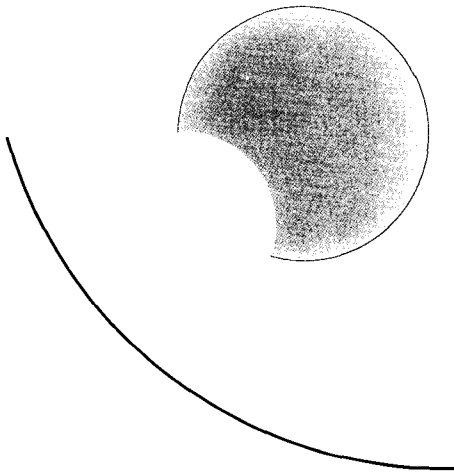




하수 슬러지와 음식물 쓰레기의 통합소화 효율평가

충남대학교 대학원 환경공학과
전문학



- I. 서론
- II. 이론적 배경
- III. 실험재료 및 방법
- IV. 실험결과 및 고찰
- V. 요약 및 결론

☞(지난호에 이어서)

1.2.2 경제적 측면

혐기성 소화공정은 무엇보다도 유용한 Biogas를 부산물로 얻을 수 있다는 장점 때문에 오늘날 에너지 값의 변동에도 불구하고 줄 곳 인기있는 Biotechnology중의 하나이다. 호기성 처리공정이 에너지 소비 자라면 혐기성 소화공정은 에너지 생산자로서 슬러지 생산량도 호기성의 10%에 불과하다는 장점이 이를 뒷받침해 주고 있다. 특히 산소 공급이 불필요하며 생분해도가 높은 음식물 쓰레기 처리시에는 호기성 공정에 비해 월등히 경제적이다. 또한 기존 하수종말 처리장에 설치·가동중인 혐기성 소화조에 음식물 쓰레기를 투입하여 하수 슬러지와 통합소화함으로써 처리효율 증진 뿐만 아니라 음식물 쓰레기 처리의 대안으로 부각될 수 있는 장점이 있다. 또한 음식물 쓰레기의 처리를 위한 시설의 설치로 인한 경제적인 낭비를 혐기성 소화조에 비교적 소규모의 전처리 시설의 설치로써 대신할 수 있다.

한편 통합소화 슬러지는 단백질, 탄수화물, 지질등이 농축된 유기자원이라는 점을 감안할 때 슬러지를 단순처리 또는 처분해야 할 대상이 아닌 유용한 자원으로서 퇴비화 등의 방법으로 재활용하는 기술에 대한 연구가 중점적으로 이루어져야 한다.

1.2.3 사회·문화적 측면

종래에 매립은 침출수 처리 및 지하수 유입방지 등의 시설만 갖추고 있으면 가장 손쉬운 처리 방법이었다. 그런 침출수 처리등의 위생매립에 따른 비용이 해마다 상승하고 있으며 특히 새로운 매립지의 확보는 인근 주민들의 반대등으로 여러가지 문제점을 안고 있다. 뿐만 아니라 매립의 대체 방법으로 논의되고 있는 소각 또는 열분해 방법은 소각시의 악취문제와 최근 발암물질로 크게 부각되고 있는 다이옥신등의 발생문제 때문에 사회적인 저항에 직면하고 있다.

앞서 언급한 바와 같이 수처리 비용의 절반 이상을 차지하는 하수 슬러지와 음식물 쓰레기 처리의 이중목적 달성과 통합소화 슬러지의 단순처리·처분이 아닌 혐기성 소화공정 개선을 위한 메탄등의 에너지 획득, 또는 위생성이 확보된 유용한 퇴비의 생산으로 연결된다면 하수 슬러지와 음식물 쓰레기를 단순처리 대상으로 보던 종래의 시각을 부가가치 창출을 위한 산업으로 전환할 수 있는 전기를 마련할 수 있을 것이다.

