

유동층연소로에서 압력요동특성치를 이용한 균일입자계 유, 무연탄 혼합연소특성 해석

장현태[†] · 홍성창* · 차왕석** · 도동섭***

한서대학교 화학공학과

*경기대학교 공과대학 환경공학과

**군산대학교 공과대학 환경공학과

***고려대학교 공과대학 화학공학과

(1998년 12월 28일 접수, 1999년 4월 9일 채택)

Analysis of Combustion Characteristics of Bituminous and Anthracite Coal Using Pressure Fluctuation Properties in a Fluidized Bed Combustor(Uniform Particle System)

Hyun Tae Jang[†], Sung Chang Hong*, Wang Seog Cha** and Dong Sup Doh***

Dept. of Chem. Eng., Hanseo University

*Dept. of Environ. Eng., Kyonggi University

**Dept. of Environ. Eng., Kunsan National University

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

(Received 28 December 1998; accepted 9 April 1999)

요 약

내경 0.155 m, 높이 2.2 m의 유동층연소로에서 유연탄과 무연탄의 혼합연소특성실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 무연탄은 발열량 2,020 kcal/kg으로 저품위 고회분 무연탄이며, 유연탄은 호주산으로 발열량이 6,520 kcal/kg인 저회분 고품위이다. 유동층연소로에서 연소특성을 해석하기 위하여 균일입자의 무연탄과 유연탄을 대상으로 무연탄 혼합비, 석탄 입경비 등을 변수로 실험을 수행하여 압력요동특성치 및 물리화학적 특성치를 이용하여 연소특성을 해석하였다. 유동층연소로에서 혼합석탄의 연소특성 해석은 압력요동특성치의 압력요동의 표준편차, 평균압력, power spectrum density function을 이용하였으며, 압력요동특성치로부터 유동층연소로에서 각각 석탄의 연소영역을 측정할 수 있었다.

Abstract – The characteristics of mixed-firing of an anthracite and a bituminous coal were studied in a fluidized bed combustor(0.155 m-I.D., 2.2 m-height). The used domestic anthracite coal has heating value of 2,010 kcal/kg and the imported high-calorific bituminous coal has heating value of 6,520 kcal/kg. The physicochemical analysis and the pressure fluctuation properties were measured to interpret the combustion characteristics in a fluidized bed combustor of uniform particles of mixed anthracite and bituminous coal is a function of the particle size ratio and the anthracite mixing fraction. The combustion characteristics of mixed fuels in a fluidized bed combustor could be interpreted by using standard deviation of pressure fluctuations, mean pressure and power spectrum density function. The different burning region of fluidized bed combustor was measured by the pressure fluctuation properties.

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

1. 서 론

생활수준의 향상과 산업의 발달로 인하여 에너지의 수요가 증가되고 석유의 한정적인 공급으로 에너지원의 획득에 많은 연구와 노력이 기울이고 있으며, 환경오염의 증가와 지구 온난화 문제로 인하여 화석연료 사용을 자제하고 있다. 또한 세계적으로 핵오염 문제로 인하여 원자력의 사용은 점점 감소하고 있는 추세이며, 국내에서도 원자력 발

전소 전립에 환경오염 문제와 안전사고의 우려로 인하여 지역주민과 환경단체의 반발에 의하여 건립이 많은 진통을 겪고 있다. 그러나 태양, 풍력, 수력, 지열, 조력에너지 등의 환경에너지라 할 수 있는 청정에너지는 대용량으로 사용할 수 있는 기술개발이 요원한 상태이다. 따라서 청정에너지 사용기술이 개발되기까지 석유의 대체 에너지로써 석탄의 수요가 증가하고 있는 상태이다. 또한 석탄의 가격이 원자력을 제외한 다른 연료에 비하여 매우 낮고, 매장량이 풍부하며 전세계적으로 광범위한 분포를 나타내어 원활한 수급으로 인하여 사용이 증가하고 있는 실정이다. 석탄을 연소하여 에너지를 얻을 때 문제가 되는 것

