

고농도 대두가공폐수의 처리를 위한 개선 활성슬러지법

조권익 · 이정수¹ · 이태규 · 김종화*

우석대학교 식품공학과, ¹우석대학교 토목공학과

(2001년 10월 15일 접수, 2002년 1월 24일 수리)

활성슬러지에 의한 생물학적 폐수처리에 있어 주된 관리인자는 유기물의 효율적인 제거와 슬러지의 침강성을 일정치 이하로 유지하는 것이다. 식품폐수의 하나인 고농도의 대두가공폐수를 일반적인 활성슬러지법을 적용한 결과 최적 F/M비(food-to-microorganism ratio)는 0.24(kg-BOD/kg-MLVSS·day)였으며 그 이상의 농도인 0.48(kg-BOD/kg-MLVSS·day)에서는 슬러지 팽화현상이 발생하여 고농도의 식품폐수처리에는 효율적이지 못하였다. 이를 개선하기 위하여 응집보조제(NaOH)를 활용하여 유입폐수의 pH를 9.0으로 조절한 결과, 2.88(kg-BOD/kg-MLVSS·day)의 고농도 폐수를 유입하여도 슬러지의 팽화현상없이 SVI(sludge volume index)를 150 이하로 유지하였다. 이것은 최대 허용부하를 일반적인 활성슬러지법에 비하여 7.2배 높일 수 있는 효율적인 방법으로 평가되었다.

Key words: 활성 슬러지, 대두가공 폐수, 응집보조제, 슬러지 팽화현상

서 론

활성슬러지법의 운전관리 핵심은 미생물에 의한 유기물의 제거와 슬러지의 침강성이며, 부차적으로 슬러지의 처리, 처분이나 포기강도 등과 같은 경제성 문제라고 할 수 있다. 하지만 상기 인자 중 슬러지의 침강성은 부유미생물을 이용하는 활성슬러지법의 설계시 핵심인자로 취급된다. 본 실험은 고농도로 배출되는 대두가공폐수의 효율적 처리방법을 도출하기 위한 것으로, 대상폐수의 경우 일반 가정하수와 달리 질소와 인의 농도가 낮고 유기물의 농도가 상대적으로 높다. 이러한 고농도의 폐수를 활성슬러지법으로 처리할 경우, 슬러지의 팽화(sludge bulking)가 발생하는 것으로 알려져 있다.^{1,4)} 한편, Lee와 Kim⁵⁾은 응집제가 아닌 NaOH와 같은 응집보조제를 가하여 부하를 재래식 활성슬러지법의 최대 허용부하의 4배까지 증가시켜 운전할 경우에도 SVI(sludge volume index)는 100이하로 유지되었음을 밝힌 바 있다. 따라서, 본 연구는 재래식 활성슬러지를 이용하여 대두가공폐수의 처리특성을 분석하고 아울러 가장 효율적인 운전조건 및 처리 가능성을 파악하였다.

재료 및 방법

실험 장치. 실험에 사용한 장치는 완전혼합 연속포기식 반응기로 아크릴을 이용하여 제작하였다. 반응기의 생물반응조 용적은 각각 25L, 침전지 용적은 22.2L였다. 반응기의 주요 구성 요소는 산기위치를 상하로 조정하거나 공기변을 가짐으로써 조내 DO농도를 조절할 수 있는 이동식 포기장치 및 feed tank이고, 그 외 부속장치로는 일정수온 유지를 위한 가온기 및 feed pump 등이었으며 반응기의 개략적인 형태는 Fig. 1과 같다.

*연락처자

Phone: 82-63-290-1439; Fax: 82-63-291-9312

E-mail: jhkim@woosuk.ac.kr

실험시료. 실험대상 폐수는 D-식품회사의 대두가공공정에서 발생된 폐수를 이용하였다(Table 1). 이 폐수는 대두를 삶고 난 후 배출되는 것으로 평균 BOD₅는 약 4000 mg/l이고, BOD₅:N:P가 100:5:1의 비율이 되도록 질소원으로 Urea{(NH₂)₂CO}를 450 mg/l, 인을 보충하기 위해 Na₂HPO₄·12H₂O를 470 mg/l 첨가하였으며, 이 폐수는 반응기 주입 시 각 조건마다 지하수를 이용하여 희석하였다.

