

## 600℃에서 제지류 소각시 발생하는 휘발성 유기화합물 농도분석 연구

이 병 규 · 조 정 범  
울산대학교 토목환경공학부  
(2002년 8월 5일 접수; 2002년 10월 8일 채택)

### Analysis of Volatile Organic Compounds Produced from Incineration of Papers at 600℃

Byeong-Kyu Lee and Jung-Bum Jo

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea  
(Manuscript received 5 August, 2002; accepted 8 October, 2002)

This study analyzed concentrations of volatile organic compounds (VOCs) produced from incineration of papers at 600 °C. The papers used in this study included A4 papers (new, printed with ink-jet, printed with carbon), newspapers (printed with bean oil, printed with a general newspaper ink), packaging box, document envelope, single-use paper cup, and cosmetic tissue. Papers were heated from room temperature upto 600°C providing air inside of the electric furnace and then they were oxidized for 80 minutes at 600°C maintaining the same air supply. VOCs emitted from the incineration process were sampled using an air sampling pump and bags for 160 minutes and then the components and concentrations of the VOCs were analyzed by a GC-MS. The most prominent chemical structure of the VOCs identified from incineration of the papers was furans and then furans were followed by aromatics and aliphatic alkenes. About 40 % of the identified VOCs contained double bonds, which have relatively a high ozone (ground level) formation potential, within their molecular structure. Also, some cancer suspecting compounds like benzene, dichloromethane and chloroform were identified.

Key words : Papers, Incineration, VOCs, Furans, Benzene

#### 1. 서 론

최근 인구증가와 더불어 도시화, 산업화 및 생활 수준의 향상으로 인해 가정 및 사업장 등에서 배출되는 폐기물의 발생량이 급속하게 증가함으로써 폐기물 처리에 따른 비용절감과 효율적인 폐기물 처리방법들이 중요시되어지고 있다<sup>1-2)</sup>. 2001년 현재 우리나라에서 생활 폐기물 처리법으로 많이 활용되고 있는 기술로는 매립, 재활용, 소각 등이 있다. 이러한 처리법 중 생활쓰레기에 대한 처리법으로 가장 먼저 고려 되어야 할 방법은 생활폐기물을 재

활용하거나 재사용 또는 자원화하는 방법일 것이다. 그러나 아직 우리나라에서 생활쓰레기가 실제로 재활용 또는 재생되는 비율은 낮다<sup>3)</sup>. 국토가 협소하고 매립장 시설이 거의 포화상태에 이르게 되고 추가적인 매립장 건설도 어려운 우리나라 실정에서는 재활용 다음의 대안으로 소각처리법을 생각해 볼 수 있다<sup>3-5)</sup>. 소각처리는 전염병의 예방, 유해물질의 무해화, 단시간에 폐기물의 대량감량이 가능하다는 등의 이점도 갖고 있다<sup>6-7)</sup>. 또한 중소형 사업장에서는 각종 가연성 폐기물이 다량으로 발생되고 있으며, 이들을 매립처리 방법으로 처리할 경우 큰 경제적 부담이 되고 있다. 그래서, 많은 중소 사업장에서는 가연성 폐기물의 효과적인 처리를 위하여 자체적으로 소형 소각로를 최근까지 운영하였거나 지금도 일부 운영 중에 있다. 그러나, 소형 소

Corresponding Author : Byeong-Kyu Lee, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea  
Phone : +82-52-259-2864  
E-mail : bklee@mail.ulsan.ac.kr

각로에 부착된 대기오염 방지시설로는 싸이클론이 전부이다. 따라서 소형 소각로 운영에서 많은 양의 대기오염물이 아무런 대책없이 대기 중으로 방출되고 있는 실정이다<sup>8~11)</sup>.

현재 국내에서 사업장폐기물의 성상 변화는 비교적 적은 것으로 분석되고 있다. 그러나 생활폐기물은 가연성이나 음식물쓰레기 등의 함량이 상대적으로 다소 변화되고 있다<sup>12~14)</sup>. 또 제지류, 플라스틱류, 목재류 그리고 포장이나 일회용품의 사용에 따른 폐기물의 비중은 점차 증가되고 있는 추세이다. 이러한 추세는 산업이 고도로 발전될수록 계속될 것으로 전망된다. 특히, 각급 학교나 관공서, 또 각종 산업 현장에서도 제지류의 사용이 꾸준히 늘어나고 있다. 이러한 제지류는 단위 무게에 대한 부피비율이 다른 쓰레기보다 상대적으로 크고 가연성이기 때문에 매립보다는 주로 소각에 의해 처리되고 있다. 즉, 2001년 현재 생활쓰레기중 가연성쓰레기는 생활쓰레기 전체 발생량의 약 59.3%나 차지하고 있지만, 소각 처리율은 11.7%에 불과하다. 국토면적이 좁은 우리나라의 현실에 비추어 이렇게 낮은 소각에 의한 처리 비율은 점점 늘어날 것으로 예상되고 있다<sup>3,15~18)</sup>. 얼마전 까지만 해도 각종 관공서 및 많은 사업장에서 보유중인 대기오염 방지 시설이 거의 부착되지 않은 소형 소각로나 노천 소각에 의해 상당한 양의 제지류가 소각처리 되어왔거나 되고 있다. 또 앞으로도 제지류의 사용량과 소각 처리비율은 계속적으로 늘어날 가능성이 크기 때문에<sup>19)</sup>, 제지류의 소각처리에 의한 대기오염 부하량은 아주 클 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 제지류의 소각처리에 의한 대기오염물 부하와 관련된 연구는 거의 없는 실정이다. 제지류는 여러 가지의 사용 목적에 따라 여러 가지 과정으로 표백, 코팅, 또는 피복(비닐, 아크릴, 유화제) 처리되어 생산되고, 사용 후에는 잉크나 카본, 또는 각종 인쇄액이 묻어있다. 따라서 이러한 제지류의 소각 처리에서는 각종 휘발성 유기화합물, 유해성 화합물, 소각재 등 다양한 대기오염물이 배출되고 있다<sup>20)</sup>.

