호기성 입상화 장치를 이용한 입상슬러지 생성 및 특성

Formation and Characteristics of Granular Sludge Using Aerobic Granular 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 aerobic granular reactor. To make aerobic granular sludge in short period of time, we used polymer. In reactor, we have studied on physicochemical characteristics of particle size, density, and microbial secreting polymer depending on aerobic particle's formation. The results of running aerobic granular reactor with 3, 6, 9 kg · COD/m^3 · d of COD loading rate and 35 days reaction time showed that particle size were 3.6 mm, 4.3 mm, and 3.4 mm respectively. The settling velocities were 1.5 cm/s, 1.6 cm/s, and 1.2 cm/s respectively. The microbic growth rates were 0.12 d^{-1}, 0.135 d^{-1}, and 0.133 d^{-1} respectively. The overall result of aerobic granular reactor showed that 6 kg · COD/m^3 · d of COD loading rate had optimal physicochemical characteristics.

Key words : *Aerobic Granular, Polymer, Sludge, Partical Size, Specific Growth Rate*

요약 : 본 연구는 고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에 입상형태의 슬러지를 제조한 다음, 입상슬러지를 호기성 입상화 장치에 주입하여 입상화를 시도하였다. 각 반응조에서 호기성 입자의 형성에 따른 입자의 크기, 밀도, 입자내 미생물 체외분비 고분자물질 등의 물리 · 화학적인 특성을 조사하였다. 입상형태의 슬러지를 호기성 입상화 장치에 주입하여 COD 부하량 3, 6, 9 kg · COD/m^3 · d로 35일간 운전한 결과 최종 형성된 호기성 입장의 평균 크기는 각각 3.6 mm, 4.3 mm, 3.4 mm 이었고 호기성 입자의 침강속도는 각각 1.5 cm/s, 1.6 cm/s, 1.2 cm/s 이었다. COD 부하량에 따른 미생물 군집체의 비성장속도는 0.12 d^{-1}, 0.135 d^{-1}, 0.133 d^{-1}이었으며 전반적으로 호기성 입상화 장치에서는 COD 부하량이 6 kg · COD/m^3 · d로 운전된 반응조에서 호기성 입자의 물리 · 화학적인 특성이 우수하였다.

주제어 : 호기성 입상화, 고분자 응집제, 슬러지, 입자크기, 비성장 속도

1. 서 론

도시하수나 산업폐수의 생물학적 처리에 주로 이용되고 있는 재래식 활성슬러지 공법과 영양물질 제거를 위한 변형된 활성슬러지 공법들은 다단의 폭기조와 2차 침전조와 같은 시설들이 다량으로 필요하게 되어 넓은 부지의 요구와 복잡한 기계장치의 필요성, 처리시에 수리학적 부하에 민감하고 슬러지 부상현상 등 다양한 문제가 발생하였다.

이러한 단점을 극복하고자 생물학적으로 유기물을 분해할 수 있는 미생물 자기고정화의 일환으로 미생물 입상화에 대한 연구가 광범위하게 연구되어 왔으며, 그 대표적인 예로서는 상향류혐기성 슬러지블랑켓(UASB) 공법과 부착식 성장방법인 생물막을 이용한 Captor 공정이 폐수처리에 이용되어져 왔다. 일반적으로 UASB 반응조는 초기 운전시 운전조작방법이 어려우며 통상 4~6개월간 시운전이 필요하다는 단점을 지니고 있다. 장기간의 시운전에 대한 대책으로 G. Lettinga와 M. Hobma[1]는 소량의 입상화 슬러지를 식종하여 초기운전 기간을 단축할 것을 권하고 있다. 종래의 슬러지 입상화 촉진제로는 활성탄, 철 및 칼슘성분과 같은 무기물을 투입하여 입상화 핵으로 활용한 경우도 있으나 이는 6개월 정도의 시간이 입상화 슬러지 형성에 요구되며 지속적으로 투입을 하여야 하는 단점을 가지고 있다.

최근 미생물 자기고정화를 이용한 활성슬러지의 입상화에 대한 연구는 호기성 입상슬러지에 대한 검토와 논의가 증가하고 있다. 호기성 입상슬러지는 재래식 활성슬러지 플럭과 비교하면 보다 더 규칙적이고 밀도가 크고 조밀하며 강한 미생물적 구조를 가지고 있으며 양호한 침강성을 나타내고 있다. 또한, 반응조내에 높은 미생물량을 가지며 고부하의 충격에도 견딜 수 있는 능력을 지니는 것으로 보고되고 있다.[2] 따라서, 혐기성 입상화 슬러지와 마찬가지로 호기성 입상화슬러지도 도시하수

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

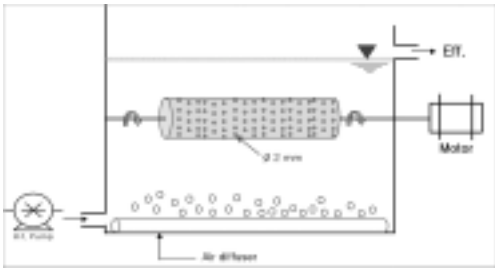


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for aerobic granulation.

