

지하역사 공기조화기에 적용 가능한 미세먼지 제거용 사이클론의 수치해석적 연구

김진관, 김호중*, 김명준**, 김태성**†, 권순박***

(주)동명기술공단 부설연구소, *성균관대학교 나노과학기술학부, **성균관대학교 기계공학부, ***한국철도기술연구원 철도환경연구실

CFD Analysis of Axial Flow Cyclone Separator for Subway Station HVAC System

Jin-kwan Kim, Hojoong Kim*, Myung-jun Lee**, Taesung Kim**†, Soon-Bark Kwon***

Dongmyeng Engineering Consultants, Seoul 130-070, Korea

SKKU Advanced Institute of NanoTechnology(SAINT), Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

Railroad Environment Research Department, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea

ABSTRACT: In this study, 3-dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis was induced to simulate air flow and particle motion in the axial flow cyclone separator. The commercialized CFD code FLUENT was used to visualize pressure drop and particle collection efficiency inside the cyclone. We simulated 4 cyclone models with different shape of vane, such as turning angle or shape of cross section. For the air flow simulation, we calculated the flow field using standard κ - ϵ turbulence viscous model. Each model was simulated with different inlet or outlet boundary conditions. Our major concern for the flow filed simulation was pressure drop across the cyclone. For the particle trajectory simulation, we adopted Euler-Lagrangian approach to track particle motion from inlet to outlet of the cyclone. Particle collection efficiencies of various conditions are calculated by number based collection efficiency. The result showed that the rotation angle of the vane plays major roll to the pressure drop. But the smaller rotation angle of vane causes particle collection efficiency difference with different inlet position.

Key words: Axial flow cyclone(축류식 싸이클론), CFD(전산유체역학), FLUENT, Subway HVAC(지하철공조), Filter(필터)

기 호 설 명

하첨자

- Re : Reynolds 수
- u : 유체속도 [m/s]
- u_p : 입자속도 [m/s]
- D_p : 입자직경 [m]
- μ : 점성계수 [N·S/m²]
- k : 난류 운동에너지
- ϵ : 난류유동 에너지 소산율 [m²/s³]

p : 입자

1. 서론

싸이클론 집진기는 강한 원심력을 이용하여 분진과 공기를 서로 분리하는 장비로써 산업현장 그리고 최근에는 가정용 청소기 에도 주로 많이 쓰이고 있는 장비이다. 기본적인 싸이클론 집진기의 원리로는 분진과 이송유체가 함께 집진기

내부로 들어오면 이송유체는 사이클론 내부의 형상으로 인하여 강한 원심력을 가지게 되며, 이때 분진과 이송유체의 밀도차이에 의하여 입자상 물질은 더 이상 이송유체와 같이 이동하지 않고 유동의 흐름에서 벗어나게 되는 현상을 이용한다. 그 후 분리된 분진만 따로 포집을 함으로써 사이클론 집진기로서 작동을 하게 된다.

사이클론 집진기의 장점으로는 장비 내부에 이동부품이 없어 설계와 유지 보수가 간단하다는 점, 직물형태의 필터와 다르게 압력강하가 시간이 지남에 따라서 일정하다는 점, 본체의 재료로 금속재질의 사용이 가능하여 극심한 환경에서도 사용이 가능하다는 점 등의 장점이 있다.

사이클론의 종류로는 분진을 이송하는 이송유체의 흐름 따라 크게 2가지로 분류가 가능하다. 첫 번째 형태는 이송유체의 흐름이 원통형 본체의 접선방향으로 들어와서 하강하는 선회류를 형성하다 방향을 바꾸어 본체의 위쪽으로 나가는 일반적인 사이클론 방식이고 두 번째 형태는 본체의 위쪽에서 이송유체가 들어와 유동의 방향변화 없이 그대로 반대편으로 빠져 나가는 축류식 사이클론 방식이다.

