

세라믹 정밀여과 및 활성탄 흡착 혼성공정에 의한 고탁도 원수의 고도정수처리: 물 역세척 시간 및 주기의 영향

이 혁 찬* · 박 진 용***.†

*한림대학교 환경생명공학과

**한림대학교 에너지·환경연구소

(2008년 12월 12일 접수, 2008년 12월 29일 수정, 2009년 1월 5일 채택)

Advanced Water Treatment of High Turbidity Source by Hybrid Process of Ceramic Microfiltration and Activated Carbon Adsorption: Effect of Water-back-flushing Time and Period

Hyuk Chan Lee* and Jin Yong Park***.†

*Department of Environmental Sciences & Biotechnology, Hallym University, Kangwon 200-702, Korea

**Institute of Energy & Environment, Hallym University, Kangwon 200-702, Korea

(Received December 12, 2008, Revised December 29, 2008, Accepted January 5, 2009)

요약: 본 연구에서는 고도정수처리를 위하여 모듈 내부와 관형 세라믹 정밀여과막 외부 사이의 공간에 입상 활성탄(GAC)을 충전한 혼성 모듈을 사용하였다. 정수 원수 중의 자연산 유기물(NOM)과 미세 무기 입자를 대체하기 위해, 휴믹산(humic acid)과 카올린(kaolin) 모사용액을 대상으로 하였다. 혼성공정에서 막오염을 최소화하고 투과선속(J)을 향상시키기 위하여 역세척 시간(BT)과 역세척 주기(FT)에 따른 영향을 알아보았으며, 최적운전조건을 규명하고자 하였다. 그 결과, BT가 증가함에 따라 R_f 는 다소 감소하는 경향을 보였으며, 더 짧은 FT는 빈번한 역세척으로 R_f 의 감소와 J의 향상에 더 효과적이었다. 그러나 운전비용을 고려하였을 때, 최적 BT 및 FT는 각각 10초와 8분이었다. 한편, 모사용액으로 실험하여 도출된 최적 운전조건을 호소수의 고도정수처리에 적용하였다. 그 결과, 탁도 및 UV_{254} 흡광도, COD_{Mn} 의 평균처리효율은 각각 99.11% 및 91.40%, 89.34%로 우수하였으나, TDS의 평균처리효율은 30.05%로 낮았다.

Abstract: In this study, we used the hybrid module that was composed of granular activated carbons (GAC) packing between module inside and outside of tubular ceramic microfiltration membrane for advanced drinking water treatment. Instead of natural organic matters (NOM) and fine inorganic particles in natural water source, modified solution was prepared with humic acid and kaolin. We were investigated effect of water-back-flushing time (BT) and water-back-flushing period (FT) to minimize membrane fouling and to enhance permeate flux (J) in the hybrid process, and tried to find the optimal operating conditions. As a result, resistance of membrane fouling (R_f) was slightly decreased according to increasing BT. Also, the shorter FT was the more effective to reduce R_f and to enhance J because of frequent water-back-flushing. However, the optimal BT and FT conditions were 10 sec and 8 min respectively when operating costs were considered. Then, the optimal conditions derived from our experiments of modified solution were applied to lake water treatment. As a result, average treatment efficiencies of turbidity, UV_{254} absorbance, and COD_{Mn} were very high as 99.11%, 91.40% and 89.34%, respectively, but that of TDS was low as 30.05%.

Keywords: ceramic membrane, GAC, hybrid process, microfiltration, water treatment

†주저자(e-mail : jypark@hallym.ac.kr)

1. 서 론

최근 들어 여름철 홍수기에 집중 유입되는 탁수의 정도가 갈수록 심각해지고 있으며, 그 기간도 점점 더 길어지고 있다. 우리나라는 댐 저수지에 따라 정도의 차이는 있으나 대부분 고탁수가 발생되고 있다. 또한 댐 저수지의 경우에는 고탁수가 장기간 체류하면서 전도 현상(turnover)이 겹쳐 쉽게 탁수가 사라지지 않고 오랜 기간 그 영향을 미치게 된다[1]. 특히 댐 저수지 및 하류에 정수장의 취수원이 있는 경우에는 정수처리에 있어서 고탁수 장애를 유발하며, 용수 이용에 대한 수처리 비용 증대 등의 경제적 손실도 가중시키게 된다[2,3]. 따라서 이러한 고탁수기에 대비하여 보다 적은 비용으로 안정적으로 탁수를 처리 할 수 있는 기술로서 탁질 제거가 우수한 막분리 기술 적용의 필요성은 증대되고 있다.

정수처리공정에 막 여과를 이용할 경우, 응집-침전-모래여과-소독 공정으로 구성된 종래의 정수처리 공정보다 많은 장점을 지닌다. 우선 기존의 모래여과를 대신하는 막 여과 공정은 현탁 물질 및 입자상 물질, 그리고 미생물에 대하여 안정적이면서도 완벽한 분리성을 나타낸다. 또한 콤팩트한 공정의 구성이 가능하며, 침전 공정을 생략함으로써 설비를 간소화 할 수 있고, 물리적인 처리 방법이므로 대상 원수의 성질 상태의 변동 등에 따라서 처리수의 수질이 크게 좌우되지 않고 비교적 안정적이며 양호하다[4].

한편, 최근에는 정수처리 공정에서 소독제와 반응하여 THMs (trihalomethanes)과 같은 소독부산물(DBPs, disinfection by-products)을 생성하는 전구물질로 알려져 있는 자연산유기물(NOM, natural organic matters)을 효과적으로 제거하는 것이 주요한 현안으로 대두되고 있다[5]. 자연산유기물은 매우 복잡한 유기화합물질로 모든 물에서 발견이 되며, 일반적으로 수변지역과 수환경 중에서의 생물학적 활동을 통해 만들어진 단백질, 다당류, 휴믹물질을 말한다. NOM 중 상당부분을 차지하는 휴믹물질(humic substance)은 서로 다른 유기화합물로 이루어진 복잡한 혼합물의 일종으로 주로 휴믹산과 펠빅산으로 구성되며, 이들은 동물과 식물의 생물분해에 의해서 생성되는 것으로 알려져 있다. 그리고 NOM은 고도정수처리공정으로 새로이 부각되고 있는 막분리 공정에서 막오염을 유발하는 주요 원인이며, NOM과 같은 용존성 유기물은 정밀여과만으로는 제거하기 힘든 것으로 알려져 있다[6]. 나노여과(NF, nanofiltration)

나 역삼투(RO, reverse osmosis)를 이용하여 NOM의 제거가 가능하지만[7,8], NF 및 RO 공정은 높은 압력에서 운전되기 때문에 에너지 소모가 많고 운전비용이 높아 경제성이 떨어진다고[9]. 그러므로 정밀여과(MF, microfiltration) 및 한외여과(UF, ultrafiltration)를 이용한 효과적인 NOM의 제거를 위하여 활성탄 처리, 오존 처리, 광촉매 등의 고도정수처리 공정과 조합한 공정구성이 필요하며, 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다[10-13].

분리막을 이용한 수처리는 원수의 성상에 따른 막 재질 및 모듈의 선정이 중요하며 운전 방법에 따라 분리막의 효율성과 경제성에 커다란 차이가 난다. 본 연구 대상이 고탁수의 처리인 점을 감안 할 때 고분자 분리막에 비해 수명이 길고, 기계적 강도가 우수하며, 내마모성 및 내화학적성이 우수한 세라믹 분리막을 이용하는 것이 적합하다고 판단된다.