와 산업폐수처리에 적용이 가능할 것이라 보고되고 있다.[3)]

고분자 응집제를 이용한 입상슬러지의 경우, 미생물과 부유물질의 단순한 가교역할을 수행하고 있어 반응조내에서 일정시간이 경과하면 플럭이 해체되어 입상화의 의미를 감소시킨다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고 활성슬러지내의 미생물만의 결합체를 형성시키기 위해 고분자 응집제를 이용하여 입상형태의 슬러지를 형성한 후 호기성 입상화 실험을 수행하였다. 반응조 운전시간에 따른 호기성 입자의 생성 여부, 최종 입자 생성 시기, 호기성 입자의 구조와 물리 · 화학적인 특성 등을 검토하였고, 기존 호기성 입상화 연구들과의 비교 · 분석을 시행하여 미생물의 호기성 입상화 시간단축과 물리 · 화학적인 특성 향상에 대한 가능성을 고찰한 내용을 기술하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

본 연구에서는 먼저 하수처리장의 반송슬러지에 고분자 응집제를 투여한 후 슬러지의 전기적 중화 및 가교역할을 유도하여 짧은 시간에 입상형태의 슬러지를 제조하였다. 이렇게 제조된 입상형태의 슬러지를 Fig. 1과 같이 호기성 입상화 장치에 주입하여 호기성 입상화를 시도하였다.

Fig. 1에 도시한 호기성 입상화 장치는 유효용량 2 L의 반응조 내부에 원통형의 호기성 입상화조로 구성하였다. 반응조와 입상화조는 두께 5 mm의 아크릴로 제작하였으며 원통형의 호기성 입상화조는 내경 50 mm, 길이 120 mm, 유효용적은 0.2 L 정도이며 입상화조를 회전시키기 위하여 5 rpm으로 회전하는 감속기를 부착하여 사용하였다. 호기성 입상화조와 반응조 사이의 원활한 합성폐수 이동을 위하여 입상화조 표면에 2 mm의 구멍을 내었으며 표면 유공율은 60 % 정도이다. 또한 입상화조 내의 입상화 슬러지의 원활한 시료채취를 위하여 입상화조 하부에 탭을 내어 사용하였으며 입상화조에 공기를 공급하기 위하여 반응조 하부에 공기공급장치(nitto kohki, 50 L 106502)를 장착하였다. 합성폐수의 유입은 유입펌프(ProMinent Korea, conbobo3pp)를 통하여 정량적으로 주입하였으며 유출수는 자연 유하식으로 유출하였다.

2.2. 시료

본 실험에 사용된 활성슬러지는 부산광역시 소재 S 하수처리장의 반송슬러지를 채취하여 실험에 사용하였다. 채취된 활성슬러지는 20 mesh의 체를 이용하여 협잡물을 제거하고 아크릴아마이드계의 양이온성 유기고분자(c-492 HMW, cytec, USA)를 주입하였으며 반대 전하의 음 이온성 무기고분자는 silica-sol을 이용하였다.

본 실험에 사용된 활성슬러지의 특성과 합성폐수의 조성을 각각 Table 1과 2에 제시하였다.

Table 2에 제시한 합성폐수는 Tay 등[4)] 연구결과에 따라 글루코스 성분만을 주탄소원으로 하고 있으며 유입 COD 부하량의 증가에 따라 농도를 조절하여 사용하였다. 미생물의 성장에 필요한 질소와 인의 기준은 생활하수를 기준으로 정하였다.

2.3. 실험방법

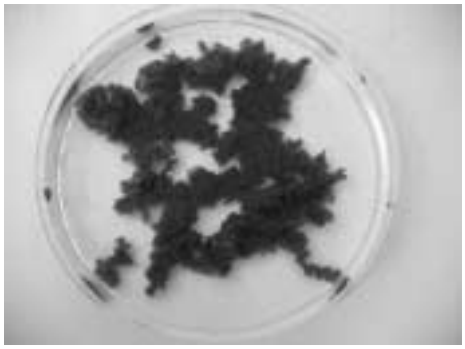
Spaghetti model에 근거하여 자테스터를 이용하여 슬러지의 입상화를 촉진하기 위해 분자량이 3,000,000 이상이며 사슬 내에 양이온이나 음이온 기를 함유하고 있는 선형 및 비선형 수용성 고분자를 활성슬러지 건조중량 대비 0.7 %(w/w)가 되도록 투입함으로써 전기적 중화 및 가교결합을

Table 1. The characteristics of activated sludge used for aerobic granulation in this study

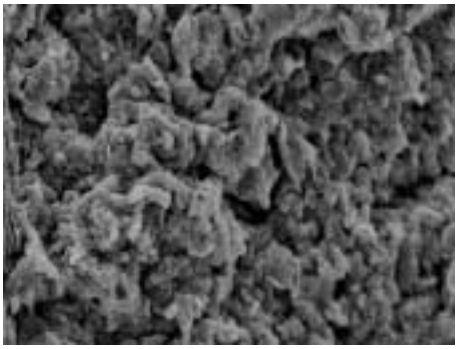
Parameters	Units	Concentrations	
		Range	Average
pH	-	6.5~7.8	7.2
TCOD	mg/L	324~708	647
MLSS	mg/L	1,830~3,020	2,350
MLVSS	mg/L	985~1,650	1,340
SVI	mL/g	115~149	128

Table 2. Composition of synthetic influent wastewater used for aerobic granulation in this study

Nutrition component	Concentration (mg/L)	Trace elements*	Concentration (mg/L)
Glucose	750	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	20
NH_4Cl	150	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	50
K_2HPO_4	20	H_3BO_3	50
KH_2PO_4	20	$MnSO_4 \cdot H_2O$	50
$mgSO_4 \cdot 7H_2O$	25	$Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	10
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	30	$ZnCl_2 \cdot 7H_2O$	10
		$CoCl_2 \cdot 6H_2O$	50
Trace element*	1 mL		



(a)



(b)

Fig. 2. Morphology observation of granular sludge formed by enhancing polymer. (a) Photograph (b) SEM (× 1,000)

