

ES_BOILER 소프트웨어 설명서

Rev. 0

2016. 6

ENGSOFT Lab, Seoul, Korea
www.engsoft.co.kr

1. 서론

본 소프트웨어는 미국 BABCOCK & WILCOX 사의 "STEAM its generation and use, 40th EDTION"의 CHAPTER 9 "Principles of Combustion"의 계산 방식을 VISUAL BASIC 언어를 사용하여 PROGRAMING 한 것이다.

소프트웨어의 이해를 돕기 위하여, 아래의 설명은 관련 이론 및 식 유도를 먼저 한 다음, 해당 PROGRAM LIST를 기술하였다.

2. 연료의 연소열(발열량)

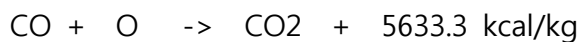
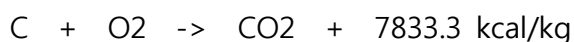
(Calorific Value 혹은 Fuel kcal Value 혹은 Heating Value 라고 불림)

2.1 연료의 연소열은 그 과정에는 관계 없이 원소의 구성 요소에 의해서만 결정

연료의 연소열은 연소가 일어나는 과정에는 관계가 없이, 연소에서 관여하는 원소의 구성에의서만 결정된다.

즉 탄소가 산소와 반응하여 이산화 탄소가 발생하는 연소를 일으킬 때 발생하는 연소열은 7833.3 kcal/kg (14100 Btu/lb) 인데, 이 값은 반응시 이산화 탄소가 바로 결합하지 않고 일산화 탄소 과정을 거쳐 결합하더라도 동일하다.

그 상황의 이해를 쉽게 하기 위하여 화학 반응식으로 표현하면 다음과 같다.



즉 탄소가 일산화 탄소가 바뀔 때 발생하는 연소열 2200 kcal/kg과 다시 일산화 탄소가 이산화 탄소가 바뀔 때 발생하는 연소열 5633.3 kcal/kg 의 합은, 탄소가 이산화 탄소가 직접 바뀔 때의 연소열 7833.3 kcal/kg과 동일하다.

2.2 연료의 연소열(발열량) 측정 및 계산

연료의 연소열은 일반적으로 열량계(CALORIMETER)로 직접 연소열을 측정하여 결정한다.

즉 열량계 내부에서 연소시킨후, 초기 온도(기준 온도)까지 냉각시켜서 측정되는 열량을 고위 발열량(Higher Heating Value, HHV)이라고 한다.

고위 발열량은 총발열량(Gross Heating Value, GHV) 라고도 한다.

산업체의 표준 측정 장치로는, 모든 고체 및 대부분의 액체 연료의 경우 밀폐 실린더(일명 폭탄, BOMB) 형식의 열량계를 사용하는데, 이 경우 연소는 산소가 정적과정(Constant Volume of Oxygen)인 상태에서 일어나게 된다.

열량이 900에서 1200 Btu/ft³ 범위의 가스의 경우에는 산업체의 표준 측정 장치로서 연속 연소 형식의 열량계(Constant Flow Type Calorimeter)가 사용되는데, 측정 원리는 위의 밀폐 실린더 형식과 비슷하나, 연소과정이 정적과정이 아니고 정압과정이다.

대부분의 경우 정압과정에서의 연소와 정적과정에서의 연소사이에 연료 열량의 차이는 적어서 그 차이는 보통 무시한다. 실제로 보일러에서 연료가 연소되는 과정은 정압과정이므로, 정압과정에서의 열량이 기술적으로는 맞는 것이다.

가스 혼합물의 성분을 분석하는데 보통 크로마토 그래프를 사용하며, 일단 가스의 성분이 분석 되면, 그 가스의 열량은 다음의 식으로 계산한다.

$$h_{c_{mix}} = v_a hc_a + v_b hc_b + \dots + v_x hc_x \quad [2.1]$$

여기서, $h_{c_{mix}}$ = 가스 혼합물의 연소 열량
 v_x = 각 성분의 체적 비율(= 몰 비율)
 hc_x = 각 성분의 연소 열량

고체와 액체 연료의 정확한 열량을 알려면 실험실 분석이 필요하다. 공업 분석(Proximate Analysis)이나 성분 분석치(Ultimate Analysis)를 갖고 석탄의 발열량을 예측하는 여러 가지 실험식들이 나와 있으며, 그 가운데 가장 자주 사용되는 식이 Dulong의 공식이다. 유연탄의 경우에 Dulong의 공식은 상당히 정확한 결과(2 내지 3% 이내)를 나타내어, 종종 실험실에서 측정된 열량을 확인할 때 사용되기도 한다.

$$HHV = 8,080 C + 34,460 [H_2 - (O_2/8)] + 2,250 S \quad [2.2]$$

여기서, HHV = 고위 발열량, Higher Heating Value, kcal/kg
 C = 탄소(Carbon)의 질량 성분 비율
 H_2 = 수소(Hydrogen)의 질량 성분 비율
 O_2 = 산소(Oxygen)의 질량 성분 비율
 S = 황(Sulfur)의 질량 성분 비율

연료의 Ultimate Analysis를 갖고 발열량을 아주 정확하게 확인하는 방법이, 연소시 단위 발열량당 필요한 이론 공기 질량을 계산하는 것이다. 아래 표에 각 연료별 이론 공기량 범위 값이 표시되어 있다. 이론 공기량 범위 값중에 중간 값을 사용해 이론 공기량을 구하는 공식을 재정리 하면, 아래와 같은 연료의 고위 발열량, HHV를 구할 수 있는 공식을 구할 수 있다.

$$HHV = 100 \times \frac{11.51C + 34.29H_2 + 4.32S - 4.32O_2}{m_{air}} \quad [2.3]$$

여기서, HHV = 고위 발열량, Higher Heating Value, kcal/kg

C = 탄소(Carbon)의 질량 성분 %

H₂ = 수소(Hydrogen)의 질량 성분 %

O₂ = 산소(Oxygen)의 질량 성분 %

S = 황(Sulfur)의 질량 성분 %

m_{air} = 이론 공기량, kg/10,000 kcal

표 2.1 연료별 이론 공기량

연료	이론 공기량 kg/kg fuel	HHV, kcal/kg	이론 공기량	
			대표 중앙 값 kg/10 ⁴ kcal	범위 값 kg/10 ⁴ kcal
Bituminous Coal (VM > 30%)	9.07	6,667	13.61	13.23 - 13.95
Sub-Bituminous Coal (VM > 30%)	6.05	4,445	13.61	13.23 - 13.95
Oil	13.69	10,222	13.43	13.23 - 13.59
Natural Gas	15.74	12,111	13.00	12.87 - 13.23
Wood	3.94	3,240	12.15	11.88 - 12.42
MSW and RDF	4.13	3,056	13.50	12.96 - 14.04
Carbon	11.50	7,830	14.69	-
Hydrogen	34.28	33,945	10.10	-

Note : VM = Volatile Matter, moisture and ash free basis

MSW = Municipal Solid Waste

RDF = Refuse-Derived Fuel

위의 방법은 연소 계산에서 물 기준을 하지 않고, 보일러 Input 열량 기준으로, 즉 1,000 kcal 기준으로 연소 계산을 할 때 사용되는 방법인데, 표에서 보듯이 연료 단위 무게당 필요한 이론 공기량은 연료에 따라 많은 차이가 있지만, 단위 Input 열량당 필요한 이론 공기량은 연료에 따라 차이가 크지 않다. 즉 보일러 Input 열량 기준으로 연소 계산을 하게 되면 이론 공기량 계산시 연료별로 큰 변화가 없다. 한편, 주어진 보일러에서 여러 가지 연료에 대한 비교 검토를 할 경우, 보일러의 Input 열량은 변화가 없으므로, 보일러 Input 열량 기준으로 연소 계산을 할 경우, 특히 이론 공기량 계산시 편리하다.

2.3 고위 발열량 및 저위 발열량

(Higher Heating Value(HHV) and Lower Heating Value(LHV))

수증기는 수소를 포함하고 있는 모든 연료를 연소시킬 때 발생하는 생성물이다. 연소중에 생성된 수증기가 증기 상태로 남아 있느냐 혹은 물로 응축되느냐에 따라, 연료의 발열량이 달라진다. 생성된 수증기가 물로 응축될 때 발생하는 응축열을 발열량의 일부

로 간주하는 발열량이 고위 발열량(HHV)이며, 생성된 수증기가 물로 응축되지 않고 수증기 상태로 남아 있다는 가정하에서 측정된 발열량이 저위 발열량(LHV)이다.

