

공기 중 음이온과 공간 내 식물용적 변화가 미세먼지 정화에 미치는 영향^{1a}

오득균² · 김정호³

The Impact of Negative Ions and Plant Volume Changes in Space on Fine Dust Purification in the Atmosphere^{1a}

Deuk-Kyun Oh², Jeong-Ho Kim^{3*}

요약

본 연구는 공기 중 음이온이 미세먼지(PM10, PM2.5) 정화에 미치는 영향을 파악하고, 식물이 공기 중 음이온 발생과 미세먼지 정화에 미치는 영향을 평가하기 위하여 음이온 발생요인별 음이온 발생량을 측정하고, 각 요인별, 식물 용적별 미세먼지 저감 모형을 구축하여 비교하였다. 음이온 발생요인별 특성은 Type N.I(Negative ion generator; 204,133.33ea/cm³) > Type P₃₀(Plant Vol. 30%; 362.55ea/cm³) > Type C(Control; 46.22ea/cm³)의 순으로 음이온 발생량을 살펴보면 무처리구에 비하여 음이온 발생기 처리구에서 약 4,417배, 식물 배치구에서 약 8배 많았다. 이에 따른 음이온 발생원별 미세먼지 저감 특성은 PM10에서 Type NI가 Type C에 비하여 정화효율이 2.52배, Type P30이 1.46배 높았으며, PM2.5의 경우, Type NI가 Type C에 비하여 정화효율이 2.26배, Type P30이 1.31배 높은 것으로 분석되었다. 식물의 용적별 미세먼지 정화 효율은 Type P₂₀(84.60분) > Type P₃₀(106.50분) = Type P₂₅(115.50분) = Type P₁₅(117.60분) > Type P₅(125.25분) = Type P₁₀(129.75분)의 순이었으며, 초미세먼지의 경우 Type P₂₀(104.00분) > Type P₃₀(133.20분) = Type P₂₅(144.00분) = Type P₁₅(147.60분) > Type P₅(161.25분) = Type P₁₀(168.00분)의 순이었다. 이렇게 음이온의 미세먼지 정화 능력과 식물의 미세먼지 정화능력을 정량적으로 분석하였으며, 향후 미세먼지 정화를 고려한 녹지계획 및 식물식재에 고려해야할 사항을 제안하였다.

주요어: 식물정화, 공기이온화, 실내 공기 질, 녹지용적계수

ABSTRACT

This study aimed to investigate the influence of anions in the air on the purification of fine dust (PM10 and PM2.5) and to evaluate the effects of plants on the generation of anions in the air and the purification of fine dust. Subsequently, the fine dust reduction models were compared according to each factor and plant volume. The characteristics of anion generation by each factor were observed to be in the order of Type N.I (negative

1 접수 2024년 2월 23일, 수정 (1차: 2024년 3월 15일), 게재확정 2024년 3월 17일

Received 23 February 2024; Revised (1st: 15 March 2024); Accepted 17 March 2024

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

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

a 이 논문은 2022년도 건국대학교 KU학술연구비 지원에 의한 결과임.

* 교신저자 Corresponding author: hoyal209@kku.ac.kr

ion generator; 204,133.33 ea/cm³) > Type P₃₀ (plant vol. 30%; 362.55 ea/cm³) > Type C (control; 46.22 ea/cm³), indicating that the amount of anion generation in the anion generator treatment group and the plant arrangement group were approximately 4,417 times and 7 times higher, respectively, than that in the untreated group. Consequently, the fine dust reduction characteristics by anion generation source showed that for PM₁₀, Type NI had a purification efficiency 2.52 times higher than Type C, and Type P₃₀ was 1.46 times higher, while for PM_{2.5}, Type NI had a purification efficiency 2.26 times higher than Type C, and Type P₃₀ was 1.31 times higher. The efficiency of fine dust purification by plant volume was in the order of Type P₂₀ (84.60 minutes) > Type P₃₀ (106.50 minutes) = Type P₂₅ (115.50 minutes) = Type P₁₅ (117.60 minutes) > Type P₅ (125.25 minutes) = Type P₁₀ (129.75 minutes), and for ultrafine dust, Type P₂₀ (104.00 minutes) > Type P₃₀ (133.20 minutes) = Type P₂₅ (144.00 minutes) = Type P₁₅ (147.60 minutes) > Type P₅ (161.25 minutes) = Type P₁₀ (168.00 minutes). Thus, a quantitative analysis of the anions and plants for purifying fine dust and suggested matters to be considered for future green space planning and plant planting considering fine dust purification.

KEY WORDS: PHYTOREMEDIATION, AIR IONIZATION, INDOOR AIR QUALITY, VEGETATION VOLUME RATIO

서 론

최근 산업기술의 발달과 에너지의 과도한 소비는 도시환경문제의 원인이 되며, 이로부터 배출되는 많은 환경오염물질은 심각한 대기오염을 초래했다. 다양한 대기오염 중 미세먼지는 대기 중에 떠다니는 입자를 말하며, 직경이 10 μ m보다 작은 미세먼지(PM₁₀)와 2.5 μ m보다 작은 초미세먼지(PM_{2.5})로 구분된다. PM₁₀은 공기 중 고체상태와 액체상태 입자의 혼합물로 배출되거나 화학반응 또는 자연적으로 생성된다. 특히 PM_{2.5}는 크기가 매우 작기 때문에 코 점막을 통해 걸러지지 않고 호흡 활동을 통해 몸속에 직접 침투하여 호흡기, 폐, 뇌 질환 등을 발생시키며 조기 사망률을 높인다(Ministry of Environment, 2018; National Assembly Budget Office, 2019). 2013년 이후 언론에서 미세먼지를 보도하는 건수가 증가하고, 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)에서 1군 발암물질로 분류함에 따라 국민들의 관심과 불안이 증가하고 있는 실정이다. 실제로 중국의 경우 PM_{2.5}로 인한 조기 사망자가 127만 명으로 추산되고 있으며(Apte *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2012), 우리나라는 2018년 한해 미세먼지로 인한 경제적 피해가 약 4조원에 이르는 것으로 보고(Hyundai Research Institute, 2019)되고 있어 이에 대한 대책이 시급한 실정이다.

