

# 사이클론 전처리부를 지닌 터널집진차량의 집진효율 최적화

정우태

한국철도기술연구원 교통환경연구팀

## Dust collection optimization of tunnel cleaning vehicle with cyclone-based prefilter

Wootae Jeong

Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute

**요약** 지하철 터널 내에 축적된 미세먼지와 초미세먼지를 제거하기 위해서는 새로운 형식의 분진흡입차량이 필요하다. 따라서 최근 개발된 분진흡입차는 초미세먼지 제거를 위한 흡입시스템과 사이클론형식의 전처리부 및 전기집진기를 장착하고 있다. 본 논문에서는 집진차량의 하부에 설치된 먼지 흡입시스템이 다양한 크기의 먼지입자를 효과적으로 흡입하고 처리하기 위해 사이클론형식의 전처리부가 포함된 집진시스템을 설계하고 집진효율을 ANSYS FLUENT의 전산유체해석을 통해 확인하였다. 흡입구와 사이클론형 프리필터가 연결된 격자모형을 기반으로 공기유동과 상차분모델(Discrete Phase Model)을 이용하여 다양한 입자의 크기와 종류 및 흡입팬의 용량에 따른 입자의 거동을 해석하였다. 다양한 입자의 크기와 종류, 흡입팬의 용량에 대해서 해석결과 집진차량의 운영속도 5km/h에서 미세먼지처리를 위해서는 흡입팬의 용량 1500m<sup>3</sup>/min에서 흡입구가 궤도면으로부터 약 100mm 이내일 때 100 $\mu$ m 이하 크기의 먼지를 모두 처리할 수 있음을 확인하였다. 이러한 흡입구와 사이클론형식의 프리필터를 탑재한 터널집진차량은 후단에 설치된 전기집진기의 부하를 줄이고, 지하 터널내의 미세먼지와 초미세먼지의 제거에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** A new dust cleaning vehicle is needed to remove fine and ultra-fine particulate matter in subway tunnels. Therefore, the recently developed tunnel cleaning vehicle is equipped with an efficient suction system and cyclone-based prefilter to handle ultra-fine particles. To treat various sizes of particulate matter with an underbody suction system, this paper proposes a cyclone-based prefilter in the suction system and validates the dust removal efficiency through Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis using ANSYS FLUENT. Using the created surface and volume mesh, various particle sizes, materials, and fan flow rates, the particles were tracked in the flow with a discrete phase model. As a result, the dust cleaning vehicle at a normal operational speed of 5km/h requires at least a fan flow rate of 1500m<sup>3</sup>/min and 100mm of suction inlet height from the tunnel track floor. Those suction modules and cyclone-based prefilters in the dust cleaning vehicle reduces the dust accumulation load of the electric precipitator and helps remove the accumulated fine and ultra-fine dust in the subway tunnel.

**Keywords** : Computational Fluid Dynamics, Cyclone prefilter, Dust cleaning, Particulate matter, Suction system

### 1. 서론

날이 증대되면서 지하철과 도시철도 터널 등의 지하공간에 축적된 미세먼지의 농도도 심각하게 증가하고 있다.

최근 국내 대기 미세먼지 농도가 기준치를 초과하는

특히 지하철 승강장에 스크린도어의 설치가 늘어나면서

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업(18RTRP-B082486-05)의 연구비 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Wootae Jeong (Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-2-460-5817 email: wjeong@krii.re.kr

Received January 19, 2018

Revised March 8, 2018

Accepted March 9, 2018

Published March 31, 2018

폐쇄된 지하철 터널에 축적된 미세먼지와 초미세먼지는 터널 작업자의 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있다[1-3]. 터널 내에 축적된 먼지는 열차운행 시에 객차내로 유입되어 열차를 이용하는 승객의 건강에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 터널 내에 축적된 미세먼지나 초미세먼지는 분진흡입차나 살수차량 등의 특수한 터널청소차량을 사용하여 주기적으로 청소하여 터널 내 공기질을 일정한 수준 값 이하로 관리할 필요가 있다. 터널의 미세먼지 제거를 위해서 지자체의 도시철도 운영기관들은 고압살수차에 의한 습식청소방법과 분진흡입차를 이용한 건식청소방법의 두 가지를 병행하여 청소를 실시하고 있다. 고압살수차에 의한 청소는 공기 중에 부유하는 먼지가 살수차에 의해 분사된 물방울에 세척되어 침하되는 방식이지만 침하된 먼지가 수거되지 못하고 건조되면 지하철 운행 시에 터널내 공기 중으로 재 비산을 일으킬 수 있다는 단점을 가진다. 분진흡입차의 진공흡입 방식을 사용한 건식청소방식은 침하된 먼지를 비산시켜 흡입하기 때문에 압축공기에 의한 공기 블로어를 동시에 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 이러한 종류의 터널 청소방식을 적용한 청소용 특수차량은 터널 청소에는 효과적일 수 있으나, 최근 사회적 관심사가 되고 있는 초미세먼지 등의 미세 입자의 제거를 위한 기능에는 제한적일 수밖에 없다.

