

석탄유동층연소로에서 분진 발생 및 배출 특성

Elutriation and Production of Fines in a Fluidized Bed Coal Combustor

장 현 태*·이 종 일*
Hyun-Tae Jang · Jong-Il Lee

ABSTRACT

The effects of coal type and mixing fraction of coal on attrition and elutriation were studied in a 15.5cm diameter fluidized bed coal combustor. The domestic low-grade anthracite coal with heating value 2010kcal/kg and the imported bituminous coal from Australia with heating value of 6520kcal/kg were used as coal sample.

It was found from the experimental that the elutriation rate increased with an increseing anthracite mixing fraction. The size of elutriated particle had a very wide distribution was found in this experiment. The mean size of elutriated particle increased with decreaseing anthracite mixing fraction.

1. 서 론

현대산업사회의 원동력은 에너지 획득능력에 크게 의존한다. 따라서 에너지원의 다변화와 에너지 소비절약을 위한 연구개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 대체에너지원의 개발과 더불어 풍부한 매장량을 가지고 있는 석탄의 효율적 이용과 화석연료의 에너지 전환과정 중에 발생하는 유해물질의 발생억제도 중요한 연구과제이다. 또한 현재 화석연료의 대부분을 석유에 의존하고 있으므로 연료원의 다변화와 국내에서 생산되는 무연탄을 사용함으로써 에너지의 자급과 기간산업으로써의 광업의 보호 측면에서 석탄의 사용은 중요하다.

미세입자 함량이 높은 국내산 무연탄을 사용할 때 미세입자 발생과 배출에 의하여 작업장에 큰 오염을 야기시키므로 석탄 연소시 발생하는 미세입자 발생과 유출특성의 연구가 절실하다.

현재 석탄연소시 발생하는 공해물질 배출을 억제하며 연소 할 수 있는 유동층연소기술 개발에 많은 연구¹⁾가 이루어지고 있다. 유동층 연소로는 900℃ 부근에서 조업하므로 NO_x의 발생을 억제할 수 있으며, 백운석, 석회석 등의 흡착제를 연소로 내에 투입하여 석탄연소시 가장 문제가되는 SO_x의 배출을 억제할 수 있다는 장점이 있다. 또한 연소시 석탄 종류의 제약이 적기 때문에 저품위 고회분 무연탄의 연소에 적합하여 국내산 무연탄 및

* 고려대학교 생산기술연구소

탄광지역에 방치되어 지역사회 주민 안전에 위협이 되는 고회분 저품위 무연탄의 처리에 적합하다.

석탄의 이용이 현재 활발하지 못한 것은 발생되는 분진, 황산화물, 일산화탄소, 질소산화물 등의 오염물질 발생때문이다. 따라서 이러한 유동층연소에 관한 연구가 활발히 이루어지는 가운데 석탄연소시 발생하는 미세분진의 유출에 관한 연구²⁾도 현재 이루어지고 있다.

연소시 발생하는 미세분진의 포집을 위하여 cyclone과 bag filter를 설치하여 운전하고 있으며, cyclone과 bag filter의 집진효율에 관한 연구⁵⁾도 이루어지고 있다. 이러한 연구와 함께 병행되어야 할 것은 미세분진의 생성 및 배출 특성이다^{2~4)}. 연소로 내에서의 마모입자는 입자와 입자간의 마찰, 입자와 기벽간의 마찰, 입자와 screen간의 마찰, 입자와 유동화공기간의 마찰, 연소에 의한 균열 등으로 생성된다. Pis 등⁵⁾은 유동층에서 발생하는 마찰 현상을 단순하게 입자의 충돌에 의한 분쇄로 설명하였다. Abrasion은 최초의 입자가 작은