우리나라는 이러한 미세먼지에 대한 대응으로 미세먼지 경보 발령, 미세먼지 대처 매뉴얼 배포, 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법 제정 등 다양한 대응책(Ministry of Environment, 2018)을 제시하고 있지만 학교 휴업, 실외활동 자제 권고 등 인간의 옥외활동에 대한 제한적 대응책일

뿐, 실질적으로 국내에서 발생하는 미세먼지를 원천적으로 저감하는 대책은 미흡한 실정이다. 일부 ‘노후경유차 운행 제한’, ‘노후 석탄화력발전소 조기폐쇄’, ‘대기오염물질 배출시설 가동시간 조정’을 실시하고 있지만 이러한 제도(National Assembly Budget Office, 2019)는 대중적 규제조치일 뿐. 근본적인 문제 해결책으로 볼 수는 없다.

이러한 현실에 도시의 녹지는 미세먼지 및 대기 오염의 유용한 해결책이 될 수 있음이 일찍이 제시되어 왔으며, 특히 식물은 지상부에서 오염물질을 흡착 및 흡수하여 제거하고, 식재 기반의 미생물에 의한 정화가 가능한 장점이 있다고 보고되었다(Beckett *et al.*, 1998; Kwon *et al.*, 2018). 또한, 광합성 과정 중 음이온을 생산하며 공기정화효과(Park, 1998; Lee, 2003; Lee and Yoon, 2003; Lee, 2004; Jin, 2005)를 기대할 수 있다.

위와 같이 식물이 대기오염을 정화하는 메커니즘은 흡수와 흡착으로 정의될 수 있으며, 이러한 전통적 정화 요소 외에 공기이온에 의한 정화가 비교적 최근에 들어 많은 연구자들의 지속적인 관심을 받고 있다. 공기이온이란 공기 중 원자 또는 부유미립자(O₂, H₂O)가 전기적 성질을 띠는 것으로, 운동도에 따라 대립자와 소립자로 구분할 수 있다. 양전하를 띠는 소립자는 양이온, 음전하를 띠는 소립자는 음이온이라 한다. 대기의 이온화 요인으로는 자외선의 공기 분자 파괴, 땅 속 방사성 물질의 붕괴, 대기와 지표 간 전위차, 기온과 기압차, 레나드 효과, 식물의 광합성 작용 등 다양한 원인으로 발생한다(Jin, 2005).

도시에서 화석 연료가 연소할 때 발생하는 양이온성인 질소산화물(NOx)이나 곰팡이, 포자, 박테리아, 세균, 미세

먼지 같은 것들은 양이온으로 대전되어 있다(Jin, 2005). 이러한 오염물질은 다양한 원인으로 인해 발생한 음이온과 결합하여 전기적으로 중화되어 안정되어 지표로 가라앉게 되는데, 이 현상으로 인해 음이온이 공기정화 효과가 있는 것으로 추정되고 있다(R.D.A., 2008). 이러한 전기적 특성에 의한 공기정화효과는 도시에서 에너지 과다사용, 차량 증가에 따른 배기가스와 미세먼지 등의 대기오염 물질 완화 등 도시의 대기 환경의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 이용될 수 있다.

식물의 음이온과 미세먼지 정화에 대한 연구는 크게 실내 환경과 실외환경이라는 두가지의 방향성을 가지고 진행되고 있다. 그러나, 현대인들의 주 생활공간은 80~90%가 실내이며, 외부 미세먼지 유입방지 및 냉난방 에너지 절감으로 인해 부족한 환기와 건축물의 에너지 저감 및 효율을 높이기 위한 실내공간의 밀폐화로 실외보다 공기오염이 전반적으로 더 높게 나타나고 있는(Weisel *et al.*, 2008) 특성으로 인해, 주로 실내공간을 대상으로 다양한 연구가 수행되고 있다. 반면, 실외의 경우 변인통제가 어렵다는 대기환경 특성으로 인하여 음이온과 미세먼지 정화에 대한 연구가 상대적으로 미진한 실정이다.

이에 본 연구는 미세먼지 저감 및 녹화용으로 많이 사용되는 초본성 관엽식물이 대기 중 음이온 발생과 미세먼지 농도 변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수행되었다. 이에 실험의 원활한 변인통제를 위하여 챔버에서 실험을 수행하되, Air circulator를 통한 외부환경의 대기순환을 가정할 수 있도록 하였으며, 선행연구와의 차별성을 위하여 인위적 음이온 발생기를 활용하여 인공적으로 발생하는 음이온과 식물의 미세먼지 정화효과를 비교분석하였으며, 식물에서 발생하는 음이온과 미세먼지의 관계, 식재밀도가 음이온 발생과 대기 중 미세먼지 분포에 미치는 영향을 종합적으로 분석하여, 식물과 음이온의 미세먼지 정화효율을 평가하고 향후 미세먼지 정화를 고려한 도시녹지 조성 기준으

로 활용하기 위해 수행되었다.

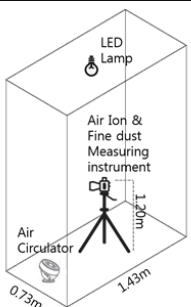
연구방법

1. 공시재료 및 실험구 구성

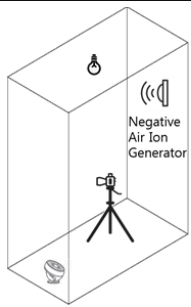
본 연구는 건국대학교 녹지환경조절실험실 내에서 이루어졌다. 실험실 1.내에 소형 챔버(Vol.: 2.04m³; 1.43 × 0.73m × 1.95 m) 3동을 설치하여 실험공간 외부로부터 받는 영향을 최소화하였으며, 모든 실험구의 측정은 동시에 진행하였다. 실험구는 대조구(Control; 이하 Type C), 음이온발생기 처리구(Negative air ion generator; 이하 Type N.I), 스파티필름 배치구(Plants; 이하 Type P)로 구분하였으며, 스파티필름 배치구는 챔버 용적비 6개의 유형(Table 1)으로 구분하여 실험하였다. Type N.I의 음이온 발생기는 BN-105 (BlueN; Korea)을 사용하였으며, Type P의 경우 실내녹화 및 실내 공기 정화식물로 알려진 스파티필름 (*Spathiphyllum wallisii*)를 소형온실의 용적비 5, 10, 15, 20, 25, 30% 등 6개의 유형을 각각 비치하였다. 모든 실험구 내부 환경은 기온과 음이온 발생량은 상관관계에 있다는 선행연구(Kim *et al.*, 2019, Kim *et al.*, 2015)를 참고하여 25±0.5 °C로 일정하게 유지하였다. 또한 음이온 발생은 식물의 광합성 작용과 상관이 있다는 보고(Park, 1998, Lee, 2003, Lee and Yoon, 2003, Lee, 2004)를 바탕으로 실험실에 유입되는 모든 광(인공, 자연)을 차단하여 암실환경을 조성하였다. 또한 측정 시 식물 배치구의 광합성 작용을 적절히 통제하기 위해 선행연구를 참고하여(Kim *et al.*, 2018) 모든 실험구에 별도의 인공광원(LED, 12W)을 설치하고, 소형 Air Circulator를 설치하였다. 또한 비치된 식물은 실내 환경 적응을 위하여 1개월간 순화과정을 거친 후 실험에 활용하였다.

