

음식물찌꺼기 산발효산물과 하수슬러지의 혼합비 및 유기물부하가 병합처리에 미치는 영향

안철우 · 장성호^{1)*} · 박진식²⁾

국립공원관리공단 오대산사무소, ¹⁾부산대학교 지역환경시스템공학전공, ²⁾경운대학교 보건환경전공
(2006년 7월 26일 접수, 2006년 8월 18일 수리)

Effects of Mixing Ratio and Organic Loading Rate of Acid Fermented Food Wastes and Sewage Sludge on the Anaerobic Digestion Process

Chul-Woo Ahn, Seong-Ho Jang^{1)*}, and Jin-Sik Park²⁾ (Korea National Parks Authority, Pyungchang, 232-941, Korea, ¹⁾Dept. of Environmental System Engineering, Pusan National University, Miryang, 627-705, Korea, ²⁾Dept. of Health & Environmental, Kyungwoon University, Gumi, 730-852, Korea)

ABSTRACT: This study has been conducted for the process of food wastes disposal using surplus capacity of established sewage treatment plant by co-digestion of fermented food wastes and sewage sludge after thermophilic acid fermentation of food wastes. The co-digestion of thermophilic acid fermented food wastes and sewage sludge was performed by semi-continous method in mesophilic anaerobic digestion reactor. It showed great digestion efficiency as the average SCOD and VS removal efficiency in organic loading rate 3.30g VS/L.d. were 74.2% and 73.6%, and the gas production rate and average methane content were 0.440 L/g VS_{add.d} and 66.5%, respectively. Based on the results of this study, the co-digestion of thermophilic acid fermented food wastes and sewage sludge in sewage treatment plant is able to improve treatment efficiency of anaerobic digestion reactor and to dispose food wastes simultaneously, and was proved excellent economical efficiency comparing with any other treatment methods.

Key Words: OLR (Organic loading rate), Acid fermentation, Mixing ratio, Food waste, Sewage sludge, Anaerobic co-digestion

서 론

음식물찌꺼기의 자원화방법에는 물질회수 형태로 자원화할 수 있는 사료화 또는 퇴비화외에 혐기성소화나 하수병합을 통하여 에너지의 형태로 자원화하는 방법 등이 있다. 특히 음식물찌꺼기는 메탄전환율이 높고,^{1,2)} 하수처리장에서 병합처리 되는 동안 염분이 감소되어 퇴비화에 유리하고 동시에 메탄 소화 후 퇴비시에는 슬러지 단독 소화 후 퇴비화보다 퇴비질이 우수한 것으로 알려져 있다.

그러나 일반적으로 음식물찌꺼기를 하수처리장의 중온 혐기성 소화조에 그대로 투입시에는 음식물찌꺼기가 대부분 셀룰로오스 성분이 높아 소화조에 스킴 및 비정상적인 산생성물

이 크게 발생하여 소화조의 소화효율을 낮추는 등의 부작용을 일으켜 유기물 부하를 충분히 높이지 못하는 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하는 방안으로 제시되고 있는 것이 음식물찌꺼기를 그대로 투입하는 대신 일종의 전처리 단계인 산발효 과정을 거친 후 기존 하수처리장의 하수슬러지와 병합하여 소화하는 방안이다.

하수병합소화는 장점으로는 기존의 소화조를 이용함으로써 건설비용을 감소시킬 수 있고, 저부하로 운전되고 있는 국내 하수처리장에 투입함으로써 소화중의 소화효율을 증대시킬 수 있을 뿐만 아니라 산발효공정에서 생성된 유기산을 탈질처리에 필요한 외부탄소원으로 공급할 수 있다는 장점뿐만 아니라 음식물쓰레기를 직접 투입할 경우 발생하는 극부적인 산발효로 인한 급격한 pH저하, 산발효 속도 차이로 인한 셀룰로오스 성분의 스킴 전환, 음식물쓰레기의 높은 염분함량으로 인한 영향 등의 저해요인을 사전에 제거할 수 있다고 보고하였다³⁻⁸⁾.

*연락처:

Tel: +82-55-350-5435 Fax: +82-55-350-5439

E-mail: jangsh@pusan.ac.kr

본 연구에서는 실험실 규모의 혐기성 소화 실험을 통하여 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 적정 혼합비와 유기물 부하율에 따른 반응조 운전특성을 분석하여 실제 플랜트에 적용가능성을 검토하였다.

실험재료 및 방법

실험장치 및 재료

음식물찌꺼기기의 혐기성소화 실험에 이용된 장치는 Fig. 1과 같다. 혐기성소화 실험에 사용된 장치는 유효용량이 10 ℓ (총용량 12 ℓ)인 10 mm 두께의 아크릴로 제작되었으며, 반응조 외부에 수조를 설치하여 히터와 온도센서가 부착된 water bath에서 물을 가온시켜 수조에 공급 순환되도록 하여 중온 산발효 조건인 35±1℃로 유지되도록 조정하였다. 반응조내 미생물과 기질의 원활한 접촉을 위하여 교반기를 부착하였으며, 반응조내 교반은 mechanical sealing이 장착된 motor를 이용하여 gas-tight 상태로 운전하였다.

시료 유입구 및 유출구는 상부에 설치하였으며, 가스포집을 위하여 10 ℓ 용적의 gas collector를 설치하였다.

시 료

본 실험에 사용된 음식물쓰레기는 B시에 소재한 D대학교 내 구내식당의 음식물쓰레기 수집통에서 국물성의 수분이 충분히 제거된 것을 채취하였으며, 채취된 음식물쓰레기는 생선 뼈와 같은 불순물을 제거한 후, 음식물쓰레기의 원활한 분쇄와 상대적으로 높은 염분농도로 인한 영향을 사전에 제거하기 위하여 물과 1:1로 섞어서 가정용 믹서로 파쇄하였다.

파쇄된 시료는 2 mm 체로 거른 후 pH, TS, VS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr}, Alkalinity, TKN등의 초기 특성을 분석하였고, 실험에 사용될 때까지 4℃의 냉장고에 최대 1주간 보관하였다. Table 1에 음식물쓰레기의 초기특성을 항목별로 제시하였다.

