

# 코안다 효과를 이용한 에어 블로어와 흡입구의 유동 제어

정우태

한국철도기술연구원 교통환경연구팀

## Flow control of air blowing and vacuuming module using Coanda effect

Wootae Jeong

Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute

**요약** 도시철도 터널 내에 축적된 미세먼지(PM10 and PM2.5)의 제거를 위해 사용되는 분진흡입차량은 에어 블로어와 흡입시스템으로 구성된 하부흡입시스템의 설계방법에 따라 성능이 달라진다. 본 논문에서는 터널 집진차량의 하부에 설치된 먼지 흡입시스템의 효율 향상을 위하여 흡입구와 에어 블로어에 코안다 효과를 이용한 유속 조절장치를 적용하여 그 효과를 확인하였다. 특히, 공기 유동에 대한 수치해석을 통하여 진공 흡입구 내에 코안다 효과를 이용한 유속조절장치를 적용하였으며, 유속 조절각이 약 90도 내외일 때 유속의 상승과 더불어 유동의 안정화가 동시에 이루어질 수 있음을 확인하였다. 또한 링 블로어에 의해 동작되는 에어 나이프형 공기 블로어는 양쪽 끝 가장자리에 코안다 효과를 유도할 수 있는 엣지 구조를 삽입함으로써 블로어 양 끝단의 유속 저하를 개선할 수 있음을 확인하였다. 이러한 4개의 통합된 모듈 형식의 흡입 시스템의 설계는 최적화를 통하여 바닥 먼지가 비산됨과 동시에 흡입구로 흡입되어 궤도면에 누적된 미세먼지와 초미세먼지의 제거에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract** The efficiency of railway track cleaning vehicle for eliminating fine particulate matter (PM10 and PM2.5) in a subway tunnel depends strongly on the structure of the air blowing and suction system installed under the train. To increase the efficiency of underbody suction system, this paper proposes a novel method to use the Coanda effect for the air blower and dust suction module. In particular, through Computational Fluid Dynamics (CFD) analysis, the flow control device induced by the Coanda effect enables an increase in the overall flow velocity and to stabilize the flow distribution of the suction module at a control angle of 90°. In addition, the flow velocity drop at the edge of the air knife-type blower can be improved by placing small inserts at the edge of the blower. Those 4 modular designs of the dust suction system can help remove the dust accumulated on the track and tunnel by optimizing the blowing and suction flows.

**Keywords** : Coanda effect, Computational Fluid Dynamics, Dust cleaning, Particulate matter, Suction system

### 1. 서론

지하철 및 도시철도 터널과 같은 폐쇄된 지하 공간에 축적된 미세먼지와 초미세먼지는 환기장치를 부분적으로 적용하더라도 외기와 분리되어 있어 지하철도를 이용하는 사용자와 터널 유지보수를 위한 근로자의 건강에

심각한 영향을 미칠 수 있다[1-3]. 특히 지하철역 승강장과 터널을 분리하는 스크린도어의 증가는 터널 내에서 열차운행으로 발생하는 미세먼지가 승강장 및 플랫폼으로 유입되는 현상을 차단할 수 있으나, 터널 내부의 청소 및 유지보수를 수행하는 작업자의 유해 먼지 노출을 증대시킬 수 있다. 또한, 터널 내에 축적된 먼지는 열차운

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업(17RTRP-B082486-04)의 연구비 지원으로 수행되었음.

