

# 음식물쓰레기와 하수슬러지의 고율 협기성 통합소화

허남효\*, 정상순

## High-rate Anaerobic Co-digestion of Food Waste and Sewage Sludge

Namhyo Heo, Sangsoon Chung

**Abstract** The effect of alkaline pre-treatment on the solubilization of waste activated sludge(WAS) was investigated, and the biodegradability of WAS, pretreated WAS(PWAS), food waste and two types of mixture were estimated by biochemical methane potential (BMP) test at 35°C. The biodegradability of PWAS and mixture waste were significantly improved due to the effect of alkaline hydrolysis of WAS. An alkaline pre-treatment was identified to be one of the useful pre-treatment for improving biodegradability of WAS and mixture waste. In high-rate anaerobic co-digestion system coordinate with an alkaline pre-treatment in process, the digesters were operated at the HRT of 5, 7, 10 and 13 days with a mixture of FW 50% and PWAS 50%. In term of CH<sub>4</sub> content, VS removal and specific methane production [SMP] which are the parameters in the performance of digester, the optimum operating condition was found to be a HRT of 7 days and a OLR of 4.20g/L-day with the highest SMP of 0.340 L CH<sub>4</sub>/g VS.

**Key words** Alkaline pretreatment(알칼리 전처리), Anaerobic digestion(협기성 소화), Biochemical methane potential test(메탄가스 발생량 측정), Biodegradability(생분해도), Biogas(바이오가스), Food waste(음식물쓰레기), Solubilization(가용화), Sewage sludge(하수슬러지)

\* 한라산업개발(주), 에너지사업부  
■ E-mail : bionhheo@hallasanup.com ■ Tel : (02)2047-5146 ■ Fax : (02)2047-5397

## 1. 서 론

국내에서 발생되는 도시고형폐기물(municipal solid waste, MSW) 중 자원으로 재활용 가능한 유기성 폐기물은 하수슬러지(sewage sludge)와 음식물쓰레기(food waste, FW)를 대표할 수 있으며, 2003년 현재 두 폐기물은 각각 2,266천톤/년과 4,169천톤/년 발생하였다<sup>(1,2)</sup>.

중·대규모 도시하수처리장 경우 하수슬러지의 안정화 및 감량화를 위해 협기성 소화공법을 적용하고 있지만, 20~30일의 긴 체류시간(hydraulic retention time, HRT)에도 불구하고 낮은 유기물 제거율은 소화공정의 운전효율을 반감시키는 주요한 요인으로 지적되고 있다. 특히, 슬러지 입자의 가수분해(hydrolysis) 반응이 전체 협기성 소화공정의 율속단계(rate-limiting step)로 보고<sup>(3,4)</sup>됨에 따라 최근에 폐활성슬러지

(waste activated sludge, WAS) 세포 파괴에 의한 가수분해 속도 개선과 동시에 생분해도(biodegradability)를 향상시키기 위한 다양한 전처리 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하수슬러지 전처리 기술의 적용은 슬러지 입자의 가용화 (solubilization)에 따른 소화율 향상, 소화공정의 체류시간 감소, 소화조 거품발생 억제, 소화슬러지 탈수율 개선에 의한 슬러지 부피감소 그리고 병원성 세균의 사멸 등과 같은 다양한 장점을 얻을 수 있다<sup>(5)</sup>.

2003년 현재 국내 음식물쓰레기 발생량의 67.7%가 재활용 되고 있으며, 재활용량의 95%가 퇴비화와 사료화에 국한되고 있는 실정이다. 하지만, 최근 사료화와 퇴비화 공법의 기술적·공간적 한계, 시설기준 강화, 재활용 제품의 수요처 한계 및 안전성 등의 문제가 대두되면서 협기성 소화(anaerobic digestion) 공법이 음식물쓰레기 처리를 위한 적절한 대안으로 인식되고 있다. 특히, 음식물쓰레기의 효율적인 처리를 위한 대안으로 기존의 하수처리장에 설비되어 있는 협기성 소화조에 음식물쓰레기를 투입하여 처리하는 통합소화(co-digestion) 방법이 최근에 주목을 받고 있다.

2003년 현재 전국 242개소 하수처리장이 정상적으로 가동 중에 있으며, 이중 소화조가 설치된 하수처리장(69개소)의 경우 평균 소화조 가동율이 63.3%인 점을 감안해 볼 때<sup>(6)</sup>, 여분의 협기성 소화조 용량을 활용함에 따라 기존 소화조의 빈부하 문제를 해결에 따른 소화조의 안정적 운전, 음식물쓰레기의 처리비용 절감 및 효과적인 감량화 동시에 재생에너지원인 메탄 가스 생성량의 극대화를 통하여 하수처리장 자체 에너지원 확보 뿐만 아니라 냉·난방용 및 산업용 전력생산 등의 대체에너지원 확보에 상당히 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 음식물쓰레기와 하수슬러지의 협기성 통합소화와 관련하여 두 폐기물의 적정 혼합비와 소화조 최적 체류시간 (HRT) 도출을 위한 실험이 이전에 수행되었고<sup>(7,8)</sup>, 또한 하수슬러지의 가수분해 속도 개선과 동시에 협기성소화 효율 향상 시키기 위한 알칼리 전처리 기술의 최적 운전조건을 이전 연구에서 도출하였다<sup>(9)</sup>. 따라서 본 연구에서는 실험대상 하수슬러지인 폐활성슬러지의 가용화와 생분해도에 대한 알칼리 전처리 효과를 조사하고, 음식물쓰레기와 하수슬러지의 통합소화에서 있어 하수슬러지의 알칼리 전처리를 병행함에 따른 소화공정의 운전변수 거동과 운전성능을 평가하여 최적 운전조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 유기성 폐기물의 통합소화

### 2.1 기술의 개요

유기성 폐기물의 협기성 통합소화는 Fig. 1에 제시된 바와 같이 물리·화학적 성상이 각각 다른 둘 이상의 유기성 폐기물을 혼합하여 단일 소화조에서 일괄적으로 처리하는 소화공정으로 정의된다. 유기성 폐기물을 처리함에 있어 통합소화 공정의 장점은 폐기물의 경제적이고 안정적인 처리 뿐만 아니라 소화효율의 개선, 바이오가스의 에너지 이용 효율 증대, 폐기물의 처리비용 경감 그리고 소화 잔류물의 퇴비로서의 가치 증면에서 단일 폐기물 소화공정에 비하여 훨씬 효과적이고 경제적인 것으로 보고하고 있다<sup>(10)</sup>.

### 2.2 생분해성 도시고형폐기물과 하수슬러지의 통합소화 기술

생분해성 도시고형폐기물(organic fraction of municipal solid waste, OFMSW)은 다른 유기성 폐기물에 비하여 유기성 고형물 함량과 C/N비가 상당히 높은 반면, 질소와 인과 같은 영양성분과 미량원소(trace elements)가 상대적으로 낮아 협기성소화공정의 운전상 가장 큰 저해요소로 제기되었다. 이에 따라 많은 연구자들은 생분해성 도시고형폐기물의 효과적이고 경제적인 처리를 위하여 영양물질과 미량원소가 풍부한 하수슬러지와 함께 통합소화하는 방안을 제시하였다<sup>(11,12,13,14)</sup>.

그림 2에서 나타낸 바와 같이, 생분해성 도시고형폐기물 (OFMSW)과 하수슬러지(SS)는 서로 상반되는 생화학적 기질

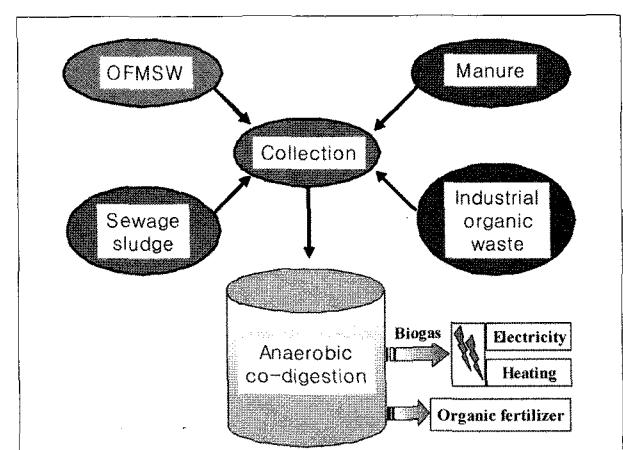


Fig. 1 Basic concept of anaerobic co-digestion of organic wastes.