[†]E-mail : htjang@gaya.hanseo.ac.kr

으로는 분진 발생과 NO_x , SO_x 발생을 들 수 있다. 이와 같은 문제점으로 인하여 석탄의 사용이 둔화되었다. 따라서 청정에너지로서 석탄 이용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내의 경우 가정용 석탄의 사용이 감소하고 석탄의 채굴비용이 증대함으로써 석탄산업이 존재 위기에 놓여 있다[1]. 따라서 국가기간산업으로써의 광업 보호와 에너지원의 다변화를 위하여 석탄의 이용은 국가적으로 매우 중요하다고 할 수 있다. 석탄 연소에 있어서 채산성의 문제로 인하여 고열량의 수입유연탄 이용은 증가하고 있으나 저열량 국내무연탄의 이용은 미비한 실정이다. 따라서 현재 가동 중인 유연탄 연소로에 국내 무연탄을 혼합연소하는 방법이 가장 적절하다. 이와 같이 두 석탄을 혼합연소할 경우 연소법으로는 유동층 연소법이 가장 적당하다고 할 수 있다. 미분연소법의 경우 미분화에 따른 분쇄비용과 활성화에너지가 크고, 회분함량이 높은 무연탄 연소의 문제점으로 사용이 어렵고, 스톡형의 연소로의 경우 연소로 내부의 혼합과 효율의 문제점으로 사용이 어렵다.

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. 국내외적으로 발생하는 많은 양의 폐기물을 처리하는 방법 중에 최근 소각에 의한 처리연구가 활발히 진행 중이고, 폐기물 소각을 위하여 유동층 연소로가 많이 활용되고 있다. 연소로 내에 입자의 주입과 배출이 다른 연소장치에 비하여 용이하므로 연속조업이 원활하게 이루어질 수 있다. 또한 유동층 연소로의 경우 회분함량이 높은 국내산 무연탄의 투입으로 유동화물질로 투입되는 모래의 대체효과를 얻을 수 있으므로 활용성이 높다고 할 수 있다. 이와 같은 유동층의 소각공정에서 소각대상물질의 발열량 및 소각조건 등에 의하여 두 물질 이상의 물질을 혼합 연소시키면서 이루어질 수 있다[2].

또한 압력요동특성치를 이용한 유동층의 유동화 상태의 예측에 관한 연구는 많은 연구자에 의하여 진행되어지고 있다[3-6]. Hong 등[3]은 압력요동특성치인 압력요동의 표준편차, 주진동수, power spectrum distribution을 이용하여 층 내 현상을 해석하고, 최소유동화속도를 측정하였다. 차 등[4]도 연소로에서의 집괴입상화에 따른 연소로의 비유동화 상태를 압력요동특성치를 이용한 관측법을 제시하였다.

따라서 혼합연소시 연소특성을 관측하기 위하여 고화분 저발열량 국내무연탄과 저화분 고발열량 수입유연탄의 혼합연소를 통하여 두 물질 이상의 혼합연소시 연소현상 및 조업특성을 압력요동을 이용하여 층 외부에서 집적 관측할 수 있는 방법을 제시하고자 연구를 수행하였다. 본 실험에서는 유연탄과 무연탄의 혼합비에 따른 유동층 층 내의 평균압력, 층 내 압력강하로써 연소특성을 해석하였고, 압력요동의 표준편차, power spectrum distribution을 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 균일한 주입과 주입기 내에서 입자 마모를 방지하기 위하여 spring screw feeder를 사용하였고 배출은 진동배출기를 사용하였다. 유출되는 입자의 포집을 위하여 층 상단에 사이클론을 설치하였다. 또한 시료 공급기는 두 시료에 대하여 각각 사용하

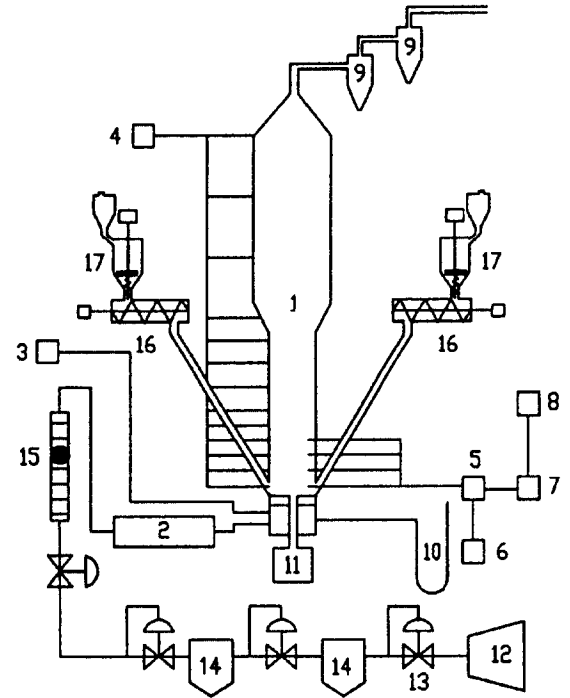


Fig. 1. Experimental facilities and data processing system of high temperature.

