

그린인프라의 미세먼지 저감효과 분석과 확대 방안

김원주 우수영 윤초롱 곽명자

Evaluation on the Reduction Effect of Particulate Matter
through Green Infrastructure and Its Expansion Plans



서울연구원
The Seoul Institute

**그린인프라의
미세먼지 저감효과
분석과 확대 방안**

연구책임

김원주	서울연구원 안전환경연구실 연구위원
우수영	서울시립대학교 환경원예학과 교수

연구진

윤초롱	서울연구원 안전환경연구실 연구원
곽명자	서울시립대학교 연구원

연구지원

이종규	서울시립대학교 연구원
김지은	서울시립대학교 연구원
박상희	서울시립대학교 연구원
김한동	서울시립대학교 연구원
임예지	서울시립대학교 연구원

이 보고서의 내용은 연구진의 견해로서
서울특별시의 정책과는 다를 수도 있습니다.

요약

미세먼지 흡착효과 우수한 가로수 심고 입체녹화·식재기법 복합적 활용도 필요

미세먼지 저감방안으로 도시공원·녹지·수목 등 그린인프라 중요성 대두

최근 극심한 미세먼지 발생으로 인하여 야외활동에 제약을 받고 있으며, 미세먼지의 건강영향에 대한 시민들의 우려가 커지고 있다. 서울시는 비상저감조치 발령 시 차량 미운행, 공해차량 운행제한 등 대책을 마련하여 시행하고 있으나, 예방적 차원의 미세먼지 대책 이외에 미세먼지를 저감하기 위한 다양한 방안이 함께 시도되어야 한다. 미세먼지를 줄일 수 있는 방안 중 하나로 도시 내 공원, 녹지, 수목 등 그린인프라스트럭처(Green Infrastructure, 이하 그린인프라)의 중요성이 높아지고 있다. 그린인프라 중에서도 수목의 나뭇잎은 미세먼지를 흡착하는 특성이 있으며, 특히 도로를 따라 조성된 가로수는 흡착작용을 통해 미세먼지를 흡착함과 동시에 도시숲을 연결하는 역할을 수행한다.

이에 서울시 주요 가로수종을 대상으로 현장 실측을 통해 수목의 미세먼지 흡착 정도를 분석하고, 이를 바탕으로 미세먼지 흡착에 효과적인 수종 선정, 수목 식재 방법 등의 그린인프라 확대 방안을 마련해 도시 내 미세먼지를 효율적으로 저감할 수 있는 방안을 강구하여야 한다.

선진도시, 그린인프라 이용해 미세먼지 저감...서울시도 확충사업 추진

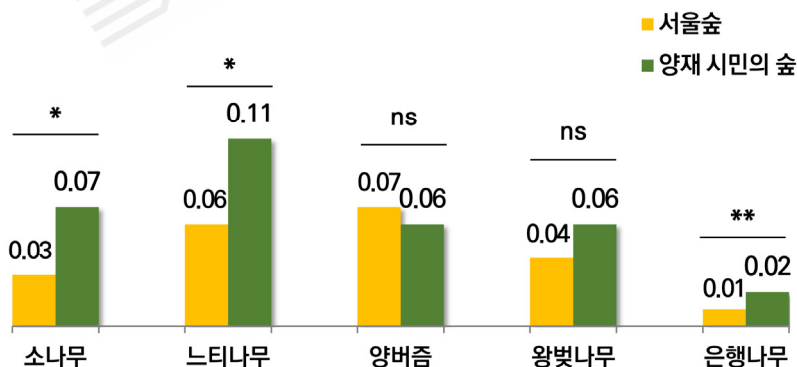
국내·외 대기오염 저감 관련 그린인프라 구축 사례 검토 결과, 국외에서는 미세먼지를 고려한 도시 그린인프라 계획을 수립하고 있다. 영국 런던은 도시 내 녹지의 중요성을 인식하여 일찍이 도시계획에 오픈스페이스 네트워크를 구축하도록 하고 있으며, 도시 내 공원녹지 간 연결뿐만 아니라 소규모 공간을 활용한 포켓파크, 빗물정원, 벽면녹화 등 소규모 그린인프라 조성도 활발하다. 독일 슈투트가르트의 바람길을 고려한 도시숲은 그린인프라를 이용하여 도시 내 대기

오염을 줄인 대표적 사례이다. 최근에는 사물인터넷 기술을 접목하여 주변 먼지를 감지하고 정화하는 녹색벽 겸 벤치가 개발되어 베를린, 파리, 홍콩 등 14개 도시에 설치되었다.

국내에서는 미세먼지 흡착 역할로서의 그린인프라의 중요성을 인식하고 아파트 단지 주변 녹화, 벽면녹화 등 건축물 녹화와 미세먼지 저감숲 조성 등의 사업을 계획 및 수행 중에 있다. 서울수도 미세먼지 저감에 수목이 효과적임을 인식하고 ‘삼천만그루 나무심기’ 사업 등 관련 그린인프라 확충 사업을 추진하고 있으며, 미세먼지 저감에 효과적인 수종과 식재 방식을 적용할 계획이다.

