Korean Journal of LCA
Vol. 5, No. 1, 2004, pp. 43~49

폐지 소각 공정의 전과정평가

정수정, 류지연, 허탁
(건국대학교 화학생물공학부, 친환경제품 및 시스템 연구실)

Life Cycle Assessment on Incineration Process of Waste Paper

Soojeong Jeong, Ji-yeon Ryu, Tak Hur
(Eco-Product and System Laboratory
Dept. of Chemical and Biological Engineering, Konkuk University)

ABSTRACT

This study is about practicing LCA on the incinerating waste paper. One kilogram of waste paper needs a 0.089kwh of electricity, 0.86kg of water and 0.0086kg of various chemicalswhile burned. As a result, 1.13kg of CO2, 0.0015kg of NOx are eliminated as the outcome to the air. Also, 0.1kg of ashs and 0.013kg of arsenic acids are produced. Steam caused by using waste heat is recovered by 3.42MJ. The exhaust of CO2 in the stage of incinerating itself is 1.13kg/f.u. but it gets 0.32kg/f.u .from the energy recovery, so, the total counts 0.82kg/f.u.

The order of impact categories from the LCA result is global warming(77.7%), abiotic resource depletion (6.3%) and acidification, eutrophication, ecotoxicity. Even though it might somewhat reduce the bad effect on ecology to cut back the amount of carbon, which is the main ingredient in CO2, however, given that the amount of carbon in paper remains unchanged, that is not the proper plan. Now we can suppose that promote energy recovery would help minimizing the overall burden on the environment. One solution to increase the rate of energy recovery is reducing the content of water in food waste came along with waste paper. And this results in lessening the burden on the environment. Promoting the recycling rate of waste paper, which accounts 56% now, might be the basic solution to reduce the burden on ecology generated from the incineration of paper.

Key Words : waste paper, incineration, LCA, global warming, energy recovery

요 약 문

본 연구에서는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)기법을 이용하여 폐지 소각 공정에 대한 전과정영향평가를 수행하였다. 폐지 1kg을 소각할 경우, 전력 0.089kwh, 용수 0.86kg, 각종 화학약품 0.0086kg이 투입되고 대기배출물로 이산화탄소는 1.13kg, NOx는 0.0015kg 발생되고 바닥재와 비산재는 각각 0.1kg, 0.013kg 발생하며 폐열을 이용한 스팀 에너지 3.42MJ이 회수된다. 소각 공정 자체에 의한 이산화탄소 배출은 1.13kg/f.u.이며 에너지 회수로 인하여 0.32kg/f.u.가 환경 이득이 되어 최종적으로 0.82kg /f.u.의 이산화탄소가 발생한다.

전과정 영향평가 결과, 지구온난화가 77.7%, 자원고갈 6.3%, 산성화, 부영양화, 생태독성 순으로 조사되었다. 이산화탄소의 주원인인 탄소함량을 줄이면 환경영향이 줄어들 수 있으나 일반적인 종이의 탄소함량은 일정하므로 이는 해결방안으로 적절치 못하다. 그렇다면 폐열 에너지 회수율을 높이는 것이 전체 환경부하 저감에 도움이 될 것이다. 회수율을 높이는 방안으로는 수분함량을 줄이는 것, 즉 폐지와 함께 섞여 들어오는 음식물 쓰레기의 양을 줄이면 에너지 회수율을 좀 더 증가시켜 환경부하를 저감하는 하나의 방안이 될 것이다. 또한 보다 근본적인 해결방안으로는 되도록이면 현재 56% 정도인 폐지의 재활용률을 높여 폐지소각으로 인한 환경부하 발생을 감소시켜야 할 것이다.

주제어 : 폐지, 소각, LCA, 지구온난화, 에너지 회수

1. 연구의 배경

소각은 연소와 그 원리가 근본적으로 같은 것으로 가연성 물질로 폐기물을 이용하고, 연소 장치가 소각로라는 점만 다를 뿐이다. 연소의 주체가 되는 가연성 물질이란 탈 수 있는 물질을 의미하며, 대표적인 가연성 물질로는 석유, 석탄 등으로 대표되는 탄화수소계 물질과 목재로 대표되는 셀룰로오스계 물질이 있다. 소각대상 폐기물은 수분량, 열적 분해온도, 휘발성분의 조성, 점화온도, 고정탄소량 등의 변화가 심하기 때문에 유해한 연소 배출물들이 많이 배출될 수 있는 반면, 소각 시에 발생하는 열을 이용하여 에너지를 회수하는 긍정적인 측면도 있다.

