

통합 폐기물 관리와 전과정목록 : 아시아에서의 지속가능한 폐기물 관리 방안

류영기*, F.R.McDougall**, C-G. C. Peng***, T. Arakaki****, 안중우*

(*과학기술부, 한국피앤지주식회사,
 **Corporate Sustainable Development, Procter & Gamble Technical Centres, UK
 ***Procter & Gamble, Japan)

Integrated waste Management Life Cycle Inventory

요약문

특정한 통합 폐기물 관리 방안들과 관련된 총체적 환경 부담을 알아내기 위하여 이러한 방안에 대하여 전과정 목록(Life Cycle Inventory, LCI)을 적용할 수 있다. 폐기물 관리에 대한 전과정 목록에서는 원료 물질의 사용, 에너지 및 물 사용, 대기, 수계 및 토양으로의 배출에 대한 자세한 데이터를 수집한다. 이 데이터에 기초하여 서로 다른 몇 가지 폐기물 관리 방안들을 비교 할 수 있으며, 정보에 기초한 의사결정을 내릴 수 있다. 이와 같은 접근법은 특정 지역에서의 전체 고품 폐기물 관리에 있어서 최선의 실행 가능한 방안이 무엇인지를 결정할 수 있게 해준다. 전과정 목록은 의사 결정을 내리는데 필요한 것들을 제공해 주는 기법일 뿐 의사 결정 자체를 내리는 기법은 아니다. 전과정 목록에서 얻은 정보는 기획 담당자나 폐기물 관리자로 하여금 미래의 좀 더 지속가능한 폐기물 관리 시스템을 설계할 수 있도록 도와준다.

고 그 사회의 가치와 우선순위를 반영해야 함을 의미한다.

I. 서론

고형 폐기물 관리는 지속가능한 개발의 3대 축(그림 1) 즉, 환경적으로 효과적이고, 경제적으로 지원 가능해야 하며 사회적으로 수용 가능해야 한다.



Fig. 1. Sustainability balances Environment, Economy and Society

- 환경적 효과(Environmental effectiveness)는 자원의 사용(에너지 및 물의 사용을 포함)과 대기, 수계 및 토양으로의 배출물 생성량 관점에서 관리 대상 폐기물의 총 환경 부하가 줄어들 것을 의미한다.
- 경제적 부담(Economic affordability)은 그 폐기물 관리 시스템에 소요되는 비용이 가정, 개인사업자, 기업, 각종 기관 및 정부 등 모든 경제 주체들이 부담할 수 있는 수준이어야 함을 의미한다.
- 사회적 수용(Social acceptability)은 폐기물 관리 시스템이 그 지역 사회의 요구를 충족시키

문제의 핵심은 미래를 위한 좀 더 지속가능한 폐기물 관리를 계획하기 위하여 폐기물 관리 시스템들의 총체적 환경적 효과와 경제적 부담 가능성을 어떻게 평가할 것인가 하는 것이다. 이러한 질문에 답하기 위해 전과정 목록이라는 기법이 사용되고 있다. 지속가능한 폐기물 관리에 대한 전반적인 필요성이 증대됨과 동시에 하나의 처리 방법을 가지고는 모든 종류의 도시 고품 폐기물을 환경적으로 효과적인 방법으로 관리할 수 없음이 점점 명확해지고 있다. 적절한 수거 시스템에 이어 물질 재활용, 생물학적 처

리(퇴비화/생물학적 가스화), 열적 처리 (Refuse-Derived Fuel (RDF)와 Packaging-Derived Fuel (PDF)의 에너지 회수 소각) 및 매립 등(그림 2) 다양한 처리 방법들이 필요할 것이다. 이러한 방법들이 종합적으로 연계되어 통합 폐기물 관리(Integrated Waste Management, IWM) 시스템을 이룬다.

