

## 유동층연소에서 압력요동특성치를 이용한 비유동화 상태 해석

### Analysis of Defluidization Using Pressure Fluctuation Properties in a Fluidized Bed Combustor

장 현 태\* · 유 정 근\*

Hyun-Tae Jang · Jeong-Kun Yoo

(1997년 2월 28일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

#### ABSTRACT

Granulation procedure was carried out in a 0.109m I.D., 1.8m height fluidized bed coal combustor of the multi-sized particles. The domestic anthracite with heating value 3240kcal/kg was used. Granulation of fine coal particles and fluidizing characteristics were investigated by the pressure fluctuation properties such as mean pressure, standard deviation of pressure fluctuation and power spectrum distribution. Defluidization state and granulation mechanism were also studied by the various analysis.

It was found that the conversion efficiency in the elutriated stream was increased by the coalescence of fine coal particles. Defluidization and pressure fluctuation properties were interrelated and this result was indication of the capabilities of pressure fluctuation properties analysis in the diagnostics of fluidizing state.

#### 1. 서 론

에너지의 수요가 증가되고 석유의 한정적인 공급으로 에너지원의 획득 연구와 노력을 기울이고 있다. 이와 같은 상태에서 환경오염의 증가로 지구 온난화에 따른 화석연료의 사용을 자제하고 있다. 그러나 태양, 풍력, 지열, 조력에너지 등의 환경에너지라 할 수 있는 청정에너지는 사용할 수 있는 기술개발이 요원한 상태이다. 따라서 청정에너지

사용기술이 개발되기까지 석유의 대체 에너지로써 석탄의 수요가 증가하고 있는 상태이다. 석탄을 연소하여 에너지를 얻을 때 문제가 되는 것으로는 분진 발생과 NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 발생을 들 수 있다. 그러나 유동화 연소법을 사용할 때는 연소로 내의 균일한 온도분포와 낮은 조업온도로 인하여 NO<sub>x</sub> 발생량이 다른 연소로에 비하여 매우 낮고, 흡착제의 층내 투입으로 SO<sub>x</sub>도 직접적으로 제어할 수 있다. 따라서 현재는 다른 연소법에 비하여 많이

\* 한서대학교 화학공학과

사용되고 있는 실정이다. 유동화 연소법은 연료성상에 제약이 적고 혼합이 우수하므로 폐기물의 연소에도 많이 응용되고 있다. 유동층연소로 조업에 있어서도 다른 연소법과 마찬가지로 연소가스와 함께 다량 분출되는 미분 제어에 관심이 모아지고 있으며, 유동층연소로에서는 미분의 비산유출로 인하여 연소효율이 감소된다. 그러므로 미분의 비산유출을 억제하는 것은 석탄의 이용효율을 높이고 환경오염을 억제할 수 있다. 따라서 미분을 층내에서 집괴입상화하여 연소효율을 증진시키고 미분의 비산유출을 억제하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 미분의 집괴입상화에 의한 연소효율 증진 및 미분유출제어 조업을 수행할 때 바인더물질의 과다주입이나, 층내의 활발한 집괴입상화에 의하여 층내물질 중의 유동화물질까지 입상화되어 비유동화가 발생된다<sup>1-3)</sup>. 따라서 유동층내의 유동화상태를 관측할 수 있는 방법의 연구가 이루어져야만 이 안전한 유동층연소로의 조업을 이룰 수 있게 된다<sup>4,5)</sup>.

