



오성원

한진 보령화력본부 환경관리부장,
서울산업대 산업대학원 석사논문

미연탄소분 분리를 위한 플라이애쉬의 공기분급 <3>

목 차

1. 서론

2. 이론적 배경

- 2.1 석탄회(Fly Ash)의 특성과 용도
- 2.2 석탄회 중 미연탄소의 분리방법
- 2.3 공기분급기에 의한 입도분리

3. 실험방법

- 3.1 실험개요와 분석방법
- 3.2 Static Cyclone 분리실험
- 3.3 Dynamic Cyclone 분리실험
- 3.4 상업용 공기분급기 성능시험

4. 결과 및 고찰

- 4.1 Static Cyclone 실험결과
- 4.2 Dynamic Cyclone 실험결과
- 4.3 상업용 공기분급기 성능시험결과
- 4.4 분급과 미연탄소분 분리에 관한 고찰

5. 결론

※ 참고문헌

3. 실험방법

3.1 실험개요 및 분석방법

3.1.1 Cyclone 분리장치를 이용한 실험

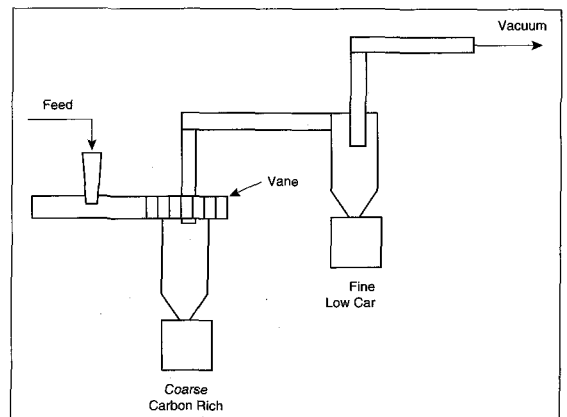


그림 3.1 two-stage cycloning system

이번 플라이애쉬의 공기분급 실험은 실험실에서 시행한 benchscale test와 상업용 공기분급기의 분급성능을 플라이애쉬 원분의 특성과 비교 고찰할 목적으로 시행하였다. 우선 실험실에서 간단하게 제작한 두 개의 소형 싸이클론

을 이용하여 플라이애쉬 원분에서 미연탄소의 분포와 미연탄소분의 저감 가능성을 알기 위해 두가지 type의 공기분급 실험을 시행하였다. 또한 상업용으로 채택하고 있는 static type classifier와 dynamic type classifier에서 분급 성능을 실제로 시험 분석하여 그 결과를 bench scale test와 비교 검토하고자 하였다.

이번 실험에서 사용된 사이클론 분리기는 기체중에 섞여 있는 고체입자를 원심력으로서 분리하는 통상적인 집진장치이다.

사이클론의 구조는 아주 다양하나 가장 많이 사용되는 표준 형태로서 원통형 아래에 원추형이 연결된 구조이다.

전체적인 과정과 원리는 그림 3.1에서와 같이 첫 번째 사이클론 inlet pipe에 설치된 깔대기에 플라이애쉬가 공급되어 진공청소기에 의해 흡입되는 공기에 실려 두 개의 사이클론으로 순차적으로 유입된다. 유입된 입자는 첫 번째 사이클론 내에서 공기와 함께 회전하며 이 때 원심력이 발생하므로 크고 무거운 입자는 사이클론 벽을 향하여 이동하고 또한 중력에 의해 아래로 떨어져 결국 하부에 포집된다. 미처 벽 쪽으로 이동하지 못한 작고 가벼운 입자는 사이클론 중앙에 형성되는 upward spiral에 의해 첫 번째 사이클론 상부로 유출되어 두 번째 사이클론에서 포집되어 입도가 분리된다.

3.1.2 미연탄소의 분석

미연탄소의 분석은 미국 LECO사에서 제작한 Thermogravimetric Analyzer 자동분석기(Max.950℃)로 강열감량(LOI)을 일괄 분석하였다. 분석방법은 먼저 시료 1.0~1.5g을 100~200℃로 가열하여 질량의 감소가 멈출 때까지 온도를 유지하고 감량된 질량 즉, 수분(Moisture)을 측정한다. 다음 다시 750℃로 질량의 감소가 멈출 때까지 가열하여 강열감량(LOI)을 측정하였다.

