

Original article

미세먼지와 식물의 상호작용: 국내외 연구동향 및 생태적 영향 고찰

손민정 · 남기정^{1,*}

경상대학교 생물교육과, ¹경상대학교 농업생명과학연구원

Interactions between Particulate Matter and Plants: Focusing on Current Research Status and Ecological Impacts. Min-Jeong Son (0000-0001-5936-5563) and Ki-Jung Nam^{1,*} (0000-0003-0040-1595) (Department of Biology Education, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea; ¹Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea)

Abstract Airborne particulate matter (APM) is increasingly recognized that it has adverse impacts on environment and human public health. As plants can have a potential to reduce APM significantly by its deposition on leaves, considerable efforts has been made to use them as a biofilter. However, APM accumulation on plants can induce physiological and morphological alterations in plants. The present review aimed to synthesize the methods and results of the recent relevant research on interactions between plants and APM, especially from an ecological perspective, and briefly took into account the current status in Korea on this actively increasing research area.

Key words: Air pollution, Ecosystem functions, Fine particulate matter, Plant functional traits

서론

산업화와 도시화가 진행되면서 그에 따라 대기오염이 가속화된 결과, 그 영향이 환경뿐만 아니라 인간의 건강에 위협이 되는 수준에까지 이르고 있다(Welsch, 2006; Kampa and Castanas, 2008; Bebkiewicz *et al.*, 2017). 일산화탄소(CO), 이산화황(SO₂), 질소산화물(NOx), 휘발성 유기분자(volatile organic compounds: VOCs), 오존(O₃), 중금속, 그리고 다양한 크기의 미세먼지(PM_{2.5}, PM₁₀)를 포함하는 대기오염물질은 화산활동이나 산불 등의 자연적 원인으로 생성되지만, 화석연료의 지속적인 사용 등의 인간활동이 주요 생성 원인으로 생각된다(Akimoto, 2003).

미세먼지(airborne particulate matters)는 직경(diameter)이 100 마이크로미터 이하인 고체 입자 및 액체 방울들이 다양한 크기와 화학적 조성으로 존재하는 집합체 정도로 정의된다(Hartono *et al.*, 2017). 주요 구성원인 토양, 먼지, 유기물, 질산염, 황산염, 암모늄 및 금속들은 바이오매스나 화석연료의 불완전 연소에 의해 생기는 블랙탄소처럼 일차적으로 발생원으로부터 만들어져 대기로 이동하거나, 혹은 대기중의 기체 오염물질들이 서로 응집하여 이차적으로 생성되기도 한다(Harrison, 2020; O'Day *et al.*, 2020). 또한 미세먼지에는 식물의 꽃가루나 포자, 그리고 바이러스, 박테리아 같은 작은 미생물도 바이오 에어로졸 형태로 포함되어, 다양한 생물, 무생물적 상호작용에 관여할 것으로 생각된다(Liu *et al.*, 2018; Hyde *et al.*, 2020). 미세먼지의 대기중 농도가 증가하고, 이러한 증가 현상과 세계 곳곳에서 사람의 사망률의 증가 혹은 예상 수명 단축(Pope

Manuscript received 1 December 2020, revised 1 December 2020, revision accepted 3 December 2020
* Corresponding author: Tel: +82-55-772-2238, Fax: +82-55-772-2239
E-mail: prin225@gnu.ac.kr

et al., 2009; Bennett *et al.*, 2019; Sarkodie *et al.*, 2019), 각종 호흡기 질환 및 심장질환(Fiordelisi *et al.*, 2017; Jo *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017), 면역 질환(Schultz *et al.*, 2017)의 증가 추세가 직간접적으로 연관이 있는 것으로 보고되고 있으며, 그에 따라 대기 중의 미세먼지의 농도를 줄여야 하는 필요성이 증가하고 있다(Paull *et al.*, 2020).

미세먼지는 대기에서 빠져나가기 위해, 비, 구름, 안개 등의 강우와 함께 지표면으로 이동하는 습성 강하(wet deposition), 그리고 강우 이외의 통로로 지표면으로 이동하는 건성 강하(dry deposition), 이 두 방법에 의존한다(Guo *et al.*, 2014). 이러한 미세먼지의 순환과정에서 식생(식물)의 수관 및 잎, 가지 등에 의한 간섭 과정에서 미세먼지의 일부가 식생에 잡혀 순환과정에서 빠져나온다(Nowak *et al.*, 2014; Bottalico, 2016). 식생이 생태계 조절 서비스 중 하나로 대기오염물질을 제거함에 있어 실제로 기여하는 정도가 얼마나 되는가에 대해서는 일부 회의적인 시각도 있으나(Setälä *et al.*, 2013; Irga *et al.*, 2015), 대기오염물질 중 미세먼지에 대해서는 농도 감소와 식생의 상관관계가 여러 실험적 연구, 특히 도시 식생을 대상으로 하는 연구들에서 보고되었고, 그에 따라 미세먼지를 제거하는 지속 가능한 수단으로서 식생(식물)을 활용하고자 하는 시도가 활발히 진행되었다(Baro *et al.*, 2014; Selmi *et al.*, 2016; Maitra and Jyethi, 2020).

본 연구는 미세먼지와 식물의 상호작용에 관한 근래의 국내외 연구 방법 및 결과들을 생태적 시각으로 분석 종합 정리하고자 한다.

