

## 축산분뇨의 호기성퇴비화 및 메탄화공정 전과정평가

임송택 · 안상전 · 정재수

((주)에코아이)

### LCA on the aerobic composting and the anaerobic digestion processes of livestock excreta

Song T. Lim, Sang-Jueon Ahn, Jae-Soo Jung

(ECOYE Co., Ltd. E-mail : danmoozi@ecoeye.com)

#### ABSTRACT

LCA study was carried out to compare different treatment methods of livestock excreta in Korea such as aerobic composting and anaerobic digestion. The potential life cycle impact of the aerobic composting process is 3.29E-06pt and anaerobic digestion process is 6.63E-07pt at the level of weighting. The environmental impacts from livestock excreta treatment processes are influenced remarkably by electricity use. And, global warming(57%) and abiotic resource depletion(35%) categories indicates key issues among the overall impacts. In order to assess the environmental impacts and identify key issues of each treatment method for livestock excreta, additional studies is called on to fulfill.

key word : livestock excreta, aerobic composting, anaerobic digestion, methane

#### 요 약 문

본 페이지에서는 기업이 환경경영을 진행함에 있어서 환경부하를 저감하고 원가를 절감하는데 유용한 의사결정 정보를 제공하는 회계적 분석기법인 '물질흐름원가회계(Material Flow Cost Accounting ; MFCA)'에 대해 살펴보고 그 유용성과 활용방안을 모색해 보겠다. 본 사례는 산업자원부 '한국생산기술연구원'의 국가청정생산지원센터가 지원한 '자동차산업의 중소기업형 통합환경경영(S-IEM) 모형 구축 및 적용'사업의 일환으로 수행된 것이다.

주제어 : 환경회계, 환경원가(관리)회계, 물질흐름원가회계(MFCA), 폐기물저감

#### 1. 서 론

우리나라 축산분뇨의 발생량은 약 136,403톤/일(2004년 기준)로 전체 오폐수 발생량의 0.6%에 불과하지만 오염 부하량은 25.8%를 차지하고 있다.<sup>1)</sup> 따라서 발생량과 부하량을 동시에 고려할 때, 토양과 수질에 미치는 영향이 상대적으로 클 수밖에 없다.

축산분뇨는 「오수·분뇨 및 축산폐수 처리에 관한 법률」의 적용을 받으며, 2003년 현재 신고미만 농가

자원화자체처리 18.6%, 신고농가 퇴비공동처리 6.3%, 퇴비자체처리 58.3%, 액비자체처리 5.4% 등 모두 88.6%에 달하는 자원화 비율을 나타내고 있다.<sup>2)</sup> 축산분뇨의 대부분은 퇴비화 및 액비화하여 재활용하고 있고 일부는 정화처리하고 있어 처리상의 문제가 없는 것 같지만, 현실적으로는 퇴비와 액비의 농지 환원이 화학비료 투입과 함께 양분 과잉 투입에 따른 토양오염을 유발하고 있고, 비점오염원으로 하천에 유입되어 오염총량규제 지역의 경제발전을 저해하는가 하면 처

리과정에서 발생하는 악취는 주민 갈등의 주요 요인으로 작용하고 있다.<sup>3)</sup>

이에 본 연구에서는 가장 일반적인 처리방법인 호기성퇴비화와 최근 관심이 높아지고 있는 메탄화(혐기성소화) 처리공정에 대한 전과정평가를 실시하여 각 공정별 환경영향을 파악하고 주요 이슈를 규명하였다.

전과정평가 연구사례는 매우 다양하지만 제품, 공정의 개선 및 환경라벨링과 관련한 제품 전과정평가(product LCA, PLCA)와 폐기물의 재활용 및 폐기 단계의 평가에 초점을 맞춘 폐기물 전과정평가(waste LCA, WLCA)로 크게 나눌 수 있다. 제품 전과정평가는 원료물질, 부품 및 최종제품과 같은 생산물을 기준으로 연구를 수행하는 반면, 폐기물 전과정평가는 처리공정에 투입되는 폐기물이 기준이 되며, 이 때 폐기물은 물리적 구성이 균일한 경우도 있지만 생활폐기물 처럼 다양한 구성을 가진 혼합폐기물인 경우가 대부분을 차지한다.

