

세라믹 한외여과 및 광촉매 혼성공정에 의한 고탁도 원수의 고도정수처리:

1. 광촉매 및 물역세척 조건의 영향

고사총* · 박진용***,†

*한림대학교 환경생명공학과, **한림대학교 에너지·환경연구소
(2011년 4월 23일 접수, 2011년 5월 30일 수정, 2011년 5월 30일 채택)

Advanced Water Treatment of High Turbidity Source by Hybrid Process of Ceramic Ultrafiltration and Photocatalyst: 1. Effects of Photocatalyst and Water-back-flushing Condition

Gao Si Cong* and Jin Yong Park***,†

*Dept. of Environmental Sciences & Biotechnology, Hallym University, Gangwon 200-702, Korea

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

(Received April 23, 2011, Revised May 30, 2011, Accepted May 30, 2011)

요약: 본 연구에서는 정수처리용 세라믹 한외여과 및 광촉매의 혼성공정에서 TiO_2 광촉매 코팅 구(bead)의 농도 및 물역세척 주기(FT), 물역세척 시간(BT) 변화의 영향을 알아보았다. 광촉매 코팅 구의 농도는 10~40 g/L로, FT는 2~10분으로, BT는 6~30초로 변화시키면서, 그 영향을 180분 운전 후 막오염에 의한 저항(R_f), 투과선속(J)과 총여과부피(V_T) 측면에서 고찰하였다. 광촉매 코팅 구의 농도가 감소할수록, R_f 는 증가하고 J는 감소하였다. 광촉매 코팅 구의 농도 40 g/L에서 V_T 가 8.85 L로 가장 높았다. FT 변화 실험에서는 FT가 감소할수록, R_f 는 감소하고 J는 증가하였다. 한편, BT 변화 실험에서는 BT가 증가할수록, R_f 는 감소하고 J는 증가하였다. 또한, NBF (no back-flushing)에서 급격한 막오염에 의한 분리막 기공의 감소로 탁도 및 용존유기물(UV₂₅₄ 흡광도)이 효과적으로 제거되었기 때문에, 탁도 및 용존유기물의 처리효율이 NBF 조건에서 가장 높았다. 한편, 광촉매 코팅 구의 세척 효과로 FT가 감소할수록, BT가 증가할수록 탁도 및 용존유기물의 처리효율은 증가하였다.

Abstract: The effects of TiO_2 photocatalyst coating bead concentration, water-back-flushing period (FT), and back-flushing time (BT) were investigated in hybrid process of ceramic ultrafiltration and photocatalyst for advanced drinking water treatment in this study. Photocatalyst coating bead concentration was changed in the range of 10~40 g/L, FT in 2~10 min and BT in 6~30 sec. Then, we observed the effects on resistance of membrane fouling (R_f), permeate flux (J) and total permeate volume (V_T) during total filtration time of 180 min. As decreasing photocatalyst coating bead concentration, R_f increased and J decreased. V_T was the highest value of 8.85 L at 40 g/L of photocatalyst coating bead concentration. At FT change experiment, R_f decreased and J increased as decreasing FT. Then R_f decreased and J increased according to increasing BT at BT change experiment. Because at NBF (no back-flushing) dramatic membrane fouling reduced membrane pore size, turbid and dissolved organic matters (UV₂₅₄ absorbance) could be removed efficiently. Therefore, treatment efficiencies of turbidity and dissolved organic matters were the highest at NBF. Then by cleaning effect of photocatalyst coating bead, the treatment efficiencies of turbidity and dissolved organic matters increased as decreasing FT and increasing BT.

Keywords: ceramic membrane, photocatalyst, hybrid process, ultrafiltration, water-back-flushing

†주저자(e-mail: jypark@hallym.ac.kr)

1. 서 론

TiO₂ 광촉매를 이용한 광분해 기술은 공기, 정수 및 폐수 중의 난분해성 유기물의 제거를 위한 가장 효과적인 방법 중의 하나로 최근 주목받고 있다[1,2]. 이것은 광분해 반응에 의해 상온 및 상압의 조건하에서 유기오염물질을 쉽게 제거할 수 있기 때문이다[3]. 광촉매 반응은 또한 유기염소화합물, 유기산, 중금속, 유해미생물 및 NO_x 등과 같은 다양한 형태의 오염물 처리에도 효능이 있는 것으로 알려져 있다. 특히, 최근에는 TiO₂ 광촉매의 특성을 제어하여 가시광(visible light)에서 광촉매 활성을 가질 수 있도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있다[4]. 지난 수십 년 동안, 정밀여과 및 한외여과, 나노여과, 역삼투에 대한 연구[5,6]가 진행되어 왔고, 최근 광촉매와 분리막의 혼성공정에 대하여 활발한 연구가 이루어지고 있다[7,8].

TiO₂ 광촉매 반응 메커니즘은 TiO₂가 UV 에너지를 흡수하면 전위대(conduction band, CB)로 전자(e⁻)가 전도되고 균형대(valance band, VB)에 양공(hole, h⁺)이 생성되며, 후속적으로 매우 반응성이 큰 라디칼(특히 수산화기, OH⁻)이 형성되어 오염물을 산화시키는 것으로 알려져 있다[9]. 따라서 대량의 OH⁻ 라디칼이 생성되면 촉매제 및 산화제가 필요 없다[10]. 광촉매 반응효율은 조건에 따라 매우 다양한 형태로 보고되고 있으며, 광촉매의 특성(입자크기, 결정형태, 비표면적), 오염물의 특성(용해도, 종류), 반응조건(농도, 전구, 반응조 형태 및 규격, pH, 보조제 등)에 의해 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 탁질의 안정적인 제거를 위한 관형 세라믹 한외여과막과, 휴믹물질과 같은 용존성 유기물 제거를 위한 광촉매를 하나의 모듈 형태로 구성하여, 고도정수처리를 목적으로 사용하였다. 정수처리에서 세라믹 한외여과 및 광촉매를 복합적으로 이용하여 그 효과를 알아보고, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도에 따른 처리 효율을 고찰하였다. 또한 물역세척 주기와 시간을 변화시킬 때 광촉매의 흡착 및 광산화, 막오염, 처리효율에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 이 론

2.1. 분리막 공정의 분리특성[11]

분리막 공정에서의 분리특성은 분리막의 단위면적당

투과되는 투과량을 나타내는 투과선속(permeate flux, J)과 공급수 중의 용질이 분리막에 의해 배제되는 배제율(rejection rate, %) 및 투과수로 회수되는 양을 공급수로 나눈 회수율(recovery, %) 등으로 나타낸다.

투과선속은 분리막의 단위면적 및 단위시간에 통과하는 투과수의 부피로 식 (2-1)과 같이 나타낸다.

$$\text{투과선속}(L/m^2hr) = \frac{\text{투과수의 부피}(L)}{\text{막표면적}(m^2) \times \text{시간}(hr)} \quad (2-1)$$

배제율은 물질의 투과 선택성을 나타내는 것으로, 식 (2-2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{배제율}(\%) = \frac{C_F - C_P}{C_F} \times 100 \quad (2-2)$$

여기서, C_F는 공급수의 농도(mg/L), C_P는 처리수의 농도(mg/L)이다. 또한, 회수율은 식 (2-3)과 같이 나타낸다.

$$\text{회수율}(\%) = \frac{P}{F} \times 100 \quad (2-3)$$

여기서, P는 분리막을 투과한 투과수의 부피이고, F는 공급한 공급수의 부피를 나타낸다.