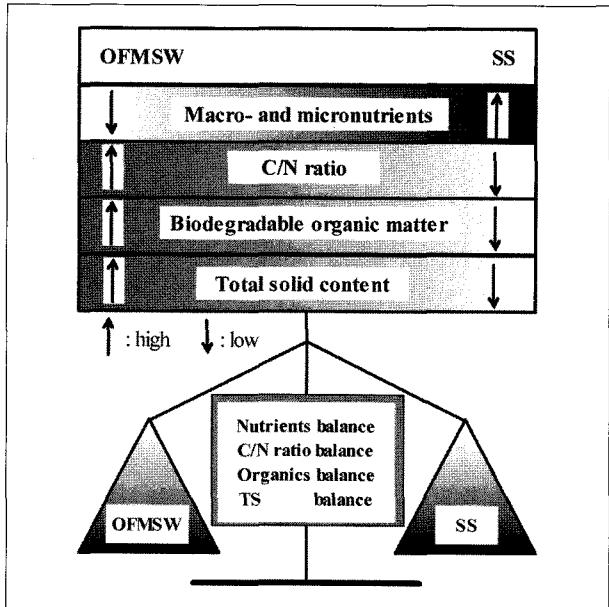


Fig. 2 The different characteristics of OFMSW and sewage sludge(SS).

특성은 지니고 있다. 하수슬러지의 경우 생분해성 도시고형폐기물에 비하여 C/N비와 생분해성 유기물 및 고형물 함량이 낮은 반면, 협기성소화에서 소화균의 성장과 신진대사에 필요로 하는 영양성분 및 미량원소 함량은 상대적으로 높다<sup>[15]</sup>. 따라서 하수슬러지와 생분해성 도시고형폐기물의 혼합은 영양성분의 균형과 C/N비 향상 효과로 인하여 소화공정의 안정성을 증가시켜 줄 뿐만아니라 생분해 가능한 유기성분의 증가에 따른 메탄가스의 발생량 증가와 같은 긍정적인 효과를 얻을 수 있다<sup>[16,17,18,19,20]</sup>.

한편, 하수슬러지와 생분해성 도시고형폐기물의 통합소화에 대한 가능성이 제시된 이후, 현존하는 하수처리장의 협기성소화조에 하수슬러지 함께 도시고형폐기물의 통합소화하는 방안이 제시되었고, 생분해성 도시고형폐기물의 효과적인 처리를 위한 대안으로 현존하는 하수처리장 협기성소화조를 이용 할 경우 초기 투자비용과 운전 및 처리비용 측면에서 상당히 유리한 것으로 보고하였다<sup>[12,16,17,19,20]</sup>.

### 2.3 유럽의 통합소화 기술 보급 현황

1990년대부터 독일을 비롯한 몇몇 유럽 국가에서는 유기성 고형폐기물의 효율적인 관리와 동시에 협기성소화공정의 에너지 생산성을 향상시키고자 축산폐기물, 하수슬러지를 포함하는 도시고형폐기물, 도축장 폐기물, 유기성 농공산업폐기물 등

을 혼합 처리하는 집중식 협기성 통합소화공정(centralized anaerobic co-digestion system)을 도입하였다<sup>[10,21]</sup>. 특히, 독일의 경우 1997년 현재 전국에 걸쳐 37개의 통합 소화조가 운전되고 있으며, 덴마크의 경우 1995년 현재 전국에 걸쳐 운영되고 있는 20개 이상의 full-scale joint biogas plant 중 5 개의 대규모 소화조는 축산분뇨와 함께 생분해성 도시고형폐기물과 기타 유기성 폐기물을 통합소화 처리하고 있다<sup>[10,15]</sup>.

유럽의 경우 90년대 초반부터 기존 하수처리장 혹은 축산분뇨 처리장의 협기성소화조를 이용하여 생분해성 도시고형폐기물, 유기성 농·산업폐기물, 하수슬러지, 축산분뇨 등의 다양한 유기성 폐기물을 통합소화하는 대규모 실증 플랜트를 상용화 하였으며, 통합소화 공정으로부터 생성되는 소화슬러지는 최종적으로 액상 혹은 고체상 퇴비화에 의해 재활용되고, 바이오 가스는 주로 가스엔진에 의해 전기를 생성하여 인근 지역에 공급하거나 열병합발전 혹은 지역냉난방의 에너지원으로 이용하고 있다<sup>[10,21]</sup>.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험재료

국내 가정에서 발생되는 음식물쓰레기의 구성비는 과일을 포함한 채소류가 평균 70%로 가장 높으며, 곡류와 어육류는 각각은 12.8%, 9.2%로 조사되었다<sup>[22]</sup>. 본 연구에서는 실험의 일관성을 고려하여 음식물쓰레기의 대표 시료로 일반 대중음식점에서 판매되고 있는 비빔밥(이하 음식물쓰레기)을 이용하였으며, 비빔밥의 성분 구성을 실제 음식물쓰레기와 유사하게 조절하여 가정용 분쇄기에 의해 최대 입경 4mm 이하가 되도록 파쇄 후 증류수로 희석하여 고형물함량 약 8±0.5%로 조절하여 사용하였다. 폐활성슬러지는 D시 하수종말처리장의 반송슬러지를 이용하였으며, 원심분리기로 농축 후 상동액을 이용하여 실험에 요구되는 고형물함량으로 조절하였다.

### 2.2 회분식 실험장치 및 방법

#### 2.2.1 알칼리 전처리

하수슬러지의 알칼리 전처리에서 가용화 효율은 반응온도, 반응시간, 알칼리 농도 그리고 슬러지의 고형물 농도와 같은

운전변수에 의해 좌우된다<sup>(23)</sup>. 폐활성슬러지의 알칼리 전처리 실험을 위해 기계 교반기가 설치된 4L 용적의 회분식 완전혼합 반응조를 이용하였으며, 반응조에 고형물 함량 3%인 폐활성슬러지 3L 주입과 동시에 액상 알칼리 농도 45meq NaOH/L로 조절 후 25°C의 반응온도 조건에서 150rpm의 교반속도를 유지하면서 4시간동안 수행하였다. 알칼리 전처리에 있어 주요 운전변수인 슬러지 고형물 함량, 알칼리제 주입농도, 반응시간은 이전의 연구로부터 얻어진 최적화된 전처리 운전조건이 적용되었으며, 알칼리제로 가성소다(NaOH)를 이용하였다<sup>(9)</sup>.

## 2.2.2 회분식 BMP test

음식물쓰레기(FW), 폐활성슬러지(WAS) 그리고 혼합폐기물(mixture)의 협기성 생분해도 평가하기 위하여 회분식 BMP(biochemical methane potential) test 방법을 이용하였다<sup>(24,25)</sup>. 혼합폐기물의 음식물쓰레기와 폐활성슬러지 혼합비(FW:WAS)는 휘발성 고형물(volatil solid, VS) 함량 기준으로 50:50 였으며, 이는 선행 연구로부터 얻어진 최적 혼합조건이다<sup>(8)</sup>. 혼합폐기물의 BMP test는 알칼리 전처리하지 않은 혼합시료(FW:WAS)와 전처리한 혼합시료(FW:PWAS)를 대상으로 수행하였고, BMP test에 사용된 식중균(inoculum)은 실험실에서 운전중인 음식물쓰레기와 하수슬러지의 중온 협기성 통합소화 반응조로부터 재취하였다.

