

SBR공정에서 전자수용체에 따른 호기성 입상활성슬러지의 공정별 특성

김이태 · 이희자[†] · 배우근^{*}

한국건설기술연구원 건설환경연구부

^{*}한양대학교 건설환경시스템공학과

Characteristics of Aerobic Granular Activated Sludge According to Electron Acceptors in Sequencing Batch Reactor Process

I-Tae Kim · Hee-Ja Lee[†] · Woo-Keun Bae^{*}

Korea Institute of Construction Technology

^{*}Hanyang University Department of Civil & Environmental Systems Engineering

(Received 9 July 2004, Accepted 19 August 2004)

Abstract : This study was conducted to find the effect of electron acceptors on the formation of granular sludge by using four different types of electron acceptors. The phosphorous uptake, denitrification, and sulfate reduction in anoxic modes were simultaneously occurred because of the presence of the polyphosphate accumulating organism(PAO) that utilize nitrate and sulfate as an electron acceptor in the anoxic zone.

Denitrifying phosphorous removal bacteria(DPB) was enriched under anaerobic/anoxic/aerobic condition with a nitrate as an electron acceptor, and desulfating phosphorous removal bacteria(DSPB) was enriched under anaerobic/anoxic/aerobic condition with a sulfate as an electron acceptor. Polyphosphate accumulating organism(PAO) were enriched in the anaerobic/aerobic SBR. PAO took up acetate faster than DPB and DSPB during the aerobic phase. The sludge with nitrate and sulfate as an electron acceptors grew as a granules which possessed high activity and good settleability. In the anaerobic/aerobic modes, typical floccular growth was observed.

In the result of bench-scale experiment, simultaneous reactions of phosphorus uptake, denitrification and sulfate reduction were observed under anoxic condition with nitrate and sulfate as an electron acceptors. These results demonstrated that the anaerobic/anoxic modes with nitrate and sulfate as an electron acceptors played an important role in the formation of the sludge granulation.

keywords : Sequencing batch reactor(SBR), Polyphosphate accumulating organism(PAO), Denitrifying phosphorous removal bacteria(DPB), Electron acceptors

1. 서론

일반적으로 활성슬러지공법은 하·폐수의 유기물을 제거하기 위하여 가장 많이 사용되고 있지만, 유입수의 충격부하 및 과부하에 민감하여 유기물부하 및 수리학적 부하가 적정 설계범위를 넘을 경우 SS 유출과 같은 중대한 문제가 발생한다. 또한, 공정설계시 폭기조와 고액분리를 위한 2차 침전지 같은 부대시설을 필요로 하며 슬러지 팽화 현상으로 최종침전지에서의 고액분리가 어렵고 운전이 까다로운 단점이 있다. 상향류 혐기성 슬러지블랭킷(UASB) 반응조는 반응기내에 접촉재, 충전재, 유동입자 등의 생물막 담체를 이용하지 않고 슬러지 미생물 자신이 가진 응집·응결 기능(aggregation, agglomeration)을 이용하여 침강성이 뛰어난 입상슬러지를 형성시켜 고농도의 생물량을 반응조내에 유

지하도록 하는 일종의 자기 고정화(self-immobilization) 방식의 메탄발효 생물반응조로 알려져 있다(Lettinga et al., 1980). UASB 공법은 고농도의 유기물질을 제거하기 위한 혐기성 공정에서 널리 사용되고 있지만, 입상슬러지의 생성 및 반응기작에 대해서는 아직도 많은 연구가 진행중에 있다.

최근에는 슬러지의 입상화가 UASB 반응조의 메탄생성균에만 국한된 것이 아니라 질산화균, 탈질균 및 SBR 공정의 호기성 슬러지에 의해서도 생성되는 것이 관찰되었다(Tay et al., 2001). Morgenroth 등(1997)에 의한 연구에 의하면, SBR 반응조에서 기질을 간헐적으로 주입했을 때 침강성이 양호한 입상슬러지가 생성되었다고 발표하였다. Beun 등(1999)도 슬러지의 입상화는 어떤 특정 미생물 그룹에만 한정된 것이 아니며 반응조를 운전하는 방법과 깊은 관련이 있으며, 호기성 입상슬러지의 형성은 활성슬러지 공정보다 높은 유기물 부하량, 기질의 종류, 공기량, 침전 시간 등이 중요한 영향인자로 작용한다고 하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
ink42@kict.re.kr

슬러지의 입상화는 서로 다른 많은 종류의 미생물들이 물리화학적 및 미생물학적 반응을 수행하여 형성되는 복잡한 과정으로 많은 인자들이 슬러지 입상화에 관련되어 있으며, 불활성물질이나 무기성 침전물질에 미생물들이 부착하거나 흡착되어 생성될 수도 있다. 또한 칼슘, 철과 같은 양이온 금속들도 슬러지 입상화를 촉진시키는 중요한 역할을 담당하는 것이 보고되고 있으나(Yu et al., 2001), 입상 슬러지의 생성 및 반응기작에 구체적으로 어떤 역할을 수행하는지에 대한 연구는 밝혀지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 실험실 규모의 연속회분식 반응조(SBR)를 운전하면서 전자수용체(황산염, 질산염, 황산염+질산염)에 따른 입상슬러지의 생성특성 및 각 단위공정별 유기물질, 질소 및 인의 거동과 세포분비물질의 특성을 파악하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

