

화력발전소 보일러 연료소비량 계산 및 정확성 검증

장석원[†] · 김재훈*

한전전력연구원, *충남대학교

(2005년 3월 14일 접수, 2005년 5월 31일 채택)

Fuel Consumption Rate Calculation Equation and its Application at Power Boiler

Seok Won Jang[†] and Jae Hoon Kim*

Korea Electric Power Research Institute, *Chungnam National University

(Received 14 March 2005, Accepted 31 May 2005)

요 약

본 논문에서는 화력발전소 보일러 연료소비량을 측정에 의하지 않고 계산으로 구하는 방법을 세부 항목 별로 유도하고 그 결과를 검증하였다. 보일러 경계를 출입하는 Energy in 및 Energy out의 정량적 관계를 분석하여 Energy in에 해당하는 투입열량과 Energy out에 해당하는 흡수열량 및 손실열량으로부터 에너지 출입의 유기적인 관계식을 수립하여 연료소비량 계산식을 유도, 정립하고 실제 운전중인 석탄 및 중유연소 발전소에 적용하여 계산식의 정확성을 검증하였다.

주요어 : 열정산, 연료소비량, 보일러효율, 발전소 보일러

Abstract — Calculation equations of fired fuel consumption rating at boiler can lead from combustion analysis and boiler heat balance using mass & energy conservations. By comparing calculation equation results with those of measurement, we can confirm the deviation of fuel consumption rate, and correction degree, and can also establish the proven technology to apply the equation at the site. We applied fuel rate equation to the operating power plant and recorded 2.4% & 1.5% of deviation at each coal and oil fired boilers. This range of deviation is regarded as trustable to apply the fuel consumption equation to the actual site.

Key words : Heat balance, Fuel consumption rate, Boiler efficiency, Power boiler

1. 서 론

보일러 연료 중 액체와 기체연료는 유체 특성상 비교적 정확하게 연료량을 측정할 수 있으나 석탄과 같은 고체연료는 측정의 정밀도가 떨어지며 특히 노후 발전소의 경우 연료량 측정의 정확도가 떨어져 발전원가 계산의 부정확성, 성능산출의 오차 등 유지, 보수, 운영에 필수적인 기본데이터 산출의 부정확성을 초래한다. 따라서

화력발전소 보일러에서 성능산출 및 최적운영에 필수적인 연료소비량을 정확하게 구하기 위해서는 측정 이외의 다른 방법적 고찰이 필요하게 되었다. 석탄연소 보일러에서 직접 측정에 의하지 않고도 연료소비량을 계산하는 방법은 보일러 경계에서의 열정산 분석으로부터 그 해답을 구할 수 있다.

본 연구에서는 ASME Power Test Code를 만족하는 보일러 열정산과 연소해석으로부터 얻어지는 연료 1 kg 당 연소가스 중량과 입열, 출열, 손실항목 등의 정량적 분석으로부터 소비연료량을 계산하고 그 결과를 실제 현장 적용을 통하여 검증함으로써 보일러 운영에 유용한 도구로의 사용 적합성을 검토하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
Korea Electric Power Research Institute
Tel: 042-865-5321
E-mail: jangsw@kepri.re.kr

2. 소비 연료량 계산식 수립

2-1. 보일러 효율 계산

Fig. 1과 같은 보일러 열정산도로부터 보일러 경계를 출입하는 energy in 및 energy out의 정량적 관계식을 분석하여 energy in에 해당하는 입열과 energy out에 해당하는 흡수열량, 손실열량 등을 구하여 에너지 출입관계식을 수립하여 연료소비량을 구한다.

