

## 지정폐기물 소각공정의 전과정평가(LCA) 연구

박익범, 송일석, 이문구\*, 임송택\*, 정재수\*

(경기도보건환경연구원, \*(주)에코아이)

## Life Cycle Assessment on the Incineration Process of Specified Wastes

Ik-Beom Park, Il-Seok Song, Moon-Gu Lee\*, SongT. Lim\*, Jaesoo Jung\*

(Gyeonggi-do Institute of Health and Environment, \*Ecoeye Co., Ltd.)

### ABSTRACT

This study was conducted to identify and evaluate the environmental impacts from inputs and outputs for the incineration facilities of specified wastes. System boundary was from the inflow of wastes to the outflow of residues in the facilities, and the LCA software used was SimaPro 6.0 pro. The gate-to-gate inventory showed that the input amounts of electricity, diesel, water and chemicals were 1.92E-01kWh, 4.13E-03kg, 1.54E+00kg and 1.20E-03kg respectively and the output amounts of CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, bottom ash, fly ash and steam were respectively 2.01E+00kg, 4.74E-03kg, 6.67E-04kg, 2.76E-01kg, 1.45E-02kg, and 1.40E+00MJ in the incineration of 1kg specified wastes. From the weighting results using the Korea LCA methodology of MOCIE, the incineration impact percentages of global warming, abiotic resource depletion and human toxicity showed 93.4%, 4.3% and 1.0% of the total respectively, and CO<sub>2</sub> produced from the incineration process was confirmed as the main contribution substance of global warming. C facility with steam production had 86.4% of total environmental impacts based on the incineration impact compared with A & B facilities with non-steam production in the incineration of specified wastes. Therefore the active heat energy recovery from non-steam production facility is preferable to reduce the environmental impacts caused by the incineration because the discharge of CO<sub>2</sub> is the inevitable characteristics of the incineration process.

Key words : LCA, specified wastes, incineration process, heat energy recovery

### 요 약 문

본 연구는 지정폐기물 소각공정의 투입물 및 산출물에 대한 데이터베이스를 구축하고, 투입물에 의한 자원·에너지소모와 산출물에 의한 잠재적인 환경영향을 종합적으로 평가하기 위하여 3개의 지정폐기물 소각시설에 대하여 수행되었다. 시스템경계는 폐기물의 소각시설 반입부터 소각재의 배출까지이며, SimaPro 6.0 pro를 이용하여 전과정평가를 수행하였다. gate-to-gate 목록 분석결과, 지정폐기물 1kg을 소각하는데 전기 1.92E-01kWh, 경유 4.13E-03kg, 용수 1.54E+00kg, 화학약품 1.20E-03kg이 투입되고, CO<sub>2</sub> 2.01E+00kg, SO<sub>x</sub> 4.74E-03kg, NO<sub>x</sub> 6.67E-04kg, 바닥재 2.76E-01kg, 비산재 1.45E-02kg 등이 배출되며, 회수된 소각에너지 중 스팀 1.40E+00MJ이 외부로 공급되는 것으로 나타났다. 지정폐기물 소각공정에서 발생한 영향범주별 소각영향(산자부 영향평가 방법론, 가중치 부여단계)을 살펴보면 지구온난화 범주가 93.4%, 자원고갈범주 4.3%, 인산독성범주 1.0% 순으로 지구온난화 범주가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 주요 원인은 대부분 소각공정에서 발생한 CO<sub>2</sub>에 의한 것임을 확인하였다. 지정폐기물 소각시설중에서 열회수를 통해 스팀을 생산하는 시설과 스팀을 생산하지 않는 소각시설의 전체 환경영향을 검토한 결과 스팀을 생산하는 C소각시설의 전체 환경영향(소각영향+회피영향)은 소각영향대비 86.4% 수준을 유지하였다. 따라서 지정폐기물의 소각으로 인한 전체 환경영향을 줄이기 위해서는 적극적인 소각 열에너지 회수가 필요하다고 할 것이다.

주제어 : 전과정평가, 지정폐기물, 소각공정, 열에너지회수

### 1. 서론

인간의 삶과 더불어 필연적으로 발생하는 폐기물의 관리문제는 대량 생산·소비시대인 현대를 살아가는 우리에게 큰 사회문제로 대두되고 있다. 우리나라는 폐기물 문제를 접근함에 있어 1980년대에 단순히 '폐기물'을 '청소개념'으로 처리함을 시작으로, 1990년대에는 '재활용'문제로 정책중심이 이동하였으며, 최근에는 '폐기물 최소화' 및 '유효이용' 개념이 폐기물관리정책의 핵심을 이루고 있다. 특히 인구와 산업이 집중되어 있는 경기도는 폐기물의 발생 최소화, 환경친화적 처리, 재활용 기반조성 등 자원순환형 폐기물관리 시스템을 정착시키려는 노력을 경주하고 있다. 현행 폐기물관리법에서는 폐기물을 분류함에 있어서 발생원과 특성에 따라 생활폐기물과 사업장폐기물로 구분하고, 사업장폐기물중에서 폐유·폐산 등 주변환경을 오염시킬 수 있는 유해한 물질로서 대통령령이 정하는 폐기물을 '지정폐기물'로 규정하고 있다. 또한 폐기물관리법 시행령 별표1에서는 지정폐기물의 종류를 열거하고 있는 바, 대표적인 지정폐기물에는 폐산, 폐알칼리, 폐유, 폐유기용제, 폐합성고분자화합물, 폐석면, 광재, 분진, 폐주물사, 소각잔재물, 고화처리물, 폐촉매, 폐흡착제, 폐농약, PCB 함유폐기물과 감염성폐기물 등이 있다. 이러한 지정폐기물은 생활폐기물에 비하여 상대적으로 폐기물의 성상이 일정하고 발열량이 높아서 단순소각보다는 에너지 회수의 관점에서 접근함이 바람직하다고 할 것이다.

