



# 단위공정별 기초실험을 통한 다기능 융복합부도의 설계·운전인자 도출

## Design and operating parameters of multi-functional floating island determined by basic experiments of unit processes

임현만<sup>1</sup>·장여주<sup>2</sup>·정진홍<sup>1</sup>·윤영한<sup>1</sup>·박재로<sup>1</sup>·김원재<sup>1,\*</sup>

Hyun-Man Lim<sup>1</sup>·Yeo-Ju Jang<sup>2</sup>·Jin-Hong Jung<sup>1</sup>·Young-Han Yoon<sup>1</sup>·Jae-Roh Park<sup>1</sup>·Weon-Jae Kim<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 국토보전연구본부, 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283, 10223

<sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 스마트도시·건설융합, 대전광역시 유성구 가정로 217, 34113

<sup>1</sup>Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT), Department of Land, Water and Environment Research, Gyeonggi-Do, Goyang-Si, Ilsanseo-Gu, Goyangdae-Ro 283, 10223

<sup>2</sup>University of Science and Technology (UST), Smart City & Construction Engineering, Daejeon, Yuseong-gu, Gajeong-ro 217, 34113

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

### ABSTRACT

Water quality improvement processes for stagnant area consist mainly of technologies applying vegetation and artificial water circulation, and these existing technologies have some limits to handle pollution loads effectively. To improve the purification efficiency, eco-friendly technologies should be developed that can reinforce self-purification functions. In this study, a multi-functional floating island combined with physical · chemical · biological functions (① flotation and oxidization using microbubbles, ② vegetation purification and ③ bio-filtration with improved adsorption capacity) has been developed and basic experiments were performed to determine the optimal combination conditions for each unit process. It has been shown that it is desirable to operate the microbubble unit process under conditions greater than 3.5 kg/cm<sup>2</sup>. In vegetation purification unit process, Yellow Iris (*Iris pseudacorus*) was suggested to be suitable considering water quality, landscape improvement and maintenance. When granular red-mud was applied to the bio-filtration unit process, it was found that T-P removal efficiency was good and its value was also stable for various linear velocity conditions. The appropriate thickness of filter media was suggested between 30 and 45 cm. In this study, the optimal design and operating parameters of the multi-functional floating island have been presented based on the results of the basic experiments of each unit process.

**Key words:** Multi-functional floating island, Microbubble, Vegetation purification, Bio-filtration, Stagnant water

**주제어:** 다기능 융복합부도, 마이크로버블, 식생정화, 생물여과, 정체성 수역

## 1. 서론

자연 상태의 오염되지 않은 하천은 하천 본래의 자정 작용에 의한 수질정화 능력을 보유하지만, 도시화 및 산업화의 진행에 따라 점오염원 및 비점오염원 등 오

염물질의 유입이 증가하면 하천은 점차 자정능력을 상실하고 오염하천으로 전락하여 하천 생태계마저 위협받게 된다 (Lim and Park, 2016). 특히 정체된 수역에서는 유입된 오염원 및 수체내부에서 생성된 유기물이 바닥에 퇴적됨으로써 수질오염을 더욱 가중시킬 수 있다.

정체성 수역에 대한 수질개선 방안으로는 주로 식생

Received 13 September 2018, revised 18 October 2018, accepted 25 October 2018.

\*Corresponding author: Weon-Jae Kim (E-mail: wjkim1@kict.re.kr)

을 이용한 기술과 인위적 물순환에 의해 자정기능을 유도하는 기술이 주를 이루고 있다. 식생을 이용한 방법으로는 인공식물섬(부도(浮島), (artificial) floating island) 및 습지 등이 적용되고 있으나, 광범위한 수역의 경우 수질개선의 영향범위가 좁기 때문에 처리효율이 떨어지며, 적절히 관리되지 않을 경우 식생에 의한 2차 오염이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 또한 인위적 물순환을 유도하기 위한 많은 기술이 제안되고 있는데, 기포를 이용한 전도순환장치, 성층화 방지용 심층포기, 연속포기, 밀도류 교반기 등이 개발되었으나 단순한 수류순환만으로는 오염부하를 저감시키는 데 한계가 있는 것으로 보고된 바 있다 (Oh et al., 2013).

한편, 인공식물섬 기술은 인공적인 부체를 형성함으로써 수심변화 및 흐름에 유동적인 조건에서 경량여재와 수생식물을 이용하여 접촉여과 및 식생에 의한 수질정화를 도모하는 것이 일반적이다 (Byeon, 2014). 식재된 식물이 수체 내의 영양염류를 흡수·동화·생장함으로써 인(P) 및 질소(N)를 제거하고, 뿌리와 부체는 어류의 산란 및 서식처로 활용되고, 다공성 경량골재를 여재로 사용하여 식재되는 식물을 지지함과 동시에 다양한 미생물의 담체 및 접촉여재로서의 기능을 수행함으로써 수질정화에 기여한다. 또한 햇빛을 차단하여 조류의 광합성을 억제시키는 등 긍정적 기능을 하는 것으로 보고되고 있다 (Park et al., 2008). 또한 최신의 연구동향을 보면, 수생식물을 이용하여 수중의 나노입자 중 산화아연을 저감하는 연구 (Jo et al., 2017) 및 조류저감 효과를 개선하기 위하여 여재와 물벼룩을 동시에 이용하는 연구도 보고된 바 있다 (Jin et al., 2018).

본 연구에서는 오염이 심화되고 있는 정체성 수역에 적용할 수 있는 기술로서 기존의 인공식물섬을 개량하여 수질정화능을 대폭 제고한 융복합부도를 제안하였다. 자연정화 기능의 향상을 유도하는 친환경적 기술로서, 영양염류(P, N) 및 유기물 제거, 용존산소(DO, dissolved oxygen) 개선, 조류 제거 및 대발생 억제, 수생태환경 개선 등의 기능을 갖는 고효율 다기능의 수질개선 융복합부도를 개발하고자 하였다. 이를 위해 ① 마이크로버블에 의한 부상 및 산화, ② 식생정화 및 ③ 흡착기능을 강화한 생물여과 등 물리적·화학적·생물학적 기능을 결합한 다기능 융복합부도의 적정 조합조건을 결정하기 위한 기초실험을 수행하였으며, 융복합부도의 각 단위공정에 대한 설계·운전인자를 제시하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 융복합부도 개요

