

Research Paper

## 바이오스톤 볼 수처리 시스템에 의한 오염물질 저감 및 저수지의 수질개선효과 산정

최선화\* · 김흥섭\*\* · 정세웅\*\*\*

한국농어촌공사 농어촌연구원\*, 수생태복원(주)\*\*, 충북대학교\*\*\*

### Estimation of Water Quality Improvement and Reduction of Influent Pollution by Installation of Water Treatment System Filled with Bio-stone Ball

Sunhwa Choi\* · Heungseop Kim\*\* · Sewoong Chung\*\*\*

Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation\*

Re-Eco Company, Limited\*\*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University\*\*\*

**요약:** 본 연구에서는 유기성 오염도가 높은 국내 하천 및 호소의 수질정화를 위해 바이오스톤 볼 담체를 이용한 수처리 기술을 개발하였다. 바이오스톤 볼 수처리기술의 오염물질 제거효율 및 저수지 수질개선효과 등을 평가하기 위하여 경기도 시흥시에 위치한 매화저수지에 실증플랜트를 설치하였다. 바이오스톤 볼 수처리시스템의 오염물질 제거효율은 BOD 70.3%(47.2~97.4%), COD 45.3%(26.1~64.7%), TOC 19.2%(8.5~50.0%), SS 82.8%(73.1~92.7%), Chl-a 80.4%(57.2~91.8%), TN 23.2%(6.4~39.5%), TP 51.8%(-1.1~80.1%)로 나타나 BOD, SS, Chl-a에서 평균 70~80% 이상의 매우 높은 정화효율을 나타내었다. 바이오스톤 볼 수처리시스템을 저수지 평시 유입량 설계기준으로 설치하였을 경우의 유입 오염물질 저감량 및 저수지 수질개선효과를 산정하였다. 저감되는 COD 부하량은 13,658 kg으로 연간 39.2%가 저감되고, TP 부하량은 297 kg으로 연간 16.8%가 저감되는 것으로 나타났다. 저수지의 연간 수질개선효과는 TOC 5.3 → 4.5 mg/L(14.5%), COD 7.9 → 6.8 mg/L(14.5%), Chl-a 42.3 → 37.0 mg/m<sup>3</sup>(12.5%), T-P 0.201 → 0.150 mg/L(25.1%)가 평균적으로 개선되는 것으로 나타났다. 바이오스톤 볼 수처리시스템은 유기성 오염도가 높은 국내 하천 및 호소의 유입수 오염물질 제거 및 수질정화를 위한 수처리 시설로서 현장적용성이 높을 것으로 판단된다.

**주요어:** 바이오스톤 볼, 유기성 오염물질, 수질오염, 수질개선시스템

**Abstract:** Water treatment system filled with Bio-stone Ball (BSB) have been developed for the purification of polluted water in many rivers and lakes. The real-scale plants of BSB water treatment system was constructed for field application test and water purification evaluation in Maewha

First & Corresponding Author: Sunhwa Choi, Tel: +82-31-400-1832, E-mail: csh@ekr.or.kr, ORCID: 0000-0002-2516-5720

Co-Authors: Heungseop Kim, Tel: +82-31-477-7003, E-mail: seakims@daum.net, ORCID: 0000-0002-7954-9720

Sewoong Chung, Tel: +82-43-261-3370, E-mail: chung@cbnu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-8596-4970

Received: 16 August, 2019. Revised: 6 September, 2019. Accepted: 24 September, 2019.

reservoir. The average water purification efficiencies of BSB water treatment system shows BOD 70.3% (47.2~97.4%), COD 45.3% (26.1~64.7%), TOC 19.2% (8.5~50.0%), SS 82.8% (73.1~92.7%), Chl-a 80.4% (57.2~91.8%), TN 23.2% (6.4~39.5%), and TP 51.8% (-1.1~80.1%). BSB water treatment system shows very high at 70~80% in the water purification efficiencies of BOD, Chl-a, and SS. The average of pollution loading reduction by installation of BSB treatment system shows 39.2% for COD and 16.8% for TP. The water quality improvement rates (%) of the Maewha reservoir shows TOC 14.5%, COD 14.5%, Chl-a 12.5% and TP 25.1%. The BSB water treatment system can be applied to many agricultural reservoirs and major rivers to deal with serious water pollution issues.

Keywords : Bio-stone ball (BSB), Organic pollutants, Water quality, Water treatment system

## I. 서론

최근 이상기후 및 오염원 증가 등으로 전국 호소 및 4대 강 등 크고 작은 하천들의 수질오염도는 날로 증가 추이에 있다. 특히, 외기 기온이 올라가는 하절기에는 부영양화 및 수질오염의 심화로 녹조 대량발생, 어류 집단 폐사, 심한 악취 등이 발생하고 있다. 농업용수 공급목적으로 설치되어 있는 농업용 호소도 유역에서 유출되는 비점오염물질의 지속적 유입과 장기간동안 축적된 퇴적오염물질의 내부 생산에 의해 수질오염도가 날로 증가하고 있다(Jang 2010; MAFRA & KRC 2014; Choi & Park 2016; Park et al. 2017). 농업용 저수지의 수질개선을 위해서 정부에서도 2007년부터 호소 유입부에 인공습지, 침강지 등의 시설을 설치하여 운영하고 있다(Jang 2010; Kim & Kim 2014). 인공습지는 자연친화적인 시설로 유지관리가 용이하고 동력소모가 없는 반면에 대규모 부지가 필요하고, N, P 등 영양염류에 대한 처리효율이 높은 반면에 식생 고사시기에 유기물 효율이 저하되는 단점도 가지고 있다. 또한 가뭄 등 유입수량 변동에 취약하고, 정기적인 식생관리도 요구되고 있다(MAFRA & KRC 2014). Choi et al.(2014)에 의하면 국내에는 댐과 저수지 수질개선을 목적으로 약 90여개가 넘는 인공습지가 조성되어 운영되고 있으나 습지에 대한 관리소홀, 운영경험 미숙과 부재 등으로 효율적인 운영이 되고 있지 않다고 보고되고 있다. 또한, Park et al.(2012) 보고에 의하면 상수원 댐 상류유역의 수질정화용 인공습지의 수처리 효율이 낮고, 일부 수질항목의 처리효율은 운영

