

## Pilot scale 2단 혐기성 소화조를 이용한 음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합처리

박 남 배, 이 헌 모\*, 이 병 현\*\*

부산광역시청 청소관리과, \* 동의공업대학 환경시스템공학과, \*\* 부경대학교 환경공학과

### Mixture treatment of food waste and sewage sludge using pilot scale anaerobic digester

Nam-bae Park, Heon-Mo Lee\*, Byung-Heon Lee\*\*

Dept. of Wastes Management, Pusan Metropolitan City Hall, Pusan, Korea

\* Dept. of Environmental Systems Engineering, Dongeui Institute of Technology, Pusan, Korea

\*\* Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National University, Pusan, Korea

#### ABSTRACT

Recently, the treatment of that wastes according to increase of food waste has been a great problem of modern society for long time.

This study was aimed to evaluate possibility for food waste and sewage sludge mixture treatment using pilot scale two-phase anaerobic digester. Pilot scale two-phase anaerobic digestion system was performed at 1 : 9 mixture ratio of food waste and sewage sludge in field. The detention time of digester was 20days. The average COD and VS removal efficiencies in organic loading rate  $3.03\text{kg TCOD}/\text{m}^3\text{-day}$  were 57.7 and 47.7%, and the gas production rate and methane content were  $0.4 \text{ m}^3/\text{kg VS-day}$  and 65.3%, respectively. TS, VS and VS/TS(%) of mixing tank were 4.44%, 2.59% and 58.34%, respectively and TS, VS and VS/TS(%) of digester in steady state were 3.32%, 1.39% and 41.90%, respectively. Through this study, it was possible to accomplish effective mixture treatment of the sewage sludge and food waste.

Key Words : Food waste, sewage sludge, two-phase anaerobic digestion

## 초 록

최근에 음식물쓰레기의 증가에 따라 폐기물의 처리가 현대사회의 큰 문제로 되었다.

본 연구는 음식물 쓰레기와 하수슬러지 혼합물의 2단 혐기성소화조에 의하여 소화의 가능성을 검토할 목적으로 수행되었다. 음식물쓰레기와 하수슬러지를 1:9의 비율로 하여 파이롯트 2단 소화시스템을 사용하여 현장에서 운전하였으며, 체류기간은 20일로 유지했다. 3.03kg TCOD/ $m^3$ day의 유기물 부하에서 COD와 VS 제거 효율이 57.7%와 47.7%를 보였으며, 가스 생성율과 메탄의 함량은 0.4 $m^3$ /kg vs.day와 65.3%로 나타났다. 이러한 결과로 부터 하수슬러지와 음식물쓰레기의 혼합처리가 효과적인 것으로 밝혀 졌다.

**주제어** : 음식물쓰레기, 하수슬러지, 2단혐기성소화

### 1. 서 론

유기성폐기물을 이용한 혐기성소화에 대한 연구는 1936년 Barbit 등에 의하여 시작된 이후 지난 20여년 동안 유럽을 중심으로 발전하여 왔다. 현재 DRANCO (De Baere, et al., 1984), VALORGA(Bonhomme and Caire, 1984), BIOCEL(De Brummeler, et al., 1988) 와 같은 많은 상업화된 공정들이 개발되어져 있으나 아직 현장 적용에 대한 경험이 부족한 상태이며, 유기물 전환효율도 낮은 상태이다. 유기성 폐기물의 연속식 이상 혐기성 소화방법에 의한 최초 pilot 규모의 공정은 독일의 FAL system으로 Weiland 등 (1992)은 biogenic solid(sugar beet pulp, brewer's grains)을 대상으로 6 $m^3$  규모의 단상 혐기성소화와 2.5 $m^3$ 의 가수분해 및 산생성 반응조와 1 $m^3$ 의 메탄발효조를 조합한 이상 혐기성 소화조를 이용 비교 실험한 바 있다. 이들의 실험에서 단백질 함량이 낮은 C/N비가 35~40 범위인 pulp 처리는 단상 혐기성 소화조가 바람직하며, 단백질 함량이 많은 C/N비가 9~11 범위인 양조장 부산물 처리에는 이상 혐기성 소화시스템이 경제적으로 유리하다고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 부산시 S 하수처리장의 하수슬러지 처리를 위한 혐기성소화조에서 소화조 여유 용량만큼 음식물쓰레기를 처리하기 위한 목적으로 기존 하수처리장의 2단 혐기성 소화시스템을 pilot 규모로 제작하여 음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합처리에 대한 운전특성을 평가하기 위한 현장실험으로서 실규모의 기존 혐기성소화 시설에 적용하기 앞서 실공정에서 발생하는 문제점을 pilot 실험을 통하여 사전 점검과 동시에 처리 가능성을 평가하는데 그 목적이 있다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 실험장치

