

물-식량-에너지 넥서스를 통한 도시주거환경에서의 지속가능한 음식물 쓰레기 및 음폐수 처리와 관리

Water-Food-Energy Nexus Approach for Sustainable Urban Food Waste
and Leachate Treatment and Management

전세계적으로 도시의 인구 집중이 심화되는 가운데, 물, 식량, 에너지 등의 자원의 수요와 공급을 지속가능하게 조율할 수 있는 도시 기반 자원관리의 중요성이 대두되고 있다. 이와 관련하여 점진적인 도시화와 더불어 생활수준의 향상 등으로 국내 수도권 및 지방도시의 주거구역에서 배출되는 음식물 쓰레기로 인한 경제적, 사회 및 환경적 영향을 최소화할 수 있는 효율적인 관리 방안이 필요하다. 이에 본 이슈레터에서는 현재 국내에서 시행되고 있는 음식물 쓰레기 관리 방안에 초점을 맞추어 이를 살펴보고 현 문제점 및 개선 방안 등과 더불어 Water-Food-Energy Nexus 관점에서 이를 접근해야 할 필요성에 대해 다루고자 한다.

음식물 쓰레기 문제와 Water-Food-Energy Nexus 관점을 통한 대처 및 관리 방안 모색의 필요성

음식물 쓰레기는 식품의 생산, 유통, 가공, 조리과정에서 발생하는 농·수·축산물 쓰레기와 먹고 남긴 음식 찌꺼기 등으로, UN 식량농업기구(FAO)에 의하면 전세계적으로 공급되는 전체 식량의 약 20~30%가 음식물 쓰레기로 배출된다.¹ 국내에서만 전체 쓰레기 발생량의 약 28.7%에 해당되는 약 14,000톤의 음식물 쓰레기가 매일 발생하고 있다.² 이중 약 86%가 주거구역에서 배출되고 있으며, 음식물 쓰레기의 처리비용으로 연간 8천억 정도가 소요되고 연간 온실가스 배출량이 885만 톤 CO₂e로 추정되어 경제적으로나 환경적으로나 그 영향이 결코 작지 않다. 현재 음식물 쓰레기의 처리 방안으로 퇴비화, 사료

화, 혐기성소화, 소각 및 매립 등이 있으며 특히 퇴비화, 사료화, 혐기성소화 등의 방안을 위해서는 음식물 쓰레기를 다른 일반쓰레기와 분리해서 수거할 필요가 있다.

지난 이슈레터 1호에서 다루었듯이 물, 식량, 에너지 자원의 수요 및 공급은 서로 밀접하게 연관되어 있으며, 이들을 총체적으로 다루는 Water-Food-Energy Nexus 접근을 통해 각 자원을 효율적으로 사용 및 관리할 필요가 있다. 예를 들어 농업지에서의 식량 생산 및 도시로의 식료품 운송, 냉장, 보관에는 막대한 양의 에너지와 물이 사용된다. 이러한 가운데 미국, 스위스, 핀란드를 포함한 많은 선진국에서 생산되는 식량의 20% 이상이 음식물 쓰레기로 배출된다는 보고가 있으며 우리나라 또한 비슷한 상황일 것으로 예상된다. 이러한 방대한 양의 음식물 쓰레기 배출은 불필요한 식량 생산의 수요 증가를 통해 물과 에너지 자원의 수요 또한 증가시킬 뿐 아니라 그 처리 과정에서도 추가적인 물과 에너지의 소비를 야기한다. 또한 우리나라의 특성 상 음식물 쓰레기는 대부분 도시 및 그 근교에서 발생하기 때문에 그 처리 과정이 미치는 환경적 영향 및 각 자원에 대한 영향은 상대적으로 도시에 집중되게 된다. 그러므로 음식물 쓰레기 배출량을 저감하고 폐기물 및 음폐수를 효율적으로 처리하는 도시기반 음식물 쓰레기 관리는 도시에서의 쓰레기 문제 해결을 통한 사회적 불만의 저감만이 아니라 도시에서의 물, 식량, 에너지 자원들의 지속가능성을 향상시킬 수 있는 매우 중요한 분야라 할 수 있다. 음식물 쓰레기 관리의 선진화를 위해서는 이를 Water-Food-Energy Nexus 관점에서 볼 필요가 있다 (그림 1).

