

침지형 막모듈에서 중공사 분산에 따른 여과특성

이재인·신춘환
동서대학교 환경공학과
(2000년 1월 18일 접수)

Filtration Characteristics according to Hollow Fiber Dispersion in Submerged Membrane Module

Jae-In Lee and Choon-Hwan Shin

Dept of Environmental Engineering, Dongseo University
(Manuscript received 18 January, 2000)

This study was carried out to investigate the filtration characteristics of membrane modules according to hollow fiber dispersion for direct solid-liquid separation of activated sludge. 2 bundle, 4 bundle, and 10 bundle module used in this experiment according to hollow fiber dispersion was manufactured at laboratory and permeate flux and transmembrane pressure(TMP) of each module were observed under a suction pressure of 0.5 kg/cm².

As the hollow fibers were dispersed, permeate flux was increased and TMP was decreased. Permeate flux and TMP of each module was 15.0 l/m²·h and 31.8 cmHg for 2 bundle, 16.0 l/m²·h and 17.4 cmHg for 4 bundle, and 20.4 l/m²·h and 13.8 cmHg for 10 bundle.

In conclusion, the membrane fouling is expected to be decrease by maintaining lower TMP with hollow fiber dispersion.

Key words · membrane module, hollow fiber dispersion, permeate flux, transmembrane pressure(TMP), membrane fouling

1. 서론

합성막은 1960년대에 비대칭형 막이 개발된 이후 탈염(desalination)을 위한 목적으로 사용되기 시작했다. 정밀여과(MF) 및 한외여과(UF)와 같은 막기술의 지속적인 개발에 의해 그 응용분야는 초순수 제조, 항생물질 및 약품 정제, 고액분리 등으로 확대되었고, 현재에는 도시하수 및 산업폐수처리에서도 응용되고 있다.¹⁾

막분리공정에서 농도분극(concentration polarization)이나 비가역적인 막오염(fouling)에 의해 막의 성능이 감소하는 것은 불가피한 현상이다. 막오염은 막표면에 용질 등이 비가역적으로 축적하여 물투과유속이 저하되는 현상으로 막표면에 점착층(adhesion layer)의 형성과 막기공의 막힘 등으로 구분된다. 막오염이 일어나는 정도는 용질의 성상 및 농도, 막의 종류 및 제질, 막모듈(membrane module)의 형상 등 다양한 인자에 영향을 받으며, 막표면에서의 물리화학적 반응이나 용질과 막간의 상호작용을 이해하는 것이 막오염현상을 이해하는데 매우 중요하다.²⁾

최근에는 기존의 활성오니조내에 중공사막모듈(hollow fiber membrane module)을 직접 침지(浸漬)시켜 그 아

랫부분에 공기를 주입하고, 여과수를 막의 양단에서 흡입(suction)하여 고액분리하는 폐수처리방식이 연구되고 있다. 이러한 방식은 폭기에 의해 상승되는 유체가 들뜸효과(scouring effect)를 발생시켜 막표면이 계속 세정되고, 처리수의 투과유속이 낮은 범위에서 유지되기 때문에 막표면에 퇴적물의 형성 및 막기공의 폐쇄(clogging)와 같은 막오염을 극단적으로 줄일 수 있다.³⁻⁶⁾ 그리고 기존 활성오니공정에서 침전조의 고액분리 역활을 오니조에 위치한 막모듈이 수행함으로써 소요부지물 절감할 수 있고,^{7,8)} 오니의 침강성에 의존하지 않음으로 인해 고농도의 미생물을 오니조내에 유지할 수 있다. 또한 중공사막을 오니조내에 직접 침지시킴으로서 내압용기가 필요 없이 0.5 kg/cm² 이하의 낮은 압력으로도 운전이 가능하다.

