



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

저류형 인공습지를 이용한
비점오염물질 저감량 산정에 관한 연구



2010년 2월

부경대학교 대학원

생태공학과

이광섭

공학석사 학위논문

저류형 인공습지를 이용한
비점오염물질 저감량 산정에 관한 연구

지도교수 이 석 모

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2010년 2월

부경대학교 대학원

생태공학과

이 광 섭

이광섭의 공학석사 학위논문을 인준함.

2010년 2월



주심 공학박사 정용현



위원 공학박사 성기준



위원 공학박사 이석모



목 차

I. 서 론	1
II. 문헌연구	3
1. 비점오염원	3
2. 습지	5
가. 습지의 정의	5
나. 습지의 오염물질 제거 메카니즘	7
3. 습지를 이용한 비점오염물질 처리에 대한 사례연구	12
가. 국내 연구 현황	12
나. 국외 연구 현황	15
4. 비점오염물질 저감시설의 저감효율 평가기법에 관한 연구현황	20
가. 제거효율법(Efficiency Ratio)	23
나. 부하량 합산법(Summation Of Loads)	23
다. 평균농도법(Mean Concentration)	24
III. 연구방법	26
1. 연구대상지역	26
가. 지역개황	26
나. 기상개황	28
2. 모니터링 방법	29
가. 모니터링의 목표	29
나. 개별 강우사상에 대한 수질 및 유량조사 방법	29
3. 분석항목 및 방법	31
가. 일반항목	32
나. 영양염류	33
다. 저감효율 평가 및 저감량 산정 방법	34

IV. 결과 및 고찰	36
1. 저류형 인공습지의 현장조사	36
2. 수질분석 결과	39
가. 부유물질(SS)	39
나. 화학적산소요구량(COD)	41
다. 총질소(TN)	43
라. 용존무기질소(DIN)	45
마. 총인(TP)	47
바. 용존무기인(DIP)	49
3. 비점오염물질 저감효율 평가	53
가. 강우 시 저감효율 평가	53
나. 저류형 인공습지 설계인자 도출 방안	54
4. 비점오염물질 저감량 산정	55
5. 저류형 인공습지 유지관리 방안	60
가. 유입수로 및 습지 내 협잡물 제거	60
나. 유입수로 및 습지 내 침전물 관리	60
다. 습지식생관리	60
라. 인공습지 내 토양 침식관리	61
마. 수위조절	61
V. 결 론	62
참고문헌	65

List of Tables

Table 2.1 Area of major inland wetland	6
Table 2.2 Area of major coastal wetland	6
Table 2.3 Major types of dissolved and insoluble phosphorus in natural waters	9
Table 2.4 Categorization of phosphorus in waters based on sequential extraction	10
Table 2.5 The characteristics of constructed wetlands	14
Table 2.6 Assessment methods for treatment effectiveness of BMP	22
Table 2.7 Removal efficiencies of non-point source pollutants for historical methods(in case of constructed wetland)	25
Table 3.1 Data of constructed wetland attribute	27
Table 3.2 Methods of analysis	31
Table 4.1 Variation of rainfall	36
Table 4.2 Runoff volume of stormevent(2009.05.21)	37
Table 4.3 Runoff volume of stormevent(2009.07.07)	38
Table 4.4 Concentrations of inlet constituents(2009.05.21)	51
Table 4.5 Concentrations of outlet constituents(2009.05.21)	51
Table 4.6 Concentrations of inlet constituents(2009.07.07)	52
Table 4.7 Concentrations of outlet constituents(2009.07.07)	52
Table 4.8 Variation of concentration, quantity(2009.05.21 ~ 06.18)	57
Table 4.9 Variation of concentration, quantity(2009.07.07 ~ 08.07)	58

List of Figures

Fig. 2.1 BMP of non-point source	4
Fig. 2.2 Nitrogen transformations in a constructed wetland treatment system	8
Fig. 2.3 Phosphorus transformations in wetlands	11
Fig. 3.1 The location of a constructed wetland	27
Fig. 3.2 Average temperature and precipitation	28
Fig. 4.1 Inlet-Outlet flowrate and rainfall comparison(2009.05.21)	37
Fig. 4.2 Inlet-Outlet flowrate and rainfall comparison(2009.07.07)	38
Fig. 4.3 Variation of inlet, outlet SS concentration(2009.05.21)	40
Fig. 4.4 Variation of inlet, outlet SS concentration(2009.07.07)	40
Fig. 4.5 Variation of inlet, outlet COD concentration(2009.05.21)	42
Fig. 4.6 Variation of inlet, outlet COD concentration(2009.07.07)	42
Fig. 4.7 Variation of inlet, outlet TN concentration(2009.05.21)	44
Fig. 4.8 Variation of inlet, outlet TN concentration(2009.07.07)	44
Fig. 4.9 Variation of inlet, outlet DIN concentration(2009.05.21)	46
Fig. 4.10 Variation of inlet, outlet DIN concentration(2009.07.07)	46
Fig. 4.11 Variation of inlet, outlet TP concentration(2009.05.21)	48
Fig. 4.12 Variation of inlet, outlet TP concentration(2009.07.07)	48
Fig. 4.13 Variation of inlet, outlet DIP concentration(2009.05.21)	50
Fig. 4.14 Variation of inlet, outlet DIP concentration(2009.07.07)	50
Fig. 4.15 Comparison of reduction efficiency(SOL(%), EMC(%))	53
Fig. 4.16 Relations between inlet and outlet surface loading rate	54

Evaluation of non-point source pollutants removal using a detention type constructed wetland

Kwang Sup Lee

*Department of Ecological Engineering, The Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

This study investigated the removal capacity of a detention type constructed wetland to control non-point source pollutants. The removal efficiencies were calculated by the summation of loads(SOL) and the event mean concentration(EMC) method for rainfall period. As a result, removal efficiencies by SOL method were 24.48 % for SS, 79.00 % for COD, 82.66 % for TN, and 82.20 % for TP. And removal efficiencies by EMC method were -20.82 % for SS, 13.13 % for COD, 27.62 % for TN, and 25.80 % for TP, respectively. But, most of the pollutant were captured in wetland after stormevent, which is removed by biochemical mechnism of wetland until next stormevent. So it is important to monitor wetland after stormevent. The result of monitoring after stormevent were 273.91 g/m²/yr for SS, 14.08 g/m²/yr for COD, 35.25 g/m²/yr for TN, 10.81 g/m²/yr for TP. In conclusion, this study may provide fundamental data for detention type wetland construction to control non-point source pollutants in future.

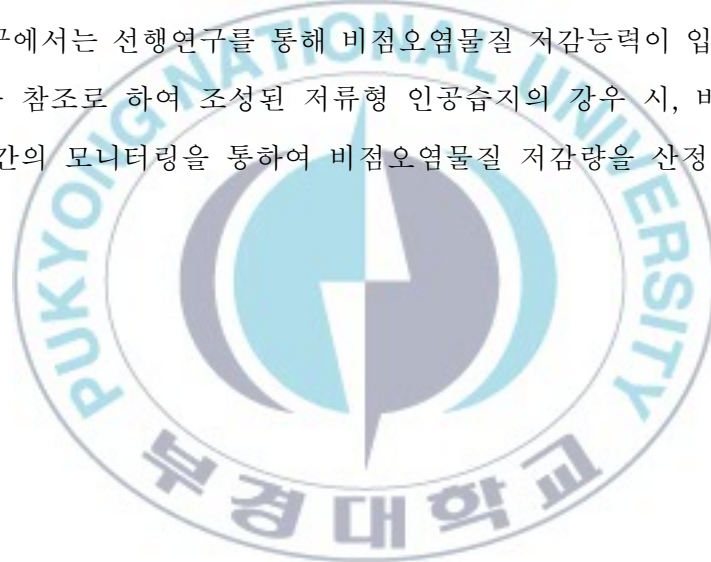
I. 서론

최근까지 수질관리의 초점은 점오염원(Point source)에 관한 것이었으며, 그 결과 하수종말처리장과 산업폐수처리장 등의 처리시설을 대폭 확충하여 도시와 주요산업지역을 중심으로 점오염원의 처리에 상당한 진전이 있었다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 하천과 호소의 수질은 크게 향상되지 못하고 있으며, 그 이유 중의 하나는 강우 시 도시지역 유출수, 농지유출수 등 다수의 비점오염원(Non-point source)이 대량으로 하천 및 호소에 유입되기 때문이다. 미국환경보호청(EPA)에 따르면 비점오염원은 호수 오염의 76 %를 차지하며, 미국 내의 지표수로 유입되는 오염물질 부하량의 약 65 %가 비점오염원이라고 하였다(USEPA, 1999b). 우리나라에서도 정부의 4대강 물 관리 종합대책에 따르면, 수계 전체 오염원 중 비점오염원이 차지하는 오염 부하가 42~69 %에 달하는 것으로 추정하고 있으며, 이대로 둔다면 2015년에는 65~70 %이상 증가할 것으로 예상하고 있다. 이처럼 수계에 많은 영향을 미치는 비점오염원은 하수처리장이나 폐수처리장을 건설하여 쉽게 처리할 수 있는 점오염원과 달리 강우에 의해 시가지, 농경지, 산림 등으로부터 넓게 확산되어 배출되므로 처리하기가 어렵다. 따라서 비점오염원의 체계적인 관리없이 하천이나 호소수질을 개선하는데 한계가 있다(환경부, 2004).

오염물질의 처리를 위하여 자연의 기능을 이용하는 생태공학적 방법들로 습지(Wetland), 체류지(Wet detention pond), 저류지(Detention pond), 산화지(Oxidation pond), 산화구(Open ditches), 인공식물섬(Artificial island) 등이 도입되고 있다. 이 중에서도 최근에 관심을 모으고 있는 것이 습지를 이용한 비점오염원관리이다. 습지는 유량 및 수질의 변화에 대한 적응력이 높고, 습지 내의 수생식물이나 미생물, 토양 등의 물리·화학·생물학적 자

연정화 능력을 이용하여 생물화학적산소요구량(BOD), 부유물질(SS) 뿐만 아니라 부영양화(Eutrophication)의 원인 물질인 질소(N)와 인(P)을 자연적이고 효율적으로 제거할 수 있으며, 수질정화 목적 외에 야생동물의 서식처 제공, 경관개선 등의 생태공원으로서의 역할 등 다양한 장점을 지니고 있다. 또한 습지를 이용한 수질관리는 처리에 대한 비용이 적게 들며 방법 자체가 자연생태계의 일부분을 이용하고 있고, 오염물질의 제거가 효과적이기 때문에 이와 관련된 연구가 국내·외에서 많이 진행되고 있다(Kadlec and Knight, 1996; Yoon, 2000; Mitsch and Gosselink, 2000; 함 등, 2004, 2005).

본 연구에서는 선행연구를 통해 비점오염물질 저감능력이 입증된 저류형 자연습지를 참조로 하여 조성된 저류형 인공습지의 강우 시, 비강우 시 및 강우사상 간의 모니터링을 통하여 비점오염물질 저감량을 산정하였다.



II. 문헌연구

1. 비점오염원

공공수역에 유입되는 수질오염물질의 발생원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분할 수 있다. 점오염원은 주로 가정하수와 공장폐수로 구성되며, 비교적 일정한 지점에서 일정한 양이 지속적으로 발생되어 강우나 비강우 배출량에 큰 변동이 없는 특성을 가진다. 반면, 비점오염원은 도시·농지·산지 등에서 불특정하게 오염물질을 발생시키는 장소 또는 지역을 의미하며, 강수·바람 등을 통해 지표유출수로 유출되거나 직접 수계에 유입되는 특성을 가진다. 주요 원인물질로는 농지에 살포된 비료 및 농약, 토양침식물, 축사유출물, 교통오염물질, 도시지역의 먼지와 쓰레기, 자연동·식물의 잔여물, 대기오염물질의 강하물 등이 있다. 비점오염물질은 일반적으로 강우 시 유출되기 때문에 일간·계절간 배출량 변화가 크고 예측과 정량화가 어려우며, 인위적 조절이 어려운 기상조건·지질·지형 등에 영향을 많이 받는 특성을 지니고 있다.

정부의 4대강 물관리 종합대책에 따르면, 수계 전체 오염원 중 비점오염원이 차지하는 오염부하가 42~69 %에 달하는 것으로 추정되고 있으며, 이대로 둔다면 2015년에는 65~70 % 이상 증가할 것으로 예상된다. 팔당상수원 비점오염원에 대한 연구(환경부, 2000)에서는 1999년말 기준으로 총 발생부하량(BOD기준) 중 비점오염원에서 발생하는 오염부하량이 19.6 %이며, 총 배출부하량(BOD기준)으로는 비점오염원이 44.5 %에 달하는 것으로 조사되어 비점오염원이 수질오염에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 조사결과는 나머지 수계도 비슷한 양상을 보일 것으로 추정되며 비점오

염물질의 저감에 대한 연구의 필요성이 더욱 대두되어 환경부, 국토해양부, 농림수산식품부 등 관계부처 합동으로 종합대책을 수립 중에 있다. 비점오염물질 저감대책으로는 비점오염원을 적절하게 관리하는 방안(Source Control)과 비점오염물질의 유출을 줄이기 위해 저감시설을 설치하는 방안(Structural Control)으로 크게 나눌 수 있다.

저감시설로는 저류형, 침투형, 식생형, 장치형 시설 등이 있으며, 저류형 시설에는 저류조, 인공습지, 연못 등이 포함된다(환경부, 2006a).



Fig. 2.1 BMP of non-point source.

2. 습지

가. 습지의 정의

습지는 간헐적으로 침수되는 육지 생태계와 수생태계의 중간지대에 위치하는 전이 생태계로서, 이러한 지리적 위치로 인하여 도시지역이나 농촌지역의 유출수를 포함한 강우유출수가 모여드는 유수지로서의 기능을 하게 된다. 저류형 습지는 여름철의 강우 시에는 유출이 있고 비강우 시에는 유출이 없이 물을 보유하고 있는 습지를 말한다.

과거에 습지는 경제성이 거의 없는 쓸모없는 땅으로 인식되어 최적의 매립 대상지였으며, 부지용도변경의 일 순위 지역이었고, 1970년대 중반까지 미국에서는 습지의 파괴가 공공연히 행해졌다. 몇몇의 습지훼손행위는 정부 정책에 의해 보장되기도 했다. 1800년대 중반 이후로 미국의 48개 주의 총 습지면적 중 절반이상의 습지가 매립되었다(Mitch and Gosslink, 1993). 그러나 최근에는 습지가 야생동식물의 서식처 역할과 먹이사슬을 지탱하는 등의 수많은 생태학적 기능을 수행하는 것으로 인식되기 시작하였고, 습지의 유형별로 물리·화학·생물학적 메카니즘의 결합으로 수질이 개선된다는 연구결과가 제시되었다(Stockdale, 1991). 현재 미국 내의 습지들은 부지용도변경을 원천적으로 제한하고, 수질기준에 의한 규제 등의 연방정부법률로부터 보호하고 있다(Kadlec, 1996). 1960~1970년대에는 습지의 수질정화기능에 착안하여 많은 폐수배출장소에 수질 모니터링 장치가 설치되었으며 이를 통하여 습지를 수질정화시설로 이용하려는 다양한 연구들이 행해졌다. 이러한 연구들의 성공으로 대규모의 수질정화용 인공습지개발이 이루어졌고, 습지를 이용한 여러 종류의 폐수처리에 대한 연구가 진행되기도 했다(CH2M-Hill, 1996). 현재 인공습지를 이용한 폐수처리는 미국뿐만 아니라,

유럽, 오스트레일리아, 아시아 일부 지역 그리고 아프리카에서도 이용되고 있으며 (Magmedov et al., 1996), 최근에는 도시 및 농업지역의 강우유출수 처리를 위한 습지활용에 관한 연구가 점점 증가하고 있는 추세이다.

우리나라에 분포하고 있는 습지의 정확한 면적을 계상한 자료는 찾아보기 힘든데, 이것은 습지에 대한 인식이 늦게 시작되었고, 전국 습지 조사가 상세하게 이루어지지 않았기 때문이다. 또한 일반인들의 습지에 대한 인식이 부족하여 각종 개발사업 등으로 인하여 훼손된 곳도 적지 않은 실정이다. 습지를 관리하는 중앙부서인 환경부와 해양수산부의 자료에 따르면 우리나라의 내륙습지는 Table 2.1과 같이 491 km²이며, 해안습지는 Table 2.2와 같다. 전체 면적이 2,393 km²에 달하여 세계 5대 갯벌에 속한다.

Table 2.1 Area of major inland wetland (Unit : km²)

Total area	The northern part (Gyeonggi, Gangwon)	The central part (Chungnam & Chungbuk, Gyeongbuk, Jeonbuk)	The southern part (Jeonnam, Gyeongnam)	note
491	128 (26 %)	250 (51 %)	113 (23 %)	estuary(405) included

주요내륙습지로는 우포늪, 정족산 무제치늪, 대암산 용늪, 철원분지, 대평 · 질날 · 유전늪지, 산남 · 주남 · 동판저수지, 화진포, 송지호, 청초호, 경포호, 대성동 및 판문점, 양수리 저수지, 서대구 달성늪지, 반월 칠보산, 제주 성산포 저수지 등이 있다.