유럽과 미국, 일본 등 선진국에서는 폐기물 처리 정책 수립에 있어 전과정평가 자료를 활용하는 경우가 많은데, 다만 전과정평가 결과만을 가지고 정책을 수립하는 경우는 거의 없기 때문에 의사결정과정에서 전과정평가의 역할이 뚜렷이 나타난 사례를 찾기는 쉽지 않다. 한편, 일본의 경우는 전과정평가 결과 중 이산화탄소로 대표되는 온실가스의 배출량만을 집중적으로 분석 평가하는 연구 사례가 많으며 이는 온실가스 관련 데이터의 관리가 비교적 쉽고, 지구온난화에 대한 사회적 인식이 높는데 따른 것으로 풀이된다.

다른 전과정평가도 마찬가지로, 폐기물 전과정평가에서도 주의해야 할 점은 연구 목적 및 범위, 시스템 경계, 폐기물의 성상, 공정의 기술 수준, 선정된 데이터와 연구 방법론 등의 차이에 따라 연구 결과값도 민감하게 반응할 수 있다는 것이다. 예를 들어 미국(University of Wisconsin study, 1998)<sup>4)</sup>, 호주(Sven Lundie, 2004)<sup>5)</sup>, 일본(北海道大學, 2000)<sup>6)</sup>에서 수행한 각각의 유기성폐기물 처리방법별 전과정평가 연구 결과를 비교해 보면, 동일한 처리방법에 대해서도 다른 환경영향 결과가 나오는 경우가 많다는 것을 알 수 있다.

이는 연구를 수행한 국가별 폐기물의 성상, 처리기술 공법과 수준, 시간적 경계, 데이터의 품질, 연구 목

적 등의 차이에 따라 나타나는 불가피한 결과로, 전과정평가 수행 시 필연적으로 수반되는 다양한 가정과 제한 사항을 정확히 인식하고 결과값을 이해하는 것이 필요하다.

## 2. 목적 및 범위 정의

### 2.1 연구 목적

본 연구의 목적은 축산분뇨의 처리방법별 전과정평가 수행에 있으며, 연구결과는 처리방법별 환경영향 평가와 비교를 통해 유기성폐기물과 축산분뇨 관리정책 수립 시 기초자료로 활용할 수도 있지만, 본 연구에서는 시간상의 제약과 데이터 부재 등으로 비교 전과정평가의 엄격한 요구 조건을 충족시켰다고 보기 어려우므로 처리방법별 비교 결과는 신중히 사용되어야 한다.

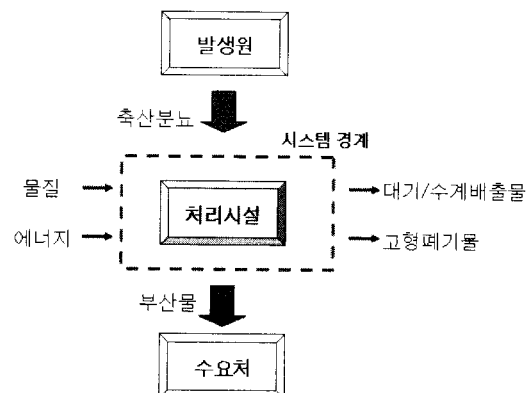
### 2.2 연구 범위

#### 2.2.1 기능 및 기능단위

본 연구의 대상 시스템은 '축산분뇨의 처리공정'으로, 기능은 '축산분뇨의 처리', 기능단위는 '축산분뇨 1kg의 처리'로 정의하였으며, 데이터 계산의 기준이 되는 기준흐름은 '축산분뇨 1kg'이다.

