

서울 청량리 교통섬과 홍릉숲의 미세먼지 특성과 저감효과 평가^{1a}

김평래² · 박찬열^{3*}

Evaluation of Particulate Matter's Traits and Reduction Effects in Urban Forest, Seoul^{1a}

Pyung-Rae Kim², Chan-Ryul Park^{3*}

요약

도시 교통섬과 도시숲 내부에서 미세먼지 농도와 영향 인자를 조사하여 숲의 미세먼지 효과를 분석하였다. 서울시 동대문구 홍릉시험림(도시숲)과 동대문구 청량리역 교차로에 조성된 숲(교통섬)에서 미세먼지 농도를 2018년 1월부터 11월까지 광산란법 기기를 적용하여 측정하였다. 연구 기간 동안 도시숲과 교통섬의 PM₁₀ 평균농도는 12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 15.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났으며, PM_{2.5}의 평균농도는 6.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 6.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 환경부 도시대기 측정망과 도시숲의 농도를 비교해본 결과, PM₁₀의 저감율은 도시숲에서 66.9±28.6%, 교통섬에서 58.6±44.1%로 나타났고, PM_{2.5}의 경우 71.3±23.0%, 64.9±31.3%로 각각 나타났다. 미세먼지 저감율의 차이는 도시숲의 규모와 구조의 차이와 관련이 있을 것이며, 풍속은 저감 요인으로 판단된다.

주요어: 도시숲, 교통섬, 미세먼지, 저감율, 풍속

ABSTRACT

This study analyzed the effect of forests on reducing particulate matter by investigating the particulate matter concentration and influencing factors between urban forest and traffic forest. The concentrations of particulate matter in Hongreung Experimental Forest (urban forest) and a forest (traffic forest) formed at the intersection of Cheongryangri Station in Dongdaemun-gu, Seoul were measured with the light scattering method instrument from January to November 2018. During the study period, the average PM₁₀ concentrations in the urban forest and the traffic forest were 12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 15.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively, and the average PM_{2.5} concentrations were 6.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 6.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. Comparing the concentration by the urban atmospheric measurement network of the Ministry of Environment and the concentration in urban forests showed that the reduction rate of PM₁₀ was 66.9±28.6% in urbanforest and 58.6±44.1% in traffic forest and that of PM_{2.5} was 71.3±23.0% and

1 접수 2020년 11월 23일, 수정 (1차: 2021년 3월 9일, 2차: 2021년 7월 27일), 게재확정 2021년 8월 11일

Received 23 November 2020; Revised (1st: 9 March 2021, 2nd: 27 July 2021); Accepted 11 August 2021

2 국립산림과학원 도시숲연구과 박사연구원 Urban Forests Division, National Institute of Forest Science, Hoegiro 57, Dongdaemungu, Seoul, 02455, Korea (pyungraekim@korea.kr)

3 국립산림과학원 도시숲연구과 임업연구관 Urban Forests Division, National Institute of Forest Science, Hoegiro 57, Dongdaemungu, Seoul, 02455, Korea (maeulsoop@korea.kr)

a 이 논문은 국립산림과학원 ‘미세먼지 발생원 대응 도시숲 조성 모델 개발’ 과제 (No. FE0100-2019-03-2020)의 지원으로 수행되었음

* 교신저자 Corresponding author: maeulsoop@korea.kr

64.9±31.3%. The difference in the reduction rate of particulate matter is likely related to the size and structure of the urban forest, and the wind velocity is considered the reduction factor.

KEY WORDS: URBAN FOREST, TRAFFIC FOREST, PARTICULATE MATTER, REDUCTION RATE, WIND VELOCITY

서 론

대기 중 미세먼지는 가시도를 감소시키고, 구름 응결핵으로 작용하여 강수에 영향을 미치며, 인간의 건강에 부정적 영향을 미친다(Seinfeld and Pandis, 2016). 미세먼지와 관련된 건강 영향은 폐, 심장, 혈관 및 신경계에 악영향을 미친다(Song *et al.*, 2016). 이러한 미세먼지는 오염원에서 직접 배출되는 것과 대기 중에서 2차로 생성되는 것으로 볼 수 있으며, 자연배출원과 인위적인 배출원을 포함한다(Myles *et al.*, 2009; Myles *et al.*, 2010; Aldabe *et al.*, 2011; Panodolfi *et al.*, 2011). 특히 인위적인 배출원에서 배출된 미세먼지의 경우 건강에 악영향을 미친다(Bosko *et al.*, 2006; Suzuki, 2006). 배출된 미세먼지는 대기 중 체류시간이 길어 장거리 이동이 가능하며 넓은 지역에서 심각한 환경문제를 야기한다. 환경부에서는 PM₁₀은 24시간 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기준을 적용하고, 2015년부터는 PM_{2.5}는 24시간 평균 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기준으로 관리하고 있다.

