

## 학교 생활 쓰레기의 성분 분석과 소형소각로 운전에 따른 유해성 오염물의 배출 잠재성 분석 연구

### Analysis of the Emission Potential of Hazardous Pollutants Produced from Disposal of the School Solid Wastes by Small-Scale Incinerator

이 병 규 · 김 행 아<sup>1)</sup>

울산대학교 토목환경공학부, <sup>1)</sup>매사추세츠대학교 환경공학과

(1999년 10월 25일 접수, 2000년 4월 11일 채택)

Byeong-Kyu Lee and Haengah Kim<sup>1)</sup>

*Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan*

<sup>1)</sup>*Environmental Studies Ph.D. Program, University of Massachusetts*

(Received 25 October 1999; accepted 11 April 2000)

#### Abstract

This study analyzed solid wastes generated from a school. The emission potential of hazardous pollutants generated from incineration of the school solid wastes (SSWs) was analyzed. Components of the SSWs were identified and the SSWs were classified into combustible and non-combustible wastes. The combustible wastes consisted of papers of 56.6%, plastics of 30.2%, woods of 7.1%, and fibers of 6.1% based on weight of the wastes. The moisture content and the ash content of the combustible wastes were 18~20% and 11~13%, respectively. The combustible wastes of the SSWs were incinerated by using a small-scale incinerator. Fly and bottom ashes and volatile organic compounds (VOCs) were collected from the incineration. Also, the metal leaching experiments on the fly and bottom ashes were performed. In analysis of metals leached from the ashes, the total amounts of metals leached in the acid solution (pH = 3) were much greater than those in the neutral solution (pH = 5.8~6.2). For the same amounts of the fly and bottom ashes, the total amounts of metals leached from the fly ashes were much greater than those from the bottom ashes. The VOCs produced from incineration of the SSWs consisted of aromatics of 42.1%, aliphatic alkenes of 26.3%, oxidized forms of 17.3%, and aliphatic alkanes of 14.3%. In addition, the considerable amounts of hazardous air pollutants (e.g., benzene, chloro-benzene, and chloro-alkanes) and compounds (e.g., aliphatic alkenes) with high potential of ozone or photochemical smog formation were identified from the incineration experiment of the SSWs.

**Key words** : school solid wastes, small-scale incinerator, ash, heavy metals, VOCs

## 1. 서 론

계속되는 인구증가 및 도시화, 그리고 급속한 산업화 과정과 더불어 쓰레기 발생량도 급속하게 증가되어 왔다. 생활폐기물의 총발생량은 1991년도까지는 연 평균 9%의 증가율을 보였지만, 1992년 이후에는 계속 감소하는 추세를 보이고 있다(Table 1 참조). 그러나 발열량이 높은 종이나 플라스틱 등의 가연성 쓰레기 비중은 점점 커져 선진국형으로 전환되고 있으며(U.S. EPA, 1998), 재활용의 비중도 점점 높아지고 있는 추세이다(Table 1 참조). 최근의 주거형태별 쓰레기 발생량 분석에서, 단독주택이 아파트와 같은 공동주택보다 단위 주택당 더 많은 생활쓰레기가 배출되고 있었고, 계절별로는 여름철의 발생량이 가장 높았다. 특히 소각, 매립 등 처리에 직접적인 영향을 주는 쓰레기 성상인 음식물류가 35.2%로 가장 높았으며, 이어서 종이(26.4%), 플라스틱(13.1%), 유리(6.7%), 금속캔(5.9%), 기타(12.7%) 등의 순으로 나타났다(환경부, 1999).

지금까지 우리나라는 이러한 쓰레기의 많은 부분을 매립에 의존하여 처리하여 왔다(1997년도 현재 생활쓰레기의 63.9%가 매립됨). 그러나 기존 운영 중인 매립장이 포화되고 있고, 매립장에서 발생된 침출수가 지하수나 지표수로 유출되어 수질 오염을 유발시키며, 매립장에서의 심한 악취발생으로 인근 주민의 민원이 끊이지 않고 있으며, NIMBY(Not in my back yard) 현상의 확산과 매립장 건설 비용의 엄청난 증대로 새로운 매립장의 건설이 어려운 실

정에 있다(Lee, 1995; Lee *et al.*, 1995). 그래서 국토가 협소한 우리나라는 일본에서처럼 소각에 의한 쓰레기의 처리비중을 점점 늘리려는 것이 쓰레기 정책 중의 하나로 대두되고 있다. 소각처리 비율의 증가에 대한 예로써, 91년도에는 생활쓰레기의 소각처리 비율이 1.5%이었던 것이 매년 증가하여 1997년에는 7.1% 까지 증가하였다(환경부, 1999; 이승무, 1995). 정부는 1996년 7월 수정 발표된 국가폐기물관리종합계획에서 2001년도 소각처리 목표율을, 생활폐기물은 20%, 사업장폐기물은 12%로 설정하고 있다. 이러한 정책과 더불어 학교나 관공서 또는 각종 사업장에서 발생하는 생활쓰레기를 소각처리하기 위한 소형소각로의 보급이 급격히 증가되어 왔다. 뿐만 아니라, 소각이나 열분해시 발생하는 에너지를 활용하기 위한 여러 기술들도 함께 연구되어지고 있는 실정이다(한국에너지기술연구소, 1993).

