미분탄 분리장치의 성능에 영향을 미치는 설계인자

이건명* • 하종광* • 안상택* • 이익형*

The effect of design parameters on the pulverized coal separator efficiency

Gun Myung Lee, Jong Kwang Ha, Sang Taek Ahn, Ik Hyung Lee

Key Words : Pulverizer(미분기), Guide vane(안내 깃), Fineness(미분도), Capacity(배출량), Static classifier(고정분리장치), Dynamic classifier(회전분리장치)

Abstract

Three-dimensional experimental analysis was conducted in the pulverizer simplified isothermal model. The experiment model was constructed on a 1/3.5 scale of 500MW pulverizer. The purpose of this study is to investigate the effect of design parameters on the pulverized coal separator efficiency. Where used pulverized coal separator design parameters are guide vane angle, static classifier angle, dynamic classifier rpm. Taguchi method was used to find the effective design parameters related to pulverized coal separator efficiency. The results of the experiment showed that guide vane angle and dynamic classifier rpm were the design key parameters. In addition to the total number of experiment cases were reduced by Taguchi method.

기호설명

ρ_a : 공기 밀도
ρ_p : 입자 밀도
Rea : 공기의 레이놀즈 수
Rep : 입자의 레이놀즈 수
μ : 공기의 점성계수

1. 서 론

미분탄을 요구하는 크기로 분리시키는 미분탄 분리장치는 미분기의 중요한 구성 요소 중 하나이다. 이러한 미분탄 분리장치의 성능 표현 방법은 크게 미분도(Fineness)와 배출량(Capacity)등으로 나타낼 수 있다. 특히, 미분탄 분리장치에 의한 미분탄의 미분도(Fineness) 향상은 보일러의 효율 향상에 직접적인 영향을 끼치며 아울러 환경 문제와 관련하여 규제 물질인 NOx 를 저감 시키는 부차적인 장점도 있으므로 그 중요성은 매우 크다. 일반적으로 고정분리장치(Static classifier : S.C)의 경우, 75μm(200 mesh sieve) 이하의 미분도가 약 70 ~ 75%의 결과를 보이고 있지만 회전분리장치(Dynamic classifier : D.C)의 경우는 제작사에 따라 약간의 차이가 있지만 일반적으로 75μm 이하의 미분도가 80% ~ 90%의 결과를 보이고 있다. 이처럼 미분탄 분리장치는 특정한 형상으로 구성되어 있지 않지만 일반적으로 회전분리장치가 장착된 미분기를 기준으로 하면, 고정분리장치 또는 안내깃(Guide vane : G.V)이 함께 장착되어 있는 경우가 대부분이다. 또한 미분탄 분리장치는 개념적으로는 아주 간단한 형태로 구성되어 있지만, 미분탄 분리장치 및 안내 깃의 형상, 크기, 회전 수, 각도 등에 따라 분리장치의 성능은 아주 크게 달라진다.

따라서 본 연구에서는 미분탄 분리장치의 성능 특성 중 미분도에 크게 영향을 미치는 설계인자를 찾고자 수행하였다. 즉 미분도를 크게 변화 시킬 수 있을 것으로 판단되는 안내깃 및 고정분리장치의 각도와 더불어 회전분리장치의 회전수를 인자로 선정하여 영향도를 분석하였다. 특히 미분탄 입자실험의 조건은 실험계획법의 일종인 다꾸찌 방법을 적용하여 채택함과 동시에 결과를 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 실험 모델

