

멸종위기종 서식처에 조성된 생태적 수질정화 바이오톱 시스템의 수질정화 및 생태복원 효과

- 금개구리 서식처인 안터 저수지 생태공원 사례를 중심으로 -

변 찬 우

상명대학교 대학원 환경자원학과

Water Purification and Ecological Restoration Effects of Sustainable Structured Wetland Biotop (SSB) System Established in the Habitat of the Endangered Species

- Exemplified by An-teo Reservoir Ecological Park in the Habitat of the Gold-spotted Pond Frog -

Byeon, Chan-Woo

Professor, Dept. of Environmental Resources, Graduate School of Sangmyung University.

ABSTRACT

A Sustainable Structured wetland Biotop (SSB) system was planned, designed, and finally constructed, and maintained in the An-teo Reservoir ecological park, which is the habitat of the endangered Gold-spotted Pond Frog. The system purifies polluted water of An-teo Reservoir which flows from up to bottom within the system. Water was sampled once a month at the inlet and at the outlet from December, 2009 to August, 2010. BOD₅, SS, T-N and T-P were analyzed. Average influent and effluent BOD₅ concentration was 2.9 and 1.0 mg/L, respectively, and BOD₅ removal was 67%. SS concentration of influent and effluent averaged 18.1 mg/L and 2.5 mg/L, respectively, and SS abatement amounted to 86%. Average influent and effluent T-N concentration was 0.426 mg/L and 0.147 mg/L, respectively, and T-N retention was 66%. T-P concentration of influent and effluent averaged 0.071 mg/L and 0.022 mg/L, respectively, and T-P removal amounted to 68%. Plant and frog species of the system were monitored during the period. Amphibia and reptiles provided 7 species and 4 families

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 : 22 November, 2010. **Revised** : 14 December, 2010. **Accepted** : 17 December, 2010.

including the Endangered Gold-Spotted Pond Frog (*Rana chosonica*) which also lives in the system. Twenty-six 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. The endangered plants, Bladderwort (*Utricularia vulgaris* var. *japonica*) and *Euryale ferox* were observed in An-teo Reservoir as well as in the system.

Key Words : *Sustainable Structured wetland Biotop, Gold-Spotted Pond Frog, Habitat Restoration, Ecological Water Purification.*

I. 서 론

최근 제한된 토지에서 과도한 개발과 고밀도화, 도시화로 인해 생물서식처가 단절, 훼손되고 저수지, 하천 등 수 공간으로의 비점오염원 유입으로 인해 생물종 및 개체수가 급격히 감소되고 있다. 이에 비점오염원 등 오염물질의 제거뿐만 아니라 홍수조절능력, 경관적가치, 야생서식지로서의 역할을 하는 인공습지가 효과적인 비점오염원 관리기법 중 하나로 제시되고 있다(환경부, 2008). 이 중 자유수면형 인공습지는 생태공학적 접근을 통해 자연습지와 유사하게 함으로써 오염되고 훼손된 수환경에 다양하게 적용되고 있다(Kadlec, 2009; Vymazal, 2010). 그간 국내에 맞는 자유수면형 인공습지의 성공사례가 거의 없었으나, 국내 환경조건에 적합한 비점오염원 관리 및 생태복원기법의 성공적 사례로서 생태적 수질정화비오톱 시스템이 연구되어 다양한 적용 사례로써 제시된 바 있다(변우일, 2006a; 2006b; Byeon, 2010; 변찬우, 2010a).

광명시의 안터저수지는 한때 도시민의 휴식을 위한 지역민의 근린공원으로 지정되어 단순한 휴식공간으로 개발되고자 계획된 바 있었다. 하지만, 환경부 법적 보호종이면서 멸종위기야생동물 II 급인 금개구리가 서식함으로써 내륙습지의 보전을 주장하는 환경단체의 이슈와 많은 마찰을 가진 바 있었다. 그 과정에 있어서 저수지 주변 고물상, 쓰레기 매립물 투기, 불법 농경지 등의 비점오염원으로 인해 안터저수지의 수질환경이

급격히 악화되어 금개구리의 서식 생태환경에 치명적인 문제가 발생하게 되었다.

이에 따라 환경부의 개정된 생태계보전협력금 반환사업의 일환으로 생태공원 조성사업이 추진되어, 생태적으로 수질정화가 검증된 자유수면(free water surface)형 인공습지(constructed wetland)로 금개구리 서식처인 습지서식처를 확장 하는 보전·복원 계획이 동시에 수립되었다. 그간 건설산업기본법(대한건설협회, 2005)에 의한 방법으로는 설계, 시공, 유지관리에 이르기까지 전체 공정에 있어서 생태 환경 모니터링을 시행하기 어려워 생태환경적 보전·복원 사업의 성공을 기대하기 어려웠다. 따라서 본 사업에서는 환경부 신기술 제 258호인 생태적 수질정화 비오톱(SSB : Sustainable Structured wetland Biotop)시스템을 도입하여 생태환경복원계획, 설계, 시공, 유지관리 등에 관한 일련의 공정을 모니터링하였다. 또한 생태환경복원을 위해 전체공종을 통합 시행함으로써, 안터저수지 생태공원에 조성된 생태적수질정화비오톱은 최근 정비된 생태계보전협력금 반환사업(환경부, 2007)의 일환으로 조성된 것 중 가장 성공적인 생태환경복원 사례의 하나로 평가받고 있다¹⁾.

본 연구는 안터저수지를 수질환경개선 및 멸

1) 환경부에서 지원하고 LH공사가 생태계 보전협력금 사업의 주체가 되어 광명시에서 조성하였다. 필자와 (주)LS생태환경복원이 설계, 복원시공, 유지관리 모니터링을 시행하였다. 최근 환경부 및 환경계획조정 협회가 주관한 자연환경대상에서 우수상을 수상함.

중위기종 서식처로 복원한 자유수면형 인공습지인 생태적수질정화바이오톱의 계획·설계·시공·유지관리·모니터링 과정을 통합적으로 고찰하고, 이를 바탕으로 아직 개척단계인 생태·환경복원분야에 이론과 실무적 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

II. 이론적 고찰

생태계 보전 협력금 반환사업 등을 위해 도시 지역에서 서식처를 복원하는 것은 대부분 훼손된 서식처를 원래의 상태로 조성해 주거나, 개발에 의해서 사라진 서식처를 새롭게 조성해 주는 창출(creation)하는 것이다(환경부, 2010a). 특히 도시지역은 택지개발로 인한 환경변화의 적응성을 고려하여 생물종, 대체종의 선정, 개발에 따른 서식처 등을 종합적으로 선별 복원하고, 복원실험지의 주변 지형, 수리·수문, 수질, 토양, 식생 등 생태·환경공학적 특성 대상지 현황을 판단하여 생물서식환경을 조성해야 한다(환경부, 2010b).

생물서식처의 다양성과 생태계 향상은 자연습지나 인공습지를 보전·복원함으로써 성공적으로 개선될 수 있다. 그 중 자유수면형 인공습지는 수질환경을 개선하면서 서식처 가치 및 복원기능을 최대화한다(US EPA, 1993; 1999a). 또한, 이는 자연습지와 유사한 기능과 구조를 가지고 있으며, 자연습지와 달리 거의 모든 장소에서 조성이 가능하다 (Kadlec and Knight, 1996; US EPA, 1999b; Kadlec, 2009).

