

## 중력여과 방식의 MBR을 이용한 하수처리에서 HRT 변화에 따른 EPS의 거동과 막오염에 대한 영향

김시원 · 광성진 · 이의신\* · 홍승모\* · 민경석\*

경북대학교 환경공학과

\*대우건설 기술연구소

## Behavior and Influence of EPS on Membrane Fouling by Changing of HRT in MBR with Gravitational Filtration

SI-Won Kim · Sung-Jin Kwak · Eui-Sin Lee\* · Seung-Mo Hong\* · Kyung-Sok Min\*

Department of Environmental Engineering, Kyungpook National University

\*DAEWOO E&C CO., LTD Institute of Construction Tech.

(Received 23 March 2006, Accepted 19 July 2006)

### Abstract

The behavior and influence of EPS on membrane fouling by changing of hydraulic retention time was investigated, using lab. scale submerged membrane bio-reactor, which was operated with gravitational filtration and fed supernatant of primary sedimentation in waste water treatment plant as influent. The membrane was adopted micro-filter of polyethylene hollow fiber. EPS was analysed as polysaccharides and protein especially, into soluble and bound EPS separately. The concentration of soluble EPS was increased at short HRT, then membrane fouling was rapidly progressed and flux was depressed. The most of EPS clogged membrane pore were polysaccharides, while protein was important parameter affected on membrane fouling because of it's more accumulating in the more term operating.

**keywords** : Extracellular polymeric substances (EPS), Gravitational filtration, Polysaccharides, Protein

### 1. 서론

침지형 분리막의 사용은 MBR(membrane bioreactor) 공정의 소요동력을 줄이게 되었고, 하·폐수 처리에 있어서 분리막의 적용 잠재력을 높였다(Rosenberger et al., 2002). 분리막의 여과방식에 있어서도 중력을 이용한 여과방식은 소요동력을 더욱 줄이면서도 안정적인 운전 및 처리수질을 확보할 수 있었다(Ueda et al., 1999).

그러나 분리막의 오염은 여전히 MBR공정의 적용에서 가장 큰 제한요소로 작용하고 있으며, 이를 해결하기 위해 많은 연구가 수행되어 왔다(Ye et al., 2005; Kimura et al., 2005; Chang et al., 2002; 이 등, 2005). 특히 미생물의 대사작용에 의해 생성되는 체외고분자물질(extracellular polymeric substances, EPS)과 용해성대사산물(soluble microbial products, SMP)이 최종 처리수질의 악화와 막오염에 영향을 준다고 보고 되면서, 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(차 등 2004; Nuengjamnong et al., 2005; Meng et al., 2006).

생물학적 처리에서 미생물 대사산물을 연구하는 학자들은 크게 두 부류로 나눌 수 있다. Biofilm과 floc 특성에

관심을 가진 연구자들은 주로 EPS에 대해 연구하여 왔으며, 유출수의 수질과 슬러지 생산량에 관심을 가진 연구자들은 주로 SMP와 inert biomass를 대상으로 연구하여 왔다(Laspidou et al., 2002). 지금까지 EPS와 SMP 연구자들은 연구의 목표와 바라보는 관점이 서로 달랐으므로 이를 해석하는 방법에도 차이가 있었다. Laspidou 등(2002)은 EPS와 SMP에 대해 통합이론을 제시하였으며, bound EPS와 soluble EPS로 구분하여 설명하면서 모든 soluble EPS는 UAP(substrate-utilization-associated products)와 BAP(biomass-associated products)이며, 결국 soluble EPS와 SMP는 같은 것이라고 하였다. 또 bound EPS와 UAP는 기질의 소비에 비례하여 직접 생성되고 bound EPS는 BAP로 가수분해 된다고 하였다.

