

PoC 부착 사이클론의 미세분진 유출 제어에 관한 연구

Emission Control of Fine Dust from Gas-Solid Cyclone

조 영 민

경희대학교 환경학과 및 환경연구소

(1998년 11월 24일 접수, 1999년 4월 27일 채택)

Young-Min Jo

Department of Environmental Science, Kyunghee University, Yongin city, Kyunggido, Korea, 449-701

(Received 24 November 1998; accepted 27 April 1999)

Abstract

Cyclones have been extensively used in the industry for removing fine particles from the gaseous streams, based on simplicity in design and construction in association with low cost and flexibility to operate in extreme and harsh environments. However, industrial cyclones are typically not very efficient for particles smaller than 10 μm . In this work, in order to improve the separation efficiency of reverse flow cyclones, a simple device named Post Cyclone (PoC) is installed on the top of an existing cyclone. Thereby the residual swirl present at the outlet (vortex finder) of a conventional cyclone has been used to capture the escaped dust from the cyclone in the PoC. The performance of PoC was closely evaluated by changing configuration of the PoC and operation condition. In addition, the dust behaviour in the PoC was investigated based on the hypothesis of residual vortex.

Key words : dust emission control, gas-solid separation, reverse-flow cyclone, dust flow behavior, vortex effect

1. 서 론

원심력을 이용한 대표적인 대기오염 방지 장치인 사이클론은 1800년대 후반 이래 공기나 배출가스로부터의 분진제거 및 입자분리에 폭넓게 사용되어 왔다. 일반적으로 사이클론은 간단한 구조로 구성되어 있으며, 조작이 용이하고 운전비용이 저렴할 뿐만 아니라 가혹조건에서의 사용이 가능하다는 장점이 있다(Shepherd and Lapple, 1939). 그러나 나선형 유체흐름(swirl flow) 속에서 입자의 관성력에 의해 분진을 분리하는 사이클론으로서는 상대적으로 낮

은 관성효과를 지니는 미세입자(주로 10 μm 이하)들에 대한 제어효율이 낮을 수 밖에 없다(Dirgo and Leith, 1985). 이러한 미세입자들의 유해성은 여러 연구들로부터 다양한 측정 및 실험을 통하여 제기되거나 입증되어왔다(최진수 등, 1998; Mahar and Zimmerman, 1977). 더욱이 최근 들어서 분진 배출에 관한 대기오염 규제가 더욱 강화되고 있는 추세이기 때문에 이를 만족시키고자 다양한 형태의 연구가 활발하게 진행되고 있다(Molerus and Gluckler, 1996; Jiao and Yamamoto, 1993; Koch and Licht, 1977).

이러한 배경을 바탕으로 산업용 사이클론의 유출

가스에 포함되어 있는 미세분진 입자들을 2차적으로 분리하고 제거할 수 있는 새로운 장치가 최근 개발되었다(Plomp *et al.*, 1996). 이 장치는 Post Cyclone (PoC)이라 명명되었고, 기존의 사이클론 윗부분에 간단히 부착할 수 있는 구조이다. PoC는 사이클론 유출부인 선회류 출구(vortex finder)를 통하여 외부로 유출되는 유체중에 잔존하는 나선형 흐름특성을 활용하여 하부 사이클론으로부터 분리되지 않은 채 유출되는 미세분진 가운데 일부를 제거할 수 있는 장치이다. 본 장치는 다른 2차 분진 처리장치에 비하여 a) 기존의 사이클론에 쉽게 설치할 수 있는 구조, b) 저렴한 제조 비용, c) 거의 무시할 수 있을 정도의 낮은 압력손실, 그리고 d) 고부가가치 입자상 물질의 재생 가능하다는 장점이 있다.

PoC를 이용한 입자상 물질의 분리는 기본적으로 접선속도장(tangential velocity field)내에서 미세입자들이 원심력에 의해 바깥쪽으로 향하는 원리에 의하여 이루어진다. 컴퓨터를 사용한 계산에서 밝혀진 바에 따르면 사이클론에서 빠져나오는 유체에 약 85~89% 정도의 나선형 흐름 효과가 남아 있음이 확인되었고, 기체에 대한 고체입자의 방사방향 속도(radial velocity)는 접선속도의 제곱에 비례하며, 선회류 출구 벽면에서 방사방향(radial direction)으로의 입자 이동은 하부 사이클론의 분리영역에서 발생하는 것보다 4.5배 가량 더 높게 나타났다(Ray *et al.*, 1997). 이에 따라 선회류 출구(vortex finder)에서 분진 입자들은 중심부보다는 바깥쪽, 즉 내측 벽면에 주로 존재함을 예측할 수 있다. 그러므로 가스와 분진들이 대기 중으로 배출되기 전 환형구조(annular shell)의 PoC를 설치함에 의해 PoC 내측면을 따라 상승하는 분진들을 외부 대기 중으로 유출되는 주 흐름으로부터 일부 분리할 수 있다. 이러한 원심력효과 이외에도 입자들의 응집(agglomeration), 결합(flocculation), 난류성 분산(turbulent dispersion), 그리고 입자들의 충돌과 같은 다양한 메커니즘이 PoC의 실제 집진효율에 영향을 미칠 것으로 여겨진다.