융복합부도는 마이크로버블, 식생정화 및 생물여과 기능이 단일한 부도에서 복합적으로 작용하므로 다각적 수질정화 기능을 갖는다. ① 마이크로버블 단위공정에서는  $\mu\text{m}$  크기의 미세한 공기방울을 다량 수체에 공급함으로써 DO를 제고하고, 마이크로버블의 낮은 부력, 느린 부상속도, 넓은 비표면적, 높은 용해도 및 음전하 하전 등 다양한 특성을 바탕으로 고형물질(SS, suspended solids)과 조류의 부상분리 기능과 함께 고반응성 라디칼을 생성함으로써 오염물질을 산화분해하는 작용을 한다 (Agarwal et al., 2011; Cha, 2009; Cho et al., 2010; Matsumoto and Tanaka, 2008; Takahashi et al., 2007). ② 식생정화 단위공정에서는 식물에 의한 영양염류(P, N)의 흡수·동화·생장(uptake)과 식물근계 미생물에 의한 유기물의 산화 및 정화작용을 하며, 미소곤충 및 조류(bird)의 서식처를 제공한다 (Lee and Kim, 2005; Lee et al., 1999; Kwon and Park, 2003; Park, 2002; Ra et al., 1996; Reddy, 1983). 경관개선, 입자성 오염물질의 여과, 햇빛 차단을 통한 조류 성장 억제 및 수중 생태계 보호 역할도 병행한다 (Park, et al., 2008; Park, et al., 2013; Yang, 2006). ③ 생물여과 단위공정에서는 식생을 지지할 수 있는 기반재로서 기능함과 동시에, 여과, 흡착, 생물막(bio-film)의 생물분해 작용에 의해 수중의 입자성 오염물질과 부유성 고형물을 제거하고, 영양염류 및 유기물을 정화한다.

① 마이크로버블 단위공정, ② 식생정화 단위공정 및 ③ 생물여과 단위공정을 각각 조합한 다기능 융복합부도의 구조도는 Fig. 1과 같다. 융복합부도는 사방의

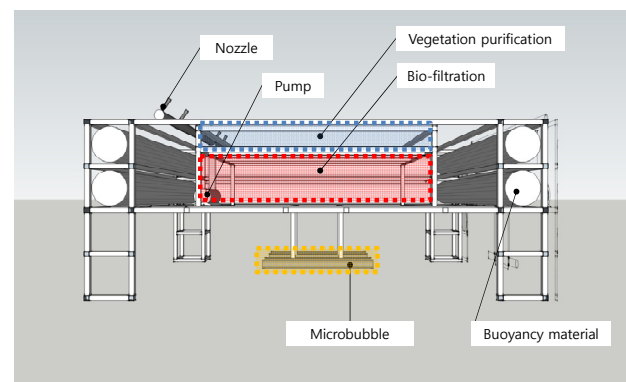


Fig. 1. Structural diagram of multi-functional floating island.



부력체에 의해 부유 상태를 유지하고, 각 개체는 가로 2.7 m 및 세로 2.7 m의 정사각형 형태를 기본으로 모듈처럼 연속하여 확장가능하도록 구성하였다. 마이크로버블은 용복합부도의 하부 1.0~1.5 m 지점에서 공급되고, 펌프를 통해 취수된 후 타이머에 의해 제어되는 관수용 노즐을 통해 분수의 형태로 상부 식생부로 살수된다. 미처리수는 식생부와 그 직하부에 조성된 여재부를 거치면서 서서히 하방으로 여과되며 처리된다.

## 2.2 마이크로버블 단위공정의 기초실험 방법

마이크로버블 단위공정의 기초실험을 위하여 Fig. 2와 같이 24 m<sup>3</sup>/day 규모를 갖는 semi-batch type의 수처리 장치를 설치하였다(반응조 부피: 0.48 m<sup>3</sup>). 마이크로버블 발생방식은 DAF 펌프 type을 적용하였다(모델명: KET-04-010, 출력: 3.7 kW). 운전유량은 35 L/min, 압력은 3.5 kgf/cm<sup>2</sup>의 조건으로 실험하였다. Particle counter의 사양은 flow cell dimension 750 μm, detection range 2~750 μm, size channel 8개인 LaserTrac™ particle counter(PC3400)을 이용하여 마이크로버블의 입경대별 입자수 분포(입경대: 2~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~70, 70~100 및 100 μm 이상), 체적 분포 및 표면적 분포를 산정하였다. Particle counter에 시료는

75 mL/min으로 공급하였으며, 1분간 연속측정한 후 평균값을 대푯값으로 하였다. 마이크로버블의 생성특성과 관련된 기초실험에는 원수로 수도수를 사용하였으며, 수질정화능 관련 기초실험에서는 오염된 하천수를 사용하여 시간 경과에 따른 SS, Chl-a 및 COD(chemical oxygen demand)의 제거효율을 분석하였다. 연속으로 마이크로버블을 공급하면서 5, 10, 30, 60, 90 및 120분 시간경과 후 각 수질항목의 농도 변화를 모니터링하였다.

## 2.3 식생정화 단위공정의 기초실험 방법

수질정화능이 우수한 식생종을 선정하기 위하여 지름 20 cm, 높이 40 cm의 칼럼을 활용한 실내 실험을 실시하였다. 태양광과 함께 36 W 백열등 2개를 이용하였으며, 실내 온도는 20°C로 조절하여 노랑꽃창포, 부들, 수크령, 질경이택사 및 창포 등 5종의 식생을 대상으로 하였다. 원형의 칼럼에 각 식생을 식종한 뒤, 15일간에 걸쳐 성장특성 및 정화효과를 모니터링하였다. 실험 경과시간에 따른 COD, 총질소(T-N, total nitrogen) 및 총인(T-P, total phosphorus)에 대한 제거효율을 관찰하였다. 본 실험에 사용된 식생은 Fig. 3과 같고, 실험장치는 Fig. 4와 같다. 원수로는 오염된 하천수를 사용하였다(Kim et al., 2015).

