

유출수 재순환 및 내부반송이 UASB 반응조 운전효율에 미치는 영향

김진혁 · 한성국 · 권오훈 · 윤경진 · 김재용[†]

충북대학교 환경공학과
(2011년 1월 4일 접수, 2011년 3월 16일 채택)

Effect of Effluent Recirculation and Internal Return on the Performance of UASB Process

Jin-Hyok Kim, Seong-Kuk Han, Oh-Hoon Kwon, Kyung-Jin Yoon, and Jae-Yong Kim[†]

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University, Cheong-ju 361-763, KOREA
(Received January 4, 2011; Accepted March 16, 2011)

런던협약에 의해 2012년부터는 폐기물 해양투기가 전면 금지될 것이다. 따라서 지상에서의 음식폐기물 처리방법의 모색이 시급한 실정이다. 위 문제의 해결방안은 UASB 공법을 이용하여 음폐수로부터 자원화개발을 하는 것이다. 본 연구에서는 유출수의 재순환 및 내부반송이 유기물 제거효율과 바이오 가스 생성에 미치는 영향을 알아보았다. 25일 동안은 내부순환만 실시하였고, 그 후엔 유출수 재순환을 실시하였다. 실험 결과 운전기간동안 유기물 제거효율은 90% 이상으로 나타났고, 메탄수율은 78~80%로 나타났다. 또한, 유출수 반송을 3 Q 이상으로 반송하여 운전할 경우 수산화나트륨(1 N)의 소모가 없었고, 그 결과 경제적이며 안정적인 운전을 할 수 있었다.

Dumping of wastes at sea will be strongly prohibited from 2012 by London Dumping Convention. So, finding the method for treatment of food waste at ground is needed urgently. The solution for above mentioned problem is the resource development from food waste leachate by using Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) process. In this research, we try to find out the effect of effluent recirculation and internal return influence on organic removal efficiency and biogas production. Laboratory investigation was conducted for 25 days with only internal recycling, and then, effluent recirculation was performed. As the result of experiments, the organic removal efficiency was above 90%, and the content of methane was 78~80% during operating time. Also, when UASB reactor was operated to over the 3 Q effluent recirculation, there was not 1 N-NaOH consumption any more, therethrough the experiment was economically and stably carried out.

Keywords: food waste leachate, UASB process, anaerobic digestion, granular sludge, biogas

1. 서 론

음식물 폐수란 음식물처리시설(퇴비화 또는 사료화시설)의 공정에서 발생하는 고농도 폐수를 말하며 2009년 전국에서 9,336 톤/일이 발생 되고 이 중 약 60%가 해양투기 되고 있는 실정이다[1].

우리나라는 2012년부터 국제협약(런던협약) 준수의 일환으로 유기성폐기물(하수슬러지, 음식물류폐기물, 가축분뇨 및 기타 유기성물질)의 해양투기가 금지될 예정이다. 따라서 환경부는 다각적인 유기성폐기물의 육상처리 방안을 추진하고 있으며 그 일환으로 유기성폐기물의 혐기성처리를 유력한 대안으로 채택하여 추진하고 있다. 2012년까지 사업추진을 위한 총사업비로 대략 9,000억원 정도를 예상하고 정책을 추진하고 있다[2,3]. 유기성폐기물의 혐기성처리는 환경적으로 안정적이고 지속가능하며 부대수익으로 화석연료(LNG)의 대체 및 온난화물질인 이산화탄소의 저감에도 기여하여 탄소배출권(CERs)을 확보할 수도 있다. 지식경제부는 2030년 국가에너지기본계획(2008. 8. 27)에서 2006년 신재생에너지 보급률 2.24%를 2020년까지 5.64%, 2030년

까지 11%, 2050년까지 20%로 확대할 계획이며 이중 대략 50% 이상을 폐자원·바이오매스 에너지화 사업으로부터 회수 할 목표를 세웠다[4,5].

음식물류폐기물의 직매립이 금지된 2005년도부터 음폐수의 해양배출은 급격히 증가되었다. 그러나 국토해양부가 폐기물의 해양투기를 억제하면서 동시에 환경부와 공동으로 해양투기 감축을 위하여 협력하고 있는 상황에서 국토해양부는 '09년 1월 22일 런던협약(“폐기물 해양배출에 의한 해양오염방지에 관한 국제협약”)96의정서에 가입을 하였다. 2008년도 폐기물의 해양배출 현황은 Table 1과 같으며 이 중 음폐수는 1484000 톤/년이 인근해역으로 배출되었다[6].

이제 음폐수는 육상처리를 위한 구체적이고 효과적인 처리방법이 요구되는데 혐기소화 공정은 고농도 유기물인 음폐수의 위생적이며 효과적인 처리공법 중의 하나이다. 또한 가장 오래된 공법 중의 하나이며 호기성공법에 비하여 에너지 소모도 적고, 처리공정 중 메탄가스를 포함한 바이오가스가 생산되어 에너지의 회수효과도 기대할 수 있다. 최근에는 공정에서 생산된 바이오가스의 양에 비례하여 탄소배출권까지 확보할 수 있어 그 의미가 크다고 할 수 있다[7].

