Int. J. Highw. Eng. Vol. 19 No. 6 : 31-36 DECEMBER 2017
https://doi.org/10.7855/IJHE.2017.19.6.031

도로 발생 분진의 방음벽 충돌 CFD 분석

Collision CFD Analysis of Noise Barrier of Road-Generated Particulate

이 재 엽 Lee, Jaiyeop
김 일 호 Kim, Ilho

한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소 신진연구원 (E-mail : pas2myth@kict.re.kr)
정회원 · 한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소 연구위원 ·
과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과 부교수·교신저자 (E-mail : ihkim@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The computational fluid dynamics of flow and fine particles in a road were set to determine the insert flow and occurrence characteristics.

METHODS : The road extension was 100 m with two lanes. A one-ton truck traveled a 50-m distance. After a noise barrier was installed on one side of the road, the flow and a collision analysis were tested.

RESULTS : The flow that occurred was 5 m/s beside the vehicle, and fine particulate was 5.0×10^2 $\mu g/m^3$ after 20 m from the exhaust vent.

CONCLUSIONS : After a collision analysis of the fine particulate on the noise barrier to find the most suitable position of the filter panel in height, the bottom 1 m was the most optimum position because 88.1% of the distribution was concentrated there.

Keywords
road fine particle, traveling vehicle particle, particle growth, computational fluid dynamic, filter panel, noise barrier

Corresponding Author : Kim, Ilho, Senior Researcher
Environmental and Plant Engineering Research Institute,
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology 283
Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.910.0649 Fax : +82.31.910.0291
E-mail : ihkim@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (Print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Aug. 24, 2017 Revised Sep. 18, 2017 Accepted Nov. 28, 2017

1. 서론

1.1. 논문개요

주행 차량 배출 및 비산에 의한 미세먼지를 저감하기 위해 기류 및 미세먼지 CFD를 구축하고 특성을 분석하였다. 이는 유입 기류와 발생 먼지를 파악하기 위함이다. 도로는 2차선에 100m 연장이고, 1톤 화물차가 50m 간격으로 운행되었다. 한편에 방음벽을 설치하고 기류와 충돌 분석을 수행하였다. 특히 가장 농도가 집중되는 범위를 통해 필터 패널의 최적 위치를 탐색하였다.

발생 기류는 차량 후면에서 30m/s, 차선 옆은 5m/s였다. 기류가 가장 높게 측정되는 위치는 높이 1~2m 구간이었다. 미세먼지는 배출구 후방 20m에서 $5.0 \times 10^2 \mu g/m^3$였다. 농도는 0.3~1.0m 높이에서 가장 집중되었다.

기류에 의한 미세먼지의 방음벽 충돌 분석을 통해 필터 패널의 가장 적합한 위치는 하단 1m인 것으로 나타났다.

2. 연구배경 및 목적

2.1. 도로 미세먼지 배출 현황

최근 미세먼지의 기상 농도가 악화됨에 따라 전국민이 매일 찾아보게 되는 관심사로 미세먼지가 부상하고 있다. 미세먼지는 대기 중에서 호흡기 등을 거쳐 폐나 혈관 등에 침투하여 건강에 악영향을 초래한다고 알려져 있다(Ailshire et. al., 2015). 초미세먼지 등을 포함한 미세먼지의 위해성은 그 농도가 증가함에 따라 사망률, 심혈관 등 관련 질환 발병률 등이 증가함을 보임으로써 명백한 상관관계를 나타내고 있다(NIER, 2009; KEI, 2012).

전국 미세먼지 배출량은 2012년 기준 PM10 약 12만 톤, PM2.5 약 7.6만 톤으로 추산되었다(ME, 2016). 이 중에서 도로이동오염원, 즉, 도로주행차량에 의한 비율은 PM10 12%, PM 16% 등 제조업 등에 의한 배출 다음으로 높은 배출원이 되고 있다. 제조업 등은 점오염원으로 비교적 배출 저감 대책이 접근 가능한 반면, 도로주행에 의한 미세먼지는 상대적인 배출원의 수(개별 차량)가 많고, 주행에 의한 재비산 먼지가 발생하므로 관리에 한계가 있다.

