

## 다양한 탄종별 자체발열 특성과 물성의 비교 분석

김정수\* · 이용운\* · 임현수\*\* · 박호영\*\* · 류창국\*

### Evaluation of self-heating propensity and its relation with fuel properties of various coals

Jungsoo Kim\*, Yongwoon Lee\*, Hyeon Soo Im\*\*, Hoyoung Park\*\*, Changkook Ryu\*

#### ABSTRACT

With an increase in the use of low rank coals in power plants, various operational issues were raised in the fuel storage and supply, combustion, boiler and flue gas treatment systems. In the fuel storage and supply system, the main issue is the self-heating propensity of low rank coals leading to spontaneous combustion in yard storage, transport and pulverization. This study evaluated the reactivity of various sub-bituminous and bituminous coals with oxygen at low temperatures by analyzing the temperature increase characteristics of coals under a constant flow rate of oxygen supply. The results were quantified to a self-heating index and the relation with the fuel properties were evaluated.

**Key Words** : Coal, Spontaneous combustion, CPT (Crossing Point Temperature)

석탄은 국내 화력 발전의 주요 연료로서 연간 40종 이상의 다양한 탄종이 수입되고 있다. 그러나 현재 고등급탄의 가격 상승에 따라 저급 석탄의 사용이 증가하면서 화력발전에서 연료공급계통, 연소계통, 보일러 및 후처리 계통에서 다양한 문제들이 발생하고 있다.[1]

본 연구는 연료공급계통에서 화재가 발생하는 것을 방지하기 위해 이를 유발하는 석탄의 자체발열 특성에 대한 표준화된 분석기법을 개발하고 이를 이용하여 석탄의 기본 특성과의 연관성을 통해 신규 탄종 도입 시 이를 빠르게 예측, 분석하여 문제 발생을 방지하는 데 활용할 수 있다.

석탄의 자체발열은 주로 석탄의 하역, 저탄 과정에서 공기 중의 산소가 석탄의 탄소와 느린 속도로 반응하여 발열하는 현상으로 인해 발생한다. 이러한 과정으로 생성된 반응열이 공기의 대류 열전달에 의해 발산하지 않을 경우, 석탄의 온도는 계속 상승한다. 이때 석탄의 온도가 120°C에 도달하면 산화 반응속도 및 온도가 급격하게 상승한다. 석탄의 온도가 180°C 이상 올라가면 탈휘발(열적분해)이 시작되어 휘발분이 착화함으로써 결국 발화에 이르게 된다.[2]

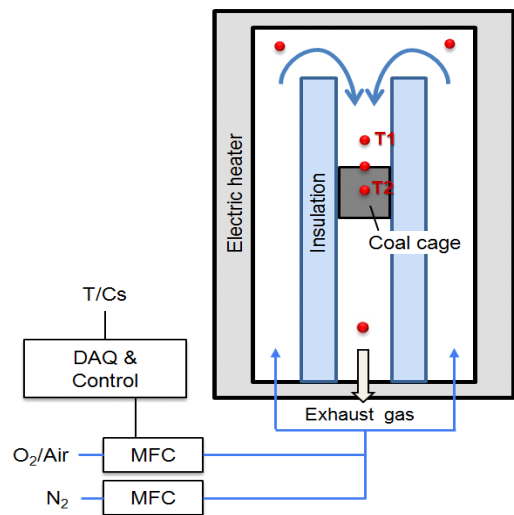


Fig. 1 석탄 발열특성 분석장치 전체 구성도

Fig. 1는 석탄의 자체발열 특성 분석 장치의 전체 구성을 그림으로 나타낸 것이다. 반응기는 외부의 전기 히터를 사용하여 내부의 가스 온도가 균일하게 제어되도록 설계하였다. 실험에 사용되는 가스는 O<sub>2</sub>이며 최대 500 ml/min으로 제어할 수 있는 Mass Flow Controller(TN 280)를 통해 공급된다. 반응기 하부로 공급된 가스는 전기히터와 닿은 외벽을 통해 승온되면서 상승한 후, 내화

