

2단 선회류 약화기가 원심력집진기의 집진효율에 미치는 영향

Effects of Two Stage Vortex Finder on the Particulate Collection Efficiency of Cyclone Separator

강 순 국 · 유 경 선¹⁾

선문대학교 환경공학과, ¹⁾광운대학교 환경공학과
(2000년 3월 2일 접수, 2000년 10월 30일 채택)

Soon Kook Kang and Kyung Seun Yoo¹⁾

Department of Environmental Engineering, Sunmoon University
¹⁾Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

(Received 2 March 2000; accepted 30 October 2000)

Abstract

The effects of structure modification of the vortex finder on the collection efficiency and pressure drop have been investigated. The pressure drop in a cyclone having the two stage vortex finder is higher than that in a conventional cyclone and increases proportionally with the increase of square of gas inlet velocity in both cases. The pressure drop of both conventional cyclone and cyclone having two stage vortex finder decreases with increasing concentration of dust loading due to reduction of friction resistance at the boundary layer. The collection efficiency of fine dust has been enhanced by addition of vortex finder in a conventional cyclone and gas inlet velocity showing maximum dust removal efficiency increases to 17 m/s (1.7 times of saltation velocity). Optimum size of two stage vortex finder has been induced to 13 cm I.D. × 26 cm Length from the results of overall dust collection efficiency. Previous models were tested for the simulation of collection efficiency of cyclone having two stage vortex finder and the Dietz model predicts the similar value with experimental results of the present study.

Key words : cyclone, vortex finder, fine particulates, collection efficiency

1. 서 론

19세기 말 부터 배가스 내의 입자상 물질을 제거하기 위하여 원심력집진기가 사용되기 시작하였다. 원심력집진기는 설치비용이 저렴하고 고온에서도 운전이 가능하며, 장치 내의 구동부가 존재하지 않아 유지보수가 매우 용이하다는 장점으로 인하여 현

재는 대부분의 산업공정에 활용되는 가장 일반적인 집진장치가 되었다. 그러나 기존의 원심력집진기는 선회류약화기와 몸체 사이의 환상영역에서 발생하는 역혼합과 난류성 에디 그리고 입자상 물질의 몸통 벽면과의 충돌 반사와 같은 2차 효과로 인하여 집진효율이 낮아지는 단점을 갖는다. 특히 인체의 건강에 큰 영향을 미치는 10 μ m 이하의 미세분진에 대한 집진효율은 매우 낮아(Kang *et al.*, 1989) 최근

에는 전기집진기나 여과집진기의 분진부하를 줄여 주기 위한 전처리 장치로 주로 사용되고 있는 실정이다.

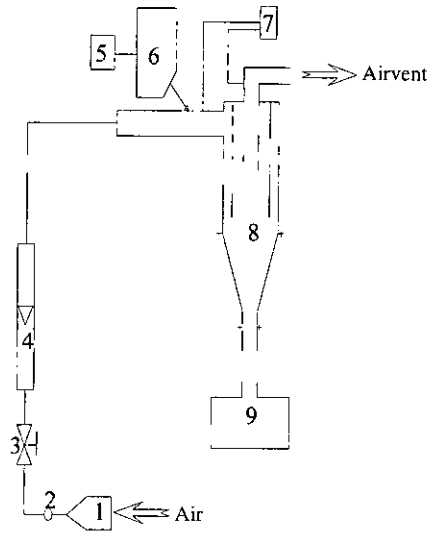
그러므로 본 연구에서는 2단 선회류약화기를 원심력집진기에 도입하여 난류혼합을 방지하고, 선회류의 원심력을 강화시켜 미세입자의 집진효율을 향상시키고자 한다. Lapple식 상업용 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 기체 유입속도와 입자상 물질의 부하량에 따른 압력강하와 분진제거 효율을 측정하였고 2단 선회류약화기의 기하치수비에 따른 부분 집진효율과 전체 집진효율을 도출함으로써 최적의 기하치수비를 결정하고자 하였다. 실험적으로 결정된 부분 집진효율을 기존의 모델식에 적용하여 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기를 모사할 수 있는 모델식을 검토하였다.