위의 2.1.2 설명된 실험실 측정 방법을 사용하여 발열량을 측정하면, 초기 온도까지 낮추는 과정에서 수증기가 물로 응축되므로, 측정된 발열량은 고위 발열량이다. 이러한 관계로, 고위 발열량은 ASTM 과 같은 표준 실험 절차에 따라 측정할 경우 정확해 특정할 수 있으나, 저위 발열량의 경우에는 직접적으로 측정하기는 어렵다. 그러므로 저위 발열량은 아래의 공식을 사용하여 측정된 고위 발열량으로부터 계산한다.

$$LHV = HHV - 5.722 (H_2 \times 8.936 + H_2O) \quad [2.4]$$

- 여기서, LHV = 저위 발열량, kcal/kg
(혹은 진 발열량, Net Calorific Value)
- HHV = 고위 발열량, kcal/kg
(혹은 총 발열량, Gross Calorific Value)
- H₂ = 연료중의 수소 질량 %
- H₂O = 연료중의 수분 질량 %

위의 식 [2.4]는, 연소 생성물인 수증기의 응축열이 고려된 것 뿐만 아니라, 정적과정과 정압과정의 차이에 대한 교정도 이미 된 공식이다. 20 °C에서 수증기의 응축열은 586.1 kcal/kg인 반면 위 공식에 572.2 kcal/kg이 반영된 이유는 정적 과정에 대한 교정이 됐기 때문이다.

식 [2.4]에서 8.936이란 수치는 H₂O의 몰 중량(18.015)를 H₂의 몰 중량(2.016)으로 나눈 값이다.

본 PROGRAM에서는 고체 및 액체 연료의 경우 식 [2.2]를 사용하여 HHV를 계산하며, LHV는 식 [2.4]를 사용하여 계산한다. 기체 연료의 경우는 책 "STEAM it generation and use"의 Chapter 9, Table 1의 Gross Heat of Combustion(Btu/ft³ 단위)을 사용하여 식 [2.1]으로 HHV를 계산하며, LHV는 식 [2.4]를 이용하여 계산한다.

3. 연소 계산

연소 계산은 보일러와 그 관련 기기들의 설계 및 성능 결정의 시발점으로서, 연소 화학 반응에 관여하는 성분들의 양(공기, 연소 가스, 잔류물 및 Limestone), 연소 과정의 효율 및 방출 열량 등을 산정한다.

연소 계산 방법에는 크게 다음의 3 가지 방법이 있다.

- 연료 100 kg당 각 성분의 Mole 수를 기준으로 계산하는 방법
- 연료 1 kg당 각 성분의 kg 성분을 기준으로 계산하는 방법
- 연료 Heat Input 10000 kcal 당 각 성분의 kg 성분을 기준으로 계산하는 방법

본 PROGRAM에서는 첫 번째 방법을 사용하여 연소 계산을 한다.

책 "STEAM, its generation and use", Chapter 9, Table 3 와 Table 5 에 나타난 계산이 연료 100 kg당 각 성분의 Mole수를 기준으로 계산하는 방법이다.

3.1 고체 및 액체 연료 성분

고체/액체 연료의 경우 일반적으로 주어지는 연료 성분은 다음과 같이 질량 %(Weight %)로 주어진다.

성분	Wt. %(예)
C	72.0
H2	4.4
S	1.6
O2	3.6
N2	1.4
H2O	8.0
Ash	9.0
Total	100.0

3.2 기체 연료 성분

기체 연료의 경우 고체 및 액체 연료와는 달리 주로 Hydro-Carbon 성분 (특히 CH₄) 이며 체적 %(Volume %) 로 주어진다. 알아두어야 할 사항은 한 성분의 체적 % 는 그 성분의 Mole % 와 같다는 점이다.

Mole 기준으로 연소 계산을 하기 위해서 어떤 특정한 형태로 연료 성분을 정리할 필요는 없으나, 기체 연료의 경우에도 고체/액체 연료의 연소식을 그대로 사용할 수 있도록 C, H₂, S, O₂, N₂, H₂O, Ash 성분으로 다시 분류하도록 PROGRAMING 하였다.

3.3 연소 계산 기준 질량

앞에서 언급하였듯이 연소 계산은 연료 100 kg을 기준으로, 즉 연료 100 kg을 연소시키는 것으로 가정하고 계산하는데, 그 이유는 연료 성분이 % 단위이기 때문에 100 kg 연료를 기준으로 할 경우, % 단위로 표시된 연료의 성분을 그대로 사용할 수 있기 때문이다.

한편 사용자가 연료 성분 값을 Input 할 때, 100%를 정확히 Input 하지 않을 경우도 있으므로, 연료 성분 값의 총합을 FWT 라는 변수를 사용하여 계산하도록 PROGRAMING 하였다. 연료 각 성분 %의 총합이 100% 일 경우 FWT = 100 kg 이 되지만, 그렇지 않을 경우에는 실제 Input 한 각 성분 % 가 그대로 연소 계산에 사용되는 것이 아니고, (성분 % / FWT)의 값이 연소 계산에 사용된다.

예를들어 C 성분 % 값으로 75%를 Input 하였으나, 연료 성분 총합이 100% 가 아니고 105% 인 경우, 연소 계산은 $(75 / 105) \times 100$ %의 값으로 계산된다.

3.4 Unburned Carbon Loss 에 의한 연료의 탄소 성분 감소량 계산

연소 계산전에 실제 연소 계산에 사용될 탄소 성분의 양을 계산하기 위하여, Unburned Carbon Loss(이하 UCL)에 의한 탄소 성분의 감소량을 계산 하여야 한다.

UCL은 HHV 효율 % 값으로 표시되며, HHV 효율 % 값은 아래의 식으로 표현 된다.

$$UCL, \% = \frac{\text{Unburned Carbon Loss, kcal/kg}}{\text{HHV, kcal/kg}} \times 100$$

그러므로 Unburned Carbon Loss를 kcal/kg 단위로 환산하면,

$$UCL, \text{ kcal/kg} = UCL, \% \times \text{HHV, kcal/kg} / 100$$

Carbon의 열량이 8,080 kcal/kg 이므로, 연료의 Carbon이 그대로 Loss로서 빠져나간 Unburned Carbon Loss의 양을 구하려면,

$$\begin{aligned} \text{CUCL, wt \%} &= UCL, \text{ kcal/kg} / 8,080 \text{ kcal/kg} \\ &= UCL, \% \times \text{HHV} / 100 / 8,080 \times 100 \\ &= UCL, \% \times \text{HHV} / 8,080 \end{aligned}$$

* CUCL = Unburned Carbon Loss 에 의한 연료의 탄소 성분의 감소량, wt %

위에서 구한 wt% 는 연료 성분의 wt%인데, 그 이유는 효율의 Loss %는 연료의 Heat Input, kcal/kg(= HHV) 에 대한 Loss, kcal/kg의 % 이므로, 위의 식에서 구한 UCL(kcal/kg) 값은 연료 1 kg 에 대한 kcal 단위의 Unburned Carbon Loss 이기 때문이다.

3.5 Limestone(= Sorbent) 계산

FBC Boiler의 경우 배기 가스의 SOx 배출량을 줄이기 위하여, Furnace에 Limestone을 투입하는데, Limestone 계산은 이 경우에 사용된다.

Limestone이 연소나 효율에 미치는 영향은 다음과 같다.

- 1) Flue Gas(연소 가스) 중의 SO₂ 양이 감소하고 CO₂ 양을 증가시켜 Flue Gas의 질량을 변화 시킨다..
- 2) 보일러의 Ash(회) 발생량을 증가시킨다.
- 3) Calcium Sulfate(CaSO₄) 반응 과정에서 SO₃를 형성하기 위해, 필요한 공기의 양을 증가 시킨다.
- 4) CaCO₃ 혹은 MgCO₃로부터 CaO 혹은 MgO를 생성하는 반응과정, 즉 Calcination 과정에서 연소 열량의 일부를 반응열로서 소비한다.

(효율 계산에서 Loss 로 작용)

5) SO₂ 와 CaO 가 반응하는 Sulfation 과정에서 반응열을 방출한다.