각 시료의 BMP test는 500ml Erlenmyer flask에 식중균 250 ml 주입 후 기질을 추가하여 S/I(VS mass of substrate to VS mass of inoculum) ratio 0.2가 되도록 조절하였다. 기질(substrate)과 식중균이 혼합된 시료는 실리콘 마개로 밀봉과 동시에 질소 가스를 이용하여 완전 협기성상태로 치환하였고, 35°C의 일정온도가 유지되는 incubator에서 40일 동안 배양하였다. 한편 식중균 분해에 의해 발생되는 biogas 량을 보정하기 위하여 1개의 Control 배양조가 운전되었으며, 모든 배양 시료는 1일 3회 수(hand) 작업에 의해 혼합되었다. 배양 시료의 biogas 발생량을 측정하기 위하여 10ml 유리주사기를 이용하였으며, 발생 biogas는 온도에 따른 부피팽창을 고려하여 표준상태(0°C, 1 atm)에서 dry biogas 부피로 계산하였다.

## 2.2.3 가용화 및 생분해도 평가

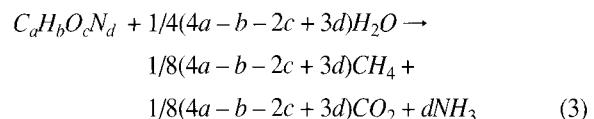
알칼리 전처리에 따른 폐활성슬러지의 가용화는 식 (1)에 나타낸 바와 같이, 초기 TCOD ( $TCOD_i$ )와 SCOD ( $SCOD_i$ )의 농도 차이로부터 얻어진 순 입자상 유기물(net particulate

COD, PCOD)의 가수분해 반응에 의해 생성되는 용해성 유기물( $SCOD_t$ ) 농도의 백분율로 나타내었다.

$$Solubilization(\%) = \frac{(SCOD_t - SCOD_i)}{(TCOD_i - SCOD_i)} \times 100 \quad (1)$$

BMP test에 의한 각 시료의 생분해도 평가는 식 (2)에서와 같이 이론적 메탄수율(theoretical methane yield, TMY)에 대한 누적 메탄수율(cumulative methane yield, CMY)의 백분율로 나타내었으며<sup>(26,27)</sup>, 이론적 메탄수율은 시료의 휘발성 고형물의 원소조성에 기초하여 식 (3)의 화학양론식(stoichiometry)으로부터 계산하였다<sup>(28)</sup>.

$$Biodegradability(\%) = \left( \frac{CMY}{TMY} \right) \times 100 \quad (2)$$



## 2.3 연속식 고온 통합소화 장치 및 운전조건

연속식 통합소화 실험을 위한 반연속 주입 및 완전혼합 반응조(semi-fed & continuously mixed reactor, SFCMR)의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 유효용적 3.5L인 4기의 소화조를 하나의 수욕조에 설치하였고, 1일 1회 소화슬러지 인출과 동시에 시료를 투입하는 fill & draw 방식으로 운전하였으며, water circulator를 부착하여 35°C의 일정온도를 유지하였다. 각 반응조에는 가스 포집구, 시료 주입구와 배출구가 있으며, 소화균과 기질간의 원활한 접촉을 위하여 기계식 교반장치를 설치하여 약 80rpm의 속도로 교반하였고, 소화조로부터 발생되는 biogas의 누출과 외부로부터 공기의 유입을 방지하기 위하여 water sealing하였다. 소화조로부터 바이오가스의 발생량을 측정하기 위하여 teflon재질의 gas bag을 부착하였으며, 가스 발생량은 wet gas meter에 의해 측정되었다.

본 실험에서 음식물쓰레기와 전처리된 폐활성슬러지의 혼합비(FW:PWAS)가 50:50인 혼합폐기물을 기질로 이용하였고, 매주 3회에 걸쳐 제조하였으며, 시료의 변질을 방지하기 위하여 4°C에서 냉장 보관하였다. 소화조는 5, 7, 10 그리고 13일의 HRT 조건에서 40일 동안 운전하였다. 각 운전조건별 소화조의 안정도 및 운전성능을 평가하기 위하여 매주 3회 혼합폐기

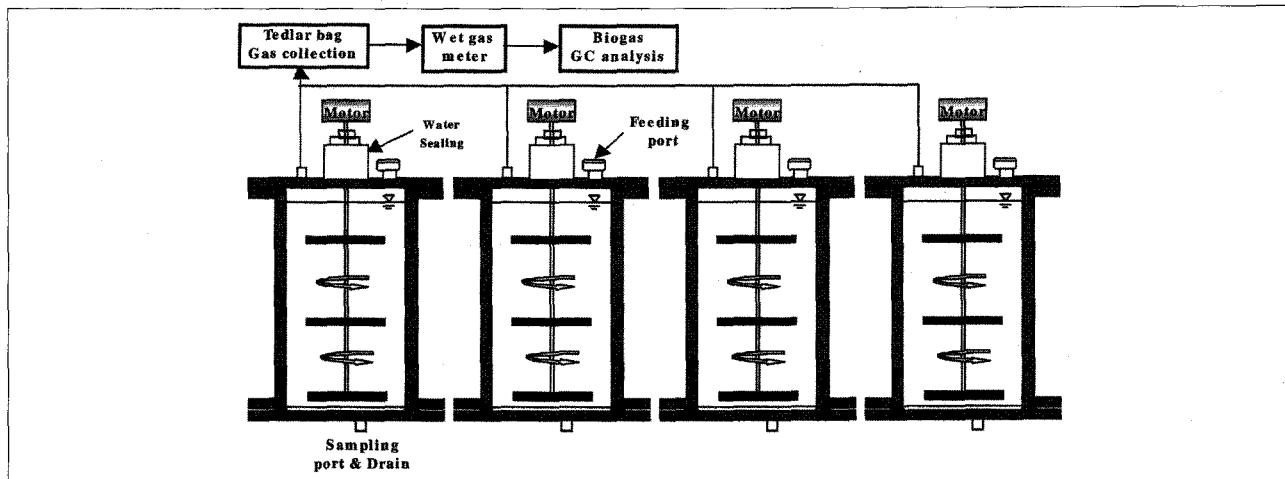


Fig. 3 Experimental apparatus for high-rate anaerobic co-digestion of the mixture.

물과 소화조 유출수의 성상 그리고 biogas 발생량 및 조성을 분석하였다.

## 2.4 분석방법

본 연구의 회분식 및 연속식 실험에 이용된 음식물쓰레기, 폐활성슬러지 그리고 혼합폐기물의 TCOD, SCOD, TS, VS, Alkalinity, NH<sub>4</sub>-N의 측정은 Standard Method<sup>(29)</sup>에 준하여 분석하였다. 특히 SCOD, NH<sub>4</sub>-N, VFA 분석을 위한 시료는 15분 동안 15,000rpm으로 원심분리 시켜 그 상동액을 0.45 μm cellulose acetate membrane filter로 여과 후 여과액을 이용하였고, pH 측정은 pH meter(Cole Parmer 5997-30)를 이용하였다. 시료의 VFA와 바이오가스의 메탄함량은 FID (flame ionization detector), TCD(thermal conductivity detector)가 장착된 G.C.(HP-5890A)를 이용하였고, wet gas meter로 측정된 바이오가스 발생량은 온도에 의한 부피팽창을 고려하여 표준상태(0°C, 1 atm)에서 dry biogas 부피로 계산하였다. 각 시료의 원소 조성은 원소분석기 CHN-1000와 SC-432BR을 이용하여 분석하였다.

## 3. 연구결과 및 고찰

### 3.1 폐활성슬러지의 알칼리 가용화

문헌에 따르면 폐활성슬러지의 가용화를 위한 알칼리 전처

Table 1 Result of alkaline pre-treatment

Sample	TCOD (mg/l)	SCOD (mg/l)	SCODt (mg/l)	Sol. <sup>1)</sup> (%)
WAS	36,200	256	432	0.49
PWAS			10,300	28.0

1) Sol.: Solubilization

리 방법은 기존 하수처리장에 적용이 용이하고 초기 투자비용 뿐만 아니라 에너지 소비량이 타 전처리 기술에 비하여 경제적인 것으로 보고하였다<sup>(5)</sup>. 고형물 함량이 3%인 폐활성슬러지의 알칼리 농도를 45meq NaOH/L로 조절 후, 25°C의 반응온도에서 4시간 동안 알칼리 전처리를 수행한 실험결과를 Table 1에 요약하였다. 대조시료인 WAS의 가용화는 SCODt 농도 432mg/l 함께 0.49%인데 반하여, 전처리 시료인 PWAS의 경우 SCODt 농도가 10,300mg/l까지 증가하여 28.0%의 가용화 효과를 나타내었다. 본 실험의 결과로 볼 때, 알칼리 전처리 방법이 폐활성슬러지의 가수분해 효율 개선에 있어 상당히 효과적임을 알 수 있다.