#### 2.2.2 시스템 경계

시스템 경계는 축산분뇨가 처리시설로 반입 처리되는 과정을 포함하며 부산물의 이용과 수송 공정은 제외했다([그림 1] 참조).<sup>7)</sup> 축산분뇨의 수집, 운반 등 수



(그림 1) 축산분뇨 처리공정의 시스템 경계

송과 관련한 사항은 실제 처리에 있어 매우 중요한 사항이나, 대상 시설별로 지역에 따라 큰 차이가 발생할뿐더러 정량적 데이터 수집이 용이하지 않으므로 본 연구에서는 시스템 경계에서 제외하되, 임의의 데이터를 사용하여 민감도 분석을 실시하였다.

2.2.3 데이터 품질 요건

축산분뇨 처리공정에 대한 데이터 수집을 위한 품질 요건은 [표 1]과 같이 처리공정 내부와 외부에 대하여 시간적, 공간적, 기술적 경계로 세분화하여 설정하였다. 먼저, 처리공정 내부에 대한 데이터는 대상 시스템의 2004년도 현장데이터를 수집하는 것을 원칙으로 하였다. 처리공정 외부의 데이터는 기술계로 투입되거나 산출되는 상위 및 하위흐름 데이터베이스로서 이에 대한 시간적인 범위는 5년 이내의 데이터베이스를 수집하는 것이 바람직하지만, 데이터 부재 시 가능한 최신의 것을 수집하였다. 공간적 범위는 사용 물질과 에너지의 생산지 데이터를 기준으로 선정하였다.

[표 1] 데이터 품질 요건

구 분	처리공정 내부	처리공정 외부
시간적 범위	2004년	가능한 최신 데이터베이스
공간적 범위	한국	대상시스템에서 사용하는 물질 및 에너지의 생산지 데이터
기술적 범위	각 대상시스템	best available technology

2.2.4 영향범주 및 영향평가 방법론

전과정 영향평가는 자연과학적 인과관계에 따른 정량적 평가를 가장 큰 특징으로 하기 때문에, 정량화하기 어렵고 원인물질과 환경영향 간의 인과관계가 불명확한 경우 환경 영향이 과소평가되기 쉽다. 예를 들어 다이옥신의 경우 독성 발암물질로서 인간과 생태계에 미치는 영향에 비해 내분비계장애물질로 작용하는 영향은 거의 고려되지 않고 있는데, 이는 인과관계 규명과 정량화가 어렵기 때문이다. 마찬가지로 유기성폐기물과 축산분뇨의 처리과정에서 가장 큰 사회적 관심 사항 중 하나인 악취 또한 전과정평가에서는 고려 대상에서 제외된다. 반면, 국제적인 환경이슈이면서

인과관계와 환경영향에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 자원 고갈과 지구온난화, 오존층 파괴와 같은 전지구적 차원의 환경영향에 대한 가중치가 높게 부여되는 까닭에 전과정평가 결과가 일반적으로 논의되는 환경영향범주와 전혀 다르게 나타나는 경우도 생기곤 한다.<sup>8)</sup>

한편, 본 연구에서는 산업자원부에서 개발한 영향평가 방법론을 사용하여 전과정영향평가를 수행하였다.<sup>9)</sup> 자원고갈(abiotic resource depletion, ARD), 지구온난화(global warming, GW), 오존층파괴(ozone layer depletion, OD), 산성화(acidification, AC), 부영양화(eutrophication, EU), 광화학산화물생성(photochemical oxidant creation, POC), 인간독성(human toxicity, HT), 생태독성(eco toxicity, ET) 등 모두 8개 영향범주(impact category)를 고려하였으며, 결과값으로는 가중화 단계 데이터를 사용하였다.