중공사막을 이용하여 활성오니혼합액을 직접 고액분리하는 경우 여과분리체의 기능은 활성오니혼합액에 함유된 현탁성물질의 투과를 저지할 수 있어야 하고, 낮은 압력차로 충분한 투과유속이 확보되어야 한다. 그리고 장시간의 운전조작에도 안정된 투과유속과 처리수질이 얻어져야 하고, 여과분리체 표면의 막오염현상으로 인한

고액분리기능의 저하도가 적어야 한다.²⁾

본 연구에서는 중공사막의 분산에 따른 처리수의 투과 플럭스(permeate flux)와 막간차압(transmembrane pressure, TMP)의 변화를 고찰하여 막오염을 저감시킬수 있는 가능성을 제시하고자 하며, 막모듈의 최적설계를 위한 기초자료로 활용하고자 한다

2. 재료 및 방법

2.1. 실험재료 및 장치

본 연구에서 사용된 침지형 막모듈은 공경 0.01 ~ 0.02 μm 의 polysulfone 재질인 중공사막을 사용하였고, 막의 사양은 Table 1에 나타내었다. 막모듈의 제조과정은 Fig. 1에 나타내었듯이 중공사막과 PVC관을 이용하여 제작하였다. 내경 16mm, 높이 50mm인 PVC관에 길이 약 30cm인 중공사막을 수직으로 세운 다음 polyurethan을 막과 막 사이에 주입하였다. 그리고 일정시간 경화시킨 후 PVC관의 밑 부분을 중공사막의 단면이 나오도록 잘라내었고, 그 단면 부분을 흡입펌프와 연결할 수 있도록 다른 PVC관과 연결하였다. 이러한 방법으로 중공사막의 분산에 따른 막모듈을 Fig. 2에 나타낸 형태로 제작하였고, 편의상 2 bundle, 4 bundle, 10 bundle로 표현하였다.

이와 같이 제작된 막모듈은 활성오니조의 중앙에 설치한 다음 0.5 kg/cm²의 흡입펌프(suction pump)에 연결시켰고, 그 하단부에 산기관을 통해 공기를 공급하였다. 공급된 공기에 의해 발생된 기포는 막을 유동시켜 막표면이 세정되도록 하였다. 실험장치의 개략도는 Fig. 3에 나타내었다.

Table 1. Specifications of hollow fiber membrane used in this study

Type	Hollow fiber
Pore size	0.01 ~ 0.02 μm
Material	Polysulfone
Outer diameter of fiber	0.7 mm
Membrane area	0.207 m^2
Number of fibers	400 threads

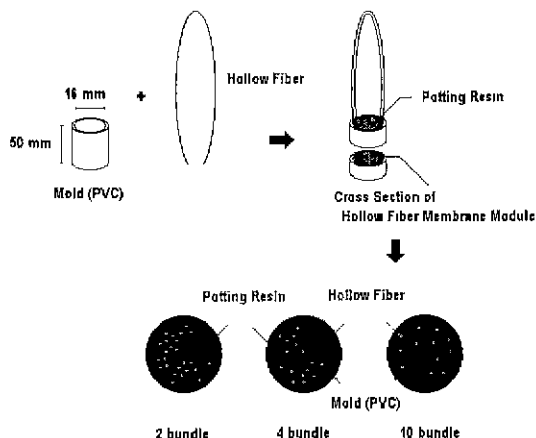


Fig. 1. Manufacturing process of membrane module.