한편, 분리막을 이용하여 실험할 때, 운전시간 동안 얻은 총여과부피(V_T)를 나타내기 위해 식 (2-4)를 이용하여 계산한다.

$$V_T = \sum_{i=0}^n A \times (t_{i+1} - t_i - BT_i) \times \left(\frac{J_{i+1} + J_i}{2} \right) \quad (2-4)$$

여기서, V_T는 총여과부피(L), A는 막표면적(m²), BT_i는 t_i~t_{i+1} 동안 총 역세척시간(hr), J_i는 t_i에서 투과선속(L/m²hr), t_i는 투과선속의 측정시점이다.

2.2. 직렬 여과저항 모델에 의한 여과저항 계산[11]

압력차를 추진력으로 하는 분리막 공정에서 발생하는 여과저항과 투과선속(J)은 일반적으로 잘 알려진 직렬 여과저항 모델(resistance-in-series model)[12]에 의해서 식 (2-5)와 같이 표현할 수 있다.

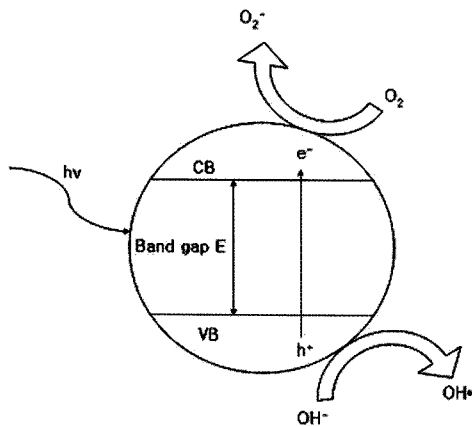


Fig. 1. Simplified mechanism for the photoactivation of a TiO₂ catalyst[15].

$$J = \frac{\Delta P}{R_m + R_b + R_f} \quad (2-5)$$

여기서, ΔP는 막간압력차(TMP), R_m은 막 자체의 고유저항(kg/m²s), R_b는 경계층에 의한 저항(kg/m²s), R_f는 막오염에 의한 저항(kg/m²s)이다. 따라서 분리막을 통한 물질이 투과에 미치는 전체 저항(R_T)은 R_m, R_b 및 R_f의 합으로 식 (2-6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_T} \quad (2-6)$$

또한, 순수(pure water)를 대상으로 한 분리막의 경우에는, R_b와 R_f는 존재하지 않으므로 식 (2-7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P}{R_m} \quad (2-7)$$

순수의 투과선속 J값을 식 (2-7)에 대입하여 R_m을 구하고 식 (2-5)를 R_b+R_f에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$R_b + R_f = \frac{\Delta P}{J} - R_m \quad (2-8)$$

식 (2-8)을 이용하여 구한 R_b+R_f 값을 시간에 대하여 도시한 후, 여과초기에 시간에 대하여 그 값이 선형적으로 증가하는 구간에서 최적 직선식을 구할 수 있다.

1. Absorption of Light by TiO₂ Semiconductor
 $TiO_2 + hv \rightarrow e_{CB}^- + h_{VB}^+$
2. $e_{CB}^- + h_{VB}^+$ diffusion
3. Positive Hole Reaction
 $h_{VB}^+ + OH \rightarrow OH \cdot$
 $h_{VB}^+ + H_2O \rightarrow OH \cdot + H^+$
 $OH \cdot + Organic \rightarrow Organic^+$
 $h_{VB}^+ + Organic \rightarrow Organic^+$
4. Electron Reaction
 $e_{CB}^- + O_2 \rightarrow O_2 \cdot^-$
 1) $2O_2 \cdot^- + 2H_2O \rightarrow 2OH \cdot + 2OH^- + O_2$
 2) $O_2 \cdot^- + H^+ \rightarrow HO_2 \cdot$
 $O_2 \cdot^- + HO_2 \cdot \rightarrow H_2O_2 + O_2$
 $HO_2 \cdot + HO_2 \cdot \rightarrow H_2O_2 + O_2$
 $HO_2 \cdot + H^+ \rightarrow H_2O_2$
 $H_2O_2 + e_{CB}^- \rightarrow OH \cdot + OH^-$
 $H_2O_2 + O_2 \rightarrow OH \cdot + OH^- + O_2$
 $H_2O_2 \xrightarrow{hv} 2OH \cdot$
 $OH \cdot + OH \cdot \rightarrow H_2O_2$
5. OH· reaction
 $OH \cdot + Organic \rightarrow Organic^+$
 $e_{CB}^- + Organic \rightarrow Organic^+$

Fig. 2. Formation of radicals and reaction mechanism from illumination of TiO₂ in water[16].

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 있다.

2.3. 광촉매에 의한 광분해 이론

고도산화공정(advanced oxidation process, AOP) 중 하나인 TiO₂/UV 공정은 비교적 긴 파장의 자외선인 400 nm 이하의 광에너지를 TiO₂ 광촉매에 조사하면 수중의 OH 이온이나 물분자가 TiO₂ 표면에서 OH 라디칼(radical)로 변화되어 유기물을 제거하는 방법이다[13, 14]. 광촉매 산화반응에서 OH 라디칼 생성 메커니즘 및 광산화 반응 경로는 확실하게 정립되질 않았지만 보편적으로 제시하고 있는 메커니즘은 Fig. 1, Fig. 2와 같다[15,16].

Fig. 1에 나타낸 것과 같이 TiO₂ 반도체 표면에 빛 에너지의 조사가 이루어지면 TiO₂ 원자가 띠에 있는 전자가 전도띠로 전이되고 원자가 띠에는 전자가 비어있는 양공(정공, positive hole)이 생성된다. 이 때 전자가 전이되기 위해서는 띠 간격(band gap)에 해당하는 약 3.2 eV 전도의 에너지가 필요한데 이에 해당하는 파장은 400 nm 이하이다. 그러므로 400 nm 이하의 자외선을 조사하면 반응이 진행된다. 이렇게 생긴 e_{CB}⁻ (전도 띠에 전이된 전자), h_{VB}⁺은 물 속의 수산화이온과 반응

Table 1. Specification of ceramic membranes used in this study

Membrane	NCMT-5231
Pore size (μm)	0.05
No. of channels	1
Outer diameter (mm)	10
Inner diameter (mm)	8
Length (mm)	250
Surface area (cm^2)	62.8
Material	α -alumina coating on α -alumina support
Company	Nano Pore Materials (Korea)

해서 OH 라디칼을 생성하고 또 물 분자와 반응해서 OH 라디칼과 H^+ 이온을 생성시키며, 또한 직접 유기물과 반응하여 유기물을 산화한다. e^-_{CB} 은 수중산소와 반응해서 광산화(superoxide) 라디칼(O_2^-)을 다시 만들고, 다시 이 광산화 라디칼은 Fig. 2와 같이 H^+ 와 반응하여 HO_2 를 만들어 결국 H_2O_2 를 생성하고, 이 H_2O_2 가 몇 가지 반응경로를 거쳐 OH 라디칼로 만들어진다.

결국 이러한 몇 단계의 과정을 거쳐서 생성된 OH 라디칼이 유기물과 반응해서 유기물을 제거하게 된다. 또한 일부 학자들은 OH 라디칼 이외에도 TiO_2 표면에 유기물이 흡착되어 가전자 띠에서는 양공(h^+)에 의해 산화가 이루어지고, 전도띠에서는 전자에 의해 환원이 이루어져서 유기물이 분해된다고 보고되고 있다.

