KEITI
Vol.40
2021년 3월 5주차

중국환경산업 주간기술동향

고체폐기물 처리

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

음식물쓰레기 자원화처리를 위한 혐기성 소화 소개

▶ 개요

중국 음식물쓰레기는 많은 양·높은 유기물 함량·풍부한 영양요소 등의 특징이 있다. 때문에 적합한 처리방식을 적용한 후 어떻게 자원화·무해화 처리해야 하는지가 중요한 문제이다.

혐기성 소화(厌氧消化, anaerobic digestion)[1]는 음식물쓰레기를 자원화·무해화 처리하기 위한 가장 중요한 과정 중 하나이다. 이 과정을 통해 바이오매스 에너지 생산이 가능하기 때문이다. 따라서 최근 음식물쓰레기를 클린에너지(clean energy) 등으로 자원화 하여 종합이용하기 위한 연구가 급부상되고 있다.

따라서 본 기술동향은 중국 음식물쓰레기의 기본적인 특징과 이를 자원화 처리를 위한 혐기성 소화의 구조 및 관련 문제 등을 살펴보고자 한다.

▶ 음식물쓰레기 혐기성 소화 처리에서 발생하는 문제

1) 음식물쓰레기 특징

중국 음식물쓰레기는 함수율이 약 80% 정도이며, 기타 건물(干物质, Dry matter)[2]은 대부분 분해 가능한 유기물질 위주로 구성되어 있다.

건물에는 탄수화물, 단백질, 지방, 리그노셀룰로스(木质纤维素, lignocellulose)[3], 유지(油脂, grease)[4] 및 소량의 금속원소가 포함되어 있다.

일반적으로 음식물쓰레기는 탄수화물, 단백질, 지방이 약 70%로 대부분을 차지하고 있다. 이러한 구성성분의 특성으로 인하여, 혐기성 소화 처리하면 비교적 높은 메탄생성(methanogenesis)을 할 수 있게 된다. 이때 음식물쓰레기의 탄소질소비(carbon-nitrogen ratio, C/N)는 일반적으로 10~30인데 동 비율이 혐기성 소화를 위한 조건에 부합하기 때문에 효율적으로 자원화 처리할 수 있다.

2) 혐기성 소화 과정

혐기성 소화 과정은 가수분해, 산화(酸化)분해, 아세트산(乙酸, Acetic Acid)[5] 생성과 메탄생성(产甲烷, Methanogenesis)[6]으로 나뉜다.

---

1) 혐기성 소화(厌氧消化, anaerobic digestion) : 혐기 상태에서 미생물을 이용하여 폐수를 처리하는 방법으로 혐기성 분해라고도 한다. 무산소성균이 슬러지 중의 유기물을 섭취하여 환원 분해하고, 무용한 무기화합물을 방출하는 것을 말한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*
2) 건물(干物质, Dry matter) : 생체에서 수분을 제거한 후 남은 물질의 총칭이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*
3) 리그노셀룰로스(木质纤维素, lignocellulose) : 리그닌에 셀룰로스와 헤미셀룰로스가 강하게 결합한 복합물. 식물성 식품의 식이 섬유의 성분이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*
4) 유지(油脂, grease) : 물에 불용이며 유기용매에 가용성인 생체성분의 총칭. 동물성 유지와 식물성 유지로 분류된다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*
5) 아세트산(乙酸, Acetic Acid) : 식초의 신맛과 자극적인 냄새가 나는 것으로 잘 알려진 유기화합물이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*
6) 메탄생성(产甲烷, Methanogenesis) : 메탄을 만들어내는 혐기성 미생물 작용이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.

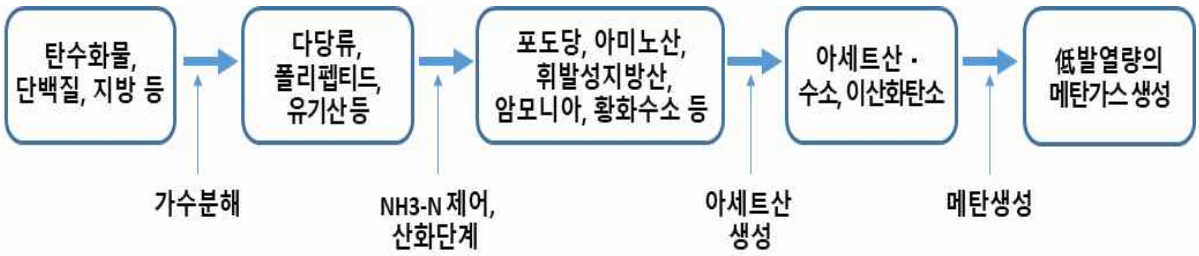
① **(가수분해)** 음식물쓰레기 중 탄수화물, 단백질, 지방 등 부유(悬浮) 과립형태 유기물질은 미생물의 가수분해로 인해 다당류(多糖, polysaccharide)[7], 폴리펩티드(多肽, polypeptide)[8], 유기산 등 가용(可溶) 성질로 분해된다.

