

## 압력요동특성치를 이용한 유동층연소에서 다입자계 유, 무연탄 혼합연소특성 해석

장현태<sup>†</sup> · 박태성\* · 도동섭\*

한서대학교 화학공학과

\*고려대학교 공과대학 화학공학과

(1999년 1월 15일 접수, 1999년 7월 5일 채택)

### The Analysis of Combustion Characteristics of Mixed-Firing with Bituminous and Anthracite Coal Using Pressure Fluctuation Properties in a Fluidized Bed Combustor(Multi-Sized Particle System)

Hyun Tae Jang<sup>†</sup>, Tae Sung Park\* and Dong Sup Doh\*

Dept. of Chem. Eng., Hanseo University

\*Dept. of Chem. Eng., Korea University

(Received 15 January 1999; accepted 5 July 1999)

#### 요 약

내경 0.155 m, 높이 2.2 m의 유동층연소에서 다입자계 유연탄과 무연탄의 혼합연소특성실험을 수행하였다. 다양한 실험조건에서 압력전달기를 이용하여 압력요동특성치를 측정하여 계산하였다. 압력요동특성치의 통계적 처리과정을 거쳐 압력요동의 표준편차, 정압력, 주진동수, cross-correlation function, power spectral density function을 계산하였다. 다입자계 유연탄과 유연탄을 대상으로 무연탄 혼합비, 석탄분포에 대하여 압력요동특성치와 배출회분입도분포, 배가스조성 등을 측정하여 연소특성을 해석하였다. 유동층연소에서 혼합석탄의 연소특성 해석은 압력요동특성치중의 압력요동의 표준편차, 평균압력, power spectrum density function을 이용하여 층내의 연소영역 및 연소현상을 외부에서 관측할 수 있음을 알았으며, 주연소영역을 제시할 수 있었으며 연소입자의 분급현상을 측정할 수 있었다.

**Abstract** – The combustion characteristics of mixture of anthracite and bituminous coal were studied in a fluidized bed (0.155 m-I.D., 2.2 m-height). The pressure fluctuations were measured by a pressure transducer under the various operating conditions. The properties of the pressure fluctuations, such as the standard deviation of pressure fluctuations, static pressure, cross-correlation function, dominant frequency and the power spectral density function, were obtained from the statistical analysis. The pressure fluctuation properties, particle size distribution of ash and composition of flue gas were measured to interpret the combustion characteristics in a fluidized bed combustor of uniform or multi-sized particles of mixed anthracite and bituminous coal have been compared with the particle size distribution, anthracite mixing fraction. From this study, the combustion characteristics of mixed fuels in a fluidized bed combustor could be interpreted by using standard deviation of pressure fluctuation and power spectrum distribution.

**Key words:** Combustion Characteristic, Pressure Fluctuation Properties, Fluidized Bed Combustor, Mixed Firing of Anthracite and Bituminous Coal

#### 1. 서 론

유동층 반응기는 고체를 다루는 다른 계에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 반응기 내에서 고체가 액체와 같이 거동하므로 연속조업이 가능하고, 열 및 물질전달의 우수성으로 인하여 현재 많은 분야에서 반응기로 사용하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 특히 열 및 물질전달의 우수성으로 인하여 연소로로써 널리 사용되고 있다. 국내의 적으로 발생하는 많은 양의 폐기물을 처리하는 방법중에 최근 소각

에 의한 처리연구가 활발히 진행중이고, 폐기물 소각을 위하여 유동층연소로가 많이 활용되고 있다. 유동층연소로에서 폐기물 소각시 다른 연소로에 비하여 열 및 물질전달이 우수하여 연소물질의 종류의 제약이 적고, NO<sub>x</sub>의 발생이 적어 소각로로써 우수하게 평가되고 있다. 또한 연소로내에 입자의 주입과 배출이 다른 연소장치에 비하여 용이하므로 연속조업이 원활하게 이루어질 수 있다.

이와 같은 유동층의 소각공정에서 소각대상물질의 발열량 및 소각조건 등에 의하여 두 물질 이상의 물질을 혼합 연소시키면서 이루어질 수 있다. 따라서 혼합연소시 연소특성을 관측하기 위하여 고회분 저발열량 국내무연탄과 저회분 고발열량 수입유연탄의 혼합연소를 통

<sup>†</sup>E-mail: htjang@gaya.hanseo.ac.kr

하여 두 물질 이상의 혼합연소시 연소현상 및 조업특성을 압력요동을 이용하여 층 외부에서 집적 관측할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다. 압력요동의 특성치를 이용한 유동층의 유동화 상태의 예측에 관한 연구는 많은 연구자에 의하여 진행되어지고 있다[1-4]. Hong 등[5]은 압력요동특성치인 압력요동의 표준편차, 주진동수, power spectrum distribution을 이용하여 층내현상을 해석하고, 최소유동화속도를 측정하였다. 차 등[6]도 연소로에서의 집괴입상화에 따른 연소로의 비유동화 상태를 압력요동특성치를 이용한 관측법을 제시하였다.