도로 내 미세먼지는 재비산과 운행 차량의 배기에 의한 응축가스, 타이어·브레이크 마모 등에 의해 발생한다. 발생량은 도로재비산에 의한 배출량(35,314톤), 도로이동오염원(9,170톤), 타이어·브레이크·도로표면 마모(4,923톤) 순이며(ME, 2012), 이에 대한 대책으로 정부에서는 도로 물청소 차량 운행을 확대하고, 노후 경유차를 폐차하도록 권고하고 있다(Korean Government, 2017). 도로 미세먼지 저감 정책 외에 도로 내 시설물을 활용한 처리방법을 고려할 수 있다(Ahn, et al., 2012). 한편, 도로 미세먼지를 제거하기 위해서는 분진을 포함한 기류가 설치 시설 내로 유입되는 정도가 관건이다. 실내와는 달리 야외에서는 기류를 파악하고 모으는 작업이 필요하다. 본 연구진은 도로 발생 미세먼지을 저감하고자 방음벽에 물분사 시스템, 무동력 필터패널 등을 개발하여 성능을 평가하였다(Lee et. al., 2016; Lee et. al., 2017).

2.2. 도로 내 CFD 해석

최근에는 전산에 의한 시뮬레이션으로 기류뿐 아니라 미세먼지의 발생, 확산 등을 시간에 따라 세밀하게 모사하는 작업이 가능해졌다. 협곡이나 터널 등 특수 지형에 대한 기류 시뮬레이션 연구가 수행되었으며(Kim et. al., 2015; Kim et al., 2016), 대기오염물질의 발생·확산을 연계하여 이동경로를 파악하거나(Gong et. al., 2015), 가깝게 도로 재비산 먼지의 이동경로를 예측하는 연구도 수행되었다(Lee et. al., 2014).

이전까지 도로 내 주행차량 기류 해석은 차량의 저항이나 소음을 줄이기 위한 네거티브 관점에서 진행되었다. 하지만 Jeon 등은 도로 주행에 의해 발생하는 기류를 통해 풍력발전을 일으킬 수 있는지 여부를 판단하고자 전산유동해석을 도입하였다(Jeon et. al., 2015). 즉, 필연적으로 발생하는 기류를 에너지 자원으로 활용하고자 기류 발생 정도를 정밀하게 모사하였다.

본 연구에서는 주행 차량에 의한 도로 2차선의 기류 및 비산먼지 발생을 전산유동해석(CFD)로 모사하였다. 기류는 발생 분진이 필터로 유입하기 위한 충분한 풍속이 나오는지 보기 위해서이며, 비산먼지는 필터를 어느 높이에 설치했을 때 주행에 의해 발생하는 미세먼지를 효과적으로 제거할 수 있는지 확인하였다. 본 연구의 내용은 다음과 같다.

- 도로 조건과 차량을 CFD로 모사하여 차량 주행에 의한 기류와 분진 발생을 모사하였다. 즉, 주행 차량에 의해 발생하는 기류와 도로 먼지의 분포를 살펴보았다.
- 기류 및 먼지 발생을 통해 도로 한편에 필터 패널 설치를 고려했을 때 필터에 유입할 수 있는 압력 발생 여부와 먼지 발생 분포로 설치 타당성 및 효과 등을 검토하였다.

3. 방법론

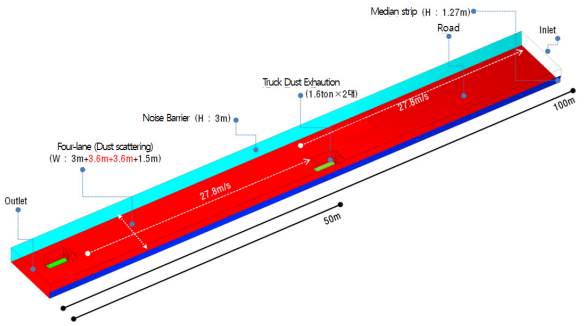
3.1. 주행차량 유동분석

본 연구에서 사용한 CFD 프로그램은 SCRYU/Tetra (ver. 11.0, Cradle Co. Ltd., Japan)으로 정밀한 mesh 형상 모사에 의해 열·유체 확산 및 고속 연산 기능을 수행한다. 소프트웨어를 통해 적용한 기류 형성 모델은 기본 k-ε 와류 모델을 개선한 RNG k-ε 와류 점성 모델을 사용하였다. k-ε 와류 모델은 Navier-Stokes 방정식을 시간에 대해 평균한 것에서 레이놀즈 응력항으로 나타나는 난류항을 풀기 위해 도입된 것이다(Jeon et. al., 2015). 특히 RNG(Re-Normalisation Group) 모델은 Navier-Stokes 방정식을 재정규화(renormalize)하여 보다 작은 규모의 움직임의 추적이 가능하도록 하였다 (Yakhot, V. et al.). 본 시뮬레이션에는 Unsteady State Simulation(transient analysis, time step

0.0005s)의 조건으로 수행하였다.