기간이 지속되면서 저하되는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 현재 수질정화용으로 널리 활용되고 있는 인공습지의 단점을 보완할 수 있는 바이오스톤 볼(Bio-stone Ball, BSB)이라는 미생물 부착 담체를 활용한 수처리공법을 개발하였다. BSB는 친자연적인 재료 활용으로 기존 여재(담체)의 폐색으로 인한 수처리 효율 저하와 슬러지 발생 등의 문제점을 획기적으로 개선하여 수질정화시설 등에 폭 넓게 이용할 수 있도록 개발되었다(MAFRA & KRC 2016). BSB는 2~3 cm의 자연 쇄석을 예폭시 수지로 접합하여 만든 직경 10 cm의 구상체에 수처리 유용 복합 미생물을 코팅하여 만든 수처리용 담체로서 1개의 중량은 0.7 kg/ea, 압축강도는 평균 4.3 MPa에 해당된다. BSB의 공극률은 63~74%로 일반 쇄석 공극률인 30~50%에 비교해 최대 2.5배의 공극률을 높여 폐색 정도를 최대 81.4%까지 저감시켰다. BSB 담체를 충전한 접촉산화공법은 생물막 여과공법의 일종으로서 오염물질의 흡착, 여과 등의 물리적 공정과 불에 부착된 미생물에 의한 산화, 분해 등 생물학적 공정을 융복합한 기술로서, 유지관리가 용이하면서 반영구적으로 사용할 수 있는 환경 친화적인 수처리 기술이라고 할 수 있겠다(MAFRA & KRC 2017).

생물막 여과공법(Biological Aerated Filter, BAF)은 1980년대 유럽에서 개발된 새로운 형태의 수처리 공법으로 생물막 기능과 여과 기능을 결합시켜 하나의 반응기에서 모든 오염물질을 처리하는 컴팩트(compact)한 시설로서, 환경 선진국에서는 1990년대 후반부터 현장적용이 확산되고 있는 기술이다. 국내에서도 외국기술 도입과 자체 기술 개발로 2000년

대 초반부터 하수 및 오폐수 처리장 중심으로 적용되고 있으며, 최근에는 정부의 지역단위 소규모 하수처리장의 확대 정책과 함께 다양한 생물막 여과공법이 개발되어 보급되고 있다. 생물막 여과공법의 확대 보급과 함께 좀 더 효율적이고 빠른 시간 내에 오염물질을 처리할 수 있는 여재(담체) 및 장치를 개발하기 위하여 많은 연구자들이 노력하고 있다(Rim 1996a; Yeom 2001). 그동안 국내에서 개발된 수처리용 담체로는 주로 초기에는 자연석을 이용하기도 하였으나 점차로 미생물의 부착 능력을 높이기 위해서 인위적인 기공을 형성한 다공성 세라믹이나 섬유상 담체로 개발되어 오염하천 정화사업 등에 널리 이용되어 왔다. 이러한 담체를 이용한 생물막 처리공정은 반응기 내에 다양한 미생물이 증식할 수 있을 뿐만 아니라 슬러지의 연령이 길고 슬러지의 자기산화가 촉진되기 때문에 폐슬러지의 발생량이 적은 장점을 가지고 있다. 또한, 다양한 미생물종이 군집을 형성함으로써 온도나 pH 변동, 충격 부하 및 난분해성 물질 유입에 따른 대처능력이 뛰어나고 슬러지 부상 등과 같은 문제점을 줄일 수 있다고 알려져 있다(Bitton 1994; Rim 1996b).

BSB을 이용한 수처리시스템은 1개의 반응조에 BSB를 병렬로 충전 후 유리 작용에 의한 고액분리와 호기부, 천이부, 혐기부 등 다양한 환경조건을 반복하여 호기성, 임의성, 혐기성 미생물 군집의 서식이 가능하게 하여 유기물, 인, 질소 등의 오염물질을 물리적, 생물학적으로 제거하는 기술이다. 본 수처리 기술은 소요부지 및 사업비가 타 공법대비 낮은 수준

이며, SS, BOD, Chl-a 정화율이 70~90%로 매우 높은 처리효율을 보이고 있다. 또한, 자연석을 이용한 여재로 거의 반영구적 사용이 가능하고, 폐색의 발생도가 매우 낮아 역세설비가 필요치 않으며, Nano 수준의 미세기포나 순산소를 활용하여 기존 시설대비 포기 효율 증가 등으로 운영 경비를 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 바이오스톤 볼(BSB) 수처리시스템의 현장 적용성을 평가하기 위하여 경기 시흥에 위치하고 있는 매화저수지에 실증플랜트를 설치하여 오염물질 제거효율을 평가하였다. 또한, 바이오스톤 볼(BSB) 수처리 시스템을 매화저수지 평시 유입량에 비례한 실규모 설치를 가정하여 호 내로 유입되는 오염물질의 저감량 및 저수지 수질개선효과 등을 산정하였다.

## II. 연구재료 및 방법

### 1. 바이오스톤 볼 제작

바이오스톤 볼(BSB)은 Figure 1(a)와 같이 크기 2~3 cm에 해당하는 일반 자갈을 예폭시계 수지로 접합하여 직경 10 cm 크기의 구형으로 성형한 뒤 수처리에 용이한 복합유용미생물(*Rhodospseudomonas sphaeroides*, *Lactobacillus plantarum*, *Bacillus subtilis* MB-51-1, *Bacillus subtilis* MB-15-2, *Rhodospseudomas*, *Paracoccus denitrificans* 등)과 천연셀룰로오스, 백토, 물로 구성된 Figure 1(b)와 같은 겔 형태의 미생물 코팅재로 합침 및 건조시켜 Figure 1(c)처럼 제작한 수처리용 여재이다. BSB



(a) General gravel



(b) Coating solvent



(c) Bio-stone ball coated with microorganisms

Figure 1. Manufacturing process of the Bio-stone Ball (BSB)

의 직경은 표면적과 공극률의 관계를 산출하여 가장 이상적인 크기인 10 cm로 제작하였고, 1개의 중량은 0.7 kg, 압축강도는 평균 4.3 MPa에 해당된다 (MAFRA & KRC 2017).

