

## 순환유동층 연소로에서의 국내무연탄의 분열 특성

이종민, 김재성, 김종진

한전 전력연구원 발전연구실 연소신발전그룹

### Comminution characteristics of Korean anthracite in a CFB combustor

Jong-Min Lee, Jae-Sung Kim, Jong-Jin Kim

APG & C Group, Power Generation Lab, KEPRI, KEPCO

#### 1. 서론

한전에서는 동해화력에 최대규모(200MW $\times$ 2)의 저급 무연탄용 순환유동층 2기를 건설하여 운영 중에 있으며, 1998년 10월 1호기의 상업운전 성공을 시작으로 현재 2호기의 상업운전을 수행하고 있다. 그러나, 이러한 성공적인 상업운전에도 불구하고 석탄입도의 최적화 및 연소온도 분포 등과 관련하여 많은 성능 향상의 여지가 남아있으며, 이러한 성능의 향상을 위한 운전상황의 예측이 최적화에 필수적이라 하겠다. 이러한 석탄입도 및 연소온도 분포는 특히 연소로내의 입도분포와 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며, 이러한 입도분포는 석탄의 연소반응성과 더불어 연소 전환율 및 성능에 큰 영향을 미친다[1,2] 석탄 입자의 연소반응성은 그 반응성의 크기에 따라 순환유동층의 연소로내의 온도분포 및 탄소분포 그리고 미연분 배출 등에 중요한 인자이며, 연소로내의 입도분포는 열전달 특성 및 온도분포 그리고 사이클론 성능 결정에 매우 중요한 인자이다. 그러나, 투입되는 석탄의 초기입도는 연소로내에서 열적충격에 의해 깨지거나(fragmentation), 유동층에서 입자 마모(attrition) 혹은 연소에 의해 축소(shrinkage)되는 현상을 나타내어 실제 연소로 내에서의 입도를 예측하기에는 매우 어려운 실정이다. 뿐만 아니라, 열적충격에 입도 분열 및 마모에 관한 연구도 대부분이 유연탄에 한정되어 있어 국내무연탄에 대한 입도변화에 대한 자료의 구축이 필요하다 하겠다[3].

이에 본 연구에서는 향후 상용 순환유동층의 성능 예측을 위한 기본 자료의 구축 및 그 특성 고찰 방안으로써, Lab 규모의 순환유동층 연소 시험 장치를 이용하여 무연탄 입자의 열충격 분열 현상 및 마모 등을 고찰, 분석하였다.

#### 2. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 크게 TGA 및 Lab 규모의 순환유동층 연소장치를 사용하여 연소 특성 및 입도 변이 특성을 고찰하였다. 먼저, 국내무연탄의 열적충격에 따른 분열 현상에 대한 기초실험으로 TGA에서 승온속도 및 입자크기에 따른 열충격 깨짐현상을 분석하였으며[4, 5], 이를 토대로 유동층에서 입자의 열충격 분열 및 입도변이를 살펴보기 위해 Fig. 1에 나타낸 실험실 규모의 순환유동층 연소장치를 사용하였다. 순환유동층 연소 장치는 크게 주 반응기부분, 외부 가열로 부분, 석탄 및 공기/질소 공급-제어 부분, 반응가스 후처리 부분 그리고 온도, 압력 및 가스농도 측정 부분으로 구성되어 있다. 반응기 부분은 연소로 부분(0.35m-I.D. $\times$ 2.3m-High), 입자 포집을 위한 1, 2차 사이클론, 하강관 (0.25m-I.D.) 및 재순환부(L-valve)로 구성되어 있다. 온도 및 압력은 연소로 높이에 따라 각각 10개씩 설치되어 측정되고 있으며, 석탄공급은 batch 및 continuous 실험이 가능토록 구성되어 있으며, 반응 동안의 가스분석 ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ )이 이루어지도록 가스분석기가 설치되어 있다. 본 입자 분열 시험에서는 3종 (경동탄, 도계탄, 삼척탄)의 국내탄이 사용되었으며, 이의 분석을 표 1에 나타내었다.