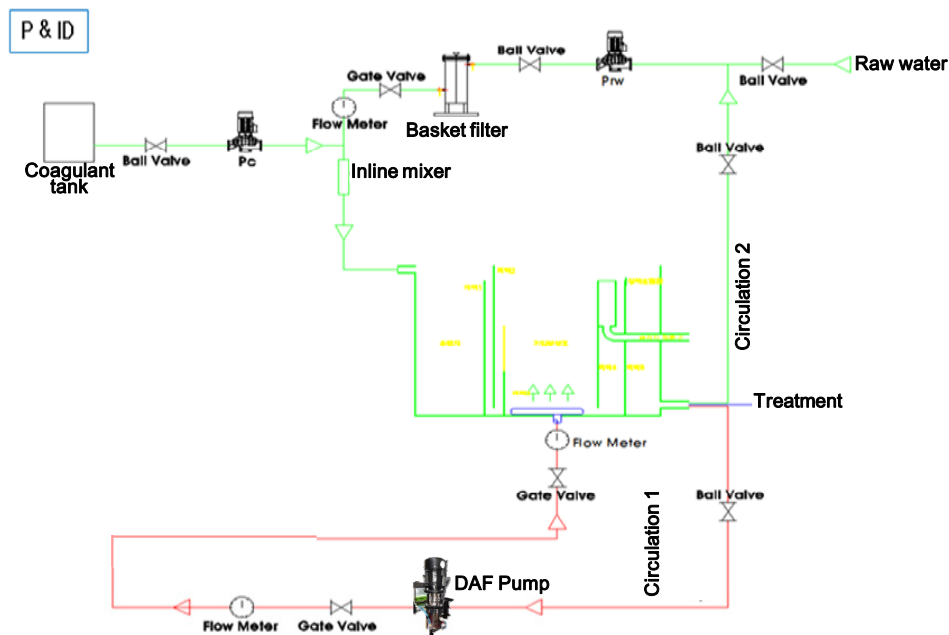


Fig. 2. Diagram of basic microbubble experiment device.

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581



Fig. 3. Candidate plants for multi-functional floating island.

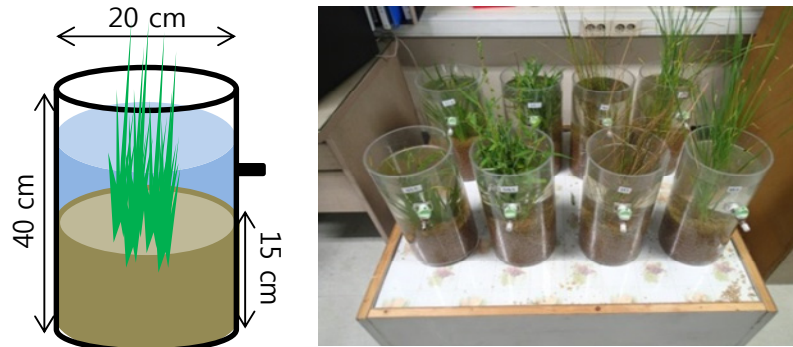


Fig. 4. Diagram of basic vegetation purification experiment device.

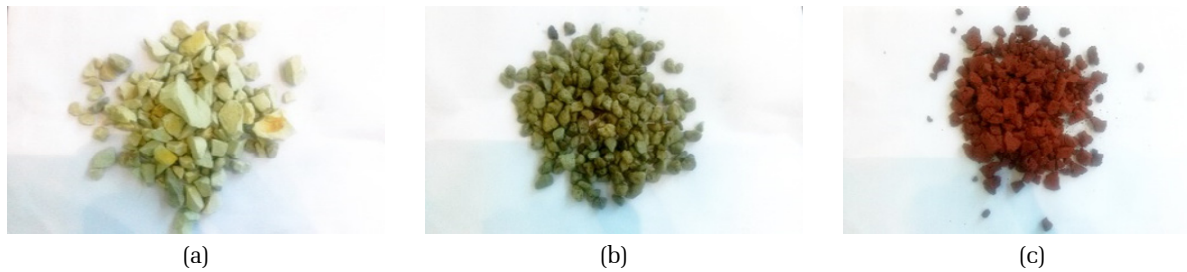


Fig. 5. Candidate media for multi-functional floating island ((a) Zeolite, (b) Volcanic stone, (c) Granular red-mud).

## 2.4 생물여과 단위공정의 기초실험 방법

생물여과 단위공정에 적합한 여재와 적정 여과조건 (여재의 충전고 및 여과선속도(LV, linear velocity))을 결정하기 위하여 제올라이트, 화산석 및 입상 레드머드를 대상으로 직경 150 mm, 높이 900 mm의 칼럼을 활용한 실내 실험을 수행하였으며(Fig. 5), 실험장치의 구성은 Fig. 6에 도시한 바와 같이 연속 순환방식으로 실험하였다.

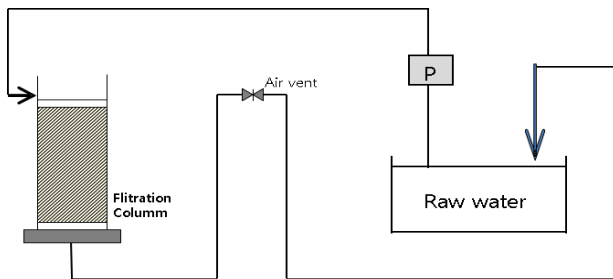


Fig. 6. Diagram of basic bio-filtration experiment device.

실험에 사용한 원수로는 오염된 하천수를 사용하였으며, LV를 각각 50, 100 및 200 m/day로 변화시키면서 충전된 여재의 bed volume 대비 여과수량이 5, 15 및 35에 달하는 시점의 처리수를 채수하여 SS, COD, T-N 및 T-P의 제거효율을 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

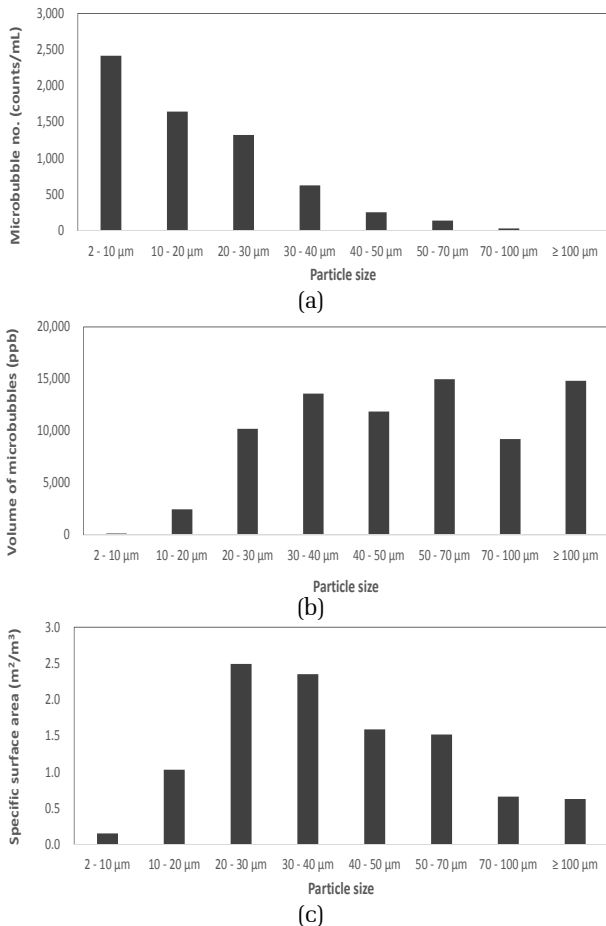
### 3.1 마이크로버블 단위공정의 설계·운전인자

#### 3.1.1 마이크로버블의 생성특성

마이크로버블은 수  $\mu\text{m}$  이하부터 100  $\mu\text{m}$  이상까지 다양한 크기의 입경대에서 생성되며, 입경대별로 생성되는 마이크로버블의 입자수 또한 각각 다르다. 이는 운전압력 및 물/공기의 공급조건 등에 의해 영향을 받는다. 압력이 커지면 기포의 크기가 작아지는 경향을 갖지만 일정