일단의 연구자들은 급격한 기질의 소모와 성장은 EPS를 덜 생산하는 것으로 보고하였다(Evans et al., 1994; Wolfaardt et al., 1999). 즉 EPS 생성율은 기질소비율과 반비례한다는 것이다. 그러나 또 다른 연구자들은 정반대의 결과를 보고하였다(Turakhia et al., 1988). 따라서 EPS와 미생물 성장속도(또는 기질소비속도)는 미생물체의 종류와 시스템의 조건에 상관관계가 있는 것으로 보인다.

차 등(2004)의 연구결과에 의하면 soluble EPS는 유기물 부하율(organic loading rate)이 증가할수록 축적이 빨랐으며

\* To whom correspondence should be addressed.  
ksmin@knu.ac.kr

그만큼 막오염도 빠르게 진행되어 투과유속의 저하를 가져온다고 하였다.

Nuengiamnong 등(2005)은 침지형 MBR에서 슬러지 플록의 extractable EPS와 supernatant DOC로 구분하여 SRT에 따른 농도변화와 막오염에 대한 영향을 연구하였다. EPS는 다당류, 단백질, DNA, RNA 및 기타 세포잔류물 등으로 구성되지만, 주로 다당류와 단백질이 대부분이다. 다당류에 비하여 단백질에는 음하전의 아미노산이 상당량 포함되어 있어 칼슘과 같은 다가 양이온과 결합하여 안정한 플록구조를 가지는데 중요한 요소로 작용한다(Laspidou et al., 2002). Meng 등(2006)은 EPS가 membrane permeability에 가장 큰 영향을 주며, 그 중에서도 단백질이 중요한 역할을 한다고 하였다.

여러 연구자들에 의해 EPS가 막오염에 중요한 영향인자로 작용한다는 것은 명확한 사실로 확인되고 있으나, 다양한 운전요소의 변화에 따른 EPS의 거동이나 EPS가 막오염에 미치는 직접적인 영향 또는 그 기작의 해석 등에 대한 연구결과는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 하수처리 침지형 MBR 공정에서 중력을 이용한 여과방식의 막운전을 채택하였으며, 이 때 HRT의 변화에 따라 EPS 중 다당류와 단백질의 거동을 살펴보고, 이들이 직접적으로 막오염에 끼치는 영향을 정량화하여 EPS와 막오염의 상관관계를 규명하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구의 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 반응조는 7.6 L의 유효용적으로 아크릴로 제작하였으며, 막모듈을 반응조 내에 침지하고, 막투과압(transmembrane pressure, TMP)은 중력을 이용하기 위해 막모듈의 헤드부와 유출부를 관으로 연결하고, 포기조의 수위와 유출부의 수두차를 일정하게 유지하였다. 실험에 사용한 막은 폴리에틸렌 재질의 유효공경 0.4  $\mu\text{m}$ 의 중공사형 MF막으로, 자세한 사양은 Table 1에 나타내었다. 막표면에 생성되는 cake에 의한 저항을 최소화하기 위해 막모듈 하부에 공기 산기장치를 설치하고 20 L/min의 양으로 주입하여 산소공급, 교반 및 전단응력

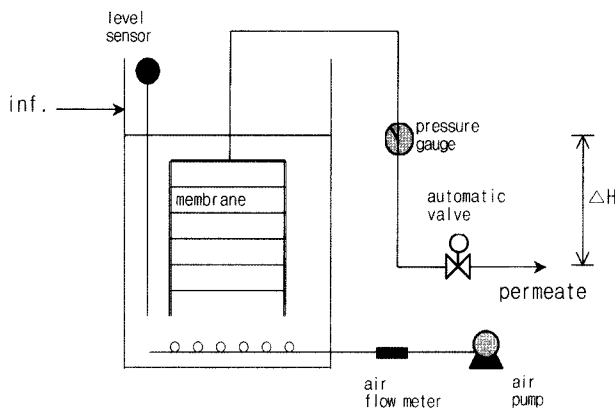


Fig. 1. Schematic diagram of membrane bioreactor.