유도하여 입상형태 슬러지를 만들었다.[5)]

원통형의 입상화조에 주입한 입상형태 슬러지는 활성슬러지에 유·무기 고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에 형성된 입상 형태의 슬러지를 사용하였으며 MLSS 12,000 mg/L 정도의 농도로 충전시켰고, Tay[2,4)]와 Shin 등[6)]의 논문에 의해 수리학적 전단력을 부여하여 호기성 입상화를 촉진하기 위하여 원통형의 반응조를 5 rpm의 속도로 회전시켰다. 반응조로 유입되는 합성폐수의 COD 부하량은 3, 6, 9 kg·COD/m^3·d 로 조절하였으며 반응조 하부로 부터 이송되는 공기량은 겉보기 상향 공기속도 1.2 cm/s 이상으로 유지하였으며 DO 농도는 2 mg/L 이상을 유지하였다. 반응조의 pH는 6.8~7.2 정도의 중성으로 유지하였으며 수리학적 체류시간은 3시간으로 비교적 짧은 시간으로 고정하였다.

2.4. 분석

호기성 입상화 실험을 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 체외분비 고분자물질(EPS), 침강속도, 화상분석기(IA)를 이용하여 입자크기, Standard method(APHA, 1998)를 이용하여 호기성 입상 활성슬러지의 COD, ML(V)SS 등을 분석하였다.[7)]

3. 결과 및 고찰

3.1. 고분자 응집제에 의한 입상형태 슬러지

유·무기 고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에 형성된 입상슬러지의 형태와 물리·화학적인 특성을 Fig. 2와 Table 3에 나타내었다.

Fig. 2를 살펴보면 고분자 응집제를 이용하여 형성된 입상형태 슬러지는 외형적으로 형상이 일정하지 않고 표면이 거칠어 보이고 불규칙한 형태와 표면을 지니고 있다.

Table 3을 살펴보면 입자의 크기는 0.3~4 mm 정도의 범위로 평균 3 mm 정도이었다. 이 입자의 크기는 순수한 활성미생물만의 응집체가 아니라 슬러지 내에 포함되어 있는 활성미생물과 부유 고형물을 고분자 응집제를 이용하여 단순한 가교역할을 하여 나타난 크기라 할 수 있을 것이다. 입자의 침강성의 지표라 할 수 있는 입자의 밀도는 1.022~1.056 g/mL의 범위를 나타내었으며 평균 1.048 g/mL이었다. 대체적인 호기성 입자들의 비중이 1.004~1.065 사이의 범위를 가진다고 보고되었는데[4)] 짧은 시간에 형성된 입상슬러지는 전형적인 입상슬러지의 밀도를 지니는 것으로 판단된다. 입자의 밀도와 더불어 입자의 침강속도는 1.8~2.3 cm/s 범위에 있었으며 평균 2.1 cm/s 였다. 입자의 MLSS는 평균 6,200 mg/L 이었고 MLVSS는 평균 4,300 mg/L으로 MLVSS/MLSS의 비는 평균 0.7 이었다. 입자 내의 세포 체외분비 고분자 물질(EPS) 중 다당류와 단백질 성분의 평균은 각각 17.6 mg/g·VSS와 28.3 mg/g·VSS를 나타내어 다당류/단백질의 비율은 0.62 이었다. 활성슬러지는 다양한 구성

Table 3. The characteristics of granular type sludge formed by enhancing polymer

Parameters		Units	Concentrations	
			Range	Average
Granular size		mm	0.3~4	3
Granular density		g/mL	1.022~1.056	1.048
MLSS		mg//L	5,600~8,100	6,200
MLVSS		mg//L	3,800~5,100	4,300
Settling velocity		cm/s	1.8~2.3	2.1
SOUR		mg·O_2/g VSS·h	188~230	205
Surface hydrophobicity		%	28~34	31
COD removal efficiency		%	92~98	97
EPS	Polysaccharide	mg/g·VSS	17.1~18.2	17.6
	Protein	mg/g·VSS	28.1~28.8	28.3