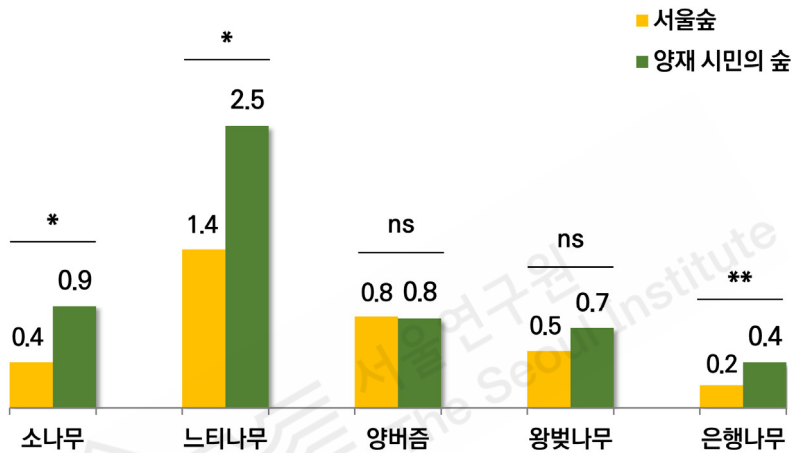
도시 가로수종 미세먼지 흡착, 느티나무가 상대적으로 더 효율·친화적

서울시 가로수 식재수량을 바탕으로 낙엽활엽수인 양버즘나무, 느티나무, 왕벚나무와 낙엽침엽수인 은행나무, 상록교목 소나무 총 5종을 선정하였으며, 서울숲과 양재 시민의 숲을 대상으로 잎 샘플링을 통해 미세먼지 흡착량을 분석하였다. 잎의 단위면적당 미세먼지 흡착량 분석 결과, 느티나무는 $0.06\sim0.11\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 상대적으로 높은 흡착 효과를 보이며, 다음으로 양버즘나무 $0.06\sim0.07\text{mg}/\text{cm}^2$, 소나무 $0.03\sim0.07\text{mg}/\text{cm}^2$, 왕벚나무 $0.04\sim0.06\text{mg}/\text{cm}^2$, 은행나무 $0.01\sim0.02\text{mg}/\text{cm}^2$ 순으로 나타났다.



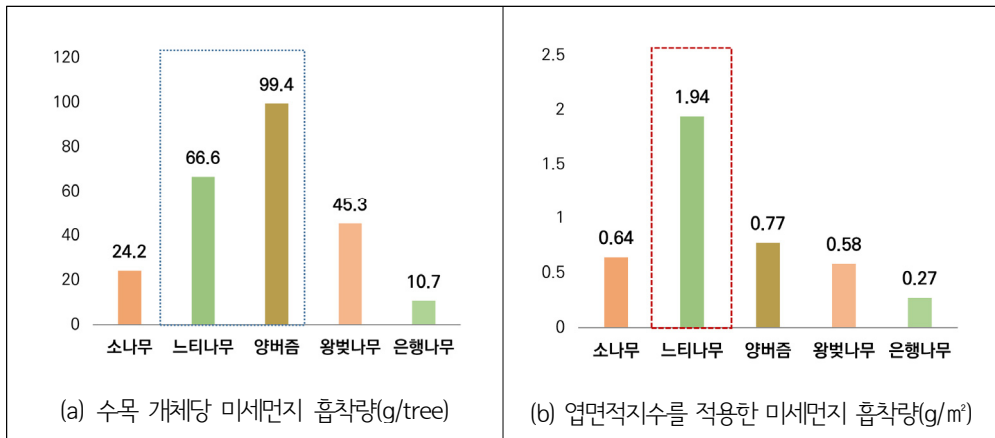
[그림 1] 잎의 단위면적당 미세먼지 흡착량(mg/cm^2)

수목별 미세먼지 흡착량 해석을 위해서는 단위면적당 미세먼지 흡착도 중요하나 수목 크기와 엽면적 등이 서로 다르므로 단순히 잎의 흡착량만을 가지고 해석하기엔 무리가 있다. 단위면적당 미세먼지 흡착량이 높더라도 엽면적이 작아 수목당 미세먼지 흡착량이 낮을 수 있으며, 단위면적당 미세먼지 흡착량이 낮더라도 엽면적이 커 수목당 미세먼지 흡착량이 상대적으로 높을 수 있기 때문이다. 이에 엽면적지수를 적용한 미세먼지 흡착량 분석 결과, 느티나무가 $1.4\sim 2.5\text{g}/\text{m}^2$ 로 가장 높게 나타났으며, 다음으로 양버즘나무 $0.8\text{g}/\text{m}^2$, 소나무 $0.4\sim 0.9\text{g}/\text{m}^2$, 왕벚나무 $0.5\sim 0.7\text{g}/\text{m}^2$, 은행나무 $0.2\sim 0.4\text{g}/\text{m}^2$ 순으로 나타났다.



[그림 2] 엽면적지수를 적용한 미세먼지 흡착량(g/m^2)

조사한 수목의 개체당 미세먼지 흡착량을 산출하기 위해 선행연구의 흉고직경에 의한 엽면적 추정식을 이용하여 수목당 미세먼지 흡착량을 산출하였다. 조사대상 수목의 흉고직경 범위에서 느티나무는 평균 66.6g 으로 상대적으로 많은 미세먼지 흡착($37\sim 96\text{g}/\text{tree}$) 효과가 있는 것으로 나타났다. 그 다음으로 왕벚나무가 평균 45.3g ($12\sim 78\text{g}/\text{tree}$), 소나무가 평균 24.2g ($17\sim 32\text{g}/\text{tree}$), 은행나무가 평균 10.7g ($5\sim 17\text{g}/\text{tree}$)으로 나타났다. 양버즘나무의 경우 전체 엽면적당 미세먼지 흡착량은 99.4g ($94.8\sim 104\text{g}/\text{tree}$)으로 가장 높게 나타났으나, 실측한 수목 중 흉고직경이 다른 수목보다 상대적으로 크기 때문으로 판단된다. 또한 양버즘나무는 봄철 알레르기 유발 가능성으로 교체 추세에 있어 미세먼지 흡착을 위한 수종으로 적합하지 않을 수 있다. 종합적으로 단위면적당 미세먼지 흡착량이 높으면서 엽면적지수에 의한 흡착효율도 높게 나타난 느티나무가 상대적으로 미세먼지 저감 효과에서 효율적이며 친화적이라고 할 수 있다.



