오염의 원인이 되고 있다. 이러한 수질오염 원인에 부합하는 처리시설은 미비한 상황이다. 그러나 최근들어 국내외적으로 비점오염물질 관리의 방안으로 자연정화기능의 적용이 용이한 생태학적 방법들이 많이 적용되고 있다.

생태학적 방법들을 이용한 비점오염물질 저감시설로는 식생수로, 식생 여과대, 인공습지, 침투도랑, 저류조 등을 들 수 있다. 이 중 인공습지는 폭넓은 범위의 수리부하에서도 운영이 가능하며, 입자상 물질, 유기물질, 영양물질 등과 같은 오염물질 제거에 효과적이기 때문에 농촌지역의 비점오염원 관리에 유용하다(함중화 등, 2004). 인공습지에서 오염물질을 저감하기 위한 주된 처리작업은 식물에 의한 흡수, 흡착 및 여과 작용과 미생물 등에 의한 생물학적 분해 등을 들 수 있으며 이러한 기작에 의한 처리효과는 도입된 식물 종, 계절, 강우특성, 체류시간 등에 의존한다. 체류시간을 조정하거나 흡착성이 강한 식생을 도입함으로써, 습지 내 오염물질의 잔류시간을 늘리고, 미생물 등과의 접촉을 증가시켜, 오염물질의 제거율을 향상시킬 수 있다(Gregoire *et al.*, 2009). 인공습지는 오염물질의 저감기능과 더불어 농촌 지역에 존재하는 야생 동식물의 서식처 제공, 가뭄철 부족한 농업용수의 제공 및 홍수 조절기능, 주변 경관 개선, 생태적 교육 장소로서의 기능도 기대할 수 있으며, 다른 저감시설에 비하여 유량 및 수질 변화에 대한 적응력이 높고, 설비 및 유지관리 비용이 상대적으로 저렴하다는 장점을 가지고 있어 농업지역의 비점오염 저감 시설로 적합하다.

본 연구의 목적은 농업적 토지이용에 의하여 발생하는 농촌지역의 비점오염물질을 저감하기 위해 인공습지를 조성하여 정화효율을 평가함으로써 농

업지역에 대한 인공습지 적용가능성을 살펴보고 향후 수행 될 비점오염저감방안 및 시설설계를 위한 기초자료를 충분히 확보함에 있다.

II. 연구방법

1. 모니터링 지점

모니터링 지점은 농경지 및 축산단지로부터 발생하는 강우유출수 처리를 위한 비점오염원 저감시설로서 충청남도 공주시에 위치하고 있다. Table 1은 처리대상 유역면적에 대한 토지 이용 현황을 나타내고 있으며, 처리대상 유역면적은 465ha이고 유역면적의 대부분은 임야(338ha)와 논(82ha)으로 구성되어 있다. Fig. 1은 인공습지의 흐름 경로와 샘플링 지점을 나타낸 것으로 강우시 발생된 강우

유출수는 인근 소하천으로부터 유입부의 스크린을 거쳐 인공습지로 유입되어 침강지, 인공습지, 침전지를 거치면서 정화되어 유출부를 통해 다시 하천으로 방류된다.

2. 인공습지 제원

연구대상 지점인 인공습지는 비강우시에도 농업 배수가 유입되며, 강우시에는 농경지 및 축산단지로부터 발생하는 강우유출수를 유입시켜 연속흐름 방식으로 처리할 목적으로 설계되었다. 인공습지는 특성에 따라 침강지, 깊은습지, 얇은습지, 침전지 등으로 구성되어 있다. Table 2는 인공습지의 설계인자를 보여주고 있으며 표면적은 3,282 m², 용량은 2,957 m³이며 설계유량은 0.05 m³/s, 체류시간은 0.7 일로 선정되어 적용되었다. Table 3은 인공

Table 1. Landuses of watershed areas in constructed wetland

Land use	Area (ha)				
	Forest	Wet paddy	Dry paddy	Urban	Total
Constructed wetland	338 (72.7%)	82 (17.6%)	37 (8.0%)	8 (1.6%)	465 (100%)

