

축조된 습지(wetland)를 이용한 폐수처리의 설계기준에 관한 연구

윤 춘 경, 정 재 춘*

건국대학교 농과대학 농공학과
*연세대학교 보건과학대학 환경과학과

A Study on the Design Criteria of Wastewater Treatment by Constructed Wetland

Chun-Gyeong Yoon, Jae-Chun Chung*

Department of Agricultural Engineering, Kongook University

*Department of Environmental Science, Yonsei University

ABSTRACT

Recently, significant attention is given to the wastewater treatment using Constructed wetland. This is because the wetland system is a kind of natural treatment system, simple to maintain and it has relatively fewer technical difficulty. Thus, it would be a practical method to employ especially in rural area in Korea. In this paper, the authors discuss the design criteria of constructed wetland developed in USA as an initial feasibility study to adopt it in Korea. We discuss about especially types of vegetation, natural succession and management, planting techniques, seeding techniques and management after construction.

Key words : Constructed wetlands, Natural treatment system, Natural succession, Planting techniques, Seeding techniques, Management after construction

적 요

최근 축조된 습지를 이용한 폐수처리에 대한 관심이 높아지고 있다. 이는 습지이용시스템이 자연정화법을 이용한 처리법으로써 에너지의 소모량이 적고 유지관리가 비교적 간단하며 기술적 난점이 적기 때문에 판단된다. 그래서 이러한 시스템은 우리나라 농촌지역에서 특히 응용될 수 있는 처리법이라고 생각된다. 본 논문에서는 이러한 처리법을 우리나라에서 적용할 수 있도록 미국 등 구미선진국에서 개발된 축조형 습지에 대한 설계기준에 대해서 논하였다. 본 논문에서 중점적으로 논한 것은 식생의 종류, 자연적 천이와 관리,

식재기법, 파종기법 및 건설 후의 관리이다.

핵심낱말 : 축조된 습지, 자연정화법, 자연적 천이, 식재기법, 파종기법, 건설 후의 관리

1. 서 론

습지 (Wetland)란 약 1 m 이내의 얇은 습지로서 그곳에 서식하고 있는 수중식물이나 토양 등의 자연정화능력을 이용하여 폐기물을 처리할 수 있는 생태계의 일부분이다. 이곳에 서식하는 식물들이 제공하는 넓은 표면적에는 미생물군이 형성되어 오염물질을 생물학적으로 분해하고, 이 식물들과 토양 또는 골재들은 오폐수내 오염성분들의 여과와 흡착에 도움을 주며, 식물들은 물 속에 산소를 공급하여 미생물의 활동을 활발하게 하고 또 햇빛을 차단하여 Algae의 생육을 억제하는 등 Wetland에는 오폐수처리에 필요한 많은 장점들이 포함되어 있다 (Lowe, 1990; Metcalf & Eddy, 1991).

그리하여 자연적인 습지가 발달한 미국과 유럽 등지에서는 1980년대 후반서부터 이러한 습지의 자연정화능력에 대해서 주목하기 시작하였다. 그리고 이러한 단계에서 한걸음 더 나아가 최근에는 축조된 습지 (constituted wetland)를 이용하여 폐수를 처리하려는 연구가 행해지고 있다.

습지를 이용한 폐수처리는 자연적인 정화시스템을 이용하는 것으로 기술적인 난점이 비교적 적으며 에너지소모량이 적다는 장점이 있다.

그러므로 이러한 처리법은 우리나라에서, 특히 농촌지역에서 적용이 가능한 처리시스템이라고 보여진다.

본 논문에서는 우리나라에서 습지를 이용한 폐수처리시스템에 대한 연구의 발전을 위한 제1단계

로서 우선 외국에 있어서 습지의 유형별로 검토된 설계기준에 대해 논하기로 한다.

2. 습지처리에 사용되는 식생

2.1 식생의 종류

창설되거나 축조된 습지에 도입되는 식물종의 유형은 요구되는 습지의 유형, 지역, 기후 등에 달려있다. 표 1에 습지의 창설과 복원사업에 흔히 사용되는 식물종을 요약하였다.

담수늪에 흔히 사용되는 식물에는 아기부들 (*Scirpus validus*), 부들 (*Typha latifolia* 및 *Typha angustifolia*) 사초 (*Carex* spp) 흰 물백합 (*Nymphaea odorata*) 및 황수련 (*Nuphar luteum*) 등이 있다. 침수식물은 습지의 설계에 있어서 그렇게 흔히 사용되지 않으며 이들의 번식은 종종 탁도에 의해서 억제된다.

연안 염수늪의 복원에 있어서 *Spartina alterniflora*는 우선적으로 선택되는 것이다 (Broome 등, 1988). 그러나 *Spartina townsend*와 *S. anglica*도 유럽 (Ranwell, 1987)과 중국 (Chung, 1982; 1989)에서 염수늪의 복원에 사용되었다. 성공적인 연안 습지의 복원에 대한 세부사항은 물론 장소마다 다르다. 그러나 대부분의 경우에 통용되는 몇가지 일반화가 가능하다 (H.K. Smith, 1980; Seneca, 1980).

