

# 도심 도로변 가로녹지가 주변 오픈스페이스의 미세먼지농도에 미치는 영향 연구<sup>1a</sup>

- 부산시청 광장을 대상으로 -

홍석환<sup>2</sup> · 강래열<sup>3</sup> · 안미연<sup>3\*</sup> · 김지석<sup>4</sup> · 정은상<sup>5</sup>

Study on the Impact of Roadside Forests on Particulate Matter between Road and Public  
Openspace in front of Building Site<sup>1a</sup>

- Case of Openspace of Busan City hall in Korea -

Suk-Hwan Hong<sup>2</sup>, Rae-Yeol Kang<sup>3</sup>, Mi-Yeon An<sup>3\*</sup>, Ji-Suk Kim<sup>4</sup>, Eun-Sang Jung<sup>5</sup>

## 요 약

본 연구는 도로변 선형의 가로녹지 구성이 고밀시가지 대로와 건물 사이에 조성한 보행로 및 오픈스페이스의 미세먼지 농도에 미치는 영향을 살펴보고자 부산시 중앙대로와 부산광역시청 건물 사이에 폭 약 70m로 조성된 오픈스페이스를 대상으로 연구를 진행하였다. 조사결과 가로녹지가 없는 지역의 경우 주중과 주말 모두 차도와 인접한 오픈스페이스의 농도차이가 미미하였으나, 반대로 가로녹지가 조성되어 있는 지역은 차도에 비해 오픈스페이스의 농도가 현저히 높음을 확인할 수 있었다. 특히 가로녹지가 조성된 지역은 차도와 보도 모두에서 미조성지역보다 미세먼지량이 높게 나타나고 있어 차도와 건축물 사이가 넓은 공간의 경우 가로녹지의 구성이 전체적으로 도로 밖 오픈스페이스의 미세먼지 농도를 높이는 효과를 보였으며, 특히 차도보다 오픈스페이스에 미치는 영향이 더 큰 것으로 확인되었다. 이러한 현상은 차량에 의해 발생한 미세먼지가 빠른 바람흐름에 의해 가로변 관목림을 통과하지만 바람흐름이 줄어든 보행공간에서는 확산이 이루어지지 않아 발생하는 것으로 판단되었다. 본 연구에서와 같이 넓은 오픈스페이스를 확보하고 있는 도심 도로변 지역의 경우에는 가로녹지가 오히려 바람에 의한 확산을 억제하여 하여 차량이동에 따른 부유 미세먼지를 녹지 내부에 가두어 보도를 포함한 오픈스페이스의 미세먼지 농도를 높이는 것으로 확인되었다. 도로에서 발생하는 미세먼지를 줄이기 위한 가로녹지의 구성에 있어 도로와 건물의 거리는 매우 중요하게 작용하는 것을 확인하였다.

주요어: 도로변 관목림, 바람흐름, 확산, 보행공간

## ABSTRACT

This study was conducted to examine the effects of constructing streetside urban forests on particulate matter (PM) content in pedestrian paths and open spaces created between the main streets and buildings in a high-rise,

1 접수 2018년 3월 15일, 수정 (1차: 2018년 4월 30일, 2차: 2018년 5월 22일), 게재확정 2018년 6월 14일

Received 15 March 2018; Revised (1st: 30 April 2018, 2nd: 22 May 2018); Accepted 14 June 2018

2 부산대학교 조경학과 Dept. of Landscape Architecture, Pusan National Univ., Miryang, 627-706, Korea

3 부산대학교 대학원 조경학과 Graduate School, Dept. of Landscape Architecture, Pusan National Univ., Miryang, 627-706, Korea

4 서울특별시 중부공원녹지사업소 공원여가과 Landscape Management Office, Jungbu Parks, Seoul, Korea

5 부산대학교 바이오환경에너지학과 Dept. of Bioenvironmental Energy, Pusan National Univ., Miryang, 627-706, Korea

a 이 과정은 2017년도 부산대학교 교수국외장기파견 지원비에 의하여 연구되었음.

\* 교신저자 Corresponding author: ahnmi0809@naver.com

high-density urban area. The study site is a 70m-wide open space between Busan City Hall and Jungang-street in Busan, Korea. The results showed that the density of PM differences between the open space and the adjacent main street were small in regions without linear trees and shrub rows during both the weekdays and weekend. On the other hand, the areas with linear trees and shrub rows were found to have significantly higher concentrations of PM compared to the roadway. In particular, sections with linear trees and shrub rows had higher PM levels both on roads and in adjacent open space, indicating that the composition of linear trees and shrub rows increased the concentration of PM in the off-street open space in areas with wide space between the roadway and building. The impact was more significant in the open space than the roadway. This phenomenon can be explained by the fact that PM generated by vehicles flows through the roadside shrubs by rapid wind flow but does not disperse widely in the pedestrian paths where the wind flow was reduced. In this study, we found that the roadside tree and shrub walls slowed the flow of wind, causing vehicle-emitted PM to accumulate if a wide open space was created between the road and building, resulting in higher concentration of PM in the open space. We confirmed that the distance between the road and building was a critical factor for constructing linear trees and shrub rows to reduce PM generated by vehicle traffic.