실험방법 및 분석. 조건변화에 따른 반응기내의 총고형물은

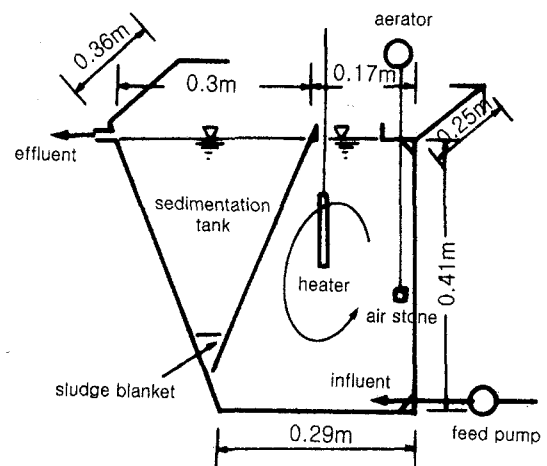


Fig. 1. Schematic diagram of reactor.

Table 1. Composition of the experimental soybean wastewater

Component	Concentration (mg/l)
Total Sugar	1760
Reducing Sugar	942
Protein	560
Normal-Hexane	856
Ash	290
Suspended Solid	1460

105°C 상압가열 건조법⁶⁾을 사용하였고, suspended solid(SS)는 유리섬유 여지법을 사용하였으며 Glass Microfibre Filter(Whatman, GF/C 47 mm)의 질량을 수분분석기(HR73, Mettler Toledo, Switzerland)로 측정 한 다음 시료를 여과하여, 여지의 질량을 수분분석기로 측정하였다. 여과 전후 여지의 무게 차를 SS의 양으로 하였다. 화학적 산소요구량(COD) 측정은 $KMnO_4$ 법⁶⁾으로 정량분석하였으며 결과치를 BOD로 환산하였다. 여러 가지 농도로 측정 한 결과 BOD는 $0.2 \times COD$ 에 해당되었다. 본 폐수의 성상이 크게 변화될 가능성이 없고, 단일 폐수의 처리 경험에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료되었기 때문에 비교적 측정이 용이한 상기 방법을 사용하였다. 실험은 2단계로 구분하였는데 1단계 실험에서는 부하변화에 따른 대두가공 폐수의 처리특성을 파악하였으며, 2단계 실험에서는 응집보조제인 NaOH를 이용하여 pH를 9정도로 조절한 후, 부하 증가에 따른 처리특성을 관찰하였다. 실험의 주 변화인자는 유입수 농도였으며, 그 외에 일반적인 실험조건은 수리학적 체류시간(HRT = hydraulic retention time) 6 hr, 폐수 주입량 0.0694 l/min, 반응온도 $28 \pm 0.2^\circ C$, 반응조 내의 DO농도는 공기의 주입량을 조절하여 2 ± 0.5 mg/l, 반응조 내 미생물의 농도(MLVSS = mixed liquor volatile suspended solid)는 매일 분석하여 약 2500 mg/l로 일정하게 유지하였다. 측정항목은 유출수의 S-COD, SVI, SS였으며, 유출수의 S-BOD₅는 S-COD를 환산하였다. 이때 BOD₅/COD는 약 0.5였다. 실험에 사용된 미생물은 도시(I) 하수처리장의 반송슬러지를 순양하여 이용하였다. 실험전 슬러지의 순양은 10일 이상 실시하여 유출수의 S-COD, SS 및 pH가 안정될 때까지 충분히 실시하였으며, 실험 조건의 변화는 사전 실험 결과를 토대로 약 4~6일 간격을 유지하였으며, 이 기간 내에 유출수의 수질과 pH 및 SVI는 안정되었다.

