

페타이어 건류 소각에서 발생하는 재와 배기 가스에서의 독성 오염 물질의 정량

Characterization of Toxic Pollutants in Ash and Flue Gas from Gasification Incinerator of Waste Tires

구자공* · 서영화** · 김석완** · 유동준**

Koo, Ja Kong · Seo, Young Hwa · Kim, Seok Wan · Yoo, Dong Joon

Abstract

The problem of disposing of huge quantities of used tires is of growing concern to every country. As an economical solid waste management, a gasification followed by incineration process was applied to scrap tires to recover heat and to reduce waste volume for final landfill disposal. The gasification temperature, combustible and non-combustible gasified products and possibly produced air pollutants were predicted by changing equivalent mole ratios of carbon to oxygen by a chemical equilibrium model. For a risk assessment of ash toxic pollutants including heavy metals and toxic organics were thoroughly analyzed. Gasification bottom ash contained much more toxic organic compounds than fly ash, whereas fly ash contained higher concentration of heavy metals such as Pb and Cd. Pretreatment or secure landfill technology is suggested for a safe management of ash produced from the gasification incinerators.

요 지

본 논문에서는 해마다 수 십만 개씩 발생하는 페타이어의 열적 처리 방법인 건류 소각 처리 방법에서 발생하는 이차 오염 물질을 정량하여 페타이어의 안전한 최종 처리 방법까지 고찰하였다. 건류-소각 처리 방법에서 발생하는 배기 가스에서 이차 독성 오염 물질을 화학 평형 모델을 응용하여 예측하였고 실질적인 잔류 물질인 건류재와 소각재에서 유기성 독성 물질과 중금속을 정량하였다. 건류재에서는 페타이어의 불완전 연소에 따른 유기성 이차 오염 물질이 다량 포함되어 있는 반면에 소각재에서는 납과 카드뮴과 같은 중금속 화합물의 함량이 높았다. 건류재 및 소각재의 안전한 최종 매립을 위하여는 서로 다른 전처리 방법이 요구된다.

1. 서 론

전 세계적으로 대두되고 있는 각종 폐기물 처리

문제는 각각의 국가에서 해결해야만 되는 중요한 과제이다. 한 해에도 수십만개씩 발생하는 페타이어의 대부분은 좁은 국토 이곳 저곳에 야적되어 가고 있으며, 일부분이 재활용이나 재이용되고 있는 실정이다. 페타이어는 8000 Kcal/kg 이상의 발열량을

* 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수, 공 · 박

** 정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

가지고 있어서 훌륭한 에너지원으로 평가되나, 소각이나 건류처리에 의한 에너지화 방법은 적합한 대기오염 방지시설을 갖추지 않고서는 많은 양의 분진, 탄화수소, 황산화물, 질소산화물 등의 오염 물질을 발생시켜 2차 대기오염문제를 일으키게 된다. 매립에 의한 처리방법은 페타이어가 주로 발생하는 도심지역에서 매립지 확보의 문제와 타이어 자체의 부피 감량화가 불가능한 점, 매립 상태에서 생물학적 분해가 거의 이루어지지 않는 점 등을 고려하면 만족할 만한 방법이 아니며 아직역시 도시의 미관을 깨뜨리며, 공중보건상 문제를 일으키기도 하여 페타이어의 처리 문제는 현대사회에서 해결하여야 할 커다란 문제이다.⁽¹⁾

고체 폐기물의 건류 소각 방법은 극소량의 산소 하에서 건류과정을 거쳐 발생하는 건류가스성분을 연소시켜 처리하는 방법이다. 페타이어 건류 소각에서의 화학적 반응은 타이어의 화학적 성분, 표면 구조, 타이어의 물리적 성질 등과 건류소각공정의 조건, 즉, 산소의 주입량, 온도, 연소로의 구조에 따라 상당히 복잡하게 일어나고 있다. 건류공정과 비슷 하면서 무산소하에서 일어나는 열분해공정은 유기 탄소성 폐기물의 소각 방법과 비교하여 양질의 직접, 간접 에너지를 회수할 수 있는 점과 대기오염물질의 배출을 최소화시킬 수 있는 점에서 많은 사람들의 관심의 대상이 되고 있다.⁽²⁾