- (1) 저지의 상승은 성공적인 식생의 확립과 생존할 수 있는 식물종을 결정해 주는 가장 중요한 인자인 것 같다. 습지의 부지는 조간대에 있어야 한다. 대체로 조간대의 상

Table 1. Selected plant species planted in created and restored wetlands.

Scientific name	Common name
Freshwater Marsh – Emergent	<i>sweet flag</i>
<i>Acornus Calamus</i>	<i>sawgrass</i>
<i>Cladium jamaicense</i>	<i>sedges</i>
<i>Carex</i> spp.	<i>spike rush</i>
<i>Eleocharis</i> spp.	<i>manna grass</i>
<i>Glyceria</i> spp.	<i>rose mallow</i>
<i>Hibiscus</i> spp.	<i>yellow iris</i>
<i>Iris pseudacorus</i>	<i>blue iris</i>
<i>Iris versicolor</i>	<i>soft rush</i>
<i>Juncus effusus</i>	<i>rice cutgrass</i>
<i>Leersia oryzoides</i>	<i>swit chgrass</i>
<i>Panicum virgatum</i>	<i>arrow arum</i>
<i>Peltandra virginica</i>	<i>reed canary grass</i>
<i>Phalaris arundinacea</i>	<i>giant reed</i>
<i>Phragmites australis</i>	<i>smartweed</i>
<i>Polygonum</i> spp.	<i>pickerehweed</i>
<i>Pontederia cordata</i>	<i>duck potato</i>
<i>Sagittaria rigida</i>	<i>duck potato; arrowhead</i>
<i>Sagittaria latifolia</i>	<i>Lizard's tail</i>
<i>Saururus cernuus</i>	<i>hard-stem bulrush</i>
<i>Scirpus acutus</i>	<i>three-square bulrush</i>
<i>Scirpus americanus</i>	<i>woolgrass</i>
<i>Scirpus cyperinusa</i>	<i>river bulrush</i>
<i>Scirpus fluviatilis</i>	<i>soft-stem bulrush</i>
<i>Scirpus validusa</i>	<i>giant burreed</i>
<i>Sparganium eurycarpum</i>	<i>prairie cordgrass</i>
<i>Spartina pectinata</i>	<i>narrow-leaved cattail</i>
<i>Typha angustifolia</i>	<i>wide-leaved cattail</i>
<i>Typha latifolia</i>	<i>wild rice</i>
<i>Typha latifolia</i>	
<i>Zizania aquatica</i>	
Freshwater Marsh – Submersed	<i>coontail</i>
<i>Ceratophyllum demersum</i>	<i>waterweed</i>
<i>Elodea nuttallii</i>	<i>milfoil</i>
<i>Myriophyllum aquaticum</i>	<i>Sago pondweed</i>
<i>Potamogeton pectinatus</i>	<i>wild celery; tape grass</i>
<i>Vallisneria</i> spp.	
Freshwater Marsh – Floating	<i>water fern</i>
<i>Azolla caroliniana</i>	<i>water hyacinth</i>
<i>Eichhornia crassipes</i>	<i>water pennywort</i>
<i>Hydrocotyle umbellata</i>	<i>duckweed</i>
<i>Lemna</i> spp.	<i>fragrant white water lily</i>
<i>Nymphaea odorata</i>	<i>spatterdock</i>
<i>Nuphar luteum</i>	<i>water lettuce</i>
<i>Pistia stratiotes</i>	<i>floating moss</i>
<i>Salvinia rotundifolia</i>	<i>water meal</i>
<i>Wolffia</i> sp.	

Table 1. Continued.

Scientific name	Common name
Bottomlands/Forested Wetland	
<i>Acer rubrum</i>	red maple
<i>Acer floridanum</i>	Florida maple
<i>Acer saccharinum</i>	silver maple
<i>Alnus</i> spp.	alder
<i>Carya illinoensis</i>	pecan
<i>Celtis occidentalis</i>	hackberry
<i>Cephalanthus occidentalis</i>	buttonbush
<i>Cornus stolonifera</i>	red-osier dogwood
<i>Fraxinus caroliniana</i>	water ash
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	green ash
<i>Gordonia lasianthus</i>	loblolly bay
<i>Liquidambar styraciflua</i>	sweet gum
<i>Platanus occidentalis</i>	sycamore
<i>Populus deltoides</i>	cottonwood
<i>Quercus falcata</i> var. <i>pagodaefolia</i>	cherrybark oak
<i>Quercus nigra</i>	water oak
<i>Quercus nuttallii</i>	Nuttall oak
<i>Quercus phellos</i>	willow oak
<i>Salix</i> spp.	willow
<i>Ulmus americana</i>	American elm
Deepwater Swamp	swamp tupelo
<i>Nyssa aquatica</i>	black gum
<i>Nyssa sylvatica</i> var. <i>biflora</i>	bald cypress
<i>Taxodium distichum</i>	pond cypress
<i>Taxodium distichum</i> var. <i>nutans</i>	
Salt Marsh	spike grass
<i>Distichlis spicata</i>	saltwort
<i>Salicornia</i> sp.	cordgrass(eastem United States)
<i>Spartina alterniflora</i>	cordgrass(Europe; China)
<i>Spartina anglica</i>	cordgrass(westem United States)
<i>Spartina foliosa</i>	salt meadow grass
<i>Spartina patens</i>	cordgras(Europe)
<i>Spartina townsendii</i>	
Mangrove	red mangrove
<i>Rhizophora mangle</i>	black mangrove
<i>Avicennia germinans</i>	white mangrove
<i>Laguncularia racemosa</i>	

