

음식물쓰레기 처리방식별 경제성과 CO₂ 발생량 비교

-바이오가스화, 단순건조, 건조부산물 에너지화를 중심으로-

(주)가이아
Gaia corporation

서론

음식물쓰레기는 최근 바이오매스 에너지원으로서의 새로운 신재생에너지원으로 주목받고 있어서 처리, 자원화 및 에너지화를 위한 다양한 대안이 필요하다.

우리나라에서 현재 음식물쓰레기를 처리하는 방식은 수집, 운반 후 압축, 파쇄하여 고형물(음식쓰레기의 액 30%)은 사료화 및 퇴비화 공정을 통한 자원화로, 나머지 탈리액(전체의 6%)는 혐기성소화에 의한 바이오가스 에너지화로 처리되고 있으나 처리공정, 운영비용, 이산화탄소 배출량, 최종부산물 처리 등을 고려할 경우 기존 가장 보편적인 처리 방식으로 일부는 저급 비료생산으로 대부분은 음폐수처리 또는 탈리액의 Bio-gas화 하는 방식 보다는 음식쓰레기 발생 현장에서 음식쓰레기를 건조하거나 또는 건조부산물 에너지화 하는 WTE(Waste To Energy) 같은 융복합공정의 새로운 기술 적용이 시급하다. 따라서 본 연구에서는 바이오가스화, 건조 및 건조와 건조부산물 에너지화가 결합된 WTE 등 3가지 방식을 비교하여 음식물쓰레기 처리 대안으로 제시하고자 한다.

또한 신기후체제(파리 협정)에 의해 2020년부터는 전세계 195개국 모두에게 구속력있는 자발적인 이산화탄소(CO₂)의 감축목표를 달성하기 위하여 선진국들은 매년 1,000억 달러 약(115조원)을 지원하기로 하였고, 우리나라는 2030년 약 8억5천만 톤으로 예상되는 이산화탄소 발생량을 37% 감축 목표로 하고 있는데, 우리나라 자체의 노력만으로는 25.7% 밖에 감축이 안되어 잔여 11.3%(약 9,600만 톤) 감축 분량을 국제 탄소배출 시장에서 수입(대체)하여 감축목표로 달성하려고 한다.

에너지 부분에서 석탄, 석유 에너지 대신 신재생에너지로 대체하는 등 환경부가 정한 감축 방안 외에 추가로 환경부의 감축방안으로 포함되어 있지 않은 연간 500만 톤씩 발생하는 음식물쓰레기를 처리하면서 발생하는 연간 약 880만 톤의 이산화탄소를 대폭적으로 감축(최소 625만 톤, 최대 780만톤 감축하여 현재 방식 대비 70~90% 감축)하여 총 수입 탄소배출 감량분의 최대 8 %를 대체할 수 있는 방법을 모색하였다.

한편 이산화탄소배출 감축을 위해서 선진국에서도 현재까지는 음식쓰레기를 분리수거하지 않았으나, 수년 내에 우리나라처럼 음식쓰레기를 분리수거하는 것을 법제화 하고 있다.

프랑스의 경우를 예로 들면 2018년부터는 1일 600식(meal) 이상의 식당은 음식쓰레기를 분리하여 배출하도록 하고, 음식쓰레기를 매립이나 소각이 아닌 가스화 또는 건조 방식으로 변경하고 있다.

따라서 음식쓰레기의 처리는 이산화탄소의 감축이라는 환경적 측면과 처리비용을 대폭 줄이며 자원화하는 경제적 측면을 고려하여 두 마리 토끼를 다 잡을 수 있는 방안을 강구해야 할 것이다.

목차

1. 처리방식별 운영비용 비교

A. 바이오가스화

- (1) 처리공정
- (2) 처리공정의 문제점
 - ① 과도한 설비의 설치비
 - ② 높은 설비 운영비용
 - ③ 기술지침서 제시가 필요한 운영상의 문제점
 - ④ 낮은 바이오가스 발생량과 낮은 부가가치 창출
 - ⑤ 최종 부산물(음폐수) 처리 부하량 증대

B. 전기 또는 가스(LNG 등)에 의한 건조감량

- (1) 효율적인 자원화를 위한 방안
- (2) 전기 또는 가스 열원에 의한 건조 처리 공정
- (3) 건조 방식
- (4) 전기 또는 가스 열원에 의한 건조 처리 운영비용
- (5) 최종 부산물

C. 융복합 방법 : WTE(Waste To Energy : 열원일체형 건조감량)

- (1) 음식쓰레기 건조물을 음식물건조를 위한 열원으로 이용하여 건조하는 방식의 개념
- (2) WTE 건조 감량 처리 공정도
- (3) WTE 건조 방식
- (4) 건조 운영 비용
- (5) 최종 부산물

D. 운영비용 요약

2. 처리방식별 이산화 탄소(CO₂) 발생량 비교

- (1) 바이오가스화(AD)
- (2) 전기(가열)식 건조감량방식
- (3) 가스(가열)식 건조감량방식
- (4) WTE 건조감량 방식
- (5) 이산화탄소 발생량 요약

3. 결론

- Reference

1. 처리방식별 비교

음식물쓰레기 에너지화는 현재 바이오가스화가 주로 적용되고 있으나 음폐수처리의 문제를 해결할 필요가 있을 뿐만 아니라 혐기성 미생물의 성장속도가 느리기 때문에 처리효율이 낮아지고, 운전 및 유지관리 기술이 부족하여 정상가동률이 감소하는 단점을 지니고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 건조(전기 또는 가스 열원)방식이나 건조후 건조부산물을 에너지화하는 기술이 결합된 WTE(Waste To Energy) 같은 융복합방식과의 비교를 통해 최상의 해결방안을 제시하고자 한다.

