

강우유출수 처리목적 인공습지의 강우시 오염물질 저감특성에 관한 연구

박기수 · 우사평 · 김영철*

한서대학교 환경공학과

Reduction Efficiency of the Stormwater Wetland from Animal Feeding-Lot

Kisoo Park · Siping Niu · Youngchul Kim⁺

Dept. of Environmental Engineering, Hanseo University

요 약

가축사육지역으로부터 발생하는 강우유출수 처리를 위해 건설된 인공습지에 대해 2010년 5월부터 2011년 11월까지 수행한 20회의 강우시 모니터링을 통하여 얻은 자료를 분석한 결과 강우시 저감효율은 TSS 88%, BOD 54%, COD_{Mn} 35%, COD_{Cr} 70%, TN 31%, TP 64%이었다. 이론적으로 강우계급의 증가(강우유출량 증가)는 습지의 수리학적 교환비율을 증가시키기 때문에 TSS 저감효율은 감소해야하는데 교환비율이 1에 접근하였을 때 대략 55%의 효율을 달성하였다. 또한 연속적인 강우활동, 개별적인 강우사상의 대소, 강도, 선행건기 일수 등 습지에서는 실험자가 제어할 수 없는 수많은 자연 변수들이 복합적으로 작용하기 때문에 처리효율의 변동이 매우 컸다. 효율에 가장 큰 영향을 미친 요인으로는 수리학적 요인과 함께 조류증식이 성능 불확실성에 크게 기여하였다.

핵심용어 : 강우유출수, 비점오염, 인공습지, 저감효율, 조류증식

Abstract

Stormwater wetland targeted to treat the rainfall runoff from cow feeding-lot basin has been monitored from May 2010 to November 2011. Reduction efficiency estimated based on 20 rainfall event monitoring was 88%, 54%, 70%, 31%, and 64% for TSS, BOD, COD_{Cr}, TN, and TP, respectively. Theoretically, as rainfall depth increases, hydraulic exchange ratio has to be increased. When the exchange ratio approaches to 1 (usually design goal), TSS reduction efficiency was estimated about 55%. Uncertainty in reduction efficiency of the stormwater wetland is normally very high due to the continuous rainfall activity, its magnitude and intensity, antecedent dry days, and other natural variables which can not be controlled by experiment conductors. In this study, predominant affecting variables was found to be hydraulics caused by consecutive rainfall events having different intensity and algal growth during dry days.

Keywords : Algal growth, Rainfall activity, Reduction efficiency, Stormwater wetland

1. 서론

과거 우리나라에서는 수계의 물 환경개선을 위하여 점오염원을 집중적으로 처리하는 정책을 시행한 결과 점오염원으로부터의 오염물질 유달량을 크게 감소시켜 괄목할 만한 수질향상을 달성하였다. 그러나 강우시 불특정 지역에서 배출되는 비점오염원을 제어하지 않고서는 장래목표 수질달성에 한계가 있음을 인지하고 환경부에서는 전국 비점오염원 현황 및 수계별 비점오염원의 유출량을 조사하였고 그 결과 수계로 유입되는 전체 오염물질 양 중 약 50%이상의 오염물질이 비점오염원

에 의해 기여되는 것으로 조사되었다. 또한 전국 농업용 저수지 18,000개소의 82%는 비점오염원이 주 오염원 이라고 보고되었으며(Rural Community Corporation (RCC), 2004), 미국의 Environmental Protection Agency (EPA)에서는 비점오염물질이 하천이나 호수로 유입되는 총 오염부하량의 65%이상이라고 평가되고 있다(EPA, 1989).

따라서 이러한 비점오염원으로부터의 유출량을 삭감하기 위해 정부에서는 비점오염물질을 저감할 수 있는 다양한 형태의 구조적, 비구조적 BMP 시범사업을 수행하고 있으며 특히 환경부에서는 2006년부터 4대강 수계

⁺ To whom correspondence should be addressed.
ykim@hanseo.ac.kr

비점오염저감시설 모니터링 시범사업을 수행하고 있다. 비점오염저감시설은 자연형 시설과 장치형 시설로 구분 지을 수 있다. 자연형 시설에는 인공습지, 식생여과대, 침투형 시설 등이 있으며 장치형 시설에는 여과형, 와류형, 스크린형 시설 등이 있다. 각 시설별 토지이용은 도로, 주택단지, 임야, 축산단지, 농지 등으로 구성되어 있으며 각 시설의 과학적인 저감효율 검증을 위해 다양한 연구가 이루어지고 있다.

그 중 인공습지는 침전, 여과, 흡착, 미생물 분해, 식생식물에 의한 정화 등 습지가 보유하고 있는 자연적인 처리능력을 인위적으로 향상시켜 오염물질을 저감하고 지역의 경관적 가치 및 야생 동식물의 서식지로서의 역할을 수행하는 비점오염처리시설이다(Gavin et al., 2006). 동시에 인공습지는 저류기능을 통하여 호우시 발생할 수도 있는 홍수 등 같은 자연재해를 방지하는 기능도 보유하고 있으므로 물리적인 실현가능성이 가장 높은 저감시설 중 하나이다(William J. M. et al., 2000).

인공습지의 종류에는 자유흐름 습지(FWS), 수평지하흐름 습지(HSSF), 수직지하흐름 습지(VSF), 혼합 결합형 습지 등이 있으며 강우유출수, 광산유출수, 생활하수, 산업폐수, 축산폐수 등의 다양한 수처리가 가능한 시설로서 TSS, 유기물질, 영양염류, E.Coil 등의 저감효율이 우수한 시설로 평가되고 있다.

이 중 강우유출수 처리목적의 인공습지의 경우 강우시 급변하는 유입량을 처리할 수 있는 규모로 설계되어야 하며 습지의 구성은 침강지, 깊은 연못, 얇은 연못, 상수지 등으로 구성하여 침강지에서는 고농도의 탁수를 침전기작을 통해 제거하고 깊은 연못과 얇은 연못에서는 탈질 및 질산화, 식물에 의한 정화, 조류의 성장을 통해 유기물과 영양염류를 제거하고 상수지는 유출전 재부유된 오염물질을 제거하기 위해 조성하고 있다.

본 연구에서는 전라북도 정읍시의 한우사육축사가 밀집된 유역으로부터 발생하는 강우유출수 처리목적으로 설치된 인공습지의 성능평가에 관한 연구로 오염물질의 유입특성 및 저감효율을 분석하여 연구대상 습지와 기

준에 운영된 인공습지의 저감효율 비교하고 강우특성에 따른 인공습지의 저감효율 변화를 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 습지

본 연구 대상습지는 전라북도 정읍시 덕천면 도계리에 위치하고 있는 강우유출수 처리목적의 인공습지이다. 정읍 인공습지는 2008년 금강수계 비점오염저감 시범사업의 일환으로 환경부 및 환경관리공단에서 설치한 시설이다. 본 습지에 의한 처리대상 배수면적은 약 64ha로 주요 토지이용은 논 14.8%, 밭 18.8%, 임야 41.8%, 가축사육단지 16.8%, 주택 7.8% 등으로 이루어져 있다. 이 지역에는 대규모 한우축사가 산재하고 있고, 본 인공습지의 설치목적은 가축사육지역에서 발생하는 강우유출수를 처리하는데 있다.

