

## 정체수역에서의 Mattress/Filter에 의한 수생식물 복원

여운기·허창환\*·이승윤\*\*·지흥기  
영남대학교 토목공학과, \*영남대학교 방재연구소, \*\*일본구주대학교 토목공학과  
(2005년 8월 2일 접수; 2005년 12월 8일 채택)

## Aquatic Plant Restoration by Mattress/Filter System in Stagnant Stream Channel

Woon-Ki Yeo, Chang-Hwan Heo\*, Seung-Yun Lee\*\* and Hong-Kee Jee  
Department of Civil & Environmental Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea  
\*Institute of Disaster Prevention, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea  
\*\*Department of Civil Engineering, Kyushu University, Kyushu 812-8591, Japan  
(Manuscript received 2 August, 2005; accepted 8 December, 2005)

Aquatic plants grow in water with photosynthesis and purify water quality as taking organic and inorganic matter in water. Polluted water in stagnant stream channel where nutritive salts load is great can be purified by activities of aquatic plants. Aquatic plants should be fixed to bed easily to plant and sustainable environment is needed. So in this study, Mattress/Filter system is suggested to plant aquatic plant in stagnant stream channel.

In the result of study, coverage of *Phragmites australis*, *Zizania latifolia* and *Typha angustifolia* which planted in mattress was 78%, 62% and 82% and numbers of species in each mattress system were 7, 11, 3. The evenness index of each mattress system was 0.86, 0.91 and 0.79 and diversity index of each mattress system was 1.67, 2.18 and 0.87.

Removal rates of phosphorus at *Phragmites australis*, *Zizania latifolia* and *Typha angustifolia* which planted in mattress were 68.7%, 62.7%, 55.3% and removal rates of nitrogen of them were 79.8%, 74.7%, 64.9%. The removal rate of nitrogen was greater than phosphorus at all system and both removal rates were greater at *Phragmites australis* than at *Zizania latifolia* and at *Typha angustifolia* the rate was the least. Removal rates of  $PO_4^{3-}$ ,  $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$  at *Phragmites australis* were 57.4%, 52.8%, 47.8% and at *Zizania latifolia* were 82.6%, 77.2%, 67.5% and at *Typha angustifolia* were 80.6%, 73.7%, 64.3%. It seems that removal effect is great by the planted mattress system.

Key Words : Mattress/Filter, Aquatic Plant Restoration, Stagnant stream channel

### 1. 서론

댐건설은 치·이수적인 측면에서 홍수유출을 저감시키고 안정적인 용수공급을 보장해왔으나, 홍수조절로 인해서 침투홍수량이 크게 줄어들고 하천유량이 전반적으로 적어지면서 유속이 감소되어 물의 흐름이 일부 막히는 정체수역이 발생하게 되었다. 특히, 정체수역으로 생활하수, 산업폐수가 유입

되는 경우에는 영양염류 부하량을 증가시켜 부영양화 등 수질을 악화시키는 결과를 초래하고 있다. 이러한 오염하천에서 수질을 개선시키고자 정체수역에서 식물이 활착·성장할 수 있는 여건(환경)을 조사하기 위해 Mattress를 사용하고자 많은 연구가 진행되어 왔다.

Mattress시스템은 구조 및 재료역학적으로 우수하고 수리학적으로 매우 안정되어 있어 호안과 하상의 보호에 매우 유리하며(배상수 등, 2001, 2002)<sup>1,2)</sup>, 자연하천에서의 식생복원성이 우수한 것으로 알려져 있다(서영민, 2003)<sup>3)</sup>. 배상수 등(2002)은

Corresponding Author : Woon-Ki Yeo, Department of Civil & Environmental Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan 712-749, Korea  
Phone: +82-53-810-3664  
E-mail: adonas@nafree.net

하상보호와 호안을 목적으로 Mattress 수리구조물을 설계하는 프로그램을 개발한 바 있다. 하천에 Mattress 구조물을 설치함에 있어 채움재로 슬래그를 이용할 경우 슬래그에 의한 2차 오염성은 없는 것으로 알려져 있으며(고진석 등, 2003)<sup>4)</sup>, 슬래그의 다공성이 매우 크므로 생물막 형성에 유리하며, 그 결과 수질이 개선된다는 연구가 있었다.(고진석 등, 2004)<sup>5)</sup>.

여운기 등(2004)<sup>6)</sup>은 댐 하류와 같이 홍수조절에 의해서 유황이 급격히 감소한 자연하천에서 식생이 복원되는 메카니즘에 대해 연구한 바 있다. 김미경 등(2005)<sup>7)</sup>은 정체수역 내에서 조류발생의 잠재력을 측정하기 위해 생리·생화학적 분석방법을 제시하였다. 여운기 등(2003)<sup>8)</sup>은 수질개선과 식생복원을 위해 자연하천인 대구광역시 범어천에 pilot plant를 설치하여 수질개선 모니터링을 해오고 있고 자연하천에 설치된 Mattress의 수중식생 복원성을 평가하기 위해 모니터링 시스템을 운영·평가하는 기법(여운기 등, 2004)<sup>9,10)</sup>이 제시되었으며, 자연하천에 설치된 Mattress 시스템을 모니터링하여 평가한 결과 수중식생이 잘 복원되는 것으로 보고된 바 있다(여운기 등, 2004)<sup>11)</sup>. 또한, 수중식생은 부영양화로 인한 호소의 오염 정도를 측정할 수 있는 지표식물로 이용되며(Melzer, 1985)<sup>12)</sup>, 영양염류와 중금속의 섭취(Mickle and Wetzel, 1979)<sup>13)</sup> 및 오염원을 제거하는 식물군집의 물질대사가 수계의 영양염류 순환에 영향을 준다고 발표된 바 있다.(Kucklentz, 1985)<sup>14)</sup>. 한편 Hammer(1996)<sup>15)</sup>는 인공습지에 적합한 식물