실험장치는 Fig. 1과 같이 직경 10cm, 높이 25cm, 실용적 800mL의 아크릴로 제작된 4개의 SBR 반응조를 이용하였으며, 입상활성슬러지의 생성에 대한 전자수용체의 영향을 파악하기 위하여 Table 1과 같이 혐기조건 후 무산소단계에 질산염과 황산염을 선택적으로 주입하는 실험을 수행하였다. R-1은 단순히 혐기-호기조건으로 운전하였으며, R-2는 혐기조건이 끝난 후 질산염을 주입한 혐기-무산소-호기조건, R-3는 혐기조건이 끝난 후 황산염을 주입한 혐기-무산소-호기조건, R-4는 무산소단계에 황산염과 질산염을 동시에 주입한 혐기-무산소-호기 조건으로 운전하였다. SBR 운전은 5hr을 1 cycle로 R-1 반응조는 혐기 2hr, 호기 2hr, 침전 30min, 배출 30min으로 운전하였으며, 기타 반응조는 혐기 1hr, 무산소 1hr, 호기 2hr, 침전 30min, 배출 30min으로 운전하였다.

유입수는 합성폐수를 이용하였으며, 모든 반응조에 유입 탄소원으로 아세트산을 초기농도로 300~500mg/L가 되도록 주입하였으며, S-P농도는 8~10mg/L, NH₃-N 농도는 25~30mg/L, 기타 칼슘, 철과 같은 미량 영양물질을 같은 농도로 주입하였다. 합성폐수에서 미량영양물질 주입농도는 CaCl₂·2H₂O 30mg/L, MgCl₂ 40mg/L, FeCl₃·6H₂O 16mg/L, KH₂PO₄ 35mg/L, K₂HPO₄ 45mg/L를 주입하였다.

전자수용체의 영향을 파악하기 위하여 무산소단계에 R-2 반응조에는 NO₃⁻-N 25~40mg/L, R-3 반응조에는 SO₄²⁻ 25~40mg/L, R-4 반응조에는 NO₃⁻-N과 SO₄²⁻를 각각 15~20mg/L가 되도록 주입하였다. Cycle별로 반응조별 물질의

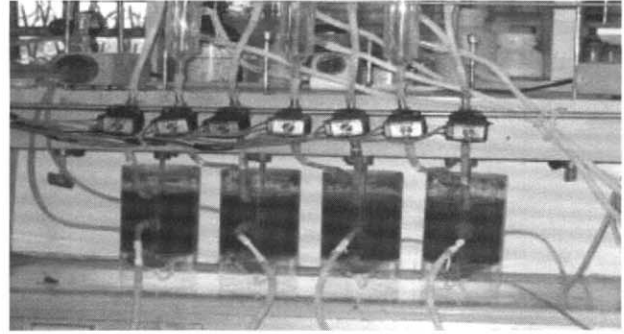


Fig. 1. Photos of bench-scale SBR process.

거동을 파악하기 위하여 20min 간격으로 COD, NH₃-N, NO₃⁻-N, PO₄³⁻-P, SO₄²⁻ 농도를 분석하였으며, 혐기, 무산소, 호기조건이 끝날 무렵에 슬러지 시료를 채취하여 PHB, ATP, glycogen, T-P/VSS 함량을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. SVI 변화

SBR 공정의 COD 및 NH₃-N 부하는 각각 0.9kg COD/m³·d, 0.14 kg NH₃-N/m³·d이며, 반응조의 MLSS 농도는 3,600mg/L, MLVSS 농도는 2,980mg/L였다. R-1~R-4 반응조 모두 초기에는 미생물 플록이 형성되었다가 점차적으로 입상슬러지의 형성에 따라 SVI가 낮아졌으며, 슬러지의 침강성을 측정된 결과 Fig. 2와 같이 R-1~R-4 모두 초기 SVI가 270~294mL/g이었으나 꾸준히 감소하여 SVI가 65~90mL/g까지 떨어졌다.

특히, sulfate를 무산소조건에서 전자수용체로 주입한 R-3 반응조의 슬러지 침강성이 좋았으며, SVI는 초기 294mL/g에서 실험을 시작하였으나 12일 후에는 65mL/g으로 매우 낮은 값을 보였으며, 다른 반응조에 비하여 안정적인 침강성을 보였다. 이것은 입상활성슬러지 내부에서 황산염 환원 박테리아에 의한 황산염의 환원으로 생성된 sulfide가 호기 조건에서 황산화세균에 의해 입상황(elemental sulfur)으로 산화되어 슬러지내에 존재하면서 그래놀을 촉진시켰기 때문으로 판단된다(Yamaguchi et al., 2001).

Fig. 3에는 입상슬러지의 생성에 중요한 역할을 담당하는 extracellular polymeric substance(EPS) 물질인 다당류와 단백질의 비를 각 반응조별로 측정된 결과를 나타내었는데, 슬러지의 침강성이 좋은 R-3 반응조의 수치가 비교적 낮았으며, R-1 반응조의 수치가 비교적 높았다.

