

알칼리 가수분해와 상향류 블랭킷 여상 조합공정을 이용한 음식물류 폐기물의 전처리 및 산발효 특성

김진복 · 박종웅[†]

대구한의대학교 소방방재환경학과

(2012년 5월 11일 접수, 2012년 9월 17일 수정, 2012년 9월 21일 채택)

Characteristics of Pretreatment and Acid Fermentation of Food Wastes by Combining Alkali Hydrolysis and Upflow Blanket Filter Process

Jin-Bok Kim · Jong-Woong Park[†]

Department of Safety & Environmental Prevention, Daegu Hanny University

(Received 11 May 2012 : Revised 17 September 2012 : Accepted 21 September 2012)

Abstract

The objective of this study was to investigate the characteristics of pretreatment and acid fermentation of food wastes by combining alkali hydrolysis and upflow blanket filter (UBF) process. In order to obtain reasonable acid fermentation efficiency of food wastes, the NaOH dilution water of 0.075 g/g TS was injected to adjust the pH in the UBF acid fermentation reactor. The maximum concentration and production rate of volatile fatty acid (VFA) were 19,070 mg/L, 120.6% at the hydraulic retention time (HRT) of 2days and the dilution ratio of 2 times based on initial TS concentration, respectively. These conditions were optimal operating conditions for UBF acid fermentation reactor. The COD removal efficiency and solubilization rate (Ps) were increased with the lower dilution ratio and longer HRT. The removal efficiencies of protein, fatty, carbohydrate in this reactor became higher with the increment of organic loading rate and HRT. The attached biomass of total biomass in the reactor was 5.8~12.4%. Much of the mudball in the upper part of the reactor had been created, it could affect on the device operation.

Key Words : Food wastes, Upflow blanket filter, Acid fermentation, Alkali hydrolysis, Solubilization rate

요 약 문

본 연구의 목적은 알칼리 가수분해와 상향류 블랭킷 여상(upflow blanket filter : UBF)의 조합공정을 이용한 음식물류 폐기물의 전처리 및 산발효 특성에 대해 조사 분석을 하였다. 음식물류 폐기물의 이상적인 산발효 효율을 얻기 위해, NaOH희석수 0.075 g NaOH/g TS의 주입은 UBF 산발효조의 pH조정을 위해 사용하였다. 생산된 최대 휘발성유기산(VFA)농도와 생산율은 TS농도 기준 2배 희석, 수리학적 체류시간(HRT) 2일에서 19,070 mg/L, 120.6%이었다. 이들 조건들이 UBF 산발효조의 최적운전 조건이었다. COD 제거율과 가용화율(Ps)은 희석비가 낮고 체류시간이 길수록 증가하였다. 단백질, 지방, 탄수화물은 체류시간이 길수록, 유기물부하가 높을수록 제거율이 높았다. 조 내의 총 미생물량 중 부착미생물이 차지하는 비율은 5.8~12.4%이었다. 반응조 상부에는 다량의 머드볼(mudball)이 생성되었으며, 이것은 장치 운전엔 영향을 미칠 수 있었다.

주제어 : 음식물류 폐기물, 상향류블랭킷여상, 산발효, 알칼리 가수분해, 가용화율

[†]Corresponding author
E-mail : jwpark@dhu.ac.kr

I. 서 론

우리나라에서 발생하는 음식물류 폐기물의 양은 2009년 현재 13,701톤/일로 전체 생활 폐기물 발생량 50, 906톤/일의 26.9%를 차지하고 있다(환경부, 2010). 음식물류 폐기물로 인한 경제적 손실과 환경오염을 줄이기 위해서는 발생량 자체를 원천적으로 줄이는 것이 무엇보다 중요하다. 그래서 정부에서는 음식물류 폐기물 관리정책의 기본방향으로 발생량을 줄이는데 정책의 최우선 순위를 두되 일단 발생한 음식물류 폐기물은 유기성 자원으로 재활용을 적극적으로 권장하고 있다(환경부, 2007). 그러나 발생한 음식물류 폐기물은 대부분 사료화, 퇴비화 등 재활용 원료로 사용되고 있으며, 일부는 소각 등의 방법으로 처리되고 있다.

음식물류 폐기물의 복잡한 성상변화와 높은 염분 함유도, 신선도 유지의 어려움 때문에 재활용 시설에 많은 문제점을 내포하고 있다. 이에 반해 혐기성소화를 통한 에너지화의 경우는 수거된 음식물류 폐기물의 함수율이나 부패정도 등과 같은 초기특성에 크게 영향을 받지 않고 부산물로 메탄가스를 얻을 수 있으나 운전상에 어려움이 있다(송영채 외 2인, 2002; 백병천 외 5인, 2002) 특히 음식물류 폐기물의 직접적인 산발효는 음식물류 폐기물 자체에 고농도로 존재하는 유기성 고형물 성분의 낮은 가용화로 인하여 산발효의 최종산물인 휘발산의 수율이 저조하게 되므로 생분해성을 높이기 위해 적절한 전처리를 행하는 것이 중요하다. 이러한 전처리로서는 열처리, 열-알칼리 처리, 알칼리 처리, 초음파 처리 등을 들 수 있는데 지금까지는 주로 폐슬러지의 생분해성을 높이기 위하여 적용되어왔다.

이들 전처리방법 중 알칼리 처리는 음식물류폐기물의 가용화 및 pH 조절 기능 효과가 있으며, 초음파 생성을 위한 에너지 비용보다는 약품비가 다소 저렴하여 비용 면에서도 유리한 것으로 조사된바 있다(김희준 외 4인, 2003; Barlandhaug and degard, 1996; Neis *et al.*, 2000) 일반적으로 알칼리제는 주입량이 많을수록 가용화 효율이 높아진다고 알려져 있고, 주입 알칼리제의 양이 같을 경우에는 폐슬러지내의 고형물 농도가 높아질수록 가용화 효율이 떨어진다고 알려져 있으며, 또한 알칼리제 중 NaOH가 가용화 효율이 높은 것으로 보고된 바 있다(Penaud *et al.*, 1999; Ray *et al.*, 1990).