그리고 실험에 사용된 하수슬러지와 식종슬러지는 B시에 소재한 J하수처리장의 농축조와 소화조에서 각각 채취하였다. 시료는 4 mm 체로 체거름을 하여 불순물을 제거하였고 pH, TS, VS, TCOD, SCOD, Alkalinity등의 초기시료 특성을 분석한 뒤 실험에 사용되기 전까지 4℃의 냉장고에서 최대 1주

간 보관하였다. 산발효액의 경우 유기물 부하(Organic Loading Rate) 20 gVS/L.d, 온도조건은 고온영역인 55±1℃로 하였으며, 산발효 반응이 진행되는 동안 급격한 산 생성물의 축적 현상으로 인한 pH저하를 방지하기 위하여 0.05 g NaOH/g TS로 전처리를 행하였으며, 전처리된 시료는 1일을 주기로 1회 시료주입구를 통하여 수작업으로 주입하는 방법으로 음식물찌꺼기를 산발효시켜 실험에 사용하였다.

실험에 사용된 하수슬러지의 성상은 Table 2와 같다. Table 3은 음식물찌꺼기와 농축슬러지의 원소분석을 한 결과로서 Carbon 48.5%, Nitrogen 3.8%을 나타내 본 연구에 사용된 음식물찌꺼기의 C/N비는 12.8로 조⁹⁾가 보고한 음식물찌꺼기의 C/N비 10~15의 범위 내로 나타났으며, 또 변¹⁰⁾이 하수슬러지와 의 병합소화에 이용한 음식물찌꺼기의 C/N비 10.0~10.6보다는 약간 높은 값을 보였다.

운 전

본 실험에서는 실험실 규모의 반연속식 혐기성 소화 실험

Table 1. Characteristics of Food Wastes

Item	Range	Average
pH	4.4 ~ 4.9	4.7
TS (%)	6.2 ~ 9.8	7.6
VS / TS(%)	89.1 ~ 93.8	91.4
TCOD _{Cr} (mg / ℓ)	65,300 ~ 120,800	96,500
SCOD _{Cr} (mg / ℓ)	23,400 ~ 45,100	32,300
Alkalinity (mg / ℓ)	490 ~ 980	760
TKN (mg / ℓ)	1,180 ~ 2,560	1,930
T-P (mg / ℓ)	390 ~ 710	510
Cl (mg / ℓ)	1,420 ~ 4,260	2,940

Table 2. Characteristics of sewage sludge

Item	Unit	Range	Average
pH	-	6.5 ~ 6.9	6.7
TS	%	3.5 ~ 4.2	3.8
VS/ TS	%	50.2 ~ 55.4	52.8
TCOD _{Cr}	mg / ℓ	26,500 ~ 28,400	27,500
SCOD _{Cr}	mg / ℓ	11,600 ~ 13,700	12,400
Cl	mg / ℓ	322 ~ 438	375

Table 3. Chemical characteristics of food waste and sewage sludge

Samples	Items	Chemical elements (% dry weight)					C/N ratio
		C	H	O	N	S	
Food waste		48.5	7.6	39.6	3.8	0.6	12.8
Sewage sludge		25.8	4.0	20.6	4.1	1.4	6.3

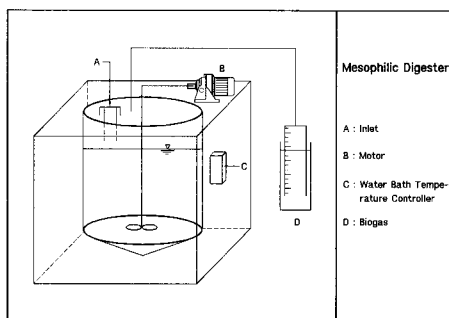


Fig. 1. Schematic diagram of anaerobic digester.

을 통하여 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 적정 혼합비 및 유기물부하(OLR)에 따른 반응조 운전특성을 평가하여 실제 플랜트에 적용 가능여부 등에 대하여 검토하였다.

음식물찌꺼기 고온 산발효액은 55±1℃에서 산발효를 실시하여 회수하였으며, 농축슬러지와 식중슬러지의 경우 부산시 J하수처리장의 농축조와 소화조에서 각각 채취하여 실험에 사용하였다.

유입시료인 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합액은 반응조 상단에서 250 ml 주사기를 이용하여 1일 1회 같은 시간에 Draw and Fill 방식으로 일정량을 주입하였다.

각 반응조에 식중슬러지를 식중시킨 후 초기 유기물 부하에 의한 충격을 피하기 위하여 HRT를 50일로 하여 반응조 상단을 통하여 유입시켰으며, 일정농도의 유출수가 얻어졌다고 판단되는 시점에서 HRT를 20일로 하고 하수슬러지와 음식물찌꺼기 고온 산발효액을 부피기준으로 7:3, 5:5, 3:7, 1:9의 4단계로 반연속식으로 운전하였다.

고온 산발효 과정을 거치지 않은 음식물찌꺼기와 하수슬러지의 혼합비율에 따른 유기물질 부하율(OLR)은 2.93~6.36 gVS/L.d였고, 고온 산발효된 음식물찌꺼기와 하수슬러지의 혼합액의 유기물질 부하율(OLR)은 음식물찌꺼기의 고온 산발효과정중 일어나는 유기물질, 즉 VS의 감소로 인하여 2.39~4.73 gVS/L.d의 범위였다.

이러한 유기물질 부하율은 하수처리장 혐기성 소화조의 설계시 적용되는 2~5 gVS/L.d를 감안해서 적용하였으며¹¹⁾, 실제로 원 음식물찌꺼기와 하수슬러지 혼합물의 유기물질 부

하율은 이 범위보다 더 높았다. 그리고 발생 가스조성 및 휘발성유기산(VFA)의 분석은 TCD와 FID가 부착된 Gas Chromatography(HP-5890 II)를 이용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

반응조내 화학적 인자의 변화

유기성 폐기물의 혐기성 처리시 반응조내 pH, 알칼리도(Alkalinity), 및 휘발성 지방산(VFAs)은 소화조내 반응상태를 나타내는 지표가 되고 이들 인자들의 변화를 통하여 반응조내의 운전상태를 평가할 수 있다.

Table 5는 실험실 규모의 혐기성 소화 실험 기간 중 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비에 따른 소화조내 pH, 알칼리도(Alkalinity), 및 휘발성 지방산(VFAs)의 범위와 평균값을 나타내고 있다.

