

보일러 연소해석시와 측정시의 연소가스 중량 및 체적비교

장석원[†]· 임상규*· 정 훈*· 이인철*

Comparison of the Product Properties between Combustion Analysis and Measurement

Jang Suck Won, Rhim Sang Kyu, Jung Hoon, Lee In Cheol

Key Words: Power Plant Boiler(발전용보일러), Combustion Mass Balance Calculation(연소질량평형계산), Combustion Product Volumetric Analysis(연소체적계산), Performance Test(성능시험), Heat Loss(열손실), Combustion Products(연소생성물)

Abstract

There are two methods to evaluate the combustion product, that is analysis method and measurement method. Properties of the combustion products, constituents, and quantities, can be used to calculate boiler efficiency and heat losses. Using combustion evaluation methods combustion calculation were performed at certain condition and analyze the results. In this paper by comparing the results between two methods, deviation, correction and possibility of site application were confirmed

기호설명

N_2, CO_2, CO : Economizer출구 건배기가스 체적%

M_a : 공기량

M_a/M_f : 단위연료당 공기량

M_{CB} : 연료중 실제 연소된 탄소중량%

M_{CP} : 생성가스량

M_f : 연료량

M_{CP}/M_f : 단위연료당 연소가스량

M_S, M_{N_2} : 연료중 성분중량%

N : 단위연료당 질소중량

WA' : 건공기량

$WG'N_2$: ECO출구 N_2 가스 중량

1. 서 론

보일러 연소해석은 보일러 화로해석 및 성능해석의 첫 관문이다. 이를 통하여 Superheater와 Reheater의 출구증기조건을 만족시키기 위한 연료량과 연소가스 성분, 연소가스량, 공기량 등이 계산되고 보일러의 열효율이 결정된다.

발전소 보일러의 연소시 생성물에 대한 질량평형을 구하여 생성가스의 성분질량, 유량, 필요공기량 등을 산출하고, 체적해석을 수행하여 체적분율, 몰분율, 분압 등의 연소열역학 해석과 효율 및 열손실 계산에 필수적인 연소가스 필수물성을 구함으로써 기본적인 연소공학 이론을 실제 운전 보일러에 적용하여 연소가스 물성을 해석적으로 구할 수 있다. 이렇게 구한 연소생성물의 물성으로 이론적으로 열손실의 주요인자인 연소가스량, 생성수분 등을 구할 수 있으므로 보일러 효율산출에 사용될 수 있다. 그러나 이론적인 해석방법을 실제 보일러에 적용하기 위해서는 해석적으로 구한값을 현장측정값과 비교하고 계산결과의 차이를 분석함으로써 연소해석적으로 구한 연소물

† 한전 전력연구원

E-mail : jangsw@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5221 FAX : (042)865-5304

* 한전 전력연구원

성들이 실제 발전소 현장에서 열손실계산에 사용되어질 수 있는지 평가하여야 한다.

본 연구는 직접 측정에 의하지 않고 연소가스 물성을 계산으로 구해냄으로서 보일러 성능평가 과 효율산정에 사용하고 연료량 결정과 보일러 성능개선 등에 대하여 정량, 정성적인 분석에 활용할 수 있는지를 평가하였다.

2. 연소측정

2.1 연소가스 체적측정

실제 보일러에서 연소시 이론공기량으로는 불완전연소가 일어나므로 과잉공기를 공급한다. 과잉공기를 포함한 연소용으로 공급되는 실제 건공기량을 계산하기 위해서는 보일러 최종단 튜브인 Economizer 출구가스에서 측정되는 가스성분의 체적%를 이용하고 연소가스량 역시 체적%를 사용하여 구해진다.

건공기 1kg당 중량기준으로 76.85 wt%의 N₂가 포함되어 있으므로 실제공기량은 ASME Power Test Code에 의거하여 다음식 (1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$WA' = \frac{WG'N_2 - N}{0.7685} \quad (1)$$

$$WG'N_2 = \frac{28.02 * N_2 * (\frac{M_{CB}}{100} + \frac{12.01}{32.066} * \frac{M_S}{100})}{12.01 * (CO_2 + CO)} \quad (2)$$

$$WA' = \frac{28.02 * N_2 * (\frac{M_{CB}}{100} + \frac{12.01}{32.066} * \frac{M_S}{100})}{12.01 * (CO_2 + CO)} - \frac{M_{N_2}}{100} \quad (3)$$

연소가스량은 건배기가스손실 계산에 필수적이며 Economizer 출구에서 측정된 각 연소가스성분의 체적%를 사용하여 다음과 같이 구한다.

