

Microalgal-MBR과 Bacterial-MBR 운전에서 EPS 조성이 Fouling 발생특성에 미치는 영향

김태연^a · 이수현^b · 권수민^c · 황선진^{d,*}

경희대학교 일반대학원 환경응용과학과

Effects of EPS Composition on Fouling Characteristics at the Microalgal-MBR and Bacterial-MBR Process

Tae-yeon Kim^a · Su-Hyeon Lee^b · Su-min Kwon^c · Sun Jin Hwang^{d,*}

Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University

(Received 27 February 2023, Revised 16 March 2023, Accepted 20 March 2023)

Abstract

The aim of this study was to compare the fouling characteristics of Extracellular polymeric substances (EPS) secreted by *Chlorella vulgaris* with the case of Bacterial-MBR (BMBR), Microalgal-MBR (MMBR) for advanced wastewater treatment using the Laboratory scale, in order to suggest a method to minimize fouling in MMBR by identifying the effects of amounts and compositions of EPS secreted by *C. vulgaris* and bacteria in the activated sludge on fouling. Contrary to expectations, fouling occurred relatively severely in the MMBR from the beginning of the operation than in the BMBR. Reasons for such a fouling pattern were considered to be the effect of C-EPS, which accumulates on the membrane surface of MMBR 30 times more than that on the membrane surface of activated sludge (BMBR). In this respect, according to the results of this experiment and a comparative review of several previous studies, it was confirmed that unlike activated sludge, in which the ratio of P-EPS was relatively higher than that of C-EPS, in case of *C. vulgaris*, the ratio of C-EPS to P-EPS was relatively higher than that in case of activated sludge. This was presumed to be the main cause of the significant fouling phenomenon in MMBR. However, an increase in TMP with increasing C-EPS concentration was not observed.

Key words : C-EPS, Fouling, MBR, Microalgae, P-EPS

^a 연구원(Researcher), calmness90@naver.com, <https://orcid.org/0000-0003-1102-7519>

^b 연구원(Researcher), kbg03075@khu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0001-7932-9666>

^c 연구원(Researcher), sumin6169@khu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-0880-4615>

^d Corresponding author, 교수(Professor), sjhwang@khu.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0003-3865-4811>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

박테리아를 적용한 기존의 생물학적처리에서는 질소, 인 제거효율이 낮아 추가적인 고도처리공정을 필요하는데 비해, 질소, 인 제거능이 상대적으로 매우 우수한 미세조류를 적용하여 하폐수처리를 수행할 경우, 추가 공정이 불필요하고 유기물 저감도 가능하여 최근 많은 연구가 진행되고 있다(Arbib *et al.*, 2014).

대부분의 미세조류는 물과 비교했을 때 밀도 차이가 거의 없고, 박테리아에 비해 상대적으로 세포내 지질성분이 높으며, floc 생성능이 낮기 때문에, 기존 AO나 A2O로 대표되는 활성슬러지법 중 2차 침전지에서의 고액분리 같이 자연침강을 통해 처리수와 미세조류를 분리하기가 쉽지 않다. 선행연구에 의하면 미세조류를 이용한 수처리 공정에서 수확(harvesting) 비용은 전체 운전비용의 20~30%를 차지할 정도로 예상보다 많은 부분을 차지하는 것으로 알려져 있다. 이에 미세조류의 수확에 소요되는 비용을 절감하고, 보다 효율적인 수확을 위해 원심분리, 전기응집, 화학응집 등 여러 가지 수확기법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다(DOE, 2010). 최근에는 전술한 수확방법 이외에 수처리 분야에서 주목받고 있는 막(membrane)을 사용하여 미세조류 세포를 물리적으로 배지와 분리시켜 수확해 보고자 하는 시도가 진행되고 있다(Bilad *et al.*, 2014). 고액분리라는 막의 기능적 특성상, 미세조류의 낮은 침강성으로 인해 발생하는 처리수로의 wash out 없이 미세조류와 처리수를 완전히 분리할 수 있기 때문에, 침전조 없이 높은 효율로 미세조류 회수를 연속운전을 통해 달성할 수 있다.