선행 연구에서는 실험용 사이클론과 PoC를 제작하여, 다양한 운전 조건하에서 두 종류의 서로 다른 성질의 분진을 공급하며 사이클론 및 PoC의 분진 제거효율을 관찰하였다(Jo *et al.*, 1998). 실험결과 PoC를 설치함으로써 전체적으로 약 5~10% 정도의

총괄 집진효율 상승효과가 있었고, PoC의 효율은 입자의 크기와 밀접한 관계가 있음이 밝혀졌으나, 공급 농도나 유체의 유입속도(inlet velocity)와의 특정한 경향은 발견하지 못하였다. 또한 Ray 등(1997)의 연구결과와 비교하여 볼 때 크기가 다른 사이클론에 적용할 경우 PoC의 분진 제거 성능에 있어서 입자 크기에 따른 개별효율(grade efficiency)이 서로 다른 경향을 나타내었다. 따라서 경제적인 효과를 비롯한 여러 가지 장점을 지니고 있는 PoC를 다양한 크기 및 구조의 사이클론에 광범위하게 적용시킬 수 있도록 구체적인 분리 메커니즘을 연구하고 미세입자에 대한 안정적인 집진효율을 얻을 수 있는 최적구조를 설정할 필요가 있다. 아울러 직렬로 연결된 PoC와 주 사이클론을 통과하는 분진/가스 혼합 유체의 운동현상을 실제 실험을 통하여 관찰하여 유체역학적 이론 시뮬레이션의 신뢰성을 높이고 보완할 수 있는 귀중한 자료로 활용할 수 있는 기반을 마련하고자 하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 실 험

2.1 실험장치 및 시료

두 개의 스텐레스 원통형으로 구성되어 있는 PoC는 사이클론의 선회류 출구(vortex finder) 상부에 그림 1과 같이 수직으로 설치하였다. 실험에서 사용된 사이클론은 고효율 Stairmand식 표준 설계 조건에 준하여 몸통 지름이 0.2 m, 높이가 0.8 m, 그리고 접선방향 분진/유체 흐름입구(tangential inlet)는 0에서 0.04 m까지 너비를 변화시킬 수 있는 여단이 구조로 제작하였다. 사이클론과 PoC의 주요부분의 치수는 표 1에 정리 요약하였다. PoC의 크기는 최적 조건의 PoC 설계 기준이 아직 설정된 상태가 아니므로 하부 사이클론의 기본 크기를 기준으로 제작하였다. 한편 PoC를 포함한 전체적인 실험 장치 배열은 그림 2에 개괄적으로 도시하였다.

PoC의 중앙 공간은 내실(inner chamber), 외부 환형공간은 원형외실(ring chamber)이라 명명하였다. PoC의 내측벽(inner shell)의 직경에 따라 상부 배출부(De')와의 공간 크기를 2~5 cm로 변화시킬 수 있으며, 이 환형(環形)틈을 통하여 지류(bleed flow)와 분리된 분진이 PoC의 원형외실(ring cham-

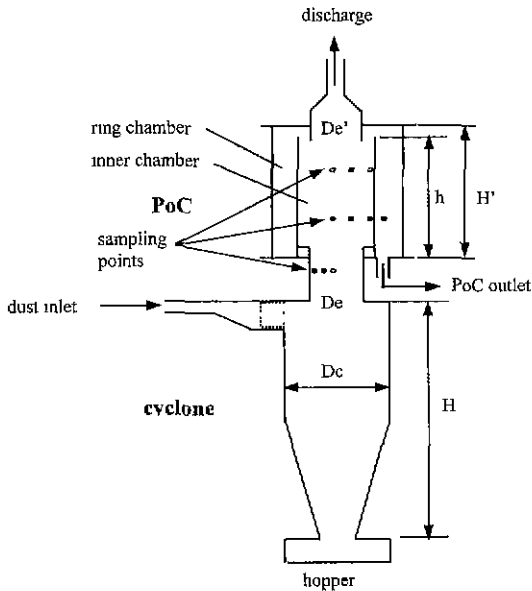


Fig. 1. The schematic of the cyclone and the PoC combination.

Table 1. Major dimensions of cyclone set-up.

Dimension	Length (cm)
Inlet height (H)	10
Cyclone height (H)	80
Cyclone diameter (Dc)	20
vortex finder (De)	10
PoC height (H')	40
Inner chamber height (h)	25
Outlet diameter (De')	10

Table 2. Overall mass efficiency of PoC, abs at different configuration.

Configuration	E(%)
2 mm holes in inner shell	23.4
5 mm holes in inner shell	22.9
Standard PoC	21.3
Conical vane in vortex finder	20.4
open structured inner shell	21.7

ber)로 흘러 들어가게 된다. PoC로 향하는 지류의 양은 주 유체흐름의 20%로 설정하였고, 원형외실의 하부에 위치한 구멍(φ: 2 cm)을 통하여 고효율 필터로 유도되어 분진은 분리하고 깨끗한 기체만 외부 대기 중으로 배출시킨다. 섬유질(Gore-Tex)로 제작

된 고효율 필터는 PoC의 기본 작동과는 무관하며 다만 전체 system의 질량수지(mass balance)를 유지하고 PoC에 의해 분리된 분진의 특성분석을 위하여 설치하였다. 추후 산업용 규모로 제작할 경우 지류(bleed flow)는 주 공정으로 재 회수할 수 있다.

실험에 사용한 분진시료는 소석회(Ca(OH)₂) 입자로서 평균 직경(mass mean diameter)이 1.8 μm 이고 비교적 좁은 크기분포를 보여주었다. 분진입자는 기체중에서의 분산을 촉진시켜주는 분산매(Aerosil 200)와 사전 혼합하여 진동 분진 공급장치(vibratory dust feeder)에 의해 스텐레스 망(taylor no. 70)을 통과 시켜가며 3.5 g/m³로 사이클론으로 공급하였다. 스텐레스 망은 비정상적인 크기의 입자나 불순물의 유입을 방지하고, 거대한 덩어리를 분쇄시켜주는 중요한 역할을 한다.