입출열법 효율계산식에서 보일러 효율은 보일러 총 입열량에 대한 총출열량의 비율로서 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \eta_B &= \frac{\text{Heat output}}{\text{Heat input}} * 100(\%) \\ &= \frac{O_{stm}}{Q_{fuel} + Q_{cr}} * 100(\%) \\ &= \frac{mSH_{out} * (hSH_{out} - hFW) + mRH_{out} * (hRH_{out} - hRH_{in}) + Q_{AUX}}{mfuel * HHV + Q_{cr}} \end{aligned} \quad (1)$$

윗 식에서 대부분 항목은 측정, 계산으로 구하거나 설계값으로 대체가 가능하고 유일한 미지수는 연료소비량 mfuel이다. 에너지와 질량의 입출입 관계를 도식한 보일러 열정산도로부터 에너지보존과 질량보존의 법칙을 적용하여 연료소비량을 도출할 수 있다.

2-2. 소비 연료량 계산

(1)에서 Heat Output의 항목들은 측정에 의하여 구할 수 있고 Heat Input 중 부가입열 Qcr도 측정하여 구할 수 있으며 고위발열량 HHV 또한 구할 수 있는 값이므로 효율을 구하기 위해서는 연료량 mfuel을 알아야 한다. 보일러 heat balance 상태에서 열의 출입과 보존관계식을 수립하여 입열에너지 총량과 출열에너지 총량은 동일하다는 에너지보존의 법칙과 연소전후의 반응물과 생성물의 질량은 동일하다는 질량보존의 법칙으로부터 연료소비량을 구한다. 즉

$$\begin{aligned} \text{Energy In} &= \text{Energy Out} \\ \text{Fuel Mass In} + \text{Combustion Air In} &= \text{Combustion Mass Out} \end{aligned}$$

Fig. 1의 보일러 열정산도로부터

$$\text{Energy In} = Q_{fuel} + Q_{air} + Q_{cr} + Q_{FW} + Q_{RHin} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Energy Out} &= Q_{SHout} + Q_{RHout} + Q_{etc} + Q_{dg} \\ &+ Q_{ub} + Q_{ra} + Q_{ua} + Q_m \end{aligned} \quad (3)$$

계의 입열 중 공기입열은 공기예열열량, 공기수분열량으로 부가입열에 해당하므로 에 통합한다. 입열에너지와 출열에너지는 보존되므로 Energy In=Energy Out에서 다

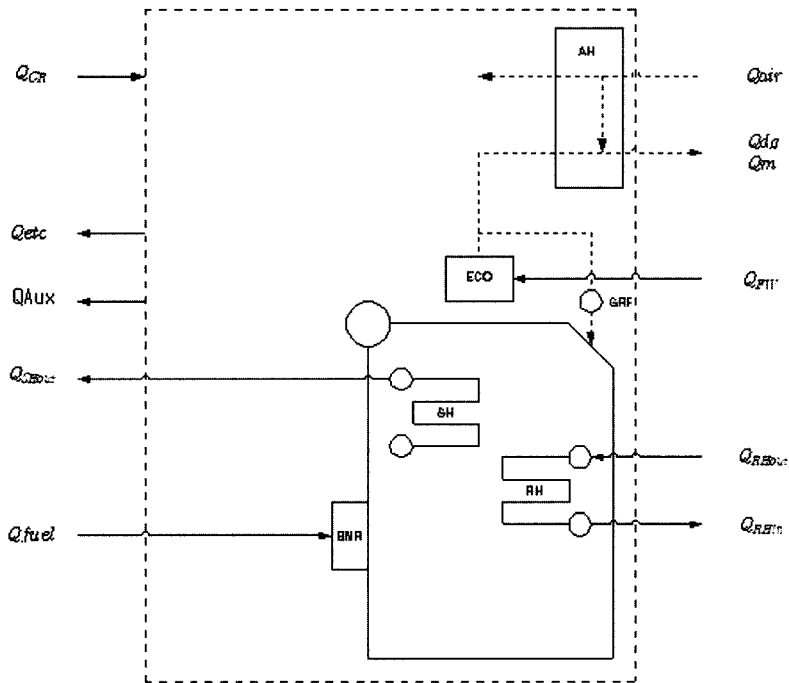


Fig. 1. 보일러 열정산도.