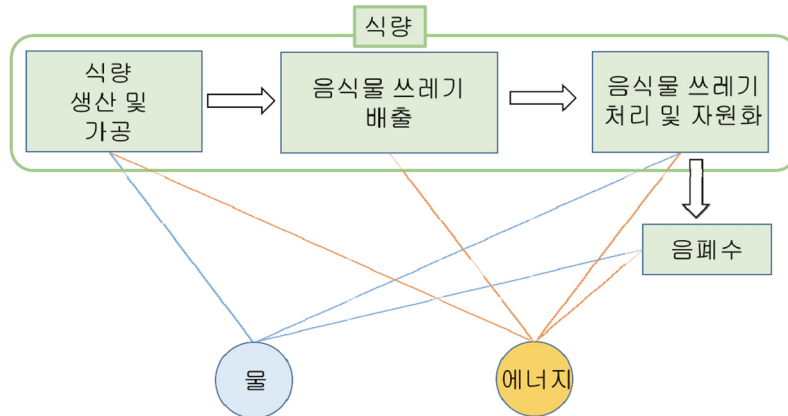


그림 1. 물-식량-에너지 넥서스에서 본 음식물 쓰레기 배출 및 처리에서의 각 자원의 연계성

우리나라 음식물 쓰레기 현 관리 방안과 문제점

우리나라에서는 음식물 쓰레기 매립에 의한 각종 문제점이 지적되고 음식물 쓰레기에 대한 관심이 증가하게 되자 1994년도에 대규모 식당에 대하여 음식물 쓰레기를 자체처리 할 수 있는 감량화 기기 설치에 관한 정책을 추진하였으며 이후 지속적으로 음식물 쓰레기에 대한 대책을 마련하고 관리 제도를 만들어왔다. 이를 통해 음식물 쓰레기의 대부분이 분리수거되고있다.³ 현재 우리나라의 음식물 쓰레기 관리 방안은 크게 음식물 쓰레기의 발생을 최대한 감량하는 방안과 처리과정에서의 자원화를 통한 음식물 쓰레기 재활용 방안 두 가지에 초점을 맞추고 있다.

특히 지난 20년 동안 음식물 쓰레기의 자원화에 초점을 두며 이를 위한 인프라 확충 및 제도 수립을 통해 음식물 쓰레기의 95%이상이 퇴비, 사료, 및 바이오가스 등의 자원화 처리시설로 보내지며, 5% 미만만 소각 및 매립을 통해 처리되고 있다(그림2). 2015년 기준으로 자원화된 음식물 쓰레기 중 32%가 사료화, 47%가 퇴비화, 20%가 바이오가스화로 재활용되는 등, 대부분이 사료 및 퇴비로 자원화되고 있다.² 퇴비화의 경우 신선도가 떨어진 음식물 쓰레기도 이용이 가능하며 제한된 조건에서 비교적 빠른 시기에 부식과 같은 안정된 물질을 얻는 과정으로 미생물의 활성만 최적상태로 유지할 수 있다면 비교적 쉽게 적용할 수 있으므로 음식물 쓰레기의 자원화 방법으로 많이 사용된다. 우리나라에는 음식물 쓰레기 처리시설로 공공부문과 민간부문을 합쳐 308개가 있으며(2015년기준), 총 시설용량은 19,425톤/일로 현재 전체 시설 가동률은 70%이다. 이중

172개소가 사료화 시설이며, 퇴비화 시설은 83개소이다.³ 민간 의 경우 사료화 시설이 많은 편인데 그 이유 중 하나는 축산농가 등에서 시설을 설치하여 음식물 쓰레기를 사료로써 자가 이용하기 때문이다. 한편 우리나라는 음식물 쓰레기의 자원화를 촉진하기 위해 1997년 12월 폐기물처리시설 설치 촉진 및 주변 지역지원 등에 관한 법률 시행령을 개정하여 일정 규모 이상의 택지 관광단지 개발자에게 음식물류 폐기물 자원화시설 설치를 의무화하였다.

또한 음식물 쓰레기는 약 80%가 수분으로 구성되어 있어, 퇴비화나 사료화 등의 자원화 처리과정에서 고농도의 BOD/COD를 함유한 음폐수가 추가적으로 발생한다. 국내에서는 약 8,500톤의 음폐수가 매일 배출되고 있으며, 음폐수 수질 특성은 대체적으로 약산(pH 4)에 BOD농도 약 70,000 mg/L, COD 농도 150,000 mg/L, TN 2,300 mg/L, TSS 40,000 mg/L정도로 일반 폐수에 비해 매우 높은 농도의 오염물질을 함유하고 있다.⁴ 이러한 고농도 폐수로 인한 수질 오염의 우려로 2013년부터 음폐수의 해양배출이 금지된 후에는 이들의 대부분이 하수·폐수처리장, 소각시설, 침출수처리장 등으로 유입된다. 전체 음폐수 발생량의 약 44%가 수도권(서울시, 경기도, 인천)에 집중되어 있어 음폐수로 인한 하수·폐수처리장에 대한 부담이 비교적 도시에 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 음폐수 중 일부(약 23%)만이 바이오가스화 시설 및 침출수처리장에서의 처리과정을 거쳐 바이오가스로 자원화되며 자동차연료나 발전, 보일러 등의 에너지원으로 사용되고 있다.⁴