본 연구에 사용한 pilot 실험장치는 Fig. 1과 같이 실제 하수슬러지를 처리하고 있는 소화조 장치와 동일한 2단 혐기성 소화조 형태로 설계하였다. 1단 및 2단 소화조 본체의 규격은 내경 2.2m, 높이 3.2m, 유효용량 9.5 $m^3$ 인 원형탱크로 재질은 철판을 이용하여 제작하였으며, 내부에 방식처리를 하여 철판의 부식을 방지하였다. 반응조내 미생물과 기질의 원활한 혼합을 위하여 교반기를 부착하였으며, 교반기는 120 rpm으로 운전하여 반응조내 완전혼합이 이루어지도록 하였다. 또한 중온성 소화

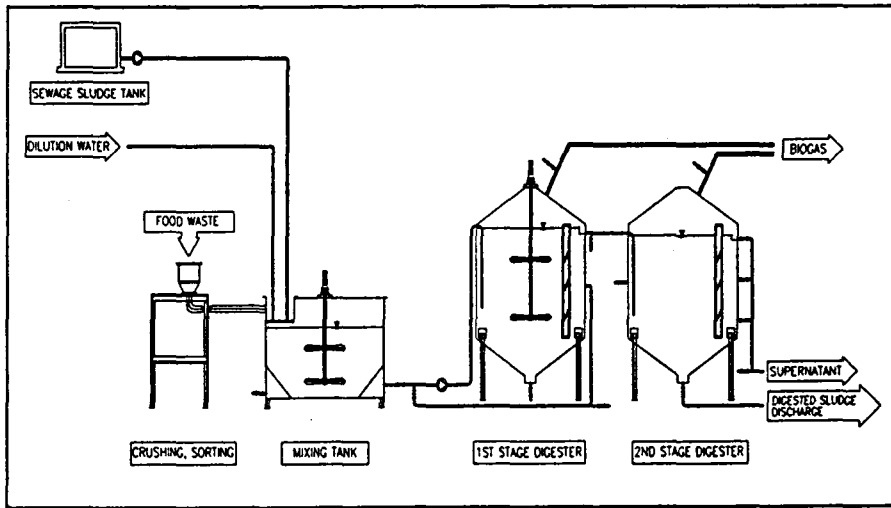


Fig. 1. Schematic diagram of pilot scale anaerobic digestion system.

조건인  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  로 유지하기 위하여 반응조 외부에 유리섬유로 감싸고 그 내부에 열선을 감아 가열되도록 하였고, 반응조 내부에 온도계를 설치하여 자동온도 조절장치로 온도가 조정되도록 하였다. 음식물쓰레기를 반응조내로 원활하게 연속 유입시키기 위한 전처리시설로서 파쇄기(200kg/hr)를 설치하여 음식물쓰레기를 10mm 이하로 파쇄하였으며 이후 희석수와 함께 혼합저류조(1.3m<sup>3</sup>)에서 혼합시킨 후 소화조에 유입되도록 하였다. 유입슬러지는 모노펌프를 이용하여 일정량을 연속적으로 반응조내에 주입되도록 하였다.

