

미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간의 중요도 분석[†] - AHP 기법을 이용하여 -

정대영* · 최윤의** · 진진형***

*고려대학교 환경생태공학부 연구교수 · **고려대학교 오정에코리질리언스연구원 연구교수 · ***고려대학교 환경생태공학부 교수

Analysis of Importance in Available Space for Creating Urban Forests to Reduce Particulate Matter - Using the Analytic Hierarchy Process -

Jeong, Dae-Young* · Choi, Yun-Eui** · Chon, Jin-Hyung***

*Research Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

**Research Professor, OJeong Eco-Resilience Institute, Korea University

***Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University

ABSTRACT

Despite recent projects to create urban forests to reduce the levels of particulate matter, objective evaluation criteria for selecting suitable sites for the projects have not been provided. The purposes of this study are to identify assessment items for the evaluation of available spaces for urban forests for the reduction of particulate matter and to analyze the relative importance of the items using the Analytic Hierarchy Process (AHP). We identified a total of 19 items in five categories through a literature review and a panel discussion. A total of 29 responses were collected from surveys given to experts, and an AHP analysis was conducted on the results. As a result, 'locational characteristics' (0.355) received the highest weighted value among the five categories, followed by 'planting type of existing green space' (0.184), 'weather conditions' (0.183), 'physical characteristics' (0.15), and 'human social environment' (0.128). In addition, among all the assessment items, 'proximity of source apportionment of particulate matter' (0.143) had higher weighted value while 'plantation of existing green space' (0.024) had the lowest weighted value. This study will present objective criteria and directions in the selecting of available spaces to create urban forests for the reduction of particulate matter.

Key Words: Physical Characteristics, Locational Characteristics, Planting Type, Weather Conditions, Human Social Environment

국문초록

최근 미세먼지 저감 도시숲을 조성하기 위한 사업이 활발하게 추진되고 있으나, 적합한 가용공간을 선정하는데 필요한 객관적

[†]: 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업(2019153A00-1921-0101)의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.
Corresponding author: Jinhyung Chon, Professor, Division of Environmental Science and Ecological Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea, Tel.: +82-2-3290-3048, E-mail: jchon@korea.ac.kr

평가 기준을 마련하지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구의 목적은 미세먼지 저감 도시숲을 조성하기 위한 가용공간의 평가항목을 개발하고, AHP 기법을 이용하여 평가항목의 상대적 중요도(가중치)를 분석하는 것이다. 이를 위해 문헌고찰 및 전문가 검토를 통해 5개 범주의 총 19개 평가항목을 도출하였다. 전문가 설문조사를 통해 총 29부를 회수하였으며, AHP 분석을 수행하였다. 분석 결과, 상위항목의 중요도는 '입지적 특성'(0.355)이 가장 높게 나타났으며, '기존 녹지의 식재유형(0.184)', '기상조건 (0.183)', '물리적 특성(0.15)', '인문사회환경(0.128)' 순으로 중요도가 나타났다. 또한 하위항목의 전체 중요도는 '미세먼지 발생원 인접성'(0.143)이 가장 높은 것으로 나타났으나, '기존 녹지의 식재수종'(0.024)은 가장 낮은 것으로 나타났다. 본 연구는 미세먼지 저감 도시숲을 조성하기 위한 가용공간을 선정하는데 객관적 기준과 방향을 제시할 수 있을 것이다.

주제어: 물리적 특성, 입지적 특성, 식재유형, 기상조건, 인문사회환경

1. 서론

최근 미세먼지가 사회재난으로 지정되고, 미세먼지로 인한 국민건강에 대한 우려가 높아짐에 따라 미세먼지 저감 대책이 강조되고 있다. 정부는 2022년까지 미세먼지 국내 배출량의 30%를 감축하는 '미세먼지 관리 종합대책'을 발표하고, 경유차 운행 제한, 친환경차 보급 확대, 도로 및 건설공사장 비산먼지 저감, 노후 석탄발전소 폐지계획 등 사회 전 분야에 대한 미세먼지 감축 대책을 추진하고 있다. 이에 따른 미세먼지 관련 정부 예산은 2018년 약 6,920억 원에서 2019년에는 전년 대비 27.6%가 증가한 약 8,832억 원으로 나타났으나(Ministry of Environment, 2018a), 시민들이 체감하는 대기 환경은 여전히 만족스럽지 않은 실정이다(Ministry of Environment, 2018b). 미세먼지는 계절풍을 타고 외부에서 유입되는 것뿐 아니라, 인간의 경제·사회활동에 의해 발생하기 때문에 도심 생활권에 직접적으로 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 차량 운행으로 인해 발생한 도로변 오염물질이 보도로 유입되거나(Hong *et al.*, 2018) 건설현장에서 배출되는 비산먼지가 인근 지역에 영향을 미칠 수도 있다(Seo, 2013). 하지만 정부는 주로 공장, 발전소, 사업장 등 대기오염물질 배출원 규제에 최우선 목표를 두고, 미세먼지 저감 대책을 추진하면서 생활권 내 미세먼지 저감은 큰 효과를 거두지 못하였다.

이러한 배경에서 도시숲은 시민들의 미세먼지 대피처로서 주목을 받고 있다. 도시숲은 대기 정화, 폭염 완화, 경관적 가치 향상, 시민들의 정서함양 등 도심 생활권에서 시민들에게 다양한 혜택을 제공하는데(Lee *et al.*, 2008), 최근 미세먼지 문제가 대두되면서 도시숲의 미세먼지 저감 효과에 대한 관심이 증대되고 있다. 수목의 미세먼지 저감 효과는 녹지계획, 식재기법, 수종분석 등 다양한 방법을 통해 분석되었으며(Yu *et al.*, 2017; Hwang *et al.*, 2018; Xu and Kim, 2017), 이러한 연구를 근거로 산림청에서는 차단숲, 저감숲, 바람길숲 등 미세먼지 저감 도시숲 모델을 개발하고, 조성관리 지침을 발표하였다(Korea Forest Service, 2018). 이는 토지이용, 건물배치, 시민 이용 등 다양한 환경적 요인에 의해 미세먼지 농도에 영향을 받는 도심

생활권에서 도시숲 모델의 상호 연계성을 증대시킴으로써 미세먼지 저감 효과를 높이기 위한 관리전략이다. 또한 미세먼지 저감을 위해 바람길을 구축하거나, 미세먼지 저감 효과가 높은 수종을 중심으로 식재하는 등 조성목적이 명확한 도시숲 유형이라고 할 수 있다.

특히 미세먼지 저감 도시숲은 도심 생활권 내 녹지를 조성함으로써 구현이 가능하기 때문에 기존에 조성된 도시숲 뿐만 아니라, 유휴부지, 장기미집행 도시공원 등을 대상으로 가용공간을 선정할 수 있다. 따라서 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간은 가용성, 시급성, 효과성 등을 고려한 객관적 평가 기준이 요구된다. 도시공원, 가로띠녹지, 학교숲 등 기존에 조성된 도시숲 유형은 가용공간으로서 가치가 높은 편이다. 도시숲은 생태적, 사회문화적, 경관적 조건을 충족하고 있기 때문에(Lee *et al.*, 2008), 기존 녹지형태가 미세먼지 저감에 적합한 구조에 가까울수록 가용성이 높다고 평가할 수 있다. 또한 미세먼지 저감 도시숲은 미세먼지 발생원과의 거리, 미세먼지 취약계층 이용현황 등을 고려해야 한다. 즉, 미세먼지 발생원과의 거리가 가깝고, 미세먼지 취약계층 이용빈도가 높을수록 시급성이 높다고 볼 수 있기 때문이다. 국립산림과학원 연구에 따르면, 시화산업단지 인근 주거지역의 미세먼지 농도가 완충녹지 조성 이후 약 12% 낮아졌다고 보고된 바 있다(National Institute of Forest Science, 2018). 이처럼 미세먼지 발생원이 인접하여 대기오염물질이 주거지역으로 확산될 가능성이 높은 경우, 미세먼지 저감 도시숲 조성이 필요하다. 구체적으로 학교, 보육시설, 노인복지시설, 장애인복지시설 등 미세먼지 취약계층 집중 활동지역에 산업단지, 발전소 등 미세먼지 배출원이 인접할 경우, 미세먼지 저감 도시숲 조성의 시급성이 높다고 볼 수 있다. 한편, 도시 내 바람길 도입은 도시 외부의 깨끗한 공기를 유입시키고, 도시 내 미세먼지를 배출시킬 수 있다는 점에서 효과적인 미세먼지 저감 대책으로 알려져 있다(Sung *et al.*, 2019; Eum, 2019). 다만 바람길 계획은 바람길 확보를 위한 도시계획을 통해 구현이 가능하므로 가용공간 주변 토지이용 및 건물배치 등이 중요한 요인이다. 즉, 바람길이 형성된 공간에 미세먼지 정화 및 저감 기능이 적용된 도시숲이 조성될 경우 효과성