Table 1. Specification of membrane

Parameter	Specification
Material	Polyethylene
Mean pore size ( $\mu\text{m}$ )	0.4
Effective area ( $\text{m}^2$ )	0.2
Module size (mm)	250L×220W×50T

에 의한 cake의 형성이 억제되도록 하였다. 막의 운전은 포기조에 설치된 수위센서에 의해 고수위에서 자동밸브가 열려 막투과수가 유출되고 저수위에서는 닫혀 유출이 없는 방식의 운전이 되도록 하였다. 막투과압은 3 kPa로 고정되도록 포기조와 유출부의 수위차( $\Delta H$ )를 45 cm로 유지하였다.

유입원수는 현장 적용성을 높이기 위해 D시 B하수처리장의 1차 침전지 유출수를 사용하였다. Table 2에 유입수의 분석자료를 나타내었다.

Table 2. Characteristics of influent

Items	concentration*(mg/L)
SS	55.9
TCOD <sub>Cr</sub>	131
SCOD <sub>Cr</sub>	75
TOC	17.5
BOD	58
TKN	29
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	26
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.6
TP	4.0
SP	3.3

\* Mean value during experimental period.

### 2.2. 실험방법

실험에 사용한 종 슬러지는 D시 B하수처리장의 반송슬러지를 사용하였으며, 반응조에 투입하여 MLSS를 10,000 mg/L로 농축한 후 일정기간의 적응기간을 두어 안정상태(steady state)가 되었다고 판단되었을 때부터 본 연구를 위한 분석을 수행하였다. 반응조의 MLSS는 실험 전기간에 걸쳐 약 10,000 mg/L로 유지하였다. 반응조의 운전조건은 Table 3에 나타내었는데, 다른 모든 조건은 일정하게 유지한 상태에서 수리학적 체류시간(HRT)만 12, 6, 4 시간으로 다르게 조정하였다. 막투과수의 flux는 TMP가 3 kPa로 일정한 상태에서 운전기간에 따라 점차 감소하게 되어 유출유량이 유입유량보다 낮아지게 되면 운전을 정지하였다.

막저항의 증가로 운전을 종료한 후 막의 투과성능에 영

Table 3. Experimental condition

Mode	I	II	III
HRT (hr)	12	6	4
Influent loading rate (L/hr)	0.63	1.26	1.9
Reactor volume (L)	7.6		
MLSS (mg/L)	10,000		
TMP (kPa)	3 ( $\Delta H=45\text{cm}$ )		
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	20		
Aeration intensity (L/min)	20		

향을 미치는 각 여과저항의 분포를 알아보기 위해 막을 회수하여 flux와 막투과압을 측정하였다. 이 때 더 이상의 고형물이 유출되지 않을 때 까지 흐르는 물로 세정하여 cake 층을 제거하였으며, 초음파 세척(200 W, 2 hr)으로 gel층을 제거하였고, 0.1 N NaOH 수용액으로 막세공을 오염시킨 EPS를 24시간 용출하였으며, 500 mg/L의 차아염소산소다 용액에 24시간 침지하여 나머지 오염물질이 세정된다고 가정하고, 각 단계마다 동일한 막투과압하에서 증류수를 사용하여 플럭스를 측정하였으며, 아래의 여과저항식을 이용하여 여과저항을 여섯 종류로 나누어 각 여과저항의 비를 산출하였다.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_t} \quad (1)$$

$$R_t = R_c + R_g + R_{EPS} + R_{fc} + R_m \quad (2)$$

여기에서

$\Delta P$  = 막투과압 (Pa)

$\mu$  = 투과액의 점도 (Pa · sec)