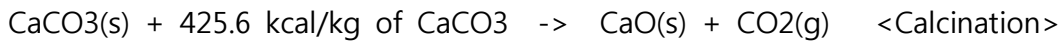
(효율 계산에서 Credit 로 작용)

Limestone의 화학 반응은, 일반적인 연소 계산과정에서 하나의 추가 과정으로서 계산된다.

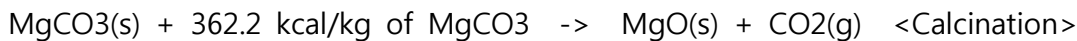
고체 상태의 Limestone은 그 성분이 CaCO₃, MgCO₃, Water, Inerts로 구성되어 있지만, 어떤 경우에는 Limestone 이 용액 상태로 사용되기도 하는데 그럴 경우에는 Ca(OH)₂와 Mg(OH)₂ 성분이 추가로 포함되어 있기도 한다.

연소 과정에서 일어나는 Limestone의 각 성분별 반응 과정은 다음과 같다.

1) CaCO₃



2) MgCO₃



* 생성된 MgO는 SO₂ 제거에 참여하지 않음.

3) Ca(OH)₂



4) Mg(OH)₂



위에 나타난 화학 반응식은 이론적인 경우이고 실제로는 여러 가지 불완전 요소들이 있으며, 연소 계산에서는 이들 불완전 요소들을 다음의 3 가지 계수로서 처리한다.

1) Calcium to sulfur molar ratio, Ca/s (2.5)

연료 성분중의 황(S) 1 mole과의 원활한 반응을 위하여 잉여로 필요한 칼슘(Ca)의 mole 비율이다. 위의 Sulfation 반응식에서 보듯이 Sulfur 1 mole의 반응에 필요한 Ca의 mole 수는 단지 1 mole이다. 그러나 이러한 mole 비는 이론적인 것이고 실제 Furnace 에서의 반응을 위해서는 연소시 과잉 공기가 필요하듯이 과잉 Ca 가 필요한 것이다. "Steam it generation and use" 책의 예제 계산에서 동 비율로 2.5를 사용하였는 관계로 PROGRAM에서도 DEFAULT 값으로 2.5를 제시 하였다.

2) Sulfur capture percent, % (90)

연료 성분중의 모든 황(S)이 Limestone과 반응하여 제거되는 것은 아니다. 일부는 Ca와 반응을 통해 CaSO₄로 제거되지 않고 일반 연소에서와 마찬가지로 산소와 반응해 SOx 형태로 Flue Gas 와 함께 대기중으로 방출된다. Sulfur Capture Percent는 연료 성분중

의 황이 Limestone과 반응하는 Percent를 의미한다.

"Steam it generation and use" 책의 예제 계산에서 동 Percent로 90를 사용하였는 관계로 PROGRAM에서도 DEFAULT 값으로 90를 제시 하였다.

3) Calcination fraction of CaCO₃, *.* (0.9)

투입된 CaCO₃의 모든 양이 Calcination 반응을 일으켜 CaO로 전환되는 것이 아니고 그 투입된 양의 일부는 Calcination 반응을 안 일으키는 것으로 가정한다.

이 비율을 Calcination fraction of CaCO₃ 라 한다.

"Steam it generation and use" 책의 예제 계산에서 동 비율로 0.9를 사용하였는 관계로 PROGRAM에서도 DEFAULT 값으로 0.9를 제시 하였다.

Limestone의 연소 계산 과정의 PROGRAMING은 다음과 같다.

1) Limestone 성분 Input

Limestone의 성분은 다음의 성분을 As Fired Base의 질량 %를 Input 해야 한다.

Limestone 성분의 Input 도 총합이 100%가 안되는 경우 PROGRAM이 자체에서 총합에 대한 각 성분의 Percent를 다시 계산하도록 되어 있다.

성분	Wt.% (예)
CaCO ₃ < CaCO ₃ >	89.8
MgCO ₃ < MgCO ₃ >	5.0
Ca(OH) ₂ < CaOH ₂ >	0.0
Mg(OH) ₂ < MgOH ₂ >	0.0
H ₂ O < SH ₂ O >	1.6
Inert < Inert >	3.6

Total < SWT >	100.0

2) 다음의 계수를 Input 한다.

- Calcium to sulfur molar ratio < CaS >
- Sulfur capture percent < SCAPT >
- Calcination fraction of CaCO₃ < CaCO₃calcin >

3) Limestone 100 kg 질량에 포함되어 있는 칼슘(Ca) kmole 수 계산 < CaSWT >

$$\text{< CaSWT = CaCO}_3 / \text{MWCaCO}_3 + \text{CaOH}_2 / \text{MWCaOH}_2 \text{ >}$$

4) Limestone 1 kg 질량에 포함되어 있는 칼슘(Ca) kmole 수 계산 < Ca >

$$\text{< Ca = CaSWT / 100 >}$$

5) 연료 100 kg에 필요한 Limestone의 kg 수 < Sorbent >

$$\langle \text{Sorbent} = S / \text{MWS} * \text{CaS} / \text{Ca} \rangle$$

6) 연료 100 kg 당 필요한 Limestone의 반응에 필요한 이론 산소 요구량

$$\langle \text{O2MBSORB} = 0.5 * \text{SCAPT} / 100 * S / \text{MWS} \rangle, \text{O2 kmole}/100 \text{ kg fuel}$$

$$\langle \text{O2WBSORB} = \text{O2MBSORB} * \text{MWO2} \rangle, \text{O2 kg}/100 \text{ kg fuel}$$

7) 연료 100 kg 당 필요한 Limestone 반응에의해 생성된 CO2 양

$$\langle \text{FCO2MBSORB} = (\text{CaCO3} * \text{CaCO3calcin} / \text{MWCaCO3} + \text{MgCO3} / \text{MWMgCO3}) / 100 * \text{SORBENT} \rangle, \text{CO2 kmole}/100 \text{ kg fuel}$$

$$\langle \text{FCO2WBSORB} = \text{FCO2MBSORB} * \text{MWCO2} \rangle, \text{CO2 kg}/100 \text{ kg fuel}$$

8) 연료 100 kg 당 필요한 Limestone 반응에의해 생성된 H2O 양

$$\langle \text{FH2OMBSORB} = (\text{CaOH2} / \text{MWCaOH2} + \text{MgOH2} / \text{MWMgOH2}) / 100 * \text{SORBENT} \rangle, \text{H2O kmole}/100 \text{ kg fuel}$$

$$\langle \text{FH2OWBSORB} = \text{FH2OMBSORB} * \text{MWH2O} \rangle, \text{H2O kg}/100 \text{ kg fuel}$$

9) 연료 100 kg 당 필요한 Limestone 반응에의해 연소 가스 가운데 **감소된** SO2 양 (줄어든 결과 값이 아니고, 줄어든 양)

$$\langle \text{FSO2MRBSORB} = \text{SCAPT} / 100 * S / \text{MWS} \rangle, \text{SO2 kmole 감소량}/100 \text{ kg fuel}$$

$$\langle \text{FSO2WRBSORB} = \text{FSO2MRBSORB} * \text{MWSO2} \rangle, \text{SO2 kg 감소량}/100 \text{ kg fuel}$$

10) 연료 100 kg 당 필요한 Limestone 반응에의해 생성된 고체 잔류물 (Spent Sorbent) < RESSORB >

투입된 Limestone 자체가 고체 잔류물이며, 그 잔류물에 추가되거나 감소되는 성분은 다음과 같다.

- Sulfation 반응 과정에서 사용됐던 산소는 Limestone 외부로부터 들어와 CaSO4 에 포함되어 고체 형태로 잔류하므로 추가 성분임.

- Limestone 반응에의해 감소된 연소 가스중의 SO2도 역시 Limestone 외부로부터 들어와 CaSO4에 포함되어 고체 형태로 잔류하므로 추가 성분임.

- Calcination 및 Dehydration 과정중에 가스 형태로 생성되어 연소 가스와 함께 배 출되는 CO2와 SO2는 감소 성분임.

<RESSORB = Sorbent - FCO2WBSORB - FH2OWBSORB + FSO2WRBSORB + O2WBSORB > , 고체 잔류물 kg/100 kg fuel

11) 열량 발생 및 감소에 의한 효율 증감

Calcination과 Dehydration 과정에 필요한 반응열은 Heat Loss가 되며, Sulfation 과정에 발생한 열은 Heat Credit가 된다.

