

도시 미세먼지 저감 식재를 위한 수종 선정 기준의 우선순위 도출^{1a}

조동길^{2*}

Prioritization of Species Selection Criteria for Urban Fine Dust Reduction Planting^{1a}

Cho, Dong-Gil^{2*}

요약

도심지 내 미세먼지 저감 식재를 위한 식물 소재 선정 시에는 식물의 흡착 기능에 영향을 미치는 식물의 잎 모양, 질감, 수피의 형태 등 형태적 특성을 종합적으로 고려하여 선정하여야 한다. 그러나 지금까지 식물을 통한 미세먼지 저감에 대한 연구는 식물의 흡착 기능보다 흡수 기능에 대한 연구가, 실외식물보다 실내식물인 관엽식물을 대상으로 한 연구가 주로 진행되어 왔다. 특히, 미세먼지 저감 수종 선정 기준이 구체적이지 않아 미세먼지 저감 식재를 위한 식물 소재 선정 기준에 대한 연구가 필요한 실정이다. 본 연구는 퍼지다기준 의사결정법(Fuzzy MCDM)을 활용하여 미세먼지 저감에 영향을 미치는 8가지 지표 항목에 대한 우선순위를 도출하고 도심 내 미세먼지 저감 식재를 위한 수종 선정 기준을 마련하였다. 이를 위하여 미세먼지 관련 분야 전공자와 미세먼지 관련 연구 경험자들을 대상으로 설문 조사를 실시하였다. 설문 조사 분석 결과, 미세먼지 저감에 영향을 미치는 지표 항목 중 잎 면적과 수종의 종류가 가장 높은 순위를 나타냈다. 그리고 잎 표면의 거칠기, 수고, 성장 속도, 잎의 복잡성, 잎 가장자리 형태, 수피 특징 순서로 우선순위가 높게 나타났다. 잎 표면이 거친 수종을 선정할 경우에는 잎에 털이 있고, 광택이 나며, 왁스층이 있는 수종을 우선적으로 선정하는 것이 좋다. 잎의 형태를 고려할 경우, 단일 잎보다 3중 혹은 2중 잎과 손바닥 형태의 잎을 선정하고, 잎의 가장자리는 밋밋한 모양보다는 톱니 모양의 잎을 선별하여 공기 중의 미세먼지가 잎의 표면에 흡착되는 표면적 비율을 높이지게 할 필요가 있다. 수피의 특성을 고려할 경우에는 피목이나 무늬종보다는 코르크층이 있고 껍질이탈이나 갈라짐이 관찰되거나, 앞으로 관찰될 가능성이 높은 수종을 선정하는 것이 바람직하다. 본 연구는 도심 내 미세먼지 저감을 위한 식재계획 시 식물의 미세먼지 흡착 기능에 영향을 미치는 식물의 형태적 특성을 중심으로 식물 소재 선정 기준에 대한 우선순위를 제시하였다는 것에 의의가 있다. 본 연구에서 도출한 결과는 도심지 내 수목 식재 계획을 위한 수종 선정 시 기초 자료로서 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 흡착 기능, 실외 식물, 식재 계획, 잎 면적, 잎 표면

ABSTRACT

Selection of the plant material for planting to reduce fine dust should comprehensively consider the visual characteristics, such as the shape and texture of the plant leaves and form of bark, which affect the adsorption function of the plant. However, previous studies on reduction of fine dust through plants have focused on the absorption function rather than the adsorption function of plants and on foliage plants, which are indoor plants, rather than the outdoor plants. In particular, the criterion for selection of fine dust reduction species is not specific, so research on the selection criteria for plant materials for fine dust reduction in urban areas is needed.

1 접수 2019년 7월 22일, 수정 (1차: 2019년 8월 12일), 게재확정 2019년 8월 14일

Received 22 July 2019; Revised (1st: 12 August 2019); Accepted 14 August 2019

2 넥서스환경디자인연구원 대표, NEXUS Design Centre, 40, Imi-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 16006, Rep. of Korea, (cdgileco@naver.com)

a 이 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호19CTAP-C143827-02)에 의해 수행되었습니다.

* 교신저자 Corresponding author: cdgileco@naver.com

The purpose of this study is to identify the priorities of eight indicators that affect the fine dust reduction by using the fuzzy multi-criteria decision-making model (MCDM) and establish the tree selection criteria for the urban planting to reduce fine dust. For the purpose, we conducted a questionnaire survey of those who majored in fine dust-related academic fields and those with experience of researching fine dust. A result of the survey showed that the area of leaf and the tree species received the highest score as the factors that affect the fine dust reduction. They were followed by the surface roughness of leaves, tree height, growth rate, complexity of leaves, edge shape of leaves, and bark feature in that order. When selecting the species that have leaves with the coarse surface, it is better to select the trees with wooly, glossy, and waxy layers on the leaves. When considering the shape of the leaves, it is better to select the two-type or three-type leaves and palm-shaped leaves than the single-type leaves and to select the serrated leaves than the smooth edged leaves to increase the surface area for adsorbing fine dust in the air on the surface of the leaves. When considering the characteristics of the bark, it is better to select trees that have cork layers or show or are likely to show the bark loosening or cracks than to select those with lenticel or patterned barks. This study is significant in that it presents the priorities of the selection criteria of plant material based on the visual characteristics that affect the adsorption of fine dust for the planning of planting to reduce fine dust in the urban area. The results of this study can be used as basic data for the selection of trees for plantation planning in the urban area.