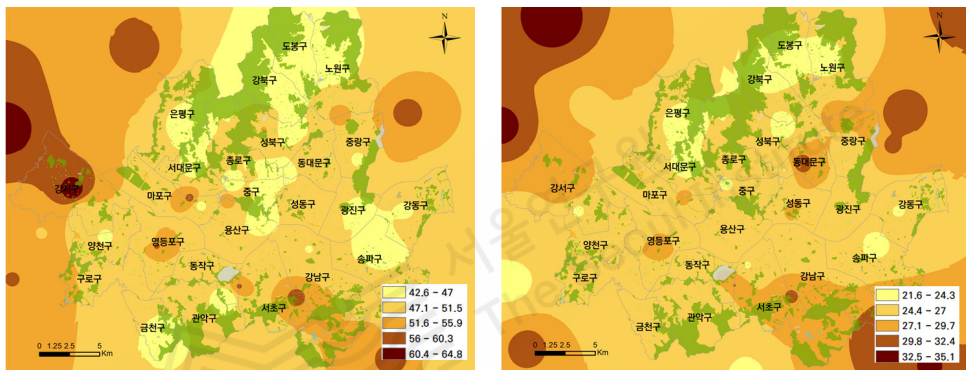
[그림 3] 수목당 미세먼지 흡착량과 엽면적지수를 적용한 미세먼지 흡착량 비교

미세먼지 저감수종, 느티나무 외 겨울·봄 위해 상록교목도 선택할 필요

미세먼지 흡착효과가 상대적으로 높은 느티나무는 잎에 털이 많고, 흠이 잘 발달되어 있어 다른 활엽수종에 비해 미세먼지 흡착 능력이 우세한 것으로 분석되었다. 그러나 겨울과 봄에 고농도 미세먼지가 발생할 가능성이 높아 겨울과 이른 봄에 잎이 없는 낙엽활엽수종은 미세먼지 흡착 효과가 상대적으로 낮을 수 있다. 반면 상록교목은 겨울철과 이른 봄 동안 미세먼지를 흡착하는 데 상대적으로 효과적이라고 할 수 있다. 소나무, 스트로브 잣나무 등의 상록교목은 바늘 모양의 잎이 겨울철과 봄철에 잎이 없는 낙엽활엽수 대비 미세먼지를 포획하기에 유리하므로 흡착효과가 상대적으로 높다. 이외 가문비나무, 곰솔 등 미세먼지 저감에 우수한 상록교목을 종합적으로 고려하여야 하며, 생육환경에 따라 적절한 식재가 필요하다.

서울시 미세먼지 농도는 북한산·남산·관악산 등 대규모 녹지에서 낮아

서울시 최근 5년간 연평균 미세먼지, 초미세먼지 농도(2013~2017)와 서울시 주변에 위치한 경기도 소재 측정소의 최근 5년간 연평균 미세먼지(2013~2017), 최근 4년간 초미세먼지(2014~2017) 농도를 이용해 미세먼지 분포와 서울시내 공원녹지 분포를 비교하였다. 미세먼지 농도는 측정소 위치, 교통량, 토지이용 등의 복잡한 요인으로 인해 차이가 발생하지만, 녹지 분포와 비교하여 보았을 때 상대적으로 대규모 녹지가 분포하는 지역이 타 지역에 비해 농도가 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a) 녹지+미세먼지($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

(b) 녹지+초미세먼지($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

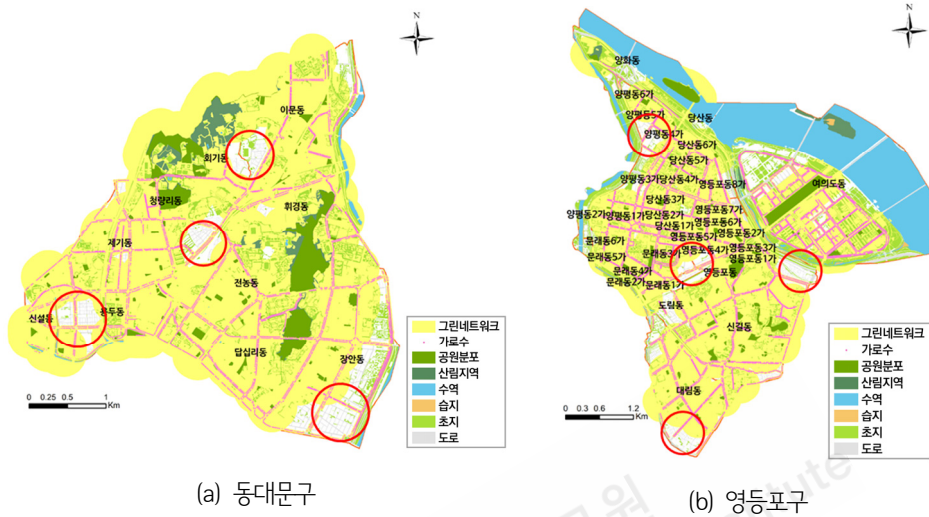
[그림 4] 서울시 녹지와 미세먼지 농도 분포 비교

그린인프라 간 연결, 공원·가로수 배치로 미세먼지 저감효율 향상해야

미세먼지, 초미세먼지 농도가 상대적으로 높으면서 시가지지역 대비 녹지 면적이 낮게 나타난 영등포구와 동대문구를 대상으로 그린인프라 연결성을 분석하였다. 그린인프라 간의 연결은 미세먼지 저감 효과뿐만 아니라 쾌적한 환경 창출, 삶의 질 개선, 생물다양성 측면에서도 중요하다.

그린인프라 연결성이 낮은 지역은 인근에 공원이 없고 도로폭이 좁아 가로수가 조성되기 어려

운 주택밀집지역이 분포한다. 공장 등이 있는 준공업지역은 주거지와 공업지역이 혼합적으로 나타나고, 도로가 넓은 편이나 가로수와 공원녹지가 부족하다.



