

화물차 적재 방식에 따른 축 하중을 고려한 타이어 먼지 중 PM10 발생량 평가기법 연구

이은정* · 이희관**

Study on the assessment methodology for the PM10 generated from tire-dust considering the axle load of the truck according to the loading method

Lee, Eunjeong · Lee, Heekwan

Abstract: Recently, regulations on automobile exhaust gas emission are being strengthened. Accordingly, automobile exhaust gas emissions are expected to decrease and continue to decrease. On the other hand, many countries do not yet consider the emission of non-exhaust air pollutants from automobiles as important. Automobile non-exhaust substances are classified into three categories: tire dust emissions, brake wear emissions, and road scattering dust. In particular, in the case of tire dust, research results exist that pollutant emissions increase as the weight of a vehicle increases. Since the weight of trucks varies according to the load and the load along the axles is also different, it can be expected that the emission of PM10 from the tire dust will be different depending on the loading method. Therefore, this study was conducted on the amount of PM10 generated in tire dust considering the axle load of the truck according to the loading method. However, it was confirmed that the total amount of PM10 was less than that all loads are loaded in the front or rear when the load was evenly distributed in the front and rear of the cargo compartment. In particular, if the load is distributed evenly in the front and back of the cargo compartment and the load in the front part is divided into 2 to 6 and loaded, as the number of divided loading increases the amount of PM10 generated decreases. And when the load is divided into 6 pieces, the total amount of PM10 generated is 0.3952g, the minimum value. If the load is divided into 6 or more and loaded evenly, the total PM10 generated continuously increases and converges to about 0.3964g.

키워드: 도로이동오염원, 화물차, 비배기성 오염물질, 타이어 먼지, PM10

Key Words: Road Mobile Source, Truck, Non-Exhaust pollutant emission, Tire Dust, PM10

1. 서론

최근 탄소 중립을 위해 자동차의 배기성 오염 물질을 줄이고자 자동차 배기성 오염물질 배출량에 관한 규제가 강화되고 있다. 따라서 현재 많은 나라가 자동차의 배기성 오염물질 배출량을 줄이기 위해 내연기관이 장착된 자동차의 운행을 감소시키는 것을 목표로 하고 있는데, 이를 위해 내연기관 차량을 조기 폐차시킬 뿐만 아니라 내연기관이 없어 배기성 오염물질을 배출하지 않는 전기 자동차의 운행량을 늘리고자 다양한 정책을 펼치고 있다. 특히 독일을 포함한 유럽에서는 2030년까지 판매되는 전체 차량 중 전기차 비중을 70%까지 증대할 뿐만 아니라, 2035년에는 내연기관 차량판매를 중단할 계획이라고 밝혔다. 이는 앞으로 전 세계에서 대기환경을 위해 결국 내연기관 차량은 퇴출될 것을 의미하기도 한다.

이렇게 전기차는 친환경적인 차량이라는 일반적인 인식들과 달리 최근 전기차 역시 내연기관 자동차와 마찬가지로 많은 양의 대기오염 물질을 배출한다는 연구 결과가 보고되고 있다. 전기차의 경우, 내연기관이 없어 배기가스는 배출되지 않아 O 및 NO₂ 등의 배기성 오염물질 배출량이 적은 것은 사실이나 타이어, 브레이크의 마모 및 도로 표면 마모 등으로 인한 비배기성 오염물질로 인해 입자상 오염 물질 또는 중금속 역시 배출되는 것으로 밝혀졌다(Victor Timmers, 2016).

또한 전기차의 경우에는 배터리를 탑재하여 일반 차량보다 약 24% 무거운 것으로 알려져 있는데, 차량이 크고 무거울수록 타이어에 실리는 하중이 커지면 타이어와 브레이크 마모량이 많아 비배기성 오염물질을 많이 발생시키고, 입자상 오염물질의 경우에는 전기차가 내연기관 차량과 비슷한 수준으로 발생시킨다는 연구 결과가 있다(Simons, 2016; ETRMA, 2019; 박선영 외, 2020).

이에 따라 유럽 및 미국은 비배기성 오염물질

* 인천대학교 환경공학과 졸업

** 인천대학교 환경공학과 교수,
교신저자(hlee@inu.ac.kr)

에 대한 인식을 바탕으로 비배기성 오염물질 배출량을 산정하기 위해 각 나라에서 비배기성 오염물질 배출량 산정알고리즘을 개발하였고, 이를 이용하여 비배기성 오염물질 배출량을 산정하고 있다. 특히 유럽의 경우에는 차량크기 뿐만 아니라 적재량까지 고려하여 비배기성 오염물질 배출량을 산정하고 있는 것을 알 수 있다 (EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019, 2019).

우리나라의 경우 역시 대기환경 전문가들 사이에서 비배기성 대기오염 배출평가에 대한 관심이 증가하면서 비배기성 오염물질을 측정하고자 하는 연구 및 우리나라 비배기성 오염물질 배출량 산정을 위한 배출 계수에 관한 연구가 일부 진행되었다(이석환, 2017; 김경준 외, 2019; 손병래 외, 2021; 정선경 외, 2021). 그러나 우리나라는 여전히 도로이동오염원 배출량을 산정 과정에서 배기성 오염물질만을 고려하기 때문에 실제 도로이동오염원 중 중량이 큰 전기차나 대형 화물 차량의 입자상 오염물질 배출량이 저평가 되었을 가능성이 높다.