일반적인 형태의 사이클론은 이미 1930 - 40년대부터 실험적인 연구가 진행되었으며 Marple에 의하여 표준화된 설계기법이 유추되었다⁽¹⁾. 최근에는 복잡한 유동특성을 전산유체역학(CFD)을 이용하여 해석하려는 연구가 많이 진행되고 있다. 하지만 유체의 흐름이 사이클론 내부에서 반대로 바뀌는 유동 특성 때문에 이로 인하여 높은 수준의 압력강하를 유발하게 된다.

이를 극복하고자 제안된 사이클론 방식이 축류식 사이클론 방식이다. 유체의 흐름이 입구에서 출구까지 방향이 바뀌지 않으며 강항 회전류는 사이클론 내부의 유동 유도날개에 의하여 생성되게 된다. 유동의 흐름이 바뀌지 않으므로 일반적인 사이클론 형태보다 낮은 압력강하를 가진다고 알려져 있다. 하지만 일반적인 사이클론 형태보다 보고된 연구가 많지 않으며 앞으로 더 연구가 많이 필요한 실정이다⁽²⁾.

한편, 최근들어 실내공기질(IAQ)에 대한 연구가 늘어나면서 미세먼지에 의한 실내공기 오염에 대한 경각심이 높아지고 있는 추세이다. 특히, 지하공간의 공공장소에 대한 미세먼지 오염 수준은 다양한 측정을 통하여 그 심각함이 발견되었다⁽³⁾.

대표적인 공공목적의 지하공간인 지하철 역사는 환기의 제약, 선로 및 승객 등 다양한 미세먼지 발생 요소 등으로 인하여 환기 시스템의 중요성이 더욱 부각된다.

현재 국내 지하역사에서 사용되는 환기 방식으로는 주로 강제환기 방식이 사용되고 있으며 입자상 분진의 제거를 위하여 판넬형태의 필터를 이용하고 있다. 하지만 판넬형태의 필터의 경우 주기적으로 필터를 갈아주어야 하고 오래 사용할수록 압력강하가 높아지는 등의 유지 및 보수에 어려움이 있다.

위와 같은 이유로 현재의 전처리 판넬필터가 축류식 사이클론 클러스터로 교체되면 일정한 압력강하로 및 필터교체의 불필요 등으로 유지·보수에 들어가는 비용이 현저히 줄어들 것으로 예상되고 있다.

본 연구에서는 이러한 축류식 사이클론의 개념 설계를 바탕으로 단일 사이클론의 입자 포집효율을 수치해석적 방법을 통하여 연구해 보고자 한다.

2. 해석이론

2.1 이송유체 유동해석

본 연구에서 사용된 축류식 사이클론의 작동유체속도를 5 m/s 로 가정한 결과 난류유동이 예측되어 FLUENT내의 난류모델 중 하나인 Standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하게 되었다.

Standard $k-\epsilon$ 난류모델은 Launder와 Spalding에 의해 제안된 이래 공학적인 수치해석 분야에서 많이 이용되어 왔다. 넓은 범위의 난류유동 운동에서 경제적으로 납득할만한 수준의 정확한 해석을 제시한다고 알려져 있다. 본 모델은 두 개의 다른 수송방정식이 유체난류속도와 length scale값을 각각 독립적으로 계산한다. k 와 ϵ 에 대한 각각의 수송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\rho + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

위 식에서 G_k , G_b , Y_M 는 각각 평균속도 구배에 의한 난류운동에너지의 생성, 부력에 의한 난류운동에너지의 생성, 압축성유동에 의한 팽창율의 변화가 전체적인 소산율에 미치는 영향을 나타낸다. 본 모델에서는 온도구배가 없다고 가정하였으므로 온도구배의 영향이 있어야만 생기는 G_b 항은 무시하여도 된다. 각각의 식은 다음과 같다.

$$G_k = - \overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$Y_M = 2\rho\epsilon M_t^2 \quad (4)$$

위 식중 G_k 에 대한 완전식은 Boussinesq 이론과 일치하도록 하여 G_k 를 산출한다. Boussinesq 이론은 다음과 같이 표현된다.