2. 2 실험방법

본 연구에서는 선행 연구결과들을 바탕으로 미세 입자(3 μm 이하)에 대해 중점적으로 집진효율을 관찰하여 PoC의 최적 구조를 찾고, 분진의 분리 메커니즘을 확인하기 위하여 기체와 분진의 흐름을 관찰하고자 하였다. 압축기로부터 발생하는 압축공기는 건조장치를 거쳐 25 psi의 압력으로 노즐을 통하여 inlet pipe로 공급되면서 pipe내의 분진을 완전히 혼합, 분산시켜 사이클론으로 분진과 함께 흘러들어간다. 이때 유체의 흐름은 제의 최종 배출구 쪽에 설치한 역방향 송풍기인 vortex blower(Hitachi, NF 1513)에 의해 유지하였다. 사이클론 및 PoC에 대한 유량은 두개의 유량계(gas rotameter)로 측정하였으며, 기체의 공급유속은 일정한 부피속도(90 m³/hr) 하에서 사이클론 입구에 설치된 여단이 막의 개구면적(opening area) 변화를 통하여 6.5~23.2 m/s의 범위내에서 조절하였다. 사이클론과 PoC를 흐르는 분진의 크기분석은 레이저를 이용한 분석장치인 Aerodynamic Particle Sizer(APS, TSI 3302)를 사용하여 입구 및 출구 등 3 지점에서 real-time으로 측정하였다. PoC의 구조변화와 관련한 실험을 위하여 내실벽 하부틈새(그림 2, A부 참조) 개폐, 내측벽에서 다른 크기의 구멍(φ: 2 mm, φ: 5 mm)을 형성, 그리고 원추형 유도물(conical guide)을 선회류 출구(vortex finder)에 설치하는 구조를 준비하였다.

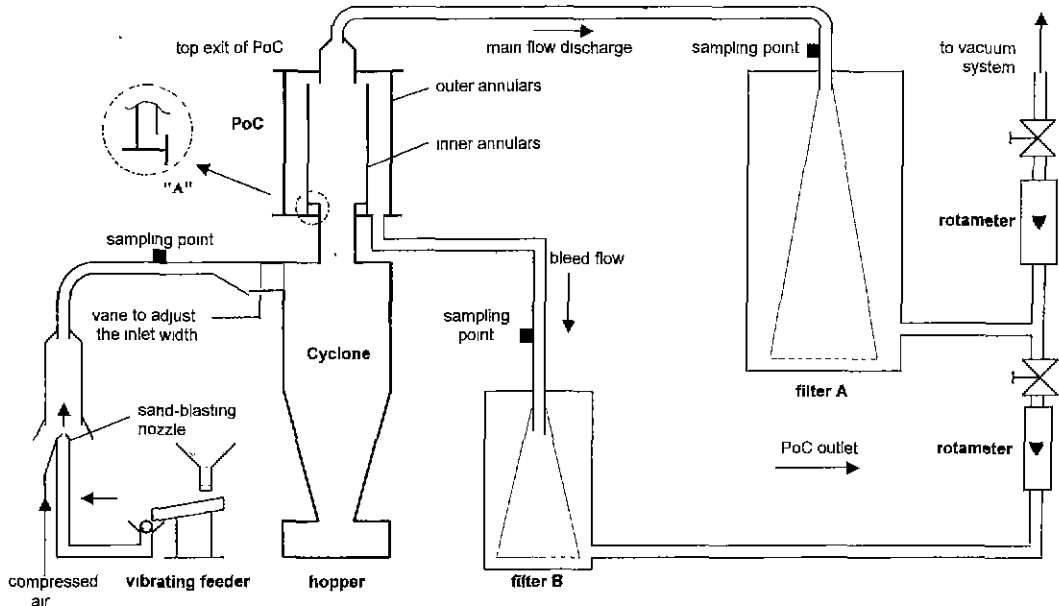


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental set-up.

3. 결과 및 고찰

처음 실험은 PoC 없이 싸이클론만의 특성을 유속과 분진 농도를 변화시켜가며 진행하였다. 그 후 다양한 조건하에서 PoC를 부착한 후 실험을 진행하고, 싸이클론의 호퍼(hopper), PoC 필터(filter B) 그리고 최종 필터(filter A)에 모아진 분진들의 무게를 각각 측정하였다. 최종 필터에 수집된 분진은 싸이클론과 PoC를 거쳐 빠져나오는 미세분진이다. 측정된 입자의 크기와 무게로부터 질량을 기준으로 한 총괄효율(overall efficiency)과 개별효율(grade efficiency)을 계산하여 각 실험조건에 따라 비교 분석하였다. PoC의 절대효율($\eta_{PoC, abs}$)은 PoC로 들어가는 전체분진의 양에 대한 PoC에 의하여 분리되는 분진의 비로써 정의하였다.

$$\eta_{PoC, abs} = \frac{m_p}{m_p + m_f} \quad (1)$$

첨자 p 와 f 는 PoC와 최종필터(filter A)를 각각 의미한다. 시스템의 총괄 분진 제거효율은 싸이클론과 PoC에 의해 제거되는 전체 분진에 대한 효율을 의미하며 다음과 같은 식을 통하여 계산하였다.

$$\eta_{combined} = \frac{m_h + m_p}{m_h + m_p + m_f} \quad (2)$$

m_h 는 주 싸이클론 호퍼에 모아진 분진의 질량이다. 한편, PoC의 개별효율은 아래와 같이 정의된다.

$$\eta(dp)_{PoC, abs} = \frac{x(dp)_p m_p}{x(dp)_p m_p + x(dp)_f m_f} \quad (3)$$

여기서 $x(dp)$ 는 크기 dp 인 입자의 질량분율이다. 본 연구에서 사용된 싸이클론은 산업용 싸이클론보다 작기 때문에 $5\mu m$ 이상의 입자에 대해서는 비교적 높은 효율을 얻을 수 있었다. 그러므로 PoC로 진입하는 분진은 $5\mu m$ 이하의 매우 작은 입자들로 구성되어 있고, 본 논문에서는 PoC의 개별효율은 약 $5\mu m$ 까지의 입자에 대하여 논하도록 한다.

