

# 大氣汚染 防止技術

## 原理 및 機器

金 鍾 奭

〈環境廳 大氣管理課長·技術士〉

### 2.1 大氣汚染原으로서의 燒却爐

燒却爐는 燃燒施設中 중요한 大氣汚染原의 하나이다. 燒却爐는 燒却物質에 따라 都市用燒却爐(municipal incinerator) 自家燒却爐(on-site incinerator), 産業廢棄物燒却爐 등으로 分類될 수 있다. 여기서는 이중 自家燒却爐에 對하여 그 構造特性과 大氣汚染排出特性을 살펴보고 大氣汚染防止技術의 側面에서 이를 다루어보고자 한다.

#### (1) 自家燒却爐의 大氣汚染問題

보통 사무실이나 家庭에서 나오는 쓰레기를 自家用燒却爐로 燒却處理할 때 排出되는 大氣汚染物質은 재(flyash), 매연(smoke) 가스 및 惡臭가 發生된다. 이중 재와 매연은 주변가옥과 사무실등에 심한 公害현상을 유발시키게 되며, 또 매연과 가스는 재, 먼지에 비하여 확산이동(擴

散移動) 범위가 광대하여 地域全體에 심한 公害요인을 유발하여 視界減少(visiblity reduction) 연무형성 및 光化學現象의 主原을 增加시키기도 한다. 보통 自家用燒却爐는 기능적 구조에 따라 單室燒却爐(single chamber incinerator)와 多室燒却爐로 區分하며 이 單室燒却爐는 쓰레기를 燒却하는 燃燒室이 하나로 되어 있으며, 多室燒却爐는 燒却機轉에 따라 분류되는 固相燃燒室, 氣相燃燒室과 같은 몇개의 燃燒室을 가지게 된다. 따라서 大氣汚染物質 排出面에서 보면 單室燒却爐는 多室燒却爐보다 排出量이 많아지고 있다.

外國에서 發表된 單室燒却爐와 多室燒却爐의 쓰레기 1 ton 燒却時 發生하는 粉塵量을 보면 單室燒却爐에선 7~17kg 多室燒却爐에선 2.5kg 정도라 한다. 아래 표는 單室燒却爐와 多室燒却爐의 大氣汚染物 排出量을 比較한 것이다.

〈표 - 1〉 汚染物質 排出量 比較〈쓰레기 1톤소각〉

汚 染 物 質	多室 燒却爐	單室 燒却爐	備 考
粉 塵 ( $g/m^3$ )	0.25	2.05	배가스중 CO <sub>2</sub> 12%
휘 발 분 ( $g/m^3$ )	0.16	1.14	"
CO $kgm/톤$	1.35	88.6~445.9	쓰레기 1톤 당 배출 가스
NH <sub>3</sub> $kg/톤$	0	0.5~2	"
유 기 산 "	0.8	<1.5	"
알데히드 "	0.8	1.5~30	"
NOx "	12	<0.05	
탄화수소 "	<0.5		

(2) 燒却爐燃燒機作

燒却爐는 燃燒를 利用한 것으로 燒却爐 大氣汚染을 이해하기 爲해선 燃燒에 關하여 살펴 보지 않으면 안된다. 燃燒施設에서 大氣汚染物의 發生은 앞 <표-1>에서 본 바와 같이 大部分 不完全燃燒에 起因한다고 판단되므로 燃燒施設의 燃燒效率改善이 汚染物質排出減少에 직결된다. 燃燒는 燃料를 산소와 反應시키는 것이며, 어떤 연료든 우리가 使用하는 것은 그 組成의 大部分이 炭素와 水素로 구성되며, 소량의 불순물을 함유하게 된다. 보통 연료는 炭素와 水素比 即 C/H 比에 따라 가스, 액체, 고체중 하나의 相을 나타내게 된다. 따라서 연료의 相에 따라 燃燒에 必要한 조건(보통, 3T, Temperature Time, Turbulent)이 변하며, 이들을 要約하면 아래 <표-2>와 같다.