페타이어의 열분해 처리공정은 1970년대 초에 미국 Firestone Tire 회사⁽³⁾가 밀봉된 리토르트 타입 (retort type)의 열분해 파이롯트에서 페타이어를 처리하여 가스상 오일성분을 회수하여 간접 연료로 사용하고, 잔류물은 **찰(char)**나 무연성 연료, 콘크리트, 아스팔트로써 이용할 수 있는 가능성을 제시한 이후로 페타이어의 재활용, 에너지 회수면에서의 실용화 연구는 1980년대 후반에 들어와서야 진척을 보이고 있다. 근래에는 미국, 일본 등에서 에너지 회수에 의하여 화력 발전소의 가동⁽⁴⁾이나, 시멘트 제조공정⁽⁵⁾에 직접, 간접적으로 페타이어가 활용되고 있다. 최근에 보고된 연구에서는 실험실 규모로 페타이어를 진공 열분해하여 생성되는 오일 성분을 포집하여 용매로 사용되는 limonene 성분을 분리하여 재활용하는 방법도 시도되고 있다.⁽⁶⁾

고온 소각 방법은 높은 발열량을 가진 고체상 폐기물을 처리하는데 있어서 바람직한 방법으로 간

주되고 있다. 그러나 도시폐기물 및 산업폐기물 소각에서 PCDD(Polychlorinated dibenzodioxin)이나, PCDF(Polychlorinated dibenzofuran)와 같은 여러 가지 발암성 물질이나 난분해성, 독성 물질들이 발견되어⁽⁷⁾, 소각에 의한 폐기물 처리에 경각심을 갖게 되었고 방지 시설의 규제를 강화하게 되었다.

페타이어는 제조시에 고무 성분 이외에 수십가지의 화학물질이 첨가되는데 PCDD발생의 전구 물질이라고 알려진 pentachlorophenol과 발암성 물질인 phthalate 등의 화합물이 첨가되고 있어서 페타이어 건류 소각시에 이러한 물질들이 어떻게 분해되어 처리되는지 확실하게 알려지고 있지 않다. Elter와 Hites⁽⁸⁾의 연구보고서에 의하면 환경시료에서 발견되는 PCDD/PCDF의 주 발생원은 폐기물연소에 기인한다고 보고하였고, Hagenmaier⁽⁹⁾는 목재가공시 사용되는 pentachlorophenol이 전반적인 자연환경을 오염시키는 발생원이라고 보고하기도 하였다. 그러므로 페타이어의 소각처리시에는 연소성 발생원인과 전구물질이 모두 함유되어 있어서 페타이어의 건류 소각처리에서 PCDD/PCDF 생성 가능성을 배제하지 않을 수 없다. 또한 탄소화합물이 불완전 연소되면서 발생하는 발암성 물질인 Polynuclear aromatic hydrocarbons(PAH)도 폐기물 소각으로부터 다량 발생되며, 염소가 치환된 유기 화학 물질도 배기가스에서 검출되고 있어서⁽¹⁰⁾ 소각으로 발생하는 2차 오염물질의 제어가 상당히 큰 문제로 부각되고 있다. 현재 국내에서는 소각에 의한 배기가스의 규제는 강화되고 있으나 소각되지 않고 배출되는 금속성 물질과 완전 연소되지 않고 방출되는 독성 유기성 물질들은 농축된 상태로 bottom ash나 fly ash로 배출되지만 중금속 용출시험이나 혹은 유해성 평가 없이 대부분 최종 매립 처분되고 있다. 토양이나 지하수를 매립에 의한 오염으로부터 방어하기 위하여 재의 유해성 평가와, 이 결과에 의거하여 매립 처분되기 전에 안전 매립에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 기존의 페타이어 소각에 의존한 처리에서 이차 오염물질의 발생을 억제하기 위한 건류 소각 공정을 활용하여 발생하는 독성 오염물질을 정량하였으며, 페타이어의 건류 소각 공정의 반응 파라미터, 생성 가스의 종류, 대기 오염 물질의 발생 상황을 기존의 화학적 평형 계산 방법을 사용하여 정량적으로 예측하였다.

2. 실험 방법

2.1 건류 소각 시스템

본 연구에서 이용된 건류 소각 시스템은 그림 1과 같은 시스템으로 1차 건류기, 2차 연소로 및 보일러, 멀티 사이클론, 닥트, 팬, 집진기, 굴뚝, 기타 부대 장치로 구성되어 있다.