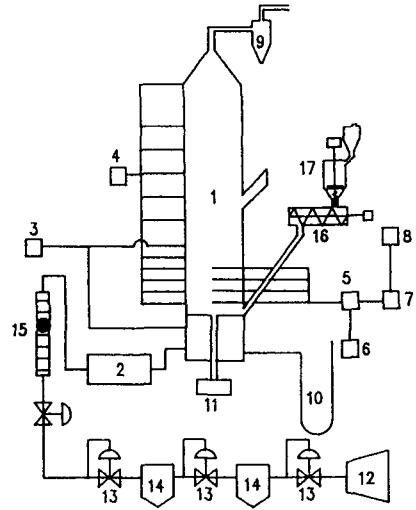
따라서 본 연구에서는 Nail을 결합핵으로 사용하여 미세입자를 성장시키므로써 미세입자의 체류 시간을 연장시켜 연소효율을 증진시키고 여러 분석을 이용하여 유동층에서 NaCl에 의한 집괴입상화가 어떤 기구에 의하여 이루어지는가를 고찰하였으며, 압력요동신호를 이용하여 유동층연소로에서의 비유동화현상을 관측할 수 있는 방법을 제시하고 비유동화현상이 일어나기 직전의 상태를 관측하므로써 안전한 유동층연소로의 조업을 이루고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 유동층연소로는 내경 0.109m의 stainless steel로 제작되어져 있으며 높이는 1.8m이다. 공기분산판은 내경 0.7mm의 다공형분산판이고 nozzle의 개수는 324개이며 개공비가 1.75%이다. 압력요동신호를 측정하기 위하여 분산판으로부터 2.5cm 간격으로 측정관을 설치하여 층내의 압력요동신호를 측정하였고, 같은 위치에서 층내의 온도를 측정하였다.

유동층의 가열은 5.5kW의 Kantal을 층외부에 감아서 사용하였고, 유동층의 연소열을 제어하기



- |                             |                          |
|-----------------------------|--------------------------|
| 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. Flow meter           |
| 7. Amplifier                | 16. Screw feeder         |
| 8. Personal computer        | 17. Hopper               |
| 9. Cyclone                  |                          |

Fig. 1 Experimental facilities and data processing system

위하여 층 외부에는 구리관을 감아서 층내의 온도를 일정하게 유지하였다.

유동층에 공기의 공급은 공기압축기를 사용하였고, 공기압축기와 정화기를 거친 후 공기에열기를 이용하여 300°C로 가열하였으며, 유량계를 사용하여 일정하게 공급하였다. 석탄시료의 주입은 screw feeder를 설치하였으며, 공기의 역류를 방지하기 위하여 2단 hopper를 설치하였다. 배출부는 배출시료의 양을 조절하기 위하여 vibrating discharger를 사용하였다. 또한 층 상부로 유출되는 입자를 포집하기 위해 사이크론을 설치하여 비발동반된 입자를 채취하였다.

측정부는 유동층으로부터 전달되는 압력요동신호를 측정할 압력전달기(Valcoom Co. LTD. Model VTRN)와 압력전달기로부터 전기신호를 증폭시켜주는 증폭기, 압력전달기를 시동시키는 직류전원공급기 및 전기신호를 digitalization시켜 주는 12bit A/D Converter, 그리고, 신호를 기록하는 Computer 부분으로 구성되어 있다. 압력요동신

호의 측정은 10ms당 한 개의 전기신호를 받아서 이를 1024개를 한 set로 16set를 평균하여 사용하였다. 압력전달기는 분산판으로부터 2.5cm 간격으로 4개를 설치하여 사용하였다. 또한 압력전달기로 미세입자의 유입을 막기 위하여 probe 끝을 표준망체(200 mesh)와 석면올로 봉하였다. 또한 층하부에서 상부까지의 전 영역에 K-Type의 열전대를 설치하여 온도를 측정하였다.

### 2.2 실험방법

유동화공기는 300°C로 예열된 상태에서 plenum을 거쳐 분산판을 통해 일정한 유속으로 유동층에 공급한다. 0.715mm 크기의 회분을 초기유동화물질로 종횡비가 1.0이 되도록 충전한 후 800°C까지 유동층을 가열한다. 유동층전체의 온도가 일정하여 지면 유동층부에 전원을 중단하고 석탄시료를 주입하기 시작한다. 주입과 동시에 배출부를 통하여 시료를 배출시키며 종횡비가 1이 유지되도록 일정한 양의 시료를 층내의 압력과 주입량 등을 기초자료로 계산하여 배출한다. 또한 층내 온도가 900°C에 도달되면 10분 간격으로 유출입자를 채취하고 유출된 시료를 입도분석 및 연소전환율을 열 분석하여 구한다.

