

시험연소로를 이용한 역청탄과 아역청탄의 연소특성 비교 연구

양승환, 김성철, 이현동, 김태형, 신영진, 홍성선\*  
 한국전력공사 전력연구원, 충북대학교\*

A Study on the Combustion Characteristics of Bituminous and Sub-Bituminous Coal using Test Furnace

S.H. Yang, S.C. Kim, H.D. Lee, T.H. Kim, Y.J. Shin, S.S. Hong\*  
 Korea Electric Power Research Institute, Chungbuk National University\*

1. 서론

발전용 연료로 사용하는 석탄은 취급의 어려움과 가스 및 석유에 비해 품질이 낮은 단점이 있으나, 매장량이 풍부하고 가격이 저렴하여 발전용 연료로의 사용은 더욱 증대될 전망이다. 이에 따라 석탄의 안정적 수급 측면에서 구입원의 다양화가 예상되고 있으나, 현재 발전용 연료의 연소특성 평가는 주로 실험실적 기초 시험에 의존함에 따라 정확한 평가가 곤란한 실정이므로 시험연소로를 이용하여 각종 연소특성을 비교 평가하여 탄종별 최적 연소조건 규명과 적정 혼탄비에 대한 Data Base를 구축하고자 한다.

2. 실험 및 실험 결과

연소 시험탄에 대한 기초 성분분석 결과는 다음 표 1.과 같다. ASTM D388-38에 따라 역청탄은 6384kcal/kg이상의 발열량을, 아역청탄은 6384kcal/kg이하의 발열량을 가진 것을 의미한다.

시료 분석항목	KIDECO	SCIEC	CNCIEC	Wark- worth	Bays- water	Drayton	Luscar	Nova	SBCL	Total	Adaro	Roto	
분 류	아역청	역청	역청	역청	역청	역청	역청	역청	역청	역청	아역청	아역청	
열 량	기건식	6,098	6,796	6,934	6,924	6,893	6,750	6,429	7,089	7,226	6,637	5,963	
	건 식	7,055	7,197	7,239	7,102	7,143	6,926	6,686	7,248	7,367	6,821	6,804	6,481
공업분석 (wt%)	수분	12.65	7.14	6.02	8.80	6.96	6.17	9.52	5.87	3.48	4.80	15.96	15.85
	휘발분	43.00	31.60	30.28	34.77	33.64	31.42	31.49	28.67	24.48	24.98	39.27	39.55
	회분	2.63	9.38	10.94	10.52	10.67	10.82	9.85	13.21	9.82	14.53	1.76	2.92
	고정탄소	36.58	48.28	49.24	41.90	44.64	51.59	49.14	52.25	62.22	55.69	43.01	41.68
원소분석 (wt%)	탄소	68.05	72.23	70.7	67.6	71.15	69.0	66.5	67.5	74.6	68.1	70.2	67.1
	수소	4.42	4.05	3.94	4.04	4.44	4.38	3.99	4.29	4.38	3.68	4.85	4.59
	산소	23.24	11.93	11.84	15.65	10.65	13.52	17.56	12.03	8.37	10.81	22.03	23.80
	질소	1.15	1.00	0.84	1.06	1.86	1.24	0.92	1.61	1.82	1.60	0.74	0.91
	유황	0.23	0.74	1.11	0.32	0.52	0.63	0.39	0.56	0.69	0.93	0.16	0.22
	회분	3.01	10.10	11.64	11.54	11.46	11.53	10.89	14.03	10.17	15.26	2.09	3.47

