



Organic Waste Treatment and Composting

Chapter 8. 폐기물의 연소 (3)

박 성 직



1. 연소계산

- 연소의 정의

- 연소는 빛과 열이 있는 급격한 산화 현상.
- 연소 과정에서는 열이 발생하게 되고 이 열은 물질의 가열용이나 동력으로 이용.
- 일단 연소가 시작되면 지속력이 강해짐.
- 일종의 화학반응이므로 일반 화학반응의 원리와 법칙을 적용하여 연소 반응계와 생성계 사이에 존재하는 양적관계를 계산 -> 연소에 필요한 공기량과 연소 가스량 등을 계산 가능.

- 고체 및 액체 연료의 연소

- 탄소: $C + O_2 = CO_2 + 8100$ [kcal/kg]
- 수소: $2H_2 + O_2 = 2H_2O(\text{기체}) + 34,000$ [kcal/kg]
- 황: $S + O_2 = SO_2 + 2,500$ [kcal/kg]



1. 연소계산

- 열량 (cal)

- 열은 에너지의 한 형태로 그 물리량을 열량이라 하며, 단위는 cal 또는 kcal로 표기
- kcal란 표준 대기압 (760 mmHg)에서 순수한 물 1kg을 1℃ 만큼 올리는데 필요한 열량
- BTU (British Thermal Unit): 60°F에서 1lb의 물을 1°F 상승시키는데 소요되는 열량

- 온도

- 섭씨 온도 Celsius scale °C: 760 mmHg의 압력하에 물의 빙점을 0℃, 비등점을 100℃로 하고 그 사이를 100 등분하는 것.
- 화씨 온도 Fahrenheit's scale °F: 760 mmHg의 압력하에 소금물의 빙점을 0°F, 인체의 체온을 100°F라 하고 그 사이를 100 등분한 것.
- $t^{\circ}\text{F} = 9/5 t^{\circ}\text{C} + 32$
- 절대 온도: 절대온도 눈금은 열역학 제2법칙에서 유도된 것으로 실용 눈금과의 관계를 표시
- $T^{\circ}\text{K}(\text{Kelvin's scale}) = t^{\circ}\text{C} + 273$, $T^{\circ}\text{R}(\text{Rankin's scale}) = t^{\circ}\text{F} + 460$



1. 연소계산

- 반응열

- 화학반응이 일어날 때에는 열의 발산이나 흡수가 일어나는 데 이 열을 반응열
- Hess 법칙: 반응열의 양은 반응이 일어나는 과정에는 무관하고, 반응 전후에 있어서의 물질 및 그 상태에 의하여 결정

- 열화학 반응식

- Ex) $C + O_2 = CO_2 + 94.4 \text{ kcal}$
- 발열 반응의 경우에는 (+), 흡열반응의 경우에는 (-)

- 착화온도

- 충분한 공기의 공급하에서 고체연료를 가열해 주면 어떤 온도에 달하여 더 가열하지 않아도 연료 자신의 연소열에 의하여 연소를 계속하게 되는 온도
- 착화온도=착화점=발화점=발화온도

- 인화점

- 액상연료를 일정조건 하에서 가열하면 액체에서 증기가 나오게 된다. 이때 그 액체의 표면에 불꽃에 대어 처음 소폭발을 일으킬 때의 온도



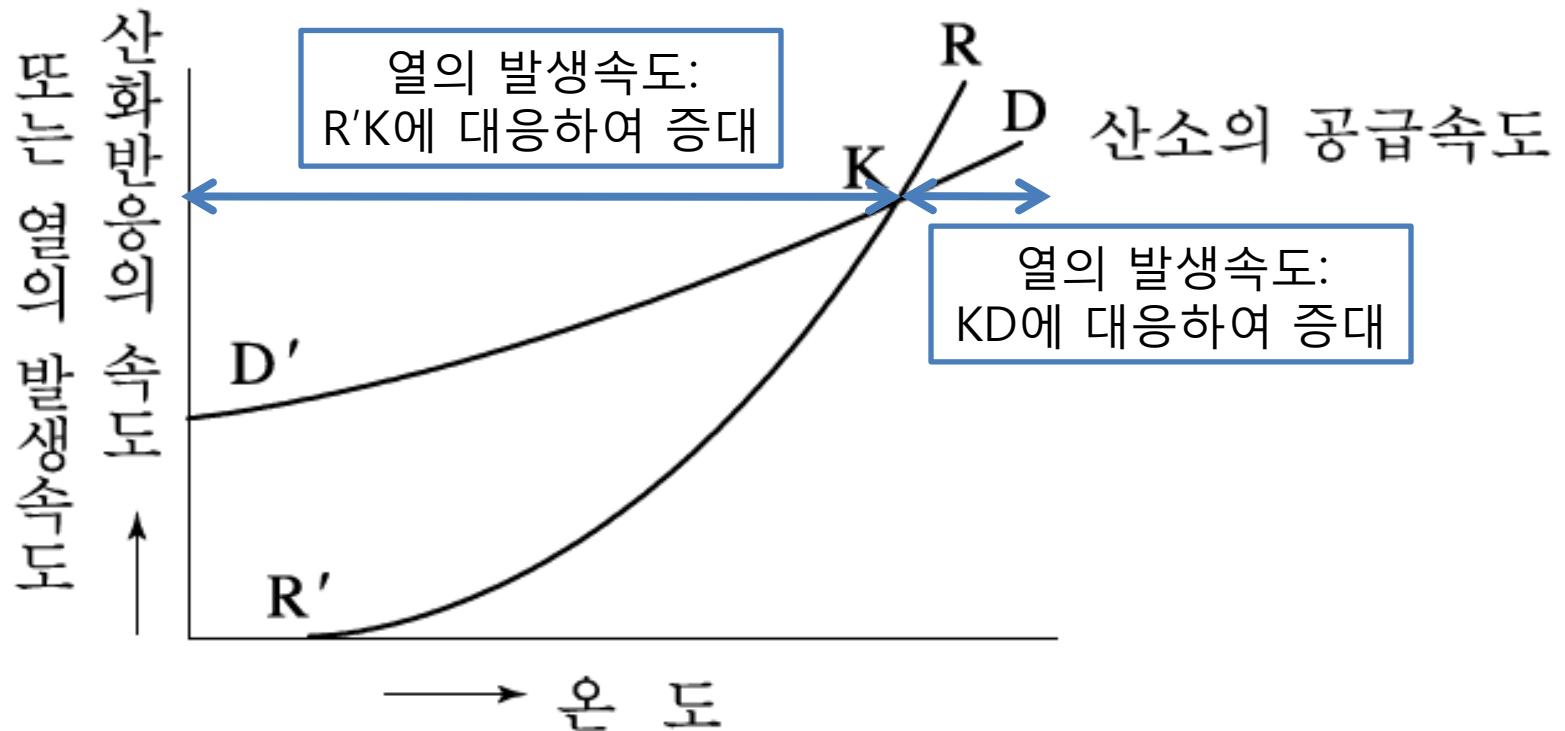
1. 연소계산

- 착화 시간을 단축시키기 위한 대책
 - 폐기물 표면의 온도를 짧은 시간 내에 고유 착화 온도 이상으로 올림
 - 폐기물의 입경을 미세하게 하여 비표면적을 최대화
 - 충분한 산소의 공급
 - 과잉공기의 유입에 따른 노내의 온도 저하를 방지
 - 충분한 공기를 균일한 난류로 하여 필요한 반응면에 공급



1. 연소계산

- 산화반응의 속도와 온도의 관계

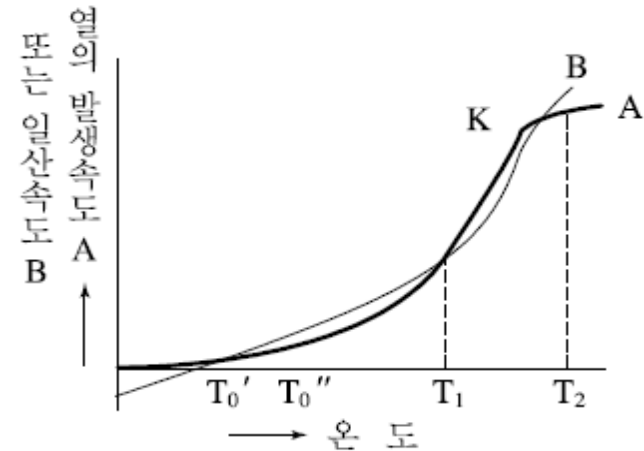
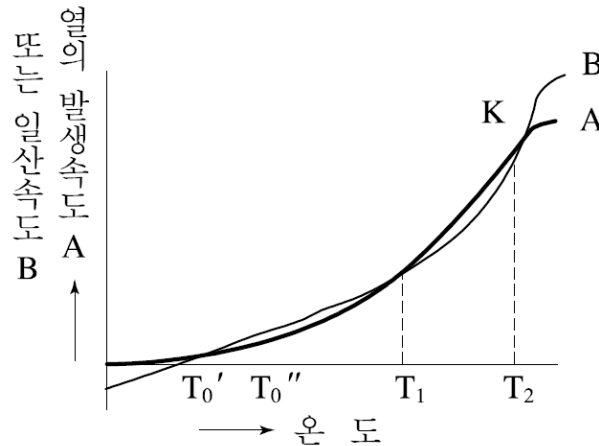




1. 연소계산

• 정상연소

(T_1 : 연소온도
 T_2 : 착화온도



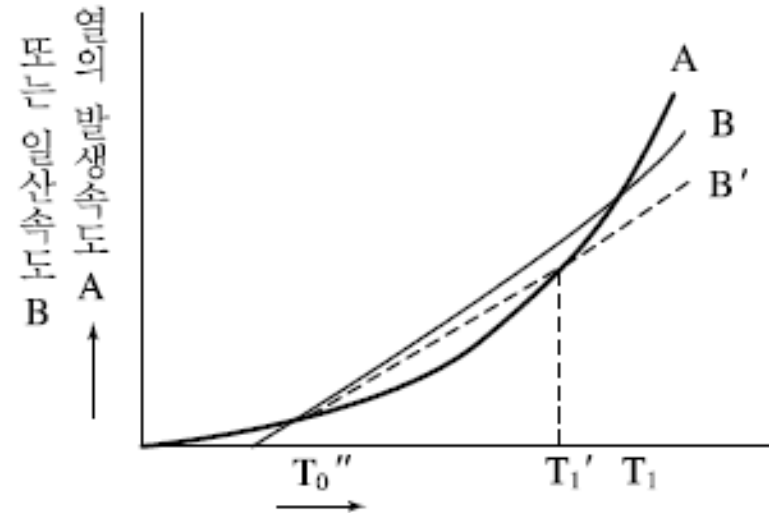
- $T_0'' < T < T_1$: 탄의 일부분을 온도 T 까지 가열을 계속하는 사이에는 그 부분을 T 도에 상당하는 속도로 산화를 계속 받지만 일단 열원을 제거하면 차차 냉각되어 T_0'' 도까지 내려간다.
- $T_1 < T < T_2$: 열발생 속도 쪽이 일산화속도보다 크므로 차차 축적되어 온도가 상승하여 T_2 까지 올라가면 열발생 속도와 일산화 속도가 같게 되므로 이 온도를 유지
- $T_2 < T$: 열발생 속도가 일산화속도보다 작아지므로 T 도까지 가열하는 사이에는 T 에 상당하는 속도로 연소가 진행되지만, 열원을 제거하면 연소 온도 T_2 까지 내려와서 정상 연소를 하게 됨



1. 연소계산

• 비정상연소

- 밀폐용기 중의 화약의 연소라든가 휘발유 및 증기와 공기의 혼합체 등이 착화하는 경우에는 열의 일산곡선 B는 아래 그림과 같이 A 곡선과는 T_0'' 점 이외 착화온도 T_1 에 있어서만이 서로 교차
- T_1 이상이 되어 연소가 시작되면 연소온도에 따라서 연소속도는 가연성 물질이 있는 한 급속히 올라감
- 이와 같은 연소를 비정상 연소 또는 폭발이라고 하며, 이 경우의 T_1 을 기폭온도 (priming temperature)라 함





1. 연소계산

- 증발연소

- 비교적 용융점이 낮은 고체가 연소되기 이전에 용융되어 액체와 같이 표면에서 증발되는 기체가 연소하는 형태
- 증발 온도가 분해온도보다 낮을 때 생기며, 주로 파라핀계 고급 탄화수소계가 이런 종류의 연소 특성을 가지고 있음
- 고체 또는 액체상 가연물의 연소형태

- 분해연소

- 증발온도보다 분해 온도가 낮은 경우에 일어남
- 가열에 의해 열분해된 휘발하기 쉬운 성분이 표면으로부터 떨어진 곳에서 연소하는 현상
- 목재나 종이 등 많은 고형물질의 연소 형태

- 액면연소

- 화염에서 복사나 대류에 의해서 가연물의 표면으로 열이 전달되어 증발이 일어나게 되고 발생한 증기가 액면상에서 연소
- 화재 시 많이 볼 수 있으며 주로 액체상 가연물의 연소 형태



1. 연소계산

- 표면연소

- 휘발분을 거의 포함하지 않은 목탄이나 코크스, char 등의 고체 표면에서 연소하는 현상으로 불균일 연소라고도 함.
- 산소나 산화가스가 고체표면이나 내부의 빈 공간에 확산되어 표면반응.

- 등심연소

- 연료심지로 빨아 올려 심지의 표면에서 증발 연소시키는 형태
- 주로 비점이 높은 액체연료의 연소에 많이 이용

- 혼합기 연소

- 기체 연료와 공기를 알맞은 비율로 혼합하여, 혼합기에 넣어 점화하여 연소하는 반응
- 예혼합연소와 부분 예혼합연소, 확산연소로 구분되며 이는 모두 기체상 가연물의 연소 형태



1. 연소계산

- 연료의 연소

- 고체상태

- 목탄, 석탄, 목재 등의 연소 방법에는 화격자 연소와 미분탄 연소가 있는데, 화격자 연소는 착화와 연소 속도가 느린 것이 결점이며, 미분탄 연소 속도는 미분탄 입자가 작을수록 빠름.

- 액체상태

- 휘발유, 등유, 경유, 중유는 대부분 분무화하여 연소시키는데, 고체 연료와 같이 분무입경이 작을수록 착화와 연소 속도가 빨라짐. 그 이외에도 연속 속도는 기름 방울과 공기의혼합률, 분진무각도, 연료의 예열온도 등에 의해 크게 지배를 받음.

- 기체 상태

- 공기와의 혼합율이 알맞으면 착화와 동시에 연소를 일으키는데, 이때 가스의 유출속도가 너무 빠르면 취소가 일어나고 늦으면 역화가 발생



1. 연소계산

- 로에서 고체·액체·기체의 연료가 잘 연소되기 위한 조건
 - ① 공기 · 연료비(AFR)가 잘 맞아야 한다.
 - ② 공기와 연료의 혼합이 잘 되어야 하며, 충분한 산소가 공급되어야 한다.
 - ③ 연료의 점화를 위하여 혼합도가 높아야 한다.
 - ④ 완전 연소를 위한 충분한 체류시간이 제공되어야 한다.
 - ⑤ 점화온도가 유지되고, 재(ash)의 방출이 최소가 될 수 있는 충분한 소각로의 형태가 요구된다.



1. 연소계산

• 고체 연료와 액체 연료의 특성

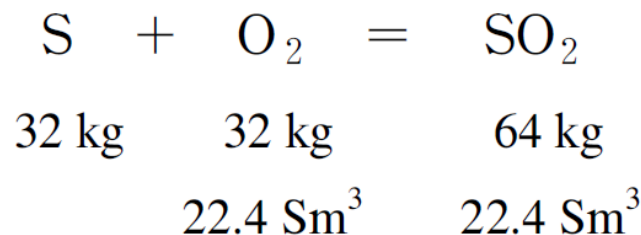
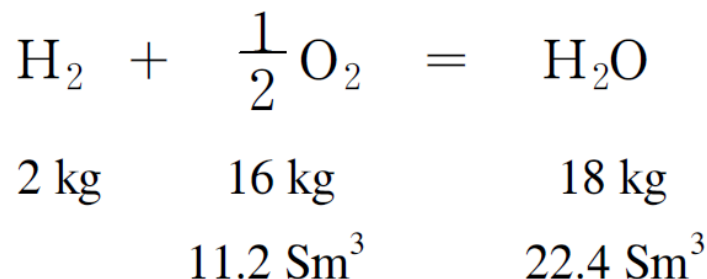
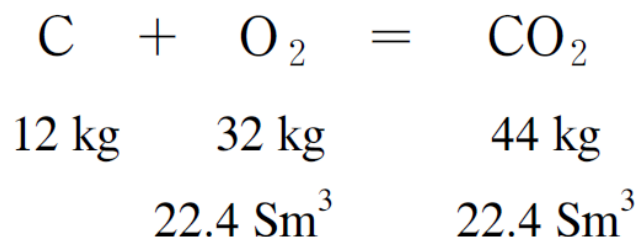
- ① 석유계 연료는 석탄계 연료에 비하여 발열량이 높다(석탄의 발열량은 5,000~8,000 kcal/kg, 석유의 발열량은 10,000 kcal/kg 이 상이다).
- ② 석유계 연료의 연소시는 회분이 없으며 열효율이 높다.
- ③ 석유계 연료는 동일 중량의 석탄계 연료보다 용적이 35~50 % 정도이다.
- ④ 석유계 연료의 연소시는 과잉 공기량이 적고 쉽게 완전 연소되며 연소후 현탁액(slurry)이 없다.
- ⑤ 석유계 연료는 연소의 조절이 간단하고 용이하며, 운반과 적재도 간단하고 신속하다.