### 3.2 원소조성과 C/N비

본 실험에 이용된 음식물쓰레기와 폐활성슬러지 그리고 혼합폐기물의 원소조성과 C/N비를 Table 2에 나타내었다. 협기 성소화에 있어 처리대상 기질의 C/N비는 소화균의 성장과 신진대사 뿐만 아니라 공정의 운전성능을 좌우하는 중요한 변수로 작용하므로 특히 고려되어야 한다. 폐활성슬러지 경우 질소성분 함량이 탄소성분에 비하여 상대적으로 높아 5.79의 낮

은 C/N비를 나타낸 반면, 음식물쓰레기의 C/N비의 경우 자체 탄소성분 함량이 높고 질소성분이 상대적으로 낮아 폐활성슬러지에 비하여 3배 높은 값을 나타내었다. 한편, 혼합폐기물의 C/N비는 음식물쓰레기의 혼합 효과로 인하여 8.38까지 향상되었다.

### 3.3 생분해도 평가

협기성소화에서 처리대상 기질의 생분해도를 측정함으로써 시료의 총 휘발성 고형물(total volatile solid, TVS) 중 생분해성 휘발성 고형물(biodegradable volatile solid, BVS)량을 알 수 있다. 시료의 TVS 중 BVS 부분만이 biogas로 분해되기 때문에 메탄발생량을 측정함으로써 BVS 정도를 예측할 수 있으며, 또한 BVS의 분해에 따른 메탄 생성속도는 소화조 설계시 반응조 형태나 규모를 결정하는 주요한 설계인자로 이용된다.

회분식 BMP test로부터 얻어진 5종 폐기물에 대한 누적 메

Table 2 Elemental compositions and C/N ratio of the substrate used in BMP test

Sample	Elemental composition(wt% of TS)				
	C	H	O	N	C/N
FW	45.76	6.68	38.8	2.84	16.11
WAS	38.75	5.39	21.35	6.69	5.79
Mixture	41.00	5.87	29.60	4.89	8.38

Table 3 Methane yields of different organic wastes obtained from BMP test<sup>(30)</sup>

Waste types	Methane yield (L CH <sub>4</sub> /g VS)
Livestock manures	
- Cattle slurry	0.252~0.323
- Pig slurry	0.210~0.348
- Poultry slurry	0.250~0.390
Agro-industrial wastes	
- Tomato & orange	0.320~0.330
- Sorghum & sugarbeet	0.260~0.390
- Brewer's grain	0.310
- Straw	0.105~0.250
- Whey	0.250~0.560
Organic fractions of MSW	
- Garden wastes	0.140~0.350
- Fruit wastes	0.175~0.350
- Sewage sludge	0.120~0.210
- European food waste	0.321~0.540
- Korean food waste	0.421

탄발생량(Cumulative methane yield, CMY) 배양시간의 함수로써 Fig. 4에 나타냈으며, 이에 기초한 각 폐기물의 생분해도 평가 결과를 Table 4에 요약하였다.

#### 3.3.1 음식물쓰레기 생분해도

음식물쓰레기의 메탄 발생량은 배양 1일 동안 급속한 증가를 보였는데, 이는 음식물쓰레기를 포함하는 입자상 유기물의 대부분이 가수분해가 용이하고 쉽게 생분해 가능한 유기성분으로 구성하고 있기 때문으로 평가되고 있다<sup>(26)</sup>. 음식물쓰레기의 유기물 분해는 배양 15일 이내 완료되어 0.421 L CH<sub>4</sub>/g VS의 최종 메탄수율과 함께 86.1%의 높은 생분해도를 나타내었으며, 본 연구결과는 이전에 선행된 Cho 등<sup>(26)</sup>의 생분해도 평가 결과와 거의 유사하였다.

Table 3에 다양한 유기성 폐기물의 BMP test로부터 얻어진 메탄수율을 비교해 볼 때, 국내·외에서 발생되는 음식물쓰레기의 메탄수율은 축산분뇨와 농공산업폐기물에 비하여 월등히 높음을 알 수 있다. 따라서 국내 음식물폐기물의 높은 메탄수율과 생분해도 특성을 감안해 볼 때, 협기성소화 처리는 폐기물의 효과적인 감량화와 동시에 메탄과 같은 유용한 에너지원을 다량 회수 할 수 있으므로 폐기물의 자원순환형 관리시스템 구축에 있어 적극적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

#### 3.3.2 폐활성슬러지 생분해도

폐활성슬러지(WAS)와 알칼리 전처리된 폐활성슬러지(PWAS)의 BMP test를 통하여 알칼리 전처리가 메탄수율과 생분해도에 미치는 영향을 조사하였다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이, WAS의 경우 슬러지 입자의 가수분해반응이 소화반응의 율속단계로 작용하여 느린 메탄생성 속도와 함께 낮은 수율을 나타낸 반면, PWAS 경우 슬러지 입자의 알칼리 가수분해 효과로 인하여 메탄발생량은 배양 1일 동안 급격히 증가하였다. WAS와 PWAS의 biogas 발생은 배양 23일 이후부터 중단되었고, PWAS의 생분해도는 0.260 L CH<sub>4</sub>/g VS의 메탄수율과 함께 48.0%를 나타내었으며, WAS의 생분해도에 비하여 65% 향상하였다. 따라서 폐활성슬러지의 알칼리 전처리는 메탄 생성량의 극대화와 동시에 슬러지의 생분해도 향상에 상당히 효과적이며<sup>(27)</sup>, 슬러지의 생분해도 개선은 후속 최종처분 슬러지의 감량화와 직접적으로 연관됨으로 슬러지 처리비용을 경감 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.3.3 혼합폐기물의 생분해도

폐활성슬러지에 음식물쓰레기 50%를 혼합함에 따라 C/N비는 5.79에서 8.38까지 상승하였고, 메탄 발생량 증가와 함께 생분해도는 29.3%에서 55.0%까지 향상되어 약 88%의 생분해도 개선 효과를 가져왔다. 이러한 결과는 음식물쓰레기 혼합에 따른 혼합폐기물의 C/N비 증가와 더불어 쉽게 생분해 가능한 유기성분의 증가로 인하여 소화효율이 향상되었기 때문으로 판단되며, 이에 Rivard 등<sup>(31)</sup>과 Hamwawi 등<sup>(32)</sup>은 생분해성 도시고형폐기물(organic fraction of municipal solid waste, OFMSW)과 하수슬러지를 통합소화 할 경우, 하수슬러지의 낮은 C/N비와 생분해도는 OFMSW의 혼합에 의해 개선되고, 하수슬러지의 혼합은 미량원소(macro-and micronutrient)를 제공함에 따라 전체 소화공정의 안전성 뿐만아니라 소화균의 적절한 생육환경이 조성됨에 따라 메탄가스의 발생량 증대와 같은 긍정적인 효과를 얻을 수 있는 것으로 보고하였다. 따라서 음식물쓰레기 처리를 위한 대안으로 년중 빈부하 상태로 운전 중인 하수종말처리장의 협기성소화조에 생분해도가 높은 음식물쓰레기를 투입함으로써 빈부하 문제의 해결과 동시에 소화조의 안정적인 운전을 기대할 수 있으며, 또한 소화효율 증대로 인하여 다량의 메탄가스를 회수할 수 있을 것으로 기대된다.