- CaCO₃ Calcination에 의한 Heat Loss

< CaCO₃CALCL = CaCO₃ / SWT * CaCO₃Calcin * Sorbent * 425.6 > , kcal/100 kg fuel

- MgCO₃ Calcination에 의한 Heat Loss

< MgCO₃CALCL = MgCO₃ / SWT * Sorbent * 362.2 > , kcal/100 kg fuel

- Ca(OH)₂ Dehydration에 의한 Heat Loss

< CaOH₂DEHI = CaOH₂ / SWT * Sorbent * 353.3 > , kcal/100 kg fuel

- Mg(OH)₂ Dehydration에 의한 Heat Loss

< MgOH₂DEHI = MgOH₂ / SWT * Sorbent * 347.2 > , kcal/100 kg fuel

- Total Heat Loss < CALCDEHDL > : 상기 Heat Loss들의 합

- Sulfation에 의한 Heat Credit

각 Sulfation 과정별로 발생 열량을 구하는 것 보다는, 포집되는(Captured) S의 양으로 계산하는 것이 간단하다.

< CRDSULFUR = SCAPT / 100 * S * 3740.6 > , kcal/100 kg fuel

주) 고체 잔류물의 온도에 의해 방출되는 현열은 효율 계산에서 Heat Loss로

고려치 않았음. 이 Heat Loss는 Manufacturing Margin에 포함시키는 것으로 한다.

3.6 총 잔류물(Total Residue) 계산 < RESTT >

연소후 버려지는 잔류물은, 연료 성분중의 회(Ash)와 Unburned Carbon Loss에 의해 연소에 참여하지 않고 버려지는 연료중 탄소 성분, 그리고 Sorbent 투입시 반응에 참여하지 않고 버려지는 잔류 Sorbent 들이다.

< RESTT = Ash + CUCL + RESSORB > , kg/100 kg fuel

3.7 공기 요구량 계산

1) 이론 산소 요구 mole 수 계산 < O2MTHEO >

연료의 성분 가운데 연소 반응을 일으키는 성분은 탄소와 수소, 황인데, 이들 각 성분의 연소에 필요한 산소량은 화학 반응식으로부터 쉽게 구할 수 있다.

$C + O_2 \rightarrow CO_2$: 탄소(C) 1 mole에 산소(O2) 1 mole 필요

$H_2 + O \rightarrow H_2O$: 수소(H2) 1 mole에 산소(O2) 0.5 mole 필요

$S + O_2 \rightarrow SO_2$: 황(S) 1 mole에 산소(O2) 1 mole 필요

Sorbent가 투입되는 경우에는 Sorbent의 Sulfation 반응에 산소가 필요하며, 칼슘(Ca) 1 mole에 산소(O2) 0.5 mole이 필요하다.

한편 연료 성분중에 산소(O2)가 포함되어있으므로, 연료의 연소에 필요한 전체 산소 mole 수를 구하기 위해서는, 위의 연소 반응에 의해 필요한 산소 mole 수에서 연료중에 포함되어있는 산소 mole 수를 빼면 된다.

연료 성분 kmole/100 kg fuel 이론 O2 요구 kmole/100 kg fuel

< CFM = (C - CUCL) / MWC >

< O2MBC = CFM >

< H2FM = H2 / MWH2 >

< O2MBH2 = H2FM / 2 >

< SFM = S / MWS >

< O2MBS = SFM >

< O2FM = O2 / MWO2 >

< O2MBO2 = - O2FM >

< N2FM = N2 / MWN2 >

< H2OFM = H2O / MWH2O >

< O2MTHEO = O2MBC + O2MBH2 + O2MBS - O2MBO2 + O2MBSORB >
, kmole/100 kg fuel

2) 건조 공기의 구성

보일러가 연소에 필요한 산소를 얻는 곳은 대기중의 공기이다.

대기중의 공기는 질소와 산소 그리고 기타 아주 적은 양의 가스들로 구성되어 있다.

미국의 표준 대기 건조 공기(Dry Air)의 구성은 다음과 같다.

성분	mole%	mole wt.
N2	78.086	28.0135
O2	20.947	31.9988
Ar	0.934	
CO2	0.033	44.0098

합계	100.000	28.966

연소 계산을 간략히 하기 위하여, Ar과 CO2를 N2에 포함시켜 대기 질소(N2a)라 부르기로 하며, 그럴 경우 대기 질소의 분자량(mole wt)는 28.161 이 된다.

건조 공기의 성분을 산소와 대기 질소로만 구분하여 나타내면 다음과 같다.
(mole % 는 Vol % 와 동일함)

성분	Vol %	mole wt	Wt	Wt %
O2	20.95	31.9988	6.7037	23.14
N2a	79.05	28.161	22.2613	76.86

합계	100.00		28.9650	100.00

$$(Wt = \text{mole wt} \times \text{Vol \%} / 100)$$

3) 공기중의 습분

일반적으로 공기는 습기를 가지고 있으며, 그 습기는 보일러의 연소 계산에서, 특히 효율 계산에서 무시할 수 없는 영향을 미친다.

공기중의 습분은 상대 습도(Relative Humidity, RH)라는 계수로 나타내는데, 상대 습도는 다음 식으로 정의된다.

$$RH = \frac{P_v}{P_{vd}} \times 100$$

여기서, P_v = 습공기중 습분(H2O)의 부분압

P_{vd} = 건구 온도에서의 H2O 포화 압력

(증기표에서 건구 온도에 해당하는 포화 압력을 구할 수 있음)

Dalton의 부분압의 법칙에 따르면, 혼합 가스의 각 성분별 mole 비율은 각 성분의 부분압에 비례하며, 각 성분의 부분압의 합은 혼합 가스의 압력과 같다.

습공기의 경우 대기 공기는 건조 공기와 습분의 혼합 가스이며, 혼합 가스의 압력이 대기압이므로, Dalton의 법칙을 이용해 습공기의 건조 공기에 대한 습분의 mole 비율 <MMFWA >을 구하면 다음과 같다.

$$P_b = P_d + P_v$$

$$P_d = P_b - P_v$$

그러므로

$$\frac{\text{moles H}_2\text{O}}{\text{mole dry air}} = \frac{\text{습분(H}_2\text{O)의 mole 수}}{\text{건조공기의 mole 수}} = \frac{P_v}{(P_b - P_v)}$$

여기서, P_b = 대기압

P_d = 습공기중 건조 공기의 부분압

P_v = 습공기중 습분(H₂O)의 부분압

위의 상대 습도 식에서 P_v 값을 구한 다음, Dalton의 법칙을 이용하면 습공기의 습분의 mole 비율을 구할 수 있다. 즉 대기의 건구 온도와 상대 습도, 그리고 대기 압력을 알면 습분의 mole 비율을 구할 수 있는 것이다.

한편, 질량 단위의 연소 계산을 하는 경우에는 mole 비율 보다는 질량 비율의 습분 < MFWA > 을 알 필요가 있는데, mole 비율을 질량 비율로 바꾸려면 다음과 같이 분자량을 적용하면 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\text{kg 습분(H}_2\text{O)}}{\text{kg 건조공기(Dry Air)}} &= \frac{\text{H}_2\text{O 분자량}}{\text{Dry Air 분자량}} \times \frac{\text{moles H}_2\text{O}}{\text{mole dry air}} \\ &= \frac{18.0153}{28.966} \times \frac{P_v}{(P_b - P_v)} = 0.622 \times \frac{P_v}{(P_b - P_v)} \end{aligned}$$

예를들어, 건구 온도가 26.7 °C 이고, 상대 습도가 60%, 대기압이 1.03323 kg/cm² abs인 경우의 건조 공기에 대한 습분의 mole 비와 질량비를 구해보자.

- 증기표에서 건구 온도 26.7 °C 에서의 포화 압력 P_{vd} 를 구하면 0.035715 ata 이다.