따라서 본 실험에서는 유연탄과 무연탄의 혼합비에 따른 유동층 층내의 평균압력, 층내압력강하로써 연소특성을 해석하였고, 압력요동의 표준편차, 주진동수를 이용하여 혼합연소의 조건, 상태 등을 해석하고자 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같으며 유동층부, 시료주입 및 배출부, 측정부로 나누어져 있다. 유동층부는 내경 0.15 m이고 비산입자의 체류시간을 증진시키기 위하여 freeboard는 내경 0.21 m로 확장된 형이며, 다공형 분산판을 사용하였다. 또한 압력요동신호, 온도, 가스농도 등을 측정하기 위한 시료채취용 tap을 유동층 전역에 설치하였다. 시료의 주입은 spring screw feeder를 사용하였고 배출은

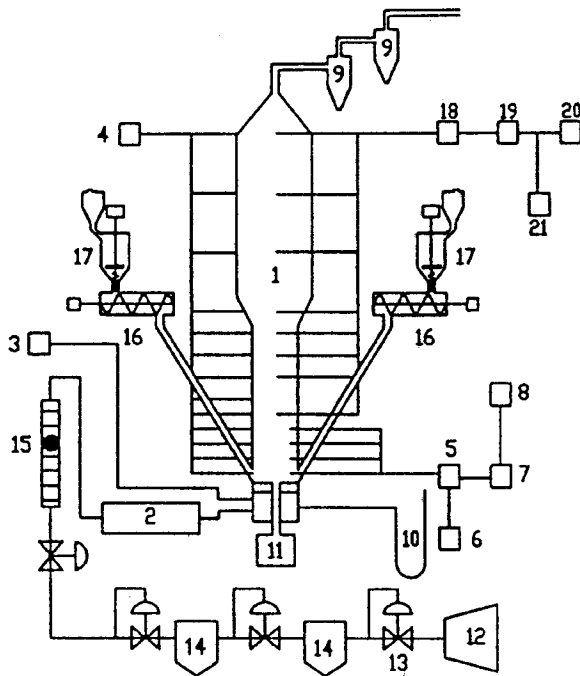


Fig. 1. Experimental facilities and flue gas analysis system.

- |                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| 1. Fluidized bed combustor  | 12. Air compressor     |
| 2. Preheater                | 13. Regulator          |
| 3. PID temp. controller     | 14. Air filter         |
| 4. Digital multithermometer | 15. Flow meter         |
| 5. Pressure transducer      | 16. Screw feeder       |
| 6. Power supplier           | 17. Hopper             |
| 7. Amplifier                | 18. Condenser          |
| 8. Personal computer        | 19. Filter             |
| 9. Cyclone                  | 20. Flue gas analyzer  |
| 10. Monometer               | 21. Gas chromatography |
| 11. Vibrating discharger    |                        |

진동배출기를 사용하였다. 유출되는 입자의 포집을 위하여 층 상단의 사이클론을 설치하였다. 또한 시료 공급기는 두 시료에 대하여 각각 사용하였는데 이는 시료공급기의 저장조내에서 두 석탄의 밀도차에 의한 분리가 발생되어 균일한 조성의 공급이 이루어지지 않기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 두 석탄 시료를 각각 분리 공급하였다.

측정부는 압력요동신호 측정부, 온도측정부, 가스농도측정부로 구성되어 있다. 압력요동신호 측정부는 압력전달기, 압력전달기를 시동시켜 주는 직류전원공급기, 12bit A/D converter 그리고 측정된 신호를 계산 기록하는 컴퓨터부분으로 구성되어 있다. 압력전달기(Valcom Co. Ltd., model VPRN, pressure transducer, PT) probe는 외경 4 mm, 길이 0.4 m stainless steel관을 사용하였고, 층내물질의 유입을 막기 위하여 관의 끝 부분은 400 mesh 망으로 밀봉하였다. 유동층의 온도는 냉각수를 사용하여 제어하였으며 층의 외벽에 설치된 냉각관과 층내에 설치된 냉각관을 이용하여 층내온도를 900 °C로 유지하였다. 또한 유입되는 유동화공기는 예열기를 사용하여 300 °C로 공급하였다.