**KEY WORDS : ROADSIDE SHRUBS, WIND FLOWS, WIDESPREAD, PEDESTRIAN PATH**

## 서론

도심에서 급격히 증가하는 각종 만성질환의 원인으로 신체활동의 축소가 일정부분 차지한다는 연구결과는(e. g. Allender *et al.*, 2008; Vlahov and Galea, 2002) 건강한 신체활동 유도를 위한 도시구조 변경 당위성을 높이고 있다. 그러나 기 조성된 도시의 획기적 구조개선은 현실적으로 어려우므로 최근 보행환경 및 건물 주변 오픈스페이스의 휴게기능 개선을 통해 일상의 신체활동 증진을 꾀하는데 많은 관심을 보이고 있다. 실제 도심에서 단순하게 실천할 수 있는 걷기와 같은 신체활동이 비만이나 당뇨병, 심혈관 질환 등의 각종 성인병뿐만 아니라 우울증이나 스트레스와 같은 정신건강의 개선에 효과가 있음이 증명되면서(e.g. Camacho *et al.*; 1991; Shiroma and Lee, 2010) 건물 외부 공간으로의 신체활동 유도에 높은 관심을 보이고 있다(Pikora *et al.*, 2003).

미세먼지는 각종 질환을 유발하는데, 대표적으로 호흡기 질환과 심혈관질환 발병율을 높이는 것으로 보고되고 있다. 질병관리본부는 미세먼지(PM<sub>10</sub>)의 농도가 10 $\mu\text{m}^3$  증가할 때마다 만성 폐쇄성폐질환으로 인한 사망률은 1.1% 증가하고, 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)에 장기간 노출될 경우 심근경색과 같은 허혈성질환의 사망률이 30~80% 증가된다고 하였다(Jang *et al.*, 2017). 또한 초미세먼지 농도가 5 $\mu\text{m}^3$  상승할 때마다 폐암 발생 위험은 18% 증가하며, 조기 사망 확률이 7%씩 증가하고 일반 미세먼지가 10 $\mu\text{m}^3$  상승할 때마다 폐암 발생 위험은 22% 증가하는 것으로 보고되고 있다. 특

히 환경에 민감한 임산부에게 미치는 영향이 치명적으로, 미세먼지 농도가 10 $\mu\text{m}^3$  상승할 경우, 기형아를 출산할 확률이 최대 16%나 높아지며 저체중아 출산율과 조산사산율도 각각 5.2%와 7.4%씩 증가하고, 임신 4~9개월 사이의 사산 위험도 8.0~13.8%까지 증가하는 것으로 보고된 바 있다(Raaschou-Nielsen *et al.*, 2013). 어린이의 경우에는 미세먼지가 42.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하는 경우에 영아 사망률이 14.2%나 증가하는 것으로 연구되기도 하였다(Ha *et al.*, 2003).

도로변 미세먼지는 도시의 일반적 미세먼지와는 달리 차량의 타이어, 에너지 소모로 인해 발생하는 미세먼지와 금속성 물질 등 차량이용에 따른 먼지들이 도로 바닥에 축적되고 이들 먼지가 차량이동에 의한 돌풍을 따라 도로변으로 이동하여 도로변을 이용하는 사람들에게 영향을 주게 된다. Matzka and Maher (1999)는 소규모 공업도시를 대상으로 한 연구에서 도로변에서 자라는 나무들, 특히 도로와 접한 수목과 도로 상부사면에서 자라는 수목들이 도심 내 공원에서 자라는 나무에 비해 훨씬 높은 전기저항성을 보임을 밝혀 같은 도시에서도 도로변이 훨씬 많은 금속성 미세먼지의 영향을 받는 것을 확인한 바 있다. 이후 많은 다양한 연구에서 공장지대가 없는 도심에서도 도로가 금속성 미세먼지의 주된 원인임이 밝혀지고 있으며, 고밀도심, 특히 도로와 접한 공간에서 금속성 미세먼지량이 높게 나타난다는 결과들이 다양하게 보고되었다(e. g. Muxworthy *et al.*, 2002; Moreno *et al.*, 2003; Hanesch *et al.*, 2003; Sadeghian, 2012). 이러한 도로변의 높은 미세먼지량은 쾌적한 휴식을 위해 조성된 도로변 녹지에서의 휴식이 반대로 건강에 부정

적 영향을 미칠 수도 있을 것으로 추정할 수 있다. 이러한 이유로 높은 교통량에 의해 상대적으로 미세먼지 농도가 현저히 높은 지역인 고밀도심의 도로변 보행 활성화 및 휴게공간 조성에 있어 미세먼지는 심각히 고려되어야 할 요소 중 하나가 되어야 한다.

일반적으로 도시녹지가 미세먼지 저감에 매우 효과적이라는 것이 통념적 생각이었는데, 지엽에 의한 미세먼지 흡착량이나 중금속 등 오염물질의 흡수량이 극히 미미하여 최근 이에 대한 검증요구가 꾸준히 제기되어왔다. 도로 바닥면에 쌓여있는 미세먼지는 차량이동 시 발생하는 바람에 의해 도로 주변으로 빠르게 전달되는데, 현재 가로녹지는 미세먼지 자체의 흡착을 통한 저감효과보다는 도로에 쌓인 재비산먼지의 이동을 차단하는 차단막 역할로 인식되고 있다. 그러나 가로변 녹지에 의한 미세먼지 차단 효과는 현장 측정의 어려움으로 인해 주로 모델링을 이용한 분석(eg. Tong *et al.*, 2015; Gromke *et al.*, 2016; Hagler *et al.*, 2011)이 진행되었으나 모델링의 한계로 인해 미세먼지 차단 역할을 명확히 제시하지는 못하고 있었다. 구체적으로 살펴보면 Nowak and Crane(2000)이 가로녹지의 미세먼지 차단효과 모델링을 만든 이후 해당 모델링을 활용한 여러 연구가 가로녹지의 미세먼지 차단효과가 매우 높음을 제시한 반면, 해당 연구들에 대한 Pataki *et al.*(2011)의 문제제기 이후 Vos *et al.*(2013)는 다른 모델링을 적용하여 가로녹지가 미세먼지의 확산을 막아 도로변 미세먼지량을 증가시킨다는 정반대의 결과를 제시하면서 현장측정을 통한 검증 필요성을 강조하였다. 이러한 전적으로 상반되는 모델링 연구의 결과와 현장측정에 대한 요구에도 불구하고, 복잡하고 다양한 환경변화를 통제하기 어려운 현장측정 여건상 현재까지 고밀도심에서 현장측정을 통한 가로변 미세먼지와 수목의 관계 연구는 찾아볼 수 없는 실정이다.

