

## 플럭스 향상을 위한 막생물반응조의 운전조건에 관한 연구

김선일\*

조선대학교 화학공학과

(sibkim@chosun.ac.kr\*)

## A Study on the Operation Condition of Membrane Bioreactor for Flux Improvement

Sun-Il Kim\*

Dept. of Chemical Engineering, Chosun University

(sibkim@chosun.ac.kr\*)

## 서론

도시의 하·폐수는 대규모 생물학적 반응조에서 호기성 박테리아에 의하여 오염물질의 자연분해를 증진시키는 활성슬러지공법[1]을 이용하여 주로 처리되고 있다. 그러나 물과 유사하고 일정하지 않은 밀도를 지닌 부유물질 분리의 어려움으로 인하여 처리 효율에 한계가 있다. 더구나 침강 농도는 5 g/L 정도이며 거대한 탱크를 필요로 하고, 다량의 과잉 슬러지를 생산하여 그것을 처리하는데 총 처리비용의 50%가 소비되고 있다. 따라서 침강조를 대신하여 고 수질 처리수를 추출할 수 있는 막을 이용한 분리공정의 기술적 개선이 요구된다. 막 생물반응기(membrane bioreactor; MBR)의 장점은 BOD 및 COD의 제거효율이 높고 과잉 슬러지 생산이 작으며[2], 폐수처리 설비의 총 규모는 생물반응기 크기의 감소와 침강조의 부재로 인하여 설비비용이 저렴하고 20 g/L 이상의 고농도 폐수처리에도 적용 가능하다[3]. 그러나 현재 MBR 처리공정의 총 운전비용은 투과 플럭스를 향상시키기 위한 비용이 감소되지 않는 한 기존의 처리공정보다 높고, 막 유닛은 적어도 8~10일간의 장기간동안 화학적 세정 없이 운전되어야만 한다. Field 등[4]은 이스트 셀 현탁액 정밀여과 실험을 토대로 하여 “임계 플럭스”라는 흥미로운 개념을 제안하였다. 그들은 일정한 압력과 일정한 투과 플럭스 실험을 비교하여 시간의 경과에 따른 플럭스 감소가 일어나지 않는 플럭스 바로 아래를 임계 플럭스로 규정하였으며, 반면에 그보다 위에서 오염도를 관찰하였다. 이러한 현상은 플럭스를 고정시킨 실험에서 관찰되었고, 막을 통과하는 압력은 대체적으로 일정하거나 약간 증가하였다. 임계 플럭스의 결정은 막 생물반응기를 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 생물반응기의 최적 운전조건을 알아보기 위해 일정한 TMP와 일정한 플럭스 여과방식에 따른 각각의 성능을 비교하고자 한다.

## 실험

본 연구에서는 생물반응기의 유효체적을 12 L로 일정하게 유지하기 위해서 유입펌프 P<sub>1</sub>을 이용하여 원수 유입량을 조절하였으며, 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 막은 공경 0.1 μm의 세라믹 관형막이며, 드럼펌프 P<sub>2</sub>에 의하여 유입수의 유속을 조절하여 막에 유입시켰다. 플럭스를 고정시킨 실험에서는 연동펌프 P<sub>3</sub>에 의하여 투과플럭스를 조절한 반면에, TMP를 고정시킨 실험에서는 밸브 V<sub>1</sub>과 V<sub>2</sub>를 이용하여 적정 압력으로 조절하였으며 막의 입구, 출구 및 투과측에서 압력을 측정하였다. 생물학적 처리는 생물반응조 하부에서 압축공기를 세공 튜브를 통하여 슬러지로 공급하여 호기성 조건에서 수행하였다. 원폐수는 축산폐수(75%)와 산업폐수(25%)로 구성하여 전처리(모래와 유기 제거)한 후 생물반응기로 처리하였고, 그 후 막의 세공 막힘을 방

지하고자 막모듈에 유입하기 전 500  $\mu\text{m}$  카트리지 필터로 여과하였다. 생물학적 매개변수는 수리학적체류시간(HRT) 24시간 및 슬러지체류시간(SRT) 60일로 일정하게 유지하였으며, 그 결과 20일 운전 후 부유물질농도(SS)는 약 10 g/L로 안정되었다.

