

연속 회분식 반응기내 유기물 생물흡착특성: SRT 영향

김금용 · 김진형 · 김대근 · 류홍덕 · 이상일[†]

충북대학교 공과대학 환경공학과

(2007년 10월 31일 접수, 2008년 1월 21일 채택)

Biosorption Characteristics of Organic Matter in a Sequencing Batch Reactor : Effect of Sludge Retention Time

Keum-Yong Kim · Jin-Hyung Kim · Daekeun Kim · Hong-Duck Ryu · Sang-Il Lee[†]

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

ABSTRACT : The objective of this study was to investigate biosorption of organic matter on EPS(Extracellular Polymeric Substances) at different SRT(Sludge Retention Time) in a SBR(Sequencing Batch Reactor) process, which was operated with the following operation steps : Fill-React-Settle-Decant-Idle. The hydraulic retention time was set to be 24 hours. The results obtained from this study showed that the organic removal efficiency per unit microbial biomass decreased with increasing SRT, and the corresponding EPS amount also did. The percent removal of organic by biosorption increased with SRT, and it reached to 53.2% at SRT of 30 days. However, the highest biosorption per microbial biomass(48.6 mgCOD/gVSS) was found at SRT of 2 days. The EPS analysis was performed by measuring TSS, TCOD_G, and TKN. The EPS production per unit microbial biomass was observed to be high at a low SRT. Due to the above result, the floc formation was hindered and therefore poor settlement of sludge resulted in decreasing the COD removal efficiency. It was therefore concluded that the consideration of the system design should include the characteristic of EPS as well as other factors such as SRT, MLSS, and organic loading.

Key Words : Sequencing Batch Reactor, Sludge Retention Time, Biosorption, Extracellular Polymeric Substances

요약 : 본 연구는 Fill-Contact-Settle-Decant-Idle의 공정으로 구성된 활성슬러지 공정인 SBR(Sequencing batch reactor)공정에서 수리학적 체류시간을 24시간으로 하여 운전하였으며, 세포의 폴리머의 생성량, 흡착량, 제거율 등과 SRT와의 상관관계에 대한 특성을 조사하였다. 본 실험의 목적은 활성슬러지 시스템에서 다양한 SRT를 통한 생물흡착 특성을 결정하기 위한 것이다. 연구 결과 SRT(Sludge retention time)가 증가함에 따라 단위 미생물당 유기물 흡착율 및 제거율이 감소하는 것으로 나타났으며 단위 미생물당 생성되는 세포외 폴리머 양도 감소하는 것으로 나타났다. 생물흡착효율은 SRT가 증가할수록 높았고 SRT 30일에서 그 값은 53.2%였다. 하지만 단위 미생물당 생물흡착량은 SRT 2일에서(48.6 mg COD/gVSS) 가장 높게 관찰되었다. SRT에 따른 EPS량은 TSS, TCOD_G 그리고 TKN에 의해 정량적으로 분석하였다. 상기의 결과로 인하여 슬러지의 플록 형성을 방해하여 슬러지의 침강성을 저해하며, COD 제거효율을 감소시키는 결과를 초래하는 것으로 사료된다. 따라서 미생물을 이용한 생물학적 공정 운영시 EPS의 특성을 고려하여 SRT, MLSS 유지, 유기물 부하량 등의 설계 인자를 적정히 선정하여 운영하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

주제어 : 연속회분식반응기 공정, 슬러지 체류시간, 생물흡착, 세포외 중합체

1. 서론

국내 도시하수 처리장은 활성슬러지를 이용한 생물학적 처리가 대부분이다. 또한 폐수처리에서 공통적으로 안고 있는 문제점인 부족한 부지문제, 낮은 C/N비 문제 등을 해결하기 위한 방안으로 미생물이 갖는 특성을 연구하는 사례가 늘고 있다. 생물학적 처리공정 내 미생물들은 신진대사과정에서 세포외폴리머(Extracellular polymeric substances, EPS)를 생성한다. EPS의 주된 구성 성분은 탄수화물, 단백질, 지방, 핵산, 휴믹산 및 기타 고분자 물질로

이루어져 있다.¹⁻³⁾ EPS는 미생물간, 혹은 미생물군집 간의 상호작용시 매개체 역할을 수행할 뿐만 아니라 중금속 등 유해물질에 대한 방벽역할, 물 보전력, 유기물 흡착 등에 관여하는 것으로 밝혀졌다.⁴⁾