또한, 고탁수의 처리에 세라믹 분리막을 적용할 경우 해결해야 할 과제는 막오염이다. 막오염은 시간에 대한 투과선속(Permeate flux)을 감소시키고 막의 수명을 저하시키는 등의 문제를 발생시킨다. 막 오염은 원수의 성상에 따라 차이는 있으나, 일반적으로 지표수를 이용한 정수처리의 경우 막오염은 칼슘(Ca^{2+}) 및 마그네슘 이온(Mg^{2+}), 철, 실리카, 부유물질(suspended solids)과 같은 무기물이나, 휴믹물질(humic substances), 폴리사카라이드(polysaccharides), 단백질, 미생물과 같은 유기물에 의해 일어난다고 알려져 있다[14-16]. 그리고 이것은 농도분극[17]이나 막 표면의 겔(gel)층[18] 및 케이크(cake)층의 형성[19], 막 기공 내에 흡착이나 기공막힘[20]을 야기하여 투과선속을 감소시키게 된다. 따라서 막오염을 효과적으로 제어하기 위하여 물이나 질소를 이용한 역세척[21,22], 초음파[23,24], 역진동[25], 광산화[26]와 같은 기술들이 다양하게 연구되어져 왔다. 이중에 역세척을 이용한 방법은 막오염을 줄이고 투과선속을 증대시키는 기술 중 하나로 오늘날 많이 사용되며, 역세척은 침전물이 막벽에 완전히 형성되거나 압밀화 되기 전에 제거하여 줄 수 있다[4].

본 연구에서는 고도정수처리를 위해 탁질의 안정적인 제거를 위한 관형 세라믹 정밀여과막과 휴믹물질과 같은 용존성 유기물 제거를 위한 입상활성탄(GAC, granular activated carbon) 흡착공정을 하나의 모듈 형태로 혼성공정을 구성하였다. 정수처리의 대상이 되는 자연산유기물 중 상당부분을 차지할 것이라 생각되는 휴믹산(humic acid)과 점토계 탁도 유발물질인 카올린(kaolin)으

Table 1. Specification of Ceramic Membrane used in This Study

Membrane	NCMT-7231
Pore size (μm)	0.1
No. of channels	1
Outer diameter (mm)	8
Inner diameter (mm)	6
Length (mm)	252
Surface area (cm ²)	47.5
Material	α-alumina coating on α-alumina support
Company	Nano Pore Materials (Korea)

로 모사용액을 제조하였다. 이러한 모사용액을 혼성공정으로 고도정수처리 시, 역세척 시간 및 주기의 변화가 막오염과 투과선속에 끼치는 영향을 살펴보았으며, 탁질 및 용존 유기물의 처리 효율을 알아보았다. 또한, 그 결과로부터 도출된 최적운전 조건을 실제 호소수에 적용하여 혼성공정으로 고도정수처리 하였다.

2. 이론[27]

압력차를 추진력으로 하는 막분리 공정에서 발생하는 여과저항과 투과선속은 일반적으로 잘 알려진 직렬여과저항 모델에 의해서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[31].

$$J = \frac{\Delta P}{R_m + R_b + R_f} \quad (1)$$

여기서, J는 투과선속이고, ΔP는 막간압력차(TMP, Transmembrane pressure), R_m은 막자체에 의한 저항, R_b는 경계층에 의한 저항, R_f는 막오염에 의한 저항이다.

순수(Pure water)를 대상으로 한 분리막의 경우에는 R_b와 R_f는 존재하지 않으므로, 식 (1)은 식 (2)와 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_m} \quad (2)$$

순수의 투과유속 J값을 식 (2)에 대입하여 R_m을 구하였다. 또한 식 (2)를 R_b + R_f에 대해 정리하면 식 (3)과 같다.

Table 2. Specification of GAC Employed in This Study[27]

Parameter	Average value
Mesh size	8 × 30 mesh
Moisture	2.8%
Iodine number	1,058 mg/g
Hardness	95.8%
Bulk density	0.48 g/mL

$$R_b + R_f = \frac{\Delta P}{J} - R_m \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 구한 R_b + R_f 값을 시간에 대하여 도시한 후, 여과초기에 시간에 대하여 그 값이 선형적으로 증가하는 구간에서 최적 직선식을 구하였다. 구한 직선식을 연장하여 t = 0 (R_f = 0)에서의 값이 R_b가 된다. 이렇게 구한 R_b를 R_b + R_f에서 빼주면 시간변화에 따른 R_f를 구할 수 있었다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1. 실험 재료 및 장치

3.1.1. 세라믹 분리막

본 연구에서 사용한 관형 세라믹 정밀여과막(NCMT-7231)은 tubular type으로 α-alumina 지지층에 같은 재질인 α-alumina로 코팅 한 것이며, 나노기공소재(주)에서 구입하였다. 분리막의 평균기공크기는 0.1 μm이고, 유효막면적은 47.5 cm²이다. Table 1에는 본 연구에서 사용한 관형 세라믹 정밀여과막의 제원을 정리하였다.

3.1.2. 입상활성탄(GAC)

입상활성탄(GAC)은 수처리용 야자계 활성탄을 구입하여 사용하였으며, Table 2에는 GAC의 규격을 나타내었다. 실험에 앞서 구입한 GAC를 일정한 입도로 선별하기 위하여, 9 mesh (2 mm)와 16 mesh (1 mm) 크기의 체로 분리하였다. 또한 체분리를 통하여 얻어진 일정한 1~2 mm 크기의 GAC는 미세한 입자를 제거하기 위하여 증류수로 3~4번 행군 다음, 105°C에서 2시간 동안 건조시킨 후 사용하였다[27].

3.1.3. 대상 시료

3.1.3.1 모사용액

정수처리의 대상이 되는 자연산유기물 중 상당 부분을 차지하는 휴믹물질과 탁도를 유발하는 점토성 무기물과

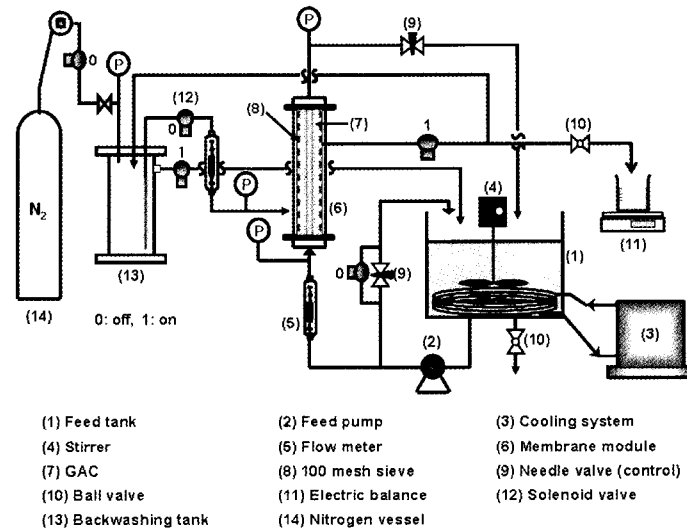


Fig. 1. Apparatus of advanced water treatment system using hybrid module of ceramic microfiltration and GAC adsorption with periodic water-back-flushing[27].

같은 미세 무기 입자를 모사하기 위하여 카올린과 휴믹산을 사용하였다[27]. 모사용액은 카올린(Kaolin, Sigma-Aldrich)과 휴믹산(Humic acid sodium salt, Aldrich) 일 정량을 증류수에 녹여, 카올린과 휴믹산의 농도를 각각 30 mg/L와 2 mg/L로 제조하여 사용하였다.