우리나라의 음식물 쓰레기의 재활용률(95%이상)은 세계적으로도 매우 높은 수치이며 일본의 경우 약86%(2014년기준),

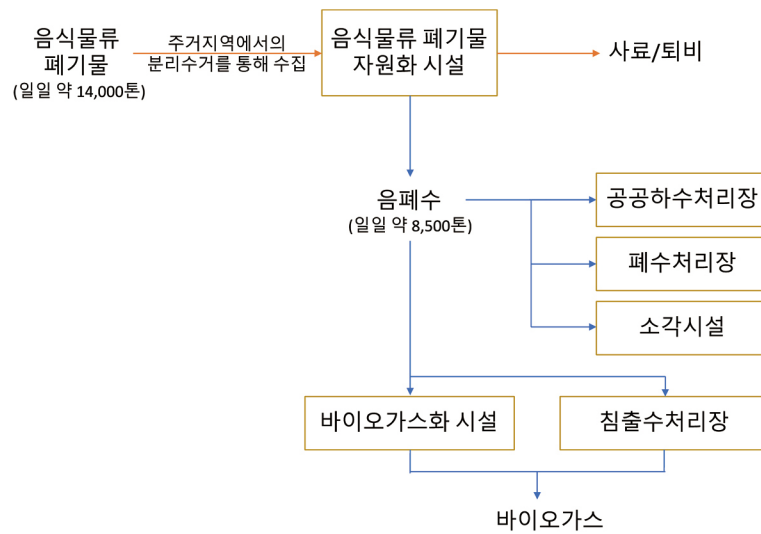


그림 2. 우리나라에서의 음식물류 폐기물 및 음폐수 처리 계통도

미국은 약 4.8%이다.^{5,6} 일본의 경우 사업장에서의 음식물 쓰레기 자원화는 비교적 체계화되어 있는데 반해 일반가정에서는 음식물 쓰레기를 거의 분리수거하지 않고 있으며 주로 소각시설에서 일반 쓰레기와 함께 처리되고 있다.⁶ 미국의 경우 주마다 쓰레기의 폐기물 처리 제도가 다르며 대부분은 음식물 쓰레기가 별도로 분리수거되지 않고 일부는 분쇄기 등을 통해 하수처리시설로 보내지고 나머지는 일반쓰레기와 함께 매립 및 소각되고 있다.⁷ 다만 최근에는 일부 지자체, 도시, 및 주 규모로 음식물 쓰레기를 별도로 분리하여 퇴비화 및 자원화 처리하는 곳이 점차 늘고 있다. 독일의 경우 음식물 쓰레기를 정원쓰레기와 합쳐 유기물쓰레기로 분리수거하고 퇴비 등으로 재활용한다. 또한 주민들이 스스로 퇴비화를 할 수 있도록 소규모 발효조 및 발효통 등이 보급되기도 한다. 음식물쓰레기의 자원화는 Water-Food-Energy Nexus 측면에서 살펴볼 때도 에너지 자원을 폐자원에서 생산하고 또한 이에 필요한 물 자원의 소비를 최소화하기에 매우 좋은 방안이라고 볼 수 있다.

비록 지난 20년 동안 음식물 쓰레기 재활용률은 매우 높아졌지만, 현재 우리나라의 음식물 쓰레기 처리 방안에도 해결해야 할 문제들이 있다. 첫번째로 음식물 쓰레기 자원화로 생산된 사료나 퇴비 등은 실질적인 사용에 어려움이 있다. 잘 분리수거된 음식물류 폐기물은 건조발효 시키면 단백질이 11~43%, 조지방이 7~29%로(비록 배출원별로 상당한 편차가 있지만) 대체로 이들의 함량이 상당히 높아 단백질 사료로서 가치가 높다. 또한 퇴비 같은 경우에도 음식물 쓰레기를 대량으로 처리할 수

있고 그 처리 공정의 기술적 난이도가 높지 않아 민간단체 등에서도 비교적 손쉽게 생산할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 염분이 비교적 많이 포함되어 있는 우리나라 음식물의 특성상, 음식물 쓰레기에서 만들어진 사료나 퇴비는 염분함량이 매우 높은 경우가 많아(약 1~4.9%) 그 사용이 극히 제한적이다. 또한 영양분도 배출원별, 계절별로 변동이 크고, 음식물 쓰레기에서 만들어졌다는 인식으로 인해 농가 및 그 외 이용자들이 사용을 기피하는 경향이 있어 이를 극복하기 위한 대책이 필요하다. 음식물 쓰레기의 사료화나 퇴비화의 경우 부가가치가 큰 사업이 아니기 때문에 생산설비를 대규모화해도 제품 경쟁력을 갖기 어렵고 초기 시설비 부담 또한 크므로 염분 처리 등의 추가적인 품질 향상이 어려운 것이 현실이다.⁸

최근에는 음식물 쓰레기의 자원화와 더불어 그 발생량을 감량시키는 방안에 더 중점을 두고 있다. 생활폐기물에서 음식물 쓰레기가 차지하는 비율(약 30%)은 매우 높아 2006년과 2010년에 발표된 음식물류 폐기물 종합대책에서는 음식물 쓰레기 전체 발생량의 5%, 20% 감량을 정책목표로 설정하였으나² 최근 들어 음식물 쓰레기 배출량은 생활폐기물과 더불어 다시 증가하는 추세에 있다(그림3).³ 최근 각 지방자치단체는 음식물 쓰레기 감량을 위해 공동주택 음식물 쓰레기 세대별 종량제 RFID(radio frequency identification) 도입을 추진하는 등 음식물 쓰레기의 원천감량을 촉진시키고자 하였다(그림4). 하지만, 일부 주민들이 요금을 절감하기 위해 집안 싱크대와 화장실에 음식물을 배출하는 등 부작용이 발생하고 있다. 또 한국민의

