

미세먼지 처리에 따른 전나무, 중국단풍, 소나무, 굴참나무의 생리·생화학적 반응 및 흡착 특성

우상헌¹ · 이고은¹ · 이종규¹ · 광명자¹ · 임예지¹ · 정수경¹ · 제선미² ·
장한나² · 손정아² · 오창영² · 김경하¹ · 우수영^{1*}

¹서울시립대학교 환경원예학과, ²국립산림과학원 도시숲연구과

Physiological, Biochemical, and Adsorption Characteristics of *Abies holophylla*, *Acer buergerianum*, *Pinus densiflora*, and *Quercus variabilis* under Elevated Particulate Matter

Sang-heon Woo¹, Koeun Lee¹, Jongkyu Lee¹, Myeong Ja Kwak¹, Yea Ji Lim¹,
Su Gyeong Jeong¹, Sun Mi Je², Hanna Chang², Jounga Son², Chang-Young Oh²,
Kyongha Kim¹ and Su Young Woo^{1*}

¹Department of Environmental Horticulture, University of Seoul, Seoul 02504, Korea


²Urban Forest Division, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

요약: 도시와 자연에 부정적인 영향을 끼치는 미세먼지에 대한 저감 연구가 점점 심화되고 있다. 이에따른 미세먼지 저감 대책 중 하나로써 도시 수목의 미세먼지 저감 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 이와 관련하여 미세먼지에 의한 도시 수목의 피해 반응 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 도시 수목 중 전나무(*Abies holophylla*), 중국단풍(*Acer buergerianum*), 소나무(*Pinus densiflora*), 굴참나무(*Quercus variabilis*)에 대하여 고농도 미세먼지 처리로 나타나는 피해 반응을 조사하기 위한 목적으로 수행되었다. 위 네 수종을 대상으로 식물생장조절챔버(phytotron)에서 시간 당 300 $\mu\text{g m}^{-3}$ 농도의 미세먼지를 처리하여 각 수종의 생리적, 생화학적 변화 반응과 잎의 흡착면적을 측정하였다. 그리고 순광합성량, 기공전도도, 증산률, 엽록소 함량, ROS, MDA, 잎의 흡착면적에 대해서 상관 분석을 진행하여 상호 간의 관계를 살펴보았다. 연구 결과, 수종마다 생리·생화학적 반응과 흡착면적이 종 특이적으로 나타났다. 순광합성량의 경우 전나무에서 가장 큰 감소세를 보였으며 소나무와 굴참나무는 큰 변화를 나타내지 않았다. 굴참나무는 ROS의 변화 또한 미미하였다. 모든 수종에서 MDA 함량이 공통적으로 증가하였다. 4주 처리 이후 흡착면적에서 전나무는 잎의 앞면, 소나무는 잎의 뒷면에 높은 면적량을 나타냈다. 상관성 분석 결과 생리적 반응 요인들 간에 양의 상관관계가 있음을 확인하였고, 잎의 앞면에 높은 흡착면적을 보일수록 생리적 반응에 부정적인 영향이 있음을 확인하였다. 본 연구는 미세먼지 저감과 지속 가능한 도시 숲을 효율적으로 조성하기 위한 수종 선택의 기초 데이터를 제공한다.

Abstract: In recent years, the frequency of warnings about particulate matter (PM) has gradually increased in Korea, along with an increase in its intensity. Because of their vast surface area, reactivity to external particles, and characteristics of their leaves, urban trees can act as biofilters, reducing PM pollution. However, the air pollutant PM can cause various types of damage not only to human health but also to vegetation. Studies performed to date on the responses of trees to PM are still insufficient. Here, we analyzed the correlation between PM adsorption and physiological and biochemical responses of four major street tree species, namely, *Abies holophylla*, *Acer buergerianum*, *Pinus densiflora*, and *Quercus variabilis*, under conditions of approximately 300 $\mu\text{g m}^{-3}$ of fly ash emissions using a phytotron. The results showed that the physiological and biochemical responses and PM adsorption

* Corresponding author
E-mail: wsy@uos.ac.kr

ORCID

Su Young Woo  <https://orcid.org/0000-0002-5801-948X>

differed depending on the tree species. In correlation analysis, it was confirmed that there were positive correlations between physiological factors, and PM adsorption on adaxial leaf surfaces negatively impacted the physiological characteristics. This study provides fundamental information for selecting tree species to reduce PM pollution and develop sustainable urban forests.

Key words: biochemical characteristics, particulate matter, PM adsorption, physiological characteristics, urban trees

서론

도시 대기 내 미세먼지(Particulate matter, PM)의 증가는 도시민의 건강에 큰 영향을 준다. 역학 연구를 통해서 이미 도시 내 PM은 인체 호흡기 및 심혈관 질환 및 조기 사망 증가와 큰 상관성을 보였다(Nawahda et al., 2012). 최근 PM 오염은 아시아 전역에서 증가하고 있으며, 가장 큰 보건 문제로 대두되었다(Tiwari et al., 2012).

대기오염물질이 대기 중으로 노출된 경우 이를 제거할 수 있는 경제적인 방법은 식물환경복원(phytoremediation)을 이용한 정화이다. 그 중, 도시 지역에 PM을 효과적으로 포집할 수 있는 식재가 포함되고, 이를 통해 생물학적 필터 역할을 할 수 있고 공기 중 부유하는 PM의 양을 상당히 제한할 수 있다(Sæbø et al., 2012). 넓은 표면적을 지닌 교목과 관목은 잎 내 미세먼지를 집적시키는 능력이 크지만, 이는 종마다 많은 차이를 보인다(McDonald et al., 2007). 트라이콕과 왁스와 같은 잎 표면의 형태학적 구조는 PM 집적에 상당한 연관성을 지닌다(Leonard et al., 2016). 특히, 잎 표면과 표피 왁스층은 PM에 대한 주요 수용체이다. PM을 흡착하는 식물의 능력은 잎에 언급한 잎 표면의 미세구조뿐만 아닌, 수형 같은 거시적인 구조 및 풍량과 온도와 같은 환경변수가 동반되어 여러 요인의 영향을 받는다(Chen et al., 2016).

반면, 수목의 미세먼지를 저감할 수 있는 생물학적 필터 역할에 대한 인식은 증가했으나, 미세먼지에 의한 수목에 대한 위협은 다소 과소평가되어 있다(Popek et al., 2018). 일반적으로, 도시 수목은 지속적인 인위적인 답압, 제한된 햇빛, 오염, 제한된 공간, 증가된 온도와 같은 인위적인 환경 변화에 노출된다(Ferrini et al., 2014). 이러한 요인들은 광합성 효율을 포함하여 식물의 생물학적 기능의 모든 수준에 부정적인 영향을 준다(Hanslin et al., 2017). 여러 대기오염물질, 특히 미세먼지는 도시 및 산림 식생(형태학적, 생리학적, 생화학적, 분자적, 유전적 변형 등)에 미치는 영향은 최근 많이 조사되었다(Gómez-Arroyo et al., 2018; Rai, 2016; Sicard et al., 2016). 수목은 도시 내에서 대기 내 미세먼지에 지속적으로 노출되며, 다년생 습성으로 인하여 PM 농도의 영향을 지속적으로 받는다(Janhäll, 2015). 기상요인, 기후 조건, 대기오염물질의 물리화학적

특성 및 대기 내 체류 기간과 같은 다양한 대기 구성 요인에 의해서 수목은 큰 영향을 받는다(Wagh et al., 2006).

잎에 축적된 미세먼지는 광 흡수에 방해를 주고, 광을 산란시켜 엽록체의 광흡수에 부정적인 영향을 준다(Ram et al., 2014). 기체교환능력 내에서도 기공폐쇄는 대기오염 스트레스에서 가장 먼저 나타나는 생리현상으로 보고되었다. 또한, 전이원소, 유기오염물질, 무기 이온 같은 화학적 특성의 미세먼지는 식물의 생리적 변화에 많은 영향을 준다(Teke et al., 2020). 특히 도시 수목은 미세먼지 노출에 의한 산화스트레스가 발생하여 세포 내 활성산소종이 형성되기 쉽다. 이러한 ROS 형성은 세포막과 DNA의 산화적 손상과 같은 세포에 악영향을 끼치는 다양한 기작을 발생시킨다(Lee et al., 2020). 또한 세포막의 지질이 손상되면 말론디알데하이드(Malondialdehyde, MDA)와 같은 작은 탄화수소가 발생된다. 식물세포는 산화 스트레스를 방어하기 위해 항산화물질 형성하는 시스템을 갖추었지만, ROS 양이 과도하게 증가하게 되면 세포 괴사가 발생하여 세포 내 물질 불균형으로 인한 식물 생장에 피해를 발생시킨다(Ahmed et al., 2013).