Table 1. Operating conditions of SBR process

Reactor	Process	Electron acceptor	Anaerobic (min)	Anoxic (min)	Aerobic (min)	Settle (min)	Decant (min)
R-1	A/O	-	120	0	120	30	30
R-2	A ₂ /O	Nitrate	60	60	120	30	30
R-3	A ₂ /O	Sulfate	60	60	120	30	30
R-4	A ₂ /O	Nitrate+Sulfate	60	60	120	30	30

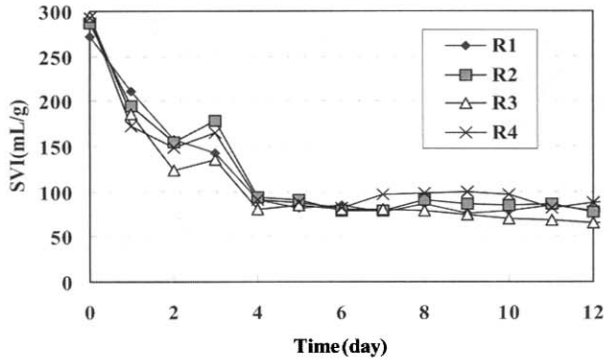


Fig. 2. Variation of Sludge Volume Index(SVI).

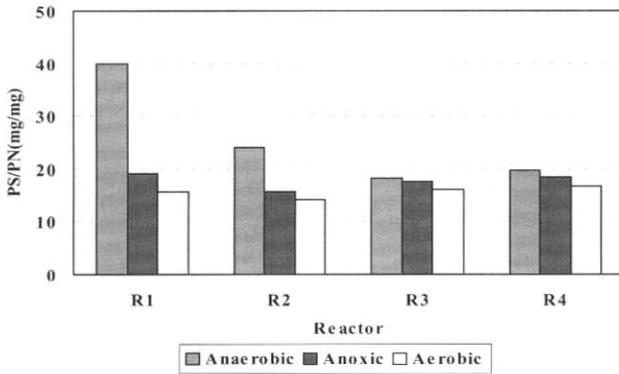


Fig. 3. The ratio of cellular polysaccharides(PS) to cellular proteins(PN).

미생물에 의해 생성된 EPS 물질은 대부분 다당류로 구성되어 있으며, 생물막이나 혐기성 입상슬러지의 형성과 유지에 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한, EPS 물질은 미생물의 표면전하를 변화시켜 미생물들을 서로 뭉치게 하는 가교역할을 한다고 한다(Tay et al., 2001).

Liu 등(2002)에 의하면 입상슬러지내에서 다당류(polysaccharides)는 단백질(protein)함량보다 훨씬 높은 농도로 측정되었고, 그레놀내 EPS물질의 성분을 분석한 결과 다당류가 중량비로 61.9%, 단백질이 14.4%, 기타 물질이 23.7%가 함유되어 있다고 한다. Vandevivere 등(1993)에 의한 연구에 의하면, 단백질에 대한 다당류의 함량은 부유 미생물보다 부착미생물이 5배정도 더 많으며, 따라서 단백질보다 다당류가 세포의 자기고정화에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Tay 등(2001)에 의한 연구에 의하면, 다당류는 호기성 입상슬러지를 형성하고 유지하는데 중요한 역할을 담당하고 있어 PS/PN비는 호기성 그레놀이 잘 형성될 때 증가한다고 발표하였는데, 본 실험에서는 혐기-호기조건으로 운전한 R-1 반응조의 PS/PN비가 높고 입상슬러지의 생성속도가 빠른 R-2~R-4 반응조에서 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이것은 초기 호기성 그레놀의 형성에는 다당류가 세포들을 연결하는 중요한 역할을 담당하여 R-1 반응조에서와 같이 PS/PN비가 증가하지만, R-2~R-4와 같이 그레놀 형성 이후에는 황이나 FeS, CaCO₃와 같은 불활성물질이 그

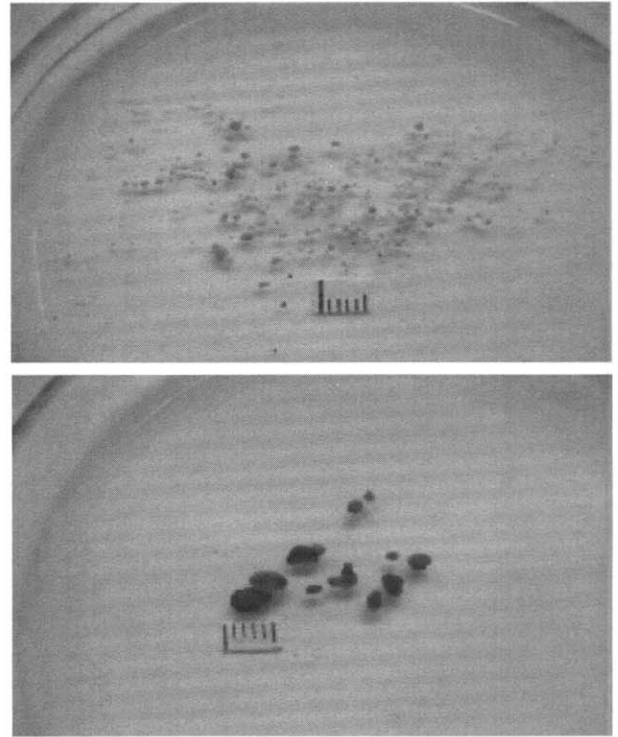


Fig. 4. Photos of granular activated sludge: (a) granules after 7 days in R-3; (b) granules after 30 days in R-3 (bar: 5mm).

래놀 유지에 더 큰 역할을 하는 것으로 판단된다.