<표-2>에서 보듯이 燃燒에는 반드시 타는 物質(燃料)이 必要하며, 이 物質의 化學的 組成에 따라 燃燒産物인 排氣가스의 量과 組成이 달라진

다. 大氣汚染防止技術에서 排氣가스의 效果的인 管理를 爲해선 發生하는 排氣가스量과 組成을 정확히 이해하고 이에 따라 적절한 방법을 선택 조합하여 大氣汚染防止技術로 응용하여야 한다. 燒却爐에서 排氣가스 發生量과 組成을 정확히 파악하기 爲해선 燒却物質과 이 物質燃燒에 必要한 過剩空氣比를 정확히 파악하여야 한다. <표-2>에 는 정상연료 연소시 必要한 過剩空氣比를 提示하였다. 실제 燒却爐의 경우에는 燒却物質인 쓰레기가 정상적인 연료와는 수분함량, 가연성 물질비 등으로 크게 차이되므로 일반연소 보다는 過剩空氣比를 많이 使用하게 된다. 보통 일반 쓰레기 燒却爐의 過剩空氣比는 150% 정도를 過剩으로 使用하고 있었으나 이 경우 排出汚染物質의 稀釋度가 높아지며, 또 熱損失이 增大되고 汚染防止에 도 불리한 점이 많으므로 最近에는 가능하면 過剩空氣比를 줄여 使用할 수 있도록 燒却 쓰레기의 전처리등 必要한 과정을 병행하는 경우가 많이 개발되고 있다.

<표-2> 연료별 연소조건 변화

연료의 종류	가연성 조성	열분해 산물	최종 연소산물	전배기 가스내 CO <sub>2</sub> %	최대 연소 효율을 얻기 위한 과잉 공기 량	전배기 가스내 실제 CO <sub>2</sub> %
기체 연료 C/H = 3/1	CO 탄화수소가스 수소	CO C + H <sub>2</sub> O H <sub>2</sub>	CO → CO <sub>2</sub> C + H <sub>2</sub> O H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	11 ~ 13	5 ~ 10	10
액체 연료 C/H = 6 ~ 7:1	탄화수소	CO C + H <sub>2</sub> O H <sub>2</sub>	CO → CO <sub>2</sub> C + H <sub>2</sub> O H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	15 ~ 16	10 ~ 20	13.5
고체 연료 C/H = 10 ~ 30:1	타-르 휘발분 및 수소 코크	C + H <sub>2</sub> O H <sub>2</sub>	CO → CO <sub>2</sub> C + H <sub>2</sub> O H <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O	18 ~ 19	미분탄 15 ~ 25 스토크형 24 ~ 40 수동형 40 ~ 50	15 13.5 11.5

(3) 自家燒却爐 種類

원래 自家燒却爐는 쓰레기 發生量이 적은 관공서, 공장 및 사업장 등에서 發生하는 쓰레기의 自家燒却을 爲해서 開發 使用되고 있는 것으로 보통 시간당 25kg~1000kg 정도의 쓰레기를 燒却할 수 있는 소형 單室 또는 多室燒却爐가 主種을 이룬다.

최근에는 중소기업에서, 이상에서 언급한 일반 쓰레기 이외에도 전선등 합성수지가 함유된 各種 폐품, Brake shoe, 폐 drum 등의 再生과 實驗室 또는 병원에서 發生하는 병독성물질의 처리에도 이들 소규모 自家用燒却爐類型的 燒却爐가 실제 使用되어 가고 있다. 따라서 小型燒却爐中 自家燒却爐로 使用될 수 있는 것들을 類型別로 分類해 보면 아래와 같이 열거할 수 있겠다.

- ① 일반쓰레기 燒却爐  
(General Refuse Incinerator)
- ② 廢木燒却爐  
(Wood Waste Incinerator)
- ③ 아파트 연돌 燒却爐  
(Flue Fed Apt Incinerator)
- ④ 병독성 소각로  
(Pathologic Waste Incinerator)
- ⑤ Brake shoe 및 전선재생소각로
- ⑥ Drum 再生燒却爐  
(Drum Reclamation Incinerator)
- ⑦ 철선재생소각로  
(Wire Reclamation Incinerator)

이들을 汚染物質組成에 따라 分類해 본다면 이 중 일반쓰레기, 폐목, 아파트연돌 소각로에선 粉塵, 매연등이 主要汚染物質이며, 병독성 소각로에서 各種 生物學的 재재 및 병독성물질을 燒却하므로써 惡臭 및 병독성물질이 主要 汚染物質이며 Brake shoe, 전선등은 이에 포함되어 있는 석면 합성수지 등이 主要汚染物質일 것으로 판단되며, 이들로부터 發生되는 排氣가스량도 연소방식 即, 燒却爐 構造에 따라 상이하게 되므로 大氣汚染原으로서의 燒却爐는 그 構造나, 運轉 및 燒却쓰레기의 種類를 정확히 파악하고 관리하는 것이 첫째이며, 다음은 이들 特性 파악을 기초로