A. 바이오가스화

국내의 유기성폐기물 바이오가스화는 주로 음식물쓰레기(음폐수 포함), 축산분뇨 및 하수슬러지 등을 대상으로 이루어지고 있다. 이 중 음식물쓰레기를 대상으로 혐기성소화 바이오가스 처리에 대한 처리공정, 운영비용, 최종부산물 처리 등에 대해 검토하였다.

(1) 바이오가스화 처리 공정

일반적인 음식물쓰레기 혐기성소화 바이오가스화 설비를 그림 1에 나타내었으며, 각 설비의 주요 설계인자를 제시하여 안정적이고 효율적인 시설의 설계방향을 설정하고 있다¹⁾.

- 가. 반입 및 전처리설비 : 수집, 운반, 중간처리장으로 반입, 파쇄, 선별, 이송, 저장조 등
- 나. 혐기성소화설비 : 교반, 가온 등
- 다. 소화가스이용설비 : 소화가스 저장, 발전기, 소화가스 정제 등
- 라. 소화슬러지 처리설비 : 탈수, 약품주입, 탈수케익 이송 및 반출 등
- 마. 폐수처리설비 : C/N 비, 체류시간, 온도 등
- 바. 악취제거설비 : 환기횟수, 악취제거 방식, 모니터링 등

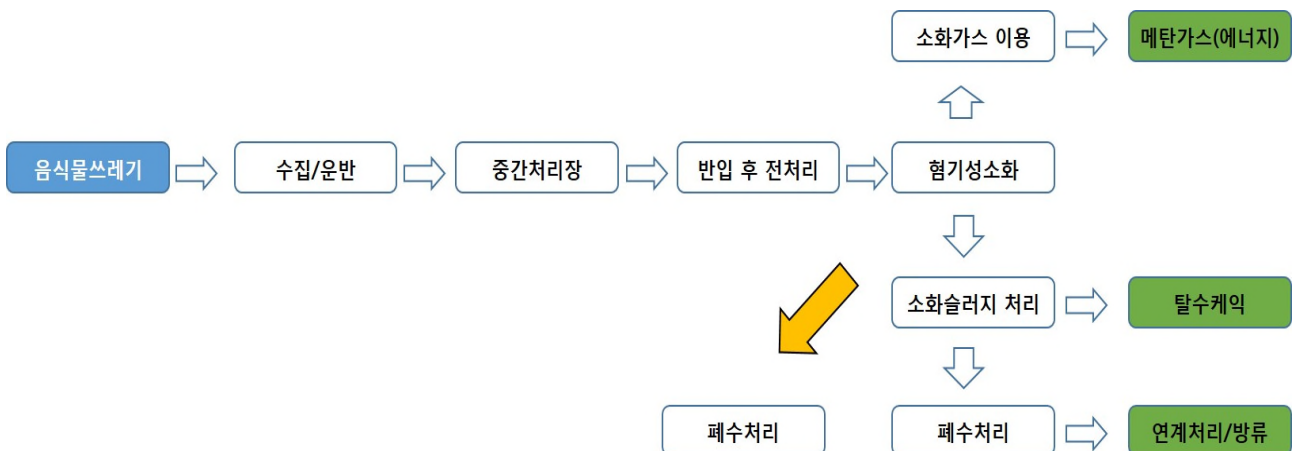


그림 1. 바이오가스 시설 공정 흐름도.

바이오가스화시설에 유입되는 음식물쓰레기는 비닐, 철재, 뼈 등의 이물질로 인해 이송설비의 막힘이나 혐기성소화 효율을 저하시킨다. 또한 바이오가스화 공정의 안정적이고 효율적인 운영

을 위해서는 기술지침서 습득과 같은 전문기술이 반드시 필요한 것으로 알려져 있다.

(2) 바이오가스화 처리공정의 문제점

① 과도한 설비의 설치비

정부는 2008년 “폐자원 및 바이오매스 에너지 대책 실행계획”을 근거로 총 사업비 7,225억원을 투입하여 22개의 바이오가스화 시설 설치를 추진한 바 있으며, 2020년 까지는 28개소의 유기성 폐자원 에너지화 시설을 신규 확충·설치 계획이었다. 하지만 2015년말 음식물쓰레기 등 유기성 폐자원 바이오가스화 시설은 88개소(음식물쓰레기(음폐수 포함) 20개소, 가축분뇨 6개소, 하수슬러지 32개소, 병합 30개소)로 2020년 계획 대비 3.1배로 알려져 있다. 이 중 음식물쓰레기가 주원료인 주요 바이오가스화 처리시설에 대한 설치사업비를 표 1에 요약하여 나타내었다.

표 1 국내 음식물쓰레기 바이오가스화 처리시설 설치 사업비 요약²⁾

시설명	가동개시	설치 사업비	처리용량	톤당 사업비
서울동대문 환경자원센터	2010년	619.31억원	98톤/일	6.32억원/톤
부산생곡 음식물쓰레기 자원화시설	2005년	109.48억원	200톤/일	0.55억원/톤
대구상리 음식물류폐기물 처리시설	2013년	831.00억원	300톤/일	2.77억원/톤
남양주 별내신도시 음식물자원화시설	2013년	597.69억원	31톤/일	19.28억원/톤
고양 바이오매스 에너지화시설	2014년	692.18억원	260톤/일	2.66억원/톤

표 1과 같이 국내 음식물쓰레기가 주원료인 바이오가스화 처리시설 중 LH로부터 인수한 남양주 별내신도시 음식물자원화시설, 실패로 알려진 서울동대문 환경자원센터 및 2005년에 설치한 부산생곡 음식물쓰레기 자원화 시설을 제외하면, 평균 2.7억원/톤의 사업비가 소요되어 2017년 폐기물처리시설 설치비용 표준단가(2.4억원/톤)보다는 12.5%가 높은 것으로 알려져 있다. 이는 사료화(건식)나 퇴비화보다는 각각 2.5배, 2.3배로 매우 높은 설치비용의 폐기물처리시설에 해당된다³⁾.

