

下水슬러지 處理工程에 대한 全過程評價(LCA)

韓芝暎 · 趙熙燦 · 金道均*

LG-EDS Systems Inc., *서울大學校 地球環境시스템工學部

Life Cycle Assessment (LCA) Study of Wastewater Sludge Treatment Systems: Incineration, Composting, Solidification

Ji Young Han, Hee Chan Cho and Do Kyun Kim*

LG-EDS Systems Inc.

*Department of Civil, Urban and Geosystem Engineering, Seoul National University

요 약

폐기물 관리법에 의하면 2001년부터 슬러지의 매립이 금지됨에 따라, 매립이외의 다른 처리방식을 도입해야 할 상황이다. 전과정평가는 제품 및 서비스의 전과정을 통해서 발생하는 환경부하를 정량화 하는 방법으로 대두되고 있으며 환경성에 대한 정책의 입안 및 제품의 비교평가 등 그 활용분야가 다양하다. 본 논문에서는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 이용하여 슬러지의 처리방법 중 소각, 퇴비화, 고�형화에 대한 환경성을 비교 평가하여 적절한 처리방식을 선정하는데 도움이 되고자 하였다. 각각 처리시설의 Data는 구리시 하수처리장의 소각시설, 난지도 하수처리장의 퇴비화 시설, 수도권매립지의 고�형화 처리시설을 방문하여 운영자료를 사용하였으며, 국내 D/B로 구축된 전력 및 수송자료도 이용하였다. 전과정 평가를 수행한 결과 퇴비화가 가장 낮은 환경부하를 나타냈고, 고�형화 처리방식이 가장 큰 환경부하를 나타냈다.

주요어: 전과정평가, 하수슬러지, 소각, 퇴비화, 고�형화.

ABSTRACT

As it is not allowed to landfill sludge from 2001 by the act of waste management, new systems of treating sludge are necessary. Life Cycle Assessment, LCA, is a method for evaluating systems in the aspect of environment and also can apply to decision making tools for policy making. The objective of this study is to assess 3 alternatives of landfill: incineration, composting, solidification by applying LCA. This study is done with operation data from incinerator in Kuri, composting facility in Nanjido, solidification facility in Kimpo and electricity and transport data of Korea in 1998 are used. The results of the LCA is that the composting system is most environmental-friendly and the solidification system is least environmental-friendly.

Key words: Life Cycle Assessment (LCA), sludge, incineration, composting, solidification

1. 서 론

1998년 현재 하수슬러지 발생량은 연간 130만 톤으로 추정되며 이들은 거의 대부분 매립과 해양투기에 의해 처리되고 있다.¹⁾ 그러나 매립의 경우는 매립지의 부족으로 매립지 확보가 점점 어려워지고 있고, 슬러지의

높은 함수율로 인해 매립 작업시 어려움이 따른다. 뿐만 아니라 슬러지에 함유되어 있는 각종 유해 중금속에 의한 지하수 및 지표수의 2차 오염도 고려해야 할 것이다. 해양투기의 경우에도 해양생태계의 오염 및 교란 등의 우려가 있고, 국제적으로도 공유해상을 보호하기 위해 슬러지의 해양투기를 금지하기 위한 국제적인 협상이 진행되고 있다. 따라서 기존의 처리방식에 대한 합리적인 대안이 요구되고 있는 실정이다.

* 2002년 4월 22일 접수, 2002년 7월 22일 수리

* E-mail: hjyoung@hanmail.net

정부에서도 이러한 사실을 직시하여 2001년부터 적용되는 폐기물 관리법에서 슬러지의 직접 매립 및 해양 투기를 금지하고 있으며, 이에 대한 대안으로 퇴비화, 토지개량제, 매립지 복토제, 고�형화 등이 대두되고 있다. 따라서 여러 가지 대안 중 어느 방법이 가장 친 환경적인지 평가하고 모색해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 슬러지 처리의 환경성을 평가하는 도구로서 전과정평가(Life Cycle Assessment)기법을 도입하였다.

전과정평가는 ISO 14000시리즈 중 하나로 표준화되면서 관심을 얻기 시작하여 근래에는 방법론 및 응용분야에서 국내외의 활발한 연구가 진행되고 있다. 전과정평가는 제품의 환경성을 원료채취단계에서부터 제품의 폐기단계까지 제품의 전과정을 고려한다. 또한 ISO 문서에서는 LCA에서 말하는 '제품'을 '서비스'를 포함하는 개념으로 문서화하고 있다. 따라서 슬러지 처리를 공공기관에 대한 서비스로 생각할 때 이들 방식을 평가하는 데에 대한 LCA 이용은 지극히 타당하며, 더욱이 국제 표준화 기구에 의해 LCA가 표준화 작업이 이루어지고 있는 상황에서 대외적으로도 인정받는 도구라 할 것이다.

본 논문에서는 환경성평가 도구 중 대내외에서 그 연구가 활발하게 진행되고 또한 국제표준화 기구에 의해 인정받고 널리 사용하고 있는 방법인 LCA를 이용하여 하수슬러지의 처리방식 중 퇴비화, 고�형화, 소각에 의한 환경성을 평가하여, 매립이나 해양투기의 대안으로 친환경적인 방법을 찾고 정책입안에 도움이 되게 하였다.

2. 이 론

2.1. 정의

전과정평가는 제품의 전과정 동안에 제품 또는 서비스에서 야기된 환경부하를 계산하고 환경에 미치는 잠재적인 영향을 분석 및 평가하는 기법이다. 여기서 전과정이라 함은 제품의 전과정 즉, 원료물질의 취득 및 가공, 제품제조, 수송, 사용, 폐기물 관리까지를 포함하며, 환경부하란 수질 및 대기오염물, 폐기물배출량, 자원소모량을 말한다. 마지막으로 환경에 미치는 영향이란 생태계, 인간보건 및 천연자원에 미치는 영향을 말한다. 따라서 전과정 평가란 제품의 전과정을 통해 발생하는 수질 및 대기 오염물, 폐기물, 자원소모 등의 환경부하를 생태계 및 인간에 얼마만큼의 영향을 미치는지 그 양을 정량화 하는 일련의 작업이라 할 수 있다.