결과 및 고찰

부하변동에 따른 유출수의 S-BOD₅ 변화. 대두가공 폐수의 부하 변화에 따른 처리수의 S-BOD₅ 변화를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 처리수의 S-BOD₅는 부하 0.16 kg-BOD/kg-MLVSS · day까지 악화되다가 그 이상의 부하에서 다시 개선되었으며, 부하 0.48 kg-BOD/kg-MLVSS · day 이상에서 다시 악화되는 S자 형의 곡선을 보였다. 이와 같은 현상을 Lee는⁷⁾ 합성폐수를 이용하여 미생물간의 먹이사슬관계로 설명한 바 있으며, 실 폐수인 대두가공 폐수의 처리에 있어서도 유사한 경향을 보였다.

일반적으로 생태계를 구성하는 생물학적 인자는 생산자, 소비자 및 분해자로 구분되는데, 생물학적 처리법은 유입폐수를 생산자로 고려하고, 유입폐수 중의 유기물을 분해하여 성장하는 박테리아나 균류 등을 분해자로, 이들 분해자를 포식하는 윤충, 선충 및 원생동물 등 고등한 미생물을 소비자로서 고려하면 하나의 독립된 생태계로 간주할 수 있다. 따라서 포기조 내의 미생물상은 크게 분해자와 소비자로서 구분할 수 있는데, 실험 조건별로 충분한 순양기간을 제공할 경우, 부하의 변화 및 포기조 내의 미생물 농도 유지를 위한 미생물의 인출 등으로 생물반응조 내 종조성은 변화할 것이다. 따라서 종 조성의 변

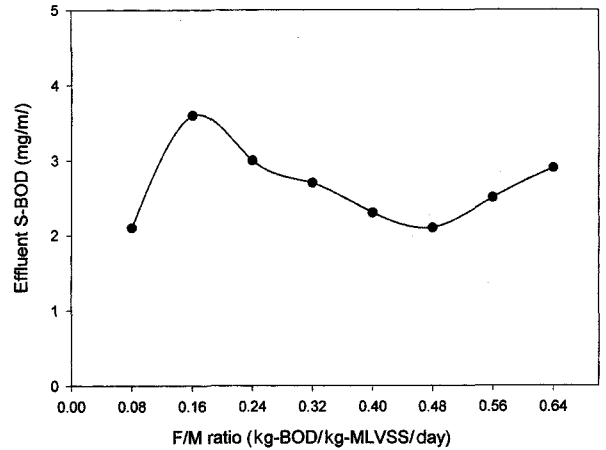


Fig. 2. Changes of effluent S-BOD in soybean wastewater treatment.

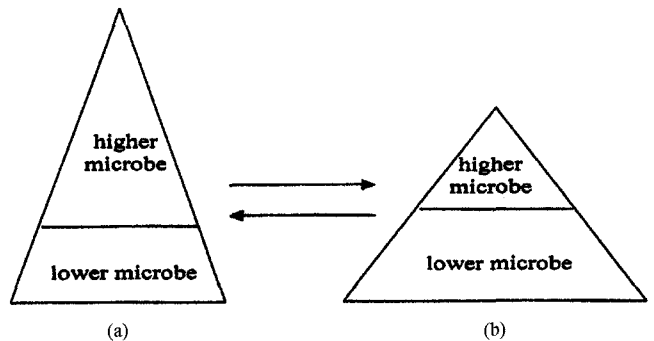


Fig. 3. Exemplification of organism pyramid.