이와 같은 접근법은 “각 방법들이 총체적으로 폐기물 재생에 일조하는 통합된 접근법이 바람직한 것이다.” 라고 말한 현재의 영국 폐기물 전략 “Making Waste Work”[1]에서 주창되었다. 여러 방안들을 조합하여 사용하면서 환경적으로 효과적이고, 경제적으로 부담 가능하며, 사회적으로 수용 가능한 방식으로 모든 폐기물들을 관리하기 위한 총체적 접근법을 택하는 것이 통합 폐기물 관리 시스템으로 정의된다[2].

McDougall과 White[3]은 통합 폐기물 관리 시스템을 시행 중인 유럽과 북미 지역의 많은 지방자치단체들을 조사하였다. 모든 자치단체에서 폐기물 발생 억제, 재활용률 증가, 에너지 회수를 통하여 상당한 수준의 매립 전환을 달성하였다. 이들 지역에서의 이용 가능한 자원은 개발 도상국에서보다 훨씬 많은 것으로 나타났으나 미개발국가에서도 적용할 수 있음을 경험으로 터득하였다. 이 논문에서는 통합 폐기물 관리를 통한 폐기물 관리의 개선을 위하여 그들이 아시아의 선진국과 개발 도상국 모두의 폐기물 관리자에게 제안하는 교훈과 개선점들에 대하여

강조하고자 한다.

II. 아시아에서의 폐기물 관리

표 1에 나타나 있는 데이터에서 알 수 있듯이 아시아 국가 간에는 상당한 차이가 있다. GNP의 예를 들면 데팔의 US\$ 200에서 일본의 US\$39,640에 이르기까지 매우 넓은 범위를 보인다. 국가들의 부를 나타내는 이러한 수치는 많은 경우 그 나라의 폐기물 관리에 관련된 인프라의 수준을 반영한다고 볼 수 있다. 아시아 국가에서 폐기물 관리상의 특징은 북미나 유럽에 비하여 도시 폐기물 흐름에서 차지하는 유기성 물질의 함량이 80%까지 상대적으로 높다는 것이다. 이와 같은 폐기물은 높은 수분 함량과 낮은 열량을 가지고 있다.

많은 양의 유기성 물질 처리에 적절한 기술인 퇴비화나 생물학적 가스화를 위해서는 유기성 물질의 분리 수거가 필요할 것이다.

일본을 제외한 아시아 대다수 국가에서 소각은 별로 바람직한 처리 기술이 아니라고 보여지는데, 이는 소각 공정에 필요한 폐기물의 최적 열량이 10.0 MJ/kg 인데 비하여 아시아 국가들의 폐기물은 3.4 - 4.6 MJ/kg 사이의 낮은 열량을 보이며 소각에 필요한 소각로, 대기오염 방지 시설, 열 회수 장치 등을 건설, 운전, 유지하는데 많은 비용이 소요되기 때문이다. 이에 비하여 유럽과 북미에서의 도시 고형

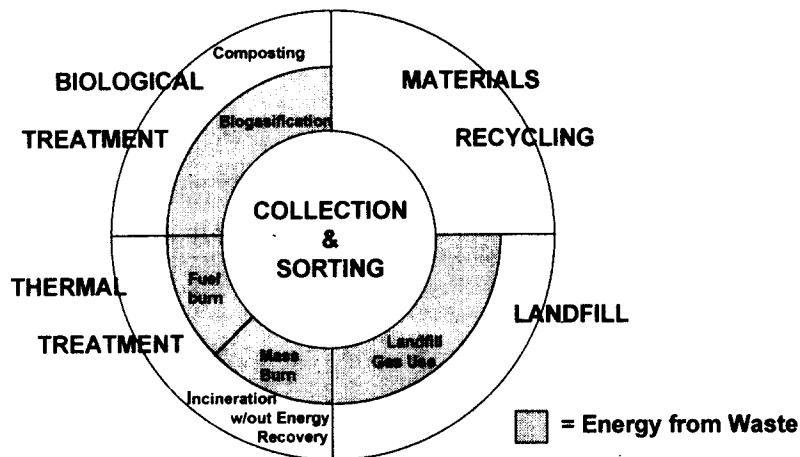


Fig. 2. Elements of an Integrated Waste Management system

폐기물 중 유기성 물질 함량은 30~40% 범위에 있으며 이는 소각에 좀 더 적합하다고 볼 수 있다.