- RH 식을 이용해 습공기의 부분압 P_v 를 구하면,

$$P_v = RH / 100 \times P_{vd} = 0.6 \times 0.035715 = 0.021429 \text{ (ata)}$$

- 습분의 mole 비율을 구하면,

$$\begin{aligned} \text{mole H}_2\text{O} / \text{mole dry air} &= P_v / (P_b - P_v) = 0.021429 / (1.03323 - 0.021429) \\ &= 0.0218 \end{aligned}$$

- 습분의 질량 비율을 구하면,

$$\text{kg H}_2\text{O} / \text{kg dry air} = 0.0218 \times 0.622 = 0.0136$$

4) 이론 건조 공기 요구 mole 수 계산 < DAIRMTHEO >

상기 1) 절에서 구한 필요 산소 mole 수를 건조 공기중의 산소 Vol % 0.2095로 나누면 요구되는 이론 건조 공기 mole 수를 구할 수 있다.

$$\text{DAIRMTHEO} = \text{O}_2\text{MTHEO} / 0.2095$$

5) 과잉 공기 (Excess Air) % < EXAIR >

과잉 공기는 연소시 공기와 연료의 혼합이 완전하지 않기 때문에 필요하다. 과잉 공기는 연소에 사용되지 않고 연돌 온도로 빠져나가 비효율 요인의 하나이므로 가능한한 과잉 공기의 양을 최소화 해야 한다. 연료별 그리고 연소 방법별로 연소기구에서 필요한 대표적인 과잉 공기량은 아래의 표와 같다. 연소 구역에서 완전 연소가 일어나지 않아 이론 공기량 보다 적은양의 공기가 필요한 경우에는(NOx 저감을 위해 지연 연소시키는 경우), 과잉 공기를 포함한 나머지 공기는 Furnace로 공급 된다.

한편 보일러 출구에서 측정한 과잉 공기의 양은(일반적으로 이곳에서 측정함) 연소 기구에서 필요한 과잉 공기 보다 많은데, 그 이유는 평형 통풍(Balanced Draft)를 사용하는 보일러의 경우, 보일러 본체의 틈새를 통해 외부 공기가 스며 들어 오기 때문이다 (강제 통풍(Forced Draft)의 경우에는 기밀을 유지용 공기(Seal Air)에 의해). Membrane 구조로 설계되는 요즈음의 보일러의 경우 이 추가 과잉 공기는 최대 부하에서 약 1 내지 2% 정도 된다. 그러나 오래된 보일러의 경우에는 이 양이 적지 않기 때문에, 만일 보일러 출구에서 측정한 과잉 공기를 기준으로하여 공기의 양을 줄이게 되면 연소 기기 구역에 충분한 공기가 공급되지 않아 불완전 연소를 일으킬 수도 있다.

연소 기기별 대표적인 과잉 공기 요구량

연료	연소 기기 혹은 Furnace의 형태	과잉 공기량, % wt
Pulverized coal	Completely water-cooled furnace - wet or dry ash removal	15 to 20
	Partially water-cooled furnace	15 to 40
Crushed coal	Cyclone furnace-pressure or suction	13 to 20
	Fluidized-bed combustion	15 to 20
Coal	Spreader stoker	25 to 35
	Water-cooled vibrating grate stoker	25 to 35
	Chain grate and traveling grate	25 to 35
	Underfeed stoker	25 to 40
Fuel oil	Register type burners	3 to 15
Natural, coke oven and refinery gas	Register type burners	3 to 15
Blast furnace gas	Register type burners	15 to 30
Wood/bark	Travelling grate, water-cooled vibrating grate	20 to 25
	Fluidized-bed combustion	5 to 15
Refuse-derived fuels(RDF)	Completely water-cooled furnace-traveling grate	40 to 60
Municipal solid waste(MSW)	Water-cooled/refractory covered furnace reciprocating grate	80 to 100
	Rotary kiln	60 to 100
Bagasse	All furnaces	25 to 35
Black liquor	Recovery furnaces for Kraft and soda pulping processed	15 to 20

6) 각종 공기 mole 수 계산

이제까지 살펴본, 연소에 필요한 공기의 양을 정리해 보면 다음과 같다.

연료 성분 가운데 탄소, 수소 및 황의 연소에 필요한 이론적인 산소 요구량을 구한 다음, 연료 성분의 하나로 존재하는 산소량을 빼 총 이론 산소 요구량을 계산한다. 그리고 총 이론 산소 요구량을 건조 공기중 산소%(20.95 Vol %)로 나누면 총 건조 이론 공기량을 구할 수 있다. 보일러에서 연소중 연료와 공기의 혼합이 완전할 수 없으므로 여분의 공기가 필요하며 그 공기를 과잉 공기라 부른다. 과잉 공기량은 연소 기기 및 연료에 따라 그 필요량이 다르다.

그러므로 연소에 필요한 총 건조 공기량은, 총 이론 건조 공기량 과 과잉 공기량의 합으로 계산 된다.

한편 대기 공기중에는 연소에 불필요한 대기 질소외에 역시 불필요한 습분이 존재한다. 연소에 사용하기 위해서 외부 공기를 끌어 들이면 필요한 산소만 들어오는 것이 아니

라 불필요한 대기 질소와 습분이 들어온다. 이러한 대기 질소와 습분이 연소 과정에서 열을 흡수해 연소 가스와 함께 보일러 밖으로 배출되어 연소 효율에 영향을 미치므로 이들 양도 계산해야 한다.

대기 공기중의 대기 질소의 양은 건조 공기 기준으로 볼 때 항상 일정한 비율(79.05 Vol %)로 존재하므로 건조 공기량으로부터 쉽게 구할 수 있으며, 대기 공기중의 습분의 양은 대기압 과 건구 온도 및 상대 습도로부터 Dalton의 분압의 법칙에 의해 구할 수 있다. 대기 공기중의 습분의 양은 건조 공기 기준으로 나타낼 수 있으므로, 총 건조 공기량에 대기 공기중의 습분의 양을 곱하면 총 습분의 양을 구할 수 있고, 그렇게 구한 총 습분의 양과 총 건조 공기의 양을 더하면 총 습공기량을 구할 수 있다.

이상의 설명을 기준으로 필요한 공기량을 구하면 다음과 같다.

- 과잉 건조 공기 mole 수 < DAIRMEX >
이론 건조 공기 mole 수 * 과잉 공기 비율
< DAIRMEX = DAIRMTHEO * EXAIR / 100 >
- 총 건조 공기 mole 수 < DAIRM >
이론 건조 공기 mole 수 + 과잉 건조 공기 mole 수
< DAIRM = DAIRMTHEO + DAIRMEX >
- 총 공기 습분 mole 수 < H2OMDAIR >
총 건조 공기 mole 수 * 건조 공기에 대한 공기중 습분의 mole 비율
< H2OMDAIR = MMFWA * DAIRM >
- 총 습공기 mole 수 < WAIRM >
총 건조 공기 mole 수 + 총 공기 습분 mole 수
< WAIRM = DAIRM + H2OMDAIR >
- 이론 건조 공기중의 대기 질소 mole 수 < N2MTHEO >
이론 건조 공기 mole 수 * 0.7905
< N2MTHEO = DAIRMTHEO * 0.7905 >
- 과잉 건조 공기중의 대기 질소 mole 수 < N2MEX >
과잉 건조 공기 mole 수 * 0.7905
< N2MEX = DAIRMEX * 0.7905 >
- 과잉 건조 공기중의 산소 mole 수 < O2MEX >
과잉 건조 공기 mole 수 * 0.2095
< O2MEX = DAIRMEX * 0.2095 >

7) 공기 질량 계산

- 이론 건조 공기 질량 < DAIRWTHEO >
이론 과잉 건조 공기 mole 수 * 건조 공기의 분자량
< DAIRWTHEO = DAIRMTHEO * MWDAIR >
- 총 건조 공기 질량 < DAIRW >
총 건조 공기 mole 수 * 건조 공기의 분자량
< DAIRW = DAIRM * MWDAIR >
- 총 공기 습분 질량 < H2OWDAIR >
총 공기 습분 mole 수 * H2O의 분자량
< H2OWDAIR = H2OMDAIR * MWH2O >
- 총 습공기 질량 < WAIRW >
총 건조 공기 질량 + 총 공기 습분 질량
< WAIRW = DAIRW + H2OWDAIR >

3.8 연소 가스량 계산

연소에 의해 발생한 총 가스 생성물을 습연소 가스(Wet Flue Gas)라 한다. 고체 생성물이나 잔류물은 제외한다. 습연소 가스량은 연전달 계산이나 보조 기기 설계에 사용된다. 연소 가스중 습분을 제외한 총 가스 생성물을 건조 연소 가스(Dry Flue Gas)라 한다.

습연소 가스는 다음 성분의 합이다.

- 연료로부터 발생한 습연소 가스 (연료는 Ash, Unburned Carbon 및 Limestone 투입에 의해 포집된 Sulfur를 제외한 연료임) 투
- 연소용 공기
- 연소용 공기중 습분(H2O)
- 분무용 증기에 의한 추가 습분(H2O)
- Limestone 투입에 의해 생성된 CO2와 습분(H2O)

PROGRAM에서 사용된 계산 순서와 방법에 의한 연소 생성물의 성분별 계산 설명은 다음과 같다.

