

고도정수처리를 위한 HCPAC-MBR 공정에서의 소독부산물 저감에 관한 연구

A Study on Removal of Disinfection By-products in High Concentration Powdered Activated Carbon Membrane Bio-reactor Process for Advanced Water Treatment

이송희^{1,*} · 장성우¹ · 서규태²

Lee-Song Hee^{1,*} · Jang-Sung Woo¹ · Seo-Gyu Tae²

1 한국수자원공사 경북지역본부

2 창원대학교 환경공학과

(2005년 7월 13일 논문 접수; 2006년 2월 13일 최종 수정논문 채택)

Abstract

This study was conducted to evaluate the performance of a membrane bioreactor filled with high concentration of powdered activated carbon (HCPAC-MBR) to reduce DBPs at the drinking water treatment. The pilot system was installed after the rapid sand filtration process whose plant was the conventional treatment process. The removal efficiencies of DBPs were measured during pilot operation period of 2 years. HAA and THM removal rates could be maintained around 80~90% without any troubles and then tremendous reduction of HAA and THM reactivity were observed more than 52%. The average removal rate of HAA formation potential (FP) and THM formation potential (FP) were 70.5% and 67.6% respectively. It is clear that the PAC membrane bioreactor is highly applicable for advanced water treatment to control DBPs.

Key words: High concentration of powdered activated carbon membrane bio-reactor (HCPAC-MBR), Advanced Water treatment, Haloacetic acids (HAAs), Trihalomethanes (THMs), Reactivity, Formation potential (FP)

주제어: 고농도분말활성탄, 혼합막시스템, 고도처리, 소독부산물, 소독부산물생성능

1. 서론

상수원수중에 포함된 천연유기물(NOM: Natural Organic Matter)은 정수장에서 산화 또는 소독목적

로 많은 정수장에서 사용되고 있는 염소와 반응하여 소독부산물을 형성하므로 정수처리에 있어 큰 문제점으로 지적되고 있다. 소독제인 염소는 대부분의 정수장에서 조류(Algae), 철, 망간, 암모니아성질소 제거를 위한 전처리(Pre-chlorination)와 병원성미생물의

*Corresponding author Tel: +82-2-3156-7751, FAX: +82-2-3156-7778, E-mail: lsh@kowaco.or.kr (Lee, S.H.)

불활성화를 위한 후처리(Post-chlorination)를 실시하고 있으나 염소 소독부산물은 대부분 발암성물질로 규명되어 세계 여러나라에서 수질기준으로 규제하고 있다. 미국환경청(USEPA)에서는 1994년도에 소독/소독부산물법(D/DBPs rule)을 제정하여 단계별로 물질 최대허용농도(MCL: Maximum Contaminant Level)을 정하였다. Stage I에서는 트리할로메탄(TTHMs: Total Trihalomethane)의 MCL을 0.080 mg/L로, 할로초산(HAA₅: Haloacetic acids) 0.060 mg/L로 정하고 있으며, Stage II에서는 트리할로메탄(THMs) 0.040mg/L, 할로초산(HAA₅) 0.030mg/L으로 한층 강화된 기준을 정하고 있다. 2003년 이전까지 우리나라의 먹는물 수질기준에서는 소독부산물중 트리할로메탄(THMs)만을 0.1mg/L로 규제하였으나, 2004년 7월부터 소독부산물 5종을 추가하여 규제하고 있다. 환경부 조사결과 대부분의 정수장이 트리할로메탄(THMs)에 대한 수질기준치를 준수하는 것으로 알려져 있으나 원수수질의 악화, 재래식 정수공정의 노후화 등으로 일부 정수장에서는 법정 기준치를 만족시키기 어려울 것으로 전망된다.

우리나라에서도 낙동강 수계를 위주로 전국적으로 17개 정수장이 활성탄처리공정을 도입하여 운영하고 있으나, 주로 오존/활성탄 공정으로 건설비가 많이 소요되고 운영관리가 복잡한 문제점을 안고 있다. 대안으로 시공의 용이성, 운영관리의 편의성 등을 장점으로 하는 혼합막(Hybrid membrane)시스템을 고려할 수 있다. 실험실 규모(Lab scale)로는 이미 소독부산물, 암모니아성질소 제거효율이 높은 것으로 입증되어 본 연구에서는 파일럿 규모(Pilot scale)로 장기간

운전하면서 전 세계적으로 수질규제가 점차 강화 추세에 있는 소독부산물에 대한 제거효율변화를 관찰하고 고도공정으로서의 적응성을 평가하고자 한다.