소각 시 배출되는 오염물질에는 먼지, 산성가스(염화수소, 황산화물), 질소산화물, 다이옥신류, 중금속, 소각재 등이 있다. 연소에 의해서 생성되는 물질이 연소배출물이며 이 중에는 인체에 유해한 물질이 포함되어 있고 대기오염을 비롯한 환경오염의 원인이 된다. 이와 같이 인체에 유해한 물질은 미연소 상태에서 배출되는 연료 구성물질, 연료구성물질이 연소과정에서 다른 성분과 반응하여 생성되는 물질 및 공기 중의 산소와 질소의 반응에 의해 생성되는 것 등이 있다.

폐기물의 소각 시 배출되는 소각재는 크게 바닥재(bottom ash)와 비산재(fly ash)로 구분할 수 있으며, 바닥재는 소각로 하부에서 직접 배출되고, 비산재는 배출가스 처리장치인 집진기와 건식/반건식세정탑 등에서 발생된다. 바닥재와 비산재는 그 특성 및 유해정도가 다르기 때문에 처분방법도 다르다. 바닥재는 일반폐기물로서 수분을 가하여 비산하지 않도록 하고, 금속성 물질을 회수한 후 매립한다. 비산재에는 중금속, PAHs(Poly-cyclic Aromatic Hydrocarbons), 다이옥신류가 바닥재보다 훨씬 높은 농도로 농축되어 있어 지정폐기물로 분류되며, 사람의 건강이나 생활환경에 피해가 발생하지 않도록 오염물질의 불용화, 무해화 등 매립처분에 관한 기준에 적합하도록 처리하여야 한다.

생활폐기물은 현재 음식물 쓰레기의 분리수거로 인하여 매년 함수율이 낮아지고 있으며 이에 따른 생활폐기물의 발열량이 계속 증가추세에 있다. 이는 에너지 회수에 긍정적인 변수로 작용하고 있으며 환경성 개선에 기여할 것으로 기대된다. 또한 소각재의 적절한 처리를 통해 환경성을 개선하려는 연구들이 진행되고 있다

따라서 본 연구에서는 폐지 소각에 대한 현황을 살펴보고, 폐지 소각 공정에 대한 환경데이터베이스 구축을 통해 잠재적인 환경영향을 평가하고자 한다.

2. 국내의 폐지 소각 현황

국내 소각로 시장은 주로 도시쓰레기 대형 소각로를 대상으로 하는 대기업군과 중소규모 폐기물 소각로를 대상으로 하는 중소기업군으로 분류할 수 있으며, 순수 국내 기술로서 추진되고 있는 시설은 드물고 대부분 외국의 소각로 전문 업체로부터 기술을 도입하거나 기술제휴에 의존하고 있는 실정이다.

2002년 현재 국내에서 가동 중인 소각능력 50톤/일 이상의 생활폐기물 소각시설은 30여 곳으로 이들은 대부분 스토커식 방식에 의한 소각기술을 도입하여 운영하고 있다. 이들 소각장은 데이터 수집을 위하여 설문지를 발송하기 위한 대상업체들이다. 그러나 데이터 수집 당시 안정적인 운영을 하고 있는 소각장은 이 중 27개 업체였으며, 최종적으로 데이터를 수집한 업체는 11개 업체이다. 2001년 현재, 국내 생활계폐기물에 포함된 폐지 중 16.9%가 소각되고 있으며, 29.7%가 매립되고, 53.5% 정도가 재활용되고 있다. 대부분의 생활폐기물 소각장에서는 소각열을 회수하여 전기나 스팀을 생산하고 이를 자체 사용하거나 외부로 공급하고 있는데, 가장 높은 폐플라스틱의 소각열 다음으로 높은 것으로 알려져 있는 폐지의 소각열은 생활폐기물 평균 소각열보다 높은 발열량으로 에너지 회수에 기여를 하고 있다.

