

## 음식물쓰레기의 유기물 부하 및 식종율 변화가 생분해도에 미치는 영향

박남배 · 정용현\* · 양병수\*

부산광역시청 청소관리과 · 부경대학교 환경공학과\*

## The Effect of Organic Loading and Seeding Rate to Biodegradability of Food Waste

Nam-Bae Park · Yong-Hyun Chung\* · Byung-Soo Yang\*

*Dept. of Waste management, Pusan metropolitan city, Pusan, Korea*

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

### Abstract

Energy recovery technology from municipal solid waste has been increasingly established in many countries. Anaerobic treatment of municipal sewage sludge has low digestion efficiency because of low organic loading rate of sewage sludge. The purpose of this study was to evaluate anaerobic biodegradability of food waste which was based on organic loading rate and seeding rate.

From the results of anaerobic biodegradation, the optimum condition for seeding rate was turn out over 40%, which did not inhibition of methane production.

### I. 서론

음식물쓰레기 및 하수슬러지와 같은 유기성폐기물은 전체쓰레기 발생량의 반 이상을 차지하고 있다. 이는 주로 매립처분 되고 있으며, 일부분만 재이용, 소각, 해양투기 등으로 처리되고 있다. 그러나 매립지 부족과 부패하기 쉬운 특성상 악취, 침출수 등 여러 가지 환경오염 문제를 유발하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 유기성 폐기물을 안정화, 감량화 시키기는 효과적인 처리·처분 기술의 개발이 폐기물 처리의 큰 목적으로 대두되고 있다. 그 방안 중의 하나가 유기성폐기물을 직, 간접적으로 생물의 에너지원으로 이용

하거나 메탄발효 등의 자원화 기술에 의해 화석연료의 대체 에너지원으로 전환시키는 것이다. 따라서 매립이나 소각 대신 음식물 쓰레기의 혐기성 소화 처리를 통한 자원화에 관심이 모아지게 되었다. 그러나 혐기성 운전시 pH 변화로 인한 메탄생성균의 성장저해, 생성되는 중화산물의 저해작용 및 알카리 첨가에 의한 경제성 감소는 음식물 쓰레기의 혐기성 처리에 대한 새로운 방안이 요구되어지고 있다.<sup>1-2)</sup> 이러한 문제점에 대한 해결방안의 하나로 하수 슬러지에 음식물 쓰레기를 혼합 처리함으로써 기존의 하수슬러지 처리에 유기물 부하를 증가시켜 소화효율의 향상과 음식물쓰레기의 매립 및 소각시 발생하는 문제점을 해결하기 위한 음식

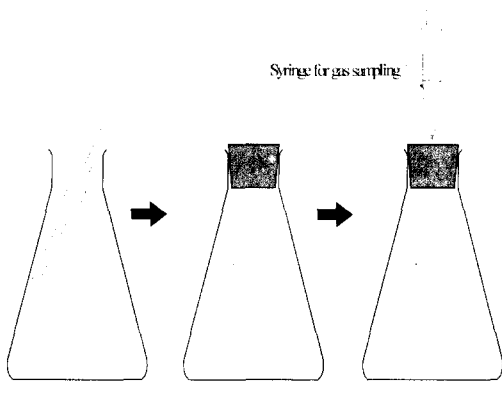
물쓰레기의 저감에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>39)</sup>

본 연구에서는 음식물쓰레기 저감에 대한 연구의 일환으로, 유기성 폐기물에 대한 폐기물의 분해 특성을 완전히 이해하고 공정의 합리적인 설계와 소화조 운전의 최적화를 쉽게하며, 유기성물질의 메탄전환수율의 최적화를 가능하게 하기 위해 음식물쓰레기의 생분해도를 측정하고자 한다. 이는 발생원별 폐기물의 특성조사 및 실제 주방에서 배출되는 음식물쓰레기에 대한 체계적인 조사를 목적으로 하므로 Owen<sup>41)</sup> 및 Shelton<sup>51)</sup>에 의해 정립된 BMP (biochemical methane potential) 측정법으로 음식물쓰레기의 유기물 부하 및 소화율의 식중용 변화에 따른 혐기성 생분해도 특성을 평가하는데 그 목적이 있다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같이 음식물쓰레기의 생분해도 실험을 위하여 300ml 용량의 삼각플라스크를 이용하였으며, 반응조내에 시료와 식중슬러지를 넣기 전에 35℃의 배양기에서 배양온도와 평형을 유지시켜 온도에 따른 영향을



- (a) pouring food waste and seed sludge with N<sub>2</sub> flushing
- (b) capping
- (c) gas measuring with syringe

Fig. 1. Schematic diagram of experimental set up.

