

정수장에서 막여과 전처리용 F/A 공정 개발을 위한 Filtralite 여재의 적용성 연구

김 준 현[†] · 전 용 성 · 곽 영 주 · 장 정 우*

인천시수질연구소, *(주)에코니티
(2015년 11월 26일 접수, 2015년 12월 10일 수정, 2015년 12월 18일 채택)

A Study of Filtralite Media Applicability for Development F/A Process of Membrane Filtration Pre-treatment Process in the Water Purification Plant

JUN-Hyun Kim[†], Yong-sung Jun, Young-ju Kwak, and Jung Woo Jang*

Water Quality Research Center, Waterworks Headquarters, Incheon Metropolitan City
*ECONITY Co., Ltd.

(Received November 26, 2015, Revised December 10, 2015, Accepted December 18, 2015)

요 약: 본 연구는 잔류함으로써 문제를 일으킬 수 있는 응집제를 사용하지 않고 물리적인 처리만을 사용하는 막여과 정수처리의 전처리로 F/A 공정을 구성하고자 하였고 이를 구성하는 여재의 성능을 연구하였다. 특히, 탁질 물질과 유기물 제거가 가능한 것으로 알려진 Filtralite의 도입 가능성을 검토하였다. Filtralite의 탁도 제거효율은 원수대비 83~84%로 여과사와 비슷한 결과 값을 나타내었으며 여재표면에 잘 발달된 공극 때문에 유기물 제거능은 여과사보다 50% 더 높게 나타났다. 따라서 F/A 공정을 구성함에 있어 여과사보다 Filtralite가 더 효율적이라 검토되었다. 활성탄과 연계한 F/A 공정을 구성하여 막여과 처리 시스템의 전처리효율을 실험한 결과, TOC 농도는 TMP의 증가에 큰 영향을 주는 것으로 판단되어 막오염 저감에 유기물 제거가 중요함을 확인하였으며 유기물 제거 효율이 뛰어난 여재 사용이 필요할 것으로 판단되었다.

Abstract: In this study, water purification system without coagulant was consisted of F/A and membrane to produce purified water which only uses physical treatment without coagulant. Because the use of coagulant has a possibility remaining of hazardous aluminum with our health. Especially, the Filtralite was reviewed the possibility to remove turbidity and organic material. It was found that the turbidity removal rate of Filtralite was 83~84%. It show that Filtralite has similar efficiency to sand-filter. But Filtralite has higher 50% removal rate of organic material than sand-filter due to well-developed pore on the surface of it. So, Filtralite could be used to substitute the sand-filter for the F/A process due to higher removal rate. And also coupled with activated carbon in F/A process, TMP was increased by TOC value. To prevent increasing TMP, media that has outstanding organic adsorption ability should be used.

Keywords: Media, Filtralite, Pre-treatment, Membrane filtration, Sand-filter

1. 서 론

하천수 또는 호소수를 상수원수로 사용하는 국내 중 대규모 정수시설 중 많은 곳에서 계절적인 조류 대발생 및 맛·냄새 등의 문제가 주기적으로 발생하고 있지만 응집/침전/여과/소독을 기본으로 하는 재래식 정수처리 공정으로는 맛·냄새, 소독부산물, 미량유해유기물질

등을 효과적으로 제어하는데 한계가 있다. 이와 함께 최근정수처리에 관한 기준으로 규제대상이 된 *지아디아* (*Giardia*) 및 *크립토스포리디움*(*Cryptosporidium*)에 대하여 보다 근본적인 정수처리 대책이 필요한 상황이다[1].

이러한 기존 처리방식의 한계성을 해결하기 위해 최근 막여과 방식을 이용한 정수처리 공정이 연구되고 있다. 정밀여과(MF : Micro Filtration), 한외여과(UF: Ultra Filtration)를

[†]Corresponding author(e-mail: dmsdlskwnd@korea.kr, <http://orcid.org/0000-0002-6914-2627>)

이용한 막여과 정수처리방식은 탁도와 병원성 미생물에 대한 완벽한 제거 성능을 나타내 기존 급속모래여과 시스템을 대체할 만한 획기적인 기술로 주목받고 있다. 또한 오존 활성탄 등 기존 단위 고도정수처리공정과 용이하게 결합하여 원수의 특성과 수질관리 목표에 적합한 최적의 고도정수처리 공정 구성이 가능하고 기존 정수처리방식에 비해 보다 컴팩트하면서 유지관리가 용이한 특징이 있다[2,3,4]. 하지만 막여과 설비의 높은 초기 설치비용과 운전비용은 막여과 기술 확산에 걸림돌이 되고 있으며 또한, 상대적으로 운전 경험이 적어 상수원 수질에 따른 전체적인 공정구성에 어려움이 있다. 특히 우리나라의 경우 연중 지표수의 수량변화가 크고 이에 따른 수질차이도 상당해서 막여과 시설의 안정적인 운영을 위해 전처리 공정은 필수적이다[5,6,7]. 일반적으로 하천수에는 많은 종류의 유기물들이 존재하며, 특히 소수성 유기물에 의한 막오염은 여과 성능에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[8,9]. 또한 상수원에서 발생하는 조류는 막오염 및 이에 따른 막 차압 상승 등의 영향을 일으켜 운전상 문제를 일으킬 수 있는 큰 원인 물질이다[10]. 이와 같이 막의 수명을 증가시키기 위해서는 전처리가 필요하다.

전처리 공정으로는 다양한 처리 공정이 적용될 수 있지만 혼화/응집/침전이 가장 일반적으로 사용되어 왔다. 혼화/응집/침전의 경우 입자성 물질과 유기물의 제거 효율이 뛰어나지만 오랜 응집시간과 넓은 침전지 면적이 요구되고, 혼화, 응집에 따른 동력비가 소요되므로 비경제적이고 비효율적이라는 문제점을 가지고 있다[11,12,13]. 수질 안정성 측면으로는 응집제가 전처리수에 잔류하여 인체에 유해한 영향을 줄 수 있다[14]. 또한 조류가 증식한 원수유입은 응집공정의 floc 형성을 어렵게 하고, 조류 자체의 낮은 밀도는 침전공정의 효율을 크게 저하시킨다[15]. 이를 보완하기 위해 적용되고 있는 섬유사 필터는 정수처리에 대한 적용이 전무한 실적이지만 막여과 전처리로 널리 사용되고 있다. 단위 면적당 처리 용량이 높아 소요하는 부지 면적이 작고 초기 공사비가 절감되며 장치의 사용이 간단하여 유지관리가 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만 입자성 물질 제거 효율에 비하여 막오염 인자로 거론되는 유기물 제거에는 한계가 있어 유기물 제거를 위한 추가 공정을 적용해야 하는 단점을 가지고 있다[16,17,18]. 이러한 전처리 공정의 단점을 보완할 수 있는 방법 중 하나가 다공성 여재를 이용한 전처리 공정이다. 현재까지 국내

에서 개발된 다공성 여재는 입자성 물질과 용존성 유기물을 충분히 제거하기 위해 긴 접촉시간이 필요하다. 따라서 흐름이 적고 체류시간이 긴 조건에만 적용이 가능하다. 일반적으로 가압식 막여과를 이용한 정수처리 공정의 일반적인 처리용량은 모듈 당 $0.8\sim 1.5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 으로 매우 짧은 체류시간을 요하므로, 이런 조건에 적합한 막여과 전처리 연구가 추가로 필요한 실정이다.