음식물류 폐기물은 고농도 입자상 유기물의 가수분해와 산발효를 효율적으로 하기 위하여 반응기 내부에 미생물을 집적하여 산발효 미생물 농도를 높일 필요가 있다. 이러한 점을 감안하여 기존 혐기성여상(anaerobic filter: AF)에서 발생하는 막힘(plugging)과 편류(channeling) 현상을 개선한 상향류 블랭킷 여상

(upflow blanket filter: UBF) 반응기를 사용하였다. 상향류 블랭킷 여상 반응기는 상부의 혐기성여상(anaerobic filter: AF) 기능과 하부에 침전성이 큰 입상슬러지를 형성한 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷(upflow anaerobic sludge blanket: UASB) 특성을 조합한 것으로 Guiot and Van den berg(1985)에 의해 고안된 장치이다. 이 장치는 상부에 매체 층에 부착된 미생물에 의한 혐기성 여과 기능과 하부에 형성된 고밀도 슬러지층의 고율 혐기성 분해가 이루어지는 장치로서 기존 방식에 비해 장치성능이 우수한 것으로 보고되었다(Kennedy *et al.*, 1988; Samson and Guiot, 1985).

한편 산발효된 음식물류 폐기물의 이용방법은 단독 소화 또는 가수슬러지와 혼합소화를 실시하거나, 산발효액을 고액분리 한 후 그 상등액을 하수고도처리의 탄소원으로 이용하는 방법이다. 위와 같이 음식물류 폐기물을 이용하기 위해서는 우선 가수분해 및 산발효가 효율적으로 이루어지는 것이 중요하다. 그러나 지금까지 음식물류 폐기물과 같이 고농도 입자상 유기물질 산발효시 알칼리 가수분해와 상향류 블랭킷 여상 반응을 이용한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 효과적인 음식물류 폐기물의 자원화를 위한 전 단계로 이용되는 가수분해와 상향류 블랭킷 여상의 조합공정을 이용하여 회석비와 수리학적 체류시간에 따른 전처리 및 산발효 운전성능에 미치는 영향에 대해 조사 분석을 하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료

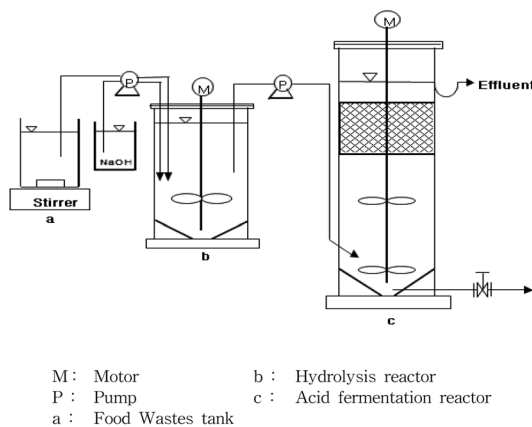
본 연구에서 사용된 음식물류 폐기물은 경북 경산시 소재의 G퇴비화 시설에서 수집한 것으로 경산시 일대의 공동주택을 대상으로 분리수거 되어 G시설로 반입된 음식물류 폐기물 중 파쇄 후 드럼스크린에 의해 험잡물이 1차적으로 제거된 것을 사용하였다. 채취한 시료는 초기 TS농도를 기준으로 탈이온수로 각각 2배와 3배로 희석한 후 실험을 진행하였으며, 시료의 조제는 음식물류 폐기물 채취 시 종류와 성상의 변화 및 장시간 보관에 의한 유기물 분해 등의 문제를 최소화하기 위해 1주일에 2회씩 제조하였다. Table 1에 음식물류 폐기물을 2배 및 3배 희석하여 분해한 시료의 초기성상을 나타내었다.

2. 실험장치

본 실험에 사용된 장치는 Fig. 1에 보인 바와 같이

Table 1. Characteristics of the raw food wastes

Item	Average		
	Sample	Dilution ratio (× 2)	Dilution ratio (× 3)
pH	3.8	4.0	4.3
TCOD (mg/L)	191,600	100,655	62,517
SCOD (mg/L)	135,200	54,244	31,309
TS (mg/L)	151,400	78,119	50,234
VS (mg/L)	125,100	62,958	41,379
Cl- (mg/L)	9,300	4,560	3,150

**Fig. 1.** Schematic diagram of experimental apparatus.

음식물류 폐기물 원수조, 원수 및 NaOH 용액 이송용 정량펌프, 가수분해조(hydrolysis reactor)와 산발효조(acid fermentation reactor)로 구성하였다. 음식물류 폐기물의 연속식 산발효 실험을 위해 $\phi 150$ mm, 높이 300 mm로서 조의 유효용적이 5 L인 가수분해조 각 2set(H-1, H-2)와 $\phi 150$ mm, 높이 800 mm로서 조의 유효용적이 10 L인 산발효조를 각 2set(A-1, A-2)가 되도록 제작하였다. 가수분해 및 산발효조에는 유입, 유출 및 시료채취를 위한 3개의 port가 반응조 상부에 설치되었고, 조내의 혼합을 위해 교반기를 설치하였다. 또한 대상기질인 음식물류 폐기물과 알칼리 중화제인 NaOH 희석수의 연속적인 주입을 위해 유량조절이 가능한 호스펌프를 설치하였으며, 반응조의 온도를 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하기 위해 히터와 온도센서가 부착된 항온조 내에 설치하였다. 산발효조는 상부 1/3지점에 조

용적의 30%를 pall ring 여재 ($\phi 15$ mm, H15 mm)를 충전하고 하부를 슬러지 블랭킷층으로 남겨 UASB와 AF를 조합한 상향류 블랭킷 여상(upflow blanket filter: UBF) 반응조를 제작하였다.

3. 운전방법

본 실험의 운전방법은 소화온도 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 NaOH 투입량과 산발효실험에 따른 예비실험의 연구결과(김민철 등 3인, 2001)를 토대로 분쇄한 음식물류 폐기물을 2배(R-I)와 3배(R-II)를 희석한 후 pH조절을 위해 NaOH 0.075 g/g TS를 1일 유입유량의 5%의 희석수에 첨가하여 주입하였으며, 가수분해조와 산발효조를 연계한 총 체류시간 1일, 2일, 3일 3단계로 약 98일간 운전하였다.

