

서울지역 교통수단별 이동시간과 호흡량을 고려한 미세먼지 흡입량 추정에 관한 연구

이 용 일^{1),2)} · 정 원 석^{1),2)} · 황 도 연³⁾ · 김 태 성²⁾ · 박 덕 신^{1),*}

¹⁾한국철도기술연구원 교통환경연구팀, ²⁾성균관대학교 기계공학과, ³⁾센텍(주) 개발부

(2018년 11월 19일 투고, 2018년 11월 30일 수정, 2018년 11월 30일 게재확정)

Estimation of PM₁₀ and PM_{2.5} inhalation dose by travel time and respiratory volume in common transport microenvironments in Seoul, Korea

Yong-Il Lee^{1),2)} · Wonseck Jung^{1),2)} · Doyeon Hwang³⁾ · Taesung Kim²⁾ · Duckshin Park¹⁾

¹⁾Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute,

²⁾Mechanical Engineering, Sung Kyun Kwan University, ³⁾Department of Development, Sentec

(Received 19 Nov 2018; Revised 30 Nov 2018; Accepted 30 Nov 2018)

Abstract

Recently, people's interest in particulate matter (PM) has been increasing, due to its hazardous health effects. The purpose of this study was to investigate the concentrations and as well as the inhaled weight of PM, correlated with person's heart rate in subway, bus, vehicle and bicycle in the major public transportation (Sadang - Jamsil and Nowon - Dongdaemun) in Seoul. The concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} were measured from each of transportation means and calculated the average concentrations which were 87.2 and 57.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for subway, 62.8 and 42.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for vehicle, 61.5 and 36.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for bus and 53.0 and 29.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for bicycle in PM₁₀ and PM_{2.5} respectively. Inhalation dose for PM₁₀ and PM_{2.5} were estimated at 248.1 and 139.4 μg for bicycle, 56.7 and 39.3 μg for vehicle, 49.4 and 29.9 μg for bus and 44.3 and 29.1 μg for subway, respectively. Even though subway had the highest concentration, the highest inhalation dose was the bicycle. It was due to the long travel time-exposure and breathing rate which leads to maximum of PM₁₀ 5.6 and PM_{2.5} with 4.8 times inhalation dose comparing with other modes of transportation. With regards to future studies, the amount of inhalation in each transportation means should be considered in risk assessments of PM.

Keywords: Transportation, Breathing rate, Particulate Matter, Inhalation dose

* Corresponding author.

Tel : +82-31-460-5367

E-mail : dspark@krrri.re.kr

1. 서론

2013년 10월 World Health Organization 산하기관인 International Agency for Research on Cancer 는 미세먼지를 1급 발암물질로 규정하였다(WHO, 2013). 특히 중국 북경에서는 PM₁₀이 10 µg/m³ 이 증가 할 때마다 사망률이 8.36% 증가하며(He et al., 2016), 네델란드에서의 코호트 연구결과는 PM_{2.5} 10 µg/m³ 증가 시 6%의 자연사망률이 증가함을 보고하였다(Beelen et al., 2008). 또한, 국내에서는 PM₁₀ 및 PM_{2.5}는 호흡기계 관련 질환과 심혈관계 발생위험을 높이는 것으로 보고된 바 있다(Bae, 2014).

대도시에서 교통수단인 버스, 지하철 및 자동차는 국민 대다수가 이용하고 있으며, 자전거 도로의 발달로 자전거 이용률 역시 증가하고 있다. 그리고 교통수단에 따라 공간적인 협소함과 승객의 수 및 외부환경의 영향에 따라 공기 중 오염도가 다르게 나타나는 특징을 가지고 있다(Lim et al., 2007; Sakong et al., 2009). 교통수단에서 오염된 공기는 대부분 호흡으로 인체 내에 흡입되어 건강에 영향을 미치게 된다. 그리고 교통수단의 오염수준과 개개인의 호흡량에 따라 오염물질의 흡입량 차이를 나타낸다. 특히, Lee의 연구에 따르면 운동강도가 증가함에 따라 호흡량 역시 증가하며, 호흡량이 증가할 경우 코 호흡에서 입 호흡과 코 호흡으로 전환되어 오염물질이 쉽게 폐에 도달한다(Lee, 2010). 그리고 호흡량에 따른 기도 내 미세먼지의 침전량에 영향을 미치는 수치해석결과가 보고되었다(Lee, 2010; Sung et al., 2012). 이는 동일한 농도의 오염물질에 노출되어도 개인의 호흡량 및 침전량에 따라 흡입 정도의 차이를 나타낼 수 있다. 호흡량은 개개인의 신체적 특성, 연령, 성별 및 운동강도 등 다양한 요인에 의해 차이를 나타내므로 평균적인 호흡량의 표준치를 측정하는 것은 매우 어렵다. 다양한 연구자에 의해 연령별, 활동단계별 노출지수로 개발되어 보고되었으며, 국내에서는 환경부에서 호흡량에 대한 한국형 노출지수를 발표하였다(Jang et al., 2007; US-EPA, 2011).

