

# 단일연소실 공기제어 소각로의 특성연구

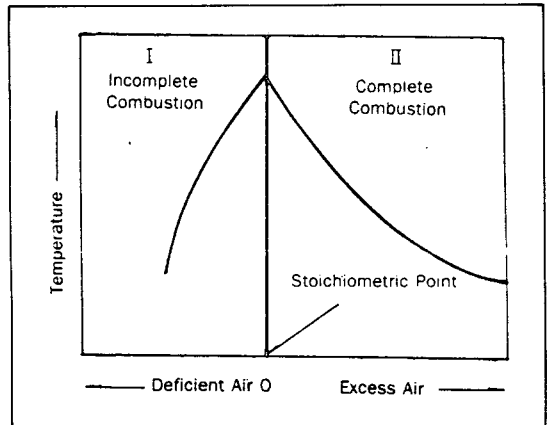
편집부

## 1. 서론

국내에서 발생하는 산업폐기물중 다량이 가연성 고체폐기물로서 소각기술을 이용한 안정화 및 부피의 감소로 처분을 용이하게 하는 것이 절대적으로 필요한 시기이다. 상기와 같은 이유로 국내 산업폐기물의 소각에 대한 전망을 보면 1986년에 유기물의 28%가 소각되었으나 2000년에 이르러서는 약 63%가 소각될 것으로 알려져있다. 종합적으로 수거하여 처리하는 산업폐기물 처리업소를 통해 처리할 수도 있겠지만 소형 산업폐기물 소각장치를 이용하여 발생자에 의한 자가 소각처리가 폐기물자체의 발생원을 이해하고 있고 또한 간단히 처리할수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 관점에서 소형이고 운전이 용이하며 효율적인 연소특성을 보이는 소각로가 필요하다. 대부분의 소각로는 폐기물을 직접 충분한 공기를 주입하여 소각하는 과잉공기형을 이용하고 있지만 공기의 주입을 전혀 주지않아 열분해(pyrolysis)를 시키거나 당량 이하의 충분치 못한 공기(deficient air)를 주입함으로써 휘발성 탄소성분을 가스화하거나 부분적으로 탄화수소를 먼저 분해한 후에 후연소장치에서 당량공기 이상으로 주입하여 완전연소하는 장치가 많이 이용되고 있다.

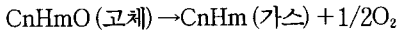
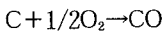
특히 열분해의 경우는 자원 회수라는 측면의 연구가 국내에서도 실시되고 있는 실정이다. 당량 이하공기 및 과잉공기 소각의 경우 공기 주입량에 따른 온도의 변화 및 반응과정을 <그림1>과 같이 설명할 수 있다. 공기가 조절되어 당량 이하의 공기가 들어가는 I 부분에서는 탄소가 불완전연소를 일으키게 되고 적당한 열에 의해 탄화수소의 분해가 부분적으로 일어나게 되며 이때 온도는 당량비의 공기가 주입되는 곳으로 가까이 갈 때 급격히 높아지게 된다.

<그림 1> Temperature profile under deficient and excess air

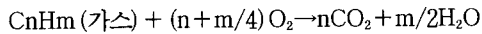
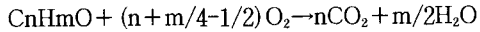
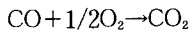
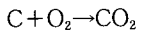


또한 과잉공기의 주입시에는 공기 주입량이 증가할 때에 찬 공기의 주입에 의한 온도가 서서히 떨어지게 되지만 탄소 및 불완전연소된 일산화탄소와 부분 분해되었거나 그대로 있던 탄화수소 물질은 완전연소를 일으켜 이산화탄소와 물로 변하게 된다. 일련의 공기조절 소각장치는 부분 I 과 II 의 반응을 분리된 공정 즉 다실 소각로(multichamber incinerator)로 되어 있으나 이 연구에서의 소각로 형태는 두 부분의 현상이 단일 연소실(singlechamber)에서 이루어지도록 된 제어공기 소각로(controlled air incinerator)이다. 즉 연소실의 벽으로 주입되는 공기를 상. 하단부에서 조절 공급함으로써 하단부에서는 공기부족으로 인한 가스화현상이 일어나며, 상단부에서는 과잉공기가 심한 와류를 일으키며 소각로 벽과 내부의 관을 통해 주입되므로 완전연소가 이루어진다. 이것을 반응식으로 나타내면 다음과 같은 주반응이 일어난다.