### 2-2. 실험방법

유동층연소로의 운전은 초기에 무연탄 다입자계 회분을 유동층에 충전시킨 후 예열공기를 이용하여 유동층의 온도를 목탄의 착화점까지 가열한다. 목탄의 착화점까지 유동층이 가열되면 목탄을 불연속적으로 유동층에 공급하여 유동층의 온도를 유연탄의 착화점까지 상승시켜 조업하고 무연탄은 유동층의 온도가 800 °C에 도달하면 무연탄을 공급한다. 이때에 조업온도를 일정온도로 유지하기 위하여 유동층의 각 부분에 설치된 냉각관에 냉각수 유량을 조절한다. 이와 같이 조업하면서 유동층이 정상상태에 도달할 때까지 압력요동신호 및 온도 등을 측정하게 된다.

압력요동신호의 측정은 분산판으로부터 5 cm 간격으로 네지점에서 하였으며, sampling probe는 유동층 기벽으로부터 3 cm 중심에 설치하였다.

또한 유동층에서 압력요동 신호측정의 sampling time 간격은 sample theorem을 이용하여 10 ms로 하였으며, sampling 갯수는 1,024개로 하였다. 이와같이 16번을 측정하여 이 값의 평균을 취하였다. 본 실험에서 분석에 사용한 압력요동의 통계적 처리는 아래와 같다. 압력요동의 표준편차 variance는 positive square root인 표준편차로 data signal의 intensity를 의미하며 식 (1)과 같이 표현된다[7, 8].

Power spectrum density function은 random data의 시간영역함수를 빈도수 영역으로 변환시킨 함수이며 auto-correlation function의 Fourier transform한 것으로 식 (3)과 같다.

$$S.D. = \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (X(t) - \mu_x)^2 dt \right]^{1/2} \quad (1)$$

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \quad (2)$$

$$G_x(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (3)$$

본 실험의 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

본 실험에 사용한 무연탄 시료는 경북 문경산으로 발열량이 2,010 kcal/kg으로 고회분 저품위 무연탄으로 산지에 방치되어 있는 석탄이고, 유연탄 시료는 호주산으로 발열량이 6,520 kcal/kg이고 회분 함량이 8.38%인 저회분 고품위 유연탄이다. 각 시료의 특성은 Table 2, 3에 나타내었다. Table 2에 나타나 있는 바와 같이 유연탄에는 다량의 휘발분이 함유되어 있으며 이러한 휘발분에 의하여 무연탄과는 다른 연소특성이 나타날 것으로 사료된다. 유동층연소로에 공급되어지는 각 석탄의 입도분포는 Fig. 2에 나타내었다. 유연탄은 2 mm 이하

Table 1. Experimental conditions

Operation variables	Operating range
Inlet air velocity(m/sec)	0.304
Initial in-bed particle size(mm)	multi-sized
Operating temperature(°C)	900
Aspect ratio(L/D)	1
Anthracite mixing fraction	0.0-1.0
Excess air(%)	19.24
Anthracite feeding rate(kg/hr)	0.27-6.74
Bituminous feeding rate(kg/hr)	1.85-2.55
Pressure fluctuation properties	0.05, 0.10, 0.15, 0.20
measuring position(above distributor, m)	

Table 2. Proximate analysis of coals

	Moisture (wt%)	Volatile matter (wt%)	Ash (wt%)	Fixed carbon (wt%)
Anthracite	1.80	6.48	64.75	26.97
Bituminous	6.74	27.38	8.38	57.19

Table 3. Ultimate analysis of coals(wt%, dry basis)

	C	H	N	O	S
Anthracite	30.0	0.71	0.34	4.24	0.31
Bituminous	72.3	4.30	0.36	11.70	0.21

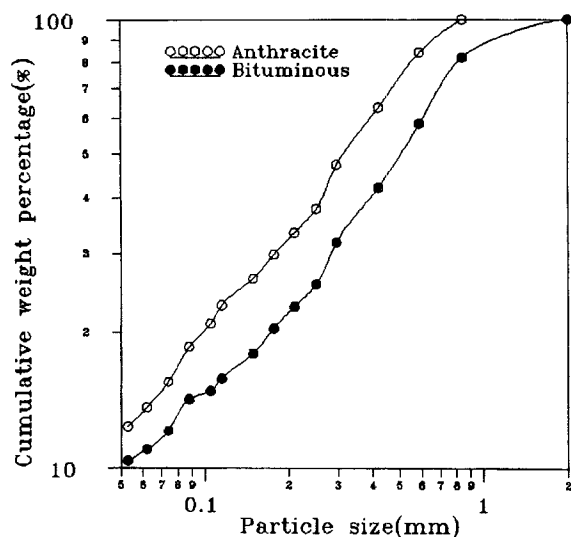


Fig. 2. Size distribution of coal samples.