대도시에서의 교통수단에 따른 오염물질 노출 정도를 비교하기 위한 다양한 연구가 수행되어 왔다. 국내에서는 국민들의 생활 패턴에 따른 미세먼지 노출 정도를 추정하고 실험자의 주변 환경에 따른 기여도를 파악하였다(Yoon et al., 2012; Hwang and

Lee, 2018). 그리고 미국 캘리포니아와 콜롬비아 보고타에서는 통근자를 대상으로 호흡량을 고려하여 교통수단에 따른 미세먼지 흡입량을 비교하였다(Betancourt et al., 2017; Ham et al., 2017).

본 연구에서는 서울지역을 연구대상으로 교통수단에 따른 미세먼지 흡입량을 비교하기 위하여 버스, 지하철, 자동차 및 자전거 등 교통수단을 이용하여 동일한 구간을 이동하는 동안 미세먼지 농도 및 교통수단 이용 실험자의 호흡량 추정을 위한 심장박동수를 실시간으로 측정하였다. 그리고 미세먼지의 농도와 추정된 호흡량을 이용하여 미세먼지 흡입량을 산정하고 교통수단에 따른 차이를 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 측정방법

본 연구에서는 실험 대상지역으로 서울의 강남지역과 강북지역을 선정하였으며, 2013년 6월 28일 오전 9시 30분에 강남지역에서, 2013년 6월 26일 오후 1시 30분에 강북지역에서 측정을 수행하였다(그림 1). 측정시간은 차량 혼잡 및 승객수에 의한 미세먼지의 영향을 줄이기 위해 출·퇴근 시간을 제외하여 선정하였다. 강남지역은 서울에서 유동인구 및 차량의 통행량이 가장 많으며, 고층빌딩들이 밀집되어 있다. 주요 도로는 총 8차선으로 구성되어 있으며, 버스전용차선이 인도에 인접해 있으나, 대부분 혼용하여 사용되고 있다. 강북지역은 북한산 국립공원, 수락산 및 작은 공원들이 있어 강남지역에 비해 녹지 비율이 높다. 그리고 총 6개의 차선으로 구성되어 있으며 중앙의 2개차로는 버스전용으로 운행되고 있다.

측정구간은 강남지역은 사당역에서 잠실역까지, 강북지역은 동대문역에서 노원역이다. 강남지역은 사당역에서 출발하여 잠실역까지 동일한 노선을 지하철, 자동차 및 자전거를 이용하여 11.98 km를 이동하였으며, 버스노선의 경우 동일노선이 없어 가장 유사한 지선버스 4319번 노선을 선택하였으며, 이동거리는 14.79 km 이다. 강북지역은 노원역에서 출발하여 동대문까지 지하철, 자동차 및 자전거를 이용하여 13.25 km 를 이동하였으며, 버스노선은 간선 102번 버스를 이용하여 13.54 km 를 이동하였다. 여

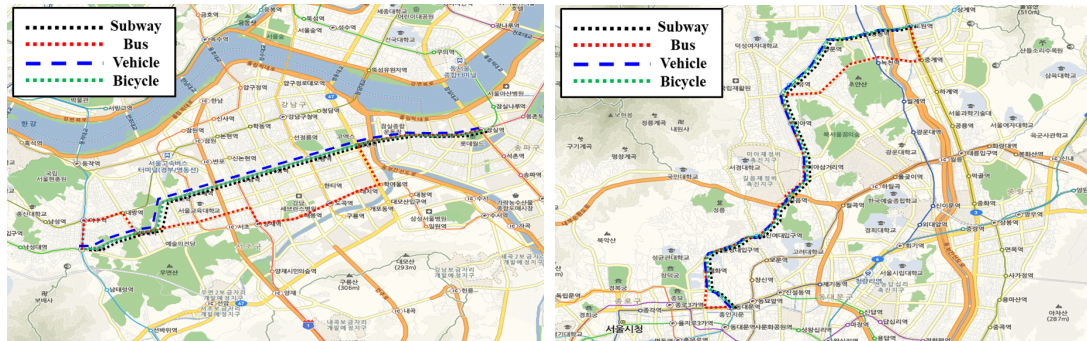


Fig. 1. Measurement route in Seoul.

기서 자동차의 환기장치는 외부유입을 차단하였으며, 창문을 닫고 에어컨을 가동하였다. 그리고 실험대상은 신체적 특성에 따른 호흡량 및 심장박동수의 차이를 줄이기 위하여 20대 초반의 건강한 남성을 선정하였다.