따라서 Fig. 1에 나타나 있는 것과 같이 최근 도시철도 터널 내의 미세먼지와 초미세먼지를 동시에 포집할 수 있는 새로운 집진차량이 개발되고 있다[4]. 새롭게 개발되고 있는 분진흡입차량은 기존의 청소차량에 비해 입자의 크기가 매우 작은 초미세먼지 제거에 효과적으로 대응하기 위해서 배터리 구동방식을 채택하고, 전기집진장치를 최초로 차상용으로 제작하였으며 하부먼지의 흡입뿐 아니라 측면 흡입구를 통하여 터널 부유먼지까지

처리할 수 있도록 설계된 것이 특징이다.

일반적인 청소차량과는 다르게 터널 내 초미세먼지 집진을 위한 분진흡입차의 효율은 전기집진장치와 먼지흡배기 구조의 설계에 의해서 좌우될 수 있으며, 대상물인 터널 내 초미세먼지의 발생과 특성에 따라서 다르게 나타날 수 있다. 터널 내에 비산하거나 축적되어 있는 초미세먼지의 발생원인은 외부로부터의 유입도 일부 존재하지만 열차운행 시의 열차 차륜 및 레일의 접촉으로 인한 마모, 제동 시의 브레이크 디스크의 마찰과 마모, 전차선과 판토틀그래프의 접촉에 의해서 많은 양이 발생한다. 따라서 터널 내부의 발생원에 의한 미세먼지의 성분은 외기중의 미세먼지의 구성과는 다르게 금속성분의 함량이 높고 특히, 철금속(Fe)이 전체 지하철 미세먼지의 40% 이상을 차지한다[5,6]. 이렇게 생성된 초미세먼지는 열차운행 시의 열차풍에 의해 비산되었다가 다시 침강하는 순환과정을 반복하게 되고 초미세먼지(PM2.5, 직경 2.5 $\mu\text{m}$ 이하)와 같은 크기의 먼지 입자는 터널 바닥으로 침강하는 시간이 두 시간이상 소모되기도 한다.[7]. 따라서 도시철도 터널 내에 존재하는 초미세먼지를 제거하기 위한 차량은 Fig. 1과 같이 궤도면에 침강된 먼지와 더불어 터널에 비산된 먼지를 동시에 제거할 수 있도록 설계 될 필요가 있다. 또한 초미세먼지 집진을 위해서 설치된 전기집진장치의 효율을 극대화하기 위해서는 흡입된 먼지 중에서 상대적으로 큰 직경을 가지는 입자를 사이클론장치와 같은 프리필터를 통해서 필터링하는 과정이 매우 중요하다.

본 논문에서는 터널청소를 위한 분진흡입차량의 초미세먼지 집진효율을 높이기 위해서 설계된 흡입팬의 용량에 따른 흡입구의 설계인자와 사이클론형식의 프리필터 성능향상을 위한 최적화 해석을 수행하였다. 설계의 주요 요소는 Fig. 1의 두 번째 차량 하부에 설치된 흡입시

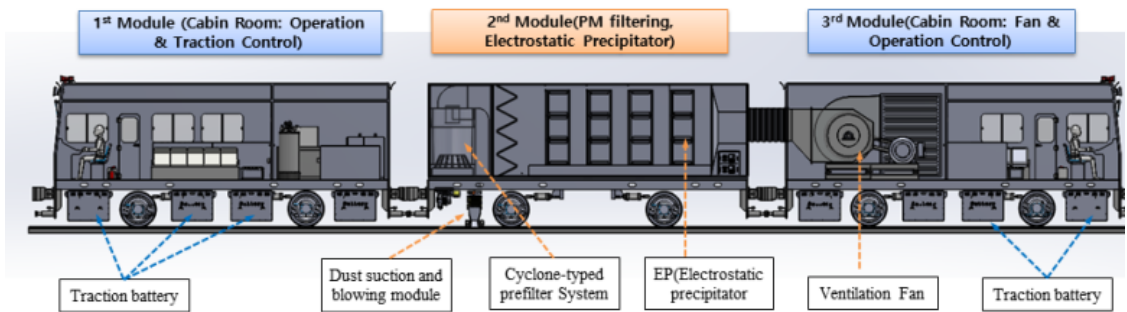


Fig. 1. Dust collecting vehicle for subway tunnel

시스템과 듀얼 사이클론형 프리필터의 집진효율을 확인하기 위해 전산유체역학을 사용하여 요구되는 흡입시스템의 먼지흡입성능을 확인하고자 한다.