한 기압 이상에서는 한계압력이 작용하여 더 이상 기포의 크기가 작아지지 않는다 (Han et al., 2002). Han et al., (2002)은 이 한계압력으로 3.5 kg/cm<sup>2</sup>를 제시한 바 있다. 본 연구에 적용된 DAF 펌프를 대상으로, 반송수와 공기의



**Fig. 7.** Microbubbles' property distribution according to their size (flow rate: 35 L/min, operation pressure: 3.5 kgf/cm<sup>2</sup>)(a) Microbubble number, (b) Volume of microbubble, (c) Specific surface area of microbubble).

유입량을 개별적으로 제어하여 35 L/min의 운전유량 및 3.5 kg/cm<sup>2</sup>의 압력 조건에서 안정적으로 다량의 마이크로버블이 생성됨을 확인하였다. Particle counter를 활용하여, 2~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, 50~70, 70~100 및 100 μm 이상의 입경대에 대해 크기별로 구분하여 입자수를 측정하였으며, 체적 분포 및 표면적 분포를 산정하였다. 입경대별 입자수 분포를 살펴보면 2~10 μm 크기의 기포가 가장 많이 발생하였으며, 입경대가 커질수록 입자수는 감소하는 경향을 나타내었다. 마이크로버블의 체적 분포에서는 30~70 μm 입경대에서 높은 분율을 차지하는 것으로 나타났다. 표면적 분포에서는 20~40 μm 입경대에서 높은 분율을 나타내었다. 20~70 μm의 입경대에서 마이크로버블의 최대 체적 및 표면적의 피크가 형성되는 것으로 나타나 유사한 입경대를 갖는 입자성 오염물질(조류, 현탁성 입자)에 대해 상대적으로 우수한 처리효율을 나타낼 것으로 기대된다.

### 3.1.2 마이크로버블 단위공정의 수질정화 효율

마이크로버블의 수질정화 효과를 분석하기 위하여 오염된 하천수를 원수로 사용하여 연속으로 마이크로버블을 공급하면서 5, 10, 30, 60, 90 및 120분 경과 후 SS, Chl-a 및 COD의 농도 변화를 모니터링한 결과는 Table 1과 같다. SS 및 Chl-a의 경우 원수 농도 40.5, 37.1 mg/L에서 마이크로버블 공급 개시 10분 시점에서 20.5, 22.7 mg/L로 49.4, 38.8%의 제거효율을 나타내었다. 10분 이상 시간이 경과하여도 제거효율은 크게 증가하지 않는 특성을 나타내었다. 유기물 지표인 COD의 경우 원수는 6.7 mg/L, 마이크로버블 공급 60분 경과 시점에서 5.3 mg/L로 최대 20%의 제거효율을 나타내었으며, 10분 이상의 시간이 경과 이후에는 추가적인 제거효율

**Table 1.** Experimental results on water quality improvement by microbubble unit process according to elapsed time

Time (min)	SS (mg/L)	Chl-a (μg/L)	COD (mg/L)
0	40.5	37.1	6.7
5	28.5	26.4	6.2
10	20.5	22.7	6.0
30	20.0	23.8	5.9
60	19.5	25.3	5.3
90	18.0	21.2	5.4
120	21.0	25.9	5.8
Average	24.00	26.06	5.90
Standard deviation	8.02	5.21	0.48

의 증가가 크지 않았다. 이상의 결과를 바탕으로, 마이크로버블 단위공정의 적정한 접촉시간은 10분으로 선정하였다. 향후 제거대상 오염물질의 물리화학적 특성이 마이크로버블 단위공정에서 경시적으로 어떠한 변화를 거치는지, 어떠한 기작에 의해 제거되는지에 대한 보다 상세한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 3.2 식생정화 단위공정의 설계·운전인자

식생의 뿌리 부분을 원수에 직접 접촉시켜 15일 동안 생장시키면서 노랑꽃창포, 부들, 수크령, 질경이택사 및 창포에 대하여 COD, T-N 및 T-P의 제거효율을 검토한 결과는 Table 2와 같다. 15일 이상 경과할 경우, 일부 식생이 활착하지 못하고 괴사하는 현상이 발생하는 점을 고려하여 총 접촉시간을 결정하였다. 실험결과 COD의 제거효율은 부들이 47.1%로 가장 높게 나타났고, T-N의 제거효율은 노랑꽃창포가 63.9%로 가장 높게 나타났으며, T-P는 46.0%로 부들이 가장 높은 것으로 나타났다 (Kim et al., 2015). 위 결과의 해석 시 식재기반 없이 실험이 진행되어 각 식생별로 초기 활착률에 차이가 있을 수 있다는 점에 대한 고려가 필요하다. 또, 여러

문헌에서 부도에 식생을 도입할 때 검토할 사항으로 경관개선능 및 과성장에 따른 유지관리 특성 등을 고려할 필요가 있음을 언급하고 있다 (Lee et al., 2001; Yang, 2006). 본 융복합부도에서는 경관개선 효과가 우수하고, 부도에서 활착 및 성장능이 우수하고, 상대적으로 유지관리가 용이한 것으로 알려져 있는 노랑꽃창포를 1순위 후보 식생으로 선정하였다. 참고로, 위의 실험결과를 바탕으로 노랑꽃창포를 대상으로 한 수질 처리목표를 제시하면, COD 30%, T-N 50% 및 T-P 10% 이상을 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 생물여과 단위공정의 설계·운전인자

#### 3.3.1 여재별 수질정화능 비교

오염된 수체의 수질개선을 위하여 일반적으로 자갈 및 쇄석 등이 접촉여재로 사용되어 왔다. 자갈 및 쇄석은 입자성 물질의 제거효율은 뛰어나지만 유기물 및 영양염류의 제거에는 효율이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 유기물 및 영양염류(P)의 제거까지 가능한 적절한 여재를 선정하기 위하여 제올라이트, 화산석 및 입상 레드머드를 대상으로 COD, T-N 및 T-P의 제거효율을