측정구간을 이동하는 동안 미세먼지 농도 및 심장박동수를 측정하기 위하여 Grimm 사의 Dust Monitor 1.108과 POLAR 사의 RS400를 사용하였다. 그리고 실험대상에 흡입되는 미세먼지의 농도를 측정하기 위해 공기 유입구의 위치를 호흡기 근처에 위치하였으며, 정확한 심장박동수를 측정하기 위하여 심장박동수 센서를 심장 근처에 부착하였다. 미세먼지 측정장치는 1분마다 자료를 획득하였으며, 심장박동수 측정장비는 1초마다 획득한 자료를 1분 평균으로 변환하여 사용하였다.

2.2 심박수를 이용한 호흡량 및 미세먼지 흡입량 추정

미세먼지의 흡입량을 추정하기 위해서는 미세먼지의 농도만으로는 충분하지 않다. 미세먼지의 흡입량을 알기 위해서는 호흡량을 알아야 하며 이외에도 흡입시간 및 흡입기간 등을 알아야 한다. 호흡량은 Table 1에 나타난 바와 같이 다양한 기관에서 발표된 노출지수를 사용할 수 있다. 하지만 교통수단을 이용하여 이동하는 동안 실험 대상자의 운동량 또는 주변 환경의 요인으로 인한 호흡률 상승 등에 대해 고려할 수 없는 문제가 있어 노출지수를 그대로 사용하기에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 이를 고려하여 심장박동수 모니터링을 이용한 간접측

정방법을 활용하였으며, 교통수단을 이용하는 실험자의 호흡량을 실시간으로 측정하였다(Lee, 2010; Adam et al., 1993).

Table 1. Exposure factors of breathing rate.

	Inhalation rate (L/min)	
	US-EPA, 2011*	Korea, 2014**
Sedentary	5.11	Resting 8.0
Light	13.0	Light exercise 17.3
Moderate	29.2	Medium exercise 21.2
Vigorous	53.9	Heavy exercise 34.7
-	-	Very heavy exercise 42.8

* Young adults aged 21-31 years. ** Male

실험자의 호흡량을 산정하기 위해 한국형 노출지수 개발 및 운영체계 구축 보고서에 기재된 심장박동수를 활용한 호흡량 추정식을 적용하였으며 식 (1)과 같다(환경부, 2002). 미세먼지의 흡입량은 식 (2)를 이용하여 계산하였다(Yoon et al., 2012). 여기서 침착계수(D_i)는 1로 가정하였으며, 미세먼지 농도(C_i)는 실험대상자의 호흡기 주변 농도이다. 그리고 분당 호흡량(V_E)은 식 (1)에 의해 추정된 값을 사용하였으며, 노출시간(t_i)은 이동시간이다. i 는 교통수단을 나타낸다.

$$V_E = 48.18585 - 1.652212 \times hr + 0.019807 \times hr^2 - 0.00005852 \times hr^3 \quad \text{식 (1)}$$

$V_E = \text{Breathing rate}(m^3/\text{min})$
 $hr = \text{Heart rate}(beat/\text{min})$

$$Inhalation\ dose\ of\ PM(\mu g) = \sum (D_i \cdot C_i \cdot V_E \cdot t_i)$$

$D_i = Deposition\ coefficient (D_i = 1)$
 $C_i = Particle\ concentration (\mu g/m^3)$
 $V_E = Breathing\ rate (m^3/min)$
 $t_i = Duration\ at\ mode\ of\ transportation$

식 (2)

3. 결과 및 고찰

3.1 교통수단 별 이동시간 및 속도

본 연구에서 이동시간은 미세먼지 흡입량을 평가하기 위한 주요한 요인 중 하나이다 (Jang et al., 2007; Yoon et al., 2012). 그림 2는 교통수단별로 목적지까지의 이동시간 및 이동속도를 나타내었다. 두 지역 모두 지하철이 가장 짧은 이동시간을 나타내었다. 운동강도가 높으며, 보행신호를 지켜야 하는 자전거가 가장 오래 걸렸다. 강남지역의 경우 버스 노선의 교통혼잡으로 인하여 버스가 자전거보다 더 많은 이동시간이 소요되었고 자동차는 교통체증이 있었으나, 중간 정차 없이 목적지까지 바로 이동하여 버스의 이동시간보다 절반 정도 차이가 났다. 그리고 강북지역은 도로 중앙에 위치한 버스 전용차선으로 인해 강남지역과는 달리 자동차와 버스 간 이동시간의 차이가 없었다. 그리고 이동속도는 강남지역 지하철 > 자동차 > 버스 > 자전거 순으로, 강북지역 지하철 > 버스 > 자동차 > 자전거 순으로 나타났으며, 국외 도시에서와 유사한 결과를 나타내었다 (Betancourt et al., 2017; Ham et al., 2017).