3.1.3.2. 호소수

실험에 사용한 호소수는 강원도 춘천시에 위치한 북한강 수계 상류지역인 의암호의 한 지류인 공지천수를 대 상 원수로 하였다. 2008년 11월 현재 비탁수기인 점을 고려하여, 비교적 탁도가 높고 유기물이 다량 포함되어 있 으리라 예상되는 공지천수를 대상 원수로 선정한 것이다.

3.1.4. 실험장치

Fig. 1에는 본 연구에 사용한 십자흐름(cross-flow) 여 과방식의 처리수로 역세척이 가능한 정밀여과 장치를 나타내었다. 탁질 및 용존 유기물 제거를 위하여, 세라 믹 분리막과 모듈 사이의 공간에 일정한 1~2 mm의 입자크기를 갖는 GAC로 채워 하나의 막 모듈(6) 형 태로 구성 하였다. 또한 세라믹 분리막을 먼저 통과한 후 GAC에 의해 흡착된 처리수를 GAC의 입자보다 훨씬 작 은 공경을 갖는 100 mesh (0.150 mm) 크기의 망(8)을 통과하여 처리수 관로로 이동되도록 하여, 막 모듈 안의 GAC가 처리수의 관로로 유실되는 것을 방지하였다[27].

실험 장치에 일정량의 GAC(7)를 충전한 막 모듈(6) 을 설치한 다음, 공급탱크(1)에 10 L의 모사용액을 채

우고, 항온순환기(3) (Model 1146, VWR, U.S.A)를 이 용하여 공급수의 온도를 일정하게 유지하였다. 또한 공 급탱크에는 교반기(4)를 설치하여 연속적으로 교반시 켜, 공급수가 균질한 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 공급수는 펌프(2) (Procon, Standex Co., U.S.A)에 의해 공급탱크로부터 막 모듈 안으로 유입되며, 유입유량은 유량계(5) (NP-127, Tokyo keiso, Japan)를 이용하여 측 정 하였다. 막 모듈에서의 유량과 압력은 펌프 우회관 과 농축수라인의 밸브(9)를 조절하여 일정하게 하였다. 또한, 세라믹 막과 GAC에 의해 처리된 투과수의 부피 는 전자저울(11) (Ohaus, U.S.A)로 무게를 측정하여 플 럭스를 계산하였다. 투과 플럭스를 측정 하지 않을 때 에는, 처리수가 역세척조(13)로 이동 되어지도록 하였 으며, 역세척조에 일정량 이상의 처리수가 모이면 다 시 공급탱크로 순환되어 실험하는 동안 공급수의 수질 을 일정하게 유지 하도록 하였다[27].

한편, 여과 시간 및 역세척 시간 조절을 위하여 투과 액 배출구와 역세척조의 처리수 배출구, 그리고 질소 투입구 및 역세척수의 모듈 내 투입구에 각각 솔레노이 드 밸브(12) (Solenoid valve: CKD, JPN)를 설치하였 다. 또한, 원활한 역세척이 이루어질 수 있도록 역세척 동안 막 내부의 압력을 낮추기 위하여 막 모듈의 우회 관에 솔레노이드 밸브를 장착하여, 역세척시 공급수는 막 모듈 내로 공급되지 않고 우회관을 통해 공급탱크로 순환되게 하였다. 이들 다섯 개의 솔레노이드 밸브는 모두 하나의 시간 제어계(Twin timer: OMRON, JPN)

에 연결 부착되어 밸브의 개·폐가 동시에 일어나며, 역세척시 처리수는 질소탱크의 압력에 의해 막 모듈의 하단부를 통하여 역세척이 수행된다.

3.2. 운전 조건

본 연구에서는 정수처리를 위한 관형 세라믹 정밀여과막 및 입상활성탄(GAC) 흡착 혼성공정에서 발생하는 막오염을 최소화하기 위하여, 역세척 시간(BT, Back-flushing time) 및 역세척 주기인 여과 시간(FT, Filtration time)을 변화시키면서 이에 따른 영향을 살펴보았다. 역세척 주기는 여과 시간(FT)으로, 역세척이 수행되는 주기를 의미한다. BT에 의한 영향을 살펴보기 위하여 FT를 10분으로 고정한 다음, BT 조건을 역세척이 없을 때(NBF), 6, 10, 15, 20, 30초로 변화시켰다. 또한 BT 변화 실험 결과로부터 최적 BT 조건을 찾은 후, FT 영향을 알아보았다. FT 변화 실험은 FT 조건을 2, 4, 6, 8, 10분으로 각각 변화시키면서, 전체 운전시간에 따른 막오염에 대한 저항(R_f) 및 투과선속(J), 무차원적인 투과선속(J/J_0), 총여과부피(V_T)의 변화를 관찰하였다. 모든 실험에서 다른 운전 변수인 막간압력차(TMP)는 1.77 bar, 물 역세척 압력은 2.50 bar, 유입유량은 1.0 L/min, 공급수의 온도는 $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 로 일정하게 하였으며, 이것은 선행 연구결과[27]와 같은 조건이다. 한편 세라믹 분리막과 모듈 사이에 충전한 GAC의 충전율은 최대 충전율인 24.05%로 하였으며, 이 때 충전된 GAC 양은 64 g이다. GAC 충전율은 수중에서 일정량의 GAC가 차지하는 부피를 측정하여, 세라믹 분리막과 모듈 사이의 빈 공간의 부피에 대한 GAC 부피의 비로 계산하였다.

3.3. 막세척 및 수질분석

각각의 실험이 종료된 후 공급수로 사용한 모사용액을 배수한 다음, 15분 동안 수돗물을 순환시키면서 실험장치 및 분리막을 세척하였다. 그 다음 혼성모듈에서 GAC를 분리한 후, 세라믹 분리막을 탈착하였다. 탈착 후 관형 세라믹 정밀여과막을 550°C 에서 30분간 강열한 다음, 15% 질산 수용액과 0.25 N 수산화나트륨 수용액에 각각 1일 및 3시간 동안 화학세정을 실시하였다. 새로운 조건에서 운전하기 전에 세정을 실시한 막 모듈에 설치한 후, 1차 증류수로 정상 운전하면서 투과량을 측정하여 막의 성능 회복여부를 확인하였다.