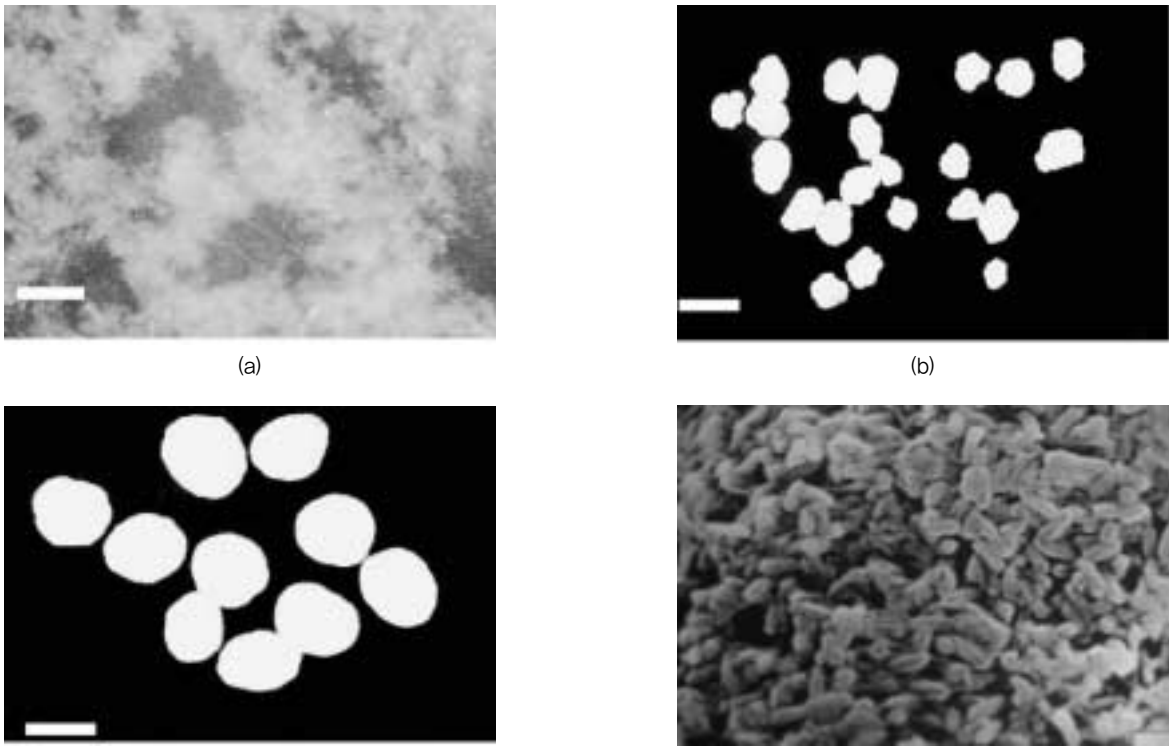


Fig. 3. Photographs of the granular sludge in the reactor on different days after inoculation. (bar = 4 mm)

물질의 복합체들로 구성되어 있고 물리적, 화학적, 생물학적인 다양한 변화를 관찰할 수 있다. 통상적으로 언급되는 입상슬러지는 순수한 고밀도의 활성미생물만의 결합체이기 때문에 고분자 응집제를 이용하여 제조된 입상슬러지는 진정한 의미의 입상슬러지라 볼 수 없을 것이다. 따라서 순수한 활성미생물만을 단기간에 점진적으로 성장 · 발달시키기 위하여 호기성 입상화 실험을 하였다.

3.2. 호기성 입상화 장치를 이용한 입상화

고분자 응집제를 이용하여 형성된 입상 슬러지를 입상화 형성조에 주입하고 합성폐수를 유입하면 엉켜있던 입자들이 약간은 풀어져 각각의 불규칙한 형태의 입자를 나타내었다. 입상화 형성조를 운전한지 하루가 지나면서 뭉쳐있던 입자들은 완전히 독립된 입자의 형태를 나타내었다. Tay 등[8]은 연속회분식 장치를 이용한 호기성 입상화를 시도한 연구에서 최종 형성된 호기성 입자는 주로 막대형태의 박테리아로 구성되어 있으며 매끈하고 둥글며 조밀한 형태를 지닌다고 보고하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 호기성 입상화 장치에서의 운전시간에 따른 호기성 입상화 과정을 화상분석기를 통하여 관찰한 결과는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에서 나타나는 바와 같이 시료로 이용된 활성슬러지 (a)의 화상분석 사진은 솜털모양의 매우 불규칙한 형태의 모양을 나타낸다. 운전시간이 경과되면서 불규칙한 외형이 매끈하고 조밀한 외형의 형태로 진행되는 것을 알 수 있다. 이러한 호기성 입상슬러지는 솜털모양의 활성슬러지에서 조밀한 응집체로 나아가 최종 성숙된 입자의 형태로 진행되는 것을 암시하는 점진적인 공정이라고 판단된다.

Fig. 3의 (c)와 (d)는 운전을 시작한지 35일 경과된 후의 성숙한 호기성 입상슬러지의 화상분석 사진과 주사현미경 사진으로 매끈한 둥근 형태의 외형을 나타내고 있으며 입자의 지름은 최대 4.2 mm를 유지하였다. SEM 분석에 의하면 고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에 형성된 입상슬러지에서는 볼 수 없었던 Zoogloea ramiger 등의 플럭생성 미생물들이 조밀하게 밀집되어 있는 형상을 나타내고 있다. 또한 윤 등[9]의 보고에서와 같이 운전과정 중의 수리학적 전단력 등과 같은 인자들에 의해 입상화슬러지가 지속적으로 형성되었으며 일정한 입경 이상으로 입자가 형성된 후에는 반응조 내 수리학적 전단력에 의한 표면 탈리과정의 균형에 의해 반응조 내의 바이오매스 농도가 일정하게 유지되는 것으로 판단된다.

3.3. 입자크기와 침강속도 변화

호기성 입상화 장치의 호기성 입상화 반응조에서 각각의 COD 부하율에서 운전시간에 따른 호기성 입자의 크기 변화는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4를 보면 고분자 응집제를 이용한 초기 입상 슬러지의

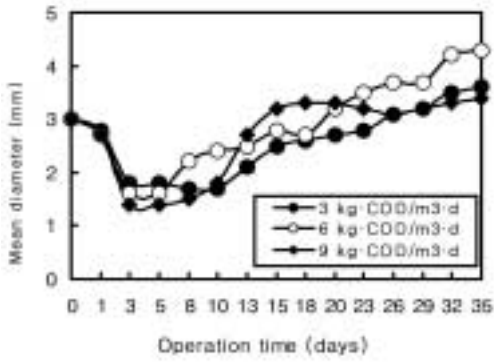


Fig. 4. Variation of aerobic granular diameter operated at different COD loading rate according to operation time.

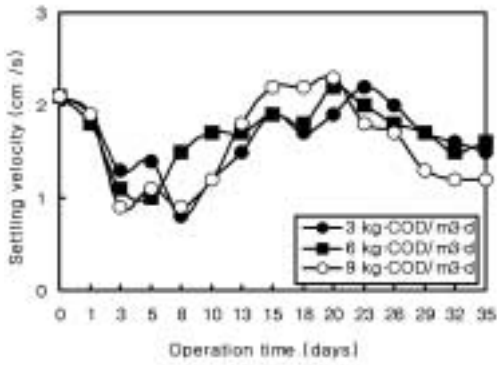


Fig. 5. Variation of granular sludge settling velocity operated at different COD oading rate.

