

음식물쓰레기의 슬리지 병합처리에 있어서 입경 및 세척율의 영향

최성문 · 김은호 · 성낙창 · 김정권* · 윤태경* · 임영석**
동아대학교 환경공학과 · 동의대학교 환경공학과* · (주)신도시 산업개발**

A Study on the Effect of Food size and Washing rate on the Mixed Digestion of Food Waste and Sewage Sludge

Sung Moon Choi · Eun Ho Kim · Nak Chang Sung
Jung Kwon Kim* · Tae Kyung Yoon* · Young Seuk Lim**
Dept. of Environmental Engineering, Dong-A University
*Dept. of Environmental Engineering, Dongeui University**
*Sin Do Si Architecture Engineering Co.,LTD.***

Abstract

5L laboratory-scale anaerobic digester was used to study the effects of food size and washing rate of food waste on the mixed digestion with sewage sludge. Food waste was crushed with particle diameters of 4mm and 2mm and washed two to three times, and seven to eight times before feeding the batch digester.

The digester with crushed or washed food waste showed better performance than that with uncrushed or unwashed to produce methane gas or reduce volatile solids. The digester with 2mm food waste showed 17.4% higher VS/TS reduction rate and 18ml higher methane production rate per gram VS input than that with uncrushed food waste, where VS and TS are volatile solid and total solids in the liquid effluent, respectively. Also food waste crushed eight times gave 8% higher VS/TS reduction rate and 11ml higher methane production rate per gram VS input than unwashed food waste.

I. 서 론

풍요로운 생활을 유지하기 위해서는 식료품, 신문, 잡지 등 여러 가지 상품이 필요로 한다. 이러한 물건들은 우리들의 필요에 의해 소비되어진 후에 폐기물로서 발생한다. 발생되어진 폐기물은 각종의 환경문제를 더불어 그 처리·처분이 날로 어려워지며 또한, 처분지 문제도 심각하게 대두된다.

폐기물은 소각, 퇴비화 및 자원화 등의 중간 처리를 통하여 감량화를 실시하여 최종 처분지인 매립장의 부하를 줄여주는 역할과 자원의 재이용이라는 장점을 가져다 준다. 우리나라는 이웃 일본과는 달리 현재까지는 폐기물 처분을 매립에 의존하고 있는 실정이기 때문에 중간처리의 의미는 더욱 크다고 할 수 있다. 폐기물 중 1996년 기준으로 전체 생활쓰레기의 발생량(49,925톤/일)의 약 30%를 차

지하고 있는 음식물쓰레기¹⁾는 수분함량이 높고, 발열량이 낮아 소각처리에 어려움이 있으며 쉽게 부패하기 때문에 운반 및 매립시 악취, 병원균, 지하수 오염 등 여러 가지 환경오염 문제를 유발시킨다. 따라서, 이러한 음식물쓰레기를 안정적으로 자원화하기 위해서는 안정된 자원화 기술의 확보가 무엇보다 중요하다. 음식물쓰레기의 자원화 방안으로는 사료화, 퇴비화, 혐기성 소화 등이 있으며 현재 사료화(59%), 퇴비화방법(41%)이 주를 이루고 있다.

전보²⁾에서 음식물쓰레기를 혐기성 소화조에 주입하여 혼합소화 가능성을 고휘물 분해율, 가스생성경향 및 방해물질의 영향 등을 통하여 살펴보았다. 본 연구에서는 전보의 결과를 토대로 주입 음식물쓰레기와 슬러지의 일정 혼합비에 대한 음식물쓰레기의 일경의 영향과 주입되는 음식물쓰레기의 세척의 정도가 소화에 미치는 영향 등을 살펴보았다.

II. 실험 및 실험방법

1. 실험에 이용된 시료성상

본 연구에 사용된 시료는 음식물쓰레기의 경우 부산 D대학교내 구내식당에서 발생하는 것을 사용하였으며, 슬러지의 경우 부산 J하수처리장의 농축조에서 소화조로 이송되는 슬러지를 이용하였다.