배제하였다. 시료를 주입 후 반응조 상단을 실리콘 마개로 밀봉하여 혐기성 상태로 유지시켜 35℃의 차광된 진탕배양기 내에서 120rpm으로 진탕 배양하였다. 가스발생량은 주사기를 간헐적으로 삽입시킨 뒤 대기압과 평형이 될 때의 값으로 산정하였으며, 가스압에 의하여 반응조 상단에 밀봉한 실리콘 마개가 튀어나가거나 반응조가 파쇄되지 않도록 하기 위하여 반응조 상단부의 바이오가스 압력이 2기압이 넘지 않도록 주의하여 측정시간 간격을 조정하였다.

### 2. 실험 방법

음식물쓰레기의 혐기성 생분해도 실험의 최적조건을 평가하기 위하여 실험시 각 가정에서 수거한 음식물쓰레기를 수거해와 믹서기로 파쇄한 후 Table 1과 같이 유기물부하와 식중용을 달리하여 300ml의 삼각플라스크(유효용량 200ml)에 주입하였다. 대상시료는 본래의 물리 화학적 특성을 유지시키기 위하여 실험목적에 관련되지 않은 건조, 분쇄 등의 전처리를 배제하였다. 실험전 믹서기로 파쇄 후 측정된 음식물쓰레기의 고형물 함량은 약 20% 정도로서 생분해도 실험시 피펫으로 취하기 곤란하여 부피와 무게를 측정할 결과 비중이 1.01로 측정되어 실험의 원활한 진행을 위해서 이후 음식물쓰레기 주입시 부피와 무게의 비를 1:1로 평가하여 부피단위 대신에 무게단위로 시료를 취하여 주입하였다.

본 실험에 사용된 식중액은 하수처리장의 슬러지를 음식물쓰레기와 혼합처리 실험을 하고 있는 pilot plant의 소화조로부터 채취하여 200mesh 체로 거른 여액으로 불순물을 제거한 후 실험에 이용하였으며, 주입된 식중슬러지의 양은 Table 1에 나타난 바와 같이 전체 배지부피(200ml)의 10% (20ml), 20%(40ml), 40%(80ml) 및 60%(120ml)였다.

실험순서는 Shelton et al. 등<sup>51)</sup>의 방법에 따라 대상시료인 음식물쓰레기의 양은 각 식중량에 대하여 1, 2, 3 및 4g TS/200ml로 주입하였으며, 전체 배지의 나머지 부피분에 대하여 탈이온수를 끓여서 용존산소를 제거한 후 질소가스를 불어넣으면서 실험 온도인 35℃까지 식힌 탈이온수를 채워

Table 1. Operating conditions of the organic loading and seeding rate experiment

Seeding rate (%)	Amount of food wastes (g TS/200ml)				
	1	2	3	4	blank
10	1	2	3	4	blank
20	1	2	3	4	blank
40	1	2	3	4	blank
60	1	2	3	4	blank

전체용량을 200ml로 하였다.

시료 주입후 음식물쓰레기 내에 알칼리도 유발 물질이 함유되어 있다고 판단되어 별도로 pH는 조정하지 않았다. 반응조는 35°C로 유지되는 배양기 내에서 120rpm으로 진탕 배양하였으며, 식중슬러지로부터 발생된 소화 가스량을 보정하기 위하여 혐기성 배지와 10, 20, 40 및 60%의 식중슬러지만 주입한 공시료(blank)를 동일한 조건에서 배양하였다. 모든 실험은 자료의 정확성을 기하기 위하여 2회 반복 실시하여 평가하였다.