\* 성균관대학교 기계공학부

\*\* 한국전력연구원, 그린에너지연구소

† 연락처, cryu@me.skku.ac.kr

TEL : (031)299-4841 FAX : (031)-290-5889

재 안으로 하강하면서 내부의 석탄이 담긴 케이지를 지나게 된다. 큰 오븐의 중앙에 석탄 케이지가 위치하고 스크류를 이용하여 강제 순환시키는 기존의 CPT 실험과 달리, 본 연구에서 적용한 실험 방식은 모든 가스 유량이 석탄 샘플을 관통하므로 균일한 물질전달 특성을 가지게 된다.[3] 반응기 내부에는 총 6개의 K-Type 열전대를 사용하여 반응기 상부, 석탄 케이지 20 mm 상부 (T1, 케이지 상부에서 20 mm 위), 표면, 내부 (T2, 케이지 바닥면에서 20 mm 위) 및 반응기 하부 (반응기 바닥면에서 30 mm 상단)의 각 부위별로 온도 분포를 측정한다. 또한 석탄이 설정한 목표 온도에 도달하면, 화재를 방지하기 위하여 O<sub>2</sub>의 유입을 중단하고, N<sub>2</sub>를 투입하도록 설정하였다.

매 회당 약 15 g의 석탄 샘플을 케이지에 넣고 가스(공기 또는 산소)를 일정유량으로 공급하면서 일정 승온율을 유지하여 가스 온도(T1)와 케이지 내부의 석탄 온도(T2)가 교차할 때 까지 실험을 진행하였다. 석탄 자체 발열 특성 분석은 승온율 0.5°C/min으로 250°C까지 승온한다.

가스는 공기와 산소를 사용하여, 유량 10-200 ml/min 범위에서 실험을 진행하였다. 이 때 공기의 경우, 산소의 농도가 21 %로 낮기 때문에 발열반응 대비 대류열손실에 따른 온도하락의 효과도 커서 승온 특성이 뚜렷하지 않다. 또한 CPT가 100 % 산소 조건에 비해 크게 상승하여 실험 시간이 크게 증가하였다. 다양한 조건에서의 실험을 반복한 결과 최종적으로 산소 분위기, 유량 100 ml/min, 승온율 0.5°C/min에서 탄종별 최종 비교 실험을 수행하였다. 이 때 입자크기는 0.1-1 mm의 구간에 대해 선별하여 탄종별로 비교하였다. 온도 측정을 통해 얻어지는 대표적인 실험 결과는 Fig. 2에 나타나있다. 반응기에 공급

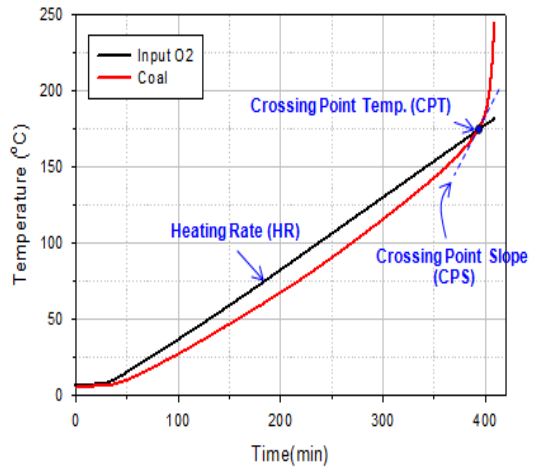


Fig. 2 CPT 및 CPS 분석 사례 (M탄, O<sub>2</sub> 100 ml/min, 0.5°C/min)

되는 산소는 일정 속도(Heating rate, HR [°C/min])로 승온되며 산소 온도와 석탄 온도가 교차하는 값이 CPT (Crossing point temperature [°C])이며, CPT에서의 기울기인 CPS (Crossing Point Slope [°C/min])를 함께 계산하였다.

실험결과에서 CPS와 HR의 차이(CPS-HR)는 석탄의 고유 승온율로서 발열 특성에 중요한 지수이다. 예를 들어, 회분량이 많거나 비열이 큰 경우 등 석탄 탄종에 따라 CPS가 영향을 받게 되며 같은 CPT를 가져도 CPS가 낮으면 자체발열성이 더 낮은 것으로 볼 수 있다. 따라서, CPT와 CPS를 모두 고려한 인자로서 아래와 같이 SHP 지수를 정의하여 조건별로 분석하였다.

$$SHP\ Index = (CPS - HR) \times \frac{180}{CPT} \times 2 \quad [^\circ C/min] \quad (1)$$