소각에 의한 쓰레기 처리 방법은 쓰레기의 부피를 크게 감소할 수 있으며 매립공간을 절약할 수 있을 뿐만 아니라 쓰레기의 수거 및 운반비용을 절감할 수 있는 등과 같은 많은 이점이 있다. 그러나 쓰레기의 소각처리는 소각과정에서 휘발성유기화합물 및 다이옥신과 같은 유해성화합물이 배출될 수 있고, 소각과정과 소각후에 발생된 소각재에 포함된 여러 중금속 및 유해성화합물이 유출될 수도 있다(서성석 등, 1999; 이우근, 1995; Lee *et al.*, 1995).

이러한 여러 가지 오염물질의 배출가능성에도 불구하고 소형소각로에 부착된 오염방지 시설이라고는 싸이클론이 전부이다(첨단환경기술 편집부, 2000). 그러므로 소형소각로의 운영과정에서 제거되지 않

Table 1. Change of components of municipal wastes.

unit : % (based on weight)

Year		'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97
Combustible	Foods/ Vegetables	27.4	28.5	29.0	31.4	31.0	31.6	29.1	27.2
	Papers	14.1	14.8	17.5	18.3	21.5	23.4	12.8	12.6
	Woods	3.4	3.8	4.0	4.5	4.2	4.1	3.7	4.0
	Others	8.6	9.9	12.3	16.6	16.0	16.7	15.1	16.1
	Sub total	52.5	57.0	62.9	70.8	72.7	75.8	60.7	60.0
Sub total incombustible		46.5	43.0	37.1	29.2	27.3	24.2	14.9	13.9
Sub total recycling		1						24.4	26.1
Total generation (%)		100	100	100	100	100	100	100	100
Total generation (ton/day)		83,962	92,246	75,096	62,940	58,118	47,774	49,925	47,895

은 많은 양의 오염물질이 대기로 배출될 것으로 판단된다(김중원, 1993; Wheatley *et al.*, 1993). 또 발생된 소각재가 특별한 처리과정 없이 매립되고 있는 것이 현실이다. 이러한 소각재가 매립장 속의 여러 가지 상황(침출수 또는 산성용액) 또는 빗물에 노출될 때는 재속에 포함된 여러 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)나 Polychlorinated Biphenyls (PCBs)와 같은 유해한 유기화합물 및 중금속 성분들이 용출될 수 있다. 그 결과 지하수나 지표수의 수질을 악화시킬 수 있다(Yasuda and Takahashi, 1998). 그럼에도 불구하고 쓰레기 처리비용의 절감을 이유로 각종 학교나 관공서 심지어 각종 중소형 사업장에서 발생된 생활쓰레기의 많은 부분을 소형소각로를 이용하여 처리하고 있다. 이러한 관점에서 본 연구는 일반 도시 생활쓰레기와는 다소 구성성분 및 발생특성이 다른 학교 생활쓰레기를 가연성과 비가연성으로 분류하고, 분류된 가연성 쓰레기를 소형소각로를 이용하여 소각하였다. 소형소각로 운영과정에서 발생하는 각종 휘발성 및 유해성 화합물을 분석하였고, 소각재를 비산재(Fly ash)와 바닥재(Bottom ash)로 구분하여 이들을 산성 및 중성용액에서의 경금속 및 중금속의 용출특성을 분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 쓰레기 조성분석, 소각과정, 금속 용출분석

학교가 정상적 활동을 하는 월요일부터 금요일까지 주 5일간 학교내 각 건물에서 발생하는 쓰레기를 수집하여 대표시료를 채취한 후, 각 건물별 쓰레기 발생에 대한 1일간 총 부피와 총 발생증량을 계산한다. 각 시료를 가연성(종이류, 플라스틱류, 목재류, 섬유류)과 비가연성(유리, 금속 및 알루미늄 캔)으로 구분한다. 성분비가 비슷한 건물의 시료를 혼합시킨 후 원추 4분법에 의하여 시료를 분류하고, 분류된 시료의 무게를 측정하고 성분비를 백분율로 나타낸다. 일정양의 가연성 쓰레기를 종이류, 섬유류, 플라스틱류, 목재류 등으로 분류하여, 소형소각로에서 소각시키면서 각 성분별 소각시간과 온도를 체크한다. 가연성 쓰레기를 일정한 조성으로의 혼합한 후 이를 소형소각로에 넣고 쓰레기를 소각시킨다. 실험에 사용된 소각로는 고정상 직화식 소각로

로 수냉식 2중 자켓(Jacket) 구조이고 연소용적은 1.33 m<sup>3</sup>이며, 소각로내 가스체류시간은 1.63 sec이고 소각능력은 90 kg/hr인 소형소각로였다. 소각로를 700~800°C 이상의 온도를 유지하면서 시료가 완전히 재가 될 때까지 태운다. 월요일부터 금요일까지의 5일간 5회에 걸쳐 가연성분의 쓰레기를 소각시킨 후 비산재와 바닥재를 구분하여 채취한다. 채취된 비산재와 바닥재 시료를 채취하여 항량시킨후 각각 250 ml 비이커에 넣고 0.1 mg까지 정확히 무게를 단다. 산성용액(pH=3)에서의 용출시험을 위하여 염산(1+10)과 증류수를 넣고 Water Bath에서 30분간 끓인다. 한편, 중성 근처의 용액에서의 중금속 용출을 위해서는 우선 정제수에 염산을 넣어 pH 5.8~6.3인 용매를 만든 다음, 이 용매를 소각재가 든 플라스크에 넣고 혼합액을 상온, 상압에서 분당 약 200회의 진탕회수 및 4~5의 진폭을 가진 진탕기를 사용하여 6시간 연속 진탕한다. 각각의 용액을 상온에서 냉각시키고 Glass Filter로 여과시킨 후, 염산(1+10)을 넣어서 산성 및 중성용액에서 경금속 및 중금속을 용출시켜 금속 분석용 시료를 제조한다. 이러한 방법으로 경금속 및 중금속을 용출하여 제조된 금속성분 시료들을 유도결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma Emission Spectroscopy: ICP)를 이용하여 분석한다.

