

# 연속회분식 장치에서 응집제를 이용한 호기성 입상슬러지 생성 및 특성

## Formation and Characteristics of Aerobic Granular Sludge Using Polymer in Sequencing Batch Reactor

이봉섭 · 최성우 †  
Bong-Seob Lee · Seong-Woo Choi †

동아대학교 환경공학과  
Department of Environmental Engineering, Dong-A University

(2009년 8월 26일 접수, 2009년 12월 2일 채택)

**ABSTRACT** : This study was carried out to investigate of aerobic granulation by using sequencing batch reactor(SBR). To make aerobic granular sludge in short period of time, we used polymer. In case of SBR, we have studied on physicochemical characteristics of particle size, settling velocity, surface charge, and specific oxygen utilization rate(SOUR) depending on aerobic particle's formation. The results of running SBR with  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  of COD loading rate and 20 days reaction time showed that aerobic particle size, settling velocity, SOUR, surface charge, polysaccharide/protein(PS/PN) ratio were 2.6 mm, 1.7 cm/s, 346  $\text{mg} \cdot \text{O}_2/\text{g} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{hr}$ , (-)0.26 meq/g  $\cdot \text{MLVSS}$ , and 2.06 mg/mg respectively.

**Key words** : Aerobic Granular, SBR, Settling Velocity, SOUR, Surface Charge

**요약** : 본 연구는 고분자 응집제를 이용하여 단시간에 입상형태의 슬러지를 제조한 후 연속회분식 장치에 주입하여 호기성 입상화를 시도하였다. 연속회분식 반응조에서 호기성 입자의 형성에 따른 입자의 크기, 침강속도, 표면전하, 비산소 소비율 등의 물리·화학적 특성을 조사하였다. 입상형태의 슬러지를 연속회분식 장치에 주입하여 COD 부하량  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 로 운전한 결과 운전경과 20일만에 2.6 mm 내외의 호기성 입자를 형성하였으며, 최종형성된 호기성 입자의 침강속도, 비산소 소비율, 표면전하, 다당류/단백질비는 각각 1.7 cm/s, 346  $\text{mg} \cdot \text{O}_2/\text{g} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{hr}$ , (-)0.26 meq/g  $\cdot \text{MLVSS}$ , 2.06 mg/mg을 나타내었다.

**주제어** : 호기성 입상화, 연속회분식, 침강속도, 비산소 소비율, 표면전하

## 1. 서론

최근 현탁증식형 반응조들의 운전 및 효율면에서의 한계를 극복하고자 미생물의 자기고정화 방식을 이용한 호기성 입상화 공정이 많은 관심을 받고 있다. 호기성 입상화는 반응조에 고농도의 미생물 군집체를 유지시킴으로서 밀도가 크고 조밀하며 강한 미생물적 구조를 가진 입자를 형성시켜 양호한 침강성을 나타내며 고부하의 충격에도 견딜수 있는 능력을 지니고 있다.

최근까지 호기성 미생물 입상화에 대한 연구들은 장치의 간단함과 고액분리에 대한 효율성, 운전의 유연성 등으로 인하여 주로 연속회분식장치(SBR) 장치에 대한 연구가 증가하고 있다.<sup>1,2)</sup> 미생물의 연속배양 공정과 비교한 SBR의 특별한 형태는 주기적인 공정으로 이루어져 있으며 회

분반응단계 동안 완전한 혼합이 이루어지는 유입-유출공정이다. 일반적으로 SBR의 공정주기는 유입, 폭기, 침전, 슬러지 폐기 등의 공정으로 이루어져 있으며 폭기와 정화의 연속적인 단계가 같은 반응조 내에서 이루어진다. SBR 장치 내에서 상향류 공기유량에 의한 수리학적 전단력, 선택압 등의 적절한 반응조건 하에서 박테리아의 자기고정화를 통한 호기성 입자를 형성한 연구결과들이 보고 있으나<sup>3~6)</sup> 이러한 연구보고들은 반응조 내의 입상화 슬러지의 특징과 구조에 대한 연구보다는 입상화 슬러지에 의한 처리효율에 관심을 두었다.

El-Mamouni<sup>7)</sup>는 슬러지 입상화의 촉진을 위해 촉진제로 황성탄, 철 및 칼슘성분과 같은 무기물을 투입하여 입상화 핵으로 활용하였으나 입상화 슬러지 형성에 6개월 정도의 시간이 요구되었으며, 지속적으로 투입해야 한다

† Corresponding author : E-mail : blue7931@hanmail.net Tel : 051-200-7674 Fax : 051-200-7683

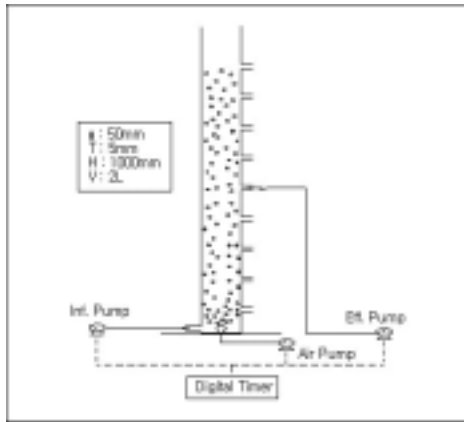


Fig. 1. Schematic diagram of lab-scale SBR for aerobic granulation sludge.

