

식물에 의한 표면적 증가와 생리작용이 미세먼지 정화에 미치는 영향 추정^{1a}

오득균² · 임성수³ · 김정호^{4*}

Estimating the Impact of Plant Surface Area Increase and Physiological Activities on Fine Dust Purification^{1a}

Deuk-Kyun Oh², Sung-Soo Lim³, Jeong-Ho Kim^{4*}

요약

본 연구에서는 식물에 의한 표면적 증가와 생리작용이 미세먼지 정화에 미치는 영향을 추정하기 위하여 대조구(Control; Type C)을 설정하고, 관엽식물(*Spathiphyllum wallisii*; Type P)과 인조식물(Artificial Plant; Shape of *Spathiphyllum wallisii*; Type A.P)을 활용하여 미세먼지 정화소요시간을 측정하고 비교·분석하였다. 그 결과, 각 실험구별 미세먼지 정화에 소요된 시간은 Type C에 비하여 Type A.P는 57~64%, Type P는 31~32% 수준으로 감소하였다. 이후, LMM(Liner Mix Model)을 활용하여 각 실험구별 시간변화에 따른 교호작용을 검정한 결과, 표면적증가와 시간변화(PM10 : $t=3.123$, $p<0.05$, PM2.5 : $t=3.180$, $p<0.05$), 생리작용과 시간변화(PM10 : $t=4.065$, $p<0.05$, PM2.5 : $t=4.307$, $p<0.05$)는 통계적으로 유의한 것으로 분석되어 각 요인과 시간변수의 교호작용이 있음을 확인할 수 있었다. 마지막으로 식물의 미세먼지 정화요인에 따른 효율은, 정화요인이 존재하지 않는 대조구(Type C)에 비하여 표면적 증가로 1.40배, 생리작용으로 1.95배, 총 평균 2.74배의 정화시간이 더 짧은 것으로 비선형회귀분석을 통해 추정하였다. 이상의 결과를 종합하여 식물체의 미세먼지 정화매커니즘 중 생리작용(방출 및 흡수 등)이 표면적 증가(흡착)보다 더 큰 영향을 미치고 있음을 예상하였으며, 이에 따라 미세먼지 정화 기능을 목적으로 하는 녹지에서 비배 및 관수관리등 녹지관리가 중요한 요인임을 피력하였다.

주요어: 선형혼합모형, 침착, 흡수, 식물정화공법

ABSTRACT

In this study, to estimate the effects of plant-induced surface area increase and physiological activity on fine dust purification, a control group was set up. We utilized both foliage plants (*Spathiphyllum wallisii*) and artificial plants (shaped like *Spathiphyllum wallisii*) to measure and compare the purification time for fine dust.

1 접수 2024년 3월 29일, 수정 (1차: 2024년 6월 5일), 게재확정 2024년 6월 28일

Received 29 March 2024; Revised (1st: 5 June 2024); Accepted 28 June 2024

2 건국대학교 녹색기술융합학과 교수 Dept. of Green Technology Convergence, Konkuk Univ., 268 Chungwon-daero, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27478, Korea (nice10214@kku.ac.ac.kr)

3 건국대학교 경제통상학과 교수 Dept. of Economics and Trade, Konkuk Univ., 268 Chungwon-daero, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27478, Korea (sslim07@kku.ac.ac.kr)

4 건국대학교 녹색기술융합학과 교수 Dept. of Green Technology Convergence, Konkuk Univ., 268 Chungwon-daero, Chungju-si, Chungcheongbuk-do, 27478, Korea (hoya1209@kku.ac.ac.kr)

a 이 논문은 한국연구재단에서 지원하는 연구비(과제번호 2022R1A2C1092173)에 의하여 연구되었음.

* 교신저자 Corresponding author: hoya1209@kku.ac.kr

The results showed that the time required for fine dust purification in each experimental group decreased by 57-64% for Type AP and 31-32% for Type P compared to the control group. Subsequently, using a Linear Mixed Model (LMM), we tested the interaction between time and each experimental group, revealing statistically significant interactions between surface area increase and time (PM10 : $t=3.123$, $p<0.05$, PM2.5 : $t=3.180$, $p<0.05$), as well as physiological activity and time (PM10 : $t=4.065$, $p<0.05$, PM2.5 : $t=4.307$, $p<0.05$), indicating the presence of interactions between each factor and the time variable. Finally, we estimated the efficiency of fine dust purification by plant factors through nonlinear regression analysis. Compared to the control group without purification factors (Type C), it was estimated that surface area increase shortened the purification time by 1.40 times and physiological activity by an average of 1.95 times, resulting in a total 2.74 times shorter purification time. Based on these results, we hypothesized that physiological activity (transpiration and absorption) has a greater impact on fine dust purification than surface area increase (biosorption). Accordingly, we emphasize the importance of vegetation management practices such as pruning and irrigation management in green spaces aimed at fine dust purification.