이에 본 연구는 도심 내에서 건물과 도로 사이 조성된 휴게공간을 대상으로 일반적으로 도로변에 조성하고 있는 선형의 관목림이 차량통행에 의해 발생하는 재비산먼지 중심의 미세먼지 저감에 효과가 있는지를 현장측정을 통해 확인하고자 하였다.

## 연구방법

### 1. 연구대상지

연구대상지는 부산광역시청과 경찰청, 부산시의회 건축물과 왕복 8차선의 부산대로 사이의 오픈스페이스를 대상으로 하였다. 부산광역시청은 1998년에 부산광역시의 대표적 고밀도심 중 한 곳인 연제구 연산동 왕복 8차선인 중앙대

로와 접하여 조성하였다. 청사는 시의회와 경찰청과 함께 조성하면서, 중앙대로와 건물 사이에 시민광장과 동백광장을 조성하여 건축물과 중앙대로 사이에는 보행공간을 포함하여 약 70m의 오픈스페이스 공간을 확보하여 일반적으로 고밀도심의 건축물이 도로와 연결하여 조성되는 환경과는 차이가 있는 지역이다. 오픈스페이스는 도로와 접하여 보행을 위한 공간과 휴식과 집회 등의 활동을 위한 광장, 녹지로 구성되어 있다. 버스정류장 구간을 제외하고 차도와 보도 사이에는 시각적, 물리적 차단을 위해 지엽이 치밀한 꽃대강나무와 남천, 철쭉이 폭 6m, 높이 2m로 식재되어 가로녹지대가 양호하게 조성되어 있는 공간이다.

최근 정부의 미세먼지 발생요인 연구결과는 공장지역의 발생량이 41%이었고 다음으로 자동차에서 배출되는 배기가스가 29%로 높은 비율을 차지하였는데, 본 조사대상지는 반경 10km이내의 가까운 지역에 대규모 공업지대가 위치하고 있으며 교통량이 많은 왕복 8차선의 중앙대로가 지나가는 지역으로 상대적으로 높은 미세먼지량을 보이는 지역으로 볼 수 있었다.

본 연구에서는 도로와 건축물 사이 오픈스페이스에 조성되는 선형의 관목림이 도로변 가로의 미세먼지 농도에 어떠한 영향을 미치는지 확인하고자 도로와 오픈스페이스 사이 가로녹지가 조성된 공간과 조성되지 않은 공간의 미세먼지 농도를 조사하여 분석하였다. 세부 조사지점은 경찰청 앞 도로변으로 양호한 가로녹지 조성지역 사이 차량진입을 위한 공간에 가로녹지가 없는 지역으로 두 지점간 거리는 30m로 설정하였다. 두 공간 사이에는 가로녹지 외 다른 고정시설물이나 점유물은 없는 상태였다. 세부 가로녹지 현황을 살펴보면 차도와 보도 사이에 6m폭의 관목림이 조성되어 있으며, 보도에는 느티나무 가로수가 2열로 식재된 지역이다. 관목림의 경우 전체 폭 6m 중 약 2m 폭으로 꽃대강나무와 남천이 2m 높이로 식재되어 있었으며, 나머지 4m 폭에는 철쭉이 약 1.6m 높이로 식재되어 있는 지역이다. 보도에 2열로 식재된 느티나무 가로수는 평균 수고 8m이었으며, 수관폭 8mx8m로 전반적인 생육상태는 양호하였다.

조사는 가로녹지 외 복잡하고 다양한 외부환경변수의 영향을 최대한 억제하기 위해 동일기종의 미세먼지측정기 4대를 비교지역의 차도와 보도 각 지점에 동시에 설치하여 같은 시간의 데이터를 수집하였다. 재비산먼지의 영향을 비교하기 위해 현장조사는 차량통행량이 크게 차이를 보이는 평일과 휴일을 구분하여 각각 실시하였다.

### 2. 대상지 일반적 개황

조사대상지인 부산광역시청에 인접한 대기오염측정망(Air Pollution Measurement Network; APMN) 인 연산동

부산광역시청 내 광장, 조사대상지에서 약 3km 떨어진 온천동 동래지하철 3번 출구 맞은편(온천동 700-4번지 일원)과 전포동 경남공업고등학교의 미세먼지 자료를 비교하였다. 조사대상지와 접한 연산동은 주말에 비해 주중 미세먼지농도가 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 모두 주말에 비해 약 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도 높은 수치를 보여 주중과 주말의 차이가 높게 나타났으며 전포동 또한 유사한 결과를 보였다. 온천동의 경우 주중의 미세먼지량이 주말보다 높기는 하였으나 그 차이가 PM<sub>2.5</sub>의 경우 다른 지역의 절반 수준이었으며 PM<sub>10</sub>은 주중과 주말의 차이가 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 적었다. 연구대상지 주변으로 전반적인 도심 미세먼지 농도는 PM<sub>2.5</sub>는 주중 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 주말 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도이었으며 PM<sub>10</sub>은 주중 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 주말 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  정도이었다.