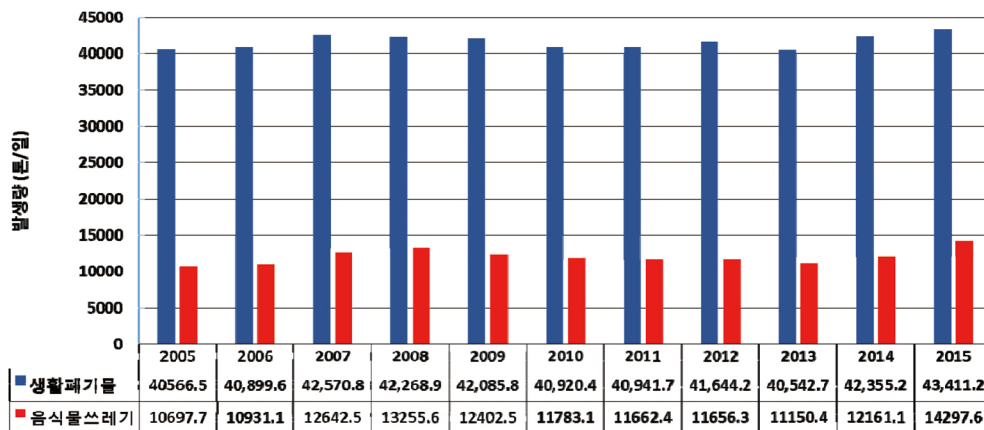


그림 3. 생활폐기물 및 음식물 쓰레기 발생량 (2005~2015년)⁹

생활수준 향상 및 식생활의 고급화 등으로 그 효과가 도드라지게 나타나지 않고 있고 각 지자체의 청소재정자립도도 약 26%로 낮은 수준을 유지하고 있다. 근 20년동안 우리나라는 음식물 쓰레기 처리 및 관리 체계화에 있어 상당한 성과를 거두었으나 자원화 및 감량화 두 방향 모두 지속가능한 단계에 이르려면 아직도 많은 발전이 요구된다.

음식물 쓰레기의 다른 관리 방안의 가능성과 우리나라 도시에서의 적용성

앞서 언급하였듯이 현재 우리나라의 음식물 쓰레기 자원화의 대부분이 사료화 및 퇴비화에 집중되어 있으나 높은 염분, 음식물 쓰레기에서 생성된 자원에 대한 부정적 인식, 낮은 경제성 등의 문제로 지속가능한 방안이라 하기 어렵다. 이에 미국에서 현재 시행되고 있듯이 주방용 오물분쇄기를 도입하여 음식물 쓰레기의 일부를 분쇄해 하수처리장으로 보내는 방안 등도 검토되고 있다. 이는 음식물 쓰레기의 분리수거로 인한 수고를 덜어주어 일반 시민들이 선호하는 방안이 될 수 있으나 우리나라에서 기존에 구축한 분리수거/자원화 시스템을 변경하고 새로운 인프라를 구축해야 하는 등 그 실현성이 낮다. 분쇄된 음식물 쓰레기가 하수처리장으로 직접 유입될 경우 하수 내 유기물질 농도 증가로 인해 이들을 처리하기 위한 하수처리장 운영방법 및 처리공정이 불가피하게 변경되어야 한다. 또한 기존에 없던 고형물의 유입으로 인해 기 설치된 하수관거의 경우 고형물 퇴적에 대한 최소 유속을 확보하지 못해 관거 내 유기물 퇴적으로 인한 악취 및 처리 시설 운영에 지장을 줄 수 있고 하

수관거의 이음불량으로 인한 지하수 오염도 일어날 수 있는 등 부작용 또한 많다.⁸ 분류식하수관이 설치된 지역이나 새로 건설되는 신도시 지역에 오물분쇄기를 이용한 배출방식을 허용하고, 분류식하수관이 설치되지 않은 지역은 사전 정화시설을 통해 배출하여 이러한 문제를 극복할 수 있다. 그러나 음식물 쓰레기를 하수와 함께 처리하는 하수처리장에서 그 처리 과정에 별도의 자원화 공정이 없을 경우, 현재의 분리 수거 및 자원화 시스템과 비교해 에너지 측면에서는 지속가능성이 낮을 가능성이 있어 이러한 변화가 에너지 및 물 자원에 미치는 영향을 정량화하고 구체적으로 평가할 필요가 있다.