Fig. 2는 소화일수에 따른 소화조내의 pH변화를 나타내고 있는데, 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지를 9:1로 혼합한 R-4반응조를 제외한 나머지 반응조에서는 전 운전기간을 통하여 pH는 7.03~7.74로 나타났다.

이러한 수치는 McCarty¹²⁾가 메탄형성을 위한 적정한 pH범위로 제시한 6.8~7.4를 초과하고 있으나 한계범위로 제시한 6.4~7.8범위 이내이고 또 pH 6.0~8.0의 범위에서는 메탄생성에 별 영향이 없다는 Clark and Speece¹³⁾의 보고에

Table 4. Operating conditions of anaerobic digestion

Run. No.	Mixture ratio	Organic Loading Rate (g VS/L.d)		Operating Temp. (°C)
		I*	II**	
R-1	3 : 7	2.4*	2.9**	35±1
R-2	5 : 5	3.3	4.2	35±1
R-3	7 : 3	4.2	5.4	35±1
R-4	9 : 1	4.7	6.4	35±1

* ; Mixture = (fermented food waste + sewage sludge)

** ; Mixture = (food waste + sewage sludge)

Table 5. Summary of chemical factors during operation

Mixture ratio	pH	VFA (mg/L)	Alkalinity (mg/L)	VFA/Alkalinity
R-1(3 : 7)	7.31 (7.03~7.53)	2,280 (2,120~2,500)	3,447 (2,990~3,880)	0.66 (0.57~0.75)
R-2(5 : 5)	7.43 (7.21~7.67)	3,850 (3,520~4,170)	4,790 (4,270~5,230)	0.79 (0.69~0.84)
R-3(7 : 3)	7.53 (7.37~7.74)	7,326 (7,040~7,680)	6,000 (5,520~6,380)	1.23 (1.12~1.39)
R-4(9 : 1)	6.07 (5.82~6.29)	12,463 (11,970~12,860)	1,667 (1,460~1,860)	7.50 (6.86~8.29)

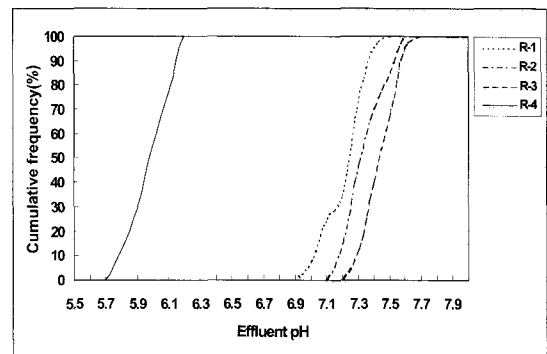


Fig. 2. Effluent pH cumulative frequency during operating time.

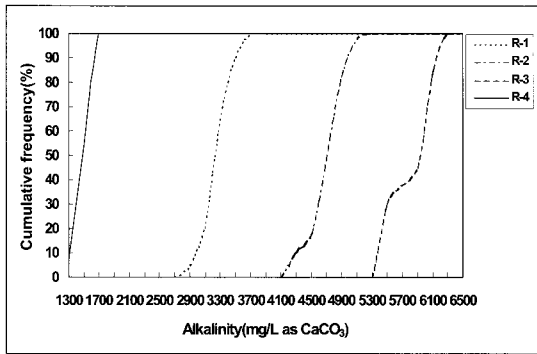


Fig. 3. Effluent Alkalinity cumulative frequency during operating time.

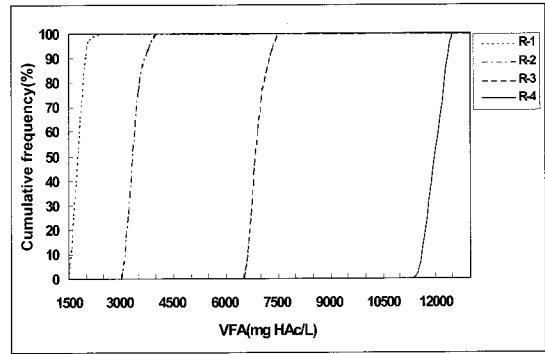


Fig. 4. Effluent VFA concentration cumulative frequency during operating time.

근거하면 R-1반응조~R-3반응조에서는 pH에 따른 메탄생성균의 활동에는 저해가 없는 것으로 판단된다.

한편, R-4반응조는 높은 유기산 농도로 인하여 5.82~6.29의 낮은 pH를 나타내었는데, 이러한 현상은 완충능력의 부족으로 인한 결과로 판단된다.

pH는 혐기성 반응조내의 알칼리도(Alkalinity), 휘발성 지방산(VFAs), 발생된 가스에 포함된 CO₂량에 직접적인 영향을 받는데, pH의 감소는 산생성균과 메탄생성균의 균형 변화 즉 휘발성 지방산의 축적으로 발생하며 결과적으로 메탄생성균에 저해를 주게 된다.

혐기성 소화실험에서 휘발성 지방산의 축적으로 인한 저해 현상을 제어하는 완충능력을 나타내는 것이 알칼리도인데 본 실험에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 1,460~6,380 mg/L로 나타났으며, 음식물찌꺼기 고온 산발효액의 혼합비율이 가장 높은 R-4반응조에서 평균 1,667 mg/L의 낮은 알칼리도를 나타내었다.

이러한 결과들은 대체적으로 De Baere¹⁴⁾가 제시한 혐기성 분해시 정상적인 알칼리도인 1,000~5,000 mg/L의 범위에 있는 것으로 나타났으며, 높은 VFA농도에 대응하여 일정 수준의 알칼리도를 유지할 수 있었던 것은 음식물찌꺼기 내에 들어있는 일부 알칼리도 생성물질에 의한 것도 있지만, 음식물찌꺼기 고온 산발효시 원활한 가수분해를 위해 투입한 NaOH에 의해서 생성된 알칼리도에 의한 영향이 가장 큰 것으로 판단되어진다.