Fig. 4에는 R-3 반응조에 형성된 입상슬러지의 사진을 나타내었는데, 초기에 분산되어 있던 슬러지들이 다당류와 같은 세포의 분비물질과 불활성물질에 의해 점차적으로 뭉치면서 12일 이후에는 1mm 내외의 그레놀을 형성하다가 한 달 후에는 3~4mm의 타원형 형태로 뭉쳐있는 입상활성슬러지를 확인할 수 있었다. R-2와 R-4 반응조의 슬러지도 R-3와 비슷한 경향을 보이면서 입상슬러지가 형성되었는데, R-1 반응조의 슬러지는 입상슬러지보다 오히려 플록에 가까운 형태를 보였다.

3.2. 반응조별 물질거동 변화

Fig. 5에는 R-1 반응조의 COD, 질소 및 인 농도의 변화를 나타내었는데, 2hr의 혐기조건에서 acetate의 급격한 소모(COD 300mg/L에서 52mg/L)와 함께 인방출이 10mg/L에서 24mg/L까지 활발하게 일어났으며, 2hr의 호기조건에서는 혐기조건에서 방출된 인 흡수와 함께 암모니아의 질산화가 진행되었다. R-1 반응조에서 COD제거와 인방출 및 흡수가 진행되는 동안의 pH는 혐기, 호기조건 동안에 7.3으로 중성을 유지하였으며, DO는 호기조건 동안에 3.0~4.0mg/L를 유지하였다. ORP는 초기에 10mV 였으나 혐기조건이 끝날 무렵 -90mV로 떨어졌다가 호기조건에서 다시 130mV까지 증가하였다.

R-1 반응조에서는 혐기조건에서 유기물의 감소와 함께 인의 방출이 활발하게 일어났으며, 다음 호기조건에서 인의

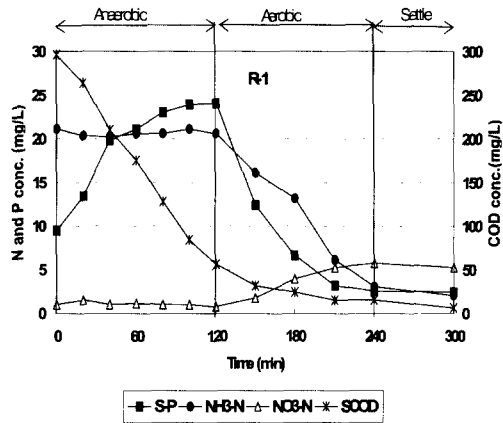


Fig. 5. COD, nutrients, DO, pH and ORP profiles in a SBR.

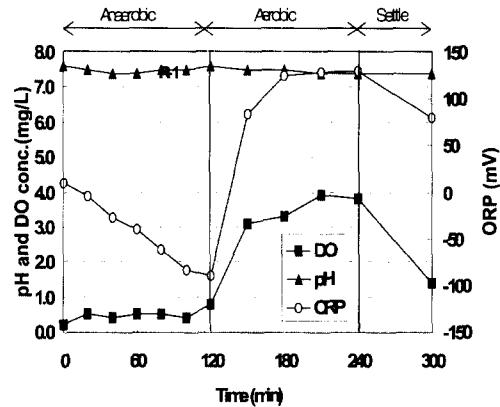


Fig. 6. COD, nutrients, DO, pH and ORP profiles in a SBR using nitrate as an electron acceptor.

과잉흡수가 일어나 전형적인 혐기-호기조건의 인축적 미생물(PAO)의 특성을 나타내었다. 따라서 다른 반응조의 슬러지와 비교해보면 SVI도 약간 높고, 그레놀 형성속도도 늦어 PAO에 의한 호기성 그레놀의 형성에는 많은 시간이 소요되는 것으로 판단된다.

Fig. 6에는 R-2 반응조의 COD, 질소 및 인의 농도 변화를 나타내었는데, 1hr의 혐기조건에서는 acetate의 감소와 함께 인방출이 8mg/L에서 18mg/L까지 활발하게 일어났으며, 1hr의 무산소 단계에서는 질산염의 감소(25mg/L에서 5mg/L)와 함께 인 흡수가 일어났다. 호기조건에서는 암모니아의 질산화가 활발하게 진행되어 질산염 농도가 약간 증가하였으며, 무산소조건에서와 같이 인흡수도 계속 진행되었다. 운전기간동안의 pH는 7.3~7.5로 중성을 유지하였으며, DO는 호기조건 동안에 3.5~4.0mg/L를 유지하였다. ORP는 혐기조건에서 -28mV까지 감소하였다가 무산소조건에서 -10mV까지 증가하는 경향을 보였으며, 호기조건에서는 128mV까지 증가하였다. 따라서 R-2 반응조에서는 호기조건 이후 무산소조건에서 질산염의 탈질과 함께 인흡수가 동시에 진행되어 denitrifying phosphorous removal bacteria (DPB)의 존재를 간접적으로 확인할 수 있었으며, DPB가 호기성 입상슬러지의 형성에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

Fig. 7에는 R-3 반응조의 COD, 질소 및 인의 농도 변화를 나타내었는데, 1hr의 혐기조건에서는 acetate의 감소와 함께 인방출이 8mg/L에서 17mg/L까지 활발하게 일어났으며, 무산소 단계에서는 황산염의 감소(35mg/L에서 20mg/L)와 함께 인 흡수가 약간 일어났다. 호기조건에서는 암모니아의 질산화가 활발하게 진행되어 질산염 농도가 약간 증가하였으며, 인흡수도 활발하게 진행되었다. 무산소조건에서 황산염의 환원과 함께 R-2 반응조보다는 약하지만 인흡수가 동시에 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. R-3 반응조에서의 pH, DO 및 ORP의 변화는 R-2와 비슷한 경향을 보였는데, pH는 운전기간동안 7.3~7.5로 유지되었고 DO는 무산소조건에서 0.5mg/L를 유지하다가 호기조건 동안에 3.2~3.8mg/L를 나타내었다. ORP는 혐기조건에서 -25mV까지 감소하였다가 호기조건에서는 125mV까지 증가하였으며, 또한 황산염의 환원이 일어나는 무산소단계에서는 ORP가 -25mV를 나타내었다.