최근 정책적으로 더 중점을 두고 있는 감량화의 경우 Water-Food-Energy Nexus 측면에서 보았을 때도 매우 바람직하다고 볼 수 있다. 음식물 쓰레기 배출량 자체가 원천적으로 감량될 경우 그 처리 및 관리에 요구되는 물과 에너지의 양 또한 줄어들고 생산된 식량 대비 배출되는 음식물 쓰레기량이 줄어들어 식량 생산량 또한 그만큼 줄일 수 있어 각 자원의 수요 및 공급에 대한 지속가능성을 크게 향상시킬 수 있다. 다만 앞서 언급하였듯이 생활수준 및 식생활의 고급화 등의 이유로 일반 시민들이 개인적으로 쓰레기를 감량할 동기부여는 비교적 낮아 지방정부 차원에서의 정책 및 보상 제도 등 도입, 지속적인 교육 및 홍보를 통해 그 효과를 향상시킬 필요가 있다. 또한 개인이 아니라 아파트 또는 단지 별로 음식물 감량화 장치를 도입하여 배출되는 음식물 쓰레기의 총량을 줄이는 방안도 고려할 수 있다. 이를 통해 세대별로 폐기물 관리 비용도 절감할 수 있으며 자원화 처리시설 입장에서는 수거량을 대폭 줄일 수 있다는 이점이 있다. 따라서 지방정부 등에서 이런 장치 비용의 일부를



그림 4. (왼쪽, 가운데)공동주택 음식물 쓰레기 세대별 종량제 RFID (radio frequency identification)와 (오른쪽)음식물 쓰레기 제로 하우스 현장 실험시설¹⁰

보조하여 도입을 활성화하는 것도 좋은 방안일 수 있다. 최근 토지주택연구원 및 한라오염에스(주)에서는 발효 및 소멸 기술을 이용하여 음식물 쓰레기를 감량하는 현장 실험장치 모니터링 실험을 실시하여 그 가능성을 평가하였다(그림 4).¹⁰ 이러한 방향은 소규모지역별로 발생하는 오염물의 부하량을 줄이고 이들을 에너지화하여 활용함으로써 중앙처리의 관리 부담을 줄이겠다는 분산화 개념과 일치한다. 결국 개별 지역에서 발생하는 폐기물의 총량을 줄여서 수거한다면 현재 부족한 자원화 시설을 관리 및 운영하는 데 더 여유를 가질 수 있으며, 이를 통해 에너지 생산 효율성을 증대시키고 생산된 자원을 다시 주변 단지에 나누어주는 자원순환의 일환이 될 수 있다. 이러한 소규모지역별로 분산화된 음식물 쓰레기 감량화 및 자원화가 도시에서의 식량, 물, 에너지 자원의 지속가능성에 어떠한 영향을 미칠지에 대해서는 지속적인 연구가 필요하다.

음식물 쓰레기에서의 에너지 회수 방안의 가능성

퇴비나 사료로의 자원화 외에도 음식물 쓰레기에서 메탄 가스 등의 바이오가스를 생산하여 에너지 자원으로 회수하는 방안도 자원화의 일부로 이미 시행되고 있으며 그 보급이 점차 증가하고 있는 추세이다. 퇴비나 사료와 비교했을 때 에너지 자원은 그 수요가 도시에서 높아 점차 그 비중이 높아질 것으로 예상된다. 현재 우리나라의 음식물 쓰레기의 에너지화 방법은 하수 슬러지나 가축 분뇨 등 다양한 유기성 폐기물과 통합하여 혐기성 소화에 의한 메탄 (바이오가스)를 생산하는 것이 주류를 이루고 있다.¹¹ 이는 다른 성상의 유기성 폐기물을 혼합하여 에너지화에 더 나은 기질을 형성하기 위해서이다. 예를 들어 하수 슬러지의 경우 중성 pH, 높은 유기물 농도, 낮은 생분해성, 높

은 함수율을 가지고 있고, 가축 분뇨의 경우 높은 pH (8 이상), 높은 알칼리도, 높은 암모니아 농도, 낮은 유기물 함량을 갖고 있으며, 음식물 쓰레기의 경우 낮은 pH(4 이하), 낮은 알칼리도, 높은 유기물 농도, 높은 생분해성을 갖고 있어 이들을 혼합했을 때 혐기성 소화의 효율을 향상시킬 수 있다. 음식물 쓰레기를 포함한 유기성 폐자원에서 바이오가스를 생산 이용하는 시설은 총 71개소(2014년 기준)이며 이중 음식물 쓰레기만으로 바이오가스를 생산하는 시설은 서울 동대문 환경자원센터, 부산 생곡 음식물 자원화시설 등 5개소가 있다.³ 음식물 쓰레기의 처리에서 추가적으로 발생하는 음폐수에서도 에너지 자원의 회수가 가능하나, 자원화 처리시설에서 배출되는 음폐수를 처리하기 위한 추가 시설 혹은 에너지화를 하는 하폐수처리장 등과의 연계 인프라 구축이 아직 대부분 이루어져 있지 않다. 현재 처리되는 음폐수 중 공공부문은 22%, 민간부문은 31%만이 에너지화 공정으로 처리되고 있어, 음폐수의 에너지화 비율은 낮다고 볼 수 있다.¹¹ 남은 음폐수의 경우 하폐수로 유입되어 호기성 하폐수 처리 공정 등을 통해 별도의 에너지 생산 없이 도리어 에너지를 대량으로 소비하게 되어 음폐수의 에너지화 및 지속 가능한 처리 방안을 위한 많은 노력이 필요하다.

