

순환유동층 층물질의 입도 변이 연구

이 시훈, 김 요한, 김 상돈, 이 종민\*, 김재성\*  
한국과학기술원 화학공학과 및 에너지·환경연구센터  
\*한전 전력연구원 발전연구실 연소신발전그룹

The size change of bed materials used in CFBC

S. H. Lee, Y. H. Kim, S. D. Kim, J. M. Lee\* and J. S. Kim\*

Department of Chemical Engineering and Energy and Environment Research Center,  
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

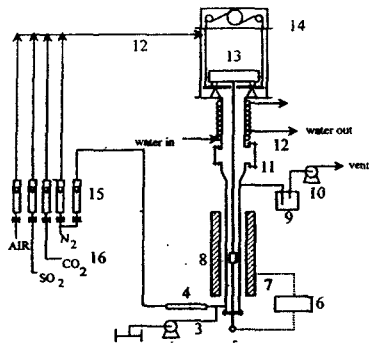
\*Power Generation Lab. Advanced Power Generation & Combustion Group KEPRI,  
Taejon 305-380, Korea

서론

1980년대 중반이후 화력발전소용으로 순환유동층 연소로(Circulating fluidized bed combustor : CFBC)가 많이 건설되고 있다. 이는 기존의 고정층 연소로보다 효율면에서 좋고, 차지하는 부피는 훨씬 적기 때문이다. 순환유동층의 층물질로 사용되는 모래, 석탄회, 석회석 등은 순환하는 입도, 비산유출되는 회재(fly ash)와 하부로 배출되는 회재(bottom ash)로 나누어진다. 주입되는 석탄 및 석회석의 입도는 입자-입자, 입자-연소로의 마모(attrition), 입자의 깨짐(fragmentation), 입자의 축소(shrinking) 등에 의해서 변화하게 된다. 입자의 크기 변화는 연소 효율 증가와 미연분(fly ash) 발생이라는 두 가지 측면에서 장·단점을 가지고 있다. 기존에 나와있는 석탄분석 방법으로는 공업분석, 원소분석, 발열량측정, 회분분석, Swelling index 측정 등이 사용되고 있으나, 이런 분석방법 방법으로는 실제로 순환유동층 연소로 내에서 일어나는 연소 상황을 구현하지 못하기 때문에 석탄연소특성과 입도 변이를 파악하는데 부족하다. 이를 측정하기 위하여 몇몇 연구자들은 유동층 반응기 및 단일 입자 실험을 통하여 유연탄의 파쇄를 연구하였다[1,2,3]. 그러나 국내 무연탄 및 석회석의 경우, 순환유동층의 원료로 사용된 것이 최근의 일이므로 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 순환유동층의 층물질로 사용되는 국내 무연탄과 석회석을 사용하여 입자의 깨짐에 따른 층물질의 입자 크기 변화를 측정하였다.

실험

석탄 입자들의 깨짐 현상을 고찰하기 위하여 열천칭 반응기를 사용하였다. 실험에 사용된 열천칭 반응기는 그림 1 처럼 크게 반응기와 무게 감량 탐지기, 반응기체 주입부로 구성되어 있으며, 각 부분의 설명은 다음과 같다. 반응기는 내경 0.055m, 길이 1m의 304 S.S pipe로 제작되었으며, 무게감량 탐지기는 시료의 무게 변화를 연속적으로 특정하기 위하여 Presisa Model 205-A 전자식 저울을 사용하였다. 저울의 상, 하 운동을 위하여 자동식 Winch assembly를 채택하였고, 컴퓨터를 사용하여 저울에서 나오는 무게감량의 신호를 받아서 저장하여 분석하였다. 고체 시료는 400 mesh 316 SUS 망으로 제작한 basket에 넣고 직경 0.3mm 니크롬선으로 저울 하부에 부착된 hook와 연결된 시료홀더에 장착하여 무게



1. water reservoir, 2. Masterflex pump,
3. Steam generator, 4. Preheater,
5. Thermocouple, 6. Temperature controller,
7. Electric heater, 8. Sample basket, 9. Cold trap,
10. Vacuum pump, 11. Hatch, 12. N<sub>2</sub> purge line, 13. Electric balance, 14. Winch assembly, 15. Flowmeter, 16. Reactant gas

변화를 측정하도록 하였다. 열천칭의 중앙 부분에 hatch형 플렌지(flange)를 만들어 시료의 주입과 제거를 가능하게 하였다.