다른 공법에 비해 비교적 높은 초기 시설비와 운영비, 그리고 분리막 오염에 따른 막힘(fouling) 현상은 Membrane Bio-Reactor (MBR)과 같은 막을 이용한 종래 하폐수처리 공정의 주된 해결과제였지만, 최근 막 제조기법의 발달과 fouling에 대응하는 운전기술이 진보함에 따라, 이제는 어느 정도 운전기술적으로 안정화된 수준이라고 할 수 있는 상황이다.

그러나 이러한 MF 막을 기반으로 하는 MBR 공정에서 빈번히 나타나는 fouling 방지 및 억제에 대한 연구 및 기술개발은 하폐수처리 목적의 활성슬러지 공정에 대한 연구에 대부분 국한되어 있고, 본 연구의 주제인 미세조류를 MBR에 적용했을 때 나타나는 fouling 현상에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 특히, 많은 종의 미세조류는 유기탄소와 무기탄소를 동시, 혹은 선택적으로 이용하는 mixotrophic 대사를 진행할 수 있는데, 무기탄소를 이용하는 광합성만을 진행하는 autotrophic 대사만 수행하는 종과 비교하였을 때, BOD 및 영양염류 제거가 탁월하고, 광합성에 의해 호기성 유지에 필요한 산소를 생산하므로, 이러한 mixotrophic 미세조류의 특성을 적절히 이용하면 매우 진보적이고 효과적인 미세조류에 의한 차세대 하폐수처리공정 개발이 기대된다.

MBR에서의 fouling 발생은 Fig. 1에 나타난 개념도와 같이 미생물이 분비하는 Extracellular polymeric substances (EPS)와 매우 높은 상관관계를 갖는 것으로 알려져 있는데,

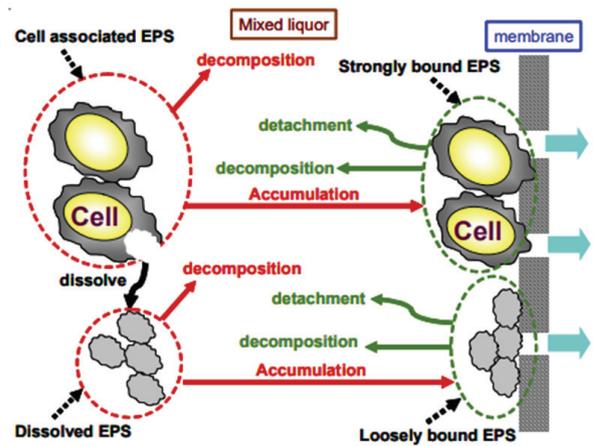


Fig. 1. A conceptual diagram of membrane fouling by EPS (Nagaoka and Akoh, 2008).

mixotrophic 대사를 수행하는 미세조류가 분비하는 EPS에 대해 조사하고, 이러한 EPS가 MBR 운전에서 있어 fouling에 미치는 영향에 대해 살펴본 선행연구 보고는 거의 없었다(Chang *et al.*, 2002; Nagaoka and Akoh, 2008).

이에 본 연구에서는 mixotrophic 미세조류를 MBR에 적용(Microalgal-MBR, MMBR)시켜 고도처리를 수행시켰을 때, fouling 발생수준 및 특징을 파악하기 위하여 MMBR 연속운전을 통해, 일반적인 MBR에서 많이 채택되는 활성슬러지 박테리아를 근간으로 하는 Bacterial-MBR (BMBR) 운전결과와 비교분석 하였다. 또한, fouling 발생기작과 관련하여, 미세조류 및 활성슬러지가 분비하는 EPS의 종류 및 조성 차이를 규명하고, 이를 통해 향후 MMBR 운전에서 발생하는 fouling을 최대한 억제시킬 수 있는 방안을 EPS 관점에서 제시하고자 연구를 진행하였다.

