

석탄의 반응성연구를 위한 DTF 연소실험(I)

박주식, 한웅, 이시훈, 현주수, 손용권
한국에너지기술연구소 에너지환경연구부

Drop Tube Furnace Studies of Coal Combustion on the Coal Reactivity(I)

Chu-sik Park, Woong Han, Si-hun Lee, Ju-soo Hyun, Eung-kwon Shon
Energy Environment Research Department, Korea Institute of Energy Research

1. 서론

석탄의 연소시 발생하는 대기 오염물질인 질소산화물은 생성과정에 따라 fuel NO_x와 thermal NO_x로 대별될 수 있다. 이중 fuel NO_x는 석탄중의 질소 성분이 연소과정중 산화되어 생성되는 물질로서 석탄으로부터 질소성분의 방출은 석탄의 burn-out ratio에 비례한다고 알려져 있다. 따라서 Fuel NO_x의 발생률은 석탄의 연소성과 밀접한 관계가 있다. 또한 질소 산화물은 석탄을 구성하는 C, H, S 성분들과의 경쟁적인 산화, 환원반응을 통하여 생성되어지기 때문에 탄종에 따라 질소산화물의 생성량은 다른 결과를 보여준다.

본 연구에서는 열중량분석기와 drop tube furnace(DTF)를 이용하여 공기비, 연소 온도등의 변화에 따른 석탄의 연소성 변화를 관찰하여 보았다.

2. 실험

본 실험에서는 유연탄인 호주산 Drayton과 Ulan탄을 대상탄으로 사용하였다. 기본분석으로 대상탄에 대한 원소 및 공업분석이 수행되었다. 원소분석에 Perkin Elmer 2400 원소분석기가 사용되었다. 공업분석에 사용된 기기는 LECO automatic proximate analyser 이었다. 열 중량분석기를 이용한 연소성 평가실험에서는 비등온 및 등온 분석이 수행되었다. 비등온분석에서 가열속도는 10°C/min 이었으며 등온분석은 600°C, 700°C, 800°C에서 각각 수행되었다. 열중량분석에는 SETRAM TG-DTA-92가 사용되었다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 DTF의 구성도를 나타낸 그림이다. DTF는 균일한 반응온도조절을 위하여 3지역으로 분할 제어되도록 제작되었으며 반응 유도관은 외부로부터의 가스유입을 차단하기 위하여 밀폐구조로 제작되었다. 또한 석탄입자의 공급장치(coal feeder)는 screw-type으로 제작되었으며 석탄의 균일한 공급을 위하여 진동 spoon을 설치

하여 screw feeder에서 뭉쳐 떨어진 석탄입자가 분산되어 공급되도록 하였다. DTF연소실험에서는 석탄의 입자크기에 따른 영향을 배제하기 위하여 200~400mesh로 체 분리된 시료를 사용하였다. 연소실험은 1100℃, 1300℃, 1500℃에서 각각 수행되었다. 공기비(SR)는 0.6~1.4까지 변화를 주었으며 반응거리는 5~50cm까지 변화를 주어 실험하였다.

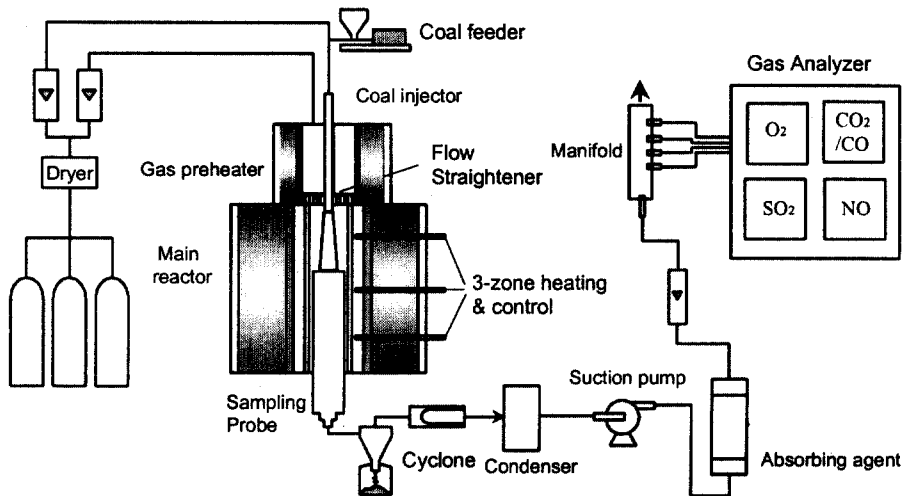


Fig. 1 Schematic diagram of Drop Tube Furnace

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 석탄의 기본분석

Table 1에는 대상탄의 원소분석 결과를 나타내었다. 분석 결과는 석탄에 함유된 수분과 회분의 함량을 제외시켜 산출된 결과이다. 질소성분의 분석결과 약 2%내외의 비교적 높은 함량을 보였으며 황성분은 1%이하의 분석결과를 나타내었다. 대상탄은 탄소, 수소함량의 비교결과 역청탄으로 판단된다. Drayton탄의 경우 산소함량이 비교적 높은 12.67%로 분석되었다. 이와같은 높은 산소함량은 일반적으로 휘발분이 많은 시료에서 보여지는 결과이다.

