

축산폐수성상에 따른 SBR 처리특성

The Characteristics of SBR Treatment with Different Types of Piggery Wastewater

전병희 * · 부경민 · 김양훈 · 임정훈 · 김창원

Byong-Hee Jun *, Kyung-Min Poo, Yang-Hoon Kim, Jeong-Hoon Im and Chang-Won Kim

부산대학교 환경공학과

* 부산대학교 환경기술산업개발연구센터

Department of Environmental Engineering, Pusan National University

* Institute for Environmental Technology and Industry, Pusan National University

Abstract

A pilot scale SBR (effective volume, 20m³) for the treatment of piggery wastewater treatment was performed with three different kinds of wastewater; fermenter effluent, scraper type and slurry type. The react phase in SBR was performed by sub-cycle operation consisting of repeated short cycle of anoxic-aerobic step. The fermenter effluent was characterized by the rapid nitrification and NO_x-N accumulation due to depletion of organic matter in wastewater. The scraper type wastewater showed appropriate nitrogen removal efficiency, however, a poor response capacity for high loading rate often resulted in increased nitrogen concentration in effluent. Moreover, severe P release was the most serious problem in scraper type wastewater. SBR treated slurry type wastewater with high nitrogen removal efficiency to satisfy effluent quality requirement. It was thought that high concentration of organic matter in slurry made it possible to uptake P during SBR operation, where P concentration of 140mgP/l was decreased to 8mgP/l. As results, SBR was suitable to treat slurry type wastewater which has been discharged to the ocean till now.

Keywords : Piggery Wastewater, SBR, N · P removal

1. 서 론

연속 회분식 반응기(Sequencing Batch Reactor, SBR)는 유기물과 함께 질소, 인의 제거가 한 반응기에서 이루어짐으로 장치가 간단하고 경제성이 우수하여 축산폐수처리에 대한 현실적 대안이 될 수 있다¹⁾. 단, 축산폐수와 같이 고농도 암모니아를

포함하는 폐수를 SBR로 처리하기 위해서는 고농도 암모니아 충격을 막기 위해 대단히 긴 HRT를 요구한다²⁾. 이러한 문제를 해결하고 고출운전을 가능하게 하기 위해 원수를 기질저해가 일어나지 않을 정도의 농도범위에서 투입하고, 그 대신 높은 반응속도를 유지할 수 있도록 짧은 시간내 무산소-폭기 과정을 반복하는 공정이 제시되었다³⁾.

연구의 결과 이 운전형태는 처리부하를 크게 증가시킬 뿐만 아니라 외부탄소원의 소비도 감소시켜 그 우수성을 인정받아 현재 K시 축산폐수공공처리장에서 실규모로 운전되고 있다.

축산폐수의 수질은 가축의 종류와 사육방법, 사료의 종류, 축사의 청소방법 등에 영향을 받으며⁴⁾, 특히 수거방식에 따라 슬러리형과 스크래퍼형으로 나뉘어지는데 슬러리형 폐수는 분과 세정수가 전부 혼합되어 배출되기 때문에 그 농도가 매우 높게 되고, 스크래퍼형 폐수는 분이 기계식 분리장치에 의해 분리되어 분의 20% 정도만이 세정수에 포함되어 슬러리형 폐수보다는 그 농도가 낮다⁵⁾. 지금까지의 연구에서 유기물 농도가 비교적 높은 슬러리형 축산폐수처리에 대한 검토는 부족한 실정이었다. 본 연구에서는 각 농가에서 배출되는 대표적인 유형인 액비탱크(발효조) 유출수, 스크래퍼형 폐수, 슬러리형 폐수를 SBR로 처리할 때 나타나는 각각의 처리특성을 질소와 인을 중심으로 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 원수