Table 2.2 Area of major coastal wetland (Unit : km²)

Total area	Province				
	Gyeonggi	Chungnam	Jeonbuk	Jeonnam	Gyeongnam
2393	838.5	304.2	113.6	1054.1	82.6

(자료 : 해양수산부, 우리나라의 갯벌(1998))

나. 습지의 오염물질 제거 메카니즘

습지는 생물화학적산소요량(BOD), 부유물질(SS), 질소(N), 인(P) 뿐만 아니라 중금속, 병원균을 처리하는데 효과적인 것으로 알려져 있다. 인공습지의 오염물질 제거 메카니즘은 생물대사활동이나 식물의 흡수와 같은 생물학적 작용과 수중이나 바닥, 수생식물 간에서 일어나는 침전, 흡착, 침강과 같은 물리·화학적 작용을 포함한다(Reddy and DeBusk, 1987).

(1) 부유물질(SS)제거 메카니즘

입자성 부유물질은 수생식물의 스크린 작용과 같은 물리적 요인에 의해 유속이 감소되어 침전·제거된다.

(2) 생물화학적산소요구량(BOD)제거 메카니즘

식물체에 서식하는 많은 미생물들의 섭취에 의해 유기물질이 제거된다.

(3) 질소(N)제거 메카니즘

질소(N)는 유기질소, 암모니아질소(NH_3 , NH_4^+), 산화질소(NO_2^- , NO_3^-) 등 여러 가지 형태로 존재한다. 질소의 제거는 암모니아(NH_3)의 휘발, 질산화(Nitrification) 및 탈질화(Denitrification), 침전, 습지식물에 의한 흡수 및 생체량의 저장 등을 통해서 이루어진다(Brix, 1993). 대기 중의 산소가 식물의 잎, 줄기, 뿌리줄기, 뿌리를 통해서 근권으로 확산되어 호기층을 형성하고, 이러한 호기층에서 암모니아질소(NH_4^+-N)가 Nitrosomonas 박테리아에 의해 아질산질소(NO_2^--N)로 분해된다. 분해된 아질산질소(NO_2^--N)는 Nitrobacter 박테리아의 의해 최종적으로 질산질소(NO_3^--N)로 분해되며 이

무기염을 식물이 흡수하여 수역으로부터 제거된다. 또한 습지 환경의 혐기성 상태에서는 질산질소(NO_3^- -N)가 N_2 가스로 탈질화(Denitrification)되어 대기 중으로 방출된다. 탈질화(Denitrification)는 습지로부터 질소를 영구적으로 제거하는 방법으로 온도, pH, 산화·환원전위, 탄소이용성(Carbon availability), 질산이용성(Nitrate availability)과 같은 여러 가지 요인에 의해 영향을 받게 된다(Johnston, 1991).

By Nitrosomonas :



By Nitrobacter :



Fig. 2.2 Nitrogen transformations in a constructed wetland treatment system(Cooper et al., 1996).

(4) 인(P) 제거 메카니즘

인은 생태계에서 중요한 화학적 제한요소중의 하나이며, 습지에서도 역시 그러하다. 인 보유력은 자연습지나 인공습지의 가장 중요한 특성 중 하나인데, 특히 비점오염원이나 폐수가 유입되는 곳은 더욱 그러하다. 인이 수역에서 제거되는 주요기작은 저질에 의한 흡착과 식물에 의한 흡수이다. 식물은 유기인을 직접 흡수하지 않으므로 수역에 유입한 유기인은 미생물에 의하여 PO_4^{3-} -P로 무기화 되어 흡수가 이루어진다.

인은 습지 토양에서 무기물과 유기물의 형태로 용해성 및 불용성의 복합물로 존재한다. 무기물형태는 PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- 를 포함하고, pH에 따라 형태가 변화한다.

Table 2.3 Major types of dissolved and insoluble phosphorus in natural waters

Phosphorus	Soluble Forms	Insoluble Forms
INORGANIC	Orthophosphates(H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}) Polyphosphates	Clay-phosphate complexes Metal hydroxide phosphates, e.g., vivianite $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$, variscite $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$
	Ferric phosphate(FeHPO_4^+)	
	Calcium phosphate($\text{CaH}_2\text{PO}_4^+$)	Minerals, e.g., apatite $[\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6]$
ORGANIC	Dissolved organics, e.g., sugar phosphates, inositol phosphates, phospholipids, phosphoproteins	Insoluble organic phosphorus bound in organic matter

인은 칼슘, 철, 알루미늄과 친화성을 가지며, 이러한 성분들과 쉽게 착화물을 형성한다. 토탄층과 무기 토양층에서 인의 주요 특성은 유기분해물과 이탄, 무기 침전물을 고정하는 것이다. 인의 주요 무기 형태는 오르토인산염이다. 인을 분류하는 방법으로는 다양한 화학적 특성에서의 용해 정도로 분류한다(Reddy et al., 1999). Van Eck(1982)이 고안한 분류방법은 Table 2.4와 같다.

Table 2.4 Categorization of phosphorus in waters based on sequential extraction

Phosphorus Fraction	Extractant
Exchangeable phosphorus	0.5 M NaCl
Labile organic phosphorus and carbonate-bound phosphorus	1 M NH ₄ Cl
Fe-Al-P	0.1 M NaOH
Fe-Mg-P	0.5 M HCl
Resistant organic phosphorus	Remaining residue

생물학적으로 이용 가능한 오르토인산염의 분석방법을 ‘Soluble Reactive Phosphorus (SRP)’ 라고 하는데, 용존성 반응 인산염(Soluble reactive phosphorus), 교환성 인산염(Exchangeable phosphorus), 오르토인산염 사이의 당량이 정밀하지는 않지만 이 방법을 이용한다. 이는 생물학적으로 이용 가능한 인의 지표로 종종 쓰인다. 용존 유기인과 비용존 유기 및 무기인은 용존 무기인 형태로 변환되지 않으면 생물학적으로 이용할 수 없다. 인이 식물이나 미생물들이 이용하기 어려운 이유는 다음과 같다.

- (1) 호기성 조건에서 철, 칼슘, 알루미늄과 비용존성 인산염으로 침전
- (2) 점토입자, 유기토탄, 철이나 알루미늄의 수산화물 및 산화물과 인산염의 흡착
- (3) 박테리아, 조류, 수생부유식물 등의 살아있는 유기물과 인의 결합

인의 일반적 제거 기작은 아래와 같은 세 가지 경향이 있다.

- (1) 산성 토양에서의 인은 알루미늄인산염과 철인산염으로 고정 된다.
- (2) 알칼리성 토양에서의 인은 칼슘, 망간과 침전한다.
- (3) 약산성 및 중성인 토양에서의 인은 생물학적인 이용이 쉽다.

Richardson(1985)과 Reddy와 D'Angelo(1994)는 습지의 인 수확 지표로서 토양 내 수산염으로 추출할 수 있는 철과 알루미늄의 양을 제안하였다. 습지의 표면에서 낮 동안 높은 조류의 생산력은 수중 CO_2 를 대기 중으로 방출하여 pH를 9~10으로 높게 유지한다. 이러한 조건하에서 방해석과 인산칼슘염에 흡착된 인은 빠르게 침전한다(Reddy et al., 1999). 음전하인 인과 양전하인 점토의 화학적 결합과 점토에서의 규산염과 인의 치환은 강기습 습지와 염습지에서 중요하다. 그 이유는 강의 범람이나 조석차가 인과 흡착된 점토입자를 운반하고, 점토입자에 수확된 인을 미생물들이 간접적으로 이용하기 때문이다.

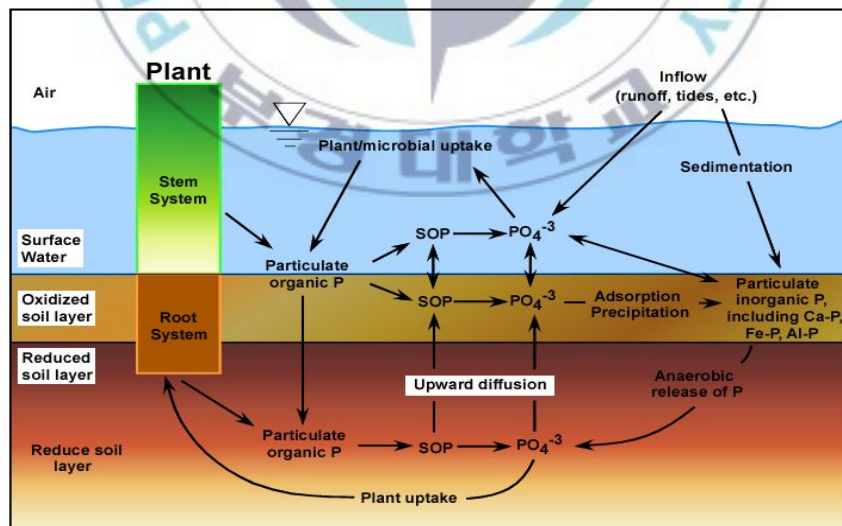


Fig. 2.3 Phosphorus transformations in wetlands.
(SOP indicates soluble organic phosphorus).

3. 습지를 이용한 비점오염물질 처리에 대한 사례연구

가. 국내 연구 현황

국외에서는 이미 1970년대부터 식물 재배를 통해 무기물질을 제거하는 방법을 현지에도 도입, 활용하고 있다(Mitsch, 1996). 우리나라에서도 축산폐수를 정화하기 위하여 부레옥잠, 물옥잠, 줄, 부들, 창포, 왕골, 토란 등을 이용한 연구(Kim et al., 1988; 이, 1993), 인공호에서 대형수생식물에 의한 물질 생산과 순환에 관한 논문(조, 1992), 부레옥잠의 자연정화능에 관한 연구는 물론 생활하수, 축산폐수 및 양식폐수의 처리에 실용화한 사례도 있다(Kim et al., 1988; 공, 1997; 김, 1998). 또한 포플라 나무에 의한 비점오염원 처리를 위한 기초연구(이, 2001)와 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리방안에 대한 연구(이와 배, 2002), 인공습지에 의한 영양물질처리효율 분석(김 등., 2006), 인공습지의 수질정화효율 평가(최 등., 2006), 비점오염원 제어 위한 인공습지의 계절별 처리효율 비교(함 등., 2004), 비정수성 수생식물의 생태적 특성을 이용한 호소성 농경습지의 친환경 관리방안 연구(농업기반공사, 2003) 등 최근에 연구가 계속되고 있다. 그 중 대표적인 인공습지 조성사례를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 시화호 인공습지

시화호로 유입되는 3개하천(반월천, 동화천, 삼화천)이 모이는 합류부 간석지에 갈대 등의 수생식물을 식재한 인공습지를 조성하였다. 이 습지는 축산폐수 및 생활하수를 자연적 정화방법으로 처리한 후 시화호로 유입시킴으

로써 시화호의 수질개선을 도모하고, 또한 자연학습장 기능을 갖춘 생태공원 및 환경교육장으로 활용하고자 설치하였다. 대상 하천들의 유역은 대부분 농경과 축산을 하는 지역으로, 산재되어 있는 소규모 오염원들에 의해 비교적 저농도의 오염도를 보이는 유입 하천수를 효과적으로 처리하기 위해 인공습지를 선정하였다. 습지의 형태는 자유수면형 습지이며, 침강저류지, 갈대식생대, 개방수면(Open water), 중도(Island)로 구성되어 있다. 유입수는 양수(Pumping)에 의해서 습지로 유입된다.

습지내부의 토양은 간척지 토양특성의 하나인 염분토양(Saline soil : $\text{pH} < 8.5$, $\text{ECe} > 4 \text{ dS/m}$)의 특성을 나타내고 있으며, 습지내부의 식생은 대부분이 갈대로 식생다양도가 매우 낮다.

(2) 길성천, 보청천, 복내천 인공습지

환경관리공단에서는 4대강 물관리종합대책의 일환으로 상수원댐(주암호, 동북호, 대청호 등)의 주요 유입하천에 인공습지를 조성하고 있다(Table 2.5). 현재 주암호의 유입하천인 복내천에는 2002년 12월에 조성되어 운영 중에 있으며, 동북호 유입하천인 길성천, 대청호 유입하천인 보청천에는 2003년에 공사를 완료하였다. 복내천의 인공습지는 복내하수처리장의 방류수처리와 주변지역에서 유입되는 비점오염원을 처리하기 위해 설치되었다. 길성천의 습지는 길성천 유역에서 발생하는 비점오염원을 처리하기 위해 설치되며, 보청천은 오염하천 정화를 목적으로 조성할 계획이다. 유입수를 유입하는 방법으로는 복내천이 자연유하식이며, 길성천과 보청천은 보 설치에 의한 자연유하방식이다.

Table 2.5 The characteristics of constructed wetlands

		Bok-Ne stream	Cil-Sung stream	Bo-Cheong stream
Area(ha)		2.3	4.3	0.5
Source		Non-point source	Non-point source	Non-point source
Capacity (m ³ /day)	normal	385	-	350
	rainfall	7,407	53,880	1,900
HRT	normal	5.6 day	-	4.3 day
	30 mm rainfall	21 hr	24 hr	1.3 day

(3) 마산저수지 인공습지

충남 아산시 방축동에 위치한 마산저수지를 대상으로 오염물질과 유역 환경을 고려한 수환경의 물리화학적 특성을 분석하고 농업용저수지의 수질 개선을 위해 면적 2,773 m²의 인공습지를 조성하였다. 이는 양수기를 이용하여 유량조절로 수심 및 HRT를 결정하여 수질정화효율, 단위면적당 제거량 등을 분석하는 연구시설이다. 2000년 5월~11월 유입수와 유출수의 수질분석결과를 토대로 단위면적당 제거량은 BOD가 0.64~12.65 g/m²/day, COD 1.27~8.73 g/m²/day, TN 0.41~1.32 g/m²/day, TP 0.04~0.20 g/m²/day 였다(농림부, 2004b).

(4) 석문자연정화시설 인공습지

간척지 담수호의 수질개선을 위해 설치된 연구시설로 위치는 석문지구 담수호 유입부 좌안 퇴적구간(당진군 고대면 슬항리)이며, 조성면적은 8,055 m²로 수심 0.3 m, HRT은 2~7 일인 인공습지이다. 본 시설은 지표흐름형 습지로 평균처리효율은 TN 48.0 %, TP 55.2 %, SS 50.0 % 였다(농림부, 2004e).

나. 국외 연구 현황

실제로 외국에서 인공습지를 적용하여 성공을 거둔 예는 많으나 그중 각국별 대표적인 사례를 보면 아래와 같다.

(1) 미국

북캐롤라이나주의 모어헤드시에서는 지난 68년 인근 뉴포트 강변의 습지에 지름 30 m 정도의 연못 3개를 조성하여 도시하수처리장에서 발생하는 방류수를 수생식물이나 갈대 등을 심은 호수로 통과시켜, 부영양화의 원인이 되는 질소·인을 제거하였다. 이 결과 하수처리장 방류수의 질소·인 농도가 대폭 감소하였고, 경제적으로 고도처리시설을 설치한 효과를 얻을 수 있었다. 또한 1997년 미국 환경보호청(EPA)에 의하면 특정폐기물을 액상화하여 내성이 강한 포플러나무가 심어진 지역에 투여함으로써 고농도의 오·폐수를 처리하였고, 포플러나무 한 그루는 PCBs나 카드뮴, 수은 등 각종 유해중금속이 포함된 액상 특정폐기물을 하루에 200 L나 정화할 수 있다고 하였다. 이렇게 제거된 오염물은 생물체 내에 농축되어 대기로 방출되는 2차 오염을 유발하지 않았고, 수명이 다한 나무는 벌목하여 목재로서의 가치도 지닌다고 하였다. 현재 미국에서는 이러한 습지 또는 기타의 자연친화적 수질정화법을 이용한 신종 환경산업이 발달하고 있어 1차, 2차적 수질정화법이 갖는 비효율적이고, 비경제적인 단점을 보완할 수 있을 것이라 기대하고 있다.

(2) 중국

난징(南京)대학에서는 64년부터 86년까지 22년간 황해 연안지방에서 갈대를 길러 간척지의 염분과 오염물질을 제거하는 현장실험을 수행하여 성공적인 결과를 얻었다. 이러한 수질개선 효과 외에 해안의 침식도 방지되었고, 수확한 갈대를 연료나 제지원료로 이용하였다. 또한 1992년 벼를 이용하여 정화능력을 측정한 결과 2일 동안 화학적산소요구량은 80 %, 총인은 73 %, 총질소는 82 %의 처리효과를 나타내어 인구 10만 명이 생활하는 쑤양(瀋陽)시의 하수를 처리하였으며, 이러한 결과를 토대로 인구 12만이 생활하는 항저우(杭州)시에서는 부레옥잠, 갈대를 이용하여 도시하수를 성공적으로 처리하여 화학적산소요구량은 75 %, 총인은 94 %, 총질소는 86 %의 처리효과를 나타내었다.