의 조건으로 그 지역의 기후와 토양에 적합하고 오염원에 내성이 있을 뿐만 아니라 생산력이 크고 다년생이면서 빠른 번식력을 가지며, 야생동물의 서식처가 될 수 있는 종을 제시하였다. 갈대와 줄 그리고 애기부들 등은 이러한 조건에 모두 부합되는 우리나라의 대표적 정수식물로서 넓게 분포되어 있고 생산력이 크므로(조강현 1992, 농어촌진흥공사 1997)<sup>16,17)</sup> 인공습지의 주요 조성종으로써 식재되어 왔다(김도선 1998)<sup>18)</sup>. 그리고 갈대와 줄 및 애기부들과 같은 정수식물은 질소와 인 등의 영양염류와 중금속을 직접 흡수하여 축적하므로 수질오염물질을 제거할 수 있다(Shutes 등, 1993)<sup>19)</sup>. 그 중에서 갈대는 수질오염물질에 강한 내성을 가지며, 지하경이 발달하여 근권토양에 O<sub>2</sub>를 많이 공급하여 줌으로써 미생물에 의한 질소제거율이 높다는 연구가 있었다(Cooper and Boon, 1987)<sup>20)</sup>.

따라서 수생식물은 태양빛을 받아 광합성 작용을 통하여 수중에서 성장하면서 수중의 유·무기물질을 영양소로 섭취함으로써 수질을 정화시키는 작용을 일으키게 된다. 영양염류 부하량이 큰 정체수역의 오염된 물은 식물의 성장활동에 의해서 어느 정도 정화시킬 수 있으며, 식물에 의한 정화를 촉진시키기 위해서 수중에 식물을 식재할 경우는 식물이 하상에 쉽게 정착하여 지속적으로 성장하고 번식할 수 있는 여건이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 정체수역에 Mattress/Filter를 설치함으로써 이러한 식물의 성장과 번식을 촉진시킬 수 있는 환경조건을 제안하였다.

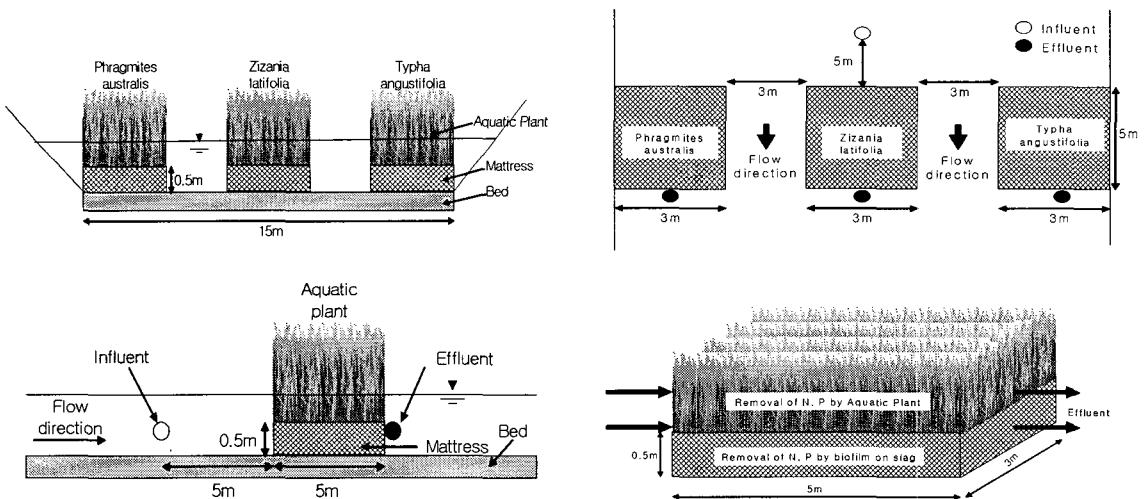


Fig. 1. Diagram of aquatic plant restoration test and monitoring system by Mattress.

## 2. 실험 및 모니터링방법

### 2.1. 실험 및 모니터링장치의 구조

본 연구의 실험은 영남대학교내에 위치한 농업용 저수지인 삼천지에 유입하고 있는 사동 및 삼풍동 지역의 소하천에서 이루어졌으며, 정체수역의 폭은 15m이고 수심은 0.5 - 1.0m, 실험에 이용한 수중 Mattress의 크기는 5.0m×3.0m×0.5m이고 채움재로는 슬래그를 이용하였다. Fig. 1과 같이 3개의 Mattress를 정체수역 바닥에 설치하였으며, 각각 갈대(*Phragmites australis*), 줄(*Zizania latifolia*) 그리고 애기부들(*Typha angustifolia*)의 1년생 식물묘를 16개/m<sup>2</sup>의 밀도로 Mattress에 식재하였다. 갈대, 줄, 애기부들은 우리나라 습지에서 가장 빈번히 출현하는 정수식물이기에 Mattress의 식재종으로 선정하여 모니터링하였다

### 2.2. 실험 및 모니터링방법

#### 2.2.1. 식생복원의 모니터링과 측정

본 연구의 실험 및 모니터링에 이용한 Mattress는 2002년 6월에 정체수역 내에 설치되었으며, 2004년 9월에 실험지에서 정수식물 군집의 식생구조와 생물량을 조사하였다. Mattress의 식물 군집에 종별로 각각 5개의 0.3m×0.3m의 방형구를 임의로 설치하여 출현 식물종을 기록하였으며, 각 식물종의 피도와 경엽부의 밀도를 측정하였다. 여기서, 피도는 전체 면적에 대한 각 종이 차지하는 면적(%)을 의미하며, 밀도는 단위면적당 각 종의 개체수(no./m<sup>2</sup>)를 의미한다. 식물의 동정은 대한식물도감(이창복, 1993)<sup>21)</sup>을 참고하였다.

채집된 식물체는 경엽부(shoot)와 지하경(rhizome) 그리고 뿌리(root)로 구분하였으며, 부위별로 분리된 식물 시료는 건조기로 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 그리고 각 식물군집별 생물다양성을 비교하기 위하여 Margalef(1958)<sup>22)</sup>의 정보이론(information theory)에 의하여 유도된 Shannon - Weaver Function(Pielou, 1966)<sup>23)</sup>을 이용하여 다양도지수(Diversity Index, H')와 균등도지수(Evenness Index, J')를 산정하였으며, 식(1) 및 식(2)와 같다.