한편, 음식물쓰레기와 알칼리 전처리한 폐활성슬러지의 혼합폐기물 FW:PWAS의 메탄 생성량과 생분해도는 혼합폐기물 FW:WAS 보다 25.5% 증가한 0.349L CH<sub>4</sub>/g VS와 69.1%를 나타내었다. 하수슬러지의 협기성소화에서 가수분해반응이 을 속단계로 작용함을 고려해 볼 때, 메탄의 생성량 및 속도 증가의 주요한 원인은 알칼리 전처리에 의해 슬러지 입자의 가수분해속도 개선과 동시에 용해성 유기물 증가로 인하여 소화균에 의한 기질 이용율이 증가하였기 때문으로 판단된다. 이와 관련하여 Hamzawi 등<sup>(32)</sup>은 생분해성 도시고형폐기물(OFMSW) 25%와 하수슬러지 75%인 혼합폐기물의 협기성 통합소화에서 하수슬러지의 알칼리 전처리를 병행 할 경우, 슬러지 입자의 화학적 가수분해 효과로 인하여 혼합폐기물의 biogas 생성율과 생분해도가 향상된다고 보고하였다.

### 3.4 고을 통합소화 반응조의 운전 최적화 및 성능 평가

선행된 실험에서 음식물쓰레기와 폐활성슬러지의 혼합비율이 다른 다양한 혼합폐기물을 대상으로 HRT 변화에 따른 통합

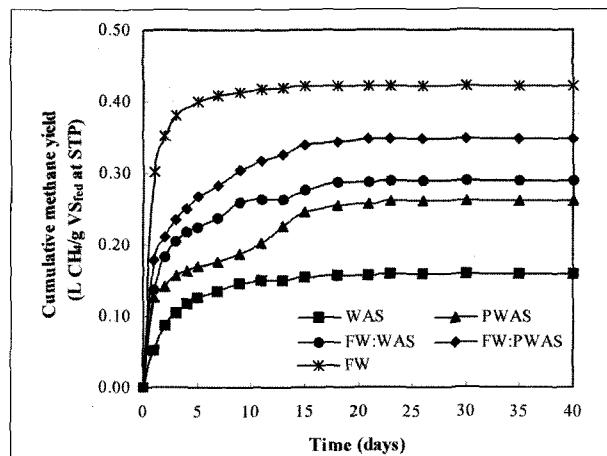


Fig. 4 Cumulative methane yield (CMY) of the substrate used in BMP test.

Table 4 CMY, TMY and biodegradability (BD) of the substrate used in BMP test

Sample	CMY (L CH <sub>4</sub> /g VS)	TMY (L CH <sub>4</sub> /g VS)	BD (%)
WAS	0.159	0.542	29.3
PWAS	0.260		48.0
FW:WAS	0.278	0.505	55.0
FW:PWAS	0.349		69.1
FW	0.421	0.489	86.1

소화 반응조의 운전성능을 조사한 결과, 혼합폐기물의 biogas 및 메탄 발생량 측면에서 적정 혼합비와 운전 HRT는 50:50과 13일로 평가되었다<sup>(7,8)</sup>. 따라서, 본 연구에서는 혼합폐기물 FW:PWAS을 대상으로 13일보다 짧은 HRT 조건에서 통합소화 반응조의 운전특성과 유기물 제거율 및 메탄 발생량을 평가하였고, 폐활성슬러지의 알칼리 전처리를 병행하는 고을 통합소화 공정의 최적 운전조건을 도출하고자 하였다.

통합소화 반응조는 5, 7, 10 그리고 13일의 HRT 조건에서 40일 동안 운전되었으며, 운전 15~20일 경과하면서 모든 반응조는 정상상태에 도달하였고, 정상상태 도달 이후 각 소화조 유출수의 성상분석 결과 및 운전성능을 Table 6에 평균값을 토대로 요약하여 나타내었다.

#### 3.4.1 시료와 혼합폐기물의 성상

혼합폐기물 조제에 이용된 음식물쓰레기(FW)와 알칼리 전처리한 폐활성슬러지(PWAS) 그리고 폐활성슬러지(WAS)와 혼합폐기물 50:50의 평균 성상분석 결과를 Table 5에 나타내었다. 폐활성슬러지의 TCOD 농도는 33.97g/L 이었고, 4시간

Table 5 Physicochemical characteristics of feedstocks and mixture waste

Items	Feedstocks & Mixture waste			
	FW	WAS	PWAS	50:50
TCOD(g/l)	114.2	33.97	29.91	57.7
SCOD(g/l)	40.6	0.03	7.78	16.4
S/TCOD(%)	36.0	0.08	26.0	28.4
TS(%)	8.47	3.02	3.36	4.04
VS(%)	7.96	1.91	1.88	2.94
VS/TS(%)	94.0	63.2	60.0	72.8
pH	4.15	6.67	8.42	5.50
VFA(g/l)	0.35	-	-	0.76
Alkalinity(g/l)	-	0.84	3.13	1.26
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(g/l)	0.15	0.02	0.30	0.22

동안 알칼리 전처리한 폐활성슬러지의 가용화 정도는 평균 26%를 유지하였다. 알칼리 전처리 후 폐활성슬러지의 pH, 알칼리도는 전처리 이전에 비하여 증가한 8.42, 3,130mg/L을 나타내어 통합소화 반응조의 알칼리도 보충에 있어 상당한 효과를 기대 할 수 있다. 한편, 혼합폐기물의 경우 음식물쓰레기의 빠른 가수분해 특성과 슬러지의 전처리 효과로 인하여 SCOD 농도와 SCOD/TCOD 비는 각각 16.4g/L와 28.4%로 조사되었고, 슬러지의 알칼리 전처리 효과로 인하여 pH와 alkalinity는 음식물쓰레기보다 높은 5.5와 1,260mg/L을 유지하였다.

### 3.4.2 소화조의 안정성 평가

일반적으로 협기성소화공정에서 반응조의 pH, alkalinity, 암모니아성 질소 그리고 유기산 농도 등은 협기성소화 반응조의 안정성 평가를 위한 주요 운전지표로 이용되며, 이들의 생화학적 거동은 유기물 부하율(organic loading rate, OLR), 수리체류시간(HRT), 소화조의 운전방식 등의 운전조건과 처리 대상 폐수 및 폐기물의 고유한 특성에 의해 상당히 좌우된다.

협기성소화에서 소화조 pH 저하를 유발하는 주요한 원인은 반응조내 유기산의 축척에 따른 알칼리도가 파괴되기 때문이며, 특히 이러한 현상은 과부하 조건으로 운전 할 경우 더욱 심화된다. Lay 등<sup>(33)</sup>은 효과적인 유기물 분해와 메탄발생량을 극 대화하기 위한 소화조 적정 pH 범위는 6.6~7.6 범위이며, pH 가 6.1보다 낮거나 혹은 8.3 이상인 경우 소화조의 운전효율은 상당히 감소한다고 보고하였다. Table 6에 나타낸 바와 같이, 정상상태 도달 이후 통합소화 반응조의 경우 7.5~7.7과 5,241~5,552mg/L 범위를 유지하였고 운전 HRT 변화에 따른 큰 차이를 나타내지 않았다. 심지어 HRT 5일 조건에서 OLR

이 5.88g VS/L-day까지 증가함에도 불구하고 소화조의 pH 와 알칼리도는 7.52와 5,241mg/L을 유지하였다.

Ray 등<sup>(34)</sup>과 Lin 등<sup>(35)</sup>은 하수슬러지의 협기성소화에서 폐활성슬러지를 알칼리 전처리 할 경우 소화조 HRT를 20일에서 7.5일까지 단축 가능하며, 또한 유기물 제거율과 biogas의 발생량 증가 뿐만아니라 슬러지의 높은 알칼리도 보유능으로 인하여 고부하 조건에서도 소화조의 안정적인 운전이 가능한 것으로 보고하고 있다. 따라서, 음식물쓰레기와 하수슬러지를 통합소화 함에 있어 폐활성슬러지의 알칼리 전처리는 소화조 pH 및 알칼리도의 상승효과를 가져오며, 이에 고부하 조건에서도 소화조의 안정적인 운전이 가능한 것으로 판단된다.

