

생태공학 기법을 활용한 습지생태계 복원¹⁾

배 경 석²⁾

서울특별시 보건환경연구원

서 론

습지의 수생식물을 이용한 수질 및 수생태계 개선기술은 1960년대 이후 영양물질에 대한 고도처리, 수질정화, 친수효과, 생물서식을 위한 비오톱(biotope) 조성, 실내공기오염의 정화기술 등에 광범위하게 적용되어 왔다. 생태공학(ecoengineering) 혹은 에코테크놀로지(ecotechnology)란 공학의 원리를 이용하여 자연생태계에 대한 정화효과를 높이고 수환경을 복원시키는 방법이며, 야생생물의 서식공간 창출을 위한 비오톱 조성과 하천, 호소 및 갯벌의 수변대 복원을 통한 수질정화기술로 도입되었다. 이와같이 생태공학은 생태계의 먹이사슬에서 생산자인 조류, 낮은 영양단계의 세균과 원생동물, 상위 영양단계인 어류 및 철새 등의 생활사가 이루어지는 서식처가 되는 수역, 육상, 습지대 등의 유기적 연계가 이루어지는 역할을 공학적으로 조절함으로써, 생산, 분해, 흡수, 정화 등 각각의 기능을 높이는 수생태 보전 및 회복에 관한 기술이다.

1970년에 맑은 물 법(Clean Water Act)을 제정하고, 하수처리장 확충 등의 엄청난 노력을 기울인 미국은 점오염원을 성공적으로 저감하였지만 비점오염물질을 제어하지 못

해 1990년대 들어와서도 목표수질을 달성할 수 없었다. 그 이후 생태복원이라는 최적관리기법(BMP)을 통해 비점오염물질의 저감에 노력을 기울이기 시작하였다. 그 대표적인 방법중의 하나가 수변완충구역의 설정과 관리이다(우 등, 2006). 국내에서도 수자원의 주요 공급원인 저수지, 하천의 습원 수질을 개선하려는 노력이 지속되고 있다. 그러나 점오염원에 대한 처리가 다소 달성된 상황에서 비점오염원의 비중이 높아지고 있는 현실에서는 뚜렷한 개선효과를 보지 못하고 있는 실정이다(김 등, 2005). 비점오염원은 점오염원에 비하여 규격화된 처리장과 같은 수질정화방식을 도입하기 어렵다. 또한 점오염원이라고 해도 현재의 2차 처리에 의한 유기물 제거만으로는 조류의 성장에 따른 부영양화에 의한 호소의 수질오염은 방지하기 어렵다. 따라서 수중의 인과 질소 등의 영양물질을 제거하기 위한 고도처리시설이 요구되고 있다. 일반적으로 이들 영양물질을 제거하기 위한 고도처리에는 물리, 화학적처리를 위주로 하였으나 막대한 비용과 운영에 대한 기술적 부담으로 어려움을 겪고 있다. 따라서 수중의 영양물질을 성장이 왕성한 수생식물이 흡수하도록 하고, 다시 식물을 제거하는 방법이 주목을 받고 있다.

1) Restoration of Wetland Ecosystem Using Ecoengineering Technique

2) BAE, Kyung-Seok, Aquatic Ecology Team, Seoul Metropolitan Inst. of Public Health and Environment;

E-mail: baekyungs@paran.com

이것은 비교적 자연적인 조건과 과정에 의해 진행되므로 이러한 자연정화 과정은 식생만 잘 조성되면 훌륭한 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다(김 등, 2005). 한편, 인공습지 또는 수생식물지에 의한 수질정화 방법은 오염원에서 배출수에 대한 직접 처리 방식으로 제안된 것이며, 수생식물에 의한 수질정화 방법이 습지를 이용하여 생태계의 복합적 기능에 의한 정화와 친환경 조성 및 다양한 생물상 복원을 통하여 생태계를 복원시키는 방향으로 발전해가고 있다.

습지의 수질정화 및 생태계 복원개념

수생식물에 의한 수처리 개념

대형 수생식물에 의한 수질개선은 식물, 미생물, 저서생물간의 상호 작용을 통해 이루어진다. 대형 수생식물의 근계(root system)는 미생물의 매질로 작용한다. 이와같은 근계는 입자상 물질을 전기적, 기계적으로 퇴적 및 흡착시켜 미생물에게 먹이원을 제공하여 수질을 정화한다. 또한, 대형 수생식물은 통기조직은 통해 산소를 근계로 전달시켜 미생물의 유기물 분해활동을 촉진하며, 혐기조건의 근계에서 질산화를 유도하여 탈질을 촉진한다. 미생물의 유기물 분해를 통해 생성된 영양염류는 식물의 영양원이 되며, 식물이 합성한 유기물과 대사물질은 다시 미생물의 먹이원이 되는 순환과정을 거친다. 중금속이나 방사선물질을 흡수하며, 때로 유기물질을 직접 흡수하여 요소대사를 한다. 대형 수생식물은 저서 무척추동물들에게 서식처를 제공하여 이들에 의한 유기물질의 쇄설과 분해를 촉진시키며 무기화된 영양물질은 재흡수한다. 이와같이 수생식물은 자연생태계의 정화기능을 강화하는 물질순환시스템을 구축하는 근원입과 동시에 식물에 의한 영양염의 흡수, 뿌리 및 줄기를 통한 산

소공급에 의한 혐기·호기조건 하에서의 분해능 촉진, 수확과 수음 작업에 의한 이용, 퇴비화, 사료화에 의한 자원순환 등 수생식물 식재를 통하여 경관향상 및 생태계 복원, 식용자원으로서의 생산성을 기대할 수 있다.

수생식물활용 정화시스템은 수질정화와 수생태계 복원을 목적으로 장소의 특성에 따라 적절하게 도입된다. 이때 외래종 도입에 의한 생태계 교란이 일어나서는 안되고, 자생생물의 서식환경에 적합한 환경조건을 응용하여 설치하고 개선하는 방법을 통해 수질정화를 하여야 한다. 이와 같은 수생식물활용 정화시스템의 장점은 다음과 같다. 유기물 정화와 더불어 질소, 인 정화가 가능하다. 시설의 건설비가 저렴하여 대규모 시설을 설치할 수 있다. 시설의 건설비가 저렴하여 대규모 시설을 설치할 수 있다. 유지관리가 용이하고 비용이 저렴하고 자원순환이 가능하다. 생물이 서식하는 비오톱 조성외에 친수공간으로 경관 기능을 향상시킬 수 있다. 이외에도 시민이 참여하는 수질정화와 환경 교육 장소를 제공할 수 있다.