KEY WORDS: ADSORPTION FUNCTION, OUTDOOR PLANTS, PLANTING PLAN, LEAF AREA, LEAF SURFACE

서론

최근 도시민의 삶의 질 향상을 위하여 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」(2019. 03. 26.)을 시행하는 등 정부와 각 지자체 간에 다양한 방안이 제시되고 있다. 특히, 식물을 활용한 미세먼지 제거 효능이 부각됨에 따라 국토부, 환경부, 산림청과 각 지자체 등에서 미세먼지 식물에 대한 흡착, 흡수 기능에 대한 연구가 활발하다. 서울시에서는 식물의 미세먼지 저감 효과를 활용한 미세먼지 차단 도시숲을 조성하여 국민의 삶의 질을 개선하고자 노력 중이다.

이처럼 도시숲 조성과 같이 식물을 활용하여 도심지 내 미세먼지 저감을 극대화시키기 위해서는 식물의 미세먼지 저감 기작을 고려하여 적합한 식물을 선정하고 주변 환경을 고려한 배식 구조를 만드는 등 종합적인 식재 기법이 필요하다.

특히, 미세먼지 저감을 위한 식물 소재 선정에 있어서는 식물을 통한 미세먼지 저감 기작을 고려하여야 한다. 미세먼지 저감 기작은 일반적으로 차단, 침강, 흡수, 흡착의 네 가지로 구분한다(National Institute of Forest Science, 2018). 차단은 대기 중 미세먼지가 수목의 수관층 밖에 다다르면 미세먼지의 확산과 유속이 감소하면서 유입되지 않고 차단되는 것이며, 침강은 식물 및 수목이 모인 공간에 들어온 미세먼지가 수관층에서 지면으로 낙하하는 것을 의미한다. 흡수와 흡착은 식물의 형태, 잎 뒷면의 기공에 따라서 발생한다. 흡수 기작은 미세먼

지가 나뭇잎의 기공에 의해 흡수되며, 흡착 기작은 식물 및 수목의 잎 표면, 줄기와 가지의 표면에서 미세먼지를 잡아두거나 부착하는 것을 의미한다.

기존의 선행연구들에서는 식물 잎의 특징이 미세먼지 저감에 영향을 미치는 것으로 분석되었다(Weikang *et al.*, 2017, Hwang, 2012). 또한 식물의 흡수 기작뿐만 아니라 식물체의 잎을 통한 흡착을 통해 미세먼지가 저감된다(Ryan *et al.*, 2016, Colleen F., 2017, Robert *et al.*, 2013). 즉, 미세먼지 저감 식재를 위해서는 흡수뿐만 아니라 흡착 기능에 초점을 맞추어 식물을 선정할 필요가 있다.

이에 미세먼지 저감을 위한 식재 시 식물 선정에 있어서는 식물의 흡착 기능에 영향을 미치는 시각적 요소인 식물의 잎과 수피의 형태와 질감을 고려하여야 한다. 그러나 현재까지 국내외 미세먼지 식물에 대한 연구는 미세먼지 저감 식물의 흡착 기능에 대한 연구보다 흡수 기능에 대한 연구가 주로 이루어져 왔고, 결과적으로 미세먼지 저감을 위한 수종 선정 결과의 차이는 매우 불규칙하게 나타나고 있다. 또한 대부분 실내 관엽식물 중심의 연구가 이루어졌다(Kwon *et al.*, 2014, Kim *et al.*, 2016). 하지만 외부 활동이 많은 현대의 특성을 고려하였을 때, 도심지역에서 미세먼지 저감을 위한 실외 환경에 적합한 식물 선정에 대한 연구가 필요하다. 또한 미세먼지 저감 식물의 형태적 특성에 대한 기준이 구체적이지 않아 미세먼지 저감 식재를 위한 식물 선정 기준이 구체화 될 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 미세먼지 저감 식재를 위한 식물 소재의 선정 기준 마련을 위하여 문헌조사를 통해 미세먼지 저감 수종 잎의 형태적 특성을 도출하고, 수목, 원예, 환경, 조경 등 미세먼지 연구와 관련한 전공자 중 미세먼지 연구 경험이 있는 연구원을 대상으로 설문조사를 실시하고자 하였다. 조사 결과는 퍼지다기준 의사결정법(Fuzzy MCDM)을 활용하여 미세먼지 저감 관련 수종의 형태적 특성에 대한 우선순위와 기준치의 중요도를 분석함으로써 미세먼지 저감 식재를 위한 수종 선정 기준을 제시하고자 하였다.

연구사

1. 식물을 통한 미세먼지 저감 요인

식물을 통한 미세먼지 저감을 위한 국내외 선행 연구는 실내식물, 실외식물을 대상으로 진행한 것으로 구분된다. Kwon *et al.*(2014)은 실내 공기정화 식물 4종에 대한 초미세먼지 제거 효과를 확인하기 위해 소형 챔버를 제작하여 담배연기의 입자상 오염물질인 초미세먼지 PM10, PM2.5의 저감 효과를 실험하였다. 단위 엽 면적 당 아레카야자의 제거 효과가 가장 좋았으며, 식물의 미세먼지 흡착 효과는 잎 표면의 큐티클 층의 두께와 관련이 있는 것으로 판단하였다. Kim(2003)은 관엽식물 5종에 대한 주간과 야간의 실내미세분진 제거량을 확인하기 위해 소형 밀폐 챔버를 제작하여 부유분진(TSP)의 저감 효과를 실험하였다. 야간보다 주간 분진 제거율이 높으며, 엽면적이 크고 광합성률이 낮은 인도고무나무의 분진 감소가 큰 것으로 보아 식물의 엽 면적이 넓을수록 분진 제거 효과가 있는 것으로 판단하였다.

