

순환 유동층의 수역학적 특성 및 석탄연소 특성

신병철 · 고영범 · 김상돈

한국과학기술원 화학공학과

(1984년 3월 27일 접수, 1984년 7월 10일 채택)

Hydrodynamics and Coal Combustion Characteristics of Circulating Fluidized Beds

Byung Chul Shin, Young Bum Koh, Sang Done Kim

*Department of Chemical Engineering, Korea Advanced Institut of Science and
Technolog Seoul, 131 Korea*

(Received 27 March 1984, accepted 10 July 1984)

요 약

순환유동층 (7.8 cm - 내경 × 250cm - 높이) 내의 석탄-공기 계의 흐름특성을 실온에서 측정하였고, 석탄연소시의 연소효율과 유동층 높이에 따른 온도분포를 결정하였다.

발열량이 4.870Kcal/kg인 국내 무연탄을 사용하여 흐름특성은 석탄의 평균입자경을 0.205, 0.395 및 0.71mm로 바꾸 어서 측정하였으며 석탄연소실험은 0.71mm입자를 사용하였다.

기포층과 난류층 흐름의 경계속도(transition velocity) 및 난류유동층과 고속유동층의 경계속도인 수송속도(transport velocity)를 결정하였다.

난류유동층흐름에서의 석탄연소효율은 기포층흐름때 보다 높게 나타나며 낮은 온도에서도 쉽게 정상상태를 유지할 수 있었다.

석탄연소효율은 과잉공기양이 증가함에 따라 기포유동층 및 난류유동층에서 다같이 증가하며 난류유동층에서의 유동층높이에 따른 온도분포는 기포층유동층보다 더 균일하게 측정되었다.

Abstract— In a circulating fluidized bed (7.8 cm-ID x 250 cm-high), flow regimes of coal-air system at room temperature and coal combustion efficiency and temperature profiles along the bed height have been determined.

An anthracite domestic coal having heating value of 4,870 Kcal/Kg was employed. Coal particle sizes were varied 0.205, 0.395 and 0.71 mm for flow regime and 0.71 mm for coal combustion studies.

The transition velocity between bubbling and turbulent beds and the transport velocity between turbulent and fast beds have been determined.

In a circulating fluidized bed, combustion efficiency was higher in the turbulent bed than that in the bubbling bed. Steady combustion operation can be easily maintained at much lower temperature in the turbulent bed than in the bubbling bed.

서 론

근래의 에너지 파동이라 전세계적으로 새로운 에

너지 개발에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 에너지 수급을 위한 효과적인 방법은 핵연료나 태양에너지 활용방안이 있으나 개발에 필요한 시간 및 경

비가 과다하여서 근래에 와서 석탄에너지 활용의 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 고순도의 석탄은 합성연료, 석유화학공업 및 제철산업의 원료로 활용되어야 하겠고 저품위 석탄은 효율적인 연소방법을 개발하여서 활용되어야 하겠다.

석탄연소에 따른 환경오염 없이 경제적인 석탄연소 기술의 하나가 고속순환유동층(1-5)연소이다. 재래의 기포층유동층의 기체조업조건은 최소유동화속도에서 입자의 종말속도 사이에서만 조업이 가능하나 순환유동층은 입자의 종말속도 이상에서 조업하여서 비말동반 되는 입자들을 cyclone에서 분리하여서 다시 연소로에 재주입하므로 조업유속의 범위가 넓은 장점이 있을 뿐만 아니라 조업속도가 빨라서 caking 석탄을 직접 사용할 수 있고 처리용량도 상대적으로 크다고 알려져 있다. 현재까지 산업적으로 순환유동층은 중유의 촉매분해반응과 제철산업에서 유화철의 배소로로써 활용되어져 왔으나 석탄연소로로써의 개발은 매우 최근의 연구대상이다.