### 3. 시료의 조제 및 분석방법

소화가스 발생량은 반응조의 상단부에 장착된 실리콘 막에 간헐적으로 주사기를 삽입시킨 뒤 주사기 내부와 반응조 내부의 압력이 평형으로 유지될때의 값으로 하였다. 발생가스중 메탄함량은 열전도검출기가 부착된 Gas Chromatography (HP-6890A)를 이용하여 병안의 가스를 뽑을 때마다 병내부로 직접 분사용 주사기로 채취하여 측정하였다. 각 반응조의 생분해도 운전특성을 평가하기 위하여 유입시료의 pH는 pH meter, TS(total solids), VS(volatile solids)는 Standard Methods<sup>6)</sup>에 의하여 측정하였으며, 음식물쓰레기 및 각 종류별 음식물쓰레기의 원소분석은 원소분석기(Elemental Analyzer: Profile HV-3)를 이용하여 분석하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 유기물 부하 및 식중독 변화에 따른 생분해도 특성

본 실험에 사용한 식중슬러지는 부산시에서 유

식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합처리로 정상적으로 수행중인 pilot plant의 소화조로 부터 가져온 슬러지를 200 mesh 체로 거른 여액을 사용하였으며, 이때 식중슬러지의 TS 농도는 41,190mg/l (4.61%) 였고 TS에 대한 VS의 비는 40.67% 였다. 음식물쓰레기는 pilot plant로 실험중인 시료를 사용하였으며, 이들 시료는 주거지역에서 수거해온 것으로 각 가정에서 배출된 후 수거과정에서 2~3일 가량 경과되어 약간의 부패가 일어난 상태였으며, 파쇄후 반응조에 주입하기 직전에 측정된 pH 값은 4.0~4.5로 나타났으나, 시료, 식중액 및 탈이온수로 혼합 후 pH는 6.5~7.2로 측정되어 생분해시 pH에 의한 영향이 없을 것으로 판단되어 별도의 pH 조정은 하지 않았다. 실험에 사용된 음식물쓰레기의 TS는 18.04%(수분함량:81.96%), TS에 대한 VS는 78.34%로 전체 고형물중 휘발성고형물이 차지하는 비율이 약 80%로 높게 나타났다. 음식물 쓰레기에 대한 생분해도 실험시 적정 유기물 부하 및 식중독을 구하기 위하여 음식물 쓰레기를 파쇄한 후 별도의 전처리를 가하지 않고 식중독 10%, 20%, 40% 및 60% 각각에 대하여 음식물 주입량 0.7g VS(1.0g TS), 1.4g VS(2.0g TS), 2.1g VS(3.0g TS) 및 2.8g VS(4.0g TS)로 주입한 후 시간에 따른 메탄발생량을 평가하였으며, 이들의 결과를 Fig 2.에 나타내었다. 운전시간 경과에 따른 각 식중독 및 유기물 부하에 따른 메탄생성량을 보면 식중독 및 유기물 부하량에 따라서 누적 메탄발생량 및 메탄발생속도에 다소 차이는 있으나, 식중독 10%, 유기물부하 2.8g VS를 제외한 전 반응조에서 최종메탄발생량은 유기물질 1g VS당 400~460ml를 나타내었다. 이러한 수치는 Owen and Chynoweth<sup>7)</sup>가 보고한 Food packaging에서의 g VS당 메탄발생량 318~349ml와 Jerger and Chynoweth<sup>8)</sup>이 Sorghum cultivars에서 실험한 값 280~400ml CH<sub>4</sub>/g VS added에 비하여 높은 값을 나타내었으나, Chynoweth et al.<sup>9)</sup>이 Food waste에서 연구 보고한 540ml CH<sub>4</sub>/g VS added 보다는 낮은 값을 나타내었다. 이러한 결과는 음식물의 구성 및 각 성분당 원소조성에 의하여 달라질 수 있다고 생각된다. 또한 Fig. 2.에 보는바와 같이 식중독 40% 이상의 경우 유기물부하에 큰