음식물 쓰레기 및 음폐수에서의 에너지 자원 회수의 경우, 생산되는 바이오가스 등의 사용에 대한 사회적 인식 문제도 거의 없고 수요처의 확보 또한 비교적 쉽기 때문에 자원화 방안 중에 매력적인 옵션이라 할 수 있다. 특히 좁은 국토와 열악한 환경으로 인해 재생 에너지원 자체가 부족한 우리나라의 여건상 음식물 쓰레기를 이용한 바이오가스 및 여러 에너지 자원의 저비용 생산은 미래의 재생 에너지 수요를 충족시키는데 필수적인 기술이라 할 수 있다. 현재 혐기성 소화 외에도 다양한 에너지화 기술들이 연구 및 개발되고 있으며, 이들은 크게 생물학적

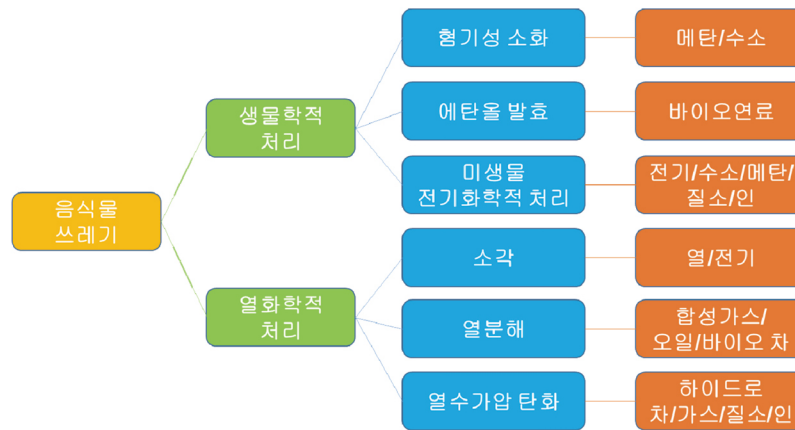


그림 5. 음식물 쓰레기의 에너지화 기술 및 생산 물질

처리와 열화학적 처리 방법으로 나뉜다(그림5). 생물학적 처리는 혐기성 소화조를 통한 바이오가스 생산, 발효를 통한 바이오 에탄올 생산, 혹은 미생물 전기화학적 처리를 이용한 전기나 바이오가스 생산 등이 있고, 열화학적인 처리에는 소각에 의한 열과 전기의 생산, 열분해를 통한 합성가스나 오일 및 바이오 차의 생산, 열수가압 탄화를 통한 가스 및 하이드로차 생산 방법이 있다.

음식물 쓰레기에서의 에탄올 생산은 lignocellulose 성분을 분해하기 위해 다양한 전처리가 필요하며 carbohydrases와 amyloglucosidases나 amylases 효소를 통한 가수 분해와 *Saccharomyces cerevisiae* 등의 효모를 이용한 발효 과정을 거친다.^{12,13} 에탄올 발효를 통해 음식물 쓰레기로부터 생산할 수 있는 에탄올의 에너지 함량은 대략 8.3–11.6 kJ/g TS 정도이며 이렇게 생산된 에탄올은 옥수수나 사탕수수에서 생산하는 바이오 에탄올처럼 가솔린에 혼합하여 주유소에서 판매하는 등 자동차 연료 등으로 활용될 수 있다.¹⁴ 최근에는 미생물 전기화학적 처리를 통한 유기성물질 분해 및 전기나 수소, 메탄 등의 생산에 대한 연구가 주목받고 있다. 이를 이용한 처리 사례로 양조장 폐수나 포도 농장 폐수, 가축 폐수 등이 있으며 전기화학적 처리기술 중 하나인 미생물 연료전지(microbial fuel cell, MFC)를 통해 폐수에 함유되어 있는 유기물질을 분해하고 전기를 생산하였다.¹⁵ 다만 유기성물질의 제거율 및 전력생산 효율성은 폐수의 특성에 따라 영향을 크게 받는 것으로 나타나 음폐수 수질의 편차에 비교적 민감하지 않은 처리시스템에 대한 연구가 필요하다. 미생물 전기화학 시스템의 경우 고체인 음식물 쓰레기보다 음폐수 처리에 적합하며, 염도가 비교적 높은 우리나라

의 음폐수 같은 경우 전기 전도성이 높아져 전기화학적 반응을 촉진시켜 그 처리 및 에너지 생산의 효율성이 더 높아질 것으로 기대된다. 또한 반응조 크기가 비교적 작아 음식물 쓰레기 자원화 처리장 등에 배출되는 음폐수를 직접 처리하는 추가 시설로도 적합할 수 있다.