1. 식물이 미세먼지에 미치는 영향: 식물 잎에의 침착(deposition), 흡수(absorption)

식물체 곁에 쌓이거나(침착), 내부로 이동(흡수)되는 미세먼지의 양은 식물 종(species), 미세먼지의 크기나 조성, 그리고 바람의 세기, 습도와 같은 미기후 등의 다양한 인자들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Litschke and Wilhelm, 2008). 이와 관련해서는 식물의 미세먼지 제거 효율을 알아보려고 하는 응용적 측면의 연구들 위주로, 세계적으로(주로 중국에서) 많은 수의 연구가 진행되어 왔고, 많은 자료가 축적되어 있다. 그간의 연관 연구들은 연구의 규모(scale)에 따라 크게 두 가지의 목적에 집중하여 수행되었는데, 첫째, 식물 개체 수준에서 미세먼지를 더 많이 축적(침착과 흡수 모두를 포괄하는 용어임)하는 식물 종을 찾고 그 이유를 알아보려고 하거나, 둘째, 군집 수준에서 특정지역(주로 도심)의 식생이 미세먼지를 축적하는 양을 추정하여 가치를 판단하거나 효율적으로 수목을 식재하기

위한 방법을 찾으려는 목적인 경우가 대부분이다.

어느 경우든 미세먼지의 양을 실험적으로 측정하는 과정이 포함될 수 있는데, 축적된 미세먼지의 양을 구체적으로 어떻게 측정하는지에 관해서 정리해보고자 한다. 관련 연구들에서 식물체(주로 잎)에 존재하는 미세먼지의 양을 정량화하기 위해 가장 일반적으로 사용하는 방법은 잎을 초음파 분쇄기 속에서 용매(주로 증류수)로 씻어 묻어 있는 미세먼지를 잎에서 분리시킨 후, 다양한 크기의 필터로 용매를 걸러낸 뒤 필터에 남아있는 미세먼지의 무게를 측정하는 방법이다(Xu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020). 사용한 잎의 면적도 측정하여 최종적으로 미세먼지의 양을 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 단위로 표시한다. 방법이 상대적으로 간단한 반면 용매로 씻어낸 후에는 잎에 미세먼지가 거의 남아있지 않다고 가정한다. 클로로포름을 용매로 사용하여 잎의 가장 바깥의 큐티클 왁스층(epicuticular wax)의 미세먼지를 따로 분리하는 방법으로 왁스층 내 미세먼지를 확인하는 연구들도 있으나 많은 경우 왁스층 내 존재하거나 식물체 내부에 흡수된 미세먼지는 따로 고려하지 않는다. 또 다른 방법으로, 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 잎 표면을 관찰하여 영상을 확보한 후, 영상 속에 존재하는 미세먼지의 크기 분포 및 수, 밀도를 ImageJ 등의 다양한 이미지 분석 도구를 이용하여 측정하는 방법이 있다(Shao *et al.*, 2019; Kwak *et al.*, 2020). 이 경우는 분석에 시간이 상대적으로 오래 걸리고 영상 속 이미지에서 미세먼지를 구분하기 쉽지 않지만 미세먼지를 실제로 확인하여 분석할 수 있다. 미세먼지의 양을 직접적으로 측정하는 방법 외에 미세먼지 속에 자성(magnetic properties)을 띤 입자들이 들어 있음을 응용하여 잎의 자성 정도를 미세먼지의 양을 추정하는 대용물(proxy)로 이용하는 연구들도 일부 존재한다(Zhang *et al.*, 2008; Rai *et al.*, 2014).

미기후의 시간적 공간적 변이가 심하여, 상이한 지역에 서식하는 식물 간 미세먼지 축적량의 비교는 용이하지 않다. 같은 종이나 유사한 잎구조를 가진 유사종도 지역에 따라 미세먼지 축적량이 다른 것으로 알려져 있다(Guerrero-Leiva *et al.*, 2016; Popek *et al.*, 2017). 그러므로 식물체 간 미세먼지 축적량을 비교하기 위한 연구에서는, 가능한 환경조건이 유사한 곳에 서식하는 유사한 크기의 개체들을 선택하거나, 공통정원에 다양한 식물들을 식재하여 몇 년 키운 후 잎을 채집하여 미세먼지의 양을 측정한다(Sæbø *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2020). 환경조건을 좀 더 통제된 상황에서 식물 잎에 축적된 미세먼지의 양을 측정 비교하는 방법으로 종종 실내에서 풍동(wind tunnel)을 이용하기도 하는데(Zhang *et al.*, 2018; Chiam *et al.*, 2019), 바람의 세기와 방향을 일정하게 통제할 수 있고 미세먼지

Table 1. Some plant traits thought to be relevant to particulate matter accumulation on plant leaves.

| Selected leaf or plant traits | *Relationship between PM quantities deposited | References |
|-------------------------------|---|------------------------------|
| Leaf surface roughness | + | Zhao <i>et al.</i> (2019) |
| Leaf wax layer depth | + | Popek <i>et al.</i> (2013) |
| Stomatal density | + | Zhao <i>et al.</i> (2019) |
| Stomatal size | + | Zhao <i>et al.</i> (2019) |
| Specific leaf area (SLA) | - | Chiam <i>et al.</i> (2019) |
| Leaf area (LA) | - | Chiam <i>et al.</i> (2019) |
| Trichome | + | Leonard <i>et al.</i> (2016) |
| Leaf arrangement complexity | + | Leonard <i>et al.</i> (2016) |

*represents the relationship between traits and PM deposition. If * is plus, it means positive relationship between the two; if * is minus, negative relationship.

의 종류를 한정하여 조성과 크기를 조절할 수 있으나, 실험 설계상 단기간에 축적된 양을 측정하는 것으로 연구의 범위를 한정해야 한다. 특정 지역에 서식하는 식물의 잎에 미세먼지가 일정기간 동안 얼마나 축적되는지 확인하고자 하는 경우, 비가 어느 이상 내린 날에 잎에 있는 미세먼지가 제거된 것으로 가정하고(즉, 잎에 축적된 미세먼지의 양을 0으로 가정) 일정 기간 이후 잎을 채집하여 잎에 기술된 방법을 이용하여 미세먼지의 양을 측정한다(Cai *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2019a).