한편, HRT 5~13일의 범위에서 운전된 통합소화 반응조의 암모니아성 질소 농도는 협기성소화의 저해농도인 1,500mg/l 보다 훨씬 낮은 778~843mg/L의 범위를 나타내었고, VFA 농도 15~115 mg/L as C<sub>2</sub>로 V/A ratio는 안정 지표인 0.3보다 훨씬 낮은 0.02 이하를 유지하였다. 이상의 주어진 HRT 조건에서 혼합폐기물이 주입된 통합소화 반응조로부터 측정된 pH, 알칼리도, 암모니아성 질소 및 VFA 농도는 협기성소화 공정에 적합한 수준을 유지하였으며, 전반적으로 소화반응이 안정적으로 진행된 것으로 평가되었다.

### 3.4.3 소화조의 운전성능 평가

협기성소화공정에서 바이오가스의 메탄 함량과 함께 유기물(TCOD or VS) 제거율과 메탄 생성량(specific methane production, SMP)은 소화조의 운전성능을 평가하는데 있어 대표적인 지표로 이용되며, 이와 같은 운전변수는 소화조의 HRT와 OLR에 의해 좌우된다.

소화조 HRT 함수로 OLR에 따른 바이오가스의 메탄함량, 유기물(VS) 제거율과 메탄 생성량(SMP)을 Fig. 5에서 보여주고 있다. 일반적으로 적절한 OLR 조건에서 협기성 소화조가 정상적으로 진행 될 경우 biogas 메탄 함량은 60~70% 범위를 유지한다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 biogas 메탄함량은 HRT 감소와 함께 OLR이 증가 될 때 비례적으로 감소하는 경향을 나타냈다. HRT 5~13일 범위에서 메탄함량은 60.7~66.7% 범위를 유지하여 전반적으로 소화조가 안정적으로 운전되었다. VS 제거율은 HRT 7~13일에서 OLR 2.27~4.20g VS/L-day 일 때 49.8~51.5% 범위로 큰 차이가 없는 반면, HRT 5일로 단축과 동시에 OLR이 5.88g VS/L-day로 증가됨에 따라 VS 제거율은 43.5%까지 상당히 감소하였다. 메탄 생성량(SMP)은

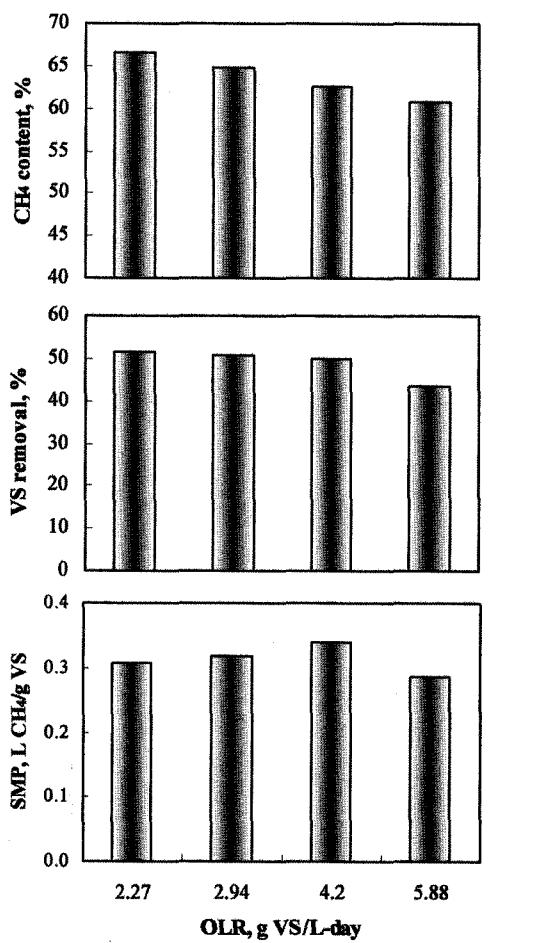


Fig. 5 CH<sub>4</sub> content, VS removal and SMP versus organic loading rate (OLR) as a function of HRT.

HRT 7일에서 OLR 4.20g VS/L-day 조건으로 운전된 소화조에서 가장 높은 0.340 L CH<sub>4</sub>/g VS를 나타내었고, HRT 5일에서 OLR이 5.88g VS/L-day으로 증가됨에 따라 메탄 생성량은 0.287 L CH<sub>4</sub>/g VS까지 상당히 감소하였다.

이상의 연구결과에서 나타낸 바와 같이, 소화공정의 운전성능 평균 기준인 바이오가스의 메탄함량, 유기물 제거율 그리고 메탄 발생량을 토대로 볼 때 음식물쓰레기와 알칼리 전처리한 폐활성슬러지의 혼합비 50:50인 혼합폐기물의 효과적인 통합소화를 위한 적정 HRT와 OLR은 7일과 4.20g VS/L-day로 평가되었다.

본 연구와 관련하여 이전에 수행된 실험결과<sup>(30)</sup>에서 고형물 농도 3%인 폐활성슬러지에 대한 음식물쓰레기의 혼합비율을 10%에서 90%로 증가하였을 때 혼합폐기물의 총 고형물농도는 3.16~6.28%까지 증가하였으며, HRT 13일에서 OLR 1.85~

Table 6 Result of anaerobic co-digestion for a mixture of 50% FW and 50% WAS at different HRT

Operating conditions				
HRT(day)	5	7	10	13
OLR(g VS/L-day)	5.88	4.20	2.94	2.27
OLR(g TCOD/L-day)	11.55	8.25	5.78	4.46
Reactor characteristics				
TS(%)	2.74	2.56	2.54	2.53
VS(%)	1.66	1.48	1.44	1.43
TCOD(g/L)	31.4	27.4	26.5	26.3
SCOD (g/L)	1.27	0.72	0.65	0.60
pH	7.52	7.68	7.64	7.61
Alkalinity (g/L)	5.24	5.52	5.55	5.50
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/L)	778	804	827	843
VFA as C <sub>2</sub> (mg/L)	115	103	78	15
Digester performances				
TCOD removal(%)	46.4	53.1	54.7	55.2
VS removal(%)	43.5	49.8	50.9	51.5
CH <sub>4</sub> content(%)	60.7	62.6	64.7	66.6
GPR(L/L-day)	2.796	2.291	1.453	1.054
SGP(L gas/g VS)	0.472	0.543	0.491	0.461
SMP(L CH <sub>4</sub> /g VS)	0.287	0.340	0.318	0.307

4.19g VS/L-day 범위로 운전한 통합소화 공정의 VS 제거율과 메탄 발생량은 각각 36.7~69.2%와 0.186~0.345 L CH<sub>4</sub>/g VS를 나타낸 것으로 보고하였다. 특히 이전에 수행된 혼합폐기물 FW 50% : WAS 50%의 통합소화에서 반응조 HRT를 13일에서 10일로 단축과 동시에 OLR이 2.45g VS/L-day에서 3.18g VS/L-day로 증가됨에 따라 VS 제거율과 메탄 발생량이 감소한 반면<sup>(8)</sup>, 폐활성슬러지의 알칼리 전처리를 병행한 본 연구에서는 HRT 7일까지 감소와 함께 OLR이 1.7배 증가에도 불구하고 효과적인 유기물 제거와 함께 메탄 생성량이 증가하는 결과를 보였다. 이는 생분해도가 낮은 폐활성슬러지를 알칼리 전처리 함에 따라 가수분해속도 개선과 동시에 용해성 유기물 증가로 인하여 소화균에 의한 기질 이용율이 증가하였기 때문이며, 이에 따라 소화 공정의 효율 향상과 더불어 소화기간을 단축시키는 긍정적인 효과를 얻을 수 있었다.

