

## Removal characteristics of NOM in advanced water treatment using ceramic MF membrane

### 세라믹막(MF) 고도정수처리에서 NOM 제거 특성

Sang-Jun You<sup>1</sup> · Sung-Han Park<sup>1</sup> · Jae-Lim Lim<sup>2</sup> · Jeong-Min Suh<sup>3</sup> · Seong-Ho Jang<sup>3</sup> · Sung-Chul Hong<sup>3</sup> · Pyong-In Yi<sup>3\*</sup>

유상준<sup>1</sup> · 박성한<sup>1</sup> · 임재림<sup>2</sup> · 서정민<sup>3</sup> · 장성호<sup>3</sup> · 홍성철<sup>3</sup> · 이병인<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>K-water Geoje Office · <sup>2</sup>K-water Institute · <sup>3</sup>Department of Bioenvironmental Energy, Pusan National University

<sup>1</sup>K-water 거제권관리단 · <sup>2</sup>K-water 연구원 · <sup>3</sup>부산대학교 바이오환경에너지학과

**Abstract :** This study assessed the removal efficiency of NOM which is known as the precursors of DBPs in advanced water treatment using the ceramic membrane filtration, introduced the first in the nation at the Y water treatment plant (WTP). It is generally well-known that the removal of NOM by MF Membrane is very low in water treatment process. But, the result of investigation on removal efficiency of NOM in advanced water treatment using the ceramic membrane was different as follows. The removal rate of organic contaminant by the ceramic membrane advanced water treatment was determined to be 65.5% for the DOC, 85.8% for UV<sub>254</sub>, and 77 to 86% for DBPFP. The removal rate of pre-ozonation was found to be 6 to 15% more effective compared with the pre-chlorination. The removal rate of DOC and UV<sub>254</sub> in biological activated carbon(BAC) process was over 50% and 75%, respectively although the rate was decreased 10 ~ 20% according to analysis items in converting from GAC to BAC.

**Key words :** Ceramic membrane, NOM(Natural Organic Matter), GAC, BAC, Ozone

**주제어 :** 세라믹막, 자연유기물질, 입상활성탄, 생물활성탄, 오존처리

## 1. 서론

정수처리공정에서 막공정 도입시 일반정수처리 공정에 비해 많은 장점을 제공한다. 우선 기존 모래여과에 비해 막여과 공정은 원수 수질 변화에 상관없이 탁질 등 입자성 물질과 미생물 제거에 매우 안정되고 일관성 있는 처리 효율을 나타낸다. 외국문헌이나 실공정 운영결과에 의하면 막 유형이나 제조업체, 응집제 사용여부와 무관하게 평균 여과수 탁도 0.1NTU 이하를 안정적으로 유지하는 것으로 조사되었다(AWWA, 2005). 또한 침전공정을 생략할 수도 있어 수처리 공정을 컴팩

트화시켜 기존 정수장에 비해 작은 부지가 요구되는 장점도 있다(Cabassud et al., 1991).

하지만 정밀여과(MF)막으로는 0.001 ~ 0.1 μm 정도 크기의 용존유기물질(dissolved organic carbon, DOC)에 대한 제거는 곤란하며, 수처리공정에서 소독부산물 전구물질로 알려진 자연유기물질(NOM, Natural Organic Matter)의 제거는 어려운 것으로 알려져 있다(손 등, 2004, Schäfe et al., 2000). 따라서 NOM 제거 효율 향상을 위해서는 일반정수처리공정과 마찬가지로 정밀여과(MF, microfiltration) 공정에서도 응집 등 막 전처리 및 오존, GAC 등 고도정수처리 적용이 필요하다. 막여과와 함께 응집, 고도처리 공정을 도입시 탁질 뿐 아니라 비가역적 오

• Received 10 April 2014, revised 16 June 2014, accepted 30 June 2014.

\* Corresponding author: Tel : +81-55-350-5432 Fax : +81-55-350-5439 E-mail : water@pusan.ac.kr

염물질인 용존 유기물 및 콜로이드성 물질도 플록 안에 고정화시켜 제거시킬 수 있으며, 오존 활성탄 흡착공정을 통해, 막여과 단독 운전에 비해서 유기물 및 수중의 무기 콜로이드 입자들의 제거 효율이 향상된다(Wang et al., 2011; Meyn et al., 2010)

거제시 연초면에 위치한 Y정수장은 1979년 12월에 건설된 16천 m<sup>3</sup>/일의 규모의 재래식 정수처리공정으로 노후화로 인한 수처리 문제점 발생으로 2004년 9월부터 정수장 가동을 중지 하였으나, 기존정수장의 제한된 부지조건을 극복하고 조류발생으로 인한 맛·냄새 및 소독부산물 처리와 조류와 철·망간에 의한 파울링 현상을 극복하기 위하여 오존 및 화학약품에도 내구성이 강한 세라믹막(Clement et al., 2009; Lehman et al., 2009)을 국내 최초로 수돗물 고도정수처리공정(오존+세라믹막+GAC)에 도입하여 2013년 2월부터 수돗물을 거제시 옥포 지역에 공급하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내 최초로 수돗물 생산공정에 세라믹막 고도정수처리공정이 도입된 Y정수장 실공정 운영을 통하여, 계절별 전처리 공정(산화, 응집) 조건에 따른 세라믹막여과 및 활성탄 공정에서의 NOM 및 유기물 제거효율을 비교 분석하였으며, GAC 사용기간 경과에 따라 BAC(Biological Activated Carbon) 공정으로 전환에 따른 제거 효율변화를 조사하였다.

