

세라믹 정밀여과 및 활성탄 흡착 혼성공정에 의한 고탁도 원수의 고도정수처리: 입상 활성탄 충전율에 의한 영향

이 혁 찬 · 박 진 용[†]

한림대학교 환경생명공학과
(2008년 6월 14일 접수, 2008년 9월 3일 수정, 2008년 9월 4일 채택)

Advanced Water Treatment of High Turbidity Source by Hybrid Process of Ceramic Microfiltration and Activated Carbon Adsorption: Effect of GAC Packing Fraction

Hyuk Chan Lee and Jin Yong Park[†]

Department of Environmental Sciences & Biotechnology, Hallym University, Kangwon 200-702, Korea
(Received June 14, 2008, Revised September 3, 2008, Accepted September 4, 2008)

요 약: 본 연구에서는 고도정수처리를 위하여 모듈 내부와 세라믹 정밀여과막 외부 사이의 공간에 입상 활성탄(GAC)을 충전한 혼성 모듈을 이용하였으며, 정수 원수 중의 자연산 유기물(NOM)과 미세 무기 입자를 대체하기 위해, 휴믹산(humic acid)과 카올린(kaolin) 모사용액을 사용하였다. GAC의 충전율(packing fraction)에 따른 처리효율의 변화를 알아보고자, GAC의 충전율을 0~24.05%로 변화 시켰다. 그 결과, 3시간 운전하는 동안 막오염에 의한 저항(R_f) 및 투과선속(J)의 변화 곡선은 GAC의 충전율에 관계없이 거의 중첩되었다. 그리고 탁도의 처리효율은 모든 조건에서 99.46% 이상으로 높았으며, UV₂₅₄ 흡광도로 측정된 NOM의 처리효율은 최대 충전율 24.05%에서 제거율은 99.43%로 가장 높게 나타났다. 한편, 충전율 24.05%에서 13시간 동안 운전한 결과, J는 막오염의 증가에 따라 운전 초기 1시간 이내에 급격히 감소하였으며 3시간 운전 후부터는 거의 일정한 투과선속을 나타냈다. 그리고 탁도 및 NOM의 처리효율은 각각 99.52%와 96.63%로 안정적인 높은 처리효율을 보였다.

Abstract: In this study, we used hybrid module that was composed of packing granular activated carbon (GAC) between module inside and outside of ceramic microfiltration membrane for advanced drinking water treatment. Instead of natural organic matters (NOM) and fine inorganic particles in natural water source, synthetic water was prepared with humic acid and kaolin. Packing fraction of GAC was changed from 0 to 24.05% to see effect of packing fraction. As a result, changing curves of resistance of membrane fouling (R_f) and permeate flux (J) during 3 h operation were almost overlapped independent of packing fraction of GAC. Treatment efficiencies of turbidity were very high above 99.46% at all packing fractions of GAC. And treatment efficiency of NOM, which was measured by UV₂₅₄ absorbance, was the highest value of 99.43% at packing fraction of 24.05%. Then, we operated the hybrid process during 13 h at packing fraction of 24.05%. As a result, J was rapidly dropped according to increase of membrane fouling within initial 1 h of operation, and almost constant after 3 h. And treatment efficiencies of turbidity and NOM were stable and high values of 99.52% and 96.63%, respectively.

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

1. 서 론

산업의 발달로 인하여 각종 유기 및 무기 오염물질, 탁도 및 병원성 미생물에 의한 상수원의 오염이 심화되

는 반면에, 생활수준이 향상됨에 따라 이를 효율적으로 제거하기 위한 고도정수처리 공정에 대한 관심과 적용이 증가하고 있다. 그 중에서도 막분리 공정은 현재 정수처리에 활발히 적용되고 있으며, 이에 대한 연구도 꾸준히 진행되고 있다[1-4].

정수처리공정에 막여과를 이용할 경우, 응집-침전-모

[†]주저자(e-mail : jypark@hallym.ac.kr)

래여과-소독 공정으로 구성된 종래의 정수처리 공정보다 많은 장점을 지닌다. 우선 기존의 모래여과를 대신하는 막여과 공정은 현탁 물질 및 입자상 물질, 그리고 미생물에 대하여 안정적이면서도 완벽한 분리성능을 나타낸다. 또한 컴팩트한 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[5].