또 다른 점은 많은 아시아 국가의 도시 고�형 폐기물은 재활용 가능한 물질의 함량이 상대적으로 낮은 것이다. 북미와 유럽에서는 재활용 가능한 물질을 일차로 분리 수거한 후 물질 회수 시설에서 추가로 분류하는 방법이 급속히 증가하고 있다. 아시아의 많은 국가에서는 길거리나 매립지에서 주로 낭마주이들이 재활용 가능한 물질들을 수거한다. 낭마주이들의 보건 및 작업 환경을 개선시킴으로써 그들을 현재에 비하여 더욱 효과적인 폐기물 관리 시스템 구성원으로 활용할 수 있다[4].

Ⅲ. 향후 아시아에서의 폐기물 관리에 대한 견해

전반적으로, 개발 도상국에서 현재의 폐기물 관리 시스템을 통합 폐기물 관리 시스템으로 전환하는 과정에는 다음과 같은 단계들을 포함하도록 권장한다.

1. 폐기물 조성에 대한 데이터 수집

이는 도시 고�형 폐기물의 수거, 수송, 처리를 계획하는 데에 필요한 사항이다. 양질의 데이터는 효과적인 통합 폐기물 관리 시스템의 초석이 된다.

Table 1. Overview of statistics pertinent to waste management planning in Asia

	Population 1998 (000s)	Gross National Product per capita (US\$)	Per capita solid waste generation (kg/day)	House-holds with waste collection (%)	P/B (%)	Pl. (%)	Gl. (%)	Met. (%)	F/G (%)	Tex. (%)	Oth. (%)
Bangladesh	124,043	240	0.49	50	6	2	3	3	84		2
China	1,255,091	620	0.8	-	4	4	2	0.5	35.5		54
Hong Kong	6,200	22,990	5.07		26	14	2	2	29	4	23
India	975,772	340	0.46	71	6	4	2	2	42		44
Indonesia	206,522	980	0.76	71	11	9	2	2	70		6
Japan	125,920	39,640	1.47		38	11	7	6	32	6	
Korea Rep.	46,115	9,700	1.5	89	24	5	5	8	32	26	
Lao PDR	5,358	350	0.9	5	3	8	9	4	54		22
Malaysia	21,450	3,890	0.81	-	24	11	3	4	43		15
Myanmar	47,625	240	0.45	-	4	2	0	0	80		14
Nepal	23,168	200	0.3	60	7	2	3	1	80		7
Pakistan	147,811	460	1.2	50	-	-	-	-	-	-	-
Philippines	72,164	1,050	0.7	85	19	14	2	5	42		18
Singapore	3,491	26,730	1.1	-	28	12	4	5	45		7
Sri Lanka	18,450	700	0.5	94	11	6	1	1	76		5
Thailand	59,612	2,740	1.1	-	15	14	5	4	48		14
Vietnam	77,896	240	0.55	45	3	0	0.5	1	52	1	42.5

약어 : P/B = 종이/판지, Pl. = 플라스틱, Gl. = 유리, Met. = 금속류, F/G = 음식물/정원쓰레기, Tex. = 섬유류, Oth. = 기타.

출처 : World Resources 1998-1999 (1998), OECD (1997) and World Bank (1999).

2. 무단 매립에서 단순 위생 매립으로의 진보
3. 도시 고품 폐기물로부터 퇴비화나 생물학적 가스화가 가능한 유기성 폐기물의 분리
4. 재활용 가능 물질의 수집 체계에 낭마주이를 정식으로 포함

이 논문에서 설명된 통합 폐기물 관리와 전과정 목록 기법의 개념은 북미, 유럽, 남미 지역에서 폐기물 관리 시스템에 성공적으로 적용되었으며 선진국과 개발 도상국 모두에서 지속가능한 폐기물 관리 시스템을 구축하기 위한 적절한 기술임이 증명되었다.