선행 연구 결과에 따르면 차량 중량이 증가할수록 비배기성 오염물질 배출량이 증가한다 (Simons, 2016). 그런데 대형 화물 차량의 경우 일반 차량에 비해 공차 중량이 매우 클 뿐만 아니라, 적재 중량도 매우 크기 때문에 이는 화물 차량이 상당히 많은 양의 비배기성 오염물질을 배출할 수 있다는 것을 시사하고 있다. 뿐만 아니라 화물차의 경우에는 적재 중량 및 적재 방식에 따라 앞 축과 후 축에 가해지는 하중이 달라져 입자상 오염물질 배출량이 달라질 수 있는 것으로 보고되고 있다(Simons, 2016).

따라서 본 연구에서는 2축 화물 차량에 화물을 적재하였을 경우 적재 방식을 화물칸 앞 부분에 적재하였을 때, 화물칸 뒷 부분에 적재하였을 때, 그리고 앞 뒤에 골고루 적재하였을 때 3가지로 구분하여 각 축의 하중량을 계산한 뒤, EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 에서 제시하고 있는 타이어 먼지 발생식을 이용하여 적재 방식에 따른 타이어 먼지 중 PM10 발생량 평가방법을 연구하고자 한다. 해당 연구를 통해 동일 하중 경우에도 상대적으로 적은 양의 미세먼지를 발생 시킬 수 있는 적재 방법을 제시할 수 있을 것이다.

2. 이론적 고찰

2.1 자동차 배출 오염물질

자동차에서 발생하는 대기오염물질 배출 주요 원인은 크게 내연기관 연소 시 발생하는 배기성 오염물질과 비배기성 오염물질로 구분된다.

국가미세먼지정보센터에서 대기오염물질 배출량 산정방법 중 도로이동오염원 경우 도로에서 주행하는 차량에 의해 발생하는 대기오염물질 배출량을 산정하는 부문이다. 해당부문의 대기오염물질 배출량 산정 시 차종별(경형, 소형, 중형, 대형) 엔진가열(Hot-Start)배출량, 엔진 미가열(Cold-Start)배출량, 증발 배출량 등으로 분류하여 도로이동오염원의 대기오염배출량을 산정한다.



Fig 1. 부문별 오염물질 배출량(2017년)
(출처 : 국가미세먼지정보센터)

국내 부문별 대기오염배출량 자료를 살펴보면 도로이동오염원의 오염물질 배출량이 가장 높은 것을 알 수 있다 (Fig 1 참조). 현재 국가미세먼지정보센터에서 밝히고 있는 국내 도로이동오염원의 대기오염물질량 산정방식은 비배기성 오염물질 배출량을 고려하지 않고 있다. 따라서 비배기성 오염물질 배출량을 고려하여 도로이동오염원 배출량을 산정한다면, 도로이동오염원 배출량 산정이 보다 개선될 것으로 기대된다.

2.1.1 배기성 오염물질

차량으로 대표되는 도로이동오염원이 배출하는 배기성 오염물질은 내연기관 등 연소에 의해 발생하는 오염물질로 PM10, PM2.5, NOx, SO2, CO 등이 있다. 이들 대기오염물질은 기후변화, 미세먼지, 대기오염 등 다양한 방식으로 환경에 영향을 미치고 있는 것으로 알려져 있으며, 지역 또는 국가 및 지자체 구역을 대상으로 하는 다양한 대응 정책, 기술 등을 강구하고 있다.

2.1.2 비배기성 오염물질

비배기성 오염물질의 배출은 크게 직접 마모 배출과 도로 비산먼지로 분류된다. 직접 마모 배출의 주요 원인으로는 타이어 마모, 브레이크 마

모 그리고 도로 표면 마모가 있다. 이때 차량이 배출하는 비배기성 입자상 오염물질의 배출량은 차량 중량, 브레이크, 타이어 및 도로의 재질 구성, 노면의 먼지 양, 주행 속도 그리고 운전 방식 등 여러 요인에 의해 결정된다. 실제 주행 조건에서 배출되는 비배기성 오염물질인 PM의 양에 대한 불확실성이 존재하지만 대부분 비배기성 오염물질의 양이 증가한다는 데에는 동의하고 있다.



Fig 2. 도로오염원분류 중 비배기성 대기오염물질 배출 미세먼지 기여도 (출처 :독일 환경청 자료, 2013)

독일환경청에서 발표한 도로오염원 부문에서 비배기성 대기오염배출 미세먼지의 상대적 기여도를 나타낸 것으로, 2030년에 이르면 비배기성 배출 미세먼지가 PM10의 경우 93%, PM2.5의 경우 74%를 차지할 것이라고 보고하였다 (Fig 2 참조).

비배기 배출원인 중 타이어의 마모의 경우, 타이어의 트레드 고무와 도로 사이 전단력과 같은 기계적인 마찰에 의해 발생한다. 이러한 마찰로 인해 발생하는 타이어 마모 입자는 초미세입자(Ultra fine particle, PM2.5-10) 크기를 가진다. 타이어의 마모는 타이어의 구조, 트레드 패턴 그리고 차량 중량과 같은 내부적인 요인, 차량속도 및 운전습관과 같은 주행조건과 기후, 온도나 노면의 거칠기 정도와 같은 도로환경에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다.

브레이크 마모는 브레이크 패드와 디스크의 기계적인 마찰에 의한 제동 과정 중 브레이크에 큰 마찰열이 발생하며 브레이크 패드와 디스크가 마모되면서 다양한 크기의 미세먼지 및 심지어는 초미세입자를 생성한다. 브레이크 마모 미세먼지는 제동 과정 중 브레이크 마모가 발생하는 것을 고려하면 교차점, 신호등, 코너 근처에서 미세먼지 농도가 높게 관찰되고 있다.

2.2 차량 중량별 비배기성 오염물질

선행 연구 결과 비배기성 배출의 원인을 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로 표면 마모로 구분

하고 차체 중량(소형차, 중형차, 대형차)에 따라 비배기 배출 계수를 개발하였다(Simons, 2016)(Fig 3 참조).

