

바실러스 미생물을 이용한 하수처리에서 포기조의 DO농도 변화에 따른 EPS 물질생성과 슬러지 침강성에 관한 연구

이상호^{1*}, 손한형²

Sedimentation and EPS Production by the Change of Dissolved Oxygen Concentration for the Aeration Tank to treat Wastewater with *Bacillus sp.*

Sang Ho Lee^{1*} and Han-Hyung Son²

요 약 슬러지의 침전성에 영향을 미치는 인자는 F/M비, 유입수의 성분과 조성, 처리수온, 포기조의 pH, 슬러지 일령, 사상성세균의 증식 등으로 알려져 있으며, 유기산의 잔류량이 EPS의 분비에 영향을 미쳐 슬러지의 침강성에 영향을 주게 된다. 바실러스를 이용한 공법에서 생물 반응조는 특히 바실러스 종의 우점화를 위한 포자화의 진행을 이루는데 중요한 것으로 알려져 있으나 이에 대한 기작 설명은 아직 미흡한 실정이다. 바실러스를 이용한 B3 공법과 RABC 공법으로 운전 중인 처리장의 생물반응조는 점감포기를 하고 있으며 침전조에서 포자를 형성한 바실러스가 생물반응조로 반송되면 1.6 mg/L로 높아진 DO농도와 유기물질 유입으로 바실러스가 발아를 하고 활성도가 높아지며, 0.5 mg/L로 낮아진 DO농도로 인하여 포자를 형성하면 EPS 추출물질 중 Protein의 함량이 109.95 mgEPS/gSS에서 131.77 mg EPS/gSS로 증가하고 SVI는 85 mL/g에서 96 mL/g사이로 양호함에 따라 DO농도가 EPS 추출물질 중 Protein의 생성에 영향을 미치며 Protein의 함량이 침전에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 Protein/Carbohydrate 비율에 따라 침강성은 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 RABC 공법에서는 Protein/Carbohydrate의 비가 침전에 영향을 미치는 것으로 나타난 반면, B3 공법에서는 Protein/Carbohydrate의 비에 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

Abstract The factors affecting on sludge sedimentation are reported as F/M ratio, ingredient, composition of influent substrate, dissolved oxygen concentration, temperature, pH, filamentous bacteria and SRT. Aeration tank applying *Bacillus sp.* has an important role for maintaining the dominant microorganism species to make steady progress for spore growth affecting sedimentation. This research aims to investigate the affecting factor for the sedimentation in B3 system and RABC system with aeration tank applying tapered aeration. Extracellular polymeric substances (EPS), protein and carbohydrate can be produced for the extreme condition, that is down to 0.2 mg/L of dissolved oxygen in the aeration tank. This research found out the relation between the sedimentation and the EPS production, especially the ratio of protein/carbohydrate. The spore of *Bacillus sp.* was formed at the low DO then microorganisms produced EPS. The results showed that the production of EPS was 109.95 mgEPS/gSS at 1.6 mg/L of DO, however it was 131.77 mgEPS/gSS at 0.5 mg/L of DO. The sedimentation was affected by protein content in EPS and the ratio of protein and carbohydrate. The settleability of sludge was not affected by the ratio of protein/carbohydrate in B3 process, meanwhile settleability was affected by the ratio of it in RABC process, respectively.

Key Words : *Bacillus sp.*, DO, Tapered Aeration, EPS, Protein/Carbohydrate, SVI

본 연구는 환경부 수처리 선진화 사업
(과제번호 : 04-7-2)의 지원에 의해 수행되었음
¹상명대학교 환경공학과
²상명대학교 대학원 토목환경공학과
*교신저자 : 이상호(lecsh@smu.ac.kr)

1. 서론

하·폐수 처리는 기본적으로 분리의 개념에서 비롯되는데 부유 미생물을 이용할 경우 슬러지의 침전성은 가장 핵심이 되는 설계인자이다. 슬러지의 침전성에 영향을

