

수질정화를 위한 다기능 인공식물섬의 개발과 적용

Development and Application of Multi-Functional Floating Wetland Island for Improving Water Quality

윤영한 · 임현만 · 김원재 · 정진홍 · 박재로*

한국건설기술연구원 환경플랜트연구소

Younghan Yoon, Hyun Man Lim, Weon Jae Kim, Jin Hong Jung and Jae-Roh Park*

Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang 10223, Korea

Received 29 November 2016, revised 9 December 2016, accepted 20 December 2016, published online 31 December 2016

ABSTRACT: Multi-functional floating wetland island (mFWI) was developed in order to prevent algal bloom and to improve water quality through several unit purification processes. A test bed was applied in the stagnant watershed in an urban area, from the summer to the winter season. For the advanced treatment, an artificial phosphorus adsorption/filtration medium was applied with micro-bubble generation, as well as water plants for nutrient removal. It appeared that the efficiency of chemical oxygen demand (COD) and total phosphorus (T-P) removal was higher in the warmer season (40.9%, 45.7%) than in the winter (15.9%, 20.0%), and the removal performance (suspended solid, chlorophyll a) in each process differs according to seasonal variation; micro-bubble performed better (33.1%, 39.2%) in the summer, and the P adsorption/filtration and water plants performed better (76.5%, 59.5%) in the winter season. From the results, it was understood that the mFWI performance was dependent upon the pollutant loads in different seasons and unit processes, and thus it requires continuous monitoring under various conditions to evaluate the functions. In addition, micro-bubbles helped prevent the formation of anaerobic zones in the lower part of the floating wetland. This resulted in the water circulation to form a new healthy aquatic ecosystem in the surrounding environment, which confirmed the positive influence of mFWI.

KEYWORDS: Artificial filtration/adsorption media, Microbubble, Multi-functional floating wetland island, Stagnant watershed, Vegetative filter

요 약: 유속이 낮은 정체수역에 대하여 부영양화에 의한 녹조발생을 미연에 방지하고 수질개선을 도모하기 위하여 기존 인공식물섬 운영기술에 다양한 요소기술을 도입한 다기능 인공식물섬을 개발하였고 개발기술에 대한 성능검증을 위하여 경기도에 소재하는 하천에서 여름철과 겨울철 동안에 모니터링 하였다. 본 연구의 다기능 인공식물섬은 수질정화 기능을 높이기 위해서 정수식물 기반의 식생여과 공정 위주의 일반 인공식물섬 기술에 미세기포 공정과 인공여과에 의한 인 흡착/여과 공정을 추가하여 운영하였다. 개발기술에 대한 계절에 따른 오염물질 (COD, T-P) 제거율 변화로부터 오염부하가 낮은 겨울철 (15.9%, 20.0%)보다는 부하가 높은 여름철 (40.9%, 45.7%)에 높은 처리효율을 갖는 것으로 나타났고 공정별 제거율 (SS, Chl-a)에서는 미세기포 공정은 여름철 (33.1%, 39.2%)에, 인 흡착/여과 인공여과 및 식생여과 공정은 겨울철 (76.5%, 59.5%)에 높은 제거효율을 갖는 것으로 분석되어 다기능 인공식물섬의 정화능은 계절별 변화 또는 오염부하 정도에 따라서 적용 기술별로 제거능을 나타내어 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 사료되었다. 또한, 인공식물섬 주변의 생태변화 분석결과, 식물섬 저부에 미세기포의 공급으로 용존산소가 증가됨으로써 혐기화에 의한 물질환원 현상을 방지하고 수류순환을 유도하여 친환경적인 새로운 수생태계가 조성되는 것을 확인하였고 이러한 결과들을 통하여 다기능 인공식물섬에 의하여 정체수역의 수질이 개선되고 다양한 동식물의 성장으로 정체수역 저부의 물질순환이 개선될 수 있는 가능성을 확인하였다.

핵심어: 인공 흡착/여과 여재, 미세기포, 다기능 인공식물섬, 정체수역, 식생여과

*Corresponding author: jrpark@kict.re.kr, ORCID 0000-0002-6854-3074

© Korean Society of Ecology and Infrastructure Engineering. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 일조량이 늘고 강수량이 감소하는 등의 기후변화의 영향으로 하천 생태환경이 변화되었고 대규모 하천정비사업 등으로 하천횡단구조물이 설치되어 많은 구간에서 유속의 감소로 하천정체구간이 발생하고 있다(Kim et al. 2003). 이러한 정체구간으로 미처리된 하수처리수 등의 점오염원과 강우시 발생하는 강우유출수에 동반된 비점오염원이 유입되어 자연적으로는 부영양화 및 녹조발생을 일으켜 공중 보건상의 위협을 초래하고 정수공정에서는 응집침전 저하에 따른 약품비 증가, 여과지 폐색, 유해한 소독부산물 발생 등으로 처리비용이 증가되는 요인이 되고 있다(Park et al. 2008). 이와 같이 오염되는 하천수 또는 호소수 수역의 수질개선을 도모하고 이에 따른 부영양화 및 녹조발생을 방지하기 위하여 인공식물섬 기술이 제안되어 왔다. 부체를 활용하여 제작된 식물섬에 식생생태를 조성하여 수체내의 유기물 및 영양염류를 제거하는 시스템으로 정의되는 인공식물섬(floating wetland island)에 의한 수질정화기술은 독일에서 1972년에 처음 소개되었고 국내에서는 1998년에 충남 아산의 마산저수지 수질개선을 목적으로 처음으로 설치 및 적용되었다(Lee et al. 1999, Kim et al. 2007, Vogel 2011).