IV. 폐기물 관리에서의 선호도 순서

과거에는 “폐기물 관리의 선호도 순서”에 의존하여 폐기물 관리 전략과 폐기물 관리 시스템에 대한 결정을 내린 바 있다. 이는 보통 폐기물 발생량 감축, 재사용, 물질 재활용, 생물학적 처리, 에너지 회수를 겸한 소각, 에너지 회수가 없는 단순 소각, 매립 순의 선호도를 보여왔다. 하지만, 다양한 폐기물 관리 방법들에 대해 우선순위를 두게 되면 여러 가지 심각한 제약점이 따르게 된다.

- 이와 같은 선호도 순서에는 과학적이나 기술적으로 아무런 근거가 없다. 예를 들면 물질 재활용이 항상 에너지 회수보다 선호되어야 한다는 어떠한 과학적 이유도 없다는 뜻이다.
- 선호도 순서는 특히 통합 폐기물 관리 시스템 내에서 여러 가지 폐기물 처리 방법들이 조합되어 사용될 때에 특히 그 의미를 상실하게 된다. 예를 들면, 통합 폐기물 관리 시스템 내에서 여러 방법들에 대하여 특정한 순서를 선호한다면 소각과 퇴비화의 조합이 물질 재활용과 매립의 조합에 비하여 환경적으로 우수한지 아닌지를 예측할 수 없다.
- 필요한 것은 전체 시스템에 대한 총체적인 평가인데 여러 방법들에 대하여 선호도에 순서가 존재한다면 이러한 총체적 평가는 불가능해진다.

- 선호도 순서는 비용적 측면을 전혀 고려하지 않고 있으며 폐기물 관리 시스템이 경제적으로 부담 가능한지를 평가할 수 없다.

폐기물 관리에 있어서 선호도 순서를 들 때에 나타나는 제약점들은 점점 더욱 명확해지고 있으며 특히 통합 폐기물 관리 시스템에서는 더욱 그러하다. 예를 들면, 영국 환경부의 폐기물 전략인 “Making Waste Work”[1]은 “폐기물 관리에서의 선호도 순서는 시민들의 의식에 관한 체크리스트로서는 의미가 있지만 특정 폐기물 흐름에 대해 항상 최적의 폐기물 관리 방안을 가르키는 것은 아니다”라고 말하고 있다. 이와 유사하게 유럽 연합 내에서의 다양한 고품 폐기물 관리 방안들에 대한 비교 연구도 “유럽 연합 내에서 도시 고품 폐기물 관리 시스템에 대한 사회적 비용 - 혜택 분석 (cost-benefit analysis) 결과 선호도 순서는 너무 단순화된 것이며 이에 집착할 경우 복지 측면에서의 손실을 가져올 수 있다.”라고 결론짓고 있다[5]. 우리가 해야 할 일은 먼저 폐기물의 발생량을 줄이고 그래도 발생하는 폐기물을 환경적으로 효과적이고, 경제적으로 부담 가능하며 사회적으로 수용할 수 있는 방법으로 처리할 수 있도록 통합 폐기물 관리를 구축하는 것이다. 선호도 순서에 의한 폐기물 관리 보다는 환경 경영 도구인 전과정 목록을 사용하는 것이 이 목표를 달성하는데 도움이 될 것이다.

V. 고품 폐기물에 대한 전과정 목록

도시 고품 폐기물에 대한 전과정 목록은 물질이 폐기물로 되는 순간 시작하여 이 폐기물이 유용한 제품이나 불활성의 매립 물질로 되거나 대기나 수계로 배출되는 시점에서 끝난다. 통합 폐기물 관리 시스템에 대한 투입물은 고품 폐기물, 에너지 및 기타 원료 물질들이다. 이 시스템에 대한 산출물은 재생된 유용한 제품, 에너지, 퇴비, 대기 및 수계로의 배출물 그리고 나머지 매립 대상 물질들이다. 일단 폐기물 관리 시스템이 설정되면 선택된 각 처리 공정들에 대한 데이터를 사용하여 그 공정에 대한 투입물과

산출물을 계산해야 한다. 전과정 목록 방법론 중 이 부분에서 폐기물 관리 실태에 대한 양질의 데이터가 없다는 것이 모든 국가에서의 문제점으로 인식되고 있다.