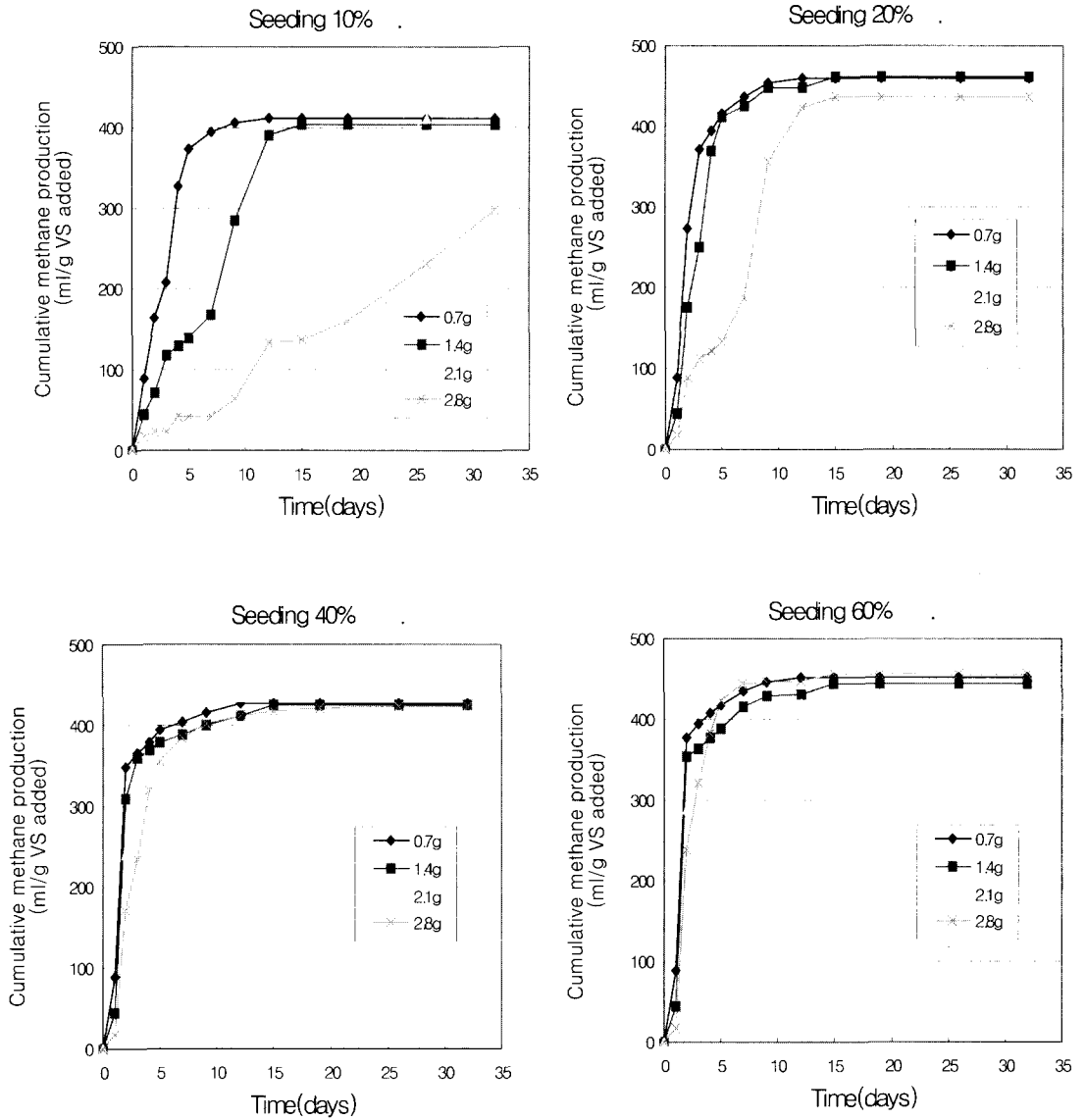


Fig. 2 Cumulative methane production of the organic loading and seeding rate.