본 연구에서는 우리나라의 음폐수를 2상 UASB공법을 이용하여 자

[†] 교신저자(e-mail: jykim4@korea.com)

Table 1. Domestic Generation of Food Waste Leachate

Contents	(Unit : ton/day)					
	'04	'05	'06	'07	'08	'09
Food waste leachate	4008	6293	8225	8818	9044	9336
Ocean dumping	(1989)	(3562)	(5420)	(5070)	(5114)	(5280)

Table 2. Characteristics of Food Waste

Items	Range	Average
pH	3.5~4.0	3.75
TCOD (mg/L)	10500~12500	11500
SCOD (mg/L)	9000~11000	10000
SS (mg/L)	450~550	500
VS (mg/L)	380~420	400
VS / TS	0.76~0.84	0.8
NH ₄ -N (mg/L)	70~130	100
Alkalinity (mg/L)	900~1100	1000
TP (mgP/L)	64~76	70

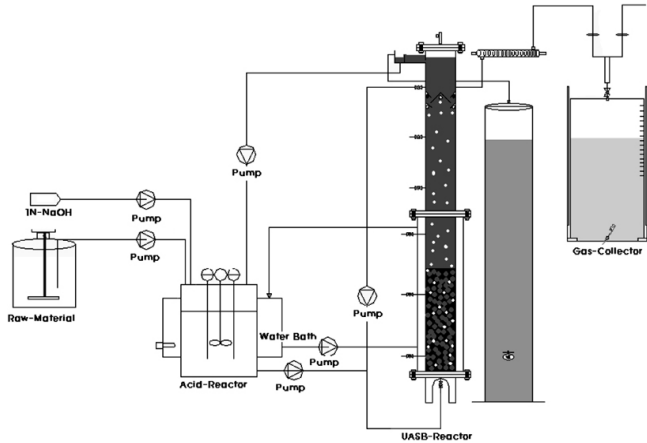


Figure 1. Schematic diagram of UASB reactor.

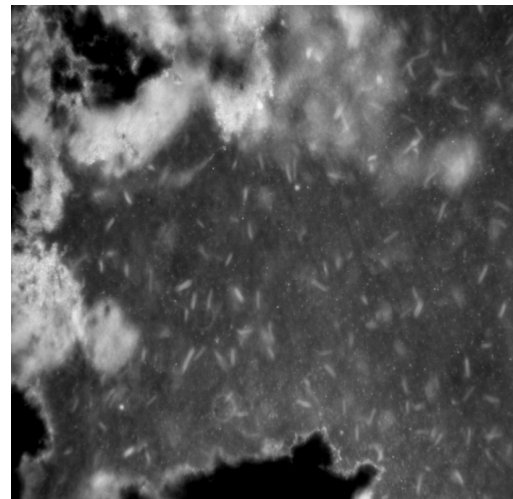


Figure 2. Photo of granular sludge.

원화하는 것이며, 12000 mg/L의 일정한 유기물농도로 중온소화를 실시하였다. UASB를 활용한 음폐수를 혐기성 소화에 있어서 반응의 유무에 따른 유기물 제거 및 바이오가스 생산에 미치는 영향 역시 많이 나타나 있지 않다. 따라서 우리나라의 음폐수 성상에서 수리학적 체류시간(HRT)을 어떻게 결정할 것인가의 이론적 배경을 구축하기 위하여, 바이오가스 생산 및 유기물 제거 특성에 대한 효율평가를 실시하였다. 이는 공법에 대한 기술적인 어려움은 성상과 발생량이 다소 차이가 있지만 외국의 사례에서 그 결과를 예측할 수 있다. 하지만 수리학적 체류시간(HRT)에 대한 연구가 부족한 실정이다. 향후 반응조 내에 수리학적 체류시간(HRT)의 변수에 따른 에너지 생산과 폐수 처리에 관여되는 수질인자의 제거에 대한 영향 파악은 음폐수 처리시 결정적인 단서를 제공할 것이다.

2. 실험

2.1. 실험장치

본 연구에 사용된 실험 장치는 UASB 형태로 Figure 1과 같다. 연구에 이용된 산발효조는 26 cm (W) × 30 cm (L) × 40 cm (H)로 유효용적은 31 L로 사용하였고, 메탄 발효조 UASB로 내경이 12 cm, 높이 115 cm인 원형 아크릴로 구성되어 있으며 유효용적은 12.5 L로 제작하였다. 상향유속의 변화에 따른 반응조 내 입상슬러지의 농도 및 분포를 조사하기 위하여 반응조 하부에서부터 20 cm 간격으로 시료 채취용 port를 4군데 설치하였고 소화조에서 발생하는 가스의 포집을 위해서 기액분리장치와 원형아크릴 용기(유효용량 : 50 L)를 소화조 상부와 연결하여 설치하였다.