소화가스량 측정을 위하여 각 소화조 상부에 가스메타를 설치하였고, 가스 분석을 위하여 상부에 가스 포집구를 설치하였다.

## 2.2 실험 방법

본 실험에 사용한 식중슬러지는 부산시 S 하수처리장의 소화슬러지를 실험에 이용하였다. 음식물쓰레기는 부산광역시 연제구 일원의 500세대 이상의

아파트 단지에서 배출되는 쓰레기를 파쇄기로 파쇄한 후 사용하였고, 하수슬러지는 S 하수처리장의 농축슬러지를 사용하였다. 이때의 TS 함량은 소화슬러지 3~4%, 2차 활성슬러지 3~4% 및 음식물쓰레기 약 20%였다. 반입된 음식물쓰레기는 1차적으로 수작업을 통해 헝겍물을 선별 제거하여 파쇄기에서 파쇄한 후 혼합조로 투입하였고, 하수슬러지는 하수처리장의 슬러지 저류조에서 이송라인을 통하여 직접 이송하였다. 음식물쓰레기의 혼합과 적정 함수율을 유지하기 위하여 하수처리장의 처리수를 희석수로 사용하였다. 혼합저류조로 이송된 음식물쓰레기, 하수슬러지 및 희석수를 균등하게 교반 혼합시킨 후 모노펌프를 이용하여 소화조로 유입되도록 하였으며, 타이머를 이용하여 24시간 반연속식으로 일정량 주입되도록 하였다.

소화방식은 중온성 고율 2단 혐기성 소화조로서  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  유지하였고, 1단 소화조는 반응조내 미생물과 기질의 원활한 혼합을 위하여 교반기로서 120rpm을 유지하였으며, 2단 소화조에서는 소화

슬러지와 상등수가 분리되도록 교반을 수행하지 않았다.

pilot plant에 유입되는 하수슬러지 및 음식물쓰레기양의 결정은 현재 가동중인 하수처리장의 유입 하수 수질과 하수슬러지의 발생량을 고려하여 검토하였다. 현재 S 하수처리장의 설계 유입하수량은 550,000m<sup>3</sup>/일이며, 유입수질은 하수처리장의 '96.1~'98.3까지의 운전자료를 평가한 결과 BOD와 SS의 유입수질은 각각 114mg/l, 117mg/l로 조사되어 이 자료를 사용하였다. 그리고 하수처리장에서 발생하는 1차 슬러지는 중력농축조로 이송되고 2차 슬러지는 원심력 농축조로 보내어져 부피를 저감시키는데 중력농축후 슬러지의 함수율은 95.5%이고 발생량은 866m<sup>3</sup>/일이며, 원심농축후 슬러지의 함수율은 94.3%이고 발생량은 496m<sup>3</sup>/일 으로서 두가지를 혼합한 농축슬러지의 발생량은 1,362m<sup>3</sup>/일로 평가되었다.

따라서 S 하수처리장의 전체 소화조 용량 1,500m<sup>3</sup>/일에 대하여 여유 용량이 138m<sup>3</sup>/일 발생되었으나 희석수 사용 등 여건을 고려하여 음식물쓰레기의 주입 가능량을 104톤으로 결정하였으며, 이때의 소화조 체류시간은 20일이었다. 따라서 음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합처리를 위한 pilot plant의 체류시간은 동일하게 20일로 하고 pilot plant의 처리용량 9.5m<sup>3</sup>에 대하여 음식물쓰레기와 하수슬러지의 주입량을 Table 1에 나타낸 바와 같이 음식물쓰레기 63kg, 하수슬러지 554L 및 희석수 63L를 혼합하여 일일 680L가 주입되도록 하였고 이때의 음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합비는 1:9 였으며, 이에 따른 유기물부하는 1.86kg VS/

m<sup>3</sup>일이었다.

