

한국 남부지역 가로수종 잎 미세구조와 미세먼지 흡착량의 계절 변화: 가시나무, 종가시나무, 참가시나무, 동백나무, 왕벚나무 중심으로

진연주¹ · 윤준혁^{1*} · 최명석² · 성창현¹

¹국립산림과학원 산림바이오소재연구소, ²경상대학교 환경산림과학부

Seasonal Changes in the Absorption of Particulate Matter and the Fine Structure of Street Trees in the Southern Areas, Korea: With a Reference to *Quercus myrsinifolia*, *Quercus glauca*, *Quercus salicina*, *Camellia japonica*, and *Prunus x yedoensis*

Eon-Ju Jin¹, Jun-Hyuck Yoon^{1*}, Myung Suk Choi² and Chang-Hyun Sung¹

¹Forest Biomaterials Research Center, National Institute of Forest Science, Jinju 52817, Korea


²Division of Environmental Forest Science & Institute of Agriculture and Life Science,
Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea.

요약: 본 연구는 한국 남부지역의 주요 조경수 가시나무(*Quercus myrsinifolia*), 종가시나무(*Quercus glauca*), 참가시나무(*Quercus salicina*), 동백나무(*Camellia japonica*), 왕벚나무(*Prunus x yedoensis*) 등 5수종을 대상으로 계절별 미세먼지 흡착량 및 수종별 잎 표면 미세구조와의 관계를 연구하였다. 계절별 미세먼지 흡착량 범위는 1월(31.51~110.44 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), 11월(23.20~79.30 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), 5월(22.68~76.90 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$), 8월(9.88~49.91 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 순으로, 8월보다 1월에 54.4% 더 높은 미세먼지 흡착량을 보였다. 잎 표면에 홈이 있고 털을 갖고 있으며, 왁스층 함량이 높은 *Q. salicina*는 미세먼지 입자 크기별 흡착량이 높게 유지되었으며, 광택이 있고 잎 표면이 매끄러우며, 왁스층 함량이 낮은 *C. japonica*와 *Prunus x yedoensis*는 계절별 미세먼지 흡착량이 낮았다. 엽면적 크기, 기공밀도 및 기공 길이의 증가는 PM 흡착량의 감소와 관련이 있고 반면, 잎 표면 거칠기, 왁스층 함량, 기공 폭의 증가는 PM 흡착량의 증가와 관련이 있었다. 또한, 잎 표면 왁스층 함량이 증가할수록 잎 표면 PM 흡착량도 증가하였으며, PM₁₀, PM_{2.5} 보다는 PM_{0.2}와 관련이 높은 것으로 확인되었다. 또한, 앞으로 개별 수종에 대한 미세먼지 저감 효율을 정량적으로 판단할 수 있는 기준을 통한 저감 수종 선발과 더불어 미세먼지 저감을 위한 숲 조성 가이드라인 또한 제시되어야 할 것으로 판단된다.

Abstract: The study investigates the correlation between the seasonal changes in the absorption of fine dusts and the fine structure of surface on each type of street tree, such as *Quercus myrsinifolia*, *Quercus glauca*, *Quercus salicina*, *Camellia japonica*, and *Prunus x yedoensis* in the southern areas of Korea. The absorption ranges of fine dust were 31.51~110.44 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in January, 23.20~79.30 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in November, 22.68~76.90 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in May, and 9.88~49.91 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ in August. The absorption value was about 54.4% higher in January than in May. With the grooves and hairs on the leaf surface and lots of wax, *Q. salicina* seems related to the high absorption rate of fine dust for each fine dust particle size. The one with gloss and smooth leaf surface has a low amount of wax. *C. japonica* and *Prunus x yedoensis* showed a low absorption rate of fine dust in each season. Whereas the increase in porosity density, length, and leaf area size can be related to the reduced PM and increased absorption rate, the leaf surface roughness, total wax amount, and porosity width can be related to the increase in the PM absorption rate. There was also a high correlation between the total wax amount and absorption rate of the leaf surface at the size of PM_{0.2} than PM₁₀ and PM_{2.5}. These results imply that the quantitative and qualitative traits of leaf, such as wax amounts and leaf surface, can increase the absorption of fine dusts, and the small-sized particles seem to be highly adsorbed with the high wax amounts.

Key words: particulate matter(PM), retention amount, micromorphological traits

* Corresponding author
E-mail: jhyoon7988@korea.kr

ORCID
Jun-Hyuck Yoon  <https://orcid.org/0000-0003-4467-777X>

서론

미세먼지(Particulate Matter: PM)는 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질인 먼지 중, 입자가 매우 작은 것으로 지름이 10 μm 보다 작은 미세먼지(PM_{10}), 지름이 2.5 μm 보다 작은 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$), 지름이 1.0 μm 보다 작은 ($\text{PM}_{1.0}$)으로 분류된다. 이러한 PM의 주요 화학성분은 유기탄소, 원소탄소, SO_2^+ , NO_3^- , NH_4^+ (Park et al., 2012) 및 금속(Thorpe and Harrison, 2008)으로 다환 방향족 탄화수소(PAH)를 흡수하여 인체 건강에 심각한 문제를 야기함이 확인되었다. WHO 분석에 폐암 사망의 29%, 폐질환 사망의 43%가 대기오염과 직접 관련이 있다고 보고하였으며, 중국에서 PM 오염이 심각해지면서 뇌졸중, 심장병, 폐암 등으로 인한 사망률이 크게 증가한 것으로 나타났다(Lopez et al., 2010).

최근에는 대기권에서의 PM제거에 대한 수목의 역할에 관심이 높아지고 있다(Abhijith et al., 2017). 식물에 의한 미세먼지 저감 원리는 1930년 이후부터 관찰되어 연구되었으며, 식물은 잎을 통해 PM를 흡수하고 공기를 효과적으로 여과하여 대기오염을 줄일 수 있는 것으로 나타났다(Yang et al., 2005; Nowak et al., 2006; McDonald et al., 2007; Escobedo et al., 2008; Cavanagh et al., 2009). Han et al. (2020)은 중국 16개 도시를 대상으로 도시 숲(단목, 도시 중심 숲, 지역적 규모 숲)과 대기 PM 입자 간의 관계를 연구한 결과 단목은 대기 중 PM를 잎의 엽모, trichomes, 왁스, 기공, 잎의 형태 등과 같은 잎의 미세구조를 통하여 PM를 차단하고 흡수하는 것으로 나타났다. 또한, 지역적 규모에서 도시 산림에 의한 대기 PM 입자 제거 능력은 오염 수준, 식생 범위, 잎 면적 지수 및 기준 표면 유형에 따라 달라질 수 있으며, 다양한 식생 유형의 PM 제거 능력은 일반적으로 침엽수림, 상록수림, 낙엽수림 순으로 나타났다. 이처럼 PM를 흡착하는 식물의 능력은 모상체, 표면 거칠기, 표피 왁스 층과 같은 잎의 형태적 특성에 따라 PM 흡착량 차이를 보였다(Dzierzanowski et al., 2011; Terzaghi et al., 2013; Wang et al., 2015). 따라서 수종별 PM 흡착량의 차이가 비교되어야 하며, 미세먼지 저감 효과가 우수한 수종은 도시식재 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

그러나 지금까지 식물을 통한 미세먼지 저감에 대한 연구는 식물의 흡착 기능보다 흡수 기능에 대한 연구가, 실외 식물보다는 실내식물인 관엽식물을 대상으로 한 연구가 주로 진행되었다. 따라서 본 연구는 남부지방 도시 내 가로수로 많이 식재되고 있는 가시나무, 종가시나무, 참가시나무, 동백나무, 왕벚나무 등 5수종을 선정하여 PM 흡착에 효과적인 수종을 선별하고자 수행하였다. 또한, 연구에 앞서 PM 농도가 동일하다는 가정하에 다음과 같은 가

설을 세웠다. 1) 대기 중 PM 농도가 높을수록 수종별 잎 표면 PM농도 또한 높을 것이다. 2) 질적 인자(엽면적 크기, 잎 표피 거칠기, 기공 크기), 3) 양적 인자(기공 밀도, trichome 밀도, 왁스 함량)의 특성에 따라 수종별 PM 흡착량의 차이를 보일 것이며, 양적 인자와 질적 인자 사이에는 서로 상관관계 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 대상지 현황

시료 수집은 경상남도 진주시에 위치하고 있는 대학 캠퍼스(35°15.26", 128°09.93") 내 가로수를 대상으로 수행되었다(Figure 1). 캠퍼스의 동쪽과 남쪽에는 왕복 4차선의 도로가 위치 하고 있어 도시 도로 먼지, 자동차 배기 가스 및 자연 먼지에 노출되어 있다. 그러나 대상지 주변 5 km 이내에는 건설 현장이나 석탄 화력 발전소 및 공단지역 등 오염 산업은 없었다. 또한, 시료 수집 장소는 캠퍼스 내 2차선 도로에서 2~3 km 떨어져 있는 곳으로 미세먼지 농도는 현장 조사 당일 휴대용 장비(DT-9881M, CEM, China)로 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)를 측정하였으며, 온도, 상대습도, 강수량, 풍속은 기상청 관측 자료(www.weather.go.kr)를 활용하였다. 공시 수종 간 거리는 문헌에서 보고한 바와 같이(Popek et al., 2012; Song et al., 2015) 200 m 미만에서 시료를 수집하여 생육환경을 동일한 것으로 간주하였다.



