

경안천 고수부지에 조성한 금어천 생태적수질정화바이오톱 시스템의 수질정화 및 생태복원 효과*

변 찬 우

상명대학교 대학원 환경자원학과

Water Purification and Ecological Restoration Effects of the
Keumeo Stream Sustainable Structured wetland Biotop (SSB)
System Established on the Floodplain of Kyungan Stream*

Byeon, Chan-Woo

Professor, Dept. of Environmental Resources, Sangmyung University.

ABSTRACT

A Sustainable Structured wetland Biotop (SSB) system was constructed on the floodplain of Kyungan stream in December, 2006. It purifies polluted water of Keumeo stream which flows into the stream. Water were sampled once a month at inlet and outlet from December, 2007 to December, 2008. BOD₅, SS, T-N and T-P were analyzed. Plant and fish species of the system were monitored twice during the period. Average influent and effluent BOD₅ concentration was 6.2 and 2.2 mg/L, respectively and BOD₅ removal was 50.8%. SS concentration of influent and effluent was averaged 10.1mg/L and 1.5mg/L, respectively and SS abatement amounted to 77.0%. Average influent and effluent T-N concentration was 4.9mg/L and 2.9 mg/L, respectively and T-N retention was 50.8%. T-P concentration of influent and effluent was averaged 0.386mg/L and 0.107mg/L, respectively and T-P removal amounted to 77.0%.

Twenty two plant species were naturally introduced into the system, however, they didn't make up a significant portion of the plant populations compared with the planted species. Dominant plant species were in the following order; *Phragmites communis* > *Typha latifolia* > *Iris pseudoacorus* > *Persicaria*

* 본 연구는 2007~2009년도 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업”의 일환으로 수행된 과제임.

Corresponding author : Byeon, Chan-Woo, Professor, Dept. of Environmental Resources, Graduate School, Sangmyoung University, Seoul, Korea,
Tel : +82-2-2287-5439, E-mail : bwi@smu.ac.kr

Received : 16 December, 2009. **Revised** : 30 March, 2010. **Accepted** : 29 April, 2010.

thunbergii. Five families and 15 species of fish were observed in the system including Chinese minnow (Moroco oxycephalus) which inhabits in clean water. Six more fish species were monitored in the system compared with ones living in Kyungan stream. Amphibia and reptiles accounted for 11 species of 4 orders and 7 families including Korean Salamander (*Hynobius leechi*) which also lives in clean water.

Key Words : *Sustainable Structured wetland Biotop, Water Purification, Ecological Restoration.*

I. 서 론

최근 4대강 사업, 새만금 사업, 지방하천복원 사업 등과 같은 수생태환경 관련 사업이 추진되고 있다. 이러한 국가적 사업뿐만 아니라 지방자치단체의 수환경 개발에 있어서 생태적으로 수질을 정화하고 수변 생태계를 복원시킬 수 있는 기술이 절실히 필요하다. 현재 생태적 수질정화 및 환경 친화적인 공정을 통해 생태계를 복원할 수 있는 제도적, 법적 장치나 연구, 교육, 실무 사례가 없거나 적은 상태에서 일반적인 건설업으로는 수생태·환경복원에 관한 목표를 달성하기 어려운 실정이다.

이러한 현실에서 자유수면형 인공습지가 생태적 수질정화의 중요한 기법으로 활용되고 있다(변우일, 2005a). 자연수면형 인공습지는 이미 선진국에서 자연생태적 수처리기법으로 활용하고 있으며(Mitsch, 1993), 각국의 지역 환경에 맞는 다양한 연구활동 및 조성사례를 통해서 조성 방안 및 관리에 대한 다양한 기술을 축적해 오고 있다(Debo and Reese, 1993; Shutes, 2001).

특히 도시지역에서 초기강우에 발생하는 비점오염원은 주로 습지를 활용하여 처리하고 있다(Kadlec and Knight, 1996; US EPA, 1999).

국내에서는 생태적수질정화비오톱(SSB : Sustainable Structured wetland Biotop)이 연구되어 국내 환경조건에 적합한 구조와 기능 및 모듈이 제시된바 있다(변우일, 2006a; 2006b). 저류지 기능까지 고려한 치천 수질정화 및 하수종말처리장 방류수 재활용 등을 위한 수생태환경복원에 적용되

어 기술이 축적되고 유형별 매뉴얼화가 수행되고 있다.

점·비점오염원을 처리하면서 습지를 복원하기 위한 방법으로 조성되어 운영되고 있는 생태적 수질정화습지의 모니터링을 통해 수처리 효과에 대한 데이터를 축적하고 객관적인 자료를 확보하는 것이 필요하다(환경부, 2008; 환경부, 2009). 아울러 생태적 수질정화습지의 종다양성 증진효과 및 생태적 건강성 회복에 관한 기능의 모니터링 자료도 필요하다.

본 연구는 생태공학과 환경공학적인 이론을 바탕으로 대상지 특성에 맞게 복원된 금어천 생태적수질정화비오톱(2007년 완공)의 조성후 2차년도 유지관리 및 모니터링을 통해 수질정화 및 생태복원 효과를 조사·분석하는데 일차적 목적이 있으며, 국내여건에 적합한 수질정화 습지 조성과 유지관리에 활용할 수 있는 기초자료를 제시하는 데도 목적이 있다.

II. 이론적 고찰

1. 생태적 수질정화 습지

Hammer(1993)는 습지를 자연습지, 복원습지, 조성습지(created wetland), 인공습지(constructed wetland) 등 4가지로 구분하였다. 이 중에서 오염물질을 처리하는데 주로 이용되는 습지는 자연습지와 인공습지이며, 특히 자유수면형 인공습지는 자연습지와 유사한 기능과 구조를 가지고 있으며, 자연습지와 달리 거의 모든 장소에서 조성이 가능하다(Kadlec and Knight, 1996; US EPA, 1999).