이러한 관점에서 본 연구는 전기로에서 제지류를 소각 처리할 때 발생하는 각종 휘발성 유기화합물에 대한 배출농도 분석을 수행하였다. 본 연구에서 얻어지는 결과는 폐기물의 소각처리에서 제지류의 단위무게당 발생하는 휘발성 유기화합물의 종류와 양을 파악하였다. 이러한 연구결과는 소각을 이용한 폐기물의 처리에서 발생하는 오염물로 인한 대기오염 및 대기환경에의 영향파악, 그리고 대기오염물 배출방지를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

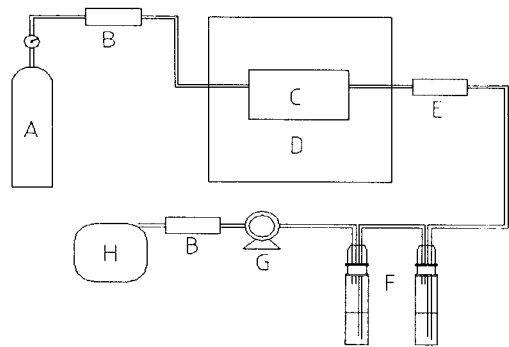
## 2. 연구방법

### 2.1. 대상시료

일상생활에 사용되는 제지류를 분류하는 방법에는 목적에 따라 다양하게 분류할 수 있겠지만, 본 연구에서는 일상생활중에 다양한 용도로 사용되는 제지류를 A4용지류, 신문용지류, 포장용 Box지, 서류봉투류, 일회용 종이컵류, 화장지류로 임의로 분류하였다. 미국 EPA 보고에 따르면, 본 연구에서 분류한 제지시료는 내구성이 없는 전체 제지 폐기물 (Nondurable Paper and Paperboard)의 81% 정도를 포함한다고 볼수 있다<sup>1)</sup>. 본 연구에서 분류된 A4 용지 시료를 사용하지 않은 것(이하 A4 새종이), 잉크젯 프린트 된 것(이하 A4 잉크젯), 레이저 프린트 된 것 (이하 A4 레이저) 등으로 분류하였고, 신문용지 시료에는 콩기름 신문과 일반 신문으로 분류하여 실험하였다. 그리고 일회용 종이컵 시료는 한 대학교에서 물이나 커피류, 그리고 우유컵으로 상용되고 있던 것을 혼합하여 사용하였고, 포장용 Box나 서류봉투 시료는 적어도 한번 이상 사용된 여러 종류를 혼합하여 사용하였다. 화장지 시료로는 여러회사의 두루마리 화장지와 흔히 티슈라 불리는 얇은 화장지를 사용하지 않은 상태에서 골고루 혼합하여 상용 하였다. 본 연구에서 사용된 제지시료를 가능하면 흙이나 다른 불순물에 오염이 적게 되도록 하면서 일상생활 중에 흔히 사용하는 형태나 폐기물로 발생하는 형태를 그대로 사용하였다. 이렇게 여러 장소나 생활 패턴에서 다양하게 발생하는 유사한 시료를 모아서 원추사분법으로 분류된 대표 제지시료를 만든 다음 소각 실험에 사용하였다.

### 2.2. 실험장치도

Fig. 1은 본 연구에서 제지류 소각과 시료채취를 위하여 적절히 디자인된 실험장치도를 개략적으로 나타내었다. 전기로에서 시료가 놓여있는 부분에는 열전대가 설치되어 있어서 정밀한 온도가 제어가능하다. 원활한 연소를 위하여 압축공기를 유입하였고, 압축공기의 유량은 Flow Ball Meter로 조절하였다. 전기로의 소각 (연소)실 (Combustion Chamber)은 폭 16cm, 가로 10.5cm, 세로 31.5cm의 크기이며, 전기로 소각실의 중앙에 도가니 (Crucible)를 사용하여 시료를 수평으로 위치하였다. 전기로 출구에서 비산되는 입자상 물질을 제거하여 효과적인 VOCs 시료 포집이 가능하도록 필터 (Filter)를 설치하였다. 또 시료 소각시 생성되는 산성가스를 포집하여 시료채취용 펌프의 부식방지와 시료봉지에서 포집이 용이하도록 하기 위한 배출가스의 온도감소를 위하여 2개의 250ml 흡수병



A : Compressed air, B : Ball flow meter,  
C : Incineration chamber, D : Furnace,  
E : Filter, F : Impinger,  
G : Pump, H : Air sampling bag

Fig. 1. A schematic diagram for VOC sampling and incineration of papers by using an electric furnace.