반응기가 원하는 온도에 도달하면, 시료 0.5-0.7g를 basket에 넣고, 반응부분까지 하강시킨다. 시료 내의 잔류 수분 및 휘발분의 방출로 인한 무게변화가 일어나지 않는 시간을 관찰하고 이를 탈휘발 시간으로 정한다. 수분과 휘발분 방출로 인한 시료의 무게감량은 전자저울로부터 개인용 컴퓨터로 신호를 받아서 저장한다. 일정시간 후, 질소가스를 유지시킨 채 basket을 플렌지 높이까지 올려서 시료를 꺼내고 이를 Image analyzer와 Particle size analyzer로 분석한다. 실험 온도는 순환유동층 연소로의 조업온도인 850℃로 하였으며 온도 영향을 고찰하기 위하여 700-900℃의 온도구간에서도 실험하였다. 사용된 석탄은 국내 무연탄 7종과 석회석이며 국내 무연탄의 원소 및 공업분석값을 Table 1 [4]에 나타내었으며 입도는 0-10mm를 사용하였다.

Table 1 무연탄의 공업분석 및 원소분석

항 목	단 위	기준 치	태백	동원	삼탄	경농	한보	도계	광성	평균
공업분석(습식)										
고유수분	%Wt	3.3	3.42	3.31	3.46	3.88	3.79	3.55	3.41	3.55
회	%Wt	39.0	36.71	38.47	35.57	30.40	34.49	33.52	34.16	34.76
휘발분	%Wt	4.0	5.04	5.34	4.96	5.97	5.70	5.57	5.04	5.37
고정탄소	%Wt	53.7	54.87	52.87	56.00	59.75	56.01	57.36	57.39	55.87
유황분(습식)	%Wt	0.6	0.44	0.36	0.31	0.55	0.60	0.52	0.40	0.45
원소분석(건식)										
탄소	%Wt	54.7	53.05	55.46	58.90	62.15	58.38	58.38	56.51	60.37
수소	%Wt	0.3	1.10	1.12	1.39	1.13	1.13	1.16	1.05	1.16
질소	%Wt	0.2	0.41	0.38	0.32	0.38	0.36	0.32	0.26	0.35
황	%Wt	0.6	0.23	0.96	0.54	0.51	0.53	0.40	0.32	0.55
산소	%Wt	3.8	2.31	2.99	3.01	2.56	4.57	1.54	2.41	3.79
회	%Wt	40.4	42.91	39.18	35.87	33.29	35.03	38.22	39.57	35.96

### 결과 및 고찰

석탄이 연소로에 주입되면 입자가 가열되고 이에 따라 수분이 증발하며 그 다음에 휘발분이 방출되고 그 후 연소과정을 거치게 된다. 이때, 열충격과 휘발분의 방출로 인하여 입자의 깨짐이 발생한다(1). 따라서 연소로에 주입된 석탄과 동일한 환경을 조성하여 파쇄 현상을 열천칭 반응기에서 실험하였다. 특히 열충격과 내부 압력 때문에 발생하는 파쇄를 1차 파쇄라고 하며 이 현상을 구현하기 위하여 질소 분위기 하에서 실험하였다. 그림 2에는 순

환유동층 조업온도인 850℃에서 석탄 입자의 파쇄에 대해서 나타내었다.

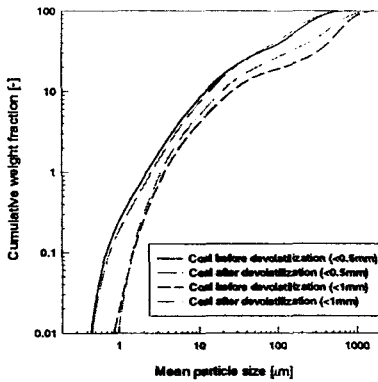


Fig. 2 Particle size distribution of samchuk coal

석탄과 마찬가지로 석회석도 연소로에 들어가 소성 반응을 거치게 된다. 이 반응에 따른 입도분포의 변화를 시간에 따라 관찰하여 그림 3에 나타내었다. 석회석의 소성 반응은 아래와 같이 일어난다.