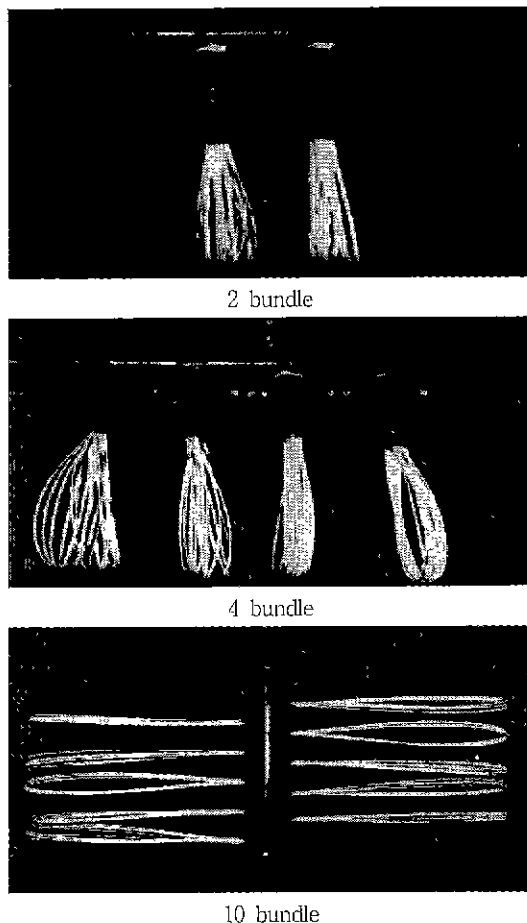


Fig. 2. Photograph of membrane module used in this study

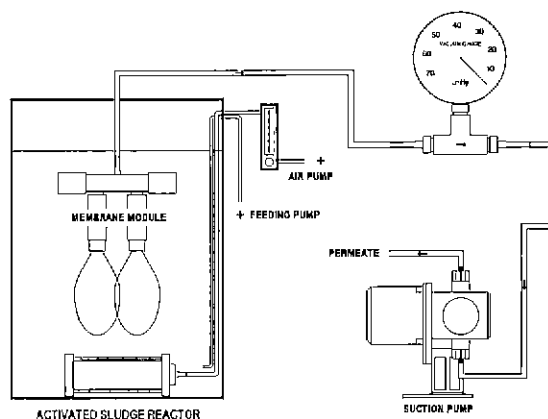


Fig. 3 Schematic diagram of submerged membrane bioreactor.

침지형막 생물반응조의 운전조건은 Table 2에 나타내었듯이 유효체적을 14 ℓ 로 일정유지하기 위해 막모듈에 따라 원수의 유입유량을 조절하였고, 막의 운전은 막오염

을 최소화하기 위해 흡입펌프에 타이머를 부착하여 간헐적인 흡입과 정지를 반복하였다. 원수는 glucose를 사용하여 제조한 후 총유기탄소(TOC) 농도가 200 mg/ℓ가 되도록 조절하였다. 합성폐수의 조성은 Table 3에 나타내었다

Table 2 Operation conditions of reactor

Temp	25 ± 1 ℃
pH	6 ~ 7
Volume	14 ℓ
DO	6 ~ 7 mg/ℓ
MLSS	about 7200 mg/ℓ
Air flow	15 ℓ/min

Table 3. Composition of synthetic wastewater

Chemicals	Conc (mg/ℓ)
Glucose(C ₆ H ₁₂ O ₆)	1000
KH ₂ PO ₄	0.533
K ₂ HPO ₄	0.640
(NH ₄) ₂ SO ₄	0.284
NH ₄ Cl	0.427
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.013
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.178
MnSO ₄ ·H ₂ O	0.018
KCl	0.025
FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.008

2.2. 실험방법

중공사막의 분산에 따른 여과특성을 검토하기 위해 생물반응조내에 막모듈을 침지시켜 투과실험을 하였다. 막모듈에 따른 투과플럭스는 흡입시 단위 시간당 여과수량을 측정하여 다음과 같이 계산하였다

$$\text{Permeate Flux} (\ell/m^2 \cdot h) = V / (A \cdot T)$$

- 여기서 V = 여과수량(ℓ)
- A = 막의 면적(m²)
- T = 여과시간(hr)

막간차압은 막모듈과 흡입펌프 사이에 부착된 게이지(suction gauge)를 통해 측정하였다. 그리고 TOC 분석기(DOHRMANN Phoenix 8000)를 이용하여 원수와 여과수의 TOC 농도를 분석한 후 TOC 제거율을 계산하였다