2.2 건류 소각재의 중금속 용출실험

중금속 용출 실험에 사용된 재는 건류기 바닥에서 채취한 건류잔재 (bottom ash)와 대기 오염 방지 시설을 거쳐 굴뚝으로 배출되는 입자들이 밑에 떨어지는 굴뚝잔재(fly ash)를 채취하였다. 용출실험은 미국 환경처에서 고시한 용출실험법⁽¹¹⁾과 우리나라의 환경 오염 공정 시험법⁽¹²⁾에 의거하여 실험하였는데 납, 카드뮴, 구리, 크롬 이온을 용출시킨 후 원자 흡광 흡수 분석기(Atomic Absorption Spectrometer)에 의하여 분석하였다.

2.3 건류 소각재의 독성 유기화합물 분석

재에 함유된 독성 유기화합물 분석을 위하여 채취한 건류잔재는 데시케이터 안에서 건조를 시킨후 분쇄하여 80 mesh 채로 거른 것을 사용하였으며, 굴뚝잔재는 건조만 시킨후 사용하였다. 준비된 시료는 일정량 무게를 쟀후 Eiceman 등이⁽¹³⁾ 서술한 재 분석법을 약간 변경하여 시도하였다. 일정량의 잔재를 유리솜에 쌓아 캐필러리 컬럼 크로마토그래피(capillary column chromatography)용 고순도 벤젠을 사용하여 24 시간 Soxhlet 추출을 한 후, 타르성분과 같은 불순물을 제거하기 위하여 추출 용액을 알루미늄-실리카 컬럼 크로마토그래피(alumina-silica column chromatography)에 의하여 정제를 하였다. 정제된 추출용액은 로타리 증발기에 의하여

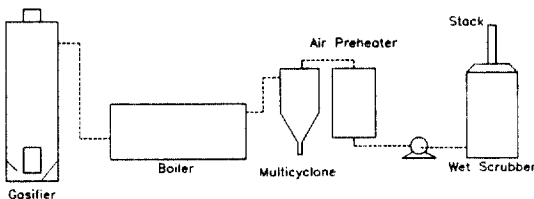


그림 1. Schematic diagram of experimental gasification incinerator

농축을 한 후 캐필러리 가스 크로마토그래피에 의하여 분석을 실시하였다. 가스 크로마토그래피의 분석 조건은 다음과 같다. 컬럼(column)은 SPB-5 fused silica capillary column(30m×0.26 mm ID, 0.25 μm film)을 사용하였으며, 오븐 온도 프로그래밍(oven temperature programming)은 100℃에서 2분간 유지하고, 분당 8℃ 씩 증가하여 280℃에서 5분간 유지하였으며, 불꽃 이온화 검출기(Flame Ionization Detector)를 이용하였다. 분리된 성분의 규명은 가스 크로마토그래피/질량분석기(HP 5890 GC/HP 5988 quadrupole MS)를 이용하였고, 질량분석 조건은 Electron Impact mode를 적용하여 질량 스펙트럼을 얻은 후 library reference 질량 스펙트럼과 비교하여 물질 규명을 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

페타이어 건류 공정의 반응 매개변수인 산소 요구량은 화학적 평형계산(CEC 71)⁽¹⁴⁾에 의하여 예측되었으며, 산소 요구량 변화에 따른 반응기의 온도, 가스화반응 생성물, 배기가스 성분 등을 평가하였다. 화학적 평형 계산에 입력되는 변수는 페타이어의 화학적 조성과 열역학적 상태 함수이며, 페타이어의 화학적 조성은 페타이어의 원소분석 결과를 사용하였고, 열역학적 상태함수는 JANAF Table⁽¹⁵⁾을 참고하였다. 또한 본 연구에서 활용한 화학 평형 계산 방법은 고온영역의 기체 반응에서는 실제 값과 열역학적 평형 계산값이 거의 비슷한 값으로 해석이 가능하지만, 페타이어의 건류와 같이 기체와 고체의 저온반응에서는 실제 측정값과의 비교가 어렵고, 화학 반응 기작의 해석에 의한 접근이 가능하다고 볼 수 있다. 그러나 이상적인 건류로에서의 반응 조건에 따른 건류 생성물간의 관계를 정성적으로 건류로의 거동을 예측할 수 있다.⁽¹⁶⁾

3.1 건류 소각로의 운전 매개변수의 예측

페타이어의 화학적 조성은 표 1의 원소 분석 결과와 같이 탄소가 80% 이상을 차지하고 있으며, 나머지는 유황, 철 등의 금속 성분으로 이루어져 있다. 건류화 반응에서 당량비(equivalent ratio)를 변화시켰을 때의 온도 변화도 그림 2에서 당량비가

표 1. Elemental Analysis Result of Waste Tire^{a)}

Composition	C	H	S	O	N	Ash	Moisture
Weight(%)	81.5	7.5	1.5	2.5	2.3	4.0	1.2

^{a)}참조, "폐기물의 건류가스 연료화 기술 개발", 에너지 관리공단, 1989.