$R_t$  = 전체 저항

$R_c$  = cake에 의한 저항

$R_g$  = gel 층에 의한 저항

$R_{EPS}$  = EPS에 의한 막세공 오염 저항

$R_{fc}$  = EPS를 제외한 막세공 오염 저항

$R_m$  = 막자체의 저항

EPS 분석을 위해 본 실험에서는 NaOH 추출법을 사용하였으며, 포기조의 현탁액 10 mL를 채취하여 4,000 rpm에서 10분간 원심분리한 후, 상정수의 EPS를 soluble EPS로 가정하였다. 침전물에 0.1 N NaOH 수용액 10 mL를 주입하여 10분간 교반한 후, 4,000 rpm에서 10분간 원심분리한다(Nagaoka, 1996). 이러한 EPS 용출과정을 4회 반복하여 40 mL의 추출액을 확보한 후, 이를 bound EPS로 보고 분석하였다. 또 EPS는 다당류와 탄수화물로 나누어 다당류는 glucose를 표준물질로 phenol-황산법(Dubois et al., 1956)을 사용하여 정량하였으며, 단백질은 Lowry method(Lowry et al., 1951)를 사용하여 정량분석하였다. 기타 분석항목은 수질오염공정시험방법과 standard methods(APHA, 1998)에 따라 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. HRT 변화에 따른 EPS의 거동

Fig. 2에는 수두차를 이용한 중력으로 발생하는 3 kPa의 일정한 투과압하에서 운전기간 동안 flux의 변화를 나타내었다. 막투과압을 상승시키면 운전일수를 늘일 수 있겠지만, 본 실험은 일정한 투과압에서 flux의 감소경향을 보기 위한 것이므로 막투과유속이 유입유속보다 낮아지면 운전을 중단하고 각 여과저항의 분포를 알아보기 위해 2.2절에

서 언급한 방법대로 막세정을 실시하였다. Table 4에는 각 mode별 운전일수와 총처리유량 및 유기물부하율(organic loading rate)과 누적부하량을 나타내었다. HRT 12 hr으로 운전한 Mode I에서는 초기 막투과유속이 18.3 LMH (L/m<sup>2</sup>/hr)에서 3.6 LMH 까지 서서히 감소하여 20일간 운전 가능하였고 HRT 6 hr인 mode II에서는 6일, HRT 4시간인 mode III에서는 약 3일간으로 운전일수가 급격히 줄어들었다. 총 처리유량에서도 mode I에서는 20일 동안 총 302 L, mode II에서는 6일 동안 총 181 L, mode III에서는 3일 동안 총 136 L를 처리하였다. 따라서 HRT가 일정 규모이상 유지되어야 운전일수도 증가하며, 막이 처리할 수 있는 총 유량도 증가함을 알 수 있다.

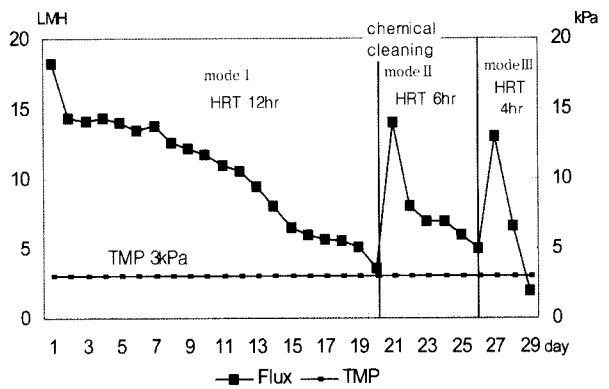


Fig. 2. Variation of flux during operational period.

