

부직포 여과막 생물반응조의 혐기성 폐수처리에 관한 기초연구

김택수 · 배민수 · 조윤경* · 조광명†

인하대학교 환경토목공학부
*위스콘신대학교 토목환경공학과

A Basic Study on the Anaerobic Wastewater Treatment using Nonwoven Fabric Filter Bioreactor

Taek-Su Kim · Min-Su Bae · Yun-Kyung Cho* · Kwang-Myeung Cho†

School of Environmental & Civil Engineering, Inha University
*Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison
(Received 3 March 2005, Accepted 8 June 2005)

Abstract

In the nonwoven fabric filter bioreactor (NFBR), both the construction and the operation costs could be saved because a high concentration of microorganism can be maintained in the reactor as in the membrane bioreactor. However, the NFBR process has been investigated only under aerobic and/or anoxic conditions.

In this research, a basic anaerobic treatment experiment was performed at 35°C by feeding an airtight NFBR with a concentrated synthetic organic wastewater. The organic loading rate (OLR) of the NFBR was increased stepwise from 0.25 kg COD/m³-day to 0.77 kg COD/m³-day by gradually decreasing the hydraulic retention time from 20 days to 13 days.

The results of the research showed that the best COD removal efficiency achieved at the OLR of 0.67 kg COD/m³-day with a value of 99.3%. The methane content of the produced gas was highest with a value of 61.2% at the OLR of 0.33 kg COD/m³-day. The highest methane production rate was 0.89 kg COD/m³-day at the same OLR. The operation was terminated at the OLR of 0.77 kg COD/m³-day because of the deterioration in COD removal efficiency, gas production rate, and the methane content of the gas. Further researches are recommended for the NFBR to be employed for anaerobic treatment of organic wastewaters.

keywords : Nonwoven fabric, Filtration, Anaerobic treatment, Bioreactor

1. 서론

고농도의 유기성 폐수나 슬러지의 처리를 위해 흔히 채택되는 혐기성 공법은 호기성 공법에 비하여 처리수의 수질이 나빠 수질규제를 만족시키기 위하여 호기성 마무리(polishing)가 요구되고 충격부하나 독성물질에 민감하다는 단점이 있지만, 슬러지 생성량이 적고 영양물질 및 에너지 요구량이 적으며 에너지원이 될 수 있는 메탄(CH₄)이 부산물로 생성될 뿐만 아니라 염소유기화합물도 분해될 수 있고 병원균도 사멸시킬 수 있는 장점이 있다(Grady et al., 1999). 그러나 혐기성 공법에서 중요한 역할을 하는 메탄 생성 박테리아는 성장률이 매우 낮기 때문에 반응조에서의 미생물 체류기간(solids retention time, SRT)이 길어야 한다(Lema et al., 1991).

근래에 개발된 막 결합형 생물반응조(membrane bioreactor, MBR)는 막에 의한 부유물의 분리가 가능하여 반응

조 내에 미생물을 고농도로 유지할 수 있어 SRT를 길게 할 수 있기 때문에 장치를 소규모화할 수 있다는 장점이 있다(Lubbeke et al., 1995; Nagaoka et al., 1999; Pouet et al., 1994; Shimizu et al., 1996; Trouve et al., 1994). 그러나 막의 가격이 비싸고 막을 통한 저항이 높아 실용적인 투과수량(flux)을 얻기 위하여 동력이 요구되며, 막이 막히는 등 단점도 많다.

이러한 MBR의 단점을 보완하기 위하여 부직포를 여과막으로 이용한 연구가 수행되었는데(조, 1974; Kiso et al., 2000), 부직포는 제조방법에 따라 차이가 있으나 일반적으로 섬유가 3차원으로 무질서하게 배열된 다공성 구조이므로(<http://www.nonwovens.com>) 미생물 floc 등의 부유물은 투과과정에서 섬유조직에 의하여 여과되거나 섬유의 표면에 쉽게 부착된다. 따라서 부직포를 여과막으로 사용하는 부직포 여과막 생물반응조(nonwoven fabric filter bioreactor, NFBR)(이 등, 2004; 임 등, 2003; 황 등, 2003)는 부직포의 가격이 싸기 때문에 MBR에 비하여 시공비가 적게 요구될 뿐만 아니라, 부직포의 공극이 커서 흐름에 대한 저항이 낮으므로 적은 수두차이에서도 높은 여과율을 얻을

† To whom correspondence should be addressed.
kmcho@inha.ac.kr

수 있어 가압이나 흡인을 위한 펌프시설이 불필요하고, 또한 여과막의 폐쇄현상이 거의 없어 역세척이 불필요하므로 운전비도 적게 든다는 장점이 있다.