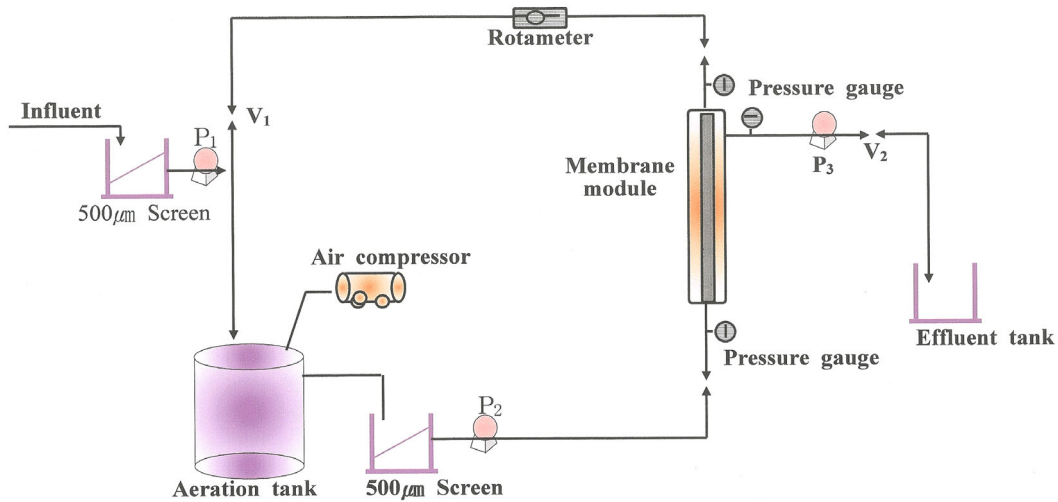


Fig. 1. Schematic of membrane bioreactor.

## 결과 및 토론

### 1) TMP를 고정시킨 여과

먼저 TMP를 30분동안 0.4 bar로 맞추어서 안정한 플럭스를 얻은 후, 플럭스가 압력에 영향을 받지 않을 때까지 15분 증가할 때마다 0.2 bar씩 상승시켜 1~5 m/s까지 서로 다른 유속에서 TMP의 단계적 증가에 따른 투과 플럭스의 변화를 조사하였다. 그 결과를 Fig. 2에 나타낸바와 같이 TMP에 따른 투과 플럭스의 변화는 각각의 유속에서 TMP에 따라 선형으로 증가하였으며, 각각의 유속에 대하여 선형으로 증가한 절정을 Fig. 3에 나타내었다. 플럭스는 순수에서 보다 낮았으며, 플럭스가 선형으로 증가하는 동안 막의 표면 또는 세공 속에 용질이 흡착되어 오염은 일정하게 나타났다. 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 증가하는 임계압력을 Fig. 3에 나타내었다.

### 2) 투과 플럭스를 고정시킨 여과

먼저 안정된 TMP를 얻고자 연동펌프를 이용하여 투과플럭스를 60분동안 50 L/m<sup>2</sup>h로 조절하였다. 그 후 1시간 경과할 때마다 플럭스를 10 L/m<sup>2</sup>h씩 증가시켜 1~4 m/s까지 서로 다른 유속에서 투과 플럭스의 단계적 증가에 따른 TMP의 변화를 조사하였다. 그 결과 90 L/m<sup>2</sup>h까지 증가시킨 각각의 플럭스에서 TMP는 적당히 상승한 반면에 플럭스를 100 L/m<sup>2</sup>h로 조절하였을 때 TMP는 안정되지 않고 급속히 상승하였다. 이러한 경우 투과 플럭스를 조절하는 연동펌프에서 일어나는 캐비테이션으로 인하여 플럭스를 일정하게 유지할 수가 없었으며, Field 등[4]의 제안에 따르면 90과 100 L/m<sup>2</sup>h 사이의 조건하에서 임계 플럭스를 가정할 수 있다. Fig. 4에 나타낸바와 같이 속도에 대한 임계 플럭스 증가 간격은 선형적이었으며, 막 생물반응기 운전에서 supra-critical zone과 sub-critical zone의 두 지대로 구분되었다. 막 생물반응기는 화학적 세정 없이 장기간

운전되어야하므로 최적인전조건은 sub-critical zone 경계층 위, 임계 플럭스 바로 아래 상태임을 알 수 있었다.

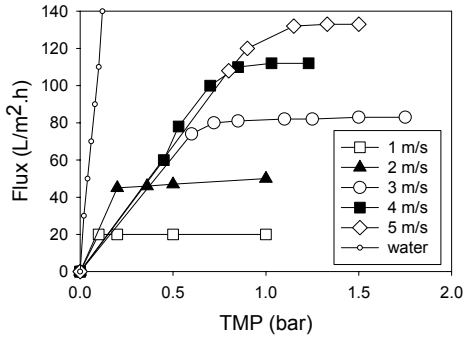


Fig. 2. Variations of stabilized permeate flux with TMP for different circulation velocities, T=20°C, SS at 10 g/L.