Table 7에 기존에 연구된 유기성 폐기물의 혼기성 통합소화 결과를 나타내었으며, 생분해성 도시고형폐기물(OFMSW), 축산분뇨(manure), 하수슬러지(SS), 농공산업폐기물(crops, ISW, FVW) 등이 혼합되어 처리되었다. 고형물 함량이 15% 이상인 혼합폐기물은 고온(54~56°C) 건식소화 공법(dry digestion)을 이용하였고, 고형물 함량이 10% 이하인 혼합폐기물의

Table 7 Comparison of the performance and anaerobic co-digestion of different organic wastes

Process	Wastes	Temp.(°C)	TS(%)	SMPL CH <sub>4</sub> /g VS)	References
CSTR <sup>a)</sup>	OFMSW <sup>i)</sup> +SS <sup>j)</sup>	35	2.4~12	0.38~0.39	Schmidell et al.(1986)
CSTR	OFMSW+SS	35	5.70	0.360	Mata-Alvarez et al.(1990)
HSAD <sup>b)</sup>	Crops+MSW <sup>h)</sup> SS	37	17.0	0.36~0.38	Nordberg et al.(1994)
HSAD	OFMSW+SS+Manure	55	28.0	0.375	Kayhanian and Rich(1995)
CSTR	OFMSW+SS	37	10~15	0.310	Rintala and Jorvinen(1996)
HSAD	MSW+HSW <sup>i)</sup>	54	30.0	0.302	Oleszkiewicz and Poggi-Varaldo(1997)
HSAD	MSW+HSW+SS	55	25.0	—	Poggi-Varaldo et al.(1997)
SBAD <sup>c)</sup>	OFMSW+SS	35	17.0	0.315	Demirekler and Anderson(1998)
CSTR	OFMSW+SS	55	6.24	0.180	Del Borghi et al.(1999)
Two-phase <sup>d)</sup>	SS+FVW <sup>j)</sup>	38	10.0	0.252	Dinsdale et al.(2000)
Two-phase Temp.-phase <sup>e)</sup>	OFMSW+SS	55/35 55/35	3.0~5.2 3.0~5.2	0.280~0.330 0.300~0.420	Schmit and Ellis(2001)
CSTR	FVW+Manure	35	10~15	0.230~0.450	Callaghan et al.(2002)
CSTR	OFMSW+SS	56	6.0~10.0	0.319	Sosnowski et al.(2003)
CSTR	FW <sup>k)</sup> +SS	35	3.16~6.28	0.186~0.345	Heo et al. (2004)
Two-phase		35	3.16~6.28	0.230~0.350	

<sup>a)</sup> CSTR : continuous stirred tank reactor.<sup>b)</sup> SBAD : semi-dry anaerobic digestion.<sup>c)</sup> Temp.-phase : acidogenesis or methanogenesis.<sup>d)</sup> SS : sewage sludge<sup>e)</sup> ISW : industrial waste.<sup>b)</sup> HSAD : high-solid anaerobic digestion.<sup>d)</sup> Two-phase : acidogenesis/methanogenesis.<sup>f)</sup> OFMSW : organic fraction of municipal solid waste.<sup>h)</sup> MSW : municipal solid waste.<sup>j)</sup> FVW : fruit and vegetable waste.

경우 증온(35~37°C) 습식소화공법(wet digestion)에 의해 처리되었다. Kayhanian and Rich<sup>(14)</sup>와 Poggi-Varaldo 등<sup>(41)</sup>은 도시고형폐기물의 건식 소화조에 하수슬러지의 추가는 OFMSW에 부족한 영양성분(N, P)과 미량원소(trace elements) 제공하여 소화균의 적절한 생육환경이 보장하게 되고, 또한 OFMSW의 높은 고형물을 희석하여 전체 소화공정의 안정적인 운전과 더불어 메탄 발생량 증대와 같은 긍정적인 효과를 얻은 것으로 보고하였다. 한편, 습식소화 공정의 하수처리장 소화조에 일정량의 OFMSW를 혼합 처리할 경우 기질의 영양소 균형과 C/N비 향상에 의해 소화효율이 개선됨과 동시에 쉽게 생분해 가능한 유기성분의 추가로 인하여 메탄가스 발생량이 증가하는 것으로 보고하였다<sup>(8,20,30)</sup>.

특히, 기존 하수처리장의 협기성소화조에 주입되는 하수슬러지의 총 고형물(total solid, TS) 농도가 평균 3% 정도임을 감안해 볼 때, 하수처리장의 소화조를 이용한 유기성 폐기물의 통합소화 방안은 국내에서 문제시 되고 있는 음식물쓰레기의 효과적인이고 경제적 처리를 위한 기술적 대안으로 유망할 것으로 예견된다.

## 4. 결론

하수슬러지인 폐활성슬러지의 가용화와 생분해도에 대한 알칼리 전처리 효과를 조사하고, 음식물쓰레기와 하수슬러지의 통합소화에서 있어 하수슬러지의 알칼리 전처리를 병행함에 따른 소화공정의 운전변수 거동과 운전성능을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 알칼리 전처리한 폐활성슬러지(PWAS)의 가용화 효율과 생분해도는 대조시료(WAS) 대비 각각 57배와 65% 증가하여 알칼리 전처리가 폐활성슬러지의 가수분해 효율과 생분해도 향상에 상당히 효과적임을 알 수 있었다.
2. 하수슬러지에 음식물쓰레기를 50% 혼합함에 따라 혼합폐기물(FW 50% : WAS 50%)의 C/N비 증가와 더불어 생분해도는 향상되었고, 알칼리 전처리한 혼합폐기물(FW:PWAS)의 경우 폐활성슬러지 입자의 알칼리 가용화 효과로 인하여 생분해도는 대조시료(FW:PWAS) 대비 25% 향상되었다.
3. 폐활성슬러지의 알칼리 전처리는 협기성소화균에 양질의

기질을 제공 할 뿐만아니라 소화조의 pH와 알칼리도의 상승을 수반하는 효과를 나타내었다.

4. 소화공정의 운전성능 평가 기준인 바이오가스의 메탄함량, 유기물 제거율 그리고 메탄 발생량을 토대로 볼 때 음식물쓰레기와 알칼리 전처리한 폐활성슬러지의 혼합비 50:50인 혼합폐기물의 효과적인 통합소화를 위한 적정 HRT와 OLR은 7일과 4.20 g VS/L-day로 평가되었다.

현재까지 국내외적으로 음식물쓰레기와 같은 생분해성 도시 고형폐기물과 하수슬러지의 협기성 통합소화 처리하는데 있어 하수슬러지의 전처리를 병행하는 연구는 거의 전무한 실정이다. 본 연구결과를 종합해 볼 때, 음식물쓰레기를 하수슬러지와 협기성 통합소화 함에 있어 폐활성슬러지를 선택적으로 알칼리 전처리 할 경우 하수슬러지의 협기성소화에서 율속단계로 작용하는 가수분해단계가 단축됨에 따라 소화기간을 단축 할 수 있고, 이에 높은 소화효율과 함께 효율적인 소화조 운영이 가능 할 것으로 판단되며, 또한 소화효율의 증진은 곧 메탄 발생량 및 소화슬러지 감량화와 직결되므로 에너지원으로서 적극적인 활용과 더불어 슬러지 처리비용을 경감에 상당한 효과를 가져 올 것으로 기대된다.

## 사사

본 연구는 산업자원부의 대체에너지기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 주신 산업자원부에 감사의 뜻을 표합니다.