인공습지의 설계 수질처리용량(water quality volume, WQv)은 4,027m³이고 수표면적은 3,085m²이다. 전체 배수면적 대비 습지면적은 약 0.8%로 강우 유출수 인공습지 분류기준에 따르면 포켓습지(pocket wetland)에 해당된다(EPA, 1993). 인공습지의 최선단에 위치하고 있는 전처리 공정인 침강지(forebay)의 용량은 국내 권장기준인 WQv의 10% 할당기준보다 적은 8.7% 수준으로 설치되어 있다(Ministry of Environment (MOE), 2008b).

습지의 비표면적(습지면적/습지용량)은 0.77m²/m³이며, 깊은 습지(deep marsh)의 평균수심은 1.6m, 얇은연못(shallow marsh)의 평균수심은 1.3m로 권장기준 보다 약 2~4배 깊은 수심을 나타내고 있다(MOE, 2008b).

습지의 구성은 유입(inflow) → 침강지(forebay) → 간헐 포기식 습지(aeration pond) → 깊은연못(deep marsh) → 얇은연못(shallow marsh) → 소규모 침강연못(polishing pond) → 유출(outflow) 단계로 구성되어 있으며 Table 1 과 Fig. 1에는 각 공정의 제원 및 구성요소별 사진을 제시하였다.

Table 1. Physical features of the stormwater wetland investigated in this study

Elements	Surface area (m ²)	Depth (m)	Capacity (m ³)	Percent capacity (%)
Forebay	288	1.2	351	8.7
Aeration pond	662	1.1	708	17.6
Deep marsh	450	1.6	725	18.0
Shallow marsh	1,436	1.3	1,867	46.4
Polishing pond	249	1.5	373	9.3
Sum	3,085	1.3 (avg.)	4,027	100.0

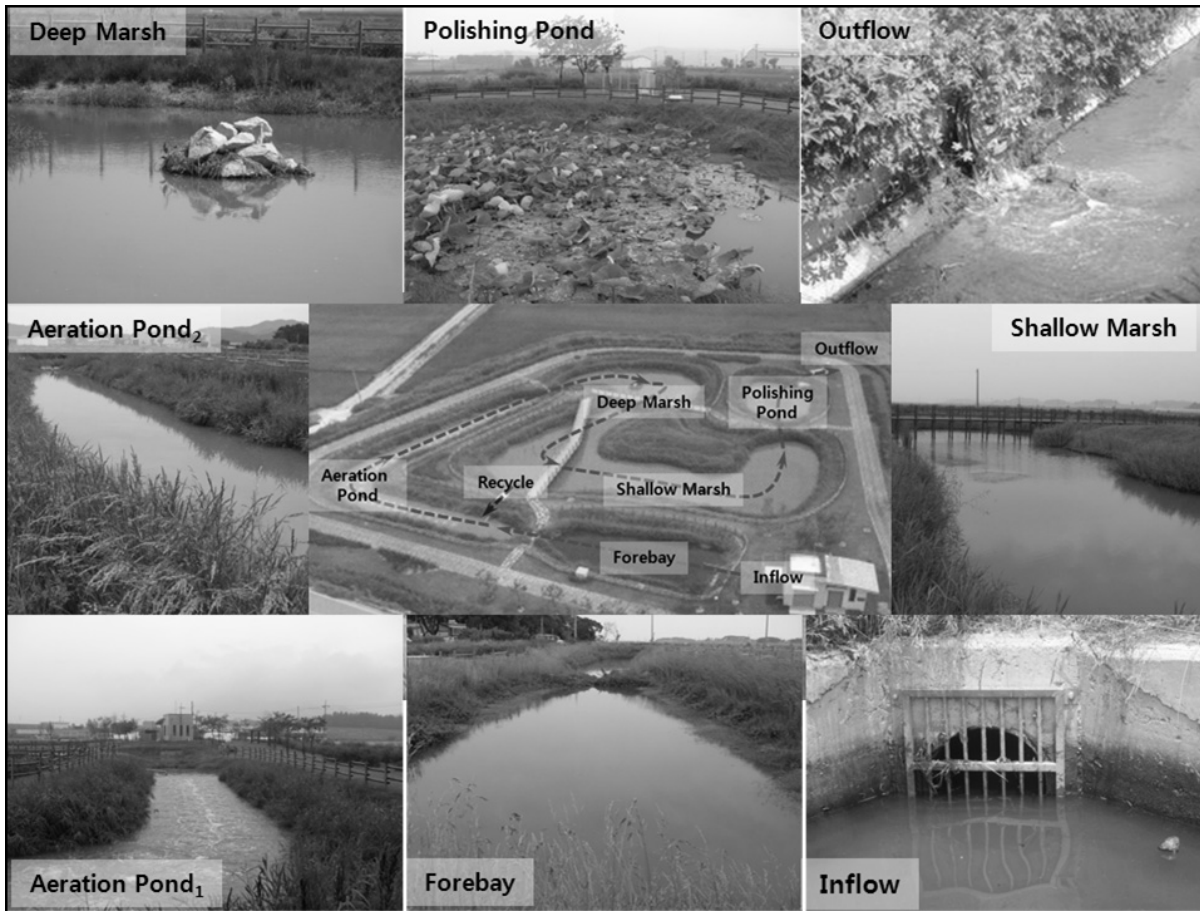


Fig. 1. Elements of the stormwater wetland used for this study

정읍 인공습지에는 다른 강우 유출수 습지와 다르게 간헐적으로 기계적인 포기가 이루어지는 습지와 얇은 습지에서 깊은 습지로 내부순환 펌프(internal recycle pump)에 의해 연속적인 순환이 이루어지도록 설계되어 있는데 이는 습지가 제공하는 자연적인 처리현상을 인공적으로 보완하여 가축사육지역으로부터 발생하는 유기물질 및 질소제거를 촉진시키기 위함이다.