### 2.3 시료조제 및 분석방법

#### 2.3.1 시료선정 및 전처리

본 실험에 사용된 시료는 부산광역시 연제구 일원의 500세대 이상의 아파트 단지, 단독주택 및 식당에서 배출된 음식물쓰레기를 2일에 1번 전용 차량으로 수집하여 헹잡물을 제거하고 파쇄기로 파쇄한 후 사용하였다. 수거된 음식물쓰레기는 각 발생원에서 배출된 후 2-3일 정도 경과되었으며, 일부 음식물쓰레기는 퇴비화 및 악취제거를 위하여 EM(effective microorganism)발효제를 주입한 쓰레기가 포함되어 있었다. 그리고 하수슬러지는 일일 55만 처리규모의 S 하수처리장에서 발생한 1차 및 2차슬러지가 혼합된 슬러지를 사용하였다. 음식물쓰레기의 혼합과 적정 함수율을 유지하기 위하여 하수처리장의 처리수를 희석수로 사용하였다.

#### 2.3.2 시료의 채취 및 분석방법

운전특성을 평가하기 위한 분석항목은 유입시료(음식물쓰레기 및 하수슬러지), 혼합저류조, 1단소화조 및 2단소화조 상등수의 pH, 알칼리도, TS, VS, COD를 주 2-3회 측정하였다. 그리고 발생가스량은 가스메타로서 매일 측정하였으며, 가스조성은 주 2회 분석하였다. 실험의 분석절차는 Standard Methods(APHS, AWWA, WPCF, 1996) 분석방법에 준하여 실험하였다.

## 3. 결과 및 고찰

Table 2. Operating conditions of pilot plant

Feeding volume			Organic loading (kg VS/m <sup>3</sup> .d)	HRT (day)
food waste	sewage sludge	water		
63kg	554 l	63 l	1.86	20

Table 2. Summary of chemical factors during operation

Feeding Volume (l/d)	Temp. (°C)	pH				Alkalinity(mg/l)	
		food waste	sewage sludge	mixing reactor	digester	mixing reactor	digester
680	35±1	4.29 (3.89-4.70)	6.44 (6.32-6.67)	5.45 (5.16-5.80)	7.31 (6.80-7.55)	1,242 (900-2,200)	4,570 (3,600-5,350)

3.1 반응조내 화학적 인자의 변화

혐기성 처리시 반응조내 화학적 인자는 반응조의 반응상태를 나타내는 중요한 지표가 된다. Table 2는 음식물쓰레기, 하수슬러지, 혼합저류조 및 소화조의 pH와 알칼리도를 나타내었으며, 운전기간에 따른 이들 값의 변화를 Fig. 2에 도시하였다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 반응조 유입전 음식물쓰레기와 하수슬러지의 pH는 각각 4.29 및 6.44였으며, 이들을 혼합한 혼합 저류조에서의 pH는 5.45로 혐기성소화를 위한 유입수로서는 비교적 낮은 수치였다. 그러나 혼합 처리가 이루어진 소화조

의 내의 pH는 7.31 정도로 유지되어 혐기성 소화에 적당한 일반적인 pH 범위인 6.0~8.0의 값 (Benfield et al., 1980)을 나타내어 pH에 의한 악영향은 없었던 것으로 나타났다. 이와 같이 음식물쓰레기와 하수슬러지를 혼합한 혼합저류조에서 pH가 5.45에서 혐기성 소화처리한 소화조에서는 pH가 7.31로 상승되었는데 이러한 현상은 음식물쓰레기의 혼합처리에 따른 알칼리도의 생성에 기인된 결과로 판단된다. 이러한 현상은 알칼리도의 결과에서도 잘 나타나 있는데 이러한 알칼리도의 증가 현상은 음식물쓰레기내 함유된 단백질 성분의