채취한 음식물쓰레기는 자연상태에서 약 30분간 수분을 제거한 후 각각의 크기(미파쇄, 4mm 및 2mm)로 파쇄하여 슬러지와 일정한 비율로 혼합하였다. 실험에 이용된 음식물쓰레기 및 슬러지의 성상을 Table 1과 2에 각각 나타내었다.

Table 1.에 나타내었듯이 슬러지 TS 중의 VS가 58.8%로 절반이상의 유기함량을 나타내었으며 음식물쓰레기의 경우에는 90.2%로 대부분이 유기물임을 알 수 있었다. 또한, 음식물쓰레기의 문제점 중의 하나인 염분은 염소이온으로 약 3,000mg/L를 나타내어 역시 높은 염분을 함유하고 있음을 알 수 있었다. 슬러지의 pH는 거의 중성이었으나, 음식물폐기물은 음식물쓰레기 채취당시의 형태에 의해 낮은 pH를 나타내었다.

2. 실험장치 및 실험방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 회분식 혐기성 소화조(R로 표기)의 모형도이다. 본 실험에 이용된 혐기성 소화조는 유효용량이 4L(총용량 5L)인 아크릴로 제작된 원형 소화조 3기를 사용하였으며, 소화조의 온도는 실제 하수처리장의 혐기성 소화조에서 이용하고 있는 중온성 혐기성 소화온도인 35±1℃를 유지하면서, 70rpm의 회전 속도로 교반하였다. 가스의 포집은 용량이 10L인 풍선을 사용하였으며, 소화는 40일 동안 실시하였다. 주입된 시료의 분석은 2~3일에 한번씩 행하였으며, 분석항목은 TS, VS, pH,

Table 1. Characteristics of Sludge and Food Waste (R₁, R₂, R₃)

Items Sample	TS(%)	VS/TS(%)	COD _{Cr} (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	pH
Sludge	3.6	58.8	27500	250	6.8
Food waste	18.0	90.2	-	3000	4.7

Table 2. Characteristics of Sludge and Food Waste (R₄, R₅, R₆)

Items Sample	TS(%)	VS/TS(%)	COD _{Cr} (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	pH
Sludge	2.9	60.3	28000	345.5	6.7
Food waste	18.0	89.4		1701.6	4.9

Cl⁻ 및 Alkalinity이며 TS, VS의 경우 폐기물공정 시험법을, pH는 pH meter로 측정하였고, Cl⁻ 및 alkalinity는 standard methods³⁾와 수질오염공정시험법에 준하였고 가스 분석은 GC의 TCD(Shimadzu GC-8A형, Glass Column(35°C), N₂ Carrier Gas)를 이용하여 분석하였다.

Table 3.은 본 실험에 대한 운전조건을 나타낸 것이다. Table 3에서 나타낸 것처럼 반응조 R₁~R₃는 충전 음식물쓰레기의 파쇄 여부에 따른 소화 효과를 알아보기 위하여 제작하였다. R₁은 미파쇄의 음식물쓰레기를 충전하였으며, R₂ 및 R₃는 각각