최근, 도시 내 미세먼지 증가에 의해서 도시 수목의 생물학적 필터의 역할이 상당히 주목받고 있다(Sæbø et al., 2012). 도시 내 미세먼지 저감을 위한 적절한 수종 선택은 종 특이적 미세먼지 저감 효율뿐만이 아닌 미세먼지에 의한 비생물적 스트레스에 대한 내성도 고려해야 한다. 여러 연구에서 다양한 종에 대한 PM 저감 능력에 관한 연구가 진행되었다. 이전 연구에서 잎의 특성과 생리적 차이에 의하여 대기오염에 대한 수목의 저감능력과 반응이 다양하게 나타나는 것을 언급하였으며, 특히, 침엽수와 활엽수의 대기오염에 관한 반응은 상이하다고 알려져 있다(Pace and Grote, 2020; Zhang et al., 2020). 국내의 경우에도 도시 숲 내 도시 주요 수종의 미세먼지 흡착 능력 비교에 관한 연구는 다수 진행되어왔다(Bui et al., 2021; Hwang et al., 2011; Kwak et al., 2019; Park et al., 2022). 반면, 미세먼지에 의한 국내 도시 주요 수목에 대한 생리적 및 생화학적 반응 변화 연구는 아직 부족한 실정이다. 또한, 챔버 내 묘목 단기 연구는 성목에 대한 예측을 완벽하게 할 수는 없지만, 환경요인 통제를 통하여 수목 생리학적 반응 연구는 성목의 장기적 반응의 불확실한 영역을 설명

할 수 있다(Norby et al., 1986). 이에 따라, 본 연구에서는 미세먼지 환경 조성이 가능한 공간에서 도시 주요 수목인 전나무(*Abies holophylla*), 중국단풍(*Acer buergerianum*), 소나무(*Pinus densiflora*), 굴참나무(*Quercus variabilis*) 묘목을 이용하여 각 수종별 미세먼지에 대한 생리적 및 생화학적 변화와 다음 수종들의 미세먼지 흡착능력에 대한 상관관계를 파악하고자 한다.

재료 및 방법

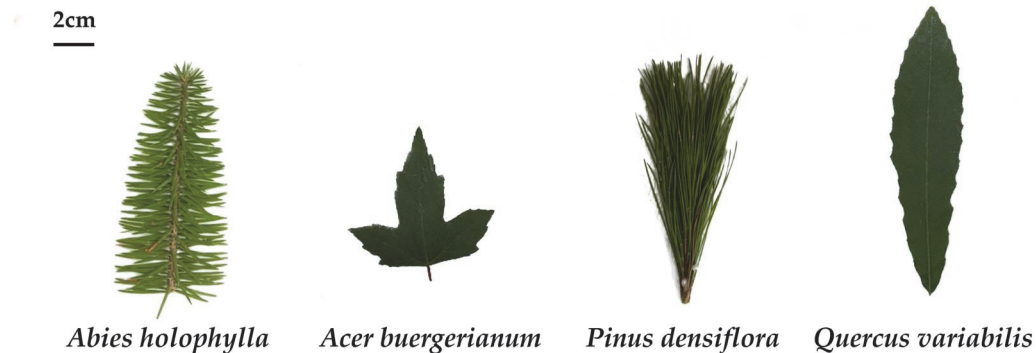
1. 연구대상 수종

본 연구는 전나무(*Abies holophylla*), 중국단풍(*Acer buergerianum*), 소나무(*Pinus densiflora*), 굴참나무(*Quercus variabilis*)의 네 수종을 대상으로 미세먼지 처리에 대한 수목 반응 특성을 알아보기 위해 실험을 진행하였다(Figure 1). 산림과학원 내 3년생 묘목을 조경용 상토(Forest bed soil, Nongkyung, Incheon, Korea)를 채운 9 L 플라스틱 포트에 이식하여 사용하였다. 모든 묘목은 수분 스트레스를 피하기 위해 매일 관수를 진행하였다. 미세먼지 처리 전 7일 동안 주·야간 온도 27 °C/22 °C와 상대습도 40~45%를 유지하는 입자상 미세먼지 처리 가능한 식물생장조절챔버(Phytotron) 내에서 순화 과정을 거쳤다. 각 수종당 생장이 유사한 10개체를 선별하여 초기 묘고(Seedling height)와 근원경(Root collar diameter) 측정 후 각 수종별 다섯 개체씩 대조구와 미세먼지 처리구로 나누어 실험을 7월

한 달 동안 진행하였다. 제한된 공간 특성에 따라 각 수종별 5개체를 5반복으로 간주하여 생리 및 생화학적 반응을 조사하였다.

2. 미세먼지 처리

실험은 서울시립대학교 내 미세먼지 발생기(SAG 410, Topas GmbH, Germany)가 연동되는 식물생장조절챔버(Dust growth chamber, YTK cooperation, Gyeonggi, Korea)에서 이루어졌다(Figure 2). 미세먼지 처리 생장조절챔버 시스템은 Lee et al.(2021)에 기술된 대로 사용하였다. 각 챔버는 부피가 약 4.5 m³(1.5 m×1.5 m×2.0 m)으로 강화유리로 제작되어 자연광 하에서 실험을 진행하였다. 각 챔버는 광산란법 방식 미세먼지 농도 측정기(CEL-712, Casella, USA)를 통해 챔버 내 미세먼지의 농도를 실시간으로 측정 및 조절하였다. 처리된 입자상 물질은 1차 발생 미세먼지로 지정된 비산재(fly ash) (JIS test powder class 5, APPIE, Kyoto, Japan)를 처리하였다. 환경부의 미세먼지 정보 발령기준 ‘매우나쁨’ 기준인 2시간 평균 농도 총 미세먼지(TPM, total particulate matter) 300 µg m⁻³으로 처리 농도를 정하였으며, 처리 기간은 2020년 수도권 미세먼지 주의보 발령일수를 고려하여, 4주간 처리를 진행하였다(National Institute of Environmental Research, 2021). 하루 9시간(09:00~18:00)씩 총 4주간 미세먼지 노출을 진행하면서 식물의 피해 반응을 확인하였다. 대조구 및 처리구 챔버는 주·야간 온도 27 °C/22 °C와 상대습도 40~45%를



| | Seedling height (cm) | Root collar diameter (mm) | Leaf area (cm ²) |
|---------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------|
| <i>Abies holophylla</i> | 50±5c | 14.66±0.7a | 0.6±0.1c |
| <i>Acer buergerianum</i> | 86.67±6.51ab | 10.74±0.56b | 23.3±2.97b |
| <i>Pinus densiflora</i> | 75±3b | 9.87±1.1bc | 3.58±0.03c |
| <i>Quercus variabilis</i> | 97.33±7.09a | 8.52±0.65c | 43.44±12.82a |

Figure 1. Seedling height, root collar diameter, leaf shape, and leaf area of experimental tree species (*Abies holophylla*, *Acer buergerianum*, *Pinus densiflora*, *Quercus variabilis*) used in this experiments. Scale bar = 2 cm.

24시간 동안 챔버 환경을 유지하였으며, 처리구 내 일일 광량 및 미세먼지 환경변화량은 Figure 3과 같았다.

3. 생리적 반응 측정

1) 순광합성량, 기공전도도, 증산율

식물의 생리적인 특성인 순광합성량(P_n), 기공전도도(g_s), 증산율(T_s)은 LI-6400XT 휴대용 광합성 측정기(LI-6400XT, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)를 사용하여 미세먼지 처리 0주, 1주, 2주, 3주 그리고 4주 차에 09:00~12:00 내 측정을 진행하였다. 수종별 5개체를 5반복으로 간주하여, 개체 내 정단부에서 2~4번째의 완전히 전개된 잎을 선정하여 측정하였다. 기체교환능력 측정 시 광합성 광량 자속 밀도(Photosynthetic Photon Flux Density, PPF)는 $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 을 유지하였으며, 챔버 내부 온도 27°C , 상대습도는 50~60%, CO_2 농도는 CO_2 injector system을 이용하여 $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ 로 유지하였다.

2) 엽록소 함량

활엽수종인 중국단풍과 굴참나무의 엽록소 함량은 엽록소 함량 측정기(MC-100, Apogee instruments, Inc., Logan, UT, USA)를 이용하여 $\mu\text{mol m}^{-2}$ 기준으로 측정하였다. 그리고 침엽수종인 소나무와 전나무의 경우 총 엽록소 함량 분석을 위해 Arnon(1949)방법을 수정하여 진행하였다. 측정시기 별로 잎을 샘플링 한 후 절편으로 잘라 0.1 g의 잎을 10 ml의 80%(v/v) 아세톤에 넣은 후 4°C 에서 2주간 보관 후 UV/VIS spectrophotometer (Epoch microplate Spectrophotometer, Synergy-Bio Tek, Winooski, VT, USA)를 이용하여 645와 663 nm에서 흡광도를 측정하고, 광색소별 함량을 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ FW를 기준으로 산출하였다.

$$\text{Total Chlorophyll (a+b)} (\text{mg}\cdot\text{g}^{-1} \text{ FW}) = 20.2 \times A_{645} + 8.02 \times A_{663}$$

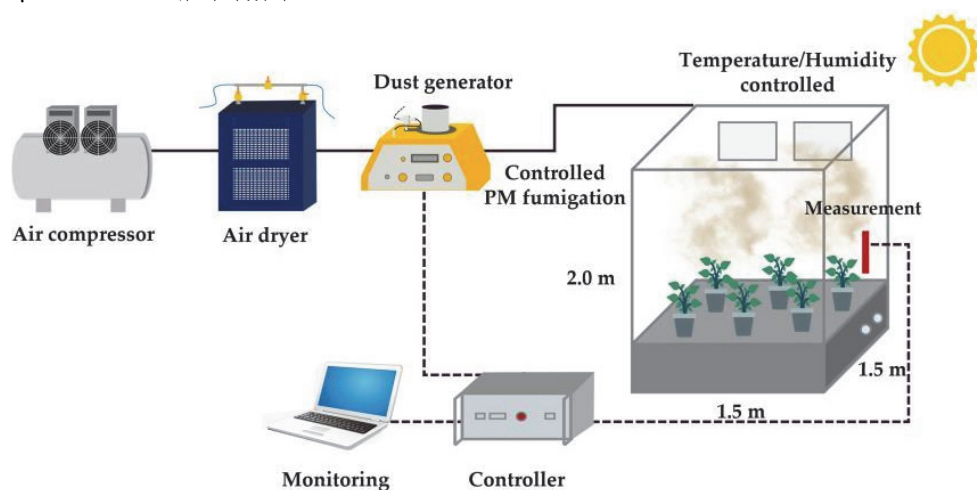


Figure 2. Schematic diagram of the PM-fumigated growth chamber adopted from Lee et al.(2021).