1. 연소계산

• 연료의 연소이론

- 연료의 연소에 필요한 공기량 및 연소하여 발생된 연소가스량은 연료를 구성하는 가연원소 즉, 탄소(C), 수소(H) 및 황(S) 등 3원소의 연소에 필요한 산소량에 의해서 계산





1. 연소계산

– 중량으로 계산

$$\begin{array}{ccccccc} \text{C} & + & \text{O}_2 & (+\text{N}_2) & = & \text{CO}_2 & (+\text{N}_2) \\ 12 \text{ kg} & & 32 \text{ kg} & 107 \text{ kg} & & 44 \text{ kg} & 107 \text{ kg} \\ \therefore 1 \text{ kg} & & 2.67 \text{ kg} & 8.90 \text{ kg} & & 3.67 \text{ kg} & 8.90 \text{ kg} \\ & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \\ & & \text{소요공기량} & = 11.6 \text{ kg} & & \text{연소가스량} & = 12.6 \text{ kg} \end{array}$$

– 용적으로 계산

$$\begin{array}{ccccccc} \text{C} & + & \text{O}_2 & (+\text{N}_2) & = & \text{CO}_2 & (+\text{N}_2) \\ 12 \text{ kg} & & 22.4 \text{ Sm}^3 & 84.4 \text{ Sm}^3 & & 22.4 \text{ Sm}^3 & 84.4 \text{ Sm}^3 \\ \therefore 1 \text{ kg} & & 1.87 \text{ Sm}^3 & 7.03 \text{ Sm}^3 & & 1.87 \text{ Sm}^3 & 7.03 \text{ Sm}^3 \\ & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & & & \underbrace{\hspace{1.5cm}} & \\ & & \text{소요공기량} & = 8.90 \text{ Sm}^3 & & \text{연소가스량} & = 8.90 \text{ Sm}^3 \end{array}$$



1. 연소계산

– 공기의 조성과 공기중 산소의 양

공기의 조성		산소 1kg(1m ³)에 대해	
중량 (%)	용 적 (%)	중량비	용적비
산소 23	산소 21	공기 4.31	공기 4.77
질소 77	질소 79	질소 3.31	질소 3.77



1. 연소계산

• 이론공기량

① 기체 연료의 연소에 필요한 공기량

$$A_o = \frac{O_o}{0.21}$$

$$= \frac{1}{0.21} \left\{ 0.5(H_2) + 0.5(CO) + 2(CH_4) + 3(C_2H_4) \cdots + (C_xH_y) + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 \right\} \frac{Sm^3}{Sm^3}$$

표 5-2 각종 연료의 이론공기량의 근사치

연 료	$A_o \left(Sm^3/Sm^3 = \frac{(stp)}{m^3(stp)} \right)$	연 료	$A_o \left(Sm^3/Sm^3 = \frac{(stp)}{m^3(stp)} \right)$
천연가스	8.0 ~ 9.5	연료유	10 ~ 13
오일가스	4.5 ~ 11.0	역청탄	7.5 ~ 8.5
고로가스	0.6 ~ 8.0	무연탄	9.0 ~ 10.0
석탄가스	4.5 ~ 5.5	코크스	8.0 ~ 8.7
발생로가스	0.9 ~ 1.2	탄소	8.9



1. 연소계산

예1) 분자식이 C_mH_n 인 탄화수소가스 $1m^3(STP)(=1Sm^3)$ 의 연소에 필요한 이론공기량을 구하시오.



1. 연소계산

– ② 액체 및 고체연료의 경우

- 이론 산소량 및 공기량 (용적)

이론 산소량 $O_0 = \frac{22.4}{12}C + \frac{11.2}{2}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{22.4}{32}S$

$$O_0 = 1.867C + 5.6H - 0.7O + 0.7S (\text{Sm}^3/\text{kg})$$

이론 공기량 $A_0 = O_0 \times \frac{1}{0.21} = 8.89C + 26.67H - 3.33O + 3.33S (\text{Sm}^3/\text{kg})$



1. 연소계산

- 이론 산소량 및 공기량 (중량)

이론 산소량

$$O_{om} = \frac{32}{12}C + \frac{16}{2}\left(H - \frac{O}{8}\right) + \frac{32}{32}S$$

$$O_{om} = 2.667C + 8H - O + S \text{ (kg/kg)}$$

이론 공기량 $A_o = O_o \times \frac{1}{0.232} = 11.49C + 34.48H - 4.31O + 4.31S \text{ (kg/kg)}$



1. 연소계산

예2) 탄소 85 %, 수소 13 %, 황 2 %로 조성된 중유의 연소에 필요한 이론공기량을 구하시오.



1. 연소계산

예3) 탄소, 수소, 산소, 황의 중량 %가 86.6 %, 4 %, 8 %, 1.4 %인 중유의 연소에 필요한 이론산소량과 이론공기량을 구하시오.



1. 연소계산

예4) 메탄올(CH_3OH) 1 kg이 연소하는 데 필요한 이론공기량을 구하시오.



1. 연소계산

- 실제 소요 공기량

- 연소 장치에서 연소되는 모든 가연물질은 이론 공기량만으로는 완전 연소시키기 어렵기 때문에 실제 연소시는 더 많은 양의 공기를 투입시켜 연소시키게 되는데 이 때 이론적인 공기량에 대한 실제 투입된 소요 공기량의 비를 과잉 공기비 또는 과잉 공기계수라 하고, m 으로 표시한다.

$$m = \frac{A}{A_0}$$

- m : 공기비 >1 , A_0 : 이론 공기량, A : 실제 소요 공기량
- 과잉 공기율(A_p)= $(m-1) \times 100 \%$
- 과잉 공기량(A_G)= $(m-1) \times A_0$



1. 연소계산

• 공기비

- 배기가스 분석치를 이용: 연소 배기가스의 조성을 이용하여 구하는 방법으로 배기가스의 조성은 오르자트 배기가스 분석법 등에 의해 측정 가능

완전 연소시

$$m = \frac{21}{21 - O_2}$$

불완전 연소시

$$m = \frac{N_2}{N_2 - 3.76[O_2 - 0.5CO]}$$

표 5-3 연소 방법과 공기비

연소방법	가스버너	유류버너	미분탄버너	이동화격자	수동수평화격자
m 의 값	1.1 ~ 1.2	1.2 ~ 1.4	1.2 ~ 1.4	1.3 ~ 1.6	1.5 ~ 2.0
CO ₂ (%)	8 ~ 20	11 ~ 14	11 ~ 15	10 ~ 14	8 ~ 10



1. 연소계산

- 공기비가 너무 클 경우의 영향
 - 1) 연소실의 냉각효과를 가져 온다.
 - 2) 배기가스의 증가로 인한 열손실이 증가한다.
 - 3) 배기가스의 온도 저하 (저온 부식) 및 SO_3 , NO_x 등의 생성량이 증가한다.
- 공기비가 너무 작을 경우의 영향
 - 1) 불완전연소의 원인(매연 및 검댕 발생)이 된다.
 - 2) 불완전 연소로 인한 열손실이 있다.
 - 3) CO , HC 의 농도가 증가한다.



1. 연소계산

예5) 연소가스 중 질소, 산소의 부피 %가 각각 (N_2), (O_2)일 때 과잉공기계수를 구하라.



1. 연소계산

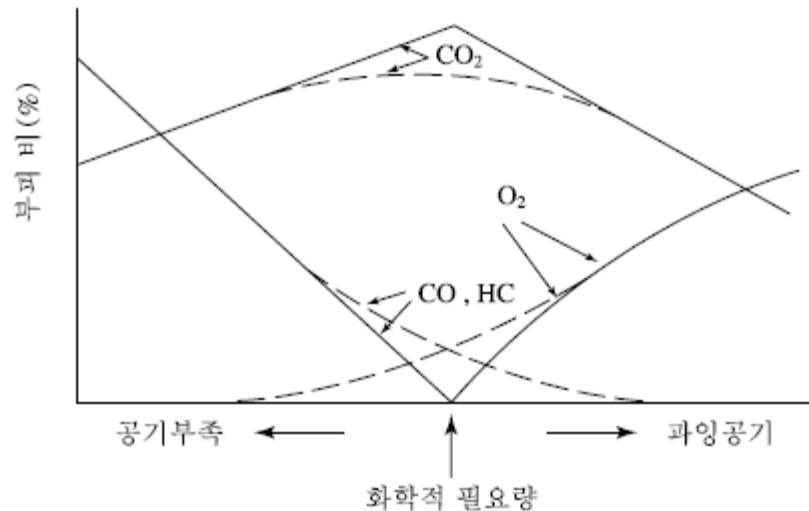
예6) 탄소, 수소의 중량 조성이 각각 86 %, 14 %인 액체 연료를
매시 100 kg 연소한 경우 배기가스의 분석치는 다음과 같다.
 CO_2 12.5, O_2 3.5, N_2 84% 이 경우 시간당 필요한 공기량은 얼마인가?



1. 연소계산

– 화학적으로 연소에 소요되는 이론적인 산소량과 연료의 관계

- 공기의 양이 적으면 배기가스 내에는 CO가 많고, 공기가 많게 되면 완전 연소
- 이론적으로 소요되는 공기량보다 더 넣어 주는 과잉공기(excess air)라고 하며, 화학적 이상연소에 필요한 공기량을 이론공기량(theoretical air)
- 과잉공기에 의해서 CO가 CO₂로 산화되지만 동시에 연소온도가 감소되어 열손실 발생
- 보통의 경우에 0.5 ~ 5%의 열손실이 이루어지면 최적





1. 연소계산

- 등가비(ϕ **Equivalent ratio**)

$$\phi = \frac{\text{실제의 연료량/산화제}}{\text{완전연소 이상적 연료량/산화제}}$$

$\phi = 1$ 일 때 완전 연소

$\phi < 1$ 일 때 과잉 공기

$\phi > 1$ 일 때 연료의 과잉

– 등가비 ϕ 에서는 $\phi < 1$ 인 상태에서 완전연소를 기대할 수 있으므로 CO는 최소가 되고, 질소산화물(NO)은 증가



1. 연소계산

- 연소가스량

- 연소가스: 연료가 연소해서 생성되는 고온가스
- 배기가스: 연소가스가 피열물에 열을 전도한 다음 연도나 굴뚝으로 나가는 가스를 연소배출가스, 또는 단순한 배기가스라고 함
- 습윤연소가스: 연소배출가스 중에 연료 속의 수분이나 연소에서 생성된 수증기를 불포화 상태로 함유하고 있는 것
- 건조연소가스: 수증기를 제거한 가스



1. 연소계산

- 이론 연소가스량

- 연료가 이론공기량으로 완전연소되었다고 가정했을 때에 **생성되는** 가스량
- 이론습윤연소가스량 G_o
- 이론건조연소가스량 G_o'

- 실제 연소가스량

- 습윤연소가스량 G
- 건조연소가스량 G'

$$G = G_o + (m-1) A_o$$

$$G' = G_o' + (m-1) A_o$$



1. 연소계산

- 연소가스의 계산
- 1) 액체 및 고체연료의 이론산소량, 이론습윤연소가스량, 이론 건조연소가스량, 습윤연소가스량, 건조연소가스량
 - ① 이론공기량(Sm^3/kg 연료) 또는 ($\text{m}^3(\text{stp})/\text{kg}$ 연료)

$$A_o = \frac{1}{0.21} \left[\frac{22.4}{12} C + \frac{11.2}{2} \left(H - \frac{O}{8} \right) + \frac{22.4}{32} S \right]$$

$$\begin{aligned} \text{이론산소량} &= \frac{1}{0.21} \left[1.867C + 5.6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0.7S \right] \\ &= 8.89 + 26.7 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 3.3S \end{aligned}$$



1. 연소계산

② 이론습윤연소가스량은 이론연소가스량의 합

$$\begin{aligned} G_o &= 1.867C + 11.2H + 0.7S + 0.8N + 0.79 A_o + 1.24W \\ &= A_o + 1.867C + 11.2H + 0.7S + 0.8N - (0.21 A_o) + 1.24W \\ &= A_o + 1.867C + 11.2H + 0.7S + 0.8N \\ &\quad - \left\{ 1.867C + 5.6 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 0.7S \right\} + 1.24W \quad (\because) \\ &= A_o + 5.6H + 0.7O + 0.8N + 1.24W \text{ [Sm}^3\text{/kg]} \end{aligned}$$

③ 이론건조연소가스량[Sm³/kg]

$$\begin{aligned} G_o' &= 1.867C + 0.7S + 0.8N + 0.79A_o \\ &= A_o - 5.6H + 0.7O + 0.8N \end{aligned}$$



1. 연소계산

④ 연소가스 중의 $N_2 + O_2$ 량

- 공급공기량 $\rightarrow A = mA_o$ [Sm^3/kg 연료]
- 과잉공기량 $\rightarrow A - A_o = mA_o - A_o = (m - 1)A_o$
- 연소가스 중 잔존 O_2 는 과잉공기량의 21%에 해당 $\rightarrow 0.21(m - 1)A_o$
- 연소가스 중의 N_2 는 공급공기량의 79%에 해당 $\rightarrow 0.79mA_o$

따라서, 연소가스 중의 $N_2 + O_2$ 량은 과잉산소와 연소가스 질소와의 합이다.

$$\text{즉, } N_2 + O_2 = 0.21(m - 1)A_o + 0.79mA_o = (m - 0.21)A_o$$



1. 연소계산

⑤ 습윤연소가스량(G) [Sm^3/kg]

$$\begin{aligned} G &= G_o + (m-1)A_o \text{ [Sm}^3/\text{kg]} \\ &= G_o + mA_o - A_o \\ &= A_o + 5.6H + 0.7O + 0.8N + mA_o - A_o + 1.24W \leftarrow (5.18)\text{식에서 유도} \\ &= mA_o + 5.6H + 0.7O + 0.8N + 1.24W \end{aligned} \quad (5.24)$$

또는,

$$\begin{aligned} G &= G_o + mA_o - A_o \\ &= 1.867C + 11.2H + 0.7S + 0.8N + 0.79A_o + mA_o - A_o + 1.24W \\ &= 1.867C + 11.2H + 0.7S + 0.8N + (m-0.21)A_o + 1.24W \end{aligned} \quad (5.25)$$

(보통 수분 1.24W는 무시한다.)



1. 연소계산

⑥ 건조연소가스량(G') [Sm^3/kg]

$$\begin{aligned} G' &= G_o' + (m-1)A_o \\ &= mA_o - 5.6H + 0.7O + 0.8N \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$\text{또는, } G' = 1.867 C + 0.7S + 0.8N + (m - 0.21)A_o \quad (5.27)$$

그리고, $G_o = G_o' + 11.2H$ 이고, $G = G' + 11.2H$ 관계식도 성립된다.



1. 연소계산

• 2) 액체연료의 이론산소량과 이론가스량

액체, 고체 연료의 반응식	각 성분 1kg연소에 필요한 이론산소O ₂ [Sm ³]	연료 1kg 당		
		각 성분의 중량분율	이론산소량 O ₂ [Sm ³]	이론연소가스량
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ $12\text{kg} \quad 22.4\text{m}^3 \quad 22.4\text{m}^3$	$\frac{22.4}{12} = 1.867$	C	1.887C	CO ₂ ...1.867C
$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ $2\text{kg} \quad 11.2\text{m}^3 \quad 22.4\text{m}^3$	$\frac{11.2}{2} = 5.607$	*H	5.6H	**H ₂ O... 11.2H
$\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2$ $32\text{kg} \quad 22.4\text{m}^3 \quad 22.4\text{m}^3$	$\frac{22.4}{32} = 0.70$	S	0.7S	SO ₂ ... 0.7S
$\text{연료중에 } \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2$ $28\text{kg} \quad 22.4\text{m}^3$		N		$\text{N}_2 \dots \frac{22.4}{28}$ $= 0.8\text{N}$

– 연료 중에 산소가 포함되어 있을 경우에는 그 중량분율을 O [kg/kg 연료]로 하면 유효수소는 H-O/8



1. 연소계산

- 예8) 탄소 86%, 수소 12%, 황 2% 조성의 중유를 연소시켜 그
의 배기가스를 분석했더니, 다음과 같은 결과를 얻었다.
 $(\text{CO}_2) + (\text{SO}_2) = 13[\%]$, $(\text{O}_2) = 3[\%]$, $(\text{CO}) = [\%]$ 이다. 이때, 건
조연소가스 중의 SO_2 의 농도(부피, %)는 얼마인가?



1. 연소계산

- 예9) 탄소 86%, 수소 13%, 황 1%의 조성의 중유를 연소하고 배기가스 분석을 했더니, $(\text{CO}_2) + (\text{SO}_2)$ 가 13%, (O_2) 가 3%, (CO) 가 0.5%였다. 건조연소가스 중의 SO_2 의 농도는 몇 ppm인가?



1. 연소계산

- 예10) 탄소 85%, 수소 15%로 된 경유를 과잉공기계수 1.1로 연소했더니, 탄소 1%가 그을음으로 된다. 건조배기가스 1Sm^3 중 그을음의 농도 $[\text{g}/\text{Sm}^3]$ 는 얼마인가?



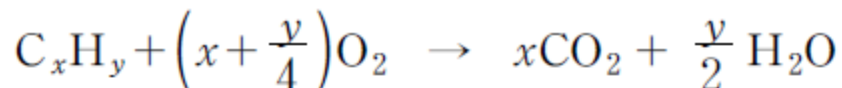
1. 연소계산

- 예11) 프로판 1 kg을 과잉공기계수 1.1로 완전연소시킬 경우에 발생하는 연소가스의 중량을 구하라.



1. 연소계산

• 3) 탄화수소 연소시 연소반응식의 계수에 의한 계산법



• 이론공기량 $A_o = \frac{1}{0.21} \left(x + \frac{y}{4}\right) = 4.76x + 1.19y \text{ [Sm}^3\text{]}$ (5.28)

• 이론연소가스량 $\left\{ \begin{array}{l} \text{이론습윤연소가스량 } G_o = 0.79A_o + x + \frac{y}{s} \text{ [Sm}^3\text{]} \end{array} \right.$ (5.29)

$\left\{ \begin{array}{l} \text{이론건조연소가스량 } G_o = 0.79A_o + x \text{ [Sm}^3\text{]} \end{array} \right.$ (5.30)

• 과잉공기계수 m 일 때 $\left\{ \begin{array}{l} \text{습윤연소가스량} \\ G = (m-1)A_o + G_o = (m-0.21)A_o + x + \frac{y}{2} \text{ [Sm}^3\text{]} \end{array} \right.$ (5.31)

연소가스량 $\left\{ \begin{array}{l} \text{건조연소가스량} \\ G' = (m-1)A_o + G_o' = (m-0.21)A_o + x \end{array} \right.$ (5.32)



1. 연소계산

- 예12) 프로판(C_3H_8) 1 Sm^3 를 연소시킬 때 이론 건조 연소가스량은 얼마인가?



1. 연소계산

- 예13) 메탄 1 Sm^3 를 과잉공기계수 1.2로 연소시킬 경우 습윤 연소가스량을 구하라.



1. 연소계산

- 예14) 프로판 1 Sm^3 를 과잉공기계수 1.1로 완전연소시킬 때 건조연소가스량을 구하라.



1. 연소계산

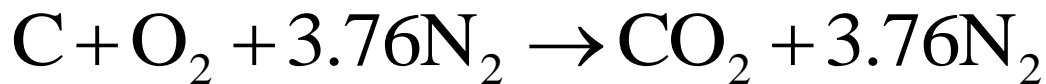
- 예15) CH_4 92%, O_2 4%, N_2 4%의 조성가스 1 Sm^3 를 연소시키는 데 필요한 이론공기량을 구하라.