한편, 혼성모듈을 통한 탁질 및 용존 유기물질의 처리효율을 알아보기 위하여 공급수 및 처리수의 수질을

분석 하였다. 탁도(Turbidity)는 Turbidity meter (2100 N, Hach, U.S.A.)를 사용하여 직접 측정하였다. 휴믹산과 같은 용존 유기물의 지표로 사용되는 UV₂₅₄ 흡광도는 UV Spectrophotometer (GENESYS 10 UV, Thermo, U.S.A)를 이용하여 측정하였다. 일반적으로 상수원수에 존재하는 용존 유기물의 양을 표시하는 방법 중의 하나로 많이 사용되는 방법은 UV₂₅₄ 흡광물질의 양으로 표시하는 방법이다. UV₂₅₄ 흡광도는 자외선(Ultraviolet)파장 200~400 nm 사이에서 검출되는 물질로 방향족 물질(aromatic substance), 불포화지방족물질(unsaturated aliphatic compound), 포화지방족물질(saturated aliphatic compound)과 천연유기물인 휴믹물질(humic substance) 등이 주를 이룬다. 이들은 모두 탄소의 이중결합 구조가 있는 물질들로 잔류염소와 반응하여 THM 등의 발암성 물질이 되거나 미생물의 영양원이 되는 문제를 발생시키는 물질들이다. 따라서 UV₂₅₄ 흡광도의 양으로 표시하는 방법은 여러 가지 형태로 존재하는 용존 유기물 중에서 환경에 영향을 주는 중, 고분자 유기물질의 변화 상태를 측정하는데 이용하고 있다. 특히 UV₂₅₄ 흡광도는 휴믹물질을 함유한 물의 DOC 측정 대응으로 사용하기에 효과적이고 간단한 측정법이다[28,29]. 본 연구에서 UV₂₅₄ 흡광도의 측정은 공급수의 경우 카울린 입자에 의한 빛의 산란현상을 방지하기 위하여 0.2 μm cellulose 여과지로 여과 후 측정 하였다. 그리고 0.1 μm 세라믹 정밀여과막에 의해 여과된 처리수는 다른 여과과정을 거치지 않고 직접 측정하였다. 또한, 총용존고형물(TDS)은 Conductivity meter (Model 162, ATI ORION, U.S.A.)로 측정하였으며, 화학적 산소요구량(COD_{Mn})은 수질오염 공정시험방법[30]에 의하여 분석을 하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 역세척 시간(BT)의 영향

카울린과 휴믹산의 농도가 각각 30 mg/L와 2 mg/L인 모사용액을 대상으로, 혼성공정에서 발생하는 막오염을 최소화하고 투과선속을 향상시키기 위하여 역세척 시간(BT)을 변화시켰다. 그리고 BT 변화가 여과인자 즉, 막오염에 의한 저항(R_f), 투과선속(J) 및 무차원화한 투과선속(J/J_0)에 미치는 영향을 알아보았다. 이러한 여과인자들은 직렬 여과저항 모델식(Resistance-in-series model)[31]을 이용하여 선행 연구 결과[27]의 방법으로 계산하였다.

Table 3. Effect of Water-back-flushing Time on Filtration Factors for NCMT-7231

Experimental condition		Filtration factors					
FT (min)	BT (sec)	$R_m \times 10^{-9}$ (kg/m ² · s)	$R_{f,180} \times 10^{-9}$ (kg/m ² · s)	J_0 (L/m ² · hr)	J_{180} (L/m ² · hr)	J_{180}/J_0	V_T (L)
10	NBF ^a	0.49	2.42	1199.85	214.99	0.179	4.66
	6	0.49	1.98	1096.68	247.71	0.226	4.58
	10	0.49	1.76	1246.97	280.29	0.225	5.39
	15	0.49	1.75	1266.53	281.81	0.223	5.59
	20	0.49	1.73	1273.36	285.22	0.224	5.35
	30	0.49	1.68	1219.31	288.88	0.237	5.32

a : No back-flushing.

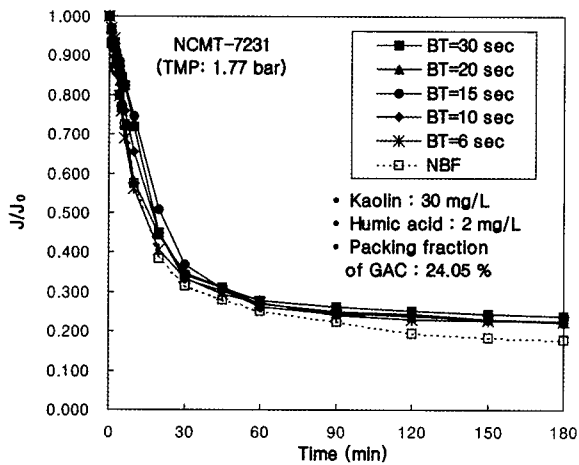


Fig. 2. Effect of water-back-flushing time on dimensionless permeate flux for NCMT-7231.

Fig. 2에는 초기투과선속(J_0)에 대한 시간에 따른 투과선속(J)인 무차원화된 투과선속(J/J_0)을 운전시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 역세척 수행 시 NBF보다 J/J_0 가 조금 더 높게 유지 되는 것을 볼 수 있었다. 그리고 BT 6, 10, 15, 20초 조건에서는 180분 운전 후 비슷한 J/J_0 를 보였으며, BT가 가장 긴 30초 조건에서 가장 높은 J/J_0 를 보였다.

Fig. 3에는 BT 변화가 R_f 에 미치는 영향을 운전시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 역세척이 없는 조건(NBF)에서 R_f 는 가장 크게 나타났으며, BT가 가장 짧은 6초에서는 90분 운전시간 이전에 NBF와 R_f 가 비슷한 양상을 보이다가, 90분 이후부터는 NBF보다 더 낮은 R_f 를 나타내었다. 이러한 결과로 볼 때, BT를 짧게 하였을 때는 운전 초기에 그 효과 거의 없지만, 운전시간이 경과함에 따라 서서히 역세척 효과를 보이는 것으로 판단된다. 한편, BT가 6초보다 더 긴

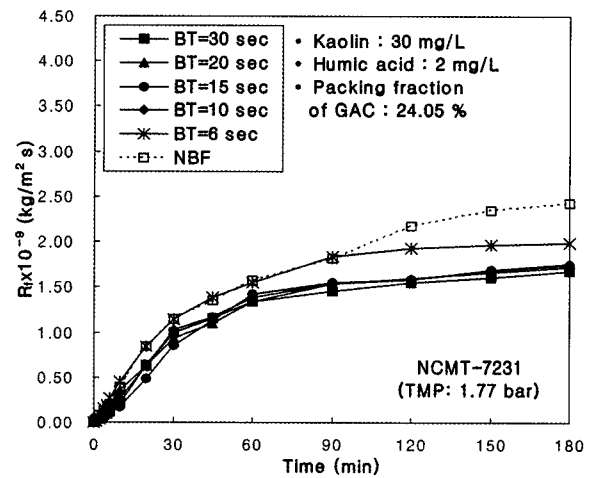


Fig. 3. Effect of water-back-flushing time on resistance of membrane fouling for NCMT-7231.

10, 15, 20, 30초 조건에서는 운전 초기부터 꾸준히 역세척 효과를 나타내어 NBF 보다 더 낮은 R_f 를 유지하는 것을 알 수 있었으며, BT가 가장 긴 30초 조건에서 R_f 는 가장 낮게 유지 되었다. 그러나 BT가 6초인 경우에 비해 BT 10~30초 조건에서 R_f 는 더 낮게 유지 되었지만, 이 조건들에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이것으로 볼 때, BT가 10초보다 더 길어지더라도 역세척 효과는 증가한 BT만큼 효과를 보지 못하는 것으로 판단된다.

한편, BT 변화에 따른 막 자체의 저항(R_m), 180분 운전 후 막오염의 저항($R_{f,180}$), 180분 운전 후 투과선속(J_{180}), 초기투과선속(J_0), 초기투과선속에 대한 180분 운전 후 투과선속의 비(J_{180}/J_0), 그리고 총여과부피(V_T)에 대한 결과를 Table 3에 정리 하였다. Table 3에서 보는 바와 같이, BT가 가장 긴 30초 조건에서 $R_{f,180}$ 은 $1.68 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 가장 낮았으며, J_{180} 은 $288.88 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 BT 10, 15, 20초 조건

Table 4. Average Water Quality and Treatment Efficiency in the Experiments for Effect of Water-back-flushing Time using Hybrid Module of NCMT-7231

Experimental condition		Turbidity (NTU)			UV ₂₅₄ absorbance (cm ⁻¹)		
FT (min)	BT (sec)	Feed water	Treated water	Treatment efficiency (%)	Feed water	Treated water	Treatment efficiency (%)
	NBF ^a	33.30	0.09	99.73	0.042	0.001	98.05
	6	37.20	0.11	99.70	0.045	0.001	97.33
	10	38.60	0.12	99.70	0.044	0.001	97.32
10	15	37.60	0.11	99.71	0.041	0.001	97.52
	20	38.50	0.11	99.71	0.045	0.001	97.34
	30	39.20	0.11	99.72	0.040	0.001	98.37

a : No back-flushing.