낙동강수계의 하류에 위치한 B정수장은 유기물 농도가 높고(평균 DOC농도: 3.5mg/L) 수온이 낮은 시기에는 암모니아성질소가 높게(최대농도: 1.8 mg/L) 검출되고 있어 오존/활성탄 처리공정으로 효율적인 정수처리가 곤란한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 B정수장 여과수를 유입수로운 고농도 분말활성탄(PAC)과 정밀여과막(MF)을 조합한 장치(HCPAC-MBR: High Concentration Powdered Activated Carbon Membrane Bio-reactor)를 설치하여 장기간(2년) 운전을 통한 소독부산물의 생성, 제거특성을 조사하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구를 수행한 B정수장의 원수와 여과수 수질을 **Table 1**에 나타내었다. B정수장의 여과수를 통과한 여과수를 HCPAC-MBR 반응조로 유입시켜 실험하였다. 중공사막이 설치된 파일럿플랜트에 고농도의 분말활성탄을 주입한 후 분말활성탄과 막의 유동성을 확보해 주기 위해 유량 60L/min의 공기를 반응조 바닥에 설치된 산기관으로 공급하였다. 공급공기량은 분말활성탄의 침강방지와 막표면에 부착방지 목적을 달성할 수 있도록 교반강도를 고려하여 결정하였다. 사용된 막은 미쓰비시(社)에서 생산된 폴리에틸렌(PE)제질의 흡입식 중공사막(공칭경: 0.1 μ m)을 사

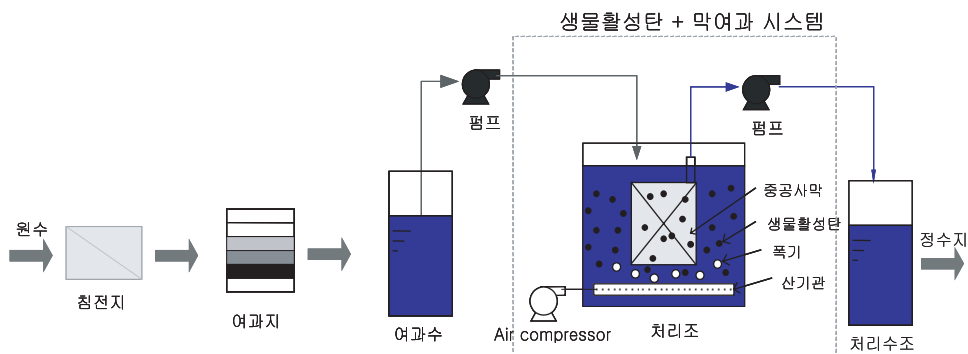


Fig. 1. Schematic diagram of the Pilot-plant.

Table 1. The characteristics of raw and filtered water qualities at the B plant

| Item | Unit | Raw water | Filtered water |
|-------------------------------|------------------|-------------|----------------|
| pH | - | 7.2~9.3 | 6.5~7.2 |
| DOC | mg/L | 1.82~4.05 | 1.53~2.83 |
| UV254* | cm ⁻¹ | 0.055~0.090 | 0.015~0.049 |
| SUVA** | L/mg.m | 2.2~3.0 | 1.0~1.6 |
| Turbidity | NTU | 55~110 | 0.04~0.10 |
| DO | mg/L | 6.5~12.1 | 6.0~11.5 |
| NH ₃ -N | mg/L | ND~0.65 | ND~0.02 |
| NO ₃ -N | mg/L | ND~3.22 | ND~4.8 |
| Alkalinity | mg/L | 35~69 | 18~55 |
| KMnO ₄ consumption | mg/L | 7.8~18.5 | 1.2~6.4 |
| T-N | mg/L | 2.0~5.0 | 2.1~2.5 |
| T-P | mg/L | 0.04~0.20 | ND~0.008 |