[그림 5] 공원녹지 및 가로수 배치 필요지역

벽면녹화·옥상녹화 포함한 입체녹화, 흡착효율 높은 식재기법 복합 활용

서울시는 산림이 시 외곽에 분포하여 시가지와 녹지가 이원화되어 있고 그린인프라 조성 공간이 제한적이기 때문에 미세먼지 흡착 효과가 상대적으로 우수한 수종을 선택하는 것도 중요하지만 미세먼지 흡착에 효율적인 그린인프라 식재 방법을 함께 고려해야 한다. 벽면녹화, 옥상녹화 등 건축물의 입체녹화와 함께 다층식재, 교호식재 등의 다양한 그린인프라 조성 방식을 복합적으로 활용할 필요가 있다. 이에 미세먼지 흡착 효율이 높은 수종과 선행연구 검토를 통해 도출한 그린인프라 요소를 적용하여 동대문구, 영등포구 지역을 사례로 주거, 상업, 공업, 대로변의 미세먼지 저감을 위한 그린인프라 조성 방식을 구상하였다.



[그림 6] 주거지역 그린인프라 조성



[그림 7] 상업지역 그린인프라 조성



[그림 8] 공업지, 주거지 혼재지역 그린인프라 조성



[그림 9] 대로변, 가로 그린인프라 조성

서울시, 시민·시민단체, 기업이 함께 그린인프라 확대 협력체계 구축해야

효율적인 그린인프라 확대를 위해서는 시민으로 하여금 그린인프라의 중요성을 인식하게 하고, 그린인프라를 조성하기 위한 실천 활동이 함께 이루어져야 한다. 기업 또한 미세먼지 저감을 위한 그린인프라의 역할을 이해하고 관련 사업에 자발적으로 참여하여야 한다. 여기에 서울시가 공공의 역할을 수행함으로써 서울시, 시민 및 시민단체, 기업이 함께 그린인프라 확대를 위한 협력 체계를 구축하여야 할 것이다. 서울시는 미세먼지 저감을 위한 그린인프라 확대를 위해 부지를 제공하며, 기업은 기금을 지원하고 공장 및 기업부지를 대상으로 미세먼지 저감 그린인프라를 조성함으로써 브랜드 이미지를 제고할 수 있다. 시민 및 시민단체는 부지 나무심기, 수목 시민입양 제도 등에 참여해 그린인프라 조성을 위한 실천 축으로 활동하는 것이 필요하다.

목차

01 연구개요	2
1_연구배경 및 목적	2
2_연구내용 및 방법	3
02 그린인프라와 미세먼지	6
1_그린인프라 개념 및 요소	6
2_선행연구 검토	11
3_서울시 그린인프라 현황	17
03 그린인프라를 이용한 대기오염 관리 사례	24
1_해외 그린인프라 정책과 조성 사례	24
2_국내 그린인프라 조성 사례	33
04 그린인프라의 미세먼지 저감 효과 분석	38
1_수종별 미세먼지 흡착 효과 분석	38
2_수종별 대기오염 내성 효과 분석	51
3_종합 및 시사점	56
05 미세먼지 대응 그린인프라 확대 방안	64
1_그린인프라의 연결성 확대	64
2_유형별 그린인프라의 조성 방식	75

참고문헌

81

Abstract

88



표

[표 2-1] 그린인프라스트럭처의 해외 정의 비교	7
[표 2-2] 개념적 측면의 그린인프라 요소	10
[표 2-3] 미세먼지 저감 그린인프라 주요 요소 및 식재 기법	16
[표 2-4] 서울시 구별 녹지 면적	18
[표 2-5] 서울시 구별 공원 면적	20
[표 2-6] 서울시 가로수 식재 현황	21
[표 3-1] 독일 슈투트가르트 그린인프라 관련 정책	30
[표 4-1] 최근 5년간 미세먼지 농도(2013~2017)	39
[표 4-2] 서울시 가로수 식재 수량과 분석대상 수종	39
[표 4-3] 분석대상 수종 특징 및 수형	40
[표 4-4] 서울숲 분석대상 수종별 일반정보	41
[표 4-5] 양재 시민의 숲 분석대상 수종별 일반정보	42
[표 4-6] 분석대상 수종의 엽면적지수	46
[표 4-7] 주요 수종별 흉고직경에 의한 엽면적 추정식	47
[표 4-8] 분석대상지별 수목의 엽면적 산출 결과	48
[표 4-9] 알레르기 질환에서 국내 주요 수목의 꽃가루 감작률(%)	49
[표 4-10] 조사 대상 수목의 대기오염내성지수(APTI) 및 관련 생화학적 특성	55
[표 5-1] 분석에 활용한 미세먼지 측정소	65
[표 5-2] 서울시 도시대기 측정소별 연평균 미세먼지, 초미세먼지 농도(2013~2017)	66
[표 5-3] 서울시 도로변 측정소별 연평균 미세먼지, 초미세먼지 농도(2013~2017)	66

그림

[그림 1-1] 연구흐름도	4
[그림 2-1] 그린인프라의 범위	9
[그림 2-2] 국립산림과학원(2016)의 수목 미세먼지 흡수효과 연구 결과	13
[그림 2-3] 미세먼지를 고려한 도로녹지 조성 방법	17
[그림 2-4] 서울시 녹지 분포	19
[그림 2-5] 서울시 공원 현황	19
[그림 2-6] 서울시 가로수 수종별 수량	22
[그림 2-7] 서울시 가로수 분포	22
[그림 3-1] 런던시 지원에 의한 소규모 그린인프라 조성 사례	25
[그림 3-2] 런던환경전략에 의한 미세먼지(PM10) 저감 계획	26
[그림 3-3] 맨체스터 도심지역 그린인프라 전략 2015-2025	28
[그림 3-4] 슈투트가르트 그린 유 프로젝트	31
[그림 3-5] 시티트리 설치 사례	32
[그림 3-6] 저층부 벽면녹화와 상층부 광촉매 도로 시공 아파트 예시	34
[그림 3-7] 마포구 그린벤치 설치 사례	35
[그림 4-1] 조사대상지 위치	38
[그림 4-2] 잎 샘플링 방법	41
[그림 4-3] 서울숲 분석대상 수목 위치도 및 사진	42
[그림 4-4] 양재 시민의 숲 분석대상 수목 위치도 및 사진	43
[그림 4-5] 질량을 이용한 미세먼지 흡착량 측정법	44