Hwang(2012)은 도심 가로수에서 주로 볼 수 있는 수목 5종(소나무, 주목, 플라타너스, 은행나무, 느티나무)에 대한 매연나노입자 제거 효과를 확인하기 위해 밀폐 챔버를 제작하여 확산화염을 이용한 매연 나노 입자를 모사하고 이에 대한 저감 효과를 실험하였다. 그 결과 소나무의 매연 나노 입자 제거 능력이 가장 좋은 것으로 나타났는데, 나뭇잎의 형상, 표면의 상태가 매연 나노 입자의 제거 특성에 영향을 주는 것으로 판단하였다. Li Mo *et al.*(2015)은 중국의 자생수종 35종(교목 24종, 관목 11종)에 대한 미세먼지 축적량과 식물의 특성에 대한 관계를 확인하기 위해 식물 잎을 채취하여 미세먼지 축적량을 분석하였다. 그 결과 꾸지나무, 양버즘나무, 굴참나무의 미세먼지 축적량이 높았으며, 미세먼지 입자는 식물 잎의 표면 왁스층에 축적되므로 잎 표면의 거칠기, 솜털의 유무에 따라 축적량 차이가 있는 것으로 판단하였다.

Ryan Leonard *et al.*(2016)은 시드니의 도심 가로변 식재 수종(16종)을 대상으로 입자상 물질의 흡착과 식물 잎의 모양

및 표면 상태에 대한 관계를 확인하기 위해 식물 잎의 형태적 특성(잎의 모양, 표면 털의 유무)에 따라 식물 잎을 채취하여 흡착된 입자상 물질량을 분석하였다. 그 결과 피침(披針)형의 잎과 표면에 털이 있는 식물의 입자상 물질 흡착량이 가장 높은 것으로 확인되어 잎의 모양과 표면의 털이 입자상 물질 흡착에 영향을 주는 것으로 판단하였다. Beckett *et al.*(2000)은 거친 잎 표면(rough leaf surface)을 가진 넓은 잎의 종(broad-leaved species)은 부드러운 표면(smooth surfaces)을 가진 종보다 더 효과적으로 미세먼지를 축적할 수 있다고 언급하였다. 또한, 두꺼운 왁스층을 가진 침엽수림이 활엽수림보다 효과적으로 미세먼지를 흡착하는 것으로 판단하였다.

국내외 선행 연구를 고찰해 본 결과, 실내식물을 대상으로 한 연구들은 관엽식물을 중심으로 연구를 진행하고 있다. 실외 수종을 대상으로 한 연구의 경우에는 가로수 중심의 특정 수목을 대상으로 진행하고 있다. 또한 선행 연구 분석 결과, 식물의 미세먼지 저감에 영향을 주는 요인으로 잎의 형태적 특성, 잎의 기공 수, 기공의 배치 형태, 광합성률 등이 도출되었고, 잎의 형태적 특성은 잎의 면적, 잎 표면의 털 유무, 잎 표면의 거칠기, 잎 표면 왁스층의 두께 등이 도출되었다(Table 1).

기존 선행 연구에서 나타나듯 연구자의 연구 설계 방법에 따라서 각 영향 요인의 결과 값에 차이가 발생하고 있어 미세먼지 저감 식재를 위한 식물 선정에 있어 보다 구체화되고 종합적인 기준 마련이 필요하다. 또한, 실내 식물의 잎을 대상으로 미세먼지 흡수 기능에 대한 연구를 진행하고 있기 때문에 이를 실외 식물 선정을 위한 기준으로 도입하기에는 한계가 있다. 실외 환경에서는 흡수 기능뿐만 아니라 흡착 기능을 포함하여 미세먼지의 차단과 침강을 높일 수 있는 식물 소재 선정에 대한 다양한 기준을 제시할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 국내외 선행 연구를 고찰하여 실외 식물을 대상으로 흡수 및 흡착 기능에 영향을 주는 요인을 종합적으로 제시하고, 이에 대한 세부 항목을 구체화하여 설문 항목으로 구성하였다.

2. 퍼지다기준 의사결정법(Fuzzy MCDM)

퍼지다기준 의사결정법(Fuzzy MCDM)은 미세먼지 저감에 영향을 미치는 다변수들의 상대적인 영향력의 차이를 비교할 수 있는 연구 방법이다(Kwak *et al.*, 2015). 리커트 척도를 활용한 설문조사에서 설문자의 응답을 특정 수치가 아닌 구간으로 표현하는 퍼지넘버(Fuzzy numbers)로 변환하여 객관성을 확보하고, 언어적 표현을 수리적인 계산에 용이하게 할 수 있다(Kwak *et al.*, 2003; Ku *et al.*, 2010; Choi *et al.*, 2017). 이러한 실제 문제에서 발생하는 모호성과 불확실성 개념을 효과적으로 처리할 수 있는 이론으로 다양한 분야에서 응용하고 있다.