2.2. 음폐수의 전처리

음식폐물 탈리액은 C시 음식물류 폐기물처리시설에서 선별 및 파쇄만 이루어진 원료를 채취하여 수돗물로 1 : 10 비율로 희석한 뒤 Sieve (200 mesh)를 통하여 거른 후 시료의 고형물을 낮추기 위하여 침

전조(D : 19 cm, H : 120 cm)에 4 h 방치 후 침전조의 하부 20 cm 지역에서 시료를 채취하여 유입수로 사용하였다. 실험에 사용하기 위해 채취해온 음식물류 폐기물을 희석한 성상은 Table 2에 나타내었다.

2.3. 입상슬러지

본 실험에 사용된 입상슬러지는 축산폐수를 처리하는 혐기성 소화조에서 채취한 입상화된 슬러지를 식중하였고, 체분석방법(Sieve Analysis)을 통하여 측정된 결과 1.6 mm 이하는 12.5%, 1.6~3.2 mm 은 73.5%, 3.2 mm 이상은 14% 정도로 입상화가 이루어진 것을 볼 수 있었다. Figure 2는 Nikon 현미경으로 100배 확대하여 관찰한 미생물의 모습이다.

2.4. 분석방법

연속운영 반응조의 유입수, 산반응조, 메탄반응조, 유출수를 1일 1회 채취하여 시료의 CODcr은 Standard methods의 closed reflux법으로 측정하였고, 암모니아성 질소는 Nessler법(NH₄⁺-N Distillation method, HACH, USA)을 이용하여 측정하였다. pH, SS, T-P는 Standard methods에 준하여 측정하였다.

가스성분분석은 Thermal conductivity detector (TCD)가 장착된 Gas Chromatography (SERIES 580)로 분석하였다. 컬럼은 CHROM-P-AW-DMCS 80~100 mesh를 사용하였고, 캐리어 가스는 헬륨을 사용하였으며, 유속은 20 mL/min이었다[8].

Table 3. Operation Condition of Reactor

Items	Value	Remarks
Temperature (°C)	35 ± 0.5	Acid Reactor UASB Reactor
pH	6.5~6.8	Acid Reactor (1 N-NaOH)
Liquid Velocity (m/hr)	0.2~0.6	UASB Reactor
RPM	200	Acid Reactor
Effluent Recycle (Q)	1, 2, 3, 4 Q	UASB Reactor → Acid Reactor

(Q = 20 L/Day)

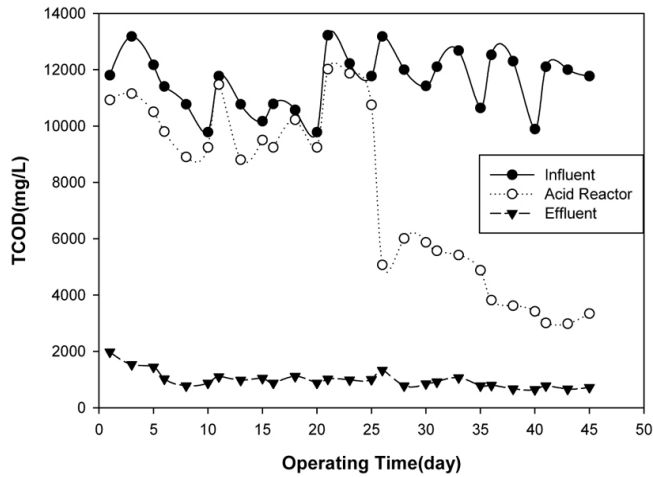


Figure 3. Variations of TCOD concentration during operating time.

2.5. 운전방법

반응조의 온도 조절은 산반응조 외부에 Water Bath를 장착하여 온도를 35 ± 0.5 °C로 세팅하였고, UASB 반응조는 Sludge층에 펌프순환을 통하여 온도를 산반응조와 같게 운전하였다. UASB 반응조에 입상슬러지를 식중환 후 음폐수에 순응시키기 위해 유입수 농도를 약 12000 mg/L로 맞추어 20 L/day로 유입하여 약 10일간 시운전을 실시하였다. 그 후 5일 간격으로 초기 25일간은 내부순환을 0, 2, 4, 6, 8 Q로 운전하였으며, 그 후 20일간은 유출수의 재순환을 1, 2, 3, 4 Q로 운전하였다. Q는 하루에 유입되는 양을 말하며 본 논문의 경우 Q는 20 L/day로 정의하였다.

