

## Rumen 미생물을 이용한 주방폐기물 혐기성소화의 효율증진 방안

신항식, 송영채, 손성섭\*, 배병욱

한국과학기술원 토목공학과 환경공학연구실, 대전직할시 유성구 구성동 373-1(우 305-701)

\* (주) 코오롱엔지니어링, 서울특별시 중구 무교동 45(우 100-170)

## Enhanced Anaerobic Degradation of Food Waste by Employing Rumen Microorganisms

Hang-Sik Shin, Young-Chae Song, Sung-Sub Son\*, and Byung-Uk Bae

*Environ. Tech. Research Lab., Dept. of Civil Engineering, KAIST, Taejeon 305-701, Korea*

*\*Kolon Engineering Inc., Seoul 100-170, Korea*

### ABSTRACT

Every year, over  $3.37 \times 10^7$  ton of municipal solid waste is generated in Korea, of which about 28% is organic food waste from restaurant, dining halls and households etc. Methane conversion of the food waste by anaerobic digestion could be a viable approach for energy recovery as well as safe disposal of the waste. However, as food waste is composed of highmolecular complex polymers such as cellulose, lignin and protein, anaerobic digestion of food waste has not been efficient in terms of volumetric loading rate, solid retention time and extent of anaerobic degradation.

In this research, the improved anaerobic degradation of food waste was attempted by applying rumen microorganisms to anaerobic digestion. Acidification efficiency of food waste by rumen microorganisms was compared with that of conventional acidogenesis. And optimum acidification conditions by rumen microorganisms were also determined. For the experiments, anaerobic batch reactors of 600 mL was fed with the processed (dried and milled) food waste obtained from a restaurant.

Ultimate volatile fatty acid (VFA) yield produced by rumen microorganisms was about 8.4 meq VFA/g volatile solid (VS) that is 95% of the theoretical value. This yield was not much different from that of conventional acidogenesis, but hydrolysis rate was about twice faster. Cumulative VFA concentration increased from 66 meq/L to 480 meq/L, when the

initial TS was increased from 1% to 15%. But VFA yield at 15% TS was half of that at 1% TS. This inhibition on the acidification might be caused by the rapid drop of pH and higher concentration of nonionized VFA. Optimal pH and temperature range for the acidification were about 6.0~7.5 and 35~45° C, respectively.

## 초 록

우리나라에서 연간 3,367만톤(1991년) 배출되는 생활쓰레기의 28% 이상이 주방폐기물로 통칭되는 음식찌꺼기, 채소류등으로 구성되는데 수분함량이 75~85%로 높고 발열량 낮아 혐기성 소화에 의한 처리법은 폐기물의 안정화 및 메탄가스 회수를 통한 효율적인 자원화가 가능하여 매우 실용적인 것으로 고려된다. 그러나, 주방폐기물은 셀룰로즈, 단백질등의 복잡한 고분자 고형물질들로 구성되어 있어 혐기성 소화시 가수분해반응이 율속단계로 인식되고 있으며, 이로 인한 유기물 부하율이 작고 반응조 용적이 커져 경제적이지 못한 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 셀룰로즈 등의 고분자물질의 가수분해 반응에 활성이 뛰어난 rumen 미생물을 이용하여 주방폐기물의 혐기성 소화의 효율을 증진시키기 위한 연구가 600 mL의 회분식반응조에서 수행되었다. 주방폐기물의 가수분해 및 산생성 반응에 대한 중온산생성균과 rumen 미생물의 산생성반응 효율을 비교하였으며, rumen 미생물을 이용한 산형성 반응에서 pH, 온도, 고형물 농도등 환경인자의 영향을 평가하였다. Rumen 미생물을 이용한 주방폐기물의 산형성 반응에서 최종휘발산수율은 이론치의 약 95%에 해당하는 8.4meq/g VS를 보여 중온산형성균을 이용하였을 때와 비슷하였으나, 산생성반응의 속도는 중온산형성균을 이용했을 때 보다 약 2배 이상 빨랐다. Rumen 미생물을 이용한 주방폐기물의 산생성 반응에 대한 기질 농도의 영향에서는 TS 15%일 때 급격한 pH저하 및 비이온화된 VFA 등의 저해작용으로 휘발산수율은 TS 1%인 반응조에서의 절반이하의 값을 보여 유출수의 연속적인 회석이 중요한 인자임을 알 수 있었다. Rumen 미생물을 이용한 산생성 반응의 최적 pH 및 온도 범위는 각각 6.0~7.5, 35~45°C였다. 이상과 같은 결과로부터 rumen 미생물을 주방폐기물의 혐기성소화 공정에 이용할 경우 혐기성 반응의 율속단계로 고려되는 가수분해 및 산형성 반응의 속도를 증가시킬 수 있어 반응조 용적 감소 및 유기물 부하 증가 등의 소화 효율향상이 가능함을 알 수 있었다.