EPS의 유기물 흡착작용(biosorption)을 이용한 대표적인 처리공법은 접촉안정 활성슬러지 공정이며 지난 수십 년간 이용되고 있다. 1990년대 이탈리아에서 개발된 Dephanox 공정도 biosorption 기작을 이용하고 있다. 일반적으로 생물학적 반응기의 운전 조건 및 운전 형태에 따라서 EPS의 생성 특성은 변화될 수 있다. *Zoogleal ramigera* 등 특정 미생물은 EPS 생산량이 비교적 많고 C/N비가 클 때 생산량이 증가하는 것으로 보고되었다. 또한 생물흡착은 단백질 및 핵산의 농도에 따라 차이가 큰 것으로 보고되고 있

[†] Corresponding author

E-mail: gatorlee@chungbuk.ac.kr

Tel: 043-261-2469

Fax: 043-272-2469

다. 일반적으로 EPS 생성속도는 기질분해속도에 반비례한다고 보고되고 있다.^{5,6)} 그러나 Turakhia와 Characklis는⁷⁾ EPS 생성속도가 미생물 성장속도에 비례한다고 주장하였고, Hsieh 등⁸⁾은 미생물 성장속도 범위에 따라 EPS 생성속도는 기질분해에 따라 증가할 수도 있고, 감소할 수도 있다고 보고하였다. 이렇듯 생물학적 처리 공정에서 반응기의 운전 조건에 따른 EPS의 생성량의 관계는 여러 연구자들에 의해 다양한 결과가 제시되고 있다. 따라서 EPS 생성특성과 반응기내 미생물간의 연구는 아직 미흡하다고 할 수 있다.

본 연구는 미생물을 이용한 생물학적 공정에서 EPS 특성을 고려한 최적 SRT를 도출함으로써 공정운동을 최적화하고자 실시되었다. 이를 위해 실험실 규모의 연속 회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)를 대상으로 SRT에 따른 EPS의 유기물 생물흡착 특성을 알아보았다.

2. 재료 및 방법

2.1. 반응기 운영

본 연구에서는 10 L의 SBR 반응기를 총 5개 제작하여 실험실내에서 개별적으로 운전하였다. SRT를 제외한 반응기의 모든 운전조건은 동일하게 유지하였다. 반응기별 SRT는 각각 2, 5, 9, 14 및 30일로 정하였다. 각 반응기별로 설정된 SRT를 유지하기 위하여 일정량의 슬러지를 24 hr 간격으로 인출하였다. 반응기 내 슬러지의 원활한 혼합 및 반응을 위하여 충분한 공기량을 주입하였으며 반응기의 DO 농도는 3~5 mg/L로 유지하였다. 반응기의 미생물 적중 슬러지는 도시하수에 적용된 C시 도시하수 처리장의 반송슬러지를 이용하였다. 반응기의 기질로는 동일한 처리장에 유입되는 도시하수를 이용하였으며, 유입수의 평균 TCOD 및 SCOD는 각각 427 및 128 mg/L 였다(Table 1). 또한 pH와 알칼리도는 각각 평균 7.28과 219 mg/L였다. 도시하수의 주입은 매회 5 L를 주입 시켰고, 슬러지 침전 후 상등수 5 L를 배출하였다.

SBR의 운영 주기는 1일 1회(HRT: 24 hr)로 하였으며, 운영단계는 채우기(fill, 1 min)-반응(react, 40 min)-침전(settle, 30 min)-인출(decant, 1 min)-휴지기(idle, 22.8 hr)로 구성되었다. 휴지기 단계에서는 호기성으로 운영하여 잔류 및 미생물에 흡착된 유기물의 완전한 분해를 유도하였다. 접촉 및 휴지기 기간 동안 반응기의 용존산소농도는 3 mg/L 이상으로 유지하였다.