Table 4. Organic loading at each mode

Mode	I	II	III
Operating term (day)	20	6	3
Total permeate (L)	302	181	136
OLR (organic loading rate, kg/m <sup>3</sup> /d)	0.25	0.62	0.91
Total organic loading (kg/m <sup>3</sup> )	4.89	3.70	2.72

Mode I에서 OLR은 0.25 kg/m<sup>3</sup>/d로 제일 낮지만 20일 동안 투입된 총누적부하량은 4.89 kg/m<sup>3</sup>으로 가장 높게 나타났다. 이는 HRT가 길면 유기물 처리속도는 늦지만 막의 운전가능일수가 길어지므로 막의 1회 세척까지 처리할 수 있는 유기물 총량은 오히려 증가한다는 것을 의미한다. 바꾸어 말하면, 막의 운전기간은 유기물 부하량보다는 처리유량에 크게 좌우된다는 것을 의미하며, 동일한 막투과압, 동일한 고형물 농도(MLSS) 하에서 막투과유량이 많을수록, 막표면에 고형물에 의한 cake가 빠르게 형성되는 것으로 판단된다.

Fig. 3에는 운전기간동안 soluble EPS와 bound EPS 중 다당류와 단백질의 거동을 나타내었다. Soluble EPS 중 다당류의 농도는 20~200 mg/L 정도로 변화가 심하나 대체적으로 단백질에 비해 약 5배 이상으로 많이 존재하였다. HRT가 짧아짐에 따라 다당류의 농도는 증가하는 경향을 보이며 이는 단백질에서도 같은 경향을 나타내어, 유기물 부하가 증가되면 soluble EPS가 막오염에 큰 영향을 줄 것으로 추론할 수 있다.

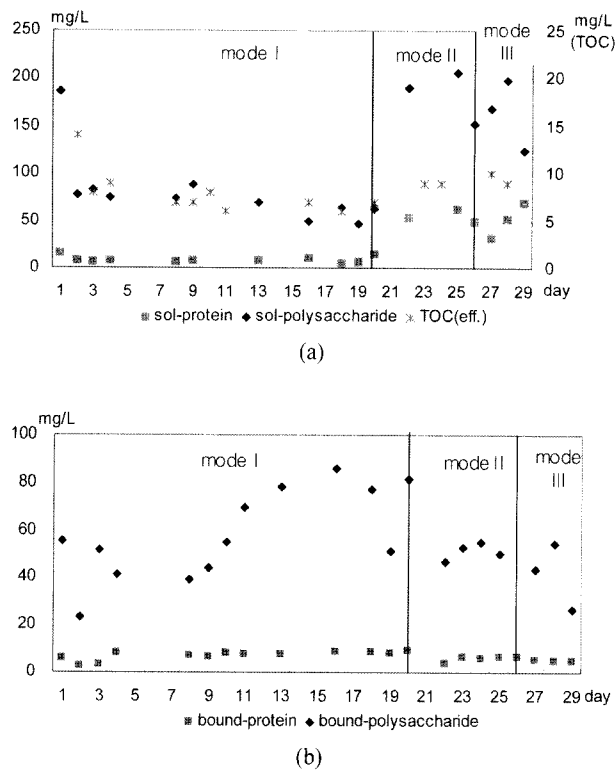


Fig. 3. Fate of soluble and bound EPS (a) soluble EPS, (b) bound EPS.

한편 bound EPS를 살펴보면 단백질은 일정한 농도를 나타내고 다당류의 농도는 상대적으로 높으며 편차가 심한 편이지만 bound EPS는 soluble EPS에 비해 대체적으로 HRT와는 무관하게 일정한 농도를 유지하고 있는 것으로 보인다. Sutherland(1999)와 Davis 등(1998)에 의하면 EPS를 용해시키는 효소인 polysaccharide lyase는 어떤 계기가 되면 능동적으로 분비되어 EPS를 용해시킴으로써 생물막의 파괴나 예기치 못한 sloughing 현상이 일어난다고 하였다. Davis 등(1998)은 여기에서 어떤 계기를 두 가지로 설명하였다. 첫 번째는 cell 내부에 폐기될 물질(이산화탄소나 유기산)이 축적될 경우로, 이는 pH의 저하나 영양염류 부족 등을 야기한다. 또 다른 하나는 cell의 밀집농도가 높을 경우로, 이 때에도 효소를 방출하여 생물막의 경우 matrix의 붕괴(disintegration)나 탈리현상(sloughing)이 일어난다. 본 실험에서도 HRT가 짧아지면 미생물의 성장속도가 증가하여 cell의 밀집농도가 높아지게 되고, 이것이 어떤 계기로 작용하여 polysaccharide lyase가 능동적으로 분비되어 다당류를 분해함으로써 bound EPS는 어느 정도 일정하게 유지되는 반면에 soluble EPS, 특히 soluble protein의 농도가 증가하는 것으로 추정되며 이는 앞에서 설명한 Sutherland와 Davis의 설명과 일치하는 것으로 판단된다.