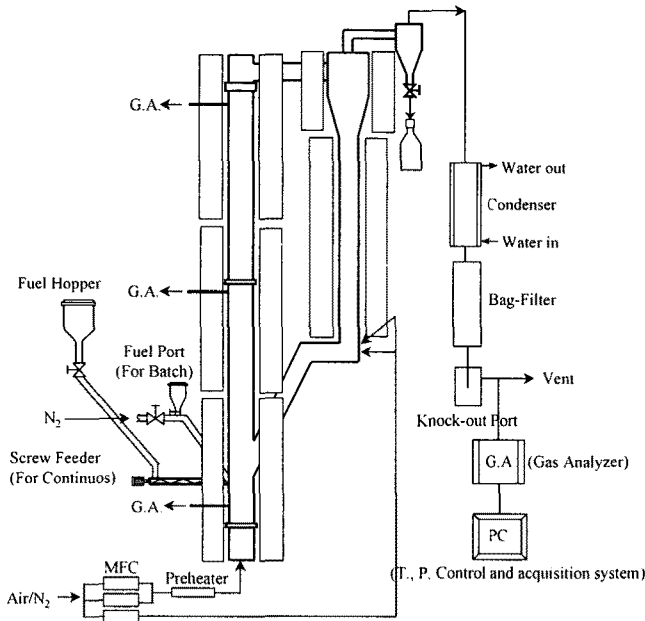


Fig. 1 Lab. scale CFB combustor

입자분열 실험은 일정 온도에 도달한 순환유동층 연소로에 일정한 입도를 갖는 석탄입자를 투입하여 반응조건에 따른 입도 분열을 관측하였으며, 이때 유동매체로는 90 $\mu$ m의 모래를, 그리고 유동 기체로는 질소 혹은 공기와의 혼합가스를 사용하여 반응조건(탈휘발 및 연소반응)에 따른 영향을 고찰하였다. 반응시간은 가스분석기를 통한 배가스 조성으로부터 결정하여 탈휘발 반응 시간 및 연소 시간을 결정하였으며, 본 실험에 있어서는 각각 300s 및 1500s의 반응시간을 갖는 것으로 나타났다. 입자분열에 미치는 운전조건에 대한 영향을 고찰하기 위해

탄종에 따라 반응조건 (탈휘발 및 연소) 및 반응온도 (760~850 $^{\circ}$ C), 기체 유속 (0~1.2m/s) 그리고 입자 크기(1~5.6mm)에 따라 입자 분열 실험을 수행하여, 그 결과를 고찰하였다.

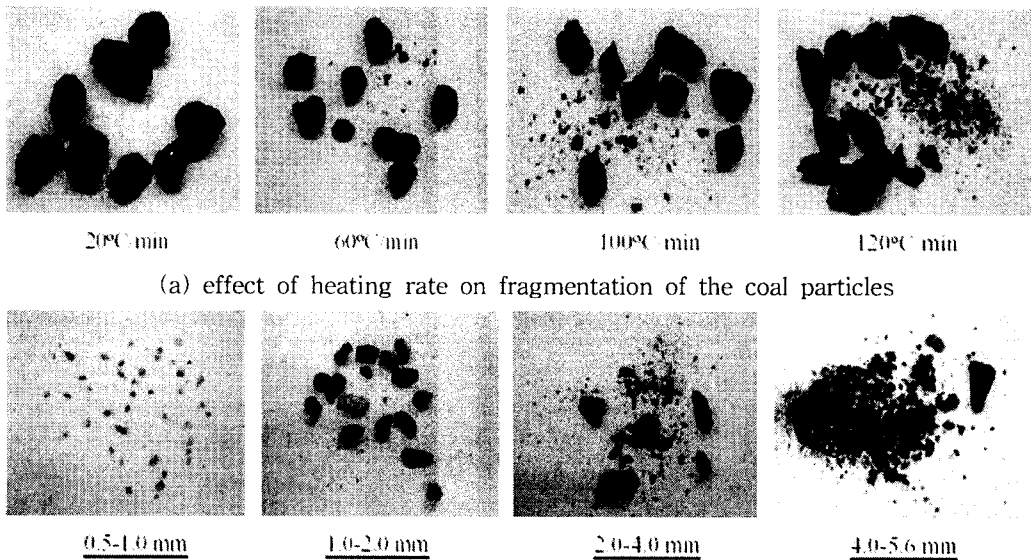
Table 1. Proximate and ultimate analyses of Korean anthracite.