본 연구를 위해 제작된 실험 모델의 외형은 크게 미분기 몸체, 분쇄장치 및 미분탄 분리장치

* 두산중공업 기술연구원

부위로 구성되어 있으며, 500MW 급 화력 발전소에서 실제 구동중인 미분기의 기하학적 상사를 고려하여 1/3.5 scale 로 축소하여 제작하였다. 모델의 재질은 미분기 몸체 부위는 투명 아크릴로, 미분탄 분리장치 부위는 탄소강으로 제작하였다. Fig. 1 은 본 실험 모델 중 미분탄 분리장치 인자들의 형상을 도시한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 미분탄 분리장치는 크게 회전형 분리장치, 고정형 분리장치 및 안내 깃으로 구성되어 있으며 회전형 분리장치는 회전이 가능하도록 제작되어 있으며 반면 고정형 분리장치와 안내 깃은 각도 조절이 가능함과 동시에 장탈착이 가능하도록 제작하였다. 또한 회전형 분리장치는 60 개의 Vane 으로 구성되어 있으며 고정형 분리장치와 안내 깃은 각각 36 개의 Vane 으로 구성되어 있다. 반면 Fig. 1 에는 도시하지 않았지만 미분기 분쇄장치 부위에는 Roller, Bowl 및 Bowl 에 부착된 Vane wheel 로 구성되어 있다. 이러한 미분기 몸체 및 분쇄장치 부위에 장착된 구성품들도 원형과의 기하학적 상사성을 고려하여 제작하였다. 즉 Vane wheel 은 $\pm 45^0$ 까지 각도 조정이 가능하도록 제작하였으며, 원형과 같이 30 개의 vane 으로 구성되어 있으며 Roller 는 원형과 마찬가지로 Raw coal pipe 를 중심으로 120° 간격으로 각각 Bowl 위에 놓여져 있다. 하지만 본 실험모델은 미분탄 분리장치의 미분도에 영향을 끼치는 인자들의 영향도 분석에 국한시켰기 때문에 실제 가동중인 미분기처럼 미분탄을 직접 분쇄시킬 수 있는 모델은 아니다.

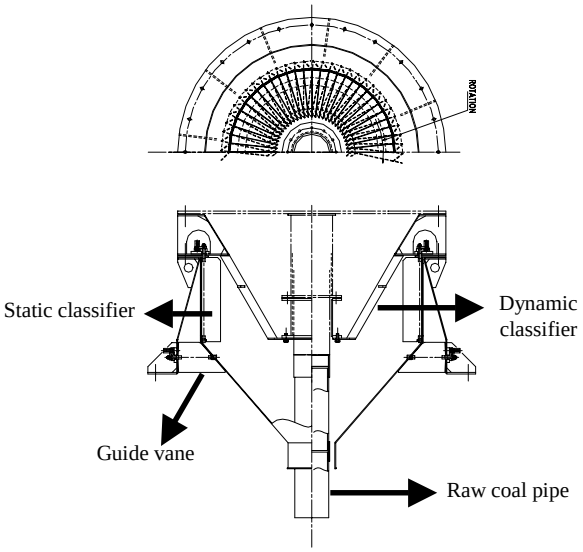

Fig. 1 Schematic diagram of the pulverizer test model

2.2 모델의 상사성

본 연구에서는 앞서 언급한 바와 같이 가능한 기하학적 상사를 유지시켰다. 또한 기하학적 상사뿐만 아니라 완전한 운동학적 상사를 시키기 위해서 동일한 레이놀즈 수를 적용시켜야 한다. 하지만 경험적으로 10^4 이상의 레이놀즈 수 조건에서는 운동량 및 질량의 수송 과정은 난류 강도(Turbulent intensity)에 의해 지배되며, 분자 수송 과정은 무시될 수 있으며 또한 이 조건에서는 레이놀즈 수를 증가 시켜도 유동 패턴은 변화지 않는다고 알려져 있다. 따라서 본 모델 실험에서는 레이놀즈 수가 10^5 이상이기 때문에 레이놀즈 수의 영향을 무시하였다. 또한 Vane wheel 통로로부터 유입되는 유동의 선회 각도는 Bowl 회전수를 조절하여 원형과 유사하게 상사 시킴과 동시에 미분기 내부의 공기와 석탄 입자의 질량비 역시 실제 원형과 유사하게 상사 하였다. 또한 공기와 미분탄 입자간의 다상유동 실험이므로 공기와 미분탄 입자가 최초로 혼합되는 Vane wheel 부위에서 각각의 미분탄 입자에 대한 입자의 레이놀즈 수에 대한 상사도 고려하였다. Table 1 은 실험과 원형에서의 물성치 및 무차원 변수 값을 나타내었다.