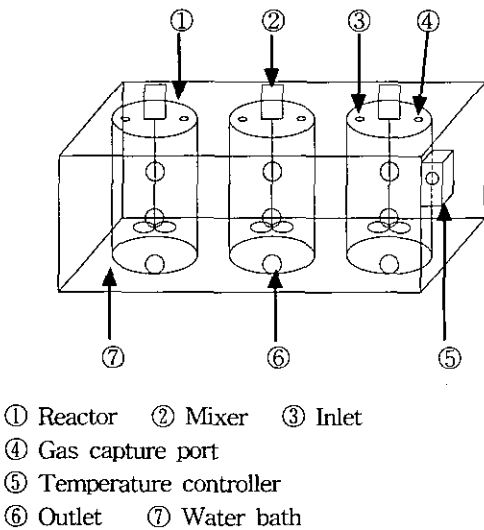


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

Table 3. Operating conditions of anaerobic digestion

Condition Reactor	Food size (mm)	Washing rate (times)	Mixing rate Sludge : Foodwaste (W : W)	Operating period (days)
R ₁	Raw food	·	1 : 0.1	40
R ₂	4	·	1 : 0.1	40
R ₃	2	·	1 : 0.1	40
R ₄	4	·	1 : 0.1	40
R ₅	4	2~3	1 : 0.1	40
R ₆	4	7~8	1 : 0.1	40

4mm 및 2mm로 파쇄하여 주입하였다. 이때의 슬러지와 음식물쓰레기의 혼합비는 질량비로 1 : 0.1이었다. 반응조 R₄~R₆의 경우는 음식물쓰레기 중의 열의 영향을 알아보기 위하여 R₄는 음식물쓰레기 그대로 주입하였고, R₅ 및 R₆은 각각 물로 2~3회와 7~8회 반복 세척하여 주입하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 음식물쓰레기 파쇄에 따른 소화 효과

음식물쓰레기를 하수 슬러지와 혼합하여 소화시킬 경우, 음식물쓰레기의 적정크기가 혼합소화에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 따라서, 음식물쓰레기와 하수슬러지를 혼합하기 전, 음식물쓰레기를 일정하게 파쇄하여 혼합주입하였다.