1.3 연구 목표

우리나라 음식물 쓰레기 발생량이 증가함에 따라 이의 처리가 사회적인 문제로까지 대두되고 있는 실정이다. 현재는 주로 매립에 의존하고 있으나 매립지 확보의 어려움 및 고농도 침출수 발생으로 인한 2차 공해가 문제시 되고 있으며 2005년부터는 음식물 쓰레기의 직매립이 금지될 예정이다. 따라서 음식물 쓰레기의 효과적인 처리방법의 개발이 시급한 실정이다.

현재 우리나라 하수종말 처리장에서 발생한 하수 슬러지를 처리하기 위하여 혐기성 소화공정을 사용하고 있는데 설계과정에서 과다 설계되어 여유처리 능력을 보유하고 있다. 이에 부족한 유기물로 음식물 쓰레기를 투입함으로써 소화효율 증대 및 유용한 Biogas를 회수할 수 있는 통합소화 공정이 각광을 받고 있다.

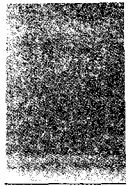
따라서 본 연구에서는 통합소화 공정을 이용하여 하수 슬러지와 음식물 쓰레기의 운전조건에 따른 공정의 운전효율을 분석하고 가장 적절한 운전조건을 고찰하고자 하였다.

II. 이론적 배경

혐기성 소화반응은 복잡한 유기물이 혐기성 조건하에서 생물학적으로 분해가능한 유기물이 가수분해 반응, 산생성 반응 및 메탄생성 반응등의 생화학 반응을 거치면서 CH_4 와 CO_2 로 최종 분해되는 과정으로 정의될 수 있다. 그러나 그 반응경로가 매우 복잡다단하여 정확한 반응경로 및 각 반응에 관여하여 서로 다른 기질을 이용하는 미생물에 관한 명확한 규명이 아직까지도 이루어지지 못하고 있다.

Gujer 등은 가정하수 슬러지의 혐기성 소화시 혐기성 및 통기성 Bacteria에 의해 고분자 복합 유기물을 메탄으로 전환하는 혐기성 반응경로를 다음과 같이 6단계로 설명하였다.

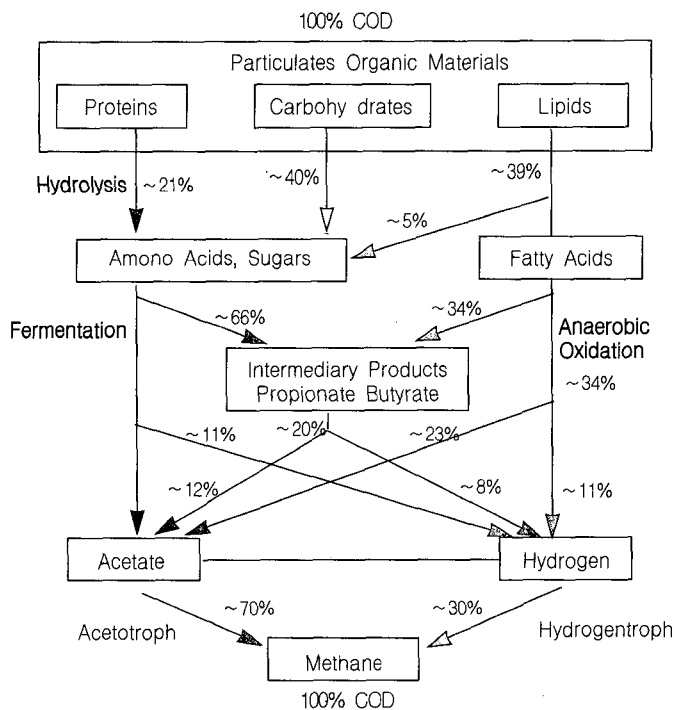
- (1) 유기성 고형물의 가수분해 단계
 - ㉠ 단백질의 가수분해 단계



- ㉠ 탄수화물의 가수분해 단계
- ㉡ 지방의 가수분해 단계
- (2) Amino Acid와 Sugar의 발효단계
- (3) 고분자 지방산과 알코올의 혐기성 산화단계
- (4) 아세트산 이외의 휘발산(Volatile Fatty Acids, VFA)의 혐기성 산화
- (5) 아세트산에서 메탄으로의 전환
- (6) 수소에서 메탄으로의 전환

또한 메탄생성 경로를 설명하는데 있어서 메탄발생량의 70%가 Acetate로부터 비롯된다고 덧붙였다.