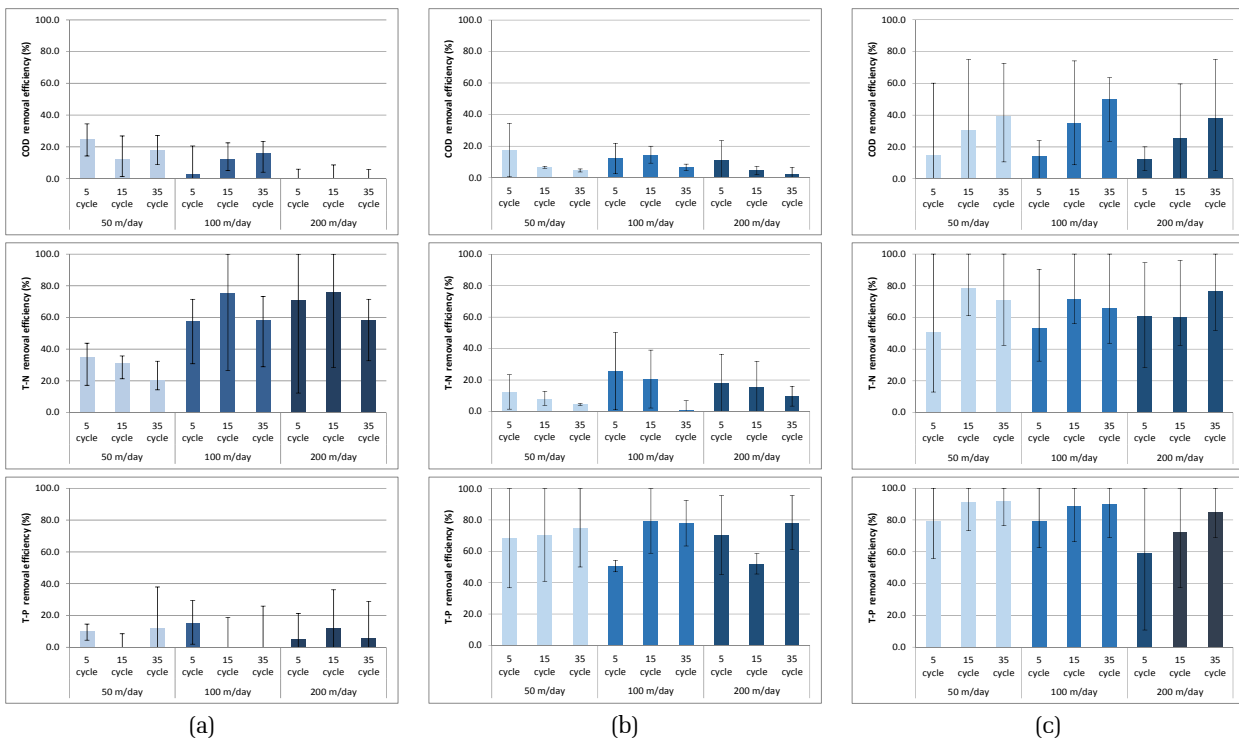
**Table 2.** Experimental results on water quality improvement by vegetation purification unit process according to plant species

Plant species	Item	Initial con. (mg/L)	Final con. (mg/L)	Removal eff. (%)
Yellow iris ( <i>Iris pseudacorus</i> )	COD	7.2	4.4	38.9
	T-N	8.4	3.0	63.9
	T-P	0.43	0.37	15.9
Cattail	COD	6.8	3.6	47.1
	T-N	8.4	4.4	48.2
	T-P	0.80	0.43	46.0
Pearl millet	COD	7.2	5.6	22.2
	T-N	8.4	4.9	41.9
	T-P	0.43	0.39	9.2
Thrumwort	COD	7.2	6.0	16.7
	T-N	8.4	6.1	27.6
	T-P	0.43	0.54	-24.4
Iris	COD	7.2	4.4	38.9
	T-N	8.4	4.3	48.3
	T-P	0.43	0.32	26.5
Average	COD	7.12	4.80	32.76
	T-N	8.40	4.54	45.98
	T-P	0.50	0.41	14.64
Standard deviation	COD	0.18	0.98	12.75
	T-N	0.00	1.12	13.09
	T-P	0.17	0.08	25.88



**Table 3.** Experimental results on water quality improvement by bio-filtration unit process according to linear velocity

Items	Linear velocity (m/day)	Removal efficiency (%)		
		Zeolite	Volcanic stone	Granular red-mud
COD	50	18.3	9.5	28.2
	100	10.4	11.1	33.0
	200	-8.7	5.9	25.2
Average standard deviation	-	6.67	8.83	28.80
	-	13.88	2.66	3.93
T-N	50	28.7	8.4	66.7
	100	63.9	15.8	63.6
	200	68.5	14.4	66.0
Average standard deviation	-	53.70	12.87	65.43
	-	21.77	3.93	1.63
T-P	50	4.1	71.3	87.5
	100	1.6	69.3	85.7
	200	7.5	66.9	72.0
Average standard deviation	-	4.40	69.17	81.73
	-	2.96	2.20	8.48



**Fig. 8.** COD, T-N, T-P removal efficiency according to media ((a) Zeolite, (b) Volcanic stone, (c) Granular red-mud).

비교하는 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 원수(오염된 하천수)의 수질은 실험조건에 따라 상이하였으며, 평균 COD 15.5, T-N 13.7 및 T-P 1.2 mg/L에 상당하였다.

LV에 따른 각 오염물질의 제거효율을 검토한 결과는

Table 3 및 Fig 8에 도시한 바와 같다. COD 실험결과에서, 각 여재의 제거효율은 제올라이트가 6.7%, 화산석은 8.8% 및 입상 레드머드가 28.8%로 나타나 입상 레드머드의 제거효율이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 입상

레드머드의 경우에는 LV에 따른 제거효율의 변동이 크지 않고 안정적인 것으로 나타났다. T-N의 경우, 각 여재의 제거효율은 제올라이트가 53.7%, 화산석이 12.9% 및 입상 레드머드가 65.4%로 나타나 입상 레드머드의 제거효율이 가장 우수한 것으로 나타났다. T-N에 대해서도 입상 레드머드는 안정적인 제거효율을 나타내었다. T-P의 경우, 각 여재의 제거효율은 제올라이트가 4.4%, 화산석이 69.2% 및 입상 레드머드가 81.7%로, 입상 레드머드가 타 여재에 비해 우수한 제거효율을 나타내었다.

