



ORAL PRESENTATION

논문

음식물쓰레기의 구성성분에 따른 산발효조의 거동특성

한선기, 신향식, 김상현, 김현우

한국과학기술원 건설 및 환경공학과
(2002년 6월 18일 접수, 2002년 6월 24일 채택)

Effect of waste components on performance of acidogenic fermenter

Sun-Kee Han, Hang-Sik Shin, Sang-Hyoun Kim, Hyun-Woo Kim

Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon

ABSTRACT

The previous studies showed that rumen microorganisms had an enhanced waste-degrading capability and controlling the dilution rate was very effective in improving acidification efficiency. Generally the composition of food waste has a small deviation value, but one of the waste components (grains, vegetables or meats) can be increased dramatically depending on a seasonal variation. Thus, it is important to evaluate the efficiency of acidogenic fermentation in this case. Each component was spiked to be 80% of the total waste in R1 (grains), R2 (vegetables), and R3 (meats). In R1, rapid degradation occurred during the initial two days. R2 showed similar performance to that of general food waste. In R3, degradation retarded in the initial stage and then increased after controlling the dilution rate. The acidification efficiencies of the reactors were 88.7 (R1), 73.5 (R2), and 62.1% (R3), respectively. Therefore, the fermentation efficiency was kept over 62% regardless of waste components, indicating that it was stable to acidify food waste by employing rumen microorganisms and controlling the dilution rate.

Key Words : Acidogenic fermentation, Rumen microorganisms, Controlling the dilution rate, Food waste, Waste components

초록

이전의 연구에서 루멘미생물을 뛰어난 활성을 보여주었고, 희석율의 적절한 조절은 산발효 효율을 크게 증가시켜 주었다. 그러나 배출되는 음식물쓰레기는 일반적으로 그 구성성분비가 상대적으로 큰 편차를 갖지 않는 일정한 범위의 값을 보여주지만, 계절에 따라 특정한 음식을 많이 섭취하는 날에는 육류가 대부분인 음식물쓰레기가 배출된다든지, 혹은 곡류나 야채류가 대부분인 음식물쓰레기가 배출되는 경우가 발생한다. 따라서 이런 경우에도 루멘미생물을 이용한 희석율의 조절이 적절한 산발효 효율을 유지할 수 있는지 평가해 보는 것은 중요하다. 본 연구에서는 음식물쓰레기의 각 성분(곡류, 야채류, 육류)을 전체 기질의 80%로 주입한 후 실험을 실시하였다. 곡류가 주인 경우에는 초기 2일 동안 그 분해가 주로 일어났으며, 야채류가 주인 경우에는 일반적인 음식물쓰레기를 처리하는 경우와 가장 유사한 거동특성과 효율을 보였고, 육류가 주인 경우에는 초기에는 분해가 지체되다가 희석율의 조절 이후 그 분해가 활발히 이루어졌다. 처리효율은 구성성분 중 곡류, 야채류, 육류가 주인 반응조에서 88.7, 73.5, 62.1%의 값을 얻을 수 있었다. 그러므로 구성성분비의 조절에도 불구하고 최소 62% 이상의 효율을 보여주었기 때문에, 루멘미생물을 이용한 산발효가 음식물쓰레기의 구성성분비에 관계없이 매우 안정된 처리효율을 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

주제어 : 산발효, 루멘미생물, 희석율 변화, 음식물쓰레기, 구성성분

1. 서 론

음식물쓰레기는 부폐성이 큰 특성으로 인해 수집 및 운반, 매립에 있어 부폐, 악취, 침출수 발생 등의 여러가지 환경문제를 유발하고 있지만, 다른 한편으로는 타 생물의 영양원이나 대체에너지원으로 이용될 수 있는 잠재력을 가지고 있어 적절한 기술을 이용한 음식물쓰레기의 자원화는 천연자원의 소비를 감소시켜 환경보전에 큰 기여를 할 수 있다.