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[6]. NOM 중 상당부분을 차지하는 휴믹물질(Humic substance)은 서로 다른 유기화합물로 이루어진 복잡한 혼합물의 일종으로 주로 휴믹산과 펠빅산으로 구성되어 있다. NOM과 같은 용존성 유기물은 정밀여과만으로는 제거하기 힘든 것으로 알려져 있다[7]. 나노여과(NF, Nanofiltration)나 역삼투(RO, Reverse osmosis)를 이용하여 NOM의 제거가 가능하지만[8,9], NF 및 RO 공정은 높은 압력에서 운전되기 때문에 에너지 소모가 많고 운전비용이 높아 경제성이 떨어진다고 한다[10]. 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[11-14].

한편, 세라믹 분리막은 세라믹 특성상 유기질 막에 비해 내화학적 및 내마모성이 우수하고, 고온 및 고압하에서도 특성을 유지할 수 있으며, pH 사용 범위가 넓고, 장기간 사용이 가능하기 때문에 식품 및 균주의 농축, 정수 및 폐수처리 분야에 널리 응용되어 왔고 현재에도 활발하게 연구되고 있다[15-17]. 또한 본 연구실에서도 다채널 및 관형 세라믹 정밀여과막을 사용하여 호소수를 처리한 연구를 지속적으로 수행하여 왔다[18,19].

본 연구에서는 탁질 제거를 위한 세라믹 정밀여과와 용존성 유기물 제거를 위한 입상 활성탄(GAC, granular activated carbon) 흡착공정을 하나의 모듈 형태로 구성하여, 고도정수처리를 목적으로 사용하였다. 휴믹산과 카올린을 이용하여 제조한 모사용액을 대상으로 GAC의

충전율에 따른 막여과 특성 및 처리효율을 알아보았다.

2. 이 론

압력차를 추진력으로 하는 막분리 공정에서 발생하는 여과저항과 투과선속은 일반적으로 잘 알려진 직렬여과 저항 모델에 의해서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[20].

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

여기서, J는 투과선속이고, ΔP 는 막간압력차(TMP, Trans-membrane pressure), R_m 은 막자체에 의한 저항, R_b 는 경계층에 의한 저항, R_f 는 막오염에 의한 저항이다.

순수(Pure water)를 대상으로 한 분리막의 경우에는 R_b 와 R_f 는 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_m 을 구하였다. 또한 식 (2)를 R_b+R_f 에 대해 정리하면 식 (3)과 같다.

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

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_b 가 된다. 이렇게 구한 R_b 를 R_b+R_f 에서 빼주면 시간변화에 따른 R_f 를 구할 수 있었다.

한편, 분리막을 이용하여 실험할 때, 공급수 및 처리수의 수질을 분석하였다. 그리고 막에 의한 오염물질의 제거율을 구하기 위해 식 (4)를 이용하여 구하였다.

$$E = \frac{C_f - C_p}{C_f} \times 100 \quad (4)$$

여기서, E는 처리효율(Treatment efficiency, %), C_f 는 공급수의 농도, C_p 는 처리수의 농도이다.

Table 1. Specification of GAC Employed in This Study

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

3. 실험

3.1. 세라믹 분리막 및 GAC

본 연구에서 사용한 세라믹 분리막(NCMT-7231)은 tubular type으로 α -alumina 지지층에 같은 재질인 α -alumina로 코팅한 것이며, 나노기공소재(주)에서 구입하였다. 분리막의 유효막면적은 47.5 cm², 평균기공크기는 0.1 μ m, 외경은 8 mm, 내경은 6 mm, 길이는 252 mm이다. GAC는 수처리용 야자계 활성탄(8 × 30 mesh)을 구입하여 사용하였으며, GAC의 규격을 Table 1에 나타내었다. 실험에 앞서 구입한 GAC를 일정한 입도로 선별하기 위하여, 9 mesh (2 mm)와 16 mesh (1 mm) 크기의 체로 분리하였다. 체분리를 통하여 얻어진 일정한 1~2 mm 크기의 GAC는 미세한 입자를 제거하

기 위하여 증류수로 3~4번 행군 다음 105°C에서 2시간 동안 건조시킨 후 사용하였다.

