

공탑속도 및 과잉공기비에 따른 석탄유동층연소로의 조업특성

Effect of Excess Air and Superficial Air Velocity on Operation Characteristics in a Fluidized Bed Coal Combustor

장 현 태* · 차 왕 석** · 태 범 석***

H.T. Jang · W.S. Cha · B.S. Tae

(1998년 10월 14일 접수, 1999년 7월 24일 채택)

ABSTRACT

The effects of air velocity and excess air on combustion characteristics were studied in a fluidized bed combustor. The domestic low-grade anthracite coal with heating value of 2010 kcal/kg and the imported bituminous coal from Australia with heating value of 6520 kcal/kg were used as coal samples.

The combustion characteristics of mixed fuels in a fluidized bed combustor could be interpreted by pressure fluctuation properties, ash distribution and gas emission. The properties of the pressure fluctuations, such as the standard deviation, cross-correlation function, dominant frequency and the power spectral density function, were obtained from the statistical analysis.

From this study, the combustion region increased with increasing air velocity but decreased with excess air due to combustion characteristics of anthracite and bituminous coal.

1. 서 론

현대산업사회 발전의 원동력은 에너지원의 획득에 있다고 하여도 과언이 아니다. 이와 같은 현실에 불구하고 국내에는 석탄을 제외한 화석

연료는 매장량이 전무한 상태이고, 매장된 석탄의 경우도 매장량은 약 15억톤에 달하나 그 중 약 40% 정도가 4,000 kcal/kg 이하의 저열량 무연탄이기 때문에 이용이 어려운 상태이다¹⁾.

국내에서는 석유 매장량의 한계와 가격 및 발

* 한서대학교 화학공학과

** 군산대학교 공과대학 환경공학과

*** 한경대학교 화학공학과

전단가 등의 이유로 현재 원자력의 이용을 증대하고 있으나 원자력의 경우 방사능 오염, 핵 확산 등의 환경오염 문제가 있다. 핵 폐기물과 조업시 발생할 수 있는 방사능 누출과 같은 안전사고의 문제점으로 인하여 전 세계적으로는 이용이 감소하고 있는 추세이다.

따라서 이러한 국내 저품위 고회분 무연탄의 활용문제는 국가 부존자원의 효율적인 이용 측면에서 중대한 관심사가 되고 있다. 특히 석유 소비량의 전부를 수입에 의존하고 있는 국내의 경우 국내 부존자원의 활용도를 높이고, 석유보다 값이 싸고 장기적으로 안정한 공급이 가능한 석탄을 에너지원으로 이용하는 방안의 강구는 국가적으로 절실히 요망되는 일이다. 이와 같은 석탄 이용시 발생하는 문제점으로는 환경과 인체에 유독한 NOx, SOx, CO, HC, 분진 등의 오염물질 발생으로 석탄의 사용을 저해하고 있으며 이 문제 해결을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다¹⁻³⁾.

이러한 저질탄 연소는 연료 종류의 제약이 적은 유동층 연소법에 의하여 가능하므로 그 적용이 적극적으로 추진되고 있는 상황이다. 또한 유동층연소법의 경우 다른 석탄연소법에 비해 비교적 낮은 온도인 800~900℃에서 연소되므로 회재의 용융이나 소결현상이 없을 뿐만 아니라 주입공기의 질소산화로 인한 NOx 발생량을 줄일 수 있으며, 층물질에 석회석이나 백운석을 첨가하면 대기오염의 주 원인인 석탄 연소시 발생하는 아황산가스의 탈황도 가능하다¹⁻⁶⁾.

이와 같은 장점을 지니고 있는 유동층의 단점중의 하나는 조업의 어려움이다. 유동층연소로의 경우 조업의 어려움으로 인하여 안전한 조업이 이루어지지 않고 중단되는 경우가 많이 발생하고 있다. 조업의 어려움은 층내현상을 외부에서 관측하는 기술이 떨어지기 때문이다. 또한 층내에서 다량의 가연 분진에 의한 폭발현상도 관측 보고되고 있다. 그러므로 조업조건 설정과 운전문제를 해결하여 원활한 조업이 이루어지도록 하는 층내의 조업상태의 측정과 해석방법에 대한 연구가 필수적이므로 조업상태의 측정과 해석 및 이상 조업현상의 관측에 관한 연구가 이루어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 유동층연소로의 안전한 조업을 위한 기초자료를 제시하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 유동층에서 유동화상태를 층외부에서 관측하고 해석할 수 있는 방법을 제시하고자 유동층연소로에서 석탄 연소시 과잉공기비, 유속 등의 주요 조업변수에 따른 연소로 내부 거동을 관측하였다. 압력요동특성치, 층내물질의 입경분포, 발생 가스농도 및 축방향분포를 측정하여 내부 거동을 해석하였다. 측정된 값 중에서 압력요동특성치는 압력요동의 표준편차, 평균압력, 압력강하, 공극율, 주진동수, cross-correlation, power spectrum distribution 등으로 계산하여^{7,8)} 각 특성치와 측정된 값을 이용하여 층내현상을 관측하고 해석하는 연구를 수행하였다.