R-3 반응조에서는 그레놀 형성이 가장 좋았는데, 이것은 호기조건 이후 무산소조건에서 인의 흡수와 함께 황산염환원세균에 의해 sulfate가 sulfide로 환원되어 FeS 물질이 생성되거나, 이후 호기조건에서 황산화세균에 의해 sulfide가 입상황(S)으로 산화되면서 FeS와 입상황 물질이 그레놀 형성의 핵으로 작용했기 때문으로 판단된다(Yamaguchi et al., 2001).

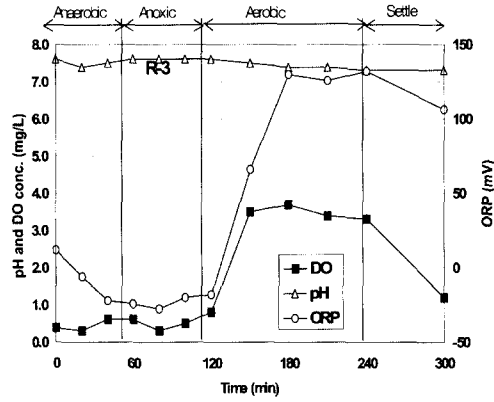
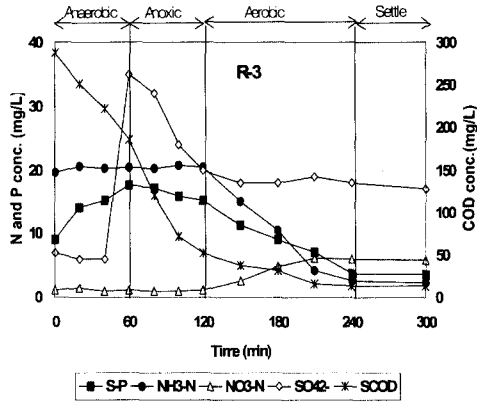


Fig. 7. COD, nutrients and sulfate profiles in a SBR using sulfate as an electron acceptor.

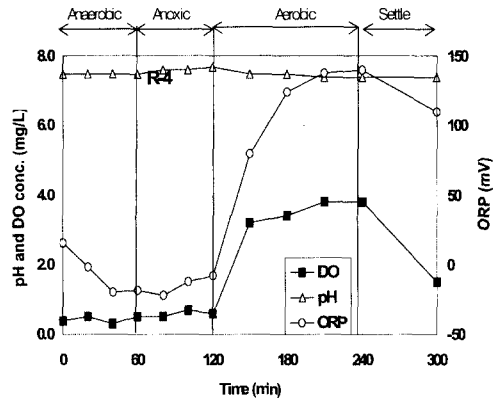
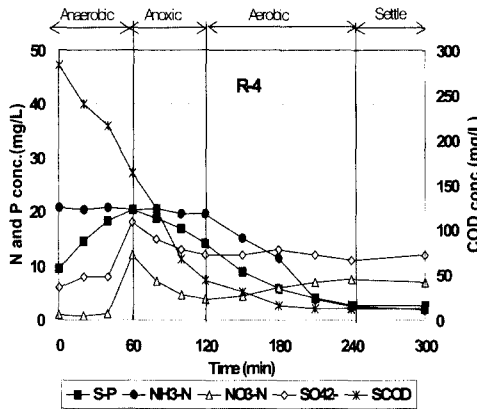


Fig. 8. COD, nutrients and sulfate profiles in a SBR using sulfate and nitrate as an electron acceptor.

Fig. 8에는 R-4 반응조의 COD, 질소 및 인의 농도 변화를 나타내었는데, 1hr의 혐기조건에서는 acetate의 감소와 함께 인방출이 10mg/L에서 20mg/L까지 활발하게 일어났으며, 무산소단계에서는 질산염(12mg/L에서 3.5mg/L)과 황산염(18mg/L에서 12mg/L)의 감소와 함께 인 흡수가 발생하였다. R-4 반응조에서는 질산염을 주입한 R-2 반응조와 비슷한 인흡수속도를 보였다. 호기조건에서는 다른 반응조와 비슷하게 암모니아의 질산화가 활발하게 진행되어 질산염 농도가 약간 증가하였으며, 인흡수도 빠르게 진행되었다. 무산소조건에서 황산염의 환원과 함께 R-2 반응조 보다는 약하지만 인흡수가 동시에 진행되는 것을 관찰할 수 있었다. R-4 반응조에서 pH는 운전기간동안 7.3~7.5로 중성을 유지하였으며, DO는 호기조건 동안에 3.2~3.8mg/L를 나타내었다. ORP는 혐기조건에서 -25mV 까지 감소하였다가 호기조건에서는 125mV 까지 증가하였으며, 또한 황산염의 환원이 일어나는 무산소단계에서는 ORP가 -25mV를 나타내었다.