본 연구에서는 3종류의 원수를 이용하였다. 먼저 스크래퍼형 폐수는 각 축산농가에서 수거차량을 이용해 수집되고 있는 공공처리장 유입폐수를 이용하였다. 분과 뇨를 분리할 수 있는 스크래퍼가 설치된 각 농가에서는 배출된 폐수를 자체 저장조에서 상당기간 침전, 안정화시킨 후 수거차량으로 공공처리장에 유입시키고 있다. 슬러리형 폐수는 공공처리장에 유입되지 않으므로 별도의 차량을 이용해 슬러리형 축사를 보유한 여러 농가들에서 수거해 Pilot운전에 이용하였다. 그리고 발효조 유출수는 30m³의 pilot 규모의 혐기발효조를 운영하여 그 유출수를 SBR 유입수로 이용하였다. 발효조 내부는 열수코일을 장치하여 35℃를 유지하도록 하였고 내부순환을 30l/min으로 유지하였다. 원수는 스크래퍼 원수를 110일, 슬러리 원수를 250일 운전하였으며 유량은 500~2,480 ml/min의 범위로서 HRT는 7.7~41.6일이었다. Table 1에 각 폐수의 대표적인 성상을 나타내었다. 먼저 암모니아농도는 슬러리나 스크래퍼에서 3,500mgN/l전후로 비슷하였으나, 발효조 유출수는 세포용출등으로 인해 4,500mgN/l로 높아져 있음을 알 수 있

Table 1. The characteristics of each type influent (mg/l)

| | | fermenter | scraper | slurry |
|--------------------|------|-----------|---------|--------|
| NH ₄ -N | Ave. | 4499 | 3339 | 3730 |
| | Std. | 298 | 431 | 422 |
| NO _x -N | Ave. | 0.81 | 0.22 | 0.52 |
| | Std. | 0.75 | 0.24 | 0.54 |
| PO ₄ -P | Ave. | 114 | 22 | 83 |
| | Std. | 18 | 8 | 43 |
| SCOD | Ave. | 12060 | 10172 | 18365 |
| | Std. | 2418 | 1285 | 6175 |

다. 이러한 고농도 암모니아는 기질저해를 일으킬 수 있는 농도수준이었다. 폐수중 NO_x-N은 거의 포함되어 있지 않았다. 인은 스크래퍼에서 22mgP/l로서 가장 낮았고, 다음이 슬러리(83mgP/l)였으며, 가장 높은 것은 발효조 유출수로서(114mgP/l) 저장 또는 발효중 발생한 인방출의 결과라고 생각된다. SCOD는 유기물 농도가 매우 높은 분이 분리된 스크래퍼가 가장 낮고 슬러리에서는 18,300mg/l로서 2배에 가까운 농도차를 보였다. 수집된 원수는 펌프등 기기의 안정적인 운전을 위하여 진동형 고액분리기를 이용하여 큰 협잡물을 제거한 후 시료로 이용하였다.

2.2 실험장치

본 연구를 위해 Pilot-scale SBR(유효부피, 20m³) 반응기를 K시 축산폐수공공처리장내에 설치, 운전하였다. 실험에 이용된 반응기의 사진을 Fig. 1

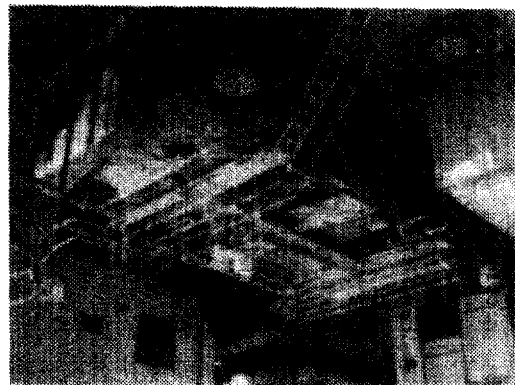


Fig. 1. Photograph of pilot scale SBR

에 나타내었다. 반응기는 사각입형으로 너비가 3m, 길이가 5.5m, 높이가 2.5m로 실제공정과 유사하게 운전이 가능하도록 약 20m³의 working volume으로 하였다. 송풍기는 3.64m³/min유량의 ring blower를 사용하였고, disk type의 30개의 Diffuser를 반응기 바닥에 설치하였다. 무산소기간에는 임펠러식의 교반기로 혼합을 시켰다. 반응기 내에는 pH(ECO IT21, EcoSys 2001 pH), ORP(U.S. filter, Strantrol 880), DO(Knick,Stratos, 2401 Oxy/Made in Germany) Sensor를 설치하여 on-line Monitoring 및 제어 설비를 갖추었다.