2.2 강우시 모니터링

분석대상 시료는 습지 유입수 및 유출수이며 시료채취 방법은 강우개시와 동시에 수문곡선의 변화를 관찰하여 5~10분 간격으로 6~8개의 시료를 채취하였다. 강우 중기에는 지속적인 수문곡선의 변화 및 강우활동의 변화를 고려하여 침투유량의 도달여부를 확인하고 2~4개의 시료를 채취, 강우가 소강상태로 접어든 강우말기에는 적정시간을 주기로 4~8개의 시료를 채취하였고 유입수의 농도가 강우 직전의 농도와 비슷한 수준에 도달하였을 때 시료채취를 종료하였다. 강우시 시료는 수문곡선의 변화 및 오염물질 농도를 고려하여 최소 12개에서 최대 20개의 시료를 선정하여 분석하였다.

2.3 수질분석

강우시 채취한 시료의 수질분석항목은 수온, pH, 전기 전도도(EC), DO, 탁도, TSS, BOD₅, COD_{Mn}, COD_{Cr}, TN, TP, DTP, TKN, NO₃-N, NH₄-N, PO₄-P, E-Coli (대장균 군) 이었다.

수온, pH, EC, DO, 탁도는 현장 측정항목으로 YSI 63, YSI 30, YSI 5000, Hach 2100Q 모델을 이용하여 측정하였고 그 외의 유기물질 및 영양소 항목은 *Standard Methods(APHA et al., 1998)*와 수질오염 공정시험법(MOE, 1998a)에 의거하여 분석하였다.

2.4 모니터링 강우특성

Fig. 2에는 조사기간 동안의 강우사상 및 모니터링 시점, 누적 강우량을 나타내고 있으며 모니터링은 2010년 5월부터 2011년 11월까지 총 20회의 강우사상에 대하여 모니터링을 수행하였다. 연구수행기간 동안 전체 누적 강우량은 약 3,000mm로 조사되었으며 그 중 720mm의 강우량을 대상으로 모니터링을 실시하였다.

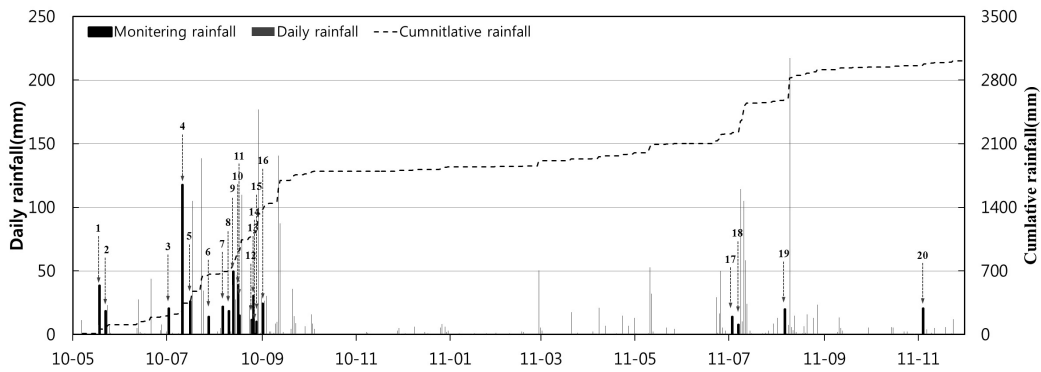


Fig. 2. Distribution of monitoring rainfall event and cumulative rainfall depth

Table 2에는 정읍 인공습지에서 수행된 모니터링 대상 강우사상의 특성을 분석하여 제시하였다. 모니터링 대상 강우사상의 선행 건기일수 ADD는 0.3~11일의 범

위였고 조사대상 사상의 강우량은 0.2~117.5mm로 다양한 강우사상을 망라하였다. 강우지속시간은 2~18시간 범위이었으며 강우강도는 0.1~10.3mm/hr 이었다.

Table 2. Summary of the wet day monitoring

Rainfall events	ADD (days)	Rainfall depth (mm)	Duration (hrs)	Rainfall events	ADD (days)	Rainfall depth (mm)	Duration (hrs)
10-05-18	11	38.5	13	10-08-17	0.5	15	10
10-05-22	3.3	18.5	18	10-08-25	7.5	11.5	3
10-07-02	0.5	20.5	8	10-08-26	0.6	30.5	4
10-07-11	8.0	117.5	18	10-08-27	0.3	0.2	2
10-07-16	4.5	26.5	7	10-08-28	1.5	9.5	12
10-07-28	0.5	14.0	7	10-09-01	0.5	26.5	6
10-08-06	3.0	22.0	7	11-07-03	2.0	14.0	3
10-08-10	2.0	18.5	14	11-07-07	2.0	7.7	2
10-08-13	1.7	49.5	12	11-08-06	5.0	20.0	6
10-08-16	0.5	39.0	14	11-11-04	11.0	20.5	2

2.5 성능평가 방법

2.5.1 EMC 산출

일반적으로 강우시 유역으로부터 발생하는 오염물질의 유출특성으로 사용되는 인자는 강우전 농도, 침투농도, 산술평균농도, 유량가중평균농도, 강우전 부하량, 침투부하량, 산술평균 부하량, 총부하량 등으로 나타낼 수 있다.

그러나 대부분의 경우 강우시 발생하는 총부하량이 각 샘플의 농도 또는 침투부하량 보다 중요성을 갖는데, 그 이유는 유출사상이 비교적 짧고, 강우유출수가 유입되는 수체, 특히 저수지나 댐 내에서는 어느 정도 혼합 현상이 수반되므로 저수지내의 오염물질 농도는 강우로 인한 강우유출수의 농도변화 보다는 총 부하량에 의하여 결정되기 때문이다. 따라서 비점오염물질의 유출은

이와 같이 변화가 심한 특성을 나타내기 위하여 일반적으로 유량의 이산을 고려한 유량가중평균농도를 사용한다(Kim et al., 2003).

본 연구에서는 인공습지에서 수행한 강우시 모니터링 데이터를 이용하여 각각의 강우사상에 대한 EMC 값을 분석하고자 한다. EMC 값의 계산은 (식 1)과 같이 계산할 수 있다.

$$EMC = \frac{\text{총유출량 중 총오염물질중량}}{\text{총유출량}} \quad (\text{식 1})$$

$$= \frac{\sum Q_i C_i}{\sum Q_i}$$

여기서, Q_i = 관측시간 t에서의 유출량(m^3/hr)

C_i = 오염물질 농도 (mg/L)

EMC = 특정강우사상에 대한 평균농도(mg/L)

2.5.2 제거효율법(Efficiency Ratio, ER)

제거 효율법은 (식 2)와 같이 연간 모니터링 된 강우 사상별로 저감효율을 각각 산정한 후(각각의 저감효율 = 해당 강우사상의 총저감부하량/총유입부하량으로 산정) 각각의 저감효율을 모두 더하고 수행한 강우사상의 횟수로 나누는 산술평균(모니터링 된 강우사상별 저감효율의 산술평균)의 방식이다.