2. 실험

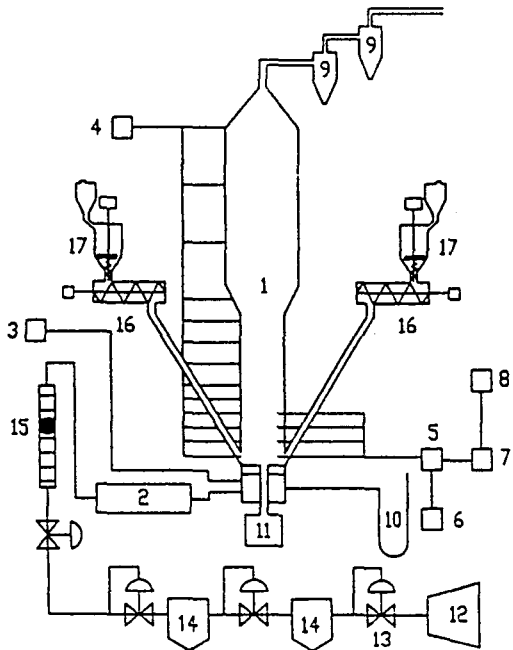
2.1 실험장치

본 실험에 사용된 장치는 Fig. 1과 같다. 유동층연소로는 전체높이가 2.1m이며 분산판으로부터 1m까지는 내경 0.155m인 원통형 stainless steel로 되어 있으며 1.15m이상의 freeboard부분은 미세입자와 휘발분의 체류시간을 증가시키기 위해 내경 0.21m로 확대되어 있다. 공급기체 분산판은 지름 1mm인 구멍이 10mm의 square pitch 형태로 되어 있으며 개공비 1.53%이다.

연소로 외부는 열손실을 막기 위하여 ceramic wool로 단열하였다. 연소용 공기는 공기압축기에 의해 공급되며 예열기를 통해 400℃로 가열되어 연소로로 공급된다. 유연탄과 무연탄은 각각 spring screw type의 feeder를 이용하여 분산판위 0.05m 지점으로 공급되며, 조업중 생성된 회분은 진동배출기를 통해 유동층 하부로 배출된다. 배출가스 중에 포함되어 비산유출되는 분진을 포집하기 위해서 연소가스 배출구 부분에 싸이클론을 2단으로 설치하였다.

연소로 분산판으로부터 높이에 따라 K-type의 열전대를 설치하여 층내의 온도를 측정하였으며, 연소로 외부와 내부에 설치되어 있는 냉각관의 냉각수 유량을 조절하여 유동층의 온도를 일정하게 유지시켰다.

또한 층내의 유동화상태 및 연소상태 해석을 위하여 plenum과 유동층내에 압력전달기를 설치하였으며 이로부터 압력신호를 측정하였다.



- 1. Fluidized bed combustor
- 2. Preheater
- 3. PID temp. controller
- 4. Digital multithermometer
- 5. Pressure transducer
- 6. Power supplier
- 7. Amplifier
- 8. Personal computer
- 9. Cyclone
- 10. Manometer
- 11. Vibrating discharger
- 12. Air compressor
- 13. Regulator
- 14. Air filter
- 15. Flow meter
- 16. Screw feeder
- 17. Hopper

Fig. 1 Experimental facilities and data processing system at high temperature

2.2 실험 방법

유동층은 초기에 1.19mm이하의 다입자경 무연탄회분입자를 종횡비가 1이 되도록 유지시킨다. 예열된 공기에 의해 층은 유동화되며 유동층의 온도가 400℃에 도달하면 목탄을 공급하며, 목탄의 연소로 인해 층내 온도가 600℃에 도달하면 유연탄을, 800℃에 도달하면 무연탄을 각각 공급한다. 휘발분 및 고정탄소 함량이 높

고 회분함량이 낮은 유연탄은 연소과정에서 미분화되어 일부 비산회를 생성하지만 휘발분 함량이 낮고 회분함량이 높은 무연탄은 연소과정에서 남는 회분이 층내에 누적되므로 연소로 하부에 있는 배출관을 통해서 연속적으로 배출시켜 유동층의 층 높이를 일정하게 유지시킨다.