3.1 싸이클론과 PoC의 집진효율

PoC 설치에 대한 미세분진 제거 효과를 관찰하기 위하여 시스템의 각 부분에서 분진입자의 크기를 측정하였다. 그림 3은 fractional distribution (a)과 undersized cumulative distribution (b)을 입자의 aerodynamic size에 따라 도시한 것으로 최종적으로

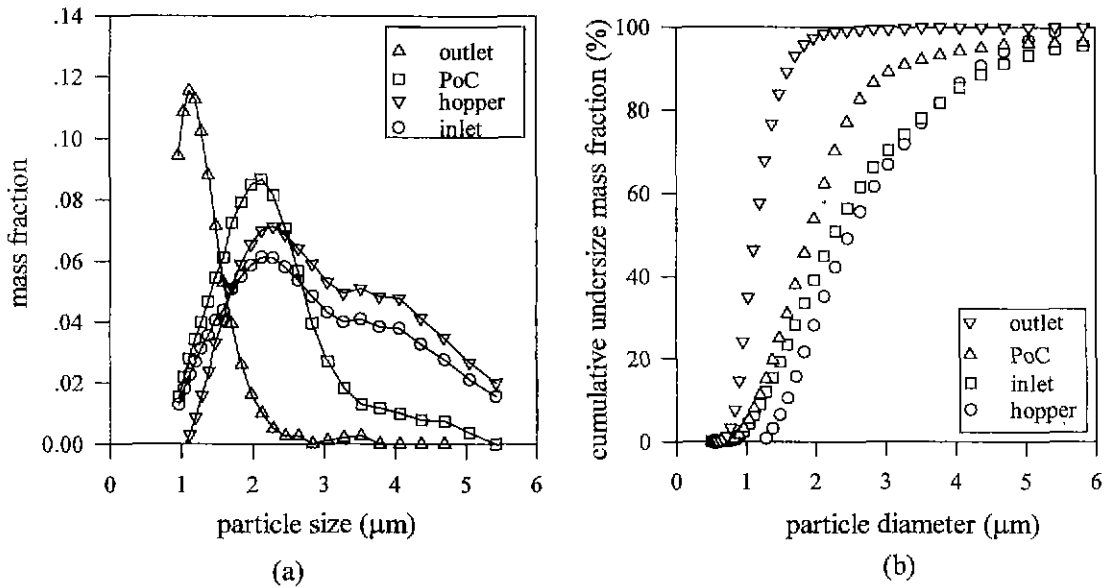


Fig. 3. Particle size distribution at different positions.

(a) fractional distribution (b) undersized cumulative distribution

system을 빠져 나가는 분진의 대부분은 2 μm 이하라는 것을 보여주고 있다. 즉, 2 μm 이상의 분진들의 경우 사이클론과 PoC에 의해 99% 이상 분리, 제거됨을 알 수 있다. PoC에서 분리된 입자들의 크기는 대체로 5 μm 이하로 나타났듯이 5 μm 이상의 분진들은 본 실험에서 사용된 사이클론에 의하여 대부분 제거됨을 확인할 수 있었다. 그림 3(b)는 입자 크기에 대한 적산 분포를 나타낸 것으로서 사이클론에 의해 분리되는 2 μm 이하 분진들은 hopper에 모아진 분진의 약 25% 이내인 반면 PoC에 의해 분리되는 분진 가운데 2 μm 이하의 미세입자가 차지하는 비율은 50%를 상회하고 있음을 보여준다. 전체적으로 PoC에 의해 분리되는 입자들의 크기는 90% 이상이 3 μm 이하인 반면, 대기 중으로 유출되는 분진은 약 1.6 μm 이하가 90%를 차지하고 있다. 이러한 크기에 따른 분명한 분리는 사이클론과 PoC 시스템이 주요 입자상 물질을 회수 할 필요가 있을 때 유용하게 사용될 수 있음을 암시하고 있다.

그림 4는 PoC가 사이클론 장치의 총괄효율에 미치는 영향을 유체의 유입속도 변화에 따라 관찰한 것이다. 유체의 유입속도가 증가함에 따라 사이클론

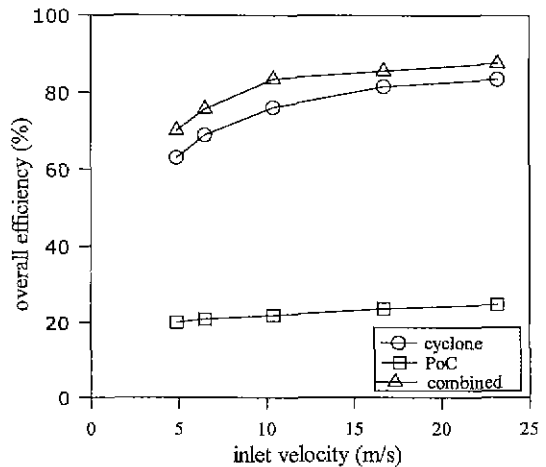


Fig. 4. Overall efficiency of cyclone and PoC with inlet velocity.

의 분진제거 효율의 증가는 이전의 연구들에서 폭 넓게 관찰되었으나, PoC의 경우 상대적으로 적은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 사이클론으로 주입되는 유체속도가 클수록 PoC내의 유체의 접선속도

(tangential velocity)가 증가한다는 사실은 computer 를 이용한 simulation 연구를 통하여 이미 밝혀졌다 (Venkata and Ray, 1998). 그러나 입자 제거효율의 증가가 크게 나타나지 않는 이유는 유입속도 증가에 의하여 주 사이클론의 집진효율이 상승함으로써 선회류 출구를 거쳐 PoC로 진입하는 분진의 농도가 상대적으로 낮아지기 때문에 PoC에 의한 분리효율의 증가를 억제하는 요소로 작용한다. 따라서 유속 증가에 따른 PoC의 분진 제거효율은 사이클론에 비해 현저히 낮다. 그러나 사이클론과 PoC 전체 효율을 고려해 볼 때 PoC로 인하여 약 5~8%의 분진 제거율 상승효과를 얻을 수 있다.