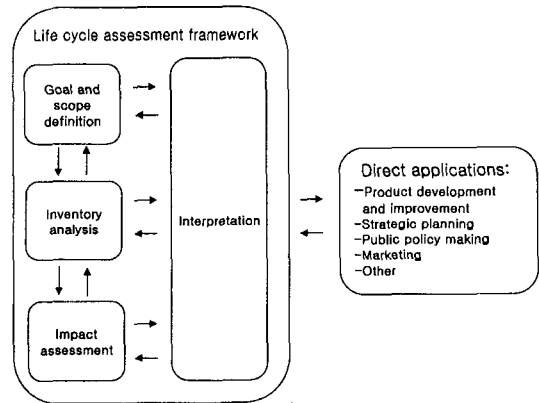


Fig. 1. Phases of LCA.²⁾

전과정평가는 크게 목표 및 범위 설정(Goal and Scope Definition), 목록분석(Inventory Analysis), 영향평가(Impact Assessment), 결과해석(Interpretation)의 과정으로 구성되어 있다. 이들의 상관관계를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 LCA는 수행하는 과정 전반에 걸쳐서 각 단계별로 그 이외의 단계와 검토하는 상호 유기적인 관계에 있다.

2.2. 목표 및 범위 설정 (Goal and scope definition)

목표 및 범위 설정의 단계에서는 우선 연구목적을 분명히 해야 한다. 즉, LCA를 수행한 결과물을 누구에게 공개할 것이며 어떤 용도로 쓸 것인가 하는 것이다. 예를 들면 A라는 상품의 LCA의 결과물이 내부적으로 이용되어 A를 생산하는 제조공정을 환경친화적으로 개선하는데 이용될 수 있으며, Type III(환경마크의 일종)를 목적으로 수행할 수도 있을 것이다.

연구의 범위에서는 시스템의 기능 및 범위, 기능단위, 영향평가 방법, 데이터의 요구조건, 연구의 가정 및 제한 요인 등이 포함된다.²⁾ 이때, 연구범위의 폭과 깊이는 목표정의에서 설정한 바를 충분히 다룰 수 있도록 설정해야 하며, 모든 가정과 설정은 근거를 제시하고 투명성이 보장되어야 한다.

2.3. 목록분석 (Inventory Analysis)

목록분석은 앞서서 수행한 범위설정 단계에서 선정된 시스템 경계내의 시스템을 대상으로 모든 에너지, 원료, 제품, 부산물 및 환경오염 배출물 등을 정성적, 정량적으로 기록하여 목록화 하는 단계이며 시스템의 환경부

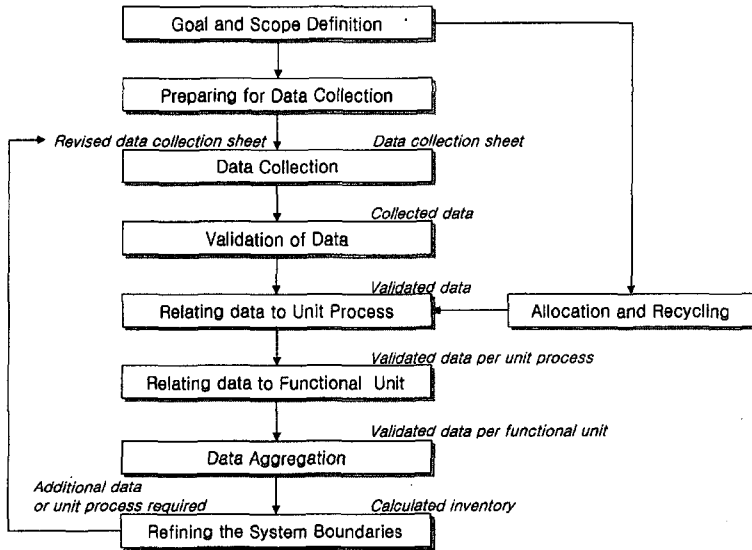


Fig. 2. Simplified procedures for inventory analysis.³⁾

하를 계산하는 과정이다.³⁾ 여기서 말한 환경부하라 함은 시스템 내로 들어오는 모든 Input과 Output을 지표별로 정리함을 말한다. 즉, Input 항목에서 원료 및 에너지, Output 항목에서 대기배출물, 수질배출물, 폐기물, 제품, 부산물 등으로 정리함을 말한다. 목록분석은 반복적으로 수행된다. 즉, 목표 및 범위설정 단계에서 규정된 연구목적, 시스템경계, 데이터 질등을 고려하여, 이들 사항과 일치하는지 계속적으로 검토해야 한다. 이들 과정을 Fig. 2에 간략히 소개하였다.

2.4. 영향평가 (Impact Assessment)

목록분석을 통해서 얻어진 결과물의 의미는 각각의 단위공정을 통해서 얻어진 현재의 자원소모량 및 대기배출물, 수질배출물, 폐기물 등의 지표별 발생량 만을 의미한다. 즉, 목록분석의 결과물을 가지고 연구 수행된 시스템이 얼마만큼 환경적으로 친화적인지 판단할 수 없다는 의미이다. 자원소모량, 대기배출물, 수질배출물, 폐기물발생량 등에 좋지 않은 영향을 미칠 것이라는 생각은 할 수 있으나, 이들이 생태계-인간보건-천연자원을 어우르는 곳에 얼마의 영향을 미친다고 말할 수 없다. 이것이 목록분석(Inventory Analysis)의 한계이며 또한 영향평가(Impact Assessment)를 수행하는 이유이기도 하다.