UASB 반응조 내의 미생물 pH의 환경을 유지하기 위해서 산반응조에 1 N-NaOH를 이용하여 pH를 6.5~6.8정도로 자동 조절하였으며, 미량정량펌프(Master-flux)를 사용하여 반응조의 하부로 시료를 주입하였다. Table 3에 운전조건을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유기물 농도 및 유기물제거율

UASB 운전에서 내부반송 및 유출수의 반송은 중요한 운전 조건 중 하나이다. 그 평가를 위해서 25일간은 내부반송의 변화만 주어서 0, 2, 4, 6, 8 Q로 운전하였으며, 그 후 20일간은 유출수의 재순환을 하여서 1, 2, 3, 4 Q로 반송을 하여 운전하였다. 그에 따른 농도의 변화를 Figures 3, 4에 나타내었다.

초기 25일간 내부반송만 실시할 경우는 약 12000 mg/L의 유기물

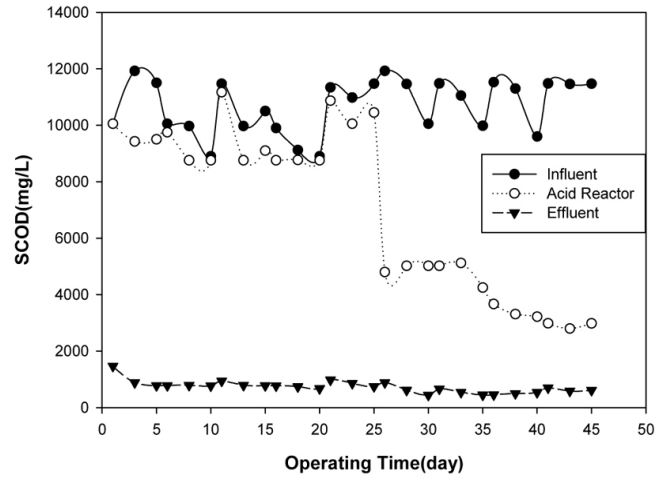


Figure 4. Variations of SCOD concentration during operating time.

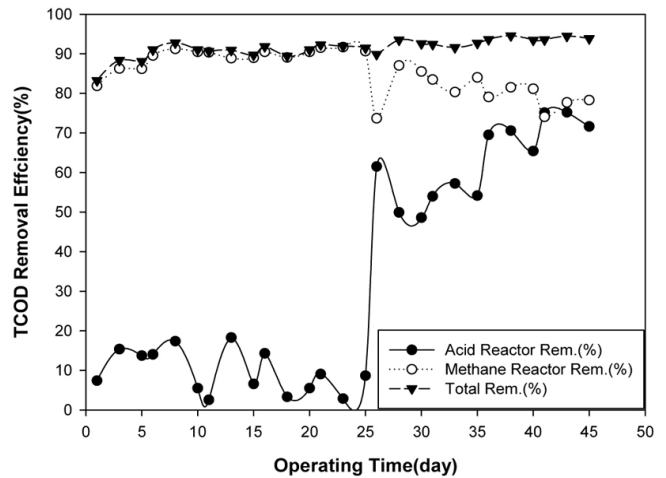


Figure 5. Variations of TCOD removal efficiency in each reactor.

농도가 유입되어, UASB를 통과한 유기물 농도는 약 1000 mg/L로 유출됨을 알 수 있었다. 유출수의 반송이 없을 경우 산반응조에서는 유기물농도감소는 거의 없었다. 25일부터 유출수의 재순환을 실시하였는데 산반응조에서의 제거율이 50% 이상의 유기물제거율을 나타남을 알 수 있었다.

이는 유출수의 재순환에 의한 미세슬러지의 반송에 의하여 산 반응조에서도 제거가 이루어진다고 할 수 있으나, 반송에 의한 유출수의 희석에 의한 유기물농도의 감소가 제일 큰 원인이라 할 수 있다. Figures 5, 6에서 보듯 내부반송에 의한 유기물의 제거율은 큰 변화가 없이 90%정도로 나타났으나, 유출수의 반송 이후에는 점차 유기물제거효율이 95%까지 증가하는 것으로 나타났다. 메탄반응조 내에서 산반응조로 반송하는 것이 전체적인 유기물제거율이 잘되는 것을 알 수 있다.

3.2. 부유물질, pH 및 알카리도

운전기간 동안 고형물의 변화를 Figure 7에 나타내었다. 고형물의 농도는 UASB운전에 있어서 1000 mg/L 이상의 높은 고형물의 농도는 입상슬러지 층에 영향을 미치는 인자로 입상슬러지의 부상 및 유출저해를 나타낼 수 있다. 운전기간동안 특징적인 것은 25일까지의 산반응조의 고형물농도가 증가하는 것을 알 수 있다.