(0.1N NaOH 용액)을 설치하였다.

### 2.3. 실험 및 분석방법

실험은 분류된 제지시료 30g을 전기로 (HY-8000S)에 넣고 연소실(Combustion Chamber) 중앙에 위치시킨 후 압축공기 통으로부터 압축공기(약 21% 산소)를 60ml/min의 유량으로 연소실내로 유입하였다 (Fig. 1 참조). 마찬가지로 시료채취용 Air 펌프를 통하여 60ml/min의 유량으로 배출가스 시료를 Tedlar Air 백에 포집하였다. 실험시 전기로의 온도는 최초 상온 30°C에서 실험을 시작하여 약 7.5 °C/min의 승온 속도로 600°C까지 승온한 후 (80분 소요) 600°C에서 80분동안 유지하였다. 소각 실험에서 발생하는 휘발성 유기화합물 시료는 30°C에서 600°C까지 승온동안의 80분과 600°C에서 80분간을 합쳐 총 160분 동안 포집되었다. 포집된 휘발성 유기화합물은 GC-MSD(HP 5971A MS)를 이용하여 발생 성분과 그들 성분의 정량적 농도를 분석하였다. 소각 후 상온으로 식힌 후 재가 든 도가니를 황산테시게이터에서 3일 이상 충분히 항량시키고, Gravimetric 방법으로 소각재의 함량을 분석하였다. 분류된 각각의 제지 시료를 가지고 이러한 일련의 소각 실험과 휘발성 유기화합물에 대한 분석을 각각 3번 반복하였다. 또한, 각종 제지류의 수분함량 분석을 위해서 소각 전에 제지류 시료를 준비하여 105°C의 조건에서 2시간 이상 유지시킨 다음, 소각재 함량 분석에서와 같은 Gravimetric 방법으로 수분함량을 분석하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3.1. 휘발성 유기화합물

본 연구를 통한 제지류의 소각에서 분석한계 이상으로 검출이 확인된 휘발성 유기화합물은 총 25종이었다. 같은 무게 제지류 시료를 동일한 조건에서 소각시 가장 높은 농도로 검출되는 화합물은 2-methyl furan으로 평균농도가 6.3 ug/g 정도였다. 또한, benzene (2.0 ug/g), 2-methyl 1-propene (0.9 ug/g), toluene (0.7 ug/g), 1-Butene (50.4 ug/g) 등도 높은 농도로 검출되었다. Table 1은 본 연구에 사용된 제지류의 종류변화에 따른 소각실험에서 검출된 휘발성 유기화합물의 평균농도를 나타낸 것이다. 이 중에서 인체 유해성 대기 오염물질(Hazardous Air Pollutants : HAPs) 또는 발암성 물질인 Benzene이나 Butene도 상당한 농도로 검출되므로, 제지류 소각에서 발생한 휘발성 유기화합물 가스는 소각장 주변의 대기를 악화시킬 수도 있다.

#### 3.1.1. 휘발성 유기화합물의 평균 배출농도

본 연구에서는 휘발성 유기화합물을 화학적 구조와 특성에 따라 Furan계, Aromatic계, Aliphatic Alkene계, n-Aliphatic Alkane계, Chlorine계, Ketone계, 그리고 Aldehyde계로 분류하였다. Table 1은 제지류의 소각시 발생하는 휘발성 유기화합물의 농도와 계열별 농도값을 제지시료의 단위 무게당 (g) 배출되는 VOCs의 농도 (ug)를 나타내었다. 제지류의 소각시 발생하는 가장 많은 양의 VOCs는 Furan계로서 전체 배출농도의 57.4%나 되었다. 이처럼 Furan계 화합물의 발생비율이 높은 것은 제지류가 소각되면서 산소와 결합하여 안정한 오각형 고리구조의 산화물인 Furan이 많이 형성되기 때문이다. 그 다음으로 Aromatic 계의 화합물의 검출농도가 높는데, 이는 발생된 VOCs가 산소에 의해 미처 산화되기 전에 화학 구조적으로 안정한 방향족 화합물이 형성되었기 때문으로 판단된다. 본 연구에서 확인된 휘발성 유기화합물의 대부분이 대기 중의 오존 및 광학적 스모그 형성의 좋은 전구체 물질로써 사용될 수 있다.