영향평가(Impact Assessment)는 잠재적인 환경영향을 평가하는 단계이며, 4가지 단계로 이루어졌다. 우선 목

록분석을 통해 얻어진 결과물(LCI)을 각각의 환경영향 범주에 연결하고 각각의 환경영향범주내의 목록들을 포함시키는 분류화(Classification), 분류화를 통해 분류된 항목들이 각각의 환경영향에 미치는 잠재적인 환경영향을 계산하여 정량화 하는 특성화(Characterization)단계, 그밖에 특성화한 결과물을 해당지역에서 일정기간동안 배출되는 각각의 영향범주에 속하는 모든 항목들이 기여하는 잠재적인 영향으로 나누는 정규화(Normalization), 영향범주들이 환경전반에 미치는 영향을 고려하여 영향 범주간의 상대적인 중요성을 고려하여 그에 따른 순위를 결정하는 과정(Weighting)으로 이루어진다.

2.5. 해석 (Interpretation)

해석단계는 기 수행된 LCA를 결과를 가지고 결론을 이끌고 환경친화적인 방향을 제시하는 단계이다. 해석 단계에서는 두개의 작은 단계를 가지고 있는데 한가지는 중요한 이슈(significant issues or key issues)를 도출해 내는 단계와 평가를 하는 단계로 이루어진다. 평가단계에서는 LCA의 결과물의 신뢰성과 확실성을 위해서 완전성(Completeness), 민감도(Sensitivity), 일관성(Consistency)등의 검사를 수행하기도 한다. 물론 해석 단계에서는 환경친화적인 방향을 제시할 수 있으나, 실제로 기업이나 기타 공공기관에서 이 결과를 받아들이고 시스템을 개선하는 데에는 그밖에 경제성이나, 기술, 제품의 내구성, 시장성, 제품의 기능 등의 다른 많은 경

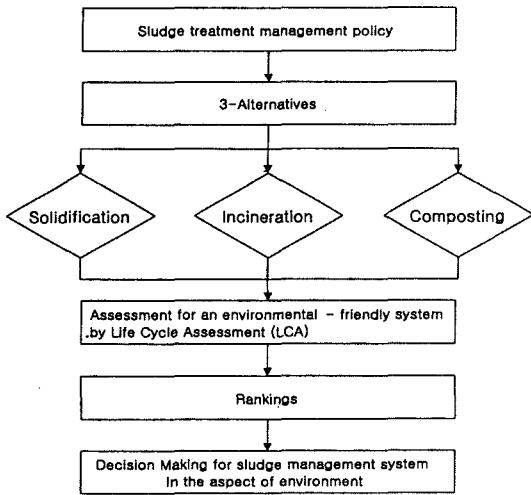


Fig. 3. Overview of the study.

제적, 사회적인 요인이 매우 복잡하게 얽혀 있기 때문에 표준화 대상이 힘들며, 따라서 국제 표준화 기구에서는 개선평가단계를 제외시키고 대신 해석(Interpretation)의 단계로 대체하였다.

3. 연구방법

본 연구는 목록분석과 전과정영향평가는 ISO 문서에 기초하여 수행하였으며, Fig. 3 에서와 같이 3가지 대안에 대한 LCA를 수행하고 가장 환경 친화적인 하수슬러지 처리방식을 찾고자 하였다.

3.1. 처리시스템

본 연구의 대상이 되는 시스템은 소각시스템, 퇴비화 시스템, 고품화 처리 시스템의 세 가지이며, 소각시스템은 구리시 하수처리장에 위치한 소각로를 기준으로 하였으며, 퇴비화 시스템은 난지도 하수처리장에 pilot scale로 설치되어 운영중인 퇴비화 시설의 운영자료를 사용하였다.

3.1.1. 소각

Fig. 4 는 대상 시스템인 구리시의 소각 공정을 도식화하여 나타낸 것이다. 하수처리장에서 발생한 슬러지는 소각시설로 이송되어 투입된다. 소각로로 투입되기 전, 건조시설에서 스팀에 의해 건조되어 함수율을 낮추게 된다. 소각로는 유동상 소각로이며, 소각로에서 발생한 배가스는 폐열교환기에서 가스에 의해 열교환이 일어나며 배가스에서 이렇게 얻어진 폐열은 다시 연소공

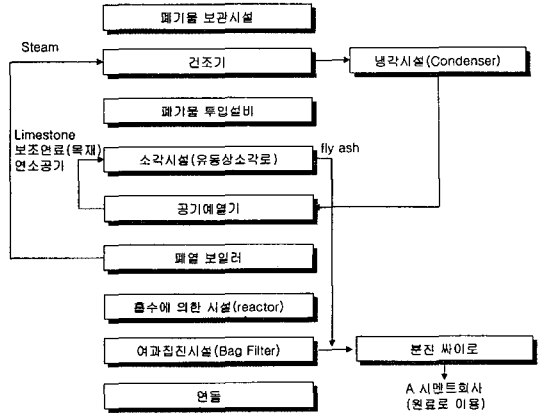


Fig. 4. Flow diagram of incineration process in Kuri.

기를 예열하는데 재사용된다. 배기가스 처리시설은 Bag filter를 이용하며 연돌로 배출되기 전에 먼지와 SO_x의 농도를 낮춘다. 포집된 먼지와 발생한 소각재는 함께 모아서 분진으로 배출되는데 이는 A시멘트회사에서 원료로 사용하기 위해 전량 회수해 가는 것으로 조사되었다.

