

버스와 자전거를 이용한 통근 수단에 따른 PM₁₀ 노출량의 비교

김원 · 김성연 · 이지연 · 김성근 · 이기영[†]

서울대학교 보건대학원 환경보건학과
(2009. 10. 10. 접수/2009. 11. 2. 수정/2009. 11. 26. 채택)

Comparison of Commuters' PM₁₀ Exposure Using Different Transportation Modes of Bus and Bicycle

Won Kim · Sung Yeon Kim · Jiyeon Lee · Seong Keun Kim · Kiyoung Lee[†]

Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

(Received October 10, 2009/Revised November 2, 2009/Accepted November 26, 2009)

ABSTRACT

Cycling has been lately recommended as an alternative commuting mode because it is believed to be good for health and the environment. However, the exposure to environmental pollutants, such as fine particulates, could be a potential problem for cycling in urban environments. In this study, we compared commuters' PM₁₀ exposure using the different transportation modes of bicycle and bus. When a bicycle was used as a commuting mode, the additional PM₁₀ exposure due to transportation was about 3.5 times higher than that when using a bus. The difference of additional PM₁₀ exposures by cycling and bus was statistically significant ($p < 0.01$). The PM₁₀ exposure during cycling was significantly correlated with atmospheric PM₁₀ concentration ($r = 0.98$, $p < 0.01$) and its correlation coefficient was higher than that of bus ($r = 0.55$, $p < 0.05$). The results of this study demonstrated that the main reasons of higher PM₁₀ exposure when using the bicycle as the mode of transport were its vicinity to road traffic and routes that were unavoidably close to road traffic. Bicycle commuting along the road side may not be good for health. Exclusive bicycle lanes away from road traffic are recommended.

Keywords: PM₁₀, commuting, bicycle, bus

I. 서 론

대기오염은 일산화탄소, 오존, 미세먼지, 이산화질소, 유해대기오염물질(hazardous air pollutants, HAPs) 등 다양한 오염물질을 포함하며 특히 도시 지역에서는 도로의 교통량에 의한 미세먼지가 주요 오염 물질로 간주되고 있다. 미세먼지는 공기역학적 직경에 따라 PM₁₀과 PM_{2.5} 등으로 나누어지며 10 μm 보다 작은 미세먼지는 상기도를 통과하여 폐의 폐포까지 유입이 가능하기 때문에 입경 크기는 건강영향의 측면에서 매우 중요하다. 이러한 미세먼지는 디젤 자동차에 의한 직접적인 영향과 대기 중에서 2차 오염물질을 형성하는 간접적인 방법으로 대기 오염에 영향을 준다. 또한 대기 중의 미세입자들이 장거리 이동이 가능하지만 도로에

가까울수록 농도가 높은 경향을 가지고 있기 때문에 자전거나 버스 등을 이용할 때 많이 노출될 수 있다.¹⁾

세계보건기구의 조사에 의하면²⁾ 대기오염에 의해 매년 3백만 정도의 인구가 조기사망하고 있으며, Zhao *et al.*(2004)³⁾에 의하면 대기오염이 호흡기질환과 심혈관계 질환에 의한 사망률을 증가시킨다. 미세먼지의 흡입은 폐에 염증을 일으키고 순환계를 통해서 다른 기관으로 전이되어 심혈관계에 영향을 주게 된다. 이와 같이 대기오염과 관련된 건강영향이 널리 알려지면서 교통량을 줄여 대기오염 수준을 낮추려는 다각적인 노력이 경주되고 있으며 대표적으로 대중교통의 이용을 증가시키려는 홍보와 자전거와 같은 대체 이동수단의 증진을 도모하는 캠페인 등을 예로 들 수 있다.