1. 연소계산

- 최대 탄산가스량 $(\text{CO}_2)_{\max}$

- 공기를 충분히 송입하여 연소가 양호해지면 $(\text{CO}_2)\%$ 상승.
- 유입되는 공기가 이론량을 초과하면 연소가스 중에 과잉공기가 들어가기 때문에 $(\text{CO}_2)\%$ 는 감소
- 연료에 부여하는 공기량이 부족에서 최적량에 과잉되는 단계로 진행됨에 따라 $(\text{CO}_2)\%$ 는 상승, 최대, 하강
- 이상적인 연소를 위해서는 $(\text{CO}_2)\%$ 가 최대가 되도록 연소를 조절



$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{(\text{CO}_2)}{(\text{CO}_2) + (\text{N}_2)} \times 100 \%$$

- 연료가 이론공기량으로 완전연소한다고 가정할 경우, **이론건조 연소가스 중 CO_2 의 부피분율**(용량%)을 최대 탄산가스량이라고 하고 $(\text{CO}_2)_{\max} \%$ 로 표시



1. 연소계산

① 고체 및 액체 연료의 경우

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{1.867C}{G_o'} \times 100 \div \frac{187C}{G_o'}$$

보통의 분석법으로는 (SO₂)도 KOH 용액에 흡수되므로

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{1.867C + 0.7S}{G_o'} \times 100$$

② 기체 연료의 경우

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{(\text{CO}) + (\text{CO}_2) + (\text{CH}_4) + 2(\text{C}_2\text{H}_4) + x(\text{C}_x\text{H}_y)}{G_o'} \times 100\%$$

③ 완전 연소일 경우

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{(\text{CO}_2) \times 100}{100 - \frac{(\text{O}_2)}{0.21}} = \frac{21(\text{CO}_2)}{21 - (\text{O}_2)}$$



1. 연소계산

④ 불완전 연소일 경우

$$(\text{CO}_2)_{\max} \% = \frac{21[(\text{CO}_2) + (\text{CO})]}{21 - (\text{O}_2) + 0.395(\text{CO})}$$

⑤ 공기비와 $(\text{CO}_2)_{\max}$ %의 관계

- 완전연소시 : $\frac{21}{21 - (\text{O}_2)} \doteq m, \quad m \doteq \frac{(\text{CO}_2)_{\max} \%}{(\text{CO}_2) \%}$

- 불완전연소시 : $m = \frac{21(\text{N}_2)}{21(\text{N}_2) - 79[\text{O}_2 - 0.5(\text{CO})]} \doteq \frac{(\text{N}_2)}{(\text{N}_2) - 3.76(\text{O}_2)}$



1. 연소계산

- 예16) 일산화탄소의 최대 탄산가스량은 얼마인가?



1. 연소계산

- 예17) 공기를 사용하여 C_3H_8 를 연소시킬 때 건조가스 중의 $CO_{2max}\%$ 를 구하라.



1. 연소계산

- 발열량이란?

- 연료의 단위량 (기체 연료에서는 1Sm^3 , 고체 연료와 액체 연료는 1kg)이 완전 연소 할때 발생하는 열량(kcal)
- 쓰레기 발열량은 소각로를 설계할 때 가장 기본이 되는 쓰레기의 질적 특성으로, 쓰레기 1kg 을 완전히 연소할 때 발생하는 열량(kcal)
- 단위: 고체 및 액체 연료일 경우 kcal/kg 이고, 기체 연료인 경우는 kcal/Sm^3 을 사용



1. 연소계산

- 고위발열량

- 열량계로 측정되는 열량. 총발열량이라고 하고 H_h 로 표시.
- 이것은 연료 중의 수분 및 연소에 의해 생성된 수분의 응축열 (일명 증발잠열: H_s)을 포함한 열량

- 저위발열량

- 실제 연소에서는 연소 배출가스 중의 수분은 보통 수증기(과열) 상태로 배출되기 때문에 응축열은 이용 불가능한 경우가 많으므로 고위발열량에서 응축열을 공제한 잔여 열량이 유효하게 이용되는데 이것을 저위발열량(H_l)이라고 지칭
- 진발열량 또는 순발열량이라고도 함

$$H_h = H_l + H_s$$



1. 연소계산

— 증발잠열

- H_s 는 수증기의 증발잠열로 0°C 기준으로 하면,
- $H_s = 597 \div 600 \text{ kcal/kg}$ (물)
- $H_s = 597 \times 18 / 22.4 \div 480 \text{ kcal/Sm}^3$ (수증기)

표 5-8 물의 증발잠열(응축열) [kcal/kg]

0°C	$597 \div 600$
10°C	592
15°C	589
20°C	586
25°C	583
100°C	539



1. 연소계산

- 발열량의 산정 방식

- ① 단열 열량계에 의한 방법
- ② 추정식에 의한 방법 (물리적 조성에 의한 방법 포함)
- ③ 물리적 조성에 의한 방법
- ④ 원소분석에 의한 방법



1. 연소계산

① 단열 열량계에 의한 방법

- 고체 및 액체 연료의 경우에는 봄브식 열량계(bomb calorimeter)를 이용하고, 기체연료의 경우는 용겔스식 열량계를 이용하여 측정
- 폐기물은 주로 봄브식 열량계를 사용하는데 용기 내의 연소열에 의한 반응용기를 감싸고 있는 수조의 수온이 상승하는 것을 측정하여 발열량 결정
- 결정 방법: 건조된 쓰레기를 2mm 이하로 분쇄한 후 일정량을 취하여 단일 열량계로써 발열량을 측정. 이때 분쇄하는 과정에서 약간의 수분이 다시 흡수, 함유(약1~4%)되므로 측정된 발열량은 기건식이 됨. 따라서 측정할 시료의 수분함량을 다시 측정하여 보정하여 줌으로써 정확한 건식의 발열량을 얻음



1. 연소계산

$$\text{건조쓰레기의 발열량(kcal/kg)} = \frac{\sum C_i E_i}{\sum C_i}$$

C_i : 조성 i 의 가연분 조성 (%)

E_i : 조성 i 의 열량계 발열량(kcal/kg)

$$\text{생쓰레기의 발열량(kcal/kg)} = \frac{\sum A_i F_i}{\sum A_i}$$

A_i : 조성 i 의 회분 조성 (%)

F_i : 조성 i 의 습식 발열량(kcal/kg)

$= (\text{건조쓰레기 발열량}) \times (100 - \text{수분함량 \%}) / 100$



1. 연소계산

- 발열량 계산 (기체, 기준 1 Sm³)

$$H_l = H_h - 480[(H_2) + 2(CH_4) + \Lambda \Lambda + \frac{y}{2}(C_xH_y)] \text{kcal/Sm}^3$$

수증기 1Sm³당 응축열
= 597 × 18 / 22.4
= 480 [kcal/m³]



1 부피

1 부피



1 부피

2 부피



1 부피

2 부피



1 부피

$\frac{y}{2}$ 부피



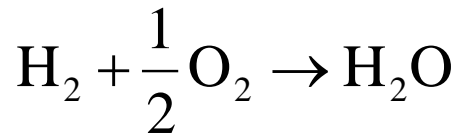
1. 연소계산

- 예) 메탄의 고위발열량이 $9,500 \text{ [kcal/Sm}^3\text{]}$ 이면 저위발열량은?



1. 연소계산

– 발열량 계산 (액체 및 고체, 기준 1Sm³)



$$2\text{kg} \rightarrow 18\text{kg} = \frac{18}{2}\text{H} = 9\text{H}$$

- 연료 중 수소와 수분의 중량분을 각각 H, W로 하면 연료 1kg 당 9H+W (kg)의 H₂O가 생성
- 물 1kg의 증발잠열(=응축열)은 약 600kcal이기 때문에 다음 식이 성립

$$H_1 = H_h - 600(9H + W) \text{ [kcal/kg]}$$



1. 연소계산

- 예) 수소 12.0%, 수분 0.3%인 중유의 고위발열량이 10,600 [kcal/kg]일 때, 저위발열량을 구하라.



1. 연소계산

② 추정식에 의한 방법

- 쓰레기의 저위발열량은 소위 **쓰레기의 3성분(가연분, 수분, 회분)의 조성비**를 바탕으로 다음 식에 의하여 추정

$$H_h = 4,500 \times V$$

$$H_l = 4,500 \times V - 600 \times W$$

- V: 쓰레기 중 가연분의 조성비 (%)
- W: 쓰레기 중 수분함량의 조성비 (%)
- 저위발열량의 간이식으로 가연분, 수분 및 회분의 분석치를 이용함으로써 시간이나 인력을 절약할 수 있는 방식
- 쓰레기 자체가 불균일성 물질이고 수분을 50% 이상 함유하고 있는 경우에는 상당한 오차가 발생할 수 있는 문제점 발생



1. 연소계산

③ 물리적 조성에 의한 방법

– 폐기물 중의 물리적 조성(종이, 플라스틱, 진개 등)으로부터 열량을 산출하는 방법

$$H_h = (4500V_1 + 8000V_2) \text{ [kcal/kg]}$$

$$H_1 = (4500V_1 + 8000V_2) - 600W \text{ [kcal/kg]}$$

- V_1 : 플라스틱 이외의 가연분 중량비 (건조기준, %)
- V_2 : 팔르스틱류의 중량비 (건조기준, %)
- W : 수분함량 (%)



1. 연소계산

– 폐기물 중의 플라스틱, 부엌쓰레기 함량에 따른 추정 방법

$$H_h = 8820R + 4050(G + P)[kcal / kg]$$

$$H_l = 8820R + 4050(G + P) - 600W[kcal / kg]$$

- R: 플라스틱 함량 (건조기준, %)
- G: 부엌쓰레기 함량 (건조기준, %)
- W: 수분함량(%)



1. 연소계산

④ 원소분석에 의한 방법

– **듀롱(Dulong)**의 식: 전체 수소 중 유효발열수소($H - O/8$)을 고려한 식

$$H_h = 8100C + 34250 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2250S [kcal / kg]$$

$$H_l = H_h - 600(9H + W) [kcal / kg]$$

- 여기서, C: 탄소(%), H: 수소(%), O: 산소(%), S: 황(%), W: 수분(%)



1. 연소계산

- 스투어(Steuer)의 식: 산소의 1/2이 CO, 나머지 1/2가 H₂O로 존재하는 것으로 가정

$$H_l = 8100\left(C - \frac{3}{8}O\right) + 5700\left(\frac{3}{8}O\right) + 34250\left(H - \frac{1}{2} \cdot \frac{O}{8}\right) + 2500S - 600(9H + W)[kcal/kg]$$

- 쉴레-케스트너(Scheurer-Kestner)의 식: 산소가 CO로 존재한다고 가정한 경우

$$H_l = 8100\left(C - \frac{3}{4}O\right) + 5700\left(\frac{3}{4}O\right) + 34250H + 2250S - 600(9H + W)[kcal/kg]$$



1. 연소계산

– 기타 원소 조성에 의한 저위발열량 추정식

- Kunle

$$8100C + 34000(H - O + N/8) + 2250S - 600(9H + W)$$

- Mahler

$$8140C + 34500H - 3000(O + N)$$

- Gumz

$$8130C + 2970H + 1500N + 450S - 2350D(\text{가연분의 함량}) - 600(9H + W)$$



1. 연소계산

• 타는 성분의 발열량 (완전연소의 경우)

타는 성분	화학식	발열량(kcal/kg)		발열량(kcal/Sm ³)	
		H _h	H _l	H _h	H _l
탄 소 수 소 황	C	8,100	8,100	-	-
	H	3,400	2,860	3,050	2,570
	S	2,500	2,500	-	-
일산화탄소 메 탄	CO	2,430	2,430	3,035	3,035
	CH ₄	13,320	11,970	9,530	8,570
에 탄	C ₂ H ₆	12,410	11,330	16,820	15,380
프로판	C ₃ H ₈	12,040	11,070	24,370	22,350
부 탄	C ₄ H ₁₀	11,840	10,920	32,010	29,610
아세틸렌	C ₂ H ₂	12,030	11,620	14,080	13,600
에틸렌	C ₂ H ₄	12,130	11,360	15,280	14,320
프로필렌	C ₃ H ₆	11,770	11,000	22,540	21,070
부틸렌	C ₄ H ₈	11,630	10,860	29,110	27,190
벤졸증기	C ₆ H ₆	10,030	9,620	34,960	33,520



1. 연소계산

- 예) 폐기물의 함수율이 25%이고, 건조기준으로 연소 성분 및 열량계를 이용한 열량은 다음과 같다. 이 폐기물의 저위 발열량을 구하면? (단, C:55%, H: 18%, 발열량: 2,800Kcal/Kg이다)



1. 연소계산

- 예) 폐기물의 분석한 결과 수분 20%, 회분 15%, 고정탄소 25 %, 휘발분 40 %이고, 휘발분을 운소 분석한 결과 수소 20 %, 황 5 %, 산소 25 %, 탄소 50 %이었다. 이 때 이 폐기물의 고위 발열량은 얼마인가?

(단, 고위 발열량 = $8,100C + 34,000(H - \frac{O}{8}) + 2,500S$)



1. 연소계산

- 예) 어느 폐기물을 연소 처리하고자 한다. 함유성분이 다음과 같을때 폐기물의 고위 발열량은? (단, 함유율:29%, 불활성분:14 %, 탄소:26 %, 수소:6 %, 산소:24 %, 유황:1 %, Dulong식 사용)



1. 연소계산

- 예) 가연분 함량 30%(무게기준)인 어떤 폐기물의 현재 저위 발열량이 990kcal/kg 이다. 수분함량(무게기준)은? (단, 삼성분의 조성비를 통한 발열량 계산 기준)



1. 연소계산

- 최고 연소 속도

- 기벽의 영향이 없는 상태에서 대량의 가연 혼합물 중 화염전파속도를 지칭. 기체 연료의 연소속도는 1차 공기의 혼합비에 따라서 다름
- 이론 혼합비 정도일 때 최고 연소 속도
 - H_2 : 292cm/sec, CH_4 : 37cm/sec, C_2H_6 : 44cm/sec, CO : 43cm/sec, C_3H_8 : 43cm/sec



1. 연소계산

- 이론연소온도

- 단위량의 연료 (1kg, 1 Sm³)를 이론공기량으로 연소시킬 때, 연소가스가 도달하는 이론상 최고 온도

$$H_l = G_0 C_P (t_2 - t_1)$$

$$t_2 = \frac{H_l}{G_0 C_P} + t_1$$

H_l : 저위 발열량 [kcal/Sm³]

G_0 : 이론 연소가스량 [m³/Sm³]

C_p : 연소가스량의 평균 정압 비열 [kcal/Sm³°C]

t_1 : 실제 온도 [°C]

t_2 : 이론온도 [°C]



1. 연소계산

- 예22) 저위발열량이 $7,000 \text{ kcal/Sm}^3$ 의 가스연료의 이론연소 온도는 몇 $^{\circ}\text{C}$ 인가?



1. 연소계산

- 예23) 메탄의 이론연소온도를 구하여라. 단, 메탄과 공기도 18°C 에서 공급되는 것으로 한다. 또한, CO_2 , $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$, N_2 의 평균정압 몰비열(상온 ~ $2,100^{\circ}\text{C}$)은 각각 13.1, 10.5, 8.0 [kcal/kmol $^{\circ}\text{C}$]이다. 단, 메탄의 저위발열량 $H_1 \doteq 8,600[\text{kcal}/\text{Sm}^3]$



1. 연소계산

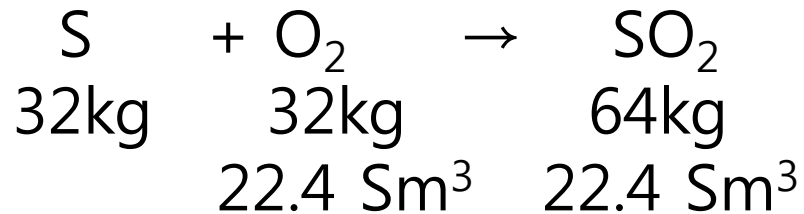
- 완전 연소와 불완전 연소의 생성물
 - 완전 연소: 탄소와 수소가 완전 연소하면 각각 CO_2 와 H_2O 생성
 - 불완전 연소: 검댕, CO , H_2 , 또는 CH_4
- 배출가스 분석
 - 보통 CO_2 , SO_2 , CO , O , N_2 등으로 구성
 - 배출 가스 분석에 사용되는 오르자트 분석 장치는 CO_2 를 흡수할 때에 SO_2 도 동시에 흡수하기 때문에 겉보기에 의한 CO_2 로 간주.
 - 보통의 측정은 CO_2 , CO , O_2 를 실측하고 나머지는 N_2 로 간주
 - SO_2 농도는 보통의 가스 분석 장치로서는 실측하지 못하고, 연료의 원소 조성을 통하여 그 양을 구할 수 있음



1. 연소계산

- 연소가스 중 오염성분의 농도계산

- 황화물의 생성량을 구하는 계산



- SO₂ 생성량

- 무게비: $64/32 \text{ S}=2\text{S} \text{ (kg/kg연료)}$

- 부피비: $22.4/32 \text{ S}=0.7 \text{ S (Sm}^3\text{/kg연료)}$



1. 연소계산

- 예24) 탄소, 수소, 황의 중량%가 각각 85%, 12%, 3%인 중유를 과잉공기계수 1.2로 완전연소시킬 때 습윤연소가스 중 SO_2 의 부피 %는 얼마인가?



1. 연소계산

- 예25) 탄소 84 %, 수소 13.0 %, 황 2.0 %, 질소 1.0 %의 중유 1 kg당 15 Sm³의 공기로 완전 연소시킬 경우, 습윤배기가스 중의 황산화물은 부피 분율로 몇 ppm인가?



1. 연소계산

- 예26) 황화수소 0.5 %를 포함하는 메탄가스를 과잉공기계수 1.05로 연소하면 건조연소 가스 중 이산화황은 몇ppm인가?



1. 연소계산

- 중유연소시 SO_2 의 농도계산

- Rosin 식 사용: 액체 연료에 있어서 이론공기량 A_o , 이론 연소 가스량 G_o 를 구하는 근사식

$$A_o = \frac{0.85H_l}{1,000} + 2 \quad [\text{Sm}^3/\text{kg}],$$

$$G_o = \frac{1.11H_l}{1,000} \quad [\text{Sm}^3/\text{kg}]$$

- H_l 은 저위 발열량 [kca/kg]이며, 중유의 경우는 $H_l \doteq 10,000$ [kcal/kg]



1. 연소계산

- 예27) 황 2 %를 포함하는 저위발열량 10,000 kcal/kg의 액체연료를 과잉공기계수 1.2로 완전연소시킬 때 습윤연소 가스 중의 황산화물의 농도는 얼마인가?