3.1.3 입도의 분석

입도는 보통 표준 체를 이용하여 체눈금이 큰 체로부터 순서대로 골재를 제거함으로써 체에 남아 있는 입자의 중량

이번 플라이애쉬의 공기분급 실험은 실험실에서 시행한 benchscale test와 상업용 공기분급기의 분급성능을 플라이애쉬 원분의 특성과 비교 고찰할 목적으로 시행하였다. 우선 실험실에서 간단하게 제작한 두 개의 소형 사이클론을 이용하여 플라이애쉬 원분에서 미연탄소의 분포와 미연탄소분의 저감 가능성을 알기 위해 두가지 type의 공기분급 실험을 시행하였다.

을 측정하여 전체에 대한 비율을 계산하지만, 여기서는 짧은 시간에 많은 시료를 비교 분석하기 편리한 습식 레이저 투과법으로 입도별 질량분율을 바로 구했다.

분석방법은 프랑스 Cilas사가 제작한 Cilas Particle Size Analyzer(분석범위 : 0.04~500 μ m)를 이용하였으며, 분석은 시료 1.0g을 sampler에 주입 후 교반하여 시료를 고르게 분산시키고 레이저 Detector로 순환 측정하였다. 크기와 형상을 측정한 후 형상계수를 곱해 원형입자로 환산하고 입도별 질량분율을 계산하였다.

3.2 Static Cyclone 분리실험

3.2.1 실험장치

사이클론 분리기는 Lapple의 설계식¹⁷⁾을 기초로 그림 3.2와 같이 두 개의 사이클론 모두 직경 10cm로 설계하였다. 사이클론 inlet tangential type으로 2-stage cyclone으로 제작하여, 첫 번째 사이클론은 입도 분리용으로 두 번째 사이클론은 분리된 플라이애쉬 포집용으로 하였다. 특히 본 실험에 사용된 사이클론은 상부에 vane이 장착되어 공기주입량이 같더라도 열림 각도에 따라 사이클론 내부의 유속 중 tangential velocity가 변화되어 원심력이 틀려짐에 따라 분급입도가 2차적으로 조정되도록 하였다.

3.2.2 실험시료 분석

본 실험에서는 미연탄소함량 6%,9%,11%의 플라이애쉬 3종이 사용되었으며, 실험조건은 공기주입량을 800 l/min(싸이클론의 입구유속 10.6%)로 일정하게 하고 vane의 열림 각도를 30°에서 60°까지 10° 단위로 변경하여 실험하였다. 이 실험조건에서 싸이클론의 집진 효율을 이론적으로 구해보면 유효회전수는 6, 공기의 점도는 0.062kg/m-hr, 분체의 밀도는 2.62kg/m³일 때 가스의 밀도는 무시되므로 절단입경(cut diameter)은 42.8μm으로 계산되고 미연탄소분6%의 원분일 경우에 첫 번째 싸이클론에서 37.2%가 집진될 수 있으므로 세분을 62.8% 얻을 수 있다. 그러나 입구 vane의 각도를 높혀 만약 유효회전수가 3으로 떨어진다면 cut diameter는 60.5μm으로 증가되고 제거(집진)되는 조분은 25.2%로 감소되어 세분을 74.8% 얻을 수 있지만 미연탄소의 함량은 증가하게 된다.¹⁸⁾

본 실험에서 사용된 미연탄소함량 6%,9%,11% 플라이애쉬의 입도별 질량분포 및 미연탄소함량을 표 3.1에 나타내었다. 미연탄소함량 6%,9%,11%의 플라이애쉬는 26 μm이하의 경우 질량분포가 각각 70.9%,71%,69.1%이며, 미연탄소함량은 각각 2.3%,3.92%,2.5%로 나타났다.

표 3.1과 같이 미연탄소함량 6.0%,11.0%의 플라이애쉬는 26μm이하로 입도를 분리할 경우에 각기 플라이애쉬 회수율 70.9%, 69.1%에서 미연탄소함량 2.3%, 2.5%로 3%이하의 플라이애쉬를 회수할 수 있으나, 미연탄소함량 9%의 플라이애쉬일 경우에는 26μm이하로 입도를 분리하여도 미연탄소함량이 3.92%이기 때문에 3%이하의 플라이애쉬 회수가 상당히 어려울 것으로 예상된다.