### 2.2 쓰레기의 수분함량 및 재함량 분석

학교 각 건물별로 원추 4분법으로 분류된 가연성 생활 쓰레기를 일정양 취하여 성분을 잘게 자른 후, 다시 원추 4분법에 의거하여 각 건물의 대표적 가연성 쓰레기 시료를 제조한다(김삼권 등, 1995). 항온항습으로 건조된 후 무게를 단 도가니(Crucible)에 대표시료를 넣고 황산 데시케이터에서 항량시킨 후 무게를 달고, 전기로(Muffle furnace)에 넣고 105~110°C로 2시간 유지하여 수분을 날려보낸다. 상온으로 온도를 낮춘 후 도가니를 황산 데시케이터내에서 항량한 후 Gravimetric 방법으로 수분함량을 구한다. 또 소각재 함량은 쓰레기 시료가 든 도가니를 전기로에 넣고 550°C 이상의 온도에서 2시간 유지한다. 그 후 재가 든 도가니를 상온으로 천천히 식힌 후, 황산 데시케이터내에서 항량시켜 무게를 측정하여 각 건물의 가연성 대표쓰레기 시료에 대한 재 함량을 계산한다.

### 2.3 휘발성 유기화합물 분석

소각과정에서 연돌(stack)에서 배출되는 배가스의 포집은 600 ml/min 속도로 유지된 High-Flow Air Sampling Pump와 Thermal Desorption System (Supelco TDS) 흡착 튜브를 이용하였다. 시료 포집 직후 흡착 튜브의 마개를 잘 닫고 Ice Box에서 급속 냉각시켰고 분석전까지 냉동실에 보관되었다. Thermal Desorption Unit (TDU)를 이용하여 튜브에 흡착된 휘발성 및 유해성 가스를 탈착한 후, 5890A GC와 Mass Detector가 연결된 GC-MS에서 휘발성 유기화합물의 성분과 농도를 분석하였다(백성욱 등, 1999).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 쓰레기 조성과 중량비 분석

#### 3.1.1 General Buildings

인문관은 대학교의 정상적 수업이 주기능이 되며 공학관은 대학교의 정상적 수업과 일반적인 공학실험이 이루어지지만, 그것들의 기능이나 특성이 유사하다고 가정하여 이 두 건물에서 발생한 쓰레기를 합쳐 General Buildings 쓰레기로 분류하여 분석하였다(실제로 분석된 결과는 공학관에서 한사람당 배출된 쓰레기의 양이 인문관에서 보다 훨씬 많았다). General Buildings에서 분류된 쓰레기의 조성과 중

량을 Table 2에 나타내었다. 신문지, 복사지 및 음료팩 등으로 구성된 종이류의 발생량이 발생한 전체 생활쓰레기의 2/3나 될 정도로 종이류의 발생 비중이 높게 나타났다. 종이류 다음으로는 플라스틱이 22%를 차지하고 있다. 이러한 결과는 우리나라의 평균적인 일반 생활쓰레기 중 종이류의 비중이 26%인 것과 비교할 때, 학생들의 일반적인 수업 및 학교활동과 관련하여 발생하는 생활쓰레기(학교쓰레기)는 종이류의 비중이 훨씬 높다는 것을 알 수 있었다.

#### 3.1.2 Special Buildings

Table 3은 건축관과 화공관에서 발생한 생활쓰레기에 대한 쓰레기의 조성 및 중량비를 나타내고 있다. 화공관은 강의 뿐만 아니라 화학 및 화공 실험 활동이 많고, 건축관은 강의와 모형 건축물 제조 및 제작 등과 관련된 활동이 많기 때문에, 이 두 빌딩을 특수 목적을 가진 Special Buildings으로 분류하였다. General Buildings과 비교하면 종이류의 비중은 상대적으로 줄었지만 플라스틱류의 비중은 오히려 증가하였다.

이는 두 Special Buildings의 기능을 General Buildings과 비교할 때, 상대적으로 강의보다는 특별한 실험 및 실습활동이 더 많기 때문인 것으로 판단된다. 또 본 연구에서 확인된 다른 빌딩의 경우 종이류 성분 중에서 신문지가 월등히 많이 나오는데, 이

**Table 2. Component analysis of the combustible SSWs produced from the general buildings.**

Item	Kind	Generation (kg/day)	Weight ratio (%)
Papers	Newspapers	13.2	67.0
	Magazines/Books	2.3	
	Photocopy papers	5.2	
	Drink packs	3.8	
	Others	0.9	
Fibers	Clothes	-	3.8
	Others	1.4	
Woods	Furniture	-	7.2
	Others	2.7	
Plastics	PET Bottles	1.6	22
	PS	1.2	
	PE	3.7	
	Others	1.8	
Total		37.8	100

**Table 3. Component analysis of the combustible SSWs produced from the special buildings.**

Item	Kind	Generation (kg/day)	Weight ratio (%)
Papers	Newspapers	10.2	59.9
	Magazines/Books	13.4	
	Photocopy papers	8.2	
	Drink packs	2.6	
	Others	0.8	
Fibers	Clothes	-	6.6
	Others	3.9	
Woods	Furniture	1.5	4.4
	Others	1.1	
Plastics	PET Bottles	3.4	29.1
	PS	5.7	
	PE	4.1	
	Others	4.2	
Total		59.1	100