2.2.5 가정 및 제한 사항

- 처리시설의 건축, 토목, 기계 설비 및 인프라 관련 환경부하는 데이터 부재로 고려하지 않는다.
- 처리공정에서 배출되는 잔재물의 처리에 따른 환경부하는 고려하지 않는다.
- 호기성퇴비화 공정과 메탄화공정에서는 축산분뇨의 생물학적 분해와 메탄의 연소에 의해 이산화탄소가 대기 중으로 배출되지만, IPCC 『1996 국가온실가스 통계 가이드라인』 등에서 밝히고 있는 바와 같이 생물계폐기물의 분해과정에서의 이산화탄소 배출은 자연적인 탄소 순환 과정에 해당하므로 전과정영향평가에서 제외한다.<sup>10)</sup>
- 기술계에서 투입되거나 산출되는 공정 데이터들 중에서 상위 및 하위흐름 데이터베이스가 없는 경우에는 기본흐름(elementary flow)으로 처리한다(예: 축산분뇨 퇴비화 공정 중 축사에서 혼입된 볏짚, 톱밥 등).
- 축산분뇨 처리공정에서 생산된 퇴비, 메탄 등 부산물로 인한 환경영향 회피효과(avoided impact)는 고려하지 않는다.

### 3. 전과정목록분석

#### 3.1 대상 시설

축산분뇨는 사육시설 규모에 따라 허가, 신고, 신고미만 등으로 분류하여 관리한다. 허가 및 신고 농가에게는 처리시설의 설치, 운영 등의 관리의무를 부여하고 있지만, 신고미만 농가는 무단방류 금지 이외는 처리의무 없이 자율관리하고 있다. 이러한 소규모 신고미만 농가에서 발생하는 축산분뇨의 처리를 위해 축산폐수공공처리시설을 설치 운영하고 있기도 하다.<sup>3)</sup>

본 연구에서는 축산분뇨의 자원화 처리방법을 중심으로 처리용량과 가동률, 표준처리방식, 향후 적용 가능한 기술 등에 대한 문헌 조사 및 현장조사를 통하여 [표 2]와 같이 처리방법별로 1~2개의 대상 시설을 선정하였다. 주요 투입물인 톱밥 등이 폐기물 처리량 자체와 밀접한 관련이 있으므로 각 시설 간의 처리규모와 가동률 차이로 인한 데이터 왜곡은 크지 않을 것으로 사료된다.<sup>11)</sup>

[표 2] 처리방법별 대상 시설의 공정 특성

처리방법	공정 특성
호기성퇴비화	혼합, 발효(공기공급 및 교반)
메탄화	파쇄, 선별, 혐기성소화, 바이오가스처리

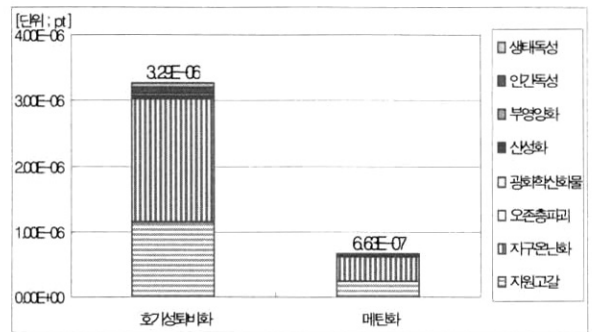
#### 3.2 전과정 목록표

전과정 목록분석은 연구의 목적 및 범위정의에서 정의한 내용을 토대로 데이터를 수집하고 이를 객관적, 과학적으로 분석 계산하여 정량적인 투입 산출물 목록을 구축하는 단계로 ISO14041의 절차에 준하여 수행하였다. 데이터 수집은 범위정의 단계에서 정의한 대로 대상업체 내부와 외부로 구분하여 수행하였으며, 각 대상시스템별로 2004년 연간 데이터를 기준으로 투입산출물 목록표를 작성한 후, 기준흐름인 축산분뇨 1kg을 기준으로 데이터들을 환산하여 처리방법별 gate-to-gate 목록표를 완성하였다. 목록표 상의 주요 투입산출물을 살펴보면, 호기성퇴비화는 기능단위당 톱밥 1.06E-01kg, 전기 2.15E-02kWh가 투입되

고 퇴비 1.95E-01kg이 생산된 반면, 메탄화는 전기 1.46E-02kWh가 투입되고 메탄 2.95E-02kg, 퇴비로 활용가능한 탈수슬러지 1.96E-01kg 등이 산출되는 것으로 나타났다. gate-to-gate 목록표 작성 이후, 전기, 톱밥 등과 같이 기술계로 투입되거나 산출되는 항목에 대해 산업자원부 및 환경부의 국가 LCI DB9)를 이용하여 상위 및 하위흐름 데이터베이스를 연결하고 전과정목록표(Life Cycle Inventory, LCI)를 작성하였다.