2. 실험 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에 대한 실험장치의 개략도는 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보듯이 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 본체와 입자상 물질을 투입하기 위한 스크류 입자 주입기와 진동 주입기, 미량의 추적자를 펄스 형태로 주입하기 위한 솔레노이드 밸브, 기체를 일정 압력과 유속으로 주입하기 위한 압력조절기와 유량계 및 분진포집함으로 구성되어 있다. 본 연구에 사용된 원심력집진기는 투명아크릴로 제작되었으며 표 1에 정리한 바와 같이 Lapple이 제시한 기하치수비로 설정하였다(Lapple and Sheperd, 1940). 몸통직경과 몸통높이는 각각 20 cm와 40 cm 이고, 원심력집진기의 전체 높이는 80 cm로 하였다. 미세분진의 집진효율을 향상시키기 위하여 제작된 2단 선회류약화기는 분진 역혼합을 최대 줄이기 위한 외부선회류약화기와 외부선회류를 내부선회류로 전환시켜 가스출구로 유도하는 내부선회류약화기로 구성되어진다. 표 1에 보인 바와 같이 외부선회류약화기는 선회류약화기의 기하치수비에 따른 집진특성과 압력특성을 조사하기 위하여 직경을 13 cm, 16 cm, 18 cm 세 종류로 제작하였으며, 길이는 15~39 cm를 6 등분하여 투명 아크릴로 제작하였

다. 일반적으로 외부선회류에서 내부선회류로 전환되는 지점은 원추부의 바닥에서 1/3 되는 곳이 가장 이상적인 것으로 보고되고 있다. 만일 내부 선회류약화기의 길이가 길어지면 전환점의 위치가 지나치게 낮아져서 분진퇴적함 내에 포집된 분진들의 비말동반 유발할 수 있다. 또한 내부 선회류약화기의 길이가 작으면, 원추부의 상부에서 전환점이 형성되므로 미세분진이 집진되지 않게 된다. 그러므로 본



- 1. Air filter
- 2. Air regulator
- 3. Valve
- 4. Gas flowmeter
- 5. Motor and speed controller
- 6. Screwfeeder
- 7. Inclinedmanometer
- 8. Two vortex finder cyclone
- 9. Particle collector

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1. Dimensions of experimental apparatus.

Cyclone		Lapple dimension	Size (cm)
Body diameter	(D/D)	1.0	20
Height of inlet	(H/D)	0.5	10
Width of inlet	(W/D)	0.25	5
Diameter of gas exit	(D _e /D)	0.5	10
Length of vortex	(S/D)	0.625	15
Length of body	(L _b /D)	2.0	40
Length of cone	(L _c /D)	2.0	40
Diameter of dust outlet (D _d /D)		0.25	5
Two stage vortex finder			
Body diameter	(d)		13, 16, 18
Length	(L)		15, 21, 26 31, 36, 39

연구에서는 적정의 전환점을 갖도록 내부 선회류약화기의 내경을 10 cm, 길이를 15 cm로 제작하였다.

2.2 실험방법

공기필터를 통해 수분과 유분 등이 제거된 공기는 벨브와 유량계로 유량을 조절하여 일반 공업용 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 입구로 주입한다. 원심력집진기가 안정상태에 도달하면, 모터와 속도 조절기로 본진의 투입속도를 변화시켜 플라이에쉬를 원심력집진기의 입구로 주입하면서 경사도가 5°인 경사 마노미터로 원심력집진기의 가스 유입구와 가스출구 덕트 사이에서의 압력 강하를 각각 측정하였다. 일반 공업용 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 입자상 물질의 집진효율을 평가하기 위하여 고체 입자의 크기분포와 무게가 측정된 플라이에쉬(평균 입경크기 = 3.1 μm) 입자를 집진기 내로 주입하고 분진퇴적함에 집진되는 고체 입자를 포집하였다. 분진퇴적함에 집진된 고체 입자의 무게를 재고, x-ray sedigraph를 이용하여 집진된 입자의 크기 분포를 측정하였다. 측정된 무게들과 입자의 크기 분포를 이용하여 부분 집진효율과 전체 집진효율을 결정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 압력강하