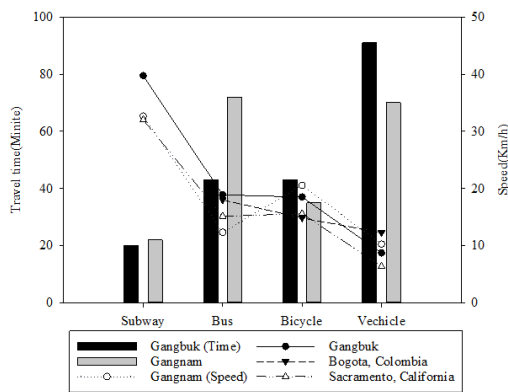


Fig. 2. Travel time and speed depending mode of transportation at each route.

3.2 교통수단에 따른 미세먼지 농도

그림 3은 강남 및 강북지역의 측정구간을 교통수단으로 이동하는 동안 미세먼지 농도를 나타내었다. 강남지역에서는 지하철이 PM_{10} $81.1 \pm 10.1 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $56.9 \pm 6.0 \mu g/m^3$ 으로 가장 높은 농도를 나타내었다. 그리고 버스가 PM_{10} $67.9 \pm 11.1 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $42.6 \pm 4.5 \mu g/m^3$ 으로, 자동차가 PM_{10} $64.6 \pm 5.2 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $39.8 \pm 2.8 \mu g/m^3$ 으로, 마지막으로 자전거가 PM_{10} $55.7 \pm 7.1 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $28.4 \pm 3.3 \mu g/m^3$ 으로 가장 낮은 농도로 측정되었다. 특히 $PM_{2.5}$ 의 경우 버스와 자전거의 농도는 약 2배 차이를 나타내었으며, 버스와 자동차는 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도의 차이가 크지 않았다. 강북지역에서는 지하철이 PM_{10} $93.4 \pm 23.8 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $58.7 \pm 8.6 \mu g/m^3$ 으로, 자동차가 PM_{10} $61.0 \pm 8.6 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $45.1 \pm 2.8 \mu g/m^3$ 으로, 버스가 PM_{10} $55.2 \pm 9.4 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $31.1 \pm 4.0 \mu g/m^3$ 으로, 마지막으로 자전거가 PM_{10} $50.3 \pm 5.9 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $30.5 \pm 3.0 \mu g/m^3$ 으로 측정되었다. 강남 및 강북지역 모두 지하철이 가장 높은 농도를 차지하였다. 하지만 강북지역의 경우, PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 의 농도가 버스보다 자동차가 높게 나타났으며, $PM_{2.5}$ 의 경우 버스와 자전거의 농도가 크게 차이 나지 않았다.

국외 도시의 경우, 중국 시안에서 지하철, 버스 및 자동차를 대상으로 연구를 수행하였으며, 지하철(오전) PM_{10} $74.7 \mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $43.2 \mu g/m^3$, 버스(오전, 에어컨 가동) $122.7 \mu g/m^3$, $54.4 \mu g/m^3$, 자동차(오전, 창문 닫음, 외부 유입 차단) $44.9 \mu g/m^3$, $29.9 \mu g/m^3$ 로 보고되었다 (Qiu et al., 2017). 콜롬비아의 보고타에서는 버스, 자전거, 자동차에 대한 $PM_{2.5}$ 의 농도가 비혼잡 시간에 $118.3, 19.3, 62.3 \mu g/m^3$ 로 (Betancourt et al., 2017), 캘리포니아의 새크라멘토는 지하철, 자전거, 버스, 자동차 순으로 $PM_{2.5}$ $32.5, 9.6, 7.5, 7.1 \mu g/m^3$ 로 보고되었다 (Ham et al., 2017). 본 연구에서는 자전거보다 버스와 자동차의 농도가 높게 나타나 콜롬비아의 보고타와 유사한 패턴을 보였으며, 이는 버스와 자동차의 경우 도로 내에 위치하여 있으면서 배기가스의 영향에 의한 것으로 사료된다 (Betancourt et al., 2017). 특히 보고타에서의 연구 결과에 따르면, 10개 차선으로 구성된 도로의 중앙에 위치하여 버스의 농도가 높게 나온 것으로 추정하였다 (Betancourt et al., 2017).