본 연구 대상지에 적용된 생태적수질정화바이오톱(SSB : Sustainable Structured wetland Biotop)은 다단계셀을 도입한 자유수면형 인공습지 시스템으로서 생태적 수질정화 및 대상지의 현황과 장소성에 맞게 다양한 생물서식환경을 복원한다. 또한 도심지 홍수조절기능 및 경관향상기능을 수행하고 생태환경체험공간 등으로 동시에 활용할 수 있어 도시지역에서도 서식환경을 복원하고 토지를 효율적으로 이용할 수 있다(변우일, 2005a; 2006b). 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(Byeon, 2010; 변찬우, 2010a). 생태적 수질정화바이오톱 시스템을 도입하여 수질정화 및 생물서식처를 복원한 사례는 주암호 인공습지 Bio-Park 조성 프로젝트를 비롯하여(환경관리공단, 2002) 최근 경안천 하류에 조성된 대규모 인공습지에 이르기까지 다양하다. 특히 생태하천 제내지와 제외지, 택지개발지역내 저류지, 하수종말처리수 재처리 등에 다양하게 도입되어 대상지 특성에 맞게 수질정화효율 및 생태복원기능 등이 검증되어 왔다(Byeon, 2010; 변찬우, 2010b).

III. 연구범위 및 방법

1. 대상지 특성

본 연구대상지인 안터저수지는 광명시 하안 1



그림 1. 조성전 생태적수질정화바이오톱 안터저수지 전경(2008년 7월 14일).

동 327-3번지 일원(20,294m²)으로 ‘국토의 계획 및 이용에 관한 법률’에 따른 지역·지구, ‘자연환경보전지역’, ‘생태계보존지구’, ‘근린공원’, ‘개발제한구역’ 등으로 지정되어 있는 지역이다. 안터저수지는 그림 1과 같이 택지개발지역 내에서 불안정하게 보전되어 왔던 내륙습지의 하나로 분류되었다. 특히 환경부 멸종위기야생동물 II급인 금개구리가 서식하는 지역으로 보전가치가 높았으나, 주거 밀도가 높은 택지지역에 접함으로써 복원당시 무분별한 토지이용과 비점오염원 유입으로 금개구리 서식 생태계와 수질환경이 위협받았다.

2. 생태적수질정화비오톱의 특성

본 대상지 저수지의 악화되는 수질을 정확하고 금개구리 등의 서식처를 확장하고 지역민의 휴식공간 마련을 위해 도입된 생태적수질정화비오톱(SSB : Sustainable Structured wetland Biotop)의 구조는 크게 침강저류지(forebay)와 습지(wetland)와 연못(pond)으로 이루어진 다단계 셀(multi-cell), 침전지(micro-pool) 등 세 개의 영역으로 나뉜다. 기본적인 수처리 및 생태복원방식은 1차적으로 생태적 핵심지역인 침강저류지로서, 생태연못을 조성함으로써 고형물질을 침전시키고 유속을 저하시킨다. 영양물질이 풍부하고 생산성이 높은 수생식물 습지·연못으로 유입된 후 시스템적으로 생태적 수질정화 기작을 거친다. 마지막으로 침전지내에 산소공급 및 재부유·방지 등의 기작을 통하여 수질정화는 물론, 자연발생적인 전이지대와 다양한 생물의 서식처를 조성한다(변우일, 2006a). 이는 환경부에서 인증된 환경신기술 제 258호이면서 경년에 걸쳐 기능과 효율을 개선하기위한 세부특허를 등록하여, 한국적 풍토와 생태적 특성에 맞도록 다양한 대상지에 맞춤형으로 적용하여 온 시스템이다. 특히, 본 대상지와 같이 멸종위기종을 복원하는 사업에서, 건설산업기본법에서 행하기 어려운 모니터링을 시스템적으로 시행함으로써, 성공적인 수생태계 및 생물

서식처 복원기능과 수질처리효율이 도출될 수 있었다(변찬우, 2010a; 2010b).

3. 연구의 방법

본 연구는 우리나라 풍토에 맞게 개발된 자유수면형 인공습지로서 생태적수질정화비오톱 시스템을 적용하여 멸종위기야생동·식물을 복원한 안터저수지 생태공원의 수질환경 개선 및 생태환경 복원방안을 고찰하였다. 이에 안터저수지의 장소 및 생태환경적 특성, 복원목표에 맞게 계획, 설계, 시공, 유지관리 및 모니터링한 전 과정을 제시하였다.

1) 생태환경 계획·설계·시공과정

2007년 12월부터 2008년 5월까지, 시공전 본 연구의 대상지인 안터저수지에 관한 문헌조사와 수질, 금개구리뿐만 아니라 주변 생물상의 모니터링을 통해 타당성 조사를 수행하였다. 특히 금개구리 서식처 복원의 핵심인 생태적수질정화비오톱시스템 뿐만 아니라, 이를 교란할 수 있는 안터저수지 생태공원(근린공원) 전체를 ‘자연과 인간의 공생’이라는 주제로 계획, 설계 하였다. 안터저수지 생물서식처 조성 및 생태공원조성을 위한 구상 및 설계 과정은, 대상지내 점·비점오염원의 성장별(BOD, T-N, T-P, SS 등) 유입농도 및 체류시간, 수리학적 부하율(HRT) 등을 고려하였다. 수질환경을 공학적이고 정량적으로 개선하는 환경공학적(Environmental engineering) 접근과 수리·수문, 토양, 습지식생, 지질, (미)기후, 야생동물 등의 생태적 구조와 기능을 생태적으로 향상시키는 생태공학적 (Ecological engineering) 접근을 통해 금개구리 서식처 등 장소적 특성에 맞게 생태복원하였다.

복원 시공은 2008년 6월에서 2009년 5월까지, 생태적수질정화비오톱을 중심으로 생태환경복원수행하였다. 현장의 수질환경은 물론, 지하 및 지표 수위, 토양, 동식물상 등 생태공학·환경공학적인 요소를 모니터링하면서 시행하였다.

2) 유지관리·모니터링

조성직후 2009년 9월부터 2010년 8월까지 정기적인 모니터링을 통해 생태적수질정화바이오톱의 동·식물상 등 소생물서식처 복원효과, 수질정화효과를 조사하였다.

안터생태공원 내 생태적수질정화바이오톱의 수질처리효과를 모니터링하기 위해서 분석에 의한 방법(analytical monitoring)으로 수행하였다(환경부, 2008). 2009년 9월부터 2010년 8월까지 시스템 유입부와 유출부 2곳에서 월 1회 이상 시행하였으며 수질오염공정시험법에 따라 현장에서 시료를 채취하였다. 수질 측정항목은 주로 BOD₅, SS, T-N, T-P 등을 환경부등록 대기기관에서 분석하였으며, 수위, 수온, 유량 등은 현장에서 간이수질측정기와 유량계로 측정하였다.