[Fig. 2.1] Pathway for Anaerobic Digestion of Organic Matter



반면 1964년에 McCarty는 [Fig. 2.1]과 같이 메탄생성 경로를 밝히고 총 메탄의 72%가 Acetate로부터 발생되며, 나머지 28%는 CO₂의 Reduction(Pro-pionic Acid 13%, Other Intermediates 15%)에서 비롯된다고 주장하였다.

III. 실험재료 및 방법

3.1 통합소화 공정

본 연구에 사용된 SCMFR(Semi-Continuously Mixed & Fed Reactor) 공정[Fig. 3.1]은 중온소화(35°C, mesophilic digestion)를 달성하기 위해 Heater와 Fan이 설치된 8m³ 크기의 항온실(walk-in-chamber)내에서 운전하였으며 온도가 일정하게 유지 되도록 Thermostat으로 자동조절 하였다. 반응조의 재질은 아크릴로써 총 유효용적은 10L로 하고, 유입시료 및 유출시료는 변질을 막기 위해 냉장고(4±1°C)에 보관하였다. 음식물 쓰레기와 하수슬러지를 혼합한 유입시료는 1일 1회 반응조 상부의 유입부로 주입하였으며 시료가 고르게 분산되도록 그리고 반응조 내부에서 미생물과의 접촉이 활발하도록 기계식 교반장치(Motor)를 설치하여 약 60rpm의 속도로 교반하였다. 또한 교반기 축 사이로 발생된 Biogas의 누출을 막기 위하여 Water Sealing을 하였으며 반응조 최상부의 Port에는 Biogas Collecting Bag을 연결하여 발생 Biogas를 포집할 수 있도록 하였다. 혐기성 소화가 이루어진 유출수는 반응조 중반부의 Port에서 sampling하였다.

원동형인 반응조의 내경은 18cm, 높이는 42cm로 Chloroform을 이용하여 아크릴 반응조 Column 끝에 밀착시켰으며 원형뚜껑을 제작하였다. 반응조 후렌지와 원형뚜껑 사이에 Biogas의 누출을 막기 위하여 Gasket을 넣고 Bolt와 Nut로써 강하게 고정시켰다. 또한 분석시료의 채취와 Biogas의 포집을 위하여 7개의 지점에 Nipple를 설치하였다.

[Fig. 3.1] Schematic Diagram of SCMFR

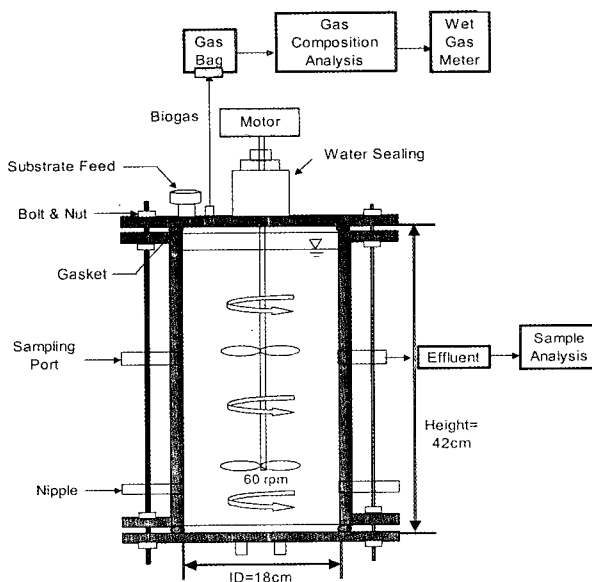
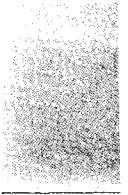


Fig. 3.1 Schematic Diagram of SCMFR



3.2 대상시료 및 반응조 운전

3.2.1 대상시료

본 연구에서 사용된 음식물 쓰레기는 대전시 유성구 H 아파트의 음식물 쓰레기 분리 수거함에서 채취하였으며, 먼저 파쇄를 실시한 후 Sieve로 전처리하여 이용하였다. 하수 슬러지는 대전시 원촌동 하수종말처리장의 1° 및 2° Sludge가 포함된 농축 슬러지를 이용하였다.