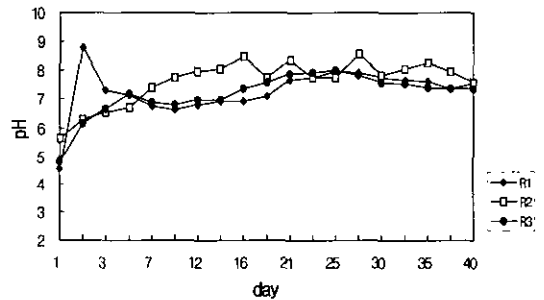


Fig. 2. Variation of pH during the experimental period

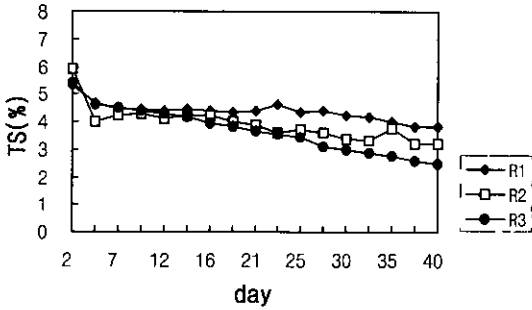


Fig. 3. Variation of TS during the experimental period

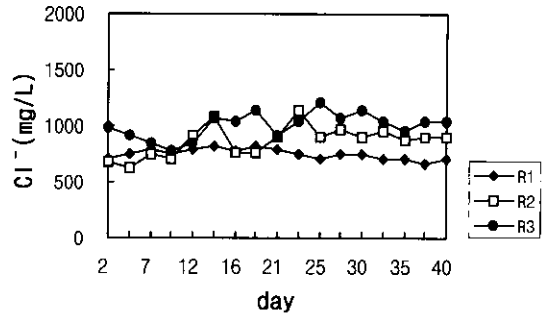


Fig. 5. Variation of Cl⁻ concentration during the experimental period

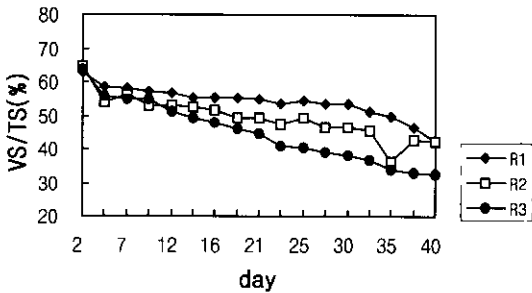


Fig. 4. Variation of VS/TS rate during the experimental period

반응조 R₁은 음식물쓰레기 그대로 이용하였고, R₂와 R₃는 각각 4mm와 2mm로 파쇄한 후 슬러지와 혼합주입하였다. 이 때의 pH변화를 Fig. 2에 나타내었다. 소화조에 혼합 주입한 직후, 4.7의 낮은 음식물쓰레기의 pH 때문에 각 반응조는 5.0 전후의 pH를 나타내었다. 그리하여, 실험 초기 음식물쓰레기에 의한 유기물 분해에 따른 급격한 pH의 저하를 막기 위하여 pH 조절제인 NaOH를 이용하여 pH를 실험 종료까지 중성으로 유지시켰다. 따라서, 실험기간 중 pH에 의한 영향은 발생하지 않았다.

Fig. 3은 실험기간 중의 TS함량 변화를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 실험초기에는 음식물쓰레기의 파쇄 정도에 따른 명확한 경향은 나타나지 않지만 실험 약 12일을 전후로 하여 파쇄입경이 2mm인 R₃가 가장 빠르게 TS분해가 일어남을 알 수 있다. 시간이 경과 할수록 그 경향은 뚜렷하게 나타나, 비파쇄의 반응조 R₁의 TS가 4.37%이었으나, 4mm와 2mm로 파쇄하여 주입시킨 반응조 R₂와 R₃는 각각 3.9%와 3.7%를 나타내었다.

결과적으로 주입되어지는 음식물쓰레기의 파쇄 입경이 적을수록 빠른 TS분해가 일어남을 알 수 있었으며, 실제 하수처리장에서 음식물쓰레기와 하수슬러지를 혼합소화 시킬 경우 음식물쓰레기의 파쇄가 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 4는 TS중의 VS비의 변화를 나타낸 것이다. 이 결과는 Fig.3의 TS변화와 유사하며, TS중의 유기고형물 성분의 제거율이 R₃>R₂>R₁형태를 나타내었으며, 특히 실험의 중반으로 갈수록 반응조에 따른 제거폭이 넓어짐을 알 수 있었다.

반응조 R₃는 R₁보다 평균 약 17%정도 높은 제거율을 나타내었다. Table 4는 Fig 3, 4의 결과를 토대로 총유입 TS, VS와 제거된 TS, VS 비율을 나타낸 것이다. TS의 경우 미파쇄의 R₁보다 2mm로 파쇄한 R₃가 약 27.5%정도의 높은 TS제거율을 나타내었으며, VS의 경우도 약 17%정도로 높은 제거율을 나타내어 파쇄에 따른 혼합소화의 경향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 5는 음식물 쓰레기 중의 염의 성분이 혼합 소화에서 끼치는 영향을 살펴보았다. 실제 생물학적 처리에서 염은 Na⁺염과 Cl⁻염의 영향이 매우 큰 것으로 나타난다. 혐기성 소화에서 있어서 Na⁺염의 독성한계는 4000~5000mg/L로 나타내며⁴⁾, Cl⁻의 농도는 1000mg/L이상에서 미생물에 영향을 끼친다⁵⁾. 본 연구에서는 Cl⁻염의 영향에 대해서 살펴 보았다. Cl⁻염은 Table 1, 2에서도 알 수 있듯이 하수 슬러지 보다는 음식물 쓰레기에서 유래되어 있다고 생각되며, 반응조별로 살펴보면 2mm로 파쇄한 R₃에서는 실험초기부터 증가하기 시작하여 실험 14일경부터 종료까지 1000mg/L 전후를 나타내

