CT1) 싸이클론을 이용한 미세분진 포집효율 증대에 관한 연구

Improvement of the Collection Efficiency of Fine Dust in Reverse Flow Cyclone

조영민

경희대학교 환경학과

1. 서 론

원심력을 이용한 대표적인 대기오염 방지 장치인 싸이클론은 1800년대 후반이래 공기나 배출가스로부터의 분진제거 및 입자분리에 폭넓게 사용되어 왔다. 일반적으로 싸이클론은 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 싸이클론으로서는 상대적으로 낮은 관성효과를 지니는 미세입자(주로 10μm이하)들에 대한 제어효율이 낮을 수밖에 없다(Dirgo and Leith, 1985). 이러한 싸이클론의 유출가스에 포함되어 있는 미세분진 입자들을 2차적으로 분리하고 제거할 수 있는 새로운 장치가 최근 개발되었다(Plomp et al, 1996). 이 장치는 Post Cyclone(PoC)이라 명명되었고, 그림 1에 개략적인 모습을 도시하였으며 기존의 싸이클론 윗 부분에 간단히 부착할 수 있는 구조이다. PoC는 싸이클론 유출부인 선회류 출구(vortex finder)를 통하여 외부로 유출되는 유체중에 잔존하는 나선형 흐름특성을 활용하여 하부 싸이클론으로부터 분리되지 않은 채 유출되는 미세분진의 일부를 제거할 수 있는 장치이다.

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 싸이클론에서 빠져나오는 유체에 약 85-89% 정도의 나선형 흐름 효과가 남아 있음이 확인되었다. 이에 따라 분진 선회류 출구(vortex finder)에서 입자들은 중심부보다는 바깥쪽, 즉 내측 벽면에 주로 존재함을 예측할 수 있다. 그러므로 가스와 분진들이 대기중으로 배출되기 전 환형구조(annular shell)의 PoC를 설치함에 의해 PoC 내측면을 따라 상승하는 분진들을 외부 대기중으로 유출되는 주 흐름으로부터 일부 분리할 수 있다.

2. 실 험

실험에서 사용된 하부 싸이클론은 고효율 Stairmond식 표준 설계 조건에 준하여 몸통 지름이 0.2m, 높이 0.8m로 제작하였으며, PoC의 크기는 최적 조건의 PoC설계 기준이 아직 설정된 상태가 아니므로 하부 싸이클론의 기본 크기에 준하여 내실(inner chamber)의 지름을 12cm, 13.5cm, 15cm로 다양하게 준비하였다. PoC의 내측벽(inner shield)의 크기에 따라 상부 배출부(De)와의 공간 크기를 2-5cm로 변화시킬 수 있게 하였다. PoC로 향하는 지류의 양은 주 유체흐름의 20%로 설정하였고, 원형외실의 하부에 위치한 구멍(ø: 2cm)을 통하여 고효율 필터로 유도되어 분진은 분리하고 깨끗한 기체만 외부 대기중으로 배출시킨다. 실험에 사용한 분진시료는 소석회(hydrated lime, $Ca(OH)_2$) 입자로써 평균 직경(mass mean diameter)이 1.8μm이고 비교적 좁은 크기분포를 보여주었다. 분진입자는 기체중에서의 분산을 촉진시켜주는 분산매(Aerosil 200)와 사전 혼합하여 진동 분진 공급장치(vibratory dust feeder)에 의해 스텐레스 망(tylor no.70)을 통과 시켜가며 싸이클론으로 공급하였다. 스텐레스 망은 비정상적인 크기의 입자나 불순물의 유입을 방지하고, 거대한 덩어리를 분쇄시켜주는 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 미세입자(3μm 이하)에 대해 중점적으로 집진효율을 관찰하여 PoC의 최적 구조를 찾고, 분진의 분리 메카니즘을 확인하기 위하여 기체와 분진의 흐름을 관찰하고자 하였다. 압축기로부터 생성되는 압축공기는 건조장치를 거쳐 25psi의 압력으로 노즐을 통하여 inlet pipe로 공급되면서 pipe내의 분진을 완전히 혼합, 분산시켜 싸이클론으로 분진과 함께 흘러들어간다. 이때 유체의 흐름은 계의 최종 배출구 쪽에 설치한 역방향 송풍기인 vortex blower (Hitachi, NF 1513)에 의해 유지하였다. 싸이클론 및 PoC에 대한 유량은 두개의 유량계(gas rotameter)로 측정하였으며, 기체의 공급유속은 일정한 부피속도(90m3/hr) 하에서 싸이클론 입구에 설치된 여닫이 막의 개구면적(opening area) 변화를 통하여 6.5-23.2m/s의 범위내에서 조절하였다. 싸이클론과 PoC를 흐르는 분진의 크기분석은 레이져를 이용한