R-4 반응조에서는 무산소단계에서 인의 흡수와 함께 탈질과 황산염환원이 동시에 일어났으며, 그레놀 형성도 양호하였다. 이것은 세포의 분비물질인 다당류와 함께 DPB, 입상황, FeS와 같은 무기불활성물질이 슬러지의 입상화에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 2에는 SBR 반응조를 이용하여 전자수용체의 종류

별로 실험하였을 때 각 반응조별로 일어난 acetate의 흡수 속도와 인의 흡수 및 방출속도를 나타낸 표이다. 혐기조건에서 인의 방출속도는 혐기-호기조건으로 운전한 R-1 반응조와 황산염과 질산염을 동시에 주입한 R-4 반응조에서 각각 3.81 mg P/g VSS · h, 4.21 mg P/g VSS · h로서 가장 높은 값을 보였으며, 무산소조건에서 황산염을 주입한 R-3 반응조에서는 2.77 mg P/g VSS · h로서 가장 낮은 인방출속도를 보였다. 인 흡수속도는 전 반응조에서 비슷한 값을 보였는데, 혐기-호기조건으로 운전한 R-1 반응조에서는 34.7 mg P/g VSS · h의 값을 보였고, 질산염을 주입한 R-2 반응조에서는 38.8 mg P/g VSS · h로서 R-1 보다 약간 높은 값을 보였다. 특히 황산염을 주입한 R-3 반응조와 황산염과 질산염을 같이 주입한 R-4 반응조에서도 각각 32.6 mg P/g VSS · h, 39.4 mg P/g VSS · h로서 전형적인 인 제거공정인 혐기-호기 공정과 비슷하거나 오히려 높은 인 흡수속도를 보였으며 이것은 무산소조건에서 질산염과 황산염을 전자수용체로 이용하여 인흡수와 탈질 및 황산염 환원이 동시에 수행되었기 때문으로 판단된다.

혐기조건 동안에 세포내 Acetate 흡수속도는 R-1 반응조에서 5.7 mg acetate/g VSS · h로서 R-2 반응조의 2.0 mg P/g VSS · h의 2.8배로 가장 높은 흡수속도를 보였다. 반면에 R-3 반응조에서는 1.4 mg P/g VSS · h로서 가장 낮은 acetate 흡수속도를 보였다. COD는 5hr의 체류시간에 모든

Table 2. Phosphorus release and uptake rate of granular activated sludge

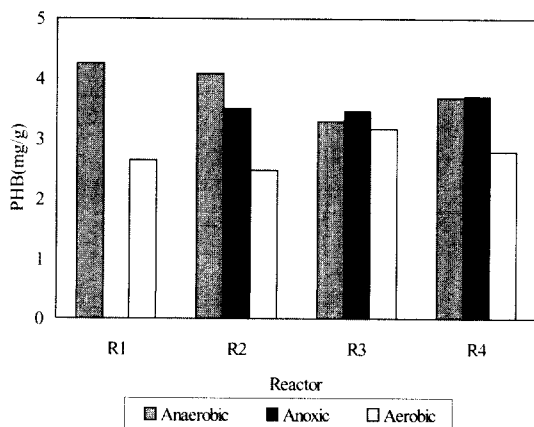
Reactor	Specific P release rate (mgP/gVSS·h)	Specific P uptake rate (mgP/gVSS·h)	Acetate uptake rate (mgAcetate/gVSS·h)	COD removal (%)	S-P removal (%)
A/A sludge	3.81	34.7	5.7	97.8	73.7
A/A/O sludge (nitrate)	3.73	38.8	2.0	95.8	66.7
A/A/O sludge (sulfate)	2.77	32.6	1.4	95.6	61.5
A/A/O sludge (nitrate+sulfate)	4.21	39.4	2.99	95.5	71.9

반응조에서 95% 이상의 제거율을 나타내었고, S-P는 혐기-호기조건인 R-1에서 63%로서 가장 높은 제거율을 보였다.

황산염을 주입한 R-3에서 COD와 S-P의 제거율이 가장 낮은 경향을 보였는데, 이것은 미생물이 혐기조건에서 acetate를 분해하여 생성된 PHB를 세포내에 축적하면서 인을 방출하는데 혐기조건에서 인의 방출속도와 acetate의 흡수속도가 낮았으며, 따라서 이후 무산소 및 호기조건에서 인의 흡수속도가 낮았기 때문이다. 즉, 인의 방출속도가 높을수록 COD 제거와 다음 단계에서의 인 흡수가 잘 되며, 방출된 인이 무산소조건에서 흡수될 때 전자수용체로서 질산염을 이용하는 것이 황산염을 이용하는 것보다 더 유리한 것으로 판단된다. 또한 R-3에서 그레놀 형성은 잘 되었지만 COD와 인 제거측면에서는 다른 반응조보다 약간 낮은 경향을 보였는데, SBR 반응조에서는 입상슬러지보다 일반 인축적 미생물(PAO)이 인 제거에 더 효과적인 것으로 판단된다.