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

Tel: +82-31-460-5817 email: wjeong@krii.re.kr

Received February 8, 2017

Revised March 8, 2017

Accepted March 10, 2017

Published March 31, 2017

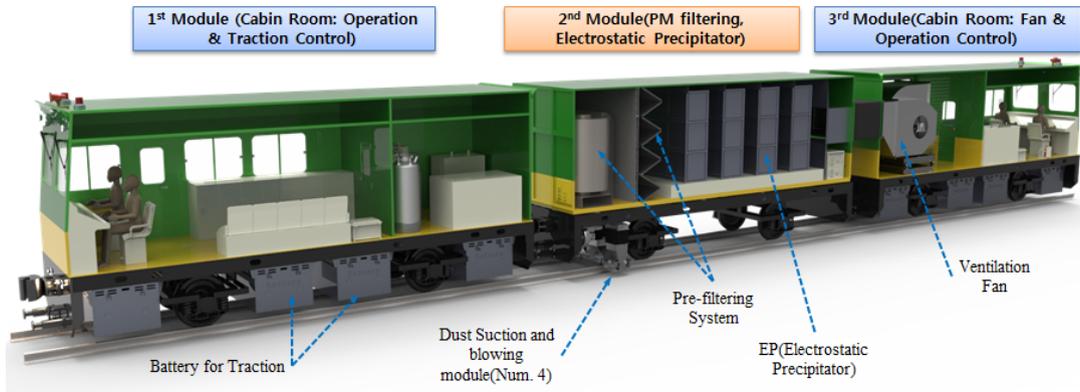


Fig. 1. Dust collecting vehicle for subway tunnel

행 시에, 환기구를 통해 객차 내로 유입되어 승객의 건강을 위협하는 요소가 되기도 한다. 따라서 도시철도 운영기관에서는 이러한 미세먼지를 제거하고 터널 내 공기질 개선을 위해 분진흡입차량 등의 특수한 터널청소차량을 이용하여 청소작업을 실시하고 있다.

터널청소차량을 이용한 먼지 청소방법은 크게 고압살수차에 의한 습식방식과 분진흡입차를 이용한 진공 흡입식의 건식방식이 대표적으로 사용된다. 고압살수차에 의한 세척은 공기 중에 부유하는 먼지가 살수차에 의해 분사된 물방울에 세척되어 침하시키는 방식으로 사용되나 자갈도상이나 콘크리트 궤도의 바닥에 침하된 먼지가 수거되지 못하고 건조되면 지하철 운행 시에 터널내 공기중으로 재비산을 일으킬 수 있다는 단점을 가진다. 분진흡입차를 이용한 건식방식은 주로 진공흡입 방식을 사용하지만 침하된 먼지를 비산시키기 위하여 압축공기에 의한 공기 블로어를 동시에 사용하기도 한다. 그러나 이러한 터널청소방식은 다양한 궤도형식과 구조형상을 가진 터널 청소에 적용 시에 효율이 일정하지 않으며, 최근 사회적 관심사인 초미세먼지 제거에 대응하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 도시철도 터널 내의 미세먼지와 초미세먼지를 동시에 포집할 수 있는 새로운 집진차량이 개발되고 있다. 개발 중인 초미세먼지 포집용 집진차량은 Fig. 1에 도시되어 있다. 그림에서 나타나 있는 것과 같이 배터리 구동방식을 채택하고 전기집진장치를 탑재한 3량 1편성의 양방향 운전 차량으로 구성되어 있는 것이 특징이다.

초미세먼지 집진을 위한 분진흡입차의 효율은 전기집진장치와 흡배기 구조의 설계에 의해서 좌우될 수 있는

며, 대상물인 터널 내 초미세먼지의 발생과 특징에 따라서 결정된다. 도시철도 터널에 축적되어 열차운행 시에 비산되는 초미세먼지의 발생원은 열차운행 시에 철제 차륜 및 레일의 접촉으로 인한 마모, 제동 시의 디스크 브레이크와 브레이크 패드의 마찰과 마모, 전차선과 판토그래프의 접촉에 따른 분진으로 알려져 있다. 이러한 발생 원인으로 인해 대기 중의 미세먼지의 구성과는 다르게 터널에 쌓인 미세먼지의 성분은 철금속(Fe)이 전체 지하철 미세먼지의 40% 이상을 차지한다[4-6]. 이렇게 발생한 초미세먼지 입자들은 열차운행 시의 열차풍에 의해 비산되었다가 다시 침강하여 궤도 도상 및 터널 하부에 다시 쌓이게 되는데 PM2.5(직경 2.5um이하)의 초미세먼지의 경우에 비산된 이후 추가적인 유동이 발생하지 않을 경우 터널 하부로 침전되어 쌓이는데 두 시간 이상이 소모된다[7]. 따라서 도시철도 터널의 미세먼지 제거를 위한 차량은 주로 열차운행이 끝난 새벽 시간에 운영됨을 고려할 때, 미세먼지 흡입시스템은 Fig. 1에서 나타나 있는 것과 같이 터널 궤도 하부에 침강 또는 누적된 먼지를 고려하여 측면보다 바닥을 대상으로 설계될 수 있다.