휘발성 지방산의 변화를 나타낸 Fig. 4에서 보면 유기산(VFA)농도가 2,120~12,860 mg/L의 범위로 반응조에서 음식물찌꺼기 고온 산발효액의 혼합비율이 높아질수록 유기산(VFA)의 농도가 증가하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

VFA농도의 증가에 따라 발생할 수 있는 휘발성 지방산의 축적에 의한 메탄생성의 저해 가능성을 판단하고자 반응조의 완충능력을 판단하는 지표인 VFA와 알칼리도의 비를 조사한 결과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 0.66~7.50으로 나타났다.

문헌에 따르면 VFA와 알칼리도의 비가 0.8이상이면 pH저하 및 메탄생성 억제에 일어나고, 그 비가 0.5이상이면

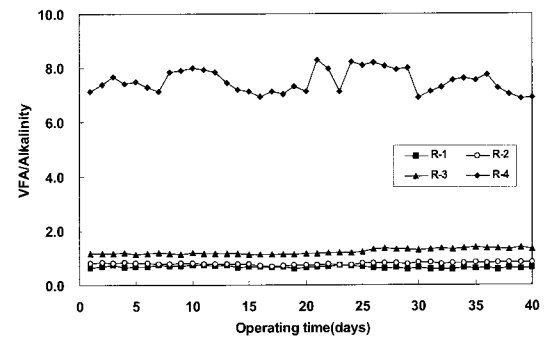


Fig. 5. Variations of effluent VFA/Alkalinity during operating time.

면 조절해 줄 필요가 있는 것으로 보고 되고 있는데¹⁵⁾, 본 실험에서는 R-4반응조를 제외하고는 VFA와 알칼리도의 비가 0.57~1.39로 완충능력이 충분하지는 않았으나 Table 6에 나타난바와 같이 R-1~R-3의 메탄생성량이 0.238~0.307 l/g VS_{add,d}로 메탄생성의 억제는 이루어지지 않은 것으로 판단된다.

그러나 VFA와 알칼리도의 비가 평균 7.50을 나타낸 R-4반응조에서는 메탄생성에 있어 저해현상이 발견되었다.

유기물 및 고형물 제거효율

음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비와 유기물질 부하율(OLR)에 따른 반응조의 운전특성을 평가하기 위하여 R-1, R-2, R-3, 및 R-4반응조에 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지를 각각 3:7, 5:5, 7:3, 9:1의 비율로 혼합하여 실험을 실시하였다.

운전기간중 혼합비에 따른 SCOD의 변화와 COD부하율에 따른 COD제거효율을 Fig. 6과 7에 각각 나타내었다. Fig. 6에 의하면 음식물찌꺼기 고온 산발효액의 혼합비율이 높을수록 유출수의 농도가 높게 나타났으며, 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비율이 9:1인 R-4반응조의 경우 혼합비가 3:7인 R-1반응조보다 유출수의 SCOD농도가 약 5배에 가까운 높은 농도를 나타내었다.

Fig. 7에서는 유기물 부하율(OLR)이 3.97 g COD/L.d

에서 7.19 g COD/L.d로 증가할 때의 SCOD 제거효율을 나타내었는데, 유기물 부하율이 3.97 g COD/L.d에서 가장 높은 78.6%를 SCOD 제거효율을 보였다.

그리고 유기물 부하율이 증가함에 따라 SCOD의 제거효율이 점차 감소하는 경향을 보였으며, 유기물 부하율이 6.23 g COD/L.d보다 높을 경우 급속히 처리효율이 떨어졌다.

음식물찌꺼기 고온 산발효액의 경우 원 음식물찌꺼기가 고온 산발효 과정을 거치는 동안 유기물의 감소가 일어나 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지 혼합물의 유기물 부하율이 원 음식물찌꺼기와 하수슬러지의 혼합시의 유기물 부하율(OLR)보다 낮은 수준임을 감안하면 상대적으로 높은 부하율에서도 처리효율이 뛰어난 것을 알 수 있었다.

실�험실 규모의 혐기성 소화조 운전기간 동안 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비와 유기물(VS) 부하율에 따른 유출수의 TS, VS 농도변화 및 제거효율 등을 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

R-1~R-3반응조의 경우 음식물찌꺼기 고온 산발효액의 혼합비가 높아짐에 따라 유입수의 VS 농도가 46,520 mg/L에서 63,240 mg/L로 농도 차가 크게 나타났으나, 반대로 소화조 유출수의 VS 농도는 혼합비에 따라 8,320 mg/L~17,840 mg/L로 그 농도 차가 유입농도와 비교할 때 상당히 줄어든 것을 알 수 있었다.

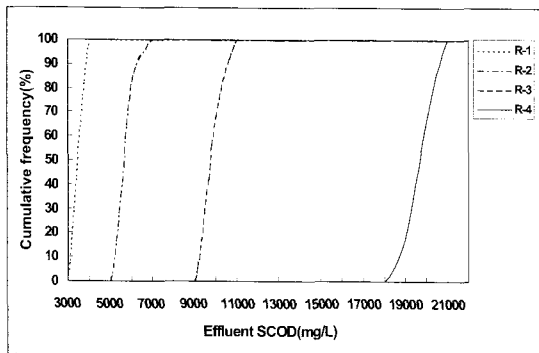


Fig. 6. Effluent SCOD concentration cumulative frequency during operating time.

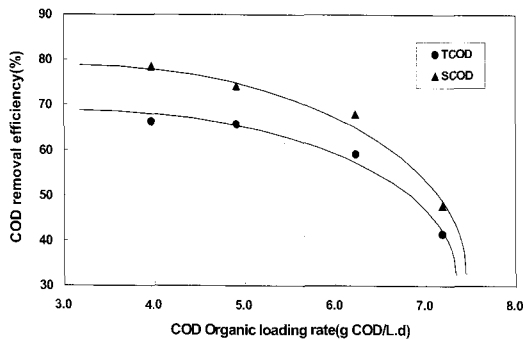


Fig. 7. COD removal efficiency related to COD organic loading rates during operating time.

그러나, 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지를 9:1로 혼합한 R-4반응조의 경우 유출수의 VS농도가 27,000 mg/L로 다른 반응조들과 비교하여 유출수의 농도가 상당히 높아 제대로 처리가 이루어지지 않은 것으로 나타났다.