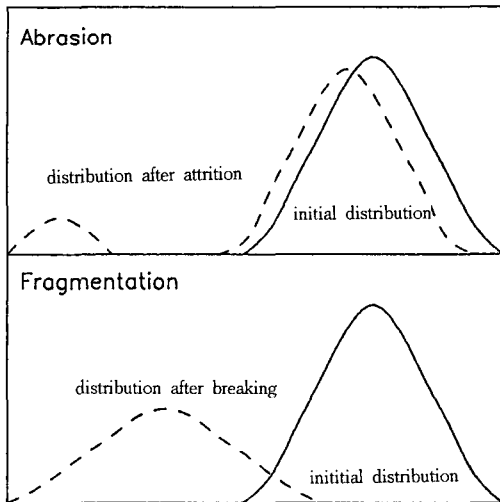


Fig. 1 Attrition mechanism

입자를 생성하고 초기입자는 최초크기보다 약간 작은 상태로 남아 있는 상태이며, fragmentation은 최초의 입자가 여러개의 입자로 마모되는 것으로 분류하여 설명하였으며, Fig. 1⁵⁾에 그림으로 나타내었다.

따라서 본 연구에서는 국내산 저품위 무연탄과

수입유연탄의 마모특성과 미세분진의 유출특성을 석탄입자 크기, 유, 무연탄의 혼합비, 유동층연소로 체류시간 등에 대하여 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용한 실험장치는 Fig. 2와 같으며 유동층은 크게 유동층부, 시료주입 및 배출부, 측정부로 나눌 수 있다. 유동층 본체는 내경 0.155m, 높이 2.3m인 실린더형 stainless steel관으로 제작하였으며 층상부는 미세입자의 체류시간을 증진하기 내경 0.21m로 확장된 형태를 사용하였다. 분산판은 개공비 1.53%의 다공형분산판을 사용하였다. 석탄의 연소로내의 주입은 가스분산판으로부터 0.05m인 층상부 지점에서 하였으며, 연소로 하부에서 연소로 생성된 회분을 배출하였다. 배출가스중에 함유되어 비산유출되는 입자를 포집하기 위하여 층상부에 2개의 cyclone을 설치하였으며, cyclone을 통과한 후의 마모입자중 미세입자의 유출을 관찰하기 위하여 단일관형태의 열교환기를 설치하고 침강기를 설치하여 미세입자의 유출여부를 관찰하였고, 유출입자의 관내 충적을 막기 위하여 열교환기 전까지는 ceramic wool로 단열하였다.

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

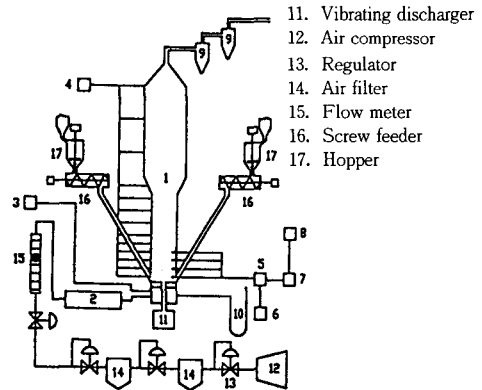


Fig. 2 Experimental facilities and data processing system at high temperature

유동층의 각 지점에 chromel-alumel type의 열전대를 설치하여 층내의 온도를 측정하였으며, 유동층 외부와 층내에 설치된 6개의 냉각관의 냉각수량을 조절하여 층내 온도를 일정하게 유지하였다.

2.2 실험방법

공기압축기로부터 공급된 공기는 정압기와 제습기를 거친후, 유량계과 니들밸브를 이용하여 일정하게 유지하고 유동층에 설치된 열선을 이용하여 석탄의 착화점 이상인 800°C까지 가열한 후 석탄을 투입하기 시작하여 층내가 정상상태에 도달하면 층 하부와 cyclone에서의 유출량을 각각 포집하여 측정한다. 이렇게 포집된 각각의 유출물을 입도분석, 연소효율을 측정하여 투입 회분기준의 마모율을 측정하게 된다. 투입회분 기준의 각 입자 크기별 회분양은 다음과 같은 식 (1), (2), (3), (4)으로 측정하였다.