보통 폐수처리용 습지에 심는다

부가 하부보다 빨리 식생이 자리잡는다. 조간대 상부에서 빠른 건조에 영향을 받는 거의 순수한 모래가 아닌한 저지의 조성은 식

물의 집락화에 있어서 중요한 인자가 된다. 또 하나의 중요한 요구조건은 에너지가 높은 부지에 식생을 확립시키는 것이다. 에너

지가 높은 부지에 식생을 확립시키는 것은 어렵고 불가능한 경우도 있다.

- (2) 만약에 퇴적물의 깊이가 적당하고 파랑(wave)에너지가 적절하다면 퇴적물에는 자연적으로 식생이 자리잡게 된다. 어떤 경우에는 살아있는 식물의 잔 가지를 치거나 다듬기를 하는 것이 좋을 수 있다. 조간대의 상부에 있어서는 씨를 뿌리는 것이 성공적이었다.
- (3) 성장기의 첫 계절에 좋은 식분(stard)을 확립시킬 수 있다. 그러나 두 계절이 지나기 전에는 저니의 안정화가 일어나지 않는다. 성공적으로 식물을 식재한 부지는 4년 내에 자연적인 늪과 구별할 수 없을 정도로 된다.

숲지대 습지의 복원과 창설은 대체로 유묘의 확립에서 부터 시작된다. 남동부에서는 낙엽성 견목종이 저지 숲에 식목되는 전형적인 수종이다. 이러한 수종에는 Nattall 참나무 (*Quercus muttallii*), 벗적겹질참나무 (*Q. falcata var. pagocaefolia*), 버들참나무 (*Q. phellos*), 물참나무 (*Q. nigia*), 솜포플라 (*Populus deltoides*), 플라타너스 (*Platanus occidentalis*), 녹색물푸레나무 (*Fraxinus pennsylvanica*), 풍향수 (*Liquidambar styracifula*), 미국호두나무 (*Carya illinoensis*), 물총총나무 (*Nyssa aquatica*) 등이 있다 (Clewel and Lea, 1990). 플로리다에서는 다양한 종류의 습지 참나무, 월계수, 고무나무, 물푸레나무 및 소나무 등이 숲지대 습지의 복원에 이용된다 (Edwin 등, 1984, M. T. Brown 등, 1992).

2.2 외래종 또는 바람직하지 못한 식물종

어떤 경우, 특정한 식물종은 야생생물의 가치면이나 미학적인 면에서 볼 때 바람직하거나 바람직하지 못하다고 볼 수 있다. 갈대풀 (*Phragmites*

australis)은 유럽에서 축조되는 습지에서 자주 식재되나 (Cooper and Hobson, 1989) 미국에서는 대체로 이용되지 않는다. 어떤 식물은 습지에서 바람직하지 못한 것으로 생각되고 있는데 이는 이들이 공격적인 경쟁자이기 때문이다. 미국 남부에서는 부생식물인 부레옥잠 (*Eichhornia crassipes*)과 악어풀 (*Alternanthera philoxeroides*)이, 미국북부에 있어서는 수상식물인 자주 까치수영 (*Lythrum salicaria*)이 습지에 바람직하지 못한 식물로 인식되고 있다. 그러나 부레옥잠은 흔히 영양물질의 보유역할을 한다고 평가되고 있다 (예: Mitsch, 1997; Ma and Yan, 1989). 미국전체를 볼 때 어떤 사람은 부들 (*Typha spp*)이 최고라 하기도 하고 어떤 사람은 이를 경시하기도 한다. 왜냐하면 이것은 집락을 재빨리 구성하지만 야생생물로서의 가치는 적기 때문이다 (W.E. Odum, 1987).