$$WG' = \frac{44.01 * CO_2 + 32 * O_2 + 28.02 * N_2 + 28.01 * CO * (\frac{M_{CB}}{100} + \frac{12.01}{32.066} * \frac{M_S}{100})}{12.01 * (CO_2 + CO)} \quad (4)$$

태안화력 5호기 보일러 인수성능시험시 정격출력에서 Gas Analyzer를 사용하여 현장에서 측정된

연소가스의 체적은 다음 표 1과 같다. 측정된 체적을 상기 식 (1)~(4)를 사용하여 계산한 공기 및 연소가스의 단위연료당 중량은 다음표 2와 같다. 성능시험시 과잉공기율은 18.71%였으며 이 조건에서 각 연소가스성분의 체적, 공기량, 공기량 등을 측정하고 계산하여 구하였다.

Table 1 Volume of the flue gas

성분	체적분율	체적 %
CO ₂	0.1561	15.61
O ₂	0.0336	3.36
N ₂	0.8103	81.03
합계	1.0000	100.00

Table 2 Weight of the air & flue gas

구 분	계산값
Air Fuel Ratio(kg/kgF)	10.49
Dry Mass Out(kg/kgF)	10.90
Wet Mass Out(kg/kgF)	11.40
Excess Air Ratio(%)	18.71

3. 연소해석

3.1 질량평형

화력발전소는 석탄, 오일, 가스 등과 같은 화석연료의 화학반응으로 얻은 열에너지를 물과 같은 저온유체에 전달하여 저온유체의 열역학적 상태를 단순한 물로부터 과열증기로 바꾸어 전기에너지를 생산하는 설비이다. 과열증기의 열에너지가 터빈을 거치면서 기계에너지로 바뀌고 발전기를 돌려서 전기를 생산한다. 이와같이 전기를 생산하기까지 화석연료는 여러단계의 다양한 에너지 변환과정을 거치는데 그 시작단계가 바로 연소이다.

연료는 보일러내 화로에서 연소되며 연소상태에 따라 보일러의 효율과 성능이 좌우되며 보일러 열소비율, 발전원가 등에 직접적인 영향을 끼친다. 연소는 화학적으로 일종의 산화반응(oxidation reaction)이다. 화석연료가 가지고 있는 화학성분중 가연성 성분은 C, H₂, S 세가지

이때 이들이 O₂와 화학반응하여 일정한 열을 방출하고 이 열은 연소반응을 더욱 가속화시켜 연소가스의 온도와 비체적을 증가시킨다. 연소가스의 비체적이 증가하면서 CO₂, H₂O와 같은 연소생성물들(combustion products)이 확산되고 시간이 지날수록 더욱 빨라진 연소반응속도와 느린 연소생성물의 물리적 확산속도에 의하여 연소반응이 매우 얇은 공간에서 이루어진다. 이상적인 연소에서 확산화염에서는 얇은 공간내에서 연료와 산화물인 O₂에 의한 연소반응이 완전하게 일어난다고 볼 수 있으며 얇은 공간안에는 연료나 O₂가 존재하지 않고 순수한 연소생성물만 존재한다고 볼 수 있다.

Combustion Mass Balance Calculation(이하 CMBC)의 의미는 이와같이 연소반응에 의하여 반응물과 생성물간 에너지 변환이 일어날 때 완전연소 또는 불완전연소 상태에서 반응물인 연료, 공기와 생성물인 연소생성물사이에 질량평형(mass balance)이 유지된다는 기본적인 법칙하에서의 mass-base 연소계산이다. CMBC를 이용하면 이상적인 연료와 공기의 혼합비를 계산할 수 있으며 이를 이용하여 필요공기량, 생성가스성분, 생성물의 중량분율 등의 계산이 가능하다.

M_f kg의 연료와 M_a kg의 공기가 완전연소한 결과 M_{CP} kg의 연소가스가 생성되면 질량평형에 의하여 연료, 공기, 연소가스 사이에는 항상

$$M_f + M_a = M_{CP} \quad (5)$$

의 관계가 성립된다. 식(1)을 M_f로 나누면

$$1 + \frac{M_a}{M_f} = \frac{M_{CP}}{M_f} \quad (6)$$

가 된다. 즉 연료 1kg을 완전연소하기 위하여 공급하여야 할 연료당 공기량, 즉 A/F ratio는 $\frac{M_a}{M_f}$

이고, 연료당 생성되는 연소생성물은 $\frac{M_{CP}}{M_f}$ 이다.