원수는 무산소기간 동안만 고유량 정량펌프(20L/min)를 이용하여 10-20분간, 0.2-0.4m³을 주입하는 간헐주입방식을 채택하였고, 1시간의 무산소 단계, 3시간의 호기 단계의 sub-cycle로 운전되었다. 이전의 연구결과를 바탕으로 (anoxic state with feeding + aerobic state)의 sub-cycle을 4~6번 가진 후 잔존한 nitrite, nitrate 제거를 위한 외부탄소원(메탄올) 공급과 settling, decant, idle기간을 가지도록 운전하였다. 반응기내 MLSS는 10,000~15,000 mg/l로 유지되었다. 시료분석은 Wattman GFC-40으로 여과한 후 Auto Analyzer 3(Bran+Luebbe)를 이용하여 SCOD, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, PO₄⁻-P이 분석되었다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 발효조 처리수를 원수로 한 SBR 운전

앞선 연구들에서 원수의 유기물을 이용하여 탈질반응에 탄소원으로서 이용하는 많은 시도들이 이루어졌다. 축산폐수 역시 높은 COD농도를 보여 주므로 (Table 1), 이를 무산소 기간에 주입하여 탈질을 이룰 수 있다. 본 연구에서는 폐수내 유기물의 분해성을 높이기 위해 산발효조를 설치하여 탈질속도를 높이기 위한 실험을 행하였다. Fig. 2(A)는 발효조 유출수를 이용하여 운전했을 때 질소와 인 농도변화를 나타내었다.

원수중 질소농도는 발효조를 거치면서 cell lysis 등으로 약간 증가하여 4,000~5,000mg/l였다. 운전결과 처리수중의 NH₄⁺-N는 거의 검출되지 않아 질산화는 원활하게 일어남을 알 수 있으나, NO_x-N는 100mgN/l 전후로 잔존하고 있다. 이런 결과는 탈질에 쓰여질 내부탄소원이 발효조에서 제거되어 SBR에서는 유기물 부족으로 탈질이 완

활히 일어나지 않아 과다하게 축적된 NO_x-N이 유기물 주입에도 불구하고 미처 다 제거되지 않은 이유라고 생각된다. 이런 결과로 SBR 전단계 처리로써의 발효조 이용은 바람직하지 않다는 것을 알 수 있다. 실험기간중 SCOD 농도는 원수에서 8,000~15,000mg/l, 처리수는 1,000~2,000mg/l로써 유지되었다.

Fig. 2(B)는 인농도의 변화를 나타내었다. 발효조내의 인방출로 인해 SBR 유입수의 P는 80~130mg/l로 매우 높다. 그런데 유출수중의 P는 유입수보다 20mg/l 정도 더 높은 값을 보여주고 있어 유기물부족으로 인한 poly-P의 해체와 인방출이 매우 심각함을 알 수 있다. 이런 인거동을 볼때에도 발효조의 이용은 적절하지 않음을 알 수 있다.

발효조를 거친 후 SCOD가 14,000mg/l인 원수를 SBR에 적용시켰을 때, 질소농도 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 질산화는 충분히 일어나 NH₄⁺-N는 거의 다 제거되고 있으나 NO_x-N은 축적량이 많아 메탄올 주입에도 불구하고 탈질이 완료되지 못하고 매일 축적되기 시작해 4일 후에는 250mg/l까지 상승하였다.