같이 식중을 40% 이상의 경우 유기물부하에 큰 영향을 받지 않았으나, 10%의 경우 유기물 부하가 2.1g VS에서는 반응초기 전반적으로 느리게 진행되었으며, 운전기간에 따라 서서히 회복하여 최종 메탄발생량이 타 반응조와 유사하게 나타났다. 이러한 현상은 Georgacakis et al.<sup>10)</sup>이 음식물쓰레기

내에 단백질 및 지방성분의 존재로 혐기성 분해에 의해 자체내 알칼리도가 생성된다고 보고한바 있어 운전 기간이 길어짐에 따라 알칼리도의 보충으로 점차 회복되어 가는 것으로 판단된다. 그러나 유기물 부하를 높인 2.8g VS에서는 최종메탄생량이 300ml CH<sub>4</sub>/g VS added로 타 반응조에 비하

여 저조하게 나타나 높은 유기물부하로 인하여 메탄 생성박테리아에 의한 메탄생성보다는 유기산생성박테리아에 의한 유기산의 축적으로 전체 반응에 영향을 미친 것으로 판단된다. 결국 낮은 식종을 및 높은 유기물부하에서는 반응이 느리게 진행되며, 유기물 부하에 의한 저해를 받는 것으로 생각된다.

이와 같이 각 식종율에서 누적메탄 발생량은 식종율 10%, 유기물부하 2.8g VS를 제외하면 1g VS당 약 400~460ml CH<sub>4</sub>/g VS로 큰 차이를 보이지 않으나 초기 식종율 및 유기물부하에 따라 가스발생속도 면에서 차이를 보여주고 있으며, 식종율 10%, 20%에서 초기 유기물 농도가 증가할 경우 축적되는 유기산으로 인하여 메탄발효가 느리게 진행됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 초기 산생성균의 증식에 의한 유기산 생성 및 낮은 pH에서 메탄균의 증식이 저해를 받은 결과로 생각된다. 그러나 식종율을 40%, 60%로 증가시켜감에 따라 빠르게 극복 할 수 있어 초기 식종율을 높게 하는 것이 바람직 하지만 본 실험에서의 적정 식종율은 40%로 나타났다.

Shin et al.<sup>1)</sup>은 유기성폐기물의 생분해도 실험시 식종액을 하수처리장의 소화슬러지를 농축하여 TS 80,430mg/ℓ의 경우 약 10%를 사용하였는데 본 실험에 사용한 식종슬러지의 TS는 39,680mg/ℓ로 20%이상 사용할 경우 약 2g VS 이하에서는 가능한 것으로 보아 유사한 결과를 얻었다. 따라서 일반적으로 우리나라 하수처리장의 슬러지 처리를 위하여 혐기성 소화조내의 TS 농도가 30,000~40,000mg/ℓ인 점을 고려할 때 이들 슬러지를 농축시키지 않고 음식물쓰레기의 유기물 부하를 1~2g VS로 하여 생분해도 실험을 할 경우 식종율은 반응조 유효용량의 20~40% 범위가 적당할 것으로 평가되었다. 한편 Shelton and Tiedje<sup>11)</sup> 및 Shin et al.<sup>1)</sup>의 실험에서는 생분해도 측정시 영양분을 첨가시킨 배지를 이용하였는데 본 실험에서는 배지를 첨가하지 않아도 저해를 받지 않는 것으로 나타나 음식물쓰레기를 생분해 실험시 별도의 배지를 첨가하지 않아도 생분해도에는 영향을 미치지 않는 것으로 평가되었다. 이러한 이유는 음식물쓰레기 중에 폐수와는 달리 미생물의 성장

에 필요한 영양염류 등이 존재하는 것으로 판단된다.

한편 식종율 10%를 제외한 20%, 40% 및 60%로 운전할 경우 유기물부하 2.8g 까지는 소화기간 10일 이내에 전체 메탄발생량의 90% 이상을 차지하며 유기물 분해가 거의 대부분 10일 이내에 일어난 것을 알 수 있다. 식종율 10%의 경우 상대적으로 높은 유기물부하로 초기 유기산의 축적으로 인하여 메탄발생량이 느리게 진행되며 유기물부하 1.4 및 2.1g VS의 경우 운전 30일 이내에 전체적으로 같은 전환율을 나타내나 유기물 부하 2.8g VS의 경우 축적된 유기산으로 인하여 메탄 발생이 느리게 진행하였다.