유동층이 충분히 조업되어 정상상태에 도달하면 압력요동특성치는 유동층연소로의 분산판으로부터 0.05, 0.1, 0.15, 0.2m 위치에 설치되어 있는 압력전달기를 이용하여 측정한다. 또한 연소로 각 높이에 설치되어 있는 가스채취관으로부터 연소가스의 농도를 측정한다. 층내 입도분포의 측정은 조업을 순간적으로 정지시키고 층내물질을 일시에 배출하여 체분석을 통하여 구하였다. 이와 같은 실험을 유속, 과잉공기량, 무연탄 혼합비 따라 수행하며 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 또한 유속과 과잉공기비에 다른 석탄의 공급량과 공기의 공급량은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

air velocity (m/sec)	initial in-bed particle (mm)	bed temperature (°C)	aspect ratio (L/D)	anthracite fraction	excess air (%)
0.25~0.40	multi-sized	900	1	0.0~1.0	0.1~51.7

Table 2 Operation conditions for air velocity and excess air experiment.

Run No.	anthracite feeding rate(kg/hr)	Bituminous feeding rate(kg/hr)	air velocity (m/sec)	Excess air (%)	flow rate (m ³ /hr)
1	0.87	2.04	0.250	19.43	18.0
2	0.95	2.20	0.304	19.43	22.2
3	1.30	3.04	0.358	19.43	26.4
4	1.40	3.26	0.394	19.43	28.8
5	0.95	2.20	0.250	0.10	18.0
6	0.95	2.20	0.304	38.80	26.4
7	0.95	2.20	0.358	51.71	28.8

2.3 연소가스 분석

가스측정의 계통도는 Fig. 2에 나타내었다. 연소가스측정부는 유동층부와 freeboard, cyclone

의 각 지점에 가스 채취관이 설치되어 있으며 연소로 내부에 존재하는 미세입자가 가스채취관 내부로 들어와 연소될 경우 연소로내부의 실제 가스농도와 큰 차이가 나므로 채취관 끝부분을 stainless steel망으로 봉하여 미세입자의 유입을 방지하였다. 채취된 연소가스의 수분응축 및 제거를 위한 제습기, 미분체거용의 filter을 설치했으며 연도가스분석기(MCSAM-2000Z, KIMOTO Electric Co., LTD)를 on-line으로 설치하여 O₂, CO₂, CO, SO₂의 각 농도를 측정할 수 있도록 하였다.

연소가스분석기는 O₂분석기(755 gaseous oxygen analyzer, paramagnetic method), CO분석기, CO₂분석기, SO₂분석기(865 NDIR analyzer, absorption method)등 4부분의 분석장치를 통하여 1분, 10분 단위로 각 가스농도의 평균값을 기록하도록 되어 있다.

휘발성분의 측정은 배출구에서 일정량의 배출가스를 채취하여 GC-Mass(HP 5971)로 정성 분석을 한 후, FID방식의 GC(HP 5890)로 정량 분석을 하였다.

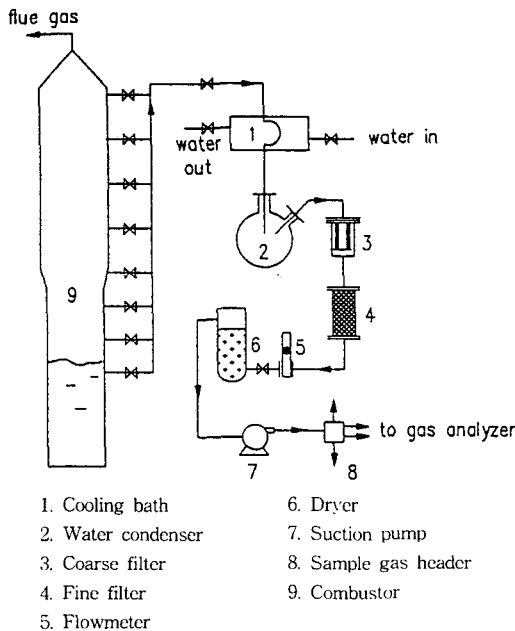


Fig. 2 Flue gas analysis system

Table 3 Analyses of coals

	Anthracite	Bituminous
Proximate analysis(wt%)		
moisture	1.8	6.7
volatile matter	6.5	27.5
fixed carbon	27.0	57.4
ash	64.7	8.4
Ultimate analysis(wt% on drv basis)		
C	30.0	72.3
H	0.7	4.3
O	4.2	11.7
N	0.3	0.4
S	0.3	0.2
Ash analysis(wt%)		
SiO ₂	53.0	65.5
Al ₂ O ₃	28.2	27.9
Fe ₂ O ₃	2.7	2.2
K ₂ O ₃	3.9	1.4
TiO ₂	1.3	1.5
MgO	1.9	0.4