모니터링된 강우사상의
 연간오염물질 저감효율 (%) = $\frac{\sum_{i=1}^N RE_i}{N}$ (식 2)

여기서,
 N = 모니터링 강우사상 일수 (Number of event)
 RE_i(%) = 강우사상 i에서의 오염물질
 저감효율 (Removal Efficiency)

이 방법의 경우 모니터링이 수행된 강우사상의 종류에 상관없이 일괄적으로 평균하게 되므로 만족할 만한 대표성을 갖기 위해서는 장기적으로 많은 모니터링이 수행되어야 한다. 일반적으로 점오염원의 경우, 이러한 산술평균을 통한 저감효율 산정이 보편화되어 있으나, 강우사상별 특성에 의해 불확실성이 높은 비점오염원 저감시설에서 장기간 모니터링이 수행되지 않은 상태에서 이러한 산술평균을 적용할 경우 신중을 기할 필요가 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 강우사상별 EMC 분석

Table 3과 Table 4에는 모니터링이 수행된 20회의 강우사상에 대한 강우시 유입수와 유출수의 EMC 분석결과를 나타내고 있다. 유입 평균 EMC 값의 경우 TSS 440mg/L, BOD 17.5mg/L, COD_{Mn} 20mg/L, COD_{Cr} 101mg/L, TN 11.4mg/L, TP 1.4mg/L를 보이고 있으며 유출평균 EMC 값은 TSS 55mg/L, BOD 8.1mg/L, COD_{Mn} 13mg/L, COD_{Cr} 30mg/L, TN 7.9mg/L, TP 0.5mg/L로 나타났다.

강우시 인공습지로 유입되는 오염물질의 농도는 선행 건기일수, 강우강도, 강우량, 토지이용의 변화(경작활동, 시비량)에 영향을 받아 모니터링 시점에 따라 많은 차이를 내었다. 대표적으로 강우시 TSS와 유기물질의 경우 유입수의 유량에 따라 큰 변화를 보였다.

각 오염물질의 변폭을 살펴보기 위하여 변동계수(coefficient of variation, COV)를 분석하였다. 유입수의 변동계수 분석결과 TSS는 0.72, BOD는 0.48, COD_{Mn}은 0.20, COD_{Cr}은 0.42, TN은 0.28, TP는 0.43이었으며 TSS의 변동계수가 가장 큰 것으로 나타났다. 따라서, 유기물질 및 인과 같이 입자상 물질의 영향이 큰 오염물질이 TSS의 영향으로 큰 변동을 보인 것으로 판단된다.

한편, 유출수의 경우 TSS는 0.30, BOD는 0.62, COD_{Mn}은 0.27, COD_{Cr}은 0.41, TN은 0.41, TP는 0.60으로 TSS의 변동계수가 가장 낮은 수치를 보였다. 이는 강우시 습지에서 입자상 물질의 침강 및 여과 등에 의한 물리적 제거작용의 작용에 기인한 것으로 판단된다.

Table 3. Summary of the EMC values in the Inflow

Parameters (mg/L)	Sample No.	Min. (mg/L)	Max. (mg/L)	Avg. (mg/L)	95% C.I.	Standard deviation	C.O.V.
TSS	20	59.9	1053.6	439.7	304~574	315.5	0.72
BOD ₅	20	6.0	36.2	17.5	13.9~21.1	8.4	0.48
COD _{Mn}	20	15.8	34.1	20.0	18.3~21.8	4.0	0.20
COD _{Cr}	20	42.1	203.1	100.5	82.6~118.4	41.9	0.42
TN	20	7.2	20.0	11.4	10.1~12.8	3.2	0.28
DTN	20	3.1	14.4	7.3	6.1~8.6	3.0	0.41
TKN	20	4.4	17.0	8.4	7.1~9.7	3.0	0.36
NH ₄ -N	20	0.4	7.6	2.0	1.3~2.7	1.6	0.80
NO ₃ -N	20	1.2	6.5	3.1	2.6~3.6	1.2	0.39
TP	20	0.3	2.5	1.4	1.1~1.7	0.6	0.43
DTP	20	0.2	1.4	0.8	0.6~0.9	0.3	0.38
PO ₄ -P	20	0.2	1.1	0.5	0.4~0.6	0.2	0.40

Table 4. Summary of the EMC values in the Outflow

Parameters (mg/L)	Sample No.	Min. (mg/L)	Max. (mg/L)	Avg. (mg/L)	95% C.I.	Standard deviation	C.O.V.
TSS	20	27.2	88.4	55.2	48.2~62.2	16.4	0.30
BOD ₅	20	2.2	19.0	8.1	6.0~10.3	5.0	0.62
COD _{Mn}	20	8.2	24.9	13.0	11.5~14.5	3.5	0.27
COD _{Cr}	20	12.6	57.0	30.1	24.9~35.4	12.3	0.41
TN	20	4.0	14.0	7.9	6.5~9.3	3.2	0.41
DTN	20	2.0	9.9	5.1	4.1~6.1	2.4	0.47
TKN	20	1.2	10.7	4.9	3.6~6.1	2.9	0.59
NH ₄ -N	20	0.2	3.7	0.9	0.6~1.3	0.8	0.89
NO ₃ -N	20	0.9	6.2	3.1	2.5~3.8	1.5	0.48
TP	20	0.2	1.4	0.5	0.4~0.7	0.3	0.60
DTP	20	0.1	0.8	0.3	0.2~0.4	0.2	0.67
PO ₄ -P	20	0.03	0.6	0.2	0.1~0.2	0.1	0.50