인공식물섬에 의한 수질정화기술은 적은 부지면적이 소요되고 오염된 수체 내 주변의 토착식물을 식재하거나 수질정화능력이 있는 정수식물을 식재하여 식물의 성장, 식물뿌리 등에 서식하는 미생물, 그리고 이들의 구성에 의한 동식물 생태계 등의 작용으로 수체를 오염시키는 유기물과 영양염류 및 기타 오염물질을 흡수/흡착, 분해 등의 작용으로 제거시킬 뿐만 아니라, 조류증식에 필수요소인 햇빛의 투과를 차단시켜 광합성을 억제함으로써 녹조대발생(agal bloom) 현상을 사전에 방지시킬 수 있는 기능도 갖는다(Winston et al. 2013, Kim et al. 2014). Li et al. (2010)과 Song et al. (2011)은 수체에 부유하는 조류의 내부보다는 침수된 부유매트에서 성장하는 식물과 미생물의 조직에 영양물질을 포함한 여러 오염물질이 저장되어 오염저감효과가 있다는 연구결과를 도출하였고, 이 밖에도 생활하수 및 농업폐수, 돈사안정화지(swine lagoons), 과영양호수의 처리에 인공식물섬이 적용된 사례가 보고되고 있다(Wu et al. 2006, Yang et al. 2008, Hubbard et al. 2011).

미세기포를 이용한 기술은 다양한 수처리 분야에서 활

용되어 왔다. 대표적인 공정으로는 높은 압력에서 압축수를 용존시킨 후 부상조에 노출시켜 미세기포를 공급하여 수중의 오염물질을 기포 표면에 흡착 및 부상시키는 용존 공기부상분리(dissolved air flotation)가 있다(Jung et al. 1994). 발생된 미세기포는 넓은 계면면적, 작은 입경, 긴 체류시간 등의 특징으로 부상공정에 주목 받아왔고 최근에는 산소 미세기포의 경우 높은 제타전위로 인하여 미세기포 간의 결합을 지연시켜 체류시간이 더 지속될 수 있는 것으로 알려지고 있다. 또한 일부 연구에서는 미세기포가 수중에서 터지기 직전에 프리 라디칼(free-radical)이 발생되어 기액표면의 이온밀도가 증가되고 오존 미세기포의 경우에는 pH 조건에 따라서 하이드록실 라디칼(hydroxyl radical)이 발생되어 새로운 수처리 대안방안으로 제시할 수 있는 것으로 보고하였다(Takahashi et al. 2007, Liu et al. 2012).

인공경량골재는 기존의 천연골재가 갖지 못하는 경량성, 흡습성, 단열성 등의 기능을 활용한 인공토양으로서 수처리 분야에서는 식생의 지지를 위한 기반재, 수처리 여재 등에 적용되고 있다. 수처리 여재로 사용될 경우 흡착 및 여과기능을 기대할 수 있으며 여재의 공극에 의한 입자상 물질의 여과작용과 동시에 용존성 물질 및 콜로이드성 물질의 흡착으로 수중의 오염물질을 제거시킬 수 있다. 여과 과정에서 경량골재 표면에는 수중에 존재하는 미생물이 생물막을 형성하여 오염물의 생물학적 분해, 용존물질의 흡착, 이온교환 또는 화학적 반응에 의한 입자성물질의 흡착반응 등이 일어날 수 있고 동시에 여재의 입경에 의한 입자성 오염물질이 제거될 수 있다(Tchobanoglous et al. 2003, Kim and Jang 2011).

인공식물섬에 식재된 수생식물은 수중으로 뿌리를 내려 수중의 질소, 인 등의 영양물질을 흡수하여 생장하기 때문에 하천 및 호소의 수질을 개선시킬 수 있다. 부들, 꽃창포, 부레옥잠 등을 이용한 연구사례가 보고되고 있고 이러한 정수식물을 인공식물섬에 식재하기 위하여 가벼우면서도 식물을 지지할 수 있는 인공토양을 사용하는데 이와 더불어 수중 오염물질을 여과 및 흡착시켜 제거할 수 있는 인공경량골재로 식생기반재를 사용한다(Choi et al. 2010).

본 연구에서는 하천의 흐름이 낮은 정체수역의 수질정화를 도모하고 오염물질에 의한 부영양화 및 녹조발생을 방지하기 위하여 수질정화능이 강화된 인공식물섬 기술을 개발 중에 있고 파일럿 규모로 하천현장에 적용하여 기술의 성능평가를 실시하고 있다. 본 연구에서는 미세기포 발

생장치와 흡착여재 기반의 여과 및 식생정화 등의 요소기술이 적용된 다기능 인공식물섬을 이용한 수질정화능의 성능검증을 위하여 실규모로 테스트베드를 하천에 구축하고, 겨울철과 여름철 각각 약 3개월 동안의 현장 운영 결과를 중심으로 기술의 성능결과를 살펴보았다.

2. 연구 방법

2.1 미세기포 공정부

다기능 인공식물섬에 미세기포를 공급하기 위하여 별도의 공기가압이 없이 공기투입 및 혼합이 가능한 벤추리 노즐 타입의 펌프형 버블장치 (5 HP, 3상 3600 RPM)를 인공식물섬의 하부 (수면으로부터 0.7 m)에 설치하였다. 4개의 모듈로 구성된 인공식물섬의 저부에는 노즐 타입의 미세기포 발생장치가 사각형 형태로 설치되어 균일하게 미세기포수가 각 모듈로 공급되도록 설치하였다. 미세기포 공기량은 평균적으로 6 L/min으로 공급되었고 미세기포의 평균적인 크기분포를 파악하기 위하여 입자계수기 (Laser Trace Particle Counter, PC3400, CHEMTRAC)로 측정하였다. 또한 인공식물섬의 운영 효율성을 위하여 매일 낮시간 동안 (8 시간)에 하천 수질정화를 위하여 운전되고 이후에는 휴지되도록 PLC 로직에 반영하여 시스템을 설계하였다.