주입기질은 TS농도 기준으로 조정되어 냉장(4°C) 보관된 상태에서 magnetic stirrer를 이용, 완전 혼합한 후 유량조절이 가능한 호스펌프로 연속 주입하였고, NaOH 희석수 역시 호스펌프에 의해 연속 주입하였다. 또한 반응조 내 교반은 mechanical sealing이 장착된 모터를 이용하여 gas-tight상태로 교반하였고, 교반강도는 가수분해조에서 150 rpm, 산발효조에서 50 rpm으로 하였다. 한편 각 반응조는 초기 유기물 부하에 의한 충격을 줄이기 위하여 일정 기간 동안 순응시킨 후 일정 농도의 유출수가 얻어졌다고 판단되는 시점에서 각 반응조의 수리학적 체류시간(이하 체류시간)을 Table 2에 나타난 바와 같이 실험 조건에 맞게 조절하여 운전하였다. 각 체류시간별 정상상태의 확인으로는 혼합액의 pH, 휘발성유기산(volatil fatty acid: VFA), SCOD농도 등을 지표로 하여 이들의 값이 거의 일정하게 되는 기간으로 하였다. 또한 정상상태에서 약 15일 이상 지속적으로 운전하여 측정된 값의 평균값을 정상상태의 대표치로 사용하였다.

4. 분석방법

4.1. 수질분석

연속식 산발효조의 운전특성을 평가하기 위하여 일정기간 경과 후 반응조내의 시료를 채취하여 pH, 알칼리도, TCOD, SCOD, TS, VS, TSS, VSS, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, Cl^- 및 VFA를 측정하였으며, VFA 및 SCOD는 3,000 rpm에서 10분간 원심 분리한 여액을 시료로 사용하였다. 분석방법은 Standard methods(APHA *et al.*, 1998)와 수질오염 공정시험법(환경부, 2007) 및 폐기물공정시험법(환경부, 2004)에 준하여 분석하였다.

Table 2. Operating condition of the experiment

Reactor	Item	Dilution ratio	HRT (day)	Temp. (°C)	pH adjustment
R-I (H-1, A-1)		× 2	1, 2, 3	35 ± 1	The pretreatment condition of acid fermentation (0.075 g NaOH/g TS)
R-II (H-2, A-2)		× 3	1, 2, 3		

4.2. 물질조성 분석

음식물류 폐기물의 물질조성은 주요 성분인 단백질, 지방, 탄수화물의 함량을 측정하였다. 단백질의 정량은 식품의 수용성 단백질의 정량에 널리 이용되고 있는 Lowry법으로 측정하였고, 지방은 Soxhlet 추출법에 따라 중량법으로 분석하였으며, 탄수화물의 경우 총량에서 수분, 단백질, 지방, 회분 등의 조성비를 이용하여 아래의 식 (1)에 의해 산출하였다.

$$\text{탄수화물의 함량(\%)} = 100 - (\text{수분} + \text{단백질} + \text{지방} + \text{회분의 량}) \quad (1)$$

4.3. 미생물 성장조사

매체에 부착된 미생물량의 측정방법은 각각의 반응조내의 매체가 충전된 중간지점에서 pall ring을 10개씩 채취하여 부착된 미생물의 젖은 무게와 건조무게를 측정하였다. 조내의 총 미생물 농도는 부유미생물과 부착미생물량을 조 용적으로 나누어 구하였으며, 생물막 두께, 생물막 건조밀도, 매체단위 면적당 부착된 미생물량을 산정하였다(박종웅 · 송주형, 2003).

III. 결과 및 고찰

1. pH, 알칼리도, VFA의 변화

체류시간의 변화에 따른 운전기간 중 pH, 알칼리도 및 VFA의 농도 변화는 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 pH는 전 운전기간에 걸쳐 2배 희석한 음식물류 폐기물을 주입한 공정(이하 R-I)의 각 반응조인 기질혼합조(S-1), 가수분해조(H-1), UBF 산발효조(A-1)에서 각각 4.0~4.5, 6.1~6.6, 6.0~7.1이었으며, 3배 희석한 음식물류 폐기물을 주입한 공정(이하 R-II)의 각 반응조 S-2, H-2, A-2는 3.9~4.0, 6.2~6.6, 5.9~6.5로써 이는 Zoetemeyer *et al.*(1982)과 Kisaalita and Siegrist (1987)에 의한 유기물의 최적 발효 조건 pH영역인 5.5~6.5에 거의 일치함으로써 산발효조의 운전이 양호함을 알 수 있었다.

알칼리도의 농도변화를 살펴보면, R-I의 H-1과 A-1

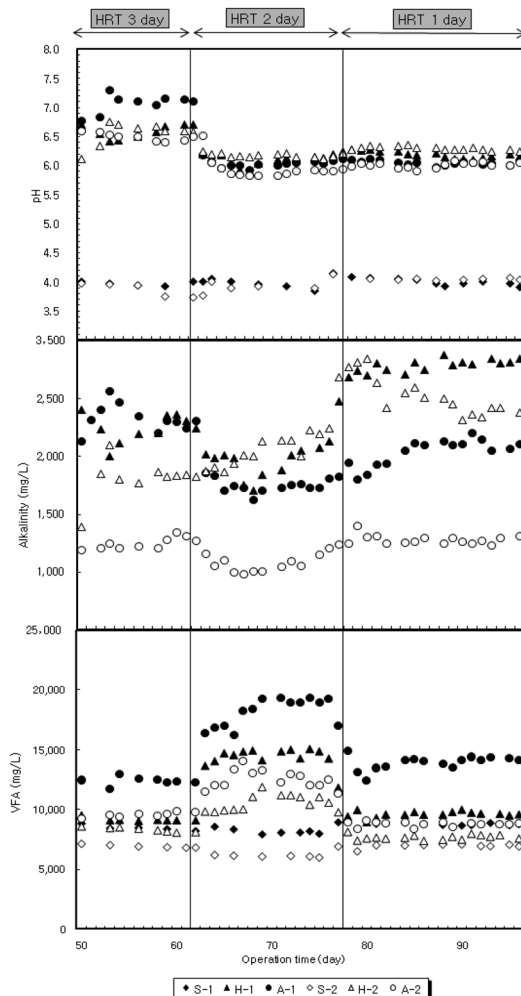


Fig. 2. Variations of effluent pH, Alkalinity and VFA during operation time.

