# 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〉

③ 연소공기유입구

연소공기유입구(Combustion air port)라 함은 폐기물을 소각실(Combustion chamber) 내에서 소각연소시킬 때 필요한 연소공기를 소각실내로 流入시키는 燒却空氣流入口(구멍)을 의미한다. 燒却爐에서 폐기물질을 완전연소 시킬 수 있도록 하게 하기 위해선 연소공기유입구의 크기가 알맞아야 하며 그 설치 위치도 적합하여야 하므로 연소공기유입구는 소각로구조중 중요한 부분의 하나이다. 효율적인 소각로를 제작설치하기 위한 연소공기유입구의 설계가 매우 중요하다. 이상의 목적을 달성키 위하여 흔히 사용되는 연소공기유입구 설계의 기초사항을 소개하면 아래와 같다.

○ 소각로의 연소공기는 고상연소(固狀燃燒)에 필요한 一次燃燒空氣(1次空氣)와 氣狀燃燒에 必要한 2次燃燒空氣(2次空氣)로 구성된다.

○ 연소공기유입구의 단면적은 연소공기주입에 필요한 단면적보다 100%정도 여유를 두어 크게 설계한다.

보통 1차연소주입구는 필요 연소공기를 100%과잉으로, 2차 연소주입구로 이론 연소공기량을 공급할 수 있도록 설계한다.

○ 연소시 연소공기주입구에서의 유입연소공기의 동압(Velocity Head)은 2.54 ㎜ $H_2O$로 한다. 보통 이동하는 공기의 동압과 속도와의 관계는 아래 공식으로 주어지므로

$$V = 3.88\sqrt{\Delta P}$$

(V : 속도(/sec), ΔP : 동압(㎜$H_2O$))

유입구속도 V = 6.18 m/sec 정도로 하면좋다.

본 Brake shoe재생소각에서는 재생 Brake shoe중량의 5%를 가연성분으로 보며, 또 가연성분은 B.C油와 그 성분이 같다고 가정하였으므로 본 가연성분 1 ㎏을 소각시킬 때 필요한 이론연소공기량은 11.03 ㎥이며 100% 과잉공기로 연소하면 필요연소공기량은 표준상태에서 22.06 ㎥가 된다. 이상의 내용으로 1,2차 공기유입구를 설계하면 아래와 같다.

(a) 일차연소공기유입구설계

일차유입구설계는 최대 가연성분량을 100% 과잉공기로 한 연소에 필요한 최대연소공기량을 구하고 이를 연소공기유입구에서의 유입공기속도로 나누면 된다.

○ 최대연소공기량

가연성분의 최대량은 충진재생되는 Brake shoe의 5%이고 이 때 100%과잉 공기를 연소하면 앞에서 말한 바와 같이 필요연소 공기량은 다음과 같이 산출된다.

$$(0.05)\left(\frac{160\ kg}{1\text{번충진}}\right)\left(\frac{2\text{번충진}}{1\text{시간}}\right)\left(\frac{22.06\ m^3}{kg}\right) = 6.03\ m^3/\text{min}$$

따라서 1차공기유입구의 단면적은 아래와 같다.

$$1\text{차공기단면적} = \frac{6.03\ m^3/\text{min}}{6.18\ m/\text{sec} \times 60\text{sec}} = 158.6\ cm^2$$

(b) 이차연소공기유입구설계

이차연소공기유입구의 설계조건은 1차연소실 설계조건과 같다. 단 이 때 유입공기량은 B.C 1㎏을 연소하는데 필요한 이론연소공기량인 11.03㎥만을 공급시킬 수 있으면 되므로 아래와 같이 2차연소공기유입구를 설계할 수 있다.

$$(0.01)\left(\frac{160\,kg}{1\text{번충진}}\right)\left(\frac{2\text{회충진}}{1\text{시간}}\right)\left(\frac{11.03\,m^3}{kg}\right)$$
$$= 176\,m^3/\text{시간} = 2.9\,m^3/\text{min}$$

따라서 2차공기유입구 단면적은 아래와 같다.

$$2\text{차연소공기주입구단면적} = \frac{2.9\,m^3/\text{min}}{6.18\,m/\text{sec}\times 60}$$
$$= 78.2\,cm^2$$

④ 2차연소버너용량설계

앞서 설명한 바와 같이 고체상폐기물은 고상연소와 氣狀燃燒機構을 거쳐야 1차연소시 발생한 악취가스 및 분진이 2차연소과정에서 완전연소되어 제거되어 燒却爐가 大汚染防止機能을 발휘하게 된다.