지금까지 NFBR을 호기성 또는 준호기성 상태에서 운전한 연구는 있으나(이 등, 2004; 임 등, 2003; 조, 1974; 황 등, 2003) 혐기성 조건에서 연구된 예는 전무하다. 따라서 본 연구에서는 고농도의 유기성 합성폐수를 혐기성 조건에서 NFBR로 처리하는 연구를 실시하였다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에 사용된 실험장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 부직포 여과막 생물반응조, 폐수 주입펌프, 습식 gas meter, 교반기 등으로 구성되었다. 반응조는 내경이 190 mm인 투명한 아크릴관 내에 내경이 170 mm인 원통형의 부직포 주머니를 설치한 것으로, 부직포의 두께가 약 6 mm이므로 이론적으로 부직포와 아크릴관 사이에 4 mm의 간격이 생기지만 부직포 주머니가 성형하지 않은 hanger 형태이므로 실제 간격은 균일하지 않았다. 반응조의 유효용적은 15 L이며 부직포 주머니의 유효면적은 0.29 m²이었다.

여과막 주머니의 제작에 사용된 부직포는 polyethylene과 polypropylene을 약 65 : 35의 비로 혼합하여 두께가 약 6 mm 그리고 단위중량이 약 1.06 kg/m² 되도록 제조된 것으로, 섬유가닥이 무질서하게 배열된 다공성 구조이므로 공극 크기(pore size)가 일정하지 않으나 전자현미경 관찰에 의하면 섬유가닥간의 간격은 약 100 μm로 측정되었다. 그러나 섬유가닥이 불규칙하게 수많은 층으로 배열된 상태이므로 실제 공극 크기는 100 μm보다 더 작을 것으로 판단된다.

혐기성 상태를 유지하기 위하여 반응조 상부에 밀폐형 덮개를 설치하였으며, 덮개에 폐수 유입구, 발생가스 유출구, 그리고 슬러지의 침전을 방지하기 위한 교반기를 설치하였다. 폐수는 펌프를 사용하여 폐수 유입구로 연속주입시켰으며, 슬러지의 침전을 방지하기 위해 연속교반을 실시하였다.

반응조는 35°C로 유지되는 항온실에 설치하였으며, 하수처리장의 혐기성 소화슬러지 상정액으로 식중하고 N₂가스로 purging한 다음, Table 1에 주어진 바와 같이 주성분이 글루코스와 COD농도가 4,700-11,000 mg/L인 합성폐수를 주입하였다. Table 2에 제시한 바와 같이 13-20일의 수리학적 체류시간에서 유기물 부하율(organic loading rate, OLR)

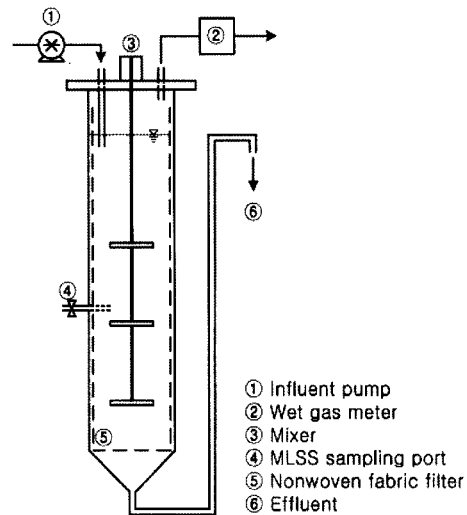


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental system.