3 실험결과 및 고찰

3.1. 막모듈에 따른 반응조의 운전특성

투과실험을 시작한 후 비교적 낮은 조작압력에서 15분간 여과수량을 측정된 결과 막모듈의 종류에 따라 다소 큰 차이를 나타내었다. 즉 초기 15분 동안 2, 4, 10 bundle의 평균 여과수량은 각각 55.0, 63.0, 75.5 ml/min 였다. 따라서 반응기의 유효체적을 일정하게 유지하기 위해 원수의 유입수량을 모듈마다 다르게 조절하였다. 실험기간 동안 2 bundle의 유입수량은 평균 22.5 ml/min 을 유지했고, 4, 10 bundle은 각각 27.0, 32.5 ml/min을

유지하였다. 이와 같이 각각 막모듈의 초기 여과수량 차이로 인해 막모듈 2, 4, 10 bundle이 사용된 각 반응조의 수리학적체류시간(HRT)은 약 10.4, 8.6, 7.2 시간을 각각 나타내었다.

3.2. 막의 분산에 따른 여과특성

0.5 kg/cm²의 낮은 흡입압력에서 시간변화에 따른 투과플럭스 및 막간차압의 변화를 Fig 4에 나타내었다. 투과실험 11 시간 동안 투과플럭스 및 막간차압의 평균값은 2 bundle의 경우 15.0 ℓ/m²·h, 31.8 cmHg로 각각 나타났으며, 4 bundle의 경우 16.0 ℓ/m²·h, 17.4 cmHg, 10 bundle의 경우 20.4 ℓ/m²·h, 13.8 cmHg로 나타나 비교된 막모듈 가운데 10 bundle이 가장 높은 투과플럭스와 낮은 막간차압을 나타내었다. 즉 10 bundle은 2, 4 bundle과 비교하여 투과플럭스가 각각 5.4, 4.4 ℓ/m²·h 정도 높았고, 막간차압은 각각 18.0, 3.6 cmHg 정도 낮았다.

투과시간의 진행에 따른 투과플럭스 및 막간차압의 변화를 보면 전반적으로 투과플럭스는 감소하는 경향, 막간차압은 증가하는 경향을 보이고 있다 Fig. 4와 같이 막모듈별 투과실험 11 시간 동안 막간차압의 증가는 2, 4, 10 bundle에서 각각 7.5, 4.0, 2.5 cmHg를 나타내어 중공사막의 분산에 따라 막간차압의 증가폭이 낮음을 알 수 있었다.

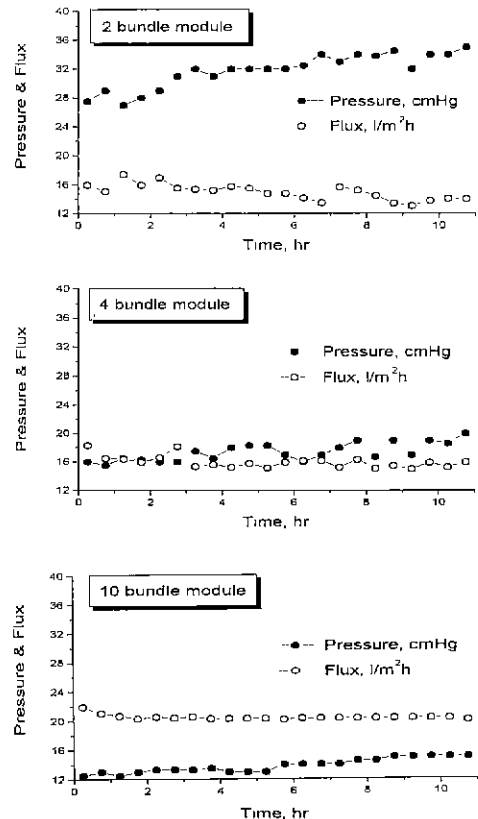


Fig. 4. Variation of permeate flux and TMP at each module.

이상과 같이 막모듈별 특징으로 나타나 있는 중공사막을 분산시킴으로서 막모듈의 막간차압이 낮게 유지되었고, 투과플럭스는 높게 유지되었다. 이는 중공사막간의 공간이 커지고, 막간의 멍치는 정도가 적어지므로써 막간사이에 형성되는 막오염층이 적어져 투과저항이 낮아진 결과로 생각된다

Fig. 5는 막모듈에 따른 여과수의 TOC 농도를 나타낸 것이다. 대부분 여과수의 TOC 농도는 9 mg/l 이하를 나타내었고, 막모듈별 TOC 평균 제거율은 2 bundle의 경우 96.2 %, 4 bundle 및 10 bundle의 경우 각각 99.3, 98.6 %를 나타내었다.