[그림 4-6] 앞의 단위면적당 미세먼지 흡착량(mg/cm^2)	45
[그림 4-7] 엽면적지수를 적용한 미세먼지 흡착량(g/m^2)	46
[그림 4-8] 수목 개체당 미세먼지 흡착량(g/tree)	48
[그림 4-9] 서울숲, 양재 시민의 숲 공원 내와 도로변의 미세먼지 농도(mg/m^3)	50
[그림 4-10] 수종별 대기오염내성지수(APTI) 측정방법 도식화	54
[그림 4-11] 대기오염내성지수(APTI) 평가 결과	55
[그림 4-12] 수종별 미세먼지 저감 효과	56
[그림 4-13] 미세먼지 저감 도시생활권 수종 제안	57
[그림 4-14] i-Tree 예측 모델링 구조화 알고리즘	59
[그림 4-15] i-Tree Eco 모델과 주요 결과	60
[그림 5-1] 분석에 활용한 미세먼지 측정소	64
[그림 5-2] 서울시 미세먼지 농도 공간 분포 분석 결과	67
[그림 5-3] 서울시 초미세먼지 농도 공간 분포 분석 결과	68
[그림 5-4] 서울시 주요 대단위 녹지 분포	68
[그림 5-5] 서울시 녹지와 미세먼지 분포도 비교	69
[그림 5-6] 서울시 녹지와 연평균 초미세먼지 농도(2014~2017)에 의한 분석 사례지역 선정	70
[그림 5-7] 동대문구 그린인프라 분포 및 토지이용현황	71
[그림 5-8] 영등포구 그린인프라 분포 및 토지이용현황	71
[그림 5-9] 동대문구 그린인프라 연결성 분석 결과	72
[그림 5-10] 영등포구 그린인프라 연결성 분석 결과	73
[그림 5-11] 동대문구 조사대상지(장안동 남부)	74
[그림 5-12] 영등포구 조사대상지(양평동 4, 5가)	74
[그림 5-13] 영등포구 조사대상지(대림동 남부)	74
[그림 5-14] 주거지역 그린인프라 조성	75
[그림 5-15] 상업지역 그린인프라 조성	76

[그림 5-16] 공업지, 주거지 혼재지역 그린인프라 조성	77
[그림 5-17] 대로변, 가로 그린인프라 조성	77
[그림 5-18] 공원녹지 및 가로수 배치 필요지역	78
[그림 5-19] 시민참여형 그린인프라 확대 협력체계(안)	79



01

연구개요

- 1_연구배경 및 목적
- 2_연구내용 및 방법

01 | 연구개요

1_연구배경 및 목적

최근 극심한 미세먼지 발생으로 인하여 야외활동에 제약을 받고 있으며, 미세먼지의 건강 영향에 대한 시민들의 우려가 커지고 있다. 우리나라 주요 도시의 미세먼지 농도는 최근 줄어드는 경향이지만 초미세먼지의 농도는 미세먼지와 비교하여 크게 줄어들지 않고 있다 (박찬열, 2018). 이에 국가 차원에서 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」을 제정하여 미세먼지 비상저감조치의 법적 근거를 마련하는 등 대책을 수립하고 있으며, 서울시에서도 미세먼지를 재난으로 규정하여 배출과 노출을 줄일 수 있도록 비상저감조치 발령 시 차량 미운행, 공해차량 운행제한 등 서울시 차원의 대책을 마련하여 시행하고 있다. 그러나 국내 예방적 차원의 미세먼지 대책 이외에 미세먼지를 줄일 수 있는 다양한 방안이 시도되어야 한다.

이러한 측면에서 미세먼지 저감을 위한 방안 중 하나로 도시 내 공원, 녹지, 수목 등 그린 인프라의 중요성이 높아지고 있다. 도시 내 공원녹지는 기온이 주변보다 상대적으로 낮고 습도가 높아 미세먼지를 빨리 침강시키는 데 효과적이다. 수목의 경우 나뭇잎이 미세먼지를 흡착하는 특성이 있어 침강하는 미세먼지를 흡착하고 외부 유출을 차단하는 기능을 수행한다. 도시 수목은 대기환경문제를 개선할 수 있는 방안 중 하나가 될 수 있지만, 정책적 측면에서는 중요하게 고려하진 않고 있다. 서울시에서는 먼지 먹는 숲, 탄소상쇄 숲, 한강숲 등 그린인프라를 지속적으로 조성하여 왔지만, 미세먼지를 줄이는 것과 연계하여 그린인프라를 조성하는 정책과 관련 연구는 시작단계에 있다.

국립산림과학원(2017)의 분석 결과에 따르면, 1ha의 숲이 연간 168kg의 먼지를 소멸시키며, 나무 한 그루가 연간 에스프레소 1잔 분량인 35.7g의 미세먼지를 흡수한다고 하였으나, 이는 실험실 자료를 해석한 것으로 현장 수목에 대해 실측한 연구는 아직 진행되지 못하였다. 최근 식물종에 따른 미세먼지의 흡착 특성, 도시숲의 미세먼지 저감 기능 등과 관련한 연구가 진행되고 있으나, 실제 현장에서 도시 수목을 대상으로 나뭇잎의 미세먼지

저감 효과를 조사·분석한 연구는 부족한 실정이다.