2. Materials and Methods

2.1 실험장치의 구성

2.1.1 실험에 사용한 미세조류 및 슬러지

MMBR에 식종한 미세조류는 *C. vulgaris*로, mixotrophic 대사가 가능하며, 환경에 대한 적응력이 높고 성장속도가 비교적 빠른 종으로 알려져 있다. 뿐만 아니라 세포 내 지질 함량비가 다른 미세조류 종에 비해 비교적 높아 바이오연료와 같은 바이오매스 생산에 많이 활용되고 있는 종이다. *C. vulgaris*는 Korean collection for type culture (KCTC)에서 종을 분양받은 후, MBBM (Modified Bold's Basal Medium)를 이용하여 25℃ 항온배양기에서 계대배양을 통해 유지된 종을 사용하였으며, 반응조 운전초기 MLSS가 800 mg/L가 되도록 조정하여 식종시킨 후 운전하였다. BMBR에 식종한 활성슬러지는 S-하수처리장의 폭기조에서 채취한 후, 회분식으로 glucose를 탄소원으로 1주일간 적정배지에서 순응시킨 활성슬러지를 운전초기 MLSS가 800 mg/L가 되도록 조정하여 식종시킨 후 운전하였다.

2.1.2 MBR 장치 구성

두 종류의 MMBR 및 BMBR 장치에 적용한 막은 Chlorinated polyvinyl chloride (CPVC) 재질의 연구용 평막 모듈이었으며, 유효 막 면적 0.0162 m^2 ($9 \text{ cm} \times 9 \text{ cm}$), 평균공극 크기 $0.1 \mu\text{m}$ 의 MF 막을 사용하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이, 두 MBR 반응조의 용적은 약 4.6 L이었고, working volume은 약 3.6 L이었으며, 아크릴 반응조를 사용하였고, 두 반응조 모두 항온챔버에 설치 후 온도를 25°C 로 유지해 주었으며, pH 컨트롤러를 사용하여 $0.1 \text{ N H}_2\text{SO}_4$ 와 0.1 N NaOH 를 주입하며 반응조의 pH를 7~7.5로 유지시켜 주었다. 그리고 미세조류 및 활성슬러지의 대사를 위한 탄소원 공급 및 폭기를 실시하고, 실제 현장과 같이 폭기에 의한 막 표면의 cake 층 탈리를 유도하기 위해 막모듈 하부에 산기관을 설치한 후 0.4 vvm 강도로 폭기를 실시하였다.

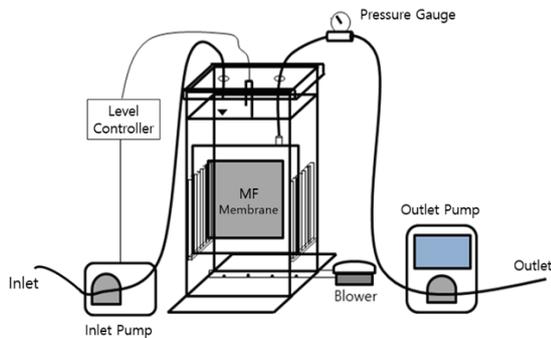


Fig. 2. A conceptual diagram of the MBR setting.

MBR 운전은 sequencing batch reactor 운전으로 8분간의 미생물 성장과 파울링 억제를 위한 폭기를 동반한 운전과 2분간의 폭기가 없는 휴지기를 두고, 15 LMH 에 해당하는 유출수를 정량유출시켰다. HRT는 17 시간이었으며, pressure data logger 기능이 있는 자동압력 측정계(Sensys Co., model SBS)를 통해 막간 차압(Transmembrane Pressure, TMP)을 측정하여, fouling 발생정도를 평가하였다. 본 실험에서의 막 한계차압은 임계플럭스 측정실험을 통해 도출된 25 kPa 로 설정하였다(Le Clech et al., 2003).