Table 4 Particle size distribution of coals

d _p	wt %	
	anthracite	bituminous
0.0265	12.39	10.40
0.0575	1.26	0.64
0.068	1.90	1.08
0.081	3.01	2.11
0.097	2.37	0.63
0.115	2.03	0.94
0.137	3.39	2.15
0.163	3.50	2.43
0.194	3.48	2.45
0.231	4.31	2.77
0.274	9.60	6.14
0.359	16.03	10.37
0.505	20.91	16.16
0.715	15.78	23.79
1.015		17.94
d ₀ (mm)	0.342	0.586

2.4 시 료

유연탄은 황함량이 낮고 회분함량이 적으므로 현재 국내에서 많은 양이 수입 소비되고 있

는 호주산 유연탄을 선정하였다. 무연탄은 경북 문경에 방치되어 환경오염을 유발시키는 저품질 무연탄을 선정하였다.

국내 저질무연탄과 호주산 유연탄을 시료의 공업분석, 원소분석 및 회분분석을 Table 3에 나타내었으며 발열량은 무연탄과 유연탄이 각각 2010, 6520 kcal/kg이다.

Table 4에 유연탄과 무연탄 시료의 입도분포를 나타내었다. 무연탄과 유연탄의 평균입경은 각각 342, 586 μm 이며 유연탄에 비해 무연탄의 미세입자분율이 높음을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

반응이 없는 유동층의 경우 유동층내의 평균 압력은 유동층내에 입자량을 나타내며 일정구간내의 압력강하는 그 구간에서 입자의 체류량과 공극율을 나타낸다. 그러므로 유동층에서 층높이에 따른 압력은 분산판으로부터 높이가 증가함에 따라 감소하며 이때에 층내물질이 균일입자인 경우는 직선적으로 감소하게 된다. 이성분계 입자균이나 다입자경 입자균의 경우는 축방향 입자분포에 따라 곡선으로 감소하므로 이를 이용하여 층내의 혼합도를 예측할 수 있다는 연구결과도 있다^{9,10)}.

따라서 유동층의 층내 상태를 표현할 수 있는 축방향 압력을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3은 다입자경 유연탄과 무연탄을 혼합 연소한 것으로서 무연탄의 혼합비가 무게비로 30%인 경우로 과잉공기비 및 유속에 따라 연소하였을 경우 측정된 압력을 나타낸다.

유속과 과잉공기비에 따른 결과의 차이는 다음과 같다. 유속 영향을 고찰한 결과는 과잉공기비를 일정하게 유지한 상태에서 도출된 것이며 과잉공기비의 결과는 각 실험조건에서 동일한 석탄 주입량을 유지시킨 상태로 유속을 증가시켜 과잉공기비를 조절한 것이다. 각 비교조건에서 유동층내의 유동화 기체 선속도는 일정하며 연소부하율의 차이가 있다고 할 수 있다. Fig. 3에서 일반적인 유동층반응기와는 다른 현상이 일어나고 있다. 분산판으로부터 0.1m에서 측정된 압력이 0.15m에서 측정된 값보다 작게

나타나고 있다. 이는 연소와 유동화특성에 의하여 나타나는 현상으로 사료된다.

실험에 사용된 유연탄의 경우 수축핵모델로 연소되고 투입시 다입자경을 투입하였으며 무연탄의 경우는 미반응핵모델로 연소되나 다입자경으로 투입되었으므로 층내 물질은 다입자 상태로 조업되고 있다. 따라서 층내의 분리가 발생되고 lean phase가 존재하게 되어 층 하부인 0.1m에서 낮은 압력이 나타나는 현상으로 사료된다. 이러한 현상과 더불어 본 실험에 사용된 유동층연소로의 석탄 주입위치가 0.1m로써 석탄 주입에 따른 영향도 함께 나타나는 것으로 판단된다. 석탄이 유동층에 주입되었을 경우 주입과 동시에 탈휘발과 착화가 일어나며 이때에 다량의 가스가 발생하고 입자주위에는 가스필름이 형성된다. 따라서 분산판으로부터 0.1m영역에 입자의 체류량이 감소하여 나타나는 현상도 함께 발생하는 것으로 해석할 수 있다.