도시숲은 열섬효과 완화, 대기 정화, 온실가스 흡수 저장, 토양보전, 물 순환, 산림 경관 제공, 산림 휴양기능, 정서함양, 삶의 질 향상 등 도심에서 시민들에게 다양한 혜택을 제공하고 있다(Lee *et al.*, 2008). 특히 도시숲은 대기 오염을 줄이고, 오염 물질을 개선함으로써 도시 환경의 질을 높이는 데 중요한 역할을 한다. 도시숲의 미세먼지 저감 기작은 일반적으로 차단, 침강, 흡수, 흡착의 네 가지로 구분된다(Nowak *et al.*, 2013). 흡착(adsorption)은 잎, 줄기, 가지 등의 미세한 구조에 의해 미세먼지를 부착한다. 흡수(absorption)는 잎의 기공을 통해 나무와 식물의 내부로 미세먼지가 흡수한다. 차단(block)은 숲의 수관 층에 미세먼지가 다다르면, 공기가 흐르는 이동면적 감소로 인해 속도가 줄어들게 되어 숲에 의해 차단된다. 침강(deposition)은 숲의 수관층과 줄기, 가지에 내려앉거나 이동하던 미세먼지가 숲 내부의 미기상 조건에 의하여 지표면으로 수직으로 하강하는 것을 말한다.

도시숲의 미세먼지 저감에 관한 연구는 다양한 환경에서 실시되었으며, 숲에서 미세먼지 측정을 통해 저감 시키기도 하고, 농도를 상승시키기도 한다는 상반된 연구 결과가 나타났다. 잎 기공의 크기보다 큰 크기의 미세먼지는 식물의

잎과 줄기에 붙는다(Rasanen *et al.*, 2013). 식생의 미세먼지 흡수 유지율이 일정량에 도달하면, 기공을 포화시켜 입자의 효율을 감소시킨다. 나무의 복잡한 내부 구조로 인해 잎, 줄기 및 가지의 넓은 표면적과 대기의 난기류로 인해 입자 흡수에 효율적이다(Lovett *et al.*, 1994; Mori *et al.*, 2015). 미세입자는 바람에 의해 확산이 가속화되므로 큰 입자보다 감소가 잘된다(Freer-Smith *et al.*, 2005).

McPherson *et al.*(1994)의 연구에서는 나무의 특정 유형과 특성뿐만 아니라 적절한 초목으로 인해 미세먼지 세정 효과가 나타났다. 녹지 내부로 유입된 미세먼지가 숲에 의해 공기 흐름이 정체되면 내부가 외부보다 미세먼지 농도가 높게 관측되었다(Chen *et al.*, 2015).

확 트인 공간의 도로변에서 가로녹지가 오히려 바람에 의한 확산을 억제하여 차량 이동에 따른 미세먼지를 녹지 내부에 가두어 미세먼지 농도를 높이는 것으로 확인되었다(Hong *et al.*, 2018). 모델링 결과 도시숲이 미세먼지를 차단해 미세먼지 저감이 뛰어나다는 연구가 진행되었다(Nowak and Crane, 2000; Hagler *et al.*, 2011; Pataki *et al.*, 2011; Nowak *et al.*, 2013; Gronke *et al.*, 2016). 이와는 반대로 Vos *et al.*(2013) 연구에서는 CFD(computational fluid dynamics)모델을 사용하여 도시숲에 따라 미세먼지 확산효과를 확인하였다. 모델 결과 대기를 정체시켜 미세먼지 확산에 부정적인 효과를 보인다는 상반된 모델링 연구 결과를 보였다. 모델에서 상반된 결과를 제시하였기 때문에 현장 측정을 통한 검증이 필요하다. 따라서 본 연구는 도심에 있는 도시숲과 교통섬에서 미세먼지 농도를 측정하여, 미세먼지 저감 특성과 효과를 파악하고, 영향 인자를 확인하고자 하였다.

연구방법

1. 연구 대상지

연구 대상지는 도시숲 지역은 서울특별시 동대문구 국립산림과학원 내에 홍릉시험림(N37°35', E127°02')에서 측정하였고, 교통섬 지역은 서울특별시 동대문구 청량리역 교차로에 조성된 숲(N37°58', E127°04')에서 측정하였다

(Fig. 1). 홍릉숲은 서울의 동쪽 천장산의 남서 자락에 자리를 잡고 있으며, 1922년에 임업시험장을 창설하면서 우리나라 최초로 수목원이 조성된 곳으로 여러 가지 임업 시험 및 연구과제를 수행 중이며, 국내외 다양한 식물유전자원 총 2,035종(목본 1,224종, 초본 811종)을 체계적으로 관리하고 있다(Cheon *et al.*, 2012). 교통섬이란 자동차의 안전하고 원활한 교통처리나 보행자도로횡단의 안전을 확보하기 위하여 교차로 또는 차도의 분기점 등에 설치되는 섬 모양의 시설을 말한다(도로의 구조 시설 기준에 관한 규칙, 국토교통부령 제 706호), 최근에는 이 교통섬에 수고 15 m 높이의 소나무를 식재하였으며, 하층에 철쭉 등 관목 식생이 조성되어 있다.