*:Absorbance at wave length 254 nm **: UV254/DOC × 100 ND : Not detected

Table 2. Operating condition at Pilot-plant

| Items | unit | Conditions |
|----------------------------|--------------|-----------------------------------|
| Reactor capacity | L | 250 (125 × 25 × 100cm) |
| Added PAC | - | Coconut shell |
| Injection PAC conc. | g/L | 40 |
| Flux | m/d | 0.72 |
| Suction type | - | continuous · intermittent suction |
| Intermittent suction cycle | suction/idle | 12min/3min |
| Operating water level | min. max. | 90cm~110cm |
| Back washing time | min | 3 |
| Air flow | /min | 20 × 3EA |

용하였으며, 실험기간동안 막여과 유속은 0.72m/d를 유지하였다. 반응조내 분말활성탄 야자계이며, 농도는 40g/L를 유지하였다. 반응조의 수위는 레벨센서와 자동주입펌프를 연동시켜 일정수위를 항상 유지토록 하였다. 파일럿플랜트 구성은 Fig. 1에 나타내고 있으며 장치의 운전조건을 Table 2에 요약하였다. 본 연구를 위해 2001년 6월부터 2003년 9월까지 2년 동안 운전하였다.

2.2. 활성탄의 특성실험

혼합막 장치내 투입할 분말활성탄 종류와 농도결정을 위해 3종류의 입상활성탄(GAC)를 325mesh (44 μ m) 이하로 분쇄하여 pH 7이 되도록 수 차례 증류수로 세척한 후 105°C에서 4시간 건조시켰다. 증류수 2L에 0.3g 활성탄을 취해 25°C, 200rpm으로 16시간 교반 후 용존유기탄소(DOC), 할로초산(HAA),

트리할로메탄(THM)을 측정하여 등온흡착선을 작성하였다. 용존유기탄소(DOC), 할로초산(HAA) 등은 흡착반응은 반응조로 자-테스트(Jar-tester)를 이용하였으며 트리할로메탄(THM)은 휘발성이므로 등온흡착반응 중에 휘발되는 것을 방지하기 500ml 유리병을 사용하였다. 시료와 트리할로메탄(THM) 표준용액을 일정량씩 증가시켜 반응병에 주입한 후 교반배양기에서 25°C, 200rpm으로 16시간 반응시켰다.

2.3. 용존유기탄소(DOC) 측정

용존유기탄소(DOC) 측정은 0.45 μ m membrane filter로 여과한 후에 Standard Method 5310C, "Persulfate-Ultraviolet Oxidation Method"에 준하여 실시하였다.

2.4. 트리할로메탄/할로초산(THM/HAA₅) 측정

트리할로메탄(THM) 분석은 USEPA 502.2법, "Purgeable Organic Compounds in Water by Capillary Column Gas Chromatography"에 준하여 실시하였고 HAA 분석은 EPA552.2 Micro-extraction method 중 acidic methanol을 이용한 Methylation 방법에 따랐다. 소독부산물생성능(Formation Potential)실험에서 염소 투입량은 5 * [DOC농도] + 7.5 * [암모니아성질소농도]을 근거로 하여 계산된 양만큼의 차아염소산나트륨(NaOCl)용액을 첨가하여 배양기에서 20°C, 72시간 동안 반응시켜 트리할로메탄(THM), 할로초산(HAA) 분석방법에 따라 분석하였다.

Table 3. Adsorption coefficient of Freundlich Isotherm for various types of PAC

| Parameters | Coal base | | Wood base | | Coconut base | |
|-------------------------|-----------|--------|-----------|--------|--------------|--------|
| | K | 1/n | K | 1/n | K | 1/n |
| DOC (mg/L) | 5.53 | 0.7468 | 12.03 | 0.6851 | 11.69 | 0.3921 |
| THM ($\mu\text{g/L}$) | 253.86 | 0.6598 | 87.38 | 0.7326 | 373.59 | 0.6068 |
| HAA ($\mu\text{g/L}$) | 70.41 | 0.7100 | 12.31 | 0.8972 | 33.99 | 0.6009 |
| MB adsorption (ml/g) | 170 | | 80 | | 190 | |
| Iodine value (mg/g) | 975 | | 982 | | 1010 | |