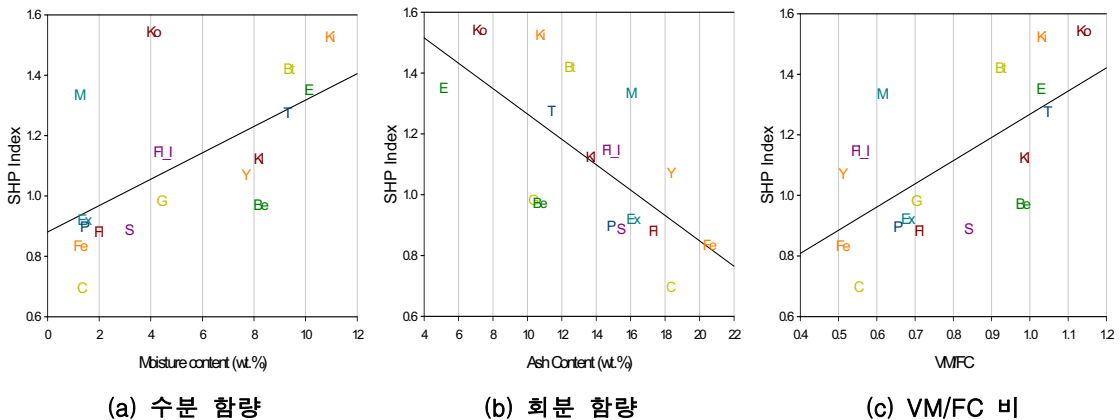


Fig. 3 SHP와 석탄 물성 상관관계 분석

이러한 실험 결과에 대해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 석탄의 기본물성(공업분석, 원소분석, 발열량)과의 상관관계를 분석하였다. 먼저, 기본 물성인 H/C, O/C에 대해서는 직접적인 상관관계를 찾을 수 없었다. 반면 수분의 경우 Fig 4(a)과 같이 전반적으로 증가하고, 회분의 경우 Fig. 4(b)와 같이 반비례하는 상관관계가 존재한다. Fig 4(c)의 경우 휘발분/고정탄소 비(VM/FC)의 경우 비례하여 증가하는 경향을 보인다. 그러나, M탄과 B탄은 전반적으로 모두 경향에서 크게 벗어난다. 또한, Ko은 유증증발 과정에서 흡착 가능한 수분이 대부분 제거되고, 잔류 오일이 표면에 남아있다. 따라서 수분 함량이 낮더라도, 100°C 이상이 되면 잔류 오일 성분의 기화에 의해 저온 발열 특성이 상승하는 것으로 판단된다.[4]

국내 화력 발전에 사용되는 아역청탄 및 역청탄 계열의 다양한 탄종의 자체발열성을 실험을 통해 분석하고 그 결과를 기본 물성과 비교하여 상관관계를 분석하였다. 산소를 이용한 저온영역에서의 반응 특성에 대한 실험 결과로부터 CPT와 CPS를 구하고 이를 통합한 자체발열성 지수를 SHP 지수로 정의하여 탄종별로 비교하였다. SHP 지수는 석탄의 공기건조 기준(Air-dried) 고유수분과 휘발분/고정탄소 비(VM/FC)에 대해 전반적으로 양의 비례관계를, 회분에 대해 음의 비례관계를 가지지만, M탄과 B탄 등 특정 탄종은 이를 벗어나는 결과를 보인다. 반면, 석탄의 C, H, O 원소조성과 발열량에 대해서는 직접적인 상관관계를 찾을 수 없었다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(2011101010004B)입니다.

## 참고 문헌

- [1] Smith AC, Lazzara CP, 1987. Spontaneous combustion studies of US coals, US Bureau of Mines, Report of Investigations RI 9079
- [2] H. Nalbandian “Propensity of coal to self-heat”, CCC/172 October 2010 Copyright © IEA Clean Coal Centre, ISBN 978-92-9029-492-4.
- [3] R. Sen, S.K. Srivastava, M.M Singh, “Aerial oxidation of coal-analytical methods, instrumental techniques and test method:A survey”, Indian Journal of Chemical Technology Vol. 16, March 2009, pp. 103-135.
- [4] 김재관, 고수분 저등급 석탄의 최적 유증 건조를 통한 자연발화 예방, 한국전력공사 전력연구원, 2011