Table 1. Influent wastewater characteristics

Item	Concentration
Suspended solids, mg/L	64 (22~88)
TCOD, mg/L	427 (149~820)
SCOD, mg/L	128 (56~298)
Alkalinity, mg/L as CaCO ₃	219 (180~246)
pH	7.28 (7.06~7.55)

2.2. 실험 방법 및 분석

유기물의 흡착효율은 SBR 운전 단계 중 채우기 단계(fill) 직후 시료를 채취하여 즉시 여과한 시료의 SCOD 값을 유입 SCOD 값과 비교하여 식 (1)에 의하여 얻었다. 유기물의 제거효율은 인출단계(decant)의 SCOD와 TCOD를 분석하여 각각 SCOD 제거효율과 TCOD 제거효율로 나타내었다. 각 반응기의 유입수 및 유출수의 TCOD 및 SCOD의 분석은 standard methods⁹⁾의 Closed Reflux, Colorimetric Method에 준하였다.

$$\text{Biosorption, \%} = \frac{\text{SCOD}_{\text{input}} - \text{SCOD}_{\text{fill}}}{\text{SCOD}_{\text{input}}} \times 100 \quad (1)$$

EPS 농도 측정은 인출되는 슬러지를 대상으로 하였다. 분석법은 Ueda¹⁰⁾의 방법에 준하여, 인출 슬러지의 TSS(Total Suspended Solids), TCOD(Total Chemical Oxygen Demand), TKN(Total Kjeldahl Nitrogen) 측정값을 EPS 농도로 나타내는 간접 지표로 활용하였다. 실험방법은 우선 각각의 반응기에서 슬러지를 취하여 원형 시험관에 일정량씩 분취한 후 3,000 rpm에서 20분간 원심분리 하였다. 상등액 30 mL를 100 mL 삼각플라스크에 취한 다음 95% 에탄올 60 mL를 주입하여 혼합하였다. 이렇게 준비된 시료를 4℃에서 48시간 동안 방치한 후 GF/C로 여과하여 TSS로 정량한 단위 무게로 나타내었다. 또한 EPS 내의 TCOD(유기물) 및 TKN(질소) 측정은 냉장 보관된 시료를 GF/C로 여과한 후 105℃에서 약 24시간 동안 방치하여 에탄올을 완전히 발산시킨 후 이를 Standard Method⁹⁾의 Closed reflux-Titrimetric Method 및 Semi-Kjeldahl Method로 각각 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 제거 특성

3.1.1. COD 제거

Fig. 1은 SBR 전체공정의 COD 제거율을 SRT별로 나타낸 것이다. SRT가 증가함에 따라 TCOD와 SCOD의 제거효율이 각각 증가함을 확인할 수 있었다. 그 제거율을 보면, 최대 SRT값인 30일에서 TCOD와 SCOD는 각각 75.4%와 66.7%를 보였다. 여기서 특이한 점은 SRT 9일 이후부터는 SRT값에 상관없이 TCOD와 SCOD의 제거율은 거의 일정하게 유지되었다는 것이다. 이것은 SRT 9일 이상에서 미생물의 활성도가 더 이상 증가하지 않음을 의미하며, 각 환경조건에서 생성되는 미생물의 양과 밀접한 관계가 있을 것으로 유추된다. 따라서 COD 제거율면에서 본다면, 실험에 이용된 SBR공정의 최적 SRT는 약 9일로 볼 수 있겠다. 또한 연구기간동안 유입수의 TCOD/SCOD 값은 약 7.9 정도였지만, 반응기 유출수에 분석되는 TCOD/SCOD 비는 SRT값에 관계없이 약 2.0으로 일정한 특징을 보였다. Fig. 2는 반응기내 단위 미생물량을 고려한 유

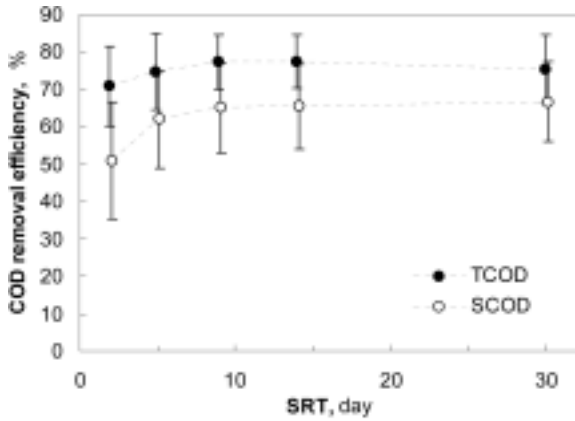


Fig. 1. COD removal efficiency as a function of SRT.