3. 2 스크래퍼 폐수를 처리하기 위한 SBR 운전

농가에서 분과 뇨가 분리되어 수거, 보관된 스크래퍼 폐수는 비교적 낮은 COD값을 가진다. 산발

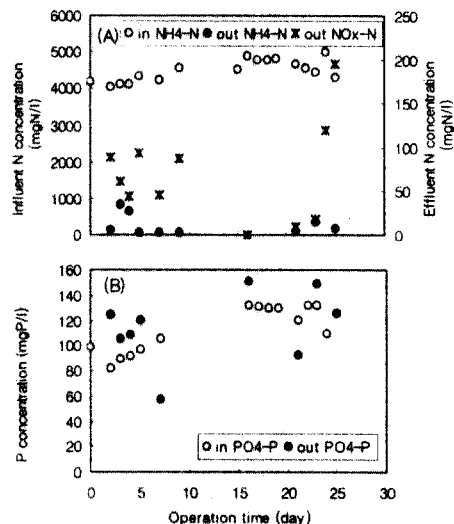


Fig. 2. Variation of N, P in fermented wastewater.

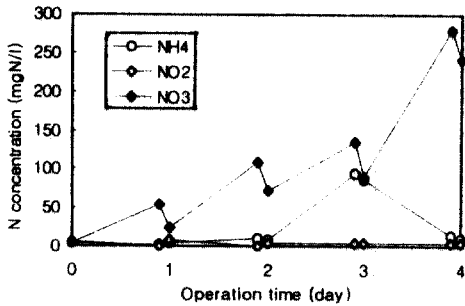


Fig. 3. Daily variation of Nitrogen.

효조를 거치지 않고 직접 SBR로 유입되었을 때 유기물, 질소, 인의 제거효율을 현장 pilot를 이용하여 검토하였다. Fig. 4(A)는 160일간의 스크래퍼를 대상으로 한 SBR 운전 결과 얻어진 질소의 변화와 제거를 나타내었다. 여기서는 자동제어가 아닌 무산소(원수주입)/폭기를 1시간/3시간으로 고정시켜 제거효율과 거동을 살펴보았다. 먼저 유입수중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 농도범위는 3,000~4,300mg/l로서 파악되고 $\text{NO}_x\text{-N}$ 은 거의 포함되어 있지 않다. 유출 질소농도는 대부분 60mg/l의 수질기준을 만족하고 있다. 부분적으로 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 이나 $\text{NO}_x\text{-N}$ 이 200mgN/l이상 축적되고 있는데 이는 원수변동에 대하여 대응이 신속하지 않은 비자동운전의 특징이라 생각된다. SBR운전에서 가장 중요한 것은 주어진 time sequence내에 허용되는 폐수량을 일정한 주입하는 것으로서 허용량을 벗어나 상회하면 원수내 고농도 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 로 인하여 배출수질은 급격히 악화된다. 그러나 이런 운전상의 문제는 ORP 제어를 이용하여 폭기시간을 조절함으로써 해결될 수 있다. ORP를 이용한 제어가 적용되지 않은 경우 질소가 장기간 안정적으로 처리되기는 힘들다. 왜냐하면 원수수질이 일정하지 않기 때문에 최대부하를 초과하는 질소가 유입되기 쉬우며, 이런 경우 유출수질이 악화되고 유입폐수량을 불가피하게 줄일 수밖에 없다. 유입수중 SCOD는 8,000~12,000mg/l의 범위로 파악되었고 유출수는 500~1,300mg/l였다. 유입수내의 난분해성 COD 성분으로 인해 500mg/l이하의 유출수질을 얻을 수는 없었다.