에서 각각 2,028~2,821 mg as CaCO_3/L 와 1,625~2,560 mg as CaCO_3/L 이었으며, R-II의 H-2와 A-2에서는 1,838~2,383 mg as CaCO_3/L 와 1,108~1,297 mg as CaCO_3/L 로 나타나 산발효조의 알칼리도는 전 운전 기간에 걸쳐 일정하게 유지되었으나, 가수분해조의 알칼리도는 음식물류 폐기물의 가용화 효율의 증대를 위해

주입한 NaOH의 축적에 의해 다소 완만히 증가하였다.

한편 체류시간 변화에 따른 VFA의 농도변화는 R-I의 경우 반응조 H-1, A-1에서 각각 9,107~14,692 mg/L, 12,398~19,071 mg/L로써 주입기질 8,081~8,774 mg/L와 비교해 볼 때 약 1.8배와 2.3배 증가하였고, 체류시간이 3일에서 2일로 감소함에 따라 약 1.6배와 1.5배 증가하였으며, 체류시간 1일에서는 급격히 감소하였다. R-II는 반응조 H-2, A-2에서 각각 7,381~10,871 mg/L와 8,858~12,486 mg/L로써 주입기질 6,087~6,971 mg/L보다 약 1.8배와 2.1배 증가하였고, 체류시간이 3일에서 2일로 줄어듦에 따라 약 1.3배 증가하였으며, 체류시간 1일에서는 R-I과 마찬가지로 급격히 감소하였다. 이는 체류시간 1일에서는 짧은 체류시간으로 인하여 유기물의 분해가 완전히 이루어지지 못해 VFA의 생성자체가 감소되었기 때문으로 사료되며, R-II의 A-2보다 R-I의 A-1에서 다소 높은 VFA의 농도 값을 보였는데, 이는 유기물 부하량이 상대적으로 R-I이 높았기 때문에 나타난 결과로 사료된다. 이와 같은 결과는 박진식 외 2인(2006)의 음식물류 폐기물 산발효에 대한 연구 결과에 의하면 유기물부하 40 g VS/L.d일 때 고온에서 pH가 4.8을 나타내어 VFA의 급격한 축적으로 인해 VFA의 생성에도 영향을 미친 것으로 조사되었으나, 본 연구에서는 pH조정을 위해 NaOH을 TSG 기준 0.075 g씩 주입하였기 때문에 pH저하에 따른 VFA의 급격한 축적현상은 발생되지 않았다.

또한 희석비와 체류시간에 따른 R-I과 R-II의 각 반응조에 VFA 평균 생성율은 체류시간 1, 2, 3일에서 각각 48.2%, 120.6%, 62.7%와 39.5%, 94.7%, 27.0%로 2배 희석한 R-I이 체류시간 2일에서 120.6%로 가장 높게 나타났다. 본 실험 결과를 토대로 볼 때, 체류시간 2일에서 유기물부하가 높은 R-I이 R-II보다 약 25.9%의 높은 VFA 생성율을 나타내었는데, 이는 김보배 등(2010)이 음폐수의 혐기성 산발효시 VFA 생성이 체류시간의 영향을 조사한 것과 동일한 결과를 보였다.

2. 유기물 및 고형물의 분해

2.1. COD 및 가용화율

희석비와 체류시간에 따른 SCOD농도 변화는 Fig. 3에 나타내었고, TCOD 중 SCOD의 전환율, COD제거 효율 및 입상COD의 가용화율(Ps)은 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 보듯이 S/TCOD는 각 반응조 H-1, A-1과 H-2, A-2에서 각각 54.6~59.9%, 65.3~82.3%와 48.3~68.4%, 62.5~78.0%이었으며, 이중 A-1과 A-2는 주입기질 S-1, S-2의 51.8~56.3%, 45.3~50.7%보다 약 9.0~26.3%, 11.8~32.7% 높게 나타났다. 유기물부하가

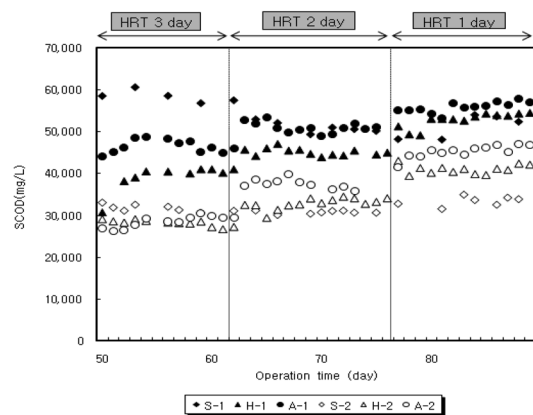


Fig. 3. Variation of effluent SCOD concentration during operation time.

큰 R-I에서는 긴 체류시간이 S/TCOD의 증가에 유리하였으나, 반대로 유기물부하가 작은 R-II의 경우 체류시간이 짧을수록 유리하였다. 이는 유기물 부하에 비해 너무 긴 체류시간에서는 조 내 미생물에 의한 SCOD 소비가 일어났기 때문인 것으로 사료된다. 한편, TCOD제거율은 R-I의 경우 H-1, A-1에서 각각 9.5~31.4%, 3.9~21.1%이었고, R-II는 H-2, A-2에서 각각 3.6~10.9%, 4.1~12.3%로써 체류시간이 길고, 유기물 부하가 높을수록 높은 제거율을 나타내었다.