2.4. UV 흡광도[17]

일반적으로 상수원수에 존재하는 용존유기물의 양을 표시하는 방법 중의 하나로 많이 사용되는 방법은 UV_{254} 흡광물질의 양으로 표시하는 방법이다. UV_{254} 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 UV_{254} 흡광도의 양으로 표시하는 방법은 여러 가지 형태로 존재하는 용존유기물 중에서 환경에 영향을 주는 고분자 유기물질의 변화 상태를 측정하는데 이용

Table 2. Specification of TiO_2 coating bead employed in this study

Material of bead	Polypropylene (PP)
TiO_2 coating method	Chemical vapor deposition
Diameter (mm)	4~6
Weight (mg)	21.8~48.3
Average weight (mg)	39.9

되고 있다. 특히 UV_{254} 흡광도는 휴믹물질을 함유한 물의 DOC 측정 대용으로 사용하기에 효과적이고 간단한 측정법이다. 따라서 본 연구에서는 NOM 중 상당부분을 차지하는 휴믹물질을 모사하기 위해 휴믹산을 이용하였으며, 이를 UV_{254} 흡광도로 측정하였다.

3. 재료 및 방법

3.1. 재료 및 장치

3.1.1. 세라믹 분리막[18,19]

본 연구에서 사용한 세라믹 한외여과막은 관형 분리막인 NCMT-5231 (pore size : 0.05 μm)이다. 관형 분리막(NCMT-5231)은 α -alumina 지지층에 같은 재질인 α -alumina로 코팅한 것으로 나노기공소재(주)에서 구입하였다. 본 연구에서 사용한 분리막의 제원을 Table 1에 제시하였다.

3.1.2. 광촉매 및 UV Lamp

본 연구에서 사용한 광촉매는 Table 2에 제시한 바와 같이 4~6 mm 직경의 PP (polypropylene) 구(bead)에 TiO_2 분말을 플라즈마 화학증착(Plasma Chemical Vapor Deposition) 공정으로 코팅시켜 이용하였다. Table 3에 제시한 파장 352 nm의 UV 램프(8 W)를 막 모듈 외부에 두 개 설치하였다.

3.1.3. 모사용액

정수처리의 대상이 되는 자연산유기물 중 상당부분을 차지하는 휴믹물질과 탁도를 유발하는 점토성 무기물과 같은 미세 무기 입자를 모사하기 위하여 카올린과 휴믹산을 사용하였다. 모사용액은 카올린(Kaolin, Sigma-Aldrich)과 휴믹산(Humic acid sodium salt, Aldrich) 일정량을 증류수에 녹여 일정한 농도로 조제하여 사용하였다[20,21].

Table 3. Specification of UV Lamp employed in this study

Wavelength (nm)	352
Power (W)	8
Model number	F8T5BLB
Company	Sankyo (Japan)

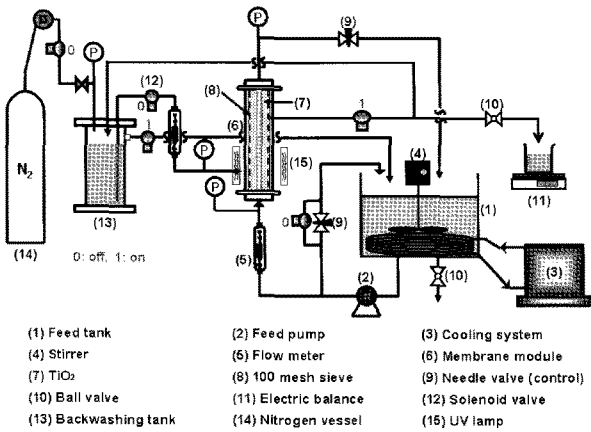


Fig. 3. Apparatus of advanced water treatment system using hybrid module of ceramic ultrafiltration and photocatalyst coated beads with periodic water-back-flushing.

3.1.4. 실험장치

Fig. 3은 본 연구에 사용한 십자흐름(cross-flow) 여과 방식의 처리수로 역세척이 가능한 한외여과 장치를 나타내었다. 탁질 및 용존유기를 제거를 위하여, 세라믹 분리막 외부와 모듈(Module) 내부 사이에 TiO₂ 분말을 코팅시킨 PP (polypropylene) 구(7)로 채워 하나의 막 모듈(6) 형태로 구성하였다. 또한 세라믹 분리막과 TiO₂ 코팅 PP구를 통과한 처리수를, PP구의 크기보다 훨씬 작은 공경을 갖는 100 mesh (0.150 mm) 크기의 망(8)을 설치한 모듈 출구를 통과시켜, 막모듈 안의 PP구가 처리수의 관로로 유실되는 것을 방지하였다. 2개의 UV 램프(15)를 모듈의 외부 양측에 설치하여, 실험하는 동안 조사하였다.

공급탱크(1)는 스테인레스 재질로 20 L의 용량이며, 항온순환기(3) (Model 1146, VWR, U.S.A.)와 연결된 동관 코일을 설치하여 공급수의 온도를 일정하게 유지하였다. 또한 공급탱크에는 교반기(4)를 설치하여 연속적으로 교반시켜, 공급수가 균질한 상태를 유지할 수 있도록 하였다. 공급수는 펌프(2) (Procon, Standex Co., U.S.A.)에 의해 공급탱크로부터 막 모듈 안으로 유입되

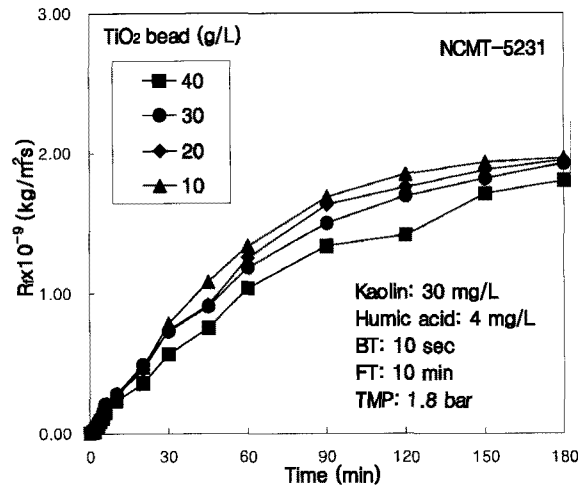


Fig. 4. Effect of photocatalyst coating bead concentration on resistance of membrane fouling for NCMT-5231.

며, 유입유량은 유량계(5) (NP-127, Tokyo keiso, Japan)를 이용하여 측정하였다. 분리막 모듈의 입구와 출구부에는 각각 6.8 bar까지 측정할 수 있는 압력계를 설치하여 막 내에서의 압력차를 측정하였다. 막 모듈에서의 유량과 압력은 펌프 우회관과 농축수라인의 밸브(9)를 조절하여 일정하게 하였으며, 세라믹 막과 TiO₂에 의해 처리된 투과수의 부피는 전자저울(11) (Ohaus, U.S.A.)로 무게를 측정하여 투과선속을 산정하였다. 투과선속을 측정 하지 않을 때에는, 처리수가 역세척조(13)로 이동 되어지도록 하였으며, 역세척조에 일정량 이상의 처리수가 모아지면 다시 공급탱크로 순환되어 실험하는 동안 공급수의 수질을 일정하게 유지하도록 하였다. 한편, 위쪽 막모듈 고정용 집계의 높이 조절이 가능하게 설계되어, 모듈의 크기가 바뀌어도 장착이 가능하다.