고형 폐기물에 대한 전과정 목록 모델의 결과는 순 에너지 소비, 대기 배출물, 수계 배출물, 매립 대상물의 체적, 재생된 물질, 퇴비, 물질 재생률, 매립 전환율로 표현된다. 폐기물 관리에 있어서의 전과정 목록의 유용성은 환경적 측면에서의 효율성을 평가하는 데 있다. 퇴비화, 소각, 매립 등과 같은 개개의 방법들이 안전하다는 전제 하에 에너지 및 원료 물질의 사용, 대기 및 수계 배출물과 최종적으로 남는 고형 폐기물을 최소화할 수 있는 최적의 조합을 도출하는 데 전과정 목록이 도움이 된다.

또한 전과정 목록은 최선의 폐기물 관리 전략에 대하여 어떠한 실질적인 결정을 내리는 것이 아니라 는 것을 강조하고자 한다. 고형 폐기물 관리를 위한 전과정 목록은 전 라이프 싸이클에 있어서의 에너지 소비, 대기, 수계 및 토양으로의 배출물에 대한 목록을 제공하며 퇴비, 이차 물질, 에너지와 같이 폐기물로부터 생성된 유용한 제품의 양을 예측해 준다(그림 3).

어떠한 지역에서의 최선의 시스템은 매립량이나

수계나 대기 배출물을 줄여야 할 필요성과 같은 그 지역의 특수한 요구 사항과 우선 순위에 따라 달라진다. 따라서 전과정 목록은 의사 결정의 보조 기법이 아닌 의사 결정 기법은 아니다. 특정 지역에 대한 최선의 통합 폐기물 관리 시스템은 여전히 판단과 선택의 문제로 남아있긴 하지만 전과정 목록은 이와 같은 의사결정 과정에 필수적인 상세하고 총체적인 환경 정보를 제공해 줄 수 있다.

VI. 통합 폐기물 관리 시스템을 위한 최선의 전과정 목록 모델

폐기물 관리를 위한 최초의 완전한 전과정 목록 컴퓨터 모델은 1995년 출간된 "Integrated Waste Management: A Lifecycle Inventory"[2]라는 책의 일부에 나와 있다. 이 모델은 도시 고형 폐기물 관리 시스템에서의 총체적인 환경 투입물과 산출물을 예측하였고 수평적 경제 모델을 포함하고 있다. 이 모델은 폐기물 관리의 여러 방안들 중에서 최선의 방안을 결정해야 하는 산업체나 지자체의 폐기물 관리자를 위한 의사결정 보조 도구로서 고안되었다. 이 모델은 유럽, 남미, 아시아 지역에서 그 지역의

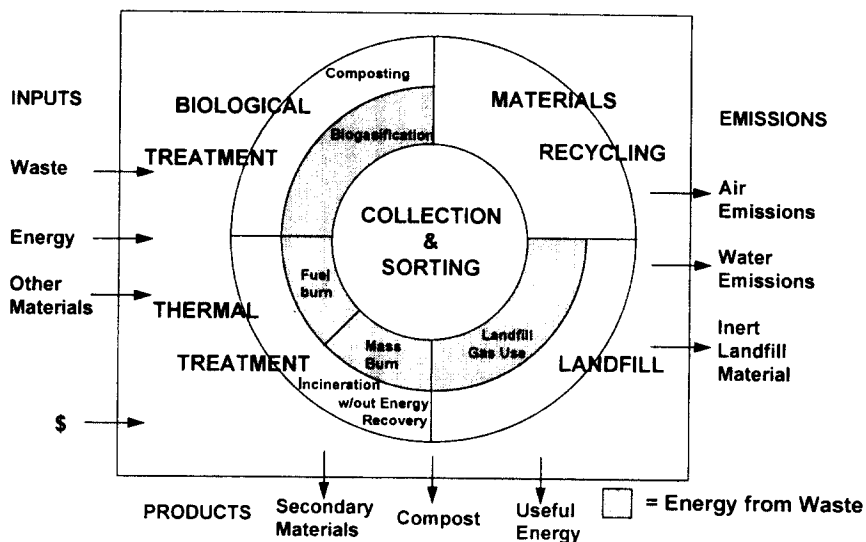


Fig. 3. Using Life Cycle Inventory to assess an Integrated Waste Management System