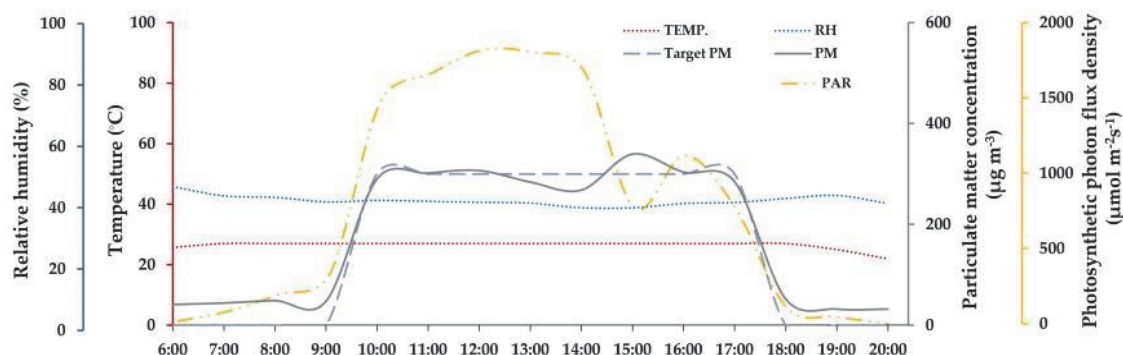


Figure 3. Daily mean values of particulate matter concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$), temperature, relative humidity (RH), and photosynthetic photon flux density (PPFD) in phytotron with fly ash-fumigation system during the experimental day.

4. 생화학적 반응 측정

1) 활성산소종(Reactive oxygen species; ROS)

Alexieva et al.(2001)의 방법을 수정하여 활성산소종인 과산화수소(H₂O₂) 함량을 계산하였다. 잎의 생체 중 0.1 g에 0.1% TCA (Trichloroacetic acid)를 넣은 후 원심분리 (15,000 × g, 15분)하여 얻은 상등액 0.5 ml에 100 mM의 potassium phosphate buffer (pH 7.8) 0.5 ml와 1 M KI 1 ml를 혼합하였다. 혼합액을 암 조건에서 1시간 동안 보관하여 반응시킨 후 상등액 200 μl를 micro well로 옮긴 뒤 파장 390 nm에서의 흡광도를 UV/VIS spectrophotometer를 통해 측정하였다.

2) 지질과산화(Malondialdehyde; MDA)

Heath and Packer(1968) 분석방법을 이용하여 MDA (Malondialdehyde) 함량을 측정하였다. 잎 0.1 g 생체중에 0.1% TCA (Trichloroacetic acid)를 넣은 후 원심분리 (15,000×g, 15분)하여 얻은 상등액 0.5 ml와 20% TCA를 용매로 하는 0.5% TBA (Thiobarbituric acid) 용액 1.5 ml를 혼합하였다. 혼합액을 95 °C에서 15분간 가열하여 반응을 유도한 후 얼음으로 바로 식힌 뒤 반응된 상등액 200 μl를 취하여 UV/VIS spectrophotometer (UV-2100, Shimadzu, Japan)를 이용해 532, 600 nm 파장에서 흡광도를 측정하였다. MDA의 함량은 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{MDA (nmol g}^{-1} \text{ FW)} = ((A_{532} - A_{600}) / 155,000) \times 10^6$$

5. 잎 표면의 미세먼지 흡착면적 측정

각 수종을 측정기간 별로 샘플링한 3~5개의 완전히 전개된 잎을 대상으로 동결건조기(freeze dryer)를 이용하여 건조한 후 잎 표면의 미세먼지 흡착면적 관찰에 이용하였다. 활엽수의 경우 1 mm×1 mm, 침엽수의 경우 1 mm로 건조된 잎을 절단한 뒤, metal stub 위에 올린 다음 백금(platinum)으로 코팅하였다. 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscopy, FE-SEM; SU8010, Hitachi High-Tech, Tokyo, Japan)를 사용하여 미세먼지 처리 후 각 수종별 잎 표면의 미세먼지 흡착면적에 대하여 관찰하였다. Image J image analysis software를 이용하여 잎의 100 mm²당 PM 흡착면적을 계산하였다.

6. 통계처리

모든 데이터는 IBM SPSS Statistics 26 (SPSS Inc., IBM Company Headquarters, Chicago, IL, USA)을 사용하여 통계분석 되었으며, 집단 간 통계적 유의차를 확인하기 위해 일원배치분산분석(One-way ANOVA analysis)을 사용하

였다. 그런 다음 ANOVA를 수행하여 통계적으로 집단 간 중요한 차이를 확인하고 Tukey's HSD test (P=0.05)을 사용하여 각 집단 간 차이의 유의성을 검증하였다. 각 수목의 생리적 피해 모니터링을 위한 대조구와 처리구의 통계적 유의성은 T-test를 사용하여 수행되었다. 효과크기 (Cohen's d)의 추정치는 미세먼지 처리에 대한 수목의 생리적·생화학적 변화 차이를 알아보기 위해 사용하였다 (Cohen, 1988). 피어슨 상관 분석(Pearson's correlation analysis)은 미세먼지 흡착면적 변수와 생리적·생화학적 변화 간의 상관성 분석을 위해 수행되었다. 모든 데이터는 평균(Mean)±표준편차(Standard deviation)로 표현하였다.

결과 및 고찰

1. 미세먼지 처리에 따른 생리적 반응 변화

4주 동안 미세먼지에 노출된 개체들의 광합성률을 측정하였을 때, 소나무를 제외하고 모든 수종에서 미세먼지 처리구인 실험구의 광합성률이 대조구에 비하여 감소하였다(Figure 4). 전나무의 경우, 1주 차, 2주 차, 3주 차, 4주 차 모두 유의한 차이를 보이며 대조구보다 더 낮은 광합성률을 보였다. 중국단풍은 3주 차에 대조구에 비하여 유의한 차이를 보이며 큰 폭으로 감소했다. 소나무의 경우, 광합성률이 대조구에 비하여 유의한 차이를 보이지 않았다. 본 연구에서 전나무는 같은 침엽수인 소나무보다 미세먼지 노출에 의한 피해 반응이 확연하게 나타난 것을 알 수 있다. 굴참나무는 1주차부터 3주차까지 유의한 차이는 보이지 않았지만, 4주차에 대조구 대비 광합성률이 감소한 것을 확인할 수 있다. 잎에 축적된 미세먼지는 광 흡수에 방해를 주고, 광을 산란시켜 엽록체의 광 흡수에 부정적인 영향을 준다(Ram et al., 2014). 미세먼지 흡착능력은 침엽수가 활엽수보다 큰 것으로 알려져 있다(Li et al., 2017; Zhang et al., 2017). 침엽수종의 표면적이 활엽수종보다 넓고 침엽수의 두꺼운 왁스층이 미세먼지 흡착에 효과적이기 때문이라고 판단하였다(Hwang et al., 2011). 본 연구에서는 침엽수인 전나무는 대조구에 비해 처리구에서 확연한 유의적인 차이를 보였으며, 활엽수인 중국단풍과 굴참나무의 경우 각각 3주차와 4주차에 유의적인 차이를 보였다. 반면, 소나무의 경우 다른 수종과 달리 대조구 대비 광합성 저감이 나타나지 않았다. 침엽수인 전나무와 소나무의 미세먼지에 대한 광합성률 반응의 차이가 다르게 나타났다(Figure 4). 전나무의 경우 건조 및 고온 스트레스와 같은 비생물적 스트레스에 다른 수종에 비해 취약하다고 보고되었다(Jo et al., 2022). Zhang et al.(2022)의 연구에 따르면, 전나무가 *Pinus* 속보다 평균 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 흡착

량이 약 1.3배 정도 높은 것으로 나타났으며, PM 농도가 높은 지역의 전나무가 낮은 지역에 비해 잎의 표면적 특성이 변화하였다. 이러한 특성 변화는 표면 내 미세먼지 흡착으로 인한 왁스 손상, 기공 막힘, 트라이콤 변형에 의해 나타났다(Zhang et al., 2022).