두 MBR에 유입시킨 배지의 탄소원은 glucose를 100 mg-OC/L , 무기탄소원으로 KHCO_3 를 72 mg-IC/L 가 되도록 제조하여 연속으로 유입시켰으며, 질소, 인과 미량 영양염류는 NH_4Cl 25 mg-N/L , KH_2PO_4 2.5 mg-P/L , 그리고 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 90 g/L , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 6 g/L , $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.5 g/L , $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 6.5 g/L , $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.7 g/L , $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.1 g/L , $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 1.9 g/L , $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 6.5 g/L , H_3BO_3 0.1 g/L , $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.6 g/L , yeast extract 1 g/L 를 1 ml/L 의 농도로 넣어, 두 MBR에 연속적으로 유입시켜 주었으며, MLSS는 800 mg/L 를 유지하도록 하였다. 또한 *C. vulgaris*의 mixotrophic 및 autotrophic 대사에 필요한 광은 *C. vulgaris*가 식종된 MMBR에만 Bar-LED를 사용하여 $130 \text{ Photosynthesis Photon Flux Density (PPFD)}$ 의 광도로 빛을 조사해 주었으며, 활성슬러지가 식종된 BMBR에는 광을 조

사하지 않았다.

2.2 분석방법

EPS는 존재하는 형태에 따라 soluble-EPS (sEPS)와 bound-EPS (bEPS)로 구분되는데, sEPS를 추출할 때는 시료를 $3700 \text{ Relative centrifugal force (RCF)}$ 의 강도로 30분간 원심분리한 후, 상등액을 전량 GF/C 여지에 여과하여 이때의 여액을 sEPS 시료로 하였다. bEPS 시료는 여러 참고문헌에서 제시된 열처리법을 사용하여 추출하였는데, sEPS 시료를 추출할 때 원심분리 후 침전된 세포에 0.9% NaCl 수용액을 같은 부피로 채워 재현탁시킨 후, 105°C 오븐에 넣어 약 1시간 열처리 하였으며, 이를 상온까지 식힌 후 3700 RCF 의 강도로 30분간 원심분리, 상등액을 GF/C 여지에 걸러 이때의 여액을 bEPS 시료로 하였다(Chang and Lee, 1998; Wang et al., 2009). 또한, EPS의 70~80% 이상이 다당류와 단백질이 차지한다고 알려져 있기 때문에, 본 연구에서는 EPS를 측정할 때, 다당류와 단백질을 측정하여 대표치로 사용하였으며, 다당류 측정방법으로는 페놀황산법, 단백질 측정방법으로 BCA (Bicinchoninic acid method)법을 이용하였다(Dignac et al., 1998; Houghton and Stephenson, 2002).

다당류 sEPS 측정시에는 기질로서 미처 대사되지 못한 glucose가 sEPS로 측정되는 것을 방지하기 위해, 포도당, 과당 등 환원당만을 선별적으로 검출 및 정량할 수 있는 Dinitrosalicylic acid method (DNS)법을 활용하여 glucose를 별도로 정량하여, 페놀황산법을 통해 정량된 다당류 값에서 DNS method를 통해 정량된 환원당들의 측정치를 빼주었다. 본 연구에서는 EPS를 각각 다당류 형태의 sEPS (C-sEPS), 다당류 형태의 bEPS (C-bEPS), 단백질 형태의 sEPS (P-sEPS), 단백질 형태의 bEPS (P-bEPS)로 구분하여 분석하였다.