3.3. 전자수용체에 따른 세포분비물질 및 저장물질분석

Fig. 9는 각 반응조에서의 혐기-호기 및 혐기-무산소-호기 조건동안에 acetate의 분해에 따라 생성된 세포내 PHB (poly- β -hydroxybutyrate)를 분석한 결과이다. R-1 반응조에서는 혐기 조건동안에 PHB가 4.2mg/g가 합성되고 호기조건에서 PHB가 2.6mg/g으로 소모되는 것을 뚜렷이 확인할 수 있다. R-2 반응조에서는 혐기조건에서와 마찬가지로

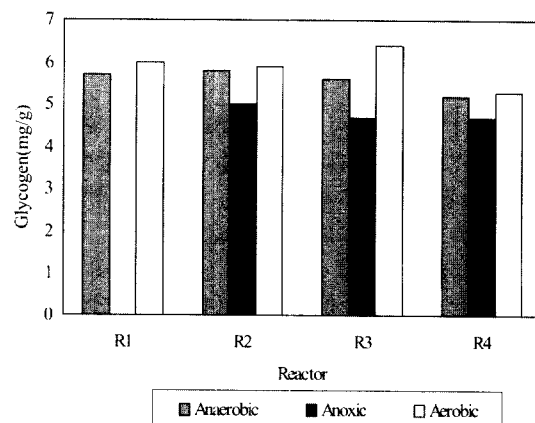
**Fig. 9.** Variations of PHB in SBR process.

PHB가 4.1mg/g까지 합성되었다가 무산소조건에서 3.4mg/g, 호기조건에서 2.5mg/g으로 PHB가 소모되었으며, 따라서 무산소조건에서는 혐기조건에서 축적된 PHB를 이용하여 탈질과 인 흡수가 일어나는 것을 확인할 수 있다.

황산염 환원이 일어나는 R-3에서는 인축적 박테리아가 적어 PHB의 합성과 이용이 활발하지 않은 것을 알 수 있다. R-4에서는 혐기조건에서 합성된 PHB가 무산소조건에서는 전혀 소모되지 않다가 호기조건에서 다시 PHB가 소모되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에는 각 반응조별 글리코겐의 변화를 나타내었는데 모든 반응조에서 혐기조건일 때는 글리코겐이 약간 소모되었다가 호기조건에서는 다시 축적되는 것을 알 수 있다. 특히 R-2, R-3, R-4 반응조는 무산소조건에서 글리코겐이 다량 소모되었다가 호기조건에서 다시 축적되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11에는 SBR 반응조별로 혐기, 무산소, 호기조건이 끝날 무렵 입상활성슬러지를 시료채취하여 세포내 ATP 함량을 분석한 그림이다. ATP는 혐기조건에서 미생물이 acetate를 PHB로 전환할 때 필요한 에너지로서 ATP가 ADP로 가수분해 되면서 인이 방출되어 용액내에 인의 농도가 높아지게 된다. R-3 반응조에서 혐기조건에서 ATP의 소모와 무산소 및 호기조건에서 ATP의 합성현상이 가장 뚜렷이 일어났으며, R-1 반응조에서도 ATP 경향을 파악할 수 있다. R-2와 R-3 및 R-4 반응조에서는 무산소조건에서

**Fig. 10.** Variations of glycogen in SBR process.

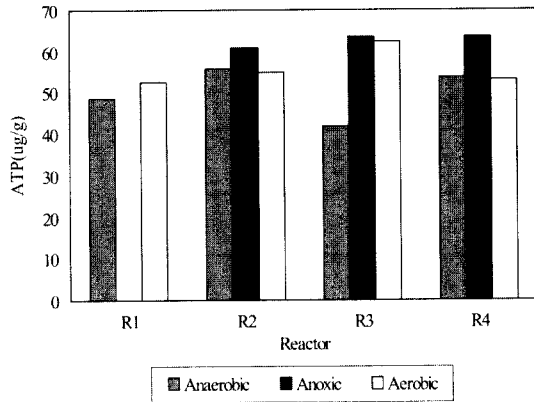


Fig. 11. Variations of ATP in SBR process.

ATP의 합성이 많이 되었는데, 이것은 전자수용체로 질산염과 황산염을 이용하여 ATP를 합성하였으며 이 때 탈질과 황산염의 이용 및 인의 흡수가 ATP 합성과 동시에 수행된 것으로 판단된다.

Fig. 12에는 입상활성슬러지의 세포내 인함량을 측정함으로써 각 반응조 모두 혐기조건에서는 인이 방출되어 세포내 T-P 함량이 2.3~3.0% 였으나 호기조건에서는 인이 흡수되어 세포내 T-P 함량이 5.8~6.2%로 급격하게 증가한 것을 확인할 수 있다. 또한 R-2와 R-4 반응조에서는 무산소조건에서도 세포내 인흡수가 일어나 세포내 T-P 함량이 5.0~5.2%로 증가한 것을 볼 수 있다.

특히, R-2 반응조의 세포내 인함량을 분석해 본 결과 혐기 3.1%, 무산소 5.3%, 호기 6.1%를 나타내어 무산소조건에서 질산염을 전자수용체로 이용하여 인흡수가 진행되는 것을 알 수 있으며, 따라서 탈질과 인흡수를 동시에 수행하는 DPB의 존재를 간접적으로 확인할 수 있다. 황산염을 전자수용체로 주입한 R-3 반응조에서는 질산염을 주입한 R-2에 비하여 인방출과 인흡수가 낮았지만 무산소조건에서 황산염의 감소에 따른 인 흡수가 일어나는 것을 확인하였다. 질산염과 황산염을 동시에 주입한 R-4 반응조에서도 무산소조건에서 황산염과 질산염의 감소와 함께 인흡수가 진행되었으며, 입상슬러지의 생성속도 및 슬러지 상태도 양호하였다.