결과적으로 Fig. 10에 나타난 바와 같이 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비가 증가할수록 유출수의 TS에 대한 VS의 함유율이 증가되는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비율에 따른 VS 부하율에 따른 VS 제거효율과의 관계를

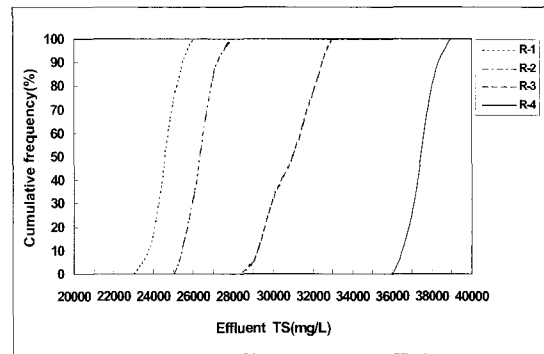


Fig. 8. Effluent TS concentration cumulative frequency during operating time.

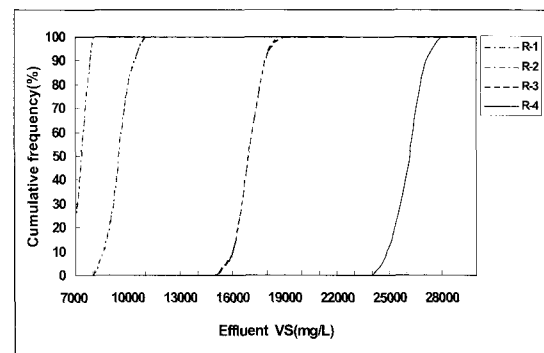


Fig. 9. Effluent VS concentration cumulative frequency during operating time.

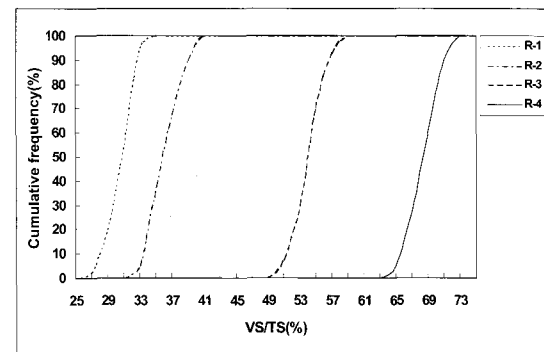


Fig. 10. Effluent VS/TS cumulative frequency during operating time.

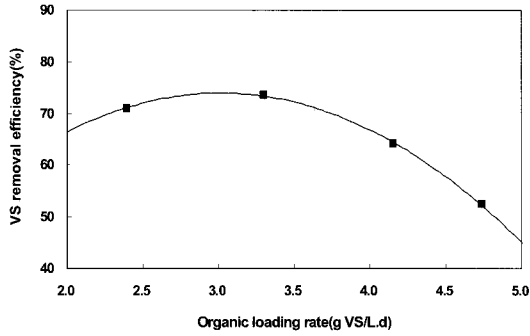


Fig. 11. VS removal efficiency related to VS loading rates during operating time.

나타내었는데, VS부하율은 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비를 3:7에서 9:1로 변화됨에 따라 2.39 g VS/L.d에서 4.73 g VS/L.d까지 증가하였다.

VS 제거효율은 VS부하율 3.30 g VS/L.d일 때 73.6%로 가장 높은 제거효율을 나타내었으나, 이 후 VS부하율이 증가함에 따라 제거효율도 점차 감소하여 VS 부하율이 4.73 g VS/L.d에서는 52.5%의 VS 제거효율을 나타내었다.

음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비를 3:7, 5:5, 7:3, 9:1로 운전했을 때 혼합비 및 유기물(VS) 부하율에 따른 각 반응조의 전체적인 소화효율을 살펴보기 위하여 하수슬러지를 혐기성 소화할 때 소화조의 소화효율을 산정하는 식 (1)을 이용하여 계산한 결과 R-1반응조~R-4반응조의 소화효율이 70.1%, 76.2%, 65.6%, 49.9%로 나타났다.

$$D = \left(1 - \frac{FS_1 \times WS_2}{VS_1 \times FS_2}\right) \times 100 \quad (1)$$

- 여기서, D : 혐기성 소화조의 소화효율(%)
- FS₁ : 투입 슬러지 중의 무기성분(%)
- VS₂ : 투입 슬러지 중의 유기성분(%)
- FS₂ : 소화 슬러지 중의 무기성분(%)
- VS₂ : 소화 슬러지 중의 유기성분(%)

각 반응조의 소화효율을 살펴보면 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비율이 5:5인 R-2반응조에서 76.2%로 높은 소화효율을 나타내었으나 혼합비가 9:1인 R-4반응조에서는 49.9%로 낮은 소화효율을 나타내었다.

앞에서 언급한 COD와 VS제거효율 결과로부터 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지를 혼합하여 처리할 경우 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비는 최대 7:3까지 가능할 것으로 판단된다.

소화가스 발생량 및 메탄함량

음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비에 따른 각 반응조(R-1, R-2, R-3, R-4)의 투입 기질당 소화가스발

Table 6. Gas production and methane content according to mixture ratios

Mixture ratio	VS loading rate (gVS/L.d)	Gas production (ℓ / g VS _{add} .d)	CH ₄ production (ℓ / g VS _{add} .d)	CH ₄ (%)
3 : 7	2.39	0.502	0.307	61.1
5 : 5	3.30	0.440	0.292	66.5
7 : 3	4.15	0.410	0.238	58.1
9 : 1	4.73	0.205	0.091	44.6

* ; Mixture ratio = fermented food waste : sewage sludge

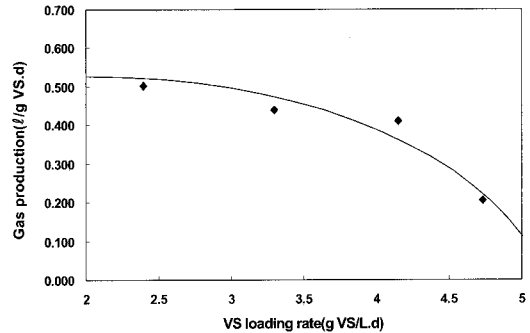


Fig. 12. Gas production related to VS loading rates.

생량, 메탄발생량, 소화가스내 메탄함량 등을 Table 6에 나타내었다.