Table 2. Operational conditions of the reactor

| Experimental stages | I | II | III | IV | V |
|---------------------|-----|------|------|------|------|
| OLR (g COD/L-day) | 0.5 | 0.25 | 0.33 | 0.67 | 0.77 |
| HRT(days) | 20 | 20 | 15 | 15 | 13 |

Table 3. Summary of the analytical methods

| Item | Analytical method |
|-----------------|--|
| pH | pH meter(ORION 720A) |
| Alkalinity | Titration Method(Standard Methods : 2320 B) |
| COD | Dichromate Reflux Method(Closed) (Standard Methods : 5220 C) |
| TSS | Advantec GS-25 (Korean Standard Methods for Water Pollutants) |
| TVA | Distillation Method (Standard Methods : 5560 C) |
| Gas composition | Gas chromatography (Hewlett Packard 6890-TCD) |

을 0.25-0.77 g COD/L-day로 변화시키면서 5단계로 실험을 실시하였는데, 각 실험단계에서 처리수의 COD농도, 발생가스의 양, 그리고 발생가스의 조성이 정상상태인 것으로 판단되었을 때 실험단계를 바꾸었다. 주입폐수 및 처리수는 Standard Methods(APHA, 1998)와 우리나라의 수질오염공정시험법(환경부, 1996)에 준하여 요구되는 항목을 Table 3에 제시된 방법에 따라 대략 일주일에 3회씩 분석하였다.

Table 1. Composition of the synthetic wastewater

| Solution | Compound | Conc. (mg/L) | Solution | Compound | Conc. (mg/L) |
|----------------------|--|--------------|------------------------|---|--------------|
| Synthetic wastewater | Glucose | 10,000 | Trace element solution | H ₃ BO ₃ | 50 |
| | NaHCO ₃ | 5,000 | | FeCl ₂ · 6H ₂ O | 4,000 |
| | NH ₄ Cl | 716 | | ZnCl ₂ | 50 |
| | NaH ₂ PO ₄ · 2H ₂ O | 198 | | MnCl ₂ · 4H ₂ O | 500 |
| | MgCl ₂ · 6H ₂ O | 24.6 | | CuCl ₂ · 2H ₂ O | 30 |
| | KCl | 56.3 | | (NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ · 4H ₂ O | 90 |
| | CoCl · 6H ₂ O | 16 | | NiCl ₂ · 6H ₂ O | 50 |
| | Yeast extract | 263 | | Na ₂ S ₂ O ₃ · 5H ₂ O | 100 |
| | Trace element solution | 0.1(mL/L) | | Conc. HCl | 1(mL/L) |

가스 조성은 Alltech CTR 1 column이 장착된 gas chromatography (Hewlett Packard 6890-TCD)로 일주일에 3회씩 분석하였는데, carrier gas는 helium으로 유량이 25 mL/min였으며 주입기, 노 및 검출기의 온도는 각각 110°C, 50°C 및 210°C로 유지되었다. 가스 발생량은 wet gas meter (Sinagawa W-NK-1)로 매일 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

약 300일간 수행된 실험의 결과를 실험단계 및 항목별로 농도범위와 산술평균값을 계산하여 Table 4에 나타내었다.

3.1. 유기물 제거

Fig. 2와 Table 4에 나타낸 바와 같이 초기의 순유기간인 I 단계실험에서는 COD 제거효율이 평균 58.3%로 낮았는데, 이는 유입수의 COD농도가 평균 10,274 mg/L 그리고 평균 OLR이 0.50 g COD/L-day로 매우 높아 미생물의 증식이 충분하지 않은 과부하상태였기 때문으로 판단된다. 따라서 II 단계실험에서는 유입수의 COD농도를 평균 4,941 mg/L로 낮추어 OLR이 0.25 g COD/L-day 정도 되도록 운전하였다. 그 후 OLR이 증가함에 따라 점차 COD제거효율도 상승하여 IV단계실험에서 최고 99.3% 그리고 평균

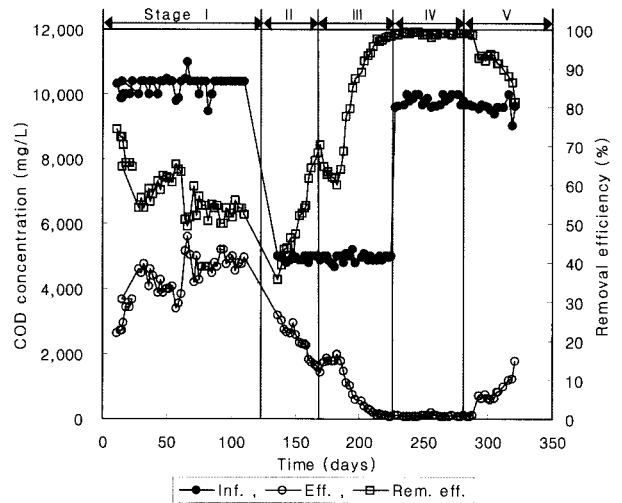


Fig. 2. COD removal in the anaerobic NFBR.