소각을 통한 음식물 쓰레기의 처리는 이미 오랜 시간 검증된 기술로 그 양을 80~85% 감량하면서 에너지를 생산할 수 있지만, 음식물 쓰레기의 높은 수분 함량으로 인한 건조과정의 필요성, 다이옥신 및 중금속을 포함하는 유독성 공기 배출 등의 문제가 있다.¹⁶ 현재 우리나라에서는 음식물 쓰레기의 소각처리율은 매우 낮지만 일본에서는 가정에서 배출되는 음식물 쓰레기의 대부분이 소각처리 되는 등 나라에 따라 차이가 있다. 1톤 TS(total solid)의 음식물 폐기물 건조에 필요한 평균 전력 소비량이 27,920 MJ정도이고, 이 건조된 쓰레기의 소각을 통해 1톤 TS의 음식물 폐기물 당 37,700MJ의 열이 발생되므로,¹⁷ 에너지 측면에서 살펴보았을 때는 순 생산형(net positive) 공정이라 할 수 있다. 열분해(pyrolysis)와 가스화(gasification)는 탄소기반 물질을 고온 상태에서 처리하여 바이오 오일, 일산화탄소와 수소의 합성 가스, 바이오차, 또는 가스 엔진이나 가스 터빈의 연료로 사용되는 저위 발열량 가스 등을 생산하는 공정으로 주로 전처리된 폐기물이나 폐기물 재생연료에 적용되고 있으나 아직 음식물 쓰레기에는 거의 사용되고 있지 않다.^{16,18} 열수탄화(hydrothermal carbonization)는 높은 수분 함량의 유기 화합물을 자생 압력과 비교적 낮은 온도(180–350℃)에서 에너지 함량이 높은 자원으로 전환시키는 습식 공정 기술이다.¹⁹ 생물학적으로 폐기물을 에너지로 전환하는 기술과 비교하면,

열수탄화는 처리 시간이 짧아 더 적은 처리 면적에서 더 많은 폐기물 처리가 가능하다. 또한, 처리 단계에서 악취를 발생하지 않는 이점을 갖고 있다. 현재 다양한 음식물 쓰레기를 열수탄화를 이용하여 처리하는 연구가 이루어지고 있는데, 음식물 쓰레기에서 높은 탄소 함량(45~93%)과 높은 에너지 함량(15~30 kJ/g-dry solids)을 가진 hydrochar의 생산이 보고되었다.^{16,20} 열수탄화는 건조화에 소요되는 많은 에너지를 줄일 수 있으며 다른 생물학적 처리 기술에 비해 탄소원들이 대부분 hydrochar에 유지되므로 음식물 쓰레기 처리 과정에서의 추가적인 온실가스 배출을 최소화 할 수 있다는 장점도 있다.²¹

음식물 쓰레기 관리에서의 Water-Food-Energy Nexus 접근의 현재 한계와 연구의 필요성

지속가능한 음식물 쓰레기의 처리 및 관리를 위해서는 이에 연계되는 물, 식량, 에너지 자원에 대해 반드시 고려하고 그 영향을 최소화 및 최적화하는 방안을 찾아야 한다. 하지만 아쉽게도 현재 음식물 쓰레기와 관련된 각 자원의 연계성은 우리나라를 포함하여 전세계적으로도 잘 파악되지 않고 있다. 식량 생산에서의 물과 에너지와의 연계는 이미 많은 연구가 되어 있으나 음식물 쓰레기의 배출 및 처리 과정에 있어서 얼마나 많은 물과 에너지 자원이 소모되는지 파악하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다. 특히 본 이슈레터에서 언급한 다양한 자원화 및 에너지화 기술이 생애주기적 관점에서 물과 에너지 자원, 환경에 미치는 영향을 정량화하여 평가 및 비교하여 이를 토대로 각 기술별로 어떤 trade-off가 있는지 파악할 필요가 있다. 또한 음식물 쓰레기가 분리수거된 후 처리시설로 운반되는 비용과 아파트 단지 등 소규모지역별로 분산하여 처리하는 비용 등도 비교하여 지역별로 어떤 처리 및 관리 방안이 더 지속가능한지 살펴볼 필요가 있다. 이러한 연구 결과를 토대로 음식물 쓰레기의 자원화 및 감량화 방안을 다각화 및 다양화하고 또한 음식물 쓰레기의 처리에 있어 연계 및 병합처리를 통하여 그 효율성을 향상시켜 음식물 쓰레기 관리 및 이에 관련한 각 자원의 지속가능성을 향상시킬 수 있다. 더불어 처리과정 및 수집 운반 과정에서의 음식물 쓰레기 및 소모되는 자원들의 꾸준한 모니터링을 통해 그 관리체계를 최적화 할 필요가 있다.