화는 처리속도를 변화시키는데, 반응조 내 세균류의 증가는 처리속도를 상승시킨다. Fig. 3는 부하에 따른 분해자와 소비자 간의 종 조성 변화를 이상적으로 나타낸 것이다. 즉 일정 부하 이하에서 먹이원의 부족으로 분해자인 세균류의 증식은 제한되며, 이로 인하여 소비자인 고등한 미생물의 증식 역시 제한된다. 따라서 먹이사슬을 구성하는 미생물간의 종 구성비는 Fig. 3(a)와 같이 비교적 안정된 상태를 유지하여 부하 증가시 일반론과 같이 처리수는 악화된다. 그러나 이 부하범위를 초과하면 반응조 내의 전체 미생물량은 증가하고 과잉의 미생물은 계속 인출된다. 이와 같이 부하 증가과정에서 고등한 미생물에 비해 상대적으로 세대기간이 짧은 하등한 세균류가 크게 번성하여 Fig. 3(b)와 같이 종 조성이 변화한다. 따라서 미생물상의 변화속도가 부하증가속도의 차는 부하의 증가에도 불구하고 일부 부하구간에서 처리수가 개선되는 현상을 보이는데, 이러한 현상이 발견되는 부하 구간은 대체적으로 재래식 활성슬러지법의 운전부하범위와 일치한다. 하지만 그 이상의 부하에서 부하증가속도보다 미생물상의 변화속도가 감소하여 부하증가에 따라 처리수는 악화된다.

부하변동에 따른 유출수의 SS 변화. Fig. 4에서 보는 바와 같이 처리수의 SS는 부하를 0.08 kg-BOD/kg-MLVSS · day에서 0.64 kg-BOD/kg-MLVSS · day까지 상승시키는 동안 계속 감소하였다. 이와 같은 현상은 일정 HRT에서 유입수의 농도가 상승할 경우 기질 제거 중간과정에서 생성되는 이분해성 유기산의

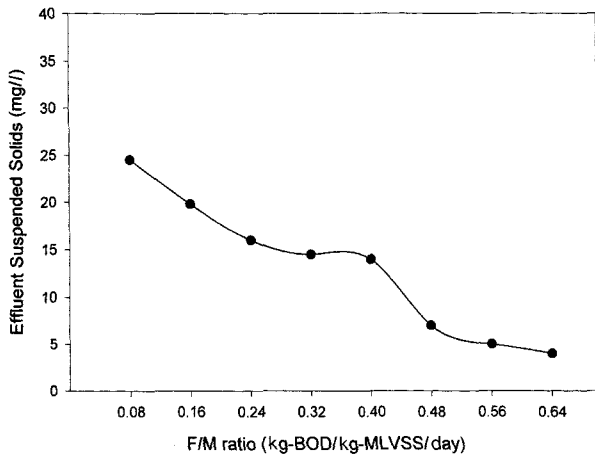


Fig. 4. Changes of effluent suspended solids in soybean wastewater treatment.

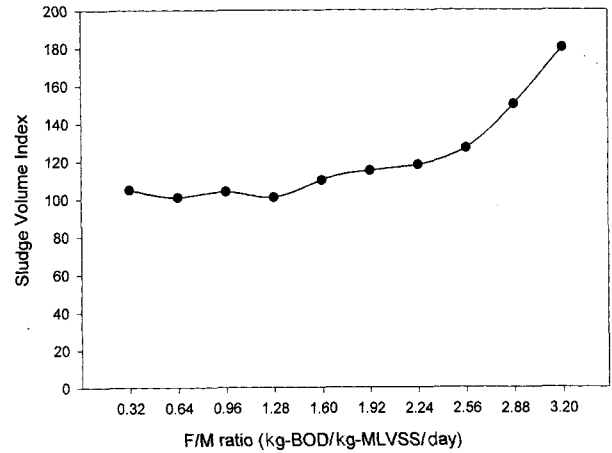


Fig. 6. Changes of effluent S-BOD in soybean wastewater treatment by the controlling of influent pH using NaOH as a coagulant agent.