수생식물의 구분과 기능

수중이나 수변에 서식하는 대형 유관속식물(vascular hydrophytes)인 수생식물은 생활형에 따라 침수식물, 정수식물, 부유식물 등으로 구분한다. 이들의 서식조건은 기온의 분포와 토양의 영양물질함량, 수심(또는 지하수위) 등에 의하여 영향을 받는다. 서식조건은 수생식물이 정착하는 과정에서 대부분 결정되거나 선택된다. 한편 유수환경(lotic environment)에서의 수생식물 서식조건은 유속과 퇴적물의 양이 좌우한다. 물의 흐름 정도에 따라 정착할 수 있는 수생식물의 종류와 분포가 달라지며, 퇴적물이 식물의 성장에 지장을 줄 정도로 과도한 곳은 대체로 밀도가 낮다(그림 1, 2).

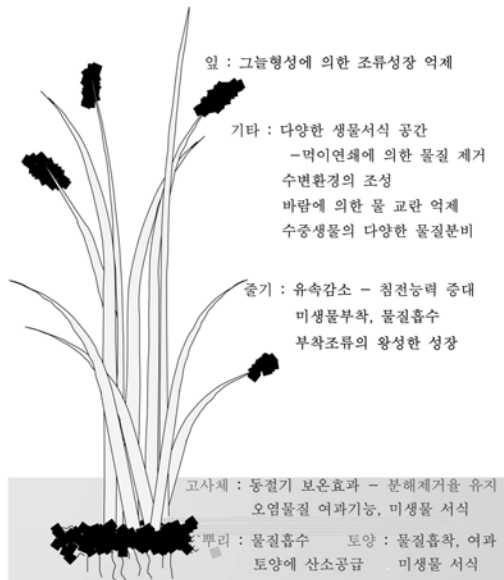


그림 1. 습지내 수생식물 군집에 의한 자연정화 및 관련된 기능모식도(김 등, 2005).

◦ 유수환경에서의 수생식물 분포 구분은 유속과 퇴적물에 의해 결정된다(Butcher, 1933; Hynes, 1960).

- ① 빠른 유속의 바위 및 자갈층 지역 : 대부분 이끼류
- ② 유속이 완만한 자갈층 지역 : 가는 모래의 퇴적이 없는 지역. 서양가새풀, 물미나리아재비
- ③ 가는 모래가 부분적으로 퇴적된 자갈

및 모래층 지역 : 가래. 약간의 탁도를 보임

- ④ 가는 모래가 퇴적된 점토층 지역 : 침전물이 많고 탁도 높음. 수선화
- ⑤ 교란이 없는 진흙층 지역 : 연안지역에 정수식물이 우점. 갈대, 큰고랭이

◦ 정수환경(lotic environment)에서의 수생식물 서식은 연안지역의 경사도에 의존한다.

- ① 정수식물대 : 대기중에서의 이산화탄소(CO_2) 공급이 중요
- ② 부수(부유, 부엽)식물대 : 토양에서 영양염류공급
- ③ 침수식물대 : 토양과 물에서 영양 섭취, 수중 이산화탄소 이용-기울기와 광량이 길이와 밀도 결정

수생식물은 필요한 영양물질의 대부분을 뿌리를 통하여 토양, 또는 수중으로부터 흡수한다. 따라서 호수의 수표면 또는 수변이 수생식물로 덮여 있는 경우에 식물체의 성장은 호수의 물질수지 및 순환에 중요한 역할을 담당한다. 한편, 국내 호수는 대부분이 인공호로 수량관리를 1차 목표로 하고 있기 때문에 연중 호수내의 수위변동이 심하다.

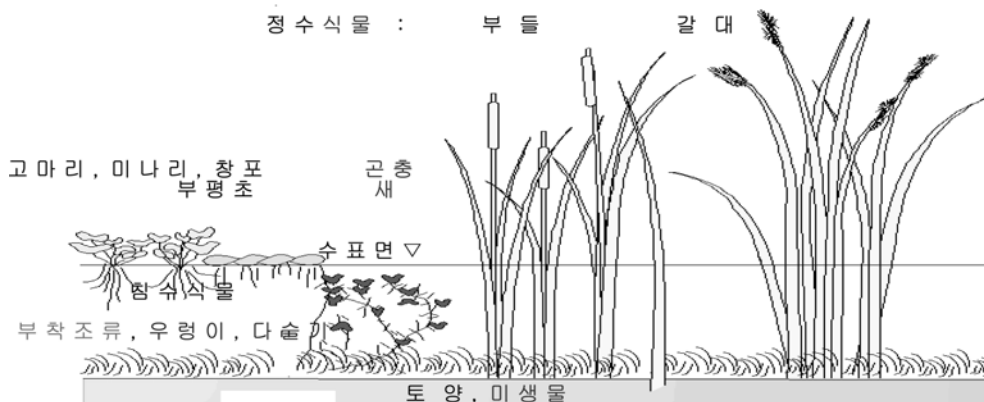


그림 2. 인공습지에서의 수생식물과 다양한 생물구성 모식도(김 등, 2005).

국내 최대수심을 자랑하는 소양호의 경우에는 연간 수위변동이 최대 30 m에 달하기도 한다. 이처럼 큰 수위변동은 수변부에서 수생식물의 성장을 저해하여 수위변동폭 사이에 포함된 지역은 맨 땅을 드러내게 된다. 수변부에 수생식물대가 발달한 자연호수에서는 일반적으로 이러한 수생식물대를 중심으로 호수내의 물질순환 과정이 이루어지는데 반하여 수생식물이 거의 없는 인공호에서는 수중의 식물플랑크톤을 중심으로 물질순환이 발생한다. 잘 알려져 있는 것처럼 수중에서 유기물을 생성하는 1차 생산자인 식물플랑크톤은 무기영양물질의 흡수를 통하여 호수의 화학적산소요구량을 증가시키는 주요 원인중의 하나이므로, 호수내에 유입된 무기영양물질의 흡수를 수변부의 식물이 담당하도록 조절하는 것은 호수의 수질관리를 위한 유용한 방안의 하나가 될 수 있다.

인공습지의 생태계 복원 개념과 발전 전개

한강과 같이 호수와 유수지역이 교차되는 수계에서는 호수내,외의 복원방법이 구분되며, 호수의 경우도 팔당과 같이 평지형 호수와 파라호와 같이 계곡형 호수의 복원 방법은 다양하게 적용된다. 그러나 일반적인 수변생태계 복원의 원리는 다음과 같다(안, 2006).