② 높은 설비 운영비용

유기성폐기물 바이오가스화 시설 중 2014년 기준 음식물쓰레기 6개소, 음폐수 6개소, 병합 11개소를 대상으로 운영비용을 조사한 결과, 100톤/일 이상 시설은 60,000원/톤, 100톤/일 미만 시설은 108,000원/톤으로 2012년 국회예산정책처가 보고한 110,116 원/톤(시설용량 200 톤/일)과는 유사한 것으로 나타났다. 또한 이러한 설비운영 비용은 건식사료화(63,521원/톤, 100톤/일) 및 호기성퇴비화(68,682원/톤, 100톤/일) 보다는 각각 1.7배, 1.6배 높은 것으로 알려져 있으며, 주로 위탁 운영되고 있다^{4,5)}. 그리고 지자체 위탁운송업체의 도시형과 도농형에서의 차량운반비용은 각각 톤당 54,177원, 55,266원이므로 단순평균보다는 음식물쓰레기 배출량 분율(도시형 73.8%, 도농형 26.2%)로 평균값을 도출하는 것이 더 합리적이다. 따라서 도시형과 도농형을 대

상으로 차량운반비용 평균을 산정하면 톤당 54,462원이 되며, 결과적으로 운반비용을 포함한 톤당 162,462원이 총 운영비용이라고 할 수 있다.

③ 기술지침서 제시가 필요한 운영상의 문제점

바이오가스화 시설의 공정별 영향인자인 바이오가스 생산율, 온도, 소화조 유입농도, 유기산, pH, 미량원소, 암모니아, 스컴 등으로 인해 바이오가스화 시설의 운전지침서에 대한 전문적인 기술의 사전습득이 필요하며, 이러한 근본 원인을 아래에 나타내었다.

- (i) 음식물쓰레기가 큰 건더기와 과다유입에 의한 컨베이어 폐색, 저장호퍼 여유용량 부족과 겨울철 저장시설의 동결방지용 가온설비 반영이 필요함.
- (ii) 파쇄선별기, 미세파쇄기 등의 제 기능부족에 의한 배관 막힘, 10 mm 이하로 분쇄 가능한 설비가 필요함.
- (iii) 음식물쓰레기 완충탱크의 교반이 필요함.
- (iv) 옥외 소화조 바닥 청소용 집수정이 반드시 필요함.
- (v) 가스발전기 연소가스 배출 연도를 보일러와 구분하여 설치가 필요함.
- (vi) 소화조 상부에 발생하는 스컴(거품) 제거설비 설치가 필요하고, 충분한 소화조 체류시간 확보가 필요함.
- (vii) 슬러지 농도 증가 시 교반기 구동이 어려우므로 교반기 모터 용량 증대가 필요함.
- (viii) 계측기만 신뢰하기에는 위험이 따르므로 육안확인을 위해 소화조 점검창이 필요함.
- (ix) 바이오가스 배관에 응축수 배출용 다수의 드레인 밸브 설치가 필요함.
- (x) 습식탈황장치는 특히 겨울철 가성소다 응결로 인한 순환배관 막힘에 대한 대책이 필요함.
- (xi) 보일러 가스누출 감지기 및 가스차단밸브 반영이 필요함.
- (xii) 악취포집시설이 미반영 된 폐수처리실의 악취제거시설 반영이 필요함.
- (xiii) 진동 및 소음이 심한 고압송풍기의 방음실 설치 계획이 필요함.

④ 낮은 바이오가스 발생량과 낮은 부가가치 창출

음식물쓰레기가 주원료인 바이오가스시설의 바이오가스 발생량은 톤당 77.5 m³로 보고되고 있으며, 2015년 기준 바이오가스 발생량도 이와 유사한 톤당 72 m³로 나타났다^{1,6)}. 이는 유럽연합에서의 바이오가스 시설의 바이오가스 발생량인 120 m³의 60% 수준이어서 효율이 우수한 시설로의 개선이 필요함에 따라 단순건조와 건조부산물 에너지화가 결합된 융복합공정기술과 같은 새로운 처리방안도 검토되어야 한다^{6,7)}.

물론 유럽(특히 독일)의 경우 옥수수를 재배하여 전량 Bio-gas 시설로 보내 바이오가스를 생산하므로, 음식물쓰레기를 주로 바이오가스화 하는 우리나라보다 바이오가스 발생량이 많은 것은, 기술적인 우위라고 할 수만은 없다.

또한 국내 음식물쓰레기 바이오가스화 시설 10개소를 대상으로 한 소화조 운영현황 결과에의 하면 바이오가스의 바이오메탄함량은 평균 64.4±1.1%(Mean±S.E., n=12)로 나타났다⁸⁾. 이를 근거로 바이오가스 에너지를 활용한 발전량을 아래와 같이 산정할 수 있다.

- 바이오가스 에너지 생산량

$$= 72 \text{ m}^3\text{-Biogas/톤} \times 64.4\% \text{ CH}_4/\text{m}^3\text{-Biogas} \times 8,550 \text{ kcal/m}^3\text{-CH}_4$$

$$= 396,446.4 \text{ kcal/톤}$$

여기서, 순수메탄의 저위발열량은 8,550 kcal/m³이다.

- 바이오가스를 활용한 가스엔진 발전량

$$= 396,446.4 \text{ kcal/톤} \times 34\% \div 860 \text{ kcal/kWh}$$

$$= 156.7 \text{ kWh/톤}$$

여기서, 가스엔진 발전효율은 28~40%이며, 평균 34%이다¹⁾.