$$W_{ae,i} = W_{e,i} - W_{ce,i} \dots\dots\dots (1)$$

$$W_{ad,i} = W_{d,i} - W_{cd,i} \dots\dots\dots (2)$$

$$W_{a,i} = W_{ae,i} + W_{ad,i} \dots\dots\dots (3)$$

$$f_i = \frac{W_{a,i}}{\sum W_{a,i}} \dots\dots\dots (4)$$

또한 마모율에 관하여는 P_{is} 등⁵⁾이 아래와 같은 식을 제안하였다.

$$R = - \frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \dots\dots\dots (5)$$

전체 마모율 A는

$$\begin{aligned} A &= 100 \int_0^t R dt \\ &= 100 \int_M^{M_0} \left(\frac{1}{M} \right) dM \\ &= 100 \ln \left(\frac{M_0}{M} \right) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

따라서 위식에서의 마모율은 시간의 함수이며, 따라서 유동층내의 석탄, 모래, 석회석의 체류시간에 따라 변한다 하였다^{6,7,9)}.

Table 1 Experimental conditions

air velocity (m/sec)	initial inbed particle(mm)	bed temperature (°C)	aspect ratio (L/D)	anthracite fraction	excess air (%)
0.306	0.715 multi-sized	900	1	0.0~1.0	20

Table 2 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 dry 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 3 Particle size distribution of coals

d _{pi}	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
\bar{d}_p (mm)	0.342	0.586

또한 본 실험의 조업조건은 Table 1에 나타내었으며, 시료의 물리적, 화학적 특성치는 Table 2에 나타내었고, 다입자경 무연탄과 유연탄의 입자분포는 Table 3에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 균일입자계 석탄의 마모 및 배출

유동층연소로의 미세입자 배출현상은 층하부로 공급되는 유동화 유체에 의하여 유동층의 유동화 물질중에 유동화공기의 선속도 이하의 종말속도를 가지는 입자가 유동화공기와 함께 층 상부로 유출되는 현상이며, 유동층 석탄연소로에서는 유출이 초기 투입되는 석탄입자 크기가 작은 경우나 연소 중 입자의 마모로 인하여 발생하는 미세입자에 인하여 발생된다.

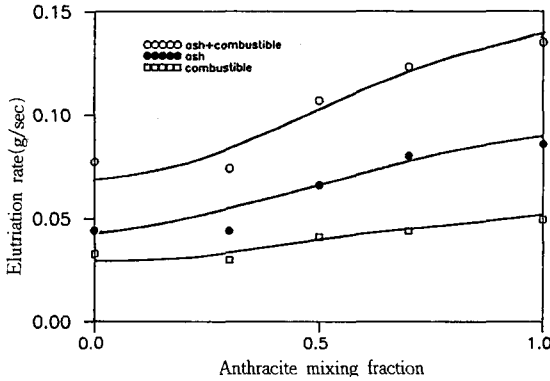


Fig. 3 Elutriation rate with anthracite mixing fraction

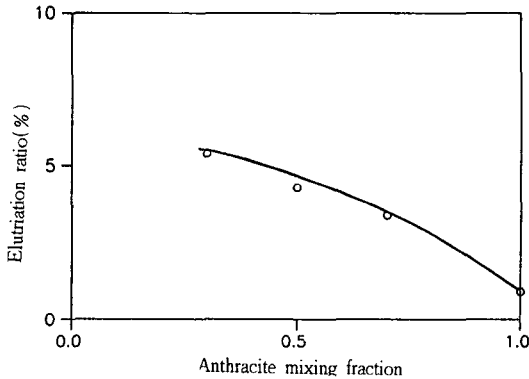


Fig. 4 Elutriation ratio with anthracite mixing fraction

Table 4 The effect of anthracite mixing ration and mean residence time on extent of attrition

Anthracite mixing ratio	0.3	0.5	0.7	1.0
Mean residence time(min)	250	128	81	41
Extent of attrition	9.48	7.20	5.36	2.53

Table 5 The effect of coal size on elutriation rate

Elutriation rate(g/sec)	size(mm)		
	0.359	0.715	1.300
Anthracite	0.139	0.135	0.079
Bituminos	0.139	0.077	0.032