(3) 일본

일본 건설성에서는 차집관로를 거쳐 하천으로 흐르는 고농도의 폐수를 사상조류습지를 조성함으로써 정화하여 인과 질소의 탁월한 제거능력을 나타냈음을 증명하였고, 그 부산물을 돼지 등 가축의 사료로 사용하였다.

(가) Swift Run 습지

Michigan주의 Swift Run 습지는 유역으로부터 도시 및 농지 유출수가 유입되며, 습지를 통과하면서 탁도 64 %, TP 49 %, TKN 20 %, TFe 62 % TPb 83 %가 제거되는 것으로 나타났다(Scherger and Davis, 1982). 강우사상 별 제거효율은 체류시간이 길어질수록 증가하였고, 단일 용설수에 대한 제거효율은 상대적으로 짧은 시간동안 많은 양의 유량이 습지를 통과함으로 인해 낮게 나타났다.

(나) Wayzata 습지

Minnesota주의 Wayzata라는 자연습지는 도시강우유출수가 유입되는데 일 년 동안 습지를 통과하면서 TP 77 %, TSS 94 %가 제거된다고 하였다(Hickok et al., 1977). 제거효율이 높게 나온 이유는 유입수의 유속이 낮고 유기토양에 의한 부유사의 물리적인 포획 때문인 것으로 나타났다.

(다) Hidden River의 초지자연습지

Florida 남서쪽에 위치한 초지자연습지는 강우유출수 처리를 위한 습지로서 두 개의 유입부에서 침전 저류지를 통과한 후 본 습지로 유입된다(Carr and Rushton, 1995). 습지를 통한 제거효율은 총 유입부하 중 TSS 86 %, 영양염류 29~94 %, 총 미량금속(Cd, Cu, Pb, Zn) > 79 %로 매우 높게 나타났다. 습지의 오염물질 정화능력은 우기보다 건기에 더 우수하였으며 그 원인은 적은 유량과 느린 유속 그리고 높은 유입농도 때문이라고 하였다.

(라) Josephine, E2, Jones Lake, Kingston, Lower Watkins 습지

Minnesota(Willenbrion, 1985)의 호소복원 사업과 관련된 다섯 개의 자연습지에 대한 연구로부터 습지의 면적이 오염물질 제거능력에 상당한 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다. 세 개의 습지 Josephine, E2, Jones Lake는 도시강우유출수가 유입되고, Kingston 습지는 농지유출수가 유입되며, Lower Watkins는 상류로부터 고농도의 낙농폐수 처리수가 유입된다. 유입, 유출수 조사와 유량측정에 기초하여 5개 습지에 대하여 제거효율을 평가한 결과 TSS, TP, TKN 모두 효과가 있는 것으로 나타났다. Josephine 습지의 경우 가장 높은 제거효율을 보였는데 그 원인은 유역면적에 대한 습지의 면적비율이 6 %로 가장 큰 면적을 차지하고 있기 때문이다.

(마) Island Lake 자연습지

고형물과 TP, 다양한 금속의 제거에 있어서 침전의 역할이 중요하다는 사실이 부각되면서 습지 내 성분들의 공간적인 분포에 대한 연구가 진행되어 왔다. Florida 중앙에 위치한 Island Lake의 자연습지는 상류로부터 도시지역의 강우유출수가 유입된다. Schiffer(1989)는 건기와 우기동안 하루에 한번 씩 유입수와 유출수 그리고 습지내의 여러 지역에서 시료를 채취하였다. 그 결과 영양염류, 중금속류, TOC, 색도는 유입부에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보였고, 퇴적물의 경우도 인산염과 중금속류(Cd, Cu, Fe, Pb, Zn)의 농도가 유입부에서 멀어질수록 감소하였다. 유입구로부터 가장 멀리 떨어진 곳에서 채취한 시료에서 Cr의 경우는 더 높게 나타났는데 이로 미루어 볼 때 Cr은 다른 금속류에 비해 수층으로부터 제거되기 전에 더 오래 유하하여 흘러가는 것으로 간주하였다. 이와 유사하게 Harper 등(1986)은 Orlando와 Florida 인근에 위치한 Hidden Lake의 관목습지로 유입되는 도시 강우유출수내의 영양염류와 미량금속들에 대한 거동에 대하여 수년간 연구하였다. 건기와 우기에 각각 유입부에서 시료를 채취하였으며, 습지 내에서 25 m 간격으로 저질 채취와 채수를 하여 분석하였다. 그 결과 미량금속(Cd, Zn, Mn, Cu, Fe, Pb, Ni, Cr) 특히, 입자성 중금속류가 저질토 표층을 통하여 효과적으로 제거된다고 하였다.

(바) Hidden Lake 습지

침전작용이 오염물질의 제거에 중요한 역할을 한다는 것을 입증한 연구로서 Hidden Lake 습지의 경우에는 TN의 제거율은 나타나지 않았지만, 수층을 통해 Ortho-phosphate이 습지내로 유입되어 유하하면서 오히려 농도가 증가한다는 결과를 내렸는데 습지를 통과하여 하류로 갈수록 산화·환원전위와 pH가 감소함으로 인해 침전물에 결합된 인산염이 방출되어 오히려 Ortho-phosphate이 증가한다고 가정하였다.

(사) Cache River 하천변습지

Arkansas 동부에 위치한 Cache River의 하천변 습지에 대한 Dortch(1996)의 연구에서, 습지의 상류와 하류경계에서 3년간 물질흐름(Mass Flux)을 측정한 결과 계산에 있어서 불확실성이 발생하였는데 이유는 상류에서 계측된 유입량보다 23 % 이상 많은 유량이 습지 안으로 유입되었기 때문이다. 이 유량은 상류와 하류의 계측장소 사이로 계측되지 않은 지류들의 추가적인 유입량이 발생했기 때문이었다. 저자는 이 오차를 설명하기 위하여 유입수내의 오염물질의 농도와 상류에서 계측된 농도를 동일하다고 가정하였으며, 연구결과 TN 20 %, FSS 30 %, TP 3 %의 제거효율을 보였다.



4. 비점오염물질 저감시설의 저감효율 평가기법에 관한 연구현황

현재 국내의 경우, 비점오염물질의 저감을 위해 설치된 저감시설의 처리 효율 평가는 비점오염원관리 업무편람에서 예시로 제시한 “비점오염원관리 시설 처리효율”을 이용하여 부하량을 계산하고 있는데, 처리효율의 범위를 값으로 주지 않거나 최대값만 나와 있는 경우 그 수치를 그대로 사용하기에는 여러가지 문제를 야기한다. 이는 비점오염물질이 강우특성, 유역특성, 유출량, 시설규모에 따라 처리효율이 달라지기 때문이며 모든 시설에 대하여 처리효율을 일률적으로 적용하기는 어렵기 때문이다.

미국의 경우 비점오염물질의 최적관리기법(BMP : Best Management Practice)으로서 저류지(Detention pond), 저류연못(Retention pond), 습지(Wetland) 등의 성능에 대하여 20년 동안 데이터를 수집하였는데, 조사결과 유사 비점오염물질 처리시설효율과의 관계를 명확하게 증명할 수 없어 다른 형태의 비점오염물질 처리시설효율에 거의 활용할 수 없었다고 보고된 바 있다(Urbonas, 1994).

따라서, 비점처리시설에서 삭감효율 평가하고, 그 결과를 유사처리시설에 활용하기 위해서는 처리시설의 설계기준 및 시설현황을 조사하고, 일관된 강우 유출량, 처리시설의 유입수 및 유출수 수질을 모니터링 해야 한다.

이러한 문제점을 인식하여, 국내에서는 국립환경연구원(2006)에 의해 “우수유출수 처리에 따른 오염물질삭감효과 평가”에 관한 연구가 진행된 바 있는데, 이 연구에서는 ASCE 및 EPA 지침에서 제시하고 있는 비점오염물질 처리시설의 삭감효과 평가방법 중 EMC를 이용한 제거효율법, 부하량 합산법, 평균농도법에 대해 고찰하였고, 우리나라에 적용해 보기 위해 한강수

계의 비점오염저감시설 중 인공습지, 식생수로, 식생여과대, 장치형처리시설에 대한 모니터링 결과를 활용하여 이들 처리시설의 삭감효과를 비교평가하고, 삭감효과 평가방법을 제안하는 연구를 수행한 바 있다. 또한 비점오염물질 처리시설 평가지침(안)을 제안하기도 하였다.

일반적으로 비점오염물질 저감시설로 유입, 유출되는 오염물질량을 평가하고 정량화할 때는 강우 시 일정시간 간격의 강우유출수 농도, 총유입부하량, 유량가중평균농도의 세 가지가 가장 많이 이용되고 있다.

먼저, 농도의 경우 시간별 시료분석 결과에 따른 오염물질의 농도변화를 도표화 한 pollutograph를 통해 특정강우사상의 초기강우유출현상(First flush)을 관찰하는데 유용하게 이용되며, 특히 불투수 지역의 경우에 있어 중요한 평가인자가 될 수 있다.

부하량의 경우, 농도측정과 더불어 유량측정을 병행함으로써 계산된 총오염물질의 양으로서, 호소나 만과 같이 강우 지역 외부에 있지만 장시간 부하가 지속되어 수질이 악화되는 수체에 적용된 최적관리기법(BMP) 평가에 가장 유용하게 사용되는 인자이다.

유량가중평균농도(Event Mean Concentration)의 경우, 유량에 비례적인 평균농도로 표현되는 통계적 인자로서 총유입부하량을 총 유출량으로 나눈 값으로 정의된다. 유량가중평균농도는 강우사상시 유출되는 오염물질의 수준을 정량화하는데 가장 유용한 수단으로 이용되고 있다.

ASCE and EPA(2002)에서는 위에서 언급한 비점오염물질 평가인자 3가지를 바탕으로 전통적으로 이용되어왔던 비점오염물질 처리효율계산을 아래 6가지로 언급한 바 있고, Table 2.6에 각 처리효율 계산법의 장단점을 수록하였다. 그 내용을 살펴보면 기본의 저감시설의 처리효율 평가방법의 경우, 농도저감효율 및 부하량합계 저감효율 평가방법이 추천되나 각각 단독으로 사용될 시에는 의미가 없다고 언급하고 있다.

**Table 2.6 Assessment methods for treatment effectiveness of
BMP(ASCE and EPA(2002))**

Catagory	Method Name	Recommendation	Comments
Historical Methods	Efficiency Removal	Not recommend as a stand-alone assessment of BMP performance. More meaningful when statistical approach is used	Most commonly used method to date. Most researchers assume this is the meaning of "% removal". Typical approach does not consider statistical significance of result.
	Summation Of Loads	Not recommend as a stand-alone assessment of BMP performance. More meaningful when statistical approach is used	Utilizes total loads over entire study. May be dominated by a small number of large events. Results are typically similar to ER method. Typical approach does not consider statistical significance of result.
	Regression Of Loads	Do not use.	Very rarely are assumptions of the method valid. Cannot be universally applied to monitoring data.
	Mean Concentration	Do not use.	Difficult to "track" slug of water through BMP without extensive tracer data and hydraulic study. Results are only for one portion of the pollutograph.
	Efficiency of Individual Storm Loads	Do not use.	Storage of pollutants is not taken into account. Gives equal weight to all storm event efficiencies.
Alternative Methods	Percent Removal Exceeding Irreducible Concentration or Relative to WQ Standards/Criteria	Not recommended. May be useful in some circumstances.	Typically only applicable only for individual events to demonstrate compliance with standards.
	Relative Efficiency	Not recommended. May be useful in some circumstances.	Typically only applicable only for individual events to demonstrate how well a BMP performs relative to how well it would perform if it
	"Lines of Comparative Performance©"	Do not use.	Spurious self-correlation Method is not valid.
	Multi-Variate and Non-Linear Models	Possible future use.	Additional development of methodology based on more complete data sets than ar currently available.
Recommend Method	Effluent Probability Method	Recommended Method.	Provides a statistical view of influent quality. This is the method recommended in this guidance manual. Benefits over other approaches that are discribed in this section of the Guidance.

가. 제거효율법(Efficiency Ratio)

제거효율법은 일정기간 동안 오염물질의 평균 EMC로 환산하여 계산하는 방법이다.

$$ER = 1 - \frac{\text{Average Outlet EMC}}{\text{Average Inlet EMC}} \quad (3)$$

$$EMC = \frac{\sum_{i=1}^n V_i C_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (4)$$

$$\text{Average EMC} = \frac{\sum_{j=1}^m EMC_j}{m} \quad (5)$$

$$\text{Average of the log EMC} = \frac{\sum_{j=1}^m \text{Log}(EMC_j)}{m} \quad (6)$$

나. 부하량 합산법(Summation Of Loads)

부하량 합산법은 총유입부하량에 대한 총 유출부하량의 비에 기초한 효율로 정의된다. .

$$SOL = 1 - \frac{\sum \text{of outlet loads}}{\sum \text{of inlet loads}} \quad (7)$$

다. 평균농도법(Mean Concentration)

평균농도법은 1에서 평균유입수 농도에 대한 평균 유출수 농도의 비를 뺀 것으로 효율을 정의한다. 이 방법은 유량자료가 없을 경우 이용하는 방법이며, 저류능력을 설명할 수 없다.

$$\text{Mean Concentration} = 1 - \frac{\text{Average outlet concentration}}{\text{Average inlet concentration}} \quad (8)$$

상기에 언급한 저감효율평가기법들은 모든 비점오염저감시설들에 대해서 동일하게 적용하는 방법들이다. 그러나 본 연구대상시설은 자연형 시설 중에서도 인공습지를 대상으로 하고 있으므로, 국립환경연구원(2006)의 비점오염저감시설 평가기법별 결과 중 인공습지 부분을 정리하여 Table 2.7에 제시하였다. 평가결과를 살펴보면 우선, 기존평가기법에 따른 평가결과 평가방법에 따라 삭감효과의 변화가 넓게 분포하고 있었고, 부하량 합산법에 의한 저감효과가 EMC 저감효과나, 평균농도 저감효과 보다 상당히 높은 효율을 나타내고 있었는데, 이는 유입유량이 유출유량보다 많았기 때문이다. 유입, 유출 유량이 비슷했던 조사에서는 EMC, 부하량 합산저감효과가 거의 동일한 값을 나타내었다. 그리고 EMC효율과, 평균농도 효율의 차이는 EMC산정시 등간격으로 측정을 했는지 유무에 따라 다소 다르게 나타났다고 언급하였다.

이상 비점오염물질 저감시설의 저감효율을 평가하기 위한 여러 가지 기법들을 살펴보았다. 그 결과 모든 평가기법들이 각 저감시설들의 저감효율을 대표하기 위해서 상당한 양의 모니터링 결과가 포함되어야 함을 알 수 있었고, 국가 비점오염원 관리대책 수립을 위한 기초자료로 활용되기 위해서는

통계적 유의성 확보 및 검증 작업이 이루어져야 함을 지적하고 있었다.

그러나 습지와 같은 저감시설들의 경우, 강우 시 유입·유출되는 모니터링 결과만으로는 저감효율 평가결과가 큰 의미를 가질 수 없으며, 건기 시 혹은 강우사상 간의 습지에 체류된 오염물질의 생물학적 저감량을 모니터링 하여 그 결과를 포함하는 저감량 산정이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 상기의 문헌고찰 결과를 바탕으로 연구대상 인공습지에 이들 기법을 적용하여 강우 시 저감효율을 평가해보고자 하며, 또한 비강우시 및 강우사상 간의 습지모니터링 결과를 포함하여 인공습지의 총괄적인 저감량을 산정하고자 한다.