3. 결과 및 고찰

3.1. 분말활성탄(PAC) 등온흡착

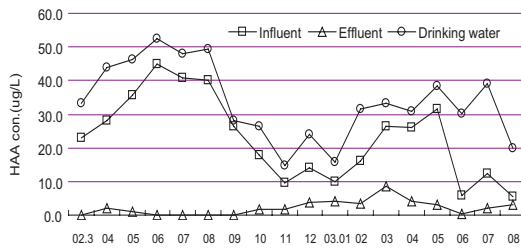
활성탄 등온흡착실험은 반응조내에 첨가할 분말활성탄의 선정과 적절한 주입농도를 알기 위한 준비실험으로써 실시하였다. 3종류(석탄계, 목탄계, 야자계)의 분말활성탄에 대하여 용존유기탄소(DOC) 표준용액(KHP; potassium hydrogen phthalate), 할로초산(HAA), 트리할로메탄(THM) 표준용액을 각각 사용하였다. 제거대상물질 모두 등온흡착식(Freundlich equation)을 잘 따르는 것으로 나타났으며, 최소자승법으로 구한 Freundlich 상수 값을 Table 3에 나타내었다.

일반적으로 Freundlich 등온 흡착실험 결과 $1/n$ 의 값이 2보다 큰 값을 보이면 등온흡착선의 기울기가 크게 되어 활성탄량을 증가시켜도 피흡착물질이 잘 제거되지 않으며, $1/n$ 이 0.1~0.5일 때 흡착되기 쉽고, 이 범위 내에서는 K값이 클수록 효과적으로 알려져 있다. Table 2의 결과에서 야자계 활성탄이 석탄계와 목탄계보다 K, $1/n$ 값 모두 양호한 것으로 나타났다. 분말활성탄의 흡착능을 Freundlich 상수값으로 단순 비교할 수는 없지만 제거대상물질에 대해 우수

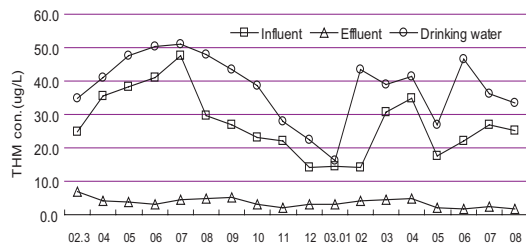
한 값을 나타낸 야자계 분말활성탄을 본 연구에 사용된 파일럿플랜트 반응조에 투입하도록 결정하였다.

3.2. 소독부산물(DBPs)의 제거특성

소독부산물의 생성량은 유입되는 원수중 자연유기물(NOM)의 농도, 주입되는 염소량, 수온, pH, 반응시간, 브롬이온 등 많은 인자들이 생성특성에 관여하는 것으로 알려져 있다. B정수장 여과수, 정수 그리고 파일럿플랜트 처리수의 소독부산물(HAA, THM) 조사결과를 Fig. 2에 나타내었다. B정수장 여과수와 정수의 할로초산, 트리할로메탄 농도는 거의 비슷한 경향을 보이고 있다. 수온이 상승하는 6~8월(2002년 평균; 25°C)에는 높은 값을 나타내는 특성을 보이고 있으며, 최고농도는 할로초산(HAA) 78.2 $\mu\text{g/L}$, 트리할로메탄(THM) 57 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 파일럿플랜트 유입수 중의 할로초산(HAA), 트리할로메탄(THM) 평균농도는 각각 23.5 $\mu\text{g/L}$, 27.9 $\mu\text{g/L}$ 이었으며, 유출수는 2.1 $\mu\text{g/L}$, 3.4 $\mu\text{g/L}$ 로서 유입수 농도에 관계없이 매우 낮은 농도를 유지하고 있다. 파일럿플랜트 유출수 중의 소독부산물 농도는 B정수장 정수에서 검출되는 양의 10% 이하인 것으로 나타났다. 본 파일럿플랜트를 2년 이상 연속운전한 현재까지도 천연유기물(DOC 기준) 제거효율은 10~20%를 보이는 반면에



(a) The variation of HAA concentration



(b) The variation of THM concentration

Fig. 2. HAA, THM concentrations of influent, effluent of pilot plant and drinking water of B plant (2002. 3~2003. 8)

소독부산물은 80~90%의 높은 제거율을 지속적으로 유지하고 있다.

