

## SM-SBR 공정과 MBR 공정의 막 여과 특성에 관한 비교

홍준호, 김선일\*  
 조선대학교 화학공학과  
 (sibkim@mail.chosun.ac.kr\*)

**Comparison of Submerged Membrane Coupled with Sequencing Batch Reactor Process  
 and Membrane Bioreactor Process for Membrane Filtration Characteristic**

Joon-Ho Hong, Sun-Il Kim\*  
 Department of Chemical Engineering, Chosun University  
 (sibkim@mail.chosun.ac.kr\*)

**서론**

산업의 발달과 인구의 도시 집중현상에 의해 하·폐수 발생량이 급속하게 증가하고 있고 이로 인해 방류 하천의 자정 작용의 한계를 넘어 심각한 수준의 환경오염을 유발하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 우리나라를 비롯하여 전세계적으로 하·폐수의 고도 처리에 관한 수처리 공정이나 새로운 수자원 확보 및 용수의 재활용에 대한 관심이 고조되고 있다. 이에 기존 생물학적 하·폐수 처리 공정인 활성슬러지 공정(activated sludge process)의 침전조를 분리막으로 대체한 막 결합형 활성슬러지 공정(MBR, Membrane Bioreactor)이 등장하여, 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

한편 각종 오염물질에 의한 수질오염 문제가 크게 대두되면서, 부영양화(eutrophication)의 직접적 원인이 되는 영양염류(nitrogen and phosphorus)의 제거를 위한 고도처리 공정이 요구하고 있으며, 용수의 재활용 가능한 수질을 충족시키기 위해서도 유기물 및 영양염류 제거의 고도처리 공정이 필수적이다.

따라서 본 연구에서는 MBR 공정의 장점에 생물학적 영양염류 제거(BNR, Biological Nutrient Removal) 중에 하나인 SBR(Sequencing Batch Reactor) 공정을 도입한 고효율 소규모 폐수처리 공정으로서의 침지형 막 결합 연속 회분식 반응조(SM-SBR, Submerged Membrane coupled with Sequencing Batch Reactor)를 이용하여 수자원 재활용 시스템으로서의 적용가능성을 막 여과 특성을 기준으로 알아보려고 하였다.

**실험**

본 연구에서는 유기물과 영양염류 동시 제거가 가능한 SM-SBR 공정의 운전주기 변화에 따른 막 여과 특성에 대해 알아보았다. 일정한 투과플럭스(permeate flux)에서 운전주기를 6, 8, 12 hr/cycle로 변화시켜 운전하여 투과압력(TMP, Transmembrane Pressure)을 관찰하였다. 또한 SM-SBR 공정의 성능 평가를 위하여 동일한 운전 주기의 MBR 공정 실험을 수행하여 막 여과 특성을 비교 검토하였다.

SM-SBR 공정 주기의 시간적 변화에 따라 수리학적 체류시간(HRT, Hydraulic Retention Time)이 결정되며, 이 HRT의 변화에 따른 운전조건에서의 막 여과 특성은 일정한 투과플럭스(30 L/m<sup>2</sup>hr)에서 투과압력을 관찰하여 이를 지표로 하였다. 한편 MBR 공정에서 막 오염(fouling)은 수리학적 인자들뿐만 아니라, 생물학적 인자들에 의해서도 영향을 받게 되는데, 일반적으로 운전조건이나 활성슬러지의 특성에 따라 활성슬러지 플록이 깨지면서 나오는 용존 유기물 및 콜로이드성 입자들이 투과플럭스에 제한 요소로 작용하며 이러한 용존 유기물 및 콜로이드 입자의 주된 구성 성분은 미생물이 분리하거나 또는 미생물이 용혈(cell lysis)되면서 나오는 EPS(Extracellular Polymeric

Substances)인 것으로 보고되고 있다. 이때 유출되는 EPS는 막 표면에 쌓이면서 겔 층(gel layer)를 형성하여 막 오염에 커다란 영향을 미치게 된다. 또한 EPS가 존재하면 오히려 bioflocculation에 방해가 되어 침강성이 좋지 않아지고, 점도 상승을 유발하여 막의 오염을 유발한다고 보고되어 있다[2]. 그래서 막 오염 유발 물질로 알려져 있는 EPS의 정량 분석 등을 통해 막 오염 정도에 대해 관찰하였다.