	Coal	Kyung-dong coal	Do-gae coal	Sam-chuck coal
Proximate analysis	Moisture	3.76	3.26	3.60
	Volatile matter	3.92	3.90	3.89
	Fixed carbon	65.32	60.86	58.44
	Ash	27.0	31.98	34.07
Ultimate analysis (dry basis)	C	68.79	63.21	60.76
	H	0.82	0.77	0.82
	O	2.41	2.16	2.41
	N	0.43	0.39	0.43
	S	0.24	0.41	0.24
	Ash	35.31	33.06	35.34
Ash analysis	SiO <sub>2</sub>	52.58	53.41	56.41
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.99	34.82	31.38
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.10	2.60	2.53
	CaO	0.99	0.80	0.58
	MgO	0.72	0.65	0.65
	Na <sub>2</sub> O	0.20	0.16	0.34
	K <sub>2</sub> O	3.71	4.65	4.08
	TiO <sub>2</sub>	2.24	2.14	2.02
HGI		73	93	103

### 3. 결과 및 고찰

고정층(TGA) 반응기에서의 열적충격에 의한 입자의 분열현상에 대해 질소분위 기하에서 크게 승온속도, 입자크기 및 탄종에 따라 그 영향을 고찰하였다. Fig. 2는

승온속도(20~120°C/min) 및 입자 크기에 따른 분열현상에 대한 사진으로써 승온속도가 커질수록, 입자크기가 커질수록 입자의 깨짐현상이 두드러지게 고찰되었다. 특히 국내 무연탄의 경우 일반적으로 휘발분을 많이 포함하고 있는 유연탄과는 달리 그 깨짐 현상이 겉 표면으로부터 폭발적으로 일어나 비교적 많은 미세입자를 포함하고 있으며, 질소 분위기뿐만 아니라 및 공기 분위기에서의 연소시에도 비슷한 분열 현상을 나타내는 것으로 고찰되었다. 이는 휘발분에 의한 입자기공 내부 압력의 상승으로 인한 분열현상보다는 입자크기 및 승온속도 증가에 따른 입자내 온도구배의 증가로 인한 thermal stresses의 증가가 입자의 열충격 강도를 증가시켰기 때문으로 이해된다[5].



(a) effect of heating rate on fragmentation of the coal particles

(b) effect of particle size on fragmentation of the coal particles

Fig. 2 Fragmentation phenomena of the anthracite in a TGA reactor

한편, 순환유동층 연소장치에서의 입도변이는 크게 다음과 같은 형태를 고찰할 수 있었다. 먼저, 휘발분이 방출되는 동안의 입도변이는 원래의 입자크기를 유지함과 동시에 200 $\mu\text{m}$ 이하의 생성을 야기하는 것으로 고찰되었으며, 특히, 100 $\mu\text{m}$ 이하의 입도 생성을 상당히 많이 발생시키는 것으로 나타났다. 그러나, 점차 연소가 진행됨에 따라 원래의 입도군은 마모에 의해 감소하고, 점차 미세 입자의 생성이 심화됨을 고찰할 수 있었다. 이는 입자크기가 증가함에 따라 그 영향이 더욱 확실하게 나타났으며, 입자가 작을수록 마모 및 열적충격에 의한 입도변이 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이러한 분열 현상은 순환유동층 온도조건에 따라 영향을 받으며, Fig. 3에 나타난 바와 같이 석탄 입자의 초기 투입에 따른 탈휘발 과정에서 온도가 높을수록 분열현상이 심화되는 것으로 나타났다. 이는 온도증가에 따른 열충격 강도의 증가로 인한 분열현상의 심화로 이해되며, 고정층과 마찬가지로 상당히 많은 미세입자의 생성이 고찰되었다. 탈휘발 과정을 지나 연소반응에 이르면, 초기 입도분포의 양상을 유지하며 대부분의 입자 마모가 진행되어 미세입자의 증가가 두드러지는 것으로 나타났다. 한편, 입자크기에 따라서도 고정층에서 고찰한 경우와 마찬가지로 초기입자 크기가 커질수록 입자 분열이 크게 일어남을 고찰할 수 있었다 (Fig. 5). 입자 크기가 커질수록 100 $\mu\text{m}$  이하의 입자 분율이 12%에서 18%로 증가함을 고찰할 수 있었으며, 입자 크기가 커질수록 초기 입도의 분율이 점차 감소하