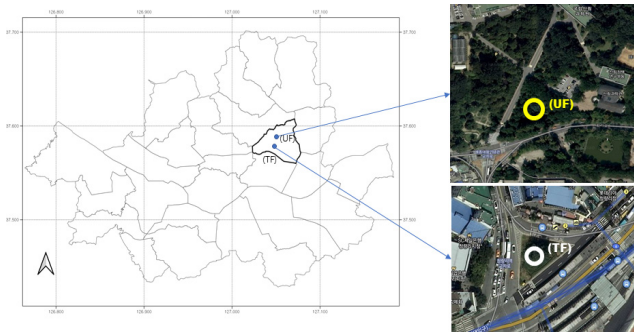


Figure 1. Location of study site(UF- Urban Forest, TF-Traffic Forest).

2. 측정 방법

1) 미세먼지와 풍속 측정

미세먼지 측정은 2018년도 1월부터 2018년도 11월까지 도시숲 지역과 교통섬 지역에서 측정하였다. 시료 채취 높이는 그 부근의 평균 오염도를 나타내고, 숲에 의한 영향을 파악하기 위하여 높이 1.5m로 선정하였으며, 사람들의 통행이 비교적 적은 위치를 선정하여 측정 오차를 최소화하였다. PM_{10} , $PM_{2.5}$ 측정은 Osiris(Turnkey Instruments Ltd. UK)를 사용하여 24시간 연속으로 측정하였으며, 풍향(degree), 풍속(m/s), 상대습도(%)도 내장되어있는 저장장치에 5분마다 자동으로 기록하였다. 본 장비는 마이크로프

로세서에 의해 설정된 유량으로 펌프에 의해 기기로 지속적으로 유입되고, 들어온 공기는 광산란양을 측정하여 총 부유 입자의 농도를 결정하는 방식이다. 광산란 측정 장비는 미세먼지의 중량을 이용한 농도 값이 아닌, 미세먼지의 개수 및 산란 양을 이용하여 미세먼지의 농도를 측정한다(Lee and Park, 2019). 대기 중 환경에 의해 중량측정 방법보다 에어로졸 농도를 과대평가할 가능성이 존재한다. 이를 방지하기 위하여 습도가 80 이상인 값은 제거하였다(Kim *et al.*, 2014). $PM_{10-2.5}$ ($PM_{10}-PM_{2.5}$)는 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도 차이를 이용하여 계산하였다.

2) 저감율

도시숲에 의한 미세먼지 저감율은 다음과 같은 식으로 계산하였다.

$$I = \frac{x_0 - x_i}{x_0} \times 100$$

여기서, I는 도시숲의 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 저감율, x_0 는 대기 오염 측정망(성북구 도시 대기 측정소)에서 측정한 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 농도($\mu g/m^3$)(NIER, 2018), x_i 는 도시숲, 교통섬에서 측정한 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 농도($\mu g/m^3$)로 계산하였다. 성북구 대기 오염 측정망은 서울시 성북구 길음2동 주민센터 옥상에 위치한 곳이며, 측정 장비는 BAM 1020 (Met One Instruments, USA)로서 중량측정법에 기반한 측정 장비이다. 본 연구에서 측정한 방법(광산란 측정법)과 대기 오염 측정망(중량 측정법)에서 측정한 방법이 차이가 있다. 따라서 본 연구에서는 농도의 직접적인 비교보다는 저감율(%)을 사용하여 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 도시숲의 미세먼지 농도 특성

연구 기간인 2018년 1월부터 11월까지 PM_{10} 의 평균농도는 도시숲과 교통섬에서 각각 $12.5 \mu g/m^3$, $15.7 \mu g/m^3$ 이었다(독립표본 T검정 p -value < 0.05). PM_{10} 농도는 두 지역에

Table 1. Summery statistics and mass concentration($\mu g/m^3$) of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{10-2.5}$

	Traffic Forest			Urban Forest		
	PM_{10}	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	$PM_{10-2.5}$
Average	15.7	6.9	8.8	12.5	6.6	5.8
Std	19.4	10.5	11.1	14.0	11.2	6.3
Max	383.0	283.0	150.3	147.6	127.2	114.5
Min	0.4	0.2	0.2	0.4	0.0	0