유동층연소로가 정상상태에 도달한 후인 조업 개시 후 200분 후부터 순도 99%의 NaCl을 주입하기 시작한다. NaCl의 무게분율을 바꾸어가며 NaCl의 주입량에 따른 집괴입상화의 차이를 실험하였다. 주입시료와 NaCl의 혼합은 V-mixer를 사용하였다. 각각의 혼합비에 따라 일정한 양의 석탄과 NaCl를 V-Mixer에 주입한 후 가장 혼합이 우수한 30rpm에서 30분간 혼합하였다. 또한 조업 시간은 주입된 NaCl이 완전 교체되는 200분간 행하였다. 본 실험의 조업조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Experimental Variables	Conditions
Superficial gas velocity(m/sec)	0.204
Bed Temperature(°C)	900
Aspect ratio(L/D)	1.0
Operating time(min)	400
Solid feeding rate(g/min)	30
NaCl Concentration(wt. %)	0~7

### 2.3 시 료

본 실험에 사용된 석탄시료는 문경산 무연탄으로 발열량은 3240kcal/kg이고 회분에는 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등이 포함되어 있으며 석탄 및 회분의 분석은 Table 2, 3에 나타내었다. 본 시료 석탄은 jaw crusher로 2번 파쇄한 후 표준망체로 16mesh 이하의 것을 얻었으며, 0.11mm이하의 미세입자는 무게비로 42%에 해당되며 시료의 크기가 작을수록 고정탄소의 분율이 높으며 0.11mm이하의 미세입자 고정탄소분율은 약 51%에 해당하는 시료특성을 가지고 있다. Fig. 2에 사용된 석탄 시료의 입도분포를 나타내고 있다.

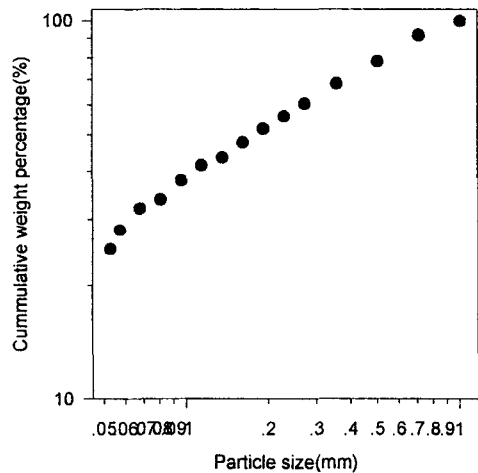


Fig. 2 Cumulative size distribution of feeding coals

Table 2 Chemical analysis of anthracite coal ash. (wt. %)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	etc.
60.65	22.07	11.64	1.05	4.59

Table 3 Proximate analysis of anthracite coal(wt. %)

Heating value(kcal/kg)	Moisture	Ash	Volatile Matter	Fixed Carbon
3240	2.98	52.08	5.51	39.43

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세입자의 집괴입상화

#### 3.1.1 미세입자의 집괴 mechanism

일반적으로 granulation mechanism은 시료에 따라 layering mechanism model과 agglomeration model로 나누어질 수 있다. 각 model을 살펴보면 다음과 같다<sup>6~11)</sup>.

(1) layering mechanism model

입자가 binding 용액에 의해 coating되고 입자가 건조되기 전에 다른 입자와 충돌하여 용액 속에 녹아있는 시료가 점점 층을 이루며 성장하는 모델이다. Urea, sodium nitrate, potassium carbonate 등은 이 모델에 의하여 성장한다. 이때의 성장속도는 0.01~0.05mm/hr 정도이다.

(2) agglomeration model

집괴현상은 다음과 같은 세과정을 거치며 일어나고 성장속도는 보통 0.1~0.5mm/hr이다.

① 핵생성과정 : binding 액체의 표면장력에 의해 입자들이 끌어당겨져 granule을 생성한다.

② 성장과 치밀과정 : 입자가 충분히 젖으면 입자간에 결합이 생기고 좀 더 큰 입자가 생성되고 진동현상에 의하여 구형이 된다.

③ 건조과정 : 증발, 결빙, 화학반응 등에 의해 액상이 제거되고 표면장력이 다른 힘으로 대치되어 granule된 입자가 다시 떨어진다.