본 논문에서는 미세먼지 포집을 위한 집진차량의 설계에서 가장 중요한 요소 중의 하나인 고효율 하부 흡입 구조 설계를 진행하였다. 특히, Fig. 1의 두 번째 차량 하부에 설치된 것과 같이 흡입구와 에어 블로어가 동시에 장착된 시스템의 미세먼지 흡입효율을 높이기 위하여, 유체 역학의 코안다 효과를 적용하여 공기 흐름을 조절하고 그 효과를 수치해석 기법을 통하여 입증하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 고효율 흡입시스템 설계

국내 도시철도 지하 터널의 미세먼지 제거를 위해 사용되고 있는 분진흡입차 하부에 설치된 흡입구의 형식은 단순히 진공 흡입구를 직렬로 배치한 구조이다. 그러나 장시간 궤도터널 바닥에 누적된 초미세먼지를 효과적으로 집진하기 위해 Fig. 2에 도식화된 것과 같이 고압의 공기 블로어와 흡입구가 일체화된 구조를 적용할 시 진공 흡입구에 의해서 흡입되지 못하는 누적 먼지를 블로어를 통해 비산시키고, 이 비산된 먼지를 흡입구를 통해 흡입할 수 있다. 하지만 이러한 혼합형 흡입구조는 공기 블로어와 흡입구를 동시에 적용함으로써 터널 바닥의 유동이 복잡한 난류유동으로 형성되므로 흡입구로 유입되지 않고 공기 중으로 비산되는 먼지양이 많아지거나 자갈도상과 같은 복잡한 바닥구조에서는 흡입효율을 높이기 어려운 단점을 지닌다. 이러한 문제점을 보완하고, 먼지흡입의 효율을 높이기 위해서 공기 블로어와 흡입구의 형상 및 적용각 등을 최적화하여 먼지 흡입효율을 극대화할 수 있다[8].

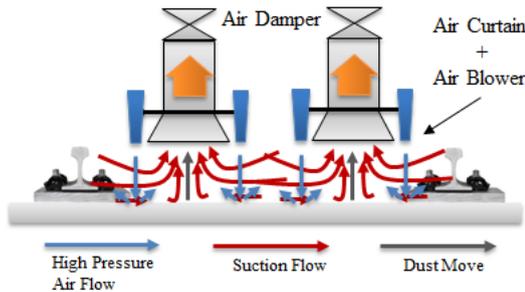


Fig. 2. Working schematics of air blower and suction system

Fig. 3은 Fig. 2에서 제시된 공기 블로어와 에어커튼의 기능을 하나의 모듈로 설계한 분진흡입차량의 하부 흡입구조 시스템을 보여준다. 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.

본 연구에서 제시된 미세먼지 흡입모듈은 터널궤도에 침착되어 누적된 미세먼지를 링블로어와 에어 나이프(air knife)를 이용해 고속의 공기를 분사하여 비산시킨 후 흡입하는 방식을 사용하고 있다. 이 때 사용되는 각 모듈에서 에어 나이프와 흡입구가 수평 방향으로 길게 설계되어 있기 때문에 블로어의 공기가 궤도 하부에 균일하게 분사되고, 흡입구의 흡입유동이 궤도의 전 영역에서 균일하도록 설계하기 위하여 코안다 효과를 바탕으로 한 유속 및 유동 조절장치를 설계하고 공기 유동의 수치해석을 통해 흡입시스템을 최적화할 필요가 있다.

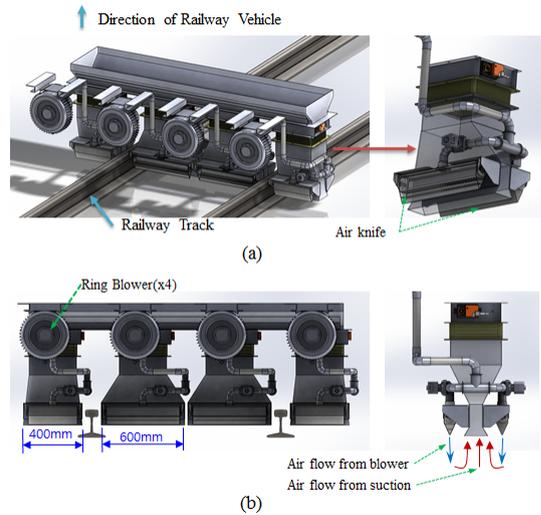


Fig. 3. Modular design of dust intake structure for the railway tunnel vacuuming vehicle; (a) four modular configuration and (b) suction and air knife-based blowing components