## 2. 실험 및 연구방법

### 2.1 실험재료 및 장치

#### 2.1.1 원수 수질 특성

2013년도 2월에서 12월까지 Y정수장 원수 수질 항목별 특성은 Table 1과 같다.

Y정수장 원수에 대한 NOM 특성을 분석한 결과 Table 2와 같이 소독부산물 전구물질로 알려진 소수성의 휴믹물질(Humics)이 35%를 차지하고 있으며 친수성물질이 65%인 것으로 조사되었다. 또한 친수성물질중 조류와 박테리아 등 미생물로 인해 발생하는 Polysaccharides 성분이 14%로 매우 높은 것으로 나타났으며, 원수중 TOC(total organic carbon) 대부분이 DOC 형태로 존재하는 특성을 나타내었다.

Table 1. Raw Water Qualities of Y Water Treatment Plant

Parameter	Raw Waters		
	Average	Maximum	Mimumum
pH	7.2	7.7	6.6
Temperature (°C)	20.8	32	8
Turbidity (NTU)	6.4	18.8	2.9
COD (mg/L)	3.8	4.4	3.2
DOC (mg/L)	2.12	2.79	1.40
UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	0.0532	0.0673	0.0404
SUVA (L/mg·m)	2.7	3.5	1.7
D-Mn (mg/L)	0.068	0.277	0.012

Table 2. NOM characterization of raw water by LC-OCD

Category	Approx. Molecular Weights/mol:					> > 20,000	~ 1000			300-500	< 350	< 350
	TOC (total OC)	DOC (dissolved)	POC (particulate)	HOC (hydrophobic)	CDOC (hydrophilic)		Humic Subst.					
							(HS)	Aromaticity	Mol-Weight			
	ppb-C	ppb-C	ppb-C	ppb-C	ppb-C		ppb-C	L/(mg*m)	g/mol			
2009/08/13	2173	2138	35	123	2015	258	886	5.00	705	427	438	6
2010/02/03	2042	2033	8	1	2032	344	753	2.50	685	493	442	0
2010/02/22	2231	2218	13	359	1859	311	629	3.86	685	428	491	0
2010/04/22	2743	2691	52	258	2432	258	639	3.62	695	484	895	157
Aver.	2297	2270	27	185	2085	293	727	3.7	693	458	567	41
Ratio(%)	-	-	-	8	92	14	35	-	-	22	27	2

### 2.1.2 세라믹막

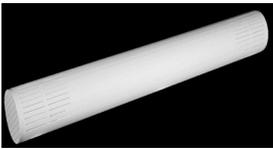
Y정수장에 설치된 세라믹막은 일본 META WATER사의 정밀여과막으로, 막사양은 Table 3에 나타내었으며, 전량여과방식으로 운전된다. 막 flux는  $1.5 \sim 2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{일}$ 로 운영되며, 4 ~ 5시간 여과 후 물-공기 병행 역세척을 실시한다. 막형태는 내압 단일체형(Monolith)으로 막 공급수는 막여과 채널로 공급되며, Fig. 1과 같이 채널 내부벽에 구성되어 있는 분리층에 의하여 여과가 이루어진 후 여과된 물은 집수셀을 통

하여 빠져나간다.

### 2.1.3 활성탄

활성탄 종류는 Norit사의 GAC 1240(유효경 0.6 mm, 균등계수 1.8) 제품이며, 여과지 규격은 B2.6 m×L5.5 m (여층두께 3 m) 4지로 구성되어 있다. 활성탄 접촉시간인 EBCT(Empty Bed Contact Time)값이 14.7분(상수도시설기준 5 ~ 15분)이며, 여과속도는 293.7 m/day(상수도시설기준 240 ~ 360 m/day) 으로 설계되어 운영되고 있다.