안터생태적수질정화바이오톱의 식물상은 식재종 및 침입종의 변화를 2009년 9월부터 2010년 8월까지 월 1회를 원칙으로 저수지 및 생태적수질정화바이오톱내 현지조사를 통해 지속적으로 모니터링하였으며, 강우 등으로 조사가 불가능한 경우를 제외하고는 조사시기를 준수하였다. 식물종의 동정과 분류는 「대한식물도감」(이창복, 1985)과 「야생식물생태도감」(고경식, 1993)을 참고하여 정리하였다. 같은 시기에 양서파충류 모니터링을 2회 시행하였으며 직접확인 방법(direct survey), 간접확인 방법(indirect survey)으로 생태적수질정화바이오톱 시스템이 적용된 구간의 금개구리를 포함한 다양한 야생동·식물의 복원효과를 분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 생태환경계획·설계과정

1) 대상지 복원 전 현황

본 연구대상지는 환경부 멸종위기 야생동·식물 II 급인 금개구리가 서식하는 생태계보전지구 이면서도, 근린공원으로 지정되어 인간의 무분별한 토지이용으로 인해 생물종(금개구리)의 서식환경이 위협을 받고 있던 지역이었다. 특히 택지개발로 인해 생태계가 파편화되었으며, 주변 토지이용에 따른 비점오염원의 악영향으로 수질환경이 악화되고 있었다. 그에 따라 금개구리 및 자생종의 개체수가 감소하여 연구대상지에서 멸종할 위기에 처해있었다(광명시, 2003; 2004).

안터저수지의 상시 유지용수는 2개의 지하 유출수가 깨끗한 수질로 유입되고 있었다. 하지만, 주변의 무분별한 토지이용으로 인한 비점오염원이 대상지의 자정능력을 이미 초과하여 연구대상지로 유입되고 있었다. 대상지의 주요 오염원은 대상지 동측 제방 주차장, 북측 불법농경지, 서측 사면부 불법농경지, 남측 고물상부지 등 사방에서 유입되어 있었다. 특히 주변을 감싸고 흐르는 구거에서 BOD 70mg/l 이상의 고농도 생활하수가 방류되었고, 도로(주차장)와 고물상부지에서 BOD 30mg/l 이상의 고농도의 비점오염원과 중금속 등이 발생하여 안터저수지의 생태계를 위협하였다. 또한 저수지 내에는 애기부들, 갈대 등 군락의 발달하여 겨울철 수생식물의 고사시 수질오염의 우려가 높은 상황이었다. 조성전 안터저

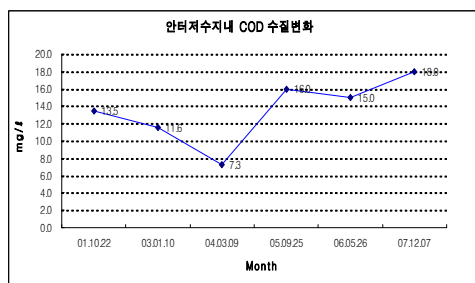
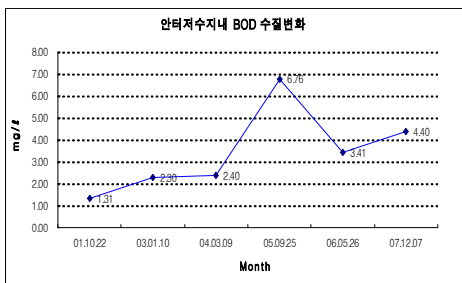


그림 2. 안터저수지 내 BOD와 COD 수질변화 그래프.

수지내 BOD 수질환경 분석결과, 2001년 10월 BOD농도는 1.31mg/l로 하천 수질환경 기준에서는 좋음 (Ib) 등급이었으나, 2005년 9월에는 6.76mg/l로 약간나쁨 (IV)으로 수질이 급속도로 악화되었으며, 조성직전 조사자료인 2007년 12월에는 4.4mg/l 보통(III) 등급으로 조사되었다 (그림 2). 양서과충류 전문가의 모니터링 수행결과 2003년 6월 300개체, 2007년 5월 22개체, 2008년 5월 15개체로 추정되는 등, 수질환경 악화 등의 생태환경적 문제로 인해 금개구리의 개체수가 급격히 감소하여 본 사업의 착수 당시

는 거의 멸절위기에 처한 상황이었다.

2) 안터저수지 생태공원 계획 및 설계과정 연구대상지는 금개구리가 서식하는 내륙습지로 가치가 높은 생태계이나, 법적으로는 택지로 둘러싸인 근린공원 부지였다. 따라서 인간 활동에 의한 교란을 최소화하면서도 지역민들이 자연과 휴식을 하고, 생태환경학습을 도모할 수 있도록 두 가지의 상충된 목표를 달성하고자 하였다. 이런 대상지에서 고물상 부지와 불법 투기된 성토지역 등의 훼손지를 활용하여 생태적수질정