KEY WORDS: LINER MIX MODEL, DEPOSITION, ABSORPTION, PHYTOREMEDIATION

서론

미세먼지는 직경에 따라 PM10, PM2.5 등으로 구분하며, PM10은 1,000분의 10mm보다 작은 먼지이며, PM2.5는 1,000분의 2.5mm보다 작은 먼지로, 머리카락 직경의 1/20~1/30 크기보다 작은 입자이다. 이렇게 작은 입자의 특성으로 인하여 인간의 호흡기를 통해 체내로 유입될 경우, 직접적으로 체내에 흡수되어 호흡기 질환과, 심혈관질환 및 조기사망 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며 (Nawahda *et al.*, 2012; Bennett *et al.*, 2019; Sarkodie *et al.*, 2019), 이에 대응하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

실내 환경에 대한 미세먼지오염의 경우, 물리적 필터를 이용한 여과집진과 전기집진으로 정화가 가능하나, 필터를 이용한 여과 집진을 활용할 경우 고가의 필터를 주기적으로 교체해야 되는 경제적 문제가 있으며 필터가 제대로 교체되지 않으면 필터에 포집된 먼지에서 다양한 미생물이 배양되어 2차 오염이 발생하는 문제가 있다 (Kim and Kim, 2023). 또한 실외환경은 공간적·물리적 한계성으로 인해 미세먼지오염에 대한 정화 및 대응이 상대적으로 까다롭다.

우리나라는 이러한 미세먼지에 대한 대응으로 미세먼지 정보 발령, 미세먼지 대처 매뉴얼 배포, 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 제정 등 다양한 대응책 (Ministry of Environment, 2018)을 제시하고 있으며, 산림청, 국립산림과학원, 국립환경과학원 등 다양한 기관에서 도시 미세먼지 저감방법의 도시숲과 도시림, 그린 인프라에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다 (Koo, 2019; Korea Forest Service,

2014). 지자체에서도 도시 대기환경에 미세먼지 저감을 위한 다양한 매뉴얼을 제시 (Seoul Institute, 2018; Suwon City, 2019)하고 있는데, 다양한 보고에 공통적으로 제시되고 있는 것이 경제성을 고려한 식물환경복원 (phytoremediation)이다 (Woo *et al.*, 2023).

식물환경복원이란, 식물의 다양한 작용에 의해 대기오염 물질을 정화하는 것을 말하며, 식물에 의하여 미세먼지가 정화되는 매커니즘으로는 크게 흡수와 흡착 그리고 방출에 의한 것으로 다양한 연구자들에 의해 보고되고 있다. 흡수기 작은 잎 뒷면의 기공에서 발생하는 현상으로 미세먼지가 나뭇잎의 기공에 의해 흡수되는 것을 뜻하며, 흡착기작은 식물 및 수목의 잎 표면, 줄기와 가지의 표면에서 미세먼지를 잡아두거나 부착하는 것을 의미한다 (Cho, 2019). 미세먼지 정화능력에서는 식물 종에 따라 차이는 있으나, 넓은 표면적을 지닌 교목과 관목은 잎 내 미세먼지를 집적시키는 능력이 큰 것으로 알려져 있다 (McDonald *et al.*, 2007). 마지막으로 방출에 의한 미세먼지 정화의 경우, 식물의 광합성 과정에서 증산작용은 공기 중 습도를 높이는 요인으로서 높은 습도는 공기중 미세먼지 입자와 결합하여 무거워져 가라앉게 되며 정화되는 것으로 추정되며, 공간 내 식물 및 인위적인 요인에 의한 상대습도의 증가는 미세먼지 저감시간 단축에 효과가 있는 것으로 보고되었다 (Kwon and Park, 2017; Kim and Kim, 2023). 뿐만 아니라 광합성에 의해 방출되는 음이온은 미세먼지를 전기적 인력으로 안정화하여 공기정화효과가 있음이 지속적으로 연구되어 왔다 (Park *et al.*, 1998; Lee, 2003; Lee and Yoon, 2003; Lee, 2004; Jin, 2005).

식물의 미세먼지 정화에 관한 최근 연구동향으로, 식물을 활용하여 미세먼지 저감을 위한 녹지계획 수립(Koo, 2019; Cho, 2019), 미세먼지가 식물에 미치는 영향(Son and Nam, 2020; Woo *et al.*, 2023), 식물의 미세먼지 제거능 평가(Lee *et al.*, 2015; Kwon and Park, 2018; Kim *et al.*, 2018, Kim and Kim, 2023)의 주제로 다양하게 다루어지고 있다. 반면, 외부공간 및 실내공간에서 미세먼지 저감을 위해 식물을 이용할 때, 식물의 흡착량 및 흡수량의 비교를 통해 어떤 매커니즘이 어느정도의 영향을 미치고 있는지 파악하는 연구는 부재하였다. 일부 식물수종에 따른 미세먼지 흡착 및 흡수량을 분석하기 위한 연구(Kwon *et al.*, 2020)가 존재하나, 축적량에 대한 접근으로 식물이 미세먼지 상황에서 흡수매커니즘과 흡착매커니즘이 각각 어느정도의 비율로 미세먼지를 정화하는지 규명하는 분야의 연구는 미진한 상태이다.