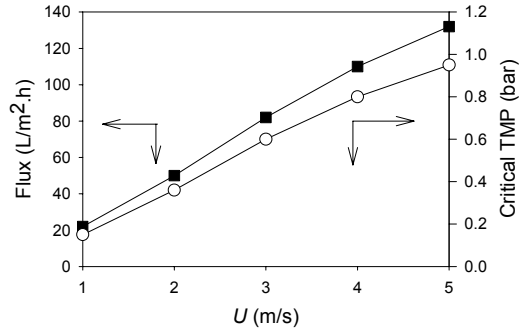


Fig. 3. Variations of limiting flux and critical pressure with circulation velocity, T=20°C, SS at 10 g/L.

3) 고정시킨 투과 플럭스와 TMP 실험의 비교

유속 4 m/s에 대하여 고정시킨 투과 플럭스와 TMP 실험의 비교결과를 Fig. 5에 나타내었다. 양쪽의 플럭스와 TMP는 안정된 값을 보였으며, 최대 투과 플럭스는 양쪽의 경우 같았다. 임계 플럭스에 매우 근접한 값의 플럭스는 낮은 TMP(0.6 bar)에 도달할 수 있었으나, 약간의 플럭스 증가는 시간에 따라 급격하게 상승하는 TMP에서 불안정한 상태에 이를 수 있다. 동일한 투과 플럭스와 TMP에서 관찰할 수 있는 오염층의 수리학적 여과저항은 고정시킨 TMP에서 보다 고정시킨 투과 플럭스 여과 실험에서 더 낮았다. 그러므로 일정한 TMP에서 플럭스는 초임계수준으로부터 감소하고, 막의 세공은 입자들에 의하여 폐색되어 일정한 sub-critical flux에서 운전할 때 피할 수 있었던 심각한 오염을 증가시키게 된다.

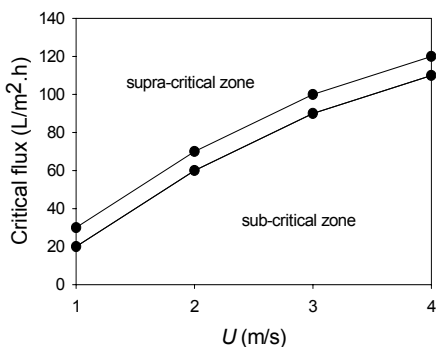


Fig. 4. Variations of critical flux with circulation velocity, T=20°C, SS at 10g/L.

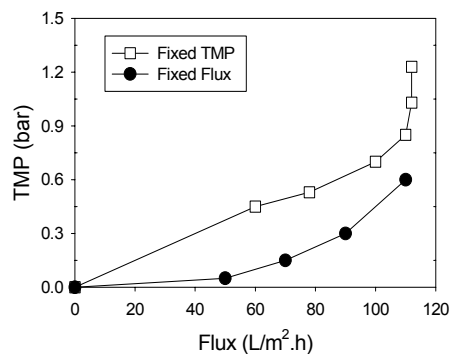


Fig. 5. Comparison between filtrations at fixed TMP and at fixed permeate flux,  $\mu=4$  m/s, T=20°C, SS at 10g/L.

### 결론

막 생물반응기를 이용하여 일정한 TMP와 일정한 플럭스 여과방식에 따른 실험을 수행한 결과, 일정한 TMP에서보다 일정한 투과 플럭스에서 여과하는 것이 여과의 초기 단계동안 과도한 오염을 피할 수 있으므로 바람직하다는 것을 확인하였다. 투과 플럭스를 고정시킨 실험에서 속도에 대한 임계 플럭스 증가 간격은 선형적이었으며, supra-critical zone과 sub-critical zone의 두 지대로 구분되었다. 막 생물반응기는 화학적 세정 없이 장기간 운전되어야하므로 TMP를 고정시키는 것보다 플럭스를 고정시켜 운전하는 것이 효과적이며, 최적운전조건은 sub-critical zone 경계층 위, 임계플럭스 바로 아래상태임을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

1. J.P. Behac, P. Boutin, B. Mercier, P. Nuer, *Traitement des eaux usees*(1984), Eyrolles, Paris.
2. K.H. Krauth, K.F. Staab, *Water Res.*(1993), **27**, 405.
3. K. Yamamoto, M. Hiasa, T. Mahmood, T. Matsuo, *Water Sci. Technol*(1989)., **21**, 43.
4. R.W. Field, D. Wu, J.A. Howell, B.B. Gupta, *J. Membrane Sci.*(1995), **100**, 259.
5. A. Beaubien, M. Baty, F. Jeannot, E. Francoeur, J. Manein, *J. Membrane Sci.* (1996), **109**, 173.