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (5)$$

여기서 μ_t 는 난류점성계수, S 는 평균변형율 계수 (Modulus of mean rate-of-strain tensor)를 나타낸다. 난류점성계수는 다음과 같이 표현되며 본래의 수송방정식에도 이용되는 계수이다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

식 (4)의 M_t 는 난류 Mach 수를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (7)$$

여기서 a 는 음속(speed of sound)을 나타낸다.

수송방정식 (3),(4)에서 나머지 항들인 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$ 들은 상수를 나타내며 σ_k , σ_ϵ 는 k 와 ϵ 에 대한 각각의 Prandtl 수를 나타낸다.

2.2 입자궤적해석

본 연구에서 사용된 입자궤적해석방법은 Euler-Lagrangian방법으로 일차적으로 Eulerian 방법으로 해석된 유동장에 Lagrangian법으로 입자궤적을 추적하는 방법이다. 이때 입자에 작용하는 외력과 관성력의 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (8)$$

위 식의 우변에서 첫 번째 항은 항력, 두 번째항은 부력을 나타내며 F_x 는 추가적인 브라운확산, 열영동력(Thermophoretic force) 등의 외력을 나타낸다. 본 연구에서는 중력, 브라운확산 및 열영동력 등은 수 마이크로미터 크기의 미세입자의 특성 상 무시하고 유체에 의한 항력만 고려하였다. 주요 해석입자가 수 마이크로 미터 크기를 가지므로 Stokes 항력법칙이 적용된다. 이때 항력 F_D 는 다음과 같이 표현된다.

$$F_D = \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p C_c} \quad (9)$$

위 식에서 C_c 는 Cunningham 미끄럼 보정계수를 나타내며, 이는 입자가 수 마이크로미터보다 작아지게 되면 입자 표면에서 유체의 상대속도가 미끄러짐으로 인해 변하는 것을 보정하기 위한 계수이며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$C_c = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} (1.257 + 0.4e^{(-1.1d_p/2\lambda)}) \quad (10)$$

여기서 λ 는 유체의 평균자유행로 (mean free path)를 나타낸다.

3. 수치해석 및 해석결과

3.1 수치해석 모델

본 연구에서는 Fig. 1에 제안된 개념설계도를 바탕으로 축류식 사이클론에 대한 3차원 수치해석을 진행하였다. 사이클론 베인의 형상과 각도에 따른 내부 유동의 변화와 입자 궤적에 대한

영향을 알아보기 위해 네 가지 다른 형상에 대한 수치해석을 상용 CFD 프로그램인 FLUENT를 이용하여 수행하였다.

Fig. 1은 가장 기본이 되는 개념설계 형상으로 이중 형상 1은 4개의 나선형 유도깃을 가지고 회전각이 180°인 모델이다. 이 모델을 기준으로 유도깃 회전각이 각각 90°, 360°인 형상 2와 형상 3, 그리고 유도깃 회전각은 형상 1과 같되 유도깃의 측면 형상이 직선형으로 다른 형상 4를 해석 모델로 삼았다. 이 규격들은 Table 1에 정리되어 있다.

상기 4개의 모델들은 FLUENT프로그램 내의 격자구조 생성 프로그램인 GAMBIT을 이용하여 형상 및 격자를 만들었다. 이 때 각 케이스들에서 생성된 격자는 tetrahedral형태의 격자로 약 850,000 ~ 900,000개 가량의 격자가 사용 되었다.