• **당량이하 공기주입부분 (Section I: 로의 하단부)**



• **과잉공기 주입부분 (Section II : 로의 상단부)**



공기 주입량에 따라 연소 온도의 차이가 나게 되므로 상. 하단부의 온도를 동시에 측정하면 I 회분을 연소하는 경우 두 온도의 온도교차점(temperature

crossover point)이 생기게 된다. 이로부터 일정량의 폐기물(투입폐기물 중 공기제어 연소가 일어나는 부분의 폐기물)에 대한 연소시간을 연소시점으로부터 온도교차시점의 사이로 정의하여 측정할 수 있다. 여기서의 연소시간(tb)은 가스화 및 완전연소가 동일연소로에서 일어나는 즉, 공기제어 연소가 지배하는 시간을 말한다. 좀 더 세밀한 관찰을 위해 온도계를 소각로의 상하로 여러개 설치하여 이 교차점의 변화를 다른 두지점에서 찾아 폐기물의 연소속도를 찾을 수도 있겠다. 이로부터 각 폐기물의 연소량과 열량을 고려하여 소각로가 갖는 열적 소각용량을 결정할 수 있게 된다.

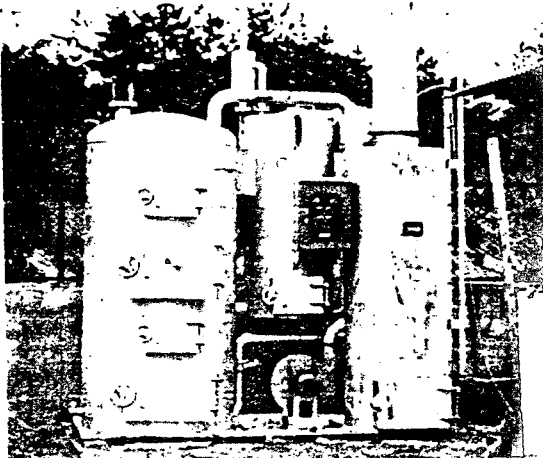
이 연구에서는 상기에서 기술한 바와 같은 단일 연소에로서 공기조절을 통해 가스화 및 완전연소를 유도하는 소각장치에서 연소현상을 관찰하고 연소시간의 결정으로 소각용량을 산출하여 소각 특성을 나타내 보았으며 방출기체 및 분진, 감량상태 등을 측정, 계산함으로써 각폐기물에 대한 소각장치의성능을 조사하였다.

## 2. 실험

### 가. 단일 원통형 공기제어 소각로

이 소각로는 실용신안 특허 제31479호에 의거 국내에 보급된 소각장치로서 공정의 구성은〈그림2〉와 같다. 소각 대상폐기물이 상단에서 과잉공기의 공급에 의해 연소가 이루어지는데 이 때 상부의 화염을 동반하는 높은 온도에 의해 하부의 충전된 폐기물이 당량공기이하의 조건에서 휘발 또는 분해가 일어나 가스화되어 상부로 올라와 연소된다. 이와 같은 조건의 연소가 효과적으로 일어나도록 blower에서 공급되는 공기는 damper를 이용하여 상하단부로의 공기량을 조절하게 된다. 즉 초기에는 연소영역이 상부쪽에 치우치므로 상부에 많은 공기를 공급하고 연소 표면이 서서히 하부로 이동하면서 하단부의 공기를 서서히 증가시켜 최종에 하단부에도 과잉공기의 조건으로 만들게 된다.