폐기물 관리 시스템을 설계하는 데에 사용되었고 지금도 사용되고 있다. 좀 더 유연하고, 투명하며 사용자에게 편리하게 구성된 이 모델의 향상된 버전이 2000년 내 배포될 예정이다.

- 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)은 최근의 전과정(Life Cycle) 방법들을 통합 폐기물 관리를 평가하기 위한 도구로 개발, 적용하는 작업을 진행 중이며[6], 이 연구는 1994년에 시작하여 사례연구와 더불어 2000년내에 끝날 것으로 예상된다.
- 영국 환경청도 또한 1994년 전과정 연구 프로그램을 시작하였다. 이 연구의 목표는 폐기물 관리 전략과 개별 폐기물 유형들에 대한 처리 방안들을 객관적으로 비교 평가할 수 있는 근거를 제공하기 위함이다[7]. 이 연구 프로그램은 1999년 완료되었으며 사례연구들이 2000년에 출간될 예정이다.
- 캐나다의 산업 단체인 Corporations Supporting Recycling(CSR)과 The Environment and Plastics Industry Association(EPIC)은 지자체가 그들의 통합 폐기물 관리 시스템, 전략 및 실행에 미치는 제시된 변화의 환경적, 경제적 영향을 평가할 수 있는 도구의 개발을 공동 후원하였다. 이 모델은 이 프로젝트의 공동 참여자인 런던시와 온타리오시로부터 그 지역에 관련된 많은 정보를 받아 설계되었다. 런던시의 참여로 훌륭한 사례 연구를 만들 수 있었는데 시 직원들이 데이터, 분석, 해석 및 결과물을 제공하였으며 시 관계자들과도 충분한 대화 이루어졌다[8].

전과정 목록과 같은 기법을 사용함으로써 얻을 수 있는 이점은 국가나 대륙 전체에 대한 단일 해법을 찾기보다는 해당 지역의 여건에 기초하여 최적 폐기물 관리 전략을 평가할 수 있도록 유연성을 제공한다는 점이다. 정책은 에너지 보존이나 지구 온난화 가능성(Global Warming Potential, GWP)의 감소 등과 같은 바람직한 결과를 이끌어 낼 수 있어야 한다. 전과정 목록은 이러한 결과에 도달하는데 도움이

되는 총체적인 산출 도구를 제공한다. 이에 반해 선호도 순서는 바람직한 결과를 이끌기보다는 수단만을 구체화할 뿐이다.

VII. 앞으로 가야할 길

통합 폐기물 관리를 위한 초기의 전과정 목록 모델은 이 기술을 폐기물 관리 분야에 적용한 최초의 시도에 불과하다. 수많은 다양한 계층의 폐기물 관리에 관련된 결정을 내릴 때에 관계자들이 전과정 목록 결과가 토론을 위한 근거 자료로 사용될 것이라면 무엇보다 이 기법의 신뢰성이 중요할 것이다. 따라서 그 방법론과 가정은 투명해야 하며 기본 데이터는 적합하고 신뢰할 수 있어야 한다. 영국 환경청이나 미국 환경보호청으로부터 인증을 받는 것도 모델의 신뢰성을 높이는 데 도움이 될 것이다. 모든 값들을 이해하고 이들이 의사결정 과정 중에 포함되도록 하는 최선의 방법은 전과정 목록 기법을 겸해 폐기물 기획 및 관리자의 경험을 통하는 것이다. 아래의 참고 문헌에서 몇 가지 사례연구들을 참조할 수 있다. 이 기법이 아시아 국가들에서도 적절히 사용될 수 있다는 점은 분명한 사실이다. 아시아 국가들이 이 모델을 수용하고 적용하는 데 도움이 되기 위하여 기사용자들의 경험들을 수집하고 이를 출간하려는 작업을 진행중이다. 사용자에게 편리하고 신뢰성과 유연성이 있는 모델과 함께 이 작업의 결과는 통합 폐기물 관리 시스템 내에서 전과정 목록이라는 환경 경영 기법의 잠재력을 시험하기에 충분할 것이다.