Figure 1. The location of sampling points.

Table 1. Atmospheric and meteorological factors at the survey sites during May 2019-January 2020.

Climate factors	Date of Sampling			
	May. 2019	Aug. 2019	Nov. 2019	Jan. 2020
Concentrations of PM _{2.5} (µg/m ³)	17.2±6.9	12.7±6.2	12.8±6.1	14.5±8.5
Concentrations of PM ₁₀ (µg/m ³)	49.4±15.7	29.5±9.9	43.7±16.3	37.0±18.1
Air Temperature (°C) *	18.4±2.2	26.4±2.4	9.4±2.9	3.0±3.0
Relative humidity (%) *	64.3±11.6	78.4±5.6	71.1±10.3	69.7±11.6
Precipitation (mm) *	132.3	65.4	21.5	105.7
Wind speed (km/h), m/s *	3.8±1.0	3.5±1.5	2.7±1.5	2.7±1.9

* Data was obtained from the Jinju station (aws 194).

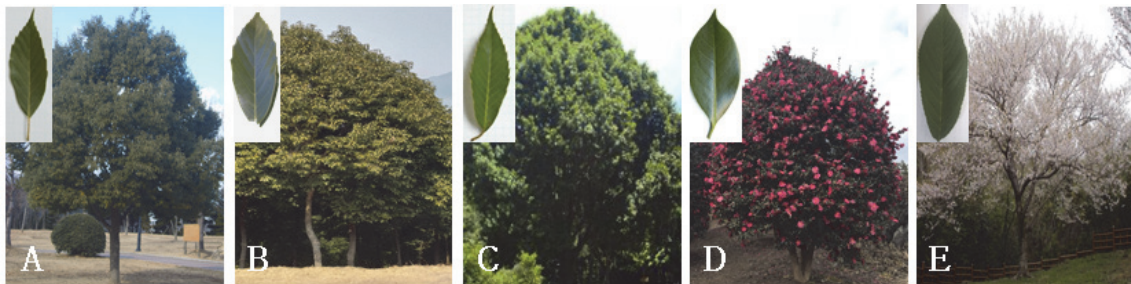


Figure 2. Pictures of the selected five plant species at sampling sites in campus (A: *Q. myrsinifolia*, B: *Q. glauca*, C: *Q. salicina*, D: *Q. salicina*, E: *Prunus x yedoensis*)

Table 2. The general characteristics of sample trees in the survey sites (SE±SD, n=3).

Species	Height (m)	Diameter at breast height (cm)	Crown height (m)	Width of crown (m)
<i>Q. myrsinaefolia</i>	9.1±0.8	24.5±2.4	1.8±0.3	7.6±0.7
<i>Q. glauca</i>	9.1±0.3	22.8±5.2	1.8±0.2	7.9±1.2
<i>Q. salicina</i>	11.6±0.5	29.3±5.3	1.7±0.4	8.1±1.3
<i>C. japonica</i>	3.6±0.9	4.6±0.3	0.5±0.1	3.4±0.5
<i>Prunus x yedoensis</i>	7.1±0.7	24.7±3.9	1.8±0.2	1.0±0.6

2. 공시수종 및 시료수집

공시수종은 가시나무(*Quercus myrsinifolia*), 종가시나무(*Quercus glauca*), 참가시나무(*Quercus salicina*), 동백나무(*Camellia japonica*), 왕벚나무(*Prunus x yedoensis*) 등 5수종(Figure 2)으로 조사지 내 평균적인 생장을 보이는 수종별 3개체(총 15개체)를 선택하여 잎을 수집하였으며, 수종별 생육특성은 Table 2와 같다. 시료 수집은 같은 날 오전 9시에서 10시 사이 동일한 개체목에서 1.5 m 높이의 네 방향에서 병해충이 없는 온전한 잎을 대상으로 수집하였다. 식물의 잎이 먼지를 최대로 흡착할 수 있는 기간은 26일이며, 그 이후로는 포화상태에 이른다는 Liu et al.(2013)의 연구결과를 바탕으로 25일 동안 강수량이 없었던 날을 선택하여 잎을 수집하였다. 또한, 시료를 수집하는 과정에서 잎에 묻어있는 PM이 떨어지지 않도록 주

의하였으며, PM 특성상 정전기에 약하므로 종이봉투 속에 잎 시료를 가위로 잘라 넣은 뒤, 실험실로 옮겨 분석할 때까지 4 °C 온도에서 보관하였다.

3. 잎 표면 및 왁스층 PM 흡착량

모든 분석에 사용된 필터는 먼저 증류수에 2시간 동안 담근 후 105 °C에서 3시간 동안 건조하여 가용성 불순물을 제거하였다. 그런 다음 습도 변화를 안정화하기 위해 세척한 필터를 balancing chamber에 48시간 동안 두었다가 사용하였다. 또한, XS105DU 저울(Mettler-Toledo International Inc., Switzerland)을 사용하여 잠재적인 오류를 줄이기 위해 모든 필터의 무게를 여과 전후로 세 번 측정하였다. PM 여과에 사용된 필터는 1) 10-100 µm (PM₁₀), 2) 2.5-10 µm (PM_{2.5}), 3) 0.2-2.5(µm) (PM_{0.2}) 등 세 가지로 구분하여 분석

하였다(Sæbø et al., 2012; Song et al., 2015).

잎 표면의 PM 흡착량(SPM)을 분석하기 위해 수집된 잎 (10장)을 먼저 500 ml 증류수가 담긴 유리용기에서 5분 동안 Vortex mixer (Vortex Genie2 Shaker, G560E, U.S.A, Washington, D.C.)로 세척한 후, 필터 크기별로 진동 여과한 다음 60 °C에서 30분 동안 건조한 후 무게를 측정하여 잎 표면 PM 흡착량을 조사하였다. 증류수로 세척한 잎은 왁스층의 PM 흡착량(WPM)을 분석하기 위해 동일한 여과 방법으로 증류수 대신 클로로포름(UN 1888, DAEJIN CHEMICAL, Republic of Korea, seoul)을 사용하여 60초간 세척하였다(Dzierzanowski et al., 2011). 잎 표면 및 왁스층의 PM 흡착량은 다음 공식을 사용하여 분석하였다 (Wang et al., 2013).

$$W = W_2 - W_1/A$$

여기서, W= PM 흡착량, W₁= PM 여과 전 필터 무게, W₂= PM 여과 후 필터 무게, A=엽면적(cm²)를 나타낸다.

4. 잎 표면 형태적 특성

잎 표면과 왁스층 PM 흡착량을 분석한 동일한 잎을 대상으로 잎이 완전히 마를 때까지 48시간 동안 60 °C 건조기에서 건조하였다. 건조한 잎맥의 양면에서 4개의 조직 (1×1 mm)으로 시료를 준비하였다. 그런 다음 사각형 잎 부분을 전도성 접착제로 시료를 접착한 다음 ion sputter coater (Hitachi Co., Ltd., E-1045, Tokyo, Japan)를 사용하여 금으로 코팅하였다. SEM(Hitachi Co., Ltd., S-3400N, Tokyo, Japan)을 통하여 잎의 표면 형태(기공 밀도 및 크기, trichomes, 표피 거칠기)를 관찰하고 잎 면적은 잎 면적 측정기(Licor LI-3050A / 4, LICOR, Inc., Lincoln, NE, USA)를 사용하여 분석하였다. 또한 잎 표피 거칠기는 리 커드 척도(1= 매우 매끄럽다, 2= 보통 매끄럽다, 3=매끄럽

다, 4= 거칠다, 5= 매우 거칠다)로 평가하였다. 사진 보존을 위해 이미지를 적절한 배율로 조정하여 촬영하였으며, 이러한 과정을 수종별 5회 반복하였다.