이에 본 연구에서는 식물에서 이루어지는 미세먼지의 매커니즘을 흡착과 생리작용으로 구분하여 식물의 미세먼지 정화 매커니즘별 효율을 평가하고 미세먼지 저감을 위한 도시녹지 및 공원설계의 식재량 및 관리방법에 대한 기초자료를 제공함에 그 목적이 있다.

연구방법

1. 공시재료 및 실험구 구성

1) 실험구 조성

본 연구는 실험실 내에 소형 챔버(Vol.: 2.04m³; 1.43 × 0.73m × 1.95 m) 3동을 설치하여 실험공간 외부로부터 받는 영향을 최소화하였으며, 모든 실험구의 측정은 동시에 진행하였다. 실험구는 대조구(Control; 이하 Type C), 인조 식물 배치구(Artificial Plants; 이하 Type A.P), 스파티필름 배치구(Plants; 이하 Type P)로 구분하였으며, 인조식물 배치구는 식물배치구와 동일한 스파티필름(*Spathiphyllum wallisii*)형태의 조화(Artificial Plant)로 동일하게 조성하였다. 또한 비치된 식물은 실내 환경 적응을 위하여 1개월간 순화과정을 거친 후 실험에 활용하였다.

Type A.P.와 P의 식재에 활용된 화분은 플라스틱 재질

(P.P)로 화분 및 토양에 의한 표면적 증가, 식물의 원활한 생육환경 조성 등 다양한 교란요인을 최소화하기 위하여 3호(윗지름 13.3cm, 밑지름 10.7cm)로 설정하였으며, 대조구에도 동일한 부피비로 토양을 충진한 화분을 동일한 개수로 배치하였다. 인조식물과 식물 비치에 앞서 표면적 증가량의 통제를 위하여, 인조식물을 기준으로 식물의 규격을 통일(잎 크기 선별 및 개수 조절)하였으며(Table 1), 챔버 내에 투입되는 식물체의 개수는 선행연구(Lee *et al.*, 2019)을 참고하여 식물체의 용적(GVZ)을 계산하고 실험구 당 57개의 화분(챔버용적의 30%)을 비치하였다.

2) 실험구 환경

모든 실험구 내부 환경은 식물의 일정한 생리작용을 유도하기 위하여, 25±0.5℃로 일정하게 유지하였으며, 실험실에 유입되는 모든 광(인공, 자연)을 차단하여 암실환경을 조성하였다. 또한 미세먼지 농도변화 측정 시 식물 배치구의 광합성 작용을 적절히 통제하기 위하여 모든 실험구에 별도의 인공광원(LED, 12W)을 설치하고, 실험구 내 공기의 순환을 위해 선행연구를 참고하여(Kim *et al.*, 2018) Air Circulator를 설치하였다.

Type P의 경우, 실험일 1일 전 침수법을 활용한 관수 후 실험전까지 방치하여 증류수를 제거하고, 토양 유효수분을 최대상태로 형성하여 식물의 생리작용이 최대로 나타날 수 있도록 하였으며, Type C와 A.P에도 동일한 처리를 통하여 토양에서 나타나는 증발현상 또한 모든 실험구에 동일하게 나타날 수 있도록 통제 후 실험하였다.

2. 조사 · 분석

1) 조사방법

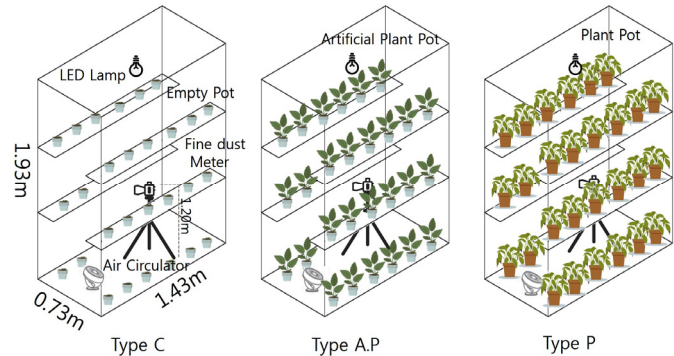
본 연구에서는 흡착에 의한 정화는 식물에 의한 표면적 증가로 미세먼지가 표면에 직접 흡착되는 것으로 정의하였고, 생리작용에 의한 정화는 식물에 의한 흡수(기공에 의한 흡수)와 방출(증산작용에 의한 습도, 음이온 방출 등)에 의한 정화로 정의하였으며, 실험은 총 2단계로 진행되었다. 첫 번째 단계에서는 대조구-인조식물의 미세먼지 정화량 차이를 분석하여 식물에 의한 표면적 증가가 미세먼지 농도

Table 1. Characteristic of Artificial Plants and Plants

Division	Average Characteristics of Plant each Pot			Average Area of Leaf Each Pot (m ²)	Number of Pot(ea)	L.A.I.
	Plant Height(m)	Area of Leaf(m ²)	Number of Leaf(ea)			
Type C	-	-	-	-	-	-
Type A.P	0.354±0.024	0.0075±0.0035	13.0±0.0	0.0979	57	5.3156
Type P	0.366±0.080	0.0074±0.0041	13.0±0.0	0.0964	57	5.2337

Table 2. Experimental composition method of particulate matter purification efficiency

Division	Type C	Type A.P	Type P
Chamber standards (m)	(L) 1.43 (W) 0.73(H) 1.95 (Vol.) 2.04 m ³		
Temp. (°C)	25±0.5		
Illumination (Lux)	1,300±62		
Protocol	Control	Artificial Plants (Shape of <i>Spathiphyllum wallisii</i>)	Plants (<i>Spathiphyllum wallisii</i>)
Remarks	-	30% of vol.	