3. 2 선회류 출구와 PoC내에서의 분진 입경 분포

만약 PoC 안에서의 분진제거가 입자의 원심력 운동에 의해 이루어진다면 입자크기에 따른 농도구배가 중심에서 내측 벽면방향의 방사방향(radial direction)으로 발생할 것이다. 실제로 APS 입경분석기를 사용하여 선회류 출구와 PoC내에서의 입자흐름을 관찰해보면, 비교적 큰 입자들이 내측 벽 부근에서 많이 발견되고 있다(Fig. 5a, b). 입자의 sampling 위치는 그림 1에 표시한 바와 같다. 선회류 출구에서 세 곳(중심(R=1.0), 중심에서 1cm 떨어진 곳(R=0.8), 벽면(R=0.4))과 PoC 내부 여섯 곳(상·

하 각 세 곳)과 원형 외실 한 곳(하부 바닥으로부터 10cm)을 선정하여 real-time으로 입경을 측정하였다. 그림 5a와 5b는 선회류 출구와 PoC 내부 방사방향의 샘플링 위치에 따른 분진의 적산분포를 각각 보여주고 있다. 선회류 출구에서 얻어진 적산 질량분포(cumulative mass distribution)에 따르면 dp₅₀(적산분포 50%가 되는 입자의 입경)가 중앙에서는 1.5 μm 이고, 벽면 근처에서는 1.8 μm이었다. 또한 PoC에 대해서는 중앙에서 1.2 μm, 벽면에서는 약 1.7 μm로 분석되었으며, 상하 축방향의 입경분포차는 거의 없었다. 한가지 재미있는 사실은 그림 5.b에 나타난 바와 같이 1.2 μm 이하의 입자들에 대해서 PoC 내실의 중심부분을 제외하고서는 PoC의 방사방향 농도차이가 거의 없었다. 이 점은 그림 3에 나타난 PoC의 개별효율 분포와 잘 일치한다. 즉, PoC에서의 1 μm 이하의 극미세입자들에 대한 제거효율이 매우 낮은 현상을 보여주고 있다. 이는 1.2 μm 이하의 입자들이 선회류 출구를 빠져 나오면서 난류 분산효과(turbulent dispersion)에 의해 PoC의 중앙부위로 몰리는 현상으로 설명할 수 있다. 입자가 특정 크기를 넘어서게 되면 원심력효과가 분진의 분리효율에 더 크게 영향을 미치게 되며, 이는 또한 PoC의 크기와도 밀접한 관계가 있을 것으로 사료된다.

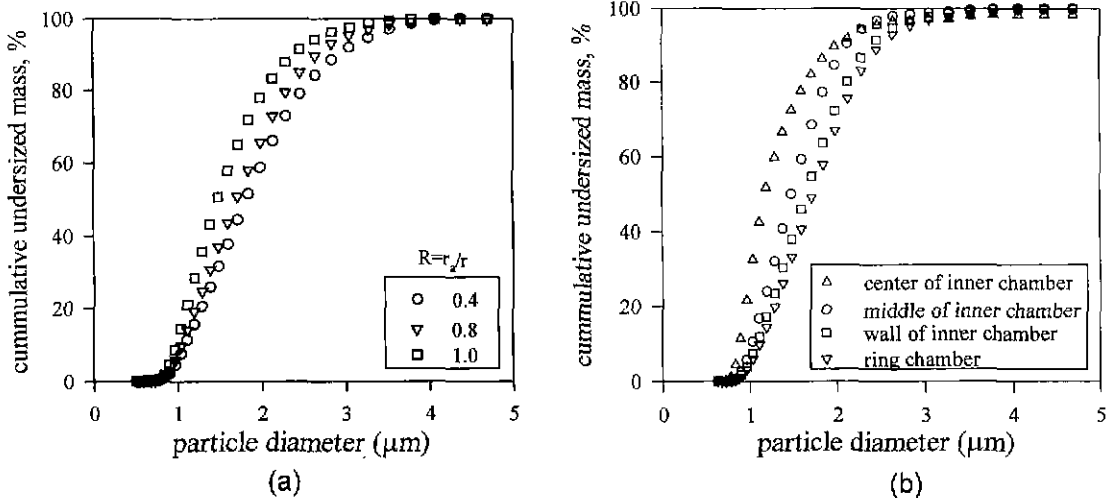


Fig. 5. Particle size distribution (a) in the vortex finder (b) in the PoC.

3.3 PoC의 구조에 따른 분리효율변화

몸체 지름이 0.4m인 사이클론과 최대 30cm의 PoC를 사용한 이전의 연구에서 선회류 출구 근처의 PoC 하부에 있는 환형 열린틈(그림 2 'A' 부 참조)의 존재는 3 μ m 이상의 입자에 대하여 그 제거 효율을 상승시킨다는 결과를 얻었다(Ray *et al.*, 1997). 입자의 크기가 클 경우 원심력에 의한 영향을 더 크게 받게 되고, 결국 높은 관성력을 지니게 된다. 그 결과 선회류 출구로부터 빠져나가는 분진 입자들이 PoC의 내실벽 방향으로 팽창할 때 상당량이 PoC 내실 상부로 상승하기 전에 PoC의 하부 틈을 통하여 원형외실쪽으로 빠져나가 분리되기도 하고, 일부 입자가 PoC 내실 벽에 충돌하면서 tangential force를 잃음으로써 낙하하여 하부 열린틈을 통하여 외실로 나가게 된다. 그렇지만 이러한 성질이 분리 효율 차이에 직접적인 영향을 끼치는 주요 원인이라고 보기에는 무리가 있다. 본 실험에 사용한 분체의 경우 PoC로 진입하는 입자의 크기는 거의 모두 3 μ m 이하이고, 이러한 작은 입자의 관성력이 아마도 하부 틈을 통하여 빠져 나갈 수 있을 정도로 충분히 크지 않기 때문일 것으로 여겨진다. 오히려 일부 분리된 미세입자들의 틈을 통한 재진입도 예상할 수 있다. 그러므로 이에 관하여는 보다 더 많은 실험이 요구되며, 현재 진행중이다. 따라서 본 연구에서는 상기 열린 구조를 비롯한 네 가지

서로 다른 형태의 PoC 및 보조물을 제작하여 PoC 효율에 대한 차이를 확인 하였다. 그림 6은 각 입자 크기별 개별효율을 계산한 것이며, 총괄효율은 표 2에 요약하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 3 μ m 이상의 모든 입자에 대하여 PoC는 대단히 높은 분리 성능을 보여주었다. 반면에 3 μ m 이하의 입자에 대하여는 그 효율이 5~90%까지로 PoC의 구조와 입자의 크기에 따라 다양하게 변화하였다.