표 1. 시험탄 성분표

## 2.1. 열중량분석(Thermogravimetric Analysis)

석탄의 열중량 분석 실험은 석탄의 열분해 반응 Kinetics를 연구하기 위한 방법으로, 일정한 온도에서 시료의 무게 변화를 측정하는 등온 열중량 분석법과 미리 정해진 방법으로 온도를 변화시키면서 시료의 무게 변화를 측정하는 비등온 열중량 분석법이 있다. 본 실험에서는 온도를 분당 10℃ 상승시키면서 무게변화가 온도의 함수로서 연속적으로 기록되어지는 비등온 열중량분석법을 사용하였다. 표 2는 탄종별 착화온도와 연소종료온도, Coats - Redfern이 제시한 방법으로 계산한 활성화에너지를 나타낸 것이다. 탄종에 따른 착화온도 범위는 아역청탄 240~274℃, 역청탄 308~364℃ 이었으며, 연소종료온도 범위는 아역청탄 719~730℃, 역청탄 752~780℃로 서로 다르게 나타났다. 착화온도는 ADARO탄이 분석 탄종중 가장 낮고 SBCL탄이 가장 높았으며, 연소종료온도는 ROTO SOUTH탄이 가장 낮고 SBCL탄이 가장 높았다. 아역청탄들의 활성화에너지는 11.84~13.06kcal/kg 범위를 나타냈고, 역청탄들은 13.31~17.07kcal/kg 범위를 나타내 아역청탄의 연소성이 상대적으로 높음을 알 수 있다.

탄 종	착화온도 (℃)	종료온도 (℃)	연소시간 (분)	활성화에너지 (kcal/mol)
ADARO	240	730	49.0	11.84
BAYSWATER	331	752	42.1	17.07
DRAYTON	343	767	42.4	16.56
ROTO SOUTH	274	719	44.5	13.06
LUSCAR	312	759	44.7	15.30
SBCL	364	780	41.6	15.77
TOTAL	357	778	42.1	16.32
WARK WORTH	308	776	46.8	13.31
SCIEC	309	748	43.9	14.28
KIDECO : TOTAL(7:3)	283	745	46.2	10.81
KIDECO : NOVA(6:4)	289	747	45.8	11.36

표 2. 탄종별 착화, 연소 완료온도와 활성화에너지

## 2.2 소형연소장치(Drop Tube Furnace)

본 실험장치의 구성은 DTF시스템과 주변장치로 구성되어 있다. DTF시스템은 주반응로, 가스예열기, 제어시스템을 갖추고 있으며, 주변장치는 가스공급, 냉각수 공급, 석탄공급장치와 Coal Injector 및 Sampling장치로 구성되어 있다.

석탄의 연소과정에서 발생하는 석탄입자의 질량감소량을 알기 위해서는 연소 생성물의 전량을 포집하여 공급량과 비교하면 되지만, 실제로 연소생성물의 전량을 포집하기는 거의 불가능하므로 약간의 오차요인을 무시한다면 공업분석으로부터 알 수 있는 석탄의 회분량을 기준으로 연소율을 계산하여 구할 수 있다. 본 실험에서도 DTF의 주반응로에서 연소후 싸이클론에 포집된 연소생성물로부터 연소율을 계산해내는 회분추적법을 이용하였다.

석탄의 성상이 동일하다고 가정하면, 공급된 석탄중 회분의 양과 포집된 고체연소생성물중의 회분 양은 동일하므로 daf(Dry ash free) 상태에서 계산된 연소율 E는 다음과 같다.

$$E = 100 - 100 \left[ \frac{W_s(100 - A')}{W_c(100 - A_0)} \right] = 100 \left[ 1 - \left( \frac{A_0(100 - A')}{A'(100 - A_0)} \right) \right] \quad (1)$$

Coal Injector 끝으로부터 Sampling probe 끝단까지의 거리를 700mm로 유지하였으며 미분탄은 분당 0.23g씩 공급하면서 내부온도를 1250℃, 공기비 1.6의 조건으로 실험하였다.

표 3은 식(1)따라 계산된 연소율을 나타낸 것으로 SBCL탄을 제외한 나머지 탄은 연소율 99%이상으로 나타났으며, 그 중 아역청탄인 Roto South탄과 Kideco탄과 혼탄된 NOVA와 TOTAL탄의 연소율이 역청탄보다 높게 나타났다.