분말활성탄의 흡착능이 과과점에 도달한 현재까지도 자연유기물(NOM)과 소독부산물에 대한 제거특성을 유지하는 것은 반응조내의 활성탄에 부착 성장하는 미생물의 대사작용으로 인한 것으로 판단된다. 활성탄의 표면은 다공성으로 표면적이 커서 부착 성장하는 미생물량이 상대적으로 크며(9~12), 활성탄내의 미생물 순응기간은 일반적으로 약 4~6주 정도로 보고되고 있다. 또한, 활성탄 부착미생물이 $1.1 \times 10^4 \text{cell/cm}^3$ 이상 존재할 때 생물활성탄의 기능을 발휘할 수 있고 $1.1 \times 10^8 \text{cell/cm}^3$ 이상에서는 최대의 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 실험에서도 운전개시 2개월 후 활성탄 부착미생물의 개체수가 $3.4 \times 10^4 \text{cell/cm}^3$ 으로 측정되었으며, 현재 $2.6 \times 10^6 \text{cell/cm}^3$ 의 평균 개체수를 보여 생물활성탄으로서의 기능을 발휘하고 있는 것으로 판단된다.

3.3. 미생물의 생분해작용에 의한 소독부산물(DBPs)의 제거 기작

미생물에 의한 소독부산물의 제거 기작을 알아보고자 막만 사용한 경우, 모래만을 이용한 경우, 미생물이 부착된 모래를 이용한 경우, 미생물이 부착된 활성탄을 이용한 경우(평균 DOC 제거율 20.1%일 때) 등 모두 4가지 제거과정으로 나누어 실험을 실시한 결과를 Table 4에 나타내었다.

막만을 사용하여 소독부산물을 처리한 경우와 모래만을 이용한 경우에서는 HAA는 거의 제거되지 않았고 THM은 18.1%와 6.6%가 제거됨을 알 수 있었다. 그러나 THM은 휘발성 물질이므로 실험도중 반응조에서 휘발하여 감소한 것으로 사료된다. 미생물이 부착된 모래를 이용한 처리 실험결과 HAA의 경우 50%의 제거율을 나타낸 반면 THM은 7.3%만이 제

거되어 미생물에 의한 제거특성은 HAA가 THM보다 뛰어난 것으로 나타났다. 모래만을 이용한 경우와 비교했을 때 아주 높은 제거율로서 이것은 미생물의 생물학적 제거특성을 보여주는 것이라 할 수 있을 것이다. 미생물이 부착된 분말활성탄의 Slurry를 이용한 제거 실험결과 HAA 72.7%, THM 99.6%의 높은 제거율을 보였다. 활성탄에 미생물이 부착 서식할 때 미생물을 부착된 상태 그대로 유지하면서 살균하고 그 때에 활성탄의 흡착만으로 소독부산물을 얼마나 제거하는지를 알아보기 위해 여러 가지 방법(UV 살균, 멸균기를 이용한 고압멸균, 건조등)으로 시도해 보았지만 그때마다 활성탄의 흡착능이 증가하여 정확한 값을 얻는데는 실패하였다. Table 4를 통하여 HCPAC-MBR 시스템에서 소독부산물의 제거 기작을 명확하게 규명할 수는 없지만 HAA는 활성탄의 흡착과 미생물의 생분해 작용이 동시에 영향을 주어 제거되며, THM 제거는 미생물에 의한 생분해 작용보다는 활성탄의 흡착력에 의해 주로 제거되는 것으로 조사되었다.

3.4. 소독부산물의 생성반응도(Reactivity)

파일럿플랜트 유입수와 유출수 중의 천연유기물질(NOM)의 할로초산(HAA)과 트리할로메탄(THM)에 대한 생성반응도(소독부산물생성능/용존유기물농도)를 Table 5에 나타내었다. 재래식 정수공정인 B정수장 처리수 생성반응도가 파일럿플랜트 유출수에 대한 값보다 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다. B정수장 모래여과수의 할로초산(HAA), 트리할로메탄(THM) 생성반응도는 각각 $32.3 \mu\text{g}/\text{mg}$, $40.7 \mu\text{g}/\text{mg}$ 이며, 파일럿플랜트유출수에 대한 생성반응도는 $13.8 \mu\text{g}/\text{mg}$, $19.7 \mu\text{g}/\text{mg}$ 으로 52~57%의 제거효율을 보였다. 실험결과로 미루어 B정수장 여과수와 정수는 생성반응도가 높기 때문에 급·배수관망에서 잔류염소