의 다입자경 유연탄을 사용하였고, 무연탄은 1.19 mm 이하의 다입자경을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

혼합연소시의 층내 현상을 외부에서 on-line으로 monitoring하여 층내 현상을 해석하고 조업을 원활히 유지할 수 있는 방법의 개발을 위하여 유동층의 거동특성을 가장 크게 대표할 수 있는 압력요동 신호를 측정하여 측정된 신호의 평균값을 층내 높이에 따라 Fig. 3에 나타내었다. 유동층에서 분산판으로부터 거리에 따른 평균압력은 층내 물질의 양, 층내물질의 밀도, 공극률, 유동화기체의 선속도 등에 의하여 결정된다. 평균압력은 층 물질의 양에 따른 값이므로 분산판으로부터 거리에 따라 선형적으로 감소하게 된다. Fig. 3은 무연탄의 혼합비에 따른 평균압력을 나타낸 그림으로써 일반적인 유동층과는 다른 경

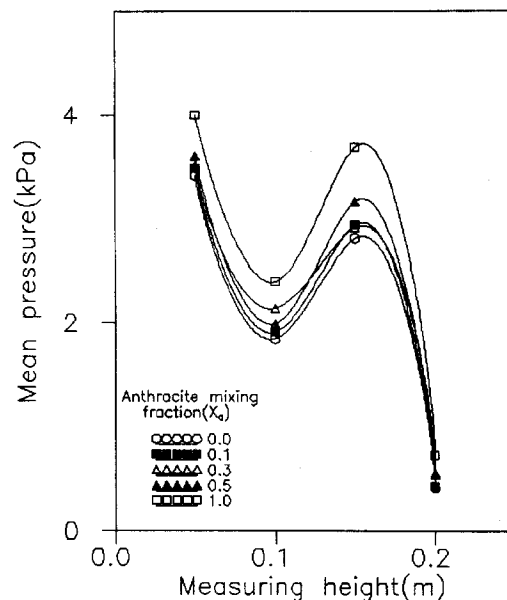


Fig. 3. Effects of measuring height on mean pressure in the coal combustor with the variation of anthracite coal mixing fraction.

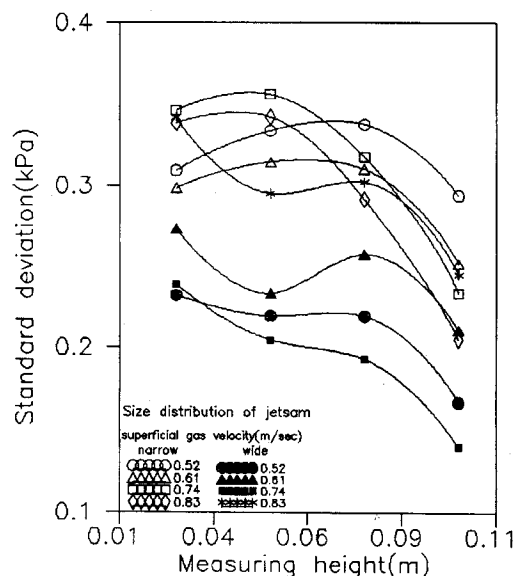


Fig. 4. Standard deviation of pressure fluctuations for the size distribution of jetsam with superficial gas velocity.

향을 나타내고 있다. 석탄연소시 높이에 따라 선형적으로 감소하게 되지 않고 그림에서는 층하부 지점인 0.1 m 지점이 0.15 m 지점 보다 낮게 나타나고 있다. 이는 연소와 층내의 분급에 의한 영향으로 사료되는데 분급에 의한 영향은 Fig. 4에 나타내었다[9]. Fig. 4는 본 연구에서와 같은 조건을 만들기 위하여 밀도가 큰 모래와 밀도가 작은 PMMA를 대상으로 두 입자군을 혼합하여 각각의 입자분포와 유속에 따른 압력요동의 표준편차를 분산판으로부터 높이에 따라 측정하여 나타낸 그림이다. 상온실험에 사용한 두 입자군의 입도분포는 Table 4에 나타내었다. 그림에서 입자군의 입도가 넓어지고 평균입경이 작은 입자와 혼합되었을 때 유속이 증가함에 따라 Fig. 3에 나타난 것과 같이 두 지점에서의 평균압력의 역전현상이 일어나게 된다. 즉, 분급현상이 발생하므로써 층내의 0.1 m부근에서 회박상이 생성되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 이러한 해석은 주진동수의 측정으

Table 4. Size distribution of cold test samples

Particle size(mm)	Cumulative weight percentage		
	PMMA	Sand(narrow)	Sand(wide)
0.058			3
0.069			13
0.081			17
0.097	6		26
0.115	16		35
0.137	29		45
0.163	44		56
0.193	60		66
0.230	74	12	74
0.274	84	17	81
0.359	91	26	89
0.508	95	48	95
0.715	98	100	100
1.016	100		