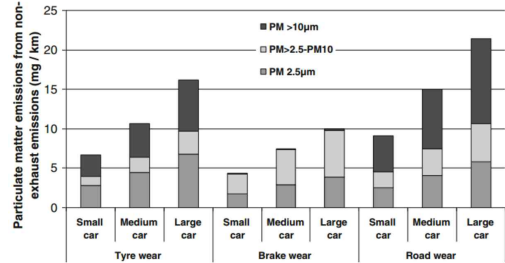


Fig 3. 차량 크기에 따른 미세먼지 증가량 (출처 : Non-exhaust PM emissions by source and car size, from Simons (2016))

첫 번째로 타이어 마모의 경우 차량 주행(km) 당 브레이크 마모 PM10 배출량(mg)이 차량 중량(kg)당 0.0041 증가한다고 추정했고, 차량 주행(km)당 브레이크 마모 PM2.5 배출량(mg)이 차량 중량(kg)당 0.0029 증가한다고 보고하였다 (Simons, 2016).

두 번째로 브레이크 마모의 경우 차량 주행(km)당 브레이크 마모 PM10 배출량(mg)이 차량 중량(kg)당 0.004 증가한다고 추정했고, 차량 주행(km)당 브레이크 마모 PM2.5 배출량(mg)이 차량 중량(kg)당 0.0017 증가한다고 보고하였다 (Simons, 2016).

세 번째로 도로 마모의 경우 차량 주행(km)당 브레이크 마모 PM10 배출량(mg)이 차량 중량(kg)당 0.0049 증가한다고 추정했고, 차량 주행(km)당 브레이크 마모 PM2.5 배출량(mg)이 차량 중량(kg)당 0.0026 증가한다고 보고하였다 (Simons, 2016).

또한 여러 나라의 타이어 먼지 배출 계수는 아래 Table 1과 같이 조사되었다.

Table 1. 각 국의 타이어 먼지 배출 계수

	Vehicle type	Tire dust emission factor (mg/v·km)
UK	Passenger car	100
	Lightweight truck	-
	Bus	-
	Heavyweight truck	-
Sweden	Passenger car	50
	Lightweight truck	50
	Bus	700
	Heavyweight truck	700
Germany	Passenger car	90
	Lightweight truck	700
	Bus	700
	Heavyweight truck	700
Netherlands	Passenger car	100
	Lightweight truck	495
	Bus	360
	Heavyweight truck	600
Russia	Passenger car	132
	Lightweight truck	306
	Bus	1110
	Heavyweight truck	1110

모든 국가의 타이어 먼지 배출계수는 나라별로 큰 차이를 보이고 있으나, Passenger car, Lightweight truck, Bus, Heavyweight truck 순으로 배출계수가 커지는 경향이 있다. 이는 차량의 무게에 영향을 받는 것으로 분석되었다(Simons, 2016).

2.3 화물차 축 하중 계산식

2축 화물차량에 하중을 적재 시 전축 중량을 먼저 구한 뒤, 총 적재 중량에 대해 전축 중량을 빼서 후 축 중량을 구하였다.

$$Wf = wf + \frac{p_1a_1 + p_2a_2 + \dots + p_n a_n}{L} \quad (1)$$

$$Wb = \text{적재시 차량총중량} - Wf \quad (2)$$

- Wf : 적재 시 전 축 중량
- wf : 공차 시 전 축 중량
- Wb : 적재 시 후 축 중량
- L : 축 간거리
- p_n : 적재 무게
- a_n : 적재 하중의 무게 중심으로부터 후 축에 이르는 수평 거리

즉, 적재 중량이 늘어날수록 각 축의 하중은 커지는 것을 알 수 있다. 또한 적재 하중의 무게 중심이 화물차 후 축에서 전 축으로 가까워질수록 후 축 보다 전 축의 하중량이 커진다. 적재 하중의 무게 중심이 화물차 후 축에 가까워질수록 전 축의 하중량은 작아지고, 후 축의 하중량이 커지는 것을 알 수 있다.

2.4 타이어 먼지 계수 식

EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 에서 발표한 타이어 먼지 배출 식을 이용하여 화물차의 전 축, 후 축에서 발생하는 PM10 발생량을 산정하였다.

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{TSP,s,j} \times f_{s,j} \times S_s(V) \quad (3)$$

(s : 타이어 또는 브레이크, j : 차량)

TE = 정의된 기간 및 공간에 대한 총 배출량 [g]

N_j = 정의된 공간 내 j의 차량 수

M_j = 정의된 기간 동안 각 j의 차량이 주행한 거리[km]

$EF_{TSP,s,j}$ = j의 차량에 대한 TSP 질량 배출 계수[g/km]

f_j = 입자 크기에 기인한 입자 분율

$S_s(V)$ = 평균 차량 주행 속도 V에 대한 보정 계수

Table 2. $EF_{TSP,s,j}$, j 차량에 대한 입자상 TSP 질량 배출 계수

(단위 : g/km)		
Vehicle class (j)	TSP emission factor (g/km)	Uncertainty range (g/km)
Two-wheel vehicles	0.0046	0.0042 - 0.0053
Passenger cars	0.0107	0.0067 - 0.0162
Light-duty trucks	0.0169	0.0088 - 0.0217
Heavy-duty vehicles	Equation 3	0.0227 - 0.0898

본 연구는 화물차(Heavy-duty vehicles)를 대상으로 하므로, Equation3을 이용하여 질량 배출 계수를 구한다.

$$\text{Equation3} = \frac{N_{axle}}{2} \times LCF_T \times EF_{TSP,T,PC} \quad (4)$$

N_{axle} = 화물차의 차축 수

LCFt = 타이어 마모에 대한 하중 보정 계수

= 1.41 + (1.38 * LF)
 LF의 경우 빈 경우 0부터 완전히 꽂 찬 경우 1까지의 하중 계수를 의미한다.