Table 3. Characteristics of MF ceramic membrane element

Parameter	Characteristics	Photograph of ceramic membrane
Nominal pore size	0.1 $\mu\text{m}$	
Dimension	180 mm × 1,500 mmL	
Membrane surface area	25 m <sup>2</sup>	
Size of channel	2.5 mm	
Number of channel	2,000	
Material	ceramic	

### 2.2 연구 방법

2013년도 3월부터 12월까지 10개월간 Y정수장 실공정에서 전처리공정(산화, 응집) 조건에 따른 세라믹막여과 및 활성탄 공정에서의 NOM 및 유기물 제거효율을 비교 분석하였으며, GAC 사용기간 경과에 따라 BAC 공정으로 전환에 따른 제거 효율변화를 조사하였다. 막여과 전처리 공정은 원수 수질변화에 따라 오존 또는 차아염소산나트륨을 0.8 ~ 2.5 mg/L의 범위에서 투입하였으며, 응집제(A-PAC : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10%, 비중 1.20)는 수질에 따라 20 ~ 25 mg/L로 차등 투입하였으며, 최소 30분 이상의 반응시간을 확보하였다.

현재 수중의 NOM 분석은 LC-OCD(DOC-Labor)를 이용한 방법이 가장 정확하나 장비가 고가인 관계로 일반적인 사용은 어려운 실정이다. 따라서 전처리 조건에 따른 세라믹막 여과공정에서의 NOM 제거 특성을 도출한 후, 월별 제거 효율 변화는 NOM과 많은 상관관계가 있는 DOC, UV<sub>254</sub>(Weishaar et al., 2003), 소독부산물FP를 유기물 분석 항목으로 설정하여, 매월 1회이상 분석하였다.

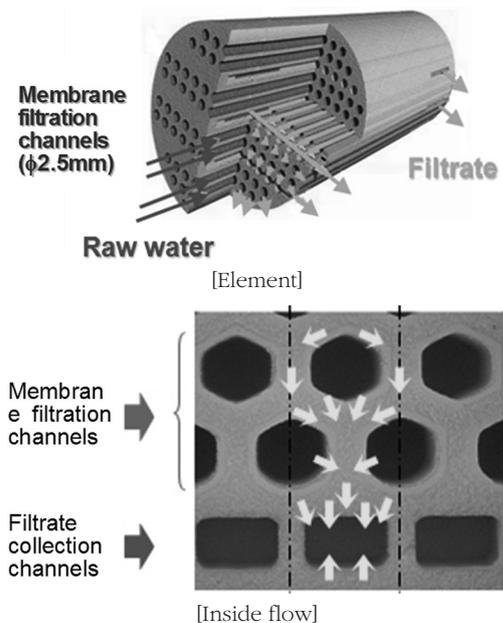


Fig. 1. Water path of ceramic membrane element in a module.

### 2.3 분석방법

DOC 농도는 분석시료를 0.45  $\mu\text{m}$  PP filter로 여과한 후 SHIMADZU사의 TOC Analyzer (TOC-V CPH)를 이용하여 분석하였으며, UV<sub>254</sub> 분석은 Standard METHOD 5910 방법으로 전처리 후 UV-VIS Spectrophotometer (cary 300, varian)을 이용하여 253.7nm 파장에서 흡광도를 측정하였다.

소독부산물 생성능 분석은 Standard METHOD 5710 B, Trihalomethane Formation Potential 방법을 적용하여 분석시료를 전처리 후, THMs는 먹는물수질공정시험기준 ES 05601.2b, 퍼지·트랩 GC/FID(450-GC, Bruker) 방법으로 분석하였으며, HAAs는 먹는물수질공정시험기준 ES 05552.2a, GC/ECD (6890N, Agilent) 방법으로, CH는 먹는물수질공정시험기준 ES 05551.2b, GC/ECD(7890N, Agilent) 방법으로 분석하였다.

NOM 특성분석은 Direct injection mode를 이용한 size exclusion chromatography와 고감도 유기탄소 검출기를 장착한 LC-OCD(DOC-Labor model 7, Germany)를 이용하여, Table 4와 같은 분석조건으로 전처리 과정 없이 2 ml의 시료주입 후 약 3시간 안에 분석이 완료되었고, TOC, DOC, CDOC(Chromatographic DOC) 값을  $\mu\text{g/L}$  단위로 제시하였다. 아울러 NOM을 분자량 20,000 Da 이상인 고분자물질인 polysaccharide부터 DBPs 전구물질로 잘

알려진 humic 물질(500-1,200 Da), building block(350-500 Da), 분자량 350 Da 이하인 acids와 neutral 물질 등으로 분자크기별로 분리하여 정량값을 제시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 전처리 조건에 따른 NOM 제거 특성

전처리 조건에 따른 세라믹막 여과공정에서의 NOM 제거 특성을 조사한 결과는 Table 5와 같다. 전처리 공정에서 A-PAC ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  10%, 비중 1.20)를 25 mg/L을 주입하였으며, 응집·막여과 공정을 통한 NOM 제거 특성과 전오존 처리에 따른 NOM 특성 변화를 LC-OCD를 이용하여 분석하였다. Fig 2에서 보듯이 응집·막여과를 통하여 원수 대비 biopolymer는 79%, humic 물질은 61%, Neutrals는 56% 순으로 전체적으로 큰 폭으로 감소되었으며, 고분자 물질이 저분자 물질에 비해 제거율이 높은 것으로 나타나 기존의 연구결과와 일치하며(Amy et al., 1992), 이는 알루미늄 응집제가 소수성 유기물을 제거한다는 Park 등(2013)의 연구와도 일치한다.