서 연평균 기준치($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 이하로 나타났고, 일평균 기준치($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 일수는 측정 기간 동안 교통섬 3일, 도시숲 1일로 나타났다(Table 1, Figure 2, 3). $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 도시숲과 교통섬에서 각각 $6.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며(독립표본 T 검정 $p\text{-value} > 0.05$), $\text{PM}_{2.5}$ 는 두 지역에서 연평균 기준치($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 이하로 나타났고, 일평균 기준치($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 초과하는 날은 교통섬 3일, 도시숲 5일로 나타났다. 서울시 대기 오염 측정망에서 측정한 PM_{10} 의 평균농도 $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 값이 나타났고, $\text{PM}_{2.5}$ 의 평균농도 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 농도가 관측되었다(NIER, 2018). $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 비율은 교통섬에서 0.42로 나타났고, 도시숲에서 0.48로 나타났다. 이는 국내 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 비율 0.6보다는 낮은 값이었다(Cho *et al.*, 2016b; Lee *et al.*, 2016). 양측 측정 지점은 숲 아래에 위치하여, 교통섬 주변 많은 교통량으로 인한 비산먼지로 인해 조대 입자(coarse particle, $2.5 \mu\text{m} < D_p(\text{직경}) < 10 \mu\text{m}$)의 비율이 상승한 것으로 판단된다. 3월 25일의 경우 교통섬보다 도시숲의 미세먼지양이 높게 관측되었다. 측정 기간동안 연무와 박무가 관측되었습니다. 연무와 박무는 시정거리가 10 km 이하일 때를 말하며, 이때 미세먼지 농도를 상승시키는 특징을 가지고 있습니다(Han *et al.*, 2016). 생성된 미세먼지가 바람에 의해 확산하지 않는다면, 주변보다 습도가 높은 도시숲의 경우 미세먼지가 고여 타 지역보다 높은 농도가 관측된 것으로 보인다.

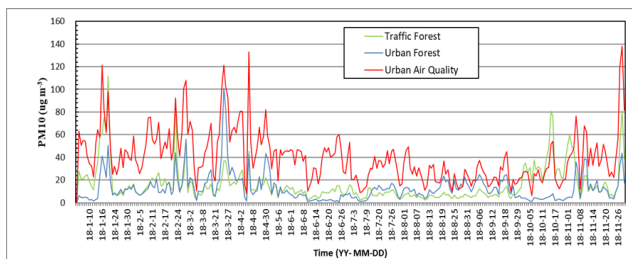


Figure 2. The daily concentration of PM_{10} in each site (Blue : TF, Green : UF, Red : Urban air quality site).

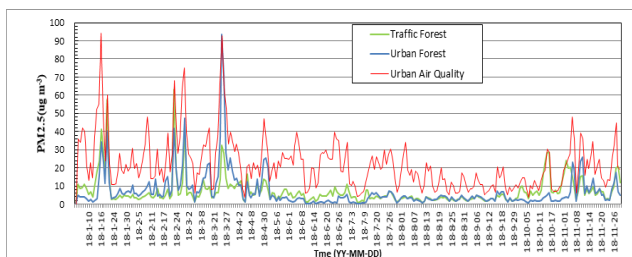


Figure 3. Daily concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ in each site (Blue : TF, Green: UF, Red: Urban air quality site).

계절 비교를 위해 1월부터 2월까지 겨울, 3월부터 5월까지 봄, 6월부터 8월까지 여름, 9월부터 11월까지 가을로 구분하였다. PM_{10} 의 경우 교통섬이 도시숲보다 높은 농도를 보였으며 가을철에 고농도를 보이고, 겨울, 봄 여름 순으로 나타났다. 반면에 도시숲의 PM_{10} 의 경우 봄철에 고농도, 겨울, 가을, 여름 순으로 나타났다(Figure 4). 가을철 고농도의 경우 한반도에서 형성된 고기압과 대기 정체 조건에 의해 국내 오염 물질의 축적으로 인해 미세먼지 고농도가 관측되었으며 추가로 외부에서 유입되는 오염 물질로 인해 미세먼지 고농도 현상이 가중되었다(Son and Park, 2019). 겨울철 고농도와 여름철 저농도는 우리나라에서 일관적으로 나타나는 현상이며, 혼합층 고도, 풍향 및 강수량 변화 등을 포함한 기상 현상, 계절별 배출량 차이 등으로 야기된다(Jeon, 2012; Cho *et al.*, 2016a). $\text{PM}_{2.5}$ 는 교통섬에서는 PM_{10} 과 비슷하게 나타났으나, 도시숲의 경우 겨울, 봄, 가을, 여름 순으로 나타났다.

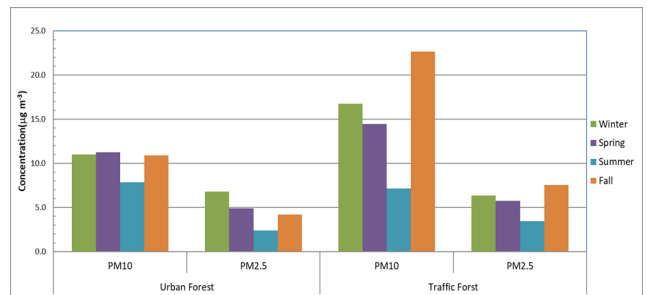


Figure 4. Seasonal average concentrations of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ at UF and TF.