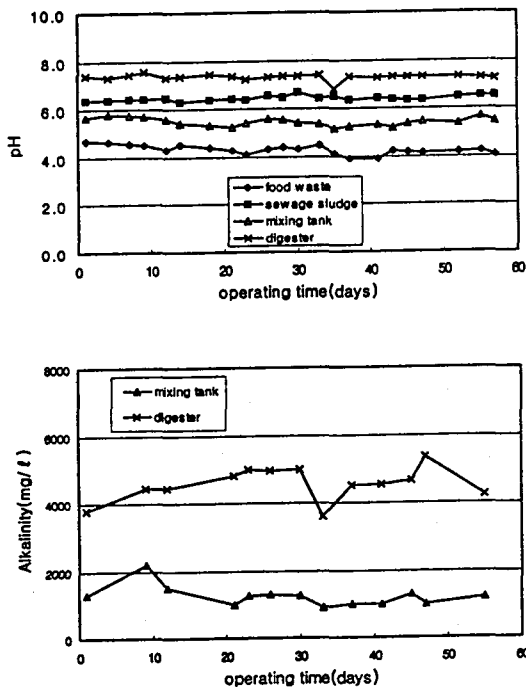


Fig. 2. Variations of pH and Alkalinity during operating time.

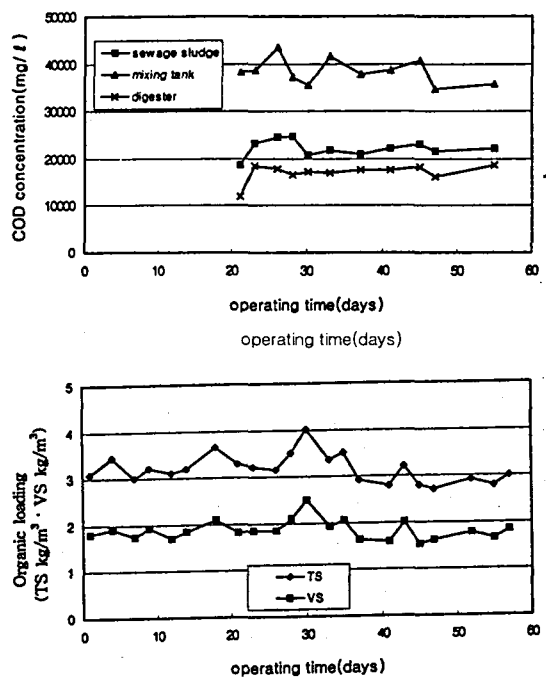


Fig. 3. Variations of COD concentration and organic loading during operating time.

분해로 인한 NH<sub>4</sub>OH의 생성원인으로 판단된다.

한편 알칼리도는 반응조내 pH에 대한 완충능력을 나타내는 것으로 전과정을 통하여 소화조내 알칼리도는 3,600~5,350mg CaCO<sub>3</sub>/l의 범위로 일반적인 혐기성 소화조내의 허용치인 1,000~5,000mg CaCO<sub>3</sub>/l에 들고 있어 반응조내의 완충능력은 충분했던 것으로 판단된다. 이상의 결과를 통해서 음식물쓰레기와 하수슬러지를 혼합하여 혐기성으로 혼합처리할 경우 혼합액의 pH에 따라서 음식물쓰레기와 하수슬러지를 혼합처리할 경우 혼합액의 pH가 정상적인 소화조의 유입수 pH 범위보다 낮다 하더라도 자체 알칼리도의 상승 영향으로 인하여 회복될 수 있으며 소화조내 pH의 안정을 위하여 별도의 pH조정을 위한 약품 첨가 및 인위적인 알칼리도의 첨가는 필요치 않는 것으로 평가되었다.

### 3.2 반응조의 운전특성

음식물쓰레기와 하수슬러지와의 혼합처리 능력을 평가하기 위하여 pilot 규모의 2단 혐기성 소화조에서 음식물쓰레기와 하수슬러지와의 혼합 부피비를 1:9로 하고 소화시간을 20일로 하여 운전효율을 검토하였다.