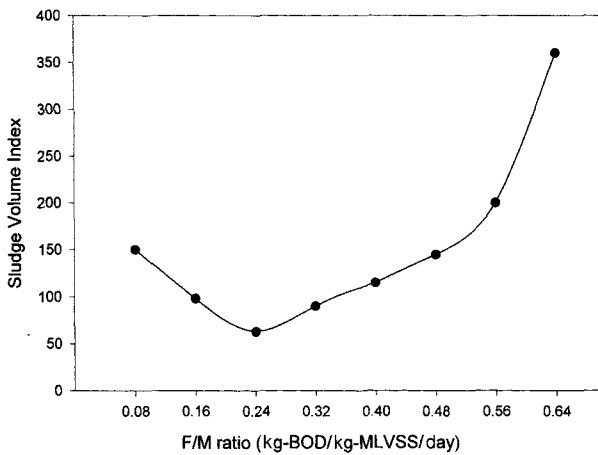
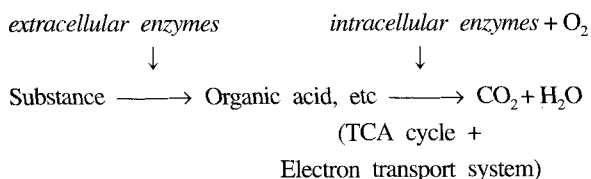


Fig. 5. Changes of effluent sludge volume index in soybean wastewater treatment.

농도가 상승하고 이들 유기산이 미생물에게 독성으로 작용하며, 결과 일종의 방어기작으로 미생물의 점액물질인 polymer의 생산을 자극하기 때문인 것으로 추정된다. 즉 유출수의 SS는 점액물질의 양에 반비례하고 이에 따라 부하증가에 따라 SS는 감소하는 경향을 보였다.

부하변동에 따른 SVI의 변화. 부하 증가에 따른 SVI의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 슬러지의 침강성은 부하 0.24 kg-BOD/kg-MLVSS·day에서 최소치를 보이며, 이 부하를 중심으로 부하의 증감에 따라 상승하는데, 호기성 상태에서 기질은 산소를 필요로 하지 않는 가수분해과정을 통하여 유기산을 포함한 각종의 중간생성물을 생성하고,^{8,14)} 이들 중간생성물은 산소의 존재 하에서 TCA cycle과 전자전달계를 통하여 CO₂와 H₂O로 분해된다. 이 과정을 도식하면 다음과 같다.



한편 가수분해과정에서 생산되는 각종 유기산은 미생물에게 독성으로 작용하고,¹⁵⁾ 이때 미생물은 polymer를 분비하여 이러한 독성물질에 대응한다.^{9,16-19)} 이들 polymer는 슬러지의 flocc형성과 양론적으로 관련되는데, 지나치게 적을 경우 flocc을 형성하지 않고 지나치게 많을 경우 느슨한 flocc를 형성하여 슬러지는 침강하지 않는다.^{20,21)} 본 실험은 HRT가 6시간으로 일정한 상태에서 Si를 상승시킨 경우로, 부하가 0.08에서 0.64 kg-BOD/kg-MLVSS·day로 증가하는 과정에서 0.24 kg-BOD/kg-MLVSS·day에서 최소의 SVI를 보였다. 이상과 같이 재래식 활성슬러지법으로 대두가공 폐수를 처리할 경우 최적의 F/M비는 0.24 kg-BOD/kg-MLVSS·day이며, 운전가능 SVI를 150으로 가정한 경우 대두가공 폐수의 처리유효 범위는 최대 0.48 kg-BOD/kg-MLVSS·day이며 유입수의 BOD₅ 농도로는 300 mg/l인 것으로 나타났다. 따라서 별도의 대책이 없는 한 유입수의 BOD₅가 4000 mg/l 정도를 나타내는 대두폐수를 활성슬러지법으로 처리하기란 곤란한 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 Si(influent substrate concentration)가 지나치게 높을 경우 반응조내 유기산농도가 상승하고 미생물은 polymer를 과다 생산하여 슬러지는 팽화한다. 한편, Lee와 Kim⁵⁾은 유입수에 보조응집제인 NaOH를 혼입하여 pH를 9.0 정도로 조정할 경우 고부하에서도 슬러지의 침강성은 크게 개선된다고 보고한 바 있다. 이러한 현상은 유기산과 NaOH가 반응하여 유기산의 용해도가 크게 감소하여, 미생물의 점액물질 생산을 자극하는 유기산의 농도가 크게 감소하기 때문이다.