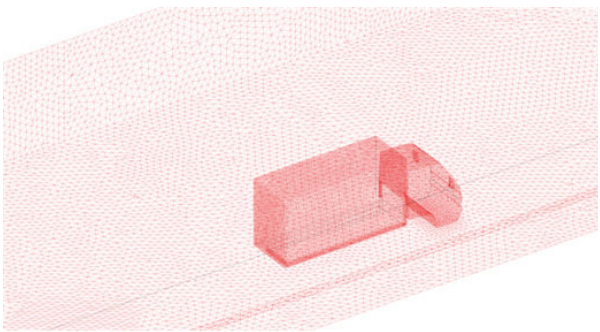
- 너비는 왼쪽 길어깨 1.5m, 1차로 3.6m, 2차로 3.6m, 오른쪽 길어깨 3m
- 도로 길이 100m, 중앙분리대 높이 1.27m, 방음벽 높이 3m

도로 및 차량의 구체적인 경계 조건은 Fig. 1과 같다.



(a) Road Boundary Condition

(b) Road Mesh



(c) Vehicle Mesh

Fig. 1 Road and Vehicle Mesh Boundary Condition

3.2. 차량의 먼지 배출량

차량에서 배출되는 미세먼지의 배출량 산정은 국립환경과학원에서 제안한 배출량 산정 방법을 통해 구하였다. 즉, 주행속도 V(km/h)에 대해 발생하는 미세먼지의 배출량은 km 당 다음과 같다(NIER, 2005).

$$PM(g/km) = 0.1759 \cdot V^{-0.5357}$$

본 시뮬레이션에서는 100km의 주행속도를 적용하였다.

3.3. 도로 비산 먼지 배출량

주행에 의한 도로 비산 먼지량은 EPA에서 제안한 먼지배출계수 E(g/km)을 통해 산정할 수 있다. 즉, 주행거리 당 먼지배출량은 다음과 같다(NIER, 2005).

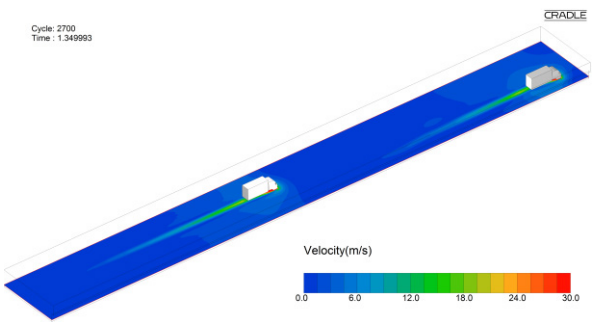
$$E(g/km) = k(sL/2)^{0.65}(W/3)^{1.5}$$

k는 보정계수로서 TSP와 PM10에 대해 다르게 적용한다. PM10은 4.6g/km에 해당한다. sL은 silt 부하량으로서 도로 위에 쌓인 먼지의 비산 잠재성을 나타낸다. 국립환경과학원 자료에 의해 도로 종류 및 지역 특성에 따라 구분이 되어 있다. 본 연구에서는 고속국도에 해당하는 $0.02g/m^2$을 적용하였다. W는 차량의 무게로 12종 차종 분류표에 의한 3종 소형화물차 A 및 상기 식과 함께 제시되는 분류표에서 1.6ton(소형 화물차)을 적용하였다.