Table 4. HAA&THM behavior by various process for Influent and Effluent

| Process \ DBPs | HAA($\mu\text{g}/\text{L}$) | | | THM($\mu\text{g}/\text{L}$) | | |
|--------------------|-------------------------------|----------|------------|-------------------------------|----------|------------|
| | Influent | Effluent | Removal(%) | Influent | Effluent | Removal(%) |
| Only membrane | 396.2 | 391.6 | 1.2 | 214.5 | 175.7 | 18.1 |
| Only sand | 393.0 | 386.8 | 1.6 | 275.0 | 256.8 | 6.6 |
| Sand+microorganism | 756.5 | 378.1 | 50.0 | 781.8 | 724.4 | 7.3 |
| PAC+microorganism | 570.2 | 155.4 | 72.7 | 776.7 | 3.4 | 99.6 |

Table 5. HAA & THM reactivities of influent, effluent of pilot plant and treated water of B plant

| Water | $\mu\text{g HAAFP/mg DOC}$ | $\mu\text{g THMFP/mg DOC}$ |
|---------------|----------------------------|----------------------------|
| Treated water | 29.5 | 38.2 |
| Influent | 32.3 | 40.7 |
| Effluent | 13.8 | 19.7 |
| Removal (%) | 57.3 | 51.7 |

와 반응하여 소독부산물(HAA, THM) 농도가 증가될 수 있음을 나타낸다.

3.5. 소독부산물 생성능(FP: Formation Potential) 제거특성

Fig. 3은 4개월(2003. 5~8) 동안 파일럿플랜트 유입수와 유출수의 소독부산물(HAA, THM)농도와 생성능 농도(HAAFP, THMFP)를 나타내고 있다. 유입수 중의 할로초산생성능(HAAFP), 트리할로메탄생성능(THMFP)의 평균농도는 $59.1\mu\text{g/L}$, $72.1\mu\text{g/L}$ 이었고, 유출수 중의 할로초산과 트리할로메탄생성능의 평균농도는 $19.8\mu\text{g/L}$, $25.3\mu\text{g/L}$ 의 값을 보여 제거율은 약 70% 정도로 나타났다. B정수장 여과수에서 할로초산(HAA) 생성농도는 생성능 농도의 19%이었으

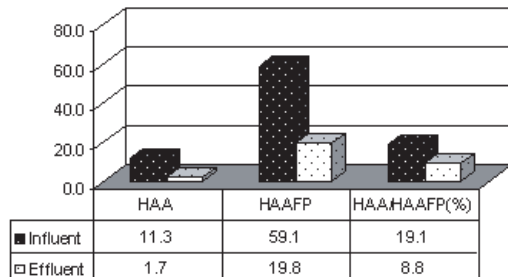
며, 트리할로메탄은 34%로 나타났다.

3.6. 장기운전에 따른 HCPAC-MBR 시스템의 막여과 특성

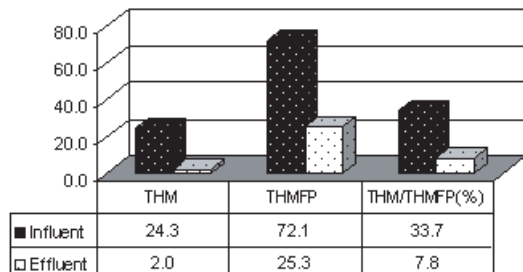
2001년 6월부터 2003년 10월까지 약29개월 동안 운전한 Pilot-plant의 Segment별 운전조건을 Table 6에 나타냈으며 Fig. 4는 장기운전하는 동안 막여과저항의 변화를 나타내고 있다. 운전 중 막교체는 새막으로 10회, 재생막으로 7회 실시하였으며 Fig. 4의 각 정점에서 막을 교체하였다. 흡인형태에 따른 조사결과, 12분 흡인/3분 휴지 type의 간헐식 흡인(Run-2)과 90분 흡인/30분 휴지 type을 단순 비교하기는 어렵지만(계절적, 막 상태, 원수 등 Matrix 차이로) 전자가 후자보다 여과저속가능시간이 월등히 길어지는 것으로 조사되었으며 역세척을 실시한 경우가 그렇지 않았을 때보다 여과저속시간이 1.8배가 더 길었다. 반응조의 유기물 농축을 해소하기 위하여 실시한 유입수 오존처리 여부에 따른 실험결과, 오존처리를 했을 때(Run-6)가 하지 않았을 때(Run-5)보다 여과저항 증가 속도가 현저히 느려짐을 알 수 있었다. 그러나, 오존처리된 유입수가 생물반응조내로 지속적으로