배출특성중 마모에 의하여 미세입자의 발생특성을 고찰하기 위하여 균일입자계 유연탄과 무연탄을 대상으로 유출율을 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 입경 0.715mm의 균일입자계 석탄을 유동층에 주입하여 연소할 때 석탄입자가 연소, 입자와 기벽간의 마찰, 입자와 입자간의 마찰현상에 의하여 미세입자가 생성되고 미세입자가 층상부로 유출된다. Fig. 3은 무연탄과 유연탄의 혼합비에 따른 유출율을 나타내었고 유출된 입자의 가연성분을 무게분석으로 구하여 가연성분의 유출율과 회분유출율로 각각 나타내었다. 그림에서 무연탄의 혼합비가 증가함에 따라 유출율은 증가하고 있으며 회분과 가연성분의 유출율도 증가하고 있음을 나타내고 있다. 본 실험에서 투입석탄입자의 크기가 0.715mm의 유연탄과 무연탄의 연소특성의 차이로써 나타나는 현상으로 유연탄의 경우는 수축핵 모델로 연소되므로 연소시 회분이 대부분 미세입자로 생성되게 된다. 반면에 무연탄의 경우는 미반응핵모델로 연소되므로 미세입자의 생성이 작다. 그러나 그림에서는 무연탄의 혼합비 증가에 따라 유출율이 증가하는 것은 무연탄의 경우 회분함유율이 64.7%이므로 회분함유율이 8.4%인 유연탄보다 발생하는 회분양이 절대적으로 크기 때문에 나타나는 현상이다. 유연탄의 경우 발생된 회분중에 유동화공기와 함께 유출되는 비율이 68.7%로써 대부분이 유출되고 있고, 무연탄의 경우는 유출비가 0.915%로 전체 회분중에 유동화공기와 함께 층상부로 유출되는 비율이 작게 나타나고 있다.

이러한 경향은 전체 투입되는 회분에 대한 유출되는 회분의 비를 나타낸 Fig. 4에서도 알 수 있다. Fig. 3과 Fig. 4의 비교로써 유출되는 절대량은 무연탄의 혼합비의 증가에 따라 증가하나 유출입자의 비율은 감소하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Table 4의 마모율을 나타낸 표에 잘 나타나 있다. Table 4에서 무연탄 혼합비가 증가함에 따라 유동층내 회분입자의 층내체류시간이 짧아지며 마모율이 작은 무연탄 혼합비가 증가하므로 전체 마모율이 감소하고 있다.

석탄의 경우 입자크기에 따라서 가연성분의 비가 다르므로 크기에 따른 마모율이 변화되고 유출율이 다르게 나타난다. 따라서 유연탄과 무연탄을 대상으로 입자크기에 따른 배출율을 Table 5에 나

타내었다. 석탄 입경이 커지면 회분비율이 증가하므로 경도가 강하여지고 연소에 의한 탄소분의 감소가 작으므로 회분입자의 입자치밀도가 크다. 따라서 마모율이 감소하게 된다. 이러한 영향으로 두 석탄이 크기의 증가와 함께 유출율이 감소하게 된다. 두 석탄의 연소모델 차이에 의한 마모현상의 변화가 크기차이에 의한 배출율의 변화로 나타나고 있다. 유연탄의 경우 석탄의 크기에 따른 마모율의 변화가 더욱 크므로 유출율의 변화가 크게 나타난다. 또한 유동층의 최소유동화속도의 비가 입경이 작아짐에 따라 증가하므로 층내의 이동성이 더욱 커지고 마모현상이 더욱 증가하여 나타나는 현상이다.

3.2 다입자계 석탄의 유출특성

앞 절에서는 균일 입자계의 석탄을 대상으로 마모율과 유출율을 측정하였으나 실제 유동층연소로는 다입자경으로 운전되고 있으므로 다입경 무연탄과 유연탄의 혼합연소시 유출율을 조사하였다. 다입자계 석탄연소시 유동화 속도이상의 종말속도를 가지는 입자는 유동층의 투입과 동시에 유출된다. 따라서 Table 3의 입도를 가지는 무연탄과 유연탄에 대하여 동일 공압속도와 동일 과잉공기비하에서 연소실험을 수행하고 이때 발생하는 분진의 양과 입도분포를 측정하였으며 유, 무연탄의 혼합비를 변화하면서 실험을 수행하여 Fig. 5, 6에 나타내었다.