② **(산화단계)** 가수분해된 유기질은 산성생산균(产酸菌)에 의해 포도당, 아세트산, 휘발성지방산(挥发性脂肪酸, volatile fatty acid)[9], 암모니아, 황화수소 등으로 분해된다.

③ **(아세트산 생성)** 이 단계는 포도당이나 아미노산(氨基酸, amino acid)[10]을 아세트산균과 반응시켜 아세트산, 수소(H2), 이산화탄소로 생성한다.

④ **(메탄생성)** 메탄화 단계에서 메탄생성균(产甲烷菌, methanogen)[11]을 이용하여 아세트산과 수소를 메탄과 이산화탄소로 변환한다.

그림 1. 음식물쓰레기 혐기성 소화 구조



자료 : 북극성수처리망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

3) 음식물쓰레기 혐기성 소화 과정에서 발생하는 문제

보통 음식물쓰레기는 영양물질이 풍부하며, 탄소질소비 또한 혐기성 소화를 적용하기 위한 조건에 비교적 부합하는 편이다. 하지만 최근 연구 자료에 따르면, 음식물쓰레기 자원화·무해화 처리를 위한 혐기성 소화 과정에서 다음과 같은 문제점들이 발생하고 있다.

① **(복합한 성분구조)** 음식물쓰레기는 과립이 비교적 크고, 리그노셀룰로스(lignocellulose), 케라틴(角蛋白, Keratin)[12] 등 혐기성 조건에서 생물분해 되지 않는 복잡한 유기물질로 구성되어 있다. 따라서 이러한 복잡한 유기물질은 음식물쓰레기의 가수분해 속도를 늦추고 혐기성 소화 과정이 길어지는 문제가 발생한다.

---

7) 다당류(多糖, polysaccharide) : 단당류 3개 이상이 글리코시드결합을 통하여 큰 분자를 만들고 있는 당류를 통틀어 일컫는 말을 뜻한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

8) 폴리펩티드(多肽, polypeptide) : 2개 이상의 아세트산이 사슬 모양의 펩티드결합으로 길게 연결된 것을 말하는데 보통 분자량이 작은 단백질을 가리킬 때 쓰인다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

9) 휘발성지방산(挥发性脂肪酸, volatile fatty acid) : 화학 구조를 이루는 탄소의 개수가 여섯 개 이하인 포름산, 아세트산, 프로피온산, 부티르산 따위의 지방산. 반추위 미생물이 발효되는 과정에서 만들어져 반추 동물의 에너지원으로 쓰인다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

10) 아미노산(氨基酸, amino acid) : 단백질(펩타이드)을 구성하는 단위이며 염기성 아미노기와 산성 카복실기 모두 포함하는 유기산을 아미노산이라고 말한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

11) 메탄생성균(产甲烷菌, methanogen) : 늪이나 진흙 등 혐기성 환경에서 대사 작용의 생산물로 메탄가스를 발생시키는 세균이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

12) 케라틴(角蛋白, Keratin) : 머리털·손톱·피부 등 상피구조의 기본을 형성하는 단백질로, 머리털·양털·깃털·뿔·손톱·말굽 등을 구성하는 진성 케라틴과, 피부·신경조직 등에 존재하는 유사 케라틴으로 구별된다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.

② **(성분에 따른 시스템 성능저하)** 메탄생산균(产甲烷菌)은 산생성균(产酸菌, acid-forming bacteria)[13]에 비해 세포세대시간(世代时间, generation time)[14]이 길기 때문에 유기산을 소모하는 것이 제한적이다. 뿐만아니라 여러 환경적 요소나 중금속 등에 쉽게 영향을 받는다.

따라서 만약 시스템에 유기물질 부하가 높을 경우, 휘발성지방산의 생성과 소모가 일정하지 않아 시스템이 산성화로 변하게 된다.

특히 암모니아성 질소는 미생물의 영양물질인데, 이는 시스템의 부하능력을 향상시킨다. 하지만 음식물쓰레기에 단백질 함량이 높을 경우, 혐기성 소화 과정에서 암모니아성 질소 생성이 억제되며, 미생물의 활성능력 저하로 나타나 시스템의 가스 생성 효율을 감소시킨다.

