

공학석사 학위논문

하수슬러지 관리를 위한 전과정
평가(LCA)연구

- 부산시를 중심으로 -

지도교수 김 상 용

이 논문을 학위논문으로 제출함



2002년 2월

부경대학교 산업대학원

토목공학과

김 태 훈

이 논문을 김태훈의 공학석사 학위논문으로 인준함

2001년 12월 15일

주 심 공학박사 이 종 출



위 원 공학박사 손 인 식



위 원 공학박사 김 상 용



목 차

1 서론.....	1
1.1 연구배경 및 목적.....	1
1.2 연구범위 및 방법.....	2
2 이론적 고찰.....	3
2.1 LCA 기법에 관한 고찰.....	3
2.1.1 LCA의 정의.....	3
2.1.2 LCA목적 및 용도.....	3
2.1.3 LCA구성.....	3
2.1.4 LCA의 응용분야 및 연구성과.....	6
2.2 각국의 하수슬러지 관리 현황.....	8
2.2.1 하수슬러지의성상.....	8
2.2.2 국내현황.....	9
2.2.4 국외현황.....	12
2.2.3 부산시 슬러지 발생량의 추정.....	17
2.2.5 슬러지처분 방법.....	19
3 LCA를 이용한 부산시 슬러지 관리.....	24
3.1 전과정평가 목적 정의.....	24
3.2 전과정 범위 설정.....	24
3.3 전과정 목록 분석.....	25
3.3.1 수송.....	25
3.3.2 매립.....	27
3.3.3 소각.....	28
3.3.4 전과정목록표 작성.....	30

3.3.5	목록분석 결과해석.....	33
3.4	영향 평가.....	35
3.4.1	영향평가의 기준.....	35
3.4.2	결과해석.....	36
3.5	결과 및 고찰.....	38
4	결론.....	39
	참고문헌.....	41

그림 목차

그림 2.1 LCA의 일반적인 구성.....	4
그림 2.2 전과정 영향평가.....	5
그림 2.3 연도별 전국 하수슬러지 발생량의 변화.....	10
그림 2.4 연도별 부산시 하수슬러지 발생량의 변화.....	10
그림 2.5 부산시 슬러지발생량 변화의 추이.....	17
그림 3.1 수송시 대기오염 배출가스.....	26
그림 3.2 매립시 오염물질 배출량.....	34
그림 3.3 소각시 오염물질 배출량.....	34
그림 3.4 부산광역시 하수슬러지 1톤의 매립시 전과정영향평가 결과.....	37
그림 3.5 부산광역시 하수슬러지 1톤의 소각시 전과정영향평가 결과.....	38

표 목 차

표 2.1 부산시 하수슬러지 발생량	9
표 2.2 연도별 하수처리장의 변화.....	11
표 2.3 하수슬러지의 처리현황.....	11
표 2.4 하수슬러지 재이용 현황.....	12
표 2.5 일본의 하수슬러지의 처리처분 및 유효이용현황.....	13
표 2.6 유럽의 하수슬러지 발생량 및 처리현황.....	15
표 2.7 슬러지의 토양 살포시 오염물질의 한계.....	16
표 2.8 부산시 인구 및 하수량변화의 추이.....	18
표 2.9 각국의 퇴비중 주요 오염물질 기준.....	22
표 2.10 각국의 퇴비기준 분석 항목.....	23
표 3.1 슬러지 1t 수거·운반시 연료 사용량.....	25
표 3.2 경유 1ℓ 사용 시 대기오염배출물의 발생량.....	25
표 3.3 수송시스템(LCI).....	26
표 3.4 매립시 대기배출 가스량.....	27
표 3.5 매립장의 침출수 농도.....	27
표 3.6 매립장 장비사용(S매립장).....	28
표 3.7 슬러지 소각시 배출되는 배기가스 농도(H소각장).....	28
표 3.8 슬러지 소각장의 수계배출물 농도(H소각장).....	28
표 3.9 1kwh 전력사용으로 인한 배출물 발생량.....	29
표 3.10 매립시 전과정목록분석.....	30
표 3.11 소각시 전과정목록분석.....	32
표 3.12 영향평가 이용 기준.....	36
표 3.13 부산시 하수슬러지의 1톤 매립처분시 가치평가.....	36
표 3.14 부산시 하수슬러지의 1톤 소각처분시 가치평가.....	37

A Study on Life-Cycle Assessment for Sewage Sludge Management

-Attaching importance to Pusan Metropolitan city-

Tae-Hoon, Kim

*Department of Civil Engineering, Graduate School of Industry,
Pukyong National University*

Abstract

Sewage sludge treatment of Busan metropolitan city has been depending that most of the sludge has been throwing away in the sea while only the part of sludge produced in the Haeundae is incinerated. But Forbidding ocean disposal of waste has been applied all over the world since 1996 by London Dumping Convention in the 1993 and it is also expected to be applied in the Korea.

This study intends to suggest the prospersion we could treat that situation and to compare the environmental impact by using LCA. As the result of that, NO_x and CO during collection and transportation of sludge is produced a lot with 1.67E-4 kg/ton and 3.61E-5 kg/ton. So It is needed to decide treatment place more carefully and to minimize the carrying distance of traffic so that pollution would be decreased. It is needed to construct facility to withdraw CH₄ since the CH₄ is produced a lot during reclaiming disposal.

Finally It is concluded following. Even though each treatment has a merit or demerit, it is needed to select incineration than reclamation considering regional characteristic of Busan metropolitan city.

1 서론

1.1 연구 배경 및 목적

경제발전과 생활의 향상은 생활하수나 공업폐수의 증가를 가져왔고, 이에 따라 하천과 폐쇄성수역의 오염을 방지하기 위한 하·폐수처리장의 증가는 필연적이다. 이와 함께 처리장에서 발생하는 슬러지의 양 또한 증가하여 이를 효과적으로 처리, 처분하는 것이 주요 환경정책 과제중의 하나로 대두되고 있다.

우리나라의 생활하수 발생량은 1996년 약 1,500만톤/일이었으며 생활하수처리를 위한 하수처리장은 1996년에 79개소로서 하수처리량이 1,003만톤/일이었으나 1998년에는 114개소로 증설하여 하수처리량이 1,399만톤/일이며 2005년까지는 하수도 보급율의 80%까지 처리할 계획에 있다. 이와 같이 하수종말 처리시설은 계속 증설할 계획에 있으며, 이로 인한 하수처리시 부산물인 슬러지의 발생량도 매년 증가할 것으로 추정하고 있다.

하수슬러지와 같은 유기성폐기물의 현행 처리방법은 주로 매립, 소각 및 해양투기 등의 방법으로 처리되고 있으나, 폐기물의 소각처리는 폐기물의 부피를 보통 90% 이상 감소시킬 수 있는 매우 바람직한 방법이지만 대기오염을 가중시킬 가능성이 있고 설치비나 운영비가 매우 비싼 단점이 있으며, 매립은 적은 비용이 소요되지만 우리나라의 경우 국토가 협소하여 매립지의 확보가 어려운 실정이다. 또한 침출수로 인한 지하수를 오염시킬 가능성이 있으므로, 현행 유기성폐기물의 처리 방법은 많은 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 유기성폐기물의 재활용기술 개발이 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 부산시에서 발생하는 슬러지의 처분을 LCA기법을 적용하여 앞으로 계속 증가하는 슬러지를 지역특성에 맞는 지속 가능한 처분 계획과 방향을 제시하고자 한다.

1.2 연구 범위 및 방법

슬러지 처분을 위해 고려해 볼 수 있는 시나리오는 매립과 소각, 재활용 등이 있는데 현재 슬러지 재활용 부분에서는 개발이 진행중이고 실용화 단계에는 못 미쳐서 자료자체가 미흡하므로, 여기서는 매립과 소각에 있어서 환경에 미치는 영향을 비교해 보고자 한다. 뿐만 아니라 하수 슬러지의 함수율과 지역적 여건 때문에 슬러지 만을 소각, 매립하기는 극히 어려우므로 본 연구의 자료는 하수슬러지 자료와 일반 유기성폐기물 자료를 병행하여 사용하였다.

이용자료는 해당지방자치단체, 소각장, 매립장 등의 방문을 통한 내부자료 및 관련기관 등의 각종 자료와, 환경부 통계자료, 각 지자체의 통계자료 및 내부자료, 관련연구보고서 등을 사용하였다.

본 연구는 슬러지의 처분 방식이 비교의 대상이므로 슬러지가 배출된 시점부터 슬러지의 처분이 끝난 시점까지를 LCA의 범위로 정하였다. 각 처리 방식별로 슬러지의 운반과 처리, 그리고 처리 후 과정에서 나타나는 환경영향과 비용을 정량화하고, 정량화한 환경영향목록(Life Cycle Index)을 작성한 뒤 영향 평가의 과정을 거친다. 새로운 영향평가 방법론의 개발은 이 연구의 범위를 벗어나는 것이므로 기존의 영향평가 기법을 사용하였다.

이 연구의 구성은 본문 2장에서 슬러지 처분방법을 LCA기법으로 평가하기 위한 선행 연구로 이론적 고찰이 행해진다. 이론적 고찰은 LCA기법에 대한 일반적인 사항과 각국의 슬러지 관리 현황 및 슬러지 처분방법을 소개하였다. 3장에서는 슬러지의 처분방법을 실제로 평가해보고, 4장에서는 연구의 성과를 정리하고 이 논문의 한계 및 향후 연구과제를 제시하였다.

2 이론적 고찰

2.1 LCA 기법에 관한 고찰

2.1.1 LCA(전과정평가)의 정의

특정 제품(서비스 포함)의 전과정 즉, 원료 획득 및 가공, 제조, 수송, 유통, 사용, 재활용, 폐기물 관리 과정 동안에 소모되고 배출되는 에너지 및 물질의 양을 정량화하여, 이들이 환경에 미치는 영향을 총체적으로 평가하고, 이를 토대로 환경개선의 방안을 모색하고자 하는 객관적이며 적극적인 환경영향 평가방법이다.

2.1.2 LCA 목적 및 용도

LCA의 기본적인 목적은 환경적으로 건전하고 지속 가능한 발전을 실현하기 위하여 제품, 재료 등의 원료, 자원 채취, 제조공정, 유통, 소비활동, 폐기로 인한 자원, 에너지 소비 및 환경오염 부하를 최소화시키고 개선 방안을 모색하는데 있다.