세계보건기구(WHO)가 제시하고 있는 미세먼지 안전 권고기준은 24시간 평균을 기준으로 PM<sub>2.5</sub>는 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 PM<sub>10</sub>은 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 해당 지역 및 주변은 해당 농도에 비해 매우 높은 수준으로 형성되고 있음을 확인할 수 있었다.

Table 1. Average APMN data value of Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>) near the survey site

Date	APMN Location	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Weekend (2017.09.24.)	Yoensan-dong1	38.3	76.9
	Oncheon-dong2	42.3	74.0
	Jeonpo-dong3	45.0	70.6
Weekday (2017.09.25.)	Yoensan-dong1	47.3	88.9
	Oncheon-dong2	48.7	75.9
	Jeonpo-dong3	55.7	80.4

※ 1: 0.3km, 2: 2.7km, 3: 3.3km from the survey site

### 3. 미세먼지 측정 및 분석

가로녹지를 제외한 주변 환경이 동일하다고 판단되는 인접한 4개 조사지점을 대상으로 각 조사지점에서 차도와 인접한 오픈스페이스의 미세먼지 농도를 측정하기 위해 보차도 경계선을 기준으로 차도방향 50cm 지점과 3m 폭으로 조성된 띠녹지를 기준으로 보도방향 1.5m 지점에 미세먼지 농도 측정기를 각각 동시에 설치하여 도로 내 측정위치와 오픈스페이스 내 측정위치간 거리를 10m가 되도록 하여 측정하였다. 미세먼지 측정에는 CEM partiel counter (DT-9881M; 5% coincidence loss) 4대를 동시에 사용하여 2.5 $\mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>), 10 $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) 크기의 미세먼지를 동시에 측정하였고, 측정 높이는 보행자의 호흡을 고려하여 1.5m높이에서 질량농도 (mass concentration)를 측정하였다. 측정을 위한 Sampling time은 공기 1 $l$ 을 흡수하는 시간인 22초 (1.0347 $l$ )로 설정

하여 각 1분 간격으로 한 장소에서 200회씩 반복 측정하였다. 측정기기 설치 및 조작 이후 조사자가 현장에 머무르는 초기 및 기기 제거를 위한 이동 등의 변수를 제거하기 위해 최초 10회, 마지막 10회의 측정기록은 분석에서 제외하고 각 공간별 180회씩의 측정결과를 분석에 활용하였다. 일반적으로 미세먼지량은 1일 측정자료의 평균값을 사용하게 되는데, 본 연구는 거시적 관점에서 다루는 다른 지역과의 평균적인 오염농도 비교가 아닌 미시적 관점에서 동일시간대 동일공간의 상대적 미세먼지량을 비교측정하기 위한 것으로 단시간 동시측정 방법을 사용하였다.

비록 동일지역이라 하더라도 조사위치의 차량속도나 보행자에 의한 환경변화, 기 측적된 미세먼지량 등 현장에서 발생하는 미세하고 복잡한 변수의 제어는 현실적으로 가능하지 않으므로 4개 조사지점을 대상으로 동일시간에 데이터를 측정하여 통계량을 비교분석하였다. 현장조사는 주변의 전반적인 미세먼지농도에 따른 차이가 있는지를 살펴보기 위해 차량통행량이 비교적 적은 주말과(2017년 9월 24일) 차량통행이 많은 주중(2017년 9월 25일) 각 1일씩 조사를 실시하였다. 대기 중 미세먼지가 바람세기에 영향을 많이 받을 수 있어 조사일은 예보상 풍속이 낮은 날을 선정하였는데, 부산기상관측소(부산광역시 중구 대청로 1가)의 지상기상관측 결과를 살펴보면 바람세기는 일평균풍속은 24일 2.0m/s, 25일 2.6m/s이었고 최대순간풍속은 24일 6.7m/s, 25일 8.0m/s이었다. 이는 9월 하순 10일간의 대상지 평균풍속 2.4m/s, 순간최대풍속 8.5m/s이었는데 조사일은 이를 모두 비교적 바람세기가 크지 않은 안정된 시기로 볼 수 있었다. 지점별 미세먼지량의 통계적 차이를 살펴보기 위해 IBM SPSS Statistcs 23프로그램을 이용하여 집단별 평균분석을 실시하였다.

기존 대기오염측정망 미세먼지 자료와 현장조사 자료를 비교하기 위해 시청 건물에 의해 도로와 분리된 부산광역시청 녹음광장의 대기오염측정망을 참조하였다. 대기오염측정망은 1시간 단위로 미세먼지 농도를 측정하고 있어 현장조사가 진행된 6시간(8시~13시)동안의 자료를 평균하여 비교하였는데, 데이터 획득을 위한 측정시간 및 방법의 차이



Figure 1. Location of study site

로 참고적 수치만 비교하였으며 통계분석은 실시하지 않았다. 아울러 조사대상지와 부산시 주변 지역의 대기오염 측정데이터를 비교하여 조사대상지의 일반적 미세먼지 농도를 비교하여 살펴보았다. 고정측정지점은 Figure 1에서 보이는 바와 같이 도로에 의한 직접적인 영향은 미미한 지역이다.

