

에어 블로어와 흡입기능을 가진 미세먼지 흡입시스템의 최적화

정우태*, 권순박¹, 고상원¹, 박덕신¹
¹한국철도기술연구원 교통환경연구팀

Dust collection system optimization with air blowing and dust suction module

Wootae Jeong*, Soon-Bark Kwon¹, Sangwon Ko¹, Duckshin Park¹

¹Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 도시철도 터널내에 축적된 미세먼지(PM10 and PM2.5)의 제거를 위해 사용되는 분진흡입차량의 성능은 하부흡입시스템의 설계방법에 따라 성능이 달라진다. 본 논문에서는 터널집진차량의 하부에 설치된 먼지흡입시스템의 고효율화를 위하여 궤도의 바닥면에 쌓인 먼지를 비산시키는 압축공기 블로어와 먼지 흡입구를 동시에 가지는 모듈화된 먼지흡입구조를 제안하였다. 흡입과 블로어의 상반된 구조를 동시에 가진 흡입시스템의 먼지유동 최적화를 위해 난류유동에 기초한 수치해석을 수행하였다. 해석결과로 먼지흡입효율을 최대화 할 수 있는 공기 블로어의 설치각이 6° 내외에서 결정되고, 이를 적용하면 5 km/h의 청소속도를 가지는 분진흡입차량의 흡입효율을 10%이상 높일 수 있음을 확인하였다.

Abstract The performance of track cleaning trains to remove accumulated fine particulate matter in subway tunnels depends on the design of the suction system equipped under the train. To increase the efficiency of the suction system under the cleaning vehicle, this paper proposes a novel dust suction module equipped with both air blowing nozzles and a dust suction structure. Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis with turbulent flow was conducted to optimize the dust suction system with a particle intake and blowing function. The optimal angle of the air blowing nozzle to maximize the dust removal rate was found to be 6 degrees. The performance of the track cleaning vehicle can be increased by at least 10 percent under an operation speed of 5km/h.

Keywords : Computational Fluid Dynamics, Dust cleaning, Optimization, Particulate matter, Suction system

1. 서론

지하철 및 도시철도 터널과 같은 지하공간에 축적된 미세먼지와 초미세먼지는 사용자와 근로자의 건강에 심각한 영향을 미칠 수 있으며, 이에 따른 지하 공기질 개선 기술에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다[1-3]. 최근 지하역사의 스크린도어의 설치에 터널내의 축적된 먼지가 지하역사의 승강장 및 플랫폼으로 유입되는 현상을 일부 차단해 주고 있으나, 터널내부의 청소 및 유지보

수를 수행하는 작업자의 유해먼지 노출을 증대시키거나, 환기구를 통해 객차내로 유입되어 승객의 건강을 위협하는 요소가 된다. 이러한 지하터널의 축적된 먼지제거와 공기질 향상을 위해 일부 지하터널에 특수한 터널청소차량을 이용하여 청소작업을 실시하고 있다.

터널내에 축적된 먼지를 청소하는 방법은 크게 고압살수차에 의한 습식방식과 분진흡입차에 의한 건식방식이 사용되고 있다. 고압살수차에 의한 세척은 공기 중의 먼지가 물방울에 흡착되어 침하되게 하는 방식으로, 침

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

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

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

Received November 4, 2015





Accepted January 5, 2016

Revised (1st December 10, 2015, 2nd December 30, 2015)

Published January 31, 2016

강된 먼지가 자갈도상이나 콘크리트 궤도의 바닥에 고여 건조되면 지하철 운행시에 터널내의 공기중으로 재비산될 수 있다는 단점을 가진다. 분진흡입차를 이용한 건식 방식은 압축공기로 궤도상에 침하된 먼지를 불어 일으키고 이를 집진장치로 포집하는 방식으로 사용되나, 자갈도상 등의 궤도청소에 효율이 낮으며, 초미세먼지 포집의 한계를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 도시철도 터널내의 미세먼지와 초미세먼지를 흡입하여 포집할 수 있는 집진차량이 개발되어 적용되고 있으며, 일반적으로 차량에 탑재된 집진장치와 하부에 장착된 먼지 흡입구조의 설계방식과 효율에 따라 다른 성능을 나타낸다. 국내외의 다양한 분진흡입차량은 Table 1에 요약되어 있다.