**핵심용어** — 주방폐기물, 혐기성소화, Rumen 미생물, 산생성균, 가수분해, 산생성반응

## 1. 서 론

우리나라에서 연간 3,367만톤(1991년) 배출되는 생활쓰레기의 약 28% 이상이 음식물찌꺼기, 채소류 등의 생분해성 주방폐기물로 구성되는데 (환경처, 1992), 대부분이 다른 일반폐기물과 함께 매립처분되고 있어 매립지 확보의 어려움 및 공중위생등

의 사회적인 문제를 가중시키고 있는 실정으로 적절한 처리 및 관리 대책이 시급하다 (신항식, 1992). 이러한 주방폐기물은 일반가정을 비롯한 식당가, 시장 및 집단급식소 등에서 주로 배출되는데 수분함량이 75~85%로 높고 발열량이 낮아 소각, 퇴비화 등의 처리법이 경제적이지 못한 것으로 인식되고 있으며 (구자공, 1992), 혐기성 소화에 의한 처리법은 폐기물의 안정화라는

환경적인 측면뿐만아니라 메탄가스 회수를 통한 효율적인 자원화가 가능하여 매우 실용적인 것으로 고려된다 (신항식, 1992).

그러나, 주방폐기물의 혐기성 소화는 용존 유기성 폐수의 경우와는 달리 셀룰로즈, 단백질 등의 고분자 고형물질들로 구성되어 있어, 가수분해반응이 전체 혐기성 반응의 율속단계로 인식되고 있으며, 이로 인해 높은 유기물 부하의 적용이 불가능하고 반응조 용적이 커져 효율적이지 못한 것으로 알려져 있다 (gijen *et al.*, 1986). 따라서, 고분자 유기성 폐기물을 물리적, 화학적으로 전처리하거나 (shin *et al.*, 1992) 반응조내에 미생물 보유량을 증가시키는 방법으로 가수분해반응을 촉진시켜 소화조 효율을 증진시키는 방법이 연구되고 있으며, 최근에는 가수분해반응에 더욱더 활성이 큰 미생물을 screening한 뒤 적용하는 방법에 (muller and trosch, 1986) 의해 혐기성 소화 효율을 향상 시키는 연구가 진행되고 있다. 초식동물의 위에 존재하는 rumen 미생물은 박테리아, 섬모류 원생동물 등의 복잡한 미생물군으로 구성되는 특별한 형태의 생태계를 형성하고 있으며, 셀룰로즈 등의 고분자 물질 가수분해에 대단히 효과적이라고 알려져 있다 (gijen *et al.*, 1986). 유기성 폐기물의 효율적인 혐기성 처리를 위해 rumen 미생물의 활용에 관한 연구는 구미의 경우 제지슬러지, 농축산폐기물, 유기성 도시폐기물 등에 집중되고 있으며, 대부분의 경우에 있어서 대단히 효율적임이 입증되고 있다 (gijen *et al.*, 1986).

따라서, 본 연구에서는 중온산생성균과 rumen 미생물을 이용한 주방폐기물의 가수분해 및 산생성반응의 효율을 비교하고, rumen 미생물에 의한 가수분해 및 산생성

반응에 대한 고형물 농도, pH, 온도 등의 환경인자에 대한 연구를 수행하여 효율적인 주방폐기물의 혐기성 소화의 가능성을 타진하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험장치 및 분석

본 실험에서는  $60 \pm 5$  mL의 회분식 반응조를 사용하였으며, 실리콘 마개로 밀봉하여 혐기성 상태를 유지시켰다. 발생가스의 양 및 성분의 분석은 실리콘 마개에 부착된 고무관에 주사기를 삽입시켜 측정하였다. 혐기성 배지의 조성은 Shelton and Tiedje(1984) 등이 혐기성 생분해도 실험에 사용하였던 것과 유사하게 제조하였다. 식종균의 양은 회분식 반응조 총 유효용량의 30%를 첨가하였으며, 식종균으로부터 발생하는 휘발산의 흡착이나 휘발에 의한 손실을 보정하기 위하여 공시체(blank)를 시료와 동일한 조건에서 배양하였다. 초기 알카리도는 4,500 mg/L as  $\text{CaCO}_3$ 가 되도록 중탄산 나트륨을 이용하여 조정하였다. 초기 pH는 10 N의 NaOH와 HCl을 이용하여 조정하였으며, 반응이 진행되는 동안에는 조절하지 않았다. 모든 장치와 배지는 가온, 가압 멸균하고 질소로 flushing 하여 산소 및 기타 외부환경인자에 의한 저해를 감소시켰으며, 실험상의 오차를 감소시키기 위해 2회 반복수행하였다. 실험준비가 끝난 회분식 반응조는 항온의 진탕배양기에서 60 rpm으로 교반, 배양하였다. 모든 반응조는 약 2일 주기로 가스발생량 및 성분을 분석하였으며, 20 mL씩 시료를 채취하여 pH 및 VFA를 측정하였다.