3.2. 모사용액

정수처리의 대상이 되는 자연산유기물 중 상당 부분을 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 각각 30 mg/L와 6 mg/L로 제조하여 사용하였다.

3.3. 실험 장치 및 방법

Fig. 1에는 본 연구에 사용한 십자흐름(cross-flow) 여과방식의 처리수로 역세척이 가능한 정밀여과 장치를 나타내었다. 탁질 및 용존 유기물 제거를 위하여, 세라믹 분리막과 모듈 사이의 공간에 일정한 1~2 mm의 입자크기를 갖는 GAC로 채워 하나의 막 모듈(6) 형태로 구성하였다. 또한 세라믹 분리막을 먼저 통과한 후 GAC에 의해 흡착된 처리수를 GAC의 입자보다 훨씬 작은 공경을 갖는 100 mesh (0.150 mm) 크기의 망(8)을 통과하여 처리수 관로로 이동되도록 하여, 막 모듈

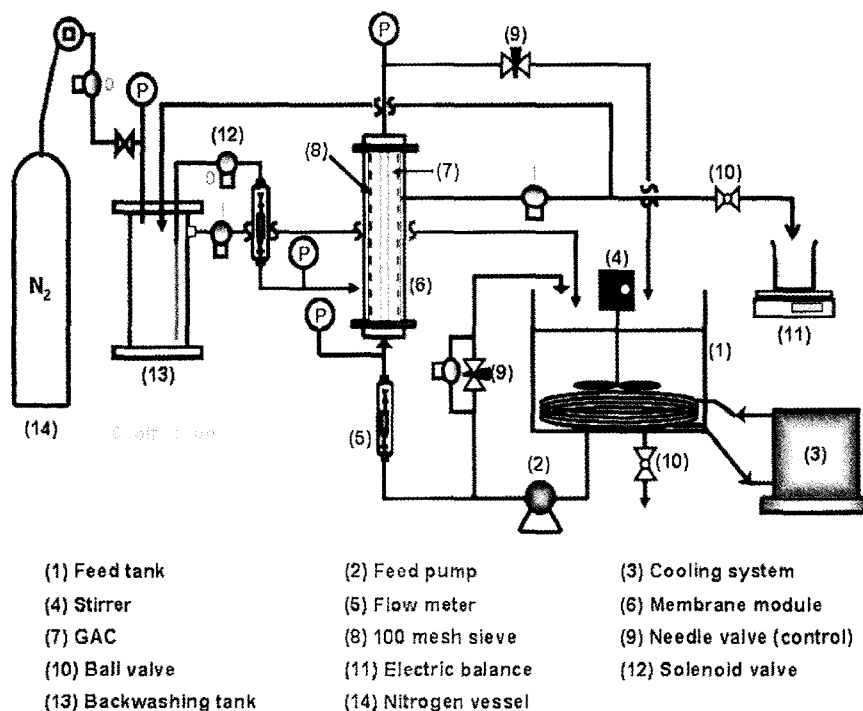


Fig. 1. Apparatus of advanced water treatment system using hybrid module of ceramic microfiltration and GAC adsorption with periodic water-back-flushing.

안의 GAC가 처리수의 판로로 유실되는 것을 방지하였다.

실험 장치에 일정량의 GAC(7)를 충전한 막 모듈(6)을 설치한 다음, 공급탱크(1)에 10 L의 모사용액을 채우고, 항온순환기(3) (Model 1146, VWR, U.S.A)를 이용하여 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 유입되며, 유입유량은 유량계(5) (NP-127, Tokyo keiso, Japan)를 이용하여 측정하였다. 막 모듈에서의 유량과 압력은 펌프 우회관과 농축수라인의 밸브(9)를 조절하여 일정하게 하였다. 또한, 세라믹 막과 GAC에 의해 처리된 투과수의 부피는 전자저울(11) (Ohaus, U.S.A.)로 무게를 측정하여 플렉스를 계산하였다. 투과 플렉스를 측정하지 않을 때에는, 처리수가 역세척조(13)로 이동되어지도록 하였으며, 역세척조에 일정량 이상의 처리수가 모아지면 다시 공급탱크로 순환되어 실험하는 동안 공급수의 수질을 일정하게 유지하도록 하였다.