본 연구에서는 막오염의 주요 인자로 거론되는 유기물 제거를 위해 노르웨이, 영국 등 여러 정수장에서 해수담수화 전처리여재[19,20] 및 모래여과 대체여재로 [21,22] 사용하고 있는 Filtralite에 대한 여재 특성을 파악하고자 한다. 정수처리 공정에서 Filtralite가 갖는 오염물질에 대한 제거 능력을 검토하였고, 최적의 유기물 제거를 위한 F/A 공정을 구성하기 위해서 여재의 특성이 막여과 전처리 공정으로 적용 가능한지 검토하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상 원수

팔당 취수원과 비교하여 상대적으로 유기물(TOC) 농도가 높은 풍납취수장에서 취수한 하천수를 실험 원수로 사용하였다. 여재의 활용성을 높이고자 Pilot Plant에 적용된 시료는 2가지로 나누어 실험되었다. 우선, 대상 여재의 유기물 제거 가능성을 알아보고자 혼화/응집/침전/모래여과 공정으로 처리된 공정수를 여재의 원수로 사용하였다. 그리고 한강 원수를 직접 F/A Pilot Plant 공정 원수로 사용하여 응집제를 사용하지 않았을 경우에도 탁도와 유기물 제거가 가능한지를 검토해 보았다.

2.2. 대상여재

본 실험에서는 사용된 여재는 여과사와 Filtralite이다. 여과사는 균등계수(Equality coefficient)가 일정하지 않으면 탁질 억지율이 높은 반면, 폐색되기 쉬우므로 충분한 여과지속시간을 유지할 수 없으므로 입경의 균일도를 높이고자 상한을 1.7로 규정하고 있다. 따라서 실험에 사용된 여과사는 Table 1에서와 같이 한국상하수도협회 규격에 맞는 자연모래를 사용하였다.

Filtralite (Norway, webber사)는 점토를 고열(1200°C) 처리하여 팽창시킴으로서 Biological aerated filter (BAF) 역할이 가능한 많은 기공을 내포하고 있다. 사용된 Filtralite는 여재의 크기 및 공극률에 따라 3분류로 나누

Table 1. Specification of Sand Media

| Parameter | Contents |
|----------------------|-----------------|
| Size | 0.45~1.0 mm |
| Equality coefficient | lower than 1.70 |
| Density | 2.55~2.65 |

Table 2. Specification of Filtralite Media

| Sort | Density (particle) | Material | Voids |
|--|-------------------------|---------------|-----------|
| Filtralite HC 0.3~1.0 (F-A) | 1,700 kg/m ³ | Expanded clay | 55% |
| Filtralite NC 0.8~1.6 (F-B) | 1,260 kg/m ³ | Expanded clay | 65% |
| Filtralite Multi (HC : NC = 1 : 1 mix) (F-C) | - | - | about 60% |

어 실험하였으며 그 특성은 Table 2와 같다. Filtralite의 여재 특성에 따라 F-A, F-B, F-C로 구분하고 실험에 적용하였다. Fig. 1은 Filtralite 여재의 외형을 나타내고 있다.

2.3. 실험 장치

2.3.1. 여재별 성능 평가 장비 구성 및 운전 조건

Filtralite 여재의 유기물 제거 성능을 평가하기 위한 실험을 위해 제작한 설비는 적용성 극대화를 위해 부평 3공장 활성탄여과지 설계 기준을 참고로 유입유량 만큼 축소하여 처리유량(Q), 공상접촉시간(EBCT), 선속도(LV), 공간속도(SV)를 각각 3.6 m³/d, 13.18 min, 3.33 m/h, 4.55 h⁻¹로 제작하였다. 실험 장치는 Fig. 2에서와 같이 높이 800 mm, 직경 240 mm (칼럼 내경 235 mm, 두께 5 mm)인 아크릴 재질의 원형지 4지로 구성하였으며 석탄계 활성탄과 Filtralite 강도와 크기별로 분류한 3종(F-A, F-B, F-C)을 각 지별로 충전하였다. 여재층고는 바닥자갈층 40 mm를 포함하여 총 800 mm로 충전하였다.

유량계를 이용하여 4지로 나누어진 여재칼럼에 유입수가 균등하게 3.6 m³/d씩 유입되도록 1차로 조절한 후 Timer와 실린더를 이용하여 각각의 여재칼럼 유출수의 유량을 실측하여 유량에 따른 오차를 최소화하였다. 설계 초기 2개월 동안 부평3공장 활성탄여과지 운영방식과 동일한 조건(20일 여과, 15분 역세)으로 시운전을

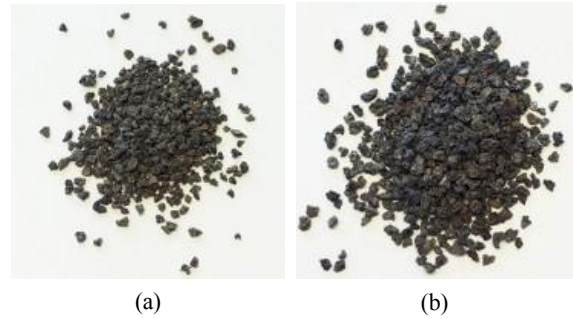


Fig. 1. Picture of filtralite ((a) : HC 0.3~1.0, (b) : NC 0.8~1.6).

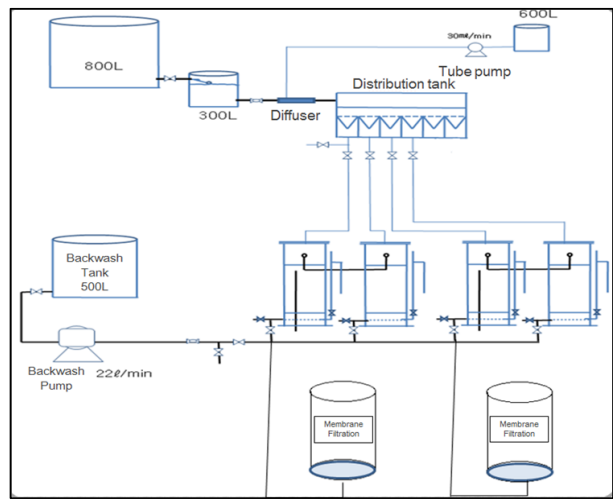


Fig. 2. Media filtration process.

하였으며 수계별 원수 특성변화가 가장 적었던 6, 7월에 역세공정을 생략하고 2개월간 여과공정만을 지속적으로 운전하면서 유입수와 여과수를 매일 같은 시간에 채수하여 실험항목별로 분석하였다. 특히, 각 실험에 사용된 여재별 부착세균량(HPC)을 조사하기 위해 여재칼럼 하부에 산기관을 두어 2 L/m으로 공기를 연속적으로 주입함으로써 미생물 활성화를 유도하였다. 여층 상부 DO 농도를 8~9 mg/L로 유도하면서 여층 상부에서 약 20 cm 아래의 탄을 식취하여 분석에 사용하였다.