본 연구에서 적용된 생태적수질정화비오톱 습지는 자연습지 기능+대체습지 기능+인공습지 기능을 복합적으로 수행할 수 있도록 개발한 유형이다(변우일, 2008). 자연습지(natural wetland)는 자연적으로 형성된 습지로서 보전하거나 자연과 유사한 구조와 기능으로 복원하는 습지유형이다. 대체습지(mitigation wetland)는 손실되거나 훼손된 습지를 대체하고자 생태복원 및 생물서식처 증진효과를 기대할 수 있는 습지복원 유형이다. 인공습지(constructed wetland)는 점·비점오염원의 정화를 목적으로 조성하는 습지이다. 특히 선진국에서 성공적으로 활용되고 있는 자유수면형(free water surface) 인공습지는 수질정화기능은 물론 생태적 기능까지 수행할 수 있음을 보여주고 있다.

생태적 수질정화 인공습지는 수질정화기능이 반드시 정량적으로 검증되어야 할 뿐만 아니라 대체습지나 자연습지에서의 생태복원기능의 향상과, 습지생태계를 교란시키지 않는 범위에서의 친수 및 경관향상 기능까지 다양한 가치를 충족시킬 수 있는 구조와 기능으로 복원되는 것이 바람직하다. 이러한 복합 기능을 수행하기 위해서는 환경공학(environmental engineering)과 생태공학(ecological engineering)에 기초하여 설계와 시공을 수행하여야만 하며, 그 대상지의 풍토와

장소성을 고려하여 조성해야 한다(변우일, 2008). 생태적 수질정화비오톱 시스템을 도입하여 생태적 수질정화 습지를 조성한 사례는 2001년 말 환경부 최초 점·비점오염원처리 실험사례인 주암호 인공습지 Bio-Park 조성 프로젝트를 비롯하여 본 연구의 사례대상지인 금어천 생태적 수질정화비오톱은 물론, 최근 경안천 하류에 조성된 대규모 인공습지에 이르기까지 생태하천, 하수처리수 재이용, 댐 상류 저수지, 택지개발지역내 저류지, 방수로 비점오염원 처리 등에 다양하게 도입되고 있다(변우일, 2005a; 2005b; 2006b).

III. 재료 및 방법

1. 생태적 수질정화비오톱의 구조

생태적수질정화비오톱의 구조는 크게 침강저류지(forebay)와 습지(wetland)와 연못(pond), 침전지(micro-pool) 등 세 개의 영역으로 나뉜다(표 1). 기본적인 수처리방식은 1차적으로 고형물질을 침전시키고 유속을 저하시켜 수생식물 습지로 유입시킨 후 수생식물에 의한 자연형 수질정화 기작을 거친 다음, 산소공급 및 재부유·방지 등의 기능을 하는 기작을 통하여 이루어진다(변우일, 2005a). 그 외에도 한국적 풍토와 장소성에 맞는 수생태계 기능과 수질처리효율을 증진시키

표 1. 생태적수질정화비오톱(SSB)의 구조와 기능.

구조		주요기능 및 식재시스템
침강저류지 (forebay)		<ul style="list-style-type: none"> 호수에 유입되는 물을 일시 저류하여 유속을 저하시키고 침전시킴 노랑어리연꽃, 수련 등의 식재시스템과 적절한 개방수면 조성
다단계셀형 습지 (wetland)	정수식물 습지(wetland) 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 오염물의 침전, 흡수, 흡착, 분해를 통한 정화하는 기작이 이루어짐 애기부들, 갈대, 부들, 달뿌리풀, 줄 등 깊은습지와 얇은 습지로 이루어짐
	연못(pond) 및 개방수면(open water)	<ul style="list-style-type: none"> 탈질화를 통한 수질정화 이루어짐 노랑어리연꽃, 수련, 마름 등의 식재시스템으로 적정규모의 개방수면조성
침전지(micro-pool)		<ul style="list-style-type: none"> 산소공급 및 재부유방지용으로 습지 말단부에 설치 노랑어리연꽃 등과 적절한 개방수면 조성

표 2. 1차년도(2007년) 금어천 생태적수질정화비오름 월별 수질분석결과.

일자	BOD(mg/l)			SS(mg/l)			T-N(mg/l)			T-P(mg/l)		
	유입수	방류수	효율	유입수	방류수	효율	유입수	방류수	효율	유입수	방류수	효율
2006년 12월	4.9	0.2	95.9%	3.0	2.0	33.3%	7.3	6.4	12.3%	0.50	0.30	40.0%
2007년 01월	8.1	6.8	16.0%	-	-	-	11.5	6.2	46.3%	1.35	0.17	87.7%
2007년 02월	10.5	3.7	64.8%	-	-	-	9.4	5.3	43.6%	0.81	0.40	51.4%
2007년 03월	3.1	1.9	38.7%	-	-	-	7.1	6.7	5.5%	0.10	0.05	52.6%
2007년 04월	6.7	2.7	59.7%	11.3	2.7	76.1%	4.8	3.5	26.4%	0.18	0.07	60.0%
2007년 05월	10.4	2.5	76.0%	66.6	2.6	96.1%	5.8	3.2	44.8%	0.30	0.10	66.7%
2007년 06월	-	-	-	-	-	-	2.5	1.7	32.0%	0.40	0.10	75.0%
2007년 07월	2.6	0.5	80.8%	14.2	4.5	68.3%	4.0	3.5	12.5%	0.06	0.02	66.7%
2007년 08월	-	-	-	3.8	3.4	10.5%	3.0	2.8	27.0%	0.13	0.02	84.6%
2007년 09월	1.2	0.5	58.3%	43.7	2.1	95.2%	-	-	-	0.30	0.15	50.0%
2007년 10월	4.6	2.5	45.7%	-	-	-	4.0	2.6	35.0%	0.20	0.07	65.0%
평균	5.8	2.4	59.2%	23.8	2.9	87.8%	5.9	4.2	29.3%	0.39	0.13	66.7%

고, 겨울철 및 BOD처리 효율을 높이기 위해 생태적 수질정화미디어(SSM) 등 다양한 공법들을 지속적으로 개발, 적용하였다.