Table 1. Various vacuuming vehicles

| Manufacturer | Picture | Description |
|----------------------------|---|-----------------------------------|
| Bucher Schoerling, Germany |  | Vacuuming & brushing / road |
| Sinjeong, Korea |  | Vacuuming & watering / road |
| Vaktrak, France |  | Vacuuming & nozzle flap / Railway |
| Schorling Kommunal GmbH |  | Vacuuming & air curtain / Railway |

분진흡입차의 성능에 영향을 미치는 하부 먼지흡입구조의 설계와 해석을 위해서는 철도 터널내부의 미세먼지의 발생과 특징을 살펴볼 필요가 있다. 도시철도 터널에 쌓이는 미세먼지는 열차운행시에 철제 차륜 및 레일의 접촉으로 인한 마모, 제동시에 디스크 브레이크와 브레이크패드의 마모, 전차선과 판토틀레프의 접촉에 의해서 발생된다. 이러한 발생 원인으로 인해 대기중의 미세먼지의 구성과는 다르게 터널에 쌓인 미세먼지의 성분은 철(Fe) 성분이 전체 지하철 미세먼지의 40 % 이상을 차지한다고 알려져 있다[4-6]. 이러한 미세먼지 입자들은

열차 통과 시 열차풍에 의해 비산되었다가 다시 침강하여 궤도 도상 및 터널 하부에 쌓이게 되는데 PM 2.5 크기의 초미세먼지의 경우에도 비산된 이후 두 시간 이내에는 추가적인 유동이 발생하지 않을 경우 하부에 침전된다[7]. 따라서 도시철도터널의 미세먼지 제거를 위한 차량은 주로 열차운행이 끝난 시간에 운영됨을 고려할 때, 미세먼지 흡입구조는 터널 하부에 침강 또는 누적된 먼지를 우선 고려하여야 한다.

본 논문에서는 집진차량 하부에 설치되는 흡입구조의 설계에 있어서, 미세먼지의 흡입 및 제거 효율을 극대화함과 동시에 압축공기 블로어에 의해 바닥에 침강된 먼지를 비산시키는 기능을 유지하기 위한 적절한 블로어 토출유량과 노즐각을 구하기 위해서 먼지유동의 수치해석을 통한 최적의 흡입구조를 제안하고자 한다. 먼지의 비산과 유동해석을 위해서는 일반적으로 난류유동 모델 즉 표준 $k-\epsilon$ [8], realizable $k-\epsilon$ [9], 레이놀즈응력모형 [10]을 이용하여 해석이 가능하나 블로어에 의한 토출유량과 흡입구의 흡입유동을 동시에 고려하여 해석한 경우는 본 연구에서 독창적으로 수행되었다고 판단된다.

2. 연구방법

2.1 고효율 흡입시스템 설계

도시철도 터널의 미세먼지 제거를 위해 사용되고 있는 분진흡입차 하부에 설치된 흡입구는 진공흡입구를 설치하여 운행하였으나, 최근 터널궤도 하부에 누적된 먼지를 효과적으로 흡입하기 위해 Fig. 1(a)에 도식화된 것과 같이 고압의 공기 블로어에 의해 침하된 먼지를 비산시키고, 이를 흡입구를 통해서 흡입하는 방식을 적용하기 시작하였다. 그러나, 흡입구로 유입되지 않고 공기중으로 비산되는 먼지량이 많아지거나 자갈도상과 같은 복잡한 바닥구조에서는 흡입효율을 높이기 어려운 단점을 지닌다. 이러한 문제점을 보완하고, 먼지흡입의 효율을 높이기 위해서 먼지 흡입구조를 Fig. 1 (b)에 표현된 것과 같이 공기 블로어를 흡입구의 양단에 설치하여 에어 커튼과 공기 블로어의 역할을 동시에 가지도록 설계하여 터널궤도 바닥의 먼지가 흡입구 바깥의 공기중으로 비산되는 현상을 최소화하고 흡입구로 유입되는 효율을 증대시켰다.