이 높다고 할 수 있다. 이와 같이 미세먼지 저감 도시숲을 조성하기 위해 가용공간을 평가하는 기준들은 다양하게 논의되고 있으나, 가용공간 평가항목 개발 관련 연구는 아직 부족한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 문헌고찰 및 전문가 자문을 통해 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간 평가항목을 개발하고, 전문가 조사결과를 계층적 분석기법(Alytic Hierarchy Process: AHP)으로 분석하여 가용공간 평가항목의 중요도를 도출하는 것이다. 본 연구는 정부 및 지자체가 미세먼지 저감 도시숲 사업대상지를 선정하는데 객관적인 평가 기준을 제시함으로써 도시숲 조성을 통한 미세먼지 저감 대책을 수립하는데 기여할 것이다.

II. 이론적 고찰

1. 미세먼지 저감 도시숲

도시숲은 도시민에게 안정성, 위락성, 쾌락성을 제공하는 기능이 중시되었으나, 점차 환경보전의 기능이 점차 부각되고 있는 실정이다(Oh *et al.*, 2008). 특히 수목이 대기로부터 미세 입자를 흡수·흡착하여 공기의 질을 개선하는 것으로 알려지면서(Nowak *et al.*, 2013) 숲의 대기 정화기능에 관심이 높아졌다. 대기오염물질은 습성 강하, 화학적 반응, 건성 강하 과정을 통해 제거될 수 있는데, 수목은 잎의 기공을 이용한 흡수, 표면 침전, 가스 상태의 반응과정을 통해 대기오염물질을 제거하는 것으로 나타났다(Salbitano *et al.*, 2015). 국립산림과학연구원은 수목의 미세먼지 저감 기작을 차단, 침강, 흡수, 흡착의 네 가지 형태로 구분하였다(National Institute of Forest Science, 2018). 첫째, 흡착은 숲의 줄기, 가지, 잎 등으로 미세먼지를 부착하는 것, 둘째, 흡수는 주로 잎의 기공에 의해 잎의 내부로 미세먼지가 흡수되는 것, 셋째, 차단은 미세먼지가 수관층 밖에 도달하여, 미세먼지 확산과 유속이 감소하면서 차단되는 것이다. 마지막으로 침강은 수목에 모인 미세먼지가 지면으로 가라앉는 것을 의미한다. 이러한 수목의 미세먼지 저감과정을 통해 1ha의 도시숲은 연간 168kg의 미세먼지를 줄이는 효과가 있으며, 도시숲의 미세먼지 농도는 일반 도심보다 25.6%, 초미세먼지 농도는 무려 40.9%나 낮은 것으로 나타났다(Yu *et al.*, 2017).

미세먼지 저감 도시숲은 도시 내 미세먼지 문제에 대응하기 위해 미세먼지 저감 기능이 강조된 유형으로 “식물의 생리적 기능과 모양 및 숲의 구조적 구성을 통해 미세먼지를 발생원으로부터 생활권으로의 확산을 차단하고, 양질의 공기 공급과 흡수를 통해 미세먼지 농도를 저감하는 숲”으로 정의할 수 있다(Korea Forest Service, 2018). 미세먼지 저감 도시숲의 유형은

다음과 같이 차단숲, 저감숲, 바람길숲으로 구분된다. ‘차단숲’은 숲 내부의 공기 흐름을 최소화하여 미세먼지 발생원으로부터 미세먼지 유입을 방지하기 위해 조성, 관리되는 숲을 의미하고, ‘저감숲’은 식재구조 및 조합을 통해 미세먼지 흡착, 흡수 기능을 극대화할 수 있도록 조성된 숲, 그리고 ‘바람길숲’은 도시 외곽에서 생성된 신선한 공기를 도심으로 유도할 수 있도록 연결된 숲이다. 이러한 미세먼지 저감 도시숲 모델은 수종 선정, 식재 유형에 따라 기능이 달라질 수 있다. 다만 바람길숲은 도시계획 차원에서 고려되어야 할 부분들이 많기 때문에, 가용공간을 평가하는 본 연구에서는 미세먼지 차단숲과 저감숲을 중심으로 특성을 파악하였다.

한편, 도시숲의 식재수종과 관련된 연구들은 주로 식물의 흡착 기능에 영향을 주는 물리적 특성(수관구조, 잎의 복잡성, 잎 크기, 잎 표면특성 등)을 고려하여 선정하였다. 산림청에서는 미세먼지 저감에 효과가 있는 소나무, 곰솔, 향나무, 산철쭉 등 322종을 제시하였으며(Korea Forest Service, 2018), 미세먼지가 주로 겨울, 봄에 집중된다는 점을 고려하여 수종 자체를 상록수종으로 선정해야 한다는 견해도 제시되었다(Xu and Kim, 2017). 이러한 측면에서 활엽수보다는 침엽수가 미세먼지 제거 효율성이 높은 것으로 제시한 연구도 있었다(Liu *et al.*, 2018). 다만 미세먼지 저감 도시숲 식재수종 선정 시에는 미세먼지 제거 효율뿐만 아니라, 기후변화에 따른 대체 수종, 내공해성이 우수한 수종 등을 고려할 필요성이 있다.

미세먼지 저감 도시숲의 식재밀도는 미세먼지 저감 유형에 따라 다르게 적용될 수 있다. 예를 들어 좁은 부지 규모에서 밀식하는 경우, 공기의 흐름을 차단하여 미세먼지가 정체할 수 있으므로 충분한 간격을 확보해야 한다(Xu and Kim, 2017; Hong *et al.*, 2018). 즉, 도시숲이 대기 정화기능을 갖추더라도 도시 차원의 바람길을 고려하지 않는 경우 오히려 대기 정체 현상을 유발한다는 것이다. 미세먼지 저감 도시숲의 식재구조는 크게 계단식 배치법과 복합식 배치법으로 구분할 수 있다(Xu and Kim, 2017). 계단식 배치법은 교목을 배경으로 중간에 큰 관목, 앞쪽으로는 소형 관목 또는 지피식물을 심어 수목 간에 뚜렷한 높이 차이가 나도록 하는 기법으로서 앞쪽에 식물을 밀집시켜 오염물질이 주거지역 등으로 확산하지 못하도록 방지하는 효과를 기대할 수 있다. 복합식 배치법은 큰 교목을 이용하여 앞쪽에는 중형 관목 위주의 군락형태로 조합하고, 군락 사이로 일정한 틈을 만드는 기법으로써 바람 유입 시 오염된 공기가 배출하는 효과가 있다. 다층의 관목구조를 형성하는 것이 초미세먼지 저감에 효과적이라는 연구도 발표된 바 있었으며(Kim *et al.*, 2017; Hwang *et al.*, 2018), 녹지 내부로 유입된 미세먼지가 순환하지 못하고 정체되면서 녹지 외부에 비해 미세먼지 농도가 높게 나타났다는 연구결과도 있었다(Chen *et al.*, 2015). 즉, 녹지의 미세먼지 저감 효과는 다양한 환경적 요

인에 따라 달라질 수 있다는 것이다. 종합해 보면 미세먼지 저감 도시숲은 숲의 구조적 개선과 수종별 특성을 고려하여 미세먼지 저감 기능을 극대화할 필요성이 있다. 또한 녹지의 연결성 증대로 도시 외곽 산림의 깨끗한 공기를 유도하여 미세먼지를 빠르게 순환시키는 작용도 고려해야 한다.

이와 같이 도시 내 미세먼지 저감 효과를 위해 조성하는 도시숲이라 하더라도 근본적으로 부지확보를 위한 대책이 필요한 실정이다. 특히 2020년 시행되는 도시공원 일몰제로 인해 도시공원 확보에 어려움을 겪을 것으로 예상되는데(Lee and Cho, 2011), 실효예정 장기미집행 도시공원을 활용해 도시숲을 조성하는 방안도 거론되고 있다. 또한 녹지가 부족한 도시 공간에서 교통섬, 도시 유흥지 등 새로운 형태의 녹지공간에 적합한 식재기법을 개발하는 연구도 발표되고 있다(Kim and Oh, 2019).