분석장치인 Aerodynamic Particle Sizer(APS, TSI 3302)를 사용하여 입구 및 출구등 3 지점에서 real-time으로 측정하였다

3. 결과 및 고찰

PoC 설치에 대한 미세분진 제거 효과를 관찰하기 위하여 system의 각 부분에서 분진입자의 크기를 측정하였다. 그림 2는 fractional distribution (a)과 undersized cumulative distribution(b)을 측정된 입자의 aerodynamic size에 따라 도시한 것으로 최종적으로 system을 빠져 나가는 분진의 대부분은 2mm 이하라는 것을 보여주고 있다. 즉, 2mm 이상의 분진들의 경우 싸이클론과 PoC에 의해 99% 이상 분리, 제거 됨을 알 수 있다. PoC에서 분리된 입자들의 크기는 대체로 5 μm 이하로 나타났듯이 5 μm 이상의 분진들은 본 실험에서 사용된 싸이클론에 의하여 대부분 제거됨을 확인할 수 있었다. 그림2(b)는 싸이클론에 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, 대기중으로 유출되는 분진은 약 1.6 μm 이하가 90%를 차지하고 있다. 이러한 크기에 따른 분명한 분리는 싸이클론과 PoC system이 주요 입자상 물질을 회수 할 필요가 있을 때 유용하게 사용될 수 있음을 암시하고 있다.

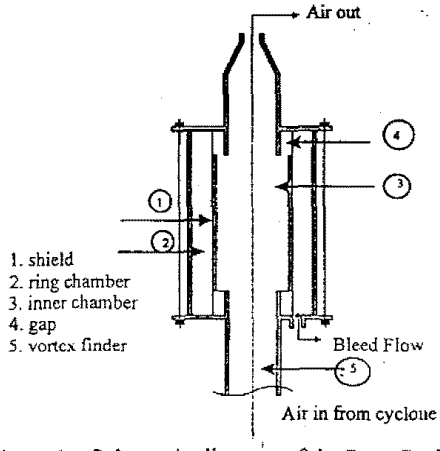

Figure 1. Schematic diagram of the Post-Cyclone

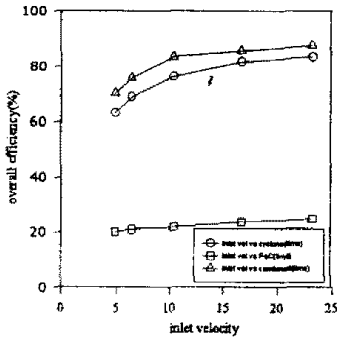

Figure 3. Overall efficiency with inlet velocity

그림 3은 PoC가 싸이클론 장치의 총괄효율에 미치는 영향을 유체의 inlet velocity변화에 따라 관찰한 것이다. 유체의 유입속도가 증가함에 따라 싸이클론의 분진제거 효율의 증가는 이전의 연구들에서 폭넓게 관찰되었으나, PoC의 경우 상대적으로 적은 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 싸이클론으로 주입되는 유체속도가 클수록 PoC내의 유체의 접선속도(tangential velocity)가 증가한다는 사실은 computer를 이용한 simulation 연구를 통하여 이미 밝혀졌다(Venkata and Ray, 1998). 그러나 입자 제거효율의 증가가 크게 나타나지 않는 이유는 유입속도 증가에 의하여 주 싸이클론의 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 싸이클론에 비해 현저히 낮다. 그러나 싸이클론과 PoC 전체 효율을 고려해 볼 때 PoC로 인하여 약 5~8%의 분진 제거율 상승효과를 얻을 수 있다.

4. 참고문헌

Dirgo J. and Leith D. (1985) Cyclone collection efficiency; comparison of experimental results with theoretical predictions, Aerosol Sci., 4, 401

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

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

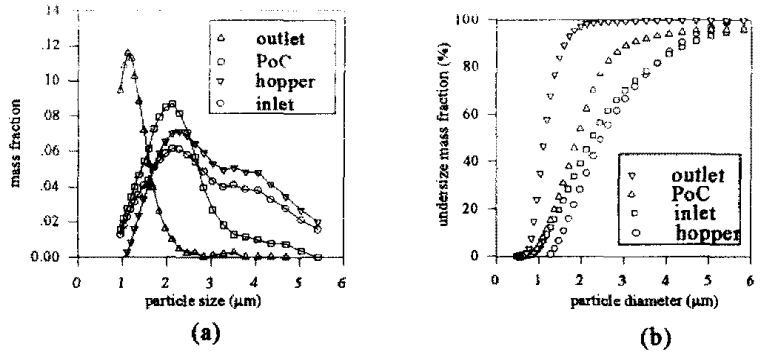

Figure 2. Particle size distributions at different positions