Table 2.7 Removal efficiencies of non-point source pollutants for historical methods(in case of constructed wetland)(NIER, 2006)

BMPs	Event date	Parameters	ER(EMC)	Methods	MC
				SOL %	
Constructed wetland	2006.06.10	TSS	41	61	36
		BOD	43	63	38
		COD	10	41	10
		TN	48	64	51
		TP	78	85	77
	2006.06.13	TSS	44	70	45
		BOD	18	62	17
		COD	30	59	30
		TN	14	63	15
		TP	37	80	35
	2006.06.29	TSS	80	78	72
		BOD	56	64	51
		COD	24	52	21
		TN	5	54	4
		TP	53	73	46

Ⅲ. 연구방법

1. 연구대상지역

가. 지역개황

본 연구에서의 인공습지는 자연습지인 대평늪을 참조습지로 하여 서낙동강과 평강천의 합류지점에 위치한 묘목장을 이용하여 조성되었다. 인공습지가 조성된 서낙동강은 동경 $128^{\circ} 44' 36'' \sim 129^{\circ} 00' 28''$, 북위 $35^{\circ} 06' 33'' \sim 35^{\circ} 17' 22''$ 사이에 위치한 낙동강의 파천으로서 행정구역상 부산광역시 강서구와 경상남도 김해시에 걸쳐 있다. 1934년 김해평야에 안정된 농업용수의 공급을 위해 상류에 대저수문과 하류에 녹산배수갑문이 설치된 이후 수문관리에 따라 낙동강 본류수의 유입과 배수가 이루어지는 호소에 가까운 하천의 특성을 보이고 있다. 서낙동강 하천의 유로연장은 26.8 km이고 유역면적이 303.1 km^2 으로 유역의 폭은 동서간 최대거리가 약 19.8 km, 남북으로는 약 19.5 km 정도로 원형에 가까운 형태를 유지하고 있다. 서낙동강은 파천인 평강천, 맥도강과 지류인 조만강의 중, 하류 구간까지 담수지를 형성하여 평상 시에는 농업용수의 공급원으로 사용되고 홍수 시에는 거대한 유수지의 역할을 하고 있으나 1/24,000~1/30,000 정도의 완만한 하상경사로 인해 흐름이 정체되어 갈수기에는 수질오염이 심화되고, 홍수 시에는 저지대의 농경지가 침수피해를 받고 있다. 서낙동강은 유역 내 광활한 김해평야의 유일한 농업용수 공급원으로서 이용되고 있고 최근 시민들의 환경에 대한 관심의 증가와 수변공간에서의 여가활동 등의 증가로 인해 서낙동강의 수질

에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 이러한 농업용수의 이용과 관심의 증가에도 불구하고 서낙동강의 수질은 이에 부응하지 못하여 지역 내 농민과 시민들의 끊임없는 수질개선에 대한 요구가 증대되고 있는 실정이다. 이에 중앙정부 및 지방자치단체는 최근 서낙동강의 수질개선을 위해 오염총량관리제, 서낙동강 수질개선 종합대책 등 다양한 수질개선대책을 마련하여 추진 중에 있다. 그 중 낙동강 수계 비점오염관리시설 설치사업으로 본 저류형 인공습지가 조성되었다(부산광역시, 2007).

이 저류형 인공습지는 침사지와 저류형 습지로 구성되어 있다. 인공습지에는 갈대, 고랭이, 부들 등의 정수식물을 직접 이식하였고 상대적으로 수심이 깊은 지점에는 서낙동강의 토양 및 침수식물을 채취하여 적용하였다.

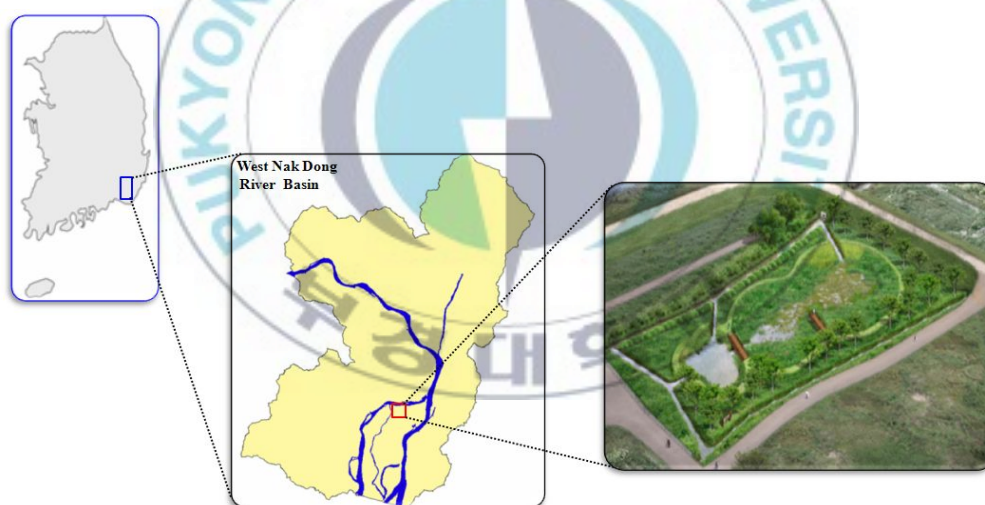


Fig. 3.1 The location of a constructed wetland.

Table 3.1 Data of constructed wetland attribute

	Area(m ²)	Average depth(m)	Volume(m ³)
Constructed wetland	300	0.9	270

나. 기상개황

수질측정시점을 기준으로 그전에 비가 내리지 않은 일수를 의미하는 선행무강우일수가 길면 일반적으로 갈수기 때 비점오염물질 발생량이 증가한다. 또한 강우량의 증가는 강우유출량의 증가를 유발하여 하천으로 흘러들어가는 비점오염물질부하량을 증가시킨다(김은중 등, 2003). 조사기간의 기상자료는 부산지방기상청의 관측자료를 활용하였다.

부산지역의 2009년 총 강수량은 1,773 mm로서 우리나라의 30년(1971~2000년)간 연평균 강수량인 1,315.9 mm보다 많았고, 2009년 전국 평균 강수량인 1,265.7 mm보다도 많은 것으로 나타났다. 하계절인 6~8월에 총 강수량의 절반이 넘는 양의 많은 비가 내렸고, 특히 7월에만 886 mm의 강우가 집중적으로 발생했다. 평균기온은 15.2 °C로 우리나라의 30년간 연평균기온인 12.4 °C보다 높게 나타났다.

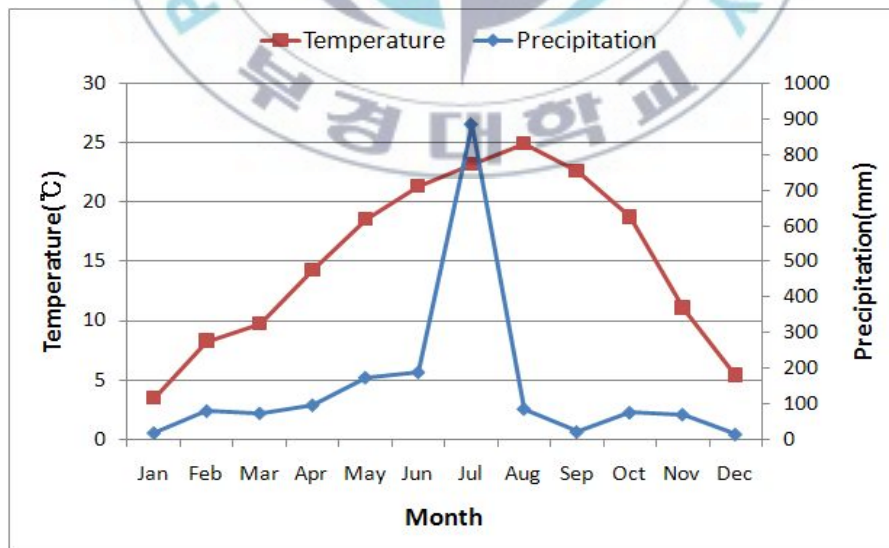


Fig. 3.2 Average temperature and precipitation.

2. 모니터링 방법

연구대상의 저류형 인공습지는 강우 시 가동되는 시설에 포함되므로 국립환경과학원에서 제시하는 비점오염저감시설 모니터링 방안에 따라 수질 및 유량조사를 실시하였다.

가. 모니터링의 목표

저감시설의 오염물질별 유입 및 오염부하량의 변동상황을 평가하고, 저감시설의 오염물질 저감 및 제거효율 등을 평가한다.

나. 개별 강우사상에 대한 수질 및 유량조사 방법

(1) 모니터링 대상 강우사상

강우량은 2.5 mm 이상이고, 선행강우시간은 24시간 이상이며, 강우사상 중 무강우시간은 6시간 이내인 강우사상에 대해서 모니터링을 실시한다.

(2) 유량조사

(가) 유량의 측정조건

1) 강우유출수 조사대상 강우량의 크기는 가장 근접한 기상청 강우관측소의 30년간 월 강우자료를 분석하여 결정하며, 각 월평균강우량의 합을 대표년강우량으로 한다. 다만, 해당 기상청 강우관측소의 강우자료가 30년 미만인 경우에는, 가용한 자료 전체를 이용한다.

2) 대표일강우량은 30년간 월강우량을 분석하여 해당월 평균 강우량에 가장 근접한 달의 일강우량으로 사용한다.

- 3) 대표일강우량의 시강우량은 대표시강우량으로 사용한다.
- 4) 대표일강우량은 10 mm 간격으로, 대표시강우량은 2.5 mm/hr 간격으로 강우계급을 설정하고 각 강우계급별 빈도를 분석한다. 다만, 가장 큰 강우계급 이상의 강우량은 가장 큰 강우계급의 빈도수 산정에 사용한다.
- 5) 강우계급은 최소 5개 이상으로 구분한다.
- 6) 기상청 강우량 예보를 근거로 강우계급별 현장 유량측정 실시여부를 사전에 결정한다. 다만, 일기예보의 불확실성으로 현장에서 유량측정을 수행하지 못한 경우에도 일기예보 근거 및 조사지점 현장상황을 기록으로 보관한다.
- 7) 강우유출수의 토지피복분류별 유량가중평균농도(EMC)를 산출하기 위한 유량조사는 조사 시마다 유출시점부터 유출종료 시까지 수질시료 채수와 동시에 최소 10회 이상의 유량을 측정하여야 하며, 강우계급별로 최소 10회 이상 조사하여야 한다.
- 8) 특정 강우계급에서 유출이 발생되지 않거나 조기에 종료되어 10회 이상 채수가 불가능한 경우 해당 강우계급 이하를 별도로 구분하고 토지피복분류별 대표농도 산정 시에는 이를 배제한 경우와 포함한 경우를 각각 산정하여 검토한다.

(나) 유량의 측정

각 강우계급별 유량측정 간격은 토성, 유역면적, 침투유량 도달시간, 유출지속시간별 농도변화 특성을 고려한다. 유입·출 시작시점부터 1시간까지는 15분 간격으로, 이후 유입·출이 중단되는 시점까지는 1~4시간 간격으로 유량을 측정한다.

(3) 모니터링 시기

봄(4~5월), 여름(8~9월), 가을(10~11월)에 각각 1회 이상의 모니터링을 수행하고, 강우 시 일정조건의 강우사상을 대상으로 모니터링을 실시한다.

3. 분석항목 및 방법

분석방법은 수질오염공정시험기준(2008) 및 Standard methods(2005)에 의하여 Table 3.2와 같이 분석하였다. 분석항목은 일반항목으로서 수온, pH, DO는 현장에서 수질자동측정장비(YSI-6600)을 이용하여 측정하였고, 시수는 실험실로 운반하여 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS)을 분석하였으며, 영양염류로서는 용존무기질소(DIN), 총질소(TN), 용존무기인(DIP), 총인(TP)을 분석하였다.

Table 3.2 Methods of analysis

조 사 항 목	분 석 방 법
Water temperature	A field study by YSI-6600
pH value	A field study by YSI-6600
Dissolved Oxygen	A field study by YSI-6600
Chemical Oxygen Demand	Potassium permanganate oxidations method
Suspended Solid	Glass-fiber filter method
Ammonia-nitrogen($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	Phenate method(Indophenol blue method)
Nitrite-nitrogen($\text{NO}_2^-\text{-N}$)	NED method
Nitrate-nitrogen($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	Cadmium reduction method
Dissolved Inorganic Nitrogen(DIN)	$\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_2^-\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$
Total Nitrogen(TN)	Cadmium reduction method
Dissolved Inorganic Phosphorus(DIP)	Ascorbic acid method
Total Phosphorus(TP)	Ascorbic acid method

가. 일반항목

수질분석 항목 중 수온, 수소이온농도(pH), 용존산소(DO)는 현장에서 측정하였고, 그 밖의 항목은 2 L 용량의 폴리에틸렌병에 채수하여 실험실로 운반한 후 분석하였다.

(1) 수온

현장에서 YSI-6600를 사용하여 측정하였다.

(2) pH

현장에서 YSI-6600를 사용하여 측정하였다.

(3) 용존산소(Dissolved Oxygen, DO)

현장에서 YSI-6600를 사용하여 측정하였다.

(4) 화학적산소요구량(Chemical Oxygen Demand, COD)

산성 과망간산칼륨법으로 분석하였다.

(5) 총부유물질(TSS) 및 휘발성부유물질(VSS)

총부유물질(TSS)은 유리섬유 여과지를 사용하여 105~110 °C에서 2시간 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 총부유물질을 측정하고 난 후 여과지를 전기로에 넣고 550±50 °C에서 15~20분간 회화시킨 후 휘발성 부유물질(VSS)을 측정하였다. 이는 부유물질 중의 유기물질 함량을 나타낸다.

나. 영양염류

(1) 용존무기질소(DIN)

여과한 시료를 항목별로 암모니아질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$)는 알칼리성에서 차아염소산의 존재 하에서 니트로프로시드의 축매작용으로 페놀과 반응하여 청색의 Indophenol이 생성되는데 이의 흡광도를 측정하여 암모니아질소($\text{NH}_4^+\text{-N}$)를 정량하고, 아질산질소($\text{NO}_2^-\text{-N}$)는 산성 용액 중(pH 2.0 내지 2.5)에서 방향족 제1아민과 반응해서 생성되는 디아조 화합물에 방향족 아민류를 가해 형성된 적색의 아조화합물의 흡광도를 측정하여 정량하였고, 질산질소($\text{NO}_3^-\text{-N}$)는 황산구리 용액으로 처리한 카드뮴 입자가 채워진 환원용유리관을 통과시켜 환원된 아질산질소를 NED법으로 측정하여 질산질소로 정량한다. 용존무기질소(DIN)는 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 의 합으로 나타내었다.

(2) 총질소(TN)

알칼리성 과황산칼륨법으로 전처리한 시료를 카드뮴 환원칼럼에 통과시켜(카드뮴 환원법) 술폰아미드와 α -나프틸에틸렌디아민이염산 용액에 반응시켜 생성된 적색의 아조 염료를 543 nm에서 비색 정량하였다.

(3) 용존무기인(DIP)

여과한 시료를 몰리브덴산암모늄과 황산, 아스코르빈산, 타르타르산 안티모닐칼륨으로 구성된 혼합 시약과 반응시켜 흡광도를 880 nm에서 측정, 정량하였다.

(4) 총인(TP)

알카리성 과황산칼륨법으로 전처리한 시료를 몰리브덴산암모늄과 황산, 아스코르빈산, 타르타르산 안티모닐칼륨으로 구성된 혼합 시약과 반응시켜 흡광도를 880 nm에서 측정하였다.

다. 저감효율 평가 및 저감량 산정 방법

(1) 강우 시 저감효율 평가

저류형 인공습지의 강우 시 비점오염물질의 저감효율을 평가하기 위한 방법으로 유입, 유출수의 유량가중평균농도(EMC : Event Mean Concentration)를 계산하여 비교하는 EMC efficiency(%)와 부하량의 합으로 계산하는 부하량 합산법(Summation of loads, SOL%)을 이용하였으며, 각 방식별 계산식은 아래와 같다.

$$\text{EMC efficiency}(\%) = [(\text{EMC}_{\text{in}} - \text{EMC}_{\text{out}}) / \text{EMC}_{\text{in}}] \times 100 \quad (9)$$

EMC_{in} : 유입 EMC(kg/m³)

EMC_{out} : 유출 EMC(kg/m³)

$$\text{SOL}(\%) = [(\text{SOL}_{\text{in}} - \text{SOL}_{\text{out}}) / (\text{SOL}_{\text{in}})] \times 100 \quad (10)$$

SOL_{in} : 유입 부하량(kg)

SOL_{out} : 유출 부하량(kg)

(2) 강우 후 저감량 산정

앞의 두 가지 저감효율 평가방법과 함께 본 저류형 인공습지의 비점오염 물질 저감량을 산정하기 위하여 강우 후 다음 강우가 발생하기 전까지 습지 내에 저류하는 기간동안 저감되는 양을 계산하는 방법을 사용하였다.

계산식은 다음과 같다.

$$\text{저류기간 동안의 저감량(g)} = (C_1V_1 - C_2V_2) / (C_1V_1) \quad (11)$$

C_1 : 강우 후 습지 내 수질농도(mg/L)

C_2 : 다음 강우 발생 전 습지 내 수질농도(mg/L)

V_1 : 강우 후 습지 내 수량(m^3)

V_2 : 다음 강우 발생 전 습지 내 수량(m^3)

IV. 결과 및 고찰

1. 저류형 인공습지의 현장조사

서낙동강에 조성된 저류형 인공습지의 비점오염물질 저감량을 산정하기 위하여 2009년 5월 21일, 7월 7일 강우 시 현장조사를 실시하였다. 강우시간 및 강우가 종료된 후 유량이 급격히 줄어드는 시점까지 습지의 유입과 유출 부에서 유량 측정 및 채수 등의 현장조사를 수행하였다. 또한 강우가 끝나고 다음 강우가 발생하기 전까지 습지 내에 저류하는 동안 저감되는 양을 계산하고 효율을 평가하기 위해 2009년 6월 18일, 8월 7일 청천 시 저류형 인공습지의 수심 측정 및 채수 등의 현장조사를 수행하였다.