2. 미세먼지 영향요인

미세먼지는 도시 외부에서 계절풍을 타고 유입되거나(Park *et al.*, 2012), 산업시설, 차량 등에 의해 도시 내부적으로 배출되는 1차 오염물질, 그리고 1차 오염물질이 대기 중 화학반응을 일으켜 생성되는 2차 오염물질에 의해 발생한다(Choi *et al.*, 2018). 도시 내 미세먼지 농도는 풍향, 풍속, 기온, 습도 등 기상조건에 따라서 달라질 수 있으며(Chae, 2009; Park, 2017), 도시 경관패턴 및 토지이용형태가 미세먼지 농도 변화에 영향을 미칠 수도 있다(Wu *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2018). 국내에서도 도시의 토지이용현황과 미세먼지 분포의 상관성을 규명한 연구가 있었다(Han *et al.*, 2015). 즉, 도시의 미세먼지 농도는 도시의 복잡한 공간 구조와 인간 활동, 기상조건 등 복합적인 변수들에 의해 영향을 받을 수 있다는 것이다.

그럼에도 중국발 대기오염물질이 우리나라 대기질을 악화시키는 주요 원인으로 지목되어 왔다. 우리 정부가 지속적으로 배출오염물질 규제를 통해 대기환경 개선사업을 추진하고 있음에도 고농도 미세먼지 발생빈도가 증가하고 있다는 사실을 이를 뒷받침한다. 2019년 보고된 국립환경과학원의 동북아 장거리이동 대기오염물질 국제공동연구(LTP)에 따르면 중국의 배출원이 우리나라 주요 도시의 초미세먼지(PM_{2.5})에 미치는 영향은 32.1%로 나타났으나, 우리나라 배출원이 중국에 미치는 영향을 1.9%에 불과했다(Joint Research Project for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia, 2019). 특히 우리나라는 편서풍대에 위치하고 있기 때문에 장거리 이동에 의한 영향이 매우 크다고 볼 수 있으며(Son and Kim, 2009), 북풍이나 서풍 계열이 영향을 미치는 경우 미세먼지 농도가 증가하는 것으로 보고된 바 있다(Park, 2017). 또한 미세먼지 오염도와 관련성이 있는 기상변수로는 일 최고온도(maximum temperature), 풍속(wind speed), 상대습도(relative

humidity), 강수량(rainfall), 일사량(radiation), 운량(amount of cloud) 등이 있다(Lee, 2010; Shin *et al.*, 2007). 특히 상대습도와 일 최고온도, 이슬점 온도, 풍속을 모두 고려할 경우 전체 미세먼지의 49%를 설명할 수 있는 것으로 보고된 바 있다(Wise and Comrie, 2005).

또한 미세먼지는 입지적 특성에 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히 미세먼지 발생원과 차량으로 인한 대기오염물질 배출이 인접 지역에 미치는 영향에 대해서 다양한 견해가 제시되고 있다. 우리나라의 경우, 주요 산업단지 운영이 해당 지역뿐 아니라, 인접 지역까지 미세먼지 생성에 영향을 미치고 있었으며, 가중농도에 따른 조기 사망자수가 증가할 것으로 추정되어 배출원 관리가 시급한 것으로 나타났다(Moon *et al.*, 2017). 즉, 미세먼지 발생원으로 인한 건강 위해성이 심각한 수준이라고 할 수 있다. 이동발생원 측면에서 도로와의 거리, 도로 혼잡 정도, 과적차량수 등 도로변 요인들이 초미세먼지 농도에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 혼잡한 도로일수록 초미세먼지 농도가 높게 관측되었다(Brauer *et al.*, 2003). 다만 지역 특성에 따라 초미세먼지에 영향을 미치는 주요 변수들도 차이가 있었다. 한편 토지이용 변수가 교통 관련 변수와 상관성이 높다는 견해도 있었다(Rosenlund *et al.*, 2008). 도로의 유형, 도로와의 거리, 인구밀도 등이 미세먼지, NO_x 등의 대기오염물질의 농도에 미치는 영향을 분석한 결과, 대부분 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. Jerrett *et al.*(2007)은 낮은 인구밀도와 단일 토지이용이 도로의 밀도를 증가시킴으로써 차량통행량을 증가시키는 원인이 되고 있다고 지적하면서 대기오염을 줄이기 위해서는 혼합 토지이용으로 전환해야 한다고 주장하였다.

특히 도시의 대기질은 고밀도 개발에 따른 인구증가와 산업발전, 생활환경 변화 등과 관련성이 있다. 도시 내 미세먼지 분포는 행정구역별 차량등록대수, 인구밀도 등의 변수와도 관련이 있는 것으로 나타났다(Lee *et al.*, 2014b). 또한 유동인구 분포와 대기오염수준의 관계를 분석하여 미세먼지 취약계층인 노년층이 청년층보다 대기오염에 노출되는 빈도가 높은 지역이 발견되기도 하였다(Park *et al.*, 2018). 즉, 도시 내 미세먼지 분포와의 상관성이 있는 인문사회환경 변수는 미세먼지 발생에 따른 사회적 영향을 지역 특성에 따라 추정할 수 있다는 점에서 유용하다고 볼 수 있다.

3. AHP 기법

사티(Saaty)에 의해 제안된 AHP(Analytic Hierarchy Process) 기법은 의사결정 계층구조를 구성하는 의사결정요인 간의 쌍대비교(Pair-wise Comparison)를 통해 중요도를 도출하는 의사결정 방법론이다. AHP 기법은 불명확한 의사결정 문제에 있어서 전문가의 지식과 경험을 바탕으로 객관적으로 접근할

수 있으며, 의사결정자의 주관적 판단을 정량적 기준에 따라 비율적으로 평가함으로써 측정하기 어려운 정성적 평가항목들도 쉽게 처리할 수 있다는 장점이 있다. AHP 기법은 다음과 같이 4단계 과정으로 진행된다(Wind and Saaty, 1980).

첫째, 의사결정 문제의 의사결정요인 간의 관계를 분석하여 계층구조를 구성한다. 본 연구에서는 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간 평가라는 목표를 달성하기 위해 의사결정 계층구조를 구성하였다. 둘째, 각 계층을 구성하는 의사결정요인들을 쌍대비교하기 위해 쌍대비교행렬을 작성한다. 의사결정요인간 중요도를 평가하는 척도에 대해 사티는 9점 척도(총 17점 척도)를 권장하고 있으나, 많은 수의 척도가 일관성을 저하시킬 수도 있다는 주장(Song and Lee, 2013)을 고려하여 본 연구에서는 양방향 1점에서 5점 척도(총 9점 척도)를 적용하였다. 셋째, 쌍대비교를 통해 각 계층별 의사결정요인의 상대적 중요도 및 가중치를 도출한다. 평가자에 의해 쌍대비교가 이루어지면 계층별 평가기준이 갖는 상대적 가중치를 추정하는데, AHP 기법은 평가자의 일관성을 검토할 수 있는 기준이 마련되어 있다. 즉, 일관성(consistency) 검토는 평가자의 논리적 모순을 판단하는 척도이다. 예를 들어 해당 계층에 'A', 'B', 'C'라는 평가항목이 있는 경우, 평가자가 'A>B', 'B>C'라고 평가하였으면, 'A>C'라고 해야만 일관성을 가진다고 판단할 수 있다. 만약 평가자가 'C>A'라는 평가를 내렸다면 모순이 나타난 것이므로 재검토해야 한다. AHP 기법에서는 일관성을 검토하기 위해 일관성 지수(Consistency Index:CI)를 무작위 지수(Random Index:RI)로 나눈 일관성 비율(Consistency Ratio:CR)을 산출하여 평가한다. 다만 CR이 0.1이하일 경우, 일관성이 있다고 판단하고, 0.1~0.2일 경우 일관성을 인정할 수 있으나, 0.2 이상이면 일관성이 부족한 것으로 판단하고 쌍대비교를 다시 실시하거나 설문문항을 수정해야 한다. 마지막 단계는 전체 평가항목

에 대한 중요도 순위를 산출하기 위해 통합 가중치를 산출하는 과정으로써 최상위 계층에 있는 의사결정문제를 달성하는데 있어 하위항목의 중요도를 산출하게 된다.