는 단점이 나타났다. 또한 고분자 응집제를 이용한 입상슬러지의 경우, 미생물과 부유물질의 단순한 가교역할을 하여 일정시간이 경과하면 플러이 해제되어 입상화의 의미를 감소시킨다.

따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하고자 하폐수 처리공정에 광범위하게 이용되는 고분자 응집제를 이용하여 입상형태의 슬러지를 형성한 후 연속회분식 장치를 이용하여 호기성 입자를 생성하고자 하였다. 반응조에서 호기성 입자의 생성에 따른 입자의 크기, 밀도, 침강 속도, 입자내 미생물 체외분비 고분자물질 등의 물리·화학적 특성을 조사하였으며 최종 형성된 호기성 입상슬러지의 특성을 검토하고 고찰한 내용을 기술하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실험장치

하수처리장의 반송슬러지에 고분자 응집제를 첨가하여 짧은 시간에 형성된 입상슬러지를 연속회분식 공정에 투입하여 호기성 입상화를 시도하고 최종 형성된 호기성 입상화 슬러지의 특성을 알아보기 위하여 실험실 규모의 칼럼형태 SBR 장치를 이용하였으며, 장치는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에 도시한 실험실 규모의 칼럼형태 SBR 장치는 아크릴로 제작하였으며 내경 50 mm, 두께 5 mm, 높이 1000 mm로 유효용적은 2 L였다. 칼럼 하부의 공기공급 장치를 설치하였고, 칼럼 하부로부터 10 cm 간격으로 샘플링 포트를 설치하였으며 반응조의 중간 포트에서 유출 펌프를 통해 유출수를 방류하였다. SBR 장치의 연속적 운

Table 1. Composition of the feed substrate used in this experiment<sup>8)</sup>

Parameter	Concentration	Source	
COD (mg/L)	1,500	Glucose	
T-N (mg/L as N)	92.3	NH <sub>4</sub> Cl	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/L)	27.9		
T-P (mg/L as P)	16.9	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> P (mg/L)	1.8		
Mg <sup>2+</sup> (mg/L as MgSO <sub>4</sub> )	33.1	MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	
Ca <sup>2+</sup> (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	64.6	CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	
Trace elements* (mL/L)	0.15		
Trace elements* (mg/L)			
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	20	Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	10
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	50	ZnCl <sub>2</sub> · 7H <sub>2</sub> O	10
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	50	CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	50
MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	50		

전을 위하여 디지털 타이머를 유입 및 유출펌프, 및 공기 공급장치 등에 연결하였다.

### 2.2. 시료

본 실험에 사용된 활성슬러지는 부산광역시 소재 S 하수처리장의 반송슬러지를 채취하여 20 mesh의 체를 이용하여 협잡물을 제거 후 실험에 사용하였다. 채취한 활성슬러지는 짙은 갈색을 띠고 있었으며 유리된 상태와 솜털모양의 부유물을 육안으로 확인할 수 있었다. 또한 슬러지 입상화를 촉진하기 위해 사용된 유기 고분자는 아크릴아마이드계의 양이온성 유기고분자(c-492 HMW, cytec, USA)를 투입하였으며 반대 전하의 음이온성 무기고분자는 silica-sol을 이용하였다.

본 실험에 사용된 폐수는 합성폐수를 사용하였으며 Table 1에 합성폐수의 조성을 제시하였다.

Table 1에 제시한 합성폐수는 글루코스 성분만을 주탄소원으로 하고 있으며 유입 COD 부하량의 증가에 따라 농도를 조절하여 사용하였다. 미생물의 성장에 필요한 질소와 인의 기준은 생활하수를 기준으로 정하였으며 질소와 인의 영양염류는 NH<sub>4</sub>Cl, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 용액으로 공급하였다. 미생물의 성장에 부가요소인 미량원소는 합성폐수 20 L당 3 mL씩 첨가하여 사용하였다. 본 실험에서 글루코스 성분만을 주탄소원으로 사용한 이유는 Tay 등<sup>9)</sup>의 연구에서 글루코스와 아세테이트 2 종류의 탄소원으로 합성폐수를 제조하여 호기성 입상화를 시도하였을 때 글루코스만을 주탄소원으로 사용한 호기성 입자들의 크기나 입자밀도, 입자강도 등이 아세테이