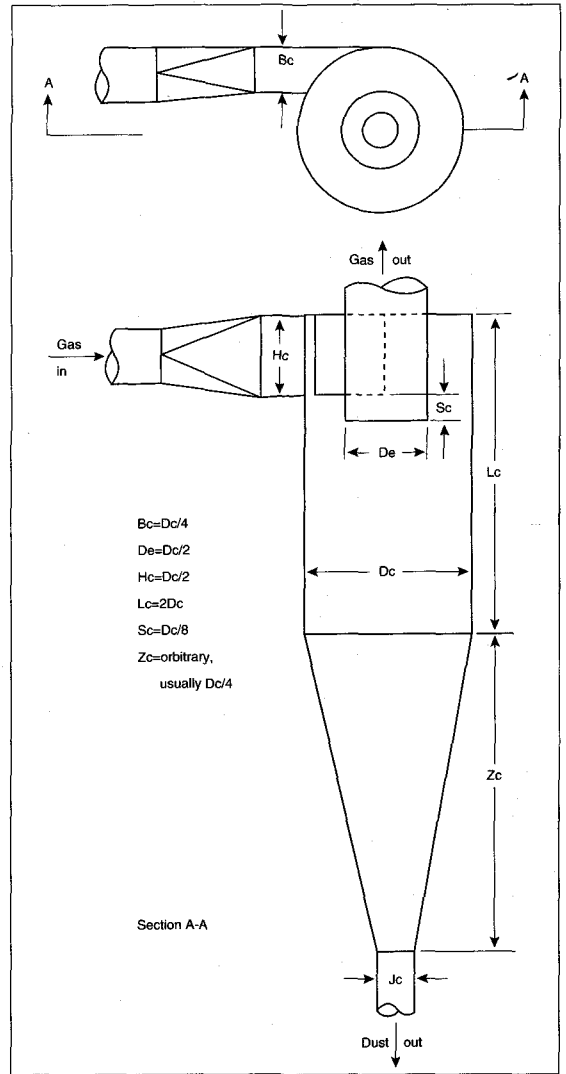


그림 3.2 싸이클론 설계도면

표 3.1 플라이애쉬 시료 3종의 입도 특성

싸이클론 입도분리장치 설계규격

기호	단위(cm)	기호	단위(cm)
Bc	2.5	Lc	20
Hc	5.0	Zc	20
Dc	10.0	Jc	2.5
De	5.0	Sc	1.25

feed,	LOI	particle size(μm)						
		+150	150~105	105~75	75~53	53~38	38~26	-26
6%	wt.%	2.6	2.9	3.8	5.6	6.2	8.0	70.9
	LOI	67.01	36.95	26.2	12.5	4.75	3.53	2.3
9%	wt.%	2.8	3.9	4.6	5.5	5.8	6.4	71
	LOI	62.39	44.38	30.46	17.33	8.03	5.69	3.92
11%	wt.%	5.6	3.8	3.4	4.8	5.4	7.9	69.1
	LOI	68.4	50.7	34	15.2	8.7	6.1	2.5

3.3 Dynamic Cyclone 분리실험

3.3.1 실험장치

실험장치는 한국 플라이애쉬(주)가 개발한 것으로 전체 구성은 그림 3.3에서 보는 바와 같이 static cyclone 실험 장치 구성과 비슷하다. 플라이애쉬 분리는 첫 번째 dynamic classifier(cyclone)에서 이루어지며, 두 번째 사이클론은 역시 정제된 플라이애쉬를 포집하기 위한 것이다. dynamic classifier내에서는 rotor가 장착되어 빠른 속도로 회전하는데, 분급입도는 이 회전속도에 의하여 결정된다. 플라이애쉬는 상부 중앙에서 공급되고 크고 굵고 무거운 입자는 원심력에 의해 외각으로 회전되면서 하부에 포집되며 작고 가벼운 입자는 rotor 중앙으로 흡입되어 두 번째 사이클론에서 포집된다. 본 실험에서 사용된 장비는 rotor의 직경이 30cm이며 시간당 350kg의 플라이애쉬를 처리할 수 있다.