로도 알 수 있으며 차 등[5]의 입자크기차이가 존재하는 이성분계의 연구 결과에서도 나타나고 있다. 그러므로 본 실험의 경우와 같은 연소가 일어날 경우 연소가스가 발생하게 되고, 연소되고 있는 입자의 주변에 가스경막이 발생되어, Fig. 4에서와 같은 분급현상과 더불어 연소에 의한 높은 압력이 나타나므로 더 큰 값의 반전이 발생된다[10-12]. 이와 같이 연소에 의하여 두 지점의 압력이 층위치에 따라 선형적으로 나타나지 않는 것은 Fig. 5의 분산판으로부터 거리에 따른 평균압력을 시간에 대하여 살펴보면 알 수 있다. 그림에서 조업초기에는 평균압력값이 분산판으로부터 거리에 따라 작은 값을 나타내고 있다. 그러나 조업시간이 증가되면 0.1 m의 값과 0.15 m의 절대값이 바뀌게 된다. 따라서 연소현상이 정상상태에 도달하게 되면 평균압력값의 크기가 바뀌게 되고, 일정하게 유지된다. 이러한 연소현상에 의한 압력 변화는 일반적으로 유동층의 연소는 연소 중인 입자의 부력으로 인하여 층 상부로 분급이 일어나며 이에 의하여 층 상부에서 연소가 일어나게 된다. 또한 본 연구에서 사용한 유동층은 석탄 공급을 층내영역의 중앙인 지점에서 하였으므로 새로이 공급되는 입자가 실은 상태로 공급되어진다. 조업시 층내의 0.1 m 지점의 온도가 0.15 m 지점의 in-bed영역에 비하여 30 °C 정도 낮게 나타나고 0.25 m의 상부온도가 0.15 m 보다 조건에 따라 30-50 °C 정도 높게 측정되었다. 따라서 층내에 차가운 입자의 유입으로 시료유입부 부분 층내 입자의 운동성이 감소되고, 가열된 입자에 착화가 일어나고 회발분이 방출되면서 층상부로 분급되므로 나타나는 현상으로 사료된다.

Fig. 6은 무연탄의 혼합비에 따른 층내 위치에 따른 평균 압력을 나

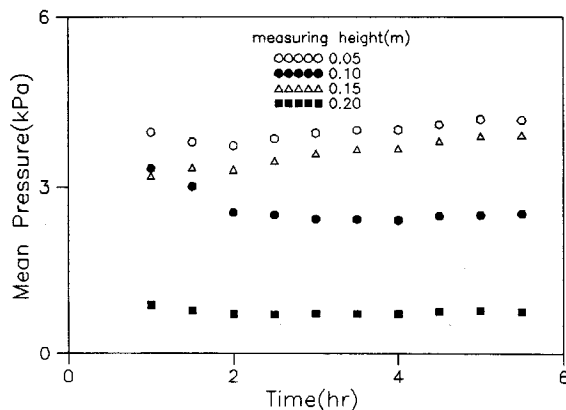


Fig. 5. Effects of measuring height on mean pressure in the FBC with the operation time (anthracite coal, 0.304 m/sec,  $E_a=20\%$ ).

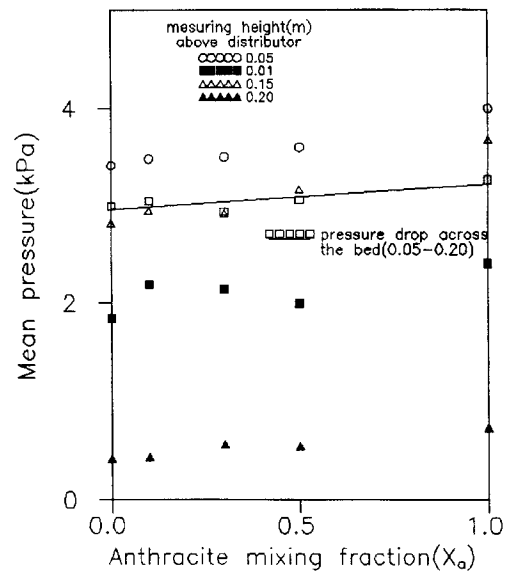


Fig. 6. Effects of measuring height on mean pressure and pressure drop across the in-bed region.