## 결과 및 고찰

### 1. 미세먼지 측정 결과

본 조사대상지는 고밀 도심의 한가운데에 위치하고 있으며 주변이 주로 업무상가지역으로 구성되어 있는 만큼 주중과 주말의 교통량이 많은 차이가 있으며, 약 10km정도 거리를 두고 대규모 공업단지가 입지하고 있어 공장 가동여부에 따른 미세먼지 영향 또한 있을 것으로 판단되었다.

총 180회씩의 데이터 분석결과 주변 미세먼지농도가 전반적으로 낮은 주말의 경우 가로녹지가 조성되지 않은 지역은 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>이 도로와 보도에서 모두 WHO 일평균 권고기준 이하의 양호한 수치를 보였고 도로지역이 상대적으로 다소 높은 미세먼지량을 기록하고 있었다. 가로녹지 조성지역의 경우에도 비교적 양호한 수치를 보였는데, 보행로의 PM<sub>10</sub>수치가 WHO 기준을 상회하는 58.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 값을 보였다. 가로녹지 조성지역의 경우 미조성지역과는 달리 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 모두 보행로가 도로보다 높은 값을 보였고 전반적으로도 가로녹지 미조성지역에 비해 다소 높은 미세먼지농도를 보였다. 다만 농도의 변동폭은 모두 도로가 높게 나와 차량이동에 의한 도로의 바람흐름 변화가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

주변 미세먼지농도가 상대적으로 높고 도로교통량이 많

은 주중의 미세먼지농도는 주말에 비해 매우 높게 형성되고 있음이 확인되었는데, 조사한 모든 지역에서 WHO 일평균 권고기준을 훌쩍 넘는 값을 보였다. 특히 보행로의 PM<sub>10</sub>은 WHO 권고기준의 두 배가 넘는 102.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 값을 보였다. 단, WHO의 권고기준은 1일 평균값으로 본 조사가 야간에 비해 상대적으로 미세먼지농도가 높은 주간조사결과임을 감안해야 하지만, 주중과 주말의 미세먼지농도가 모든 지역에서 평균적으로 주중이 약 두 배 정도 높아 주중 도로변 미세먼지 저감을 위한 적극적 대책이 필요한 것으로 판단되었다.

조사결과 주변 대기의 전반적인 미세먼지농도가 가로녹지와 차량에 의한 재비산먼지 관계에 영향을 주지는 않았다. 차도와 보행로의 미세먼지량 차이의 경우 가로녹지가 없는 지역은 주중과 주말 모두 차도와 보행로의 미세먼지량이 거의 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었으며 반대로 가로녹지가 조성되어 있는 지역의 경우에는 차도에 비해 보행로의 미세먼지량이 높아짐을 확인할 수 있었다. 특히 가로녹지가 조성된 지역은 차도와 보도 모두에서 미조성지역보다 미세먼지량이 높아 차도와 건축물 사이가 넓은 공간의 경우 가로녹지의 조성이 도로변 공간의 미세먼지농도를 높이는 효과를 보이며, 특히 보행로에 미치는 부정적 영향이 훨씬 강하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 차량에 의해 발생한 미세먼지가 빠른 바람흐름에 의해 가로변 관목림을 통과 또는 벽을 타고 넘어가지만 바람세기가 줄어든 보행공간에서는 도로로부터 옮겨온 미세먼지의 확산이 원활히 이루어지지 않아 발생하는 것으로 판단할 수 있었다.

인접한 대기오염측정망 자료와는 주말의 경우 주중, 주말 모두 도로변 측정자료가 훨씬 낮은 값을 보였으나 주중과 주말의 차이값은 전반적으로 유사하였다. 이러한 결과는 측정위치뿐만 아니라 측정기계 및 측정방식, 측정 높이 등 다양한 변수가 영향을 준 것으로 판단되는데 향후 다양한 관

Table 2. Average value of Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>) in the survey site

Date	Location*	Sample N.	PM <sub>2.5</sub>		PM <sub>10</sub>	
			Pedestrian (max/low)	Road (max/low)	Pedestrian (max/low)	Road (max/low)
Weekend (2017.09.24.)	A	180	16.2 (11/20)	17.8 (9/30)	39.3 (24/65)	47.3 (22/91)
	B	180	20.5 (15/28)	19.0 (14/60)	58.0 (35/96)	43.9 (27/134)
	C	6	29.8		67.7	
Weekday (2017.09.25.)	A	180	39.8 (26/53)	36.4 (25/60)	77.6 (50/111)	76.7 (45/134)
	B	180	44.3 (33/58)	39.6 (25/54)	102.2 (72/143)	80.8 (51/121)
	C	6	50.2		99.2	

\* A: non shrubs, B: shrubs, C: APMN data (Yoensan-dong(6hour: 08:00~13:00))