2.2 인 흡착 및 여과 공정부

다기능 인공식물섬의 식생부를 지지하고 하천수 중의 입자성 및 용존성 오염물질을 흡착과 여과를 통하여 제거할 수 있는 기반재로서 비중이 낮고 비표면적이 높은 인공 경량골재 (레드머드, ADPhos™ pellet)를 채택하였다. 인공 경량골재로 사용한 레드머드의 화학조성 및 물리적 특성은 Table 1과 같다. SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃를 주성분으로 하고 있으며 겉보기 비중이 1.75 g/cm³로서 매우 가볍고 비표면적이 넓은 소재이다. 인공식물섬의 각 모듈에는 레드머드, 1.45 ton을 충전시켜 정수식물 식생부의 지지와 흡착 및 여과에 의한 오염물질 제거, 호기 및 혐기성 미생물 서식, 식생부 영양원 공급부의 기능을 할 수 있도록 하였다.

2.3 식생여과 공정부

하천내 오염물질을 정화하기 위한 수생식물로는 정수

Table 1. The chemical components and physical properties of red mud (ADPhos™ pellet), which was used as the artificial media for pollutants removal through adsorption and filtration.

Chemicals or property	Content or value
Na ₂ O (%)	1.1
Al ₂ O ₃ (%)	19.9
SiO ₂ (%)	26.3
Cl (%)	14.7
K ₂ O (%)	1.2
CaO (%)	13.1
TiO ₂ (%)	3.0
Fe ₂ O ₃ (%)	18.5
MgO, SO ₃ , ZrO ₂ , P ₂ O ₅ etc.	Small quantity
Specific surface area (m ² /g)	2.97
Specific gravity (g/cm ³)	1.75
Water absorption (%)	7.8
Compression strength (N)	23.2



Fig. 1. The location of the experimental group (EG), control group 1 (CG1) and control group 2 (CG2) to survey the environmental improvement through the application of a multi-functional floating wetland island.

식물로 알려진 노랑꽃창포를 일정간격으로 모듈당 50수씩 식재하였다. 꽃창포는 경량골재에 흡착 및 여과된 다양한 오염물질을 영양원으로 공급받아 성장함으로써 오염물질을 분해하고 또한 뿌리부는 호흡작용으로 수중에 용존 산소를 공급하여 다양한 수생 동식물의 서식처를 제공함으로써 인공식물섬에 의한 소규모의 생태계 조성을 유도하여 대상하천의 수질정화가 향상될 수 있도록 하였다. 이와 같이 식생여과 공정을 포함한 미세기포 공정과 인 흡착 및 여과 공정이 조합된 다기능 인공식물섬에 의한 수환경 개선정도를 검증하기 위하여 동일 하천에 대하여 인공식물섬에 의한 생태모니터링 분석을 실시하였다. 실험구 (인공식물섬 내부, EG), 대조구1 (인공식물섬 외부, CG1), 대조구2 (미설치된 상류지점, CG2)로 구분하여 수환경, 동·식물플랑크톤, 저서성 대형무척추동물, 어류 및 육상 곤충을 조사하였다 (Fig. 1).

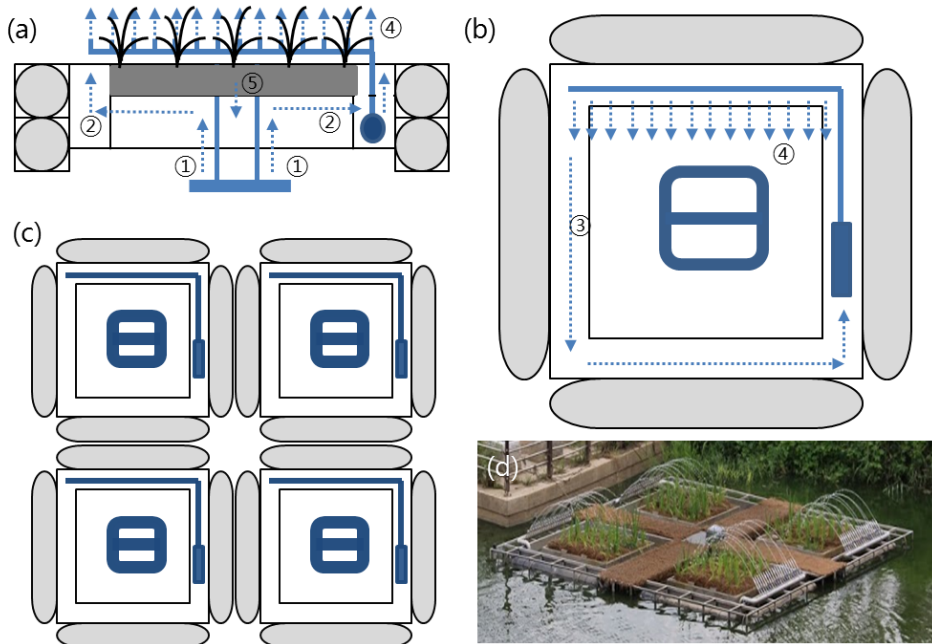


Fig. 2. The operation design (a, the side view; b, the ground view) of each unit of a multi-functional floating wetland island (mFWI). The arrows in operation design show the water flow in this system (c, the whole frame; d, the operating demonstration of mFWI).