Table. 1 전체생활계폐기물과 폐지류의 발생량 및 처리방법

(단위 : 톤/일)

구분		생활계폐기물	폐지류
총발생량		48,498.6 (100%)	12,173.4 (100%)
처리방법	매립	21,000.2 (43.3%)	3,609.6 (29.7%)
	소각	6,576.3 (13.6%)	2,052.8 (16.9%)
	재활용	20,922.1 (43.1%)	6,510.7 (53.5%)

출처 : 환경부, 2001 전국폐기물 발생 및 처리현황

3. 전과정평가(Life Cycle Assessment)

3.1 목적 및 범위정의

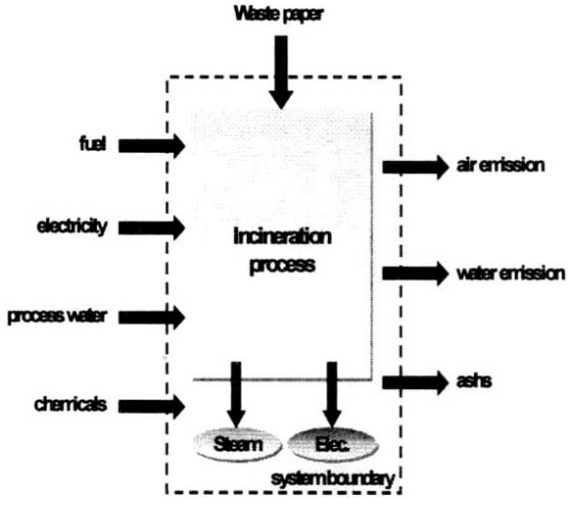

Fig. 1 폐지 소각 공정에 대한 시스템 경계

본 연구의 목적은 폐지의 소각 공정에 대한 전과정 목록 데이터베이스를 구축하고 이를 토대로 환경에 미치는 잠재적 환경영향을 평가하고자 하는 것이다. 본 연구의 대상시스템은 폐지 소각 공정으로, 연구의 목적과 관련된 기능은 폐지의 소각으로 정의하였다. 또한 이 기능을 토대로 기능단위는 폐지 1kg의 소각으로 정의하였으며, 데이터 계산의 기준이 되는 기준흐름 역시 폐지 1kg으로 정하였다.

데이터의 품질은 연구결과에 영향을 미치는 주요 요인이므로 대상이 되는 공정의 내부와 외부에 대한 데이터 품질 요건을 다음과 같이 설정하여 연구를 수행하였다.

Table. 2 데이터 품질요건

구분	소각 공정 내부	소각 공정 외부
시간적 경계	2001년	가능한 최신의 데이터베이스
공간적 경계	11개 소각장	생산지 또는 생산지 환경과 유사한 지역의 데이터
기술적 경계	대상 소각장의 공정	유사공정 데이터

영향범주는 자원고갈, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학산화물형성, 산성화, 부영양화, 생태독성, 인간독성의 8가지 영향범주를 고려하였으며 영향평가 방법론은 산업자원부 영향평가 방법론을 적용하였다.

가정 및 제한사항으로는 ① 소각공정 관련 설비 및 Infra를 구축하는 과정에 대한 환경부하는 고려하지 않았다. ② 폐지가 소각공정으로 운반되는 수송부분은 제외하였다. ③ 투입되는 화학물질의 일부는 용도별로 구분하여 통합하였으며, 데이터베이스가 존재하지 않는 화학물질은 elementary flow로 가정하였다. ④ 소각공정에서 발생하는 이산화탄소량의 경우 생활폐기물과 폐지의 탄소 구성비율(%)과 연소방정식을 이용하여 계산하였다. ⑤ 소각공정에서 발생하는 금속류, 소각재, 폐수 등은 생활폐기물과 폐지의 회분량비, 수분함량비를 이용하여 데이터를 계산하였다. ⑥ 소각재와 바닥재의 매립에 따른 환경부하는 데이터의 부재로 고려하지 못했다.

3.2 전과정 목록분석

전과정 목록분석은 ISO 14041의 절차에 준하여 수행되었으며, 연구의 목적 및 범위정의에 정의한 내용을 토대로 데이터를 수집, 검증하고 이를 분석, 계산하여 전과정 목록표를 작성하였다.