전과정 평가의 가장 기본적인 용도는 기업, 정부 또는 소비자 단체 등 의사결정권자들에게 그들이 취하는 행동이 환경에 어떤 영향을 미치는가를 이해할 수 있는 정보를 제공하는데 있다. 즉, 의사결정권자가 여러 대안 중 하나를 선택할 때 경제적, 기술적, 사회적 측면 이외에도 환경적 측면을 고려한 후 최종결정을 내릴 수 있도록 하는 것이다. 결론적으로 전과정 평가는 의사결정의 보조 수단이라고 할 수 있다.

2.1.3 LCA구성

전과정 평가는 목적 및 범위정의(Goal and Scope Definition), 전과정 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 전과정 영향평가(Life Cycle Impact Assessment), 전과정 결과해석(Life Cycle Interpretation)의 4가지

로 구성된다. 이에 대한 구성도는 그림 2.1에서 보는바와 같다.

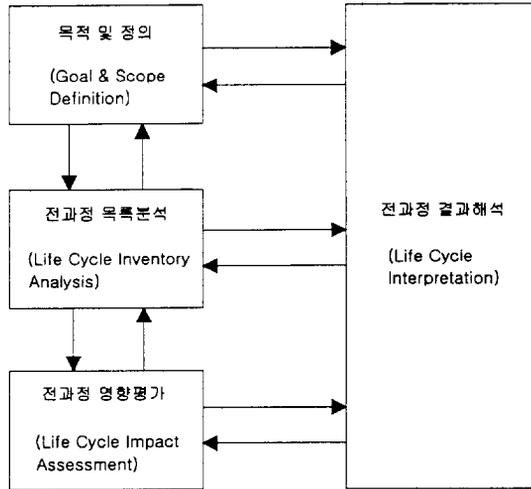


그림 2.1 LCA의 일반적인 구성

가) 목적 및 범위정의

여기에서는 연구의 목적, 범위, 기능단위(functional unit)등을 정하는데 연구의 범위 및 정도를 가다듬는 것이다. LCA는 그 사용목적에 따라 수집하는 자료, 분석방법, 결과가 다르기 때문에 우선 LCA를 어떠한 목적으로 사용할 것인가를 명확히 해야 한다. 또한, 모든 연구의 결과들이 도출된 이후에도 항상 연구 수행 목적에 부합되는가를 살펴보아야 한다. 만약, 목적 및 범위정의 단계에 비추어 데이터가 부족하거나 설정된 가정이 타당하지 못한 것으로 판명된 경우에는 목적 정의 단계에 부합하도록 이를 다시 보충하거나 수정해야 한다. 또한, 설정된 목적을 만족시키는 데이터나 타당한 가정을 구하지 못할 경우에는 목적 및 범위정의 단계가 다시 수정되거나 연구가 철회되고 재 시작해야 한다.

나) 전과정 목록분석

상품, 포장, 공정, 물질, 원료 및 활동에 의해 발생하는 에너지 및 천연 원료 요구량, 대기오염물질, 수질오염물질, 고형폐기물 배출량 등의 환경오염부하량 등에 대한 기술적, 통계적 자료구축과정이다.

다) 전과정 영향평가

영향평가 단계로 목록에서 제시된 항목에 가중치를 제시하는 과정이다. 일반적으로 이 단계는 특정한 잠재적인 환경영향들과 목록 데이터를 연결하고 이들 영향들을 이해하는 것을 포함한다. 아직 특정한 잠재적인 환경영향들과 목록 데이터를 일관되고 정확하게 연결시킬 수 있는 방법론들이 개발되지 못한 상황이다.

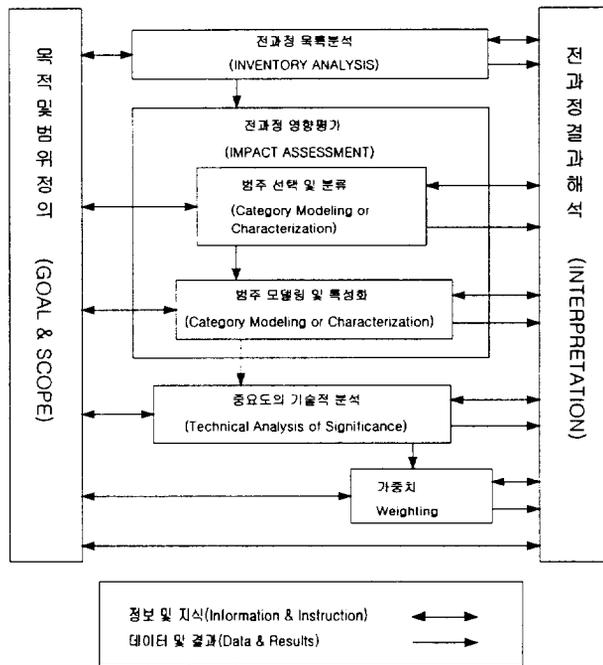


그림 2.2 전과정 영향평가(Impact Assessment in the LCA Framework)

라) 전과정 결과해석

전과정 결과해석 단계는 전과정 평가의 최종단계로서 목록분석과 영향평가 단계로부터 얻은 정보를 규명하여 검토하고 평가하는 체계적인 절차로 이를 통해 얻은 결론들은 목적 및 범위정의 단계에서 설정된 연구의 이용분야에 부합하도록 수행되어야 한다.

전과정 결과해석은 목록분석과 영향평가의 보다 기술적인 사안(technical matter)에 대하여 결과의 신뢰성을 주기 위해 설계된 정보의 의사 결정자(decision maker)에게 원활히 전달되도록 연결시켜 주는 단계이다. 그러므로 전과정 평가의 해석 단계의 적용에서 그 이전의 단계로 다시 돌아가는 반복적인 절차의 수행도 중요하지만 품질기능전개(Quality Function Deployment)나 전과정 비용평가(Life Cycle Costing, LCC) 해석의 결과를 이용하는 식으로 나아가는 것도 매우 중요하다. 결과 해석 단계 동안의 투명성의 확보는 필수적인 것이다. 선택, 선호도(preference), 가정이나 가치 판단(value judgment)등이 포함되었다면 최종 보고서를 통해 명백히 언급되어야 한다.

결과해석의 목적은 결론을 도출하고 LCA 혹은 LCI 연구를 위해 권고사항과 결과보고를 제공한다. 결과해석 단계에서는 해석의 결과가 이해하기 쉬워야 하고, 완전성과 일관성(completeness & consistency)이 있어야 하며, 목적 및 범위정의 단계에 부합해야 한다.

2.1.4 LCA의 응용분야 및 연구성과

가) LCA 국내 적용실태

선진국에서는 LCA를 친환경제품개발 및 환경비용절감에 활용하고 있다. 대표적으로 미국의 3M, 휴렛팩커드, IBM, XEROX사, 유럽의 PHILIPS, SEMENS, 일본의 도시바, 일본IBM, 마쯔시다, 히다찌 등을 들 수 있다. 미국의 3M에서는 LCA모델을 개발하여 제품의 환경영향평가, 비용적합성 평가에 사용하고 있다. 휴렛팩커드사에서는 LCA를 통해 제품을

회수하여 연간 2천만불의 절감효과를 거둔 바 있다. IBM사에서도 LCA를 통한 환경부하 조정을 통해 환경성 극대화를 꾀하고 있다. XEROX사는 LCA 적용을 통해 회수, 재활용, 재사용을 실시하여 연간 1억달러 정도를 절감하였다.

우리나라에서는 1993년 경실련 환경개발센터가 “유리병 재활용 활성화 방안에 관한 연구”를 발표함으로써 처음으로 LCA가 소개되었다. 그 이후로 서울시립대학교와 한국과학기술원을 중심으로 논문이 발표되었으며, 공업진흥청, 상공회의소, 환경과학연구협회의 후원하에 LCA연구가 진행되었다. 국내의 LCA연구는 아직 미흡한 단계이긴 하나 최근 들어 관심을 보이는 단체가 하나 둘씩 늘어나고 있다. 환경마크협회는 LCA를 환경마크 부여기준으로 책정하고 올해 안으로 세탁기와 에어컨을 포함한 대상제품에 대한 LCA를 실시할 계획이다. 한국품질환경인증협회도 LCA 관련 정보를 수집, 보급하고 교육프로그램을 개발하기 위하여 1996년 9월 'LCA 센터'를 건립하였다.

특히 가전3사를 중심으로 90년대 중반부터 시범적용을 시작하였는데, 삼성의 경우 95년도 냉장고 LCA를 시작으로 하여 현재까지 TV 모니터, 세탁기, 에어컨등의 LCA를 추진중이다. LG의 경우 냉장고, 모니터, 반도체 등에서 LCA를 실시중이며, LCA를 제품개발체제에 접목하여 친환경제품 개발에 적극적으로 활용할 계획이다. 대우의 경우 자동차를 대상으로 2차년도에 걸쳐 LCA를 수행하였다.

현재 기업에서 LCA는 시범단계를 넘어서 친환경제품개발에 접목하는 단계까지 발전하고 있으나, LCA 실시에 따르는 비용, 인력, 사회적 인프라의 부족으로 어려움을 겪고 있다. 특히 국내의 경우 기본적인 데이터베이스조차 구축되어 있지 않은 상태이기 때문에 외국의 데이터베이스를 일부 도입해서 사용하기도 하고, 중요한 부분의 경우 기업에서 직접 데이터베이스를 구축하고 있는 상태이다. LCA를 보다 효과적으로 정착시키기 위해서는 기본적인 데이터베이스 구축이 필수적인데, 현재 국내에서는 국

내 전력에 대한 전과정 목록 구축, 포항제철의 철강 관련 전과정 목록 구축 등이 진행되거나 완료되어 있는 상태이다. 이러한 기초적인 데이터베이스 구축을 바탕으로 하여 신뢰성있는 환경통계원 확보, 우리 실정에 알맞은 영향평가 방법의 개발 등이 계속되어야 LCA가 제대로 자리잡을 것이다.

2.2 각국의 하수슬러지 관리현황

슬러지는 통상 상수, 공업용수, 산업용폐수, 하수 및 분뇨의 수처리 과정에서 발생하는 최종산물로서 이 슬러지가 생성되는 과정은 미생물이 폐수속에 용존되어 있는 영양물질을 섭취하여 증식된 후 이화학적으로 부상 또는 침전시켜 분리된 미생물덩어리를 말한다. 따라서 슬러지의 주요 특성은 많은 유기성물질을 함유하고 있으며 최근에 들어서는 폐기처분 하여야 할 폐기물에서 자원으로 재활용 가능한 원료물질로 보는 경향이 있다. 이러한 맥락에서 미국과 캐나다에서는 슬러지를 biosolids(생물토양)이라고 부르고 재활용하고 있는 실정이다.