4. 실험결과

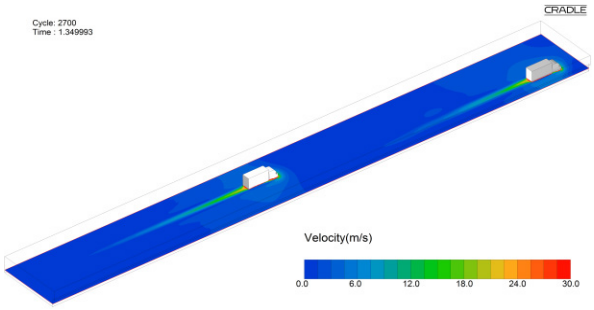
4.1. 기류 발생 특성

지면으로부터 3.0m까지의 높이별 기류 발생 정도를 Fig. 2에 나타내었다. 주행 차량 바로 뒤편의 풍속은 30m/s였으며, 차선 옆에서는 5m/s이었다. 높이별로는 0.5m 이하에서는 15m/s, 1.0~2.0m에서는 30m/s, 2.8m 이상에서는 10m/s 이하의 기류가 나타났다(Table 1). 이는 화물차의 높이로 설정한 3.0m/s에 따라 차량의 중간 지점에서 가장 높은 풍속이 나타나는 것이다. 2m가 떨어진 거리에서는 84%에 해당하는 4.2m/s이므로 필터 패널의 풍속 조건이었던 2.0~3.0m/s에는 만족하는 것으로 확인되었다(Lee et. al., 2017).

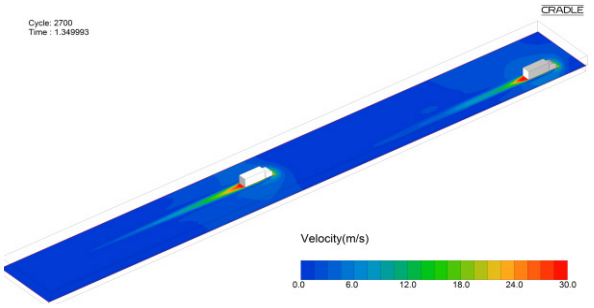


(a) 0.3m

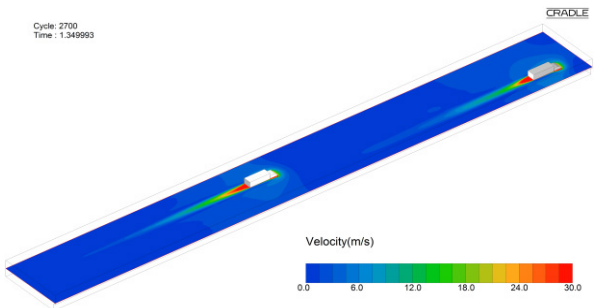
〈Figs. Continued〉



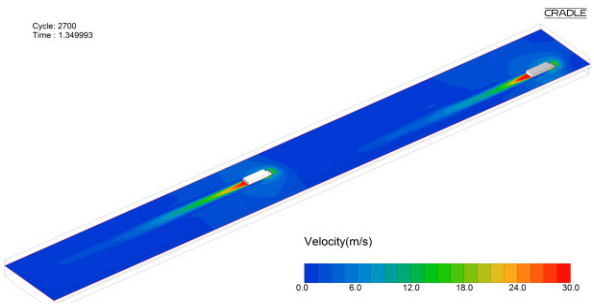
(b) 0.5m



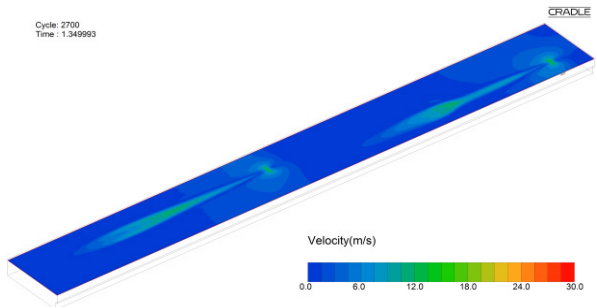
(c) 1.0m



(d) 1.5m



(e) 2.0m



(f) 2.8m

Fig. 2 Flow Rising from Ground by Height

Table 1. Air-flow Levels by the Position(m/s)

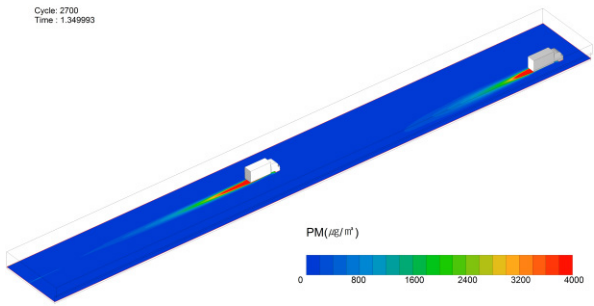
Axis	Position	Concentration
Vehicle back	Rear	30
	Road side	5
Height	≤ 0.5 m	15
	1.0 ~ 2.0 m	30
	≤ 2.8 m	≤ 10