Table 4. The removal of TS and VS during the experimental period

Reactor	Item	TS			VS		
		Total(g)	Removed volume(g)	Removal rate(%)	Total(g)	Removed volume(g)	Removal rate(%)
R ₁		206.7	57.7	27.9	142.4	45.9	32.2
R ₂		212.4	97.3	45.8	137.2	60.4	44.0
R ₃		207.2	112.7	54.4	142.9	70.9	49.6

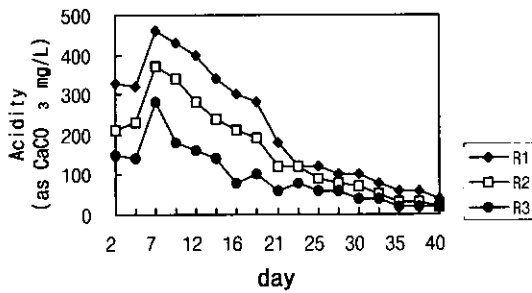


Fig. 6. Variation of Acidity during the experimental periods

는 등 다른 반응조 R₂(4mm로 파쇄)와 R₁(비파쇄)보다 높게 나타났다. 실험 전기간동안의 Cl⁻염의 평균농도는 R₁, R₂ 그리고 R₃에서 각각 749mg/L, 867mg/L, 1004mg/L를 나타내어 파쇄 입경이 적을수록 빠른 분해와 많은 비표면적으로 인하여 염분 농도가 높게 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 3개의 반응조에서 평균 1000mg/L 전후의 농도를 나타내어 실제 혐기성 소화에는 Na⁺염과 Cl⁻염의 영향이 그다지 크지는 않은 것으로 생각되어진다.

Fig. 6은 실험기간중의 산도의 경향을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 반응조 R₃는 반응조 R₁과 R₂에 비하여 전 실험기간동안 낮은 산도를 유지하였다. 이는 후술되는 가스 생성의 Table 7에서 알 수 있듯이 비교적 산의 축적 없이 분해된 유기물들이 빠르게 가스화 됨을 알 수 있다.

Table 5.는 실험기간 동안 각 반응에서 발생한 가스의 성분과 농도 및 주입 VS에 대한 메탄 발생량을 각각 나타낸 것이다. 주입 음식물쓰레기 미파쇄의 R₁과 파쇄의 R₂와 R₃의 메탄 농도가 각각 33.4% 53.1% 및 50.6%를 나타내어 파쇄의 경우가

Table 5. The results of gas composition and production during the experimental period

Reactor	Item	CH ₄		CO ₂		Methane yield (ml CH ₄ /g VS input)
		%	ml	%	ml	
R ₁		33.4	10,700	18.7	3,400	75
R ₂		53.1	11,621	12.3	2,683	84
R ₃		50.6	13,122	11.9	3,100	93

발생량과 더불어 높은 메탄농도를 나타내었다. 또한, 주입 VS에 대한 발생 메탄량의 경우도 R₃>R₂>R₁ 형태로 나타난다. 전체적으로 주입 음식물을 파쇄한 경우가 미파쇄한 경우보다 빠른 유기물 분해와 더불어 높은 메탄 발생량을 나타냄을 알 수 있다. 이는 파쇄의 입경이 적을수록 미생물과 접촉하는 비표면적이 넓어져 빠르게 반응한 결과라고 생각된다.

2. 음식물 쓰레기 세척에 따른 소화 효과

음식물 쓰레기와 하수슬러지를 혼합 소화할 경우 하수슬러지는 난분해성물질이 다소 함유되어 있고, 음식물쓰레기는 대부분 분해성 유기물로 구성되어 있다. 그러나 음식물 쓰레기는 우리 나라 특유한 음식문화로 인하여 많은 염분이 함유되어 있으며, 또한 식초등으로 인하여 낮은 pH를 갖는 것이 특징이다. 따라서 본 연구에서는 3개의 반응조 R₄, R₅ 및 R₆를 이용하여 세척효과를 조사하였다. R₄의 경우는 4mm로 파쇄한 음식물쓰레기를 무세척하여 주입하였으며, R₅와 R₆는 물을 이용하여 각각 2~3회, 7~8회 세척한 후 하수슬러지와 혼합