탄 종	미분도 (200mesh통과분)	공업분석회분 (wt%)	미연분 (wt%)	연소율 (%)
BAYSWATER	48%	10.67	2.62	99.68
DRAYTON	65%	10.82	1.80	99.78
LUSCAR	75%	9.85	1.87	99.79
ROTO SOUTH	75%	2.92	0.85	99.97
SBCL	76%	9.82	10.81	98.68
SCIEC	79%	9.38	2.41	99.74
TOTAL	55%	14.53	4.44	99.21
WARK WORTH	58%	10.52	4.26	99.48
KIDECO : NOVA(6:4)	75%	6.86	1.39	99.90
KIDECO : TOTAL(7:3)	64%	6.20	3.20	99.78

표 3. 탄종별 연소율 비교

### 2.3 시험연소로

시간당 미분탄 200kg을 공급하는 시험연소로의 연소시험 절차는 LNG를 이용하여 연소로 내화벽의 온도를 900℃까지 예열한 후 미분탄을 공급을 시작하여 30분간 LNG와 미분탄을 함께 연소시킨 후 LNG를 소화한 뒤 약 6시간의 각종 연소시험을 수행한다.

#### 2.3.1 화염형태

시험연소로 내부에 설치된 CCD Camera를 이용하여 연소시험시 노내의 화염상태를 관찰한 결과 과잉공기 및 버너의 Swirl이 1로 동일한 조건에서 회분의 함량이 적고, 휘발분의 함량이 높은 ADARO, KIDECO탄(그림 1, 2)과 같은 아역청탄은 화염이 밝고, 깨끗하게 형성되었으며, 화염의 길이는 휘발분이 높을수록 버너 주위에서 짧고 넓게 퍼지는 형태를 보였다. 그러나 회분의 함량이 상대적으로 높은 역청탄의(그림 3, 4) 경우는 아역청탄보다 화염이 긴 형태로 형성되어 상대적으로 연소시간이 더 소요됨을 알 수 있었다.



그림 1. ADARO(O<sub>2</sub> 2%)

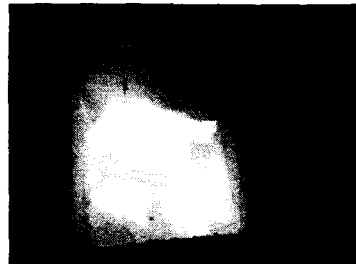


그림 2. KIDECO(O<sub>2</sub> 2%)

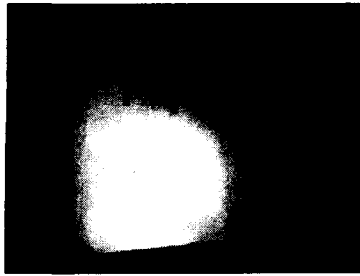


그림 3. BAYSWATER(O<sub>2</sub> 2%)

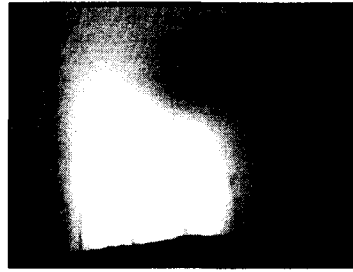


그림 4. DRAYTON(O<sub>2</sub> 2%)

### 2.3.2 노내온도 분포

시험탄의 온도분포는 1,200~1,300℃ 부근에서 형성이 되었고, 고 수분함량의 아역청탄인 KIDECO탄은 1,100~1,150℃의 비교적 낮은 온도분포를 보였으며, LUSCAR탄이 1,400~1,500℃로 높은 온도를 형성하였다. 일반적으로 수분의 함량이 높은 아역청탄들의 연소시 노내온도가 다른 탄에 비해 상대적으로 낮게 형성되며, 특히 연소로 후단에서의 배가스 온도가 상대적으로 낮게 형성되는 경향을 나타냈다.