퍼지다기준 의사결정법은 개인의 응답으로 나타난 언어적 표현을 수리적인 계산이 용이한 퍼지넘버(fuzzy integrals)를

Table 1. Preliminary Study on Factors of Fine Dust Reduction in Plants

Title (Year)	Contents	Factors Influencing Fine Dust Reduction
Removal of Particulate Matters of Four Foliage Plant-Based Biofilter (Kwon <i>et al.</i> , 2014)	Removal effects of particulate pollutants PM1 and PM2.5 in environmental tobacco smoke were confirmed by using air purification plants (4 species) and planting base (pearlite).	Leaf area, leaf wax layer thickness, Number of pores of leaves
Particulate Matter Removal of Indoor Plants, <i>Dieffenbachia amoena</i> ‘Marianne’ and <i>Spathiphyllum</i> spp. according to Light Intensity (Kwon <i>et al.</i> , 2018)	The removal efficiency of particulate pollutant PM1 according to the light quantity condition of the air purifying plant DIPPENVAKIA and SPARTHER FILM was confirmed.	Photosynthetic rate, Number of pores of leaves, layout type of pores
Identification of airborne fine dust removal efficiency of indoor plants (Kim <i>et al.</i> , 2016)	Using the enclosed chamber, we observed the effect of fine dust removal on 10 species of plants and 3 species of tilandia.	Photosynthetic rate, Number of pores of leaves, layout type of pores
Characteristics of soot Aerosol Removal according to Tree Species (Hwang <i>et al.</i> , 2012)	Confirmed the removal characteristics of soot nanoparticles on five kinds of leaves of trees that can be mainly seen in urban roadside trees by using a closed chamber	Shape of leaf, Leaf surface roughness
Relationship between Leaf Surface Characteristics and Particle Capturing Capacities of different Tree Species in Beijing (Weikang <i>et al.</i> , 2017)	Broad-leaved tree exhibits a good correlation between micro-roughness of leaf surfaces the main factors affecting the adsorptive capacities of the leaves in coniferous trees are the number of stomata as well as the amount of epicuticular wax and the properties of the cuticle in different seasons.	Wax layer thickness on leaf surface, Leaf surface roughness
Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations (Ryan <i>et al.</i> , 2016)	Identification of the adsorption of particulate matter of 16 kinds of plant species on the roadside, the shape of the leaves, and the presence of fur on the leaves	Leaf area, hair of leaf surface
Interception of particulate matter by street tree leaves in an inland valley community of southern California(Colleen F., 2017)	Identify the relationship between leaf characteristics and particulate matter interception for seven species of plant species in the roadsides of California	Wax layer thickness on leaf surface, Number of pores of leaves
Particulate matter on foliage of 13 woody species: Deposition on surfaces and Phytostabilisation in waxes - a 3-year study (Robert <i>et al.</i> , 2013)	Long-term confirmation of the correlation between the wax surface of 13 plants and the accumulated particulate matter over 3 years	Wax layer thickness on leaf surface

통해 정량화 할 수 있다. 퍼지넘버는 세 개의 숫자로 이루어져 있어, 신뢰 구간을 고려할 수 있게 해준다. 총 합산값을 구하는 과정에서 퍼지넘버의 가운데 숫자에는 0.5의 가중치가 부여되고, 나머지 두 숫자에 0.25의 가중치가 부여된다. 따라서 본 논문에서는 응답의 불확실성을 보다 명시적으로 반영할 수 있는 퍼지다기준 의사결정기법을 사용하였다.

퍼지다기준 의사결정법 적용 절차는 4단계를 가진다(Kwak *et al.*, 2015; Choi *et al.*, 2017). 1단계는 퍼지넘버 설정이다. 영향력 정도를 나타내는 언어 척도 P와 확신 정도를 나타내는 언어값 S에 대한 퍼지넘버를 설정한다.

$$P_{ti} = (a_{ti}, b_{ti}, c_{ti}) \quad S_{ti} = (o_{ti}, p_{ti}, q_{ti})$$

2단계는 퍼지넘버를 이용하여 개별 평가자의 퍼지신뢰지수 (Fi)를 계산한다(①). 3단계는 총합산값(total integral values)을 계산하고 각 응답자에 대한 중요도(weights)를 도출한다(②).

$$F_i \cong (Y_i, Q_i, Z_i) \dots\dots\dots ①$$

$$Y_i = \sum_t \frac{a_{ti} \cdot o_{ti}}{R} \quad Q_i = \sum_t \frac{b_{ti} \cdot p_{ti}}{R} \quad Z_i = \sum_t \frac{c_{ti} \cdot q_{ti}}{R}$$

F_i =퍼지신뢰지수, Y_i, Q_i, Z_i =신뢰지수 요소, R =평가문항수

$$I(F_i) = \frac{1}{2}[\alpha Z_i + Q_i + (1 - \alpha) Y_i] \dots\dots\dots ②$$

$I(F_i)$ =총합산 값, $\alpha=0.5$ (낙과주의 지수 0.5로 가정)

마지막으로 4단계는 총합산값의 단위를 통일하기 위해 정규화(③)하여 최종적으로 각 평가 항목별 가중치를 도출하게 된다. 가중치 값의 총합은 1이 되도록 하여 퍼지평가 점수를 도출한다.

$$w_i = \text{norm}I(F_i) \dots\dots\dots ③$$

$$w_i \geq 0, \sum w_i = 1$$

따라서 본 연구는 퍼지다기준 의사결정법 적용 절차를 고려하여, 식물의 미세먼지 저감에 영향을 미치는 수종의 특성에 대한 지표 항목의 퍼지평가 점수를 도출하고, 미세먼지 저감 수종을 선정하는 기준의 우선순위를 제시하였다.