3. Results and Discussion

3.1 BMBR과 MMBR의 fouling 발생특성

광조사를 제외한 나머지 조건이 동일한 상태에서 MMBR과 BMBR의 fouling 특성을 파악하기 위한 11일간의 시간에 따른 TMP 경시변화 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

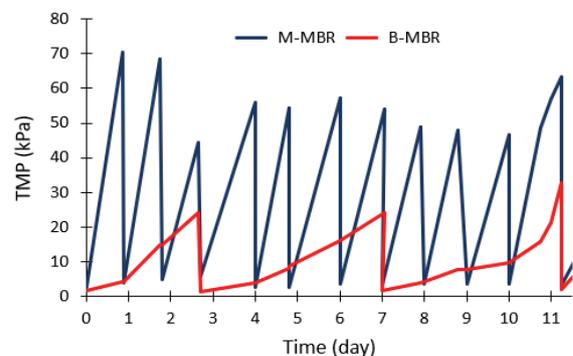


Fig. 3. TMP variations in the MMBR and BMBR.

MBBR에서는 TMP 상승이 상대적으로 매우 완만(최대 약 30 kPa)했으며, 한계차압인 25 kPa에 도달하는데는 3~5일 정도의 시간이 소요된 반면, MMBR에서는 24시간 이내에 한계차압을 현저하게 넘는 최대 70 kPa의 높은 TMP가 발생하였다. 뿐만 아니라 MMBR의 경우에는 발생한 높은 TMP를 확인 후 막 세척을 실시하여 TMP를 회복시키더라도, 변함없이 빠른 속도로 TMP가 상승함을 확인할 수 있었다. 또한, TMP 변동에서 두 반응기에서의 막세척 후 TMP는 초기 TMP 값과 유사한 값으로 유지되었는데, 이는 MF 기공보다 크기가 큰 미세조류와 미생물이 MF 내부 기공을 막지 않고 막 위에 쌓였기 때문일 가능성이 언급될 수 있는데, 이와 관련해서는 입자 크기의 관점 이외에 MBR 운전기간이 단기간이었던 부분도 영향을 미쳤을 것으로 예상되어, 향후 장기운전에 따른 TMP 변화에 대한 검토도 필요하다.

실험을 시작하기 전에 다음의 이유 즉, 첫째, *C. vulgaris*의 세포 크기(10~20 μm)가 활성슬러지 내 박테리아의 크기(0.5~5 μm)에 비해 크기 때문에 pore clogging에 비교적 유리하고, 둘째, floc을 형성하며 침전하는 BMBR 활성슬러지와 달리, MMBR의 *C. vulgaris*는 floc을 활발하게 형성하지 않는데, 이러한 근거로 *C. vulgaris*의 경우, floc 형성에 가교 역할을 하는 물질인 EPS 생성량이 활성슬러지 내 박테리아에 비해 적을 것(Ding et al., 2015; Flemming and Wingender,

2010; Guo et al., 2012)이므로 MMBR의 fouling 발생 정도가 BMBR에 비해 비교적 양호할 것으로 추측하였다. 그러나, 예상과 반대로 실제 본 실험의 결과에서는 오히려 MMBR에서 더욱 극심한 fouling이 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 fouling 결과의 원인을 규명하기 위해, MBR의 fouling 발생과 가장 큰 상관관계를 갖는 것으로 알려진 EPS 발생량을 직접 측정하여 비교해 보았다.

3.2 BMBR과 MMBR의 EPS 발생량 및 조성

MMBR과 BMBR 반응조에서 각각 C-EPS를 측정한 결과를 Fig. 4에, P-EPS를 측정한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 참고로 C-EPS 측정시 완전히 대사되지 않은 glucose가 C-EPS로 측정되는 것을 보정하기 위해 DNS법으로 glucose를 측정했으나, 두 반응조 모두 대사에 이용되어 glucose는 검출되지 않았다.