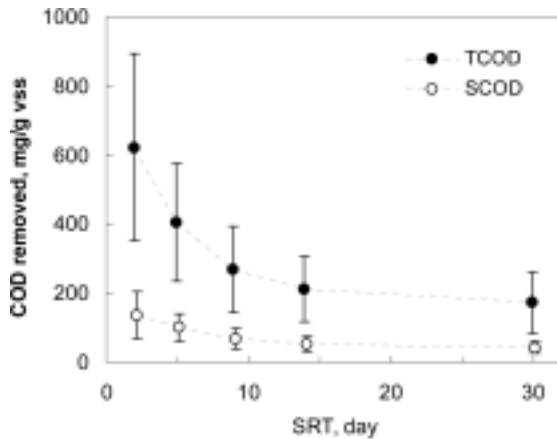


Fig. 2. COD removal per biomass as a function of SRT applied.

기물 제거량을 SRT별로 도식한 결과이다. SRT가 증가할수록 반응기 내의 미생물량은 증가하기 때문에, 단위 미생물 당 유기물 제거량은 SRT가 증가할수록 감소함을 확인할 수 있다.

3.1.2. 흡착에 의한 SCOD 제거

Fig. 3은 반응기 접촉 시간에 따른 유기물 제거량을 나타낸 결과이다. 반응기로 유입되는 유기물이 반응기내 슬러지와 접촉한 후 1분 이내에 초기 유입물량의 약 25%가 일시적으로 감소되었다. 이러한 일시적인 유기물 감소의 원인은 반응기내 biosorption 작용에서 찾을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 반응기내 biosorption이 일어날 수 있는 기간을 유기물 유입 후 1분 이내로 정의하였다.

Fig. 4(a)에서는 전체 SCOD제거율 중 생물흡착에 의한 SCOD제거 정도 및 SCOD 생물흡착량을 도식화하였다. 생물흡착율의 전체 SCOD제거율에 대한 기여도는 SRT상관없이 거의 일정함을 알 수 있었으며, 그 값은 약 30%이었다. 하지만 낮은 SRT, 즉 2일에서는 그 값이 약 25%이었다. 또한 유기물 흡착량은 SRT의 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였다. Fig. 4(b)는 단위 미생물당 생물흡착의 특성을 SRT에 따라 분석한 결과를 보여주고 있다.

단위 미생물당 흡착된 SCOD량은 SRT가 증가할수록 점차적으로 감소함을 보였다. 일반적으로 미생물 일령이 짧은 경우에는 유입되는 유기물 대부분이 셀 합성에 이용되는 반면에, 긴 SRT에서는 유기물은 내생호흡단계의 산화작용에 이용된다. 이러한 관점에서 볼 때, 본 연구결과는 SRT가 증가될수록 기질과 셀의 양이 동시에 감소하는 내생호흡단계에서 기인했다고 사료된다.

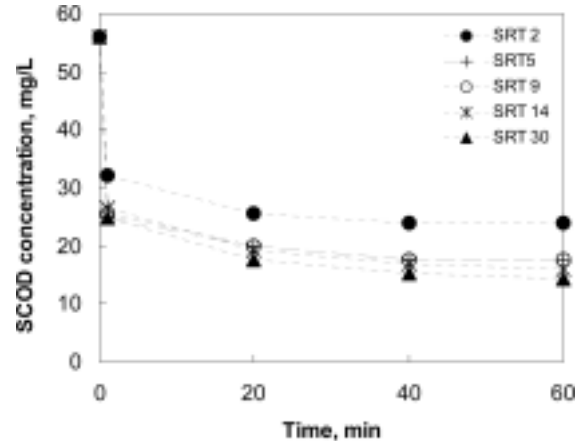


Fig. 3. Determination of SCOD biosorption in SBR.