2. 대상지 특성

연구대상지는 경안천 본류수 수질악화를 방지하기 위해, 경안천의 지천 중에서도 가장 수질이 나빴던 금어천의 수질을 정화하기 위해 경기도 용인시 포곡면 둔전리 금어천 합류부 하단의 경안천 우안 홍수터에 조성된 인공습지이다(용인시, 2006). 입지선정 당시의 대상지는 물이 차고 빠지는 홍수터로서 방치된 나대지였으며 콘크리트 호안 등으로 이루어져 생태환경적으로 많이 교란되어 있었다. 부지면적은 23,270m²이며, 그 중 생태적 수질정화 습지 면적은 9,557m²로 자유수면형(Free Water Surface) 인공습지방식을 응용하여 생태적수질정화비오름 시스템을 조성하였다. 처리용량은 금어천 평수량 8,200m³/d을 처리할 수 있는(경기도, 2001) 구조와 기능으로 설계하고 조성하였다. 2005년 8월부터 2006년 12월까지 설계, 시공하였으며, 준공이후부터 2007

년 말까지 1차년도의 유지관리 모니터링이 진행된 바 있다(표 2.)

3. 조사 및 분석방법

1) 수질환경 모니터링

(1) 수질측정 지점

연구대상지의 수질측정지점은 본 시스템이 도입된 구간별 특성을 대표하며, 하천수의 오염정도 및 그에 따른 생태적 특성과의 관련성을 고려하여 채수 지점을 선정하였다(경기지역환경기술개발센터, 2007). 특히 생태적수질정화비오름(SSB) 구간별 주요 연결부를 채수지점으로 선정함으로써 구간별 농도변화와 오염량 변화과정을 판단할 수 있도록 하였다(그림 1). 금어천 유입부와, 경안천 본류 지점은 대상지 주변지역의 수질을 비교 분석하기 위해 선정하였다.

(2) 수질측정 방법

수질분석을 위한 샘플링은 2007년 12월부터 2008년 12월까지 월 1회 이상을 시행하였다. 저수기, 갈수기 등 채수가 불가능한 경우를 제외하

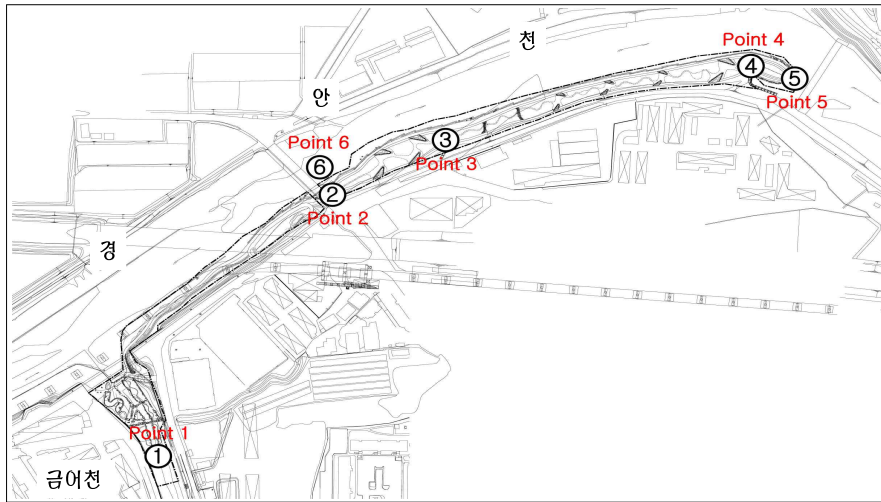


그림 1. 금어천 생태적수질정화비오톱내 수질분석용 샘플 채취 위치도.

고, 채수시기를 준수하여 지속적인 간격으로 샘플링하여 분석하였다. 2008년 8월에는 홍수재해로 인해 대상지가 모두 잠기는 침수 피해가 있어 일부구간의 복구공사가 진행된 바 있었다. 따라서 이 기간에는 조사자체가 불가능하여 조사에서 제외되었다.

수질 측정항목은 주로 BOD5, SS, T-N, T-P 등을 수질오염공정시험법에 따라 분석하였으며, 수위, 수온, 유량 등은 현장에서 간이수질측정기와 유량계로 측정하였다.

중금속류(As, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Hg 등)는 2007년 1월과 2008년 1월에 조사결과 본 연구대상지에서 발견되지 않아 본 조사항목에서 제외하였다.

2) 생태환경 모니터링

금어천 생태적수질정화비오톱의 식물상은 식재종 및 침입종의 성장 변화를 2008년 5월부터 10월까지 월 2회를 원칙으로 지속적으로 모니터링하였으며, 강우 등으로 조사가 불가능한 경우를 제외하고는 조사시기를 준수하였다. 같은 시기에 어류 및 양서파충류 모니터링을 2회 시행하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 수질환경 모니터링 결과

1) 월별 및 평균 처리효율

금어천은 계절별 유량차이는 물론 수질오염의 정도가 심한 지방하천으로 실제로 생태적수질정화비오톱 취수구에서 본 시스템으로 유입된 BOD 농도 범위와 평균농도는 각각 16.2mg/L~0.1mg/L (6.2mg/L), SS 농도 범위와 평균농도는 각각 18.0mg/L~2.4mg/L(10.1mg/L), T-N 농도 범위와 평균농도는 각각 8.7mg/L~1.7mg/L(4.9mg/L), T-P 농도 범위와 평균농도는 각각 1.4mg/L~0.098mg/L(0.38mg/L)로 측정되었다.

경안천의 지천인 금어천의 성상을 살펴보면 수질은 BOD 기준으로 수질 II등급에서 III등급 사이로 상대적으로 유량이 적은 봄, 겨울에는 IV등급에 해당하는 수질을 보이나 유량이 많은 여름, 가을철에는 II등급에 해당하는 수질을 보이는 등 계절, 갈수기, 우기에 따른 수질 변화가 심한 것이 특징이다. 특히 2008년 9월에는 수질이 매우 악화된 것을 볼 수 있는데 조사 시기의 환경 여건에 따른 일시적인 비점오염원의 유입으로 판단되었다.

표 3. 2차년도(2008년) 금어천 생태적수질정화비오름 월별 수질분석결과.