Table 6. The removal of TS and VS during the experimental periods

Reactor	Item	TS			VS		
		Total(g)	Removed volume(g)	Removal rate(%)	Total(g)	Removed volume(g)	Removal rate(%)
R ₆		171.5	71.6	41.7	118.3	40.0	33.8
R ₇		171.8	70.7	41.2	118.6	50.5	42.6
R ₈		171.5	75.2	43.8	118.3	56.8	48.0

시켜, 세척에 의한 혼합소화 효과를 알아보았다. 전술의 3.1에서와 동일하게 pH 유지를 위해서 조절제를 사용하였기 때문에 전기간동안 중성을 유지하였다.

Fig. 7은 실험기간중의 Cl⁻농도 변화를 나타낸 그림이다. R₆는 실험 초기부터 약 610mg/L 정도를 나타내어 무세척의 반응조 R₄의 965mg/L보다 매우 낮은 농도를 나타내었고, 평균 약 630mg/L였다. 이에 반해 무세척 및 2~3회 세척의 반응조 R₅와 R₆는 각각 1185와 965mg/L를 나타내었다.

따라서, 실험 전체적으로 보았을 때, 앞서 살펴 보았듯이 Cl⁻농도가 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 세척으로 인하여 Cl⁻농도가 무세척에 비하여 절반정도의 Cl⁻농도는 Fig. 8 및 Table. 6에서 알 수 있듯이 유기물 분해 및 가스 발생량에 다소의 영향을 미침을 알 수 있다. 또한, Cl⁻농도 이외의 Na⁺농도도 세척과 더불어 어느 정도 낮아진 부분도 있다고 생각되어진다.

Fig. 8은 VS/TS의 비를 나타낸 그림이다. 앞서 언급하였듯이 많은 차이를 나타내지 않았지만 실험 약 8일 정도부터 세척의 효과가 나타나기 시작함을 알 수 있다.

실험기간 동안 R₆와 R₈의 VS/TS 감소율을 살펴 보면, R₆가 52% 낮아졌음에 비하여 R₈는 44% 감소하여 다소의 세척효과를 알 수 있다. 또한 Table 6에서도 알 수 있듯이 VS의 제거율이 R₆에 비하여 R₈가 약 15% 정도 높음을 알 수 있었다. 따라서, 세척에 의한 효과는 분해성 유기물의 제거에 효과가 있는 것으로 생각되어진다.

Table 7은 실험 전기간 동안 발생한 메탄농도 및 발생량을 나타낸 것으로, 역시 세척의 여부와

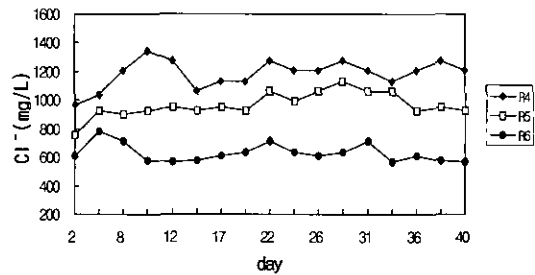
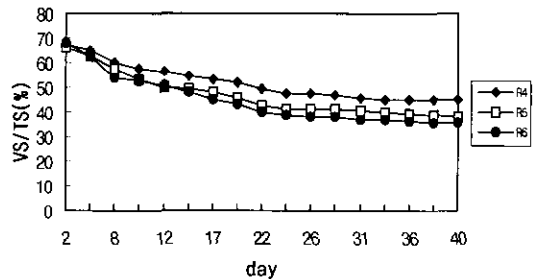
Fig. 7. Variation of Cl⁻ concentration during the experimental periods

Fig. 8. Variation of VS/TS ratio during the experimental periods

Table 7. The results of gas composition and production during the experimental periods