2.4 다기능 인공식물섬 단위 모듈 및 운전방법

본 연구에서 다기능 인공식물섬에 의한 수질정화능을 평가하기 위하여 SUS 재질의 프레임과 부력체 (PE pipe) 로 제작된 단일모듈 (3.0 m × 3.0 m) 이 4개로 결합된 형태로 인공식물섬을 제작하였다. Fig. 2는 인공식물섬 각 단일모듈의 측면도와 평면도 및 이를 통한 처리수 순환을 나타내고 있다. 화살표와 같이 단일모듈 저부에는 미세기포수 공급부 (미세기포공정) 가 있어 상부로 미세기포수가 공급되고 (①), 본체의 측면부로 이동하면 (②, ③), 펌프에 의하여 분수노즐을 통해 식생 및 여과부로 고르게 공급 (인흡착 여재 및 식생여과 공정) 이 되도록 하여 (④), 최종 처리수는 여과층을 통과하고 최종으로 인공식물섬의 저부로 유출되는 구조로 제작하였다 (⑤). 인공식물섬의 처리유량은 최대 97.5 m³/day (하루 8 시간 운전 기준) 로 설계하였고 인공식물섬의 상부에는 하천을 정화시킬 수 있는 정수식물로 노란꽃창포를 식재하였으며 식생부의 지지를 위한 기반재로는 경량골재로 사용되는 레드머드를 사용하였다. 적용된 기반재는 가벼우면서 비교적 비표면적이 넓어서 오염물질을 흡착할 수 있는 기능이 있어 하천수에 포함된 인을 제거하는데 기여할 것으로 판단된다. 또한 원활한 공정의 운전과 유지관리를 위하여 전체적인 운영은 낮시간

동안 (8 시간) 운전되도록 PLC (Programmable Logic Controller) 로직에 의하여 자동 운영되도록 시스템을 구축하였다.

대상하천에 대한 인공식물섬의 수질정화능을 분석하기 위하여 적용된 각 단위공정의 마지막 부분에서 샘플링하여 정화효율을 분석하였다. 이를 위하여 Fig. 2에서와 같이 공급된 미세기포수 (①) 는 식물섬의 여과 및 식생부로 직접 유입되지 않고 측면으로 이동하여 (②) 분수노즐에 의하여 부도의 상부에서 시작하여 하향류 방식으로 식생여과층에 분사될 수 있도록 여러 개의 노즐을 통하여 공급되도록 하였다 (③, ④).

2.5 성능검증을 위한 대상하천 현황

단위기술이 적용된 다기능 인공식물섬의 성능검증을 위하여 경기도에 위치한 하천의 정체수역에 설치하였다. 대상하천은 대상 도시의 호수공원과 한강을 연결하는 기존 중앙배수로 1.3 km 구간을 수변공원으로 조성한 인공하천 (하상경사: 1/2,600) 이다. 하천 상·하류에는 2 m 높이의 가동보 2 개를 설치해 50,000 m³의 빗물을 가두고 오염 방지를 위한 수처리 시설과 교반기 등을 만들어 인공하천으로 기능하도록 하여 평상시에는 유속이 매우 낮은 정

체수역이다. 그러나 장마철 및 강우기간에는 하천 주변의 비점오염원이 포함된 강우유출수가 하천으로 유입되어 산책로 등의 하천시설물이 물에 잠길 정도로 연중 하천의 수량과 수질의 변동이 매우 큰 특징을 갖고 있다.

2.6 성능검증을 위한 대상하천 현황 및 수질 분석방법

요소기술이 적용된 다기능 인공식물섬의 하천수질정화능을 분석하기 위하여 요소기술별로 수처리능을 나타낼 수 있는 지점을 선정 및 샘플링하여 측정하였다. 즉, 하천수, 미세기포수 (②), 식생여과수 (⑤)를 채취하였고 일반항목 (온도, DO, 전기전도도, pH)은 다항목 수질측정기로 측정하였으며 샘플링을 통한 수질분석 항목으로는 유기물은 COD 및 SS, 영양물질은 T-P, 조류의 농도변화를 위해서는 Chl-a를 각각 분석하였다. 시료의 분석은 수질오염 공정시험법에 준하여 실내에서 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 대상하천의 계절별 수질변화

다기능 인공식물섬이 적용된 대상하천은 배수구역내 우수배제를 위한 우수관거의 연장수로로서의 역할을 하고 있는 하류부에 가동보가 설치된 인공하천이다. Table 2는 성능검증 기간 동안의 대상하천에 대한 계절별 평균 수질변화를 나타내고 있다. 대상하천의 계절별 평균 수질변화를 보면 겨울철보다 여름철 평균수질의 오염도가 T-N을 제외하고는 모두 높은 것을 알 수 있다. 또한 본 논문에는 제시하지 않았으나 2015년 겨울철에는 계절적인 영향으로 잦은 강우가 있었고 2016년도 여름철에는 무강우일수가 길고 높은 수온으로 인한 증발산량의 영향으로 대상하천의 수질이 겨울철에는 빗물과 혼합되는 현상으로 오염도가 낮고 여름철에는 상대적으로 수질 오염도가 높았던 것으로 판단된다.

3.2 미세기포 발생에 의한 처리결과 분석

미세기포 발생장치는 용존공기부상법으로 잘 알려져 있고 설치부지가 적게 소요되고 조류제거에 효과적인 장점이 있어 다양한 수처리공정에서 전처리를 위한 방안으로 빈번하게 적용되고 있는 기법이다. 폐수 또는 원수 중의 물보다 가벼운 현탁물질을 제거하는 방법으로서 수중에 미세기포를 발생시켜 이들이 부상할 때 기포표면에 제거 물질을 흡착·부상시켜 제거하는 과정에 의하여 수질을 정화시키게 된다. 본 연구의 다기능 인공식물섬 기술에 적용한 미세기포 발생장치는 공기가압이 없이 공기투입 및 혼합이 가능한 벤추리노즐 타입의 펌프형 버블장치이다. 입자계수기로 측정된 결과 발생하는 평균 미세기포의 입경이 10 μm 이하가 50%에 달하는 것으로 나타나 나노에서부터 마이크로까지의 다양한 크기의 미세기포를 갖는 것으로 나타났다. 이를 통하여 하천 저부에 용존산소를 공급할 뿐만 아니라 미세기포의 부상에 의해서 성층화되어 있는 수층을 혼합시키는 작용을 유도함으로써 부영양화에 의한 녹조발생 현상을 사전에 방지시키는 역할을 할 수 있다. 또한 수체의 오염물질도 미세기포 표면의 흡착과 부상으로 분리하여 제거할 수 있는 역할도 기대할 수 있다.