앞서 기술한 방법들로 측정된 다양한 연구들로부터, 식물 종간의 미세먼지 축적량의 차이는 식물 종이 가지는 다양한 형질(trait)들과 관련 있는 것으로 생각되어지고 있다. 주로 언급되는 형질들은 식물체의 키, 잎의 배열 형태, 잎의 모양, 잎의 최외곽왁스층(epicuticular wax)의 두께, 털(trichome)의 유무 및 밀도, 기공의 크기 및 밀도, 표면의 거칠음정도(roughness), 잎면적(leaf area; LA) 및 잎면적비(specific leaf area; SLA) 등이다. 대체적으로 식물체의 키가 클수록, 잎의 배열이 복잡할수록, 축적되는 미세먼지가 많다. 또한 잎 표면이 주름져있고, 왁스층이 두껍고, 털이 있고, 기공 밀도가 높고 기공의 크기가 클수록, 잎면적(비)가 작을수록 축적되는 미세먼지가 많다. 식물 잎의 모양은 아래쪽이 넓적하고 잎병이 짧을수록 미세먼지가 많다(Table 1).

식물군집 수준에서 축적되는 미세먼지의 양을 추정하기 위해서는 미세먼지의 흐름(flux)을 모델을 이용하여 계산하는 방법을 주로 사용하는데, 관련 수식은 아래(1)과 같다.

$$F (\mu\text{g} / \text{m}^2 / \text{hr}) = V_d \times C \quad (1)$$

식에 의하면, 대기중 미세먼지의 농도(C)와 미세먼지가 잎에 도달하는 속도(V_d)가 일정기간 동안 축적되는 미세

먼지의 양을 결정하게 된다(이와 관련된 자세한 수식 및 설명은(Mohan, 2016)에 정리되어 있다). 식물군집에 의해 축적되는 미세먼지의 양을 추정하거나 특정 지역, 주로 도시에서의 연간 축적, 혹은 제거되는 미세먼지의 양을 추정하는데 UFORE (urban forest effects) 혹은 i-Tree Eco 모델이 주로 사용된다(Selmi *et al.*, 2016; Bottalico *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2019). 예를 들어 Tallis *et al.* (2011)은 UFORE 모델을 이용하여 영국 런던 내 157킬로 헥타르에 해당하는 지역에서 숲에 의해 제거되는 미세먼지의 양이 전체 미세먼지의 양의 0.7~1.4% 정도 되는 것으로 추정하였다. 같은 방법으로 측정된 연구들에 의하면 침엽수림이 활엽수림보다 미세먼지 축적량이 많다(Marando *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017).

이외 일부 연구에서는 식물군집의 미세먼지 제거량을 실험적으로 측정하기 위해 식물군집 앞, 뒤에서 미세먼지의 양을 직접 측정하는 방법을 사용하기도 하며, 이런 방법으로 숲과 습지 등의 생태계 유형별 미세먼지 제거량을 비교한다(Cong *et al.*, 2018). 같은 방법으로 수행된 국내 연구에서, 시화공업지구와 거주지역 사이에 위치한 식생 지역이 많게는 50% 이상의 미세먼지(PM_{10})를 제거하는 것으로 조사되었다(Yoo *et al.*, 2020).

2. 미세먼지가 식물에 미치는 영향

미세먼지가 지속적으로 식물에 축적됨을 고려할 때 축적된 미세먼지가 식물에 어떤 방식으로든 영향을 미칠 것이라 예상할 수 있으나, 이에 관한 연구는 식물의 미세먼지 제거 관련 연구에 비해 많이 이루어지지 않았고 이용가능한 정보도 상대적으로 많이 부족하다. 대기오염물질이 식물에 미치는 영향은 오염물질의 화학적 특성 및 식물의 생

리, 생화학적 특성에 의존하는 복잡한 과정으로 (Pavlik *et al.*, 2012), 식물체에 축적되는 오염물질의 양(dose-dependent), 오염물질을 축적하는 식물의 성장단계 등이 복잡하게 상호 얽혀 작용하게 되므로, 올바른 이해를 위해서는 정교한 식물생리학적 지식이 요구된다(Shahid *et al.*, 2017). 또한 대기오염물질과 미세먼지를 구분하여 영향을 파악함에 기술적 한계도 존재한다. 그간 수행된 관련 연구는 자동차에서 배출되는 오염물질 혹은 도심의 대기오염이 식물에 미치는 영향을 파악하거나(Honour *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2012), 사막근처 토양에서 기원하거나 시멘트, 공장 등에서 기원한 먼지(dust)가 식물에 미치는 영향을 파악하는 등 미세먼지를 포함한 대기오염물질의 영향을 총체적으로 파악하는 접근 방법을 사용하였다(Hatami *et al.*, 2018; Shah *et al.*, 2020).

그간의 연구결과에 의하면, 식물 잎에 축적된 미세먼지는 식물의 생리적, 형태적 변화를 유발할 수 있다. 잎에 침착된 미세먼지는 잎에 도달하는 광합성 활성 복사(PAR)의 흡수를 방해하고(shading effect), 기공 근처에 침착하거나 기공으로 흡수된 미세먼지는 기공을 막아 기공전도도를 떨어뜨려 이산화탄소의 드나듦을 방해하는 방법으로 식물의 광합성 효율을 떨어뜨릴 수 있다(Naidoo and Chirkoot, 2004; Li *et al.*, 2019b). 기공의 크기 및 표피세포의 크기가 작아지는 현상도 관찰된다(Rai *et al.*, 2010). 잎에 축적된 미세먼지가 빛의 흡수량을 늘리는 결과 잎의 온도가 올라가고 이에 따라서 광합성 속도가 증가하게 되므로(Hirano *et al.*, 1995), 미세먼지가 광합성효율에 미치는 영향은 다소 복잡하게 나타난다. 잎의 온도 증가와 더불어 증산량도 증가하게 되므로, 수분이용효율도 변하게 된다(Pavlik *et al.*, 2012). 미세먼지의 영향으로 식물 잎의 크기가 감소하고, 그에 따라 광합성 속도도 감소하며 이는 광합성 산물의 감소로 이어질 수 있음이 관찰되었다(Pourkhabbaz *et al.*, 2010).