응집보조제 첨가시의 SVI의 변화. 본 연구에서는 상기의 결과를 근거로 대두폐수에 응집보조제로 NaOH를 혼입하여 pH를 조절함으로써 고농도인 대두폐수를 희석 없이 처리할 수 있는지, 그 가능성을 실험하였다. Fig. 6에서 보듯이 부하를 0.32에서 3.20 kg-BOD/kg-MLVSS·day까지 증가시키는 동안, 즉 MLVSS; 2500 mg/l의 조건에서 유입수농도로 200에서 2000 BOD₅-mg/l까지 증가시키는 동안, SVI값은 서서히 증가하여 최대 156을 보였다. 따라서 NaOH를 혼입할 경우 SVI를 기준으로 최대운전 가능 범위는 3.20 kg-BOD/kg-MLVSS·day정도인 것으로 나타났다. 한편 F/M비는 식 (3)과 같이 Si 및 MLVSS

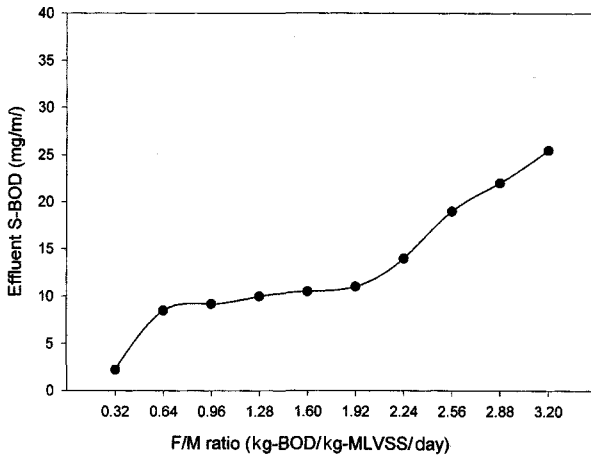


Fig. 7. Changes of effluent suspended solids in soybean wastewater treatment by the controlling of influent pH using NaOH as a coagulant agent.

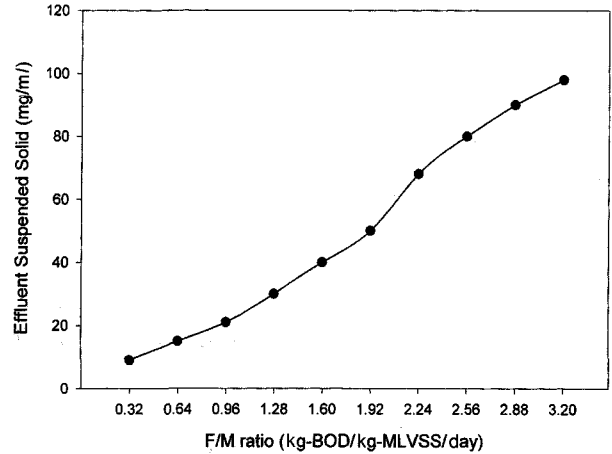


Fig. 8. Changes of effluent sludge volume index in soybean wastewater treatment by the controlling of influent pH using NaOH as a coagulant agent.

의 함수인데, MLVSS를 상승시킬 경우 보다 높은 농도의 폐수를 적용시킬 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 재래식 활성슬러지법의 적용 미생물농도는 MLVSS로 2,000 mg/l 정도이지만, 순산소법의 경우 최대 10,000 mg/l 정도까지 적용이 가능한 것으로 알려져 있다. 하지만 5,000 mg/l 이상에서 경제성이 크게 떨어지는 것으로 알려져 있고, 일반적으로 5,000 mg/l 이상을 초과하지는 않는다.²²⁾ 따라서 최대 5000 mg/l를 적용할 경우, 유입수농도는 4000 BOD₅-mg/l 정도까지 적용 가능하므로, 본 대두폐수를 희석없이 처리하더라도 처리장의 슬러지는 운전가능한 범위인 150을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

$$F/M = \frac{Q \times S_i}{X \times V} \quad (1)$$

$$V = \frac{Q}{24} \times HRT \quad (2)$$

$$F/M = \frac{Q \times S_i}{X \times \frac{Q}{24} \times HRT} = \frac{S_i \times 24}{X \times HRT} \quad (3)$$