각 반응조에서 제거된 g COD 당 가스발생량은 R-1반응조~R-3반응조의 경우 0.45~0.46 ℓ/g COD_{rem}.d로 비슷한 수준의 가스발생량을 나타내었으나, R-4반응조의 경우 0.32 ℓ/g COD_{rem}.d로 상대적으로 낮은 가스 발생량을 나타내었다.

한편, 투입된 g VS당 가스발생량은 R-1, R-2, R-3 및 R-4반응조에서 0.205~0.502 ℓ/g VS_{add}.d를 나타내어 전체적으로 음식물찌꺼기 고온 산발효액의 혼합비율이 높을수록 가스발생량이 감소하는 경향을 보이고 있다.

즉 Fig. 12에 보이는 바와 같이 VS부하율이 증가할수록 가스발생량은 감소하는 것으로 나타났으며, VS 부하율이 4.73 g VS/L.d인 R-4반응조에서 가스발생량이 0.205 ℓ/g VS_{add}.d로 낮게 나타났다.

각 혼합비별로 VS부하율에 따른 소화가스내 메탄생성량과 함유량을 Fig. 13에 나타내었다. 소화가스내 메탄생성량은 혼합비가 3:7인 R-1반응조에서 0.307 ℓ/g VS_{add}.d, 혼합비가 5:5인 R-2반응조에서 0.292 ℓ/g VS_{add}.d, 혼합비가 7:3인 R-3반응조에서 0.238 ℓ/g VS_{add}.d, 혼합비가 9:1인 R-4반응조에서 0.091 ℓ/g VS_{add}.d로 나타나 음식물찌꺼기 고온 산발효액의 혼합비율이 높아져 반응조내의 VS부하율이 증가할 경우 상대적으로 메탄생성량은 감소하는 것을 알 수 있었다.

Ghosh 등¹⁶⁾이 섬유질 폐기물(cellulose waste)을 190일 동안 이상 혐기성 소화를 실시한 결과 유입폐기물 1 g VS당 0.3 ℓ CH₄을 생성하였다는 보고와 비교했을 때 R-1, R-2반

응조에서 메탄생성이 원활하였던 것으로 나타났다. 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합비에 따른 소화가스내 메탄함량은 혼합비 3:7, 5:5, 7:3, 9:1의 혼합비에서 각각 61.1%, 66.5%, 58.1%, 44.6%로 측정되어 혼합비 5:5에서 가장 높은 메탄 함량을 나타내었다.

혐기성 소화조의 설계기준¹⁷⁾에 소화가스내 메탄(CH₄)의 함량이 60~70%로 되어 있고, 또 혼합유기산을 이용한 혐기성 소화 실험에서 메탄(CH₄)함량이 50~70%로 나타났다는 Chiu¹⁸⁾의 보고를 감안하면 본 실험의 경우 R-4반응조를 제외한 나머지 반응조에서는 운전기간동안 정상적인 소화가 일어났음을 알 수 있었다.

Table 7에는 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의

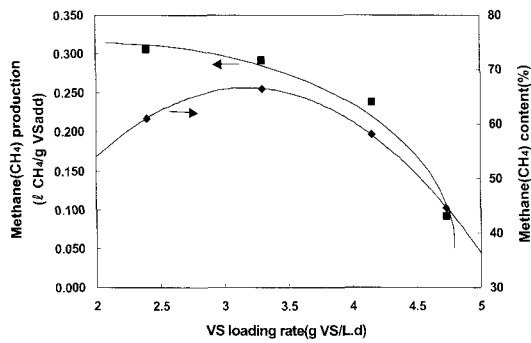


Fig. 13. CH₄ production and CH₄ content according to VS loading rates.

Table 7. CH₄ and energy production according to mixture ratios

Mixture ratio	CH ₄ production (m ³ CH ₄ /kg VS _{add})	Energy production	
		(kcal/kg VS _{add}) ^{**}	(kWh/kg VS _{add})
3 : 7	0.307	2,646	1.18
5 : 5	0.292	2,517	1.13
7 : 3	0.238	2,052	0.92
9 : 1	0.091	784	0.35

* : Mixture ratio = fermented food waste : sewage sludge

** : CH₄ production × 8,620 kcal/m³ CH₄

혼합비에 따른 VS주입당량 발생하는 CH₄ 발생량과 이에 대한 에너지 환산값을 나타내었다.

에너지 회수 가능량은 가스발생량중 메탄량을 측정하고, 메탄의 발열량을 이용하여 추정하였다¹⁹⁾.

음식물찌꺼기 고온 산발효액의 혼합비율이 증가함에 따라 VS부하율이 증가하였으나, 주입된 kg VS당 생성된 메탄량은 감소하여 이에 따른 에너지 회수가능량도 감소하였다. 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지를 3:7, 5:5, 7:3, 9:1로 혼합하여 혐기성소화시켰을 때 회수가능한 에너지량은 kg VS주입당 각각 1.18 kWh, 1.13 kWh, 0.92 kWh, 0.35 kWh로 나타났다.

결과적으로 가스발생량과 가스내 메탄함량, 그리고 회수 가능한 에너지량등을 감안했을 때 음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지의 혼합소화할 경우 최대 7:3까지 가능하나 소화효율 측면에서 5:5로 하는 것이 최적인 것으로 나타났다.

경제성분석

음식물찌꺼기는 타생물의 영양원이나 대체에너지원으로 이용될 수 있는 잠재력을 가지고 있기 때문에 적절한 기술을 이용한 음식물찌꺼기 자원화는 천연자원의 소비를 감소시켜 환경보전에 큰 기여를 할 수 있다.

또, 2005년도부터 시 단위 이상 지역에서 음식물찌꺼기의 직접 매립이 금지됨에 따라 음식물찌꺼기의 자원화는 더욱 확대될 것이다.

그러나 현재 자원화 기술에는 본 연구내용인 하수슬러지와 의 연계처리를 비롯하여 혐기성 소화, 퇴비화, 사료화 등 여러 가지 방법들이 대두되고 있어 그 선정에 많은 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 문헌고찰을 통하여 음식물찌꺼기를 자원화하는 방법을 선정하는데 있어 중요 평가 사항인 실제 처리비용을 파악하고자 서울시²⁰⁾에서 각 처리 방법별 비용 산정(운반비 포함)을 한 자료를 Table 8에 제시하였고, 또 경기도²¹⁾와 김²²⁾과 효성²³⁾의 자료를 근거로 하여 산정한 처리 공법별 소요비용(운반비 제외)을 Table 9에 나타내었다.