여과 시간 및 역세척 시간 조절을 위하여 투과액 배출구와 역세척조의 처리수 배출구, 그리고 질소 투입구 및 역세척수의 모듈 내 투입구에 각각 솔레노이드 밸브(12) (solenoid valve : CKD, JPN)를 설치하였다. 또한, 원활한 역세척이 이루어질 수 있도록 역세척 동안 막 내부의 압력을 낮추기 위하여 막 모듈의 우회관에 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 막모듈의 하단부를

Table 4. Effect of photocatalyst coating bead concentration on filtration factors for hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst

TiO ₂ (g/L)	10	20	30	40
$R_m \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	0.424	0.418	0.417	0.420
$R_b \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	0.001	0.007	0.001	0.001
$R_{f,180} \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	1.965	1.949	1.927	1.802
J_0 (L/m ² hr)	1495	1494	1518	1507
J_{180} (L/m ² hr)	266	267	271	286
J_{180} / J_0	0.178	0.179	0.178	0.190
V_T (L)	7.60	7.85	8.01	8.85

통하여 역세척이 수행된다.

3.2. 실험운전방법

관형 세라믹 한외여과막(NCMT-5231) 및 TiO₂ 혼성 공정에서 TiO₂ 광촉매를 코팅한 구 농도의 영향을 살펴 보기 위해, 모사용액의 카울린 농도를 30 mg/L, 휴믹산 농도를 4 mg/L 에서 TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도는 10, 20, 30, 40 g/L로 변화시키면서 그 영향을 알아보았다. 그리고 각 조건에서 180분 여과하는 동안 막오염에 대한 저항(R_f) 및 투과 선속(J), 무차원화한 투과선속(J/J_0), 총여과부피(V_T)의 변화를 관찰하였다. 한편, 휴믹산의 농도가 10 mg/L인 모사용액으로, 물역세척 주기(FT, filtration time)는 NBF (no back-flushing), 2, 4, 6, 8, 10분으로, 물역세척 시간(BT, back-flushing time)은 NBF, 6, 10, 15, 20, 30초로 변화시키면서 변화량을 관찰하였다. 그리고 위의 모든 실험에서 다른 운전변수인 막간압력차(TMP)는 1.80 bar, 역세척 압력은 2.50 bar, 유입유량은 1.0 L/min, 공급수의 온도는 $20 \pm 1.0^\circ\text{C}$ 로 일정하게 하였다.

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 TiO₂를 분리한 후, 분리막을 탈착하였다. NCMT-5231 분리막의 경우 탈착 후 550°C에서 30분간 강열한 다음, 15% 질산 수용액과 0.25 N 수산화나트륨 수용액에 각각 1일 및 3시간 동안 화학세정을 실시하였다. 새로운 조건에서 운전하기 전에 막을 모듈에 설치한 후, 1차

증류수로 정상 운전하면서 투과량을 측정하여 막의 성능 회복여부를 확인하였다[17].

혼성모듈을 통한 탁질 및 용존유기물질의 처리효율을 알아보기 위하여 공급수 및 처리수의 수질을 분석하였으며, 실험장치의 운전 후 30분 간격으로 공급탱크와 처리수 라인에서 시료를 채취하였다. 탁도(Turbidity)는 turbidity meter (2,100 N, Hach, U.S.A.)를 사용하여 직접 측정하였다. 휴믹산과 같은 용존유기물질의 지표로 사용되는 UV₂₅₄ 흡광도는 UV spectrophotometer (GEN-ESYS 10 UV, Thermo, U.S.A.)를 이용하여 측정하였다[22]. 또한, 총용존고형물(TDS)은 conductivity meter (Model 162, ATI ORION, U.S.A.)로 측정하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. TiO₂ 광촉매를 코팅한 구 농도의 영향

모사용액의 카울린 농도는 30 mg/L, 휴믹산의 농도는 4 mg/L, FT는 10 min, BT는 10 sec로 일정한 조건에서, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도는 10, 20, 30, 40 g/L로 증가 변화시키면서 광촉매를 코팅한 구 농도의 영향을 고찰하였다. Fig. 4은 광촉매 코팅 구의 농도에 따라 3시간 운전하는 동안 R_f 의 변화를 비교하였다. 그 결과, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도가 감소할수록 R_f 는 증가하는 경향을 보였다. 광촉매 농도 40 g/L에서 R_f 값이 적게 유지되는 것을 볼 수 있었으며, 180분 운전 후의 막오염 저항($R_{f,180}$)은 1.802×10^{-9} kg/m²s로 가장 낮게 나타내었다. 광촉매 코팅 구의 농도가 다양한 여과인자에 미치는 영향을 정리한 것이 Table 4이다. Table 4에서 보는 바와 같이, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도 30, 20, 10 g/L에서 $R_{f,180}$ 은 각각 1.927, 1.949, 1.965×10^{-9} kg/m²s로 다소 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 5는 광촉매 코팅 구의 농도에 따라 운전시간 동안 무차원화한 투과선속 J/J_0 의 변화를 비교하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도 40 g/L에서 120분까지 J/J_0 은 가장 높게 유지되었으나, 180분 운전 후 J_{180}/J_0 값은 광촉매 코팅 구의 농도에 따라 큰 차이가 나타나지 않았다. Fig. 6은 광촉매 코팅 구의 농도가 투과선속 J 에 미치는 영향을 나타낸 것이다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도가 감소할수록 J 의 값이 다소 감소하였다. Table 4에서 정리한 바와 같이, 180분 운전 후 J_{180} 값은 각각 286,

Table 5. Water quality and treatment efficiency of turbidity in the hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst for effect of photocatalyst coating bead concentration

Experimental condition			Turbidity (NTU)				Average Treatment efficiency (%)
Kaolin (mg/L)	Humic acid (mg/L)	TiO ₂ (g/L)	Feed water		Treated water		
			Range	Average	Range	Average	
30	4	10	25.8~37.5	31.6	0.323~0.705	0.444	98.6
		20	31.2~34.4	32.3	0.386~0.521	0.448	98.6
		30	31.2~34.5	32.4	0.366~0.512	0.431	98.7
		40	31.0~34.7	32.4	0.218~0.443	0.300	99.1

Table 6. Water quality and treatment efficiency of UV₂₅₄ absorbance in the hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst for effect of photocatalyst coating bead concentration

Experimental condition			UV ₂₅₄ absorbance (cm ⁻¹)				Average Treatment efficiency (%)
Kaolin (mg/L)	Humic acid (mg/L)	TiO ₂ (g/L)	Feed water		Treated water		
			Range	Average	Range	Average	
30	4	10	0.057~0.087	0.071	0.003~0.006	0.005	92.9
		20	0.060~0.084	0.070	0.004~0.005	0.005	93.4
		30	0.058~0.082	0.070	0.003~0.005	0.004	94.1
		40	0.059~0.085	0.068	0.002~0.004	0.003	96.1

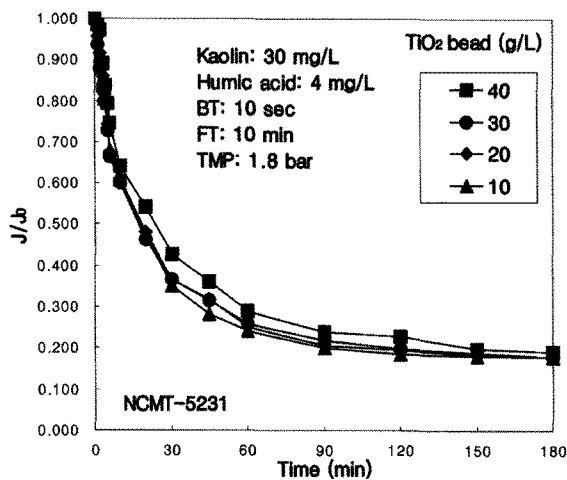


Fig. 5. Effect of photocatalyst coating bead concentration on dimensionless permeate flux for NCMT-5231.