3. 자연적 천이와 관리

습지설계의 중요한 일반적 고려사항은 식물재가 최초의 파종과 식재에서부터 자연적으로 발달하는 것을 허용할 것인가 아니면 바람직한 식물을 원예학적으로 선별해 나갈 것인가 하는 것이다. 궁극적으로 유지관리가 적게 드는 습지를 건설하려면 자연적인 천이과정이 진행되도록 해야 할 필요가 있다. 이것은 종종 토기에 바람직스럽지 못한 종이 침입하는 기간이 있음을 의미한다. 그러나 만약에 적절한 수리학적 조건이 부여되면 이러한 침입은 일시적인 것이 될 것이다. 가장 좋은 전략은 파종과 식재에 의해서 가능한 한 많은 자연적 과정을 도입함으로써 식물종과 군집의 형성이 시간에 맞게 선택되도록 하는 것이다 (H. T. Odum, 1989; Dunn, 1989). 이러한 선택과정을 돕기 위하여, 예를 들면, 초기에는 선택적인 잡초제거가 필요할 수도 있다. 그러나 궁극적으로는 상당한 노동집약

적인 관리가 행해지지 않는한 이 시스템은 그 자체의 천이적 패턴을 가지고 생존해야 할 필요가 있다. W.F. Odum (1987)은 담수 습지에서 천이를 연안습지의 천이와 구별하고 있다. 그는 다음과 같이 말했다. “많은 담수 습지 부지에 있어서 야생생물로서의 가치가 높은 종을 식재하는 것은 시간 낭비가 될 것이다. 비록 덜 매력적인 해결책이긴 하지만 교란 종의 확립을 허용하는 것이 값싸고 현명할 것이다.”

Sinicrope 등 (1990)도 10년 이상에 걸쳐 코네티컷주에 있는 웅덩이로 만든 염수늪 20 ha을 자연적으로 복원할 것에 대해서 기술하고 있다. 이 경우에 습지는 다년간 조수의 씻김을 받지 않았고 *Thpha angustifolia*가 지배적이었다. 1970년대 후반과 1980년대 초기에 조수의 씻김 작용을 도입시키기 위해서 몇 개의 주된 배수도랑을 만들었다. 이에 따라 *T. angustifolia*의 식피율은 74%에서 16%로 감소하고 *Spartina alterniflora*는 1%이하에서 45%로 회복되었다. 기수에서 건지는 *Phragmites australis*는 예측한 바와 같이 감소되지 않았지만 식피율은 6%에서 17%로 증가되었으며 대체로 늪 가장자리를 따라 키가 작은 형태로 (0.3~1.5 m의 키) 발견되었다. 비교적 간단한 수리학적 조건의 변경에 의해서 염수늪을 재건했던 것이다.

4. 식재기법

습지에 식재되는 식물은 뿌리나 근경, 덩이줄기, 유묘 또는 성숙한 식물 그 자체가 될 수 있다. 종자는 상업적으로 파는 것을 사서 전파하거나 다른 부지로부터 채취할 수도 있다. 또한 지반을 들여오거나 근처 습지에서 종자가 포함된 흙을 들여올 수도 있다. 또는 원래 부지에 있었던 흙에 전적으로 의지할 수도 있다. 만약에 원래의 부지에 있었던 종자보다 식물자체를 이용한다고 하면 육묘상

에서 식물을 가져오기 보다 야생종을 선택하는 것이 가장 바람직한데, 이는 후자가 대체로 이들이 직면하게 될 축조된 습지의 환경조건에 더 잘 적응되어 있기 때문이다. 가능하다면 식물은 근처에서 가져와야 하며 36시간 이내에 식재되어야 한다. 만약에 육묘상의 식물이 이용된다면 동일한 기후조건하에 있었던 것을 가져와야 하며 손상을 줄이기 위해서 속달우편으로 보내야 한다 (Allen 등, 1989).

Esry와 Cairns (1989)는 홍수씻김수 처리를 위해 설계된 세 개의 늪 조각(cell)에 대해서 기술하였다. 이 늪의 조각들에는 서로 다른 식피의 효과와 견고성을 결정하기 위하여 식재 종을 달리하였다. 첫 번째 늪 조각에는 그 지역에서 얻은 톱풀(*Cladium*)을 심고 두 번째 늪 조각에는 육묘상에서 얻은 아기부들(*Scirpus*)을 식재하였다. 이러한 식물들은 모두 줄을 맞춰서 손으로 심었다. 세 번째 늪 조각에는 근처 농장의 연못에서 수집한 물옥잠(*Pontederia*)을 심었다. 첫 번째와 세 번째 늪 조각에 심은 식물은 번성하였다. 그런데 두 번째 늪 조각에서는 아기부들이 아직도 남아있었지만 전체적인 생존율은 제한되었다. 이곳에서는 대신에 개구리밥(*Lemna*)과 수상식물이 빠르게 번식하였다.

수상식물에 대해서는 적어도 줄기의 길이가 20~30 cm인 것이 추천되었다 (Tomljanovich and Perez, 1989). 그리고 종자보다 식물전체나 근경 또는 덩이줄기를 넣는 것이 가장 성공적이었다. 온대지방에 있어서 어떤 좋은 가을과 봄철의 식재시기가 모두 적당하다. 그러나 봄철에 식재하는 것이 보다 더 성공적이다.

Garbisch (1989)는 봄철의 식재는 겨울에 배회동물의 채식에 의한 식물의 파괴를 최소화하고 얼음에 의해 새로운 식물의 뿌리가 뽑히는 것을 방지하는데 좋다고 제안하였다.