반응조는 투명 아크릴 재질의 유효 부피(effective volume) 27 L, 운전주기당 처리 부피(working volume) 9 L인 직사각형(30×30×45 cm) 구조로 제작하고 분리막은 정밀여과(MF, Microfiltration) 중공사형 막 모듈(SUR234LF, Mitsubishi Rayon Co., Japan)을 사용하였다. 실험 중 분석 물질의 농도를 일정하게 유지하기 위하여 합성폐수를 제조하였다. 탄소원으로는 glucose(200 mg/L as COD)를, 질소원 및 인산원으로는 각각 NH<sub>4</sub>Cl(40 mg/L as N)과 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>(5 mg/L as P)를, 완충 용액으로는 NaHCO<sub>3</sub>(150 mg/L as CaCO<sub>3</sub>)를 사용하였고, 미생물의 성장에 관련된 미량의 무기 영양물질을 첨가하였다.

한편 SM-SBR 공정 및 MBR 공정의 운전조건은 Table 1에 나타내었으며, 운전주기 변화에 따른 각 공정의 단위 주기(1 cycle)당 배분시간을 Figure 1에 나타내었다.

또한 활성슬러지 플록에서 EPS의 추출 방법은 여러가지가 있으나 본 실험에서는 EPS를 미생물의 용혈이 적고 추출 효율이 가장 양호한 방법으로 알려져 있는 열처리법[3]을 이용하여 추출하였으며, 추출된 EPS는 단백질(protein)과 다당류(carbohydrate) 성분을 측정하여 MLVSS(g/L)에 대한 값으로 환산하여 총량[4]하였다. 단백질 성분은 lowry 법에 의해 측정하였으며, 다당류는 phenol-sulfuric acid 법으로 측정하였다.

Table 1. Operating Condition for the Experiment

Operating Condition	Value
Temperature (°C)	20 ~ 25
Flux (L/m <sup>2</sup> hr)	30
TMP (kPa)	< 30
Air flow rate (L/min)	6
DO (mgO <sub>2</sub> /L)	< 6
MLSS (mg/L)	4,000 (±500)
SRT (day)	30
Effective volume (L)	27
Working volume (L)	9
Pulsation time (min)	5 / 1

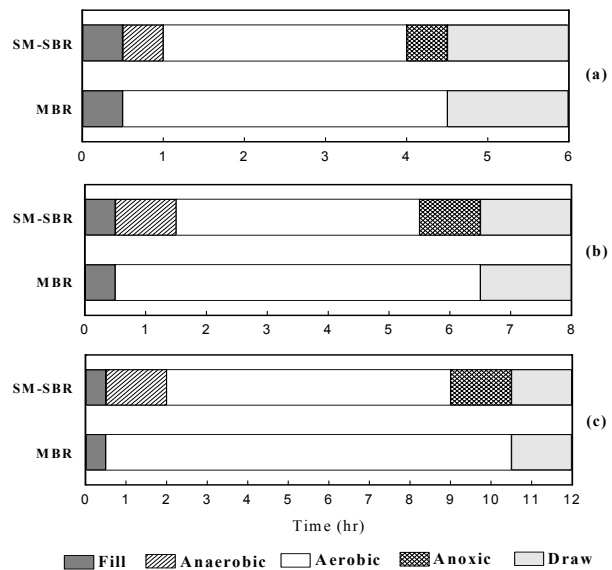


Figure 1. Operating time of each other process cycle((a) 6, (b) 8, (c) 12 hr/cycle).

## 결 과

SM-SBR 공정과 MBR 공정의 일정 투과플럭스(30 L/m<sup>2</sup>hr)에서 운전주기 변화에 의한 HRT 증가에 따른 막 여과 특성을 알아보려고 투과압력을 관찰하여 Figure 2에 나타내었다.

운전주기 6 hr/cycle에서는 짧은 HRT로 인하여 SM-SBR 공정 및 MBR 공정의 투과압력이 급격히 증가되었으며, 이는 짧은 HRT로 인하여 막 표면에 케이크 층 형성이 빠르게 진행되고 막 여과 단계전의 호기 조건에서 공기 방울에 의한 케이크 층 탈착이 원활하게 이루어지지 않아 막 오염을 유발한 것이라 사료된다. 그리고 SM-SBR 공정의 운

전주기 변화에 의한 HRT 증가에 따른 운전기간(Figure 2(a))은 HRT 18 hr(6 hr/cycle)인 경우 6 일간 운전 후 투과압력 30 kPa에 도달하였으며, HRT를 24 hr(8 hr/cycle), 36 hr(12 hr/cycle)로 증가시킬수록 각각 12 일, 20 일로 운전기간이 연장되었다. MBR 공정의 운전주기 변화에 의한 HRT 증가에 따른 운전기간(Figure 2(b))은 HRT 18 hr(6 hr/cycle)인 경우 6 일간 운전 후 투과압력 30 kPa에 도달하였으며, HRT를 24 hr(8 hr/cycle), 36 hr(12 hr/cycle)로 증가시킬수록 각각 15 일, 26 일로 운전기간이 연장되었다.

