

막 결합형 생물반응조의 여과 특성에 관한 연구

노성희*, 김선일
 조선대학교 화학공학과
 (roh-sh@hanmail.net*)

A Study on the Filtration Characteristics of Membrane Coupled Bioreactor

Sung-Hee Roh*, Sun-Il Kim
 Department of Chemical Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
 (roh-sh@hanmail.net*)

서론

도시의 하·폐수는 생물학적 반응조에서 호기성 미생물에 의하여 오염물질의 자연분해를 증진시키는 활성슬러지공법[1]을 이용하여 주로 처리하고 있다. 그러나 현재 사용되고 있는 활성슬러지공법으로는 물과 비슷한 정도의 밀도를 가진 부유물질(suspended solid, SS)의 제거가 어려워 처리효율에 한계가 있다. 더구나 폐수처리 공정에 거대한 침전조가 필요하며, 다량의 과잉 슬러지를 생산하여 그것을 처리하는데 총 처리비용의 50%가 소비되고 있다. 따라서 침전조를 대신하여 고 수질 처리수를 추출할 수 있는 막을 이용한 분리공정의 기술적 개선이 요구된다. 막 생물반응조(membrane bioreactor, MBR)의 장점은 BOD 및 COD의 제거효율이 높고 과잉 슬러지 생산이 작으며[2], 폐수처리 설비의 총 규모는 생물반응조 크기의 감소와 침전조의 부재로 인하여 설비비용이 저렴하고 고농도 폐수처리에도 적용 가능하다[3]. 그러나 현재 MBR 공정의 총 운전비용은 투과 플럭스를 향상시키기 위한 비용이 감소되지 않는 한 기존의 처리공정보다 높고, 막 유닛은 가능한 장기간동안 화학적 세정 없이 운전되어야만 한다. Field 등[4]은 이스트 셀 현탁액 정밀여과 실험을 토대로 하여 “임계 플럭스(critical flux)”라는 흥미로운 개념을 제안하였다. 그들은 압력을 일정하게 유지시킨 경우와 투과 플럭스를 일정하게 유지시킨 경우의 실험 결과를 비교하여 운전시간이 경과하여도 플럭스의 감소가 일어나지 않는 한계 플럭스를 임계 플럭스로 정의하였다. 임계 플럭스의 결정은 막 생물반응조를 화학적 세정 없이 장기간 운전할 수 있고 높은 플럭스에 도달하기 위한 최적 운전조건을 산출하는데 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 순환속도의 함수로서 임계 플럭스를 조사하여 막 생물반응조의 최적 운전조건을 알아보기 위해 일정한 TMP(transmembrane pressure)와 일정한 플럭스 여과방식에 따른 각각의 성능을 비교하였다.

실험

본 연구에서는 생물반응조의 유효 용량을 12 L로 일정하게 유지시키기 위해서 유입펌프 P₁을 설치하여 원수 유입량을 조절하였으며, 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용한 막은 공경 0.1 μm의 세라믹 관형막이며, 드럼펌프 P₂에 의하여 유입수의 유속을 조절하여 막에 유입시켰다. 플럭스를 고정시킨 실험에서는 연동펌프 P₃에 의하여 투과플럭스를 조절한 반면에, TMP를 고정시킨 실험에서는 밸브 V₁과 V₂를 이용하여 적정 압력으로 조절하였으며 막의 입구, 출구에서 투과압력을 측정하였다.

생물학적 처리는 생물반응조 하부에서 압축공기를 세공 튜브를 통하여 슬러지로 공급하여 호기성 조건에서 수행하였다. 축산폐수(75%)와 산업폐수(25%)로 구성된 원폐수는 모래와 유지를 제거한 후 생물반응조로 처리하였고, 그 후 막의 세공 막힘을 방지하고자 막모듈에 유입하기 전 500 μm 카트리지 필터로 여과하였다. 생물학적 매개변수로 수리학

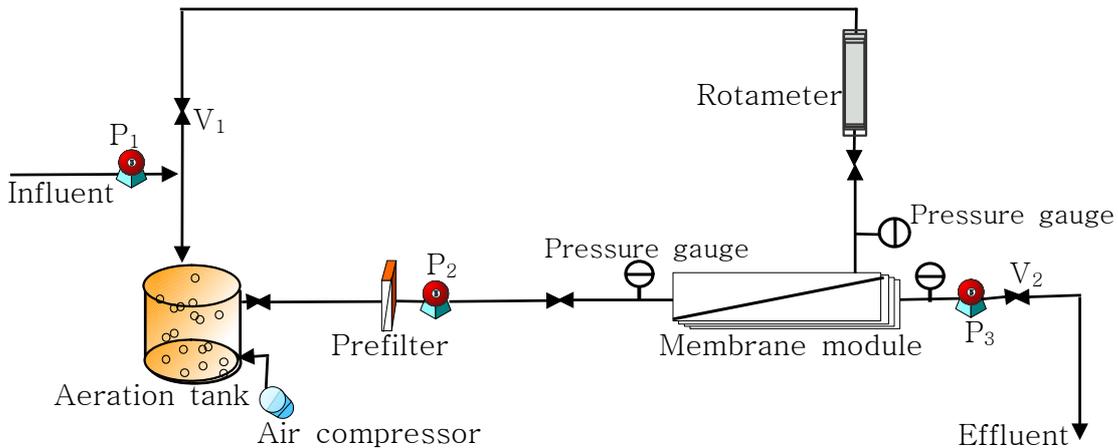


Fig. 1. Schematic of membrane bioreactor

적체류시간(hydraulic retention time, HRT)은 24시간으로 유지하였고, 슬러지체류시간(solid retention time, SRT)은 60일로 일정하게 유지하였다.