이하에서는 국내에 가동중인 3개 지정폐기물 소각 시설(A 및 B시설 : 스팀 비생산, C시설 : 스팀 생산)에 대한 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 실시하여, 폐기물 소각공정의 투입물 및 산출물의 양을 정량화하고, 투입물에 의한 자원소모와 산출물에 의한 잠재적 환경영향 평가 및 주요이슈(key issue) 규명을 통하여 지정폐기물 소각시설의 효율적 관리, 기업의 환경경쟁력강화 및 종합적인 폐기물관리정책의 기초자료로 제공하고자 한다.

### 2. 지정폐기물의 발생 및 처리 현황

#### 2.1 지정폐기물의 발생 현황

국내의 지정폐기물 발생 추이를 살펴보면 <Table

1>에 나타난 바와 같이 국제통화기금(IMF)하에서 경제활동과 소비가 다소 위축된 1998년(1,922천톤)을 제외하고는 연도별 전체 지정폐기물 발생량은 증가추세를 보이고 있다. 또한 지정폐기물의 종류별 발생현황(2003년)을 살펴보면 폐산(26.3%), 폐유(20.7%), 폐유기용매(17.4%)의 순으로 발생비율이 높게 나타났다.

<Table 1> Generation of Specified Wastes by Material Type

(Unit :1,000 ton/year, %)

	1997	Rate	1999	Rate	2001	Rate	2003	Rate
Total	2,217	(100)	2,733	(100)	2,958	(100)	2,913	(100)
Waste Acid	639	(28.8)	838	(30.7)	747	(25.3)	766	(26.3)
Waste Alkali	427	(19.3)	314	(11.5)	221	(7.5)	113	(3.9)
Waste Oil	257	(11.6)	415	(15.2)	579	(19.6)	603	(20.7)
Waste Organic Solvent	395	(17.8)	522	(19.4)	549	(18.6)	508	(17.4)
Waste Synthetic Plastics	90	(4.0)	125	(4.6)	50	(1.7)	54	(1.9)
Dust	272	(12.3)	334	(12.2)	367	(12.4)	385	(13.2)
Sludge	117	(5.3)	142	(5.2)	203	(6.9)	222	(7.6)
Infectious Waste	-	-	-	-	28	(0.9)	37	(1.3)
Others	20	(0.9)	45	(1.6)	213	(7.2)	225	(7.7)

Source : Ministry of Environment

#### 2.2 지정폐기물의 처리 현황

국내의 지정폐기물 처리 추이를 살펴보면 <Table

<Table 2> Disposal Trend of Specified Wastes

(Unit : ton/year)

	1997	1999	2001	2003
Total	2,217,215 (100%)	2,733,313 (100%)	2,958,201 (100%)	2,913,257 (100%)
Recycling	1,134,540 (51.2%)	1,372,255 (50.2%)	1,446,069 (48.9%)	1,695,311 (58.2%)
Incineration	391,448 (17.6%)	466,292 (17.0%)	659,600 (22.3%)	499,879 (17.2%)
Landfill	216,452 (9.7%)	261,716 (9.6%)	452,678 (15.3%)	519,197 (17.8%)
Others	474,775 (32.5%)	633,050 (23.2%)	399,854 (13.5%)	198,870 (6.8%)

Source : Ministry of Environment

2>에 나타난 바와 같이 재활용과 매립은 증가추세이며 소각은 비슷한 추세를 보이고 있다. 하지만 좁은 국토여건 및 매립지 확보난을 고려할 때 지정폐기물 처리방법으로서의 소각은 일정부분 불가피하다고 할 것이다. 또한 지정폐기물의 처리방법별 현황(2003년)을 살펴보면 재활용 58.2%, 소각 17.2%, 매립 17.8%, 기타 6.8%를 차지하고 있다.

### 3. 지정폐기물 소각공정의 전과정평가

#### 3.1 목적 및 범위의 정의

##### 3.1.1 연구 목적

본 연구의 목적은 지정폐기물 소각공정의 투입물 및 산출물에 대한 데이터베이스를 구축하고 이를 기초로 환경에 미치는 잠재적인 영향을 평가하는 한편 주요 이슈(key issue)를 규명하는 데 있다. 또한 본 연구의 대상 청중은 지정폐기물 소각처리시설 관련자, 폐기물 관련정책 입안자, 비정부 기구(NGOs) 등이다. 그리고 본 연구 결과는 국가, 지자체 및 기업의 지정폐기물 관련 정책에 기초자료로 활용이 가능하다.