이와 같이 CMBC를 통하여 주어진 연료를 일정한 과잉공기율 조건에서 연소시켰을 때 A/F ratio와 연소가스량, 연소가스를 구성하는 성분과 절대중량을 일목요연하게 알 수 있다.

미연손실에 의한 미연탄소를 제외한 시험탄의

성분분석은 다음 표 3과 같다. CMBC 계산을 위하여 태안화력 5호기 보일러 인수성능시험시 사용한 시험탄으로 CMBC 계산을 수행하여 표 4와 같이 각 성분별 생성중량, 공기량, 가스량을 구하였다. 각 성분별 반응 O₂ 중량으로 공기중량 계산되고 연소가스 성분중량으로 가스량이 구해진다.

Table 3 Test coal constituents

성분	C	H ₂	O ₂	N ₂	S	ASH	H ₂ O	합계
wt%	66.54	4.26	7.09	1.48	0.40	12.19	8.04	100

Table 4 CMBC of the test coal at EA 18.71%

성분	질량 분율 (kg)	공급 O ₂ , N ₂ 량		생성물	
		O ₂ (kg)	N ₂ (kg)	생성물	중량 (kg/kgF)
C	0.6654	1.7729		CO ₂	2.4383
H ₂	0.0426	0.3381		H ₂ O	0.3807
S	0.0040	0.0040		SO ₂	0.0080
O ₂	0.0709	- 0.0709		O ₂	-
N ₂	0.0148			Fuel N ₂	0.0148
H ₂ O	0.0804			Fuel H ₂ O	0.0804
ASH	0.1219			ASH	0.1219
	Stochi	2.0441	6.7858	Air N ₂	6.7858
	EA (18.71%)	0.3825	1.2659	Excess N ₂	1.2659
	Total	24266	8.0517	Excess O ₂	0.3825
	공기량 (Ma/Mf)		10.4783	Air H ₂ O	0.0398
	Mass In		11.4783	Mass Out	11.4783
	건가스량				11.0127
	습가스량				11.5181
	Combustion Gas				11.3962

3.2 체적물성 계산

CMBC에 의하여 연소가스물성과 연소가스량, 공기량 등이 구해지면 연소가스 성분중량을 체적으로 변환시키는 과정을 거쳐서 체적%로 나타낸다. 중량분율과 체적분율은 각 가스성분의 몰중량에 의하여 상호호환 관계가 있다.

연소가스내에서 차지하는 체적분율 즉 mole fraction을 알기 위해서 CMBC 결과로 얻은 각 가스성분의 절대중량을 중량분율로 바꾸고 중량분율을 체적분율로 전환하는 과정인 Combustion Product Volumetric Analysis(이하 CPVA)를 수행하였다. 표3의 CMBC를 CPVA로 전환한 결과는 표 5와 같다.

Table 5 CPVA of the test coal

성분	중량 kg/kgF	분율 kg/kgCP	물중량 kg	물수 mole/kgCP	체적 분율	체적 %
CO ₂	2.4383	0.2139	44.01	0.0048	0.1445	14.46
H ₂ O	0.5009	0.0439	18.016	0.0024	0.0725	7.26
SO ₂	0.0080	0.0007	64.066	0.0001	0.0003	0.03
O ₂	0.3825	0.0335	32.00	0.0010	0.0311	3.12
N ₂	8.0665	0.7078	28.01	0.0252	0.7513	75.13
합계	11.3962	1.0000		0.0336	1.0000	100.00

4. 측정과 해석시의 결과비교

4.1 비교 대상

보일러출구인 Economizer 출구 연소가스에서 Gas Analyzer로 직접측정한 연소가스의 물성과 CMBC와 CPVA로 연소해석한 물성중 열손실 및 효율계산에 필요한 성분체적, 연소가스량, 연소공기량에 대하여 시험탄과 과잉공기율 18.71% 등 동일한 조건에서 구하여 결과차이를 비교하였다.