Table 1. Experimental composition method of particulate matter purification efficiency

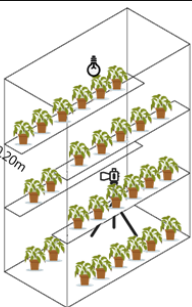
Division	Type C	Type N.I	Type P
Chamber standards (m)	(L) 1.43	(W) 0.73	(H) 1.95 (Vol.) 2.04 m ³
Temp. (°C)	25±0.5		
Illumination (Lux)	1,300±62		
Protocol	Control	Negative air ion generator	
Remarks	-	1ea (Max 2 million)	5 type of vol. (5, 10, 15, 20, 25, 30%)



Type C



Type N.I



Type P

2. 조사 · 분석

실험은 음이온 발생원별 발생량 측정단계 및 발생원별 미세먼지(PM10, 2.5)정화 효율 평가단계, 식물용적별 미세먼지 저감 분석 등 총 3단계에 걸쳐 수행되었으며, 음이온 발생량 측정은 흡입식 음이온 측정기(Com-3600Pro, Nico, Japan)을 활용하여 각 유형별 15분 동안 실시간 측정을 6회 반복 진행하였다. 스파티필름 배치구의 경우, 식물 음이온의 발생 검증을 위하여 30% 식물용적을 대표 실험구로 설정하고 측정을 실시하였다. 이후 음이온 발생원 별, 스파티필름 용적별 미세먼지 정화능력 평가를 위하여 오염물질을 투입하고 최고오염도와 시간변화에 따른 정화도를 측정 분석하였다.

본 연구에서 미세먼지 오염원은 선행연구(Lee, 2004)를 참고하여 일반궤련으로 설정하였으며, 본 실험을 위해 고안된 튜브를 통하여 일반궤련의 직접연기를 60 cc 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 측정은 Air Quality Monitor M2000 (Temtop, China)을 활용하였으며, 3분 간격으로 측정하였다. 측정은 3동의 실험구 중 2동이 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 반복수행 하였다.

측정된 자료는 처리구별 음이온 발생량 및 미세먼지(PM10, 2.5) 농도 차이의 통계적인 비교를 위하여 일원배치 분산분석(ANOVA)과 비선형 회귀분석(2차 방정식), 독립 검정t검정을 실시하고, 통계적으로 유의한 것으로 나타난 결과에 한하여, 사후검정(Duncan's multiple range test, Dunnett T3)을 적용하였다. 모든 통계분석은 자연과학연구에서 통상적으로 인정되는 유의확률 5%를 적용하였다.

결과

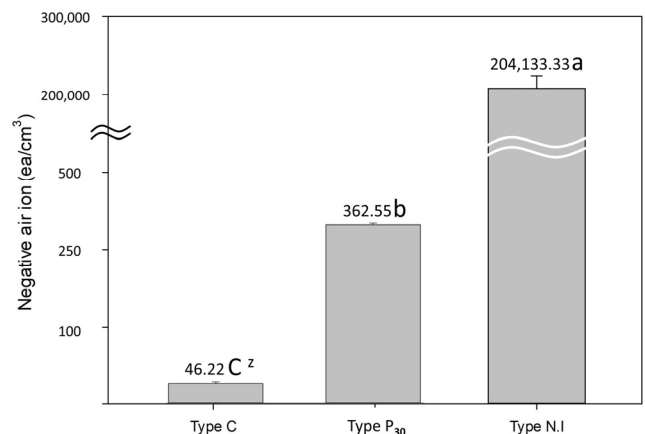
1. 음이온 발생원 차이에 따른 실험구별 음이온 발생량

각 실험구별 평균 음이온 발생량은 Type N.I (204,133.33ea/cm³) > Type P₃₀(362.55ea/cm³) > Type C (46.22ea/cm³)의 순인 것으로 나타났다. 음이온 발생량을 살펴보면 무처리구에 비하여 음이온 발생기 처리구에서 약 4,417배, 식물 배치구에서 약 8배 많은 것으로 나타났다(Figure 1)

식물처리구(스파티필름, 용적 30%)에서는 음이온 발생량이 362.55ea/cm³인 것으로 나타났는데, 이는 실내의 Cam 식물 및 C3식물에서 음이온 발생량을 측정 분석한 연구

(Kim *et al.*, 2012)에서 보고된 실내 환경에서 식물의 음이온 발생량 300~735 ea/cm³에 어느 정도 일치하는 경향인 것으로 판단되었다. 음이온 발생기 처리구에서는 20만개를 초과하여 월등히 높은 음이온발생량이 측정되었으나, 생산업체에서 보증하는 최대 발생량 200만ea/cm³에 크게 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이는 Wu *et al.*(2006)의 결과를 살펴보면, 기온과 상대습도의 차이에 따라 상이하지만, 공기 중 음이온은 전기적으로 불안정하여 대기 중 구름물질과 빠르게 반응하려는 특징이 있어 일반적인 상황에서 확산 거리는 1m 내외이기 때문으로 사료되었다.

각 실험구별 음이온 발생량의 차이를 일원배치분산분석을 실시하여 통계적으로 검증을 실시한 결과, 모든 유형에서 통계적인 유의성이 있는 것으로 분석되었으며(Levene's Statistic= 108.986, Welch's Statistic= 1078.020, $p < 0.001$), Dunnett T3사후검정에서도 모든 유형간 차이가 통계적으로 유의함($p < 0.001$)에 따라 음이온 발생량은 Type N.I > Type P₃₀ > Type C의 순인 것으로 판단되었다. 이러한 결과에 따라, 스파티필름 실험구에서 음이온이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 음이온 발생으로 인한 공기정화 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단되었다.



Z: Values of each bar followed by the same letter indicate no significant difference according to Dunnett T3 test, Levene's Statistic : 108.986($p < 0.001$), Welch's Statistic : 1078.020 ($p < 0.001$), Dunnett T3($n = 2, 700$)

Figure 1. Negative air ion generation by experiment type.