- 바이오가스에 의한 부가 수입

$$= 156.7 \text{ kWh/톤} \times 90.67\text{원/kWh}(2017\text{년 } 2\text{월 평균 SMP 가격 } 90.67\text{원/kWh 기준})$$

$$= 14,208\text{원/톤}$$

즉 음식쓰레기 1ton으로 발생하는 바이오가스를 전기발전을 할 경우 14,208원의 가치를 창출한다.

물론 발생한 바이오가스의 탈황 및 발전 비용은 미계상된 것으로 실제의 부가가치는 14,208원/ton 보다 낮다.

따라서 바이오가스화 공정을 통한 음식물쓰레기 자원화의 경우, 바이오가스에 의한 부가 수입(14,280원/ton)을 감안하여 공제한다 하여도 음식쓰레기 1ton당 바이오가스화 하는 것은 최소 148,254원/ton의 손해가 발생하는 것이다.

⑤ 최종부산물(음폐수) 처리 부하량 증대

2015년 기준 국내 음식물쓰레기 공공자원화시설 104개소 중 퇴비시설 42개소, 사료시설 24개소, 하수병합/혐기성 분해시설 14개소, 탈수/건조/파쇄시설 20개소, 연료화 4개소를 조사한 연구에 의하면, 2014년 동안 음식물쓰레기 반입량에 비해 음폐수 발생량이 퇴비방식 자원화시설 및 사료시설에서 더 증가한 것으로 보고하였고 이러한 이유로 하수처리장 반입농도 조절을 위해 용수를 가수했기 때문이라고 제시하였다¹¹⁾. 따라서 바이오가스화 공정을 적용하기 위해서는 반입량 대비 배출량이 증가된 음폐수의 안정적인 처리가 필수적이며, 또한 최종 잔재물도 퇴비나 에너지로 재활용 할 수 있는 대안의 다양화가 시급하다.

B. 전기 또는 가스(LNG 등) 열원에 의한 건조

(1) 효율적인 자원화를 위한 방안

음식물쓰레기 발생원인 가정과 식당 등 감량의무사업장에서의 계절평균 수분함량이 각각 81.5%, 76.2%이고, 자원화시설로 반입되는 평균 수분함량도 82.1%로 높기 때문에 퇴비 및 사료로 자원화하기 위해서는 음식쓰레기의 발생장소에서 음식쓰레기 발생 즉시 처리하여 수집 운반 등의 비용 절감은 물론 과도한 부패에 의한 악취 감소, 자원화 용이 등의 이유로 건조공정이 반드시 필요하다^{4,12)}. 따라서 기존 자원화 시설의 대안으로 음식물쓰레기의 수분을 증발시키기 위해 전기 또는 가스를 열원으로 건조 처리하여 사료나 비료로 재활용하는 기기와 시설을 대상으로 처리공정, 운영비용 및 최종부산물 등에 대해 고찰하였다.

(2) 전기 또는 가스열원에 의한 건조 감량 처리 공정

수분함량이 높은 음식물쓰레기를 가열/건조하기 위해 열원에 의한 가열장치, 구동모터에 의한 교반장치, 건조 중 발생하는 수증기를 배기하는 순환장치, 배기된 수증기를 응축하여 액상으로 배출하는 열교환장치, 운전시간/교반방향/냉각시간/정지 등의 기능을 제어하는 제어장치 등으로 구성하였으며, 그림 2에는 전기열원에 의한 건조 공정을, 그림3에 그 공정이 들어간 전기식 건조기기를 나타내었다.

그림 4에는 가스 열원에 의한 건조 공정을, 그림 5에는 그 공정이 들어간 가스식 건조기기를 나타내었다.

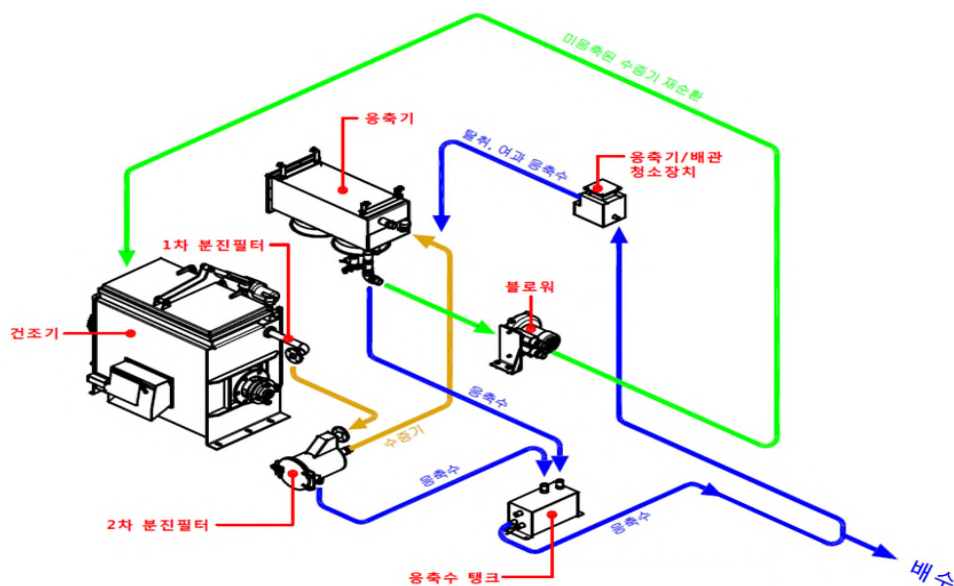


그림 2. 전기식 열매체 간접가열에 의한 음식물쓰레기 건조 공정도.