연구 범위 및 방법

1. 연구의 범위

본 연구의 내용적 범위는 식물의 형태적 특성에 따른 미세먼지 흡착 기능을 중심으로 식물의 미세먼지 저감 영향 인자 및 세부 항목을 제시하고, 이에 대한 우선순위를 산정하는 것이다. 식물의 종류는 교목류로 한정하여 진행하였다. 실외에 적용할 수 있는 미세먼지 저감 식물에 대한 연구가 주로 교목류를 중심으로 진행되어 왔으며, 식물의 종류에 따라 형태적 특성이 다르기 때문에 미세먼지 저감 영향 인자의 세부 항목 범위에 차이가 발생할 수 있기 때문이다.

2. 설문지 구성

본 연구에서는 미세먼지 저감에 영향을 미치는 요인에 대하여 영향력 정도와 조사자의 응답 확인 정도를 5점 리커트 척도로 응답하도록 설문지를 구성하였다. 질문 항목은 미세먼지 저감에 영향을 미치는 8가지 지표 항목에 대한 영향력 정도, 지표 항목 중 잎 표면의 거칠기, 잎의 가장자리 형태, 잎의 복잡성, 수피 특성의 세부 항목에 대한 영향력 정도, 일반사항 등 총 6가지 항목으로 구성하였다.

수종을 통한 미세먼지 저감에 영향을 미치는 요인은 Nowak (2008)와 Yang *et al.*(2015)의 연구에 따라 8가지 지표 항목과 세부 항목으로 구분하였다. 미세먼지 저감에 영향을 미치는 지표 항목 8가지는 잎 면적, 수종의 종류(상록침엽수, 상록활엽수, 낙엽수), 잎 표면의 거칠기, 수고, 성장 속도, 잎의 복잡성, 잎 가장자리 형태, 수피의 특징으로 구성하였다. 8가지 지표 항목 중 4가지 항목(잎 표면의 거칠기, 잎의 복잡성, 잎 가장자

리 형태, 수피의 특징)에 대한 세부 항목의 영향 정도를 질문하였다. 잎 표면의 거칠기는 털, 왁스층, 광택, 굴곡, 수지성을 측정 항목으로 구성하였다. 잎의 복잡성은 단일엽, 3출엽, 2중엽, 3중엽, 손바닥 형태의 잎으로 구성하였다. 잎의 가장자리는 밋밋한 모양, 물결 모양, 둔한 톱니 모양, 톱니 모양, 2중 톱니 모양으로 구분하였다. 수피의 특징은 피목, 무늬, 갈라짐, 껍질 이탈, 코르크로 구분하였다(Table 2).

Table 2. Influence factor of fine dust reduction of plant Survey items

Item		Detailed item
Indicators affecting fine dust reduction		Leaf Size, Type(Evergreen conifer, Evergreen broadleaf, Deciduous), Leaf surface roughness, Size, Growth rate, Leaf complexity, Leaf margin, Canopy structure
	Leaf surface roughness	hairy, waxy, glossy, tufts, sticky
	Leaf complexity	single leaf, Pinnately or palmately compound, deeply-divided, Bi-or tri-pinnately compound
	Leaf margins	spiny, undulate, cleft, serrulate, double serrate
Canopy structure	Smooth, Patterned bark, vertical cracks, vertical strips, dense canopy	
General information		Sex, Major(occupation), Related research experience

3. 분석 방법

설문 조사 기간은 2018년 10월 15일부터 11월 5일까지이며, 설문 조사는 K대학교, S대학교 대학원의 산림, 조경, 원예, 환경 전공자 중 미세먼지 관련 연구 등에 경험이 있는 연구원들을 대상으로 하였다. 총 50부를 배포하였고, 이 중 40부를 회수하였다. 이 중에서 미세먼지 관련 연구를 실제로 진행한 경험이 있거나, 공모전, 세미나 등에 참여한 경험이 있다고 응답한 조사자 총 25부의 설문지를 선별하여 분석하였다(Table 3). 일반적으로 설문 유효 부수라고 할 수 있는 30부에는 미치지 않으나, 미세먼지 분야의 전문가를 대상으로 한 설문지만을 선정하였기 때문에 설문 부수의 숫자보다는 질적인 측면을 선택하였다. 무엇보다도 미세먼지 연구와 관련하여 저감 수종이 다양하게 나타나고 있기 때문에 보다 전문성을 가진 연구원들만을 엄선한 것이다.

또한 각 설문 항목 하단에 세부 항목에 대한 설명 사진을 첨부하여 이해도를 높이고자 하였다. 설문 조사 결과 분석은 Kwak *et al.*(2003), Ku *et al.*(2010), Choi *et al.*(2015)의

연구를 참고하여 퍼지다기준 의사결정법 적용 절차에 따라 Excel Win. 2000의 수식 기능을 활용하여 영향력 지수(퍼지평가 점수)를 도출하였다.