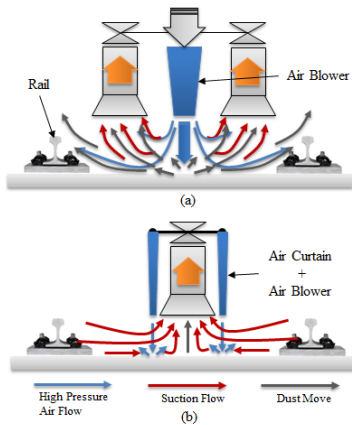


Fig. 1. Schematics of (a) conventional dust suction system with air blower and (b) new dust suction system with air curtain and blower

Fig. 2(a)는 Fig. 1(b)에서 제시된 공기 블로어와 에어 커튼의 기능을 하나의 모듈로 설계하여 분진흡입차량의 하부 흡입구조 시스템을 보여준다. 구체적으로 7개의 독립적인 모듈로 구성되어 있으며 궤도에 따른 상하높이의 조절이 가능하고, 측면에 설치된 각각 2개의 모듈은 수평방향의 스핀확장을 통하여 폭넓은 터널 궤도 공간의 미세먼지 흡입이 가능하도록 설계되었다. 각 모듈은 Fig. 2(b)에 표시된 것과 같이 8개의 압축공기 블로어와 공기 흡입구를 일체형으로 구성하였다.

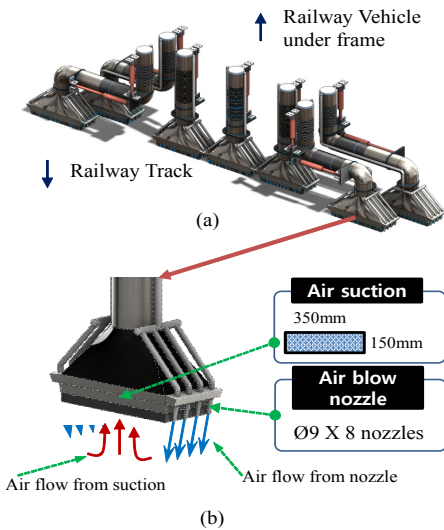


Fig. 2. Modular design of dust intake structure for the railway tunnel vacuuming vehicle; (a) seven modules under vehicle and (b) suction and blowing components of the single module

본 연구에서 제시된 미세먼지 흡입모듈은 터널궤도에 침하되어 누적된 미세먼지를 공기 블로어(air blower)를 이용해 압축공기를 분사하여 비산시킨 후 흡입하는 방식을 사용하고 있다. 이 때 미세먼지 제거효율은 흡입모듈에 설치된 공기 블로어의 압력, 노즐 분사 각도 및 흡입구의 지면으로부터의 높이, 차량의 속도와 같은 변수에 의해서 결정된다. 따라서, 흡입효율을 높이기 위해서는 미세먼지의 난류유동에 대한 수치해석을 통해 블로어의 공기압, 분사각도 등을 최적화 할 필요가 있다.

2.2 미세먼지 난류유동 모델

본 연구에서는 바닥에 누적된 먼지의 강제 비산을 위해서 하나의 흡입구 모델에 8개의 압축공기 노즐을 가진 공기 블로어와 진공흡입구를 동시에 사용한 구조를 채택하였고, 유동해석에 있어서 난류유동이 예측되어 Solidworks Flow Simulation에서 제공하는 Standard $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다[8].