원심력집진기에서 처리가스가 집진기를 통과하면서, 처리가스의 속도와 방향변화, 확장수축과 벽면마찰에 의한 에너지손실이 압력강하로 나타나게 된다. 그림 2는 일반 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 가스의 유입속도 변화가 압력강하에 미치는 영향과 이전 연구자들에 의해 제시된 압력강하 이론식과 경험식을 이용한 계산결과를 함께 나타내었다. 그림에서 보듯이 일반적인 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기 모두 가스유속이 증가함에 따라 압력강하는 유입속도의 자승에 비례하여 증가하였다. 이는 유속이 증가함에 따라서 유입구에서 난류성 에디가 증가하고 확장수축에 따른 난류세기와 벽면과의 마찰저항이 증가하기 때문이다.

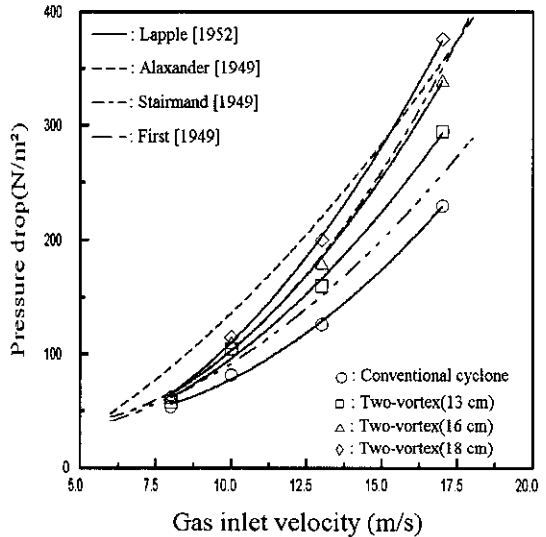


Fig. 2. Effect of gas inlet velocity on the pressure drop of conventional cyclone and modified cyclone having two stage vortex finder (L = 39 cm) with the calculated value.

2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 압력손실은 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 일반 공업용 원심력집진기 보다 더 크게 나타나고 있다. 이는 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 경우 몸통 내부에 외부 선회류약화기를 갖기 때문에 벽면 마찰이 몸통 벽면과 외부 선회류약화기의 외부 벽면에서 발생되어 마찰저항이 보다 증가하기 때문이다. 또한 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기는 몸통 내에서의 선속도가 증가하여 일반 공업용 원심력집진기보다 더 큰 선회류수를 갖게 된다. 이는 Browne and Strauss (1978)가 제시한 대로 증가된 압력 헤드 항의 에너지가 선회류 형성에너지 항으로 전환되었음을 의미하게 된다. 그러므로 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 압력강하가 기존의 원심력집진기의 압력강하보다 크게 나타나게 된다.

그림 3은 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 외부선회류와 내부선회류의 간격변화가 압력강하에 미치는 영향을 외부선회류 길이에 따라 도시한 결과이다. 그림에서 보듯이 외부 선회류약화기를 갖는 원심력집진기는 외부선회류와 내부선회류의 간격이 증가할수록 압력강하가 증가하였고 증가폭은 외부선회류 약화기의 길이가 증가할수록 증가하

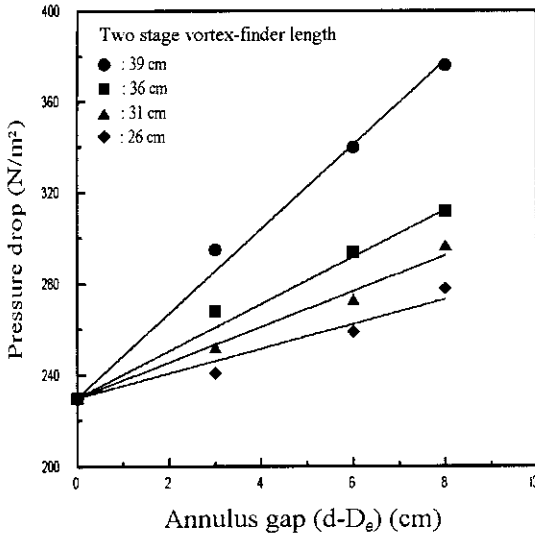


Fig. 3. Effect of annulus gap ($d-D_a$) on the pressure drop of modified cyclone having two stage vortex finder with variation of the vortex finder length.