기공전도도, 증산율과 같은 기체교환능력 지표는 비생물적 스트레스에 대한 식물 반응을 알아보기 위한 확실한 지표이다(Woo et al., 2007). 기공폐쇄의 현상은 세포 내 CO₂ 이동을 억제하며, 이로 인하여 광합성 기구에 많은 영향을 준다(Guo et al., 2017). 기공전도도는 식물의 기체 및 수증기 교환을 위한 중요한 출입구이며, 순광합성량과 증산율에 상당한 연관성이 있다(Li et al., 2017). 본 연구에서 활엽수종인 중국단풍이 3주 차에 대조구에 비해 유의한 차이를 보이며 감소하였다(Figure 4). 중국단풍은 기공전도도와 마찬가지로 광합성률이 3주 차에 유의한 차이를

보이며 줄어든 것으로 보아 기공전도도와 광합성 효율은 상관관계가 있는 것으로 판단하였다. 네 수종에서 광합성과 달리 뚜렷한 대조구와의 차이를 나타내지는 않았지만, 중국단풍과 소나무의 경우, 순광합성량과 비슷한 경향을 보였다. 일반적으로, 수목은 건조 스트레스와 같은 비생물적 스트레스에 대해 기공을 닫아 잎의 수분을 유지하는 등, 기공 반응은 스트레스에 의한 탄소 동화 감소에 대한 방어기작으로 작용한다(Sala et al., 2010).

기공전도도와 달리, 굴참나무를 제외한 세 수종 모두 대조구에 비해 증산율이 감소하였다(Figure 4). 전나무의 경우 1주 차부터 대조구와 유의적인 차이를 보이며 증산량이 감소하였으며, 이는 순광합성량과 비슷한 경향을 보였다. 중국단풍의 경우 3주, 4주 차에 대조구와 큰 차이를 보이며 증산율이 감소하였다. 증산 속도는 일반적으로 수종의 기공 개폐 과정의 효율성에 의해 결정된다(Abdulrahman

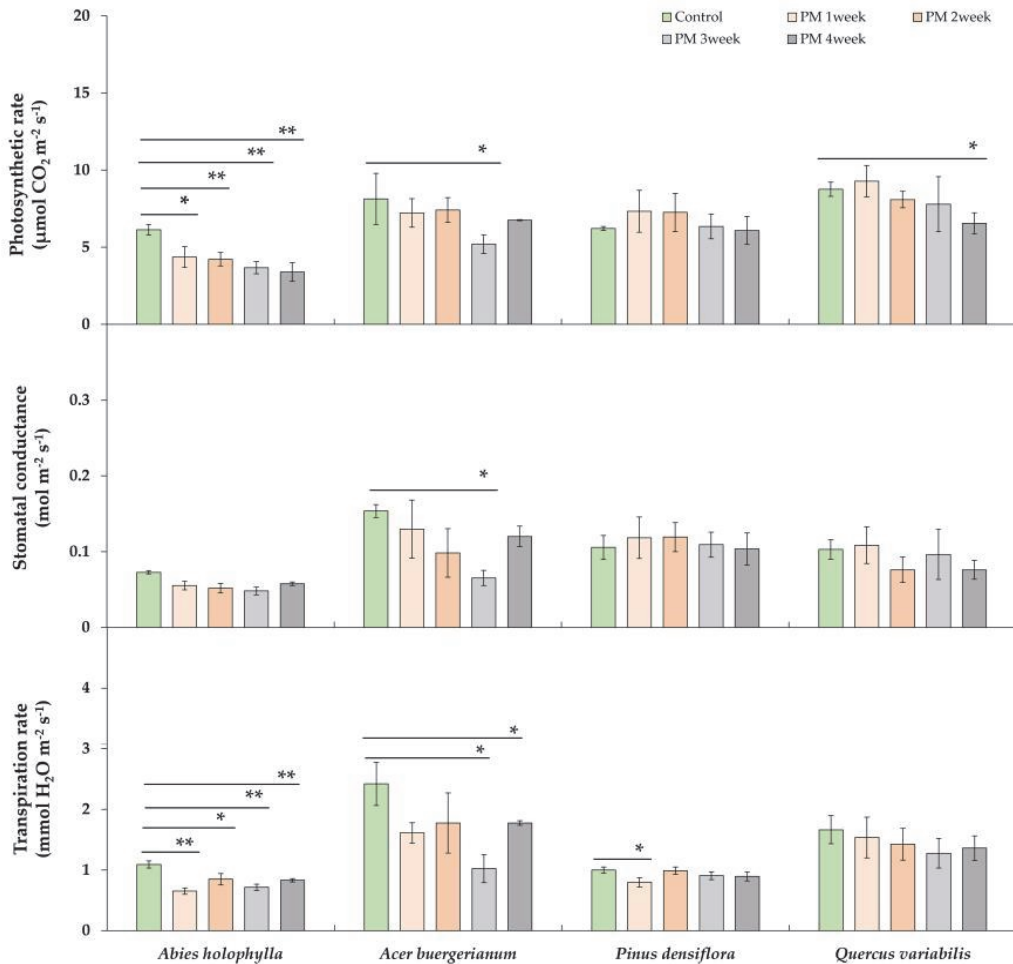


Figure 4. Photosynthetic rate, stomatal conductance and transpiration rate of experimental tree species exposed to elevated particulate matter. Significant differences between control and each treatment were indicated as ‘*’ ($p < 0.05$), ‘**’ ($p < 0.01$) and ‘***’ ($p < 0.001$) according to the paired-samples t-test. Values are mean \pm SE ($n = 5$).

and Oladele, 2009). 잎 표면의 먼지 퇴적은 기공이 막히는 현상뿐만 아니라, 잎 표면에 물리적인 손상을 일으켜 증산율을 떨어뜨린다(Saha and Padhy, 2012).

고농도의 미세먼지 환경에서는 엽록소의 양이 감소할 수 있다고 알려져 있다(van Heerden et al., 2007). 본 연구에서는 300 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 미세먼지 처리 후 모든 수종에서 총 엽록소 함량이 유의적으로 감소하였다(Figure 5). 엽록소는 미세먼지와 같은 대기오염에 상당한 영향을 받는다. 특히, 미세먼지 내 황 성분은 잎의 엽육조직에서 쉽게 확산되고 용해되며, 황산염(sulfite) 또는 중아황산염(bisulfite) 이온을 형성하여 광산화를 시켜 엽록소를 파괴한다(Sharma and Tripathi, 2009). 또한, 고농도의 미세먼지는 식물체에 스트레스를 유발하고, 미세먼지 입자는 물리적으로 가스 교환 능력을 방해하여 CO_2 동화작용을 감소시켜 엽록소 합성을 방해할 수 있다(Chaturvedi et al., 2013). 이것으로 보아 모든 수종은 미세먼지에 의해서 스트레스를 받아 엽록소 함량이 감소하였고, 광화학 반응에 영향을 주는 엽록소 함량의 감소는 광합성 효율 감소와 상관관계가 있음을 의미한다. 전반적으로, 각 수종별 기체교환능력 및 엽록소 함량을 확인하였을 때, 전나무의 경우 광합성량, 증산율, 그리고 엽록소의 함량이 대조구 대비하여 고도로 유의하게 감소하였다. 소나무의 경우, 엽록소 함량의 변화에는 영향을 주었지만, 그것이 광합성 능력 저하까지는 나타나지 않았다. 활엽수인 중국단풍과 굴참나무의 엽록소 저감이 확인되었으며, 광합성 능력이 감소했다. 반면, 중국단풍, 굴참나무의 광합성 능력 저하가 각각 3주차, 4주차에 나타났다.

2. 미세먼지 처리에 따른 생화학적 반응 변화

식물세포는 산화 스트레스를 방어하기 위해 항산화물질을 형성하는 시스템을 갖추었지만, ROS 양이 과도하게 증

가하게 되면 세포 과사가 발생하여 세포 내 물질 불균형으로 인한 식물 성장에 피해를 발생시킨다(Ahamed et al., 2013). 높은 활성산소종의 수준은 세포막의 지질을 손상시켜 지질과산화(MDA)를 유발한다. 손상된 세포막으로부터 생성되는 MDA 함량의 변화는 산화 스트레스 예측 인자로 사용될 수 있다(Shohael., 2006).

본 연구에서는 모든 수종에서 공통적으로 MDA 함량이 증가하였다(Figure 6). 미세먼지 처리 2주 차에서 MDA 함량 변화는 미미하였지만 4주 차에서 유의적으로 큰 증가를 보였다. 모든 수종에서 H_2O_2 함량의 증가와 함께 MDA 함량 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 소나무의 경우 H_2O_2 함량이 급격히 증가한 4주 차에서 MDA 함량 또한 유의적인 증가를 나타내었다. 대기오염에 의한 스트레스는 식물 세포 내 과산화수소(H_2O_2), 초과산화 음이온(O^-), 수산화 이온(OH^-), 수산화라디칼 (OH^\bullet) 등의 ROS 생성을 유발한다고 알려져 있다(Suzuki and Mittler, 2006).