미치는 인자는 F/M비[1], 유입수의 성분과 조성[2], 처리수온[3], 포기조의 pH[4], 슬러지 일령[5], 사상성세균의 증식[6] 등으로 알려져 있으며, 따라서 슬러지의 팽화는 주로 생물학적 원인에 의한 것으로 알려져 있다[7]. 또한 유기산의 잔류량이 EPS의 분비에 영향을 미쳐 슬러지의 침강성에 영향을 주게 된다[8]. 슬러지 침전성 문제를 해결하기 위해서는 슬러지 별킹과 같은 미생물 특성에 관한 것으로 문제를 해결하기 위해 선택조를 운전하는 방법도 있지만 슬러지 침전 보조제를 주입하여 슬러지 침전성을 증가시키는 방법이 있다[9]. 슬러지 침전 보조제로 비중이 매우 큰 철가루를 사용할 수 있으며 슬러지 침전성 인자인 SVI(Sludge Volume Index)가 50%정도 까지 감소할 수 있는 것으로 나타났다.

생물학적 고도처리 기술 중 B3공법, RABC공법 등 사실상 바실러스균을 우점으로 하는 부유미생물 공법으로 바실러스의 모양은 단간균 형태이고 불리한 환경이 되면 포자를 형성하여 포자를 만드는 그람양성의 통성혐기성 세균이다[10].

또한 바실러스균은 증식과 포자화를 반복하면서 우점화가 가능하며, 증식이 일정농도 이상을 유지하면 슬러지의 침강이 향상된다는 연구가 진행되어 왔다. 즉, 영양분이 충분한 상태에서 이 미생물이 급속하게 성장하면서 사상체를 형성하면 결과적으로 영양분의 부족상태가 초래되고 이때 균체량을 반송비의 증가 등을 통해 오히려 늘려 주면 사상체를 형성한 개별 미생물은 더욱 심한 영양분 부족상태가 발생한다. 이 상태가 한계점에 도달하면 생존을 위하여 포자를 형성하면서 사상체가 해체되어 포자를 포함한 균체수는 증가하게 되고, 이와 더불어 효율적인 침강이 일어나게 된다.

바실러스를 이용한 공정에서는 점감포기로 생물반응조를 운영하고 있으며 바실러스의 우점화를 위한 포자화의 진행을 이루는데 중요한 것으로 알려져 있으나 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 바실러스를 이용한 공정인 B3와 RABC 공법에서 반응조별 점감포기에 의해 침전에 영향을 미치는 인자들과 점액물질(EPS) 추출물질의 변화를 고찰하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험재료

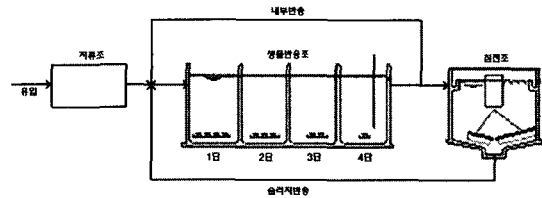
본 연구의 대상으로는 바실러스를 이용한 B3공법으로 운전하고 있는 U 분뇨처리장과 RABC공법으로 운전중인

B 분뇨처리장을 대상으로 실험을 하였다.

U 분뇨처리장의 경우 바실러스를 이용하여 B3 공법으로 운전중이며 일반적인 B3공법은 점감포기를 실시하여 바실러스균을 우점화 함으로써 유기물 및 질소·인을 제거하는 공법이다. U 분뇨처리장의 경우 일반적인 점감포기 대신 생물반응조 2단에서 1단보다 포기량을 늘려서 운전하고 있다.

