

Vortex 구조를 이용한 Cyclone 집진기의 효율향상에 관한 연구 The Study about Efficiency Improvement of Cyclone Dust Collector with Vortex Structure

*강민규¹, #이석순¹, 탁승민¹ 박동진¹

*M. K. Kang¹, #S. S. Lee(leess@gsnu.ac.kr)¹, S. M. Tak¹, D. J. Park¹
¹경상대학교 기계공학과

Key words : CFD, Cyclone Dust Collector, Vortex

1. 서론

싸이클론의 제진원리는 처리가스를 싸이클론의 입구로 유입시켜 선회류를 형성시키면 처리가스내의 분진은 이에 의한 원심력을 얻어 선회류를 벗어나 본체 내벽과 충돌하여 집진되는 것이며, 가동부가 없는 것이 특징이다. 현재 싸이클론은 보건위생 분야에서 호흡에 의해 인체에 흡입이 가능한 Submicrometer 크기의 입자를 집진하는 본체직경 10mm 이하에서 부터, 각종 산업공정에서 배출되는 오염가스로부터 입자상 물질을 집진하는 7~8Meter의 크기로 다양하게 적용되고 있다.

그런데, 대부분의 관성력 이용 집진장치와 마찬가지로 이러한 싸이클론 집진장치는 미세입자의 집진에는 효과적이지 못하며, 중간입자 또는 큰 입자의 경우에 효과적인 집진이 가능하므로 전기 집진기 또는 여과포 집진장치의 수명향상을 위한 전처리용으로 사용되고 있다.

그러나, 최근에는 싸이클론 내부의 유동 구조변경 및 전기 효과등을 통하여 미세입자의 집진에서도 고효율화에 관한 연구가 지속적으로 수행되고 있는데, 여기서는 이러한 싸이클론의 집진원리와 고효율화 연구 방안에 관하여 기술하고자 한다.

2. 관련이론

Fig. 1에 접선유입식 싸이클론에서의 가스선회류를 표시하고 있다. 유입가스는 점선으로 표시한 바와 같이 회전되고, 입자의 반경 r에 있는 P점에서 가스의 속도 V는 원주속도 V_0 , 축방향 성분 V_x 및 반경방향 성분속도 V_r 로 되며, 원심력에 의한 입자의 분리에 최대의 영향을 주는 것은 접선방향속도 V_0 이다. 중앙부분 와류의 선회류는 자유와류(Free Vortex)라고 부르며, n은 선회속도지수(0.5~0.7로써 $V_0 r^n = C_0$ 로 나타낸다. 한편 가운데 실선으로 표시되는 상승류는 강제와류(Forced Vortex)로 부르며, ω 는 반경 r에 무관한 일정한 각속도일 때 $V_0 = r\omega$ 로 표시된다. 선회가스 유동중의 입자가 원심력에 의하여 분리되는 한계는 강제와류와 자유와류의 경계면 주위의 가상원통면에 존재한다. 실제로 가상원통면의 반경 r_c 는 시간적, 공간적으로 변동하는데, 여기서 r_c 는 그들의 평균 V_{OC} , 입자의 직경을 d_{PC} , 그리고 입자밀도 ρ_p 에 비하며

기체밀도를 생략할 때 입자의 작용하는 바깥방향의 원심력 F_C 는 다음식으로 표현된다.

$$F_C = \frac{\pi}{6} d_{PC}^3 \rho_p \frac{V_{OC}^2}{r_c}$$

한편, 가상원통면 r_c 에서의 선회류의 안쪽방향의 반경방향속도 성분을 V_{rc} 라고 하면, V_{rc} 도 또한 축방향에 따라 그 크기가 달라질 뿐만 아니라 같은 위치에서도 시간에 따라 변동하기 때문에 그 평균값으로 표시한다. 처리가스 유량을 Q_i , 가상원통의 높이(원주와류의 길이)를 H_C 라고하면, V_{rc} 는 다음식으로 표현되는데,

$$V_{rc} = \frac{Q_i}{2\pi r_0 H_C}$$

즉, 이 V_{rc} 에 의하여 입자를 회전시켜 바깥으로 밀어낸다. 가스유동에 의한 입자의 항력 F_S 는 가스의 점도를 μ 라고 하면 입자가 스토크 영역에 있을 때 다음식으로 표현되는데

$$F_S = 3\pi\mu d_{PC} V_{rc}$$

이것과의 방향이 서로 다른 반경방향의 힘이 평행이 되는 입자, 즉, $F_C = F_S$ 의 조건을 만족하는 입자는 균형을 이루어 r_c 의 원주상을 회전하게 된다. 그러나, 그것은 시간적인 평균치로 생각되어지며, 유동이 난류로 될때는 시간에 따라 $F_C > F_S$ 또는 $F_C < F_S$ 로 된다.