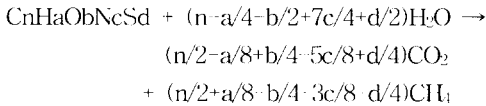
## 2. 음식물 쓰레기의 원소조성 및 이 론 메탄 발생량

실험에 사용된 음식물쓰레기의 원소조성을 파악하기 위하여 실험시 음식물쓰레기를 분쇄 건조시킨 후 분석하였다. 분석된 원소조성을 통하여 이론적인 메탄 발생량을 계산할 수 있으며, 음식물쓰레기의 원소조성 및 계산된 메탄생성량의 평균치를 Table 2.에 나타내었다. Table 2.에 나타낸바와 같이 탄소의 경우 전체 49.3%를, 질소의 경우 4.2%로 나타내 본 연구에 사용된 음식물쓰레기의 C/N 비는 11.7로 나타났다. 이는 Choi<sup>12)</sup>가 보고한 음식물쓰레기의 C/N 비 10~15의 범위내로 나타났으나, Koo et al.<sup>13)</sup>이 연구한 우리나라 주방폐기물의 평균치 13~15 보다는 약간 낮은 값을 보였고 Shin et al.<sup>1)</sup>이 곡물류, 채소류, 육류 및 어류를 대상으로 조사한 C/N비 9.7보다는 높은 수치를 나타내었다.

본 실험에 사용된 음식물쓰레기의 생분해율을 알아보기 위해서는 음식물쓰레기가 이론적으로 어느 정도의 메탄을 생성할 수 있는지를 조사할 필요가 있다. 따라서 음식물쓰레기의 이론적인 메탄 가스 발생량을 구하기 위하여 원소분석 자료로부터 구한 분자식과 Buswell이 제시한 화학양론적인 메탄발생량 계산식을 이용하여 메탄발생 가능량을 계산하였다<sup>2)</sup>.

Table 2. average chemical compositions and theoretical methane productions of food waste used in this study

Elemental composition(%)					C/N ratio	Theoretical methane production (ml CH <sub>4</sub> /g VS)
C	H	O	N	S		
49.3	6.9	38.7	4.2	0.9	11.7	491



이들 계산 결과로부터 음식물쓰레기의 메탄발생 가능량은 491ml CH<sub>4</sub>/g VS로 나타났다. 식중독 변화에 따른 음식물쓰레기의 g VS당 누적메탄 발생량을 나타낸 Fig 2.를 보면 식중독 10%일 경우 유기물 부하 0.7g VS, 1.4g VS, 및 2.1g VS에서 누적메탄 발생량은 각각 410, 400 및 430ml CH<sub>4</sub>/g VS로 나타나 화학 양론적 이론메탄발생량과 비교하면 메탄전환율은 각각 83.5%, 81.5% 및 87.6%로 높은 생분해율 나타낸 반면 유기물부하 2.8 g VS에서는 300ml CH<sub>4</sub>/g VS로 약 61.1%로 낮게 나타났다. 그러나 식중독을 20%, 40% 및 60%로 증가시켜감에 따라 누적메탄발생량은 각 유기물부하에서 비슷한 수치인 430~460ml CH<sub>4</sub>/g VS를 나타내어 87.6~93.7%의 높은 생분해율을 나타내었다. 이와 같이 생분해도가 높게 나타나는 이유는 음식물쓰레기내에 리그닌 등과 같은 난분해성 물질을 함유한 야채 성분의 함량이 낮고 반면에 고기등과 같은 성분이 상대적으로 많이 함유되었기 때문인 것으로 생각된다. 또한 Fig 2.에서 보는바와 같이 음식물쓰레기의 유기물부하 0.7~2.8g VS의 범위에서 식중독이 증가함에 따라서 메탄생성율도 높아지나 식중독 40% 이상에서는 비슷한 값을 보여 소화조 운전시 식중독을 40%로 운전하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 우리나라에서 일반적으로 발생되는 음식물쓰레기는 비교적 분해율이 높은 물질로 구성되어 있고 유기물 분해속도가 빨라 하수슬러지와 혼합하여 혐기성소화로 처리할 경우 하수슬러지 단독처리보다 대체에너지 획득 면에서 유리할 것으로 판단되며 기존의 음식물쓰레기처리에