Special Buildings의 경우 신문지보다는 잡지나 책과 같은 성분의 비중이 가장 높게 나왔다. 이러한 결과는 건축관에서 새로운 건축물 모형이나 신품법을 소개하는 다양한 책이나 잡지 등이 실험 및 실습자료로 많이 활용되고 있음이라고 판단된다. 또한 플라스틱중에서도 Polystyrene (PS)의 비중이 특히 높은데, 이는 건축 실습과 화학 및 화공 실험에 사용되는 재료, 완충재 및 포장재의 많은 것이 PS로 되어있기 때문이다. Special Buildings에서의 전체 쓰레기 발생량은 유사한 상주인구와 건물크기임에도 불구하고 같은 조사기간 동안의 General Buildings에서 보다 약 56% 이상 많이 배출되었다. 이는 건물의 특성이나 용도 또는 행하여지는 실험 및 실습의 형태에 따라 발생하는 쓰레기의 조성과 총 발생량도 달라지고 있음을 나타낸다.

3. 1. 3 Cafeterias

Table 4는 학교내에서 운영중인 학생식당 2곳에서 발생한 쓰레기의 조성과 중량비를 나타내고 있다. 학교내식당은 다른 건물들에 비하여 종이류의 비중은 상대적으로 낮지만 복사지나 음료팩 등의 비중은 다른 건물들에 비하여 높다. 이는 많은 학생들이 식당(휴게실)에 설치된 복사기의 빈번한 사용과 식당에서의 팩에 담긴 음료수 등의 판매가 다른 곳 보다 월등히 많기 때문이다.

또 Cafeterias에서의 쓰레기중 플라스틱류의 비중

은 다른 건물들보다 상대적으로 높으며, 특히 Polyethylene (PE)의 비중이 높게 나오고 있다. 이는 식당에서 많이 판매되고 있는 음료수나 물병, 우유통, 그리고 과자나 음식물 및 간단한 생필품의 포장지의 많은 부분이 주로 PE로 만들어져 있기 때문이다. 또 목재류의 발생 비중이 다른 건물에 비하여 월등히 높은데, 이는 학생들이 집에서 가지고 온 나무도시락 및 나무 젓가락, 식당에서 사용된 이쑤시개, 그리고 식당 주변 지역에서 학생들의 동아리 활동 중에 사용된 여러 가지 나뭇가지 등이 식당 쓰레기에 포함되어 있기 때문이다. 학교내 식당에서 발생하는 잔반 및 여러 음식물 찌꺼기는 따로 분리수거되어 소각이 아닌 다른 방법으로 처리되고 있었기에 가연성 식당 쓰레기에 포함시키지는 않았다.

3. 1. 4 Art Building

여러 가지의 디자인 및 예술작품의 제작이 활발한 조형관에서 발생한 쓰레기를 조성별로 분류하고 그 조성별 중량비를 Table 5에 나타내었다. 조형관에서는 종이류의 배출 비중은 연구대상 다른 건물들에 비하여 적게 발생되었다. 그러나 섬유류, 목재류 및 플라스틱류의 발생 비중은 연구대상 학교의 다른 건물에서보다 훨씬 높게 나타났다. 즉, 플라스틱류, 목재류, 섬유류의 상대적 함량비는 도시 일반 생활쓰레기와 발생특성이 다소 유사한 General

Table 4. Component analysis of the combustible SSWs produced from cafeterias.

Item	Kind	Generation (kg/day)	Weight ratio (%)
Papers	Newspapers	8.9	56.7
	Magazines/Books	1.2	
	Photocopy papers	6.8	
	Drink packs	7.8	
	Others	3.3	
Fibers	Clothes	-	1.1
	Others	1.1	
Woods	Furniture	2.1	9.8
	Others	2.7	
Plastics	PET Bottles	1.3	31.4
	PS	3.5	
	PE	8.4	
	Others	4.3	
Total		49.4	100

Table 5. Component analysis of the combustible SSWs produced from the art building.

Item	Kind	Generation (kg/day)	Weight ratio (%)
Papers	Newspapers	11.2	48.3
	Magazines/Books	7.3	
	Photocopy papers	2.3	
	Drink packs	5.6	
	Others	0.9	
Fibers	Clothes	2.7	10.7
	Others	3.4	
Woods	Furniture	0.8	8.0
	Others	3.7	
Plastics	PET Bottles	0.9	33.0
	PS	4.7	
	PE	8.9	
	Others	4.2	
Total		56.6	100

Buildings의 경우와 비교할 때, 각각 1.5배, 2배 및 3배 정도로 높았다. 이러한 이유는 디자인학부(섬유, 시각 및 산업디자인학) 및 미술학부의 학문 특성과 학생들의 빈번한 실습 수업으로 인한 것으로 판단된다. 잡지나 책의 발생 비중도 상대적으로 높은 편인데, 이것도 역시 건축관에서 처럼 Art Building에 있는 사람들의 실습 및 연구자료로 책이나 잡지가 많이 활용되거나 구독되고 있기 때문으로 판단된다.