또한 Fig. 3에서 동일 유동화기체의 선속도에서 과잉공기비보다 선속도에 따른 값이 더 큰 값을 진 영역에서 나타내고 있다. 이는 층내의 부하율의 증가로 인하여 발생하는 것으로 사료된다. 상부영역에서는 각각의 조건에 따른 압력강하 값의 편차가 작게 나타나고 있다. 이 위치는 유동층에서 기포가 파괴되고 입자가 freeboard로 분출되는 splash영역으로써 연소영역을 형성하며 균일한 연소가 일어나므로 발생하는 것이라 할 수 있다. 따라서 층하부와 상부에서 나타나는 동일한 선속도에서 발생하는 압력강하의 결과로 유동층의 동일 유속에서 연소 부하량과 과잉공기비에 의한 유동화상태를 측정할 수 있음을 알 수 있다.

이와 같은 특성을 이용하여 각각의 조건에 따른 유동층의 조업상태를 규명하기 위하여 층의 구간에 따른 압력강하값으로 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 각 구간에 따른 압력강하를 유속에 대하여 나타낸 그림으로써 층상부, 하부, 전 영역에 대하여 도시하고 있다. 그림에서 층상부의 경우 유속에 대한 실험 결과 공탑속도 증가에 따라 급격한 증가를 나타내고 있다. 이는 층내의 연소입자의 증가로 인하여 발생하는 것으로써 과잉공기비의 경우 낮은 증가율과 비교하면

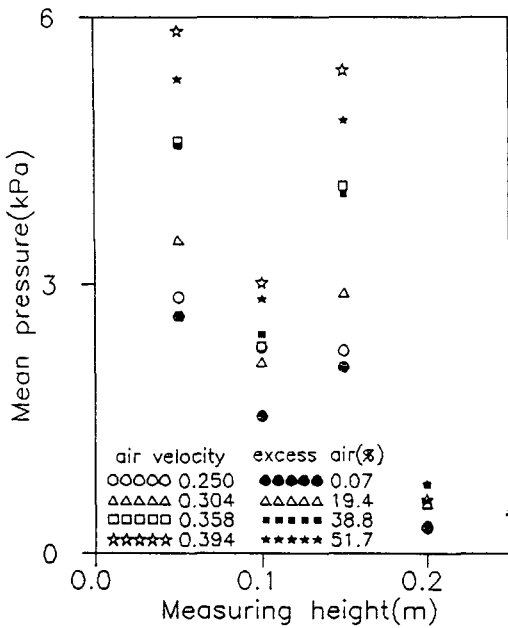


Fig. 3 Mean pressure for air velocity and excess air percentage with height above the distributor ($X_a=0.3$)

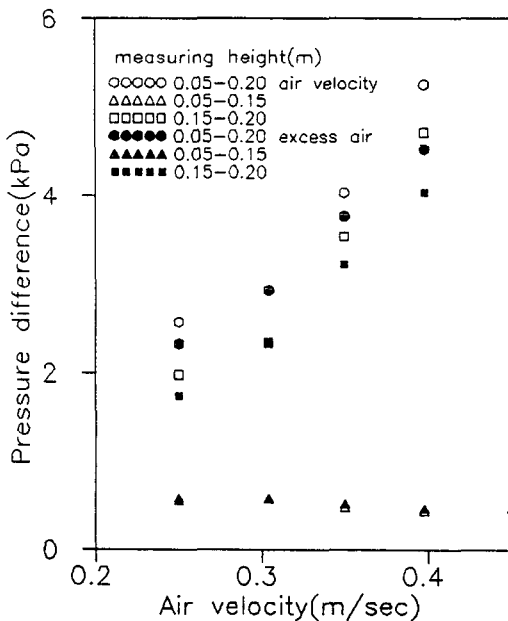


Fig. 4 Pressure difference of the bed according to axial position above the distributor

알 수 있다. 또한 층 중하부에 해당하는 0.05 ~ 0.15m 영역의 경우는 낮은 압력강하를 나타내고 있다. 앞에서 언급한 층내에 lean phase가 존재함을 나타낸다고 할 수 있다.

압력요동의 표준편차를 이용하여 유속과 과잉공기가 유동층연소로의 연소현상에 미치는 영향을 해석해 보고자 Fig. 5에 각각의 경우에 대한 압력요동의 표준편차를 나타내었다. 일반적으로 압력요동의 표준편차는 층내 기포의 빈도수, 크기, 초기생성기포크기 등의 인자에 의하여 발생되는 것으로서 유동층내의 상태를 나타낸다고 할 수 있으며 동일 조건에서 축방향 절대값의 비교로써 층내의 기-고 및 고체혼합의 우수성을 판단할 수 있다. 즉, 유속은 같으나 공급되는 석탄의 양에 의하여 과잉공기비가 다른 경우에 대하여 상호 비교하여 보았다. Fig. 5에서도 Fig. 3과 같이 분산관으로부터 0.1m 위치에서 낮은 값을 나타내고 있다. 이러한 현상도 일반적인 유동층에서 일어나지 않는 현상으로써 다입자경의 유동화와 연소에 의하여 발생하는 현상으로 사료된다. 일반적으로 기포의 합체가 가장 격렬한 층의 중앙에서 압력요동의 표준편차 값이 가장 크게 나타난다.