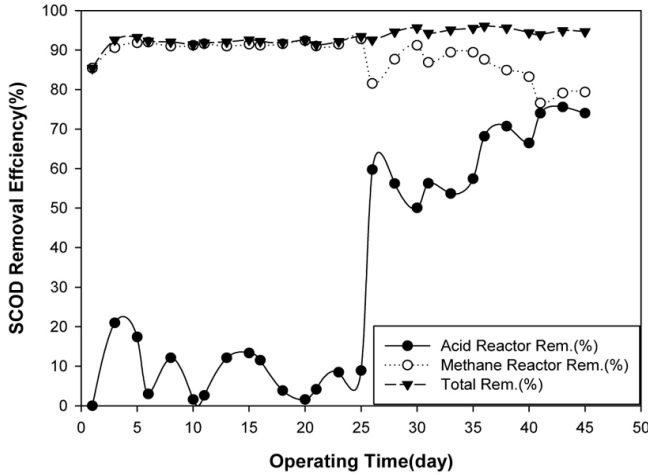


Figure 6. Variations of SCOD removal efficiency in each reactor.

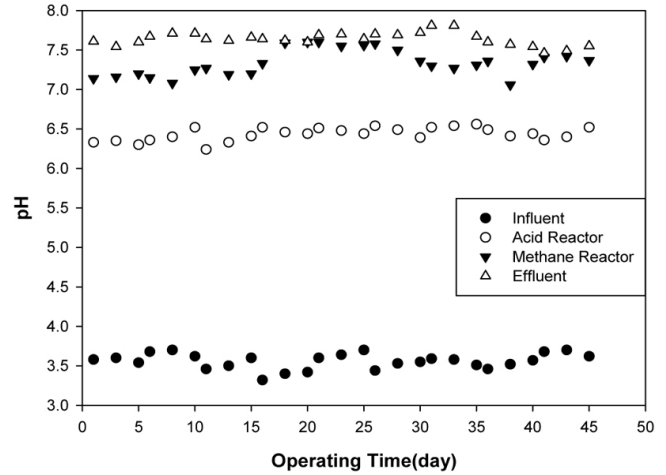


Figure 8. Variations of pH value during operating time.

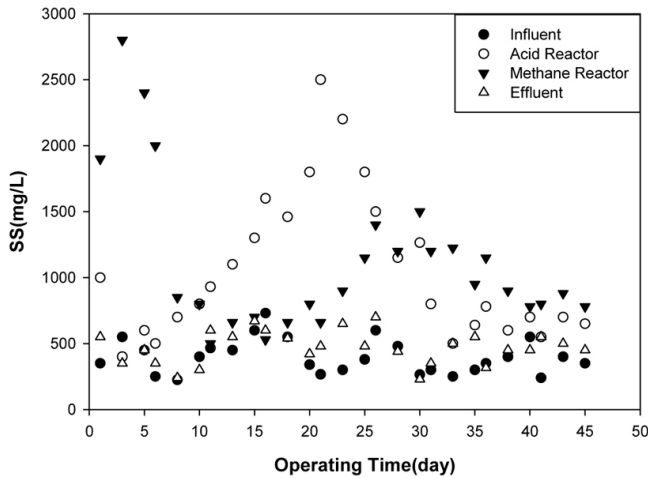


Figure 7. Variations of SS value during operating time.

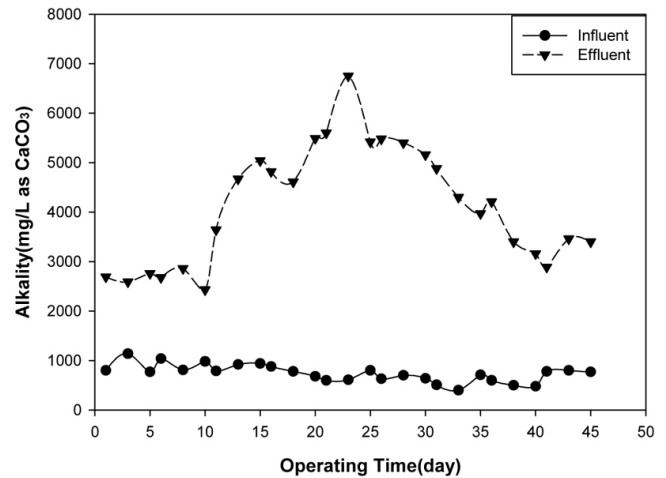


Figure 9. Variations of alkalinity value during operating time.

이는 UASB 반응조의 pH를 조절을 위해 산반응조에 투여한 수산화나트륨의 많은 소모량(약 2000 mL)이 음폐수의 여러 화합물과 결합하여 결정화를 이루어 증가하였다고 판단된다. 그 후 유출수 재순환을 진행하였을 경우 보다 안정적인 고형물의 농도 변화가 나타나 유출수의 재순환은 고형물농도의 변화에 있어서 큰 영향을 미치며, 안정적인 UASB 운전시에 필요한 운전인자로 판단하였다.

혐기성 공정에서는 일반적으로 온도와 pH의 운전조건은 매우 중요한 인자이다. Figure 8에 나타나듯이 유입수의 pH는 3.5 이상 4.0 미만으로 나타나는 것을 알 수 있었다.