그러므로 본연의 목적은 국내 저질탄활용의 일환으로 재래의 기포층유동조건과 난류유동층 조건에서의 석탄연소 효율을 측정함과 아울러 순환유동층의 수역학적 특성을 인지하기 위하여 기포층과 난류층의 경제속도 및 난류유동층과 고속유동층의 경제속도인 수송속도를 결정하였다.

실험장치 및 방법

본 실험은 7.62cm-내경과 높이 2.5m의 stainless steel관을 연소로로써 제작하였고 석탄착화를 위하여 연소로 외벽에 kanthal선을 감고 전원에 연결하여서 가열하였다. 연소로의 열손실을 막기 위하여 kaowool ceramic fiber로 보온하였다. 압축공기는 압력조정기, 여과기를 거쳐서 유량계에서 유량을 측정하여서 연소로에 공급하였다.

비말동반되는 석탄은 첫번째 cyclone(19cm-ID)에서 고온의 가스와 분리되어 연소로로 순환되며 이 순환되는 석탄의 양은 순환관에 venturi-meter를 부착하여서 공기의 주입속도로써 조절하였다. 또한 첫번째 cyclone에서 집진되는 많은 입자는 두번째 cyclone(12.8cm-ID)에서 집진하였다.

유동층 높이에 따른 압력변화를 측정하기 위하여 분산판으로 부터 7.52, 92, 140, 180 및 231cm 높이에 설치하여서 manometer에 연결하였다.

연소로의 온도를 측정하기 위하여 chromel-alumel thermocouple을 분산판으로 부터 30, 100, 170 및 235cm 높이에 설치하여서 기록계에 연결하였다. 흐름특성을 측정하기 위한 실험에서 사용한 석탄입자 크기는 비중이 1.72g/cm^3 인 0.205 (0.147-0.297), 0.395 (0.297-0.595) 및 0.710 (0.597-0.891) mm인 석탄을 사용하였고 연소실험에서는 0.710mm 석탄입자를 사용하였다. 자세한 실험장치도를 Fig. 1에 도시하였다.

사용한 석탄의 공업분석치는 Table 1과 같다.

Table 1. Proximate Analysis of Coal Sample.

Component	Moisture	Ash	V. M.	Fixed Carbon	Sulfur	
wt. %	4.10	4.10	35.10	2.0	58.88	0.15

실험방법

흐름특성에 대한 연구는 실온에서 석탄을 공기유

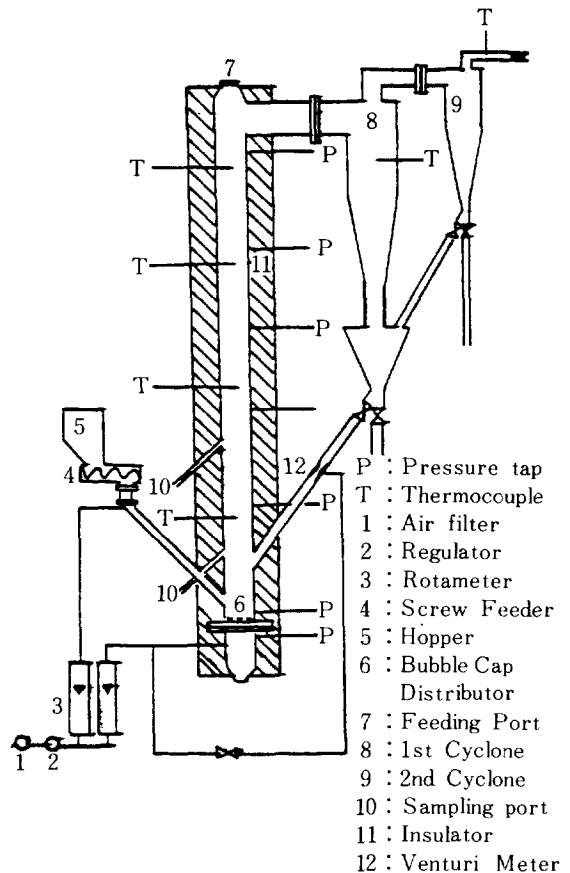


Fig. 1. Experimental equipment.