오존 처리에 따른 NOM 특성 변화를 조사하기 위하여 오존 2 mg/L을 주입후 LC-OCD를 이용하여 NOM을 분석한 결과, Fig 3과 같이 biopolymer의 변화는 거의 없었으며, 소수성인 humic 물질은 미미하게 감소한 반면, UV<sub>254</sub>의 큰 감소로 인해 SUVA값은 3.86에서 1.55 L/mg·m으로 크게 낮아졌다. 또한, 오존처리수의 응집·막여과를 통한 NOM 제거율은 미처리수에 비해 biopolymer 제거율은 9% 증가하였으나, humic 물질 및 building block 등 저분자 물질의 제거율은 감소되었으며, SUVA값은 0.41 L/mg·m로 미처리수보다 낮아진 것으로 나타났다. 이러한 결과는 오존처리를 통하여 humic 물질의 탄소 이중결합이 상당량 끊어져 단일결합으로 바뀌므로서, 저분자 유기물질로 변환이 쉬운 구조로 변환됨으로 나타나는 현상

Table 4. Analytical conditions of LC-OCD

Column : TSK HW 40 S, HW 50S
Injection Volume : 2 ml
Detector : K-200 UV254-Detector, Non-Dispersive Infrared Detector (NDIR)
Carrier Gas : Nitrogen 4.0 or 5.0, about 20 L/h.
Mobile Phase : Phosphate buffer 28 mmol, pH 6.58, about 2 L/24 hrs.
Acidification Solution : Phosphoric Acid pH 1.5, about 0.6 L/24 hrs.
Measuring Range LC-OCD : >10-5,000 $\mu\text{g/L}$ (compound-specific)
Detection Limit LC-OCD : 5-50 $\mu\text{g/L}$ (compound-specific)

Table 4. LC-OCD values of the NOM fractions by pretreatment condition

Category	Approx. Molecular Weights/mol:					> > 20,000	~ 1000			300-500	< 350	< 350
	TOC (total OC)	DOC (dis- solved)	POC (par- ticul)	HOC (hydro- phob)	CDOC (hydro- phil)	Bio-Poly- mers	Humic Subst.			Building blocks	Neutrals	acids
							(HS)	Aroma- ticity	Mol- Weight			
	ppb-C	ppb-C	ppb-C	ppb-C	ppb-C	ppb-C	ppb-C	L/ (mg*m)	g/mol	ppb-C	ppb-C	ppb-C
Raw water	2743	2691	52	258	2432	258	639	3.62	695	484	895	157
Filtered W.	1243	1214	29	158	1056	55	246	1.01	653	360	395	0
R.E(%)	55	55	43	39	57	79	61	-	-	26	56	100
Raw water	2042	2033	8	1	2032	344	753	2.50	685	493	442	0
ozone 2.0	2002	1954	20	30	1951	340	738	1.55	692	486	388	0
Filtered W.	1206	1203	3	33	1169	43	367	0.41	627	377	383	0
R.E(%)	41	41	60	-	42	88	51	-	-	24	13	-

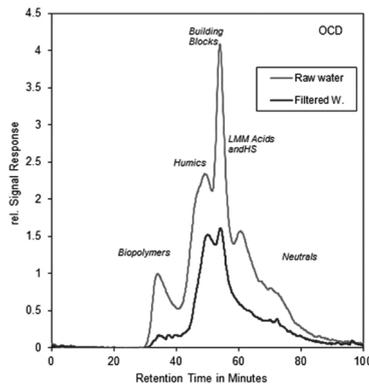


Fig. 2. LC-OCD chromatogram of raw water and filtered water.

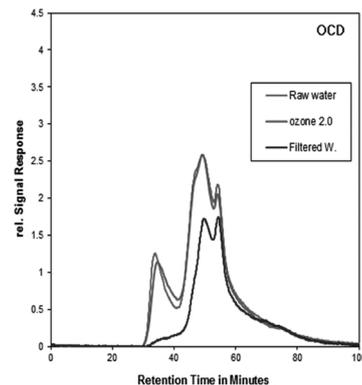


Fig. 3. LC-OCD chromatogram of raw water, ozonated, filtered water.

으로 판단된다. Westerhoff 등(1999)은 오존처리에 의한 NOM 구조변형에 대해서 연구한 결과, 소수성 유기물질중에서도 주로 방향족 구조를 가지는 물질들만 오존에 의해 구조적인 변화를 일으키고 주로 탄소 이중결합과 반응하여 carboxyl과 carboxyl 화합물을 형성한다고 보고하였다.

### 3.1 DOC 제거 특성

2013년도 3월부터 12월까지 실시한 수처리 공정별 DOC 농도 조사결과는 Table 5 및 Fig. 4와 같다.