Fig. 2는 형상 1의 생성된 격자구조 및 경계조건을 나타낸다. 각 형상별로 유도 깃의 모양만 다르므로 경계조건의 위치 및 종류는 모두 동일하다. 본 입구경계조건으로 일정한 유속 5 m/s를 설정 하고 입자와 유체의 출구는 같은 펌프를 이용한다고 가정하여 동일한 압력을 지니는 압력 출구 조건으로 설정하였다.

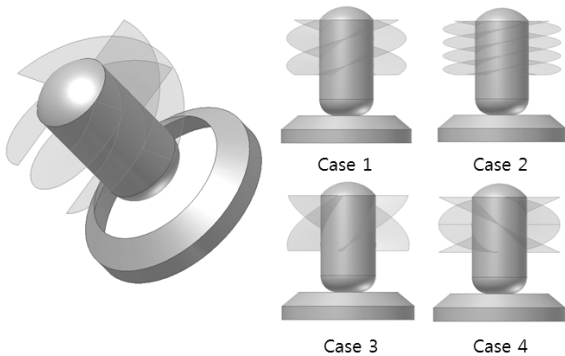


Fig. 1 Overall shape and side views of each cases

Table 1 Models of cyclone

Case no.	Side view of	Vane rotation
	vane	angle
1	coil	180°
2	coil	360°
3	coil	90°
4	linear	180°

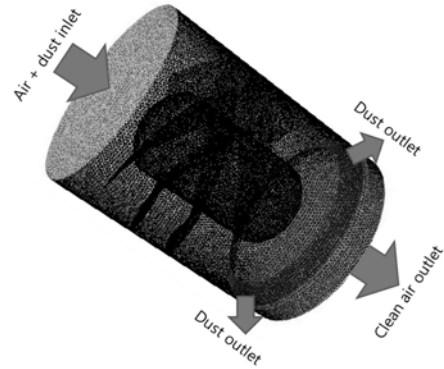


Fig. 2 Surface mesh structure of cyclone

입자궤적해석에 사용한 입자는 표준 밀도를 지니는 물 입자로서 각 형상 별로 직경 1.5 μm , 2 μm , 2.5 μm , 3.5 μm , 5 μm 인 입자들을 투입해서 해석을 진행하였다. 투입되는 입자의 궤적은 분진과 공기가 함께 들어오는 입구 경계조건 표면에서부터 추적을 시작하였다.

3.2 해석결과

유도깃의 회전각도는 축류형 싸이클론의 원심력을 결정짓는 가장 큰 요인중 하나이다. 회전각을 크게 하면 이송유체가 유도깃을 지나는 시간이 길어지므로 큰 원심력을 얻을 수 있다. 하지만 그와 동시에 유도깃이 이송유체의 흐름을 방해하므로 일정한 유속을 유지하는데 필요한 압력강하도 커지게 된다.

각 형상별 압력강하 결과는 Table 2에 나타나 있다. 위의 예상과 같이 형상 1의 압력강하인 500 Pa을 기준으로 형상 2는 약 4배정도 압력강하가 높았으며 제일 작은 회전각을 지니는 형상 3의 경우 형상 1의 압력강하에 비해 약 33% 정도를 나타내었다. 주목할 만한 점은 형상 1에 비해 형상 4가 압력강하가 높은 점인데 이는 직선형 유도깃의 경우 유도깃 간 폭이 위치에 따라 달라지므로 유체는 유도깃 사이를 지나갈 때 팽창 및 압축 과정을 거치게 되고 이로 인해 압력강하가 높아지기 때문이다.

Fig. 3는 각 형상별, 입자 직경별 포집 효율을 그래프로 나타낸 것이다. 여기서 입자 포집 효율은 계수법을 이용 투입된 입자 수 중 입자출구로 빠져나온 입자의 수 비율로 도출하였다.