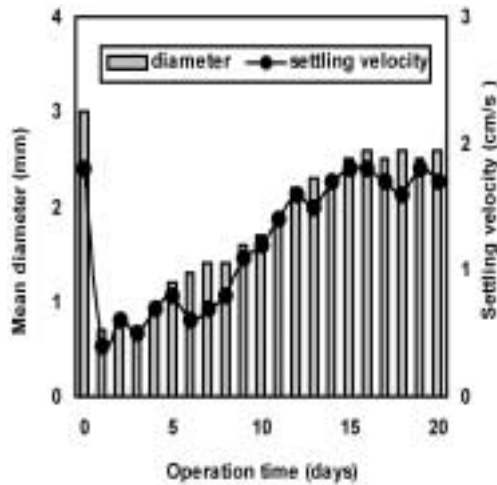


Fig. 2. Variation of aerobic granule diameter and settling velocity operated at COD loading rate  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  according to operation time.

트만을 주탄소원으로 사용한 경우보다 나은 결과치를 보였기 때문이다.

### 2.3. 실험방법

기존의 호기성 입상화에 대한 연구들 대부분이 10 L 이하의 Lab scale SBR 장치를 이용해 시도되었기에 기존의 호기성 입상화에 대한 연구 결과들과의 비교를 위하여 본 실험에서도 실험실 규모의 SBR 장치를 이용하였다. 반응조의 운전은 디지털 타이머를 유입 및 유출펌프와 공기공급 장치에 연결하여 주기적인 공정으로 운전하였다. SBR 공정의 주기는 유입 4분, 폭기 230분, 침전 2분, 유출 4분으로 1주기는 총 4시간으로 구성되었다. 유입유량 대비 용량 교환비는 60 %로 정하였으며 칼럼 하부의 공기공급장치를 통하여 미세공기방울을 2 L/min (겉보기 상향류 공기속도 : 1.2 cm/s)의 속도로 주입하여 용존산소농도를 2 mg/L 이상으로 호기성 조건을 유지하였다.<sup>10)</sup> 칼럼 하부로부터 10

cm 간격으로 샘플링 포트를 설치하여 시료를 채취하였으며 반응조 하부로부터 50 cm의 높이의 포트에서 유출펌프를 통해 유출수를 방류하였다. 유입유량 대비 수리학적 체류시간은 6.67시간이었고 폐수는 글루코스를 단일 탄소원으로 구성된 합성폐수를 조제하여 사용하였다. COD : N : P의 구성비율은 100 : 6.2 : 1.1의 비율로 구성하였고 모든 실험 기간 동안 COD 부하율은  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ 로 고정하였다. 반응조내 온도조절장치를 장착하여 수온을 25°C로 유지하였으며, 초기 반응조에 유입시킨 MLSS 농도는 6,760 mg/L 정도였다.

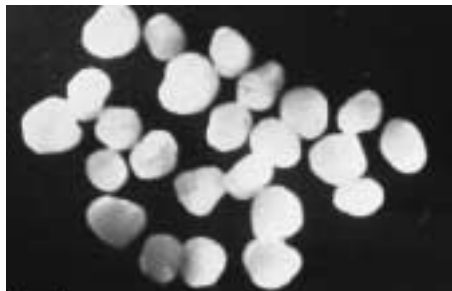
### 2.4. 분석

연속회분식 장치실험을 통해 형성된 입상형태의 슬러지특성을 파악하기 위해 입자의 밀도, 구조 관찰을 위해 주사현미경(SEM, JEOL- JSM-35CF, USA), phenanthrene 흡착법을 이용하여 표면소수성, colloidal titration법에 의한 슬러지 표면전하, 전극법에 의한 비산소 소비율(SOUR), 미생물 제외분비 고분자물질(EPS), 침강속도, 화상분석기(IA)를 이용하여 입자크기, Standard method(APHA, 1998)를 이용하여 호기성 입상 활성슬러지의 COD, ML(V)SS 등을 분석하였다.

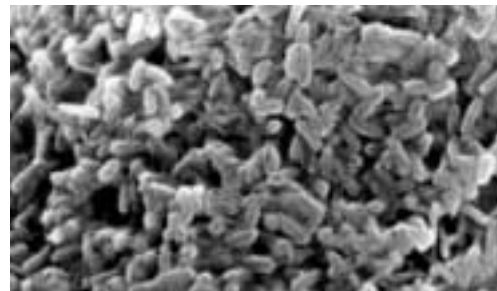
## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 입자의 크기와 침강속도 변화

고분자 응집제를 주입하여 만들어진 입상형태의 슬러지를 MLSS 농도 6,760 mg/L로 SBR 장치에 주입하여 운전을 시작하였다. SBR 장치를 이용한 호기성 입상화 실험에서 운전시간 경과에 따른 평균입자크기와 침강속도 변화를 Fig. 2에 나타내었다.