Standard $k-\epsilon$ 난류모델은 경계층유동의 해석에서는 오차가 있다고 알려져 있으나, 본 연구의 해석에서와 같이 경계층에서의 해석이 목적이 아닌 경우에는 비교적 정확한 수준의 해석결과를 보여준다고 알려져 있다. 이 모델은 아래와 같이 두 개의 수송방정식을 이용하여 각각 독립적으로 유체난류속도와 length scale값을 계산한다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho \epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon \quad (2)$$

위 식에서 μ_t 는 난류점성계수($N \cdot S/m^2$), u 는 유체속도(m/s), ϵ 는 난류유동 에너지 소산율(m^2/s^3)을 나타내며, 난류점성계수를 표현하기 위해 사용된 f_μ , R_T , R_y 는 아래와 같다.

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

$$f_\mu = [1 - \exp(-0.025 R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_T} \right)$$

$$R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \epsilon}, R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}$$

여기서 k 는 난류 운동에너지, ρ 는 밀도를 나타내며, 식 (1),(2)에서 사용된 S_k , S_ϵ 는 아래와 같이 표현된다.

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \mu_t P_B \quad (4)$$

$$S_\epsilon = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \mu_t C_B P_B \right) - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (5)$$

여기서 $\tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 는 평균속도구배에 의한 난류운동에너지를 나타내며, $C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$ 는 $k-\epsilon$ 모델에서 적용되는 상수값으로 0.09, 1.44, 1.92의 값이 각각 사용되었다. 이때 부력에 의하여 발생하는 난류효과는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$P_B = - \frac{g_i}{\rho_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (6)$$

2.3 미세먼지모델 및 해석조건

입자의 크기에 따른 먼지의 분류는 직경이 10 μm 이하로 구성된 먼지를 미세먼지(PM10), 직경이 2.5 μm 이하인 먼지를 초미세먼지(PM2.5)라고 정의한다. 본 연구에서는 미세먼지의 크기를 고려하여 입자의 크기를 1, 10, 100 μm 의 3가지로 분류하고, 철도터널내에 축적되는 먼지성분의 대다수를 구성하는 철(Fe)입자의 물리량을 모델에 적용하였다.

흡입모듈과 터널레도 바닥면까지의 거리는 100 mm로 고정하고, 집진차량의 운행속도는 정지상태에서 최대 5 km/h까지로 설정하였으며, 흡입구의 흡입유량은 집진차량의 팬용량을 고려하여 모듈당 1 m³/s에서 2 m³/s까지 변화시키면서 결과값을 도출하였다. 또한 압축공기를 사용한 공기 블로어의 토출유량은 노즐(지름 9 mm)당 0.1 ~ 0.2 m³/s의 값에 따른 먼지유동상태를 확인하고, 최적의 압축공기 분사각을 찾아내기 위해서 노즐분사각을 0° ~ 30°까지 변화하면서 입자의 유동을 관찰하였다. 해석에 사용된 물리량은 아래의 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Summary of variables for simulation and analysis

| Variable | Value |
|---------------------------------------|------------|
| Particle size (μm) | 1, 10, 100 |
| Particle material | Fe |
| Nozzle height (mm) | 100 |
| Nozzle angle (Degree) | 0° ~ 30° |
| Suction flow rate (m ³ /s) | 1 ~ 2 |
| Nozzle flow rate (m ³ /s) | 0.1 ~ 0.2 |
| Vehicle Speed (km/h) | 0 ~ 5 |

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 흡입모듈 해석결과

분진흡입차의 하부에 설치될 흡입모듈은 Fig. 2(a)와 같이 모두 7개의 모듈로 구성되어 있다. 먼저 하나의 모듈은 8개의 노즐로 둘러싸인 압축공기 블로어와 하나의 흡입구로 구성되어 있고, 분진흡입차량의 속도, 블로어 노즐의 각도와 공기유량, 흡입구의 흡입유량과 지면으로부터의 높이 등의 변수조합이 많으므로, 해석의 편리성을 위해 흡입구의 높이는 지면으로부터 100 mm로 고정하여 수치해석을 수행하였다. 또한 차량의 운행속도는 정지 상태에서 일반적인 청소주행속도인 5 km/h까지를 대상으로 하였다.