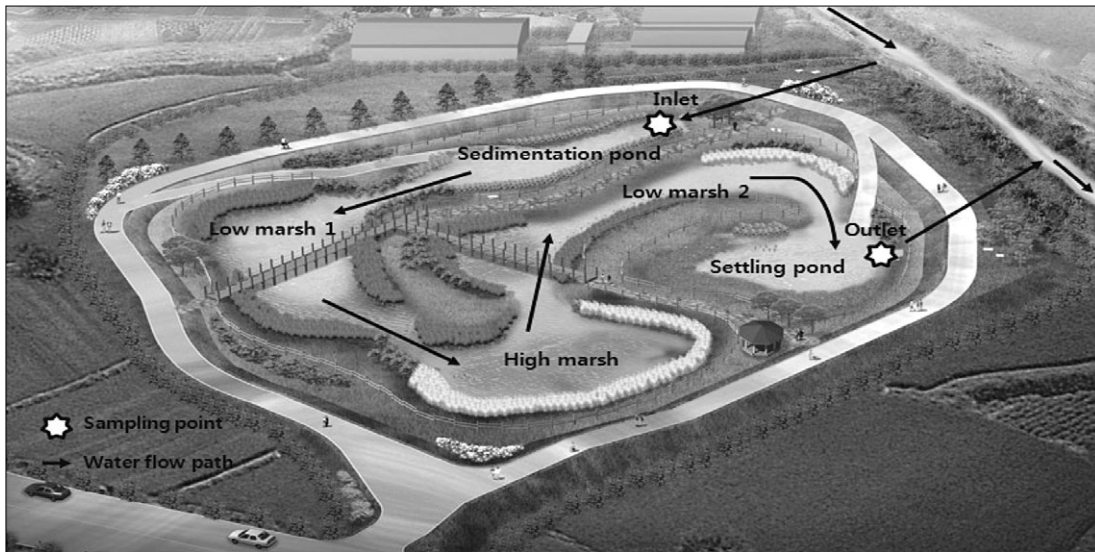


Fig. 1. Sampling points and inflow/outflow path in constructed wetland

Table 2. Specification of constructed wetland

Facility	Surface area (m ²)	Capacity (m ³)	Design flow (m ³ /s)	HRT (day)
Constructed Wetland	3,282	2,957	0.05	0.7

Table 3. Dominant plant species planted in the constructed wetland

Process	Size	No. of plants	Scientific name
Sedimentation pond	5" POT	4,580	<i>Oenanthe javanica</i>
Low marsh	5" POT	7,570	<i>Phragmites japonica</i>
High marsh	5" POT	4,580	<i>Phragmites communis</i>
High marsh	5" POT	2,700	<i>Typha angustata</i>
Settling pond	2~3 Tilling	630	<i>Nelumbo nucifera</i>

습지의 주요도입식물을 각 공정별로 나타낸 것으로 얇은 습지와 깊은 습지에 달뿌리풀과 갈대 등을 식재하여 수질 개선효과를 도모하였다.

3. 시료채취 및 분석항목

강우시 발생하는 강우유출수에 대한 인공습지의 정화능력을 분석하기 위하여 강우유출수가 인공습지 내로 유입되는 지점에 유입부와 유출부에서 수질 시료 샘플링이 수행되었다. 샘플링 시작 시간을 기점으로 초기 1시간 동안은 0분, 5분, 10분, 15분, 30분, 1시간에 수질시료를 채취하였으며 1시간 이후에는 습지 내에 강우유출수의 유입이 끝날 때까지 1시간 간격으로 시료채취가 이루어졌다. 또한 유입부와 유출부의 유량은 자동유량측정장치에 의하여 1분 단위로 측정되었다. 수질시료는 샘플링 완료 직후 실험실로 옮겨져 입자상물질(TSS, Turbidity)과 유기물질(BOD, COD_{Mn}, DOC), 영양염류(TN, NO₃-N, NH₄-N, TP, PO₄-P)에 대하여 수질오염공정시험기준(2008)에 준하여 분석이 실시되었다.

식생조사는 균일한 개체군이 나타나는 지점을 선정하여 30×30 cm² 또는 50×50 cm²의 방형구를 설치하였으며, 방형구내 식생의 개체수를 측정하였다. 이 중에서 평균적인 생육상태를 나타내는 개체를 채취하여 현장에서 생중량을 측정하였으며, 실험실로 운반하여 건중량을 측정하여 단위면적당 식물량(g/m²)을 계산하였다. 또한 인공습지내 식생의 전체면적을 측정하여 월별 변화를 살펴보았다.