2.3.2. 분리막의 사양 및 운전 조건

본 실험은 정수공정에서 여재를 이용한 전처리가 분리막 여과 성능에 주는 영향을 알아보는 것이므로 이를 평가하기 위해 소형의 분리막 모듈을 만들어 실험에 적용하였다. 여재별로 처리된 처리수를 막여과 시스템 원수로 사용하여, 여과동안 일어나는 막오염 정도를 측정하였다. 막오염을 측정하기 위해 일정 시간 여과하는

Table 3. Specification of Membrane Module

| Parameter | | Content |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Membrane | Material | PVDF (Polyvinylidene Fluoride) |
| | Surface area (m ²) | 0.01 |
| Operation Condition | Pore Size (μm) | 0.1 |
| | Filtration mode | Outside to Inside |
| | Operation Temp. (C) | 1~40 |
| | pH | 1~10 |
| Test Module | Module length (mm) | 120 |
| | Module diameter (mm) | 16 |
| | Material | Polyurethane |
| | Potting material | Epoxy |

Table 4. Operation Condition of F/A Column System

| Operation condition | Contents | Operation condition | Contents |
|---------------------|--|---------------------|------------------------------|
| Filter Media | 1stage Sand Filter Filtralite | Filter Media Height | every media : 20 cm |
| | 2stage Activated Carbon | | |
| Stream method | Upstream | Filtration Flux | 3.5 L/min |
| Operation frequency | Filtration : (8 hr) Back Wash : (1.5 min → 4 min) | Back Wash Method | Air + Water 4 min at once |
| Column Size | Cylindricity/Diameter 24 cm | | |

**Fig. 3.** Membrane module.

동안 증가하는 막차압을 측정하였다. 사용된 막에 대한 특징은 Table 3과 같으며, 단시간 내 막오염 영향력을 평가하기 위해 일반 여과조건보다 과부하의 운전조건 하에서 실험이 진행되었다.

막여과 방식은 전량여과(Dead-end flow)방식으로 역세 공정 없이 여과 유량 3 m³/m² · day (120 LMH)의 조건으로 연속적으로 운전하였다.

2.3.3. F/A 공정 운전 시스템

F/A 공정은 탁질을 제거하는 (F) Filtration 공정과 유기물질을 제거하는 (A) Adsorption 공정으로 이루어진

**Fig. 4.** F/A pilot system.

다. 본 연구에서는 탁질을 제거하는 1단계 제거공정으로 탁질을 제거하기 위해 여과사와 Filtralite를 선정하여 탁질 제거 여재의 성능을 평가하였다. 2단계 흡착공정에서는 전체 공정의 유기물 제거효율을 최대 유지하기 위해 입상활성탄을 사용하였다. 각 여재층은 20

Table 5. The TOC Value of Each Sample for Filtralite and Activated Cabon (unit : mg/L)

| Sample | 6/23 | 6/25 | 6/27 | 6/27 | 7/1 | 7/3 | 7/7 |
|--------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Raw water (after sand filtration) | 1.12 | 1.07 | 1.20 | 1.04 | 1.05 | 1.11 | 1.04 |
| F-A | 0.83 | 0.92 | 0.96 | 0.77 | 0.76 | 1.05 | 0.94 |
| F-B | 1.05 | 1.02 | 0.97 | 0.99 | 0.96 | 1.09 | 1.02 |
| F-C | 1.00 | 1.01 | 0.94 | 0.95 | 1.02 | 1.08 | 1.00 |
| Activated Carbon | 0.92 | 0.89 | 0.30 | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.011 |

※ Filtralite HC 0.3~1.0 = F-A / NC 0.8~1.6 = F-B / Multi = F-C

cm로 설정하였으며 실험에 사용된 칼럼 사양 및 운전 조건은 Table 4와 같다.

2.4. 실험 방법

2.4.1. 여재별 미생물 부착능 실험 방법

여재의 유기물 제거효율은 여재에 부착되는 미생물에 있다고 추정하고, 부착된 미생물의 개체수를 측정하는 실험을 진행하였다. 여재의 비표면적 분석은 Quantachrome사의 Autosorb-iQ 2ST/MP 모델을 이용하여 BET (Brunauer Emmett Teller)이론에 근거하여 분석하였다. 일반세균 실험을 위해 여재 5 g을 45 mL 증류수에 넣고 JEIO사의 SK-600모델을 이용하여 온도 25°C, 교반 속도 200 rpm으로 분리 후 10, 100, 1000배 희석하여 Sample별 2개씩 OXOID사의 Standard Plate Count Agar 배지에 접종하였다. 접종된 배지는 35°C로 설정된 Thermo사의 Heraeus B6760 배양기에서 48시간 배양 후 Cell Count하여 30~300개 사이의 페트리디시 판을 선별하여 사용하였다.

2.4.2. 조사항목 및 분석방법

F/A Pilot Plant 운전에 필요한 기본 data 수집을 위해 온라인 연속측정기를 이용하여 탁도(TC-5000, 한창), pH (PC-5000, 한창), 잔류염소(RC-5000, 한창)변화를 현장에서 모니터링하고 여층 내부 부착미생물의 성장성을 최적화하기 위해 각 여재컬럼 상부에 DO온라인 연속측정기(HACH, SC200-LDO2)를 연결하여 5분 간격으로 24시간 측정하였다. 또한 공정별로 채취한 시료를 먹는 물 수질공정시험기준에 의거하여 탁도(2100AN, HACH), pH (550A, Thermo), TOC (5310C, Sievers), DO (YSI 58, YSI)을 각각 분석하였고 일반세균수는 Standard Method에 따라 실험하여 유기물제거 효율 및 분석 항목 간 상관성을 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Filtralite의 오염물질 제거 성능 실험

3.1.1. Filtralite의 유기물 제거율

Filtralite는 세라믹 재질의 팽창점토로 다공성과 표면적이 높고 크기가 다양한 장점이 있다. 이러한 여재의 장점을 활용하여 국내에서는 삼성전자 화성공장 폐수 처리장, 부산환경관리공단 등 하·폐수 처리장에서 주로 사용하고 있다. 주요 처리 기작은 여재 표면에 부착 성장한 다양한 미생물들이 하·폐수에 포함된 질소, 인, 유기물 등을 먹이원으로 사용하여 제거하는 것이다. 이런 기작을 이용하여 정수장 원수에 포함된 입자성 및 용존성 유기물을 제거하고자 여재별 성능 평가 설비를 이용하여 여과 성능을 실험하였다. 정수장에서 모래여과공정을 통과한 처리수를 이용하여 활성탄과 유기물 제거율 비교 실험을 TOC 분석을 통해 진행하였다.

실험 결과 Table 5에서와 같이 운전 초기에는 미생물이 성장하지 않아 여재에 상관없이 제거율의 차이가 크게 나타나지 않는다. 즉, 여재를 통한 유기물 흡착은 운전 초기에 발생하지 않았다. 하지만 시간이 지남에 따라 활성탄의 유기물 제거율은 90% 이상 높게 유지되었지만 Filtralite의 제거율은 상관성을 나타내지 못하였으며 입경이 가장 작아 표면적이 가장 큰 F-A (HC 0.3~1.0 mm) 에서도 제거율이 30%를 넘지 못하였다.