였다. 외부선회류와 내부선회류 간격의 증가는 유입 가스의 몸통내 선속도를 증가시켜 압력손실을 증가시키기 때문인 것으로 사료된다. 또한 외부 선회류 약화기의 길이가 길어질수록 처리가스와 외부 선회류 약화기의 벽면에서의 마찰저항이 직선적으로 증가하며 외부 선회류수가 증가하기 때문에 선회류 약화기의 길이가 길어질수록 압력강하는 보다 크게 증가하게 된다.

그림 4는 플라이애쉬 입자가 공기 흐름 속에 포함되었을 때 가스 유입속도에 따른 일반 공업용 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 가스유속 변화가 압력강하에 미치는 영향을 분진농도 변화에 따라 나타내었다. 처리가스 내에 분진입자가 존재하면 압력강하가 감소하며 분진부하량이 증가할수록 압력강하의 감소효과가 더욱 증가하였다. 이는 가스흐름 내에 미량의 분진입자가 존재하면 압력강하가 30% 정도 감소한다고 보고한 Yuu *et al.* (1978) 등의 결과와 잘 일치하였다. 가스흐름 내에 존재하는 분진입자는 원심력집진기의 원통 또는 원추부의 벽면에서 미끄러지면서 공기와 벽면과의 마찰항력을 줄이게 되어 압력강하를 보다 감소시키는 것으로 사료된다. 또한 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 분진에 의한 압력강하의 감소는 2

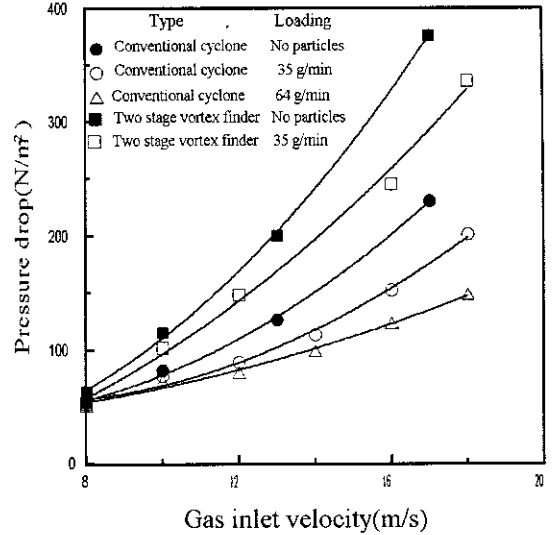


Fig. 4. Effect of gas inlet velocity on the pressure drop of conventional and modified cyclone having two stage vortex finder with variation of dust loadings.

단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 더 증가하고 있다. 이는 마찰항력에 의한 압력강하가 일반적인 원심력집진기보다 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 더 크게 작용하였음을 의미한다.

3.2 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 부분 집진효율

그림 5는 본 실험에 사용된 보령화력발전소의 전기집진기에 의해 포집된 입자상 물질에 대한 입경 크기분포를 나타낸 것이다. 그림 5-A는 입경크기를 상수좌표로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 본 실험에 사용된 시료는 평균 입경크기 3.1 μm 를 중심으로 작은 입경크기의 입자상 물질이 보다 많이 포함된 비대칭 분포를 갖고 있다. 그림 5-B는 입경크기를 대수좌표로 하여 나타낸 입경 크기분포이다. 그림에서 보듯이 대수좌표로 나타낸 입경 크기분포는 대칭분포를 갖고 있음을 알 수 있다. 그림 5-C는 X축을 대수좌표로 나타낸 누적분포이며, 5-D는 Y축을 확률분포로 나타낸 입경 크기분포이다. 이 확률분포를 이용한 시료의 기하평균 크기는 확률이 50%일 때의 입경크기이다. 그러므로 그림 5-D를 이용하여 계산된 본 실험에 사용된 시료의 평균크기는 3.1 μm 이다. 또한 그림 5-D의 확률대수분포를