본 해석에서 공기 블로어와 진공흡입구는 서로 교차된 유동을 일으켜 난류유동을 유발할 것으로 예상되므로, 특정 흡입유동속도에 대해서 최적의 공기 블로어의 노즐 각을 찾고, 이를 활용하여 흡입구에 흡입되는 미세먼지 입자의 양을 구하였다. 미세먼지와 초미세먼지는 앞서 설명한 바와 같이 철도터널레도에서 많은 비중을 차지하는 철(Fe)성분을 기준으로 하고, 입자의 크기는 1, 10, 100 μm 의 3가지에 대한 유동속의 입자궤적을 살펴 보았다.

Fig. 3은 노즐당 블로어의 유량이 0.2 m³/s인 상태에서 압축공기의 노즐각을 0°에서 10°까지 변화시키고 차량의 주행속도를 5 km/h로 지정하였을 때, 단일 흡입구 모듈 주위에서의 유동속도와 입자의 궤적에 대한 스트림을 나타낸다. 노즐각이 약 10°까지 증가함에 따라서 흡입구로 유도되는 복잡한 난류유동에 의한 입자궤적을 확인할 수 있다.

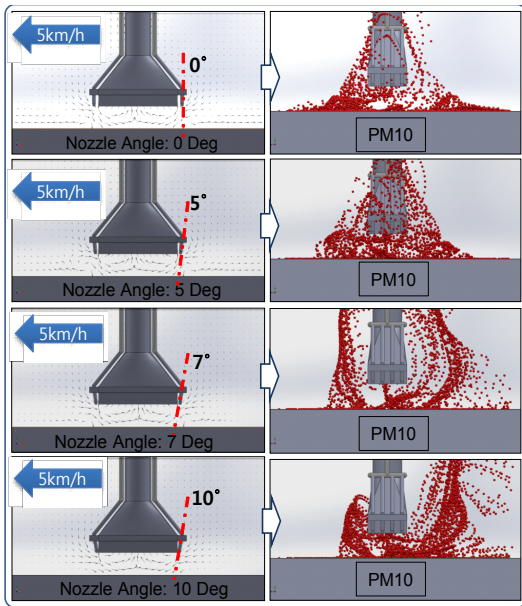


Fig. 3. Flow simulation of the PM10 as nozzle angle changes under the train speed of 5 km/h

Fig. 4와 Fig. 5는 미세먼지입자의 흡입효율을 높일 수 있는 최적의 노즐각을 구하기 위해서 노즐각의 변화에 따른 미세먼지의 크기별 포집효율값의 결과를 나타내었다. 개별 모듈에 대한 최적 노즐각을 구하기 위함으로 차량의 속도는 정지 상태로 가정하였다. Fig. 4의 결과에서 보여주는 것과 같이 입자의 크기에 따라 상대적인 크기의 차이는 있지만, 흡입효율의 변화는 입자의 크기에 상관없이 동일한 유형을 나타내었다. 이때 흡입효율 또는 dust removal rate(%)는 바닥에 쌓인 먼지입자가 공기 노즐에 의해서 비산될 때 외부로 흩어지지 않고 흡입구로 흡입되는 먼지의 비율로 계산될 수 있다. 노즐과 흡입구가 동시에 동작될 때의 난류유동의 수치해석 결과는 노즐각이 6°까지 효율이 점차적으로 상승한 후에 6°이상에서는 하강하는 패턴을 보여주다가 15°이상의 높은 노즐각에 대해서는 예측하기가 어려운 복잡한 효율 변화를 보여주었다. 이는 높은 노즐각을 통한 압축 공기 토출이 흡입구의 흡입유동과 직접적으로 교차하여 복잡한 난류유동을 형성하여 공기중으로 비산된 먼지의 흡입효율을 불일정하게 하는 요인이 된다고 할 수 있다.