## 2.2 식중균 및 기질의 특성

본 연구에서 대상 기질로 사용한 주방폐기물 시료는 한국과학기술원 식당에서 채취하였으며, 시료의 균질화 및 정량화를 위하여 노천건조시킨 뒤 2 mm 이하로 분쇄하여 사용하였다. 이때 전처리된 주방폐기물의 특성은 Table 1에서 보는 바와 같이 수분함량이 약 20% 내외였으며, VS/TS비와 COD/VS비는 각각 0.83, 0.8이었고 C/N비는 약 13이었다.

Table 1. Characteristics of processed food waste

moisture(%)	VS/TS	COD/VS	C	H	O	N	S
20.5	0.83	0.80	45%	6.8%	44%	3.5%	0.7%

식중균은 본 실험실에서 대상기질로 연속운전된 rumen 및 중온산생성 반응조의 유출수가 사용되었다. 이때 rumen 식중균의 섬모류 원생동물의 총수는  $6.75 \times 10^6$  protozoa/mL였고, TS 및 VS/TS비는 각각 11,420 mg/L, 0.53이었다. 한편, 식중에 사용된 중온산생성균의 TS는 29,980 mg/L였으며, VS/TS비와 pH는 각각 0.71, 6.5였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 중온산생성균과 rumen 미생물에 의한 산생성반응 효율 비교

중온산생성균과 rumen 미생물을 이용한 주방폐기물의 가수분해 및 산생성 효율을 비교 평가하기 위하여 TS 1%인 회분식 반응조에 rumen 미생물과 중온산생성균을 각각 식중하였으며, 중온산생성균을 접종한 반응조(meso acidogenic reactor, 이하 MA)는 35°C에서, 그리고 rumen 미생물

을 접종한 반응조(rumen microorganism inoculated reactor, 이하 RI)는 39°C 항온에서 배양하였다. RI와 MA의 초기 pH는 6.6으로 조정하였으나 반응이 진행됨에 따라 단백질화합물등 유기질소를 함유한 물질의 분해로 생성된 암모니아이온의 영향으로 배양 18일째 7.6까지 높아졌다.

RI와 MA에서의 시간에 따른 휘발산 농도(total VFA) 변화는 Fig. 1과 같다. 산생성반응의 진행정도는 초기기질의 농도에

대한 휘발산농도 비로 정의되는 산성화분율(% acidification)에 의해 평가 가능하며(dinopoulon *et al.*, 1988), 식(1)과 같이 이론적인 VFA 수율에 대한 어느 시점에서의 휘발산 수율의 비로 표현할 수 있다.

$$\text{Acidification}(\%) = \frac{\text{VFA}_p}{\text{VFA}_{\text{theo}}} \times 100 \dots (1)$$

여기서,

VFA<sub>p</sub>: VFA of product at any time

VFA<sub>theo</sub>: theoretical VFA yield

본 실험에서 19일째 RI와 MA의 휘발산 농도는 각각 66 meq/L, 63 meq/L였으며, 이때 식(1)에 의해 계산한 산성화분율은 90.4%, 86.3%로서 RI가 MA보다 약 4% 가량 산생성 반응이 빨리 진행되었음을 알 수 있었다.

일반적으로 주방폐기물 등 고분자 유기물로부터 휘발산(VFA)이 생성되는 산생성

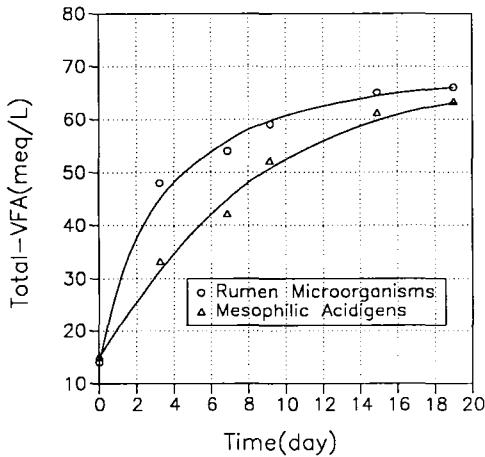


Fig. 1. Comparison of cumulative VFA productions according to inoculum sources.

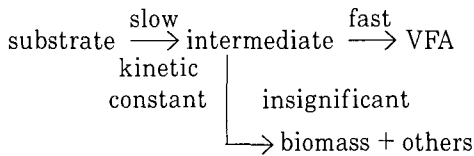


Fig. 2. Proposed reaction scheme for anaerobic degradation of food waste.