일자	BOD(mg/l)			SS(mg/l)			T-N(mg/l)			T-P(mg/l)		
	유입수	방류수	효율	유입수	방류수	효율	유입수	방류수	효율	유입수	방류수	효율
2007년 12월	0.1	0.1	0.0%	2.4	1.0	58.3%	3.9	3.6	7.7%	0.01	0.01	0.0%
2008년 1월	11.2	4.7	58.0%	4.4	1.7	61.4%	6.2	5.6	9.7%	0.20	0.01	95.0%
2008년 2월	6.3	0.4	93.7%	15.4	2.6	83.1%	8.7	6.8	21.8%	0.40	0.30	25.0%
2008년 3월	0.6	0.7	-16.7%	7.0	1.5	78.6%	6.4	4.0	37.5%	0.30	0.10	66.7%
2008년 4월	5.2	1.7	67.3%	3.5	1.0	71.4%	5.294	3.639	31.3%	0.098	0.088	10.2%
2008년 5월	7.5	2.0	73.3%	18.0	1.0	94.4%	2.9	0.1	96.6%	0.05	0.01	80.0%
2008년 6월	5.6	5.4	3.6%	3.5	2.0	42.9%	4.207	1.512	64.1%	0.349	0.093	73.4%
2008년 7월	8.9	4.9	44.9%	17.7	1.4	92.1%	2.1	0.8	61.9%	-	-	-
2008년 9월	16.2	2.8	82.7%	11.8	1.5	87.3%	1.7	1.7	0.0%	1.40	0.02	98.6%
2008년 10월	3.0	0.2	93.3%	15.7	2.2	86.0%	4.2	0.8	81.0%	0.40	0.10	75.0%
2008년 12월	3.1	1.3	58.1%	12.0	1.0	91.7%	7.943	3.622	54.4%	0.655	0.335	48.9%
평균	6.2	2.2	50.8%	10.1	1.5	77.0%	4.9	2.9	42.3%	0.386	0.107	57.3%

금어천의 점·비점오염원을 내포한 평수량에 대한 금어천 생태적수질정화비오름의 처리효율은 BOD의 경우 평균 유입농도가 6.2mg/L, 평균 유출농도가 2.2mg/L로 50.8%의 처리효율을 보였으며, SS는 평균 유입농도가 10.1mg/L, 평균 유출농도가 1.5mg/L로 77.0%의 처리효율을 보였다. 또한 T-N은 평균 유입농도가 4.9mg/L, 평균 유출농도가 2.9mg/L로 42.3%를 보였고, T-P는 평균 유입농도가 0.386mg/L, 평균 유출농도가 0.107mg/L로 57.3%의 처리율을 보여, 금어천 생태적수질정화비오름의 처리효율은 계획시의 예상처리효율 이상의 결과를 보였다. 그러나 수질 환경 모니터링 기간에도 홍수로 인한 침수 및 보완공사는 물론 유지관리 공사가 진행되면서 생태적으로 수질정화 작용이 쉽게 일어나는 시스템이 완벽하게 조성되지는 않았다. 향후 생태·환경적 조건이 더욱 안정화 되면 수질정화 효율은 시간이 지날수록 더 높아질 것으로 예상된다. 유입수 및 처리수의 시험분석 결과 및 제거효율은 다음과 같다. 초기 조성사례인 주암호 생태적수질정화 Bio-park에 비해보면 높은 처리효율을 나타냈

고 1차년도(2007년) 모니터링 자료(표 2)와 비교해 보아도 더욱 안정적인 처리효율을 나타냈다.

(1) BOD

2차년도 BOD 평균 제거효율은 50.8%이며, 조사기간 동안 제거효율은 2008년 2월에 93.7%로 가장 높았으며, 2008년 6월 3.6%로 가장 낮았다.

1차년도 모니터링(BOD 63.6%) 결과에 비교하면, 평균 처리효율은 낮게 측정되었으나, 월별 처리효율이 대체적으로 50% 이상 안정적으로 측정된 것이 특징이다. 하지만 2008년 3월 유지관리 공사 진행시 수질측정된 경우 약간의 수질농도의 변화가 있었다.

(2) SS

2차년도 SS 평균 처리효율은 77.0%이며, 조사기간 동안 제거효율은 2008년 5월에 94.4%로 가장 높았으며, 2008년 6월 42.9%로 가장 낮게 조사·분석되었다.

1차년도 모니터링(SS 89.4%) 결과에 비해서 평균 처리효율은 낮게 측정되었으나, 70%이상의

수처리 효율이 도출되었다.

2008년 5월은 18.0mg/l로 높은 농도의 점·비점오염원이 습지로 유입되어 높은 처리효율이 도출되었으며, 2008년 6월에는 환경적인 영향으로 금어천의 수질환경이 좋아지고 부유물질이 거의 없어 유출수질은 비교적 낮은 효율이 도출되었다.

(3) T-N

2차년도 T-N 평균 제거효율은 42.3%이며, 조사기간 동안 2008년 5월에 제거효율이 96.6%로 가장 높았으며, 2007년 12월 7.7%로 가장 낮았다.

1차년도 모니터링(T-N 30.1%) 결과에 비해 2차년도에는 42.3%라는 높은 처리효율을 보였다. 이는 습지가 점차 안정화 단계로 진행되고 있는 것으로 판단된다.

(4) T-P

2차년도 T-P 평균 제거효율은 57.3%이며, 조사기간 동안 제거효율은 2008년 9월에 98.6%로 가장 높았으며, 2008년 4월 10.2%로 가장 낮게 나타났다.

1차년도와 2차년도 T-P 처리효율 각각 69.1%, 57.3%로 지속적으로 높은 처리율을 보였다. 하지만 완전한 안정화 단계가 아니기 때문에 지속적으로 유지관리, 모니터링을 진행할 경우 현재보다 높은 처리효율을 보일 것으로 예상된다.

금어천 생태적수질정화비오탑의 1차년도, 2차년도 모니터링 결과, 지속적이고 안정적으로 수질 처리효율을 보여 실험습지가 안정화 단계로 가고 있음을 알 수 있다. 향후 지속적으로 유지관리, 모니터링을 진행할 경우 보다 높은 수질 처리효율이 도출될 것으로 예상된다.

2) 계절별 수질 처리효율

(1) BOD

BOD 처리효율은 봄철 48.1%, 여름철 40.6%, 가을철 88.0%, 겨울철 50.8%를 보였다(그림 2).