생물학적 인자로서 막 오염 유발 물질로 알려져 있는 EPS의 정량 분석 등을 통해 앞서 살펴본 SM-SBR 공정 및 MBR 공정에서 운전주기 변화에 의한 투과압력의 변화 원인에 대해 알아보았다. EPS의 주성분과 미생물 농도와의 관계로부터 운전조건에 따른 EPS 총량(mg/g VSS)을 계산하여 Figure 3에 나타내었다. SM-SBR 공정과 MBR 공정에서 운전주기 증가에 의한 HRT가 증가함에 따라 EPS 총량(mg/g VSS)은 감소되었으며, 이것은 기존 미생물에서는 EPS가 축적되어 증가하게 되지만 새롭게 합성된 미생물에서는 EPS가 소량 존재하기 때문인 것으로 사료된다.

또한 운전주기가 6, 8, 12 hr/cycle로 증가할수록 SM-SBR 공정과 MBR 공정의 EPS 총량(mg/g VSS)의 차이가 크게 나타났으며, 12 hr/cycle에서 EPS총량(mg/g VSS)은 각 공정에서 77.8 및 69 mg/gVSS로 나타나 MBR 공정에서 EPS가 더 적게 분비되었음을 알 수 있었다. 용존산소 농도증가에 따라 EPS가 증가한다는 신 등[4]의 연구 결과와 비교할 때 본 연구에서는 유출수의 용존산소가 SM-SBR 공정보다 높은 MBR 공정의 EPS 총량(mg/g VSS)이 더 낮게 나타나 상반된 결과를 보였다. 이것은 SM-SBR 공정의 운전주기 내의 혐기 및 무산소 단계에서의 미생물의 활성과 대사과정 등이 달라져 이러한 현상이 일어난 것으로 사료된다.

Figure 4에 각 공정의 운전주기 변화에 따른 EPS 내 탄수화물과 단백질의 정량비(C/P, carbohydrate/protein ratio)를 나타내었다.

Mukai 등[5]의 연구에서는 막 결합형 생물 반응 공정에서 EPS 내 단백질에 대한 탄수화물의 비(P/C)가 큰 반응조에서 투과수량이 낮게 나타났으며, 본 연구 공정에서도 운전주기가 증가함에 따라 단백질에 대한 탄수화물의 비(C/P)가 감소하므로 막 오염이 감소되어 운전기간을 연장시킬 수 있었다. 신 등[6]의 연구에서는 낮은 EPS에서도 단백질에 대한 탄수화물의 비율(C/P)에 따라 막 오염에 미치는 영향이 현저하게 달라지므로 침지형 막분리 반응조 운전시 EPS 총량뿐만 아니라 EPS 내 단백질 농도를 관찰하는 것이 중요하다고 하였다.

## 결론

본 연구에서는 유기물과 영양염류를 동시에 제거하기 위해 침지형 막 결합 연속 회분식 반응조(SM-SBR)를 이용하여 운전주기 변화에 따른 막 여과 특성을 조사하였다. 또한 SM-SBR 공정의 성능 평가를 위해 동일한 운전주기에서 MBR 공정 실험을 수행하여 운전주기 변화에 따른 막 여과 특성을 비교 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. SM-SBR 공정 및 MBR 공정에서 운전주기 변화에 의한 HRT를 증가시킴으로써 막의 운전 기간의 연장을 유도할 수 있었으며, 기존 MBR 공정에서 제거할 수 없는 영양염류가 제거 가능한 SM-SBR 공정이 더 효율적이라 사료된다.

2. 막 오염에 있어 생물학적 인자로 잘 알려져 있는 EPS의 정량을 통해 막 여과 특성에 대해 규명할 수 있었으며, 특히 본 연구의 SM-SBR 공정의 운전주기가 증가할수록 HRT가 증가하게 되고 이로써 EPS 내 단백질에 대한 탄수화물의 비(C/P, carbohydrate/protein ratio)가 감소하였으며, 막 오염이 느리게 진행되어 운전기간을 연장시킬 수 있었다. 따라서 침지형 막분리 반응조 운전시 EPS 총량뿐만 아니라 EPS 내 단백질 농도를 관찰하는 것이 중요하다고 사료되며 EPS의 주 성분 물질의 관한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. M. Mulder, Basic principle of membrane technology, Kluwer, London(1986).
2. Urbain V. J.C. Block, and J. Manem. Bioflocculation in activated sludge; An analytic approach." *Wat. Res.*, **27**, 829(1993).
3. Brown M. J., Lester H. N., Comparison of bacterial extracellular polymer extraction methods, *Appl. Environ. Microbiology*, **40**, 179(1980).
4. H. S. Shin, S. T. Kang, S. Y. Nam, Effect of carbohydrate to protein ratio in EPS on sludge settling characteristics, *Biotech. Bioprocess Eng.*, **5**, 460(2000).
5. Mukai T. et al., Ultrafiltration behavior of extracellular and metabolic products in activated sludge system with UF separation process, *Proc. Asian Waterqual '97*, Seoul, 1499(1997).
6. H. S. Shin, H. Y. An, S. T. Kang, Fouling factors in submerged membrane bioreactor(I), *J. KSWQ*, **15**, 415(1999).