반응에서는 가수분해 반응이 율속단계로 인식된다. 따라서, 본 연구에서는 주방폐기물의 산생성반응을 속도론적으로 해석하기 위해 Fig. 2와 같은 반응 기작을 가정하였다. 먼저 산생성반응의 가수분해 중간생성물이 연속적으로 휘발산으로 발효되어 반응조내에 축적되지 않고, 미생물의 농도가 일정하게 유지되며, 메탄등의 다른 미소 생성물을 무시할 수 있다고 가정한 뒤 산생성 반응을 식(2)와 같이 1차 반응식으로 표현하였다.

$$dS/dt = -kS \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

k : hydrolysis constant (d<sup>-1</sup>)

S : substrate concentration (mg/L)

이때 유일한 발효 생성물인 휘발산농도 (VFA)는 식(3)과 같이 기질농도의 함수로 관련 지을 수 있다.

$$\frac{VFA_u}{VFA_u - VFA_t} = \frac{S_o}{S} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

VFA<sub>u</sub> : ultimate VFA concentration (meq/L)

VFA<sub>t</sub> : VFA concentration at time t

S<sub>o</sub> : initial substrate concentration (mg/L)

식(2)와 식(3)으로부터 식(4)를 얻을 수 있다.

$$\ln[(VFA_u / (VFA_u - VFA_t))] = kt \dots\dots\dots (4)$$

식(4)에서 VFA 농도를 시간의 함수로 나타내면 식(5)와 같다.

$$VFA(t) = VFA_u \times [1 - \exp(-kt)] \dots (5)$$

따라서, Fig. 1의 시간에 따른 VFA 농도변화에 대한 실험 결과를 식(5)에 대해 비선형 회귀분석하여 Table 2과 같이 최종휘발산수율과 가수분해속도상수(k)를 구하였다. 이때, RI와 MA의 최종휘발산수율은 약 8.4 meq VFA/g VS로 비슷한 값을 보였다. 그러나, RI와 MA의 가수분해속도상수 값은 각각 0.1141/d, 0.2548/d를 보여 rumen 미생물을 이용한 산생성 반응이 중온산생성균보다 약 2배 이상 빠르게 진행되었음을 알 수 있었다. 또한, 이 값은 Owen등(1992)이 보고한 도시폐기물, yard waste, 종이류 및 포장지의 가수분해속도상수

Table 2. Comparison of ultimate VFA yield and hydrolysis constant on the RI and MA

content	ultimate VFA yield(meq/g VS)	hydrolysis constant, k(d1)	correlation coefficient(r)
RI	8.32	0.2548	0.978
MA	8.48	0.1141	0.956

값인 0.072-0.075/d, 0.035-0.084/d, 0.058-0.136/d(8)보다 큰 값으로 주방폐기물의 생분해가 비교적 빠르게 진행됨을 보였으며, 적절한 혐기성처리 공정의 개발시 메탄회수능이 우수함을 알 수 있다.

### 3.2 Rumen 미생물을 이용한 산생성 반응의 환경인자

#### (1) 기질농도

Rumen 미생물을 이용한 주방폐기물의 가수분해 및 산생성 반응에 대한 기질농도의 영향을 TS 1-15%의 범위에서 평가하였다. Fig. 3은 반응시간에 따른 고형물농도(TS(%))의 함수로서 pH의 변화를 보여주고 있다. 반응이 진행됨에 따라 TS 1%인 반응조의 pH는 초기 6.9에

서 점차 증가하여 7.6 내외로 유지가 되었으며, TS 5%는 초기 pH 6.9에서 큰 변화 없이 일정하였다. 반면, TS 10%와 15%인 반응조의 pH는 배양 3일 이내에 급격한 휘발산의 생성으로 큰폭의 감소를 보였으며, 배양 10일 이내에 각각 4.3과 4.2로 감소하였다.

Fig. 4는 고형물농도에 따른 휘발산 농도의 시간적인 변화를 보여준다. TS 15%인 반응조의 휘발산농도는 그림에서 보는 바와 같이 배양 6일 경에 약 480 meq VFA/L의 높은 농도에 도달하였으나 그 이후는 큰 증가없이 비교적 일정하게 유지되었다. 이것은 낮은 pH 및 이로 인한 비이온화된 휘발산이 반응을 저해시켰기 때문인 것으로 사료된다. TS 10%인 반응조의

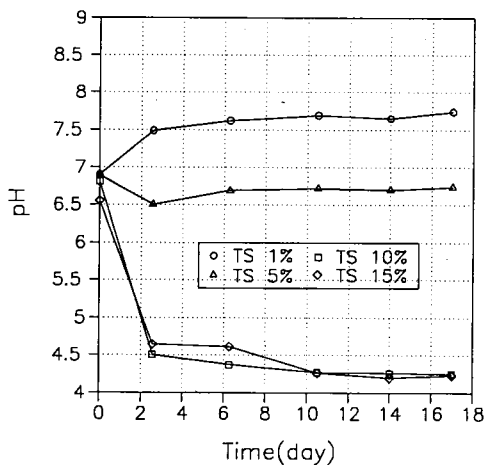


Fig. 3. pH changes of different initial TS(%) in rumen batch reactors.

