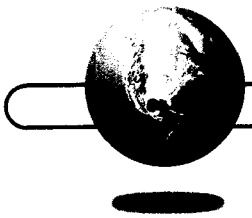
연소 배기 가스 열손실 감소와 폐열 회수

Reducing the Heat Loss and the Waste Heat Recovery of the Exhaust Gas

李 長 浩*
Lee, Jang Ho



최근 우리 경제는 외환 위기를 맞아 한푼의 외환이라도 아껴야 할 형편이 되었다. 이에 가장 중요한 에너지 절감의 기본이 되는 연소 배기가스 손실 감소와 폐열 회수에 대하여 검토하였다.

1. 배기가스 열손실의 원인과 대책

현대 문명은 연소에서 얻어지는 열에너지가 가장 큰 몫을 함으로서 유지된다고 할 수 있다. 따라서 폐열에 있어서도 연소시 발생되는 폐열이 가장 중요하며 특히 배기가스 손실열이 가장 큰 요인이 된다. 배기가스 손실열을 최소로 하기 위해서는 배기 가스량을 최소로 줄이고 온도를 낮추는 방법이다.

그 내용을 보면 다음과 같다.

배기가스 손실열 감소
- 배기 가스량 감소 : 공기비 조절, 전열 사용, 산소 부화
- 배기가스 온도 저하 : 운전 합리화, 스케일 및 수트 청소, 전열면증대, 공기 예열기 및 열회수 장치 설치

배기가스 온도가 높은 원인으로서는

① 피열물의 온도가 높을 때, ② 전열 면적이 적을 때, ③ 연소가스의 통과 시간이 너무 짧을 때, ④ 공기비가 높을 때, ⑤ 전열면에 스케일이나 검댕(Soot)이 끼어 있을 때, ⑥ 기타 등이며 이들 원인을 제거 함으로써 배기가스 온도를 낮출 수 있다. 이론적으로 폐열회수가 안될 경우의 배기가스 온도는 피열물보다 다소 높은 것이 보통이나 실제는 피열물의 예열, 공기예열, 방열손실, 냉각공기혼입 등으로 차이가 있다. 배기가스 온도가 정상시보다

*요업기술사,
한국산업기술연구소 소장.

높을 때에는 시설면과 작업 방법, 연소 방법 등에 대하여 검토할 필요가 있다. 시설면에서는 열교환에 필요한 전열 면적이 적은 경우이며 이때에는 전열면을 늘리거나 시설 교체, 공기예열기 설치 등으로 폐열을 회수하는 것이 가능하나 투자를 요한다.

작업 방법이나 연소 관리가 미흡할 때에도 배기가스 온도가 높아지며 공기비조절이 안될 때에는 과잉 공기로 인하여 전열이 제대로 안되고 높은 온도로 배출되며 불완전 연소로 검댕(Soot)이 끼거나 수질 관리를 불완전하게 하여 스케일이 증가하게 되면 전열을 방해하므로 배기가스 온도가 상승한다. 연소 관리는 배기가스 열손실을 줄일 수 있는 가장 직접적인 요인이 되며 특히 공기비 조절은 과잉 공기에 의한 열손실을 막고 불완전 연소를 막을 수 있으므로 매우 중요하다.

2. 연소 가스 분석과 공기비 조절

연소 가스 분석의 목적은 공기와 연료의 비율, 즉 공기비가 적당한가를 파악하고 gas의 흐름을 알기 위한 것으로 연소 관리에 있어서 매우 중요하다. 연소 가스 분석은 CO_2, O_2, CO를 분석하고 나머지는 질소(N_2)로 계산한다.

분석기로서는 올자트 분석기를 이용하기도 하나 현장용으로는 부적합하므로 보통 간편한 O_2분석기가 일반화되어 있으며 CO_2분석기도 널리 사용된다.

분석 결과가 정확한지를 판단하기 위해서는 몇 번 되풀이하여 분석하는 것도 필요하나 CO_2, O_2, CO, 값을 서로 비교해 보면 알 수 있는 경우가 많다.