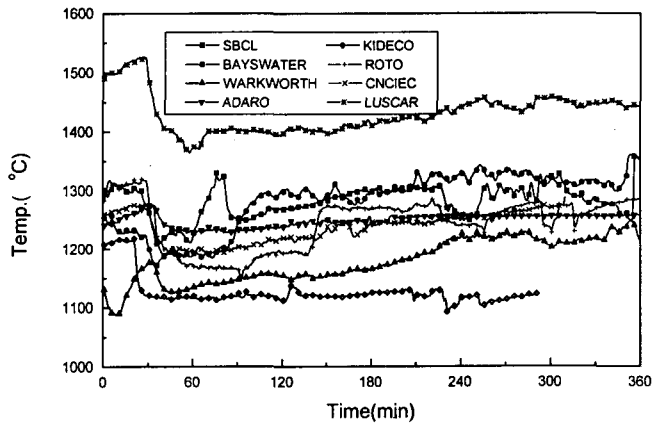


그림 5. 탄종별 복사전열부 온도비교

혼소시 노내 온도분포 경향을 비교하기 위해 아역청탄 ADARO 단탄 연소시와 역청탄 LUSCAR 단탄 연소시, 그리고 두 탄의 혼소시 온도분포와 아역청탄 ROTO SOUTH와 역청탄 TOTAL탄의 혼소 결과를 비교해본 결과, ADARO와 LUSCAR 혼소시 (50:50 혼소) 온도는 각 탄 단탄 연소 때의 중간 정도에서 형성이 되어 혼합된 성상의 이론적 예측과 매우 일치하는 결과를 보였고, ROTO SOUTH와 TOTAL탄 혼소 결과도 상대적으로 수분 함량이 높아 TOTAL탄에 비해 낮은 온도분포를 보인 ROTO SOUTH 단독 연소시 보다 높은 온도를 형성하는 결과를 보였다.

적정 공기량 이상의 과잉공기 공급은 연소분위기보다 상대적으로 낮은 2차 공기 유입으로 인해 노내온도가 낮아지는 경향이 있으며, 특히 아역청탄의 경우 그 온도차가 역청탄보다 50℃ 이상 커지는 결과를 나타내었다. 아역청탄의 산소함량이 평균 21%로 역청탄보다 2배 이상 함유되어 역청탄보다 낮은 과잉공기로도 완전 연소가 가능하였다.

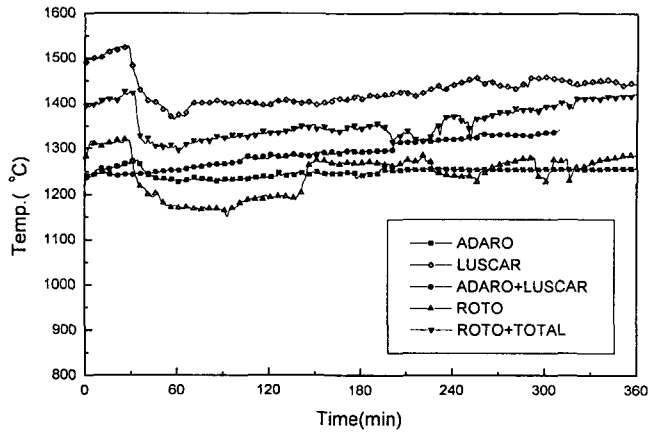


그림 6. 혼소시 노내온도

### 2.3.3 환경성

석탄연소에 의한 배기가스 중 황산화물은 연소조건에 영향을 받지 않는 SO<sub>2</sub>가 97~98%, 연소조건에 영향을 받는 SO<sub>3</sub>가 1~2%를 차지하는 것으로 알려져 있으므로 SO<sub>x</sub>는 연소조건이 변하여도 그 영향은 미미하다.

본 시험에 사용된 탄의 SO<sub>x</sub>발생량을 계산한 이론치와 시험연소로에서 측정한 실측치를 배기가스 중의 산소농도 6.0% 기준으로 환산한 결과를 그림 7.에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 측정치와 이론치는 차이가 거의 없었고, 대부분의 탄종에서 이론치가 측정치를 상회함을 보였다. 또한 아역청탄의 황함량이 상대적으로 적어 역청탄의 SO<sub>x</sub> 발생량보다 낮게 나타났다.