3.1.2 미세입자의 집괴에 의한 입상화

Cape 등<sup>7)</sup>은 공극률과 고체와 액체의 밀도를 연관하여 집괴시키는데 필요한 결합액의 무게비를 다음과 같이 구해냈다.

$$W = \frac{\epsilon \rho_L}{\epsilon \rho_L + (1 - \epsilon) \rho_S} \dots\dots\dots (1)$$

위 식(1)에 의한 특정 값에서 집괴되는 것이 아니고 넓은 범위에서 집괴가 일어나며 식(1)에서 구한 결합액의 무게비는 최적 값을 나타낸다. 또한 점도, 표면 장력, 젖은 특성과 같은 결합액의 특성과 입자크기 모양 등과 같은 고체의 특성 등이 식(1)에 고려되어야 하지만 식(1)은 집괴시키는데 필요한 결합액 한계를 예측함에 있어 유용하게 된다.

Harada 등<sup>6)</sup>은 염의 종류에 따른 characteristics molar volume,  $V_o$ ,  $T_o$ 를 녹는점과 표준상태에서 molar volume을 연결하여 구해냈다. 그리고 표면 장력과 포화곡선에 따른 등온압축성과의 관계가 다음식으로 나타나짐을 알아냈다.

$$\frac{\sigma (V_o/N_A)^{2/3}}{kT_o} = \bar{\sigma} \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{\sigma} = 3.52 - 1.55\bar{T} \dots\dots\dots (3)$$

$$\bar{T} = T/T_o \dots\dots\dots (4)$$

위 식으로 표면장력 값이 계산되어진다. 또 Cape와 Dankwert<sup>8)</sup>는 입상공간도에 결합액이 포화상태를 이룰 때 입자크기와 표면장력의 관계가 4600dyne/cm<sup>2</sup> 이상이면 집괴-입상화될 수 있다고 보고하였다. 이 관계를 이용하여 유동층내의 특정한 입자군의 집괴-입상화되는 범위를 추론할 수 있다. Table 4에 결합액으로 사용할 수 있는 다양한 염의 표면장력과 입상공간을 채우는데 필요한 결합액의 무게비, 집괴-입상화할 수 있는 입자군의 지름을 나타낸다. 따라서 본 실험에서는 NaCl이 상온에서 다루기 쉽고 경제적이며 연소로의 조업은도인 900℃에서 액상화되므로 염은 NaCl을 선택하였다.

Table 4 The particle size that can be captured by salts

Salt	$T_o$ , K	$V_o$ , cm <sup>3</sup> /mol	$\sigma$ , dyne/cm <sup>2</sup>	d, mm	W, %
LiF	1246	14.60	422.3	0.92	44.8
LiCl	987	28.83	173.2	0.38	42.3
LiBr	962	35.15	143.8	0.31	55.1
NaF	1168	20.74	299.9	0.65	49.7
NaCl	1048	37.09	165.2	0.36	43.4
NaBr	994	43.18	134.3	0.29	53.2
NaI	933	54.05	100.8	0.22	56.5
KF	1084	29.71	205.7	0.45	46.8
KCl	1049	48.91	137.4	0.30	41.3
KBr	969	54.89	108.3	0.23	49.4
KI	909	66.19	83.1	0.18	52.6
RbCl	963	52.98	109.5	0.24	49.4
RbBr	911	72.81	112.7	0.25	54.3
CsCl	919	59.85	91.1	0.20	58.6
CsBr	897	67.11	79.6	0.17	61.1
CsI	928	82.02	75.9	0.16	61.5

3.2 비유동화(Defluidization)

유동층연소로에 주입되는 염의 함량이 높아지면 염이 용융되어 석탄표면에 융착되고 고체입자들은 높은 점착성(stickness)을 갖게 된다. 이와 같은 과정에 의하여 생성된 입자를 Fig. 3에 나타내었다. 왼쪽에 나타낸 그림은 주입된 석탄입자이고 오른쪽에 나타낸 것은 집괴-입상화된 입자를 나타낸다. 따라서 순간적으로 미세입자들이 염에 의한 집괴 속도가 빨라지고 이를 제어하지 않을 경우 연소의 급격한 증가로 회분 내에 포함된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 등이

서로 반응하여 집괴현상이 급격하게 일어난다. 이와 같이 급격하게 집괴된 물질이 유동층연소로 전체를 막으므로 인하여 유동층의 조업이 어려워지는 현상을 비유동화라 한다. 염에 의한 집괴 입상화에서 집괴-입상화기구(granulation mechanism)는 앞에서 고찰한 바와 같이 layering mechanism model과 agglomeration model로 나눌 수 있으나 유동층에서 NaCl을 이용한 석탄의 집괴입상화는 어느 model에 속하는지가 아직 고찰되어지지 않고 있다.