Reactor	CH ₄		CO ₂		Methane yield (ml CH ₄ /g VS inputed)
	%	ml	%	ml	
R ₆	40.7	11,200	14.2	3,100	95
R ₇	45.7	11,800	13.5	3,300	99
R ₈	50.1	12,500	11.8	2,200	106

횡수에 따라 발생하는 메탄의 농도와 발생량의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 Cl^- 이온을 비롯한 Na^+ 등의 염의 성분이 세척에 의해 농도가 낮아져, 메탄생성 박테리아 등에 끼치는 영향이 감소된 것으로 생각되어진다.

주입 VS에 대한 메탄 발생량도 R_6 가 R_0 에 비하여 주입 g·VS당 11ml정도 많이 발생한 것으로 나타났다.

IV. 결 론

음식물쓰레기를 하수슬러지와 혼합하여 혼합소화시킬 때, 주입되는 음식물쓰레 입경과 세척효과를 알아본 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 주입되는 음식물쓰레기를 미파쇄, 4mm 및 2mm로 파쇄하여 하수슬러지와 혼합한 결과 VS/TS(%) 감소율이 미파쇄의 R_1 보다 2mm로 파쇄 주입한 R_3 쪽이 약 27.5% 높은 감소율을 나타내는 등, 전체적으로 VS/TS(%) 감소율이 $R_3 > R_2 > R_1$ 형태로 나타났다.
- 2) Cl^- 농도의 경우는 파쇄로 인하여 비표면적이 넓어진 R_3 쪽이 R_1 보다 높은 농도를 나타내었다.
- 3) 음식물쓰레기를 2mm로 파쇄한 R_3 에서 미파쇄한 R_1 보다 높은 메탄가스 발생을 보였고, 주입 VS그램당 메탄발생량도 상당히 높게 나타났다.
- 4) 염분의 영향을 줄이기 위하여 주입되는 음식물쓰레기를 세척한 결과, Cl^- 농도의 영향을 크게 보이지 않았으나, VS/TS(%) 감소율, 미세척의 반응조 R_4 보다 7~8회 세척의 반응조 R_6 에서 약 8% 정도 높게 나타나 다소의 세척효과가 있음을 알 수 있었다.
- 5) 메탄가스 발생경향의 경우, 미세척의 R_4 보다 R_6 의 반응조가 주입 g VS당 메탄발생량

이 약 11ml정도 많게 나타났다. 따라서, 음식물쓰레기와 하수슬러지를 혼합소화시킬 경우, 반입되는 음식물쓰레기를 세척 파쇄 후 하수슬러지와 혼합 소화시킴이 효과적인 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 1998학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. 심재곤: 음식물쓰레기 관리 정책 추진방향, 음식물쓰레기 줄이기 연구 결과 공동발표회 발표집, 5-19, 1998
2. 김정권, 이영형, 김철희, 정유진, 성낙창: 음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합소화처리에 관한 연구, 대한환경공학회, Vol. 21, No.5, 951-957, 1999
3. WPCF: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16th edition, American Public Health Association, 1985
4. 최의소: 폐기물처리와 자원화, 청문각, 1989
5. 임재명: 황산염을 함유한 유기폐수의 혐기성처리, 고려대학교박사학위논문, 1989
6. 유영석, 최대권, 지재성: 음식물쓰레기와 하수슬러지의 합병컴포스트화에서 혼합비 산정과 염분 및 중금속의 회석효과, 한국 유기성 폐자원학회, 141-155, 1997
7. 성일화, 유명진, 김동민: 유기질 고품질 폐기물과 하수 슬러지의 혼합 혐기성 소화에 관한 연구, 한국 폐기물 학회지 3(1), 1-14, 1986
8. 신항식, 문민주: 생분해도 실험에 의한 주방 폐기물의 혐기성 소화 타당성 연구, 한국 폐기물 학회지 10(1), 35-42, 1993