그러나 연속적으로 폐기물을 투입할 경우에는 연소 표면의 중간에 이른 시점에서(즉 온도교차점 이전에서) 추가로 폐기물을 투입하여 상단부의 과잉공기하의 완전연소와 하단부의 공기제어 상태로 가스화를 유도하여 연소하게 된다. 또한 연소 촉진을 위하여 소각로 중



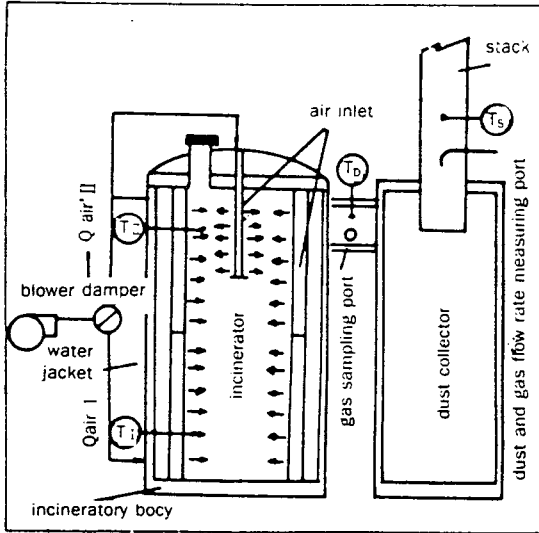
양과 내벽에 설치된 파이프 노즐을 접선방향으로 설치하여 공기 흐름이 와류가 되게 하였고 연소실 내에 dead zone이 없고 소각 효율을 높일 수 있는 구조로 되어있다.

연소 배출가스는 duct를 통하여 오른쪽의 제진장치(원통형 cyclone구조)로 유입된 후 stack을 통하여 대기로 방출된다. 또한 소각로 duct 및 제진장치 외벽은 물 jacket을 설치하여 발생하는 폐열을 회수하여 온수로 사용하도록 되어 있다.

## 나. 실험방법

실험은 5종류의 폐기물을 대상으로 회분식으로 실시하였으며 대상 폐기물의 공업분석(proximate analysis)

(그림 2) A Sketch of the single chamber controlled air incinerator



s) 과 원소분석(ultimate analysis)의 결과가 <표1>에 나타나있다. 폐기물을 중량하고 부피를 측정후 투입구에 주입하면서 점화시킨다. 점화가 되면 일시 폐기물층의 표면에서 심한 와류의 공기에 의해 불꽃을 일으키면서 연소가 시작되어 하단부에서는 상단부의 열에 의한 가스화가 일어나 가스는 상단부로 상승하여 함께 연소된다. 연소가 일어나 폐기물층의 표면이 서서히 아래로 내려오에 따라 공기 주입량을 damper에 의해 상단부는 줄이고 하단부를 증가시키면서 연소한다. 연소중 온도측정을 위해 열전대를 이용하여 로내상, 하단부의 2지점과 duct 및 stack에서 온도를 측정한다. Duct에서 각종 배기가스의 농도를 연속적으로 측정하였고 Stack에서 배출가스 유량과 분진농도를 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 가. 로내 온도변화 및 연소시간

타이어 소각시의 로내 상, 하단부 및 stack에서의 온도변화를 <그림3>에 도시하였다. 초기에 폐기물 1회분을 투입한 후 폐기물 상층부를 점화시키면 상부에서는 급격한 연소가, 하부에서는 상부에서 전달된 열에 의해 가스화 반응이 진행된다. 폐기물의 연소가 진행됨에 따라 로 상부의 온도는 감소하고 하부의 온도는 계속적인 증가로 인해 두 온도의 교차점이 발생되는데 (<그림3>의 tb점) 이 연구의 경우 폐기물 초기 점화부터 온도 교차점까지의 시간을 해당폐기물에 대한 연소시간(tb)이라 두었다. 각 폐기물의 연소속도 및 이에 따른 소각로의 소각열용량(열부하량 : 단위시간당 소

