

## 음식폐기물 및 폐활성슬러지의 용해성 유기물의 수화/용출 특성과 산 발효를 위한 적정 혼합비 결정

허남효, 박순철, 이진석, 이준표, 강호\*

한국에너지기술연구원 바이오매스연구팀, 충남대학교 환경공학과\*

### I. 서 론

1999년 국내 음식폐기물 및 폐활성오니 발생량 각각은 11,577 ton/day와 16,035 ton/day으로 음식폐기물의 경우 생활폐기물의 25.4%이고 오니의 경우는 사업장 폐기물의 15.5%로 조사되었으며<sup>1)</sup>, 이러한 생분해성 유기 고형폐기물은 주로 매립과 해양투기와 같은 방식에 의해 처분되어 왔다. 하지만, 침출수 및 악취 발생, 해양오염 및 생태계 파괴와 같은 2차 오염 발생과 처분을 위한 site 확보 제한 그리고 유기성 폐기물의 직매립 금지라는 새로운 환경법규가 제정됨에 따라 이에 대한 대책과 경제적이고 실효성 있는 처리기술 개발이 시급한 실정에 직면하고 있다. 따라서, 음식폐기물과 하수처리장 폐오니를 자원화하기 위하여 사료화, 퇴비화(호기성, 지렁이)에 대한 많은 연구와 기술이 개발되었지만 제품의 안정성 및 경제성, 수요처 확보, 보관 등과 같은 근본적인 문제에 대한 해결책이 미흡한 실정이다. 따라서, 최근에는 이러한 생분해성 유기 고형폐기물의 감량화와 동시에 자원화 및 에너지화를 위하여 혐기성소화 공법의 다양한 응용 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구 동향은 크게 세 부류로 구분할 수 있는데, 첫 번째로 기존의 하수처리장 소화조에 다른 생분해성 유기 고형폐기물과 혼합 처리하는 통합소화 방안<sup>2,3)</sup>, 두 번째로 two-phase 혐기소화 공법을 적용하여 재래식 소화조의 운전상 문제점을 해결하고 산 발효와 동시에 메탄가스 회수<sup>4,5)</sup>, 세 번째로 단일 산 발효조의 부산물을 회수하여 하수 고도처리 공정의 외부탄소원으로 재활용<sup>6)</sup>하는 것이다.

하지만, 이러한 혐기소화 공법의 응용기술을 효율적이고 안정적으로 운전하기 위해서는 음식폐기물과 폐활성오니의 고유한 특성을 고려한 운전 전략이 요구된다. 특히, 혐기성 산 발효조에서 단 시간내 유기산 생성을 극대화하기 위해서는 고형물내 존재하는 가용성 유기물의 수화(Hydrolysis)/용출(Solubilization) 반응이 빠르게 진행되어야 한다. 따라서, 유기성 고형폐기물의 수화/용출 반응을 향상시키기 위해 전자선 조사, 초음파, 열처리, 기계적 처리 그리고 알칼리 약품 주입과 같은 전처리 방법에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다. 특히, 입상 유기물의 가수분해 반응은 pH, 온도, 입자의 특성과 농도 그리고 효소생성 미생물 즉, 산 생성균의 활성 등과 같은 인자에 의해서 좌우되며, 이는 혐기성 분해시 반응의 율속단계(rate-limiting step)로 보고되고 있다<sup>7)</sup>.

본 연구는 음식물쓰레기와 폐활성슬러지의 혐기성 산 발효조 조건에서 운전온도와 TS(Total Solid) 농도 변화에 따른 가용성(용해성) 유기물의 수화/용출 정도(SCOD/TCOD)를 파악하고, 혐기성 산 발

[연락처] (우) 305-343 대전광역시 유성구 장동 71-2 번지 한국에너지기술연구원 바이오매스연구팀  
허남효, Tel.: 042-860-3552, Fax.: 042-860-3739, E-mail: bionhheo@kier.re.kr

효시 두 기질의 적절한 혼합비를 결정하기 위한 기초 연구로서 batch 실험을 수행하였다.

## II. 실험재료 및 방법

### 1. 실험장치 및 분석방법

본 batch 실험은 온도와 교반속도 조절이 가능한 shaking incubator에서 수행되었다. 시료의 완전한 혼합을 위하여 200rpm의 교반속도로 운전하였고, 20℃, 35℃, 55℃ 각 온도 조건에서 0.5 L 삼각 flask에 시료량 0.3 L로 하였다. 각 시료의 pH 측정은 pH meter(Cole Parmer, 5997-30)를 이용하였고, TCOD, SCOD, TS, VS 측정은 Standard Method 준하여 측정하였다. VFAs는 Gas Chromatography(Hewlett Packard-FID, 5890-A)로 분석하였다.