CO_2의 값은 연료 종류에 따라 최대치가 정해져 있으며 다음과 같다. Bunker C유는 15.7%이며 역청탄은 18.5%, 무연탄 20.5%, 수소 0%, 순탄소 또는 세룰로-즈 20.9%, 메탄 11.7%, 프로판 13.7%이다. 일반 연소의 경우 $CO_2 + O_2$의 값은 CO_2 최대와 21% 사이에 있어야 하고 공기비가 적을 때에는 $CO_2 + O_2$의 값은 CO_2 최대 쪽에 가까워지고 공기비가 클 때에는 21%에 점점 가까워진다. Bunker C유의 경우 공기비 1.2때 CO_2는 12.7%, O_2 3.7%이며 Bunker C유 연소시에 CO_2 13%, O_2 4%의 분석치가 나왔다면 오차가 있다고 보아야 한다. (O_2는 3.7%보다 적어야 한다). 다만, 다량의 CO gas가 발생하던가 반응으로 CO_2 gas가 발생하여 연소 gas에 혼입되는 경우에는 탄소 정산을 따로 하여야 한다. 이상과 같이 gas 분석 결과가 정확하다고 판단되면 공기비 계산이 가능하다. 공기비를 계산하는 식은 다음과 같다.

$$\text{공기비 } m = \frac{N_2}{N_2 - 3.76(O_2 - 0.5\ CO)} \quad \text{또는}$$

$$\frac{21}{21-O_2} \fallingdotseq m \text{ 이나}$$

$(CO_2)\ max \div CO_2 \fallingdotseq m$이 된다.

이들은 거의 비슷한 결과를 가져오므로 어떤 방법으로 계산해도 큰 차이는 없으나 N_2에 의한 계산이 정확하므로 KS에서는 이 식을 사용하도록 되어 있다.

각 연료 성분으로부터 이론공기량 및 배기가스량을 산출하는 식은 다음과 같다.

$$\text{이론 공기량 } (Ao) = 8.89C + 26.67(H - \frac{O}{8}) + 3.33S$$

$$\text{이론배 gas 량 } (G_1) = 8.89C + 32.3(H - \frac{O}{8}) + 1.4(O) + 3.33S + 0.8N$$

$$\text{이론건배 gas량}(G_0) = 8.89C + 21.1H + 3.33S + 0.8N$$

여기서 C, H, S, N, O는 연료 1kg중에 포함된 성분의 kg수이다.

그러나 우리가 일상 사용하는 연료는 그 조성을 정확히 알 수 없는 경우가 많고, 따라서 이상의 방법으로는 이론공기량이나 배 gas량 계산이 곤란하다. 여기서 발열량을 간단히 식에 대입하므로서 이론공기량 또는 배 gas량을 계산할 수 있으며 현재 우리 나라에서는 KS에서 다음과 같이 계산한다.

액체 연료의 경우

$A_o = 12.38 \times (Hl) / 10{,}000 - 1.36\ Nm^3/kg$ 연료

$G_1 = 15.75\ (Hl) / 10{,}000 - 3.91\ Nm^3/kg$

고체의 경우

$$A_o = 1.01 \times \frac{Hl}{1{,}000} + 0.56 m^3/kg$$

$$G_1 = 0.904 \times \frac{Hl}{1{,}000} + 1.67 m^3/kg$$

Gas의 경우

$$A_o = 11.20 \times \frac{Hl}{10{,}000}\ m^3/m^3$$

$$G_1 = \frac{12.25\ Hl}{10{,}000}\ m^3/m^3$$

여기서 Hl : 저위발열량

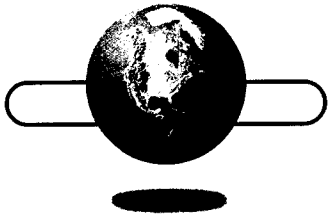
가장 많이 사용하는 Bunker C유의 경우 Hl (저위 발열량)은 9,750 Kcal/kg 이며 위식에서 $A_o = 11.443\ Nm^3/kg$, $G_1 = 15.75$연료이다.

이상에서 공기비와 이론공기량을 알면 실제공기량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

즉, $A = m \cdot A_o$ 여기서 A : 실제공기량, m : 공기비, A_o : 이론공기량이다.

공기비는 1이하가 되는 일은 거의 없고 1.1 ~ 1.2 정도가 연소 관리상 바람직하다.

공기량은 이론공기량 만으로 완전연소를 시킬 수 있으면 가장 바람직하나 실제로는 불완전연소로 매연이 생기고 CO gas가 다량 발생되어 최소한의 과잉 공기를 허용하지 않을 수 없다. 연소 조건이 아주 좋은 경우에는 1.05 정도의 공기비로 완전연소에 가깝게 유지할 수 있으나 연소 상태가 나쁠 때에는 공기비가 높아도



연소 조건이 아주 좋은 경우에는 1.05 정도의 공기비로 완전연소에 가깝게 유지할 수 있으나 연소 상태가 나쁠 때에는 공기비가 높아도 매연이 발생되는 수가 있다.

매연이 발생되는 수가 있다.

과잉 공기에 의한 열손실은 공기를 가열하는데 필요한 열량을 버리는 것이므로 다음과 같이 간단히 계산할 수 있다.