Fig. 5의 무연탄의 혼합비에 따른 유출율에서도 Fig. 3과 같이 무연탄 혼합비의 증가에 따라 전체 유출율은 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. 반면 회분 유출율은 전체 유출율 증가비 보다 작게 증가함을 알 수 있다. 이는 무연탄의 혼합비가 증가함에 따라 가연성분의 유출이 증가하고 회분의 유출 증가는 작게 나타나고 있음을 의미한다. 유, 무연탄만의 연소시 가연성분 배출은 거의 없고 회분만이 유출되는 것으로 나타나 있다.

작업장에 배출되는 분진의 양과 더불어서 중요한 것은 분진의 입도분포이다. 입자크기가 큰 분진의 경우 침강속도가 빠르고 연소로에서 제거가 쉬우므로 작업장에서 큰 문제점을 발생시키지 않는다. 반면에 작은 입자들은 cyclone 등의 분진제어장치로는 제거가 용이하지 않다. 따라서 입도분

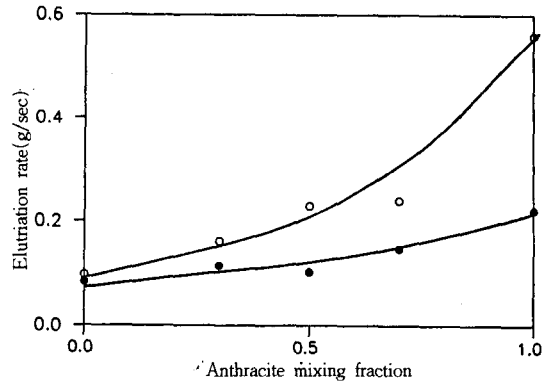


Fig. 5 Elutriation rate with anthracite mixing fraction (using multi size)

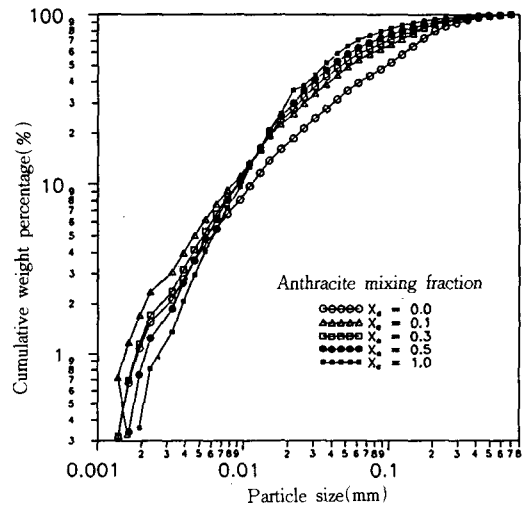


Fig. 6 Size distribution of discharged particles according to anthracite mixing ratio at constant excess air and gas velocity ($E_a=20\%$, 0.304m/sec)

포 자료가 있어야만 발생하는 분진을 제어할 수 있는 장치 선정과 설계변수 설정이 가능하다. 따라서 Fig. 6에 다입자계 유, 무연탄 혼합연소시 배출 분진의 입도분포를 나타내었다. Fig. 6에서 유, 무연탄의 혼합에 따라 배출분진의 평균입경은 유연탄의 경우가 가장크고 무연탄의 혼합비가 증가함에 따라 감소하고 있다. 또한 모든 경우에 0.01mm 이하의 미세입자의 배출 분율은 약 10%에 달한다. 이러한 입자는 cyclone으로는 제거가 어렵고 bag filter나 EP(Electric(dust) precipitator)로써 가능하다. 배출입자중 미세입자의 비율은 유연탄 주입을 증가와 함께 증가한다. 따라서 유, 무연탄 유