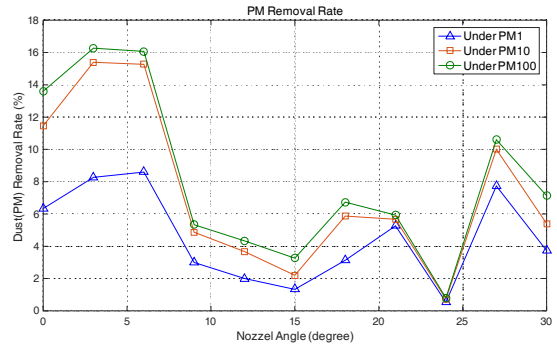


Fig. 4. PM removal efficiency as dust particle size and nozzle angle change

Fig. 5는 노즐의 압축공기유량을 변화시켰을 때 나타나는 미세먼지 흡입효율을 나타낸다. 흡입구의 양쪽 측면 노즐에서 토출되는 압축공기는 진공흡입구의 먼지 흡입의 유동 스트림을 방해하는 효과를 지니기 때문에 노즐의 유량이 낮은 경우는 흡입효율이 높게 나타난다. 이러한 공기노즐의 낮은 유량은 진공흡입구의 흡입유량을 높일 수는 있으나, 노즐에서 토출된 압축공기가 궤도 바닥까지 전달되지 못하여 침강된 먼지를 비산시키거나 차단막의 역할인 에어커튼의 역할을 하지 못하는 것으로 판단된다. 따라서, Fig. 5의 해석결과에 나타나 있는 것과 같이 노즐의 토출유량이 0.025 ~ 0.05 m³/s의 경우는 공기중의 먼지에 대한 흡입효율은 높게 보이지만 토출유량이 낮아 바닥면에 침강된 먼지를 비산시킬 수 있는 충분한 압력을 생성하지 못하기 때문에 바닥면에 누적된 먼지를 비산시켜 흡입하는 효율이 떨어지게 된다. 이는 노즐각의 변화에 따라라도 먼지 흡입효율의 변화가 거의 없다는 점과, Fig. 7의 블로어 유량이 0.1 m³/s 일 때 바닥면에 대한 압력효과가 거의 없다는 점에서 적절한 토출유량으로 사용될 수 없다는 것을 알 수 있다.

따라서, 본 연구의 노즐과 흡입모듈의 설치에 있어서 노즐의 압축공기에 의한 바닥면지의 비산효과를 동시에 이용하기 위해서는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 노즐당 유량이 0.15 ~ 0.2 m³/s정도는 되어야 함을 알 수 있다. 또한 노즐각의 변화에 따른 흡입효율은 노즐각이 10°이상으로 높은 각을 유지하게 되면 블로어와 흡입구의 공기유동이 급격한 난류유동을 발생시켜 효율이 예측할 수 없는 상태로 변화하였다. 이는 미세먼지 흡입효율을 최적화 할 수 있는 공기 블로어의 노즐각은 6° 내외임을 나타낸다고 할 수 있다.

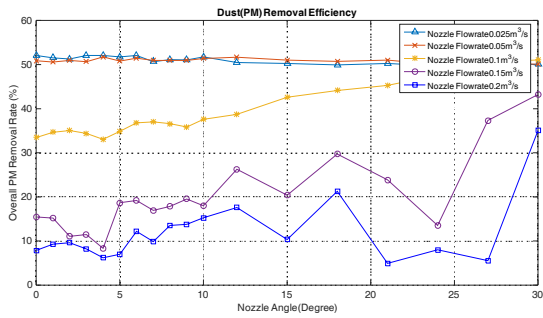


Fig. 5. PM removal efficiency as nozzle angle and flow rate change

3.2 통합 흡입모듈 해석결과

모듈단위의 공기 블로어의 최적 노즐각인 6°를 적용하여 7개로 구성된 흡입구 모듈을 차량하부에 위치시키고, 터널케도면에서의 전체 미세먼지 유동해석을 수행하였다. Fig. 6은 7개의 흡입모듈을 레일과 함께 설치하였을 때의 바닥면과 흡입구 사이의 유동 스트림을 나타낸다. 흡입구의 흡입유량을 6 m³/s까지 증가시킬 경우에도 공기노즐의 에어커튼 효과와 블로어 효과가 잘 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