Table 3. General characteristics by group

Item		Frequency	Percentage (%)
Sex	Male	7	28%
	Female	18	72%
	Total	25	100%
Major (occupation)	Forest	5	20%
	Landscape	11	44%
	Horticulture	3	12%
	Environment	6	24%
	Total	25	100%
Related research experience	Have	25	100%
	None	-	0%
	Total	25	100%

결과 및 고찰

1. 미세먼지 저감에 영향을 미치는 8가지 지표 항목의 우선순위 결과

미세먼지 저감에 영향을 미치는 8개 지표 항목에 대한 가중치와 이에 따른 순위 결과는 다음과 같다. 1순위는 잎면적(0.168)과 수종의 종류(0.168)로 동일하게 나타났다. 잎 표면의 거칠기(0.162)가 3순위, 수고(0.116)가 4순위, 성장 속도(0.107)가 5순위, 잎의 복잡성(0.103)이 6순위, 잎 가장자리 형태(0.090)가 7순위, 수피의 특징(0.086)이 8순위로 나타났다(Table 4).

Table 4. Indicator item weights and ranking affecting fine dust reduction

Item	Weights	Ranking
Leaf Size	0.168	1
Type	0.168	1
Leaf surface roughness	0.162	3
Size	0.116	4
Growth rate	0.107	5
Leaf complexity	0.103	6
Leaf margin	0.090	7
Canopy structure	0.086	8

2. 미세먼지 저감에 영향을 미치는 지표 항목에 대한 세부 항목의 우선순위 결과

미세먼지 저감에 영향을 미치는 지표 항목 중 잎 표면의 거칠기, 잎의 복잡성, 잎의 가장자리 형태, 수피 특성의 4가지 항목의 세부 항목에 대한 우선순위 결과는 다음과 같다. 첫 번째로 ‘잎 표면의 거칠기’에 대한 세부 항목의 가중치 결과는 다음과 같다. 1순위는 털(0.247), 2순위는 광택(0.227), 3순위는 왁스층(0.199), 4순위는 수지성(0.173), 5순위는 굴곡(0.154)으로 나타났다(Table 5).

Table 5. Weights and rankings of roughness of leaf surface

Item	Weights	Ranking
Hairy	0.247	1
Waxy	0.227	2
Glossy	0.199	3
Sticky	0.173	4
Tufts	0.154	5

두 번째로 ‘잎의 복잡성’에 대한 세부 항목의 가중치 결과는 다음과 같다. 1순위는 3종엽(0.239), 2순위는 2종엽(0.222), 3순위는 손바닥 형태의 엽(0.205), 4순위는 3출엽(0.184), 5순위는 단일 엽(0.149)으로 나타났다(Table 6).

Table 6. Weights and rankings of leaf complexity

Item	Weights	Ranking
Tri-pinnately compound	0.239	1
Bi-pinnately compound	0.222	2
Deeply-divided	0.205	3
Pinnately or palmately compound	0.184	4
Single leaf	0.149	5

세 번째로 ‘잎의 가장자리 형태’에 대한 세부 항목의 가중치 결과는 다음과 같다. 1순위는 톱니 모양(0.267), 2순위는 2중 톱니 모양(0.239), 3순위는 둔한 톱니 모양(0.199), 4순위는 물결 모양(0.167), 5순위는 밋밋한 모양(0.129)으로 나타났다(Table 7).

Table 7. Weights and rankings of leaf margins shapes

Item	Weights	Ranking
Serrulate	0.267	1
Double serrate	0.239	2
Cleft	0.199	3
Undulate	0.167	4
Spiny	0.129	5

마지막으로 ‘수피의 특성’에 대한 세부 항목의 가중치 결과는 다음과 같다. 1순위는 코르크(0.255), 2순위는 껍질 이탈(0.247), 3순위는 갈라짐(0.215), 4순위는 피목(0.144), 5순위는 무늬(0.139)로 나타났다(Table 8).

Table 8. Weights and rankings of bark characteristics

Item	Weights	Ranking
Dense canopy	0.255	1
Vertical strips	0.247	2
Vertical cracks	0.215	3
Smooth	0.144	4
Patterned bark	0.139	5

미세먼지 저감에 영향을 미치는 8가지 지표 항목에 대한 우선순위 결과는 ‘잎 면적’과 ‘수종의 종류’가 가장 높은 순위로 나타났다. 잎 면적의 경우에는 미세먼지 저감 기능이 수목의 잎에 의지하고 있는 비율이 높기 때문인데, 이는 Kwon *et al.*(2014)의 연구에서도 언급된 바 있다. 다만, ‘수종의 종류’ 항목은 이번에 새롭게 설문에 포함한 것인데 ‘잎 면적’과 같이 높은 우선순위를 나타내었다. 위의 결과로만 해석할 경우, 미세먼지 저감을 위한 수종을 선정할 때에는 잎 면적이 넓은 수종들을 최우선적으로 고려할 필요가 있다. 또한, 미세먼지는 연중 발생하는 환경문제이지만, 우리나라에선 주로 겨울철과 봄철에 큰 문제로 대두되기 때문에 겨울철에도 잎이 존재하는 상록 활엽수나 상록침엽수 등을 중심으로 선정할 필요가 있다. 결과적으로 잎 면적이 넓은 상록수를 미세먼지 저감 수종으로 선택하는 것이 바람직하다. 다만, 상록활엽수의 경우에는 우리나라에서 생육가능한 지역이 한정되어 있기 때문에 도입할 지역의 기후 특성을 충분히 반영해서 선정해야 할 것이다.