1999년 현재 음식물쓰레기 발생량은 일일 11,577톤으로서 생활폐기물 발생량 일일 45,614톤의 25.4%라는 상대적으로 높은 점유비율을 유지하고 있는데, 1996년 11월 수도권 매립지의 음식물쓰레기 반입제한 이후 음식물쓰레기에 대한 국민적 관심이 고조됨에 따라, 음식물쓰레기를 원천적으로 줄이면서 최대한 자원화하기 위한 ‘음식물쓰레기 줄이기 종합대책’이 1996년 12월 5일 환경보전위원회에서 확정되었고, 1998년 9월에는 ‘음식물쓰레기 자원화 기본계획’을 마련하여 2002년까지 음식물쓰레기의 총 배출량을 10% 이상 감소시키는 방안과 배출된 총량의 60% 이상을 자원화하기 위한 방안을 마련하여 추진하여 1999년 음식물쓰레기 발생량의 33.9%를 사료·퇴비 등으로 재활용하고 있다¹⁾.

자원화 기술에는 호기성퇴비화, 사료화, 열분해, 혼기성 소화 등과 다양한 방법들이 있으나, 이 중에서도 부피감량이 뛰어나고 대체에너지를 회수할 수 있는 혼기성소화가 최근 커다란 주목을 받고 있다. 음식물쓰레기와 같은 고형 폐기물을 율속단계(rate-limiting step)가 산발효이기 때문에 상분리를 통하여 산발효 및 메탄발효를 각각 최적화 시켜 주는 것이 바람직하다. 이미 신 등(2000)²⁾은 음식물쓰레기의 약 50%를 야채류가 차지하고 있기 때문에 가장 효율적이면서도 경제적인 방법은 셀룰로우스 분해능력이 뛰어난 루멘미생물을 식종균으로 이용하는 것이라고 보고 한 바 있으며 이는 중온 산발효균의 효율(59.5%)과 비교했을 때 1.2배의 향상된 효율(71.2%)을 보여주었다. 또한

적절한 희석율의 조절($3.0 \rightarrow 1.0 \text{ d}^{-1}$)을 통하여 효율을 81.1%까지도 향상시킬 수 있음을 보여주었다³⁾.

배출되는 음식물쓰레기는 일반적으로 그 구성성분비가 상대적으로 큰 편차를 갖지 않는 일정한 범위의 값을 보여준다⁴⁾. 하지만 계절에 따라 특정한 음식을 많이 섭취하는 날에는 육류가 대부분인 음식물쓰레기가 배출된다든지, 혹은 곡류나 야채류가 대부분인 음식물쓰레기가 배출되는 경우가 발생한다. 따라서 이런 경우에도 앞서 보고된 루멘미생물을 이용한 희석율의 조절이 적절한 효율을 유지할 수 있는지 평가해 보는 것이 필요하다.

그러므로 본 논문은 음식물쓰레기의 산발효시 곡류, 야채류, 육류의 구성성분이 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 시료의 성상

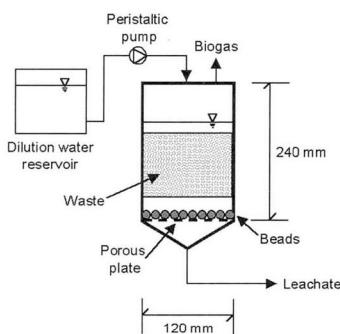
음식물쓰레기는 학교 내 구내식당으로부터 채취하여 동물의 뼈와 조개류를 제거한 후 사용하였는데, 임의로 곡류, 야채류, 육류를 각각 80%로 조절하였다. [Table 1]은 구성성분비, 함수율, VS/TS, 밀도와 같은 음식물쓰레기의 특성을 보여주고 있으며, 한편 Na^+ 의 농도는 1.0–1.5 g/L 이었고, 입자크기는 곡류, 야채류, 육류가 각각 10, 25, 15mm 이하였다.

2.2 실험장치

본 실험에 이용된 leaching bed 반응조는 [Fig. 1]에서 보는 바와 같이 직경이 120 mm, 높이가 240 mm로서 총 부피는 2.7L, 유효부피는 2.0L이다. 희석수는 연동식 (peristaltic) 펌프를 이용하여 연속적으로 공급되며, 하부에는 침출수를 효과적으로 수집하기 위한 다공판과 bead 가 설치되었다. 발생되는 바이오가스는 wet gas meter에 의해서 측정이 되었으며, 반응조의 온도는 37°C로 유지되었다.

[Table 1] Characteristics of Food Waste

Run	Composition (%) (Grains : Vegetables : Meats)	Water content (%)	VS/TS	Bulk density (kg/m ³)
R1	80.0 : 10.0 : 10.0	74.1	0.97	720.3
R2	10.0 : 80.0 : 10.0	86.5	0.94	650.1
R3	10.0 : 10.0 : 80.0	66.0	0.92	644.7



[Fig. 1] Schematic diagram of the experiment leaching bed reactor

2.3 식종균

루멘 미생물은 소의 위(rumen)로부터 그 액을 채취한 다음 이물질을 체로 걸러 낸 후 사용하였다. [Table 2]는 pH, alkalinity, VSS/TSS와 같은 루멘미생물의 특성을 보여주고 있다.