평균 지름은 3 mm 정도였으나 입상화 형성조를 운전한지 3일이 지나면서 입상슬러지가 최하 1.4 mm 정도까지 해체되는 현상을 볼 수 있었다. 이는 합성폐수의 유입에 대한 적응과 수리학적 전단력으로 인한 입자사이의 초기 결합력이 낮아졌기 때문으로 생각된다. COD 부하가 6 kg · COD/m^3 · d로 운전되어진 반응조에서 8일이 지나면서 점차적으로 2 mm 전후의 크기로 입자가 유지되는 반면, 3, 9 kg · COD/m^3 · d로 운전되어진 반응조에서는 열흘이 경과한 후에야 입자의 크기가 회복세를 보였다. 운전을 시작한 지 열흘이 경과된 후에는 입자의 크기가 빠르게 성장해 갔으며 운전을 시작한 지 35일이 경과된 후에는 3 kg · COD/m^3 · d로 운전되어진 반응조에서의 입자는 평균 3.6 mm, 6 kg · COD/m^3 · d로 운전되어진 반응조에서의 입자는 평균 4.3 mm, 9 kg · COD/m^3 · d로 운전되어진 반응조에서의 입자는 평균 3.3 mm를 나타내었다.

유기물 부하율은 폐수처리공정의 설계에서 매우 중요한 운전상의 인자로서 취급되어진다. 유기물 부하율에 따른 호기성 입상화 실험을 행한 Moy 등[10]은 글루코스를 6 kg · COD/m^3 · d 부하로 주입한 호기성 입상화 실험에서 3주 후에 입상화 슬러지가 나타난다고 보고하였으며 최대 15 kg · COD/m^3 · d의 부하에도 호기성 입상화 슬러지가 형성된다고 주장하였다. 또한 단일 탄소원으로 글루코스를 각각 6, 9, 12, 15 kg · COD/m^3 · d로 주입하여 최종 성숙된 입자의 크기는 각각 2.7, 2.95, 3.06, 3.3 mm를 나타낸다고 보고하였다. Liu 등[11]은 유기물 부하율이 호기성 입상화에 미치는 영향을 관찰하였는데 유기물 부하율이 3 kg · COD/m^3 · d와 9 kg · COD/m^3 · d에서 운전된 반응조에서 각각 1.6 mm, 1.9 mm 정도의 호기성 입자를 형성하였다고 보고하였다.

본 실험과 Moy 등[10]과 Liu 등[11]의 연구결과와 비교하여 보면 동일한 유기물 부하율에서 입자의 크기가 1.5~2 mm의 차이를 나타내었다. 유기물 부하율에 따른 호기성 입자크기의 변화에 대한 연구보고를 살펴볼 때 호기성 입상화는 유기물 부하율에 민감하지 않다는 것과 호기성 입자형성에 유기물 부하율의 영향이 무의미하다는 것을 알 수 있다.[10] 그러나, 입자 형성에 따른 입자의 밀도, 비중, 물리적 강도 등과 같은 입자들의 물리적인 특징들은 유기물 부하율에 상당히 의존하는 것으로 생각된다.

호기성 입자들의 침강속도는 입자의 크기와 연관되어 있고 대체적으로 0.9~2 cm/s 정도의 높은 값을 가진다. 본 실험에서의 COD 부하량에 따른 입자의 침강속도를 Fig. 3과 같다.

Fig. 5를 살펴보면 호기성 입상화조에 주입한 입상형태 슬러지의 침강속도는 2.1 cm/s이었으며 각 COD 부하율에 따라 8일 경의 운전시까지는 입자의 해체에 기인하여 입자의 침강속도가 0.9 cm/s까지 감소하였다. 8일 이후에서 20일까지의 운전시간까지는 입자의 크기가 증가함에 따라 입자의 침강속도도 2.3 cm/s 까지 증가하였으나 20일 이후에서 실험 종료시까지는 대체적으로 침강속도가 감소하는 경향을 나타내었다. 운전경과 COD 부하율 3, 6, 9 kg · COD/m^3 · d로 운전된 입상화 형성조에서 35일째 입자의 침강속도는 각각 1.5 cm/s, 1.7 cm/s, 1.2 cm/s이었다. COD 부하율 3 kg · COD/m^3 · d로 운전한 입상화 형성조의 경우 초기 침강속도, 최대 침강속도, 최종 성숙된 입자의 침강속도가 각각 2.1 cm/s, 2.2 cm/s, 1.5 cm/s이었으며 입자의 크기가 2.8 mm 이상의 크기에서 침강속도가 감소하는 경향을 나타내었다. COD 부하율 6 kg · COD/m^3 · d로 운전된 입상화 형성조의 경우에는 초기 침강속도, 최대 침강속도, 최종 성숙된 입자의 침강속도가 각각 2.1 cm/s, 2.2 cm/s, 1.6 cm/s이었고 입자의 크기가 3.0 mm 이상의 크기에서 침강속도가 감소하는 경향을 나타내었다. COD 부하율 9 kg · COD/m^3 · d로 운전된 입상화 형성조의 경우 초기 침강속도, 최대 침강속도, 최종 성숙된 입자의 침강속도가 각각 2.1 cm/s, 2.3 cm/s, 1.2 cm/s이었고 입자 크기가 3.3 mm 이상의 크기에서 침강속도가 감소하는 경향을 나타내었다. 대체적으로 3 mm 이상의 입자의 크기에서 입자의 침강속도가 감소하는 경향을 나타내었으며 이는 Stock 법칙에 따른 입자상의 특성 중 입자 밀도에 의한 침강성 저하에 의한 것으로 판단된다.