각 여재를 종합적으로 비교하면, 제올라이트는 T-P 및 COD의 제거효율이 낮고, 화산석은 COD 및 T-N의 제거효율이 낮은 것으로 나타났다. 한편, 입상 레드머드는 COD 28.8%, T-N 65.4% 및 T-P 81.7% 등 여러 수질항목에 대해 우수하고 안정적인 제거효율을 나타내었으며, 특히 LV에 따른 변동도 크지 않아 용복합부도의 수질정화용 여재로 적합한 것으로 판단하였다. 한편, LV를 과도하게 높은 상태로 장기간 연속운전할 경우 여재의 폐색이 조기에 발생하는 등 유지관리 상의 문제가 있어 현장적용 설계 값으로는 LV 50 m/day를 제안하였다.

### 3.3.2 적정 여층두께 선정

여재별 수질정화능 비교실험에서 용복합부도의 여재로 적절한 것으로 판단된 입상 레드머드를 대상으로 적정 여층두께를 알아보기 위한 실험을 진행한 결과는 Fig. 9와 같다. 운전은 연속흐름 하향류 방식을 선택하였다. LV 50 m/day에서 여층두께별 통수실험을 통하여 SS, COD, T-N 및 T-P의 제거효율을 관찰하였다. 실험에 사용한 원수로는 하수처리수를 사용하였다. 실험에는 15.7 L 용량의 아크릴 원통 칼럼을 사용하였다.

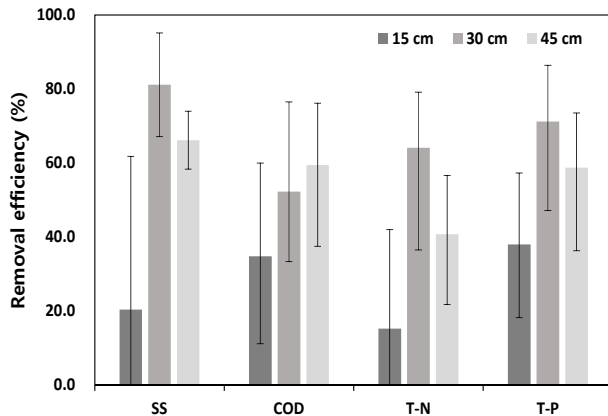


Fig. 9. Pollutant removal efficiency according to filter depth.

여층두께에 따른 오염물질별 제거효율을 살펴보면, SS, T-N, T-P의 경우 여층두께 30 cm에서 제거효율이 높게 나타났으며, COD는 여층두께 45 cm에서 제거효율이 우수한 것으로 나타났다. 현장적용 설계 값으로 처리효율, 일처리 용량 및 용복합부도의 자중을 고려할 때 30~45 cm의 여층두께가 적정할 것으로 판단된다.

### 3.3.3 입상 레드머드의 흡착능 검토

입상 레드머드의 흡착능 및 적정 pH 조건을 실험한 결과는 아래의 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. Langmuir 등은 흡착식을 적용하여 해석한 결과, 최대흡착용량은 59.5 mg/g에 상당하였다. pH에 따른 제거효율을 분석한 결과, pH 4~10의 범위에서 처리효율이 양호한 것으로 나타났으며, pH 4~5의 범위에서는 70% 이상, pH 7~10의 범위에서 40~60%의 T-P 제거효율을 보였다. 이상의 결과로부터 이 소재가 pH 10 이하의 조건에서 인(P)에 대한 높은 흡착능을 보유하고 있음이 실험적으로 확인되었다.

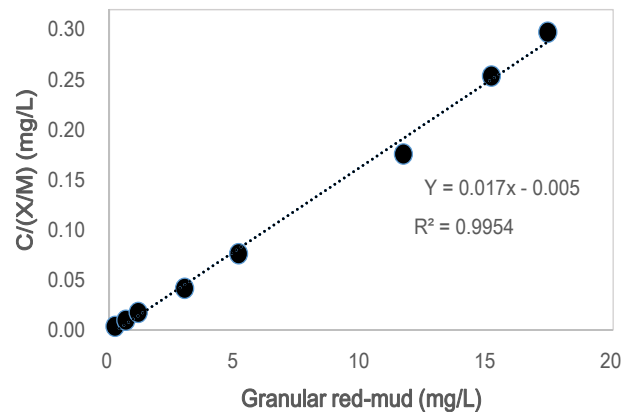


Fig. 10. Adsorbed T-P according to input of granular red-mud.

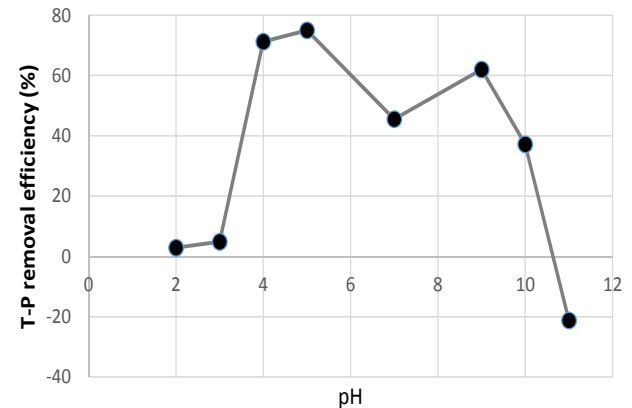


Fig. 11. Removal efficiency of T-P according to pH.





**Table 4.** Qualitative analysis results of granular red-mud components

								(Unit : %)
Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Trace elements
1.1	19.9	26.3	14.7	1.2	13.1	3.0	18.5	MgO, SO <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>

참고로 입상 레드머드의 XRF(X-ray fluorescence)(장비명: WD-XRF, 제조사: RIGAKU, 모델명: ZSX 100e)에 의한 정성분석 결과(분석방법: FP method)는 위의 Table 4와 같다. 이 성분분석 결과로부터 입상 레드머드는 응집/침전, 흡착 및 결정화 등 복합적 작용을 통해 T-P를 제거하고 있을 것으로 판단된다. 레드머드는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 및 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등 금속산화물의 구성비가 높아서 응집/침전의 기작을 보조할 수 있고, quartz(SiO<sub>2</sub>) 및 hematite(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 등 수용액 상의 일정한 pH에서 서로 다른 형태의 전하를 갖는 다양한 mineral을 함유하고 있기 때문에 효과적인 흡착 성능을 보유하고 있다. 또한, CaO 성분도 다량 함유하고 있는데, 이는 용해되면서 Ca<sup>2+</sup> 및 OH<sup>-</sup> 이온을 공급하는 역할을 하고 인산이온과 결합하여 결정재의 표면에 하이드록시아파타이트(hydroxyapatite, HAP)의 형태로 석출되는 결정화 기작을 제공할 수 있다 (Kang et al., 2015; Li et al., 2006; Yim et al., 2011; Yue et al., 2010).