전처리 조건에 따른 DOC 농도 변화를 조사한 결과, 전오존으로 처리 할 경우 약 12% 감소

하는 것으로 조사되었으며 전염소 처리를 한 경우 약 13% 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 강력한 산화제인 오존에 의해 용존유기물의 일부가 산화되어 제거되나(Hyung 등, 2002; Kim 등, 1999), 전염소 처리를 한 경우에는 수중에 존재하는 조류 등이 염소에 의해 산화·분해되어 조류 세포내에 있는 유기물질이 방출되었기 때문에 증가한 것으로 판단된다. 또한 전염소 처리를 한 시기의 원수중 조류 농도가 전오존 처리 시기에 비해 훨씬 높았던 것도 전염소 처리수의 DOC 농도가 증가한 원인으로 판단된다. 하지만 전처리후 막여과수의 DOC 농도는 원수대비 평균 약 30%가 감소한 것으로 조사되었으며, 산화제 종류에 따른 제거율은 전오존 처

리시 32%, 전염소 처리시 28%로 전오존 처리시 제거율이 다소 증가하는 것으로 나타났다. 유기고분자 막에 비해 세라믹막의 DOC 제거효율이 높은 이유는 세라믹막 형태가 내압 단일체형(Monolith)으로 막 공급수가 막여과 채널로 공급되면, Fig. 1과 같이 채널 내부 단일 흐름 특성에 의해 여과되는 동안 응집을 촉진시켜 플록 안에 용존유기물질을 고정화시킴으로서 유기물 제거효율이 향상되는 것으로 판단된다(Yonekawa et al, 2004).

GAC 유출수의 DOC 농도는 원수 대비 평균 65.5%가 제거된 것으로 조사되었다. 전처리 조건에 따른 제거율은 전오존 처리시 67.1%, 전염소 처리시 61.3%로 전오존 처리시 제거율이 약 6% 증가하는 것으로 조사되었다.

GAC 사용기간 경과에 따라 BAC 공정으로 전환되면서 DOC 제거율 변화를 조사한 결과, 흡착단계인 초기부터 BAC 초기단계인 7월 초까지 평균 70% 이상의 높은 제거율이 보였으며, 7

월말 이후 제거율이 60%대로 다소 감소하였지만, 일반적으로 BAC로 전환 단계로 여기는 Bed volume(여과수량을 GAC 체적으로 나눈 값)이 20,000이 넘어선 2013년 11월 이후에도 전처리 조건에 상관없이 평균 50% 이상의 안정된 제거율을 나타내었다.

### 3.2 UV<sub>254</sub>

2013년도 3월부터 12월까지 실시한 수처리 공정별 UV<sub>254</sub> 조사결과는 Table 6 및 Fig. 5와 같다. UV<sub>254</sub>는 수중의 탄소 이중결합과 같은 불포화결합 및 방향족 물질들의 함량을 나타내는 지표로, 전처리 조건에 따른 UV<sub>254</sub> 농도 변화를 조사한 결과 DOC 농도 보다 산화제 종류에 따른 제거율 차이가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 전오존으로 처리 할 경우 37%, 전염소를 한 경우 4% 감소되는 것으로 조사되어, 염소에 비해 오존에 의한 UV<sub>254</sub> 제거 효과가 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 강력한 산화제인 오존에 의해 humic 물질의 탄소 이중결합들이 상당량 끊어져 탄소 단일결합과 같은 구조로 바뀌었기 때문인 것으로 판단된다(Choi, 2008).

전처리 공정후 막여과수의 UV<sub>254</sub>는 원수대비 평균 65.1% 감소한 것으로 조사되었으며, 산화제 종류에 따른 제거율은 전오존 처리시 75.7%, 전염소 처리시 56.7%로, 전오존 처리시 제거율이 19% 증가하는 것으로 나타났다. GAC 유출수의 UV<sub>254</sub> 농도는 원수 대비 평균 85.8%가 제거되었으며, 전오존 처리시 88.9%, 전염소 처리시 83.2%로 전오존 처리시 제거율이 약 6% 증가하는 것으로 조사되었다.

GAC 사용기간 경과에 따라 BAC 공정으로 전환에 따른 UV<sub>254</sub> 제거율 변화를 조사한 결과, 흡착단계인 초기부터 BAC 초기단계인 8월까지 평균 89%의 높은 제거율을 보였으며, BAC 공정으로 전환 이후에도 평균 75% 이상의 안정된 제거율을 나타내었다.