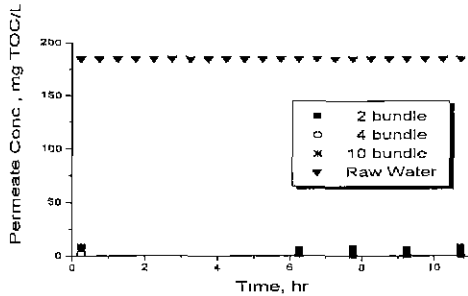


Fig 5 Variation of permeate TOC concentration.

4. 결 론

중공사막의 분산에 따른 여과특성을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 중공사막을 분산시킴에 따라 낮은 막간차압에서 높은 투과플럭스를 얻을 수 있었다. 즉 투과시간 진행에 따른 2, 4, 10 bundle의 투과플럭스는 15.0, 16.0, 20.4 l/m²·h였고, 막간차압은 31.8, 17.4, 13.8 cmHg였다

2) 투과시간에 따른 막간차압의 증가는 2, 4, 10 bundle에서 7.5, 4.0, 2.5 cmHg를 각각 나타내어 중공사막의 분산에 따라 막간차압의 증가폭이 낮게 나타났다.

3) 여과수의 TOC 농도는 대부분 9 mg/l 이하를 나타내었고, 막모듈에 따른 TOC 제거율은 평균 98 %였다.

이상의 결과로부터 중공사막을 이용하여 활성오니를 직접 고액분리할 경우 막의 분산으로 가능한 낮은 막간차압에서 운전되도록 하는 것이 막의 오염속도를 늦출

수 있으며, 막오염층에 의한 투과저항을 낮게 유지할 수 있을 것으로 생각된다. 나아가 운전조작 변수들에 의한 운전효과를 연속적으로 고찰함으로써 이러한 결과를 뒷받침하고자 한다

참 고 문 헌

- 1) Kiat, W. Y, K Yamamoto, and S Ohgaki, 1992, Optimal Fiber Spacing in Externally Pressurized Hollow Fiber Module for Solid Liquid Separation, Wat. Sci. Tech., 26(5-6), 1245~1254.
- 2) 허해명, 이영철, 최승일, 박종운, 이상화, 1999, 염색폐수 처리에 따른 한의여과막의 파울링 특성, 대한환경공학회지, 21(6), 1055~1061
- 3) Yamamoto, K, M. Hiasa, T. Mahmood, and T. Matsuo, 1989, Direct Solid-Liquid Separation using Hollow Fiber Membrane in an Activated Sludge Aeration Tank, Wat. Sci. Tech., 21, 43~54.
- 4) Cote, P, H. Buisson, C. Pound, and G. Arakaki, 1997, Immersed Membrane Activated Sludge for the Reuse of Municipal Wastewater, Desalination, 113, 189~196.
- 5) Ueda, T, K. Hata, Y Kikuoka, and O. Seino, 1997, Effects of Aeration on Suction Pressure in a Submerged Membrane Bioreactor, Wat. Res, 31(3), 489~494.
- 6) Yamamori, H, A Hoshide, and M. Kobayashi, 1996, Hollow Fiber Membrane Module, U. S. Patent, 5480553.
- 7) Smith, Jr. C. V, D D. Gregono, and R. M. Talsott, 1969, The Use of Ultrafiltration Membrane for Activated Sludge Separation, Presented paper at 24th Annual Purdue Industrial Waste Conference.
- 8) Bemberis, I, P. J. Hubbard, and F B. Leonard, 1971, Membrane Sewage Treatment System-Potential for Complete Wastewater Treatment, Presented paper at Winter Meeting, American Soc. of Agricultural Engineers