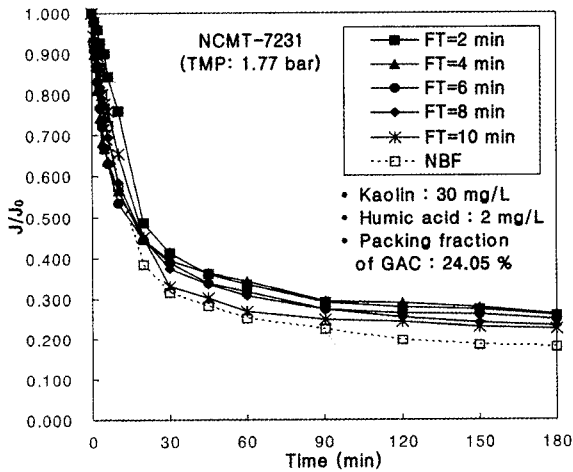


Fig. 4. Effect of water-back-flushing period on dimensionless permeate flux for NCMT-7231.

에서는 $R_{f,180}$ 과 J_{180}/J_0 는 거의 비슷한 결과를 보였으며, J_{180} 은 BT가 길어짐에 따라 소폭 증가 하는 것으로 나타났다. 한편, V_T 는 BT 15초에서 BT 30초보다 J_{180} 이 더 낮았음에도 불구하고 5.59 L로 가장 높게 나타났다. 그 이유는 BT가 20초와 30초일 때 BT가 15 sec인 조건보다 J_{180} 은 더 높았지만, BT가 길어짐에 따라 총 여과시간이 감소하였기 때문으로 판단된다. 따라서 $R_{f,180}$, J_{180} , J_{180}/J_0 측면에서 볼 때, 최적 BT 조건은 30초 이고, V_T 측면에서는 15초임을 알 수 있었다. 그러나 BT 10~30초에서 조건 $R_{f,180}$, J_{180} , J_{180}/J_0 , V_T 모두 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 BT 변화 실험에서 최적 BT는, 에너지 저감을 위해 10초로 선정하였다. BT 10초 조건에서 V_T 는 5.39 L로, BT 15초인 조건 다음으로 두 번째로 큰 V_T 값이다. 그리고 R_m 은 모든 조건에서 $0.49 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 동일하였는데, 이것은 모사용액으로 실험하기 전에

순수 투과량을 측정하여 분리막의 R_m 값이 동일한 것을 확인한 후 실험을 진행하였기 때문이다. 이러한 R_m 값은 분리막의 초기 특성을 결정하는 중요한 인자가 된다.

한편, Table 4에는 BT 변화 실험에서 공급수와 처리수의 평균 수질 및 평균 처리효율을 정리하였다. 공급수의 평균 탁도는 33.30~39.20 NTU이고 처리수의 탁도는 0.09~0.12 NTU이었으며, 모든 BT 조건에서 99.70% 이상의 평균 처리효율을 나타내었다. 따라서 본 연구에 사용한 관형 세라믹 정밀여과막은 탁질 제거에 매우 우수하면서 안정적인 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 공급수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.040~0.045 cm⁻¹의 범위였으며, 처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.001 cm⁻¹로 나타나 평균 처리효율은 97.32% 이상으로 높게 나타났다. 이것으로 보아, 관형 세라믹 정밀여과막과 GAC 혼성 모듈이 용존 유기물의 제거에 우수한 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

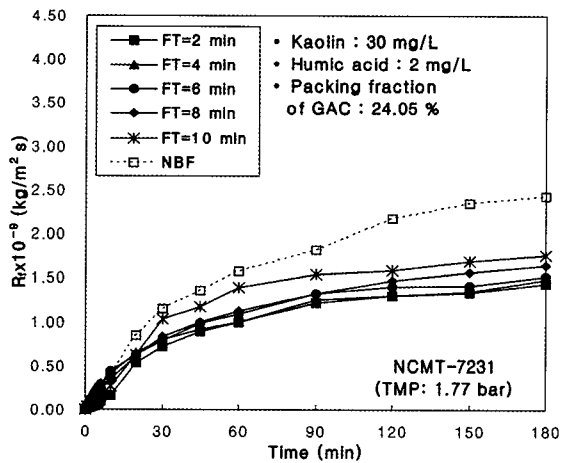
4.2. 역세척 주기(FT)의 영향

역세척 시간(BT) 변화 실험에서 규명된 최적 BT조건 10초로 고정한 후, 역세척 주기인 여과시간(FT)을 변화시키면서 이에 따른 영향을 살펴보았다. FT 변화 실험은 FT 조건을 2, 4, 6, 8, 10분으로 각각 변화시키면서 최적 FT 조건을 고찰하였다. Fig. 4에는 FT 변화에 따른 J/J_0 의 변화 나타났다. Fig. 4에 나타난 바와 같이, FT가 가장 짧은 2분일 때 가장 높은 J/J_0 를 나타내었으며, 운전시간 30분 이내의 투과선속도 가장 높게 유지하였다. 이것은 역세척이 빈번 할수록 막오염의 역제가 유리하였기 때문이며, 이로 인해 가장 높은 J/J_0 를 나타내었다. 한편, FT 변화 실험에서도 FT의 변화가 아주 큰 투과선속도의 증가를 가져오지는 못했지만, BT 변화

Table 5. Effect of Water-back-flushing Period on Filtration Factors for NCMT-7231

Experimental condition		Filtration factors					
FT (min)	BT (sec)	$R_m \times 10^{-9}$ (kg/m ² · s)	$R_{f,180} \times 10^{-9}$ (kg/m ² · s)	J_0 (L/m ² · hr)	J_{180} (L/m ² · hr)	J_{180}/J_0	V_T (L)
NBF ^a		0.49	2.42	1199.85	214.99	0.179	4.66
10	10	0.49	1.76	1246.97	280.29	0.225	5.39
8		0.49	1.64	1273.81	296.84	0.233	5.73
6		0.49	1.52	1268.53	314.40	0.248	5.74
4		0.49	1.48	1216.78	316.93	0.260	5.74
2		0.49	1.43	1266.56	328.17	0.259	5.97

a : No back-flushing.

**Fig. 5.** Effect of water-back-flushing period on resistance of membrane fouling for NCMT-7231.

실험보다 FT를 감소시킴에 따라 더 높은 투과선속을 얻을 수 있었다.

Fig. 5에는 FT에 따른 R_f 의 변화를 운전시간에 따라 나타내었다. 그 결과, FT가 짧아질수록 BT변화 실험에서 보다 더 확연한 R_f 의 감소를 볼 수 있었으며, FT가 가장 짧은 조건인 FT가 2분일 때 가장 낮은 R_f 값을 보였다. 그리고 FT가 8분 이하일 경우에, 운전 초기에 발생하는 막오염은 NBF나 FT가 10분인 조건보다 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 운전 초기 90분까지 FT 6분과 8분, 그리고 FT 2분과 4분 조건이 각각 비슷한 경향을 보였으며, FT 6분의 경우 90분 운전 후부터 8분보다 더 낮은 R_f 를 보였다. 그리고 FT 2분의 경우 운전 시간동안 FT 4분과 비슷한 경향을 보였지만, R_f 는 다소 낮게 유지 되었다. 따라서 이러한 결과는 FT가 짧을수록 역세척이 자주 수행되어, 분리막 표면에 카올린 입자 및 휴믹물질의 케이크 층 형성을 지연시키거나, 케이크 층이 압밀화 되기 전에 탈착시켜 막오염이 둔화

되는 것으로 판단된다.