3.1.5 학교 쓰레기 조성 및 종량비

Table 6 및 그림 1에는 앞서 논의된 각 건물별에서 발생된 생활쓰레기를 하나로 모아 쓰레기의 조성별로 종량비를 산출하여 학교전체의 평균적인 생활쓰레기의 구성성분 및 조성비를 나타내었다. 본 연구에서 조사된 학교의 생활쓰레기의 평균 구성은 종이류가 가장 많았고, 그 다음으로 플라스틱류가 많았으며, 나머지는 목재류 및 섬유류 등으로 볼 수 있다. 본 연구대상 각 건물에서는 식당을 제외하고는 음식물 쓰레기의 발생이 거의 없는 실정인어서, 음식류를 가연성 쓰레기로 분류하지 않았고 학교의 가연성 생활쓰레기의 조성에 포함시키지는 않았다. 그렇다하더라도 본 연구에서 확인된 학교의 생활쓰레기에는 종이류, 플라스틱류, 목재류, 그리고 섬유류의 발생비중은 우리나라 전체의 생활쓰레기 조성보다 훨씬 높은 비중을 차지함이 확인되었다. 이것은 학교의 업무나 학생 활동의 많은 부분이 종이류를 사용하고 있고, 수업이나 학생들의 과제활동 등에 따른 신문지나 책, 복사지 등의 쓰레기가 다량 발생하기 때문이다. 또 학교에서 이루어지는 실험이나 실습 등에 많은 양의 플라스틱류 및 목재류가

Table 6. Average composition of the SSWs produced from a school.

Item	Generation (kg/day)				Total generation (kg/day)	Weight ratio (%)
	Liberal arts/ Engineering	Cafeterias	Art	Architecture/ Chemical Eng.		
Papers	25.4	28	27.3	35.2	115.9	56.6
Fibers	1.4	1.1	6.1	3.9	12.5	6.1
Woods	2.7	4.8	4.5	2.6	14.6	7.1
Plastics	8.3	17.5	18.7	17.4	61.9	30.2
Total (Building)	37.8	51.4	56.6	59.1	204.9	100

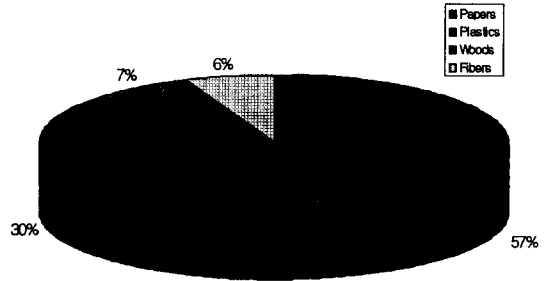


Fig. 1. Average weight ratio of the combustibles SSWs produced from a school.

사용되기 때문으로 판단된다. 이러한 결과로 볼 때 쓰레기가 발생하는 지역이나 장소의 특성이나 기능 또는 구성원들의 활동상태 및 종류에 따라 발생하는 생활쓰레기의 조성은 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

3.2 수분함량 및 재함량 분석

본 연구대상 학교에서 발생된 가연성 생활쓰레기에 대한 수분 함량은 18~20% 정도였으며, 재의 함량은 약 11~13% 정도로 관찰되었다. 그러나 학교에서 실제로 소각되는 생활쓰레기의 수분함량과 소각 후 발생하는 재의 함량은 이러한 값보다 더 높을 것으로 판단된다. 왜냐하면, 실제로 발생하는 쓰레기들이 취급 및 운반과정에서 비나 눈에 다소 노출 될 수도 있기 때문에 수분 함량은 실험실적인 자료보다는 높을 것으로 예상된다. 또 소각되는 실제의 쓰레기 양상은 본 연구에서처럼 성분에 따라(가연성 또는 비가연성) 정밀하게 분류될 수 없을 것이고, 이로 인하여 비가연성 성분의 쓰레기가 소각로 안에 투입될 수 있기 때문에 타지 않고 남은 성분이나 재의 배출량은 실험실적인 자료보다 높을 것이다. 또 다른 이유로는 실제의 소각과정에서도 소형소각로 운전자가 고온 연소를 위해서 타고 있는 쓰레기를 항상 골고루 저어 준다는 것이 불가능하다는 것이다. 이러한 소형소각로 운전상의 문제만으로도 보아도 쓰레기의 불완전 연소의 가능성이 높아지기 때문에, 소각재의 실제 발생량은 실험 자료보다 더 높을 수도 있다. 또 유사한 이유로 벤젠이나 톨루엔과 같은 유해성 및 휘발성 유기화합물들의 배출의 양이 이론적인 소각보다 훨씬 높게

배출될 수 있다고 판단된다(Table 9 참조).

### 3.3 소각재 중의 금속 함량분석

월요일부터 금요일까지 소형소각로를 이용하여 학교에서 발생하는 가연성 생활쓰레기를 매일 소각하였고, 그 후 매일(전체 연구기간 동안 5회 반복하여) 소각재를 비산재와 바닥재로 구분하여 채취하였다. 이들 각각의 소각재 시료를 산성용액(pH 3)과 중성에 가까운 용액(pH 5.8~6.3)에서 금속을 용출하여 ICP로 분석된 결과를 Table 7 및 8에 나타내었다. 본 연구에서 시험된 산성용액에 비산재와 바닥재를 포함한 소각재 전체에서 용출된 금속의 총량은 본 연구에서 시험된 중성 근처의 용액에 용출된 금속 총량에 비하여 260~270배 정도 높게 검출되었다. 이러한 결과는 소각재가 더욱 산성화된 비에 노출 될수록 용출되는 금속의 총량은 엄청나게 증가됨을 의미한다. 특히, 본 연구에서 시험된 중금속(Pb, Mn, Cr, Cd, Ni)만으로 비교할 때, 빗물에 노출된 소각재에서 용출되는 중금속의 용출총량은 빗물의 산성화가 더욱 진행될수록 경금속의 용출총량 증가 정도에 비하여 더욱 증가되는 것으로 확인되었다.