Table 3은 대상하천에서의 다기능 인공식물섬에 설치된 미세기포 공정과 인 흡착/여과 및 식생여과 공정에 의한 운전결과에 대한 수질의 변화를 계절별로 샘플링하여 분석한 결과이다. 겨울철 강우사상 증가 및 기후적인 영향으로 하천의 수질변화가 매우 급변했던 사황을 고려할 때 미세기포 발생장치에 의한 처리율은 겨울철 (COD 10.1 mg/L, SS 18.0 mg/L, Chl-a 19.9 $\mu\text{g/L}$) 보다는 여름철 (COD 19.9 mg/L, SS 9.1 mg/L, Chl-a 39.7 $\mu\text{g/L}$) 평가기간에 T-P를 제외한 모든 수질항목에서 다소 높은 결과 (COD 23.6%, SS 33.1%, Chl-a 39.2%)를 보였다. 그러나 여름철 운전시의 대상하천의 수질이 겨울철보다는 매우 높았기 때문에 여름철의 처리효율은 높게 나타났으나 처리수질은 SS를 제외한 모든 수질항목에서 높은 농도를 나타내었다.

Table 2. The average water quality of the demonstrated site in the summer and winter seasons (values in parenthesis indicate the range) (COD, chemical oxygen demand; SS, suspended solid; T-N, total nitrogen; T-P, total phosphorus; Chl-a, chlorophyll-a).

Season	COD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a ($\mu\text{g/L}$)
Winter (Oct. - Dec. 2015)	10.8 (7.5-15.1)	5.1 (0.05-20.0)	6.6 (2.0-17.7)	0.06 (0.004-0.13)	20.7 (3.8-77.1)
Summer (June - Aug. 2016)	27.0 (9.4-42.2)	16.5 (5.0-37.0)	6.4 (2.5-14.8)	0.18 (0.045-0.34)	82.3 (13.1-186.0)

Table 3. The treated water quality and removal efficiency by microbubbles (MB) and adsorption media and vegetative filter (AV) part in a multi-function floating wetland island in the summer and winter seasons (COD, chemical oxygen demand; SS, suspended solid; T-P, total phosphorus; Chl-a, chlorophyll-a).

Property	Winter (Oct. - Dec. 2015)				Summer (June - Aug. 2016)			
	Effluent (mg/L)		Removal efficiency (%)		Effluent (mg/L)		Removal efficiency (%)	
	MB	AV	MB	AV	MB	AV	MB	AV
COD	10.1	9.1	6.4	10.2	19.9	16.0	23.6	18.9
SS	18.0	1.6	0.3	76.5	9.1	3.5	33.1	58.5
T-P	0.07	0.04	20.8	34.2	0.14	0.10	18.6	25.3
Chl-a	19.9	8.1	3.9	59.5	39.7	30.2	39.2	28.3

3.3 인 흡착/여과 및 식생여과에 의한 처리결과 분석

인공식물섬에 설치한 식생기반재와 노란꽃창포에 의한 인 흡착/여과 및 식생여과 공정의 계절별 운전결과를 분석한 Table 3과 같이, 대상원수의 농도가 높았던 여름철에 대하여 단위 요소공정에 의한 처리농도 (COD 16.0 mg/L, SS 3.5 mg/L, T-P 0.10 mg/L, Chl-a 30.2 µg/L)가 겨울철 (COD 9.1 mg/L, SS 1.6 mg/L, T-P 0.04 mg/L, Chl-a 8.1 µg/L)에 비하여 높게 나타났고 처리효율 측면에서는 COD를 제외하고 겨울철의 운전결과 (SS 76.5%, T-P 34.2%, Chl-a 59.5%)가 더 우수한 것으로 분석되었다. 대상하천에서의 운전결과가 운전초기인 겨울철에 처리수질이 낮은 것은 인공 경량골재의 높은 인 흡착/여과능으로 인해서 운전초기에 높은 처리효율로 기인한 것으로 판단되고 여름철에는 넓은 표면적에 의해서 수중의 인을 흡착시킬 수 있는 식생기반재인 레드머드가 시간이 지남에 따라서 이미 다양한 수중의 유기 영양물질이 다량 흡착되어 제거능이 한계에 도달하여 여름철의 처리수질이 겨울철의 경우보다 높게 나타났고 처리효율도 COD 항목을 제외하고는 모두 낮게 분석된 것으로 사료된다. 인 흡착/여과 및 식생여과 기반재로 사용된 레드머드를 현장 적용 전과 후의 단위부피 (m³)당 건조중량을 비교 분석한 결과 약 10.6 kg의 차이가 있는 것으로 측정되어서 여과의 흡착/여과능이 저하되었고 이로 인하여 제거 효율저하로 관측된 것으로 판단된다. 또한 모니터링 기간 동안 겨울철 강우일수는 여름철보다 많았던 것으로 기상청자료 (<http://www.kma.go.kr>)를 통하여 확인할 수 있었고 여름철에 무강우일수가 증가되어 대상하천의 수심은 점차 낮아져 인공식물섬 운전 시 미세기포 발생장치에 의해서 하천 저부의 물질이 동시에 함께 부상되어 원수농도가 높아지고 또한 운전기간 동안 지속적으로 비점오염물질이 대상하천으로 유입되어 이와 같은 운전결과가 나타난 것으로 분석된다.