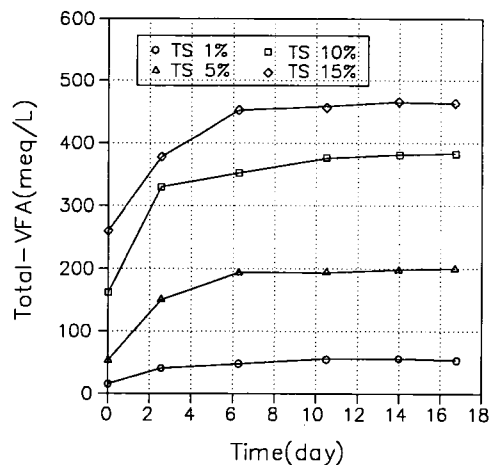


Fig. 4. Cumulative VFA production with different TS(%) in rumen batch reactors.

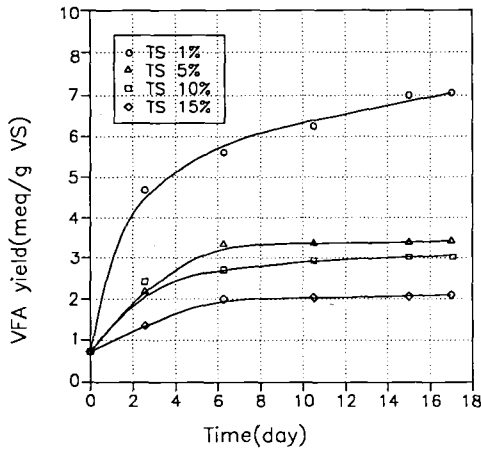


Fig. 5. VFA yields with different TS(%).

VFA는 약 390 meq VFA/L에서 유지되었다. Fig. 5는 고형물 농도별 휘발산 수율의 변화를 보여주는 그림이다. TS 1%의 경우 반응조 운전 약 15일경까지 휘발산 수율이 계속 증가하여 8 meq VFA/g VS 값을 보였으나, TS 10% 및 TS 15%인 반응조는 모두 반응 약 2일부터 급격한 pH의 저하로 인하여 15일째 휘발산의 수율은 각각 4.12 meq VFA/g VS, 3.15 meq VFA/g VS로서 낮은 수치를 보였다.

이에 반해 TS 5%인 반응조는 pH가 6.8 정도로 비교적 일정하게 유지되었으나 약 200 meq VFA/L의 휘발산농도에서 비이온화된 VFA에 의해 반응이 지체되어 TS 1%에 비하여 낮은 수율을 보였다. 따라서, rumen 미생물을 이용한 산생성 반응에서 고형물의 농도는 반응조의 pH 및 생성물의 저해작용과 밀접한 관계를 가지므로 유출수의 계속적인 희석이 무엇보다 중요함을 알 수 있다.

(2) PH

rumen 미생물을 이용한 가수분해 및 산생성반응의 효율에 대한 pH의 영향을 평가하기 위하여 TS 1%인 회분식 반응조의 초기 pH를 4.3, 5.4, 6.5, 7.0, 7.5, 8.0으로 각각 조절한 뒤 배양하였다. 이때 산형성 반응의 진행에 따른 pH 변화, 산성화분율, 가수분해속도 등이 평가되었다. Fig. 6은 각 반응조의 배양 시간에 따른 pH 변화를 보여주고 있다. 초기 pH가 4.3인 반응조는 배양 3일 이후 pH 값이 4.5에서 4.9 사이로 유지 되었으며, 초기 pH 5.5인 반응조의 경우는 전 배양 기간동안 비교적 일정하게 유지 되었다. 그외에 초기 pH가 6.5 이상인 4개의 반응조는 반응이 진행됨에 따라 pH 값이 조금씩 증가 또는 감소하여 7.2에서 7.8 사이의 값을 유지하였다.

Fig. 7은 초기 pH의 함수로서 시간에 따른 휘발산 농도의 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 보면 초기 pH 5.4 이하의 낮은 pH에서는 배양 18일째 35 meq

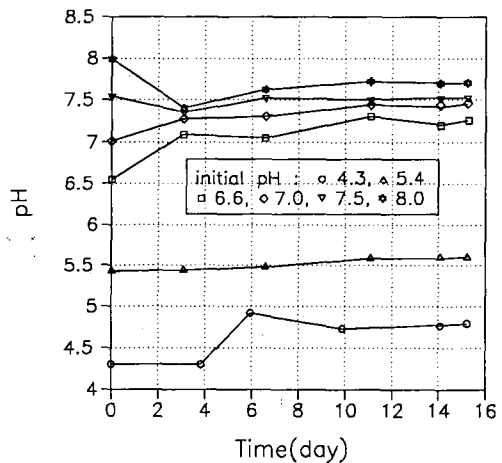


Fig. 6. pH changes with various initial pH in batch reactors.