GAC의 충전율에 따른 영향을 알아보기 위하여 막 모듈 내의 GAC 충전량을 0, 30, 40, 50, 60 g으로 변화시켰으며, 이때의 충전율은 각각 0, 11.27, 15.03, 18.79, 22.55, 24.05%이었다. GAC 충전율은 수중에서 일정량의 GAC가 차지하는 부피를 측정하여, 세라믹 분리막과 모듈 사이의 빈 공간의 부피에 대한 GAC 부피의 비로 계산하였다. 그리고 각 조건에서 180분 운전하면서 막오염에 대한 저항(R_f) 및 투과선속(Permeate flux, J), 무차원적인 투과선속(J/J_0), 처리효율의 변화를 관찰하였다. 또한, 충전율이 가장 높은 24.05%에서 13시간 동안 운전하면서, 이에 따른 R_f 및 J 그리고 처리효율의 변화를 살펴보았다. 기존의 연구결과[19]에서는 고탁도 원수 처리시 역세척 효과를 분명히 보기 위해 정밀여과의 일반적 운전압력 조건보다 비교적 높게 운전하였다. 따라서 본 실험에서도 운전압력인 막간압력차(TMP)는 1.77 bar로 하였으며, 역세척 압력은 TMP보다 높은 2.50 bar로 하였다. 그리고 유입유량은 1.0 L/min으로, 공급수의 온도는 $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 하였으며, 10분 여과마다 10초 동안 처리수를 이용한 주기적인 역세척을 실시하였다.

또한, 탁질 및 용존 유기물의 제거율을 알아보기 위해 공급수 및 처리수의 수질을 분석하였다. 탁도

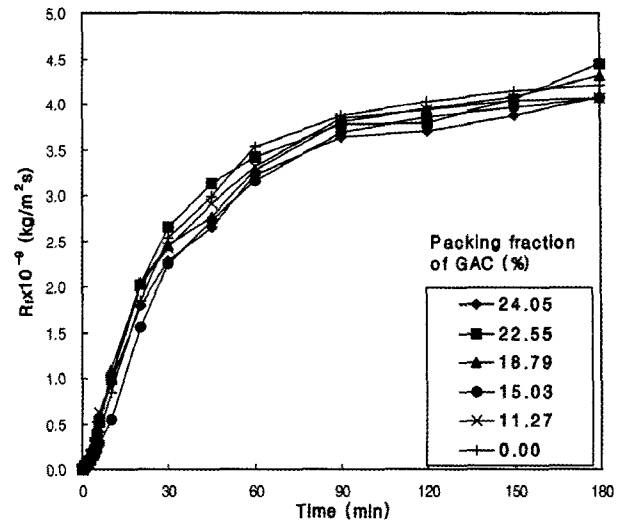


Fig. 2. Effect of GAC packing fraction on resistance of membrane fouling.

(Turbidity)는 Turbidity meter (2100N, HACH, U.S.A.)를 사용하여 직접 측정하였다. 그리고 휴믹산과 같은 용존 유기물의 지표로 사용되는 UV_{254} 흡광도는 UV Spectrophotometer (GENESYS 10 UV, Thermo, U.S.A)를 이용하여 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 입상 활성탄 충전율의 영향

탁질 제거를 위한 세라믹 정밀여과와 용존성 유기물 제거를 위한 GAC 혼성공정에서 GAC의 충전율을 변화시키면서 그에 따른 영향을 살펴보았다. 그 결과, Fig. 2와 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 R_f 와 J 는 GAC의 충전율에 관계없이 비교적 일정하게 나타났다. 이러한 결과로부터 분리막과 모듈의 사이에 충전한 GAC의 충전율은 고도정수처리를 위한 본 연구의 혼성 공정에서 막오염 증가 및 투과선속 감소에 영향을 끼치지 않는 것을 알 수 있었다. 한편 Fig. 2에서 보는 바와 같이 막오염은 운전 초기 30분 이내에 매우 빠르게 진행되어, 이로 인해 J 는 Fig. 3에서 보듯이 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다.