3.4 인공식물섬에 의한 생태변화 분석

다기능 인공식물섬에 의한 생태변화 분석을 위해서 실험구 (인공식물섬 내부, 대조구1 (부도 외부), 대조구2 (미설치된 상류지점)로 구분하여 기조 수환경, 동-식물플랑크톤, 저서성 대형무척추동물, 어류 및 육상곤충을 조사하였다. 그 결과, 식물플랑크톤은 실험구에서 19속 26종, 대조구에서 16속 22종이 출현하였으며, 현존량은 실험구에서 26,409 cells/ml, 대조구에서 28,424 cells/ml로 조사되어 실험구인 부도 내의 TiO₂ (광촉매)가 식물플랑크톤의 현존량을 감소시키는 효과가 있는 것으로 판단되었다. 저서성 대형무척추동물은 총 3문 3강 7목 11과 13종 504개체가 출현하여, 실험구에서 뚜렷한 차이가 나타났으며 어류는 382개체가 출현하여 실험구와 대조구 지점간의 종수 및 전장 평균의 차이는 없으나, 인공식물섬이 설치된 실험구에서 개체수가 훨씬 많아 그에 따라 다양한 생물군이 서식할 수 있는 미소서식처 제공효과가 있는 것으로 판단되었다.

3.5 다기능 인공식물섬 운영결과 분석

Table 4는 각 계절별로 운영되었던 다기능 인공식물섬에 의한 처리수의 최종 평균농도 및 처리율을 나타내고 있고, Fig. 3와 4는 각각 겨울철과 여름철의 운전결과를 모니터링한 결과를 보여주고 있다. 모든 수질항목에서 나타난 바와 같이 인공식물섬의 운영효율이 겨울철 (COD 15.9%, SS 68.6%, T-P 20.0%, Chl-a 61.1%) 보다는 여름철의 처리결과 (COD 40.9%, SS 78.6%, T-P 45.7%, Chl-a 63.2%)가 우수한 것으로 측정되었으나 항목별 처리농도를 살펴봤을 때는 T-N을 제외하고는 모든 항목에서 다소 높은 농도 (COD 16.0 mg/L, SS 3.5 mg/L, T-P 0.10 mg/L, Chl-a 30.2 µg/L)로 측정되었다. 이는 대상 원수의 여름철 평균 수질이 T-N을 제외하고 겨울철에 비하여

Table 4. The final treated water quality and removal efficiency by a multi-function floating wetland island in the summer and the winter seasons (COD, chemical oxygen demand; SS, suspended solid; T-P, total phosphorus; Chl-a, chlorophyll-a).

Season	COD		SS		T-P		Chl-a	
	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)	Effluent (mg/L)	Removal efficiency (%)	Effluent (µg/L)	Removal efficiency (%)
Winter (Oct. - Dec. 2015)	9.1	15.9	1.6	68.6	0.04	20.0	8.1	61.1
Summer (June - Aug. 2016)	16.0	40.9	3.5	78.6	0.10	45.7	30.2	63.2

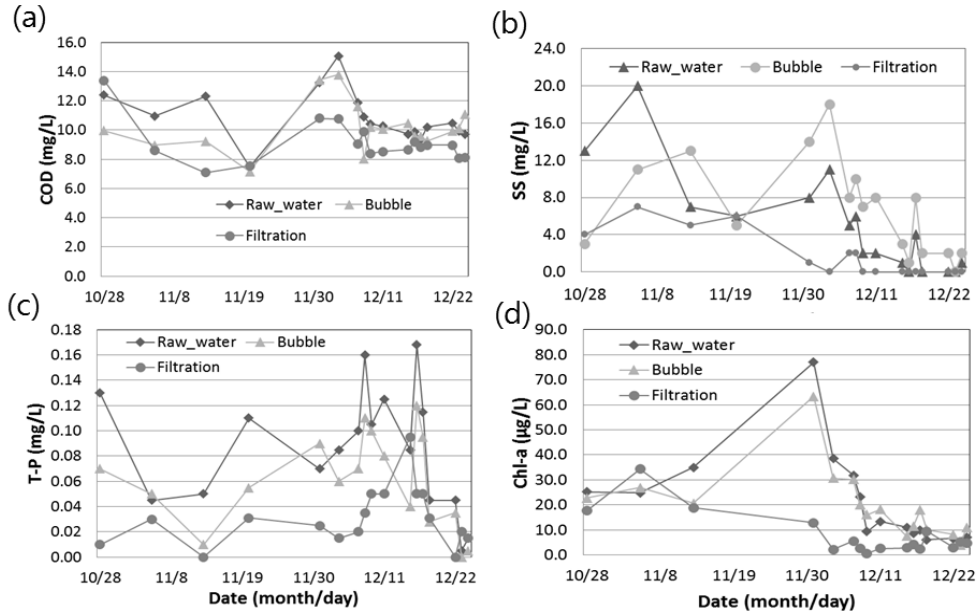


Fig. 3. The treated water quality trends by the multi-functional wetland island conducted in the winter season (a, chemical oxygen demand (COD); b, suspended solid (SS); c, total phosphorus (T-P); d, chlorophyll-a (Chl-a)).