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (1)$$

$$J = H / \ln(S) \quad (2)$$

여기서, P<sub>i</sub>는 i 번째에 속하는 개체수의 비율(n<sub>i</sub>/N)로 계산하며, N은 군집내의 전체 개체수이고 n<sub>i</sub>는 i번째 종의 개체수이다. 또한 S는 전체 종의 수를 의미한다.

#### 2.2.2. 수질의 측정

소하천 내에 설치된 Mattress로부터 상류방향으로 5m 떨어진 곳에서 유입수의 수질을 측정하였으며, 하천 폭이 넓지 않은 소하천이므로 모든 Mattress 시스템에 유입되는 유입수는 하천 중앙에서 측정된 값을 사용하였다. 또한 Mattress에 복원된 수생식물들에 의한 수질정화효과를 측정하기 위해 각 Mattress 시스템의 하류단에서 유출수의 수질을 측정하여 유입수와 비교한 뒤 각 수질측정 항목에 대한 제거율을 산정하였다. 이를 위해 2004년 5월부터 2004년 8월까지 유입구와 유출구에서 월 2회 수질을 측정하였다. 수질측정 항목으로는 T-N, T-P, PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N 항목을 Standard method에 준하여 분석하였다. PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N은 시료를 GF/C로 여과후 Automatic Analyser로 분석하였으며, T-N, T-P는 산 및 열분해과정을 거쳐 Automatic Analyser로 분석하였다.

## 3. 분석 및 모니터링결과의 고찰

### 3.1. Mattress에서의 식물생장 모니터링

#### 3.1.1. 갈대 군락의 식생구조

Mattress에 식재한 갈대 군락의 식생구조는 Table 1과 같으며, 갈대 군락에서는 초기 식재종인 갈대가 902개/m<sup>2</sup>의 밀도와 78%의 피도로써 주로 우점한 것으로 나타났다. 또한 하늘지기(*Fimbristylis dichotoma*)가 13개/m<sup>2</sup>의 밀도와 4.4%의 피도로 출현하였으며, 들피(*Echinochloa crus-galli*)가 8개/m<sup>2</sup>의 밀도와 3.8%의 피도로 출현하여 갈대를 제외한 종 중에서 가장 큰 우점도를 보였다 그 외에도 여뀌바늘(*Ludwigia prostrata*), 미꾸리늪시(*Persicaria Sieboldii*), 알방동사니(*Cyperus difformis*), 황새냉이(*Cardamine flexuosa*) 등의 종이 출현한 것으로 나타났다.

Table 1. Vegetaion structure of *Phragmites australis* community

Species	Coverage (%)	Density (no./m <sup>2</sup> )
<i>Phragmites australis</i>	78.0	902
<i>Fimbristylis dichotoma</i>	4.4	13
<i>Echinochloa crus-galli</i>	3.8	8
<i>Ludwigia prostrata</i>	3.6	7
<i>Persicaria Sieboldii</i>	0.5	3
<i>Cyperus difformis</i>	0.2	2
<i>Cardamine flexuosa</i>	0.2	1

Table 2. Vegetaion structure of *Zizania latifolia* community

Species	Coverage (%)	Density (no./m <sup>2</sup> )
<i>Zizania latifolia</i>	62.0	167
<i>Echinochloa crus-galli</i>	8.2	31
<i>Cyperus amuricus</i>	6.0	24
<i>Arthraxon hispidus</i>	2.4	7
<i>Persicaria Sieboldii</i>	2.2	12
<i>Ludwigia prostrata</i>	1.6	5
<i>Cyperus difformis</i>	0.8	3
<i>Centipeda minima</i>	0.4	2
<i>Fimbristylis dichotoma</i>	0.2	1
<i>Panicum dichotomiflorum</i>	0.2	1

3.1.2. 줄 군락의 식생구조

Mattress에 식재한 줄 군락의 식생구조는 Table 2와 같으며, 줄 군락에서는 초기 식재종인 줄이 167개/m<sup>2</sup>의 밀도와 62%의 피도로서 주로 우점한 것으로 나타났다. 또한 돌피(*Echinochloa crus-galli*)가 31개/m<sup>2</sup>의 밀도와 8.2%의 피도로 출현하였으며, 방동사니(*Cyperus amuricus*)가 24개/m<sup>2</sup>의 밀도와 6%의 피도로 출현하여 줄을 제외한 종 중에서 가장 큰 우점도를 보였다 그 외에도 조개풀(*Arthraxon hispidus*), 미꾸리나시(*Persicaria Sieboldii*), 여뀌바늘(*Ludwigia prostrata*), 알방동사니(*Cyperus difformis*), 중대가리풀(*Centipeda minima*), 하늘지기(*Fimbristylis dichotoma*), 미국개기장(*Panicum dichotomiflorum*) 등의 종이 출현한 것으로 나타났다.

3.1.3. 애기부들 군락의 식생구조

Mattress에 식재한 애기부들 군락의 식생구조는 Table 3과 같으며, 애기부들 군락에서는 초기 식재종인 애기부들이 297개/m<sup>2</sup>의 밀도와 82%의 피도로서 주로 우점한 것으로 나타났다. 또한 세모고랭이(*Scirpus triqueter*)가 7개/m<sup>2</sup>의 밀도와 1.0%의 피도로 출현하였으며, 미국가막사리(*Bidens frondosa*)가 2개/m<sup>2</sup>의 밀도와 0.4%의 피도로 출현하였다. 애기부들 군락에서는 갈대 군락과 줄 군락에 비해 비교적 적은 종류의 식물종이 출현한 것으로 나타났다.