### 2. 시료 성상 및 실험방법

본 연구에서는 음식폐기물 대응으로 일반 대중음식점에서 판매되고 있는 비빔밥을 이용하였다. 비빔밥을 대표 시료로 선정된 이유는 i) 음식폐기물의 계절적인 변화에 따른 성상 변화, ii) 대규모 주거단지 음식물 분리수거함의 경우 이미 산 발효단계가 진행되고 있어 실험적 오차 발생하기 때문이다. 비빔밥의 구성비를 습량 기준에 의한 야채류 70%, 곡류(소량의 육류 포함) 30%로 조정하였고, 이때 총고형물(Total Solid, TS) 및 수분 함량 각각은 19~21%, 79~81%로 VS/TS비는 0.92~0.96 정도로 조사되었다. 입으로 조제된 비빔밥은 분쇄기를 이용하여 입경 2 mm 이하로 파쇄 후 증류수로 회석하여 TS 농도 각각 3%, 5%, 7%로 하였다. 폐활성슬러지는 대전시 하수처리장의 반송슬러지를 이용하였으며, 원심분리기로 농축 후 상등액을 회석수로 하여 TS 농도 각각 1%, 3%, 5%로 하였을 때 VS/TS비는 0.72~0.74를 나타냈다. 반응온도 35℃ 조건에서 산 발효 최적화를 위한 두 폐기물의 혼합비는 반응조 총 VS 함량에 대한 각 기질의 VS 함량 기준으로 각각 1:9, 3:7, 5:5로 하였다. 본 연구에서 이용한 음식폐기물 및 폐활성슬러지와 두 기질의 혼합물에 대한 TS, TCOD, SCOD, pH 그리고 각 기질의 초기 유기산 농도는 Table 1에서 보여주고 있다.

Table 1. Characteristics of food waste, wasted activated sludge and mixture

Contents		TS(VS/TS) (%)	TCOD (mg/l)	SCOD (mg/l)	pH	VFAs as C <sub>2</sub> (mg/l)
Food Waste	3	34,125~39,000	5,600~7,200	5.1~6.0	117~342	
	5	50,400~55,520	8,060~10,613		161~495	
	7	76,150~79,800	12,700~15,080		235~795	
Wasted Activated Sludge	1	13,340~16,100	120~344	6.5~7.0	0~80	
	3	37,800~42,480	240~720		96~103	
	5	61,000~64,000	240~968		103~182	
Mixture Ratio (FW:WAS)	1:9	3.01(0.73)	37,100	742	6.53	66
	3:7	3.33(0.78)	46,600	2,330	6.5	97
	5:5	3.79(0.83)	49,200	4,920	6.4	139

### III. 결과 및 고찰

본 연구에서 세 입상 유기물에 대한 최대 용해도 평가는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Solids Solubility,}_{\max}(\%) = \frac{\text{SCOD}_{t,\max} - \text{SCOD}_i}{\text{TCOD} - \text{SCOD}_i} \times 100$$

TCOD: The initial TCOD, mg/l, SCOD<sub>i</sub>: The initial SCOD, mg/l

SCOD<sub>t,max</sub>: The maximum SCOD at reaction time t

#### 1. 음식폐기물의 용해성 유기물 수화/용출 특성

음식쓰레기(비빔밥)의 TS 농도가 각각 3%, 5%, 7% 일 때 온도 변화에 따른 가용성(용해성) 유기물의 수화/용출 정도를 Table 2에 나타냈다. 각 TS 농도에 따른 초기 SCOD/TCOD비는 0.16~0.19 범위로 이미 입자 파쇄과정에서 상당한 수화/용출 반응이 진행되었음을 볼 수 있다. 온도 변화에 따른 입상 유기물내 존재하는 가용성 유기물의 최대 용해도는 20℃와 35℃ 조건에서 9~11.6%로 큰 차이는 없지만 35℃ 경우 20℃ 보다 반응시간이 단축됨을 볼 수 있다. 55℃의 경우 TS 농도 3%, 5%, 7%에서 반응 6 시간과 36 시간 경과하였을 때 용해도 각각은 30%, 35%를 나타냈으며, 최대 용해도 40% 도달하는데 요구되는 반응시간은 32 시간(TS 3%)과 51(TS 5%, 7%) 시간이 소요되었다. 따라서, 혐기성 산 발효조에서 음식쓰레기내 존재하는 가용성 유기물을 최대한 이용하기 위해서는 높은 운전온도가 요구되며, 이와 동시에 성장 속도가 빠른 산 형성 박테리아에 의한 유기산의 생성을 극대화 할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2. The degree of solubility of food waste at different TS conc. and temperature