따라서 소각로의 2차연소실이란 1차연소실에서 연소시 발생한 가연성가스를 완전연소시키기에 필요한 공기와 열을 직화(Flame)으로 공급하여야 한다. 따라 2차연소실에는 직화공급을 위한 버너가 필요하다. 그림 1의 아프터버너(After burner)는 소각로의 2차연소실에 해당하며 아프터버너의 기능은 소각로의 2차연소실의 기능과 같다. 아프터버너를 설계하려면 아프터버너에서 소각되기 위해서 유입되는 가연가스량을 연소시키기 위해서 필요한 열량을 구하여 이를 2차버너에 사용하는 연료의 열량으로 나누면 필요한 버너의 용량을 결정할 수 있다. 또 이 때 발생한 연소가스량을 알면 2차연소실(아프터버너화실구조)을 결정할 수 있다. 아프터버너에 필요한 2차연소버너의 용량을 아래 순으로 결정해 본다.

○ 최대가연가스량(2차공기제외)

아프터버너(2차연소실)에 유입되는 최대가연가스량은 일차연소시 발생한 연소산물의 총량과 이 때 1차버너를 통해서 공급된 연료(이 경우는 천연가스)의 연소산물량의 합이 된다. 즉 일차연소시 발생된 연소산물량(A), 일차버너를 통해 사용된 천연가스의 연소산물량(B)와의 합이다.

$$A:(0.05)\left(\frac{160\,kg}{1\text{회충진량}}\right)\left(\frac{2\text{회}}{1\text{시간}}\right)\left(\frac{\text{배가스}\ 41.47\,kg}{\text{B.C}\,kg}\right)$$
$$= 663.5\,kg/\text{hr}$$

$$B:(2.2\,m^3/\text{hr})(16\,kg/m^3) = 35\,kg/\text{hr}$$

A, B에서 41.47㎏과 16㎏은 각각 Brake shoe에 있는 가연성분 1㎏ 연소시 발생한 배가스량의 중량과 천연가스㎤연소당 발생한 배가스 중량이다. 따라서,

A + B = 698.7㎏/hr가 된다.

○ 2차연소실 연소에 필요한 열량

2차연소실에 Imput된 698.7㎏/hr의 가연가스는 그 온도가 480℃이며 이를 2차연소실에서 260℃까지 올려야 되므로 이 때 필요한 열량은 아래 공식으로 구한다.

$$Q = WC_p(T_2 - T_1)$$
$$= (698.7)\left(0.26\frac{Kcal}{kg\,℃}\right)(760-480)$$
$$= 50865.36\text{Kcal/hr}$$

○ 2차버너용량

천연가스를 사용하면 760℃에서 LNG 1㎥의 발열량은 5500Kcal/㎥임으로 필요한 LNG량 즉 2차버너용량은 아래와 같다.

$$\text{LNG량}(m^3/\text{hr}) = \frac{50865.36\text{Kcal/hr}}{5500\text{Kcal}/m^3}$$
$$= 9.2\,m^3/\text{hr}$$

⑤ 혼합실의 크기(2차연소실의 크기)

혼합실이란 1차연소시 발생한 휘발가연서분의 완전연소에 필요한 공정이다. 따라서 소각실은 1차연소실에서 발생된 가연휘발성가스와 2차공기가 완전혼합될 수 있도록 되어야 하며 연소에 충분한 온도와 체류시간이 유지되어야 한다. 2차연소실 즉 혼합실의 크기는 1차연소시 발생한 최대 연소가스량에 맞추어 설계한다.
소각량이 결정되면 최대연소가스량은 1차연소실의 최대소각능력에 기초하여 얻으면 된다.
혼합실소각에 필요한 온도는 2차버너를 사용하여 얻어야 하며 이 때 버너의 용량은 앞서 살펴본 바와 같이 실내온도를 760℃까지 유지할 수 있는 용량을 선택한다. 혼합실내에서 가연성휘

발분과 2차연소공기의 혼합은 혼합실내에서 이들 가스를 난류(Turbulent)상태에 달하게 하여 이룰 수 있고 이는 혼합실내에서의 유속(流速)을 6 m/sec ~ 9 m/sec가 유지 되도록 하면 된다. 이와 같은 양호한 혼합상태와 온도조건에서 체류시간은 0.15 ~ 0.2초 정도면 대부분의 가연휘발가스는 완전연소를 하게 된다.