현존하는 습지로부터 장 (8~10 cm식경)을 이

식시키는 것도 성공적으로 사용되어온 방법이다. 왜냐하면 이것은 각종 습지식물의 종자와 줄기 및 뿌리를 새로 축조된 습지로 옮겨주기 때문이다 (Kobriger 등, 1983; Allen 등, 1989). M. T. Brown (1987)은 하수처리수의 재처리를 위해 사용된 플로리다의 부지에 대해서 몇가지 식재 방법을 추천하고 있다. 그는 높은 신속한 집단화를 보장하기 위한 밀도와 적절한 종자원 및 *Typha* spp와의 효과적인 경쟁이 가능하도록 식재되어야 한다고 제안하였다. 구체적으로 볼 때 이것은 ha당 2000~5000개의 식물 (800~2000개의 식물/에이커)을 의미할 것이다. M. T. Brown (1987)과 Willard 등 (1989)은 바닥의 형태를 다양성있게 하는 것이 식생의 다양성을 증가시킴을 발견하였다.

식생 식재에 대한 구체적인 지침의 예를 매릴랜드에서 홍수관리를 위한 습지건설에 있어서 Atharas (1987)와 Livingston (1989)이 제시하였다. 식물 종에 대해서도 구체적인 제안을 하고 있다. 식재에 있어서는 적어도 2개의 공격적인 습지종 (1차 종)을 심었고 3개의 2차 종을 1차 종보다 적은 수로 심었다. *Typha* spp와 *Phragmites acustralis* (=communis)는 공격적인 종이지만 야생생물로서의 가치는 별로 없다고 생각된다. 이러한 이유로 인해 이들 종은 바람직한 종의 명단에 포함되지 않았다. *Peltandra virginica*는 보다 덜 공격적인 2차종의 예이지만 (이는 아마도 번식 방법이 식생적 수단보다는 종자의 발아에 있기 때문일 것이다). 야생생물로서의 가치는 크다.

식재에 대한 지침은 다음과 같다.

- (1) 1차종은 얇은 지대의 30%는 덮여야 하고 1 m간격으로 거리를 두어야 한다.
- (2) 이러한 종들도 4개의 구역으로 나누어서 한종씩 심어야 한다.
- (3) 습지의 나머지 지역은 ha당 100 무더기 (40무더기/에이커)를 분산시켜서 심는다.

Table 2. Recommended Wetland Plant Species for Storm-water management in Maryland.

Primary species
<i>Sagittaria latifolia</i>
<i>Scirpus americanus</i>
<i>Scirpus validus</i>
Secondary species
<i>Acorus Calamus</i>
<i>Cephalanthus occidentalis</i>
<i>Hibiscus moscheutos</i>
<i>Hibiscus laevis</i>
<i>Leersia oryzoides</i>
<i>Nuphar luteum</i>
<i>Peltandra virginica</i>
<i>Pontederia cordata</i>
<i>Saururus cernuus</i>
Undesirable species
<i>Typha latifolia</i>
<i>Typha angustifolia</i>
<i>Phragmites australis</i>

Source : Athanas, 1987 ; and Livingston, 1989

- (4) 2차 종에 있어서는 ha당 125개 (50개/에이커)를 심는다. 개개의 종은 습지의 가장 자리에 가깝게 ha당 25무더기 (1무더기는 5개체)를 심는다. 그러나 무더기간의 간격은 가능한한 넓게 한다.

5. 파종기법

만약에 종자나 종자함유토양이 습지 식생에 이용된다면 몇가지 주의사항이 필요하다.

종자함유 토양을 종자의 생존성과 출현중에 대해서 평가되어야 한다 (van der valk, 1981).

만약에 새로운 습지의 수리학적 조건이 비슷할 때 근처의 부지로부터 얻은 종자 함유토양을 건설되는 습지에 이용하면 효과적이다. Weller (1981)는 종자함유 토양의 이식은 사초 (*Cerex* spp.), *Sagittaria* sp., *Scirpus cutus*, *S. validas* 및 *Typha* spp를 위시하여 여러 가지 종에 대해서 성

Table 3. Construction costs of wetlands for various uses in the United States.