Table 7과 8은 또한 비산재와 바닥재에서 용출되는 금속의 총량 비교를 나타내고 있다. 산성용액의 경우 비산재와 바닥재에서 용출된 금속의 총합량 분석에서, 확인된 금속의 약 60%가 비산재에서 용출되었고 약 40%는 바닥재에서 용출된 것으로 나타났다. 그러나 중성 근처의 용액의 경우 용출된 금속의 총합량의 약 78%가 비산재에서 용출되었고 약 22%는 바닥재에서 용출되었다. 즉, 용출용액이 중성에 가까워질수록 바닥재에서보다 비산재에서 용출된 금속의 양이 훨씬 많음을 나타낸다. 이러한 결과는 소각재에 포함된 금속의 함량이 바닥재보다는 비산재가 더 많음을 의미한다. 특히, 용출용액이 산성에서 중성으로 가까워질수록 금속의 용해도 감소에 따라 금속의 총용출량은 감소하지만, 바닥재에 비하여 비산재에서 용출되는 금속의 상대적인 비율은 더욱 증가함을 알 수 있었다. 또, 소형소각로를 이용하여 학교 생활쓰레기를 소각하고 그 소각재에서 용출된 것으로 확인된 중금속 성분(Pb, Mn, Cr, Cd, Ni)을 비교할 때(Table 7, 8 참조), 산성용액의 경우 비산재와 바닥재에서 용출된 중금속 성분의

총량에 대한 상대적인 비율은 각각 약 67% 및 33%였다. 또한 중성 근처의 용액의 경우, 비산재와 바닥재에서의 용출된 중금속의 총량 비율은 각각 약 86% 및 14%였다. 이러한 결과는 소각재가 산성화

**Table 7. Concentrations of the metals leached from ashes in acid solution.**

Metal		Fly ashes		Bottom ashes	
		Average conc. (ppm)	Std. deviation (ppm)	Average conc. (ppm)	Std. deviation (ppm)
Light metal	Al	330.4	17.1	297.0	33.2
	Fe	41.1	14.1	21.0	2.5
	Ca	1,054.2	60.8	744.7	64.2
	K	173.7	9.2	49.2	6.3
	Mg	264.2	17.7	165.9	10.8
Sub total (light)		1,863.7 (59.3%)		1,277.9 (40.7%)	
Heavy metal	Pb	90.9	2.1	48.7	0.5
	Mn	10.5	3.9	3.4	9.2
	Cr	0.4	0.1	0.3	0.04
	Cd	0.7	0.01	0.07	0.01
	Ni	3.4	0.2	0.08	0.04
Sub total (heavy)		105.8 (66.8%)		52.5 (33.2%)	
Total		1,969.5 (59.7%)		1,330.4 (40.3%)	

**Table 8. Concentrations of the metals leached from ashes in neutral solution.**

Metal		Fly ashes		Bottom ashes	
		Average conc. (ppm)	Std. deviation (ppm)	Average conc. (ppm)	Std. deviation (ppm)
Light metal	Al	330.4	0.41	1.87	0.49
	Fe	2.71	0.19	0.07	0.06
	Ca	0.42	0.66	0.65	0.10
	K	5.40	0.01	0.01	0.01
	Mg	0.06	0.08	0.01	0.01
Sub total (light)		8.70 (77.1%)		2.61 (23.0%)	
Heavy metal	Pb	0.11	0.01	0.00	0.00
	Mn	0.01	0.23	0.02	0.06
	Cr	0.25	0.01	0.01	0.01
	Cd	0.01	0.08	0.14	0.03
	Ni	0.34	0.36	0.00	0.00
Sub total (heavy)		1.01 (85.6%)		0.17 (14.4%)	
Total		9.71 (78.3%)		2.78 (21.7%)	

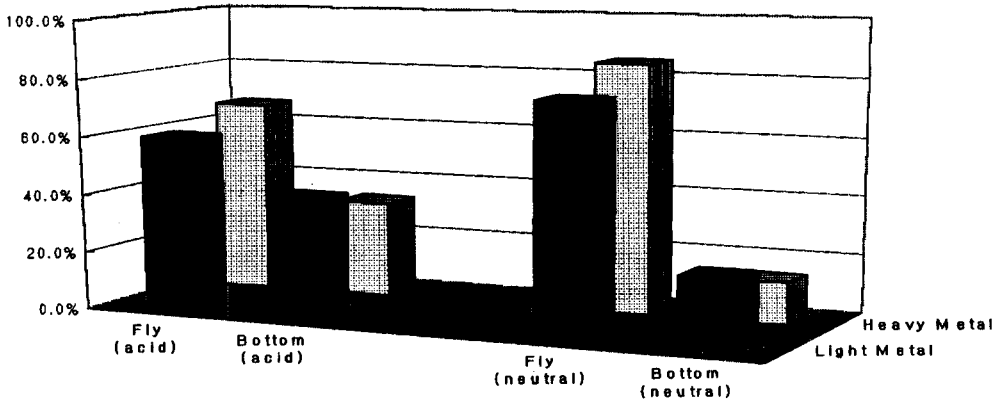


Fig. 2. Relative proportion of the metals leached from the ashes in acid and neutral solutions.