3.1.2. 퇴비화

난지도 하수처리장에 pilot로 설치되어 운영중인 퇴비화 시설은 기존의 기계식 퇴비화 시설이 아닌 통풍식 방식의 퇴비화 시설이다. 이 시설은 풍압조절밸브를 이용한 발효조의 막힘방지 공법으로 설치된 시설물로서 발효조에 일정하게 공기공급량을 유지하는 공기공급시스템이다. 크게 발효조와 집수정으로 이루어졌으며, 발효조의 바닥은 기울기 처리에 의해 자연배수가 이루어

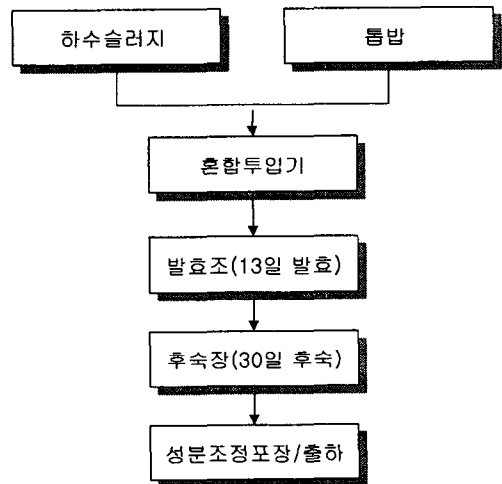


Fig. 5. Flow diagram of composting process in Nanjido.

지도록 만들어졌다. 발효조의 바닥에 배수기울기를 주어 침출수와 오니 등의 자연배출을 유도하였다. 집수정으로 모이는 원차재 침출수는 발효조의 온도변화에 따른 적절한 습도(60~70%)를 맞추기 위해 recycling 된다. Fig. 5 에 퇴비화 처리공정을 나타내었다. 하수슬러지와 톱밥을 혼합투입기에 넣어 발효조에 투입을 한 후 약 13일 발효와 30일 후숙을 거쳐 퇴비화 시킨다.

3.1.3. 고행화

슬러지 고행처리 시스템은 폐수슬러지에 고행재(생석회, 시멘트)를 일정량 투입하여 기계적으로 혼합시킴으로써 생석회 및 시멘트 고행재에 의한 수화반응, 이온교환반응, 포졸란반응, 탄산화 반응 등이 유발되어 무게감량 및 악취가스 등의 발생을 억제하고 불리, 화학적으로 비교적 안정한 물질로 변화시키는 공정이다. 처리된 슬러지는 물성이 개질되어 매립복토재로 재활용이 가능하다.

Fig. 6 에 고행화처리시설의 공정도를 간략히 나타내었다. 슬러지는 먼저 전처리되어 이물질 제거, 함수율 균등화 등 간단한 전처리를 거치게 되며, 이때 슬러지의 함수율은 약 75%된다. 전처리된 슬러지는 1차혼합기에서 생석회 5%가량과 혼합되며, 혼합기를 거쳐서 2차적으로 생석회(5%)와 시멘트(10~13%)를 투입한다. 이러한 과정을 거친 슬러지는 3일간의 숙성과정을 거치며, 고행된 슬러지의 함수율은 약 40~45% 가량 된다.

3.2. 목적 (Goal)

본 연구의 목적은 하수처리의 모든 과정을 거쳐 최종적으로 발생한 하수슬러지를 처리하는 방안으로 소각하는 경우, 퇴비화 하는 경우, 고행화 처리하는 경우에 대

하여 각각의 환경성을 평가하고 가장 환경친화적인 슬러지 처리방식을 찾는 데 목적이 있다. 따라서 이 연구의 결과물은 폐기물 처리 정책을 연구하는 정책입안자에 대한 참고자료로 이용될 수 있다.

3.3. 기능, 기능단위, 참고흐름(function, functional unit and reference flow)

하수처리장에서 발생하는 슬러지를 처리하는 것이 슬러지 처리시스템의 기능이 되며, 따라서 하수 슬러지 1톤을 기능단위 및 참고 흐름으로 하였다.

3.4. 시스템경계

시스템경계는 폐기물의 배출에서부터 수송단계를 거쳐 처리되는 과정과 처리 후 최종적으로 발생한 배출물의 처리까지를 전과정으로 하였다. 소각과 퇴비화 시설은 하수처리장에 설치되어 있기 때문에 슬러지에 의한 수송은 일어나지 않는 것으로 보았다. 다만 소각시 보조연료로 사용되는 목재와 퇴비화의 부차재인 톱밥의 수송은 고려하였다. 고행화 처리시설의 경우는 하수처리장이 아닌 매립지에 위치하였기 때문에 하수슬러지에 의한 수송과 고행화에 소요되는 시멘트와 생석회의 수송도 함께 고려하였다. 그리고 시스템범위의 중심이 되는 소각시설, 퇴비화시설, 고행화시설의 운영 과정에서 발생하는 환경영향을 고려하였다. 처리시설을 거친 후 배출되는 폐기물이 최종적으로 사용되는 지점으로 수송되는 과정까지를 시스템의 경계로 보았다. 소각재는 시멘트회사의 원료로 사용되기 위해 수송되며, 고행화 처리시설을 거친 슬러지는 매립지에서 사용되므로 수송이 일어나지 않는 것으로 보았다. 퇴비는 아직까지는 판매

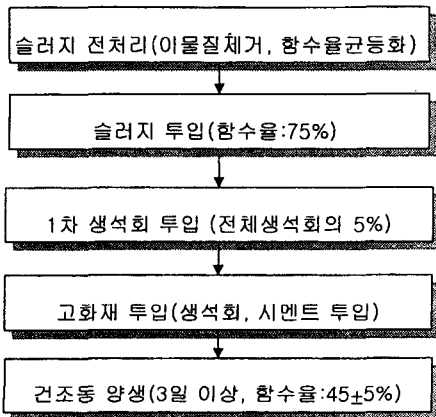


Fig. 6. Flow diagram of solidification.