(표 1) Analysis of compositions for incinerated wastes

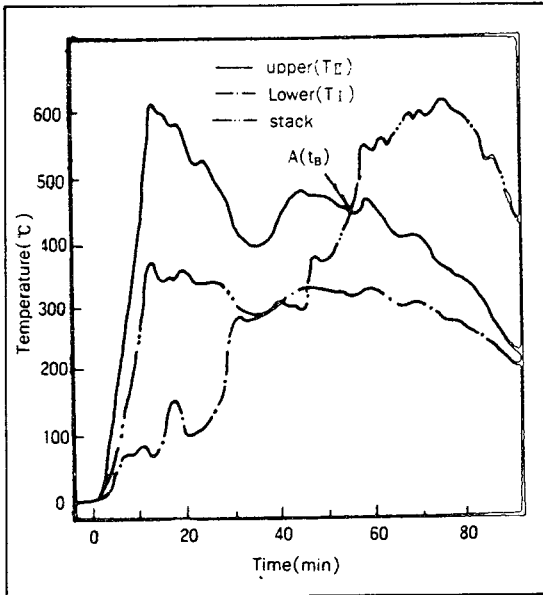
Waste	Moisture	Proximate analysis, wt %		Ultimate analysis, wt %							Caloric value Kcal / kg
		Volar, matter	Fixed carbon	Ash	C	H	O	N	S	Cl	
Tire	13.65	53.17	26.16	7.02	76.87	4.18	10.35	-	1.58	-	8184.3
Shoes scrap	0.84	76.40	20.16	2.60	61.92	8.08	24.90	-	1.29	1.21	7074.9
Thermoset, plastics	0.42	61.09	23.68	14.81	61.47	6.28	14.30	3.10	-	0.04	5882.4
Nonwoven fabric	0.80	95.79	1.05	2.36	57.66	7.36	29.54	0.98	0.05	2.05	5702.9
Poly-ethylene	30.70	54.85	0.62	13.83	75.34	10.76	-	-	0.01	0.06	7918.8

각 가능한 폐기물의 총 열량을 식(1) 및 (2)와 같이 정의하여 실험대상 폐기물별로 분석을 시도하였다.

$$\frac{\text{연소속도}(R, \text{kg/h}) \times \text{폐기물 1회투입량}(W, \text{kg})}{\text{연소시간}(t_b, \text{h})} \times f_c \dots\dots (1)$$

$$\text{소각로 소각 열용량} = \text{연소열}(H_c, \text{Kcal/kg}) \times \text{연소속도}(R, \text{kg/h}) \dots\dots (2)$$

여기서  $f_c$ 는 반연속식(semi-continuous)으로 폐기



물을 계속 투입하는 경우 제어공기에 의해 가스화 및 연소가 동시에 진행될 때 초기 폐기물층에 대한 공기 제어연소가 진행되는 폐기물층의 높이 분율을 말하는데 이값은 각 폐기물에 대해 거의 동일한 수치를 보일 것이라 가정하고, 타이어의 경우에 대해 1회분 및 반연속식투입시의 결과를 이용하여 이소각공정에 대한  $f_c$ 값을 산출하였는데 그 과정은 다음과 같다. 반연속식으로 총 235kg의 타이어를 연소시켰을 때 점화 초기부터 로 하단부 온도가 감소하는 시점까지를 총 연소시간으로 두고 측정한 연소시간은 4.713시간이었다. 이로부터 타이어의 평균 연소속도는  $235/4.713=49.86$  (kg/h) 이었다. 또한 1회 연소시(타이어 65.1kg) 온도 교차점을 이용한 연소시간은 0.88시간으로 이 때의 연소속도는  $65.1/0.88=73.98$  (kg/h) 였다. 이로부터  $f_c$ 를 구한 결과 약 2/3의 값이 나왔다.

$$f_c = 49.86/73.98 = 0.67 = 2/3$$

<표1> 및 식(1), (2)와 상기의  $f_c$ 값을 이용하여 산출한 각 폐기물별 연소속도 및 소각로의 소각 열용량은 <표2>와 같은데 이로부터 이 실험대상 소각로는 녹지않는 폐기물에 대해 시간당 평균 400~500Mcal/h의 소각 열용량을 가짐을 알 수 있었다.