수중에 존재하는 NOM의 특징을 SUVA

Table 5. DOC removal efficiency in Water Treatment Process

Parameter		RW	M,I	G,I (M,E)	G,E	
DOC (mg/L)	Average	2.24	2.29	1.56	0.82	
	Maximum	2.79	2.85	2.01	1.11	
	Minimum	1.42	1.24	1.05	0.32	
	R,E compared to RW(%)	Average	-	-3.17	29.56	63.54
		Ozone	-	12.1	32.1	67.1
Chlorine		-	-12.9	27.9	61.3	

\* RW : raw water, M,I : membrane influent, G,I : GAC influent(=M,E). G,E : GAC effluent, R,E : removal efficiency

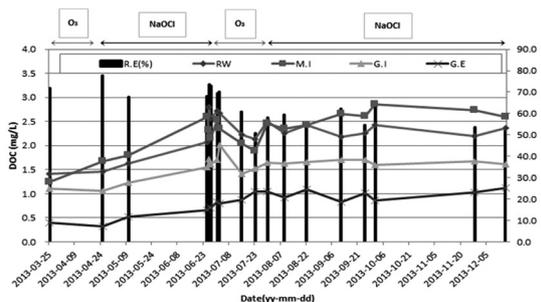


Fig. 4. DOC removal efficiency in Water Treatment Process.

Table 6. UV<sub>254</sub> removal efficiency in Water Treatment Process

Parameter		RW	M,I	G,I(M,E)	G,E
UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> )	Average	0.0532	0.0437	0.0188	0.0079
	Maximum	0.0673	0.0601	0.0262	0.0139
	Minimum	0.0404	0.0252	0.0090	0.0029
	R,E compared to RW(%)	Average	-	18.64	65.13
Ozone		-	37.0	75.7	88.9
Chlorine		-	4.0	56.7	83.2
SUVA (L/mg · m)		2,375	1,908	1,205	0.96

\* RW : raw water, M,I : membrane influent, G,I : GAC influent(=M,E), G,E : GAC effluent, R,E : removal efficiency

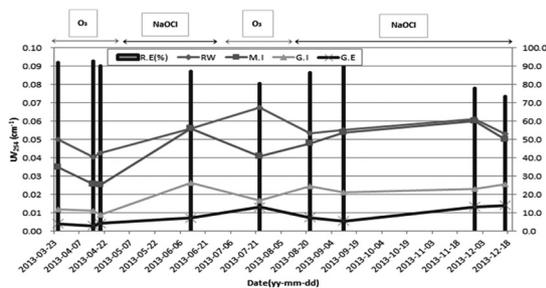


Fig. 5. UV<sub>254</sub> removal efficiency in Water Treatment Process.

(Specific UV absorbance), 즉 유기탄소농도에 대한 UV absorbance의 비율을 이용하여 특성을 파악하기도 하는데, GAC 유출수의 SUVA 값은 0.96 L/mg · m으로 원수 SUVA 값인 2.37 L/mg · m에 비해 낮아져, 전처리, 막여과 및 GAC 공정을 통해서 원수의 용존유기물질 중 소수성, 고분자 유기물질의 약 60%가 제거 또는 저분자 유기물질로 바뀌었음을 알 수 있다. SUVA 값이 4 이상이면 DOC는 주로 humic 물질로 이루어져 있으며, 상대적으로 소수성 방향족 물질과 고분자량 성분을 많이 함유한 유기물질로 구성되며, 3 이하이면 주로 nonhumic 물질로 이루어져 있으며, 상대적으로 친수성, 비방향족 물질과 저분자 성분을 많이 함유한 유기물질로 구성되는 것을 나타낸다(Kitis et al, 2001).

### 3.3 소독부산물 생성능

2013년도 3월부터 12월까지 실시한 수처리 공정별 소독부산물 생성능(THMFP, HAAsFP, CHFP) 조사결과는 Table 7 및 Fig. 6과 같다.

원수의 평균 소독부산물 생성능은 THMFP가 0.066 mg/L, HAAsFP는 0.128 mg/L, CHFP는 0.018 mg/L로 조사되었으며 계절별 특성은 하절기에 상승하는 것으로 나타났다. 특히 HAAsFP의 경우 하절기에 먹는물 수질기준(0.1 mg/L)을 초과하는 경우가 많이 발생하는 것으로 조사되었다.

하지만, 막여과수의 HAAsFP는 평균 0.053 mg/L으로 원수대비 평균 57.4% 감소하였으며, 산화제 종류에 따른 제거율은 전오존시 64.8%, 전염소시 54.1%로, 전오존 처리시 제거율이 약 10% 증가하는 것으로 조사되었다. GAC 유출수의 HAAsFP는 원수대비 평균 86.2% 제거되었으며 전오존 처리시 91.1%, 전염소 처리시 84.0%로, 전오존 처리시 제거율이 약 7% 증가하는 것으로 조사되었다.

또한, 막여과수의 THMFP도 원수대비 평균 50.1% 감소하였으며, 산화제 종류에 따른 제거율은 전오존시 41.6%, 전염소시 53.9%로, Son 등(2008) 연구와는 달리 전염소 처리시 제거율이 증가하는 것으로 조사되었는데, 향후 전오존 처리시 추가적인 조사가 필요할 것으로 판단된다. 하지만 GAC 유출수의 THMFP는 원수대비 평균 77.4% 감소하였으며 전오존 처리시 82.2%, 전염소 처리시 75.2%로, 전오존 처리시 제거율이 7% 증가하는 것으로 조사되었다.