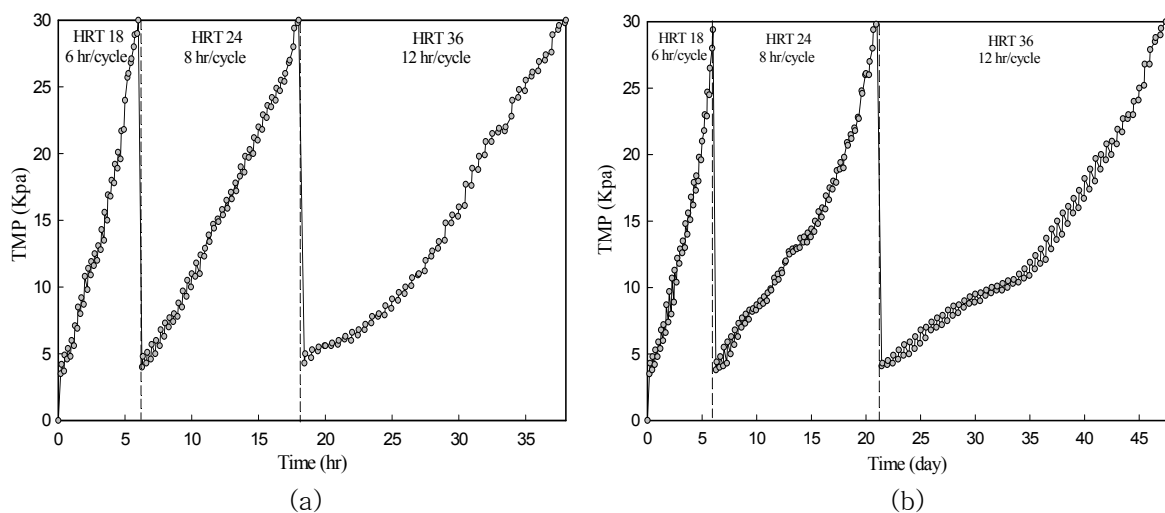


Figure 2. Variation of TMP of each cycle in the (a) SM-SBR, (b) MBR at constant flux(30 L/m<sup>2</sup>hr).

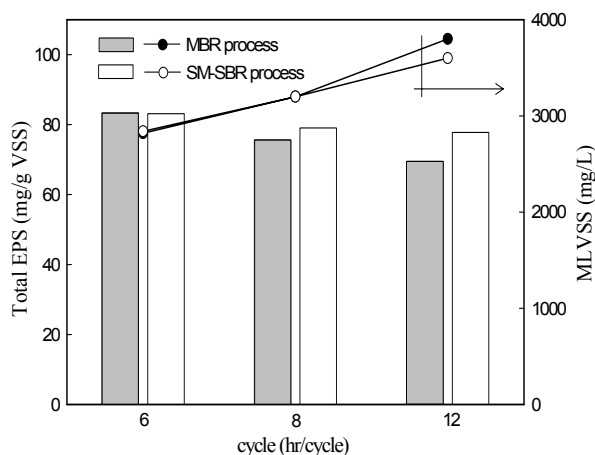


Figure 3. Variation of total EPS and MLVSS in cycle for each process.

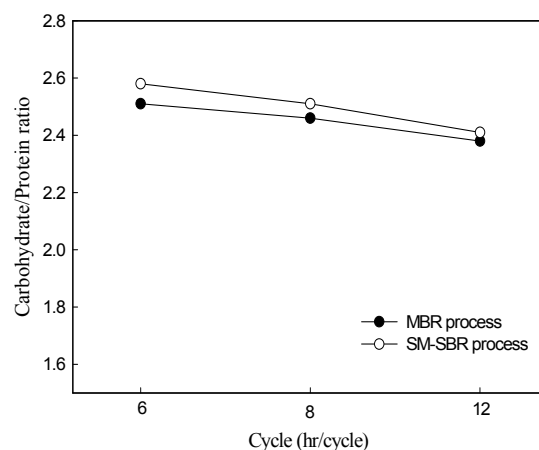


Figure 4. Variation of carbohydrate and protein concentration in the amount of total EPS for each process.