(a)



(b)

Fig. 3. Morphology(a) and microbial structure(b) of granular sludge in the SBR on 20 days. (bar =2.5 mm, SEM ×1000)

Fig. 2를 보면 초기 반응조에 주입한 입상형태의 슬러지 입경은 3 mm 내외였으나 공기방울에 의한 수리학적 와류와 입자간의 충돌로 인하여 반응 경과 하루 만에 0.7 mm 내외의 크기로 입자가 해체되는 현상이 발생하였다. 운전시간이 3일이 지난 후에는 입자의 크기가 점점 증가하여 반응조 운전시간 20일이 경과한 시점에서는 2.6 mm 내외로 입자의 크기가 성장하였다. 운전시간 15일째가 지난 시점부터 입자의 크기는 2.5 mm 정도로 유지하면서 더 이상 성장하지 않았으며 20일이 지난 후에는 평형 상태에 도달하였다. 운전 3일째까지 입자의 형태는 입상 형태의 슬러지가 해체되어 솜털모양의 형태가 되었으며, 10일 정도에는 입자의 크기는 성장했지만 여전히 입자 자체의 결합력은 낮아 보였다. 운전시간 20일째의 입자의 형태는 Fig. 3과 같이 외형적으로도 비교적 단단한 입자의 형태로 나타났으며 외형상으로 밝은 갈색의 매끈하고 조밀한 형태의 입자를 형성하였다.

Zheng 등<sup>11)</sup>의 실험실 규모 SBAR을 이용한 호기성 입상화 실험에서는 10일째 조그마한 호기성 입자를 관찰하기 시작하여 반응경과 60일 이후에 0.5~1.2 mm 범위의 평균 1.0 mm의 크기를 가지는 호기성 입자를 형성하였으며, 최근 Liu 등<sup>8)</sup>의 SBR 장치를 이용한 실험에서 1.2~1.8 mm의 호기성 입자를 형성하였고 Kim 등<sup>12)</sup>은 COD 부하율 2.5 kg · COD/m<sup>3</sup> · d, 6시간의 운전주기로 SBR 장치를 가동하여 70일 경과 후에 1.0~2.0 mm 정도의 호기성 입자를 형성하였다. 실험실 규모의 SBR 장치를 이용한 대부분의 호기성 입상화 실험의 결과치를 총괄하여 보면<sup>1,2,8,9)</sup> 0.1~0.3 mm 크기의 초기 호기성 입자의 형태는 반응경과 7일경에 나타났으며 1.5~3 mm 크기의 최종 호기성 입자의 형태는 반응경과 60일~70일경에 나타나는 것으로 보고되었다. 따라서, 유 · 무기 고분자 응집제를 이용하여 입상형태의 슬러지를 형성한 후 호기성 입상화를 시도한 본 연구와 비교하면 본 연구에서의 호기성 입상화는 운전시작 3일째까지는 지체기라 판단되며 이후 15일째까지는 호기성 입상화의 형성기라 판단되며 20일째 호기성 입상화의 평형상태에 도달한 것으로 판단된다. 또한 최종 형성된 호기성 입자의 크기가 2.6 mm로 기존의 호기성 입상화 연구결과들보다는 큰 입경의 호기성 입상화 슬러지가 형성되었다. 이는 양이온성 고분자 응집제로 인해 DLVO (Derhaguin, Landau, Verwey, Overbe) 이론에 의한 2중층의 크기가 감소되고 입자들 사이의 반발력을 감소시켰기 때문에 생물입상화를 촉진시킨 것으로 판단된다.

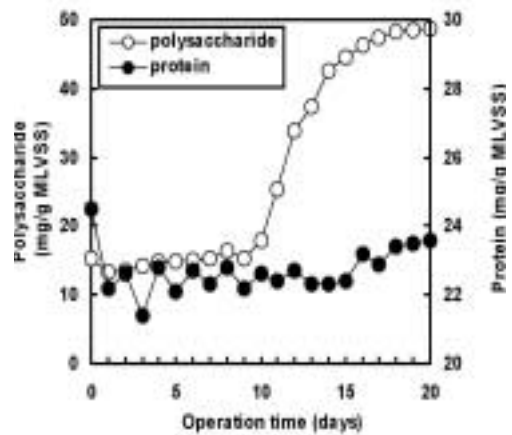


Fig. 4. Variation of polysaccharide and protein in aerobic granule operated at COD loading rate 5.4 kg · COD/m<sup>3</sup> · d according to operation time.