3.3.1 PoC 내실벽에 서로 다른 크기의 원형구멍 형성

PoC 내실 벽(inner shell)에 각각 지름 2mm(200개)와 5mm(32개)의 구멍(hole)을 내어 입자의 분리효율을 관찰하였다. 구멍이 있는 PoC 내부 column(perforated inner shell)을 삽입하였을 경우 기존의 표준형태보다 낮은 압력강하와 분리효율 증가 효과를 얻었다. 표 2에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 약 2~5% 정도의 분명한 효율 상승이 있었다. 투명한 아크릴제 PoC를 사용하여 관찰한 결과 분리효율의 증가는 단순히 열린 구멍을 통한 입자들의 물리적 통과가 촉진되기 때문인 것으로 파악되었다. 입자들이 내실 벽에 충돌한 후 안쪽으로 반동하는 양이 상대적으로 적을 것으로 여겨진다. 한편, 전체 개구 면적(opening area)이 서로 동일함에도 불구하고 2mm 크기의 구멍이 있는 내부 실린더가 5mm 크기의 구멍이 있는 경우보다 약간 높은 효율이 발견되었다. PoC의 효율에 대한 구멍의 영향이나 유체흐름에 대한 영향을 정확히 이해하기 위해서는 보다 포괄적이고 다양한 실험이 필요하다.

3.3.2 원추형 유도판의 삽입

입자들이 PoC내 환형 분리지역으로 이동하는 것을 돕기 위하여 아래로 경사진 깔대기 형상의 유도판(conical vane)을 선회류 출구 내부에 설치하였다. 이러한 원추형 유도판은 입자들이 PoC로 진입하기 직전 초기 방사형 위치(initial radial position)를 인위적으로 내실 벽 근처로 유도하기 위한 의도에서 설치하였다. 그러나 오히려 PoC의 효율이 약 2~3% 감소하는 역효과가 발생하였다. 육안으로 확인할 수는 없었지만 사이클론에서 올라온 분진들이 PoC의 내측 벽에 강하게 부딪힌 후 안쪽으로 반동하는 현상이 발생하는 것으로 추측된다. 동시에 미세입자들의 경우, 유도판을 빠져 나오자마자 농도구배에 의해 유체와 함께 안쪽, 즉 PoC 중심부로 급격

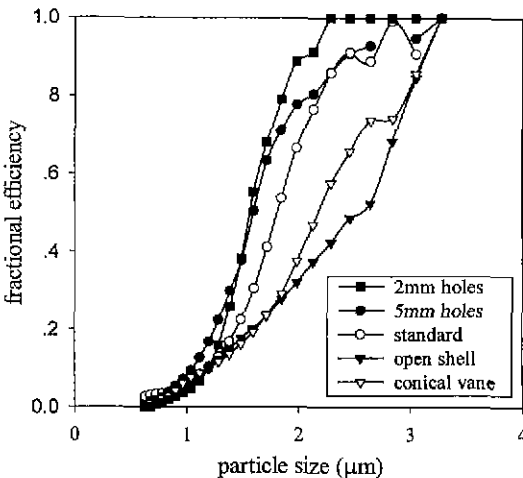


Fig. 6. Grade efficiency of the PoC with and without holes.

히 빨려들어가듯 움직인다고 믿어진다. 원추형 유도판은 유체 유입속도 10m/s에서 약 10Pa 정도의 추가 압력손실을 야기함으로써 그다지 큰 장점이 없는 것으로 파악되었다.

3.4 입자의 이동

PoC를 적용하는 이유는 규모가 큰 사이클론을 빠져나오는 미세입자의 일정부분을 추가로 포집하고자 하는 것이다. 따라서 PoC내에서의 입자 움직임을 확인하기 위하여 1~10 μ m 크기의 입자의 운동궤적을 계산해보았다. 이때 PoC는 순방향 흐름 사이클론(uni-flow cyclone)과 같은 형태로 가정하였고, 방사형(radial direction) 운동식은 일반 사이클론에 관한 기존의 연구결과(Ogawa, 1993; Leith & Licht, 1972)와 유사한 가정을 고려하여 다음과 같이 적용하였다.

i) 선회류 출구(vortex finder)에서 입자의 낮은 농도로 인하여 입자와 입자, 고체입자와 기체간의 상호 작용은 무시한다.

ii) 작은 크기의 입자에 대하여는 Stokes의 법칙을 적용한다.

iii) 기체의 방사형 방향 속도(radial velocity)는 무시한다.

iv) 입자의 접선속도는 기체와 동일한 것으로 간주한다(접선방향으로 미끄러짐 현상이 없다고 가정한다).

v) 잔여 와류 효과로 인하여 사이클론의 선회류 출구로부터 빠져나오는 기체내의 입자들의 방사 방향농도구배(radial concentration gradient)가 존재할 것으로 예상된다.