산반응조에서의 수산화나트륨 첨가로 인하여 산반응조의 pH는 약 6.5정도의 pH를 나타내었고, 메탄반응조에서의 pH는 운전기간동안 7.0~7.5정도로 나타났다. 내부반송만 실시할 경우 15일 이후의 pH상승은 혐기조건에서 암모니아 농도의 증가로 인한 수소이온의 감소로 pH상승에 영향을 미친 것으로 나타났다. 그 후 유출수의 재순환을 통한 암모니아 농도의 감소로 인하여 메탄반응조 내의 pH는 메탄 생성균의 최적 pH범위인 6.8~7.2로 범위 내로 안정적으로 나타남을 확인할 수 있었다.

Figure 9에 나타나듯이 알칼리도는 유입수의 경우 약 1000 mg/L로 나타났으며, 유출수의 경우는 유출수의 반응에 따라 큰 편차를 보였다. 유출수의 재순환이 없이 내부반송만 진행하였을 경우 알칼리도는

7000 mg/L까지 상승함을 알 수 있었으며, 유출수의 재순환 진행 후 점차 줄어들면서 3000 mg/L까지 감소하였다. 이는 안정적인 혐기성 소화화를 위하여 McCarty (1961)가 제시한 1500 mg/L를 훨씬 상회하는 것으로 나타났다[9]. 그러나 이번 연구 데이터에서는 유출수의 높은 알칼리도가 운전이 미치는 영향이 미미하게 나타났으며, 암모니아농도 변화 및 UASB 반응조 내의 pH와 유사한 상관관계로 나타났음을 알 수 있다.

3.3. NH₄-N 및 T-P

Figure 10에 나타나듯이 유입수의 암모니아의 농도는 약 100 mg/L로 나타났으며, 유출수의 암모니아 농도는 약 200 mg/L의 농도로 나타났다. 이는 혐기성소화시헤테로트rophic 박테리아가 단백질을 분해해서 암모니아로 만들기 때문에 증가된 것으로 사료된다.

25일 이후 유출수의 재순환을 통하여 암모니아 농도를 관찰해본 결과 점점 줄어들면서 약 150 mg/L의 농도로 나타났다. 이는 산반응조의 농도가 낮아졌기 때문이라고 사료된다.

암모니아는 혐기성 미생물(메탄균)의 활성화에 독성작용을 한다고 보고되어 있으며 혐기성 소화에 적합한 pH 범위에서 혐기성 미생물에 대한 암모니아의 독성영향 농도의 범위는 NH₄-N으로서 700 mg/L에서 활성의 저해, 700~1500 mg/L에서 초기독성, 1500~3000 mg/L

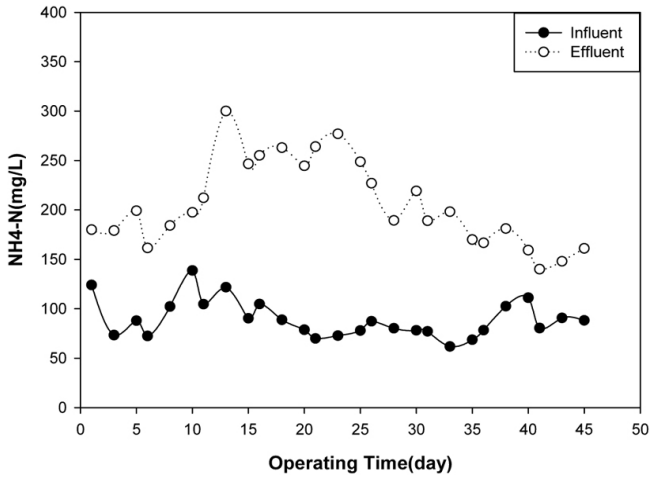


Figure 10. Variations of NH₄-N value during operating time.

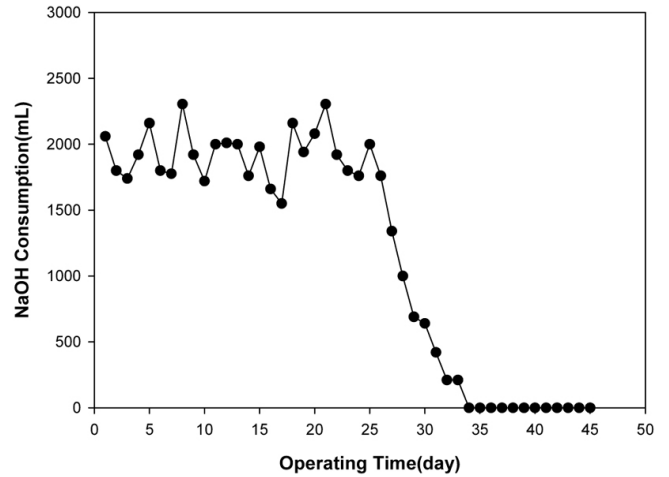


Figure 12. Consumption of NaOH value during operating time.