Table 5에는 FT의 변화에 따른 R_m 및 $R_{f,180}$, J_0 , J_{180} , J_{180}/J_0 , V_T 를 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이, FT의 변화는 NBF와 비교하였을 때, $R_{f,180}$, J_{180} , J_{180}/J_0 및 V_T 측면에서 뚜렷한 차이를 보였으며, FT가 짧아질수록 $R_{f,180}$ 은 감소하였으며, 저항의 감소에 따라 J_{180} 와 J_{180}/J_0 그리고 V_T 는 증가하였다. 또한 FT가 가장 짧은 FT가 2분일 때, $R_{f,180}$ 은 1.43×10^{-9} kg/m² · s로 NBF에 비해 약 41%가 감소하였으며, J_{180} 은 328.17 L/m² · hr로 약 1.5배 증가하여 가장 많은 V_T 인 5.97 L를 얻을 수 있었다. 한편, J_{180}/J_0 는 FT가 4분일 때 0.260으로 FT 2분일 때의 0.259보다 조금 더 높은 값을 보였다. 이것은 FT 4분에서의 J_0 가 FT 2분에서보다 상대적으로 조금 더 적은 값을 나타내었기 때문이다. 따라서 가장 낮은 $R_{f,180}$ 과 가장 높은 J_{180} , J_{180}/J_0 및 V_T 측면에서 볼 때, 본 실험에서 최적 FT 조건은 FT 2분으로 역세척을 자주 수행하는 것이 효과적임을 알 수 있었다. 그러나 역세척 주기가 짧을수록 잦은 역세척으로 인하여 역세척에 대한 운전비용은 증가한다. 따라서 운전비용을 고려하여 최적 FT조건은 8분으로 설정하였다. 막 여과 공정의 효율을 결정짓는 가장 큰 인자는 투자한 운전비용에 대한 처리수량이다. 본 연구에서는 FT가 8분일 때 V_T 는 5.73 L로 FT 2분의 V_T 인 5.97 L보다는 작지만, FT가 4와 6분일 때와 비교 할 때 비슷한 값을 나타내었기 때문에 이를 최적 FT조건으로 결정하였다.

Table 6에는 FT 변화 실험에서 공급수와 처리수의 평균 수질 및 평균 처리효율을 정리하였다. 공급수의 평균 탁도는 33.30~38.60 NTU 이었으며, 처리수의 탁도는 0.09~0.20 NTU로 탁도의 평균 처리효율은 99.47% 이상으로 높게 나타났다. 또한 UV₂₅₄ 흡광도의 경우, 공급수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.040~0.044 cm⁻¹의 범위가

Table 6. Average Water Quality and Treatment Efficiency in the Experiments for Effect of Water-back-flushing Period using Hybrid Module of NCMT-7231

Experimental condition		Turbidity (NTU)			UV ₂₅₄ absorbance (cm ⁻¹)		
FT (min)	BT (sec)	Feed water	Treated water	Treatment efficiency (%)	Feed water	Treated water	Treatment efficiency (%)
NBF ^a		33.30	0.09	99.73	0.042	0.001	98.05
10	10	38.60	0.12	99.70	0.044	0.001	97.32
8		38.10	0.12	99.70	0.042	0.001	96.84
6		35.60	0.13	99.63	0.040	0.004	90.65
4		37.90	0.20	99.47	0.041	0.002	95.47
2		34.50	0.11	99.67	0.042	0.002	95.67

a : No back-flushing.

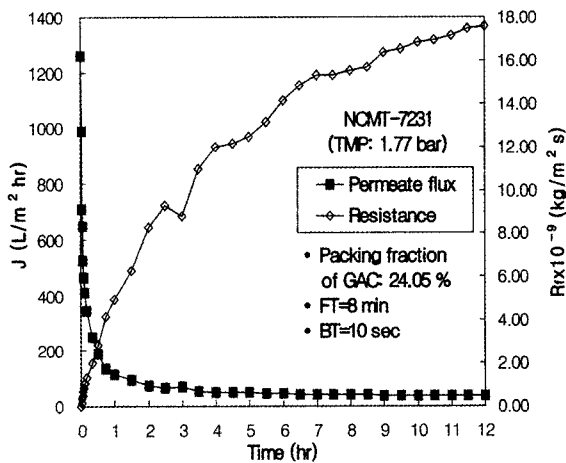


Fig. 6. Resistance of membrane fouling and permeate flux during 12 hours' operation in lake water treatment by hybrid module of tubular membrane and GAC.

고, 처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.001~0.004 cm⁻¹로 나타나 평균 처리효율은 90.65% 이상으로 나타났다.

4.3. 호소수에 대한 실증 실험결과

관형 세라믹 정밀여과막 및 GAC 혼성공정을 이용하여 인공으로 제조된 모사용액으로 실험하여 도출된 BT 및 FT의 최적 운전조건을 실제 호소수에 적용하여 실험하였다. 실험은 관형 세라믹 정밀여과막 및 GAC 혼성공정의 최적 운전조건인 FT 8분에 BT 10초로 하였으며, 다른 운전조건인 TMP와 역세척 압력, 유입유량, 공급수의 온도 그리고 GAC의 충전율은 동일하게 하였다. 또한 호소수 40 L를 공급탱크에 순환시키면서 12시간 동안 실험을 진행하였으며, 혼성공정의 처리수는 공급탱크로 순환시키지 않고 수질분석을 위하여 채수하였다.

Fig. 6에는 운전시간 동안 R_f와 J의 변화를 함께 나타

내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 운전초기에 1시간 동안에 막오염이 매우 빠르게 진행되어 R_f는 급격히 증가하였으며, 실험 시작 후 4시간 동안 R_f는 급격한 증가를 보였고, 4시간 이후에는 비교적 완만한 증가를 나타내었다. 또한, 운전시간 3시간 30분일 때 R_f가 일시적으로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 결과는 이 시점에서 투과선속 측정 직전에 역세척이 수행되어, 역세척 효과로 인해 상대적으로 조금 더 많은 처리 수량을 얻을 수 있었기 때문에 R_f가 일시적으로 감소한 것으로 판단된다. J의 경우 운전 초기 1시간 동안 매우 빠르게 감소하였으며, 그 이후에는 서서히 감소하는 경향을 나타내었다. 한편, 관형 세라믹 정밀여과막 및 GAC 혼성공정으로 12시간 동안 운전한 결과, 총여과부피(V_T)는 3.71 L를 얻을 수 있었다.

이러한 결과로부터 관형 세라믹 정밀여과막 및 GAC 혼성공정을 이용한 호소수 처리시 막오염의 발생은 운전초기에 매우 빠르게 진행되며, 운전 시간이 경과함에 따라 막오염은 꾸준히 증가하고, 이로 인해 투과선속이 급격하게 감소하여 매우 낮게 유지됨을 알 수 있었다. 본 실험에서의 경우 운전압력이 1.77 bar로 비교적 높기 때문에, 원수 내에 존재하는 미세 콜로이드 입자나 다양한 종류의 유기물이 막면에 매우 강하게 결합하여 케이크 층을 형성하거나 기공막힘 등을 초래하는 것으로 판단되며, 역세척 만으로는 제거할 수 없는 비가역적인 막오염이 점점 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 탁도가 비교적 높고 유기물이 다량 포함된 원수의 경우에는 역세척과 같은 물리적인 방법만으로는 막오염을 해결하기에 부족한 것으로 판단된다. 이를 해결하기 위해서는 주기적인 역세척과 더불어, 막여과 전에 응집과 같은 적절한 전처리 공정과의 연계가 필요할 것으로 판단된다.