Table 1 Ultimate analysis of coals

Sample	Ultimate analysis(wt%, Dry Ash Free Basis)				
	C	H	N	S	O
Australia Ulan	83.66	5.62	2.04	0.75	7.94
Drayton	79.33	5.54	1.87	0.59	12.67

Table 2에는 공업분석과 발열량 분석결과를 나타낸 결과이다. 휘발분의 고정탄소분의 함량은 유사한 결과를 보여주었으며 Ulan탄의 회분이 17.92%로 상대적으로

높은 함량결과를 보여주었다.

Table 2 Proximate and Calorific value analysis of coals

Sample	Proximate analysis(wt%, Air Dry Basis)				Calorific value kcal/kg	
	Volatile Matter	Moisture	Fixed Carbon	Ash		
Australia	Ulan	29.03	2.37	53.64	17.92	6859
	Drayton	31.82	4.53	52.61	11.04	6920

3.2 열중량분석결과

비등온분석법에서는 반응이 시작되는 IT(Initiation Temperature)와 반응이 종료되는 BT(Burn-out Temperature)에 대한 결과를 얻을 수 있다.

Table 3 IT and BT of coal

	Coal	
	Drayton	Ulan
IT(°C)	402	405
BT(°C)	550	545

대상탄의 IT와 BT는 미소한 차이를 보여주고 있어 이들 결과로부터 연소성의 우열은 구분할 수 없었다.

그러나 등온분석에서는 대상탄의 연소성의 차이를 확인할 수 있었다. Table 4는 등온분석실험에서 반응온도별 연소종료시간에 대한 측정결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 반응온도가 증가함에 따라 연소성이 향상되어 연소종료시간이 단축되고 있음을 확인할 수 있다. Drayton 보다는 상대적으로 Ulan탄이 연소성이 좋을

을 알 수 있다.

Table 4 TGA burn-out time compared with reaction temperature.

Reaction Temp.(°C)	Coal	
	Drayton	Ulan
600	1242	1150
700	1140	1085
800	1045	998

TGA를 이용한 등온 실험에서 석탄의 연소성(반응성)을 결정하는 방법은 매우 다양하게 제시되고 있다. 이 중 Tsai와 Scaroni는 평균 반응성 매개변수 즉 $R_{a,x}$ 의 사용을 추천하고 있다. $R_{a,x}$ 는

다음과 같이 정의 된다.

$$R_{a,x} = \frac{\sum_0^x (R_u \Delta W)}{\sum_0^x \Delta W} \quad R_u = \frac{1}{W_u} \frac{dW}{dt}$$

$R_{a,x}$: averaged reactivity parameter

ΔW : weight loss within an arbitrary time interval around t

x : percentage burn-off in the same time t

R_u : the instantaneous reaction rate at time t

W_u : the weight of char(daf basis) unreacted at time t

dW/dt : the slop of the weight-loss versus time curve at time t

Table 5 Averaged reactivity parameter, $R_{a,90\%}$,

Reaction Temp. °C	Coal	
	Drayton	Ulan
600	0.152	0.158
700	0.166	0.180
800	0.183	0.194

Artos와 Scaroni는 burn-off 90%일 때의 평균 반응속도로 연소성을 비교할 것을 권하고 있다. Table 5는 반응온도에 따른 burn-off 90%일 때의 평균 반응속도와 burn-off time을 산출한 결과이다. $R_{a,90\%}$ 의 비교에서 Ulan탄이 Drayton탄에 비교하여 연소성이 좋을 수 있었으며 반응온도가 증가함에 따라 Drayton탄에 비교하여 Ulan탄에서 증가 폭이 큼을 알 수 있었다.

3.3 DTF 연소실험 결과

DTF연소실험에서 DTF내의 유체흐름은 층류로 조성되어 석탄입자가 1차원 운동을 보인다는 가정 하에 석탄입자의 1차원 운동방정식을 세우고 이를 정리하여 다음과 같은 미분방정식을 얻었다.

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} - \frac{C_D u o^2 \rho A_p}{2 m}$$

석탄입자의 반응온도별, 반응거리별 체류시간은

Runge-Kutta 4차 해법을 이용 계산되어졌다. DTF연소실험에서 석탄의 연소성은 전환율(burn-out ratio)로 고찰되었다. 석탄의 전환율의 산출에는 회분 추적법(ash trace method)과 생성 가스 분석결과가 각각 사용되었다. 회분 추적법은 석탄의 연소시 회분의 함량은 불변한다는 가정 하에 다음과 같이 정의 된다.