Temp. (°C)	TS (%)	TCOD (mg/l)	SCOD <sub>i</sub> (mg/l)	SCOD <sub>t,max</sub> (mg/l)	SCOD <sub>t,max</sub> (hr)	Solubility (%)
20	3	39,900	6,824	10,384	11	10.76
	5	54,560	10,400	15,187	14	10.84
	7	76,150	14,800	18,060	10	5.31
35	3	36,600	7,200	9,840	6	8.98
	5	55,520	10,613	15,400	8	10.66
	7	79,800	15,080	22,600	13	11.62
55	3	34,125	5,600	16,840	32	39.4
	5	50,400	8,060	24,780	51	39.5
	7	76,695	12,700	37,400	51	38.6

#### 2. 폐활성슬러지의 용해성 유기물 수화/용출 특성

폐활성슬러지 TS 농도가 각각 1%, 3%, 5% 일 때 온도 변화에 따른 가용성 유기물의 수화/용출 정도를 Table 3에 나타냈다. 각 운전온도와 고형물 농도 변화에 따른 가용성 유기물의 최대 용해도는 상당한 차이를 나타냈다. 20℃ 반응온도에서 운전 91 시간 도달하였을 때 고형물 농도 1%, 3%, 5%의 최대 용해도 각각은 0.9%, 1.64%, 5.9%였고, 35℃ 경우 0%, 9.35%, 20.1%를 보였다. 35℃ 조건에서

TS 1% 일 때 용해도 0%를 나타낸 이유는 용해성 유기물의 상당량이 발효 미생물의 기질로 이용되었기 때문으로 사료된다. 55°C의 경우 TS 농도 1%, 3%, 5%에서 최대 용해도 도달하기 위한 반응시간 각각은 53 시간, 67 시간, 100 시간으로 이때 용해도 각각은 23%, 30%, 33%를 보였다. 55°C에서 초기부터 반응 15시간까지 20%의 용해도를 보였으며, 이후부터 용해성 유기물의 용출 반응속도는 상당히 느리게 진행되었다. 이는 미생물 세포막내 존재하는 가용성 유기성분(탄수화물, 단백질, 지방)이 상당히 느리게 용출 되었기 때문으로 사료된다. 따라서, 폐활성슬러지내 존재하는 가용성 유기물을 최대한 이용하기 위해서는 혐기성 산 발효단계 이전에 전처리 과정이 수행되어야 할 것으로 판단되었다.

Table 3. The degree of solubility of WAS at different TS conc. and temperature

Temp. (°C)	TS (%)	TCOD (mg/l)	SCOD <sub>i</sub> (mg/l)	SCOD <sub>t,max</sub> (mg/l)	SCOD <sub>t,max</sub> (HRT, hr)	Solubility (%)
20	1	16160	120	268	91	0.9
	3	38320	240	864	91	1.64
	5	61000	240	3827	91	5.9
35	1	1576	344	328	91	0
	3	42480	536	4456	91	9.35
	5	64000	880	13560	91	20.1
55	1	13340	252	3256	53	23
	3	37800	720	11648	67	30
	5	61800	968	21060	100	33

#### IV. 참고문헌

- 1999 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 환경부(2000).
- 박남배, 이현모, 이병현, "Pilot scale 2단 혐기성 소화조를 이용한 음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합처리", *폐기물자원화*, No. 7(2), 47-55(1999).
- 김정권, 이영형, 김철희, 정유진, 성낙창, "음식물쓰레기와 하수슬러지의 혼합소화 처리에 관한 연구", *대한환경공학회지*, No. 21(5), 951-957(1999).
- 신항식, 한선기, 송영채, 이채영, "MUSTAC 공정을 이용한 음식물쓰레기의 처리", *한국폐기물학회지*, No. 18(1), 43-50(2001).
- J. P. Lee, J. S. Lee and S. C. Park, "Two-Phase Methanization of Food Wastes in Pilot Scale," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol. 66/68(1998).
- 박재석, 김희준, 정태학, "음식물쓰레기의 혐기성 산 발효," 한국물환경학회 추계학술발표회(한국수자원연구소), 313-316(2000).
- Eastman, J. A. and Ferguson, J. F., "Solubilization of Particulate Organic Carbon during the Acid Phase of Anaerobic Digestion," *J. WPCF*, Vol. 53(3), 352-366(1981).