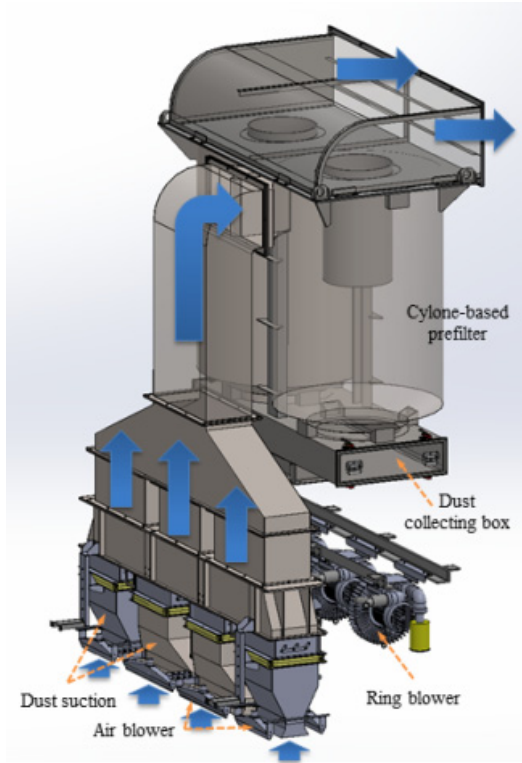


Fig. 2. Dust suction system with cyclone-based prefilter

## 2. 연구방법

### 2.1 사이클론방식의 흡입시스템 설계

기존의 분진흡입차에 사용되고 있는 단순 진공 흡입구를 직렬로 배치한 구조이다. 그러나 장시간 궤도터널 바닥에 누적된 초미세먼지를 효과적으로 집진하기 위해 Fig. 1의 2호차에 먼지흡입 시스템을 궤도 하부의 먼지흡입부와 사이클론방식의 프리필터를 결합하여 적용하였다(Fig. 2). 터널 바닥의 먼지 흡입부는 고압의 공기 블로어와 흡입구가 일체화된 구조를 적용하여 진공 흡입구에 의해서 흡입되지 못하는 누적 먼지를 블로어를 통해 비산시키고, 이 비산된 먼지를 흡입구를 통해 흡입할 수 있다[4]. 하지만 이러한 혼합형 흡입구조만으로 이루어진 흡입부는 터널 바닥에 존재하는 흙 또는 모래 등의

상대적으로 큰 입자들을 모두 공기와 같이 흡입하여 중앙의 전기집진부로 이동시킬 수 있으며, 크기가 큰 먼지 입자는 지속 사용 시에 전기집진기의 초미세먼지 집진효율을 급속도로 저하시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 사이클론방식의 프리필터를 설치하여 상대적으로 큰 먼지입자는 사이클론내부에서 원심력과 중력에 의해 수거함으로써 분리되도록 설계하였다.

Fig. 3은 Fig. 2에 도시된 사이클론을 포함한 흡입시스템 전체에서 공기 블로어와 에어커튼의 기능을 하나의 모듈로 설계하여 터널 바닥먼지를 효율적으로 흡입할 수 있는 흡입부 구조 설계를 나타낸다. 설계된 흡입시스템은 4개의 모듈로 구성되어 있으며, 공기 블로어는 링 블로어와 에어 나이프 형식의 구조를 적용하였다. 터널 및 궤도의 다양한 형상에 대응하기 위해 상하 높이의 조절이 가능하고, 에어 나이프의 블로어는 Fig. 3(b)의 우측에 도시된 것과 같이 일정각도의 조절이 가능하도록 설계되었다[4].