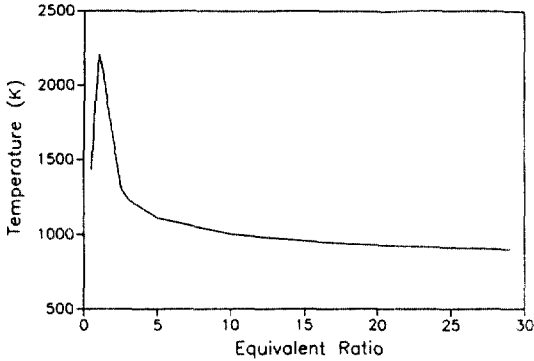


그림 2. Temperature profile predicted with varying equivalent ratios in the gasification of waste tires.

$$\left[\text{Equivalent Ratio} = \frac{(\text{Fuel/Oxidant})_{\text{real}}}{(\text{Fuel/Oxidant})_{\text{Stoichiometric}}} \right]$$

1일때 이론적으로 완전 연소가 일어남으로 당량비가 1보다 작은 영역에서는 과잉 공기의 주입 현상이 나타나고, 당량비가 1보다 큰 지역에서는 산소량이 부족하여 연소열의 발생이 적어 온도가 낮아지는 것을 볼 수 있으며, 당량비가 9 이상 일때는 온도의 변화가 거의 없이 약 1,000℃ 정도로 유지됨을 볼 수 있다.

3.2 건류화 성분과 배기가스 성분의 예측

화학 평형 계산에 의하여 예측된 페타이어의 건류 생성물은 그림 3에서 나타낸 바와 같이 연소성 물질인 CO, C₂H₂, C₂H₄, CH₂O, CH₄, H₂, Char 등이 발생되는 것을 알 수 있고, 생성물질의 수율은 당량비 7 이상에서 거의 일정하여 적절한 산소의 주입량은 당량비 7 정도에서 건류 생성물의 최대량이 예측되는 점을 선택할 수가 있다. 불연성 물질의 예측 생성 변화도는 그림 4에서와 같이 공기의 주입량이 감소됨에 따라 산소와 질소의 배출량이 감소하고, 수증기와 이산화탄소는 당량비가 2.5 일 경우에 가장

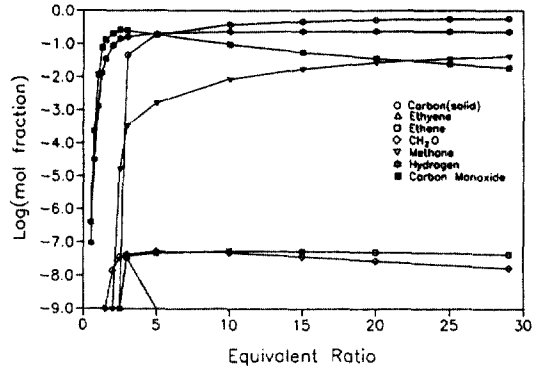


그림 3. Combustible gases concentration profile predicted with varying equivalent ratios in the gasification of waste tires.

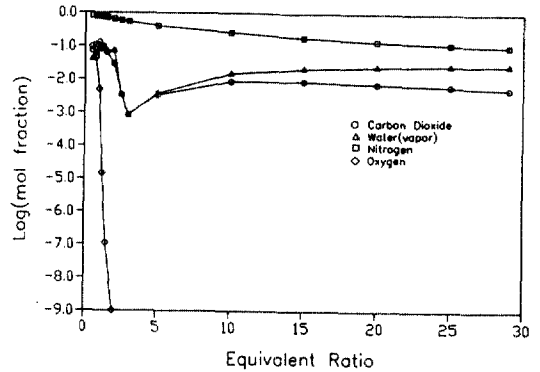


그림 4. Noncombustible gases concentration profile predicted with varying equivalent ratios in the gasification of waste tires.

적게 생성되는 것으로 예측되었다.