B 분뇨처리장은 망상형 회전식 바실러스 접촉장치(RABC)를 이용한 공법으로 바실러스 미생물의 생물학적 특징과 망상형 담체의 특성을 잘 결합시킨 새로운 복합 공법이다. 크게 전단의 RBC장치, 점감포기방식으로 운전되는 생물반응조, 침전지의 세부분으로 나눌 수 있다. U 분뇨처리장과 마찬가지로 B 분뇨처리장도 생물반응조 2단에서 포기량을 높여서 운전하고 있다. 각각의 주요 공정 모식도는 그림 1에 나타내었다.

* B3 공법



* RABC 공법

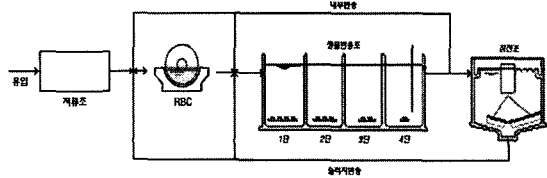


그림 1. B3공법과 RABC공법의 주요 공정 모식도

2.2 실험방법

본 연구에서 바실러스가 포함되어 있는 U 분뇨처리장의 건조슬러지를 이용하여 포자화 전·후의 EPS 추출물질을 분석하였으며 실험의 정확성을 기하기 위해 U 분뇨처리장의 건조슬러지를 3차까지 배양하였다. 액체 배지 제조는 Nutrient Broth 4g을 증류수 500mL에 녹이고, autoclave에서 121°C, 15분 동안 멸균한 다음 건조슬러지를 3g(습중량)/500mL(액체배지+무기염료)에 넣고 바실러스의 우점화를 위해 85°C에서 30분 동안 stirring 한다. 그런 다음 Shaking Incubator에서 다음 배양조건을 적용하여 1차 농화배양을 하였다.

표 1. 바실러스 배양 조건

temperature	37℃
rpm	200rpm
time	24hr
culture media	Nutrient broth + (인삼염인 완충용액, CaCl ₂ , FeCl ₃ , MgSO ₄)

2차 배양은 1차 농화배양액 50mL를 액체배지에 넣고 1차 농화배양과 같은 조건에서 2차 배양하였으며 3차 배양은 2차 농화배양액 50mL를 같은 배지 500mL에 넣고 같은 배양 조건으로 3차 농화배양을 실시하였고, 3차 농화배양액을 이용하여 EPS 물질을 추출하였다. 포자화 방법은 3차 농화배양액을 85℃에 30분 동안 가열한 후 배양조건과 동일한 상태로 24hr 교반하였다.

또한 반응조별 DO, MLSS의 변화에 따른 SVI 변화를 파악하는 실험을 수행하였으며, EPS 물질 분석은 Carbohydrate와 Protein을 분석하였으며 Carbohydrate의 함량은 페놀황산법으로 분석하였으며[11], Protein의 함량은 원심분리 후 Bio-Rad Protein Assay Kit II로 측정하였다[12].

3. 결과 및 고찰

3.1 U 분뇨처리장 건조슬러지 포자화 전·후의 EPS 추출 물질 분석

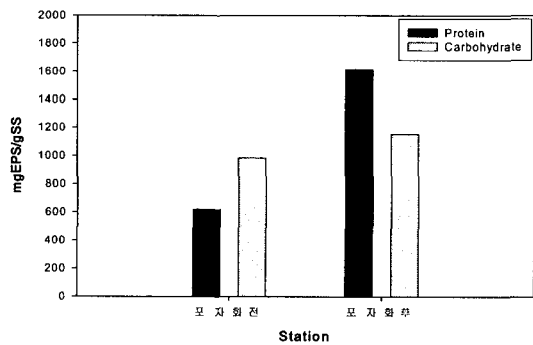


그림 2. U 분뇨처리장 건조슬러지의 EPS 추출 물질 비교

B3 공법으로 운전중인 U 분뇨처리장의 건조슬러지를 이용하여 액체배지에 배양 후 포자화 전·후의 EPS 추출 물질 중 Protein과 Carbohydrate의 함량을 비교하였다. 포자화 전과 후의 Carbohydrate의 함량은 그림 2에서 나타난 바와 같이 별 차이가 없지만 Protein의 함량은 포자

화 전보다 포자화 후에서 크게 증가하였다. 따라서 EPS 추출 물질 중 Protein의 함량 변화가 침전성에 영향을 미칠 수 있다고 판단하여 EPS 추출물질과 DO, SVI와의 상관관계를 분석하였다.