1. 연소계산

- 예28) 탄소 85 %, 수소 13 %, 황 2 %의 중유를 과잉공기계수 1.2로 연소시킬 때 건조 배기가스 중의 이산화황의 부피분율은 얼마인가?



1. 연소계산

– 보상계-사툰식에 의한 황 배출량의 표시법

- 황산화물의 허용배출량(보상계 사툰의 식)

$$q = K \times 10^{-3} H_e^2 \text{ [Sm}^3/\text{h]}$$

q : 황산화물의 허용배출량[Sm³/h]

K : 지역에 따라 정해지는 값(황산화물의 배출기준)

H_e : 유효 굴뚝의 높이, 굴뚝의 부상효과에 의한 보정을 한 배출구의 높이(m)

- 황산화물의 배출량

$$Q = 0.0067 \times S \times W \text{ [Sm}^3/\text{h]}$$

Q : 황산화물의 배출량 [Sm³/h]

S : 중유 중 황함유율 [%]

W : 연료 사용량 [L/h]



1. 연소계산

- 예29) 서울의 황산화물의 배출기준 K 값은 3.5로 정해져 있다. 지금 $H_e=100[m]$ 의 굴뚝을 가진 시설에서 중유가 5 kL/h의 윗으로 연소될 경우, 연료 중의 황분의 함유율은 몇 %이하의 것을 사용하지 않으면 안 되겠는가?



1. 연소계산

- 예30) 황산화물 배출의 K의 값이 11.7의 지역에서 다음 시설 중 개선을 필요로 하는 것은 어느 것인가?



1. 연소계산

- 예31) K값이 6.42의 지역에서 황분 2%의 중유를 매시 1kL 사용하는 보일러의 유효굴뚝높이는 몇 m가 되지 않으면 안 되겠는가?



1. 연소계산

- 연소실 열발생율 [$\text{kcal}/\text{m}^3/\text{h}$]
 - 연소실의 단위 부피당 단위시간에 발생하는 열량
 - 연소실 열부하 또는 단순히 열부하라고도 함
 - 연소 속도, 로의 크기, 로재의 내열도, 연료의 종류, 버너의 형식 등에 따라 다름.
- 화격자 연소율 [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$]
 - 석탄연소로에서 화격자의 단위 넓이당 단위시간에 연소하는 석탄의 중량



1. 연소계산

- 예32) 가로 1.2 m, 세로 2.0 m, 높이 11.5 m의 연소실에서 저위발열량 10000[kcal/kg]의 중유를 1시간에 100 kg 연소한다. 연소실 열발생률은 얼마인가?



1. 연소계산

- 예33) 중유 300 kg/h를 과잉공기계수 1.2로 연소시키는 연소실이 있다. 이 연소실의 공기의 온도를 220℃로 올리면 연소실 열발생률은 상온의 공기(20℃)의 경우보다도 몇% 증가하겠는가? 단, 중유의 저위발열량은 10,000 kcal/kg, 이론공기량은 10 Sm³/kg, 공기의 평균비열은 0.31 kcal/Sm³이라 한다.



2. 연소의 조건

- 연소의 조건

- 유기물질을 높은 온도에서 산화시키는 과정



- 연소 성능을 결정하는 시간(time), 온도(temperature), 난류 또는 혼합 (turbulence)로서 보통 3T라 지칭
- 폐기물의 연소과정에서 발생한 불완전 연소 생성물의 파괴를 위해서는 국부적으로 일정이상 온도에서 강한 난류에 의해 산소와의 혼합이 이루어져 반응이 종료될 시간 이상 머물러야 함



2. 연소의 조건

① 체류시간

- 연소실에서의 연소가스의 평균 체류시간은 열 및 물질수지로부터 계산된 연소가스의 양과 평균온도, 그리고 연고실 체적으로부터 계산 가능
- 체류시간이 짧은 경우에는 미연소된 가스가 외부로 배출되어 대기오염을 유발
- 연소가스의 체류시간은 연소실 내부온도가 850°C 이상으로 유지되는 상태에서 폐기물 소각량에 따라 다음과 같은 시간이상 유지 필요
 - ① 200 kg/일 이하 : 0.5초 이상
 - ② 200 kg/일 ~ 1 ton/hr : 1.0초 이상
 - ③ 2 ton/hr 이상 : 2초 이상



2. 연소의 조건

② 난류 또는 혼합 (Turbulence)

- 연소기내에 단회로가 형성되면 불완전 연소된 가스가 외부로 나가서 문제가 되므로, 이때에는 격벽을 설치하여 단회로를 방지
- 단회로가 발생하면 다이옥신류의 전구물질인 클로로페놀, 클로로벤젠류 등이 형성되어 다이옥신류가 배출될 가능성이 높아짐
- 2차 공기가 효과적으로 설계되고 운전되는 경우, 2차 연소실 내에서 연소가스의 완전 혼합과 고른 체류시간 분포를 달성 가능.
- 공기 주입방식은 엇갈린 제트로 하여 제트 간의 충돌이 최소화하고 교차가 이루어짐으로서 전단력에 의한 혼합의 향상과 고른 유속분포를 얻을 수 있음.



2. 연소의 조건

③ 연소 온도

- 연소온도는 연소시키는 물질의 발화온도, 수분함량, 사용되는 공기량, 연소기의 모양에 따라 변화
- 도시폐기물의 발화온도(ignition temperature)는 260~370℃ 가량 되나 필요한 연소기의 최소 온도는 650℃ 정도
- 연소온도가 너무 높아지면 NO_x나 O_x가 형성되며, 공기를 보다 많이 주입하여 냉각시켜야 하며, 온도가 낮으면 불완전 연소에 의한 HC, CO 등이 발생되며 냄새 발생
- 연소온도가 높게 되면 일반적으로 연소시키는 데 소요되는 시간을 짧아져도 되므로 어느 정도 이상의 온도에서는 연소시간이 그리 중요하지 않게 됨.
- 그러나 연소과정에서 생산되는 재가 짧은 체류시간으로 연소가스와 함께 외부로 나가지 않도록 유속을 줄여서 내부에 침전되도록 설계



3. 연소공정

- 연소공정

- ① 폐기물의 주입
- ② 연소
- ③ 연소가스 처분
- ④ 재의 처분
- ⑤ 기타 공정 (폐기물의 분쇄나 또는 선별 공정, 또는 에너지 회수공정)



3. 연소공정

- 주입 시스템

- 회분식으로 주입하는 방법과 연속적인 주입방법이 있음
- 연소기의 연속주입을 위해서는 충분한 폐기물을 확보하여 저장
- 시킬 수 있어야 하며, 또한 연소기의 고장이나 정기적인 점검에 대비하여 최소한 예비 연소기가 필요
- 저장탱크의 크기가 지나치게 클 경우(2~3일 이상 저장) 부패성 폐기물에 의하여 냄새 유발
- 강우에 의하여 폐기물이 젖는 것이 좋지 않으므로 일반적으로 지붕을 씌우는 것이 상례
- 일반적으로 연소기의 입구는 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ 또는 $1.2\text{ m} \times 2.4\text{ m}$ 정도



3. 연소공정

- 연소실(Combustion Chamber, Furnace)
 - 연소실은 연소로, 또는 소각로라고도 지칭
 - 연속적으로 연료를 주입시키는 경우에 내화재를 충전한 연소로와 기다란 물파이프가 충전된 경우의 수냉벽 연소기로 구분
 - 내화재로 충전된 연소로의 경우에는 벽에 슬래그가 생기지 않도록 여분의 공기를 주입하여 냉각 배출하므로 가스량이 많아 대기오염물질의 제거시설의 크기가 커져야 함
 - 수냉벽 연소기의 경우는 여분의 공기가 많이 소요되지 않으므로 대기오염물질의 제거장치의 규모는 그리 크지 않음
 - 연소실은 주입된 폐기물을 건조, 휘발, 점화시켜 연소시키는 1차 연소실(primary combustion)과 1차 연소실에서 미연소된 부분을 연소시키는 2차 연소실(secondary combustion)로 구성



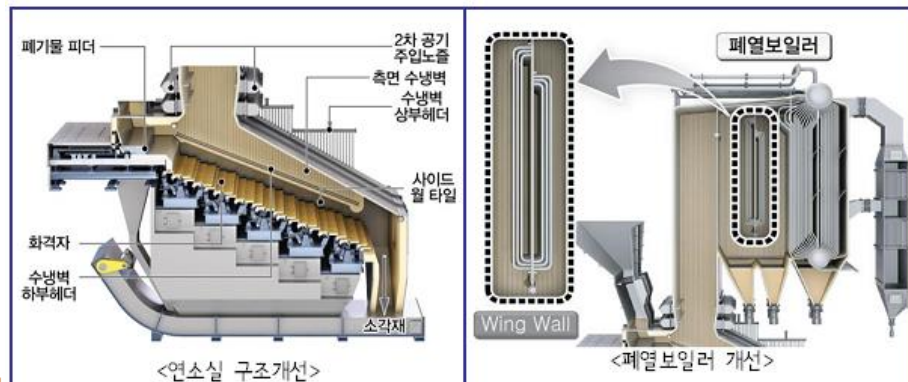
– 내화재 충전 소각로



<http://m.konetic.or.kr>

– 수냉벽 소각로

【성능개선평가 그림】



<http://spp.seoul.go.kr>



3. 연소공정

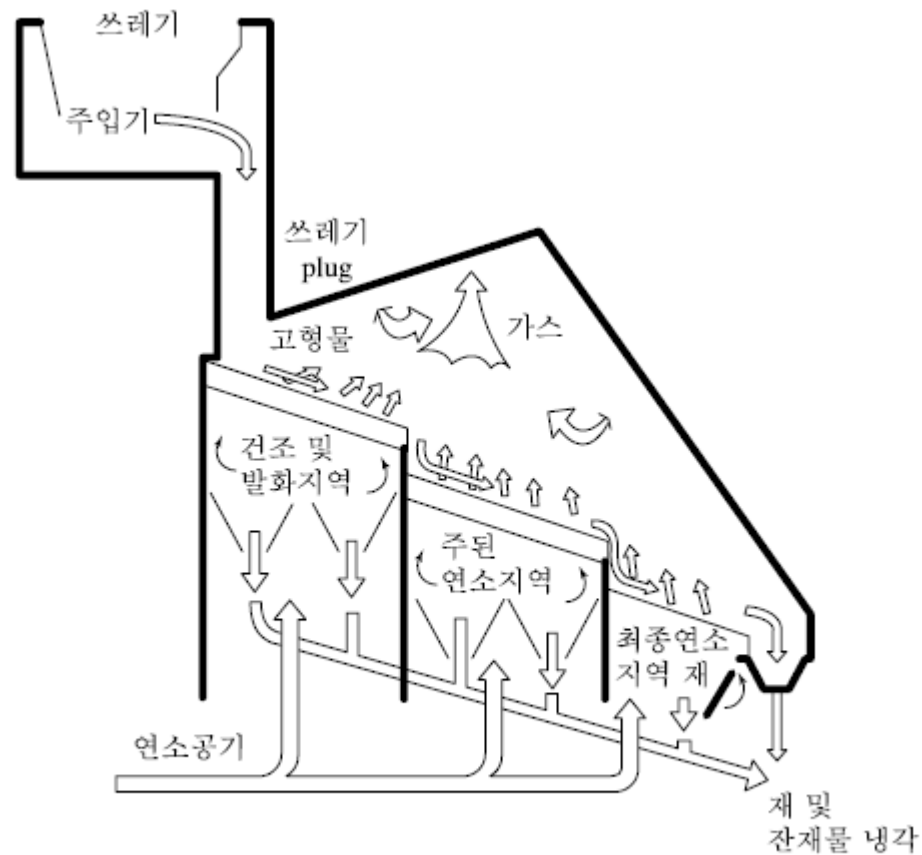


그림 5-5 연소실의 기본적인 구조



3. 연소공정

- 연소실의 크기

- 연소실의 최대 크기는 과거에 15 ton/day의 규모였으나 연속주입을 수행하는 현재에는 250 ~ 350 ton/day의 규모도 있으며, 수냉벽인 경우에는 300 ton/day의 규모까지 생산
- 연소실이 아주 적은 경우에는 입구가 폐쇄될 가능성이 있으며, 또한 폐기물이 휘발되어 연소될 여유없이 그대로 외부로 배출되어 대기오염 문제를 유발
- 또한 연소실이 너무 크면 연소 효율이 저하
- 운전문제와 시설비를 고려할 때에 연소실의 최소 규모는 60 ton/day 가량으로 고장시를 고려하여 2개가 있어야 하므로 최소한 폐기물의 생산량이 120 ton/day 이상인 지역에 연소기를 설치



3. 연소공정

- 화상부하율

- 폐기물을 연속적으로 공급하여 화층을 형성하는 영역을 화상이라고 하며 소각로의 구조, 화상의 종류, 피소각물의 성상, 통풍방법에 따라 차이 발생

- $$\text{화상부하율 (kg/m}^2 \cdot \text{hr)} = \frac{\text{연소량 (kg/hr)}}{\text{화상넓이 (m}^2\text{)}}$$

- 화상부하율이 크면 로내 온도저하로 불완전 연소를 초래하므로 연소율이 떨어지므로 화상부하율을 약간 작게 하는 것이 연소효율의 안정성이 있음

- 동일한 소각물에 대하여 화상부하율이 높은 소각로가 Compact하고 경제성이 있음



3. 연소공정

- 열부하율

- 열부하가 과다하면 국부적인 과열에 의한 로 손상 및 불완전 연소를 야기
- 보조 연료는 소각물의 저위발열량이 낮아 적정연소온도 유지가 어려울 때 사용되며 특히 가연성 휘발분이 적고 착화성이 나쁘거나 난연성 물질의 경우 많이 소요
- 열부하율은 가능한 범위 내에서 크게 하는 것이 연소실 부피를 작게 할 수 있어 경제적이며 연소실 외부로의 열손실을 방지할 수 있는 구조로 설치하여야 적정 열부하율을 유지할 수 있고 보조연료 사용량을 줄일 수 있음



3. 연소공정

– 열부하율 계산식

$$\text{열부하율}(K, \text{kcal}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}) = \frac{Q}{V} = \frac{G(H_{l1} + A \cdot C_a(t_a - t_o) + F \cdot H_{l2})}{V}$$

여기서 G : 소각량(kg/h)

H_h : 소각물의 저위발열량(kcal/kg)

A : 소요공기량(kg/kg, Sm^3/kg)

C_a : 공기의 정압비열(kcal/kg $^{\circ}\text{C}$, 또는 kcal/ $\text{Sm}^3^{\circ}\text{C}$)

t_a : 공급공기온도($^{\circ}\text{C}$)

t_o : 외기공기온도($^{\circ}\text{C}$)

F : 보조 연료 공급량(kg/h, Sm^3/h)

H_{l2} : 보조 연료 저위 발열량(kcal/kg)



3. 연소공정

- 로 본체의 형식

- 폐기물의 이송방향과 연소가스의 흐름방향에 따라 쓰레기의 건조 및 연소상황에 차이가 발생

- ① 역류식

- 폐기물의 이송방향과 연소가스 흐름방향이 반대로 되어 있는 형식으로 연소가스에 의한 방사열이 폐기물에 유효하게 작용하므로 수분이 많고 저위발열량이 낮은 쓰레기에 적합하나 후연소내의 온도저하 및 불완전 연소가 발생

- ② 병류식

- 폐기물의 이송방향과 연소가스의 흐름방향이 같은 형식으로서 수분이 적고 저위발열량이 높은 폐기물에 적합하나 건조대에서의 건조 효율이 저하



<역류식>



<병류식>



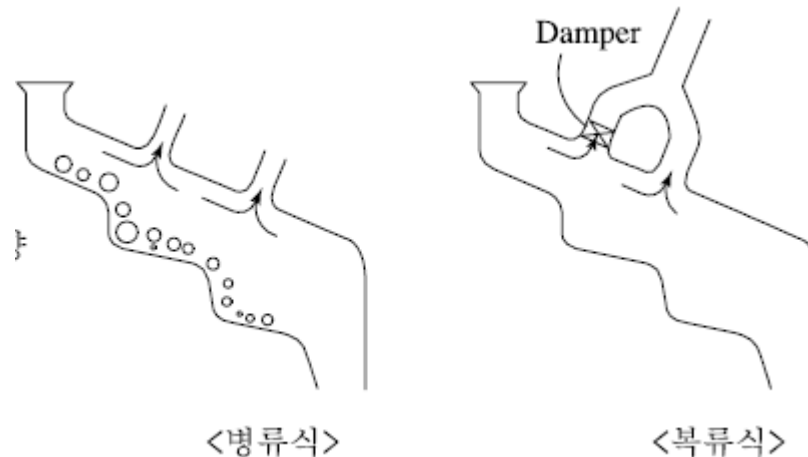
3. 연소공정

— ③ 교류식

- 역류식과 병류식의 중간적인 형식으로 중간정도의 폐기물에 적합

— ④ 복류식

- 2개의 출구를 가지고 있고 댐퍼의 개폐로 역류식, 병류식, 교류식으로 조절할 수 있어 폐기물의 질이나 저위발열량의 변동이 심할 경우에 사용





3. 연소공정

- 주입 공기량

- 연소실 내로는 필요한 산소공급과 혼합, 그리고 연소온도의 저하를 위해서 공기가 주입
- 공기가 연소실에 주입되면 불꽃 근처에서 $1,650^{\circ}\text{C}$ 까지 그 온도가 급격히 상승할 수도 있음.
- 연소실로부터 배출되는 가스의 온도는 $760\sim 1,000^{\circ}\text{C}$ 가량이어야 하며, 굴뚝 유입온도는 540°C 이하
- 대기오염 방지시설을 설치하는 경우에는 그 온도가 $260\sim 370^{\circ}\text{C}$ 의 범위



3. 연소공정

- 재

- 재에는 약 5~15 %의 미연소된 폐기물이 포함
- 냉각 후의 폐수는 경도가 매우 높고 pH가 낮은 부식성의 폐수. 이 폐수는 대체로 침전시킨 후에 다시 냉각수로 재사용
- 연소후의 재의 성질