페타이어의 건류로부터 발생될 수 있는 오염 물질의 변화도 그림 5를 보면 NO_x와 SO_x의 경우에는 연소 영역에서 발생량이 많으며, 건류 영역에서는 질소와 유황 성분들이 산소의 부족으로 산화되지 않고 암모니아와 황화수소로 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 페타이어의 건류가스가 누출되었을 때 발생하는 냄새의 원인은 이러한 화학 물질에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

3.3 건류 소각재의 용출 실험

용출 실험은 국내에서 가동되고 있는 건류 소각 시스템에서 페타이어를 건류 소각 시킨후 채취한 각 시료당 세번 실시하였으며 그 결과는 표 2에 정리

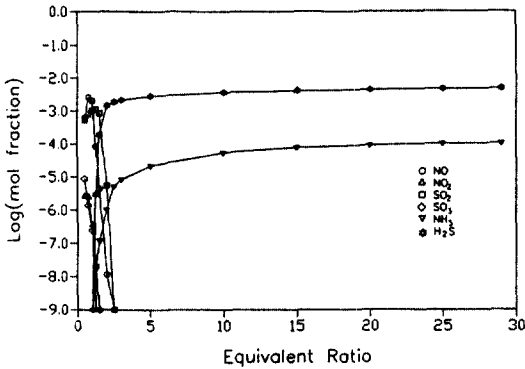


그림 5. Possibly produced air pollutants concentration profile predicted with varying equivalent ratios in the gasification of waste tires.

하였다. 국내의 환경 오염 공정 시험법은 HCl을 사용하여 pH를 5.8-6.3 사이의 범위를 맞춰 주어야 하는 반면 미국 환경처 시험 방법에서는 높은 pH 범위에서 용출함으로 최종 농도가 상당히 차이가 남으로서 용출시 허용 수질의 농도를 표 2와 같이 시험법에 따라 다르게 설정되어 있다.

두 가지의 시험법 모두에서 굴뚝잔재의 중금속 농도가 높게 나타나는 경향을 나타내었으며, 건류 잔재는 국내 매립 기준을 초과하지 않으나, 굴뚝잔재는 납과 카드뮴에 있어서 국내 매립 기준을 상당히 초과하고 있음을 보여 주었다. 이러한 중금속 배출 분포는 Bruner의 도시 폐기물 소각에서 방출되는 중금속의 흐름 분포도를 연구한 결과⁽¹⁸⁾와 흡사하게 나타났으며, 휘발성이 큰 중금속들은 집진기나 싸이클론에서 완전 제거되지 못하고 다량 배출됨을 알 수 있으므로 고효율의 입자 방지 시설이 요구된다. 크롬 이온의 경우 환경 오염 공정 시험법에 의하여는 검출되지 않으나, 미국 환경처 시험법에 의하여는 미량의 크롬 이온이 검출되기도 하였다.

3.4 건류 소각재의 독성 유기물 측정

건류 소각재의 독성유기물질 측정은 예비실험에서 몇가지의 PAH 화합물과 유황 성분이 함유된 물질, 질소성분이 함유된 물질들이 발견되었으나 수많은 화합물들이 혼합된 상태에서 분리가 잘 이루어지지 않아 혼합물의 상세한 분리를 위하여 알루미늄과 실리카겔을 담지한 컬럼을 이용하여 정제를 하였다.

표 2. Leachability Test Result for Heavy Metals (unit : ppm)

Heavy Metals		Pb	Cd	Cr	Cu
Korean Test Method	Korean Standards ^{a)}	1	0.1	0.5	3
	Gasifier Bottom Ash	0.036	.1	ND ^{b)}	0.02
	Stack Fly Ash	2.47	5.65	ND	0.05
EPA Test Method	EPA Standards ^{a)}	5	1	5	100
	Gasifier Bottom Ash	4.97	0.18	0.11	4.07
	Stack Fly Ash	28.55	4.46	0.20	0.03

^{a)}Maximum allowable concentration for landfill Treatment

^{b)}Not detected

표 3. PAH concentration Measured in Bottom and Fly ash (unit : µg/g)

PAH Compounds	Gasifier Bottom Ash	Stack Fly Ash
	Phenanthrene	320
Fluoranthene	240	2.2
Pyrene	250	2.0
Benz(a)anthrenne	165	0.7
Chrysene/triphenylene	73	2.3
Benzo(a)pyrene	650	4.2
Perylene	320	9.7
Benzo(ghi)perylene	270	5.6
Total PAH	2,288	30.0