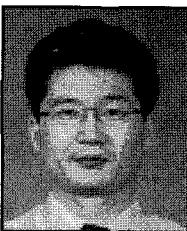
## References

1. 2003년 하수종말처리시설 운영관리실태 분석, 환경부, 2004. (<http://www.me.go.kr>)
2. 음식물발생 및 처리현황, 환경부. (<http://www.me.go.kr>)
3. Eastman, J. A. and Ferguson, J. F., 1981. "Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion", *J. Water Pollut. Control Fed.* 53, 3, 352-366.
4. Li, Y. Y. and Nokid, T., 1992. "Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment", *Wat. Sci. Tech.* 26, 3-4, 857-866.
5. Muller, J. A., 2001. "Prospects and problems of sludge pre-treatment processes", *Wat. Sci. Tech.* 44, 10, 121-128.
6. 하수처리장 소화조 효율 개선사업 추진계획, 환경부, 2005. (<http://www.me.go.kr>)
7. Heo, N. H., Park, S. C., Lee, J. S., Kang, H. and Park, D. H., 2003. "Single-stage anaerobic co-digestion for mixture wastes of simulated Korean food waste and waste activated sludge", *Applied Biochem. and Biotech.*, 105-108, 567-579.
8. Heo, N. H., Park, S. C. and Lee, J. S., 2004. "Effects of mixture ratio and hydraulic retention time on single-stage anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge", *J. of Environ. Sci. and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, A39, 7, 1745-1762.
9. Heo, N. H., Park, S. C., Lee, J. S. and Kang, H., 2003. "Solubilization of waste activated sludge by alkaline pretreatment and biochemical methane potential tests for anaerobic co-digestion of municipal organic waste", *Wat. Sci. & Tech.*, 48, 8, 211-219.
10. Progress Report on the Economy of Centralized Biogas Plants, The Biomass Section of the Danish Energy Agency, Danish Energy Agency, 1995.
11. Ahring, B. K. and Johansen, K., 1992. "Anaerobic digestion of source-sorted household waste together with manure and organic industrial waste, In Proceeding of International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, Venice", Italy, pp. 203-208.
12. Rintala, J. A. and Järvinen, K. T., 1996. "Full-scale mesophilic anaerobic co-digestion of municipal solid waste and sewage sludge: methane production characteristics", *Waste Management Research*, 14, 2, 163-170.
13. Demcirekler, E. and Anderson, G. K., 1998. "Effect of sewage sludge addition on the start-up of the anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste", *Environmental Technology*, 19, 837-843.
14. Kayhanian M. and Rich, D., 1996. "Sludge management using the biodegradable organic fraction of municipal solid waste as a primary substrate", *Water Environ. Res.*, 68, 2, 240-252.
15. Mata-Alvarez, J., 2003. *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste*, IWA Publishing, London, pp.

- 181–199.
16. Cecchi, F., Traverso, P. G., Perin, G. and Vallini, G., 1988. "Comparison of co-digestion performance of two differently collected organic fractions of municipal solid waste and sewage sludge", *Environ. Technol. Lett.*, 9, 391–400.
  17. Mata-Alvarez, J., Cecchi, F., Pavan, P. and Llabres, P., 1990. "The performance of digesters treating the organic fraction of municipal solid waste differently sorted", *Biological Wastes*, 33, 181–199.
  18. Poggi-Varaldo, H. M. and Oleszkiewicz, J. A., 1992. "Anaerobic co-composting of municipal solid waste and waste sludge at high total solids levels", *Environmental Technology*, 13, 409–421.
  19. Hamzawi, N., Kennedy, K. J. and McLean, D. D., 1998. "Technical feasibility of anaerobic co-digestion of sewage sludge and municipal solid waste", *Environ. Technol.*, 19, 993–1003.
  20. Schmit, K. H. and Ellis, T. G., 2001. "Comparison of temperature phase and two phase anaerobic co-digestion of primary sludge and municipal solid waste", *Water Environ. Res.*, 73, 3, 314–321.
  21. Hedegaard, M. and Jaensch, V., 1999. "Anaerobic co-digestion of urban and rural wastes", *Renewable Energy*, 16, 1064–1069.
  22. 음식물류 폐기물의 효율적인 처리방안에 대한 연구 보고서, 수도권매립지관리공사, 2003.
  23. Rajan, R. V., Lin, J.-G. and Ray, B. T., 1989. "Low-level chemical pretreatment for enhanced sludge solubilization", *J. Water Pollut. Control Fed.*, 61, 11–12, 1678–1683.
  24. Owen, W. P., Stuckey, D. C., Healy, J. B., Young, L. Y. and McCarty, P. L., 1979. "Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity", *Wat. Res.*, 13, 485–492.
  25. Shelton, D. R. and Tiedje, J. M., 1984. "General method for determining anaerobic biodegradation potential", *Appl. Environ. Microbiol.*, 47, 850–857.
  26. Cho, J. K., Park, S. C. and Chang, H. N., 1995. "Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food waste", *Bioresource Technology*, 52, 245–253.
  27. Penaud, V., Delgenes, J. P. and Moletta, R., 1999. "Thermo-chemical pretreatment of a microbial biomass: influence of sodium hydroxide addition on solubilization and anaerobic biodegradability", *Enzyme and Microbial Technology*, 25, 258–263.
  28. Tchobanoglou, G., Theisen, H. and Vigil, S., 1993. *Integrated Solid Waste Management –Engineering Principles and Management Issues*, McGraw-Hill, New York, 679–683.
  29. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998), 20th Ed. APHA-AWWA-WEF, Washington DC, USA.
  30. Heo, N.H., 2004. High-rate anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge for the recovery of biogas, Ph.D. thesis, Chungnam National University.
  31. Rivard, C. J., Vinzant, T. B., Adney, W. S. and Grohmann, K., 1989. "Nutrient requirements for anaerobic and aerobic digestion of processed municipal solid waste", *J. Environ. Health*, 52, 96–100.
  32. Hamzawi, N., Kennedy, K. J. and McLean, D. D., 1998. "Anaerobic digestion of co-mingled municipal solid waste and sewage sludge", *Wat. Sci. Tech.*, 38, 2, 127–132.
  33. Lay, J. J., Li, Y. Y., Noike, T., Endo, J. and Ishimoto, S., 1997. "Analysis of environmental factors affecting methane production from high-solids organic waste", *Wat. Sci. Tech.*, 36, 6–7, 493–500.
  34. Ray, B. T., Lin, J.-G. and Rajan, R. V., 1990. "Low-level alkaline solubilization for enhanced anaerobic digestion", *J. Water Pollut. Control Fed.*, 62, 1, 81–87.
  35. Lin, J. G., Chang, C. N. and Chang, S. C., 1997. "Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization", *Bioresource Technology*, 62, 85–90.
  36. Callaghan, F. J., Wase, D. A. J., Thayarithy, K. and Forster, C. F., 2002. "Continuous co-digestion of cattle alurry with fruit/vegetable wastes and chicken manure", *Biomass and Bioenergy*, 27, 71–77.
  37. Del Borghi, A., Converti, A., Palazzi, E. and Del Borghi, M., 1999. "Hydrolysis and thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste", *Bioprocess Engineering*, 20, 553–560.
  38. Dinsdale, R. M., Premier, G. C., Hawkes, F. R. and Hawkes, D. L., 2000. "Two-stage anaerobic co-digestion of waste acti-

- vated sluge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digestets", *Bioresouce Technology*, 72, 159-168.
39. Mata-Alvarez, J., Cecchi, F., Pavan, P. and Llabres, P., 1990. "The performance of digesters treating the organic fraction of municipal solid waste differently sorted", *Biological Wastes*, 33, 181-199.
40. Nordberg, A., Nilsson, A., Edstrom, M. and Thyselius, L., 1994. "Pilot-scale co-digestion of energy crops, source-sorted municipal waste and sewage sludge with liquid recirculation-a chemical and microbial evaluation", In Proceeding of 7th International Symposium on Anaerobic digestion, Cape Town, South Africa, 639-644.
41. Poggi-Varaldo, H. M., Valdes, L., Esparza-Garcia, F. and Fernaadez -Villagomez, G., 1997. "Solid substrate anaerobic co-digestion of paper mill sludge, biosolids and municipal solid waste", *Wat. Sci. Tech.*, 35, 2-3, 197-204.
42. Schmidell, W., Craveiro, A. M., Peres, C. S., Hirata, Y. S. and Varella, R. F., 1986. "Anaerobic digestion of municipal solid waste", *Wat. Sci. Tech.*, 18, 12, 163-171.
43. Sosnowski, P., Wieczorek, A. and Ledakowicz, S., 2003. "Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste", *Advances in Environmental Research*, 7, 609-616.

### 허 남 희



2004년 충남대학교 환경공학과, 공학박사

현재 한라산업개발(주) 에너지사업부, 과장  
(E-mail : bionhheo@hallasanup.com)

### 정 상 순



1981년 고려대학교 기계공학과, 공학사

현재 한라산업개발(주) 에너지사업부, 상무  
(E-mail : sschung@hallasanup.com)