즉, $Q = (m_1 - m_2)\ Ao\ Cpa\ (tg_1 - to)$

여기서

m_1 : 개선 전의 공기비

m_2 : 개선 후의 공기비

A_o : 이론공기량 (B-C유의 경우 10.709 Nm^3/kg)

C_{pa} : 공기 비열 (보통의 경우 0.31 $Kcal/Nm^3$ ℃)

t_{g1} : 배 gas의 출구 온도

t_o : 외기 온도이다.

배기가스와 외기 온도차가 275℃일 때 공기비가 0.1커짐에 따라 열손실은 1%가 된다.

공기비가 1.2 정도인데 불완전연소가 될 때에는 그 원인을 ① 연료 ② 연소 장치인 버너 ③ 로(연소실)와 관계 시설에서 찾을 수 있다. 첫째 연료의 경우 온도 관리, 배수 관리, Strainer 청소가 잘되고 있는지 불순물 혼입으로 Sludge가 형성되지 않았는지를 조사하고 다음 버너와 부속장치의 회전속도, 유압, 공기압, 노즐의 상태 또는 분무 Cup의 상태 등을 검토하여야 하며 화실(로)의 구조에 대해서도 불꽃이 로에 닿는다던가 화실이 너무 좁다든지 하는 원인들을 찾아 개선함으로써 해결이 가능하다.

3. 배기가스 손실열 및 회수 열량

배기가스 손실 열량의 계산은 다음과 같은 공식에 의하여 산출한다. 즉

$Q_L = F\ [G_1 + (m - 1)A_o]\ C_{pg} \cdot (t_g - t_o)$

여기서

Q_L : 배기가스 손실열 (Kcal/Hr)

F : 연료 사용량 (kg/Hr)

G_1 : 이론 배기가스량 (Nm^3/kg연료)

m : 공기비

A_o : 이론공기량 (Nm^3/kg연료)

C_{pg} : 배기가스 비열 ($Kcal/Nm^3$ 연료)

t_g : 배기가스 온도 (℃)

t_o : 외기 온도 (℃)이다.

실제 계산에 있어서 연료 사용량 F는 중량으로 환산해야 하며 액체 연료의 경우 다음 공식으로 계산한다.

$F = dKV_t$

여기서

F : 연료 사용량 (kg/Hr)

d : 연료의 15℃때의 비중(kg/l)

K : 온도보정계수로

$K = 0.9754 - 0.00067\ (t-50)$ 이다.

온도가 낮을 때는 $K = 1-0.0007(t-15)$의 식으로 계산한다.

V_t : t℃에 있어서의 유류의 체적(l)이다.

G_1은 전술한 바와 같이 유류인 경우

$$G_1 = \frac{15.75}{10,000} \times H\,l - 3.91$$ 에 대입하여 계산

하며 Bunker-C유인 경우 11.443Nm^3/kg 연료이다. 공기비 m은 전술한 방법으로 계산되며 공기비를 모를 때에는 유속 등으로부터 계산한다. 배기가스 비열 C_{pg}는 보통의 경우 0.33$Kcal/Nm^3$℃를 적용하여 계산하나 배 gas 온도가 지나치게 높거나 조성이 특별한 경우 각 성분비율에서 계산한다.

공기예열기 등에 의하여 폐열을 회수할 때의 회수 열량은 열 회수 전후의 온도차(t_{g1}-t_{g2})와 회수 효율 η를 넣어서 다음과 같이 변형된다. 즉,

$Q = [G_1 + (m - 1)\ Ao] \cdot Cpg \cdot (t_{g1} - t_{g2}) \cdot \eta$

이때

t_{g1} : 공기예열기 입구의 배기가스 온도(℃)

t_{g2} : 공기예열기 출구의 배기가스 온도(℃)

η : 공기예열기 효율(0.9 ~ 0.95)이다.

여기서 공기예열기를 지난 배 gas온도가 지나치게 낮을 때에는 저온 부식이 발생되므로 노점보다 다소 높은 온도로 배출시켜야 한다. 참고로 유황 함량과 노점과의 관계는 다음 식으로 추정할 수 있다.

노점 = 117.4 + log (26×S) × 16.8

여기서 S는 연료중의 유황함량(%)이다.

공기예열기 설치로는 효과적으로 폐열 회수가 안되던가 공기예열기를 설치할 수 없을 때에는 피열물의 가열을 하는 방법이 효과적이다. 급수예열기에 의한 급수예열도 같은 범위에 속하나 일반적으로는 고체나 액체가 가열 물질인 경우가 많다.