계절별에 따라 일변화 패턴은 분석하였다. 고농도에 의한 영향을 최소화하기 위하여 고농도 시기를 제외하고 분석하였고, 농도에 의한 영향을 줄이기 위하여 계절별 최솟값을 제외하여 농도의 변화만 분석하였다. 도시숲보다 교통섬이 시간에 따라 뚜렷한 변화가 나타났다. 이는 작은 규모의 숲의 경우에는 내부보다는 외부에 의한 영향(도로, 교통, 바람, 외부 미세먼지)에 의한 영향이 크기 때문으로 판단된다. 도시숲의 경우 교통섬에 비해 많은 수목으로 인하여, 도로에서 배출되는 미세먼지의 영향은 낮은 것으로 생각된다. 교통섬의 경우 겨울철에 19시부터 농도가 상승하고, 21시 이후에는 농도가 낮아졌다. 이는 퇴근길 차량에서 배출된 미세먼지가 대기로 배출되고, 해가 진 후 낮아진 혼합층고로 인하여 미세먼지가 교통섬 주변으로 모인 것으로 보인다. 풍속을 보았을 때 주간에는 높던 풍속이 해가 진 후 낮아진다. 낮아진 풍속으로 인하여 미세먼지가 희석되지 못하고 모인 것으로 판단된다. 특히 계절적 영향으로 인하여 겨울철에는 21시에 농도가 더 상승하는 경향을 보였다. 그에 반면 미세먼지 농

Table 2. Summery statistics and reduction rate(%) of PM₁₀ and PM_{2.5}.

	Traffic Forest		Urban Forest	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Average	72.6	73.0	61.3	67.1
Std	19.4	21.6	33.4	28.0
Max	99.2	99.3	91.2	93.8
Min	-116.5	-219.3	-247.1	-303.6

도가 낮은 여름 경우 뚜렷한 일변화 패턴이 보이지 않았다.

2. 도시숲에서의 미세먼지 저감율(%)과 환경인자와의 관계

본 연구에서 전체기간 동안 측정된 미세먼지 저감율은 도시숲에서 PM₁₀이 66.9±28.6%, PM_{2.5}가 71.3±23.0%로 나타났고, 교통섬에서는 PM₁₀이 58.6±41.4%, PM_{2.5}는 64.9±31.3%로 나타났다(Table 2). 저감율은 도시숲이 교통섬보다 높게 나타났다(독립표본 T 검정 *p*-value > 0.01). PM₁₀보다 PM_{2.5} 저감율이 더 높게 나타난 것은 입자크기가 작은 입자의 경우 확산이 쉬운 것(Hinds, 199)과 관련이 있을 것으로 판단한다. 확산으로 인해 이동된 입자는 수목의 잎, 줄기, 가지 등의 미세한 구조에 흡착되어 저감율이 더 높게 나타난 것으로 보인다(Bi *et al.*, 2018, Matsuda *et al.*,

2010). 교통섬보다는 도시숲에서 높은 저감율을 보였는데, 이는 도시숲이 교통섬에 비교해 큰 규모로 인한 저감율이 높게 나타난 것으로 판단되나, 수종, 크기, 식재 방식, 배치 형태에 따라 저감율의 차이가 나타날 것으로 보인다.

계절에 따라서 PM₁₀과 PM_{2.5}의 저감율 분포가 다르게 나타난다. PM₁₀의 저감율은 도시숲에서는 겨울에 가장 높은 저감율을 보이고 봄, 여름 가을 순으로 나타났다. 이에 반해 교통섬은 여름철에 가장 높은 저감율을 보이고, 봄, 겨울, 가을 순으로 나타났다. PM_{2.5}의 저감율은 도시숲에서는 여름철에 가장 높은 저감율을 보였고, 가을 겨울, 봄 순으로 나타났고, 교통섬에서는 여름철에 가장 높은 저감율을 보이고, 겨울, 봄, 가을 순으로 나타났다(Figure 5, 6).

계절별 입자의 크기와 도시숲과 교통섬에 식재되어있는 나무의 종류의 차이로 인해 저감율의 차이가 나타난 것으로 보인다. 이전 연구에서는 입경 크기에 따라 미세먼지 저감율이 다르게 나타났다(Chen *et al.*, 2015). 크기가 큰 입자의 경우 중력에 의해 쉽게 제거가 되고, 아주 작은 입자(>1 μm)의 경우 바람에 의한 영향을 많이 받는 경향이 있으므로, 도시숲에서 상대적으로 농도가 낮은 것으로 생각된다.