그림 3. 전기식 건조기기

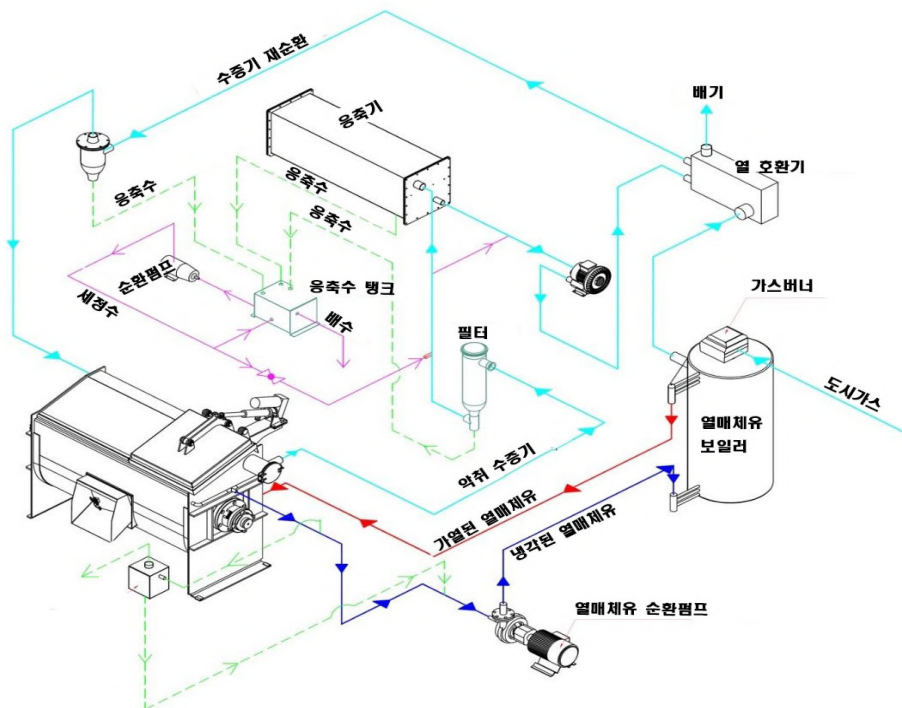


그림 4. 가스열원에 의한 건조 공정도



그림 5. 가스식 건조기기

(3) 건조방식

건조 방식은 다음과 같다.

음식물쓰레기 중에 다량의 수분은 전기히터 또는 가스 보일러에 의해 열매체가 170℃까지 가열되어 수증기로 전환된다. 건조과정에서 발생된 수증기는 배기 재순환공정에 의해 건조기 내부에서 배출된 후 분진필터로 입자상물질을 분리하고, 응축 열교환기를 통해 액상은 분리 배출되며 미응축된 수증기는 블로워를 거쳐 건조기 내부로 전량 재순환된다. 이와 같은 수증기 재순환공정은 폐쇄회로(closed loop)로 제작되어 음식물쓰레기 건조 중 발생하는 복합악취 원인 물질을 외부로의 배출을 사전에 차단할 수 있으며 악취발생에 대한 민원해결의 근본적인 대안 기술로 적용가능하다.

참고로 건조기의 성능은 피건조물이 접촉하는 전열면적과 밀접한 상관성을 지니고 있다.

(4) 전기 또는 가스열원에 의한 건조 처리비용

건조감량기기의 처리 용량은 1일 10kg부터 2,000kg(2 톤)의 unit 기기로부터 1일 3 ton~ 200 ton 용량의 대형설비(plant)가 있으나, 가장 수요가 많은 1일 100kg 용량의 감량화 사업장(식당)용과 같은 100kg 용량이나 RFID기능(저울, 컴퓨터, internet)이 장착된 고층 아파트용의 건조 감량기기, 그리고 대형 슈퍼마켓이나 호텔 등에서 주로 사용되는 1일 1,200kg 용량의 건조 감량기기를 수년간 운영한 data를 종합하여 그 평균 값(함수율 85% 기준)으로 표 2의 운전비용으로 표시했다.

전기와 가스의 단가는 2017년 2월 평균가격으로 계산하였다.

표 2 전기열원식 vs 가스열원식 1일 운전비용 비교(지난 2년간의 평균치)

GC-1200(전기식)			GG-1200H(가스 직화방식)		
전기	가스(LNG)	비용	전기	가스(LNG)	비용
960kWh @ 120원/kWh		115,200원	44kWh	125.5Nm ³ @ 565원/Nm ³	5,280원 70,907원
합계		115,200원	합계		76,187원 (전기대비 66.1%)

GC-100(전기식)			GC-100HG(가스 보일러식)		
전기	가스(LNG)	비용	전기	가스(LNG)	비용
80kWh @ 120원/kWh		9,600원	14.08kWh	12.04Nm ³ @ 565원/Nm ³	1,690원 6,803원
합계		9,600원	합계		8,493원 (전기대비 88.4%)

※ 가스보일러 사용시 하루 1,104원 절감, 5년 사용시 1,656,000원 절감효과

GS-100HD(전기식)			GS-100HG(가스 보일러식)		
전기	가스(LNG)	비용	전기	가스(LNG)	비용
102kWh @ 120원/kWh		12,240원	19.2kWh	13.27Nm ³ @ 565원/Nm ³	2,304원 7,497원
합계		12,240원	합계		9,801원 (전기대비 80%)

※ GS-100HD의 전기사용량은 설치장소에 따라 차이가 큼. 102kWh/day는 관악구에서 4 년간 시험가동시의 평균값으로 1 일 평균 100 kg 씩 처리한 수치임.

※ 가스보일러 사용시 하루 2,439원 절감, 5년 사용시 4,451,175원 절감효과

전기열원을 이용한 열매체 간접가열 건조기 성능을 확인하기 위해 공인인증기관(한국산업기술시험원)에서 시험하여 발급한 시험성적서에 기재된 것과 같이, 100kg의 음식쓰레기를 처리하기 위하여 사용된 전기 소모량은 78 kWh/일(3.25 kW/h)로 나타났다. 수증기 재순환공정(즉 폐쇄회로, closed loop) 특성상 배기구가 없기 때문에 건조기 주변 1 m 거리에서 복합악취를 측정 한 결과로는 규격기준(복합악취 희석배수 15)의 47%에 해당되는 희석배수 7이다. 이때의 음식물건조부산물 함수율은 8.17%이었고, 수분제거효율은 98%로 우수한 성능결과를 보였다.