Table 1 Non-dimensional variables & properties

Description	단위	Model	Actual
Bowl speed	Rpm	55	35
유체밀도(ρ_a)	Kg/m^3	1.21	0.564
입자밀도(ρ_p)	Kg/m^3	1,320	1,320
점성계수(μ)	$N\cdot S/m^2$	1.806×10^{-5}	3.256×10^{-5}
레이놀즈 수(Rea)	-	1.07×10^5	7.6×10^5
레이놀즈 수(Rep)	-	88.66	58.93
Mass loading rate	-	0.14	0.5

2.3 실험장치

Fig. 2 는 본 연구에서 사용된 입자 분리 실험장치의 개략도를 도시한 그림이다. 본 미분기 모델은 미분탄을 분쇄할 수 없기 때문에 분쇄된 미분탄 10kg 을 Raw coal pipe 를 통해서 미분기에 공급된다. 이렇게 공급된 미분탄은 회전하는 Bowl 위에 떨어지고 원심력에 의해 반경 방향으로 밀려나오게 되며 Vane Wheel 통로에서 유입되는 선회유동의 공기와 함께 상부의 미분탄 분리장치까지 이송된다. 이송된 미분탄은 미분탄 분리장치에 의해 분리되어 출구 파이프로 배출되고 출구 파이프에 장착된 Sampling probe 및 사이크론에 의해 입자가 포집된다. 따라서 포집된 미분탄은 표준 체망(Standard Sieve)을 순차적으로 적층하여 Sieve shaker machine 을 사용하여 ASTM D197(87) 방법에 따라 미분탄 입자 Size 분포를 측정하였다. Table 2 는 본 실험에 사용된 분쇄된 미분탄의 입자 Size 별 분포를 나타낸 표이다.

Table 2. Distributions of pulverized coal size

Size (μm)	Weight(g)			%
	Sieve	Sieve+coal	Coal	
500 이상	393.1	393.3	0.2	0.4
300 이상	368.3	369.8	1.5	2.97
150 이상	351.1	363.8	12.7	25.15
75 이상	339.3	354.5	15.2	30.1
45 이상	336.9	344.4	7.5	14.85
45 미만	299.5	312.9	13.4	26.53
Coal 총 무게			50.5	100

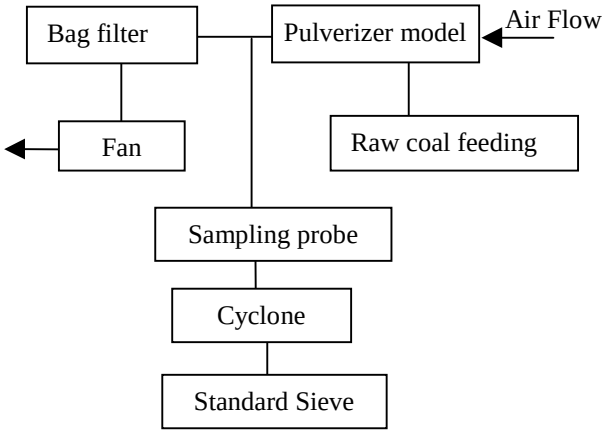

Fig. 2 Schematic diagram for the experiment of the pulverizer model

3. 미분탄 분리장치 설계인자의 배치

3.1 인자의 선정

미분탄 분리장치의 성능 특성은 미분도 및 배출량등으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 미분탄 분리장치의 많은 성능 특성 중에서 보일러 효율에 직접적인 영향을 주는 미분도에 국한시켜 연구하였다. 따라서 미분도의 특성 변화에 영향력이 크게 작용한다고 판단되는 안내 깃의 각도, 고정분리장치의 각도 및 회전분리장치의 회전수를 설계인자로 선정하였고 각각의 설계인자에 대해서 변동조건 3 가지를 선정하였다. Table 3 은 이렇게 선정된 설계인자 및 변동조건을 나타내었다.