무게감량비	
건조무게(%)	70
젖은무게(%)	55
부피감소비(%)·젖은 상태기준	90 ~ 95
젖은 재의 밀도, kg/m ³	890
재의 열량 J/g	2,328 ~ 4,656
재중의 연소 가능한 물질(%)	5 ~ 15(건조무게비)



3. 연소공정

- 쓰레기 소각로의 부식 (저온부식)

- 일반적인 보일러에서는 배기가스 중에 SO_3 가 존재하므로 노점이 상승하게 되는데 가스가 저온부의 관벽과 접촉하면 이슬을 맺고 수분에 부식성 가스가 용해되어 산을 형성함에 따라 철재류를 부식시키는 저온부식현상이 발생
- 쓰레기 소각로의 경우 $150^\circ\text{C} \sim 320^\circ\text{C}$ 에서는 부식이 잘 일어나지 않고 노점인 150°C 이하의 온도에서는 저온부식 발생
- 결로로 생성된 수분에 산성가스 등 부식성 가스가 용해되어 이온으로 해리되면서 금속부와 전기화학적 반응에 의하여 금속염을 생성함에 따라 부식이 진행



3. 연소공정

- 쓰레기 소각로의 부식 (고온부식)

- 320℃ 이상에서 가스성분과 소각재 성분의 반응에 의하여 부식이 진행되는데 480℃까지는 염화철 또는 알칼리철 황산염 생성에 의한 부식이고 700℃까지는 염화철 또는 알칼리철 황산염의 분해에 의한 부식으로써 650℃에서 피크를 이루며 700℃ 이상에서는 퇴적물이 완전히 분해되어 기상에 의한 부식속도와 같은 속도

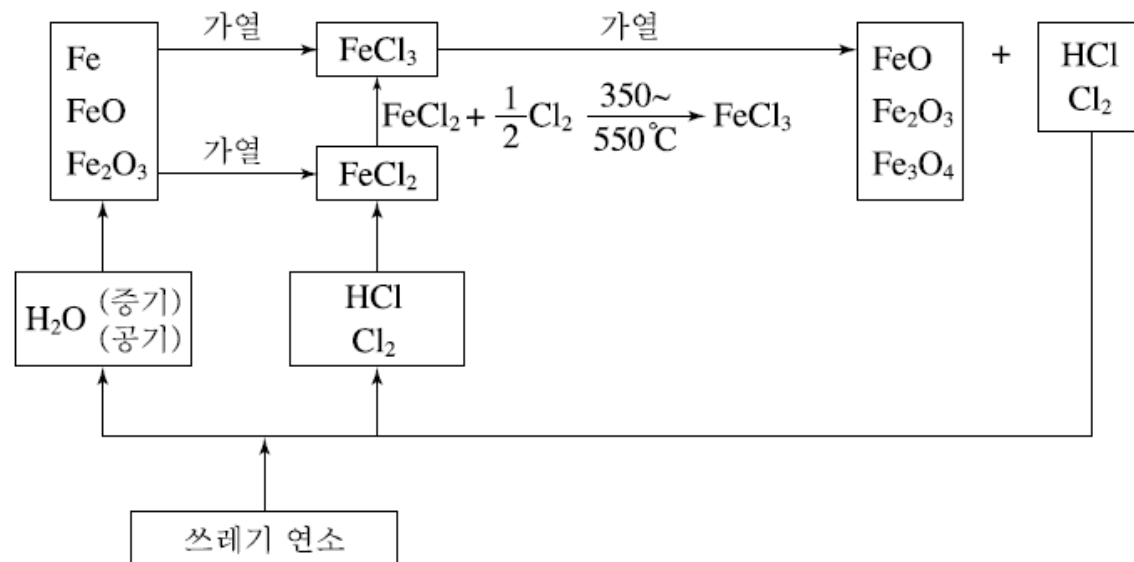
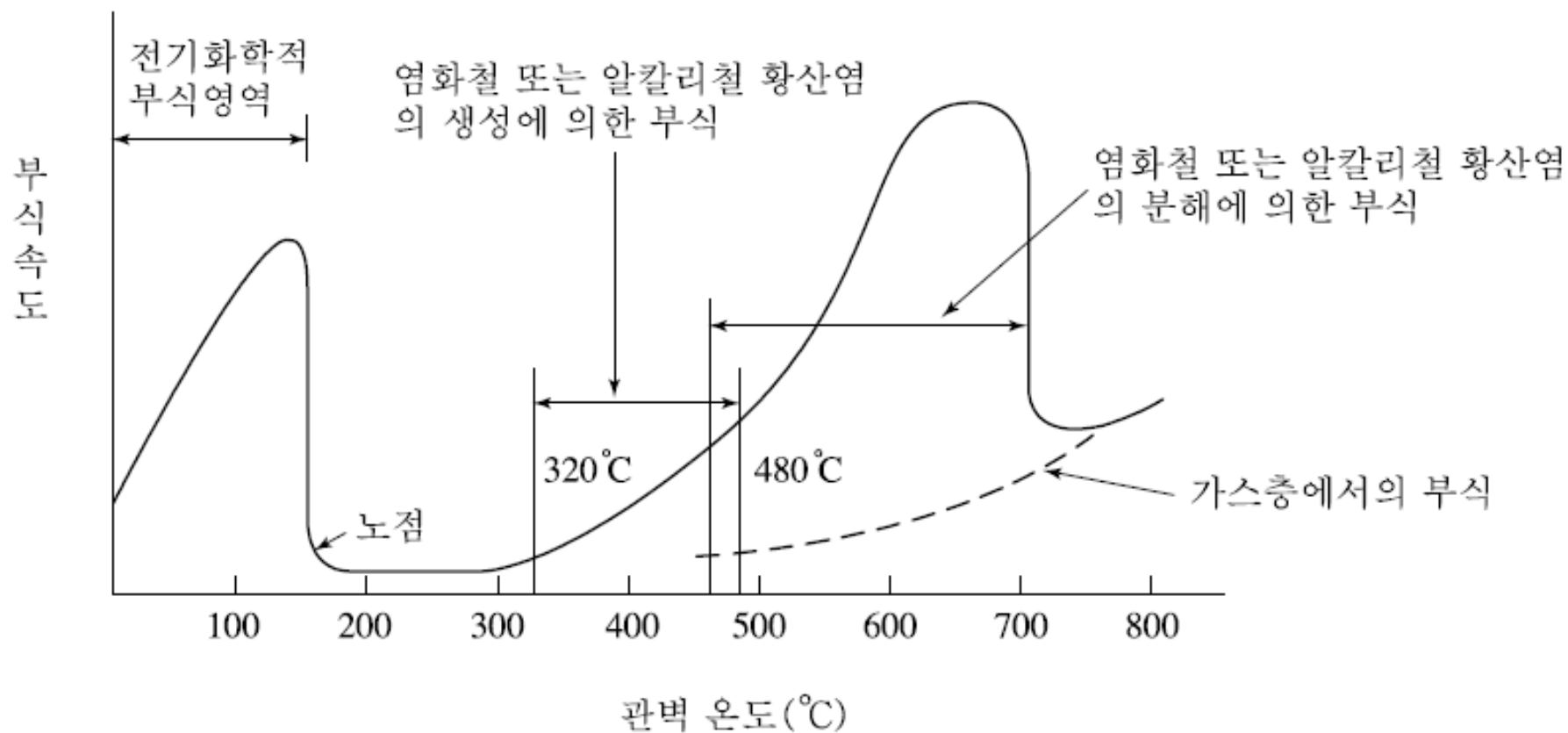


그림 5.8 쓰레기 소각로에 있어서의 고온부식 메카니즘



3. 연소공정

- 쓰레기 소각로에 있어서의 온도와 부식의 관계

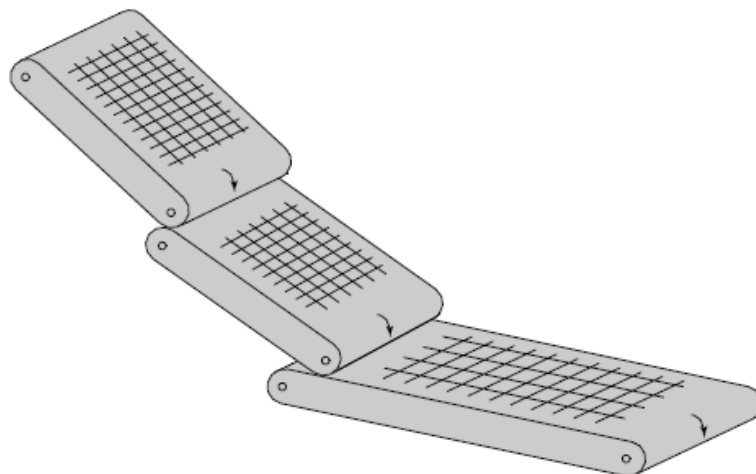




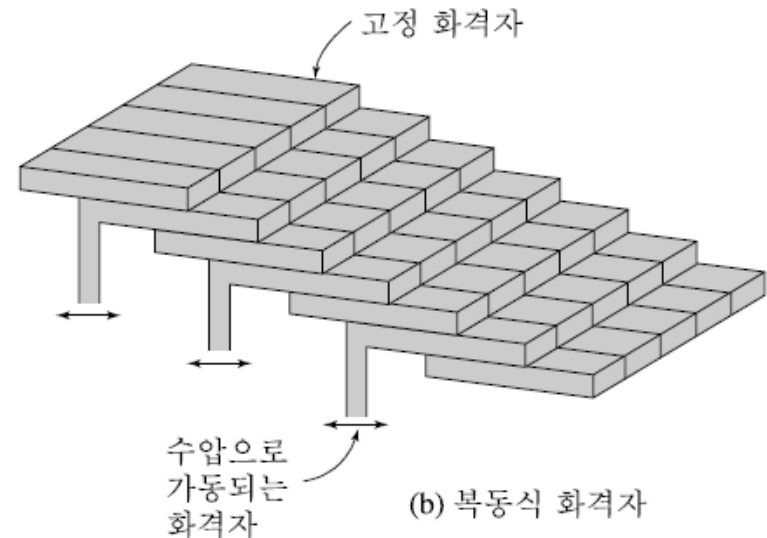
4. 연소기의 종류

• 화격자(Grate or Stoker) 연소기

- 소각로내에 고정화격자 또는 가동화격자를 설치하여 이 위에 소각물을 올려서 태우는 방식으로 재가 쉽게 낙하하여 하부에서 재를 수집
- 대상: 도시 폐기물은 대부분 화격자 연소방식을 채용
- 특징: 슬러지상이나 분체 또는 미세한 폐기물, 그리고 플라스틱과 같이 용융·적하하는 폐기물에 대해서는 적용하기 곤란



(a) 이동식 화격자



(b) 복동식 화격자



4. 연소기의 종류

– 장점

- 연속적인 소각과 배출이 가능
- 경사 Stoker 방식의 경우, 수분이 많은 것이나 발열량이 낮은 것도 어느 정도 소각이 가능
- 전처리시설이 필요하지 않음
- 노내 제어는 유동층에 비하여 용이

– 단점

- 수분이 많은 것이나 플라스틱과 같이 열에 쉽게 용해되는 물질은 화격자가 막힐 염려가 있음
- 체류시간이 길고 교반력이 약하여 국부가열이 발생할 염려가 있음
- 고온 중에서 기계적으로 구동하기 때문에 금속부의 마모손실이 심함
- 플라스틱 등 고열량 폐기물이나 용융성 폐기물 또는 슬러지, 미세한 폐기물의 처리에는 부적합



4. 연소기의 종류

- 고정상 연소기(Fixed Bed Incinerator)

- 대상: 소각로내의 화상위에서 소각물을 태우는 방식으로 화격자로서는 적재가 불가능한 슬러지(sludge), 입자상 물질, 열을 받아 용융해서 착화연소하는 물질의 연소에 적당

- 종류

- 경사식은 소각물의 건조와 연소에 있어서 기계적인 가동부분이 없고 건설비가 싸지만 소각물의 성상이 일정하고 점착성이 없어야 함
- 수평식은 회분이 적은 고분자계 폐기물의 소각에 알맞고 소각로 밖에 설치된 공기송풍기에 의해 연소공기를 균등하게 분산해서 강제 주입



4. 연소기의 종류

– 장점

- ① 플라스틱과 같이 열에 열화, 용해되는 것을 잘 소각시킬 수 있다.
- ② 화격자에 적재가 불가능한 폐기물(슬러지, 입자상 물질)을 소각할 수 있다.

– 단점

- ① 체류시간이 길고 교반력이 약하며 국부가열이 발생할 염려가 있다.
- ② 연소효율이 나쁘고 잔사의 용량이 많아진다.



4. 연소기의 종류

- 회전로(Rotary Kiln)

- 회전하는 원통형 소각로로서 경사진 구조

- 장점

- ① 넓은 범위의 액상, 고상 폐기물을 소각할 수 있다.
- ② 액상이나 고상 폐기물을 따로따로 수용하거나 섞어서 수용할 수 있다.
- ③ 용융상태의 물질에 의하여 방해 받지 않는다.
- ④ 드럼이나 대형 용기를 그대로 집어넣을 수 있다.
- ⑤ 공급장치의 대형 용기를 그대로 집어넣을 수 있다.
- ⑥ 고형 폐기물에 높은 난류도와 공기에 대한 접촉을 크게 할 수 있다.
- ⑦ 폐기물의 소각에 방해됨이 없이 연속적인 재배출이 가능하다.
- ⑧ 습식가스 세정시스템과 함께 사용할 수 있다.
- ⑨ 대체로 예열, 혼합, 파쇄 등 전처리 없이 주입 가능하다.
- ⑩로의 회전속도를 조절함으로써 폐기물의 체류시간을 조절할 수 있다.
- ⑪ 1,400℃ 이상에서 가동할 수 있어서 독성물질의 파괴에 좋다.



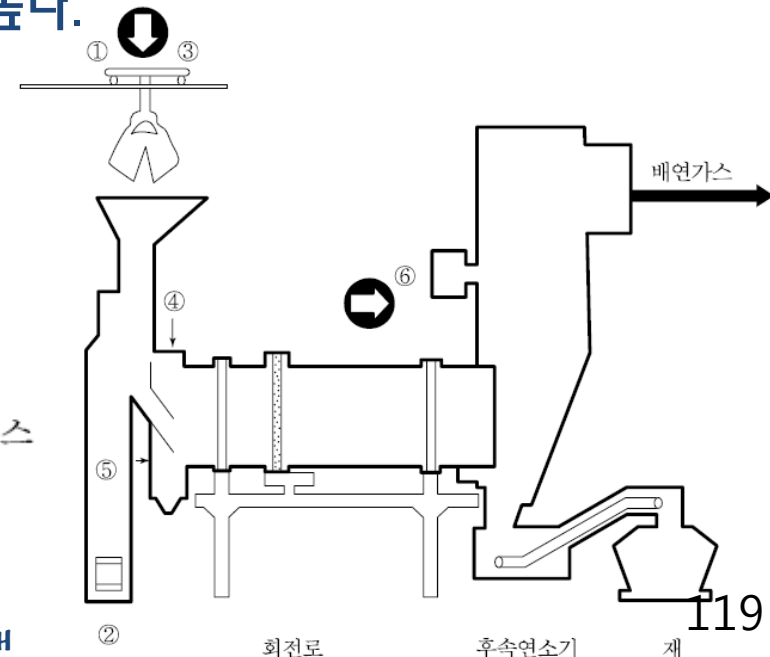
4. 연소기의 종류

– 단점

- ① 설치비가 높다. 이는 특히 처리량이 적을 때 현저하다.
- ② 대형폐기물로 인한 내화재의 파손 때문에 운용에 주의를 요한다.
- ③ 완전연소되기 전에 대기 중으로 부유성 물질이 배출될 수 있다.
- ④ 구형 및 원통형 물질은 완전연소가 끝나기 전에 굴러 떨어질 수 있다.
- ⑤ 로에서의 공기유출이 크므로 종종 대량의 과잉공기가 필요하다.
- ⑥ 대기오염 제어시스템에 분진부하율이 높다.
- ⑦ 비교적 열효율이 낮은 편이다.

① 고형폐기물
③ 슬러지
⑤ 연료용 오일

② 배럴식 충전(Barrel Charging)
④ 생산공정과 탱크로부터의 배기가스





4. 연소기의 종류

- 다단로(Multiple Hearth)

- 내화물을 입힌 가열판, 중앙의 회전축, 일련의 평판상(床)을 구성하는 교반팔(rabble arms)로 구성
- 하수 슬러지는 물론 하수, 타르와 같은 고상, 액상, 기상, 가연성 폐기물의 연소에 사용
- 다단로는 3개의 가동영역
 - ① 건조영역 : 이것은 상부 상(床)영역으로 폐기물의 수분함량이 약 48 %까지 건조된다.
 - ② 연소, 탈취영역 : 온도가 750 ~ 1,000 °C 범위의 영역이며 연소와 탈취가 일어난다.
 - ③ 냉각영역 : 여기에서는 뜨거운 재가 유입공기에 의해 냉각된다. 배출가스는 250~600 °C이며 소각재는 거의 불활성이다.



4. 연소기의 종류

— 장점

- ① 체류시간이 기므로 특히 휘발성이 적은 폐기물의 연소에 유리하다.
- ② 다량의 수분이 증발되므로 수분함량이 높은 폐기물도 연소가 가능하다.
- ③ 물리, 화학적 성분이 다른 각종 폐기물을 처리할 수 있다.
- ④ 천연가스, 변형가스, 프로판, 뷰테인, 오일, 석탄가루, 폐유, 용매 등 다양한 연료를 사용할 수 있다.
- ⑤ 많은 연소영역이 있으므로 연소효율을 높일 수 있다.
- ⑥ 국부 연소 및 클링커(일부가 융해하여 전체가 괴상소결물로 된 덩어리) 생성을 방지할 수 있다.



4. 연소기의 종류

– 단점

- ① 체류시간이 길기 때문에 온도반응이 더디다.
- ② 늦은 온도반응 때문에 보조연료사용을 조절하기가 어렵다.
- ③ 움직이는 부분(교반팔, 중심축)이 있으므로 유지비가 높다.
- ④ 빈번한 유입방해와 과도한 수분함량에 의하여 열적 충격이 쉽게 발생하고 내화물이나 상에 손상을 초래한다.
- ⑤ 유해폐기물의 완전분해를 위해서는 2차 연소실이 필요하다.
- ⑥ 용융성 재를 포함한 폐기물이나 높은 분해온도를 가진 것, 불규칙적인 대형 폐기물의 처리에는 부적합하다.
- ⑦ 분진발생율이 높다.