한편 미세먼지 저감에 영향을 미치는 8가지 항목 중에서 차 순위는 잎 표면의 거칠기, 수고, 성장 속도, 잎의 복잡성, 잎 가장자리 형태, 수피의 특징 순서로 우선순위 점수가 높게 나타났다. 따라서 미세먼지 저감에 효과적인 수종 선정 시 우선적으로 잎 면적이 크고, 상록성이며, 잎 표면이 거친 수종을 선정하

고, 이후에는 수고가 높고 성장 속도가 빠른 수종을 선별하는 것이 바람직하다고 판단된다. 다만, 미세먼지를 차단하는 경우에는 수고가 높은 것이 바람직하지만, 수고가 4m 이상으로 높아질 경우에는 외부에서 유입하는 바람을 막는 역할을 하게 된다(Seok *et al.*, 2015). 수고가 높은 경우에는 미세먼지가 수목벽의 전면부에서 침강하는 패턴을 보이기 때문에 수목벽의 전면부에서 높은 미세먼지 농도를 나타내게 된다. 결과적으로 가로수에 의해서 미세먼지를 저감하고자 할 경우에는 잎 면적이나 수종, 잎 표면의 거칠기 이외에도 수고를 적절하게 유지하거나 바람이 잘 통할 수 있는 식재 기법이 필요하다.

또한 ‘잎 표면이 거친 수종’을 선택할 때에는 잎에 털이 있고 광택이 나며, 왁스층이 있는 수종을 우선적으로 선정하는 것이 바람직한 것으로 분석되었다. 이 결과는 Li Mo *et al.*(2015)과 Ryan L. *et al.*(2016)의 선행 연구와도 맥을 같이 한다. 이후에는 ‘잎의 복잡성’과 ‘잎의 가장자리 형태’를 고려하여 미세먼지 저감 수종을 선별할 필요가 있다. 잎의 형태를 고려할 경우에는 단일 잎보다 3중 혹은 2중 잎과 손바닥 형태의 잎을 선정하는 것이 바람직하다. 또한, 잎의 가장자리는 밋밋한 모양보다는 톱니 모양의 잎을 선별하여 공기 중의 미세먼지가 잎의 표면에 흡착되는 표면적 비율을 높아지게 하는 것이 바람직하다.

‘수피의 특성’은 8가지 지표 항목 중 가장 낮은 우선순위를 나타냈으나, 수피의 특성에 따라 분진 등과 같은 오염물질의 흡착 정도가 달라질 수 있기 때문에 미세먼지 저감 수종 선정 시에도 고려해야 하는 항목으로 볼 수 있다. 수피의 특성은 피목이나 무늬종보다는 코르크층이 있고 껍질 이탈이나 갈라짐이 관찰되거나, 앞으로 관찰될 가능성이 높은 수종을 선정하는 것이 미세먼지 저감에 도움이 된다.

종합적으로 볼 때 도시지역의 실외에서 미세먼지 저감을 위한 수종을 선정할 때에는 미세먼지 농도가 높은 겨울이나 봄철에 잎을 지니고 있는 수종이 바람직하고, 잎의 형태나 구조가 복잡한 수종을 우선적으로 고려할 필요가 있다. 본 연구에서 제시한 수목 선정 기준은 미세먼지 흡착 기능을 중심으로 수목의 형태를 고려하여 기준을 선정하였으나, 앞으로 개별 수종에 대한 미세먼지 저감 효율을 정량적으로 판단할 수 있는 기준이 추가로 제시될 필요가 있다. 또한, 앞으로 지속적인 연구를 통하여 개별 수종에 대한 미세먼지 저감 효과 기준 및 실증 데이터 연구 등을 통해 본 연구에서 제시한 미세먼지 저감 수종에 대한 선정 기준을 보완해 나갈 필요가 있다. 더불어 도시 내 배식 시에는 식재 목적과 수종의 기능, 수종의 생육 환경과 성장 기간에 따라서 수종 선정 기준과 우선순위에 차이가 발생할 수 있으므로 앞으로 식재 환경에 따른 수목 선정 기준이 차별화되어 제시될 필요가 있다.

감사의 말

이 논문은 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(과제번호19CTAP-C143827-02)에 의해 수행되었습니다. 본 연구과제의 연구책임자인 경대승 박사님(LH 토지주택연구원)께 감사를 표합니다. 또한 본 논문 연구의 진행에 도움을 준 넥서스환경디자인연구원(주)의 노희영 연구원과 이소담 연구원에게도 감사를 표합니다.