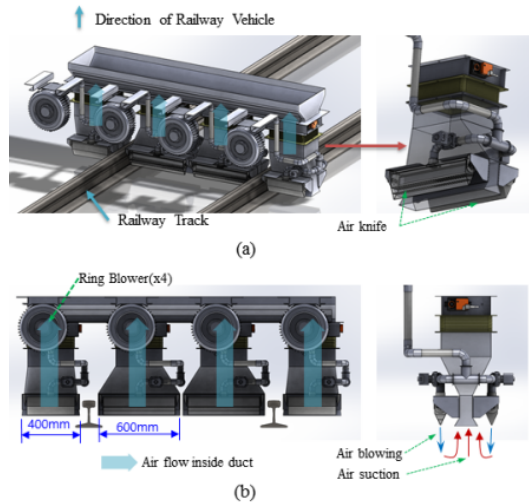


Fig. 3. Modular design of dust intake structure for the railway tunnel vacuuming vehicle; (a) four modular configuration and (b) suction and air knife-based blowing components system

본 연구에서 제시된 미세먼지 흡입모듈은 터널궤도에 침하되어 누적된 미세먼지를 링 블로어와 에어 나이프 (air knife)를 이용해 고속의 공기를 분사하여 비산시킨 후 흡입하는 방식을 사용하고 있다. 이 때 흡입되는 먼지의 양과 공기유동의 속도는 차량에 장착된 대용량 흡입

팬의 용량과 비례하지만, 고정된 용량의 흡입팬이 차량에 장착된 후에는 흡입구가 바닥으로부터 위치한 높이가 가장 중요한 설계변수가 된다. 따라서 흡입대상이 되는 크기의 먼지가 흡입구를 통해 흡입되어 사이클론형식의 프리필터부로 넘어갈 수 있도록, 청소하고자 하는 궤도의 형상이나 높이에 따라 바닥으로부터의 위치한 흡입구 높이를 최적화 할 필요가 있다.

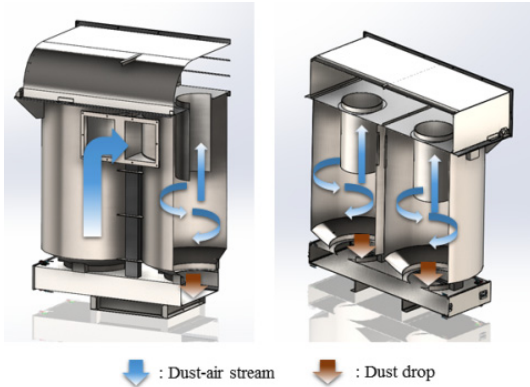


Fig. 4. Working schematics of dual cyclone-based prefilter

Fig. 4는 흡입부에 연결된 사이클론형식의 프리필터 구조를 나타낸다. 적용된 사이클론은 처리용량과 설계공간을 고려하여 두 개의 쌍으로 설계하였다. 흡입부로 올라온 먼지와 공기는 자체의 흡입력에 의해서 사이클론 원통 내부에서 회전하게 된다. 이 때 상대적으로 크기와 무게가 큰 먼지입자들은 원심력과 중력에 의해서 사이클론 벽면을 따라 회전하며 아래로 내려가 하부에 설치된 포집박스에 쌓이게 된다. 상대적으로 가벼운 초미세먼지 등은 사이클론 중앙부의 덕트관을 따라 다음 단계의 전기집진기로 이동하게 된다. 이렇게 설계된 사이클론형식의 프리필터는 큰 입자들을 일차적으로 포집하여 다음 단계의 전기집진기의 효율을 높은 상태로 유지시키는 역할을 한다.

## 2.2 유동모델 및 조건

본 연구의 터널집진차량에 설치된 먼지흡입시스템과 사이클론형식의 프리필터의 먼지흡입 및 집진능을 계산하기 위해서 입자가 포함된 터널내의 공기를 흡입팬의 용량에 따라 ANSYS FLUENT을 이용한 전산유체해석을 통하여 계산하였다.

유동해석에서 터널내부와 흡입시스템의 공기유동은 연속상(Continuous phase) 모델과  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하지만, 공기중에 부유하거나 궤도 바닥면에 누적된 먼지입자의 추적을 위해서는 Fig. 5(a)에 간략하게 표시한 것과 같이 ANSYS Fluent에서 제공하는 상차분모델(Discrete Phase Model)을 사용하였으며 입자추적을 위한 간략한 프로세서를 함께 나타내었다[8]. 라그랑지안 방법(Lagrangian Method)이라 불리는 상차분모델을 이용한 입자추적에서 입자간의 상호 작용력은 무시할 수 있다고 가정하여 해석 시 필요한 설계변수인 먼지입자의 무게 및 크기에 따른 입자의 유동을 효과적으로 분석할 수 있었다. 먼지입자의 움직임에 따른 벽면과의 상호작용은 Fig. 5(b)와 나타낸 바와 같이 흡입시스템의 특성에 따라 다른 경계조건을 사용하여 모델링하였다.