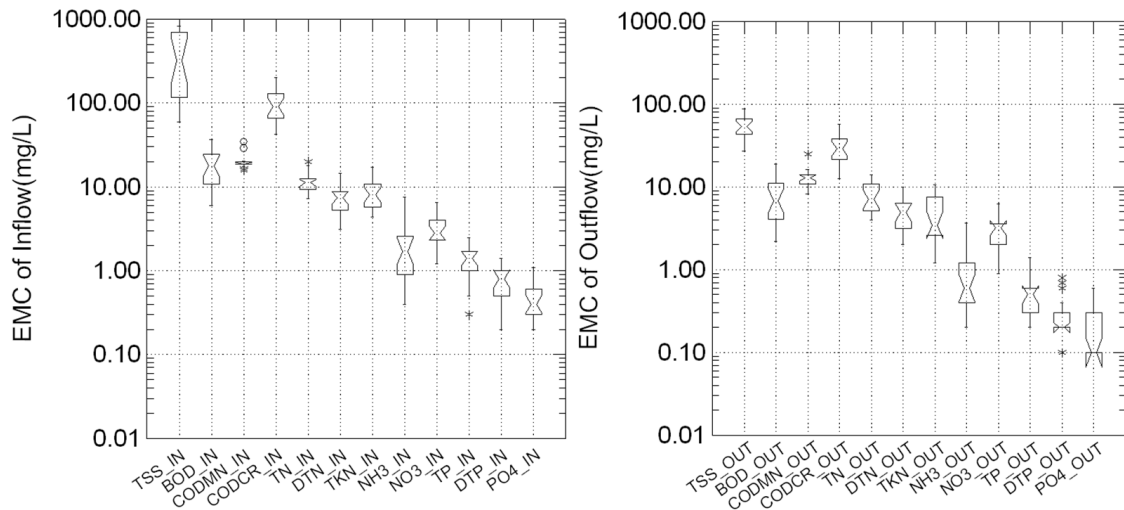


Fig. 3. Statistical analysis of inflow and outflow EMC

Fig. 3에는 전체 모니터링 강우사상의 유입수 및 유출수 EMC 값에 대해 Box Plot을 작성하였다. 그림에 나타난 것처럼 강우유출수에 함유된 오염물질이 습지를 통과하면서 저감되었으며 각각의 수질인자 저감효율은 TSS 87.4%, BOD 53.7%, COD_{Mn} 35.0%, COD_{Cr} 70.0%, TN 30.7%, TP 64.3%를 나타내고 있다.

Table 5에는 환경부 시범사업으로 조성된 경기도 이천시 백사면의 인공습지 유입수와 유출수의 EMC 범위 및 저감효율을 나타내고 있다. 이천 인공습지의 경우 집수면적이 대부분 임야(40%) 및 농촌지역(45%)으로 이루어져 가축사육 축사가 산재한 정읍 인공습지에 비해 유입수의 오염물질 농도가 낮은 특성을 지니고 있다.

Table 5. Reduction efficiency in wet days (Icheon wetland)

Parameters	EMC (Inflow)	EMC (Outflow)	Average reduction(%)
TSS(mg/L)	282.8±305.6	33.4±28.4	84.7
COD _{Cr} (mg/L)	88.6±69.7	28.5±22.3	57.0
TN(mg/L)	9.8±3.1	9.1±3.2	6.1
TP(mg/L)	0.83±0.5	0.23±0.15	68.3

Table 6. Pollutant reduction efficiencies of stormwater wetlands in the U.S.A.

Parameters (mg/L)	Jeoungup stormwater wetland reduction eff.(%)	U.S.A Maryland stormwater wetland [†] reduction eff.(%)	U.S.A Florida stormwater wetland ^{**} reduction eff.(%)
TSS	87.4	65.0	93.0
TN	30.7	22.8	76.0
TP	64.3	39.1	76.0

* Athanas et al., (1991)

** Occoquan Watershed Monitoring Lab and George Mason University, (1990)

정읍 인공습지와 이천 인공습지의 EMC 기반 저감효율을 비교한 결과 TSS와 인(P)의 경우 비슷한 수준의 저감효율을 보이고 있으나 유기물의 경우 약13%, 질소의 경우 약 25%이상 정읍 인공습지에서 우월한 저감효율을 나타내고 있다.

또한, 정읍 인공습지와 이천 인공습지의 유입수와 유출수의 유의성을 알아보기 위해 T-test를 분석한 결과 정읍 인공습지의 P-value는 TSS=0.000, COD_{Cr}=0.000, TN=0.001, TP=0.000이며 이천 인공습지의 경우 TSS=0.004, COD_{Cr}=0.001, TN=0.160, TP=0.000으로 나타났다. 대부분 항목에서 P<0.01수준의 유의한 결과를 나타내고 있으며 이천 인공습지의 TN에서만 P<0.16수준의 유의성을 보였다.

Table 6에는 과거 미국에서 운영된 강우유출수 처리 목적 인공습지와 정읍 인공습지의 오염물질 저감효율을 비교하여 나타내었다. Florida의 인공습지의 경우에는 연중 온화한 기후여건으로 인해 모든 오염물질의 저감효율이 우수한 것으로 보이며 특히 수온에 절대적인 영향을 받는 질소의 제거가 매우 큰 것으로 판단된다. 한편, 우리나라의 기후여건과 비슷한 Maryland 습지와 비교 결과 모든 오염물질에서 정읍 인공습지의 저감효율이 높은 것으로 나타났으며 특히 TP의 제거가 정읍습지에서 탁월하였다.

3.2 강우계급별 EMC 분석

강우계급별 EMC 분석을 통해서 국내 강우의 특성에 따라 오염물질별 유출경향을 파악할 수 있으며, 이를 통해 비점오염 저감시설의 규모 산정시 오염물질별 특정 강우계급을 활용할 수 있는 방안을 제시할 수 있기 때문에 중요하다.

Table 7과 Table 8에는 정읍 인공습지에서 수행된 20회의 모니터링을 대상으로 강우 계급별 EMC 분석을 실시하였다. 평균 유입 TSS EMC의 경우, 10mm 이하의 강우계급에서 280mg/L, 10-20mm의 경우 520mg/L, 20-30mm의 경우 537mg/L, 30mm 이상의 경우 291mg/L를 나타내고 있다. 강우량의 증가에 따라 20-30mm 범위까지 증가 후 30mm이상의 강우계급에서 감소하는 경향이 나타났다.

한편 TSS, 유기물질, 영양염류의 EMC 값과 강우계급과의 상관관계를 분석한 결과 TSS 이외에는 뚜렷한 관계가 없었다. 가축사육단지가 산재한 유역에 설치된 논산 인공습지와 일반 농촌지역에 설치된 나주 인공습지에서 수행된 연구도 강우계급과 특별한 관계없이 유출이 발생하는 것으로 보고되고 있다(MOE, 2011). 한편 토지이용의 형태가 본 연구와 다른 주차장과 간선도로의 강우 유출수의 경우에는 오염물질의 EMC는 강우계급이 높아질수록 감소하는 경향을 보였으며(Lee et al., 2009; Lee et al., 2011), 대부분 10mm이하의 강우 깊이에서 많은 양의 오염물질이 유출되는 것으로 보고하고 있다.

포장지역에서 강우계급이 증가할수록 EMC 값이 감소하는 이유는 강우계급이 커질수록 초기강우에 의해서 대부분의 오염물질이 유출되고 이후 발생하는 후속강우는 유출되지 않고 포장면에 남아있는 오염물질을 크게 희석시켜 유출시키기 때문인 것으로 보고하고 있다. 한편 미국 도시지역 강우유출수 연구(National Urban Runoff Program)결과에 따르면 67개 지점에서 517세트의 자료를 통계 분석한 결과 116개 자료가 신뢰구간 95%에서 유의성을 보였고 대부분 (+)나 (-)관계가 관측되었으나 EMC 값과 강우 깊이 사이에 뚜렷한 선형관계가 없는 것으로 결론짓고 있다(EPA, 1983).