속을 변화시키면서 그때의 압력강하 fluctuation 을 측정하여서 기포층과 난류유동층의 경계속도를 결정하였고 난류층과 고속유동층의 경계유속인 수송 속도는 초기 장입석탄량의 3%가 남는 압력인 2.9 cm-H₂O때로 가정하여서 결정하였다(6).

석탄연소 실험은 석탄과 열매체로서 석탄재를 혼합하여서 연소로에 장입하고 연소로 외벽에 설치한 열선을 가열하여서 석탄착화 온도인 550°C 까지 가열시켜 석탄을 착화시킨후 열선의 가열을 중단한다. 이상태에서 석탄과 공기주입량을 조절하여서 정상 상태를 유지한다. 이때의 유동층의 온도를 높이에 따라 multipoint recorder에 기록하며 동시에 압력 강하를 측정한다. 또한 분산판으로 부터 45 및 95 cm 높이에 설치된 시료채취관을 통하여서 시료를 채취하여 미연소된 석탄을 furnace에 넣고 완전연소 시켜서 연소효율을 결정한다. 석탄의 연속적인 주입량은 1.6에서 3.6kg/hr까지 변화시키고 이에 따른 공기량을 결정하여서 과잉공기양도 1.0 에서 1.15까지 변화시키면서 연소효율에 미치는 영향을 관찰하였다.

실험결과 및 고찰

1. 수역학적 특성

본 실험에 사용한 석탄의 최소 유동화 속도를 유속에 따른 압력강하 곡선으로부터 결정한 결과 석

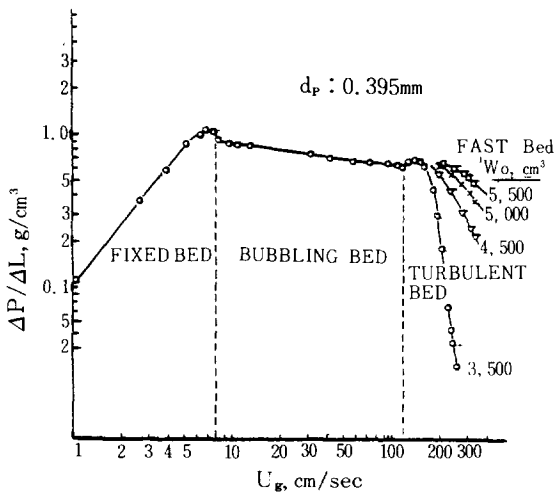


Fig. 2. Superficial gas velocity versus pressure drop.

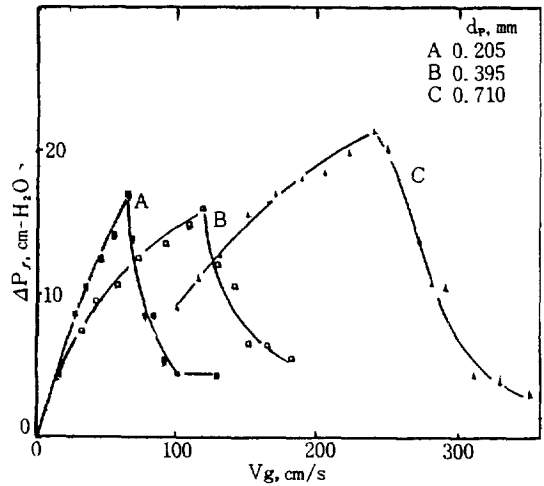


Fig. 3. Effect of gas velocity on pressure fluctuation.

탄의 평균입자경이 0.205, 0.395 및 0.71mm일때 각각 2.1, 8.0 및 44cm/sec로 측정되었다. 그 대표적인 경우 (dp : 0.395mm)의 전체 흐름영역도를 Fig.2에 도시하였다.