폐지 소각 공정은 폐기물 반입/저장/투입, 소각, 연소가스 처리, 소각재 처리, 배출수 처리, 여열 이용 공정 등의 과정으로 구분할 수 있다. 그러나 소각장에서는 공정데이터를 위와 같이 세부적인 단위공정으로 세분화하여 데이터를 관리하지 않고 전체로 통합하여

관리하고 있기 때문에 소각장의 데이터 관리수준을 반영하여 전체를 하나의 단위공정으로 통합하기로 하였다. 데이터 수집은 모두 2001년도 데이터를 대상으로 실시하였으며 수집된 데이터는 단위공정별로 업체들 간의 가중평균을 실시하여 데이터를 구축하였다.

데이터 수집을 위한 설문조사는 2001년도 운영현황을 기준으로 1회 실시하였으며 대기/수질오염물질 배출현황, 전력사용 현황, 용수 사용 현황, 공정흐름도, 약품/소모품 사용현황에 대한 연도별 또는 월별데이터를 요청하여 데이터를 수집하였으며 데이터 계산은 다음과 같다.

■열에너지, 전기에너지 회수

Dulong 식을 이용하여 발열량을 계산하면, 생활폐기물은 2,392kcal/kg, 폐지는 3,263kcal/kg의 열량이 얻어지게 된다. 이중 회수되어 외부로 공급되는 에너지는 열에너지 810kcal/kg, 전기에너지 0.0004kwh/kg이며, 이는 생활폐기물 기준 에너지이므로 생활폐기물과 폐지의 발열량비로 할당하여 계산하였다.

■이산화탄소 발생량

생활폐기물을 종이류, 플라스틱류 등 물리적 조성에 따라 구분한 뒤, 다시 각 폐기물들에 대한 원소조성비를 조사하였다. 이로써 생활폐기물 및 폐지 내에 포함된 탄소량을 산출하여 완전연소를 가정하고 이산화탄소량을 계산했다.

■바닥재 및 금속류

소각공정에서 발생한 바닥재량을 생활폐기물의 회분량으로 보고, 폐지의 회분발생율 9.3%를 적용하여 할당을 수행하였다.

■위탁처리폐수

폐기물이 소각되기 전 저장조에 저장되어 있는 동안 발생하는 폐기물 폐수는 소각 또는 외부로 위탁처리되며, 이는 폐기물 매립시의 침출수와 성상이 비슷하다고 가정하고, 매립공정의 침출수처리 공정에 대한 데이터베이스를 연결하였다.

이렇게 수집한 자료를 기준흐름인 폐지 1kg 당 gate-to-gate 목록을 작성하였다. gate-to-gate 목록을 분석한 결과, 폐지 1kg을 소각하는 데에는 전력 0.089kwh, 용수 0.86kg, 각종 화학약품 0.0086kg이 투입되고 대기배출물로 이산화탄소는 1.13kg, NOx는 0.0015kg 발생되고 바닥재와 비산재는 각각 0.1kg, 0.013kg 발생하며 폐열을 이용한 스팀은 3.42MJ 회수되는 것으로 나타났다.

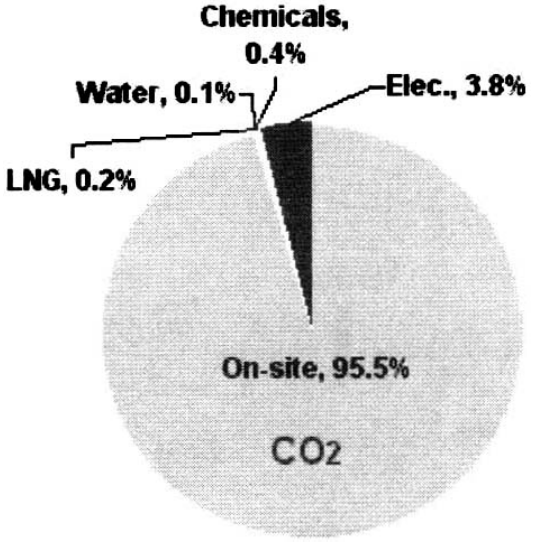

Fig. 2 목록분석 결과 (이산화탄소)

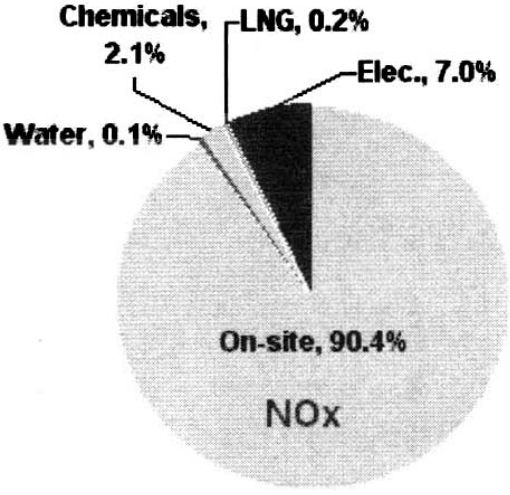

Fig. 3 목록분석 결과 (NOx)