변화에 미치는 영향을 분석하였다. 두 번째 단계에서는 인조식물-식물의 미세먼지 정화량의 차이를 분석하여 표면적을 제외한 식물의 생리작용이 미세먼지 정화에 미치는 영향을 추정하였다.

미세먼지오염원은 선행연구(Lee, 2004)를 참고하여 일반 켈런으로 설정하였으며, 본 실험을 위해 고안된 튜브를 통하여 일반켈런의 직접연기를 60cc 채취하고 실험구에 주입하였다. 이후, 챔버 내 원활한 공기 순환을 위하여 소형 공기순환기를 측정시간 중 항시 가동하였으며, 미세먼지(PM 2.5, 10) 최고농도와 그 변화를 모두 관측하였다. 오염물질 측정에는 Air Quality Monitor M2000 (Temtop, China)을 활용하였으며, 3분 간격으로 측정하였다. 측정은 국내 환경기준 [보통] 이하가 되는 시점에 종료(PM 10; 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, PM 2.5; 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)하였으며, 총 6회 반복수행하였다.

2) 분석방법

측정된 자료는 처리구별 미세먼지(PM10, 2.5) 농도 변화에 대한 차이의 통계적인 비교를 위하여 SPSS 27(IBM, USA)을 활용하였다. 분석방법에서는 일원배치분산분석(ANOVA)을 통하여 실험구에 투입된 초기 미세먼지의 농도와 정화소요시간의 통계적 차이를 검정하였으며, 선형혼합모형(Linear Mixed Model; LMM)을 통하여 실험구별 특성(표면적증가, 생리작용)과 미세먼지 정화소요 시간의 교호작용을 검정하였다. 이때, 실험구별 특성은 표면적 증가(없음=0, 있음=1), 생리작용(없음=0, 있음=1)로 범주형 변수로 정의하였으며, 이에 따른 변수입력은 Type C(0, 0), Type A.P(1, 0), Type P(1, 1)로 변환하여 입력하였다. 이후, LMM에 따라 실험구별 정화 소요시간의 차이가 교호작용이 있음이 확인될 경우, 정확한 수치적 차이를 확인하기 위하여, 비선형회귀분석(2차 방정식)을 통해 시간변화에 따른 미세먼지 농도변화의 특성을 추가적으로 살펴보았다. 최종

적으로 모든 통계분석은 자연과학연구에서 통상적으로 인정되는 유의확률 5%를 적용하였다.

결과 및 고찰

1. 각 실험구별 미세먼지 투입 전후 공기 환경 특성

실험구별 최초 미세먼지 평균량은 Type C 949 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Type A.P 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Type P 999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 초미세먼지 투입 평균량은 Type C 634 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Type A.P 638 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Type P 718 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것 측정되었다. 본 실험에서 통제요인으로 투입되는 미세먼지 양이 동일해야 하므로 투입된 미세먼지의 초기값을 통계적으로 비교한 결과, PM10(F=0.986, p>0.05)과 PM2.5(F=2.394, p>0.05) 모두 투입량이 통계적으로 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 3).

Table 3. Air Environmental Characteristics Before and After Fine Dust Introduction in Each Experimental Type

Division	Before*	After**	
PM10	Type C	28.2333a ^z	949.4667a ^z
	Type A.P	29.9667a	999.0000a
	Type P	32.4000a	999.0000a
PM2.5	Type C	18.6500a	634.3000a
	Type A.P	20.4000a	638.0167a
	Type P	22.3167a	717.6500a

^z Means followed by different letters indicate significant differences using Duncan's multiple range test at 5% level(n=6).

*PM10:F=0.265(p>0.05), PM2.5 : F=0.486 (p>0.05)

**PM10:F=0.986(p>0.05), PM2.5: F=2.394 (p>0.05)

2. 실험구별 미세먼지 정화 일반 특성

각 실험구별 미세먼지가 국내 환경기준 보통(PM 10; 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, PM 2.5; 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)으로 변화하는데 소요된 시간은 PM10은 Type C(215 \pm 35.33분) > Type AP(138 \pm 13.55 분) > Type P(66 \pm 3.31분)의 순이었으며, PM2.5의 경우 Type C(260 \pm 37.68분) > Type A.P(149 \pm 13.51분) > Type P(84 \pm 5.82 분)의 순이었다(Table 4).