이 연구에서는 도시 주요 수목의 미세먼지 저감 효과를 파악하기 위하여 서울시 주요 가로수를 대상으로 현장 실측을 통해 수목의 미세먼지 흡착량 분석을 실시하였다. 이를 바탕으로 미세먼지를 효율적으로 줄이기 위한 적정 수종 선정, 수목 배치 방법 등 그린인프라 확대 방안을 제안하고자 한다.

2_연구내용 및 방법

이 연구의 주요 내용은 그린인프라와 미세먼지와 관련된 동향 분석, 그린인프라를 이용한 국내외 대기오염 관리 사례 검토, 그린인프라의 미세먼지 저감 효과 분석, 미세먼지 대응을 위한 그린인프라 확대 방안 제안으로 구분된다.

첫째로 그린인프라의 개념 및 요소, 관련 선행연구, 서울시 현황 등 그린인프라와 미세먼지 관련 동향을 파악하였다. 그린인프라 정의의 다양성을 고려하여 연구에서 사용하고자는 그린인프라의 개념을 정리하였으며, 선행연구를 통해 그린인프라 요소를 설정하였다. 그린인프라와 미세먼지를 주제로 한 문헌 검토를 통해 그린인프라와 미세먼지의 관계를 파악하고자 하였으며, 공원녹지와 가로수를 대상으로 서울시 그린인프라 현황을 검토하였다.

둘째, 그린인프라를 이용한 국내외 대기오염 관리 사례를 조사 및 분석하였다. 국외에서 대기오염 저감을 위해 수행하였던 정책 및 조성사례를 조사하고, 국내 그린인프라 조성 사례 검토를 통해 미세먼지 대응 그린인프라 확대 방안 제안에 참고할 수 있도록 하였다.

셋째, 그린인프라의 미세먼지 저감 효과를 분석하였다.¹⁾ 서울시 주요 가로수종 통계를 바탕으로 5개 수종을 선정하였으며, 2개 공원의 현장조사를 통해 공원수 및 도로변 가로수의 미세먼지 흡착량을 측정하였다. 또한 수종별 대기오염 내성 효과 분석을 위해 대기

1) 그린인프라의 미세먼지 저감 효과 분석은 서울시립대 환경원예학과 우수영 교수 연구실에서 수행하였음

오염물질 내성평가(APTI)를 수행하여 미세먼지 제거 효율이 우수한 수종을 도출하고자 하였다. 추가적으로 도시숲의 구조와 오염물질 흡수 가능성을 설명하기 위해 미국에서 사용되는 i-Tree모델의 국내 적용가능성을 검토하였다.

넷째, 미세먼지 농도가 높으면서도 상대적으로 그린인프라가 적은 지역을 대상으로 서울시 공원과 가로수를 이용한 그린인프라 연결성 분석을 수행하여 그린인프라 연결성이 낮은 지역을 파악하고, 현장조사를 실시하였다. 현장의 경관기능 검토를 바탕으로 미세먼지 흡착 효과가 높은 수종을 적용하여 유형별 그린인프라의 조성 방식을 제안하였다.

그린인프라와 미세먼지 관련 동향 분석	
• 그린인프라의 개념 및 요소 범위 설정 • 그린인프라의 미세먼지 저감 관련 선행연구 검토 • 서울시 그린인프라 현황 분석	
그린인프라를 이용한 국내외 대기오염 관리 사례 검토	
• 해외 대기오염 관리를 위한 그린인프라 정책과 조성 사례 • 국내 그린인프라 조성 사례	
그린인프라의 미세먼지 저감 효과 분석	
수종별 미세먼지 흡착 효과 분석	수종별 대기오염 내성 효과 분석
• 주요 가로수 현황 분석 및 대상지 선정 • 주요 가로수의 미세먼지 흡착·흡수 특성 분석	• 수목의 대기오염물질 내성평가(APTI) 수행 • i-Tree 모델 적용가능성 검토
미세먼지 대응 그린인프라 확대 방안 제안	
• 서울시 공원·가로수를 이용한 연결성 분석 • 그린인프라 확대 배치 제안을 위한 경관 기능 분석 • 지역별 그린인프라 조성 방식 제안	

[그림 1-1] 연구흐름도

02

그린인프라와 미세먼지

- 1_그린인프라 개념 및 요소
- 2_선행연구 검토
- 3_서울시 그린인프라 현황

02 | 그린인프라와 미세먼지

1_그린인프라 개념 및 요소

1) 그린인프라의 개념

그린 인프라스트럭처(Green Infrastructure, 이하 그린인프라)의 개념과 정의는 지속적으로 논의되고 있으며, 현재에도 다양한 연구를 통해 발전하고 있다. 그린인프라는 ‘Green’과 ‘Infrastructure’가 결합된 것으로서, 공식화되어 사용된 최초의 시점은 1999년 5월 미국의 지속가능한 발전에 관한 대통령 위원회(President’s Council on Sustainable Development)의 보고서²⁾에서 지속가능한 발전을 위한 지역개발의 실천전략 중 하나로 제시하면서부터이다(국립환경과학원, 2016). 그린인프라와 관련한 정의와 의미를 고찰한 연구를 살펴보면 국내뿐만 아니라 외국에서도 연구의 목적이나 관점에 따라 개념과 범위가 조금씩 상이하다. 따라서 이 연구에서는 다양한 국내·외 그린인프라의 개념과 정의를 문헌연구를 통해 종합 정리하고, 이 연구에서 활용하는 그린인프라의 범위를 설정하였다.