##### 3.1.2 연구 범위

###### (1) 기능 및 기능단위

본 연구의 대상시스템은 '지정폐기물의 소각공정', 주요 기능은 '지정폐기물의 소각'으로 정의하고, 이를 토대로 기능단위(functional unit)는 '지정폐기물 소각 1kg'으로 정의하였다. 또한, 데이터 계산의 기준이 되는 기준흐름(reference flow)은 '지정폐기물 1kg'으로 정하였다.

###### (2) 시스템 경계

시스템 경계는 지정폐기물이 소각시설로 반입된 후부터 연소, 가스 처리 등을 거쳐 소각재가 배출되는 과정까지로 정의하였다. 지정폐기물 소각공정은 폐기물 저장공정, 공급공정, 연소공정, 연소가스 처리공정, 폐열이용공정, 소각재배출공정 등이 포함되며, 소각시설까지의 수집·운반·적환공정, 위탁폐수처리공정, 소각재 처리공정은 제외하였다.

###### (3) 시스템의 주요 공정특성

<Table 4>에 나타난 바와 같이 데이터 수집대상인 3개 지정폐기물 소각시설의 공정특성을 살펴보면 다음과 같다. A소각시설은 폐열보일러를 설치하지 않고 소각로에서 배출된 배출가스를 수분사 가스 냉각실에서 약 360℃로 냉각한 후, 활성탄 및 소석회를 연속적으로 분사하여 SOx, HCl등의 산성가스와 다이옥신류, 중금속 등을 흡착하면서 B/F로 이동하여 B/F 내부의 여과포에 비산재, 소석회 분말등과 함께 퇴적층을 형성하여 다이옥신류, 중금속 등을 흡착 제거한다. 또한 B소각시설은 연소실 상부에서 노즐을 통하여 요소수를 분사하여 질소산화물을 제거하고, SDA에서 소석회 슬러리를 분사하여 SOx, HCl 등의 산성가스를 제거한다. B/F입구의 덕트내로 A/C분말을 연속적으로 분무하여 배출가스중의 다이옥신류, 중금속 등을 흡착하면서 B/F로 이동하여 B/F내부의 여과포에 비산재, 소석회 분말등과 함께 퇴적층을 형성하여 다이옥신류, 중금속 등을 흡착 제거한다. 그리고 C소각시설은 ESP를 집진 장치로 사용하고, 후단에 W/S를 설치하여 가성소다 수용액을 분사함으로써 산성가스를 제거하며, 이어서 SCR에서 질소산화물 등을 제거하며, 특히 C소각시설은 폐열보일러를 이용하여 스팀을 생산하고 있다.

<Table 4> Combination of air pollution control units in the incineration facilities

Facility Name	Air Pollution Control Unit	Remarks
A facility	INC + GCT + A/C & Lime + B/F	-INC : Incinerator -SNCR :
B facility	INC + SNCR + WHB + Cyclone + SDA + B/F	Selective Non-Catalytic Reduction -GCT : Gas Cooling Tower -WHB : Waste Heat Boiler -SDA : Semi-Dry Absorber -W/S : Wet Scrubber
C facility	INC + WHB + ESP + W/S + SCR	-A/C : Activated Carbon -B/F : Bag Filter -ESP : Electrostatic Precipitator

###### (4) 데이터 품질 요건

지정폐기물 소각공정에 대한 데이터 수집을 위한 품질요건은 소각공정 내부와 소각공정 외부에 대하여 시간적범위, 공간적범위, 기술적범위로 세분화하여 설정하였다. 즉, 소각공정 내부데이터는 데이터를 수집할

3개 지정폐기물 소각시설의 현장데이터(2003년)를 수집하는 것을 원칙으로 하였다. 소각장 외부 데이터는 기술계로 투입되거나 산출되는 상위 및 하위흐름 데이터베이스로서 이에 대한 시간적 범위는 5년 이내의 데이터베이스를 수집하는 것을 원칙으로 가능한 최신의 데이터를 수집하였다. 공간적 범위는 물질과 에너지의 생산지 데이터를 수집하는 것을 원칙으로 하였으며, 생산지의 데이터베이스가 없는 경우에는 생산지와 환경이 유사한 지역의 데이터베이스를 수집하였다.

(5) 가정 및 제한 사항

- 소각로 본체, 대기오염 방지설비 등 소각공정관련 시설과 설비의 구축과정에 대한 환경부하는 고려하지 않았다.
- 기술계로 투입되거나 산출되는 데이터 중에서상위 및 하위흐름 데이터베이스가 없는 경우에는 기본 흐름(elementary flow)으로 가정하였다.
- 각 물리적 조성별 수분 함량 및 화학적 조성값은 소각대상폐기물의 가중평균값을 사용하였으며, 소각시설의 연소용 공기나 작동유는 주요 이슈가 아니므로 제외하였다.
- 소각과정에서 발생한 잔재물인 바닥재(bottom ash)와 비산재(fly ash)는 주로 매립된 후 장기간 중금속이 용출되는 등 환경부하의 원인이 되지만 관련 데이터의 부재로 고려하지 못하였다.
- 소각시설 배출폐수의 위탁폐수처리 관련 데이터는 입수할 수 없어 고려하지 못하였다.
- 소각공정에서 발생하여 배출되는 CO<sub>2</sub>량은 소각대상 폐기물과 보조연료의 탄소함량 및 이론연소방정식을 이용하여 계산하였다.
- 월별 데이터의 일부가 누락된 경우에는 연간 평균 데이터로 대체하였으며, 월별 데이터 전체가 없는 경우에는 다른 소각시설의 연간 평균 데이터로 대체하였다.