미세먼지 속 질산염은 nitrate reductase의 활성을 떨어뜨리는데, 이는 결과적으로 광합성 산물이 정상적으로 식물체 내에 재분배되지 못하게 할 수 있고, 이는 식물의 수행능력(performance)를 저해하고 생장을 방해하게 된다(Robinson *et al.*, 1998; Nagajyoti *et al.*, 2010). 식물 잎에 침착된 미세먼지 내 중금속 및 미량 원소는 큐티클층 사이의 틈이나 기공 등의 여러 경로를 통해 식물체 내로 들어가는 것으로 알려져 있는데, 식물 대사 과정에 다양하게 영향을 미칠 수 있다(Pavlik *et al.*, 2012). 가령 식물체 내의 활성산소(Reactive oxygen species: ROS)의 생성과 제거의 균형을 깨뜨려 산화스트레스의 원인이 될 수 있음이 알려져 있다(Rai, 2016).

3. 미세먼지가 식물을 통해 생태계에 미치는 영향

생태계는 생물적 요소와 무생물적 요소가 상호 유기적으로 연결되어있는 시스템이므로, 미세먼지가 식물에 미치는 영향이 식물을 통하여 생태계의 다른 생물적, 무생물적 요소로까지 확대될 수 있음은 오래전부터 생각되어 왔으나(Grantz *et al.*, 2003), 이 부분 역시 최근까지도 연구가 많이 부족하다. 그간의 연구들은 먹이사슬 속에서 식물을 섭식하는 소비자에 미치는 영향, 또는 식물이 분해되는 과정에서 미치는 영향에 관해 일부 연구되었다.

초식 동물은 식물을 직접 섭식하므로 식물 잎에 축적된 미세먼지와 어떤 방식이든 접촉하게 된다. 이때 초식 곤충(초식 곤충 이외에 다른 초식동물을 대상으로 한 연구는 보고된 바 없음) 체내에 미세먼지가 축적되는 정도는 초식 곤충의 섭식 패턴(feeding type 혹은 guild)에 따라 다를 것이다(Łukowski *et al.*, 2018). 물론, 체관의 액체성 먹이를 먹는 곤충에 미치는 미세먼지의 영향에 관한 연구는 보고된 바 없고, 잎을 씹어먹는 곤충의 경우 대부분 미세먼지가 곤충의 발달을 저해하거나 사망률을 높이는 것으로 보고되었다. 예로, Flander *et al.* (1941)는 잎에 쌓인 먼지(dust)가 초식 곤충 중 잎을 씹어먹는 곤충의 경우 곤충의 소화관 내에 미세먼지가 축적되어 정상적인 소화 활동을 방해한다고 보고하였고, Khan *et al.* (2013)은 미세먼지를 섭식한 누에나방 애벌레의 사망률이 증가하고 체중이 감소하며 번식력이 감소한다고 보고하였다. Vanderstock *et al.* (2018) 역시 석탄 기원의 미세먼지가 축적된 잎을 먹은 왕담배나방 애벌레의 사망률이 증가한다고 보고하였다. 꽃, 꽃가루(pollen), 꿀물(nectar) 등을 먹이로 하는 벌목 곤충의 경우 꿀물이나 꽃가루를 채집할 때 미세먼지도 같이 채집하게 되는데, 미세먼지에 포함된 중금속이나 바이러스 등의 병원체가 좋지 않은 영향을 미칠 가능성이 있으나, 이를 확인하는 실험이 부족하고 결과가 명확치 않다(Feldhaar and Otti, 2020; Negri *et al.*, 2020; Thimmegowda *et al.*, 2020). 벌목 곤충 중 일부는 포식기생자로서 천적으로 기능하는데, 이들에 대한 영향은 아직 거의 연구되지 않았다. 또한 초식곤충에 축적되는 미세먼지의 양 및 먹이사슬의 다음단계인 육식곤충으로 이동되는 미세먼지의 양에 대한 연구도 아직 보고된 것이 없다.

식물 잎에 축적되는 미세먼지에 포함된 중금속이나 미량원소 등의 다양한 화학물질들은 식물 잎의 질(quality)을 변화시키고, 이는 분해자(다양한 미생물 및 무척추동물들) 분해 활동에 영향을 미칠 수 있으며, 이는 결과적으로는 분해 속도에 영향을 미치게 된다. 몇 안되는 관련 연구 중 Ji *et al.* (2020)는 육상생태계를 가정한 실내 실험조건에

Table 2. Summary examples on research objectives and plant species utilized in studies conducted by Korean researchers.