### 4. 전과정영향평가

축산분뇨의 호기성퇴비화 및 메탄화 공정에 대한 전과정평가 수행 결과, 가중화 단계의 최종 전과정영향평가값(환경영향지수)은 각각 3.29E-06pt, 6.63E-07pt로 산출되었다. 전과정영향평가값은 대상시스템의 잠재적 환경영향을 의미하기 때문에 수치가 클수록 환경에 미치는 영향도 크므로 환경성은 저하된다.

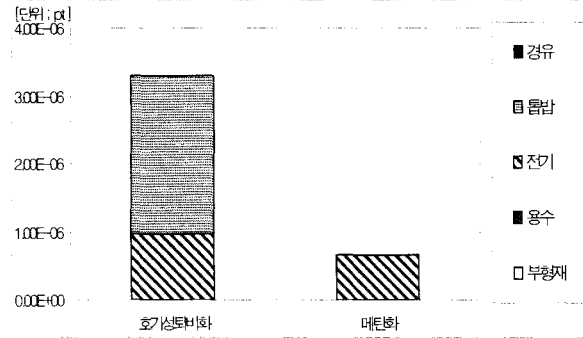


[그림 2] 영향범주별 전과정영향평가 가중화 결과

영향범주별 가중치부여를 통한 최종 전과정영향평가값은 [그림 2]와 같다. 퇴비화와 메탄화 공정 모두 지구온난화범주가 57%, 자원고갈범주가 35%의 영향을 차지하는 것으로 나타났다. 두 공정의 영향범주별 비중이 동일한 까닭은 퇴비화 공정에 투입되는 톱밥의 환경영향이 전기사용에 기인하기 때문이다([그림 3] 참조).

톱밥의 경우, 상위 흐름에서 폐목재로 톱밥을 만드는데 사용되는 전기에 의한 환경영향이 대부분을 차지하므로 결국, 축산분뇨 처리공정에서 가장 많은 환경

영향을 유발하는 요인은 전기임을 알 수 있으며, 추가적인 물질 투입이 없는 메탄화 공정의 환경성이 현저히 우수한 것으로 나타났다.



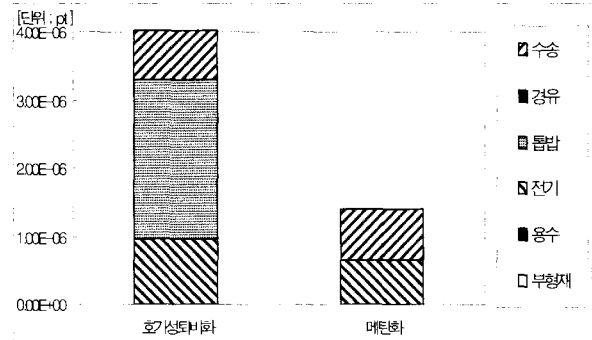
(그림 3) 주요 요인별 전과정영향평가 가중화 결과

[그림 3]은 주요 투입물별로 환경에 미치는 영향을 보여주고 있는데, 퇴비화의 경우 톱밥(70%), 전기(30%), 메탄화는 전기가 유일한 요인이었다. 전기사용에 따른 환경영향값은 처리공정별로 큰 차이를 보이지 않았으며, 호기성퇴비화공정은 축산분뇨의 자원화를 위한 톱밥 투입이 절대적 영향을 미쳤다. 톱밥은 생산 퇴비의 품질과 직결되는 주요 물질로, 만일 투입량을 줄인다면 퇴비의 품질에 영향을 미치게 되므로 공정 개선의 여지는 크지 않은 것으로 사료된다.