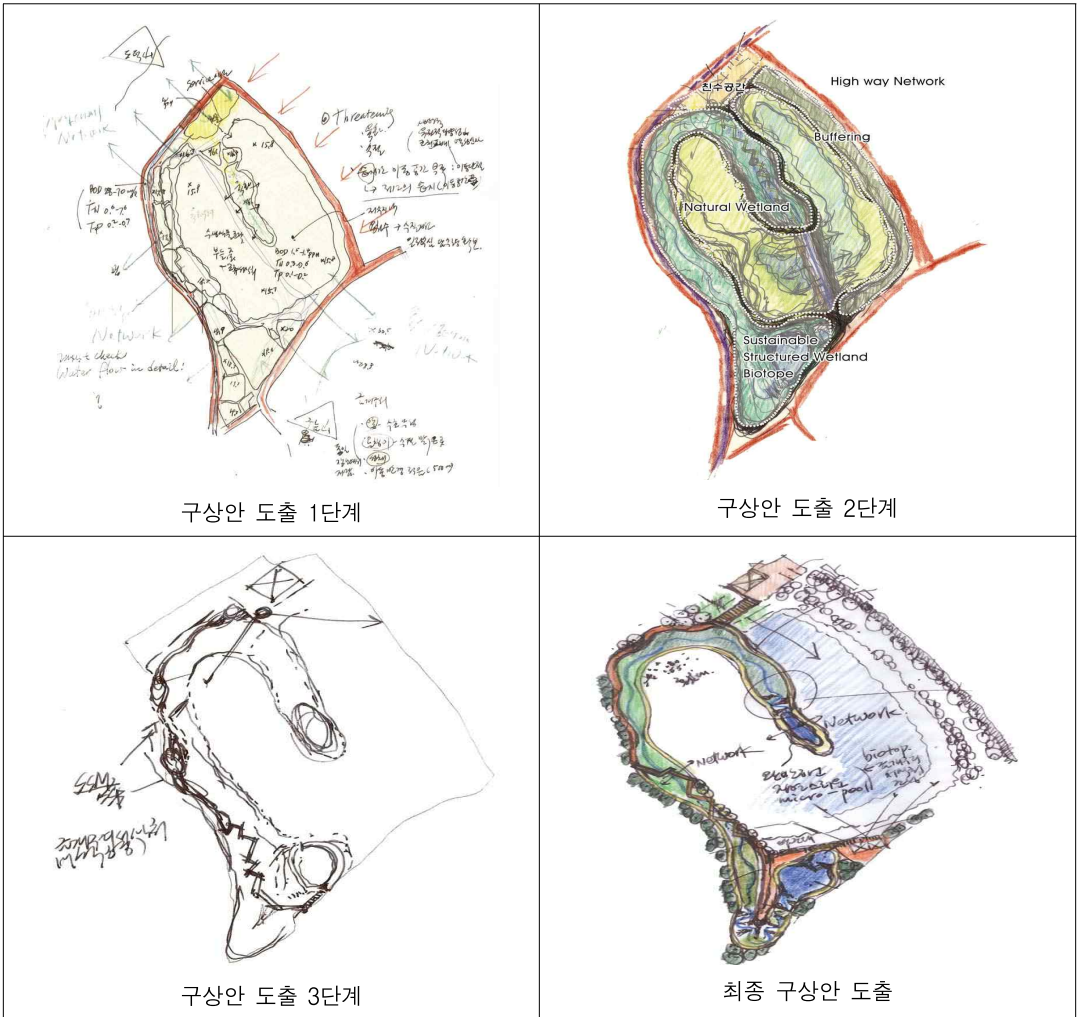


그림 3. 안터 저수지 생태적수질정화비오톱(SSB) 구상안 도출과정(변찬우, 2010b).

화비오톱(SSB : Sustainable Structured wetland Biotop)시스템을 도입 적용하였다. 먼저, 생태공학(수리, 수문, 토양, 식생, 미기후, 어류, 동물상 등) 특성 및 환경공학(평면구조, 처리유량, 목표처리농도, 용량 및 유속, 수리학적 체류시간, 수리학적 부하율, 배치 및 형태, 길이/ 넓이비 (AR), 배수 및 수위, 식재밀도, 토양 등) 특성을 고려하여 안터저수지의 수질환경을 개선시키고, 금개구리 등이 서식할 수 있는 대체서식처를 복원하고자 계획하였다. 또한 SSB시스템주변으로 생물의 생육 및 산란에 영향이 없도록 관찰데크, visitor center 등을 설치하여 주민들의 휴식과 자연생태학습이 이루어질 수 있도록 하였다.

본 생태환경계획 과정은 다음과 같이 4단계에 걸쳐 수행되었다(그림 3).

(1) 구상안 도출 1단계

구상안 도출 1단계는 대상지의 현황 특성과 문제점을 분석하고, 주변의 환경적 영향을 고려하여 도시화 및 유지용수 부족에 따른 육화를 막기 위해 수생태계를 복원하였다. 택지내 고립된 수생태계를 주변의 구름산, 도덕산 등으로 연결할 수 있는 생태네트워크 방안을 큰 맥락에서 구상하고 주변 농경지 부분의 비점오염원 유출에 따른 문제점을 분석하여 사면 완충녹지대를 생태적으로 복원하여 주변 지역에서 배출되는 생태환경적 악영향을 완충시키고자 하였다.

(2) 구상안 도출 2단계

구상안 도출 2단계는 구상안 도출 1단계의 설계안을 구체화하여 생물 서식처와 인간영향(human impact)를 고려하여 자연습지(natural wetland), 완충구간(buffering zone), 생태적수질정화비오톱(SSB)구간, 친수 및 자연생태학습구간으로 구분하여 체계적인 생태적 토지이용계획(ecological land use planning)을 구상하였다.

자연습지(natural wetland) 구간은 기존 금개구리 등 다양한 생물들이 서식하는 자연습지로 육

화가 진행된 일부 훼손된 구간은 주변 생태계와 동일한 원형경관(archetypical landscape)을 토대로 복원해주고, 주변지역의 완충을 통해서 최대한 핵심서식처를 보전하는 방향으로 계획하였다. 또한 인간의 활동으로 인해 생물서식환경에 악영향의 가능성이 높으므로 근린공원으로써의 이용을 부분적으로 제한하였다.

완충구간(buffering zone)은 주택지역과 근접한 구간, 농경지 등에서 발생하는 오염원이 유입되는 등 인간의 활동에 의한 악영향을 완충해주는 지역으로 주택지역과 근접한 구간에 차폐, 완충식재를 통해서 생물서식처를 보전·복원하였다. 완충지대의 사면부는 육상생태계와, 습지생태계의 전이지대로 다양한 생물들이 이동할 수 있는 생태통로 기능을 부여하여 생태적 연결성을 복원하였다.

생태적수질정화비오톱(SSB) 구간은 생태환경 복원의 핵심지역으로, 대상지 오염원의 온상이 되었던 고물상부지, 불법투기 매립지, 불법경작지, 육화된 곳 등 생태적 가치가 낮은 곳을 재활용하여 안터저수지의 수질환경을 개선하고, 훼손된 습지 내 생물서식처로 복원하였다. 복원당시 금개구리의 서식환경으로 맞지 않는 방향으로 천이 진행되고 있으므로, 금개구리가 서식할 수 있는 생태환경과 대체서식처를 확장하는 방향으로 복원하였다.

또한 친수 및 자연생태학습 시설은 다양한 프로그램을 지원관리하기 위한 Visitor Center, 안내판, 해설판, 휴게공간 등 이용객의 편의를 도모하는 시설을 배치하고, 이용객의 활동을 제한할 수 있도록 공간계획을 수립하였다. 안터저수지 내 생물서식처의 영향이 적은 공간에 친수공간을 배치하였고 습지의 생태계에 악영향을 최소화할 수 있는 목교 등을 활용한 동선체계를 구상하였다. 자연생태학습원으로 활용할 수 있는 생태학습, 관찰, 체험 등의 공간을 도입하고, 주택단지와 근접한 구간에 완충지역을 두고 생태적으로 복원하였다.

(3) 구상안 도출 3단계

구상안 도출 3단계는 구상안 도출 2단계의 설계안을 구체화하여 안터저수지 생태계 최대교란 요인인 사람의 접근을 차단하기 위해 중심부로 이동하는 동선을 제거하고, 대체 습지를 조성하였다. 점차 악화되는 안터저수지의 수질을 개선하기 위하여 주변지형 수위차와 수문학적 특성을 고려하여 자연유하방식으로 생태적 수질정화 비오름 시스템을 설계하였다. 이를 통해 금개구리의 새로운 서식공간을 창출하였고, 기존 금개구리 서식처의 원형을 도입한 대체습지를 조성함으로써 금개구리 서식처를 확대하고 금개구리의 개체수를 늘릴 수 있도록 하였다.

(4) 최종 구상안 도출

구상안 도출 4단계인 최종안 도출은 기존안을 구체화하고, 시설 및 동선체계를 확정하여 대체습지의 자유수면 형태, 생태적 수질정화 기능 등을 부여하고, 적절한 생태통로의 위치를 판단하여 조성하였다. 금개구리 대체 서식처로 습지식물 식재 및 생태적 어도보를 조성하여 습지내 금개구리가 종횡으로 이동할 수 있는 환경을 조성하고, 주동선 외곽에 완충지대를 설치하여 경관적, 생태적 악영향을 저감하였다. 동측 제방사면 급경사부는 경사를 완화하고, 다층식재를 적용하여 생육터전을 늘렸다.