순수 연소 생성물은 탄소 연소에 의한 CO2 와 황의 연소에 의한 SO2, 수소의 연소에 의한 H2O 뿐이다. 불완전 연소에 의한 CO나 SO, SO3 등의 발생은 없는 것으로 가정한다.

CO2 mole 수는 Unburned Carbon Loss를 뺀 연료중 탄소의 mole 수와 같고, SO2 mole 수는 연료중 황의 mole 수와 동일하다. 수소 연소에 의한 H2O mole 수는 연료

중 수소의 mole 수와 동일하다. 한편 Limestone이 연소 과정에 투입 되면, Calcination 과정에 의해 CO₂ 양은 증가하고, Sulfation 과정에 의해 SO₂ 양은 줄어들며, Dehydration 과정에 의해 H₂O 양은 증가한다.

한편 연소 과정에는 참여치 않으나 연소를 위해 투입됐던 연료나 공기와 함께 들어왔다가 그대로 빠져 나가는 성분들이 있는데, 이들을 정리하면 다음과 같다.

- 질소 (N₂) :

연소용 공기와 함께 들어온 대기 질소 와 연료 중에 성분으로 포함되어 있던 질소 (PROGRM)에서는 대기 질소와 순수 질소를 동일한 대기 질소로 처리 하였다. 왜냐하면 연료 성분중의 순수 질소의 양은 그리 많지 않으며, 대기 질소와 순수 질소사이에 분자량 차이가 아주 적기 때문이다.) 과잉 공기와 함께 들어온 대기 질소도 포함된다.

- 산소 (O₂) :

연소 과정을 완전 연소 과정으로 보기 때문에 과잉 공기와 함께 들어온 산소는 그대로 연소 가스로 배출된다.

연료중에 성분으로 포함되어 있던 산소는 연소 가스 계산에 참여하지 않는데, 그 이유는 앞에서 이룬 산소 요구량 계산시 연료 성분중의 산소는 빼고 계산했으므로, 연료중의 산소는 연소 생성물에 포함되어 있기 때문이다.

- 습분 (H₂O) :

수소의 연소에 의해 발생한 습분외에, 연소 과정에 참여하지 않고 들어 왔다가 그대로 빠져 나가는 습분이 있는데, 연료중에 포함되어 있던 H₂O와 대기 공기 중에 포함되어 있던 습분이 그들이다.

이상의 설명을 기준으로 연소 가스 발생량을 구하면 다음과 같다.

1) 건조 연소 가스

- CO₂ 발생량 < FCO₂M, FCO₂W >

< FCO₂M = CFM + FCO₂MBSORB > , kmole/100 kg fuel

< FCO₂W = FCO₂M * MWCO₂ > , kg/100 kg fuel

- SO₂ 발생량 < FSO₂M, FSO₂W >

< FSO₂M = SFM - FSO₂MRBSORB > , kmole/100 kg fuel

< FSO₂W = FSO₂M * MWSO₂ > , kg/100 kg fuel

- 연료 성분에 의한 N₂ < FFN₂MBF, FFN₂WBF >

< FFN₂MBF = N₂FM > , kmole/100 kg fuel

< FFN₂WBF = FFN₂MBF * MWN₂ > , kg/100 kg fuel

- 총 연소용 공기와 함께 들어온 대기 N₂ < FFN₂MBA, FFN₂WBA >

< FFN2MBA = N2MTHEO + N2MEX > , kmole/100 kg fuel

< FFN2WBA = FFN2MBA * MWN2a > , kg/100 kg fuel

- 과잉 공기와 함께 들어와 연소에 참여하지 않은 O2 < FO2M, FO2W >

< FO2M = O2MEX > , kmole/100 kg fuel

< FO2W = FO2M * MWO2 > , kg/100 kg fuel

- 총 건조 연소 가스 량 < FGASMDRY, FGASWDRY >

< FGASMDRY = FCO2M + FSO2M + FFN2MBF + FFN2MBA + FO2M >
, kmole/100 kg fuel

< FGASWDRY = FCO2W + FSO2W + FFN2WBF + FFN2WBA + FO2W >
, kg/100 kg fuel

- 건조 연소 가스의 성분별 Vol. %

< PCO2VD = FCO2M / FGASMDRY * 100 >

< PSO2VD = FSO2M / FGASMDRY * 100 >

< PN2BFVD = FFN2MBF / FGASMDRY * 100 >

< PN2BAVD = FFN2MBA / FGASMDRY * 100 >

< PO2VD = FO2M / FGASMDRY * 100 >

2) 연소 가스중 습분 (H2O)

- 연료중 H2 연소에 의한 H2O 및 Limestone 투입시 Dehydration 과정에 의해
생성된 H2O < FH2OMBCOMB, FH2OWBCOMB >

< FH2OMBCOMB = H2FM + FH2OMBSORB > , kmole/100 kg fuel

< FH2OWBCOMB = FH2OMBCOMB * MWH2O > , kg/100 kg fuel

- 연료중 H2O < FH2OMBF, FH2OWBF >

< FH2OMBF = H2OFM > , kmole/100 kg fuel

< FH2OWBF = FH2OMBF * MWH2O > , kg/100 kg fuel

- 대기중 H2O < FH2OMBA, FH2OWBA >

< FH2OMBA = H2OMDAIR > , kmole/100 kg fuel

< FH2OWBA = FH2OMBA * MWH2O > , kg/100 kg fuel

- 연소 가스중 총 습분 (H2O) < FH2OM, FH2OW >

< FH2OM = FH2OMBCOMB + FH2OMBF + FH2OMBA > , kmole/100 kg fuel

< FH2OW = FH2OM * MWH2O > , kg/100 kg fuel

3) 습 연소 가스량 < FGASMWET, FGASWWET >

앞에서 구한 건조 연소 가스와 연소 가스중 습분의 합이 총 습 연소 가스량이다.

< FGASMWET = FGASMDRY + FH2OM > , kmole/100 kg fuel

< FGASWWET = FGASWDRY + FH2OW > , kg/100 kg fuel

- 습 연소 가스의 성분별 Vol. %

< PCO2VW = FCO2M / FGASMWET * 100 >

< PSO2VW = FSO2M / FGASMWET * 100 >

< PN2BFVW = FFN2MBF / FGASMWET * 100 >

< PN2BAVW = FFN2MBA / FGASMWET * 100 >

< PO2VW = FO2M / FGASMWET * 100 >

< PH2OVW = FH2OM / FGASMWET * 100 >

- 습 연소 가스의 성분별 Weight %

< PCO2WW = FCO2W / FGASWWET * 100 >

< PSO2WW = FSO2W / FGASWWET * 100 >

< PN2BFWW = FFN2WBF / FGASWWET * 100 >

< PN2BAWW = FFN2WBA / FGASWWET * 100 >

< PO2WW = FO2W / FGASWWET * 100 >

< PH2OWW = FH2OW / FGASWWET * 100 >

4. 보일러 효율

4.1 효율의 정의

보일러 효율에 대한 정의는 ASME PTC 4.1 에 규정되어 있는데, 그 기본 정의는 모든 열기관의 정의와 동일하게 보일러의 출열(Output of boiler)을 보일러의 입열(Input of boiler)로 나눈 값으로 정의된다.

한편 보일러 건설후 건설된 보일러의 효율이 계약서의 보증 효율과 일치하는지 여부를 판단하기 위한 Acceptance Test 용으로 ASME PTC 4.1의 Test Procedure를 따르는데, ASME PTC 4.1에 따라 Test를 할 경우 많은 노력과 비용이 필요하므로, ASME PTC 4.1 Clause 1.07에 보면 발전소 운전중에 적은 노력과 비용으로 정기적으로 효율을 측정하기 위한 방법으로 "Abbreviated Efficiency Test"을

정의해 두었다. Abbreviated Efficiency Test의 경우, 아래에서 설명되겠지만, Minor Heat losses들을 고려하지 않을 뿐 아니라, Heat credits를 Input of boiler로 고려하지 않고 단지 Heat in fuel 만을 Input of boiler 로 고려하도록 명시되어 있다. Heat credits를 Input of boiler 로 고려하지 않을 경우 보일러 효율이 높게 나타나는 관계로, 보일러 업체들이 이 Abbreviated Efficiency Test 의 정의에 따른 효율을 즐겨 사용하며, 이 효율을 ASME PTC 4.1의 정식 Test에 의한 효율과 구분하기 위하여 연료 효율(Fuel Efficiency)라고 부르기도 한다.