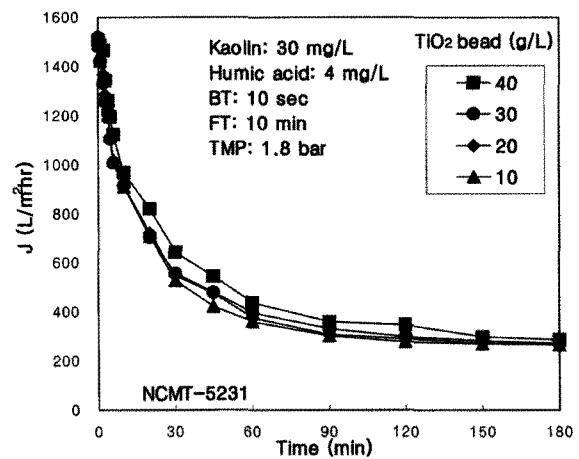


Fig. 6. Effect of photocatalyst coating bead concentration on permeate flux for NCMT-5231.

271, 267, 266 L/m²hr로 비슷하게 나타내었다.

한편, Table 4에서 보는 바와 같이, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도 10~30 g/L에서 R_{f,180}, J₁₈₀, J₁₈₀/J₀ 값이 거의 유사한 값을 보였다. 그러나 광촉매 코팅 구의 농도가 감소할수록, 180분 운전 후 V_T의 값은 각각 8.85, 8.01, 7.86, 7.60 L로 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 본 실험 범위에서 최적 TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도는 40

g/L로 볼 수 있다.

Table 5와 Table 6은 TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도 변화에 따른 공급수와 처리수의 평균 수질 및 평균 처리 효율을 정리한 것이다. 공급수의 평균 탁도는 31.6~32.4 NTU이었으며, 처리수의 탁도는 0.30~0.45 NTU로 탁도의 처리효율은 TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도 40 g/L에서 99.1%로 가장 높게 나타났다. 그러나 광촉매

Table 7. Effect of water-back-flushing period on filtration factors for hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst (BT 10 sec)

FT (min)	NBF	10	8	6	4	2
$R_m \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	0.417	0.415	0.415	0.411	0.410	0.412
$R_b \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	0.007	0.024	0.030	0.025	0.007	0.015
$R_{f,180} \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	5.049*	3.485	3.159	3.084	2.096	1.921
J_0 (L/m ² hr)	1499	1448	1426	1457	1521	1489
J_{180} (L/m ² hr)	116*	162	176	182	253	271
J_{180} / J_0	0.077*	0.112	0.124	0.125	0.166	0.182
V_T (L)	1.78*	4.12	4.80	4.93	5.69	5.75

NBF: No back-flushing.
 * : After 60 mins' operation.

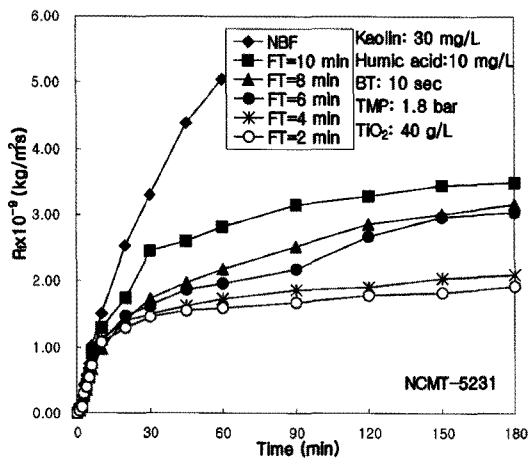


Fig. 7. Effect of water-back-flushing period on resistance of membrane fouling for NCMT-5231.

코팅 구의 농도가 감소하여도 탁도의 처리효율은 크게 감소하지 않았다. 또한 UV₂₅₄ 흡광도의 경우, 공급수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.068~0.071 cm⁻¹의 범위이고, 처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.003~0.005 cm⁻¹로 휴믹산의 처리효율은 광촉매 코팅 구의 농도 40 g/L에서 96.1%로 가장 높게 나타났다. 또한 광촉매 코팅 구의 농도가 감소할수록, 휴믹산의 처리효율은 다소 감소하였다. 이러한 결과는 TiO₂ 주입농도가 증가함에 따라 UV 램프로부터 공급되는 광에너지를 많이 흡수할 수 있고, 이에 따라 휴믹산과 같은 유기물질들이 광촉매와 반응할 수 있는 가능성이 커지기 때문인 것으로 보인다. 따라서 본 실험 범위에서 광촉매 코팅 구의 농도가 증가할수록, 휴믹산의 처리효율이 증가하는 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 광촉매로 유기물 제거를 한

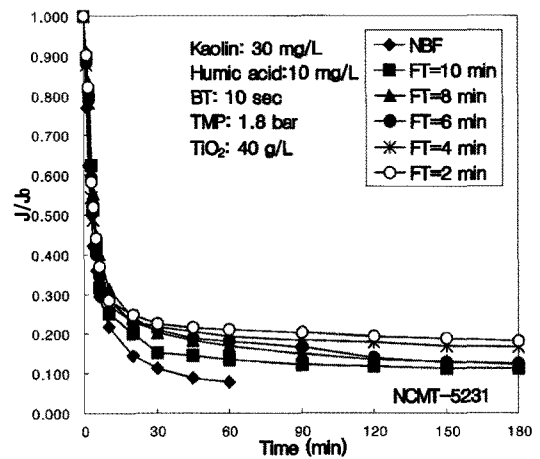


Fig. 8. Effect of water-back-flushing period on dimensionless permeate flux for NCMT-5231.

오해철[4]의 결과와 일치한다.

4.2. 물역세척 주기(FT)의 영향

카올린과 휴믹산의 농도가 각각 30 mg/L와 10 mg/L인 모사용액을 대상으로, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도는 40 g/L, 역세척 시간(BT) 10초로 고정한 후, FT 변화 실험은 FT 조건을 NBF, 2, 4, 6, 8, 10분으로 각각 변화시키면서 최적 FT 조건을 고찰하였다. Fig. 7은 FT의 변화에 따른 R_f의 변화를 운전시간에 따라 나타내었다. 그 결과, FT가 가장 짧은 조건인 FT가 2분일 때 가장 낮은 R_f값을 보였다. 역세척 주기(FT)가 증가할수록 R_f값을 증가하였다. 물역세척이 없는 조건(NBF)에서는 막오염이 급격히 증가하여, 60분 경과 후 투과량이 너무 적어서 실험 더 이상 진행 할 수 없었다. 이러한 결

Table 8. Water quality and treatment efficiency of turbidity in the hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst for effect of water-back-flushing period (BT 10 sec)

Experimental condition			Turbidity (NTU)				Average Treatment efficiency (%)
Kaolin (mg/L)	Humic acid (mg/L)	FT (min)	Feed water		Treated water		
			Range	Average	Range	Average	
30	10	NBF*	33.1	33.1	0.616	0.616	98.2
		10	27.4~30.5	28.8	2.78~3.32	3.10	89.2
		8	24.6~28.9	27.0	2.46~2.78	2.72	89.9
		6	28.4~30.7	29.3	2.40~2.81	2.61	91.1
		4	27.9~30.2	29.1	2.18~3.24	2.41	91.7
		2	25.6~29.7	27.6	1.92~2.65	2.18	92.1

NBF : No back-flushing.
 * : After 60 mins' operation.