Table 7. EMC analysis in terms of the rainfall size (Inflow)

Rainfall depth (mm)	Parameters (mg/L)	Sample No.	Min.	Max.	Avg.	95% C.I.	Standard deviation
> 10	TSS	3	106.4	408.6	280.4	103.6~457.3	156.3
	BOD ₅		7.8	24.7	13.9	3.3~24.5	9.4
	COD _{Cr}		60.6	159.2	124.7	61.8~187.6	55.6
	TN		10.9	11.3	11.1	10.9~11.4	0.2
	TP		1.6	2.1	1.7	1.4~2.1	0.3
10 - 20	TSS	6	108.9	755.6	520.0	301.1~738.9	273.6
	BOD ₅		17.8	36.2	23.9	18.2~29.5	7.1
	COD _{Cr}		42.1	203.1	116.4	70.5~162.2	57.3
	TN		9.5	20.0	14.3	10.9~17.7	4.3
	TP		0.5	2.0	1.2	0.7~1.6	0.6
20 - 30	TSS	6	124.3	1053.6	536.9	224.2~849.5	390.7
	BOD ₅		6.0	27.9	15.2	7.4~22.9	9.7
	COD _{Cr}		51.5	128.2	94.3	70.7~117.9	29.5
	TN		7.2	12.5	9.7	8.2~11.3	1.9
	TP		1.4	2.5	1.9	1.5~2.3	0.5
30 <	TSS	5	63.9	829.3	291.2	14.4~568.0	315.8
	BOD ₅		10.9	24.8	16.5	11.5~21.4	5.7
	COD _{Cr}		59.5	110.1	81.5	64.5~98.5	19.4
	TN		8.4	12.9	10.2	8.3~12.2	2.2
	TP		0.4	1.3	0.9	0.6~1.3	0.4

Table 8. EMC analysis in terms of the rainfall size (Outflow)

Rainfall depth (mm)	Parameters (mg/L)	Sample No.	Min.	Max.	Avg.	95% C.I.	Standard deviation
> 10	TSS	3	32.2	52.4	40.4	28.4~52.4	10.6
	BOD ₅		2.2	7.8	4.5	1.2~7.8	2.9
	COD _{Cr}		24.3	37.9	33.2	24.5~41.9	7.7
	TN		7.1	10.1	8.1	6.2~10.1	1.7
	TP		0.4	1.1	0.7	0.2~1.1	0.4
10 - 20	TSS	6	35.8	70.3	55.6	44.7~66.5	13.6
	BOD ₅		3.7	17.2	11.4	7.1~15.7	5.4
	COD _{Cr}		13.6	49.4	30.4	20.2~40.7	12.8
	TN		4.3	12.7	8.7	5.9~11.4	3.4
	TP		0.2	0.9	0.4	0.2~0.6	0.3
20 - 30	TSS	6	46.0	59.9	53.7	49.7~57.8	5.0
	BOD ₅		2.9	19.0	7.2	2.4~11.9	5.9
	COD _{Cr}		12.6	57.0	28.9	16.2~41.6	15.9
	TN		4.1	14.0	6.6	3.7~9.6	3.7
	TP		0.2	1.4	0.7	0.3~1.0	0.4
30 <	TSS	5	43.4	88.4	72.2	57.1~87.3	17.2
	BOD ₅		4.7	11.2	8.5	6.3~10.7	2.5
	COD _{Cr}		15.7	47.8	30.6	18.8~42.5	13.5
	TN		4.0	11.8	7.8	4.7~10.8	3.5
	TP		0.3	0.6	0.4	0.3~0.5	0.1

3.3 강우계급별 저감효율

Table 9에는 강우계급별 오염물질의 저감효율(EMC 기준)을 제시하였다. TSS의 경우 10mm이하에서 20-30mm까지는 유사한 저감효율을 보이고 있으나 30mm이상의 강우에서 급격하게 저감효율이 떨어지는 것으로 나타났다. BOD의 경우에는 10mm이하에서 가장 높은 저감효율을 보이고 있으나 10mm이상의 강우에서는 유사

한 저감효율을 보였고 COD의 경우에는 강우계급에 상관없이 일정한 저감효율을 나타내었다.

한편 TN의 경우 10mm이하의 강우계급에서 가장 저조한 효율을 보였으며 10-20mm에서 가장 높은 효율을 보이고 차츰 감소하는 경향을 보였고 TP의 경우 모든 강우계급에서 유사한 수준의 효율을 나타내었지만 30mm이상의 계급에서 가장 저조한 효율을 보였다.

Table 9. Reduction efficiency at the specified rainfall depths

Rainfall depth (mm)	Pollutant removal efficiency(%)				
	TSS	BOD ₅	COD _{Cr}	TN	TP
> 10	77.3	57.3	66.1	27.3	59.5
10 - 20	81.3	47.0	61.0	38.2	59.4
20 - 30	81.7	49.2	64.4	34.0	67.6
30 <	47.3	47.0	63.3	26.1	49.6

수리학적 교환비율은 습지의 내용적(설계 WQ_v)에 대한 모니터링 강우사상에서 습지로 실제로 유입된 총유입량($WQ_{v_{in}}$)의 비율로 정의된다. 이론적으로 강우계급의 증가(강우 유출량 증가)는 습지의 수리학적 교환비율(%)을 증가시키기 때문에 TSS의 저감효율은 감소하여야 한다.

연구대상 습지에서는 총유입량(m^3)이 설계 $WQ_v(m^3)$ 에 비해 작은 관계로 선형적인 관계가 미약하지만 교환비율이 증가할수록 TSS의 저감효율은 감소하는 경향을 보여주고 있다(Fig. 4(a)). 수리학적 교환비율과 TSS

저감효율에 관한 자료가 미비하여 설계 목표달성여부를 판단하기는 어렵지만 수리학적 교환비율이 1에 접근할 때 대략 55%의 TSS 저감효율을 보이고 있다.

한편 Fig. 4(b)의 이천습지의 경우 실제로 운전된 최대 수리학적 교환비율이 80%로 다양한 유입유량 조건에서 운전되었으며 선형관계도 준수한 수준을 나타내고 있다(Yi, 2010). 수리학적 교환비율($WQ_{v_{in}}/WQ_v$)이 1에 접근할 경우 75%정도의 TSS 저감효율을 보여 국내 인공습지의 TSS 제거목표인 80%에 근접하는 수치로 습지설계 조건을 충족시키는 것으로 판단된다.