2.2.1 하수슬러지의 성상

일반적으로 하수슬러지의 성상은 도시의 구조, 하수의 배제방식, 생활양식, 하수처리방식 등에 영향을 받으며 또한 이러한 슬러지중에는 중금속을 비롯한 다양한 종류의 유해물질이 함유되어 있다. 예를 들면 사진 현상과정의 인화재료나 페인트, 농약등이 하수관거로 유입되는 경우, 그리고 각 가정에서 사용되고 있는 수도관로의 부식에 의한 Zn, Cd, Cu 및 Pb등의 누출, 강우시 지표에 침전된 자동차 배기가스중 Pb의 하천 유입 및 하·폐수처리장에서 사용되고 있는 여러 가지 약제에 포함된 미량 중금속류가 슬러지내의 중금속원이다.

하수슬러지내에 포함된 중금속의 양은 처리장에 따라서 달라진다. 그 이

유는 도시하수와 공장폐수의 비율, 처리공정 등 많은 변수들이 있으며, 또한 같은 처리장이라 하더라도 시료채취시기나 장소에 따라 매우 변화가 크기 때문이다. 일반적으로 슬러지는 처리단계를 거칠수록 중금속의 농도가 증가하고 있으며 이는 슬러지내 유기물질의 농도가 점차 낮아지기 때문이다.

2.2.2 국내 현황

'98년말 하수종말처리장은 114개로 시설용량 16,616천톤/일, 공단폐수종말처리장은 30개소로 시설용량은 645천톤/일이고, 농공단지 폐수종말처리 시설은 88개소로 56천톤/일로서 총 17,317천톤/일로서 매년 처리시설이 신규 및 증설됨에 따라 증가되는 경향을 보여주고 있다. 하수처리 종말시설에서 발생하는 하수슬러지는 폐수처리량과 밀접한 상관관계를 갖고 있는데 '96년 전국79개소 하수처리장에서 발생한 슬러지는 하수 발생량의 0.03%에 해당되는 연간 128만톤 발생하며 현재와 같은 추세로 하수슬러지가 발생된다면, 2001년에는 212만톤/년, 2006년에는 285만톤/년이 발생될 것으로 예상된다. 그림 2.3에서는 연도별로 전국 하수슬러지 발생량의 변화를 나타내었다.

표 2.1 부산시 하수슬러지 발생량('99)

(단위:톤/년)

처리장	발생량	처분량						미처분량
		계	재이용	육상매립	소각	해양투기	기타	
수영	34,707	34,707	2,457	-	-	32,250	-	-
장립	57,852	50,642	-	-	-	50,642	-	7,210
남부	12,243	12,224	208	-	-	12,016	-	19
해운대	10,693	10,693	-	-	9,859	834	-	-
부산광역시	115,495	108,266	2,665	-	9,859	95,742	-	7,229

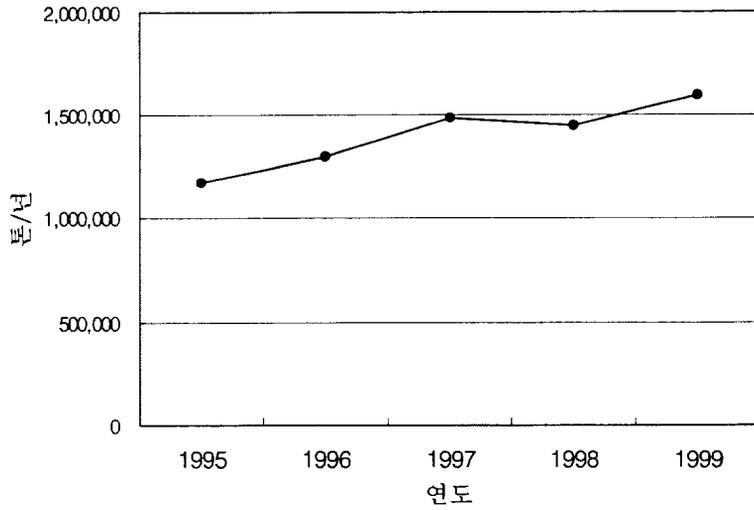


그림 2.3 연도별 전국 하수슬러지 발생량의 변화

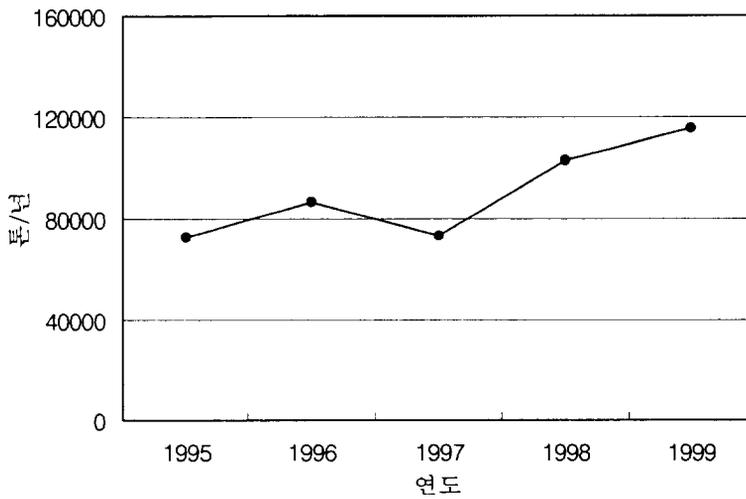


그림 2.4 연도별 부산시 하수슬러지 발생량의 변화

표 2.2 연도별 하수처리장의 변화

연도	처리장 수	시설용량 (천m ³ /일)	실제 처리량 (천m ³ /일)	슬러지 Cake 발생량 (톤/년)	단위슬러지 발생량 (kg/m ³)
1995	71	9,653	9,039	1,171,205	0.355
1996	79	11,452	10,037	1,298,409	0.354
1997	93	15,038	12,150	1,478,229	0.333
1998	114	16,074	13,995	1,447,170	0.283

한편 하수종말처리장에서 발생하는 하수처리슬러지는 전체 하수슬러지 발생량의 약 76%인 968천톤은 수도권 매립지 폐기물처리장에 매립으로, 20%는 일정 해역에 투기되어 처리되고 있으며, 3.5%인 45천톤만 퇴비 등으로 재활용되고 있으며, 하수슬러지처리에 소요되는 비용은 연간 약 240 억원으로 처리방법별로 구분하여 보면 매립 91억원, 해양투기 47억원 및 재이용이 약 2억원으로 나타났다.

표 2.3 하수슬러지의 처리현황(전국 '96)

구분	계	육상매립	해양투기	재이용	소각	기타
처리량(천톤)	1,275.8	967.8	258.8	44.9	0.3	4.0
비율(%)	100	75.9	20.3	3.5	-	0.3
처리비용(백만원)	23,998	19,111	4,714	162	11	-
처리단가(원/톤)	78,236	19,747	18,214	3,608	36,667	-

하수슬러지 재이용은 퇴비활용, 조경, 지렁이 사육 등의 용도로 사용되고 있다(표 2.4). 하수슬러지 재활용이 이루어지고 있는 하수처리장 특성을 살펴보면 시설규모가 대용량인 경우 다량의 슬러지가 발생하기 때문에 많은 양을 처리하기 위한 육상매립과 해양투기 같은 방법이 이용되고 소량 발생하는 소규모 용량의 시설에서는 주변지역에서 퇴비나 조경 등으로 이

용이 가능한 조건이 충족되어 주변지역에서 이용하는 것으로 나타났다. 그리고 지렁이를 이용하여 발생 슬러지를 처리하는 시설은 하수와 분뇨를 처리하는 시설로서 발생 슬러지의 특성이 지렁이의 먹이로서 가능하므로 지역과 시설규모의 크기에 관계없이 이용되는 특징을 보이고 있으며 특히 최근에 들어서는 이에 대한 연구가 활성화되고 지자체에서 많은 관심을 기울이고 있어 점차 이 방법에 의한 재활용이 증가될 것으로 예측된다.

표 2.4 하수슬러지 재이용 현황(전국 '98) (단위:톤,%)

합계	퇴비활동		건자재		지렁이사육		기타		처리비용 (천원)
	양	비율	양	비율	양	비율	양	비율	
34,467	16,753	49	1,073	3	5,641	16	11,000	32	539,206

2.2.3 국외현황

가) 일본

일본의 하수슬러지 최종처리처분 현황을 보면 하수슬러지가 1년에 170만여톤 발생되며 발생하는 하수슬러지는 약 70%가 소각방법으로 처리되고 있으며, 처리된 하수슬러지중 61%가 매립되고 있으며 33%는 유효 이용되고 있는 것으로 나타났다. 한편 재활용되고 있는 유효이용량의 41%가 녹농지에 이용되고 있는데 이용하는 원료도 다양하여 탈수케익 및 건조오니, 퇴비화제품 등으로 사용하고 있다. 이러한 실정은 우리나라와 비교할 때 많은 양의 하수슬러지 최종산물이 재활용되는 것으로 판단되고 이러한 이유로서는 하수슬러지에 대한 재이용을 하는 경우 하수슬러지에 대한 규제를 하지 않고 다양한 형태로 녹농지에 이용하는 것을 허용하고 있기 때문으로 판단된다.(표 2.5)

표 2.5 일본의 하수슬러지의 처리처분 및 유효이용현황(1996.4~1997.3)

구 분	하수슬러지 발생현황 (천Dry solid ton/년)				구 분	하수슬러지 유효이용현황 (천Dry solid ton/년)						
	계(%)	매립 처분	유효 이용	기타		계(%)	탈수 케익	건조 오니	소각 재	퇴비	용융 스래그	
탈 수 케 익	351 (21)	243	84	24	녹농지 이 용	자 치 단 체	35 (6)	11	4	0	20	
소각재	1,180 (69)	780	344	56		비 료 회 사	198 (35)	69	15	14	100	
건 조 슬 러 지	161 (9)	14	139	8		소 계	233 (41)	80	19	14	120	
소 화 농 축 슬 러 지	18 (1)	0	0	18	건설자재이용	334 (59)	4	0	252		78	
계(%)	1,710 (100)	1,037 (61)	567 (33)	106 (6)	계	567 (100)	84 (15)	19 (3)	266 (47)	120 (21)	78 (14)	

나) 유럽

유럽에서의 하수슬러지 최종처분방법은 녹농지 이용, 매립, 소각, 해양투기, 폐기물처분장의 공동처분, 기타(시험적인 건설 자재화 등)로 대별된다. 주된 처리방법은 소각 및 유효이용, 매립처분이지만, 각각의 처분량을 비교하면 녹농지 이용이 많으며, 소각비율은 증가하리라고 예상되지만, 예상만큼은 증가하지 않고 있다. 해양투기는 영국 등에서 일부 행해졌지만, 현재는 해양투기를 전면 금지한 것으로 알려져 있다. 매립처분방법은 각국에 따라 국가정책, 문화, 역사, 지리, 법률, 정치, 경제 등 여러 가지 상황에 따라 선택되어 왔다. 그러나 최근에는 환경문제에 대한 관심이 높아져 하수슬러지처리 방법의 선택은 큰 전환시기에 와 있고 소각과 녹농지 이용 및 기타 재이용방향으로 진행되고 있다.