$EF_{TSP,T,PC}$ = 승용차의 타이어 마모에 대한 TSP 배출 계수

Table 3. f_j , 타이어 먼지의 입경별 계수

Particle size class (i)	Mass fraction ($f_{T,i}$) of TSP
TSP	1.000
PM10	0.600
PM2.5	0.420
PM1	0.060
PM0.1	0.048

Table 4. $S_t(V)$, 평균 차량 주행 속도 V에 대한 보정 계수

V<40km/h	$S_t(V) = 1.39$
40km/h<V<90km/h	$S_t(V) = -0.00974+1.78$
V>90km/h	$S_t(V) = 0.902$

3. 연구방법

3.1 PM10

타이어 마모 입자의 대부분은 상대적으로 큰 입자(20 μ m 이상)로 배출되는 것으로 알려져 있다. 따라서 해당 실험에서는 화물차에서 배출되는 PM10을 대상으로 배출량을 산정하였다.

3.2 화물차 크기

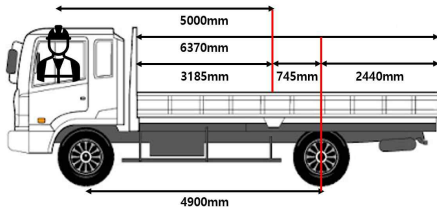


Fig 3. 2축 화물차 크기 (출처 : 화물운송론(2019))

화물운송론(이원동, 2019)에 따라 그림 3.1과 같은 2축 화물차량을 선정하여 적재 중량이 4,500kg 일 때 각 축의 하중을 계산하도록 하였

다. 따라서 실험에서 사용하고자 하는 2축 화물차량은 위의 크기의 화물차량을 이용하였다.

차체 중량은 5,200kg으로 공차 시, 전 축 중량은 2,000kg, 후 축 중량은 3,200kg이다. 기본 승차 인원은 65kg의 1인으로 하고, 적재 중량은 4,500kg으로 설정하도록 하였다. 또한 각 축에 걸리는 하중은 2.3의 (1), (2) 식을 통해 구하였다. 예를 들어 4,500kg의 하중을 화물차 중앙에 적재한다고 가정하였고 (1), (2) 식을 이용하여 각 축 중량을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{전 축 중량}(Wf) &= 2000kg + \frac{(65kg \cdot 1\text{명} \cdot 5m) + (4500kg \cdot 0.745m)}{4.9m} \\ &= 2883.16kg \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{후 축 중량}(Wb) &= 65kg + 9700kg - 2883.16kg \\ &= 6881.84kg \end{aligned}$$

3.3 타이어 먼지 배출량 산정

우리나라에서 1일 동안 2축 화물차 1대가 만들어 내는 PM10 배출량을 계산하기 위해 아래와 같은 계수를 이용하였다.

Table 5. 타이어 먼지 배출량 산정을 위한 계수 (출처 : kosis)

N_j	정의된 공간 내 j의 차량 수, 1대
M_j	정의된 기간 동안 j의 차량이 주행한 거리[km] 49.4km(km/대) (참고 : 우리나라의 화물차 1일 평균 주행거리(2020) = 49.4km)
$f_{s,i}$	입자 크기 i에 따른 PM10의 질량 분율 ,0.6
$EF_{TSP,T,PC}$	0.0107
$S_t(V)$	평균 차량 주행 속도 V에 대한 보정 계수 , -0.00974*44.3+1.78 (참고 : 우리나라의 화물차 1일 평균 속도(2020) = 44.3km/h)

기존의 (4) Equation3 식은 각 축의 하중량을 고려하지 않고, 두 축이 모두 같은 하중량을 가진다고 가정한 뒤 축의 개수로만 화물차의 중량을 고려하여 PM10의 배출량을 계산하였다. 본 연구에서는 앞 축과 후 축을 나누기 위해 축의 개수를 평균하여 합치는 방식으로 산정하였다.

3.4 적재 방법

4,500kg의 하중을 다음과 같은 방식으로 구분해서 화물차에 적재한다고 가정하였다.

3.4.1 화물칸 앞에 모든 하중을 적재하는 경우

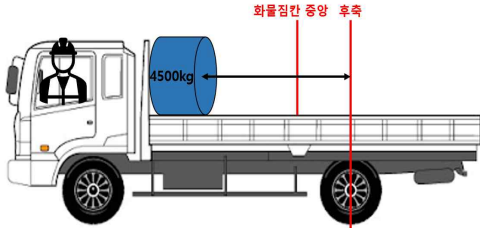


Fig 4. 화물칸 앞에 4,500kg 하중을 모두 싣는 모습

하중을 화물칸 앞쪽부터 화물칸 중간까지 다음과 같은 모습으로 싣는다고 가정하였고, x축을 적재 하중의 무게 중심부터 후 축까지 이르는 수평거리로 두고 적재 하중의 후 축 거리로부터의 위치에 대해 전 축과 후 축 하중량을 계산하였다.