따라서 본 실험에서는 집괴-입상화된 입자를 지름방향으로 절단하여 SEM분석하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 수많은 입자가 집괴되어 있음을 나타내고 있다. 또한 내부에는 미연소된 입자가 남아있고 외부는 연소된 회분 입자로 구성되어져 있음을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 5, 6에 위치에 따른 입자의 EDAX분석을 나타내었다. 연소된 회분으로 이루어진 외부층에서는 Fe가 없어진 것을 알 수 있다. 이는 첨가된 NaCl 중에 Cl이 Fe와 결합하여  $FeCl_3$ 가 되며  $FeCl_3$ 의 끓는점이  $315^{\circ}C$ 이므로 건조과정 중에 층외부로 유출된 것으로 보여진다. 따라서 유동층에서 일어나는 집괴-입상화는 미연소 석탄입자를 핵으로 하여 성장과 치밀과정을 거친 후 건조과정이 일어나는 agglomeration인 것으로 추론할 수 있다.

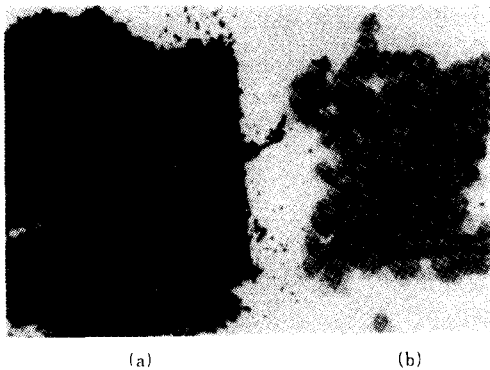


Fig. 3 Comparison of granule by agglomeration and natural ash. (a) Multi-sized ash (b) Granule by agglomeration

### 3.3 압력요동특성치를 이용한 비유동화 해석

물리적 현상에 의한 random data(압력요동 data)

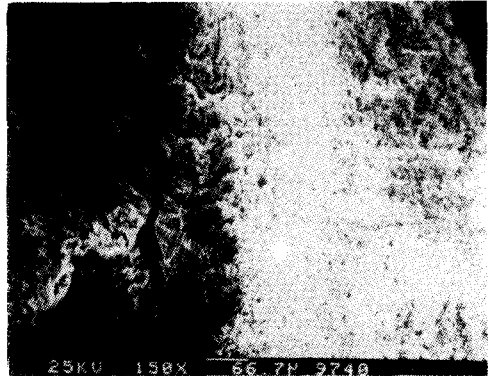


Fig. 4 SEM of coal granule along the radial direction

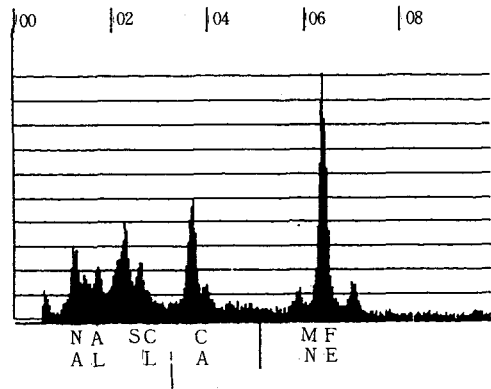


Fig. 5 EDXA analysis of coal granule of inner region

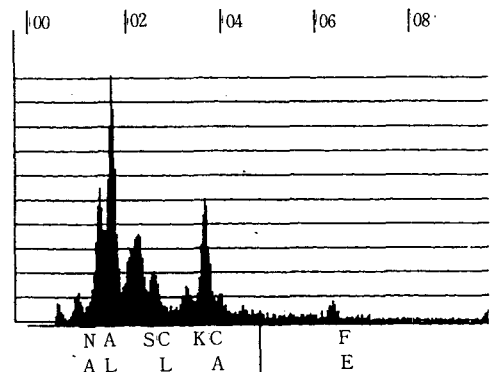


Fig. 6 EDXA analysis of coal granule of outer region

는 정적성분(time invariant)과 동적성분(fluctuating properties)으로 구성되어 있다. 유동층에서 압력요동 data의 정적성분 즉 평균치는 층내의 입자에 의한 평균압력을 나타내며 식(5)와