음과 같이 표현된다.

$$Q_{fuel} + Q_{cr} + Q_{FW} + Q_{RHin} = Q_{SHout} + Q_{RHout} + Q_{etc} + Q_{dg} + Q_{ub} + Q_{ra} + Q_{ua} + Q_m \quad (4)$$

(4)를 가스측 에너지와 증기측 에너지로 구분하여 가스측은 좌항, 증기측은 우항으로 정리하면 다음과 같다.

$$(Q_{fuel} - Q_{ub} - Q_{ra} - Q_{ua} + Q_{cr}) - Q_m - Q_{dg} = (Q_{SHout} - Q_{FW}) + (Q_{RHout} - Q_{RHin}) + Q_{AUX} \quad (5)$$

계산을 단순화하기 위하여 가스측 에너지중 Q_{ub} , Q_{ra} , Q_{ua} 를 기타손실열량 Q_{etc} 로 표현하고 수분손실열량 Q_m 은 연소가스중 수분손실열량(연료수분손실열량+수소연소수분손실열량) Q_{mf} 과 공기중 수분손실열량인 Q_{ma} 로 구분한다. 연소해석으로부터 연료 1 kg당 수분손실중량, 공기중 수분중량, 전배기가스중량 mfg/m_{fuel} , ma/m_{fuel} , mdg/m_{fuel} 을 구하고 이를 연료량과 연료발열량으로 상세 표현하면 (5)의 가스측 에너지인 좌항은 다음과 같이 연료량 m_{fuel} 의 항으로 표현된다.

$$Q_{fuel} - Q_{ub} - Q_{ra} - Q_{ua} + Q_{cr} - Q_m - Q_{dg} = (Q_{fuel} - Q_{etc} + Q_{cr}) - Q_m - Q_{dg} = (Q_{fuel} - Q_{etc} + Q_{cr}) - Q_{mf} - Q_{ma} - Q_{dg} \quad (6)$$

$$= (m_{fuel} * HHV - X_{etc} * m_{fuel} * HHV + X_{cr} * m_{fuel} * HHV) - hfg * mfg - hma * ma - hdg * mdg = m_{fuel} * (HHV - X_{etc} * HHV + X_{cr} * HHV) - hfg * mfg - hma * ma - hdg * mdg \quad (7)$$

$$= m_{fuel} * [(1 - X_{etc} + X_{cr}) * HHV - hfg * (mfg/m_{fuel}) - hma * (ma/m_{fuel}) - hdg * (mdg/m_{fuel})] \quad (8)$$

다음으로 (5)의 증기측 에너지인 우항은 다음과 같이 유량과 엔탈피로 표현된다.

$$(Q_{SHout} - Q_{FW}) + (Q_{RHout} - Q_{RHin}) + Q_{AUX} = m_{SHout} * (h_{SHout} - h_{FW}) + m_{RHout} * (h_{RHout} - h_{RHin}) + Q_{AUX} \quad (9)$$

보일러 스팀 온도조절용 스프레이 입열을 고려하면 다음의 식(10)이 구해진다.

$$m_{SHout} * (h_{SHout} - h_{FW}) + m_{SHsp} * (h_{FW} - h_{SHsp}) + m_{RHout} * (h_{RHout} - h_{RHin}) + m_{RHsp} * (h_{RHin} - h_{RHsp}) + Q_{AUX} \quad (10)$$

에너지보존에 의하여 가스측 에너지=증기측 에너지이므로 (8), (10)로부터 다음의 식 (11)이 구해진다.

$$m_{fuel} * [(1 - X_{etc} + X_{cr}) * HHV - hfg * (mfg/m_{fuel}) - hma * (ma/m_{fuel}) - hdg * (mdg/m_{fuel})]$$

$$= m_{SHout} * (h_{SHout} - h_{FW}) + m_{SHsp} * (h_{FW} - h_{SHsp}) + m_{RHout} * (h_{RHout} - h_{RHin}) + m_{RHsp} * (h_{RHin} - h_{RHsp}) + Q_{AUX} \quad (11)$$