인공습지는 생태적 기작을 통해 수질을 정화하는 시설이므로 정수식물 및 기타 미생물의 성장활동이 활발한 봄·여름·가을철에는 상대적으로 높은 처리효율을 보이고, 성장활동이 느려지거나 거의 없는 겨울철에는 상대적으로 낮은 처리효율을 나타내는 것이 일반적인 특징이다. 하지만 본 연구대상지에서는 생태적수질정화미디어(SSM) 등 수년에 걸쳐 개발한 자연형 수질정화 시스템을 통해 겨울철 처리효율 및 BOD 처리효율을 보완함에 따라서 겨울철에도 50.8%로 높은 처리효율이 도출되었다.

(2) SS

SS 처리효율은 봄철 77.7%, 여름철 76.5%, 가을철 86.6%, 겨울철 77.0%를 나타냈다(그림 3).

SS 처리효율은 안정화 단계로 진행된 것으로 판단되고, 추후 지속적인 유지관리, 모니터링을 통해서 안정적으로 처리효율이 도출될 수 있도록 할 경우 다른 시공사례에서 더욱 높은 효과가 도출될 것이다.

(3) T-N

T-N 처리효율은 봄철 30.2%, 여름철 74.2%, 가을철 40.5%, 겨울철 42.3%를 보였다(그림 4).

봄철의 처리효율이 타계절에 비하여 낮은 것으로 조사되었는데, 이것은 봄철 정수식물이 성장하기 이전의 식재시스템에 농도가 높은 점·비점오염원이 유입되어 수질정화 효과가 떨어진 것으로 판단된다. 습지가 점차 안정화 되면서 여름, 가을, 겨울에는 T-N 처리효율이 높게 증가하였다. 향후 습지 생태계가 시스템적으로 안정화 되면 봄철 처리효율 역시 높은 제거효율을 보일 것으로 판단된다.

(4) T-P

T-P 처리효율은 봄철 34.0%, 여름철 51.1%, 가을철 86.8%, 겨울철 52.1%를 나타냈다(그림 5).

조사결과 봄과 여름철이 가장 낮은 제거효율

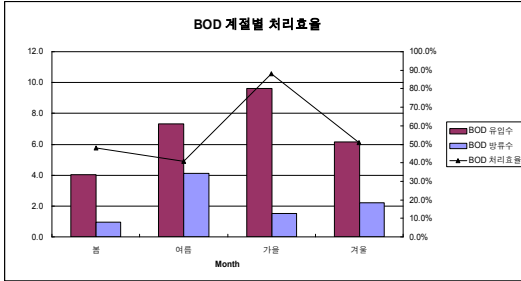


그림 2. 계절별 BOD 처리량 및 처리효율 변화.

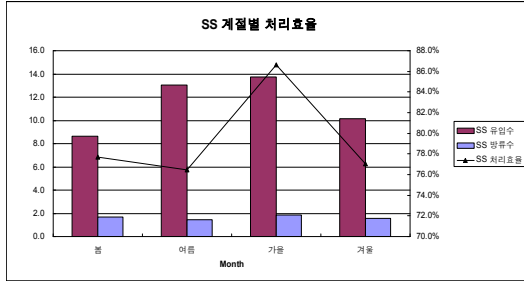


그림 3. 계절별 SS 처리량 및 처리효율 변화.

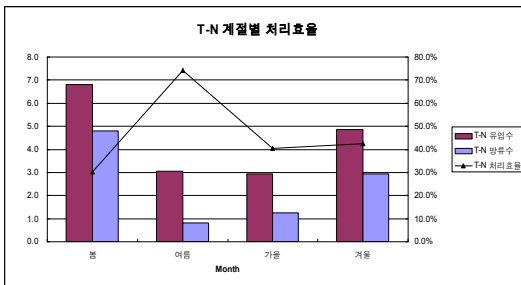


그림 4. 계절별 T-N 처리량 및 처리효율 변화.

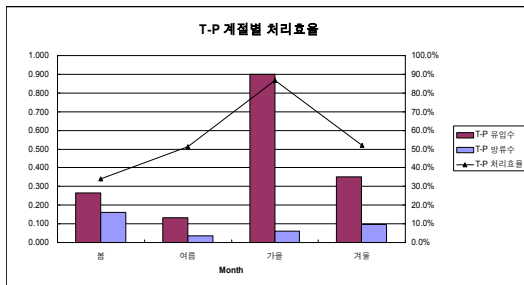


그림 5. 계절별 T-P 처리량 및 처리효율 변화.

을 보이고 있는데, 이는 강우에 의해서 수질농도가 맑은 상태로 유입되는 등으로 그 원인이 분석된다.

습지에서 인은 질소제거와 달리 기체형태로는 변형되지 않고 식물과 부착 미생물의 흡수되거나 습지바닥에 침강되어 제거된다.

따라서 인은 향후 습지가 더욱 안정화 되면 처리효율이 더욱 향상 될 것으로 기대된다.

2. 생태계 모니터링

1) 식생

(1) 식재종

생태적수질정화비오톱에 식재된 수생식물은 토양, 수문, 식재시스템 등을 고려하여 식재되었으며, 총 8과 11종으로 갈대, 노랑꽃창포, 부들, 애기부들, 줄, 큰고랭이, 골풀, 고마리, 수련, 마름, 미나리 등이다(표 4). 식재종은 수생식물의 상호경쟁에서 우세한 식물들이어서 조성 초기에는 다른 수생식물의 침입을 허용하였으나, 점차적으로 순군집의 형태를 취함으로써 구간별로 우점하고

있다.

우점종 순으로 보면 갈대 > 부들 > 노랑꽃창포 > 고마리 순으로 우점하고 있으며 수질정화 효율이 높다고 알려진 식물 위주로 군집이 형성됨을 알 수 있다. 1차년도와 우점종을 비교할 때 부들이 노랑꽃창포보다 우점현상이 나타났다.

(2) 침입수종

생태적수질정화비오톱의 식재 시스템에 침입한 수생식물은 총 13과 22종으로 갈풀, 미국개기장, 달뿌리풀, 가래, 물옥잠, 소리쟁이, 띪, 미나리, 매자기, 미꾸리남시, 개구리밥, 부처꽃, 사마귀풀, 개피, 택사, 뚝새풀, 자귀풀, 여뀌, 미국가막사리, 돼지풀, 단풍잎돼지풀, 환삼덩굴 등이 관찰되었다(표 4).