3.2. 전과정 목록분석

(1) 전과정 목록분석은 ISO14041의 절차에 준하여 수행하였다. 또한 3개 지정폐기물 소각시설(A시설, B 시설, C시설)의 데이터를 각각 수집한 후 하나의 소각공정이 존재함을 가정하고 다시 각 데이터들을 통합하였다. 그리고 지정폐기물 1 kg을 기준하여 환산하

는 과정을 거쳐 <Table 3>과 같이 소각 공정에 대한 gate-to-gate 목록표를 완성하였다.

(2) gate-to-gate 목록표의 분석결과, 지정폐기물 1kg을 소각하는데 전기 1.92E-01kwh, 경유 4.13E-03kg, 용수 1.54E+00kg, 각종 화학약품 1.2E-03kg 이 투입되고, CO<sub>2</sub> 2.01E+00kg, SO<sub>x</sub> 4.74E-03kg, NO<sub>x</sub> 6.67E-04kg, 바닥재 2.76E-01kg, 비산재 1.45E-02kg 등이 배출되며, 회수된 소각에너지 중 스팀 1.40E+00MJ이 외부로 공급되는 것으로 나타났다.

<Table 3> Gate-to-gate inventory for the incineration of specified wastes

INPUTS			
Group	Name	Unit/f.u.	Amount
Main Flow	Specific wastes	kg	1.00E+00
Energy	Electricity	kWh	1.92E-01
Fuel	Diesel	kg	4.13E-03
Utility	Industrial water	kg	1.51E+00
Utility	Potable water	kg	0.03E+00
Chemical	NaOH(50%)	kg	1.20E-03
Chemical	FeCl <sub>3</sub> (35%)	kg	4.39E-03
Chemical	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (70%)	kg	2.59E-04
Chemical	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO(40%)	kg	2.10E-05
Chemical	Activated carbon	kg	1.61E-04
Chemical	Ca(OH) <sub>2</sub>	kg	2.21E-03

OUTPUTS			
Group	Name	Unit/f.u.	Amount
Co-product	Steam	MJ	1.40E+00
Air Emission	SO <sub>x</sub>	kg	2.35E-04
Air Emission	NO <sub>x</sub>	kg	6.67E-04
Air Emission	HCl	kg	6.13E-05
Air Emission	CO	kg	1.65E-04
Air Emission	Dust	kg	1.20E-04
Air Emission	Dioxin	kg	3.01E-11
Air Emission	CO <sub>2</sub>	kg	2.01E+00
Air Emission	Cu	kg	9.95E-06
Air Emission	Ni	kg	9.86E-07
Air Emission	Pb	kg	5.63E-06
Solid Waste	Fly ash	kg	1.45E-02
Solid Waste	Bottom ash	kg	2.76E-01

(3) 데이터베이스의 연결

본 연구는 LCA software로서 SimaPro를 사용하고 상기한 gate-to-gate 목록표 중 기술계로 투입되거나 산출되는 목록에 대해 상위 및 하위흐름관련 국내 데이터베이스(산자부, 환경부) 및 외국 데이터베이스(IDEMAT, BUWAL 등)를 연결하여 cradle-to-grave 데이터베이스로 전환하였다.

3.3 전과정 영향평가

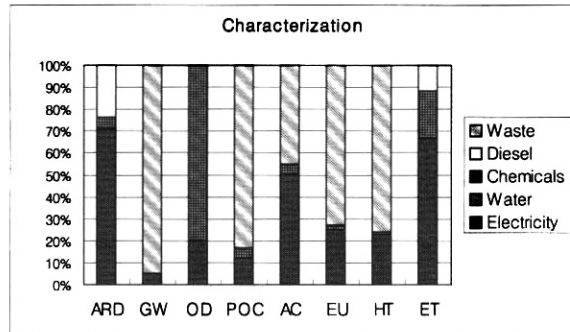
(1) 전과정영향 평가에서는 산업자원부에서 개발한 영향평가 방법론을 적용한 특성화인자, 정규화인자 및 가중치부여인자를 적용하여 무차원 단일지수(single score)로 잠재적 환경영향값을 산출하였다.

(2) 또한 영향범주로는 자원고갈(abiotic resource depletion, ARD), 지구온난화(global warming, GW), 오존층파괴(ozone layer depletion, OD), 산성화(acidification, AC), 광화학산화물형성(photochemical oxidant creation, POC), 부영양화(eutrophication, EU), 인간독성(human toxicity, HT), 생태독성(eco toxicity, ET) 등 8개 영향범주를 고려하였다. 그리고 ISO14042의 절차에 준하여 분류화, 특성화, 정규화, 가중치 부여 순으로 전과정영향평가를 수행하였다.