Table. 3 폐지 1kg 소각에 대한 주요 투입/산출물

INPUTS			OUTPUTS		
구분	투입량	단위	구분	배출량	단위
전기	8.90E-2	kwh	CO2	1.13E+0	kg
LNG	4.02E-3	kg	NOx	1.51E-3	kg
Diesel	1.11E-3	kg	바닥재	1.01E-1	kg
용수	8.63E-1	kg	비산재	1.28E-2	kg
화학물질	8.57E-3	kg	스팀회수	3.42E+0	MJ

3.3 전과정 영향평가

본 연구에서는 ISO 14042에 언급되어 있는 절차대로 전과정 영향평가를 실시하였으며 산업자원부 영향평가 방법론을 적용하여 자원고갈, 지구온난화, 오존층 파괴, 광화학산화물형성, 산성화, 부영양화, 인간독성, 생태독성의 8가지 영향범주에 대해 분류화, 특성화, 정규화, 가중치 부여 순으로 영향평가를 실시하였다.

3.3.1 특성화 결과

특성화 기여도를 파악하기 위해 다음 [그림4]와 같이 주요 투입산출 인자의 각 영향범주별 기여도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 지구온난화, 산성화, 부영양화, 생태독성 등에서 소각 공장 자체의 이산화탄소와 질소산화물 등의 대기 배출물에 의한 환경 영향이 가장 두드러짐을 알 수가 있다. 자원고갈 범주에서는 전기사용과 LNG 등의 에너지 사용에 따른 원유와 석탄이 주요 영향요인이다. 인간독성은 화학약품 사용에 의한 영향이 대부분으로 그 원인은 NaCl 사용에 따른 dioxin배출이 주요 원인이다.

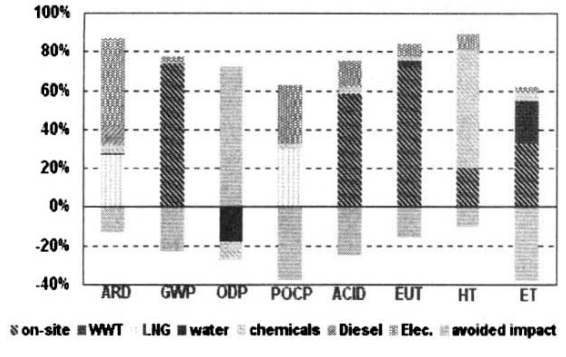

Fig. 4 영향범주별 주요 투입산출 인자의 특성화 결과

Avoided impact은 생태독성에서 가장 큰 저감효과가 나타나는데, 이는 폐열로 스팀을 회수함으로써 스팀 생산에 따른 수은 배출 저감에 의한 효과와 역시 마찬가지로 폐열 회수에 의한 전기생산에 의한 카드뮴과 암모니아 저감에 따른 결과이다.

3.3.2 가중치 부여 결과

가중치 부여 단계에서의 영향범주별 환경영향의 비중은 지구온난화가 77.7%로 압도적인 비율을 차지했고 그 뒤를 이어 자원고갈 6.3%, 산성화, 부영양화, 생태독성 순으로 조사되었다. 지구온난화의 주요 원인으로는 예상한 바와 같이 소각물의 탄소원과 연료의 연소에 의한 이산화탄소 배출에 의한 영향이 압도적인 것으로 나타났다. 소각 공정 자체에 의한 이산화탄소 배출은 1.13kg/f.u.이며 에너지 회수로 인하여