Table 3. Vegetaion structure of *Typha angustifolia* community

Species	Coverage (%)	Density (no./m <sup>2</sup> )
<i>Typha angustifolia</i>	82.0	297
<i>Scirpus triqueter</i>	1.0	7
<i>Bidens frondosa</i>	0.4	2

3.1.4. 각 군락의 식물다양성의 비교

Mattress에 식재한 각 군락의 종 수와 식(1)과 식(2)에 의해 구한 다양도지수와 균등도지수를 이용해서 나타난 식물다양성은 Table 4와 같다. 줄 군락에서는 11개의 종이 출현하였으며, 다양도지수는 2.18, 균등도지수는 0.91로 나타나 3군락 중 식물다양성이 가장 큰 것으로 나타났다. 갈대군락에서는 7개의 종이 출현하였으며, 다양도지수는 1.67, 균등도지수는 0.86으로 나타나 줄 군락 다음으로 식물다양성이 큰 것으로 나타났다. 한편 애기부들 군락에서는 3개의 종이 출현하였으며, 다양도지수는 0.87, 균등도지수는 0.79로 갈대 군락과 줄 군락에 비하여 식물다양성이 상대적으로 적게 나타났다. 따라서 줄과 갈대가 자연하천에 설치된 Mattress 시스템에 상대적으로 잘 적응하는 종으로 판단된다.

3.1.5. 각 군락의 생물량 비교

Mattress에서 식물의 건물(dry matter, DM)로 표시한 각 군락의 부위별 생물량은 Table 5와 같으며, 그 중에서 경엽부의 생물량은 갈대가 2.34, 줄이 2.56, 애기부들이 2.08로 각각 나타나 줄, 갈대, 애기부들 순으로 많은 것을 알 수 있었다. 본 연구의 모니터링에 이용한 식물은 모두 다년생 정수식물로서 지하경에 의하여 영양번식을 하였다. 갈대, 줄 및 애기부들은 지하부 생물량 중에서 지하경이 뿌리보다 많은 것으로 나타났다. Mattress에 식재된 식물에서 지하부/지상부의 생물량 비는 갈대가 0.72, 줄이 0.53, 애기부들이 0.79로 나타나 지하부의 생물량보다 지상부의 생물량이 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 채택하고 있는 Mattress 시스템은 환경적으로 토양에서보다 영양소의 공급이 제한될

Table 4. Plant Diversity of each communities

Community	No. of Species	Diversity Index	Evenness Index
<i>Phragmites australis</i>	7	1.67	0.86
<i>Zizania latifolia</i>	11	2.18	0.91
<i>Typha angustifolia</i>	3	0.87	0.79

Table 5. Biomass comparison of each communities (unit : Kg DM/m<sup>2</sup>)

Community	Shoot	Rhizome	Root	Biomass ratio of Belowground/Aboveground
<i>Phragmites australis</i>	2.34	1.02	0.67	0.72
<i>Zizania latifolia</i>	2.56	0.88	0.48	0.53
<i>Typha angustifolia</i>	2.08	1.32	0.32	0.79

정체수역에서의 Mattress/Filter에 의한 수생식물 복원

수밖에 없기때문에 뿌리가 잘 발달하고 지하부의 생물량이 큰 식물이 적합하다고 할 수 있다. 그러므로 생물량의 관점에서 볼 때는 갈대가 Mattress 시스템에 가장 적합한 종으로 판단된다.

3.2. 정체수역에서 식생Mattress에 의한 수질정화 효과

3.2.1. 유입수와 유출수의 수질 모니터링

3.2.1.1. T-P의 변화

정체수역에서 유입수와 유출수의 수질을 월 2회 모니터링한 결과 중에서 T-P의 변화를 Table 6과 같이 나타내었다. 갈대군락의 제거율은 약 65~71%인 것으로 나타났으며, 평균치는 68.7%로 나타나 3군락중에서 가장 높게 나타났다. 그리고 줄 군락의 제거율은 약 61~65%인 것으로 나타났으며, 평균치는 62.7%로 나타나 갈대보다는 제거율이 조금 낮은 것으로 나타났다. 한편 애기부들 군락의 제거

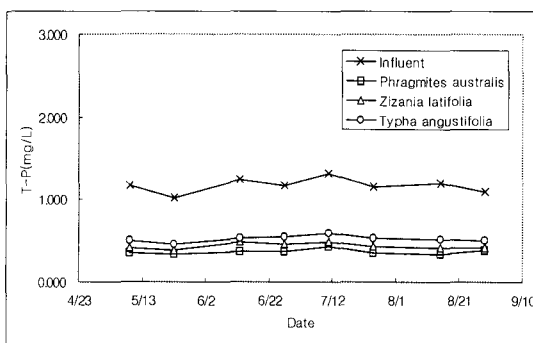
율은 약 53~57%인 것으로 나타났으며, 평균치는 55.3%로 나타나 3군락 중에서 T-P의 제거율이 가장 낮은 것으로 나타났다.

3.2.1.2. T-N의 변화

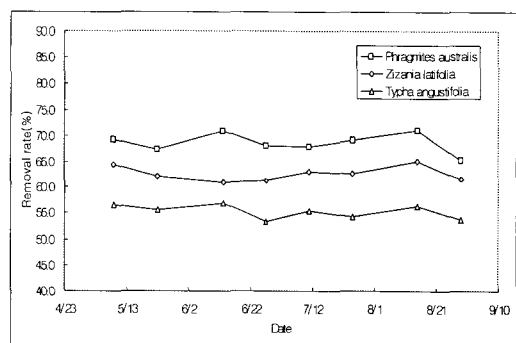
정체수역에서 유입수와 유출수의 수질을 월 2회 모니터링한 결과중에서 T-N의 변화를 Table 7과 같이 나타내었다. 갈대군락의 제거율은 약 78~82%인 것으로 나타났으며, 평균치는 79.8%로 나타나 3군락중에서 가장 높게 나타났다. 그리고 줄 군락의 제거율은 약 72~77%인 것으로 나타났으며, 평균치는 74.7%로 나타나 갈대보다는 제거율이 조금 낮은 것으로 나타났다. 한편 애기부들 군락의 제거율은 약 62~68%인 것으로 나타났으며, 평균치는 64.9%로 나타나 3군락 중에서 T-N의 제거율이 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 6. Removal rate of T-P for each communities