자연생태계의 원리를 이용한 생태공학의 장점은 무한한 태양에너지가 기본적인 운영 에너지로서 운영관리비가 저렴하다. 인공습지의 조성은 생태계내의 물질순환 고리를 이용하여야 한다. 이 과정을 통해 자연계로 오염물질을 분해하고 돌려보내기 때문에 새로운 오염원이 발생하지 않는다. 습지조성의 기본은 식생을 기반으로 하는 자연생태계가 창출되어야 한다. 낮은 농도의 유기물과 영양염류를 높은 농도로 전환시키는 미생물의 특징을 잘 활용하며, 스스로 진화하는 습지

생태계를 만들어야 한다. 계절의 변화에도 큰 영향을 받지 않는 다년생 식물을 이용하여 유지보수 비용이 최소화되고, 항상성이 큰 생태계로 진화할 수 있게 하여야 한다. 이와같이 형성된 습지생태계는 물고기, 곤충, 새, 개구리 등의 다양한 생물이 서식가능한 비오톱으로 작용하여야 한다. 일반적으로 수변생태계 복원은 넓은 부지를 필요로 하나, 국내의 경우 호수 및 하천의 전이 생태계가 파괴되었거나 시설물이 들어선 곳이 대부분으로 어려움이 많다. 이 경우 수표면, 나대지, 유헬 토지 등 호수연안과 호수내에 식생구조물을 설치하여 토지 비용을 절감하는 방법을 택한다. 그리고 식생 등 복원 이후에 나오는 생성물은 가급적 재 이용이 가능하고 무해하여야 한다.

습지는 보전해야 할 생물자원의 보고로 매우 중요시 되고 있다. 이와함께 습지지역의 수생식물을 이용한 수질정화 방법이 주목을 받고 있으며, 자연습지 원리를 이용한 인공습지를 조성하여 자연의 정화 기능을 증폭시키고 다양한 생물이 서식할 수 있는 비오톱을 제공한다. 수생식물의 적절한 관리와 수확을 통한 수질정화 효과가 입증되면서 1952년 독일의 Seidel이 사초과 식물(*Scirous lacustris*)을 이용하여 하수중의 폐놀 제거를 시도한 후 국내외에서 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근까지의 시도는 여러 가지 환경구성인자와 기능이 복합적으로 적용되기보다는 단순히 식물의 물질흡수 기능의 도입 단계와 단순히 몇 종의 식물을 이용하던 단계에서 생태계의 전반적인 기능을 복합적으로 복원한 습지형태의 수질정화 시설을 도입하였다(황 등, 1999). 이러한 시도는 비점 오염원에서 유출되는 영양물질 처리의 필요성과 수질정화시설의 친환경적 기능강화, 생태계 복원을 통한 환경개선의 방법으로 중요시되고 있다.

습지는 갈대, 줄, 부들 등의 습지식물과 이들을 지지하고 미생물 부착 매체인 자갈 및 토양 그리고 오염물질의 분해를 진행시키는 미생물로 구성된다. 습지에서의 수질정화는 무생물적인 요인(침전과 흡착)과 생물적 요인(식물에 의한 흡수)으로 구분된다(황과 공, 1999). 침전과 흡착에 의한 물질제거는 입자상으로 저층에 가라앉거나 식물체 표면에 부착되어 제거되는 방식으로 습지에서 가장 중요한 정화기작이다. 이렇게 제거된 물질들은 생물에 의해 직접 흡수되지 않고 미생물에 의해 분해되어 이용된다. 영양염류는 습지내에 생육하는 식물에 의해 직접 흡수되고 유기물은 토양이나 수중의 미생물에 의해 분해되어 정화된다.

습지 및 인공습지 시스템

습지의 기능과 유형

지금까지 습지의 중요성은 다양한 생물상에 집중되었으나 근래에 이르러서는 육상으로부터 유출된 영양염류를 흡수·제거하는 곳으로서의 역할이 밝혀지기 시작하면서 수질정화에 활용하고자 하는 노력이 일고 있다(김 등, 2005). 습지를 수질정화에 이용할 경우 매우 경제적인 수처리공정을 제공하는 데 점·비점 오염원으로부터의 많은 오염물질을 효과적으로 제거하거나 전환시키는 것으로 알려져 있으며(Hammer, 1989), 하천에

서의 수질개선 및 경관개선에 큰 몫을 하고 있다.

1. 인공습지의 재분류

인공습지는 수질을 정화하기 위해 인위적으로 조성한 습지를 지칭한다. 습지의 종류에는 자연습지(natural wetland), 복원습지(restored wetland), 조성습지(created wetland), 인공습지(constructed wetland)로 분류할 수 있다(박, 2003). 인공습지를 이용한 수처리 방식은 지난 20년에 걸쳐 지속적으로 개발 및 발전되어 현재는 전세계의 많은 나라에서 도시하수, 합류식 하수의 월류수, 낙농폐수, 매립지 침출수, 병원폐수 등의 산업폐수와 강우 등의 비점오염원으로부터 발생한 오염물질의 처리, 농업배수 등 다양한 분야에서 적용되고 있어 폐수의 관리 및 수질오염 제어에서 중요한 역할을 담당한다. 이와 같은 오염물질 제거는 정수식물의 지상부와 지하부의 조직, 미생물, 토양, 수용성 영양염류 등의 생물학적 및 이화학적 상호 작용을 통하여 이루어지므로 습지에서 정수식물의 역할은 대단히 중요하다(노 등, 2002; Gerberg et al., 1996).

습지 및 인공습지의 유형을 국내에서는 수질정화를 위하여 수생식물을 위주로 평가하며, 수생식물의 배치와 물리적, 생물적 복합 기능을 중심으로 구분하면 표 1과 같다(김 등, 2005).