첫번째 접근으로 입자들이 사이클론으로부터 PoC로 수직이동할 때 지름방향으로 고르게 혼합, 분포되어 있다고 가정하며, vortex field내에서의 입자에 대한 힘 수지는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\pi d_p^3 \rho_p U_T^2}{6R} - 3\pi \mu d_p (V_r - U_r) = \frac{\pi d_p^3}{6} \rho_p \frac{d^2 R}{dt^2} \quad (4)$$

이 식에서 $d^2R/dt^2=0$, $U_r=0$ 그리고 $V_r=dR/dt$ 인 것으로 가정하였다. 입자가 PoC내의 어떠한 임의의 지점(R_1)에서 PoC 내측벽(R_2) 또는 분리영역까지 이동하는데 걸리는 시간은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$t = \frac{9\mu}{\rho_p(n+1)} \left[\frac{R_2}{U_{T2} d_p} \right]^2 \left[1 - \left[\frac{R_1}{R_2} \right]^{2n+2} \right] \quad (5)$$

일반적으로 입자가 PoC내에서 유체의 체류시간 동안 R_1 에서 R_2 로 움직이는 동안 PoC에 의한 분리가 발생한다. 식(5)를 이용하여 입자의 이동시간을 계산하기 위하여 내측벽(inner annular)에서의 접선속도(U_{T2})를 알아야 한다. U_{T2} 는 기존의 참고문헌들에서 제안한 경험식들로부터 유추할 수 있지만, 본 연구에서는 수치적 시뮬레이션을 이용한 계산 결과를 적용하였다(Jo and Ray, 1998). 진입유속(inlet velocity) 10.4 m/s와 R_2 가 6.75 cm일 때를 기준으로 계산한 결과 6.9 m/s의 평균속도(U_{T2})를 얻었다. 선회류 인자(vortex index, n)는 사이클론의 첫수를 기준으로 Alexander(1949)가 제안한 식으로부터 계산한 결과 0.54를 얻었다. 각각의 다른 크기의 입자들이 잠재적인 분리지역(potential separation region)에 도달하는 시간을 PoC의 중심으로부터 입자의 처음 출발 위치에 따라 계산하여 그림 7에 도시하였다. 이때 분진입자들의 축방향 출발점은 선회류 출구 표면으로 설정하였다. 그림 7로부터 3 μ m 이상의 입자들은 그들의 출발점에 관계없이 매우 짧은 시간(약 0.3초) 내에 분리영역에 도달하고 있음을 알 수 있다. 입자의 분리제거가 어떠한 예기치 못한 mechanism에 의해 영향을 받지 않는다면 높은 효율이 얻어질 것으로 짐작한다. 이러한 사실은 3 μ m 이상의 비교적 큰 입자들이 거의 모두 분리되고 2~3

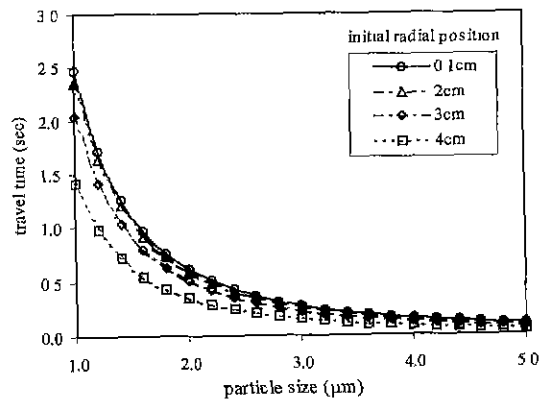


Fig. 7. Travel time of the particles in the PoC as a function of an initial radial position from the center.

μm 입자들은 약 60~80% 정도 분리되고 있음을 보여주는 그림 3에서 얻은 실측 결과와 잘 일치한다.

이러한 모델링 접근은 간단할 뿐만 아니라 복잡하고 시간이 많이 소요되는 계산없이 PoC의 최소 내부 직경을 제시해줄 수 있다. 그렇지만 보다 정확한 PoC의 개별효율의 예측을 위해서는 다음과 같은 두 개의 매개변수가 여전히 필요하다: a) 유체의 체류시간, b) 선회류 출구에서 나와 PoC로 들어가는 입자의 초기 위치.

한편 사이클론과 마찬가지로 PoC내에서 기체는 나선형 흐름을 유지하기 때문에 입자와 기체의 평균 체류시간 계산이 쉽지 않다. 사이클론(reverse flow cyclone)에서 유체의 회전수를 계산할 때 가장 널리 쓰이는 Lapple(1950)의 경험식을 PoC에 적용하기에는 무리가 있다. 왜냐하면 와류의 강도와 PoC로의 진입상태가 모 사이클론과는 많은 차이가 있기 때문이다. 본 연구에서는 가능한 실제와 가까운 유체의 체류시간을 결정하기 위하여 일종의 분필 가루인 적색 tracer (Snowcal 40, Blue Circle Industry, ρ: 2640 kg/m³, 평균입경: 3.5 μm)를 동시에 주입하여 투명 아크릴 PoC를 통하여 관찰한 결과 평균 1.6회 정도 선회함을 알 수 있었다. 이를 바탕으로 계산한 결과 PoC내에서 유체의 평균체류 시간(mean residence time)은 0.18초로 나타났다. 즉, 이 시간 이내에 입자가 초기위치에서 방사방향으로 PoC 분리 영역에 도달할 수 있으면 PoC 외실로 빠져 나가며 분리될 수 있다.

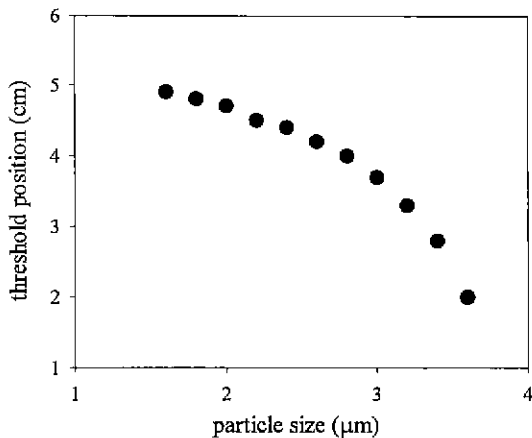


Fig. 8. Threshold initial position from the PoC center.