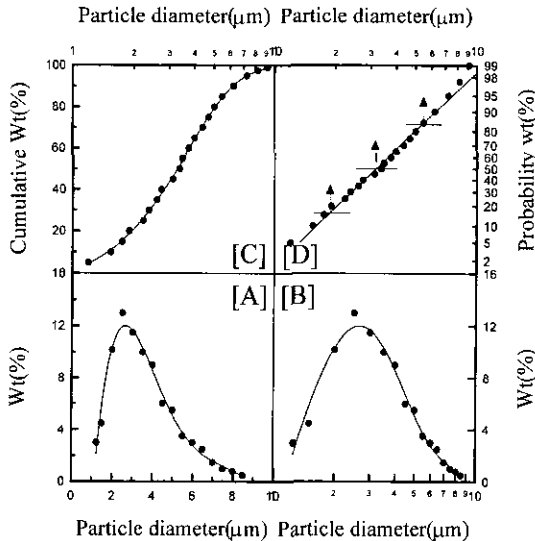


Fig. 5. Particle size distribution of fly ash.

이용하여 구한 보령 화력발전소의 플라이에쉬에 대한 기하표준편차는 1.72 μm이다.

그림 6은 처리가스의 유입속도 17 m/s, 선회류약화기 길이가 26cm일 때 일반 공업용 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 부분 집진효율을 2단 선회류약화기의 직경에 따라 나타내었다. 그림에서 보듯이 직경이 13cm와 16cm인 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 부분 집진효율이 일반 공업용 원심력집진기 보다 높다. 이는 2단 선회류약화기가 선회류약화기와 원심력집진기 사이의 입구영역에서 만들어지는 난류성 에디와 몸통 영역의 bouncing 효과, 그리고 내-외부선회류 사이의 동압차에 의한 분진 재비산을 감소시켰기 때문에 나타나는 것으로 사료된다. 그러나 2단 선회류약화기의 직경이 18cm인 원심력집진기에서의 부분 집진효율은 일반 공업용 원심력집진기보다 낮아지는데, 이것은 외부 선회류약화기와 몸통 사이의 간격이 지나치게 좁아져 선회류약화기와 몸통 사이의 환상구역을 흐르는 가스의 선회속도가 매우 증가하였기 때문이다. 환상구역 내에서 빨라진 선회속도는 강한 난류성 에디를 발생시키고 몸통에서의 2차 bouncing 효과를 증가시켜 미세분진을 선회영역으로 재비산시키게 된다. 그로 인해 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 선회류약화기와 몸통 사이

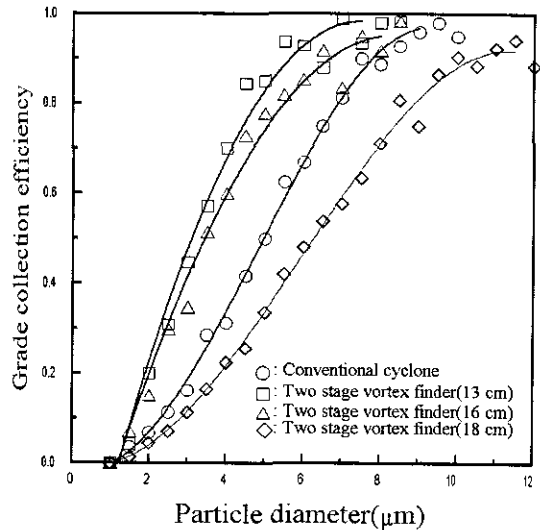


Fig. 6. Effect of particle diameter on the grade collection efficiency of conventional cyclone and modified cyclone having two stage vortex finder with variation of vortex finder length.

의 간격이 지나치게 좁아지면 집진효율이 크게 감소하는 것으로 사료된다.

그림 7은 2단 선회류약화기의 길이가 26cm이고 직경이 13cm인 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 입자크기에 따른 집진효율을 가스유속변화에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 처리가스의 유속이 증가할수록 집진기의 부분 집진효율은 증가하고 있다. 처리가스의 유입속도가 증가하면, 원심력집진기의 몸통영역과 원추부에서의 선회속도가 증가하고 가스흐름 내의 미세분진 원심력이 증가하게 된다. 따라서 미세분진의 경계층 이동이 용이하게 되고 원심력집진기에서 분진입자의 부분집진효율은 증가하게 된다. 그러나 처리가스의 유입속도가 분리속도 (saltation velocity) 이상으로 증가하게 되면 경계층에 포집되었던 분진의 재비산을 유발시킴으로 부분집진효율은 오히려 감소하게 된다. 그러므로 원심력집진기는 이러한 분리속도 이하에서 조업을 하여야 한다.