Table 2에는 GAC의 충전율에 따른 총여과부피(V_T)와 초기투과선속(J_0), 180분 운전 후의 $R_{f,180}$, J_{180} , J_{180}/J_0 를 정리하였다. 그 결과를 보면, 모든 인자들이 거의 일정한 값을 보이고 있어, 막오염 및 투과선속, 총여과부피에 대한 GAC 충전율의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

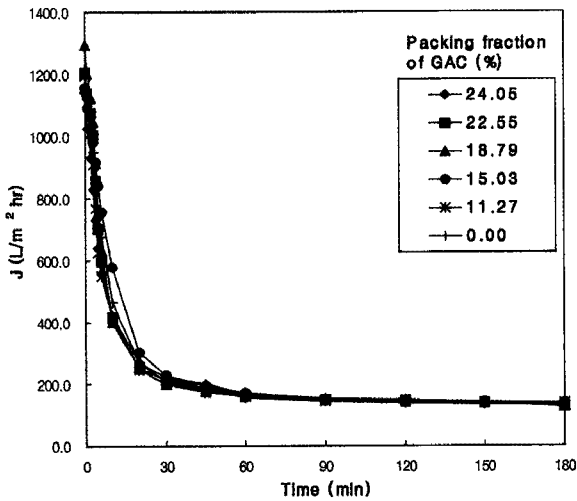


Fig. 3. Effect of GAC packing fraction on permeate flux.

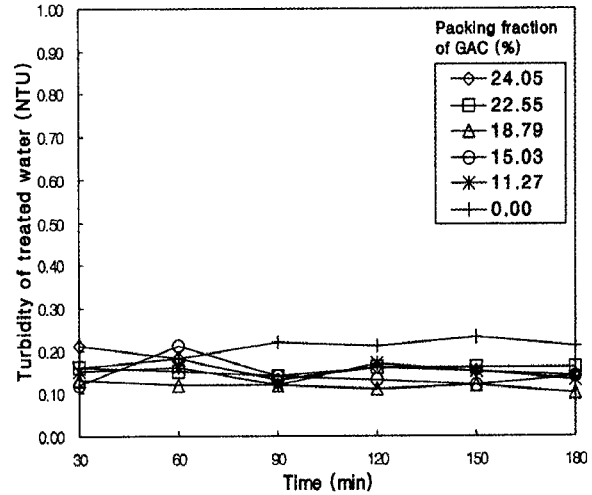


Fig. 4. Turbidity of treated water during operation time.

Table 2. Filtration Factors in the Experiments for Effect of GAC Packing Fraction

Packing fraction of GAC (%)	$R_{f,180} \times 10^{-9}$ ($\text{kg/m}^2\text{s}$)	J_0 ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	J_{180} ($\text{L/m}^2 \cdot \text{h}$)	J_{180}/J_0	V_T (L)
0	4.208	1207.74	134.15	0.111	28.24
11.27	4.064	1194.65	138.19	0.116	27.84
15.03	4.068	1157.28	137.56	0.119	30.39
18.79	4.311	1293.15	133.25	0.102	28.63
22.55	4.436	1204.60	127.96	0.106	27.91
24.05	4.073	1140.80	137.18	0.120	28.51

GAC 충전율이 탁도 및 NOM의 제거율에 미치는 영향을 알아보기 위해, 180분 동안 운전하면서 탁도 및 UV₂₅₄ 흡광도를 측정하였다. 그 결과, 공급수의 평균 탁도는 33.40~37.47 NTU이고 처리수의 탁도는 0.10~0.23 NTU 범위로 비교적 일정하여, 모든 충전율 조건에서 99.46% 이상의 높은 탁도 제거율을 나타내었다. 따라서 본 연구에 사용한 세라믹 정밀여과막과 GAC의 혼성공정은 탁질 제거에 매우 우수하다는 것을 알 수 있었다. Fig. 4에는 운전시간에 따른 처리수의 탁도 변화를 나타내었는데, 180분 운전하는 동안 처리수의 탁도는 거의 일정하였다.