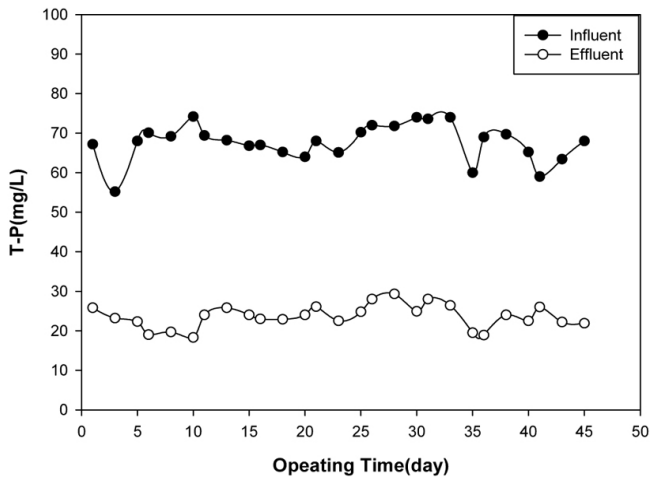


Figure 11. Variations of T-P value during operating time.

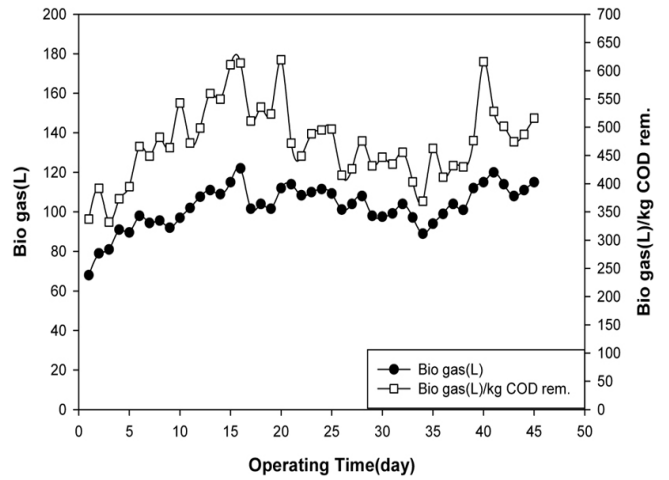


Figure 13. Biogas production per removed COD.

에서 치명적인 독성, 그리고 3000 mg/L 이상에서 활성이 완전히 정지된다고 보고되고 있다[10,11].

총인의 경우 약 유입되는 70 mg/L의 농도에서 UASB 반응조 이후 30 mg/L로 감소하였으며, 약 57%의 제거율을 나타냈고, 그 결과는 Figure 11과 같다.

3.4. NaOH 소모량

수산화나트륨은 UASB 반응조 내에 Granular Sludge의 적정 pH 환경을 조절하기 위해 산반응조에서 1 N-NaOH를 첨가하여 약 pH 6.5로 유지시킨다. Figure 12에서 나타나듯이 초기 25일 동안 유출수의 재순환 없이 내부반송만 이루어질 경우는 하루에 약 2000 mL/day의 NaOH가 소모된다.

그러나 유출수 재순환이 이루어지는 순간부터 점차 그 소모량이 줄어 유출수의 반응이 3 Q 이상부터는 소모되는 수산화나트륨의 양은 없음을 알 수 있다. 수산화나트륨의 소모는 경제성과 직접적인 관련이 있으며 과다의 소모는 미생물에게 영향을 미칠 수 있어 유출수의 3 Q 이상 재순환은 필수적이라 판단된다.

3.5. 바이오가스 발생량

유기물농도를 약 12000 mg/L, 수리학적체류시간(HRT)를 15 h으로

설정하여 유기물부하를 약 20 kg/m³·day에서 UASB 내부반송과 유출수의 재순환에 대하여 바이오가스 발생에 미치는 영향을 평가한 결과 바이오 가스 발생량은 Figure 13에서 나타나듯이 약 80~110 L로 나타났다.

유기물 제거당 발생하는 biogas양은 Figure 13에 나타나듯이 350~550 m³biogas/kg COD로 나타났음을 확인할 수 있었다. 또한, biogas의 조성은 CH₄ 78~80%, CO₂ 14~18%, H₂ 2~6%로 발생되었으며, 반송에 의한 편차는 크게 나타나지 않았다.

유기물의 메탄전환율의 편차에서 20일이 지난 후 감소하는 경향을 나타남을 알 수 있다. 이 결과는 암모니아 농도의 분석결과에서 나타나는 암모니아농도 상승값이 메탄 생성균의 활성에 있어서 암모니아가 독성으로 영향을 미쳐 20일 후의 바이오가스 발생량 감소에 기인하였다고 사료되며, 그 후 유출수의 재순환에 의한 암모니아농도 감소는 40일 후의 바이오가스 발생량 상승에 영향을 미쳤다고 판단된다.