Table 3 Design parameters & experiment conditions

설계 인자	조건			비고
	0	1	2	
A	None	CW30°	CCW30°	G.V angle
B	None	CW30°	CCW30°	S.C angle
C	75	150	250	D.C rpm

3.2 직교배열표를 이용한 실험의 배치

인자가 많을 시에는 일반 요인배치법으로 모든 실험을 할 수 없기 때문에 적은 수의 실험으로 주효과 파악을 얻기 위한 목적으로 만들어 놓은 직교배열표를 이용하는 것이 유용하다. 직교배열표를 사용하면 실험의 횟수를 줄일 수 있을 뿐 아니라 요인 변동의 계산이 용이하여 결과 분석이 용이하고, 실험에 많은 인자를 적용할 수 있는 장점이 있다. 이러한 직교배열표를 이용해 앞서 선정한 설계인자 및 변동 조건들을 배치하면 Table 4 와 같은 결과를 얻을 수 있다. 특히 본 실험에 선정된 설계인자 상호간에는 미세한 영향을 주기 때문에 교효작용은 없는 것으로 판단하였다. 이처럼 직교배열표에서 인자 상호간에 교효작용이 없는 경우에는 실험 수행 횟수와 많은 시간적 소요를 줄일 수 있다. Table 4 는 본 연구의 설계인자 및 변동 조건들의 영향력을 분석하는데 필요한 직교배열표를 작성한 표이다. 즉, 설계인자 및 변동 조건들을 분석하는데 실험의 반복이 없는 경우 단 9 회의 실험만 수행하면 된다. 만약 이를 일반 요인배치법을 이용해 전체를 실험하고자 했다면 27 회의 실험이 필요하게 된다.

Table 4 Disposition of parameters

실험 번호	열번호/인자				실험 조건
	1	2	3	4	
	A	B	e	C	
1	0	0	0	0	A0B0C0
2	0	1	1	1	A0B1C1
3	0	2	2	2	A0B2C2
4	1	0	1	2	A1B0C2
5	1	1	2	0	A1B1C0
6	1	2	0	1	A1B2C1
7	2	0	2	1	A2B0C1
8	2	1	0	2	A2B1C2
9	2	2	1	0	A2B2C0
기본표시	a	b	ab	ab^2	계

4. 실험 결과

Fig.3 은 직교배열표의 9 개 조건에 대한 실험결과를 도시한 그림이다. 우선 Case 1~3 의 안내깃을 제거하고 고정분리장치 및 회전분리장치가 장착된 경우의 결과를 살펴보면, 미분도 분포값이 상대적으로 낮게 분포하고 있다. 반면, 고정분리장치를 제거하고 안내 깃 및 회전형 분리장치가 장착된 경우의 Case 4 와 Case 7 의 결과를 살펴보면 앞선 결과와 상반된 결과를 보여주고 있다. 즉, 미분도가 상대적으로 높게 분포하고 있다. 또한 회전분리장치가 유동과 같은방향(Case 5)으로 회전할 경우의 미분도 분포는 유동과 반대방향(Case 9)으로 회전할 경우의 분포값과 유사함을 볼 수 있다. Table 5 는 입자 실험 결과 데이터를 정리한 표다. 여기서 미분도 분포값은 200mesh(75μm) 통과량을 백분율로 나타내었다.

Table 5 Fineness & capacity of orthogonal array

Case No.	실 험 조 건	미 분 도
1	A0B0C0	46.55
2	A0B1C1	41.73
3	A0B2C2	45.72
4	A1B0C2	75.78
5	A1B1C0	66.47
6	A1B2C1	69.32
7	A2B0C1	70.39
8	A2B1C2	78.32
9	A2B2C0	65.15

