

지하역사 공기조화기용 축류형 사이클론 클러스터의 수치해석적 성능 평가 연구

김 명 준, 김 호 중*, 김 진 관**, 권 순 박***, 김 태 성†

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

Numerical Study of Axial-flow Cyclone Cluster for Subway Station HVAC system

Myeoung-Joon Kim, Hojoong Kim*, Jin-Kwan Kim**, Soon-Bark Kwon***, Taesung Kim†

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

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

***Institute of Engineering Technology, Dongmyeng Engineering, Seoul 130-070, Korea*

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

ABSTRACT: Axial-flow cyclone separator cluster can be used for a dust removal device inside a heating, ventilation, and air conditioning(HVAC) system of subway station. In this study, 3-dimensional computational fluid dynamics(CFD) analysis was performed to compare single unit axial-flow cyclone with couple unit axial-flow cyclone cluster. It is shown that the performance of cyclone separator is not influenced by number of single units but influenced by ability of single unit.

Key words: Axial-flow cyclone(축류형 사이클론), CFD(전산유체역학)

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. 서 론

1974년 수도권 전철이 개통된 이래 전국의 광역시마다 지하철이 운행되기까지 계속해서 확장을 거듭해온 지하철은 지금도 대중교통에서 차지하는 비율이 계속해서 증가하고 있는 운송수단이다. 2006년 기준으로 일평균 전국 지하철 이용 인구가 570만 명에 육박했으며⁽¹⁾, 시민들의 하루 평균 지하철 이용 시간도 증가하고 있다. 지하철이 생활의 일부가 됨에 따라 지하역사 실내 부유 미세먼지에 의한 공기질 악화가 심각한 사회적

† Corresponding author

Tel.: +82-31-290-7466; fax: +82-31-290-5889

E-mail address: tkim@skku.edu

문제로 대두되고 있으며, 지하역사에서의 실내공기질에 관한 다양한 연구가 진행되고 있다. 해외 주요 도시들 마다 지하철에 대한 미세먼지량 측정이 활발히 이루어지고 있으며⁽²⁾ 국내에서도 수도권 지하철에서 미세먼지량 측정을 실시한 사례⁽³⁾가 존재한다. 이 연구에 따르면 현재 지하역사의 미세먼지 농도는 2004년 환경부의 지하생활공간 공기질 관리법 시행규칙 개정령에서 정해진 기준인 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 상회하고 있다. Karlsson et al⁽⁴⁾의 연구에 의하면 지하철에서 발생하는 미세먼지는 지상에서 발생하는 미세먼지보다 호흡기관에 8배 이상의 독성을 지니기 때문에 지하역사에서 발생하는 미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있는 방안이 필요함을 강조하고 있다.

현재 지하역사 실내공기 관리를 위해 사용되고 있는 공기조화기는 그 주기능이 미세먼지 저감보다는 급기, 배기 및 냉방과 같은 기본적 공기조화 기능에 초점이 맞춰져 있다. 세정과 교체가 가능한 미세먼지 제거용 에어필터가 공기조화기 내에 설치되어 있지만 유지보수의 어려움으로 인해 관리가 미흡한 실정이다. 최근 권순박 등은 이러한 기존의 에어필터들의 단점을 보완한 새로운 방식의 미세먼지 제거 장치로 축류형 사이클론이 제안하였다⁽⁵⁾.

사이클론 집진장치는 강한 원심력을 이용하여 분진과 공기를 서로 분리하는 장치다. 사이클론 집진장치에 유입된 분진과 이송유체는 사이클론 내부의 형상으로 인해 강한 원심력을 가지게 되는데 이 때 밀도가 큰 분진은 큰 관성력으로 인해 유동의 흐름에서 벗어나게 되면서 출구에서는 깨끗한 유체만 배출된다. 이러한 사이클론 집진장치는 설계와 유지보수가 간단하고 압력강하의 변화가 없다는 장점을 지닌다.