Wetland	State	Use	Area (ha)	Cost		Source
				\$/hectare	\$/acre	
Ballona Wetland	California	habitat, recreation	87.4	\$70,100	\$28,400	Metz, 1987
Greenwood Urban Wetland	Florida	stormwater runoff	11.0	\$51,500	\$20,800	Palmer and Hunt, 1989
Lake Jackson Restoration	Florida	urban runoff	4.0	\$199,500	\$80,700 ^a	Esry and Cairns, 1989
Santee Marsh	California	wastewater treatment	0.1	\$1,820,000	\$737,000 ^b	Gersberg <i>et al.</i> , 1989
Iselin Marsh/Pond/Meadow	Pennsylvania	wastewater treatment	0.2	\$2,080,000	\$842,000 ^b	Conway and Murtha, 1989
Pintail Lake	Arizona	wastewater treatment	20.2	\$73,800	\$30,000	Wilhelm <i>et al.</i> , 1989
Jacques Marsh	Arizona	wastewater treatment	18.0	\$75,300	\$30,500	Wilhelm <i>et al.</i> , 1989
Kash Creek(impoundment 3)	Alabama	acid mine drainage	0.4	\$84,200	\$34,000	Brodie <i>et al.</i> , 1989a
SIMCO Mine	Ohio	acid mine drainage	0.2	\$480,000	\$194,000	Kolbash and Murphy, unpub. data
Widows Creek Steam Plant	Alabama	ash pond seepage	0.5	\$69,800	\$28,200	Brodie <i>et al.</i> , 1989 ^b
Kingston	Alabama	ash pond seepage	0.9	\$142,100	\$57,500	Brodie <i>et al.</i> , 1989 ^b
Bolivar Peninsula	Texas	disposal site for dredge	8.0	\$34,100	\$13,800	Newling, 1982
Windmill Point	Virginia	disposal site for dredge	8.0	\$25,300	\$10,300	Newling, 1982
Blue River Reclamation Project	Colorado	riparian restoration	12.0	\$41,300	\$16,700	Roesser, 1988
		Average		\$374,800	\$152,000	
		Median		\$74,500	\$30,200	

* 연못화 및 여과지가 건설되는 면적 포함

공적이라고 말하고 있다. 종자함유토양을 채취한 습지 부지에 대한 혼란도 고려되어야 한다.

습지에 직접 종자를 뿌린다면 종자는 완속되었을 때 수확해야 하고 가능하면 층을 이루어 뿌려야 한다. 만약에 상업적인 종자함유토양이 이용된다면 그 순로가 결정되어야 한다 (Garbisch, 1989; Willard 등, 1989). 종자를 상업적인 드릴(drill), 지면에서의 살포, 물을 이용한 살포 또는 항공살포가 가능하다. 습지에 고여있는 물이 적을 때는 지면에서의 살포방법이 가장 효과적이다.

표 3에서는 미국에 있어서 각종 용도를 위한 습지의 건설비용을 보였다.

6. 건설 후의 관리

6.1 식물의 수확

식물의 수확은 이것이 성장기에 몇번 수확되지 않는한 영양물질과 같은 화학물질을 그 시스템에서 다량으로 제거해주지 않는다. 어떤 경우에는 식물

의 수확이 축조된 습지의 일상적인 관리의 한 부분으로서 권장된다.

Wieder 등 (1989)은 식물의 수확을 식물이 생태계에 주는 영향을 변화시켜주는 기전이 된다고 하였다. 식물의 수확은 대체로 순 성장율이 커질 때 이들 천이의 초기단계로 되돌려주는 역할을 한다. 식물의 수확은 또한 모기의 제어, 수중에서의 과밀집 감소, 습지의 체류시간을 변화 시키는데 필요할 수 있으며 식물의 다양성을 크게 해준다. Garisch (개인적 의사소통, Nanjing, China, 1989)는 수상식물의 줄기를 정기적으로 수확하므로서 크기와 강도 및 남아있는 줄기의 숫자를 증가시키고 식물의 번식을 촉진시킨다고 하였다. Suzuki 등 (1989)은 성장기에 *Phragmites*를 두번 수확하는 것, 한 번은 영양물질의 함량이 최고에 달했을 때, 또 한 번은 식물의 성장기가 끝났을 때 수확하게 되면 질소와 인을 최대량 제거할 수 있다고 하였다.

만약에 침입종이 바람직스럽지 못하다고 생각되

면 어떤때는 목본류 식생의 침입을 제어하기 위한 수단으로 물을 빼고 태우는 관리 방법이 사용된다 (Warners, 1987). 습지에 통제된 방화기법이 사용된다면 습지의 관리인은 물이 다시 유입되었을 때 저니로부터 수층으로 무기 영양물질이 재투입되는 것은 물론 야생생물에 대한 영향도 생각해야 한다 (Willard 등, 1989).

6.2 야생생물의 관리

축조된 습지에서 비록 야생생물의 번식이 환영할 만한 일이고 종종 바람직한 측면이기는 하지만 수달과 사향뒤쥐는 독에 구멍을 뚫거나 물흐름을 가로막고 식생을 제거하는 등 악영향을 줄 수 있다 (Tomljanovich and Perez, 1989). 이러한 것을 막기위해 모래와 자갈 또는 철망이 사용될 수 있다. 새로 식재된 다년생초본과 유묘를 동물이 채식하게 되면 식생이 크게 파괴되기 쉽다. Garbisch (1989)는 식재시기가 중요하다고 하였는데, 이는 특히 배회성 동물이 겨울철에 채식하게 되면 식생이 크게 파괴되기 때문이다. 이와 마찬가지로 수심이 깊은 습지는 잉어와 같이 과도한 탁도를 일으키고 식생의 뿌리를 뽑는 바람직스럽지 않은 물고기의 천국이 될 수 있다.