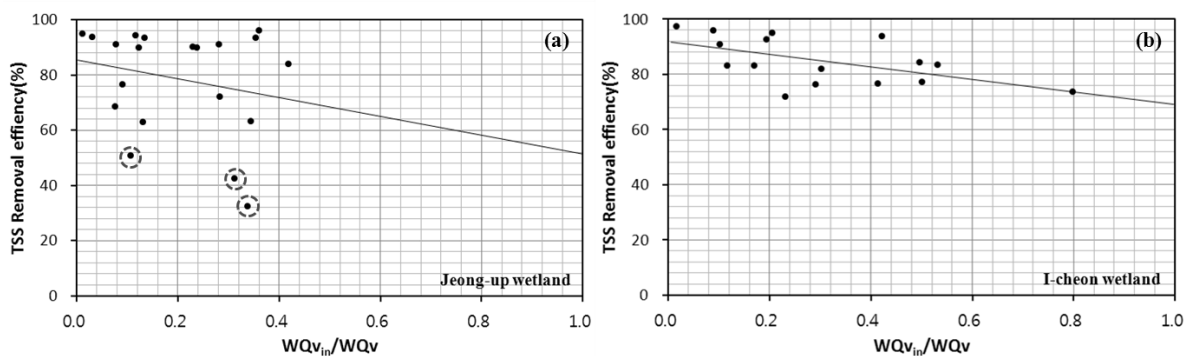


Fig. 4. TSS removal efficiency and hydraulic exchange ratio. (a) Jeongup wetland, (b) Icheon wetland.

3.4 저감효율의 불확실성

강우유출수 처리목적의 인공습지에서 일어나는 제거 기작은 크게 두가지로 분류할 수 있다. 하나는 강우가 진행되는 동안 습지로 유입된 강우유출수가 습지 내부

공간을 이동하며 단순한 물리적 침전, 여과, 흡착 등에 의해 제거되는 현상이다. 다른 하나는 강우시 유입된 강우유출수가 습지 내부에 체류하면서 비강우시 습지가 제공하는 산화, 환원조건에서 미생물의 내부생산 활동이나 습지에 식재된 각종 식물체에 의한 흡수작용, 토양과

물, 공기 사이에서 일어나는 물질이동 현상에 의해 처리가 이루어진다.

연속적인 강우활동과 개별적인 강우사상의 대소, 강도, 선행 건기일수 등 실험자가 제어할 수 없는 수많은 자연변수들이 복합적으로 작용하기 때문에 저감효율의 변동 요인을 규명하는 것은 쉽지 않은 일이다.

본 연구결과를 검토한 결과 저감효율에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 수리학적 요인과 강우발생 패턴을 예로 설명할 수 있다. Fig. 5 에는 강우 발생패턴과 수리학적 영향을 도식적으로 나타내었다. 강우강도가 다른 연속적인 강우사상이 발생하였을 때를 상정한 것으로 자연형 시설에서 일어나는 강우 유출수의 유입 → 저류/

유출 → 교환(replacement) 과정을 나타내었다. 대형 강우사상이 발생했을 때 습지로 유입되는 강우 유출수량은 습지의 수질처리용량 WQ_v 보다 커서 선행건기 동안 저류된 물은 완전히 교체가 이루어지면 습지 내부의 수질은 현재의 강우유출수에 의해 지배된다.

대형 강우 후 짧은 시간 이내에 소규모의 강우활동이 다시 시작하게 되면 그림에 나타난 것처럼 대형 강우에 의해 습지에 남겨진 수류(flume)가 아직 습지 내부에 존재하고 있고, 이 시기에 강우 모니터링이 이루어지게 되면 비교적 낮은 농도의 오염물질을 포함하고 있는 강우 유출수가 유입되기 때문에 결국 유입유량이 작아도 처리효율이 낮거나 (-) 저감효율을 나타나게 되는 것이다.