4. 공기예열기 전열 면적

공기예열기의 전열 면적은 다음 공식에 의해 산출된다. $A = Q/u \cdot \Delta T_m$

여기서

A : 전열 면적(m^2)

Q : 회수 열량 (Kcal/Hr)

u : 열관류율 ($Kcal/m^2\ Hr℃$)

ΔT_m : 대수 평균 온도차(℃)로 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

ΔT_1 : 배기가스의 공기예열기 입구 온도 - 예열공기출구온도

ΔT_2 : 배기가스 출구 온도 - 공기의 입구 온도

u의 값은 여러 가지 요인에 의하여 차가 많으나 관형의 경우 10 ~ 15Kcal/m^2Hr℃선으로 15Kcal/m^2 Hr℃로 계산하면 된다.

ΔT_m은 ΔT_1과 ΔT_2가 비슷한 경우 산술 평균 [(ΔT_1 + ΔT_2) ÷2]으로 계산해도 별차이가 없다.

5. 급수 예열기, 폐열 보일러

배기가스 폐열을 회수하는 방법으로 공기예열외에 물을 가열하여 보일러 급수로 사용하거나 난방 등에 이용하는 경우가 많다.

공기예열기보다 열관류율이 높고 열 용량도 커서 장치가 작아도 된다는 장점이 있으나 반면 Gas 온도가 낮을 때는 저온 부식의 우려가 크고 온도가 상승되면 보일러와 마찬가지로 압력이 나타나게 되므로 안전에 대한 관리가 철저히 이루어 져야 하는 단점도 있다.

급수예열기는 강제와 주철제가 있으며 강제는 주철제에 비하여 열관류율이 크나 수명이 짧다. 배기가스 온도가 비교적 높고 보일러가 필요한 곳에서는 폐열 보일러가 운영되고 있는 곳이 많으며 배기가스 중의 먼지 불순물 등에 의하여 전열 면이 오염되기 쉽고 가스온도가 낮기 때문에 전열 면적을 일반 보일러보다 훨씬 크게 하여야 하므로 가격이 고가로 되는 경우가 많다. 급수예열기나 폐열 보일러의 경우에는 물의 온도가 매우 낮아서 가스측 표면 온도가 로점이하로 떨어지는 경우가 있으므로 B-C유등 유황 성분이 많을 때에는 배기가스 온도를 160 ~ 170℃이하로 떨어지지 않도록 하여야 하며 그 이하로 떨어질 경우에는 수명이 단축되는 것을 각오해야 한다. 급수예열기의 전열 면적은 다음과 같이 계산된다.

$$Aé = \frac{D(t_{w2} - t_{w1})}{u \Delta T_m}$$

여기서 $\Delta T_m = \frac{(t_{g1} + t_{g2})}{2} - \frac{(t_{w1} + t_{w2})}{2}$

Aé : 전열 면적

t_{w1} : 예열전 급수 온도

t_{w2} : 예열후 급수 온도

D : 급수량 kg/Hr

u : 열관류율 Kcal/m^2 Hr℃

6. 기타 방법에 의한 폐열 회수

공기예열기 설치로는 효과적으로 폐열 회수가 안되던가 공기예열기를 설치할 수 없을 때에는 피열물의 가열을 하는 방법이 효과적이다. 급수예열기에 의한 급수예열도 같은 범위에 속하나 일반적으로는 고체나 액체가 가열 물질인 경우가 많다. 피열물의 예열은 요업이나 금속 분야에서 널리 사용되고 있는 방법이며 시멘트 공장에서의 Preheater, Kiln에서의 예열대, Hoffman식 Kiln에서의 예열실 등이 그 예이며 어떻게 피열물과 배기가스를 효과적으로 열교환하느냐 하는 것이 열효율과 직결된다고 볼 수 있다. 피열물의 가열로 얻어지는 효과는 다음 공식에 의하여 계산할 수 있다.

$$\text{피열물의 가열에 의한 절감율 } r = \frac{i' - i_o}{i'' - i_o}$$

i'' : 최종가열 온도에서의 엔탈피(열함량)

i' : 가열 후의 엔탈피(열함량)

i_o : 외기 온도에서의 엔탈피(열함량)

각 온도에서 피열물의 엔탈피는 상변화를 가져오지 않을 때는 평균 비열과 온도차 그리고 질량에서 계산이 가능하다.

즉, $i'' = M \times C \times \Delta t$

M : 피열물의 질량 (kg)

C : 피열물의 비열

Δt : 최종가열 온도까지의 온도차(℃)

이밖에도 폐열을 건조에 이용한다거나 낮은 온도로 가열하는데 응용하는 등 많은 연구가 진행되고 있다.

(원고 접수일 1998. 7. 16)