③ **(낮은 발열량)** 메탄생성균은 고세균(古生菌, Archaea)[15]이라고도 불리며, 이는 주로 아세트산과 수소를 영양분으로 하는 메탄균이다.

메탄생성 단계에서 아세트산을 영양분으로 하는 메탄균은 아세트산의 탈탄산반응(脱羧, decarboxylation)[16]으로 인해 메탄과 이산화탄소로 분해된다. 반면에 수소를 영양분으로 하는 메탄균은 수소와 이산화탄소를 각각 전자 주개(电子供体, electron donor)[17]와 전자 받개(电子受体, electron acceptor)[18]로 하여 최종적으로 메탄과 물로 생성된다.

하지만 음식물쓰레기의 혐기성 소화 과정에서 발생하는 메탄가스 중 순수메탄은 약 55%이며, 나머지는 대부분 이산화탄소이거나 소량의 황화수소 등이다. 따라서 혐기성 소화로 인해 생성된 메탄가스의 발열량이 낮다.

표 1. 음식물쓰레기 혐기성 소화 과정에서 발생하는 문제

구분	주요특징
복잡한 성분구조	· 음식물쓰레기는 과립이 비교적 크고, 리그노셀롤로스, 케라틴 등 난분해성의 복잡한 유기물질로 구성되어 있음
성분에 따른 시스템 성능저하	· 메탄생성균은 산생성균 대비 세포세대시간이 길어 유기산 소모에 제한적임 · 여러 환경적 요소나 중금속 등에 쉽게 영향을 받음. 유기물질이 많은 경우, 휘발성지방산의 생성과 소모가 불균형하게 나타나 시스템이 산성화로 변함. 반면에 단백질 함량이 높을 경우, 암모니아성 질소 생성을 억제하여 시스템의 가스 생성 효율이 감소함
낮은 발열량	· 음식물쓰레기 혐기성 소화 과정에서 발생하는 메탄가스 중 순수메탄은 약 55%이며, 나머지는 대부분 이산화탄소나 황화수소로 되어 있어 발열량이 낮음

자료 : 북극성고체폐기물망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

13) 산생성균(产酸菌, acid-forming bacteria) : 우유 중의 유당을 분해하는 산을 생성시키는 균을 총칭해서 말함. 발효유, 요구르트 제조에 사용하며 연쇄상구균, 락토바실러스 불가리스균, 락토바실러스 애시드필루스균과에 속한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*
14) 세포세대시간(世代时间, generation time) : 세포가 분열을 시작하여, 그것이 완료하고, 다음의 분열을 개시할 때까지의 시간을 세대시간이라고 한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*
15) 고세균(古生菌, Archaea) : 단세포로 되어 있는 미생물의 한 종류이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*
16) 탈탄산반응(脱羧, decarboxylatio) : 유기 화합물에서 카복실기를 떼어내어 이산화탄소를 생성하는 반응. 탄산 제거 효소의 작용으로 일어난다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*
17) 전자 주개(电子供体, electron donor) : 원자, 분자 또는 이온 사이에서 전자를 주고받을 때 전자를 주는 쪽. 전자 공여체라고도 한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*
18) 전자 주개(电子供体, electron donor) : 원자, 분자, 이온 사이에서 전자를 주고받을 때 다른 것으로부터 전자를 받는 쪽. 전자 수용체라고도 한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.

▶ 처리방식

1) 전처리(预处理)

음식물쓰레기에 있는 유기물질은 일반적으로 알갱이 형태이며, 단백질, 지방, 리그노셀롤로스 등 복잡한 성분의 대분자로 구성되어 있다. 따라서 이러한 유기물질은 가수분해 과정이 느리기 때문에 음식물쓰레기에 대한 혐기성 소화 속도를 억제한다.

또한 물리·화학·생물학적 전처리 방식을 통해 음식물쓰레기의 알갱이 크기를 조절하고, 분해하기 어려운 대분자 유기물질 구조를 파괴하며, 가수분해 활성을 촉진 시키게 된다. 이로 인해 혐기성 소화 시간을 단축하여 메탄생성을 향상 시킬 수 있는 것이다.

(1) 물리적 전처리(物理预处理)

일반적으로 물리적 전처리는 초음파, 마이크로파, 용융방식 등이 있다.