(3) 또한 소각공정에의 투입·산출물의 종류가 많으므로 이를 지정폐기물, 전기에너지, 용수(공업용수, 상수 포함), 보조연료(경유), 화학물질(활성탄, 가성소오다, 소석회, 황산, 요소 등) 및 환경영향 회피효과(외부로 공급되는 스팀, 'avoided impact') 등 6개 영향인자로 분류하여 영향범주에의 기여도 파악을 용이하게 하였다. 여기서 환경영향 회피효과(avoided impact)라 함은 소각공정에서 소각열을 회수하여 일정량의 스팀과 전기를 생산하지 않았다면 그 만큼의 에너지 생산을 위하여 화석연료 채취부터 최종 제품인 스팀·전기 생산에 이르기까지 투입·산출물에 의한 환경부하가 발생하였을 것이지만, 소각열에너지 회수로 인해 해당량 만큼의 환경부하 발생 방지효과를 갖게 됨을 의미하며, 일반적으로 음의 부호(-)의 값을 갖는다.

3.3.1 특성화 단계

<Fig. 1>은 각각의 영향인자들이 해당 영향범주내

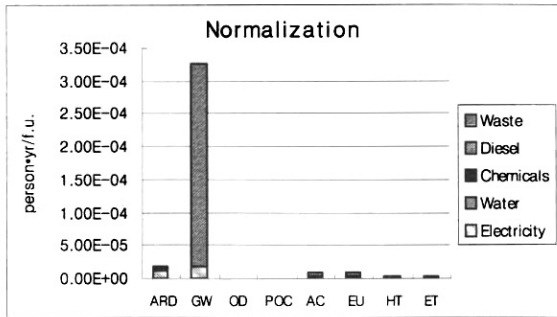


<Fig.1> Characterization results for the incineration of specified wastes

에 미치는 영향의 크기를 정량화하는 특성화 단계의 분석결과를 나타낸 것으로 전체 환경영향에서 회피영향을 제외한 소각영향만을 표시한 것이다. 자원고갈범주는 전기(71.0%)와 보조연료(23.3%)의 생산이 주요 영향인자였으며 소모되는 자원은 원유, 석탄, 천연가스 순이었다. 지구온난화범주는 지정폐기물 소각(94.6%) 및 전기생산(5.3%)이 주요 영향인자였으며 주요 기여물질은 CO<sub>2</sub>였다. 오존층파괴범주는 화학물질(80.2%) 및 전기생산(19.8%)이 주요 영향인자였으며, 주요 기여물질은 화학물질 생산과 관련된 할론가스였다. 광화학산화물형성범주는 지정폐기물 소각(83.1%) 및 전기생산(12.3%)이 주요 영향인자였으며, 주요 기여물질은 일산화탄소와 황산화물이었다. 산성화, 부영양화 및 인체독성 범주는 지정폐기물 소각이 각각 4.52%, 73.0%, 76.0% 및 전기 생산이 각각 50.0%, 25.2%, 23.1%로서 주요 영향인자로 나타났으며, 주요 기여물질은 산성화의 경우 질소산화물, 염화수소, 황산화물이고, 부영양화는 질소산화물이며, 인간독성은 납, 니켈, 황산화물, 질소산화물 등이었다. 생태독성범주는 전기(66.7%), 보조연료(11.6%) 및 화학약품(21.5%) 생산이 주요 영향인자였으며, 주요 기여물질은 페놀, 카드뮴, 다환방향족탄화수소(PAH) 등이었다

3.3.2 정규화 단계

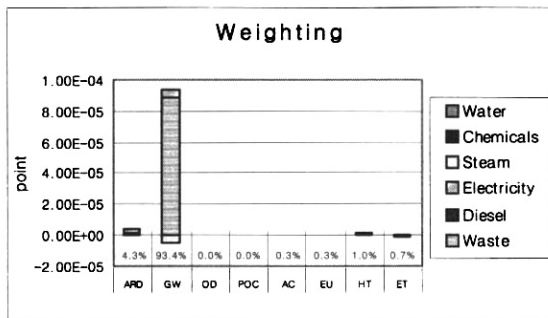
<Fig. 2>는 8개 환경영향 범주간의 상대적 비교가 가능한 정규화 단계의 분석 결과를 나타낸 것이다. 정규화 결과 전체 환경영향중 소각영향에서 차지하는 각 영향범주의 정규화 값이 지구온난화>자원고갈>부영양화 순으로 나타났다.



<Fig.2> Normalization results for the incineration of specified wastes.

3.3.3 가중치부여 단계

<Fig. 3>은 산업자원부에서 국내 여건을 반영하여 개발한 영향범주간 상대적 중요도인 가중치를 정규화 결과값에 적용하여 잠재적 환경영향값을 산출한 가중치부여단계의 분석결과를 나타낸 것이다. 회피영향을 고려하지 않은 상태에서 소각공정에서 발생한 소각영향값은 1.17E-04point로서 지구온난화 범주가 소각영향의 93.4%, 자원고갈범주가 4.3%, 인간독성범주가 1.0%로서 지구온난화범주가 가장 높게 나타났으며, 주요 영향인자는 지정폐기물 소각(94.6%) 및 전기생산(5.3%)에 의한 CO<sub>2</sub>였다. 또한 소각공정에서 발생한 소각영향은 1.17E-04point, 스팀생성으로 인한 회피영향은 -5.06E-06point 및 소각영향과 회피영향을 합산한 전체환경영향은 1.12E-04point로서 소각영향을 기준으로 했을때 회피영향이 4.3%에 불과하며, 전체환경영향은 소각영향대비 95.7%를 나타냈다. 이는 임송택<sup>3)</sup>의 생활폐기물 소각시설에서 소각영향을 기준하였을때 회피영향이 60.3%, 전체환경영향이 39.7%