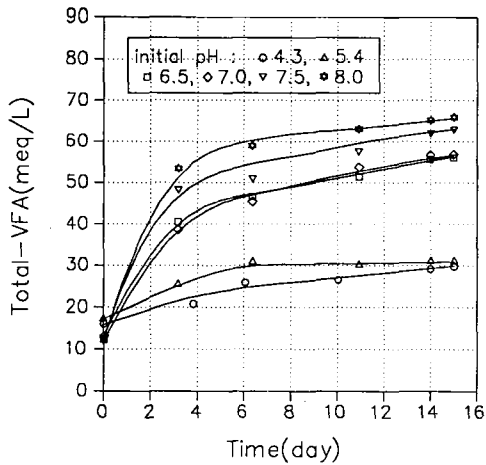


Fig. 7. Cumulative VFA production at different initial pH.

VFA/L 이하의 낮은 휘발산 농도를 보여 산생성 반응이 지체되었음을 알 수 있다. 그러나 초기 pH 값이 8.0까지 증가함에 따라 산생성 반응속도가 점차 빨라지고 산생성반응의 진행정도를 나타내는 산성화분율이 크게 증가하여 초기 pH 6.5인 반응조에서 배양 18일째 휘발산 농도는 58 meq VFA/L였으며, 초기 pH 8.0인 반응조에서는 66 meq VFA/L의 휘발산농도 값을 보였다.

이와 같이 산생성 반응에 대한 pH의 영향을 반응속도론적으로 해석하기 위하여 산

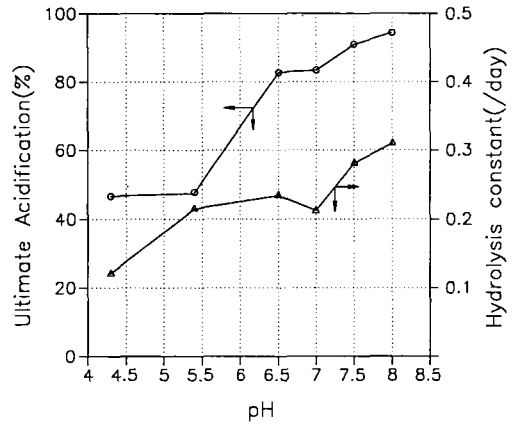


Fig. 8. Ultimate acidification and hydrolysis constant as a function of initial pH.

생성반응을 기질농도에 대한 1차반응으로 가정하여 계산한 최종휘발산수율과 가수분해속도상수는 Table 3과 같다. Fig. 8은 Table 3의 휘발산수율로부터 계산된 최종 산성화분율과 가수분해속도상수의 변화를 초기 pH의 함수로 보여 주고 있다. 이 그림에서 보면 최종산성화분율은 초기 pH 5.4 이하에서 50% 이하의 낮은 값을 보였으나, 초기 pH가 6.5~8.0 사이일 때는 약 88~97%까지 증가한 것을 볼 수 있다. 가수분해속도상수는 초기 pH 4.3인 반응조에서 0.121/d의 낮은 값을 보이고 있으나,

Table 3. Ultimate VFA yield and hydrolysis constant for various pH in batch reactors

pHi	pHf	ultimate VFA yield	k(d <sup>-1</sup> )	r	pHi	pHf	ultimate VFA yield	k(d <sup>-1</sup> )	r
4.3	4.80	4.14	0.121	0.975	7.0	7.44	7.93	0.212	0.990
5.4	5.60	4.24	0.215	0.996	7.5	7.52	8.23	0.281	0.986
6.5	7.20	7.84	0.234	0.981	8.0	7.71	8.58	0.310	0.988

pHi & pHf : initial and final pH, k : hydrolysis constant, r : correlation coefficient



초기 pH 5.4~7.0의 범위에서는 약 0.22/d의 값을 보이며, 초기 pH 값이 7.5 이상 증가했을 때 가수분해속도상수는 크게 증가하여 초기 pH 8.0에서 0.310/d 라는 높은 수치를 보였다. 이상과 같은 결과로부터 rumen 미생물에 의한 주방폐기물의 산형성반응에 관련되는 효소의 활성은 pH 5.4에서 8.0 사이의 범위에서 큰 변화없이 유지되지만, pH 5.4에서의 낮은 최종산성화분율등을 두고볼 때 6.0 이하의 낮은 pH에서 rumen 미생물군 종의 다양성이 감소한 것으로 추측할 수 있으며, 초기 pH 7.5 이상의 범위에서 큰 산생성효율을 보이는 것은 높은 pH에서 수산화기(OH)의 작용으로 주방폐기물을 구성하는 셀룰로즈, 리그닌등의 고분자물질들이 팽윤(swelling)되어 효소와 기질의 효과적인 접촉을 유도했기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 적절한 pH 조절이 rumen 미생물을 이용한 산생성 반응의 효율에 대단히 중요한 영향을 미치며, pH 6.0 이상에서 주방폐기물의 효율적인 산생성반응이 가능함을 알 수 있었다.