4. 연소기의 종류

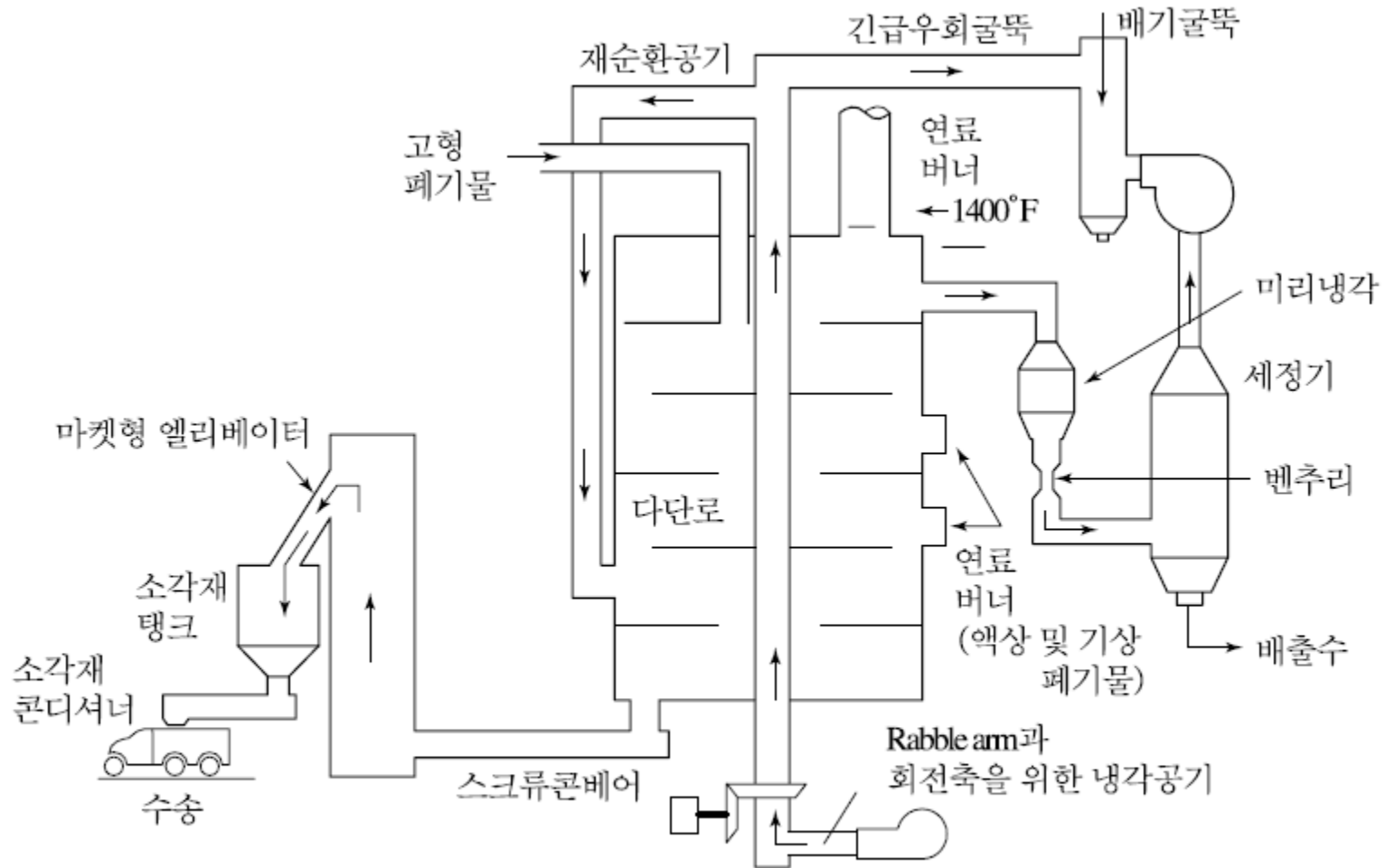


그림 5-11 다단로의 모식도



4. 연소기의 종류

- 유동층 소각로(Fluidized Bed Incinerator)
 - 유동층 소각로는 밑에서 가스를 주입하여 불활성층(모래)을 띄운 후 이를 가열시키고 상부에서 폐기물을 주입하여 태우는 것
 - 상의 온도는 $760\sim 870^{\circ}\text{C}$ 이고 불활성층이 미리 가열된 상태에서 태우기 때문에 폐기물은 순간적으로 연소하고 열효율이 좋음
 - 폐기물을 주입하기 전에 파쇄 필요
 - 일반적인 소각로로 소각이 어려운 난연성 폐기물 소각에 적합. 특히 하수슬러지 및 폐유, 폐윤활유

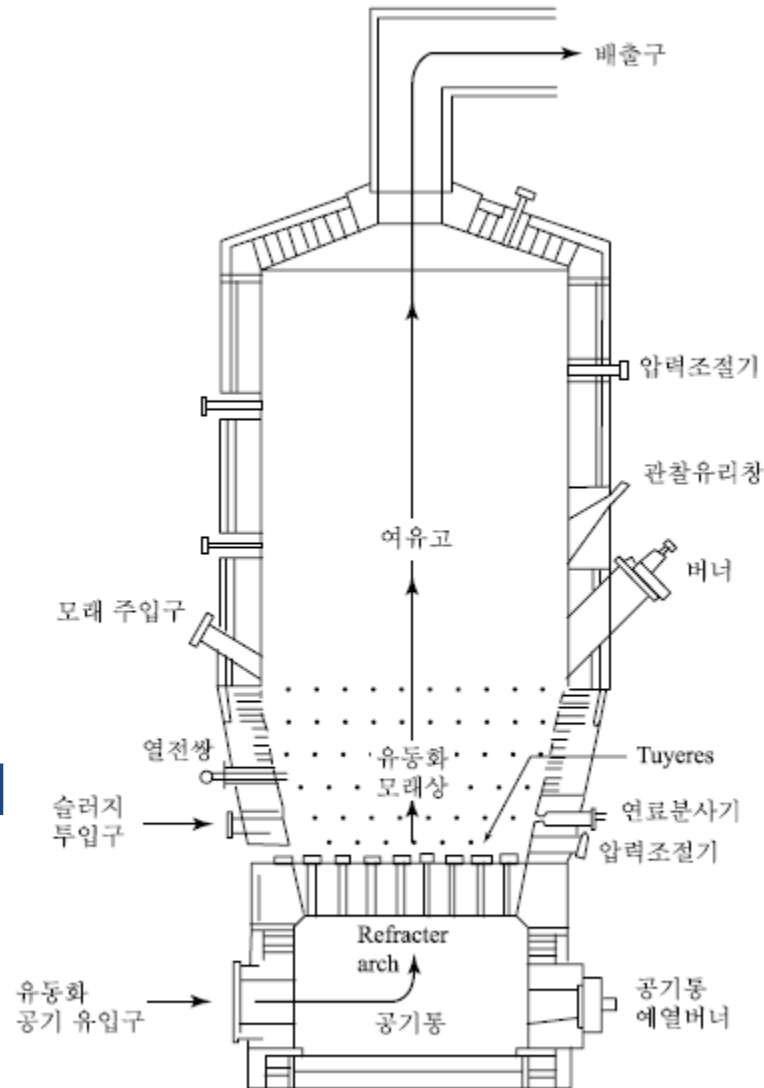


그림 5-12 유동층 소각로



4. 연소기의 종류

— 장점

- ① 유동매체의 열용량이 커서 액상, 기상 및 고형폐기물의 전소 및 혼소가 가능하다.
- ② 반응시간이 빨라 소각시간이 짧다(로 부하율이 높다).
- ③ 연소효율이 높아 미연소분이 배출이 적고 2차 연소실이 불필요하다.
- ④ 가스의 온도가 낮고 과잉공기량이 낮다. 따라서 NO_x도 적게 배출된다.
- ⑤ 기계적 구동부분이 적어 고장율이 낮다.
- ⑥ 로내 온도의 자동제어로 열회수가 용이하다.
- ⑦ 유동매체의 축열량이 높은 관계로 단기간 정지 후 가동시에 보조연료 사용없이 정상가동이 가능하다. 야간에 운전정지한 후 이튿날 가동해도 온도는 50℃ 밖에 내려가지 않는다.



4. 연소기의 종류

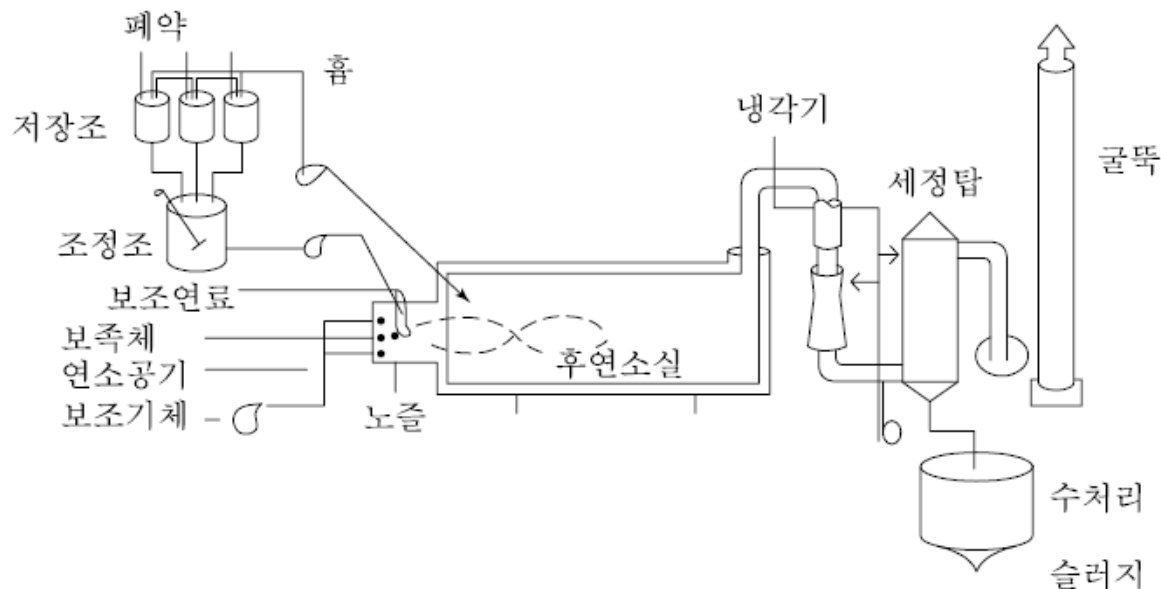
– 단점

- ① 床으로부터 슬러지의 분리가 어렵다.
- ② 투입이나 유동화를 위해 파쇄가 필요하다.
- ③ 유동상의 마련과 정비, 유동매체의 손실로 인한 보충이 필요하다.
- ④ 상재료의 용융을 막기 위해 연소온도는 816 °C를 초과할 수 없다.
- ⑤ 운전비, 특히 동력비가 높다.



4. 연소기의 종류

- 액체 주입형 연소기(liquid injection incinerator)
 - 액상 폐기물의 연소에 많이 이용
 - 연소기의 핵심은 미세분사 장치인 노즐버너
 - 회전로식 연소기와 그 원리는 유사하나 액체 주입형 연소기에는 소각재의 배출설비가 없으므로 회분함량이 낮은 액상폐기물에만 사용이 가능





4. 연소기의 종류

– 장점

- ① 광범위한 종류의 액상폐기물을 연소할 수 있다.
- ② 대기오염 방지시설 이외에도 소각재의 처리설비가 필요없다.
- ③ 구동장치가 없어서 고장이 적다.
- ④ 운영비가 적다.
- ⑤ 기술개발이 잘 되어 있다.

– 단점

- ① 버너 노즐을 통해 액체를 미립화하여야 한다.
- ② 완전히 연소시켜 주어야 하며 내화물의 파손을 막아주어야 한다.
- ③ 고형분의 농도가 높으면 버너가 막히기 쉽다.
- ④ 대량 처리가 불가능하다.



5. 폐열회수 및 이용설비

• 폐열회수 및 이용설비

- 폐기물을 소각할 경우에는 이들의 발열량에 해당하는 양의 열량이 발생하므로 배기가스의 온도가 올라가게 되어 이를 냉각시켜 배출
- 배기가스 처리설비의 장치를 보호하고 외부로의 열오염(thermal pollution)을 줄이기 위함
- 보통 배기가스의 온도를 250~300 °C로 정함. 하한온도는 배출가스에 의한 저온 부식이 발생하지 않는 온도이며 상한온도는 분진의 부착에 의한 고온부식을 억제할 수 있는 온도
- 냉각설비에는 ① 폐열 보일러식 ② 물 분사식 ③ 공기 혼입식 ④ 간접공냉식이 있음



6. 대기오염제어 설비

- 대기오염 물질의 발생

- 폐기물 중에 포함된 유황이나 염소성분은 소각하면 각각 황산화물(SO_2)과 염화수소(HCl)가 발생
- 연소과정에서 폐기물과 연소공기 중의 질소는 고온조건에서 질소산화물(NO_2)로 되어서 배출가스 중에 포함되어 밖으로 배출
- 이외에도 다이옥신류나 수은, 카드뮴 같은 중금속류도 섞여 배출될 가능성도 있음

- 불완전연소분

- 소각은 가연성 성분만을 연소시키므로 불연소분이 타지 않고 남게 되고 가연성 성분 가운데도 불완전연소분은 남아 재가 발생
- 재에는 바닥재(bottom ash)와 비산재(fly ash)가 있어 이를 완벽하게 매립처분



6. 대기오염제어 설비

• 배기가스 처리설비

– 크게 먼지제거설비와 유해가스 제거설비가 있음

• 먼지제거설비

원 리	설비명칭	처리입경 (μm)	압력손실 (mmH_2O)	먼지제거율 (%)	시설비	운전비
중 력 관성력	침강식	1,000 ~ 50	10 ~ 15	40 ~ 60	소	소
	충돌식	100 ~ 10	30 ~ 70	50 ~ 70	소	소
	반전식	-	-	-		
	로우버식	-	-	-		
	다열충돌식	-	-	-		
원심력 세 정	사이클론	100 ~ 3	50 ~ 150	85 ~ 95	중	중
	Ventury	-	-	-		
	Scrubber	100 ~ 0.1	300 ~ 380	80 ~ 95	중	대
여 과	Bag Filter	20 ~ 0.1	100 ~ 200	90 ~ 99	대	대
	Cottrell	20 ~ 0.05	10 ~ 20	80 ~ 99.9	대	중
전기식먼지 제거장치						



6. 대기오염제어 설비

- 통상 평균 입자크기가 20~30 μm 정되며, 10 μm 이상의 분진이 50~80% 정도
- 집진 장치의 종류: 집진장치는 중력 집진 장치, 관성력 집진 장치, 원심력 집진장치, 전기집진장치, 여과집진장치 등 다양한 종류가 있으나 중력, 관성력, 원심력 집진기는 처리가스의 출구 먼지 농도가 비교적 높으므로 배출 허용기준 이하의 농도로 낮추기 어렵기 때문에 실질적인 집진기로 여과집진기 및 전기집진기를 일반적으로 사용
- 전기집진기: 전기 집진기는 먼지를 코로나 방전에 의해 하전시킨 후 쿨통력을 이용하여 집진하는 방식
- 여과집진기: 필터에 가스를 통과시켜 먼지를 분리하는 방식



6. 대기오염제어 설비

– 여과 집진기

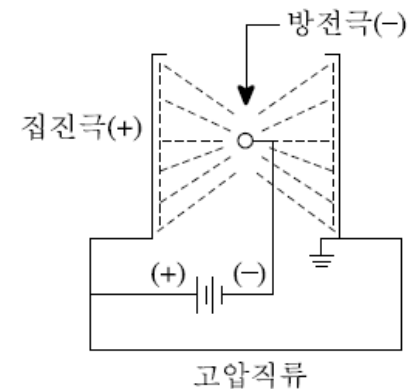
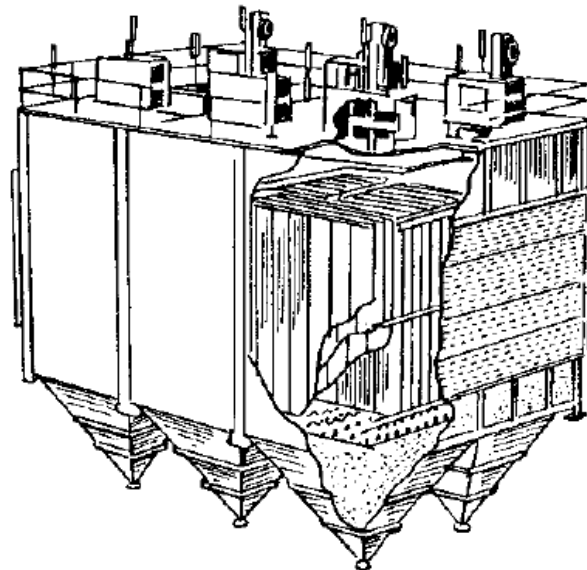
- 여과 집진기는 배출가스가 통과하는 유선상에 여재를 설치하여 차단, 관성충돌 및 확산 메커니즘에 의해 배출가스 중 입자물질을 분리 및 포집
- 집진 성능에 영향을 주는 주요 인자
 - 여과 속도
 - 여과포의 특성: 여과 집진기에 사용되는 여과포의 선정에 있어서는 처리가스의 성상 및 탈착방식에 따라 내열성, 내산성, 내알칼리성, 흡습성 및 강도 등을 고려하여야 하며, 실제 운전에서 사용된 여과포의 특성에 따라 집진율에 영향
 - 압력손실: 유속에 비례하여 압력 손실은 증가



6. 대기오염제어 설비

– 전기집진기

- 원리: 직류 고전압에 의해 발생된 코로나 방전을 이용하여 전계를 형성하고 입자에 전하를 부여한 후 대전된 입자가 정전기력에 의해 가스로부터 분진 입자를 분리 및 포집한다. 전기집진기 내의 입자에 작용하는 전기력은 대전입자의 하전에 의한 쿨롱력, 전기경도에 의한 힘, 입자간의 흡집력, 전기풍에 의한 힘 등이 있으나 실제로는 입자 하전에 의한 유인력이 주요 기전이다





6. 대기오염제어 설비

- 집진성능에 영향을 주는 주요 인자
 - 먼지의 전기 비저항
 - 가스 중 수분량 – 일반적으로 가스 중 수분함량이 증가할수록 입자의 전기 비저항이 낮아져 집진 효율이 증가
 - 처리가스량 – 처리가스량이 증가하면 가스의 유속이 증가하게 되고, 가스 유속이 어느 정도 이상으로 증가하면 먼지 입자의 재비산으로 인하여 집진효율 현저히 감소. 반면에 가스 유속이 급격히 저하되면 집진기 내에서 가스 유속의 분포가 불균일하게 되어 집진 효율 감소.
 - 먼지의 입자 직경- 먼지의 입자 직경이 작으면 집진극으로 향하는 입자의 이동속도가 느려져 집진 효율은 감소. 먼지의 입자 직경이 작을 경우 먼지입자의 비표면적이 증가하게 되고 이로 인해 먼지 입자의 대전량이 증가하므로 집진극의 부착된 먼지를 용이하게 제거하는데 한계가 생기고 이로 인해 방전 전류가 감소하여 집진효율 저하.
 - 먼지 농도- 가스 중 먼지 농도가 크면 먼지 입자의 비표면적이 증가하여 공간 전하효과가 크게 되므로 방전 전류가 억제 되며, 집진율은 저하된다.