3.2.2 초기 운전

반응조는 대전광역시 원촌동 하수종말처리장의 중온소화조 슬러지를 Inoculum(식중균)으로 사용하여 전체 Reactor를 슬러지로 채운 후 반응조내를 혐기성 조건으로 만들기 위하여 질소 가스로 10~15분 동안 탈기 시켰다. 초기에는 미생물의 적응이 쉽도록 미량원소(Trace Elements)를 주입 하였으며 시료는 0.5g VS/L·d의 낮은 Organic Loading Rate(OLR)로 유입 시키면서 pH와 Volatile Fatty Acids(VFA) 농도를 측정하였다. pH와 VFA의 농도가 큰 변화가 없으면 점점 높은 OLR로 운전하여 본 연구에 적절한 소화조건을 유지하였다.

3.2.3 운전조건

혐기성 소화조가 안정적으로 유지되면 전처리를 거쳐 준비된 유입시료의 OLR을 [Table 3.1]과 같이 적절히 조절한 뒤 반응조에 유입시켜 운전하였다. 이때 하수 슬러지와 음식물 쓰레기의 혼합은 VS 기준으로 하였으며 혼합비는 1:1, 1:2 및 1:4로 운전하였다. 또한 각 혼합비에 대하여 수리학적 체류시간(Hydraulic Retention Time, HRT)을 20일, 15일, 10일로 단계적으로 감소시키면서 운전하였다. 한편, 소화조의 적정 유기물 부하율을 찾기 위하여 HRT 20일의 혼합비 1:5(3.79g VS/L·d), 1:6(4.32g VS/L·d) 및 HRT 15일의 1:3(3.54g VS/L·d)을 실행하였다. 또한 각각의 조건에 대하여 음식물 쓰레기의 Particle Size에 따른 영향을 알아보기 위하여 2mm, 5mm, 10mm로 전처리하여 제반영향인자에 따른 반응조의 처리효율에 대하여 고찰하였다.

본 연구의 세부내용을 정리하면 다음과 같다.

- ① 하수 슬러지와 음식물 쓰레기의 혼합비, 음식물 쓰레기의 Particle Size 및 수리학적 체류시간(20, 15일, 10일)에 따른 통합소화조의 운전특성 파악
- ② 운전조건(혼합비, Particle Size, HRT)에 따른 pH 및 Volatile Fatty Acids의 관계 고찰
- ③ 각각의 운전조건에 따른 메탄 발생량 및 TVS 제거효율의 관계 고찰
- ④ 하수 슬러지와 음식물 쓰레기의 혼합비 및 Substrate/Inoculum(S/I) Ratio에 따른 최종생분해도(Ultimate Biodegradability) 평가

[Table 3.1] Operation Conditions for Co-Digestion Process

HRT (day)	Mixing Ratio (Sewage Sludge : Food Waste)	OLR (g VS/L-d)
20	1 : 1	157
	1 : 2	221
	1 : 4	308
15	1 : 1	208
	1 : 2	292
	1 : 4	405
10	1 : 1	312
	1 : 2	440
	1 : 4	612

IV. 실험결과 및 고찰

4.1 Feed Substrate의 물리·화학적 특성

본 연구에 사용된 음식물 쓰레기와 하수 슬러지의 물리·화학적 특성 분석결과를 [Table 4.1]에 나타내었다. 본 연구에서는 하수 슬러지와 음식물 쓰레기의 혼합비(VS 기준)로 1:1, 1:2 및 1:4로 하였으며 각각 R-1, R-2 및 R-3로 명명하였다. 음식물 쓰레기의 pH는 4.3으로 매우 낮았으며 VFA가 1,280mg/L as C₂로 높게 나타났는데 서로 연관지어 봤을 때 어느 정도 수준까지 수화반응(Hydrolysis)이 일어났음을 알 수 있고 또한, 이로 인하여 Alkalinity가 소모되어 130mg/L as CaCO₃로 매우 낮게 나타났다. 하수 슬러지의 pH와 Alkalinity는 6.8, 1,650mg/L as CaCO₃으로 나타났으며 VFA도 36.7mg/L as C₂로 낮게 나타났다.