2. 음이온 발생원 차이에 따른 미세먼지 정화효율 평가

1) 음이온 발생원별 미세먼지 투입 최고농도

오염원 투입 직후 각 실험구별 PM10의 최고 농도를 살펴본 결과, PM10의 경우 Type P₃₀(999.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type C(949.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type N.I (944.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 분석되어

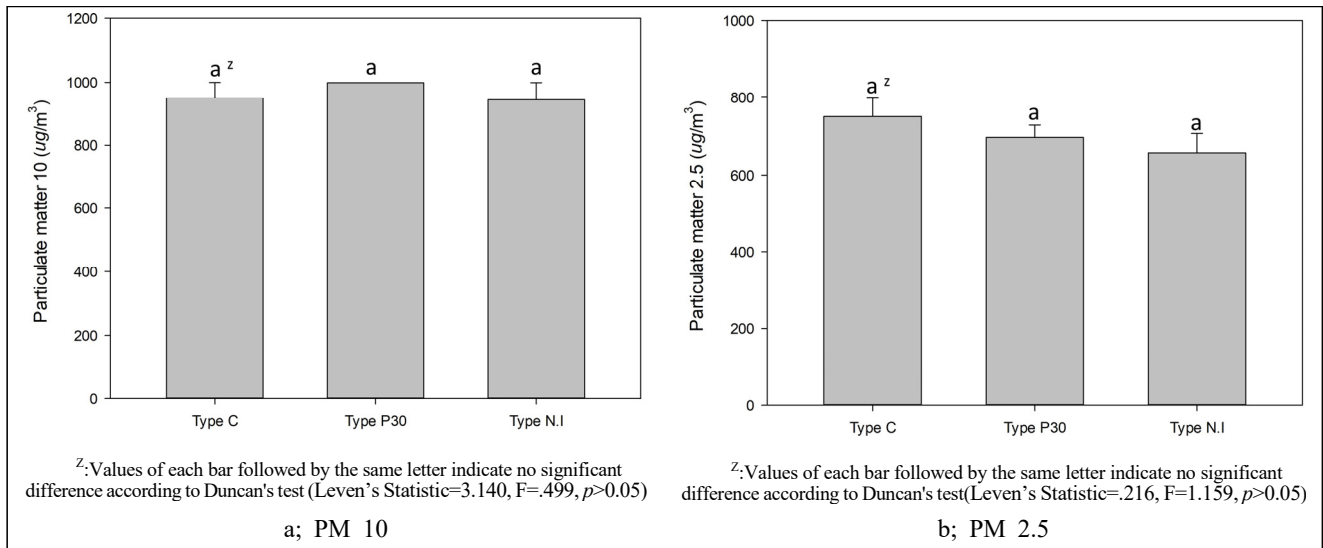


Figure 2. Maximum particulate matter concentration by experiment type(n=6).

식물 배치구에서 가장 높은 것으로 나타났다(Figure 2a). 각 유형별 PM10 최고 농도를 통계적으로 분석하기 위하여 일원배치 분산분석을 실시한 결과 통계적인 유의성은 없는 것으로 분석되었다(Leven's statistic=3.140, F=0.499, $p>0.05$). PM2.5의 경우 Type C($750.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type P₃₀($697.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type N.I($657.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 순으로 나타났으며, 최고와 최저 수치 차이는 평균 $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 분석되었다. 하지만 일원배치 분산분석 결과, 유형 간 통계적 유의성은 없는 것으로 분석되었다(Leven's statistic=0.216, F=1.159, $p>0.05$). 이에 따라 각 실험구별 주입된 PM10의 농도는 차이가 없는 것으로 판단되었다(Figure 2b).

2) 음이온 발생원 차이에 따른 미세먼지 정화능력 평가

음이온 발생원별 미세먼지 정화능력을 평가하기 위하여, 환경부 미세먼지(PM10) 및 초미세먼지(PM 2.5) 예보기준(Ministry of Environment, 2018)을 기준으로 실험구 챔버 내 미세먼지 농도변화를 분석하였다.

PM10이 환경부 기준 보통($80 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 이하가 되는 평균시점의 경우, Type N.I의 경우 51분이었으며, Type P₃₀의 경우 114분인 것으로 나타났다. 반면, Type C의 경우 실험이 종료되는 114분 시점에서도 보통 농도로 낮아지지 않았다. PM10 정화능력을 정량적으로 분석하기 위하여 비선형 회귀분석을 실시한 결과. 모든 항목에 대해 통계적인 유의성이 있는 것으로 분석되었으며($p<0.05$), 설명력은 53.7~82.5%인 것으로 나타났다(Figure 3a).

실험구별 시간변화에 따른 PM10 정화효율은 Type NI > Type P₃₀ > Type C의 순인 것으로 판단되었다. PM10 정화량에 가장 큰 영향을 미치는 1차항을 각 실험구별 모델

별로 살펴보면 Type NI -17.673이었으며, Type P₃₀의 경우 -10.232, Type C의 경우 -7.020인 것으로 분석되었다. 이를 통하여 고농도의 음이온 환경이 대조구 환경보다 PM10 정화능력이 약 2.52배 높으며, 식물 용적 30%의 경우 1.46배 높은 것을 확인하였다(Table 2).

PM2.5가 환경부 기준 보통 이하가 되는 평균 시점의 경우, Type N.I의 경우 53.5분이었으며, Type P₃₀의 경우 141분인 것으로 나타났다. 반면, Type C의 경우 실험이 종료되는 시점에서도 보통 농도로 낮아지지 않았다. 비선형 회귀 분석 결과, 모든 항목에 대해 통계적인 유의성이 있는 것으로 분석되었으며($p<0.05$), 설명력은 66.8~84.1%인 것으로 나타났다(Table 2). 정화능력은 PM2.5의 경우 또한, Type NI > Type P₃₀ > Type C의 순인 것으로 분석되었으며, 1차항의 계수는 Type NI -11.910이었으며, Type P₃₀의 경우 -6.899로, Type C(대조구)에 비하여 각 2.26배, 1.31배의 정화효율을 나타내었다(Figure 3b).

Type N.I. 와 Type P의 PM10 및 PM2.5 정화특성을 살펴보면, 첫째, Type NI는 PM10과 PM2.5의 정화 시간의 편차는 약 2.5분으로 분석되었으나, Type P₃₀의 경우 정화시간의 편차가 30분으로 Type N.I.에 비해 큰 것으로 나타났다. 이는 음이온 정화 방법은 전기적 성질을 활용한 방법으로, 전기적 인력이 공기 중 모든 입자에 균일하게 작용되었기 때문것으로 판단되었다. 반면 식물을 이용한 정화는 식물의 흡수 및 흡착, 음이온 발생을 통한 정화 등 다양한 요인이 복합적으로 작용하기 때문에 입자의 크기에 영향을 상대적으로 많이 받기 때문인것으로 사료되었다.