98.9%로 가장 좋았다. OLR이 0.77 g COD/L-day로 운전된 V 단계실험에서는 유출수의 총유기산농도(total volatile acid, TVA)가 점차 증가하면서 COD제거효율이 다시 악화되는 경향을 나타내었다.

본 연구에서 사용된 부직포와 동일한 부직포를 사용하여 하수를 호기성으로 처리한 연구(이 등, 2004; 임 등, 2003;

Table 4. Summary of the results of the experiment

| Experimental stages | | | I | II | III | IV | V |
|--|------------------------|-------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| Experimental period (days) | | | 110 | 37 | 57 | 57 | 38 |
| pH | Inf. | Range | 7.8 ~ 9.0 | 8.5 ~ 8.6 | 8.6 ~ 8.8 | 8.5 ~ 8.9 | 8.6 ~ 8.9 |
| | | Avg. | 8.3 | 8.5 | 8.7 | 8.8 | 8.8 |
| | Eff. | Range | 5.7 ~ 9.1 | 8.1 ~ 9.2 | 8.6 ~ 9.4 | 8.6 ~ 9.5 | 8.8 ~ 9.4 |
| | | Avg. | 8.2 | 9.0 | 8.9 | 9.0 | 9.1 |
| Alkalinity (mg/L) | Inf. | Range | 950 ~ 9,750 | 4,690 ~ 5,000 | 4,690 ~ 5,000 | 9,500 ~ 10,000 | 9,500 ~ 10,000 |
| | | Avg. | 5,852 | 4,934 | 4,882 | 9,780 | 9,759 |
| | Eff. | Range | 750 ~ 6,500 | 4,190 ~ 4,600 | 4,190 ~ 5,000 | 4,920 ~ 9,460 | 9,400 ~ 9,960 |
| | | Avg. | 3,169 | 4,428 | 4,702 | 7,934 | 9,731 |
| COD (mg/L) | Inf. | Range | 9,500 ~ 11,000 | 4,800 ~ 5,000 | 4,700 ~ 5,189 | 9,600 ~ 10,000 | 9,021 ~ 9,987 |
| | | Avg. | 10,274 | 4,941 | 4,949 | 9,811 | 9,593 |
| | Eff. | Range | 2,638 ~ 5,584 | 1,455 ~ 3,211 | 77 ~ 2,000 | 69 ~ 194 | 83 ~ 1,808 |
| | | Avg. | 4,292 | 2,344 | 883 | 105 | 750 |
| | Removal efficiency (%) | Range | 49.2 ~ 74.5 | 35.8 ~ 70.3 | 60.0 ~ 98.4 | 98.0 ~ 99.3 | 81.3 ~ 99.1 |
| | | Avg. | 58.3 | 52.6 | 82.1 | 98.9 | 92.2 |
| Gas production rate (L/day) | Range | 0.00 ~ 2.02 | 0.55 ~ 0.70 | 1.10 ~ 2.85 | 2.80 ~ 5.20 | 0.90 ~ 5.00 | |
| | Avg. | 0.79 | 0.60 | 2.04 | 4.46 | 3.29 | |
| Gas composition (%) | CO ₂ | Range | 16.0 ~ 61.1 | 14.3 ~ 36.2 | 27.7 ~ 51.7 | 28.2 ~ 42.4 | 40.4 ~ 46.0 |
| | | Avg. | 45.4 | 27.0 | 35.7 | 39.4 | 43.5 |
| | CH ₄ | Range | 5.1 ~ 32.6 | 13.8 ~ 44.7 | 33.8 ~ 61.2 | 47.1 ~ 57.9 | 44.4 ~ 50.2 |
| | | Avg. | 26.9 | 36.8 | 51.3 | 50.5 | 47.5 |
| CH ₄ produced/COD removed (g COD/g COD) | Range | 0.00 ~ 0.34 | 0.14 ~ 0.38 | 0.31 ~ 0.89 | 0.43 ~ 0.70 | 0.12 ~ 0.57 | |
| | Avg. | 0.13 | 0.29 | 0.64 | 0.58 | 0.38 | |
| Eff. TVA (mg/L) | Range | 500 ~ 2,158 | 700 ~ 1,100 | 25 ~ 770 | 15 ~ 18 | 15 ~ 312 | |
| | Avg. | 1,639 | 918 | 394 | 16 | 171 | |
| Eff. TSS (mg/L) | Range | 39 ~ 179 | 34 ~ 84 | 18 ~ 71 | 28 ~ 64 | 36 ~ 42 | |
| | Avg. | 72 | 62 | 55 | 39 | 38 | |