$$E = \left[1 - \frac{A_o \times (100 - A')}{A' \times (100 - A_o)} \right]$$

E = Conversion
Ao = Ash content(%) in coal
A' = ash content(%) in char

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 Ulan탄과 Drayton탄에 대하여 공기비 의 반응온도에 따른 탄소전환율 곡선을 나타낸 것이다. Ulan탄은그림에 나타난 바와 같이 반응거리 10cm에서 각 반응온도에 따라 0.55~0.72의 전환율을 보여주고 있다. 반응거리 10cm일 때의 체류시간은 약 0.4sec로서 짧은 시간안에 연소가 50%이상 진행된 결과이다. 반응온도가 증가함에 따라 탄소 전환율 또한 증가하는데 반응이 진행되면서 반응온도에 의한 탄소 전환율의 차는 감소되고 있다. DTF의 연소실험에서 1500°C일 때 반응거리 50cm, 즉 체류시간 1.79sec일 때 탄소전환율이 1.0으로 산출되어 연소가 종료되었음을 보여준다. 이와 비교하여 Drayton탄은 상대적으로 낮은 연소성을 보여주었다. 1500°C의 경우 반응거리 10cm에서 0.6의 전환율을 보였으며 반응거리 50cm에서도 불완전 연소된 결과를 보여주고 있다. 또한 1100°C의 연소결과는 Ulan 탄에 비교하여 연소성이 더욱 낮아 반응거리 50cm에서 0.75의 전환율을 보여주었다. 1100°C이상의 반응온도에서 Ulan탄의 경우에는

반응온도의 증가에 따라 연소성의 변화가 상대적으로 적은 반면 Drayton탄은 연소성이 낮은 상태에서 온도에 따른 변화가 큼을 보여주었다.

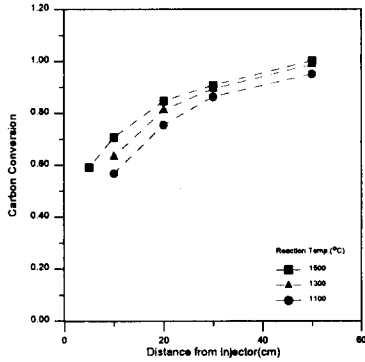


Fig. 2 Variation of carbon conversion for Ulan coal with reaction temperature.

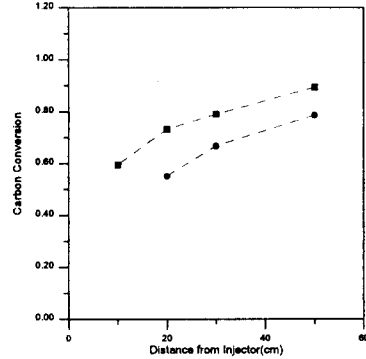


Fig. 3 Variation of carbon conversion for Drayton coal with reaction temperature.

Fig. 4와 Fig 5는 1500°C의 반응온도에서 공기비(SR)의 변화에 따른 전환율의 변화를 나타낸 그림이다.

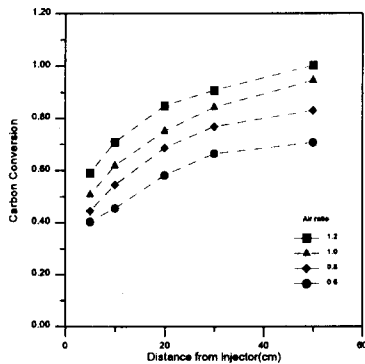


Fig. 4 Variation of carbon conversion for Ulan coal with Air ratio

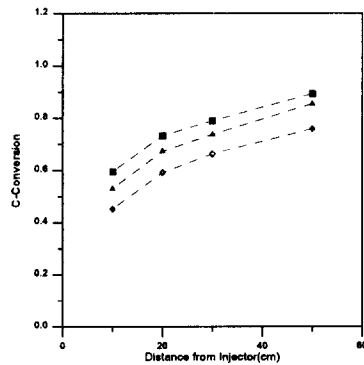


Fig. 5 Variation of carbon conversion for Drayton coal with Air ratio

전반적인 탄소전환율 곡선은 공기비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다. Ulan 탄의 경우에는 체류시간이 증가함에 따라 공기비에 따른 전환율의 차는 더욱 커짐을 알 수 있다. 이와 같이 공기비에 의한 전환율의 차가 연소 초기 적게 발생하는 원인은 비록 저 공기일지라도 연소초기에는 미 반응된 산소가 충분히 존재하고 있기 때문으로 판단된다. DTF의 연소성 비교실험에서 Ulan 탄이 상대적으로 높은 연소성을 보여주어 열중량 분석결과와 일치된 결과를 얻

을 수 있었으며 두 탄종 간의 연소성의 차는 반응온도가 높아짐에 따라 더욱 뚜렷이 관찰할 수 있었다.

4. 참고문헌

1. Tsai, C. Y. and Scarnoi, A. W., Fuel, 66, 1401(1987)
2. Artos, V. and Scarnoi, A. W., Fuel, 72, 927(1993)
3. Solomon, P. R and Serio, M. A., Prog. Energy Combust. Sci., 18, 149 (1992)
4. Serio, M. A., Hamblen, D. G. and Solomon, P. R., Energy Fuels, 1, 138(1987)
5. Maloney, D. J. and Jenkins, R. G., 20th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1435 (1985)
6. Tsai, C. Y. and Scarnoi, A. W., 20th Symposium(Int.) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1455-1462 (1985)