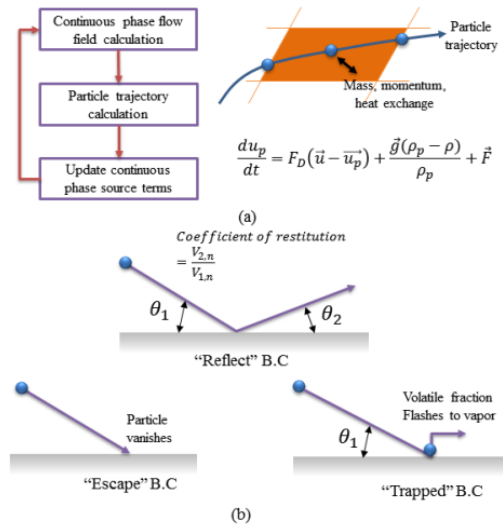


Fig. 5. Discrete phase model: (a) Lagrangian particle tracking method, (b) Particle reaching boundary conditions

상차분모델에서 입자의 궤적은 라그랑지안 기준 프레임에서 입자에 작용하는 힘을 적분하여 예측할 수 있다. 이러한 힘은 입자에 작용하는 관성력과 같으며 아래 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial u_p}{\partial t} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

$$\therefore F_D(u - u_p) = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \frac{1}{24}$$

여기서  $F_D(u - u_p)$ 는 입자의 단위질량당 드래그 힘이며,  $u, u_p, \mu, \rho, \rho_p, d_p$ 는 각각 유체의 속도, 입자의 속도, 유체의 점성, 유체의 밀도, 입자의 밀도, 입자의 직경이다.  $Re$ 와  $C_D$ 는 레이놀드 수와 드래그 상수를 나타낸다[9].

마이크로단위 이하의 입자를 추적하기 위해서는 입자의 좌표회전, 열 영동력(Thermophoretic force), 브라운 힘(Brownian force)등을 모두 고려할 필요가 있지만, 본 연구에서는 마이크로단위 이상의 입자의 거동을 분석하기 때문에 생략되었다.

### 2.3 미세먼지모델 및 해석조건

지하터널에 존재하는 미세먼지는 다양한 크기와 성분으로 구성되어 있으나 일반적으로 직경이  $10 \mu m$  이하의 미세먼지(PM10), 직경이  $2.5 \mu m$  이하인 초미세먼지(PM2.5)로 구분되며, 수치해석에서는 대표적인 세 가지 크기의 미세먼지를 대상으로 해석을 수행하고 구성성분은 터널 내부 금속성 미세먼지의 대부분을 구성하는 철(Fe)입자와 비금속계인 모래의 물리량을 수치해석 모델에 적용하였으며, 유동해석에는 ANSYS Fluent에서 제공하는  $k-\epsilon$  난류모델과 입자추적을 위한 상차분모델(Discrete Phase Model)을 사용하였다.

흡입구에서 터널궤도 바닥면까지의 거리는 최소간격인 100mm에서 200mm까지 변화시키면서 흡입구와 에어 블로어를 통해 사이클론까지 이동하는 입자의 개수와 흡입효율을 측정하였다. 흡입구의 흡입유량은 집진차량의 최대 팬 용량(2000CMM)에서 유동손실을 가정하여 최대 1500CMM까지 설정하여 해석을 수행하였다. 흡입구에 설치된 에어 나이프형 공기 블로어에는 최대 풍량 6 CMM( $m^3/min$ )의 3.7kW급 링 블로어를 적용하였다. 해석에 사용된 물리량은 아래의 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Summary of variables in analysis

Variable	Value
Particle size ( $\mu m$ )	10, 100, 200, 500
Particle material	Fe, Sand
Particle density( $kg/m^3$ )	8030, 1650
Suction height (mm)	max. 200
Fan flow rate ( $m^3/min$ )	1000 and 1500
Growth rate	1.2 and 1.6

## 3. 설계 및 해석

### 3.1 격자 모델 및 설정

분진흡입차의 하부와 프리필터로 설치되는 사이클론 모듈의 흡입팬의 유량에 따른 미세먼지 입자거동을 살펴보기 위하여 Fig. 6과 같이 표면격자와 공간격자를 구성하였다. 해석의 정확성을 높이고 계산에 필요한 시간과 자원을 최소화하기 위해 관심영역을 더 조밀한 격자로 설정하였다.