5. 통계분석

시료의 정밀도는 10개의 반복 시료를 측정된 값으로 평가하였으며 표준편차로 표시하였다. 본 연구의 통계 처리는 SPSS Statistics software 25 (International Business Machines Co., USA)를 사용하였다. K-평균 군집화 분석을 통하여 PM 입자를 흡착할 수 있는 낮은, 중간, 최고 그룹으로 분류하였다. 수종별 및 월별 PM 입자 간 흡착량을 비교하기 위하여 다원분산분석을 실시하여 처리 간 차이를 분석하였다. 또한, 잎의 질적·양적 인자 및 수종별 PM 흡착량 사이의 상관관계를 분석하기 위해 다중 회귀 모델을 적용하였다. 시료에 따른 분석 결과의 차이는 일원 배치 분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 평가하였고 사후분석으로 Duncan의 다중 검정을 실시하여 처리 간 차이를 표시하였다.

결과 및 고찰

1. 계절별 PM 흡착량

분석된 5 수종의 계절별 PM 흡착량은 유의적인 차이 ($p=0.001$)를 보였으며, 겨울(1월), 가을(11월), 봄(5월), 여름(8월) 순으로 높게 나타났다(Table 3). 계절별 수종 간 총 PM 흡착량 범위는 5월 22.68~76.90 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 8월 9.88~49.91 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 11월 23.20~79.30 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, 1월 31.51~110.44 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 이었으며, 5월과 11월에 흡착된 PM양은 유사한 경향을 보인 반면, 1월은 8월보다 54.4% PM 흡착량이 높은 것으로 나타났다. 조사 기간 동안 PM 흡착량이 가장 높은 *Q. salicina*의 1월(110.44 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 흡착량은 8월(46.02 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)에 비해

Table 3. Accumulation of particulate matter on leaves of 5 species in the survey sites during May 2019–January 2020, presented as the sum of surface and wax-deposited particulate matter. Data are mean \pm SD, n = 10 (4 months with 3 replicates in each).

Species	Total amount of PM($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)				Average
	Month				
	May.	Aug.	Nov.	Jan.	
<i>Q. myrsinaefolia</i>	76.14 \pm 29.39a ¹	49.91 \pm 8.86a	69.32 \pm 13.14a	75.24 \pm 11.58b	67.65
<i>Q. glauca</i>	55.08 \pm 8.79b	28.80 \pm 4.53b	51.71 \pm 9.26b	43.52 \pm 6.30c	44.78
<i>Q. salicina</i>	76.90 \pm 17.45a	46.02 \pm 13.23a	79.30 \pm 15.25a	110.44 \pm 36.40a	78.17
<i>C. japonica</i>	35.33 \pm 14.44c	17.25 \pm 6.64c	23.20 \pm 8.22c	31.51 \pm 9.58c	26.82
<i>Prunus x yedoensis</i>	22.68 \pm 7.54c	9.88 \pm 3.63c	nd ²	nd	16.28
Average for species	55.23	30.37	55.88	65.18	46.74

¹ Values in rows followed by different letters are significantly different ($p<0.05$).

² Not determined in this year.

58.3% 많은 양을 흡착하였으며, PM 흡착량이 가장 낮은 *C. japonica* 또한 1월(31.51 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 흡착량은 8월(17.25 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$)에 비해 45.3% 더 높은 것으로 나타났다. 수종별 잎의 PM 흡착량 조사는 연속적이지 않았지만(대략 3개월 마다 시료 수집), 측정된 총 PM 흡착량은 월 강수량이 비교적 낮은 8월, 11월보다 강수량이 높은 1월, 5월에 높은 것으로 나타났다. Kardel et al.(2011)은 미세먼지 모니터링을 위한 대체자료로 강우 시 잎을 수집하여 PM 흡착량을 분석한 결과 강우가 발생하더라도 생육기간 동안 잎 포화 등은 잔류 자화(saturation isothermal remanent magnetization, SIRM)는 발생하는 것으로 보고하였다. 그러나 겨울철과 여름철에 비해 장마철 기간 동안 잎 표면 PM 흡착량이 낮았다는 Prajapati and Tripathi(2008)의 연구 결과와는 다르게 나타났으나, 본 연구결과와 동일하게 겨울철에 PM 흡착량이 높은 이유는 안개로 인한 잎의 젖은 표면으로 PM 분산을 방지한 것으로 나타났다.

계절별 대기 중 평균 PM 농도와 수종별 잎 표면 평균 PM 흡착량과의 관계를 분석한 결과 *Q. myrsinaefolia*, *Q. glauca*, *Q. glauca*는 대기 중 PM₁₀, PM_{2.5} 농도와 유사한 경향으로 잎 표면 PM 흡착량 또한 높게 나타났다. 반면, *Q. salicina*는 평균 대기 PM 농도가 높은 5월 보다 1월에서 높은 경향을 보여 가설 1)은 본 연구결과에서 검증되지 않았다. Wang et al.(2013)는 잎 표면 PM 흡착량과 흡착된 PM₁₀ 농도 사이에는 유의적인 상관관계가 나타났지만, 대기 중 평균 PM₁₀ 농도와는 상관관계가 나타나지 않았다. 이러한 이유는 PM의 일부 미립자는 잎의 표면보다는 잎 표피 왁스층에 장기간 흡착되는 것으로 판단하였다(Kardel et al., 2011; Urbat et al., 2004). 또한, Neinhuis and Barthlott (1997)는 대기 중의 PM는 부분적으로 수목의 잎 표면에 흡착되며, 주로 큐티클층 거칠기, 왁스층 함량 등 화학적 조성과의 잎 표면 형태적 특성과 관련이 높은 것으로 판단하였다.

2. 총 PM 흡착량

계절별 수종 간 잎 표면과 왁스층에 흡착된 총 PM 흡착량을 바탕으로 군집분석을 한 결과, 총 PM 흡착량은 3개의 그룹으로 분류되었다(Table 4, Figure 3). *Q. salicina*는 총 PM 흡착량이 312.67 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 가장 높은 군집(Cluster 3)에 속하였으며, *Q. myrsinaefolia* 270.57 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, *Q. glauca* 179.14 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$, *C. japonica* 107.28 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 는 중간군집(Cluster 2), *P. x yedoensis*는 32.57 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 로 가장 낮은 군집(Cluster 1)으로 분류되어 같은 Fagaceae과 내에서도 종간의 유의적인 차이를 보였다.

또한 수목의 PM 흡착은 잎 표면과 왁스층에 의해 이루어졌으며, 왁스층(22.9~50.1%) 보다는 잎 표면(49.9~77.1%)에

Table 4. Species analyzed and results from the clustering analysis with surface and wax solved fractions of PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{0.2} and total PM as variables. Cluster 1 had the smallest quantity of deposited PM and Cluster 3 had the largest.

Species	Family	Cluster
<i>Q. myrsinaefolia</i>	Fagaceae	2
<i>Q. glauca</i>	Fagaceae	2
<i>Q. salicina</i>	Fagaceae	3
<i>C. japonica</i>	Tea	1
<i>Prunus x yedoensis</i>	Rosaceae	1

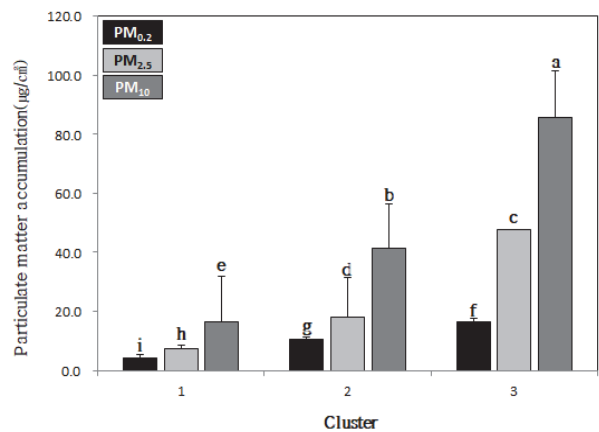


Figure 3. Accumulation of particulate matter (means ± SD) on leaves within three different size fractions in the three clusters found in the survey sites. Treatments with the same letter(a-i) were not significantly different(ANOVA with Duncan test, p<0.05). SE is standard error.