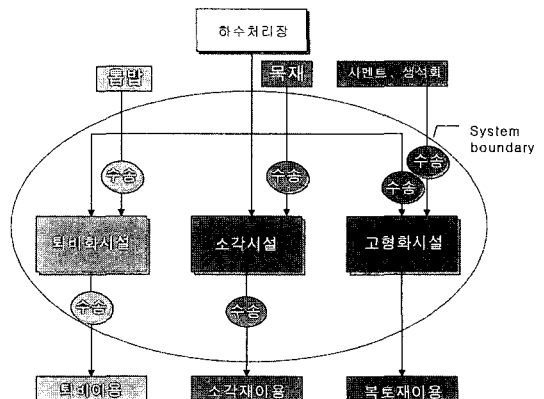


Fig. 7. System boundary of 3-alternatives.

가 법적으로 허용되지 않고 있는 상황이므로 판매망에 따른 정확한 수송거리를 예측하기 어려우나, 일단 합리적인 판단에 의해서 근거리 수송이 일어나는 것으로 고려하였다. 시스템의 시간적 경계는 1년으로 하였으며, 지리적 경계는 한국 내로 하였다. Fig. 7에 시스템경계를 도시하였다.

3.5. 데이터

모든 전과정에 걸쳐 발생하는 자원소모와 환경오염물 배출목록을 작성하는데 필요한 데이터 범주는 에너지, 천연자원, 대기배출물, 수계배출물, 폐기물, 방사능폐기물 등으로 선정하였다. 3가지 대안 공정에 대한 데이터는 1999년 1월 1일에서부터 1999년 12월 31일까지의 현장 운영 데이터를 이용하였으며, 현장 데이터 취득이 어려운 경우 그 밖에 1998년에서 2000년 사이의 문헌자료 및 기타 유사공정의 데이터를 참고하였다.

기타 전력 에너지 및 수송 데이터는 1999년에 작성된 국내 전력 및 수송 데이터베이스를 사용하였다.

3.6. 전과정평가 방법

전과정 목록분석 방법은 ISO 문서에 기초하여 수행되었으며, 할당은 공정내의 물리적인 인과관계를 파악하였으며 주로 중량에 의한 물리적인 특성에 의하여 할당을 하였다. 목록분석에 사용된 data는 스웨덴의 LCAiT내에 있는 데이터베이스를 이용하였다.

전과정 영향평가는 분류화, 특성화, 정규화 및 가중치 부여 단계로 이루어 졌으며, 먼저 영향범주로는 무생물 자원고갈(Abiotic Resource Depletion; ARD), 지구온난화(Global Warming; GW), 오존층고갈(Ozone Depletion; OD), 산성화(Acidification; Acid), 부영양화(Eutrophication; Eut), 광화학 산화물 생성(Photochemical Oxidant Creation; POC), 생태독성-수계(Eco-Toxicity to water; ET) 및 인간독성-대기(Human Toxicity to air; HT)의 영향범주를 이용하였다.

특성화는 여러 가지 방법 중 가장 널리 이용하는 상용인자모델을 이용하여 해당 목록항목의 잠재적인 환경영향을 평가하였다.

정규화는 국내 정규화 기준값⁴⁾을 사용하였으며, 가중치 부여는 한국형 Eco-indicator방법을 이용하여 수행하였다.⁵⁾

3.7. 가정 및 한계

전과정 평가를 수행하는데 있어서 현실적 상황에 따

라 여러가지 가정을 설정하였으며, 본 연구에서 설정한 가정은 다음과 같다.

첫째, 고품화 처리시설은 현재 하수슬러지가 아닌 인근 공장으로부터 운반된 산업폐수의 폐수슬러지를 처리하고 있다. 그러나 최근 인근지역의 하수슬러지를 이용하여 시설을 운영할 예정이며, 따라서 고품화 처리시설도 하수슬러지를 대상으로 운영하고 있는 것으로 가정하였다.

둘째, 슬러지 및 목재, 톱밥, 시멘트 등의 부자재 수송거리는 지도상의 거리를 기준으로 하여 왕복거리를 계산하였다. 그리고 완성된 퇴비는 현재 판매되고 있지 않기 때문에 퇴비 판매에 따른 수송거리는 10 km로 가정하였으며, 이는 2000년 현재 수송비용을 기준으로 할 때, 수송거리가 10 km를 넘게 되면 퇴비 생산비용과 수송비용의 합이 일반 비료 가격을 상회하게 되며, 따라서 현실적으로 10 km 이상의 판매망은 불가능하다고 보고 설정하였다.

셋째, 수송시 연료사용량은 11.5톤 트럭을 이용하여 국도(60 km/h)와 고속도로(80 km/h)를 정속으로 주행하여 수송할 때를 기준으로 한 diesel 소비량 계산식에 의해 구하였다.

넷째, 목록 데이터들은 이미 구축되어 있는 데이터베이스와 현장에서 취득 가능한 자료를 중심으로 하였기 때문에, 시간적 범위가 모두 일치하지는 않는다. 전력과 수송 부문의 데이터베이스는 99년 기준으로 구축된 것이며, 현장에서 얻은 처리 시설의 운영자료는 1998년부터 2000년 사이의 자료들을 사용하였다.

다섯째, 환경성 분석이 슬러지 처리공정별로 한 곳만 지정하여 수행되었으며, 따라서 LCA수행과정 및 결론이 일부 제한적일 수 있다.

4. 연구결과

4.1. 전과정 목록분석 결과

폐기물 처리에 대한 소각, 퇴비화, 고품화 공정은 하나의 단위공정으로 볼 수 있으며, 전체공정이 단일공정으로 이루어졌다고 보았다. 그 결과를 기능단위 하수슬러지 1톤당으로 계산하여 처리시설에 대한 목록분석 결과를 Table 1, Table 2, 그리고 Table 3에 각각 나타내었다.