[Table 4.1] Physicochemical Characteristics of Sewage Sludge and Food Wastes

Item	Food Wastes	Sewage Sludge
pH	4.3(3.9~4.7)	6.8(6.6~7.1)
Alkalinity(mg/L as CaCO ₃)	130(0~330)	1,650(1,350~1,850)
TS(%)	20(18.7~22)	2.4(1.4~3.2)
VS(%)	18.9(18.1~19.8)	1.3(0.9~2.2)
VS/TS(%)	92(88.7~94.1)	59(52~64)
TCOD(g/L)	190(160~225)	25.4(22.2~33)
SCOD(g/L)	42(32~47)	0.35(0.15~0.6)
NH ₃ -N(mg/L)	1,070(940~1,200)	310(260~350)
TKN(mg/L)	1,320(1,150~1,500)	380(330~460)
VFA(mg/L as C ₂)	1,280(990~1380)	36.7(21.8~42.3)

음식물 쓰레기는 하수 슬러지에 비해 상대적으로 TS와 VS가 매우 높게 나타났는데 이는 음식물 쓰레기 자체의 특성에서 기인하였다. 또한, VS/TS도 92%로 하수 슬러지의 59%에 비해 높게 나타났는데 이는 음식물 쓰레기의 비교적 많은 부분을 유기물이 차지하고 있어 혐기성 반응조에 Substrate로 쉽게 이용될 수 있을 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 각 운전 조건별로 하수 슬러지와 음식물 쓰레기의 혼합비를 달리하였으며 그에 대한 특성은 [Table 4.2]에 나타내었다. 음식물 쓰레기의 혼합비를 증가시킴에 따라 TS, VS 그리고 기타 다른 항목들의 농도도 함께 증가하는 결과를 보였다. 먼저 유입폐수의 TS는 3.31%에서 5.3%로 VS는 2.71%에서 4.7%로 증가하였으며 또한, VS/TS도 71.1%에서 83.8%로 증가하였다.

$\text{NH}_3\text{-N}$ 의 농도는 음식물 쓰레기에 의해 455mg/L에서 615mg/L까지 증가하였으나 혐기성 반응조에 독성을 유발하는 농도범위인 1,500mg/L 이상에는 미치지 않았다. pH와 Alkalinity는 혼합비가 증가할수록 감소하였으나 혐기성 반응조 자체의 완충능력으로 다시 상승할 수 있으리라 판단되었다.

[Table 4.2] Physicochemical Characteristics of Substrate to Co-Digestion Reactor

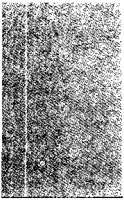
Mixing Ratio	R-1	R-2	R-3
pH	6.61	6.43	6.18
Alkalinity(mg/L as CaCO_3)	1,530	1,420	1,270
TS(%)	3.31	4.04	5.3
VS(%)	2.71	3.54	4.7
VS/TS(%)	71.1	78.2	83.8
TCOD(g/L)	32	46	62
SCOD(g/L)	5.6	9.6	16
$\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	370.1	424	499.6
TKN(mg/L)	455.2	521	615.3
VFA(mg/L as C_2)	112.2	145.6	198.5

4.2 최종생분해도 실험(Ultimate Biodegradability Test)

최종생분해도 시료중 총유기물(Total Volatile Solids, TVS)중에서 생분해 가능한 유기물(Biodegradable Volatile Solids, BVS)이 차지하는 비율을 측정하는 것이다.

시료의 TVS중 BVS만이 Biogas로 분해되기 때문에 이 Parameter를 통해서 유기성 폐기물이 분해될 때 얻을 수 있는 최대의 메탄 생성량을 예측할 수 있으며, 분해 과정에서 유기물이 분해되는 속도를 측정할 수 있기 때문에 반응조 설계시 형태나 크기를 결정하는데 중요한 인자로 인식되어야 한다.