TCOD 중 ICOD가 SCOD로 전환되는 입상 COD의 가용화 효과, 즉 Ps(%)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Ps(\%) = \frac{(ICOD_0 - ICOD_t)}{ICOD_0} \times 100 \quad (2)$$

여기서, $ICOD_0$: 초기 ICOD 농도(mg/L)

$ICOD_t$: t시간 후 ICOD(mg/L)

Table 3에 나타나듯이 Ps변화는 R-I의 H-1, A-1에서 13.7~31.3%, 17.3~67.4%로 체류시간이 짧을수록 감소하였으며, R-II의 H-2, A-2의 경우 11.3~48.3%, 12.2~34.5%로써 체류시간이 3일에서 2일로 줄어듦에 따라 다소 감소하였으나, 체류시간 1일에서는 급격한 증가로 A-1과 약간의 반대현상을 보였다. 이는 Fig. 3에서 보듯이 R-II의 H-2와 A-2의 유출수내 SCOD가 급속히 증가하였기 때문인데, 이런 SCOD의 급격한 증가는 R-I에 비해 유기물 부하가 낮은 R-II의 경우 짧은 체류시간에서는 조내 미생물에 의한 SCOD의 생산이 소비보다 많아 잔여 SCOD 농도가 높아졌기 때문으로 사료된다. 그러나 R-I의 경우, 미생물에 의해 쉽게 분해될 수 있는 RBCOD(readily biodegradable COD) 성분 이외에 알칼리처리에 의해 RBCOD로의 전환이 가능

Table 3. Summary of operation result for S/TCOD, COD removal efficiency and Ps with dilution ratio and HRT

HRT (day)		3			2			1		
Reactor	Item	S/TCOD (%)	COD removal efficiency (%)	Ps (%)	S/TCOD (%)	COD removal efficiency (%)	Ps (%)	S/TCOD (%)	COD removal efficiency (%)	Ps (%)
S-I		55.7-56.9 (56.0)	-	-	50.5-56.9 (51.8)	-	-	50.6-56.9 (56.3)	-	-
H-I		46.8-58.6 (56.0)	29.8-36.3 (31.4)	21.5-35.8 (31.1)	52.6-56.9 (54.6)	13.2-18.3 (16.5)	17.0-26.4 (21.3)	56.5-61.0 (59.9)	34.9-11.0 (9.5)	10.1-19.5 (13.7)
A-I		80.3-90.0 (82.3)	19.7-25.2 (21.1)	64.4-89.9 (67.4)	59.6-68.5 (66.7)	2-12.5 (7.1)	10.5-41.9 (33.0)	61.1-66.5 (65.3)	0.5-5.4 (3.9)	5.7-22.3 (17.3)
R-I		-	45.1-52.4 (45.9)	76.7-89.0 (81.2)	-	16.6-24.1 (22.5)	32.4-51.8 (44.7)	-	6.7-13.3 (13.0)	23.0-34.2 (29.6)
S-I		48.2-51.7 (48.4)	-	-	49.0-51.8 (50.7)	-	-	44.5-49.7 (45.3)	-	-
H-2		46.7-52.7 (48.3)	9.9-13.9 (10.9)	8.6-18.1 (11.3)	49.8-60.0 (57.8)	2.4-8.7 (4.0)	8.8-23.6 (17.6)	62.7-69.7 (68.4)	0.7-6.8 (3.6)	35.0-52.7 (48.3)
A-2		51.6-71.1 (62.5)	7.0-30.9 (12.3)	9.9-57.7 (30.1)	58.0-63.7 (62.5)	4.5-7.9 (6.1)	1.4-14.3 (12.2)	68.1-80.7 (78.0)	1.8-6.0 (4.1)	7.3-43.4 (34.5)
R-II		-	17.2-40.5 (21.9)	20.0-64.9 (33.0)	-	7.5-12.9 (10.0)	11.6-29.6 (25.2)	-	2.9-8.8 (7.6)	44.1-68.1 (66.6)

Table 4. Summary of operation result for protein, fatty, carbohydrate and moisture with dilution ratio and HRT

(unit : %)

HRT (day)		3					2					1				
Reactor	Item	P	F	C	A	M	P	F	C	A	M	P	F	C	A	M
R-I	S-1	0.83	0.86	1.15	0.79	96.37	0.85	0.85	1.15	0.75	96.40	0.81	10.82	1.24	0.74	96.39
	H-1	0.63	0.53	0.84	0.46	97.49	0.72	0.62	1.11	0.54	97.01	0.78	0.74	1.17	0.60	96.71
	A-1	0.59	0.16	0.73	1.18	97.34	0.63	0.19	0.87	1.23	97.08	0.67	0.23	1.01	1.30	96.79
	R · E	(28.9)	(81.4)	(36.5)	-	-	(25.9)	(77.6)	(24.4)	-	-	(17.3)	(72.0)	(18.5)	-	-
R-II	S-2	0.68	0.70	0.97	0.61	97.04	0.70	0.69	1.02	0.58	97.01	0.69	0.72	0.90	0.59	97.10
	H-2	0.57	0.52	0.73	0.45	97.68	0.62	0.61	0.94	0.49	97.34	0.67	0.70	0.88	0.55	97.20
	A-2	0.44	0.12	0.62	1.01	97.81	0.53	0.19	0.77	1.09	97.42	0.59	0.24	0.79	1.15	97.23
	R · E	(35.3)	(82.9)	(36.1)	-	-	(24.2)	(72.5)	(24.5)	-	-	(14.5)	(66.7)	(12.2)	-	-

Note) P: protein, F: fatty, C: carbohydrate, A: ash, M: moisture, R.E: removal efficiency

한 ICOD(insoluble COD) 성분이 높아 3일 정도의 충분한 체류시간에서는 RBCOD로의 전환이 원활히 이루어져 높은 Ps값을 보였으나, 체류시간이 2일과 1일로 줄어들에 따라 ICOD에서 SCOD로의 전환이 원활하지 못하여 Ps가 감소한 것으로 나타났다.

2.2. 단백질, 지방, 탄수화물

각 공정(R-I, R-II)에서 음식물류 폐기물 중 단백질,

지방, 탄수화물의 분해가 산발효조의 운전성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 체류시간별 반응조내 각 성분의 변화를 조사하였다. 체류시간의 변화에 따른 R-I과 R-II의 단백질, 지방, 탄수화물의 변화는 Fig. 4에 나타내었고, Table 4에 정상상태에서의 이들의 평균값을 나타내었다. Table 4와 Fig. 4에서 보듯이 체류시간이 3일에서 1일로 줄어들에 따라 A-1, A-2의 단백질의 조성비는 0.59~0.67%와 0.44~0.59%로써 유입기질과

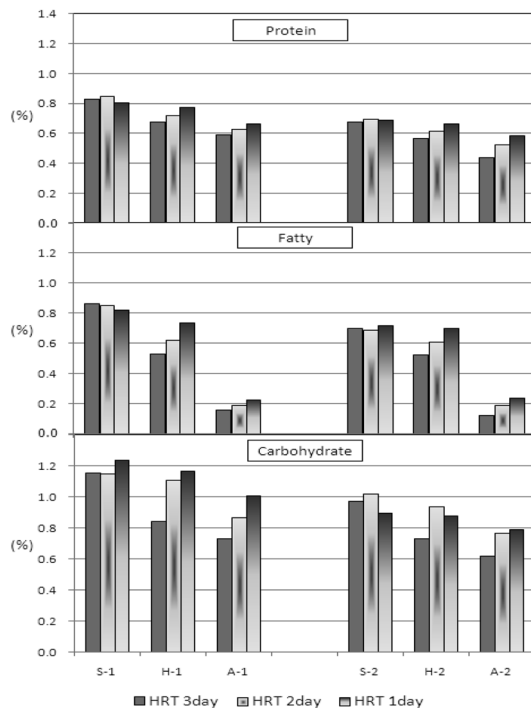


Fig. 4. Variation of protein, fatty and carbohydrate according to HRT.