타낸 그림으로써 무연탄만을 연소한 경우가 가장 크게 나타나고 있다. 본 실험은 중형비가 일정한 상태에서 수행한 것으로 그림에 나타나고 있는 압력의 변화값은 입자 양에 의한 영향은 아니고 층내입자의 입도분포, 층내의 연소상태, 유연탄 회분과 무연탄 회분의 비에 의하여 나타나고 있다. 그림에서 무연탄 연소시 평균압력이 크게 나타나고 있는 것은 무연탄의 경우 가연성분의 비가 유연탄에 비하여 현저하게 작고, 미반응 핵 모델로 연소되므로 조업유속이 입자의 종말속도 이하인 입자는 모두 층내에서 연소한다. 따라서 유동층의 전 영역에서 연소되는 입자가 유연탄을 혼합한 경우보다 작게 되므로 더욱 연소가 많이 일어나게 된다. 혼합비에 따라 층내온도를 일정하게 유지하기 위하여 in-bed영역의 냉각관에 공급된 냉각수의 유량에서도 알 수 있다. 따라서 층내에서 다른 경우에 비하여 높은 압력강화가 일어나게 된다. 이와 같은 특성은 유연탄의 혼합비에 따른 값을 고찰하면 혼합비에 따라 일정하게 증가되고 있으므로 특성은 무연탄의 층

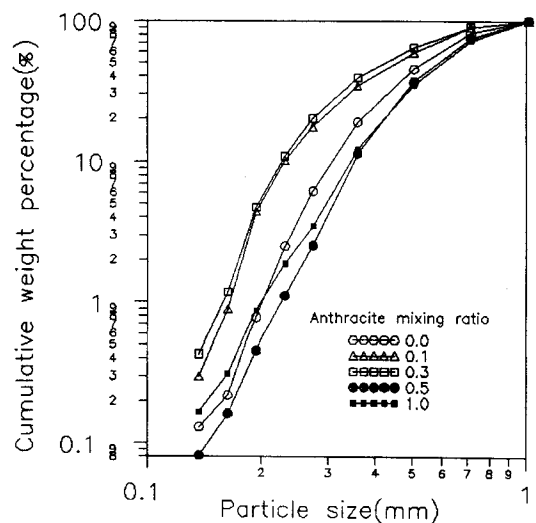


Fig. 7. Size distribution of discharged particles according to anthracite coal mixing ratio.

내연소에 의하여 나타나는 것은 Fig. 7의 각 혼합비에 따른 층하부 배출 회분의 입도분포에서 알 수 있다. Fig. 7의 각 경우의 배출 회분의 입도분포는 거의 동일하게 나타나고 있다.

Fig. 8에 각 혼합비에 따른 압력요동의 표준편차를 유동층의 높이에 따라 나타내었다. 일반적으로 반응이 없는 유동층의 경우 분산판으로부터 높이에 따라 압력요동의 표준편차 값은 증가하고 높이가 증가함에 따라 다시 감소하게 된다. 또한 이때에 최대점을 나타내는 지점은 대개의 기포의 합체와 고체의 혼합이 가장 우수한 것으로 알려져 있다[5, 13]. 본 실험의 경우 연소와 주입 석탄입자의 탈휘발의 반응이 존재하므로 반응이 없는 경우와는 다를 것으로 사료된다. Fig. 8의 높이에 따른 압력요동의 표준편차가 층 하부에서 가장 높고 층 중상부가 층 중앙, 층 상부 순으로 나타나고 있다. 이와 같은 경향은 Fig. 6의 압력값과 같은 것으로서 층 중앙에서 다른 경우와는 달리 작게 나타난다. 석탄의 탈휘발 과정은 석탄의 주입과 동시에 일어나고 석탄입자는 가스 필름을 갖게 된다[14]. 따라서 lean phase가 층 중앙에서 발생하게 되어 압력요동의 표준편차값이 감소하게 된다. 평균 압력값으로부터 연소영역으로 예측된 분산판으로부터 0.15 m의 지점은 연소에 의하여 높은 값을 나타내고 있다. 석탄시료에 따라 살펴보면 층 하부의 경우 유, 무연탄이 50%로 섞여있는 경우 가장 높게

나타나고 있으며 무연탄, 유연탄 순으로 나타나고 있다. 층 중앙의 경우는 유연탄, 혼합탄, 무연탄 순으로 나타나고 있다. 유연탄의 경우는 탈휘발되는 가스의 양이 가장 많으므로 유연탄의 혼합에 따라 나타나고 있다. 층 중상부의 경우는 층 중앙과는 반대로 나타나고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 연소현상이 무연탄의 경우 층내에서 연소가 가장 활발하게 일어나므로 인하여 이의 영향으로 나타난 것으로 사료된다. 층의 최상부에서도 같은 경향을 나타내고 있다.

또한 조업시간에 따른 압력요동의 표준편차 값을 층 높이에 따라 살펴본 결과도 Fig. 5와 같이 0.1 m, 0.15 m 지점의 값이 바뀌고 있음을 Fig. 9에서 보여주고 있다.