표 1. 수생식물을 이용한 수질개선 시설의 유형 및 특성

시설 유형	시설 특성	관련 식물	주요기능
식생수로형(vegetated channel system)	수로의 지표면에 식생대 설치 - 지하호름형태 포함	갈대, 부들, 미나리, 달뿌리풀	침전, 분해, 흡착
식생부도형(vegetated floating bed system)	수로의 수면에 식생대를 부유 - 수경재배형태	부레옥잠, 개구리밥	흡수, 흡착, 분해
연못형(pond system)	식생의 역할보다 침전지, 산화지의 기능을 강화하는 구조	갈대, 부들 미생물(조류 포함)	침전, 분해
인공습지형(constructed wetland system)	자연습지 구조를 모방한 시설	갈대 등 다양	침전, 분해, 흡수, 흡착

1) 식생수로형

이 방식은 용배수로상의 수로에 식생대를 설치하여 수 시간 정도의 짧은 체류시간을 수질개선에 이용한다. 유량 변동이 크지 않거나 토사 유입이 적은 소하천에서는 수로에 직접 식생대를 조성하기도 한다. 대형하천 및 도시하천의 자갈접촉 수로에 조성되고 있으며, 수질정화를 높일 수 있는 자연적인 조건이 좋은 소하천의 경우는 배수로에 접촉수로를 설치하고 표면에 갈대, 달뿌리 등의 식물을 식재한다.

2) 식생부도형

부유성 식물인 부레옥잠, 개구리밥 등을 부체에 부유시키거나 식물섬을 만들어 갈대, 창포 등을 재배하는 방법이다. 식생부도형은 수로내에 설치하는 경우와, 호소내에 설치하는 방법이 있다. 호소에 설치한 식물섬의 경우 수중생물의 서식지로 이용되어 생물상 복원 및 경관 개선에도 도움을 준다.

3) 연못형

연못형의 수질정화시설은 대부분의 단독설치 대신 인공습지형, 식생부도, 식생수로형과 조합된 전처리 또는 배출수 처리시설로 이용되고 있다. 특히 인공습지형은 인제거 효율이 높지 않기 때문에 연못형과 결합하여 인이 포함된 고형물의 침강 제거, 무기영양물질의 응집침전을 유도하는 시설로 활용될 수 있다.

4) 인공습지형

자연습지 형태를 인위적으로 조성하여 습지가 가지고 있는 생물·생태적 기능을 오염물질 제거에 활용하는 방법이다. 습지에서는 한 두 가지의 식생을 조성할 때보다는 좀더 다양한 생물·화학·물리적인 기능이 복합되므로 식생의 제거 등과 같은 인위적인

관리를 최소화할 수 있는 장점이 있다. 인공습지형은 식생수로, 연못형 등이 복합된 형태로 세부적으로는 수변 및 수중생물의 서식지까지 포함한다.

인공습지의 설계방안

인공습지의 구분과 설계시 반영인자

1. 수질정화용 인공습지의 구분

수질정화 기능을 담당하는 인공습지는 지표흐름형과 지하흐름형, 부유식물시스템으로 분류할 수 있으며 그개념도는 그림 3~5와 같다(김 등, 2005; 안 등, 2006).

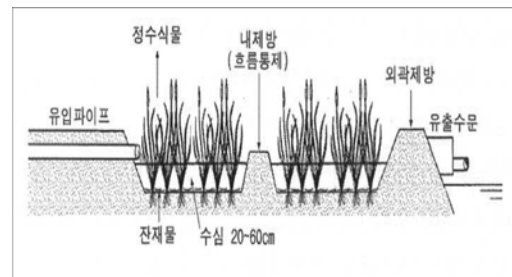


그림 3. 지표흐름형 인공습지 개념도.

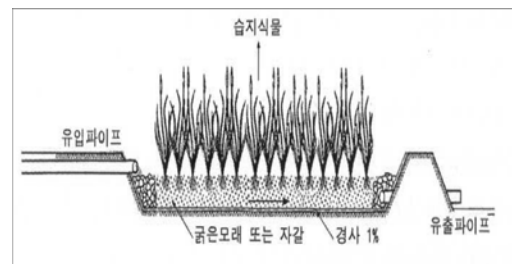


그림 4. 지표면하흐름형 인공습지 개념도.

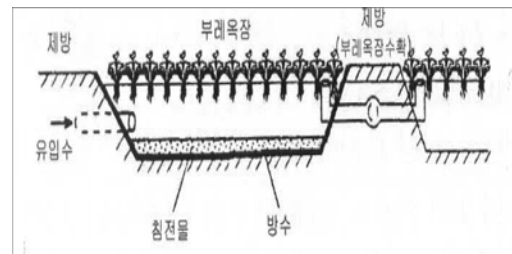


그림 5. 부유식물시스템 인공습지 개념도.

1) 지표흐름형 인공습지(Free water surface flow system, FWS)

지표흐름형은 유입수가 토양 표층위로 폐수를 흐르게 하여 물리, 화학, 생물학적 처리를 하는 방식이다. 광산폐수, 농업폐수, 산업폐수, 오염된 하천처리 등에 적용할 수 있으며, 처리 목적에 따라 수심이 0.2~0.6 m 범위이나 일반적으로 사용하는 수심은 0.3 m이다. 수면이 식생기반재 상부에 위치하고 있어 자연습지와 비슷한 형태이며, 수질개선 외에 자연생물이 서식하고 미관이 향상되는 장점이 있다.

2) 지표면하 흐름형 인공습지(Subsurface flow system, SFS)

지표면하 흐름형 인공습지는 대부분이 수질정화를 목적으로 지반을 굴착하고 입자가 큰 것은 모래 또는 작은 자갈 등의 여재를 채운 습지이다. 여재의 두께는 0.3~0.6 m 범위이며, 일반적으로 0.6 m가 사용되고 있다. 수위는 여재층의 상부보다 낮게 유지하고 식물은 여재사이로 뿌리를 뻗으며 자라게 된다. 계획유량이 4,000 m³/일을 초과하면 지표흐름형 인공습지와 비교해 건설비용이 크게 증가하여 경제성이 떨어지므로 300 m³/일 이하의 소규모 하수처리에 적합하다.

3) 부유식물시스템 인공습지

부레옥잠과 같은 부유식물을 이용하는 시스템으로 영양염류를 제거하기 위해서는 식생을 제거해야 하기 때문에 식생 제거비용과 처리비용이 드는 단점이 있다.

2. 인공습지의 식재 식물

1) 식물선택

식재할 식물종은 현장조사를 통하여 결정하며, 다음을 고려하여야 한다.

- 인공습지의 형태, 운영방법에 따라 선택

- 인공습지의 조성 예정지 주변에 서식하는 종 선택
- 오염지역에 서식이 가능하며, 오염물질의 흡수 및 제거능이 좋은 종 선택
- 다년생이며, 성장속도가 빠른 식물종 선택
- 자연경관성이 좋으며, 야생동물의 서식처로 활용도가 높은 종 선택
- 공급, 유지, 관리가 용이한 종 선택
- 인공식재후 자연도래 식물종은 경관 목적외에는 제거하지 않는 것이 좋다.