#### 3.2.1 유기물 제거특성

운전 기간중 하수슬러지, 혼합저류조 및 소화조

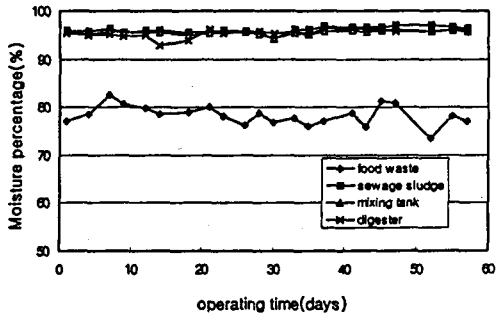


Fig. 4. Variations of moisture percents during operating time.

의 COD 변화와 소화조내 TS, VS의 부하 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 COD값은 운전 시작 후 약 20일까지 불안정한 값을 나타내어 정상적인 운전상태를 나타내는 20일이 경과된 후 유출수 농도를 측정하였는데 30일 경과 시부터 일정한 유출수 값을 얻는 것으로 나타났다. 이때 소화조 유입슬러지의 TS 부하는 3.21kg TS/m<sup>3</sup>.d 였고, VS 부하는 평균 1.86kg VS/m<sup>3</sup>.d 였다. 음식물쓰레기와 하수슬러지와의 혼합액의 평균

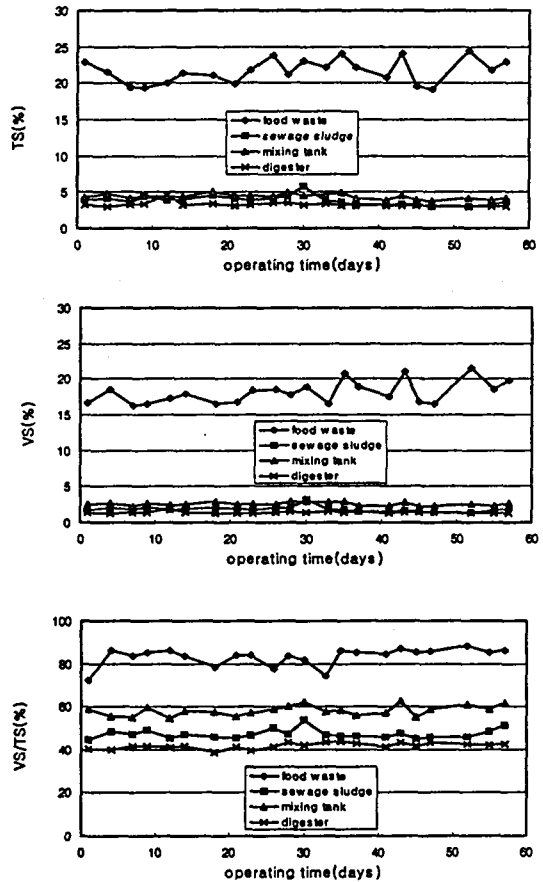


Fig. 5. Variations of TS, VS and VS/TS(%) during operating time.

TCOD 농도는 42,275mg/l 이고 소화 후 유출수의 TCOD 농도는 17,869 mg/l로서 유기물부하 3.03kg TCOD/m<sup>3</sup>·d에서의 소화조내의 COD 제거 효율은 평균 57.7%로 나타났다.

### 3.2.2 TS, VS의 변화

운전 기간중 음식물쓰레기, 하수슬러지, 혼합저류조 및 소화조에서의 수분함수율과 TS, VS 및 VS/TS(%)의 변화를 Fig. 4 및 Fig. 5에 도시하였

다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 음식물쓰레기 및 하수슬러지의 TS, VS 및 VS/TS(%)는 각각 21.61%, 17.91% 및 82.87%와 3.84%, 1.79% 및 46.55%였다. 그리고 음식물쓰레기, 하수슬러지 및 희석수를 혼합한 후 혼합저류조의 TS, VS 및 VS/TS(%)는 각각 4.44%, 2.59% 및 58.34%였으며, 정상상태에서의 소화조의 TS, VS 및 VS/TS(%)는 각각 3.32%, 1.39% 및 41.90%로서 소화효율은 평균 47.7%였다.