마지막으로, 막여과수의 CHFP는 원수대비 평균 38.9% 감소하였으며, 산화제 종류에 따른 제거율은 전오존시 45.0%, 전염소시 36.9%로,

Table 7. DBPsFP removal efficiency in Water Treatment Process

Parameter		RW	G,I	G,E	
THMFP (mg/L)	Average	0,066	0,033	0,016	
	Maximum	0,155	0,097	0,059	
	Minimum	0,031	0,014	0,004	
	R,E compared to RW(%)	Average	-	50,1	77,4
		Ozone	-	41,6	82,2
Chlorine		-	53,9	75,2	
HAAsFP (mg/L)	Average	0,128	0,053	0,018	
	Maximum	0,213	0,119	0,079	
	Minimum	0,064	0,013	0,001	
	R,E compared to RW(%)	Average	-	57,4	86,2
		Ozone	-	64,8	91,1
Chlorine		-	54,1	84,0	
CHFP (mg/L)	Average	0,018	0,011	0,004	
	Maximum	0,023	0,023	0,018	
	Minimum	0,011	0,005	0,000	
	R,E compared to RW(%)	Average	-	38,9	79,1
		Ozone	-	45,0	90,4
Chlorine		-	36,9	75,4	

\* RW : raw water, G,I : GAC influent(=M,E), G,E : GAC effluent, R,E : removal efficiency

전오존 처리시 제거율이 약 8% 증가하는 것으로 조사되었다. GAC 유출수의 CHFP는 원수 대비 평균 79.1% 제거되었으며, 전오존 처리시 90.4%, 전염소 처리시 75.4%로, 전오존 처리시 제거율이 15% 증가하는 것으로 조사되었다.

GAC 사용기간 경과에 따라 BAC 공정으로 전환에 따른 소독부산물 생성능 제거율 변화를 조사한 결과, 흡착단계인 초기부터 BAC 초기단계인 8월까지 평균 80% 이상의 높은 제거율이 보였으며, GAC Bed volume 값이 20,000이 넘어선 BAC 단계에도 전처리 조건에 상관없이 평균 70% 이상의 안정된 제거율을 나타내었다.

결론적으로 전처리후 세라믹막여과 및 활성탄 공정을 통한 소독부산물 생성능 제거효율은 평균 80% 이상인 것으로 조사되었으며, 막여과 고도정수처리를 통해 소독부산물 생성능을 먹는물 수질기준 이하로 안정적으로 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

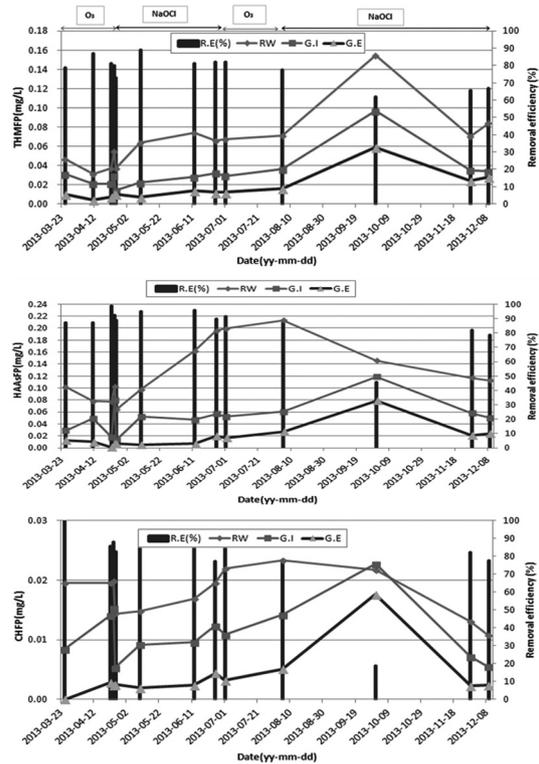


Fig. 5. DBPs FP removal efficiency in Water Treatment Process.

### 3.4 결론

본 연구에서는 세라믹막 고도정수처리 공정별 전처리 조건에 따른 NOM 및 유기물 제거효율을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 세라믹막 여과공정에서의 NOM 제거 특성은, 응집·막여과를 통하여 원수 대비 biopolymer는 79%, humic 물질은 61%, Neutrals는 56% 순으로 제거되었으며, 고분자물질이 저분자물질에 비해 제거율이 높은 것으로 나타났다.
2. 세라믹막 고도정수처리 공정별 DOC는 막여과수에서 원수대비 평균 30%가 제거되었으며, GAC 유출수는 원수 대비 평균 65.5%가 제거되었다. UV<sub>254</sub>는 막여과수에서 원수대비 평균 65.1% 제거되었으며, GAC 유출수는 평균 85.8% 제거된 것으로 나타났다. 전처리 조건에 따른 제거율은 DOC, UV<sub>254</sub> 모두 전오존 처리시 전염

소에 비해 약 6% 증가하였다.