Table 2. Expectation purification efficiency model of PM2.5 as on experiment type

Division	R ² adj	F	Model
PM10	Type C	.537	$y = -7.020^{***}\chi + 0.017^{***}\chi^2 + 828.313^{***}$
	Type P ₃₀	.825	$y = -10.232^{***}\chi + 0.043^{***}\chi^2 + 661.747^{***}$
	Type N.I	.695	$y = -17.673^{***}\chi + 0.111^{***}\chi^2 + 675.166^{***}$
PM2.5	Type C	.841	$y = -5.254^{***}\chi + 0.013^{***}\chi^2 + 572.149^{***}$
	Type P ₃₀	.724	$y = -6.899^{***}\chi + 0.029^{***}\chi^2 + 446.137^{***}$
	Type N.I	.668	$y = -11.910^{***}\chi + 0.075^{***}\chi^2 + 452.169^{***}$

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

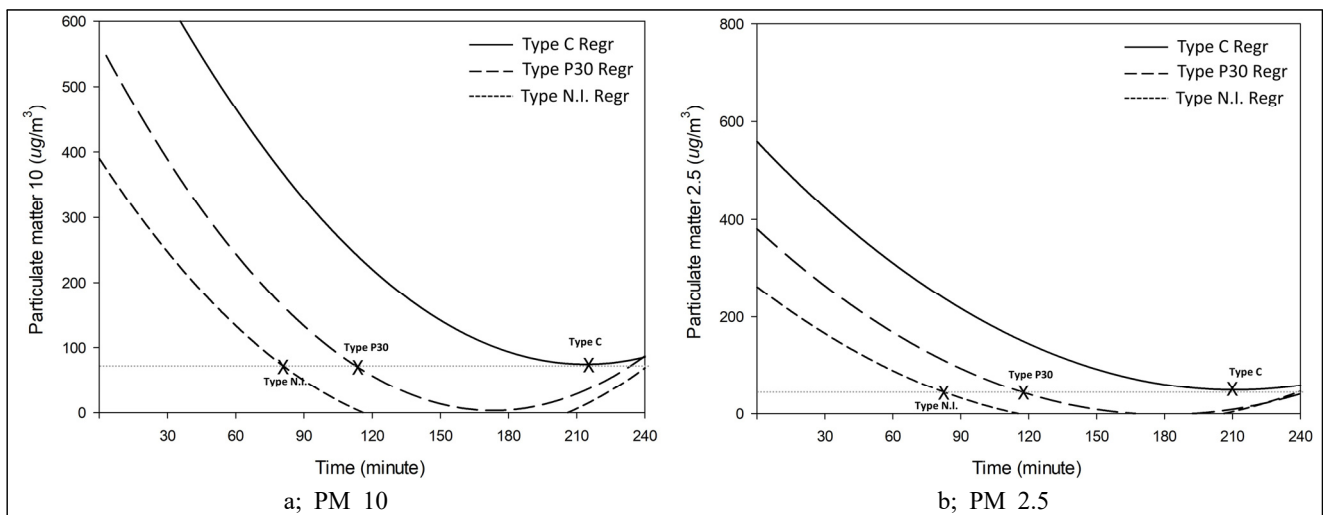


Figure 3. Non-linear regression model of particulate matter by experiment type(n=6).

3. 식물 용적별 미세먼지 정화효율 평가

1) 스파티필름 용적 차이에 따른 미세먼지 투입 최고농도

챔버 내 스파티필름 용적별 오염원 투입 직후 PM10 최고 농도를 비교한 결과(Figure 5a) Type P₅(998.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) = Type P₂₀(998.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) = Type P₃₀(998.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type P₁₀(954.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type P₁₅(953.17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type P₂₅(953.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 순이었으며, 통계적 분석결과 유의성이 없는 것으로 나타났다(Leven's statistic=3.723, Welch's statistic=0.599, $p > 0.05$). PM2.5의 경우 Type P₅(734.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) = Type P₁₅(716.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type P₃₀(697.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type P₁₀(680.50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) > Type P₂₀(645.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) Type P₂₅(635.53 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 순이었으며(Figure 5b), 통계적 분석 결과 유의성이 없는 것으로 나타났다(Leven's statistic=3.600, Welch's statistic=0.499, $p > 0.05$).

각 실험구별 평균 투입 PM10과 PM2.5 농도는 최대 98.67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 나타내었으나, 통계적으로 유의성이 없는

것으로 분석되어 모든 식물용적유형의 PM10과 PM2.5 투입 농도는 차이가 없는 것으로 판단되었다(Figure 4).

2) 식물용적 차이에 따른 미세먼지 정화량

챔버 내 스파티필름 용적률 차이에 따른 PM10 정화량을 분석하기 위하여 일원배치 분산분석을 실시한 결과(Figure 5a), PM10이 환경부 기준 보통(80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이하가 되는 평균 시점은 Type P₂₀(84.60분) > Type P₃₀(106.50분) = Type P₂₅(115.50분) = Type P₁₅(117.60분) > Type P₅(125.25분) = Type P₁₀(129.75분)의 순으로 나타났다(Leven's: 1.164($p > 0.05$), F:3.655($p < 0.05$), $n = 6$). 정화시간 소요시간 편차는 최대 45.15분의 차이로 정화효율상 153%까지 나타났다, 그 차이는 Type P₂₀과 Type P₁₀에서 나타났다. 이는, 식물 용적이 높을수록 PM10 정화에 효율적이라고 예상한 결과와 상이하였다(Figure 5b).