TOC로 대표되는 자연유기물질(NOM : Natural Organic Matter) 중 휴믹성 유기물 제거 가능성을 알아보고자 UV₂₅₄ 분석을 진행하였다. Table 6에서 정리하였듯이 Filtralite는 휴믹성 유기물을 제거효율이 낮은 것으로 나타났으며 비교분석을 위해 실험한 활성탄의 경우 약 1주일 후부터 제거되는 것으로 나타났다.

Table 6. The UV₂₅₄ value of each sample for Filtralite and Activated Cabon (unit : ABS : 1/cm)

| Sample | 6/23 | 6/25 | 6/27 | 7/1 | 7/3 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Raw water | 0.024 | 0.021 | 0.022 | 0.024 | 0.022 |
| F-A | 0.021 | 0.017 | 0.018 | 0.019 | 0.020 |
| F-B | 0.021 | 0.018 | 0.018 | 0.021 | 0.016 |
| F-C | 0.021 | 0.017 | 0.013 | 0.025 | 0.014 |
| Activated Carbon | 0.016 | 0.010 | 0.012 | 0.006 | 0.001 |

Table 7. Comparison of Surface Area and Pore Size in Each Sample

| Material | surface Area (m ² /g) | Pore Volume (cc/g) | Pore Size (Å) |
|-------------|----------------------------------|-----------------------|---------------|
| Virgin A.C. | Coal base | 1009 | 17.55 |
| | Coconut base | 1250 | 17.64 |
| F-A | 0.198 | 6.65*10 ⁻⁴ | 67.3 |
| F-B | 2.63 | 3.19*10 ⁻³ | 24.3 |

Table 8. The DO Value of Each Sample (unit : mg/L)

| Sample | 9/1 | 9/3 | 9/12 | 9/15 | 9/17 | 9/19 | 9/22 | 9/26 | 9/29 | 10/1 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Raw water | 8.37 | 8.21 | 7.91 | 7.96 | 7.93 | 7.86 | 7.95 | 7.88 | 7.99 | 7.91 |
| F-A | 6.83 | 7.01 | 7.95 | 8.11 | 7.93 | 8.05 | 8.21 | 8.11 | 7.99 | 8.03 |
| F-B | 8.27 | 8.03 | 8.03 | 9.94 | 9.84 | 8.88 | 7.73 | 8.52 | 7.96 | 7.96 |
| F-C | 8.25 | 8.01 | 7.95 | 7.96 | 7.95 | 7.85 | 7.70 | 8.01 | 8.03 | 7.96 |
| Activated Carbon | 6.88 | 4.22 | 4.61 | 4.62 | 4.75 | 5.01 | 4.73 | 3.89 | 6.87 | 6.01 |

Table 9. The TOC Value of Each Sample for Filtralite and Activated Cabon after Activating

| Sample | 9/1 | 9/3 | 9/12 | 9/15 | 9/17 | 9/19 | 9/22 | 9/26 | 9/29 | 10/1 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Raw water | 1.32 | 1.17 | 1.05 | 1.07 | 1.12 | 1.07 | 1.15 | 1.05 | 1.56 | 1.07 |
| F-B | 2.33 | 1.23 | 0.92 | 0.97 | 1.02 | 1.01 | 1.05 | 0.97 | 1.41 | 0.95 |
| Activated Carbon | 0.28 | 0.21 | 0.26 | 0.33 | 0.35 | 0.41 | 0.43 | 0.43 | 0.90 | 0.45 |

상기와 같이 Filtralite의 유기물 제거능이 낮은 이유를 알아보려고 비표면분석기를 이용하여 비표면적(surface Area), 기공 부피(Pore Volume), 기공 크기(Pore Size)를 각각 분석해 보았다. Table 7에서 정리한 것과 같이 Filtralite의 기공 크기는 3가지 여재 모두 활성탄과 비교하여 더 큰 값을 보여주고 있고 기공 부피와 비표면적은 활성탄에 비해 현저히 낮은 값을 나타내었다. 따라서 Filtralite는 겉보기 기공은 매우 잘 발달되어 있지만 실제 Micro 단위의 미세공 발달이 이루어지지 못한 것으로 판단된다. 따라서 Filtralite는 비표면적이 작기 때문에 미생물이 여재 표면에만 성장하지만 활성탄은 20~500 Å 사이의 다양한 미세공을 포함한 넓은 비표

면적을 가지고 있으므로 미생물이 여재 깊은 곳까지 파고들어 성장할 수 있다. 그로인해 미생물이 흡착/성장 후 고정될 수 있는 기회도 낮은 것으로 판단된다.

3.1.2. Filtralite의 유기물 제거율과 미생물 개체수와의 상관성 규명

상기 결과를 바탕으로 Filtralite의 미생물 부착 및 활성도를 높여 유기물 제거율을 높이고자 하였다. 여재 컬럼 하단에 산기관을 설치·운전함으로써 DO농도를 8~9 mg/L로 맞추어 미생물 성장을 최대도로 유도하였다. 시료별로 주 3회 분석 Sampling 후 DO와 TOC를 분석한 결과 Tables 8, 9에서처럼 Filtralite를 통과했을 때

Table 10. The Counts of Heterotrophic Bacteria by Agitation Time (unit : CFU/mL)

| Mixing time (min) | A.C. | F-B | Separation rate (extraction)% | 비고 |
|-------------------|----------------|----------------|-------------------------------|---|
| 0 | 45,000 | 141,000 | | |
| 30 | 52,000 | 160,000 | | |
| 60 | 76,000 | 238,000 | 8 | 240 min sample : Ultrasonicator Equipment : sonics Model : VCX-750 Pulse 30, amplification 50% separation time 2 min |
| 120 | 62,000 | 228,000 | | |
| 150 | 100,000 | 265,000 | 24 | |
| 180 | 145,000 | 260,000 | 48 | |
| 210 | 106,000 | 345,000 | | |
| 240 | 550,000 | 480,000 | | |

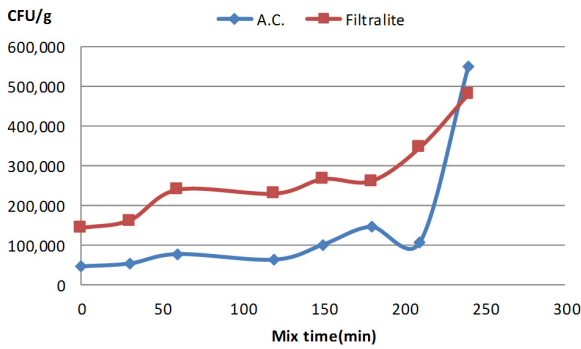


Fig. 5. The counts of heterotrophic bacteria by agitation time.

유기물 제거율은 낮게 나타났다.

운전기간 동안 대상 여재의 DO 변화량을 검토한 결과, 원수에 비하여 Filtralite 처리수의 DO변화는 2% 미만의 변화율을 보였지만, 활성탄의 경우 약 15~40%의 감소율을 보였다. 즉 원수 내의 DO는 Filtralite와는 달리 활성탄여재를 통과하면서 여재 내 존재하는 미생물에 의한 작용에 따라 유기물 제거 시 사용되는 산소 소모량 차이로 사료된다.