서울시의 경우 Table 8에 나타난 바와 같이 음식물찌꺼기 처리비용에 있어 건조사료화 공정이 톤당 83,527원으로 가장 높았고, 습식발효사료가 톤당 57,068원으로 가장 낮게 산정

Table 8. Treatment cost of food waste with the same condition (unit:won/ ton)

Classification	Labor	Expenditure					Management cost	Profit	Total
		Depreciation cost	Facilities maintenance	Impurities disposal	Etc.	Sub total			
Aerobic compost	7,349	29,717	8,399	3,382	4,390	45,888	2,662	5,590	61,489
Anaerobic compost	7,349	21,969	9,145	26,632	4,390	62,136	3,474	7,296	80,255
Dry feed stuff	7,349	22,522	26,714	11,882	4,390	64,969	3,616	7,593	83,527
Wet feed stuff	7,349	22,522	12,017	3,132	4,390	42,061	2,470	5,118	57,068
sewagesludge connection treatment	7,349	15,206	4,975	26,632	4,390	51,202	2,928	6,148	67,627

되었다. 음식물찌꺼기를 하수처리장에서 병합 처리할 경우에는 톤당 67,627원으로 산정하여 혐기성 퇴비화, 건조 사료화보다는 낮았으나 호기성 퇴비화, 습식발효 사료화보다는 높게 나타났다.

그러나 Table 9에서는 음식물찌꺼기의 직접 처리방법중의 하나인 소각의 경우 1 ton당 처리비용이 노원소각장의 경우 36,903원으로 타 공법에 비해 상대적으로 낮은 단가를 나타내었으며, Table 9에는 나타나 있지 않지만 실제 처리방법별 비용의 우선순위는 매립에 의한 처리였으나 2005년부터 폐기물 관리법에 의거 음식물찌꺼기의 직접매립이 금지됨에 따라 본 검토대상에서는 제외되었다.

목동 소각장의 경우 시설설치비는 노원과 비슷하였으나 운영비에서 노원보다 높은 비용이 소요되어 음식물찌꺼기 1 ton당 처리비용이 56,148원으로 퇴비화보다 높은 비용을 나타내었다.

비교대상 처리공법 중 건식사료화에 의한 음식물찌꺼기의 처리에 비용에 가장 많이 소요되었는데, 1 ton당 처리비용이 149,103원으로 소각(노원)에 비하여 4배 정도, 호기성 퇴비화(난지도)의 3배 정도로 높은 단가를 나타내었다.

전반적으로 음식물찌꺼기의 처리비용별로 보면 소각, 호기성 퇴비화, 습식 사료화, 건식 사료화 순으로 운전비용이 낮은 것으로 나타났다.

Table 9에는 음식물찌꺼기를 산발효시켜 산발효 생성물과 하수슬러지를 병합처리하는 방식에 의해 음식물찌꺼기를 처리할 경우 1톤당 처리비용이 23,505원으로 타 처리공법에 비하여 상대적으로 낮은 처리비용을 나타내었다.

위의 결과들로 볼 때 기존 하수처리장의 여유용량을 이용하는 음식물찌꺼기와 하수슬러지의 병합처리는 타 공법과 비교하여 경제성이 있는 것으로 나타났으며, 또한 처리비용 산정에서 제외된 발생 메탄가스를 이용한 에너지 회수면을 감안한다면 실제로 다른 처리방법에 비해서 상대적으로 낮은 비용이 소요되는 것을 알 수 있었다.

한편, 본 연구와는 달리 음식물찌꺼기를 산발효하지 않고 전처리 과정을 거쳐 하수처리장 혐기성 소화조로 바로 투입하여 음식물쓰러지와 하수슬러지를 혼합소화하는 방법도 연구되고 있는데, 이러한 처리방법의 경우 박²⁴⁾은 음식물찌꺼기와 하수슬러지의 혼합비가 최대 3:7이하로 운전하는 것이 바람직하다고 제시하고 있으며, 또 다른 문헌¹³⁾에서는 음식물찌꺼기와 농축슬러지의 혼합처리 최대 가능량은 혼합비 1:4 수준인 것으로 보고하고 있다.

이러한 자료들을 근거로 하여 산발효를 하지 않았을 경우 음식물찌꺼기와 하수슬러지의 적정 혼합비를 1:4 정도라고 가정하면, 본 연구의 결과인 음식물찌꺼기 산발효 생성물과

Table 9. Comparison of the economical efficiency between food waste treatment methods

Classification	Treatment costs (won/ton)	Average (won/ton)	Remark
Incineration I	34,884~38,928	36,903	Nowon
Incineration II	52,045~60,252	56,148	Mokdong
Aerobic composting I	41,495~45,669	43,582	Nanjido
Aerobic composting II	35,958~41,719	38,688	H parm
Dry feed stuff	149,103	149,103	Everland
Wet feed stuff	69,027	69,027	Hwasung
Food waste and sewage sludge connection treatment	23,505	23,505	-

Table 10. Comparison of the food waste treatment efficiency according to existence or nonexistence of thermophilic acid fermentation

Classification	co-digestion food wastes and sewage sludge	
	without thermophilic acid fermentation	using thermophilic acid fermentation
Optimum mixture rate	4 : 1 (sewage sludge:food waste)	1 : 1 (sewage sludge:food waste)
Organic loading rate	2.0 g VS/L.d	3.3 g VS/L.d
Food waste treatment quantity	125 ton/d (on the basis of sewage sludge 500 ton/d)	500 ton/d (on the basis of sewage sludge 500 ton/d)
Treatment cost (converted landfill cost)	125 ton/d×15,000 won/ton = 1,875,000 won/d	500 ton/d×15,000 won/ton = 7,500,000 won/d
Additional expense	-	Chemicals : 1,500 kg/d × 660 won/kg = 990,000 won/d

* : landfill cost in Pusan metro city

하수슬러지의 적정 혼합비 1:1과 비교할 때 음식물찌꺼기를 산발효할 경우 더 높은 부하에서 혼합소화가 가능해지기 때문에 더 많은 양의 음식물찌꺼기를 처리할 수 있는 것으로 나타났다.