### 2.2 흡입구 유동과 코안다 효과

본 연구의 터널집진차량 하부 먼지흡입시스템은 궤도의 바닥면에 누적된 먼지를 에어 나이프 형식의 공기 블로어에 의해서 비산시키고 동시에 진공 흡입구를 통해 흡입하는 구조로 되어 있다. 집진차량하부의 링블로어에 의해 동작하는 에어 나이프형 블로어와 먼지 흡입구는 Fig. 3에서 도시되어 있는 것과 같이 4개의 모듈로 되어 있으며 길이는 400mm와 600mm로 두 개의 길이를 가진다. 이렇게 수평 방향의 길이가 긴 블로어와 흡입구는 중앙과 끝단에서의 유동의 유속이 일정하지 않고 형상에 따라 변화가 심한 단점을 가지고 있다. 이와 같이 흡입구와 블로어의 형상에 의한 유동의 불균형성을 해소하고

블로어 토출 속도와 흡입구의 흡입속도를 고르게 분포하도록 유지하기 위해서 코안다 효과를 활용한 유속 조절용 장치를 삽입하면 효율 개선이 가능하다.

코안다 효과(Coanda Effect)는 곡면에 접선방향으로 분사된 제트유동이 물체의 곡면을 따라 표면에 밀착되어 흐르는 현상을 말한다. 즉 고속 제트 유동이 표면을 따라 밀착되어 흐르면서 주위 유동을 가속시키게 되며, 날개 형상에 적용할 경우에는 양력을 발생시킬 수 있게 된다 [9-11].

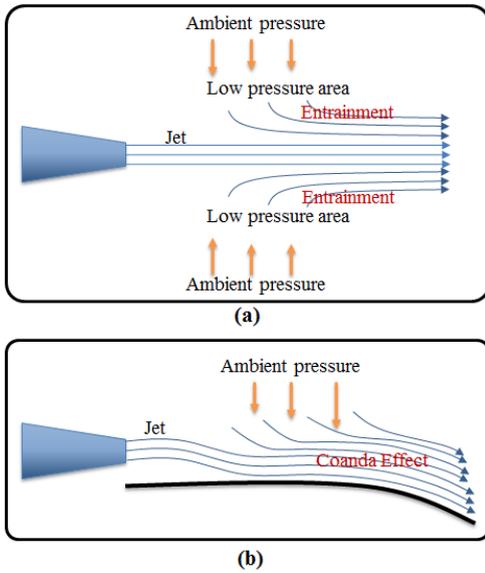


Fig. 4. Coanda effect of jet flow

유체 동역학에서 비압축성(incompressible) 비점성(invscid) 유동은 아래 식 (1)과 같이 질량보존의 연속 방정식, 운동량 보존 방정식 및 에너지 보존 방정식에 의한 미분방정식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) &= 0 \\ \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \{(\rho \mathbf{u}) \times \mathbf{u}\} &= 0 \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}(E+p)) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{u}, p, \rho$ 는 각각 유동의 속도, 압력, 밀도이다. 이 방정식은 유체의 속도, 압력, 밀도와와의 관계를 나타내 주며, Fig. 4(a)에서 표시한 것과 같이 노즐로부터 유체 유동이 발생할 경우에 유체 스트림라인 바깥쪽으로 저압

영역이 생성되고 주위의 유체가 제트 유동 방향으로 이동하며 속도가 높아지는 사실을 설명해 준다. 특히 Fig. 4(b)와 같이 물체의 표면이 제트 유동의 근처에 있을 경우 유동의 압력 차에 의한 코안다 효과에 의해서 유동의 속도 변화와 방향을 제어할 수 있다.

특히, 밀도가 일정하고, 상태 방정식이 수치해석적으로 충분히 안정적이라면, 오일러 운동량 방정식을 유선을 따라 적분하여 베르누이 방정식을 얻을 수 있다. 이러한 유동은 비행체의 날개 등에 적용되어 오고 있으며 양력 형성과 유동 속도, 방향 제어에 효과적으로 이용될 수 있다.

### 2.3 미세먼지모델 및 해석조건

도시철도 터널 등에서 발행하는 미세먼지는 다양한 크기와 성분의 입자로 구성되어 있으나 일반적으로 분류되는 직경이  $10 \mu\text{m}$  이하의 미세먼지(PM10), 직경이  $2.5 \mu\text{m}$  이하인 초미세먼지(PM2.5)로 구분되며, 수치해석에서는 대표적인 크기의 미세먼지를 가정하고 터널 내 미세먼지의 대부분을 구성하는 금속성 철(Fe)입자의 물리량을 수치해석 모델에 적용하였으며, 유동해석에는 Solidworks Flow Simulation에서 제공하는 Standard  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였다.