따른 여러 가지 문제점을 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

#### IV. 결론

음식물쓰레기에 대한 유기물 부하 및 식중독의 변화가 혐기성 생분해도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 회분식 반응조를 이용 실험을 수행하였으며 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 실험에 사용된 부산시 음식물쓰레기를 원소 분석기로 분석한 결과 원소조성에서 C/N비가 약 11.7을 나타냈고, 생분해율의 지표가 되는 메탄발생량은 이론적으로 491ml CH<sub>4</sub>/g VS를 나타냈다.
2. 식중독 및 유기물부하량에 따른 메탄생성량에 있어서는, 식중독 10%, 유기물부하 2.8g VS를 제외한 반응조에서 유기물질 g VS당 400~460ml CH<sub>4</sub>/g VS add의 생성량을 보였고 유기물 부하 0.7g VS에서는 식중독 10%를 제외하고는 최종 메탄 발생량이 동일하였으며, 1.4g VS의 경우 20%이상, 2.1g VS 및 2.8g VS에서는 40% 이상에서는 영향을 받지 않았으나, 이 이하일 경우 유기물 부하로 인하여 영향을 받고 있는 것으로 나타났다.
3. 이론적 메탄발생량에 대한 메탄전환율은 식중독 20%이상에서는 메탄전환율이 약 94%의 높은 생분해율을 보이고 있다. 이는 음식물쓰레기가 비교적 분해율이 높은 물질로 구성되어 있고 유기물 분해속도가 빨라 하수슬러지와 혼합하여 혐기성소화로 병행하여 처리할 경우 하수슬러지 단독처리보다 대체에너지 획득면에서 유리할 것으로 판단되며, 음식물쓰레기처리에 따른 여러 가지 문제점을 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

1. Shin, H. S., Song, Y. C., and Mun, M. J. : 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, 1993.
2. Shin, H. S., Moon, J. J., Lee, J. J., Chung, Y. J., Song, Y. C. and Bae, B. U. : Anaerobic Treatability of Food Waste with High Salt Concentration. in Proceedings of the Seventh International Symposium of Anaerobic Digestion, Cape Town, South Africa, 23-27 January, 120-129, 1994.
3. 박남배 : 혐기성 소화에 의한 음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합처리, 부경대학교 박사학위 논문, 1999.
4. Owen, W. P., Stuchey, D. C., Healy, J. B., Young, L. Y. and McCarty, P. L. : Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. Water Res., 13, 485-492, 1979.
5. Shelton, D.R., and Tiedje, J. M. : General Method for Determining Anaerobic Biodegradation Potential. Applied and Environmental Microbiology, 47, 850-857, 1984.
6. APHA, AWWA, WPCF : Standard Methods for the examination of water and wastewater, APHA, AWWA, WPCF, 19ed, 1995.
7. Owens, J. M., and Chynoweth, D. P. : Biochemical Methane Potential of MSW Components, 5th Inter. Symp. on AD of Solid Waste, Venice, Italy, 29-42, 1992.
8. Jerger, D. E. and Chynoweth, D.P. : Anaerobic digestion of Sorghum biomass. Biomass, 14, 99-113, 1987.
9. Chynoweth, D.P., Turick, C. E., Owen, J. M., Jerger, D. E. and Peck, M.W. : Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks, Biomass and Bioenergy, 5(1), 95-111, 1993.
10. Georgacakis, D., Sievrs, D. M., and Iannotti, E. L. : Buffer stability in manure digesters. Agric. Wstes 4, 427-441, 1992.
11. Shelton, D. R., and Tiedje, J. M. : General Method for Determining Anaerobic Biodegradation Potential. Applied and Environmental Microbiology, 47, 850-857, 1984.
12. Choi. H. B., Hwang K. Y., and Shin. E. B. : Mechanical pretreatment process of waste-activated sludge prior to anaerobic digestion system, J. Korea solid waste engineering society 14, 2, 189-194, 1997.
13. Koo, J. K., et al. : Role of solid waste anaerobic digestion in Seoul city waste management, Proc. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste, Venice, Italy, 14-17 April, 413-416, 1992.