## 2. 현장적용 플랜트 설치 및 운영

BSB로 구성된 수처리시스템의 오염물질 제거효율을 평가하기 위하여 현장적용 실증플랜트를 제작하여 경기 시흥시 도창동 매화저수지 수변에 설치하였다. 매화저수지는 1941년도에 설치되어 약 70년 이상된 농업용 호소로서, 유역면적 260 ha, 만수면적 15.5 ha이고, 유효저수량은 227 천m<sup>3</sup>, 평균 수심은 2~3m에 해당하는 저류지형 저수지이다(Table 1). 매화저수지는 하류지역 농경지에 농업용수를 공급하고 있으며, 현재 유료 낚시터로 활용되고 있다. BSB 수처리시스템의 처리 공정은 Figure 2와 같이 유입수 → 유량조정조 → 바이오스톤 볼 반응조 → 방류로 구성되어 있고, 전체 시설 규격은 500mm(W)×5,900mm(L)×1,100mm(H)으로 STS 304을 사용하여 프레임을 제작하였다. 바이오스톤 볼 반응조에는 BSB 약 2,500개를 병렬구조로 충전하였다. 플랜트의 설계는 유입 유량 45 m<sup>3</sup>/day, 체류시간 1.5 hr, 유하거리 5.0m, 수심 1.0m로 하였고, 시설은 2016년

10월부터 2017년 11월까지 약 1년간 운영하였다.

BSB 수처리시스템의 수질정화효율을 평가하기 위해 수처리 장치의 유입부와 유출부에서 총 7회에 걸쳐 물 시료를 채취하였으며, 채취한 시료는 즉시 냉장 보관하여 실험실로 운반 후 실내분석을 실시하였다. 분석항목은 BOD, CODCr, TOC, SS, TN, TP, Chl-a이며, 분석방법은 수질오염공정시험기준(환경부, 2016)에 준하였다.

## 3. 매화저수지 물질수지 분석

BSB 수처리시스템은 매화저수지 유입수의 오염물질 저감을 통해 저수지 수질개선을 목적으로 설치하였다. 본 연구에서는 BSB 수처리시스템을 매화저수지 실제 유입 수량에 맞게 실험규모로 설치했을 경우를 가정하여 오염물질 저감량 및 호소 수질개선효과를 평가하였다. BSB 수처리시스템의 운영에 따른 유입 오염물질의 저감량 산출 및 저수지 수질개선효과 등을 정량적으로 산정하기 위해서는 매화저수지의 유입량 및 유출량에 대한 정확한 물수지 분석이 필요하다.

매화저수지의 물수지 분석은 수문학 분야에서 널리 활용되고 있는 강우-유출 해석 모형인 HEC-HMS (HEC-Hydrologic Modeling System)를 활용

Table 1. Characteristics of the study site, Maehwa reservoir

Drainage area (ha)	Total storage (103m <sup>3</sup> )	Effective storage (103m <sup>3</sup> )	Maximum water surface area (ha)	Area irrigated (ha)	Range of water depth (m)	Construction year
260	248.0	227.0	15.5	52.4	2~3	1941

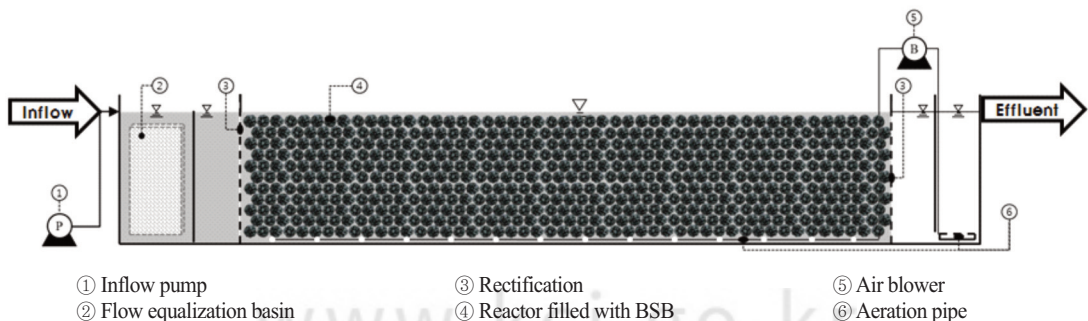


Figure 2. Overview of the test-bed facility for field experiment

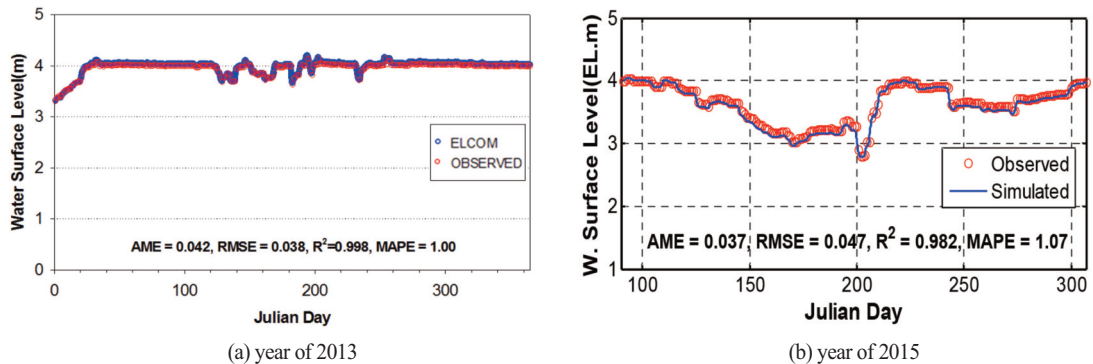


Figure 3. Comparison of the actual water surface level and simulated water surface level in Maehwa reservoir.

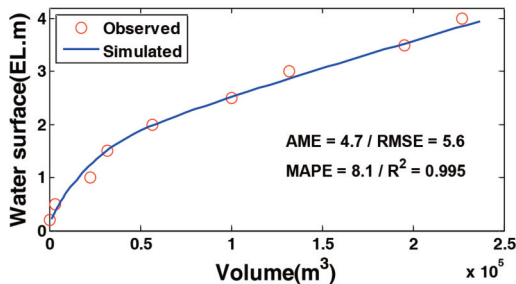


Figure 4. Relationship between water surface level and water volume in Maehwa reservoir.