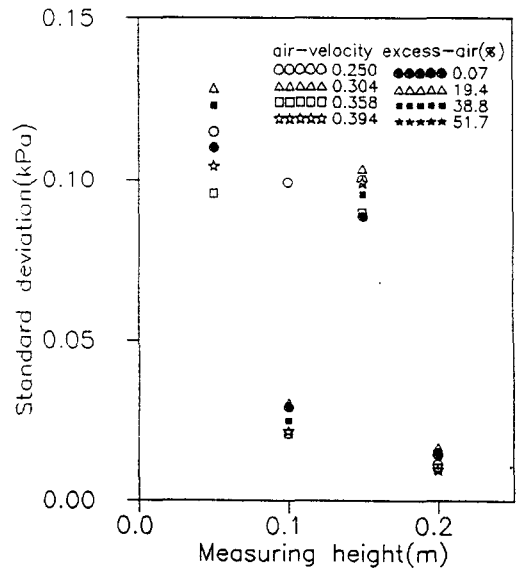


Fig. 5 Standard deviation of pressure fluctuation for air velocity and excess air with height above the distributor ($X_a=0.3$)

그러나 Fig. 5에서는 일반적인 현상과 다르게 압력요동의 표준편차값이 낮게 나타나는 것은 투입된 석탄의 탈휘발과정에서 다량으로 발생하는 가스가 압력요동보다 크게 발생되므로 인하여 나타나는 것으로 사료된다. 압력요동의 표준편차가 발생하는 주 원인은 기포의 거동이다. 따라서 유속과 과잉공기에 따른 압력요동의 표준편차값의 편차가 크게 나타나는 것은 유동층내의 연소영역이 과잉공기비의 증가시 하부로 이동하는 경향을 나타내고 유속의 증가시 상부로 이동하는 경향을 나타내기 때문으로 해석된다.

이러한 현상을 주진동수로써 알 수 있다. 주진동수는 유동층의 조업 상태를 나타내 주는 값으로써 초기생성기포 크기가 작으면 큰 값을 나타내고 slugging이 일어날 경우 작은 값을 나타내게 된다^{11,12}.

Fig. 6에서는 유속 증가에 따라 주진동수가 작은 값을 나타내지 않으므로 slugging이 일어나지 않음을 알 수 있다. 압력요동의 표준편차 발생의 주원인은 기포로서 기포의 거동에 의하여 변화가 나타난다. 또한 기포는 층내의 입자 분포에 의하여 영향을 받는 상호 유기적 관계에 있다. 따라서 유속의 변화가 층내 축방향 입도 분포를 변화시키고 변화된 입도분포에 따라 연소현상과 기포 거동에 영향을 미치므로 압력요동의 표준편차가 지배받게 된다¹³. Fig. 6에서 나타나는 두 개의 작은 값 중의 낮은 유속에서 발생하는 것은 연소영역의 하부로의 이동에 따른 현상으로 사료되며 높은 유속에서 발생하는 것은 층내의 연소부하의 상승에 따라 층내 압력이 증가되어 초기 생성기포크기를 증가시켜서 발생하는 것으로 해석할 수 있다.

일반적으로 유동층에서 cross-correlation 함수는 기포의 상승속도의 측정에 많이 사용되었다. 그러나 이와 같은 방법은 단일기포의 존재 시나 slugging과 같은 영역으로 제한되어져 있다. 따라서 본 연구에서와 같은 격렬한 연소반응이 있고 freely bubbling 영역에서는 기포의 상승속도로 간주하기보다는 층상부와 하부의 개별성으로 설명할 수 있다. 그러므로 유속과 과잉공기비에 따른 cross-correlation 함수를 동일 공탐속도인 0.358 m/sec에서 나타내었다. Fig. 7

에서 과잉공기비에 의한 값은 주기성을 나타내고 있지 않으나 유속에 따른 결과는 주기성을 나타내고 있다. 또한 격렬한 반응이 없는 계보다 나타나는 주기가 매우 짧다. 이와 같은 짧은 주기를 나타내는 것은 격렬한 연소반응에 의하여 층상부와 하부가 각기 다른 영향을 받게 되므로 과잉공기비가 증가함에 따라 유동층의 상부와 하부는 전혀 다른 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 과잉공기비의 증가가 따르는 유속의 증가는 연소영역과 유동화영역을 분리시키며 상부에서의 연소가 활발히 일어남을 알 수 있다.