| Research objectives | Plant species used in studies | References |
|---|---|---------------------------|
| | <i>Epipremnum aureum</i> | Ryu <i>et al.</i> (2018) |
| | <i>Sansevieria hyacinthoides</i> | |
| | <i>Ficus banghalensis</i> | |
| | <i>Hedera helix</i> | |
| | <i>Viburnum odoratissimum</i> | |
| | <i>Aesculus turbinata</i> | |
| | <i>Buxus koreana</i> | |
| | <i>Chionanthus retusus</i> | |
| | <i>Euonymus japonicus</i> | |
| | <i>Ginkgo biloba</i> | |
| Measuring particulate matter removal by plant species | <i>Liriodendron tulipifera</i> | Kwak <i>et al.</i> (2020) |
| | <i>Magnolia denudata</i> | |
| | <i>Rhododendron schlippenbachii</i> | |
| | <i>Styphnolobium japonicum</i> | |
| | <i>Taxus cuspidata</i> | |
| | <i>Quercus glauca</i> | |
| | <i>Quercus myrsinaefolia</i> | |
| | <i>Ginkgo biloba</i> | |
| | <i>Prunus serrulata</i> var. <i>spontanea</i> | |
| | <i>Pinus densiflora</i> | |

서 미세먼지가 축적된 잎의 분해 속도가 느려지며 토양 미생물의 생물량이 감소하고 효소의 활성이 떨어진 것을 확인하였고, Wu and Zang (2018)는 수생태계를 모방한 실내 실험조건에서 미세먼지가 축적된 잎의 분해속도가 느려지며, 여러 수종의 잎들 중 잎의 pH가 낮을수록 더 분해속도가 느림을 확인하였다.

식물을 통한 직접 수표면으로 이동하던 미세먼지는 결국에는 수생태계로 이동하게 되는데, 유입된 미세먼지가 수생태계에 서식하는 생물들에 영향을 미칠 수 있음은 상대적으로 연구가 좀 더 진행된 편이다. 몇몇 연구의 예로, 인간활동 기원의 미세먼지가 타이완 중국 근해 여러 말미잘중에 축적되어 있음을 관찰 확인하였고 (Liu *et al.*, 2020), 해양에 첨가된 미세먼지가 해양 플랑크톤의 생물량, 종다양성 및 조성을 변화시킬 수 있음을 실험으로 보여 주었고 (Maki *et al.*, 2016), 해양 어류 중 송사리속 물고기 *Oryzias melastigma*의 생장을 저해하고 (Zhao *et al.*, 2020), 담수에서는 수생 달팽이 (Hartono *et al.*, 2017) 행동이 저하됨을 확인하였다.

4. 국내의 식물-미세먼지 상호작용 관련 연구현황

국내 미세먼지와 관련된 연구는 거의 대부분 미세먼지 자체에 초점이 맞추어져, 대기 중 미세먼지의 농도 및 시간적 공간적 분포와 관련된 정보들이 대부분이다(예: Jung *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2019). 식물과 연관되어서는 실내 공기질을 개선하는 데에 식물을 활용하고자 하는 연구들(예: Lee *et al.*, 2015; Kwon and Park, 2018; Choe and Kim, 2019)이 상대적으로 많은 반면, 식물의 미세먼지 제거나 미세먼지가 식물에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다. 그간 미세먼지와 식물의 상호관계에 관해 수행된 국내 연관 연구를 표에 정리하였다(Table 2).

결론

미세먼지가 인간 및 환경에 미칠 수 있는 영향이 지대할 것임은 알고 있지만, 그에 대한 우리의 이해는 아직 제한적이다. 특히 식물은 먹이사슬의 기저로서 생태계를 유지함에 있어서 중요한 기능을 하고 있으며 미세먼지와 지속적 상호작용 하에 있기 때문에, 식물과 미세먼지의 상호작용에 대해 제대로 이해하는 것은 매우 중요한 일이다. 다른 관점에서, 미세먼지와 식물의 상호작용은 도시 생태학적으로도 중요한 연구주제라 할 수 있는데, 미세먼지의 대부분은 인간이 만들어내고 있고 인간은 도시에 모여 살고 있으므로(우리나라의 경우 인구의 절반 이상이 수도권에 산다), 필연적으로 도시지역에 서식하는 식물에게 있어서 미세먼지는 스트레스 요인이며 진화의 선택압이 될 수 있다. 이에 대해 이해하고자 하는 노력은 앞으로 그 중요성이 더욱 증가할 것이라 생각한다.

적요

대기 중 미세먼지가 환경과 인간의 공중 보건에 악영향을 미치고 있다는 사실은 점점 명확해지고 있다. 미세먼지가 식물의 잎에 침착, 흡수되므로 식물이 미세먼지를 제거하는 바이오필터로 활용하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 또한, 식물에 흡수된 미세먼지는 식물에 다양한 생리적, 형태적 영향을 미치게 된다. 본 연구는 식물과 미세먼지간의 상호작용에 대해 국내외에서 수행되어온 연구들의 방법과 결과를 특히 생태적 관점에서 종합 정리하였다.

저자정보 손민정 (경상대학교 생물교육과 석사과정), 남기정 (경상대학교 생물교육과 부교수)