그림 8은 그림 6에서 나타낸 일반 공업용 원심력 집진기(사각 기호)와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기(삼각 기호)의 부분 집진효율과 Lapple and Shepherd(1940), Leith and Licht(1972) 및 Dietz

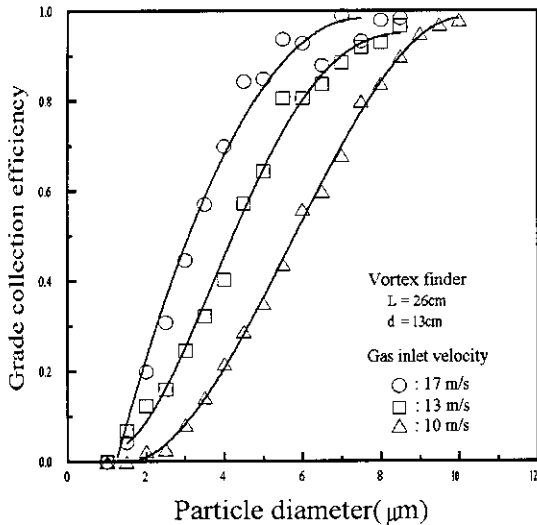


Fig. 7. Effect of particle diameter on the grade collection efficiency of modified cyclone having two stage vortex finder with variation of gas inlet velocity.

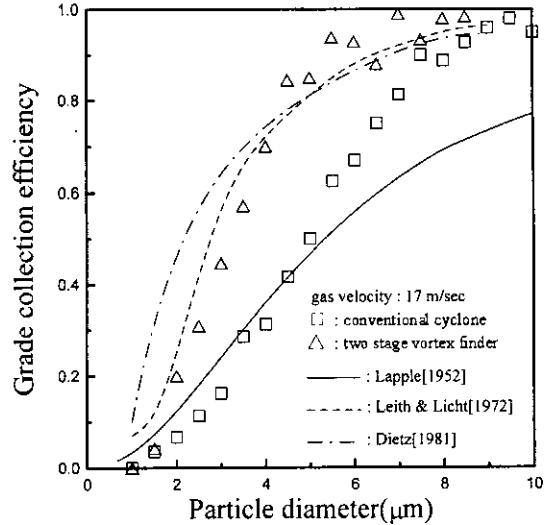


Fig. 8. Comparison of grade collection efficiency of conventional cyclone and modified cyclone having two stage vortex finder with the predicted value by model.

(1981)가 제시한 이론 모델값을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 Lapple and Shepherd (1940)에 의하여 제시된 모델 값과 실험치는 상당한 차이를 보여주고 있다. Lapple and Shepherd (1940) 모델은 고체 흐름을 단순 플러그 흐름으로 가정한 절단입경에서 부분 집진효율을 유도하고 있다. 그러나 원심력 집진기에서 고체 흐름은 단순 플러그 흐름이 아니고, 체류시간 분포를 갖는 역혼합 흐름이다. 이로 인하여 이 모델은 원심력집진기에서 일어나는 역혼합, 벽면 충돌 등과 같은 여러 현상들을 제대로 반영하지 못하는 것으로 사료된다. Leith and Licht (1972) 및 Dietz (1981)가 제시한 이론 모델식과 본 연구의 실험 값이 정확하게 일치하지 않고 있다. 이는 기존의 원심력집진기와 본 실험에 사용된 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기는 집진기의 기하구조면에서 차이를 갖고 있다. 즉, 본 원심력집진기는 선회류약화기의 외부에 차단막으로 2단 선회류약화기를 설치하였으므로 기존의 기하구조와는 차이를 보이게 된다. 그로 인해 본 연구의 결과와 이들의 이론 예측값이 차이를 나타내고 있다. 그러나 일반적인 경향성에서는 상당히 유사한 점을 갖고 있는 것으로 나타났다.