① **(초음파)** 공동현상(空化作用, cavitation)[19]과 물 분자를 얼린 얼음 결정에서 나온 기계작용(机械作用, Mechanical effect)[20]으로 세포의 벽과 세포막 구조를 파괴하는 것이다. 이 과정에서, 세포 안에 있는 많은 유기물질이 분해되어 가수분해를 진행하는 효소와 충분히 접촉하게 된다. 이러한 작용을 통해 가수분해 효율을 높이고 소화시간을 단축시킬 수 있다.

② **(마이크로파)** 열처리 전처리 방식과 유사한 것이로, 전자기장의 반응열(热效应, heat of reaction)[21]을 이용하여 세포 유기질 구조를 파괴하는 방식이다. 마이크로파는 기존의 열처리 방식에 비해 가열 속도가 빠르고 열효율은 높지만, 많은 에너지 소모량이 단점으로 지적된다.

③ **(용융방식)** 이 방식은 추가적인 화학제품을 사용할 필요 없고 에너지 소모량도 적은 경제적인 방식 중 하나이다.

④ **(기타방식)** 최근 수열(水热)을 이용한 전처리 방식이 연구개발 되고 있으며 온도, 체류시간, 압력조절이 주요 핵심이다. 일반적으로 공업 생산과정 등에서 대량으로 쉽게 얻을 수 있는 수증기를 이용하기 때문에 원가 절감과 에너지 순환이 가능한 것이 주요 특징이다.

2) 화학적 처리(化学预处理)

(1) 수소이온(H^+) 및 수산화물(OH^-) 이용

수소이온과 수산화물 등에 있는 지질(脂类, Lipid)[22] 성질을 응용하는 것이다. 음식물쓰레기 중 고체형태의 세포를 분해하여 유기질을 용해하는 것이 주요 특징이다.

---

19) 공동현상(空化作用, cavitation) : 액체 내에 증기 기포가 발생하는 현상으로 이는 유체 속에서 압력이 낮은 곳이 생기면 물속에 포함되어 있는 기체가 물에서 빠져나와 압력이 낮은 곳에 모이는데, 이로 인해 물이 없는 빈공간이 생긴 것을 가리킨다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

20) 기계작용(机械作用, Mechanical effect) : 전류는 자기장을 만들고 거대한 단일 전류로 전자기응력을 발생시키며, 회로설비의 지원부분에 기계적 손상을 초래할 수 있으며, 초음파가 매개체에서 반응할 때 효과를 가져올 수 있다. / *출처 : 바이두백과 번역(2021.3.29.검색)*

21) 반응열(热效应, heat of reaction) : 화학 반응이 진행될 때에는 에너지의 변화가 수반된다. 반응 물질의 에너지가 생성 물질의 에너지보다 클 때에는 에너지를 방출하며, 반응 물질의 에너지가 생성 물질의 에너지보다 더 작을 때에는 에너지를 흡수한다. 이와 같이 화학 반응이 일어날 때 방출하거나 흡수하는 열을 반응열이라고 한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

22) 지질(脂类, Lipid) : 생체를 구성하는 물질 중에서 유기용매에 잘 녹는 것이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.

구체적으로 셀룰로스(纤维素, cellulose)[23]나 세미 셀룰로스(semi cellulose) 사이에서 발생하는 수소의 결합을 방해하게 된다. 따라서 리그노셀룰로드와 다당류(polysaccharide) 사이에 있는 에테르(醚, ether)[24]와 에스테르(酯, ester)[25]의 결합도 막아, 후속 혐기성 소화 과정에서 유기물질의 가수분해 속도를 향상시킨다.

동 방식은 원가가 저렴하고 복잡한 유기물질의 분해를 촉진시켜 속도가 빠르고 효율성이 높은 장점이 있다. 이로 인해 산이나 알칼리를 이용한 전처리 방식 중 혐기성 소화 과정에서 메탄가스 생산 효율을 높이는 연구 결과도 많다.

(2) 열산(热酸) 이용

많은 연구결과에 따르면, 열산을 이용할 경우 용융(融解, melting)효과가 가장 높게 나타 나지만 그렇다고 해서 메탄가스 생산량이 가장 많은 것을 뜻하지는 않는다. 그 이유는 산(酸)에 열을 가하면 미생물 생장을 방해하는 물질과 난분해성의 화합물이 형성되기 때문이다. 뿐만 아니라 메탄가스 생성량은 산-알칼리의 농도에 따라 다른 특징도 있다.

저농도 산이나 알칼리를 이용해 전처리할 경우에는 그 한계가 분명하게 나타나지만 고농도 산-염기 처리는 대량의 건성 물질이 유실될 있다. 이는 메탄생성균의 활성을 억제시켜 혐기성 소화 효율을 낮추게 되는 것이다. 따라서 음식물쓰레기를 전처리 할 경우, 반드시 적합한 산-알칼리 농도를 선택해야 한다.