생태적수질정화비오톱의 수생식물 시스템 중 갈대, 노랑꽃창포, 부들, 고마리 등은 수생식물간의 상호경쟁에서 우세한 식물들이 우점종으로 조성되어 있어 대부분의 침입식물은 개체수가 적고, 군락을 형성하지 못하였다. 연구대상지 주변

표 4. 연구 대상지의 식재종과 침입수종.

식재종		침입수종	
골풀과	골풀(<i>Juncus effusus</i> var. <i>decepiens</i> Buchenau)	닭의장풀과	사마귀풀 (<i>Aneilema keisak</i> Hassk.)
마디풀과	고마리(<i>Persicaria thunbergii</i> (Siebold & Zucc.) H.Gross ex Nakai)	마디풀과	미꾸리납시(<i>Persicaria sagittata</i> (L.) H.Gross ex Nakai), 소리쟁이(<i>Rumex crispus</i> L.), 여뀌(<i>Persicaria hydropiper</i> (L.) Spach var. <i>hydropiper</i>)
마름과	마름(<i>Trapa japonica</i> Flerow)	물옥잠과	물옥잠(<i>Monochoria korsakowii</i> Regel & Maack)
부들과	부들(<i>Typha orientalis</i> C.Presl), 애기부들(<i>Typha angustifolia</i> L.)	부처꽃과	부처꽃(<i>Lythrum anceps</i> (Koehne) Makino)
붓꽃과	노랑붓꽃포(<i>Iris pseudacorus</i> L.),	사초과	매자기(<i>Scirpus maritimus</i> L.)
사초과	큰고랭이(<i>Scirpus lacustris</i> var. <i>creber</i> T.Koyama),	산형과	미나리(<i>Oenanthe javanica</i> (Blume) DC.)
산형과	미나리(<i>Oenanthe javanica</i> (Blume) DC.)	삼과	환삼덩굴(<i>Humulus japonicus</i> Siebold & Zucc.)
수련과	수련(<i>Nymphaea tetragona</i> Georgi)	콩과	자귀풀(<i>Aeschynomene indica</i> L.)
화본과	갈대(<i>Phragmites communis</i> Trin.), 줄(<i>Zizania latifolia</i> (Griseb.) Turcz. ex Stapf)	택사과	택사(<i>Alisma canaliculatum</i> A.Br. & Bouche)
총계	8과 11종	화본과	갈풀(<i>Phalaris arundinacea</i> L.) 개피(<i>Beckmannia syzigachne</i> (Steud.) Fernald), 달뿌리풀(<i>Phragmites japonica</i> Steud.), 뚝새풀(<i>Alopecurus aequalis</i> var. <i>amurensis</i>) 미국개기장(<i>Panicum dichotomiflorum</i> Michx.) 띠(<i>Imperata cylindrica</i> var. <i>koenigii</i> (Retz.) Pilg.)
침입수종		총계	13과 22종
가래과	가래(<i>Potamogeton distincuts</i> A.Benn.)		
개구리밥과	개구리밥(<i>Spirodela polyrhiza</i> (L.) Sch.)		
국화과	미국가막사리(<i>Persicaria sagittata</i> (L.) H.Gross ex Nakai) 돼지풀(<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.), 단풍잎돼지풀(<i>Ambrosia trifida</i> L. var. <i>trifida</i>)		

및 내부에 위해수종인 환삼덩굴, 돼지풀, 단풍잎 돼지풀 등과 기피식물이 미국가막사리 등이 침입할 경우 습지 생태계에 악영향을 미칠 수 있기 때문에 유지관리를 통해서 주기적으로 제거작업을 수행하였다.

2) 어류

생태적수질정화비오톱에 유입된 어류종을 조사한 결과 총 5과 15종으로, 과거 금어천 전체구간에서 출현했었고, 기존 연구된 자료의 9종과 비교하여 6종이 더 높게 조사되었다(표 5). 특히 출현종은 대부분이 잉어과(10종) 어류이며, 상류부에는 버들치, 중·하류부에서는 피라미가 우점하였다. 한국고유종으로 왜매치와 얼룩동사리가 출현하였으며, 외래종으로는 배스가 확인되었다.

조사지점간 출현종을 살펴보면 상류부에서 하류부로 갈수록 출현종의 수가 많았고, 금어천 생태적수질정화비오톱은 금어천에서 유입되는 물이 습지를 거쳐 정화된 뒤 경안천으로 흘러가는 형태를 나타내고 있어 금어천에서 유입되는 물과

함께 흘러드는 어란 및 치어들과 경안천에서 소상하는 어류들이 본 습지에 서식하고 있는 것으로 판단되었다.

조사구간은 1차 조사시(2008년 7월) 습지공사 후 다양한 미소서식처가 형성되어, 비교적 안정적으로 어류가 서식하고 있었으나, 2차 조사시(2008년 9월) 본 습지시스템의 유입수원이 되는 금어천 본류에서 어류가 집단 폐사하는 사건이 발생하였다. 그 결과 습지상류부에 서식하던 버들치 등의 서식어류가 급감한 상태가 되었다. 그러나, 2차 조사시 서식이 확인되지 않은 어류들 중 경안천에서 소상할 수 있는 종은 생태계가 복원될 경우 다시 유입될 것으로 판단된다.

3) 양서·파충류

(1) 문헌조사 결과

우선, 금어천 생태적수질정화비오톱이 복원된 후 양서·파충류상을 기존 문헌과 비교함으로써 생태계복원 효과를 모니터링하고자 하였다. 기존 문헌에 기록되어 있는 목록과 본 연구조사에서

표 5. 대상지 조사 어류 목록.