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

였는데 이는 시료공급기의 저장조 내에서 두 석탄의 밀도차에 의한 분리가 발생되어 균일한 조성의 공급이 이루어지지 않기 때문이다. 본 연구에서는 두 석탄 시료를 각각 분리 공급하였다.

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

2-2. 실험방법

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

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

또한 유동층에서 압력요동신호 측정의 sampling time 간격은 sample theorem을 이용하여 10 ms로 하였으며, sampling 개수는 1,024개로 하였다. 이와 같이 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 (2)와 같다.

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

$$\text{여기서, } \mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt$$

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

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. 유동층 연소로에 공급되어지는 각 석탄의 입경은 유, 무연탄 각각 0.715, 0.359 mm를 사용하였고 입자 분쇄후 체분석을 통하여 균일입경의 시료를 준비하여 사용하였다.

2-3. 유, 무연탄 혼합석탄의 활성화에너지 계산

무게 감소나 증가를 수반하는 고상반응(solid-state reaction)의 kinetic

Table 1. Experimental conditions

Operation variables	Operating range
Inlet air velocity(m/sec)	0.304
Initial in-bed particle size(mm)	0.715
Coal particle size(mm)	0.359, 0.715
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

parameter를 열중량법에 의해서 구하는 방법은 여러 학자들에 의해서 연구되어 왔다[5, 9, 10]. 본 연구에서는 Coats와 Redfern이 제시한 방법을 이용하고자 한다[9]. 따라서 아래의 식 (3), (4)에 의하여 유연탄과 무연탄의 혼합물에 대한 활성화에너지를 계산하였다.

$$\log \frac{1-(1-a)^{1-n}}{T^2(1-n)} \text{ vs. } \frac{1}{T} \quad n \neq 1 \quad (3)$$

$$\log \left(-\frac{\log(1-a)}{T^2} \right) \text{ vs. } \frac{1}{T} \quad n=1 \quad (4)$$

위의 식은 기울기가 $-(E/2.3R)$ 인 직선이 되어야 하므로 간단한 graphical method에 의해 적용할 수 있고 그 기울기로부터 활성화에너지를 구하였다.

석탄 연소시의 반응속도상수는 온도 증가에 따라 일정하지 않고 연소반응의 복잡성 때문에 apparent activation energy의 해석은 힘들다. 또한 석탄은 단일 성분으로 구성된 물질이 아니고 석탄 내에 함유하고 있는 여러 가지 성분들에 의해서 영향을 받고 온도 상승에 따라 내부구조도 영향을 받을 것으로 생각된다.

본 실험에서는 TG data로부터 석탄 연소시의 활성화에너지를 계산하였다. 반응을 1차로 가정[11]하고 TG data로부터 식 (5)에 의해서 Arrhenius plot을 하여 활성화에너지를 계산하였다. 즉, TG data에 따른 Arrhenius plot을 하면 확실한 선형구간이 나타나는데 각 구간에서의 활성화에너지는 직선의 기울기로부터 구할 수 있다. 각 구간에서의 활성화에너지를 E_n 이라 하면 총괄 활성화에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = E_1 M_1 + E_2 M_2 \cdots \cdots E_n M_n \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

유동층 연소로에서 무연탄입자와 유연탄입자 및 혼합석탄의 연소특성을 고찰하기 위하여 활성화에너지와 유동층 연소로에서 착화시간을 구하였다. Fig. 2는 무연탄의 질량 혼합비에 따른 활성화에너지를 나타내었다. 그림에 나타난 활성화에너지는 Coats와 Redfern이 제시한 방법을 사용하여 TG곡선으로부터 구하였다[9]. 그림에서 저품위 무연탄의 혼합비가 증가함에 따라 활성화에너지가 증가하고 있음을 나타내고 있다. 즉, 탄화도가 높은 무연탄의 혼합에 따라 활성화에너지가 급격히 증가함을 알 수 있다. 또한 유동층에서 회분식 실험을 통하여 구한 발화시간은 Fig. 3에 나타내었다[5]. 활성화에너지가 큰 무연탄의 혼합비 증가에 따라 급격한 발화시간의 증가를 나타내며 무연탄의 경우 135 sec의 긴 발화시간을 나타낸다. 또한 무연탄의 혼합률이 0.9