Table 7. Average Water Quality and Treatment Efficiency in Lake Water Treatment using Hybrid Module of Tubular Membrane and GAC

Items	Hybrid module			Tubular membrane		
	Feed water	Treated water	Treatment efficiency (%)	Feed water	Treated water	Rejection rate (%)
TDS (mg/L)	57	40	30.05	57	55	3.81
Turbidity (NTU)	16.50	0.15	99.11	11.90	0.16	98.60
UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	0.084	0.007	91.40	0.067	0.039	42.15
COD _{Mn} (mg/L)	15.01	1.60	89.34	9.24	3.05	P66.97

한편, 혼성공정을 실제 호소수에 적용하였을 경우의 처리효율을 알아보기 위하여 수질분석을 수행하였다. 수질분석은 실험 시작 후 30분 간격으로 공급수 및 처리수를 채수하여 총용존고형물(TDS)과 탁도, 그리고 UV₂₅₄ 흡광도를 측정하였으며, 화학적 산소요구량(COD_{Mn})의 경우에는 1시간 간격으로 수질 분석을 수행하였다. 또한 세라믹 정밀여과막 단독공정의 처리효율을 확인하기 위하여, GAC를 충전하지 않고 관형 정밀여과막만 모듈에 장착하여 3시간 동안 실험을 수행하면서 같은 방법으로 수질분석을 하였다. 그리고 혼성공정에서 분리막에 의해 여과된 투과수가 GAC와 접촉하는 체류시간을 알아보기 위해, 비교적 투과선속이 일정한 운전시작 후 6~12시간 동안의 투과량을 이용하여 체류시간을 계산하여 본 결과 평균 37.7분인 것을 알 수 있었다.

Table 7에는 관형 세라믹 정밀여과막 및 GAC 혼성공정과, GAC 없이 관형 정밀여과막의 단독공정에서 공급수 및 처리수의 평균 수질 및 평균 처리효율을 정리하였다. Table 7에서 보는 바와 같이, 혼성공정 실험과 단독공정에서 공급수의 수질이 다소 차이를 나타내었는데, 이는 각각의 실험에서 사용한 공지천수의 채수일이 혼성공정 실험의 경우 2008년 11월 14일, 그리고 관형 정밀여과막만을 이용한 실험의 경우 2008년 11월 20일로 다르기 때문이다. 탁도의 경우 혼성공정에서 공급수의 평균 탁도는 16.50 NTU, 처리수의 평균 탁도는 0.15 NTU로 평균 처리효율은 99.11%로 매우 높았다. 또한 관형 정밀여과막 단독공정에서 공급수의 평균 탁도는 11.90 NTU 처리수의 평균 탁도는 0.16 NTU로, 평균 처리효율은 98.60%로 비교적 비슷한 결과를 나타내었다. TDS의 경우 두 조건의 실험에서 공급수의 평균 TDS는 57 mg/L로 동일하였다. 반면에 처리수의 평균 TDS는 혼성공정에서 40 mg/L이고 단독공정에서는 55 mg/L로 차이를 나타내어, 평균 처리효율 또한 각각

30.05%와 3.91%로 비교적 큰 차이를 보였다. 따라서 정밀여과막 단독공정에서는 용존 고형물의 처리가 거의 되지 않는 반면, GAC와 결합한 혼성공정의 경우 GAC에 의해 용존 고형물이 흡착 처리됨을 알 수 있었다.

용존 유기물의 지표로 사용되는 UV₂₅₄ 흡광도의 경우에도 채수일이 다른 관계로, 공급수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 혼성공정의 경우 0.084 cm⁻¹이고, 단독공정의 경우 0.067 cm⁻¹로 약간의 차이를 나타내었다. 하지만 처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 혼성공정의 경우 0.007 cm⁻¹이고, 단독공정의 경우 0.039 cm⁻¹로, 평균 처리효율은 각각 91.40%와 42.15%로 두 배 이상의 큰 차이를 보였다. 이러한 결과로부터, 혼성공정으로 처리시 정밀여과막 단독공정으로는 제거되지 않는 용존 유기물의 경우 GAC의 흡착으로 인하여 효과적인 제거가 가능함을 확인 할 수 있었다. 한편, 단독공정에서 GAC를 사용하지 않았음에도 UV₂₅₄ 흡광도의 평균 처리효율이 42.15%로 비교적 높음을 알 수 있었다. 이것은 단독공정으로 처리시 세라믹 분리막 표면에 쌓인 케이크 층에 의해 분자량이 비교적 큰 휴믹물질이 배제되었기 때문으로 판단된다. 유기물을 나타내는 COD의 경우에도 혼성공정에서 공급수의 평균 COD가 15.01 mg/L로 단독공정에서의 공급수의 COD보다 매우 높았음에도 불구하고, 처리수의 평균 COD는 1.60으로 더 낮아 평균 처리효율은 89.34%로 더 높게 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 고탁도 원수의 고도정수처리를 위하여, 탁질 제거를 위한 관형 세라믹 정밀여과와 용존 유기물 제거를 위한 입상활성탄 흡착공정을 하나의 모듈로 구성하였다. 이러한 혼성공정에서 발생하는 막오염을 최소화하기 위하여, 모사용액을 대상으로 역세척 시

간 및 역세척 주기의 최적 운전조건을 알아 본 후, 실제 호소수를 대상으로 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

역세척 시간(BT)의 변화에 영향을 살펴 본 결과, BT가 30초일 때 $R_{f,180}$ 은 $1.68 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 가장 낮았으며, J_{180} 은 $288.88 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 가장 높아 $R_{f,180}$, J_{180} , J_{180}/J_0 측면에서 볼 때 최적 BT는 30초였다. 그러나 V_T 는 BT 15초에서 5.59 L로 가장 높았다. 그리고 BT 10~30초에서 조건 $R_{f,180}$, J_{180} , J_{180}/J_0 , V_T 모두 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다. 따라서 에너지 저감을 고려할 때, 최적 BT는 10초임을 알 수 있었다.

최적 BT 10초에서 역세척 주기(FT) 변화에 따른 영향을 살펴 본 결과, FT가 짧아질수록 R_f 는 감소하였고, 저항의 감소에 따라 J 와 J_{180}/J_0 , V_T 는 증가하여, FT가 2분일 때 $R_{f,180}$ 은 $1.43 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 로 최소였고, J_{180} 은 $328.17 \text{ L/m}^2 \cdot \text{hr}$ 로 가장 높아 가장 많은 V_T 인 5.97 L를 얻을 수 있었다. 따라서 $R_{f,180}$, J_{180} , J_{180}/J_0 , V_T 측면에서 볼 때, 본 실험조건에서 최적 FT는 2분으로 역세척을 자주 수행하는 것이 효과적임을 알 수 있었다. 그러나 FT가 8분 일 때 V_T 는 5.73 L로 FT 2분의 V_T 인 5.97 L와 큰 차이를 보이지 않아, 역세척에 대한 운전비용을 고려하여 최적 FT조건을 8분으로 설정하였다.