Table 6. Operation condition by various segment at Pilot-plant

| Items | Run-1 | Run-2 | Run-3 | Run-4 | Run-5 | Run-6 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Status | St 1 | St 2 | | | St 3 | |
| Added PAC con. (g/L) | 20 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| suction/Idle (min) | 90/30 | 90/30 | 12/3 | 12/3 | 12/3 | 12/3 |
| Pore size (μm) | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.4 | 0.1 |
| Air backwashing | × | × | × | × | ○ | ○ |
| Added ozone | × | × | × | × | × | ○ |



(a) The removal rates of HAA and HAAFP



(b) The removal rates of THM and THMFP

Fig. 3. The removal rates of DBPs and DBPFPs at the pilot plant.

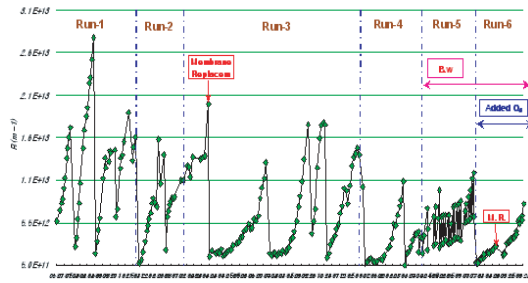


Fig. 4. Variation of filtration resistance in HCPAC-MBR process.

공급되었을 때 반응조내의 MF 중공사막이 산화되어 33일 만에 끊어지는 현상이 발생하였다. 이것은 모래 여과수를 오존처리 후 잔류오존을 유지한 채 생물반응조에 공급하여 막이 잔류오존에 의해 산화된 것으로 판단되며 반응조내 유기물 농축해소를 위한 방안 에 대한 실험은 향후과제로 선정하고자 한다..

4. 결론

낙동강 하류에 위치한 B정수장과 같이 원수수질이 나쁜 재래식 공정의 정수장은 수온이 높은 시기에는 소독부산물 농도가 높게 검출되어 정수처리에 어려움을 겪고 있다. 우리나라에서 많이 적용되고 있는 고도처리 공정인 오존/활성탄, 활성탄 공정 등을 검토할 수 있으나, 건설비가 많이 소요되고 운영관리가 복잡하여 많은 전문인력이 필요한 단점이 지적되고 있다. 대안 공정으로 본 연구에서 고농도분말활성탄 혼합막(HCPAC-MBR)시스템을 장기간 운영하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 반응조에 주입할 활성탄은 등온흡착실험에서 제거대상물질인 용존유기탄소(DOC), 소독부산물(HAA, THM)에 대한 흡착성이 우수한 야자계로 결정하였으며, 투입농도는 막여과 저항(Resistance)가 가장 적은 농도 40g/L로 결정하였다.
2. 장기간(2년) 운전이후에도 용존유기탄소(DOC) 제거율이 10~20%로 유지되고 있으며, 소독부산물(HAA, THM) 제거율은 80~90%로 높게 유지되고 있다. 이는 분말활성탄에 부착성장하는 미생물 개체수가 $2.6 \times 10^6 \text{ cell/cm}^3$ 로 생물활성탄 기능에 의한 처리효과로 판단할 수 있다. 이러한 제거효율은

낙동강 하류의 오존/활성탄 정수장보다 우수한 것으로 평가되었다.