후축으로부터 중간까지의 거리는 0.745m이고, 후축과 화물칸 맨 앞쪽 간의 거리는 3.930m이므로, x축은 0.745~3.930의 범위를 갖는다. 전축과 후축 하중은 x에 대해 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{전축 하중} &= ((65 \cdot 5) + (x \cdot 4500)) / 4.9 \text{ (kg)} \\ \text{후축 하중} &= 65 + 4500 - \text{전축 하중 (kg)} \end{aligned}$$

이 경우 축 마다 발생 PM10량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{전축 PM10} &= 1 \cdot 49.4 \cdot 0.6 \cdot (-0.00974 \cdot 44.3 + 1.78) \cdot (0.25 \cdot 0.0107 \cdot (1.41 + 1.38 \cdot ((\text{전축 하중}) / 4565))) \text{ (g)} \\ \text{후 축 PM10} &= 1 \cdot 49.4 \cdot 0.6 \cdot (-0.00974 \cdot 44.3 + 1.78) \cdot (0.25 \cdot 0.0107 \cdot (1.41 + 1.38 \cdot ((\text{후축 하중}) / 4565))) \text{ (g)} \end{aligned}$$

3.4.2 화물칸 뒤에 모든 하중을 적재하는 경우

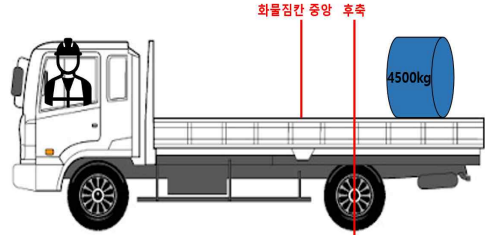


Fig 5. 화물칸 뒤에 4,500kg 하중을 모두 싣는 모습

하중을 화물칸 후 축 이후에 두는 경우는 다음과 같은 모습으로 싣는다고 가정하였고, 앞쪽의 적재량이 없으므로 앞 축에는 차에 타고 있는 사람 외에 하중이 없다. 즉, 뒤쪽에 하중을 싣는 경우는 각 축 하중을 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \text{전축 하중} &= 325 / 4.9 \text{ (kg)} \\ \text{후축 하중} &= 4,500 \text{ (kg)} \end{aligned}$$

이 경우 축 마다 발생 PM10량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{전축 PM10} &= 1 \cdot 49.4 \cdot 0.6 \cdot (-0.00974 \cdot 44.3 + 1.78) \cdot (0.25 \cdot 0.0107 \cdot (1.41 + 1.38 \cdot ((325 / 4.9) / 4565))) \\ &= 0.1529009250574457 \text{ (g)} \\ \text{후축 PM10} &= 1 \cdot 49.4 \cdot 0.6 \cdot (-0.00974 \cdot 44.3 + 1.78) \cdot (0.25 \cdot 0.0107 \cdot (1.41 + 1.38 \cdot ((4500) / 4565))) \\ &= 0.296205726944922 \text{ (g)} \end{aligned}$$

3.4.3 고르게 적재하는 경우

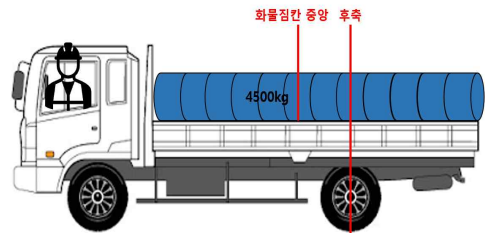


Fig 6. 화물칸 전체에 4,500kg 하중을 고르게 싣는 모습

하중을 앞뒤로 골고루 분포한 경우 축 하중을

계산하기 위해 앞쪽에 실을 하중과 뒤쪽에 실을 하중의 적재 하중을 나누도록 한다. 화물칸의 총가로 길이는 6.370m로 맨 앞부터 후 축까지의 거리는 3.93m로 전체 화물칸 길이의 약 60%이다. 따라서 후 축 이후의 길이는 전체 화물칸 길이의 약 40%가 된다. 이에 따라 적재 중량 4,500kg을 60%, 40%로 나누면 앞쪽의 적재 중량은 2,700kg, 뒤쪽의 적재 중량은 1,800kg이 된다.

본 연구에서는 앞의 실험처럼 적재 하중을 몰아서 적재하는 것이 아닌 끌고루 분배하여 각 축의 하중을 구하는 것이므로, 하중의 분배에 따른 축 하중을 계산하기 위해 x축을 적재 하중과 후 축까지의 거리가 아닌 후 축 앞의 하중을 고르게 분배하는 횡수로 하였다.

예를 들어 만약 x가 2이면 앞 부분의 하중을 2개로 나누어서 실는다. x가 3이면 앞부분의 하중을 3개로 나누어 실는다. 이때 하중들 사이의 간격도 일정하게 나누는 것으로 한다. x가 1인 경우는 앞쪽에 몰아서 실는 경우 즉, 3.4.1의 실험 방식이므로 x는 2부터 고려하도록 하였다.

후 축 하중의 경우 하중을 실는 방식에 관계없이 앞 부분의 적재 중량이 2,700kg으로 정해 졌다면 후 축 적재 하중은 항상 1,800kg으로 일정하기 때문에, 후 축의 하중을 분배하는 경우는 고려하지 않았다.

앞 쪽 분할 횡수에 따른 전축 중량

$$= ((65 \cdot 5) + (3.93 \cdot (2700/x)) + (0.745 \cdot (2700/x)) + (3.93 \cdot (2700/x) \cdot (1/x) \cdot (((x-1) \cdot (x-2))/2))) / 4.9 \text{ (kg)}$$

앞 쪽 분할 횡수에 따른 후 축 중량

$$= 1800 \text{ (kg)}$$

이 경우 앞 화물칸 하중 분할에 따른 축 마다 발생 PM10량은 다음과 같이 구할 수 있다.