4.2. 미세먼지 발생 특성

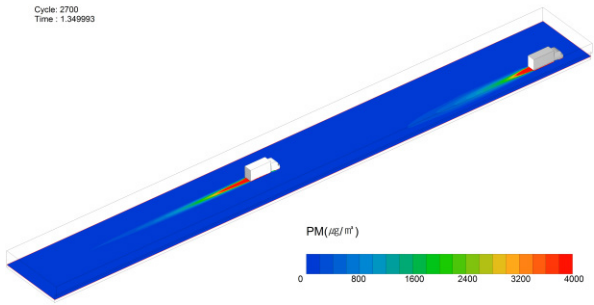
주행거리당 발생하는 미세먼지는 본 연구에 적용된 차량을 기준으로 주행에 의해서는 14.2%(1.49×10^{-2} g/km), 비산먼지에 의해서는 85.7%(8.98×10^{-2}g/km)가 발생하였으며, 이를 토대로 시뮬레이션 조건에 적용하였다.

차량 후면부에 발생하는 미세먼지의 농도는 4.0×10^{3} $\mu g/m^3$으로 10m 후방에서는 $1.0\times10^{3}\mu g/m^3$, 20m 후방에서는 $5.0\times10^{2}\mu g/m^3$로 나타났다. 높이별로는 0.3~1.0m에서 최고 $4.0\times10^{3}\mu g/m^3$로 나타나며, 높이가 높아짐에 따라 발생 농도는 낮아지며 2.8m에서 5.0×10^{2} $\mu g/m^3$의 농도가 나타나는 것으로 확인되었다(Fig. 3, Table 2).

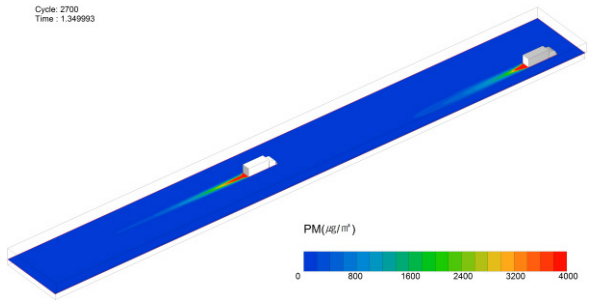
차량이 통과하고 난 이후 10m 후방에서는 차로에서 $1.0\times10^{3}\mu g/m^3$가, 차선 옆은 $5.0\times10^{2}\mu g/m^3$가 나타났다. 20m 후방에서는 대부분 지점에서 $5.0\times10^{2}\mu g/m^3$의 농도가 관측되었다(Fig. 4).



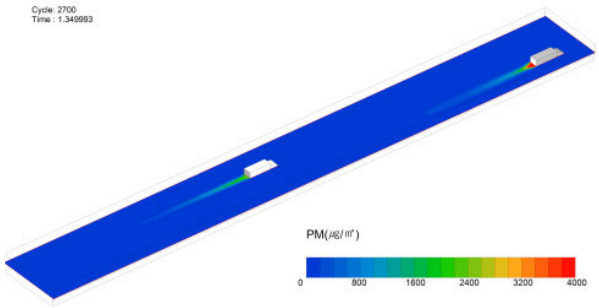
(a) 0.3m



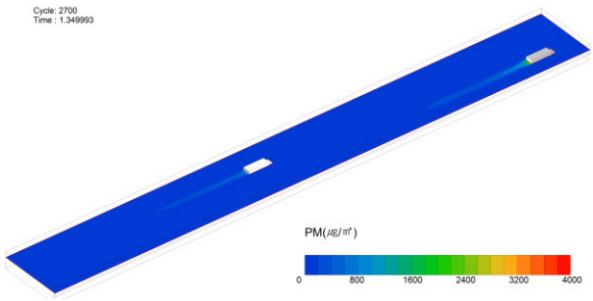
(b) 0.5m



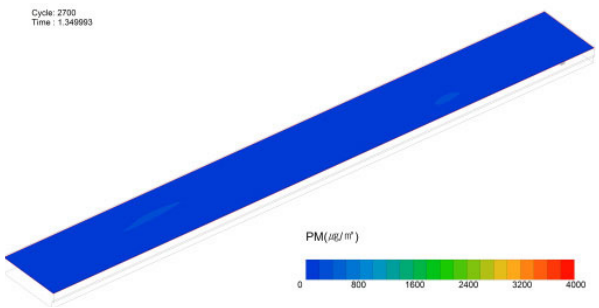
(c) 1.0m



(d) 1.5m



(e) 2.0m



(f) 2.8m

Fig. 3 Fine Dust Rising from Ground by Height

Table 2. Concentration Levels of Fine Dust by the Position ($\mu g/m^3$)