동층연소의 경우 투입회분에 대한 배출회분의 비는 수축핵모델로 연소되는 유연탄이 크게 나타나며, 회분의 절대량이 큰 무연탄이 유출양은 크게 나타나지만 회분투입에 대한 비율로는 작게 나타나며 배출물 중에 가연성분의 비율이 높게 나타난다. 또한 무연탄은 배출분진중 0.1~0.2mm 사이의 입자가 가장 큰 비율을 차지하며 유연탄은 0.02~0.06mm 사이의 입자가 큰 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

국내 무연탄과 수입유연탄 연소실험을 통하여 석탄연소시 발생되어 작업장의 환경과 작업자의 안전 및 연소시설 근방에 커다란 환경오염을 유발시키는 분진의 발생과 연소로로부터의 배출 특성을 본 실험을 통하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 석탄연소시 유연탄의 경우 대부분의 입자가 마모되고 배출분진중에 가연성분인 탄소분이나 휘발분이 거의 없는 회분상태로 배출되고, 무연탄의 경우 연소현상보다는 마찰에 의하여 분진이 발생하고 인화점이 높고 활성화 에너지가 크므로 분진 중에 대부분이 가연성분중의 탄소분으로 배출된다.
- 2) 다입자경 유, 무연탄 연소시 발생하는 분진량은 미세입자의 비율이 높은 무연탄의 증가와 함께 증가하나, 분진입도분포중 0.01mm에서 0.7mm 사이 분진은 무연탄의 비율에 따라 증가하며 그 이하의 분진량은 유연탄의 비율에 의존한다.
- 3) 유, 무연탄의 연소시 작업장내의 분진의 방제를 위하여는 무연탄혼합비가 높을 경우 cyclone에 의한 방제가 추가될 수 있고 유연탄의 연소시는 bag filter나 EP에 의한 제어가 필수적이다.

기 호 설 명

A	: extent of attrition	%
f_i	: weight fraction of ith particle size	
M	: mass of coarse particles in bed	g
M_0	: initial mass of coarse particle in bed	g
R	: attrition rate	sec^{-1}
t	: time	sec
$W_{a,i}$: weight of ith particle size in ash	

	basis	g
$W_{d,i}$: weight incompletely combusted discharged stream ith particle size	g
$W_{e,i}$: weight incompletely combusted elutriated stream ith particle size	g
$W_{ad,i}$: weight fraction of discharged ash ith particle size	
$W_{ae,i}$: weight fraction of elutriated ash ith particle size	
$W_{ce,i}$: weight unburned combustible elutriated stream ith particle size	g
$W_{cd,i}$: weight incompletely combusted discharged stream ith particle size	g

참 고 문 헌

- 1) T. Hirama, et al., Effect of the Size Distribution of Coal on Fluidized Bed Combustion, *Int. Chem. Eng.*, Vol. 24, No. 3, pp. 502~510, 1984.
- 2) J. H. Choi, J. E. Son, and S. D. Kim, Solid Entrainment in Fluidized Bed Combustors, *J. of Chem. Eng. of Japan*, Vol. 22, No. 6, pp. 597~606, 1989.
- 3) P. R. Trasl, and W. Licht, Effect of Recycle on Cyclone Performance, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, Vol. 23, pp. 479~482, 1984.
- 4) 박영성, 손재익, 유동층 연소로에서 국내 저열량 무연탄의 마모특성, *화학공학*, 제28권, 3호, pp. 320~326, 1990.
- 5) J. J. Pis, et al., Attrition of Coal Particles in a Fluidized Bed, *Powder Tech.*, Vol. 66, pp. 41~46, 1991.
- 6) U. Arena, et al., Evaluation of Attrition Rate Constants of Char Burning in Fluidized Beds by Means of laboratory-Scale Combustors, *AIChE J.*, Vol. 32, pp. 869~871, 1986.
- 7) P. A. Shanlou, Z. Liu, and J. G. Yates, Hydrodynamic Influences on Particle Breakage in Fluidized Bed, *AIChE J.*, Vol. 45, pp. 809~817, 1991.