### 3.2. EPS와 막오염의 영향

막에 미치는 각 저항값의 비를 구하기 위하여 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = R_c + R_g + R_{EPS} + R_{fc} + R_m = \frac{\Delta P}{\mu J_c} \quad (3)$$

각 세척 단계마다의 flux와 TMP의 관계식도 식 (3)과 같은 형식으로 나타내면

$$R_g + R_{EPS} + R_{fc} + R_m = \frac{\Delta P}{\mu J_g} \quad (4)$$

$$R_{EPS} + R_{fc} + R_m = \frac{\Delta P}{\mu J_{EPS}} \quad (5)$$

$$R_{fc} + R_m = \frac{\Delta P}{\mu J_{fc}} \quad (6)$$

$$R_m = \frac{\Delta P}{\mu J_m} \quad (7)$$

식 (3)에서 식 (7)를 까지를 각각 서로 빼주고, 식 (1)로 다시 나누어 주면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$R_c/R_t = 1 - \frac{J_c}{J_g} \quad (8)$$

$$R_g/R_t = \frac{J_c}{J_g} - \frac{J_c}{J_{EPS}} \quad (9)$$

$$R_{EPS}/R_t = \frac{J_c}{J_{EPS}} - \frac{J_c}{J_{fc}} \quad (10)$$

$$R_{fc}/R_t = \frac{J_c}{J_{fc}} - \frac{J_c}{J_m} \quad (11)$$

$$R_m/R_t = \frac{J_c}{J_m} \quad (12)$$

각 세척 단계마다 flux를 측정하고, 위 식 (8)부터 식 (12)을 이용하여 전체저항에 대한 각저항의 비를 구하였다.

Fig. 4에는 HRT 12시간과 6시간의 운전 후 막을 회수하여 측정된 저항값의 비를 나타내었다. 역시 슬러지 cake에 의한 저항( $R_c$ )이 60% 이상으로 가장 크게 나타났고, EPS에 의한 저항( $R_{EPS}$ )은 약 13%로 비교적 낮게 나타났다. 본 실험에서는 막여과압을 3 kPa로 낮게 유지하여 운전시간을 3일, 6일 및 20일로 짧게 하였지만, 운전시간이 길어진다면 EPS에 의한 오염은 누적될 것이므로 이에 의한 저항( $R_{EPS}$ )의 비중은 점점 커질 것으로 사료된다. HRT가 변환에 따라 cake에 의한 저항( $R_c$ )은 HRT 12시간에 비해 HRT 6시간에서 상대적으로 낮아지고 대신 EPS에 의한 저항( $R_{EPS}$ )과 EPS를 제외한 막체공 오염저항( $R_{ic}$ )이 증가하는 것으로 나타났다. 막자체저항( $R_m$ )도 증가하는 것으로 나타났다는데, 이는 막의 재사용빈도가 많아질수록 화학약품세정을 하여도 완전히 회복되지 않기 때문으로 생각된다.