비교할 때 R-I와 R-II에서 각각 17.3~28.9% 및 14.5~35.3%의 제거율을 나타내었다. 지방성분의 조성비는 약 0.16~0.23%, 0.12~0.24%로써, 72.0~81.4%와 66.7~82.9%의 높은 제거율을 나타냈으며, 탄수화물의 조성비 경우에는 0.73~1.01% 및 0.6~0.79%로써, 제거율은 18.5~36.5%와 12.2~36.1%이었다. 위의 결과를 통해 유기물 중 단백질, 지방, 탄수화물의 경우 체류시간이 길수록 높은 제거율을 나타내었고, 동일한 체류시간에서는 유입 유기물부하가 높을수록 제거율이 높아짐을 알 수 있었다. Noike *et al.*(1985)과 Breure *et al.*(1986)의 연구결과에 의하면 전분의 경우는 낮은 pH에서, 셀룰로오스는 체류시간이 증가할수록, 그리고 단백질은 체류시간의 증가 및 중성 pH에 근접할수록 분해가 잘 이루어진다고 보고하는데 이는 본 연구의 결과와 거의 일치하는 경향이였다.

2.3. 고품질

유입기질 및 가수분해조와 산발효조의 회석비 및 체류시간에 따른 VS의 농도변화는 Fig. 5에 각각 나타내었다. Fig. 5에서 보듯이 VS농도는 R-I의 H-1과 A-1은 각각 31,768~53,218 mg/L, 20,915~38,291 mg/L이었고, R-II의 H-2와 A-2는 각각 30,979~38,444 mg/L, 21,266~27,414 mg/L 범위이었다. 한편 체류시간의 변화에 따

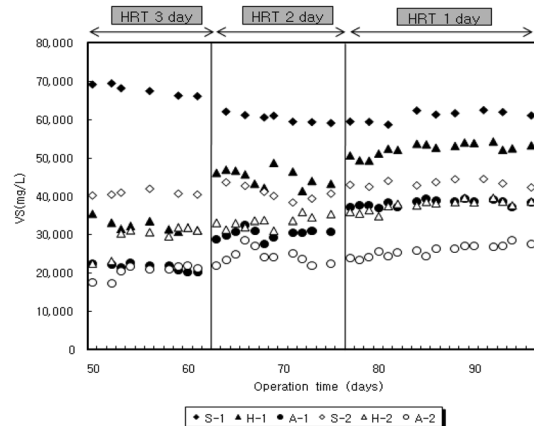


Fig. 5. Variation of effluent VS concentration during operation time.



Fig. 6. Shape and size of mudball.

른 전 공정 R-I와 R-II의 VS제거효율은 체류시간이 3일, 2일, 1일로 변환에 따라 38~69%와 37~49%로 음식물류 폐기물을 2배 희석하여 주입한 R-I이 음식물류 폐기물을 3배 희석하여 주입한 R-II보다 약 1~21% 높은 VS제거효율을 나타냈다.

3. 머드볼 생성 및 암모니아, 염분의 영향

3.1. 머드볼 생성

단백질, 지방, 탄수화물 중 UBF 산발효 공정에 의한 제거율은 지방이 약 67% 이상으로 단백질과 탄수화물에 비해 가장 높게 나타났는데, 이는 순수 지방이 분해되어 제거율이 높아졌기보다 Fig. 6에서 보듯이 운전기간 중 공 모양의 머드볼(mudball)이 생성되면서 다량의 지방분을 흡착하여 유출수 중 지방의 함량이 낮아졌기 때문으로 사료된다. 가수분해조에 생성된 머드볼은 지름이 0.2~2 cm의 크기를 보였고, 교반 임펠러 축에 붙어 성장한 머드볼은 나선형 모양으로 최대 3.5 cm 정도였으며, 대부분의 머드볼은 물의 회전력에 의해 둥근

Table 5. Characteristics of suspended and attached biomass in each reactor

Reactor		R-I (A-1)			R-II (A-2)		
HRT(day)		3	2	1	3	2	1
OLR (kg VS/m ³ · day)		33.1-34.7 (33.7)	44.3-46.5 (44.9)	87.9-93.6 (92.4)	20.1-21.1 (20.4)	28.7-32.6 (29.9)	63.3-66.6 (65.3)
Biomass	Concentration (mg/L)	24,330-26,380 (25,630)	29,500-30,200 (29,730)	32,000-37,600 (34,330)	20,400-31,500 (24,880)	28,300-28,600 (28,430)	30,200-32,600 (31,730)
	VSS/TSS ratio (%)	87.0-89.5 (88.5)	89.7-90.5 (90.2)	84.6-89.2 (87.3)	85.6-90.8 (88.2)	82.7-88.7 (85.5)	87.4-88.9 (88.0)
	Biomass (g)	442-447 (256)	295-302 (297)	320-376 (343)	204-315 (249)	283-286 (284)	302-326 (317)
	Water content (%)	94.0-94.9 (94.4)	94.0-95.2 (94.7)	94.0-95.1 (94.6)	74.1-95.2 (94.7)	94.0-95.1 (94.4)	94.2-95.8 (94.8)
Biofilm	Thickness (μm)	522-656 (565)	421-577 (478)	381-458 (403)	426-463 (442)	334-392 (364)	316-347 (331)
	Density (mg/cm ³)	54.2-63.7 (59.8)	50.9-63.8 (56.6)	51.9-64.5 (57.1)	51.3-63.2 (56.4)	52.6-63.5 (59.6)	45.2-62.3 (55.4)
	Mass (mg/cm ²)	2.8-4.0 (3.4)	2.1-2.9 (2.7)	2.2-2.5 (2.3)	2.4-2.7 (2.5)	1.8-2.4 (2.1)	1.5-2.2 (1.8)
	Biomass (g)	30.3-42.8 (36.3)	22.9-34.1 (29.0)	23.1-26.3 (24.5)	25.4-28.8 (26.6)	19.6-26.2 (229)	18.5-23.1 (19.6)
Attached biomass / Total biomass (%)		11.9-14.0 (12.4)	7.2-10.6 (8.9)	6.5-6.7 (6.7)	8.4-11.07 (9.6)	6.5-8.4 (7.5)	5.8-6.6 (5.8)
Total biomass concentration (mg TSS/L)		27,330-29,880 (29,230)	31,790-33,610 (32,560)	34,310-40,230 (36,750)	22,940-34,380 (27,560)	30,260-31,220 (30,690)	32,050-34,910 (33,660)