하였다(Joo et al. 2005; William & Jang 2009; USACE 2015). 매화저수지 유역면적과 인천 기상대의 시흥시 강우자료 10개년(2006~2015년)을 기반으로 하여 저수지 유입량을 산정하였고, 유입량 자료와 일별 저수지의 저수용량 자료를 기반으로 하여 유출량을 산정하였다. 2013년과 2015도년의 수문사상을 대상으로 하여 매화저수지의 물수지를 재현하였으며, 그 결과는 Figure 3과 Figure 4에 나타내었다. Figure 3에서는 2013년(a)과 2015년(b)의 실측 수위와 모의한 수위값에 대한 민감도 분석결과로서, 2013년에 대해서는 절대평균오차(AME, Absolute mean error) 0.042, 평균제곱근오차(RMSE, Root mean square error) 0.038, 평균절대비율오차(MAPE, Mean absolute percentage error) 1%, 결정계수( $R^2$ , R-squared) 0.998로 나타났고, 2015년에 대해서는 AME 0.037, RMSE 0.047, MAPE 1.07%,  $R^2$  0.983으로 나타나 높은 재현성을 구현하였다. Figure 4는 매화저수지의 실측 및 모의한 수위 값에

대한 저수지의 저수용량에 대한 모의 결과로서, 예측한 값의 정확성에 대한 민감도 분석결과 AME 4.7, RMSE 5.6, MAPE 8.1,  $R^2$  0.995로 99.5%에 해당하는 높은 재현성을 나타내었다.

### III. 연구결과 및 고찰

#### 1. BSB 수처리시스템의 수질정화효율

BSB 수처리시스템의 오염물질 제거효율을 평가하기 위해 사용된 유입수와 유출수의 수질항목별 수질농도 및 오염물질 제거효율은 Table 2와 같다. 유입수의 평균적인 수질농도는 BOD  $10.1 \pm 1.8$ mg/L, COD  $21.1 \pm 10.2$  mg/L, SS  $42.7 \pm 33.6$ mg/L, Chl-a  $173.8 \pm 132.8$ mg/m<sup>3</sup>로 수질등급 VI등급(매우 나쁨) 이상에 해당하는 수질을 나타내었다. BSB 수처리시스템의 수질정화효율은 BOD 70.3%(47.2~97.4%), COD 45.3%(26.1~64.7%), TOC 19.2%(8.5~50.0%), SS 82.8%(73.1~92.7%), Chl-a 80.4%(57.2~91.8%), TN 23.2%(6.4~39.5%), TP 51.8%(-1.1~80.1%)로 BOD, SS, Chl-a에서 평균 70~80% 이상의 높은 정화효율을 나타내었다.

국내 자갈을 이용한 접촉산화기술 연구에서도 유기물질 및 부유물질 제거에는 안정적인 효율을 보이는 반면에 질소와 인 등의 영양염류의 처리효율은 상대적으로 낮다는 결과가 있다(KICT 1997; Kim & Park 2000). 또한, Park(2000)의 쇄석과 플라스틱 여재를 사용한 접촉산화수로 연구에서는 COD, TP의 처리효율은 높은 반면에 TN 처리효과는 거의 없

Table 2. Pollutants removal efficiency by the water treatment system composed of BSB

		Inflow Concentration	Effluent Concentration	Removal Efficiency (%)
BOD (mg/L)	Average±S.D (Min~Max)	10.1 ± 1.8 (5.9 ~ 12.2)	3.0 ± 1.4 (0.3 ~ 4.7)	70.3 ± 13.5 (47.2 ~ 97.4)
COD (mg/L)	Average±S.D (Min~Max)	21.1 ± 10.2 (11.8 ~ 47.3)	11.5 ± 5.9 (7.6 ~ 11.4)	45.3 ± 9.7 (26.1 ~ 64.7)
TOC (mg/L)	Average±S.D (Min~Max)	8.8 ± 4.2 (5.9 ~ 18.2)	6.8 ± 2.6 (5.1 ~ 14.7)	19.2 ± 12.3 (8.5 ~ 50.0)
SS (mg/L)	Average±S.D (Min~Max)	42.8 ± 33.6 (20.0 ~ 120.0)	8.1 ± 8.1 (2.2 ~ 28.0)	82.8 ± 6.6 (73.1 ~ 92.7)
Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	Average±S.D (Min~Max)	173.8 ± 132.8 (51.8 ~ 500.7)	32.5 ± 26.7 (11.1 ~ 99.9)	80.4 ± 8.8 (57.2 ~ 91.8)
TN (mg/L)	Average±S.D (Min~Max)	3.899 ± 1.1 (1.853 ~ 8.594)	2.930 ± 1.5 (1.350 ~ 6.115)	23.2 ± 28.2 (6.4 ~ 39.5)
TP (mg/L)	Average±S.D (Min~Max)	0.321 ± 0.2 (0.167 ~ 0.854)	0.156 ± 0.2 (0.046 ~ 0.425)	51.8 ± 21.9 (-1.1 ~ 80.1)

는 것으로 보고하고 있다. 기타 제올라이트, 인공 수세미, 부직포, 숯 등 다양한 여재를 활용한 접촉산화 기술에 대한 실험결과에서도 유사한 결과를 보이고 있다(Joo & Kwun 1999). 이처럼 BSB가 다른 담체에 비해 정화효율이 높은 이유는 BSB 제조 과정에서의 미생물 사전 코팅이 BSB 생물막의 미생물 활성화 및 안정화를 촉진하였기 때문으로 나타났다. BSB와 일반 쇄석을 대상으로 미생물 생물량을 평가한 결과에서는 BSB의 MLSS와 MLVSS는 각각 6,079와 2,043 mg/m<sup>2</sup>으로 나타났고, 일반 쇄석에서는 각각 3,023 mg/m<sup>2</sup>와 455 mg/m<sup>2</sup>으로 나타났다. 또한, DNA 농도에서도 BSB 생물막에서 5,338 µg/m<sup>2</sup>으로 일반 쇄석의 2,084 µg/m<sup>2</sup>에 비해 2배 이상의 높은 농도를 나타내었다. 미생물 활성화 평가에서는 BSB의 탈수소효소 활성도는 48.70 µmol/m<sup>2</sup>, 쇄석에서는 3.05 µmol/m<sup>2</sup>으로 나타났고, glycosidase는 BSB 0.08~0.51 µU/m<sup>2</sup>, 일반 쇄석 0.048 µU/m<sup>2</sup>, Lipase는 BSB에서 0.77 µU/m<sup>2</sup>, 쇄석 0.43 µU/m<sup>2</sup>으로 나타났다(MAFRA & KRC 2017).