1999년 미국의 정책 보고서에서는 그린인프라를 ‘지속가능한 생명과 삶의 질을 증진시키는 다양한 주요 서비스인 오픈 스페이스, 대기권역, 유역, 산림, 야생서식처, 공원, 자연지역 등의 네트워크’라고 정의하고, 이러한 편익을 얻기 위해서는 많은 커뮤니티가 자연자원과 어메니티를 보존, 보호, 회복하는 접근이 필요하다고 하였다. 이는 그린인프라가 주는 이익을 지속적으로 얻기 위해서는 자연의 상호 연결로 보존, 보호가 필요함을 강조한 개념이다. 이를 기초로 하여 가장 널리 통용되는 정의는 Benedict and MacMahon(2006)이 집필한 저서³⁾에서 제시한 개념으로, 그린인프라를 ‘자연생태계의 가치와 기능을 보존하고 깨끗한 공기와 물을 유지하여 사람과 야생생물에게 편익을 제공하는 오픈스페이스와 자연지역의 상호 연결된 네트워크’로 정의하면서 넓은 범위의 그린인프라로 발전시켰다. 한편 유럽에서는 그린인프라를 2020 생물다양성 전략을 달성하기 위한 전략 중 하나로 보

²⁾ The president’s Council on Sustainable Development, 1999, *Towards a Sustainable America*.

³⁾ Benedict, M. A. and McMahon E. T., 2006, *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*, Island press.

며, ‘생물다양성을 보호하고 생태계서비스를 제공하도록 설계·관리되는 자연에 가까운 지역과 높은 수준의 자연지역의 전략적으로 계획된 네트워크’로 정의하고 있다. 이는 기존의 녹지, 생태 네트워크 개념이 확장된 것으로, 자연 그대로의 녹색 공간을 강조하는 개념이라고 할 수 있다. 반면 미국 환경청(US EPA)에서는 그린인프라가 우수를 관리하는 비용 효율적이고 탄력적인 접근방식으로서 일반 배수 및 수처리 시스템의 기존 인프라⁴⁾와 대비되는 개념으로 환경, 사회, 경제적 이익을 제공하면서 친환경적으로 우수를 처리하는 방식으로 설명한다. 이는 우수, 수질, 관거 관리 등과 같이 물관리 및 도시홍수와 관련한 그린인프라의 기술적인 측면에 접근한 것으로, 생태적인 측면과 연결성을 강조하는 유럽의 개념과는 일부 차이가 있다. 이러한 다양한 정의의 공통점은 그린인프라의 목적이 인간에게 서비스를 지속적으로 제공하면서도 인간과 자연의 삶이 공존할 수 있도록 하는 것이며, 관련한 인프라 간의 네트워크를 강조한다는 것이다.

[표 2-1] 그린인프라스트럭처의 해외 정의 비교

정의	참고자료
지속가능한 생명과 삶의 질을 증진시키는 다양한 주요 서비스인 오픈스페이스, 대기권역, 유역, 산림, 야생서식처, 공원, 자연지역 등의 네트워크	The president's Council on Sustainable Development(1999)
자연생태계의 가치와 기능을 보존하고 깨끗한 공기와 물을 유지하여 사람과 야생생물에게 편익을 제공하는 오픈스페이스와 자연지역의 상호 연결된 네트워크	Benedict and MacMahon(2006)
생물다양성을 보호하고 생태계서비스를 제공하도록 설계·관리되는 자연에 가까운 지역과 높은 수준의 자연지역의 전략적으로 계획된 네트워크	European Commission(2013)
자연적인 물 순환과정 및 이와 비슷하게 만드는 시스템 또는 기술	US EPA (https://www.epa.gov/)

4) 미국 환경청에서는 일반적인 배수를 수행하는 단일 목적의 기존 시스템이나 시설을 회색 우수 인프라(Gray stormwater infrastructure)로 설명함

5) 미국 환경청의 그린인프라 기술은 Rainwater Harvesting, Rain Garden, Planter Boxes, Bioswales, Permeable Pavements, Green street and alleys, green parking, green roofs, urban tree canopy, land conservation 등임

국내에서는 그린인프라의 개념에 대해 위의 내용을 복합적으로 활용하고 있다. 환경부(2009)에서는 한국형 그린인프라를 ‘기후변화에 대한 적응을 위해 전략적으로 계획·관리된 네트워크로서 도시 및 인접지역 생태계의 가치와 기능을 보존하고 나아가 인간에게 이익을 가져다주며 물의 순환과정을 이용하고 향상시키기 위한 접근 기반시설’로 도시 물순환 체계를 강조한 개념으로 정의하였다. 김승현(2012)은 녹색기반시설에 대해 ‘산림, 하천, 습지 등 자연지역과 공원, 녹지, 정원, 경작지 등의 오픈스페이스, 그리고 생태 네트워크, 바람길 등 계획시스템까지도 포함할 수 있는 폭넓은 녹지체계’로 정의하였으며, 강우유출 저감의 수단으로 옥상녹화, 옥상저류, 생태저류지 등을 제시함으로써 그린인프라의 기술적인 측면을 강조하였다. 박재철 외(2012)는 녹색 인프라가 기술적인 측면에서 수질 보전에 활용될 수 있다고 하였으며, 강정은 외(2014)는 도시 물순환 개선을 위한 그린인프라의 활용을 제시하였다. 이는 미국 환경청의 개념과 동일하게 그린 인프라의 기술적 측면을 강조한 것으로서, 대부분 물관리에 집중한 연구가 주를 이루고 있다.