공기 블로어로 사용되는 에어 나이프의 공기 출구에는 0.3mm의 조밀한 격자로 구성하고 먼지입자들이 놓여지는 바닥, 덕트, 사이클론 등의 흡입장치들의 표면격자는 40mm로 구성하였다. 공간격자도 관심영역을 보다 조밀하게 구성하고 모든 영역을 사면체 격자모델을 적용하고 흡입부의 내부는 팽창비(Growth rate)를 1.2로 설정하고 외부는 1.6으로 설정하였다.

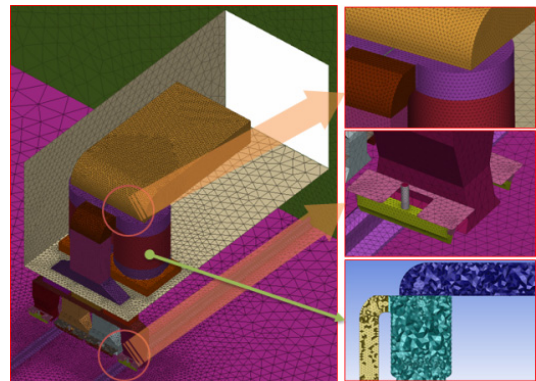


Fig. 6. Surface mesh and volume mesh of the dust suction system

먼지입자들의 추적을 위한 상차분모델(DPM)은 기본적으로 연속체(공기)를 먼저 계산한 후에 그 값을 바탕으로 입자들의 거동을 계산한다. 따라서 입자들의 거동을 계산하기 위해 필요한 연속체의 값을 얼마의 주기로 적용할 것인지를 정의해야 하는데 본 연구에서는 일정한 시간 간격마다 확인하기 위해서 매 시간격당 50회의 반복 결과값을 상차분모델에 적용하도록 설정하였다.

### 3.2 먼지입자 추적 및 거동해석

흡입구와 사이클론형 프리필터가 연결된 Fig. 6의 격자모델을 기반으로 공기유동과 상차분모델(DPM)을 이용하여 입자의 거동을 해석하였다. Fig. 7은  $10\mu m$ 크기

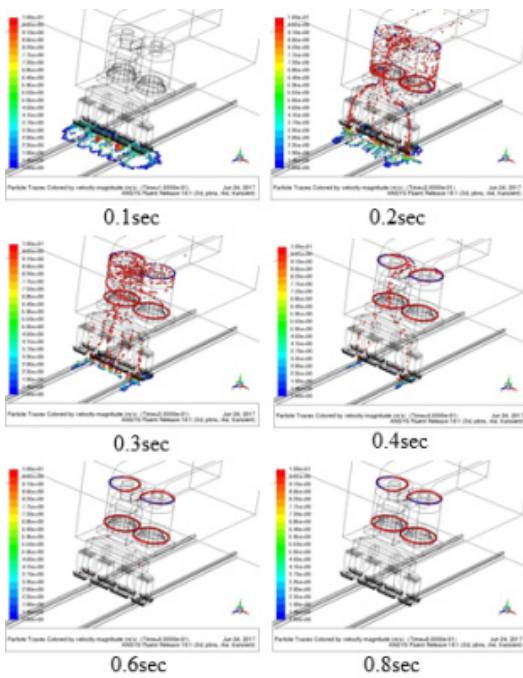


Fig. 7. 10µm of particle tracking at 100mm height and flow rate of 1500CMM

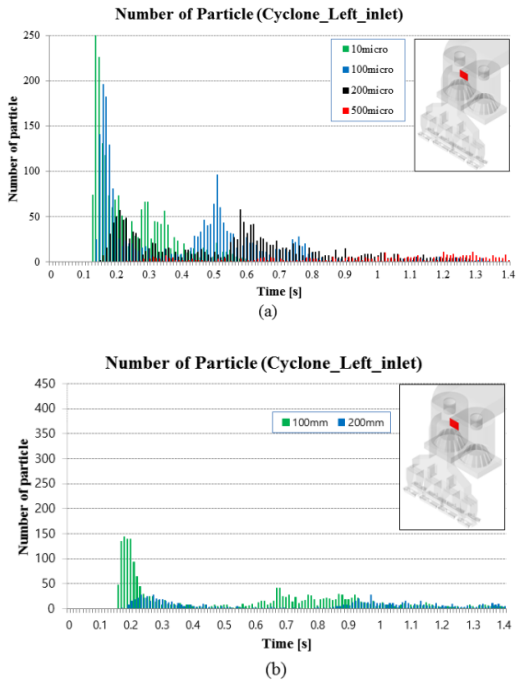


Fig. 8. Number of particles at a cyclone inlet with: (a) flow rate, 1500CMM, (b) different Inlet duct height