비선형 회귀분석 결과, 모든 항목에 대해 통계적인 유의성이 있는 것으로 분석되었으며($p < 0.05$), 설명력은 46.1~

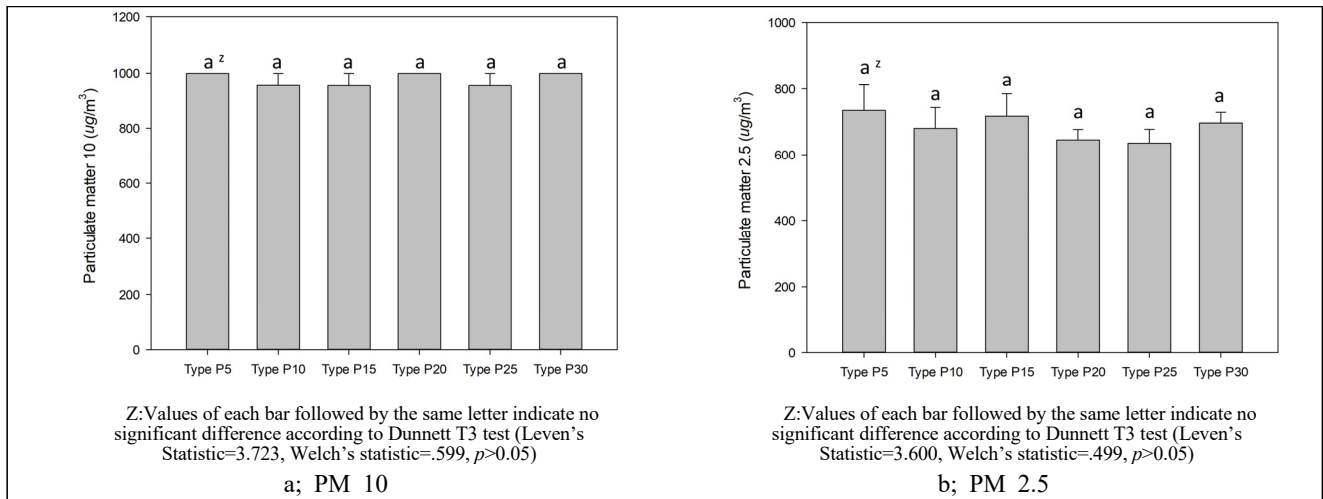


Figure 4. Maximum particulate matter concentration by green volume type(n=6).

83.9%인 것으로 나타났다. PM10 정화량에 가장 큰 영향을 미치는 1차항을 각 용적 모델별로 살펴보면 Type P₂₀ (-16.175), Type P₂₅(-12.534), Type P₁₅(-12.201), Type P₃₀(-10.232), Type P₁₀(-10.175), Type P₅(-6.882)의 순으로

분석되었다. 이를 Type C의 PM10 1차항 계수와 비교하였을 때, Type P₅를 제외한 모든 유형에서 1.45~2.35배 더 높은 것으로 나타났으며, 특히 Type P₂₀의 경우 Type N.I.의 정화효율 2.52배에 근사한 수치를 나타내었다(Table 3).

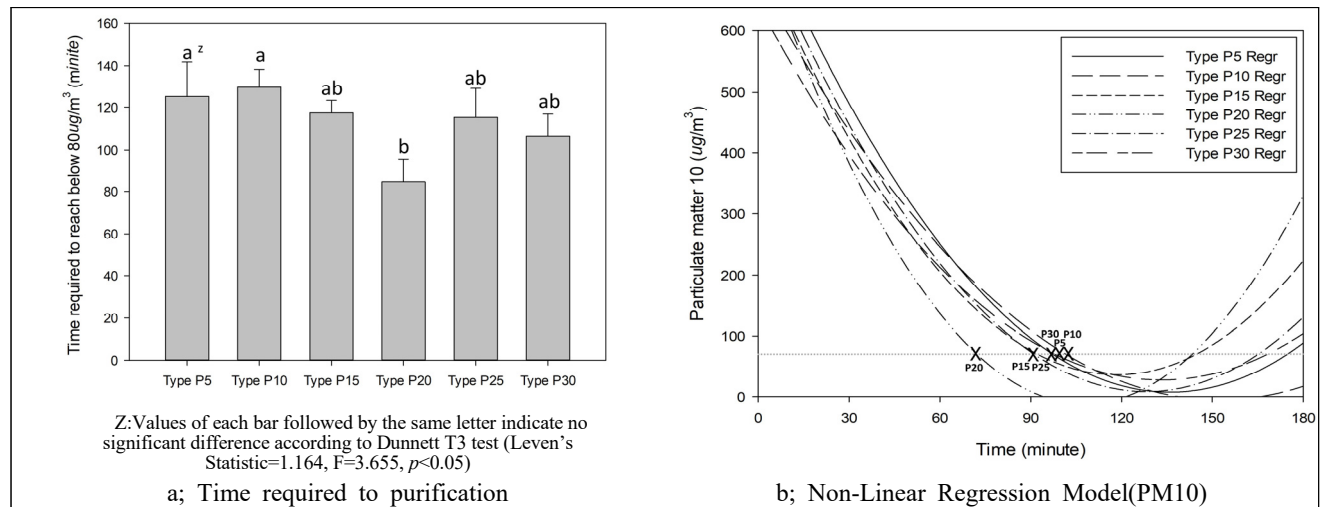


Figure 5. Non-linear regression model and Time required to purification of PM10 by green volume type(n=6).

Table 3. Expectation purification efficiency model of PM10 as on green volume type(n=6)

Division	R ² adj	F	Model
Type P ₅	.461	133.718***	$y = -6.882***\chi + 0.017***\chi^2 + 773.444***$
Type P ₁₀	.816	551.727***	$y = -10.175***\chi + 0.038***\chi^2 + 706.632***$
Type P ₁₅	.808	498.702***	$y = -12.201***\chi + 0.054***\chi^2 + 738.732***$
Type P ₂₀	.839	446.722***	$y = -16.510***\chi + 0.087***\chi^2 + 803.409***$
Type P ₂₅	.751	322.471***	$y = -12.534***\chi + 0.054***\chi^2 + 772.829***$
Type P ₃₀	.825	568.017***	$y = -10.232***\chi + 0.043***\chi^2 + 661.747***$

* : ($p<0.05$), ** : ($p<0.01$), ***: ($p<0.001$), y=PM 10 (µg/m³), χ =Time(minute), n=6

PM2.5가 환경부 기준 보통(35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이하가 되는 평균시점은 Type P₂₀(104.00분) > Type P₃₀(133.20분) = Type P₂₅(144.00분) = Type P₁₅(147.60분) > Type P₅(161.25분) = Type P₁₀(168.00분)의 순이었다(Leven's: 0.539($p > 0.05$), F:2.717($p < 0.05$), n=6). 정화시간 소요시간 편차는 최대 64.00분의 차이로 정화효율상 161%까지 나타났으며, 그 차이는 Type P₂₀과 Type P₁₀로 PM10과 동일한 경향이였다(Figure 6).

비선형 회귀분석 결과, 모든 항목에 대해 통계적인 유의성이 있는 것으로 분석되었으며($p < 0.05$), 설명력은 45.5~84.1%인 것으로 나타났다. PM2.5 정화량에 가장 큰 영향을 미치는 1차항을 각 용적 모델별로 살펴보면 Type P₂₀(-10.728), Type P₂₅(-8.662), Type P₁₅(-8.271), Type P₃₀(-6.899), Type P₁₀(-6.729), Type P₅(-4.791)의 순으로 분석되었다. 이를 Type C의 PM2.5 1차항 계수와 비교하였을 때, Type P₅를 제외한 모든 유형에서 1.28~2.04배 더 높은 것으로 나타났으며, 특히 Type P₂₀의 경우 Type N.I.의 정화효율 2.26배에 근사한 수치를 나타내었다(Table 4).