이상과 같은 실험상의  $t_b$ 와  $f_c$ 의 관계를 입증하면서 더 정확한 연소속도를 구하기 위해서는 다 점(multipo

< 표 2 > Experiment results of Incinerating wastes

Waste	Initial weight (kg)	Burning time (hr)	Burning rate (kg/h)	Thermal capacity (Mcal/h)	Remarks
Tire	65.1	0.8800	49.3	403.6	
Shoes scrap	52.3	0.6215	56.1	396.9	
Thermoset, plastics	101.9	0.7865	86.4	508.1	
Nonwoven fabric	49.2	0.2980	165.1	941.6	Melting
Polyethylene	37.6	0.2120	177.4	1404.5	Melting

< 표 3 > Concentrations of off-gases and dust

Waste	O <sub>2</sub> %	CO, ppm	H <sub>2</sub> O, mg/l	NO <sub>x</sub> , ppm	SO <sub>2</sub> , ppm	Cl <sub>2</sub> , ppm	Dust, mg/Nm <sup>3</sup>
Tire	11.2	80	3	237	139	0	10
Shoes scrap	18.5	320	3	56	23.3	0.5	1930
Nonwoven fabric	10.1	32	4.5	108	18	1	1421
Polyethylene	12.7	170	7	247	15	0	4095
Thermosetting Plastics	7.6	80	8	320	0	0	77

int) 온도 측정방법을 이용할 수도 있다. 즉 로내에 세로 방향으로 여러 위치에 설치한 온도계로 측정된 두 지점 (i, j)에서의 온도 교차점을  $t_{bi}$ ,  $t_{bj}$ 라고 하면 연소속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R = \frac{(H_i - H_j) A_i \rho_w}{t_{bi} - t_{bj}} \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $(H_i - H_j) A_i$ 는 두 지점 내의 폐기물 부피이고,  $\rho_w$ 는 쌓여진 폐기물의 겉보기 밀도이다.

즉 두 교차점의 시간차이는 두 지점 내에 있는 폐기물이 공기제어 연소에 의해 소각되었을 것이므로 그 경계면이 이동 속도로부터 연소속도를 구한다. 이 실험에서는 이를 실시하지 못하였으나 연소속도에 관한 차후의 연구로 제시한다. 타이어 신발, 스크랩 및 열경화성 플라스틱 등은 초기 점화 또는 연소시에 녹지않기 때문에 소각로 상단부는 연소, 하단부는 가스화가 진행되어 연소영역이 서서히 하단부로 이동한다. 그러나 부직포나 폴리에틸렌처럼 열 또는 불에 의해 녹는 현상이 발생하는 물질은 연소영역이 비교적 빨리 하단부로 이동하며, 가스화보다는 연소반응이 주를 이루게 되어서 투입 폐기물의 대부분은 로 하단부에서 장시간 연소된다.

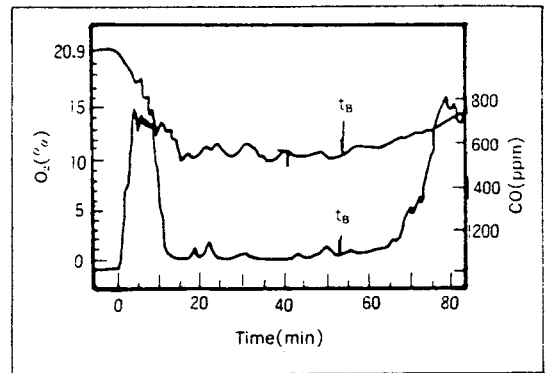
따라서 폐기물의 연소시간을 이 경우처럼 로 상단부와 하단부의 온도 교차점까지의 시간으로 정의한 경우에는 상기와 같은 이유로 인해 녹는 물질의 경우에는 연소속도나 소각 열용량이 실제보다 크게 되며  $fc$ 값의 도입이 의미를 갖지 못하므로 <표2>에서 부직포 및 폴리에틸렌의 경우에는  $fc$ 값을 1로 두고 산출한 결과로서 녹아서 공기조절 소각의 경우 마지막 직연소 과정에서 녹았던 폐기물이 소각되므로 구해진  $t_b$ 와 총 투입량과 연관 계산결과가 맞지 않게 된다.