미세먼지 저감 도시숲은 생태적, 사회문화적, 경관적 기능뿐만 아니라(Lee *et al.*, 2008), 미세먼지 저감 작용을 극대화할 수 있는 식재수종 선정과 식재구조 및 조합을 통해 최적 대안을 선정해야 한다. 더불어 도시 외곽산림으로부터 신선한 공기를 유도하고, 미세먼지를 빠르게 순환시킬 수 있는 바람길 도입을 위해서는 주변 건물배치나 토지이용형태를 고려해야 하며, 이는 가용공간의 풍향, 풍속을 통해 검증이 가능하다. 그럼에도 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간을 평가하는 기준은 아직 마련되지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 미세먼지 저감 도시숲 조성 시 고려해야 하는 다양한 의사결정 사항들을 객관적으로 평가하기 위해서 전문가의 의견을 반영하고, 지표 간 상대적 중요도를 결정하는 AHP 기법을 채택하였다.

III. 연구방법

1. 평가항목 선정 및 계층구조 모형 개발

미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간 평가항목을 도출하기 위해 도시숲 유형, 도시숲의 미세먼지 저감 메커니즘(수종선정, 식재구조 등), 미세먼지 저감을 위한 바람길 도입, 미세먼지 영향요인 등에 관한 선행연구를 고찰하였다. 이를 통해 물리적 특성, 입지적 특성, 기존 녹지의 식재유형, 기상조건, 인문사회환경 5가지 평가항목과 의사결정 계층구조 모형을 도출하였다. 그리고 현재 미세먼지 저감 도시숲 관련 연구개발과제를 수행하고 있는 조경, 산림, 대기 환경 분야 전문가 5인으로부터 의사결정 계층구조와 평가항목의 적합성을 논의하였다.

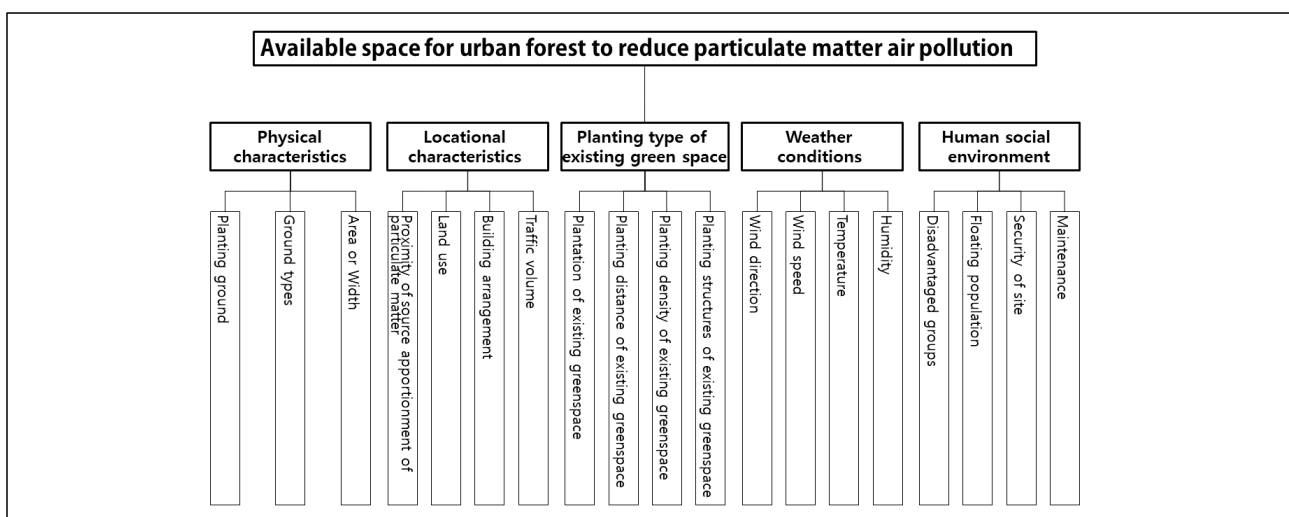


Figure 1. Evaluation factors hierarchy metrics

Table 1. Deduction of evaluation criteria about available space for urban forest to reduce particulate matter air pollution

Layer 2	Layer 3	Evaluation indexes	Reference
Physical characteristics	Planting ground	Planting ground types	Lee <i>et al.</i> (2008)
	Ground types	Ground types(flat, sloped, mounded)	Hwang <i>et al.</i> (2018), Kim <i>et al.</i> (2017)
	Area or width	Area(m ²) or width(m) of the site	Lee <i>et al.</i> (2008)
Locational characteristics	Proximity of source apportionment of particulate matter	Distance from source apportionment of PM10 and PM2.5 to site(m)	Moon <i>et al.</i> (2017)
	Land use	Use districts around the site	Han <i>et al.</i> (2015), Jerrett <i>et al.</i> (2007)
	Building arrangement	Open space and site plan around the site	Hong <i>et al.</i> (2018), Sung <i>et al.</i> (2019)
	Traffic volume	Average daily traffic around the site	Brauer <i>et al.</i> (2003), Jerrett <i>et al.</i> (2007)
Planting type of existing green space	Plantation of existing greenspace	Particulate pollution mitigating ability	Liu <i>et al.</i> (2018), National Institute of Forest Science(2018)
	Planting distance of existing greenspace	Planting distance(m)	Xu and Kim(2017)
	Planting density of existing greenspace	Planting density(tree/m ²)	National Institute of Forest Science(2018)
	Planting structures of existing greenspace	Planting structures	Hwang <i>et al.</i> (2018), Kim <i>et al.</i> (2017), Shin <i>et al.</i> (2007), Xu and Kim(2017)
Weather conditions	Wind direction	Main wind direction	Park(2017), Shin <i>et al.</i> (2007)
	Wind speed	Maximum wind speed(m/s)	Lee(2010), Shin <i>et al.</i> (2007), Wise and Comrie(2005)
	Temperature	Maximum temperature(℃)	Lee(2010), Wise and Comrie(2005)
	Humidity	Relative humidity(%)	Lee(2010), Shin <i>et al.</i> (2007), Wise and Comrie(2005)
Human social environment	Disadvantaged groups	Use frequency to disadvantaged groups	Yu <i>et al.</i> (2017)
	Floating population	Number of the floating population	Park <i>et al.</i> (2018)
	Security of site	Land ownership	Kim and Oh(2019)
	Maintenance	Site conditions and management subject	Lee <i>et al.</i> (2008)

최종적으로 결정된 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간 평가항목에 관한 의사결정 계층구조 모형은 Figure 1과 같다.

미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간 평가항목의 계층구조는 다음과 같이 3단계 구조모형을 구성하였다. 1단계에서는 미세먼지 저감 도시숲 조성 시 고려사항을 목표로 설정하였고, 2단계에서는 물리적 특성, 입지적 특성, 기존 녹지의 식재유형, 기상조건, 인문사회환경으로 구성하였으며, 3단계는 19개의 세부 평가항목으로 구성하였다(Table 1 참조).

2. 자료수집 및 분석

미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간을 평가하는데 있어서 중요시되는 항목의 우선순위를 결정하기 위하여 전문가 설문조사를 실시하였다. 설문조사의 모집단은 조경·산림·도시 등 관련 분야의 박사급 또는 기술사로서 설문지는 학계(조경학과, 산림자원학과, 환경원예학과 등) 연구원(산림, 원예, 국토계획 관련 연구부서), 조경업체(설계, 시공, 엔지니어링 업체)를 대상으로 2019년 10월 15일부터 11월 5일까지 이메일을 통해 배포되었다. 특히 AHP 조사는 정규분포를 따르기

위해 일정 표본 수를 확보해야 하는 일반 설문조사와는 달리 관련 분야에 대한 전문성이 높은 표본 선정이 더 중요하다. 따라서 본 연구에서 전문가 선정은 '산림분야 미세먼지 저감 연구개발 협의회', '미세먼지 대응 도시숲 R&D 활성화 심포지엄' 등 미세먼지 저감 관련 학술행사에 초청된 전문가 또는 미세먼지 저감 녹지 관련 연구경력이 있는 전문가들을 대상으로 이루어졌다. 이는 미세먼지 저감 도시숲 관련 연구자들을 대상으로 설문조사를 실시함으로써 보다 전문성 있는 분석결과를 도출하기 위함이다. 설문조사는 신뢰성을 유지하기 위해 설문 대상자들에게 연구목적과 필요성을 사전에 설명하였고, AHP 평가방법을 충분히 숙지한 이후 조사에 응답하도록 하였다. 분석을 위해 총 48부를 배포, 그 중 29부(회수율 60.4%)를 회수하였다.