[Table 2] Characteristics of Inoculum

Parameters	Rumen microorganisms
pH	6.4
Alkalinity (g/L as CaCO ₃)	4.3
VSS/TSS	0.61

2.4 실험조건

실험조건은 [Table 3]에서 보는 바와 같다. 먼저, 앞선 연구^{2,3)}의 결과로부터 루멘미생물을 식종균으로 이용하였으며, 초기 희석율은 3.0 d⁻¹로 유지시키고 이를 후에는 1.0 d⁻¹으로 희석율을 조절하여 실험을 실시하였다. 루멘 미생물(5% v/v)의 식종 후, 6시간동안 순응기간을 가진 후 희석수가 공급되었는데 희석율의 적절한 변화를 통하여 최적의 산발효 환경을 유지하도록 하였다. 이때 희석율은 다음과 같이 정의된다: 희석율 (D rate; d⁻¹) = 1 / θ (수

리학적 체류시간; d) = Q (희석수의 유량; L/d) / V (반응 조 유효부피; L).

2.5 분석방법

유기산은 gas chromatography(GC; Hewlett Packard model 5890A)를 이용하여 측정하였으며, 가스 발생량은 wet gas meter를 이용하였고 가스성분은 thermal conductivity detector(TCD)가 정착된 GC(GowMac series 580)를 이용하였다. Protozoa count 시료는 0.4ml 37% formaldehyde로 고정시켰으며, Reichert MeF inverted microscope를 이용하여 측정하였다⁵⁾. 그리고 TS, VS, TSS, VSS, 알칼리도, pH 및 COD와 같은 항목은 Standard Methods⁶⁾에 준하여 측정하였다.

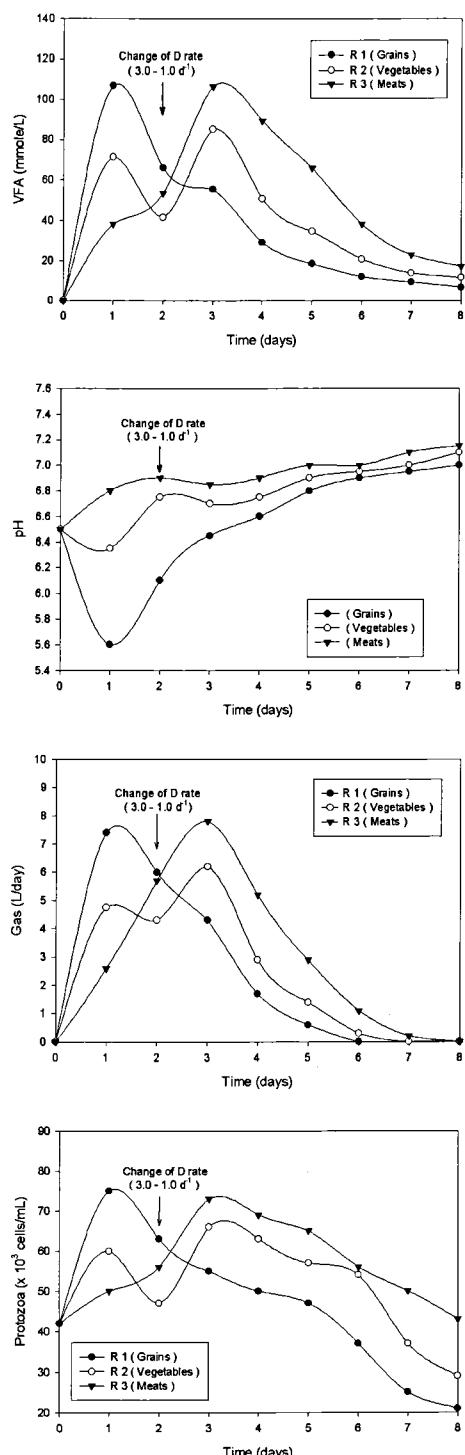
3. 실험결과 및 고찰

3.1 유기산, pH, 가스발생 및 원생동물의 수 (protozoa population)