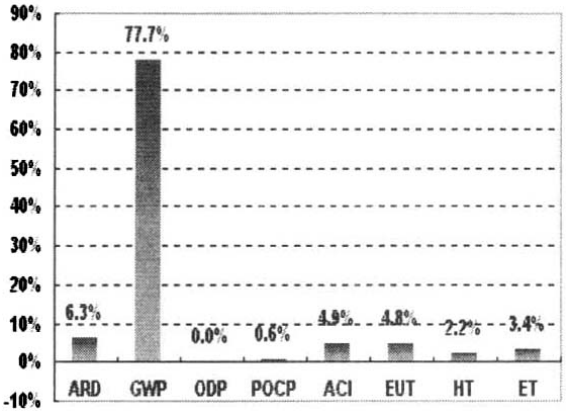

Fig. 5 영향범주별 환경영향 분포

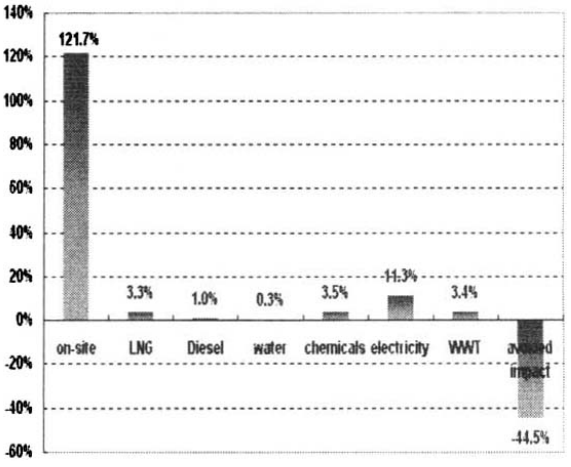

Fig. 6 파라미터별 환경영향 분포

0.32kg/f.u.가 저감되어 최종적으로 0.82kg /f.u.의 이산화탄소가 발생하게 된다. 그 외의 자원고갈은 전력사용과 기타 연료의 사용에 따른 원유의 소모에 의한 영향이다.

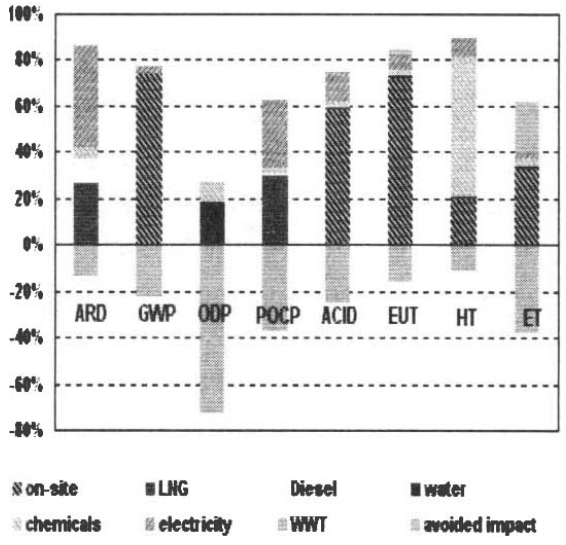

Fig. 7 영향범주별 주요 투입산출 인자의 가중치 부여 결과

3.4 민감도 분석

폐지 소각 공정은 앞서 예상한 바와 같이 폐지의 탄소성분 함유율에 따른 이산화탄소가 전체 환경영향의 대부분을 차지하고 있다. 이산화탄소의 주원인이 되는 탄소함량을 줄이면 환경영향이 줄어들 수 있겠으나 일반적인 종이의 탄소함량은 일정하므로 이 방법은 해결방안으로 적절치 못하다. 그렇다면 에너지 회수율을 높이는 것이 전체 환경부하를 저감하는데 도움이 될 것이다. 회수율을 높이는 방안으로는 수분함량을 줄이는 것, 즉 폐지와 함께 섞여 들어오는 음식물 쓰레기의 양을 줄인다면 에너지 회수율을 좀 더 증가시켜 환경부하를 저감하는 하나의 방안이 될 것이다.

또한 보다 근본적인 해결방안으로는 되도록이면 현재 56% 정도인 폐지의 재활용률을 높여 폐지의 소각으로 인한 환경부하 발생을 감소시키는 방안이 있다. 본 민감도 분석에서는 소각재와 비산재의 매립에 따른 환경영향을 규명하지 못하여 동등한 비교가 불가능하므로 폐지 재활용과의 비교분석은 추후 연구를 통해 실시할 예정이며 이 절에서는 회수되는 에너지의 증가(1.5배)에 따른 민감도 분석을 실시하였다.