Leith and Licht (1972)가 제시한 원심력집진기의

부분 집진효율에 대한 이론 모델식은 입자의 형태는 구형, 입자의 반경 방향의 속도는 기체 흐름과 같다는 등이 이상적인 가정 하에서 식을 유도하였다. 그러므로 고체 입자의 벽면 반사, 난류성 에디의 역혼합에 의해 보다 작은 입자들이 내부 선회류로 들어가 집진되지 않거나 싸이클론 벽에서 고체 입자의 saltation, 분진회피 내에서 내부선회류로의 pick-up이나 재비산 등의 2차 효과를 정확하게 설명하지 못하는 경향을 갖는다. 그러므로 3 μm 이하의 미세분진에 대한 본 연구의 실험값이 Leith and Licht (1972)가 제시한 이론 모델값보다 적은 부분 집진 효율을 갖는 것으로 사료된다.

3.3 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 총괄 집진효율

그림 9는 일반 공업용 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 가스유속의 변화가 총괄집진효율에 미치는 영향을 선회류약화기 높이변화에 따라서 나타내었다. 그림 9-A는 일반 공업용 원심력집진기에서의 총괄집진효율을 나타낸 것이고 그림 9-B, C, D는 각각 2단 선회류약화기의 직경이 13cm, 16cm, 18cm일 때 원심력집진기의 총

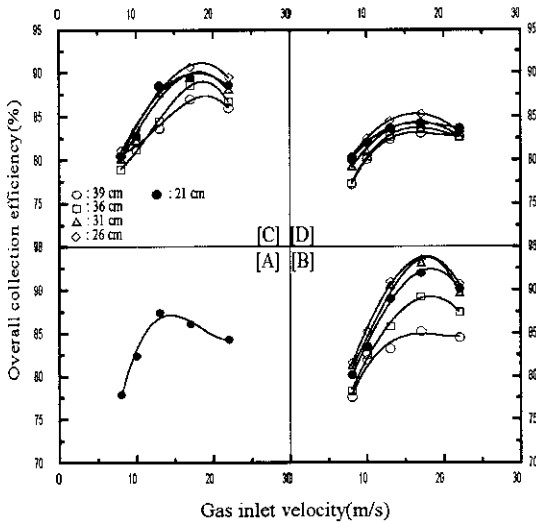


Fig. 9. Effect of gas inlet velocity on the overall collection efficiency of cyclone with variation of vortex finder length; (A) conventional cyclone, (B) vortex finder diameter (13 cm), (C) vortex finder diameter (16 cm), (D) vortex finder diameter (18 cm).

팔 집진효율을 나타낸 것이다. 그림 9-A에서 보듯이 일반 공업용 원심력집진기에서의 총괄 집진효율은 처리가스의 유입속도가 대략 13 m/s 정도까지는 유입속도가 증가할수록 집진효율은 증가하지만 그 이상의 유속에 대해서는 속도가 증가할수록 감소한다. 이것은 기체의 유입속도가 일정속도 이상으로 증가하면 벽면을 따라 흐르는 고체 입자가 내부선회류 흐름 속으로 비산분리되어, 분진호퍼 내에서 위로 상승하는 내부선회류와 같이 가스출구로 빠져 나가기 때문이다. 또한 처리가스의 유입속도가 증가하면 선회류약화기와 원심력집진기 입구부분의 환상구역 내에서 역혼합이 크게 발생하여 전체 집진효율이 감소하게 된다.

Kalen and Zenz (1974)는 가스 유입속도가 비산 분리속도의 1.25배 일 때 최고 집진효율을 가지며, 가스 유입속도가 비산 분리속도의 1.36배일 때 분진회적합 내에서 미세분진의 재비산이 일어난다고 하였다. 분진의 전체 집진효율은 기상 유속이 12.5 m/sec에서 최대값을 보이다가 그 이상의 유속에서는 감소한다고 하였는데, 이는 본 연구의 일반 공업용 원심력 집진기의 총괄 집진효율에 대한 실험값과 잘 일치하고 있다.