유동층내에 석탄을 장입(3500cm³)한 후 공기 유속을 증가시키면서 유동화시키면 기포가 형성되면서 압력변화의 파동이 유속증가에 따라 증가한다. 그 이유는 공기 유속증가에 따라 기포의 크기가 증가하며 동시에 기포의 상승속도가 증가하면서 입자층의 혼합을 증가시키기 때문이다(7). 그러나 유속을 계속 증가시키면 기포의 합체가 심하여져서 기포 크기가 반응기 내경에 가까운 크기가 되는 슬러그(slug)가 형성되어서 주기적으로 상승한다. 이때의 유속보다 더 유속을 증가시키면 슬러그가 깨어지기 시작하여서 기포가 없이 기체와 고체가 직접 접촉되어서 흐르게 된다. 이 경계점에서 압력강하의 fluctuation은 기포가 흐를때의 심한 파동은 기포가 깨어진 상태에서는 급격히 감소한다. 이점의 유속을 기포층 흐름과 난류층 흐름의 경계속도로 정의할 수 있다(5). 이 fluctuation은 주어진 유속에서 7과 52cm 높이의 pressure taps사이의 manometer에 나타나는 파동을 읽어서 ΔP_r를 결정하였다. 본 실험 조건에서의 경계속도는 Fig. 3에서 보듯이 석탄의 평균입자 크기 0.205, 0.395, 0.71mm에 따라 각각 65, 120 및 240cm/sec로 결정할 수 있다.

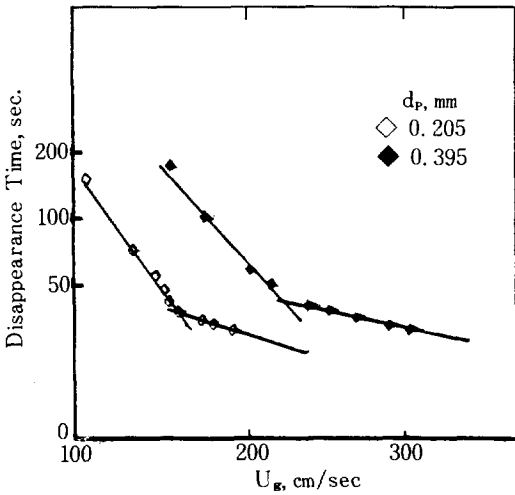


Fig. 4. Effect of gas velocity on solids disappearance time.

석탄입자들이 비말동반(entrain)되는 속도 이상으로 유속을 증가시키면 입자들은 유동층에서 날려나가서 cyclone에서 분리되어져서 연소로에 재순환되어진다. 난류유동층과 고속유동층(fast fluidized bed)의 경계속도는 앞에서 언급하였듯이 초기석탄장입량의 3%가 남는 때의 시간을 측정하여서 결정하였다(6). 또한 그 결과를 semilog plot 하여서 그 변곡점의 값을 수송속도로 결정하였다. 그 이유는 유동층에서의 유속에 따른 비말동반되는 현상은 free board 높이에 따라 지수적으로 감소하기 때문이다(8). 실험결과를 보면(Fig. 4) 석탄입자가 비말동반되어서 소멸되는 시간은 고속유동층에서 보다 난류유동층에서 급격히 감소한다. 그림에서 보듯이 석탄입자 크기가 0.205 및 0.395mm일때 수송속도는 158 및 228cm/sec로 측정되었다.

2. 연소실험

연소실험에서는 석탄입자경이 0.71mm를 사용하여서 연소효율 및 유동층 높이에 따른 온도분포를 기포유동층과 난류유동층 조건에서 결정하였다.

석탄과 공기의 주입량은 각각 1.64에서 3.61kg/hr까지 50에서 110cm/sec(0-15% 과잉공기)까지 변화시켰다. 초기에 유동층에 석탄 500cm³와 열매체로 석탄회분 2000cm³를 혼합하여 장입한 후 연소시킨 후 석탄과 공기주입량을 상기범위에서 변화시켜서 실험을 수행하였다.