자전거는 교통 혼잡을 피하고 공기오염물질의 방출과 온실효과 가스를 줄이는 효과가 있는 반면에 인간의 물리적인 활동을 증가시키는 장점이 부각되면서 대체 교통수단으로써 점점 더 많이 선택되어지고 장려되고 있다. 그 예로, 서울시에서 에너지절약과 시민의 건강증

[†]Corresponding author : Graduate School of Public Health, Seoul National University
Tel: 82-2-740-8881, Fax: 82-2-745-9104
E-mail : cleanair@snu.ac.kr

진 등의 목적을 가지고 2007년에 자전거이용활성화에 관한 조례를 제정하여 공포하였으며 2012년까지 가변 차로나 자전거 중앙차로 등을 이용해 207 km에 이르는 자전거 전용도로를 조성할 계획을 하고 있다. 그러나 자전거 도로의 입지에 대해서는 진지한 고려가 없는 상황이다. 반면, 선진국에서는 자전거 이용이 대기 오염에 의한 추가적인 피해 없이 안전하고 건강한 교통수단으로 자리 잡기 위해 향후 자전거 도로를 확보함에 있어 그것이 어떻게 건설되는 것이 합리적이고 바람직한 것인지에 대한 논의가 활발히 전개되고 있다.¹⁴⁾

자전거 이용에 따른 대기오염물질에의 노출 특히, 미세먼지에 관한 연구는 덴마크, 영국 등을 포함한 유럽에서 많이 이루어지고 있으며 자전거를 이용할 경우 버스나 자동차를 이용한 경우와 비교해 비슷하거나 조금 낮게 측정되었다고 보고되어지고 있다.⁵⁾ 다른 교통수단에 비해 자전거를 이용하는 사람들의 오염물질 노출에 대한 우려는 자전거 이용이 건강증진에 기여한다는 인식에 묻혀 제대로 평가되지 못하고 있다. 우리나라의 경우 자전거 이용에 따른 대기오염 물질의 노출, 특히 미세먼지에 대한 노출 평가는 전무한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 대중교통수단인 버스와 친환경 대체 교통수단으로 각광받고 있는 자전거를 이용하여 통근할 경우에서의 미세먼지(PM₁₀) 노출 수준을 비교 평가해 보고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구방법

본 연구는 자전거와 버스의 통근수단에 따른 PM₁₀의

노출정도의 차이를 알아보기로 2008년 9월 24일부터 11월 21일까지 서울 도심을 가로지르는 노선에서 출퇴근시간 중 PM₁₀ 노출을 측정하였다. 출근시간과 퇴근시간은 각각 7:30~9:30과 18:00~19:30로 사람들이 많이 이용하는 시간을 선정하였으며 출근의 경우 자전거와 버스를 이용하여 각각 7회와 9회를 측정하였으며, 퇴근의 경우 각각 6회와 8회를 측정하였다.

통근수단으로는 자전거와 버스를 이용하였다. 자전거의 경우 출발지와 목적지는 버스와 동일하면서 도로변을 따라 이동하는 최단경로를 선정하였으며 서울대학교 보건대학원 ↔ 이화동사거리 동대문역 ↔ 신설동역을 거치는 경로였다. 버스(2112번 지선버스)의 운행 경로는 서울시 종로구 연건동에 위치한 서울대학교 보건대학원을 경유하여 이화동사거리 ↔ 종로 ↔ 동대문역 ↔ 신설동역에 이르는 구간이었다(Fig. 1). 자전거 주행로와 버스노선이 달라진 구역에서의 각 길이의 차이는 약 350 m 정도였으며(버스: 1.2 km, 자전거: 850 m) 모두 왕복 4차선의 길로써 연구 결과에 영향을 미칠만한 특별한 도로 공사가 없는 구간이었다.

측정 대상 물질은 PM₁₀으로써 광산란 측정기인 SIDEPAK Personal Aerosol Monitor(AM510, TSI)를 이용하여 측정하였다. SIDEPAK Monitor는 PM₁₀ impactor를 통해 10 μm보다 큰 입자를 제어하고 광산란법에 의해 10초 간격으로 PM₁₀ 농도를 측정한다. 유량은 1.7 l/min으로 유지하였다. 매 측정 전 zero filter로 0점 보정을 하였다. 버스를 이용할 경우에는 SIDEPAK Monitor를 가방에 넣어 버스의 뒷자석 중앙에 위치하여 측정이 이루어지도록 하였으며 자전거를 이용할 경우에는 측정자가 가방을 댄 상태로 통근하면서 측



Fig. 1. Commuting routes by bicycle and bus (Dotted Line: Bicycle route, Solid Line: Bus route).

정되도록 하였다.