서 64.0% 흡착량이 더 높은 것으로 나타났다(Table 5). Poprk et al.(2012)는 교목 13종을 대상으로 PM 흡착량을 분석한 결과 잎 표면에서 60% 이상을 흡착하였으며, Dzierzanowski et al.(2011)는 교목 5종과 관목 3종의 PM 흡착량 또한 잎 표면에서 62.0% 이상 흡착하여 본 연구결과와 유사한 비율로 나타났다. 그러나 잎 표면의 PM은 광합성 도달하는 빛을 제한하고 기공을 차단함으로써 식물 생육에도 영향을 미칠 수 있다. 따라서 도심지 내 미세먼지 저감 식재를 위한 식물 소재 선정 시 공해에 따른 식물의 내성도 고려해야 할 것으로 판단된다.

반면, Nawrot et al.(2011), Dzierzanowski and Gawronski (2011) 등은 *Tilia codeata*를 대상으로 PM 흡착량을 조사한 결과 왁스층에서 더 많은 PM 흡착량이 있다고 보고하였다. 총 PM 흡착량에서 분석된 5수종 중 PM 흡착에 가장 효과적인 수종은 *Q. salicina*로 *P. x yedoensis*보다 9배 이상 높은 것으로 나타났으며, 잎 표면과 왁스층에서 가장 높은 흡착량을 보였다.

Table 5. Contribution(%) of surface PM and in-wax PM to total PM deposited on foliage of 5 species in the survey sites. Data are mean \pm SD, n = 10 (4 months with 3 replicates in each).

Species	Month							
	May.		Aug.		Nov.		Jan.	
	sPM, %	wPM, %	sPM, %	wPM, %	sPM, %	wPM, %	sPM, %	wPM, %
<i>Q. myrsinaefolia</i>	68.2	31.8	57.8	42.2	63.8	36.2	71.1	28.9
<i>Q. glauca</i>	72.9	27.1	53.0	47.0	53.8	46.2	68.2	31.8
<i>Q. salicina</i>	71.2	28.8	54.6	45.4	66.7	33.3	76.0	24.0
<i>C. japonica</i>	57.9	42.1	49.9	50.1	65.5	34.5	77.1	22.9
<i>Prunus x yedoensis</i>	54.6	45.4	60.7	39.3	nd	nd	nd	nd
Average for species	65.0	35.0	55.2	44.8	62.5	37.6	73.1	26.9

¹ Values in rows followed by different letters are significantly different ($p < 0.05$).

² Not determined in this year.

3. 총 PM 크기별 잎 표면 및 왁스층 흡착량

잎 표면 PM 크기별 흡착량을 분석한 결과, 계절별 수종 간, PM 입자 크기별 유의한 차이를 보였으며($p=0.001$), 계절별에 따른 PM 크기별 인자 간 상호작용도 존재하였다(Table 6). 총 PM 흡착량에서 $PM_{0.2}$ (0.2-2.5 μm)는 14.3%로 가장 작은 비율을 보였지만, *Q. salicina*는 다른 수종들에 비해 잎 표면 총 $PM_{0.2}$ 흡착량이 32.68(4.82~11.53) $\mu g/cm^2$ 로 가장 높게 나타났으며, *C. japonica* 8.60(1.40~3.26) $\mu g/cm^2$, *P. x yedoensis* 2.75(1.01~1.74) $\mu g/cm^2$ 로 가장 낮은 값을 보였다.

$PM_{2.5}$ (2.5-10 μm)는 잎 표면 총 흡착량에서 25.8%를 차지하였으며, *Q. salicina*에서 57.97 $\mu g/cm^2$ 로 가장 높았으며, 다음으로 *Q. myrsinaefolia* 44.34 $\mu g/cm^2$, *Q. glauca* 28.75 $\mu g/cm^2$, *C. japonica* 17.3 $\mu g/cm^2$, *P. x yedoensis* 5.01 $\mu g/cm^2$ 순으로 나타났다. PM_{10} (10-100 μm)의 흡착량은 59.9%로 잎 표면에서 가장 높은 비율을 보였으며, *Q. salicina*에서 126.03 $\mu g/cm^2$ 로 높은 값을 보였다.

잎 표면의 PM 입자 크기별 흡착량을 비교·분석한 결과 $PM_{0.2}$ (0.2-2.5 μm) 14.3%, $PM_{2.5}$ (2.5-10 μm) 25.8%, PM_{10} 59.9% 순으로 나타났으며, 이러한 PM 입자 크기별 흡착량 차이는 공기 중 각각의 부분적 PM 농도 및 수종별 잎의 형태적 특성에 의한 것으로 Popek et al.(2013), Dzierzanowski et al.(2011) 등은 보고하였다.

왁스층 PM 입자 크기별 흡착량 분석한 결과 총 PM 흡착량에서 $PM_{0.2}$ (0.2-2.5 μm)는 48.76 $\mu g/cm^2$ 으로 15.9% 비율로 나타났으며, *Q. salicina* 16.12 $\mu g/cm^2$, *Q. myrsinaefolia* 15.00 $\mu g/cm^2$, *Q. glauca* 9.20 $\mu g/cm^2$, *C. japonica* 6.58 $\mu g/cm^2$, *P. x yedoensis* 1.86 $\mu g/cm^2$ 순으로 나타났다. $PM_{2.5}$ (2.5-10 μm)는 86.24 $\mu g/cm^2$ 으로 전체 PM 흡착량에서 28.1%를 차지하였으며, *Q. salicina* 26.62 $\mu g/cm^2$, *Q. myrsinaefolia* 25.96 $\mu g/cm^2$, *Q. glauca* 18.74 $\mu g/cm^2$, *C. japonica* 10.59 $\mu g/cm^2$, *P. x yedoensis* 4.33 $\mu g/cm^2$ 순으로 나타났다. PM_{10} (10-100 μm)의 흡착량 또한 *Q. salicina* 53.25 $\mu g/cm^2$, *Q. myrsinaefolia*

51.20 $\mu g/cm^2$, *Q. glauca* 38.28 $\mu g/cm^2$, *C. japonica* 21.56 $\mu g/cm^2$, *P. x yedoensis* 7.99 $\mu g/cm^2$ 순 이었으며, 잎 표면과 동일하게 $PM_{0.2}$ (0.2-2.5 μm) 15.9%, $PM_{2.5}$ (2.5-10 μm) 28.1%, PM_{10} 56.1% 순으로 나타났다. 잎 표면과 왁스층의 PM 입자별 흡착량을 비교한 결과 $PM_{0.2}$, $PM_{2.5}$ 는 잎 표면 보다 각각 10.1%, 8.2% 높은 값을 보인 반면, PM_{10} 은 6.3% 낮은 값을 보였다. Sæbø et al.(2012)는 잎의 PM 흡착과 왁스층 함량 사이의 상관관계를 발견하였으며, *B. pendula*는 왁스함량이 높아 도시 지역 PM 저감 우수 수종의 가능성을 나타냈다. 또한, 잎에 흡착된 PM의 양은 잎의 큐티클 왁스층 두께에 따라서 달라질 수 있다는(Kwon et al., 2020) 연구 결과를 바탕으로 왁스층 PM 흡착량이 높았던 *Q. salicina*, *Q. myrsinaefolia*는 다른 수종들에 비해 왁스층이 비교적 높아 다른 수종들에 비해 더 많은 미세입자가 흡착된 것으로 예측할 수 있다. 그러나 Kim et al.(2020)는 미세먼지 제거 효율과 왁스층 함량 사이에 상관관계를 밝히기는 어려웠으며, 이는 왁스층의 함량보다는 식물 잎의 구조적인 특징과 왁스층의 형태가 미세먼지 저감에 더 큰 영향을 준다고 판단하였다. 따라서 차후 연구에서는 잎의 왁스층 점도 및 구조 등을 연구하여 미세먼지를 제거하는 식물의 메커니즘을 구명할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

Freer-Smith et al.(2004)는 상록수종인 *Pseudotsuga menziesii*의 PM 흡착량이 낙엽수종보다 높았으며, 유사하게 Moreno et al.(2003)는 상록 참나무과인 *Quercus ilex*의 PM 흡착량은 낙엽수인 *Platanus spp.* 보다 높은 것으로 나타났다. 본 연구결과에서도 낙엽교목인 *P. x yedoensis* 보다 상록활엽수종인 *Q. salicina*, *Q. myrsinaefolia*에서 PM 흡착량이 높게 나타났으며, 이러한 결과는 수목의 대기 중 PM 제거는 잎이 있는 시간 동안 발생하므로 사시사철 푸른 잎을 볼 수 있는 상록활엽수는 낙엽수보다 더 많은 PM을 흡착할 수 있는 것으로 나타났다(Wang et al., 2013).