또한 이들 녹는 물질은 실험대상 소각로의 제작 목적인 하부 가스화 및 상부 연소라는 개념에 위배되고, 와류를 형성하는 과잉공기 조건하에서의 연소가 주를 이루므로 상당량의 재가 비산되어서 <표3>에서 알 수 있듯이 분진 발생량이 다른 물질에 비해 높다. 즉 부직포와 PE(열가소성 수지)의 경우는 공기조절을 통한 가스화 소각이 적당치 않음을 알 수 있다.

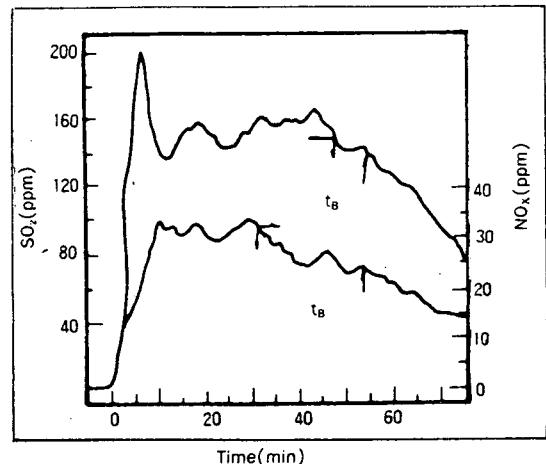
### 나. 배출가스 및 분진농도

연소시간에 따른 배출가스들의 농도변화를 알아보았다. 일반적인 경우로 타이어 소각실험시 발생하는 배출가스중 산소와 일산화탄소의 농도변화를 <그림4>에 나타내었다. 이 그림을 보면 연소 초기에는 소각로 내의 불안정으로 인하여 일산화탄소의 농도가 급격히 증가하였으나 곧 안정해져 하단부에서는 가스화가 일어나고 상단부에서는 완전연소가 일어나 일반 과잉공기하의 직연소 소각보다는 훨씬 낮은 CO가 발생됨을 볼 수 있다. 즉, 공기조절에 의한 소각이 끝나는  $t_b$ 점 이후에서 직연소가 하단부에서 일어나므로 CO가 증가된다. 그리고 산소 농도변화를 보면 20분후부터 11%의 농도

<그림 4> Concentrations of Co and O<sub>2</sub> according to incineration time(waste ; tire)



<그림 5> Concentrations of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> according to incineration time(waste ; tire)



(표 4) Calculated volume and weight reduction ratios from waste feeding amount and generated ashes

Waste	Total Feeding		Ash, kg or m <sup>3</sup>			WR	VR
	Weight, kg	Volume, m <sup>3</sup>	Incinerator		Cyclone		
			Weight	Volume	Weight		
Tire	65.1	0.384	16.9	0.048	0.11	3.8	8.0
Shoes scrap	52.3	0.579	11.5	0.078	0.54	1.3	7.4
Thermosetting plastics	101.9	0.507	19.8	0.026	2.88	4.5	19.5
Nonwoven fabric	49.2	0.942	1.2	0.026	0.26	3.7	36.2
Polyethylene	37.6	0.709	22.4	0.021	5.64	1.3	33.8

가 유지되다가 온도 교차점을 기점으로 서서히 증가됨을 알 수 있다.

동일실험에 대하여 이산화황과 질소산화물의 농도변화를 <그림5>에 나타내었다. 이 그림에서 이산화황의 농도변화는 연소시작 후 역시 불안정한 연소로 급격히 증가하며 그 이후는 약140ppm의 농도가 유지되었다. 그리고 온도 교차점을 기점으로 감소함을 볼 수 있다. 질소산화물의 경우도 거의 유사한 유형을 나타내며 평균 농도는 240ppm임을 알 수 있다. 이러한 실험결과를 전체 폐기물에 대하여 <표3>에 나타내었다. 이표에 나타낸 연소온도 및 배출가스 농도는 일정온도와 농도가 유지된시간이 긴 부분을 기준으로(평균값)하였다. Cl<sub>2</sub>는 Gastec의 sucking tube에 의하여 소각 중에 측정된 값으로 배출허용 농도보다 훨씬 작은 값을 나타내었고 연소가 일어나는 전 시간에 걸쳐 stack에서 포집된 분진의 양(농도)을 보면 타이어와 플라스틱 경우에 미량 발생하지만 신발 scrap과 부직포 및 농업용 PE의 경우 기준치 이상이 발생되었다. 당량보다 훨씬 높은 공기의 주입 또는 폐기물 자체의 특성 즉 많은 분진성 재료의 함유로 인한 것으로 보이며 원통형 단일 cyclon의 개조 및 추가의 제진장치가 필요함을 알 수 있다.