또한 소화조 유출수의 TS가 운전 기간에 따라 일정하게 나타나고 있어 반응조내 TS의 높은 농도로 인하여 소화조내에 심각한 저해현상 없이 반응이 진행되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 3의 일정한 유출수 COD 값과 잘 일치하고 있음을 나타내고 있다.

### 3.2.3 가스발생량

유입수 휘발성유기물의 유기물부하에 대한 가스 발생변화를 Fig. 6에 나타내었다. 운전기간중의 평균 유기물 부하는 1.86kg VS/m<sup>3</sup>·day였으며, VS 제거효율은 47.7%로서 주입된 VS당 생성된 가스의 량은 0.4 m<sup>3</sup>/kg VS·day였다. 그리고 운전중 평균 메탄함량은 65.3%로 나타났다. 이러한 결과치를 Ghost 등(1983)은 고휘폐기물을 대상으로 2단 혐기성소화 실험으로 섬유질 폐기물을 처리하

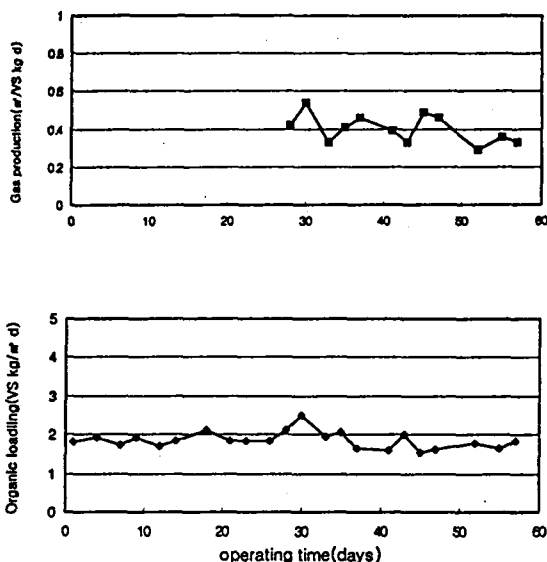


Fig. 6. Variations of gas production and organic loading during operating time.

였는데 190일동안 운전한 결과 휘발성 고휘물질 1kg당 0.3m<sup>3</sup>의 메탄생성과 60%의 휘발성 고휘물질이 제거된다고 보고하였고, Anderson 등(1992)은 2단 혐기성소화방식으로 도시고형폐기물을 약 100일간 운전한 결과 1kg VS당 270 l의 메탄을 생성하였으며, 초기휘발성 고휘물질의 73%가 가스로 전환되는 결과를 얻었다고 보고한 결과와 비교 할 때 최종 메탄생성량의 측면에서는 약간 높은 수치를 나타낸 반면 VS제거효율은 낮은 수치를 보였다.

### 3.2.4 염의 농도변화

운전 기간중 음식물쓰레기, 하수슬러지, 혼합저류조 및 소화조에서의 염분농도의 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 음식물쓰레기 및 하수슬러지의 염분 농도는 각각 1.4~2.05% 및 0.09~0.11%로 나타났다. 그러나 이를 혼합처리하기 위하여 혼합한 저류조에서의 염의 농도는 0.17~0.27%의 범위를 나타내 혐기성

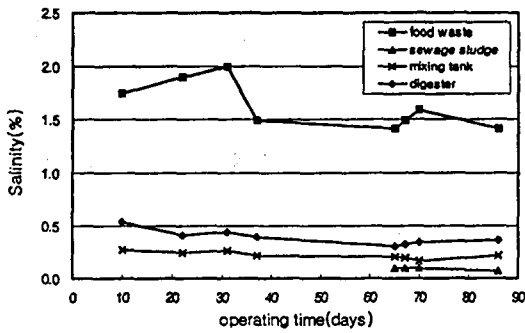


Fig. 7. Variations of salinity concentration during operating time.

처리한 소화조에서의 염의 농도는 0.24~0.46% 범위로 혼합액의 염분 농도에 비해 약 1.5배의 증가한 현상을 보였다. 이러한 현상은 음식물쓰레기의 염분농도 측정시는 고형물 상태로서 측정되지만 소화조에서 분해가 되면서 용출되어져 높게 나타나는 것으로 판단된다.