또한, Fig. 2에서 입자의 크기와 침강속도는 상당한 연관성을 가지며 증가 혹은 감소하였다. 입상형태의 슬러지가 해체되어 입자의 크기가 작아지면 입자의 침강속도도 함께 감소였다. 초기 응집제와 결합된 입상형태 슬러지의 침강속도는 1.8 cm/s이었고 슬러지의 해체와 더불어 0.4 cm/s까지 감소하였다. 이후 운전시작 8일째까지는 0.8 cm/s 정도로 일정한 값을 나타내다가 9일째부터 선형적으로 증가하였다. 운전시작 10일째, 15일째, 20일째 입자의 침강속도는 각각 1.2 cm/s, 1.8 cm/s, 1.7 cm/s 이었다. 혐기성 슬러지의 침강속도는 3~5 cm/s 정도의 값을 나타내는데 본 연구에서의 입자의 침강속도는 혐기성 슬러지의 침강속도보다 작은 값을 나타내었고 호기성 입자의 침강속도에 대한 보고와 비교하여 보면 침강속도는 유사하였다. 이러한 결과는 형성되는 입자상의 특성 중 입자 밀도에 의한 침강속도 변화 때문으로 판단된다.

### 3.2. 입자에서 생성된 EPS 농도변화

미생물 체외분비 고분자물질(EPS)은 미생물들의 결합에 대한 단위 용량당 광범위한 표면적을 제공하고 활성슬러지 플러지 침전에 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있으며 주로 다당류(PN)와 단백질(PN)로 구성되어 있다. 침전성이 우수한 미생물 군집체는 대체로 생물입상화 특성이 우수하며 EPS 물질을 다당류로 형성하여 이 EPS 물질들의 가교작용 작용을 통하여 입상화가 진행되는 것으로 알려져 있다.<sup>13)</sup> 따라서, 운전시간에 따른 호기성 입자 내의 다당류와 단백질 함유량의 변화를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4를 살펴보면 반응조에 주입한 입상형태의 슬러지

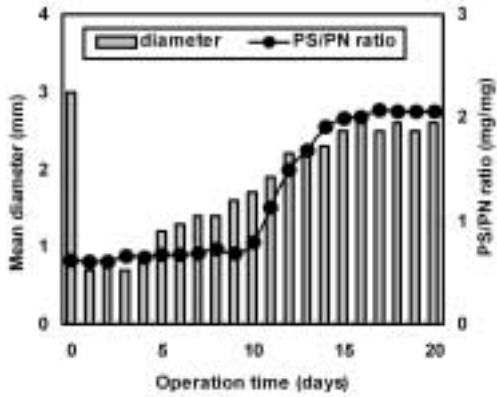


Fig. 5. The relations between aerobic granule diameter and PS/PN ratio in aerobic granule operated at COD loading rate  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ .

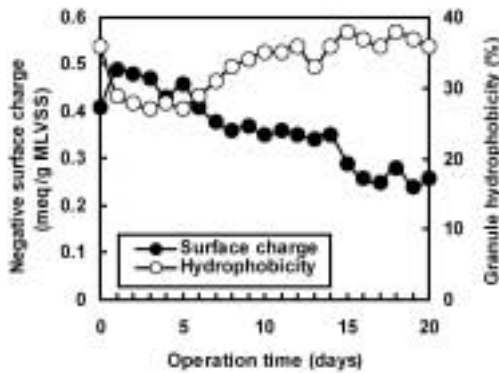


Fig. 6. Variation of surface charge on aerobic granule surface and granule hydrophobicity operated at COD loading rate  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  according to operation time.

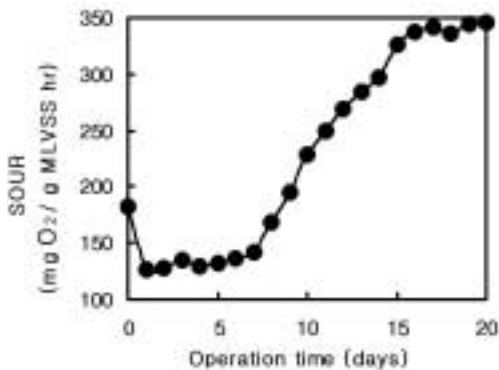


Fig. 7. SOUR variation of aerobic granule in SBR reactor operated at COD loading rate  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  according to operation time.