3.1.3. 대상 여재의 미생물 성장과 부착성 실험 결과

상기와 같이 여재에 존재하는 미생물의 개체수 차이는 각 여재의 비표면적 차이에서 기인한다고 사료되며 이를 검증하기 위해 여재에 부착된 미생물의 개체수를 측정하였다. 실험변수로 여재에 부착된 미생물의 탈리에 필요한 교반 시간을 다르게 주었다. F-B (NC) 표면에서 성장하는 미생물은 쉽게 떨어질 수 있기 때문에 교반 초기에 대부분의 부착미생물이 탈리가 될 것이므로 교반 시간이 증가하여도 변화가 적을 것이며, 활성탄은 미생물 교반 시간이 증가할수록 미세공에서 성장

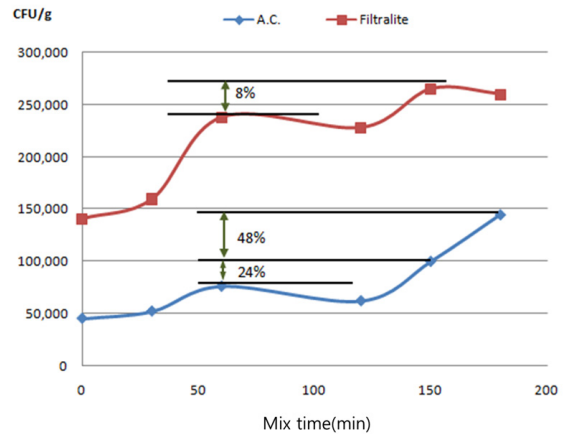


Fig. 6. The rate of increment heterotrophic bacteria by agitation time.

하고 있던 미생물이 추가로 분리될 수 있기 때문에 측정되는 개체수는 증가할 것으로 가정하였다.

검증 실험을 위해 500 mL 삼각플라스크에 여재를 5g씩 넣고 교반기를 이용하여 일정한 속도로 교반하면서 미생물 탈리를 유도한 결과 Table 10, Fig. 5에서처럼 교반공정의 시간이 길어질수록 측정되는 미생물량이 많았다. 따라서 여재에 부착된 미생물이 교반 시간 30분으로는 완전히 탈리되지 않고 더 많은 미생물이 여재에 부착되어 있다는 것을 확인하였다. 그리고 마지막 시료(교반시간 240분)는 미생물 배양 전 완전한 탈리를 유도하기 위해 초음파로 2분간 전처리를 진행한 후 분석한 결과 활성탄에서 탈리된 미생물 총량과 비슷하게 측정되었다. 즉, 두 샘플 모두에서 미생물 성장성이 유사하게 나타났다. 마지막 시료를 제외하고 F-B (NC)가 활성탄보다 더 큰 값을 보이는 것은 F-B에 부착된 미생물은 표면에서만 성장하고, 상대적으로 활성탄에 부착된 미생물은 표면뿐만 아니라 미세공에도 서식하고 있기 때

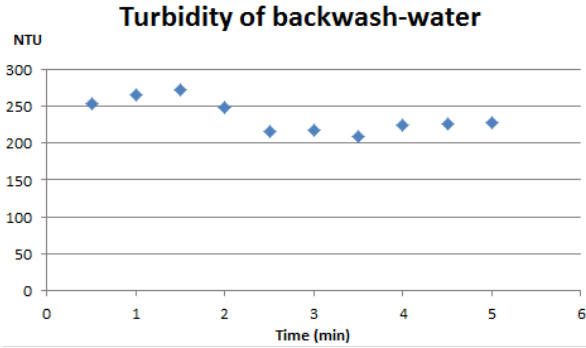


Fig. 7. The turbidity value of back-wash water by back-wash time.

문에 부착성이 더 뛰어난 것으로 사료된다. 즉, 활성탄의 경우 micro 단위의 미세공극이 잘 발달되어 있어 유기물 제거 효율이 더욱 뛰어난 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 6에서 보듯이 활성탄 부착 미생물은 실험 전 가정한 것과 같이 한 번의 정체를 거친 후 내부 세공에서 성장하고 있던 미생물이 각각 24, 48% 추가로 분리된 것을 명확하게 알 수 있었다. Filtralite도 8% 추가로 분리되었지만 증가폭이 상대적으로 낮게 나타났다. 즉, 여재의 종류에 따라 미생물 부착성이 상이함을 알 수 있었다.

위의 실험의 결과로 Filtralite는 구조적인 특성의 한계로 활성탄만큼의 유기물 제거 성능을 갖지 못하는 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 Filtralite 여재를 유기물 흡착기능에 적용하기보다 탁도 제거 기능에 중점을 두고 F/A 공정을 구성하기로 하였다.

3.2. F/A 공정의 오염물질 제거 성능 평가

3.2.1. F/A 공정의 운전조건 결정

Filtralite 여재 단일 여과로는 유기물 제거에 한계를 가지므로 2단의 F/A 공정을 구성하였다. 여과공정(F)과 흡착공정(A)의 효과를 각각 극대화하기 위해 다른 여재를 사용하였고, 여과공정에 사용되는 여재는 일반적으로 사용되는 여과사와 본 실험에 사용된 Filtralite를 적용하여 성능을 비교 하였다. 2단의 흡착공정은 널리 검증된 입상 활성탄을 사용하여 유기물 흡착 성능을 최적화하였다.

1단의 여과공정의 성능을 검토하기 위해 1단 칼럼에 각 여재를 채워 여재를 통과한 처리수의 탁도를 측정하였다. 연속 여과실험을 진행하는 과정에서 여재층에 오염물질이 폐색되어 처리효율이 감소하고 처리수 탁도가 증가하는 현상이 발생하였고 이를 방지하고자 주기

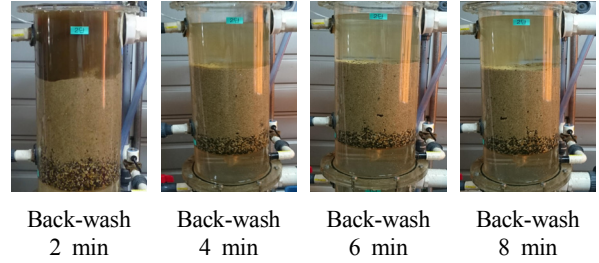


Fig. 8. The back-wash water status by back-wash time.

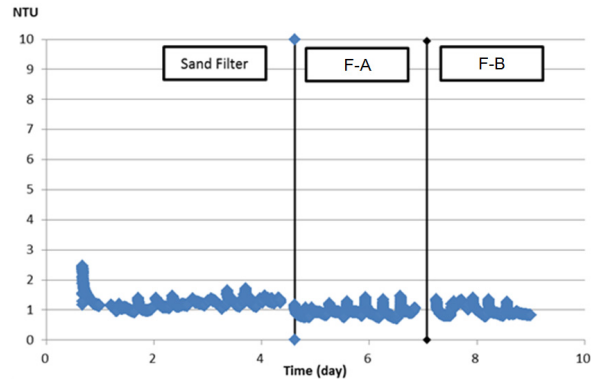


Fig. 9. The turbidity of media filtration effluent in raw water (Han river).