정도가 높은 비나 눈보다는 중성에 가까운 비나 눈에 노출될 때, 비록 용출되는 중금속의 총량은 감소하지만 바닥재보다는 비산재에서 녹아드는 중금속의 비율이 상대적으로 더 많아짐을 알 수 있다(그림 2 참조). 이러한 결과는 소형소각로를 이용한 학교 생활쓰레기의 소각에서 배출되는 중금속의 대부분이 바닥재보다는 비산재에 함유됨을 알 수 있다. 즉, 이러한 비산재에 함유된 중금속의 비중 증가로 볼 때, 소형소각로도 대기중의 중금속 배출원 중의 하나로 기여됨을 의미한다. 그러므로, 소형소각로 운전에서는 바닥재와 아울러 비산재를 효과적으로 포집하는 설비를 갖추어 대기 중으로 중금속이 포함된 소각재의 확산과 소각재를 빗물이나 눈, 특히 산성화된 빗물이나 눈에의 노출을 최소화 해야 할 것으로 판단된다.

### 3.4 소형소각로에서 발생된 휘발성 유기화합물 분석

Table 9에는 학교에서 발생된 가연성 생활쓰레기를 한데 모아서 이들을 소형소각로를 이용하여 연소하였을 때 Stack에서 배출되는 휘발성 유기화합물의 상대적 농도 분포를 나타내고 있다.

실제의 시료 포집은 Stack과 배가스의 높은 온도 때문에(실제로 Stack에 너무 근접한 시료 채취에서 펌프에 연결된 Tygon Tube가 녹아버렸음), Stack에서 바로 이루어지지는 않았다. 따라서, 주변의 기류나 바람에 의하여 다소 희석될 수 있다. 그러나 주

변의 환경이 휘발성 유기화합물을 고농도로 배출하는 물건이나 시설이 없었고, 시료 포집시 바람은 2~3m/s 정도로 약하게 불었다. 또 시료의 포집 위치를 소각로의 Stack의 Top에서 위로 약 40~50cm 올렸고, 바람과 관련하여 풍하지역(Downwind Area)으로 40~50cm 떨어진 지점에서 포집되었다. 이러한 여러 상황을 고려하였기에 포집된 시료는 대부분 연구대상 소형소각로 Stack에서 나온 것으로 간주하였다. 그럼에도 불구하고 확인된 농도는 실제의 배출농도와 다를 수 있기 때문에, 본 연구에서는 휘발성 유기화합물의 정성분석과 상대적 농도 분포에 초점을 두었다.

Table 9에서 보면 확인된 휘발성 유기화합물 중 방향족 화합물이 가장 많았고, 지방족 알케류가 그 다음을 차지하였다. 그 다음으로는 산소를 포함하는 퓨란, 케톤 및 알데히드류와 포화탄화수소인 지방족 알칸류가 차지하였다.

소형소각로에 의한 학교 생활 쓰레기의 연소에서 발암성 물질인 벤젠이나 클로로벤젠 등의 방향족 화합물도 꽤 높은 농도로 확인되었다. 또한 확인된 많은 휘발성 유기화합물들에는 NOx와 햇빛 등과 작용하여 광화학적 스모그를 발생할 잠재성이 큰 불포화 탄화수소류 및 산화성 화합물 등도 상당히 많이 배출됨을 알 수 있었다. 또 소각되는 가연성 쓰레기의 조성이 일정하지 않고 부적절한 쓰레기의 분류로 인한 불완전연소의 가능성이 높다. 따라서, 본 연구에서 비록 확인되지는 않았지만, 소형소각로



**Table 9. Volatile organic compounds identified from incineration (by small-scale incinerator) of the combustible school solid wastes (SSWs).**

Aliphatic alkanes		Aliphatic alkenes		Aromatics		Furans, Ketones, Aldehydes	
Chemical	Conc. (µg/m <sup>3</sup> )	Chemical	Conc. (µg/m <sup>3</sup> )	Chemical	Conc. (µg/m <sup>3</sup> )	Chemical	Conc. (µg/m <sup>3</sup> )
<i>n</i> -Butane	26.2	1-Pentene	8.0	Benzene	29.6	Butenal	9.9
<i>n</i> -Pentane	11.7	1,3-Pentadienes	12.5	Toluene	56.4	Furan	6.0
<i>n</i> -Hexane	25.0	Hexenes	60.9	Ethylbenzene	28.4	Methylfurans	27.1
<i>n</i> -Heptane	21.5	Hexadienes	16.5	Styrene	128.1	2-Ethylfuran	9.3
<i>n</i> -Octane	12.1	Heptenes	15.9	Dimethylbenzenes	46.7	Dimethylfuran	65.9
<i>n</i> -Nonane	19.8	Octenes	6.0	Ethylmethylbenzenes	44.4	Benzofuran	20.9
B-alkanes	12.8	1-Decene	11.9	T-methylbenzene	24.2	Benzaldehyde	25.7
C-alkanes	16.1	B-alkene	10.4	Cl-benzene	11.4	C-alkanol	10.7
Cl-alkanes	15.3	C-alkene	4.7			Others	11.3
Total	160.5	Total	295.3	Total	471.8	Total	194.2

Note: B = Branched, C = Cyclo, Cl = Chloro, T = Tri.

운영과정에서 다른 여러 종류의 오염물 및 유해성 화합물들이 배출될 가능성이 매우 높다고 판단된다.