두 MBR의 유입수 중 유기탄소 농도는 동일하였으나, 각 MBR에서 측정된 C-EPS 생성량은 현저한 차이가 있었음을 알 수 있었다. BMBR에서는 C-sEPS가 2~3 mg/L 수준이었으며, 이는 운전기간 중에 지속적으로 유지되었지만, MMBR에서는 C-sEPS 농도가 빠른 속도로 지속적으로 증가하였으며, 초기에 12 mg/L 정도였던 C-sEPS 농도가 8일째에는 약 70 mg/L 수준을 나타내었다. 운전 8일째에 MMBR과 BMBR의 C-sEPS

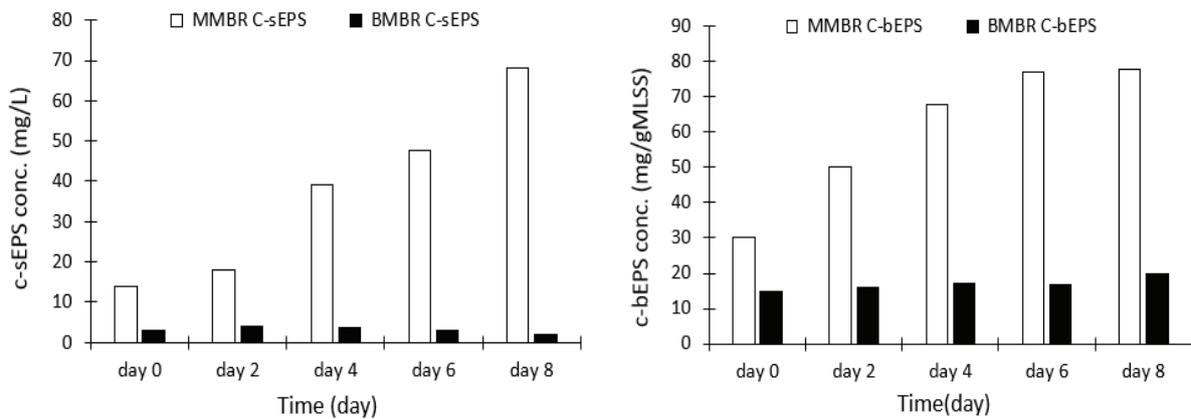


Fig. 4. C-sEPS and C-bEPS productions in the MMBR and BMBR.

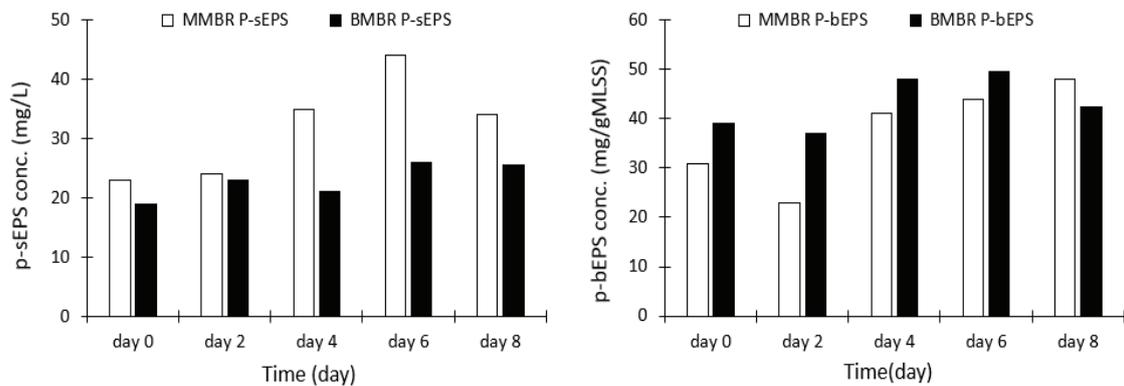


Fig. 5. P-sEPS and P-bEPS production in the MMBR and BMBR.

농도를 비교해 보면, 약 30배나 차이를 보였다.