특히, 발생된 휘발성 유기화합물 중 분자내에 이중 결합을 포함하는 화합물 (Aromatic계, Aliphatic Alkene계, Ketone 및 Aldehyde계)들의 상대적인 배출비율은 전체 배출농도에 대해 약 40.8%나 되었다. 즉, 제지류의 소각에서 발생하는 휘발성 유기화합물의 40% 이상이 그들의 화학적 구조 중에 이중결합을 가지고 있어서, 오존 형성 잠재성(Ozone Formation Potential)이 매우 크다고 볼 수 있다. 따라서, 이러한 휘발성 유기화합물은 햇빛, 질소산화물 등과 상호작용을 하여 대기 중의 오존 및 광화학적 산화

Table 1. Classification by chemical structure of VOCs produced from incineration

Classification	Name of VOCs	Concentration (ug of VOCs/g of Waste)		Percentage
		VOCs	Sub-total	
Furan series	Furan	1.06	21.77	57.4%
	2-methyl Furan	18.89		
	2-ethyl Furan	0.39		
	2,5-dimethyl Furan	1.26		
	2,4-dimethyl Furan	0.17		
Aromatic series	benzene	6.05	8.65	22.8%
	toluene	2.00		
	ethyl benzene	0.19		
	m,p-xylene	0.26		
	styrene	0.08		
	o-xylene	0.07		
Aliphatic Alkene series	2-methyl 1-propene	2.64	5.66	14.9%
	1-Butene	1.16		
	1-pentene	0.41		
	2-pentene	0.47		
	1-Hexene	0.98		
n-Aliphatic Alkane series	n-pentane	0.09	0.59	1.6%
	hexane	0.17		
	n-heptane	0.12		
	n-octane	0.21		
Chlorine series	dichloromethane	0.08	0.09	0.2%
	chloroform	0.01		
Ketone series	acetone	0.16	0.82	2.2%
	MEK	0.66		
Aldehyde series	2-methyl 2-propenal	0.34	0.34	0.9%
	Total		37.92	100.0%

물의 농도를 증가시킬 수 있고, 경우에 따라서는 광학적 스모그 형성을 형성하여 우리의 대기 환경을 저하시킬 우려가 크다고 할 수 있다.

Fig. 2에는 본 연구에서 분류된 제지류의 소각에 따른 휘발성 유기화합물의 계열별 배출농도를 그래프로 나타내었다. 제지류의 소각에서 발생하는 휘발성 유기화합물 중 가장 많은 양이 발생하는 Furan 계열은 48.9 ~ 62.6%의 비율을 차지하였는데 특히, 포장용지류에서 가장 높은 비율을 보였다. 또 Aromatic 계열의 경우 포장용지류에서는 22.0%로 가장 높은 비율을 보였고, 반면에 A4 종이류에서는 19.1%로 상대적으로 낮은 비율을 보였다. Aliphatic Alkene 계열은 A4 종이류에서 28%나 될 정도로 특히 많이 배출되었고, 포장용지류, 신문용

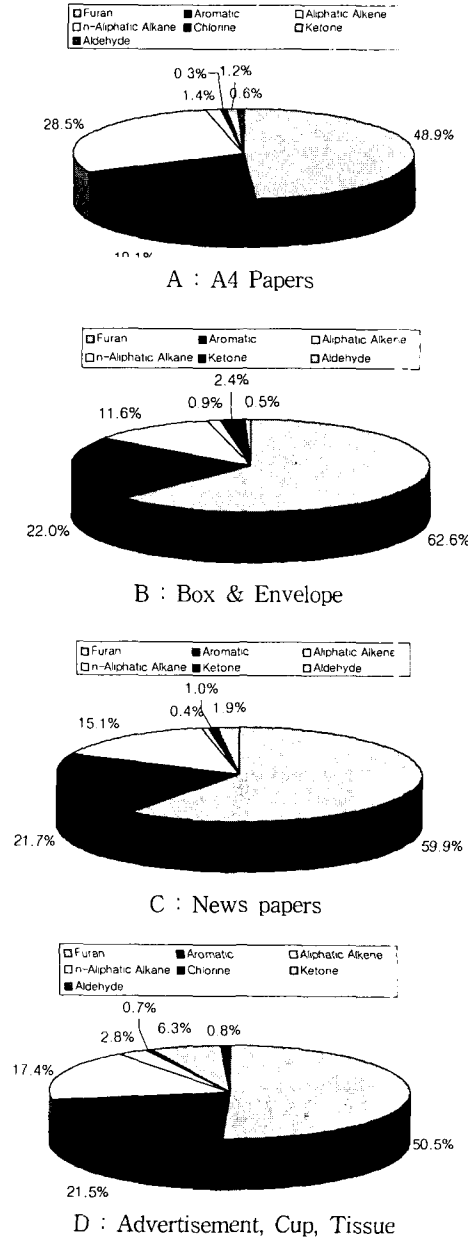


Fig. 2. Relative concentrations of VOCs produced from incineration of various papers.

지류, 기타 종이류에서도 각각 11.6%, 15.1%, 17.4%의 비율을 보였다. 제지류의 소각에서 Chlorine 계열의 휘발성 유기화합물은 포장용지류와 신문용지류에서는 검출되지 않았지만 A4 종이류 및 기타 종이류에서는 낮은 농도로 검출되었다. 이는 이러한 종이류의 제조시 표백 등의 과정에서 Chlorine 계 화합물이 사용되었음을 암시한다.