(3) 오존산화(臭氧氧化) 이용

오존산화 전처리 방식은 수산화물과 카복실산(Carboxylic Acid)[26]을 이용하여 지방류, 단백질 등 다분자 유기물질을 분해하고, 음식물쓰레기의 혐기성 소화에 대한 메탄가스 생산량을 높이는 것이다. 특히 오존산화는 상온·상압(常温常压)에서 반응기의 염분 농도를 증가시키지 않으며, 처리 후에는 산화제의 잔여물이 발생하지 않는 것이 핵심이다.

하지만 오존산화에 의해 발생된 수산화물은 탄수화물의 구조를 파괴하여 메탄 생산량을 감소시키는 특징이 있다. 또한 오존산화 전처리 과정에서 알 수 없는 난분해성의 중간생산물(中间产物, intermediate product)[27]이 발생하여, 메탄 생산량이 영향을 받기도 한다.

이러한 특징으로 인하여 오존 발생기는 전력소모가 비교적 크고 운영비용이 많이 발생한다. 또한 혐기성 소화 과정에서 생성된 바이오 메탄은 오존 발생기의 에너지 소모를 보충하기에 부족하고, 설비의 조작에 대한 위험도 존재한다. 따라서 현재 오존산화 전처리 방식으로 음식물쓰레기의 혐기성 소화에 대한 연구는 아직까지는 비교적 많지 않다.

---

23) 셀룰로스(纤维素, cellulose) : 고등식물 세포벽의 주성분으로 목질부의 대부분을 차지하는 다당류로 섬유소라고도 한다. 화학식은 (C6H10O5)n이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

24) 에테르(醚, ether) : R - O - R'의 일반식으로 표시되는 화합물의 총칭이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*

25) 에스테르(酯, ester) : 알코올 또는 페놀이 유기산 또는 무기산과 반응하여 물을 잃고 축합하여 생긴 화합물의 총칭이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*

26) 카복실산(Carboxylic Acid) : 카복시기(- COOH)를 가지는 화합물을 모두 일컫는 용어이다. 1차 알코올의 산화, 나이트릴의 가수분해, 에스터의 가수분해 등으로 얻는다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

27) 중간생산물(中间产物, intermediate product) : 유기반응에서 원료 화합물에서 목적 생성물을 합성하는 데 반응이 몇 단계로 나누어

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.

표 2. 화학적 전처리 방식

구분	주요특징
수소이온 및 수산화물 이용	· 수소이온과 수산화물에 있는 지질 성질을 이용하여 음식물쓰레기의 고체세포를 분해함 · 셀롤로스 및 세미 셀롤로스 사이에서 발생하는 수소결합을 파괴하며, 후속 혐기성 소화 과정에서 유기물질의 가수분해 속도를 향상시킴 · 원가가 낮고 난분해성 유기물질의 분해 속도가 빨라 효율성이 좋음
열산 이용	· 산에 열을 가하면 미생물 생장을 방해는 물질과 난분해성의 화합물이 형성되어 용융 효과가 가장 뛰어남 · 산-알칼리의 농도에 따라 메탄가스 생산량이 달라짐. 저농도의 산-알칼리는 한계가 분명히 존재함. 반면에 고농도의 산-염기는 대량의 건성 물질이 유실되어 혐기성 소화 효율을 감소시키기 때문에 적절한 농도를 조절해야함
오존산화 이용	· 지방류, 단백질 등 다양한 다분자 유기물질을 분해하여, 혐기성 소화에서 메탄가스 생성량을 향상시킬 수 있음 · 오존발생기는 전력소모가 크고 운영비용도 높음. 현재 혐기성 소화 과정에서 생성된 바이오메탄은 오존발생기의 에너지 소모를 줄이기에 부족하고 설비의 조작 위험도가 크기 때문에 향후 지속적인 연구개발이 필요함

자료 : 북극성고체폐기물망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

3) 생물 전처리(生物预处理)

생물 전처리 방식은 기본적으로 효소를 이용한다. 동 방식은 효소를 투여하여 음식물쓰레기의 가수분해 촉진과 탄수화물, 지방 등을 분해시킨다.

효소는 촉매반응과 같아 분해 효율이 높고, 고체나 액체상태의 단백질, 지방, 셀롤로스 등 대분자 유기물을 분해할 수 있다. 많은 연구에 따르면, 효소 전처리 방식에 있어서 불용성 COD(Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD)[28]로 인해 용해 효과가 가장 좋고, 혐기성 소화 주기를 크게 단축시키는 것을 확인할 수 있었다.