하수슬러지의 녹농지이용은 유럽의 전통적이면서도 중요한 방법이다. 표 2.6에 나타낸 것과 같이 유럽지역에서는 약 650만톤(건조기준)의 하수슬러지가 발생하고 있으며, 그 중 250만톤 정도인 40%가 농지에 이용되고 있

다. 비율로서는 프랑스, 덴마크, 노르웨이, 스페인 등이 높으며, 양적으로는 독일, 프랑스, 영국 등이 압도적으로 많다. 농지이용하는 슬러지의 형상은 액상슬러지, 탈수슬러지, 건조슬러지, 슬러지퇴비로 구분이 가능하나, 탈수 케익이 가장 많은 양을 차지하고 있다. 슬러지의 성상, 시비기준, 방법, 토양보전에 대해서는 각국별로 혹은 국내에서도 지방별로 독자적인 규제가 설정되어 있으나, 현재에는 EC지침(1986년 6월 결정)을 공통의 기준으로 하고, 이것에 규제값, 규제항목이 나라별로 가감되어 독자적인 기준으로 하고 있다. 하수슬러지의 농지이용은 각국에 있어서 농업경영과 하수도사업경영의 양면으로부터 중요하여, 이 때문에 하수슬러지와 토양에 대하여 엄격한 규제를 만들고, 가정과 공장폐수에 대한 규제를 엄격하게 하는 등으로 양질의 슬러지확보를 위하여 노력하고 있다.

표 2.6 유럽의 하수슬러지 발생량 및 처리현황(단위: 건물량 천톤/년, %)

국가명	하수슬러지 발생량	농토재이용	육상매립	소각	해양투기	산지 및 재경작지
오스트리아	170	30.6(18)	59.5(35)	57.8(34)	-	22.1(13)
벨기에	59.2	17.2(29)	32.5(55)	8.9(15)	-	0.6(1)
덴마크	170.3	92(54)	34(54)	40.9(24)	-	3.4(2)
핀란드	150	37.5(25)	112.5(75)	-	-	-
프랑스	865.4	502(58)	233.5(27)	130(24)	-	-
독일	2681.2	724(27)	1448(54)	375.2(14)	-	134(5)
영국	1107	488(44)	88.6(8)	77.4(7)	322(30)	121(11)
그리스	48.21	4.8(10)	43.4(90)	-	-	-
아일랜드	36.7	4.4(12)	16.6(45)	-	12.8(35)	2.9(8)
이태리	816	269.2(33)	449.55(55)	16.2(2)	-	81.6(10)
룩셈부르크	8	1(12)	7(88)	-	-	-
네덜란드	335	87(26)	171(51)	10(3)	-	67(20)
노르웨이	95	53.2(58)	41.8(44)	-	-	-
포르투갈	25	2.7(11)	7.3(29)	-	0.5(2)	14.5(58)
스페인	350	175(50)	122.5(35)	17.5(5)	35(10)	-
스웨덴	200	80(40)	120(60)	-	-	-
스위스	270	121.5(45)	81(30)	67.5(25)	-	-

미국에서 1997년 하수슬러지 발생량은 약 5백 3십만톤으로 소각 16%, 매립 38%, 농업지대, 목초지대 및 복원용의 재활용은 36%, 토양표면처리 10% 등으로 처리되고 있다. 미국에서는 1990년대부터 하·폐수슬러지를 살아 있는 고형물질이라는 의미를 가진 biosolids라고 부르기 시작했다. 이것은 하수처리장에서 나오는 폐기물이라기보다는 재활용 물질로 보는 시각에서 비롯된 용어이다.

미국의 오니 배출을 규제하는 법률은 지표수의 수질을 다루는 Clean Water Act(CWA)와 Federal Water Pollution Act(FWPA)로 하천에 슬러지의 직접 배출을 제한하고 있다. 두 번째로 Resource Conservation and Recovery Act(RCRA)와 Comprehensive Environmental Response,

Compensation and Liability Act(CERCLA)는 슬러지의 토지처분을 제한하고 있다. 미국 환경보호청(U.S. EPA)은 1994년 하수슬러지의 재사용에 관한 법 "The Standards for the Use or Disposal of Sewage, 40CFR Part 503(일명 503규정)"을 제정하였다. 폐슬러지는 전답, 정원, 골프장, 산림과 공원에 살포할 수 있는데, 이 같은 살포가 환경과 인체에 영향을 줄 수 있으므로 폐슬러지에 있을 수 있는 오염물질을 법으로 규제하여 올바른 폐슬러지 사용을 권장하기 위하여 슬러지법이 제정되었다. 이 법에서는 폐슬러지를 재활용 또는 처분하는데 있어서 Supart A - 일반론, Supart B - 토양살포, Supart C - 오니 매립지, Supart D - 병원균 및 병원균 매개체 제어, Supart E - 소각의 5가지로 나누어 관리하고 있다. 표 2.7은 Supart B에 의한 슬러지의 토양살포시 오염물질의 한계이다.

Supart A~E는 연방법에 따른 것이고 New York, Minnesota, Florida 및 Maine주에서 보다 강화된 규제를 적용하기도 한다.

표 2.7 슬러지의 토양 살포시 오염물질의 한계

오염물질	최대허용농도 (mg/kg)	누적오염허용부 하량 (kg/ha)	허용농도 (mg/kg)	연간허용부하량 (kg/ha/365day period)
비소	75	41	41	2.0
카드뮴	85	39	39	1.9
구리	4300	1500	1500	75
납	840	300	300	15
수은	57	17	17	0.85
몰리브덴	75	-	-	-
니켈	420	420	420	21
세레늄	100	100	100	5.0
아연	7500	2800	2800	140
dry weight basis				

2.2.4 부산시 슬러지 발생량의 추정

부산시 하수도계획의 완공시점인 2011년의 하수슬러지 발생량을 추정하기 위해 먼저 인구변화를 알아보면 60년대부터 시작된 경제성장 정책으로 농어촌 인구의 도시유입이 급격히 증가하여 '72년에 200만명, '79년에 300만명을 상회하였고, '94년에는 거의 400만명에 육박하였으나 '95년 이후 지역경제 침체에 따라 영세기업의 역외이전, 시외곽지역의 주거단지 조성 등으로 지역인구가 조금씩 줄어들고 있는 추세이어서 2011년도에 부산시 인구는 3,634,800명으로 추정된다. L-C법을 이용하여 하수발생량의 원단위를 추정하고 하수발생량의 0.03%가 슬러지 발생량이므로 이를 계산해보면 2011년 부산시 하수슬러지 발생량은 155,305.68톤/년으로 추정된다.

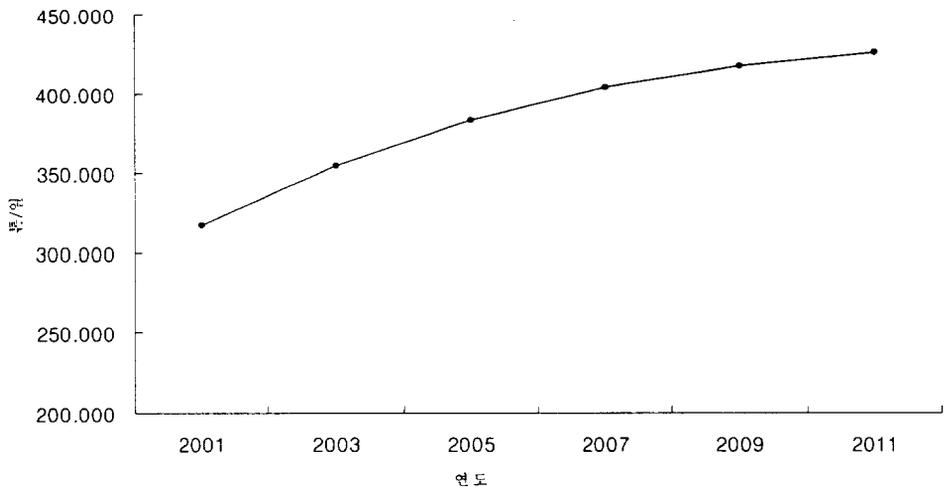


그림 2.5 부산시 슬러지발생량 변화의 추이

표 2.8 부산시 인구 및 하수량변화의 추이

년도	인구 추이	배출 원단위	하수발생량	슬러지 발생량
		톤/인·일	톤/일	톤/일
2001	3,796,800	0.27849	1,057,378	317.214
2002	3,780,600	0.29701	1,122,872	336.862
2003	3,764,400	0.31387	1,181,544	354.463
2004	3,748,200	0.32897	1,233,038	369.911
2005	3,732,000	0.34227	1,277,348	383.204
2006	3,715,800	0.35383	1,314,762	394.428
2007	3,699,600	0.36376	1,345,763	403.729
2008	3,683,400	0.37220	1,370,958	411.287
2009	3,667,200	0.37931	1,391,009	417.303
2010	3,651,000	0.38526	1,406,581	421.974
2011	3,634,800	0.39021	1,418,317	425.495

2.2.5 슬러지처분 방법

가) 소각

소각시 매립, 해양투기 및 재활용 보다 건설비가 많이 소요되고 비용이 높고 이차오염(대기오염 등)이 예측된다. 그러나, 매립장 확보가 현실적으로 어려운 점 및 위생적인 처리를 위하여 유기성슬러지 처리의 대안으로 대두되고 있다. 재정확보가 불가능한 소규모 지자체에서는 공동소각장 등을 검토 중에 있지만 주민반대 등 복합적인 문제가 있으므로 다각적인 검토가 요구되고 있다.

나) 매립

슬러지를 매립할 경우 분해·안정화 시켜 주변지역에 악영향을 주지 않고 동시에 일반토양과 같은 물질로 변환시킬 수 있다. 그러나 하수슬러지가 분해·안정화되는 과정에 오랜 시간이 걸리므로 과정상에 각종 환경문제가 발생할 우려가 있다.