황 등, 2003)에서는 부직포 여과막에 생물막이 형성된 다음에는 처리수의 SS농도가 2 mg/L 이하로 나타났는데, 본 연구에서는 Table 4에 제시된 바와 같이 처리수의 SS농도가 가장 낮은 경우에도 18 mg/L나 되어 처리수의 COD농도를 높게하는 중요한 원인이 되었다. Novak 등(2003)은 활성슬러지를 혐기성 상태에 노출시키면 flocc이 파괴되면서 독립입자가 많이 생성되는 것으로 보고하였는데, 이와같이 혐기성 상태에서 형성되는 biofloc의 크기가 호기성 조건에서 생성되는 biofloc보다 작아 여과막을 잘 통과하기 때문에 호기성 NFBR에 비하여 혐기성 NFBR에서 처리수의 SS농도가 더 높은 것으로 추정된다. 또한 혐기성 NFBR에서는 부직포 여과막에 형성되는 생물막이 호기성 조건에서 형성되는 생물막에 비하여 얇거나 조밀하지 못하여 여과효율이 저하되기 때문에 처리수의 SS농도가 증가할 수도 있을 것으로 추정된다.

3.2. 가스 발생량 및 조성

Fig. 3 및 Table 4에 나타난 바와 같이 II ~ IV단계실험에서는 OLR이 증가함에 따라 가스발생량이 점차 증가하였으나, OLR이 가장 높았던 V단계실험에서는 유출수의 TVA농도가 증가하면서 COD제거효율이 악화되고 가스발생량도 급격히 감소하였다.

실험 초기에 과부하로 COD제거효율이 나빴던 I단계실험에서는 발생가스의 CH₄함량이 평균 26.9%로 낮았으나, OLR을 낮춘 II단계실험부터는 CH₄함량이 점차 증가하여 III단계실험에서는 평균 51.3% 그리고 최고 61.2%를 나타내었다. COD제거효율이 가장 좋았고 가스발생량이 가장 많았던 IV단계실험에서는 메탄 함량이 약간 낮아져 평균 50.5%를 유지하였다.

Fig. 3에 주어진 가스생성율과 가스 구성으로부터 메탄 전환율, 즉 제거된 COD 단위무게당 생성된 메탄가스의 양을 COD값으로 환산한 값을 계산하여 Table 4 및 Fig. 4에 제시하였는데, Fig. 4를 살펴보면 특히 III단계실험에서는 COD제거효율, 가스발생량 및 가스의 메탄함량이 모두 양호

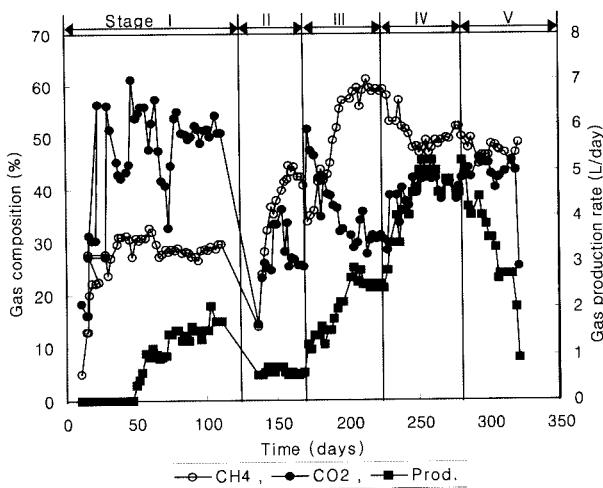


Fig. 3. Gas composition and production rate of the anaerobic NFBR under various OLRs.