Date	Influent (mg/L)	Phragmites australis		Zizania latifolia		Typha angustifolia	
		Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)
5/9	1.174	0.361	69.2	0.418	64.4	0.509	56.6
5/23	1.024	0.334	67.3	0.387	62.2	0.454	55.7
6/13	1.246	0.364	70.8	0.486	61.0	0.538	56.9
6/27	1.168	0.372	68.2	0.452	61.3	0.543	53.5
7/11	1.322	0.423	68.0	0.487	63.2	0.590	55.4
7/25	1.157	0.356	69.3	0.431	62.8	0.529	54.3
8/15	1.194	0.346	71.0	0.417	65.1	0.522	56.3
8/29	1.091	0.378	65.4	0.418	61.7	0.504	53.8
평균	1.172	0.367	68.7	0.437	62.7	0.524	55.3



(a) Change of T-P at each communities

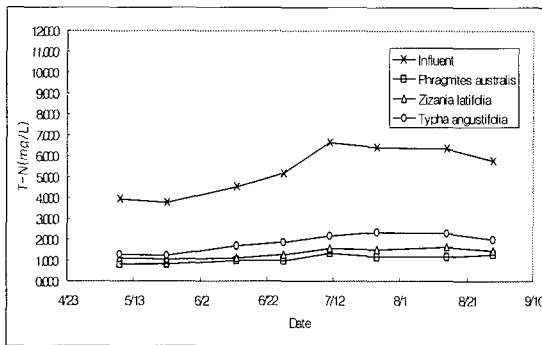


(b) Removal rate of T-P at each communities

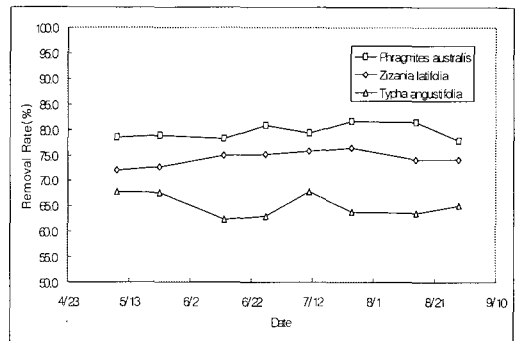
Fig. 2. Removal rate of T-P for each communities.

Table 7. Removal rate of T-N for each communities

Date	Influent (mg/L)	Phragmites australis		Zizania latifolia		Typha angustifolia	
		Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)
5/9	3.927	0.844	78.5	1.100	72.0	1.268	67.7
5/23	3.785	0.795	79.0	1.030	72.8	1.234	67.4
6/13	4.542	0.981	78.4	1.140	74.9	1.717	62.2
6/27	5.164	0.991	80.8	1.276	75.3	1.911	63.0
7/11	6.672	1.374	79.4	1.608	75.9	2.155	67.7
7/25	6.427	1.183	81.6	1.510	76.5	2.327	63.8
8/15	6.328	1.177	81.4	1.633	74.2	2.303	63.6
8/29	5.774	1.270	78.0	1.490	74.2	2.027	64.9
평균	5.327	1.077	79.8	1.348	74.7	1.868	64.9



(a) Change of T-N at each communities



(b) Removal rate of T-N at each communities

Fig. 3. Removal rate of T-N for each communities.

3.2.1.3. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 변화

정체수역에서 유입수와 유출수의 수질을 월 2회 모니터링한 결과중에서 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 변화를 Table 8과 같이 나타내었다. 갈대군락의 제거율은 약 54~60%인 것으로 나타났으며, 평균치는 57.4%로 나타나 3군락중에서 가장 높게 나타났다. 그리고 줄 군락의 제거율은 약 50~56%인 것으로 나타났으며, 평균치는 52.8%로 나타나 갈대보다는 제거율이 조금 낮은 것으로 나타났다. 한편 애기부들 군락의 제거율은 약 45~50%인 것으로 나타났으며, 평균치는 47.8%로 나타나 3군락 중에서 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>의 제거율이 가장 낮은 것으로 나타났다.

3.2.1.4. NH<sub>4</sub>-N의 변화

정체수역에서 유입수와 유출수의 수질을 월 2회 모니터링한 결과 중에서 NH<sub>4</sub>-N의 변화를 Table 9과 같이 나타내었다. 갈대군락의 제거율은 약 79~85%인 것으로 나타났으며, 평균치는 82.6%로 나타나 3군락중에서 가장 높게 나타났다. 그리고 줄 군

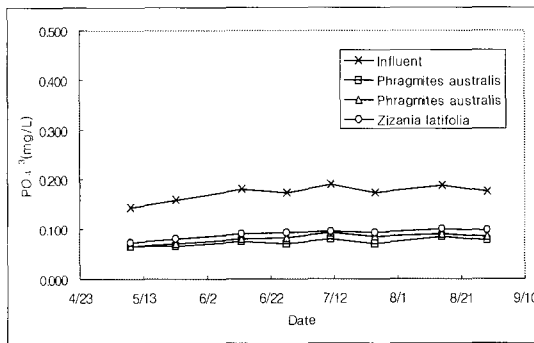
락의 제거율은 약 74~80%인 것으로 나타났으며, 평균치는 77.2%로 나타나 갈대보다는 제거율이 조금 낮은 것으로 나타났다. 한편 애기부들 군락의 제거율은 약 65~71%인 것으로 나타났으며, 평균치는 67.5%로 나타나 3군락 중에서 NH<sub>4</sub>-N의 제거율이 가장 낮은 것으로 나타났다.