3) 식물 용적 차이에 따른 정화효율 특성

식물 용적 차이에 따른 PM10과 PM2.5의 정화 특성을 살펴보면, 첫째, 식물용적이 증가할수록 정화효율 또한 증가하는 경향을 보이나, 일정 수준을 초과할 경우(본 연구의 경우 20%) 정화효율이 점차 낮아지는 것으로 나타났다. 둘째, 식물 용적이 일정량에 미치지 못할 경우(본 연구의 경우 5%), 대조구보다 낮은 정화효율을 나타내었다.

이러한 경향에 대해 살펴보면, 첫 번째 특성의 경우 밀폐 공간 내에 과도한 식물 용적비는 공간 내 공기 순환을 어렵게 하기 때문인 것으로 판단되었다. 식물은 우리 생활에 방풍림, 방재림 등으로 활용될 만큼 공기의 흐름을 억제하는 방풍의 역할을 수행한다. 선행연구로 밝혀진 식물의 미세먼지 정화 메커니즘으로는 흡수와 흡착이며, 이러한 매커니즘은 원활한 공기순환을 전제조건으로 한다. 하지만, 과도한 식물밀도는 공기의 흐름을 방해하게 되고, 이에 따라 다른 개체들의 흡수 및 흡착의 기회를 현저히 낮춤으로써 정화효율이 낮아지게 되는 것으로 사료되었다. 본 연구에서는 챔

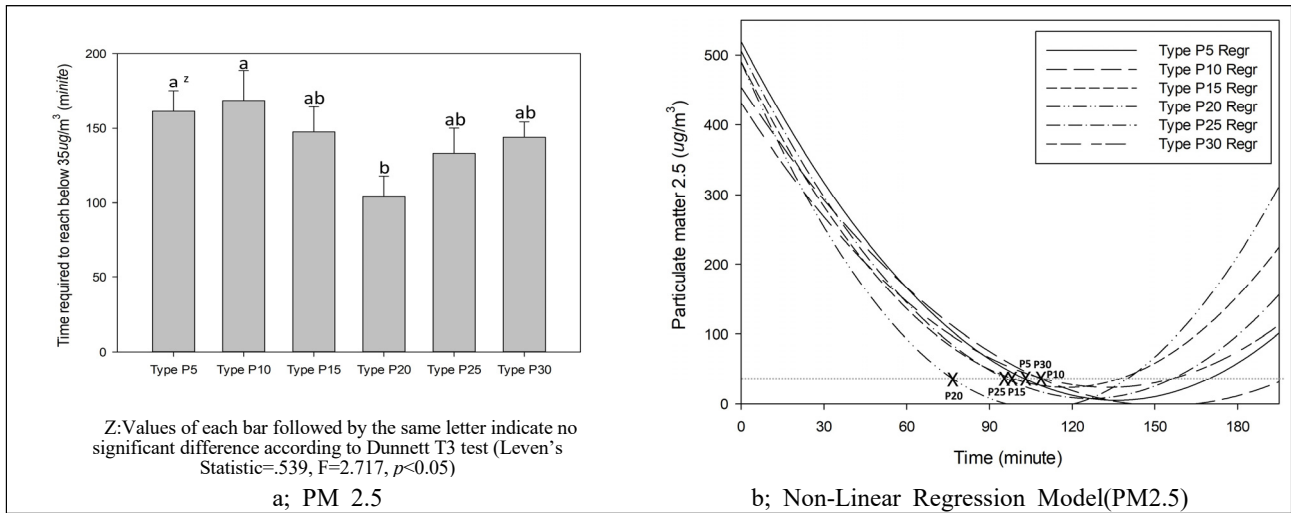


Figure 6. Non-linear regression model and Time required to purification of PM2.5 by green volume type(n=6).

Table 4. Expectation purification efficiency model of PM2.5 as on green volume type(n=6)

Division	R ² adj	F	Model
Type P ₅	.455	530.630***	$y = -4.791***\chi + 0.012***\chi^2 + 530.630***$
Type P ₁₀	.814	547.609***	$y = -6.729***\chi + 0.025***\chi^2 + 471.373***$
Type P ₁₅	.764	382.467***	$y = -8.271***\chi + 0.037***\chi^2 + 496.755***$
Type P ₂₀	.841	454.072***	$y = -10.728***\chi + 0.056***\chi^2 + 526.704***$
Type P ₂₅	.763	343.724***	$y = -8.662***\chi + 0.039***\chi^2 + 520.947***$
Type P ₃₀	.724	345.849***	$y = -6.899***\chi + 0.029***\chi^2 + 446.137***$

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

버 공기순환을 위하여 소형 공기순환장치를 설치하였으나, 용적비 25%를 초과하게 될 경우, 챔버 내 공기의 흐름에 영향을 미쳐 미세먼지 정화 저해요인으로 작용된 것으로 예상되었다.

두 번째 특성 또한, 공기 순환의 영향인 것으로 예상되었다. 미세먼지가 식물의 흡착에 의해 공기는 정화되더라도 식물의 표면에 존재하며, 강우가 아닌 상황에서는 약한 바람에도 다시 공기 중으로 재확산될 수 있다. 이에 본 연구에서 지나치게 낮은 식물용적은 식물이 표면에 흡착된 PM10 및 PM2.5가 소형 공기순환기에 의해 다시 공기 중으로 재확산된 결과인 것으로 사료되었다.

Hong *et al.*(2018)의 도심 도로변 가로녹지가 주변 오픈스페이스의 미세먼지 농도에 미치는 영향 연구에 따르면, 도심에서 가로변에 조성하는 녹지대는 보행공간 및 휴게공간에 미세먼지를 축적시켜 상대적으로 좋지 않은 공기질을 형성할 가능성이 높으므로 차량이동에 의해 발생하는 바람이 도로 밖으로 원활하게 빠져나갈 수 있도록 유도하는 것이 미세먼지 측면에서 유리할 것이라 하였는데, 본 연구의 소형 공기순환기에 따른 공기순환과 각각의 실험구를 선행 연구의 차량이동에 의해 발생하는 바람과 보행공간이라 가정하였을 때, 일맥상통하는 결과인 것으로 판단되었다.