전 축 PM10

$$= 1 \cdot 49.4 \cdot 0.6 \cdot (-0.00974 \cdot 44.3 + 1.78) \cdot (0.25 \cdot 0.0107 \cdot (1.41 + 1.38 \cdot (((\text{전 축 중량}) / 4565)))) \text{ (g)}$$

후 축 PM10

$$= 0.2089365656574048 \text{ (g)}$$

4. 분석 결과

아래 실험 결과 그래프에서 파란색은 전 축, 하늘색은 후 축 그리고 빨간색은 앞 축과 후 축의 PM10발생량을 더한 것을 나타내었다.

4.1 화물칸 앞에 모든 하중을 적재하는 경우

4.1.1 화물칸 앞에 모든 하중을 적재 시 축중량

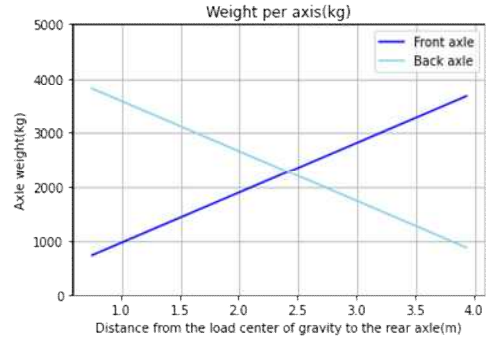


Fig 7. 화물칸 앞쪽에 4,500kg의 하중을 모두 실는 경우 후 축 거리에 따른 각 축 중량

화물칸 앞에 모든 하중을 적재하는 경우 전 축과 후 축의 축 중량은 위와 같이 변화하였으며, 적재 하중이 후 축에 가까울수록 후 축의 하중량이 커지고, 전 축의 하중량은 감소하게 된다. 이와 반대로 적재 하중이 앞쪽으로 갈수록 전 축의 하중은 커지고, 후 축의 하중량이 감소하게 된다.

4.1.2 화물칸 앞에 모든 하중을 적재 시 PM10 발생량

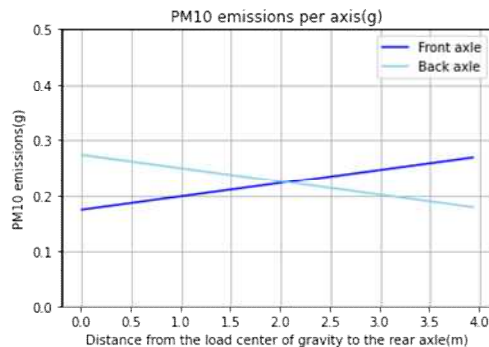


Fig 8. 화물칸 앞쪽에 4500kg의 하중을 모두 실는 경우 후 축 거리, 각 축에 따른 PM10 발생량

위의 그래프(Fig 8)는 화물칸 앞쪽에 모든 하중을 적재하는 경우, 각 축마다 발생하는 PM10량을 보여준다. 그림 4.1에서 화물칸 앞쪽에 모든 하중을 적재하는 경우 후 축까지의 거리에 따라 각 축의 하중량이 달라지는데, 이 하중량에 따라 각 축에서 발생하는 PM10 발생량을 계산해 그래프로 만든 결과 PM10 발생량도 각 축의 하중량과 유사하게 변화하는 것을 알 수

있다.

즉, 하중과 후 축까지의 거리가 가까울수록 후 축에서 발생하는 PM10 발생량이 많아지고, 하중과 후 축까지의 거리가 멀어질수록(하중이 앞 쪽으로 갈수록) 전 축에서 발생하는 PM10 발생량이 많아지는 것을 알 수 있다.

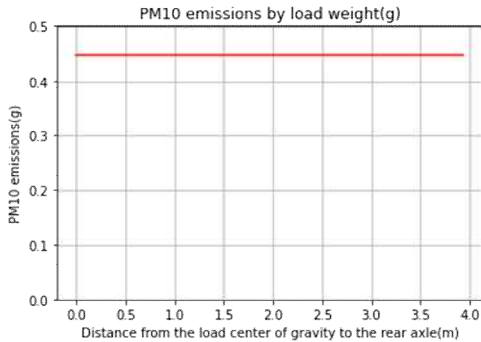


Fig 9. 화물칸 앞쪽에 4,500kg의 하중을 모두 싣는 경우 후 축 거리, 각 축에 따른 총 PM10 발생량

위의 그래프<Fig 9>는 화물칸 앞 쪽에 4,500kg의 하중을 모두 적재한 경우 각 축의 하중을 고려한 각 축의 PM10 발생량을 더한 결과를 보여준다. 위의 실험 결과를 통해 화물칸 앞 쪽에 모든 하중을 적재하는 경우, 하중과 후 축 사이의 거리에 관계없이 총 PM10 발생량은 약 0.449g으로 항상 일정한 것을 알 수 있다.

4.2 화물칸 뒤에 모든 하중을 적재하는 경우

4.2.1 화물칸 뒤에 모든 하중 적재 시 축 중량

화물칸 뒤에 모든 하중을 적재 시 전 축과 후 축의 하중량은 항상 일정하게 고정된다. 전 축의 하중량은 사람의 하중량만 고려한 $325/4.9=66.3266$ 이고, 후 축의 하중량은 모든 하중의 무게인 4,500kg이 된다.

이 하중량에 따른 각 축의 PM10 발생량을 계산한 결과 전 축에서 발생하는 PM10은 약 0.1529g이고, 후 축에서 발생하는 PM10은 약 0.2962g이 된다. 이에 따라 전 축과 후 축의 PM10 발생량을 더해 총 PM10 발생량을 계산한 결과 0.4491g으로 화물칸 앞에 하중을 모두 싣는 경우와 PM10 발생량이 유사한 것을 알 수 있었다.

