



# 모듈형 이동식 물생산 시스템 운전 성능 및 자연 유기물 제거 거동 평가

## Evaluation of the performance and the removal characteristics of natural organic matter in a modular mobile water production system

황유훈<sup>1</sup>·양필제<sup>1</sup>·송지민<sup>1</sup>·홍민지<sup>1</sup>·최창형<sup>2</sup>·고석오<sup>3</sup>·김도군<sup>3\*</sup>

Yuhoon Hwang<sup>1</sup>·Philje Yang<sup>1</sup>·Jimin Song<sup>1</sup>·Minji Hong<sup>1</sup>·Changhyung Choi<sup>2</sup>·Seokoh Ko<sup>3</sup>·Dogun Kim<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>서울과학기술대학교 환경공학과, <sup>2</sup>케이원에코텍(주), <sup>3</sup>경희대학교 토목공학과

<sup>1</sup>Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>2</sup>K-1 EcoTech Inc., <sup>3</sup>Department of Civil Engineering, Kyung Hee University

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

### ABSTRACT

It is necessary to develop a mobile water production system in order to provide stable water supply in case of disasters such as floods or earthquakes. In this study, we developed a modular mobile water production system capable of producing water for various uses such as domestic water and drinking water while improving applicability in various raw water sources. The water production system consists of three stages of filtration (sand filtration - activated carbon filtration - pressure filtration) to produce domestic water and an additional reverse osmosis process to produce drinking water. In laboratory and field experiments, the domestic water production system showed excellent treatment efficiency for particulate matter, but showed limitations in the treatment of dissolved substances such as dissolved organic matter. In addition, ultraviolet irradiation was considered as additional disinfection step, because it does not form precipitates of manganese oxides after disinfection. Reverse osmosis process was added to increase the removal efficiency of dissolved substances and the treated water satisfied drinking water quality standards. Fluorescence analysis of dissolved organic matter showed that the fulvic acid-like substances in raw water was successfully removed in the reverse osmosis process. The mobile water production system developed in this study is expected to be used not only in water supply in case of disaster, but also widely used in islands and rural area.

**Key words:** Mobile water production system, Natural organic matter, Pressurized filter, Reverse osmosis, Three stage filtration

**주제어:** 이동형 물생산 시스템, 자연유기물, 가압여과, 역삼투, 3단 여과

## 1. 서 론

급격한 세계 인구 증가 및 산업화에 의한 기후변화는 남극의 오존을 감소시키고 대기 중의 이산화탄소를 증가시켜 지구온난화를 일으키고 있으며, 이는 또다른 다

양한 환경문제를 야기하고 있다. 기후 변화는 우리나라의 강우 상황에도 큰 영향을 미칠 것으로 예측되고 있다. 2001년에서 2010년에 해당하는 10년의 강수량 자료 분석 결과, 강수의 빈도는 감소하였으나 연 평균 강수량은 소폭(97.4 mm) 상승한 것으로 나타났다 (Lee et al., 2011). 또한 1회 강우 시 강수량은 지속적으로 상승하여 홍수의 위험이 높아질 것으로 예측하고 있다.

Received 20 December 2017, revised 30 January 2018, accepted 13 February 2018

\*Corresponding author: Dogun Kim (E-mail: dogun.kim@khu.ac.kr)

홍수나 지진과 같은 재난이 발생할 경우에 안정적인 용수 공급은 가장 먼저 해결되어야 할 문제 중 하나이다 (Kim et al., 2014). 그러므로, 재난으로 인하여 기존의 용수 공급 시스템이 가동이 중단되었을 경우, 신속히 용수를 공급할 수 있는 시스템의 구축이 필요하다. 일반적인 경우에는 급수차 등을 활용하여 다른 지역에서의 물을 이송하여 공급하는 방법을 사용하지만, 정부지원 비상급수시설은 도시 인구 1인 1일 25 L 내외로, 공급할 수 있는 수량이 한정적이어서 식수 이외의 용도로 사용하기에는 턱없이 부족한 실정이며, 주민들이 큰 불편을 겪을 것으로 생각된다.

따라서 재난 현지에 신속히 투입되어 다량의 용수를 공급할 수 있는 이동형 수처리 시스템의 개발이 필요하다고 할 수 있다. 이미 국내외에서 비상시 대체급수를 위한 물생산 시스템의 기술 개발이 이루어진 바 있다. 국외의 경우 개인이 직접 휴대가 가능하거나, 컨테이너 또는 이동식 차량 등을 이용하는 다양한 형태의 이동식 여과장치 개발이 활성화되어 있으며, SUEZ사의 Mobile Water Solutions, 코카콜라의 EKOCENTER, 스위스의 TRUNZ Water Systems 등이 대표적이다. 국내에서도 SYNOPEX의 이동형 정수처리 시스템, 대한하이테크의 이동형 정수시스템 등이 개발되어 보고된 바 있다 (Xingxing, 2015). 이러한 이동형 수처리 시스템에 대한 수요는 꾸준히 증가하여 2014-2019기간 동안 시장규모 증가율이 연간 11.3% 이상일 것으로 예측되었다 (TechNavio, 2014).

그러나 대부분의 기술은 이온 제거를 위한 역삼투압 방식의 공정에 전처리로서 정밀여과 및 환외여과 등의 저압 막여과를 조합한 공정을 사용한다. 역삼투막 전처리로서 사용되는 저압 막 여과는 높은 처리수질을 얻을 수 있다는 장점은 있지만 개발 단가가 높으며, 고탁도의 물질에 대해서는 막오염이 발생할 수 있어 추가적인 전처리의 필요성이 있다. 이와 같은 막여과 공정의 한계점으로 인하여 대부분 지하수를 기반으로 한 시스템이 보급 중이며, 홍수 시 고탁도 하천수 이용을 위한 대책은 미비한 실정이다. 또한 대부분의 이동형 정수시스템의 경우, 재난 시 사용할 물의 용도를 식수로 한정하여 공급함으로써, 세척 및 살수 등 재난 복구와 생활용수에 필요한 용수를 충분하게 공급하는 데에는 한계를 가지고 있다. 따라서 다량의 저급 생활용수와 소량의 고급 음용수를 동시에 생산할 수 있는 모듈형 시스템의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 다수의 여과 공정을 역삼투 공정의 전

처리로서 사용함으로써 하천수를 원수로 사용하였을 때 안정적인 수질을 얻을 수 있도록 개발된 시스템의 성능과 거동을 연구하였다. 이 시스템에서는 1차 처리 (이중관 모래여과), 2차 처리 (활성탄 여과), 3차 처리 (가압 필터 여과)를 거친 생산수는 세척 및 살수 등 생활용수로 사용이 가능하도록 하였다. 또한 생활용수의 일부는 역삼투 공정을 통해 음용수로 생산이 가능하도록 하여, 재난 현장에서 필요한 생활용수 및 음용수의 수요를 모두 충족시킬 수 있도록 하였다. 또한 이 시스템에 포함되는 생활용수 소독을 위한 염소 접촉 및 자외선 조사의 효율을 평가하였다.