세포 내 활성산소종의 함량 조사는 식물의 산화 스트레스를 확인하는 지표로써 간주한다(Shohael et al., 2006). 도시 수목은 대기오염이 높은 환경에 노출되어 산화 스트레스로 인한 세포 내 활성산소종(ROS)이 형성되기 쉽다. 스트레스로 인한 세포 내 활성산소종의 과생성은 세포막과 산화적 DNA 손상을 발생시켜 수목에 악영향을 끼친다(Lee et al., 2020). 뿐만 아니라, 광화학 반응에 관여하는 색소 저하와 광합성 활성에 손상을 주어 광합성 능력을 저하시킨다(Suzuki and Mittler, 2006). Yang et al.(2018)는 챔버 실험에서 300 $\mu\text{g m}^{-3}$ 와 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ 농도의 미세먼지를 하루 처리한 후 7일간 ROS 함량의 변화를 확인하였는데, ROS 함량이 대조구보다 유의적으로 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 처리한 미세먼지는 수용성 무기 이온인 SO_4^{2-} 를 포함하는 비산재(fly ash)로써 대기오염물질

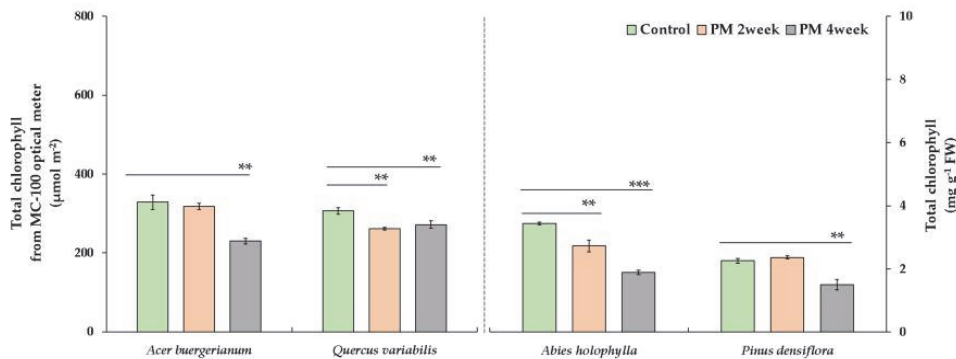


Figure 5. Total chlorophyll concentration from MC-100 optical meter ($\mu\text{mol m}^{-2}$) of broad leaves (*Acer buergerianum* and *Quercus variabilis*) and Total chlorophyll (mg g^{-1}) of needle leaves exposed to elevated particulate matter. Significant differences between control and each treatment were indicated as “*” ($p<0.05$), “**” ($p<0.01$) and “***” ($p<0.001$) according to the paired-samples t-test. Values are mean \pm SE (n=5).

인 이산화황과 비슷한 기작으로 ROS 형성에 관여한다 (Rai, 2016).

본 연구는 ROS의 변화 반응을 알아보기 위하여 활성산소종 중 하나인 과산화수소(H_2O_2) 함량의 변화를 확인하였다(Figure 6). 소나무와 중국단풍의 경우 시간이 지남에 따라 H_2O_2 함량의 급격한 증가를 보였다. 반면 전나무는 2주 차에는 약간 증가하였으나 4주 차까지 거의 일정하였다. 마지막으로 굴참나무는 4주 차까지 유의미한 변화가 나타나지 않았다.

앞서 관찰한 순광합성량의 변화와 H_2O_2 함량의 변화를 비교해보면, 4주 동안 진행된 본 연구에서 소나무의 H_2O_2 함량 증가는 순광합성량 저하에 큰 영향을 미치지 못했다. 그러나 H_2O_2 의 함량이 4주 차에 급격히 증가한 것으로 볼 때, 소나무의 광합성 능력이 미세먼지 처리 한 달 이후에는 많이 감소할 것으로 추측해볼 수 있다. 이는 추후 연구에서 미세먼지 처리 기간을 더 연장하여 확인할 필요가 있다. 그리고 순광합성량의 두드러진 감소세를 보인 전나무와 중국단풍에서는 H_2O_2 함량의 유의적인 증가가 나타났다.

3. 잎 표면의 미세먼지 흡착면적 특성

잎 표면의 미세구조 특징은 수목의 미세먼지 흡착 능력에 많은 영향을 미친다(Nowak et al., 2006). 잎 표면에 깊은 홈(grooves)과 많은 융선(ridges)을 가진 수종은 표면이 매끄러운 종보다 미세먼지 흡착 능력이 우수하다(Burkhardt,

2010). 침엽수 잎 형태의 경우, 상대적으로 활엽수보다 더 큰 표면적을 지니고 있으며, 잎 표면의 두꺼운 덩어리 왁스를 함유하고 있어 미세먼지 흡착 능력이 뛰어나다(He et al., 2020). 특히, 입자 직경 2.5~10 μm 의 미세먼지의 흡착 능력은 잎의 홈 구조와 상관성이 상당히 높다(Sgrigna et al., 2020). 이러한 잎의 복잡한 구조적인 특징은 같은 수종에서도 잎의 앞면과 뒷면에서 다르게 나타난다(Zhang et al., 2017).

각 수종별 미세먼지 흡착 능력을 알아보기 위해 주사전자현미경을 이용하여 잎 면적의 100 mm^2 당 미세입자가 붙어있는 면적을 수치화하였다. 그 결과, 잎 앞면과 뒷면의 단위면적 당 미세먼지가 흡착된 면적은 수종별로 두드러진 차이를 보여준다. 먼저, 잎 앞면에서 미세먼지 흡착 면적은 전나무가 가장 높은 수치를 나타냈다(Figure 7). 전나무는 잎 표면이 친수성이며 이러한 특성은 입자장 대기 오염물질을 저감하는데 중요한 역할을 한다고 알려져 있다(Wichink Kruit et al., 2008). 반면 소나무 잎 앞면의 미세먼지 흡착면적은 다른 수종에 비해 상대적으로 낮게 나타났다(Figure 7). 잎 뒷면 흡착면적의 경우는 소나무가 가장 넓었으며, 전나무 또한 다른 두 활엽수종에 비해 흡착 면적이 넓었다. 특히 소나무의 잎 뒷면의 미세먼지 흡착면적은 미세먼지 처리 2주 차보다 4주 차에서 다른 수종보다 유의적으로 높은 수치를 보였다. 소나무는 일반적으로 잎 뒷면에 밀집된 왁스 결정을 갖기 때문에 미세먼지 흡착 능력이 뛰어나다고 알려져 있다(Kwak et al., 2019). 소나

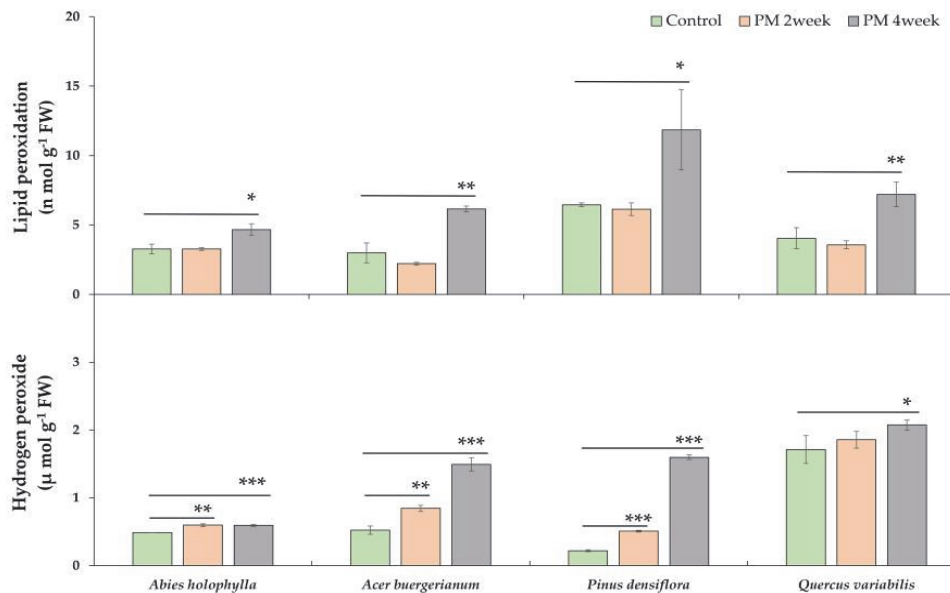


Figure 6. Lipid peroxidation and hydrogen peroxide(H_2O_2) content of tree species exposed to elevated particulate matter at 2 and 4 weeks. Significant differences between control and each treatment were indicated as ‘*’ ($p < 0.05$), ‘**’ ($p < 0.01$) and ‘***’ ($p < 0.001$) according to the paired-samples t-test. Values are mean \pm SE ($n = 5$).