가을철(10월)에 교통섬에서 미세먼지 저감율이 마이너스(-) 값이 나타났다(Figure 7). 본 연구 기간인 2018년 가을철의 경우 이 전년도 가을과는 다르게 미세먼지 농도가 고농도가 관측되었다. 원인으로는 국내 기상 상태(대기 정체)와 국외에서 유입되는 대기 오염 물질에 의한 영향으로 파악되며(Son and Park, 2019), 이로 인해 식생의 미세먼지 저감 효과가 미비할 뿐만 아니라 교통섬에서는 외부보다 미세먼지 농도가 높게 나타났다. 반면 도시숲에서는 미세먼지가 외부보다 낮은 값이 관측되었다. 미세먼지 농도와 풍향 간에 상관관계가 높지 않았으나, 미세먼지 저감율과 풍속과는 상관관계 있는 것으로 나타났다(Figure 7). 대기 정체로 인해 숲 내부에 부유하고 있던, 미세먼지가 바람에 의해 나무에 흡착되게 되고 이로 인해 미세먼지 농도가 낮아진 것으로 판단되지만, 향후 다양한 임상 조건에서 기상자료와 미세먼지의 생성, 성장, 소멸 등의 과정을 살펴볼 필요가 있다.

본 연구에서는 숲에서 2018년 동안 대기 중 미세먼지 (PM₁₀, PM_{2.5})측정을 통해 도시숲의 미세먼지 저감 효과를 파악하였으며, 도시에 있는 숲의 종류(도시숲, 교통섬)에

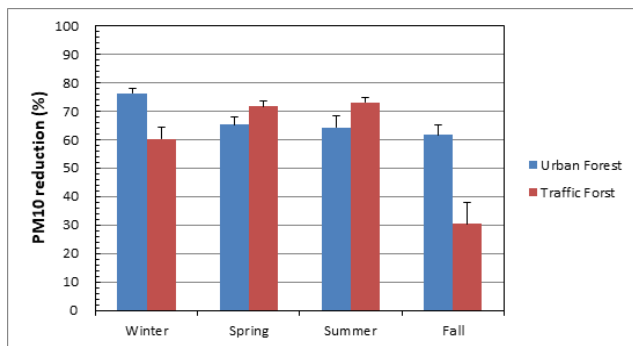


Figure 5. Seasonal PM₁₀ reduction rate in UF and TF.

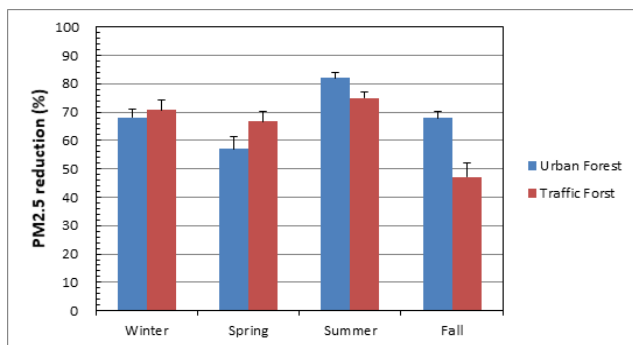


Figure 6. Seasonal PM_{2.5} reduction rate in UF and TF.

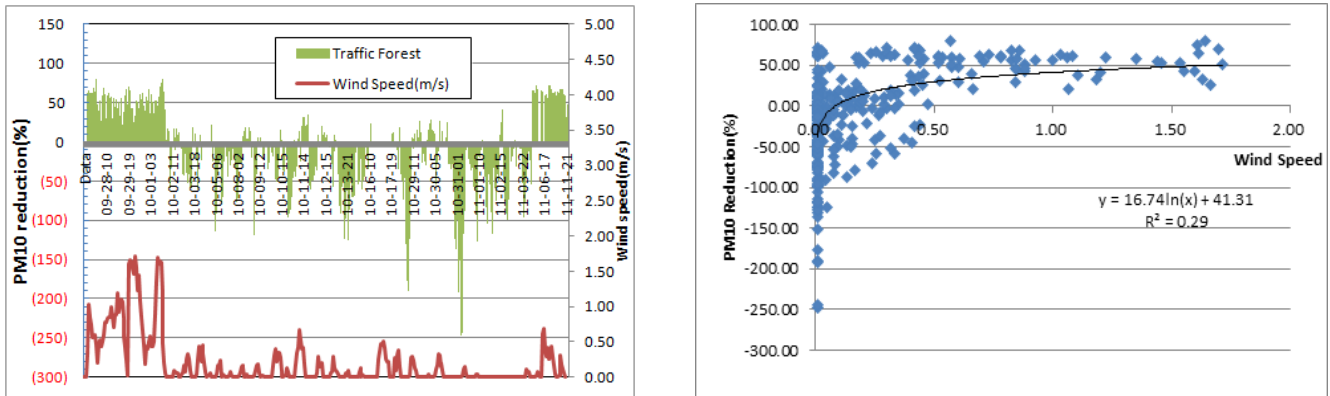


Figure 7. Relationship between PM₁₀ reduction(%) and wind speed during fall season.