같이 정의한다. 동적성분은 variance의 positive square root인 표준편차로 기초적인 data의 intensity를 의미하며 식(6)과 같이 표현된다.

$$\mu_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X(t) dt \dots\dots\dots (5)$$

$$S.D = \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T (X(t) - \mu_x)^2 dt \right]^{0.5} \dots\dots\dots (6)$$

식(6)에서 구한 표준편차는 유동층 내에서 관측 시간, T 동안에 압력요동에 의하여 발생된 전체에 너지의 합을 의미한다.

Power spectral density function은 random data의 시간 영역함수를 빈도수 영역으로 변환시킨 함수이며 auto-correlation function의 Fourier transform 한 것으로 다음의 식(7)과 같다.

$$G_x = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \dots\dots\dots (7)$$

Power spectral density function은 주어진 조건에서 각 frequency의 에너지 분포를 나타내며 표준편차와는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$[S.D]^2 = \int_0^{\infty} G_x(f) df - \mu_x^2 \dots\dots\dots (8)$$

따라서 표준편차는 유동층내에서 생성된 전체에 너지의 합으로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 유동층에서의 압력요동 data의 Power spectral density function에서 최대 값을 가지는 frequency를 주진동수(dominant frequency)라 하며 압력요동을 야기시키는 주요인의 진동수가 된다. 압력요동의 통계학적 해석방법에 관한 상세한 수학적 배경과 물리학적 의미는 Bendat와 Piersol<sup>12)</sup> 그리고 Cooper와 McGillem<sup>13)</sup>에 나타나 있다.

따라서 이러한 특성을 이용하여 유동층에서 일어나는 비유동화 현상을 관측하고자 하였다. Fig. 7은 시간에 따른 평균압력을 나타낸 그림으로써 유동층의 분산판으로부터 높이에 따라 나타낸 그림이다. 유동층에서의 평균압력은 분산판으로부터 측정지점까지의 입자의 양을 나타낸다. 따라서 층하부에서 상부로 이동함에 따라 감소하고 있다. 또한 비유동화가 시작된 지점에서 급격한 압력감소가 나타나는데 이는 유동화 입자가 집과-입상화가 급격하게 일어나게 돼 큰 입자 덩어리로 생성되므로 층내에서 유동화공기에 의하여 부력을 받아 유동화 되던 상태에서 나타났던 압력강하가 사라지게 되므로 평균압력이 감소하게 된다. 그러므로 압력의 급격한 변화로부터 비유동화 현상을 관측

할 수 있다.

또한 압력요동의 표준편차로부터 비유동화 현상을 관측할 수 있는 방법을 찾기 위하여 시간에 따른 압력요동의 표준편차를 분산판으로부터 높이에 따라 측정하여 나타냈다. 압력요동의 표준편차가 분산판으로부터 0.05m지점이 가장 크게 나타나고 있는데 이는 석탄의 연소와 유동화 특성에 따른 영향으로 나타나는 현상으로 다음과 같은 요인으로 발생한다. 본 실험에서의 석탄의 주입은 층하부의 분산판 위치에서 하였으므로 석탄이 주입과 동시에 탈휘발과정과 착화되고 또한 착화된 석탄은 gas film을 가진 채로 상부로 이동하는 과정이 이 지점에서 나타나게 되므로 압력요동의 표준편차가 크게 나타난다. 또한 분산판으로부터 0.05m 지점은 본 실험에서 총횡비가 1이 되도록 실험을 수행 하였으므로 층 중앙은 유동층 기포의 합체가 가장 활발한 영역이기도 하다. 타 연구에서도 나타난 바와 같이 기포의 합체가 가장 활발한 영역에서 가장 큰 압력요동의 표준편차값을 나타내게 된다. 또한 층상부 지역이 입자의 양이 적고 연소가 일어나는 영역이므로 작은 값을 나타내고 있다. 압력요동의 표준편차 역시 비유동화와 함께 급격한 감소를 나타내고 있다.