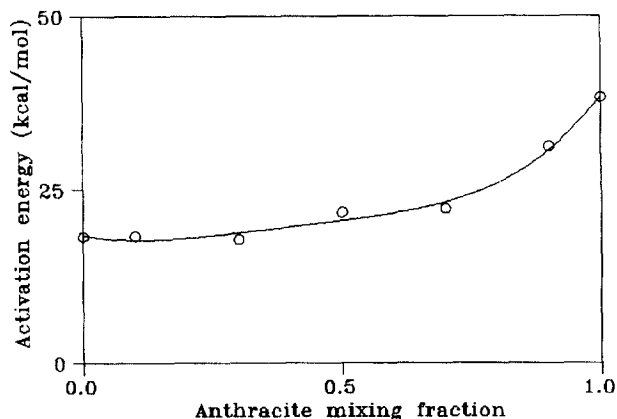


Fig. 2. Activation energy with anthracite mixing fraction.

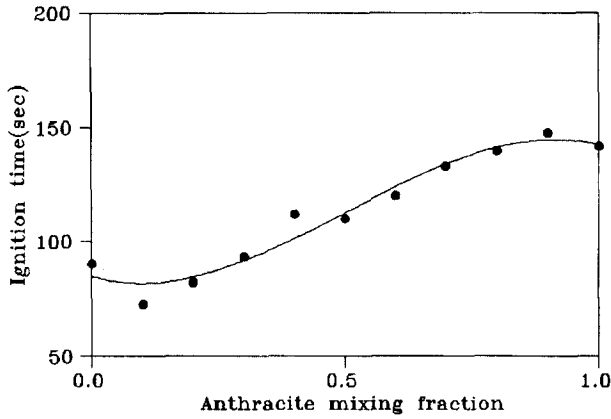


Fig. 3. Ignition time with anthracite mixing fraction.

인 경우 순수한 무연탄과 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. 유동층에서 본 실험에 사용한 무연탄은 유연탄에 비하여 느린 속도로 낮은 열량을 내며 연소될 것으로 사료된다.

유동층에서 상대적으로 무게나 밀도가 큰 입자를 jetsam이라 정의하고 이와 반대의 경우를 flotsam이라 한다. Jetsam과 flotsam비에 따라 jetsam rich system과 flotsam rich system으로 나누어지며 각각의 경우에 유동층 축방향 혼합특성과 입자 거동이 다르게 나타난다[12-14]. 따라서 연소시에도 입자 크기 차이가 있는 입자의 비율에 따른 거동 변화를 관측하기 위하여 연소특성이 동일한 무연탄을 대상으로 0.715 mm와 0.359 mm의 입자 혼합비에 따른 연소특성 실험을 수행하였다.

층 내에서 발생하는 압력강하로써 유동층의 층 내 상태를 알 수 있으므로 Fig. 4에 층 위치에 따른 압력강하 값을 나타내었다. 유동층 내의 압력강하는 유동층 내에 있는 물질의 양을 나타내며 입자의 입경비와 입자크기 및 분포, 밀도, 구형도 등의 입자특성에 영향을 받는다. 일반적으로 이성분계 유동층의 경우 크기가 다른 입자계의 혼합에 따라 공극이 감소하고 치밀도가 증진되므로 인하여 층내의 압력