3.2 U 분뇨처리장 반응조별 EPS 추출물질 비교 및 DO, SVI와의 상관관계 분석

DO 농도를 그림 3에서 살펴보면 일반 활성슬러지 공법에서는 생물반응조 2단에서 1단보다 포기량을 늘려 운전하지만, 바실러스 미생물을 이용하는 공법에서는 포기조 2단의 용존산소는 오히려 1단보다 낮게 측정되었다. 그 이유는 생물반응조 1단에서 발아된 바실러스가 생물반응조 2단에서 포기량을 늘려 바실러스의 활성도가 높아졌으며 활성도가 높아진 바실러스가 산소를 섭취하여 유기물 등을 제거하므로 생물반응조 2단이 1단보다 포기량은 많지만 DO농도는 오히려 생물반응조 1단보다 낮게 측정된 것으로 판단된다.

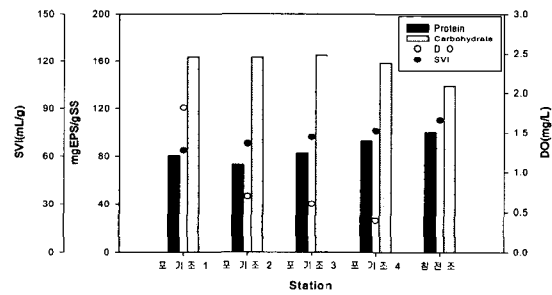


그림 3. B3 공법으로 운전중인 U 분뇨처리장 반응조별 EPS 추출물질, DO와 SVI의 관계

반응조별 EPS 추출물질은 Protein의 함량보다 Carbohydrate의 함량이 높게 측정되었다. 하지만 Carbohydrate의 경우 각 반응조를 거치면서 특별한 변화가 없지만 Protein의 경우 생물반응조 2단에서부터 침전조까지 증가하는 것을 알 수 있으며 그에 따른 SVI도 90mL/g 이하로 양호한 수치를 보였다. 생물반응조 2단에서 Protein의 함량이 감소하였다가 3단부터 다시 증가하는 추세를 보이고 있는데 그 이유는 생물반응조 2단에서 높아진 포기량으로 인하여 바실러스가 활성화되어 Protein의 함량이 감소한 것으로 판단된다.

EPS 추출물질과 DO의 관계를 살펴보면 일단 바실러스를 아사직전의 미생물로 만들 수 있는 조건은 DO 농도이다. U 분뇨처리장의 경우 반응조를 지나면서 DO의 농도가 낮아지며 2단에서 포기량을 높여 바실러스의 활성도를 좋게 하고 있다. 따라서 생물반응조 1단으로 반송된

포자화된 바실러스는 높은 DO로 인해 발아를 시작하며 2단에서 포기량을 높여 바실러스의 활성도를 높이며 유기물, 영양염류 등을 제거하고 3단과 4단에서 다시 낮아진 DO로 인해 바실러스가 생존하기에 불리한 환경조건이 되므로 포자를 형성한다. DO의 농도가 낮아질수록 그림3에 나타낸 바와 같이 EPS 추출물질 중 Protein의 생성에 영향을 미치며 Protein의 함량이 증가할수록 침전효율이 향상되는 것으로 판단된다.