의 다당류와 단백질의 함유량은 각각  $15.3 \text{ mg/g} \cdot \text{MLVSS}$ ,  $24.5 \text{ mg/g} \cdot \text{MLVSS}$  이었다. 입자형태의 슬러지가 해체되어 입자의 크기가 작아짐에도 불구하고 다당류와 단백질의 함유량의 변화는 크지 않았으며 운전 시

작 9일째 다당류의 함유량은 일정하였다. 운전시작 10일째부터 호기성 입자내의 다당류의 함유량이 증가하기 시작하여 운전시작 15일째와 20일째의 다당류의 함유량이 각각  $44.6 \text{ mg/g} \cdot \text{MLVSS}$ ,  $48.6 \text{ mg/g} \cdot \text{MLVSS}$  이었으며 운전초기 다당류의 함유량보다 3배 이상 증가하였다. 호기성 입자내의 단백질 함유량 변화는 운전을 종료할 때까지 큰 변화는 없었다. 반응조에 주입한 입자형태의 슬러지와 운전시간 10일째, 15일째, 20일째의 호기성 입자내의 단백질 함유량은 각각  $24.5 \text{ mg/g} \cdot \text{MLVSS}$ ,  $22.6 \text{ mg/g} \cdot \text{MLVSS}$ ,  $22.4 \text{ mg/g} \cdot \text{MLVSS}$ ,  $23.6 \text{ mg/g} \cdot \text{MLVSS}$  이었다. 호기성 입자의 크기변화와 호기성 입자 내의 다당류와 단백질간의 관계를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 호기성 입자가 성장함에도 입자내의 단백질 함유량의 변화는 일정한 것으로 보아 호기성 입자의 성장에 관여하는 인자는 호기성 입자내의 단백질 함유량보다는 다당류 함유량의 변화에 있다고 판단할 수 있다. 호기성 입자내의 PS/PN 비를 살펴보면 초기 입상형태의 슬러지와 운전시작 10일째, 15일째, 20일째 PS/PN 비는 각각 0.62, 0.79, 1.99, 2.06이었다. 운전시작 10일째까지는 PS/PN 비는 일정하였고 10일 이후에 PS/PN의 변화량이 나타나기 시작하였다. Tay 등<sup>14)</sup>과 Sutherland<sup>15)</sup>는 EPS 물질 중 다당류가 박테리아 점착과 부착을 유도하여 입상화를 촉진한다고 하였다. 본 실험에서 다당류의 변화를 입자의 크기변화와 비교하여 보면 입자의 크기는 운전시작 5일 후에 증가세를 나타내 15일째까지 증가하였으나 다당류의 변화는 운전시작 10일 후에 증가하여 운전 종료시까지 증가하는 경향을 나타내었다. 다당류의 변화와 입자의 크기변화 사이에는 비례적인 상관관계가 있었으나 운전초기에는 비례적인 상관관계를 나타내지 않았다.

### 3.3. 소수성과 표면전하 변화

SBR 장치에서 운전시간 경과에 따른 호기성 입자의 표면전하와 입자 소수성 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6를 살펴보면 초기 SBR 장치에 주입한 입상형태 슬러지의 표면전하와 입자소수성은 각각  $(-0.41 \text{ meq/g} \cdot \text{MLVSS})$ , 36%이었다. 운전 종료시까지 입자의 소수성은 27~37% 정도로 유지하여 큰 변화가 없었는데 이는 입자의 소수성을 결정짓는 공기의 유속을 일정하게 유지하였기 때문이라고 생각된다. 입자의 소수성은 Marshall 등<sup>16)</sup>의 연구와 Pringle 등<sup>17)</sup>의 연구에서와 같

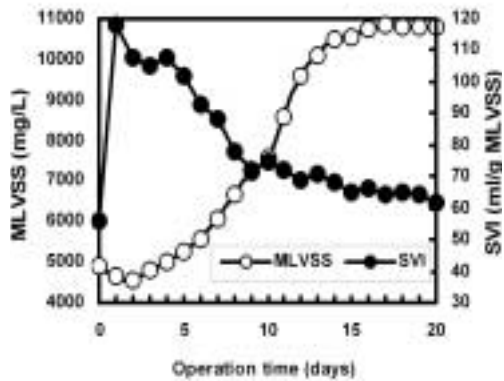


Fig. 8. Variation of MLVSS concentration and SVI in SBR reactor operated at COD loading rate  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  according to operation time.

이 세포 자기고정화와 세포 응집체에 대한 중요한 친화력으로 간주되어질 수 있으므로, 본 실험에서의 높은 입자소수성은 미생물 응집체를 보다 더 쉽게 형성할 수 있었던 것으로 판단된다. 또한 호기성 입자의 표면전하는 입상형태 슬러지의 해체와 더불어 운전시작 5일경까지는 증가하였고 5일 경과 후부터 운전 종료시까지 선형적으로 감소하여 운전 종료시에  $(-)0.26 \text{ meq}/\text{g} \cdot \text{MLVSS}$ 를 나타내었다. 이 또한 표면전하 감소에 따른 세포사이의 전기적 반발력 감소가 호기성 입자의 성장요건을 제공한 것으로 판단된다.