강하가 증가하는 경향이 있다. 또한 동일 밀도의 균일입자의 경우 입자크기가 증가함에 따라 공극이 커지므로 층간의 압력강하는 입자크기가 작은 경우보다 작게 나타난다. 이러한 반응이 없는 이성분계에서 나타나는 입자의 혼합현상이 Fig. 4에 0.359 mm의 무연탄 혼합비가 증가함에 따라 층내 압력강하 값이 증가되는 것으로 층 전체에서 나타나고 있다. 석탄 입자가 연소될 때 입자 주변에 막이 형성되면서 층내에 공극률이 증가하여 압력강하가 감소하게 되는데 그림에서는 증가하고 있다. 이는 연소현상이 층 상부에서 일어나고 층내에서는 두 입자의 혼합에 따른 치밀도 증가로 인하여 나타나는 현상과 작은 입자의 비율 증가로 인하여 큰 입자의 연소 영역이 하부로 이동하고 있음을 나타내는 것이다. 이러한 현상은 상부와 하부의 압력강하 값의 차이에서도 알 수 있다. 반응이 없는 계에서는 층 상부에서의 압력강하 값이 하부보다 작아지는데 반하여 그림에서는 층 상부 값이 더 크게 나타나고 있다. 이는 상부에서 입자 연소에 의한 현상으로 사료된다. 또한 층의 중앙에서 높은 압력강하의 값이 나타나고 있다. 본 실험에 사용한 연소로의 석탄 주입위치가 층 중앙이므로 주입과 동시에 수분의 증발과 휘발분의 방출로 인한 것으로 사료된다. 이러한 특성을 압력요동의 표준편차로 살펴보기 위하여 Fig. 5에 0.715 mm의 무연탄과 0.359 mm의 무연탄의 혼합비에 따른 층 위치별 값을 나타내었다. 모든 혼합비에 대하여 분산판으로부터 0.1 m 지점의 압력요동의 표준편차 값이 최대치를 나타내는데 이는 앞에서 설명한 바와 같이 석탄의 투입에 의하여 일어나는 수분 및 휘발분의 방출현상에 의한 것으로 사료된다. 층의 그림에서 0.359 mm의 입자크기가 작은 무연탄의 혼합비 증가에 따라 압력요동의 표준편차 값은 작게 나타나고 있으며, 위치별로 살펴보면 혼합비 증가에 따라 각 층 위치별 값의 편차가 작아지고 있다. 압력요동의 표준편차는 초기 기포크기 및 기포의 발생, 주기, 크기, 빈도수에 영향을 받으며 기포는 층내 입자의 크기 및 분포에 크게 영향을 받는다. 그림에서 나타나는 특성은 반응이 없는 유동층에서 이성분계 유동층의 거동과 유사한 경향을 나타내고 있다. 즉 입자크기가 작은 입자의 투입에 따라 초기발생 기포 크기가 감소함에 따라 층 하부에서의 압력요동의 표준편차가 작게 나타나고 있으며 층내의 치밀도가 향상되고 작은 입자의 연소영역이 상부로 이동하여 층 전체에서 유동화상태가 균일하게 일어남을 알 수 있다. 따라서 유동층에서 입자크기가 다른 석탄의 연소시 층내의 연소상

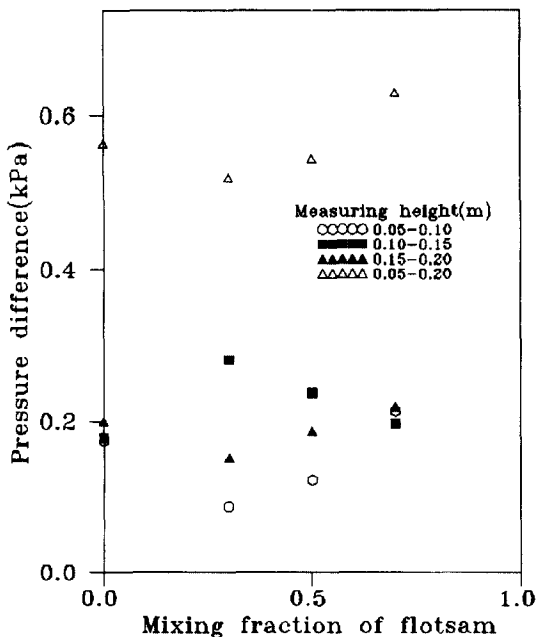


Fig. 4. Pressure difference according to mixing fraction of small anthracite coal(Jetsam coal; 0.715 mm, flotsam coal; 0.359 mm).

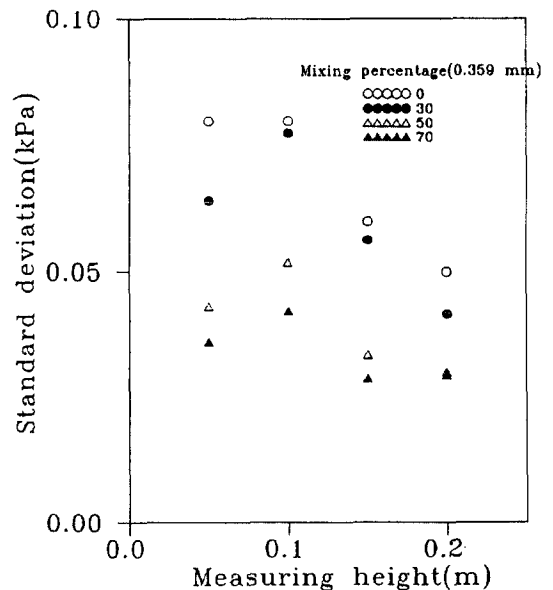


Fig. 5. Standard deviation of pressure fluctuations along the axial position of the bed.