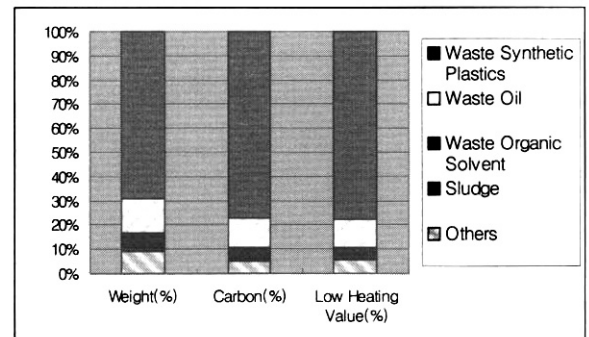
<Fig. 3> Weighting results for the incineration of specified wastes

인 것과 비교할 때 회피영향이 매우 작게 나타났다. 이는 대부분의 생활폐기물 소각시설에서는 소각열에너지를 회수하여 스팀 또는 전기를 생산하지만, 본 연구의 대상 소각시설 3개 중에서 단지 1개의 소각시설만 스팀을 생산하여 3개 소각시설의 평균값으로 적용하기 때문인 것으로 사료된다.

3.4 전과정 결과해석

3.4.1 지정폐기물 물성비의 상호관계

<Fig. 4>는 지정폐기물의 물리화학적 조성을 습량기준으로 나타낸 것이다. 중량을 기준으로 하였을 때 폐합성고분자화합물 69.1%, 폐유 14.3%, 폐유기용제 6.1% 순으로 폐합성고분자화합물이 가장 많이 소각되었다. 또한 구성성분별 탄소함량은 폐합성고분자화합물 61.3%, 폐유 46.8%, 폐유기용제 43.5% 순이었으며, 또한 지정폐기물 1kg을 기준으로 하였을 때 탄소함량은 폐합성고분자화합물 77.1%, 폐유 12.1%, 폐유기용제 4.7%를 차지하였다. 그리고 회피효과에 가장 큰 영향을 미치는 저위발열량(Low Heating Value, LHV)도 탄소함량에 상당부분 의지하므로 폐합성고분자화합물 77.3%, 폐유 11.9%, 폐유기용제 4.8% 순으로 저위발열량의 비율이 나타났다. 따라서 CO<sub>2</sub> 배출량 및 저위발열량은 탄소함량에 매우 큰 상관관계를 나타내므로 구성성분별 탄소함량이 소각시 환경영향을 결정하는 최대요인임을 알 수 있었다.



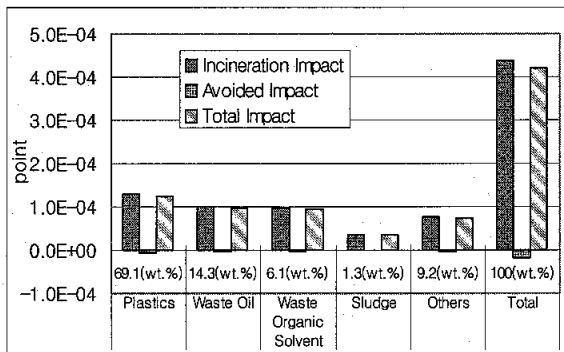
<Fig. 4> Comparison of chemico-physical characteristics of specified wastes by wet basis.

3.4.2 지정폐기물 구성성분별 할당

(1) 소각공정은 두 가지 이상의 물질이 투입되어

환경부하로 산출되는 대표적인 다중 투입공정(multi-input process)중의 하나이다. 일반적으로 다중 투입/산출 공정에서 많이 사용되는 할당인자로는 중량, 부피, 에너지, 면적 등의 물리 화학적 특성과 가격, 이윤 등의 경제적 가치가 있다.

(2) 본 연구에서는 물리 화학적 인과관계에 의거하여 각 파라미터 별로 서로 다른 할당인자를 이용하는 다중 할당(multi allocation)을 시도하였다. 즉 CO<sub>2</sub> 배출에 의한 환경영향은 구성성분별 탄소함량을 할당인자로 하고, 스팀회수에 의한 회피영향은 구성성분별 발열량을 할당인자로 적용하였다. 기타 요인들인 전기, 화학약품, 용수, non-CO<sub>2</sub> 배출물 등은 중량을 할당인자로 적용하였다.



(Fig. 5) Results of multi allocation for each component in specified wastes.

<Fig. 5>는 중량, 발열량, 탄소함량 등 3개의 할당인자를 적용한 다중인자 할당 결과를 나타낸 것이다. 탄소함량과 발열량이 높은 폐합성고분자화합물, 폐유, 폐유기용제는 소각영향값이 각각 1.20E-04, 1.0E-040, 9.73E-05point, 회피영향 값이 각각 -5.65E-06, -4.22E-06, -3.89E-06point로 모두 크게 나타났으며, 폐오나는 수분이 많고 탄소함량 따른 발열량이 적기 때문에 소각영향값(3.58E-05point) 및 회피영향값(-2.34E-07point)이 상대적으로 작게 나타났다.