측정 기간 동안 PM₁₀ 농도에 영향을 줄 수 있는 대기 중 PM₁₀ 농도와 대기의 온도 및 습도와 같은 기후 조건들을 환경부와 기상청을 통해서 수집하였다. 대기 중 PM₁₀의 경우 연구가 수행된 지점과 가장 가까운 동대문구 용두동에 위치한 대기측정망의 자료를 사용하였으며 측정 당시의 시간과 동일한 시간대의 PM₁₀ 평균농도를 자료로써 활용하였다. 또한 기온(°C) 자료 역시 측정시간대와 동일한 시간대별 기온 자료를 사용하였다. 그러나 상대습도(%)의 경우 3시간 간격의 평균자료만 공개되고 있어 측정 시간대와 가장 가까운 시간대의 상대습도를 자료로써 사용하였다.

2. 통계처리

통근 중 PM₁₀ 노출 수준은 평균 노출량, 통근 중 총 노출량, 그리고 보정 노출량의 세 가지 유형으로 평가하였다. 평균 노출량은 통근 중 측정된 PM₁₀의 평균 농도를, 통근 중 총 노출량은 평균 노출량에 통근 중 소요된 시간을 곱해준 농도를, 그리고 보정된 농도는 통근시간 중 측정된 시간 가중 평균 농도에서 같은 시간대에 대기 측정망에서 측정된 대기 중 PM₁₀ 농도를 제외한 농도로 정의하였다. 노출 지표의 하나로 보정된 농도를 활용한 이유는 통근 수단으로써 자전거와 버스를 이용할 때 노출 가능한 PM₁₀의 농도 수준을 비교함에 있어서 대기의 영향을 제외하고 각 교통수단에 의한 독립적인 영향을 비교하기 위해서이다. 측정 자료와 대기 중 PM₁₀ 및 기후조건 등의 자료들을 바탕으로 SPSS 12.0 통계 프로그램을 이용하여 통계적인 해석을 하였다.

두 독립표본인 통근 수단별 PM₁₀ 농도의 차이를 비교하기 위해 independent samples t-test를 실시하였으며 두 가지 형태의 자료에 대해 각각 t-test를 실시하였다. PM₁₀에 영향을 미칠 수 있는 관련 변수들 간의 관계를 살펴보기 위해 상관분석을 하였으며 특히, 대기 중 PM₁₀ 농도와 각 통근 수단에 따른 PM₁₀ 노출량간의 측정일별 분포를 확인하기 위해 추가적으로 둘 간의 비를 살펴보았다. 통근 수단별 PM₁₀ 농도와 대기 중 PM₁₀ 농도는 각각 대수정규분포를, 온도와 습도는 정규분포를 하고 있으므로 통근 수단 중 PM₁₀ 농도와 대기 중 PM₁₀ 농도는 모수 통계방법을, 그리고 PM₁₀ 농도와 기후 변수들 간의 상관성은 비모수통계방법으로 분석하였다.

III. 결 과

통근 수단에 따른 PM₁₀ 농도에 관한 본 조사의 결과

Table 1. Summary of environmental conditions and PM measurements by commuting modes

	Commuting mode	
	Bicycle (N=13)	Bus (N=17)
Temperature (°C) ^a	16±3	14±9
Relative Humidity (%) ^a	61±19	53±15
Duration (min) ^a	25±8	31±10
Measured PM ₁₀ concentration ^b (µg/m ³) ^d GM (GSD)	192.9 (2.0)	62.7 (1.7)
Ambient PM ₁₀ concentration (µg/m ³) GM (GSD)	72.0 (1.7)	35.0 (1.9)
Adjusted PM ₁₀ concentration ^c (µg/m ³) GM (GSD)	114.2 ^e (2.6)	32.9 ^f (1.9)
Whole-trip PM ₁₀ exposure ^d (µg/m ³ · min) GM (GSD)	5071.9 (1.9)	1925.7 (2.1)

GM: Geometric Mean, GSD: Geometric Standard Deviation

a: Mean±Standard Deviation(SD)

b: Average PM₁₀ concentration during trip (µg/m³)

c: Adjusted concentration = Measured PM₁₀ concentration - Ambient air PM₁₀ concentration

d: Total exposure during trip, multiplying commuting concentration and commuting time per trip (µg/m³·min)

e: based on 11 samples; 2 samples not having atmospheric PM₁₀ were excluded

f: based on 14 samples; 3 samples having negative value were excluded

는 Table 1과 같았다. 자전거를 이용한 13건의 통근의 경우 평균 25분의 시간이 소요되었으며 PM₁₀ 기하평균 농도는 192.9 µg/m³이었다. 버스의 경우 측정된 총 17건의 통근 동안 평균 31분의 시간이 소요되었으며 PM₁₀ 기하평균농도는 62.7 µg/m³로써 자전거를 이용한 경우에 비해 PM₁₀ 농도수준이 약 3.1배 더 낮았으며 이 차이는 통계적으로 유의하였다(p<0.01).