Axis	Position	Concentration
Vehicle back	Rear	4.0×10^3
	10m back	1.0×10^3
	20m back	5.0×10^2
Height	0.3~1.0m	4.0×10^2
	2.8m	5.0×10^2

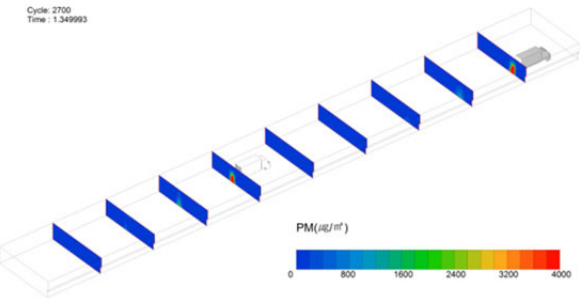


Fig. 4 Fine Dust Rising About Travelling Distance

Fig. 5는 1.35초가 경과된 후의 미세먼지가 확산된 정도를 표면 부분에 나타낸 것이다. 차량 후면 및 방음벽 방향에서 아래쪽에서 높은 농도가 확인되었다. 차량 진행 방향에 대한 방음벽 높이별 미세먼지의 농도는 Fig. 6과 같다. 높이 0.5m에서 가장 많은 농도가 집적되었고, 높이가 올라갈수록 낮은 먼지농도를 보였다. 0.5m까지의 미세먼지 농도의 분율은 76.4%이며, 1.0m까지는 88.1%에 해당하였다.

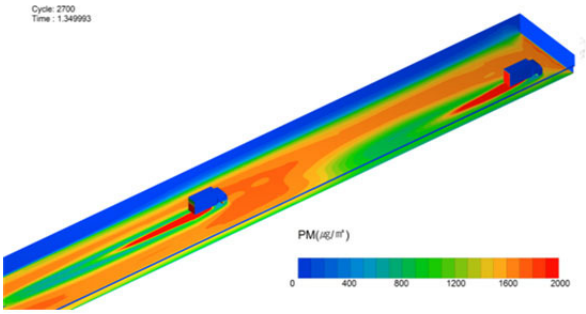


Fig. 5 Simulation of Fine Dust Scheme

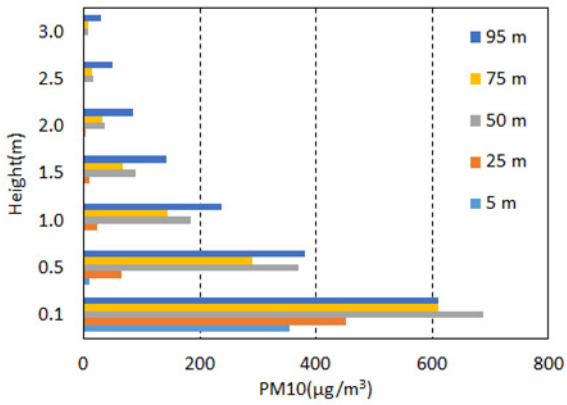


Fig. 6 Accumulated PM10 Amount by Height After 1.34s Travelling

5. 결론

차량 주행에 의한 도로의 기류 및 발생 미세먼지를 파

악하기 위해 전산 유동 시뮬레이션을 구축하여 해당 특성을 분석하였다. 해석 결과 주요 결론은 다음과 같다.