뿐만 아리나 효소를 이용할 경우, 조작방법이 간단하고, 2차 오염을 유발하지 않는다. 아울러 음식물쓰레기의 가수분해를 촉진하여 메탄생성균의 생성효율이 높은 것으로 나타났다.

하지만 효소 전처리 방식은 원가가 높고 응용범위가 제한적인 단점이 있다. 따라서 향후 원가를 절감시키는 효소 전처리 방식이 지속적으로 연구 개발될 것으로 보인다.

▶ 소화방식

혐기성 미생물은 pH, 온도, 휘발성지방산, 탄소질소비 등에 따라 활성화가 다르며, 이는 메탄생성 효율과 밀접한 관련이 있다.

음식물쓰레기 중 탄소화물이나 단백질 함량이 높을 경우, 휘발성지방산과 암모니아성 질소가 높게 나타난다. 이는 소화시스템이 쉽게 부식되고 혐기성 소화의 기체생성 효율도 낮아진다.

이러한 문제는 혐기성 소화를 진행할 때 시스템의 안정을 위해 미량원소(微量元素, trace element)[29] 등을 투여하여 미생물에 산이나 알칼리성에 대한 내성이 생기게 하거나 이중소화(两相消化), 공동소화(共消化) 방식을 통해 조절할 수 있다.

진행하는 경우, 그 중간 단계에서 생성되는 화합물이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

28) 불용성(Soluble Chemical Oxygen Demand, SCOD) : 수중의 유기물 농도를 나타내는 COD 중에서 여과조를 통과한 여액을 뜻한다. / 출처 : 바이두 등 홈페이지(2021.3.29.검색)

29) 미량원소(微量元素, trace element) : 식물체 중에는 여러 원소가 함유되어 있으나 식물의 생존에 필수적인 원소는 16종으로 알려져

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.

하지만 미량원소 등 투여는 원가상승으로 이어진다. 아울러 미량원소에 따라 메탄 액체에 슬러지가 발생하는 문제를 초래할 뿐 아니라, 메탄생성균과 미생물 생장에 시간이 오래 걸린다.

따라서 휘발성지방산을 축적하여 탄소질소비의 불균형 문제를 제어하는 방식이 이중소화에서 비교적 경제성과 안정적인 방식이다.

1) 이중소화(两相消化)

혐기성 미생물 중 산생성균은 세포세대시간이 짧고 생장속도가 빠르기 때문에 대량의 유기산을 생산할 수 있다. 반면에 메탄생성균은 세포세대시간이 길어 생장속도가 느려 유기산 생성이 제한된다. 이러한 특징으로 인하여 생성된 산이 메탄으로 전환되기 어려운 것이다.

또한 산의 생성과 소모가 일정하지 않은 불균형 상태로 나타나며, 이는 휘발성지방산 등으로 축적되어 전체 시스템이 파손되는 현상이 발생하게 된다.

여기서 이중소화란 음식물쓰레기의 혐기성 소화에서 산생성(产酸, acid production)[30]과 메탄생성 과정을 각각 별도의 반응기에서 산생성균과 메탄생성균으로 생장하도록 하는 것이다. 이는 반응 과정에서 미생물간 서로 생장을 억제하거나 휘발성지방산이 축적되는 것을 방지할 수 있고, 각각 최대 활성상태로 생장하기 때문에 시스템의 안정성과 소화 효율을 높일 수 있다.

이중반응기(两相反应器)는 직렬로 연결된 2개의 연속교반식반응시스템(连续搅拌反应系统, continuous stirred tank reactor, CSTR)[31] 등을 서로 순환하면서 혐기성 소화를 하게 된다. 또한 신형 이중 고리형 혐기성 발효 탱크(新型的双环嵌套式厌氧发酵罐) 내부에서 산을 생성하며, 가수분해와 산성화를 동시에 진행하게 된다. 이로 인해 외부에서 순환되는 메탄생성 과정 중 산으로 변하는 것을 방지할 수 있는 것이다.

일반적으로 반응기의 용적당 기체 생성률은 평균 1.69㎥/일이며, MLVSS(mixed liquor volatile suspended solid)[32] 제거율은 77.2%에 달한다.

이러한 특성하에 최근 이중소화에 대한 연구는 단일소화보다 많은 추세이다. 하지만 음식물쓰레기 혐기성 소화는 단일소화 방식이 더 많이 응용되고 있다. 이는 이중소화에서 나타나는 소화시간, 처리효과, 시스템 조작, 유지보수 등의 방면에서 단일소화 방식보다 월등히 우수하다고 할 수 없기 때문이다.