그러나 음식쓰레기의 함수율, 성상, 계절 등에 약간씩의 영향을 받을 뿐만 아니라 처리용량이 클수록, 구동부(모터/블로워/팬 등)의 전기부하율이 적어지고, 건조 효율을 높일 수 있는 구조가 가능하다.

따라서 용량 평균치로 계상할 경우 음식쓰레기 1 ton당 처리 비용은 표 3과 같다.

표 3 전기 열원식 vs 가스 열원식 운전비용 비교 요약표

(전기단가 : 120원/kWh, 가스단가 : 565원/Nm3 기준으로 2017.2. 소매가격 기준임)

전기식	일반건조감량기(식당용)	96,000원/ton(fw)
	RFID장착 건조감량기(아파트용)	122,400원/ton(fw)
가스식	일반건조감량기(식당용)	78,000원/ton(fw)
	RFID장착 건조감량기(아파트용)	98,000원/ton(fw)



그림 6. RFID 장착 건조감량기

(5) 최종부산물 처리

본 연구에서 음식물쓰레기는 건조공정을 거쳐 평균 19.3%(평균수분함량 $8.7 \pm 0.47\%$)가 최종부산물로 생성된다. 이를 물질 선별하거나 혼합만으로 사료와 퇴비 제품으로 판매가능하다. 하지만 서울시 DDM환경자원센터의 경우처럼 실시협약 시의 퇴비원료 생산량의 1.7%만 이행함에 따라 퇴비로 생산하지 못한 양은 매립이나 소각으로 최종처분 한 사례로 보아 음식물건조부산물의 퇴비화나 사료화는 미미할 것으로 사료된다¹¹⁾. 따라서 고효율연료 에너지화와 같은 대안이 필요하다.

C. WTE(Waste To Energy : 융복합기술인 열원일체형 건조감량 방식)

(1) 음식쓰레기 건조물을 음식물 건조를 위한 열원으로 이용하여 건조하는 방식

음식쓰레기 100kg 건조하면 평균 18kg의 건조물이 발생한다.

한국의 음식쓰레기 건조물의 수분함량은 평균 5% 이며, 저위발열량은 4,300kcal/kg 이고 중금속이나 유황 등 악성 배기가스가 발생할 염려가 없는 깨끗한 연료로서 손색이 없다.

(참고로 프랑스의 대형 슈퍼의 음식 건조물의 저위발열량은 6,000kcal/kg이다.)

음식 건조물의 평균 소금잔량(NaCl)은 1.0 ~ 1.2% 이나 NaCl이 연소시 염소화합물인 다이옥신이 발생할 가능성이 없다는 국립환경연구소(2004년)의 연구 결과가 이미 발표된 바 있다.

한편 음식쓰레기 100kg를 건조하기 위한 이론적 열량은 65,000kcal 이나 효율을 85%로 감안하면 약 76,480kcal가 소요되는 바, 이는 음식건조물 17.8kg이 소요되므로, 음식건조물은 음식쓰레기를 건조할 열량을 조달할 수 있다.

따라서 음식쓰레기의 건조물은 음식쓰레기의 건조열원으로 사용하면 다음과 같은 이점이 있다.

- 발생하는 음식쓰레기의 거의 전량(약 2% wt의 연소재만 남음)을 발생현장에서 처리하여 음식쓰레기의 처리나 부산물 등 일체의 잔재물 없이 처리가 가능하다.
- 음식쓰레기의 처리 비용중 상기 B항의 전기식 또는 가스식 건조비용의 약 90%를 차지하는 열원(에너지) 공급원으로 사용되어, 전기 또는 가스 등 에너지가 필요 없어지므로 한국에서 발생하는 연간 500만 톤 음식쓰레기 의 처리비용인 약 1조원(환경부자료)의 처리비용을 약 600억원(구동부의 전기료 : 100kWh/ton(fw) X 500만 ton/year X 120원/kWh)으로 낮추어 국가적으로 연간 약 9,400억원의 음식쓰레기 처리 비용을 절감할 수 있다.
- 음식쓰레기를 발생장소에서 발생 즉시 처리할 수 있으므로, 음식쓰레기의 적체로 인한 악취 발생도 방지할 수 있고, 해충이나 동물의 서식으로 인한 위생 문제를 방지할 수 있다.
- 음식쓰레기 수거차량이 필요 없어 교통장애나 미세먼지 발생을 줄일 수 있으며 음식쓰레기를 버리는 국민의 편의성이 크게 향상된다.
- 새로운 산업(감량기기 생산)으로 약 10,000명의 새로운 일자리 창출이 가능하고, 해외수출 증대(연간 10억달러)가 기대된다.

(2) WTE 건조감량 처리 공정도



그림 7. WTE 처리 공정도

※ Video : http://www.gaia21.co.kr/src/bbs/board.php?bo_table=sub0301&wr_id=43

(3) WTE 건조 방식

상기 그림 6. 및 Video에서 나타나듯이 다음의 순서로 건조감량이 순환된다.

- ① 음식쓰레기 투입
- ② 음식쓰레기 건조
- ③ 음식건조물 배출
- ④ 배출된 음식건조물의 WTE 건조감량기의 연료통에 투입(필요시 pellet화)
- ⑤ 음식건조물로 열매체 보일러를 가동하여 그 건조열로 음식쓰레기를 건조

(4) 건조운영비

	비용	계산근거
구동부 전기	12,000원/ton(fw)	100kWh/ton(fw) X 120원/kWh
열원(음식건조물)	0원	음식건조물(180kg) 부족 시 우드 펠릿사용
합계	12,000원/ton(fw)	

(5) 최종 부산물

음식건조물 180kg 중 약 20kg 정도의 연소재가 발생되어 음식쓰레기 1 톤 중 2%의 재(부산물)만 발생되어 매립 처리 하면 된다.