Fig. 5는 막운전을 정지한 후 초음파세척으로 겔층까지 제거한 다음 0.1 N NaOH 수용액으로 막으로부터 EPS를 용출하여 다당류와 단백질을 분석하고, 각각의 값은 두 값의

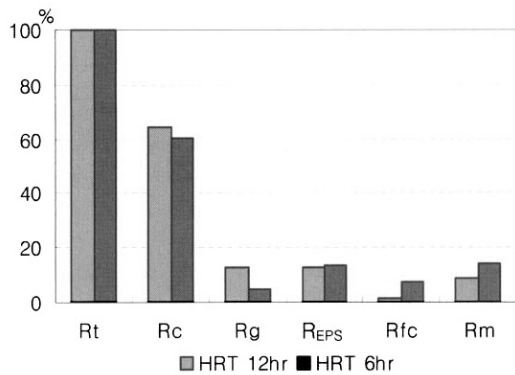


Fig. 4. Membrane fouling resistance ratio at different HRT.

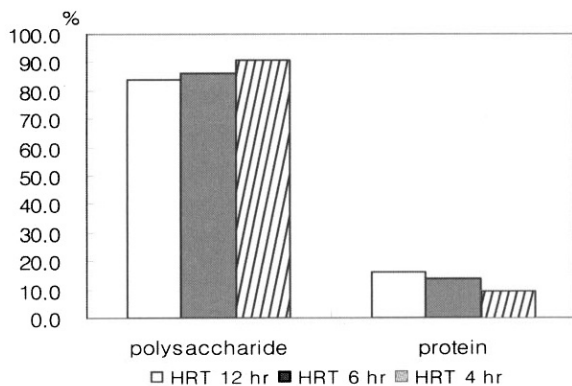


Fig. 5. Comparison of polysaccharides and protein among membrane pollutants with HRT changes.

합에 대한 백분율로 나타내었다. 다당류에 의한 막오염이 약 84~90%를 차지할 정도로 대부분이나 HRT가 커질수록 다당류의 비중은 줄고 단백질에 의한 오염비중이 증가하는 양상을 보였다. 이는 HRT 12시간의 운전시간이 약 20일로 가장 길었으므로, 운전시간이 길수록 단백질이 막세공에 축적된다는 것을 의미하게 되고, 장기간 운전시에는 단백질이 막오염에 끼치는 영향이 점차 증가할 것이라는 점을 짐작할 수 있다.

#### 4. 결론

실험실 규모의 중력여과방식의 침지형 MBR 공정 운전에서 HRT 변화에 대한 EPS의 거동과 막오염에 미치는 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- HRT가 짧을수록, 또는 유기물부하율이 높을수록 더 빠른 soluble EPS의 증가를 나타내었으나, bound EPS는 일정농도를 유지하였다. 증가된 soluble EPS는 더 빠른 막오염을 야기하며 이로 인해 flux의 급격한 감소가 나타났다.
- 생물반응조내 soluble EPS 중에서는 다당류가 단백질에 비해 5배 이상의 농도로 존재하며 막오염에도 더 큰 영향을 미치나, 운전시간이 길어질수록 막세공에 축적되는 단백질의 양이 증가하면서 이에 의한 막오염의 비중이 점차 높아지는 경향을 보였다.

- 분리막의 여과저항은 cake에 의한 저항이 가장 크게 나타났으나, HRT가 짧아질수록 EPS에 의한 저항( $R_{EPS}$ )과, EPS를 제외한 막세공 오염저항( $R_{fc}$ )이 빠르게 높아지는 것을 확인하였다.
- MBR공정에서 막의 세척주기를 늘이기 위해서는 EPS, 다당류와 단백질과 등에 의한 막오염을 제어할 수 있는, 화학약품을 이용한 역세 또는 세정방법 등에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업 Eco-STAR Project의 수처리선진화사업단의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

이우녕, 이정학, MBR 공정에서 막오염 완화제가 막여과 특성에 미치는 영향, *Applied Chemistry*, **9**(1), pp. 273-276 (2005).

차기철, 유영욱, 김동진, 유익근, MBR 공정에서 유기물 부하율의 변화에 따른 SMP와 ECP의 거동, *대한환경공학회지*, pp. 211-218 (2004)

APHA, AWWA, WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., Washington D.C. (1998).