5월 21일은 04시부터 강우가 시작되어 17시까지 총 86 mm의 강우가 내렸고, 7월 7일의 경우 04시부터 강우가 시작되어 17시까지 총 208 mm의 강우가 내렸다(Table 4.1). 그리고 각 조사시간별 유량은 Table 4.2~3에 나타내었다.

Table 4.1 Variation of rainfall

Time	2009.05.21	2009.07.07
	Rainfall (mm)	
04:00	1.5	0.5
05:00	3.0	6.0
06:00	6.5	10.5
07:00	5.0	37.0
08:00	9.5	8.5
09:00	10.0	14.5
10:00	18.5	18.0
11:00	11.5	9.5
12:00	10.5	31.0
13:00	6.5	37.5
14:00	1.5	7.5
15:00	1.0	11.0
16:00	1.0	12.5
17:00	0.0	4.0
Total	86.0	208.0

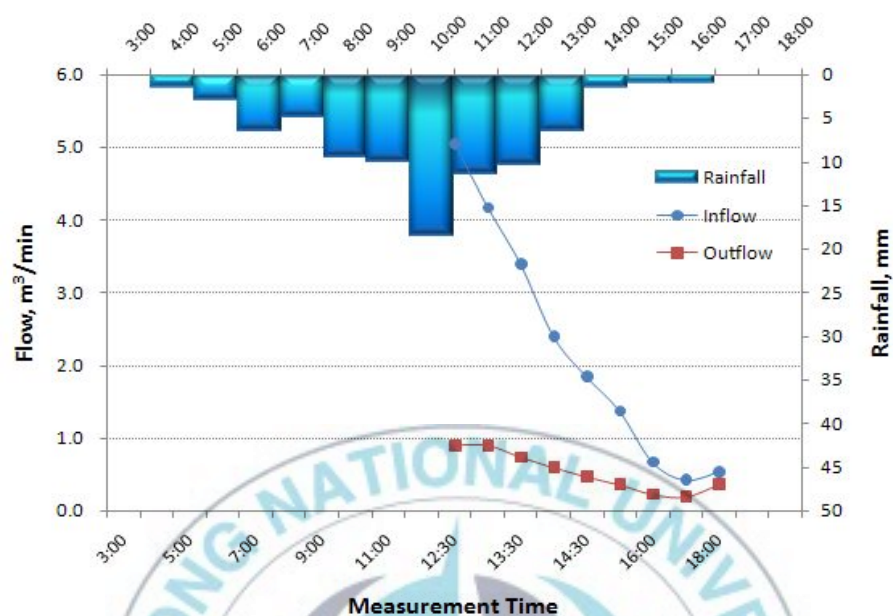


Fig. 4.1 Inlet-Outlet flowrate and rainfall comparison(2009.05.21).

Table 4.2 Runoff volume of stormevent(2009.05.21)

Time	Q(m ³)	
	Inflow	Outflow
12:30	0.00	0.00
13:00	151.78	27.30
13:30	125.36	27.30
14:00	101.90	22.38
14:30	72.01	18.03
15:00	55.44	14.23
16:00	82.77	21.91
17:00	40.55	13.93
18:00	25.81	21.91

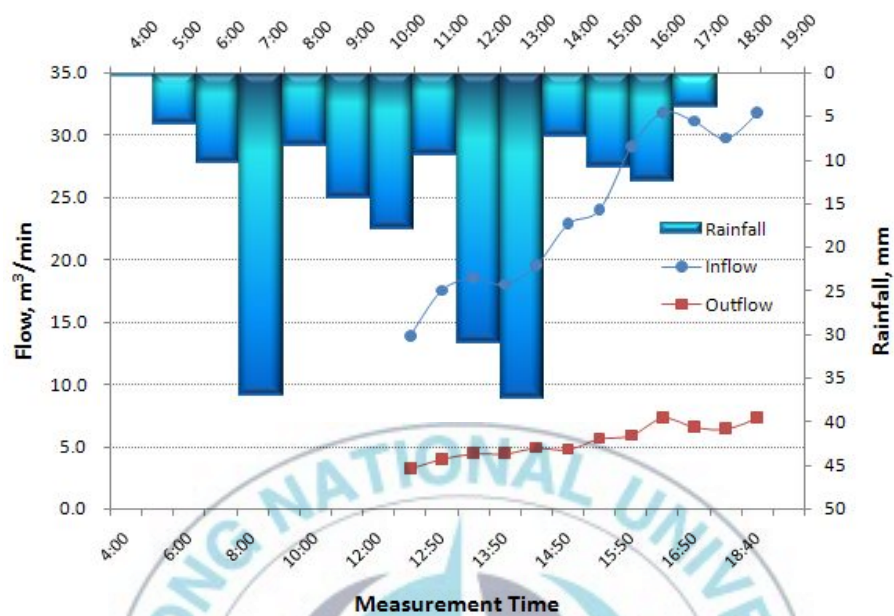


Fig. 4.2 Inlet-Outlet flowrate and rainfall comparison(2009.07.07).

Table 4.3 Runoff volume of stormevent(2009.07.07)

Time	Q(m ³)	
	Inflow	Outflow
12:20	0.00	0.00
12:50	416.05	95.42
13:20	525.94	119.06
13:50	555.85	132.07
14:20	540.77	132.07
14:50	586.75	145.90
15:20	685.55	142.37
15:50	720.55	168.21
16:20	871.13	176.08
16:50	952.91	218.68
17:20	932.05	196.69
18:40	2376.43	583.14

2. 수질분석 결과

대상 강우기간 동안의 일반항목 및 영양염류의 수질분석결과와 농도변화는 다음과 같다((Fig. 4.3~14), (Table 4.4~5)).

가. 부유물질(SS)

2009년 5월 21일 SS의 유입농도는 3.00~20.40 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 6.28 mg/L로 나타났다. 유출농도는 23.50~51.00 mg/L 범위였고 평균농도는 39.08 mg/L였다. 2009년 7월 7일 SS의 유입농도는 4.70~17.60 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 10.06 mg/L로 나타났다. 유출농도는 6.60~32.10 mg/L 범위였고 평균농도는 14.21 mg/L였다.

유입농도와 유출농도를 살펴보면 유입농도보다 유출농도가 높게 나타났는데, 이는 청천 시 쌓여있던 오염물질이 강우가 시작되면서 빗물과 함께 습지로 유입되어 강우량이 증가됨에 따라 습지 밖으로 유출된 결과로 판단된다. Lee et al. (2000)은 이와 같이 강우초기에 유량 및 오염물질이 다량으로 유출되는 현상을 초기세척현상이라 하며 입자성 물질이 용존성 물질보다 초기세척현상이 더 크게 나타난다고 보고하였다. 또한, 유역면적이 작고 강우강도가 더 클수록 초기세척현상이 강하게 나타난다고 결론을 지었다.

이와 같은 내용은 그래프에 나타나듯이 초기세척현상 이후에 강우가 지속되더라도 유입농도가 낮은 상태를 유지하며 점차 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한, 유출농도가 시간이 지날수록 감소하는 것으로 보아 침강 및 식생에 의한 여과로 인해 SS가 습지 내에서 효과적으로 제거되는 것으로 판단된다.

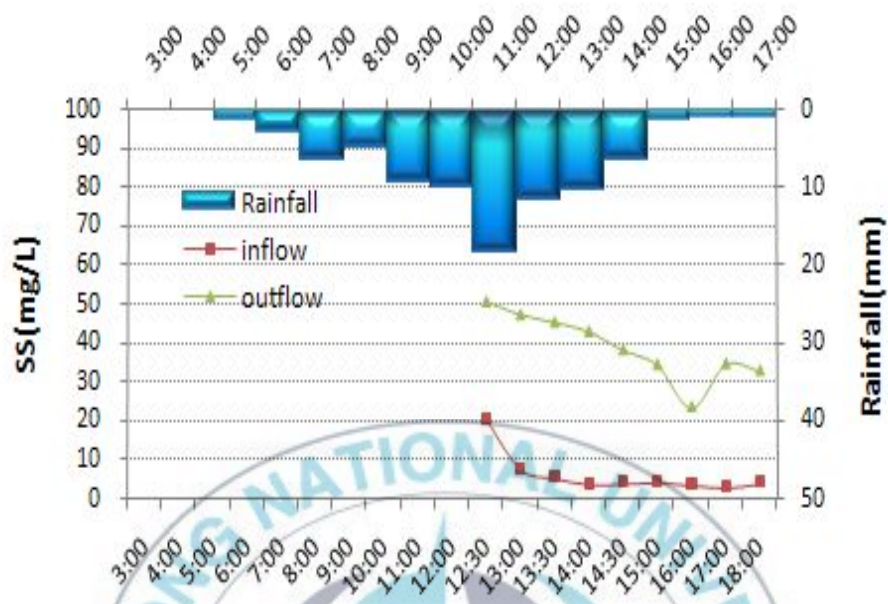


Fig. 4.3 Variation of inlet, outlet SS concentration(2009.05.21).

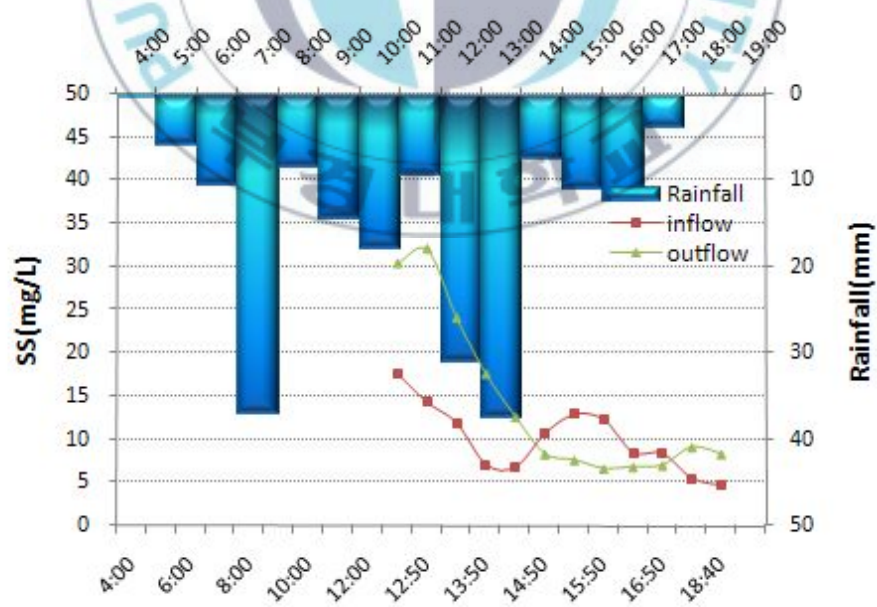


Fig. 4.4 Variation of inlet, outlet SS concentration(2009.07.07).

나. 화학적산소요구량(COD)

2009년 5월 21일 COD의 유입농도는 15.50~24.50 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 19.61 mg/L로 나타났다. 유출농도는 14.00~16.10 mg/L 범위였고 평균농도는 14.94 mg/L였다. 2009년 7월 7일 COD의 유입농도는 12.30~19.60 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 16.49 mg/L로 나타났다. 유출농도는 11.50~17.60 mg/L 범위였고 평균농도는 14.56 mg/L였다.

COD는 유출농도가 유입농도보다 낮으나 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 선행무강우 시 오염물질이 습지 내에 정제되어 저류하면서 조류가 발생하여 강우에 의해 유출된 것으로 판단된다. COD는 초기강우가 지난 시점이나 평상시에는 습지에서 저감효과가 크게 나타나지 않는 것으로 판단된다.

이에 대해 좀 더 명확한 결과를 얻기 위해서는 COD 분석 시 조류에 의한 영향을 배제하기 위해 시료를 여과해서 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

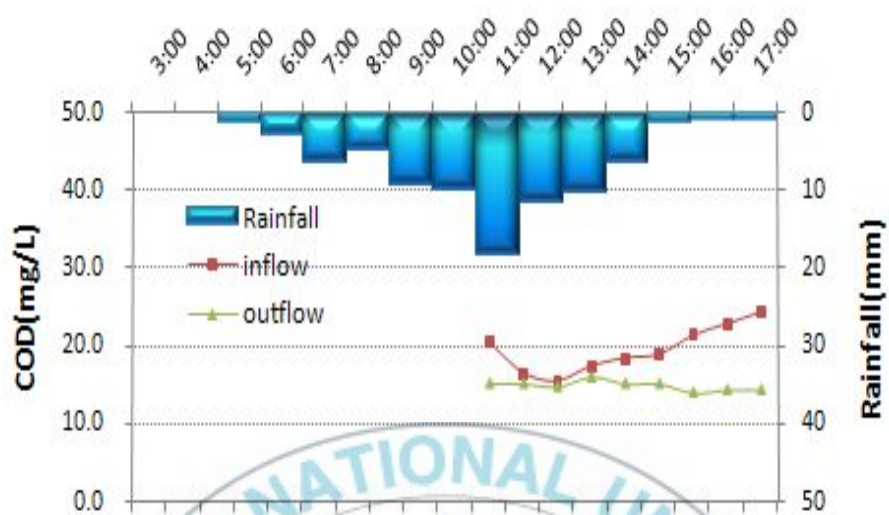


Fig. 4.5 Variation of inlet, outlet COD concentration(2009.05.21).

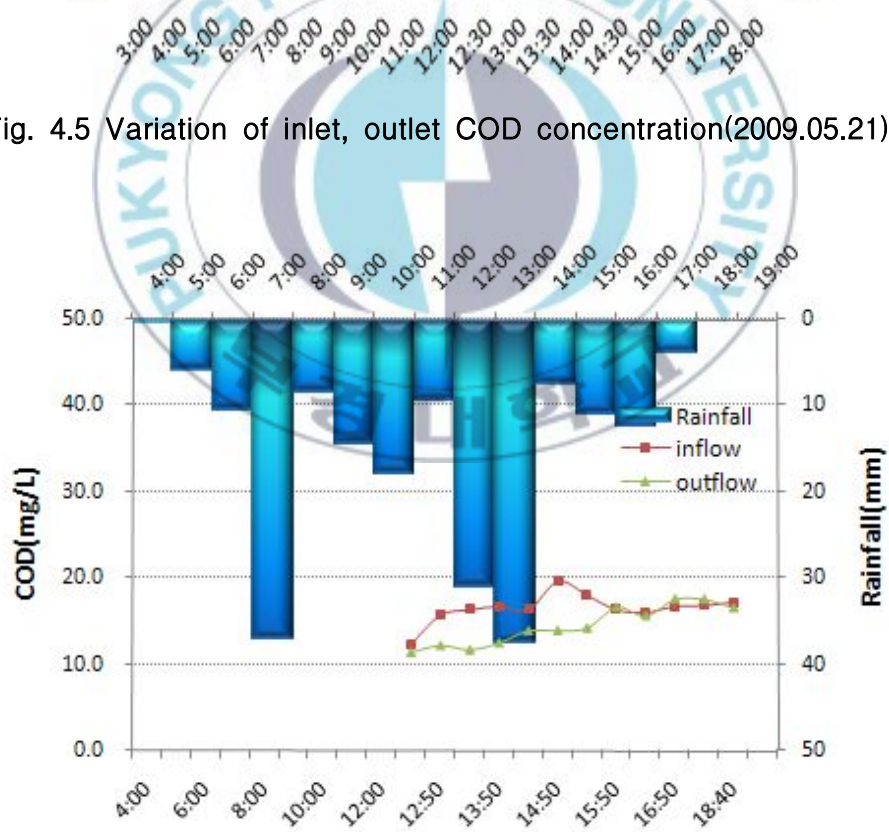


Fig. 4.6 Variation of inlet, outlet COD concentration(2009.07.07).

다. 총질소(TN)

2009년 5월 21일 TN의 유입농도는 7.334~15.580 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 10.250 mg/L로 나타났다. 유출농도는 4.244~5.536 mg/L 범위였고 평균농도는 4.990 mg/L였다. 2009년 7월 7일 TN의 유입농도는 3.527~5.803 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 5.140 mg/L로 나타났다. 유출농도는 3.317~6.423 mg/L 범위였고 평균농도는 4.820 mg/L로 감소하였다.

Fig. 4.7을 보면 강우가 점차 감소하는데 반해, TN의 유입농도는 점점 증가하고, Fig. 4.8에서는 강우량의 변화가 크게 나타나는데 유입농도는 그에 비해 크지 않은 것을 볼 수 있다. 이는 장(2005)의 TN은 유량의 변동과 관련성이 뚜렷하지 않고 평상시에도 높은 농도로 유출되는 경향이 있었다는 연구결과와 유사성이 있는 것으로 판단된다.