4.3 고르게 적재하는 경우

4.3.1 고르게 적재 시 축 중량

하중을 고르게 적재하는 경우는 앞 쪽에

4,500kg 하중의 60%인 2,700kg를 싣고, 후 축 이후에 1,800kg을 싣는다고 가정하였다.

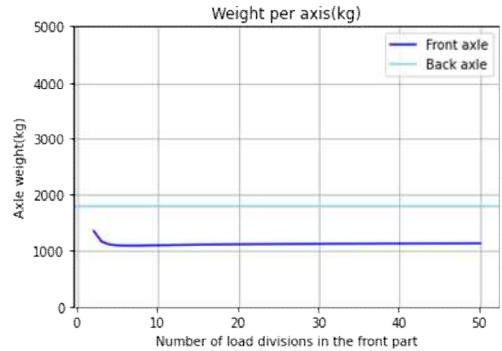


Fig 10. 화물칸에 고르게 적재 시 분할에 따른 각 축 중량(y축 0부터 시작)

위의 그래프<Fig 10>는 화물칸 앞 뒤에 4,500kg의 하중을 고르게 적재하는 경우 각 축의 하중을 계산한 결과를 보여준다.

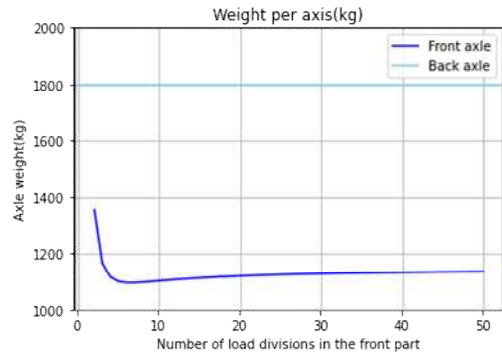


Fig 11. 화물칸에 고르게 적재 시 분할에 따른 각 축 중량(y축 1000부터 시작)

위의 그래프<Fig 11>는 그래프<Fig 10>를 확대한 것을 보여준다. 후 축은 항상 하중량이 1,800kg으로 일정하고, 전 축의 하중량은 하중을 분배하는 횟수에 따라 하중량이 달라지는 것을 알 수 있다. 화물칸 앞 쪽에 하중을 2개로 나눈 경우 하중량이 최대가 되고, 이후 약 6개로 나눌 때 까지 전 축의 하중량이 감소해 약 6개로 나눌 때 전 축의 하중량이 가장 작은 것을 알 수 있다. 그러나 하중을 이 이상으로 나누면 전 축의 하중량은 점차 증가하는 것을 알 수 있다.

4.3.2 고르게 적재 시 PM10 발생량

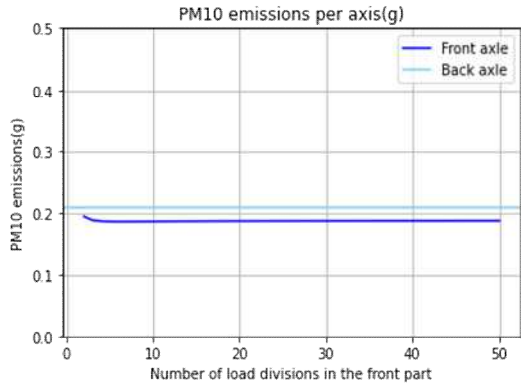


Fig 12. 화물칸에 고르게 적재 시 분할, 축 중량에 따른 PM10 발생량

위의 그래프<Fig 12>는 화물칸 앞 뒤에 4,500kg의 하중을 고르게 적재하는 경우 각 축에서 발생하는 PM10을 보여준다.

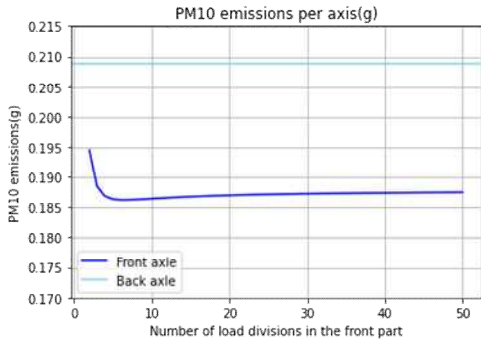


Fig 13. 화물칸에 고르게 적재 시 분할, 축 중량에 따른 PM10 발생량(y축 0170부터 시작)

위의 그래프<Fig 13>는 화물칸 앞 뒤에 4,500kg의 하중을 고르게 적재하는 경우 각 축에서 발생하는 PM10 발생 그래프를 확대한 결과이다. 실험 결과 화물칸 앞 쪽에 모든 하중을 적재하는 경우와 유사하게 화물칸 앞 뒤에 하중을 고르게 적재하는 경우 각 축의 하중량 그래프와 유사하게 PM10 발생량도 변화하는 것을 알 수 있다.

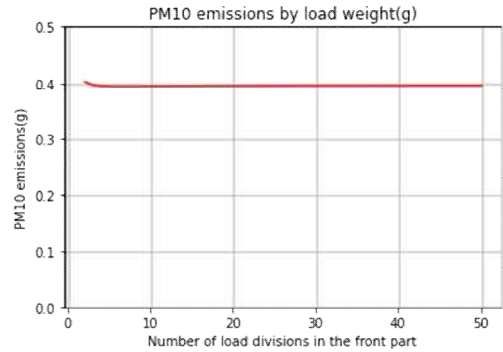


Fig 14. 화물칸에 고르게 적재 시 분할, 축 중량에 따른 총 PM10 발생량(y축 0부터 시작)

위의 그래프<Fig 14>는 화물칸 앞 뒤에 4,500kg의 하중을 고르게 적재하는 경우 각 축의 하중을 고려한 각 축의 PM10 발생량을 더한 결과를 보여준다.