또한, 변화된 UASB 반응조의 25일 동안 5일간의 내부반송과 20일간의 유출수 재순환에 대한 유기물농도, 수리학적 체류시간, 유입량, 바이오가스발생량, 제거된 바이오가스발생량, 유기물제거효율에 대한 데이터를 Table 4에 변화시킨 조건에 5일간의 평균치에 따라 정리하여 나타내었다.

Table 4. Variation of Biogas Productivity by Internal Return and Recirculation

Organic Conc. (mg/L)	HRT (h)	Inflow (L/d)	Recycle	Biogas (L/d)	Biogas (L) / kgCODrem.	Organic Rem. (%)
12500	15	20	-	81.72	365.9	89.8
11000	15	20	2 Q	95.4	480.8	92.1
11000	15	20	4 Q	108.94	538.2	92.04
10500	15	20	6 Q	108.24	560.6	92.11
12500	15	20	8 Q	110.64	480.2	92.01
12500	15	20	1 Q	101.76	439.2	93.98
12000	15	20	2 Q	96.68	425.1	94.85
12000	15	20	3 Q	106.2	473.1	95.53
12000	15	20	4 Q	113.6	501.5	94.45

(Q = 20 L/Day)

4. 결 론

현재 처리곤란한 음폐수로부터의 자원회개발을 목적으로, 고효율 혐기성소화 공정인 UASB 반응조를 이용하여 메탄반응조 내의 내부순환 및 유출수 재순환 변화에 따른 실험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) UASB 반응조를 재순환 없이 운전할 경우 암모니아농도, 알칼리도, pH 등이 상승하여 biogas 생산 저하에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 유출수의 재순환이 이루어짐에 따라 저해인자인 암모니아농도는 점점 줄어들어서 평균 150 mg/L의 농도로 나타났고, 그 결과 알칼리도 및 pH 모두 안정하게 나타나 biogas 생산이 증가함을 알 수 있었다.

2) 유출수의 재순환 후 유기물제거율이 90~95% 이상으로 상승하였고, pH 및 암모니아농도의 안정으로 유기물의 메탄전환을 또한 0.43 m³/kg COD에서 0.5 m³/kg COD로 14% 이상 상승함을 알 수 있었다.

3) 유기물 유입부하가 16 kgCOD/m³·day 정도에서 유출수의 반송이 없을 경우 NaOH의 소모량은 2000 mL 정도 소모가 되었고, NaOH의 소모량은 3 Q 이상의 반송부터는 더 이상 나타나지 않았다.

4) 운전기간동안 암모니아독성에 따른 미생물활성의 저해범위(700 mg/L 이상)를 넘지는 않았지만, 암모니아의 증가가 UASB 반응조 내에 pH에 영향을 미침을 알 수 있었고, 유출수의 재순환시 암모니아 농도는 낮아짐을 알 수 있었다.

UASB공법을 이용하여 음식물쓰레기를 바이오가스화에 적용시 운전조건에 대한 효율평가는 위의 결과에서 나타나듯 유출수의 재순환을 통하여 운전하는 것이 바이오가스 발생 및 유기물 제거에 더 효율적이라는 결과를 도출하였으며, 경제성 및 안정적인 운전을 위해서는 유출수를 3 Q 이상으로 재순환하여 운전하는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있었다.

감 사

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2010).

참 고 문 헌

1. H. S. Shim, S. K. Han, S. H. Kim, and J. H. Youn, *J. Korean Solid Waste Engineering Society*, **8**, 78 (2000).
2. D. H. Kim, H. S. Shim, and S. E. Oh, *Korean Society of Waste Management*, **25**, 716 (2008).
3. B. H. Lee, S. J. Kim, and M. K. Jeoung, *J. Korean Solid Wastes Engineering Society*, **15**, 485. (1998)
4. B. H. Lee and M. K. Jeung, *J. Korean Solid Wastes Engineering Society*, **11**, 429 (1994).
5. C. H. Won, J. H. Kwon, and J. M. Rim, *J. Korea Org. Resour. Recycl. Assoc.*, **17**, 49 (2009).
6. D. Zhou, Y. Chen, and X. Ming, *Water Sci. Technol.*, **24**, 123 (1991).
7. F. Cecen and I. E. Gonenc, *Water Sci. Technol.*, **26**, 2225 (1992).
8. H. Bouallagui, R. BenCheikh, L. Marouani, and M. Hamdi, *Bioresour. Technol.*, **86**, 85 (2003).
9. P. L. McCarty and R. E. McKinney, *J. Wat. Pollut. Control Fed.*, **33**, 399 (1961).
10. G. Lettinga and P. Hulshoff, *Water Sci. Technol.*, **24**, 87 (1991).
11. F. Rogalla, M. Badard, F. Hansen, and P. Dansholm, *Water Sci. Technol.*, **25**, 1067 (1992).