소각과 퇴비화, 고품화 시스템 중에서 각각의 처리시설에 대한 목록분석결과 기능단위에 대한 전력 소비 및 기타 에너지 소비는 소각이 가장 높고, 고품화 처리가

Table 1. Input and output materials in incineration process
(기능단위 1톤당)

구 분	조사항목	단위	소각공정
투입물			
에너지 소비량	전력	MJ/ton	288
	경유	MJ/ton	42.6047
	목재	MJ/ton	772.2426
배출물			
대기	먼지	kg/ton	0.0920
	CO ₂		336.336
	CO		0.2469
	SO _x		0.2800
	NO _x		0.1304
	HCl		0.0332
	매연		1 도
	악취		2 도이하
폐기물	소각재	kg/ton	192.3602
	Pb		N.D.
	Cu		0.043
	As		N.D.
	Hg		N.D.
	Cd		N.D.
	Cr ⁶⁺		N.D.
	CN		N.D.
수질	COD	kg/ton	측정하지 않음
	Nitrate		측정하지 않음
	T-P		측정하지 않음
	T-N		측정하지 않음
에너지		MJ/ton	시스템내 이용

가장 낮았다. 소각의 경우 슬러지 1톤당 총 에너지 소비 값이 330.6047 MJ/ton이며, 퇴비화의 경우 64.1475 MJ/ton, 고형화의 경우 9 MJ/ton으로 나타났다. 따라서 전력소비에 따른 환경부하는 고형화가 가장 낮게 나타났다.

그러나 고형화 처리의 경우 시멘트, 생석회 등의 원료 소비가 나타나므로 이에 대한 생산공정까지 포함한 다면 매우 높은 환경부하를 나타낼 것으로 예측된다.

처리시설 운영에 따른 환경부하를 살펴보면 앞서 퇴비화가 가장 낮은 환경부하를 나타내고 있다. 그러나 이

Table 2. Input and output in composting process
(기능단위 1톤당)

구 분	조사항목	단위	퇴비화 공정
투입물			
에너지 소비량	전력	MJ/ton	64.1475
	경유	MJ/ton	-
원료소비	톱밥	MJ/ton	0.09
	통기개량재	m ³	재이용
배출물			
대기	CO ₂	kg/ton	792.367
	CO		해당사항 없음
	SO _x		-
	NO _x		-
	HCl		-
	NH ₃		-
	악취		2도이하
	수질		COD
Nitrate		측정하지 않음	
T-P		측정하지 않음	
T-N		측정하지 않음	
폐기물	퇴비화잔재물	kg/ton	0.12
퇴비		ton/ton	0.674

는 토양에 대한 퇴비의 영향이 극히 미비하거나 없다는 가정 하에 성립한 것이다. 즉, 퇴비화 한 이후에는 환경에 부정적인 영향을 고려하지 않았으므로 이에 대한 좀 더 정확한 실험에 의한 데이터가 뒤따라야 할 것이다.

수송에 의한 영향을 고려해 보면, 소각공정은 목재와 소각재의 수송이 있고, 퇴비화는 톱밥과 완성된 퇴비의 수송, 고형화의 경우 시멘트와 생석회 및 슬러지의 수송까지 포함되므로 고형화에 의한 처리에서 수송이 가장 많이 일어난다. 3가지 시스템에서 발생하는 수송에 따른 연료소비량을 고려하면 퇴비가 총 2,629 kg/yr로 가장 적고, 소각은 총 12,736.9 kg/yr, 고형화는 총 194,277.3 kg/yr로 가장 높은 연료소비량을 나타냈다. 이에 따라 수송부문에 대한 환경배출부하는 고형화 처리가 가장 높게 나타났다.

4.3. 전과정 영향평가 결과 및 해석

특성화된 환경결과 3가지 모든 시스템에 있어서 모두

Table 3. Input and output in solidification process
(기능단위 1톤)

구분	조사항목	단위	고형화공정
투입물			
에너지 소비량	전력	MJ/ton	9
	경유	MJ/ton	-
원료소비	시멘트	ton/ton	0.13
	생석회	ton/ton	0.1
배출물			
대기	먼지	kg/ton	-
	CO		-
	SOx		-
	NOx		-
	HCl		-
	약취		-
수질	COD	kg/ton	없음.
	Nitrate		없음
	T-P		없음
	T-N		없음
폐기물		kg/ton	없음
복토제		ton/ton	75

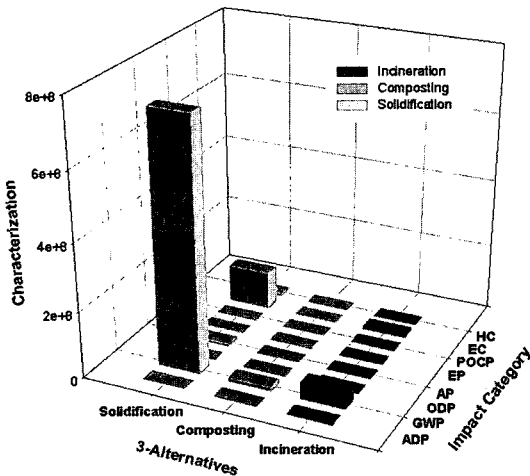


Fig. 8. Characterization results of 3-Alternatives.

지구온난화(GW)범주에 큰 영향을 미치는 물질은 CO₂, CO 등이며 이는 공정 내에서 발생하는 양보다 주로 수송과정에서 일어난다. 또한 생태독성 범주에는

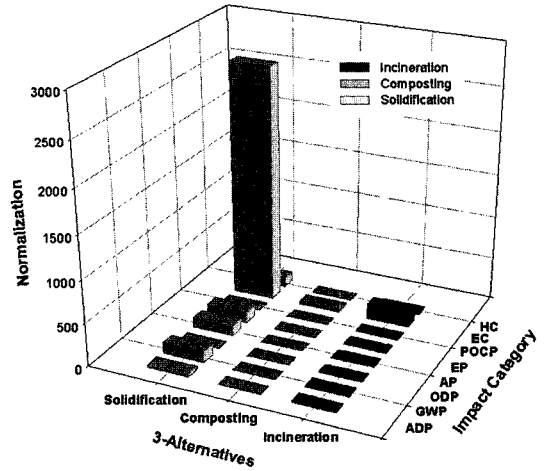


Fig. 9. Normalization results of 3-Alternatives.