하천수 등의 지표수를 사용하였을 경우에는 자연유기물 (Natural organic matter, NOM)의 농도가 지하수에 비하여 높고, 계절에 따른 수질의 변화가 크다 (Hur et al., 2006; Lee et al., 2009). NOM은 낙엽 등의 부식을 통해 자연적으로 형성되어 하천수로 유입되며, 한강 등의 수계에서 수 mg/L의 수준으로 검출이 되고 있다. 한강 수계 중 팔당댐의 경우 2017년 연 평균 TOC는 2.2 mg/L로 검출되었다 (Water Information System, 2017). 또한 홍수가 발생 시에는 토양에 존재하는 다량의 NOM이 수계로 유출됨으로써 수처리 시설 유입수에서, NOM을 포함하는 용존유기물 (Dissolved organic matter, DOM) 농도가 높아질 가능성이 존재한다 (Seo et al., 2013). NOM의 특성을 가지는 DOM은 염소와의 접촉 시 트리할로메탄과 같은 소독부산물을 형성함으로써, 음용수로써의 공급에 제한을 줄 수 있다 (Bond et al., 2012). 대규모 정수장에서는 다량의 유기물 존재 시 활성탄 흡착 등을 통해 소독부산물 공급을 최소화할 수 있는 조치가 가능하지만 (Velten, et al., 2011), 재난 시 사용되는 이동형 물생산 시스템에서는 이러한 조치가 용이하지 않을 수 있으므로, 처리 공정 내에서의 DOM 거동을 면밀히 파악할 필요가 있다.

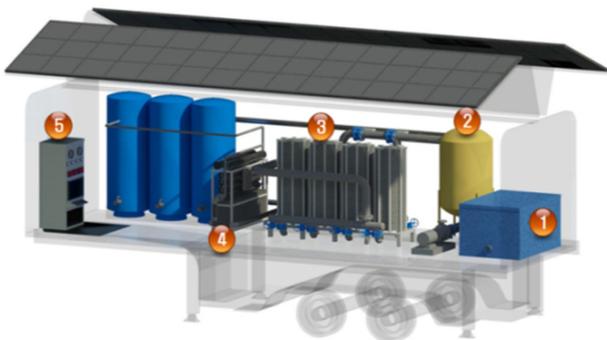
본 연구에서는 모듈형 물생산 시스템을 실험실 규모 및 파일럿 규모로 설치하여 운전함으로써 시스템의 성능을 검증하고 생활용수 및 음용수로의 적용 가능성을 평가하였다. 실험실 규모에서는 인공 하천수를 대상으로 운전하여 전체적인 공정의 처리 기작에 대해 평가하였으며, 파일럿 공정에서는 실제 하천수를 대상으로 운전하여 적용 가능성을 평가하였다. 또한 파일럿 공정에서 발생한 소독 공정에서의 문제점을 평가하여 개선점을 제시하였으며, 여과 공정에서 자연 유기물의 거동 특성을 평가하여 소독 부산물 생성 가능성에 대해 평가하였다.



## 2. 연구방법

### 2.1 모듈형 여과 시스템 구성

모듈형 물생산 시스템의 개념도는 Fig. 1과 같다. 전체적인 구성은 1차 처리(이중관 모래여과), 2차 처리(활성탄 여과), 3차 처리(가압 필터 여과), 음용수 생산(역삼투) 공정으로 구성된다. 1차 처리는 이중관 모래여과(유효경 0.45~0.7 mm) 로서 큰 이물질, 부유물질을 제거하여 후단 공정의 오염부하를 경감시키며, 2차 처리인 활성탄 여과(규격 1급 입상활성탄; 입경



**Fig. 1.** Schematic of modular water treatment system (①Sand filtration ②Activated carbon filtration ③Pressurized filtration ④Reverse Osmosis ⑤Control panel).

8~30 mesh; 가야활성탄소)는 체거름현상만으로 제거하기 어려운 각종 유기물들을 흡착하여 수처리 제거효율을 증대시키고자 하였다. 3차 처리는 가압 필터(특히 제 10-1627483호)로써, 다단의 여과포에 액상 여과재(규조토 분말; 프리코팅 후 입경 1~2 μm) 를 투입하여 프리코팅한 후, 형성된 여과막을 사용하여 여과를 수행하는 방식이다. 원형 여과관 프레임을 여러 개 겹쳐 그 사이에 여과포를 설치한 구조로 수평으로 다수 적층된 여과관의 여과포에 여과재가 균일하게 도포되어 여과효율이 뛰어나고 장치가 콤팩트하다. 음용수 생산 공정은 역삼투 여과공정으로서 대부분의 오염물질들을 제거하여 먹는 물 수준의 수질을 확보할 수 있도록 하였다.

### 2.2 실험 장치

상기 서술한 개념도를 바탕으로 설치한 실험실 규모의 여과 시스템은 Fig. 2(a)와 같다. 원수의 저류조는 약 1톤 이상 원수를 저류할 수 있게 제작하였다. 여과시스템의 운전 효율을 평가하기 위하여 인공하천수를 제조하여 실험하였으며, 인공하천수의 성분은 Table 1과 같다.

파일럿 규모 물생산 장치는 P시 J천 야외 물놀이장 내에 설치하였다 (Fig. 2(b)). 장치의 구성은 실험실 규모의 여과 시스템과 동일하나, 음용수 생산을 위한 역삼투



(a)



(b)

**Fig. 2.** Pictures of water treatment system: (a) Lab.-scale (b) Pilot-scale.

**Table 1.** Composition of synthetic stream water (mg/L)

Chemical	Concentration	Chemical	Concentration	Chemical	Concentration
CH <sub>3</sub> COONa	11.72	NH <sub>4</sub> Cl	11.46	CaCl <sub>2</sub>	1.15
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.9	NaNO <sub>3</sub>	30.39	KCl	0.48
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.23	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2.2	Kaolin	20
MnSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O	0.05	CuSO <sub>4</sub>	0.21	-	-
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.15	CoSO <sub>4</sub>	0.24	-	-

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

공정 및 소독을 위한 자외선 조사와 염소 투입 장치를 구비하였다. 1~3차 여과를 통한 생활용수 생산유량은 시간당 30 m<sup>3</sup>, 음용수 생산 유량은 시간당 5 m<sup>3</sup>으로 설계하였다. 생활용수 생산공정의 설치 규모는 D3m × L7m × H3.1m이며, 음용수 공정을 추가하면 음용수공정: D3m × L10m × H3.1m이다. 실험에 사용한 원수는 J천에서 직접 취수한 하천수를 사용하였다.