따라 미세먼지 저감율을 확인해 보았다.

본 연구에서 측정된 지점의 경우 도시숲과 교통섬을 대표할 순 없지만, 도시숲과 교통섬에서 장기간 미세먼지를 측정하였다. 도시숲에서 장기간 미세먼지 측정하는 것은 미세먼지의 기상 조건에 따른 농도를 파악할 수 있으며, 도시숲의 조성 및 관리 방안을 수립하는데 활용될 것이다.

미세먼지 저감율을 비교하기 위하여 도시 대기 측정망과 비교를 하였다. 본 연구에서 측정된 방법과 도시 대기 측정망과의 측정 방법에 차이가 있다. 측정 방법에 따라 미세먼지 농도가 다르게 측정될 수 있으므로, 이를 줄이기 위하여 이상치는 제거하였고, 습도가 높은 경우에는 값을 제거하였다. 향후 동일한 장비를 사용하여 비교하는 것이 미세먼지 저감 연구에 타당성을 제공할 것이다.

추후 다양한 환경과 도시숲의 구조에 따라 미세먼지 측정을 통해 도시숲의 미세먼지 저감효과를 파악하여야 하며, 추가로 개체별로 다양한 환경 조건(풍향, 풍속, 상대습도 등)에서 미세먼지 저감 능력을 파악할 필요성이 있다.

REFERENCES

- Aldabe, J., D. Elustondo, C. Santnmaria, E. Lasheras, M. Pondolfi, A. Alastuey, X. Querol and J.M. Santamaria(2011) Chemical Characterisation and source apportionment of PM_{2.5} and PM₁₀ at rural, urban and traffic sites in Navarra(North of Spain). *Atmospheric Research* 102(1): 191-205.
- Bi, Y.F., F.Y. Guo, L. Yang, H. Zhong, A.K. Wang, Y.K. Wang, Z.Z. Wu and X.H. Du(2018) *Phyllostachys edulis* forest reduces atmospheric PM_{2.5} and PAHs on hazy day at suburban area. *Scientific Reports* 8: 1-11.
- Bosko, M.L., D. Varrica and G. Dongarra(2005) Case study: Inorganic pollutants associated with particulate matter from an area near a petrochemical plant. *Environmental Research* 99: 18-30.
- Chen, J., X. Yu, F. Sun, X. Lun, Y. Fu, G. Jia, Z. Zhang, X. Liu and H. Bi(2015) The concentrations and reduction of airborne particulate matter(PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁) at shelterbelt site in Beijing. *Atmosphere* 6: 650-676.
- Cheon, K.I., S.C. Jung, J.H. Cho, J.G. Byeon, S.H. Joo and J.H. You(2012) Vegetation type and habitat characteristics of Hongneung arboretum at Seoul. *Journal of the Korean Institute of Forest Recreation* 16(2): 51-63. (in Korean with English abstract)
- Cho, S.H., H.W. Kim, Y.J. Han and W.J. Kim(2016) Characteristics of fine particles measured in two different functional areas and identification of factors enhancing their concentrations. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 32: 100-113. (in Korean with English abstract)
- Cho, S.H., P.R. Kim, Y.J. Han, H.W. Kim and S.M. Yi(2016) Characteristics of ionic and carbonaceous compounds in PM_{2.5} and high concentration events in Chuncheon, Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 32(4): 435-447. (in Korean with English abstract)
- Gromke, C., N. Jamarkattel and B. Buck(2016) Influence of roadside hedgerows on air quality in urban street canyons. *Atmosphere Environment* 139: 75-86.
- Hagler, G.S., W. Tang, M.J. Freeman, D.K. Deist, S.G. Perry and A.F. Vette(2011) Model evaluation of roadside barrier impact on near-road air pollution. *Atmospheric Environment* 37(36): 5125-5133.
- Ham, J.Y., H.J. Lee, J.W. Cha and S.B. Ryoo(2016) Potential source of PM₁₀, PM_{2.5}, and OC and EC in Seoul during spring 2016. *Atmosphere Korean Meteorological Society* 27(1): 41-54. (in Korean with English abstract)
- Hinds, W.C.(1999) *Aerosol technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley & Sons, New York, NY, 200pp.
- Jeon, B.L.(2012) Meteorological characteristics of the wintertime