Table 9. Water quality and treatment efficiency of UV₂₅₄ absorbance in the hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst for effect of water-back-flushing period (BT 10 sec)

Experimental condition			UV ₂₅₄ absorbance (cm ⁻¹)				Average Treatment efficiency (%)
Kaolin (mg/L)	Humic acid (mg/L)	FT (min)	Feed water		Treated water		
			Range	Average	Range	Average	
30	10	NBF *	0.234~0.238	0.236	0.007~0.014	0.011	95.6
		10	0.157~0.223	0.198	0.038~0.059	0.049	75.1
		8	0.139~0.177	0.158	0.026~0.048	0.037	76.4
		6	0.166~0.191	0.182	0.026~0.042	0.037	79.7
		4	0.159~0.181	0.170	0.026~0.041	0.034	80.2
		2	0.140~0.172	0.158	0.022~0.037	0.030	81.1

NBF : No back-flushing.
 * : After 60 mins' operation.

과는 FT가 짧을수록 역세척이 자주 수행되어, 분리막 표면에 카올린 입자 및 휴믹 물질의 케이크 층 형성을 지연시키거나, 케이크 층이 압밀화 되기 전에 탈착시켜 막오염이 둔화되는 것으로 판단된다. 이것은 활성탄 및 세라믹 정밀여과에 의한 고도정수처리 결과[23]과 일치한다.

Fig. 8은 FT의 변화에 따른 무차원화한 투과선속 J/J_0 의 변화를 운전시간에 따라 나타내었다. 그 결과를 보면, 역세척 주기가 가장 짧은 FT 2분일 때 가장 높은 J/J_0 을 유지하였다. Table 7에 FT의 변화에 따른 R_m 및 $R_{f,180}$, J_0 , J_{180} , J_{180}/J_0 , V_T 를 나타내었다. 180분 운전 후 FT 6분과 8분의 J_{180}/J_0 의 값이 비슷하게 나타났으나, FT가 감소할수록 J_{180}/J_0 은 증가하였다. Fig. 9는 FT 변화에 따른 투과선속 J 의 변화를 운전시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 FT가 가장 짧은 2

분일 때 가장 높은 J 를 나타내었으며, 초기의 투과선속도 가장 높게 유지하였다. 이것은 역세척이 빈번할수록 막오염의 억제에 유리하기 때문이며, 이로 인해 가장 높은 J 를 유지할 수 있었다.

Table 7에서 보는 바와 같이, FT가 짧아질수록 $R_{f,180}$ 은 감소하였으며 저항의 감소에 따라 V_T 가 증가하였다. 또한 FT가 가장 짧은 FT가 2분일 때, $R_{f,180}$ 은 $1.921 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2\text{s}$ 로 가장 낮게 나타났으며 V_T 는 5.75 L로 가장 높게 나타났다. 가장 낮은 $R_{f,180}$ 과 가장 높은 J_{180} , J_{180}/J_0 및 V_T 측면에서 볼 때, 본 실험 범위에서 최적 FT 조건은 2분으로 역세척을 자주 수행하는 것이 효과적임을 알 수 있었다.

Table 8과 Table 9는 탁도 및 유기물의 수질분석을 통하여 FT 변화에 따른 공급수와 처리수의 수질 및 처리효율을 정리하였다. Table 8에서 보는 같이, 공급수의

Table 10. Effect of water-back-flushing time on filtration factors for hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst (FT 10 min)

BT (sec)	NBF	6	10	15	20	30
$R_m \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	0.417	0.417	0.415	0.411	0.412	0.416
$R_b \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	0.007	0.000	0.024	0.021	0.014	0.000
$R_{f,180} \times 10^{-9}$ (kg/m ² s)	5.049 ^a	4.263 ^b	3.485	3.430	3.318	3.241
J_0 (L/m ² hr)	1499	1523	1448	1471	1491	1525
J_{180} (L/m ² hr)	116 ^a	136 ^b	162	164	170	174
J_{180} / J_0	0.077 ^a	0.089 ^b	0.112	0.112	0.114	0.114
V_T (L)	1.78 ^a	3.74 ^b	4.12	4.13	4.32	4.64

NBF : No back-flushing.
 a : After 60 mins' operation.
 b : After 150 mins' operation

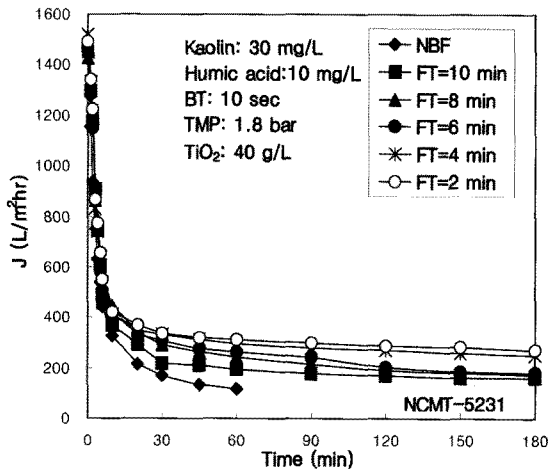


Fig. 9. Effect of water-back-flushing period on permeate flux for NCMT-5231.

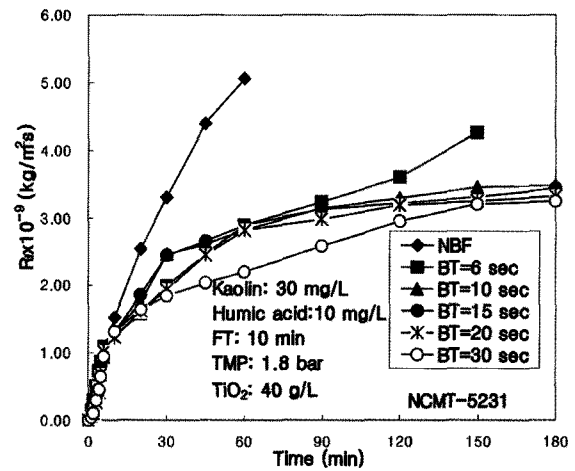


Fig. 10. Effect of water-back-flushing time on resistance of membrane fouling for NCMT-5231.

평균 탁도는 27.0~33.1 NTU이었으며, 처리수의 탁도는 0.616~3.10 NTU로 탁도의 처리효율은 NBF에서 98.2%로 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 급격한 막 오염에 의해서 탁도 처리효율이 증가하는 것으로 판단된다. 그러나 FT가 감소할수록 탁도의 처리효율은 증가하였다. 이것은 FT가 짧을수록 역세척이 자주 수행되어 광촉매 표면의 세척이 효과적이어서, 광촉매에 의한 흡착이 증가하였기 때문이다. 또한 UV₂₅₄ 흡광도를 분석한 결과, 공급수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.158~0.236 cm⁻¹의 범위이고, 처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.011~0.049 cm⁻¹로 나타나, 유기물의 처리효율은 NBF에서 95.6%로 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 급격한 막 오염으로 기공이 더 작아진 한외여과막에 의해서 유기물이 효과적으로 제거된 것으로 판단된다. 한편, FT가

감소할수록 유기물의 처리효율은 증가하였다. 이것은 물역세척 주기가 짧아질수록 광촉매 표면의 세척이 효과적이어서, 회복된 광촉매에 의한 유기물의 흡착 및 광산화가 증가하였기 때문이다.