Zn 그리고 Phenol등이며 이것 역시 주로 수송과정에서 일어난다.

Fig. 8 에 각 슬러지 처리방식에 대한 환경영향범주별 특성화된 영향을 나타내었다. 연구의 목적이 3가지 대안에 대한 환경영향을 알아보기 위함이며 따라서 이들에 대한 환경영향이 얼마나 미치는 지 아는 것이 우선 중요하다. 그러나 영향범주별 상대적인 크기 비교를 하기 위해서 다시 정규화 과정을 거쳤으며, 정규화 값은 국내 정규화 기준값을 이용하여 수행하였다. Fig. 9 에서 알 수 있듯이 고형화의 경우 다른 영향범주보다 생태독성에 대한 영향이 컸으며, 그밖에 부영양화, 지구온난화, 산성화등에 미치는 환경영향이 컸음을 알 수 있다. 그밖에 다른 대안 역시 비슷한 경향을 보였다.

또한 영향 범주별 가중치를 부여하여 결과를 나타내었다. 가중치 부여는 한국형 Eco-indicator 방법을 이용하여 수행되었다. 가중치가 부여된 환경영향 역시, 생태독성에 대한 영향이 가장 컸으며, 정규화 값과 비슷한 경향을 나타내었으며, 단지 수치적인 값의 차이만 나타내었다.

정규화 및 가중치 부여를 거친 환경영향을 계산한 결과, 고형화가 환경영향이 가장 크게 나왔으며, 고형화에 대한 가중치 부여된 환경영향을 Fig. 10 에 나타내었다. 생태독성에 대한 영향이 가장 컸으며, 다음으로 지구온난화, 부영양화 등의 순으로 나왔으며, 이 밖에 오존층 고갈이나 광화학산화물생성에 대한 영향은 미미한 것으로 나타났다.

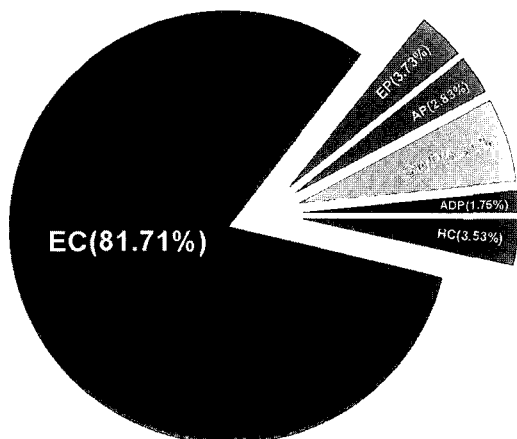


Fig. 10. Weighted impact of the solidification alternative.

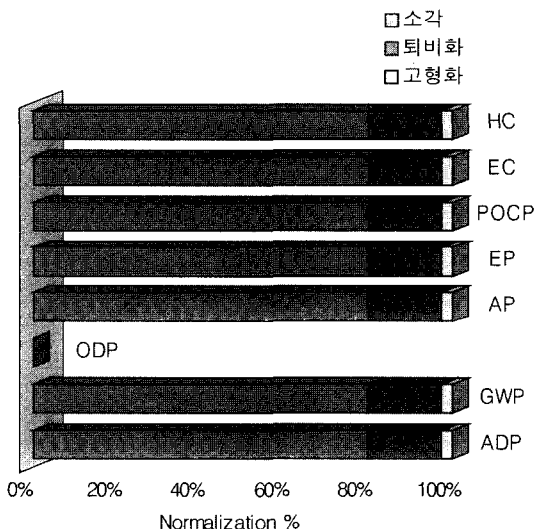


Fig. 12. Normalized impact in electricity process of 3-alternatives.

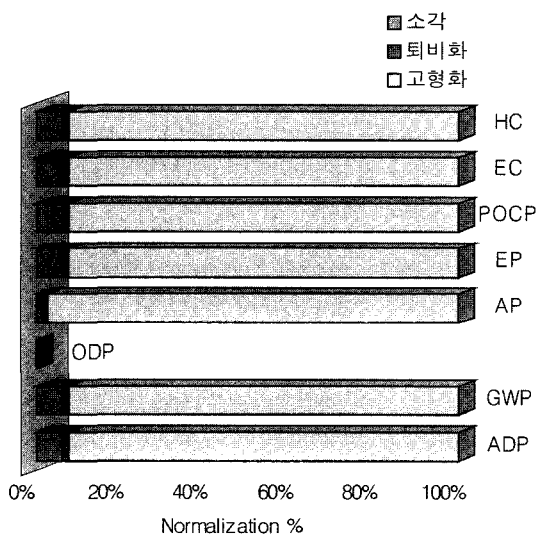


Fig. 11. Normalized impact in transport process of 3-alternatives.

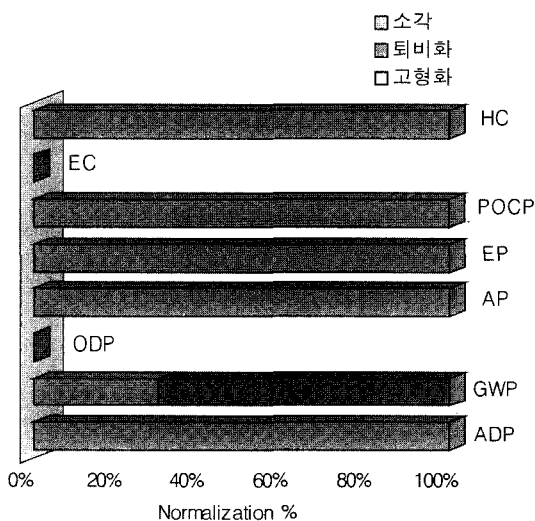


Fig. 13. Normalized impact in each process of 3-alternatives.