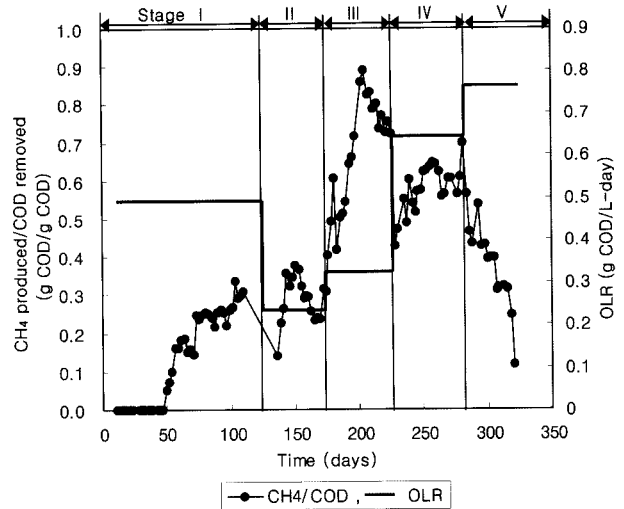


Fig. 4. Variation of CH₄ produced/COD removed ratio in the anaerobic NFBR.

함으로써 메탄전환율이 가장 높아 제거된 COD 1 g당 평균 0.64 g 그리고 최고 0.89 g의 메탄이 생성되는 것으로 계산되었으며, COD제거효율과 가스발생량이 가장 높았던 IV단계 실험에서는 가스의 메탄함량이 약간 낮아져 제거된 COD 1 g당 평균 0.58 g의 메탄이 생성되는 것으로 계산되었다. 그러나 V단계실험에서는 COD제거효율과 가스발생량이 모두 감소함으로써 메탄전환율도 크게 감소하였다.

3.3. 총유기산농도의 변화

반응조의 총유기산 농도는 유입수의 농도에 따라 다르지만 일반적으로 혐기성 반응조가 정상적으로 운전될 때 유기산의 농도는 500 mg/L 이하로 유지되는데(배 등, 1995), 유출수의 TVA농도를 나타낸 Fig. 5를 살펴보면 정상상태에 도달하지 못하여 COD제거효율이 가장 낮았던 I단계 실험에서는 처리수의 TVA농도가 500-2,158 mg/L의 범위로 변화 폭이 커 반응조의 상태가 정상적이지 못하였음을 알 수 있다.

OLR이 0.25 g COD/L-day이었던 II단계실험에서는 유출수의 TVA농도가 점점 낮아져 700 mg/L까지 감소하였으

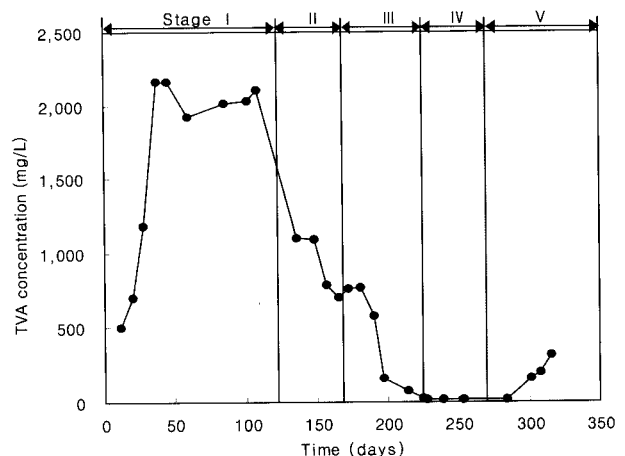


Fig. 5. Variation of TVA concentration.