2.5-4.0배 정도로 높았고 인공 경량골재에 의한 인 흡착/여과효과 같은 인공식물섬 자체의 수질 정화능에도 한계가 있었기 때문에 높은 제거효율에도 최종 처리농도는 다소 높았던 것으로 판단된다. 또한 인공식물섬의 생태변화 결과 분석을 통하여 실험군과 대조군에 대한 동식물 분포를 분석한 결과 다양하고 개체수도 많은 식생과 동물들의 서식처 역할을 하는 것으로 나타났고 온도가 낮고 생태활성도가 저하되는 겨울철 보다는 서식환경이 우월한 여름철에 성장 정도 및 다양성이 높아서 인공식물섬을 중심으로 집중되는 동·식물플랑크톤, 저서성 대형무척추동물, 어류 및 육상곤충의 생태서식에 요구되는 영양원 섭취에 의한 대상하천의 오염물질 소모 정도가 높을 수 있었던 것으로 판단된다.

다가능 식생부도에 적용된 단위요소기술에 대한 계절

별 수질정화 처리효율 결과를 살펴보면 겨울철에는 흡착/식생여과에 의한 처리가 더 우수하였고 여름철에는 미세기포 발생에 의한 처리효과 기여도가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 미세기포에 의한 수처리 공정에서는 응집제를 사용하여 수중의 부유된 미세입자를 응집반응시켜 제거하지만 본 인공식물섬에서는 응집반응을 위한 기작이 포함되어 있지 않아서 그 제거효과가 미미하였고 부상된 미세입자들은 일정시간 간격으로 공급되는 미세기포에 의해서 해당 구역에서 제거되지 못하고 지속적으로 잔류 또는 저부로 재침전 되어 총 제거효율에 대한 미세기포공정의 기여도가 상대적으로 낮아진 것으로 판단된다. 그러나 계절에 따른 외부환경 변화 및 비점오염물질의 영향으로 하천수의 유량과 농도변화가 매우 커서 다가능 인공식물섬의 보다 정확한 운전성능을 분석하기 위해

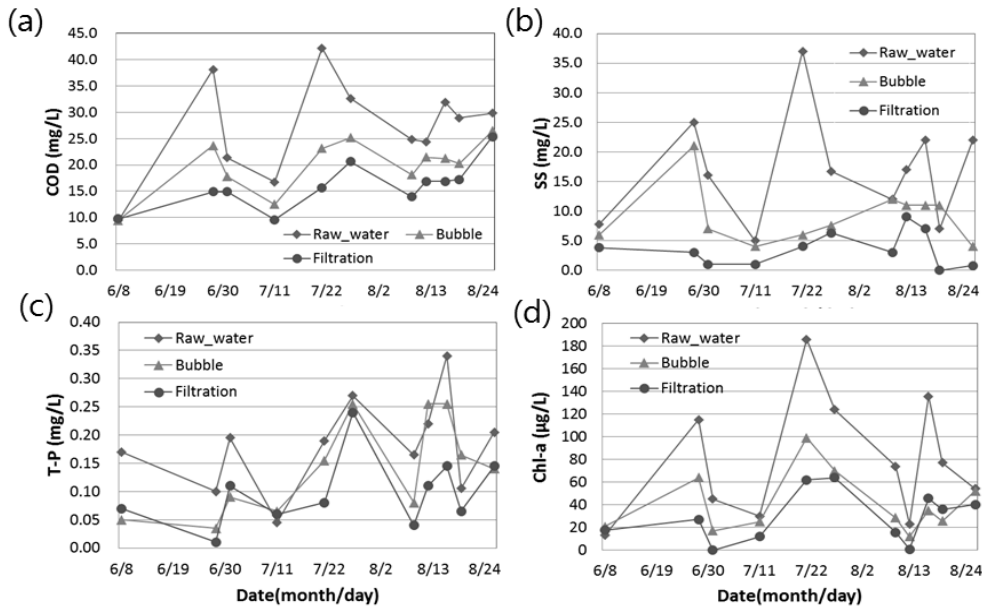


Fig. 4. The treated water quality trends by the multi-functional wetland island conducted in the summer season (a, chemical oxygen demand (COD); b, suspended solid (SS); c, total phosphorus (T-P); d, chlorophyll-a (Chl-a)).

서는 충분한 장기적인 운영결과의 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 제언

다기능 인공식물섬 기술은 유기영양물질 등에 의하여 오염된 수체를 환경친화적인 본래의 방법과 본 기능을 극대화시켜 효과적으로 오염물질을 정화시키기 위하여 개발한 기술로서 부채와 함께 수면 위에 띄우면 햇빛이 하천으로 침투하는 것을 방지함으로써 녹조변성을 미연에 제어할 수 있고 미세기포를 수중에 발생시킴으로써 용존산소의 공급을 통한 성층화 방지 등으로 수생태계를 정화하는 목적으로 개발되었다. 이러한 성능검증을 위하여 경기도의 정체성 하천에 적용하였고 겨울철과 여름철 현장운영 및 결과분석을 통하여 향후 실규모 주요하천에 적용가능성을 검토하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 다기능 인공식물섬에 의하여 비점오염물질로 오염된 정체성 하천에 대하여 평균적으로 겨울철과 여름철 처리효율은 COD 15.9%와 40.9%, SS 68.6%와 78.6%, T-P 20.0%와 45.7%, Chl-a 61.1%와 63.2%의 효율을 보여 겨울철보다는 여름철에 높은 처리효율을 갖는 것으로 나타났다.