Fig. 4(B)는 인의 농도변화를 나타내었다. 스크래퍼 원수중 $\text{PO}_4\text{-P}$ 농도는 20~30mg/l였다. 그러나 유출농도는 60~120mg P/l로써 최고 140mg/l

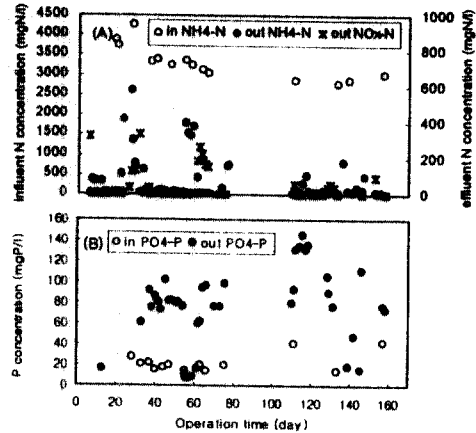


Fig. 4. Variation of N, P in scraper type wastewater.

까지 기록되었다. 이런 결과는 SBR운전에 있어서 매우 중요한 현상으로써 평가되어야 한다. 이것은 인방출/흡수 기작에서 폭기기간에 일어나야 할 인흡수가 제한 받고 있음을 의미한다. 주원인으로 생각할 수 있는 것은 유기물, 특히 VFA를 포함한 생물학적 분해가 빠른 유기물이 부족하기 때문인 것으로 판단된다. 질산화가 정상적으로 이루어졌을 때 탈질되어야 할 질소는 3,500mg/l, SBR에서 제거된 COD는 9,000mg/l이므로 C/N비로 보아 COD는 전량 탈질에 이용되어도 부족한 양이다. 따라서 세포내 VFA의 축적은 일어나지 않고 인과잉흡수도 되지않는 것으로 예상된다. 이런 결과로부터 SBR를 이용하여 스크래퍼 폐수를 처리할 경우 방출된 인 제거를 위한 후속공정이 필요함을 알 수 있다.

3. 3 슬러리 폐수를 처리하기 위한 SBR 운전

농가에서 분과 뇨가 혼합되어 저장, 수거되는 슬러리 폐수는 높은 부유물질과 유기물 농도로 인하여 공공처리장에서 폐수처리에 많은 어려움을 주고 있으며 지역에 따라서는 반입자체를 금지시키고 있다. 따라서 본 연구에서는 스크래퍼 뿐만 아니라 기존에 처리가 곤란하였던 슬러리의 처리능을 살펴보고 상용화 가능성을 검토하였다. Fig. 5(A)는 100일간 운전기간중 슬러리를 주입하여 나타난 질소의 변화를 조사하였으며 그 중 스크래퍼 처리시와 같은 운전조건으로 가동되었을 때의 결과를 나타내었다. 기간중 원수의 $\text{NH}_4^+\text{-N}$

농도는 3,500~4,000mg N/l 범위였으며 유출수중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 는 극미량 그리고 $\text{NO}_x\text{-N}$ 은 20mg/l 이하, 그리고 외부탄소원을 주입하지 않았을 때 70mg/l 이하의 수질을 보였다. 최종 무산소기간에 외부탄소원이 주입된다면 슬러리에서도 충분한 질소 제거가 일어나 방류수질을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 또 한가지 특징은 고농도 유기물로 인하여 질산화저해가 일어날 수 있음에도 불구하고 무산소기간의 탈질에 유기물이 전자공여체로 소비되어 호기기간의 질산화저해현상은 발생되지 않는 것으로 판단된다. 이는 원수의 분할주입을 이용한 SBR운전의 고농도 유기물을 포함한 원수중의 질소 제거에 효과가 있다는 것을 보여준다. 유입 SCOD는 10,000~26,000mg/l 범위이고 유출 SCOD는 1,000mg/l 내외이다. 유입수질은 폐수에 따라 크게 변동하고 있지만 유출수질은 비교적 일정한 수준을 나타내고 있다. 유출 SCOD가 900mg/l 이하로 떨어지지 않는 것은 원수중 난분해성 SCOD의 존재에 기인한다고 판단된다.