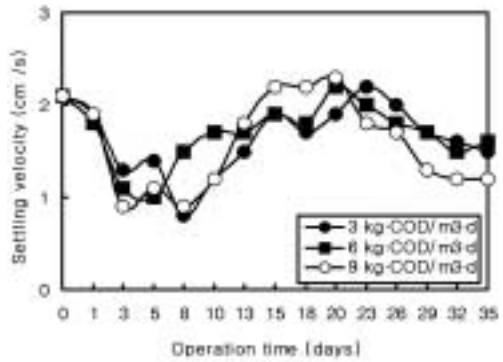


Fig. 6. Variation of the polysaccharides/protein ratio in the reactor.

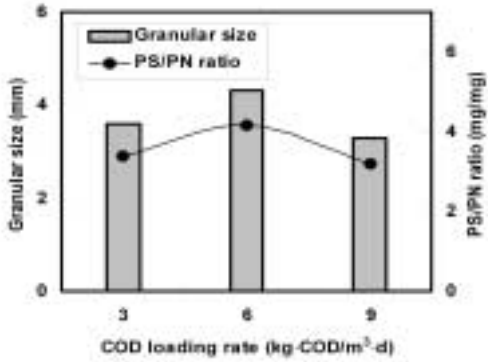


Fig. 7. Comparison of granular size and PS/PN ratio on different COD loading rate at mature aerobic granular sludge.

3.4. 부하량에 따른 EPS, SOUR 변화

미생물 체외분비 고분자물질(EPS)은 미생물들의 결합에 대한 단위 용량당 광범위한 표면적을 제공하고 활성슬러지 플럭 침전에 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있으며[12] 다당류, 단백질, DNA, 유믹산, 우론산 등의 물질로 구성되어 있다. 침전성이 우수한 미생물 군집체는 대체로 생물입상화 특성이 우수하며 EPS 물질을 다량으로 형성하여 이 EPS 물질들의 가교작용 작용을 통하여 입상화가 진행되는 것으로 알려져 있다.[2,13] 활성슬러지의 체외분비 고분자 물질의 주성분인 다당류(PS)와 단백질(PN)은 cold aquous extraction technique를 이용하여 추출하였으며, Table 4와 Fig. 6에는 운전기간 내 입상슬러지의 EPS 물질 중 다당류와 단백질의 변화량과 PS/PN 비를 나타내었다.

Table 4에 의하면 입상화 형성조 운전시간에 따른 다당류의 함량을 보면 10일 이후에는 다당류의 함량변화가 뚜렷히 나타났으며, 단백질 함유량의 경우 운전종료시까지 초기 입상형태 슬러지가 가진 단백질 함유량과 유사한 값을 유지하였다.

Fig. 6에 의하면 각 COD 부하율에 따른 입상슬러지의 단백질 함량의 변화는 크게 두드러지지 않아 PS/PN의 비율은 전적으로 다당류 함유량의 변화에 기인하게 되었다. 각 COD 부하율에서 운전경과 10일 경까지의 PS/PN 비율의 변화량은 다당류의 함유량 변화와 마찬가지로 큰 변화가 없었으나 10일 이후에서 PS/PN 비율의 변화량이 두드러졌다. 특히 COD 부하율 9 kg · COD/m^3 · d으로 운전된 입상화 형성조에서 10일 경과시와 18일 경과시의 PS/PN 비는 각각 1.3 mg PS/mg PN, 4.3 mg PS/mg PN이었다. 최종 형성된 호기성 입자의 PS/PN 비는 COD 부하량이 3, 6, 9 kg · COD/m^3 · d일 때 각각 3.4 mg PS/mg PN, 4.2 mg PS/mg PN, 3.9 mg PS/mg PN이였다. 이러한 수치는 다당류의 함유량이 단백질의 함유량보다 3~4배 정도 많다는 것을 의미하며 EPS 물질 중 다당류가 미생물의 자기고정화를 이용한 입상화에 상당히 기여한다는 것으로 판단할 수 있다. 호기성 입자형성에 대한 세포 다당류의 역할에 대하여 연구한 Tay 등[14]은 최종 형성된 입자의 PS/PN 비는 최소 5.7 mg PS/mg PN, 최대 13.9 mg PS/mg PN으로 보고하였으며 PS/PN 비가 크게 나타난 반응조에서 입자의 크기도 크게 형성되었다. COD 부하량에 따라 운전되어진 입상화 형성조에서 최종 형성된 입자의 크기와 PS/PN 비는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7을 살펴보면 COD 부하율 3 kg · COD/m^3 · d로 운전된 입상화 형성조에서 최종 형성된 입자의 크기와 PS/PN 비는 각각 3.6 mm와 3.4 mg PS/mgm PN이었으며 6 kg · COD/m^3 · d로 운전된 입상화 형성조에서 최종 형성된 입자의 크기와 PS/PN 비는 각각 4.3 mm와 4.2 mg PS/mg PN이었고 9 kg · COD/m^3 · d로 운전된 입상화 형성조에서 최종 형성된 입자의 크기와 PS/PN 비는 각각 3.3 mm와 3.2 mg PS/mg PN이었다. 이 결과를 바탕으로 판단할 때 호기성 입상화 실험에서 입자의 크기가 커질수록 PS/PN 비도 증가하였으며 호기성 입자의 형성에 미생물 체외분비 고분자 물질 중 다당류의 역할도 규명되었다.