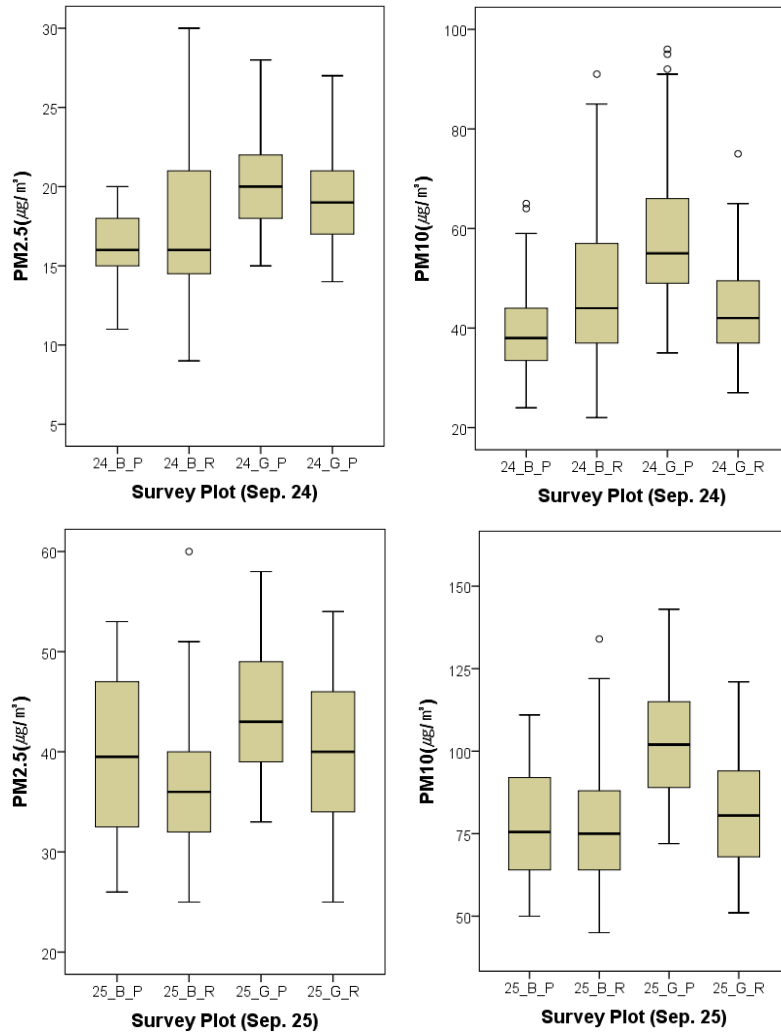


Figure 2. Box plot comparison of PM<sub>2.5</sub>(top) and PM<sub>10</sub>(bottom) of each survey plot. (\*24: date, B: without tree and shrub, G: tree and shrub, R: road, P: pedestrian path)

점에서의 보완연구가 필요한 것으로 판단되었다. 특히 가로 녹지의 유형과 배치형태 등에 따른 차이를 면밀하게 분석할 필요가 있었다.

본 대상지는 도심에서 도로와 건축물이 멀리 떨어져 있어 넓은 오픈스페이스를 형성하고 있는 지역으로 건축물과 도로가 연결한 일반적 고밀도심과는 바람흐름 측면에서 많은 차이가 있을 것이다. 따라서 넓은 오픈스페이스를 확보하고 있는 지역의 경우에는 가로녹지가 오히려 바람흐름을 완만하게 하여 차량이동시 부유하는 미세먼지 확산을 정체시키는 역할을 하는 것으로 판단할 수 있었다. 이는 건물이 없는 오픈스페이스에서 좁고 낮게 조성한 완충녹지대가 미세먼지 농도를 줄이지 못하는 기존 연구(Gromke *et al.*, 2016)와 동일한 결과로 오히려 시민들의 건강에 부정적 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 가로녹지의 경우 분명 미세먼지를

흡착하여 대기 중 먼지 총량을 줄이는 효과는 있으나 본 연구에서와 같이 대기흐름이 원활하지 않은 공간에서는 확산을 막아 지엽적으로 미세먼지농도를 높일 수도 있다. 이에 도심에서 녹지의 다양한 배치방식의 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

## 2. 미세먼지농도비교 및 종합고찰

미세먼지농도가 비교적 낮은 주말에 수집한 4개 지점의 미세먼지농도에 대한 Levene의 분산 동질성 검증결과 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 모두 신뢰도 99%수준에서 동질성이 인정되지 않았다. 도로변 미세먼지의 경우 차량통행에 따른 돌발적이며 일시적인 수치 상승이 불규칙적으로 일어나며, 가로 녹지 유무에 따른 공기흐름 변화가 큰 것이 이분산의 이유

Table 3. Result of Levene test for equality of variances (Sep. 24)

	Levene statistic	df1	df2	Sig.
PM <sub>2.5</sub>	31.911	3	716	.000
PM <sub>10</sub>	20.395	3	716	.000

Table 4. Result of Welch's robust test for means (Sep. 24)

	Statistic	df1	df2	Sig.
PM <sub>2.5</sub>	97.058	3	375.385	.000
PM <sub>10</sub>	100.630	3	384.969	.000

Table 5. Result of Games-Howell's multiple comparison (Sep. 24)

Dependent variable	(I)NO	(J)NO	I - J	Std. Err.	Sig.
PM <sub>2.5</sub>		B_R	-1.6111*	.3834	.000
	B_P	G_P	-4.3056*	.2613	.000
		G_R	-2.8667*	.3499	.000
	B_R	G_P	-2.6944*	.4164	.000
		G_R	-1.2556	.4770	.044
PM <sub>10</sub>	G_P	G_R	1.4389*	.3857	.001
		B_R	-8.0056*	1.2250	.000
	B_P	G_P	-18.7333*	1.0891	.000
		G_R	-4.6444*	1.0225	.000
	B_R	G_P	-10.7278*	1.4314	.000
		G_R	3.3611	1.3814	.073
	G_P	G_R	14.0889*	1.2625	.000