D. 운영비용 요약

처리 방식	처리방식별 사용기기	1 ton당 처리(운영)비	비용지표
현재방식(AD)	수집, 운반, 중간처리, 비료화/바이오가스화	148,254원/ton(fw)	100
전기식 건조 감량	일반건조감량기(식당용)	96,000원/ton(fw)	65
	RFID장착건조감량기(아파트용)	122,400원/ton(fw)	83
가스식 건조 감량	일반건조감량기(식당용)	78,000원/ton(fw)	53
	RFID장착건조감량기(아파트용)	98,000원/ton(fw)	66
WTE(열원일체형)	Bio-mass Boiler 및 건조감량기기 일체형 * 음식건조물을 연료로 사용(식당용)	12,000원/ton(fw)	8

2. 이산화탄소 배출량 비교

(1) 바이오가스화(AD)

음식물쓰레기를 차량으로 운반하는 거리를 산정하기 위해 도시유형에서 농어촌형을 제외한 도시형과 도농형을 대상으로, 단독주택, 공동주택 및 상가 등으로 구분한 주거유형별 연구 결과를 이용하였으며, 수집운반거리, 연간 수거량 및 수거횟수 등의 자료를 계산하여 평균화하였으며 아래 표 4에 요약하여 나타내었다.

표 4 도시유형 및 주거형태별 음식물쓰레기 수집운반거리

(Mean±S.E., n=3)

항목	도시형			도농형		
주거유형	단독주택	공동주택	상가	단독주택	공동주택	상가
운반거리(km/대·회)	42.3	38.1	41.0	59.2	50.5	48.1
수거차량(대)	54	54	53	41	41	42
수거횟수(회/년)	11,336	12,948	11,648	9,880	9,984	10,244
수거량(톤/년)	2,151,208			748,536		
운반거리(km/톤)	12.04	12.38	11.77	32.04	27.62	27.65
평균(km/톤)	12.1±0.1			29.1±1.3		

도시형의 경우, 단독주택, 공동주택 및 상가에서 수거한 음식물쓰레기를 운반하는데 소요되는 평균거리는 톤당 12.1±0.1 km이고 도농형은 톤당 29.1±1.3 km이어서 차량운반거리를 단순히 전체 평균인 톤당 20.6 km로 산정하는 것보다 음식물쓰레기 배출량 분율(도시형 73.8%, 도농형 26.2%)로 평균값을 도출하는 것이 더 합리적일 것이다. 따라서 도시형과 도농형을 대상으로 차량운반거리 평균은 톤당 16.6 km가 되므로, 바이오가스화 공정인 수거차량운반, 혐기소화시설 및 하수처리시설의 이산화탄소 배출량 산정에 적용하여 표 5에 나타내었다.

표 5 바이오가스화 공정에서의 이산화탄소 배출량

구 분	CO ₂ 배출계수	CO ₂ 배출량
수거차량운반	88.07 kg CO ₂ -e/톤·km ⁹⁾	1,461.9 kg CO ₂ -e/톤(16.6 km)
혐기소화시설	50.2 kg CO ₂ -e/톤 ⁹⁾	50.2 kg CO ₂ -e/톤(100%)
하수처리시설	244.7 kg CO ₂ -e/톤 ⁹⁾	244.7 kg CO ₂ -e/톤(100%)
합계		1,756.8 kg CO ₂ -e/톤

바이오가스화 공정은 음식물쓰레기를 수거차량으로 운반 후 혐기소화 시설과 하수처리시설을 통해 최종 처리될 경우, 이산화탄소 총 배출량은 1,756.8 kg CO₂-e/톤이 된다.

(2) 전기 가열식 건조기

가정이나 식당에서 배출되는 음식물쓰레기를 차량으로 운반하지 않고 발생지에서 전기열원 건조감량기로 처리 후 감량된 음식물건조부산물을 운반하여 소각시설에서 최종처분하는 처리방식에 대한 이산화탄소 배출량을 검토하였으며, 표 6에 요약하여 나타내었다.

표 6 전기열원 건조감량기 처리 후 소각 공정에서의 이산화탄소 배출량.

구 분	CO ₂ 배출계수	CO ₂ 배출량
건조기(전기열원)	370.7 kg CO ₂ -e/ton	370.7 kg CO ₂ -e/톤(100%)
수거차량운반	88.07 kg CO ₂ -e/톤·km ⁹⁾	63.4 kg CO ₂ -e/톤(18%, 4 km)
소각	371.8 kg CO ₂ -e/톤 ⁹⁾	66.9 kg CO ₂ -e/톤(18%)
합계		501.0 kg CO ₂ -e/톤

※ 건조물이 음식쓰레기의 18%임

전력부문 간접배출원의 경우 이산화탄소 배출량(E) 계산은 아래 식을 적용하였다.

$$E = \text{전력소비량} \times 1/(1-r) \times EF$$

여기서, EF는 배출계수 0.454 kg CO₂-e/kWh이고, r은 전력손실율 0.0448이다.

전기열원 건조감량 및 소각 공정은 음식물쓰레기를 현장에서 처리 후 소각시설을 통해 최종 처리될 경우, 이산화탄소 총 배출량은 498.7 kg CO₂-e/톤으로 바이오가스화의 29% 수준이다.

(3) 가스(LNG) 가열식 건조기

가정이나 식당에서 배출되는 음식물쓰레기를 차량으로 운반하지 않고 발생지에서 천연가스열원 건조감량기로 처리 후 감량된 음식물건조부산물을 운반하여 소각시설에서 최종처분하는 처리방식에 대한 이산화탄소 배출량을 검토하였으며, 표 7에 요약하여 나타내었다.