본 Brake shoe재생로의 경우 재생코져 하는 Brake shoe중량의 5%가 가연성 물질이며 그 화학적 조성은 BC유와 같다고 가정하였다. B.C 1kg을 과잉공기 200%로 소각할 때 발생하는 연소가스(가연휘발분이라 가정)량은 33.09 $m^3/kg$, 2차버너에 연료로 사용한 LNG을 20%과잉 공기로 연소할 때 LNG $m^3$당 발생한 연소가스량은 13.53$m^3$이 된다고 하고 혼합실을 설계하면 아래와 같다. 여기서 혼합실의 설계란 혼합실입구의 단면적 혼합실본체의 단면적 및 혼합실의 길이를 말한다.

○ 혼합실입구의 단면적

여기서 혼합실입구라 하면 1차연소실과 2차연소실이 연결되는 부위로 짧은 관을 말한다. 혼합실입구에서 유입가스(1차연소실에서 생성된 가연성휘발가스)의 유속과 온도는 각각 6m/sec 및 480℃로 한다. 가연성분에서 발생한 배가스와 LNG배가스를 각각 A, B라 하면 아래와 같다.

$$A : (0.05)\left(\frac{160\ kg}{1\text{회충진}}\right)\left(\frac{2\text{회충진}}{1\text{시간}}\right)\left(\frac{34\ m^3}{kg}\right)$$

$$= 544\ m^3/\text{hr}$$

$$B : (2.2\ m^3/\text{hr})\left(\frac{13.53\ m^3/m^3}{m^3}\right) = 29.76\ m^3/\text{hr}$$

따라서 혼합실에서 처리해야 할 최대연소가스(가연휘발가스)량은 A+B가 된다.

따라서 A+B=573.76$m^3$/hr이 되며 혼합실 입구단면적은 (A+B)의 연소가스를 혼합실내 온도인 760℃로 보정한 후 입구속도로 나누어 얻을 수 있다. 즉,

입구단면적 =

$$\left(\frac{573.76\ m^3/3600\text{sec}}{6\ m/\text{sec}}\right)\left(\frac{273+760\ ^\circ}{273+15}\right)$$

$$= \frac{342.99\ m^2}{3600} = 0.0953\ m^2$$

○ 혼합실몸체단면적

혼합실몸체내에서의 가스유속은 760℃에서 7.6m/sec로 한다. (발생가스는 15℃온도로 산출된 것임)

1차연소에서 발생된 연소가스를 A, 2차가스버너에서 발생된 연소가스를 B라 하면 혼합실내를 통과하는 전체가스량은 아래와 같다.

A : $= 567.6\ m^3/\text{hr}$

B : $(9.3\ m^3/\text{hr})(13.53\ m^3/m^3) = 124.8\ m^3/\text{hr}$

A+B : $= 692.4\ m^3/\text{hr}$

$= 11.54\ m^3/\text{min}$

$= 0.1923\ m^3/\text{sec}$

혼합실몸체단면적 =

$$(0.1923\ m^3/\text{sec})\left(\frac{273+760}{288}\right)\left(\frac{1}{7.6\ m/\text{sec}}\right)$$

$= 0.091\ m^2$

○ 혼합실의 길이

혼합실에서 체류시간은 0.15초로 하면 아래와 같다.

$(7.6\ m/\text{sec})(0.15\text{sec}) = 1.14\ m$

⑥ 굴뚝직경

혼합실에 2차연소를 거쳐 배출되는 배가스의 속도와 온도는 각각 6m/sec, 650℃로 가정한다. 굴뚝단면적은 아래와 같다.

$$(0.1923\ m^3/\text{sec})\left(\frac{273+650}{273+15}\right)\left(\frac{1}{6\ m/\text{sec}}\right)$$

$= 0.1027\ m^2$

따라서 직경은 32cm정도면 좋다.

⑦ 굴뚝높이설계

본 재생로는 자연통풍력을 이용하여 소각시 발생한 배기가스를 대기중으로 배출시키는 것으로 하였다. 소각로에서 발생한 배가스를 자연통풍력으로 배기시키기 위해선 굴뚝의 높이를 높일수록 통풍력이 크게 됨을 이용한 것이다. 따라서 자연통풍력을 이용하여 배가스를 굴뚝으로 배기시키고저 할 때는 소각로내의 각 부위에서 발생한 압력손실의 총합보다 굴뚝의 자연통풍력이 커지도록 굴뚝높이를 조정한다. 본 재생로에서 발생하는 압력손실을 구별하면 아래와 같다.