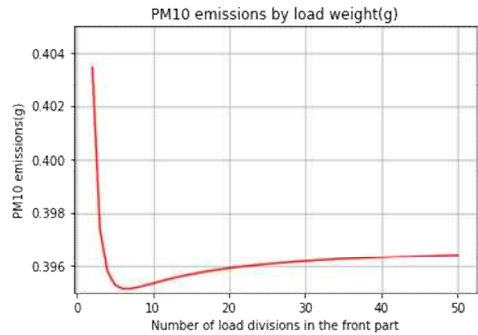


Fig 15. 화물칸에 고르게 적재 시 분할, 축 중량에 따른 총 PM10 발생량(y축 0.38부터 시작)

위의 그래프<Fig 15>는 화물칸 앞 뒤에 4,500kg의 하중을 고르게 적재하는 경우, 각 축의 하중을 고려한 총 PM10 발생량 그래프를 확대한 결과이다. 위 실험 결과 화물칸 앞 쪽에 하중을 분배하는 횟수에 따라 발생하는 총 PM10 발생량이 달라지는 것을 알 수 있다.

화물칸 앞 쪽에 하중을 2개로 나눈 경우 총 PM10 발생량이 최대가 되고, 이 후 약 6개로 나눌 때 까지 발생하는 총 PM10이 점차 감소해 약 6개로 나눌 때 발생하는 총 PM10이 가장 작은 것을 알 수 있다. 그러나 화물칸 앞 쪽에 하중을 이 이상이 횟수로 나뉘어 적재하면 발생하는 총 PM10이 점점 증가하다가 수렴하는 것을 알 수 있다.

5. 요약 및 결론

위의 결과들을 보았을 때, 하중을 화물칸 앞쪽에 몰아서 적재하거나 뒤 쪽에 몰아서 적재하는 경우 후 축 거리와 관계없이 PM10 발생량이 유사한 것을 알 수 있었다.

그러나 하중을 화물칸의 앞, 뒤로 고르게 적재한 경우, 앞선 결과들에 비해 총 PM10 발생량이 더 적은 것을 확인할 수 있었다. 고르게 적재했을 때 총 발생 PM10 최소값은 약 0.3952g이고, 총 발생 PM10 최댓값은 약 0.4035g이다. 하중을 6개 이상으로 나누어서 고르게 적재하면 총 PM10 발생량은 계속해서 증가하다가 약 0.3964g으로 수렴하는 것을 알 수 있었다.

하중을 2개로 적재한 것은 화물칸 앞에 모든 하중을 모아서 싣는 것과 거의 유사한 상황으로 볼 수 있기 때문에 총 발생 PM10이 최대가 되는 것을 알 수 있다. 하중을 고르게 적재하는 경우는 후 축 이후에도 하중을 1,800kg 적재하고, 앞쪽에는 하중을 2개로 나누어서 적재하였기 때문에 앞쪽에 몰아서 하중을 적재하는 경우보다 약 0.0456g 가량 적게 배출되는 것을 알 수 있다.

즉, 화물차에 적재 하중을 싣을 때 한쪽으로 모아서 적재하는 것 보다 앞뒤로 고르게 분배해서 하중을 싣는 것이 더 적은 PM10을 배출할 것이다. 뿐만 아니라 화물칸 앞부분의 하중을 6개 정도로 고르게 분배해서 적재하면 더 많은 PM10 감축량을 기대할 수 있다.

현재 우리나라에서는 2004년 7월 21일부터 화물자동차 운전자의 전문성 확보 및 교통사고를 최소화시키기 위해 화물운송 종사자격 시험을 시행함에 따라 우리나라에서 사업용(영업용)과 화물자동차(용달, 개별, 일반화물) 운전자는 반드시 화물운송종사자격을 취득 후 운전해야 한다. 이에 따라 한국교통안전공사는 화물운송 종사자격 시험용 참고자료로써 화물취급요령을 제안하고 있다.

따라서 본 연구의 실험 결과를 바탕으로 앞으로 화물차의 종류별 하중의 적재방식에 따라 발생하는 미세먼지 발생량에 대한 연구가 더 진행된다면, 사고의 위험성을 줄이는 동시에 도로이동오염원의 환경부담을 최소화하기 위한 화물취급요령의 적재방법을 제안할 수 있다.

REFERENCES

- 김경준 외 (2019) “주행 시간 또는 거리에 따른 타이어 먼지 배출량 산정”, 목포해양대학교 박선영 외 (2020) “자동차의 타이어와 브레이크 마모가 도심 내 미세먼지 농도에 미치는 영향” 한국대기환경학회 학술대회논문집, 208-208.
- 손병래 외 (2021) “자동차 브레이크 패드에서 발생하는 비산먼지 특성에 관한 연구” 한국자동차공학회논문집, 29(2), 165-172.
- 이새봄, (2021. 06. 10), 전기차는 다를 줄 알았는데...미세먼지 만만찮네, 매일경제, <https://www.mk.co.kr/news/business/9907984> 에서 발췌
- 이원동, (2019) 화물운송론. 두남문화사
- 이석환 (2017) “타이어와 브레이크 마모에 의해서 발생하는 미세먼지 특성”, 한국기계연구
- 정선경 외 (2021) “자동차 비배기관 미세먼지 저감 기술 동향” 오토저널, 43(7), 61-64.
- Andrew Simons (2016), Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3
- EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook (2019)
- Kosis, “용도별 차종별 시군구별 자동차주행거리” (2020)
- ETRMA, (2019), Scientific Report on Tyre and Road Wear Particles, TRWP, in the aquatic environment
- Victor R. J. H. Timmersa, (2016), Non-exhaust PM emissions from electric vehicles