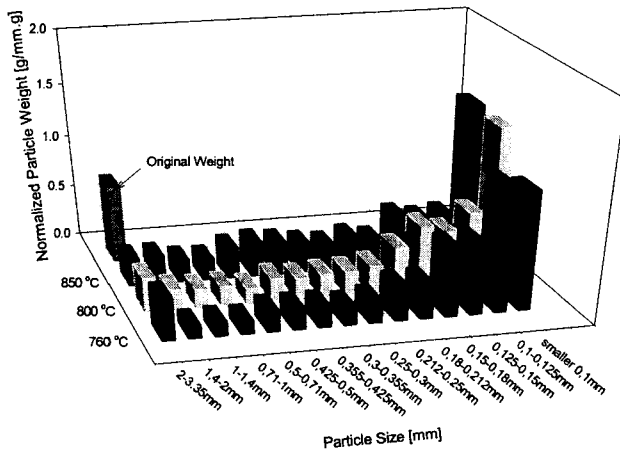


Fig. 4 Effect of temperature on fragmentation

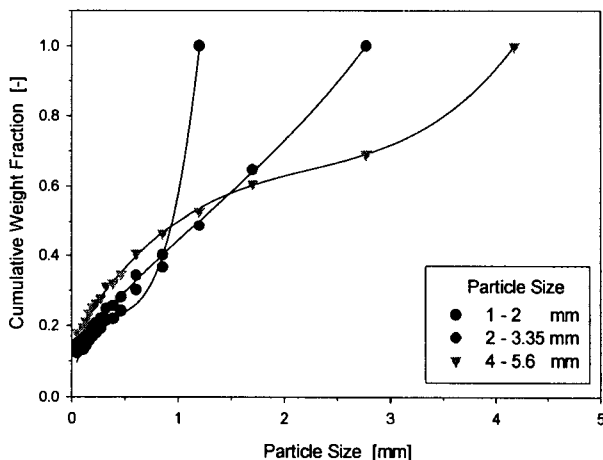


Fig. 5 Effect of particle size on fragmentation

내의 조성 및 기공도 그리고 회재 특성에 따라 입자 분열에 영향을 받는 것으로 고찰되었다 [5]. 이러한 물리, 화학적 성질 중 HGI (Hard Grove Index)는 입자의 경도를 나타내는 값으로 분열과 매우 밀접한 관계를 갖는 것으로 나타났다. Fig. 6는 HGI 값이 다른 탄종 - 경동, 도계, 삼척 -에 대해 동일조건에서의 입자 분열 특성을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 HGI 값이 높은 삼척탄이 미세입자의 형성에 더 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 이는 HGI 값이 클수록 미분도가 커서 쉽게 잘 부서지는 성질이 있기 때문이다. 이는 석탄 탄종에 따라 초기 크랙정도라든지, 회재 특성 및 조성 등이 다르기 때문이며, 이에 따른 열척 충격 강도가 다르게 작용하기 때문으로 생각된다.

한편, 국내탄의 원탄 및 탈휘발 후에 생성된 촉 그리고 완전 연소후의 회재를 SEM 및 optical microscope로 고찰한 결과, 원탄 및 촉의 표면에서 미세 입자의 cluster가 발견되었으며, 탈휘발 과정 및 완전 연소 과정을 거치면서 점차 줄어들고 궁극적으로는 이러한 cluster가 없어짐이 고찰되었다. 이는 초기 석탄 표면에 부착되어

는 것으로 나타나 분열이 상당히 크게 일어남을 알 수 있었다.

이러한 국내탄의 입도 분열현상은 thermal stresses의 증가로 인한 현상으로 잘 설명되나[6], 비교적 휘발분이 적은 탄종임에도 불구하고 분열이 잘 일어나는 특성을 지녀, 그 예측이 어려운 것으로 나타났다.

또한, 입자 탈휘발 과정상의 입자 마모도를 측정하기 위해 유속을 0m/s부터 1.2m/s로 변화시켜 입자 분열을 고찰하였다. 입자분열은 유속이 0m/s의 경우에도 상당량 진행이 되었으며, 유속이 증가함에 따라 큰 입자의 분율이 감소하는 대신 작은 입자의 분율이 증가하는 경향을 보여주었다. 이는 앞서 거론한 바와 같이 탈휘발 과정상에 결정된 입도가 시간이 지남에 따라 입자 마모에 의한 입도분율의 변화만 있을 뿐 초기 탈휘발 과정에서처럼 큰 변화는 보이지 않은 것으로 나타나, 연소로내 입도변화는 초기 입도 분열이 중요한 영향 인자임을 알 수 있었다.