미생물의 물질대사에 연관된 생화학적 반응들은 산소이용과 이산화탄소 발생량 사이에는 거의 비례관계가 성립된다. 본 실험에서도 호기성 입자의 생물학적 활성을 비산소소비율(SOUR) 수치에 의해 결정하였으며 시간당 VSS mg당 소비되어진 산소의 mg으로 표현하였다. Fig. 8에는 COD 부하율에 따른 호기성 입자의 SOUR 변화를 도시하였다.

Table 4. Comparison of Polysaccharide and Protein operated at different COD loading rate

Parameters(mg/g) \ Time(day)		0	5	10	15	20	25	30	35
3kg COD/m^3 · d	PS	17.6	20.2	20.7	59.7	78.6	91.5	95.9	99.3
	PN	28.3	28.9	28.4	29.4	29.1	28.6	28.2	29.2
6kg COD/m^3 · d	PS	17.5	20.4	24.8	75.2	101	112	117	120
	PN	28.3	29.1	29.2	28.7	28.6	28.8	28.6	28.9
9kg COD/m^3 · d	PS	17.6	21.4	37.3	110	121	109	115	111
	PN	28.3	28.9	29.4	28.6	28.6	28.3	28.6	28.6

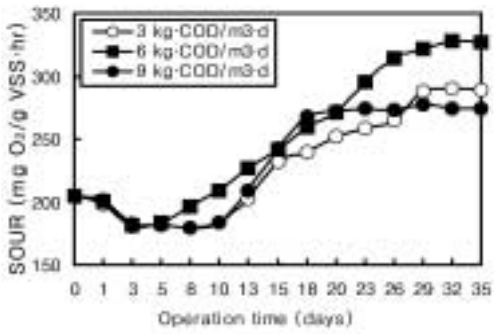


Fig. 8. Variation of SOUR operated at different COD loading rate.

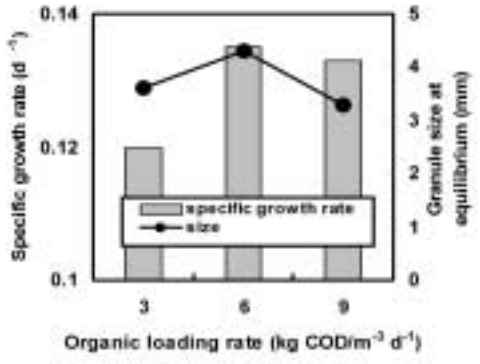


Fig. 9. Effect of organic loading rate on size of micobial aggregate at equilibrium and specific growth rate by size.

Fig. 8에 의하면 전반적으로 각 COD 부하당 운전초기 SOUR의 변화량은 적었으나 운전경과 8일 이후에 SOUR 수치가 증가하는 양상으로 나타났다. 운전초기 입상형태의 슬러지의 SOUR 값은 205 mg · O_2/g · VSS · hr이었고 최종형성된 호기성 입자의 SOUR 값은 COD 부하량이 3, 6, 9 kg · COD/m^3 · d일 때 각각 289 mg · O_2/g · VSS · hr, 327 mg · O_2/g · VSS · hr, 274 mg · O_2/g · VSS · hr이었다. COD 부하량이 6 kg · COD/m^3 · d로 운전된 반응조에서는 운전경과 5 일째 이후 선형적으로 SOUR이 증가되는 경향을 나타내었고 운전종료시의 SOUR는 327 mg · O_2/g · VSS · hr이었다. COD 부하량이 9 kg · COD/m^3 · d로 운전된 반응조에서는 운전경과 5일째부터 18일째까지는 SOUR이 선형적으로 증가하였으나 18일 이후부터 운전종료시까지는 일정한 값을 유지하였다. COD 부하량이 3, 6, 9 kg · COD/m^3 · d일 때 최종 형성된 입자의 크기가 각각 3.6 mm, 4.3 mm, 3.3 mm인 점을 감안하면 입자의 크기가 증가할수록 미생물학적 활성을 표현하는 SOUR 수치도 증가하는 현상을 나타내었다. Qin 등[16]은 SBR 장치에서 호기성 입상화 형성에 대한 침강시간의 영향을 조사하였는데 침강시간 5분 이내에서 형성된 입자의 크기가 2 mm 내외로 가장 크게 형성되었으며 최종 형성된 호기성 입자의 SOUR 수치는 280 mg · O_2/g · VSS · hr로 본 실험에서 나타난 수치보다 낮게 나타났다. Table 5에는 본 실험에서 최종 형성된 호기성 입자의 물성치와 기존 호기성 입자에 대한 연구결과의 물성치를 비교하여 나타내었다.

Table 5에 제시한 기존 호기성 입자에 대한 연구결과의 물성치는 평균범위를 나타내었다. 기존의 호기성 입자의 연구결과와 본 실험에서 획득한 호기성 입자와의 물성치를 비교하여 보면 본 연구에서는 COD 부하량을 3, 6, 9 kg · COD/m^3 · d 으로 조절하였는데 특히 COD 부하량이 6 kg · COD/m^3 · d로 운전되어진 반응조에서의 호기성 입자 물성치가 가장 높은 값으로 나타났다. 본 연구에서의 실험결과와 기존의 연구결과를 비교하여 보면 특히 본 연구에서는 SOUR, VSS/SS 비, PS/PN 비에서 기존의 연구결과보다 높은 값으로 조사되었다.