Power spectrum distribution은 유동층의 거동을 해석할 수 있는 기초적인 정보를 제공하여 주는 기초적인 방법으로 알려져 있는데 power spectrum distribution은 압력요동의 크기와 진동수에 따른 에너지 분포로 나타낸다<sup>14)</sup>. Power spectrum distribution이 좁은 폭을 나타내면 유동층 내부가 매우 주기적인 요소를 가지고 있는 것에 해당된다. 또한 power spectrum distribution이 넓은 폭을 나타내는 것은 기포의 거동이 매우 복잡함을 나타낸다. Fig. 9에서 살펴보면 정상적인 조업이 이루어지고 있을 때는 매우 주기적인 요소를 가지고 4와 6Hz부근에서 나타나고 있다. 반면에 비유동화가 일어나게 되면 거의 주기적인 요소가 나타나지 않고 있으며 power spectrum distribution이 존재하지 않게 된다. 또한 그림에서와 같이 비유동화가 시작되기 전 작은 양의 agglomeration이 일어날 때는 주기가 2Hz 부근에서 일어나게 되므로 비유동화가 일어나기 전 단계를 power spectrum distribution으로 알 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 압력요동의 표준편차와 평균압력 power spectrum distribution을 이용

하여 층내의 안정적인 조업과 비유동화 현상을 관측할 수 있으며 power spectrum distribution을 이용하여 비유동화가 일어나기 전 단계를 예측할 수 있으므로 층내의 온도, 유속 등의 유동층 조업변수를 조절하여 안정적인 유동층조업을 이룰 수 있고 유동층의 내부를 on-line으로 관측할 수 있는 방법을 제시할 수 있었다.

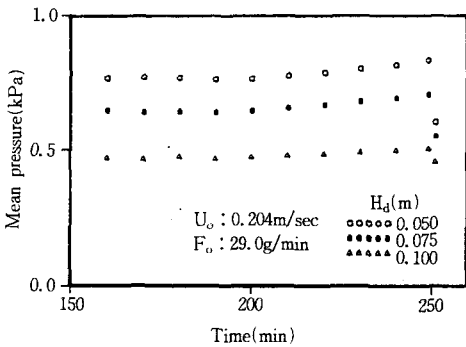


Fig. 7 Mean pressure for the bed height with operating time (NaCl content : 5%)

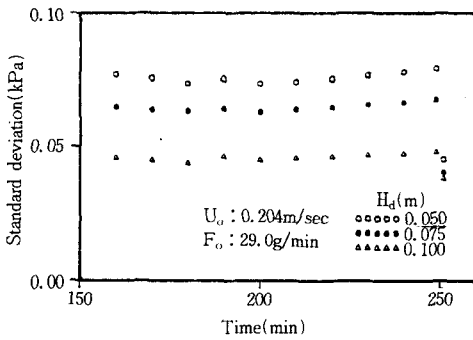
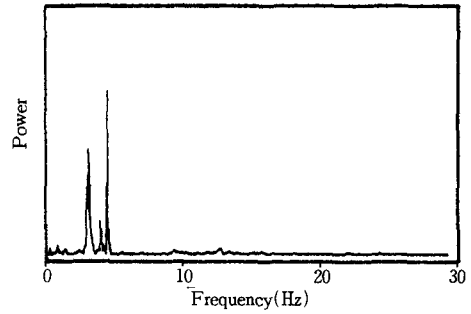


Fig. 8 Standard deviation of pressure fluctuation for the bed height with operating time (NaCl content : 5%)

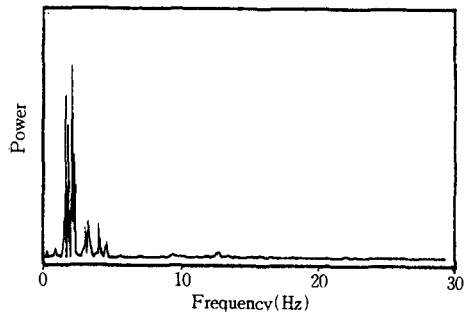
#### 4. 결 론

이상의 agglomeration을 이용한 유동층에서의 미세입자의 비산유출의 억제와 분진발생의 저감을 위한 연구 및 층내의 비유동화현상의 관측을 위한 연구 결과는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