Shin 등(1993)의 보고에 의하면 음식물쓰레기 중에 2~3g Na<sup>-</sup>/l 이 함유되어 있으며 나트륨이온에 대한 저해효과 실험결과 2g Na<sup>+</sup>/l 에서는 영향을 받지 않았으나 7.8g Na<sup>+</sup>/l 에서는 최대메탄발생율의 50% 감소하는 저해효과를 나타내었다는 연구결과와 비교해 보면 혼합처리시 염분의 농도가 낮은 하수슬러지를 혼합함으로써 염분의 농도가 희석되어 영향을 거의 받지 않는 것으로 평가할 수 있으며, 운전기간 동안 염분의 농축 현상은 관찰되지 않았다.

#### 4. 결론

음식물쓰레기와 하수 슬러지의 혼합처리 능력을 평가하기 위하여 pilot 규모의 2단 혐기성 소화조에서 음식물쓰레기와 하수슬러지와와의 혼합 부피비를 1:9로 하고 소화시간을 20일로 하여 운전효율을 검토한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 반응조 유입전 음식물쓰레기와 하수슬러지의 pH는 각각 4.29 및 6.44 였으며, 혼합 저류조에서의 pH는 5.45로 혐기성소화를 위한 유입수로서는 비교적 낮은 수 치였다. 그러나 혼합 처리가 이루어진 소화조의 내의 pH는 7.31 정도로 유지되어 음식물쓰레기와 하수슬러지를 1:9로 혼합하여 혐기성 처리할 경우 자체 알칼 리도의 상승 영향으로 인하여 회복될 수 있으며 별도의 pH조정을 위한 약품 첨 가 및 인위적인 알칼리도의 첨가는 필요치 않는 것으로 평가되었다.
2. 유기물부하 3.03kg TCOD/m<sup>3</sup>·d에서의 COD 제거효율은 평균 57.7%로 나타났고, VS 제거효율은 47.7%로서 주입된 VS당 생성된 가스의 량은 0.4m<sup>3</sup>/kg VS·d 였으며, 평균 메탄함량은 65.3%로 나타났다.
3. 음식물쓰레기, 하수슬러지 및 회석수를 혼합한 후 혼합저류조의 TS, VS 및 VS/TS(%)는 각각 4.44%, 2.59% 및 58.34%였으며, 정상상태에서의 소화조의 TS, VS 및 VS/TS(%)는 각각 3.32%, 1.39% 및 41.90%로 나타났다.
4. 음식물쓰레기, 하수슬러지, 혼합 저류조 및 소화조에서의 염분 농도는 각각 1.4~ 2.05%, 0.09~ 0.11%, 0.17~0.27% 및 0.24~0.46%의 범위였으며, 운전기간 동안 염분의 농축 현상은 관찰되지 않았다.

#### 참고문헌

- Anderson, G.K., and Saw, C.B. (1992). Leach-bed two-phase anaerobic digestion of MSW, Proc. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste, Venice, 14-17, April, pp171-179.
- APHA, AWWA and WPCF (1996). Standard



- methods for the examination of water and wastewater, 18th Ed.
- Benefield, L.D., C. W. Randall (1992). Biological process design for wastewater treatment. Prentice-Hall, Inc., pp. 82.
- Ghosh, et al. (1983). Novel two-phase anaerobic gasification with solid-bed acid digestion in tandem with fixed-film methane fermentation. Proc. Intl. Gas Res. Conf., London, England, June 13-16.
- Weiland, P. (1992). One- and two-step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues. Proc. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste, Venice, Italy, 14-17 April, 193-199.
- Shin, H. S., Song, Y. C., and Mun, M. J. (1993). A study on the feasibility of anaerobic digestion of food wastes by biodegradability test. J. Korea Solid Wastes Eng. Society, Vol. 10, No. 1 35-42.