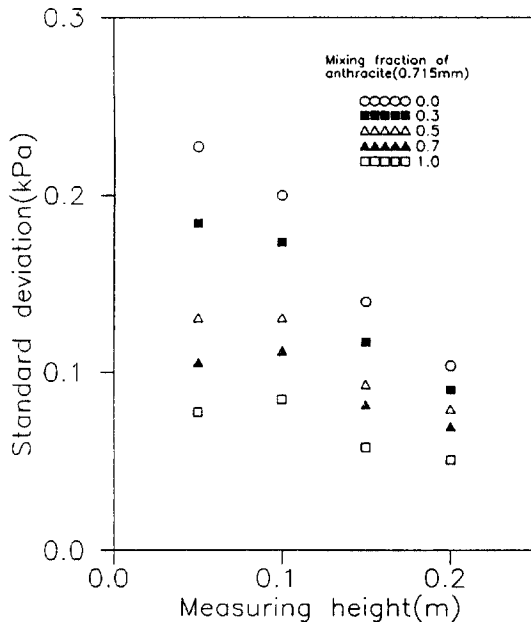


Fig. 6. Standard deviation of pressure fluctuations with mixing fraction of anthracite along the axial position of the bed.

태 및 유동화거동을 압력요동특성치를 이용하여 관측할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 특성을 이용하여 유연탄과 무연탄의 혼합연소특성을 해석하기 위하여 유연탄과 무연탄의 동일 입자크기의 균일입자계에 대하여 혼합비에 따른 실험을 수행하였다. Fig. 6은 유연탄과 무연탄 입경이 0.715 mm의 입자계에 대한 혼합비에 따른 압력요동의 표준편차 값을 층 위치별로 나타낸 그림이다. 그림에서 무연탄의 연소시는 층의 중앙이 높은 값을 나타내고 있으나 유연탄의 혼합비가 증가함에 따라 층 하부 값이 커지고 있으며, 압력요동의 표준편차 값의 절대치도 증가하고 있다. 이러한 현상은 유연탄의 연소시 선행되는 탈휘발과정과 층 하부에서 급격하게 일어나며 휘발과정과 더불어 착화된 유연탄이 상부로 이동하기 때문에 발생하는 현상으로 사료된다. 절대치의 증가

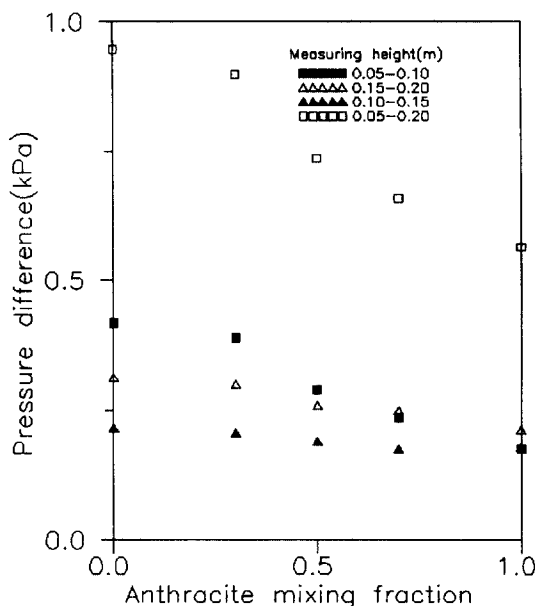


Fig. 7. Pressure difference according to axial position of the bed.