감사의 글

본문 중의 그림 (2)와 그림 3은 "Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory"(참고 문헌 2 참조)로부터 발췌한 것입니다.

참 고 문 헌

- 1) DOE (1995). Making Waste Work: a strategy for sustainable waste management in England and

- Wales. Department of the Environment. HMSO, London. 117pp.
- 2) White, P.R, Franke, M. and P. Hindle. 1995. Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory. Blackie Academic and Professional. 362 pp. ISBN 0-7514-0046-7.
 - 3) McDougall, F.R. and White, P.R. (1998). The Use of Life Cycle Inventory to Optimise Integrated Solid Waste Management Systems: A Review of Case Studies. Systems Engineering Models for Waste Management. Gothenburg, Sweden, 1998.
 - 4) Boswell, J.E.S. and Charters, G.J. (1997) Scavenging, salvaging and recycling on landfills. Proc. Sardinia 97, 6th International Landfill Symposium, Vol. 5, pp. 403-414.
 - 5) Brisson, I.E. (1997). Assessing the Waste Hierarchy - a Social Cost-Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Management in the European Union. AKF, Institute of Local Government Studies, Denmark. Available at www.akf.dk/eng
 - 6) Thorneloe, S.A. (1995). Overview of research to conduct life-cycle study to evaluate alternative strategies for Integrated Waste Management. Presented at Solid waste management: thermal treatment and waste-to-energy technologies, Washington D.C.
 - 7) Environment Agency. (1998). Life cycle Program for Waste Management. Program profile. UK Environment Agency.
 - 8) London, Ontario, Council Report (1997). Overview: The Recommended Waste Management Strategy for London/Middlesex.
 - 9) Area Metropolitana de Barcelona (1997) Programa Metropolitana de Gestio de Reius Municipals. (1997-2006).
 - 10) Franke, M., McDougall, F. and Sher, F. (1999). Integrated Waste Management in Europe-An Analyses of 11 Case Studies-. Conference Proceedings in English and Chinese presented at the United Nations Chinese Mayors Conference on Municipal Solid Waste Management and Landfill Gas Utilization, March 23-25, 1999, Nanjing.
 - 11) ISO 14040 Environmental management - Life Cycle Assessment- Principles and framework. (ISO, 1997).
 - 12) ISO 14041 Environmental management - Life Cycle Assessment- Goal and scope definition and Life Cycle Inventory analysis. (ISO, 1998).
 - 13) ISO 14042 Environmental management - Life Cycle Assessment- Life Cycle Impact Assessment. (ISO/FDIS 1999).
 - 14) ISO Technical Report 14049 Environmental management - Life Cycle Assessment - How to apply ISO 14041 Goal and scope definition and Life Cycle Inventory analysis. (ISO, 1999).
 - 15) Nordone, A. and Franke, M. (1999). Application of Integrated Waste Management to Developing Countries. Conference Proceedings on Biological Treatment of Waste and the Environment Conference ORBIT 99 - Organic Recovery and Biological Treatment, September 2-4, 1999, Weimar Germany.
 - 16) Thurgood, M. (1998) Modeling Waste Management. An environmental Life Cycle Inventory and economic cost analysis model for municipal solid waste management. Warmer Bulletin 58: 4-7.
 - 17) White, P.R. (1995) So what is Integrated Waste Management? Warmer Bulletin 49: 6.
 - 18) White, P.R. (1997) Life cycle assessment - a waste management policy tool? Warmer Bulletin 54: 20-21.
 - 19) Wilson, E. (1998) Life Cycle Inventory tools in Pamplona. Warmer Bulletin 58:13-15.