원형을 보였다. 산발효조 매체층 상부에 주로 생성된 머드볼은 지름이 1.5~4.5 cm의 크기이었고, 하부에는 0.2~0.3 cm로 상부에 비해 작은 크기 분포를 보였으며, 생성된 양 역시 상부 층에 비해 상당히 적었다. 머드볼의 형태는 물의 흐름이 큰 곳은 둥근형, 물의 흐름이 작은 곳은 괴산형을 나타냈고, 조의 측면에는 1 cm 이상의 두꺼운 케익층을 형성하고 있었다. 조내에 머드볼의 생성은 음식물류 폐기물처리 시설의 반응공간 축소 및 관로 폐쇄 등으로 장치운전에 많은 악 영향을 미치므로 앞으로 이에 대한 연구가 더 구체적으로 진행되어야 할 것이다.

3.2. 암모니아, 염분

NH₄⁺-N은 각 반응조 H-1, A-1 및 H-2, A-2에서 각각 287~401 mg/L, 366~537 mg/L 및 253~307 mg/L, 290~479 mg/L로 희석배율이 적고 체류시간이 길수록 비례적으로 증가하였다. 이는 조내 체류시간이 길어짐으로 인해 음식물류 폐기물 중 단백질 성분이 NH₄⁺-N으로 분해가 활발히 일어났기 때문이다.

Bhattacharya and Parkin(1989)과 Parkin and Miller

(1982)의 연구에 의하면 NH₄⁺-N농도의 경우 3,000 mg/L가 미생물 활성의 저해를 유발하는 한계농도이나, 미생물이 순응 될 경우에 NH₄⁺-N의 한계농도는 8,000~9,000 mg/L인 것으로 보고한 결과와 비교하여 볼 때, 본 연구에서는 한계농도 이하로 NH₄⁺-N에 의한 운전 장애는 없었던 것으로 사료된다.

또한 Cl⁻의 경우 각 반응조의 A-1과 A-2에서 3,800~4,600 mg/L와 2,950~3,360 mg/L이었다. 이는 김보배 등(2010)의 연구결과에 의하면 Cl⁻ 농도가 3,700 mg/L(0.61% NaCl)에서 9,800 mg/L(1.62% NaCl)로 증가하였을 때 VFA농도가 약 14% 감소한 결과와 비교하여 볼 때, 본 연구에서는 NH₄⁺-N와 마찬가지로 Cl⁻에 의한 저해는 받지 않은 것으로 판단된다.

4. 미생물 성장

희석비와 체류시간에 따른 각 R-I, R-II 공정에서 산발효조(A-1, A-2)의 부유 및 부착미생물의 성장조사 결과를 Table 5에 요약정리 하였다. Table 5에서 보듯이 R-I의 경우 체류시간이 3일, 2일, 1일로 변화하였을

때 유기물부하는 33.7, 44.9, 92.4, $\text{kg VS/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 나타났다, 조내 총 미생물 농도는 29,230, 32,560, 36,750 mg/L 로 체류시간이 짧을수록 증가 하였으며, 총 미생물중 부착미생물이 차지하는 비율은 12.4, 8.9, 6.7%로 감소하였다. 한편, R-II의 경우 HRT의 변화에 따라 유기물부하가 20.4, 29.9, 65.3 $\text{kg VS/m}^3 \cdot \text{day}$ 이었으며, 조내 총 미생물 농도는 27,560, 30,690, 33,660 mg/L 로 R-I과 같이 체류시간이 짧을수록 증가 하였으며, 총 미생물 중 부착미생물이 차지하는 비율은 역시 9.6, 7.5, 5.8%로 R-I에 R-II에 비해 부착미생물이 차지하는 비율은 약 1.3배 높게 나타났다.

한편, R-I과 R-II의 생물막 건조밀도는 체류시간이 3일, 2일, 1일에서 56.6~59.8 mg/m^3 , 55.4~59.6 mg/m^3 으로 거의 차이가 없었다. 그러나 생물막 두께와 매체단위 면적당 부착미생물량은 R-I의 경우 403~565 μm 와 2.3~3.4 mg/cm^2 이었고, R-II의 경우 331~442 μm 와 1.8~2.5 mg/cm^2 로 나타나 유기물 부하가 크고, 체류시간이 길수록 높게 나타났다.