선회류 출구를 빠져나오는 동안의 입자들의 위치, 즉 방사방향 농도분포에 관한 정보는 일반적인 공개문헌에서 거의 발견되고 있지 않다. 본 연구에서는 입자들의 방사형 위치를 입자 개별효율의 실험결과와 식 5에 의해 계산한 분리영역까지의 이동시간을 비교함으로써 예측하고자 하였다. 예를 들면, 2.4 μm 입자에 대한 fractional efficiency는 60% 이고, 이는 2.4 μm 크기의 입자들 가운데 60%가 선회류 출구를 빠져 나올 때 중앙 축으로부터 3.3 cm 떨어진 분계점(threshold position)을 넘어 존재한다는 것을 의미한다. 분계점이라 함은 입자가 PoC에 의해 분리될 수 있는 벽면으로부터의 최소거리(중앙으로부터 최대거리)를 지칭하며 각 입자의 크기에 따라 그림 8에 나열하였다. 분진입자들이 PoC에 의해 분리제거되기 위해서는 입자들의 초기 위치가 그래프의 분계점 윗 부분에 놓여 있어야 한다. 그림 8의 경우 3.8 μm 이상 크기의 입자들의 경우 초기 위치와 관계없이 유체가 외부로 빠져 나가기 전에 PoC 분리 영역에 도달할 수 있고, 1.6 μm 이하의 경우 미세입자가 선회류 출구 벽면에서 빠져 나올지라도 좀처럼 분리영역에 다다를 수 없음을 보여준다. 이런 종류의 분석은 운전변수나 구조변수(geometrical parameter)등과 관련하여 선회류 출구내의 입자 분포를 예측하기 위하여 많은 자료를 상호 연관 시키면서 꾸준히 진행시킬 필요가 있다.

본 연구에서 시도한 모델링 작업은 PoC내 입자의 분리제거 메커니즘이 원심력 운동에 의해 일부 입자 크기에 대해 적용될 수 있을 것으로 여겨진다. 이를 보다 광범위한 조건하에 적용시킬 수 있도록 하기 위해서 PoC의 유체흐름 형태를 토대로 컴퓨터를 사용한 수치적 시뮬레이션을 통해 효율이나 유체의 성질 변화를 계산해 낼 수 있다.

4. 결 론

사이클론의 단점인 미세입자 분리효율을 증대시키기 위하여 개발된 Post Cyclone은 최고 10%까지의 총괄효율 증가를 보여주었다. 본 연구는 PoC의 효율을 극대화 시키기 위하여 다양한 구조의 PoC를 택하여 실험하였고, 사이클론으로부터 배출되는 미세입자의 흐름형태를 파악하여 PoC의 분진 제거 메커니즘을 규명하고자 하였다. 실험으로부터 PoC

내실 column에 직경 2mm 구멍을 낸 것이 가장 높은 효율(dp_{50} : 1.6 μ m)을 보여주었다. PoC 내부에서의 힘의 평형을 기초로 한 간단한 모델링 연구를 통하여 PoC의 유효 구조나 크기를 예측하는데 한 걸음 더 나아갈 수 있었다. 그러나 자세하고 구체적인 개별효율 변화나 특성을 파악하기 위해서는 난류분산(turbulent dispersion), 입자반동(particle bouncing) 그리고 입자의 응집(agglomeration) 과 같은 2차적인 인자까지도 고려하여 보다 자세하고 정확한 모델링을 실시할 필요가 있다.

감 사

본 연구를 위해 재원 지원을 해주신 경희대학교 연구지원처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 최진수, 백성욱(1998) 대기 중 TSP와 PM10 농도의 관련성, 한국대기보건의학회지, 14(1), 1-10
- Dirgo, J. and Leith, D. (1985) Cyclone collection efficiency; comparison of experimental results with theoretical predictions. *Aerosol Sci.*, 4, 401.
- Jiao, X. and Yamamoto, K. (1993) Cyclone dust collector with an Internal Perforated cylindrical tube. *Society of Mechanical Eng. in Japan*, B. no-93-0393. 3153-3157
- Jo, Y.M. and Ray, M.B. (1998) Dust collection by post cyclone (PoC) to reduce the emission of reverse flow cyclone, *Environmental Strategies for the 21st century-an asia pacific conference*, 8-10, April, 1998 at National University of Singapore, 521-526.
- Koch, W.H. and Licht, W. (1977) New design approach boosts cyclone efficiency. *Chemical engineering*, no. 7, 80-88
- Leith, D. and Licht, W. (1972) The collection efficiency of cyclone type particle collectors-A new theoretical approach. *AIChE Symp Series*, 68(126), 196-206
- Mahar, M. and Zimmerman, N. (1975) Evaluation of selected methods to assess the potential hazards associated with particulate emissions, *Mitre Corp. interim report*, EPA contract 68-02-1859.
- Molerus, O. and Gluckler, M. (1996) Development of a cyclone separation with new design, *Powder Technol.* 86. 37-40.
- Ogawa, A. (1993) Application of mechanical similarity laws to the collection efficiency of geometrically types of uni-flow cyclone dust collectors, 1. of *Thermal Sci.*, 2(2), 87-97
- Plomp, A., Beumer, M I L and Hoffmann, A. (1996), Post Cyclone, an approach to a better efficiency of dust cyclones, *Aerosol Science*. 27, S631-S632.
- Ray, M.B Luning, P.E. and Hoffman, A.C. (1997) Post cyclone (PoC): an innovative way to reduce the emission of fines from industrial cyclones, *Ind. Eng Chem. Res.* 36. 2766-2774
- Shepherd, C.B. and Lapple, C.E (1939) Flow pattern and pressure drop, *Ind. Eng. Chem.*, 31, 972.
- Venkata, K.R. and Ray, M B (1998) Numerical simulation of swirl flow in cyclone separator with an auxiliary device, *Environmental Strategies for the 21st century-an asia pacific conference*, 8-10, April, 1998 at National University of Singapore, 293-298.