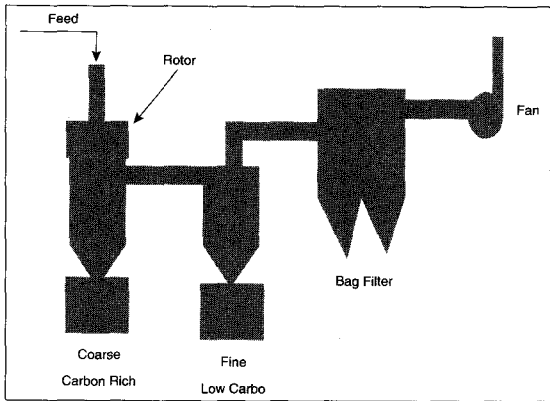


그림 3.3 dynamic classifier 장치 구성도

3.3.2 실험시료 및 실험방법

표 3.2와 같이 3종류의 플라이애쉬 (LOI 4.8%, 13.5%, 14.4%)가 본 실험에서 사용되었다. 운전 조건은 회전속도 (400~1700rpm)와 공급량을 변화시키면서 회전속도별로 세분과 조분의 중량비와 미연탄소분 함량을 측정하였다.

3.4 상업용 공기분급기 성능시험

3.3.1 시험개요

본 시험은 1998. 8월부터 9월까지 실제 현장에서 운전되고 있는 미국 GE사의 static type classifier(삼천포화력 및 한국 플라이애쉬(주))와 영국 Bradley사의 dynamic type classifier(태안화력 및 보령Fly Ash)의 분급전후의 입도 및 미연탄소함량을 측정하여 두 설비의 입도 분리효과 및 미연탄소분 제거효율을 측정하였다.

여기서 설비가 노후화된 한국탄재(주)는 시험대상에서 제외하였고 시험용 플라이애쉬 原粉 그리고 분급설비를 거친 細粉과 粗粉을 보령Fly Ash(주)에서 4회, 태안화력에서 5회, 삼천포화력에서 4회에 걸쳐 현장 시료를 채취 분석하였고, 분석결과 분석치가 좋지 못한 보령2와 보령4, 태안2와 태안5, 삼천포2번의 시료에 대한 분석치는 평균 산출에 포함치 않아 검토자료로서 채택하지 않았다.

표 3.2 실험시료의 입도분포 및 미연탄소함량

(단위 : wt.%)

feed, LOI	입경 (μm)	+150	150~105	105~75	75~53	53~38	38~26	-26
4.8%	wt.%	7.84	7.58	9.56	11.12	10.1	11.22	42.58
	LOI	18.6	7.38	5.56	3.96	3.3	2.97	1.95
13.5%	wt.%	13.82	8.35	7.75	8.39	7.59	9.1	45
	LOI	42.34	19.95	13.99	8.55	5.53	5.06	2.91
14.4%	wt.%	8.38	8.0	7.62	7.63	7.1	7.37	53.9
	LOI	57.01	43.56	25.81	14.71	9.46	13.97	3.26

3.4.2 설비의 운전조건

각각의 정제설비에서 원료회로 사용한 원탄의 혼합비율, 정제회수 및 운전조건은 표 3.3에 보령 플라이애쉬(주), 표 3.4에 태안화력, 표 3.5에 삼천포화력을 제시하였다.

표 3.3 보령 플라이애쉬(주)의 운전조건

구분	시료 채취일	탄종	수율 (%)	Dynamic Classifier(rpm)	
				rotor	rotary feeder
1	1998.8.15	SBCL:HUNTERVALLEY=1:1	80	80	16
2	1998.9.12	WALLARAH:KIDECO=6:4	65	70	17
3	1998.9.16	WALLARAH	90	70	17
4	1998.9.21	LCR:SBCL = 1:1	98	85	16