Table 2 Pressure drop of cyclone

Case no.	Pressure drop
1	500 Pa
2	2000 Pa
3	170 Pa
4	810 Pa

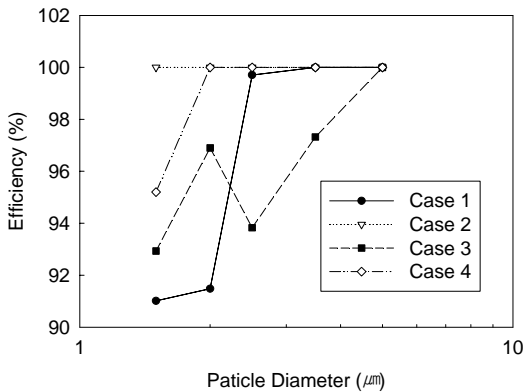


Fig. 3 Particle removal efficiency

Fig. 3의 결과로부터 유도깃의 회전각이 클수록 입자 포집효율이 좋은 것을 알 수 있다. 이는 앞서서도 설명한 회전각, 압력강하 그리고 입자에 작용하는 원심력의 관계로 해석할 수 있다. 또한 코일형 유도깃의 싸이클론보다 직선형 유도깃의 싸이클론이 상대적으로 포집효율이 좋은 것을 볼 수 있는데 이 역시 직선형 싸이클론이 코일형 싸이클론보다 입자에 큰 원심력을 가하기 때문으로 풀이 할 수 있다.

형상 3의 입경 별 포집효율 결과에서 특이한 점은 입경이 커질수록 포집효율이 높은 것이 일반적이나 2.5 μm 의 경우 2 μm 보다 포집효율이 낮게 결과가 도출되었다. 이는 입자의 입구 위치에 따른 포집효율의 변화로 형상 3의 경우 유도깃이 충분히 회전하지 못하여 입자의 입구 위치에 따라서 입자가 받는 원심력이 달라지기 때문이다.

4. 결론

본 연구에서는 축류식 싸이클론의 압력강하 특성 및 입자포집 효율 특성을 수치해석적 방법으로 규명하였다.

첫 번째로, 경험적 결과와 같이 유도깃의 회전

각이 높아질수록 압력강하가 높은 결과를 도출하였다. 그러나 압력강하가 높을수록 입구유속과 유도깃 출구유속간의 상대속도가 높아지는 결과 또한 얻을 수 있었다.

두 번째로, 입자의 효율은 압력강하에 비례하여 증가하는 추세를 보였다. 이는 압력강하가 높을수록 유도깃 출구부분의 유속이 높은 것과 관련이 있으며 이때 높은 압력강하로 인하여 충분히 가속된 입자는 원심력을 얻어 싸이클론을 빠져 나가게 된다.

세 번째로, 형상 3의 경우 입자의 입구 위치에 따라서 입자 포집효율이 달라지는 것을 발견하였으며 이는 충분히 크지 못한 회전각에 의하여 특정 위치에 들어오는 입자가 원심력을 충분히 받지 않고 빠져나가기 때문인 것으로 밝혀졌다.

마지막으로, 본 연구에서는 대부분의 이송유체 유량이 입자배출구로 함께 빠져나가는 것을 발견하였으며 실제 사용 환경에서는 댐퍼 등을 통하여 입자배출구와 공기 배출구간의 출구유량을 조정해야 할 것이다.

후기

본 연구는 건설교통부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. M. D. Slack, R. O. Prasad, A. Bakker, and F. Boysan, 2000, Advances in cyclone modeling using unstructured grids, Trans IChemE, Vol. 78, pp. 1098-1104.
2. E. Brunazzi, A. Paglianti, and A. Talamelli, 2003, Simplified Design of Axial-Flow Cyclone Mist Eliminators, AIChE Journal, Vol. 49, pp. 41-51.
3. 권순박, 박덕신, 조영민, 박현설, 임경수, 송창병, 2006, 지하철 대용량 공조설비에 적용될 축상유입식 싸이클론의 입자포집 효율 성능평가, 2006년 한국대기환경학회 추계학술대회 논문집, pp. 241-242.