그러나 1차 가스화후 완전연소시키는 공기조절 소각로의 경우가 직연소의 경우보다는 훨씬 적은 분진이 발생하게 된다.

또한 PE의 경우에는 많은 흙이 묻어 있으므로 다량의 분진이 발생하게 된다. 이와같은 배출가스 및 분진의 농도결과로부터 공기조절에 의한 연소의 경우나 회분식 소각의 말기에 일어나는 로 하단부에서의 직화연

소에는 상당한 차이가 있음을 알 수 있으며 반 연속적으로 계속 투입하여 가스화 후 완전연소를 시키는 공기조절 소각을 시키게 되면 CO, SO<sub>2</sub>, NOx 및 분진의 발생량이 상당히 적으며 안정된 운전이 진행됨을 알 수 있었다.

#### 다. 감량 및 감중비

폐기물의 소각에 의한 효과를 나타내기 위하여 표현하는 방법으로 감량 및 감중비가 있으며 다음과 같다.

$$V_R = V_i / V_f \dots\dots\dots (4)$$

V<sub>R</sub> : Volume Reduction Ratio  
 V<sub>i</sub> : Initial Waste Volume  
 V<sub>f</sub> : Final Waste Volume(Ash)

$$W_R = W_i / W_f \dots\dots\dots (5)$$

W<sub>R</sub> : Weight Reduction Ratio  
 W<sub>i</sub> : Initial Waste Weight  
 W<sub>f</sub> : Final Waste Weight(Ash)

상기식을 이용하여 각각의 폐기물에 대한 감량, 감중비를 <표4>에 나타내었다. 이 표를 보면 감중비는 플라스틱이 4.5, 타이어와 신발 밀창이 약 4.0이며 나머지는 1.3임을 알 수 있다. 그리고 감량비는 부직포가 36.2로서 가장 크고 타이어는 8이었다.

#### 결론

단일 원통형 공기조절 소각로에 산업폐기물을 소각 실험한 결과의 결론은 다음과 같다.

1. 로의 상, 하단부의 온도변화 관찰로부터 온도 교차점이 존재함을 알았으며 이를 폐기물의 연소속도로 정의 할 수 있었고 대상 폐기물을 중심으로 소각로의

---

열적 소각용량을 산출한 결과 400~500Mcal/h였다.

2. 배출가스의 농도는 모든 폐기물에 대해 양호하였으며 공기조절 소각의 경우와 파이프공기의 직화와의 차이가 있음을 알 수 있었다. 몇 폐기물에 대하여 분진발생이 과다하였으며 제진장치와 보완이 필요하였다.

3. 감량 및 감중비를 계산한 결과 이 소각로는 각

폐기물에 대한 소각 성능이 우수하였다.

4. 소형이며 단일 연소실 내의 상하단부의 공기조절을 통한 이 소각로는 우수한 소각장치였으며 제진장치의 보완 및 적절한 운전을 실시할 경우 다종의 폐기물에 적당할 것이다.\*

(제공 : 열산업정보)

---

## 회 고

각 회원사에서 일어나고 있는 일들, 연구·개발현황, 공지사항, 제언 그리고 시·수필 등을 200자원 고지에 적어 보내주시면 본지에 선별·게재하고 게재된 원고는 소정의 고료를 드립니다. 단, 보내주신 원고는 일체 반환치 않습니다.

**보내실곳** : 서울시 중구 남대문로 4가 45 상공회의소 1221호  
(사) 환경보전협회 홍보부

**T E L** : 753-7640, 7669