Table 6. Total amount of surface PM and in-wax PM accumulated on foliage 5 species with respect to three size fractions. Data are mean ± SD, n = 10 (4 months with 3 replicates in each).

Species	Month	Total amount of surface PM($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)			Total amount in wax PM($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)		
		PM ₁₀ (10-100 μm)	PM _{2.5} (2.5-10 μm)	PM _{0.2} (0.2-2.5 μm)	PM ₁₀ (10-100 μm)	PM _{2.5} (2.5-10 μm)	PM _{0.2} (0.2-2.5 μm)
<i>Q. myrsinaefolia</i>	May.	32.10±17.79b	13.97±9.59b	5.83±1.87cde	13.60±2.42ab	7.67±1.35a	2.97±0.53cd
	Aug.	15.70±4.83def	6.94±2.45cdef	6.19±3.72cd	11.48±2.35bc	5.63±1.14bc	3.96±0.90ab
	Nov.	29.45±10.24b	8.38±3.74cde	6.36±3.90cd	13.09±4.72ab	7.70±2.44a	4.33±0.06ab
<i>Q. glauca</i>	Jan.	29.26±5.75b	15.05±2.75b	9.18±3.06b	13.03±3.10ab	4.96±1.33cd	3.74±1.50bc
	May.	25.61±5.72bc	11.30±3.08bcd	3.27±0.13fgh	8.36±0.34d	4.72±0.19cde	1.82±0.08ef
	Aug.	8.37±2.17fgh	4.21±1.05ef	2.68±1.27ghi	7.14±2.18de	3.71±0.88def	2.70±0.78de
	Nov.	19.44±4.84cd	4.78±1.02ef	3.58±1.19fgh	14.03±2.74ab	7.17±0.96a	2.72±1.09de
<i>Q. salicina</i>	Jan.	17.20±3.17de	8.46±2.08cde	4.02±0.96efg	8.75±1.89cd	3.14±0.93fgh	1.96±1.02ef
	May.	31.63±9.22b	14.61±5.25b	8.49±1.87b	12.25±1.93ab	7.16±1.23a	2.76±0.48de
	Aug.	13.77±3.10def	6.56±1.39cdef	4.82±1.54def	11.37±5.62bc	5.52±2.85bc	3.99±1.46ab
<i>C. japonica</i>	Nov.	33.46±7.39b	11.61±4.12bc	7.84±2.44bc	14.85±4.55a	6.96±2.28ab	4.58±1.18ab
	Jan.	47.17±17.61a	25.19±15.92a	11.53±3.09a	14.78±3.62a	6.98±2.24ab	4.79±1.05a
	May.	13.08±6.37defg	4.98±2.70ef	2.40±1.61ghi	8.34±2.76d	4.71±1.56cde	1.81±0.60ef
	Aug.	5.21±2.07gh	1.99±0.90f	1.40±0.80hi	5.06±2.90efg	1.90±0.96ghi	1.69±0.66e
<i>Prunus x yedoensis</i>	Nov.	9.50±3.90efgh	4.16±0.87ef	1.54±0.76hi	4.57±2.48efg	2.26±1.35fghi	1.17±0.67fg
	Jan.	14.86±4.90def	6.17±2.04def	3.26±1.08fgh	3.59±1.41fg	1.72±0.50hi	1.91±0.84ef
	May.	7.46±4.56fgh	3.19±1.76ef	1.74±0.84hi	5.77±0.36def	3.26±0.21efg	1.26±0.08fg
	Aug.	3.17±1.68h	1.82±0.86f	1.01±0.32hi	2.22±0.91g	1.07±0.59i	0.60±0.44g
	Nov.	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Jan.	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Species(S)		***	***	***	***	***	***
Month(M)		***	***	***	***	***	***
S×M		***	***	***	***	***	***

4. 잎 표면 형태적 특성

수종별 잎 표면 형태적 특성을 조사한 결과 잎 당 엽면적, 잎 표피 거칠기, 왁스층 함량, 기공 밀도 및 크기, trichome 밀도에 따라 유의한 차이를 보였다(Figure 4, Table 7). 수목 잎의 형태학적 구조는 잎 표면에 흡착된 PM 흡착량과 PM가 떨어지지 않게 영향을 주는 것으로 나타났으며, 특히, 잎 표면의 기공 밀도, 표피 거칠기, 왁스층 함량, 수분 함량 등은 PM 흡착 능력에 영향을 주는 요인으로 알려져 있다(Shao et al., 2019). SEM을 통하여 수종별 잎 표면을 관찰했을 때, 잎 표면 PM 흡착량이 가장 높았던 *Q. salicina*는 잎 표피 구조가 거칠고, 높은 기공 밀도와 기공 주변으로 주름과 홈이 많으며, 왁스층 함량 또한 높은 것으로 나타났다. Mo et al.(2015)의 연구에서

많은 미세입자들은 잎의 향측면에 쌓이며, 일부 미세입자는 배면에 부착되고 대부분의 입자는 기공 근처에 부착되었다. 잎몸에 존재하는 홈은 PM_{2.5}를 흡착하는 잎의 주요 부분이며, 홈이 깊을수록 더 많은 입자가 존재하였다(Mo et al., 2015). 반면, 낙엽활엽수를 제외한 상록활엽수 중 잎 표면 PM 흡착량이 가장 낮은 *C. japonica*의 잎은 엽모가 없으며, 잎몸에 홈이 없는 매끈한 표면을 갖고 있었다. Wang et al.(2015)는 매끄러운 잎 표면은 PM 입자를 흡착할 수 있는 능력이 약하며, 비와 강한 바람에 의해 쉽게 떨어질 수 있다고 보고하였으며, Beckett et al.(2000)의 연구 결과에서도 매끈한 표면을 가진 포플러 같은 활엽수들보다 거친 잎 표면을 가진 white beam(*Sorbus aria*)에서 많은 양의 PM₁₀을 흡착했다.

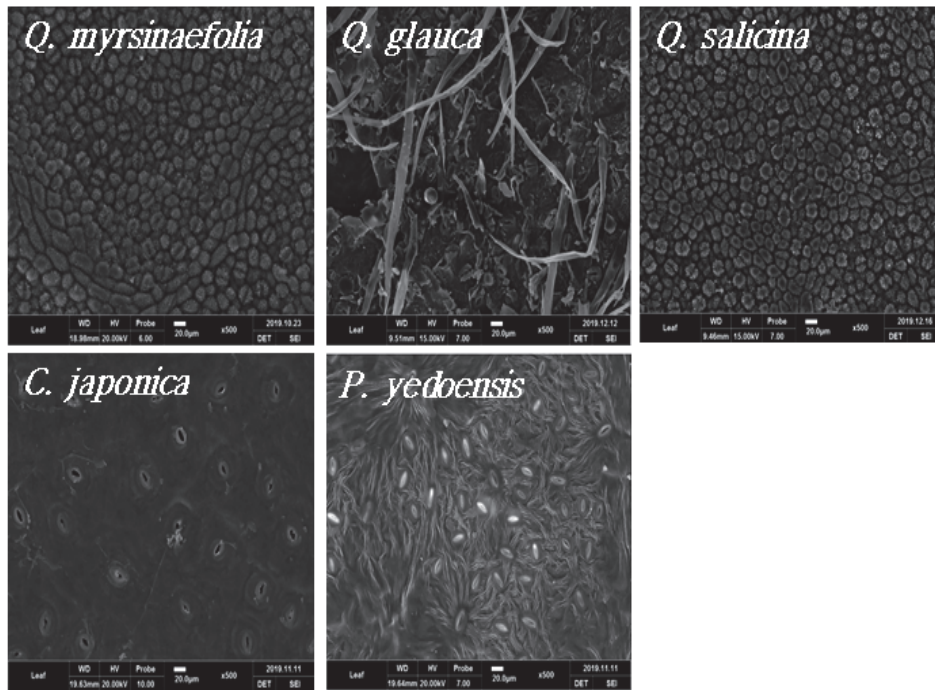


Figure 4. SEM micrographs showing micro-morphological characteristics on leaves of 5 species in the trees samples sampling sites in the survey sites.