3.2.1.5. NO<sub>3</sub>-N의 변화

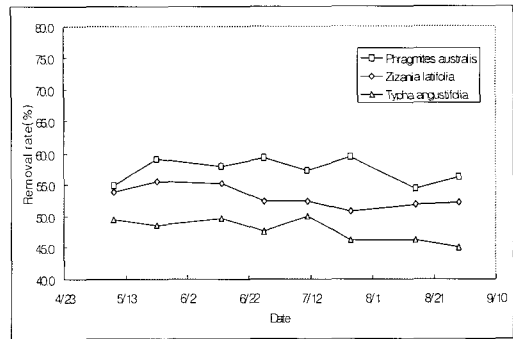
정체수역에서 유입수와 유출수의 수질을 월 2회 모니터링한 결과 중에서 NO<sub>3</sub>-N의 변화를 Table 10과 같이 나타내었다. 갈대군락의 제거율은 약 79~83%인 것으로 나타났으며, 평균치는 80.6%로 나타나 3 군락중에서 가장 높게 나타났다. 그리고 줄 군락의 제거율은 약 72~77%인 것으로 나타났으며, 평균치는 73.7%로 나타나 갈대보다는 제거율이 조금 낮은 것으로 나타났다. 한편 애기부들 군락의 제거율은 약 63~66%인 것으로 나타났으며, 평균치는 64.3%로 나타나 3군락 중에서 NO<sub>3</sub>-N의 제거율이 가장 낮은 것으로 나타났다.

Table 8. Removal rate of  $PO_4^{-3}$  for each communities

Date	Influent (mg/L)	Phragmites australis		Zizania latifolia		Typha angustifolia	
		Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)
5/09	0.145	0.065	54.8	0.067	53.8	0.073	49.4
5/23	0.159	0.065	59.1	0.071	55.5	0.082	48.4
6/13	0.181	0.076	57.9	0.081	55.1	0.091	49.6
6/27	0.174	0.071	59.3	0.083	52.2	0.092	47.4
7/11	0.192	0.082	57.3	0.092	52.2	0.096	49.9
7/25	0.173	0.070	59.4	0.085	50.8	0.093	46.1
8/15	0.188	0.086	54.3	0.091	51.8	0.101	46.1
8/29	0.177	0.078	56.1	0.085	52.1	0.097	45.0
평균	0.174	0.074	57.4	0.082	52.8	0.091	47.8



(a) Change of  $PO_4^{-3}$  at each communities

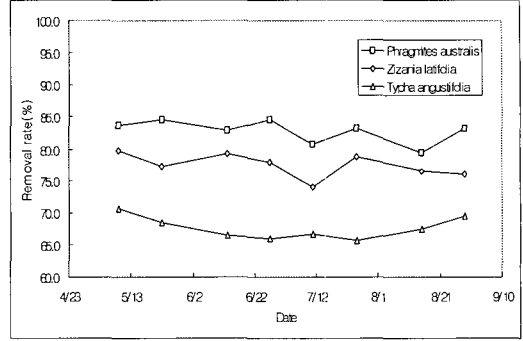
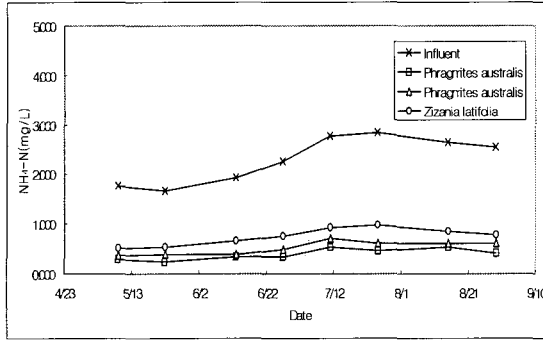


(b) Removal rate of  $PO_4^{-3}$  at each communities

Fig. 4. Removal rate of  $PO_4^{-3}$  for each communities.

Table 9. Removal rate of  $NH_4-N$  for each communities

Date	Influent (mg/L)	Phragmites australis		Zizania latifolia		Typha angustifolia	
		Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)
5/09	1.761	0.285	83.8	0.357	79.7	0.517	70.6
5/23	1.672	0.257	84.6	0.381	77.2	0.527	68.5
6/13	1.942	0.332	82.9	0.404	79.2	0.651	66.5
6/27	2.254	0.349	84.5	0.496	78.0	0.766	66.0
7/11	2.776	0.534	80.8	0.720	74.0	0.925	66.7
7/25	2.854	0.476	83.3	0.609	78.7	0.982	65.6
8/15	2.649	0.547	79.4	0.623	76.5	0.860	67.5
8/29	2.557	0.426	83.3	0.614	76.0	0.780	69.5
평균	2.308	0.401	82.6	0.526	77.2	0.751	67.5



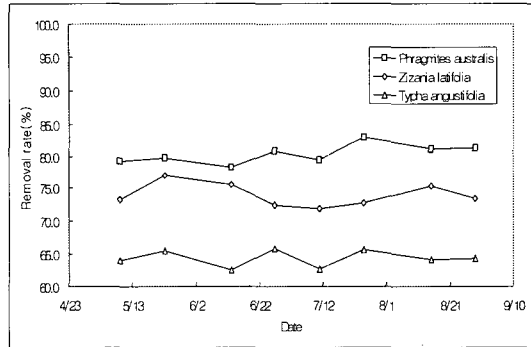
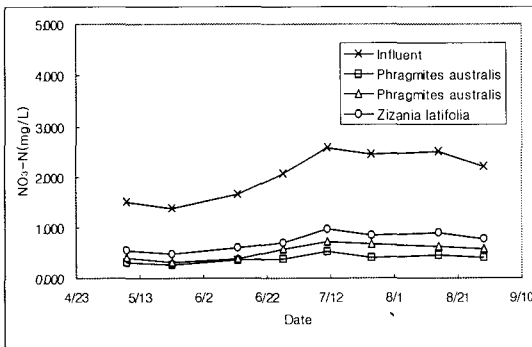
(a) Change of  $\text{NH}_4\text{-N}$  at each communities

(b) Removal rate of  $\text{NH}_4\text{-N}$  at each communities

Fig. 5. Removal rate of  $\text{NH}_4\text{-N}$  for each communities.