### 2.3 분석

원수 및 각 공정 처리수의 수질 분석을 위하여 탁도, COD<sub>Mn</sub>, 색도, pH, T-N, T-P, 전기전도도, 총대장균수를 측정하였다. 각 항목은 먹는 물 수질공정시험방법 및 수질오염공정시험방법에 의거하여 분석하였다. 소독 시 형성된 침전물의 성분의 정성분석을 위하여 레이저 어블레이션-레이저 유도 플라즈마 분광분석기(J-200, Applied Spectra)를 사용하였다. 침전물의 구조를 관찰하고 특정 부분의 성분을 분석하기 위하여 주사전자현미경과 에너지 분산형 X-선 분광기(JSM-6700F, JEOL Ltd.)를 사용하였다. DOC는 시료를 0.45 μm PVDF 필터로 여과한 후, TOC 분석기(TOC-V CPH, Shimadzu, 일본)를 이용하여 분석하였다. 원수와 각 공정 유출수의 DOM 특성을 검토하기 위하여, 각 시료를 0.45 μm PVDF 필터로 여과한 후, spectrofluorophotometer(RF5301PC, Shimadzu, 일본)을 이용하여 excitation/emission(Ex/Em) 파장 220-400/250-600 nm에서 형광강도를 측정하고, 이를 이용하여 excitation-emission matrices(EEMs)을 얻었다(Chen et al., 2017).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 실험실 규모 여과 시스템 운전 결과

실험실 규모 실험에서는 인공 하천수를 제조하여 사용하였다. 다양한 측정 항목 중 유의미한 변화를 나타내는 탁도, 부유물질 및 COD의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 입자성 물질을 대표하는 탁도와 부유물질은 여과 공정을 통해 크게 감소하는 경향을 나타내었다. 탁도의 경우 원수 내 평균 12.3 NTU로 존재하였지만 처리 공정을 거치면서 최종적으로 1.72 NTU까지 감소하였으며, 부유물질의 경우에도 최초 16.7 mg/L에서 2.00 mg/L로 감소하였다. 특히 3차 처리로 사용하였던 가압 필터에서 높은 제거 효율을 보여주었다.

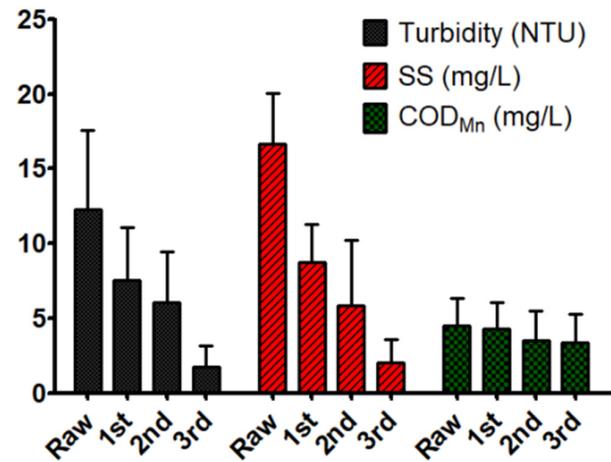


Fig. 3. Performance of lab-scale water filtration system.

그러나 유기물질 지표인 COD는 유입 원수 4.49 mg/L에서 처리수 3.38 mg/L로 약 25% 가량 감소하는데 그쳤으며, 측정 오차를 감안하면 그 제거가 미미한 수준으로 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 유입수 내 유기물질이 대부분 용존성으로 존재하여 여과 공정에서 제거되지 않음을 보여주었으며, 유기물이 존재하는 경우에는 음용수로의 적용을 위하여 추가적인 공정이 필요할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과를 토대로 현장 파일럿 규모 실험에서는 역삼투 공정을 추가하여 음용수 생산이 가능하도록 하였다. 따라서 현장 파일럿 여과 시스템은 생활용수 공급을 위한 여과 시스템(1~3차 처리) 및 음용수 공급을 위한 역삼투 시스템(4차 처리)로 구분하여 설계하였다.

### 3.2 현장 파일럿 여과 시스템 운전 결과

#### 3.2.1 생활용수 공급 시스템 운전 평가

현장 pilot-scale 시스템을 통해 생활용수를 생산하였을 때 그 수질을 Table 2에 나타내었으며, 비교할 수 있는 지표로써 중수도 수질 기준 및 음용수 수질 기준을 함께 제시하였다. 이 때 중수도 수질기준은 다양한 용도 중 가장 엄격한 수질 기준을 발췌/취합하여 표기하였다. 하천수를 직접 취수하여 사용한 현장 실험의 경우에는 탁도(4.87 NTU; 기준 <2 NTU) 및 대장균군수(30/100 mL; 기준 0)를 제외하고는 원수 자체의 수질이 양호하여 중수도 수질기준을 대부분 만족할 수 있는 수준이었다. 다만, 수질의 변동에 따라 COD 등은 기준을 초과하는 경우가 발생하므로(측정



최대치 5.71 mg/L) 이에 대한 적절한 처리가 필요하다고 판단되었다.

처리수의 수질을 살펴본 결과, 처리 후 수질은 양호하여 중수도 수질 기준을 대부분 만족시킬 수 있었으며, 음용수 수질 기준과 비교하였을 경우에도 대부분의 항목을 만족시킬 수 있었다. 다만 유입수 수질 변동에 따라 COD 및 탁도의 최댓값이 음용수 수질 기준을 초과하는 경우가 발생하였으므로, 음용수로의 사용은 부적당하다고 판단되었다. 따라서 1~3차 처리를 통해 생산되는 생산수는 음용수보다는 생활용수로써의 사용이 적합하다고 판단되었다.

중수도 수질 기준은 용도에 따라 청소/화장실 용수, 세척/살수 용수, 조경용수, 친수용수 등으로 구분되며, 각기 상이한 수질 기준을 가지고 있다. 대장균군은 인체 접촉이 가능한 용수에서는 검출되지 않아야 하는 항목으로, 청소/화장실 용수, 친수용수에서는 엄격히 규제하고 있다. 반면에 세척/살수용수나 조경용수와 같이 인체 접촉이 제한적인 용수에서는 1,000개/100 mL의 대장균군수를 그 기준으로 삼는다. 본 현장 실험의 결과로 측정된 총대장균군수의 경우에는 약 50% 내외의 시료에서만 대장균이 검출되어, 세척/살수용수 및 조경용수로써의 기준은 충족하였다. 하지만 본 이동형 물생산 장치의 목적이 재난 현장에서의 청소 등의 생활용수로써의 공급이므로 여과 공정을 거친 처리수를 인체 접촉이 가능한 생활용수로 공급하기에는 적당하지 않다고

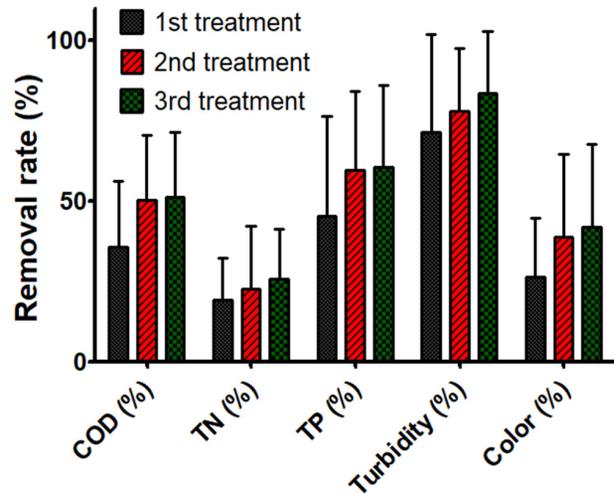


Fig. 4. Performance of pilot-scale water filtration system.