폐기물관리법 시행규칙 제6조 및 별표 4에서는 하수슬러지를 수분함량 85%이하로 관리형 매립시설에 처리하도록 규정하고 있으나, 「2001년 이후 1일 폐수배출량 2,000m³ 이상인 배출업소의 유기성슬러지를 바로 매립하여서는 아니되며, 소각·퇴비화 처리후 잔재물만 매립하여야 한다. 2005년 이후 1일 폐수배출량 700m³ 이상 2,000m³ 미만인 배출업소의 유기성슬러지를 바로 매립하여서는 아니되며, 소각·퇴비화 처리 후 잔재물만을 매립」하도록 규정하고 있으므로 소각이나, 퇴비화 후의 매립 등 관련 대책이 시급히 마련되어야 할 것으로 전망된다.

다) 해양투기

해양에 슬러지를 처리하는 것은 해양환경에 신속한 회석과 흡수동화를 제공 해준다. 슬러지의 해양투기는 처리장에서 파이프를 먼 앞바다까지 부설해서 방출하든지 혹은 슬러지를 농축해서 슬러지 운반구로 50km 이상

의 먼 앞바다에 운반 투기하는 것이다. 슬러지가 해수에 투기되면 일시적으로 해수가 크게 혼탁 되지만 대량의 해수로 곧 희석, 확산되면서 동시에 해수중에 염류의 염석작용으로 침전되며, 용존산소에 의해 유기물질이 산화되면서 해수는 원래의 상태로 되돌아온다. 따라서 상당히 강한 조류가 있는 해수 중에 투기하면 위생상 문제는 없다. 이러한 방법을 이용하려면 조류, 풍속, 지형 등을 고려해야 하며 그렇지 않으면 역류해서 해안이 오염된다. 그럼에도 불구하고 해양생태계에 어떤 면으로든 영향을 미치게 되며, 슬러지가 침전될 경우 저서생물에 오염물질이 농축되는 등 환경문제를 야기 시킬 수 있다.

우리나라에서 슬러지는 해양오염방지법 제16조에 육지에서 처리가 곤란한 폐기물로서 해양배출이 가능한 폐기물로 정의되어 공유수면 매립법 및 해양오염방지법 시행규칙 35조 관련 별표 14, 15, 16에 처리방법 및 배출해역을 정하고 있다. 그러나 해양오염방지를 위하여 주요선진국에서 폐기물의 해양투기를 금지하고 있으며, 우리나라도 「폐기물 및 그 밖의 물질의 투기에 의한 해양오염방지에 관한 협약(런던협약) (Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter(London Convention))」 등과 「해양법에 관한 국제연합 협약 (United Nations Convention on the Law of the Sea)」 등 해양과 관련된 환경협약에 가입하고 있고 해양매립을 금지하는 실정이므로 슬러지의 해양투기는 더 이상 어려운 실정이므로 이에 대한 대책도 시급한 실정이다

라) 퇴비화

하수슬러지가 중금속 및 농약, PCB 등의 오염이 우려되므로 농작물 등에 쓰이기 어려운 점이 있으나 외국의 경우 퇴비의 등급 및 기준을 정하여 농작물 이외의 수요처도 개발하고 있다. 우리나라에서도 퇴비 등급화에 대한 논의가 다각적으로 검토되고 있으며, 표 2.9과 2.10은 각국의 퇴비등급 중 오염물질 기준 및 검사 항목이다.

마) 지렁이 처리

하수처리장 부지가 넓은 곳 등에서 생각할 수 있는 대안으로 슬러지를 지렁이 사육의 먹이로 공급하여, 지렁이 생산뿐만 아니라 양질의 퇴비인 지렁이 분변토를 생산하는 방법이다.

외국에서는 지렁이를 이용하여 사업의 한 분야로서 발전시키고 있으며 예를 들면 지렁이를 이용하여 각종 유기물을 처리하는 기술(Vermitechnology), 지렁이를 사육하여 증식된 지렁이를 판매하는 사업(Earthworm Selling), 지렁이가 먹고 배설하는 분변토 및 분변토에서 과생되는 액을 판매하는 지렁이배설물 판매분야(Worm Casting, Worm Tea) 및 지렁이를 이용하여 소규모 유기성물질을 처리할 수 있는 지렁이 퇴비화용기를 판매하는 사업(Worm bin, Worm Container), 지렁이를 농업과 목축에 활용하여 생산성을 높이는 기술 등 많은 분야 상품 또는 기술이 산업의 한 분야로 널리 이용·개발되고 있다.

바) 기타

앞서 저술한 방법 이외에 슬러지를 열회수나 소각후 건축자재 등으로 재 이용하는 방법이 있다. 열회수는 퇴비화나 슬러지를 처리하는 과정에서 발생하는 가스(예: CH_4)나 소각열 등의 에너지를 이용하는 방법이다. 건축자재로 이용하는 방법은 슬러지를 소각하거나 용융할 경우, 무기성분의 재료로 바뀌어지는데 탈수과정중의 응집제 등의 성질에 따라 달라지지만 석회계를 이용한 경우 다량의 CaO 가 함유되므로 시멘트 원료, 아스팔트 충전제, 2차 콘크리트 제품, 토양개량제, 벽돌, 경량골재, 토관용 등 제조품에 이용할 수 있다. 그 외에 점착성, 보수력 등 하수슬러지의 성질을 이용하여 도로 절개면의 녹화시 사용되는 인공토양의 원료로 사용된다.

표 2.9 각국의 퇴비중 주요 오염물질 기준 (단위 : ppm)

국가	한국	네덜란드	벨기에	프랑스	호주	미국	캐나다
Cd	5	2	Agriland:5 Pakland:1	A급:8 B급:3	A:3 B:5 C:20 D:32	A:15 B:20 C:100 D:100 E:100	A:3 B:20
Hg	2	2	Agriland:5 Pakland:5	A급:8 B급:8	A:1 B:4 C:15 D:19	A:- B:- C:- D:- E:-	A:0.8 B:5
Cu	500	300	Agriland:100 Pakland:500	A급:없음 B급:없음	A:150 B:150 C:420 D:500	A:450 B:900 C:3000 D:3000 E:3000	A:100 B:757
As	50	25		A급:없음 B급:없음	A:20 B:20 C:20 D:30	A:- B:- C:- D:- E:-	A:13 B:75
Pb	150	200	Agriland:600 Pakland:1000	A급:200 B급:200	A:60 B:125 C:270 D:300	A:500 B:1000 C:1500 D:1500 E:1500	A:150 B:500
비고					A:무제한 사용 B:농업 C:산림 D:매립	A:무제한 B:상업,농업 C:일반대중 비접촉지역 D:매립 E:매립지 복토	A:무제한 B:제한적사용 (지역법령)

표 2.10 각국의 퇴비기준 분석 항목

항목	국가명							비고
	한국	네덜란드	벨기에	프랑스	호주	미국	캐나다	
As	0	0	-	-	0	-	0	
Cd	0	0	0	0	0	0	0	
Cr	0	0	0	-	0	-	0	
Co	-	-	0	-	-	-	0	
Cu	0	0	0	-	0	0	0	
Hg	0	0	0	0	0	-	0	
Mo	-	0	-	-	-	-	0	
Ni	-	0	0	0	0	0	0	
Pb	0	0	0	0	0	0	0	
Zn	-	0	0	-	0	0	0	
Se	-	-	-	-	0	-	0	
Inert	-	-	-	0	-	0	-	
glass	-	-	-	0	-	-	-	
plastic	-	-	-	0	-	-	-	
Organic Matter(min%)	0(25%이상)	-	-	-	-	0	-	
ROM(%)	-	0	0	-	-	0	-	
particle size(mm)	-	-	-	-	-	0	-	
Maturities	0(C/N비)	-	-	-	-	0	-	
DDT/DDD/DDE	-	-	-	-	0	-	-	
Aldrin	-	-	-	-	0	-	-	
Dieldrin	-	-	-	-	0	-	-	
Chlordane	-	-	-	-	0	-	-	
Heptachlor	-	-	-	-	0	-	-	
HCB	-	-	-	-	0	-	-	
Lindane	-	-	-	-	0	-	-	
BHC	-	-	-	-	0	-	-	
PCBs	-	-	-	-	0	-	-	

3 LCA를 이용한 부산시 슬러지 관리

3.1 전과정평가 목적 정의

본 연구는 부산시 하수슬러지를 가상의 시나리오 즉, 매립하였을 경우와 소각하였을 경우의 각 단계별 환경 영향을 비교·평가함에 있어서 환경 오염 배출물을 규명하고 잠재적인 환경 영향을 평가해 봄으로써 정부나 지자체의 슬러지 처분 정책 방향을 결정하는데 참고자료로서 사용될 수 있다.

3.2 전과정 범위 설정

부산광역시에서 발생하는 하수슬러지를 전량 매립하는 경우와 전량 소각하는 경우를 비교 분석해 보고, 수송거리는 현재 부산시에서는 거의 전량 해양 투기를 하고 있기 때문에 가상의 매립지로는 부산시 S매립장을 선정하였고 소각장의 위치는 운반과정에서 발생하는 비용과 환경에 미치는 영향이 동일하므로 매립장과 같은 동일 거리를 가지는 것으로 하였다. 시간적 범위는 1999년 1월부터 1999년 12월까지 1년간으로 정하고 하수처리장에서 발생하는 슬러지 1톤을 기능단위로 정하였다.

3.3 전과정 목록 분석

3.3.1 수송

부산광역시에서 발생하는 하수 슬러지는 전량 해양투기로 처리하므로 매립장 및 소각장을 S매립장 거리로 가정한다. 하수 슬러지를 매립장까지 운반하는 거리는 총 95.24km, 일일 4.5t 트럭 68대가 필요하고 일일 처분량은 296.6t, 가동률 0.8을 고려해서 계산해보면 부산시 슬러지 1톤 처분시 경유사용량은 2.98 l가 사용되어진다는 것을 알 수 있다.

표 3.1 슬러지 1t 수거·운반시 연료 사용량

처리장	거리	연비	가동률	일일 처분량	운반 횟수	1일 연료 사용량	1톤 처리시 연료사용량
수영	26.03	6.0	0.8	95.1	22	76.35	0.80
장립	11.63	6.0	0.8	138.7	31	48.07	0.35
남부	25.83	6.0	0.8	33.5	8	27.55	0.82
해운대	31.75	6.0	0.8	29.3	7	29.63	1.01
계	95.24			296.6	68	181.6	2.98

경유 1 l 사용으로 인한 대기 배출물은 환경부에서 '93년에 연구발표한 대기오염배출계수를 이용해서 각 배출물의 발생량을 예측 할 수 있고 표 3.2 에 나타내었다.