\* $p < 0.01$ 

B: without tree and shrub, G: tree and shrub, R: road, P: pedestrian path

Table 6. Result of Levene test for equality of variances (Sep. 25)

	Levene statistic	df1	df2	Sig.
PM <sub>2.5</sub>	14.446	3	716	.000
PM <sub>10</sub>	0.111	3	716	.954

로 추정되었다. 이분산데이터의 검증을 위한 Welch의 평균 차이 분석결과 신뢰도 99%수준에서 유의하여 각 지점의 미세먼지량 평균값이 유의미한 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 집단 간 평균차이 분석을 위해 Games-Howell방법을 적용한 결과, 유의확률 0.01 수준에서 PM<sub>2.5</sub>는 가로녹지가 조성되지 않은 곳의 보도가 가장 낮았으며, 반대로 가로녹지가 조성된 지역의 보도가 가장 높았다. 도로의 경우 두 지점의 미세먼지농도 차이가 통계적 유의성이 인정되지 않았다. PM<sub>10</sub>도 유사한 경향으로 가로녹지 미조성지역의 보

도가 가장 낮았고 가로녹지 조성지역의 보도가 가장 높았다. 다만 도로는 가로녹지 미조성지역의 미세먼지농도가 통계적으로 유의미하게 조성지역보다 높았으나 차이는 많지 않았다.

주중인 25일 미세먼지 값에 대한 Levene의 등분산 분석결과 PM<sub>2.5</sub>는 분산의 동질성이 인정되지 않았으며 PM<sub>10</sub>은 인정되었다. PM<sub>2.5</sub>에 대한 Welch 분석결과 신뢰도 99%수준에서 유의하여 집단 간 평균차이 분석을 위해 Games-Howell의 사후분석을 실시하였다. 분석결과 신뢰도 99%수준에서

Table 7. Result of Games-Howell's multiple comparison (Sep. 25)

Dependent variable	(I)NO	(J)NO	I - J	Std. Err.	Sig.
PM <sub>2.5</sub>		B_R	3.4389*	.6937	.000
	B_P	G_P	-4.4444*	.7026	.000
		G_R	.2667	.7500	.985
	B_R	G_P	-7.8833*	.6114	.000
		G_R	-3.1722*	.6652	.000
	G_P	G_R	4.7111*	.6746	.000

\*p<0.01

B: without tree and shrub, G: tree and shrub, R: road, P: pedestrian path

Table 8. Duncan's Post-Hoc test result for PM<sub>10</sub> (Sep. 25)

	df.	G1	G2	G3
B_R	180	76.744		
B_P	180	77.556	77.556	
G_R	180		80.811	
G_P	180			102.156
Sig.		.631	.054	1.000

가로녹지 미조성지역의 보도와 가로녹지가 조성된 도로의 미세먼지량이 낮았고 가로녹지 조성지역의 보도가 통계적으로 가장 높은 집단으로 구분되었다. 분산의 동질성이 인정된 PM<sub>10</sub>은 일원배치분산분석결과 F값이 101.422로 신뢰도 99%수준에서 집단 간 차이가 인정되었다. 집단 간 차이를 확인하기 위해 Duncan의 사후검정을 실시하였는데, 분석결과 가로녹지 조성지역 보도의 미세먼지량이 다른 3개 집단보다 높은 것으로 확인되었다. 나머지 3개 집단은 통계적으로 동질의 집단으로 구분되었다.

이상의 집단 간 통계적 차이 분석결과 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 모두 가로녹지 조성지역의 보도가 주변의 다른 공간에 비해 현저히 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 도심내 건물과 도로 사이가 넓은 보도 및 오픈스페이스의 경우 도로변에 차도와 보도의 분리를 위해 조성하는 관목림과 가로수가 외부 바람의 흐름을 방해하여 차량이동에 의해 발생하는 재비산 미세먼지를 보도 및 휴게공간 내에 오랫동안 정체시키는 역할을 하는 것으로 판단할 수 있었다. 이러한 결과는 인근에 수직적 장애물이 없는 고속도로 오픈스페이스의 미세먼지 완화 효과를 위해서는 가로녹지가 매우 조밀하면서 높고 넓게 조성되어야 함을 제시한 Gromke *et al.*(2016)의 연구와 같은 맥락으로 이해할 수 있다. 요약하면 고밀 도심에서 도로와 건축물 사이의 공간이 넓게 확보된 광장이나 공개공지, 광복의 보도 등의 경우 가로변에 조

성하는 녹지대는 보행공간 및 휴게공간에 미세먼지를 축적시켜 상대적으로 좋지 않은 공기질을 형성할 가능성이 높으므로 차량이동에 의해 발생하는 바람이 도로 밖으로 원활하게 빠져나갈 수 있도록 유도하는 것이 미세먼지 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

그간 차도변 녹지와 미세먼지와 관계성에 관한 모델링 연구들이 상반된 결과를 보이면서 모델링 연구자들에 의해 현장조사의 중요성이 강조되었는데, 이번 차도와 건물의 사이가 넓은 오픈스페이스에서 실시한 현장연구에서는 가로녹지가 차량에 의한 재비산먼지의 차단효과보다는 이입된 먼지의 외부확산 억제로 인해 보행로라는 지엽적 측면에서는 긍정적 효과가 없는 것으로 확인되었다. 그러나 본 연구는 복잡한 도심환경의 한 사례로써 종합적 결론을 위해서는 다양한 여건의 환경에서 추가적인 현장검증이 필요할 것으로 판단되었다. 아울러 향후 차량통행에 따른 재비산먼지의 이동과 관계된 연구 또한 필요하겠으며, 주변 건축물의 역할 등 보다 다양한 연구자료의 축적이 필요할 것으로 판단된다. 도시녹지는 도심 미세먼지의 총량을 줄여주는 효과는 명백하다. 그러나 국지적으로 농도를 증대시킬 수 있으므로 향후 녹지의 배치와 관련한 연구가 다양하게 수행될 필요성이 있었다.