Fig. 5(B)는 인농도의 변화를 나타내었다. 생물학적 인제거는 활성슬러지를 혐기성조건과 호기성조건에 교차로 노출시킴으로써 인함량이 높은 활성슬러지를 생성함으로써 이루어진다. 따라서, 무산소/폭기가 반복되는 SBR운전은 인제거에 매우 유리할 수 있다. 그러나 스크래퍼형 돈사의 폐수를 이용한 운전결과에서는 인농도가 크게 증가한 것으로 보아 인방출은 활발한데 인흡수가 저해되

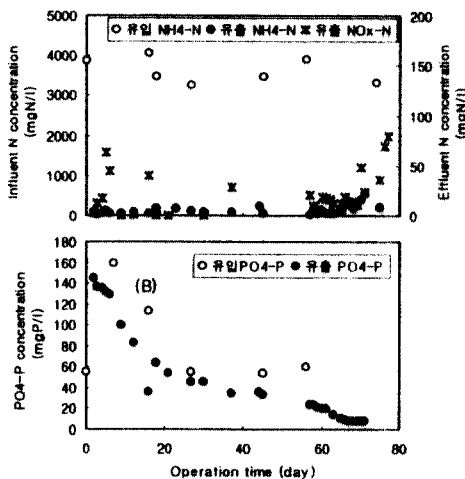


Fig. 5. Variation of N, P in slurry type wastewater.

고 있음을 알 수 있다. 혐기조건에서의 인방출은 몇 가지 이론이 있기는 하지만 주로 세포밖의 기질을 세포내로 이송하기 위해, 그리고 세포내 저장물질의 일종인 다중 히드록시 β 부티르산 (PHB)을 생성하는데 필요한 에너지를 얻기 위해 poly-P를 가수분해하고 그 결과 인산이 방출되는 것으로 이해되고 있다. 이런 과정은 인축적 미생물의 특이적 반응으로써 탈질반응과 함께 유기물 소비반응이다. 따라서 무산소기간에 원수가 주입되는 본 연구에서의 SBR 운전 특성상 인방출은 원활히 일어날 것이라 생각할 수 있다. 반면 호기기간에서는 역반응을 가능하게 하는 효소인 다중인산염 키나아제가 ADP/ATP 보전의 과정에서 인농도의 변화에 관여한다. 즉, 호기기간 중 세포성장 등으로 ATP가 부족할 때는 ATP를 보충하기 위해 poly-P를 분해, 인산이 해리되고 인이 방출되는데 반대로 ATP가 충분하다면 인산도 poly-P로 축적되어 인이 흡수된다. 다시 말해, 폐수중 유기물량에 따라 인흡수가 조절되는 것이다. 따라서 유기물 농도가 높고 특히 생물학적 분해가 빠른 성분이 많이 포함된 슬러리 원수에서는 인흡수가 활발하게 되어 140mg/l이던 반응기내 인농도가 70일만에 8mg/l로 크게 감소되어 안정되게 유지되고 있다. 이것은 스크래퍼와 구분되는 가장 큰 특징이라 할 수 있다.

원수중 SCOD가 26,000mg/l인 슬러리형 돈사의 폐수를 SBR에 적용시켰을 때 질소농도변화를 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 10mg/l 이하로 유지되어 고농도 유기물로 인한 질산화저해는 일어나지 않았음을 알 수 있다. 그리고 1일 주기 cycle이 끝난 메탄을 주입전 $\text{NO}_x\text{-N}$ 농도는 20mg/l 전후로써 각 sub-cycle에서 내부탄소원을

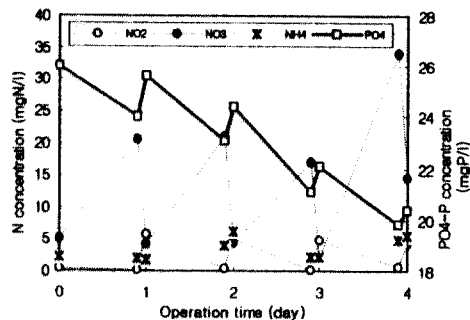


Fig. 6. Daily variation of N, P.