표 7 천연가스열원 건조감량기 처리 후 소각 공정에서의 이산화탄소 배출량.

구 분	CO ₂ 배출계수	CO ₂ 배출량
건조기(가스열원)	272.0 kg CO ₂ -e/ton	272.0 kg CO ₂ -e/톤(100%)
수거차량운반	88.07 kg CO ₂ -e/톤·km ⁹⁾	63.4 kg CO ₂ -e/톤(18%, 4 km)
소각	371.8 kg CO ₂ -e/톤 ⁹⁾	66.9 kg CO ₂ -e/톤(18%)
합계		402.3 kg CO ₂ -e/톤

도시가스(LNG) 1 Nm³의 탄소배출량(E) 계산은 아래 식을 적용하였다.

$$E = 0.955 \text{ kg} \times 0.637 \text{ Ton C/kg of LNG} \times 44 \text{ kg CO}_2/12 \text{ kg C} = 2.23 \text{ kg CO}_2$$

천연가스열원 건조감량 및 소각 공정은 음식물쓰레기를 현장에서 처리 후 소각시설을 통해 최종 처리될 경우, 이산화탄소 총 배출량은 402.3 kg CO₂-e/톤으로 바이오가스화의 23% 수준이다.

(4) WTE 고형연료 에너지화(음식건조물을 건조감량기의 열원으로 이용)

가정이나 식당에서 배출되는 음식물쓰레기를 차량으로 운반하지 않고 발생지에서 건조감량기로 처리 후 감량된 음식물건조부산물을 성형장치로 고형화 후 보일러에서 연소 후 바닥재는 운반하여 매립시설에서 최종처분하는 처리방식에 대한 이산화탄소 배출량을 검토하였으며, 표 8에 요약하여 나타내었다.

표 8 음식물건조부산물 열원 건조감량기 처리 후 소각 공정에서의 이산화탄소 배출량.

구 분	CO ₂ 배출계수	CO ₂ 배출량
건조기(고형연료)	71 kg CO ₂ -e/톤	71 kg CO ₂ -e/톤(100%)
성형기	162.0 kg CO ₂ -e/톤 ¹³⁾	29.2 kg CO ₂ -e/톤(18%)
소각	371.8 kg CO ₂ -e/톤 ⁹⁾	66.9 kg CO ₂ -e/톤(18%)
매립	992.6 kg CO ₂ -e/톤 ⁹⁾	19.9 kg CO ₂ -e/톤(2%)
합계		187.0 kg CO ₂ -e/톤

※ 건조물이 음식쓰레기의 18%임

※ 건조물의 소각 후 연소재는 음식쓰레기의 2%

음식물건조부산물 열원 건조감량 및 매립 공정은 음식물쓰레기를 현장에서 처리 후 소각시설을 통해 최종 처리될 경우, 이산화탄소 총 배출량은 187.0 kg CO₂-e/톤으로 바이오가스화의 11% 수준이다.

(5) 이산화탄소 배출량 요약

구분		이산화탄소 배출량	CO ₂ 지표
바이오가스화		1,756.8 kg CO ₂ -e/톤	100
건조감량기	전기	501.0 kg CO ₂ -e/톤	29
	가스	402.3 kg CO ₂ -e/톤	23
	WTE	187.0 kg CO ₂ -e/톤	11

3. 결론

(1) 음식쓰레기 1 ton을 처리하는 비용과 이산화탄소 발생량을 종합하면 다음과 같다.

구분		이산화탄소 배출량	CO ₂ 지표	운영비용	비용 지표
바이오가스화		1,756.8 kg CO ₂ -e/톤	100	148,254원/톤	100
건조감량기	전기	501.0 kg CO ₂ -e/톤	29	96,000원/톤	65
	가스	402.3 kg CO ₂ -e/톤	23	75,000원/톤	53
	WTE	187.0 kg CO ₂ -e/톤	11	12,000원/톤	8

(2) 결론적으로 음식쓰레기의 처리는 현재의 처리방식인 수거, 운반, 중간처리, 고형물의 비료화, 탈리액의 바이오가스화 또는 하폐수장처리 방식에서 벗어나 건조감량방식 또는 음식쓰레기 건조물을 연료로 하는 융복합 방식은 WTE(Waste To Energy) 건조감량방식으로 처리 방식을 바꾸어야 한다.

Reference

1. 환경부, 국립환경과학원, “음식물류폐기물 바이오가스화시설 기술지침서”, 2015.
2. 환경부, “2014 유기성폐자원 에너지 활용시설 현황”, 2015.
3. 환경부, “폐기물처리시설 국고보조금 예산지원 및 통합업무처리지침”, 2017.
4. 환경부, “음식물류 폐기물 관리정책 방향 및 개선방안 연구”, 2012.
5. 환경부, 한국환경공단, “2014년 폐기물 처리시설 설치·운영실태 조사·평가 결과 보고서”, 2015.
6. 환경부, “2015 유기성폐자원 에너지 활용시설 현황”, 2016.
7. Weiland, P., “Biogas production: Current state and perspectives”, Applied Micro. Biotech., 85, 849–860, 2010.
8. 이동진 외, “유기성폐자원의 고효율 바이오가스화를 위한 최적 운영방안 연구(I)”, 2014.
9. 환경부, “음식물류폐기물 관리정책 방향 및 개선방안 연구”, 2012.
10. 환경부, “음식물쓰레기 종량제 및 감량화시책 도입방안 마련 연구”, 2010.
11. 홍용표 외, “음식물류폐기물 공공 자원화시설 운영에 관한 연구(I)”, J. of KORRA, 24(1), 41–49, 2016.
12. 서울특별시, “음식물류폐기물 처리기술 연구 보고서”, 2005.