### 3.4.3 지정 및 생활폐기물 전과정목록분석 결과의 비교·검토

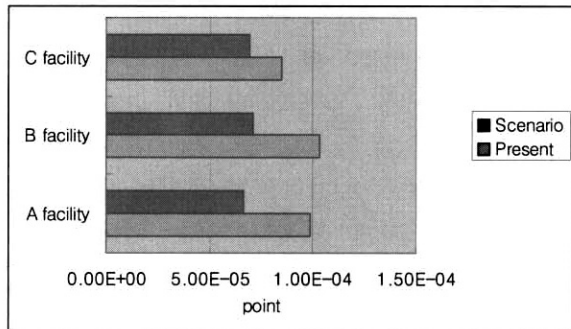
본 연구의 지정폐기물 목록분석결과와 임송택<sup>3)</sup>의 생활폐기물 목록분석 결과를 비교·검토하였는데, 국

내 생활폐기물 소각시설 11개의 평균 투입·산출물 데이터는 생활폐기물 1kg을 소각하는데 전기 8.90E-02kwh, LNG 4.37E-03kg, 경유 1.21E-03kg, 용수 8.64E-01kg, 화학약품 8.57E-03kg이 투입되고, CO<sub>2</sub> 9.73E-01kg, SOx 1.21E-04kg, NOx 5.04E-04kg, 바닥재 1.41E-01kg, 비산재 1.79E-02kg 등이 배출되며, 회수된 소각에너지 중 스팀 3.42MJ, 전기 3.79E-04kwh가 외부로 공급되었다. 즉, 지정폐기물 1kg 소각시 투입물의 양은 생활폐기물과 유사하였으나 산출물의 경우 CO<sub>2</sub> 및 바닥재의 배출량이 많은 것으로 조사되었다. 지정폐기물이 CO<sub>2</sub>의 배출량이 많은 것은 생활폐기물보다 높은 탄소함량을 보유하고 있기 때문이며, 지정폐기물 소각시설에서 상대적으로 바닥재의 배출이 많은 것은 투입되는 건설폐기물중에 다량의 모래, 흙, 벽돌 등이 포함되어 있기 때문이다. 또한 지정폐기물 1kg 소각으로 회수되는 평균 스팀량(1.40MJ)과 생활폐기물 1kg 소각으로 회수되는 평균 스팀량(3.42MJ) 및 전기량(3.79E-04kWh)을 비교해 볼 때 전체 환경영향 저감 측면과 회수열에너지의 유효이용 측면에서 지정폐기물 소각시설에서는 좀더 적극적으로 스팀 또는 전기의 회수열에너지를 증가할 필요가 있다고 판단된다.

### 3.4.4 지정폐기물 소각시설별 전체 환경영향 비교

소각 열회수에 의한 스팀을 생산하지 않는 A 및 B 소각시설은 소각영향이 각각 9.87E-05, 8.21E-04 point로서 회피영향이 없이 소각영향이 그대로 전체 환경영향으로 전환되었다. 하지만, 지정폐기물 1kg 소각시 스팀 4.2 MJ을 생산하는 C소각시설은 소각영향 1.02E-04, 회피영향 -1.52E-05point, 전체 환경영향 8.68E-05point가 되어 전체 환경영향은 소각영향대비 85.1 % 수준을 유지하였다. 또한 대기오염방지시설별 환경영향 차이를 확인할 수 없었지만, A소각시설의 경우 산성가스 제거를 위하여 건식법을 적용하여 다량의 비산재가 발생하며, C소각시설의 경우 산성가스 제거를 위하여 습식법을 적용하여 다량의 폐수가 발생하므로 향후 신뢰할 만한 관련 데이터베이스가 구축되면 이에 대한 환경영향도 고려하여 평가하여야 할 것이다. 또한 2003년도 대형 생활폐기물 소각

시설 운영현황<sup>5)</sup>에 의하면, 전국 32개 생활폐기물 소각 시설에서 생활폐기물 1kg 소각시 평균적으로 스팀 8.34MJ, 전력 4.7E-02kWh이 생산되는 바, 이를 본 연구의 A, B 및 C소각시설에서 지정폐기물 1kg 소각시 발생되는 스팀 및 전력생산량으로 가정하여 <Fig. 6>에 나타내었다.



<Fig. 6> Change of environmental impacts in the recovery of steam(8.34MJ) and electricity(4.70E-02kWh).

A, B 및 C소각시설에서 지정폐기물 1kg 소각시 스팀(8.34MJ) 및 전기량(4.70E-02kWh)을 생산함을 가정하는 경우에는 전체 환경영향이 각각 9.87E-05, 1.03E-04, 8.48E-05point에서 6.64E-05, 7.09E-04, 6.92E-05point로 저감되어 기존 환경영향 대비 32.7%, 31.3%, 18.4%의 전체환경영향 감소가 가능하게 된다. 따라서 지정폐기물 소각공정에서 CO<sub>2</sub>의 배출은 공정 특성상 불가피하므로, 소각으로 인한 전체 환경영향을 줄이기 위해서는 적극적인 소각열에너지 회수가 필요하다고 할 것이다.