적인 역세척을 진행하였다.

최적화된 역세척 조건을 찾기 위해 여과사의 여과실험에서 시간별로 탈리되는 오염물질의 탁도를 측정하였다. Fig. 7의 그래프에서 나타나듯이 초기 2분 이후 역세척수의 탁도가 감소하기 시작하여 3.5분까지 미약하게 감소하는 경향이 보인다. 2분간의 역세척 시 가장 많은 오염물질이 탈리되며 탈리되는 오염물질의 농도가 안정화 되는 구간은 약 3.5~4분이다. 따라서 본 실험에서는 8시간 여과 후 약 4분간의 역세시간을 진행하였다. Filtralite의 경우 여과사와 비슷한 폐색 경향을 보여서 동일한 역세시간을 설정하여 운전하였다. Fig. 8은 역세 시간에 따른 역세척수의 변화이다.

역세척 시간의 변경 후 처리수 탁도는 그 이전보다 안정화 되었으며, 역세척 이후 증가했던 처리수 탁도가 안정화 되는 시간도 일정해졌다. 따라서 위의 역세척 조건은 반응기의 장기 운전 조건으로 알맞음을 확인하였다.

3.2.2. 여재 종류별 탁질 물질 제거율 비교

여재 종류에 따라 F/A 공정 중 1단 Filtration 공정에서 탁질 물질을 제거하는 제거율을 검토하였다. 활성탄 대체 비교 실험을 통하여 막여과 전처리 공정으로써 뛰

Table 11. The Filtration Performance by Media Type

| Media | Sand filter | F-A | F-B |
|-------------------------------|-------------|-------|-------|
| Treated water turbidity (NTU) | 1.09 | 0.98 | 0.94 |
| Removal (%) | 81.8% | 83.6% | 84.3% |

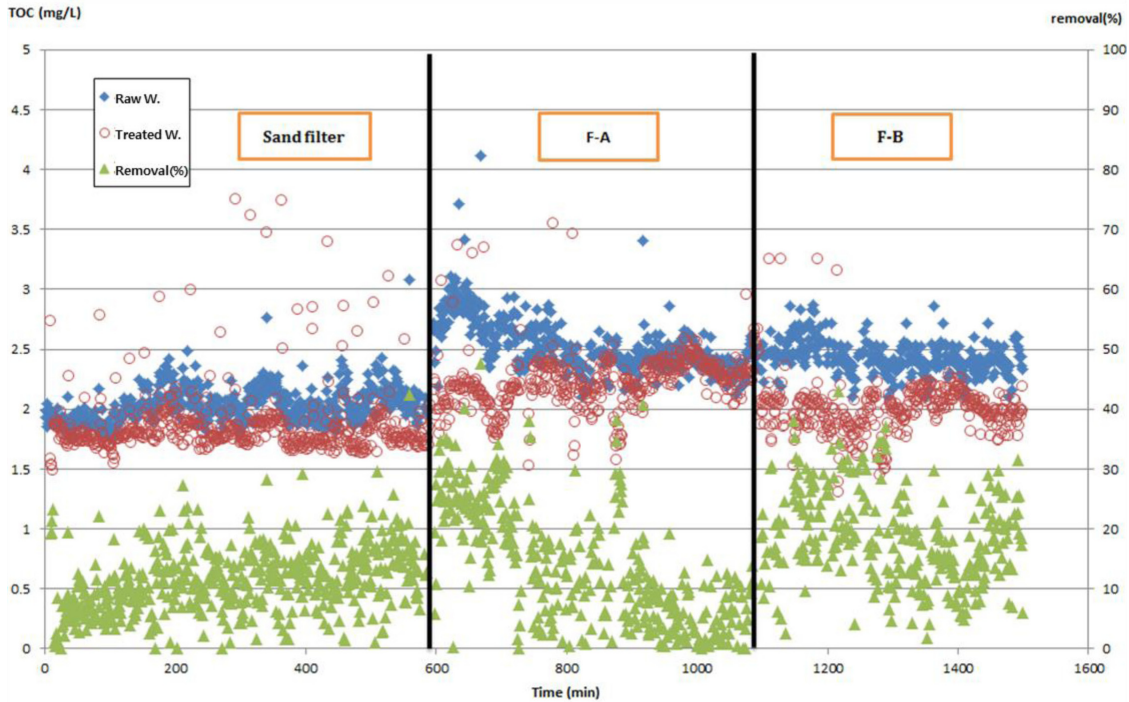


Fig. 10. The Turbidity of each media effluent with F/A system.

어난 유기물 제거효과는 낮은 것으로 나타났지만 입자성 물질 제거효율은 충분히 기대할 수 있다고 판단되어 온라인 탁도계를 이용하여 연속 측정하였다. 원수는 정수장 착수정으로 유입되는 하천수이다.

여재 여과 시 입자성 탁질 물질들은 여재 사이에 존재하는 Air gap에 trap되어 제거된다. Fig. 9에서와 같이 실험을 수행했던 6월의 원수 탁도는 4~8 NTU로 낮게 유입되었고 초기 안정화 단계를 제외하고 여재층 통과 후 모두 2 NTU 이하로 처리되어 약 50% 이상 제거됨을 확인하였다.

여재별 여과처리수의 탁도를 비교한 결과 여과사의 처리수 탁도는 평균 1.09 NTU, F-A의 처리수 탁도는 평균 0.98 NTU, F-B의 처리수 탁도는 평균 0.94 NTU로 나타났다. Filtralite는 사양에 상관없이 비슷한 처리수질을 나타냈으며 여과사에 비하여 약 10% 처리수질이 좋게 나타났다. 하지만 원수 탁도(4~8 NTU)대비 제거율차이는 3% 미만으로 보이고 있으므로 탁도 제거

능력은 여재에 상관없이 양호한 결과를 보인다고 할 수 있다.

3.2.3. 여재 종류별 유기물 제거율 비교

정수장의 착수정에 유입되는 원수에 대하여 Fig. 10과 Table 12에서와 같이 여재의 종류에 따른 처리수 TOC를 분석하여 유기물 제거능을 비교하였다.