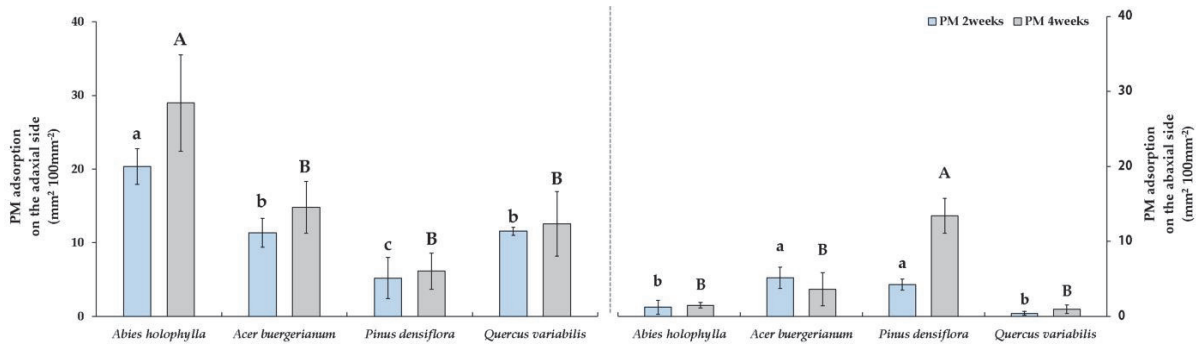


Figure 7. Adsorption on adaxial and abaxial leaves of tree species exposed to elevated particular matter at 2 and 4 weeks. Differences between four species in ‘PM 2 weeks’ were indicated as lower case and differences between four species in ‘PM 4 weeks’ group were indicated as upper case according to the Tukey’s HSD test. Values are mean±SE (n=5).

무류(e.g. *Pinus tabuliformis*, *Pinus bungeana*)는 평평하지 않은 표면의 미세구조, 높은 기공 밀도와 특이한 홈 구조에 의해 미세먼지 흡착 능력이 뛰어나다(Zhang et al., 2018). 이렇게 소나무 종은 높은 저감 능력을 가진 수종으로 알려져 있으나 오염 물질에 의한 피해에는 취약하여 심하게 오염된 지역에서의 식재가 자제된다(Chen et al., 2016).

4. 생리·생화학적 반응 특성과 잎의 흡착면적 특성 간의 상관성 분석

본 연구에서 고농도 미세먼지 처리 후 수종의 생리적 반응 특성, 생화학적 반응 특성 그리고 잎의 흡착면적에 대해 각 특성의 요인들 간의 상관관계와 각 특성 간의 상관관계에 대해서 피어슨 상관 분석(Pearson’s correlation analysis)을 통해 비교 분석하였다(Figure 8). 유의적으로 높은 상관관계를 갖는 특성들은 다음과 같다. 먼저, 생리적 특성에서 순광합성률과 기공전도도, 그리고 증산율 모두 서로 양의 상관관계를 갖는다. 순광합성율은 식물 성장을 매개하는 주요 생리적 과정이며 기공전도도 또는 RuBisCO 활동, 광합성 색소 함량 및 광화학 효율과 같은 비기공 요인에 의해 제한된다(Zhang et al., 2014). 많은 연구에서 순광합성률은 탄소 동화의 특정 대사과정보다는 주로 낮은 기공전도도의 생리적 반응에 의한 결과가 주로 이루어진다고 보고했다(Flexas et al., 2004; Sarabi et al., 2019; Zhang et al., 2009). 반면, 생화학적 특성에서 ROS와 MDA는 서로 유의적인 상관성을 나타내지 않았다. 이 원인으로서는 잎의 ROS 함량이 미세먼지 처리 2주차에서 대조구 대비 유의적으로 증가하였으나, MDA 함량은 대조구 대비 유의적으로 증가하지 않았고 4주차부터 MDA의 함량이 크게 증가하여 두 함량의 변화에 시간차이가 존재하기 때문이다. 이는 나무가 세포내 ROS가 증가하여 세포 지질괴사에 이르는 동안 잎의 기공폐쇄를 유도하여 비생

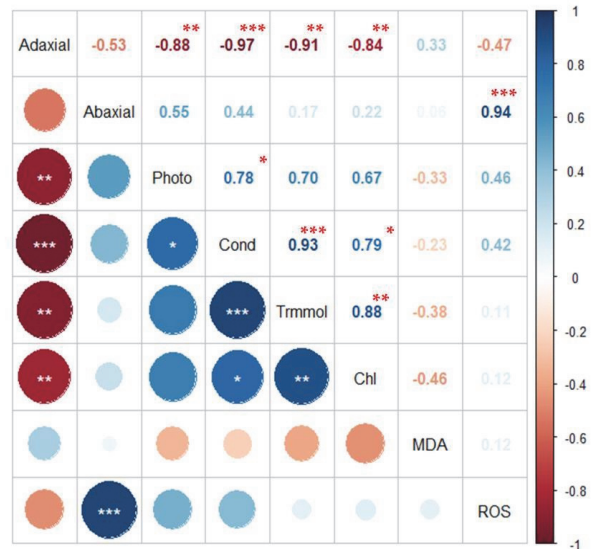


Figure 8. Pearson’s correlation analysis between physiological characteristics, biochemical characteristics and adsorption on the leaves of tree species exposed to elevated particular matter. Significant correlation between two factors was indicated as ‘*’ ($p<0.05$), ‘***’ ($p<0.01$) and ‘****’ ($p<0.001$).

물적 스트레스의 방어기작이 일어나기 때문으로 판단하였다(Liu et al., 2022). 이렇듯, 미세먼지 2주차 처리 내 전나무, 중국단풍, 소나무의 H₂O₂의 증가는 바로 세포 괴사로 나타나지 않았다. 본 연구의 상관성 분석에는 잎 앞면의 미세먼지 흡착면적과 수목의 생리적 지표인 광합성율, 기공전도도, 증산율 그리고 광합성 함량이 유의적인 음의 상관관계를 보였다. 특히 기공전도도는 상관계수가 -0.97($p<0.001$)으로 가장 높은 상관성을 보였다. 미세먼지는 일반적으로 식물 잎의 기공을 차단하고 이를 통해서 식물 호흡과 식물 광합성을 감소시킬 수 있다(Hirano et al., 1995). 잎 표면의 미세먼지 양이 증가하면, 수목의 효율적인 광합성이 감소하는데 세 가지 이유가 있다. 첫 번째로는 미세먼지는 기공을 막아 가스교환능력을 방해한

다(Li et al., 2019). 두 번째로는 잎에 쌓인 미세먼지는 잎 표면을 덮어 잎의 빛 흡수를 방해하여 광화학 반응을 줄인다(Neves et al., 2009). 마지막으로 PM흡착과 다양한 입자에 의한 기공 막힘은 증산율을 줄이고 잎의 가스교환을 억제하여 잎 온도를 높여 광합성을 손상시킨다(Lu et al., 2019). 잎의 앞면 및 뒷면의 미세먼지 흡착면적을 비교하였을 때, 잎 앞면의 미세먼지 흡착면적이 높은 것을 확인할 수 있다. 잎 앞면의 높은 흡착면적은 기체교환능력, 엽록소 함량과 같은 생리적 요인들에 유의적으로 영향을 주었다. 전나무의 경우, 잎 앞면의 미세먼지 흡착면적이 다른 수종에 비해서 상대적으로 높았으며(Figure 7), 다른 수종에 비해 순광합성량이 1주차부터 대조구 대비 감소하였다(Figure 4). 잎 뒷면의 미세먼지 흡착면적과 ROS 함량은 유의적으로 높은 정의 상관관계를 보인다. 소나무의 잎 뒷면 미세먼지 흡착면적은 다른 수종에 비해서 높았고, 소나무의 ROS 함량 증가는 2주차 미세먼지 처리부터 고도로 유의하였다. 이를 통해서, 고농도의 미세먼지는 식물체의 산화 스트레스를 유도하는 것을 확인하였다. Rai et al. (2013) 연구에서도 입자상 물질에 의해 발생하는 대기오염이 식물 활성 기능을 변화를 일으키고 다양한 산화스트레스를 유발한다고 보고하였다.

결론

본 연구에서 각 수종의 미세먼지에 대한 생리·생화학적인 반응과 잎의 흡착면적은 모두 다르게 나타났다. 순광합성률은 전나무가 가장 심하게 감소하였다. 소나무의 경우 미세먼지 4주차 처리에서도 순광합성률 뿐만 아니라 기공전도도, 증산율에서도 유의적인 변화가 나타나지 않았다. 모든 수종에서 공통적으로 유의적인 변화가 나타난 것은 엽록소 함량과 생화학적인 지표인 ROS 및 지질과산화 함량이었다. 모든 수종은 미세먼지 처리 4주 차에서 엽록소 함량이 크게 감소하였으며 MDA 함량은 크게 증가하였다. 이를 통하여 미세먼지의 증가는 대다수 수종에 산화스트레스를 유발하는 것을 확인하였고, 이에 의해 엽록소 함량이 줄어들었다. 잎 앞면의 미세먼지 흡착면적은 전나무에서 가장 높게 나타났다. 하지만 잎 뒷면의 미세먼지 흡착면적은 4주차에서 소나무가 높게 나타났다. 반면 2주차에는 중국단풍과 소나무의 통계적 차이는 나타나지 않았다.