### 3.4 다기능 융복합부도의 설계·운전인자

이상의 단위공정에 대한 검토결과를 바탕으로 ① 마

이크로버블에 의한 부상 및 산화, ② 식생정화 및 ③ 흡착기능을 강화한 생물여과 등 물리적·화학적·생물학적 기능을 결합한 다기능 융복합부도의 적정 설계·운전 인자를 제시하면 Table 5와 같다.

마이크로버블 단위공정에서는 현장적용성을 고려하여 DAF 펌프형 마이크로버블 발생장치를 제안하였으며, 운전압력과 유량은 기초실험을 통하여 결정하였다. 마이크로버블 공급 깊이는 별도의 실험과 여러 수질 항목에 대한 제거효율이 수심 1.3 m의 조건에서 최대에 달하였다는 Chen et al., (2014)의 연구를 바탕으로 융복합부도 직하부의 1.0~1.5 m 지점으로 제안하였다.

식생정화 단위공정에서는 식생종으로 노랑꽃창포를 선정하였으며, 식생기반재로서 경량인공토를 최상층에 10 cm의 깊이로 포설하고 코코넛 섬유를 이용한 코이어롤(coir-roll)로 추가 피복하여 식생종의 활착을 유도하고 식생기반재 및 여재의 유실을 방지하도록 제안하였다.

생물여과 단위공정에서는 기초실험을 통하여 여재는 입상 레드머드로, 여과 방향은 하향류로, 여재 충전고는 30~45 cm로, 여재의 입경은 3~5 mm로, LV는 50 m/day를 제안하였다. 이러한 조건을 만족하기 위하여 마이크로버블

**Table 5.** Optimal design and operating parameters for multi- functional floating island

Unit process	Design and operating parameters	Suggested type and value
Microbubble	Generator type	DAF pump
	Operating flow rate	35 L/min or more
	Operating pressure	3.5 kgf/cm <sup>2</sup> or more
	Supply depth	1.0 - 1.5 m
Vegetation purification	Species	Yellow iris ( <i>Iris pseudacorus</i> )
	Based material	Light artificial soil
	Cloth material	Coconut fiber coir-roll
Bio-filtration	Media	Granular red-mud
	Filtration direction	Down stream
	Depth	30 - 45 cm
	Average size	3 - 5 mm
	Linear velocity	50 m/day
	Feed	Submersible pumps and water spraying fountains
Total frame	Unit scale	2.7 x 2.7 m
	Frame material	SUS
	Buoyancy material	PE pipe

공정을 거친 미처리수는 수중펌프와 분수에 의해 살수되어 식생정화 및 생물여과 단위공정을 경유하도록 구성하였다. 여재의 입경을 3~5 mm로 충분히 크게 구성하고, 강우 발생 직후의 매우 심한 고탁수 조건에서는 운전하지 않으며, 일 24시간 중 8시간 전후의 운전시간을 유지하였다. 이러한 조건에서 여재 사이에 포집된 입상형 오염물질 및 흡착된 영양물질이 분해·제거되고 식생에 의해 흡수되고 시간 경과에 따라 박라·유출되는 과정을 반복하며 스스로 유지·재생됨으로써, 여층이 조기에 폐색되지 않고 자체의 생물정화(bioremediation) 기능을 장기간 보유하도록 하였다.

위의 단위공정에 대한 검토과정을 바탕으로, 단위 융복합부도의 크기는 이동성 및 현장설치의 용이성을 고려하여 가로, 세로 최대 각 2.7 m로 하였으며, 모듈형으로 제작하여 추가 확장이 가능하도록 하였다. 프레임 및 부력체는 구조적 안정성, 내부식성 및 미관을 고려하여 각각 SUS와 PE 파이프를 제안하였다.

### 3.5 다기능 융복합부도 테스트베드의 장기·연속운전 결과

본 논문에서 상세히 다루지는 않았으나, 경기도 K시의 우수배제 기능을 주로 갖고 있는 정체하천인 H천에 다기능 융복합부도의 테스트베드를 구축하여 2015년 6월부터 2018년 현재까지 3년간 운전한 결과를 요약하면 다음과 같다(n = 52, 동절기(n = 23), 하절기(n = 29)).

테스트베드에 적용된 다기능 융복합부도는 가능한 적은 공간(시설면적: 30 m<sup>2</sup>)에 인공적인 물순환 기능을 부가하여 큰 오염부하 저감효과(일 처리용량: 최대 800 m<sup>3</sup>/d)를 갖도록 하였다. 또한, ① 마이크로버블, ② 식생정화 및 ③ 생물여과 등 물리적·화학적·생물학적 요소기술의 융복합을 통해 고효율의 안정적 수질정화능을 확보한 것으로 나타났다. 계절별 및 원수성상에 따른 제거효율의 변동을 완화하고, 다양한 오염물질에 대한 수질정화능을 동시에 확보하는 특성을 나타내었다. 평균적으로 조류(Chl-a: 60%), 인(T-P: 34%), 유기물(COD: 36%) 및 부유물질(SS: 67%)의 제거효율이 관찰되었다. 고농도의 오염물질 유입 시 및 하절기에 상대적으로 높은 제거효율이 관찰되었다.

## 4. 결 론

마이크로버블에 의한 부상 및 산화, 식생정화 및 흡착

기능을 강화한 생물여과 등 물리적·화학적·생물학적 기능을 결합한 수질개선을 위한 다기능 융복합부도를 제안하였다. 다기능 융복합부도의 설계·운전인자를 도출하기 위하여, 마이크로버블 기초실험, 식생별 수질정화능 검토, 적정여재 선정 비교실험, 여과선속도(LV) 및 여층두께에 따른 수질정화능 비교실험 등을 진행하였으며, 이 결과를 바탕으로 각 단위공정의 설계·운전인자를 제시하였다. 본 연구의 주요한 제안 내용은 다음과 같다.

1) 마이크로버블 단위공정에서는 DAF 펌프형 마이크로버블 발생장치와 기초실험을 통해 결정된 적정 유량 및 운전압력을 제안하였다.

2) 식생정화 단위공정에서는 식생종으로 노랑꽃창포를 선정하고, 식생기반재로서 경량인공토를 포설하고, 추가로 상부에 코이어롤(coir-roll)을 피복하도록 제안하였다.