그림 9-B와 9-C에서 보듯이 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서의 총괄 집진효율은 일반 공업용 원심력집진기와는 약간 다른 경향을 보여주고 있다. 즉, 일반공업용 원심력집진기에서는 전체 집진효율이 가스의 유입속도가 대략 13 m/s 정도에서 최고값을 보이지만, 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기는 대략 17 m/s까지 증가하다 그 이상의 유속에 대해 감소하고 있다. 또한 전반적으로 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기가 기존의 원심력집진기보다 높은 전체 집진효율을 나타내고 있다. 이는 일반 공업용 원심력집진기에서 나타나는 일정속도 이상의 유속에서 벽면을 따라 흐르는 고체 입자의 흐름에서 내부선회류 흐름 속으로의 비산분리가 집진기 내부에 설치된 선회류약화기에 의해 저지되는 것으로 사료된다. 그림에서 보듯이 2단 선회류약화기의 직경이 18 cm인 원심력집진기를 제외하고는 보편적으로 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기의 총괄 집진효율이 일반 공업용 원심력집진기보다 향상되었다. 또한 총괄 집진효율의 상승 효과는 2단 선회류약화기의 직경이 13 cm인 원심력집진기가 다른 원심력집진기보다 더 크게 나타나고 있다. 또한 일반 공업용 원심력집진기에서 나타나는 환상구역에서의 미세분진의 역혼합이 2단 선회류약화기를 원심력집진기에서는 거의 발생되고 있지 않는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서의 결론은 앞 절의 실험결과를 근거로 하여 다음과 같이 얻을 수 있었다.

- 1) 일반 공업용 원심력집진기나 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서의 압력강하가 보다 크게 나타났으며 두 종류의 집진기 모두 가스 유입속도의 상승에 비례하여 압력강하가 증가하였다.
- 2) 원심력집진기를 통과하는 가스흐름 내에 분진이 존재함으로써 원심력집진기 내에서의 압력강하가 감소하였으며 분진 부하농도가 증가할수록 압력강하는 증가하였다.
- 3) 미세분진의 집진효율이 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 크게 향상되었다.
- 4) 기존 원심력집진기와 2단 선회류약화기를 갖는 원심력집진기에서 최대 집진효율을 보이는 가스

유속은 각각 13 m/s와 17 m/s이었다.

5) 직경 20 cm인 일반적인 원심력집진기에서 최고의 집진효율을 나타내는 2단 선회류 약화기의 크기는 직경 13 cm와 길이 26 cm이다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 선문대학교 지역연구센터(RRC)의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Alexander, R. McK (1949) Fundamentals of Cyclone Design and Operation, Proc. Austral. Inst. Min. Met. (N.S.), 152, 203-205.
- Browne, J.M. and W. Strauss (1978) Pressure Drop Reduction in Cyclones, Atm. Environ., 12, 1213-1218.
- Dietz, P.W. (1981) Collection Efficiency of Cyclone Separators, AIChE J., 27, 888-893.
- First, M.W. (1949) Cyclone Dust Collector Design, Am. Soc. Mech. Eng., Paper NO. 49-A-127.
- Kalen, B. and F.A. Zenz (1974) Theoretical-Empirical Approach to Saltation Velocity in Cyclone Design, AIChE Symp. Ser., 70(137), 388-392.
- Kang, K.S., T.W. Kwon, and S.D. Kim (1989) Hydrodynamics Characteristics of Cyclone Reactors, Powder Technol., 58, 211-220.
- Lapple, C.E. and C.B. Shepherd (1940) Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collector, Ind. Eng. Chem., 32, 1246-1248.
- Leith, D. and W. Licht (1972) The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors-A New Theoretical Approach, AIChE. Semp. Ser., 68(126), 196-201.
- Stairmand, C.J. (1951) The Design and Performance of Cyclone Reactors, Trans. Instn. Chem. Engrs., 29, 356-361.
- Yuu, S.T. Jotaki, Y. Tomita, and K. Yoshida (1978) The Reduction of Pressure Drop Due to Dust Loading in a Conventional Cyclone, Chem. Eng. Sci., 33, 1573-1577.