3.1.2. A4 용지류

일반적으로 학교나 관공서 또는 일반 사업장의 사무실 등에서 복사(인쇄)용지의 대부분이 배출된다고 할 수 있을 것이다. A4 종이류에서는 2-methyl 1-propene에서 styrene까지 20종류의 VOCs가 확인되었다. Fig. 3은 30g의 A4 종이류의 소각시 발생하는 휘발성 유기화합물 중 상대적 농도가 500ppb (Furan 기준: 0.04 ug/g) 이상인 물질들만 도식화한 것이다. 이 그림에서 보듯이 A4 종이류 중에서 잉크젯 프린터에서 인쇄되어 출력된 A4 용지의 소각에서 발생하는 휘발성 유기화합물의 농도가 다른 A4류 보다 훨씬 높음을 알 수 있다. 이는 A4 잉크류에 사용된 여러 종류의 유기화합물질 때문으로 판단된다. 다음으로는 인쇄되지 않은 A4 새종이가 차지하였고, Carbon으로 인쇄된 A4 종이류에 상대적으로 가장 적은 양의 휘발성 유기화합물이 배출되었다. 특히, A4류 소각에서 발암성 및 유해성으로 잘 알려진 Benzene도 상당량 검출되었다. A4 종이류 중에서 다른 A4류에 비하여 laser 프린트(carbon 프린트)된 A4용지의 소각에서는 상대적으로 적은 양의 VOCs가 배출되었다. 이는 laser 프린팅에 사용된 carbon이 A4 동이에 증착되어, 전체적으로 A4 새종이에 비하여 Benzene를 배출할 수 있는 종이 자체가 차지하는 비중이 줄어들었기 때문으로 판단된다.

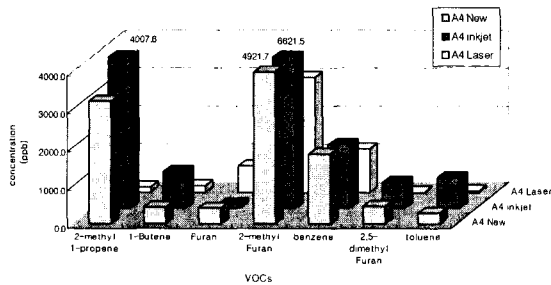


Fig. 3. Concentrations of VOCs produced from incineration of A4 papers.

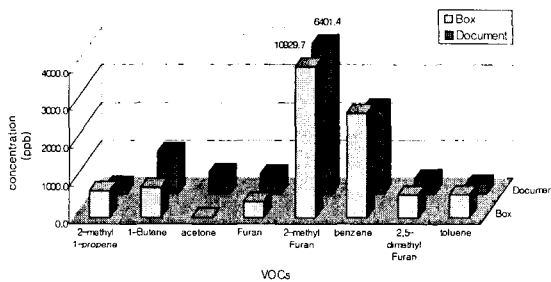


Fig. 4. Concentrations of VOCs produced from incineration of box and document papers.

3.1.3. Box 및 서류봉투류

우리의 일상생활에서 사용되는 포장용지의 종류는 매우 다양하지만, 본 연구에서는 사무용으로 가장 많이 사용되는 서류봉투와 재활용율이 높은 포장용 Box 용지에 대해서 연구하였다. 포장용지류의 소각에서는 총 23종의 휘발성 유기화합물이 검출되었고, 500ppb (Furan 기준: 0.04 ug/g)이상의 상대적 농도를 보인 물질들을 모아 아래의 Fig. 4에 나타내었다. 가장 높은 농도로 검출되는 VOCs로는 2-methyl Furan(Box용지 : 1.12 ug/g, 서류봉투 : 0.65 ug/g)이었고, 다음으로 발암성 물질인 benzene(Box용지 : 0.28 ug/g, 서류봉투 : 0.23 ug/g)이 높은 농도로 확인되었다. Box나 서류봉투류의 소각에서 배출되는 평균 benzene 농도는 A4 종이류 평균 농도의 약 1.6배 이상 높았다. 이는 Box 및 서류봉투의 두께가 두꺼워 A4류 보다 효과적인 소각이나 혼합이 되지 않았기 때문으로 판단된다. 서류봉투에 대체로 황색으로 코팅된 화학물질과도 관련이 있을 것으로 추정된다.

3.1.4. 신문용지류

본 연구에서는 신문용지류를 크게 콩기름 신문과 일반 신문으로 구분하여 연구하였다. 신문용지류에서는 총 21종의 휘발성 유기화합물이 검출되었고, 500ppb (toluene 기준: 0.06 ug/g)이상의 농도로 검출된 것은 benzene과 toluene을 비롯한 5종이었다. 일반 신문의 소각에서 배출되는 휘발성 유기화합물의 농도는 benzene과 2-methyl furan의 경우를 제외하고는 콩기름 사용 신문의 경우와 비슷하거나 다소 높은 농도로 확인되었다 (Fig. 5 참조). 그러나, 일반신문지의 소각에서 배출되는 benzene의 농도는 콩기름 잉크 사용 신문의 경우에서보다 약 4배 높은 농도로 배출되었다. 따라서 benzene 농도만으로 비교할 때 기준에 흔히 사용되는 잉크로 인쇄된 일반 신문의 소각에서는 콩기름 잉크 사용 신문의 소각에서 보다 4배나 높은 발암성 물질을 배출할 가능성이 있다. 이것은 또한 신문