Table 7. Leaf surface traits of 5 species in the survey sites.

Species	Leaf Longevity	LA (cm ² leaf ⁻¹)	R	WAX (μg cm ²)	SD (300×view ⁻¹)	SL(μm)	SB(μm)	TN (300×view ⁻¹)
<i>Q. myrsinaefolia</i>	Evergreen	15.5±3.9e	3c	7.88c	59.3±13.4a	16.3±2.9a	25.4±16.0ab	0.0c
<i>Q. glauca</i>	Evergreen	26.8±4.8c	4b	13.1b	51.0±13.9b	14.8±5.9a	29.3±13.7a	21.1±6.7a
<i>Q. salicina</i>	Evergreen	18.7±4.7d	5a	30.4a	63.8±18.8a	15.2±2.6a	21.8±10.0b	4.2±1.1b
<i>C. japonica</i>	Evergreen	31.9±5.2b	1e	4.68d	26.3±3.8d	11.0±2.1b	32.0±16.5a	0.0c
<i>Prunus x yedoensis</i>	Deciduous	41.1±5.5a	2d	1.97e	39.2±6.9c	12.6±4.6b	20.8±8.8b	0.0c

LA: leaf area per leaf; R: roughness of leaf surface; SD: stoma density of lower epidermis; SL: stoma length; SB: stoma breadth; TN: trichome density of lower epidermis.

수종별 잎의 엽면적 특성을 조사한 결과 다른 수종들에 비해 엽면적인 작은 *Q. salicina*, *Q. myrsinaefolia* 에서 PM 흡착량이 높은 것으로 나타났다. 반면, Leonard et al.(2016)는 엽면적이 좁은 수종은 넓은 수종보다 표면 항력이 높고, 더 불규칙하게 바람에 반응하므로 PM 흡착 가능성을 감소시켜 본 연구와 상반된 결과로 나타났다. 즉, 잎의 면적, 모양, 길이 이외에도 잎의 움직임에 영향을 미치는 특징도 잎의 PM 흡착 정도에 중요한 요소라는 것을 알 수 있었다(Kwon et al., 2020). 따라서 엽면적이 넓은 수종은 PM 흡착을 위한 더 큰 표면적을 제공함으로써 PM 흡착의 증가 및 감소를 유발할 가능성이 있으므로, 향후 PM 흡착에 따른 감소를 유발하는 잎의 움직임에 따른 연구도 진행

되어야 할 것으로 판단된다.

또한, 잎의 미세형태학적 특성에 따른 PM 흡착량을 분석한 결과 잎 표피가 거칠고, 왁스층 함량이 높으며, 기공 밀도가 높은 *Q. salicina*에서 PM 흡착량 또한 높은 것으로 나타나 가설 2), 3)을 뒷받침하였다. Sæbø et al.(2012) 연구 결과에서도 왁스층 함량이 증가할수록 잎 표면의 PM 흡착량 또한 증가하였으며, 왁스층 함량은 PM 흡착에 있어 중요한 예측 변수로 나타났다. 또한, Cho(2019)는 미세먼지 저감에 영향을 미치는 8가지 지표 항목에 대한 우선순위 결과는 앞면적과 잎 표면의 거칠기 가장 높게 나타났으며, 이는 Kwon et al.(2014)의 연구에서도 언급된 바 있다. Leonard et al.(2016) 연구에서는 잎 모양은 같지만 엽모의

유무에 따른 잎의 PM 흡착 정도를 비교해보았을 때, 엽모가 있는 잎이 더 많은 PM을 흡착하였으며, 잎에 분포한 털은 PM을 붙잡을 수 있는 표면적을 증가시킬 뿐만 아니라, 잎이 움직일 때 PM이 탈착되기 어렵게 할 수 있다고 설명하였다. 그러나 본 연구에서는 잎 표면에 엽모가 많은 *Q. glauca*보다 엽모가 작은 *Q. salicina*, *Q. myrsinaefolia*에서 PM 흡착량이 높은 것으로 나타났다. Sæbø et al.(2012)의 연구에서는 소나무 잎의 표면이 거칠지 않고 털이 없음에도 불구하고 많은 양의 PM을 흡착하였다. 이는 길고 좁은 바늘형태의 잎은 넓은 잎보다 공기 중의 입자에 쉽게 노출될 수 있기 때문이라 설명하여 엽면적의 차이와 관련이 있을 것으로 예측된다.

5. 잎 표면 형태적 특성과 PM 흡착량과의 관계

잎 표면 형태적 특성과 PM 흡착량과의 관계를 분석한 결과 엽면적 및 잎 표면 거칠기는 PM 흡착량의 예측인자였고, 왁스층 함량은 PM 크기별 흡착에 가장 중요한 예측인자로 나타났다. 또한 기공 길이 및 기공 폭은 PM₁₀ 보다 PM_{2.5}, PM_{0.2} 및 총 PM 흡착량에 중요 예측인자였으며, trichome 밀도는 PM_{0.2} 흡착량에 영향을 주는 것으로 나타났다. 엽면적 및 기공 길이 증가는 PM 흡착량의 감소를 예측한 반면, 증가된 잎 표면 거칠기, 기공 폭은 PM 흡착량의 증가를 예측하였다(Table 6). Sæbø et al.(2012)의 연구결과에서도 잎 표면 PM흡착량이 높은 *B. pendula*는 왁스층 함량이 높으며, 왁스층에 PM을 대부분 흡착하여 미세먼지 저감 효과가 높은 수종으로 선발하였다. Burkhardt (2010) 또한, 잎 표면 PM 흡착량과 왁스층의 화학적 조성 및 구조 사이의 상관관계를 나타낸 바 있다.

총 PM 흡착량 또한 왁스층 함량이 증가함에 따라 증가할 것으로 예측되었으며, 이는 PM 입자 크기별 경향을 나타냈다(Figure 5). Sgrigna et al.(2015) 연구에서는 *Q. ilex*

의 겉표피 왁스층은 계절과 식재지역 사이에 뚜렷한 변동성을 보이지 않았으며, 수관 하부에 있는 잎보다 수관 상부

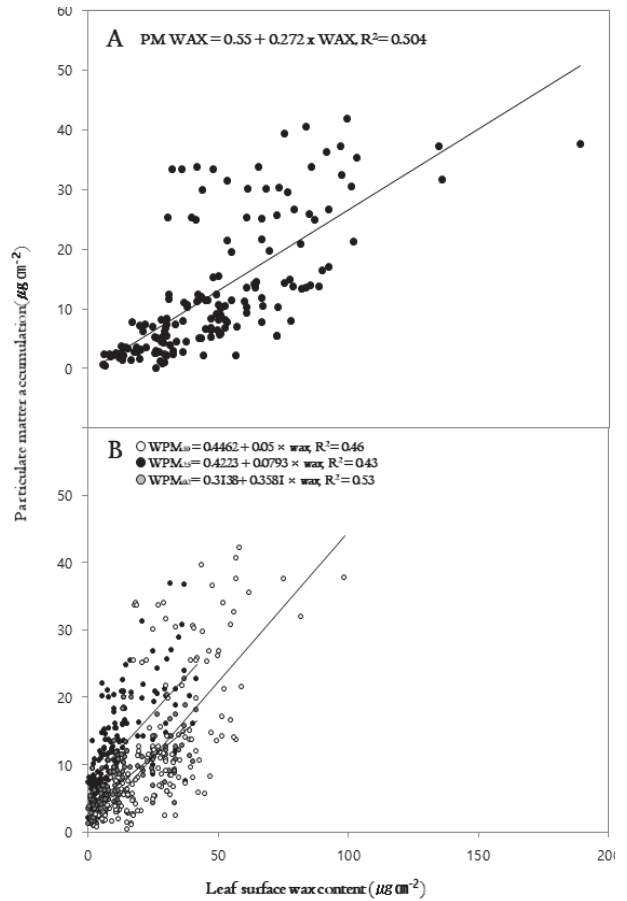


Figure 5. Relationship between leaf surface wax content and accumulation of particulate matter in the wax layer. A) Accumulation of total PM in samples collected in the survey sites. B) Accumulation of different PM fractions in relation to wax content. The linear regression of wax content on PM accumulation is also shown. Significances of linear regression models are all <0.001.