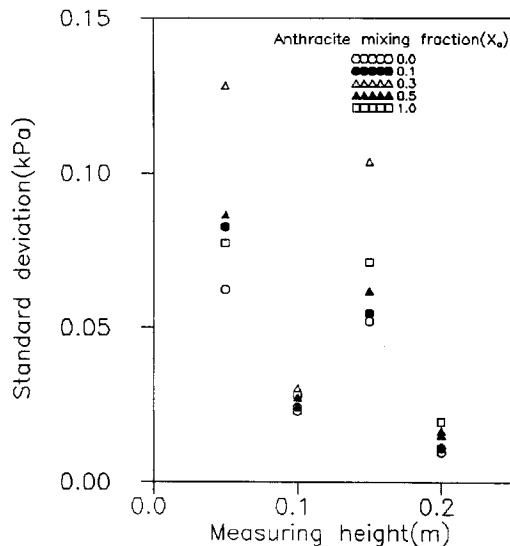


Fig. 8. Standard deviation of pressure fluctuations for anthracite mixing fraction with measuring height above the distributor.

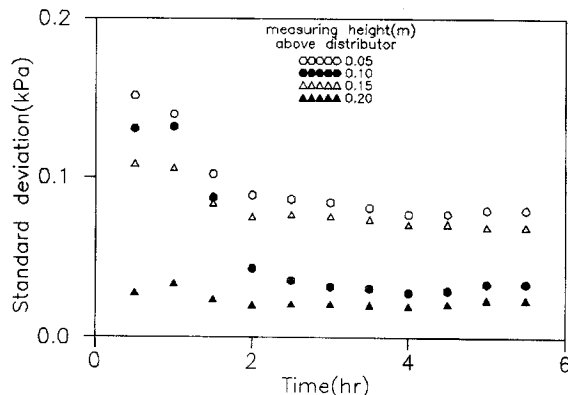


Fig. 9. Standard deviation of pressure fluctuations for the height above the distributor with operation time (anthracite coal,  $U=0.304$  m/sec,  $E_a=20\%$ ).

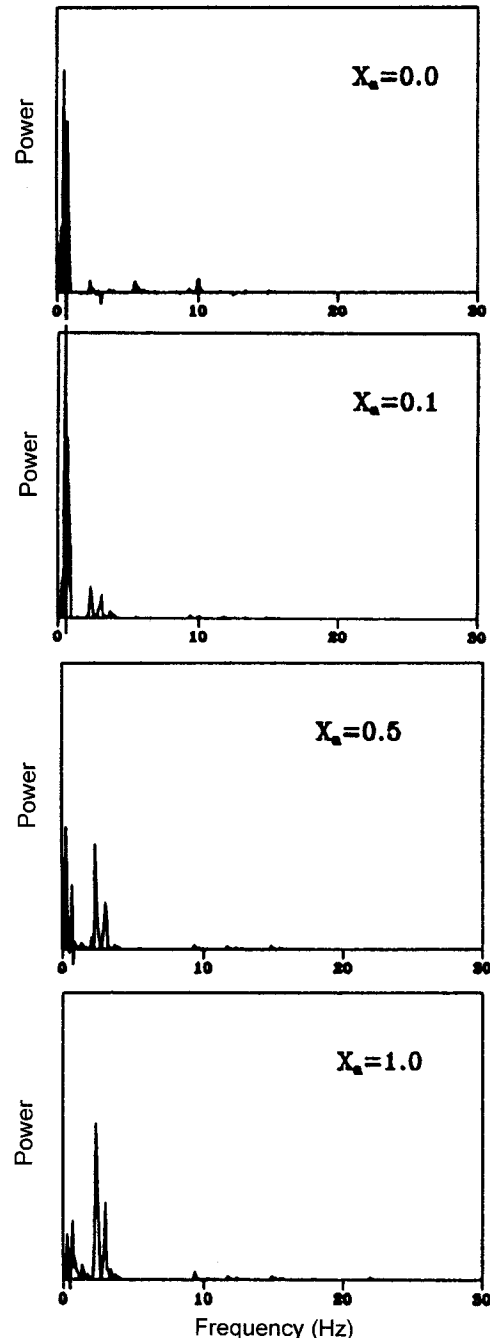


Fig. 10. Power spectrum of pressure fluctuations with the variation of anthracite mixing fraction (measuring height 0.15 m above the distributor).