[Fig. 2]는 희석율 값의 조절에 따른 산발효조의 유기산, pH, 가스발생 및 원생동물 수의 변화를 보여주고 있다. R1의 유기산 peak는 운전 하루만에 발생하였고, pH는 5.6까지 감소한 후 점차 회복하였다. 이는 곡류 성분의 생분해도가 높기 때문에, 곡류의 산화(acidification)에 기인한다. pH 5.0이하에서 200 mmol/L 이상의 유기산이 발생될 경우 심한 저해가 일어난다는 보고가 있는데⁷⁾, 본 실험의 경우 유기산의 peak가 하루만에 발생하였지만 그 값(106.9 mmol/L)과 pH는 적절한 범위를 초과하지 않았다. R2의 경우는 희석율의 변화 전후로 2개의 peak가 관찰되었으며, pH는 6.4~7.0의 값이 유지되었다. 셀룰로우스 성분은 체류시간이 증가할수록 그 분해가 증가하기 때문에⁸⁾, 두 번째 유기산의 peak는 적절한 희석율의 조절로 야채류의 분해가 향상된 것임을 알 수가 있으며 이는 유기산의 조성(Fig. 3)에서 다시 확인할 수 있다. R3의 유기산은 초기에 육류 분해의 지체로 그 값이 크지 않았으나 희

[Table 3] Experimental Conditions

Reactor	R1	R2	R3
Inoculum	Rumen microorganisms		
Dilution rate (d ⁻¹)	3.0 → 1.0 d ⁻¹		
Main component	Grains	Vegetables	Meats



[Fig. 2] Variation of VFA, pH, gas production and protozoa population during acidogenic fermentation

폐기물자원화, 제10권, 제2호, 2002

석울의 조절이 있은 그 다음날(3일째)에 peak가 관찰되었다. pH값이 상대적으로 높게 유지된 것은 발생한 암모니아에 기인한다. 단백질은 체류시간의 증가 및 증성 pH로의 근접에 따라 그 분해가 증가하기 때문에⁹, 두 번째 유기산의 peak는 육류의 분해가 향상된 결과로 발생한 것임을 알 수가 있으며 이 역시 유기산의 조성(Fig. 3)에서 확인할 수 있다. 가스의 발생과 원생동물의 수는 유기산의 발생과 유사한 경향을 보여주었는데, R2와 R3의 경우 3일째의 가스발생 및 원생동물 수의 증가는 희석율의 조절에 따른 미생물의 환경조건이 호전되었음을 나타내 주고 있다.

이와 같이 반응조마다 peak의 발생시점과 그 수가 다른 것은 음식물쓰레기의 구성성분이 각기 다른 분해 특성을 가지고 있음을 보여준다. 첫째날과 셋째날에 peak가 발생한 R2가 일반적인 음식물쓰레기를 처리하는 반응조와 가장 유사한 거동을 보여주었다⁹.

3.2 유기산의 조성

[Fig. 3]는 희석율 조절에 따른 산발효조의 거동에 있어서 각 유기산의 조성이 어떻게 변화되었는지를 보여주고 있다. R1의 경우에는 뷔틸산이 가장 많이 발생하였는데, 이는 초기부터 곡류의 빠른 분해에 기인한다. 전분의 분해 시 짹수개의 탄소를 가진 유기산(초산과 뷔틸산)이 주로 발생하며 특히 희석율이 큰 경우 뷔틸산의 발생이 두드러진다고 알려져 있다⁹. R2에 있어서는 야채류의 분해로 초산의 값이 가장 높았는데, Noike 등(1985)은 셀룰로우스의 분해시 초산이 두드러진다고 보고하였다¹⁰. R3에 있어서는 초산이 가장 높은 값을 보여주었는데, 초산 이외에 프로피온산과 발레르산의 생성이 R1과 R2에 비교했을 때 두드러졌다. 이는 단백질의 분해시 프로피온산, 발레르산 그리고 초산의 발생이 두드러진다는 결과와 일치한다⁹.