Heat losses와 Heat credits 들에 대한 자세한 내용은 ASME PTC 4.1을 참조하기 바란다.

1) ASME PTC 4.1의 정식 Test 에 의한 효율

ASME PTC 4.1에 의한 보일러계의 열평형 식은 다음과 같다.
(ASME PTC 4.1의 Fig. 2 "Heat Balance of Steam Generator" 참조)

$$\text{Heat in fuel} + \text{Heat credits} = \text{Heat output} + \text{Heat losses}$$

그리고 효율 정의를 위한 보일러의 Input과 Output은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Input of boiler} &= \text{Heat in fuel} + \text{Heat credits} \\ \text{Output of boiler} &= \text{Heat output} \end{aligned}$$

효율은 Output을 Input으로 나눈 값으로 정의되며, Heat Loss Method로 표현하기 위하여 Output of boiler를 Input of boiler의 향으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Output of boiler} &= \text{Heat output} \\ &= \text{Heat in fuel} + \text{Heat credits} - \text{Heat losses} \\ &= \text{Input of boiler} - \text{Heat losses} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{보일러효율} = \eta_g &= \frac{\text{Output of boiler}}{\text{Input of boiler}} \\ &= \frac{\text{Input of boiler} - \text{Heat losses}}{\text{Input of boiler}} \\ &= \frac{(H_f + B) - L}{(H_f + B)} = 1 - \frac{L}{H_f + B} \end{aligned}$$

여기서, H_f = Heat in fuel

B = Heat credits

L = Heat losses

2) Abbreviated Efficiency Test에 의한 연료 효율

Abbreviated Efficiency Test에 의한 연료 효율은 ASME PTC 4.1 보다는 "Steam, its generation and use" 책자 Page 9-15의 Efficiency 절의 내용을 참고하는 것이 용이하다.

Abbreviated Efficiency Test 에서는 Input of boiler로서 단지 Heat in fuel 만 고려하므로,

$$\begin{aligned} \text{Input of boiler} &= \text{Heat in fuel} \\ \text{Output of boiler} &= \text{Heat output} \end{aligned}$$

효율은 Output을 Input으로 나눈 값으로 정의되며, Heat Loss Method로 표현하기 위하여 Output of boiler를 Input of boiler의 향으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Output of boiler} &= \text{Heat output} \\ &= \text{Heat in fuel} + \text{Heat credits} - \text{Heat losses} \\ &= \text{Input of boiler} + \text{Heat credits} - \text{Heat losses} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{보일러효율} = \eta_f &= \frac{\text{Output of boiler}}{\text{Input of boiler}} \\ &= \frac{\text{Input of boiler} + \text{Heat credits} - \text{Heat losses}}{\text{Input of boiler}} \\ &= \frac{H_f + B - L}{H_f} = 1 + \frac{B}{H_f} - \frac{L}{H_f} \end{aligned}$$

여기서, H_f = Heat in fuel
 B = Heat credits
 L = Heat losses

3) ASME PTC 4.1 효율과 연료 효율의 차이

그러면 ASME PTC 4.1의 효율과 연료 효율은 동일한 값을 나타내는가? 물론 그렇지 않다. 각각의 식에서 알 수 있듯이 Heat credits를 무시할 경우 ASME PTC 4.1 효율과 연료 효율의 값은 같다. 그리고 Heat credits을 고려한다면 Heat credits은 거의 대부분의 경우 (+) 값이므로 기계 효율이 ASME PTC 4.1 효율보다는 크게 나타난다. 하나의 예를 들어 그 차이를 알아 보기로 하자.

- 연료 효율의 정의에 의한 효율

Heat losses = 13 % of Heat in fuel
 Heat credits = 0.6 % of Heat in fuel

$$\eta_f = 1 + \frac{B}{H_f} - \frac{L}{H_f} = 1 + 0.006 - 0.13 = 0.876 = 87.6\%$$

- ASME PTC 4.1 효율로의 전환

$$\eta_g = 1 - \frac{L}{H_f + B} = 1 - \frac{0.13}{1 + 0.006} = 0.8708 = 87.08\%$$

위의 예는 유연탄을 연소하는 석탄 발전소의 일반적인 효율로서, 이 경우 기계 효율이

ASME PTC 4.1 효율보다 약 0.5 % 높게 나타난다는 것을 알 수 있다.

4) HHV 효율과 LHV 효율

보일러의 효율은 위에서 설명한대로 Output of boiler를 Input of boiler로 나눈 값인데, Input of boiler의 대부분을 차지하는 Heat in fuel 이 연료의 발열량을 HHV 로 보느냐 LHV 로 보느냐에 따라서 2 가지 값을 갖게 된다.

즉 효율 계산에서 Heat in fuel 계산시 연료의 발열량으로 HHV를 사용하여 구한 효율이 HHV 효율이고 LHV를 사용하여 구한 효율이 LHV 효율이다.

가끔 HHV 효율과 LHV 효율이 별개인 것으로 혼동하기 쉬운데, 그것은 별개의 것이 아니고 기준이 다를뿐이다. 예를 들면 시간을 말할 때, 9 시 50 분을 10 시 10 분전이라고 말하는 것과 같은 것이다.

어느 일정한 운전 상태에서 보일러의 연료 사용량은 일정하며, 그 일정한 연료 사용량을 HHV를 사용하여 Heat in fuel을 계산할 경우에는 Heat in fuel 값이 커져서 효율이 낮게 나타나며, 반대로 LHV를 사용하여 계산할 경우에는 효율이 높게 나타난다. 그러나 2 가지 효율 모두 하나의 보일러의 효율을 다르게 나타낸 것일 뿐이다.

앞의 연료의 발열량 설명에서 언급하였듯이 실험실에서 연료의 발열량 측정할 경우에는 HHV를 측정하게 되므로, 보일러 효율도 HHV 효율로 규정하는 것이 추후 Performance Test 시 분쟁의 소지를 없앨 수 있다.

보일러 업체에서는 LHV 효율이 높게 나타나므로 자사의 보일러 효율을 LHV로 나타내기를 좋아 하는데, 어떠한 경우든 보일러 효율을 규정할 때는 필히 HHV 기준인지 LHV 기준인지를 명확히 해야 한다.

4.2 Heat Loss Method 에 의한 효율 계산

ASME PTC 4.1에 정의 되어 있듯이 보일러의 효율은 2 가지 방법으로 측정하는데, 하나는 Input-Output Method 이고 다른 하나는 Heat Loss Method 이다.

Input-Output Method 는 연료의 발열량과 소모량, Heat credits 와 작동 유체(H₂O)에 의해 흡수된 열량을 측정해야 한다.

Heat Loss Method는 Heat losses, Heat credits, 연료의 성분 분석치와 발열량의 측정이 필요하며, Heat losses가 발생한 부하점(Load Point)을 확인하기 위하여 Input of boiler 나 Output of boiler중에 하나를 측정해야 한다.

ASME PTC 4.1에 Input of boiler(Heat in fuel + Heat credits) 와 Output of boiler(Heat output)을 측정하는 방법이 제시되어 있고 그에 따른 측정 오차도 명시되어 있으나, 고체 연료의 경우 연료의 소모량 측정이 쉽지 않아 Input of boiler의 측정이 용이치 않으며 다른 한편으로는 보일러의 모든 급수나 증기 유입, 유출량의 측정이 쉽지 않아 Output of boiler의 측정 또한 용이치 않아, 일반적으로 Input-Output Method는 사용치 않으며 주로 Heat Loss Method를 사용한다.

Heat Loss Method 에 의한 효율 계산 공식은 앞에서 설명한바와 같으며, Input-Output Method 에 의한 효율 계산 공식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{보일러효율} = \eta_g &= \frac{\text{Output of boiler}}{\text{Input of boiler}} \\ &= \frac{\text{Output of boiler}}{\text{Heat in fuel} + \text{Heat credits}} \end{aligned}$$

Input of boiler의 열량이나 Output of boiler의 열량 측정을 위해서는 그 경계 구역설정이 필요하며, ASME PTC 4.1에서 정의하는 효율의 경계 구역은 ASME PTC 4.1의 그림 1. "Steam Generating Unit Diagram"에 나타나 있다.