본 연소계의 연소효율은 다음과 같이 정의하였다(12).

$$E = 1.0 - \left(\frac{A}{100-A} \right) \left(\frac{100-a}{a} \right)$$

$$= 1.0 - \frac{\text{연소된 석탄속에 포함된 연소물질의 무게}}{\text{연소된 석탄과 같은 무게의 회분을 포함하는 초기석탄내의 연소물질의 무게}}$$

여기서 A와 a는 초기 석탄과 연소후 석탄 시료 각각의 회분함량 %이다.

Fig. 5에 각각의 석탄 주입량때의 과잉공기 15%까지 유속을 증가시켜서 이에 대한 연소효율은 0.88에서 0.98의 범위에서 높은 연소효율을 보이며 이는 비말동반되는 석탄을 재순환하지 않는 유동층 연소로의 연소효율 0.85이하 보다 매우 높은 값을 보인다. 또한 과잉공기량이 증가함에 따라 석탄의 연소효율은 기포층에서나 난류유동층 조건에서나 다같이 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 탄소와 산소의 연소반응에서 과잉공기량의 증가는 산화반응을 증진시키며 동시에 유속의 증가는 유동층내에서의 기포와 emulsion 상간의 산소교환이 층 팽창 증가로 인하여 활발히 일어날 수 있기 때문이다(10). 또한 유속증가는 석탄과 공기간의 혼합을 증가시켜서 반응물간의 접촉을 증가시키므로 반응율이 증가되었다고 할 수 있겠다(4. 11), 상기한 바와 같이

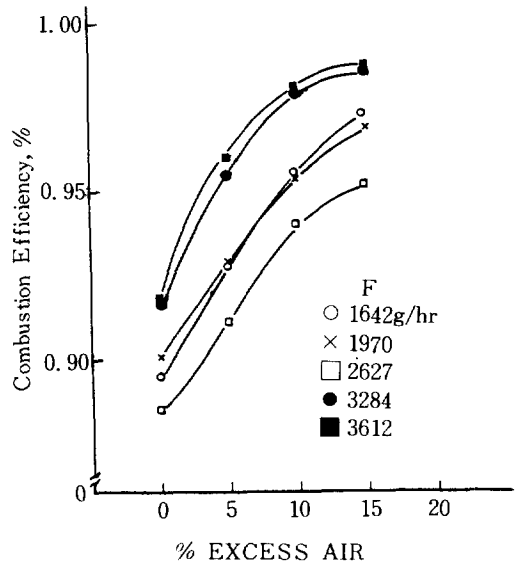


Fig. 5. Effect of excess air on combustion efficiency.

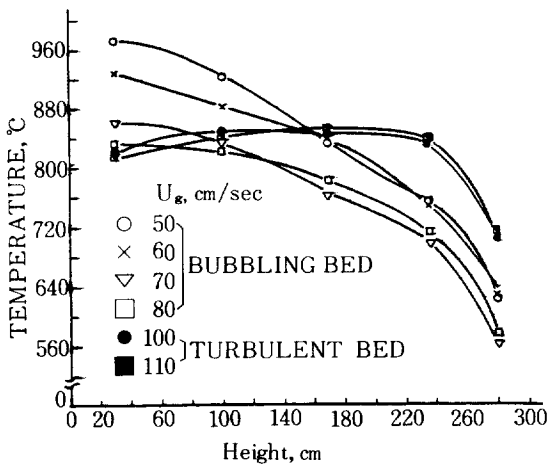


Fig. 6. Temperature profiles along the bed height.

난류유동층에서의 기체-고체간의 접촉효율은 기포층보다 기포가 없는 난류유동층이 훨씬 좋으므로 전반적으로 연소효율은 난류유동층이 높음을 알수 있다[12].