### 3.4. 비산소 소비율 변화

호기성 입자가 가지는 비산소 소비율(SOUR)은 독성함유 폐수나 고강도 산업폐수를 처리함에 있어 호기성 입자들의 폐수처리 능력을 가늠하고 평가할 수 있는 중요한 척도가 된다. 그러므로, SBR 장치에서의 운전시간에 따른 SOUR 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7을 보면 초기 입상형태 슬러지의 SOUR은  $183 \text{ mg} \cdot \text{O}_2/\text{g} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{hr}$ 이었고 입상형태 슬러지의 해체와 더불어 SOUR도  $130 \text{ mg} \cdot \text{O}_2/\text{g} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{hr}$ 로 감소하였다. 운전시작 7일째부터 SOUR도 선형적으로 증가하였으며 운전 종료시에는  $346 \text{ mg} \cdot \text{O}_2/\text{g} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{hr}$  이었다. 기존의 호기성 입자들에 대한 연구결과<sup>3,13)</sup> SOUR값이  $200 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{O}_2/\text{g} \cdot \text{MLVSS} \cdot \text{hr}$  정도와 비교하여 보면 본 실험에서 SOUR 값은 증가하였으며 SOUR은 COD 제거효율에도 적용될 수 있을 것이라 판단된다.

### 3.5. MLVSS, SVI 변화

운전시간 경과에 따라 반응조내에 체류하는 MLVSS와

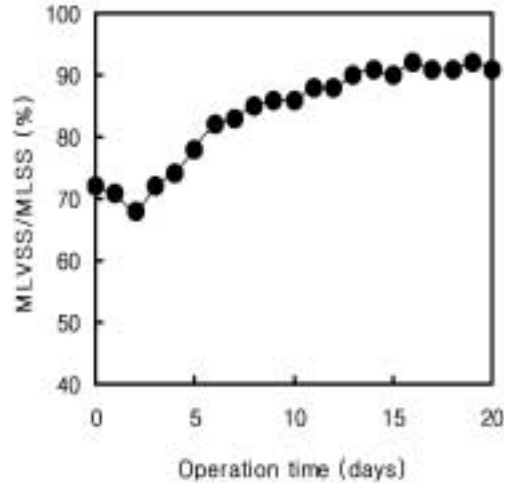


Fig. 9. Profile of MLSS/MLVSS ratio in SBR reactor operated at COD loading rate  $5.4 \text{ kg} \cdot \text{COD}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  according to operation time.

SVI 변화량을 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8을 보면 초기 입상 슬러지의 MLVSS 농도가  $4,897 \text{ mg}/\text{L}$ 로 일반적으로 알려진 활성슬러지의 MLVSS 농도인  $1,000 \text{ mg}/\text{L}$  보다는 약 5 배 큰 농도이었다. 운전 경과에 따라 입상형태의 슬러지가 해체되어 침강되지 않고 유출되는 SS 성분 때문에 운전시작 4일째까지는  $5,000 \text{ mg}/\text{L}$ 를 유지하였다. 운전시작 5일째부터는 직선적으로 증가하여 운전시작 15일째부터  $10,567 \sim 10,865 \text{ mg}/\text{L}$  정도의 농도를 운전 종료시까지 유지하였다.

입자의 침강속도와 더불어 고액분리 효율과 입자의 침강성을 나타내는 SVI변화를 살펴보면 초기 입상형태의 슬러지가 가지는 SVI는  $56 \text{ mL}/\text{g} \cdot \text{MLVSS}$  이었다. MLVSS 변화와 마찬가지로 SVI도 입상형태의 슬러지가 해체됨에 따라 입자크기가 작아짐과 동시에 침강성도 저하되어 운전시작 하루만에  $118 \text{ mL}/\text{g} \cdot \text{MLVSS}$ 를 나타내었다. 운전시작 6일째까지는  $45 \sim 48 \text{ mL}/\text{g} \cdot \text{MLVSS}$ 로 일정하게 유지되다가 운전시작 7일후부터 운전종료시까지 선형적으로 감소하여 최종 SVI는 안정된 수치인  $62 \sim 65 \text{ mL}/\text{g} \cdot \text{MLVSS}$ 이었다. 호기성 입상슬러지의 일반적인 SVI는  $60 \sim 120 \text{ mL}/\text{g}$ 로 보고되는데 본 실험에서는 기존의 연구보고 보다는 SVI 값이 낮아 침강성이 양호한 것으로 판단된다.

SBR 장치에서 운전시간 경과에 따른 반응조 내 MLVSS/MLSS 비 변화를 Fig. 9에 나타내었다.