하여 필요한 防止施設을 선택 설치하는 것이 중요하다. 예컨대 Brake shoe 전선 재생 燒却爐에는 排가스중 惡臭등 有害가스를 afterburner 로 제거한 후 집진기등을 使用하여 排가스를 처리하여야 한다. 일반적으로 燒却爐 排가스는 惡臭가스 및 粉塵等 多數의 汚染物質을 포함하면서 그 溫度(約700℃以上)가 높아, 防止施設의 설계설치가 좀 어렵고 복잡하다고 알려져 있다. 따라서 燒却爐大氣汚染防止는 燒却物質別 적합한 構造·運轉을 통하여 汚染排出量(排가스 및 汚染物質)을 가능한 減少시킨후 이를 防止施設로 처리하는 것이 원칙이며, 다음 절에서 이에 대한 예를 검토하여 보기로 하자.

(4) Brake shoe 및 전선재생 燒却爐例

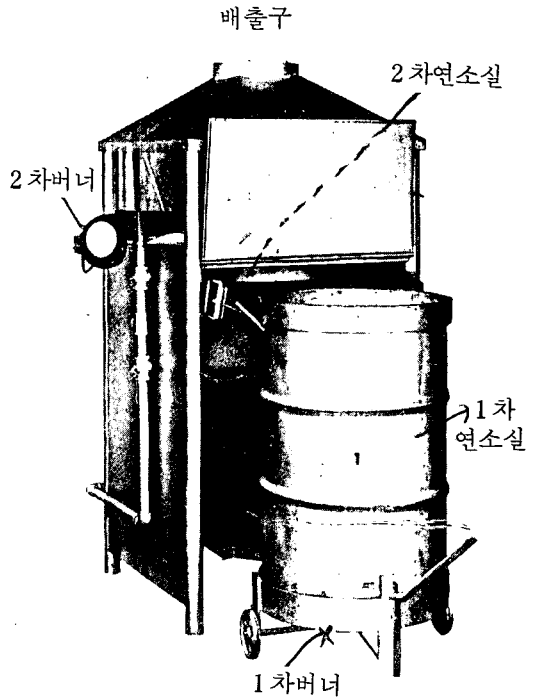
Brake shoe는 석면, 합성고무, 흑연, 검댕등을 접착기질인 페놀수지와 함께 혼합하여 만든 두께 0.3m 정도의 굵은 판으로 自動車制動器等に 使用하는 것이다. 使用후 버리는 Brake shoe는 약 400℃로 燒却하면 shoe내 접착제가 熱分解하여 카본브레이크 폐 Brake shoe 철판으로 재생되게 된다. 또 각종 합성수지 처리된 전선도 약 400℃로 가열하면 표면에 처리되어 있던 수지가 열분해하여 철사만 남게 되어 재사용이 가능해진다. 보통 Brake 및 전선 재생 소각로의 排出汚染物質은 아래 표와 같다.

<표 - 3> 단실소각 Brake shoe 재생로의 배출오염 물질

항 목	결 과	비 고
소 각 량	Brake shoe 175개 (132kg)	
가연성분량	5% (Wt%)	
배출가스유량	12m <sup>3</sup> /min	
평균 온도	120℃	
분 진	68m <sup>3</sup>	배가스내 CO <sub>2</sub> 는 12% 정도임
분 진	0.315 kg/hr	
SO <sub>2</sub>	0.15 kg/hr	
CO	0.27 kg/hr	
유 기 산	0.13 kg/hr	