C-bEPS에 있어서도, *C. vulgaris*의 C-bEPS 생성량이 MBR에 비해 2~4배 가량 많았음을 관찰할 수 있었다. 선행연구에 의하면, fouling에 미치는 영향은 C-sEPS가 C-bEPS에 비해 큰 것으로 보고되고 있으나, *C. vulgaris*에 비교적 약하게 결합된 loosely bound EPS (LB-EPS)가 확산되어 C-sEPS를 형성하는 등의 영향이 있기 때문에, C-bEPS도 fouling 발생에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Chang et al., 2002; Wang et al., 2009).

위와 같은 다당류 유래 C-EPS와 관련된 제반 경향을 종합하면, TMP 결과로부터 MBR이 BBR 보다 fouling에 취약함이 확인되었으며, 이에 대한 원인으로 8일간 지속적으로 CEPS 생성량이 MBR 보다 많았다는 것을 잠재적인 원인으로 고려할 수 있다고 할 수 있다. 다만, 세부적인 C-sEPS 및 C-bEPS 측정결과가 경시적으로 증가하는 경향과 TMP 경향이 부합하지 않는 점으로부터 이 둘의 상관관계는 매우 약하며, 총량적으로 fouling 성향에 기여한다고 추측된다.

한편, 다당류 외에 단백질 형태의 EPS(P-EPS)를 측정할 결과에 따르면, *C. vulgaris*와 활성슬러지 사이에 30배 가량의 큰 차이가 나타났던 C-EPS의 경우와 달리, P-sEPS의 농도는 MBR에서 후반에 다소 높은 경향을 보이긴 했으나, 20~40 mg/L 범위를 보였으며, P-bEPS 발생량은 역시 MBR에서 후반에 다소 높은 경향을 보이긴 했으나 25~45 mg/gMLSS 범위를 나타내, *C. vulgaris*와 활성슬러지 사이에 TMP에 영향을 미쳤을 것으로 판단되는 유의적인 차이가 보이지 않았다.

이상의 결과들로부터, *C. vulgaris*와 활성슬러지 MBR로부터 생성된 EPS 중에서 측정값에서 큰 차이가 나타났던 EPS는 P-EPS 보다는 C-EPS 이었기 때문에, *C. vulgaris*를 식용한 MBR의 fouling 발생은 특히 C-EPS에 의한 영향이 더 클 것으로 사료되며, C-sEPS 및 C-bEPS와 fouling 강도 사이의 상관성은 보이지 않았다고 정리할 수 있다(Chang et al., 2002; Nagaoka and Akoh, 2008).

몇몇 선행연구 보고를 보더라도, 다당류 형태의 EPS가 fouling에 미치는 영향이 단백질 형태의 EPS에 비해 특히 크다고 알려져 있다(Rosenberger, 2006; Yigit, 2008).

4. Conclusion

Mixotrophic 대사를 수행하는 영양염류 제거능이 박테리아에 비해 뛰어난 *C. vulgaris*를 배양 후 적정량을 식용한 MBR에서의 fouling 발생 정도에 미치는 C-EPS(C-sEPS, C-bEPS) 및 P-EPS(P-sEPS, P-bEPS)의 영향을, 종래 하폐수처리 목적으로 사용되어 왔던 활성슬러지 기반의 BBR과 비교운전을 통해 분석한 결과, 기대와 달리 MBR에서 BBR 보다 운전초기부터 fouling이 상대적으로 심하게 발생했다. 이러한 fouling의 주된 원인으로 본 연구에서는 *C. vulgaris*의 활성슬러지에 비해 30배 가량 막 표면에 많이 축적시키는 C-EPS의 영향인 것으로 판단하였다. 이와 관련하여, 본 실험결과 및 여러 선행연구를 비교 검토한 결과에 따르면, C-EPS에 비해 P-EPS의 비중이 *C. vulgaris* 보다 상대적으로 높았던