연료량 m_{fuel} 을 기준으로 (11)를 정리하면 다음과 같이 연료소비량 계산식이 유도된다.

$$m_{fuel} = \frac{m_{SHout} * (h_{SHout} - h_{FW}) + m_{SHsp} * (h_{FW} - h_{SHsp}) + m_{RHout} * (h_{RHout} - h_{RHin}) + m_{RHsp} * (h_{RHin} - h_{RHsp}) + Q_{AUX}}{[(1 - X_{etc} + X_{cr}) * HHV - hfg * \left(\frac{mfg}{m_{fuel}}\right) - hma * \left(\frac{ma}{m_{fuel}}\right) - hdg * \left(\frac{mdg}{m_{fuel}}\right)]} \quad (12)$$

윗식에서 연료발열량 HHV는 주어지는 값이다. 또한 각종 증기유량인 m_{SHout} , m_{RHout} , m_{SHsp} , m_{RHsp} 은 측정 또는 계산으로 구할 수 있고, 물과 증기의 엔탈피 항 h 는 steam table에서, 보일러출구 연소가스엔탈피 hdg 는 gas property로부터, 연료 1 kg당 생성되는 증발수분, 필요공기, 가스중량인 mfg/m_{fuel} , ma/m_{fuel} , mdg/m_{fuel} 은 연소해석 등으로 계산 또는 측정으로 구할 수 있다.

기타손실의 단위열량 X_{etc} 인 $Q_{ub}/m_{fuel} * HHV + Q_{ra}/m_{fuel} * HHV + Q_{ua}/m_{fuel} * HHV$ 또한 계산 혹은 설계값 등을 사용하고 부가입열의 단위열량 X_{cr} 인 $Q_{air}/m_{fuel} * HHV + Q_{ma}/m_{fuel} * HHV$ 도 계산 또는 측정으로 구해지므로 모든 미지수가 해소되어 연료소비량 m_{fuel} 계산이 가능해지고 보일러 효율도 구할 수 있다.

3. 연료량 계산식 검증

(12) 계산식에 의하여 Energy In=Energy Out 에너지 평형에 기초하여 미지수를 제거하고 화력발전소 보일러 소비 연료량을 구할 수 있는 식을 완성하였다. 본 식이 실제 발전소에 사용될 수 있는지에 대한 실증테스트를 실시하여 현장적용 가능성 여부를 판단하기 위하여 운전중인 석탄 및 증유연소 발전소에 대하여 계산식을 적용하여 실제 측정값과의 차이를 비교하였다. 먼저 석탄연소 발전소인 태안화력 5호기에 대하여 성능시험 운전데이터를 사용하여 시험 당시의 운전데이터를 입력하여 계산 연료량과 측정된 연료량을 비교하여 오차정도를 확인하였다.

태안화력 5호기 성능시험 당시의 500 MW 출력에서 계산에 필요한 연료관련 주요 데이터는 Table 1, 입열 및 출열 관련 주요 데이터는 Table 2, Table 3과 같다. 소비연료량 계산에 필요한 모든 항목의 값이 구해졌으므로 (12)를 사용하여 석탄 소비연료량은 다음과 같

Table 1. Fuel constituents & fuel information data.

번호	항목	단위	운전값
1	연료명	-	C&A
2	고위발열량(HHV)	kcal/kg	6386
3	탄소(C)	wt%	66.61
4	수소(H)	wt%	4.16
5	산소(O)	wt%	7.09
6	질소(N)	wt%	1.48
7	황(S)	wt%	0.4
8	회분(Ash)	wt%	12.12
9	수분(H ₂ O)	wt%	8.04
10	소비연료량	kg/hr	159,512

이 계산된다.

소비연료량

$$= \frac{(736484968 + 188758828 + 606616)}{[(1 - 0.0053 + 0) * 6386 - 287.42 - 1.70 - 258.71]}$$

$$= \frac{925850412}{5804.32} = 159,510 \text{ kg/hr}$$

Table 1에서 실제 소비연료량은 159,512 kg/hr, 계산식에 의한 소비연료량 159,510 kg/hr 이므로 오차가 거의 없음을 알 수 있다.