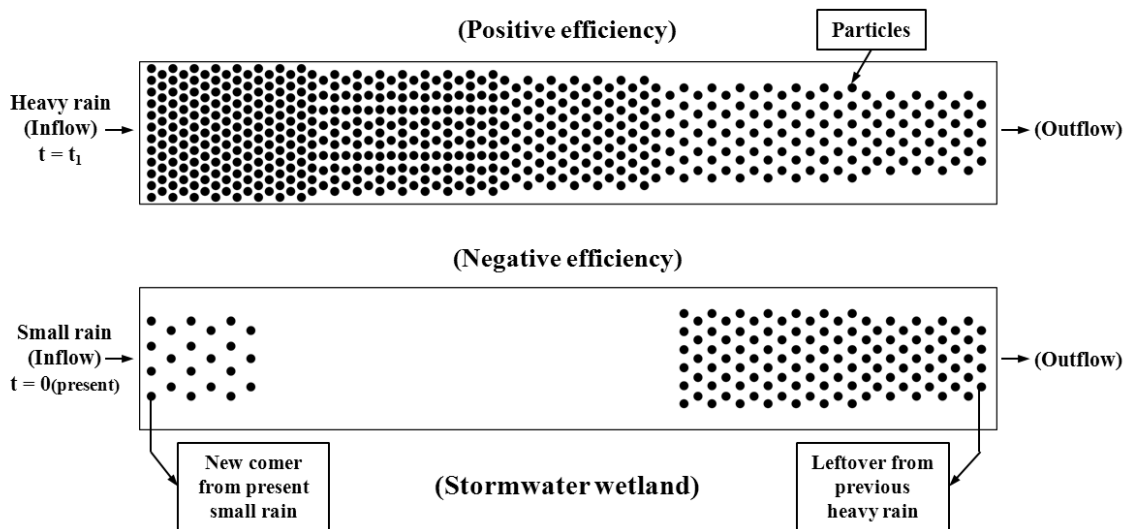


Fig. 5. Relationship between rainfall activity and reduction efficiency

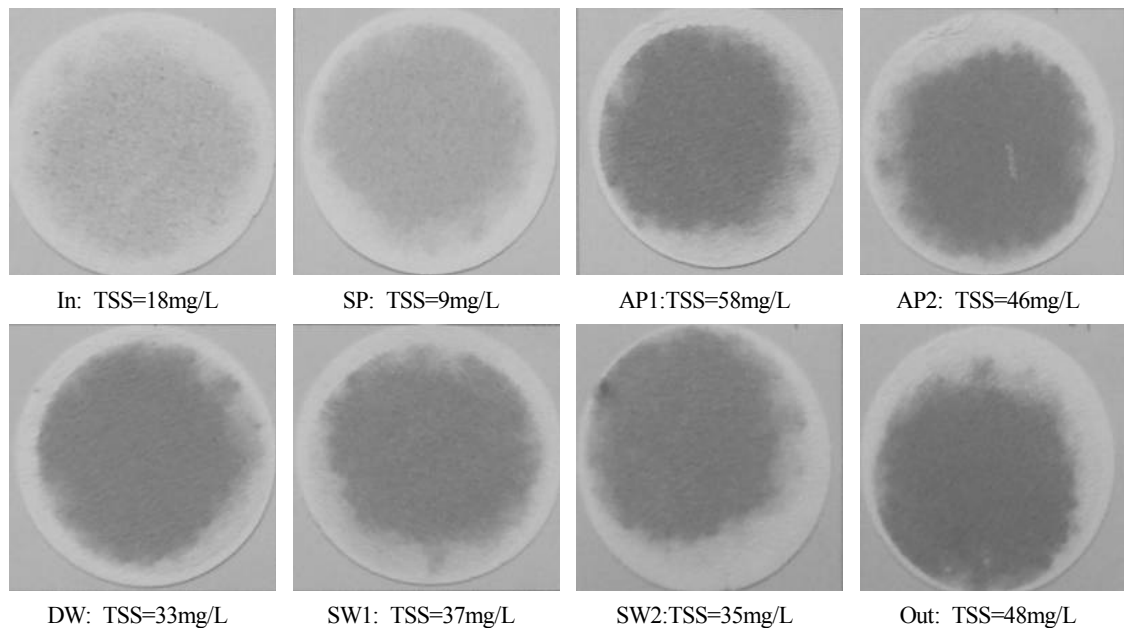


Fig. 6. Algal growth in the stormwater wetland used for this study

수리학적 요인 이외에 생물학적인 요인도 강우유출수 인공습지의 저감효율 불확실성에 크게 기여하고 있다. Fig 6에는 인공습지 각 지점에서 TSS를 측정 후 촬영한 GF/C 여지 사진을 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 인공습지 선단의 침사지와 포기식 습지를 통과한 후 깊은 연못과 얕은 연못을 통과하는 동안 급속하게 조류가 증식하였음을 보여주고 있다. 조류세포 자체가 유기물질과 영양소를 포함하고 있는 유기체이므로 습지에서 조류가 증식한 상황에서 모니터링이 이루어질 경우 입자상 형태의 오염물질, 특히 TSS와 COD의 저감효율이 저하되거나 (-)효율을 보일 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 가축사육단지가 산재한 농촌유역에서 발생하는 강우유출수 처리목적인 인공습지의 강우시 저감효율을 분석하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 모니터링이 수행된 20회의 강우사상에 대한 EMC 분석결과, 유입 평균 EMC 값의 경우 TSS 440mg/L, BOD 17.5mg/L, COD_{Cr} 101mg/L, TN 11.4mg/L, TP 1.4mg/L이었으며, 유출평균 EMC 값은 TSS 55mg/L, BOD 8.1mg/L, COD_{Cr} 30mg/L, TN 7.9mg/L, TP 0.5mg/L로 나타났다. 평균 오염물질 저감효율은 대략 TSS 88%, BOD 54%, COD_{Cr} 70%, TN 31%, TP 64%로 산출되었다.
- 2) 강우계급별 오염물질의 저감 효율은 TSS의 경우 10mm이하에서 20-30mm까지는 유사한 저감효율을 보였으나 30mm이상의 강우에서 저감효율이 크게 감소하였다. 이론적으로 강우계급의 증가(강우 유출량 증가)는 습지의 수리학적 교환비율을 증가시켰기 때문에 TSS의 저감효율은 감소하였다. 수리학적 교환비율의 자료가 미비하여 정확한 평가는 어렵지만 수리학적 교환비율이 1에 접근할 때 대략 55%의 TSS 저감효율을 보였다.
- 3) 연속적인 강우활동, 개별적인 강우사상의 대소, 강도, 선행건기 일수 등 실험자가 제어할 수 없는 수많은 자연변수들이 복합적으로 작용하였기 때문에 처리효율의 변동이 컸다. 처리효율에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 수리학적 요인과 함께 조류증식과 같은 생물학적인 요인도 처리효율 불확실성에 크게 기여한 것으로 나타났다.

References

Athanas, C and Stevenson, C (1991). *The Use of Artificial*

Wetlands in Treating Stormwater Runoff, Prepared for the Maryland Sediment and Stormwater Administration, pp. 66.

APHA (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, APHA, Washington, DC

EPA (1983). *Results of the Nationwide Urban Runoff Program*, U.S Environmental Protection Agency, Vol. I. Final Report, Water Planning Division, Washington.

EPA (1989). *Nonpoint Sources: Agenda for the Future*, U.S Environmental Protection Agency, Office of water, Washington.

EPA (1993). *National Conference on Urban Runoff Management: Enhancing Urban Watershed Management at the Local, County, and State Levels*, pp. 431.

Gavin, FB, Carsten, M, Mohammad, SF, Suh, JY (2004). Efficiency of a constructed wetland in removing contaminants from stormwater, *Wetlands*, 24(2), pp. 459-466.

Kim, GH, Kim, YC, Lee, DR, Jung, HY, Yur, JH (2003). Analysis and estimation of EMC loads of rainfall runoff from agricultural-forestry in Korea, *Korean Society of Environmental Engineers*, 25(6), pp. 760-770. [Korean Literature]

Lee, DY, Seo, GT, Lee, CS, Park, GH, Yoon, CH (2011). EMC analysis and runoff characteristic by rainfall ranges for city trunk road, *J. of Water Treatment*, 19(6), pp. 105-114.[Korean Literature]

Lee, SY, Maniquiz, MC, Choi, JY, Kim, LH (2009). Determination of EMCs for rainfall ranges from transportation landuses, *J. of Korean Wetlands Society*, 11(2), pp. 67-76. [Korean Literature]

Ministry of Environment (MOE) (2008a). *Certified Analytical Methods of Water Quality*. [Korean Literature]

Ministry of Environment (MOE) (2008b). *Design and Maintenance Guidelines of the Stormwater BMPs*, pp. 86-110. [Korean Literature]

Ministry of Environment (MOE) and Environment Management Corporation. (2011). *Final Report: Monitoring and Maintenance Studies of the Stormwater BMPs*. [Korean Literature]

Occoquan Watershed Monitoring Lab and George Mason University (1990). *Final Project Report: The evaluation of a created wetland as an urban best management practice*, Northern Virginia Soil and Water Conservation District, pp. 170.

Yi, Q (2010). *Nonpoint Source Pollution Control using Constructed Wetland in the Agricultural Area*, Ph. D. dissertation, Hanseo University, Seosan, Korea, pp.

80-87.

Rural Community Corporation (RCC) (2004). *Investigation Report on the Agricultural and Irrigational Water Quality*, Korea Ministry of Agriculture, pp. 1-52.
[Korean Literature]

William, JM, James, GG (2000). The value of wetlands:

Importance of scale and landscape setting, *Ecological Economics*, 35(200), pp. 25-33.

- 논문접수일 : 2012년 12월 07일
- 심사의뢰일 : 2012년 12월 09일
- 심사완료일 : 2013년 02월 11일