판단되었으며, 이에 따라 추가적인 소독 공정에 대한 시험을 실시하였다.

각 공정별 처리 효율을 나타내면 Fig. 4와 같다. 물리적인 여과 공정을 사용하였기 때문에 입자성 물질인 탁도의 제거율은 80% 내외로 상당히 높았지만, 용존성 물질인 총 질소의 경우에는 25%의 제거율로 그다지 높지 않은 결과를 나타내었다. 총인과 COD, 색도는 각각 60%, 51%, 42%의 제거율을 보여 입자성으로 존재하는 인이나 유기물질의 경우에 일부 제거할 수 있음을 확인하였다. 생활용수 공급 시스템의 소모 전력량은 0.473 kWh/m<sup>3</sup>으로 산정되었다.

Table 2. Characteristics of raw water and treated water for domestic water production.

	Raw water			Treated water			Regulations	
	Ave	Max	Min	Ave	Max	Min	Reclaimed water <sup>1</sup>	Drinking water
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	2.47	5.71	0.30	2.08	3.12	0.15	<3 <sup>2</sup>	<2.5 <sup>3</sup>
DOC (mg/L)	3.18	-	-	2.42	-	-		
TN (mg/L)	1.93	4.01	0.50	1.59	3.10	0.25	<10	<10 (nitrate) <0.5 (ammonia)
TP (mg/L)	0.08	0.18	0.01	0.03	0.04	0.00	<0.5	
Turbidity (NTU)	4.87	14.0	1.23	0.43	1.05	0.10	<2	<0.5
Color	3.57	6.06	1.62	2.18	4.77	0.46	<10	<5
pH	7.42	7.64	7.22	7.36	7.53	7.21	5.8-8.5	5.8-8.5
Conductivity (uS/cm)	548	655	433	582	651	437	-	<782 <sup>4</sup>
E.Coli (/100 mL)	30.6	150	1	5.15	51	0	0	0

1 The most strict regulatory standard was selected among various use of reclaimed water.

2 BOD value

3 Approximate equivalent with 10 mg/L of KMnO<sub>4</sub> consumption

4 Approximate equivalent with 500 mg/L of total dissolved solid

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

### 3.2.2 소독 공정 운전 평가

1차에서 3차에 걸친 여과 공정을 통하여 대부분의 생활용수 수질 기준을 만족하는 용수를 생산할 수 있었지만, 대장균군이 검출되는 경우가 발생하여 인체 접촉이 우려되는 용수로써의 사용은 부적합하였다. 추가적인 소독 공정이 필요하다고 판단하여, 자외선 조사 (UV) 및 염소 투입 (Cl<sub>2</sub>)의 두 가지 소독 공정에 대한 효과를 평가하였으며, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 자외선 조사량은 100,000 μW-sec/cm<sup>2</sup> 으로 설정하여 운전하였으며, 염소 투입 농도는 잔류 염소가 0.4~1 mg/L이 되도록 조절하였다. 실험 당시 pH는 7.34~8.01의 범위이었으며, 온도는 24~28°C 이었다.

대장균군의 경우에는 3차 처리수에서 평균 1.46개/100 mL으로 존재하였고, 자외선 조사 및 염소 투입 시 모두 0.29개/100 mL 로 감소하였다. 그러나 총 7회의 시험 중 단 1회에서 2/100 mL이 검출되어 산출된 값으로 나머지 경우에는 모두 검출되지 않았다. 검출된 경우는 유입 원수에 비해 오히려 값이 높게 측정된 것으로 미루어 보아 측정의 오차에 기인한 것으로 판단되며, 소독의 효율은 자외선 조사와 염소 투입 모두 효과적인 것으로 나타났다. COD의 경우에는 자외선 및 염소처리 후 유의미한 정도로 감소하였으며, 이는 산화제에 의한 유기물 산화 효과에 기인한 것으로 판단된다. 유기물 제거 효율은 염소처리가 더 우수하였으나, 소독 부산물에 대한 우려도 동시에 존재하므로 과다한 유기물의 제거가 긍정적이라고만은 볼 수 없다고 판단된다.