2) 식재 밀도

인공습지내 식재식물의 간격이 넓으면 높은 피도를 형성하는 데 시간이 많이 걸리고 원하지 않은 식물들이 침입한다. 식재간격이 좁으면 짧은 시간내에 피도가 높아지지만 식재 비용이 많아진다. 식재후 첫 성장기간에 60% 이상의 높은 피도가 이루기 위해서는 최소 9본/m²을 식재하는 것이 좋다.

인공습지 및 인공식물섬의 기능과 설계 방향

1. 인공습지

인공습지는 연못과 식생대가 자연습지의 구조와 흡사하게 구성된 형태를 갖는 경우를 말하며, 수생식물지는 연못이나 기타 침강지 등의 시설의 구성없이 몇 종의 단일 식물종 재배지에 의한 수질정화시설을 의미한다. 수생식물지는 대표적으로 이용되는 미나리, 부레옥잠 등의 식생을 재배지에 조성하여 오염물질 흡수 제거를 주 목적으로 한 반면에 인공습지는 좀더 다양한 식생이 조성되며 수변구역과 연못의 연속된 구조로 다양한 생물상의 도입에 의한 물질순환 기능을 중심으로 구성된다. 인공습지의 설계절차는 다음을 고려하여야 한다. 지형지질 요소 및 습지구조를 고려하여 대상지 선택, 습지 형태구성, 시설배치를 한다. 습지 용량, 습지구조 등 수리수문 요소와 수질특성을 고려

습지의 단면 구성

인공습지의 단면구성



시설의 설치 개념: 낙차가 큰 하천변에 조성하는 습지의 형태로 제내자에 조성할 수 있다.

유입시설: 제내지에 조성하는 경우 상류로부터 수로를 조성하여 물을 유입하기가 편리하므로 유입부 인근에 취수보를 설치하여 유입이거나 기계장치를 이용하여 유입할 수 있다.

방류시설: 하천유지용수기 없을 경우 습지의 방류부를 취수보 적역류에 조성하여 역전이 안전화 되는 것을 방지한다.

습지구성: 2단계의 유로를 조성하여 유입부 적역류에서 유출되도록 하고, 유량이 적은 경우 중간 방류구를 설치한다.

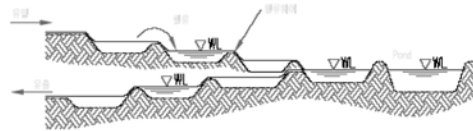


그림 6. 인공습지의 단면구성 사례.

Pond의 연결 형태

Pond의 연결형태

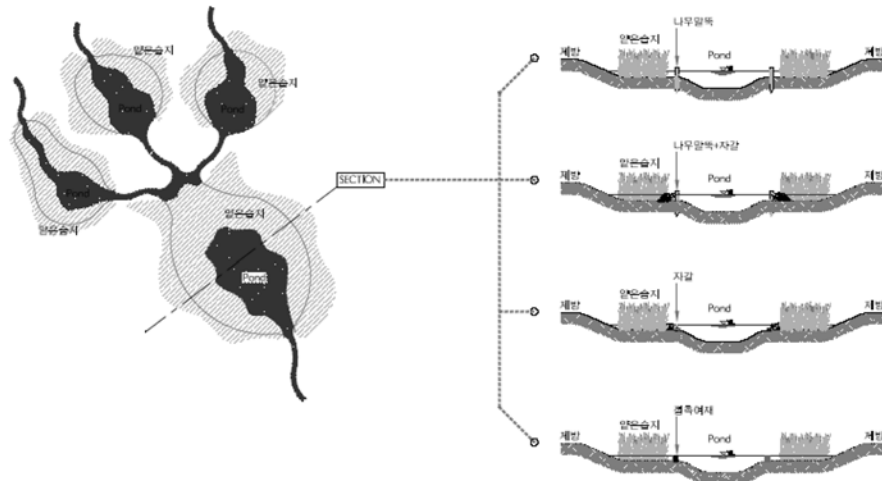


그림 7. 인공습지의 연못 연결형태 사례.

유로의 설계

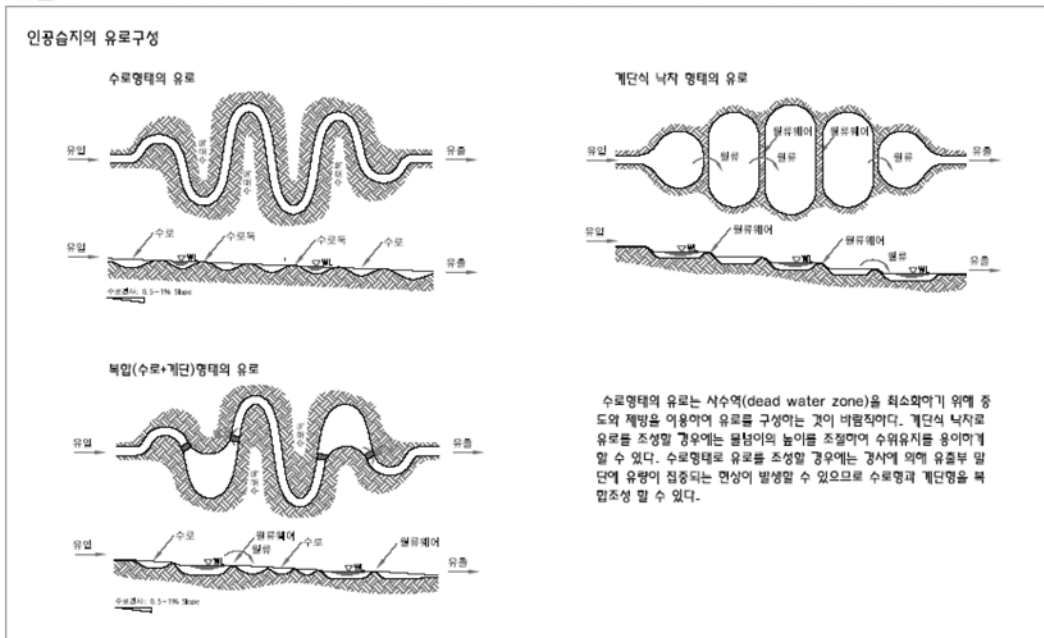


그림 8. 인공습지의 유로구성 사례.