상관성 분석을 통해 순광합성률, 기체교환능력, 증산율 그리고 엽록소 함량은 알려진 바와 같이 서로 유의적으로 높은 양의 상관관계가 있음을 확인하였다. 그리고 생리적 반응은 수목의 잎 앞면 미세먼지 흡착면적과 유의적 상관관계가 있음을 확인하였다. 특히, 잎의 앞면 미세먼지 흡

착이 증가할수록 기공과 관련된 요인들이 감소했다. 또한, 잎 뒷면의 미세먼지 흡착이 증가함에 따라 생화학적 반응인 H_2O_2 가 증가하였고, 이를 통해 미세먼지 흡착은 산화 스트레스를 유발하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통하여 미세먼지의 증가가 수목의 생리적 및 생화학 반응에 관여하는 것을 확인하였다. 미세먼지 흡착면적의 관점에서 볼 때, 전나무가 미세먼지 저감에 영향을 주는 수종으로 보이나, 기체교환능력 변화의 요인의 관점에서 전나무는 다른 수종에 비해 미세먼지에 대한 변화가 많이 나타났다. 또한, 고농도 미세먼지 스트레스가 4주간 지속되면 세포가 파괴되어 도심 수종에 치명적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 도심 수종들의 미세먼지 저감 능력을 연구하는 동시에 미세먼지 노출에 대한 내성에 관한 연구를 심화한다면, 도시 미세먼지 환경에 따라 도심 수종의 적절한 선발과 식재계획을 수립하는데 도움이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 국립산림과학원 대기오염물질 저감을 위한 식물의 메커니즘 및 기능향상 연구(과제번호: FE0000-2018-01-2021)의 일부로 진행되었습니다.

References

- Abdulrahman, A.A. and Oladele, F.A. 2009. Stomatal features and humidification potentials of *Borassus aethiopum*, *Oreodoxa regia* and *Cocos nucifera*. African Journal of Plant Science 3(4): 59-063. <http://www.academicjournals.org/AJPS>
- Ahamed, G.J., Choudhary, S.P., Chen, S., Xia, X., Shi, K., Zhou, Y. and Yu, J. 2013. Role of brassinosteroids in alleviation of phenanthrene-cadmium co-contamination-induced photosynthetic inhibition and oxidative stress in tomato. Journal of Experimental Botany 64(1): 199-213. <https://doi.org/10.1093/JXB/ERS323>
- Alexieva, V., Sergiev, I., Mapelli, S. and Karanov, E. 2001. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. Plant, Cell & Environment 24(12): 1337-1344. <https://doi.org/10.1046/J.1365-3040.2001.00778.X>
- Aron, D.I. 1949. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. Plant Physiology 24(1): 1-15. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- Bui, H.T., Odsuren, U., Kwon, K.J., Kim, S.Y., Yang, J.C., Jeong, N.R. and Park, B.J. 2021. Assessment of air pollution tolerance and particulate matter accumulation of

- 11 woody plant species. *Atmosphere* 12(8): 1067. <https://doi.org/10.3390/ATMOS12081067>
- Burkhardt, J. 2010. Hygroscopic particles on leaves: nutrients or desiccants? *Ecological Monographs* 80(3): 369-399. <https://doi.org/10.1890/09-1988.1>
- Chaturvedi, R.K., Prasad, S., Rana, S., Obaidullah, S.M., Pandey, V. and Singh, H. 2013. Effect of dust load on the leaf attributes of the tree species growing along the roadside. *Environmental Monitoring and Assessment* 185(1): 383-391. <https://doi.org/10.1007/S10661-012-2560-X/FIGURES/2>
- Chen, L., Liu, C., Zou, R., Yang, M. and Zhang, Z. 2016. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution* 208: 198-208. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2015.09.006>
- Cohen, J. 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. In *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Ferrini, F., Bussotti, F., Tattini, M. and Fini, A. 2014. Trees in the urban environment: response mechanisms and benefits for the ecosystem should guide plant selection for future plantings. *Agrochimica* 58(3): 234-246.
- Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G. and Sharkey, T. D. 2004. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C₃ plants. *Plant Biology* 6(3): 269-279. <https://doi.org/10.1055/S-2004-820867/ID/90>
- Gómez-Arroyo, S., Cortés-Eslava, J., Loza-Gómez, P., Arenas-Huertero, F., Grutter de la Mora, M. and Morton Bermea, O. 2018. In situ biomonitoring of air quality in rural and urban environments of Mexico Valley through genotoxicity evaluated in wild plants. *Atmospheric Pollution Research* 9(1): 119-125. <https://doi.org/10.1016/J.APR.2017.06.009>
- Guo, H., Wang, H., Liu, Q., An, H., Liu, C., Xia, X. and Yin, W. 2017. ¹⁵N-labeled ammonium nitrogen uptake and physiological responses of poplar exposed to PM_{2.5} particles. *Environmental Science and Pollution Research* 24(1): 500-508. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7620-2>
- Hanslin, H.M., Przybysz, A., Slimestad, R. and Sæbø, A. 2017. Stress acclimation and particulate matter accumulation in *Pinus sylvestris* saplings affected by moderate combinations of urban stressors. *Science of The Total Environment* 593-594: 581-591. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.03.133>
- He, C., Qiu, K., Alahmad, A. and Pott, R. 2020. Particulate matter capturing capacity of roadside evergreen vegetation during the winter season. *Urban Forestry & Urban Greening* 48: 126510. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2019.126510>
- Heath, R.L. and Packer, L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 125(1): 189-198.
- Hirano, T., Kiyota, M. and Aiga, I. 1995. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. *Environmental Pollution* 89(3): 255-261. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)00075-O](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)00075-O)
- Hwang, H.J., Yook, S.J. and Ahn, K.H. 2011. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. *Atmospheric Environment* 45(38): 6987-6994. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2011.09.019>
- Janhäll, S. 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution - Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment* 105: 130-137. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2015.01.052>
- Jo, H., Noulèkoun, F., Khamzina, A., Chang, H. and Son, Y. 2022. Physiological and shoot growth responses of *Abies holophylla* and *Abies koreana* seedlings to open-field experimental warming and increased precipitation. *Water* 14(3): 356. <https://doi.org/10.3390/W14030356/S1>
- Kwak, M.J., Lee, J., Kim, H., Park, S., Lim, Y., Kim, J.E., Baek, S.G., Seo, S.M., Kim, K.N. and Woo, S.Y. 2019. The removal efficiencies of several temperate tree species at adsorbing airborne particulate matter in urban forests and roadsides. *Forests* 10(11): 960. <https://doi.org/10.3390/F10110960>
- Lee, J.K., Kim, D.Y., Park, S.H., Woo, S.Y., Nie, H. and Kim, S.H. 2021. Particulate matter (PM) adsorption and leaf characteristics of ornamental sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) cultivars and two common indoor plants (*Hedera helix* L. and *Epipremnum aureum* Lindl. & Andre). *Horticulturae* 8(1): 26. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8010026>
- Lee, J.K., Woo, S.Y., Kwak, M.J., Park, S.H., Kim, H.D., Lim, Y.J., Park, J.H. and Lee, K.A. 2020. Effects of elevated temperature and ozone in *Brassica juncea* L.: growth, physiology and ROS accumulation. *Forests* 11(1): 68. <https://doi.org/10.3390/F11010068>
- 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: 249-253. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2016.03.006>