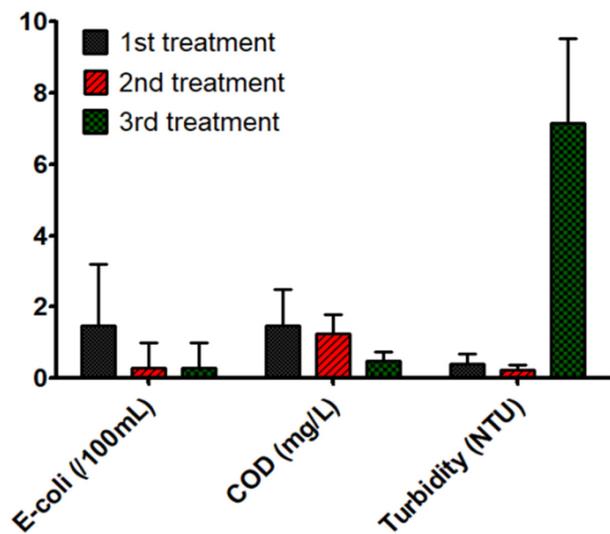


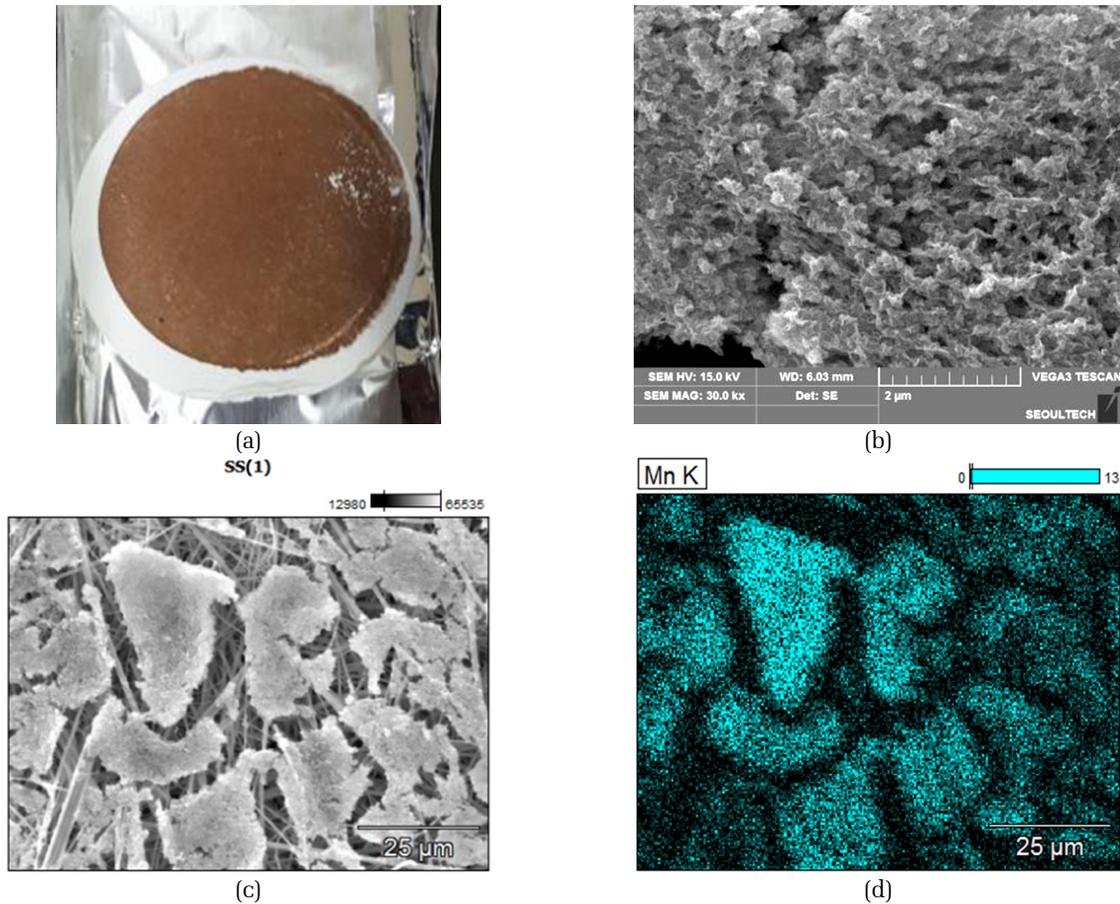
Fig. 5. Performance of disinfection systems (UV, Cl<sub>2</sub>).

그러나 소독 공정 이후 탁도를 측정하였을 경우, 염소 접촉 후 평균 7.14 NTU, 최댓값 14.4 NTU까지 높게 측정 되어, 3차 처리수는 물론 하천수 원수보다 더 높은 값을 기록하였다. 육안으로 붉은 색 계열의 침전물이 형성되는 것을 확인하였으며, 여과하여 수집한 침전물을 Fig. 6(a)에 나타내었다. 이와 같은 침전물의 형성은 생활용수 공급 시 신뢰를 하락시키는 원인으로 작용할 것인바 그 원인과 해결방안을 찾아보고자 성분 분석을 실시하였다.

레이저 어블레이션-레이저 유도 플라즈마 분광분석기를 이용해 염소 처리 시 생성된 침전물의 정성분석을 실시하였으며, 이 때 Ca, Mn, Na, K 이 주 성분으로 나타났다. 여기서 용해도가 낮아 침전물이 형성될 가능성이 높은 망간에 주목하여 추가적인 분석을 실시하였다. 주사전사현미경을 사용하여 형상을 관찰한 결과는 Fig. 6(b)와 같다. 수십 nm 크기의 구형 및 판상형의 물질이 응집되어 있는 형상으로 관찰되었으며, 이는 망간 산화물의 보고된 형태와 유사하였다 (Fouga et al., 2009). 이 물질의 성분을 분석하고자 에너지 분산형 X-선 분광법(Energy Dispersive Spectrometer, EDS)를 사용하였다 (Fig. 6(c), (d)). 그 결과 물질의 분포와 유사한 망간의 분포를 얻을 수 있었다. 전체 시료 중 주요 원소의 무게비는 Mn 21.03%, O 35.57%, Si 21.6%로 측정되어 망간 산화물 및 점토 입자로 구성되어 있음을 확인하였다.

망간은 먹는 물 수질 기준에서 수돗물의 경우 0.05 mg/L, 지하수의 경우에는 0.3 mg/L로 규제하고 있는 물질로, 무산소 조건에서 주로 용존성 Mn(II)로 존재하여 처리 공정에서 적절히 제거되지 않을 수 있다. 용존성 망간은 일반적으로 산소 및 염소와 같은 산화제를 사용하여 침전성 Mn(IV)로 산화시켜 제거하는 방법으로 제거한다 (Tobiason et al., 2016). 이와 같은 사실과 상기 분석 결과를 토대로 염소 투입 시 투입된 염소가 산화제로 작용하여 3차 처리수 내 용존성 망간을 이산화망간으로 전환시킨 것이라고 결론을 내릴 수 있었다.

이처럼 따라서 소독 공정을 적용할 시 침전물이 발생할 가능성이 높은 염소 투입보다는 자외선 조사가 효과적인 것이라고 판단하였으며, 염소 투입을 적용할 시에는 원수 내의 용존 망간 이온을 제거하기 위하여 전염소 처리를 수행할 필요가 있다고 판단되었다.



**Fig. 6.** (a) Precipitates after chlorine contact, (b-c) Scanning electron microscope images of precipitates, (d) Energy dispersive spectrometer images for Mn.

### 3.2.3 음용수 공급 시스템 평가

음용수를 생산하기 위하여 역삼투 공정을 3차 처리 후단에 설치하여 운전하였으며, 그 때의 결과를 Table 3에 나타내었다. 대표적으로 전기 전도도는 3차처리수의 약 590  $\mu\text{S/cm}$ 내외에서 13.9  $\mu\text{S/cm}$ 로 97.6% 감소하였으며, 이를 총 용존 고형물 농도로 환산하면 약 7 mg/L 내외의 아주 낮은 농도이다. 함께 나타낸 음용수 수질 기준과 비교하였을 때 모든 항목에 대해 만족하였으며, 최댓값도 COD를 제외하고는 수질 기준을 초과하지 않았다. 대장균군의 경우 1회 검출되었으나, 당시 현장 시스템의 장기간 운전 정지 이후 재시동하여 측정된 값이므로 실제 연속 운전의 경우에는 검출되지 않을 것으로 판단된다. 역삼투 공정 이후 pH가 상당히 하락하는 경향이 있는데, 이는 역삼투 공정에 따른 이온 불균형에 따른 일반적인 현상이다 (Fritzmann et al., 2007). 회수율의 조정 등을 통하여

pH를 기준치 이내로 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

역삼투 공정의 운전 시 필연적으로 농축수가 발생하게 되며, 공정의 회수율에 따라 원수의 20-50% 내외가 발생하게 되어 상당히 많은 양이 발생하게 되며, 물공급 장치의 설치 및 운전에서 농축수의 적절한 처분이 중요한 부분을 차지하게 된다. 농축수의 수질과 하수처리장의 방류수 수질기준을 Table 3에 나타내었다. 하천수를 원수로 취하기 때문에 농축수의 수질도 상당히 양호한 편으로 COD 8.55 mg/L, 총질소 5.19 mg/L, 총인 0.05 mg/L 등으로 하수처리장 방류수의 수질기준에 비하여 크게 낮은 값을 보인다. 또한 측정 최댓값도 모두 방류수 수질 기준보다 크게 낮아 하천으로 방류하는 데에 큰 지장이 없을 것으로 판단되었다. 음용수 생산공정을 포함한 총 소모 전력량은 0.657  $\text{kwh/m}^3$ 으로 산정되었다. 본 연구의 결과를 바탕으로 판단할 때, 향후 홍수 등에 일시적으로 발생하는