제방 및 사면

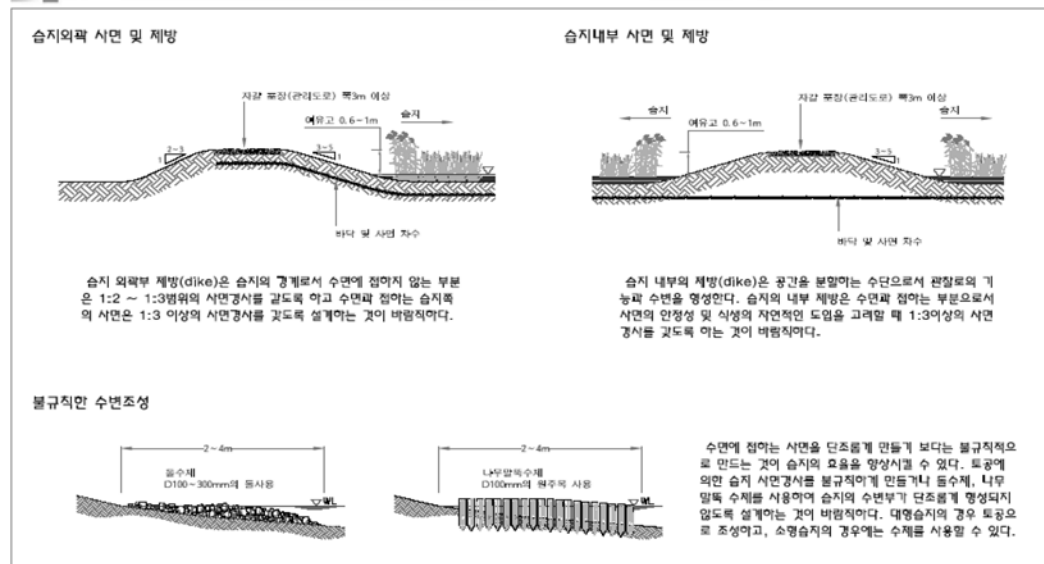


그림 9. 인공습지의 제방 및 사면 측면도 사례.

한다. 오염물질 성상과 부하량에 따른 식생의 선택과 식재기법을 고려한다. 자연정화기능 강화와 다양한 생물상 구성에 필요한 생물 서식처 및 서식조건을 고려한다. 환경요소와 생물, 생물간의 상호작용을 고려한 설계를 하여야 한다.

다음의 습지 설계 가이드라인은 앞으로 저수지 수질개선을 위한 습지 및 하천수 정화를 위한 습지 조성에 활용되어 안정된 습지 효율을 달성하는데 기여할 것으로 기대된다(김 등, 2005). 가이드라인은 전체적인 내용을 요약하는 데에는 한계가 있을 것으로 판단되어, 가이드라인에 제시되는 설계 내용을 그림 6~9와 같이 평면도 및 측면도로 정리하였다.

2. 인공식물섬

1) 인공식물섬의 기능

인공식물섬은 부영양화된 호수, 저수지, 하수종말처리장에서 사용 가능한 새로운 생태공학기술이다. 일본의 수와호, 가스미가라호 등에서 수질개선용으로 개발된 것으로 1995년 과학기술평가연구원 지원 연구에서 처음으로 시도되었다. 인공식물섬은 부력체, 식물이 성장하는 받침대(bed), 수생식물의 3부분으로 구성된다. 부력체와 받침대는 다양한 소재로 사용하고 있으며, 수생관속식물과 부착조류의 영양염류 제거능을 이용한 상향조절(bottom-up control)은 국내에서도 적용 가능성을 검증한 바 있다(공 등, 1994; 공, 1995). 인공식물섬을 수질목적으로 국내에서 대형호수에 처음 설치한 곳은 2000년 5월 팔당호 광동교 부근에 처음으로 설치하였다(그림 10). 시설면적 2,690 m², 식재면적 2,560 m²으로 갈대, 줄, 애기부들, 달뿌리풀이 식재되었다. 수질개선효과는 식물의 성장에 따라 질소와 인의 수질개선이 있었을 것이며, 생태계 복원효과가 더 큰 것으로 확인되었다. 이 시설 이후 대청호 등에도 인공식



그림 10. 수질개선용 팔당호 인공식물섬(2000년 설치, 2004년 전경).

물섬을 환경관리공단에서 설치하였으며, 소형 연못의 수질개선 및 생태계 복원용으로 서울 올림픽공원내 연못 등에서 많이 설치되어 활용되고 있다.

인공식물섬의 수질개선 및 생태계 복원효과는 다음과 같은 과정을 통해 이루어진다(안 등, 2006).

(1) 식물에 의한 영양염류의 직접 흡수

인공식물섬 위의 대형수초는 물속의 질소와 인을 흡수하여 성장하며, 이들의 성장량만큼 식물체에 흡수되어 수생태계에서 제거된다(그림 10). 환경관리공단이 2002년 팔당호에서 조사한 갈대, 줄, 애기부들, 달뿌리풀을 포함한 대형수초의 질소와 인의 제거율이 각각 232.2 kg/년, 22.8 kg/년으로 보고하였다(안, 2006). 질소와 인의 오염부하 원단위는 2.12 g N/인/일, 0.25 g P/인/일(국립환경연구원, 2002)이다. 이를 근거로 팔당호 인공식물섬에 의해 제거된 질소와 인의 양을 환산하면 다음과 같다.

◦ 질소 제거량

$$(232.2 \text{ kg/년} \times 1000 \text{ g/kg}) \div (2.12 \text{ g/인/일}) \div (365 \text{ 일/년}) = \text{약 } 300 \text{ 인/일}$$

◦ 인 제거량

$$(22.8 \text{ kg/년} \times 1000 \text{ g/kg}) \div (0.25 \text{ g/인/일}) \\ \div (365 \text{ 일/년}) = \text{약 } 250 \text{ 인/일}$$

따라서 팔당호 인공식물섬의 수초를 제거하면 연간 250명이 배출하는 인과 질소를 제거할 수 있게 되며, 특히 팔당호와 같이 낮은 농도 상태인 수체에서 인과 질소를 제거한다는 점에서 기계적 처리과정과는 비교할 수 없는 잇점이 있다.