3) 생물여과 단위공정에서는 여재는 입상 레드머드르, 여과 방향은 하향류로, 여재 충전고는 30~45 cm로, 여재의 입경은 3~5 mm로, LV는 50 m/day로 제안하였다.

4) 위의 단위공정에 대한 검토과정을 바탕으로, 단위 융복합부도의 크기는 가로, 세로 최대 각 2.7 m로 하였으며, 모듈형으로 제작하여 추가 확장이 가능하도록 제안하였다.

5) 본 연구에서 제시한 각 인자들은 실내 기초실험을 기반으로 하여 도출된 결과로서, 향후 융복합부도를 현장에 설치하고 장기간의 운영을 통해 검증함으로써 현장여건에 맞는 설계인자 및 운영인자로서 보완되어야 할 것으로 판단된다.

## 사 사

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

## References

- Agarwal, A., Ng, W.J. and Liu, Y. (2011). Principle and applications of microbubbles and nanobubble technology for water treatment, *Chemosphere*, 84, 1175-1180.
- Byeon, H.K. (2014). Fish and efficiency on attached fish eggs



- of artificial floating island in lake Soyang, Korean J. Environ. Ecol., 28, 559-565.
- Cha, H.S. (2009). Present state and future prospect for microbubble technology, *Bullet. Food Technol.*, 22, 544-552.
- Chen, S., Xu, J., Liu, J., Wei, Q., Li, G. and Huang, X. (2014). Algae separation from urban landscapewater using a high density microbubble layer enhanced by micro-flocculation, *Water Sci. Technol.*, 70, 811-818.
- Cho, D.H., Kim, D.E., Park, J.W., Sung, G.C. and Kwon, Y.S. (2010). "A study on the behavior micro-nano bubble for concentration oxygen stabilization techniques", *Proceedings of The Korea Inst. Electrical Eng Summer Conference*, 14-16 July, 2010, Busan, Korea, The Korean Institute of Electrical Engineers.
- Han, M.Y., Park, Y.H., Lee, J. and Shim J.S. (2002). The size characteristics of microbubbles in DAF according to pressure conditions, *J. Korean Soc. Water Wastewater*, 16(2), 177-182.
- Jin, M.Y., Chang, K.H., Kim, T.H. and Oh, J.M. (2018). Comparative study on biological technology in artificial floating island: application of media and *Daphnia* to algal biomass control, *JEIA.*, 27, 836-91.
- Jo, E.H., Sung, H.K., Kim, E.J., Yoo, S.K., Lee, J.E., Kim, K.T., Shin, Y.J., Kim, J.E., Park, S.Y. and Eom, I.C. (2018). Zinc oxide nanomaterial toxicity effects on growth and accumulation of the *lemna perpusilla* Torr. and *vallisneria natans* (Lour.) H. Hara, *J. Korea Soc. Environ. Anal.*, 20, 193-199.
- Kang, K., Nyakunga, E., Kim, Y.K. and Park, S.J. (2015). Influence of acid and heat treatment on the removal of fluoride by red mud, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 37, 210-217.
- Kim, B.J., Park, J.R., Choi, I.S. and Oh, J.M. (2015). Evaluation of water purification efficiency using vegetation, *KSWST J. Water Treat.*, 23(2), 49-55.
- Kwon, A.R. and Park, C.H. (2003). A study on water quality remediation using aquatic plants, *Environ. Eng. Res.*, 25, 415-420.
- Lee, H.H.M., Kwon, O.B., Seog, J.H. and Jo, G.H. (2001). Selection of suitable plants for artificial floating islands - comparisons of vegetation structure and growth of four emergent macrophytes, *J. Korea Soc. Environ. Restor. Technol.*, 4, 57-66.
- Lee, J.S. and Kim, K.N. (2005). A study on the water quality purification effect of aquatic plants in field work, *J. Environ. Sci. Int.*, 14, 937-944.
- 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 J. Environ. Agric.*, 18, 77-82.
- Li, Y., Liu, C., Luan, Z., Peng, X., Zhu, C., Chen, Z., Zhang, Z., Fan, J. and Jia, Z. (2006). Phosphate removal from aqueous solutions using raw and activated red mud and fly ash, *J. Hazard. Mater.*, 137, 374-383.
- Lim, H.M. and Park, J.R. (2016). Development of natural purification technology considering cycle of material in river reaches, *Ecol. Resil. Infrastruct.*, 3, 213-214.
- Matsumoto, M. and Tanaka, K. (2008). Nano bubble-size dependence of surface tension and inside pressure, *Fluid Dyn. Res.*, 40, 546-553.
- Oh, K.H., Jeong, D.H., Yang, S.Y., Jeon, T.W. and Cho, Y.C. (2013). Effects of submerged aerator on the growth of algae in Daechung reservoir, *J. Korean. Soc. Environ. Eng.*, 35(4), 268-275.
- Park, C.H., Park, M.H., Choi, D.H., Choi, H.J., Lee, J.H., Lee, M.H. and Hwang, S.J. (2013). The effect of floating wetland on water quality improvement in a eutrophic lake, *Korean J. Ecol. Environ.*, 46, 116-127.
- Park, J.S. (2002). Sewage treatment using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and watercress (*Oenanthe javanica*), *Korean J. Environ. Agric.*, 21, 144-148.
- Park, S.K., Cho, I.K., Kwon, O.B., Mun, J.S., Um, H.Y. and Hwang, S.J. (2008). Algae and nutrient removal by vegetated artificial floating island, *Korean J. Limnol.*, 41, 93-98.
- Ra, K.H., Kwon, S.H. and Lee, J.H. (1996). Aquatic plants for wastewater treatment, *Korean J. Environ. Health Soc.*, 22, 49-55.
- Reddy, K.R. (1983). Fate of nitrogen and phosphorus in a wastewater retention reservoir containing aquatic macrophytes, *J. Environ. Qual.*, 12, 137-141.
- Takahashi, M., Chiba, K. and Li, P. (2007). Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus, *J. Phys. Chem. B.*, 111, 1343-1347.
- Yang, H.M. (2006). Changes in pollutant concentrations by artificial floating island installed in reservoir for irrigation, *J. Korea Soc. Environ. Restor. Technol.*, 9, 23-32.
- Yim, S.B., Kim, J.G. and Song, H.C. (2011). Removal characteristics of Cd and Pb by adsorption on red mud, *J. Korea Geo-Environ. Soc.*, 12(7), 39-47.
- Yue, Q., Zhao, Y., Li, Q., Li, W., Gao, B., Han, S., Qi, Y. and Yu, H. (2010). Research on the characteristics of red mud granular adsorbents(RMGA) for phosphate removal, *J. Hazard. Mater.*, 176, 741-748.

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581