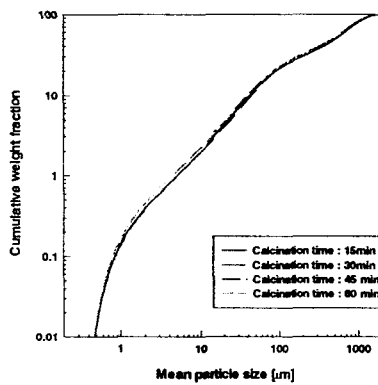
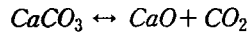


Fig. 3 Particle size distribution of Limestone

를 사용하여 2.0-4.0, 4.0-5.6, 5.6mm 이상 등으로 석탄을 나누어 질소분위기 하에서 순환유동층 조업온도인 850℃에서 실험하였다. Fig. 4을 보면 석탄 입자의 크기가 커질수록 입자의 깨짐이 증가함을 알 수 있다. 석탄 입자의 크기는 image analyzer(LEICA Q 550)을 사용하여 측정하였으며 이때의 입자크기는 실제 석탄의 sieve 크기보다 크게 나타나며 이는 석탄의 형태가 구형이 아니기 때문이다(3). Chirone and Massimilla (5)는 국내 무연탄과 러시아 무연탄을 사용하여 입자의 크기가 증가하면 파쇄가 증가한다고 하였다. 또한 무연탄의 형태를 비교할 때 구형보다는 각이 있는 형태가 파쇄가 더 크게 나타난다고 하였다. Chirone and Massimilla (5)의 실험 결과는 본 실험의 결과와 같은 경향을 나타냈으며 특히 6mm 이하에서는 거의 일치함을 보였다. Zhang et al. (6)는 중국 무연탄을 가지고 실험하여 입자의 크기가 증가할수록 fragmentation index가 증가한다고 하였다. 이는 석탄의 크기가 증가할수록 더 많은 휘발분을 포함하고 있으며 이 결과 높은 내부 압력을 가져서 1차 파쇄가 더 활발하게 발생하기 때문이라고 하였다. 그러나 국내 무연탄의 경우 깨짐이 발생하지 않는 경우도 있었으며 이는 1차 파쇄가 탈휘발에 의한 내부압력 뿐만 아니라 pore

주입되는 석탄은 sieve로 크기가 구별되어 서로 다른 입도의 석탄을 사용하여 실험하였다. 그림에서 보면 sieve 크기가 0-0.5mm의 석탄의 경우 주입되기 전과 후의 입도분포가 거의 변화가 없었으나 평균 크기는 180μm에서 162.55μm로 감소한 것으로 보아 탈휘발에 의한 파쇄의 영향이 나타나는 것으로 생각된다. 0.5-1.0mm인 경우에는 평균 크기가 540μm에서 405μm로 감소한 것으로 나타났으며 입도 분포도 0-0.5mm 것보다 많이 변화한 것으로 나타났다. 이는 석탄의 크기와는 상관없이 탈휘발 작용에 의한 파쇄에 의해 입도 분포가 변한다는 것을 보여준다.

반응기에 주입된 석회석은 반응온도에 의해서 이산화탄소가 날아가는 반응이 일어나며 보통 1시간 이상의 시간동안 소성 반응이 지속되는 것으로 보고되었다. 따라서 본 실험에서는 소성 반응 시간의 변화에 따라 주입된 석회석의 입도 분포를 측정하였다. 그림에서 보면 소성 반응이 진행되어도 입도 분포에는 영향을 끼치지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 유동층 연소로에 사용되는 증분질 중 1차 파쇄의 영향을 받는 것은 석탄임을 알 수 있다. 이에 큰 입도의 석탄을 사용하여 1차 파쇄에 영향을 끼치는 운전 조건을 조사하였다.