#### 4. 결 론

지정폐기물 소각공정의 투입물 및 산출물에 대한 데이터베이스를 구축하고, 투입물에 의한 자원·에너지소모와 산출물에 의한 잠재적인 환경영향을 종합적으로 평가하기 위하여 국내에 가동중인 3개 지정폐기물 소각시설에 대한 전과정평가의 수행 결과는 다음과 같았다.

1. gate-to-gate 목적표의 분석결과, 지정폐기물 1kg을 소각하는데 전기 1.92E-01kwh, 경유

4.13E-03kg, 용수 1.54E+00kg, 화학약품 1.2E-03kg이 투입되고, CO<sub>2</sub> 2.01E+00kg, SO<sub>x</sub> 4.74E-03kg, NO<sub>x</sub> 6.67E-04kg, 바닥재 2.76E-01kg, 비산재 1.45E-02kg 등이 배출되며, 회수된 소각에너지 중 스팀 1.40E+00MJ이 외부로 공급되는 것으로 나타났다.

2. 지정폐기물 1kg 소각시 투입·배출물의 양을 생활폐기물 소각시설과 비교 할때 CO<sub>2</sub> 및 바닥재의 배출량이 많은 것으로 확인되었다. 지정폐기물이 CO<sub>2</sub>의 배출량이 많은 것은 지정폐기물이 생활폐기물보다 높은 탄소함량을 보유하고 있음에 기인하며, 또한 지정폐기물 소각시설에서 상대적으로 바닥재의 배출이 많은 것은 투입되는 건설폐기물중에 다량의 모래, 흙, 벽돌 등이 포함되어 있기 때문이다.

3. 지정폐기물 소각공정에서 발생한 영향범주별 소각영향(incineration impact)값은 1.17E-04 point로 지정폐기물 소각공정에서 발생한 영향범주별 소각영향을 살펴보면 지구온난화 범주가 93.4%, 자원고갈범주 4.3%, 인간독성범주 1.0% 로서 지구온난화 범주가 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 주요 영향인자는 지정폐기물 소각(94.6%) 및 전기생산(5.3%)에 의한 CO<sub>2</sub>임을 확인하였다.

4. 열회수를 통해 스팀을 생산하는 C소각시설과 스팀을 생산하지 않는 A 및 B소각시설의 전체환경영향을 검토한 결과, 스팀을 생산하지 않는 A 및 B소각시설은 소각영향이 각각 9.87E-05, 8.21E-04 point로서 회피영향이 없이 소각영향이 그대로 전체 환경영향으로 전환되었다. 하지만, 지정폐기물 1kg 소각시 스팀 4.2 MJ을 생산하는 C시설은 소각영향 1.02E-04, 회피영향 -1.52E-05, 전체 환경영향 8.68E-05point가 되어 C시설의 전체 환경영향은 소각영향대비 85.1% 수준을 유지하였다.

5. A, B 및 C소각시설에서 지정폐기물 1kg 소각시 스팀(8.34MJ) 및 전기량(4.70E-02kWh)을 생산함을 가정하는 경우, 전체 환경영향이 각각 9.87E-05, 1.03E-04, 8.48E-05point에서 6.64E-05, 7.09E-04, 6.92E-05point로 저감되어 기존 환경영향 대비 32.7%, 31.3%, 18.4%의 전체 환경영향이 감소됨을 확인할 수 있었다.



6. 지정폐기물 소각공정에서는 소각 열에너지 회수가 소각공정의 환경성을 결정하는 주요 요인인바, 소각 인한 환경영향의 저감을 위해서는 적극적인 소각열 에너지 회수가 필요하며, 또한 이를 위한 금융·세제 지원 및 기술적 지원이 강화되어야 한다고 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. 김종찬, 이정임, 박익범, 권오상, 폐기물 소각방식의 비교분석 및 경기도적용에 관한 연구, 경기도보건환경연구원, 1999.12.
2. 경기도보건환경연구원, 도내 소각시설 오염물질 배출 특성에 관한 연구, 경기도보건환경연구원보, 제14권, 2002.4.
3. 임송택, 생활폐기물 소각공정의 전과정평가(LCA), 쓰레기문제해결을 위한 시민운동협의회, 2003.11.
4. 국가청정생산지원센터, 국가 LCI Database 구축방법론 및 관리·보급확산 방안, 2004.12.
5. 환경부, 2003년도 대형 생활폐기물 소각시설 운영현황, 2004.5.
6. S. Denis, R. Renzoni and A. Germain, Comparison between the incineration and the co-combustion in cement plants of industrial wastes using a life cycle approach, 7th LCA Case Studies Symposium SETAC-Europe, 1999.
7. J. Gaya Fuertes and O. Blanco Pedraza, Life Cycle Assessment of the Energy Recovery from Solid Waste Incineration, Seventh International Waste Management and Landfill Symposium, 1999.
8. Stefanie Hellweg, Thomas B. Hofstetter, Konrad Hungerbühler, Modeling waste incineration for life-cycle inventory analysis in Switzerland, 2000.
9. Profu AB, Evaluating Waste Incineration as Treatment and Energy Recovery Method from an Environmental Point of View(final version), 2004.