표 3.4 태안화력의 운전조건

구분	시료 채취일	탄종	수율 (%)	Dynamic Classifier (rpm)	
				rotor	rotary feeder
1	1998.8.22	LUSCAR:MIM=6:4	67	400	500
2	1998.8.25	WARKWORTH:MIM=7:3	62	300	350
3	1998.8.26	WARKWORTH:MIM=6:4	61	300	400
4	1998.8.31	BHP:ULAN=7:3	55	400	300
5	1998.9.4	WARKWORTH:ULAN=7:3	57	300	300

표 3.5 삼천포화력의 운전조건

구분	시료 채취일	탄종	수율 (%)	classifier damper개도(%)		
				유량조절 gate	순환 fan	2ry air fan
1	1998.8.31	ROTOSOUTH:TOTAL=1:1	72			
2	1998.8.31	ROTOSOUTH:TOTAL=1:1	72			
3	1998.9.2	ROTOSOUTH:LUSCA=1:1	78	35	70	0
4	1998.9.3	ROTOSOUTH:LUSCA=1:1	72			

※ orifice diameter : 570mm

4. 결과 및 고찰

4.1 Static Cyclone 분리실험결과

표 4.1은 vane의 열림 각도에 따른 플라이애쉬의 분리 효율을 나타냈다. vane 열림각도가 작아질수록 유효회전수가 높아져 첫 번째 사이클론에서 더 많이 포집되어 상대적으로 조분 포집율이 증가되며 결국 세분의 회수율과 미

표4.1 vane 각도에 따른 분리율 변화

feed, LOI		vane angle							
		30°		40°		50°		60°	
		yield	LOI	yield	LOI	yield	LOI	yield	LOI
6%	coarse	73	6.8	64	7.2	45	9.3	24	11.7
	fine	25	4.3	34	4.1	51	3.9	73	4.4
9%	coarse	66	11.3	50	11.7	35	15.9	21	18.9
	fine	30	5.2	43	7.4	57	6.0	77	6.5
11%	coarse	71	14.9	57	16.8	38	20.6	24	27.3
	fine	28	4.3	42	6.2	56	7.0	67	7.5

연탄소함량은 감소되었다. 시료별로 미연탄소분 11%의 원분은 vane 열림각도 60°에서 세분회수율 67%, 미연탄소분 7.5%이고, vane 열림각도 30°에서는 세분회수율 28%, 미연탄소분 4.3%로 감소되었으며, 미연탄소분 9%의 원분은 vane 열림각도 30°에서는 세분회수율 30%, 미연탄소분이 5.2%로 분석되었다. 미연탄소분 6%의 원분은 세분회수율이 25~73%의 넓은 범위에서 미연탄소분이 4% 내외를 나타내었다.

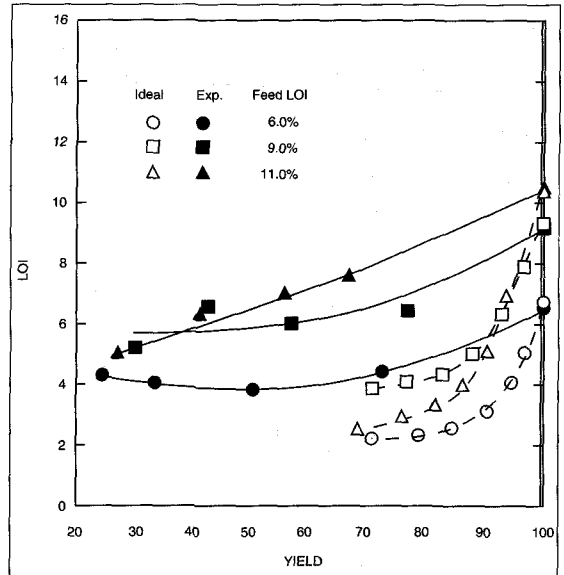


그림 4.1 플라이애쉬 회수율과 LOI의 관계

그림 4.1은 회수율과 LOI의 관계를 도식한 것이며, 위에서 언급한 경향이 잘 나타나 있다. 점선으로 표시한 것은 각 시료를 체로 분급하였을 때 회수율과 LOI의 관계이며 가장 이상적인 분급이라 가정할 수 있다. 실선으로 표시한 것은 실험치인데 보는 바와 같이 실험치의 curve가 이상치의 curve 보다 모두 위에 존재

(단위: wt.%)

하고 있다.