며, III단계실험에서는 약 200일째부터 TVA농도가 100 mg/L 이하로 낮게 유지되고 가스의 평균 메탄함량과 메탄 전환율이 각각 약 51.3% 및 0.64로 높아져 반응조의 운전이 매우 안정적이었음을 알 수 있다. 그러나 OLR이 0.77 g COD/L-day로 증가한 V 단계실험에서는 유출수의 TVA 농도가 점차 증가하면서 COD제거효율과 가스의 발생량 및 메탄함량 모두 감소하여, 결국 반응조의 운전을 중단하게 되었다.

3.4. 연속교반의 영향

일반적으로 완전혼합형 혐기성 부유성장 공법에 적용되는 OLR은 1-5 g COD/L-day(Metcalf et al., 2003)이지만 본 연구에서는 OLR이 0.25-0.77 g COD/L-day로 비교적 낮았는데도 OLR이 0.77 g COD/L-day이었던 V 단계실험에서 COD제거효율이 감소하고 유출수의 TVA농도가 증가하여 실험을 종료하였는데, 그 원인이 과부하보다 연속교반에 있는 것으로 판단된다.

일반적으로 혐기성 소화조에서는 소화조 내의 반응환경을 균일화시키고 물질전달율을 증가시키기 위하여 완전혼합을 실시한다(Grady et al., 1999). 그러나 Monteith(1981)는 교반으로 인해 반응부피가 감소하고 단화로 현상이 발생할 수 있다고 하였으며, 이러한 단점을 보완할 수 있는 새로운 완전혼합기법이 연구되기도 하였다(Daiger et al., 1992; Zoltec et al., 1975). 최근 Stroot 등(2001)은 교반이 고품체기물 및 슬러지 혼합물의 혐기성 처리에 미치는 영향을 연구한 결과 높은 유기물 부하율로 운전되는 반응조에서 연속적인 강한 교반은 공간적인 병치(spatial juxtaposition)를 파괴함으로써 산생성균과 메탄생성균의 공생을 방해한다고 하였다. 또한 Kim 등(2002)의 연구에 의하면 합성 일차슬러지를 혐기성 상태에서 처리하였을 때 교반을 실시하지 않은 혐기성 소화조가 교반을 실시한 반응조에 비하여 정상상태에 빨리 도달하고 비교적 안정된 pH, 낮은 TVA농도, 그리고 많은 가스발생량을 나타내었는데, 이는 교반을 실시하지 않음으로써 미생물간의 거리가 가까기 때문이라고 하였다.

따라서 본 연구에서 0.77 g COD/L-day의 낮은 OLR에서 혐기성 NFBR의 상태가 악화된 것이 과부하에 의한 것이라기 보다 연속교반을 실시한 데 그 원인이 있는 것으로 판단되며, 앞으로 이에 관한 연구가 요망된다.

4. 결론

부직포 여과막 생물반응조를 사용하여 고농도의 유기성 합성폐수를 혐기성으로 처리한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) COD제거효율은 OLR이 0.67 g COD/L-day였을 때 최고 99.3%로 가장 좋았다.
- 2) 발생가스의 메탄함량은 0.33 g COD/L-day의 OLR로 운전되었을 때 61.2%의 가장 높은 값을 보였다.
- 3) 0.33 g COD/L-day의 OLR로 운전되었을 때 제거된 COD

1 g 당 최고 0.89 g의 메탄이 생성되는 것으로 계산되었다.

- 4) 0.77 g COD/L-day의 OLR로 운전되었을 때 유출수의 TVA농도가 점차 증가하면서 COD제거효율, 가스발생량 및 가스의 메탄함량이 감소하였으므로 실험을 종료하였다.
- 5) 본 연구에서 최대 OLR이 0.67 g COD/L-day의 낮은 값이므로 NFBR을 유기성 폐수의 혐기성 처리에 이용하기 위해서는 이의 원인규명 및 보완을 위한 연구가 요망된다.