저자기여도 연구책임, 개념설정, 자료분석 및 논문작성: 남기정, 자료수집 및 분석, 논문작성: 손민정

이해충돌 이해충돌 여지 없음

사사 해당없음

REFERENCES

- Baró, F., L. Chaparro, E. Gómez-Baggethun, J. Langemeyer, D.J. Nowak and J. Terradas. 2014. Contribution of Ecosystem Services to Air Quality and Climate Change Mitigation Policies: The Case of Urban Forests in Barcelona, Spain. *AMBIO* **43**: 466-479.
- Bebkiewicz, K., Z. Chłopek, J. Lasocki, K. Szczepański and M. Zimakowska-Laskowska. 2020. The Inventory of Pollutants Hazardous to the Health of Living Organisms, Emitted by Road Transport in Poland between 1990 and 2017. *Sustainability* **12**: 5387.
- Bennett, J.E., H. Tamura-Wicks, R.M. Parks, R.T. Burnett, C.A.P. 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**: e1002856.
- Bottalico. 2016. Air Pollution Removal by Green Infrastructures and Urban Forests in the City of Florence. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* **8**: 243-251.
- Bottalico, F., D. Travaglini, G. Chirici, V. Garfi, F. Giannetti, A. De Marco, S. Fares, M. Marchetti, S. Nocentini, E. Paoletti, F. Salbitano and G. Sanesi. 2017. A spatially-explicit method to assess the dry deposition of air pollution by urban forests in the city of Florence, Italy. *Urban Forestry & Urban Greening* **27**: 221-234.
- Cai, M., Z. Xin and X. Yu. 2019. Particulate matter transported from urban greening plants during precipitation events in Beijing, China. *Environmental Pollution* **252**: 1648-1658.
- Chiam, Z., X.P. Song, H.R. Lai and H.T.W. Tan. 2019. Particulate matter mitigation via plants: Understanding complex relationships with leaf traits. *Science of The Total Environment* **688**: 398-408.
- Cho, M.G., E.J. Jin, E.J. Bae, K.S. Lee, H.S. Moon and M.R. Huh. 2017. Absorption ability of particulate matter in leaves of street trees in Jinju City. *Journal of People, Plants and Environment* **20**: 431-440.
- Choe, B.-H. and T.-H. Kim. 2019. Study on reduction of particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀) by vegetation bio-filters according to air conditioning wind volume. Proceedings of the Korean Institute of Landscape Architecture Conference. pp. 85-86.
- Cong, L., H. Zhang, J. Zhai, G. Yan, Y. Wu, Y. Wang, W. Ma, Z. Zhang and P. Chen. 2020. The blocking effect of atmospheric particles by forest and wetland at different air quality grades in Beijing China. *Environmental Technology* **41**: 2266-2276.
- Feldhaar, H. and O. Otti. 2020. Pollutants and Their Interaction with Diseases of Social Hymenoptera. *Insects* **11**: 153.
- Fiordelisi, A., P. Piscitelli, B. Trimarco, E. Coscioni, G. Iaccarino and D. Sorriento. 2017. The mechanisms of air pollution and particulate matter in cardiovascular diseases. *Heart Failure Reviews* **22**: 337-347.
- Flanders, S.E. 1941. Dust as an Inhibiting Factor in the Reproduction of Insects. *Journal of Economic Entomology* **34**: 470-472.
- Grantz, D.A., J.H.B. Garner and D.W. Johnson. 2003. Ecological effects of particulate matter. *Environment International* **29**: 213-239.
- Guerrero-Leiva, N., S.A. Castro, M.A. Rubio and C. Ortiz-Calderón. 2016. Retention of Atmospheric Particulate by Three Woody Ornamental Species in Santiago, Chile. *Water, Air, & Soil Pollution* **227**: 435.
- Guo, L.-C., L.-J. Bao, J.-W. She and E.Y. Zeng. 2014. Significance of wet deposition to removal of atmospheric particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons: A case study in Guangzhou, China. *Atmospheric Environment* **83**: 136-144.
- Hartono, D., B. Lioe, Y. Zhang, B. Li and J. Yu. 2017. Impacts of particulate matter (PM_{2.5}) on the behavior of freshwater snail *Parafossarulus striatulus*. *Scientific Reports* **7**: 644.
- Hartono, H. 2017. Impacts of particulate matter (PM_{2.5}) on the behavior of freshwater snail *Parafossarulus striatulus*. *Scientific Reports* **7**: 644.
- Hatami, Z., P.R. Moghaddam, A. Rashki, M.N. Mahallati and B.H. Khaniani. 2018. Effects of desert dust on yield and yield components of cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Archives of Agronomy and Soil Science* **64**: 1446-1458.
- Hirano, T., M. Kiyota and I. Aiga. 1995. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. *Environmental Pollution* **89**: 255-261.
- Honour, S.L., J.N.B. Bell, T.W. Ashenden, J.N. Cape and S.A. Power. 2009. Responses of herbaceous plants to urban air pollution: Effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. *Environmental Pollution* **157**: 1279-1286.
- Hyde, P. and A. Mahalov. 2020. Contribution of bioaerosols to airborne particulate matter. *Journal of the Air & Waste Management Association* **70**: 71-77.
- Irga, P.J., M.D. Burchett and F.R. Torpy. 2015. Does urban forestry have a quantitative effect on ambient air quality in an urban environment? *Atmospheric Environment* **120**: 173-181.
- Ji, Y., Q. Li, R. Ye, K. Tian and X. Tian. 2020. The Impact of Water-Soluble Inorganic Ions in Particulate Matter (PM_{2.5}) on Litter Decomposition in Chinese Subtropical Forests.