IV. 결 론

알칼리 가수분해와 상향류 블랭킷 여상(UBF)의 조합공정을 이용하여 희석비와 체류시간에 따른 음식물류 폐기물의 전처리 및 산발효조의 운전성능에 미치는 영향에 대해 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. TS농도 기준 2배, 3배 희석과 체류시간 1, 2, 3일의 단계별 운전조건에서 0.075 g NaOH/g TS 주입한 후 음식물류 폐기물을 산발효 한 결과, pH는 5.9~7.1이었고, 알칼리도는 1,108~2,281 $\text{mg as CaCO}_3/\text{L}$ 로 체류시간이 길수록 증가하였으며, VFA의 농도와 생성율은 2배 희석 후 체류시간이 2일 일 때 19,071 mg/L , 120.6%로 가장 높았다.
2. COD와 VS제거효율 및 입상COD의 가용화율(P_s)은 각각 7.6~45.9%, 37~69%, 및 25.2~81.2%로 체류시간이 길수록 증가하였으며, 2배 희석 후 체류시간 3일 일 때 가용화가 가장 높게 나타났다.
3. 희석비와 체류시간에 따른 단백질, 지방, 탄수화물은 체류시간이 길수록, 유기물부하가 높을수록 제거율이 높았으며, 조 상부에 다량의 머드볼 생성이 반응공간 축소 및 관로 폐쇄 등으로 장치운전에 악 영향을 미칠 수 있었다.
4. 산발효조의 총 미생물 중 부착미생물이 차지하는 비율은 5.8~12.4%이 었으며, 생물막 두께와 매체단위 면적당 부착미생물량은 각각 331~565 μm , 1.8~3.4 mg/cm^2 로 유기물 부하가 클수록 증가하였

으나, 생물막 건조밀도는 55.4~59.8 mg/m^3 으로 거의 차이가 없었다.

5. 알칼리 가수분해와 상향류 블랭킷 여상의 조합공정을 이용하여 음식물류 폐기물의 산발효시 적정 운전조건은 TS기준 2배 희석과 체류시간 2일 일 때 0.075 g NaOH/g TS 주입한 경우로 나타났다.

References

1. 김민철, 송주형, 임점호, 박종웅. 2001. 물리·화학적 전처리에 의한 음식물쓰레기의 가용화 효과. 2001년도 춘계 폐기물관련학회 논문집(1). 303-306.
2. 김보배, 박종웅. 2010. 음폐수의 혐기성 산발효시 VFA생성에 미치는 영향인자. 한국도시환경학회지. 10(1). 9-15.
3. 김희준, 박재석, 김윤중, 김대영, 정태학. 2003. 알칼리 전처리가 음식물쓰레기의 가용화 및 산 발효에 미치는 영향, 대한토목학회지. 23(1B). 23-29.
4. 박종웅, 송주형. 페타이어로 성형 제조된 부정형 과립담체에 부착된 미생물의 측정방법. 상하수도학회지. 17(2). 255-260.
5. 박진식, 안철우, 장성호. 2006. 유기물부하에 따른 음식물찌꺼기의 산발효 특성. 한국환경과학회지. 15(10). 975-982.
6. 백병천, 이창기, 송영채, 신항식, 채소룡, 오세은. 2002. 음식물쓰레기의 혐기성 산발효에 대한 유기물 부하 및 희석을 영향, 한국폐기물학회지. 19(6). 722-729.
7. 송영채, 우정희, 백병천. 2002. 음식물쓰레기의 혐기성 가수분해 및 산발효에 대한 pH의 영향. 대한토목학회지. 22(6-B). 851-857.
8. 환경부. 2004. 폐기물공정시험방법, 환경부 고시 제 2004-185호.
9. 환경부. 2007. 수질오염공정시험방법, 환경부 고시 제2007-147호.
10. 환경부. 2007. 음식물류 폐기물 처리시설 발생폐수 육상처리 및 에너지화 종합대책.
11. 환경부. 2010. 음식물류 폐기물 처리시설 현황. 8-19.
12. APHA, AWWA & WEF. 1998. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 20th Ed. Washington DC.
13. Barlindhaug, J. & Fdegard, H. 1996. Thermel Hydrolysis for the Production of Carbon Source for Denitrification. Wat. Sci. Tech. 34(1-2). 371-378.
14. Bhattacharya, S. K. & Parkin, G. F. 1989. The Effect of Ammonia on Methane Fermentation Processes. J. WPCF. 61(1). 55-59.
15. Breure, A. M., Mooijman, K, A. & Andel, J. C. 1986. Protein Degradation in Anaerobic Digestion :

- Influence of Volatile Fatty Acids and Carbohydrate on Hydrolysis and Acidogenic Fermentation of Gelatin. *Appl. Microbial. Biotechnol.* **24**. 426-431.
16. Guiot, S. R. & Van den berg, L. 1985. Performance of an Upflow Anaerobic Reactor Combining a Sludge Blanket and a Filter Treating Sugar Waste. *Biotech. Bioeng.* **27**. 800-801.
17. Kennedy, K. J., Gorur, S. S., Elliot, C. A., Andras, E. & Guiot, S. R. 1988. Effect of oriented media on solids retention in upflow sludge blanket filter (UBF) reactor. 5th Int. Symposium on Anaerobic Digestion. Poster-papers. Bologna. Italy. 295-300.
18. Kisaalita, W. S. & Siegrist, H. 1987. Acidogenic Fermentation of Lactose. *Biotechnology and Bioengineering.* **30**. 88-95.
19. Neis, U., Nickel, K. & Tiehm, A. 2000. Enhancement of Anaerobic Sludge Digestion by Ultrasonic Disintegration. *Wat. Sci. Tech.* **42**(9) 73-80.
20. Noike, T., Endo, G., Chang, J., Yaguchi, J. & Matsmoto, J. 1985. Characteristics of Carbohydrate Degradation and the Rate Limiting Step in Anaerobic Digestion, *Biotechnology and Bioengineering.* **27**. 1482-1489.
21. Parkin, G. F. & Miller, S. W. 1982. Response of methane fermentation to continuous addition of selected industrial toxicants. *Proc. 37th Purdue Indust. Waste Conf. West Lafayette. Indiana.* 729-743.
22. Penaud, V., Delgenes, J. P. & Moletta, R. 1999. Thermo-chemical Pretreatment of a Microbial Biomass: Influence of Sodium Hydroxide Addition on Solubilization and Anaerobic Biodegradability. *Enzyme and Microbial Technol.* **25**. 258-263.
23. Ray, B. T., Lin, J.-G. & Rajan, R. V. 1990. Low-level Alkaline Solubilization for Enhanced Anaerobic Digestion. *J. WPCF.* **62**(1). 81-87.
24. Samson, R. & Guiot, S. R. 1985. Mixing Characteristics and Performance of the Anaerobic Upflow Blanket Filter (UBF). *Journal of Chem. Tech. Biotechnol.* **35B**. 65.
25. Zoetemeyer, R. J., Heurvel, J. C. & Cohen, A. 1982. pH Influence on Acidogenic Dissimilation of Glucose in an Anaerobic Digestor. *Water Research.* **16**. 303-311.