건류잔재와 굴뚝잔재의 추출물질의 가스크로마토그램을 그림 6과 7에 도시하였는데 건류잔재의 벤젠 추출액은 알루미늄-실리카 컬럼에 의한 전처리에

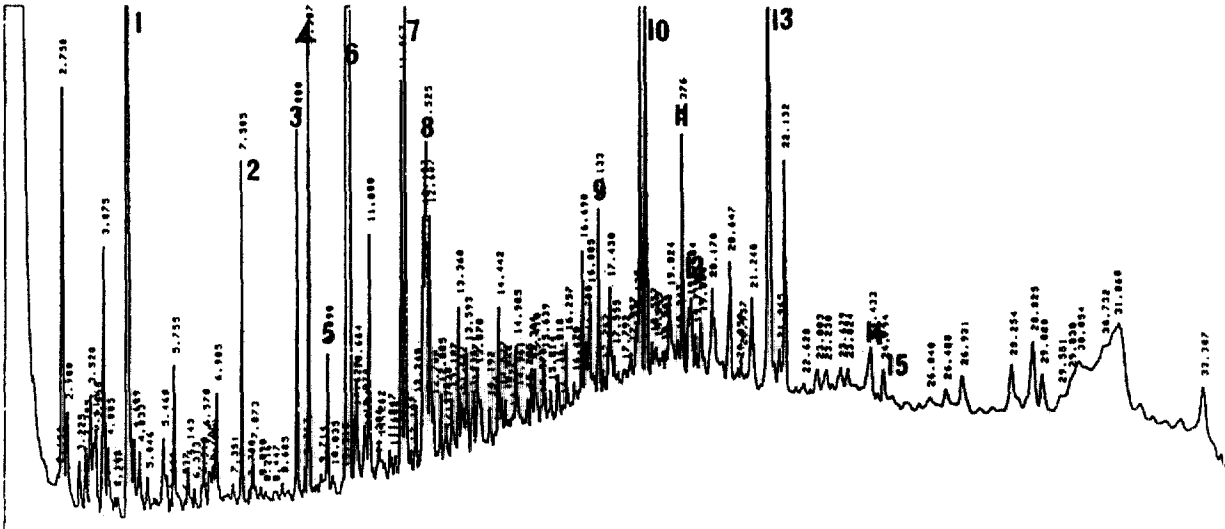


그림 6. Gas Chromatogram of Benzene Extract of Gasifier Bottom Ash Generated from Waste Tire Gasification/Incineration. Peak Identification: ¹benzothiazole, ²2,4-dimethylquinoline, ³phenanthrene, ⁴fluorenone, ⁵phenyl-naphthalene, ⁶phenylbenzothiazole, ⁷fluoranthene, ⁸pyrene, ⁹11H-benzo(b)fluorene, ¹⁰hexanoic acid dioctylester, ¹¹benz(a)anthracene, ¹²chrysene/triphenylene, ¹³benzo(a)pyrene, ¹⁴perylene, ¹⁵benzo(ghi)perylene.