4. 유입수 및 유출수의 평균농도 산정

습지로 유입되는 유입수는 체류시간의 영향을 받지 않기에 식 (1)을 이용하여 강우사상별 EMC(Event

Mean concentrations)를 산정하였으나, 유출수의 경우 복잡한 습지내 체류시간의 영향을 크게 받아 강우사상별로 유출수를 분리하기가 불가능하기에 식 (2)와 같이 유량가중 평균농도(Flow-weighted Mean Concentration, FMC)로 평균농도를 산정하였다. 이러한 유입수의 EMC와 유출수의 FMC는 상호 강우유출수의 함량이 다르기에 습지의 효율산정에 직접적으로 활용하는 것이 불가능하다. 습지에서의 물순환을 살펴보면 저류, 침투, 증발, 증산 및 유출 등으로 복잡하며, 습지의 설계과정에서 건기시 습지로부터 지속적인 유출이 발생하지 않도록 설계가 된 경우에는 특히 평균효율 산정이 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 유입수의 EMC와 유출수의 FMC를 보여줌으로써 단순비교가 가능하도록 자료를 제시하고자 한다.

$$EMC (mg/L) = \frac{\text{Discharged mass during an event}}{\text{Discharged volume}} = \frac{\int C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int Q_{TRu}(t) dt} \quad (\text{식 1})$$

$$FMC (mg/L) = \frac{\text{Discharged mass}}{\text{Discharged volume}} = \frac{\int C(t) \cdot Q_{TRu}(t) dt}{\int Q_{TRu}(t) dt} \quad (\text{식 2})$$

여기서 $C(t)$ 와 $Q_{TRu}(t)$ 는 유입 및 유출 지속시간 t 에 대한 오염물질의 농도와 유출율을 의미한다.

III. 결과 및 고찰

1. 모니터링 강우사상 정리

강우시 모니터링은 2009년 5월부터 2009년 9월

Table 4. Event table in monitoring site

Facility	Monitoring date	ADD ¹ (days)	Rainfall (mm)	Inflow duration (hr)	Rainfall intensity (mm/hr)	Total runoff (m ³)
Constructed wetland	2009/05/12	5.0	23.4	11.0	2.14	476.4
	2009/05/21	3.6	32.5	17.2	1.89	335.1
	2009/06/20	9.5	23.0	9.8	2.34	470.9
	2009/08/11	3.0	28.0	9.0	3.11	197.5
	2009/08/20	3.0	32.0	4.5	7.11	203.5
	2009/09/28	5.9	13.5	22.6	0.60	198.5

(ADD¹ : Antecedent Dry Days)

까지 총 6회에 걸쳐 수행되었다. Table 4는 각각의 강우사상에 대한 모니터링 결과를 나타내고 있으며, 선행 건기일수는 3~9.5일, 총강우량은 13.5~32.5 mm를 보였으며 유입지속시간은 4.5~22.6 hr로 나타났다. 평균강우강도는 0.6~7.11 mm/hr로 산정되었고 총 유출량은 197.5~476.4 m³의 범위로 조사되었다.

2. 강우시 유입수 EMC 산정

강우시 모니터링을 통해 채취한 인공습지 유입수의 오염물질별 EMC 산정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 강우량이 30 mm 이상 발생한 5월 21일과 8월 20일의 경우 TSS의 EMC는 각각 71.4 mg/L, 88.9 mg/L로 강우량이 높아질수록 농도가 높아지는 것으로 분석되었으며, 다른 항목에 비해 EMC의 변동 폭이 큰 것으로 나타났다. BOD의 EMC는 4.1~8.4 mg/L로 나타났으며, 대체적으로 강우량

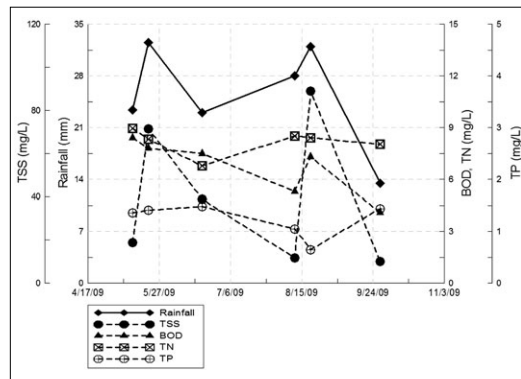


Fig. 2. Inflow EMC

이 높게 발생할수록 농도가 높아지는 것으로 분석되었다. TN과 TP의 EMC는 6.79~8.96 mg/L와 0.65~1.48 mg/L의 범위를 보였으며, 강우량과의 상관성은 TSS와 BOD에 비해 낮은 것으로 분석되었다. 강우시 인공습지 유입수의 농도는 인근 하천인 석성천의 오염물질 농도(Table 5)보다 높은 것