Table 8. Partial regression coefficients(B)and standardized regression coefficients(Beta) from a multiple regression analysis of the leaf surface-trait effects on PM accumulation.

Item	TOTPM			PM ₁₀			PM _{2.5}			PM _{0.2}		
	B	Beta	P	B	Beta	P	B	Beta	P	B	Beta	P
Constant	56.2		0.000	32.2		0.000	16.0		0.000	7.948		0.000
LA	-1.048	-0.353	0.002	-0.592	-0.342	0.004	-0.131	-0.357	0.022	-0.143	-0.294	0.000
R	5.737	0.305	0.008	2.771	0.253	0.037	1.986	0.358	0.005	0.980	0.318	0.003
Wax	0.884	0.338	0.000	0.515	0.337	0.000	0.213	0.276	0.000	0.157	0.366	0.000
SD	-0.097	-0.065	0.303	-0.032	-0.037	0.574	-0.044	-0.100	0.150	-0.020	-0.084	0.159
SL	-0.881	-0.131	0.037	-0.440	-0.112	0.089	-0.292	-0.147	0.032	-0.148	-0.134	0.023
SB	0.226	0.122	0.036	0.116	0.108	0.080	0.084	0.155	0.016	0.025	0.184	0.026
TN	0.304	0.097	0.137	0.195	0.106	0.122	0.018	0.020	0.780	0.091	0.176	0.005
R ²	0.968			0.936			0.912			0.997		

LA: leaf area per leaf; R: roughness of leaf surface; SD: stoma density of lower epidermis; SL: stoma length; SB: stoma breadth; TN: trichome density of lower epidermis.

에 있는 잎의 왁스양이 더 많다는 것을 발견하였다. 수관 상부는 열과 직사광선으로부터 큐티클층의 수분 손실을 막기 위해 왁스층 함량이 더 높은 것으로 알려져 있다 (Sgrigna et al., 2015). PM 흡착량이 가장 높았던 *Q. salicina*의 왁스층 함량은 $30.4 \mu\text{g cm}^2$ 였으며, 평균 왁스층 함량이 $71 \mu\text{g cm}^2$ 인 포르투갈의 *Q. ilex sub. ballota* (Desf.)의 측정값보다 낮다(Martins et al., 2001). 잎의 왁스층 형태학의 변동성은 동일한 식재지의 다양한 기후 요인과 변종 및 아종으로 인해 발생할 수 있다(Gultz, 1994). 큐티클층은 수분 손실에 중요한 역할을 하며, 포르투갈 연구의 뜻하고 건조한 기후 조건이 본 연구의 환경조건과의 차별성 여부를 평가하기는 어렵다. 또한, 도시의 수목은 제한적인 토양함량과 수관 공간, 토양 답압 및 대기오염과 같은 스트레스 요인에 노출될 수 있으며(Abbey and Rathier, 2005), 도시 환경은 일반적으로 주변 자연 환경보다 식재환경에서 서로 더 많은 공통점을 가지고 있다는 것이 강조되었다(McKinney, 2002). 따라서 수종별 식재환경 및 계절 변화에 따른 왁스층 함량과 잎 표면 PM 흡착량과의 상관관계에 대해서도 추후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

결론

본 연구는 대기 중 PM 제거에 있어 수목의 잠재력을 알 수 있었으며, 대기 중 PM 농도와 잎 표면 PM 흡착량과의 관계는 성립되지 않아 가설 1)은 기각되었지만, 왁스층 함량은 잎 표면의 PM 흡착량과의 상관관계를 나타내어 양적 가설 3)을 뒷받침 해주었다. 낙엽수종인 *Prunus x yedoensis*는 상록활엽수종보다 PM 흡착량이 낮았으며, 이러한 차이는 겨울철에 뚜렷이 나타났다. SEM을 통하여 잎 표면을 관찰한 결과 잎 표피 구조에서 홈이 많고 거친 형태를 가진 *Q. salicina*는 매끈한 형태를 가진 *C. japonica*보다 $\text{PM}_{2.5}$ 이하 입자를 더 많이 부착할 수 있으며, 같은 상록 교목 내에서도 PM 흡착량에 따른 차이를 보였다. 잎 표면의 미세형태적 특성과 PM 흡착량과의 관계를 분석한 결과 왁스층 함량 및 기공 폭이 넓은 *Q. salicina*에서 비교적 많은 PM의 흡착을 보였다. 또한, 잎 표면의 PM 흡착량은 엽면적, 기공 밀도 및 길이가 증가할수록 감소되는 경향을 보인 반면, 잎 표피 거칠기, 왁스층 함량, 기공 폭이 증가할수록 PM 흡착량 또한 증가하는 것으로 나타났다. 왁스층 함량과 잎 표면의 PM 입자 크기별 흡착량과의 관계를 분석한 결과 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 보다는 $\text{PM}_{0.2}$ 에서 주요 효과가 나타났다.

종합적으로 볼 때, 도시 지역의 실외에서 미세먼지 저감을 위한 수종을 선정할 경우 미세먼지 농도가 높은 겨울이나 봄철에 잎을 지니고 있는 수종을 우선적으로 고려할

필요가 있다. 본 연구에서 제시한 PM 저감 수종 선정 기준은 미세먼지 흡착량을 중심으로 선정하였으며, 앞으로는 개별 수종에 대한 미세먼지 저감 기능을 정량적으로 분석할 수 있는 기준이 추가로 제시될 필요가 있다.

한국 남부지역 수종의 왁스층은 초미세먼지 저감에 효과적일 수 있다는 결과를 바탕으로 향후 실내실험을 통한 왁스층과 수목의 PM 흡착량의 상관관계를 분석할 필요가 있으며, 또한 PM 흡착에 따른 수목의 생육 및 생리적인 측면을 고려한 수목 관리 방안연구도 필요할 것으로 판단된다.

References

- Abhijith, K.V., Prashant Kumar., John Gallagher., Aonghus McNabola., Richard Baldauf., Francesco Pilla., Brian Broderick., Silvana Di Sabatino. and Beatrice Pulvirenti. 2017. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. Atmos. Environ 162: 71-86.
- Abbey, T. and Rathier, T. 2005. Effects of Mycorrhizal Fungi, Biostimulants and Water Absorbing Polymers on the Growth and Survival of Four Landscape Plant Species. Journal of Environmental Horticulture 23(2): 180-111.
- Bakker, M.I., Casado, B., Koerselman, J.W., Tolls, J. and Kollöffel, C. 2000. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soil and plant samples from the vicinity of an oil refinery. Science of the Total Environment 263(1-3): 91-100.
- Beckett, K.P., Freer-Smith, P.H. and Taylor, G. 2000. The Capture of Particulate Pollution by Trees at Five Contrasting Urban Sites. The International Journal of Urban Forestry 24(2-3): 209-230.
- Burkhardt, J. Hygroscopic particles on leaves: nutrients or desiccants?. 2010. Ecol Monogr 80: 369-399.
- Cavanagh, J-AE., Peyman, Z.R. and Wilson, J.G. 2009. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch. Urban Forestry & Urban Greening 8(1): 21-30.
- Cho, D.G. 2019. Prioritization of Species Selection Criteria for Urban Fine Dust Reduction Planting. Korean Journal of Environment and Ecology 33(4): 472-480.
- Dzierżanowski, K. and Gawroński, S.W. 2011. Use of trees for reducing particulate matter pollution in air. Challenges of Modern Technology 2(1): 69-73.
- Dzierżanowski, K., Popek, R., Gawrońska, H., Sæbø, A.W. and Gawroński, S.W. 2011. Deposition of Particulate Matter of Different Size Fractions on Leaf Surfaces and in Waxes of Urban Forest Species. International Journal of Phytoremediation 13(10): 1037-1046.