그러나 소형소각로를 이용한 생활쓰레기의 소각에서 이러한 유해성 및 휘발성 유기화합물들이 많이 배출되고 있음에도 불구하고 소형소각로에 설치된 대기오염 제어장비라고는 싸이클론이 고작이다. 각급 학교, 각종 관공서, 중소기업도 사업장, 그리고 심지어 대형사업장에서 까지도 오염 방지대책 없이 이러한 소형소각로를 설치 운영 중에 있는 게 우리의 현실이다. 따라서, 그러한 사업장에 근무하는, 작업자뿐만 아니라 소형소각로가 설치 운영되는 곳의 인근 주민들도 이러한 유해성 오염물에 무방비로 노출되고 있다고 볼 수 있다. 그러므로, 비록 생활쓰레기를 소각에 의한 처리 비율을 점차 높이는 것이 환경부의 정책 내지는 우리 나라의 실정이라면, 소각에 의한, 특히 소형소각로에 의한 소각로 운영시 우리의 건강보호와 쾌적한 대기환경 유지를 위해 반드시 적절한 대기오염 방지시설을 부착하여야 될 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

학교내에 설치 운영되고 있는 소형소각로 운영시 배출되는 유해성물질 및 휘발성 유기화합물의 분석과, 비산재와 바닥재로 구성된 소각재를 산성 및 중성 용액에서 용출시켰을 때 배출되는 경금속 및 중

금속 함량분석에 대한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

학교에서 발생된 가연성 생활쓰레기의 대부분은 일반 생활쓰레기의 조성에서 보다 종이류(56.6%)와 플라스틱류(30.2%)의 비율이 높았다. 그러나 학교의 각 건물의 특성이나 기능 또는 구성원의 활동 종류 등에 따라 발생하는 생활쓰레기의 구성분에 많은 변화가 있었다.

수분함량과 재의 함량은 각각 18~20% 및 11~13% 정도로 확인되었지만, 실제 소형소각로의 운전에서는 쓰레기의 분류 및 취급, 그리고 소각로 운전 조건의 부적절함으로 이들의 함량은 더욱 높을 것으로 판단된다. 소형소각로를 이용한 소각에서 발생한 소각재에서 용출된 금속의 총량은 용출용액의 pH가 감소할수록 급속하게 증가하는데, 이는 더욱 산성화된 빗물에 소각재가 노출될 경우 금속의 용출총량이 엄청나게 증가함을 의미한다. 또 빗물이나 눈의 산성화에 따른 중금속의 용출량 증가는 경금속의 경우보다 훨씬 더 크게 증가하였다. 비산재와 바닥재에서 용출된 금속의 양은 비산재의 경우가 훨씬 많았는데, 특히 중금속의 경우 비산재에서의 중금속 용출비율이 바닥재에서 보다 더욱 많았다.

학교 생활 쓰레기를 소형소각로를 이용한 처리과정에서 배출되는 휘발성 유기화합물중 방향족 화합물이 가장 많았고, 다음으로 지방족 알켄류였고, 그 다음으로는 산소를 포함하는 퓨란, 케톤 및 알데히드류와 포화탄화수소인 지방족 알칸류가 차지하였

다. 방향족 화합물 중에는 발암성 물질인 벤젠이나 클로로벤젠 등도 매우 높은 농도로 확인되고 있다. 또한 NOx와 햇빛 등과 작용하여 광화학적 스모그를 발생할 잠재성이 큰 불포화 탄화수소류 및 산화성 화합물 등도 상당히 많이 배출됨을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

김삼권, 김인배, 박주량, 박호성, 배광수, 정준오(1995) 폐기물 공정시험방법 해설, 도서출판 동화기술, 1-290.

김종원(1993) 고체 폐기물 소형 소각로, 과학기술처 특정폐기물의 에너지화 기술연구보고서(KE-93012B), 52-60.

백성욱, 황승만, 박상곤, 전선주, 김병주, 허귀석(1999) 흡착포집 및 열탈착/GC 분석에 의한 공기중 휘발성 유기화합물의 측정방법론 평가, 한국대기환경학회지, 15(2), 121-137.

서성석, 윤근덕, 공영환, 이숙희, 박창규, 동종인, 김병환, 박기호, 서정호(1999) 도시고형폐기물 소각시설의 방지시설 특성별 배출가스중 다이옥신류 및 일반대기오염물질의 배출특성변화, 한국대기환경학회 추계학술대회, 1999. 11, 관동대학교.

이승무(1995) 한국의 소각로 현황과 발전 방향, Seoul International Waste Treatment Technology Conference, Chap. 21. 1995, 8, KOEX,

이우근(1995) 폐기물 소각시 배출되는 유해가스의 처리방

법, 한국대기보전학회지, 11(2), 118-129.

첨단환경기술 편집부(2000) 소형 소각로의 기술동향(2), 첨단환경기술, 3월호, 60-65.

한국에너지기술연구소(1993) 특정폐기물의 에너지화기술 연구, 과학기술처 연구보고서, KE-93012B, 1-267.

환경부(1999), Homepage, 폐기물자원/폐기물 관리.

Lee, B.K. (1995) A Study of Characterization, Disposal, Recycling, and Air Emissions of Medical and Plastic Wastes, University of Massachusetts, Ph.D. Dissertation, 1-181.

Lee, B.K., M.J. Ellenbecker, and R. Moure-Eraso (1995) Potential Dioxin and Furan Sources from Hospital Solid Waste Streams : A Pilot Study, J. of KAPRA, 11(E), 13-21.

U.S. EPA (1998) Characterization of Municipal Solid Waste in the United States: 1997 update, U.S. Environmental Protection Agency, Report No. EPA530-R-98-007, 1-174.

Wheatley, L., Y.A. Levendls, and P. Vouros (1993) Expiratory Study on the Combustion and PAH Emissions of Selected Municipal Waste Plastics, Environ. Sci. Technol., 27, 2885-2895.

Yasuda, K. and M. Takahashi (1998) The Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Municipal Solid Waste Incinerators during the Combustion Cycle, J. Air & Waste Manage. Assoc., 48, 441-447.