흡입모듈과 터널케도 바닥면까지의 거리는 100mm에서 200mm까지 변화시키면서 흡입구와 에어 블로어의 지정된 점에서 유속의 변화를 측정하였다. 흡입구의 흡입유량은 집진차량의 팬 용량(2000CMM이내)을 고려하여 모듈 당  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ 까지 변화시키면서 결과값을 도출하였다. 또한 흡입구 모듈 당 2개씩 설치된 에어 나이프형 공기 블로어에는 최대 풍량 6 CMM( $\text{m}^3/\text{min}$ )의 3.7kW급 링 블로어가 사용되었다. 지면에서 흡입구의 높이는 가변적으로 적용 가능하며, 에어 나이프의 노즐의 방향각도 조절이 가능하도록 설계되었다. 해석에 사용된 물리량은 아래의 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Summary of variables in analysis

Variable	Value
Particle size ( $\mu\text{m}$ )	1, 10, 100
Particle material	Fe
Nozzle height (mm)	max. 200
Nozzle angle (Degree)	less than $10^\circ$
Suction flow rate ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	1 ~ 2
Air knife blow rate ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	max. 3

### 3. 설계 및 해석

#### 3.1 흡입구 유동해석

분진흡입차의 하부에 설치될 흡입모듈은 Fig. 5(a)와 같은 형상을 가지며 모두 4개의 모듈로 구성되어 있다. 먼저 흡입구의 입구 전체에서 흡입유동의 크기를 균일하게 높이기 위해 Fig. 5(a)에 표시된 것과 같이 다이아몬드 형태의 유속조절장치를 추가하였다.

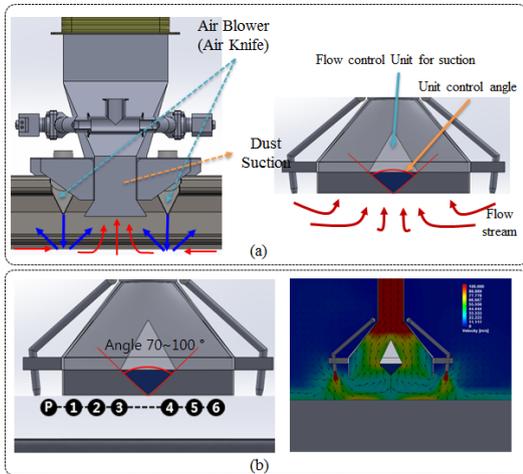


Fig. 5. Applied flow control unit with adjustable control angle for dust suction module

이러한 유속조절장치는 집진팬에 의한 흡입유동이 작용할 때 코안다 효과에 의해 유동이 유속조절장치의 표면을 따라 흐르게 해 주며, 이에 따라 표면으로 이동하는 유동의 유속도 증가하게 되는 현상을 사용한 것이다. 이러한 유속조절장치는 유선형으로 설계하면 더 나은 결과를 가져올 수 있으나, 수치해석결과가 큰 차이를 보이지 않고 제작성을 고려하여 다이아몬드 형식을 사용하여 수치해석을 수행하였다.

본 해석에서 유속조절장치의 제어각을 Fig. 5(b)d에 표시된 것과 같이 70도에서 100도까지 증가시키면서 제어각의 변화에 따른 흡입구의 입구 유속 변화를 살펴본다. 유속의 측정 점은 Fig. 5(b)에서 보이는 바와 같이 1~6까지의 등간격으로 위치하는 6개 지점을 사용하였다. 측정결과는 유속조절장치가 사용되지 않았을 경우와 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