과 (Family)	종명(Species)		조사지점								비고
	학 명	국 명	합류부		개방수면		습지		방류구		
			1차	2차	1차	2차	1차	2차	1차	2차	
잉어과	<i>Carassius auratus</i>	붕어			●	●	●	●	●	●	
	<i>Cyprinus carpio</i>	잉어			●		●	●	●	●	
	<i>Abbottina rivularis</i>	버들매치					●				
	<i>Abbottina springeri</i>	왜매치					●				고유종
	<i>Hemibarbus longirostris</i>	참마자							●	●	
	<i>Pseudogobio esocinus</i>	모래무지							●	●	
	<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어			●		●	●	●	●	
	<i>Pungtungia herzi</i>	돌고기							●		
	<i>Rhynchocypris oxycephalus</i>	버들치	●		●						
	<i>Zacco platypus</i>	피라미			●	●	●	●	●	●	
미꾸리과	<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리	●		●		●		●		
	<i>Misgurnus mizolepis</i>	미꾸라지					●	●			
검정우럭과	<i>Micropterus salmoides</i>	배스					●	●	●	●	외래종
동사리과	<i>Odontobutis interrupta</i>	얼룩동사리	●		●						고유종
망둑어과	<i>Rhinogobius brunneus</i>	밀어							●	●	
5과	15종		3종		7종		9종		10종		

관찰된 양서류 목록의 비교 결과는 다음과 같다. 문헌조사 결과 가장 많은 종이 관찰된 것은 총 9종의 양서류가 조사되었으나, 이는 주변지역인 (표 6).

표 6. 양서류상 출현상에 대한 기존 문헌과의 비교.

과(Family)	종명(Species)		기존조사기록						비고
	학 명	국 명	①	②	③	④	⑤	⑥	
Hynobiidae	<i>Hynobius leechii</i>	도롱뇽		●	●	●	●	●	
Discoglossidae	<i>Bombina orientalis</i>	무당개구리		●	●				
Bufo	<i>Bufo bufo gauguizans</i>	두꺼비	●	●	●		●	●	
Hylidae	<i>Hyla japonica</i>	청개구리	●	●	●	●	●	●	
Microhylidae	<i>Kaloula borealis</i>	맹꽁이	●	●	●				멸종II급
Ranidae	<i>Rana nigromaculata</i>	참개구리	●	●	●		●	●	
	<i>Rana catesbeiana</i>	황소개구리							
	<i>Rana coreana</i>	한국산개구리	●	●		●	●	●	
	<i>Rana rugosa</i>	옴개구리	●	●	●		●	●	
	<i>Rana dybowskii</i>	북방산개구리		●	●	●	●		
6과	10종		6종	9종	8종	4종	7종	6종	

- ① 2002년 손영종 · 조문희, '여주 · 이천, 마곡산일대의 양서 · 파충류'
- ② 2003년 심재환 · 이상철, '경기도 광주 태환산의 양서 · 파충류'
- ③ 2005년 민미숙 · 홍윤지, '광주 · 양평 지역의 양서 · 파충류'
- ④ 2006년 이상철, '광주 태환산의 양서 · 파충류 생물다양성 조사'
- ⑤ 2007년 이상철, '광주 태환산의 생물자원 모니터링 조사' 2차년도
- ⑥ 2008년 본 연구조사

표 7. 실측조사 시 구간별 양서·파충류 출현 현황.

No.	과(Family)	종명(Species)		조사구간				비고
		학 명	국 명	합류부	개방수면	습지	방류구	
1	Hynobidae	Hynobius leechii	도롱뇽			■		
2	Bufo	Bufo bufo gaugauzans	두꺼비		●		■	
3	Hylidae	Hyla japonica	청개구리	●	●	●		
4	Ranidae	Rana nigromaculata	참개구리		●	●	●	
		Rana amuriensis coreana	한국산개구리			●		
		Rana rugosa	움개구리	●		●	●	
5	Testudinidae	Trachemys scripta elegans	붉은귀거북			■	■	외래종
6	Larcertilidae	Takydromus wolteri	줄장지뱀			●	●	
7	Colubridae	Elaphe dione	누룩뱀			●		
		Elaphe rufodorsata	무자치				■	
		Rhabdophis t. tigrinus	유혈목이		●	●		
7과		4목 7과 11종		2종	4종	9종	6종	

※ ● : 서식 확인, ○ : 산란지 확인, ■ : 청문확인

태화산을 대상으로 조사한 내용이며(이상철·이상철, 2003), 산지와 농경지 등의 다양한 생태공간이 포함된 경우로써 절대적인 비교는 어렵다. 한편 가장 적은 종이 조사된 것은 총 4종의 양서류만 기록되었다(이상철, 2006).

6개 조사에서 모두 관찰된 종은 청개구리였으며, 5개 조사에서 기록된 종은 도롱뇽, 두꺼비, 참개구리, 한국산개구리, 움개구리로, 5개 지역 이상에서 관찰된 종은 모두 6종으로 조사·분석되었다. 따라서 금어천이 합류되는 경안천 지역 주변에서 전술한 6종은 보편종으로 판단된다.

(2) 현장조사 결과

생태적수질정화비오름에 유입된 양서·파충류를 실측 조사한 결과 총 4목 7과 11종이 출현하였고 일반적인 저지대성 생태지역에 비교할 때 비교적 열악한 결과로 조사되었다(표 7). 이러한 현상은 생태계 복원지역이 지나는 일반적인 초기 현상으로 볼 수 있으며 가장 많은 종이 출현한 구간은 습지지역으로 9종의 양서·파충류가 조사되었으며, 다양한 생태적인 요소가 존재하기

때문이다. 한편 가장 적은 종이 관찰된 구간은 금어천 합류부로 외적 교란이 높는데 원인이 있는 것으로 분석된다.

본 연구대상지에서는 멸종위기종은 포함되지 않았으나, 1급수에서 알을 낳고 생육을 하는 도롱뇽 등이 발견되었으며, 환경부 지정 위해외래종인 붉은귀거북이 관찰되었다.

IV. 결 론

경안천에서 가장 오염된 지천중 하나인 금어천의 수질개선을 위해 조성한 생태적수질정화비오름(2006년 12월 준공)의 조성이후, 2007년 12월부터 2008년 12월까지 모니터링 결과는 다음과 같다.

유입수의 성상을 살펴보면 수질은 Ia(매우 좋음)등급에서 VI(매우나쁨)까지 계절, 갈수기, 우기 등 자연적 요소와 비점오염원 유입, 마을하수 방류 등 인문적 요소에 따라 유입농도의 변화가 큰 것으로 조사되었다. 조사기간 유입수와 유출수의 BOD₅ 평균농도는 각각 6.2mg/L, 2.2mg/L

로 50.8%의 처리효율을 보였으며, SS는 각각 10.1mg/L, 1.5mg/L로 77.0%의 처리효율을 나타냈다. 조사기간 유입수와 유출수의 평균 T-N 농도는 각각 4.9mg/L, 2.9mg/L로 42.3%의 처리효율을 보였으며, T-P는 각각 0.386mg/L, 0.107mg/L로 57.3%의 처리효율을 나타냈다. 1차년도(2007년) 모니터링 자료와 비교할 때 전체적으로 안정적인 처리효율을 보였다. 또한, 기존 인공습지에서 약점으로 지적되었던 겨울철 수처리효율이 급어천 생태적수질정화비오톱에서는 50%이상의 처리효율(BOD, SS)을 나타내는 등 4계절 모두 안정적이고 높은 수처리효율을 보였다.