Fig. 10은 원수와 그에 따른 처리수의 TOC를 나타내고 있으며 Table 12는 그 제거율을 평균적으로 설명하고 있다. 위 결과에서와 같이 전체적으로 탁질 제거를 위한 여과공정에서도 유기물이 약 10~20% 제거되는 경향을 보였다. 이전 실험에서 Filtralite의 경우 활성탄과 비교하였을 경우 유기물 제거율이 매우 낮은 값을 보였으나 여과사에 비해서는 표면에 형성된 기공의 영향으로 유기물 제거율이 상대적으로 높은 값을 나타내었다. 또한 여러 종류의 Filtralite 중에서 F-B의 제거율이 높고 안정되게 유지됨을 확인할 수 있었다. 이는

Table 12. The TOC Removal by Media Type

| Media | Sand filter | F-A | F-B |
|-----------------|-------------|-------|-----|
| TOC removal (%) | 12.5% | 11.5% | 18% |

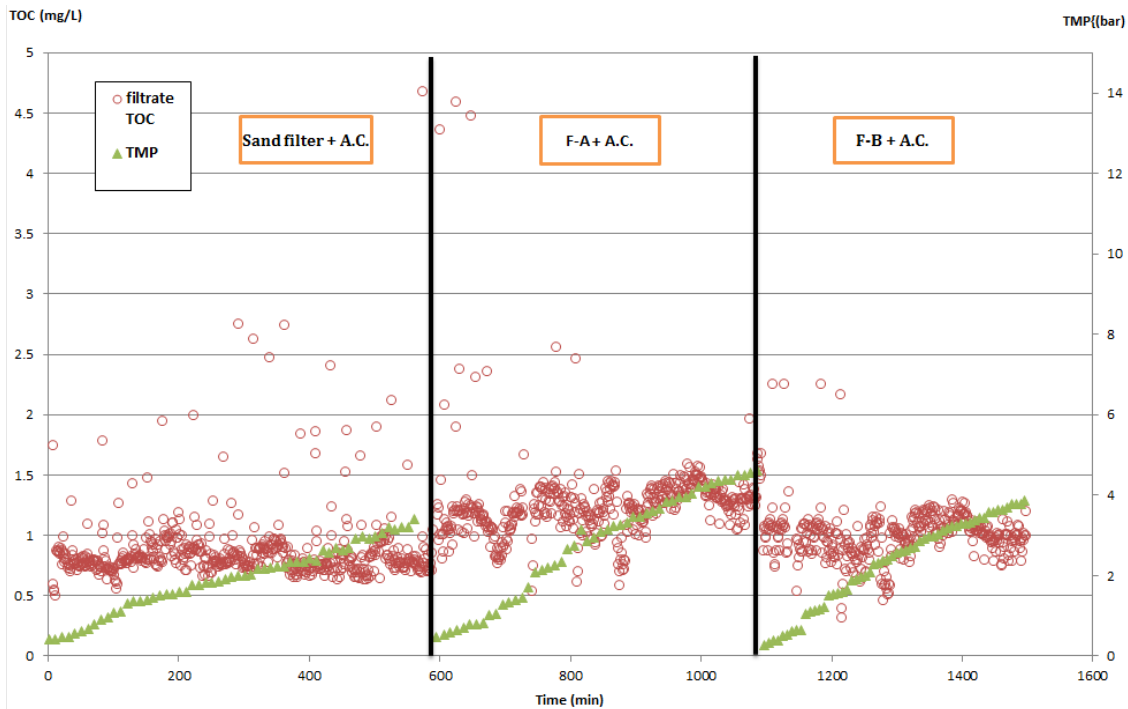


Fig. 11. The TMP (Trans Membrane Pressure) of each media effluent with F/A system.

Table 2에서 알려진 것과 같이 공극률이 F-A 종류에 비하여 1.2배 정도 더 높기 때문에 유기물 제거에 필요한 미생물이 쉽게 부착되는 것으로 사료된다.

3.2.4. 여재 구성에 따른 F/A 공정처리수의 막여과 성능 영향 비교

1단에 탁질 제거를 위한 여재를 구성하고 2단에 유기물을 제거하기 위해 활성탄으로 구성된 F/A 공정의 막여과 전처리 효과를 검토하였다. 미니 분리막 모듈을 이용하여 F/A 공정의 처리수에 대한 여과성능을 평가하고 막여과 전처리에 가장 효과적인 F/A 공정의 구성 여재를 확인하고자 하였으며 120 LMH의 일정한 투과 플럭스로 연속여과하고 여과 기간 동안 TMP를 측정하여 막오염이 발생하는 정도를 확인하였다. Fig. 11에서 나타난 것과 같이 ‘여과사+활성탄’ 처리수의 TMP 증가율이 가장 낮았고 ‘F-A+활성탄’의 TMP 증가율이 가장 높았다. 막오염의 경우 탁질이나 유기물에 의해 발생할 수 있다. 본 처리수는 여재 종류에 따라 처리수의 탁도

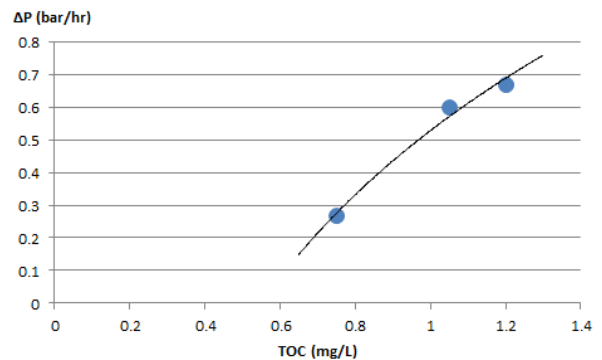


Fig. 12. The TMP increment behavior by TOC concentration.

가 큰 차이가 없었고 이는 막오염에 영향을 거의 주지 않는다고 할 수 있다[23]. 일반적으로 NOM에 의한 유기물 오염이 막오염의 주요 원인으로 알려져 있으며 이는 TOC를 통해 확인할 수 있다.[24] 이를 통해 본 처리수의 TOC 농도가 막오염에 가장 큰 영향을 준다고 해석할 수 있으며 본 실험 결과에서는 ‘여과사+활성탄’의 처리수의 결과로부터 ‘여과사+활성탄’의 조합이 가장

뛰어난 막오염 저감 능력을 보였다.

위 F/A 공정 처리수의 TOC 농도와 막오염 발생의 정도를 검토해본 결과, TOC 농도가 증가함에 따라 TMP 증가율이 급증하는 경향을 보여주었다. TOC 농도가 1.6배 증가하였지만 TMP 증가율은 2.5배 증가하였으며 TOC 농도가 1 mg/L 내외에서 증가율이 높은 것으로 판단되었다. 따라서 TOC의 제어가 막오염 발생 저감에 주요 인자가 된다고 판단할 수 있었다. 하지만 원수의 TOC/DOC 비율에 따라 막오염 거동이 다르게 나타날 것으로 예측되어 추가 연구가 필요하다.

추가적으로 Fig. 10에서 나타난 것과 같이 원수의 TOC 농도가 각기 다른 여과환경이었기에 동일한 원수 조건에 대해서 여재구성에 따른 실험이 추가 진행되어야 여재의 TMP저감 성능을 검증할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 정수처리 공정에서 막여과 운전 시 발생하는 막오염의 주범인 유기물 막오염을 저감하기 위한 공정을 개발하여 막 수명과 회수율을 증대시키고자 진행되었다. 현재 정수장에서 사용되는 여과사와 시판되어 사용되고 있는 Filtralite를 대상으로 유기물 및 탁도 제거 가능성을 검토하고 F/A 공정을 구성하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. Filtralite는 미생물이 성장하기 전(운전 초기)에는 유기물(TOC)의 제거 가능성이 나타나지 않았다. 휴믹성 유기물 제거 가능성을 알아보고자 254 nm 흡광도를 측정된 결과 또한 TOC 분석 결과와 마찬가지로 제거 가능성을 보여주지 못했다. 따라서 Filtralite 여재 단독으로는 수중에 존재하는 용존성 유기물을 제거하는데 한계성을 가짐을 확인하였다.