활성슬러지와 달리, *C. vulgaris*는 P-EPS에 비해 C-EPS의 비중이 활성슬러지 보다 상대적으로 높았다는 것을 확인할 수 있었고, 이것을 MBR에서의 현저한 fouling 현상을 야기할 주요한 원인으로 추정하였다. 그러나, C-EPS 농도 증가에 따른 TMP 증가는 관찰되지 않았다. P-EPS에 비해 C-EPS의 생성량이 많다는 것은 *C. vulgaris*의 EPS 생성상의 특징으로 추측되기는 하나, 이러한 특징이 *C. vulgaris*에만 국한되는 특징인지, 녹조류 전반의 EPS 생성특성인지, 혹은 전체적인 미세조류의 EPS 생성 특징인지에 대해서는 확실하지 않으며, 이에 대해서는 soluble 및 bound EPS를 포함한 심도있는 연구가 필요하다.

Acknowledgement

이 논문은 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No.NRF-2019R1A2C1084155) 이에 감사드립니다.

References

- Arbib, Z., Ruiz, J., Alvarez-diaz, P., Garrido-perez, C., and Perales, J. A. (2014). Capability of different microalgae species for phytoremediation processes: Wastewater tertiary treatment, CO₂ bio-fixation and low cost biofuels production, *Water Research*, 1(49), 465-474.
- Bilad, M. R., Discart, V., Vandamme, D., Foubert, I., Muylaert, K., and Vankelecom, I. F. J. (2014). Coupled cultivation and pre-harvesting of microalgae in a membrane photobioreactor (MPBR), *Bioresource Technology*, 155, 410-417.
- Chang, I. and Lee, C. (1998). *Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system - The effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling*.
- Chang, I., Le Clech, P., Jefferson, B., and Judd, S. (2002). Membrane fouling in membrane bioreactors for wastewater treatment, *Journal of Environmental Engineering*, 128(11), 1018-474.
- Dignac, M. F., Urbain, V., Rybacki, D., Bruchet, A., Snidaro, D., and Scribe, P. (1998). Chemical description of extracellular polymers: Implication on activated sludge floc structure, *Water Science and Technology*, 38(8-9), 45-53.
- Ding, Z., Bourven, I., Guibaud, G., van Hullebusch, E. D., Panico, A., Pirozzi, F., and Esposito, G. (2015). Role of extracellular polymeric substances (EPS) production in bioaggregation: Application to wastewater treatment, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(23), 9883-9905.
- U. S. Department of Energy (DOE). (2010). *National algal biofuels technology roadmap*, US Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Biomass Program.
- Flemming, H. and Wingender, J. (2010). The biofilm matrix.

- Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623-633.
- Guo, W., Ngo, H., and Li, J. (2012). A mini-review on membrane fouling, *Bioresource Technology*, 122, 27-34.
- Houghton, J. I. and Stephenson, T. (2002). *Effect of influent organic content on digested sludge extracellular polymer content and dewaterability*.
- Le Clech, P., Jefferson, B., Chang, I. S., and Judd, S. J. (2003). Critical flux determination by the flux-step method in a submerged membrane bioreactor, *Journal of Membrane Science*, 227(1), 81-93.
- Nagaoka, H. and Akoh, H. (2008). Decomposition of EPS on the membrane surface and its influence on the fouling mechanism in MBRs, *Desalination*, 231(1), 150-155.
- Rosenberger, S., Laabs, C., Lesjean, B., Gnirss, R., Amy, G., Jekel, M., and Schrotter, J. C. (2006). Impact of colloidal and soluble organic material on membrane performance in membrane bioreactors for municipal wastewater treatment, *Water Research*, 40(4), 710-720.
- Wang, Z., Wu, Z., and Tang, S. (2009). Extracellular polymeric substances (EPS) properties and their effects on membrane fouling in a submerged membrane bioreactor, *Water Research (Oxford)*, 43(9), 2504-2512.
- Yigit, N. O., Harman, I., Civelekoglu, G., Koseoglu, H., Cicek, N., and Kitis, M. (2008). Membrane fouling in a pilot-scale submerged membrane bioreactor operated under various conditions, *Desalination*, 231(1), 124-132.