미세먼지에 정화된 소요시간 특성을 일차적으로 살펴보면, 대조구에 비하여 Type AP는 57~64%, Type P는 31~32% 수준으로 정화에 소요되는 시간이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 공간 내 표면적 증가로 인해 미세먼지가 흡착될 기회가 현저히 증가하였기 때문인 것으로 예상되었다. Type A.P와 Type P를 비교하였을 때, 동일한 식물 형태와 동일한 용적비를 가졌음에도 정화 소요시간이 현저히 차이가 있는 점과 시간 편차에서 Type P가 더욱 안정적인 수치를 나타내는 것은 식물의 생리작용에 의하여 미세먼지 정화가 더욱 안정적으로 정화되었음을 추정하였다.

3. 식물에 의한 표면적 증가와 생리작용이 미세먼지 정화에 미치는 영향

시간변화에 따른 각 실험구 유형의 미세먼지 농도변화를 통계적으로 검정하기 위하여 AR(1)의 공분산행렬 구조를 바탕으로 한 LMM(Linear Mixed Model)을 활용하고, 실험구 유형특성(I.S.A.=표면적 증가 유무, P.P.A.=생리작용 유무)과 시간변화 변수의 교호작용을 검정하였다(Table 5).

그 결과를 살펴보면, 표면적 증가 유무($t=-.598, p>0.05$)와 생리작용 유무($t=-.475, p>0.05$)는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되었으나, 시간변화($t=-10.006, p<0.05$) 유의한 것으로 나타났다. 이는, 미세먼지 투입 후 시간에 종속적으로 농도가 변화하므로 각 시점별 단순 비교는 의미 없기 때문인 것으로 예상되었다. 반면, 표면적 증가와 시간 변화(PM10 : $t=3.123, p<0.05$, PM2.5 : $t=3.180,$

$p<0.05$), 생리작용과 시간변화(PM10 : $t=4.065, p<0.05$, PM2.5 : $t=4.307, p<0.05$)는 통계적으로 유의한 것으로 분석되어 각 요인과 시간변수의 교호작용이 있음을 확인할 수 있었다. 이에 따라 실험구 유형 간 시간에 따른 미세먼지 농도변화는 통계적으로 유의한 차이가 있다는 대립가설을 채택할 수 있었다. 반면 표면적 증가와 생리작용의 관계에서는 교호작용을 확인할 수 없었는데, 이는 ‘표면적 증가가 없으면서 생리작용이 존재하는 실험구는 존재할 수 없다’는 물리적 한계 의한 것으로 판단되었다. 또한, 수평누적 4분위 상자도표 그래프(Figure 1)을 살펴보면, 각 실험구별 미세먼지 농도 변화가 곡선형태를 띠고 있어 선형만으로 정화효율을 추정하는데 한계가 있어, 비선형회귀분석을 통한 정화효율 추정하였다.

4. 비선형회귀분석을 활용한 미세먼지 정화 모형

각각 실험구별 미세먼지 정화 특성을 세부적으로 분석하기 위하여 비선형회귀분석을 실시하여 2차 방정식 모형을 구축하였고, 그 결과는 Table 3과 같다. 모형의 대표적 지표를 살펴보면, 모형과 측정값의 적합도를 설명하는 설명력은 PM10에서 0.742~0.833, F값은 74.905~217.971($p<0.05$)인 것으로 분석되었다. PM2.5 또한 0.724~0.842의 설명력을 나타내었고, F값은 90.256~270.889($p<0.05$)로 나타나 제시되는 회귀모형은 통계적으로 유의함을 확인하였다(Table 6).

실험구 내 식물에 의한 표면적 증가가 미세먼지 정화에 미치는 영향을 세부적으로 살펴보기 위하여 Type C와 Type A.P의 모형의 계수를 살펴보면, 미세먼지 정화량에 가장 큰 영향을 미치는 1차 항에서 Type C는 -17.792이며 Type A.P는 -24.352로 나타나 Type A.P에서 약 137%(1.37배) 정화효율이 더 좋은 것으로 분석되었다. 초미세먼지의 경우, 1차 항에서 Type C는 -11.411이며 Type A.P는 -16.364로 나타나 Type A.P에서 약 143%(1.43배) 정화효율이 더 좋은 것으로 분석되었다. 식물의 생리작용이 미세먼지 정화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Type A.P와 Type P의 모형의

Table 4. Time Required for Fine Dust Purification in Each Experimental Type

Division	Time taken of fine dust pollution purification(min.)						M(SD)	
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th		
PM10	Type C	195	192	168	234	261	240	215.00(35.3270)
	Type A.P	141	144	153	132	114	144	138.00(13.5499)
	Type P	75	72	66	60	63	63	66.5(5.8224)
PM2.5	Type C	240	237	210	282	312	282	260.50(37.6816)
	Type A.P	147	153	162	144	126	162	149.00(13.5055)
	Type P	90	84	84	81	81	84	84.17(3.3116)

계수를 비교해 보면, PM10에서 1차항이 각 Type A.P - 24.352, Type P -48.649로 약 200%(2배) 차이를 나타냈으며, PM2.5에서 Type A.P -16.364, Type P -31.273으로 191% (1.91배)의 정확도를 차이를 나타내었다.