참고문헌

- 배재호, 조광명, 혐기성 처리(II), *대한상하수도학회지*, **9**(3), pp. 85-97 (1995).
- 이종호, 조광명, 교차 간헐 폭기식 부직포 여과막 생물반응조를 이용한 하수의 유기물 및 질소 제거, *대한환경공학회지*, **26**(2), pp. 184-190 (2004).
- 임상호, 배민수, 조광명, 부직포 여과막 생물반응조를 이용한 하수의 처리, *한국물환경학회지*, **19**(1), pp. 99-107 (2003).
- 조광명, 고농도 활성오니에 의한 소규모 하수처리방법의 개발, *대한토목학회지*, **22**(1), pp. 51-61 (1974).
- 환경부 고시 제 96-32호, *수질오염공정시험법* (1996).
- 황도연, 강복춘, 조광명, 간헐폭기식 부직포 여과막 생물반응조에서 폭기/비폭기 시간비가 하수의 유기물 및 질소 제거에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, **25**(2), pp. 258-265 (2003).
- APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., Washington D.C., USA (1998).
- Daiger, G. T. and Buttz, J. A., *Upgrading Wastewater Treatment Plant*, Technomic Publishing (1992).
- Grady, C. P. L., Daigger, G. T. and Lim H. C., *Biological Wastewater Treatment*, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc. (1999).
- Kim, M., Ahn, Y. H. and Speece, R. E., Comparative Process Stability and Efficiency of Anaerobic Digestion ; Mesophilic vs. Thermophilic, *Wat. Res.*, **36**(2), pp. 4369-4385 (2002).
- Kiso, Y., Jung, Y. J., Ichinari, T., Park, M. S., Kitao, T., Nishimura, K. and Min, K. S., Wastewater Treatment Performance of a Filtration Bioreactor Equipped with a Mesh as a Filter Material, *Wat. Res.*, **34**(17), pp. 4143-4150 (2000).
- Lema, J. M., Mendez, R., Iza, J., Garcia, P. and Fernandezpolanco, F., Chemical Reactor Engineering Concepts in Design and Operation of Anaerobic Treatment Process, *Wat. Sci. Tech.*, **24**(8), pp. 61-78 (1991).
- Lubbecke, S., Vogelpohl, A. and Dewjanin, W., Wastewater Treatment in a Biological High-Performance System with High Biomass Concentration, *Wat. Res.*, **29**(3), pp. 793-802 (1995).
- Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering*, 4th ed., McGraw-Hill (2003).
- Monteith, H. D. and Stephenson, J. P., Mixing Efficiencies in Full-Scale Anaerobic Digesters by Tracer Methods, *Jour. Wat. Pollut. Control Fed.*, **53**, pp. 78-84 (1981).
- Nagaoka, H., Nitrogen Removal by Submerged Membrane Separation Activated Sludge Process, *Wat. Sci. Tech.*, **39**(8), pp. 107-114 (1999).
- Novak, J. T., Sadler, M. E. and Murthy, S. N., Mechanisms

- of Floc Destruction During Anaerobic and Aerobic Digestion and the Effect on Conditioning and Dewatering of Biosolids, *Wat. Res.*, **37**(13), pp. 3136-3144 (2003).
- Pouet, M. F., Grasmick, A., Homer, F., Nauleau, F. and Cornier, J. C., Tertiary Treatment of Urban Wastewater by Cross Flow Microfiltration, *Wat. Sci. Tech.*, **30**(4), pp. 133-139 (1994).
- Shimizu, Y., Okuno, Y., Uryu, K., Ohtsubo, S. and Watanabe, A., Filtration Characteristics of Hollow Fiber Microfiltration Membranes used in Membrane Bioreactor for Domestic Wastewater Treatment, *Wat. Sci. Tech.*, **30**(10), pp. 2385-2392 (1996).
- Stroot, P. G., McMahon, K. D., Mackie R. I. and Raskin, L., Anaerobic Codigestion of Municipal Solid Waste and Biosolids under Various Mixing Conditions-I. Digester Performance, *Wat. Res.*, **35**(7), pp. 1804-1816 (2001).
- The nonwoven information and business network, : <http://www.nonwovens.com>
- Trouve, E., Urbain, V. and Manem, J., Treatment of Municipal Wastewater by a Membrane Bioreactor : Results of a Semi-Industrial Pilot-Scale Study, *Wat. Sci. Tech.*, **30**(4), pp. 151-157 (1994).
- Zoltec, J. Jr. and Gram, A. L., High-Rate Digester Mixing Study using Radio-Isotope Tracer, *Jour. Wat. Pollut. Control Fed.*, **47**, pp. 79-84 (1975).