표 3.2 경유 1 l 사용 시 대기오염배출물의 발생량

Air emissions	CO	CxHy	NOx	SOx	SPM	Aldehydes
Amount(mg/ l)	12.1	4.49	56.2	3.74	4.01	0.84

표 3.3 수송시스템(LCI)

Input	Energy	Material	Units	Amounts
		Light oil	ℓ /ton	2.98
Output	Air	CO	kg/ton	3.61E-5
		CxHy	kg/ton	1.34E-5
		NOx	kg/ton	1.67E-4
		SOx	kg/ton	1.11E-5
		Particle	kg/ton	1.19E-5
		Aldehydes	kg/ton	2.50E-6

표 3.3는 부산시 하수슬러지를 처리장까지 운반시 경유 1ℓ 사용으로 인한 대기배출물을 대기오염배출계수를 이용하여 전과정 목록표를 만들었다.

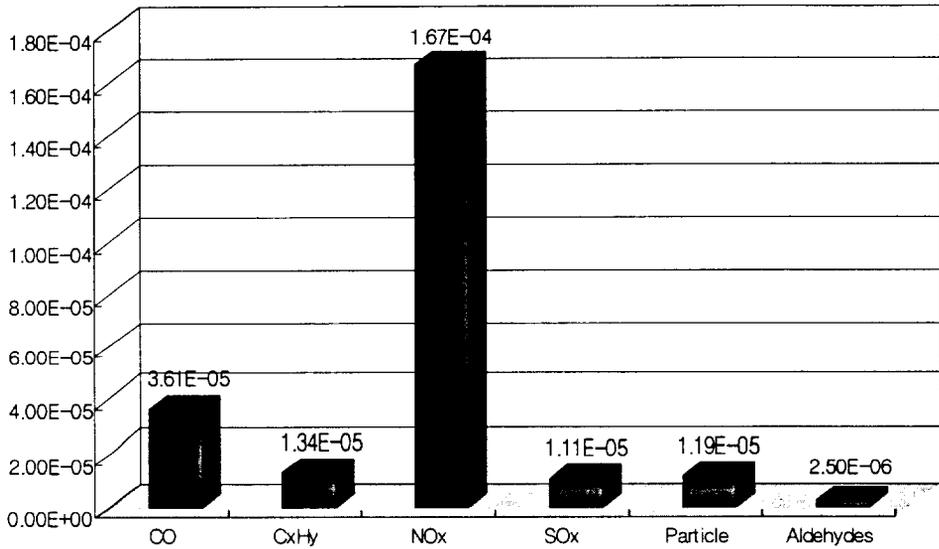


그림 3.1 수송시 대기오염 배출가스

3.3.2 매립

S매립장은 준 호기성 위생매립방식인 Cell Type 매립을 하고 있으나 실제 가스발생에 대한 실측자료가 외부로 공개되고 있지 않아, 본 연구에서는 이론적 조성비에 의한 계산 값을 이용하여 가스 발생량을 추정하여 이용하였고, 표 3.5에 매립장 침출수의 수질 농도를 나타내었다.

표 3.4 매립시 대기배출 가스량

CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S	Remark
50.25	45.37	2.7	1.68	표준상태에서 0.181m ³ /t-refuse (assumed)

표 3.5 매립장의 침출수 농도

(Units:mg/ℓ)

Material	Results	Material	Results
BOD	26.2	Hg	0.0000
COD _{Mn}	117.2	As	0.0000
SS	29.8	Pb	0.28
N-H	0.4	Cr ⁺⁶	0.14
Phenol	5.421	Mn	3.78
CN	0.000	F	1.44
T-Cr	0.75	Organic Phosphorus	0.0000
Fe	26.01	T-N	26
Zn	1.484	T-P	1.9
Cu	0.218	TCE	N.D
Cd	0.000	TeCE	N.D

S매립장내의 장비사용 현황은 불도우저, 굴삭기를 합하여 총 4대가 사용되어 지고 가동시간은 8시간으로 총 연료 사용량은 95.2ℓ/hr로 나타났다. 이것을 이용하여 장비 사용으로 인한 실제 경유 사용량을 계산해보면 슬러지 1톤을 처리하는데 경유 2.054ℓ가 사용됨을 알수 있었다. 뿐만 아니라 매립지에서 사용되는 전력을 계산해보면 슬러지 1톤 처리시 소요되는 전력은 3.414kwh로 계산된다.

표 3.6 매립장 장비사용(S매립장)

장비명	모델	규격	사용대수	연료사용량(ℓ/hr)		가동시간
				대당	총량Et	
불도저	D8N등8종	39T등5종	2	23.8	47.6	8
굴삭기	MX08등3종	0.8, 0.6m ³	2	23.8	47.6	8

3.3.3 소각

부산시 H소각장에서 슬러지를 소각하는데 발생하는 대기 배출가스와 수계 배출물을 표 3.7과 3.8에 각각 나타내었다.

표 3.7 슬러지 소각시 배출되는 배기가스 농도(H소각장)

SOx(ppm)	NOx(ppm)	HCl(ppm)	CO(ppm)
14.5	65.03	3.95	43.39

표 3.8 슬러지 소각장의 수계배출물 농도(H소각장)

Material (mg/ℓ)	pH	BOD	COD	SS	Cu	Pb	Cr ⁺⁶	Phenol
Avg. conc.	7.98	17.05	34.11	26.86	0.19	0.20	0.00	0.03

김익수(1998)“생태도시 조성을 위한 통합폐기물 관리방안”에 인용된 값을 이용하여 1kwh 전력사용으로 인한 배출물 발생량을 표 3.9에 나타내었고, 부산광역시외의 슬러지 1톤 소각시 전력사용으로 인한 배출물량을 구하였다.

표 3.9 1kwh 전력사용으로 인한 배출물 발생량

Emission	Material	Units	Amounts
Air	Aldehyde	μg	6.04
	Benzene	μg	0.287
	Benzo(a)pyrene	μg	0.00227
	Cd	μg	0.00644
	CH ₄	g	1.56
	CO	μg	17
	CO ₂	g	564
	Cu	μg	0.0585
	CxHy	μg	20.8
	CxHy aromatic	μg	16.1
	Dust(SPM)	μg	0.921
	HCl	μg	77.9
	Hg	μg	0.035
	N ₂ O	μg	0.143
	NH ₃	μg	3.03
	non methane VOC	μg	588
	NO ₂	g	1.43
	Pb	μg	0.0322
	SO ₂	g	3.48
	V	μg	8.23
Zn	μg	0.0196	
Water	BOD	μg	0.91
	Cl ⁻	g	3.48
	COD _{Mn}	μg	2.73
	Crude oil	μg	65.4
	CxHy aromatic	μg	7.23
	Dissolved substance	μg	31.9
	NH ₃	μg	9.06
	SS	μg	0.91
	Sulphates	g	1.95
	Zn	μg	6.36
Solid Waste	Final waste (inert)	g	65.1
	Product waste (inert)	g	4.51

3.3.4 전과정 목록표 작성

가) 매립

표 3.10 매립시 전과정목록분석

		Material	Units	Amounts
Input	Energy	Electricity	kWh/ton	3.414
		Light oil	l/ton	2.054
Output	Air	Aldehyde	kg/ton	2.23E-5
		Benzene	kg/ton	9.79E-7
		Benzo(a)pyrene	kg/ton	7.24E-9
		Cd	kg/ton	2.18E-8
		CH ₄	kg/ton	6.49E+1
		CO	kg/ton	8.29E-5
		CO ₂	kg/ton	1.63E+2
		Cu	kg/ton	1.99E-7
		CxHy	kg/ton	8.02E-5
		CxHy aromatic	kg/ton	5.49E-5
		Dust(SPM)	kg/ton	1.14E-5
		HCl	kg/ton	2.66E-4
		Hg	kg/ton	1.19E-7
		N ₂ O	kg/ton	4.88E-7
		NH ₃	kg/ton	1.03E-5
		non methane VOC	kg/ton	2.01E-3
		NO ₂	kg/ton	4.99E-3
		Pb	kg/ton	1.09E-7
SOx	kg/ton	7.68E-6		
SO ₂	kg/ton	1.19E-2		
V	kg/ton	2.81E-5		
Zn	kg/ton	6.62E-8		

표 3.10 매립시 전과정 목록분석(계속)

		Material	Units	Amounts
Output	Water	BOD	kg/ton	2.93E-5
		Cl ⁻	kg/ton	1.27E-3
		COD _{Mn}	kg/ton	1.27E-4
		Crude oil	kg/ton	2.23E-4
		Cr ⁺⁶	kg/ton	1.48E-7
		Cu	kg/ton	2.18E-7
		CxHy aromatic	kg/ton	2.47E-5
		Dissolved substance	kg/ton	1.07E-4
		F	kg/ton	1.44E-6
		Fe	kg/ton	2.60E-5
		Mn	kg/ton	3.78E-6
		N-H	kg/ton	4.83E-7
		NH ₃	kg/ton	3.09E-5
		Pb	kg/ton	2.81E-7
		Phenol	kg/ton	5.42E-6
		SS	kg/ton	3.29E-5
		Sulphates	kg/ton	6.66E-3
		T-Cr	kg/ton	7.58E-7
		T-N	kg/ton	2.63E-5
	T-P	kg/ton	1.94E-6	
Zn	kg/ton	2.32E-5		
Solid Waste	Final waste (inert)	kg/ton	2.22E-1	
	Product waste (inert)	kg/ton	1.54E-2	

나) 소각

표 3.11 소각시 전과정목록분석

		Material	Units	Amounts
Input	Energy	Electricity	kWh/ton	1.68
		Light oil	l/ton	0.0764
Output	Air	Aldehyde	kg/ton	1.02E-5
		Benzene	kg/ton	4.82E-7
		Benzo(a)pyrene	kg/ton	3.00E-9
		Cd	kg/ton	1.02E-8
		CH ₄	kg/ton	2.62E-3
		CO	kg/ton	7.29E-5
		CO ₂	kg/ton	9.48E-1
		Cu	kg/ton	2.88E-7
		CxHy	kg/ton	3.53E-5
		CxHy aromatic	kg/ton	2.70E-5
		Dust(SPM)	kg/ton	1.55E-6
		HCl	kg/ton	1.35E-4
		Hg	kg/ton	5.80E-8
		N ₂ O	kg/ton	2.40E-7
		NH ₃	kg/ton	5.09E-6
		non methane VOC	kg/ton	9.89E-4
		NO ₂	kg/ton	2.47E-3
		Pb	kg/ton	2.54E-7
		SO _x	kg/ton	1.47E-5
		SO ₂	kg/ton	5.86E-3
V	kg/ton	1.38E-5		
Zn	kg/ton	3.20E-8		