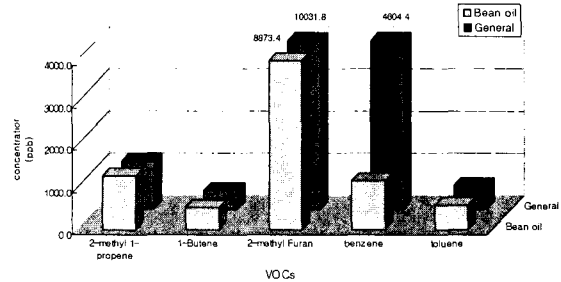


Fig. 5. Concentrations of VOCs produced from incineration of news papers.

구독시에도 기존 사용되던 잉크로 인쇄된 신문보다 콩기름 사용 신문이 독자의 건강 측면에서도 훨씬 유리할 것임을 암시하고 있다.

3.1.5. 기타 종이류

본 연구에서는 가정 등에서 신문지 사이에 끼워져서 발생하는 광고전단지, 일회용 종이컵, 가정에서의 화장지 등을 묶어 기타 종이류로 분류하였다. 기타 종이류 중 광고지의 소각에서는 benzene은 A4 종이류의 소각에서와 유사한 정도로 배출되었지만, 2-methyl Furan은 연구대상 종이류 중 가장 낮은 배출농도로 분석되었다 (Fig. 6 참조). 또 benzene은 다른 연구대상 종이류 중 가장 낮은 농도로 검출되었다. 일상생활에 가장 많이 사용되어지는 화장지는 다른 연구대상 종이류보다 배출되는 휘발성 유기화합물의 배출농도가 전체적으로 낮게 검출되었고, benzene의 농도도 종이컵 소각 다음으로 낮게 배출되었음이 확인되었다. 일회용 종이컵의 경우, 다른 종이류에서 보다 훨씬 높은 농도의 Methyl ethyl ketone(MEK)이 검출되었는데, 일회용 종이컵이 물에 젖지 않도록 하기 위해 사용된 코팅용 화학물질 때문으로 여겨진다.

3.2. 소각현상분석

3.2.1. 수분함량

Fig. 7은 본 연구에서 사용된 총 10종류의 종이 시료들에 대한 수분함량을 나타낸 것이다.

본 연구에서 시험된 제지류의 수분함량은 4.3 ~ 11.7%의 범위로 분석되었고, 일반적인 도시폐기물의 제지류 수분함량 (4.5 ~ 10 %)과 유사한 값을 보였다. 본 연구에서 사용된 10가지의 제지류가 가지고 있는 평균 수분함량은 7.2% 정도였다. 종이류에서는 레이저 인쇄된 A4 종이가 4.7 %로 가장 낮은 수분함량을 나타내었는데, 이는 laser 인쇄되면서 프린트에서 A4 종이가 급혀질 때 고온에 의한 수분증발이 일어났기 때문이다. 또, A4 잉크젯류가

6.8 %의 수분함량으로 분석되었는데, 이는 잉크젯에 함유된 수분이 인쇄되는 과정에서 A4 종이에 추가로 공급된 결과 때문이다. 신문용지류에서는 일반신문용지류에서 7.0%, 콩기름신문용지류에서 11.7 %로 상대적으로 높은 수분함량을 보였다. 이는 물에 용해성이 상대적으로 좋은 콩기름 잉크에 함유된 수분함량이 신문지 종이 자체가 가진 수분함량에 추가되었기 때문이다. 광고지의 수분함량은 연구대상 전체 제지류 중 가장 낮게 나타났는데, 이는 물과 용해성이 적은 유기화합물이 광고지에 다량 코팅되어 있기 때문에 수분함량이 낮게 나온 것이다. Box류와 화장지의 수분함량이 상대적으로 높은 것은 수분을 받아들이기 좋은 물리적 구조, 즉 충격완충을 위해 만든 Air Pocket과 그로 인한 표면적 증가로 설명할 수 있다.

3.2.2. 소각재 함량

본 연구에서는 실험시 각각의 종이(제지) 시료 30g을 취하여 소각실험을 행하였다. 전기로에서 온도를 600℃까지 승온한 후 1시간을 유지시켰을 때 소각재 (Bottom Ash)의 양이 가장 많은 것은 광고지로서 7.0532g이었는데, 이는 소각된 종이시료 무게의 약 23.5%나 될 정도로 높은 비율의 소각재 시료가 발생하였다 (Fig. 8 참조). 이렇게 광고지의 소각재 함량이 다른 제지류보다 월등히 높은 것은 종이의 두께가 상대적으로 두꺼웠기 때문이다. 즉 종이두께가 상대적으로 두꺼워 다른 종이류에 비하여 효과적인 소각이 이루어지지 않았음을 나타낸다. 또한 상대적으로 소각이 어려운 재질의 종이가 광고지에 사용되었을 것으로 추정된다. A4 종이류의 소각재 함량은 약 13 ~ 14% 정도였고, 신문용지류의 경우 5 ~ 9%의 소각재가 생성되었다. 종이컵과 화장지의 소각재 함량은 2% 정도였고, 연구대상 제지류의 소각에서 소각재의 함량이 가장 적은 것은 서류봉투로서 1% 이하만이 소각잔사로 남