일반적으로 활성슬러지의 MLVSS/MLSS 비가 약 66 % 정도로 알려져 있는데 Fig. 9를 살펴보면 운전종료시

MLVSS/MLSS 비가 89 %로 나타나 호기성 입상화를 통해 고밀도의 미생물 군집체가 형성된다는 것으로 판단할 수 있다. 또한 본 실험에서 높은 MLVSS /MLSS 비가 높은 것은 하수와 본 실험에서 이용한 합성폐수와 차이에 서도 기인하는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에 형성된 입상형태의 슬러지를 연속회분식 장치에 주입하여 미생물의 호기성 입상화의 시간 단축과 호기성 입자의 물리·화학적 특성을 향상하고자 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 5.4 kg · COD/m<sup>3</sup> · d의 부하율에서 20일 만에 2.6 mm 내외의 호기성 입자를 형성하여 기존의 호기성 입상화 공정보다 시간단축과 큰 입경의 슬러지가 나타났다.
2. EPS 물질 중 다당류의 증가와 표면음전하 감소에 의한 전기적 반발력 저하로 호기성 입상화가 진행되었다.
3. 운전시간이 경과함에 따라 MLSS 농도와 MLVSS 농도는 점차적으로 증가하여 최종 MLSS/MLVSS 비는 0.89를 나타내었고 SVI 값은 62~65 mL/g · MLVSS로 고밀도 미생물군이 형성되었다.
4. SOUR 값이 346 mg · O<sub>2</sub>/g · MLVSS · hr로 기존의 호기성 입상화에 대한 연구결과보다 높게 나타나므로 도시하수 및 산업폐수에 적용시 보다 향상된 COD 제거효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

KSEE

#### 참고문헌

1. Belen A., Anuska M. C., and Juan M. G., "Aerobic granulation with industrial wastewater in sequencing batch reactors", *Water Res.*, **38**, 3389~3399(2004).
2. Yang S. F., Tay J. H., and Liu Y., "A novel granular sludge sequencing batch reactor for removal of organic and nitrogen from wastewater", *J. Biotechnol.*, **106**, 77~86(2003).
3. Qin, L., Tay J. H., and Liu Y., "Selection pressure is a driving force of aerobic granulation in sequencing batch

- reactors", *Proc. Biochem.*, **39**, 579~584(2004).
4. Qin, L., Liu, Y., and Tay, J. H., "Effect of settling time on aerobic granulation in sequencing batch reactor", *Biochem. Eng. J.*, **21**, 47~52(2004).
5. Hu, L., Wang, J., Wen, X., and Qian, Y., "The formation and characteristics of aerobic granules in sequencing batch reactor(SBR) by seeding anaerobic granules", *Proc. Biochem.*, **40**, 5~11(2005).
6. Wang, Q., Du, G., and Chen, J., "Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force", *Proc. Biochem.*, **39**, 557~563(2005).
7. El-Mamouni, R., Leduc, R., and Guiot, S. R., "Influence of synthetic and natural polymer on the anaerobic granulation process", *Water. Sci. Technol.*, **38**, 341~347(1998).
8. Liu, L., Wang, Z., Yao, J., Sun, X., and Cai. W., "Investigation on the formation and kinetics of glucose-fed aerobic granular sludge", *Enzyme and Micro. Tech.*, **36**, 712~716(2005).
9. Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y., "Microscopic observation of aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor", *J. Appl. Micro.*, **91**, 168~175(2001).
10. Yang, S. F., Liu, Q. S., Tay, J. H., and Liu, Y., "Growth kinetics of aerobic granules developed in sequencing batch reactors", *Lett. Appl. Microbiol.*, **38**, 106~112(2004).
11. Zheng, Y. M., Yu, H. Q., and Sheng, G. P., "Physical and chemical characteristics of granular activated sludge from a sequencing batch airlift reactor", *Proc. Biochem.*, **40**, 645~650(2005).
12. Kim, S. M., Kim, S. H., Choi, H. C., and Kim, I. S., "Enhanced aerobic floc-like granulation and nitrogen removal in a sequencing batch reactor by selection of settling velocity", *Water Sci. Technol.*, **50**, 6, 157~162(2004).
13. Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y., "The effect of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules", *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **57**, 227~233(2001).
14. Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y., "The role of cellular polysaccharides in the formation and stability of aerobic granules", *Lett. Appl. Microbiol.*, **33**, 222~226(2001).
15. Sutherland, I. W., "Bacterial exopolysaccharides", *Advanced Micro. Physiol.*, **8**, 143~213(1972).

16. Marshall, K. C., and Gruickshank, R. H., "Cell surface hydrophobicity and the orientation of certain bacteria at interface", *Arch. Microbiol.*, **91**, 29~40(1973).

17. Pringle, J. H., Fletcher, M., "Influence of substratum wettability on attachment of fresh bacteria to solid surface", *Appl. Environ. Microbiol.*, **45**, 811~817(1983).