〈표-3〉을 보면 Brake shoe 燒却爐 排出가스는 爐의 構造 自體가 燒却效率이 크게 될 수 있도록 하고 그래도 발생하는 오염물질에 對하여는 after-burner를 排出口에 설치하면 쉽게 제거할 수 있음을 알 수 있다. 보통 燒却室에는 固相燃燒室(primary ignition chamber)과 氣相燃燒室(Indry ignition chamber)로 나누어 진다. 固相燃燒施設은 Brake shoe 을 쌓아 燒却시키는 곳으로 燒却室 1㎡당 무작위 충전시는 300 개 정도를 한번에 소각재생 시키면 적합하다. 그러나 실제 작업시에는 작업의 편의를 위해서 약 10% 정도 적게 충전 시킴이 좋다. 固相燃燒室은 보통 가스버너를 사용하여 가열 燒却하며 燒却室 溫度는 보통 455℃ 정도가 유지되도록 하여야 한다. 氣相燃燒室에서는 固相燃燒室에서 발생한 可燃性 휘발분과 粉塵等을 가스상으로 燃燒시키는 곳으로 混合室(mixary chamber)이라고 하며, 固相燃燒室에서 발생한 가연성 기체 물질을 流入하여 氣相燃燒를 유발시켜 排가스內 가연성 汚染物質을 完全 연소시켜 제거시키는 곳으로 2차연소실(2ndary Combustion chamber)이라고도 하며, 2차연소실 크기는 1차연소실 용량에 따라 달라지며, 1차연소실의 최대 排가스량을 수용할 수 있는 크기로 설계되어야 최대 1차배가스의 침체없이 가연성 배가스를 完全 燃燒시킬 수 있게 된다. 2차연소실 溫度는 1차연소실에서 발생한 최대 排가스량의 溫度를 760℃까지 유지시킬 수 있어야 排가스內 가연성 가스가 完全 燃燒할 수 있기 때문에 2차연소실에도 가스버너를 부착하여 이 목적을 달하고 있다. 2차연소실에 버너를 부착할 때 이 버너화열이 2차연소실 단면을 完全히 커버할 수 있도록 하는 위치에 버너를 부착하여야 한다. 2차연소실은 氣相燃燒를 最大로 하여야 하기 때문에 1차연소실로 부터 온 排가스가 2차공기와 완전히 혼합하여 燃燒되어야 하므로 보통 2차연소실 단면적은 混合가스와 버너 불꽃이 最大亂流狀態가 될 수 있도록 하여야 하며 이는 보통 2차연소실 단면에서의 混合가스 流速이 6~10m/sec에 이르게 하면 가능하다. 2차연소실 亂流效果 增加

를 爲해서 2차연소실에 baffle 및 급격한 構造의 變化를 줄 필요가 있다. 2차연소실內에서 混合가스가 完全 燃燒하기 爲해선 적어도 0.15~0.2초 정도 체류(residue time)할 수 있는 길이를 구비하여야 한다. 이상의 조건에 맞도록 Brake shoe 을 소각하면 비가연성 粉塵을 제외한 모든 粉塵이 소각되므로 앞 〈표-3〉에 표시된 粉塵排出量의 90% 정도는 減少된다.〈그림-1〉은 Brake shoe 再生爐의 예이다.



〈그림-1〉 Brake shoe 재생로

이상 설명한 바와 같이 모든 自家用 燒却爐는 그 自體가 完全燃燒를 응용한 大氣汚染防止機械의 일종임을 이해하여야 그 運轉稼動의 정상화를 통한 大氣汚染防止效果를 最大로 할 수 있다. 自家用 燒却爐는 일반적으로 都市型 燒却爐보다 그 構造가 단순하여 그 運轉 및 유지관리를 잘못 한다면 散在하는 大氣汚染原으로서의 잠재성이 매우 커진다는 點을 명시하여야 한다. 自家燒却爐를 좀더 자세히 이해하기 위한 예의 하나로 Brake shoe 200개를 30분 동안 재생시킬 수 있

는 Brake shoe 재생로 설계를 실시하여 보기로 하자. 이 Brake shoe 燒却爐를 설계하기 위해 선 固相燃燒室, 가스버너, 연소공기 주입주 크기, 2차연소실 용량설계, 混合室 크기 배출구 (굴뚝) 및 높이의 설계가 차례로 이루어져야 한다. 이들을 순서대로 설계하면 다음과 같다.

① 1차연소실 설계

Brake shoe 200개의 중량은 160kg, 무작위 충전시 1㎡당 Brake shoe는 평균 970개씩 들어간다. 작업상 편의를 고려하여 1차연소실의 크기는 무작위 충전에 필요한 용적의 25% 정도를 크게 한다. 따라서 Brake shoe 200개를 재생할 수 있는 1차연소실의 크기는 아래와 같다.

$$(200 \text{ 개}) \left( \frac{1 \text{ m}^2}{970 \text{ 개}} \right) \left( \frac{1}{0.75} \right) = 0.27 \text{ m}^3$$

따라서 1차연소실의 치수는 밀변가로(0.6 m) × 밀변세로(0.9 m) × 높이(0.5 m)로 한다.