사이클론은 이송유체의 흐름에 따라 크게 2가지로 분류가 가능하다. 입구와 출구의 유동방향이 90° 로 꺾이는 일반적인 형태의 사이클론(tangential-flow cyclone)과 입구와 출구의 유동방향이 동일한 축류형 사이클론(axial-flow cyclone)이 그것인데 전자의 장치는 압력강하가 크고 부피가 크다는 점에서 지하역사 에어필터로는 적합하지 않다. 반면 축류형 사이클론은 유체의 이동방향이 변하지 않으므로 압력강하도 적고 기기의 부피도 작기 때문에 기존의 지하역사 공기조화기 에어필터를 대체할 장치로서 적합한

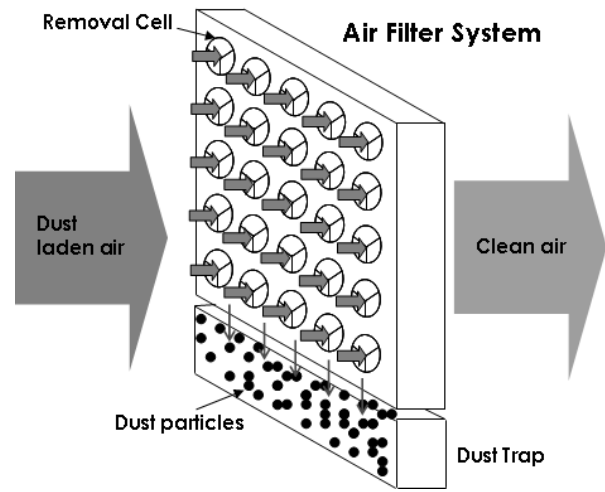


Fig. 1 Schematic of axial-flow cyclone air filter system.

특징을 지닌다⁽⁶⁾.

축류형 사이클론을 에어필터로 쓰기 위해선 Fig. 1과 같이 여러 개의 축류형 사이클론을 하나의 유닛으로 묶은 형태의 미세입자 저감장치로 구성할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 미세입자 저감장치의 개발에 앞서 단일 유닛으로의 축류형 사이클론과 두 개의 축류형 사이클론이 묶인 클러스터 유닛을 비교 수치해석 함으로써 여러 개의 축류형 사이클론을 하나의 시스템에 적용했을 때 생길 수 있는 현상들에 대해 알아보 고자 한다.

2. 해석이론

2.1 이송유체 유동해석

본 연구에서 사용된 축류형 사이클론의 작동유체속도를 2.5 m/s 로 가정한 결과 사이클론 내부에서 난류유동이 예측되어 FLUENT내의 난류모델 중 하나인 Standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 두 모델은 벽면의 경계층유동의 형상만 다르고 경계층에서 먼 곳의 유동은 같은 이론을 사용하므로 여기서는 Standard $k-\epsilon$ 난류모델만 설명하기로 한다.

Standard $k-\epsilon$ 난류모델은 Launder와 Spalding에 의해 제안된 이래 공학적인 수치해석 분야에서 많이 이용되어 왔다. 넓은 범위의 난류유동운동에서 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 법으로 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 번째 항은 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 단일 축류식 사이클론과 클러스터 형식의 축류형 사이클론에 대해 수치해석을 진행하였다. Fig. 2는 두 사이클론의 모델링 형상이다. 축류형 사이클론 밑으로 기다란 통이 달려 있는 것을 볼 수 있는데 이 부분은 축류형 사이클론에 의해 집진된 먼지들이 모이는 분진통 부분이다.

수치해석은 상용 CFD 프로그램인 Fleunt를 이용하여 수행하였다. 두 모델 모두 tetrahedral 형태의 격자를 사용하였는데 격자수는 각각 100만 개, 300만개가량을 사용하였다. 이는 클러스터 형식의 장치가 크기가 훨씬 크기 때문이다. 입구 조건은 동일하게 2.5 m/s의 유속 조건을 주었으며 출구조건은 압력 조건으로 대기압을 설정하였다.

3.2 해석결과

해석 결과 단일 축류형 사이클론의 압력강하는 11.08 mmH₂O로 나타났으며 클러스터 형식의 축류형 사이클론의 경우 압력강하가 9.53 mmH₂O로 나타났다. 이 정도의 압력강하는 기존 공기조화기에 쓰이고 있는 에어필터를 충분히 커버할

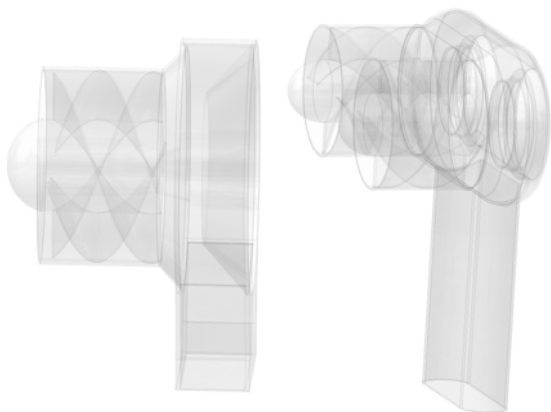


Fig. 2 One unit axial-flow cyclone(left) and cluster unit axial-flow cyclone(right).