국내에서는 오염 하천 수질정화에 접촉산화기술을 널리 이용하고 있지만, 저수지나 상수원 댐의 유입수 수질개선시설로는 인공습지를 많이 활용하고 있다. 현재 농업용저수지를 비롯해서 상수원 댐 등의 수질 개선을 위해서 호소 상류유역에 중대형 규모의 인공

습지가 약 90개소 이상 설치되어 운영되고 있다. 하천수와 호소수의 수질정화 목적으로 조성되는 인공 습지 처리효율은 보통 BOD 10~30%, SS 36~65%, TN 20~40%, TP 40% 이내로 나타나고 있으며, 국내 댐 유역에 설치되어 있는 면적 1.0ha 이상에 해당하는 10개소의 인공습지에 대한 수질정화효율을 분석한 연구결과에 의하면, BOD의 처리효율은 -133.3~41.7%, TN 처리효율은 7.6~67.6%(평균 24.9%), TP 처리효율은 -4.9~74.5%(평균 23.7%)로 나타났다(Choi et al. 2014).

BSB 수처리시스템은 인공습지와 비교하여 BOD, COD, SS, Chl-a, TP의 처리효율은 매우 우수하게 나타났고, TN의 정화효율은 거의 유사하게 나타났다. BSB 수처리시스템은 질소 및 인 제거를 위한 별도의 수처리 공법이 없는 시스템에도 불구하고 각각 최대 39.5%와 80.1%의 높은 정화효율을 나타내고 있다. BSB 수처리 시스템은 오염수를 정화하기 위한 수처리 시설로서, 기존에 설치되어 있는 인공습지와 결합하여 활용하면 저수지나 댐으로 유입되는 오염물질 제거에 매우 효과적일 것으로 판단된다. 특히 유기물의 정화효율이 설계기준 이하로 운영되고 있는 인공 습지의 후처리 시설로 BSB 수처리 시설을 활용한다면 유기물 제거효율 향상 등으로 수질개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 저수지의 유입 오염물질 저감량 및 수질개선효과 산정

### 1) 매화저수지의 유입량 및 유출량

BSB 수처리시스템 설치에 의한 매화저수지 유입 오염물질 저감량 및 수질개선효과를 정량적으로 산정하기 위하여 매화지의 2006~2015년의 10개년에 대한 연도별 평시 및 강우시의 유입량을 산정하였다 (Table 3). 매화저수지 유입량 산정을 위한 강우사상은 매화저수지가 위치한 시흥시 지역의 연평균 강우량 1,188.0 mm를 적용하였고, 유입량이 5,000 m<sup>3</sup>/d 를 초과할 경우에는 강우시 유입으로 구분하였다. 매

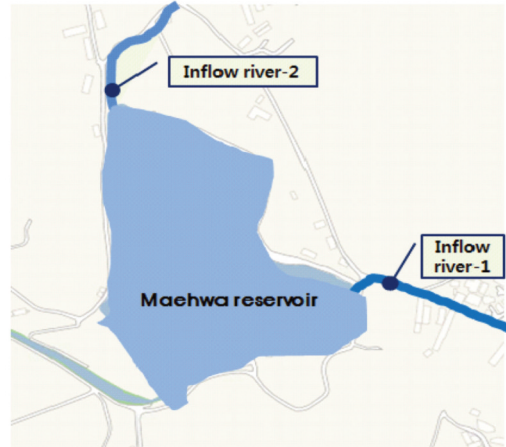


Figure 5. Location of the inflow rivers in Maehwa reservoir.

Table 3. Analysis of annual inflow rate of Maehwa reservoir(2006-2015)

Year	Total rainfall (mm/year)	Rainfall season (m <sup>3</sup> /year)	Dry season (m <sup>3</sup> /year)	Total inflow (m <sup>3</sup> /year)	Dry/Total (%)
2006	1,093.0	2,871,331.2	895,363.2	3,766,694.4	24.0
2007	1,017.5	2,785,708.8	876,960.0	3,662,668.8	24.0
2008	822.5	2,271,801.6	886,723.2	3,158,524.8	28.0
2009	1,298.0	3,474,921.6	915,321.6	4,390,243.2	21.0
2010	1,292.5	3,571,430.4	806,976.0	4,378,406.4	18.0
2011	1,953.5	5,243,011.2	852,422.4	6,095,433.6	14.0
2012	1,721.0	4,659,724.8	835,056.0	5,494,780.8	15.0
2013	1,259.0	3,205,470.0	863,364.0	4,068,838.0	21.0
2014	740.5	2,013,120.0	928,627.2	2,941,747.2	32.0
2015	682.5	1,854,835.2	937,440.0	2,792,275.2	34.0
Average	1,188.0	3,195,135.5	879,825.4	4,074,961.2	23.1

Table 4. Analysis of inflow and discharge by month of Maehwa reservoir

Month	Inflow (m <sup>3</sup> /month)				Discharge (m <sup>3</sup> /month)
	Inflow river-1		Inflow river-2		
	Dry	Rainfall	Dry	Rainfall	
1	36,196	6,763	67,386	15,922	47,082
2	20,909	46,051	46,310	113,789	232,935
3	23,933	25,229	53,050	59,789	163,165
4	18,230	47,088	40,781	110,074	216,173
5	21,299	108,407	44,973	247,684	438,314
6	26,310	31,450	54,390	72,835	170,195
7	11,750	368,770	26,525	845,698	1,250,417
8	24,526	101,434	53,989	235,267	415,216
9	16,416	167,357	36,115	389,491	607,039
10	25,229	7,258	55,642	16,848	106,148
11	21,341	39,744	47,347	91,757	203,684
12	28,080	17,107	62,640	39,658	147,485
Total	274,218	966,658	589,146	2,238,812	3,997,853

화저수지에는 Figure 5와 같이 유역에서 들어오는 유입하천 2개소가 있으며, 이들 유입하천을 통해 유입되는 연평균 총 수량은 4,074,961m<sup>3</sup>/year이다. 총 유입량 중 강우시 유입량이 3,195,135.5 m<sup>3</sup>/year의 연간 유입량의 약 77%에 해당하는 수량이 유입되고 있으며, 평시에는 전체 수량의 약 23% 정도가 유입되는 것으로 나타났다.