Where,

F/M: food-to-microorganism ratio (kg-BOD₅/kg-MLSS · day)

HRT: hydraulic retention time (hr)

X (=MLVSS): mixed liquor volatile suspended solid (mg/l)

Q: volumetric flow rate (m³/day)

S_i: influent substrate concentration (mg/l)

V: volume of aeration tank (m³)

응집보조제 첨가시의 유출수의 S-BOD₅ 및 SS 변화. 한편 Fig. 6과 Fig. 7은 MLVSS 2500 mg/l의 조건에서 부하를 3.20 kg-BOD/kg-MLVSS · day까지 증가시킬 경우 유출수의 S-BOD₅와 SS 변화를 나타낸 것이다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 부하를 0.32에서 2.56 kg-BOD/kg-MLVSS · day까지 증가시키는 동안 SVI값은 100에서 120사이를 유지하면서 큰 폭의 변화는 없었으나, 부하 2.56 kg-BOD/kg-MLVSS · day 이상에서 슬러지의

침강성은 악화되기 시작하였다. 한편 유출수의 SS는 F/M비를 0.32에서 3.20(kg-BOD/kg-MLVSS · day)까지 상승시키는 동안 큰 폭으로 증가하여 8 mg/l에서 100 mg/l까지 증가하였다. 이 때 팽화현상이 일어나지 않는 부하 2.56 kg-BOD/kg-MLVSS · day에서 유출수의 S-BOD₅는 최대 19.5 mg/l, SS는 최대 80 mg/l로 나타났다. 지역에 따라 그 기준이 다르지만 공업지역의 방류수 기준은 일반적으로 TS(S-BOD + SS) 규제 기준이 100 정도이므로, 상기의 결과로 미루어 볼 때, 최대의 부하에서도 운전 가능한 것으로 판단되었다. 다만 지역에 따라서 환경부 방류수 수질 기준이 다르므로 이러한 기준이 만족되지 않을 경우, 모래여과지 등을 추가하여 처리할 경우 환경기준을 만족시킬 수 있을 것으로 사료된다.

이상의 실험결과에 의하면 보조응집제(NaOH)를 첨가한 재래식 활성슬러지법으로 대두가공폐수를 처리할 경우 그 유입부하를 최대허용부하의 7.2배까지 상승시켜 운전할 수 있었다. 이는 고부하에서 슬러지 팽화를 억제함과 동시에 슬러지 침강성이 개선된 것으로 보이며 이미 언급한 바와 같이 별도의 SS제거시설을 갖춘다면 응집보조제 첨가 활성슬러지법은 공장규모에 적용할 경우 고농도의 폐수에 대한 운전성을 크게 개선시킬 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 우석대학교 학술연구비에 의하여 연구되었으며, 재정지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Gray, N. F. (1990) In *Activated Sludge*. Oxford University Press, London.
2. Chudoba, J., Grau, P., Ottova, V. and Madera, V. (1973) Control of activated sludge filamentous bulking: Part I. Effect of the hydraulic regime or degree of mixing in an aeration tank. *Water Research* 7, 1163-1182.