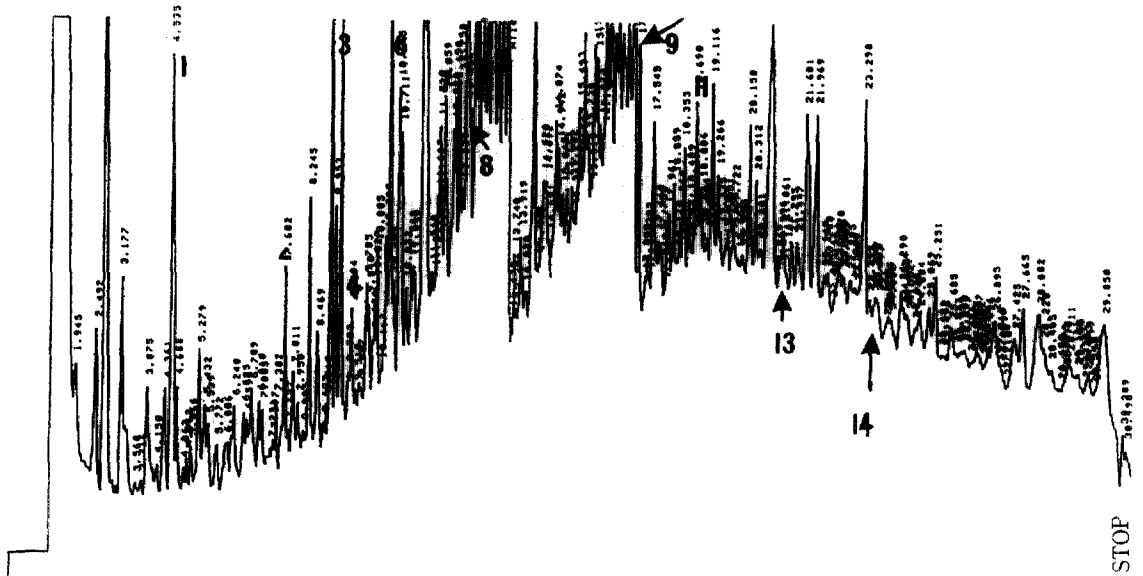


그림 7. Gas Chromatogram of Benzene Extract of Stack Fly Ash generated from Waste Tire Gasification/Incineration. Peak Identification: Identified numbers are the same as in 그림 6. Unidentified peaks are not included.

의하여 충분한 분리 상태를 가스크로마토그램상(그림 6)에서 얻을 수 있었지만 굴뚝잔재 추출물질의 경우에는(그림 7) 같은 전처리를 거처도 미량으로 함유되어있는 수많은 성분을 충분히 분리를 시킬 수 없었다. 건류잔재와 굴뚝잔재에서 발견된 화합물의 양상은 두 가스크로마토그램을 비교하여 볼 때 서로 다른 화합물들이 많이 함유되어 있었지만 PAH 화합물이 공통적으로 다량 함유되어 있었다. 규명된 화합물은 표준물질과 비교 분석한 화합물에만 국한하였고, 염소기가 치환된 유기화합물의 규명은 시도하지 못하였다. PAH 화합물의 정량은 잔재물 추출시에 일정량의 deuterated PAH 화합물을 spiking 하여 가스크로마토그래피에 의하여 분석하고 표준용액으로 검증한 후에 결정되었다. 질소성분이 함유된 물질은 타이어 제조시 투입하는 nitrosoamine과 같은 첨가물질이 건류 공정에서 완전 분해되지 못한채 금속성 물질과 같이 재로 배출된다고 예상되며, 유황성분이 함유된 물질은 건류에서 생성되는 불완전 유기성 물질과 유황 성분이 반응하여 배출된 것이라고 추측된다. 최근에 소각로 배기가스중의 다이옥신 화합물 구조에서 산소 성분이 황으로 치환된 성분이 발견 규명되어 새로운 독성 유기 물질에의 경각심을 갖게 되었다.⁽¹⁹⁾ 그러나 아직 순수하게 황이 함유된 다이옥신 화합물의 표준 물질 부재로 정확한 물질 규명은 실시하지 못하였다.

PAH 화합물중 benzo[a]pyrene은 발암성 독성 물질로 잘 알려져 있는 화합물로서 gram당 건류잔재에서 650 µg이 발견되었고, 총 PAH 양은 2300 µg이 발견되어 건류잔재의 유해성도 유기 독성 화합물에 의하여 심각함을 볼 수가 있다. PAH 화합물은 공기중에서 광화학적 분해가 잘 일어나지만, 토양에서나 매립의 환경에서는 그 분해도가 낮음으로 토양에 매립하기 전에 자연적인 광분해를 일으킨 후 매립한다면 토양의 PAH 화합물의 오염도가 적어져 바람직한 최종 처리 방법으로 기대되기도 한다. 굴뚝잔재의 경우에는 미량의 유기성 PAH 화합물이 발견된 반면에 고농도의 중금속 이온이 함유되어 있어서 안전 매립을 위하여 중금속의 전처리 과정을 고려하여야 할 것이다.

4. 결 론

화학 평형 계산에 의하여 페타이어 건류시 생성 가능한 가스 조성을 예측했을때 가연성 성분으로는 CO, C₁-C₂ 탄화수소, 알데하이드, 수소등과 불연성 성분으로 이산화탄소, 수증기등이 발생하였다. 발생 가능한 대기오염 성분으로는 NO, NO₂, SO₂, SO₃, NH₃, H₂S 등이 예측되었다.