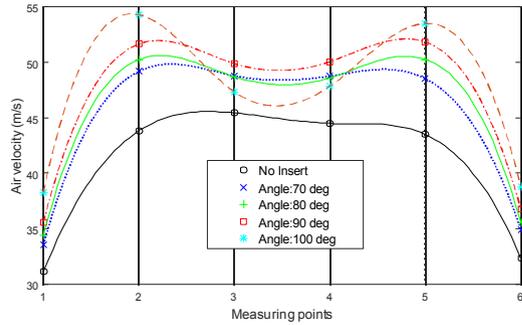


Fig. 6. Flow velocity distributed along the suction module

Fig. 6의 결과에서 확인할 수 있듯이 흡입구의 중앙부가 양쪽 끝단에 비해 높은 유속을 보여준다. 그러나 유속조절장치가 사용되지 않은 경우에는 중앙(2,3,4,5 지점)에서의 최대 유속이 약 45m/s가 된다. 유속조절장치를 설치하고 제어각을 70도에서 100도까지 변화하였을 때 중앙부에서의 유속이 전체적으로 증가된 것을 알 수 있으나, 100도 이상에서는 측정지점 사이의 유속변화량이 크게 나타나 흡입구 전체에서 균일한 유속증대를 이룰 수 없음을 확인하였다. 따라서 유속조절장치의 제어각이 약 90도 전후일 때 흡입구의 전반에 걸친 유속증대가 가능하였다.

#### 3.2 에어 블로어 유동해석

모듈 단위로 설계된 링 블로어 기반의 에어 나이프형 공기 블로어의 구조는 Fig. 7과 같다. 에어 나이프형 공기 블로어는 위쪽 중앙에 위치한 공기 유입구와 2단으로 구성된 내부의 공기 분배기, 그리고 토출구의 방향각 조절이 가능한 외부 프레임으로 구성된다. 공기 방출구는 수평 방향으로 길게 위치한 너비 1mm의 연속된 나이프 형으로 이루어져 있다. 이러한 에어 나이프형 공기 블로어의 유입구의 개수는 유량과 에어 나이프의 수평 방향 크기에 따라 선택될 수 있는데, Fig. 7과 같은 형식의 에어 나이프는 길이가 800mm이상일 경우에는 유입구가 2개소 이상으로 되어야 설계된 3CMM( $m^3/min$ )의 유량을 처리할 수 있다. 본 연구의 에어 블로어의 경우는 최대 600mm의 길이를 가지므로 1개의 유입구로도 충분한 유량(링 블로어 기준 최대 약 3CMM) 처리가 가능하기 때문에 유입구의 개수를 하나로 설정하였다.

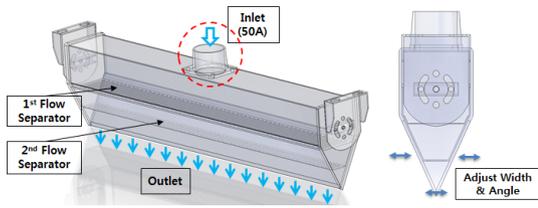


Fig. 7. Flow velocity for combined blower and suction modules

Fig. 8은 Fig. 7에서 설계된 에어 블로어의 유입구 에 링 블로어를 이용한 최대 유량을 공급하였을 때 에어 나이프 끝단에서의 유속 변화량을 나타내 준다. 즉흥 그래프는 에어 나이프의 공기 토출구에서 수직방향으로 100mm에서 200mm까지 증가시키면서 길이 방향의 유속변화를 해석한 결과이다. 실제 집진차량의 하부 흡입 시스템은 케도면으로부터 최소 100mm이상의 상부에 위치한다.

그래프의 수치해석 결과로부터 중앙부에서 약간의 유속저하가 생기는 것을 확인할 수 있으나, 가장 큰 문제점은 그래프에서 붉은색 원형으로 표시된 에어 나이프의 양쪽 끝단에서 유속저하가 매우 크다는 점이다. 이러한 양쪽 끝단의 급격한 유속저하는 케도면의 레일 양단이나 터널 가장자리에서 에어 블로어의 성능이 나타나지 않을 가능성을 포함하므로 설계의 변경을 통하여 에어나이프 양쪽 가장자리의 유속을 올려야 할 필요가 있다.

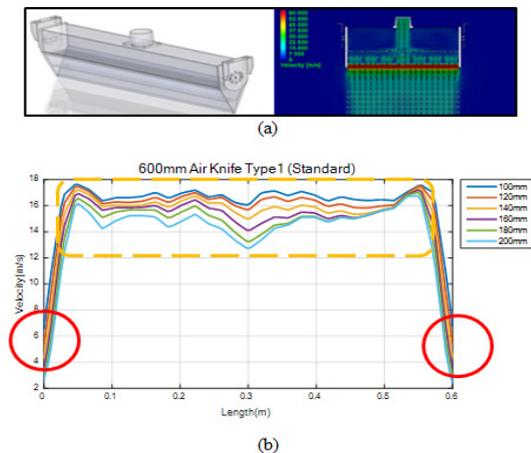


Fig. 8. Air velocity distribution without using Coanda effect inserts.