2. Filtralite의 유기물 제거율이 낮은 원인을 규명하고자 물리적인 성질을 분석한 결과 활성탄과 비교하여 기공 크기가 크고 비표면적이 월등히 낮은 것이 확인되었다. 이러한 이유로 Filtralite는 micro 단위의 미세공이 충분히 발달하지 못하여 용존성 유기물 제거율이 낮은 것으로 판단되어진다.

3. Filtralite 여재는 미세공이 부족하여 미생물이 여재 표면에만 부착 성장하므로 교반을 통해 쉽게 탈리된다. 또한, 물의 흐름이 여재 표면으로만 흐르게 됨으로서 미생물이 유기물을 분해할 수 있는 접촉 시간이 현저히

부족하게 되어 제거율이 낮은 것으로 판단된다.

4. Filtralite의 입자성 물질 제거 가능성을 검토한 결과 여재 사이에 존재하는 Air Gap에 입자성 물질들이 trap되면서 약 50% 이상 제거되었다. 따라서 Filtralite를 이용하여 입자성물질을 먼저 제거한 후 활성탄을 이용하여 유기물을 제거하는 F/A 공정을 구성하였다.

5. 정수장에서 사용하는 여과사와 Filtralite를 F/A 공정에 적용하기 위해 실험한 결과 Filtralite는 여과사와 비슷한 탁도 제거율을 보이지만 구조적 특성으로 인해 유기물 제거율이 높은 것으로 나타났다. 또한, 활성탄과 결합한 F/A처리공정의 막여과에 대한 영향을 검토하기 위해 최종 처리수를 막여과 장치로 처리하였을 경우 ‘여과사+활성탄’의 조합이 가장 좋은 결과를 보여주었으나 원수의 수질을 고려할 필요가 있는 것으로 판단되었다. TOC 농도의 증가에 따른 막오염 증가율 변화가 크게 나타나 유기물의 제어가 막오염 저감에 중요 변수인 것을 검증하였다.

Reference

1. Y. U. Kim, H. J. Son, M. H. Yu, C. S. Lee, I. C. Cho, E. H. Kim, and N. C. Seung, “A study on relation of attached algae and odor’s cause in sedimentation basin of water treatment plant”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **22**, 887 (2000).
2. Japanese Water Research Center (JWRC), ACT21 Research Report, (2002).
3. M. Marcel, “Basic principles of membrane technology” 2nd edition, pp. 157-209, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London (1996).
4. Y. Watanabe, K. Kimura, and T. Suzuki, “Membrane application to water purification process in Japan-development of hybrid membrane system”, *Water Science & Technology*, **41**, 9 (2000).
5. H. J. Son, Y. D. Hwang, J. S. Roh, C. W. Jung, and L. S. Kang, “Optimization of ultrafiltration process using MIEX+coagulation process”, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **27**, 753 (2005).
6. J. W. Cho, G. Amy, and J. Pellegrino, “Membrane filtration of natural organic matter: factors and

- mechanisms affecting rejection and flux decline with charged ultrafiltration (UF) membrane”, *Journal of membrane Science*, **164**, 89 (2000).
7. E. Austin, A. I. Schafer, A. G. Fane, and T. D. Waite, “Ultrafiltration of natural organic matter”, *Separation and Purification Technology*, **22**, 63 (2001).
 8. J. H. Jung, “Influences of organic matters originated from different water sources on membrane performance”, Ph.D. Dissertation, Univ. of Konkuk, Chung-ju, Korea (2011).
 9. M. Nystrom, “Humic acid as a fouling agent in filtration”, *Desalination*, **106**, 79 (1996).
 10. J. E. Park, H. N. Jang, D. S. Lee, C. H. Kim, J. L. Im, and J. H. Jung, “Effect of algae growth on the operation properties of drinking water treatment system combined with membrane”, *Proc. 2007-Journal of joint autumn conference*, pp. 126, Goyang-si, Korea (2007).
 11. J. J. Lee, I. K. Lee, G. B. Ko, and S. B. Kwon, “Development of package type hydraulic water treatment system for high turbid water”, *Proc. 2006-Journal of joint autumn conference*, pp. 157, Daegu, Korea (2006).
 12. J. D. Lee, S. H. Lee, M. H. Jo, P. K. Park, C. H. Lee, and J. W. Kwak, “Effect of coagulation condition on membrane filtration characteristics in coagulation-microfiltration process for water treatment”, *Environmental Science & Technology*, **34**, 3780 (2000).
 13. J. L. Lim, K. H. Lee, Y. J. Lee, and J. Y. Park, “Optimum coagulation conditions for ceramic microfiltration membrane process”, *Membr. J.*, **22**, 135 (2012).
 14. S. I. Choi and C. S. Lee, “Study of remain aluminum concentration by use coagulant”, *Proc. Korean Society of Water & Wastewater Conference*, pp. 175, Daegu, Korea (1994).
 15. S. Y. Lee, “Enhanced removal of organic matters by coagulation and flocculation process in drinking water treatment”, Ph.D. Dissertation, Univ. of Ulsan, Ulsan (2001).
 16. H. C. Hur, I. K. Lee, C. H. Kim, H. S. Kim, and H. W. Ahn, “Pretreatment of drinking water treatment by fiber filtration”, *Proc. Journal of joint autumn conference*, pp. 269, Busan, Korea (2004).
 17. U. Grabbe, C. F. Seyfried, and K. H. Rosenwinkel, “Upgrading of wastewater treatment plants by cloth-filtration using an improved type of filter-cloth”, *Water Science Technology*, **37**, 143 (1998).
 18. J. H. Lee, T. S. Moon, J. J. Lee, A. L. Jung, J. H. Lim, H. J. Son, and H. J. Woo, “Removal efficiency and characteristic of particles with fiber filter height”, *Proc. Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, pp. 868, Jeonju-si Korea (2004).
 19. S. T. Mitrouli, A. J. Karabelas, S. G. Yiantsios, and P. A. Kjolseth, “New granular materials for dual-media filtration of seawater: Pilot testing”, *Separation and purification technology*, **65**, 147 (2009).
 20. S. T. Mitrouli, S. G. Yiantsios, A. J. Karabelas, M. Mitrakas, and P. A. Kjolseth, “Pretreatment for desalination of seawater from an open intake by dual-media filtration: Pilot testing and comparison of two different media”, *Desalination*, **222**, 24 (2008).
 21. T. Saltnes, B. Eikebrokk, and H. Odegaard, “Contact filtration of humic waters: performance of an expanded clay aggregate filter (Filtralite) compared to a dual anthracite/sand filter”, *Water science & technology water supply*, **2**, 17 (2002).
 22. P. D. Davies and A. D. Wheatley, “Pilot plant study of alternative filter media for rapid gravity filtration”, *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, **66**, 2779 (2012).
 23. J. H. Kwon, Lawer, and F. Desmond, “Investigation of particle fouling in ultrafiltration”, *Proc. Korean Society of Water & Wastewater Conference*, pp. 219, Ansong-si, Korea (2003).
 24. T. Carrol, S. King, S. R. Gray, B. A. Bolto, and N. A. Booker, “The fouling of microfiltration membrane by NOM after coagulation treatment”, *Wat. Res.*, **34**, 2861 (2000).