REFERENCES

- Beckett, K.P., P.F. Smith and G. Taylor(2000) Particulate pollution capture by urban trees: Effect of species and winds speed. *Global Change Biology* 6: 995-1003.
- Chen, C., Z. Zhou, M. Teng, P. Wang and L. Zhou(2015) Accumulation of three different sizes of particulate matter on plant leaf surfaces: Effect on leaf traits. *Journal of Arch. Biol. Sci. Belgrade* 67(4): 1257-1267.
- Choi, Y.Y., J.J. Kim, D.H. Jung, D.J. Song, S.J. Yoo and J.H. Chon(2017) Social-ecological System Dynamics of Restoration of Asiatic Black Bears and Management Planning in National Park. *Journal of Korean System Dynamics Society* 18(2): 87-114. (in Korean with English abstract)
- Colleen, F.(2017) Interception of particulate matter by street tree leaves in an inland valley community of southern California, M.D. Dissertation, Univ. of California State Polytechnic, Pomona, 35pp.
- Gwak, S.J. and J.S. Lee(2011) The Analysis of the House Demander's Preference on the Location Condition Factors in Cheonan. *Journal of Korean Regional Science Association* 27(1): 69-82. (in Korean with English abstract)
- Helena, G. and B. Bakera(2014) Phytoremediation of particulate matter from indoor air by *Chlorophytum comosum* L. plants. *Journal of Air Qual Atmos Health* 8(3): 265-272.
- Heo, H.Y. and J.O. Kim(2017) Planting Design Strategies and Green Space Planning to Mitigate Respirable Particulate Matters—Case Studies in Beijing. *Journal of KILA* 45(6): 40-49.
- Hong, S.H., R.Y. Kang, M.Y. Ahn, J.S. Kim, and E.S. Jung(2018) Study on the Impact of Roadside Forests on Particulate Matter between Road and Public Open space in Front of Building site. *Journal of Kor. Environ. Ecol.* 32(3): 323-331. (in Korean with English abstract)
- Hwang, G.I.(2016) A Study on Decreasing Effects of the Ultrafine Particles(PM_{2.5}) by Structures in Roadside Buffer Green -A case Study of Buffer Green in the Songpa-gu, Seoul. M.D. Dissertation, Univ. of Seoul, Korea, 98pp. (in Korean with English abstract)
- Hwang, H.J.(2012) Characteristics of Soot Aerosol Removal according to Tree Species. M.D. Dissertation, Univ. of Hanyang, Korea, 40pp. (in Korean with English abstract)
- Kim, G.J., H.J. Kim, H.N. Seo and H.S. Jang(2016) Removal Efficiency of Particle Matter by Indoor Plants. *Journal of Kor. Hort. Sci. Technol.* 34(2): 184. (in Korean with English abstract)
- Ku, S. J., S.H. Yoo and S.Y. Park(2010) Fuzzy Decision Making Analysis for Public Assessment of Dam Construction. *The Soul Institute* 2(4): 151-160. (in Korean with English abstract)
- Ku, S.J., S.H. Yoo and S.Y. Park(2010) A Study on the Creative and Cultural City Project in Seoul : Fuzzy Decision Making Analysis. *Journal of Seoul Studies* 11(4): 151-160. (in Korean with English abstract)
- Kwak, S.J., S.H. Yoo and J.Y. Heo(2003) Fuzzy Decision Making Analysis for Public Assessment of Dam Construction. *KRIHS* 38: 7-121. (in Korean with English abstract)
- Kwak, S.J., S.H. Yoo and J.Y. Huh(2003) Fuzzy Decision Making Analysis for Public Assessment of Dam Construction. *Korea Research Institute for Human Settlements* 38: 107-122. (in Korean with English abstract)
- Kwak, S.J. and J.S. Lee(2015) Deduction of Attributes' Weight for Companies' Job Creation by Applying Fuzzy Decision Making Analysis. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society* 16(11): 7971-7977. (in Korean with English abstract)
- Kwon, G.J. and B.J. Park(2014) Removal of Particulate Matters of Four Foliage Plant-Based Biofilter. *Journal of Agr. Sci. Chungbuk Nat'l Univ.* 30(2): 157-160. (in Korean with English abstract)
- Kwon, G.J. and B.J. Park(2018) Particulate Matter Removal of Indoor Plants, *Dieffenbachia amoena* 'Marianne' and *Spathiphyllum* spp. according to Light Intensity. *Journal of KILA* 46(2): 62-68. (in Korean with English abstract)
- Li, M., Z. Ma, Y. Xu, S. Fengbin, X. Lun, X. Liu, J. Chen, and X. Yu(2015) Assessing the Capacity of Plant Species to Accumulate Particulate Matter in Beijing, China. *Journal of PLoS ONE* 10(10): e0140664
- National Institute of Forest Science(2018) How to reduce fine dust in urban trees. Press Release, Korea. (in Korean)
- Nowak, D.J.(2008). Species Selector (Beta) Utility. Univ. of Syracuse, New York, 55pp.
- Robert, P., H. Gawrońska, M. Wrochna, S.W. Gawroński and A. Sæbø(2013) Particulate Matter on Foliage of 13 Woody Species: Deposition on Surfaces and Phytostabilisation in Waxes – a 3-Year Study. *International J. Phytoremediation* 15: 245-256.
- Ryan, L. and D. Hochuli(2016) Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Journal of Urban Forestry&Urban Greening* 20(1): 249-253.

- Seok, Y.S., S.J. You, K.H. Song and J.H. Chon(2015) Conservation Method of Sindu-ri Coastal Dune using System Dynamics. Korean System Dynamics Review 16(1): 5-23.
- Weikang, Z., W. Bing and N. Xiang(2017) Relationship between Leaf Surface Characteristics and Particle Capturing Capacities of Different Tree Species in Beijing. Forests 8(3): 92.
- Yang, J., Y. Chang and P. Yan(2015) Ranking the suitability of common urban tree species for controlling PM2.5 pollution. Atmospheric Pollution Research 6: 267-277.
- Yoon, J.W., K.C. Son, D.S. Yang and S.J. Kays(2009) Removal of Indoor Tobacco Smoke under Light and Dark Conditions as Affected by Foliage Plants. Journal of Kor. Hort. Sci. Technol. 27(2): 312-318. (in Korean with English abstract)