## REFERENCES

- Allender, S., C. Foster, L. Hutchinson and C. Arambepola(2008) Quantification of urbanization in relation to chronic diseases in developing countries –a systematic review-. *Journal of Urban Health* 85(6): 938-951.
- Camacho, T.C., R.E. Roberts, N.B. Lazarus, G.A. Kaplan and R.D. Cohen(1991) Physical activity and depression – evidence from Alabama Count study-. *American Journal of Epidemiology* 134(2): 220-231.
- Gromke, C., N. Jarnack and B. Ruck(2016) Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 139: 75-86.
- Ha, E.H., J.T. Lee, H. Kim, Y.C. Hong, B.E. Lee, H.S. Park and D.C. Christiani(2003) Infant susceptibility of mortality to air pollution in Seoul, South Korea. *Pediatrics* 111(2): 284-374.
- Hagler, G.S.W., W. Tang, M.J. Freeman, D.K. Heist, S.G. Perry and A.F. Vette(2011) Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment* 45(15): 2522-2530.
- Hanesch, M., R. Scholger and D. Rey(2003) Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves. *Atmospheric Environment* 37(36): 5125-5133.
- Jang, I.S., J.B. Lee and I.S. Seo(2017), Fine dust on entering life. *Korean Society of Hazard Mitigation* 17(3): 6-12. (in Korean)
- Matzka, J. and B.A. Maher(1999) Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates. *Atmospheric Environment* 33(28): 4565-4569.
- Moreno E., L. Sagnotti, J. Dinares-Turell, A. Winkler and A. Cascella(2003) Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves. *Atmospheric Environment* 37(21): 2967-2977.
- Muxworthy, A.R., E. Schmidbauer and N. Petersen(2002) Magnetic properties and Mössbauer spectra of urban atmospheric particulate matter: a case study from Munich, Germany. *Geophysical Journal International* 150(2): 558-570.
- Nowak, D.J. and D.E. Crane(2000) The urban forest effects (UFORE) model: quantifying urban forest structure and functions. In: Hansen, M., T. Burk(Eds) *Integrated tools for natural resources inventories in the 21st Century*. Proceedings of the IUFRO Conference. USDA Forest Service General Technical Report NC-212, pp. 714-720.
- Pataki, D.E., M.M. Carreiro, J. Cherrier, N.E. Grulke, V. Jennings, S. Pincetl, R.V. Pouyat, T.H. Whitlow and W.C. Zipperer (2011) Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(1): 27-36.
- Pikora, T., B. Giles-Corti, F. Bull, K. Jamrozik and R. Donovan (2003) Developing a framework for assessment of the environmental determinants of walking and cycling. *Social Science & Medicine* 56(8): 1693-2396.
- Raaschou-Nielsen, O., Z.J. Andersen, R. Beelen, E. Samoli, M. Stafoggia, G. Weinmayr, B. Hoffmann, P. Fischer, M.J. Nieuwenhuijsen, B. Brunekreef, W.W. Xu, K. Katsouyanni, K. Dimakopoulou, J. Sommar, B. Forsberg, L. Modig, A. Oudin, B. Oftedal, P.E. Schwarze, P. Nafstad, U. Faire, N.L. Pedersen, C. Östenson, L. Fratiglioni, J. Penell, M. Korek, G. Pershagen, K.T. Eriksen, M. Sørensen, A. Tjønneland, T. Ellermann, M. Eeftens, P.H. Peeters, K. Meliefste, M. Wang, B. Bueno-de-Mesquita, T.J. Key, K. Hoogh, H. Concin, G. Nagel, A. Vilier, S. Gironi, V. Krogh, M.Y. Tsai, F. Ricceri, C. Sacerdote, C. Galassi, E. Migliore, A. Ranzi, G. Cesaroni, C. Badaloni, F. Forastiere, I. Tamayo, P. Amiano, M. Dorransoro, A. Trichopoulou, C. Bamia, P. Vineis and G. Hoek(2013) Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE). *The Lancet Oncology* 14(9): 813-822.
- Sadeghian, M. M.(2012) Biomonitoring of vehicles derived particulate matter using magnetic properties of *Ulmus carpinifolia* leaves. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 4(16): 1180-1183.
- Shiroma, E.J. and I.M. Lee(2010) Physical activity and cardiovascular health: lessons learned from epidemiological studies across age, gender, and race/ethnicity. *Circulation* 122(7): 743-752.
- Tong Z., R.W. Baldauf, V. Isakov, P. Deshmukh and K.M. Zhang(2015) Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Science of the Total Environment* 541: 920-927.
- Vlahov, D. and S. Galea(2002) Urbanization, urbanicity, and health. *Journal of Urban Health* 79(4): 1-12.
- Vos, P.E.J., B. Maiheu, J. Vankerkom and S. Janssen(2013) Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution* 183: 113-122.