유기성폐기물의 수집, 운반과 관련한 사항은 실제 처리에 있어 매우 중요하나 대상 시설별로 지역에 따라 큰 차이가 발생할뿐더러 데이터의 수집 또한 용이하지 않으므로 본 연구에서는 실제 데이터 대신 임의의 가상데이터를 사용하여 수집운반에 대한 민감도를 분석하였다.

농장 등에서 배출된 축산분뇨가 처리시설로 수집, 운반되기까지의 거리가 최장 50km라고 가정하고 전과정평가를 수행한 결과, 연료 소비, 이산화탄소 배출 등을 포함한 수송차량의 왕복 환경부하가 [그림 4]의 수송 범례에 표시되어 있다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 사료화와 퇴비화 공정에서 수송부하의 비중은 예상보다 크지 않은 것으로 나타났으나, 처리공정의 환경영향이 작은 메탄화 공정에서는 처리공정 자체의 환경영향과 유사한 값을 나타냄으로써 역시 축산분뇨 처리에 있어 주요하게 다루어야 할 요인 중 하나임을 알 수 있다.



(그림 4) 수송 고려 민감도 분석 결과

### 5. 결 론

본 연구에서는 현재 가장 광범위하게 실시되고 있는 축산분뇨의 호기성퇴비화 처리와 최근 관심의 대상이 되고 있는 메탄화(혐기성소화) 처리공정에 대한 전과정평가를 실시하여 각 공정별 환경영향을 파악하고 주요 이슈를 규명하였다.

전과정평가 수행 결과, 기중화 단계의 최종 전과정 영향평가값은 호기성퇴비화 3.29E-06 pt, 메탄화 6.63E-07pt로 산출되었다. 영향범주별로는 퇴비화와 메탄화 공정 모두 지구온난화범주가 57%, 자원고갈범주가 35%의 영향을 차지하는 것으로 나타났으며, 퇴비화에 사용되는 톱밥의 경우, 상위 흐름에서 폐목재로 톱밥을 만드는데 사용되는 전기에 의한 환경영향이 대부분을 차지하므로 결국, 축산분뇨 처리공정에서 가장 많은 환경영향을 유발하는 요인은 전기임을 알 수 있었다. 상대적으로 메탄화 공정의 환경성이 현저히 우수한 것으로 나타났는데, 이는 퇴비, 메탄 등 부산물에 의한 회피효과를 고려하지 않은 결과라는 것에 유의할 필요가 있다.

본 연구에서는 시간의 제약과 데이터 부재 등으로 비교 전과정평가의 엄격한 요구 조건을 충족시켰다고 보기 어려우므로 처리방법별 비교 결과는 신중히 사용되어야 하며, 향후 유기성폐기물과 축산분뇨 관리정책 수립 시 처리방법별 환경영향 평가와 비교를 위한 추가 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- 1) 환경부·농림부:가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 (안) 설명(2005)
- 2) 농림부·환경부:가축분뇨 관리·이용대책(2004)
- 3) 서세욱 등:유기성폐기물 처리사업의 문제와 개선방안, 「예산현안분석 8호」, 국회예산정책처(2005)
- 4) University of Wisconsin Study:Life Cycle Cost Comparison of Five Engineered Systems for Managing Food Waste(1998)
- 5) Sven Lundie, Gregory M. Peters “Life cycle assessment of food waste management options”, Journal of Cleaner Production(2004)
- 6) 北海道大學:都市ごみ処理システム評価計算プログラム(2000)
- 7) 국립환경과학원:유기성폐기물 종합관리기술구축(Ⅱ) 「유기성폐기물 처리방법별 환경성 및 경제성 평가」(2005)
- 8) 허탁 등:「환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침」, 한국인정원(1998)
- 9) 산업자원부:환경친화적 산업기반 구축을 위한 환경경영 표준화사업(2003)
- 10) IPCC:Revised 1996 Guideline for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual (1997)
- 11) 한순금 등:음식물류폐기물 건식사료화공정의 전과정 평가(LCA), 「2005년도 춘계학술연구발표회 논문집」, (사)한국폐기물학회(2005)