Table 10. Removal rate of  $\text{NO}_3\text{-N}$  for each communities

Date	Influent (mg/L)	Phragmites australis		Zizania latifolia		Typha angustifolia	
		Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)
5/9	1.521	0.315	79.3	0.408	73.2	0.549	63.9
5/23	1.382	0.279	79.8	0.318	77.0	0.478	65.4
6/13	1.647	0.358	78.3	0.402	75.6	0.617	62.5
6/27	2.085	0.399	80.9	0.575	72.4	0.712	65.8
7/11	2.587	0.530	79.5	0.726	71.9	0.966	62.7
7/25	2.467	0.422	82.9	0.672	72.8	0.848	65.6
8/15	2.517	0.473	81.2	0.622	75.3	0.903	64.1
8/29	2.208	0.411	81.4	0.588	73.4	0.789	64.3
평균	2.052	0.398	80.6	0.539	73.7	0.733	64.3



(a) Change of  $\text{NO}_3\text{-N}$  at each communities

(b) Removal rate of  $\text{NO}_3\text{-N}$  at each communities

Fig. 6. Removal rate of  $\text{NO}_3\text{-N}$  for each communities.



Table 11. Removal efficient by type of nutrient

Type of Nutrients			Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal rate (%)
Phragmites australis	Total nutrients	T-P	1.172	0.367	68.7
		T-N	5.327	1.077	79.8
	Inorganic nutrients	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	0.174	0.074	57.4
		NH <sub>4</sub> -N	2.308	0.401	82.6
		NO <sub>3</sub> -N	2.052	0.398	80.6
Zizania latifolia	Total nutrients	T-P	1.172	0.437	62.7
		T-N	5.327	1.348	74.7
	Inorganic nutrients	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	0.174	0.082	52.8
		NH <sub>4</sub> -N	2.308	0.526	77.2
		NO <sub>3</sub> -N	2.052	0.539	73.7
Typha angustifolia	Total nutrients	T-P	1.172	0.524	55.3
		T-N	5.327	1.868	64.9
	Inorganic nutrients	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	0.174	0.091	47.8
		NH <sub>4</sub> -N	2.308	0.751	67.5
		NO <sub>3</sub> -N	2.052	0.733	64.3

3.2.2. 영양염류 유형별 제거효과

Table 11은 영양염류의 유형에 따른 오염원의 제거효과를 알기 위해서 각 식물별 유입수와 유출수의 평균 영양염류 함량을 나타낸 것이다. 총인의 제거율은 갈대, 줄, 애기부들 군락에서 각각 68.7%, 62.7%, 55.3%로 나타나 갈대>줄>애기부들 순으로 총인의 제거능력이 좋음을 알 수 있었다. 총질소의 제거율은 79.8%, 74.7%, 64.9%로 나타나 총질소의 제거능력 역시 갈대>줄>애기부들의 순으로 큰 것을 알 수 있었으며, 3 군락 모두 총 인의 제거능력 보다는 총 질소의 제거능력이 우수함을 알 수 있었다. 또한 무기질 영양염류인 PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>의 제거율은 갈대, 줄, 애기부들 군락에서 각각 57.4%, 52.8%, 47.8%로 나타나 총 인의 제거능력에 비해서 낮은 결과를 보였다. NH<sub>4</sub>-N의 제거율은 갈대, 줄, 애기부들 군락에서 각각 82.6%, 77.2%, 67.5%로 나타나 총 질소의 제거능력보다 오히려 큰 것으로 나타났다. NO<sub>3</sub>-N의 제거율은 갈대, 줄, 애기부들 군락에서 각각 80.6%, 73.7%, 64.3%로 나타나 총 질소의 제거능력과 비슷한 수준으로 나타났으며, 갈대 군락의 경우는 총 질소의 제거율보다 높게 나타나 갈대의 경우 무기질 질소의 제거능력이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

Bavor와 Mitchell(1994)<sup>24)</sup>은 습지에서 식물의 효과는 식물자체의 영양염류 흡수 뿐만 아니라 식물 주위에 산소를 공급하고 미생물의 서식밀도를 높여서 생물막을 형성시키며, 이러한 생물막은 영양염류의 형태를 변환시킴으로써 이동을 막는 것을 돕는다는 연구가 있었다. 본 실험에 사용된 슬래그를

이용한 Mattress 시스템의 경우 다공성이 매우 커서 생물막의 형성이 매우 용이하고 우수하여(여운기 등, 2003)<sup>25)</sup> Mattress시스템에 형성된 생물막 또한 영양염류의 제거에 기여한 것으로 판단된다.

4. 결 론

지금까지 정체수역에서 Mattress/Filter를 이용한 수생식물 복원과 오염원 제거에 관한 연구를 요약하면 다음과 같다.

1) Mattress에 식재한 갈대, 줄, 애기부들의 피도는 각각 78%, 62%, 82%인 것으로 나타났고 각 군락의 출현 종수는 각각 7, 11, 3 이었으며, 군등도지수는 0.86, 0.91, 0.79이고 다양도지수는 1.67, 2.18, 0.87로 나타나 식물다양성이 크게 증가한 것을 알 수 있었다.

2) Mattress에서 활착한 식물의 경엽부의 생물량은 줄, 갈대, 애기부들 순으로 많은 것으로 나타났으며, 갈대, 줄 및 애기부들은 지하부 생물량 중에서 지하경이 뿌리보다 많은 것으로 나타났다. Mattress에 식재된 식물에서 지하부/지상부의 생물량의 비는 갈대가 0.72, 줄이 0.53, 애기부들이 0.79로 나타나 지하부의 생물량보다 지상부의 생물량이 높은 것을 알 수 있었다.

3) Mattress와 식생에 의해 총 인의 제거율은 갈대, 줄, 애기부들 군락에서 각각 68.7%, 62.7%, 55.3%로 나타났고 총 질소의 제거율은 79.8%, 74.7%, 64.9%로 나타나 3가지 식생 모두 인보다는 질소의 제거율이 높음을 알 수 있으며, 질소와 인의 제거율은 둘 다 갈대>줄>애기부들의 순으로 큰