다음으로 증류연소 발전소인 평택화력 4호기에 대하여 동일한 방법으로 성능시험 운전데이터를 사용하여 350 MW 출력에서의 운전데이터를 입력하여 계산 연료량과 계측된

Table 4. Fuel constituents & information data.

번호	항목	단위	운전값
1	연료명	-	B · C유
2	고위발열량(HHV)	kcal/kg	10,587
3	탄소(C)	wt%	85.67
4	수소(H)	wt%	11.61
5	산소(O)	wt%	2.14
6	질소(N)	wt%	0.29
7	황(S)	wt%	0.28
8	회분(Ash)	wt%	0.02
9	수분(H ₂ O)	wt%	0
10	소비연료량(측정값)	kg/hr	74,581

연료량을 비교하였다. Table 4-6은 계산에 필요한 연료관련 데이터, 입열 및 출열 관련 주요 데이터이다.

소비연료량 계산에 필요한 모든 항목의 값이 구해졌으므로 증류 소비연료량은 다음과 같이 계산된다.

소비연료량

$$= \frac{(616728000 + 95517000 + 2278000)}{[(1 - 0.0019 + 0.02168) * 10587 - 652.79 - 12.99 - 395.65]}$$

$$= \frac{714523000}{9735} = 73,397 \text{ kg/hr}$$

실제 측정된 소비연료량은 74,581 kg/hr, 계산식으로 구한 소비연료량 73,397 kg/hr 이므로 측정값과 계산값은 약 1.1 ton/hr, 1.5% 차이가 발생하였다.

Table 2. Heat input data.

번호	항목	단위	운전값
1	건배기가스 손실 열량(hdg*(mdg/mfuel))	kcal/kg	258.71
2	H ₂ O in fuel 수분손실 열량	kcal/kg	50.14
3	H ₂ O in combustion 수분손실 열량	kcal/kg	237.28
4	수분손실열량 합계(hfg*(mfg/mfuel))(2+3)	kcal/kg	287.42
5	공기중 수분손실 열량(hma*(ma/mfuel))	kcal/kg	1.70
6	미연손실(Qub/mfuel*HHV)	%	0.09
7	복사손실(Qra/mfuel*HHV, 설계값)	%	0.19
8	미측정손실(Qua/mfuel*HHV, 설계값)	%	0.25
9	기타손실합계(Xetc)(5+6+7)	%	0.53
10	부가입열 합계(Xcr)	%	0

Table 3. Heat output data.

번호	항목	단위	운전값
1	SH Steam 열량(QSHout-QFW)	kcal/hr	736,484,968
2	RH Steam 열량(QRHout-QRHin)	kcal/hr	188,758,828
3	SH Spray 열량	kcal/hr	0
4	RH Spray 열량	kcal/hr	0
5	기타 Steam 열량(Q _{AUX})	kcal/hr	606,616
6	Steam 열량 합계	kcal/hr	925,850,412

Table 5. Heat input data.

번호	항목	단위	운전값
1	전배기가스 손실 열량($hdg^*/(mdg/mfuel)$)	kcal/kg	395.65
2	H ₂ O in fuel 수분손실 열량	kcal/kg	0
3	H ₂ O in combustion 수분손실 열량	kcal/kg	652.79
4	수분손실열량 합계($hfg^*(mf/mfuel)$)(2+3)	kcal/kg	652.79
5	공기중 수분손실 열량($hma^*(ma/mfuel)$)	kcal/kg	12.99
6	미연손실($Qub/mfuel*HHV$)	%	0
7	복사손실($Qra/mfuel*HHV$, 설계값)	%	0.19
8	미측정손실($Qua/mfuel*HHV$, 설계값)	%	0
9	기타손실합계($Xetc$)(6+7+8)	%	0.19
10	공기에열 부가입열량	%	1.74
11	동력 부가입열량	%	0
12	공기중수분 부가입열량	%	0.0019
13	분무중기부가입열	%	0.07
14	연료예열부가입열	%	0.354
15	부가입열 합계(Xcr)(10+11+12+13+14)	%	2.168

Table 7. Heat output data.