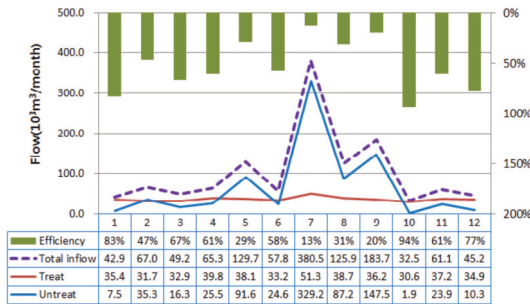
Table 4는 매화저수지의 월별 유입량과 유출량을 분석한 결과이며, 유출량은 유입량 대비 저수용량 자료를 기반으로 하여 산출하였다. 매화저수지 유입량은 유입하천-1에 비해 유입하천-2에서 약 2.3배 정도로 많은 수량이 유입되고 있으며, 강우가 많은 7~9월에는 1년간 총 유입량의 약 56%의 정도에 해당하는 유출이 발생되는 것으로 나타났다.

2) 유입 오염물질 저감량

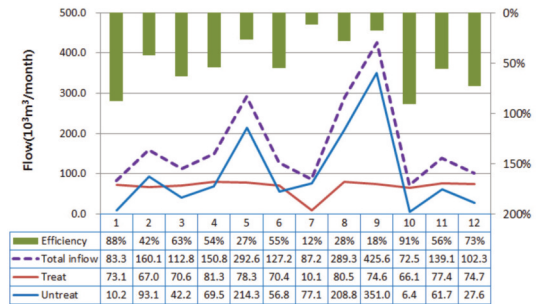
매화저수지 수질개선을 위해 BSB 수처리시스템을 유입수량에 적합한 실규모로 확대 설치를 가정하여 매화저수지에 유입되는 오염물질 저감량을 산출

하였다. BSB 수처리시스템의 규모는 평시의 평균 유입수량을 설계유량으로 하여 유입하천-1에는 처리용량 1,800 m<sup>3</sup>/d 규모의 시설을 설치하고, 유입하천-2에는 3,500 m<sup>3</sup>/d 규모의 수처리시스템을 각각 설치하는 것으로 가정하였다. BSB 수처리시스템의 수질정화효율은 현장적용실험을 통해 얻은 실측자료 중에서 보수적으로 적용하여 COD 45.3%, T-P 45.2%으로 가정하였고, 저감량 산정을 위한 대상항목은 COD와 TP을 대상으로 하였다.

매화저수지 하천별 유입수량 대비 처리용량을 월별로 비교하여 Figure 6에 나타내었다. 연간 약 40만m<sup>3</sup>의 수량이 저수지로 유입되고 있으며, BSB 수처리시스템을 통해 연간 14만m<sup>3</sup>(전체 유입량의 약 33.3%)의 수량이 처리되는 것으로 나타났다. 강우기(7~9월)동안의 처리수량은 전체 유입량의 약 17% 정도 처리되는 것으로 나타났다. 이처럼 강우시 처리율이 평시에 비해 상대적으로 낮게 나타난 이유는 BSB 수처리시스템의 설계 유량을 평시 유출량을 기준으로 설계하였기 때문이다.



(a) Inflow river-1



(b) Inflow river-2

Figure 6. Monthly water treatment volume by installation of BSB water treatment system in the two inflow rivers.

Table 5. Annual COD and TP loading reduction by installation of BSB water treatment system

		Rainfall season		Dry season		Total
		River-1	River-2	River-1	River-2	
COD	Before treatment (kg/year)	11,117	16,567	2,633	4,536	34,853
	After treatment (kg/year)	6,990	10,200	1,477	2,527	21,195
	Removal Efficiency(%)	37.1%	38.4%	43.9%	44.3%	39.2%
TP	Before treatment (kg/year)	416	896	186	271	1,769
	After treatment (kg/year)	382	834	105	151	1,472
	Removal Efficiency (%)	8.2%	6.9%	43.8%	44.2%	16.8%



BSB 수처리시스템 설치에 따른 수질항목별 오염 부하 저감량은 Table 5에 나타내었다. BSB 수처리 시스템 운영에 의해 COD 부하량의 연간 총 저감량은 13,658 kg으로 연간 39.2%가 저감되고, TP 부하량은 297 kg으로 연간 16.8%가 저감되는 것으로 산출되었다. COD 부하량은 유입하천-1에서 강우시 37.1%, 평시 43.9%의 오염물질 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 유입하천-2에서는 강우시 38.4%, 평시 44.3%의 오염물질 유입이 저감되는 것으로 나타났다. TP는 유입하천-1에서는 강우시에 8.2%, 평시에 43.8%가 저감되고, 유입하천-2에서 강우시에 6.9%, 평시에 44.2%가 저감되는 것으로 나타났다. 매화저수지는 강우시의 유입량이 전체 유입 수량의 77%를 차지할 정도로 강우시 유입이 많은 지구 특성으로 인해 평시에 비해 강우시의 오염부하 저감량이 다소 낮게 평가되었으며, 강우시 유입수량을 반영하여 큰 규모의 시설을 설치·운영한다면 강우시 오염물질 저감효과도 크게 증가할 것으로 판단된다. 농업용 저수지는 강우기 입자성 오염물질 제거 등을 위해 저

수지 유입부에 침강지 또는 부딪을 설치하여 운영하고 있는데, 침강지의 평균 효율은 SS 56.9%, BOD 20.1%, COD 19.3%, TN 43.0%, TP 52.6%의 효율을 나타내고 있다(Kim & Kim 2014). 매화저수지와 같이 강우시에 대부분의 수량이 유입되는 지구에 BSB 처리시스템을 적용시에는 비용적인 측면을 고려하여 시설규모 확대보다는 저수지 유입부에 TN, TP의 처리효율이 높은 침강지 등을 설치하여 전처리 시설로 활용한다면 BSB 처리시스템의 정화효율 향상 및 저수지 수질개선에 매우 효과적이라고 판단된다(Kim et al, 2001; Kim et al. 2018).