- Forests* **11**: 238.
- Jo, E.-J., W.-S. Lee, H.-Y. Jo, C.-H. Kim, J.-S. Eom, J.-H. Mok, M.-H. Kim, K. Lee, K.-U. Kim, M.-K. Lee and H.-K. Park. 2017. Effects of particulate matter on respiratory disease and the impact of meteorological factors in Busan, Korea. *Respiratory Medicine* **124**: 79-87.
- Jung, M.-I., S.-W. Son, H.C. Kim, S.-W. Kim, R.J. Park and D. Chen. 2019. Contrasting synoptic weather patterns between non-dust high particulate matter events and Asian dust events in Seoul, South Korea. *Atmospheric Environment* **214**: 116864.
- Kampa, M. and E. Castanas. 2008. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution* **151**: 362-367.
- Khan, T.A., G.K. Ramegowda and M.Y. Dar. 2013. Effect of Road Dust Pollution in Mulberry on Silkworm Performance in Kashmir valley, India. *Research Journal of Agricultural Sciences* **4**: 501-506.
- Kwak, M.J., J.K. Lee, S. Park, H. Kim, Y.J. Lim, K.-A. Lee, J. Son, C.-Y. Oh, I. Kim and S.Y. Woo. 2020. Surface-Based Analysis of Leaf Microstructures for Adsorbing and Retaining Capability of Airborne Particulate Matter in Ten Woody Species. *Forests* **11**: 946.
- 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**: 62-68.
- 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. *Horticultural Science & Technology* **33**: 751-762.
- Lee, M.A., L. Davies and S.A. Power. 2012. Effects of roads on adjacent plant community composition and ecosystem function: An example from three calcareous ecosystems. *Environmental Pollution* **163**: 273-280.
- Leonard, R.J., C. McArthur and D.F. Hochuli. 2016. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening* **20**: 249-253.
- Li, G., L. Wang, F. Sun, Y. Wang, H. Wu, Z. Hu, B. Zhang, L. Yu, H. Yan and F. Shao. 2019a. Capacity of Landscaping Plants to Accumulate Airborne Particulate Matter in Hangzhou, China. *Polish Journal of Environmental Studies* **29**: 153-161.
- Li, Y., Y. Wang, B. Wang, Y. Wang and W. Yu. 2019b. 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**: 120-128.
- Litschke, T. and W. Kuttler. 2008. On the reduction of urban particle concentration by vegetation - a review. *Meteorologische Zeitschrift* **17**: 229-240.
- Liu, H., X. Zhang, H. Zhang, X. Yao, M. Zhou, J. Wang, Z. He, H. Zhang, L. Lou, W. Mao, P. Zheng and B. Hu. 2018. Effect of air pollution on the total bacteria and pathogenic bacteria in different sizes of particulate matter. *Environmental Pollution* **233**: 483-493.
- Liu, L.-L., C.-Y. Hsieh, M.-Y. Kuo, C. Chen, Y.-H. Shau, H.-K. Lui, C.-S. Yuan and C.-T. A. Chen. 2020. Evidence for Fossil Fuel PM₁ Accumulation in Marine Biota. *Environmental Science & Technology* **54**: 4068-4078.
- Łukowski, A., R. Popek, R. Jagiełło, E. Mańderek and P. Karolewski. 2018. Particulate matter on two *Prunus* spp. decreases survival and performance of the folivorous beetle *Gonioctena quinquepunctata*. *Environmental Science and Pollution Research* **25**: 16629-16639.
- Maitra, S. and D.S. Jyethi. 2020. Particulate matter removal by forest cover in Delhi. *Arboricultural Journal* **42**: 36-49.
- Maki, T., A. Ishikawa, T. Mastunaga, S.B. Pointing, Y. Saito, T. Kasai, K. Watanabe, K. Aoki, A. Horiuchi, K.C. Lee, H. Hasegawa and Y. Iwasaka. 2016. Atmospheric aerosol deposition influences marine microbial communities in oligotrophic surface waters of the western Pacific Ocean. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* **118**: 37-45.
- Marando, F., E. Salvatori, L. Fusaro and F. Manes. 2016. Removal of PM₁₀ by Forests as a Nature-Based Solution for Air Quality Improvement in the Metropolitan City of Rome. *Forests* **7**: 150.
- Mohan, M.S. 2016. An overview of particulate dry deposition: measuring methods, deposition velocity and controlling factors. *International Journal of Environmental Science and Technology* **13**: 387-402.
- Nagajyoti, P.C., K.D. Lee and T.V.M. Sreekanth. 2010. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters* **8**: 199-216.
- Naidoo, G. and D. Chirkoot. 2004. The effects of coal dust on photosynthetic performance of the mangrove, *Avicennia marina* in Richards Bay, South Africa. *Environmental Pollution* **127**: 359-366.
- Negri, I., G. Capitani and M. Pellicchia. 2020. Airborne particulate matter and health effects on bees: A correlation does not indicate causation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **117**: 26576-26577.
- Nowak, D.J., S. Hirabayashi, A. Bodine and E. Greenfield. 2014. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution* **193**: 119-129.
- O'Day. 2020. Phosphorus Speciation in Atmospherically Deposited Particulate Matter and Implications for Terrestrial Ecosystem Productivity. *Environmental Science & Technology* **54**: 4984-4994.
- Paull, N.J., D. Krix, P.J. Irga and F.R. Torpy. 2020. Airborne particulate matter accumulation on common green wall plants. *International Journal of Phytoremediation* **22**: 594-606.
- Pavlík, M., D. Pavlíková, V. Zemanová, F. Hnilička, V. Urbanová and J. Száková. 2012. Trace elements present in airborne