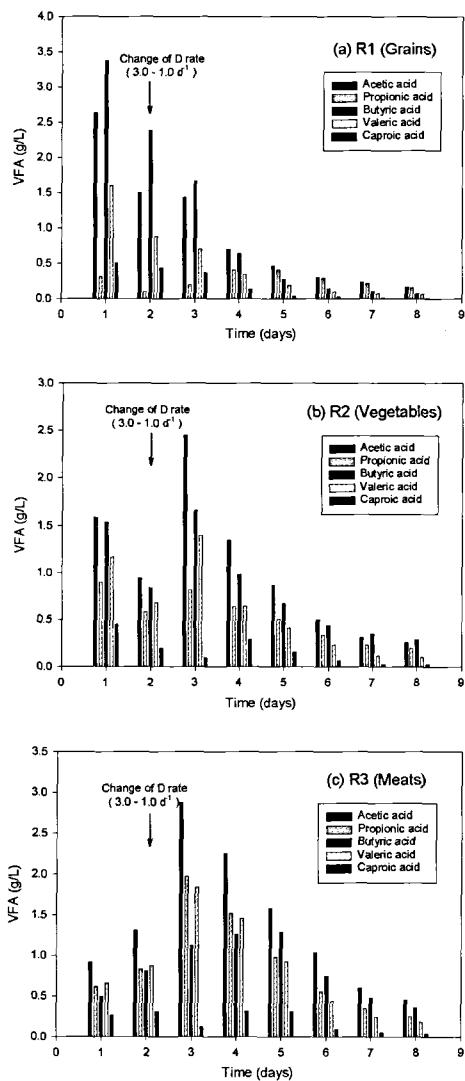
3.3 산발효 효율

산발효 효율은 기질의 이론적인 유기산 발생량에 대한 실제 유기산 발생량의 비로서 평가되었다.

$$\text{acidification (\%)} = \frac{VFA_p}{VFA_t} \times 100 \quad (i)$$

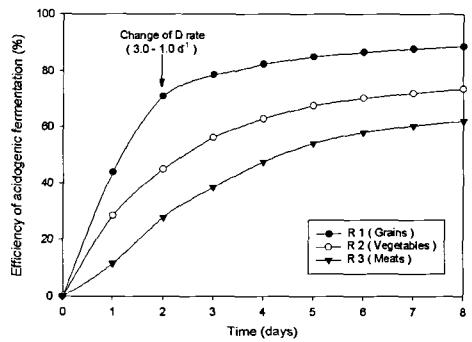
여기서, VFA_t : 기질의 이론적인 유기산 발생량, g COD

VFA_p : 임의의 산발효 시간에 발생한 실제 유기산의 양, g COD



[Fig. 3] Variation of individual VFAs during acidogenic fermentation

[Fig. 4]은 산발효 효율을 보여주고 있다. R1, R2 및 R3에 기질로 이용된 음식물쓰레기의 이론적인 유기산 발생량(VFA_t)은 각각 185.6($= 175.3\text{g VS} \times 1.06\text{g COD/g VS}$), 196.1($= 175.3\text{g VS} \times 1.12\text{g COD/g VS}$) 그리고 229.4g COD($= 175.3\text{g VS} \times 1.31\text{g COD/g VS}$)이었으며, 8일째까지 발생한 실제 유기산의 양(VFA_p)은 각각 164.7, 144.2, 142.4g COD였다. 따라서 식(i)를 이용한 효율은 각각 88.7(R1), 73.5(R2), 62.1%(R3)로 일반적인 음식물쓰레기를 처리하는 반응조의 효율(81.1%)⁹과 비교



[Fig. 4] Efficiencies of acidogenic fermentation

하였을 때, 임의로 구성성분비를 각각 최대 80%까지 조절하였음에도 불구하고 그 차이가 크지 않은 최소 62%의 효율을 보여주었다. 이것은 루멘미생물을 이용한 산발효가 음식물쓰레기의 구성성분비에 관계없이 매우 안정된 처리효율을 유지할 수 있음을 보여준다.

3.4 속도상수

미생물이 기질을 분해함에 있어서, 미생물의 성장이 아닌 기질의 이용이 율속으로 작용할 때, 그 분해작용은 1차식에 의해서 나타내어질 수 있다¹⁰.

$$\frac{VFA_t - VFA_p}{VFA_t} = \exp(-kt) \quad (ii)$$

여기서, VFA_t : 기질의 이론적인 유기산 발생량, g

COD

VFA_p : 임의의 산발효 시간에 발생한 실제 유기산의 양, g COD

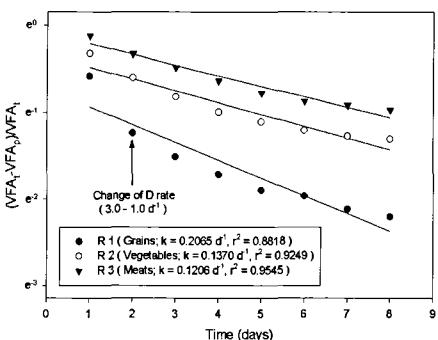
t : 산발효 시간, d

식 (ii)를 이용한 R1, R2 및 R3의 1차속도 상수는 [Fig. 5]에서 보는 바와 같이 각각 0.2065, 0.1370 and 0.1206 d^{-1} 였다. 한편, 일반적인 음식물쓰레기를 처리하는 반응조의 1차속도상수는 0.1968 d^{-1} 였다⁹.