2. 생태환경 복원시공과정

시공과정에서는 본 연구의 목표종인 금개구리 서식환경을 모니터링하고, 그를 통한 수질환경 개선 및 자연 생태계 복원 연구가 실현되어야 한다. 따라서 현장의 생태·환경공학적 특성을 모니터링한 뒤 복원시공을 수행하였다. 특히, 복원시공과정에서는, 안터저수지 생태공원에 관한 공원조성 공사전체중에서 생태환경복원의 핵심지역인 생태적수질정화 비오름 시스템을 중심으로 진행되었다.

복원시공을 위한 모니터링에서는 수문, 토양,

식생 등 습지의 주요 요소를 조사·분석하여 복원공사시 현장특성을 반영하였다. 특히 생태적 수질정화 습지는 수질환경 개선을 통한 서식환경 조성에 그 목적이 있으므로 지하수위 등 대상지의 수리·수문적 특성을 면밀히 고려하여 지하수와 오염수간의 악영향이 발생하지 않도록 복원시공하였다. 연구대상지 주변의 고물상으로 활용된 토양 오염도 등을 판단하고, 추후 수질환경 개선에 영향이 없는지 현장에서 조사·분석하여 복원시공에 적용하였다.

연구대상지의 습지 특성을 판단하기 위해 육화로 인해 훼손도가 크고, 불법 농경지 등으로 활용된 특성을 조사·분석하여 이를 토대로 육화된 습지생태계를 수생태계로 복원하였다.

설계도서와 현장 모니터링 결과를 토대로 복원시공을 착수하고 기반공사, 시설물공사, 식재공사 순으로 연구대상지의 복원공사를 실시하였다. 기반공사는 모니터링된 수리·수문특성을 고려하여 자연스러운 물흐름이 이루어질 수 있도록 자유수면형 습지형태로 토공사를 수행하였다. 조성된 기반공사 상부에 생물서식처 및 생태적 수질정화 시설을 설치하였다. 특히 생태수제 등은 주요 핵심복원종인 금개구리의 서식환경을 고려한 대표 서식처로써 육화로 인해 훼손된 구간에 개방수면을 조성하고, 양서파충류 전문가 자문을 받아 금개구리 생활사에 필요한 산란장소, 활동 및 휴식장소, 동면장소가 시스템내에 존재하는 최적의 서식조건으로 조성되었다. 또한 자연형 여울과 소, 햇대, 사면 저수호안, 생태통로 등의 생태환경 시설을 연구대상지 특성에 맞춰 설치하였다.

연구대상지의 복원공사가 진행된 후 생물중 서식환경 및 수질환경의 안정화 및 문제점 등을 분석하기 위해 생태·환경공학 전문가가 직접 시운전 및 모니터링을 수행하였다. 특히 훼손되었던 육지 생태계를 수생태계로 변환하면서 다양한 개선방안을 도출하였다. 연구대상지에서는 수량 유지 및 환경오염시설의 지하수 거동을 막기

위해 생태적 차수를 하였고, 월류보 등이 제기능을 수행하기 어려운 구간이 발생하여 이를 보완하기 위해 여러 차례의 보완공사를 실시하였다. 공사전, 공사중, 그리고 공사 직후, 생태·환경공학측면에서 시운전 및 모니터링 수행을 통해서 생태적 수질정화 습지의 구조를 안정적으로 보완하였다. 이 과정에서 생물종 서식환경을 개선하고, 안정적 수질환경 개선이 이루어질 수 있도록 조절하였다.

3. 유지관리 모니터링 분석결과

1) 수질

(1) 월별 및 평균 처리효율

안터 생태공원 생태적수질정화바이오톱 복원 후 2009년 9월부터 2010년 8월까지 수질환경모니터링을 수행하여 유입수와 유출수의 BOD5, SS, T-N, T-P 등 수질을 분석하였다(표 1).

그 결과, BOD5는 평균 유입농도가 2.9mg/L, 평균 유출농도가 1.0mg/L로 67%의 처리효율을 보였으며, SS는 평균 유입농도가 18.1mg/L, 평균 유출농도가 2.5mg/L로 86%의 처리효율을 나타냈으며, T-N는 평균 유입농도가 0.426mg/L, 평균 유출농도가 0.147mg/L로 66%의 처리효율, T-P는 평균 유입농도가 0.071mg/L, 평균 유출농도가 0.022mg/L로 68%의 처리효율로 측정되었다. 복원 후 짧은 기간 동안 습지내의 안정화가 이루어져 수처리효율이 평균 60% 이상으로 높게 측정되었다. 향후 습지가 더욱 안정적으로 정착되고, 전문적인 유지관리가 수행될 경우 수질정화효율은 시간이 지날수록 더 높아질 것으로 조사·분석되었다.

BOD5는 평균 유입농도가 2.9mg/L, 평균 유출농도가 1.0mg/L로 67%의 처리효율로, 2009년 10월에 97%로 가장 높은 제거율이 나타났으며, 2010

표 1. 안터 생태적수질정화바이오톱 월별 수질분석결과.

일자	BOD5(mg/L)			SS(mg/L)			T-N(mg/L)			T-P(mg/L)		
	유입수	유출수	효율(%)	유입수	유출수	효율(%)	유입수	유출수	효율(%)	유입수	유출수	효율(%)
09.09	2.2	1.0	55	14.4	3.8	74	불검출	불검출	-	0.035	0.024	31
09.10	6.9	0.2	97	75.5	5.2	93	1.096	0.232	79	0.228	0.035	85
09.11	2.2	1.0	55	33.2	5.2	84	0.267	0.285	-7	0.079	0.031	61
09.12	2.7	1.2	56	2.6	1.0	62	0.319	0.044	86	0.060	0.025	58
10.01	4.6	1.0	78	7.4	0.8	89	0.297	불검출	-	0.033	0.010	70
10.02	2.3	1.2	48	8.2	1.8	78	0.032	불검출	-	0.022	0.016	27
10.03	1.5	0.2	87	4.4	2.2	50	불검출	불검출	-	0.014	0.015	-7
10.04	2.6	1.9	27	6.0	2.0	67	0.330	불검출	-	0.045	0.021	53
10.05	1.4	1.1	21	11.8	2.2	81	0.449	0.025	94	-	-	-
10.06	4.8	1.5	69	31.5	4.5	86	0.615	불검출	-	0.111	0.024	78
10.07	1.7	0.8	53	8.2	0.8	90	불검출	불검출	-	0.085	0.022	74
10.08	2.4	0.4	83	14.0	1.0	93	불검출	불검출	-	0.083	0.022	73
평균	2.9	1.0	67	18.1	2.5	86	0.426	0.147	66	0.071	0.022	68

※ T-N의 '불검출'은 영양물질인 총 질소(T-N)가 수질 내에서 검출되지 않음을 의미함. T-N, T-P를 나타내는 총 질소나 총 인의 경우 녹색조류의 생성물질로 이러한 영양물질이 낮을수록 수질이 깨끗한 것이며 T-N의 '불검출'은 영양물질이 거의 없는 양호한 수질을 뜻함.

년 5월이 21%로 제거율이 가장 낮게 측정되었다. SS의 평균 제거효율은 유입 18.1mg/L, 유출 2.5mg/L로 약 86%의 제거율이 측정되었다. 조사 기간 동안 2010년 8월에 유입 14.0mg/L, 유출 1.0mg/L로 93%의 가장 높은 제거율이 조사되었으며, 2010년 3월에 유입 4.4mg/L, 유출 2.2mg/L로 50%의 가장 낮은 제거율이 조사되었다.