4.3. 물역세척 시간(BT)의 영향

BT 변화 실험은 카올린과 휴믹산의 농도가 각각 30 mg/L와 10 mg/L인 모사용액을 대상으로, TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도는 40 g/L, 물역세척 주기(FT) 10분으로 고정한 후, BT 조건을 NBF, 6, 10, 15, 20, 30초로 각각 변화시키면서 이에 따른 영향을 살펴보았다. 그 결과, Fig. 10은 BT의 변화에 따른 R_f의 변화를 운전시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 10에서 보는 바와 같이, NBF에서 급격한 막오염의 증가로 투과량 측정이 불가

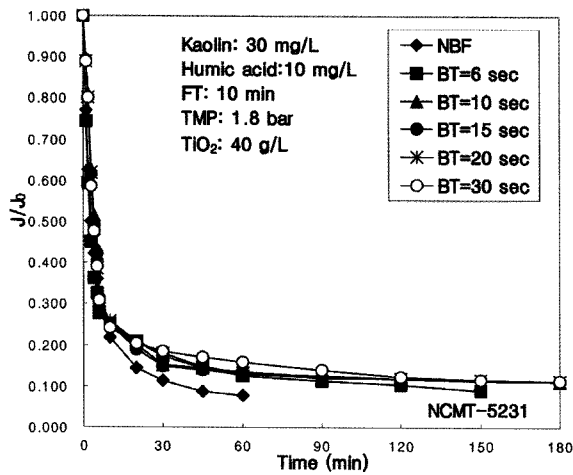


Fig. 11. Effect of water-back-flushing time on dimensionless permeate flux for NCMT-5231.

능하여 60분까지만 실험을 진행할 수 있었다. BT가 가장 짧은 6초에서 NBF 조건보다는 막오염이 감소하였지만, 역시 막오염이 급격히 증가하여 150분까지만 투과량을 측정할 수 있었다. 한편, BT가 증가할수록 R_f 값이 감소하였고, BT가 가장 긴 30초 조건에서 R_f 는 가장 낮게 유지되었다. BT가 증가할수록 긴 물역세척 시간으로 물역세척 효과는 증가하여 막오염이 감소한 것으로 판단된다. Table 10은 BT 변화에 따른 R_m 및 $R_{f,180}$, J_0 , J_{180} , J_{180}/J_0 , V_T 를 정리한 것으로, BT가 길어질수록 $R_{f,180}$ 은 감소하였다.

Fig. 11은 BT의 변화에 따른 J/J_0 의 변화를 운전시간에 따라 나타내었다. 그 결과, BT가 증가할수록 J/J_0 값은 다소 증가하였다. BT 6초로 역세척 수행 시 NBF보다 J/J_0 이 급격하게 증가하였다. 그러나 Table 10에서 보는 바와 같이, BT 10, 15, 20, 30초 조건에서는 180분 운전 후 비슷한 J_{180}/J_0 을 보였다. 이러한 결과는 BT를 10초 이상 유지하는 것이 투과선속을 증가시키는데 효과가 거의 없다는 것을 의미한다. Fig. 12는 BT의 변화에 따른 J 의 변화를 운전시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이, NBF보다 역세척 수행 시 J 가 더 높게 유지되는 것을 볼 수 있었으며, 운전시간에 따라 J 의 값이 급격한 감소하였다. 그러나 BT가 증가하여도 J 값의 증가폭은 크지 않았으며, BT 30초에서 J 의 값이 가장 높게 유지되었다.

Table 10에서 보는 바와 같이, BT가 증가할수록 J_{180} 값은 증가하였다. 그러나 BT를 10초 이상으로 증가시켰을 때 180분 운전 후 J_{180} 의 증가폭은 크지 않았다.

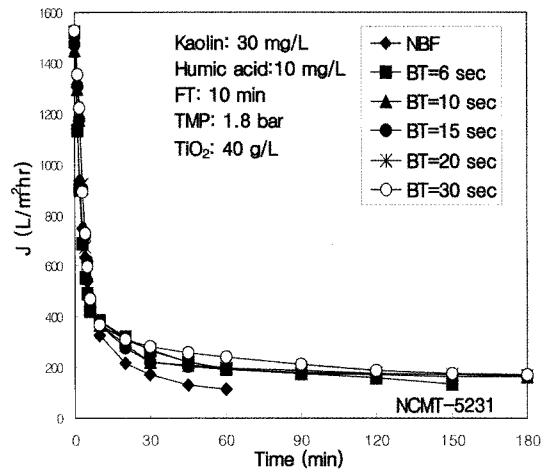


Fig. 12. Effect of water-back-flushing time on permeate flux for NCMT-5231.

BT가 가장 긴 30초 조건에서 J_{180} 은 $174 \text{ L/m}^2\text{hr}$ 로 가장 높게 나타났다. 그리고 V_T 은 BT가 길어짐에 따라 소폭 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 $R_{f,180}$, J_{180} , J_{180}/J_0 측면에서 볼 때, 본 실험 조건에서 최적 역세척 조건은 30초인 것으로 판단된다.

한편, Table 11과 Table 12는 탁도 및 유기물의 수질 분석을 통하여 BT 변화에 따른 공급수와 처리수의 수질 및 처리효율을 정리한 것이다. Table 11에서 보는 같이, 공급수의 평균 탁도는 $28.8 \sim 35.6 \text{ NTU}$ 이었으며, 처리수의 탁도는 $0.616 \sim 3.68 \text{ NTU}$ 로 나타났다. 급격한 막오염으로 축소된 분리막의 기공에 의해서 탁도가 제거되었기 때문에, NBF에서 탁도의 처리효율은 가장 높게 나타났다. 그러나 BT가 증가할수록 탁도의 처리효율은 증가하였다. 이러한 결과는 BT가 증가할수록 광촉매 표면의 세척이 효과적이어서, 광촉매에 의한 흡착이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 UV_{254} 흡광도를 분석한 결과, 공급수의 평균 UV_{254} 흡광도는 $0.198 \sim 0.236 \text{ cm}^{-1}$ 의 범위이고, 처리수의 평균 UV_{254} 흡광도는 $0.011 \sim 0.058 \text{ cm}^{-1}$ 로 나타났다. 급격한 막오염에 의해서 유기물이 제거되었기 때문에, NBF에서 휴믹산의 처리효율이 가장 높게 나타났다. 한편, BT가 증가할수록 휴믹산의 처리효율은 증가하였다. 이러한 결과도 역시 물역세척 시간이 길어질수록 광촉매 표면의 세척이 효과적이어서, 회복된 광촉매에 의한 유기물의 흡착 및 광산화가 증가하였기 때문인 것으로 보인다.

Table 11. Water quality and treatment efficiency of turbidity in the hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst for effect of water-back-flushing time (FT 10 min)

Experimental condition			Turbidity (NTU)				Average Treatment efficiency (%)
Kaolin (mg/L)	Humic acid (mg/L)	BT (sec)	Feed water		Treated water		
			Range	Average	Range	Average	
30	10	NBF ^a	33.1	33.1	0.616	0.616	98.2
		6 ^b	31.6~34.2	33.3	2.99~5.21	3.68	88.9
		10	27.4~30.5	28.8	2.78~3.32	3.10	89.2
		15	32.5~34.2	33.3	2.58~3.15	2.90	91.3
		20	34.2~37.1	35.6	1.42~3.42	2.81	92.1
		30	30.1~34.1	32.5	0.826~2.67	1.86	94.3

NBF : No back-flushing.

a : After 60 mins' operation.

b : After 150 mins' operation.