(2) 생태계 회복으로 인한 유기물 제거

인공식물섬의 아래에는 동물플랑크톤과 새끼 물고기가 많이 모여들며, 이들 동물의 증가로 인한 호흡의 증가로 유기물 제거가 일어난다. 인공식물섬이 설치된 곳에서는 효소 활성도가 매우 높게 나타나 물질순환이 매우 빠르게 진행된다. 팔당호와 백곡지조사에서(안 등, 2006) 인공식물섬 아래에서는 동물플랑크톤의 밀도가 대조구보다 20배 정도 높았으며, β -glucosidase, phosphatase 등 효소 활성도도 훨씬 높아 인공식물섬에서는 물질순환율이 빠르며(그림 11, 12), 동물플랑크톤과 새끼 물고기가 크게 증가한다. 또한 부유물질과 유기물을 흡착·분해·침전시키는 기능을 갖게되어 유기물 제거로 인한 탁도를 감소시킬 수 있다. 또 다른 중요한 기능은 물속으로 자란 식물 뿌리에 부착한 미

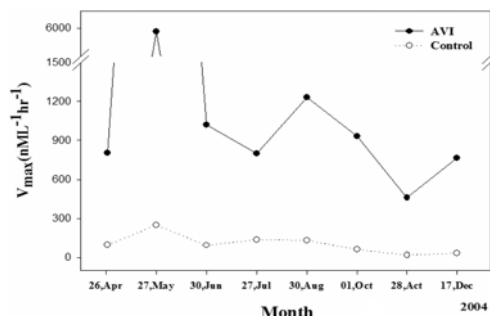


그림 11. 팔당호 대조구와 인공식물섬에서 β -glucosidase 활성도의 변화.

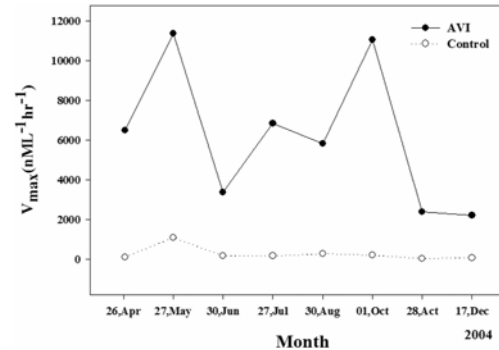


그림 12. 팔당호 대조구와 인공식물섬에서 Phosphatase 활성도의 변화.

생물에 의해 유기물질 분해를 촉진시키게 된다.

(3) 햇빛 차단 효과로 조류 성장을 제어

호수에서 조류와 대형수초는 경쟁관계에 있다. 햇빛이 미치지 못하는 깊은 수심에서는 대형수초가 자라지 못하고 식물플랑크톤이 자라게 된다. 인공식물섬을 설치하면 대형수초가 햇빛을 차단하여 조류의 증식을 저해할 것이다.

(4) 경관 창출 및 생물서식처 제공

인공식물섬은 호안침식의 방지 및 보호작용을 하게되며, 각종 생물이 서식하는 서식공간을 창출함으로써 수표면에 위치한 소규모 비오톱 역할을 할 수 있다. 인공식물섬은 오리, 산란·서식장소로 이용되고 잠자리 등의 많은 곤충이 서식할 수 있게 한다. 인공식물섬 밑의 그늘 부근에 동물플랑크톤이 모이면, 이를 먹이로 하는 수서곤충이 늘어나고 먹이사슬에 따른 양서류, 파충류의 서식처가 된다. 또한 이를 포식하는 어류, 갑각류가 늘고, 최종적으로 먹이사슬의 상층부에 있는 조류가 낚아와 동지를 틀게 된다. 실제로 일본 가스미가우라호에 설치한 인공식물섬 아래에서는 입방미터당 389개체의 치어가 발견되었으나 대조구에서는 3개

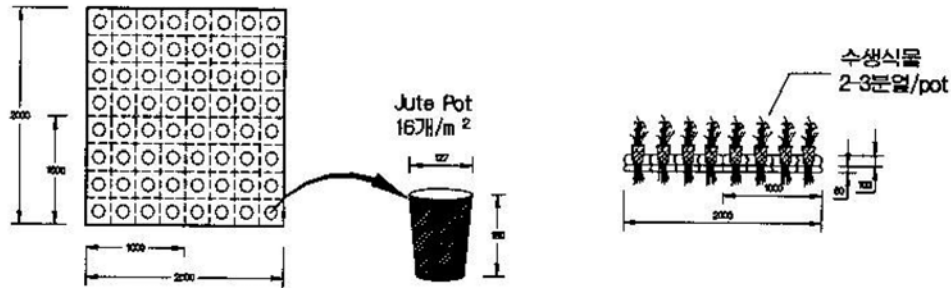


그림 13. 인공식물섬의 평면도와 측면도 사례(안 등, 2006).

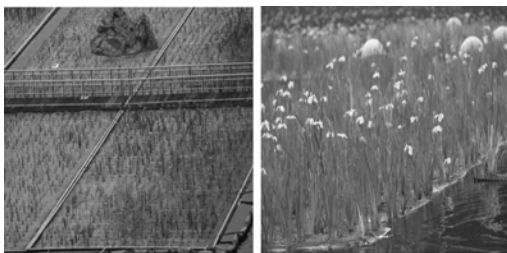


그림 14. 파로호 구만리 인공식물섬(좌)과 태산리 식물섬(우)(2004. 5).

아를 부착하기도 한다. 수생식물의 식재에 사용되는 식재화분(jute pot)과 평면도 및 측면도, 인공식물섬 각 부위의 기능과 구조는 다음과 같다(그림 13). 인공식물섬은 사용 소재에 따라 식생이 좌우될 수 있기 때문에 소재 선택이 중요하다. 파로호의 인공식물섬은 구만리보다 태산리의 식물섬이 상대적으로 식생이 잘 발달하였다(그림 14).

체만이 발견되었다(이 등, 1996).