보정된 농도에서 자전거의 경우, 2008년 10월 15일에 해당하는 대기 측정망에서의 공기 중 PM₁₀ 농도가 없어 11건의 자료만 분석에 포함되었다. 버스에서의 경우 측정된 결과가 대기 중 PM₁₀ 농도보다 낮은 3건은 음의 값이므로 기하평균의 계산과 같은 통계분석을 위해 결과 분석에서 제외하였다. 보정된 PM₁₀농도는 자전거를 이용한 경우와 버스를 이용한 경우에서 각각 기하 평균값으로 114.2 µg/m³과 32.9 µg/m³이었다. 그림 2는 각 교통수단의 이용에 따른 보정된 PM₁₀ 농도의 분포를 보여주고 있다. 각 교통수단에서의 노출 농도에서 공통적인 배경이 되고 있는 대기의 PM₁₀ 농도를 제외할 경우 자전거를 이용해서 통근할 때 버스를 이용한 경우 보다 PM₁₀ 농도가 약 3.5배 정도로 훨씬 높

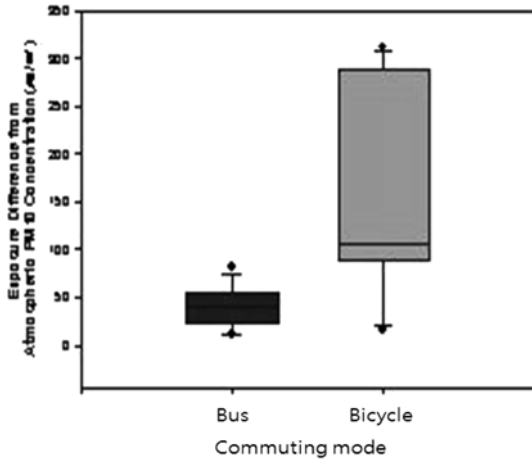


Fig. 2. Comparison of Adjusted PM₁₀ exposure by commuting modes.

았으며, 이 차이는 통계적으로 유의하였다($p < 0.01$).
 통근 중 총 노출량은 통근 중 평균 PM₁₀ 농도에 통근에 걸린 시간을 가중해 준 값으로써 각 교통수단간 총 노출량의 비교를 위해 적용하였다. 통근 중 총 PM₁₀ 노출량은 자전거를 이용한 경우와 버스를 이용한 경우에서 각각 5,071.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ 과 1,925.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{min}$ 이었으며 자전거를 이용한 경우가 버스를 이용한 경우에 비해 약 2.6배 더 높게 나타났다($p < 0.01$).
 통근 수단의 선택에 따라서 희석된 대기 중 PM₁₀ 농도에 더해 얼마나 많은 양의 PM₁₀이 개인 노출에 추가되는지를 비교하기 위해 통근 중 측정된 PM₁₀ 농도에서 각 교통수단에 따른 보정된 PM₁₀ 농도가 차지하는 비중을 계산하였다. 자전거와 버스의 경우에서 그 비율은 산술 평균으로 각각 61.2%와 53.7%였다. 즉, 자전거를 이용할 경우 전체 노출량에서 자전거 선택에 의해 추가적으로 노출되는 PM₁₀의 농도가 전체 노출량 대비 약 61.2%로써 버스의 경우에 비해 조금 더 높았으나 그 차이가 통계적으로 유의하지는 않았다.
 Fig. 3은 자전거와 버스를 이용하여 통근할 때 노출 가능한 PM₁₀의 농도 분포 양상을 보여주고 있다. 자전거를 이용할 경우, 버스로 통근할 때와 비교해 PM₁₀ 농도가 훨씬 높다는 것을 알 수 있다. 또한 각 교통수단을 이용할 때의 PM₁₀ 농도에 대한 대기 중 PM₁₀의 비는 대략 2~3배 정도의 분포를 보였으며, 각 경우에서 그 비율은 비슷하게 유지되고 있었다. 그러나 자전거를 이용한 경우가 버스를 이용한 때에 비해 대기 중 PM₁₀ 농도에 대한 비는 더욱 높았으며 그 차이는 통계적으로 유의했다($p < 0.01$).