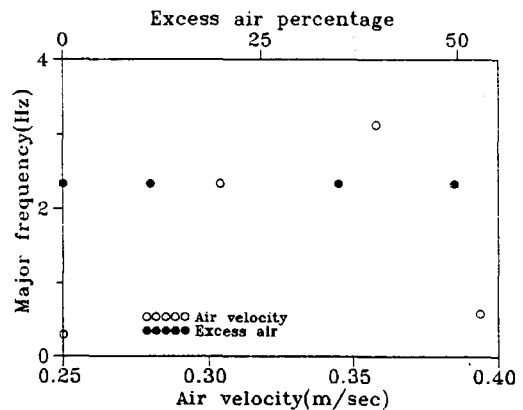


Fig. 6 Major frequency for the fluidized bed with air velocity and excess air

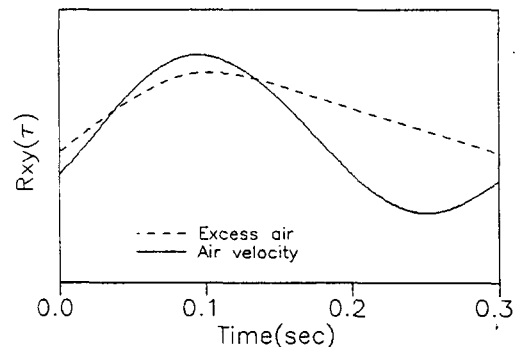


Fig. 7 Cross-correlation functions of pressure fluctuations

유동층에서 가장 큰 영향을 미치는 기포는 층내입자의 입도분포와 평균입자크기에 가장 큰

영향을 받는다. 유속과 과잉공기비의 변화에 따른 층내입자의 입도분포와 평균크기의 변화에 의한 영향을 확인하기 위하여 Fig. 8과 Fig. 9에 조업을 일시에 중단하고 층내물질을 채취하여 입도분포를 나타내었다. 각 그림에서 조업유속에 따라 변화가 매우 작음을 알 수 있으며, 이러한 변화에 의하여 층내의 압력요동특성치의 변화를 미치지 않음은 이전의 연구자¹⁴⁾의 결과에서도 알 수 있었다.

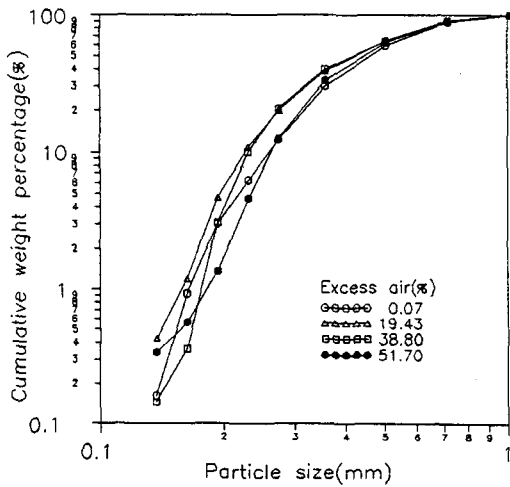


Fig. 8 Size distribution of discharged particles according to excess air ratio

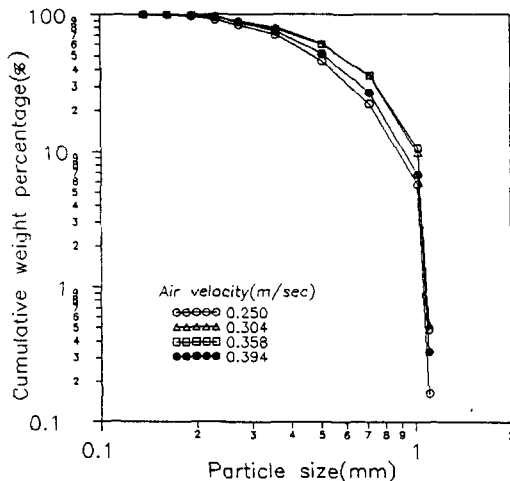


Fig. 9 Size distribution of discharged particles according to each gas velocity.

연소에서 NO_x의 생성은 조업온도와 과잉공기비에 의하여 가장 큰 영향을 받으므로 NO_x의 발생량으로부터 층내의 조업상태를 규명하기 위하여 각각의 조건에 따른 NO_x의 발생량을 Fig. 10에 나타내었다. 본 연구에서는 층내온도를 일정하게 유지하였으므로 조업온도에 따른 영향은 배제되어 있다고 할 수 있다. 따라서 유동층의 과잉공기와 사용된 유연탄과 무연탄의 비율에만 관계된다고 할 수 있다.