3. 막여과수와 GAC 유출수의 소독부산물 생성능은 THMFP가 원수 대비 평균 50.1%, 77.4% 제거되었으며, HAAsFP는 원수 대비 평균 57.4%, 86.2% 제거되었으며, CHFP는 원수대비 평균 38.9%, 79.1% 제거된 것으로 조사되었다. 또한 전오존 처리 시 전염소 처리에 비해 제거율이 7 ~ 15% 증가하였다.
4. GAC에서 BAC 공정으로 전환에 따른 유기물질 제거효율 변화를 조사한 결과, 초기 GAC 단계에 비해서는 10 ~ 20% 감소되었지만, BAC 공정 전환 후에도 원수 대비 DOC는 50%, UV<sub>254</sub>는 75%, 소독부산물 생성능도 평균 70% 이상 안정적으로 제거되는 것으로 확인되었다.

## 참고문헌

- American Water Works Association, (2005) 87(3), pp.38-49
- Cabassud, C., Anselme, C., Bersillon, J. L. and Aptel, P. (1991) "Ultrafiltration as a non-polluting alternative to traditional clarification in water treatment," *Filtrat. Sep.*, 28(3), pp.194~198.
- Son, H. J., Jeong, C. W. and Kang, L. S. (2004) "The relationship between disinfection by product formation and characteristics of natural organic matter in the raw water for drinking water", *Korean society of environmental engineers*, 26(4), pp.457-466
- Schäfer A. I., Schwicker U., Fischer M. M., Fane A. G. and Waite T. D. (2000) "Microfiltration of colloids and natural organic matter", *Journal of membrane science*, 171(2), pp.151-172
- Wang, S., Liu, C. and Li, Q. (2011) "Fouling of microfiltration membranes by organic polymer coagulants and flocculants: Controlling factors and mechanisms", *water research*, 45(1), pp.57-365
- Meyn, T. and Leiknes, T. O., (2010) "Comparison of optional process configurations and operating conditions for ceramic membrane MF coupled with coagulation/flocculation pretreatment for the removal of NOM in drinking water production," *Water Supply, Res. Technol. Aqua.*, 59(2), pp.81~91
- Clement, J. (2009) "Ceramic membranes offer chance to use ozone," *International desalination & water reuse quarterly*, 19(1), pp.26-28
- Lehman S. G. ; Liu L. (2009) "Application of ceramic membranes with pre-ozonation for treatment of secondary wastewater effluent," *Water research*, 43(7), pp.2020-2028
- Weishaar, J. L., Aiken, G. R. Bergamaschi, B. A., Fram, M. S., Fujii, R. and Mopper, K., (2003) "Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon," *Environ. Sci. Technol.*, 37, pp.4702~4708.
- Amy, G., Sierka, R. A., Bedessem, J., Price, D., and Tan, L., (1992). Molecular size distributions of dissolved organic matter, *J. Am. Water Works Assoc.*, 84(6), pp.67-75
- Park, K. Y., Choi, Y. H., Jin, Y. C, Kang, S. K., Kweon, J. H. (2013) "Removal of natural organic matter and trihalomethane formation potential by four different coagulants during coagulation-microfiltration processes" *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 27(1), pp.101-112
- Westerhoff, P., Debroux, J., Aiken, G., and Amy, G., (1999) "Ozone-induced changes in natural organic matter(NOM) structure," *Ozone Sci. eng.*, 21, pp.551-570
- Hyung, H., Lee, S., Yoon, J. and Lee, C. H., "Effect of preozonation on flux and water quality in ozonation-ultrafiltration hybrid system for water treatment", *Ozone Sci. Eng.*, 22(6), pp 637~652, 2002.
- Kim, E. H., Kim, Y. U., Son, H. J., Jang, S. H. (1999년) "A fundamental study on ozone oxidation of humic substances" *The Korean journal of sanitation*, 14(3), pp.10-21
- Yonekawa, H., Tomita, Y. and Watanabe, Y.,

- “Behavior of Micro-particles in Monolith Ceramic Membrane Filtration with Pre-coagulation”, *Water Sci. & Technol.*, **50**(12), pp 317~325, 2004.
- Choi, I. H., Jung, Y. J., (2008) “Molecular Size Distributions of NOM in Conventional and Advanced Water Treatment,” *Journal of Korean Society on Water Quality*, **24**(6), pp.682-689
- Kitis M. (2001) Probing Chlorine Reactivity of Dissolved Organic Matter for Disinfection by-products (DBP) Formation; Relations with Specific Ultraviolet Absorbance(SUVA) and Development of the DBP Reactivity Profile, Ph.D. Dissertation, Clemson University, Clemson, SC.
- Son, H. J., Roh, J. S., Kim, S. G., Kang, L. S., Lee, Y. D. (2008) “The Removal of Natural Organic Matter and Disinfection By-product Precursor by Ozone,” *Journal of Korean Society on Water Quality*, **24**(6), pp.682-689