- 2) 다기능 인공식물섬에 적용된 계절별 단위기술에 의한 처리효과를 분석한 결과, 계절적인 요인과 외부 환경적인 요인이 복합적으로 작용하여 대상 시험 하천의 원수 농도변화가 매우 높았고 그에 따라서 식물섬에 의한 오염물 처리농도와 처리효율 간의 차이가 시기별로 각기 다른 결과를 나타내어 정체성 오염하천을 효과적으로 제어하고 정화시키기 위해서는 보다 장기적인 모니터링을 통한 성능분석이 필요한 것으로 판단된다.
- 3) 또한 인 흡착/여과 공정을 위하여 식생기반재로 사용된 인공 경량골재는 적용 초기인 겨울철에 저농도의 하천원수에 대하여 낮은 처리농도를 나타냈고 오염유입 부하가 높은 여름철에는 처리수의 농도는 비교적 높았으나 오염물의 제거효율은 다소 저하되어 장기 모니터링을 통한 표면적이 넓은 경량 식생기반재의 흡착능과 약을 통한 교체주기 결정이 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 여름철에 인공식물섬에 의해서 조성되는 생태환경의 변화에 의한 다양한 동식물의 종류 및 성장정도가 대상 하천의 수질개선에 이바지하는 것으로 나타났으며 추가적인 운영효율 분석을 위해서는 장기 모니터링을 통한 시기별 생태분석을 통한 대상하천 수질개선효과 검증이 필요할 것으로 판단된다.
- 5) 인공식물섬 주변에 생태변화를 조사한 결과 다양한 동식물의 서식이 관찰되어 식물섬 하부로 미세기포의 공

급은 하천 저부에 DO 농도를 향상시켜 혐기화에 의한 물질의 환원현상 방지 및 수류순환 기능에 의한 하천혼합을 유도하여 환경친화적인 수생태계 조성을 제공할 수 있으며 이와 같은 결과를 통하여 정체수역의 수질이 개선되고 다양한 동식물의 성장으로 정체수역 저부의 물질순환이 개선될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업 (12기술혁신 C02, 자연과 인간이 공존하는 생태하천 조성기술개발 (Green River))의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Choi, M.J., Park, H.K., Byun, M.S., Jun, N.H. and Yun, S.H. 2010. Comparison of the growth of hydrophytes, aquatic biota and absorption of nutrient depending on the planting mat type of artificial vegetation island. *Journal of Korean Society on Water Quality* 26: 52-60. (in Korean)
- Hubbard, R.K., Anderson, W.F., Newton, G.L., Ruter, J.M. and Wilson, J.P. 2011. Plant growth and elemental uptake by floating vegetation on a single-stage swine wastewater lagoon. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers* 54: 837-845.
- Chung, Y., Kwon, S.P. and Choi, Y.H. 1994. Application of dissolved air flotation for water treatment. *KSWST Journal of Water Treatment* 2: 81-96. (in Korean)
- Kim, H.J., Kim, C.W. and Woo, H.S. 2003. Effects and alternatives influenced to ecological development of river-crossing structure. *Journal of Korean Society of Civil Engineering* 51: 42-58. (in Korean)
- Kim, T.J., Jun, J.C., Seo, R.B., Kim, H.M., Kim, D.G., Jun, Y.S., Park, S.W., Lee, S.Y., Park, J.J., Lee, J.H., Lee, J.J. and Lee, E.J. 2014. An initiative study on relationship between algal blooms and Asian dust for regulation of algal blooms. *Korean Society for Biotechnology and Bioengineering Journal* 29: 285-296. (in Korean)
- Kim, Y. and Jang, C. 2011. Production technology, property and application of artificial lightweight aggregates. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 23: 14-17.
- Kim, Y.J., Huh, J.G., Nam, J.H., Kim, I.S., Choi, K.S., Choi, S.I. and Ahn, T.S. 2007. Bacterial abundances and enzymatic activities in the pore water of media of artificial floating island in Lake Paro. *The Korean Journal of Microbiology* 43: 40-46. (in Korean)
- Lee, K.S., Jang, J.R., Kim, Y.K. and Park, B.H. 1999. A study on the floating island for water quality improvement of a reservoir. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 18: 77-82. (in Korean)
- Li, X.N., Song, H.L., Li, W., Lu, X.W. and Nishimura, O. 2010. An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water. *Ecological Engineering* 36: 382-390.
- Liu, S., Wang, Q., Sun, T., Wu, C. and Shi, Y. 2012. The effect of different types of microbubbles on the performance of the coagulation flotation process for coke wastewater. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 87: 206-215.
- Tchobanoglous, G., Burton, F.L., Stensel, H.D. and Metcalf & Eddy Inc. 2003. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Park, S.G., Cho, I.G., Kwon, O.B., Moon, J. S., Um, H.Y. and Hwang, S.J. 2008. Algae and nutrient removal by vegetated artificial floating island. *Korean Journal of Limnology* 41: 93-98. (in Korean)
- Song, H.L., Li, X.N., Wang, X.J. and Lu, X.W. 2011. Enhancing nitrogen removal performance of vegetated floating-bed by adding *Hyriopsiscumingii* lea and an artificial medium. *Fresenius Environmental Bulletin* 20: 2435-2441.
- Takahashi, M., Chiba, K. and Li, P. 2007. Formation of hydroxyl radicals by collapsing ozone microbubbles under strongly acidic conditions. *The Journal of Physical Chemistry B* 111: 11443-11446.
- Vogel, J.A. 2011. *The Effects of Artificial Floating Wetland Island Construction Materials on Plant Biomass*. Doctoral Dissertation, University of South Florida, St. Petersburg, USA.
- Winston, R.J., Hunt, W.F., Kennedy, S.G., Merriman, L.S., Chandler, J. and Brown, D. 2013. Evaluation of floating treatment wetlands as retrofits to existing stormwater retention ponds. *Ecological Engineering* 54: 254-265.
- Wu, Q. T., Gao, T., Zeng, S. and Chua, H. 2006. Plant-biofilm oxidation ditch for in situ treatment of

polluted waters. *Ecological Engineering* 28: 124-130.
Yang, Z., Zheng, S., Chen, J. and Sun, M. 2008. Purification

of nitrate-rich agricultural runoff by a hydroponic system.
Bioresource Technology 99: 8049-8053.