표 3.11 소각시 전과정 목록분석(계속)

		Material	Units	Amounts
Output	Water	BOD	kg/ton	1.86E-5
		Cl ⁻	kg/ton	4.23E-3
		COD _{Mn}	kg/ton	4.59E-6
		Crude oil	kg/ton	1.09E-4
		Cr ⁺⁶	kg/ton	-
		Cu	kg/ton	1.93E-7
		CxHy aromatic	kg/ton	1.21E-5
		Dissolved substance	kg/ton	5.36E-5
		F	kg/ton	-
		Fe	kg/ton	-
		Mn	kg/ton	-
		N-H	kg/ton	-
		NH ₃	kg/ton	1.52E-5
		Pb	kg/ton	2.13E-7
		Phenol	kg/ton	3.81E-8
		SS	kg/ton	2.84E-5
		Sulphates	kg/ton	3.28E-3
		T-Cr	kg/ton	-
		T-N	kg/ton	-
	T-P	kg/ton	-	
Zn	kg/ton	1.07E-5		
Solid Waste	Final waste (inert)	kg/ton	1.11E-1	
	Product waste (inert)	kg/ton	7.58E-3	

3.3.5 목록분석결과해석

부산광역시의 하수슬러지 1톤을 처리하기 위한 전과정을 현재 이용하고 있는 해양투기 외에 매립과 소각의 방법을 이용하여 목록분석을 해본 결과 수송시에는 경유사용으로 인한 NO_x의 배출이 가장 많았으며, 매립시에는 매립장에서 아직까지 매립가스를 포집 하지 않고 그대로 배출하기 때문에 CO₂, CH₄등의 배출이 많았고, 소각시에는 CO₂, NO₂, SO₂ 등이 가장 많이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

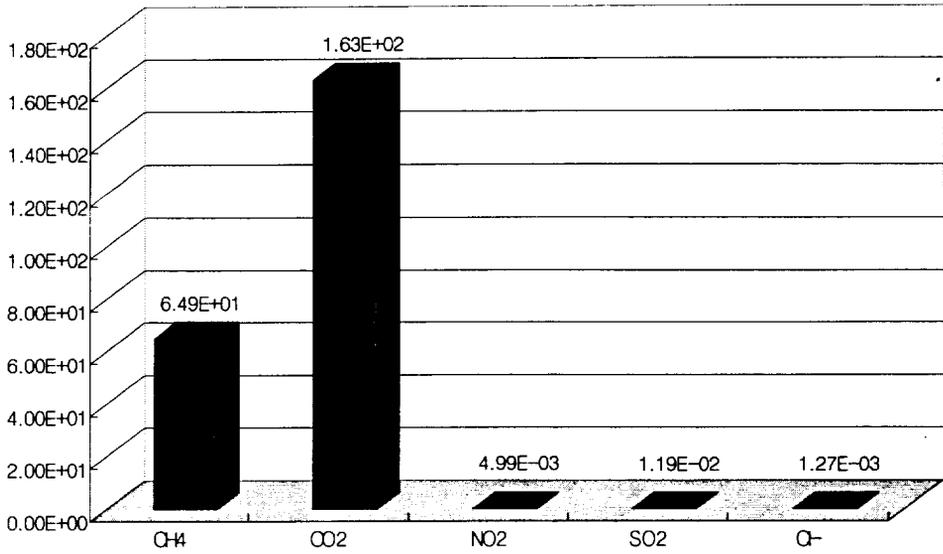


그림 3.2 매립시 오염물질 배출량

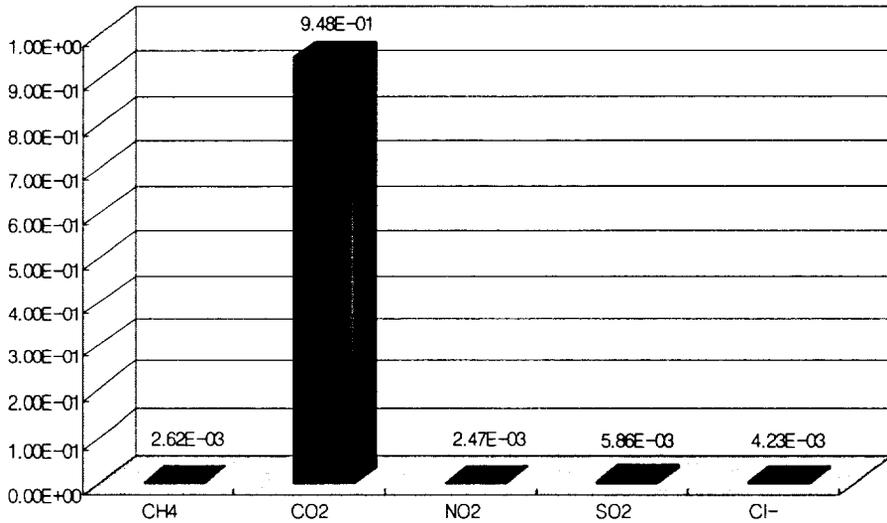


그림 3.3 소각시 오염물질 배출량

3.4 영향 평가

우리나라에서는 영향평가에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 아직 논의가 통일되어 있지 않아 그 적용이 용이하지 않은 것으로 생각된다. 하지만 본 연구에서는 부산시 하수슬러지 처분시 환경오염 배출물을 목록분석 하고 이것이 환경에 미치는 영향을 평가해 봄으로써 앞으로 부산광역시 시가 대처해 나아갈 시나리오에 도움이 되고자 함으로 여러 영향평가 방법 중 미흡하나마 범주간의 가중치에 대한 자료가 존재하고 현재 가장 널리 사용되고 있는 Eco-Indicator 방법을 이용하였다.

3.4.1 영향평가의 기준

주어진 시스템이 환경에 미치는 잠재적인 영향을 평가하기 위해 환경영향범주를 온실효과, 오존층파괴, 산성화, 부영양화, 대기중 중금속, 발암성 물질, 겨울스모그, 여름스모그의 8가지로 구분하였다.

또한, 각각의 환경영향범주에 대해 그 결과인 잠재적 환경영향의 크기를 산정하기 위해 8가지 범주별로 각각 가장 영향을 주는 주요한 물질을 기준값 1로 보고, 다른 배출물들의 상대적 중요도를 산정 하였다.

표 3.12 영향평가 이용 기준

구분	characterization 기준물질	valuation factor
지구온난화	CO ₂	2.5
오존층파괴	CFC	100
산성화	SO _x	10
부영양화	phosphate	5
대기중 중금속	polycyclical aromatic hydrocarbons	5
발암성물질	Pb	10
겨울스모그	SO ₂	5
여름스모그	ethane	2.5

표 3.12에서와 같이 온실효과의 경우는 CO₂, 오존층파괴는 CFC, 산성화는 SO_x, 부영양화는 phosphate, 대기중 중금속은 polycyclical aromatic hydrocarbons, 발암성물질은 Pb, 겨울스모그는 SO₂, 여름스모그는 ethene 을 기준으로 정한 값을 이용하였으며, valuation factor값의 산정도 각각의 환경영향범주에 대해 산정 한 값을 이용하였다.

3.4.2 결과 해석

표 3.13 부산시 하수슬러지의 1톤 매립처분시 가치평가

구분	지구 온난화	오존층 파괴	산성화	부영양화	대기중 중금속	발암물질	겨울 스모그	여름 스모그
특성화 합계	169.490	0	1.716E-2	1.892E-4	1.019E-6	2.881E-7	7.684E-6	1.193E-2
가치평가 가중치	2.5	100	10	5	5	10	5	2.5
가치평가 결과	423.725	0	1.716E-1	9.463E-4	5.095E-6	2.881E-6	3.842E-5	2.983E-2

표 3.14 부산시 하수슬러지의 1톤 소각처분시 가치평가

구분	지구 온난화	오존층 파괴	산성화	부영 양화	대기중 중금속	발암물질	겨울 스모그	여름 스모그
특성화 합계	9.532 E-1	0	8.479 E-3	5.159 E-5	5.147 E-7	2.165 E-7	1.472 E-5	5.871 E-3
가치평가 가중치	2.5	100	10	5	5	10	5	2.5
가치평가 결과	2.383	0	8.479 E-2	2.579 E-4	2.576 E-6	2.165 E-6	7.362 E-5	1.468 E-2

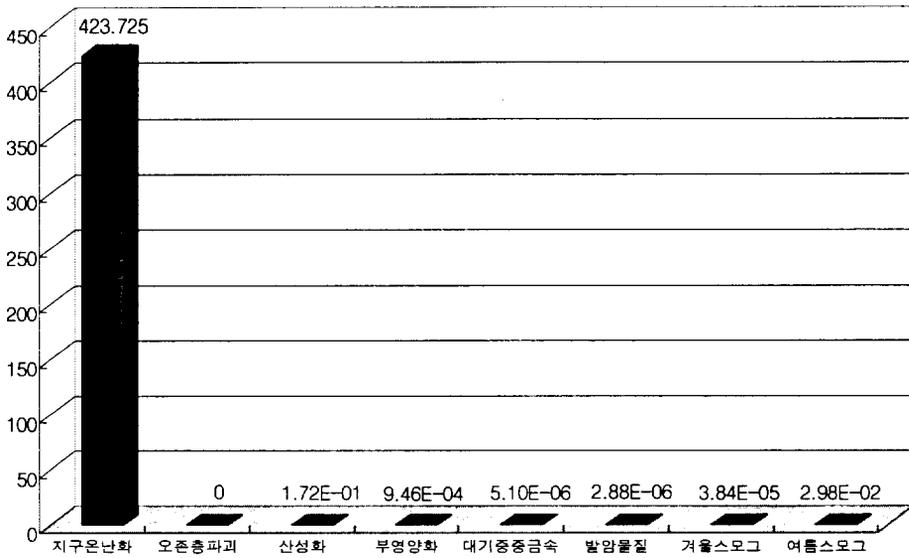


그림 3.4 부산광역시 하수슬러지 1톤의 매립시 전과정영향평가 결과

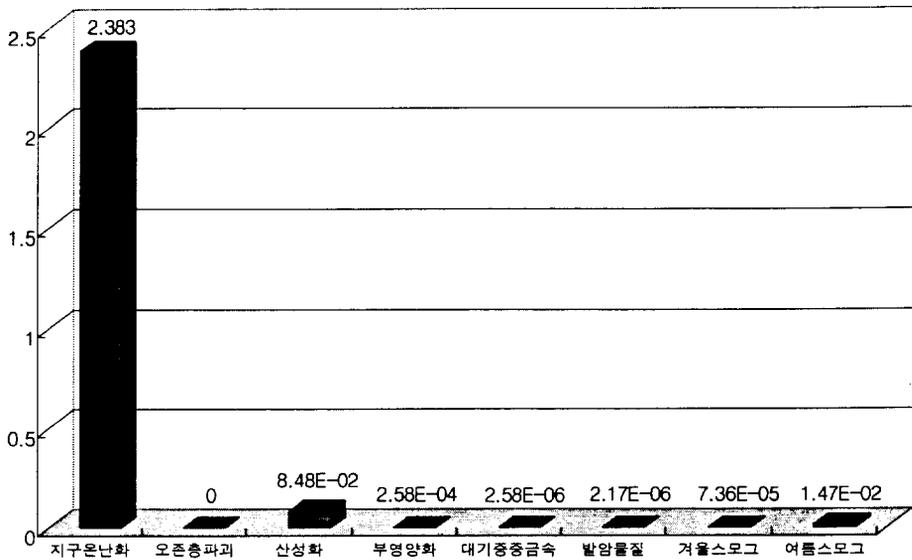


그림 3.5 부산광역시 하수슬러지 1톤의 소각시 전과정영향평가 결과

3.5 결과 및 고찰

수집자료를 토대로 환경에 영향을 미치는 배출물들을 정량화하여 목록분석을 한 후 영향평가를 실행해본 결과 CO₂의 발생량이 월등히 많아서 지구 온난화에 가장 많이 영향을 미침을 알 수 있었다. 오존층 파괴 부분에는 해당 배출물의 검출이 용이하지 않아 환경에 미치는 영향이 나타나지 않았다.