습지에서 질소의 제거과정은 질산화와 탈질화가 주 제거기작이다. 질산화는 호기성 상태에서 유기질소를 $\text{NH}_4^+-\text{N} \rightarrow \text{NO}_2^--\text{N} \rightarrow \text{NO}_3^--\text{N}$ 로 변환되는 과정이다.

탈질 작용은 혐기성 상태에서 NO_2^--N 이 $\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2(\text{g})$ 로 변환되어 대기 중으로 방출되는 과정이다. 복미의 다양한 습지에서 N제거 연구에 의하면, 습지에서 N제거에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 N의 단위면적당 유입부하량과 기후, 식생 구성, 토양 특성이다(Kadlec and Knight, 1996). 제거되는 N의 총량에서 탈질화에 의해 제거되는 양이 약 60~70 %에 이르며, 식물에 의해 제거되는 양은 약 25 % 정도이다(장, 2005).

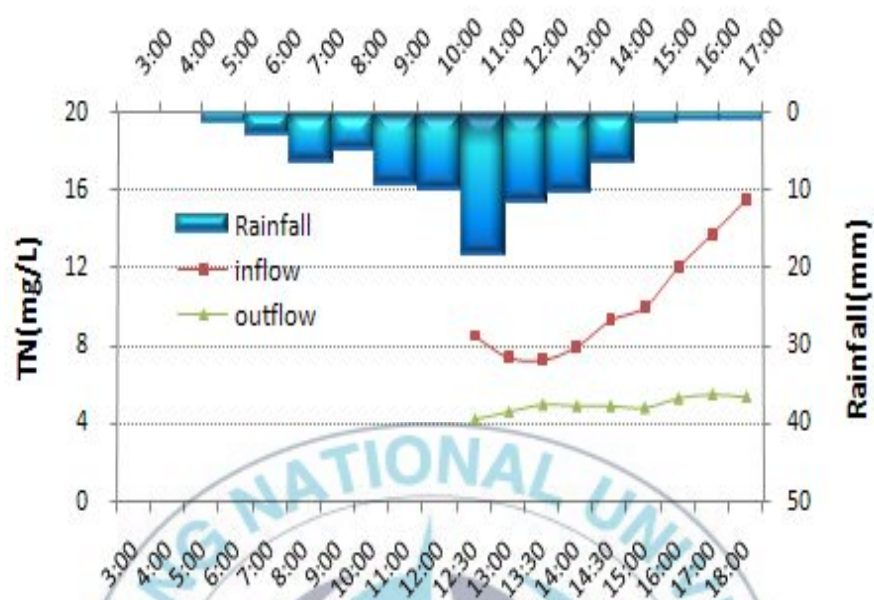


Fig. 4.7 Variation of inlet, outlet TN concentration(2009.05.21).

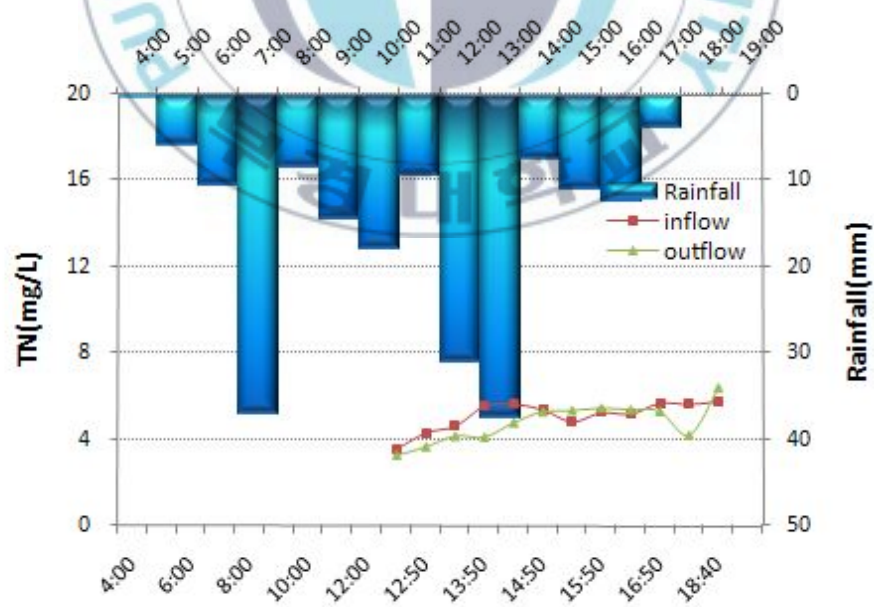


Fig. 4.8 Variation of inlet, outlet TN concentration(2009.07.07).

라. 용존무기질소(DIN)

2009년 5월 21일 DIN의 유입농도는 5.598~13.697 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 8.420 mg/L로 나타났다. 유출농도는 3.145~4.292 mg/L 범위였고 평균농도는 3.830 mg/L였다. 2009년 7월 7일 DIN의 유입농도는 2.845~4.807 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 4.160 mg/L로 나타났다. 유출농도는 2.419~4.132 mg/L 범위였고 평균농도는 3.420 mg/L였다.

용존무기질소(Dissolved Inorganic Nitrogen)인 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 과 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 을 각각 살펴보면, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 유입농도가 0.865~2.450 mg/L, 유출농도가 0.768~2.135 mg/L 범위이고, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 은 유입농도가 0.104~0.434 mg/L, 유출농도가 0.055~0.369 mg/L 범위이며 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 은 유입농도가 1.546~11.627 mg/L, 유출농도가 1.030~2.958 mg/L 범위로 대부분의 시기에서 유출수가 낮아지는 경향을 보이고 있다.

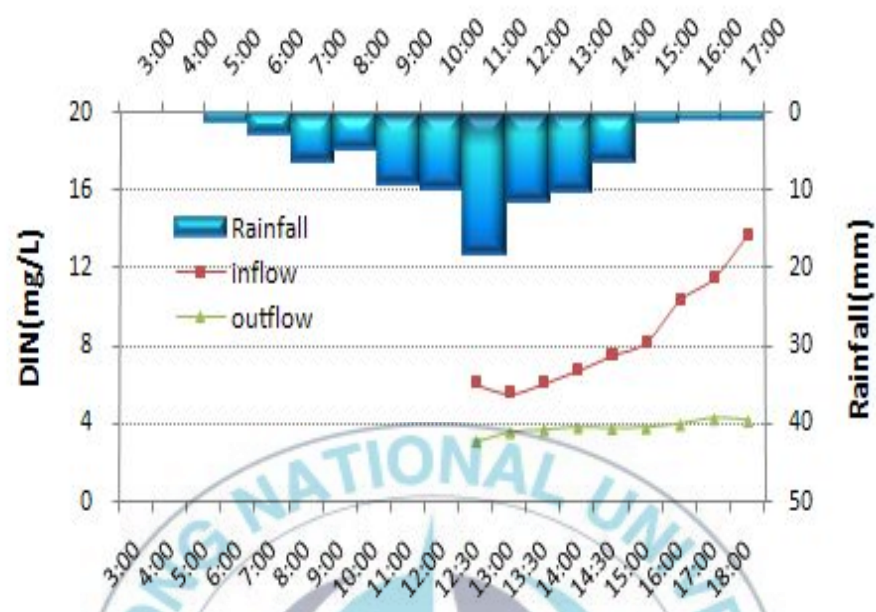


Fig. 4.9 Variation of inlet, outlet DIN concentration(2009.05.21).

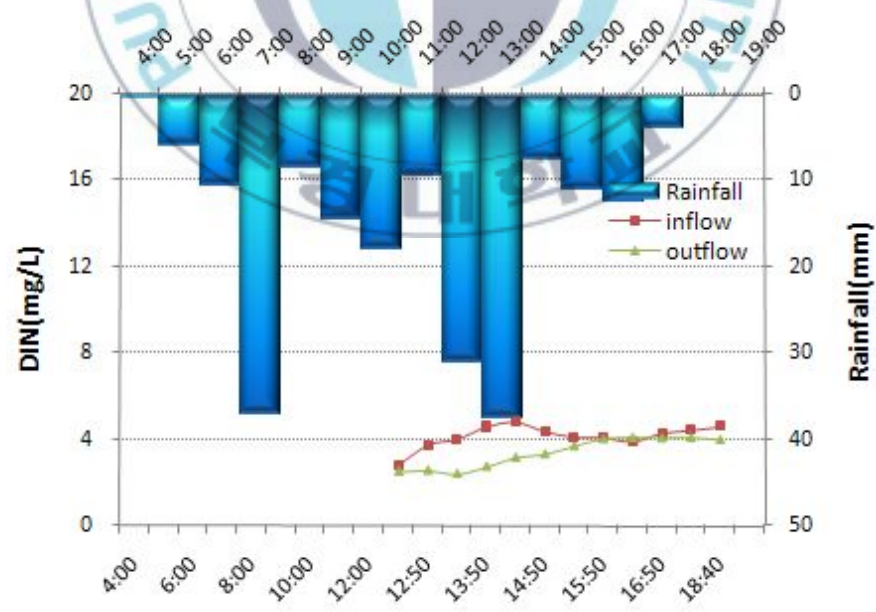


Fig. 4.10 Variation of inlet, outlet DIN concentration(2009.07.07).

마. 총인(TP)

2009년 5월 21일 TP의 유입농도는 1.632~2.140 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 1.820 mg/L로 나타났다. 유출농도는 0.892~1.181 mg/L 범위였고 평균농도는 1.070 mg/L였다. 2009년 7월 7일 TP의 유입농도는 1.258~1.821 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 1.660 mg/L로 나타났다. 유출농도는 0.952~1.794 mg/L 범위였고 평균농도는 1.480 mg/L였다.

TP는 유량변동에도 크게 변화가 없이 유사한 농도경향을 나타내었다. 5월의 경우 유출수가 유입수보다 적은 농도로 나타났고, 7월의 경우는 유입수와 유출수 농도가 시간이 지날수록 차이가 감소하였다.



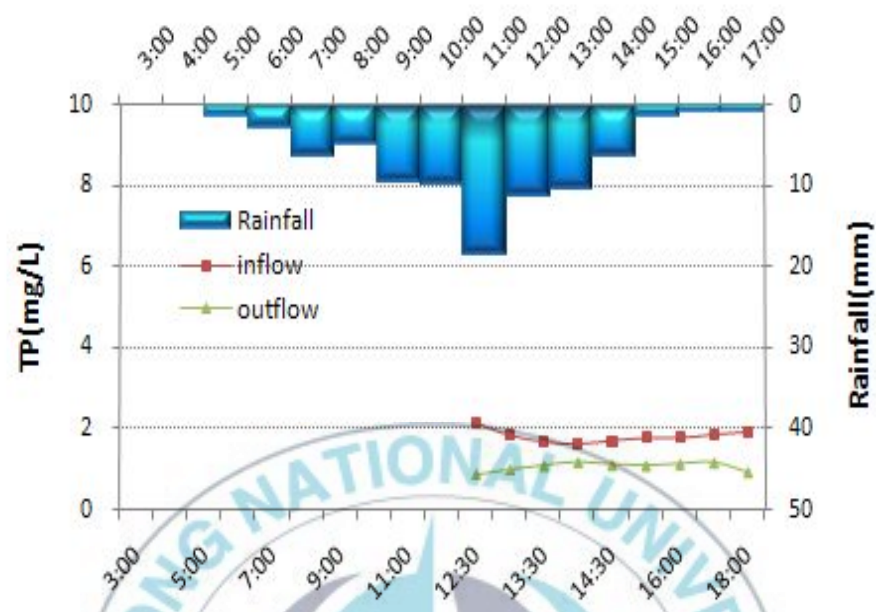


Fig. 4.11 Variation of inlet, outlet TP concentration(2009.05.21).

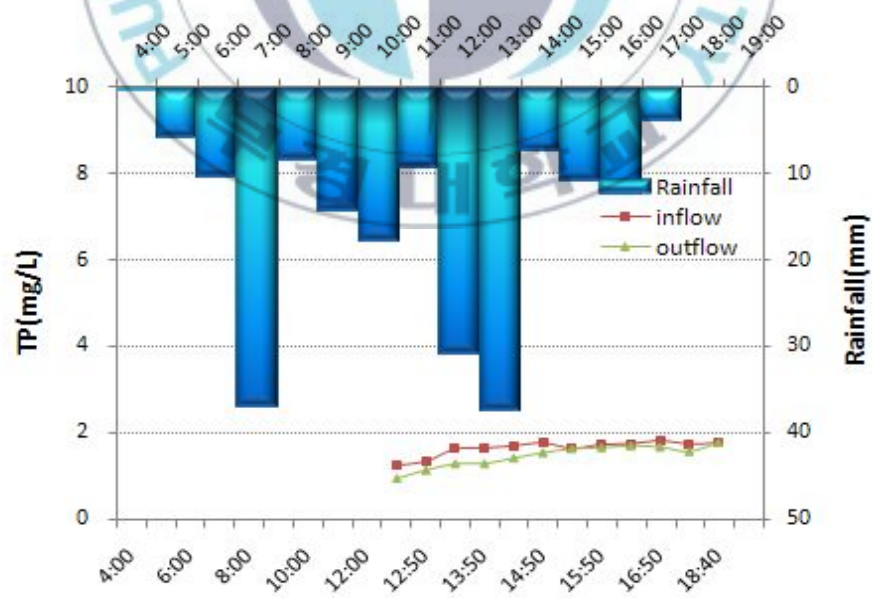


Fig. 4.12 Variation of inlet, outlet TP concentration(2009.07.07).

바. 용존무기인(DIP)

2009년 5월 21일 DIP의 유입농도는 1.570~2.072 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 1.750 mg/L로 나타났다. 유출농도는 0.836~1.072 mg/L 범위였고 평균농도는 1.000 mg/L였다. 2009년 7월 7일 DIP의 유입농도는 1.144~1.700 mg/L로 나타났으며, 평균농도는 1.510 mg/L로 나타났다. 유출농도는 0.833~1.525 mg/L 범위였고 평균농도는 1.200 mg/L로 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphorus)인 인산염인(Phosphates, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)은 평균농도가 약 50 % 가량 감소한 것으로 나타났다.

인은 우리나라 대부분의 호소에서 부영양화의 제한인자이다. 따라서 효과적인 인의 제거는 호소의 수질관리에 도움이 될 수 있다. 습지에서 인의 제거는 주로 용존성 인의 흡착과 입자성 인의 침전작용이다. 대부분의 습지 토양은 인의 흡수능력이 있으나, 위치에 따라 차이가 크고 빠르게 소진될 수 있다(Kadlec and Knight, 1996).

강우 시 TP와 DIP의 저감효율을 비교해보면, DIP가 약 50 %의 효율로 TP보다 높은 결과로 미뤄 이는 입자상의 물질의 침전보다는 용존성 인의 토양입자에의 흡착에 의한 것으로 판단된다.

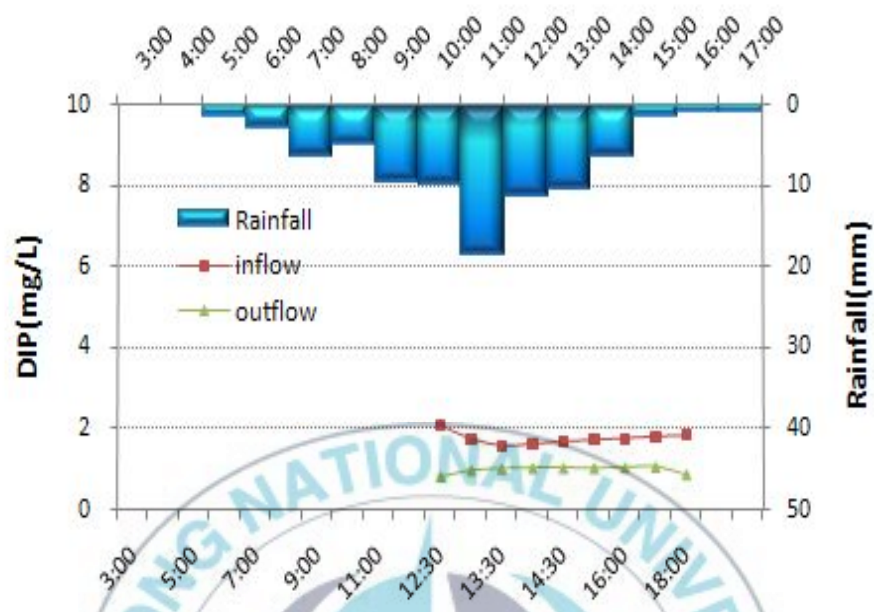


Fig. 4.13 Variation of inlet, outlet DIP concentration(2009.05.21).