6. 대기오염제어 설비

– 전기집진기와 여과집진기의 비교

㉠ 전기집진기와 여과집진기의 비교

구 분		전기집진기	여과집진기
특 징		㉠ 집진율 : 90~99.9% ㉡ 온도 : 350℃까지 사용 ㉢ 유지 보수가 용이하다. ㉣ 적용온도 범위가 넓다. ㉤ 가스성상 변화에 대한 적응성이 낮다. ㉥ 250~400℃에서 PCDD의 재합성 가능	㉠ 집진율 : 90~99% ㉡ 온도 : 200℃ 이하에서 사용 ㉢ 유지 보수가 용이하지 못하다. ㉣ 적용온도 범위가 좁다. ㉤ 반건식 반응탑과 조합할 경우 염화수소(HCl) 등의 유해가스를 제거할 수 있다.
경제성	건설비	1.2(비율)	1.0(비율)
	운전비	1.0(비율)	1.2(비율)
장 점		㉠ 가동부가 적고, 압력손실이 낮다. ㉡ 유지 보수가 용이하다. ㉢ 운전비가 적게 든다.	㉠ 탄소섬유 등 양도체 먼지의 처리 가능 ㉡ 2차 유해가스(다이옥신 등)의 제거효과 ㉢ 설치비가 적게 든다.
단 점		㉠ 설치비가 많이 든다. ㉡ 가스성상 변화에 대한 적응성이 낮다. ㉢ 탄소섬유 등 양도체 먼지의 처리 불가	㉠ 압력손실이 높고, 운전비가 많이 든다. ㉡ 수분이 많은 가스에 부적당하다. ㉢ 온도조건에 제약을 받는다.



6. 대기오염제어 설비

– 사이클론(원심력식 먼지제거장치)

- 원통상의 장치에 분진을 함유한 가스를 접선 방향으로 또는 상부에서 도입관을 통하여 불어 넣어 원통 내부에 회전흐름(와류)을 일으킨다. 입자는 소용돌이에 의한 원심력에 의해 장치벽에 충돌하고 속도를 잃고 벽을 따라 낙하 침강하여 저부에서 배출된다. 가스는 와류로 하부에 도달한 후에는 회전운동을 잃고 상부로 배출
- 싸이크로 집진장치는 원심력 집진의 한계치인 $8\sim 10\mu\text{m}$ 의 입자까지만 포집된다. 싸이크론의 포집효율은 내통 직경이 작을수록 크기 때문에 병렬로 다시 배치하는 멀티크론을 많이 사용. 엄격한 배출 기준을 만족 시키기 위해서는 부적합

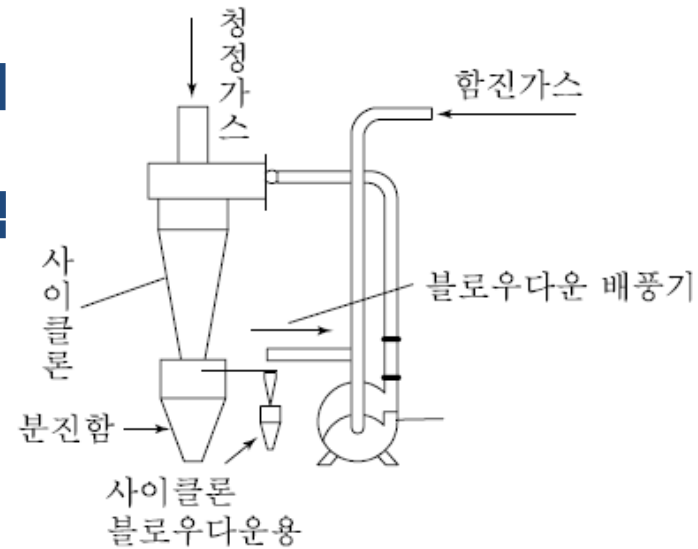


그림 5-32 Blow-Down용 사이클론



6. 대기오염제어 설비

• 유해가스 제거설비

– 염화수소(HCl)와 황산화물(SO_x)의 제거방법

구 분		방 식	사용약품	생산물(배출물)
화 학 흡 수	건식법	분체분사법 이동층법 필터법	Ca, Mg계 분말 ; CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ CaO, MgO, CaMg · (CO ₃) ₂	생성염, 미반응 약품의 건조분체
	반건식법	슬러리 분무탑 이동층법	Ca계 현탁액 Ca(OH) ₂	생성염, 미반응 약품의 건조분체
	습식법	스프레이탑 방식 충전탑 방식 벤추리 방식	NaOH 용액 Ca계 현탁액	생성염 용액
물리 흡수	습 식	물에 의한 흡수	물	폐수(산)
	건 식	활성탄 흡착	활성탄	폐활성탄



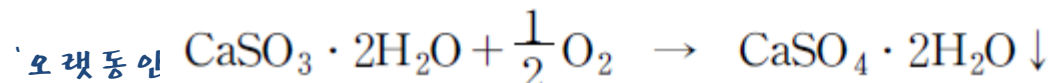
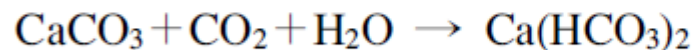
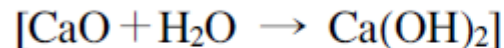
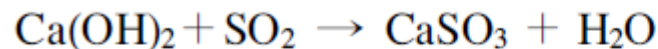
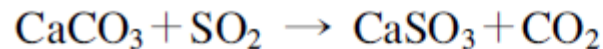
6. 대기오염제어 설비

1) 습식흡수법

- 흡수제를 물에 용해 또는 현탁시켜서 배기가스와 접촉해 탈황하며 배기가스의 온도는 저하하나 탈황률은 높음

① 석회법

- 석회석[CaCO₃] 또는 소석회[Ca(OH)₂]의 현탁액으로 배기가스를 세정하여 SO₂를 흡수 제거
- 배기가스가 50℃로 저하되기 쉬우므로 항상 온도유지는 120 ~ 150℃로 하고 pH 6.5~7.0으로 유지. 배연의 온도가 노점(55~60℃)까지 저하하여 백연이 생기는 결점





6. 대기오염제어 설비

- 장점

- 흡수제가 수용액이기 때문에 SO_2 와 잘 반응하며 흡수효율이 좋다.

- 단점

- 흡수탑 내에 결정의 퇴적과 배기가스의 냉각 등의 문제가 있다.
- 흡수탑 등을 부식시키며 탑 내에 심한 압력강하가 발생된다.

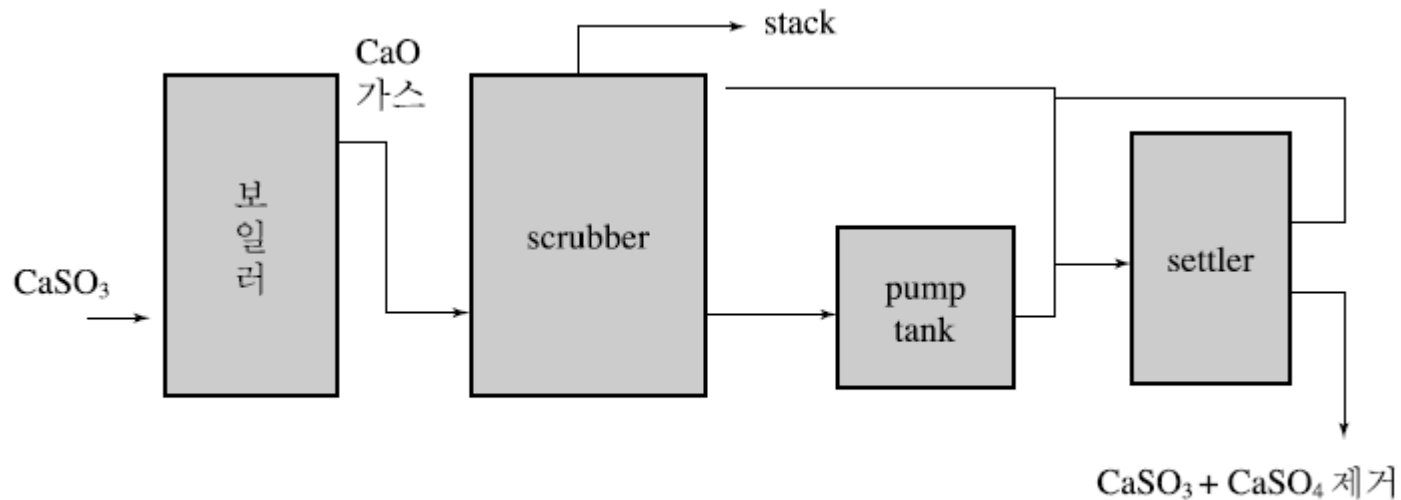
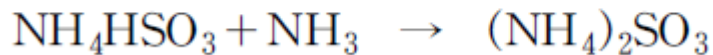
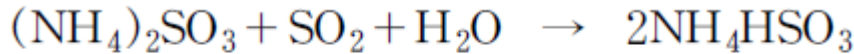


그림 5-28 습식 굴뚝 배기가스의 공정도(SO_2 제거)



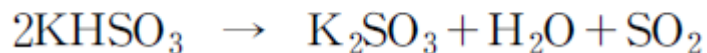
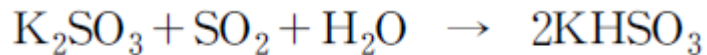
6. 대기오염제어 설비

② 암모니아 수용액을 흡수제로 이용하는 법



③ 아황산칼륨법

- K_2SO_3 수용액을 배연에 접촉시키면 SO_2 를 흡수하여 아황산수소칼륨 (KHSO_3)으로 됨
- 흡수 후의 용액을 stripper(방산탑)에 옮겨서 가열하면 SO_2 가 분리되고 부산물로서 회수하고, 동시에 K_2SO_3 가 재생되기 때문에 이를 재사용





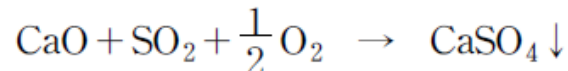
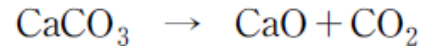
6. 대기오염제어 설비

2) 건식흡수법

- 건식 흡수법에서는 흡수제의 재생공정에 문제가 많고 시험단계를 거치지 않는 단점

① 석회흡수법

- CaCO_3 의 분말을 $1,000^\circ\text{C}$ 이상의 보일러 연소실에 직접 혼입해 열분해에 의하여 SO_2 를 황산칼슘(CaSO_4)으로서 먼지제거장치로 채취



- 장점

- i) 석회석 값이 저렴하고 재생시 부대시설이 필요 없다.
- ii) 배기가스의 온도가 떨어지지 않는다.
- iii) 소규모 및 노후 보일러에 많이 사용된다.

- 단점

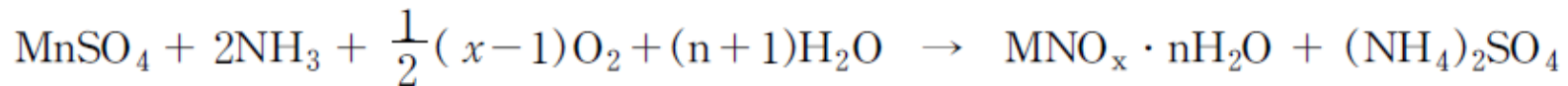
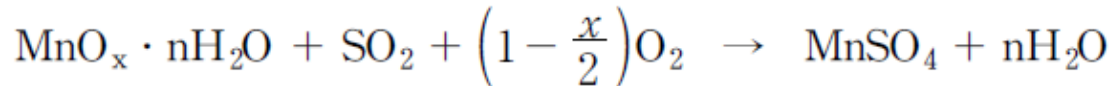
- i) 석회석과 배기가스 중 회분이 응결해 압력손실과 열전달을 감소시킨다.
- ii) 미반응 석회석분말이 전기먼지제거장치의 효율을 감소시킨다.
- iii) 연소로 내에서 짧은 접촉시간과 SO_2 가 석회석 분말표면에 침투하기가 어려워 제거 효율이 아주 낮다.



6. 대기오염제어 설비

② 활성망가니즈법

- 활성산화망가니즈($\text{MnO}_x \cdot n\text{H}_2\text{O}$)의 분말을 흡수탑 내에서 기류상태로 수송해 SO_2 와 O_2 를 반응하여 황산망가니즈(MnSO_4)을 생성



- 생성한 MnSO_4 에 암모니아 및 공기 중의 산소를 반응시키면 활성산화망가니즈가재생된다. 이때 부산물로서 황산암모늄 $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 이 얻어짐



6. 대기오염제어 설비

- 흡착장치

- 고정층 흡착장치

- 입상의 흡착제를 충전한 층에 가스를 통하여 흡착하는 방식

- 이동층 흡착장치

- 이동층 흡착의 대표적인 조작용이 hypersorption이고, 그 장치를 hypersorber라 한다. 활성탄(흡착제)은 탑상부에서 공급되고, 탑 가운데에서 냉각, 흡착, 농축, 탈착의 각 조작용을 받은 후에 탑 밑으로 배출 후 다시 꼭대기로 돌려짐

- 유동층 흡착장치

- 고정층과 이동층을 병용한 방식



6. 대기오염제어 설비

• 흡착장치

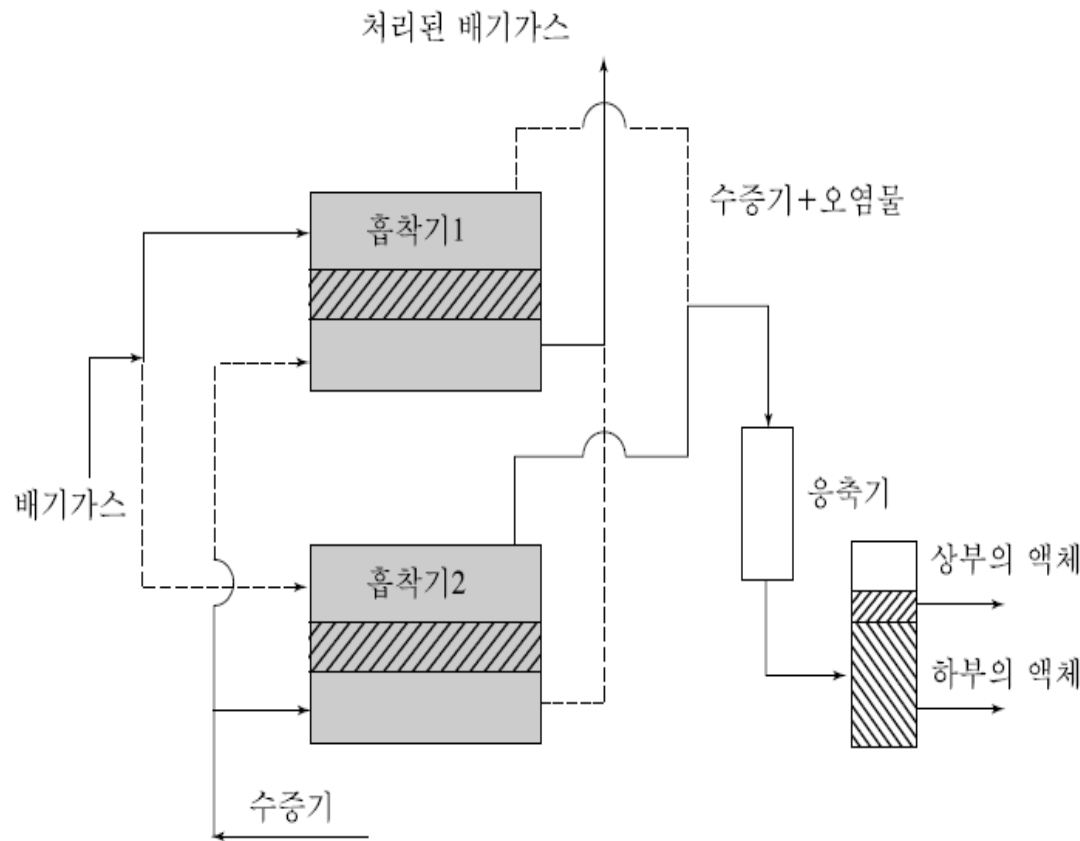


그림 5-29 고정층 흡착장치

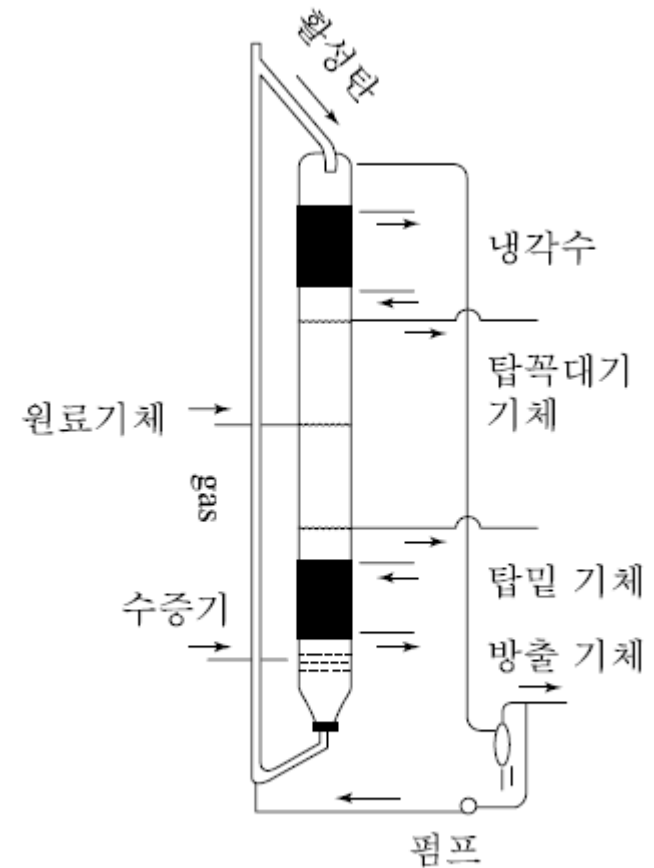


그림 5-30 Hypersorber



6. 대기오염제어 설비

- 흡착제

- ① 활성탄 : 표넓이가 $10^5 \sim 10^6 \text{ m}^2/\text{kg}$ 으로 대단히 넓으며 가장 많이 사용
- ② 활성 알루미나 : 물과 유기물을 잘 흡착하며 $175 \sim 325 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 가열해 재사용
- ③ 실리카겔 : $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 이하에서도 물과 유기물을 잘 흡수
- ④ 합성 제올라이트 : 극성이 서로 다른 물질이나 용해도가 다른 탄화수소의 흡착이 가능