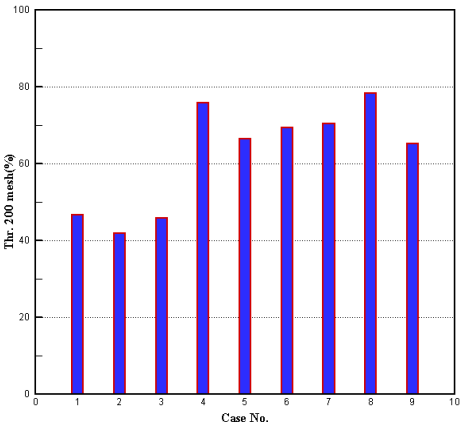

Fig. 3 Distributions of the coal fineness & the capacity

Table 6 은 Table 5 의 결과에 대한 분산분석표(ANOVA)를 작성한 결과이다. 결과를 살펴보면 미분도는 안내 깃의 각도가 상대적으로 영향력이 크게 작용하고 있는 반면 고정형 분리장치의 각도에 대한 영향력은 오차범위 이내로 매우 작음을 볼 수 있다.

Table 5 ANOVA analysis

요인	S(변동)	ϕ(자유도)	V(분산)	F0
A	1448.63	2	724.32	40.55
B	27	2	13.5	0.76
C	98.41	2	49.20	2.75
오차(e)	35.73	2	17.86	1
T	1609.77	8	-	-

그러므로 고정형 분리장치의 각도 인자를 오차에 풀링시킨 후 안내 깃의 각도 및 회전분리장치의 회전수에 대해서 일원표를 만들면 다음과 같다.

1. “A” 일원표

A0	A1	A2
132	211.57	213.86

2. “C” 일원표

C0	C1	C2
178.17	179.44	182.58

즉, 안내 깃은 A2 의 변동조건에서, 회전형 분리장치는 C2 의 변동조건에서 가장 좋은 결과를 보여주고 있다. 따라서 분산분석표에 의해 나타난 본 연구에 적용된 설계인자 및 각각의 변동조건에 대한 최적조건은 A2B0C2 의 조건으로 고정형 분리장치는 제거하고 안내 깃은 CCW30° 로, 회전형 분리장치는 250rpm 으로 설정한 조건이다.

참고로 Fig. 4 와 5 의 결과는 앞서 언급한 분산분석표의 결과를 토대로 상대적으로 영향력이 크게 나타난 안내 깃의 각도 변화와 회전형 분리장치의 회전수 변화에 대한 결과를 도시한 그림이다. 다만 분산분석표의 결과에 나타난 것처럼 고정분리장치는 오차범위 이내의 매우 작은 영향력을 주므로 제거하여 실험 수행을 하였다.

우선 Fig. 4 의 결과는 회전분리장치의 회전수를 75rpm 으로 일정하게 유지시키고 안내 깃의 각도를 변화에 따른 미분도 및 배출량에 대한 분포를 도시한 그림이다. 결과에서 알 수 있듯이 미분도는 안내 깃의 각도가 30° 이하에서는 유사한 분포를 보여주고 있지만 그 이상의 각도에서는 급격히 나빠짐을 볼 수 있다.

Fig. 5 는 회전분리장치의 회전수 변화에 대한 미분도 분포를 도시한 그림이다. 그림을 살펴보면, Fig. 4 의 결과와는 달리 회전분리장치의 회전수가 증가함에 따라 미분도는 점점 증가하고 있음을 볼 수 있다. 특히 250rpm 에서의 결과분포는 분산분석표에 나타난 최적조건에서의 실험 결과로 미분도가 상대적으로 높게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 분산(ANOVA)분석의 결과로 유추된 최적조건은 실험결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

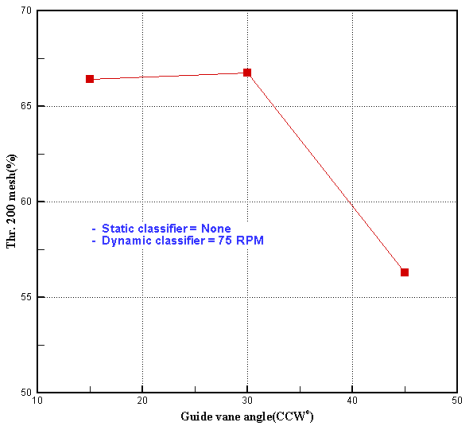

Fig. 4 Distributions of the coal fineness & the capacity for the various angle of guide vane