Table 12. Water quality and treatment efficiency of UV₂₅₄ absorbance in the hybrid process of ultrafiltration (NCMT-5231) and TiO₂ photocatalyst for effect of water-back-flushing time (FT 10 min)

Experimental condition			UV ₂₅₄ absorbance (cm ⁻¹)				Average Treatment efficiency (%)
Kaolin (mg/L)	Humic acid (mg/L)	BT (sec)	Feed water		Treated water		
			Range	Average	Range	Average	
30	10	NBF ^a	0.234~0.238	0.236	0.007~0.014	0.011	95.6
		6 ^b	0.215~0.223	0.220	0.042~0.083	0.058	73.7
		10	0.157~0.223	0.198	0.038~0.059	0.049	75.1
		15	0.199~0.232	0.214	0.032~0.058	0.046	78.8
		20	0.208~0.232	0.217	0.025~0.055	0.043	80.4
		30	0.212~0.240	0.224	0.009~0.049	0.034	84.9

NBF : No back-flushing.

a : After 60 mins' operation.

b : After 150 mins' operation.

5. 결 론

본 연구에서는 고탁도 원수의 고도정수처리를 위하여 탁질 제거를 위한 관형 세라믹 한외여과와 용존유기물 제거를 위한 광촉매를 하나의 모듈로 구성하여, 모 사용액을 대상으로 TiO₂ 광촉매를 코팅한 구의 농도, 물역 세척 주기 및 시간에 따른 막여과 특성 및 처리효율을 알아 본 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도가 감소할수록 R_f는 증가하고 J/J₀ 및 J, V_T는 감소하였다. TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도 40 g/L에서 J와 J/J₀은 가장 높게 유지되어 V_T의 값이 가장 높게 나타났다. TiO₂ 광촉매 코팅 구의 농도가 감소할수록 탁도 및 휴믹산의 처리효율은

감소하였으나, TiO₂ 광촉매의 농도 40 g/L에서 각각 99.1, 96.1%로 가장 높은 값을 보였다.

2) FT가 짧아질수록 R_f는 감소하였으며, 이러한 막오염에 의한 저항이 감소함에 따라 J/J₀과 J는 증가하였다. R_f 및 J, J/J₀, V_T 측면에서 볼 때, 본 실험 범위에서 최적 FT는 2분으로 역세척을 자주 수행하는 것이 투과 선속을 높게 유지하는 데 효과적임을 알 수 있었다. 또한 급격한 막오염에 의해서 탁도 및 유기물이 제거되었기 때문에, NBF에서 탁도 및 휴믹산의 처리효율이 가장 높게 나타났다. 한편, FT가 감소할수록 탁도 및 휴믹산의 처리효율은 증가하였다. 이러한 결과는 물역세척 시간이 길어질수록 광촉매 표면의 세척이 효과적이어서, 회복된 광촉매에 의한 휴믹산의 흡착 및 광산화

가 증가하였기 때문이다.

3) BT가 증가할수록 R_f 는 감소하여 J/J_0 과 J 는 증가하는 경향을 보였고, V_T 값도 증가하였다. R_f 및 J , J/J_0 , V_T 측면에서 볼 때, 본 실험 범위에서 최적 물역세척 시간이 30초로 역세척 시간이 길수록 막오염 억제에 효과적임을 알 수 있었다. 또한 NBF에서 탁도 및 휴믹산의 처리효율이 가장 높게 나타났으나, BT가 증가할수록 탁도 및 휴믹산의 처리효율은 증가하였다.

감 사

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0090428).

참 고 문 헌

1. H. Zhang, X. Quan, S. Chen, H. Zhao, and Y. Zhao, "Fabrication of photocatalytic membrane and evaluation its efficiency in removal of organic pollutants from water", *Sep. Pur. Tech.*, **50**, 147 (2006).
2. H. Yamashita, H. Nakao, M. Takeuchi, Y. Nakatani, and M. Anpo, "Coating of TiO_2 photocatalysts on super-hydrophobic porous teflon membrane by an ion assisted deposition method and their self-cleaning performanc", *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, **206**, 898 (2003).
3. K. W. Park, K. H. Choo, and M. H. Kim, "Use of a combined photocatalysis/microfiltration system for natural organic matter removal", *Membrane Journal*, **14**, 149 (2004).
4. H. C. Oh, "Photocatalytic degradation characteristics of organic matter by highly pure TiO_2 nanocrystals", Master Dissertation, Kangwon National Univ., Chuncheon, Korea (2006).
5. J. U. Kim, "A study on drinking water treatment by using ceramic membrane filtration", Master Dissertation, Yeungnam Univ., Daegu, Korea (2004).
6. C. K. Choi, "Membrane technology", *Chem. Ind. & Tech.*, **3**, 264 (1985).
7. R. Molinari, F. Pirillo, M. Falco, V. Loddo, and L. Palmisano, "Photocatalytic degradation of dyes by using a membrane reactor", *Chem. Eng. Proc.*, **43**, 1103 (2004).
8. T. H. Bae and T. M. Tak, "Effect of TiO_2 nanoparticles on fouling mitigation of ultrafiltration membranes for activated sludge filtration", *J. Membr. Sci.*, **249**, 1 (2005).
9. R. Molinari, C. Grande, and E. Drioli, "Photocatalytic membrane reactors for degradation of organic pollutants in water", *Cata. Today*, **67**, 273 (2001).
10. K. Azrague, E. Puech-Costes, P. Aimar, M. T. Maurette, and F. Benoit-Marquie, "Membrane photoreactor (MPR) for the mineralisation of organic pollutants from turbid effluents", *J. Membr. Sci.*, **258**, 71 (2005).
11. M. H. Kim and J. Y. Park, "Effect of periodic water-back-flushing in the tubular carbon ceramic ultrafiltration system on membrane fouling control for paper wastewater recycle", *Membrane Journal*, **11**, 190 (2001).
12. M. Cheryan, "Ultrafiltration Handbook", Technomic Pub. Co, Lancaster, PA (1984).
13. K. Karakulski, W. A. Morawski, and J. Grzechulska, "Purification of bilge water by hybrid ultrafiltration and photocatalytic process", *Sep. Pur. Tech.*, **14**, 163 (1998).
14. R. Molinari, L. Palmisano, E. Drioli, and M. Schiavello, "Studies on various reactor configurations for coupling photocatalysis and membrane processes in water purification", *J. Membr. Sci.*, **206**, 399 (2002).
15. S. M. Bai, "Preparation and photoactivity evaluation of TiO_2 added metal for removal of VOC in automobile indoor air", Master Dissertation, Hongik Univ., Seoul, Korea (2007).
16. J. K. Kim, H. J. Jung, and B. H. Koo, "A study of dye wastewater treatment using TiO_2 photocatalyst", Proceedings of Fall Conference of Korean Society of Environmental Engineers, 826 (2003).
17. H. C. Lee, "Hybrid process development of ceramic microfiltration and activated carbon adsorption for advanced water treatment of high turbidity

- source”, Master Dissertation, Hallym Univ., Chuncheon, Korea (2008).
18. J. H. Park, “Technology and applications of ceramic membranes”, *NICE*, **21**, 33 (2003).
 19. S. H. Hyun, “Present status and preparation technology of ceramic membranes”, *Membrane Journal*, **3**, 1 (1993).
 20. 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 (2004).
 21. J. Y. Park and S. H. Lee, “Effect of water-back-flushing in advanced water treatment system by tubular alumina ceramic ultrafiltration membrane”, *Membrane Journal*, **19**, 194 (2009).
 22. J. Y. Yun, “Removal of natural organic matter in Han River water by GAC and O₃/GAC”, Master Dissertation, Univ. of Seoul, Seoul, Korea (2007).
 23. H. C. Lee, J. H. Cho, and J. Y. Park, “Effect of water-back-flushing time and period in advanced water treatment system by ceramic microfiltration”, *Membrane Journal*, **18**, 26 (2008).