Table 5. Average Monthly Water Quality in Sucksung stream

년/월	TSS (mg/L)	BOD (mg/L)	COD _{Mn} (mg/L)	TN (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	TP (mg/L)
2009/01	8.0	4.8	4.6	4.56	2.17	1.66	0.47
2009/02	16.7	6.1	6.8	5.03	1.01	2.81	0.93
2009/03	34.3	7.5	6.4	4.03	2.01	0.99	0.51
2009/04	10.3	21.0	12.8	5.62	3.08	1.72	1.53
2009/05	25.5	12.6	12.3	6.55	2.11	2.12	0.54
2009/06	13.2	6.9	10.5	4.69	3.42	0.35	0.44
2009/07	49.0	5.0	8.8	2.55	0.99	0.08	0.19
2009/08	31.0	2.0	6.7	3.12	2.30	0.10	0.21
2009/09	31.5	1.2	7.0	1.52	0.99	0.07	0.26
2009/10	6.8	1.4	5.5	3.69	2.85	0.07	0.16
2009/11	6.0	2.1	4.5	4.28	2.70	0.06	0.53

로 분석되었는데 그 이유는 강우시 농업지역으로부터 다량의 토사와 영양염류가 유출되기 때문이다. 습지의 존재는 이러한 강우유출수를 저감하여 인근 하천 수질개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 유출수의 FMC

Fig. 3은 인공습지 유출수의 오염물질별 FMC 산정 결과를 나타낸 것이다. TSS의 FMC 산정결과 4.4~20.6 mg/L의 범위로 나타났으며, BOD의 경우 2.5~3.6 mg/L의 범위를 나타내는 것으로 분석되었다. TN과 TP의 FMC는 각각 4.69~7.1 mg/L, 0.11~0.61 mg/L로 산정되었으며, 모든 오염물질은 강우량이 높게 발생할 경우 농도가 높아져 강우량 발생 패턴과 유사한 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 또한 대부분 유출수내 오염물질의 농도는 유입수에 비해 안정적인 범위를 보였는데, 이는 오염물질이 인공습지를 통과하는 과정에 식생, 침전, 미생물 분해 등에 의하여 저감되는 것으로 판단된다. 이러한 저감작용을 파악하기 위하여 정기적으로 퇴적물의 오염물질 농도를 분석하고 있으며, 식물의 성장상태를 모니터링하고 있다. 인공습지로부터 유출되는 유출수의 농도는 인근 하천인 석성천의 월평균 수질보다 농도가 낮은 것으로 분석되었는데 습지의 존재는 인근 하천 수질개선에 크게 기여하는 것으로 나타났다.

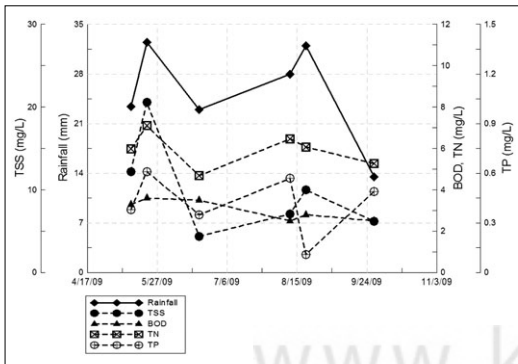


Fig. 3. Outflow FMC

4. 연간 습지내 식물량 변화

인공습지의 식생조사 결과를 바탕으로 Fig. 4에 월별 식물량 변화 및 전체적인 면적변화를 나타내었다. 습지내 단위면적당 식물량은 5월에 215.4 g/m²를 나타낸 이후 8월에 최대 식물량(6,032 g/m²)을 나타내는 것으로 분석되었는데 이는 년중 태양복사에너지가 최대에 달하기 때문이다. 인공습지내 식물의 전체 면적은 8월에 273.0 m²로 증가한 이후 점차 감소하여 12월에 53.5 m²를 나타내는 것으로 분석되었다. 인공습지내 식생은 봄부터 자라기 시작하여 여름철에 급격히 증가하여 가을철부터 점점 고사되어 겨울철에 대부분이 고사된 것을 볼 수 있다. 또한 유입되는 영양염류의 지속적 공급에 의하여 습지내 식물량은 식재된 이후 빠른 시간에 성장하였으며, 생태계 확대에 기여하는 것으로 분석되었다.