3.3 B 분뇨처리장 반응조별 EPS 추출물질 비교 및 DO, SVI와의 상관관계 분석

B 분뇨처리장의 경우 앞에서 설명한 바와 같이 U 분뇨처리장과 마찬가지로 생물반응조 2단에서 1단보다 포기량을 높여서 운영하고 있다. 침전조에서 포자를 형성하고 있는 바실러스가 생물반응조 1단으로 반송되어 높은 DO로 인해 발아를 시작하고 2단에서 포기량을 늘려 바실러스의 활성도를 높여서 유기물 등을 제거하고 3단과 4단에서 다시 낮아진 DO로 인해 포자를 형성하기 시작한다. DO농도가 낮아짐에 따라 그림 4에 나타낸 바와 같이 EPS 추출물질 중 Protein의 함량이 늘어나는 것을 알 수 있는데 U 분뇨처리장과 같은 이유로 DO농도가 EPS 생성에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

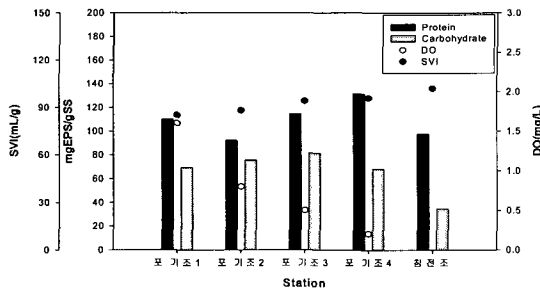


그림 4. RABC 공법으로 운전 중인 B 분뇨처리장 반응조별 EPS 추출물질, DO와 SVI의 관계

또한 EPS 추출물질 중 Protein의 함량이 Carbohydrate의 함량보다 높았으며 Protein의 함량이 반응조를 지나면서 꾸준히 증가하는 것을 알 수 있다. DO가 점점 낮아져 포자를 형성하면 EPS 추출물질 중 Protein의 함량이 높아지고 SVI도 양호한 결과를 나타내었다. 생물반응조 2단에서 Protein의 함량이 감소하였다가 3단부터 다시 증가하는 추세를 보이고 있는데 그 이유는 생물반응조 2단에서 높아진 포기량으로 인하여 바실러스가 활성화되어 Protein의 함량이 감소한 것으로 판단된다. 따라서 DO의 농도가 EPS 생성에 영향을 미치고, 그 생성물질이 침전에 영향을

을 미치는 것으로 판단된다.

지금까지 2개의 처리장에서 EPS 추출물질 중 침전에 관여하는 물질은 Protein이라는 판단 하에 그림 5와 같이 Protein과 Carbohydrate의 비율을 살펴보았다. 모든 처리장에서 각각의 반응조를 거치면서 Protein의 비율이 높아지는 것을 알 수 있으며 반응조를 거치면서 DO의 농도는 낮아지고 Protein의 비율은 높아지며 침전은 양호함에 따라 DO의 농도에 따라 바실러스의 포자화에 영향을 미치며 그에 따른 EPS 추출 물질 중 Protein의 함량이 침전에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

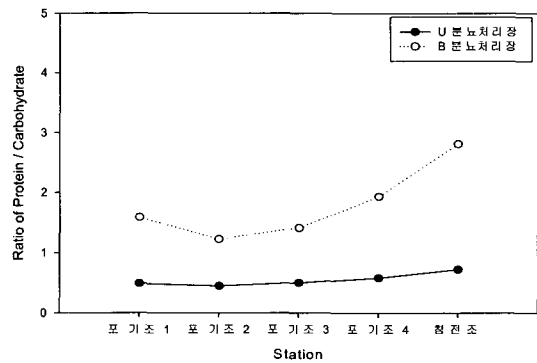


그림 5. B3공법, RABC공법으로 운전 중인 처리장의 반응조별 Protein과 Carbohydrate 비율

4. 결론

바실러스를 이용한 B3공법과 RABC공법에서 DO농도의 변화에 따른 각각의 생물반응조에서 EPS 추출물질의 변화와 침강성에 대한 실험결과는 다음과 같다.