Weller (1981)는 미국중서부의 습지에서 야생생물의 번식을 촉진하기 위하여 50%의 개방형수역 (open water)을 추천하였다. 그리고 Brinson 등 (1981)은 살아있는 식생과 죽은 식생, 섬, 떠 있는 구조물 등을 포함한 다양한 서식지를 만들 것을 제안하였다. 습지의 건설에 있어서 많은 경우 야생동물의 증식은 건설된지 몇 년후가 된다. 아리조나의 Pintail호에 있는 축조된 습지에서는 물새들의 숫자가 크게 증가하였다. 2년째에는 동우리의 밀도가 1년째보다 97% 증가하였다 (Wilhelm 등, 1989). 북동부 일리노이의 Des Plaines강 습지 시범사업에서도 조류의 활동이 상당히 증가되었다.

이동성 물새들은 1985년 (습지건설 전)에서 1990년 (물이 습지로 유입된지 1년 후)까지 3개 종에서 15개 종으로, 그리고 개체수는 13마리에서 617마리로 늘었다. 습지에서 산란하는 새들의 숫자로 8개 종에서 17개종으로 늘었으며 州에서 멸종위기종으로 분류한 2種의 새와 알락 해오라기, 노랑머리 검정새도 습지의 건설 후 그 곳에서 등우리는 지었다 (Hickman and Mosea, 1991).

6.3 모기의 제어

캘리포니아에서 축조된 습지에서는 장구벌레의 번성을 억제하기 위하여 습지의 조건 (예: 수리학적 특성)을 변경하거나 화학적 또는 생물학적 제어 (Martin and Eldridge, 1989)를 통하여 무기를 제어 하였다 (Martin and Eldridge, 1989). Wieder 등 (1989)은 물고기에 의한 모기 제어, 특히 모기를 잡아먹는 모기 물고기 (*Gambusia affinis*)에 의한 모기제어를 제안하였다. 모기를 제어하는데 있어서 수질이 수행하는 역할에 대해서는 잘 알려져 있지 않다. 세균농약 (예: *Bacillus sphaericus*)과 곰팡이, *Lagenidium giganteum*은 장구벌레의 병원균으로 알려져 있다. 그러나 이에 대해 폭넓게 시험되지는 않았다 (Martin and Eldridge, 1989). 축조된 습지에서 모기개체군을 제어하기 위해 제비나 박쥐의 집을 만들어 주는 방법이 사용되기도 했다.

6.4 교란에 대한 제어

습지의 설계에 사용된 평균적인 조건은 실제의 조건을 반영하지는 않는다. 계절적인 변동과 빈번하지 않은 교란은 빈도와 크기에 있어서 불확실하지만 모종의 반응을 요구할 수도 있다 (Willard and Hiller, 1989; Brooks, 1989; Girts and Knight, 1989). Willard와 Hiller (1989)는 습지는 교란에 관한 가장 최악의 조건에 대해서 설계하고 계획해야 하지만 형태와 기능 및 영속성 사

이에 균형을 유지해야 한다고 추천하였다. 습지의 설계는 정확한 과학이 아니며 교란은 원래의 설계(예: 선정된 식물 종)를 다른 것으로 바꾸게 할 수도 있다는 사실을 염두에 두어야 한다. 만약에 습지의 기능, 특히 습지의 목적에 관련된 기능들은 온전히 남아있고 종이 바뀌고 형태가 바뀐다면 이것은 그렇게 염려할 것도 못할 것이다.

6.5 저지의 준설

이것은 축조된 습지에 있어서 선택적인 관리 방법이다. 이의 사용은 습지가 저지로 채워지고 있어서 습지의 유효생명을 감소시키는지의 여부, 그리고 저지의 축적이 습지의 목적에 관련된 바람직하지 못한 특성으로 간주되는가에 달려있다. 준설은 대체로 비용이 비싸게 드는 작업이며 축조된 습지에서는 자주 할 것이 못된다. 준설은 저지 뿐만 아니라 종자가 함유된 토양과 유근식물도 제거시킨다. 축조된 습지로부터 저지를 준설하는 과정은 습지의 기능을 향상시키기 위해서 수행한다고 하더라도 행정기관의 허가를 얻어야 할지도 모른다. 준설이 피할 수 없는 것이 아닌한 가장 좋은 방법은 “저지의 퇴적을 습지역할의 자연적인 부분으로 받아들이는 것이다”(Willard 등, 1989).

8. 맺는 말

본 논문에서는 축조된 습지의 설계기준에 대하여 주로 미국에서 개발된 방법을 대상으로, 식생의 종류, 자연적 천이와 관리, 식재기법, 파종기법 및 건설후의 관리에 대하여 논하였다. 이러한 설계기준은 점차 우리나라 농촌지역의 습지설계에 있어서 유용한 참고사항이 될 것으로 믿는다.