또한 석탄의 주입양에 따른 연소효율 변화를 보면 기포층 유동에서는 석탄주입양을 증가함에 따라 연소효율이 감소하는 반면 난류유동층에서는 증가함을 볼 수 있다. 그 이유는 기포층 유동층 조건에서는 석탄 주입양 증가는 석탄의 연소로내의 체류시간을 감소시켜서 충분한 반응시간을 가지지 못하기 때문이며, 석탄주입양의 증가는 난류층흐름의 석탄농도를 증가시켜서 더많은 연료를 공급하는 효과라고 할 수 있겠다. 유사한 실험결과를 1.6mm 이하의 석탄입자를 사용하여서 비말동반된 석탄입자를 재주입시키지 않는 경우의 연소효율은 0.93 인 반면 cyclone에 포집된 석탄을 재주입시의 효율은 0.99라고 보고하였다[9].

연소로 높이에 따른 온도분포를 Fig. 6에 도시하였다. 여기서 보듯이 기포층 유동층에서의 온도분포는 높이증가에 따라 감소하는 반면 난류유동층에서는 높이에 따라 조금 증가하는 추세를 보이거나 일반적으로 거의 일정함을 볼 수 있다. 이는 기포층 유동층은 dense상과 dilute상이 존재하나 난류유동층은 전영역에 걸쳐 비교적 균일한 밀도를 가지고 재순환되는 게이므로 전높이 영역에 걸쳐 균일한 온도분포를 가질 수 있다. 전연소로 높이에 따른 균일한 온도분포를 보이는 난류유동층에서는 낮은 온도에서도 기포층 유동 조건때 보다 쉽게 정

상상태 조업이 가능하였다.

결 론

제한된 범위에서의 본 실험 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 석탄입자 크기에 따른 실온에서의 최소 유동화 속도, 기포층과 난류유동층의 경계속도 및 난류유동층과 고속유동층간의 경계속도인 수송 속도를 결정하였다.

2. 주어진 실험 조건 하에서 석탄의 연소효율은 난류층유동층의 경우가 기포층유동층보다 높으며 과잉공기의 증가는 기포층 및 난류유동층에서의 연소효율을 증가시킨다.

3. 난류유동층 조업이 기포층유동층 때보다 층높이에 따라 온도분포가 균일하며 더 낮은 온도에서 정상상태 조업이 가능하다.

NOMENCLATURE

dp	: particle size, mm
F	: solid feeding rate, Kg/hr
ΔP	: Pressure drop. cm-H ₂ O
W ₀	: initial loading volume. cm ³
U _g	: superficial air flow rate. cm/sec

REFERENCES

1. Reh, L.: Chem. Eng. Progr., 67, 58 (1971).
2. Reh, L., Schmidt, H.W., Paradimos, G., and Petersen, V.: Proc. of 6th Int. Conf. on Fluidized bed combustion. VI-2-1 (1981).
3. Yip, H., Rickman, W. and Engstrom, F.: Coal Technology 80, Proc. of 3rd. Int. Coal Utilization Exhibition and Conf., 698, (1980).
4. Yerushalmi, J. and Cankurt, N.T.: Powder Technology, 24, 187 (1979).
5. Yerushalmi, J. and Cankurt, N.T.: Chemtech. 564 (1978).
6. Yerushalmi, J.: Private communication.
7. Lee, J.S. and Kim, S.D.: Hwahak Konghak, 20, 207 (1982).

8. Andrews, M.: Ind. Eng. Chem., 52, 85 (1960).
9. McLaren, J., and Williams, D.F.: Combustion May, 21 (1970).
10. Pattipati, R.R., and Wen, C.Y.: Proc. of 2nd World Congr. of Chem. Eng., 2, 42, (1981).
11. Yerushalmi, J., Turner, D.H., and Squires, A.M.: Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev., 15, 47 (1976).
12. Lee, G.S., Han, G.Y. and Kim, S.D.: K.J. Chem. Eng., 1, 71 (1984).