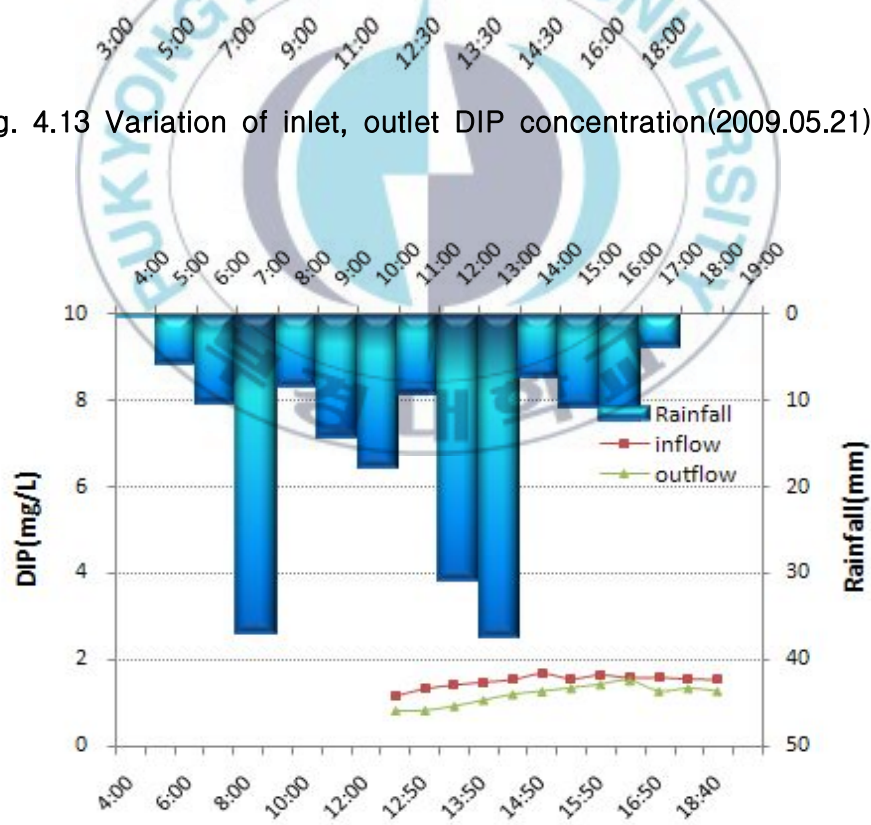


Fig. 4.14 Variation of inlet, outlet DIP concentration(2009.07.07).

Table 4.4 Concentrations of inlet constituents(2009.05.21)

Time	SS	COD	TN	DIN	TP	DIP
mg/L						
12:30	20.40	20.50	8.558	6.056	2.140	2.072
13:00	7.70	16.50	7.447	5.598	1.840	1.744
13:30	5.40	15.50	7.334	6.116	1.686	1.570
14:00	3.90	17.50	8.007	6.770	1.632	1.617
14:30	4.00	18.50	9.385	7.537	1.711	1.679
15:00	4.30	19.00	10.038	8.215	1.779	1.714
16:00	3.70	21.50	12.111	10.351	1.778	1.758
17:00	3.00	23.00	13.813	11.478	1.860	1.802
18:00	4.10	24.50	15.580	13.697	1.925	1.830
Sum	56.50	176.50	92.273	75.818	16.351	15.786
Mean	6.28	19.61	10.253	8.424	1.817	1.754

Table 4.5 Concentrations of outlet constituents(2009.05.21)

Time	SS	COD	TN	DIN	TP	DIP
mg/L						
12:30	51.00	15.20	4.244	3.145	0.892	0.836
13:00	47.60	15.20	4.631	3.595	1.008	0.989
13:30	45.60	14.80	5.014	3.720	1.105	1.032
14:00	43.20	16.10	4.939	3.858	1.181	1.048
14:30	38.40	15.20	4.940	3.793	1.123	1.051
15:00	34.60	15.20	4.839	3.838	1.106	1.043
16:00	23.50	14.00	5.339	4.000	1.140	1.059
17:00	34.80	14.40	5.536	4.292	1.171	1.072
18:00	33.00	14.40	5.406	4.186	0.941	0.887
Sum	351.70	134.50	44.888	34.427	9.667	9.017
Mean	39.08	14.94	4.988	3.825	1.074	1.002

Table 4.6 Concentrations of inlet constituents(2009.07.07)

Time	SS	COD	TN	DIN	TP	DIP
mg/L						
12:20	17.60	12.30	3.527	2.845	1.258	1.144
12:50	14.30	15.70	4.320	3.764	1.351	1.322
13:20	11.90	16.30	4.632	4.031	1.632	1.418
13:50	7.10	16.70	5.583	4.590	1.656	1.483
14:20	6.80	16.30	5.684	4.807	1.707	1.548
14:50	10.70	19.60	5.411	4.375	1.773	1.700
15:20	12.90	18.00	4.840	4.125	1.648	1.567
15:50	12.30	16.30	5.277	4.097	1.737	1.664
16:20	8.50	16.00	5.207	3.909	1.755	1.590
16:50	8.40	16.70	5.728	4.294	1.821	1.603
17:20	5.50	16.80	5.671	4.427	1.752	1.561
18:40	4.70	17.20	5.803	4.598	1.770	1.549
Sum	120.70	197.90	61.683	49.862	19.860	18.149
Mean	10.06	16.49	5.140	4.155	1.655	1.512

Table 4.7 Concentrations of outlet constituents(2009.07.07)

Time	SS	COD	TN	DIN	TP	DIP
mg/L						
12:20	30.40	11.50	3.317	2.534	0.952	0.833
12:50	32.10	12.30	3.708	2.583	1.147	0.842
13:20	24.10	11.80	4.204	2.419	1.296	0.940
13:50	17.60	12.60	4.151	2.757	1.301	1.073
14:20	12.60	14.00	4.818	3.193	1.429	1.211
14:50	8.30	14.00	5.322	3.352	1.557	1.276
15:20	7.60	14.30	5.375	3.727	1.650	1.352
15:50	6.60	16.70	5.489	4.077	1.679	1.438
16:20	6.80	15.70	5.414	4.132	1.722	1.525
16:50	7.00	17.60	5.340	4.118	1.692	1.279
17:20	9.10	17.60	4.238	4.126	1.586	1.345
18:40	8.30	16.60	6.423	4.028	1.794	1.283
Sum	170.50	174.70	57.799	41.046	17.805	14.397
Mean	14.21	14.56	4.817	3.421	1.484	1.200

3. 비점오염물질 저감효율 평가

가. 강우 시 저감효율 평가

2009년 5월 21일, 7월 7일 총 2회에 걸쳐 저류형 인공습지의 강우 시 현장조사를 실시하여 시간대별 유입, 유출 부하량을 산출하였다.

산출된 부하량으로부터 EMC(Event Mean Concentration) 및 SOL(Summation Of Loads) 방법으로 저감효율을 산정한 결과를 Fig. 4.15에 나타내었다. 먼저 SOL는 SS 24.48 %, COD 79.00 %, TN 82.66 %, TP 82.20 %로 SS를 제외한 항목에서 높은 저감효율을 나타내었다. 다음으로 EMC의 경우 SS -20.82 %, COD 13.13 %, TN 27.62 %, TP 25.80 %로 SOL 효율에 비해 낮게 나타났다. SS의 경우 초기세척현상으로 인해 강우초기에 유입된 오염물질이 강우가 소강상태로 접어들면서 유출되어 농도가 역전된 것으로 판단된다.

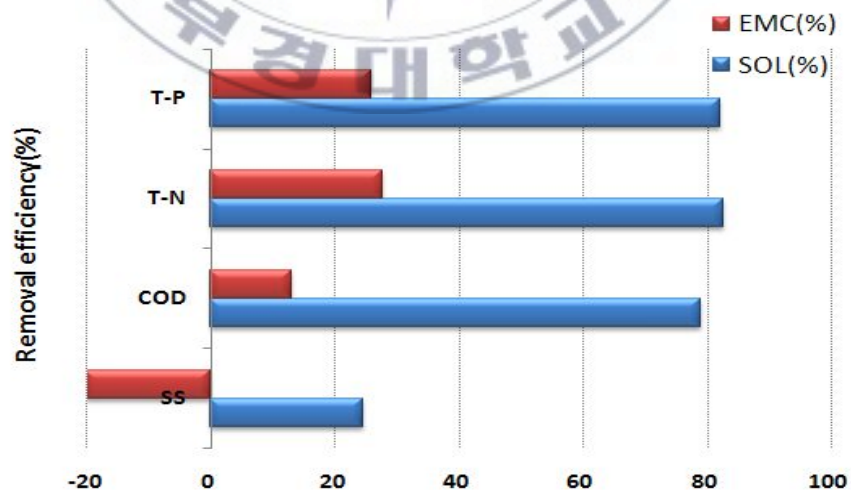


Fig. 4.15 Comparison of reduction efficiency(SOL(%), EMC(%)).

나. 저류형 인공습지 설계인자 도출 방안

저류형 습지의 설계에서 가장 중요한 요인은 조성된 습지로 유입되는 오염부하량과 이를 처리할 목표효율 혹은 목표수질을 달성하기 위한 습지의 크기이다. 아울러 저류형 습지의 특성을 유지하며 처리 효율을 높일 수 있는 수문과 기질 및 수심과 같은 세부적인 설계요인들이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 외국의 습지연구사례를 종합하여 Fig. 4.16과 같이 각각의 수질항목에 대하여 유입표면부하량과 유출표면부하량 간의 관계식을 도출해 보았다. 이러한 결과는 유입농도에 대하여 대략적인 유출농도를 추정하거나, 습지의 크기의 범위를 결정하는데 유용하게 사용될 수 있고, 습지운영에서 나온 유출유량과 농도를 이용하여 조성된 습지의 크기가 적당하게 설계되었는지를 평가하는데도 사용할 수 있다. 또한 운영과정에서 처리목표를 달성하지 못할 경우에 이를 평가할 수 있는 도구로도 사용될 수 있다.

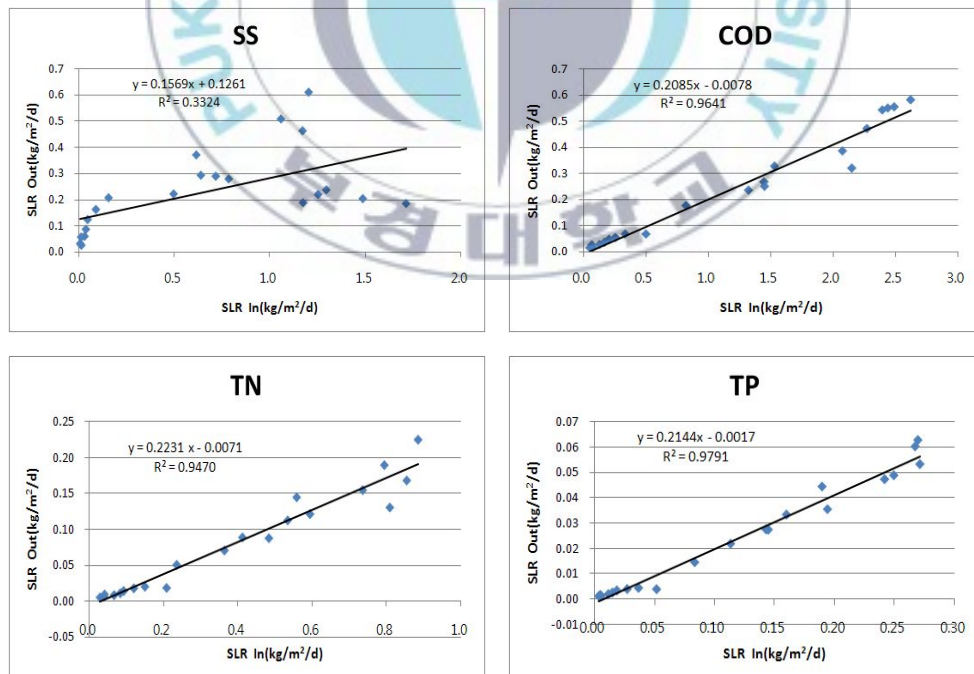


Fig. 4.16 Relations between inlet and outlet surface loading rate.

4. 비점오염물질 저감량 산정

앞선 강우 시 저류형 인공습지의 비점오염물질 저감효율 평가기법 중 EMC와 SOL의 방법을 이용하여 평가를 실시하였다. 그 결과 SOL 효율의 경우 유입, 유출수량의 차이로 인해 효율이 과대평가되어 저류형 습지와 같은 저감시설들의 경우, 강우 시 유입, 유출되는 모니터링 결과만으로는 저감 효율 평가결과가 큰 의미를 가질 수 없으며, 건기 시 혹은 강우사상 간의 습지에 체류된 오염물질의 생물학적 저감량을 모니터링 하여 그 결과를 포함하는 저감효율 산정방법이 필요할 것으로 판단되어 앞선 강우 시 조사 후부터 다음 강우가 발생하기 전까지 습지 내에 저류하는 동안 오염물질이 얼마나 저감되는지 알아보았다.

우선, 2009년 5월 21일 강우가 끝나고 유출유량이 안정되는 시점에 습지 내에 채수를 실시하였다. 그리고 28일 후인 2009년 6월 18일에 저류형 인공 습지 내에 채수를 실시하여 각각의 수질농도에 습지용량을 곱하여 부하량을 산정하였다. 5월 21일 강우가 종료되고 난 후 저류형 습지 내의 SS는 9,900.0 g였는데 28일 후인 6월 18일 SS는 1,044.0 g으로 28일 간 8,856.0 g의 SS가 저감되었다. 이를 단위면적당 일제거량으로 나타내면 $1.054 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 으로 SS는 수생식물의 스크린 작용과 같은 물리적 요인에 의해 침전 제거된 것으로 판단된다. COD는 5월 21일에 4,680.0 g에서 6월 18일은 6,154.4 g으로 오히려 1,474.4 g이 증가하였다. TN은 5월 21일에 1,653.3 g에서 6월 18일 572.4 g으로 28일 간 1,080.9 g이 저감되었다. TN의 단위면적당 일제거량은 $0.129 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 으로 나타났다. TP는 5월 21일에 341.1 g에서 6월 18일은 114.0 g으로 227.0 g이 28일 간 저감되었다. 이를 단위면적당 일제거량으로 나타내면 $0.027 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 으로 나타났다(Table 4.8).

다음으로 2009년 7월 7일 강우사상에 대한 현장조사를 실시하고 강우 종료 후 습지 내 채수를 실시하였다. 그리고 30일 후인 2009년 8월 7일에 습지 내에 채수를 실시하여 습지 보유수에 존재하는 오염물질의 양을 산정하였다. 7월 7일 강우가 종료되고 난 후 저류형 습지 내의 SS는 11,074.5 g에서 30일 후인 8월 7일 841.5 g으로 10,233.0 g이 저감된 것으로 나타났다. 단위면적당 일제거량은 $1.137 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 로 나타났다. COD는 7월 7일 5,934.0 g에서 8월 7일 3,340.5 g으로 2,593.5 g이 저감되어 단위면적당 일제거량은 $0.288 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 으로 산정되었다. TN은 7월 7일에 2,002.0 g에서 8월 7일 622.2 g으로 30일 간 1,379.8 g이 저감되었다. TN의 단위면적당 일제거량은 $0.153 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 으로 나타났다. TP는 7월 7일에 610.7 g에서 8월 7일은 75.5 g으로 535.2 g이 30일 간 저감되었다. 이를 단위면적당 일제거량으로 나타내면 $0.059 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 으로 나타났다(Table 4.9).

Table 4.8 Variation of concentration, quantity(2009.05.21 ~ 06.18)

Date	Area(m ²)	Avg. depth(m)		Volume(m ³)
	300	1		300.00
2009.05.21	SS	COD	TN	TP
Conc.(mg/L)	33.000	15.600	5.511	1.137
Quantity(g)	9,900.0	4,680.0	1,653.3	341.1

[after 28day]

Date	Area(m ²)	Avg. depth(m)		Volume(m ³)
	300	0.87		261.00
2009.06.18	SS	COD	TN	TP
Conc.(mg/L)	4.000	23.580	2.193	0.437
Quantity(g)	1,044.0	6,154.4	572.4	114.0
Removal (kg/28day)	8,856.0	-1474.4	1,080.9	227.0
Removal eff.(%)	89.5	-31.5	65.4	66.6
g/m ² /day	1.054	-0.176	0.129	0.027

Table 4.9 Variation of concentration, quantity(2009.07.07~08.07)

Date	Area(m ²)	Avg. depth(m)	Volume(m ³)	
	300	1.15	345.00	
2009.07.07	SS	COD	TN	TP
Conc.(mg/L)	32.100	17.200	5.803	1.770
Quantity(g)	11,074.5	5,934.0	2,002.0	610.7

[after 30day]

Date	Area(m ²)	Avg. depth(m)	Volume(m ³)	
	300	0.85	255.00	
2009.08.07	SS	COD	TN	TP
Conc.(mg/L)	3.300	13.100	2.440	0.296
Quantity(g)	841.5	3,340.5	622.2	75.5
Removal (kg/30day)	10,233.0	2,593.5	1,379.8	535.2
Removal eff.(%)	92.4	43.7	68.9	87.6
g/m ² /day	1.137	0.288	0.153	0.059

위의 결과로부터 우리나라 강우빈도를 고려하여 본 저류형 인공습지의 연간 비점오염물질 저감량을 산정하였다. 저감량을 산정하는 방법으로는 상기 조사를 통해 산정된 단위면적당 일제거량을 1년 중 강우일수와 그 외 건기일수를 고려하여 오염물질의 제거가 일어나는 건기일수를 곱하여 연간 비점오염물질 저감량을 산정하였다. 2009년 현재까지 총 강우일수는 100일 이고 건기일수는 250일이다. 본 저류형 인공습지의 평균 단위면적당 일제거 량은 SS가 1.096 g/m²/day, COD가 0.056 g/m²/day, TN은 0.141 g/m²/day,

TP가 0.043 g/m²/day으로 나타나 건기일수를 고려하여 연간 단위면적당 제거량으로 나타내면 SS가 273.91 g/m²/yr, COD가 14.08 g/m²/yr, TN이 35.25 g/m²/yr, TP가 10.81 g/m²/yr으로 산정되었다. 이 결과는 1년 치 강우 사상을 모두 반영한 것이 아닌 점에서 한계가 있으며 본 연구를 통해 산정된 단위면적당 일제거량을 연간 제거량으로 확대해석한 것으로 좀 더 정확한 제거량 산정을 위해서는 1년 중 다수의 강우사상 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.