5. 종합결론

본 논문에서는 식물에 의한 공간 내 표면적 증가와 생리 작용이 미세먼지 정화에 미치는 영향을 추정하기 위하여, 대조구, 인조식물, 식물을 활용하여 미세먼지오염원 투입

Table 5. Final Model for Changes of Fine Dust Over time with Factors by LMM

Division	Variables	Estimate	SE	t	p	95% CI
PM10	I.S.A.	-55.1655	92.2445	-.598	.554	-243.7304~133.3993
	P.P.A.	-46.8674	98.7489	-.475	.638	-246.7986~153.0637
	Time	-34.5517	3.4532	-10.006	>.001	-41.3847~-27.7186
	I.S.A. * · Time	7.5615	2.4214	3.123	.003	2.6981~12.4249
	P.P.A. ** · Time	16.3309	4.0175	4.065	>.001	8.3613~24.3004
	I.S.A. · P.P.A.	.	.	.	.	.
PM2.5	I.S.A.	-21.1606	75.0406	-.282	.780	-132.4704~174.7915
	P.P.A.	-27.7735	76.7468	-.362	.720	-183.9732~128.4263
	Time	-22.8770	1.9932	-11.477	>.001	-26.7978~-18.9562
	I.S.A. · Time	5.0022	1.5729	3.180	.002	1.8843~8.1202
	P.P.A. · Time	10.3306	2.3987	4.307	>.001	5.6062~15.0549
	I.S.A. · P.P.A.	.	.	.	.	.

*I.S.A.=Increased Surface Area, **P.P.A.=Plant Physiological Action, CI=confidence interval, SE=standard error.

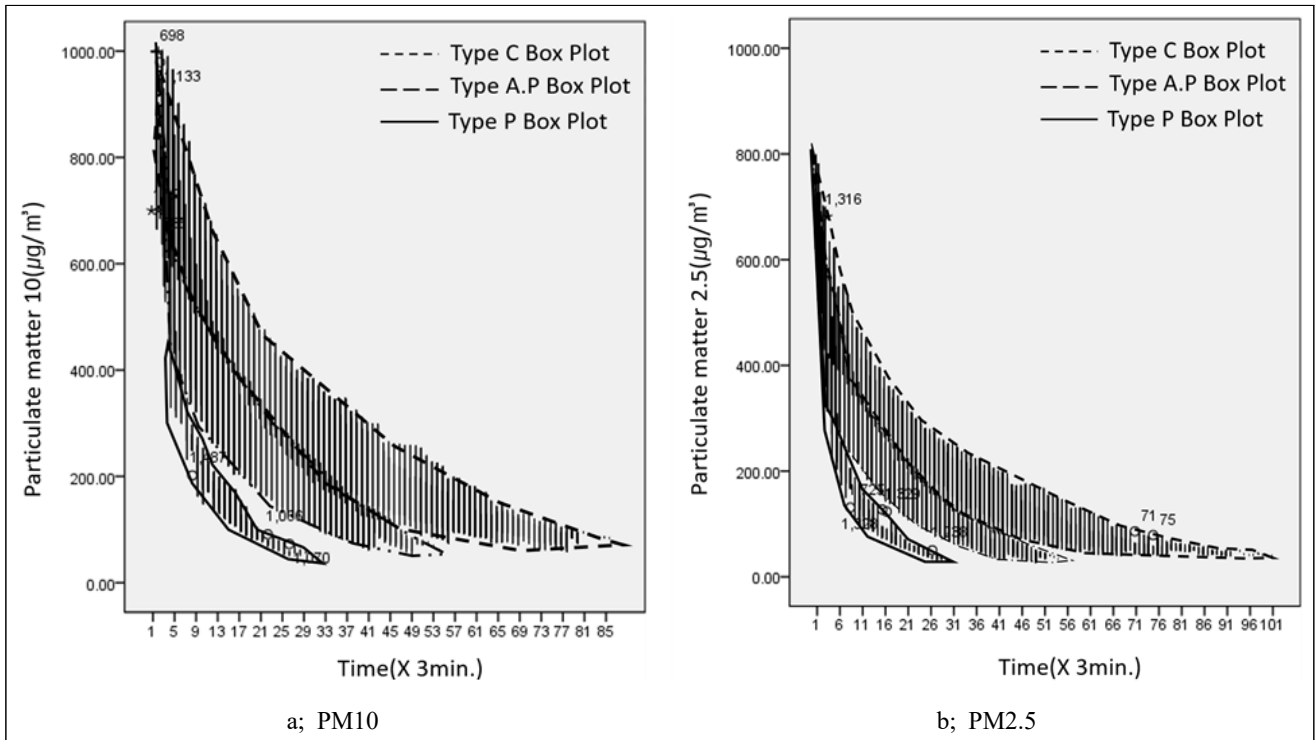


Figure 1. Horizontal Cumulative Quartile Box Plot by Experimental Composition Method.