### 3) 저수지의 수질개선효과 산정

BSB 수처리시스템을 매화저수지 유입수 대책 수질정화시설로 설치하였을 경우를 가정하여 저수지의 월별 수질개선 효과에 대해서 정량적으로 분석한 결과는 Figure 7과 같다. 매화저수지의 수질항목별 연간 수질개선효과는 TOC 5.3 → 4.5 mg/L(14.5%), COD 7.9 → 6.8 mg/L(14.5%), Chl-a 42.3 → 37.0

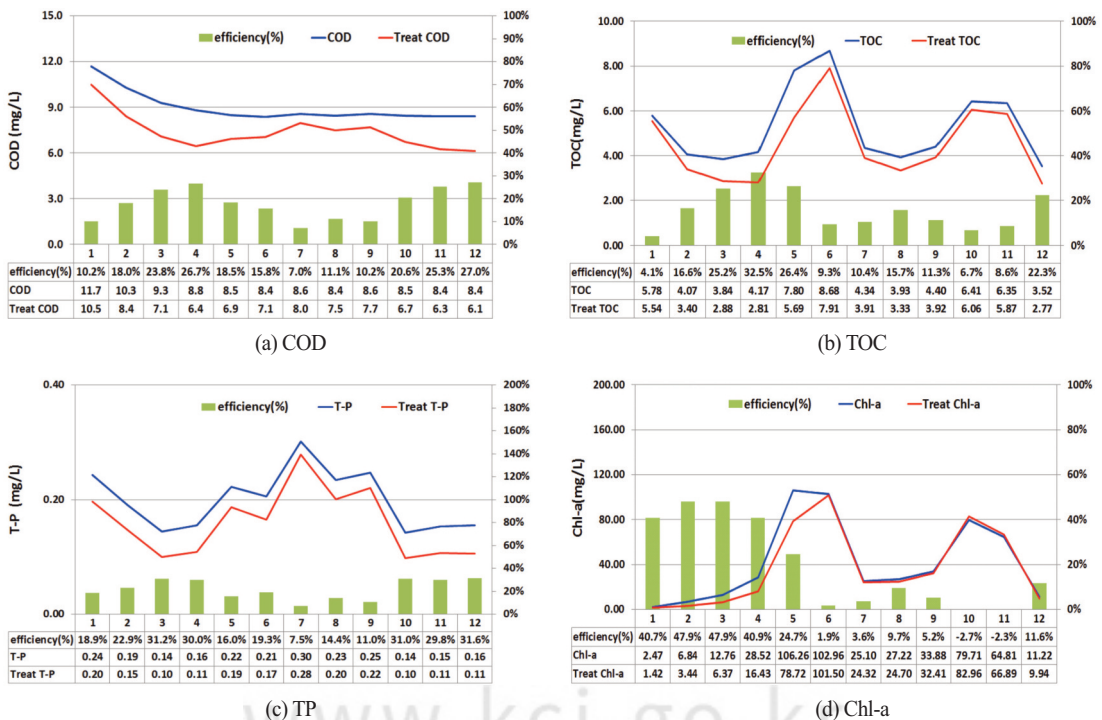


Figure 7. Monthly water quality change in Maehwa reservoir by installation of BSB water treatment system.

mg/m<sup>3</sup>(12.5%), TP 0.201 → 0.150 mg/L(25.1%)가 평균적으로 개선되는 것으로 나타났다.

매화저수지는 완전혼합인 정상상태에 도달하기 위한 시간이 1.58년(580일)로 산출되었고, 평상시 유입되는 수량이 저수지 총 유입량의 약 23%로 매우 적은 수량이다. 이러한 매화저수지의 수문학적 특성으로 인해 평시 유입 수량을 대상으로 수처리시설을 설치한다면 저수지의 수질개선효과가 단기간에 나타나기는 어렵다고 판단된다. 이러한 유형의 저수지나 호소의 수질은 강우시에 유입되는 유입수의 수질에 의해 크게 영향을 받는 특성이 있으므로 강우시에 유입되는 오염물질 저감을 대상으로 하는 수처리시설이 별도로 필요하다고 판단된다. 이러한 지구에서는 BSB 수처리시스템을 저수지 유입부에 설치되어 있는 침강지와 결합하여 운영된다면 저수지의 수질개선효과가 매우 높아질 것으로 판단된다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 바이오스톤 볼(BSB)을 이용한 수처리 기술을 개발하여 경기 시흥시에 위치한 매화저수지에 실증 플랜트를 설치하여 1년간 운영하면서 수질정화효율 등 현장 적용성을 평가하였다. BSB 수처리시스템의 수질정화효율 및 매화저수지 유입량과 유출량 등에 근거하여 저수지의 오염물질 유입 저감량 및 수질개선효과 등을 정량적으로 평가하였다. 연구의 주요결과는 다음과 같다.

1) BSB 수처리시스템의 수질정화효율은 BOD 70.3%(47.2~97.4%), COD 45.3%(26.1~64.7%), TOC 19.2%(8.5~50.0%), SS 82.8%(73.1~92.7%), Chl-a 80.4%(57.2~91.8%), TN 23.2%(6.4~39.5%), TP 51.8%(-1.1~80.1%)로 BOD, SS, Chl-a에서 70~80% 이상의 높은 오염물질 처리효율을 나타내었다.

2) 매화저수지에 대한 물수지 분석결과, 저수지로 유입되는 총 수량은 연평균 4,074,961m<sup>3</sup>/year이며, 이 중 강우기 유입량은 3,195,135.5 m<sup>3</sup>/year(77%),

평시의 유입량은 879,825.4 m<sup>3</sup>/year(23%)으로 나타났다. 매화저수지는 상류 유입하천-1 보다 유입하천-2에서 약 2.3배 정도의 유입 수량이 많았으며, 강우가 많은 7~9월에는 전체 수량의 약 56% 유출이 발생하는 것으로 나타났다.