본 연구에서 처음으로 하수 슬러지의 처분에 있어서 환경에 미치는 영향에 대해 조사, 분석, 평가해보았는데 자료의 수집 시 관련 기관이나 업체 등에서 자료의 유출을 꺼려하여 어려움을 많이 겪었다. 이런 환경에 관한 자료들은 일반시민들과 공유함으로써 더욱 효율적인 관리가 이루어 질 수 있지 않을까 하는 아쉬움이 남았으며, 환경영향에 대한 평가뿐만 아니라 비용에 대한 비교 분석 등의 미흡한 부분이 많으나 앞으로 계속 연구를 발전시킨다면 좀더 합리적이고 계획적인 도시계획의 밑거름이 될 수 있을 것이라 본다.

4 결론

본 연구에서 부산시 하수 슬러지의 매립과 소각 처분시의 환경적 영향을 분석, 평가해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 슬러지 처분장소 까지 운반시 경유 사용으로 인해 NO_x, CO가 각각 1.67E-4kg/ton, 3.61E-5kg/ton 발생해 환경에 미치는 영향이 대단히 크다. 따라서, 처분장소 선정에 있어서 주의를 기울려야하고 지역별 최단 수거 거리와 적정 수거 회수를 산출하여 차량의 이동거리를 최소화하여 오염 발생량을 줄여야 할 것이다.

둘째, 매립시 CH₄의 발생량이 6.49E+1kg/ton으로 많은 비중을 차지하고 있어 가스를 적절히 포집하고 에너지로의 재이용을 위한 메탄가스 회수 시설의 설치가 필수적으로 요구된다.

셋째, 소각이 매립보다 산성화의 비중이 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 전체적인 환경영향을 보면 매립시 1.72E-1로 소각시 8.48E-2 보다는 환경에 더욱더 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

이런 결과를 종합해보면 처분방식 별로 장·단점이 있으나, 부산시의 지역적 특성을 고려해서 매립보다는 소각 처분을 선택하는 것이 환경적으로 더 합리적이라 판단되며, 소각시설의 확충 시 하수처리장과 인접 또는 병행하여 건설하는 것이 바람직하다고 하겠다.

향후 계속되는 슬러지의 증가로 환경에 미치는 영향은 더욱 증가 할 수 밖에 없는 실정이다. 부산시의 인구증가율의 추이를 보면 2011년 인구 3,634,800명, 하수발생량을 원단위 계산을 해 보면 하수량은 1,418,317톤/일로 하수처리시 부산물인 슬러지량은 155,305톤/년으로 추정되어진다. 이에 따른 비용적인 측면을 보면 현재 시행되고 있는 해양투기의 경우 연간 약 28억원 상당의 처리비용이 예상되고 매립시 30억원, 소각시 57억원 이 예상되는 반면 재활용의 경우 6억원 상당의 처리비용으로 타 처리 방법보다 5~10배 정도의 비용절감을 가져 올 수 있으므로 자원의 재활용을 위한

대책수립이 필요한 실정이다.

장기적인 부산시 슬러지 처분 계획을 본다면 소각 및 매립에만 의존한다는 것은 결코 합리적인 방법이라 할 수 없다. 그러므로 재활용이나 퇴비화 등의 연구에 좀더 많은 노력이 필요할 것이다.

참고문헌

1. 공업진흥청(1995) LCA의 산업체 적용을 위한 전기에너지 데이터베이스의 구축, pp.183
2. 환경부(1997) 전과정평가의 기법개발과 국내산업에의 적용. 연구보고서, pp.54~111
3. 한국환경과학연구협회(1995) 제품의 LCA기법개발에 관한 연구
4. 김익수, 전숙진(1995) LCA기법을 적용한 전략적인 환경평가 사례화 절차, 환경보전
5. 조장원(1994) 슬러지 소각에 관한 연구
6. 조현숙(1993) 슬러지 소각에 따른 대기오염물질의 배출에 관한 연구
7. 김갑수(1998) 하수오니의 감량 및 재이용 방안, 첨단환경기술 p10-17
8. 주용태(2000) 폐기물 구성성분과 발생량 예측에 관한 연구
9. 김도군(1997) “전과정평가(LCA)기법에 의한 강구조교량과 콘크리트 교량의 환경성과 경제성의 기초적 비교”, 한국과학기술원 토목공학과 석사학위논문
10. 맹승주(1995) LCA의 영향평가 기법개발에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문
11. 김선희(1994) “Life Cycle Assessment의 방법론 및 적용에 관한 연구”, 서울시립대학교 대학원 환경공학과 박사학위논문
12. 김재환(1997) “민감도 분석의 전과정평가 적용에 관한 연구”, 건국대학교 대학원 공업화학공학과 석사학위논문
13. 김훈희(1996) “도시지속성지표 개발에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 생태조경학과 석사학위논문
14. 유영준(1996) 환경경영시스템, 첨단환경기술

15. 이미홍(1997) LCI 기법을 이용한 폐종이우유팩 처리방법 평가 -재활용과 소각을 대상으로-, 서울대학교 환경대학원 환경계획학과 석사학위논문
16. 인하대학교 부설 환경 연구소(1998) 슬러지 성분분석 및 모형실험
17. 한국자원재생공사(1996) 퇴비화와 폐기물 관리정책의 미래
18. 환경부(1998) 전국폐기물발생 및 처리현황 '98
19. 환경부(1997) 전과정평가의 기법개발과 국내산업에의 적용
20. 허탁(1996) "LCA의 개념 및 국내외 현황", 미래지향적 기술산업 추진 전략 심포지엄, 건국대학교
21. 환경처(1994) 하수종말처리장 오니 광역처리 방안에 대한 타당성 조사·연구
22. 김익수(1998) "생태도시 조성을 위한 통합폐기물 관리방안" 서울대학교 박사학위 논문
23. 허탁, 안중우, 정재춘(1995) 전과정 평가의 기본원리, 한국경영자
24. 환경처(1993) 대기오염배출계수, pp.136~137, 139
25. 부산광역시(1998) 환경백서, pp.200~201
26. 부산광역시 청소과 내부자료, 1998
27. 부산광역시 생곡매립지 내부자료, 1999
28. 부산광역시 남부하수처리장 내부자료 1999
29. 부산광역시 수영하수처리장 내부자료 1999
30. 부산광역시 장림하수처리장 내부자료 1999
31. 부산광역시 해운대하수처리장 내부자료 1999
32. 환경부(1994~2000) 하수도통계
33. Curran, M. A.,(1966) Enviromental Life Cycle Assessment, McGraw-Hill
34. SETAC, A Conceptual Framewao가 for Life Cycle Assessment SETAC, 1993, 3
35. EPA, The Use of Life Cycle Assessment in Environmental

Labeling, EPA/742-R-93-003, September, 1993

36. SPOLD, Impact Assessment within LCA, 1994, 6

37. Vigon, B.W, Tolle, D.A, Cornaby B.W, and Latham H.C, Life-cycle Assessment : Inventory Guideline & Principles, EPA/600/R-92/245, February, 1992

38. D. C. Adriano, A. L. Page, A. A. Elsewi, and A. C. Chang, CAadmium Availability to Sudanggrass Grown on Soil Amended Sewage Sludge and Fly Ash, Journal of Environmental Quality, 1982

감사의 글

학부시절 뿐만 아니라 대학원 진학과 본 논문이 완성되기까지 아낌없는 사랑과 정성으로 세심하게 지도해 주신 김상용 교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한 바쁘신 와중에 본 논문이 알찬 결실을 맺을 수 있도록 면밀하게 검토해 주시고 다듬어 주신 이종출 교수님과 손인식 교수님께 감사 드리며, 토목공학과 김종수 교수님, 장희석 교수님, 이종섭 교수님, 이동욱 교수님, 이영대 교수님, 김명식 교수님, 정진호 교수님, 이환우 교수님, 정두희 교수님, 국승규 교수님, 이상호 교수님께 깊은 감사를 드립니다.

그 동안 환경수리연구실에서 많은 도움을 준 인주선배와 용재, 종훈, 희호 등 후배들에게도 감사의 마음을 전하며, 같이 논문을 쓰시느라 고생하시면서 격려의 말씀을 아끼지 않으셨던 부산시 상하수도본부 박재태 과장님과, 천진 엔지니어링의 노두성 부장님께도 깊이 감사 드립니다.

그 외에도 천진 엔지니어링의 박상주 이사님, 김동근 차장님과 이근철 선배, 친구이자 선배인 이정민에게도 감사 드립니다.

원우회 회장이신 김혜수 사장님을 비롯한 회원님들에게도 고마운 마음을 전합니다.

항상 저를 믿어주시고 평생을 값아도 다 값지 못할 사랑을 주신 아버지와 어머니께도 이 지면을 빌려 감사의 마음을 전합니다. 뿐만 아니라 항상 격려의 말을 아끼지 않았던 매형과 누나 그리고 귀여운 조카 원석이와 규민이도 고맙다는 말을 전합니다.

끝으로 저에게 사랑과 격려를 아끼지 않으시고 도움을 주신 모든 분들에게 지면을 빌려 감사를 드립니다.