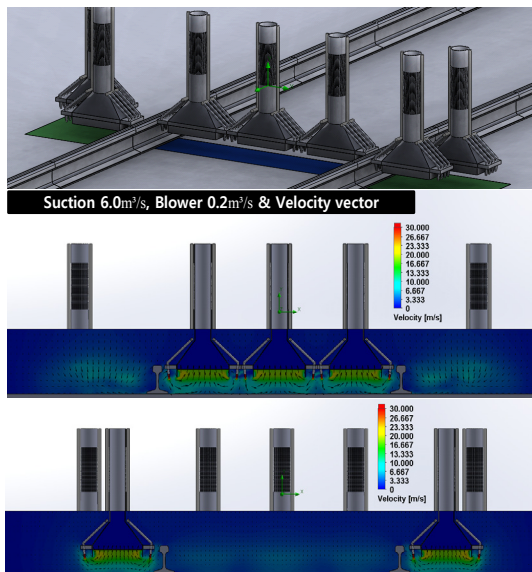


Fig. 6. Flow velocity for combined blower and suction modules

Fig. 7은 7개의 모듈을 구성하고 있는 압축공기 노즐의 토출유량 유량을 0.1 m³/s부터 0.2 m³/s까지 변화시켰을 때

을 때 궤도의 바닥면에서 관찰한 압력분포를 나타낸다. 붉은색으로 표시된 부분이 바닥면에 가장 큰 압력이 가해지는 영역으로 압축공기의 유량이 0.2 m³/s일 때 최대 20 Pa의 압력이 바닥면에 가해짐을 알 수 있다. 블로어의 토출유량이 0.2 m³/s 이상이 되는 경우는 바닥면의 먼지를 보다 많은 양으로 비산시킬 수 있으나, 일반적으로 상용에서 사용되는 소형 공기압축기를 사용한 노즐의 최대 토출유량을 초과하여 실질적인 의미를 가지기 어려우므로 배제하였다. 본 수치해석의 결과는 노즐이 바닥면에서 100 mm 위치의 높이에 설치되었을 때에 해당하는 것으로, 노즐의 위치가 바닥면과 가까워질 경우에는 적정 토출유량이 다소 줄어도 충분한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

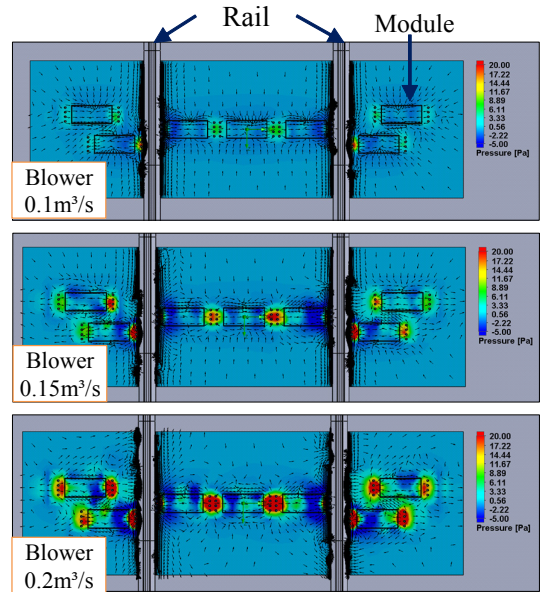


Fig. 7. Pressure distribution on the railway track according to air blower quantity change