② 1차버너 설계

Brake shoe 중량의 3%가 가연성분이라 가정한다. 1차연소실에 필요한 열량은 충전된 Brake shoe 200개를 18℃에서 480℃까지 올리는데 필요한 열량, 이때 발생한 가스溫도를 동일溫도까지 올리는데 필요한 열량의 합이며, 이 총 열량중 Brake shoe 중량의 3%에 해당하는 가연성분이 燃燒할 때 發生한 열량을 제거한 열량이 1차버너가 공급할 열량이다. 따라서 1차버너 크기는 다음과 같이 구한다.

(a) 충전된 200개 Brake shoe을 18℃에서 480℃까지 올리는데 필요한 열량(단 Brake shoe의 평균 비열은  $0.21 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} \cdot \text{C}}$ 로 한다)

$$Q = W(C_p) \Delta T \text{이다.}$$

여기서

Q : 필요열량 Kcal/hr

W : 충전량 kg/hr

$C_p$  : 평균정압비열  $\frac{\text{Kcal}}{\text{kg} \cdot \text{C}}$

$\Delta T$ :  $T_2 - T_1$  ( $T_2$ : 최종온도,  $T_1$ : 최초온도) ℃

$$Q = (160 \text{ kg} / 1 \text{ 회 충전}) \left( \frac{2 \text{ 회 충전}}{1 \text{ 시간}} \right) (0.97)$$

$$\left( 0.21 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \right) (480 - 18)$$

$$= 30189 \text{ Kcal/hr}$$

(b) 燃燒 생성물을 18℃- 480℃까지 올리는데 필요한 열량

단 이때 가연성물질의 조성은 BC와 같다고 하고 200% 과잉공기로 燃燒한다. BC 1kg 燃燒時 發生하는 연소산물의 무게로 41.47kg의 연소산물이 發生하고, 이때 평균비열이  $0.26 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg} \cdot \text{C}}$ 으로 한다.

연소산물의 총중량은

$$W = (0.03) \left( \frac{160 \text{ kg}}{1 \text{ 회 충전}} \right) \left( \frac{2 \text{ 회 충전}}{1 \text{ 시간}} \right) \left( \frac{41.47 \text{ kg}}{1 \text{ kg}} \right)$$

$$= 398.1 \text{ kg/hr}$$

이때 요구되는 열량은  $Q = WC_p(T_2 - T_1)$ 에서 구하면

$$Q = (398.1 \text{ kg/hr}) \left( \frac{0.26 \text{ Kcal}}{\text{kg} \cdot \text{C}} \right) (480 - 18)$$

$$= 47819.7 \text{ Kcal/hr}$$

(c) 소각공정에 필요한 총열량

$$a + b = 30189 + 47819.7$$

$$= 78008.7 \text{ Kcal/hr}$$

이때 복사대류, 전도에 대한 熱損失을 가스로 공급하는 열량의 30%에 해당한다고 가정하면 필요총열량은

$$(d) \frac{78008.7 \text{ Kcal/hr}}{0.7} = 111441 \text{ Kcal/hr}$$

(e) Brake shoe에 붙은 가연분이 燃燒하여 공급할 수 있는 열량(단, 가연분 1kg당 발열량 10,000Kcal로 함)

$$(0.03) \left( \frac{160 \text{ kg}}{1 \text{ 회 충전}} \right) \left( \frac{2 \text{ 회 충전}}{1 \text{ 시간}} \right) (10,000 \text{ Kcal/kg})$$

$$= 96,000 \text{ Kcal/hr}$$

(f) 일차연소실에 공급하여야할 열총량

$$111441 - 96000 = 15441 \text{ Kcal/hr}$$

(g) 1차버너용량

천연가스를 使用한다면, 천연가스 1개당 발열량이 7000Kcal/㎡로 보면

$$\frac{15441 \text{ Kcal/hr}}{7000 \text{ Kcal/㎡}} = 2.2 \text{ m}^2/\text{hr} \text{가 된다.}$$

<다음 호에 계속>