Table 6. Expectation Purification Efficiency Model Based on Experiment Type

Division	R ² adj	F	Model	
PM10	Type C	.833	217.971***	$y = -17.792***\chi + .118***\chi^2 + 759.466***$
	Type A.P	.742	74.905***	$y = -24.352***\chi + .241***\chi^2 + 693.037***$
	Type P	.825	89.211***	$y = -48.649***\chi + .968***\chi^2 + 667.799***$
PM2.5	Type C	.842	270.889***	$y = -11.411***\chi + .069***\chi^2 + 506.976***$
	Type A.P	.754	83.901***	$y = -16.364***\chi + .160***\chi^2 + 461.210***$
	Type P	.724	90.256***	$y = -31.273***\chi + .606***\chi^2 + 440.288***$

* : (p<0.05), ** : (p<0.01), ***: (p<0.001), y=PM 10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), χ =Time(minute), n=480

후 농도변화를 관측하였으며, 일원배치 분산분석, 선형혼합 모형(LMM), 비선형회귀분석을 활용하여, 식물의 표면적 증가와 생리작용이 미세먼지 저감에 미치는 영향을 분석하였다.

그 결과, 공간 내 식물 용적이 30%로 분포할 경우, 표면적 증가로 인한 미세먼지 흡착으로 대조구 대비 약 140%의 정화효율을 나타내었으며, 식물의 생리작용에 의해서는 단순 표면적증가 보다 약 200%의 정화효율을 나타낸 것으로 분석되었다. 뿐만 아니라, 이는 초미세먼지에서도 동일한 결과를 나타내었다.

LMM 결과는 대조구와 식물의 표면적증가 및 생리작용에 대응하는 각각의 실험구가 시간변화에 따른 미세먼지 정화량의 차이가 모두 통계적으로 유의함으로 나타남에 따라, 모든 실험구는 미세먼지 정화특성이 모두 다름을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 식물이 특정공간에서 미세먼지를 정화하는데 총 2.74배의 정화시간 효율을 가지고 있는 것으로 계산되었으며, 정화 매커니즘에 따른 효율은 표면적 증가로 1.40배, 생리작용으로 평균 1.95배의 정화시간을 더 단축하는 것으로 추정되었다. 하지만, 넓은 표면적을 지닌 교목과 관목은 잎 내 미세먼지를 집적시키는 능력이 크지만, 이는 종마다 많은 차이를 보이기 때문에(McDonald et al., 2007), 수종 및 잎 면적과의 관계를 파악하기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료되었다.

더 나아가, 선행연구에 따르면 녹지에서 식물의 밀도가 지나치게 높을 경우, 식물체에 의한 차폐와 공기순환의 억제로 인하여 정화효율이 감소할 수 있음이 보고되어, 전정 등에 의한 식물 수관부의 관리도 감안해야 할 요인일 것이다. 또한 미세먼지는 수목의 생리적 및 생화학 반응에 관여하며, 수목에 스트레스 요인으로 작용(Woo et al., 2023)하므로 미세먼지 내성수종에 대한 연구도 지속적으로 수반되어야 할 것으로 판단되었다. 이러한 결과의 시사점으로 미세먼지 정화 기능을 목적으로 하는 녹지에서 적절한 비배 및 관수관리를 통하여 식물의 생리작용에 따른 미세먼지 정화 기능을 극대화하는 것이 타당할 것으로 사료되었다.

뿐만 아니라, 식물 잎의 생성 및 표면적 증가는 적절한 수목의 생육관리와 깊은 상관성이 있으므로, 녹지의 미세먼지 정화기능에 영향을 가장 크게 미치는 요인이라 할 수 있을 것이다.

본 연구의 결과를 통하여 식물의 미세먼지 정화 매커니즘 요소 중 표면적 증가보다는 생리작용이 더 큰 영향을 미치고 있다는 괄목할 만한 결과를 추정하였으나, 식물의 공간 용적이 30%일 때임을 가정하였기 때문에, 공간 내 다양한 식물용적 상황에서는 결과가 상이할 수 있으며, 관엽식물 (*Spathiphyllum wallisii*)을 대상으로 수행하였기 때문에, 수목의 수피 등 다른 기관의 영향을 배제되었다는 한계점이 존재하였다. 뿐만 아니라, 흡착의 경우, 잎 표면과 표피 왁스층에 의하여 미세먼지가 물리적으로 고정되며 정화되는 것으로(Chen et al., 2016) 보고되고 있는데, 본 실험에 사용한 조화(Artificial Plant)는 잎의 표면만 반영하였을 뿐, 잎의 왁스층에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 이에 향후, 다양한 용적비를 고려할 뿐만 아니라 침엽수종 등 다양한 식물종을 대상으로 지속적인 추가연구 및 왁스층 등 잎의 특성을 반영한 보완연구가 필요할 것이다.