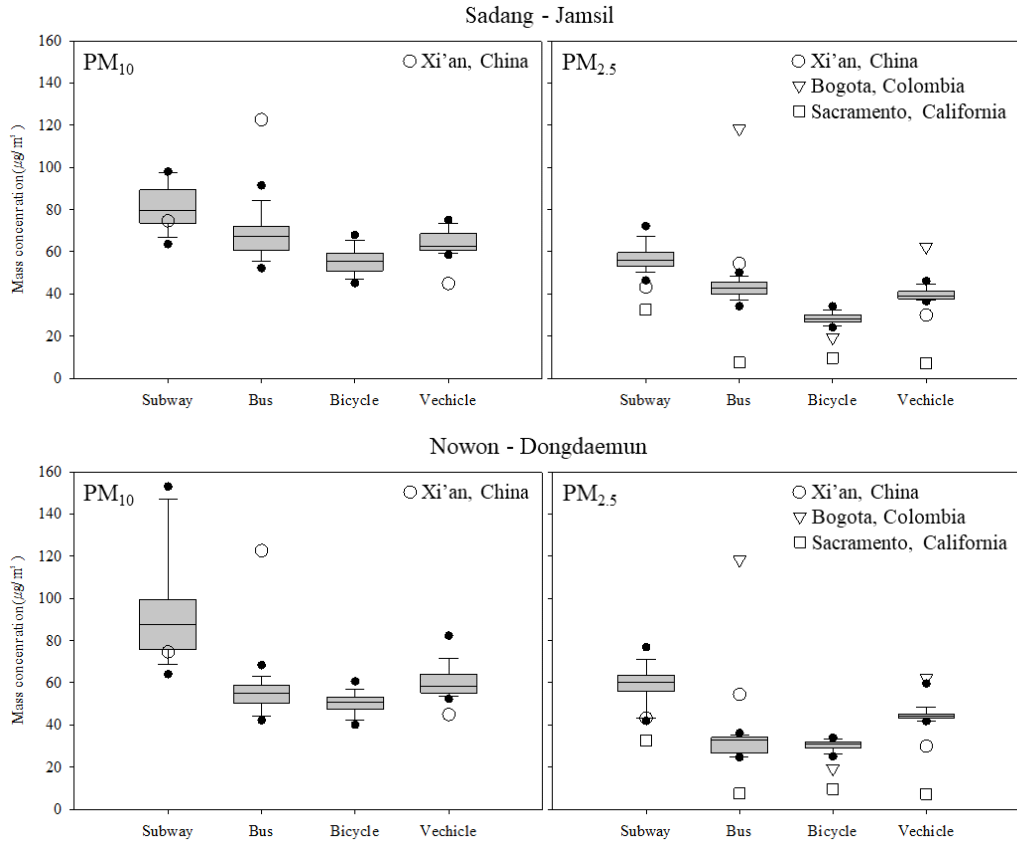


Fig. 3. Mass concentration of each mode of transportation.

3.3 교통수단별 호흡량 및 미세먼지 흡입량 추정

본 연구에서는 호흡량을 추정하기 위하여 심장박동수 모니터링을 이용한 방법을 사용하였다. 그림 4와 같이 심장박동수는 운동량이 많은 자전거가 가장 높게 나타났으며 지하철, 자동차, 버스 순으로 나타났다. 지하철, 자동차 및 버스의 경우 특별한 활동을 하지 않으나 심박수의 차이가 나타났다. 이는 도로 및 승객 혼잡도에 의한 정신적 스트레스의 영향으로 사료된다(Kim, 2008). 그리고 자전거의 심장박동수는 최대 180까지 상승하였으며, 측정구간 중 오르막길과 신호대기로 인해 차이가 발생하였다. 그림 5에 심장박동수를 이용하여 추정된 분당 호흡량 결과를 나타내었다. 강남지역 및 강북지역의 자전거 분당 호흡량이 57.5 ± 5.9 , 59.4 ± 4.6 L/min 가장 높게 나타났으며, 한국인의 성인 남성 분당 호흡량 노

출지수인 42.8 L/min 와 US-EPA의 21 ~ 31세의 성인에 대한 분당 호흡량 노출지수인 53.9 L/min 보다 높게 나타내었다(Jang et al., 2014, US-EPA, 2007). 그리고 버스의 분당 호흡량이 가장 낮았고 강남지역 13.2 ± 2.5 L/min, 강북지역 14.5 ± 2.9 L/min 으로 나타나 자전거와는 최대 4.4배까지 차이가 났다. 지하철과 자동차의 경우, 강남지역은 19.8 ± 2.4 , 19.0 ± 1.6 L/min, 강북지역은 28.5 ± 2.0 , 26.8 ± 1.8 L/min 으로 교통수단 간의 차이는 없었다.