시간 평균값으로서 $F_C = F_S$ 가 되는 입자들의 50%는 싸이클론 외통벽면으로 이동되어 분진호퍼(Dust Hopper)에 포집되며, 나머지 50%는 소용돌이의 상승기류에 혼입되어 내통을 통하여 방출하게 된다. 이와같은 입자를 싸이클론에 있어서 분리한계 입자경(Critical Cut Size)라고 부른다. 즉, 50% 분리포집될 수 있는 한계입자경을 의미한다.

싸이클론에서의 입자의 분리속도 (Rate of Segregation : 반경방향속도)는 식(1)과 식(2)에서 부터 $F_C = F_S$ 로 되며, 다음과 같이 표시된다

$$\frac{\pi}{6} d_{PC}^3 \rho_p \frac{V_{OC}^2}{r_c} = 3\pi\mu d_{PC} V_{rc}$$

$$V_{rc} = \frac{d_{PC}^2 \cdot \rho_p \cdot V_{OC}^2}{18\mu r_c}$$

일반적으로 선회류와 상승류가 서로 간섭을 일으킴에 따라 가스유동의 원주속도가 감소하게 된다. 이는 원심력에 의한 분리 효과를 저하 시키는 원인이 되므로 Vortex 구조를 Cyclone 집진기 내부에 추가하여 선회류와 상승류를 효과적으로 분리시켜 유동을 유도함으로써 원심력 F_C 를 상승시킨다.

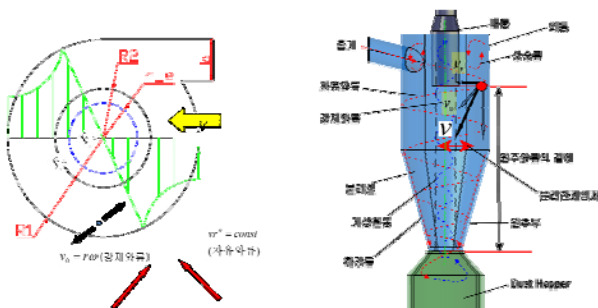


Fig. 1 Free Vortex in Cyclone

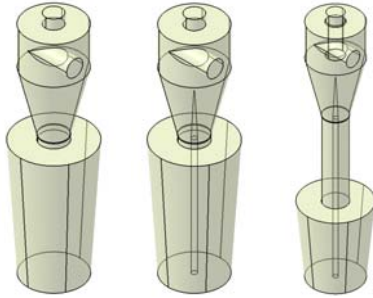


Fig. 2 3D Modeling of Cyclone Dust Collector

3. 유한요소 모델링

Cyclone 유동해석을 위한 3 차원 모델링은 Fig.1 에 나타내었다. 모두 3 가지 Case 로 구성하였으며 모델링은 차원 모델링 상용 소프트웨어인 CATIA V5 에서 수행하였다. 3 가지의 다른 Case 형상은 기본 Cyclone 형상(A) 에서 Vortex 구조가 추가된 형상(B), 마지막으로 Vortex 구조가 추가된 상태에서 Vortex 길이를 길게 유지한 형상(C)으로 구성된다

격자 및 해석은 범용 상용 코드인 STAR-CCM+ 4.02 를 사용하였고 효율적인 해석을 위하여 내부의 Vortex 구조에는 따로 조밀한 격자를 사용하였다. 격자의 총 수는 461928 개이다.

4. 해석절차

난류모델은 $k-\epsilon$ 모델을 선정하였으며 입구쪽으로 10m/s 의 공기 유속을 적용하였다. 작동유체는 집진기가 처리하는 실제 분진과 공기를 적용시키기 위하여 공기와 규소로 적용된 Lagrangian Multiphase 로 적용하였다.

해석 후 해석결과를 고찰하기 위하여 Fig. 3 과 같은 부위로 단면을 형성하여 압력분포 및 속도 분포를 관찰한다. 선회류와 상승류가 일으키는 간섭의 양이 줄어들수록 빠른 회전속도와 외부로의 높은 압력을 가지게 되므로, 이를 비교 분석한다.