결과 및 고찰

유속 4m/s에서 TMP를 0.4 bar로 일정하게 유지시키면서 30분 동안 운전하여 안정된 투과플럭스를 얻은 후, 15분 경과할 때마다 TMP를 0.2 bar씩 증가시켜 TMP의 단계적 증가에 따른 투과플럭스의 변화를 조사하여 Fig. 2에 나타내었으며, 유속을 1~4 m/s로 변화시켜 유속 증가에 따른 플럭스와 임계 TMP를 조사하였다. 각각의 유속에서 TMP의 단계적 증가에 따른 플럭스는 순수에서 보다 낮았으며, 투과 플럭스의 변화는 TMP에 따라 선형으로 증가함을 알 수 있었다. 플럭스가 선형으로 증가하는 동안 막의 표면 또는 세공 속에 용질이 흡착되어 막 오염도 증가하였다. 그러나 어느 한도의 TMP 이상에서 오염은 플럭스와 수평하게 증가하였으며 압력에는 별로 의존하지 않았다. 임계 압력은 선형 플럭스 변화에 따른 정체상태의 구분으로 정의할 수 있으며[5], 정체상태의 플럭스에서처럼 속도에 따라 대부분 선형으로 증가하였다.

연동펌프를 이용하여 투과플럭스를 50 L/m²h로 일정하게 유지시키면서 60분 동안 운전하여 안정된 TMP를 얻은 후 1시간 경과할 때마다 플럭스를 10 L/m²h씩 증가시켜 플럭스의 단계적 증가에 따른 TMP의 변화를 조사하여 Fig. 3에 나타내었으며, 유속을 1~4 m/s까지 변화시켜 유속 증가에 따른 TMP와 임계 플럭스를 조사하였다. 그 결과 90 L/m²h까지 증가시킨 각각의 플럭스에서 TMP는 적당히 상승한 반면에 플럭스를 100 L/m²h로 조절하였을 때 TMP는 안정되지 않고 급속히 상승하였다. 이러한 경우 투과 플럭스를 조절하는 연동펌프에서 일어나는 케비테이션으로 인하여 플럭스를 일정하게 유지할 수가 없었으며, Field 등[4]의 연구결과에 의하면 90과 100 L/m²h 사이의 조건하에서 임계 플럭스를 가정할 수 있다. Fig. 4에서와 같이 속도에 대한 임계 플럭스 증가율은 선형으로 나타났으며, 막 생물반응조 운전에서 supra-critical zone과 sub-critical zone의 두 지대로 구분되었다. 막 생물반응조는 화학적 세정 없이 장기간 운전되어야하므로 최적운전조건은 임계 플럭스 바로 아래의 sub-critical zone 경계층임을 알 수 있었다.

투과 플럭스를 일정하게 유지시킨 경우와 TMP를 일정하게 유지시킨 경우의 유속 4 m/s에서 각각의 실험 결과를 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 투과 플럭스를 일정하게 유지시킨 경우와 TMP를 일정하게 유지시킨 경우에서 최대 투과 플럭스는 모두 같았으며, TMP는 투과 플럭스를 일정하게 유지시킨 경우에서 더욱 안정된 값을 보였다. 임계 플럭

스에 매우 근접한 값의 플럭스에서는 안정된 TMP(0.6 bar)에 도달할 수 있었으나, 그 이상의 플럭스에서는 시간경과에 따라 TMP가 급격하게 상승하여 불안정한 상태에 이르렀다. TMP를 일정하게 유지시킨 경우와 투과플럭스를 일정하게 유지시킨 경우의 실험결과에서 관찰된 오염층의 수리학적 여과저항은 TMP를 일정하게 유지시킨 경우에서 보다 투과 플럭스를 일정하게 유지시킨 경우의 여과 실험에서 더 낮게 나타났다. 이것은 TMP를 일정하게 유지시키면서 운전한 경우의 투과플럭스가 초임계수준으로부터 감소되었고, 막의 세공은 입자들에 의하여 폐색되어 일정한 sub-critical flux에서 운전할 경우에 감소시킬 수 있었던 오염이 증가되었기 때문으로 사료된다.