T-N의 경우에는 평균 유입농도가 0.426mg/L, 평균 유출농도가 0.147mg/L로 66%의 처리효율로, 2010년 5월 유입 0.449mg/L, 유출 0.025mg/L로 94%의 처리효율을 나타냈으나, 2009년 11월에는 유입 0.267mg/L, 유출 0.285mg/L로 유입보다 유출 농도가 높게 나타났다. 이는 갈수기로 인하여 습지내에서 물리·화학·생물학적 기작이 충분히 이루어지지 않은 결과로 판단되었다. 하지만, 2009년 9월에는 유입과 유출에서 총질소가 검출되지 않았다.

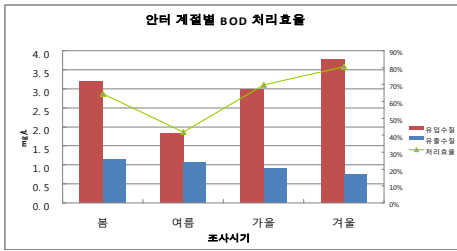
T-P은 평균 유입농도가 0.071mg/L, 평균 유출 농도가 0.022mg/L, 평균 제거효율은 약 68%로 조사되었으며, 조사기간 동안 제거효율은 2009년 10월에 유입농도는 0.228mg/L, 유출 0.035mg/L

로 85%로 가장 높았고, 2010년 3월이 -7%로 가장 낮게 조사되었다. 현재 복원 후 습지의 안정화가 진행되고 있는 상태로 판단되며, 향후 전문적인 유지관리와 습지의 완전한 자연화를 이루면 더 높은 수질 제거율이 도출될 것으로 예상된다.

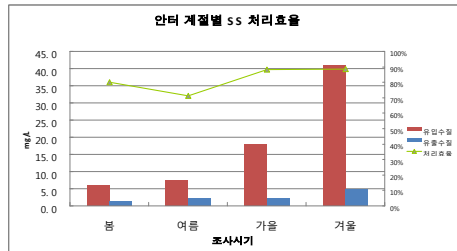
(2) 계절별 수질 처리효율

2009년 9월부터 2010년 8월까지 수질환경모니터링을 수행하여 봄, 여름, 가을, 겨울 등 계절별 수처리효율을 분석하였다(그림 4).

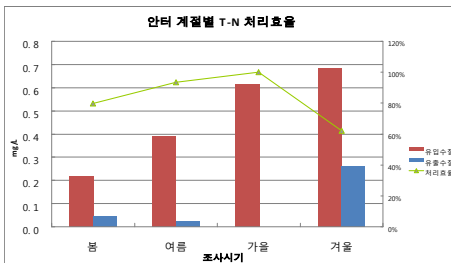
BOD 처리효율은 봄철 64.6%, 여름철 41.8%, 가을철 69.7%, 겨울철 80.5%를 보였다. 조사결과 여름철이 가장 낮은 제거효율을 보이고 있는데, 이는 여름철 기온에 의해서 유입유량이 줄어들고 수질농도가 높은 상태로 유입되는 등으로 그 원인이 분석된다. 인공습지는 생태적 기작을 통해 수질을 정화하는 시설이므로 정수식물 및 기타 미생물의 생장활동이 활발한 봄·여름·가을철에는 상대적으로 높은 처리효율을 보이고, 생장활동이 느려지거나 거의 없는 겨울철에는 상대적



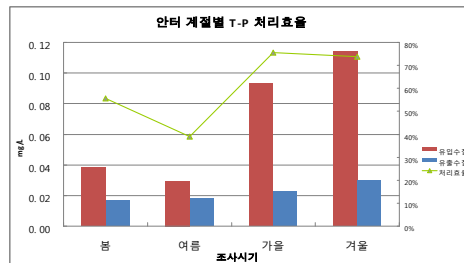
BOD 계절별 처리효율



SS 계절별 처리효율



T-N 계절별 처리효율



T-P 계절별 처리효율

그림 4. 안터 생태적수질정화비오름의 BOD5, SS, T-N, T-P 계절별 처리효율.

으로 낮은 처리효율을 나타내는 것이 일반적인 특징이다. 하지만 본 연구대상지에서는 생태적 수질정화 비오름 시스템을 보완한 생태적 수질정화 미디어 시스템(SSM) 등을 통해 겨울철 처리효율을 보완함에 따라 겨울철에도 80.5%로 높은 BOD 처리효율이 도출되었다.

SS 처리효율은 봄철 80.2%, 여름철 71.2%, 가을철 88.3%, 겨울철 88.5%를 나타냈다. 사계절 SS 처리효율은 평균 70~80%이상으로 안정화 단계로 진행된 것으로 판단된다.

T-N 처리효율은 봄철 79.6%, 여름철 93.6%, 가을철 90.0%, 겨울철 62.1%를 보였다. 겨울철의 처리효율의 경우 62.1%로 타계절에 비하여 전반적으로 60% 이상의 높은 수처리효율이 조사되었다.

T-P 처리효율은 봄철 55.7%, 여름철 39.0%, 가을철 75.6%, 겨울철 73.7%를 나타냈다. 여름철이 가장 낮은 제거효율을 보이고 있으나 금어

천 사례 등에서(변찬우, 2010a) 보여지는 생태적 수질정화 비오름시스템의 인처리 효율을 고려해 볼 때, 금번 모니터링기간의 갈수기 때 유량이 준 것 등, 일시적 환경요인들이 안정화 될 경우 높은 효율을 보일 것으로 판단된다.

2) 식생

(1) 식재종

생태적수질정화비오름에 식재된 수생식물은 수문적 특성, 토양, 지질, 식물 등 생태적 특성을 고려하여 식재되었으며, 총 7과 11종으로 갈대, 달뿌리풀, 노랑꽃창포, 부들, 애기부들, 줄, 고마리, 수련, 노랑어리연꽃, 마름 등이다(표 2). 조성 초기 다른 수생식물의 침입을 허용하였으나, 점차적으로 순군집을 이루며 구간별로 우점하고 있다. 우점종 순은 달뿌리풀 > 노랑꽃창포 > 부들 > 고마리 순으로 수질정화효율이 높다고 알려진

표 2. 안터 생태적수질정화비오름의 식재종과 침입수종.