의 입자가 흡입시간에 따른 움직임을 추적한 것으로 대략 0.6초 이내에 모든 입자가 흡입됨을 알 수 있다. 입자의 크기가 작고 초반 사이클론 내부의 유동이 불안정할 때에는 10µm 입자가 사이클론을 지나 다음의 전기집진기로 유입되는 것을 알 수 있다. 입자의 크기를 점차 증가하였을 때에 100µm까지는 1.4초 이내에 바닥에 존재하는 먼지입자가 흡입시스템으로 모두 유입되지만, 200µm 이상의 입자의 경우에는 1.4초까지 상당수의 입자가 궤도바닥에 잔류함을 알 수 있었다. 크기별 입자추적 모양은 Fig. 7과 유사함으로 생략하였다.

Fig. 8(a)은 1500CMM의 집진팬 유량에서 시간대별 사이클론의 왼쪽입구로 유입되는 개수를 나타내고, Fig. 8(b)는 덕트 높이의 변화에 따른 유입 입자의 수를 나타낸다. 좌우측면의 입구는 거의 비슷한 경향의 입자유입을 보여주었다. 이 그래프에서 10µm 입자는 약 0.12초부터 사이클론으로 유입되기 시작하여 0.15초에서 약 300개 이상으로 최고값을 보이며, 0.15초 이후부터는 유입되는 양이 급격히 줄어들어 약 0.6초에 모든 입자가 유입되었다. 100µm와 200µm의 입자는 무게로 인하여 약간의 시간격을 두고 유입되기 시작하여 0.5초와 0.6초에서 최대치를 보여주고 1.4초 이내에 거의 모든 입자가 유입되었다. 그러나 500µm의 입자는 0.22초부터 유입되기 시작하지만 전체 해석시간동안 적은양이 지속적으로 유입됨을 알 수 있다. 따라서 흡입구에 유입되는 입자의 크기가 크다면 흡입되는 데 일정한 시간이 소모될 것으로 예상되며, 움직이는 차량에 탑재 시에는 경우에 따라 운행속도를 줄일 필요가 있다고 분석되었다.

흡입 덕트 높이의 변화에 따른 유입 입자는 덕트와 지면과의 거리가 낮을수록 흡입되는 입자의 수가 많아지는 것을 확인하였다.

Fig. 9는 궤도면에 존재하는 다양한 크기의 먼지입자의 흡입효율을 나타낸다. Fig. 9(a)는 흡입팬의 유량이 1000CMM일 때를 나타내며, 200µm 이상의 입자 흡입효율이 낮은 것을 알 수 있다. 반면에 흡입팬의 유량이 1500CMM으로 증대될 때에는 Fig. 9(b)와 같이 100µm까지의 입자는 모두 흡입됨을 알 수 있다. 따라서 최대운행속도가 5km/h인 분진흡입차량이 효과적으로 동작하기 위해서는 1.4초 이내에 먼지입자의 흡입이 가능해야 하며, 본 결과에서와 같이 100µm 이하의 초미세먼지를 포함한 먼지입자의 흡입을 위해서는 1500CMM의 흡입팬유량이 요구됨을 알 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 지하철도 터널내의 미세먼지와 초미세먼지를 효과적으로 포집할 수 있는 분진흡입차량 설계와 개발에 있어서 효율을 결정할 수 있는 핵심요소인 흡입부와 사이클론형식의 프리필터의 성능효과를 수치해석을 통해서 입증하였다. 해석 결과를 바탕으로 한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 흡입팬의 적정 유량선정을 위해서 유량이 1500CMM 이상일 때에, 운영속도 5km/h의 집진차량이 약 1.4 초 이내에 500 $\mu$ m크기까지의 먼지를 모두 흡입할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 먼지입자의 최대 허용 크기는 사이클론 흡입덕트의 웨도면으로부터의 높이가 100mm이하 일 경우에 500 $\mu$ m까지의 모든 크기의 먼지입자가 모두 흡입될 수 있음을 확인하였다.
- 3) 본 연구에서 설계된 사이클론형식의 프리필터를 적용할 경우 흡입구의 높이 100mm와 팬유량 1500CMM의 조건에서 1.4초 이내에서 10 $\mu$ m(Fe)와 100 $\mu$ m(Sand)까지의 먼지입자 집진이 가능한 것을 확인하였다.
- 4) 터널 초미세먼지의 제거를 위해 차상용 전기집진기를 탑재한 분진흡입차량의 설계는 고효율 흡입시스템과 사이클론 방식의 프리필터 탑재를 통하여 바닥의 초미세먼지와 미세먼지 등이 효과적으로 처리가 가능함을 확인하였으며, 도시철도 터널 등의 미세먼지 저감에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