번호	항목	단위	운전값
1	SH Steam 열량 ($QSHout-QFW$)	kcal/hr	616,728,000
2	RH Steam 열량 ($QRHout-QRHin$)	kcal/hr	95,517,000
3	SH Spray 열량	kcal/hr	0
4	RH Spray 열량	kcal/hr	0
5	기타 Steam 열량 (Q_{AUX})	kcal/hr	2,278,000
6	Steam 열량 합계	kcal/hr	714,523,000

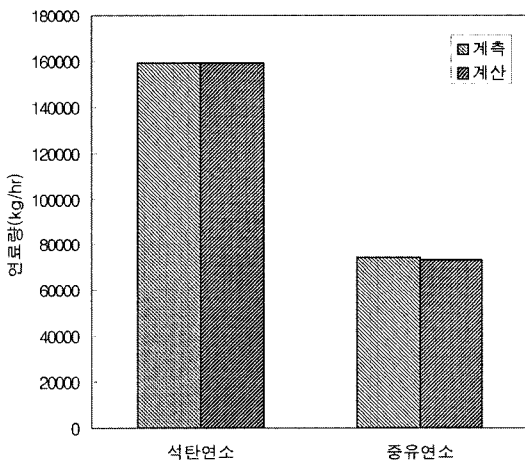


Fig. 2. Measured & calculated fuel consumption rate.

4. 결 론

화력발전소의 소비연료량을 구하기 위하여 열평형, 에너지 보존의 법칙 및 질량보존의 법칙을 사용하여 연료량 계산식을 유도하고 실제 현장적용을 통하여 측정된

연료량과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보일러 heat balance상의 입열, 출열 항목을 분석하고 에너지 보존의 법칙 및 질량보존의 법칙을 사용하여 평형상태에서 에너지 및 질량의 입, 출력 관계를 규명하였다.

2. 에너지보존과 질량보존으로부터 미지수를 제거하여 연료소비량을 구하는 계산식을 완성하였다. 완성된 계산식은 세부 항목별로 구분되어서 각 항목별 변화가 소비연료량과 효율에 미치는 영향에 대한 정량적 분석이 가능하다.

3. 측정된 연료량과 계산된 연료량은 석탄전소 발전소는 정확하게 일치하고, 중유연소 발전소는 약 1.1 ton/hr(1.5%)의 차이가 발생되었다. 이는 복사손실, 미측정손실 등 일부 항목은 설계값을 사용하였고, 현장 측정기 오차에 기인한다고 추정되지만 부가입열 등 석탄보일러에 비하여 고려해야할 변수가 많고 다른 원인에 의해서 발생할 수도 있으므로 추가적인 분석이 필요하다고 판단된다.

4. 본 계산식이 실제 현장에서 적용되기 위해서는 많은 경우의 수에 대한 계산 수행이 필요하다. 석탄의 경우 측정기 교정, 혼탄연소, 미분기 교체운전 등 보다 다

양한 운전조건하에서 계산을 수행하고, 증유 보일러에 대해서는 부가입열에 대한 정확한 측정과 계측기 교정이 확보된 후에 실시하여 신뢰도를 확보하여야 할 것이다.

5. 많은 운전조건에서 연료소비량 측정값과 계산값을 비교하고 검증하면 현장 적용 신뢰도를 높일 수 있으므로 향후 다양한 운전조건, 출력과 연료종류에 대하여 추가적인 비교, 평가, 검증하는 작업이 필요하다고 판단된다.