- 1차연소실압력손실
- 2차연소실압력손실

– 굴뚝압력손실

○ 1차연소실압력손실

1차연소실에서는 고상연소가 진행되므로 이에서 발생하는 배가스와 유입연소공기가 1차연소실 출구로 이동해 간다. 이 때 이동속도는 2차연소실 입구속도 보다 다소 느린 것으로 보아 4.5 $m/sec$ 정도로 본다. 이 때 발생하는 압력손실은 동압의 100 %에 해당한다고 보면 1차연소실 압력손실은 아래와 같다.

1차연소실동압 :

$$V_p = (\frac{V}{242})^2$$

$$= (\frac{4.5 \times 60}{242})^2$$

$$= 1.24 \ mmH_2O$$

○ 2차연소실압력손실

2차연소실압력 손실은 2차연소실입구 수축부에서 발생하는 수축손실과 난류효과를 올리기 위한 통로상하부의 앨보에 의한 앨보손실로 볼 수 있으며 수축손실은 수축부 동압의 50 %가 손실 된 것으로 하고 앨보손실은 앨보 하나당 그 부근에서 발생한 동압의 100 %가 손실로 한다.

– 수축손실

수축부(입구)유속은 6 $m/sec$ 온도는 480 ℃ 임으로 아래 공식으로 동압을 구한다.

$$H = \frac{1}{2g} \rho V^2$$

여기서 V : 유속 $m/sec$

$g$ : 9.8 $m/sec$

H : 동압 $mmH_2O$

$\rho$ : 밀도 $kg/m^3 = \rho_o (\frac{273}{273+480})$

$$H = \frac{1.3 kg/m^3 (\frac{273}{273+480})}{2 \times 9.8 m/sec^2} (36 m^2/sec^2)$$

$$= 0.865 \ kg/m^2$$

$$= 0.865 \ mmH_2O$$

수축손실은 동압의 50 %임으로 0.433 $mmH_2O$ 이다.

– 앨보손실(앨보 2개)

이것도 동압의 100 %이니까 원공식으로 먼저 동압을 구한다. (이 때 속도온도는 7.6 $m/sec$ 760 ℃임)

$$H = \frac{1}{2g} \rho V^2 \text{ 에서}$$

$$= \frac{1.3 kg/m^3 (\frac{273}{273+760})}{2 \times 9.8 m/sec^2} (7.6 m/sec)^2$$

$$= 1.012 \ kg/m^2$$

$$= 1.012 \ mmH_2O$$

따라서 앨본 2개에 의한 압력손실은

$1.012 \ mmH_2O \times 2 = 2.024 \ mmH_2O$

– 2차연소실마찰손실

2차연소실에서의 마찰손실은 Darcy의 식을 사용하여 구한다.

$$\Delta P = \lambda (\frac{L}{D}) (\frac{V^2}{2g}) \rho$$

여기서 $\lambda$ : 마찰계수 $\frac{0.316}{\sqrt[4]{N_{Re}}}$ (단 $N_{Re} = 3000 \sim 10^5$)

L:D: 는 각각 길이 및 직경

V : 속도 $m/sec$

$\rho$ : 밀도 $kg/m^3$

$\Delta P$ : 압력손실($mmH_2O$)

2차연소실 온도가 760 ℃임으로 점도 $\mu =$ 0.32CP로 하면 $\lambda$는 아래와 같다.

$$N_{Re} = \frac{\rho DV}{\mu}$$

$$= \frac{(0.345 m)(7.6 m/sec)(1.3 kg/m^3)(\frac{273}{1033})}{26 \times 10.6 kg/sec}$$

$$= 3.5 \times 10^4$$

$$\lambda = \frac{0.316}{\sqrt[4]{N_{Re}}} = \frac{0.316}{\sqrt[4]{104 \times 35}} = \frac{0.316}{10 \times 1.35}$$

$$= 0.023$$

따라서 $\Delta P$는 아래와 같다.

$$\Delta P = (0.073)(\frac{1.14 m}{0.345 m})(\frac{(7.6 m/sec)^2}{2 \times 9.8 m^2/sec^2})$$

$$(1.3 kg/m^3)(\frac{273}{1033}) = 0.077$$

○ 굴뚝압력손실

굴뚝의 길이는 아직 모르므로 굴뚝을 3 $m$ 로 가정하고 이에 대한 압력손실을 구해 본다. 굴뚝의 배기가스 속도는 6 $m/sec$ 온도는 650 ℃

직경은 0.32 $m$이다. 따라서 이 때 마찰손실도 Darcy의 공식에 의하여 계산한다.