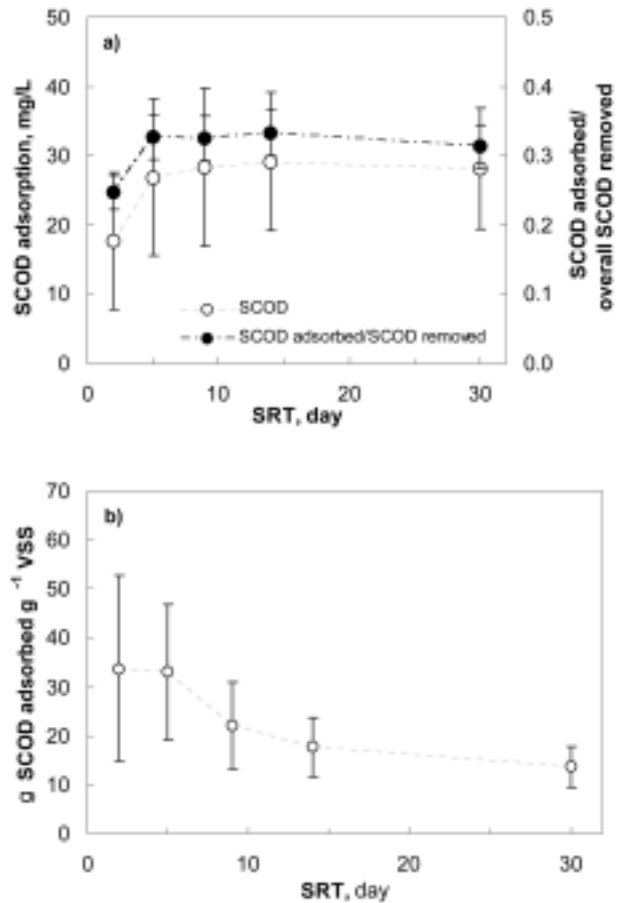


Fig. 4. SCOD biosorption during a contact period in SBR: a) the concentration of SCOD adsorbed, b) rate of COD adsorption unit microbial biomass.

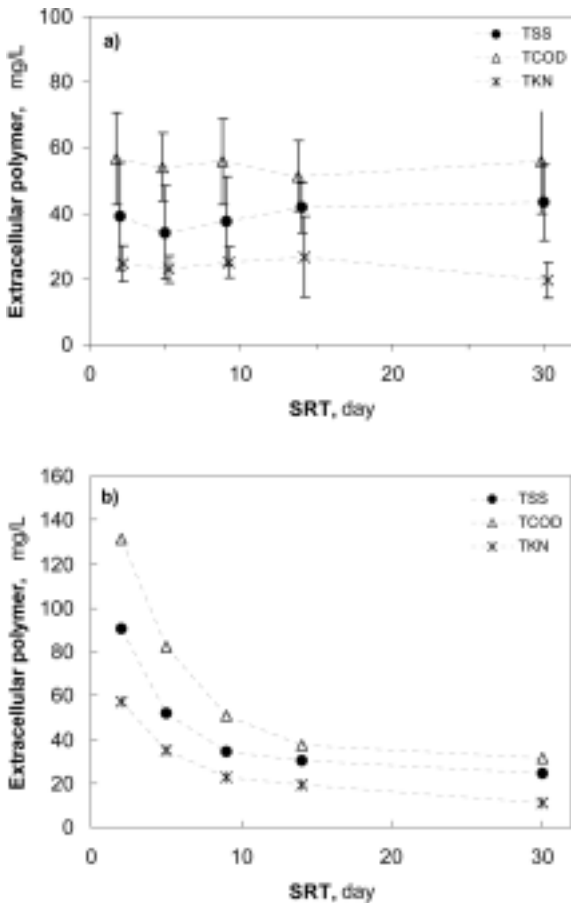


Fig. 5. Performance of EPS production in SBR: a) EPS production, b) EPS production unit microbial biomass.

3.2. EPS 생성

Fig. 5(a)는 SRT에 따른 EPS의 생성량을 나타낸 결과이다. EPS량의 간접지표인 TSS, TCOD, TKN 항목별로 특이한 차이를 보이지 않았으며, 전반적으로 SRT값에 상관없이 EPS량을 일정하게 유지되었다. 또한 Fig. 5(b)의 단위 미생물당 EPS생성량의 결과를 살펴 볼 경우, 각각의 SRT별로 생성된 단위 미생물당 EPS량은 Fig. 4(b)의 단위 미생물당 흡착량과 유사한 경향을 보였음을 알 수 있다. 본 연구에서 반응기내 전체 MLSS에서 EPS가 차지하는 값은 SRT 2일에서 약 13% 정도였으며, SRT값이 증가할수록 그 값은 다소 감소하는 경향을 보였다. Rudd 등¹¹⁾의 연구결과에 의하면 EPS의 양은 전체 MLSS량의 약 14% 정도로 보고되고 있으며, 본 연구결과와 유사한 경향을 보였다.

생물반응기 운전조건에 따른 EPS 생성량을 보고한 기존 연구를 살펴보면, 단위 미생물당 EPS 생성량은 SRT값과 유기물 부하량이 증가되었을 때 감소하는 경향^{12,13)}을 보였으며 이는 본 연구결과와도 일치한다. 하지만 Rudd 등¹¹⁾은 EPS량은 미생물이 내생성장단계에 들어간 이후 급격하게 증가한다고 보고 하였고, Paolo 등¹⁴⁾은 단위 미생물당 EPS의 양은 SRT에 상관없이 일정하다고 보고 하였다.