참고 문헌

1. Allen, H.H., G.J. Pierce, and R. Van

Wormer, 1989, Considerations and techniques for vegetation establishment in constructed wetlands, in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, D.A. Hammer, ed., Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Mich., pp.405-416.

2. Athanas, C., 1987, Guidelines for Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, Maryland Department of Natural Resources. 23p.
3. Brinson, M.M., B.L. Swift, R.C. Plantico. and J.S. Barclay, 1981, Riparian Ecosystems : Their Ecology and Status, U.S. Fish and Wildlife Service, Biol. Serv. Prog., FWS/OBS-81/17, Washington, D.C., 151p.
4. Brooks, R.P., 1989, Wetland waterbody restoration and creation associated with mining, in Wetland Creation and Restoration, J.A. Kusler and M. E. Kentula, eds., Island Press, Washington, D.C., pp.529-548.
5. Broom, S.W., E.D. Seneca, and W. W. Woodhouse. Jr., 1988, Tidal salt marsh restoration, Aquatic Botany 32: 1-22.
6. Brown, W.T., 1978, Conceptual Design for Constructed Wetlands System for Renovation of Treated Effluent, Report from the Center for Wetlands, University of Florida, 18p.
7. Chung, C.H., 1989, Ecological engineering of coastlines with salt marsh plantations, in Ecological Engineering: An Introduction to Ecotechnology, W.J. Mitsch and S.E. Jrgensen, eds., Wil-

- ey, New York, pp.255-289.
8. Dunn, W.J., 1989, Wetland succession -What is the appropriate paradigm?, in Wetlands Concerns and Successes, D.W. Fisk, ed., Proceedings of the Conference American Water Resources Association : Wetlands Concerns and Successes, Tampa, Florida. American Water Resources Association. Tampa, Fla., pp.473-488.
 9. Esry, D.H., and D.J. Cairns, 1989, Overview of the Lake Jackson Restoration Project with artificially created wetlands for treatment of urban runoff, in Wetlands Concerns and Successes, D.W. Fisk, ed., Proceedings of the Conference American Water Resources Association: Wetlands Concerns and Successes. Tampa, Florida. American Water Resources Association. Tampa, Fla., pp.247-257.
 10. Garisch, E.W., 1989, Wetland enhancement, restoration, and construction, in Wetlands Ecology and Conservation: Emphasis in Pennsylvania, S.K. Majumdar, ed., The Pennsylvania Academy of Science. Easton, Pa., pp. 261-275.
 11. Girs, M.A., and R.M. Knight, 1989, Operations Optimization, in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, D.A. Hammer, ed., Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Mich., pp.417-430.
 12. Hickman, S.C., and V.J. Mosca, 1991, Improving Habitat Quality for Migratory Waterfowl and Nesting Birds: Assessing the Effectiveness of the Des Plaines River Wetlands Demonstration Project, Technical Paper no.1, Wetlands Research, Inc., Chicago, 13p.
 13. Kobriger, N.P., T.V. Dupuis, W.A. Kreuzberger, F. Steams, G. Guntenspergen, and J.R. Keough, 1983, Guidelines for the Management of Highway Runoff on Wetlands, National Research Council Transportation Research Board, Washington D.C. National Cooperative Highway Research Program Report 264.
 14. Livingston, X.H., 1989, Use of wetlands for urban stormwater management, in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, D.A. Hammer, ed., Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Mich., pp.253-264.
 15. Ma, S., and J. Yan, 1989, Ecological engineering for treatment and utilization of wastewater, in Ecological Engineering: An Introduction to Ecotechnology, W.J. Mitsch and s.e. Jrgensen, eds., John Wiley and sons, Inc., New York, N.Y., pp.185-218.
 16. Martin, C.V., and B.F. Eldridge, 1989, California's experience with mosquitoes in aquatic wastewaste treatment system, in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment, D.A. Hammer, ed., Lewis Publishers, Inc. Chelsea, Mich., pp.393-398.
 17. Odum, H.T., 1989, Ecological engineering and self-organization, in Ecol-

- ological Engineering, W.J. Mitsch and S.E. Jorgensen, eds., Wiley, New York, pp.7-101.
18. Sinicrope, T.L.G. Hine, R.S. Warren, and W.A. Nierring, 1990, Restoring of an impounded salt marsh in New England, *Estuaries* 13:25-30.
 19. Tomljanovich, D.A., and O. Perez, 1989, Constructing the wastewater treatment wetland-some factors to consider, in *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, D.A. Hammer, ed., Lewis Publishers, Inc., Chelsea, Mich., pp.399-404.
 20. van der Valk, A.G., 1981, Succession in wetlands: a Glasonian approach, *Ecology* 62:688-696.
 21. Warners, D.P., 1987, Effects of burning on sedge meadow studied, *Restoration and Management Notes* 5(2): 90-91.
 22. Weller, M.W., 1981, *Freshwater Marshes*, University of Minnesota Press, Minneapolis, Minn., 146p.