각각의 충전율에서 공급수와 처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도 값을 Fig. 5에 나타내었다. 공급수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.142~0.147 cm⁻¹로 일정하게 유지하였으며, 혼성 모듈 내의 GAC 충전율을 0~24.05%로 변화시켰을 때 처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 각각 0.018, 0.014, 0.010, 0.008, 0.004, 0.001 cm⁻¹로 측정되었다. 따라서 가장 높은 충전율 24.05%에서 99.4%의 높은

UV₂₅₄ 제거율을 나타내었으며, GAC 주입량을 감소시킬수록 처리수의 UV₂₅₄ 흡광도 값이 조금씩 높아져 처리효율은 감소하였다. 이러한 결과는 GAC 충전율이 낮을수록 모듈 내에서 GAC와 충분히 접촉하지 못하여 휴믹산의 제거율이 감소한 것으로 판단된다. 한편, GAC를 충전하지 않은 경우인 충전율 0%에서의 평균 UV₂₅₄ 제거율은 87.42%로 GAC를 사용하지 않았음에도 불구하고 처리효율이 비교적 높았는데, 이는 세라믹 분리막 표면에 쌓인 케이크 층에 의해 휴믹물질이 배제된 것으로 판단된다.

4.2. 혼성공정의 장시간 운전

세라믹 정밀여과와 GAC 혼성공정을 3시간 동안 운전한 결과를 바탕으로, 용존유기물의 처리효율이 가장 높은 충전율 24.05%에서 동일한 TMP 및 역세척 운전 조건으로 13시간 동안 운전하면서 R_f 및 J의 변화, 그리고 처리효율을 알아보았다. Fig. 6에는 운전시간 동안 R_f와 J의 변화를 나타내었다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 운전 시간이 경과함에 따라 R_f는 점차적으로 증가하였으며, 5시간 운전 이후에는 비교적 비슷한 R_f를 나타내었다. 반면에 J는 운전 초기 1시간 동안 급격히 감소하였으며, 3시간 이후부터는 거의 일정한 플럭스를 나타냈다.

Fig. 7에는 GAC 충전율에 따른 공급수 및 처리수의 탁도 변화를 나타내었다. 공급수의 탁도는 35.10~39.10 NTU이고 처리수의 탁도는 0.14~0.24 NTU 범위로, 탁도의 평균 제거율은 99.52%로 매우 높았다. Fig. 8에는 GAC 충전율에 따른 공급수 및 처리수의 UV₂₅₄ 흡광도

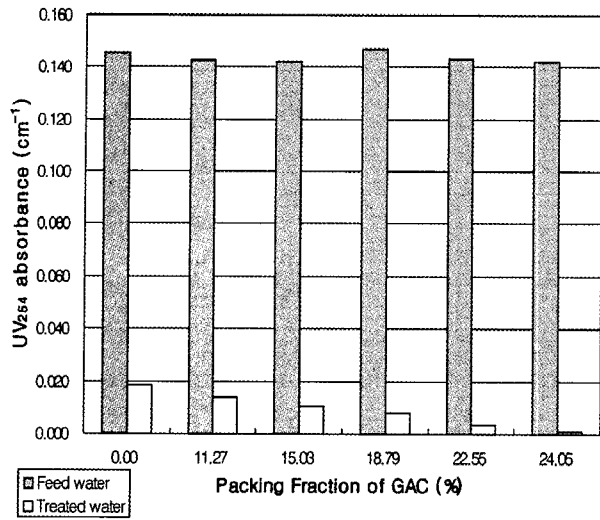


Fig. 5. Average UV₂₅₄ absorbance values of feed and treated water in various packing fraction of GAC.

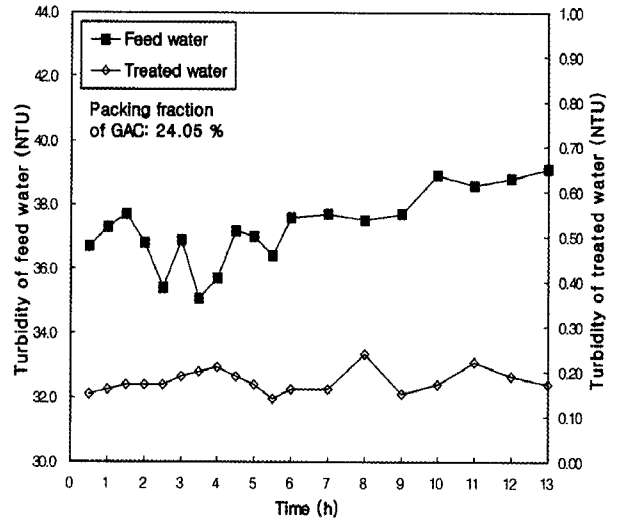


Fig. 7. Turbidities of feed and treated water during 13 h operation.