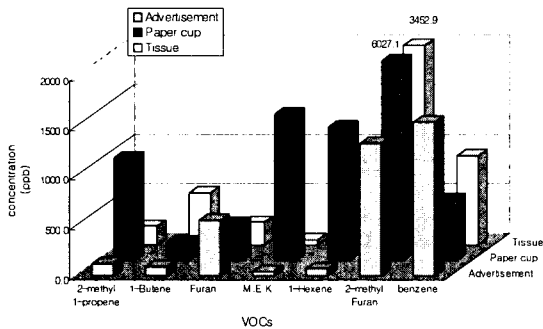


Fig. 6. Concentrations of VOCs produced from incineration of various papers.

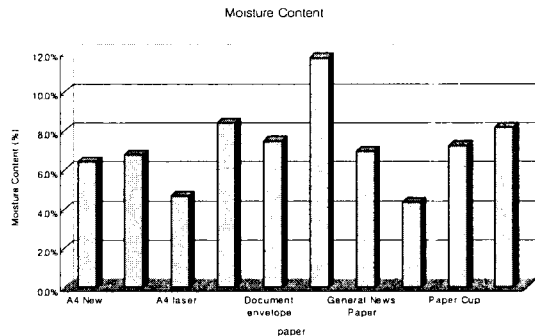


Fig. 7. Average moisture content of the papers studied.

600°C에서 제지류 소각시 발생하는 휘발성 유기화합물 농도분석 연구

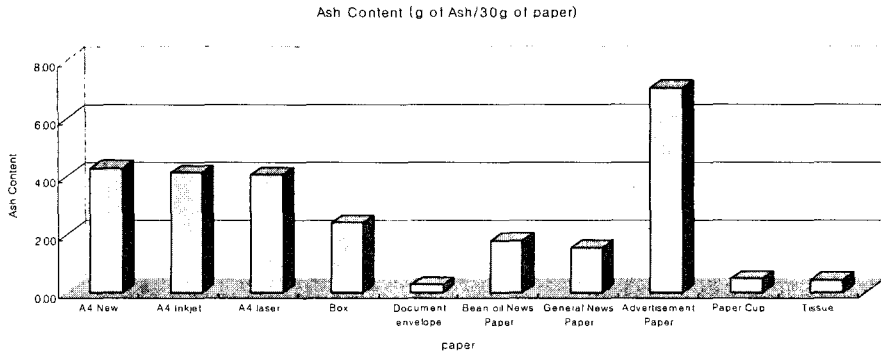


Fig. 8. Average ash contents produced from incineration of papers.

았다. 본 연구에서 이용된 제지류의 평균 소각잔재 백분율은 9.0% 이었다.

3.2.3. 소각온도

실제로 운영되는 소형 소각로의 노내 온도는 700 ~ 850°C 정도이지만, 본 연구에 사용된 전기로를 이용하여 그 정도의 온도를 유지하는 것은 현실적으로 어려움이 많았다. 즉, 많은 양의 제지류 시료를 연소실 안에 비치된 도가니로 이동하는 것의 어려움과 600°C에서 700 ~ 800°C의 온도까지 상승하는데 걸리는 시간이 너무 오래 소요되어 그 온도에서의 소각현상을 연구하기가 본 연구에서 사용된 장비로는 현실적으로 어려웠다.

만약, 제지류의 소각온도를 800°C 이상으로 유지하면서 어떤 형태로든 소각중 시료를 혼합가능하였다면, 제지류 시료 종류에 따라서는 본 연구에서 보다 불완전 연소되는 분량이 상대적으로 적어서 본 연구결과에서보다 단위 제지시료 무게당 배출된 VOCs량과 소각재의 함량은 감소할 것으로 예상된다. 그러나 본 연구에서는 600°C에서 시료를 80분 이상 유지하면서 소각하였고, Fig. 8.에서 보듯이 소각재의 함량이 거의 8%이하인 것으로 보아 본 연구에서는 어느 정도 충분한 소각이 이루어졌다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서 얻어진 휘발성 유기화합물 농도도 중요한 오염물 배출정보로서의 상당한 가치가 있다고 볼 수 있다.

4. 요약

본 연구는 제지류를 소각 처리할 때 발생하는 각종 휘발성 유기화합물에 대한 배출농도를 분석하였다.

실험대상으로는 일상생활에서 다양한 용도로 사용되는 제지류를 A4용지류 (A4 새종이, A4 잉크젯, A4레이저), 신문용지류 (쿵기를 신문, 일반 신문), 포장용 Box지, 서류봉투류, 일회용 종이컵류,

화장지류로 분류하였고, 분류된 제지류의 수분함량과 소각시 발생하는 휘발성 유기화합물농도와 소각재 함량을 분석하였다.