사용기호

- hdg : 건배기가스 엔탈피(kcal/kg)
- hfg : 보일러출구 연소가스 수분엔탈피(kcal/kg)
- hFW : 급수 엔탈피(kcal/kg)
- hma : 공기중 수분 포화증기엔탈피(kcal/kg)
- hRHin : 재열기입구 증기엔탈피(kcal/kg)
- hRHout : 재열기출구 증기엔탈피(kcal/kg)
- hRHSP : 재열증기 스프레이 증기엔탈피(kcal/kg)
- hSHSP : 과열증기 스프레이 증기엔탈피(kcal/kg)
- hSHout : 과열기출구 증기엔탈피(kcal/kg)
- ma : 공기중 수분증량(kg/hr)
- mdg : 건배기가스증량(kg/hr)
- mfg : 연소가스중 수분증량(연료수분증량+수소연소 수분증량, kg/hr)
- mfuel : 연료소비량(kg/hr)
- mRHSP : 과열증기 스프레이 유량(kg/hr)
- mRHout : 재열기 출구유량(kg/hr)
- mSHout : 과열기 출구유량(kg/hr)
- mSHSP : 재열증기 스프레이 유량(kg/hr)
- η_b : 보일러 효율(%)
- Qair : 공기예열열량(kcal/hr)
- Q_{AUX} : 보조증기 흡수열량(kcal/hr)
- Qcr : 부가입열량(Qair+Qma, kcal/hr)
- Qdg : 건배기가스 손실열량(kcal/hr)
- Qetc : 기타 손실열량, kcal/hr)
- Qfg : 연소가스중 수분손실열량(kcal/hr)
- Qfuel : 연료열량(kcal/hr)
- QFW : 급수열량(kcal/hr)
- Qm : 수분손실 열량(kcal/hr)
- Qma : 공기중 수분열량(kcal/hr)
- Qra : 복사손실 열량(kcal/hr)

- QRHin : 재열증기 입구열량(kcal/hr)
- QRHout : 재열증기출구 열량(kcal/hr)
- QSHout : 과열증기출구 열량(kcal/hr)
- Qstm : 보일러 총 출열량(kcal/hr)
- Qua : 미측정 손실열량(kcal/hr)
- Qub : 미연탄소 손실열량(kcal/hr)
- Xetc : 총입열량 대비 기타손실열량
- Xcr : 총입열량 대비 부가입열 열량
- hfg*(mfg/mfuel) : 연료 1 kg당 수분손실열량(연료수분 손실열량+수소연소수분열량, kcal/kg)
- hma*(ma/mfuel) : 연료 1 kg당 공기중 수분 손실열량(kcal/kg)
- hdg*(mdg/mfuel) : 연료 1 kg당 건배기가스 손실열량(kcal/kg)

하첨자

- HHV : High Heating Value(연료고위발열량)
- SH : Superheater(과열기)
- RH : Reheater(재열기)
- FW : Feed Water(급수)

참고문헌

1. 윤중준. “Actual CMBC by means of Orsat Gas Analyzer”, 두산중공업, 2002.
2. 장석원 외 3명. “화력발전소 보일러 연소해석과 연소 측정 결과비교”, 전력연구원, 2003.
3. 장석원 외 3명. “태안화력 5호기 보일러 연소 질량평형 및 체적물성 계산”, 전력연구원, 2003.
4. 조형래 외 3명. “평택화력 제 4호기 2003년 O/H 전 정밀 열성능 진단 결과 보고서”, 전력연구원, 2004.
5. 조형래 외 4명. “태안화력 제 5호기 성능시험 결과보고서”, 전력연구원, 2002.
6. 조형래 외 5명. “화력발전소 성능관리 지침”, 전력연구원, 1987.
7. 김주현. “공기예열기”, 한국전력공사, 1983.
8. 이창식; 한영출. “공업 열역학”, 문운당, 1985.
9. 조성환 외 3명. “열역학”, 청문각, 1982.
10. 권태영. “연소관리 실무”, 한국전력 발전교육원, 2000.
11. Stephen R. Turn. “An Introduction to Combustion”, McGraw-Hill, Inc, 1999.
12. “Power Test Codes 4.1, 4.3”, ASME, 1993.