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

**Table 3.** Characteristics of raw water and treated water for drinking water production

	RO permeate			RO Concentrate			Regulations	
	Ave	Max	Min	Ave	Max	Min	Drinking water	WWTP effluent
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	0.86	4.90	ND	8.55	13.3	0.30	<2.5	40
DOC (mg/L)	0.52	-	-	13.67	-	-		
TN (mg/L)	0.97	2.67	0.2	5.19	7.53	0.50	<10 (nitrate)	20
TP (mg/L)	0.01	0.02	ND	0.05	0.07	0.03	-	0.2
Turbidity (NTU)	0.09	0.47	ND	2.08	7.74	0.54	<0.5	-
Color	0.83	2.21	ND	8.11	11.9	5.92	<5	-
pH	6.13	7.28	5.73	7.03	7.38	5.91	5.8-8.5	-
Conductivity (uS/cm)	13.9	20.0	9.60	2,383	3,020	1,987	<782	-
E.Coli (/100 mL)	0.21	3	ND	3.5	16	0	ND	300,000

고부하 하천수에 대해서도(Jung et al., 2014) 상세한 적용성 평가를 추가로 수행한다면, 본 시스템이 재난 시 수질에서도 우수한 수질의 음용수를 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

### 3.3 자연유기물 거동 특성 평가

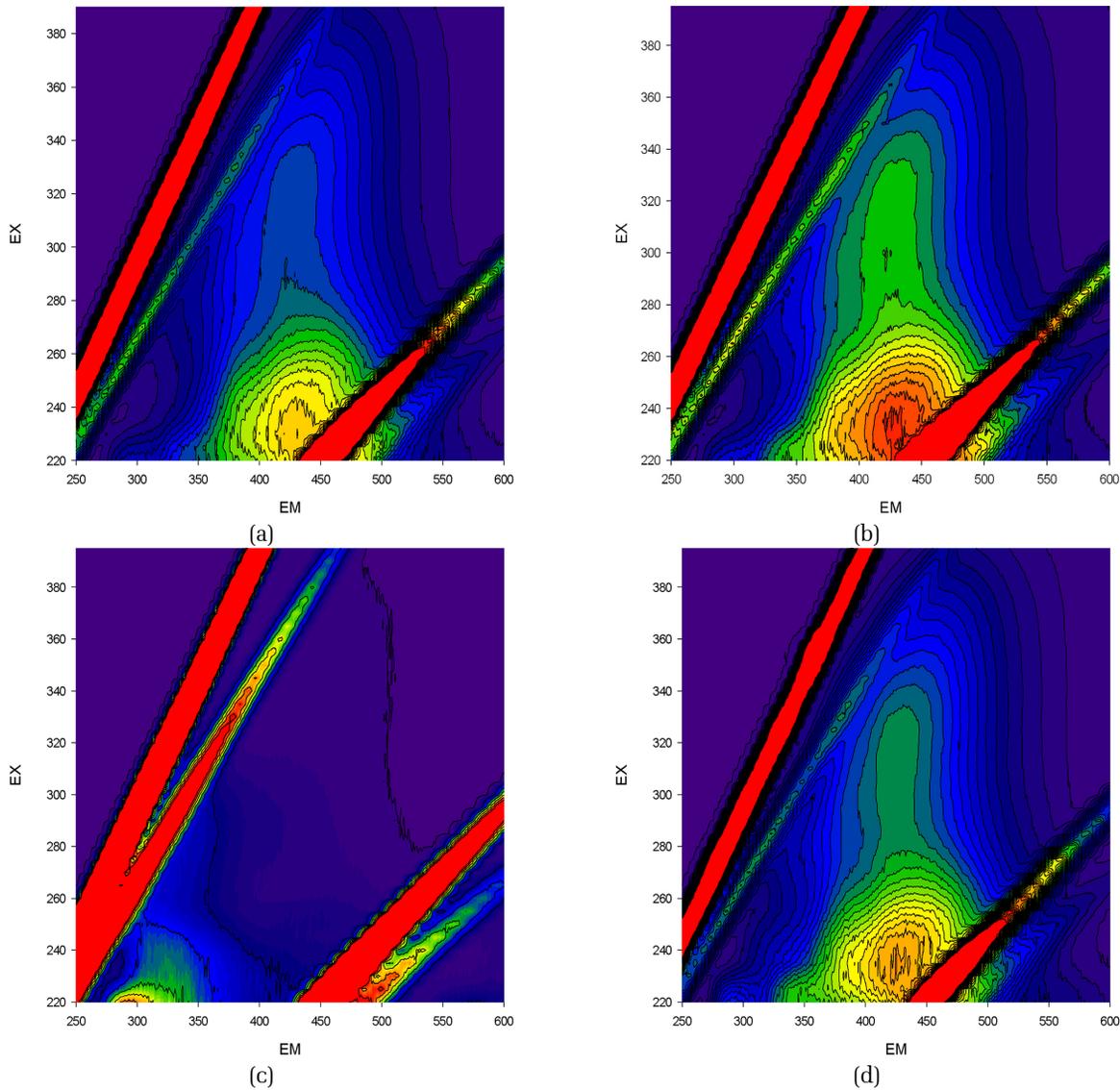
앞서서 살펴본 바와 같이 하천수를 사용하여 재난 비상 용수를 공급하는 장치를 운영할 시에, 가장 처리가 곤란한 것은 수중 존재하는 DOM이다. 하천수에는 낙엽 등 자연물의 부식으로 인하여 생성되는 자연유기물과 인간의 활동에 의해 발생하는 유기물이 필연적으로 유입되며, 지역, 기후 등에 따라 다른 특성을 보인다. 따라서 본 연구에서 제안한 수처리 시스템에서 유기물이 어떻게 제거되는 지 관찰할 필요가 있으며, 이를 위하여 각 공정 유출수의 DOM 특성을 EEM에 의하여 관찰하였다 (Fig. 7). 사용한 시료는 하천수 원수, 3차 처리수, 역삼투 공정 생산수 및 농축수를 사용하였으며, 유사한 DOC 값을 갖도록 희석하였다. 다만, 역삼투 공정 생산수는 DOC가 낮아 희석없이 측정하였으며, 타 시료에 비하여 그 농도가 낮다.