4. 결론

실험실 규모의 연속회분식 반응조(SBR)를 운전하면서 전자수용체(황산염, 질산염, 황산염+질산염)가 입상슬러지의 생성 및 유기물질, 질소 및 인 제거에 미치는 영향을 파악하고 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실내실험을 이용하여 전자수용체에 따른 입상화생성 특성을 파악하는 실험에서 전자수용체와 상관없이 모든 반응조에서 SVI가 초기에는 270~294mL/g이었으나 12일 후에는 65~90mL/g으로 탁월한 침강성을 나타내었다.
2. 무산소조건에서 황산염과 질산염을 선택적으로 주입한

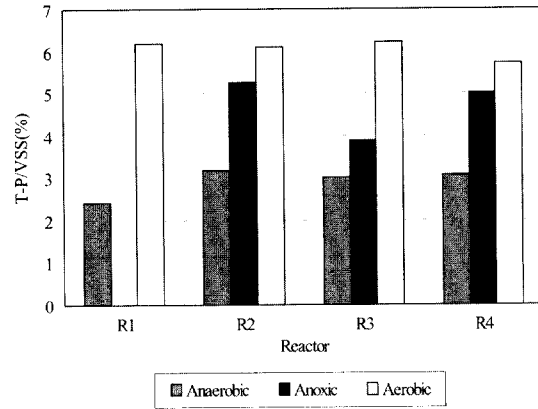


Fig. 12. Variations of T-P/VSS(%) in SBR process.

결과 황산염을 전자수용체로 주입한 반응조에서 입상화가 가장 빠르게 진행이 되었으며, SVI값도 65mL/g으로 가장 낮은 값을 보였다. EPS물질인 다당류와 단백질의 비를 각 반응조별로 측정된 결과 입상화가 가장 빠르게 진행된 반응조인 황산염을 주입한 반응조에서 PS/PN비가 가장 낮았으며, 전자수용체를 주입하지 않은 반응조에서 PS/PN비가 가장 높게 측정되었다.

3. 질산염을 전자수용체로 이용한 실내실험에서 입상활성슬러지에 의한 반응조별 물질거동 변화를 살펴본 결과 무산소조건에서 질산염의 탈질과 함께 인의 흡수가 동시에 진행되었다. 황산염을 주입한 반응조에서는 무산소조건에서 황산염의 감소와 함께 인의 흡수가 일어났다. 황산염과 질산염을 동시에 주입한 반응조에서는 무산소조건에서 황산염의 감소, 탈질 및 인의 흡수가 동시에 수행되어 DPB의 존재를 확인할 수 있었다.
4. 실내실험에서 인흡수속도는 모든 반응조에서 32~39mg P/gVSS · h로 측정되었으며, acetate 흡수속도는 혐기-호기조건의 반응조에서 가장 높게 측정되었다. 모든 반응조에서 HRT 5hr에서 COD 제거율은 95% 이상이었으며 인 제거율은 혐기-호기조건에서 74%로 가장 높았으며 황산염을 주입한 반응조에서 62%로 가장 낮은 값을 보였다.
5. 입상화 생성특성을 규명하기 위하여 세포분비물질 및 저장물질을 분석한 결과 혐기조건에서 ATP의 감소, PHB의 저장, glycogen의 감소, 세포내 인함량의 증가 현상을 보였고, 무산소조건에서 황산염과 질산염을 주입한 반응조에서는 혐기조건 이후의 무산소조건에서 PHB의 소모, ATP합성, 세포내 인함량 증가 현상을 보였다. 따라서 입상활성슬러지 생성에 DPB와 DSPB가 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단되었다.

참고문헌

- Beun, J. J., Hendriks, A., van Loosdrecht, M. C. M., Morgenroth, E., Wilderer, P. A., and Heijnen, J. J., Aerobic Granulation in a Sequencing Batch Reactor, *Wat.*

- Sci. & Tech.*, **33**, pp. 2283-2290 (1999).
- Lettinga, G., Velson, A., and Hobma, S., Use of the UASBR Concept for Biological WWT, Especially for Anaerobic Treatment, *Biotechnol. Bioeng.*, **22**, pp. 699-734 (1980).
- Liu, Y., Tay, J. H., The Essential Role of Hydrodynamic Shear Force in the Formation of Biofilm and Granular Sludge, *Wat. Res.*, **36**, pp. 1653-1665 (2002).
- Morgenroth, E., van Loosdrecht, M. C. M., Heijnen, J. J., and Wilderer, P. A., Aerobic Granular Sludge in a Sequencing Batch Reactor, *Wat. Res.*, **31**, pp. 3191-3194 (1997).
- Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y., The Role of Cellular Polysaccharides in the Formation and Stability of Aerobic Granules, *Letters in Applied Microbiology*, **33**, pp. 222-226 (2001).
- Tay, J. H., Liu, Q. S., and Liu, Y., The Effects of Shear Force on the Formation, Structure and Metabolism of Aerobic Granules, *Appl. microbiol. biotechnol.*, **57**, pp. 227-233 (2001).
- Vandevivere, P., Kirchman, D. L., Attachment Stimulates Exopolysaccharides Synthesis by a Bacteria, *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, pp. 3280-3286 (1993).
- Yamaguchi, T., Yamazaki, S., Uemura, S., Tseng, I. C., Ohashi, A., and Harada, H. Microbial Ecological Significance of Sulfide Precipitation within Anaerobic Granular Sludge Revealed by Microelectrodes Study, *Wat. Res.*, **35**, pp. 3411-3417 (2001).
- Yu, H. Q., Tay, J. H., and Fang, H. P., The Roles of Calcium in Sludge Granulation during UASB Reactor Start-up, *Wat. Res.*, **35**, pp. 1052-1060 (2001).