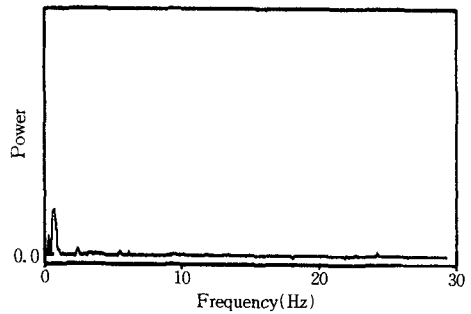
- 1) NaCl을 석탄에 혼합하여 미세입자의 granule을 형성하여 입자크기를 성장시키므로써 석탄유동층연소에서 분진발생 억제를 이룰 수 있었



(A) Normal fluidization state



(B) State of small agglomerates formation



(C) Defluidization state

Fig. 9 Patterns of power spectrum distribution during granulation process

으며, NaCl을 이용한 석탄의 granule형성은 미연소 탄소를 핵으로 하는 agglomeration model에 적용됨을 알 수 있었다.

- 2) 압력요동특성치를 이용하여 유동층에서 발생하는 비유동 현상을 관측할 수 있었으며 압력요동의 특성치 중의 평균압력, 압력요동의 표준편차 및 power spectrum distribution으로 알 수 있었다.

사 용 부 호

$f$	: frequency	[Hz]
$G_x(f)$	: power spectral density function	[-]
$k$	: constant	[-]
$N_a$	: Avogadro number	
$R_x(\tau)$	: auto correlation function	[-]
S.D.	: standard deviation of pressure fluctuation properties	[kPa]
$T$	: observation time	[sec]
$T_o$	: characteristic temperature	[K]
$\bar{T}$	: reduced temperature	[-]
$V_o$	: characteristic molar volume	[m <sup>3</sup> ]
$W$	: weight fraction in an agglomerate	
$X(t)$	: simple time history at time $t$	
$\epsilon$	: void fraction in an agglomerate	
$\sigma$	: surface tension	[N/m]
$\mu_x$	: mean pressure	[kPa]
$\rho$	: density of binding liquid	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	: space time	[sec]

참 고 문 헌

- 1) Kapur, P.C. and Fuerstenau, D.W., Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., Vol. 8, p. 56, 1969.
- 2) Hiram, T., et al., Int. Chem. Eng., Vol. 24, No. 3, p. 502, 1984.
- 3) Choi, J.H., Son, J.E. and Kim, S.D., J. of Chem. Eng. of Japan, Vol. 22, No. 6, p.

- 597, 1989.
- 4) 장현태, 홍성창, 도동섭, 화학공학, Vol. 33, No. 3, p. 353, 1996.
- 5) 장현태, 차왕석, 도동섭, 화학공학, Vol. 34, No. 1, p. 64, 1996.
- 6) Harada, M., Tanigaki, M. and Tada, Y., Ind. Eng. Chem. Fundam., Vol. 22, p. 116, 1983.
- 7) Capes, C.E., Germain, R.J. and Coleman, R.D., Ind. Eng. Chem. process Des. Dev., Vol. 16, p. 517, 1977.
- 8) Capes, C.E. and Dankwerts, P.V., Trans. Inst. Chem. Engrs., Vol. 43, p. t116, 1965.
- 9) Goldberger, W.M., ASME, 61-WA/FU-3, 1967.
- 10) Gluckman, M.J., Yerushalmi, J. and Squires, A.M., "Fluidization Technology" Ed. Keairns, D.L., Hemisphere Publishing Co., Washington, p. 395, 1976.
- 11) Squires, A.M., Lecturer notes, Denmark, September, 1979.
- 12) Bendart, J.S. and Piersol, A.G., "Random Data", John Wiley, New York, 1971.
- 13) Cooper, G.R. and McGillem, C.D., "Probabilistic Methods of Signals and System Analysis", Holt, Rinehart and Winston Inc., 1971.
- 14) Lirag, R.C. and Littmanv, H., AIChE Symp. ser., No. 67, p. 11, 1971.