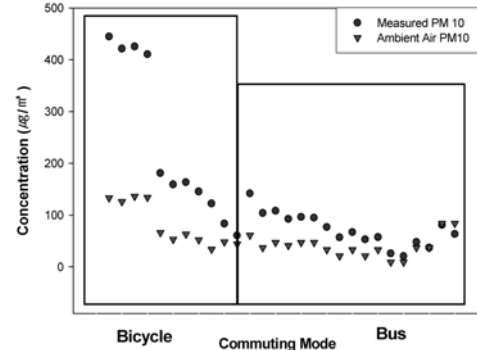


Fig. 3. PM₁₀ exposure distribution by commuting mode.
 (●) Measured PM₁₀ : Measured PM₁₀ concentration during commuting, (▼) Ambient Air PM₁₀: Ambient air PM₁₀ concentration measured at air monitoring station during same time period of commuting measurement.

Table 2. Correlations between ambient PM₁₀ concentration and measured PM₁₀ concentration by commuting mode

	PM ₁₀ concentration by bicycle ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ concentration by bus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Correlation Coefficient*	0.98	0.55
p-value (2-tailed)	0.00	0.02
N	11	17

*: Pearson's Correlation Coefficient.

Table 2는 각 통근 수단에 의한 PM₁₀ 농도와 대기 중 PM₁₀ 농도와의 상관성을 보여주고 있다. 자전거를 이용한 경우, 대기 측정망에서의 공기 중 PM₁₀ 농도가 없는 2건을 제외한 11건의 자료가 상관성 분석에 포함되었고 버스를 이용한 경우는 17건의 대기 중 PM₁₀ 농도와 통근 중 PM₁₀ 농도 자료 모두가 분석에 활용되었다. 자전거를 이용할 경우 통근 중 PM₁₀ 농도와 대기 중 PM₁₀ 농도는 매우 높은 상관성을 갖고 있었으며 이는 통계적으로 유의한 수준이었다($p < 0.01$). 그러나 온도와 상대습도와 같은 기후 조건은 자전거를 이용한 통근에서의 PM₁₀ 농도와 상관성은 낮았으며 통계적으로 유의하지도 않았다. 버스의 경우에는 버스 내부에서 온/습도를 측정하지 못했으므로 대기의 온/습도 수준과 직접적으로 상관정도를 비교할 수는 없었다. 그러나 버스를 이용한 통근 과정에서의 PM₁₀ 농도와 대기 중 PM₁₀ 농도와의 상관관계를 분석한 결과 상관계수가 0.54로써 자전거의 경우와 비교해 상관정도는 낮았지만

통계적으로 유의하게 상관관계가 있음을 알 수 있었다 ($p < 0.05$).

IV. 고 찰

서울에서 수행된 본 연구의 통근 수단별 미세분진에 대한 노출 평가 결과는 선진국에서 연구된 자전거를 포함한 교통수단의 이용에 따른 미세먼지에의 노출 경향과 달랐다. 본 연구에서는 자전거를 이용해 통근할 경우 버스를 이용할 때와 비교해 평균 약 3배 정도 노출량이 많았지만 선진국에서 수행된 연구들에서는 이와 전혀 상반되고 있었다. 예를 들면, Adams *et al.* (2001)⁶⁾의 연구에서는 자전거를 이용할 때의 PM_{2.5} 노출량이 자동차나 버스를 이용할 때와 비슷하거나 낮다는 결과를 보여주고 있으며, Gee and Rapper(1999)⁷⁾의 연구에서는 호흡성분진의 개인 노출량을 평가한 결과 버스에 비해 자전거를 이용할 때 평균 5~6배 낮은 노출량이 관찰되었다고 한다. 또한 Rank *et al.*(2001)⁸⁾ 등은 총 분진의 노출량을 비교하여 자동차를 이용한 사람이 자전거를 타는 사람에 비해 약 1.7배 더 높은 분진에 노출되었으며 기타 벤젠과 같은 유기화합물에 대한 노출량 역시 훨씬 높아, 자전거를 탈 때 호흡량이 2.3배 높다는 사실을 고려하더라도 환경오염물질 노출에 의한 위험은 자동차를 이용하는 사람이 더욱 높다고 결론 내리고 있다.