6. 대기오염제어 설비

- 황산화물의 발생방지법

- 저황 함유연료의 사용

- 연료 중에 함유된 S성분은 연소에 의하여 SO_2 로 대부분 발생

- 높은 굴뚝으로 배출

- 지표면에 착지하는 농도를 감소

- 대체 연료의 전환

- 도시가스인 LNG 또는 수력발전과 태양열 등으로 대체해 사용

- 촉매산화법

- 실리카겔 등의 담체에 V_2O_5 , 황산칼륨의 촉매층을 사용하여 아황산가스를 접촉 산화시켜서 무수황산으로서 제거

- 흡착법

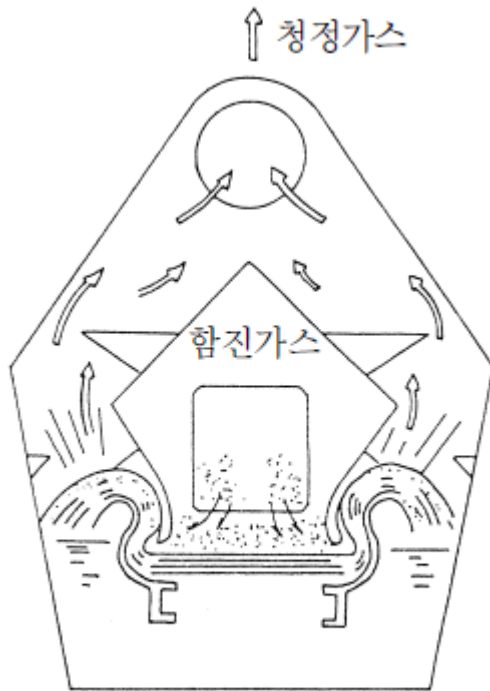
- 배기가스를 약 100°C 에서 활성탄층을 통하면 아황산가스와 산소가 활성탄에 흡착



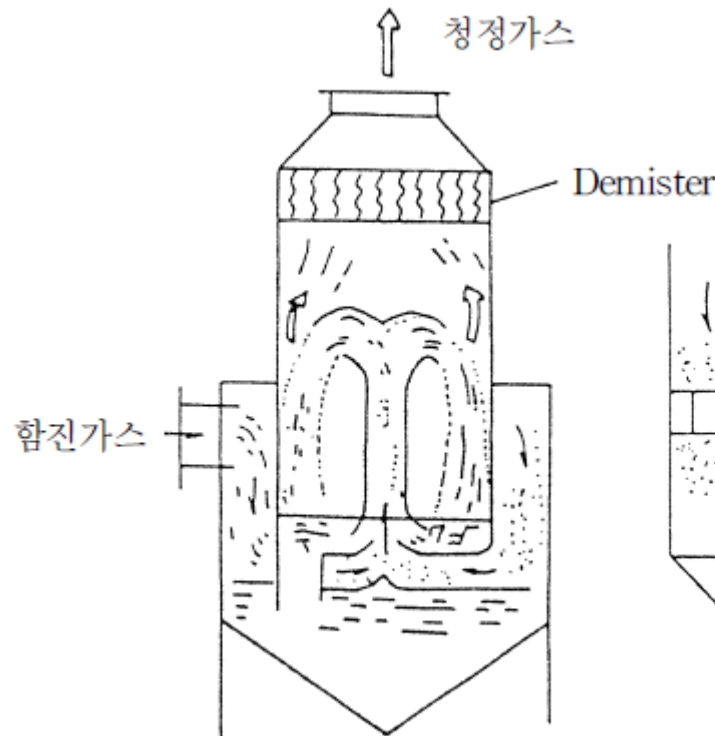
6. 대기오염제어 설비

• 스크러버(Scrubber)

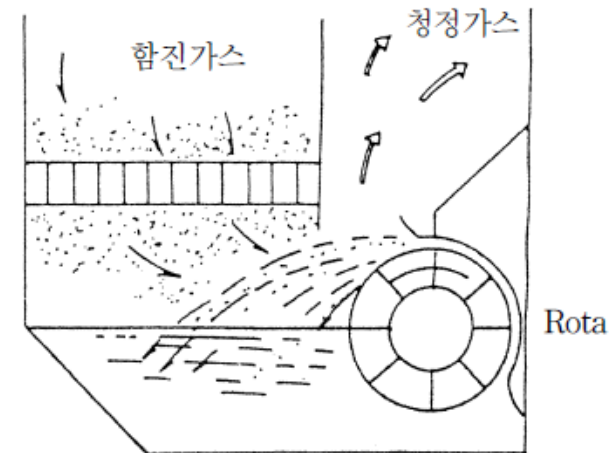
- 액적 또는 액막을 형성시켜 흡진 가스와의 접촉에 의해 오염물질을 제거시키는 장치로서 분진 및 유해가스의 동시 처리가 가능



(a) S형 임페러형



(c) 가스분출형



(d) Rotor형



7. 소각로내 공해물질의 생성과 재어

- 소각로에서의 2차 오염물질
 - 입자상 물질과 가스상 물질로 분류
 - 소각에 의해 이산화탄소와 물 외에 부수적으로 발생하는 물질 중에 공해 물질의 대상으로 분류되는 것 독성 유기물(PCDD, PCDF 등의 다쇄형 유기물), 입자(부유분진), 질소산화물, 희귀 금속 그리고 산성 가스 등이 있음
 - 이들 공해물질의 발생량은 극히 미량이지만 인간보건. 위생에 해를 끼칠 수 있기 때문에 규제의 대상으로 인정
 - 특히, 배기가스와 고형 잔류폐기물 등에서 검출되는 다이옥신(Dioxin)과 퓨란(Furan)



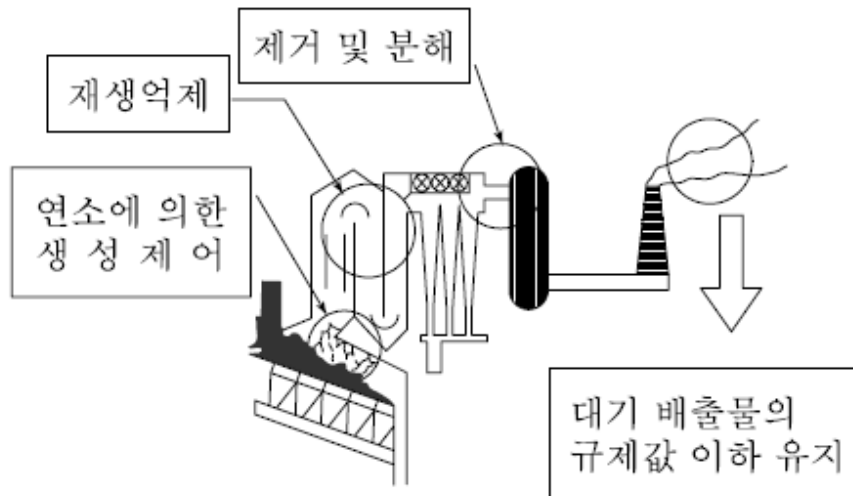
7. 소각로내 공해물질의 생성과 제어

• 저공해화방안

– 3단계 소각 개념의 도입

- ① 소각로 내에서 연소에 의한 생성 제어
- ② 굴뚝에서 재생 억제
- ③ 굴뚝으로 배출전 연소 후처리 설비에 의한 제거

– 저공해 소각로 개념도

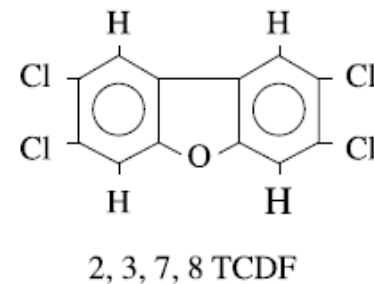
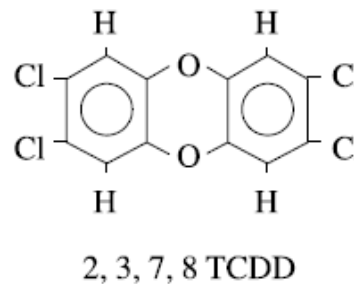
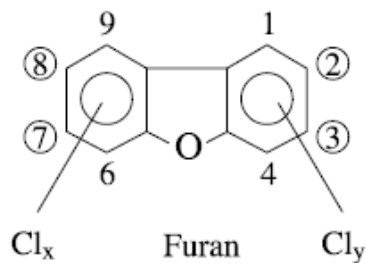
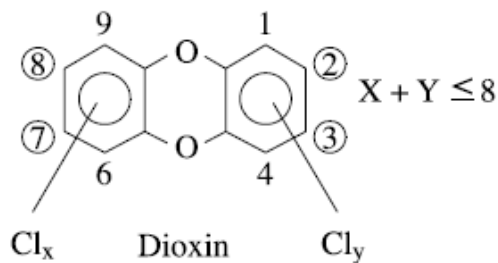




7. 소각로내 공해물질의 생성과 재어

• 다이옥신?

- polychlorinated dibenzo-p-dioxins(이하 PCDDs)와 polychlorinated dibenzofurans(이하 PCDFs)를 총체적으로 지칭
- 다이옥신의 이성체는 75개이고, 퓨란은 135개
- 양은 미량이지만 독성이 매우 높음
- 독성 유기물의 총량은 각각 함량과 등가계수를 곱하여 2, 3, 7, 8 TCDD의 양으로 환산하여 통칭하는 누계환산

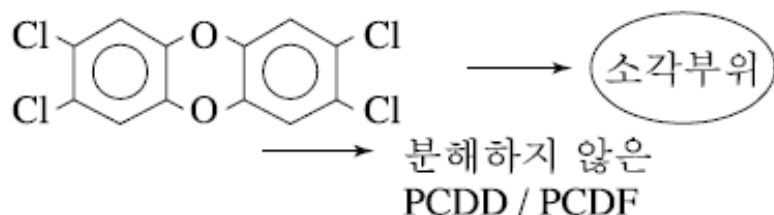




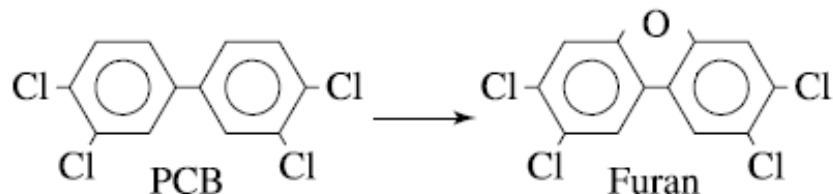
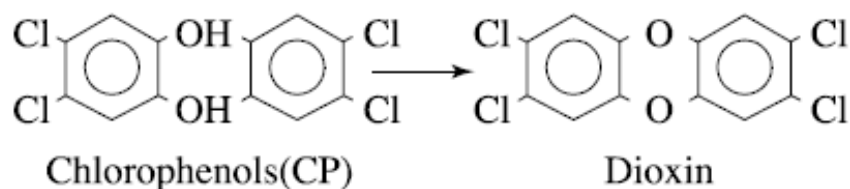
7. 소각로내 공해물질의 생성과 재어

• 다이옥신류의 생성 기작

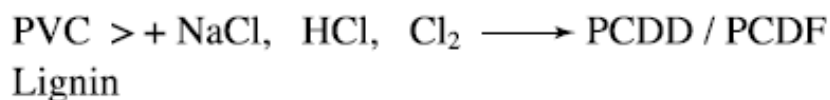
1. 쓰레기내에 존재할 경우



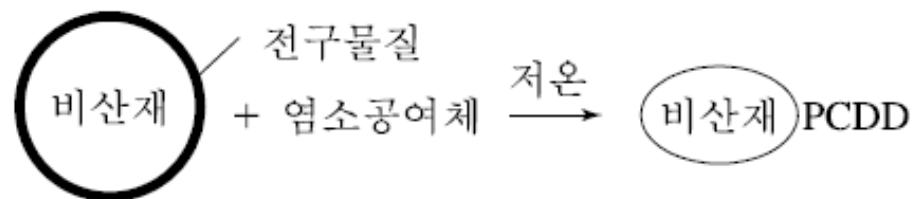
2. 염소화된 전구물질로부터 생성



3. 염소공여체와 유기물질로부터 생성



4. 고상 비산재로부터 생성





7. 소각로내 공해물질의 생성과 제어

• 다이옥신 저감방안

조정항목	방 법	Comment
· 쓰레기	사전분리방법 : 다이옥신 기원물질이나 다이옥신 생성의 촉매효과가 있는 중금속의 사전제거 쓰레기의 균질화 : 소각로로 투입되는 쓰레기의 양과 크기 및 발열량과 수분 등의 쓰레기 특성을 일정하게 함	
· 연소 조건	유기물질과 산화제가 충분히 혼합되게 함 다이옥신물질의 분해에 충분한 온도와 체류시간 유기물질을 최대로 파괴시킬 수 있는 적절한 산소량	
· 배출가스 상태	비산유출입자의 최소화 : 소각로를 벗어나는 비산재의 양이 적도록 제어 산소와 일산화탄소 측정에 의한 연소 최적화 : 다이옥신류의 생성이 최소가 되는 산소나 일산화탄소의 농도가 되도록 연소상태를 제어 황성분의 추가 : SO ₂ 나 SO ₃ 가스의 주입	



7. 소각로내 공해물질의 생성과 재어

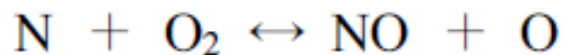
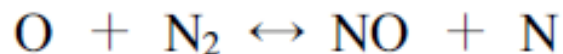
- 조업상태
 - 가동개시 : 소각로의 온도를 빨리 승온
 - 조업중단 : 소각로 내 잔류분을 완전연소시킴
 - 양호한 운전상태 : 소각로의 정지나 불안정한 운전상태가 되지 않게 함
 - 연소실 형상
 - 배가스의 고온부 통과
 - 1차 연소실출구에서 충분한 혼합유도
 - 2차 연소실에서 먼지의 역류를 막는 구조
 - 클링커의 축적이 생기지 않는 구조
-



8. 질소산화물 처리기술

- 질소산화물의 발생

- 연료의 연소과정에서 배출되는 대기오염물질 중의 하나인데 이에는 N_2O , NO , N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 , N_2O_5 등
- NO_x 중 NO 가 약 90%, NO_2 가 약 10%를 차지
- 질소 생성 반응





8. 질소산화물 처리기술

- 연소조절에 의한 NO_x 저감법

- ① 저산소연소
- ② 저온도 연소
- ③ 연소부분의 냉각
- ④ 배기가스의 재순환
- ⑤ 2단 연소
- ⑥ 버너 및 연소실의 구조개선

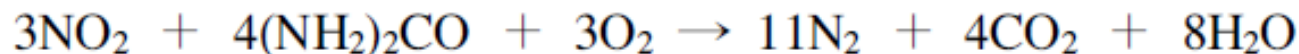
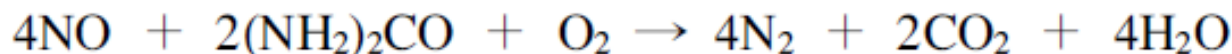
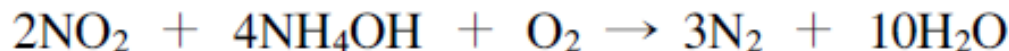
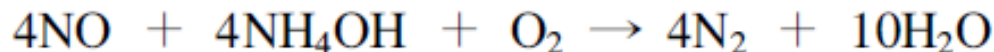


8. 질소산화물 처리기술

• 질소산화물의 제거처리 기술

– 선택적 무촉매 환원법(SNCR. Selective Non-Catalytic Reduction)

- 연소가스에 환원제로 암모니아수나 요소를 분사하여 고온에서 NO_x 와 선택 적으로 반응을 일으키게 하여 N_2 와 H_2O 로 분해하는 방법
- 약품을 과량 사용하면 미 반응, 미 분해의 암모니아가 배출가스의 HCl 과 반응하여 NH_4Cl 의 백연이 발생





8. 질소산화물 처리기술

– 선택적 촉매환원법(SCR, Selective Catalytic Reduction)

- 연소가스 중의 NO_x 를 환원제로 촉매의 존재하에 암모니아와 반응하여 N_2 와 H_2O 로 환원시키는 방법
- NO_x 의 환원은 700°C 이상의 고온에서 선택적으로 반응하지만 촉매를 사용하면 400°C 이하의 온도에서도 반응이 일어나며 촉매의 존재하에서는 환원반응이 거의 100% 일어나므로 질소산화물과 같은 다량의 암모니아를 주입함으로써 약품 투입량을 절감
- 촉매는 SO_x 의 유무에 관계없이 높은 성능과 뛰어난 내구성을 발휘하는 TiO_2 - V_2O_5 계 촉매가 많이 사용
- 반응식





8. 질소산화물 처리기술

• SNCR와 SCR의 비교

구 분	SNCR	SCR
NO _x 저감한계	50 ppm	20 ~ 40 ppm
저감효율	30 ~ 70 %	90 % 정도
운전온도	850 ~ 950 °C	250 °C ~ 400 °C
설치공간	적음	촉매반응탑 설치필요
암모니아슬립	10 ~ 100 ppm	5 ~ 10 ppm
Dioxin 제거	거의 없음	제거가능
경제성	설치비 저렴	설치비, 촉매교체비, 가스재가열비 등 설치 및 운전비용이 높음
장점	배출가스와 관계없이 적용 가능하고 장치가 간단하여 운전보수가 용이	높은 탈재효과가 있으며 암모니아 Slip이 적다
단점	NO _x 제거효율이 낮고 암모니아 Slip에 의한 백연 현상이 우려	운전 및 유지 관리비가 많이 들고 먼지, SO _x 등에 의해 효율 저하 및 압력손실이 크게 됨