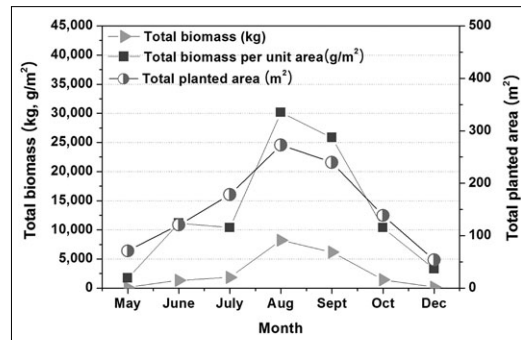


Fig. 4. Total biomass and planted area in the constructed wetland

IV. 결론

농업지역 수계 수질악화의 원인은 주로 비점오염원에 의하여 발생하고 있다. 농업지역 비점오염원의 농도는 비교적 저농도를 보이고 있지만 넓은 면적에서 대량으로 발생되기에 수계의 수질에 영향을 끼치고 있으며 관리에 어려움이 있다. 본 연구에서는 농업적 토지이용에서 발생하는 비점오염물질의 저감을 위하여 자유수면 인공습지의 적용성을 평가하고자 함이며, 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1. 강우시 농업지역에서는 다량의 토사와 영양염

류가 유출되는 것으로 나타났으며, 습지의 유입 및 유출수 농도와 인근 하천의 수질농도를 비교 할 때 습지의 존재는 강우시 인근 하천 수질개선에 크게 기여할 수 있는 것으로 나타났다.

2. 유입수의 EMC와 유출수의 FMC는 상호 강우 유출수의 함량이 다르기에 습지의 효율산정에 직접적으로 활용하기는 불가능하다. 습지에서 물순환을 살펴보면 저류, 침투, 증발, 증산 및 유출 등으로 복잡하며, 습지의 설계과정에서 건기시 습지로부터 지속적인 유출이 발생하지 않도록 설계가 된 경우에 특히 평균효율 산정이 불가능하다. 따라서 향후 강우시 인공 습지의 저감효율을 산정하기 위해서는 강우사상별 변화하는 다양한 체류시간에 대한 연구가 선행되어야 할 것이다.
3. 인공습지내 단위면적당 최대 식물량은 8월이었으며, 이때 식물량은 6,032 g/m²로 분석되었는데, 이는 년중 태양복사에너지가 최대에 달하기 때문이다. 습지내 식물량은 유입되는 영양염류의 지속적 공급에 의하여 식재된 이후 빠른 시간에 성장하였으며 생태계 확대에 기여하는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 농업기반공사, 2004, 농촌지역 오수의 자원순환형 영양염류 저감시스템 개발 (II), 농림부.
- 최선화, 안 열, 김호일, 2006, 인공습지의 수질정화효율 평가, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동총계학술발표회 논문집, 349-356.
- 함중화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 이광식, 2004, 비점오염원 제어를 위한 인공습지의 계절별 처리효율비교, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동총계학술발표회 논문집, 93-96.
- 환경부, 2008, 수질오염공정시험기준, 환경부.
- 환경부, 2008, 2008 환경백서, 환경부.
- Gregoire, C., S. Payraudeau, G. Tapia-Padilla, D. Elsaesser, R. Schulz, J. Lange, T. Schütz, D. Huguenot, T. Lebeau, A. Merli, M. Trevisan, R. Mose, A. Wanko, E. Passeport, J. Tournebize, 2009, Mitigation of agricultural nonpoint-source pesticide pollution in artificial wetland ecosystems. *Environ Chem Lett*, 7, 205-231.
- Patoine, M. and Simoneau, M., 2002, Impacts de l'agriculture intensive sur la qualite' del'eau des rivie' res du Que' bec. *Vecteur Environnement*, 35, 61-6.
- Robert, M. and Cheverry, C., 1996, Les ressources mondiales en eau et en sols: une limitation pour l'avenir. *Cahiers Agricultures*, 5, 43-48.
- Troeh, F. R., Hobbs, J. A., and Donahue, R. L., 2004, Water quality and pollution. In: Soil and Water Conservation: for Productivity and Environmental Protection, Fourth edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, 23-550.
- 최종원고채택 10. 02. 25