Chang, I. S., Le Clech, P., Jefferson, B. and Judd, S., Membrane Fouling in Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment, *Journal of Environmental Engineering*, **128**(11), pp. 1018-1029 (2002).

Davis, D. G., Parsek, M. R., Pearson, J. P., Iglewski, B. H., Costerton, J. W. and Greenberg, E. P., The Involvement of Cell-to-cell Signals in the Development of a Bacterial Biofilm, *Science*, **280**, pp. 295-298 (1998).

Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F., Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances, *Analytical Chemistry*, **28**(3), pp. 350-356 (1956).

Evans, E., Brown, M. R. W. and Gilbert, P., Iron Chelator, Exopolysaccharide and Protease Production in *Staphylococcus Epidermidis* : A Comparative Study of the Effects of Specific Growth Rate in Biofilm and Planktonic Culture, *Microbiology*, **140**, pp. 153-157 (1994).

Kimura, K., Yamato, N., Yamamura, H. and Watanabe, Y., Membrane Fouling in Pilot-Scale Membrane Bioreactors (MBRs) Treating Municipal Wastewater, *Environ. Sci. Technol.*, **39**, pp. 6293-6299 (2005).

Laspidou, C. S. and Rittmann, B. E., A Unified Theory for Extracellular Polymeric Substances, Soluble Microbial Products, and Active and Inert Biomass, *Water Research*, **36**, pp. 2711-2720 (2002).

Lowry, O. H., Rosebrough, N. J., Farr, A. L. and Randall, R. J., Protein Measurement with the Folin Phenol Reagent, *J. Biol. Chem.*, **193**, pp. 265-275 (1951).

- Meng, F., Zhang, H., Yang, F., Zhang, S., Li, Y. and Zhang, X., Identification of Activated Sludge Properties Affecting Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactors, *Separation and Purification Technology* (2006) (accepted).
- Nagaoka, H., Ueda, S. and Miya, A., Influence of Bacterial Extracellular Polymers on the Membrane Separation Activated Sludge Process, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(9), pp. 165-172 (1996).
- Nuengjamnong, C., Kweon, J. H., Cho, J. W., Polprasert, C., and Ahn, K. H., Membrane Fouling Caused by Extracellular Polymeric Substances during Microfiltration Processes, *Desalination*, **179**, pp. 117-124 (2005).
- Rosenberger, S., Kruger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U. and Kraume, M., Performance of a Bioreactor with Submerged Membranes for Aerobic Treatment of Municipal Wastewater, *Water Research*, **36**(2), pp. 413-420 (2002).
- Sutherland, I. W., *Biofilm Polysaccharides*, In : Wingender, J., Neu, T. R., Flemming H-C, editors, Microbial Extracellular Polymeric Substances : Characteristic, Structure and Function., Berlin: Springer, pp. 1-258 (1999).
- Turakhia, M. H. and Characklis, W. G., Activity of *Pseudomonas aeruginosa* in biofilms : effect of calcium., *Biotech. Bioeng.*, **33**, pp. 406-414 (1988).
- Ueda, T. and Hata, K., Performance of a Bioreactor with Submerged Membranes for Aerobic Treatment of Municipal Waste water, *Water Research*, **33**(12), pp. 2888-2892 (1999).
- Wolfaardt, G. M., Lawrence, J. R. and Korber, D. R., Function of EPS. In: Wingender, J., Neu, T. R., Flemming, H-C, editors, Microbial Extracellular Polymeric Substances: Characterization, Structure and Function, Springer, Berlin, pp. 1-258 (1999).
- Ye, Y., Le Clech, P., Chen, V., Fane, A. G. and Jefferson, B., Fouling Mechanisms of Alginate Solutions as Model Extracellular Polymeric Substances, *Desalination*, **175**, pp. 7-20 (2005).