고형화가 환경에 대한 영향이 큰 것으로 나타났으며, 그 중 생태계독성에 대한 영향이 가장 큼을 알 수 있다. 이는 고형화의 경우 슬러지, 시멘트 및 생석회를 수송하는 과정에서 매우 높은 환경부하가 발생할 것으로 예측하였으며, 이는 다음에 나오는 공정별 환경영향에 대한 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13 에서 확인할 수 있다.

Fig. 12 그리고 Fig. 13 에서 보듯이 실제적인 전력이거나, 처리공정에 있어서는 가장 적은 비율로 영향을 미침에도 불구하고, Fig. 11 의 수송부분에 상당부분의 비

율로 환경영향이 있음을 알 수 있다.

따라서 수송 및 전력부분 대한 환경영향이 실제적인 처리공정부분의 환경영향보다 상당량 중요하다는 것을 알 수 있다. 바꾸어 말하면, 적어도 하수슬러지 처리 공정에서는 3가지 대안방법을 선택할 때 수송부분의 영향을 최소화할 수 있도록 하수처리장과 가까운 곳에 공정을 세우고 하수슬러지 처리시설을 운영하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

6. 결 론

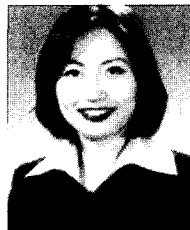
본 연구는 하수슬러지의 소각, 퇴비화, 고�형화 처리공정에 대한 환경영향을 전과정 평가를 수행함으로써 평가하고, 그 결과 환경친화적인 하수 슬러지의 처리방식을 선택하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 이끌어 내었다.

1. 전과정평가를 수행한 결과 잠재적인 환경영향에 있어서 하수슬러지 처리방식은 퇴비화, 소각, 고�형화의 순서로 환경적으로 우수한 처리방식으로 평가되었다.
2. 목록분석결과 3가지 시스템 모두 수송 및 전력에 대한 항목이 주가 되어 나타났으며, 목록분석값의 대부분을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 부자재의 수송거리가 긴 고�형화 공정에서 두드러지게 나타났다.
3. 소각의 경우 공정에 소비되는 에너지 및 연료의 양이 많고 대기오염물이 발생하여 생태계독성 및 지구온난화에 상당량의 잠재적이 환경영향을 미치는 것으로 나타났다. 이와는 대조적으로 고�형화의 경우 톤당 전력소비가 가장 낮고, 실제 처리공정에서도 환경영향이 적었으나 슬러지, 시멘트 및 생석회를 수송하는 과정에서 매우 높은 환경부하가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 무조건 소각시설을 혐오시설로 분리하여 환경적으로 고려되는 처리방식에서 제외시키면 안 된다는 것을 의미하며, 따라서 폐기물 처리시설 설계시 수송거리를 최적화하여 수송부분에 의한 환경영향을 최소화하는 것이 중요하다.
4. 전과정평가의 한계로서 수행된 전과정평가는 하수슬러지 처리방식에 대한 각각의 시스템의 잠재적인 환경영향만을 평가할 수 있다. 실질적으로 처리시스템을 선정함에 있어서 의사결정의 근거로 활용되기 위해서는 그 외에 경제성이나 기술적인 측면에 대한 평가가 반드시 병행되어야 하며, 이는 LCC(Life Cycle Costing)등의 경제적 또는 기술적인 분석도구를 통하여 좀 더 유용한 분석결과를 얻을 수 있다. 또한 좀 더 객관적인 전과정평가의 방법론 및 영향 평가를 위한 각종 상용인자 개발 및 국내실정에 맞

는 데이터베이스의 구축이 필요하다.

참고문헌

1. 환경부 홈페이지, <http://www.me.go.kr/>
2. ISO 14040, Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework, 1-12, International Organization for Standard, Switzerland (1997).
3. ISO 14041, Environmental management-Life cycle assessment-Goal and scope definition and inventory analysis, 1-22, International Organization for Standard, Switzerland (1998).
4. 허영채, 서상원, 하상선, 이건모 : “한국형 환경영향 평가 지수 방법을 위한 국내 정규화 기준값의 산정”, 한국전과정평가학회지, 2(1), 69-78 (2000).
5. Kun M. Lee : “A weighting method for the Korean Eco-Indicator.”, The International Journal of LCA, 4(3), 161-166 (1999).
6. 한국품질환경인정협회 홈페이지, <http://www.kab.or.kr>
7. 한지영 : “전과정평가(LCA)를 이용한 하수슬러지의 처리 방식 비교평가”, 서울대학교, 서울 (2000).
8. 조혜진 : “전과정평가를 이용한 음식물 쓰레기 처리방식 평가”, 석사학위논문, 서울대학교, 서울 (1998).
9. ISO 14042, Environmental management-Life cycle assessment-Life cycle impact assessment, 1-16, International Organization for Standard, Switzerland (2000).
10. Dr. Neil Kirkpatrick : “Application of Life-Cycle Assessment to Solid Waste Management Practices”, 1-14, McGraw-Hill, NY (1996).
11. 노재성 : “전과정평가에서 주요 이슈 규명에 관한 방법론”, 석사학위논문, 이주대학교, 수원 (1996).
12. 권기홍 : “하수슬러지 관리 및 재활용 방안”, 첨단환경기술, 8(11), 1-9 (2000).



韓 芝 暎

- 2001년 서울대학교 지구환경시스템공학부 공학석사
- 현재 LG-EDS Systems Inc.
- E-mail; hjiyoung@hanmail.net

趙 熙 燦

- 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수
- 본 학회지 제10권 4호 참조

金 道 均

- 현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정
- 본 학회지 제11권 3호 참조