(3) 온도

rumen 미생물에 의한 주방폐기물의 가수분해 및 산생성반응에 대한 온도의 영향을 평가하기 위하여 수행한 회분식 실험에서 각 회분식 반응조의 pH는 반응이 진행함에 따라 초기 6.5에서 점차 증가하여 운전 16일째 7.5 내외를 유지하였다. Fig. 9는 시간에 따른 휘발산농도의 변화를 보여주고 있다. 운전 16일째 휘발산농도는 37~45°C에서 운전 반응조의 경우 61-63 meq VFA/L로 비교적 큰 값을 보였으나 25°C에서 배양한 반응조는 약 56 meq VFA/L, 55°C에서 운전한 반응조의 경우 약 54 meq VFA/L의 낮은 값을 보였다. Fig. 10은 온도

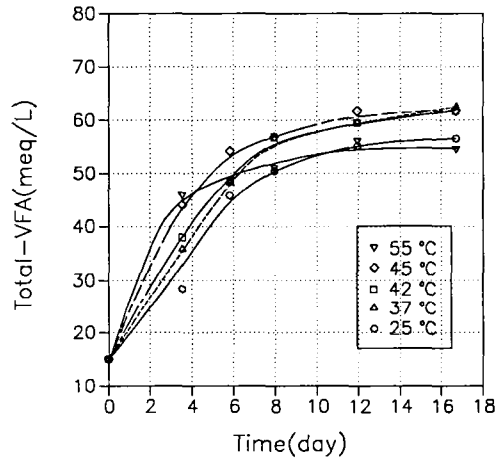


Fig. 9. Cumulative VFA production versus time as a function of temperature.

에 따른 가수분해속도상수와 최종휘발산수율을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 25°C에서부터 55°C까지 반응온도가 증가함에 따라 최종산성화분율 및 가수분해속도상수는 반응온도 약 40°C 부근에서 그 변화량이 크게 변하는 변곡점을 보였다. 이와같은 가수분해속도에 대한 온도의 영향을 식(6)과 같이 Arrhenius 식에 의하여 평가하였다.

$$\ln k = \ln k_0 - E/(RT) \dots\dots\dots (6)$$

여기서,

k = hydrolysis constant ((d<sup>-1</sup>))

k<sub>0</sub> = frequency factor

E = activation energy (cal/mol)

R = ideal gas constant (1.987cal/mol/K)

T = absolute temperature (K)

이때 변곡점온도 전후의 활성화에너지 (E)는 각각 25~42°C에서 1320 cal/mol, 42~55°C에서는 9604 cal/mol이었다. 따라서, 가수분해속도상수는 25°C의

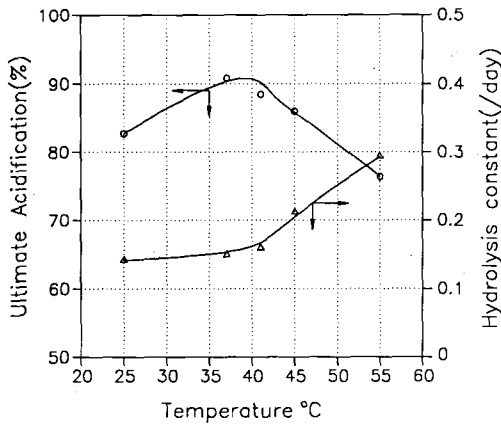


Fig. 10. Ultimate acidification and hydrolysis constant as a function of temperature.

0.141/d에서 42°C의 0.2548/d로 증가하여 온도증가에 따른 증가량이 비교적 작았으나, 42°C 이상의 고온 영역에서는 반응온도 1°C 증가에 따라 가수분해속도상수는 0.014/d씩 증가하여 55°C에서는 0.294/d라는 높은 값을 보였다. 최종휘발산수율로부터 계산한 최종산성화분율은 반응온도 25°C에서 82%, 55°C에서 76.4%였다. 그러나, 35~45°C에서 최종산성화분율은 86~90.7%로 큰 값을 보였다. 이와 같은 결과는 주방폐기물의 분해에 관한 rumen 미생물종의 다양성이 증가한 반면, 37°C 이하에서는 미생물종의 다양성 및 가수분해효소의 활성이 저조하였고, 45°C 이상의 온도에서는 미생물 종의 다양성이 상당히 감소하지만 효소의 활성이 증가하였기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, rumen 소화조의 최적운전 온도범위는 35~45°C의 범위인 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