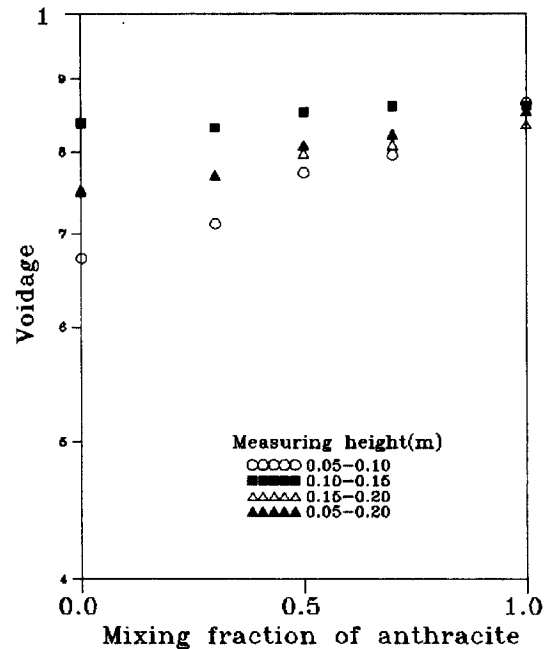


Fig. 8. Voidage according to anthracite mixing fraction (using anthracite and bituminous coal size; 0.715 mm).

는 휘발분의 방출과 활성화에너지가 낮고 연소속도가 빠른 유연탄 함량의 증가로 인하여 발생하는 격렬한 연소로 인한 현상으로 해석할 수 있다. 이러한 특성을 평균압력을 이용하여 고찰한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7은 유동층의 in-bed영역에서 각 위치에 따른 두 지점 사이의 압력강하를 나타내고 있다. 그림에서 무연탄 혼합비 증가에 따라 압력강하가 급격하게 감소하고 있으며 층의 위치별로는 하부, 상부, 중앙의 순으로 나타나고 있다. 또한 무연탄의 혼합비가 증가함에 따라 층 위치별 압력강하 값의 차이가 감소하고 있으며 70% 이상의 무연탄이 혼합된 경우에는 층 상부의 압력강하가 다른 위치보다 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 무연탄의 연소는 층 상부에서 일어나게 되며 연소된 무연탄이 하부로 이동하고 잔여 탄소분의 연소가 일어난다는 모델[15]과 일치한다고 할 수 있다. 이러한 압력강하 값을 이용하여 공극율을 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. 층 하부의 공극률이 가장 작게 나타나고 있으며 상부 값이 크게 나타나고 있다. 무연탄만을 연소시킨 경우에는 층 하부의 공극률이 크게 나타나고 있다. 이러한 특성으로부터 유연탄의 연소는 주입과 동시에 탈휘발과정과 착화가 일어남에 따라 입자가 상부로 이동하여 연소되고 연소가 일어남에 따라 수축해모델로 연소되므로 대부분의 입자가 상부에서 연소되는 것으로 사료된다. 즉, 무연탄의 혼합비가 증가함에 따라 공극률이 증가하고 있다. 이러한 현상도 무연탄 혼합비가 증가함에 따라 상대적으로 층 상부에서 연소되는 유연탄이 감소되므로 인하여 층의 splash 영역에서 연소되는 양이 감소되어 오히려 층내에 공극률은 증가되는 것이다. 무연탄의 연소는 본 실험에서 사용한 무연탄은 저품위의 무연탄이며 연소시간이 유연탄의 두배 이상이 되므로 격렬한 연소반응은 일어나지 않으며 유동층내의 입자의 순환과정에 따라 이동하며 연소가 일어나는 것으로 판단된다.

차 등[4]과 홍 등[3]에 따르면 유동층에서 이성분계의 혼합과 분리 현상의 해석이 power spectrum distribution으로 가능함은 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서 연소시의 power spectrum distribution을 층 높이별로 측정하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 층 하부 지점인 0.05, 0.1 m 지점에서는 3-4 Hz에서의 주기가 크게 발생하나 0.15, 0.2 m 지점에서는 0.5 Hz의 주기만이 크게 나타난다. 이는 층 상부에서 연소 현

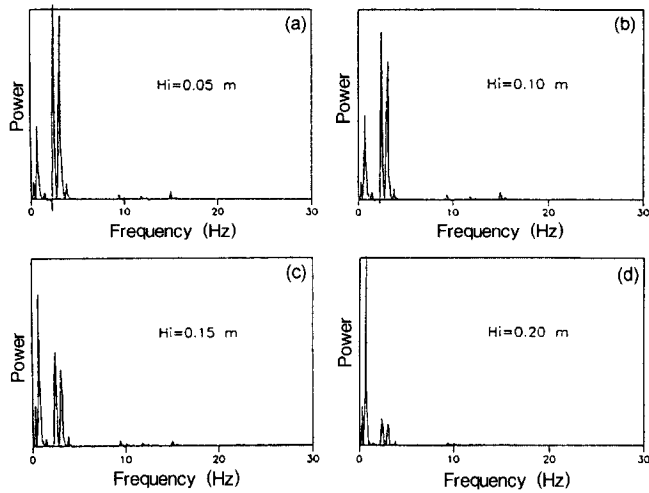


Fig. 9. Power spectrum distribution according to measuring height (anthracite mixing fraction $X_a=0$).