Table 6 Comparison of the volume between combustion analysis & measurement

성분	측정(%)	해석(%)
CO ₂	15.61	15.59
O ₂	3.36	3.36
N ₂	81.03	81.04

Table 7 Comparison of the air & flue gas weight between combustion analysis & measurement

구분	측정(kg/kgF)	해석(kg/kgF)
공기량	10.49	10.48
건가스량	10.90	11.02
습가스량	11.40	11.52

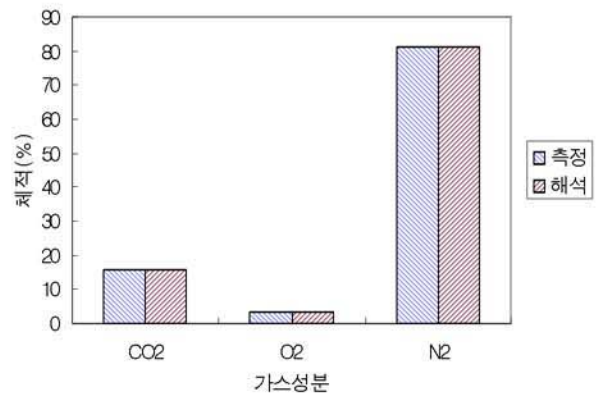


Fig. 1 Comparison of the volume between combustion analysis & measurement

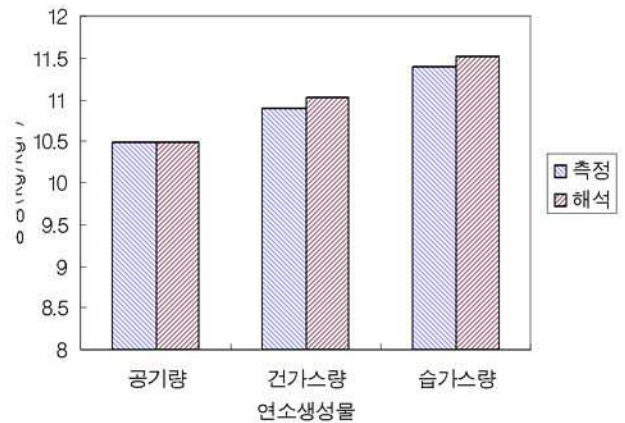


Fig. 2 Comparison of the air & flue gas weight between analysis & measurement

4. 결 론

시험탄 연소시 동일조건에서 해석적인 방법과 측정방법으로 연소가스의 물성을 구하고 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실제 보일러 운전상태에서 시험조건으로 CMBC 및 CPVA 로 연소해석 수행하여 시험탄 성분별 연소가스의 중량구성, 가스량, 공기량 및 체적구성 등을 구하였다.
2. 실제 시험조건과 동일한 조건으로 과잉공기율 18.71%에서 연소가스의 성분, 공기량, 가스량 등을 측정방법으로 산출하였다.
3. 측정결과와 해석결과를 비교하여 두 방법간의 계산값 차이를 분석하였다. 성분별 체적, 공기량, 건가스량, 습가스량 등 4개 항목에 대하여 비교하여 체적은 최고오차가 CO₂ 성분 0.02%, 유체중량은 공기량에서 0.1%, 건가스량 및 습가스량에서 0.12%의 오차를 나타내었다.
4. 측정에 의하지 않고 해석적으로 연소가스의 물성을 구하여 보일러 성능평가에 사용하기 위해서는 실제측정값과의 오차가 최소화 되어야 한다. 보일러 손실과 효율의 주요인자인 건가스량의 오차범위가 적어서 보일러효율을 평가하기 위하여 측정에 의하지 않고 해석적인 방법으로도 건배기가스 손실계산과 손실예측이 가능함을 확인하였다.
5. 다양한 운전조건에서 해석과 측정값을 비교하고 검증하여야 현장사용이 가능하므로 다양한 출력, 다양한 보일러, 다양한 탄종에 대하여 추가적으로 적용하여 비교 평가하는 작업이 필요하다.

참고문헌

- (1) Taean Power Plant, 2003, "Taean Power Plant unit 5, 6 operating guide", KOWEPCO, pp. 26
- (2) Taean Power Plant, 2003, "Taean Power Plant unit 5, 6 data book", KOWEPCO, pp. 4-23

- (3) Joh Hyong Rae, Hong Eun Kee, 2002, "Taean Power Plant unit 5 Thermal Acceptance Performance Test Results", KEPRI Report, pp. 94-110
- (4) Yoon Jong Joon, 2002, "Actual CMBC by means of Orsat Gas Analyzer" Personal Report, pp. 1-4
- (5) Jang Suck Won, 2001, "Performance Evaluation of Reheater Thermal Area Reduction on Seocheon Unit 2 Boiler", KEPRI Report. pp. 12-20
- (6) Lee Chang Sik, Han Young Chul, 1985, "Thermodynamics" Moon Woon Dang.
- (7) Joe Sung Hwan, 1982, "Thermodynamics" Chung Moon Gak.
- (8) Stephen R. Turn, 1999, "An Introduction to Combustion" McGraw-Hill, Inc. pp. 36-38