Rumen 미생물에 의한 주방폐기물의 혐기성분해 반응에서 율속단계로 인식되는 가수분해 및 산생성반응을 촉진시켜 혐기성 소화효율을 증진시키기 위한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. Rumen 미생물을 이용한 주방폐기물의 산생성 반응에서 최종휘발산 수율은 약 8.4 meq VFA/g VS로 중온 산생성균에 의한 것과 비슷한 값을 보였으나, 가수분해 속도상수는 각각 0.2548/d, 0.1141/d로서 rumen 미생물을 이용하였을 때 가수분해 반응이 약 2배 빠르게 진행되었다.

2. Rumen 소화조의 가수분해 및 산생성반응에 대한 기질 농도의 영향에서는 TS 15%에서 480 meq VFA/L를 얻었으나 휘발산 수율은 급격한 pH 저하 및 비이온화된 VFA 등의 저해작용으로 TS 1%인 반응조에서의 절반 이하의 값을 보였다. 따라서, rumen 소화조에서 효율적인 산생성 효율을 얻기 위해서는 생성된 휘발산의 연속적인 희석이 중요함을 알 수 있었다.

3. Rumen 산생성 반응에서 최종산성화분율은 pH 5.4 이하에서 50% 이하의 낮은 값을 보였으나, pH 5.5~8.0 사이에서는 88~97%의 값을 보였다. 가수분해속도상수는 pH 5.4에서 0.121/d였으나 pH에 따라 점차 증가하여 pH 8.0에서 0.310/d였다. 따라서, 경제성등을 고려한 rumen 소화조의 최적 pH는 6.0~7.5로 평가되었다.

4. Rumen 산형성반응에 대한 온도의 영향에서 가수분해상수는 25°C의 0.141/d에서 온도에 따라 점차 증가하여 42°C에 0.2548/d, 55°C에 0.294/d를 보였으나, 최종

휘발산수율에 있어서는 37~45°C의 온도영역에서 7.6~8.0 meq VFA/g VS로 가장 큰 값을 보였다. 따라서, rumen 온도범위는 35~45°C 범위인 것으로 평가되었다.

5. 이상과 같은 결과로부터 rumen 미생물을 주방폐기물의 혐기성소화 공정에 이용할 경우 혐기성 반응의 율속단계로 고려되는 가수분해 및 산생성 반응을 촉진 시킬 수 있어 반응조의 용적감소 및 유기물부하증가 등 공정의 효율증진에 효과적임을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- 1) 구자공, 1992. 생분해성 쓰레기의 대체에너지 전환 방안에 관한 연구. 한국과학기술원.
- 2) 신항식, 1992. 생분해성 주방폐기물의 혐기성 소화공정 개발에 대한 연구. 코오롱엔지니어링.
- 3) 환경처, 1992. 전국일반폐기물처리실적('91) 및 계획('92).
- 4) Dinopoulou G., Sterritt, R.M. and Lester, J.N. 1988, Anaerobic acidogenesis of a complex wastewater: I. The influence of operational parameters on reactor performance. *Biotech. & Bioeng.*, Vol.31, 958-968.
- 5) Gijen, H.J., Zwart, K.B. van Gelder, P.T. and Vogels, G.D. 1986. Continuous cultivation of Rumen microorganisms, a system with possible application to the anaerobic degradation of lignocellulosic waste materials. *Appli. Micro. Biotech.*, Vol.25, 155-162.
- 6) Gijen, H.J., Schoenmakers, T.J.M. Caerteling, C.G.M. and Vogels, G. D. 1988. Anaerobic degradation of paper mill sludge in a two-phase digestion containing rumen microorganisms and colonized polyurethane foam. *Biotechnology Letter*, Vol.10, 61-66.
- 7) Muller, H.W. and Trosch, W. 1986. Screening of white-rot fungi for biological pretreatment of wheat straw for biogas production, *Appli. Micro. Biotech.*, 24, 180-185.
- 8) Owen, J.M. and Chynoweth, D.P. 1992. Biochemical methane potential of MSW components, In *Proceedings of the International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*. Eds. F. Cecchi, J. Mata-Alvarez, and F.G. Pohland, pp. 29-42. Venice, Italy.
- 9) Shelton, D.R. and Tiedje, J.M., 1984, General method for determining anaerobic biodegradation potential. *Appl. and Environ. Microbiol.*, 47, 850-857.
- 10) Shin, H.S., Song, Y.C, and Jun, K.S, 1992. pretreatment processes for enhanced anaerobic digestion of food waste. In *Proceedings of International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*. Eds. F. Cecchi, J. Mata-Alvarez, and F. G. Pohland, pp. 451-454. Venice, Italy.