교통수단별 PM 흡입량은 강남지역 및 강북지역 모두 자전거가 다른 교통수단에 비해 월등히 높게 나타났으며, PM_{2.5}의 경우, 강북지역에서 최저 PM 흡입량을 나타낸 버스와 8.5 배의 차이를 보였다. 그리고 PM₁₀의 흡입량은 강남지역의 자전거가 $224.1 \mu\text{g}$ 으로 나타났으며, 버스 $64.4 \mu\text{g}$, 자동차 43.1μ

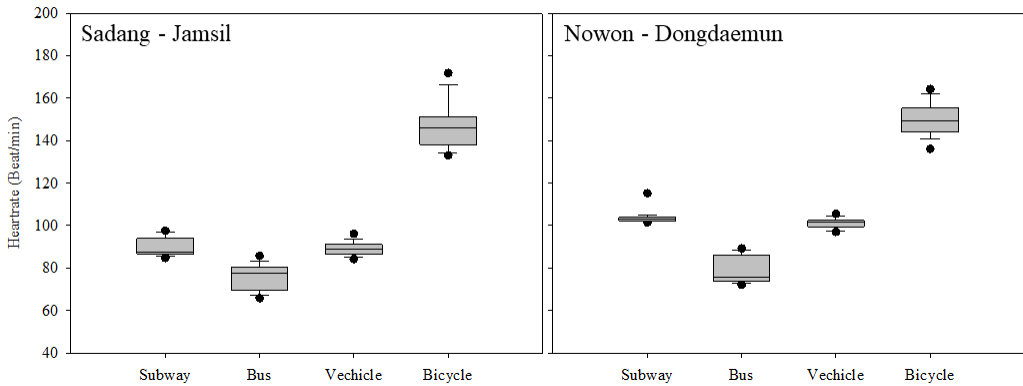


Fig. 4. Heart rate at each mode of transportation.

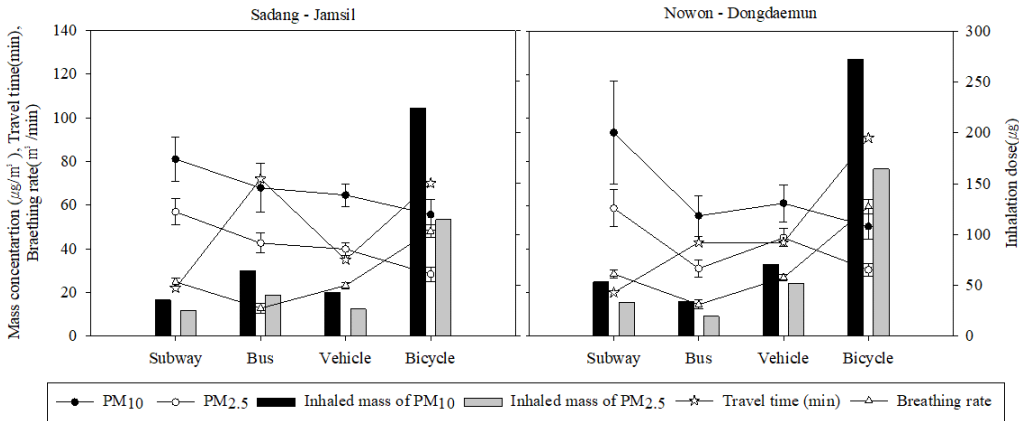


Fig. 5. Inhalation dose of PM and other factors at each mode of transportation.

g, 지하철 35.3 μg 순서로 나타났다. 강북지역에서도 자전거가 272.1 μg 로 가장 많았으며, 자동차 70.3 μg , 지하철 53.3 μg , 버스 34.5 μg 순으로 측정되었다. $\text{PM}_{2.5}$ 의 흡입량은 강남지역 역시 자전거가 114.2 μg 으로, 버스 40.4 μg , 자동차 26.5 μg , 지하철 24.8 μg 순으로 나타났다. 그리고 강북지역은 자전거 164.6 μg , 자동차 52.0 μg , 지하철 33.5 μg , 버스 19.4 μg 순이었다. 교통수단별 PM 흡입량에서 확인할 수 있듯이 자전거의 미세먼지 농도가 타 교통수단에 비해 낮았음에도 불구하고 이동시간과 호흡량으로 인해 최대 8.5배의 PM 흡입량 차이를 나타내었다.

그림 6은 교통수단별 거리 및 분당 $\text{PM}_{2.5}$ 의 흡입량을 나타내었다. 본 연구에서 교통수단별 이동거리의 차이는 크지 않아 거리 당 PM 흡입량은 PM 흡입량과 유사한 수준을 나타내었다. 거리당 PM 흡입량은 자전거가 가장 높았으며, 그 외 교통수단은 지역별 차이가 있으나 유사한 수준으로 나타났다. 그리고 분당 PM 흡입량은 자전거, 지하철, 자동차, 버스 순으로 높았다. 서울지역과 국외 도시 간 교통수단별 거리 및 분당 PM 흡입량의 수준은 다르게 나타났다. 이는 각 도시에서의 도로 특성과 미세먼지의 농도 차이의 영향에 의한 것으로 사료된다.