$\mu = 2.6 \times 10.6 \frac{kg}{m \cdot sec}$ (CP)로 한

$N_{Re} = \frac{\rho DV}{\mu}$

$= \frac{1.3\ (\frac{273}{923})(0.32)(6)}{2.6 \times 10.6} = 2.8 \times 10^4$

$= \frac{0.316}{\sqrt[4]{104 \times 2.8}} = \frac{0.316}{1.25} = 0.0263$

따라서 $\Delta P$는 아래와 같다.

$\Delta P = (0.0263)(\frac{3}{0.32})(\frac{(6)^2}{2 \times 9.8})(1.3)(\frac{273}{273+680})$

$= 0.054\ mm H_2O$

$= 0.174\ mm H_2O$

○ 3 $m$ 짜리 굴뚝의 통풍력

통풍력은 부력으로 아래와 같다.

$F_B / A = H(\gamma a - \gamma g)$

여기서 $F_B$ : 통풍력 $kg$

$A$ : 굴뚝단면적

$H$ : 굴뚝높이($m$)

$\gamma a$ : 공기밀도 $kg / m^3$

$\gamma g$ : 배가스밀도 $kg / m^3$

통풍력 $F_B / A$는 다음과 같으나

$\frac{F_B}{A} = 3(\frac{1.3 \times 273}{273+15} - \frac{1.3 \times 273}{273+650})$

$= 3 \times 273(\frac{1}{288} - \frac{1}{923})1.3 (kg / m^2)$

$= 3 \times 273 \times 1.3(0.0024)\ kg / m^2$

$= 2.5\ mm H_2O$

여기서 연돌내 마찰손실을 뺀 것이 실제 통풍력이므로 실제 통풍력 $F_{BNet}$ 는 아래와 같다.

$F_{BNet} = 2.5\ mm H_2O - 0.174\ mm H_2O$

$= 2.37\ mm H_2O$

○ 전체소각로의 압력손실

1 차연소실압력손실 + 2 차연소실압력손실 + 2 차연소실앵글에서의 압력손실 + 2 차연소실마찰손실 = 총압력 손실

따라서,

총압력손실 = $1.24\ mm H_2O + 0.433\ mm H_2O + 2.024\ mm H_2O + 0.097\ mm H_2O$

$= 3.774\ mm H_2O$

○ 연돌높이

H를 연돌 높이라 하면

$(\frac{2.37\ mm H_2O}{3\ m})(Hm) = 3.774\ mm H_2O$

$H = 3\ m(\frac{3.774\ mm H_2O}{2.37\ mm H_2O}) = 4.77\ m$

〈다음 호에 계속〉

## ◎ 토 막 소 식 ◎

산성비·복합대기 오염등 廣域的공해가 벼와 보리의 생장에 심각한 타격을 주고 있음이 밝혀졌다.

유황산화물·질소산화물·오존등으로 부터 발생되는 복합오염 물질이 벼와 보리의 수확량과 밀접한 관계가 있는 광합성을 약 25～50 %나 저해하고 있으며 실제 수확량도 상당히 감소시키고 있는 것으로 日本 三重大學의 谷山鐵郎교수(생물학)등의 조사결과 밝혀졌다.

이러한 연구결과는 산성비와 복합대기오염 피해가 지구전체적으로 진행되고 있어서 방지대책 마련도 어려우며 식량문제에 미치는 영향도 심각하기 때문에 주목되고 있다.

이 조사는 실제로 미에(三重)縣 요까이찌(四日)市에서 발생하는 복합대기오염과 유사한 상황에서 실시한 벼 생장실험 결과 이루어 졌다.

그 결과 오존 0.04, 이산화유황 0.02, 이산화질소 0.02, 일산화탄소 2.35ppm의 이 지역 환경기준치 농도에서도 벼가 오염대기에 노출되면 1 시간 뒤부터는 光合成속도가 25 % 가까이 떨어졌다.