REFERENCES

- Bennett, J.E., H. Tamura-Wicks, R.M. Parks, R.T. Burnett, C.A. Pope III, M.J. Bechle, J.D. Marshall, G. Danaei and M. Ezzati(2019) Particulate matter air pollution and national and county life expectancy loss in the USA: A spatiotemporal analysis. *PLoS Medicine*, 16(7): e1002856.
- Chen, L., C. Liu, R. Zou, M. Yang and Z. Zhang(2016) Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution* 208: 198-208.
- Cho, D.G.(2019) Prioritization of species selection criteria for urban fine dust reduction planting. *Korean J. Environ. Ecol.* 33(4): 472-480. (in Korean with English abstract)

- Jin, S.U.(2005) Anion and Well-bing(1st ed). Hanja Engineering Inc. Seoul, pp. 45-68. (in Korean)
- Kim T.H., J.M. Park and S.C. Kim(2018) The indoor air purification system using LED and fan for epipremnum aureum. The Korea Institute of Convergence Signal Processing 19(4): 167-173. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.Y. and J.J. Kim(2023) PM2.5 removal effect of racomitrium canascens under flow and relative humidity conditions. Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B. 47(11): 567-573. (in Korean with English abstract)
- Koo, M.A.(2019) The relationship between particular matter reduction and space shielding rate in urban neighborhood park. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 47(6): 67-77. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service(2014) A Study on the Formation and Management Manual of Urban Forest Types. Policy Research Service Results Report, pp. 3-150. (in Korean)
- Kwon, K.J. and B.J. Park(2017) Effects of indoor greening method on temperature, relative humidity and particulate matter concentration. J. KILA 45(4): 1-10. (in Korean with English abstract)
- Kwon, K.J. and B.J. Park(2018) Particulate matter removal of indoor plants, dieffenbachia amoena 'Marianne' and spathiphyllum spp. according to light intensity. J. KILA 46(2): 62-68. (in Korean with English abstract)
- Kwon, S.J., S.J. Cha, J.K. Lee and J.H. Park(2020) Evaluation of accumulated particulate matter on roadside tree leaves and its metal content. J. Appl. Biol. Chem. 63(2): 161-168 (in Korean with English abstract)
- Lee, C.H., B. Choi and M.Y. Chun(2015) Stabilization of soil moisture and improvement of indoor air quality by a plant-biofilter integration system. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 33(5): 751-762. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H. and P.S. Yoon(2003) A study on efficiency and mechanism of removing indoor pollutants used anion generated by indoor plants. J. People Plants and Environment 6(4): 81-92. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H.(2003) The effect of improving indoor air quality used anion by in door plants. J. Kor. Inst. Interior Landscape Archi. 5(1): 89-98. (in Korean with English abstract)
- Lee, J.H.(2004) A study of generation by indoor plants. J. Kor. Inst. Interior Landscape Archi. 6(2): 53-66. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.M., M.S. Jeong, B.H. Han, and S.C., Park(2019) A study on the planting design for the renewal of urban neighborhood park 'In case of Okgu Neighborhood Park, Siheung, Gyeonggi-do, Korea'. J. KILA 47(1): 88-103. (in Korean with English abstract)
- McDonald, A.G., W.J. Bealey, D. Fowler, U. Dragosits, U. Skiba, R.I. Smith, R.G. Donovan, H.E. Brett, C.N. Hewitt and E. Nemitz(2007) Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations. Atmospheric Environment 41(38): 8455-8467.
- Ministry of Environment(2018) Q&A of fine dust that people want to know, No. 93530, National Institute of Environmental Science, Incheon, Korea, 29(6): 623-631. (in Korean)
- Nawahda, A., K. Yamashita, T. Ohara, J. Kurokawa and K. Yamaji(2012) Evaluation of premature mortality caused by exposure to PM2.5 and ozone in East Asia: 2000, 2005, 2020. Water, Air and Soil Pollution 223(6): 3445-3459.
- Park, S.H., Y.B. Lee, G.Y. Bea and M. Kondo(1998) Anion evolution in plants and its involved factors. Horti. Environ. Bio Tech. 39(1): 115-118. (in Korean with English abstract)
- Sarkodie, S.A., V. Strezov, V. Jiang and T. Evans(2019) Proximate determinants of particulate matter (PM2.5) emission, mortality and life expectancy in Europe, Central Asia, Australia, Canada and the US. Science of the Total Environment 683: 489-497.
- Seoul Institute(2018) Evaluation on the Reduction Effect of Particulate Matter through Green Infrastructure and Its Expansion Plans. Seoul Development Institute Report, pp. 5-80. (in Korean)
- Som, M.J. and K.J. Nam(2020) Interactions between particulate matter and plants: Focusing on current research status and ecological impacts. KJEE 53(4): 436-444. (in Korean with English abstract)
- Suwon City(2019) A Manual for Creating Urban Forests for Reducing Fine Dust. Suwon City. The Green Landscape Department of the Park Green Project Establishment, pp. 2-45. (in Korean)
- Woo, S.H., K.U. Lee, J.K. Lee, M.J. Kwak, Y.J. Lim, S.G. Jeong, S.M. Je, H.N. Chang, J.A. Son, C.Y. Oh, K.H. Kim and S.Y. Woo(2023) Physiological, Biochemical, and Adsorption Characteristics of Abies holophylla, Acer buergerianum, Pinus densiflora, and Quercus variabilis under elevated particulate matter. J. Korean Soc. For. Sci. 112(1): 57-70. (in Korean with English abstract)