4. 결론

본 논문에서는 도시철도 터널의 분진흡입차량의 하부에 설치된 먼지흡입시스템의 흡입효율을 높이기 위하여 차량하부의 흡입시스템을 궤도의 바닥면에 쌓인 먼지를 비산시키는 압축공기 블로어와 먼지 흡입구를 동시에 가지는 새로운 구조를 제안하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 흡입구 모듈당 8개의 압축공기 노즐을 가진 흡입 구조를 설계하였으며, 비선형 난류유동을 가진 먼지유동의 수치해석을 통하여 블로어 노즐의 설치 각이 약 6°내외에서 흡입효율이 최적화 될 수 있음을 확인하였다.
- 2) 블로어 노즐각의 최적화와 더불어, 차량의 이동속도에 따른 개별 흡입구의 상대적인 흡입유량과 공기 블로어의 토출 유량을 산출하였으며, 최대 분진 청소속도인 5 km/h의 분진흡입차량에 적용시에 미세먼지 제거효율을 10 %이상 높일 수 있음을 확인하였다.
- 3) 특히 모듈로 설계된 흡입구조는 먼지를 비산시키는 블로어와 흡입구조를 동시에 가지는 독특한 구조로 설계하고 두 가지의 기능이 상호효과를 보여 줄 수 있도록 노즐의 유량, 설치각 및 흡입구의 흡입유량을 최적화 하였다.
- 4) 이러한 모듈화된 흡입시스템의 설계는 차량의 설계 변경시에도 적용이 간편하여 새롭게 개발중인 분집흡입차에 적용시에 터널내부의 궤도상의 레일 틈과 바닥에 집중적으로 누적된 미세먼지와 초미세먼지의 제거에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] L. M. Brosseau, et al., "Dust cleaning: a review of associated health effects and results of company and expert surveys", ASHRAE Trans., Vol. 106, pp. 180-187, 2000.
- [2] J. F. Hurley, et al., "Assessment of health effects of long-term occupational exposure to tunnel dust in the London Underground", Research Report, 2003.
- [3] D. Park, et al., "Reduction of Particulate Matters Levels in Railway Cabins in Korea", Journal of Environmental Health Science and Engineering, Vol. 38(1), pp. 51-56, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5668/jehs.2012.38.1.051>
- [4] 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.
- [5] Y. H. Cheng and Y. L. Lin, "Measurement of Particle Mass Concentrations and Size Distributions in an Underground Station", Aerosol and Air Quality Research, Vol. 10, pp. 22-29, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4209/aagr.2009.05.0037>

- [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: <http://dx.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] D. C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD", DCW Industries, Inc., 1998.
- [9] T. H. Shih, et al., "A New $k-\epsilon$ Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation," Computers & Fluids, Vol.24(3), p.227-238, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)
- [10] B. E. Launder, et al., "Progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulence Closure," J. Fluid Mech., Vol. 68, pp. 537-566, 1975.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112075001814>

정 우 태(Wootae Jeong)

[정회원]



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

<관심분야>

환경 자동화 및 지능형 로봇, 계측제어, 멀티센서융합

권 순 박(Soon-Bark Kwon)

[정회원]



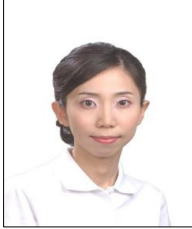
- 1999년 2월 : 광주과학기술원 (환경공학 석사)
- 2003년 2월 : 광주과학기술원 (환경공학 박사)
- 2004년 4월 ~ 2006년 1월 : 일본 AIST JSPS특별연구원
- 2006년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

실내환경, 공기질, 미세먼지, 지하역사 환경관리

고 상 원(Sangwon Ko)

[정회원]



- 2003년 2월 : 이화여자대학교대학원 화학과 (화학석사)
- 2012년 1월 : Stanford University (화학박사)
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

대기환경, 화학소제

박 덕 신(Duckshin Park)

[정회원]



- 1995년 8월 : 경희대학교 환경학과 (환경학석사)
- 2003년 8월 : 경희대학교 환경학과 (환경학박사)
- 1995년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

대기오염제어, 실내공기질제어