입도에 따른 1차 파쇄를 실험하기 위하여 sieve

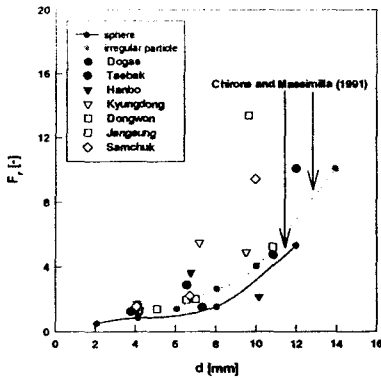


Fig. 4 Fragmentation ratio ( $N_{out}/N_{in}$ ) with particle size at temperature 850 °C

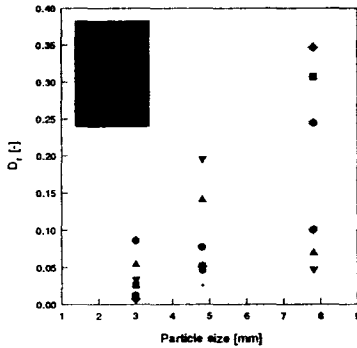


Fig. 5 Effect of P, on particle size at 850 °C

의 구조와 입자의 정도에 영향을 받기 때문이며 Choi et al.(7)의 실험결과와 비슷하였다.

파쇄에 의한 석탄의 크기 감소를 particle size reduction ratio ( $D_f$ ) 로 나타내어 그림 5 에 표시하였다.

$$D_f = 1 - \frac{d_o}{d_i}$$

그림에서 보면 입자의 크기가 증가할수록 대부분의 석탄에서  $D_f$  이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 4 에서 보듯이 석탄의 크기가 증가할수록 파쇄가 증가하는 경향과 같다. 따라서 파쇄의 증가에 따른 fragment 의 발생은 석탄 크기의 감소를 가져온다고 할 수 있다. 이는 Chirone and Masimilla (5)의 결과에서도 동일하게 나타났다. 그러나 경동탄과 한보탄의 경우 4-5.6mm의 크기의 입도에서  $D_f$  의 값이 최대값을 나타냈다. 이는 물리적, 기계적 성질이 다르기 때문이다 (7).

#### 결론

순환유동층 연소로의 조업온도인 850°C에서 충물질의 입자 깨짐에 대해서 연구하였다. 국내 무연탄의 경우 850°C 로 투입되는 경우 휘발분의 방출과 열충격에 의해서 입자의 깨짐이 발생하였으나 탈황제로 사용되는 석회석의 경우 소성 반

응이 진행되어도 입자 크기에는 큰 변화가 나타나지 않았다. 이런 입자의 깨짐은 석탄 입자의 크기를 감소하는 것으로 나타났으며 특히 입자의 깨짐이 클수록 감소하는 폭이 커짐을 알 수 있었다. 따라서 순환유동층 충물질로 사용되는 석탄의 경우 설계된 입도보다는 큰 입도를 주입하여야 설계된 입도를 가지고 운전이 될 것이며 석회석의 경우 입도 변화를 고려하지 않아도 될 것이다.

#### 참고문헌

1. Stubington, J. F., Ng, Ken W. K., Moss, B. and Peeler, P. K., *Fuel*, **76**, 233 (1997)
2. Chirone, R. and Massimilla, L., 22th Symposium on combustion, 267 (1988)
3. Dacombe, P., Pourkashanian, M., Williams, A. and Yap, L., *Fuel*, **78**, 1847 (1999)
4. Lee, S. H., Lee, J. M., Kim, J. S., Choi, J. H. and Kim, S. D., *Hwahak Konhak*, in press
5. Chirone, R. and Massimilla, L., *Power Technology*, **64**, 249 (1991)
6. Zhang, H., Cen, K., Ni, M., Heidbrink, J. and Yan, J., 12<sup>th</sup> Pittsburgh Coal Conference, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, (1995)
7. Choi, Y. S., Moon, B. S. and No, S. Y., Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Coal Combustion, 107 (1995)