Fig. 10에서 NO_x 발생량은 과잉공기의 증가에 따라 작은 양의 증가량만을 나타내었다. 즉, 유속과 과잉공기비에 따라 연소영역은 변화되고 있지만 유동층의 우수한 기-고 접촉효율에 의하여 연소반응특성은 영향을 받지 않음을 NO_x 농도로부터 알 수 있었다.

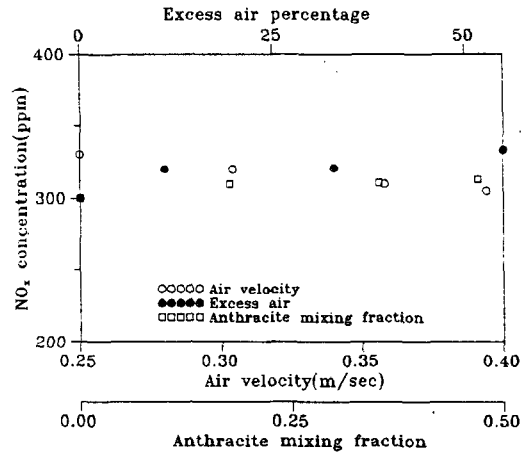


Fig. 10 NO_x concentration with respect to experiment conditions for flue gas

4. 결론

이상의 유동층연소로에서 유, 무연탄 혼합연소시 조업유속과 과잉공기비에 대한 실험으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 층하부와 상부에서 나타나는 압력차의 상호 비교로써 유동층의 동일 유속에서 연소 부하량과 과잉공기비에 의한 유동화상태를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) 과잉공기비 증가에 따른 유속의 증가는 연소

영역과 유동화영역을 분리시키며 상부에서의 연소가 과잉공기비 증가와 함께 증가함을 알 수 있었다.

- 3) 유속과 과잉공기비에 따라 연소영역은 변화되고 있지만 유동층의 우수한 기-고 접촉효율에 의하여 연소반응특성은 영향을 받지 않음을 층내 입도분포와 NO_x의 발생양으로부터 알 수 있었다.

사 용 부 호

d_p : particle diameter[mm]
 \bar{d}_p : mean particle diameter[mm]
 E_a : excess air percentage[%]
 U : air velocity[m/sec]
 X_a : anthracite mixing fraction

참 고 문 헌

- 1) 석탄통계연보, 통상산업부, 1995.
- 2) 손재익, 연구보고서, 한국동력자원연구소, 1983.
- 3) George Fumich, Jr. "Fossil Energy Program: Summary Document" U.S. DEO, Office of Program Control and Support March, 1979.
- 4) M. Radovanovic, Fluidized Bed Combustion, Hemisphere Publishing Cor., New York, pp. 3~4, 1986.
- 5) T.E. Taylor, "Experimental results from an 0.46-diameter fluidized bed pilot plant", Proc. of the 2nd Eng. Found. Conf., pp. 258~263, 1978.
- 6) E.J. Anthony, H.A. Becker, R.K. Code, D. T. Liang, and J.R. Stephenson, "Combustion of high-sulfur eastern Canadian coals by AFBC", Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, pp. 32~42, 1985.
- 7) J.S. Bendart, and A.G. Piersol, "Random Data", John Wiley, New York, 1971.
- 8) G.R. Cooper, and C.D. McGillem, "Probabilistic Methods of Signals and System Analysis", Holt, Rinehart and Winston Inc., 1971.
- 9) H.T. Jang, S.C. Hong and D.S. Do, "Prediction of Mixing Degree of Binary System with Different Density in a Fluidized Bed", 화학공학, Vol. 36, No. 1, pp. 103~110, 1998.
- 10) H.T. Jang, S.C. Hong and D.S. Do, "Measurement of the Minimum Fluidization Velocity of a Binary Density Particle System Using Pressure Fluctuations", 화학공학, Vol. 33, No. 3, pp. 353~361, 1995.
- 11) N. Sadsivan and D. Barreteau, "Studies on Frequency and Magnitude of Fluctuations of Pressure Drop in Gas-Solid Fluidized Beds", Powder Technol., Vol. 26, pp. 67~75, 1980.
- 12) J. Verloop and P.M. Heertjes, "Periodic Pressure Fluctuations in a Fluidized Beds", Chem. Eng. Sci., Vol. 29, pp. 1035~1042, 1974.
- 13) Z. Fan, et. al., "Analysis of Pressure Fluctuations in a 2-D Fluidized Bed", Powder Technol., Vol. 62, pp. 139~146, 1990.
- 14) H.T. Jang, W.S. Cha and D.S. Do, "The Elutriation of Flotsam from Binasry System with Different Density in a Fluidized Bed, 화학공학, Vol. 34, No. 1, pp. 64~71, 1996.