석탄 입자의 물리 화학적 성질은 입도분열에 큰 영향을 주며, 국내탄의 경우에도 석탄

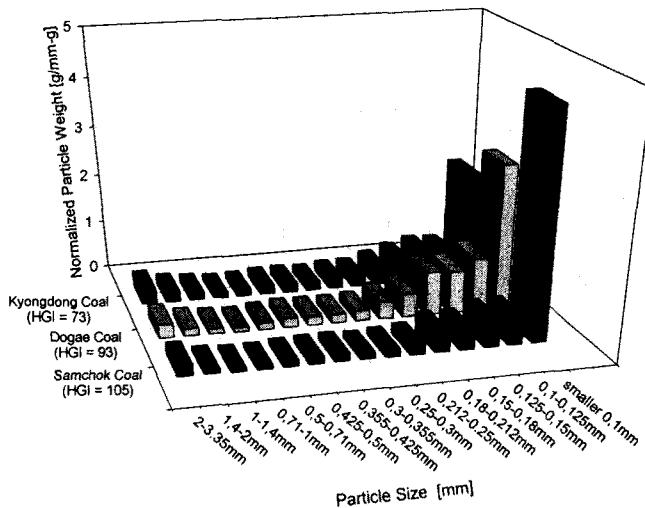


Fig. 6 Effect of HGI on fragmentation

심각하게 고려할 필요성을 제시하고 있다.

#### 4. 결론

비교적 휘발분 함량이 낮은 국내탄의 경우에도 순환유동층 연소로에서 매우 큰 입도 분열 현상이 고찰되었다. 입도 분열은 thermal stresses에 의한 폭발적 분쇄로 이어져 미세 입자의 형성에도 큰 영향을 주었으며, 이러한 입도 변이는 순환유동층 연소로에서 무연탄의 연소 및 체류 특성에도 영향을 줄 것으로 기대된다.

무연탄의 탈휘발 및 연소반응중의 입도변화에 대해서는 연소로의 온도가 증가할수록, 그리고 입자크기가 커질수록 분열현상이 증가하였으며, 특히 미세 입자의 생성이 크게 증가함을 볼 수 있었다. 또한, 유동층 조업시에는 유속의 영향은 입자의 초기 분열에도 영향을 미치긴 하나, 비교적 입자 마모 형태에만 직접적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 석탄의 입자 경도인 HGI에 대해서는 HGI가 증가할수록 분열 현상이 심화됨을 고찰할 수 있었으며, 이러한 입도변이에 따른 로내 입도분포 특성은 순환유동층의 성능평가 및 예측에 필수적으로 고려되어야 하겠다.

#### 참고문헌

- Chirione, R. Massimilla, L. and Salatino, P., Prog. Energy Combust. Sci., 17, 297(1991)
- Choi, Y.S., Moon, B.S. and No, S.Y., Proceedings of the 3rd Int. Sym. on coal combustion, 107(1995)
- Reyes, S. and Jensen, K.F., Chem. Eng. Sci., 41, 345(1986)
- Lee, J.M., Kim, J.S., Kim, J.J., Xin, L. and Winter, F., Theories and Application of Chem. Eng., vol. 7, 1(2001)
- Lee, J.M., et al., 16th international FBC conference, ASME, 2, 889(2001)
- Dacombe, P., Pourkashanian, M., Williams, A. and Yap, L., FUEL, 1847(1999)
- Choi, Y.S., Moon, B.S., and No, S.Y., Proc. of the 3rd. Int. Sym. on Coal Combustion, Beijing CHINA, 107(1995)

있는 cluste가 thermal stresses 및 shock에 의해 부분적으로 탈착되어 미세 입자를 생성하며, 또한 이러한 표면의 미세 입자군은 연소중 입자 마모로 인해 점차 탈착되는 것으로 고찰되었다, 또한, 표면 고찰중 무연탄 원탄의 표면에서 크랙이 고찰되었으며, 이러한 크랙은 탈휘발 과정을 거치면서 심화되어 크게 부서지는 작용에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

이러한 무연탄의 분열 특성은 기존의 탈휘발 과정 및 연소 과정 중 휘발분의 저 함유로 인한 분열 영향을 무시하던 차원에서 매우