Fig. 10은 무연탄의 혼합비에 따른 power spectrum distribution을 나타내고 있다. Power spectrum은 유동층의 거동을 해석할 수 있는 기초적인 정보를 제공하여 주는 방법으로 알려져 왔는데, power spectrum distribution은 압력요동의 크기와 진동수에 따른 에너지 분포를 나타낸다. 그러므로 power spectrum distribution이 좁은 폭을 나타내면 유동층이 매우 주기적인 요소를 가지고 있는 것에 해당한다. 유동층의 입자와 기포의 거동이 복잡하면 넓은 주기에 걸쳐서 power spectrum이 나타난다. Fig. 10의 power spectrum distribution은 유, 무연탄의 혼합비에 대하여 0.5, 3-4 Hz의 두 구간에서만 나타나고 있다. 따라서 power spectrum의 결과로는 본 연구에서의 유동화는 매우 주기적이고 단순하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 주기가 3-4 Hz 구간에서 복잡하게 나타나는 power spectrum은 유동화 특성으로 인하여 나타나는 것으로 사료된다. 또한 0.5 Hz에서 나타나는 power spectrum은 반응이 없는 유동층에서는 나타나지 않는 것으로써 유동층에 주입된 석탄입자의 탈휘발과정에서 일어나는 것으로 사료된다. 유동층에 주입된 석탄의 탈휘발과정은 매우 빠른 속도로 일어나는 것으로 사료된다. 그러므로 발생된 기체가 유동층에 영향을 주므로 새로운 느린 주기가 발생된다[14]. 이러한 평균압력과 power spectrum분포의 차이로 혼합연소시 두 석탄의 혼합비에 따른 혼합연소현상을 해석할 수 있다.

#### 4. 결 론

유동층연소에서 압력요동특성치를 이용한 유연탄과 무연탄의 혼합연소특성 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

유동층연소에서 압력요동특성치를 이용하여 층내의 연소영역 및 연소현상을 외부에서 관측할 수 있음을 알았으며, power spectrum distribution을 이용하여 0.5 Hz 부근의 주기가 가장 크게 발생하는 위치가 주연소 영역임을 제시할 수 있었다.

유동층연소에서 다입자계 석탄의 연소시 연소입자의 분급과 연소현상에 의하여 층중상의 압력요동의 표준편차와 평균압력이 다른 위치에 비하여 작게 나타나는 균일입자와 반응없는 계와는 다른 압력요동특성치를 나타낸다.

이러한 특성을 이용하여 다입자계 유, 무연탄의 혼합연소특성을 압력요동특성치로 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감 사

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구과제(92-26-00-02)연구비 지원에 의해 이루어진 연구결과와 일부이며 연구비를 지원한 한국과학재단에 감사드립니다.

#### 사용기호

f : frequency [Hz]  
G<sub>x</sub>(f) : power spectral density function [kPa]

g : gravity acceleration [m/sec<sup>2</sup>]  
h : bed height [m]  
p : pressure [kPa]  
R<sub>x</sub>(τ) : auto-correlation function [kPa]  
U : superficial gas velocity [m/sec]  
U<sub>mf</sub> : minimum fluidization velocity [m/sec]  
μ<sub>x</sub> : mean pressure [kPa]  
T : observation time [sec]  
S.D. : standard deviation [kPa]  
t : time [sec]  
X(t) : simple time history at time t  
ε<sub>mf</sub> : bed voidage at minimum fluidization  
ρ<sub>b</sub> : bulk density [kg/m<sup>3</sup>]  
ρ<sub>p</sub> : particle density [kg/m<sup>3</sup>]  
Φ : sphericity  
τ : time [sec]

#### 참고문헌

1. Fan, L. T., Chen, Y. M. and Lai, F. S.: *Powder Technol.*, **61**, 255 (1990).
2. Abdulrahim, A. A. and Noor Wali, M. M.: *Powder Technol.*, **76**, 185 (1993).
3. Saena, S. C. and Jadav, S.: *Powder Technol.*, **36**, 61(1983).
4. Puncocar, M., Drahos, J., Cermak, J. and Selucky, K.: *Chem. Eng. Commun.*, **35**, 81(1985).
5. Hong, S. C., Cho, B. L., Doh, D. S. and Choi, C. S.: *Powder Technol.*, **60**, 215(1990).
6. Cha, W. S., Hong, S. C., Oh, K. J. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 641(1992).
7. Bendart, J. S. and Piersol, A. G.: "Random Data," John Wiley, New York(1971).
8. Cooper, G. R. and McGillem, C. D.: "Probabilistic Methods of Signals and System Analysis," Holt, Rinehart and Winston Inc.(1971).
9. Jang, H. T., Cha, W. S. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 64(1996).
10. Sotlirchos, S. V. and Amundson, N. R.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **23**, 191(1984).
11. Tanaka, I., Shinohara, H., Hirose, H. and Tanaka, Y.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **5**, 51(1972).
12. Kato, T. and Wen, C. Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 1351(1969).
13. Svoboda, K. and Hartman, M.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **20**, 319(1981).
14. Poersch, W., Bahnen, R. and Wagner, R.: 10th Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, Atlanta GA, April, 1175(1988).