페타이어의 건류 소각에서 발생하는 잔재는 중금속 함유량과 독성 유기화합물 함유량이 서로 상반되게 나타났는데, 건류잔재는 독성 유기화합물이 다량 함유되고 중금속은 매립기준치 미만을 나타낸 반면에, 굴뚝잔재의 경우에는 독성 유기화합물은 극미량으로 발견되고, 중금속은 매립 기준치를 상당히 초과하고 있어서 페타이어의 건류 소각으로부터 발생하는 잔재의 최종 처리시에는 중금속에 의한 유해성 평가 뿐 만 아니라 독성 유기화합물에 의한 유해성도 평가되어야 하며, 안전한 최종 처리를 위하여 전처리를 거치거나 안전 매립방법을 강구하여야 할 것이라고 본다.

참 고 문 헌

1. U.S. Congress, Office of Technology Assessment, : *Facing America's Trash: What next for Municipal Solid Waste*, OTA-0424, Washington, DC: U.S. Government Printing Office, October, (1989).
2. 김진오, 김경술, 김종, : *폐기물의 에너지이용 잠재력 평가 및 보급확산 대책*, 에너지 R & D, 11,(1) 89-103, 1989.
3. J. A. Beckman and J. R. Laman : *Destructive Distillation Method of Used Tires*, Paper presented at National Industrial Solid Waste Management Conference, University of Huston, Huston, Texas, March (1970).
4. S. Camfield : Now to destroy the evidence, *European Rubber Journal*, 1990, April, 24-29.
5. I. Saito, K. Sakae, T. Ogiri and Y. Ueda : Effective use of Waste Tires by Gasification in Cement Plant, *World Cement*, 1987, September, 264-266.
6. H. Pakdel, C. Roy, H. Aubin, G. Jean and S. Coulombe : Formation of dl-Limonene in Used Tire Vacuum Pyrolysis Oils, *Environ. Sci. & Technol.*, 25, 1635-1649, 1991.
7. F. W. Karasek and O. Hutzinger : *Dioxin Danger from Garbage Incineration*, Anal. Chem., 58, 633A, 1986.

8. Eltzer, B. D. and Hites, R. A.: Airborne Dioxins and Dibenzofurans: Sources and Fates, *Environ. Sci. & Technol.*, 20, 195-200, 1986.
9. H. Hagenmaier, H. Brunner, R. Hagg, and R. Berchtold : PCDD and PCDF in sewage sludge, river, and lake sediments from southwest Germany, *Chemosphere*, 15, 1421, 1986.
10. L. Morselli, S. Zappoli, A. Liberti, M. Rotatori and E. Branncaleoni : Evaluation and comparison of Organic and Inorganic compounds between Emission and Imission Samples from Municipal Solid Waste Incinerator, *Chemosphere*, 18, 2263-2273, 1989.
11. U.S. Environmental Protection Agency : *Test Methods for Evaluation Solid Waste*, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC., SW-846, pp.8010/1-12 (1982).
12. 환경오염공정시험법, 폐기물편의 용출 시험법 (1987).
13. G. A. Eiceman, R. E. Clement, and F. W. Karasek : *Analysis of Fly Ash from Municipal Incinerators for Trace Organic Compounds*, Anal. Chem., 51, 2343-2350, 1979.
14. G. Sanford and J. M. Bonnie : *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Composition, Rocket Performance Incident & Reflect Shocks and Champman-Jouyent Detonation*, NASA, U.S.A. (1971).
15. D. R. Stull and H. Prophet : *JANAF Thermodynamic Table*, 2nd Ed., NSRDS-NBS37, (1971).
16. V. N. Smith : *Intoduction to Chemical Engineering Thermodynamics*, McGraw-Hill Co. Inc., 632p.(1975).
17. 허병기, 서형준, 김낙주 : Bunker-C 연료의 연소 조성 및 단열불꽃온도에 관한 열역학적 해석, *대한환경공학회*, 8, 1-14, 1986.
18. P. H. Brunner and H. Monch : The flux of metals through municipal solid waste incinerators", Specialized Seminars on Incinerator Emissions of Heavy metals and Particulates, Copenhagen, 18-19, September, 1985. (*Waste & Management Research*, 4, pp. 1105-1190 (1986)).
19. Hans-Rudolf Buser, I. S. Dolezal, M. Wolfensberger and C. Rappe : Polychlorodibenzothiophens, the sulfur analogues of the polychlorodibenzofurans identified in incineration samples, *Environ. Sci. & Technol.*, 25, 1637-1643, 1991.

(接受 : 1991. 11. 20)