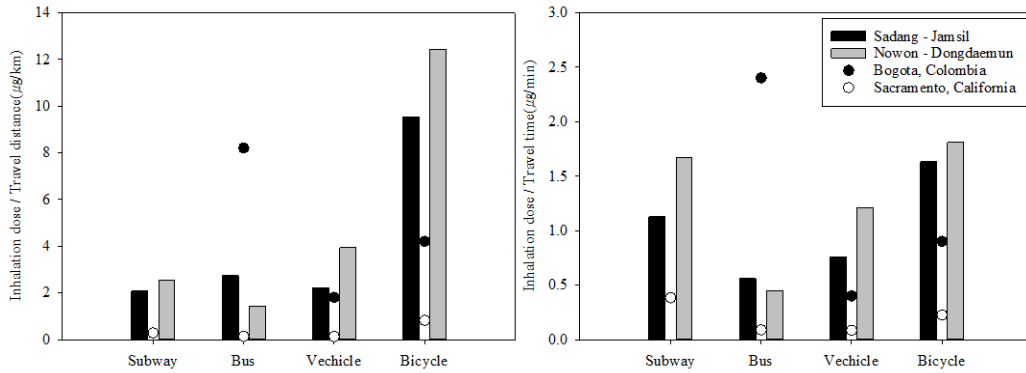


Fig. 6. Inhalation dose of PM_{2.5} per distance and time at each mode of transportation.

표 2에 나타난 바와 같이, 강남 및 강북지역에 대한 교통수단별 미세먼지의 평균 농도는 지하철, 자동차, 버스, 자전거 순으로 높았으며, PM₁₀ 87.2, 62.8, 61.5, 53.0 µg/m³, PM_{2.5} 57.8, 42.5, 36.8, 29.4 µg/m³ 으로 측정되었다. 자전거 대비 지하철의 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 농도는 1.6배 및 2.0배 높았다. 이동시간은 자전거, 버스, 자동차, 지하철 순으로 80.5, 57.5, 39.0, 21.0분이 소요되었으며, 지하철 대비 자전거가 3.8배 높았다. 그리고 호흡량은 자전거, 지하철, 자동차, 버스로 각각 58.4, 24.2, 22.9, 13.8 L/min 으로 추정되었으며, 버스 대비 자전거가 4.2배, 지하철 대비 2.4배 높게 나타났다. 미세먼지의 흡입량은 자전거, 자동차, 버스, 지하철 순으로, 각각 PM₁₀ 248.1, 56.7, 49.4, 44.3 µg, PM_{2.5} 139.4, 39.3, 29.9, 29.1 µg 으로 추정되었다. 지하철 대비 자전거의 미

세먼지 흡입량은 PM₁₀이 5.6배, PM_{2.5}가 4.8배의 차이를 나타내었다. 교통수단별 미세먼지 농도는 지하철이 가장 높았음에도 불구하고 미세먼지 흡입량은 자전거가 가장 높게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 교통수단에 따른 미세먼지의 농도와 호흡량, 그리고 목적지까지의 이동시간을 고려하여 미세먼지의 흡입량을 추정하였다. 미세먼지의 농도는 지하철이 가장 높았으며, 자동차, 버스, 자전거 순으로 나타났다. 자동차와 버스의 PM₁₀ 농도는 거의 유사하였으며, PM_{2.5}에서 차이를 보였다. 자동차의 경우 내부공기 순환으로 주행하였고 버스의 경

Table 2. Summary of the measurement and estimation value in Seoul area.

	Subway	Bus	Vehicle	Bicycle	
PM ₁₀ concentration (µg/m ³)	87.2	61.5	62.8	53.0	
PM _{2.5} concentration (µg/m ³)	57.8	36.8	42.5	29.4	
Breathing rate (L/min)	24.2	13.8	22.9	58.4	
Travel time (min)	21.0	57.5	39.0	80.5	
Inhalation dose (µg)	PM ₁₀	44.2	49.4	56.7	248.1
	PM _{2.5}	29.1	29.9	39.3	139.4
Inhalation dose per travel distance (µg/km)	PM ₁₀	3.5	3.4	4.5	19.6
	PM _{2.5}	2.3	2.1	3.1	11.0
Inhalation dose per travel time (µg/min)	PM ₁₀	2.1	0.8	1.4	3.1
	PM _{2.5}	1.4	0.5	1.0	1.7

우 정류장 마다 정차하며 출입문 개폐 및 일부 창문 개방으로 인한 차이로 사료된다. 미세먼지의 흡입량을 추정할 결과, 자전거의 미세먼지 흡입량이 다른 교통수단보다 미세먼지의 농도가 낮았음에도 불구하고 최대 8.5배까지 차이가 나타났다. 그리고 지하철, 자동차, 버스의 순서로 높게 나타났다. 이는 같은 거리를 이동할 때 이동시간과 호흡량이 미세먼지의 흡입량에 주요한 영향을 미치기 때문이다. 본 연구의 결과는 교통수단의 주변환경에 대한 불확실성으로 개개인에게 일반화하기에는 어려움이 있다. 하지만 같은 농도에 노출되더라도 운동량에 따른 호흡량의 차이와 교통수단의 이동시간 차이에 의해 체내 미세먼지의 흡입량이 크게 달라질 수 있으므로, 인체의 위해성 및 노출정도를 평가하기 위해서는 호흡량과 이동시간을 고려해야 할 필요가 있다.