설문내용은 각 평가항목 간 중요도 문항과 응답자의 업무분야, 전공분야, 학력, 실무경력 등 일반현황으로 구성하였다. 중요도 분석은 같은 수준에 있는 평가항목 간 쌍대비교가 가능하도록 구조화하였다. 예를 들어 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간을 선정할 때, 입지적 특성과 기상조건 중 어떤 항목이 얼마나 더 중요한지 평가하는 방식이다. 각 항목들의 평가는 응답 오류를 줄이기 위해 5점 척도(1: 같음, 2: 다소 중

요, 3:중요, 4:매우 중요, 5:극히 중요)를 이용하였다. 설문분석은 AHP 전용 소프트웨어 패키지인 DRESS 1.7을 이용하여 각 평가항목 간 중요도, 일관성 지수(CI), 일관성 비율(CR)을 도출하였으며, 설문응답자의 인식사항은 SPSS statistics 25를 통해 분석하였다.

IV. 연구결과

1. 응답자의 일반현황

응답자의 일반현황을 분석한 결과는 Table 2와 같다. 업무분야의 경우, 학계 51.7%, 연구기관 24.1%로 나타나 민간기업(20.7%), 공기업(3.4%) 등 연구계 그룹이 실무자 그룹의 비율보다 높게 나타났다. 전공 분야별로는 조경 분야가 58.6%로 가장 많았고, 산림 분야 17.2%, 환경 분야 10.3%, 생태복원 분야 10.3%, 기타 1% 순으로 나타났다. 전문가 집단 선정 시 전공 분야의 비중을 고려하였으나, 미세먼지 저감 식재와 관련 있는 전문가들이 다수 포함되면서 조경 분야의 비중이 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다. 학력은 박사학위가 86.2%로 가장 많았고, 석사학위는 4명으로 나타났다. 응답자의 전공 분야 경력(학사졸업 이후)은 6~10년이 10.3%, 11~15년이 13.8%,

Table 2. AHP experts profiles

Item		Number of experts	Ratio(%)
Field	Academia	15	51.7
	Research institute	7	24.1
	Private enterprise	6	20.7
	Public enterprise	1	3.4
	Total	29	100.0
Major	Landscape	17	58.6
	Forest	5	17.2
	Environmental engineering	3	10.3
	Ecological restoration	3	10.3
	Others	1	3.4
	Total	29	100.0
Education	Ph.D.	25	86.2
	Master	4	13.8
	Total	29	100.0
Seniority	6~10 years	3	10.3
	11~15 years	4	13.8
	16~20 years	10	34.5
	>20 years	12	41.4
	Total	29	100.0

16년~20년이 34.5%, 21년 이상이 41.4%로 나타나 전공 분야에 10년 이상의 경험을 가진 응답자가 전체의 89.7%를 차지하였다.

2. 평가항목 간의 중요도 분석 결과

미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간을 선정하기 위해 평가항목으로 설정한 5개의 상위항목에 대한 AHP 결과는 Table 3과 같다. 먼저 상위항목 간 중요도와 순위를 분석한 결과, 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간 선정 시, 중요도가 가장 높다고 응답한 항목은 입지적 특성으로 0.355로 나타났다. 다음으로 기존 녹지의 식재유형(0.184), 기상조건(0.183), 물리적 특성(0.150), 인문사회환경(0.128) 순으로 중요도를 보였다. 특히 모든 항목에 대한 일관성 비율(CR)이 0.1 이하로 나타나, 중요도 평가에 대한 설문 응답에는 일관성이 있는 것으로 나타났다.

하위항목 간 중요도와 순위를 분석한 결과는 다음과 같다. 첫째, 물리적 특성의 경우 면적 또는 폭원이 0.536으로 중요도 값이 가장 높았으며, 식재기반이 0.269로 2순위, 지형이 0.195로 3순위로 나타났다(Table 4 참조). 이는 면적 또는 폭원이 가용공간의 물리적 특성에 있어서 가장 중요한 요인이라는 점을 의미한다. 물리적 특성의 하위항목은 면적 또는 폭원(0.536)의 중요도가 다른 항목에 비해 상대적으로 높게 나타났다. 즉, 도시숲이 대기 흐름에 영향을 미치기 위해서는 공간 규모에 대한 고려가 중요하다는 것이다. 또한 평지형 녹지확보가 용이하지 않을 경우, 옥상이나 벽면 등 인공지반에 입체적 식재가 필요하다는 점에서 식재기반(0.269)의 중요도가 면적 또는 폭원 다

Table 3. Analyzing the importance of Layer 2

Layer 1	Layer 2	Importance (Layer 2)	Priority (Layer 2)	CR
Evaluation of importance about available space for urban forest to mitigate particulate pollution	Locational characteristics	0.355	1	0.002
	Planting type of existing green space	0.184	2	
	Weather conditions	0.183	3	
	Ground characteristics	0.150	4	
	Human social environment	0.128	5	

Table 4. Analyzing the importance of ground characteristics

Layer 2	Layer 3	Importance (Layer 3)	Priority (Layer 3)	CR (Layer 3)
Physical characteristics	Area or width	0.536	1	0
	Planting ground	0.269	2	
	Ground types	0.195	3	

음으로 높은 순위로 나타난 것으로 보인다. 지형(0.195)은 가용 공간에 마운딩 조성으로 요구조건을 충족할 수 있기 때문에 상대적으로 중요도가 낮았다.

입지적 특성의 하위항목은 미세먼지 발생원 인접성이 0.404로 1순위, 주변 도로 교통량이 0.228로 2순위, 주변 토지이용이 0.204로 3순위, 주변 건물배치가 0.164로 4순위로 나타났다(Table 5 참조). 입지적 특성의 하위항목 중 미세먼지 발생원 인접성(0.404)의 중요도가 가장 높게 나타난 결과는 미세먼지를 직접 배출하는 발생원이 가까울수록 미세먼지 저감 도시숲 조성의 우선순위를 높게 인식한다는 것을 의미한다. 산업단지에서 발생하는 대기오염물질이 주거단지로 확대되는 것을 방지하기 위해 조성하는 완충숲(차단숲)(Cho and Kim, 2009)이 대표적인 사례이다. 하지만 미세먼지 발생원이 인접한 지역이 아니더라도 차량과 같은 이동오염원은 미세먼지 농도에 큰 영향을 미칠 수 있는 배출원이다(Kumar *et al.*, 2010; Morawska *et al.*, 2007). 본 연구에서도 입지적 특성의 하위항목 중 주변 도로 교통량(0.228)이 2순위로 나타나 전문가들이 이동오염원에 대한 취약성을 중요하게 고려하는 것으로 나타났다. 입지적 특성의 하위항목 중 3순위로 나타난 주변 토지이용(0.204)의 경우 전체 항목 중에서는 4순위로 나타나 중요도가 높은 편에 속하였다. 도시 내에서 시가화지역에 비해 주변 산림 비율이 높은 지역의 미세먼지 농도가 낮게 나타나는 경향이 있는데, 이는 산림이 미세먼지 농도를 저감시키는 효과가 크다는 것을 의미한다(Choi *et al.*, 2018). 따라서 주변 산림과 연계성이 높은 공간은 미세먼지 저감 도시숲을 조성하는데 용이한 공간으로 평가할 수 있다. 또한 주변 토지이용은 주변 건물배치(0.164)와 더불어 바람길 확보에 있어서 중요한 요인으로 알려져 있다(Sung *et al.*, 2019). 도시 내 건물배치는 도시 외곽에서 생성되는 신선한 바람을 유입시키는데 영향을 미칠 수 있으며, 바람길에 배치된 그린인프라는 미세먼지 저감 효과를 극대화할 수 있기 때문이다.