- Escobedo, F.J., Wagner, J.E., Nowak, D.J., Maza, Carmen Luz De la., Rodriguez, M., Daniel, E. and Crane, C. Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management* 86(1): 148-157.
- Freer-Smith, P.H., El-Khatib, A.A. and Taylor, G. 2004. Capture of Particulate Pollution by Trees: A Comparison of Species Typical of Semi-Arid Areas (*Ficus Nitida* and *Eucalyptus Globulus*) with European and North American Species. *Water, Air, and Soil Pollution* 155: 173-187.
- Freer-Smith, P.H., Beckett, K.P., Taylor, G. 2005. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution* 133(1): 157-167.
- Gultz, P.G. 1994. Epicuticular leaf waxes in the evolution of the plant kingdom. *J. Plant Physiol.* 143, 453e464.
- Han, S.H. 2019. Fine Dust and Dementia: Is Ambient Air Pollution Associated with Cognitive Health. *Journal of the Korean Neurological Association* 37(2): 135-143.
- Han, D., Shen, H., Duan, W. and Chen, L. 2020. A review on particulate matter removal capacity by urban forests at different scales. *Urban Forestry & Urban Greening* 48: 126565.
- Kardel, F., Wuyts, K., Maher, B.A., Hansard, R., Samson, R. 2011. Leaf saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) as a proxy for particulate matter monitoring: Interspecies differences and in-season variation. *Atmospheric Environment* 45(29): 5164-5171.
- Kim, K.J., Chintakunta, S., Kim, J.C., Jeong, N.R., Han, S.W., Kim, W.Y., You, S. and Kim, C. Analysis of particulate matter(PM) reduction efficiency according to the content of wax layer in leaves of landscaping plants. *Journal of Applied Biological Chemistry* 63(2): 161-168.
- Kwon, S.J., Cha, S.J., Lee, J.K. and Park, J.H. 2020. Evaluation of accumulated particulate matter on roadside tree leaves and its metal content. *Journal of Applied Biological Chemistry* 63(2): 161-168.
- Lara-López, M.A., Cepa, J., Bongiovanni, A., Pérez García, A.M., Ederoclite, A., Castañeda, H., Fernández Lorenzo, M., Pović, M. and Sánchez-Portal, M. 2010. A fundamental plane for field star-forming galaxies. *Astron. Astrophys* 521: L53.
- Leonard, R.J., McArthur, C. and Hochuli, D.F. 2016. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening* 20(1): 249-253.
- Liu, Y., Chien, W.M., Medvedev, I.O., Weldy, C.S., Luchtel, D.L., Rosenfeld, M.E. and Chain, M.T. 2013. Inhalation of diesel exhaust does not exacerbate cardiac hypertrophy or heart failure in two mouse models of cardiac hypertrophy. *Part. Fibre Toxicol* 10(1): 49.
- Loomis, D., Yann, G., Lauby-Secretan, B., Ghissassi, F.E., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Baan, R., Mattock, H. and Straif, Kurt. 2013. The carcinogenicity of outdoor air pollution. *The Lancet Oncology* 14(13): 1262-1263.
- Martins, C.M.C., Mesquita, S.M.M. and Vaz, W.L.C. 1999. Cuticular waxes of the Holm(*Quercus ilex* L. subsp. *ballota* (Desf.) Samp.) and Cork (*Q. suber* L.) Oaks. *Phytochem Anal.* 10, 1e5.
- McDonald, A.G., Bealey, W.J., Fowler D., Dragosits, U., Skiba, U., Smith, R.I., Donovan, R.G., Brett, H.E., Hewitt, C.N. and Nemitz, E. 2007. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations. *Atmospheric Environment* 42(38): 8455-8467.
- McKinney, M.L. 2002. Urbanization, biodiversity, and conservation. *Bioscience* 52, 883e890.
- Moreno, M.M., Azcárate, C. 2003. Concepciones Y Creencias De Los Profesores Universitarios De Matematicas Acerca De La Enseanza De Las Ecuaciones Diferenciales. *Enseanza De Las Ciencias* 21(2): 265-280.
- Mo, L., Ma, Z., Xu, Y., Sun, F., Lun, X., Liu, X., Chen, J. and Yu, X. 2015. Assessing the capacity of plant species to accumulate particulate matter in Beijing, China. *PLoS One* 10(10): e0140664
- Nawrot, T.S., Perez, L., Künzli, N., Munters, E. and Nemery, B. 2011. Public health importance of triggers of myocardial infarction: a comparative risk assessment. *The Lancet* 377(9767): 732-740.
- Neinhuis, C. and Barthlott, W. 1997. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202; 1-8.
- Nowak, D.J. 1994. Chicago's Urban Forest Ecosystem: Resulting of the Chicago Urban Forest Climate Project Chapter 5 Air Pollution Removal by Chicago's Urban Forest.
- Park, S.M., Moon, K.J., Park, J.S., Kim, H.J., Ahn, J.Y. and Kim, J.S. 2012. Chemical Characteristics of Ambient Aerosol during Asian Dusts and High PM Episodes at Seoul Intensive Monitoring Site in 2009. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 28(3): 282-293.
- Popek, R., Gawrońska, H., Wrochna, M., Gawroński, S.W. and Sæbø, A. 2013. Particulate Matter on Foliage of 13 Woody Species: Deposition on Surfaces and Phytostabilisation in Waxes—a 3-Year Study. *International Journal of*

- Phytoremediation 15(3): 245-256.
- Prajapati, S.K. and Tripathi, B.D. 2008. Seasonal Variation of Leaf Dust Accumulation and Pigment Content in Plant Species Exposed to Urban Particulates Pollution. *Plant and Environment Interaction* 37(3): 865-870.
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H.M., Gawronska, H. and Gawronski, S.W. 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of The Total Environment* 427-428; 347-354.
- Sgrigna, G., Sæbø, A., Gawronski, S., Popek, R. and Calfapietra, C. Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy. *Environmental Pollution* 197: 187-194.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T. and Niazi, N.K. 2017. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials* 325(5): 36-58.
- Shao, C., Meng, L., Wang, M., Cui, C., Wang, B., Han, C.R., Xu, F. and Yang, J. 2019. Mimicking Dynamic Adhesiveness and Strain-Stiffening Behavior of Biological Tissues in Tough and Self-Healable Cellulose Nanocomposite Hydrogels. *ACS Applied Materials & Interfaces* 11(6): 5885-5895.
- Shi, Z., Li, J., Huang, L., Wang, P., Wu, L., Ying, Q., Zhang, H., Lu, L., Liu, X., Liao, H. and Hu, J. 2017. Source apportionment of fine particulate matter in China in 2013 using a source-oriented chemical transport model. *Science of the Total Environment* 601-602; 1476-1487.
- Song, Y., Maher, B.A., Li, F., Wang, X., Sun, X. and Zhang, H. 2015. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution. *Atmospheric Environment* 105: 53-60.
- Terzaghi, E., Wild, E., Zacchello, G., Bruno, E.L., Cerabolini, Jones, K.C. and Guardo, A.D. 2013. Forest Filter Effect: Role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. *Atmospheric Environment* 74: 378-384.
- Thorpe, A. and Harrison, R.M. 2008. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Science of the Total Environment* 400: 270-282.
- Urbat, M., Lehndorff, E. and Schwark, L. 2004. Biomonitoring of air quality in the Cologne conurbation using pine needles as a passive sampler—Part I : magnetic properties. *Atmospheric Environment* 38(23): 3781-3792.
- Wang, B. et al. 2013. Properties and inflammatory effects of various size fractions of ambient particulate matter from Beijing on A549 and J774A.1 cells. *Environmental Science & Technology* 47: 10583-10590.
- Wang, Y., Li, J., Jing, H., Zhang, Q., Jiang, J. and Biswas, P. 2015. Laboratory Evaluation and Calibration of Three Low-Cost Particle Sensors for Particulate Matter Measurement. *Aerosol Science and Technology* 49(11): 1063-1077.
- WANR. 2013. National Environment Policy Nairobi, Kenya: Ministry of Environment, Water and Natural Resources.
- WHO. Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide. Report. 2003 on a WHO working group. Bonn; 2003. http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf.
- Yang, J., McBride, J., Zhou, P., Zou, X., Che, S. and Wang, W. 2005. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening* 3(2): 65-78.

Manuscript Received : February 23, 2021

First Revision : April 19, 2021

Second Revision : May 4, 2021

Accepted : May 10, 2021