외국의 각 연구자들은 자전거를 이용할 경우 도로 주변으로부터 일정 정도 거리가 떨어진 노선을 다니거나 혼잡한 길을 피해갈 수 있어서 다른 교통수단에 비해 노출 농도 수준이 낮았다고 진단하고 있었다.^{6,7)} 반대로 본 연구의 결과가 다른 연구들의 결과와 달리 자전거를 이용한 통근이 버스를 이용한 통근에 비해 PM₁₀에 대한 노출이 훨씬 높았던 이유는 버스와 함께 혼잡한 도로를 따르는 비슷한 노선을 이동했기 때문이며 자동차의 배출물질에 직접적으로 노출되었기 때문일 것이다. 즉, 다른 연구들의 지적처럼 자전거 이용자의 노선의 선택과 혼잡 구간의 회피에 의한 노출 저감의 효과가 본 연구에서는 역으로 그대로 재연되었기 때문에 자전거를 이용한 경우에서의 노출량이 버스를 이용한 경우에 비해 현저히 높아졌을 것으로 판단된다.

이와 같은 판단의 근거는 본 연구 결과에서 분석된 교통수단의 선택에 따른 PM₁₀ 농도의 기여 정도에서도 확인되고 있다. 교통수단에 따른 통근 중 PM₁₀ 농도 기여도를 보여주었던 보정된 PM₁₀ 농도에서 자전거를 이용할 경우가 버스에 비해 3.5배 더 높았다는 사실과 보정된 PM₁₀ 농도가 전체 농도에서 차지하는 비중이 자

전거의 경우에서 버스에 비해 조금 더 높았다는 사실이 이를 증명한다. 이런 분석 결과들이 교통수단의 선택이 통근 중 PM₁₀ 농도에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있으며 자전거의 경우 그 영향이 버스보다 더욱 크기 때문에 PM₁₀ 농도가 훨씬 높게 측정되었다고 해석할 수 있다.

그러나 Hertel *et al.*(2008)⁴⁾의 연구에서는 일반 대기의 PM₁₀ 농도가 교통수단에 따른 PM₁₀ 농도에 기여하는 정도가 70~80%를 차지한다고 분석되고 있어 본 연구의 결과와 상반되고 있다. 결과의 해석에서 Hertel 등은 대기 중 PM₁₀ 농도가 이동 수단별 PM₁₀ 농도 수준을 상당부분 결정하고 있기 때문에 이동 수단별 PM₁₀ 농도 차이가 적어진다고 분석하고 있다. 실제로 그들의 연구에서 버스를 이용한 경우 오염 정도가 상대적으로 높은 자전거 노선을 이용할 때와 비교해 평균적인 PM₁₀ 농도 수준이 2~15% 정도 높을 뿐이었고 오염 정도가 높은 자전거 노선은 보다 청정한 노선에 비해 10~39% 정도 높았다. 그러나 교통수단간 PM₁₀ 농도의 차이를 발생시키는 원인으로 Hertel 역시 버스가 혼잡한 도로를 따라 움직이기 때문으로 해석하고 있다. Hertel의 연구에서는 버스노선과 자전거 노선이 서로 달라서 혼잡한 도로를 이동하는 버스가 PM₁₀ 농도가 더욱 높았으나 본 연구에서는 버스와 자전거가 비슷한 노선을 설정하고 있기 때문에 자전거의 경우 혼잡한 길에서 발생하는 자동차 배출물질의 영향을 더욱 직접적으로 받았을 것이다.

통근 중 PM₁₀ 농도는 교통수단에 의한 기여도가 높은 편이지만 통근할 때 PM₁₀ 농도에 기여하는 변수들의 특성은 교통수단별로 조금씩 다른 양상을 보여주고 있다. 자전거와 버스를 이용할 때 PM₁₀ 농도는 대기 중 PM₁₀ 농도에 영향을 받고 있으며 특히, 자전거의 경우 상관관계수가 1에 가까울 정도로 밀접하게 영향을 받고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 온도와 습도와 같은 기후변수들은 PM₁₀ 농도와 상관성이 떨어져 PM₁₀ 농도가 기후적인 조건들에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 따라서 대기 중 PM₁₀ 농도를 줄이기 위한 노력이 성공적으로 이루어진다면 통근 중 PM₁₀ 농도가 더 불어서 줄어드는 효과가 나타나리라는 것을 추론할 수 있다. 즉, 대기 중 PM₁₀ 농도가 통근 중 PM₁₀ 농도와 강하게 상관되어 있기 때문에 대기 중 PM₁₀ 농도를 줄이려는 노력은 통근 중 PM₁₀ 농도를 줄이는 결과로 이어질 수 있을 것이다.