2) 공동소화(共消化)

혐기성 미생물은 생장을 위해 적당한 영양 원소의 배합비율이 필요하다. 하지만 음식물쓰레기는 많은 탄소원소에 비해, 질소·금속 원소함량은 비교적 적어 산생성균과 메탄생성균의 생장 요구를 충족하기 어렵다.

있다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.29.검색)*

30) 산생성(产酸, acid production) : 가축의 체내 및 사료의 발효과정 중에 생성된다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*

31) 연속교반식반응시스템(连续搅拌反应系统, continuous stirred tank reactor, CSTR) : 발효원료와 미생물을 완전히 혼합한 상태로 만드는 혐기성 처리 기술이다. / *출처 : 바이두백과 번역(2021.3.30.검색)*

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.

연구에 따르면, 혐기성 발효에 가장 우수한 탄소질소비는 15.5~19이지만, 음식물쓰레기의 탄소질소비는 일반적으로 20 이상으로 높게 나타난다. 따라서 단일소화로 진행할 경우, 영양 원소의 불균형 문제로 인해 소화시스템의 오류나 암모니아성 질소 생성을 억제시키는 문제가 자주 발생하게 된다.

따라서 음식물쓰레기와 폐지·동물분뇨·짚·슬러지 등과 혼합하여 소화시키는데, 이는 탄소질소비를 적정 범위로 조절할 수 있어 기체발생 효율을 높일 수 있기 때문이다.

그중 슬러지와 음식물쓰레기 혼합의 공동소화는 시스템의 안정성 또한 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 특히 슬러지와 음식물쓰레기의 비율을 1:1로 혼합하였을 때, 메탄생성률은 단일소화 대비 4.59배 향상된 것으로 발표되었다.

따라서 혐기성 소화 시스템의 안정성과 메탄생성량을 향상시키는 위한 방법은 ▲소화 기질(基质, stroma)[33] 및 용해도·분해성을 고려하거나, ▲이중 혐기 미생물 활성 및 원소의 존재비(丰度, abundance of elements)[34]를 확인해야 한다.

위에서 언급한 첫 번째 방식(소화 기질 및 용해도·분해도 고려)은 전처리를 통해 해결할 수 있지만, 두 번째 방식(이중 혐기 미생물 활성·원소의 존재비)은 현재 원소의 존재비에 대한 연구는 많지 않은 상황이다.

이러한 상황하에 향후 연구개발은 미생물의 활성을 유지하면서 원소의 존재비를 향상시킬 수 있는 방향으로 발전할 것으로 보인다.

▶ 염기성 소화에서 발생하는 메탄가스 정화 및 이용

음식물쓰레기 혐기성 소화에서 생성된 부산물인 메탄가스는 메탄, 이산화탄소, 질소, 황화수소, 실록산(硅氧烷, siloxane)[35] 등으로 구성되어 있어 그 성분이 복잡하다.

특히 메탄가스내 이산화탄소 함량이 높아 발열량이 떨어지고, 메탄을 제외한 나머지 성분은 오염물질로 분류된다. 그중 황화수소와 암모니아는 부식성이 강하기 때문에 연소 후 발생하는 이산화황이 열병합발전 설비와 금속부분을 쉽게 부식시키기도 한다.

또한 실록산은 소량의 농도여도 연소 후 실리콘 산화물로 전환되어 연소 설비에 침전되여 설비의 오작동을 쉽게 일으킨다.

이러한 원인은 모두 혐기성 소화에서 발생하는 메탄가스를 직접 이용할 수 없기 때문에 물리·화학·생물적 기술을 통해 메탄가스를 정화시켜 발열량을 높일 수 있는 친환경의 연료 에너지로 전환하도록 해야 한다. 따라서 현재 혐기성 소화에서 발생하는 메탄가스 정화 방법은 다음과 같다.

---

32) MLVSS(mixed liquor volatile suspended solid) : MLSS속의 유기 물질 평균 부유물 농도를 나타낸다. 폭기조내의 혼압액에는 무기물질도 포함되어 있으므로 부유물의 미생물 농도로 엄밀하게 나타낼 때에 사용한다. VSS는 휘발성 부유 물질이므로 MLSS를 600℃로 30분간 가열하면 휘발성 물질은 증발한다. 그때의 가열로 인한 강열 감량이 MLVSS에 해당한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*

33) 기질(基质, stroma) : 엽록체 내부의 기질 부분으로 엽록체의 그라나를 제외한 기질 부분이다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*

34) 원소의 존재비(丰度, abundance of elements) : 천체의 전체나, 일부분 등의 관측 대상으로 삼은 임의의 계가 품은 원소의 양의 비를

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.