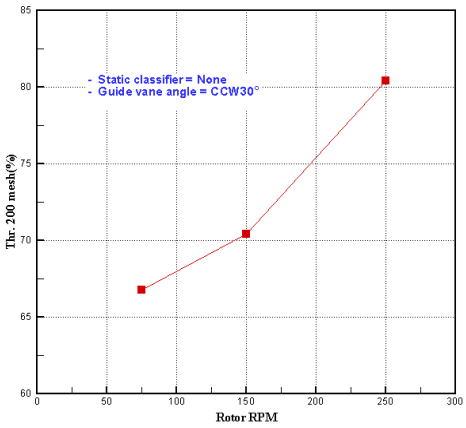

Fig. 5 Distributions of the coal fineness & the capacity for the various rpm of dynamic classifier

5. 결 론

미분탄 분리장치의 많은 성능 특성 중에서 본 연구에서는 미분도와 밀접한 연관이 있을 것으로 판단되는 안내 깃, 고정분리장치 및 회전분리장치를 중심으로 실험계획법의 일종인 다구찌 방법을 적용하여 미분탄 입자실험을 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 미분탄 분리장치의 성능 특성 중에서 미분도에 영향을 미치는 인자는 안내 깃과 회전분리장치이며 고정분리장치는 미세한 영향을 미치고 있음을 분산(ANOVA)분석을 통해 알 수 있었다.
- 안내 깃이 장착된 경우에는 고정형 분리장치를 장착하지 않는 것이 미분도 향상에 유리하다. 즉, 안내 깃이 고정분리장치의 역할을 동시에 수행하는 것으로 판단되며 아울러 본 연구에서의 고정분리장치 형상은 회전분리장치가 분리한 미분탄을 재유입 시키는 것으로 유추된다. 따라서 본 모델에서 고정분리장치를 함께 장착하려면 적절한 형상의 재설계가 필요하다.
- 안내 깃의 각도가 30^{o} 이하에서의 미분도 분포는 거의 유사하지만 30^{o} 이상의 각도에서는 미분도가 급격히 나빠짐을 볼 수 있다. 또한 안내 깃의 각도가 작아지면 압력손실은 크게 증가하므로 이로 인해 미분탄 분리장치에 파생되는 문제점은 추후 고려하여야 할 사항이다.
- 회전분리장치의 회전수가 증가함에 따라 미분도 분포는 점점 높아짐을 볼 수 있으며 특히 분산(ANOVA)분석의 결과로 유추된 최적조건은 실험결과와 거의 일치한다.

참고문헌

(1) Ramana Murty, G. V., Naga Srinivasa, P. R., 1996 “Experimental flow investigations in a coal pulverizer model” Joint Power Generation Conference ASME Volume2.

(2) Ramana Murty, G. V., Naga Srinivasa, P. R., 13-15 december 1995, “Air flow studies in a coal pulverizer”, IIT Madras, procddeings of the 22nd national conference on fluid mechanics and fluid power, pp 405-410.

(3) Chandraker A.L., Panwalkar A. S. and Bhasker, C., 13-15 december 1995, “Air flow studies in bowl mill housing”, IIT Madras, procddeings of the 22nd national conference on fluid mechanics and fluid power, pp 419-424.

(4) A.C. Benim, B. Epple, P. Stegelitz., July 1997, “Modeling the two-phase flow in coal pulverizers”, Lisbon(Portugal), 4th International conference on technologies and combustion for a clean environment

(5) M. Benz, H. Herold, B. Ulfik., 1996 , “ Performance of a fluidized bed jet mill as a function of operating parameters” Int. J. Miner. Process. 44-45, pp 507-519.

(6) Joseph G. Singer “Standard handbook of power plant engineering”.

(7) C. T. Crowe , September, 1982, “Numerical models for dilute gas-particle flows” Journal of fluids engineering, Vol. 104, pp 297-303.