기존 녹지의 식재유형의 하위항목은 기존 녹지의 식재밀도가 0.350으로 1순위, 기존 녹지의 식재구조가 0.343으로 2순위, 기존 녹지의 식재간격(0.178)과 식재수종(0.129)이 각각 3순위, 4순위로 나타났다(Table 6 참조). 즉, 기존 녹지의 식재밀도와

Table 5. Analyzing the importance of locational characteristics

Layer 2	Layer 3	Importance (Layer 3)	Priority (Layer 3)	CR (Layer 3)
Locational characteristics	Proximity of source apportionment of particulate matter	0.404	1	0.02
	Traffic volume	0.228	2	
	Land use	0.204	3	
	Building arrangement	0.164	4	

Table 6. Analyzing the importance of planting type of existing green space

Layer 2	Layer 3	Importance (Layer 3)	Priority (Layer 3)	CR (Layer 3)
Planting type of existing green space	Planting density of existing greenspace	0.350	1	0.02
	Planting structures of existing greenspace	0.343	2	
	Planting distance of existing greenspace	0.178	3	
	Plantation of existing greenspace	0.129	4	

식재구조가 기존 녹지의 식재간격과 식재수종에 비해 상대적으로 중요하다는 것을 의미한다. 기존 녹지의 식재유형의 하위항목은 기존 녹지의 식재수종(0.129)과 식재간격(0.178)에 비해 기존 녹지의 식재밀도(0.35)와 식재구조(0.343)에 대한 중요도가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 전문가들이 기존 녹지의 가용성을 평가하는데 식재밀도와 식재구조를 중요하게 인식한다는 것을 의미한다. 특히 식재수종의 중요도가 가장 낮게 나타난 것으로 고려하면 수목의 미세먼지 흡수, 흡착 기능보다는 식재밀도와 식재구조를 조절함으로써 대기 중 오염물질을 차단하거나 확산을 방지하는 기능에 가치를 두고 있는 것으로 파악할 수 있다. 예를 들어 도로변의 경우, 다층의 관목구조를 확보하는 것이 초미세먼지(PM2.5) 농도를 저감하는데 효과가 나타난 바 있다(Hwang *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017). 따라서 기존 녹지의 미세먼지 저감 기능을 충족시킬 수 있는 식재구조 및 식재밀도를 확보한 경우 가용성이 높다고 판단할 수 있을 것이다.

기상조건의 하위항목은 풍속이 0.380으로 1순위, 풍향이 0.314로 2순위, 기온(0.157)과 습도(0.149)가 각각 3순위, 4순위로 나타났다(Table 7 참조). 이는 가용공간의 기상조건에서 풍속과 풍향이 상대적으로 중요한 요인이라는 점을 의미한다. 기상조건의 하위항목은 기온(0.157)과 습도(0.149)에 비해 풍속(0.38)과 풍향(0.314)에 대한 중요도가 상대적으로 높게 나타났다. 일반적으로 풍속이 증가할수록 미세먼지 농도는 감소하는 경향을 보이는 것으로 인식하고 있으나, 풍속이 강할수록 대기 중 오염물질이 많이 유입된다는 연구도 보고된 바 있기

Table 7. Analyzing the importance of planting type of existing green space

Layer 2	Layer 3	Importance (Layer 3)	Priority (Layer 3)	CR (Layer 3)
Weather conditions	Wind speed	0.380	1	0
	Wind direction	0.314	2	
	Temperature	0.157	3	
	Humidity	0.149	4	

Table 8. Analyzing the importance of human social environment

Layer 2	Layer 3	Importance (Layer 3)	Priority (Layer 3)	CR (Layer 3)
Human social environment	Security of site	0,339	1	0
	Disadvantaged groups	0,235	2	
	Maintenance	0,235	3	
	Floating population	0,190	4	

때문에(Giri *et al.*, 2008) 가용공간의 주 풍향을 고려해야 할 것이다. 특히 우리나라의 경우, 주 풍향이 서풍 또는 북풍 계열로 나타날 경우 미세먼지 농도가 증가하는 것으로 제시되고 있다(Park, 2017). 다만 기상조건에 따른 미세먼지 농도의 변화는 일시적으로 영향을 미치는 요인이기 때문에 미세먼지 농도와 관련성이 높은 시기를 파악하는 것이 중요하겠다.

마지막으로 인문사회환경의 하위항목 중요도를 살펴보면 부지확보가 0,339로 중요도 값이 가장 높았으며, 다음으로 취약계층 이용빈도(0,235), 유지관리(0,235), 유동인구(0,190) 순으로 나타났다(Table 8 참조). 즉, 가용공간의 인문사회환경에 있어서 부지확보가 가장 중요한 요인이며, 취약계층 이용빈도와 유지관리의 중요도는 거의 동등하고, 유동인구가 상대적으로 덜 중요한 요인임을 알 수 있다. 인문사회환경의 하위항목은 부지확보(0,339)의 중요도가 가장 높게 나타나 전문가들이 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 공간 확보 여부에 대한 가치를 높게 평가하는 것으로 나타났다. 따라서 다른 평가항목들이 충족하는 가용공간이더라도 채원조달방안이 마련되지 않거나 사유재산권을 두고 나타날 수 있는 갈등상황 등 부지확보를 위한 문제점들을 충분히 고려해야 할 것이다. 유지관리(0,235)가 2순위로 나타난 것으로 볼 때, 미세먼지 저감 도시숲은 미세먼지 저감 기능 및 경관적 측면에서 유지관리 방안 마련이 중요한 것으로 파악된다. 또한 인문사회환경 하위항목 중 유동인구(0,190)에 비해 취약계층 이용빈도(0,235)의 중요도가 높게 나타난 결과는 전문가들이 일반 시민들보다는 미세먼지 취약계층이 미세먼지에 노출되는 정도를 더욱 중요하게 인식하는 것으로 볼 수 있다. 도시 내 지역적 특성에 따라 특정 계층의 대기오염 취약성이 높게 나타날 수 있다는 점을 고려할 때(Park *et al.*, 2018), 가용공간 선정 시 미세먼지 취약계층 집중활동지역과 미세먼지 농도 분포의 관계를 파악해야 할 것이다.

3. 전체 중요도 분석결과

미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간 선정 시 고려해야 하는 평가항목의 전체 중요도는 Table 9와 같다. 평가항목 전체순위 상위 5위까지 살펴보면 미세먼지 발생원 인접성의 중요도 값이 0,143으로 가장 높게 나타났으며, 주변 도로 교통량(0,081), 면적 또는 폭원(0,08), 주변 토지이용(0,072), 풍속

Table 9. Weight of related evaluation indexes

Layer 3	Importance	Overall Priority
Proximity of source apportionment of particulate matter	0,143	1
Traffic volume	0,081	2
Area or width	0,080	3
Land use	0,072	4
Wind speed	0,070	5
Planting density of existing greenspace	0,064	6
Planting structures of existing greenspace	0,063	7
Building arrangement	0,058	8
Wind direction	0,057	9
Security of site	0,043	10
Planting ground	0,040	11
Planting distance of existing greenspace	0,033	12
Disadvantaged groups	0,030	13
Maintenance	0,030	14
Ground types	0,029	15
Temperature	0,029	16
Humidity	0,027	17
The floating population	0,024	18
Plantation of existing greenspace	0,024	19
Total	1	-

(0,070) 순으로 고려해야 하는 것으로 나타났다. 반면 기존 녹지의 식재수종(0,024), 유동인구(0,024), 습도(0,027), 기온(0,029), 지형(0,029) 등은 가용공간 선정에 있어서 상대적으로 중요도가 낮은 것으로 분석되었다.

가용공간 전체 중요도 상위 5개 항목은 상위항목과 하위항목 중요도의 곱으로 산출되는 복합가중치로서 미세먼지 저감을 위한 도시숲 조성 시 우선순위를 판단할 수 있다. 19개 전체 하위항목 중 미세먼지 발생원 인접성, 주변 도로 교통량은 각각 중요도 1, 2순위로 나타나 미세먼지 발생원이 인접하거나 대상지 주변에 교통량이 많은 곳에 우선적으로 가용공간을 확보해야 한다고 볼 수 있다. 또한 면적 및 폭원은 전체 중요도 3순위로 나타나 가용공간 유형별 규모가 중요한 항목으로 나타났다. 미세먼지 저감 도시숲은 식재구조 및 조합을 통해 대기 중 오염물질의 확산을 차단하거나 외부 공기 흐름을 유도하는 등 다양한 식재기법이 요구되기 때문에 충분한 공간이 필요하다. 예를 들어 도로변 가로녹지의 경우 보도 폭원에 따라 띠녹지 규모, 층위식재, 열식 형식 등을 결정하게 된다. 전체 중요도 4순위로 나타난 주변 토지이용은 녹지 네트워크 연계를 통해 미세먼지 저감 효과를 극대화시킬 수 있다는 점에서 중요한 항목이다. 가용공간 주변에 녹지, 물(하천), 오픈스페이스의 네트워크

를 활용하여 미세먼지 저감을 위한 바람길 조성이 가능하므로 (Kim *et al.*, 2017) 도시숲 조성 시 주변 토지이용을 검토할 필요성이 있다. 전체 중요도 5순위로 나타난 풍속의 경우도 바람길 조성과의 관련이 있으나, 단순히 풍속만으로 미세먼지 저감 기능을 일반화시킬 수 없으므로 입지적 특성이나 주풍향 등을 동시에 고려할 필요가 있을 것이다.