식재종		침입수종
마디풀과	고마리(<i>Pericaria thunbergii</i> (Siebold & Zucc.) H.Gross ex Nakai)	국화과
마름과	마름(<i>Trapa japonica</i> Flerow)	썩바귀(<i>Ixeridium dentatum</i> (Thunb. ex Mori) Tzvelev)
부들과	부들(<i>Typha orientalis</i> C.Presl)	미국가락사리(<i>Pericaria sagittata</i> (L.) H.Gross ex Nakai)
	애기부들(<i>Typha angustifolia</i> L.)	돼지풀(<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.)
붓꽃과	노랑꽃창포(<i>Iris pseudacorus</i> L.)	쑥(<i>Artemisia princeps</i> Pamp.)
수련과	수련(<i>Nymphaea tetragona</i> Trin.)	망초(<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist)
	가시연꽃(<i>Euryale ferox</i> Salisb.)	개망초(<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.)
벼과	갈대(<i>Phragmites communis</i> Trin.)	고들빼기(<i>Crepidiasrum sonchifolium</i> (Bunge) Pak & Kawano)
	줄(<i>Zizania latifolia</i> (Griseb.) Turcz. ex Stapf)	한련초(<i>Eclipta prostrata</i> (L.) L.)
	달뿌리풀(<i>Phragmites japonica</i> Steud.)	꿀풀과
조름나물과	노랑어리연꽃(<i>Nymphoides peltata</i> (J.G.Gmelin) Kuntze)	머리(Perilla frutescens var. japonica (Hassk.) Hara)
총계	7과 11종	마디풀과
		어귀(<i>Pericaria hydropiper</i> (L.) Spach var. hydropiper),
		소리쟁이(<i>Rumex crispus</i> L.)
		택사과
		택사(<i>Alisma canaliculatum</i> A.Br. & Bouche)
		사초과
		방동사나(<i>Cyperus amuricus</i> Maxim.)
		벼과
		뚝새풀(<i>Alopecurus aequalis</i> var. <i>amurensis</i>)
		미국개기장(<i>Panicum dichotomiflorum</i> Michx.)
		돌피(<i>Echinochloa crusgalli</i> (L.) P.Beauv. var. <i>crusgalli</i>)
		강아지풀(<i>Setaria viridis</i> (L.) P.Beauv. var. <i>viridis</i>)
		왕바랭이(<i>Eleusine indica</i> (L.) Gaertn.)
		통발과
		통발(<i>Utricularia vulgaris</i> var. <i>japonica</i> Tamura)
		총계
		13과 26종



그림 5. 생태모니터링중 관찰된 멸종위기종 야생동식물 II 급인 가시연꽃(왼쪽, 2010년 8월 31일)과 금개구리(오른쪽, 2010년 7월 17일).

식물 위주로 우점되었다.

모니터링 결과, 대상지내 멸종위기종 야생동식물 II 급으로 지정된 가시연꽃(환경부 시행규칙 제2조관련, 법정관리종)이 식재되어 자생하고 있음이 관찰되었다(그림 5). 가시연꽃은 우리나라는 물론 일본에서도 천연기념물로 보존하고 있으며 1속 1종만 분포하는 동아시아 특산물이다. 한해살이식물로 오직 종자에 의한 번식만 있으며 발아율 또한 평균4%이하로 매우 낮은 편이라 자생지 보존을 최우선적으로 보호하고 있는 종이다. 비록 종자를 뿌린 것이라 해도 생육조건이 맞지 않으면 서식이 불가능한 수종이기에 현재 서식상태로 확인한 바 안터저수지 및 생태적수질정화비오톱은 우리나라 가시연꽃의 자생지가 될 수 있는 가능성이 높다고 판단된다.

(2) 침입수종

생태적수질정화비오톱에 침입한 종은 총 13과 26여종으로, 붕어마름, 명아주, 물달개비, 가래, 씌바귀, 미국가막사리, 돼지풀, 쭉, 망초, 개망초, 고들빼기, 한련초, 토끼풀, 붉은토끼풀, 들깨, 여뀌, 소리쟁이, 환삼덩굴, 택사, 방동사니, 뚝새풀, 미국개기장, 돌피, 강아지풀, 왕바랭이 등이 관찰되었다(표 2). 수생식물간의 상호경쟁에서 우세한 식재종이 우점종으로 구성되어 있어 대부분의 침입식물은 개체수가 적고 군락을 형성하지 못하였다. 습지생태계에 악영향을 미칠 수 있

는 침입수종인 미국가막사리, 돼지풀, 환삼덩굴 등은 주기적인 유지관리를 통해서 제거작업을 수행하고 있다.

또한, 안터 생태적수질정화비오톱내에 산림청 희귀 식충식물인 통발이 자생하고 있음이 확인되었다. 통발은 연못이나 물웅덩이에서 자라며 뿌리 없이 연못에 떠다니며 포충낭으로 곤충을 잡아 소화하는 다년생 식충식물로, 통발이 많으면 용존산소가 많이 발생하여 수질이 좋아지고 생물 서식처로서도 큰 역할을 한다. 현재 안터 생태적수질정화비오톱 내에 전반적으로 서식하며, 특히 1차습지/연못 구간에 많이 서식하고 있다. 통발이 존재한다는 것은 시스템내 복원기능이 원활하고 생태계 구조가 다양하게 연계되어 있음을 보이고 있다.

3) 양서·과충류

본 연구의 금개구리 서식처 복원전·후 모니터링 결과 기존 2004년 조성전 당시 금개구리 개체수가 300개체에 달하였지만 불법농경지와 각종비점오염원의 유입과 수질악화로 인해 2008년 5월 금개구리의 개체수는 15개체가 확인되어 멸종위기를 맞이하였다. 이후 금개구리 생태 및 서식환경을 고려한 생태습지를 조성하여 안터저수지 내 수질을 생태적으로 정화하여 맑은 수질환경을 조성함으로써 현재 금개구리 서식 환경이 복원되었다.

표 3. 양서·파충류모니터링 조사결과.

No.	과(Family)	종명(Species)		확인방법			비고
		학 명	국 명	서식 확인	산란지 확인	청문 확인	
1	Bufo	<i>Bufo bufo gauguizans</i>	두꺼비	●			
2	Hyla	<i>Hyla japonica</i>	청개구리	●		●	
3	Rana	<i>Rana nigromaculata</i>	참개구리	●			
		<i>Rana amurensis coreana</i>	한국산개구리	●			
		<i>Rana chosonica</i>	금개구리	●		●	
		<i>Rana amurensis coreana</i>	아무르산개구리	●			
4	Testudinidae	<i>Trachemys scripta elegans</i>	붉은귀거북	●			외래종
5	Larcertilidae	<i>Takydromus amurensis</i>	아무르장지뱀	●			
		<i>Takydromus wolteri</i>	줄장지뱀	●			
7과		5과 9종					

2009년 생태복원이후 양서파충류 모니터링 결과, 총 5과 9종이 확인되었으며 이중에서 양서류는 금개구리, 참개구리, 한국산개구리 등 3과 6종이 발견되었으며(그림 5), 파충류는 붉은 귀거북, 아무르장지뱀 등 2과 3종이 확인되었다(표 3). 복원후 복원전보다 두 배 이상의 금개구리 개체가 복원 서식하는 것으로 조사되는 등 금개구리 서식환경은 최상으로 개선되었으나 여름철 갈수시 저수지 유량부족에 따른 육화현상 및 대형정수식물의 과도한 증가, 위협종인 조류, 가물치, 잉어 등 증가로 금개구리 개체수 감소가 우려되었다.

V. 결 론

본 연구는 생태계보전협력금 사업의 일환으로 금개구리(멸종위기 야생동물 II급) 서식 위협을 줄이고 공원이용으로 인한 인위적 교란을 방지하고자 생태 환경적 향상을 도모하였다.