- particulate matter-Stressors of plant metabolism. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **79**: 101-107.
- Pope, C.A., M. Ezzati and D.W. Dockery. 2009. Fine-Particulate Air Pollution and Life Expectancy in the United States. *New England Journal of Medicine* **360**: 376-386.
- Popek, R., A. Lukowski, C. Bates and J. Oleksyn. 2017. Accumulation of particulate matter, heavy metals, and polycyclic aromatic hydrocarbons on the leaves of *Tilia cordata* Mill. in five Polish cities with different levels of air pollution. *International Journal of Phytoremediation* **19**: 1134-1141.
- Pourkhabbaz, A., N. Rastin, A. Olbrich, R. Langenfeld-Heysler and A. Polle. 2010. Influence of Environmental Pollution on Leaf Properties of Urban Plane Trees, *Platanus orientalis* L. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **85**: 251-255.
- Rai, A., K. Kulshreshtha, P.K. Srivastava and C.S. Mohanty. 2010. Leaf surface structure alterations due to particulate pollution in some common plants. *The Environmentalist* **30**: 18-23.
- Rai, P.K. 2016. Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. *Ecotoxicology and Environmental Safety* **129**: 120-136.
- Rai, P.K., B.M. Chutia and S.K. Patil. 2014. Monitoring of spatial variations of particulate matter (PM) pollution through bio-magnetic aspects of roadside plant leaves in an Indo-Burma hot spot region. *Urban Forestry & Urban Greening* **13**: 761-770.
- Robinson, M.F., J. Heath and T.A. Mansfield. 1998. Disturbances in stomatal behaviour caused by air pollutants. *Journal of Experimental Botany* **49**: 461-469.
- Ryu, J., J.J. Kim, H. Byeon, T. Go and S.J. Lee. 2019. Removal of fine particulate matter (PM_{2.5}) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration. *Environmental Pollution* **245**: 253-259.
- Sæbø, A., R. Popek, B. Nawrot, H.M. Hanslin, H. Gawronska and S.W. Gawronski. 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of The Total Environment* **427-428**: 347-354.
- Sarkodie, S.A., V. Strezov, Y. Jiang and T. Evans. 2019. Proximate determinants of particulate matter (PM_{2.5}) emission, mortality and life expectancy in Europe, Central Asia, Australia, Canada and the US. *Science of The Total Environment* **683**: 489-497.
- Schultz, A.A., J.J. Schauer and K.M.C. Malecki. 2017. Allergic disease associations with regional and localized estimates of air pollution. *Environmental Research* **155**: 77-85.
- Selmi, W., C. Weber, E. Rivière, N. Blond, L. Mehdi and D. Nowak. 2016. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening* **17**: 192-201.
- Setälä, H., V. Viippola, A.-L. Rantalainen, A. Pennanen and V. Yli-Pelkonen. 2013. Does urban vegetation mitigate air pollution in northern conditions? *Environmental Pollution* **183**: 104-112.
- Shah, K., N. An, W. Ma, G. Ara, K. Ali, S. Kamanova, X. Zuo, M. Han, X. Ren and L. Xing. 2020. Chronic cement dust load induce novel damages in foliage and buds of *Malus domestica*. *Scientific Reports* **10**: 12186.
- Shahid, M., C. Dumat, S. Khalid, E. Schreck, T. Xiong and N.K. Niazi. 2017. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials* **325**: 36-58.
- Shao, F., L. Wang, F. Sun, G. Li, L. Yu, Y. Wang, X. Zeng, H. Yan, L. Dong and Z. Bao. 2019. Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China. *Science of The Total Environment* **652**: 939-951.
- Tallis, M., G. Taylor, D. Sinnett and P. Freer-Smith. 2011. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning* **103**: 129-138.
- Thimmegowda, G.G., S. Mullen, K. Sottolare, A. Sharma, S.S. Mohanta, A. Brockmann, P.S. Dhandapany and S.B. Olsson. 2020. A field-based quantitative analysis of sublethal effects of air pollution on pollinators. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **117**: 20653-20661.
- Vanderstock, A.M., T. Latty, R.J. Leonard, D.F. Hochuli. 2018. Mines over matter: Effects of foliar particulate matter on the herbivorous insect, *Helicoverpa armigera*. *Journal of Applied Entomology* **143**: 77-87.
- Wang, J., Q. Yin, S. Tong, Z. Ren, M. Hu and H. Zhang. 2017. Prolonged continuous exposure to high fine particulate matter associated with cardiovascular and respiratory disease mortality in Beijing, China. *Atmospheric Environment* **168**: 1-7.
- Welsch, H. 2006. Environment and happiness: Valuation of air pollution using life satisfaction data. *Ecological Economics* **58**: 801-813.
- Wu, J., Y. Wang, S. Qiu and J. Peng. 2019. Using the modified i-Tree Eco model to quantify air pollution removal by urban vegetation. *Science of The Total Environment* **688**: 673-683.
- Wu, W. and Y. Zhang. 2018. Effects of particulate matter (PM_{2.5}) and associated acidity on ecosystem functioning: response of leaf litter breakdown. *Environmental Science and Pollution Research* **25**: 30720-30727.
- Xu, X., X. Yu, L. Bao and A.R. Desai. 2019. Size distribution of particulate matter in runoff from different leaf surfaces during controlled rainfall processes. *Environmental Pollution* **255**: 113234.
- Yoo, S.-Y., T. Kim, S. Ham, S. Choi and C.-R. Park. 2020. Importance of Urban Green at Reduction of Particulate Matters in Sihwa Industrial Complex, Korea. *Sustainability*

- 12: 7647.
- Zhang, C., B. Huang, J.D.A. Piper and R. Luo. 2008. Biomonitoring of atmospheric particulate matter using magnetic properties of *Salix matsudana* tree ring cores. *Science of The Total Environment* **393**: 177-190.
- Zhang, W., Y. Zhang, J. Gong, B. Yang, Z. Zhang, B. Wang, C. Zhu, J. Shi and K. Yue. 2020. Comparison of the suitability of plant species for greenbelt construction based on particulate matter capture capacity, air pollution tolerance index, and antioxidant system. *Environmental Pollution* **263**: 114615.
- Zhang, W., Z. Zhang, H. Meng and T. Zhang. 2018. How Does Leaf Surface Micromorphology of Different Trees Impact Their Ability to Capture Particulate Matter? *Forests* **9**: 681.
- Zhang, X. 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**: 11845.
- Zhang, Z., J. Liu, Y. Wu, G. Yan, L. Zhu and X. Yu. 2017. Multi-scale comparison of the fine particle removal capacity of urban forests and wetlands. *Scientific Reports* **7**: 46214.
- Zhao, P., W. Lu, Y. Hong, J. Chen, S. Dong and Q. Huang. 2020. Long-term wet precipitation of PM_{2.5} disturbed the gut microbiome and inhibited the growth of marine medaka *Oryzias melastigma*. *Science of The Total Environment* **755**: 142512.