Fig. 9(a)에서 푸른색으로 표시된 부분은 양쪽 가장자

리의 유속을 증대시키기 위해 설치한 유속증대 장치이다. 흡입구의 유속조절장치와 비슷하게 블로어의 양단에 엷지 형식의 구조를 삽입함으로써 코안다 효과에 의하여 유동의 방향이 엷지면을 따라 가장자리 바깥쪽으로 향하는 동시에 유속을 증대시키게 된다. Fig. 9(b)의 수치해석 결과는 기본적인 에어나이프 수치해석 결과인 Fig. 9(b)와 비교해 볼 때 양쪽 끝 가장자리의 유속이 거리별로 크게 상승한 것을 알 수 있다.

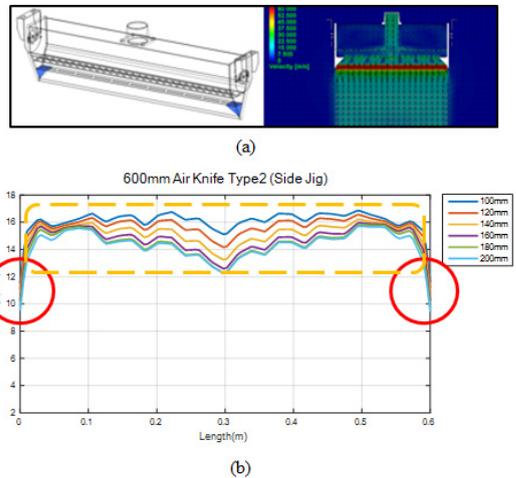


Fig. 9. Air velocity distribution by using Coanda effect inserts.

#### 4. 결론

본 논문에서는 최근 사회적 이슈가 되고 있는 도시철도 터널의 미세먼지와 초미세먼지를 포집할 수 있는 분진흡입차량 개발에 있어서 하부에 설치된 에어 나이프형 블로어와 흡입구의 유동 및 유속을 조절하여 흡입시스템의 흡입효율을 높일 수 있음을 코안다 효과에 기인한 조절장치와 수치해석 결과를 통해서 보여주었다. 해석 결과를 바탕으로 한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 도시철도 터널 분진흡입차량 성능의 주요 요소인 먼지 흡입시스템을 에어 나이프 형식의 공기 블로어와 흡입구를 모듈화 하여 4개의 모듈을 가지는 시스템으로 설계하였으며, 블로어와 흡입구의 유동 안정화와 유속 증대를 위해서 코안다 효과를 이용한 모듈을 적용하였다.

- 2) 진공 흡입구 내에 코안다 효과에 기반한 다이아몬드 형태의 유속조절장치를 적용하였으며, 유속 조절각이 약 90도 내외일 때 유속의 상승과 더불어 유동의 안정화가 동시에 이루어질 수 있음을 확인하였다.
- 3) 공기 블로어와 흡입구가 모듈로 일체화된 흡입구 조는 복잡한 난류유동을 발생시키기도 하지만 흡입 유동의 속도 분포는 에어 나이프의 토출 유량과 설치각, 흡입구의 높이 및 흡입유량에 따라 가변적이며 이를 최적화 할 수 있음을 확인하였다.
- 4) 4개의 모듈로 구성된 흡입시스템의 설계는 최적화를 통하여 바닥면지가 비산됨과 동시에 흡입구로 흡입되어 궤도면에 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] 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] 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, no. 2, pp. 165-172, June, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.5572/ajae.2015.9.2.165>
- [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: <https://doi.org/10.4209/aaqr.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, no. 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] W. Jeong, et al., "Dust collection system optimization with air blowing and dust suction module", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 17, no. 1, pp. 290-297, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.1.290>
- [9] H. Coanda, "Device for Deflecting a Stream of Elastic Fluid Projected into an Elastic Fluid", US Patent # 2,052,869. 1936.
- [10] I. Reba, "Applications of the Coanda effect", *Scientific American*. vol. 214, no. 6, pp. 84-921, 1996.  
DOI: <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0666-84>
- [11] M. Kadosch, "The curved wall effect", 2nd Cranfield Fluidics Conference, Cambridge, 1967.

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, 멀티센서융합