3. Chudoba, J., Grau, P. and Ottova, V. (1973) Control of activated sludge filamentous bulking: Part II, Selection of microorganisms by means of a selector. *Water Research* **7**, 1389-1406.
4. Clauss, F., Helaine, D., Balavoine, C. and Bidault, A. (1998) Improving activated sludge floc structure and aggregation for enhances settling and thickening performances. *Water Sci. Technol.* **38**, 35-44.
5. Lee, J. S. and Kim, J. K. (1998) A study on the treatment characteristics of the conventional activated sludge according to change of pH and SOD loading. *J. Korean Soc. Env. Eng.* **11**, 1639-1650.
6. Helrich, K. (1990) In *Official Methods of Analysis* (16th ed.) Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C., USA.
7. Lee, J. S. (1998) A comparative study on the treatment characteristics of conventional and intermittent aeration activated sludge process. *J. Korean Soc. Env. Eng.* **20**, 1267-1278.
8. Lee, J. S. (2000) The optimal design of suspended growth systems. *J. Korean Soc. Env. Eng.* **22**, 1011-1019.
9. Daniel, L. (1998) In *Microbiology* WCB/McGraw-Hill, New York, USA.
10. Sawyer, C. N., and McCarty, P. L. (1978) In *Chemistry for Environmental Engineering* (3rd ed.) McGraw-Hill, New York, USA.
11. Vallon, J. K. and McLoughlin, A. J. (1984) Lysis as a factor in sludge flocculation. *Water Res.* **18**, 1523-1528.
12. Norberg, A. B. and Enfors S. O. (1982) Production of extracellular polysaccharide by *Zooglea ramigera*. *Appl. Envir. Microbiol.* **44**, 1231-1237.
13. Mitchell, R. (1974) In *Introduction to environmental microbiology* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
14. Friedman, B. A., Dugan, P. R., Pfister, R. A. and Remson, C. C. (1969) Structure of exocellular polymers and their relationship to bacterial flocculation. *J. Bacteriol.* **98**, 1328-1334.
15. Monsen, R. M. and Davis, E. M. (1984) In *Toxicity Screening Procedures Using Bacterial Systems: Microbial responses to selected organic chemicals in industrial waste treatment units*, Marcel Dekker, New York, USA. pp. 233-249.
16. Atlas, R. M. and Bartha, R. (1997) In *Microbial Ecology: Fundamental and application* Bejamin/Cummings Science Publishing, Menlo park, California, USA. pp. 61-65.
17. Bitton, G. (1994) In *Wastewater Microbiology*. John Wiley & Sons, New York, USA.
18. Stewart, M. H. and Olson, B. H. (1992) Physiological studies of chloramine resistance developed by *Klebsiella pneumoniae* under low-nutrient growth conditions. *Appl. Environ. Microbiol.* **58**, 2918-2927.
19. Matin, A. and Haraken, S. (1990) In *Drinking Water Microbiology: Effect of starvation on bacterial resistance to disinfectants*, Springer-Verlag, New York, USA. pp. 88-103.
20. Granville, H. S. (1974) In *Introduction to environmental microbiology* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
21. Forster, C. F. and Johnston, D. W. M. (1987) In *Environmental Biotechnology: Aerobic processes*, Ellis Horwood, Chichester, UK. pp. 15-56.
22. American Society of Civil Engineers (1998) In *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants* Vol. 2 Water Environmental Federation, Alexandria.

Soybean Wastewater Treatment by Activated Sludge Process

Kwonik Cho, Jeoung Su Lee¹, Tae Kyoo Lee and Jong Hwa Kim* (*Department of Food Science and Technology, Woosuk University, Jeonbuk 565-701, Korea; ¹Department of Civil Engineering, Woosuk University, Jeonbuk 565-701, Korea*)

Abstract: The kernel of wastewater treatment by activated sludge is elimination of organic substances and maintenance of well-flocculated sludge sedimentation. By the conventional activated sludge treatment, the optimum F/M ratio of soybean wastewater treatment was 0.24 (kg-BOD/kg-MLVSS · day) and sludge bulking was generated at 0.48 (kg-BOD/kg-MLVSS · day). To improve the treatment capacity and operation quality in higher loading of soybean wastewater, influent pH was constantly controlled by 9.0 using NaOH as a coagulant agent. In this process, higher loading up to 2.88 (kg-BOD/kg-MLVSS · day) was possible and SVI was maintained under 150 without bulking. This was equivalent to 7.2 times higher than maximum permissible load of the conventional activated sludge process.

Key words: activated sludge process, soybean wastewater, coagulant agent, bulking

*Corresponding author