일반적으로 보일러의 일부분이라고 생각되는 기기 가운데, 보일러 경계 밖의 기기 즉 보일러 효율 정의에 포함되지 않는 기기는 다음과 같다.

- Forced Draft Fan
- Steam Coil Air Preheater
- Dust Collector
- Induced Draft Fan

ASME PTC 4.1에서 정의하는 각 보일러 효율 관련 항목들의 구성 요소들과 그 계산 방법은 다음과 같다. 여기서는 그 골격이 되는 계산 방법만을 기록하였으므로, 아래 내용을 읽어 본후 더 자세한 내용을 알고자 하는 경우에는 ASME PTC 4.1을 읽어 볼 것을 추천한다.

1) Input of boiler

- Heat in fuel (H_f) (Chemical), kcal/kg of A.F. Fuel (A.F. = As Fired)
(ASME PTC 4.1 Clause 7.2.6)

H_f = 실험실 분석에 의해 구한 발열량을 연료중 습분을 고려하여 "As Fired Basis" 로 수정한 발열량.

습분에 의한 수정은 다음과 같이한다.

$$H_f = H_{f'} \times \frac{100 - m_f}{100}$$

$H_{f'}$ = "Air Dry Basis"로 실험실에서 측정한 연료의 발열량, kcal/kg of A.D. Fuel (A.D. = Air Dry)

m_f = 연료 시료의 습분의 분석에 의해 구한 연료중 습분 %
(Moisture %)

위에 설명된 발열량 H_f 는 정압과정 기준이므로, 만일 실험실에서 구한

발열량이 정적과정 기준일 경우에는 다음식을 이용하여 정압과정의 발열량으로 수정한다.

$$H_f = H_{fp} = H_{fv} + 146.9 H$$

여기서, H_{fp} = 정압과정에서 연료의 "As Fired Basis" 발열량, kcal/kg of A.F. Fuel

H_{fv} = 정적과정에서 연료의 "As Fired Basis" 발열량, kcal/kg of A.F. Fuel

H = 실험실 분석에 의해 구한 "As Fired Basis" 연료의 단위 질량당 수소(H₂)의 질량 비율 (연료중 습분의 H₂ 제외)

- Input of boiler by fuel = $H_f \times W_{fe}$, kcal/hr (ASME PTC 4.1 Clause 7.2.7)

여기서, W_{fe} = 측정된 연료의 유량, kg of A.F. Fuel / hr

- Heat credits

o 보일러(Air Heater) 입구 공기의 열량

열량을 계산하기 위해 사용되는 엔탈피의 개념은 어떤 기준 온도에 대한 개념이므로, 엔탈피로 계산되는 모든 현열(Sensible Heat)에 의한 Heat losses 나 Heat credits 의 열량은 그 기준 온도가 있어야 한다. 보일러 효율 계산에서 선정되는 기준 온도는 보통 설계 주변 온도(Design Ambient Air Temperature)로 선정하는데, 계약서상에 그 기준 온도가 명기되어 있어야 한다.

즉 보일러(Air Heater) 입구 공기의 열량은 기준 공기 온도(Reference Air Temperature)을 기준으로 한 상대적인 열량이다.

한편 보일러의 Main Air Heater 앞쪽에 Steam Coil Air Preheater (SCAPH)가 설치되고 가열용 증기가 시험중인 보일러 외부로부터 공급되는 경우에는 SCAPH 후단의 공기의 열량, 즉 Main Air Heater 전단의 공기의 열량을 Air Heater 입구 공기의 열량으로 사용해야 하며, 반면에 가열용 증기를 시험 중인 보일러 본체로부터 공급받는 경우에는 SCAPH 전단의 공기의 열량을 Air Heater 입구 공기의 열량으로 사용해야 한다.

$$B_{Ae} = (W_{A'} - W_{A'5}) \times W_{fe} \times c_{pA'} [t_{A7,A8} - t_{RA}] + W_{A'5} \times W_{fe} \times c_{pA'} [t_{A'5} - t_{RA}], \text{ kcal/hr}$$

여기서, B_{Ae} = Steam Coil Air Preheater 등과 같은 외부로부터 보일러 입구 공기에 공급되는 열량, kcal/hr

W_{fe} = ASME PTC Code에 따라 측정된 연료의 유량, lb A.F. Fuel/hr

W_{A5} = 보일러 주변이나 혹은 F.D. Fan 출구측으로부터 Pulverizer용 Tempering Air로 공급된 "As Fired" 연료 1 kg 당 사용된 건조 공기의 kg 수, kg/kg A.F. Fuel

W_A = "As Fired" 연료 1 kg 당 사용된 건조 공기의 kg 수, kg/kg A.F. Fuel

$$= \frac{W_{G'N_2} - N}{0.7685}$$

여기서, $W_{G'N_2}$ = Orsat 측정기에의해 측정된 연소 가스 성분들로부터 계산된, "As Fired" 연료 1 kg 연소시 발생하는 건조 연소가스중의 질소의 kg 수, kg/kg A.F. Fuel

N = 연료의 실험실 분석에의해 결정된 "As Fired" 연료 1 kg 당 질소의 kg 수, kg/kg A.F. Fuel

$$W_{G'N_2} = \frac{28.02 N_2}{12.01 (CO_2 + CO)} \left(C_b + \frac{12.01 S}{32.07} \right)$$

여기서, CO_2 , O_2 및 CO = Orsat 측정기에의해 측정된 건조 연소 가스중 해당 가스의 Volume Percent

N_2 = Orsat 측정기에의해 측정된 건조 연소 가스중 N_2 가스의 Volume Percent로, 100 - CO_2 - O_2 - CO 로 계산됨.

(추가로 황산화물이 더 있는데, ASME PTC 4.1 Section 9, APPENDIX의 계산에서 이들 황산화물은 Orsat 실험에서 모두 CO_2 시약에의해 제거된 것으로 가정하였기 때문이다.)

S = 연료의 실험실 분석에의해 결정된 "As Fired" 연료 1 kg 당 황의 kg 수, kg/kg A.F. Fuel

C_b = 연료의 실험실 분석에의해 결정된 "As Fired" 연료 1 kg 당 탄소 가운데 연소에 참여한 탄소의 kg 수, kg/kg A.F. Fuel

$$C_b = C - \frac{W_{d'p'} \times H_{d'p'}}{8080}$$

여기서, C = 연료의 실험실 분석에의해 결정된 "As Fired" 연료 1 kg 당 탄소의 kg 수, kg/kg A.F. Fuel

$W_{d'p'}$ = "As Fired" 연료 1 kg 당 발생하는 총 건조 회의 kg 수, total dry refuse kg/kg A.F. Fuel

$H_{d'p}$ = 실험에 의해 결정된 총 건조 회의 열량,
 kcal/kg dry refuse
 8080 = kcal/kg = 회 가운데 존재하는 탄소 1 kg의
 열량.

t_{A7} 혹은 t_{A8} = °C = 보일러(Air Heater) 입구 온도. 만일 보일러에
 Steam 혹은 Water Coil Air Heater 가 설치되어 있고, 그 가열
 용열을 Test 중인 보일러 외부로부터 공급 받을 때에는, 동
 Steam(Water) Coil Air Heater 후단의 공기 온도(t_{A8})가 보일러
 입구 온도가 되며, 이 경우 입구 공기에 추가된 열량은 Heat
 Credit가 된다. 한편 그 가열용 열을 Test 중인 보일러로부터
 공급받는 경우에는 동 Steam(Water) Coil Air Heater 전단의 공기
 온도(t_{A7})가 보일러 입구 온도가 되며, 이 경우에는 Heat Credit
 는 없다.

t_{RA} = °C = 기준 공기 온도. 효율 계산시 Sensible Heat Losses 및
 Credits를 비교하기 위한 기준 온도.
 (ASME PTC 4.1 Clause 7.2.8.1)

- o 외부에서 공급되는 Atomizing Steam의 열량
- o 기준 공기 온도를 기준으로 한 연료의 현열
- o Pulverizer의 소모 동력
- o Boiler Circulating Pump의 소모 동력
- o Primary Air Fan의 소모 동력
- o Recirculating Gas Fan 의 소모 동력
- o Air Heater 입구 공기의 습분에 의해 공급되는 열량

- Heat losses

- o 잔류물(Refuse)중의 Unburned Carbon
- o 기준 공기 온도 기준의 건조 연소 가스(Dry Flue Gas)의 열량
- o

--- 이후 내용은 추후 보완 예정입니다. -----