대기 중 PM₁₀ 농도를 줄이기 위한 노력은 장기적인 계획 속에서 논의되어야 한다. 더군다나 당장 그 효과가 긍정적으로 나타나기도 힘들기 때문에 교통수단 특

성에 기인한 PM₁₀ 노출 저감 정책이 고려되어야 한다. 특히, 본 연구의 결과처럼 자전거를 이용해 도로를 따르는 경로로 통근할 때 환경 중 미세먼지에 노출되는 위험이 버스와 같은 다른 교통수단을 이용할 경우에 비해 더욱 증가할 경우 자전거를 이용하더라도 PM₁₀과 같은 미세먼지에 대한 노출을 줄일 수 있는 추가적인 고민이 필요하다.

Tsai(2008)⁹⁾ 등은 모터사이클, 자동차, 버스, 그리고 지하철 등의 교통수단을 이용할 때 노출되는 미세먼지의 노출량을 비교하여 모터사이클을 이용할 때 노선 중 평균 노출량이 가장 많았으며 교통수단의 배출물질에 가까이 노출될수록 개인별 노출량이 증가한다는 결론을 얻어냈다. 또한 영국 런던에서 추진된 연구에서는 자동차와 도보를 이용한 이동에서의 미세먼지 노출량을 비교하면서 도보로 이동할 경우 PM₁₀-PM_{2.5} 사이의 미세먼지에 노출되는 양이 자동차를 이용할 때와 비교해 약 4.7배 높다는 사실을 소개하면서 도보를 통한 이동 방법의 전환을 권장하는 환경정책이 성공하기 위해서는 교통수단들과 일정한 거리를 유지하는 통행로의 확보가 필요하다고 강조하였다.¹⁾

이와 유사한 제안들이 자전거를 이용할 경우에도 권고되고 있다. Hertel *et al.*(2008)⁴⁾은 혼잡한 도로 주변에 가까울수록 미세먼지에의 노출 위험이 커진다는 증거를 제시하며 교통수단을 이용한 이동 중 PM₁₀ 노출을 줄이기 위해서는 최단거리를 소개해주는 서비스와 마찬가지로 노출량이 적은 건강한 노선을 권장해주는 웹기반 서비스를 고안하여 통행자가 좀 더 건강한 노선을 선택할 수 있도록 도움을 줄 수 있는 정책적 고려가 가능할 것이라고 강조하였다. Thai *et al.*(2008)⁵⁾의 연구결과에서도 자전거를 이용해 다양한 노선으로 이동할 경우 미세먼지에 대한 노출량에 결정적인 영향을 미치는 변수는 건설 공사와 같은 노선 주변의 상황과 도로와의 접근 정도라고 분석하였다.

결국 이와 같은 연구 결과들은 버스나 기타 교통수단과 같은 미세먼지의 발생 소스에 접근할수록 미세먼지의 노출량이 증가할 수 있다는 사실을 증명하고 있다. 이 때, 통근 수단으로써 자전거를 이용하는 상황에 따라 다른 교통수단에 비해 훨씬 높은 수준의 미세먼지에 노출될 수 있으므로 자전거 이용을 활성화시키기 위해 별도의 자전거 도로를 만들 경우 기존 도로와 일정한 거리를 유지할 수 있도록 설계하는 고려가 필요하다는 것을 알 수 있다.