- UG.2016.09.008
- Li, Y., Li, H., Li, Y. and Zhang, S. 2017. Improving water-use efficiency by decreasing stomatal conductance and transpiration rate to maintain higher ear photosynthetic rate in drought-resistant wheat. *The Crop Journal* 5(3): 231-239. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2017.01.001>
- Li, Y., Wang, Y., Wang, B., Wang, Y. and Yu, W. 2019. The response of plant photosynthesis and stomatal conductance to fine particulate matter (PM_{2.5}) based on leaf factors analyzing. *Journal of Plant Biology* 62(2): 120-128. <https://doi.org/10.1007/s12374-018-0254-9>
- Liu, H., Song, S., Zhang, H., Li, Y., Niu, L., Zhang, J. and Wang, W. 2022. Signaling transduction of ABA, ROS and Ca²⁺ in plant stomatal closure in response to drought. *International Journal of Molecular Sciences* 23(23): 14824. <https://doi.org/10.3390/IJMS232314824>
- Lu, T., Lin, X., Chen, J., Huang, D. and Li, M. 2019. Atmospheric particle retention capacity and photosynthetic responses of three common greening plant species under different pollution levels in Hangzhou. *Global Ecology and Conservation* 20: e00783. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2019.E00783>
- 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* 41(38): 8455-8467. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSENV.2007.07.025>
- National Institute of Environmental Research. 2021. Annual Report of Air Quality in Korea, 2020.
- Nawahda, A., Yamashita, K., Ohara, T., Kurokawa, J. and Yamaji, K. 2012. Evaluation of premature mortality caused by exposure to PM_{2.5} and ozone in East Asia: 2000, 2005, 2020. *Water, Air and Soil Pollution* 223(6): 3445-3459. <https://doi.org/10.1007/S11270-012-1123-7/FIGURES/6>
- Neves, N.R., Oliva, M.A., da Cruz Centeno, D., Costa, A.C., Ribas, R.F. and Pereira, E.G. 2009. Photosynthesis and oxidative stress in the restinga plant species *Eugenia uniflora* L. exposed to simulated acid rain and iron ore dust deposition: Potential use in environmental risk assessment. *Science of The Total Environment* 407(12): 3740-3745. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2009.02.035>
- Norby, R.J., Pastor, J. and Melillo, J.M. 1986. Carbon-nitrogen interactions in CO₂-enriched white oak: physiological and long-term perspectives. *Tree Physiology* 2(1-2-3): 233-241. <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/2.1-2-3.233>
- Nowak, D. J., Crane, D. E. and Stevens, J. C. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4(3-4): 115-123. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2006.01.007>
- Pace, R. and Grote, R. 2020. Deposition and resuspension mechanisms into and from tree canopies: a study modeling particle removal of conifers and broadleaves in different cities. *Frontiers in Forests and Global Change* 3: 26. <https://doi.org/10.3389/FFGC.2020.00026/BIBTEX>
- Park, S. et al. 2022. Relationship between leaf traits and PM-capturing capacity of major urban-greening species. *Horticulturae* 8(11): 1046. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8111046/S1>
- Popek, R., Przybysz, A., Gawrońska, H., Klamkowski, K. and Gawroński, S.W. 2018. Impact of particulate matter accumulation on the photosynthetic apparatus of roadside woody plants growing in the urban conditions. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 163: 56-62. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.051>
- Rai, P.K. 2016. Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 129: 120-136. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2016.03.012>
- Rai, P.K., Panda, L.L.S., Chutia, B.M. and Singh, M.M. 2013. Comparative assessment of air pollution tolerance index (APTI) in the industrial (Rourkela) and non industrial area (Aizawl) of India: An ecomanagement approach. *African Journal of Environmental Science and Technology* 7(10): 944-948. <https://doi.org/10.4314/ajest.v7i10>
- Ram, S.S., Majumder, S., Chaudhuri, P., Chanda, S., Santra, S.C., Maiti, P.K., Sudarshan, M. and Chakraborty, A. 2014. Plant canopies: Bio-monitor and trap for re-suspended dust particulates contaminated with heavy metals. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 19(5): 499-508. <https://doi.org/10.1007/S11027-012-9445-8/FIGURES/5>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2012.03.084>
- Saha, D.C. and Padhy, P.K. 2012. Effect of particulate pollution on rate of transpiration in *Shorea robusta* at Lalpahari forest. *Trees - Structure and Function* 26(4): 1215-1223. <https://doi.org/10.1007/S00468-012-0697-4/TABLES/6>
- Sala, A., Piper, F. and Hoch, G. 2010. Physiological mechanisms of drought-induced tree mortality are far from being

- resolved. *New Phytologist* 186(2): 274-281. <https://doi.org/10.1111/J.1469-8137.2009.03167.X>
- Sarabi, B., Fresneau, C., Ghaderi, N., Bolandnazar, S., Streb, P., Badeck, F.W., Citerne, S., Tangama, M., David, A. and Ghashghaie, J. 2019. Stomatal and non-stomatal limitations are responsible in down-regulation of photosynthesis in melon plants grown under the saline condition: Application of carbon isotope discrimination as a reliable proxy. *Plant Physiology and Biochemistry* 141: 1-19. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2019.05.010>
- Sgrigna, G., Baldacchini, C., Dreveck, S., Cheng, Z. and Calfapietra, C. 2020. Relationships between air particulate matter capture efficiency and leaf traits in twelve tree species from an Italian urban-industrial environment. *Science of The Total Environment* 718: 137310. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137310>
- Sharma, A.P. and Tripathi, B.D. 2009. Biochemical responses in tree foliage exposed to coal-fired power plant emission in seasonally dry tropical environment. *Environmental Monitoring and Assessment* 158(1-4): 197-212. <https://doi.org/10.1007/S10661-008-0573-2/METRICS>
- Shohael, A.M., Ali, M.B., Yu, K.W., Hahn, E.J., Islam, R. and Paek, K.Y. 2006. Effect of light on oxidative stress, secondary metabolites and induction of antioxidant enzymes in *Eleutherococcus senticosus* somatic embryos in bioreactor. *Process Biochemistry* 41(5): 1179-1185. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2005.12.015>
- Sicard, P., De Marco, A., Dalstein-Richier, L., Tagliaferro, F., Renou, C. and Paoletti, E. 2016. An epidemiological assessment of stomatal ozone flux-based critical levels for visible ozone injury in Southern European forests. *Science of The Total Environment* 541: 729-741. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.09.113>
- Suzuki, N. and Mittler, R. 2006. Reactive oxygen species and temperature stresses: A delicate balance between signaling and destruction. *Physiologia Plantarum* 126(1): 45-51. <https://doi.org/10.1111/J.0031-9317.2005.00582.X>
- Teke, G., Hubai, K., Diósi, D. and Kováts, N. 2020. Assessment of Foliar Uptake and Accumulation of Airborne Polyaromatic Hydrocarbons Under Laboratory Conditions. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 104(4): 444-448. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02814-z>
- Tiwari, S., Chate, D.M., Srivastava, M.K., Safai, P.D., Srivastava, A.K., Bisht, D.S. and Padmanabhamurty, B. 2012. Statistical evaluation of PM₁₀ and distribution of PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ in ambient air due to extreme fireworks episodes (Deepawali festivals) in megacity Delhi. *Natural Hazards* 61(2): 521-531. <https://doi.org/10.1007/S11069-011-9931-4/FIGURES/6>
- van Heerden, P.D.R., Swanepoel, J.W. and Krüger, G.H.J. 2007. Modulation of photosynthesis by drought in two desert scrub species exhibiting C₃-mode CO₂ assimilation. *Environmental and Experimental Botany* 61(2): 124-136. <https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2007.05.005>
- Wagh, N.D., Shukla, P.V., Tambe, S.B. and Ingle, S.T. 2006. Biological monitoring of roadside plants exposed to vehicular pollution in Jalgaon city. *Journal of Environmental Biology* 27(2): 419-421. www.jeb.co.in
- Wichink Kruit, R.J., Jacobs, A.F.G. and Holtslag, A.A.M. 2008. Measurements and estimates of leaf wetness over agricultural grassland for dry deposition modeling of trace gases. *Atmospheric Environment* 42(21): 5304-5316. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2008.02.061>
- Woo, S.Y., Lee, D.K. and Lee, Y.K. 2007. Net photosynthetic rate, ascorbate peroxidase and glutathione reductase activities of *Erythrina orientalis* in polluted and non-polluted areas. *Photosynthetica* 2007 45(2): 293-295. <https://doi.org/10.1007/S11099-007-0047-8>
- Yang, Q., Wang, H., Wang, J., Lu, M., Liu, C., Xia, X., Yin, W. and Guo, H. 2018. PM_{2.5}-bound SO₄²⁻ absorption and assimilation of poplar and its physiological responses to PM_{2.5} pollution. *Environmental and Experimental Botany* 153: 311-319. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.06.009>
- Zhang, R.H., Li, J., Guo, S.R. and Tezuka, T. 2009. Effects of exogenous putrescine on gas-exchange characteristics and chlorophyll fluorescence of NaCl-stressed cucumber seedlings. *Photosynthesis Research* 100(3): 155-162. <https://doi.org/10.1007/S11120-009-9441-3/FIGURES/3>
- Zhang, W., Feng, Z., Wang, X. and Niu, J. 2014. Elevated ozone negatively affects photosynthesis of current-year leaves but not previous-year leaves in evergreen *Cyclobalanopsis glauca* seedlings. *Environmental Pollution* 184: 676-681. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2013.04.036>
- Zhang, W., Li, Y., Wang, Q., Zhang, T., Meng, H., Gong, J. and Zhang, Z. 2022. Particulate matter and trace metal retention capacities of six tree species: implications for improving urban air quality. *Sustainability* 14(20): 13374. <https://doi.org/10.3390/SU142013374/S1>
- Zhang, W., Zhang, Z., Meng, H. and Zhang, T. 2018. How does leaf surface micromorphology of different trees impact their ability to capture particulate matter? *Forests* 9(11): 681. <https://doi.org/10.3390/F9110681>
- Zhang, X., Lyu, J., Han, Y., Sun, N., Sun, W., Li, J., Liu, C. and Yin, S. 2020. Effects of the leaf functional traits

- of coniferous and broadleaved trees in subtropical monsoon regions on PM_{2.5} dry deposition velocities. *Environmental Pollution* 265: 114845. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114845>
- Zhang, Z., Liu, J., Wu, Y., Yan, G., Zhu, L. and Yu, X. 2017. Multi-scale comparison of the fine particle removal capacity of urban forests and wetlands. *Scientific Reports* 2017 7(1): 1-13. <https://doi.org/10.1038/srep46214>
-
- Manuscript Received : December 1, 2022
First Revision : December 27, 2022
Second Revision : January 16, 2023
Accepted : January 17, 2023