5 . 저류형 인공습지 유지관리 방안

인공습지를 설계한 후 효과적인 운영과 기능 향상을 위해서는 지속적인 유지관리가 필요하다. 인공습지를 설계하는데 있어서 중요한 요인이 되는 수문, 토양, 식생 등을 고려하여 유지관리를 해야한다.

가. 유입수로 및 습지 내 협잡물 제거

유입과 유출부에 수리학적 제어를 방해하지 않도록 퇴적물 및 협잡물을 제거한다. 현장조사 시마다 관찰하여 청소한다.

나. 유입수로 및 습지 내 침전물 관리

침식발생 정도를 주기적으로 조사하고 다량의 침전물 유입 시에 식생 완충대나 트랩을 사용하여 처리하고 대규모 강우 후, 일정량 이상 유입된 침전물은 제거하며, 퇴적물 축적을 모니터링하고 퇴적물로 인해 웅덩이의 부피가 심각하게 줄어들거나 식물이 잘 자라지 못하거나 습지가 부영양화되는 경우에는 퇴적물을 제거한다.

다. 습지식생관리

모니터링 시 원활한 시료채취 및 조경공간으로 주민 친화적 공간 조성 및 주민들의 심미적 안정감을 주기 위하여 지속적인 식생관리가 요구된다.

식생관리는 육안으로 관찰하여 식생관리 주기를 결정하는 것이 바람직하며 습지 내 본래 종 유지를 위해 습지주변 잡초 및 유해종 등을 제거하며, 습지 내 식생 모니터링을 통해 필요한 곳에 식재를 하거나 인근 지역에 자생하는 정수식물, 침수식물의 종자가 포함된 토양을 도입한다. 식생대의 두 번째 생장기 이후에 식재지역의 최소 50 % 식생이 유지되지 않는다면 추가로 식재를 한다.

라. 인공습지 내 토양 침식관리

월 1회 토양유실로 인한 습지구조물을 점검 및 복구한다.

마. 수위조절

식물의 생장관리에 가장 중요한 요건은 수위조절이므로, 정수식물이 식재된 습지의 경우 봄에는 수위를 낮춰 생장을 유도하고, 침수식물의 경우 일정수위 이상 유지시켜 생장을 유도하며, 비생장기인 겨울에는 수위를 높여 온도를 유지한다.

V. 결 론

본 연구에서는 서낙동강에 조성된 저류형 인공습지의 비점오염물질 저감효율을 평가하였다. 일반적으로 비점오염물질 저감시설로 유입, 유출되는 오염물질량을 평가하고 정량화할 때는 강우 시 일정시간 간격의 강우유출수 농도, 총유입부하량, 유량가중평균농도의 세 가지가 가장 많이 이용되고 있다. 연구대상 인공습지에 이들 기법을 적용하여 강우 시 저감효율을 평가하고, 또한 비강우 시 및 강우사상 간의 습지모니터링 결과를 포함하여 인공습지의 총괄적인 저감량을 산정하였다.

1) 비점오염물질을 저감하기 위한 방안으로 자연적 수처리방법인 저류형 인공습지를 도입하였다. 저류형 인공습지의 비점오염물질 저감효율을 평가하기 위해 2009년 5월 21일, 7월 7일 총 2회에 걸쳐 강우 시 유입, 유출수 채수 및 유량측정 등 현장조사를 실시하였다.

2) 강우 시 유입, 유출조사를 바탕으로 부하량을 산출하여 EMC(Event Mean Concentration) 및 SOL(Summation Of Loads) 방법으로 저감효율을 산정한 결과, 먼저 SOL는 SS 24.48 %, COD 79.00 %, TN 82.66 %, TP 82.20 %로 SS를 제외한 항목에서 높은 저감효율을 나타내었다. 다음으로 EMC의 경우 SS -20.82 %, COD 13.13 %, TN 27.62 %, TP 25.80 %로 SOL 효율에 비해 낮게 나타났다.

위의 두 가지 평가기법을 사용하여 저류형 인공습지의 비점오염물질 저감효율을 평가한 결과 습지와 같은 저감시설들의 경우, 강우 시 유입·유출되는 모니터링 결과만으로는 저감효율 평가결과가 큰 의미를 가질 수 없으며,

건기 시 혹은 강우사상 간의 습지에 체류된 오염물질의 생물학적 저감량을 모니터링 하여 그 결과를 포함하는 저감량 산정이 필요할 것으로 판단된다.

3) 그리하여 비강우 시 및 강우사상 간에 오염물질이 습지 내에 저류하는 동안 저감량을 산정하였다. 2009년 5월 21일 강우가 끝나고 유출유량이 안정되는 시점에 습지 내에 채수를 실시하였다. 그리고 28일 후인 2009년 6월 18일에 저류형 인공습지 내에 채수를 실시하여 각각의 수질농도에 습지 용량을 곱하여 부하량을 산정하였다. 이를 단위면적당 일제거량으로 나타내면 SS 1.054 g/m²/day, 으로 SS는 수생식물의 스크린 작용과 같은 물리적 요인에 의해 침전 제거된 것으로 판단된다. COD는 5월 21일에 4,680.0 g에서 6월 18일은 6,154.4 g으로 오히려 1,474.4 g이 증가하였다. TN의 단위면적당 일제거량은 0.129 g/m²/day으로 나타났다. TP는 단위면적당 일제거량으로 나타내면 0.027 g/m²/day으로 나타났다.

다음으로 2009년 7월 7일 강우사상에 대한 현장조사를 실시하고 강우 종료 후 습지 내 채수를 실시하였다. 그리고 30일 후인 2009년 8월 7일에 습지 내에 채수를 실시하여 습지 보유수에 존재하는 오염물질의 양을 산정하였다. SS의 단위면적당 일제거량은 1.137 g/m²/day로 나타났다. COD는 단위면적당 일제거량은 0.288 g/m²/day으로 산정되었다. TN의 단위면적당 일제거량은 0.153 g/m²/day으로 나타났다. TP는 단위면적당 일제거량으로 나타내면 0.059 g/m²/day으로 나타났다. 이는 습지 내에 저류하는 동안 식물 및 조류에 의한 흡수, 저질로의 침전, 흡착 및 확산 등의 작용에 의한 것으로 판단된다.

4) 본 연구를 통해서 비점오염저감시설 중 자연형 시설인 저류형 인공 습지의 비점오염물질 저감량을 산정하였다. 건기일수를 고려하여 연간 단위 면적당 제거량으로 나타내면 SS가 273.91 g/m²/yr, COD가 14.08 g/m²/yr,

TN이 35.25 g/m²/yr, TP가 10.81 g/m²/yr으로 산정되었다. 저감량을 산정하는데 있어서 강우빈도, 부하량 및 수질현황 모니터링 등이 고려되어야 하며 상당한 양의 모니터링 결과가 포함되어야 할 것으로 판단된다. 본 연구에서도 모니터링 횟수의 한계점이 있어 비점오염원 관리대책 수립을 위한 기초자료로 활용되기 위해서는 오염물질의 제거 메카니즘에 대한 연구와 그로 인한 물질수지에 대한 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 인공습지의 오염물질 정화 및 생태적, 심미적 기능 등의 향상을 위해 지속적인 운영 및 유지관리가 수반되어야 한다.



참고문헌

- 공동수, 1997, 대형수생생물을 이용한 수질개선 기법의 현형과 전망, 한국 과학재단 학연산연구교류 제 198회, 1-51pp.
- 국립환경연구원, 2006, 우수유출수 처리에 따른 오염물질 삭감효과 평가기법 연구.
- 김도선, 1998, 군부대 오수처리 효율성 향상을 위한 인공습지의 이용방안, 강원대학교 대학원 이학석사학위논문, 138pp.
- 김은중, 안건혁, 이창무, 2003, 하천유역토지이용과 비점오염물질 발생강도 간의 상관관계 분석, 대한국토·도시계획학회지 「국토계획」 제38권 2호.
- 김형철, 윤춘경, 이새봄, 이승재, 2006, 인공습지에 의한 영양물질처리효율 분석, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, 339-348pp.
- 농림부, 농업기반공사, 2004, 농업용수 수질개선을 위한 인공습지 설계·관리요령, 79-81pp.
- 농림부, 농업기반공사, 2004b, 농업용수 수질개선 시험연구 「최종」, 66-67pp.
- 농림부, 농업기반공사, 2004e, 수질개선용 자연정화시설 현장시험연구 조사보고서.
- 농업기반공사 농어촌연구원, 2003, 비정수성 수생식물의 생태적 특성을 이용한 호소성 농경습지의 친환경 관리방안 연구.
- 부산광역시, 2007, 낙동강 수계 비점오염 관리시설 설치사업 기본 및 실시 설계 보고서, 71-88pp.
- 이남희, 1993, 수생식물(부레옥잠)을 이용한 돈사폐수의 처리, 부산수산대학교 공학석사학위논문, 89pp.

- 이시진, 2001, 포플라나무에 의한 비점오염원 처리를 위한 연구, 한국폐기물학회, Vol.18, No.2, 203-210pp.
- 이현동, 배철호, 2002, 비점오염원 유출특성과 저감을 위한 최적관리방안, 한국물환경학회, Vol.18, No.6, 569-576pp.
- 장정렬, 2005, 농업유역 비점오염원 저감을 위한 인공습지 설계인자 평가, 서울대학교 박사학위논문.
- 조강현, 1992, 인공호에서 대형수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환, 서울대 대학원 박사학위논문, 233pp.
- 최선화, 안열, 김호일, 2006, 인공습지의 수질정화효율 평가, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, 349-356pp.
- 함중화, 윤춘경, 구원석, 김형철, 이광식, 2004, 비점오염원 제어를 위한 인공습지의 계절별 처리효율비교, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집, 93-96pp.
- 함중화, 윤춘경, 김형철, 구원석, 신현범, 2005, 식생피도가 인공습지의 질소 및 인 처리효율에 미치는 영향과 습지식물의 조성 및 관리, 한국육수학회 Vol. 38, No. 3, 393-394pp.
- 환경부, 2000, 팔당상수원 비점오염원 최적관리사업 기본계획 및 타당성 조사 수립.
- 환경부, 2004, 관계부처합동 [물관리 종합대책]의 추진강화를 위한 4대강 비점오염원관리 종합대책.
- 환경부, 2006a, 물환경관리기본계획(4대강대권역수질보전기본계획, '06 ~ '15).
- 환경부, 2008, 수질오염공정시험기준.
- 해양수산부, 1998, 우리나라의 갯벌.
- APHA, 2005, Standard Methods for the Examination of Wastewater(21th ed.).

ASCE and EPA, 2002, Urban stormwater BMP performance monitoring(A Guidance Manual for meeting the National Stormwater BMP Database Requirement), GeoSyntec Consultants Urban Drainage and Flood Control District, Urban Water Resources Research Council(UWRRC) of ASCE and Office of Water of EPA, EPA-821-B-02-001.

Brix, H., 1993, Wastewater treatment in constructed wetlands: system design and treatment performance. In: Constructed wetlands for water quality improvement(ed Moshiri, G.A.). CRC Press Inc., Boca Raton. 9-22pp.

Carr, D.W. and B.T. Rushton, 1995, Integrating a Native Herbaceous Wetland into Stormwater Management, Stormwater Research Program, Southwest Florida Water Management District, Brooksville, Florida.

CH2M-HILL, 1996, Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment: A Technology Assessment, Final Draft, prepared for U.S. Environmental Protection Agency.

Cooper, P.F., G.D. Job, M.B. Green, & R.B.E. Shutes, 1996, Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. WRc Swindon. 184pp.

Dortch M.S., 1996, Removal of solids, nitrogen, and phosphorus in the Cache River Wetland, Wetlands 16, 358-365pp.

- Harper, H.H., M.P. Wanielista, B.J. Fries, and D.M. Baker, 1986, Stormwater Treatment by Natural Systems, Final Report for STAR project 84-026, Submitted to Florida Dept. Of Environmental Regulation.
- Hickok, E.A., M.C. Hannaman, and N.C. Wenck, 1977, Urban Runoff Treatment Methods Volume I - Non-Structural Wetland Treatment, Office of Research and Development, Environmental Protection Agency, EPA-600/2-77-217, Washington DC.
- Johnston, C.A. 1991. Sediment and nutrient retention by freshwater wetlands: effects on surface water quality. Critical Reviews in Environment Control 21: 461-565pp.
- Jun Ho Lee and Ki Woong Bang, 2000, Characterization of Urban Stormwater Runoff, Wat. Res. Vol. 34, No. 6, 1773-1780pp.
- Kaldlec, R.H. and R.L. Knight, 1996, Treatment wetlands 415-442pp.
- Kim, B.Y., K.S. Kim and Y.D. Park. 1988. Studies on the nutrient removal potential of selected aquatic plants in the pig waste water. Korean J. Environ. Agric. 7: 111-135pp.
- Magmedov, V.G., M.A. Zakharchenko, L.I. Yakovleva, and M.E. Ince, 1996, "The Use of Constructed Wetlands for the Treatment of Run-Off and Drainage Waters: The UK and Ukraine Experience", Water Science and Technology, 3(4-5): 315-323pp.
- Mitsch, W.J., 1996, Managing the world's wetlands-Preserving and enhancing their ecological functions. Verhandlungen Internationale Vereinigung fur Limnologie.

- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink, 1993, Wetlands, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink, 2000, Wetlands, 3rd ed., Van Nostrand Reinhold (now J. Wiley & Sons), New York.
- Reddy, K.R., and E.M. D'Angelo, 1994, Soil processes regulating water quality in wetlands. In W.J. Mitsch, ed. Global Wetlands: Old World and New. Elsevier, Amsterdam, 309-324pp.
- Reddy, K.R. & T.A. De-Busk, 1987. State-of-the-art utilisation of aquatic plants in water pollution control. Water Science and Technology 19(10):61-79pp.
- Reddy, K.R., R.H. Kadlec, E. Flaig, and P.M. Gale, 1999, Phosphorus retention in streams and wetlands: A review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 29:83-146pp.
- Richardson, C.J., 1985, Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands, Science 228:1424-1427pp.
- Scherger, D.A. and J.A. Davis, 1982, "Control of Stormwater Runoff Pollutant Loads By a Wetland and Retention Basin", Proceedings: International Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, Lexington, KY, pp. 109-123pp.
- Schiffer, D.M., 1989, Effects of Highway Runoff on the Quality of Water and Bed Sediments of Two Wetlands in Central Florida, USGS Report 88-4200pp.

- Stockdale, E.C., 1991, Freshwater Wetlands, Urban Stormwater, and Nonpoint Pollution Control: A Literature Review and Annotated Bibliography, Second Edition, Washington State Department of Ecology, Olympia, WA.
- Urbonas, 1994, Parameters to report with BMP monitoring data, In Proceedings of the Engineering Foundation Conference on Storm Water Monitoring, August 7-12, Crested Butte, CO.
- USEPA, 1999b, Storm Water Technology Fact Sheet: Storm Water Wetlands.
- Van Eck, G.T.M., 1982, Forms of phosphorus in particulate matter from the Holland's Diep/Haringvliet, the Netherlands. *Hydrobiologia* 92:665-681pp.
- Willenbrion, P.R., 1985, "Wetland Treatment Systems-Why do Some Work Better than Others", in: Lake and Reservoir Management - Proceedings of the Fourth Annual Conference and International Symposium, North American Lake Management Society, McAfee, NJ, pp. 234-237pp.
- Yoon, C.G., S.K. Kwun, J.H. Ham, and J.K. Noh, 2000, Study on the Performance of Constructed Wetland for Sewage Treatment. *J. of KSAE*, 42(4), 96-105pp.