이용하여 충분한 탈질이 이루어져 잔존 $\text{NO}_x\text{-N}$ 가 낮은 수준을 유지해 메탄을 주입후 $\text{NO}_x\text{-N}$ 은 5mg/l 이하로 유지되었다. 이것은 기존의 처리방법에서 슬러리 중의 고농도 유기물로 인해 처리가 곤란하였던 것을 탈질을 위한 내부탄소원으로 적극 활용함으로써 우수한 수질을 확보할 수 있음을 보여주는 결과이다. 그리고 이 기간동안 인농도 변화를 나타내었다. 인농도 변화는 각 sub-cycle 중에 인의 흡수, 메탄을 주입으로 인의 방출이 일어나는 전형적인 형태를 보여준다. 그리하여 전체적으로 인흡수의 비율이 커서 인제거가 활발히 일어나고 있다.

이런 결과들로부터 슬러리처리를 위한 SBR 운전은 매우 효과적이며 특히 유기물 농도가 높을수록 질소와 인제거에 유리하게 작용되어 슬러리 처리에 문제가 없음을 보여준다.

4. 결 론

축산폐수중의 질소와 인을 제거하기 위한 SBR 운전을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 발효조 처리수를 원수로 한 SBR운전에서는 질산화 속도가 빨라 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 거의 검출되지 않았으나 유기물 부족으로 탈질이 이루어지지 않아 $\text{NO}_x\text{-N}$ 이 빈번하게 고농도로 축적되고 인제거 효과도 적어 SBR의 전단계공정으로서의 산발효조 이용은 적합하지 않았다.

2) 스크래퍼형 폐수를 원수로 한 SBR운전에서는 양호한 질산화, 탈질과정을 보여주었으나, 고부하에서 원수조건변화에 대한 적응력 부족으로 질소농도가 급격히 증가하기도 하였으며 특히 인방출에 따른 고농도 인의 유출은 스크래퍼형 폐수처리에서 가장 큰 문제로 제기되었다.

3) 고농도 유기물을 포함한 슬러리형 폐수를 원수로 한 SBR운전에서는 질소제거 효율이 뛰어나 유출수중 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 은 10mgN/l 이하, $\text{NO}_x\text{-N}$ 은 20mgN/l 이하, 그리고 외부탄소원을 주입하지 않은 경우에도 60mgN/l 이하의 수질을 보여 방류수

수질 기준을 만족시킬 수 있었다. 또한 인제거 효율이 안정되게 유지되어 운전초기 140mgP/l 였던 인농도가 8mgP/l 이하로 감소되어 후속처리 없이도 인방류수질 기준을 만족시킬 수 있었다.

따라서 고농도 유기물농도로 인하여 기존에 처리가 곤란하였던 슬러리형 축산폐수처리에 SBR을 적용시킬 경우, 질소와 인제거 효율이 기존에 처리가 용이하였던 스크래퍼형 폐수의 경우보다 증가하여 해양투기에 의존하던 슬러리형 폐수처리에 대한 대안이 될 수 있다고 판단된다.

5. 사 사

본 연구는 농림부 농림기술관리센터의 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것이다.

참고문헌

1. Norcross, K. L., Sequencing batch reactors-An overview, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 26, No. 9-11, 2523-2526 (1992).
2. Choi, E., Oa, S. W. and Lee, J. J., Nightsoil treatment plant converted into sequencing batch reactor to improve removal of pollutants and nutrients, *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 35, No. 1, 233-240 (1997).
3. Kim, C. W., Choi, M. W., Ha, J. Y., Lee, H. G. and Park, T. J., Optimization of operation mode for sequencing batch reactor(SBR) treating piggery wastewater with high nitrogen, 2nd International Symposium on Sequencing Batch Reactor Technology (2000).
4. 박완철, 축산폐수 문제해결을 위한 기술 및 정책심포지엄 (2001).
5. 김창원, 축산폐수 관리 정책 및 신기술(1997).