- 1) 바실러스를 이용한 B3공법과 RABC공법으로 운전 중인 처리장에서는 침전조에서 포자를 형성한 바실러스가 생물반응조 1단으로 반송되어 높은 DO농도와 유기물질 유입으로 발아를 시작하고 생물반응조 2단에서 바실러스의 활성도가 높아져 유기물질과 영양염류 등을 제거하고 다시 낮아진 DO농도로 인하여 바실러스가 생존하기에 불리한 조건이 되어 포자를 형성하게 되면 EPS 추출물질 중 Protein의 함량이 증가하고 침전은 양호함에 따라 추출물질 중 Protein의 함량이 침전에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 따라서 DO농도가 EPS 추출물질 중 Protein의 생성에 영향을 미치는 것으로 판단되며 또한 Protein의 생성이 침전에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

2) 바실러스를 이용한 B3공법과 RABC 공법으로 운전 중인 처리장에서 반응조를 지날수록 Protein/Carbohydrate의 비율이 높아지는 결과를 얻었다. 따라서 바실러스를 이용한 공법에서의 침전성은 Protein의 절대량과 관계가 있으며 또한 Protein/Carbohydrate의 비율이 증가함에 따라 향상된다고 판단된다.

10. 정선호, "분리 균주 *Bacillus* sp.G31로부터 생물응집체의 생산 및 특성", 충남대학교 미생물학과 석사학위논문, 2003.
11. Herbert, H. P., Fang, H. L., and Yong, Z., "Characterization of a Hydrogen Producing Granular Sludge, *Biotechnology and Bioengineering*", 78(1), pp. 44~52, 2002.
12. 김지연, 최의소, 김병균, 서인석, "미생물특성에 따른 슬러지 침전성에 관한 연구", 한국물환경학회 춘계 발표회 논문집, pp. 797~800, 2004.

참고문헌

1. Genetelli, E. J. and Heukelekian, H., "The influence of loading and Chemical composition of substrate on the performance of activated sludge", *WPCF*, 36(5), pp. 643~649, 1964.
2. Pasveer, A., "A case of filamentous activated sludge", *WPCF*, 47(7), pp. 1340~1352, 1969.
3. 이정수, "슬러지의 침전성에 미치는 온도의 영향", *대한환경공학회지* 23(4), pp. 671~679, 2001.
4. Pipes, W. O., "Advances in Applied Microbiology", Academic Press, 8, pp. 77~103, 1966.
5. Jenkins, D. and Garrison, W. E., "Control of activated sludge by mean cell residence time", *WPCF*, 40(11), pp. 1905~1919, 1968.
6. Farquhar, G. J. and Boyle, W. C., "Control of Thiothrix in activated sludge", *WPCF*, 44(1), pp. 14~24, 1972.
7. 이정수, "침전지의 표면적부하와 포기조의 HRT가 슬러지의 침전성에 미치는 영향", *대한토목학회*, 21(4), pp. 463~468, 2001.
8. 박영기, 김영일, 김슬기, "하 · 폐수 고도처리시 F/M 비 변화에 따른 유기산 잔류농도가 슬러지 침강성에 미치는 영향", *대한환경공학회지* 28(1), pp. 42~47, 2006.
9. 서창원, 정형석외, "슬러지 침전성이 DNR 공정에 미치는 영향 평가", *대한상하수도학회지*, 20(2), pp. 273~280, 2006.

이 상 호(Sang Ho Lee)

[정회원]



- 1982년 2월 : 경북대학교 공업화학 (공학사)
- 1988년 7월 : University of Delaware 토목환경공학과 (공학석사)
- 1993년 1월 : University of Delaware 토목환경공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 환경공학과 부교수

<관심분야>

하수고도처리, 난분해성 산업폐수처리

손 한 형(Han-Hyung Son)

[정회원]



- 2006년 2월 : 상명대학교 환경공학과 (공학사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : 상명대학교 토목환경공학과 (공학석사 과정)

<관심분야>

하수 고도처리, 수질오염방지시설 연구