V. 결론 및 제언

최근 도시숲이 생태적, 경관적 가치뿐만 아니라, 미세먼지 저감에 효과가 있는 것으로 나타남에 따라 미세먼지 문제에 대응하기 위해 도시숲을 조성하려는 수요가 점차 증가할 것으로 보인다. 이러한 도시숲이 미세먼지 저감 기능을 극대화하기 위해서는, 미세먼지 영향요인 및 도시숲 조성의 효율성을 고려한 가용공간 평가가 요구된다. 이에 본 연구는 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간 평가항목을 도출하고, 전문가 조사를 통해 중요도를 분석하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 문헌고찰 및 전문가 검토를 통해 도출된 가용공간 평가항목은 물리적 특성, 입지적 특성, 기존 녹지의 식재유형, 기상조건, 인문사회환경의 5개 상위항목과 19개 하위항목으로 구분되었다. 이는 도시숲 조성 및 관리를 위한 도시숲 건전성을 평가한 연구(Lee *et al.*, 2008), 생태적 측면에서 도시숲 지속성을 평가한 연구(Lee *et al.*, 2014a)에서 제시한 평가항목과는 차이가 있었다. 특히 미세먼지 저감 도시숲은 식재구조 및 조합을 통해 미세먼지 저감 기능에 초점이 맞춰진 유형으로서 미세먼지의 노출 수준에 따른 시급성, 기존 녹지여건의 가용성, 바람길 구축을 통한 효과성 등이 강조될 수 있다.

둘째, 최종 도출된 평가항목들의 중요도를 파악하기 위해 전문가 조사를 실시하였으며, AHP기법을 활용하여 각 항목 간의 중요도를 분석하였다. 분석결과, 상위항목의 중요도는 입지적 특성(0.355), 기존 녹지의 식재유형(0.184), 기상조건(0.183), 물리적 특성(0.15), 인문사회환경(0.128) 순으로 나타나 입지적 특성의 중요도가 가장 높은 것으로 나타났다. 특히 입지적 특성이 다른 항목에 비해 상대적으로 높은 중요도를 보였는데, 이러한 결과는 미세먼지 저감 도시숲 조성을 위한 가용공간을 선정하는데 입지적 특성이 가장 우선적으로 고려되어야 한다는 것이라고 판단할 수 있다.

셋째, 가용공간 평가를 위한 상위항목과 하위항목의 중요도를 통해 전체 하위항목 중요도를 산출하였다. 분석결과, 상위 5순위 안에 미세먼지 발생원 인접성, 주변 도로 교통량, 면적 또는 폭원, 주변 토지이용, 풍속이 포함되었으며, 기존 녹지의 식재수종, 유동인구, 습도, 기온, 지형이 하위 5순위로 분류되었다. 이러한 결과를 고려할 때 미세먼지 저감 도시숲 조성 가용공간은 입지분석을 통해 미세먼지 취약지역 내 도시숲 조성 가

능 부지를 도출하고, 바람길 도입 가능성을 고려하여 선정해야 한다. 특히 전체 중요도 6위~8위인 기존녹지의 식재밀도, 기존 녹지의 식재구조, 주변 건물배치는 바람길 조성과의 관련성 있는 요인으로서 전문가들이 미세먼지 저감에 있어서 바람길 조성을 최적의 대안으로 고려하고 있다고 예상할 수 있다. 전문가 검토의견 중에서는 바람길에 최적화된 도시숲을 조성하려면 야간의 주풍향을 살펴봐야 한다는 견해도 제시되었다. 기온이 낮은 야간에 찬 공기가 도시 내로 유입되는 방향과 동일한 방향으로 도시숲을 조성할 경우 바람길을 유도할 수 있기 때문이다.

최근 미세먼지 저감을 위한 수종을 선정하기 위해 식물의 미세먼지 흡착, 흡수 기작에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음에도 기존 녹지의 식재수종은 중요도가 가장 낮게 평가되었다. 이는 수목이 도시 전체의 미세먼지 저감에 있어서 현실적으로 한계가 있음을 인식하는 것이라고 볼 수 있다. 즉, 고농도 미세먼지 발생 시 도시숲이 미세먼지 농도를 급격하게 낮출 수는 없으나, 공기 흐름의 변화를 유도하여 미세먼지에 대한 피해를 최소화할 수 있다는 논리이다. 따라서 도시숲이 미세먼지로부터 안전한 피난처 역할을 제공함으로써 시민들에게 일시적으로 안정감을 줄 수 있는 장소로 인식될 필요가 있다.

본 연구는 미세먼지 저감 도시숲을 우선 도입하는 가용공간을 선정하기 위한 목적에서 수립되었으며, 문헌고찰 및 전문가 조사를 통해 가용공간 평가항목 중요도를 분석하였다. 미세먼지 저감 도시숲을 추진하는 지자체가 증가하는 시점에서 객관적인 가용공간 평가도구와 가중치를 도출하였다는 점에서 의의가 있다. 하지만 이를 현장에 적용하기 위한 수치화된 평가 지표는 도출하지 못하였다는 점이 본 연구의 한계라고 할 수 있다. 특히 몇몇 평가항목의 경우, 일관성 있는 평가 기준을 설정하는데 무리가 있다. 예를 들어 풍향은 미세먼지 농도에 영향을 미치는 변수이지만 정량화에 어려움이 있으며, 풍속이 높게 나타나더라도 오염물질이 빠르게 유입되는 등 예외적인 사례들이 있다는 점에서 평가 기준 설정이 어렵다. 따라서 후속 연구에서는 보편적인 가용공간 평가항목에서 나아가 도시 공간 유형별로 적합한 평가항목을 개발하는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 미세먼지 저감을 위한 도시숲 조성 시 흡착, 흡수, 차단 등 수목의 미세먼지 저감 메커니즘, 계절에 따른 식물의 생리학적 측면, 경관적 특성 등 다양한 영향요인을 고려한 연구가 수행되어야 할 것이다.

References

1. Brauer, M., G. Hoek, P. van Vliet, K. Meliefste, P. Fischer, U. Gehring, J. Heinrich, J. Cyrys, T. Bellander, M. Lewne and B. Brunekreef(2003) Estimating long-term average particulate air pollution concentrations: Application of traffic indicators and geographic information systems, *Epidemiology* 228-239.