사사

본 연구는 환경부의 “환경산업선진화기술개발사업”으로 지원받은 과제(NO.2018000120004)입니다.

참고문헌

- Adams, W. C., California Environmental Protection Agency., & University of California, Davis. (1993). Measurement of breathing rate and volume in routinely performed daily activities: Final report, contract no. A033-205, Sacramento: California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, Research Division.
- Bae, H. J. (2014). Effects of short-term exposure to PM₁₀ and PM_{2.5} on mortality in Seoul, *Journal of Environmental Health Sciences*, 40(5), 346-354. (in Korean with English abstract)
- Beelen, R., Hoek, G., van den Brandt, P. A., Goldbohm, R. A., Fischer, P., Schouten, L. J., Jerrett, M., Hughes, E., Armstrong, B., & Brunekreef, B. (2008). Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in Dutch cohort (NLCS-AIR study), *Environmental Health Perspectives*, 116(2), 196-202.
- Betancourt, R. M., Galvis, B., Balachandran, S., Ramos-Bonilla, J. p., Sarmiento, O. L., Gallo-Murcia, S. M., & Contreras, Y. (2017). Exposure to fine particulate, black carbon, and particle number concentration in transportation microenvironments, *Atmospheric Environment*, 157, 135-145.
- Ham, W., Vijayan, A., Schulte, N., & Herner, J.D. (2017). Commuter exposure to PM_{2.5}, BC, and UFP in six common transport microenvironments in Sacramento, California, *Atmospheric Environment*, 167, 335-345.
- He, G., Fan, M., & Zhou, M. (2016). The effect of air pollution on mortality in china: Evidence from the 2008 Beijing Olympic Games, *Journal of Environment Economics Management*, 79, 18-39.
- Hwang, Y., & Lee, K. (2018). Contribution of micro-environments to personal exposures to PM₁₀ and PM_{2.5} in summer and winter, *Atmospheric Environment*, 175, 192-198.
- Jang, J.Y., Jo S.N., Kim S., Kim S.J., & Cheong H.K. (2007). *Korean Exposure Factors Handbook*. Ministry of Environment.
- Kim, W. (2008). Heart Rate Variability in Stressful Events and Mental Disorder, *The Korean Society of Stress Medicine*, 16(2), 161-165.
- Lee, D. T. (2010). Modelling in estimation of air pollutants uptake volume using exercise intensity and ventilatory volume, *Journal of The Korean Society of Living Environmental System*, 17(4), 487-493.
- Lim, M. K., Jung, B. J., Park, H. G., & Nam, W.J. (2007). A Study on the Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCS) and Formaldehyde Emission from Car Interior Material Using Small Emission Chamber, *Proceedings of Autumn Annual Conference of KSEE, Korea Society of Waste Management*, Chuncheon, 51.
- Qiu, Z., Song, J., Xu, X., Luo, Y., Zhao, R., & Zhou, W. (2017). Commuter exposure to particulate matter for different transportation modes in Xi'an, China, *Atmospheric Pollution Research*, 8, 940-948.

- Sakong, J. Baek, S. O., & Jeon, M. J. (2009). Formaldehyde, Volatile Organic Compounds inside Newly Produced Vehicle and Neurobehavioral Performance of Vehicle Drivers, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 6(2), 111-122. (in Korean with English abstract)
- US-EPA (2011). Exposure Factors Handbook, 2011 Edition (Final), EPA/600/R-09/052, United States Environmental Protection Agency.
- World Health Organization (2013). Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution. REVIHAAP Project: Technical Report, WHO, Copenhagen, Denmark.
- Yang, Z., Zheng, C., Zhang, X., Li, C., Wang, Y., Weng, W., & Gao, X. (2017). Sulfuric acid aerosol formation and collection by corona discharge in a wet electrostatic precipitator, *Energy Fuels*, 31(8), 8400-8406.
- Yoon, C., Ryu, K., Kim, J., Lee, K., & Park, D. (2012). New approach for particulate exposure monitoring: determination of inhaled particulate mass by 24h real-time personal exposure monitoring, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 22, 344-351.
- Zhao, H., He, Y., & Yao Y. (2018). Study on brush of moving electrode type electrostatic precipitator (MEEP), *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 121, 052024.
- Zuurbier, M., Hoek, G., van den Hazel, P., & Brunekreef, B. (2009). Minute ventilation of cyclists, car and bus passengers: an experimental study, *Environmental Health*, 8, 48.