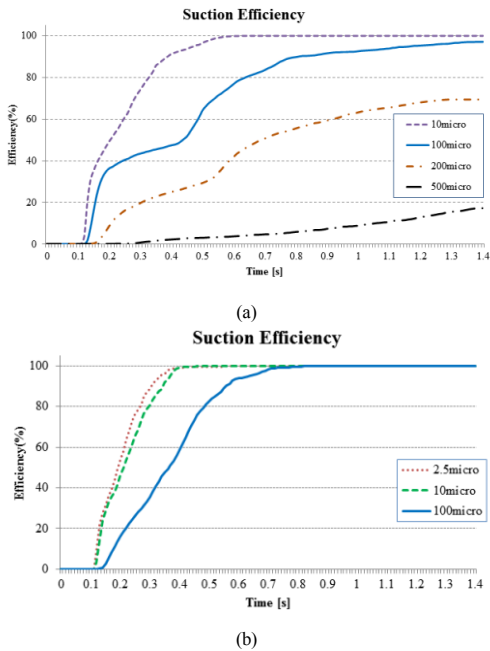


Fig. 9. Overall suction efficiency at: (a) fan flow rate, 1000CMM, (b) fan flow rate, 1500CMM

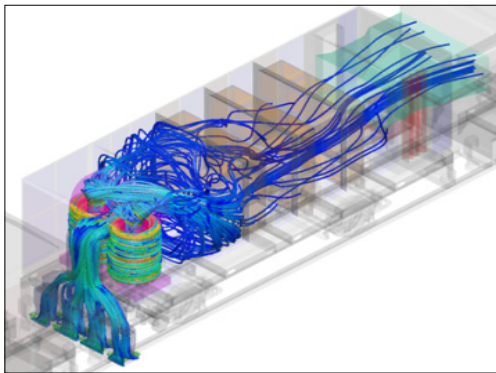


Fig. 10. Dust-air stream line of suction and blowing system.

Fig. 10은 유동해석의 스트림라인을 이용하여 바닥의 흡입구로 흡입된 유동이 사이클론형식의 프리필터를 통과해서 집진장치로 이동하는 전 과정을 나타내었다. 사이클론 입구에서는 비교적 균일한 유동을 나타내고, 사이클론 내부에서는 나선형을 형성하며 목적했던 사이클론의 프리필터 역할의 유동현상을 볼 수 있지만, 사이클론을 지난 유동은 전기집진기로 이동할 때에 매우 복잡한 유동 패턴을 형성함을 알 수 있다.

### References

- [1] L. M. Brosseau, et al., “Dust cleaning: a review of associated health effects and results of company and expert surveys”, *ASHRAE Transaction*, vol. 106, pp. 180-187, 2000.
- [2] M. Kim, et al., “Evaluation of passenger health risk assessment of sustainable indoor air quality monitoring in metro systems based on a non-Gaussian dynamic sensor validation method”, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 278, pp. 124 - 133, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.098>
- [3] S.-B. Kwon, et al., “Study on the indoor air quality of Seoul metropolitan subway during the rush hour”,

*Indoor and Built Environment*, vol. 17, pp. 361 - 369, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X08094683>

- [4] W. Jeong, "Flow control of air blowing and vacuuming module using Coanda effect", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 18(3), pp. 115-121, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.1.115>
- [5] C. M. Ma, *et al.*, "Chemical Properties and Source Profiles of Particulate Matter Collected on an Underground Subway Platform", *Asian Journal of Atmospheric Environment*, vol. 9(2), pp. 165-172, June, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.5572/ajae.2015.9.2.165>
- [6] D. Park, *et al.*, "Identification of the source of PM10 in a subway tunnel using positive matrix factorization", *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 64(12), pp. 1361-1368, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.950766>
- [7] W. C. Hinds, "Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles", A Wiley Interscience Publication, 2012.
- [8] S. A. Dickenson and J. J. Sansalone, "Discrete phase model representation of Particulate Matter (PM) for simulating PM separation by hydrodynamic unit operations", *Environmental Science & Technology*, vol. 43(21), pp. 8220-8266, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1021/es901527r>
- [9] S. A. Moris and A. J. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55(2), pp. 193-208, 1972.  
DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112072001806>

---

## 정 우 태(Wootae Jeong)

[정회원]



- 2000년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : Purdue University, IE, USA(공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2007년 9월 : PRISM Center, USA, Associate Researcher
- 2007년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

환경 자동화 및 지능형 로봇, 계측제어