대상지 특성(Site-specific)에 맞게 안터저수지 생태적수질정화비오름(SSB : Sustainable Structured wetland Biotope)시스템을 적용하여 생태·환경 공학적 설계와 시공을 수행한 결과, 현재까지 성공적인 금개구리 서식처 복원 효과 및 수질환경

개선 효과를 도출할 수 있었다. 또한 생태계에 교란을 줄이면서도 도시 내 근린공원으로서는 친수공원의 이용성을 도모할 수 있었다. 지속적인 모니터링과 대상지의 특성에 맞는 복원 시공 및 유지관리를 하여 실제로 본 대상지의 원형에 가까운 동식물상 복원의 기능과 효율이 나타났다.

멸종위기종인 금개구리의 서식을 위협하였던 저수지내 수질과 택지내 비점오염원 정화를 위해 조성한 생태적수질정화비오름(2009년 5월 준공) 시스템의 경우, 2009년 9월부터 2010년 8월까지 수질모니터링하여 월별 평균처리효율을 검토한 결과, BOD5는 유입 2.9mg/L, 유출 1.0mg/L로 67%, SS는 유입 18.1mg/L, 유출 2.5mg/L로 86%, T-N은 유입 0.426mg/L, 유출 0.147mg/L로 66%, T-P는 유입 0.071mg/L, 유출 0.022mg/L로 68%의 처리효율로 각각 모니터링 되었다. 모니터링을 수행하면서 긴 복원시공을 수행한 결과, 비교적 짧은 기간 동안 습지내의 안정화가 이루어졌고 수처리 효율이 전반적으로 높게 측정되었다.

식물상의 경우 당초 시스템에 식재한 식생은 점차적으로 순군집을 이루며 달뿌리풀 > 노랑꽃창포 > 부들 > 고마리 순으로 우점되었다. 특히, 대상지내 멸종위기종 야생동물 II급으로 지정

된 가시연꽃과 보호종인 식충식물 통발이 서식하고 있음이 모니터링되었다. 양서과충류의 경우 총 5과 9종으로 이중 양서류는 멸종위기 야생동식물 II급인 금개구리 등 3과 6종, 파충류는 붉은 귀거북, 아무르장지뱀 등 2과 3종이 확인되었다.

따라서 복원이후 모니터링 결과 서식환경 악화와 무분별한 토지이용으로 인해 멸종위기에 처한 안터저수지에 금개구리 등 지역 자생종들은 물론, 그보다 더욱 다양한 지역 생태계가 창출(creation) 복원되었음을 확인할 수 있었다. 이는 생태적수질정화비오톱 시스템으로 조성된 인공습지가 수질환경을 맑게 하면서도 자연습지에 버금가는 생태 복원 기능을 할 수 있음을 확인한 결과라고 볼 수 있다. 이처럼 생태환경복원이 성공하기 위해서는 생태환경적으로 전문적인 복원 설계, 시공, 유지관리 모니터링 등의 통합적 접근이 있었음을 간과해서는 아니될 것이며, 향후 복원관련 법 제도의 지침이 되어야 할 것이다.

지금까지 생태환경복원을 위한 인공습지기법과 연구는 비점오염원 처리에 치중되어 자연습지에 비해 생물다양성이 매우 떨어졌으며, 그에 대한 연구와 사례가 부족하였다(환경부, 2008; Vymazal, 2010). 이에 본 연구는 택지내 비점오염원 유입 등을 고려한 수질환경 개선뿐만 아니라 멸종위기종 등 소생물 서식처 조성을 위한 수생태계복원을 계획·설계·시공·유지관리·모니터링을 통합적으로 수행한 사례로, 아직 개척단계인 국내 생태·환경복원사업에 실질적 기초자료를 제공하고 있다. 특히, 기존 연구 및 건설산업 기본법중심의 공사업으로 수행할 수 없었던 수생태환경의 모니터링 과정과 멸종위기종인 금개구리서식처 복원을 환경신기술인 생태적수질정화비오톱(SSB)시스템을 통해 수행함으로써 수질개선 및 생태계 복원의 효과를 성공적으로 이룰 수 있었다. 따라서 추후 생태환경 복원을 위한 모니터링 과정을 보장하는 복원업인설 등, 제도적 개선의 필요성이 시급하다. 본 연구의 경우 금개구리 서식환경은 시스템적으로 잘 개선되었으나 여름철

갈수시에 나타났던 저수지 유량부족 및 대형정수 식물의 과도한 증가로 인한 육화 현상, 금개구리 위협종인 조류, 가물치, 잉어 등의 개체수 증가로 인한 문제점은 생태·환경공학 전문가의 유지관리와 모니터링을 통해 추후 지속적인 고찰이 필요할 것으로 사료된다.

인 용 문 헌

- 광명시. 2003. 안터저수지 생태학습장 조성사업 사전환경성검토서.
- 광명시. 2004. 안터저수지 도시계획시설 환경성 검토서.
- 대한건설협회. 2005. 건설산업기본법령집.
- 변우일. 2005a. 자유수면형 인공습지 생태공원설계에 관한 구조적 연구-생태적 수질정화비오톱(SSB)공법 적용을 중심으로. 한국환경복원녹화기술학회 춘계학술발표회 pp.63-70.
- 변우일. 2006a. 저류지 생태공원 설계모형 개발에 관한 연구. 한국환경복원녹화기술학회지 9(3) : 1-16.
- 변우일. 2006b. 자유수면형 인공습지 환경·생태공원 설계-생태적 수질정화비오톱 공원의 구조설계를 중심으로-. 한국환경복원녹화기술학회지 9(5) : 1-9.
- 변찬우. 2010a. 경안천 고수부지에 조성한 금어천 생태적수질정화비오톱 시스템의 수질정화 및 생태복원 효과. 한국환경복원녹화기술학회지 13(3) : 1-13
- 변찬우. 2010b. 우리풍토에 맞는 생태하천, 나무도시 pp.134-157.
- 환경관리공단. 2005. 주암호 인공습지(Biopark) 운영결과보고서.
- 환경부. 2007. 생태계보전협력금제도 개선을 위한 연구.
- 환경부. 2008. 비점오염저감시설의 설치 및 관리 운영 매뉴얼 pp.86-186.
- 환경부. 2010a. 생태계보전협력금 반환사업 가이

- 드라인 p.72.
- 환경부. 2010b. 택지개발지역에서의 훼손된 수생태계 복원, 창출, 향상 기술 개발 최종보고서 pp.134-283.
- Byeon, C. W. 2010. *Ecological Restoration of the Rivers and Wetlands with Sustainable Structured wetland Biotop (SSB) system*, the 8th International Symposium on ECOHYDRAULICS (ISE 2010).
- Kadlec, R. H., and Knight, R. L. 1996. *Treatment wetlands*, CRC Press/Lewis publishers, Florida, USA.
- Kadlec, R. H. 2009. *Comparison of free water and horizontal subsurface treatment wetlands*, Ecological Engineering, 35 : 159-174.
- Vymazal, J. 2010. *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, Water 2010, 2 : 530-549.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA), 1993. *Constructed wetlands for Wastewater Treatment and Wildlife Habitat*, Washington, D.C. : Office of Water, EPA 832-F-93-005, p.11.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). 1999a. *Free Water Surface Wetlands for Wastewater Treatment*, Washington, D.C. : Office of Water, EPA 832-F-99-002, p.5-5.
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). 1999b. *Storm water technology fact sheet : storm water wetlands*, Washington, D.C. : Office of Water, EPA 832-F-99-025.