1) 인공식물섬의 구조와 복원효과

(1) 인공식물섬의 구조

인공식물섬은 수생식물과 이들을 지지하는 부유틀, 부채, 식생기반재, 계류장치, 수상방책, 부교 등으로 이루어진다. 수질 상태에 따라 미생물이 부착하여 성장이 가능한 매디

(2) 인공식물섬의 효과

인공식물섬을 설치하면 생태계 복원이 이루어짐에 따라 최소 규모의 생물서식공간(bio-top)이 형성되며 이를 통해 동물플랑크톤, 수서곤충, 어류, 식물종의 다양성이 확보되고, 상위단계의 조류와 파충류의 산란처로 이용된다(그림 15). 다음으로 수질개선과 경관창출 효과로써 질소, 인, 부유물질, 화학적

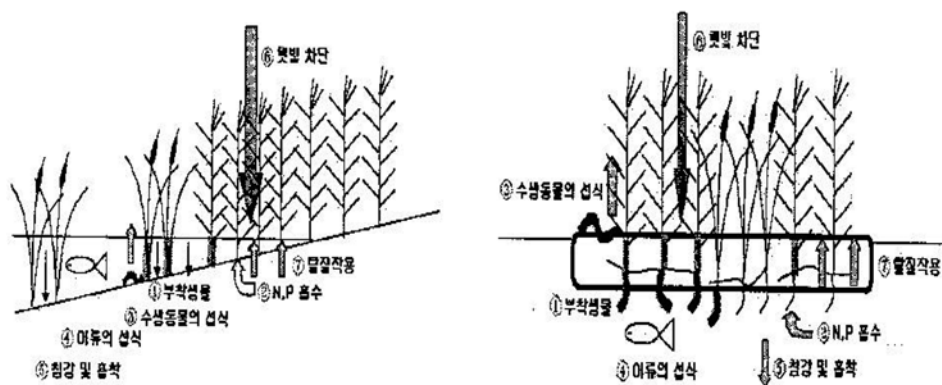


그림 15. 인공식물섬의 생태계 복원효과 기작.

산소요구량이 상당히 제거되고 식물의 뿌리는 미생물 접촉여재의 기능과 유기물질의 여과기능을 하며 식물이 자리잡아 아름다운 경관을 창출한다. 새로운 관광의 창출로 생태관광코스로 활용될 수 있으며 환경에 대한 인식전환의 기회를 부여하고 학생, 시민들에게 교육적인 효과를 위한 생태학습장으로 활용될 수 있다.

결론

생태공학(ecological engineering)을 활용한 수질정화 및 수생태계 복원은 생물의 서식장소인 수역, 습지대, 육상 등의 유기적 연계와 역할을 조절함으로써 생산, 분해, 흡수, 정화 등의 기능을 효율적으로 이루어지게 하여 생태계 보전 및 복원을 도모하는 기술이다. 생태공학 기법을 적용한 인공습지는 여러 가지 다양한 이유와 목적을 위하여 조성되고 복원되고 있다. 습지를 조성하는 가장 보편적인 목적은 수질개선, 다른 지역에서 손실되는 습지의 보충, 그리고 야생동물의 서식처 제공 등이다. 근래 미국의 습지조성에 관한 조사에 따르면, 습지조성은 농촌지역의 비점오염물질 처리에 초점을 맞추고 있으나, 하수처리와 같은 점오염원에도 효율적으로 시도되고 있다. 비점오염원 처리 습지의 조성은 일반적으로 댐 유역이나 하천의 홍수터 복원사업의 일부로 수행되었다. 비점오염물질 제거를 위한 습지조성은 하천 및 호소를 청결하게 유지하는 것과 습지자원 보충의 두 가지 목표에 기여할 수 있다.

인공습지는 자연습지 고유의 구조와 기능을 인위적으로 향상시키기 위해 조성한 습지이며, 습지의 수질정화 기능은 여러 연구를 통하여 정화기작과 효율이 입증되었다. 습지의 수질정화 능력과 생물 먹이사슬이 유지되는 건강한 생태계를 유지시키기 위해서

는 자연정화기능 강화, 자연생태계의 건전화와 바이오매스의 변환에 의해 자체적으로 완성되는 물질순환시스템이 형성되도록 기초과학과 공학이 결합된 생태공학적인 기법을 활용한 접근이 필요하다. 인공습지는 오염부하에 대한 적응 능력이 높고, 낮은 에너지 의존도, 유지관리의 용이함, 경제적인 장점을 가지고 있다. 특히, 경관이 뛰어난 친수공간, 생물 서식처를 제공하는 자연친화적인 수질정화 기능을 가지고 있으므로 이용과 관리, 개발과 보급에 대한 연구가 앞으로도 더욱 필요한 분야이다.

참고문헌

- 공동수, 1995. 팔당호의 영양구조적 특징. 수질 개선 시스템 개발에 관한 한·일 심포지움. 국립환경연구원. pp. 167-196.
- 공동수, 양상용, 황동진, 류홍일, 류재근, 1994. 대형생물에 의한 수질개선 기법. 한국환경생물학회 춘계심포지움. pp. 15-36.
- 국립환경연구원, 2002. 수계오염총량관리기술지침서.
- 김동섭, 김호준, 김세원, 계수현, 박언상, 류지훈, 이남재, 황길순, 박제철, 2005. 수질 생태보전을 위한 습지 설계지침 개발 보고서(2차년도). 한국수자원공사.
- 노희명, 최우정, 이은주, 윤석인, 최영대, 2002. 시화지구 인공습지에서 갈대에 의한 질소 및 인흡수. 한국생태학회지 25(3): 219-224.
- 박병훈, 2003. 자연형하천정화를 위한 인공습지 조성방안. 환경관리공단.
- 안태석, 최승익, 서은영, 허재규, 김용전, 2006. 한강수계 생계 복원방법 및 기술 표준화 연구. 한강수계관리위원회, 국립환경과학원 한강물환경연구소.
- 우효섭, 안홍규, 정상준, 옥기영, 오종민, 최이송, 신동환, 김경희, 손창신, 2006. 수변완충지대 효율적 조성 및 오염부하 저감효과 연구 2년차보고서. 국립환경 과학원 한강물환경연구소.

- 이찬기, 안태석, 김범철, 1996. 강원도-나간호현
간 생태공학적 호수 수질개선 공법의 비교
연구. 과학기술정책관리연구소.
- 황순진, 공동수, 1999. 습지의 인 sink 기능에 영
향을 미치는 생물학적 요인들. 한국육수학회
지, 32(2): 79-91.
- 황순진, 문형태, 정연숙, 김범철, 1999. 수생식물
에 의한 수질개선 기법. 농림부 농업기반공사.
- Butcher, R. W., 1933. Studies on the ecology of
rivers. 1. on the distribution of macrophytic
vegetation in the rivers of Britain. J. Ecol., 21:
58-91.
- Gerberg, R. M., Elkins, B. V., Lyon, S. R. and
Goldman, C. R., 1996. Role of aquatic plants
in wastewater treatment by artificial wetland.
Water Resear. 20: 363-368.
- Hammer, D. A., 1989. Constructed wetlands for
wastewater treatment : Municipal, industrial
and agricultural. Lewis Publisher.
- Hyens, H. B. N., 1960. The biology of polluted
water. Liverpool Univ. Press, Liverpool England.