- high PM10 concentration episode in Busan. *Environmental Science* 21(7): 815-824.
- Jeong, Y.J. and I.J. Hwang (2015) Source apportionment of PM2.5 in Gyeongsan using the PMF model. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 31(6): 508-519. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.B., C.H. Kim, S.B. Lee, K.H. Kim, J.W. Yoo and G.N. Bae(2019) Characteristics of spatial and temporal air pollution on bicycle way along the Han river in Seoul, Korea. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 35(2): 184-194. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., J. Oh, J.S. Choi, J.Y. Ahn, G.H. Yoon and J.S. Park(2014) A study on the correction factor of optic scattering PM2.5 by Gravimetric Method. *Journal of the Korean Society Urban Environment* 14(1): 41-47. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.P.(2006) Air Pollution in Seoul caused by aerosols. *Journal of Korean society for Atmospheric Environment* 22(5): 535-553. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.P.(2010) Analysis of the atmospheric PM10 concentration over the Seoul metropolitan area between 1999 and 2008. *Korean Society of Environmental Impact Assessment* 19(1): 59-74. (in Korean with English abstract)
- Lee, B.J. and S.S. Park(2019) Evaluation of PM10 and PM2.5 concentrations from online light scattering dustmonitors using gravimetric and Beta-ray absorption methods. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 35(3): 357-369. (in Korean with English abstract)
- Lee, D., D. Kim, E. Kim, J. Jeong, Y. Oh, S. Joo and K. Kim(2008) Evaluation indicators for creation and management of urban forest. *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 11(5): 104-113.
- Lee, E.S., T.J. Lee, M.B. Park, D. Park, S.D. Kim and D.S. Kim(2016) The size-oriented particulate mass ratios and their characteristics on the Seoul metropolitan subway lines. *Asian Journal of Atmospheric Environment* 10(4): 217-225.
- Males, L., R.J. Dobosy, T.P. Meyers and W.R. Pendergrass(2009) Spatial variability of sulfate over complex terrain in East Tennessee, USA. *Atmospheric Environment* 43: 3024-3028
- Males, L., W.R. Pendergrass, C.A. Vogel, A. Yerramilli, V.B.R. Dodal, B.R. Dodla, R.B. Dasari, H.P. Dasari, V.S. Challa, F. Tulari, J.M. Baham, R. Hughes, C. Patrick, J. Young and S.J. Swanier(2010) J3. 4 Evaluation of PM2.5 source regions over the Mississippi Gulf Coast using WRF/HYSPLIT modeling approach. 16th Conference on Air Pollution Meteorology, 17-21 January 2010, Atlanta, GA, USA.
- Marsuda, K., Y. Fukimura, K. Hayashi, A. Takahashi and K. Nakaya(2010) Deposition velocity of PM2.5 sulfate in the summer above a deciduous forest in central Japan. *Atmospheric Environment* 44: 4582-4587.
- McPherson, E.G., D.J. Nowak and R.E. Rowntree(1994) Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. USDA General Training report NE-186, Northeastern Forest Experiment Station: Radnor, PA, USA.
- National Institute of Environmental Research(2018) Annual report of air quality in Korea 2018. 338pp. (in Korean)
- Nowak, D.J. and D.E. Crane(2000) The urban forest effects (UFORE) model: Quantifying urban forest structure and function. In: M. Hansen and 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.
- Nowak, D.J., S. Hirabayashi, A. Bodine and B. Horhn(2013) Modeled PM2.5 removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution* 178: 395-402.
- Pandolfi, M., T.G. Castanedo, A. Alstuey, J.D. Ed La Rosa, E. Mantilla, A.S. De La Campa, X. Querol, J. Pey, F. Amato and T. Moreno(2011) Source apportionment of PM10 and PM2.5 at multiple sites in the strait of Gibraltar by PMF: Impact of shipping emissions. *Environmental Science and Pollution Research* 18: 260-269.
- 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.
- Seinfeld, D.G. and S.H. Pandis(2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*(3rd ed.). John Wiley & Sonc Inc, Hoboken, New Jersey, USA, 120pp.
- Son, S.E. and S.S. Park(2019) Mass size distribution of water-soluble aerosol particles during high fine particulate matter episode over Gwangju in November 2018. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 35(4): 423-437. (in Korean with English abstract)
- Song, Y., X. Wang, X. Maher, B.A. Lia, F. Xu, C. Liu, X. Sun and X. Zhang(2016) The spatio-temporal characteristics and health impacts of ambient fine particulate matter in China. *Journal of Cleaner Production* 112: 1312-1318.
- Suziki, K.(2006) Characterisation of airborne particulates and associated trace metals deposited on tree bark by ICP-OES, ICP-MS, SEM-EDX and laser ablation ICP-MS. *Atmospheric Environment* 40: 2626-2634.
- Vos, P.E., B. Maiheu, J. Vankerkom and S. Janssen(2013) Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environment Pollution* 183: 113-122.
- Watson, J.G., A.L.W. Chen, J.C. Chow, P. Doraiswamy and D.H. Lowenthal(2008) Source apportionment: Findings from the US supersites program. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58(2): 265-288.