4. 결 론

음식물쓰레기의 산발효시 음식물쓰레기 구성성분비의 영향을 살펴보았으며, 그 결론은 다음과 같다.

1. 음식물쓰레기의 각 구성성분(곡류, 야채류 및 육류)은 pH, 유기산의 peak, 유기산의 조성, 가스발생 등을 통하여 각기 다른 분해특성을 명확하게 보여주었다.



(Fig. 5) First order rate constants of acidogenic fermentation

2. 곡류가 주인 경우는 초기 2일 동안 그 분해가 주로 일어났으며, 그 이후에는 추가적인 분해만이 발생하였다. 처리효율은 88.7%로 가장 높았고, 이 때의 1차속도 상수값은 0.2065 d^{-1} 였다.

3. 야채류가 주인 경우는 일반적인 음식물쓰레기를 처리하는 경우와 가장 유사한 거동특성과 효율을 보였는데, 희석율의 조절 전후로 미생물의 분해작용이 활발하였다. 처리효율은 73.5%로 두번째였으며, 이 때의 1차속도 상수값은 0.1370 d^{-1} 였다.

4. 육류가 주인 경우에는 분해가 지체되다가 희석율의 조절 이후 그 분해가 활발히 이루어졌다. 처리효율은 62.1%로 가장 낮았고, 이 때의 1차속도 상수값은 0.1206 d^{-1} 였다.

5. 임의로 그 구성성분비를 조작하였음에도 불구하고 각 구성성분에 관계없이 최소 62%의 처리효율이 유지되었기 때문에, 루멘미생물의 식종과 적절한 희석율의 변화는 안정된 음식물쓰레기의 처리 효율을 유지할 수 있는 적절한 방안으로 평가되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 산학협력연구(No.95-1-13-01-01-3)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- MOE, "Homepage of Ministry of Environment (<http://www.me.go.kr>)," (2000).
- Shin, H. S., Han, S. K., Song, Y. C., and Lee,

C. Y. "Enhanced acidogenic fermentation of food waste (I) : Effect of seed inoculation," J. of KOWREC, Vol. 8, No. 3, pp. 112-117(2000).

- Shin, H. S., Han, S. K., Song, Y. C., and Lee, C. Y. "Enhanced acidogenic fermentation of food waste (II) : Effect of controlling dilution rate," J. of KOWREC, , Vol. 8, No. 3, pp. 118-123(2000).
- Shin, H. S. and Han, S. K. "Anaerobic digestion treatment of food waste," Vol. 8, No. 2, pp. 7-13(2000).
- Gijzen, H. J. "Anaerobic digestion of cellulosic waste by a rumen derived process," Ph D Thesis, Univ. of Nijmegen (The Netherlands)(1987).
- APHA, "Standard methods for the examination of water and wastewater," 18th Ed., Amer. Public Health Assoc., Washington, D. C., U.S.A.(1992).
- Song, Y. C. "High-rate methane fermentation of the organic solid waste," Ph D Thesis, Dept. of Civil Engineering, KAIST(1995).
- Noike, T., Endo, G., Chang, J., Yaguchi, J., and Matsumoto, J. "Characteristics of carbohydrate degradation and the rate-limiting step in anaerobic digestion," Biotech. Bioeng. 27, pp.1482-1489(1985).
- Breure, A. M., Mooijman, K. A., and van Andel, J. G. "Protein degradation in anaerobic digestion: influence of volatile fatty acids and carbohydrates on hydrolysis and acidogenic fermentation of gelatin," Appl. Microbiol. Biotechnol. 24, pp.426-431(1986).
- Llabres-Luengo, P., and Mata-Alvarez, J. "Kinetic study of the anaerobic digestion of straw-pig manure mixture," Biomass 14, pp.129-142(1987).