표 3. 혐기성 소화 산물(메탄가스) 정화 방법

구분	주요특징
물세척 (水洗)	· 메탄 용해도를 수중의 이산화탄소보다 적게 함 · 제거효율이 낮고 메탄이 손실될 수 있음
심냉분리법 (深冷分离)	· 메탄과 이산화탄소의 냉각 온도 상이 · 메탄 손실은 적지만 원가가 높음
유기용제물리흡착 (有机溶剂物理吸附)	· 메탄과 이산화탄소는 유기용제 중에서 용해도가 다름 · 황화수소가 이산화탄소의 흡착력을 감소시키기 때문에 황화수소를 우선적으로 분리해야함
아민용액화학흡착 (胺溶液化学吸附)	· 아민 용액과 이산화탄소가 선택적으로 반응함 · 메탄 손실이 없음
막분리 (膜分离)	· 메탄의 분자 크기는 이산화탄소와 황화수소보다 큼 · 원가가 낮고 설비의 조작이 간단함

자료 : 북극성고체폐기물망 자료를 바탕으로 KEITI 중국사무소 작성

▶ 시사점

음식물쓰레기는 유기물 함량이 풍부한 폐기물이며, 혐기성 소화를 통해 자원화 할 수 있다. 또한 혐기성 소화의 주요 핵심은 소화 과정에서 발생하는 메탄가스 생성효율을 높이는 것이다.

음식물쓰레기에는 풍부한 유기질이 있다. 이로 인해 혐기성 소화 과정에서 가수분해 속도가 느려 쉽게 산화되거나 암모니아성 질소 생성을 억제시키기 때문에 시스템이 파손되거나 발열량이 낮은 것이 특징이다. 하지만 이는 전처리, 이중소화, 공동소화 등을 통해 해결할 수 있다.

전처리는 음식물쓰레기의 가수분해 효율을 높이고 혐기성 소화 시간을 단축하는데 효과적이다. 이중소화나 공동소화는 산생성과 메탄생성을 분리하거나 다른 유기물과 통합 처리하여 암모니아성 질소 생성 억제 등 문제를 해결할 수 있다. 이는 혐기성 소화 효율을 높일 뿐만 아니라 혐기성 소화 과정에서 발생하는 메탄가스는 정화시켜 재이용까지 가능하게 한다.

하지만 전처리, 이중소화 및 후속단계인 메탄가스 정화는 약품 추가를 위한 설비 등이 필요하게 되는데, 이는 곧 비용원가상승과 에너지 소모로 이어진다.

따라서 향후 기체생성 효율을 향상시키고 원가를 절감시킬 수 있도록 지속적인 연구개발이 필요할 것으로 보인다.

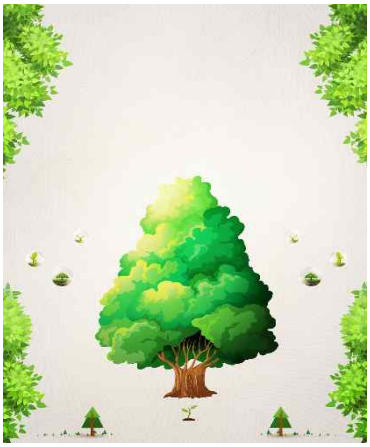
출처 : 북극성고체폐기물망(2021.3.25.발표), https://huanbao.bjx.com.cn/news/20210325/1143879.shtml, 2021.3.30.접속

※ 기술용어 번역·해석이 일부 상이할 수 있으니 반드시 중문본을 확인하시기 바랍니다.

뜻한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*

35) 실록산(硅氧烷, siloxane) : Si-O 결합(실록산 결합)을 포함한 화합물 중 규소, 산소, 수소로 되어 있는 화합물을 총칭한다. / *출처 : 네이버 지식백과 발췌(2021.3.30.검색)*

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.



중국환경산업 주간기술동향

발행

2021년 3월 30일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승 연구원(cms0522@keiti.re.kr)

공동저자

▷ 윤영근 연구원(ygyin0919@keiti.re.kr)
▷ 김종균 연구원(jaykim@keiti.re.kr)
▷ 임승택 연구원(stlim@keiti.re.kr)
▷ 성소묘 연구원(miao2013@keiti.re.kr)

중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.
문의 : +86-10-8591-0997~8

ⓒ2021, KEITI, All Rights Reserved.