3) 매화저수지로 유입되는 오염물질의 제거를 위해 평시 유량을 기준으로 하여 유입하천-1은 1,800 m<sup>3</sup>/d, 유입하천-2는 3,500 m<sup>3</sup>/d 규모로 BSB 수처리시스템 설치를 가정하였을 때, COD 부하량은 유입하천-1에서 강우시 37.1%, 평시 43.9%, 유입하천-2에서는 강우시에 38.4%, 평시에 44.3%가 저감되는 것으로 나타났다. TP는 유입하천-1에서 강우시에 8.2%, 평시에 43.8%가 저감되었고, 유입하천-2에서 강우시 6.9%, 평시 44.2%가 저감되는 것으로 나타났다.

4) 매화저수지 유입부에 BSB 수처리시스템 설치를 가정하였을 때, 저수지의 연간 수질개선효과는 평균적으로 TOC 5.3 → 4.5 mg/L(14.5%), COD 7.9 → 6.8 mg/L(14.5%), Chl-a 42.3 → 37.0 mg/m<sup>3</sup>(12.5%), T-P 0.201 → 0.150 mg/L(25.1%) 개선되는 것으로 나타났다.

5) BSB 수처리시스템은 처리 공정이 매우 단순한 수처리 시설로, BOD, SS, Chl-a의 처리효율이 평균 70~80% 이상이며, TN, TP 처리효율도 20~50%로 매우 높은 정화효율을 나타내고 있어 유기성 오염도가 높은 국내 하천 및 호소의 수질개선시설로 활용도가 매우 높을 것으로 판단된다. 특히, 농업용저수지 및 상수원 댐의 유입 오염물질 제거를 위한 수질개선시설로 널리 운영되고 있는 인공습지 및 침강지와 결합하여 활용한다면 호소 수질개선에 매우 효과적일 것으로 판단된다.

#### 사사

본 연구는 농림축산식품부의 농촌개발시험연구원 「양질의 농업용수 확보를 위한 융복합 수처리기술 개발 및 적용」과제의 일부 성과물입니다.

## References

- Bitton G. 1994. Wastewater Microbiology. John Wiley & Sons, INC. New York. pp.89-198.
- Choi KS, Kim SW, Kim DS, Lee YS. 2014. Operating status and improvement plans of ten wetlands constructed in Dam reservoirs in Korea. *Journal of Wetlands Research*. 16(3): 431-440. [Korean Literature]
- Choi SH, Park HS. 2016. Hydraulic Impact Scope and Dissolved Oxygen Distribution by the Micro-bubble Aeration in an Artificial Lake. *Ecology and Resilient Infrastructure*. 3(4): 263-271. [Korean Literature]
- Jang JY. 2010. Water quality improvement measure and promotion status in agricultural lake. *Rural Resources*. 52(2): 23-31. [Korean Literature]
- Joo UK, Kwun SK. 1999. A study on the effect of filter media for sewage treatment in biofilm reactors. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*. 6(1): 31-38. [Korean Literature]
- Joo UK, Kim JT, Park KW, Oh ST. 2005. Study on precipitation-runoff characteristics in rural watershed including agricultural reservoir. *Proceeding of the Korea Water Resource Association Convention(2005.6)*: 638-643. [Korean Literature]
- Kim BK, Park JS, Won HJ, Kim YY. 2018. Long-term performance of secondary dam installed for water purification of reservoir. *Journal of the Korea Academia Industrial cooperation Society*. 19(10): 668-676. [Korean Literature]
- Kim HJ, Park SH. 2000. Development of the depot encircled with oxidation canal for water quality improvement. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 42(6): 83-89. [Korean Literature]
- Kim HJ, Kim DH. 2014. Water purification characteristics of sedimentation basin for agricultural water quality improvement. *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*. 21(1): 55-63. [Korean Literature]
- Kim WJ, Park SH, Kim HJ, Kim TK. 2001. Water quality improvement using a contact oxidation canal with sedimentation basin. *Korean Journal of Environmental Agricultural*. 20(3): 143-149. [Korean Literature]
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). 1997. Development of river water purification technology for Korea-Contact oxidation canal-. Goyang. [Korean Literature]
- Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs (MAFRA), Korea Rural Community Corporation (KRC). 2014. The study on convergence technologies development and application for agricultural water treatment (I). Rural Research Institute. p. 3-4. [Korean Literature]
- Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs (MAFRA), Korea Rural Community Corporation (KRC). 2016. The study on convergence technologies development and application for agricultural water treatment (III). Rural Research Institute. p. 136-138. [Korean Literature]
- Ministry of Agricultural, Food and Rural Affairs (MAFRA), Korea Rural Community Corporation (KRC). 2017. The study on convergence technologies development and application for agricultural water treatment (Final). Rural Research Institute. p. 154-162. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). 2014. The official

- test method enacted by Ministry of Environment for water quality analysis (Regulation of Ministry of Environment, version 2014-163), Ministry of Environment, Sejong, [Korean Literature]
- Park BH. 2000. Analysis on the effect of water purification technology in lake and evaluation of application on the water quality model. Ph.D. Thesis. Seoul National University. Korea. [Korean Literature]
- Park JS, Kim KS, Kim YC, Rhee KH. 2012. Evaluation of treatment efficiency of water quality for 5 years in constructed wetland to upper region of water source. Journal of Wetlands Research. 14(4): 479-488. [Korean Literature]
- Park HS, Choi SH, Chung SW, Ji HS, Oh JK, Jun HB. 2017. Evaluation of internal phosphorus loading through the dynamic monitoring of dissolved oxygen in a shallow reservoir. Journal of Environmental Impact Assessment. 26(6): 553-562. [Korean Literature]
- Rim JM. 1996a. Control of the biofilm overload during high concentration organic wastewater treatment by biofilm method(I). Environmental Management Technology(1996.4): 42-45. [Korean Literature]
- Rim JM. 1996b. Control of the biofilm overload during high concentration organic wastewater treatment by biofilm method(II). Environmental Management Technology(1996.5): 24-27. [Korean Literature]
- US Army Corps of Engineers (USACE). 2015. Hydrologic modeling system HEC-HMS. User's Manual(version 4.1).
- Yoem KJ. 2001. Principles and applications of biofilm filtration for wastewater treatment. The Korean Society for Applied Microbiology. 14(1): 20-23. [Korean Literature]
- William SB, Jang HP. 2009. History of the HEC-hydrologic modeling system (HEC-HMS). Water for future. 42(11): 34-41.