결론

본 이슈레터에서는 우리나라의 도시주거환경에서의 음식물 쓰레기 및 음폐수의 관리와 처리에 초점을 맞추어 현 관리 방안 및 문제점을 살피고 그 지속가능성을 향상시키기 위하여 Water-Food-Energy Nexus 측면에서 접근할 필요성을 제기하였다. 음식물 쓰레기의 감량화 및 자원화에 있어서 다양한 기술들이 연구되고 있으며 새로운 관리 방안들도 모색되고 있으나 이러한 여러 방안 및 기술들을 평가할 때 이들이 식량 외에도 물과 에너지 자원에 미치는 영향을 파악하고 이를 토대로 가장 효율적인 음식물 쓰레기 관리 체계를 구축할 필요가 있다. 또한 음식물 쓰레기 문제는 사회적 인식 및 삶의 질과도 밀접한 관계가 있어 정부 및 지자체에서 장기적인 안목으로 접근할 필요가 있으며 지속가능한 관리 체계의 구축과 동시에 적절한 보상제도나 정책의 시행 등을 통해 그 성공적인 정착을 유도할 필요가 있을 것으로 보인다.

참고문헌

1. Food and Agricultural Organization of the United Nations (2013) Food wastage footprint: impacts on natural resources, Summary report.
2. 환경부 (2017) 음식물류폐기물 처리실태 조사 및 관리방안 연구.
3. 환경부 (2017) 음식물 쓰레기 저감과 자원화.
4. 수도권매립지관리공사 (2015) 수도권 매립지 음식물류 폐기물 폐수 처리 사례.
5. EPA (2014) Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal In the United States: Facts and Figures for 2012.
6. S. Takagi (2016) Change and solution for food waste recycle, Mizuho report, 9, 1-6.
7. Park et al. (2009) An Overview of Food Waste Treatment Methods in Korea, The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, 6, 427-432.
8. 한국행정학회 환경행정연구회 (2015) 음식물류폐기물 관리정책 개선방안 및 해외 우수관리 정책 비교연구
9. 환경부 (2016) 전국 폐기물발생 및 처리현황 (2015년도)
10. Oh et al. (2012) 발효·소멸 기술을 이용한 음식물쓰레기 제로 하우스 시스템의 실용화 연구. 토지주택연구원 & 한라오엠에스(주).
11. 한국환경공단 (2016) 유기성 폐기물 통합 에너지화 시스템 추진방향

12. H.C. Moon, I.S. Song, J.C. Kim, Y. Shirai, D.H. Lee, J.K. Kim, S.O. Chung, D.H. Kim, K.K. Oh, Y.S. Cho (2009) Enzymatic hydrolysis of food waste and ethanol fermentation, *Int. J. Energy Res.*, 33, 164–172.
13. O.N. Uncu, D. Cekmecelioglu (2011) Cost-effective approach to ethanol production and optimization by response surface methodology, *Waste Manage.*, 31, 636–643.
14. J.H. Kim, J.C. Lee, D. Pak (2011) Feasibility of producing ethanol from food waste, *Waste Manage.*, 31 (9–10), 2121–2125.
15. Q. Wen, Y. Wu, L. Zhao, Q. Sun (2010) Production of electricity from the treatment of continuous brewery wastewater using a microbial fuel cell, *Fuel*, 89 (7) 1381–1385.
16. Pham, Thi Phuong Thuy, et al. (2015) Food waste-to-energy conversion technologies: current status and future directions, *Waste Management*, 38, 399–408.
17. M.H. Kim, H.B. Song, Y. Song, I.T. Jeong, J.W. Kim (2013) Evaluation of food waste disposal options in terms of global warming and energy recovery: Korea *Int. J. Energy Environ. Eng.*, 4, 1–12.
18. P. McKendry (2002) Energy production from biomass (Part 2): conversion technologies, *Bioresour. Technol.*, 83, 47–54.
19. N.D. Berge, K.S. Ro, J. Mao, J.R. Flora, M.A. Chappell, S. Bae (2011) Hydrothermal carbonization of municipal waste streams, *Environ. Sci. Technol.*, 45 (13), 5696–5703.
20. L. Li, R. Diederick, J.R. Flora, N.D. Berge (2013) Hydrothermal carbonization of food waste and associated packaging materials for energy source generation, *Waste Manage.*, 33 (11), 2478–2492.
21. M. M. Titirici, A. Thomas, M. Antonietti (2007) Back in the black: hydrothermal carbonization of plant material as an efficient chemical process to treat the CO₂ problem, *New J. Chem.*, 31 (6), 787–789.

한국물환경학회 미래도시물환경기술위원회

위원장 | 남경필

위 원 | 김민철, 김연주, 김영모, 김철기, 문희선, 박제량, 배대현, 배성준, 서지원, 송재민, 송창근, 신창민, 윤석환,
이두진, 이재상, 이태권, 장선우, 정석희, 정성필, 조강우, 주진철, 최용주, 최정권

Water4FutureCity 3호

서울특별시 종로구 삼봉로 81 두산위브 파빌리온 1137호

Tel. 02-389-4250 | Fax. 02-385-3702 | E-mail. kswe@kswe.org