이러한 결과를 종합하여 미세먼지 정화를 위한 녹지계획 시 식재밀도 조절을 통하여, 적절한 공기흐름을 고려하는 것이 중요한 요인일 것으로 예상되었다. 본 연구는 관련된 연구와 일치하는 경향의 결과를 얻었으나, 본 연구에서 제시한 가설을 추가적으로 규명하기 위해서는 동일한 용적비 상황에서 공기 순환기 미설치, 강우 상황을 고려한 식물 지상부 세척 등 실제 오픈스페이스 환경을 가정한 추가적인 실험을 통하여 검증되어야 할 것이다.

고찰

본 연구는 음이온의 미세먼지 정화 효과를 확인하고, 식물의 공기정화효과를 검증하기 위하여 수행되었으며, 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

첫째, 음이온의 미세먼지 정화효과를 확인할 수 있었으며, 고농도의 음이온은 대조군보다 PM10은 2.52배, PM2.5는 2.26배 정화효율이 높은 것으로 나타났다. 이를 통하여, 미세먼지 정화 관점에서 식물의 음이온 발생량 증가를 위한 식재기법, 식재밀도, 관리방법의 개발 필요성을 재고할 수 있었다.

둘째, 식물이 30% 용적비로 있는 밀폐공간에서는 그렇지

않은 공간에 비해 약 8배 많은 음이온이 발생하며, 앞선 결과에 따라 음이온에 의한 공기정화 효과를 기대할 수 있다. 또한, 대조군에 비하여 PM10은 1.46배, PM2.5는 1.31배 정화효율이 높은 것으로 나타났다.

셋째, 식물과 음이온 발생기 처리구의 음이온 발생량의 차이는 563배로 매우 큰 것에 비해, PM10, PM2.5 정화 시간 차이는 1.72배로 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 이를 통하여 식물이 미세먼지를 정화하는데 음이온 발생보다는 흡수 및 흡착이 더욱 주요한 요인일 것으로 추정되었다.

넷째, 밀폐공간에서 식물용적이 증가할수록 PM10, PM2.5 정화효율은 증가하는 경향이며, 20%에서 가장 높은 효율을 나타내었다. 하지만, 그 용적이 20%를 초과할 경우 정화효율이 낮아지는 것으로 나타났다.

다섯째, 위와 같은 결과의 원인으로는 낮은 용적비에서는 앞에 흡착된 입자가 대기순환에 의해 재확산되기 때문이며, 20%를 초과하는 높은 용적비에서는 공기순환이 저해되어 입자가 흡착될 가능성이 낮아지기 때문인 것으로 추정되었으나, 이를 규명하기 위한 추가적인 실험이 필요한 것으로 판단되었다.

이상의 결과를 종합하여, 음이온의 미세먼지 정화 능력과 식물의 미세먼지 정화능력을 정량적으로 살펴볼 수 있었으며, 미세먼지 정화를 고려한 생태복원계획 시, 밀도 및 바람을 고려해야 할 사항으로 도출할 수 있었다. 뿐만 아니라, 복원대상지의 식물에서 발생하는 음이온을 극대화할 수 있는 매커니즘을 적용한다면 높은 미세먼지 정화능력을 기대할 수 있을 것이다.

본 연구의 한계점으로는 식물용적별 음이온 발생량의 차이를 확인하지 못하여, 식물의 음이온 발생이 미세먼지 정화에 미치는 영향을 파악하는데 한계가 있어, 이에 대한 보완이 필요한 것으로 판단되었다. 또한, 소형 Air Circulator를 통하여 챔버내 대기순환을 가정했다고는 하지만, 실제 대기환경에서 대기흐름을 정확하게 재현했다고 판단하기 어려운 부분과 대기순환 외 다양한 상황을 가정했다고 보기에는 한계가 있어, 이에 대한 지속적인 보완연구가 필요한 것으로 사료되었다.

REFERENCES

- Apte, J.S., J.D. Marshall, A.J. Cohen and M. Brauer(2015) Addressing global mortality from ambient PM2.5. *Environmental Science & Technology* 49(13): 8057-8066. (in English)
- Becket, K.P., P.H. Frer-Smith and G. Taylor(1998) Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate

- pollution. *Environmental Pollution* 99: 347-360. (in English)
- Hong, S.H., R.Y. Kang, M.Y. An, J.S. Kim and E.S. Jung(2018) Study on the impact of roadside forests on particulate matter between road and public openspace in front of building site. *Korean J. Environ. Ecol.* 32(3): 323-331. (in Korean with English abstract)
- Hyundai Research Institute(2019) Public perception survey on fine dust. *Weekly Economic Review* 833: 9-10. (in Korean)
- 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.H., D.K. Oh and Y.H. Yoon(2015) Comparative analysis of negative air ion generation according to vegetation type of green space in summer: Targeting to the Yangjae Citizen's Forest in Seocho-gu, Seoul. *Urban Design* 16(6): 1598-0650. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., S.H. Lee and Y.H. Yoon(2019) Evaluation of air ion according to the type of ridge in urban park: Focused on Tangeumdae park in Chung. *J. Eco. Env.* 33(5): 587-595. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.J., E.H. Yoo, H.W. Seo, S.Y. Ho, J.A. Lee and H.H. Jung(2012) Air anions emission in Cam and C₃plants affected by light intensity. *J. Korean Soc. People Plants Environ.* 15(4): 281-285. (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. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 46(2): 62-68. (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)
- Lim, S.S., T. Vos, A.D. Flaxman, G. Danaei, K. Shibuya, H. Adair-Rohani and P.M. Pelizzari(2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet* 380(9859): 2224-2260. (in English)
- Ministry of Environment(2018) Q&A of fine dust that people want to know, No. 93530, National Institute of Environmental Science, Incheon, Korea. (in Korean)
- National Assembly Budget Office(2019) Analysis of fine dust response project. Government report (31-9700487-001733-01). National Assembly Budget Office, Seoul, Korea. (in Korean)
- 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)
- R.D.A.(2008) Technology transfer workshop of air purification method using gardening plant 2008. Horticultural Research Institute, Suwon, 30 Sep. 2008. (in Korean)
- Weisel C.P., S. Alimokhtari and P.F. Sanders(2008) Indoor air VOC concentrations in suburban and rural New Jersey. *Environ Sci Technol.* 42(22): 8231-8238. (in English)
- Wu C.C., G.W.M. Lee, S. Yang, K.P. Yu and C.L. Lou(2006) Influence of air humidity and the distance from the source on negative air ion concentration in indoor air. *Sci. Total Environ.* 370(1): 245-253. (in English)