생태계 복원효과를 모니터링한 결과, 당초 시스템에 식재한 식생은 점차적으로 순군집의 형태로 변화되었으며 갈대, 부들 등 수질정화 효율이 높은 정수식물이 우점하였다. 동물상의 경우 조사된 어류종은 총 5과 15종으로, 기존 연구된 자료의 9종과 비교하여 6종이 더 많게 나타났고, 양서·파충류 모니터링 결과 총 4목 7과의 11종이 출현하였다. 모니터링 결과 나지로 방치되었던 홍수터에 지역 자생종들은 물론, 그보다 더욱 다양한 지역 생태계가 창출(creation) 복원됨을 할 수 있었다.

따라서 도시화로 인해 수질이 악화되고 생태계교란이 심했던 급어천에서 생태적수질정화비오톱 조성 후 모니터링 결과, 급어천의 평수량 및 그 비점오염원이 정화되고 훼손되었던 하천 생태계가 창출·복원됨을 확인할 수 있었다. 안정적으로 검증된 생태복원기능 및 수질정화 효능을 보이고 있는 급어천 생태적수질정화비오톱은 다음과 같은 시사점을 남기고 있다. 첫째, 자연생태계를 복원하는 다양한 사례에 자유수면형 인공습지를 적용하기 위해서는 각 대상지의 생태공학(ecological engineering) 특성과 환경공학(environmental engineering) 특성을 토대로 조성해야하며, 수질정화 효과 및 생태복원 효과에 대한 정량적인 수치가 지속적으로 모니터링 되어야 한다. 둘째, 적용되는 대상지의 장소적 특

성과, 생태적, 환경적, 경관적 특성을 고려하여 조성해야 성공할 수 있다. 생태적수질정화비오톱은 본 연구대상지와 같은 하천 홍수터 외에도 훼손지나 택지개발지역내 저류지, 하수종말처리장 재활용, 오염하천, 멸종위기야생동·식물 복원 등에 적용되고 있다. 현재의 토목이나 조경공사와 같은 일반 건설업에서는 복원관련 모니터링을 수행하기 어려운 실정이다. 따라서 시공과정과 유지관리에서 생태 환경공학적으로 모니터링 할 수 있는 법 제도화가 시급하며, 국내여건에 맞는 다양한 유형의 생태환경 복원 관련 매뉴얼화가 필요하다. 그런 의미에서 입지선정에서, 계획, 설계, 복원시공, 유지관리, 2개년도 유지관리 모니터링의 일련의 과정을 거쳐 복원한 급어천 생태적 수질정화비오톱의 조성 후 모니터링 조사·분석 결과는 향후 수생태환경복원에 필요한 매뉴얼과 지침을 작성하는데 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

- 경기지역환경기술개발센터. 2007. 경안천수계(급어천) 생태습지 수질저감효율 측정을 위한 모니터링.
- 경기도. 2001. 경안천수계 하천정비기본계획.
- 민미숙·홍윤지. 2005. 광주·양평 지역의 양서·파충류
- 변우일. 2005a. 자유수면형 인공습지 생태공원설계에 관한 구조적 연구-생태적 수질정화비오톱(SSB)공법 적용을 중심으로. 한국환경복원녹화기술학회 춘계학술발표회, pp.63-70.
- 변우일. 2005b. 자연형하천 복원설계-굴포천방수로 2단계 건설사업 제3공구 생태방수로 설계사례를 중심으로. 한국환경복원녹화기술학회 추계학술발표회, pp.45-60.
- 변우일. 2006a. 저류지 생태공원 설계모형 개발에 관한 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 9(3) : 1-16

- 변우일. 2006b. 자유수면형 인공습지 환경·생태 공원 설계-생태적 수질정화비오름 공원의 구조설계를 중심으로-. 한국환경복원녹화기술학회지 9(5) : 1-9.
- 변우일. 2008. Sustainable Structured Biotop - 생태적 수질정화 비오름, 리드환경연구원.
- 손영중·조문희. 2002. 여주·이천, 미국산일대의 양서·파충류.
- 심재한·이상철. 2003. 경기도 광주 태환산의 양서파충류.
- 용인시. 2006. 경안천수계 하천정화시설 설치사업 기본 및 실시설계.
- 이상철. 2006. 광주 태환산의 양서·파충류 생물 다양성 조사.
- 이상철. 2007. 광주 태환산의 양서·파충류 생물 다양성 조사- 2차년도.
- 환경부. 2008. 택지개발지역에서의 훼손된 수생태계 복원, 창출, 향상 기술 개발 1차년도 보고서.
- 환경부. 2009. 택지개발지역에서의 훼손된 수생태계 복원, 창출, 향상 기술 개발 2차년도 보고서.
- Debo, T. N., and Reese, A. J. 1993. *Municipal Storm Water Management*, Lewis Publishers.
- Hammer, D. A. 1993. *Designing constructed wetlands systems to treat agricultural nonpoint source pollution* (In Olson, R. K. eds., "Created and natural wetlands for controlling nonpoint source pollution"), Boca Raton : C. K. Smoley. pp.71-111.
- Kadlec, R. H., and Knight, R. L. 1996. *Treatment wetlands*, CRC Press/Lewis publishers, Florida, USA.
- Mitsch, W. J. 1993. *Landscape design and the role of created, restored, and natural riparian wetlands in controlling nonpoint source pollution*, In Olson R. K.(ed), Created and NaturalWetlands for controlling nonpoint source pollution.
- Shutes, R. 2001. Artificial wetlands and water quality improvement, *Environment International*, 26 : 445-446.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). 1999. *Storm water technology fact sheet : storm water wetlands*, Washington, D.C. : Office of Water, EPA 832-F-99-025.