유기물 제거효율의 분석과 Modeling을 통한 혐기성 반응조의 성능 예측시 사용되는 Parameter중 Influent와 Effluent이 농도가 COD 혹은 VS중 어느것으로 표현되든, 생분해 가능한 COD나 VS 농도(Biodegradable COD 혹은 BVS)로 표현되어야 가장 정확하게 반응조를 설명할 수 있다. 대표적인 공공



산업폐기물의 생분해도는 35°C에서 Sugarbeet Pulp가 91~94%, Potato Pulp가 86~91%, Brewery Grain 76~78%의 범위를 나타내고 있다.

시료의 최종생분해도를 구하는 방법에는 (1) Graphical Statistic Analysis 방법, (2) In Vitro Digestibility Test, (3) Fiber Analysis 방법이 있다.

Graphical Statistic Analysis 방법은 유기물이 분해되는 어느 시점에서 최초 시료의 TVSo중에 남아있는 TVSe의 비율을 Y축에, 운전시간의 역수(1/Operating Time)를 X축에 도시하면 운전시간이 무한대로 접근할 때 1/Operating Time은 0으로 근접하므로 이때 분해하고 남은 TVSY 즉, Y축과 만나는 점을 Refractory Fraction(Ro)으로써 난분해성 비율로 여길 수 있다. 그러므로 시료의 최종생분해도(Ultimate Biodegradability, UB)=(1-Ro)×100으로 구할 수 있으며, 이때 구한 UB가 BVS/TVS 부분이 되는 것이다. 여기서 구한 UB 값을 이용하여 회분식 반응속도 상수(k)를 구할 수 있다. 즉, $\ln(S_o/S_e)=kt$ 식에서 $\ln(S_o/S_e)$ 를 Y축에 시간(t)을 X축에 그리면 직선의 기울기로부터 k값을 구할 수 있다. 단 S_o 와 S_e 는 초기와 소화반응 시간이 경과하면서 어느 시간 t에서의 Biodegradable Substrate Concentration을 나타내기 때문에 k를 구하기 위해서는 사전에 시료의 최종 생분해도가 측정되어야 한다.

In Vitro Digestibility Test는 시료를 가축에게 먹이로 주어서 96시간 소화를 실시하여 전체 VS 제거율로 표시할 수 있는 TDOM(True Digestible Organic Matter)을 구하여 UB를 구하는 방식이다.

Fiber Analysis 방법은 Crude Protein(CP), Acid Detergent Crude Protein(ADCP), Cell Soluble, Hemicellulose, Lignin, Cutin 등을 측정하여 UB를 예측하는 방법이다.

본 연구에서는 가장 합리적이고, 분석이 용이하며, First-Order Decay Rate에 의해 반응조 설계시 직접 적용이 가능한 Graphical Statistic Analysis 방법에 의해 수행하였으며 [Table 4.3]은 실험조건 및 실험결과를 나타냈다.

[Table 4.3] A Summary of Batch Experiments for Thermophilic Ultimate Biodegradability and First-Order Decay Rates at Various S/I Ratios

S/I Ratio	Mixing Ratio	Ultimate Biodegradability(%)		First-Order Decay Rate			
		Gas	Mass	$k_1(\text{day}^{-1})$		$k_2(\text{day}^{-1})$	
				Gas	Mass	Gas	Mass
.2	1:1	73.5	74.3	0.187	0.199	0.038	0.041
	1:2	74.1	75.6	0.195	0.203	0.035	0.039
	1:4	72.8	71.3	0.186	0.179	0.040	0.042
4	1:1	72.3	74.0	0.191	0.192	0.034	0.044
	1:2	73.9	71.2	0.192	0.198	0.038	0.046
	1:4	72.9	74.3	0.183	0.207	0.044	0.033
2	Food Wastes	74.3	72.8	0.186	0.200	0.042	0.039
4	Food Wastes	71.4	73.6	0.179	0.184	0.047	0.045
2	Sewage Sludge	58.4	59.1	0.056	0.054	0.021	0.023
0	Inoculum	38.9	40.2	0.039	0.045	0.015	0.013

☞(다음호에 계속)