3.5. 부하량에 따른 비성장율

본 실험에서의 호기성 입상화에 대한 동력학적 고찰은 Gaudy 등[17]에 의해 제안된 방법을 이용하여 실험적으로 결정하였으며 평형상태에서의 미생물 군집체의 크기에 대한 유기물 부하의 영향과 미생물 군집체 크기에 따른 비성장율과의 관계를 Fig. 9에 나타내었다.

유기물 부하에 따른 미생물 군집체의 비성장속도는 각각 0.12 d^{-1}, 0.135 d^{-1}, 0.133 d^{-1} 값을 나타내었다. 일반적으로 COD 부하율이 증가하면서 미생물 군집체의 비성장속도도 증가하는 수치를 나타내지만 본 실험에서는 COD 부하율이 6 kg · COD/m^3 · d로 운전된 반응조와 9 kg · COD/m^3 · d의 부하율로 운전되어진 반응조에서 의 비성장율은 비슷하였다. 이는 COD 부하율이 6 kg · COD/m^3 · d로 운전된 반응조에서는 운전종료시까지 계속 미생물 군집체가 성장하는 반면 COD 부하율이 9 kg · COD/m^3 · d로 운전된 반응조에서의 미생물 군집체는 운전시작 15일째 평형상태에 도달하여 운전종료시까지 미생물 군집체가 더 이상 성장하지 않았기 때문이라 판단된다.

Table 5. Characteristics of mature aerobic granular sludge at different organic loading rate

Parameters	R 1	R 2	R 3	Aerobic granulation
Organic loading rate (kg · COD/m^3 · d)	3	6	9	1~15
Mean diameter (mm)	3.6	4.3	3.3	1.3~4.8
SOUR (mg · O_2/g · VSS · hr)	273	314	260	82~250
Cell hydrophobicity (%)	72	81	84	70~85
Granule settling velocity (cm/s)	1.5	1.7	1.2	12~22
PS/PN ratio (%)	3.4	4.2	3.9	2~4
Surface charge (meq/g · VSS)	−0.058	−0.017	−0.12	−0.42~−0.26
VSS/SS ratio (%)	86	92	83	82~91

4. 결 론

고분자 응집제를 이용하여 짧은 시간에 형성된 입상형태의 슬러지를 호기성 입상화 장치에 주입한 후 COD 부하량을 3, 6, 9 kg · COD/m^3 · d로 조절하면서 호기성 입상화 변화를 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 호기성 입상화 장치에서 35일만에 최종적으로 평형상태의 호기성 입상화가 나타나므로 기존의 호기성 연구결과에 비해 시간 단축이 나타났다.
2. 유기물 부하량을 6 kg · COD/m^3 · d로 운전된 반응조에서 입자의 평균지름은 4.3 mm, 평균 침강속도 1.7 cm/s로 가장 높게 나타났다.
3. 호기성 입상화 장치에서 유기물 부하에 따른 미생물 군집체의 비성장속도는 각각 0.12 d^{-1}, 0.135 d^{-1}, 0.133 d^{-1} 값을 나타내었다.
4. 호기성 입상화 장치의 운전결과 SOUR, VSS/SS 비, PS/PN 비 등에서 기존의 호기성 연구결과 보다 향상된 값이 나타나므로 도시하수 및 산업폐수의 생물학 처리공정에 응용시 보다 안정된 처리효율을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

KSEE

참고문헌

1. Lettinga, G. and Hobma, S. W., "Design operation and economy of anaerobic treatment" *Water. Sci. Technol*., **15**, 177~195 (1983).
2. 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).
3. Su, K. Z., and Yu, H. Q., "Formation and characterization of aerobic granules in a SBR treating soybean-processing wastewater," *Environ. Sci. Technol*., **39**, 2818~2827(2005).
4. 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).
5. Yu, L., Xu, H. L., Yang, S. F., and Tay, J. H., "Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor," *Water Res*., **37**, 661~673(2005).
6. Shin, H. S., Lim, K. H., and Park, H. S., "Effect of shear stress on granulation in oxygen aerobic upflow sludge reactors," *Water Sci. Technol*., **26**, 601~605(1992).
7. Lenore, S. C., Arnold, E. G., and Andrew, D. E., "Standard Methods for examination of water and wastewater : COD(5220), ML(V)SS(2540)", 19th ED, APHA-AWWA-WPCF(1998).
8. Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y., "Aerobic granulation in sequential sludge blanket reactor," *Water Sci. Technol*., **46**, 13~18(2002).
9. 윤주환, 장희란. 한종훈, 한혜정, "SBR에서 호기성 입상슬러지의 형성," 한국물환경학회지, **20**(5), 534~538(2004).
10. Moy, B. Y. P., Tay, J. H., Toh, S. K., Liu, Y., and Tay, S. T. L., "High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules," *Lett. Appl. Microbiol*., **34**, 407~412 (2002).
11. Liu, Q. S., Tay, J. H., and Liu, Y., "Substrate concentration-independent aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor," *Environ. Technol*., **24**, 1235~1243(2003).
12. Delia Teresa Sponza., "Investigation of extracellular polymer substances (EPS) and physicochemical properties of different activated sludge flocs under steady-state conditions," *Enzy. and Micro. Technol*., **32**, 375~385(2003).
13. Yang, S. F., Tay, J. H., and Liu, Y., "Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules," *J. Environ. Eng*., **131**, 1, 86~92(2005).
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. 김광수, 박수영, "입상활성슬러지와 멤브레인 조합공정에 의한 수처리공법개발(Ⅱ)," (주) 알오환경시스템, 38~40 (2001).
16. 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).
17. Gaudy, A. F., and Gaudy, E. T., " Microbiology for environmental scientists and engineers," New York : Mc Graw Hill(1980).