본 연구결과는 SRT별로 단위 미생물당 EPS 생성량이 크

게 달라지는 것으로 나타났는데 이는 SRT별로 미생물의 특성과 미생물의 활성도가 달라지는 것에서 그 차이점을 찾아볼 수 있다. 앞서서도 언급했듯이 미생물의 성장 단계(대수성장기 또는 내생호흡단계)에 따라서 미생물의 활성도가 달라지기 때문인 것으로 사료된다. Melanie 등¹⁵⁾은 EPS와 SRT와의 관계를 SRT값 별로 구분하여 분석하여 연구하는데, 연구 결과는 SRT 3~9일에서는 SRT이 증가할수록 EPS의 양이 급격하게 상승하였고, SRT 9~18일에서는 SRT에 따른 EPS 양은 완만하게 증가하였다고 보고 하였다. 하지만 단위 미생물 값으로 환산한 EPS의 양은 일정하며 EPS의 양은 MLSS양과 관계된다고 보고 하였다. 이는 앞서 말한 Paolo 등¹⁴⁾의 연구결과와 유사하다. Sudhir 등¹⁶⁾은 SRT에 따른 슬러지의 단백질과 다당류의 양을 측정된 결과 SRT 20~30일에서 protein의 양이 가장 적게 생산되며 다당류의 양은 SRT가 증가할수록 증가하는 것으로 밝혔다. 또한 유출수의 COD는 유입수의 잔류 COD라기 보다는 반응기내 미생물 플록에서 유출된 EPS 성분이었다고 보고하였다.

Fig. 6은 반응기내 미생물량(VSS)에 따른 EPS 생성량(TCOD)을 관찰한 결과를 보여주고 있다. 미생물량과 EPS 생성량과의 관계는 EPS별로 상이하였으며, 전반적으로 양의 선형관계를 보였다. 회귀분석에 따른 각 SRT별 미생물량과 EPS관계를 $y = ax$ (y: EPS, x: VSS)로 표현할 경우, 기울기 값인 a는 SRT 2일에서 0.1201, 5일에서 0.0597, 9일에서 0.0442, 14일에서 0.0340, 30일에서 0.0301로 나타났으며, SRT가 길어질수록 a는 작게 분석되었다. 이는 SRT가 낮을수록 상대적으로 단위 미생물당 생성되는 EPS량이 많음을 의미한다. 이 연구 결과를 공학적인 관점에서 살펴 보면 다음과 같다. 반응기의 SRT를 낮게 운전할 경우 상대적으로 많은 양의 EPS가 반응기내에 생성되게 되고, 이는 슬러지의 플록형성을 방해하여 슬러지의 침강성 문제를 가져와 전체적인 유기물 제거효과를 감소시킬 수 있다. 본 연구결과에서도 낮은 SRT에서 유기물 제거효율이 감소하는 현상을 관찰할 수 있었다.

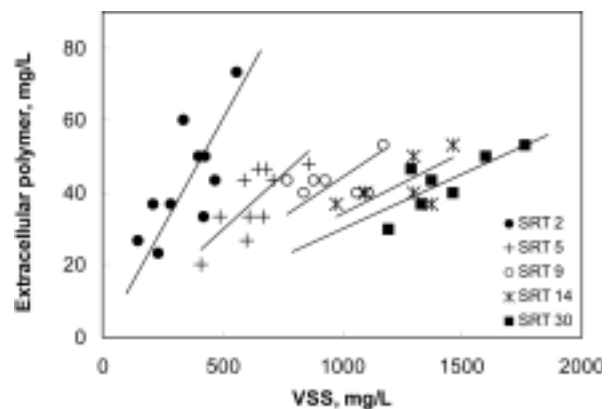


Fig. 6. Relationship between biomass and EPS in SBR: Each slope was 0.1201, 0.0597, 0.0442, 0.0340 and 0.0301 for SRT 2, 5, 9, 14 and 30, respectively, based on regression analysis.