EEM에서는 존재하는 피크의 위치에 따라 유기물의 성상을 대략적으로 분석할 수 있다. Ex/Em 260 nm/460 nm은 펠빅산 (Fulvic Acid, FA)을 대표하며, Ex/Em 265 nm/525 nm와 Ex/Em 360 nm/520 nm 구간은 휴믹산 (Humic Acid, HA)을 대표한다 (Sierra et al., 2005). 하천수 원수의 경우 Ex/Em 230 nm/430 nm에서 가장 높은 피크를 나타냈으며, 이는 DOM이 FA를 포함함을 나타낸다. 이 피크의 상단에 위치한 Ex/Em 330 nm/430 nm의 피크는 HA를 나타내는 지역으로,

하천수 원수에는 FA가 주로 존재하며 일부 HA가 혼합되어 존재한다고 판단된다. 3단계의 여과공정을 거친 3차처리수의 경우에는 동일한 위치에 피크가 존재하여 일부 DOC의 저감 등은 있을 수 있지만, 유기물의 선택적인 제거 등은 일어나지 않음을 확인할 수 있었다.

이와는 다르게 역삼투 공정에서는 피크의 위치 변동이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 역삼투 공정 생산수의 경우에는 기존에 존재하던 피크는 대부분 사라졌으며, Ex/Em 210 nm/290 nm 구간에 새로운 피크가 발생하였다. 이 부분은 분자량이 작은 단백질, 아미노산 등을 나타내는 구간으로 하천수에 존재하던 고분자 펠빅산 및 휴믹산이 역삼투 공정을 통해 대부분 제거가 되고 일부 저분자 물질만 존재하게 되는 것을 의미한다. 반면에 역삼투 공정 농축수는 높은 DOC를 나타내나, 하천수와 동일한 위치에 피크가 존재함으로써 유기물의 대부분이 농축수에 그대로 존재함을 나타낸다. 위와 같은 결과는 본 연구에서 사용한 처리 공정 중 유기물의 제어는 대부분 역삼투 공정이 담당하며, 따라서 고농도의 유기물이 우려가 되는 하천수를 사용할 경우에는 음용수용으로 역삼투 공정 생산수를 사용하여야 함을 보여준다.

Fig. 7의 EEM을 바탕으로, humification index (HIX), fluorescence index (FI), biological index (BIX) 등 3종의 형광지표를 산정하였다. HIX는 Ex/Em 254/300-345 nm와 Ex/Em 254/435-480의 형광강도의 비율이며, FI는 Ex/Em 370/450 nm와 Ex/Em 370/500의 형광강도의 비율이고, BIX는 Ex/Em 310/380 nm와 Ex/Em 310/430 nm의 비율이다 (Huguet et al., 2010; Zhao et al., 2015). HIX 값이 낮거나



**Fig. 7.** Excitation-emission map of selected samples (a) raw river water, (b) filtered water (3rd treatment) (c) reverse osmosis permeate (d) reverse osmosis concentrate.

높으면 유기물의 휴믹화 정도, 숙성도, 복잡성이 낮거나 높음을 의미한다. 일반적으로, HIX 값 10 미만은 휴믹화 정도가 낮은 것으로, 4 이하는 새로이 생성된 유기물로 판단할 수 있다 (Huguet et al., 2009). FI는 잠재적인 DOM 발생원 추정에 이용할 수 있으며, 이 값이 2.0에 가깝거나 더 높으면 휴믹화 정도가 낮고 (non-humic) 새로이 생성된 (autochthonous) 유기물일 가능성이 높고, 이 값이 더 낮으면 오래 전에 생성되어 휴믹화가 진행된 (allochthonous) 유기물일 가능성이 높다. 높은 BIX 값은 (>1) 유기물에 생물학적으로 생성되었음을, 낮은 BIX 값은 (<1) 생물학적으로 생성된 유기물 함량이 낮음을 의미한다 (Johnson

et al., 2011; Korak et al., 2015).

산정 결과, 하천수 원수와 3차 처리수의 HIX 값은 각각 0.534와 0.565로 유사하였으나, 역삼투 공정 농축수에서는 0.657로, 약간 증가하였다. 이는 3차처리까지의 공정에서는 DOM의 특성이 유사하나, 역삼투 농축수에서는 휴믹화 정도, 숙성도, 그리고 구조적 복잡성이 높은 특성을 가지는 DOM이 그렇지 않은 DOM에 비해 더 많이 제거되었음을 의미할 수 있으나, 모든 시료에서 HIX 값은 매우 낮으므로, 역삼투 공정에서의 DOM 제거능이 DOM 특성에 따라 주목할 정도로 상이하다고 할 수는 없는 것으로 생각된다. 하천수

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065

원수, 3차 처리수, 그리고 역삼투 공정 농축수의 FI와 BIX 값은 각각 1.634~1.637과 0.757~0.771로 유사한 값을 나타내었다. 이는 본 연구의 DOM이 휴믹화 정도가 낮고 비교적 최근에 생성된 유기물이며, 생물학적 반응에 의해 생성된 유기물 함량이 낮음을 의미한다. 또한, 이는 위의 EEM (Fig. 7)에서 알 수 있는 바와 같이, 3차 처리와 역삼투 공정에서도 DOM 특성변화가 적으므로, 3차 처리와 역삼투 공정이 DOM 특성에 따른 선택성이 낮음을 의미한다. 그러나, 역삼투 공정 처리수의 HIX, FI, 그리고 BIX 값은 각각 4.748, 4.846, 그리고 1.949로, 다른 시료에 비해 높은 값을 나타내었다. 이는 역삼투 공정 처리수가 원수나 3차 처리수에 비해 휴믹화 정도가 더 낮고 생물학적으로 생성된 유기물이 높음을 의미한다. 휴믹화 정도가 낮은 유기물은 일반적으로 분자량이 낮으므로 (Zhao et al., 2015), 역삼투 공정에서는 분자량이 낮고 간단한 구조의 유기물이 제거되지 않았음을 의미한다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 다양한 원수에서의 적용성을 높이는 동시에 생활용수와 음용수 등 다양한 용도의 용수를 생산할 수 있는 모듈형 이동식 물생산 장치를 개발하였고, 그 성능을 평가하였다. 모듈형 이동식 물생산 장치는 모래 여과-활성탄 여과-가압여과의 3단계의 여과를 통하여 생활용수를 생산하고, 역삼투 공정을 통해 음용수를 생산하는 공정으로 구성하였다. 실험실 및 현장 실험에서 생활용수 생산 시스템은 중수도 수질 기준에 대체로 적합한 수질을 보여주었다. 특히, 탁도, SS 와 같은 입자상 물질에 대해서는 우수한 처리 효율을 보여 주었지만, 유기물, T-N, 색도 등과 같은 용존 물질에 대해 처리에 한계를 나타내었다. 또한 일부 시료의 경우 대장균군이 검출됨으로써 인체 접촉이 가능한 생활용수로서의 적용 시에는 추가적인 소독 공정이 필요하다고 판단되었다.

추가적인 소독 공정으로써 자외선 조사와 염소 주입을 고려하였다. 두 경우 모두 안정적인 소독 효율을 보여 주었지만, 염소 주입의 경우에는 소독 후 붉은 색 계열의 침전물이 형성되었고, 다양한 분석을 통해 망간 산화물로 판명되었다. 따라서, 망간 계열의 침전물이 형성되지 않는 자외선 조사가 적절하다고 판단하였다.