따라서, 산발효의 유무에 상관없이 음식물찌꺼기를 하수슬러지와 병합처리할 경우 음식물찌꺼기를 선별, 분쇄, 농축하는 전처리 시설들이 반드시 필요하다는 점을 감안한다면 약품비등의 일부 추가비용만 소요하여 음식물찌꺼기를 산발효하는 것이 Table 10에 나타난 바와 같이 음식물찌꺼기와 하수슬러지의 혼합소화에 더 효율적인 것으로 판단된다.

또 음식물찌꺼기를 산발효할 경우 음식물찌꺼기와 하수슬러지의 소화속도 차이로 발생할 수 있는 scum 등의 문제점들을 해결할 수 있어 경제적 분석이외의 또 다른 효용가치를 부여할 수 있다.

결론적으로 본 경제성 분석은 음식물찌꺼기 처리시 발생하는 비용들을 문헌고찰을 통하여 비교, 제시하고 있기 때문에 기존 처리방법의 개선, 새로운 처리방법의 개발, 그리고 실제 현장의 적용이 있어 다소 차이가 있을 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 실험실 규모의 혐기성 소화 실험을 통하여 고온산발효를 거친 음식물찌꺼기 산발효액과 하수슬러지의 적정 혼합비와 유기물 부하율에 따른 반응조 운전특성을 분석하여 실제 플랜트에 적용가능성을 검토하여 얻은 결론은 다음과 같다.

음식물찌꺼기 고온 산발효액과 하수슬러지를 혼합하여 연속식으로 혐기성 소화실험을 실시한 결과 유기물 부하율 3.3 gVS/L.d(혼합비 1:1)에서 최적인 것으로 평가되었는데, 이때 SCOD 제거효율은 평균 74.2%, VS 제거효율은 73.6%, 주입된 VS당 생성된 가스량은 0.440 l/g VS_{add}.d였으며 평균 메탄 함량은 66.5%로 나타났다. 이는 기존에 음식물찌꺼기를 하수처리장의 중온 소화조에서 처리할 때의 유기물 부하보다 높아 효율성, 경제성에서 유리한 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 경북환경기술개발센터의 연구개발사업 지원에 의해 이루어진 것이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Shin, H. S., Han, S. K., Song, Y. C., and Lee, C. Y. (2001) Food Waste Treatment Using MUSTAC Process. *J. KSWES* 18(1), 43-50.
2. Kim, D. H. and Kim, I. S. (1998) Study on the Determination of Kinetic Coefficients and Tendency of VFA Degradation under Thermophilic Anaerobic Digestion. *J. KSWES* 15(3), 184-190.
3. McMahon, K. D., Stroot, P. G., Mackie, R. I., and Raskin, L. (2001), Anaerobic codigestion of municipal solid waste and biosolid under various mixing condition-II, Microbial population dynamic. *Wat. Res.* 35(7) 1817-1827.
4. Mata-Alvarez, J., Mace, S., and Llabres, P. (2000) Anaerobic digestion of organic solid waste. An overview of research achievements and perspectives. *Bioresource Technology*, 74, 3-16.
5. Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., and Forster, C. F. (1999) Co-digestion of waste organic solid : batch studies. *Bioresource Technology*, 67, 117-122.
6. Misi, S. N., and Forster, C. F. (2001) Batch co-digestion of multi-component agro-wastes. *Bioresource Technology*, 80, 19-28.
7. Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayanithy, K., and Forster, C. F. (2002) Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass and Bioenergy*, 27, 71-77.
8. Lafitre-Trouque, S. and Forster, C. F. (2000) Dual anaerobic co-digestion of sewage sludge and confectionary waste. *Bioresource Technology*, 71, 77-82.
9. Cho, J. K (1995) A study on the two-phase anaerobic digestion of food wastes. Kaist.
10. Byun, I. G. (2000) a study on co-digestion of food wastes and sewage sludge by two stage anaerobic digester. Pusan University.
11. ATV (1970) Lehr-und Handbuch der ABWASSER TECHNIK Band III Zweite Auflage. 155-156.
12. McCarty, P. L (1964) Anaerobic Waste Treatment Fundamentals, Public Works. 91-126.
13. Clark, R. H. and Speece, R. E. (1970) The pH tolerance of anaerobic digestion. 5th International Water Pollution Research Conf. II, 27, 1-14.
14. De Baere, L. A., Devocht M., Van Assche, P., and Verstraete, W. (1984) Influence of High NaCl and NH₄Cl Salt Levels on Methanogenic Associations. *Water Res.*, 18(5), 543-548,
15. Karapanogiotis, N. K., Rudd, T., Sterritt, R. M., and Lester, J. N. (1989) Extraction and haracterization of Extracellular Polymers in Digested Sludge. *J. Chem. Tech. Biotchnol*, 44, 107-120.
16. Ghosh (1983) Novel two-phase anaerobic gasification with solid bed acid digestion in tandem with fixed-film methane fermentation. *Proc. U. Ins.*,

- Chicago.
17. Anonymous (1987) *Anaerobic Sludge Digestion. Manual of Practice No.16, 2nd Edition*, Water Pollution Control Federation.
 18. Chiu-Yue, Kazuaki, Tatsuya Noike, and Junichiro Matsumoto (1985) *Methanogenic Digestion of Acetic, Propionic, Butyric Acids. Water Res.*
 19. 環境技術研究會都, 都市ごみ 處理 ガイドブック, 理工新社, 181 (1987).
 20. 서울시정개발연구원 (2001) 서울시 자치구의 남은음식물 처리기반 확보방안.
 21. 경기개발연구원 (1998) *음식물 재활용 방안에 관한 연구.*
 22. 김광임, 최상기 (1997) *음식물쓰레기 처리방법별 기술 및 비용편익분석 연구.* 환경정책평가연구원.
 23. 효성에바라 환경엔지니어링 주식회사 (1998) *하수처리장을 이용한 음식물쓰레기의 병합처리.* 폐기물 자원화 학회지, 8(2), 21-27.
 24. Park, N. b. (1999) *Food waste and sewage sludge mixture treatment using anaerobic digestion.* Pukyung University.
-