것을 알 수 있었다. 또한 무기질 영양염류인  $PO_4^{3-}$ ,  $NH_4-N$ ,  $NO_3-N$  의 제거율은 각각 갈대 군락에서는 57.4%, 52.8%, 47.8%로 나타났으며, 줄군락에서는 82.6%, 77.2%, 67.5% 그리고 애기부들 군락에서는 80.6%, 73.7%, 64.3%로 나타나 유입수에 비하여 유출수에서의 저감효과가 큰 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 정체수역에서 수생식물의 복원과 수질정화를 위해 유속이 느리고 폭이 좁은 소하천에 Mattress 시스템을 이용하여 정수식물에 속하는 갈대와 줄 그리고 애기부들을 식재하였다. 하지만 정수식물은 비교적 수심이 얕은곳에 주로 서식하므로 앞으로 정수식물보다 수심이 깊은 곳에서 서식이 가능한 비정수성 식물에 대한 연구가 필요하며, 비정수식물에 의한 식생복원성과 수질정화능력을 대상으로 실험과 모니터링을 할 경우에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 환경부 한국환경기술진흥원이 추진하는 “2004년도 차세대 핵심환경기술개발사업”의 자유공모과제(과제번호 : 051-041-004) 연구수행 결과의 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- 1) 배상수, 이경욱, 지흥기, 이순탁, 2001, 호안용 매트리스의 수리학적 거동해석, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, 1-4.
- 2) 배상수, 이경욱, 지흥기, 이순탁, 2002, 하상보호용 매트리스의 설계기법, 한국수자원학회 학술발표회 논문개요집, 한국수자원학회, 511-516.
- 3) 서영민, 임기석, 지흥기, 이순탁, 2003, Mattress/Filter재료의 수중식생복원성 검토, 한국수자원학회 학술발표회 논문개요집, 한국수자원학회, 919-922.
- 4) 고진석, 송시훈, 지흥기, 이순탁, 2003, Mattress/Filter용 수중 Slag의 2차 오염특성, 한국수자원학회 학술발표회 논문개요집, 한국수자원학회, 931-934.
- 5) 고진석, 배상수, 홍의선, 지흥기, 2004, Mattress/Filter 다공구조에 의한 수질개선 시스템 개발, 한국습지학회 학술발표회 논문개요집, 한국습지학회, 187-192.
- 6) 여운기, 전도석, 박종권, 지흥기, 2004, 담하류 하천의 유황 및 하상변동과 식생역발달 메카니즘, 한국습지학회 학술발표회 논문개요집, 한국습지학회, 87-92.
- 7) 김미경, 신재기, 지흥기, 2005, 정체 수역 내에서 미세조류의 생리생화학적 분석에 의한 수화

- 발생 잠재력 탐색, 한국조류학회지, Algae, 한국조류학회, 20(2), 127-132.
- 8) 여운기, 배상수, 송시훈, 지흥기, 2003, 수질개선 및 식생복원을 위한 Mattress/Filter의 Pilot Plant 시스템 구축, 대한상하수도학회·한국물환경학회 추계공동학술발표회 논문개요집, 대한상하수도학회·한국물환경학회, 229-232.
- 9) 여운기, 이승윤, 지흥기, 이순탁, 2004, Mattress/Filter에 의한 수중식생복원 Monitoring 시스템 운영기법, 대한토목학회 학술발표회 발표논문 논문개요집, 대한토목학회, 165pp.
- 10) 여운기, 배상수, 김미경, 지흥기, 2004, Mattress/Filter에 의한 수중식생복원 Monitoring시스템 평가기법, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문개요집, 한국물환경학회·대상하수도학회, 427-431.
- 11) 여운기, 이창연, 이승윤, 지흥기, 2004, Mattress/Filter에 의한 수중식생복원 효과분석, 한국물환경학회·대한상하수도학회 공동추계학술발표회 논문개요집, 한국물환경학회·대한상하수도학회, 641-643.
- 12) Melzer, A., 1985, Indikatorwert und Ökologie makrophytischer Wasserpflanzen in Bayerischen File  $\beta$ - and stillgewassern. In Schadstoff-belastung und Ökosystem schutz in a aquatischem Bereich, 407-430.
- 13) Mickel, A. M. and R. G. Wetzel, 1979, Effectiveness of submersed angiosperm-epiphyte complexes on exchange of nutrient and organic carbon in littoral system: refractory organic carbon, Aqa. Bot., 6, 339-355.
- 14) Kucklantz, V., 1985, Limnologische Untersuchungen zur Bedeutung der Makrophyten für die Selbsteinigung Filebender Gewasser. In, Schadstoff bleatung and Ökosystem-schutz in aquatischem Bereich, Bayerischen, Herausgeben v. d. Landesantalt für Wasser-forschung, 465-473.
- 15) Hammer, D. A., 1996, Creating freshwater wetlands, Lewis Publishers, N.Y., 406pp.
- 16) 조강현, 1992, 인공호에서 대형수생식물에 의한 물질생산과 질소와 인의 순환, 서울대 대학원 박사학위 논문, 233pp.
- 17) 농어촌진흥공사, 1997, 수생식물에 의한 수질개선기법 연구(I), 농어촌 진흥공사 126pp.
- 18) 김도선, 1998, 군부대 오수처리 효율성 향상을 위한 인공습지의 이용방안, 강원대학교 대학원 이학석사학위논문, 138pp.

- 19) Shutes, R. B., J. B. Ellis, D. M. Revitt and T. T. Zhang, 1993, The use of *Typha latifolia* for heavy metal pollution control in urban wetlands, In G. A. Moshiri(ed). *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. Lewis Publishers, N. Y., pp.407-425.
- 20) Cooper, P. F. and A. G. Boon, 1987, The use of phragmites for wastewater treatment by the root zone method: The UK approach In K. R. Reddy and W. H. Smith(eds), *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource Recovery*, Magnolia Pub. Inc., Orlando, Florida, 153-174.
- 21) 이창복, 1993, *대한식물도감*, 향문사.
- 22) Magalef, R., 1958, Information theory in ecology, *General systematics*, 3, 36-71.
- 23) Pielou, E. C., 1966, Shannon's formula as a measure of specific diversity: its use and misuse, *Amer. Nat.*, 100, 463-465.
- 24) Bavor, H. J. and D. S. Mitchell, 1994, Wetland system in water pollution control, *Wat. Sci. Tech.*, 29(4).
- 25) 여운기, 허창환, 이순탁, 지홍기, 2003, Mattress/Filter용 수중 Slag의 생물막 형성 검토, 한국수자원학회 학술발표회 논문개요집, 한국수자원학회, 927-930.