수 있는 정도의 수치이다.

단일 축류형 사이클론과 클러스터 형식의 축류형 사이클론의 압력강하가 비슷한 것을 알 수 있는데 이를 통해 본 연구진은 여러 개의 핵심 유닛이 병렬로 연결 되더라도 그 수는 전체 시스템의 성능에 영향을 끼치지 않으며 단일 축류형 사이클론의 성능에 더 큰 영향을 받는다는 결론을 내릴 수 있었다.

클러스터 형식의 축류형 사이클론 내부 유동의 간섭 현상이 나타났다. Fig. 3은 이러한 간섭 현상을 나타낸 그림이다. 오른쪽 핵심 유닛으로 들어가는 공기의 흐름은 붉은색으로 표시되어 있고 왼쪽 핵심 유닛으로 들어가는 공기의 흐름은 푸른색으로 나타나 있으며 양 출구 부분에 반대편 입구에서 유입된 공기의 흐름이 존재함을 알 수 있다.

양 핵심유닛 사이를 격벽으로 막고 다시 해석을 해 본 결과 유동의 간섭 현상이 압력강하나 입자제거효율에 끼치는 영향은 미미한 것으로 나타났다. 하지만 축류형 사이클론의 숫자가 늘어난 전체 시스템을 고려했을 때 이 현상은 잠재적인 결점이 될 수가 있기 때문에 추후의 연구에서는 이 부분을 해결해야 할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 지하철 공기조화기 내 미세먼지 저감장치로 사용하기 위해 고안된 축류형 사이클론에 대한 수치해석을 진행하였다. 실제 실험과 수치해석을 비교함으로써 수치해석의 신뢰도를 검증하고 검증된 방법을 통해 단일 축류형 사

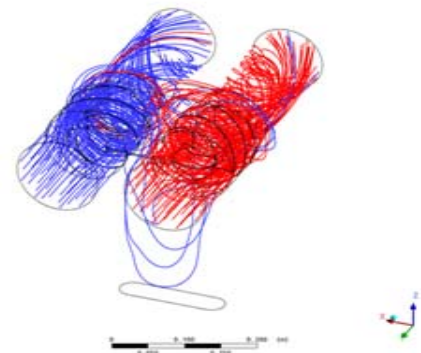


Fig. 3 Stream line of cluster unit.

이클론과 클러스터 형식의 축류형 사이클론의 연구를 진행하였다.

수치해석 결과 축류형 사이클론이 여러 개 모인 미세먼지 저감장치의 성능은 사용된 사이클론의 수보다 단일 기기의 성능에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 향후 클러스터 대형화 시 유동간섭현상의 해결이 필요한 것으로 예측되었다.

후 기

본 연구는 건설교통부 “도시철도 역사 설비 표준화”연구개발과제의 재원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Ministry of land, transport and maritime affairs, 2006, Transport summarization (2001~)
2. Nieuwenhuijsen, M. J., Gómez-Perales, J. E., Colvile, R. N., 2007, Levels of particulate air pollution, its elemental composition,

determinants and health effects in metro systems, *Atmos. Environ.*, Vol. 41, pp. 7995-8006.

3. Park, D. U. and Ha, K. C., 2008, Characteristics of PM10, PM2.5, CO2, and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea, *Environ. Int.*, Vol. 34, pp. 629-634.
4. Karlsson, H. L., Nilsson, L., Möller, L., 2005, Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells, *Chem. Res. Toxicol.*, Vol. 18, pp. 19-23.
5. Kwon, S. B., Park, D. S., Cho, Y. M. et al, 2006, Particle collection efficiency of axial-inlet cyclone for high-flow ventilation system in the subway, *Proceeding of the 43rd meeting of KOSAE*, pp. 241-242.
6. Brunazzi, E., Paglianti, A., Talamelli, A., 2003, Simplified Design of Axial-Flow Cyclone Mist Eliminators, *AICHE J.*, Vol. 49, pp. 41-51.