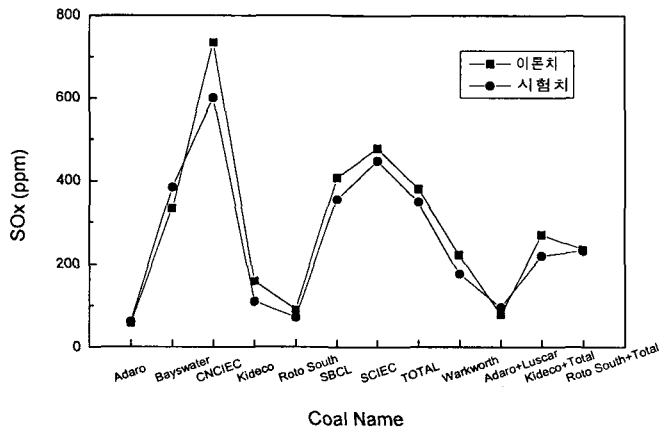


그림 7. 탄종별 SO<sub>x</sub> 발생 이론치 및 시험치

그림 8은 시험에 사용된 탄종에 대해 각각의 시험조건에서 배기가스 중의 산소농도 6.0% 기준으로 환산한 NOx 발생량과 이론치를 비교하여 나타냈다. 시험결과 대부분의 탄종에서 과잉공기가 증가할수록 NOx가 상승하였다. 시험연소로에서 연소시험시 NOx 발생이 실 발전소 배출량보다 높은 것은 시험연소로 내부가 내화벽돌로 이루어져있어 연소시험시 1,000°C 이상의 고온으로 가열되어 복사열을 방출함에 따라 전체적인 시험연소로내 열부하가 실 발전소에 비해 높아져 Thermal NOx 발생이 크기 때문으로, 노내 온도가 낮고 수분함량이 많은 아역청탄의 발생이 적은 사실을 뒷받침한다.

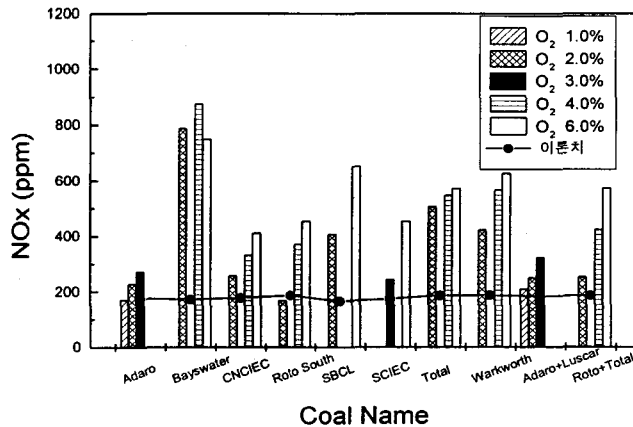


그림 8. 탄종별 과잉공기량 변화에 따른 NOx 발생

### 3. 결론

열중량분석 결과 아역청탄들의 활성화에너지는 11.84~13.06kcal/mol, 역청탄들은 13.31~17.07 kcal/mol 범위를 나타내 아역청탄의 연소성이 상대적으로 높음을 알 수 있었으며, 소형연소장치를 이용한 탄종별 연소율은 SBCL탄을 제외한 나머지 탄은 연소율 99%이상으로 나타났으며, 그 중 아역청탄인 Roto South탄과 Kideco탄과 혼탄된 NOVA와 TOTAL탄 연소율이 역청탄계열보다 높게 나타났다.

아역청탄의 화염은 밝고, 깨끗하게 형성되었으며, 화염의 길이는 휘발분이 높을수록 버너 주위에서 짧고 역청탄의 경우는 아역청탄보다 긴 형태로 형성되어 상대적으로 연소시간이 더 소요된다. 또한 노내온도는 수분함량이 많은 아역청탄이 역청탄보다 낮게 나타났으며, 노내온도와 내화벽의 온도가 낮고 수분함량이 많은 아역청탄이 NOx 발생이 적은 것으로 나타났다.

### 4. 참고 문헌

- (1) H.M.Kim et al. "Study on the Blended Coal Combustion Characteristics", Second Korea-China Joint Workshop on Coal & clean Energy Utilization Technology, p.79, 1998
- (2) 김성철 외, "시험연소로를 이용한 인도네시아탄의 연소특성", 한국공업화학회 초록, p.93, 1998
- (3) 김태형, 김성철, "미분탄의 연소특성에 관한 연구", 응용화학, 제2권 제1호, p.238, 1998