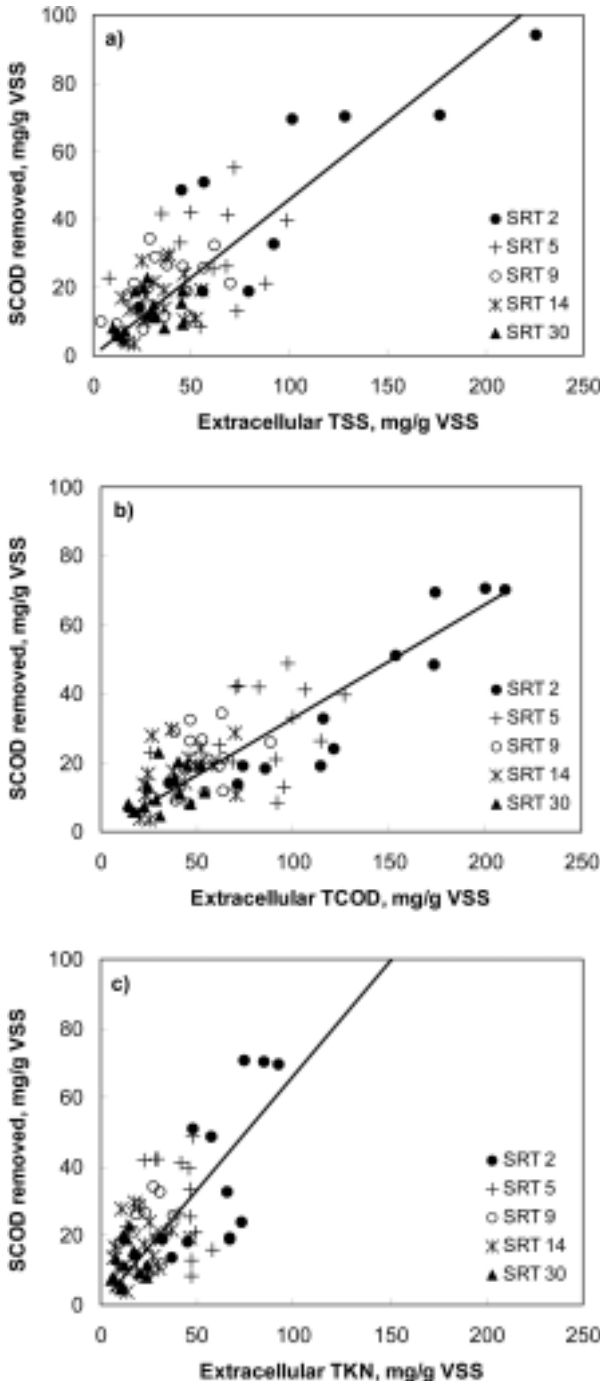


Fig. 7. Relation between EPS and SCOD removed ; a) extracellular TSS, b) extracellular TCOD, c) extracellular TKN.

3.3. EPS 생성량이 유기물 흡착에 미치는 영향

Fig. 7은 TSS, TCOD 및 TKN값으로 간접 정량한 단위 미생물당 EPS생성량을 SCOD 흡착량과의 관계로 도식화한 것이다. 단위 미생물당 EPS의 생성량이 증가할수록 단위 미생물당의 흡착량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 EPS의 생성량으로써 정량한 모든 간접지표(TSS, TCOD, TKN 정량)에서 유사한 경향을 나타내었다. 또한 전반적으로 SRT가 낮을수록 EPS 생성량이 많음을 알 수

있다. 따라서 미생물을 이용한 생물학적 공정운영시 EPS의 특성을 고려하여 SRT, MLSS 유지, 유기물 부하량 등의 설계 인자를 적정히 선정하여 운영하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 SRT가 증가함에 따라 생물흡착효율이 증가하는 경향을 보였다. COD 제거율 측면에서 볼 경우, 본 연구에서 적용한 SBR공정의 최적 SRT는 약 9일로 나타났다. 또한 SRT가 낮을수록 단위 미생물당 생성되는 EPS량이 증가하는 것으로 나타났는데 이는 슬러지의 플록 형성을 방해하여 결과적으로 슬러지의 침강성에 문제를 야기하였다. 결과적으로 이 경우에는 전체적인 제거효율을 감소시켰다.