다시 말하면 세분 회수율 70%에서 이상치의 LOI는 2%~4%가 되어야 하나 실험치는 각각 4%~8%로 2배 이상을 보이고 있다. 이는 싸이클론의 입도분급 효율이 이론적인 100% 분급에 훨씬 못 미치는 것으로 해석될 수 있으나 이외에도 여러 가지 다른 요인이 있음을 예상할 수 있을 것이다.

표 4.2는 9% 원분의 입도분포와 실험 후 조분과

세분의 입도분포를 비교한 것인데, 분리 후 세분의 입도분포는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 세분 중 26 μ m 이하의 미세입자가 거의 대부분일 만큼 분리되었다. 하지만 특기할 사항은 세분과 조분의 입도를 합친 입도분포를 원분의 입도분포와 비교하여 보면 53 μ m이상의 플라이애쉬 질량이 분리 후 30~40%가 감소한 반면, 26 μ m이하의 질량은 8% 증가하는데 그쳤음을 알 수 있다. 이는 일부의 굵은 입자가 첫 번째 싸이클론 내에서 빠른 유속과 vane 등에 마찰충격으로 미립자로 분해되어 두 번째 싸이클론으로 유입되는 것으로 생각된다.

한편 싸이클론을 이용한 플라이애쉬의 입도 분리시 분리 전후 26 μ m이하로 체가름된 입도의 질량과 미연탄소함량을 표 4.3에 나타냈다. 미연탄소함량 6%,9%,11%의 플라이애쉬 시료의 어떤 경우에도 원분 시료보다 실험 후에 질량과 동시에 미연탄소함량이 증가함을 알 수 있다. 그리고 열림각도가 높아질수록 vane의 마찰저항으로 유속과 유효회전수가 감소하고 조분보다 세분의 회수량은 증가하나 동시에 미연탄소함량도 함께 증가하였다. 이는 입도분리시 파쇄되는 조립분은 대부분의 성분이 미연탄소 성분이고 파쇄된 조립분은 세분에 포함됨을 나타내는 것

표 4.2 입도분리 전후의 입도분포

(단위:wt.%)

size(μ m)		+150	150~105	105~74	74~53	53~38	38~26	-26 μ m	
raw fly ash		2.8	3.9	4.6	5.5	5.8	6.4	71.0	
vane angle	30°	fine	0.3	0.1	0.03	0.01	0.01	0.8	98.7
		coarse	3.7	4.3	4.7	3.6	7.2	6.3	70.2
		combine	2.6	3.0	3.2	2.5	4.0	4.3	79.0
	40°	fine	0.09	0.02	0.1	0.1	0.08	0.2	94.8
		coarse	2.2	2.9	4.5	6.7	7.8	8.0	67.9
		combine	1.2	1.6	2.5	3.7	4.3	4.4	82.3
	50°	fine	0.04	0.1	0.09	0.6	1.3	1.7	96.2
		coarse	5.7	6.5	8.4	9.4	12.2	10.1	47.8
		combine	2.2	2.5	3.2	3.9	5.4	4.9	81.6
	60°	fine	0.2	0.05	0.06	0.5	2.1	3.9	93.1
		coarse	8.5	10.3	10.5	10.5	17.3	10.0	32.9
		combine	2.1	2.4	2.4	2.8	5.6	5.3	79.4

이라고 할 수 있다. 분급기의 성능이 우수하여 분급이 잘 되고 세분 회수율이 높아도 조분의 파쇄가 많이 일어나는 구조라면 파쇄된 미연탄소들이 분리된 세분에 혼입됨으로서 입도분리에 의한 미연탄소분의 분리효과를 기대치만큼 얻을 수 없게 된다.

표 4.3 입도분리 전후의 플라이애쉬의 미연탄소 함량변화

(단위: wt.%)

feed LOI	항목	원분 (-26 μ m)	vane 열림각도			
			30°	40°	50°	60°
6%	wt.%	70.9	82	80	79	72
	LOI	2.3	4.35	4.0	3.74	2.6
9%	wt.%	71	78	76	78	73
	LOI	3.92	7.02	6.2	5.7	4.6
11%	wt.%	69.1	92	74	74	70
	LOI	2.5	9.8	5.7	5.5	3.3