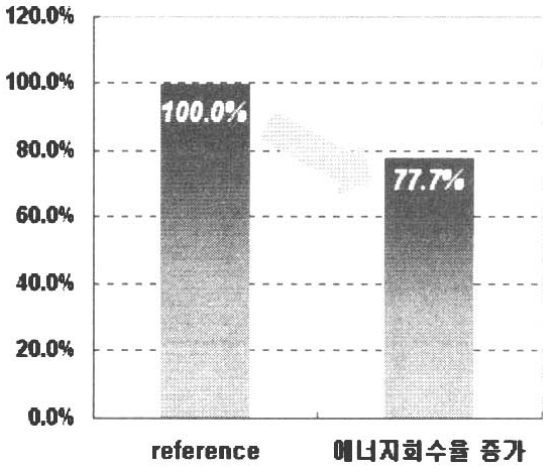

Fig. 8 에너지 회수율에 따른 민감도 분석결과

4. 결 론

본 연구에서는 폐지 소각 공정에 대한 전과정평가를 수행하였으며, 시스템 경계는 생활폐기물로 버려진 폐지가 소각장으로 반입되어 소각되는 소각공정이다. 데이터는 2002년 현재 국내에서 가동 중인 소각능력 50톤/일 이상의 생활폐기물 소각시설 11곳의 데이터를 통합하여 계산하였다. 전과정 목록분석 결과, 기능 단위인 폐지 1kg을 소각하는 데에는 전력 0.089kwh, 용수 0.86kg, 각종 화학약품 0.0086kg이 투입되고 대기배출물로 이산화탄소는 1.13kg, NOx는 0.0015kg 발생되고 바닥재와 비산재는 각각 0.1kg, 0.013kg 발생하며 폐열을 이용한 스팀은 3.42MJ 회수되는 것으로 나타났다. 소각 공정 자체에 의한 이산화탄소 배출은 1.13kg/f.u.이며 에너지 회수로 인하여 0.32kg/f.u.가 환경이득이 되어 최종적으로 0.82kg /f.u.의 이산화탄소가 발생하게 된다.

전과정 영향평가 결과, 지구온난화가 77.7%로 압도적인 비율을 차지했고 그 뒤를 이어 자원고갈 6.3%, 산성화, 부영양화, 생태독성 순으로 조사되었다. 폐지 소각 공정은 앞서 예상한 바와 같이 폐지의 탄소성분 함유율에 따른 이산화탄소가 전체 환경영향의 대부분을 차지하고 있다.

이산화탄소의 주원인이 되는 탄소함량을 줄이면 환경영향이 줄어들 수 있겠으나 일반적인 종이의 탄소함

량을 일정하므로 이 방법은 해결방안으로 적절치 못하다. 그렇다면 에너지 회수율을 높이는 것이 전체 환경부하를 저감하는데 도움이 될 것이다. 회수율을 높이는 방안으로는 수분함량을 줄이는 것, 즉 폐지와 함께 섞여 들어오는 음식물 쓰레기의 양을 줄이면 에너지 회수율을 좀 더 증가시켜 환경부하를 저감하는 하나의 방안이 될 것이다.

또한 보다 근본적인 해결방안으로는 되도록이면 현재 56% 정도인 폐지의 재활용률을 높여 폐지의 소각으로 인한 환경부하 발생을 감소시켜야 할 것이다.

소각재의 매립에 따는 환경영향을 규명하고자 하는 움직임이 세계적인 추세이다. 그러나 시간적인 제약과 실제 fate의 규명에 따른 어려움으로 연구가 미흡한 상태이다. 추 후 소각재의 매립에 따른 토양오염에 관한 연구가 계속되어 폐지 재활용, 폐지 소각, 폐지 매립의 환경영향을 보다 정확하게 비교분석하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1) 이건모, 허탁, 김승도, 환경 전과정평가(LCA)의 이론과 지침, 한국인정원, 1998
2) 임송택, 생활폐기물 소각 및 매립 공정에 대한 전과정평가 연구, 2003
3) 환경부, 환경백서, 2003
4) 환경부, 2001전국폐기물통계조사, 2002
5) G. Finnveden, Life Cycle Assessment of Integrated Solid Waste Management Systems, Systems engineering models for waste management, 1998
6) J. Sundqvist, Landfilling and incineration in LCA and system analyses, Systems engineering models for waste management - International workshop, Sweden, 1998
7) EU, Technical data for waste incineration.
8) Bernt Johnke, Emission from waste incineration