제지류 소각시 발생하는 휘발성 유기화합물을 Furan계, Aldehyde계, Aromatic계, Aliphatic Alkene계, Aliphatic Alkane계, Chlorine계, Ketone계로 분류할 때 가장 많이 발생하는 VOCs로는 Furan계로서 전체 배출농도의 57.4%였고, 그 다음으로 Aromatic계 (22.8%), Aliphatic Alkene계 (14.9%)의 순으로 높은 평균농도를 나타냈다. 발생하는 휘발성 유기화합물 중 이중 결합을 포함하는 화합물 (Aromatic계, Aliphatic Alkene계, Ketone 및 Aldehyde계)들의 상대적인 배출비중은 전체 배출농도에 대해 약 40.8%로써, 제지류의 소각에서 발생하는 휘발성 유기화합물의 40% 이상이 대기 중의 오존, 광화적 산화물 및 스모그의 전구체로써 작용할 수도 있을 것이다.

연구 사용된 전체 혼합 제지류 소각시 휘발성 유기화합물중 대표적인 발암성 물질인 Benzene, dichloromethane, chloroform도 각각 60.5 ug/g, 0.8 ug/g 및 0.1 ug/g 정도 발생될 수 있음을 볼 수 있었다. 따라서, 소형 소각로에서의 제지류의 소각시 상당량의 발암성물질도 배출되므로, 소형 소각로에서도 적절한 VOCs의 제어장치가 꼭 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 10가지의 제지류가 가지고 있는 평균 수분함량은 7.2% 정도로써 일반적인 도시폐기물의 제지류 수분함량 (4.5 ~ 10%)에 속하는 결과를 보였으며, 평균 9.0 %의 소각잔재 (Bottom Ash) 함유량을 보였다. 이러한 결과는 제지류를 소형 소각로에서 소각시 유해 휘발성유기화합물의 발생에도 불구하고, 적절한 대기오염 방지시설을 설치한다면 소각처리가 폐기물 부피감소 측면으로는 상당한 경제적 타당성을 가지고 있음을 암시한다.

참 고 문 헌

- 1) U.S. EPA, 1998, Characterization of Municipal Solid Waste In the United States:1997 Update, Environmental Protection Agency, Report No. EPA530-R-98-007, 13-24.
- 2) Meaney, J.G. and P.N. Cheremishoff, 1989, Medical Waste Strategy, *Pollution Engineering*, October, 92-106.
- 3) 환경부, 2001, 폐기물 발생 및 처리실태, 2001 환경백서, 남형문화(주), 590-599.
- 4) 환경부, 2000, 폐기물 처리시설 확충, 2001 환경백서, 남형문화(주), 629-631.
- 5) Lee, B.K., 1995, A Study of Characterization, Disposal, Recycling, and Air Emissions of Medical Plastic Wastes, University of Massachusetts, Ph.D. Dissertation, 1-181.
- 6) AWMA (Air & Waste Management Association), 2000, Waste Incineration Sources. Air Pollution Engineering Manual, 2nd Edition (W.T. Davis, Ed), Wiley-Interscience Inc., 257-293.
- 7) CEC (Citizens Environmental Coalition), 1993, Managing Medical Waste, CEC Fact Sheet #6, Albany, New York 12210.
- 8) Kitakawa, 2000, 소형소각로의 기술동향 (1), 첨단환경기술, 2월호, 41-49.
- 9) 星野 和久, 2000, 소형소각로의 기술동향 (3), 첨단환경기술, 4월호, 77-81.
- 10) 첨단환경기술 편집부, 2000, 소형소각로의 기술동향 (2), 첨단환경기술, 3월호, 6.
- 11) 이병규, 김행아, 2000, 학교생활쓰레기의 성분 분석과 소형소각로 운전애 따른 유해성 오염물의 배출 잠재성 분석 연구, 한국대기환경학회지, 16, 6, 299-308.
- 12) 환경부, 2000, 음식물쓰레기 감량화, 2001 환경백서, 남형문화(주), 606-609.
- 13) 강호, 최일엽, 김종원, 안종찬, 허형수, 1999, 종량제 실시 이후 일반폐기물의 조성 및 물리화학적 특성연구, 한국폐기물학회지, 16, 1, 1-9.
- 14) 이규만, 1998, 음식물쓰레기 자원화 기본계획의 배경 및 정책방향, 첨단환경기술, 11월호, 34-41.
- 15) 이동진, 2000, 생활폐기물 소각 및 매립처리의 경제성 평가 분석, 한국폐기물학회지, 17, 1, 53-60.
- 16) 신현국, 1995, 폐기물 소각현황과 정책, 한국대기보건학회지, 11, 2, 101-106.
- 17) 임계규, 1995, 폐기물 소각시설분석과 소각로 선정, 한국대기보건학회지, 11, 2, 107-117.
- 18) Tellus and JSI, 1990, Incineration: Decisions for the 1990s, Tellus Institute and JSI Center, 1-152.
- 19) 이승무, 1995, 한국의 소각로 현황과 발전방향, Seoul International Waste Treatment Technology Conference, Chap. 21, August 1995, KOEX, Korea.
- 20) 이성호, 이대근, 2000, 도시쓰레기의 소각재의 용출특성에 관한 연구, 한국폐기물학회지, 17, 6, 741-748.