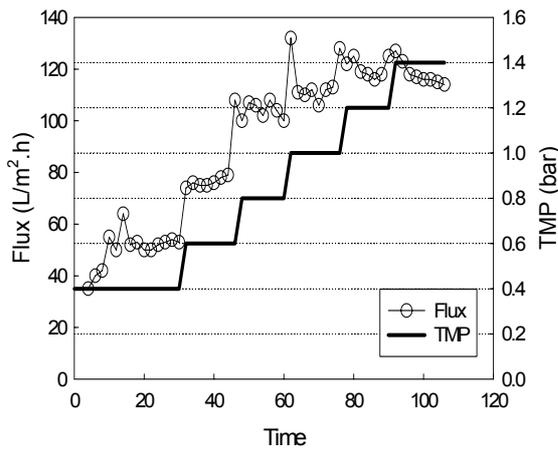


Fig. 2. Variations of permeate flux with time under step increments of transmembrane pressure, $u=4$ m/s, $T=20^{\circ}\text{C}$, SS at 10 g/L.

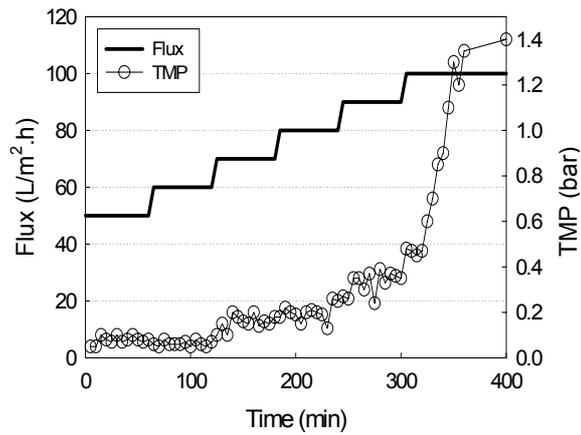


Fig. 3. Variations of transmembrane pressure with time under step increments of permeate flux, $u=3$ m/s, $T=20^{\circ}\text{C}$, SS at 10 g/L.

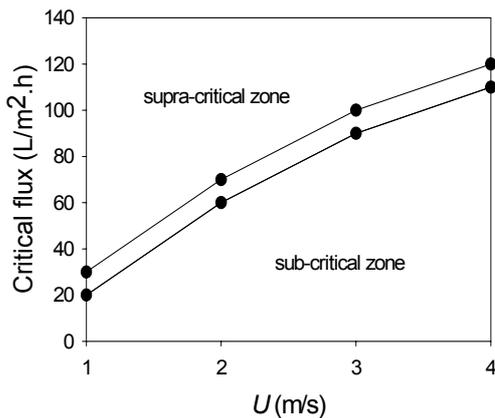


Fig. 4. Variations of critical flux with circulation velocity, $T=20^{\circ}\text{C}$, SS at 10g/L.

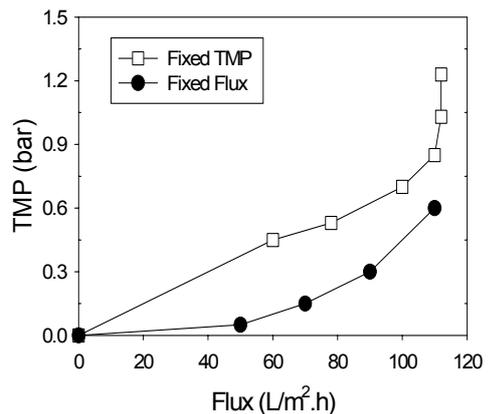


Fig. 5. Comparison between filtrations at fixed TMP and at fixed permeate flux, $\mu=4$ m/s, $T=20^{\circ}\text{C}$, SS at 10g/L.

결론

막 생물반응조를 이용하여 TMP를 일정하게 유지시킨 경우와 플럭스를 일정하게 유지시킨 경우의 여과방식에 따른 실험을 수행한 결과, 여과 초기단계동안의 과도한 막 오염을 피할 수 있는 일정한 투과 플럭스 여과방식이 더 효과적이었다. 투과 플럭스를 일정하게 유지시킨 실험에서 속도에 대한 임계 플럭스는 선형으로 증가하였으며, supra-critical zone과 sub-critical zone의 두 지대로 구분되었다. 막 생물반응조를 화학적 세정 없이 장기간 운전하기 위한 최적운전조건은 일정한 투과플럭스 여과방식에서 임계 플럭스 바로 아래의 sub-critical zone 경계층임을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. Behac, J.P., Boutin, P., Mercier, B., and Nuer, P., "Traitement des eaux usees", Eyrolles, Paris(1984).
2. Krauth, K.H. and Staab, K.F., "Pressurised bioreactor with membrane filtration for wastewater treatment", *Water Res.*, **27**, 405(1993).
3. Yamamoto, K., Hiasa, M., Mahmood, T. and Matsuo, T., "Direct liquid-solid separation using hollow fiber membrane in anactivated sludge aeration tank", *Water Sci. Technol.*, **21**, 43(1989).
4. Field, R.W., Wu, D., Howell, J.A. and Gupta, B.B., "Critical flux concept for microfiltration fouling", *J. Membrane Sci.*, **100**, 259(1995).
5. Beaubien, A., Baty, M., Jeannot, F., Francoeur, E. and Manein, J., "Design and operation of anaerobic membrane bioreactors: development of a filtration testing strategy", *J. Membrane Sci.*, **109**, 173(1996).