안정적인 음용수의 생산을 위하여 역삼투 공정을 추가함으로써 용존 물질에 대한 처리 효율을 증대시켰으며, 음용수 수질 기준을 만족하는 처리수를 생산할 수 있었다. 용존 유기물의 성상 변화를 형광분석 및 이를 통해 얻을 수 있는 HIX, FI, BIX 등의 다양한 지표를 분석하였다. 그 결과 본 연구의 DOM이 휴믹화 정도가 낮고 비교적 최근에 생성된 유기물이며, 생물학적 반응에 의해 생성된 유기물 함량이 낮음을 확인하였다. 또한 역삼투 공정을 통하여 고분자의 휴믹산 등은 대체로 제거되고 휴믹화 정도가 더 낮고 생물학적으로 생성된 유기물 중 일부만 생산수에 존재함을 확인하였다.

본 연구에서 개발한 이동식 물생산 시스템은 재난 시 신속히 전개하여 용수를 공급할 수 있음은 물론 도서 및 산간 지역 등 상수도가 보급되지 않은 지역에서도 활용될 수 있으며, 적절한 개선과 최적화가 이루어진다면 하천수, 호소수, 지하수 등 다양한 원수에서도 성공적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술사업화 지원사업(17TBIP-C111068-02)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Bond, T., Gooslan, E.H., Parsons, S.A. and Jefferson, B. (2012). A critical review of trihalomethane and haloacetic acid formation from natural organic matter surrogates, *Environ. Technol. Rev.*, 1, 93-113.
- Chen, H., Liao, Z., Gu, X., Xie, J., Li, H. and Zhang, J. (2017). Anthropogenic Influences of Paved Runoff and Sanitary Sewage on the Dissolved Organic Matter Quality of Wet Weather Overflows: An Excitation-Emission Matrix Parallel Factor Analysis Assessment, *Environ. Sci. Technol.*, 51, 1157-1167.
- Fouga, G.G., Micco, G.D. and Bohe, A.E. (2009). Chlorination of manganese oxides, *Thermochim. Acta*, 494(1-2), 141-146.
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T. and Melin, T. (2007) State-of-the-art of reverse osmosis desalination, *Desalination*, 216, 1-76.



- Hosen, J.D., McDonough, O.T., Febria, C.M. and Palmer, M.A. (2014). Dissolved Organic Matter Quality and Bioavailability Changes Across an Urbanization Gradient in Headwater Streams, *Environ. Sci. Technol.*, 48, 7817-7824.
- Huguet, A., Vacher, L., Saubusse, S., Etcheber, H., Abril, G., Relexans, S., Ibalot, F. and Parlanti, E. (2010). New insights into the size distribution of fluorescent dissolved organic matter in estuarine waters, *Org. Geochem.*, 41(6), 595-610.
- Hur, J., Shin, J.K. and Park, S.W. (2006). Characterizing fluorescence properties of dissolved organic matter for water quality management of rivers and lakes, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 28(9), 940-948.
- Inamdar, S., Singh, S., Dutta, S., Levia, D., Mitchell, M., Scott, D., Bais, H. and McHale, P. (2011). Fluorescence characteristics and sources of dissolved organic matter for stream water during storm events in a forested mid-Atlantic watershed, *J. Geophys. Res.*, 116, G03043, doi:10.1029/2011JG001735.
- Johnson, M.S., Couto, E.G., Abdo, M. and Lehmann, J. (2011). Fluorescence index as an indicator of dissolved organic carbon quality in hydrologic flowpaths of forested tropical watersheds, *Biogeochem.*, 105, 149-157.
- Jung, J., Xing, Z, Lee, T. and Kwon, O.Y. (2014). Characteristics of Temporal Variation on Water Quality (T-P, T-N, CODMn, SS, BOD5) in the Jungrang Stream during Rainfall Event, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 36(6), 412-420.
- Kim, Y., Park, H. and Jeon, S, Korea Environment Institute (2014). Study on response to water supply damage for management of drought disaster, 2014-13.
- Korak, J.A., Wert, E.C. and Rosario-Ortiz, F.L. (2015). Evaluating fluorescence spectroscopy as a tool to characterize cyanobacteria intracellular organic matter upon simulated release and oxidation in natural water, *Water Res.*, 68, 432-443.
- Lee, K., Baek, H.J., Cho, C. and Kwon, W.T. (2011). "The Recent (2001-2010) Changes on Temperature and Precipitation Related to Normals (1971-2000) in the Republic of Korea", 6th KOREA-CHINA-JAPAN JOINT CONFERENCE ON GEOGRAPHY, 11, November, 2011, Korea.
- Lee, M., Choi, K., Kim, S. and Kim, D. (2009). Characterization of Dissolved Organic Matter in Stream and Industrial Waste Waters of Lake Sihwa Watershed by Fluorescence 3D-EEMs Analysis, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 31(9), 803-810.
- McKnight, D.M., Boyer, E.W., Westerhoff, P.K., Doran, P.T., Kulbe, T. and Andersen, D.T. (2001). Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity., *Limnol. Oceanogr.*, 46(1), 38-48.
- Seo, H.N., Lee, J.K., Min, H.J. and Lee, I.J. (2013). "Analysis of Characteristics and Correlation Between TOC and COD, SS Concentration in According to River Watershed", Proceedings of the 2013 Symposium and Annual Meeting, 4-5 July, Jeongsun, Korea, Korean Society of Environmental Agriculture.
- Sierra, M.M.D., Giovanela, M., Parlanti, E. and Soriano-Sierra, E.J. (2005). Fluorescence fingerprint of fulvic and humic acids from varied origins as viewed by single-scan and excitation/emission matrix techniques, *Chemosphere*, 58, 715-733.
- TechNavio (2014) Global Mobile Water Treatment Market 2015-2019 industry research report.
- Tobiason, J.E., Bazilio, A., Goodwill, J., Mai, X. and Nguyen, C. (2016). Manganese Removal from Drinking Water Sources, *Curr. Pollut. Rep.*, 2(3), 168-177.
- Velten, S., Knappe, D.R.U., Traber, J., Kaiser, H.P., von Gunten, U., Boller, M. and Meylan, S. (2011). Characterization of natural organic matter adsorption in granular activated carbon adsorbers, *Water Res.*, 45, 3951-3959.
- Water Information System (2017). <http://water.nier.go.kr>
- Xingxing, D. (2015). A study on surface water treatment using movable water purifying system, Master's Thesis, Hanbat University, Daejeon, Republic of Korea.
- Zhao, C., Wang, C-C., Li, J-Q., Wang, C-Y., Wang, P. and Pei, Z-J. (2015). Dissolved organic matter in urban stormwater runoff at three typical regions in Beijing: chemical composition, structural characterization and source identification, *RSC Adv.*, 73490-73500.

pp. 001-010

pp. 011-018

pp. 019-025

pp. 027-035

pp. 037-045

pp. 047-053

pp. 055-065