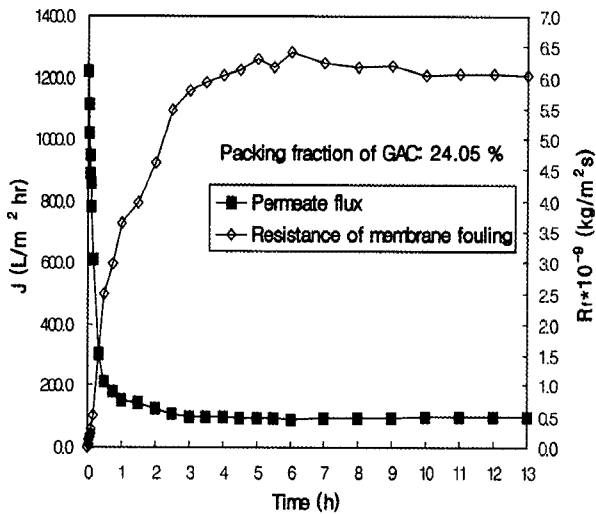


Fig. 6. Resistance of membrane fouling and permeate flux during 13 h operation.

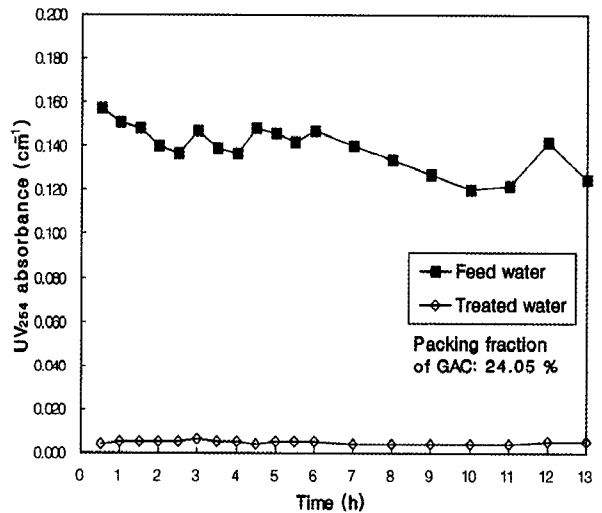


Fig. 8. UV₂₅₄ absorbance of feed and treated water during 13 h operation.

변화를 나타내었다. 공급수의 UV₂₅₄ 흡광도는 0.120~0.157 cm⁻¹의 범위였으며, 운전시간이 경과함에 따라 공급수의 UV₂₅₄ 흡광도 값이 다소 감소하였다. 이것은 실험을 수행할 때 모아진 처리수를 다시 공급탱크로 순환시켰기 때문이며, 이로 인해 GAC의 흡착에 의해 휴믹산의 농도가 낮아진 것이라 판단된다. 한편, 처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 0.004~0.006 cm⁻¹로 평균 제거율은 96.63%로 높았다.

5. 결 론

본 연구에서는 탁질 및 용존성 유기물 제거를 위하여

모듈 내부와 세라믹 정밀여과막 외부 사이의 공간에 GAC 충전한 혼성공정을 사용하였다. GAC의 충전율을 변화시키면서 이에 따른 영향을 살펴 본 결과, R_f 및 J는 GAC의 충전율에 관계없이 거의 일정하였다. 것으로 보아 GAC의 충전율은 막오염 증가 및 투과선속 감소에 거의 영향이 없는 것으로 판단된다. 한편 수질 분석을 통하여 GAC 충전율에 따른 탁도 및 NOM의 처리효율을 알아본 결과, 탁도의 경우 공급수의 평균 탁도는 33.40~37.47 NTU, 처리수의 탁도는 0.10~0.23 NTU로 측정되어, 탁도 제거율은 99.46% 이상으로 높게 나타났다. 한편 NOM의 경우, 공급수의 평균 UV₂₅₄는 0.142~0.147 cm⁻¹ 범위로 거의 일정하였으나,