모사용액으로 실험하여 도출된 최적 운전조건으로 실제 호소수에 적용하여 실험한 결과, R_f 는 운전초기에 매우 빠르게 진행되며, 운전 시간이 경과함에 따라 R_f 는 꾸준히 증가하였고, 이로 인해 J 가 급격하게 감소하여 매우 낮게 유지됨을 알 수 있었다. 따라서 탁도가 비교적 높고 유기물이 다량 포함된 원수의 경우, 주기적인 역세척과 더불어 적절한 전처리 공정과의 연계가 필요할 것으로 판단된다. 한편, 혼성공정에서 탁도와 UV₂₅₄ 흡광도의 평균 처리효율은 각각 99.11%와 91.40%로 우수하였다. 그리고 TDS는 30.05%, COD는 89.34%의 처리효율을 나타내어, 탁도를 제외한 항목에서 GAC를 충전하지 않은 단독공정의 실험보다 더욱 높은 처리효율을 나타내었다. 이러한 결과로부터, 혼성공정으로 처리시 관형 정밀여과막 단독공정으로 제거되지 않는 용존 유기물의 경우 GAC의 흡착으로 효과적인 제거가 가능함을 확인 할 수 있었다.

감 사

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로

한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-511-D00137).

참 고 문 헌

1. 박재충, 박정원, 신재기, 이희무, “인공호에서 문순과 태풍강우에 의한 고탁수층의 이동과 소멸특성”, *한국하천호수학회지*, **38(1)**, 105 (2005).
2. 신재기, 강창근, 황순진, “팔당호에서 수중탁도의 일 변동과 고탁수의 입자분포”, *한국하천호수학회지*, **36(3)**, 257 (2003).
3. 신재기, 허진, 이홍수, 박재충, 황순진, “표층수를 방류하는 저수지(용담호)에서 문순 탁수환경의 공간적 해석”, *한국물환경학회지*, **22(5)**, 933 (2006).
4. 박진용, “세라믹 여과 시스템으로 제지폐수 처리시 회수 효율에 대한 물 역세척 시간의 영향”, *멤브레인*, **14(4)**, 329 (2004).
5. 박지혜, 이상운, 박홍석, “개질 Clay를 첨가한 응집 공정에서의 자연유기물 제거”, *상하수도학회지*, **21(1)**, 37 (2007).
6. M. H. Cho, C. H. Lee, and S. H. Lee, “Effect of flocculation conditions on membrane permeability in coagulation-microfiltration”, *Desalination*, **191**, 386 (2006).
7. Y. Yoon and R. M. Lueptow, “Removal of organic contaminants by RO and NF membranes”, *J. Membr. Sci.*, **261**, 76 (2005).
8. M. R. Teixeira and M. J. Rosa, “The impact of the water background inorganic matrix on the natural organic matter removal by nanofiltration”, *J. Membr. Sci.*, **279**, 513 (2006).
9. 정지현, 추광호, 박학순, “저압 막여과 혼성공정을 이용한 고도 정수처리”, *멤브레인*, **17(3)**, 161 (2007).
10. H. S. Kim, S. Takizawa, and S. Ohgaki, “Application of microfiltration systems coupled with powdered activated carbon to river treatment”, *Desalination*, **202**, 271 (2007).
11. S. Mozia and M. Tomaszewska, “Treatment of surface water using hybrid processes-adsorption on PAC and ultrafiltration”, *Desalination*, **162**, 23 (2004).
12. R. H. S. Jansen, J. W. de Rijk, A. Zwijnenburg, M. H. V. Mulder, and M. Wessling, “Hollow fiber

- membrane contactors—A means to study the reaction kinetics of humic substance ozonation”, *J. Membr. Sci.*, **257**, 48 (2005).
13. 박경원, 추광호, 김문현, “광촉매 반응과 침지형 정밀여과를 이용한 자연산 유기물의 제거”, *멤브레인*, **14(2)**, 149 (2004).
 14. 이용택, 오중교, “분리막을 이용한 정수처리공정에서 유, 무기물질이 막오염에 끼치는 영향”, *멤브레인*, **13(4)**, 219 (2003).
 15. W. Yuan, A. Kocic, and A. L. Zydney, “Analysis of humic acid fouling during microfiltration using a pore blockage-cake filtration model”, *J. Membr. Sci.*, **198**, 51 (2002).
 16. D. B. Mosqueda-Jimenez and P. M. Huck, “Characterization of membrane foulants in drinking water treatment”, *Desalination*, **198**, 173 (2006).
 17. M. Heran and S. Elmaleh, “Microfiltration through an inorganic tubular membrane with high frequency retrofiltration”, *J. Membr. Sci.*, **188**, 181 (2001).
 18. S. K. Karode, “Unsteady state flux response: a method to determine the nature of the solute and gel layer in membrane filtration”, *J. Membr. Sci.*, **188**, 9 (2001).
 19. H. K. Vyas, A. J. Mawson, R. J. Bennett, and A. D. Marshall, “A new method for estimating cake height and porosity during filtration of particulate suspensions”, *J. Membr. Sci.*, **176**, 113 (2000).
 20. P. Rai, C. Rai, G. C. Majumdera, S. D. Gupta, and S. De, “Resistance in series model for ultrafiltration of mosambi (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) juice in a stirred continuous mode”, *J. Membr. Sci.*, **283**, 116 (2006).
 21. K. Katsoufidou, S. G. Yiantsios, and A. J. Karabelas, “A study of ultrafiltration membrane fouling by humic acids and flux recovery by back washing: Experiments and modeling”, *J. Membr. Sci.*, **266**, 40 (2005).
 22. J. Y. Park, S. J. Choi, and B. R. Park, “Effect of N₂-back-flushing in multichannels ceramic microfiltration system for paper wastewater treatment”, *Desalination*, **202**, 207 (2007).
 23. D. Chen, L. K. Weavers, and H. W. Walker, “Ultrasonic control of ceramic membrane fouling: Effect of particle characteristics”, *Water research*, **40**, 840 (2006).
 24. 육영재, 염경호, “초음파를 이용한 한외여과의 성능 향상”, *멤브레인*, **13(4)**, 283 (2003).
 25. W. F. Jones, R. L. Valentine, and V. G. J. Rodgers, “Removal of suspended clay from water using transmembrane pressure pulsed microfiltration”, *J. Membr. Sci.*, **157**, 199 (1999).
 26. F. Malek, J. L. Harris, and F. A. Roddick, “Inter-relationship of photooxidation and microfiltration in drinking water treatment”, *J. Membr. Sci.*, **281**, 541 (2006).
 27. 이혁찬, 박진용, “세라믹 정밀여과 및 활성탄 흡착 혼성공정에 의한 고탁도 원수의 고도정수처리: 입상 활성탄 충전율에 의한 영향”, *멤브레인*, **18(3)**, 191 (2008).
 28. 윤경은, “입상활성탄과 오존/입상활성탄을 이용한 한강분류 원수의 NOM 제거특성”, 서울시립대학교, 석사학위논문 (2007).
 29. 정진영, 강길윤, 윤동현, 김윤성, 서근학, 임준혁, “활성탄에 의한 상수원수중 NOM의 흡착특성에 관한 연구”, *공업화학*, **14(8)**, 1127 (2003).
 30. 동화기술편집부, “수질오염 공정시험방법”, 동화기술, pp. 129-130 (1996).
 31. M. Cheryan, “Ultrafiltration Handbook”, Technomic Pub. Co., Lancaster, PA, pp. 89-93 (1984).