1. 차량에 의해 발생하는 기류는 최대 30m/s이며, 방음벽 설치 구역까지는 4.2m/s가 발생하는 것으로 확인되었다. 이는 기류를 이용한 필터패널 적용이 충분히 가능한 미세먼지가 유입될 수 있는 범위이다.
2. 주행 차량의 배기와 도로 재비산을 고려하였을 때 PM10은 차량 바로 후면의 경우 $4.0\times10^{3}\mu g/m^{3}$에서 20m 후방까지 $5.0\times10^{2}\mu g/m^{3}$의 농도로 발생하였다. 높이별로는 1.0m까지 가장 높게 발생되며, 높이가 높아질수록 낮아져서 2.8m에서는 $5.0\times10^{2}\mu g/m^{3}$의 농도가 나타났다.
3. 방음벽에 충돌되는 미세먼지의 분포를 보았을 때 0.5m까지의 76.4%이며 1.0m까지는 88.1%로 1.0m 이하에서 대부분의 미세먼지가 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서, 분진 흡착 필터패널을 고려할 때 낮은 고에서 설치하는 것이 효과적으로 판단된다.

본 연구에서는 미세먼지의 주요 발생원으로 꼽히는 도로에서 차량 주행에 의한 미세먼지 발생과 기류에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 물리적으로 발생하는 현상을 모사하는데 그치지 않고 방음벽 등의 도로 시설물에 분진 흡착용 필터패널을 적용했을 때 제거 가능 여부와 최적 위치 등을 고려하는 것으로, 환경 공해를 자연현상을 최대한 활용하여 저감하고자 하는 시도로부터 긍정적인 결과가 확인되었다. 이후 현장에서의 설치 및 모니터링 등을 통해 실제 적용 가능 및 개선 사항을 검토하여, 도로환경뿐 아니라 국토 대기환경 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(2017-0537)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

Ahn, H., Kim, I., Park J., Lee, J. H. and Kim, G. S. (2012). "Analysis of Research Trend and Development Direction on Domestic and International Noise Barriers", *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, Vol. 34, No. 12, pp.847-854.

Ailshire, J. A. and Clarke, P. (2015). "Fine particulate matter air pollution and cognitive function among U.S. older adults", *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, Vol. 70, No. 2, pp.322-328.

Gong, B., Park, P. and Dong, J. (2015). "PM10 Emission Estimation from LNG G/T Power Plants and Its Important Analysis on Air Quality in Incheon Area", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 31, No. 5, pp.461-471.

Jeon, T. Y. and Kim, J. Y. (2015). "Characterization of Fine Dust Collection Using a Filter Ventilation", *Applied Chemistry for Engineering*, Vol. 26, No. 2, pp.229-233.

Kim, E., Park, R., Lee, D. and Kim, J. (2015). "A Study on the Characteristics of Flow and Reactive Pollutants' Dispersion in Step-up Street Canyons Using a CFD Model", *Atmosphere*, Vol. 25, No. 3, pp.473-482.

Kim, D., Hong, S., Lee, D., Lee, Y. and Kim, B. (2016). "Verification of Computational Fluid Dynamics Model Using Observation Data in Artificial Street Canyon", *Atmosphere*, Vol. 26, No. 3, pp.423-433.

Korea Environment Institute(KEI) (2012). *A study on the health impact and management policy of PM2.5 in Korea (I)* (in Korean).

Korean Government (2017). *Diesel Car Scrappage Program*, Available at : https://www.gov.kr/portal/service/serviceInfo/480000000356 (in korean).

Lee, K., Noh, J., Kim, J., Lee, M., Jeong, E. and Yook, S. (2014). "Estimation of re-scattering dust moving course using CFD", *Proceeding book of Korean society of road engineers 2014*, Korean Society of Road Engineers, pp.110.

Lee, J. and Kim, I. (2016). "Effects on Road Airpollutants Reduction by Operating Factors of Water Jet System", *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, Vol. 16, No. 3, pp.305-311.

Lee, J. and Kim, I. (2017). "Characteristics of a Filter Module Adsorption for Fine Dust Removal on Road", *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, Vol. 39, No. 1, pp.19-25.

Ministry of Environment(ME) (2012). *Dust Scattering Emission Amount and Risk Investment by Abrasion of Tire and Brake Pad* (in Korean).

Ministry of Environment(ME) (2016). *Fine particle, what it that on earth?* (in Korean).

National Institute of Environmental Research(NIER) (2005). *Handbook for Computation Method of Air-polluant Emission from Mobile Source* (in Korean).

National Institute of Environmental Research(NIER) (2009). *Health Effect of Exposure to Asian Dust and Ultrafine particle(Ⅱ)* (in Korean).

Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski, T. B. and Speziale, C. G. (1992). "Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique", *Physics of Fluids A*, Vol. 4, No. 7, pp.1510-1520.