상과 휘발분 방출 등이 일어나므로 매우 느린 주기가 발생하게 되고, 하부에서는 연소현상보다는 유동화에 의하여 층내 현상이 지배되므로 3-4 Hz 주기의 유동화 현상에 의한 주기가 발생하는 것으로 사료된다 [3].

즉, 유연탄의 연소는 층 내에서 가열되어 탈 휘발과 착화가 이루어지고 층 상부로 이동하게 되므로 층 내에서의 연소는 거의 이루어지지 않으며 상부에서 대부분 연소된다. 무연탄도 층 상부에서 연소가 이루어지고 미연분을 함유한 회분이 층 하부에서 머물면서 대부분 연소되고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

유동층연소로에서 균일입자 크기의 유연탄과 무연탄의 혼합연소실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

입자크기가 다른 무연탄혼합물의 연소시 반응이 없는 이성분계와 같이 유동층의 축방향으로 분급이 일어난 상태에서 연소가 일어나고 있음을 알 수 있었다.

유연탄과 무연탄의 혼합연소시 유연탄에 다량 함유되어 있는 휘발분 방출에 의하여 투입입자가 상부로 상승 연소되고, 석탄입자는 층 상부 영역에서 대부분 연소가 일어나며 유연탄은 무연탄 연소영역보다 상부인 splash 영역에서 연소가 일어남을 알 수 있었다. 압력요동 특성치 해석으로부터 유동층에서 석탄연소는 상부영역에서 연소가 일어나고 층 하부에서 미연탄소분의 2차 연소가 일어나는 것으로 예측할 수 있었다.

감 사

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

사용기호

D : bed diameter [m]

d_p : particle diameter [mm]
 E : activation energy [cal/g]
 f : frequency [Hz]
 $G_x(f)$: power spectral density function [-]
 H : bed height [m]
 h : height above distributor [m]
 L : static bed height [m]
 P : pressure [kPa]
 R : gas constant [cal/molK]
 $R_x(\tau)$: auto correlation function [-]
 $S.D.$: standard deviation [kPa]
 T : observation time [sec]
 t : time [sec]
 U : superficial gas velocity [m/sec]
 U_{mf} : minimum fluidization velocity [m/sec]
 $X(t)$: sample time history of time t [sec]

그리스 문자

α : fraction of decomposed at time t [-]
 τ : space time [sec]

참고문헌

1. Yearbook of Coal Statistics, Ministry of Trade Industry & Energy (1995).
2. park, Y. S. and Son, J. E.: *HWAHAK KONGHAK*, **28**, 320(1990).
3. Hong, S. C., Cho, B. L., Doh, D. S. and Choi, C. S.: *Powder Technol.*, **60**, 215(1990).
4. Cha, W. S., Hong, S. C., Oh, K. J. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 641(1992).
5. Kato, T. and Wen, C. Y.: *Chem. Eng. Sci.*, **24**, 1351(1969).
6. Lee, J. K., Lee, K. H., Jang, J. G. and Chun, H. S.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **26**, 368(1993).
7. Puncchar, M., Drahos, J., Cermak, J. and Selucky, K.: *Chem. Eng. Commun.*, **35**, 81(1985).
8. Bendart, J. S. and Piersol, A. G.: "Random Data," John Wiley, New York(1971).
9. Coats, A. W. and Redfern, J. P.: *Nature*, **201**, 68(1964).
10. Freeman, W. S. and Carroll, B.: *J. Phys. Chem.*, **62**, 394(1958).
11. Tanaka, I., Shinohara, H., Hirose, H. and Tanaka, Y.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, **5**, 51(1972).
12. Nienow, A. W., Rowe, P. N. and Cheung, L. Y. L.: *Powder Technol.*, **20**, 89(1978).
13. Peeler, J. P. K. and Huang, J. R.: *Chem. Eng. Sci.*, **44**, 1113(1989).
14. Donsi, G., Ferrari, G. and Formisani, B.: *Powder Technol.*, **55**, 153(1988).
15. Park, J. H., Choi, C. S. and Kang, W. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **20**, 283(1982).