본 연구 결과를 종합하여 검토해보면, 생물반응기내 미생물의 유기물질 분해과정 이전에 유기물의 흡착단계가 존재하며, 이는 전체 유기물 제거효율에 영향을 미친다. Biosorption을 실공정에 적용할 경우에 얻을 수 있는 효과는 다음 두 가지로 요약해 볼 수 있다. 첫째, Biosorption조를 활성슬러지 공정 전단에 설치할 경우, 비성장속도가 빠른 호기성 미생물을 이용한 흡착으로 유기물질이 우선적으로 제거되기 때문에 유입수 성상 변화나 유기물 부하량 변동에 따른 활성슬러지 공정내 미생물 충격을 완충시킬 수 있다고 본다. 둘째, 고도처리 공정(ex. DEPHANOX 공정 등)에 적용할 경우에는 질산화 효율을 극대화시킬 수 있다. 실공정 전단에 반송슬러지와 유입수가 합류하는 Biosorption조와 침전조를 별도로 설치할 경우, 반송슬러지내 EPS물질의 생물흡착작용에 의해 유기물질과 인 흡착이 우선적으로 일어난다. 이후 침전조에서 고액분리된 상등수는 상대적으로 유기물 농도가 낮고 용존성 질소가 높아 질산화조에서의 질산화 효율을 극대화시킬 수 있다.

참고문헌

1. Nielsen, P.H., Jahn, A., and Palmgren, R., "Conceptual model for production and composition of exopolymers in biofilms," *Water Sci. Technol.*, **36**, 11~19(1997).
2. Christensen, B. E., "The role of extracellular polysaccharide biofilms," *J. Biotechnol.*, **10**, 181~202(1989).
3. Lazarova, V., Manem, J., "Biofilm characterization and activity analysis in water and wastewater treatment," *Water Res.*, **29**, 2227~2245(1995).
4. Wingender, J., Neu, T.R., and Flemming, H.C., "What are bacterial extracellular polymeric substances?," *Microbial Extracellular Polymeric Substances: Characterization, structure and function*, Wingender, J., Neu, T.R. and Flemming, H.C.(Ees.), Springer, Berlin, pp. 115(1999).
5. Evans, E., Brown, M.R.W., and Gilbert, P., "Iron chelator, exopolysaccharide and protease production in Staphylo-

- coccus epidermidis: a comparative study of the effects of specific growth rate in biofilm and planktonic culture," *Microbiology*, **140**, 153~157(1994).
6. Robinson, J. A., Trulear, M. G., and Characklis, W. G., "Cellular reproduction and extracellular polymer formation by *Pseudomonas aeruginosa* in continuous culture," *Biotechnol. Bioeng.*, **26**, 1409~1417(1984).
 7. Turakhia, M. H. and Characklis, W. G., "Activity of *Pseudomonas aeruginosa* in biofilms : effects of calcium," *Biotechnol. Bioeng.*, **33**, 406~414(1988).
 8. Hsleh, K. M., Murgan, G.A., Lion, L.W., and Shuler, M.L., "Interactions of microbial biofilms with toxic trace metals I. Observation and modeling of cell growth, attachment, and production of extracellular polymer," *Biotechnol. Bioeng.*, **44**, 219~231(1994).
 9. APHA, AWWA, WEF, "Standard methods for the examination of water and wastewater," 21th Edition, Edited by Andrew, D. E., Lenore, S. C., Arnold, E.G.(2005).
 10. Ueda, S., Fujita, K., Komatsu, K., and Nakashima, Z., "Polysaccharide produced by genus *Pullularia*. I, Production of Polysaccharide by growing cells," *Appl. Microbiol.*, **11**, 211~215(1963).
 11. Rudd, T., Sterritt, R.M., and Lester, J.N., "Complexation of heavy metals by extracellular polymers in the activated sludge process," *J. Water Pollut. Control. Fed*, **56**, 1260~1268(1984).
 12. Gulas, V., Bond, M., and Benefield, L., "Use of extracellular polymers for thickening and dewatering activated sludge," *J. Water Pollut. Control Fed*, **51**, 798~807(1979).
 13. Pavoni, J. L., Keiber, S. W., and Boblitt, G.T., "The harvesting of algae as a food source from wastewater using natural and induced flocculation techniques," *in proceedings of conference on use of wastewater in production of food and fiber, Oklahoma*, pp. 435~496(1974).
 14. Paolo, B., Gabriele, F., and Maria, L. R., "Heavy metal shock load in activated sludge uptake and toxic effects," *Water Res.*, **27**, 821~827(1993).
 15. Brown, M. J. and Lester, J. N., "Role of bacterial extracellular polymers in metal uptake in pure bacterial culture and activated sludge-I. Effects of metal concentration," *Water Res.*, **16**(11), 1539~1548(1982).
 16. Sudhir N. Murthy, "Bioflocculation : Implications for activated sludge properties and wastewater treatment," Ph.D. Thesis, Univerisity of Virginia(1998).