2. Chae, H. J.(2009) Effect on the PM10 concentration by wind velocity and wind direction, *Journal of Environmental and Sanitary Engineering* 24(3): 37-54.
3. Chen, J., X. Yu, F. Sun, X. Lun, Y. Fu, G. Jia, Z. Zhang, X. Liu, L. Mo and H. Bi(2015) The concentrations and reduction of airborne particulate matter (PM10, PM2.5, PM1) at shelterbelt site in Beijing, *Atmosphere* 6(5): 650-676.
4. Cho, S. J and H. M. Kim(2009) Evaluation of green buffer zone supplement plan for air pollution decrease function: In the case of Sihwa industrial complex green buffer zone, *Journal of the Korea Society of Environmental Administration* 15(3): 145-154.
5. Choi, T. Y., H. G. Moon, D. I. Kang and J. G. Cha(2018) Analysis of the seasonal concentration differences of particulate matter according to land cover of Seoul-Focusing on forest and urbanized area, *Journal of Environmental Impact Assessment* 27(6): 635-646.
6. Eum, J. H.(2019) Analysis and utilization strategies of ventilation corridor characteristics in Jeon-ju area, *Korean Journal of Environment and Ecology* 33(3): 366-374.
7. Giri, D., V. K. Murthy and P. R. Adhikary(2008) The influence of meteorological conditions on PM 10 concentrations in Kathmandu valley, *International Journal of Environmental Research* 2(1).
8. Han, S. W., S. H. Lee and H. W. Lee(2015) Study on the characteristics of PM distribution in coastal and inland cities correlation and its correlation, *Journal of Environmental Science International* 24(11): 1513-1523.
9. 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: Case of openspace of Busan City Hall in Korea, *Korean Journal of Environment and Ecology* 32(3): 323-331.
10. Hwang, K. I., B. H. Han, J. I. Kwark and S. C. Park(2018) A study on decreasing effects of ultra-fine particles (PM 2.5) by structures in a roadside buffer green-A buffer green in Songpa-gu, Seoul, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 46(4): 61-75.
11. Jerrett, M., M. A. Arain, P. Kanaroglou, B. Beckerman, D. Crouse, N. L. Gilbert, J. R. Brook, N. Finkelstein and M. M. Finkelstein(2007) Modeling the intraurban variability of ambient traffic pollution in Toronto, Canada, *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, 70(3-4): 200-212.
12. Joint Research Project for Long - range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia(2019) Summary Report of the 4th stage (2013 - 2017) LTP Project, 1. Research Report to National Institute of Environmental Research.
13. Kim S. H and C. H. Oh(2019) A study on the new-green space derivation in urban area for the reduction of fine dust, In *Proceedings of the Korean Journal of Environment and Ecology conference* 29(2): 59-60.
14. Kim, S., S. Lee, K. Hwang and K. An(2017) Exploring sustainable street tree planting patterns to be resistant against fine particles (PM2.5), *Sustainability* 9(10): 1709.
15. Kumar, P., A. Robins, S. Vardoulakis and R. Britter(2010) A review of the characteristics of nanoparticles in the urban atmosphere and the prospects for developing regulatory controls, *Atmospheric Environment* 44(39): 5035-5052.
16. Lee, D., D. Kim, E. Kim, J. Jeong, Y. Oh, S. Joo and K. Kim(2008) Evaluation indicators for creation and management of urban forest, *Journal of the Korea Society of Environmental Restoration Technology* 11(5): 104-113.
17. Lee, H. J(2010) Analysis of time series models for PM10 concentrations at the Suwon city in Korea, *Journal of the Korean Data and Information Science Society* 21(6): 1117-1124.
18. Lee, J. E and S. H. Cho(2011) An analysis of the specialist's preference for the model of park-based mixed-use districts in securing urban parks and green spaces via private development, *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 39(6): 1-11.
19. Lee, S. D., D. P. Kim, S. H. Choi, J. H. Oh and S. H. Hong(2014a) Criteria selection of urban forestry sustainability evaluation in the view of ecology, *Korean Journal of Environment and Ecology* 28(4): 472-483.
20. Lee, W. J., M. K. Hwang and Y. K. Kim(2014b) Health vulnerability assessment for PM 10 in Busan, *Korean Journal of Environmental Health Sciences* 40(5): 355-366.
21. Liu, J., R. Zhang, H. Liu, J. Duan, J. Kang, Z. Guo, B. Xi and Z. Cao(2018) Assessing the particulate matter removal abilities of tree leaves, *JoVE (Journal of Visualized Experiments)* (140): e58026.
22. Lu, D., W. Mao, D. Yang, J. Zhao and J. Xu(2018) Effects of land use and landscape pattern on PM2.5 in Yangtze River Delta, China, *Atmospheric Pollution Research* 9(4): 705-713.
23. Moon, N. K., S. T. Kim, J. S. Ha, Y. M. Kim and J. H. Seo(2017) Analysis System for regional environmental status to support environmental assessment : Source apportionment analysis of air pollutants from major industrial complexes and local governments, *Research Report to Korea Environment Institute*.
24. Morawska, L., Z. D. Ristovski, G. R. Johnson, E. R. Jayaratne and K. Mengersen(2007) Novel method for on-road emission factor measurements using a plume capture trailer, *Environmental Science & Technology* 41(2): 574-579.
25. Nowak, D. J., S. Hirabayashi, A. Bodine and R. Hoehn(2013) Modeled PM2.5 removal by trees in ten US cities and associated health effects, *Environmental pollution* 178: 395-402.
26. Oh, J. H., J. H. Cho, H. J. Cho, M. S. Choi and J. Kwon(2008) A study on the biotope evaluation and classification of urban forests for landscape ecological management, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 11(4): 101-111.
27. Park, C. S. (2017) Variations of PM10 concentration in Seoul during 2015 and relationships to weather condition, *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers* 27(2): 47-64.
28. Park, J., J. Park and J. Choi(2018) An Air Pollution exposure on floating population using air pollution dispersion model, *The Geo-graphical Journal of Korea* 52(2): 193-204.
29. Park, S. Y., Y. J. Kim and C. H. Kim(2012) Characteristics of long-range transport of air pollutants due to different transport patterns over Northeast Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 28(2): 142-158.
30. Rosenlund, M., F. Forastiere, M. Stafoggia, D. Porta, M. Perucci, A. Ranzì, F. Nussio and C. A. Perucci(2008) Comparison of regression models with land-use and emissions data to predict the spatial distribution of traffic-related air pollution in Rome, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 18(2): 192.
31. Salbitano, F., S. Borelli and G. Sanesi(2015) Chapter 11. Urban forestry and agro-forestry, De Zeeuw H., *Cities, Food and Agriculture: Towards Resilient Urban Food Systems*, A State of the Art, Oxford.
32. Seo, Y. H(2013) Development of construction site source profile by a chemical analysis of PM10 collected at the construction site, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 19: 67-72.
33. Shin, M. K., C. D. Lee, H. S. Ha, C. S. Choe and Y. H. Kim(2007) The influence of meteorological factors on PM 10 concentration in Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 23(3): 322-331.
34. Son, H. Y and C. H. Kim(2009) Interpreting the spectral

- characteristics of measured particle concentrations in Busan, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 25(2): 133-140.
35. Song, K. W and Y. Lee(2013) Re-scaling for improving the consistency of the AHP method, Social Science Research 29(2): 271-288.
 36. Sung, S. Y., J. S. Park, S. E. Lee and S. H. Kim(2019) Introducing the ventilation corridor for reducing particulate matter air pollution, KRIHS POLICY BRIEF 709: 1-6.
 37. Wind, Y and T. L. Saaty(1980) Marketing applications of the analytic hierarchy process, Management Science 26(7): 641-658.
 38. Wise, E. K and A. C. Comrie(2005) Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States, Atmospheric Environment 39(16): 2969-2980.
 39. Wu, J., W. Xie, W. Li and J. Li(2015) Effects of urban landscape pattern on PM_{2.5} pollution—a Beijing case study, Plos one 10(11): e0142449.
 40. Xu, X. R. and J. O. Kim(2017) Planting design strategies and green space planning to mitigate respirable particulate matters-case studies in Beijing, China. Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture 45(6): 40-49.
 41. Yu, S. Y., N. I. Gu and C. Y. Park(2017) Characteristics of fine dust concentration in the urban forest. In Proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference: 191.
 42. Korea Forest Service(2018) “미세먼지 저감효과 큰 나무 심어 도시민 숨통 틔운다! ”. http://www.forest.go.kr/kfswb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_1036&mn=NKFS_04_02_01&nttId=3124638
 43. Ministry of Environment(2018a) “환경부 2019년도 예산안, 쾌적하고 안전한 생활환경 조성에 투자 확대”, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=904490&menuId=286>
 44. Ministry of Environment(2018b) “국민 78.7% “미세먼지는 건강위협”, 72.4% “시민실천운동 참여”...시민참여 의지 높아”, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=286&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=914570>
 45. National Institute of Forest Science(2018) “공장 주변 미세먼지도 ‘도시숲’이 잡는다”. http://www.forest.go.kr/newkfswb/cop/bbs/selectBoardArticle.do?sessionId=O56SVWMPldnFfCJ2SSCNg0BOA7sxHVvXH EodDf9eumFs0Vh1MnaB9a8YPSvltZYx.frswas02__servlet__engine11?nttId=3117277&bbsId=BBSMSTR_1036&mn=KFS_14_06_02

Received : 22 November, 2019

Revised : 17 December, 2019 (1st)

Accepted : 17 December, 2019

3인익명 심사필