3. 미생물의 생분해작용에 의한 소독부산물의 제거기작을 알아보기 위한 실험에서 막과 모래만을 이용했을 때는 HAA와 THM은 거의 제거되지 않았고, HAA는 활성탄의 흡착과 미생물의 생분해 작용이 동시에 영향 주어 제거되었고 THM 제거는 미생물에 의한 생분해 작용보다는 활성탄의 흡착에 의해 주로 일어나는 것으로 조사되었다..

4. 소독부산물의 생성반응도(Reactivity)는 본 실험 장치에서 52~57%의 제거율을 보였으며, 재래식 처리공정의 B정수장 처리수 보다 2배 이상 낮은 농도를 유지할 수 있어 관망에서의 추가적인 소독부산물 생성을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

5. B정수장의 여과수에서 생성된 할로초산(HAA), 트리할로메탄(THM) 평균농도는 $11.3 \mu\text{g/L}$, $24.3 \mu\text{g/L}$ 이며, 생성능(Formation Potential)농도는 $59.1 \mu\text{g/L}$, $72.1 \mu\text{g/L}$ 으로 조사되어 낮은 생성도를 나타내고 있다. 혼합막장치의 소독부산물생성능 제거율은 약 70% 정도로 소독부산물 제거율과 비슷하였다.

6. 장기운전에 따른 HCPAC-MBR 시스템의 막여과 특성실험결과 간헐식 흡인형태, 역세척 실시여부, 오존처리 여부 등에 따라 여과지속가능시간이 월등히 연장되는 것으로 나타났다.

7. 이상의 결과들로부터 본 연구에 적용된 농도분말활성탄 혼합막(HCPAC-MBR)시스템 점차 강화되고 있는 소독부산물에 대한 수질기준을 달성을 위한 재래식 정수장의 개량방안으로 충분히 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 오정우 (1998) 상수도 관로내에서의 THMs 생성특성. *한국물환경학회지*, 14(2), pp. 223-228.
2. 이상엽 (2001) Evaluation of membrane filtration processes for drinking water treatment in terms of natural organic matter(NOM) and disinfection by-products(DBPs). *광주과학기술대학석사학위논문*, 35.
3. 임도훈 (1999) 생물활성탄 여과공정을 위한 활성탄선정 방법에 관한 연구. *건국대학교 석사학위논문*, pp. 32-39.
4. 환경부 (1997) 먹는물 수질관리지침.
5. Arora, H. et al. (1997) DBP occurrence survey, *J. Am. Water Works Assoc.*, 89(6), pp. 60-68.

6. DeWaters, J.E. and DiGiano, F.A., (1990) The influence of ozonated natural organic matter on the biodegradation of a micropollutant in a GAC bed, *J. AWWA*, pp. 69~75.
7. Servais, P., Billon G., Ventresque, C. and Bablon, G.P. (1991) Microbial activity in GAC filters at the Choisy-le-roi treatment plant, *J. AWWA*, **83**(2), pp. 62~68.
8. Sohn, Jinsik (2000) Comprehensive assessment and modeling of disinfection by-products (DBPs), DBP precursors, and disinfectants, thesis.
9. Speitel, G.E., Turakhia, M. H. and Lu, C.J. (1989) Initiation of micropollutant biodegradation in virgin GAC column, *J. AWWA*, **81**, pp. 168~176.
10. Stringfellow, W.T., Mallon, K. and DiGiano, F.A., (1993) Enumerating disinfecting bacteria associated with particles released from GAC filter-adsorbers. *J. AWWA*, pp. 70~80.
11. Tien, C.T. and Huang. C.P. (1987) Adsorption behavior of Cu(II) onto sludge particulate surface, *J. Env. Eng.*, **113**(2), pp. 285~298.
12. Voice, T.C., Pak, D.W., Xianda, Z., Jing, S., and Hickey, R.F. (1992) Biological activated carbon in fluidized bed reactors for the treatment of groundwater contaminated with volatile aromatic hydrocarbons. *Water Research*, **26**(10), pp. 1389~1401.
13. Weber, W.J., Pirbazari, M. and Melson, G.L. (1978) Biological growth on activated carbon: an investigation by scanning electron microscopy, *Envir. Sci. and Tech.*, **12**(7), 817~819.
14. 北川陸夫 (1990) 活性炭水處理技術と 管理. 日本工業新聞社, **74**.