처리수의 평균 UV₂₅₄ 흡광도는 GAC의 충전율에 따라 0.001~0.018 cm⁻¹로 변화하여, 최대 충전율 24.05%에서 NOM의 처리효율은 99.4%로 가장 높게 나타났다. 한편, 충전율 24.05%에서 13시간 운전한 결과 J는 막오염의 증가에 따라 운전 초기 1시간 동안에 급격히 감소하였으며, 3시간 운전 후부터는 일정한 투과선속을 나타냈다. 그리고 탁도 및 NOM의 처리효율은 각각 99.52와 96.63%로 높고 안정적인 처리효율을 보였다.

감 사

이 논문은 2008년도 한림대학교 교비연구비(HRF-2008-028)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- 이용택, 오중교, “분리막을 이용한 정수처리 System에서 처리공정 및 운전조건의 최적화에 관한 연구”, *멤브레인*, **9(4)**, 193 (1999).
- J. I. Oha and S. H. Lee, “Influence of streaming potential on flux decline of microfiltration with in-line rapid pre-coagulation process for drinking water production”, *J. Membr. Sci.*, **254**, 39 (2005).
- L. Fiksdal and T. O. Leiknes, “The effect of coagulation with MF/UF membrane filtration for removal of virus in drinking water”, *J. Membr. Sci.*, **279**, 364 (2006).
- A. R. Costa and M. N. Pinho, “Performance and cost estimation of nanofiltration for surface water treatment in drinking water production”, *Desalination*, **196**, 55 (2006).
- 박진용, “세라믹 여과 시스템으로 제지폐수 처리시 회수 효율에 대한 물 역세척 시간의 영향”, *멤브레인*, **14(4)**, 329 (2004).
- 박지혜, 이상윤, 박홍석, “개질 Clay를 첨가한 응집 공정에서의 자연유기물 제거”, *상하수도학회지*, **21(1)**, 37 (2007).
- M. H. Cho, C. H. Lee, and S. H. Lee, “Effect of Flocculation Conditions on Membrane Permeability Incoagulation-Microfiltration”, *Desalination*, **191**, 386 (2006).
- Y. Yoon and R. M. Lueptow, “Removal of organic contaminants by RO and NF membranes”, *J. Membr. Sci.*, **261**, 76 (2005).
- 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).
- 정지현, 추광호, 박학순, “저압 막여과 혼성공정을 이용한 고도 정수처리”, *멤브레인*, **17(3)**, 161 (2007).
- H. S. Kim, S. Takizawa, and S. Ohgaki, “Application of microfiltration systems coupled with powdered activated carbon to river treatment”, *Desalination*, **202**, 271 (2007).
- S. Mozia and M. Tomaszewska, “Treatment of surface water using hybrid processes-adsorption on PAC and ultrafiltration”, *Desalination*, **162**, 23 (2004).
- 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).
- 박경원, 추광호, 김문현, “광촉매 반응과 침지형 정밀여과를 이용한 자연산 유기물의 제거”, *멤브레인*, **14(2)**, 149 (2004).
- 이용택, 송민호, “세라믹막을 이용한 *Lactobacillus* cell의 농축 공정의 특성”, *멤브레인*, **14(3)**, 192 (2004).
- K. Konieczny, M. Bodzek, and M. Rajca, “A coagulation-MF system for water treatment using ceramic membranes”, *Desalination*, **198**, 92 (2006).
- 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).
- 박보름, 박진용, “다체널 세라믹 정밀여과막으로 호소수 처리시 질소 역세척 시간 및 막간 압력차의 영향”, *멤브레인*, **17(2)**, 124 (2007).
- H. C. Lee and J. Y. Park, “Water Treatment of High Turbid Source by Tubular Ceramic Microfiltration with Periodic Water-back-flushing System”, *Korean Membr. J.*, **9(1)**, 12 (2007).
- M. Cheryan, “Ultrafiltration Handbook”, Technomic Pub. Co., Lancater, PA, pp. 89-93 (1984).