그러나 본 연구에는 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 버스와 자전거를 이용한 PM₁₀ 노출량 측정에 있어 동일한 시간대에 동시에 측정되지 못하였다는 점이다. 추

후 좀 더 많은 측정을 반복하거나 동시 측정이 이루어진다면 이와 같은 제한점은 극복될 수 있을 것으로 판단된다. 둘째, 본 연구에서는 SIDEPACK monitor라는 직독식 장비를 활용하여 노출량을 평가하였다. 직독식 장비를 정량적으로 활용하기 위해서는 우리나라의 도로환경에서 일반대기의 PM₁₀을 대상으로 증량법으로 평가한 결과와 동시에 비교하여 correction factor를 적용하는 것이 가장 정확하다. 그러나 본 연구에서는 correction factor까지 고려하지 못했다. 우리나라 도로환경에서의 correction factor를 평가하는 것은 별도의 연구과제로써 추가적인 의미가 있을 것이다. 그럼에도 본연구의 결과는 두 교통수단을 이용했을 경우의 PM₁₀ 노출량에 차이가 있으며 그것이 통계적으로 의미 있어 통근수단에 의한 노출량의 추이를 판단하는 데 의의가 있다고 하겠다.

V. 결 론

본 조사의 결과 우리는 다음과 같은 결론을 얻어낼 수 있었다.

첫째, 비슷한 노선을 이용할 경우, 자전거를 이용해 통근할 때 버스를 이용한 통근의 경우와 비교해서 PM₁₀ 농도는 약 3.1배, 통근수단에 의한 노출 기여만을 고려했을 때 약 3.5배, 그리고 통근 중 총 노출량은 약 2.6배 더 많았으며 이는 통계적으로 유의한 차이가 있었다.

둘째, PM₁₀ 노출은 온도 및 습도와 같은 대기조건보다는 대기 중 PM₁₀ 농도와 유의한 상관성을 갖고 있어 대기 중 PM₁₀ 농도에 직접적으로 노출되는 기회를 최소화해야 실제 노출되는 양을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

셋째, 본 조사의 연구결과와 외국의 연구결과를 종합해 볼 때 자전거 도로는 혼잡한 길을 피해 자동차 배출물질의 영향이 적은 노선을 고려할 필요가 있다.

자전거의 이용활성화를 위해 자전거 도로와 같은 인프라의 확장이 법제화를 통해 기정사실화 되어가고 있다. 그러나 새로운 계획안은 기존 도로를 이용하거나 가변차로를 이용하는 등, 본 연구의 결과에 근거해 예측하건데 자전거를 이용하여 통근하는 사람들의 PM₁₀ 노출량을 더욱 높일 가능성이 충분하다. 따라서 자전거 전용도로의 설계는 더욱 신중하게 고려될 필요가 있다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 보건대학원 노출평가개론 과목의 과제로 진행된 연구이다.

참고문헌

1. David, J. B., Kees de Hoogh, Morris, C., Gulliver, J. : Effects of travel mode on exposures to particulate air pollution. *Environmental International*, **34**, 12-22, 2008.
2. World Health Organization : Development of WHO Guidelines for Indoor Air Quality. Bonn Germany: World Health Organization Regional Office for Europe, 2006.
3. Zhao, L., Wang, X., He, Q., Wang, H., Sheng G., Chan, L. Y., Fu, J., Blake, D. R. : Exposure to hazardous volatile organic compounds, PM₁₀ and CO while walking along streets in urban Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, **38**, 6177-6184, 2004.
4. Hertel, O., Hvidberg, M., Ketzel, M., Storm, L., Stausgaard, L. : A proper choice of route significantly reduces air pollution exposure-A study on bicycles and bus trips in urban streets. *The Science of the Total Environment*, **389**, 58-70, 2008.
5. Thai, A., Mckendry, I., Brauer, M. : Particulate matter exposure along designated bicycle routes in Vancouver, British Columbia. *The Science of the Total Environment*, **405**, 26-35, 2008.
6. Adams, H. S., Nieuwenhuijsen, M. J., Colvile, R. N., McMullen, M. A., Khandelwal, P. : Fine particle (PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK. *The Science of the Total Environment*, **279**, 29-44, 2001.
7. Gee, I. L., Rapper, D. W. : Commuter exposure to respirable particles inside buses and by bicycle. *The Science of the Total Environment*, **235**, 403-405, 1999.
8. Rank, J., Floke, J., Per, H. J. : Differences in cyclists and car drivers exposure to air pollution from traffic in the city of Copenhagen. *The Science of the Total Environment*, **279**, 131-136, 2001.
9. Tsai, D.-H., Wu, Y.-H., Chan, C.-C. : Comparisons of commuter's exposure to particulate matters while using different transportation modes. *The Science of the Total Environment*, **405**, 71-77, 2008.