5. 해석결과

해석결과로부터 압력 분포는 Fig. 4 와 같은 결과를 도출할 수 있었다. (A) Case 의 경우 전체적인 압력분포는 199.15Pa 이다 Vortex 구조가 추가된 (B) Case 의 경우 (A) Case 보다 약 9Pa 상승된 결과를 얻을 수 있었다 (C) Case 의 경우, 다른 Case 에 비해 약 30Pa 상승된 가장 높은 결과를 얻을 수 있었다

속도분포는 약 15m/s 정도로 비슷한 결과를 얻을 수 있었지만 전체적인 속도분포는 Fig. 5 와 같이 대부분의 영역이 높은 분포를 보이는 것으로 확인할 수 있었다.

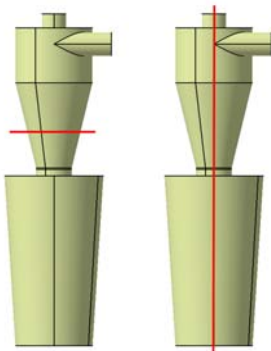


Fig. 3 Divide Section of Cyclone Dust Collector

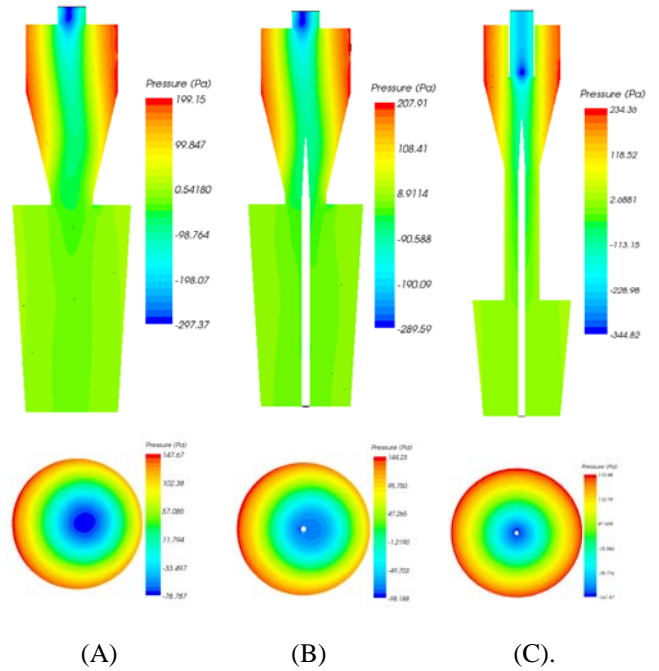


Fig. 4 Pressure of Cyclone analysis

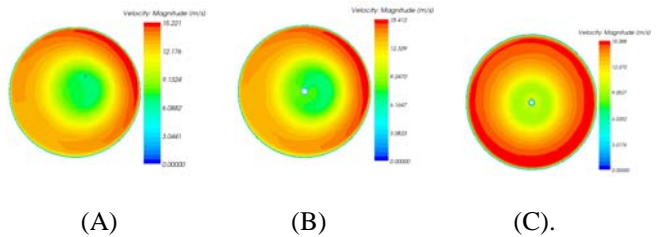


Fig. 5 Velocity of Cyclone analysis

6. 결론

전체적인 압력 및 속도 분포는 (A)에서 (C) Case 로 갈수록 높은 값을 보이고 있고 흐름 또한 점점 안정적으로 변하는 것을 확인할 수 있다. 이는 Vortex 구조가 상승류를 효과적으로 유도하고 있다고 할 수 있겠다.

또한 Vortex 구조의 길이가 길수록 흐름이 더욱 안정되는 것을 확인할 수 있었으며, 본 결과를 바탕으로 최적화된 형상적의 치수관계에 대하여 추가적인 연구를 수행한다면 보다 더 효과적인 결과를 구할 수 있다고 기대한다.

후기

본 연구는 2 단계 지역대학 육성사업(BK21)의 지원에 의해서 연구되었다.

참고문헌

1. Leith, D.,1979, "Cyclones", *Handbook of environmental Engineering*, Vol.1, Wang, L, K. and Pereira, N.C. eds.,Humana Press, Clifton
2. Licht, W., 1988, *Air Pollution Control Engineering*, 2nd ed., Marcel Dekker
3. Clift, R, Ghadiri, M. and Hoffman, A. C., 1991,"A Critique of Two Models for Cyclone Performance", *AIChE Journal*, Vol.37, No.2, PP.285-289