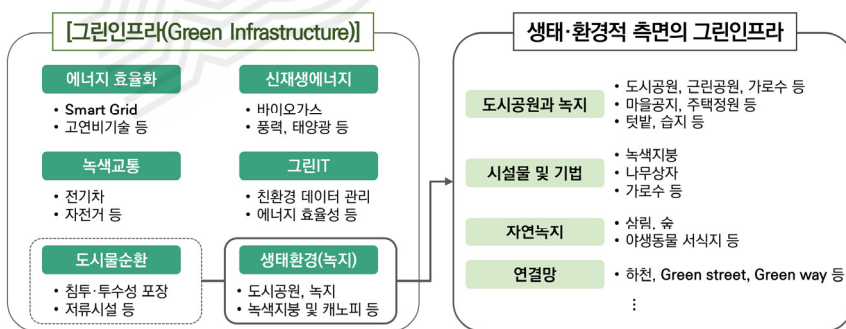
양병이(2011)는 그린인프라를 국가의 자연적 생명지원시스템(natural life support system)으로서 ‘자연생태계의 가치와 기능을 보전하고 인류에게 이익을 제공하는 녹지공간의 상호 연결된 네트워크’로 정의하였다. 이는 자연지역과 공원, 그린웨이 등이 네트워크를 이루는 것을 말하며, 기존 인프라와 조화시켜 실행하는 스마트 보전(smart conservation)이라고 하였다. 강정은 외(2014)는 ‘자연·생태적 요소의 구조와 기능을 최대한 활용하여 인간 삶의 영위와 질적 향상을 도모할 수 있는 도시공간 요소이자 시스템’으로 정의하고, 기후변화에 적응할 수 있는 도시구현 방법으로 그린인프라의 중요성을 강조하였다. 국립환경과학원(2016)은 도시 열조절 기능을 수행하는 그린인프라로서 생태계 기능회복과 자연자원과 지역시스템의 보전에 초점을 맞추고, 그린인프라의 기후변화 대응 기능을 확인하고자 하였다. 이는 그린인프라를 자연·생태적인 시스템으로서 지속적으로 인간과 공존하면서 이익을 제공하는 것으로 보며, 자연·생태적 관점에서 그린 인프라의 요소는 주로 공원, 녹지, 산림 등의 녹지공간요소를 말한다.

이 연구에서는 그린인프라 개념의 발전과 다양한 정의를 바탕으로 연구 목적에 맞게 그린인프라의 개념을 한정하였다. ‘그린’은 자연지역, 공원, 녹지, 산림 등 녹지공간요소를 포함하는 생태·환경적인 요소이고, 그린인프라는 ‘자연환경과 생태계를 보전하고 이익을 제

공하는 녹지공간요소 간의 네트워크'로 보았다. 즉, 자연지역, 공원, 산림, 가로수 등의 녹지공간요소에 해당되는 모든 요소 간의 연결성이 이루어지는 것을 말하며, 이를 위한 관리, 배치 등의 기술적인 기법도 포함한다.

2) 그린인프라 요소

그린인프라의 일반적 정의에 따른 관련 요소로는 우수관리 등 물순환에 대한 측면과 자연·생태적 녹지공간이 대표적이라고 할 수 있다. 미국 환경청의 그린인프라 개념에 의하면 도시숲, 수목과 같은 전통적 그린인프라 요소뿐 아니라 옥상녹화, 빗물정원, 식생수로, 투수성 도로 등 저영향개발⁶⁾을 위한 기법들이 요소에 포함된다고 할 수 있다(강정은, 2014). 기획재정부(2009)는 2000년대 녹색성장 기조를 따라 인프라 기반을 하이브리드 자동차, 수소연료 전지, 자전거 등 저탄소 녹색 교통, 태양열, 지열, 풍력 등 신재생에너지, 자원의 재활용 등에 초점을 맞추었다. 이외 환경을 파괴하지 않고 전력 소모를 줄이면 서도 에너지효율성이 높은 그린IT 기술도 그린인프라에 해당한다고 하였다. 이 연구에서 는 미세먼지 저감 기능에 초점을 맞추고자 일부 도시물순환과 연계하여 그린인프라의 범 위를 설정하였다.



[그림 2-1] 그린인프라의 범위

6) 저영향개발(Low Impact Development; LID)이란 소규모의 분산형 자연친화적인 빗물관리기법들을 활용해 도시개발에 따른 물순환에 대한 부정적 영향을 최소화하고자 하는 토지이용 방식(강정은 외, 2014)

생태·환경적인 그린인프라의 주요 요소는 근린공원, 어린이공원 등의 도시공원과 마을공지, 수변완충녹지, 주거지역의 녹지 등 도시녹지, 저류·우수시설 등 시설물 또는 관련 기법, 습지, 유수지, 서식지 등 자연녹지 공간, 가로수 등이다. 그린인프라 요소는 허브와 링크로 크게 구분하여 네트워크를 구성한다.

[표 2-2] 개념적 측면의 그린인프라 요소

정의	대분류	소분류
공원녹지 (허브)	도시공원과 정원	도시공원, 근린공원, 어린이공원, 공공정원, 커뮤니티 정원 등
	도시녹지 공간	주거지 녹지, 상업녹지, 주택정원, 마을공지, 운동장 및 레크리에이션 공간, 가로녹지, 완충녹지 등
	기타녹지 공간	텃밭, 도시농장, 묘지, 빗물정원, 식생수로 등
	시설물 및 기법	홍수 및 우수관리시설(저류지, 유수지 등), 녹색지붕, 나무상자, 투수성 포장, 우수저장통 등
	자연녹지 공간	홍수터, 습지, 삼림, 숲, 보전지, 목초지, 야생동물 서식지 등
연결망 (링크)	하천, 녹색거리, 그린벨트, 그린웨이, 경관연결지, 보존벨트, 가로수 등	

자료: 환경부, 2009, 기후변화 적응을 위한 한국형 그린인프라 구축방안 연구. p.10;
강정은 외, 2014, “도시물순환 개선을 위한 그린인프라 계획 프레임워크 개발 및 시범 적용”,
「환경정책연구」, p.48 보완 및 재구성

이 연구에서는 그린인프라 요소 중에서도 미세먼지 저감 효과 분석을 위해 도시공원과 가로수를 중심으로 검토하였다. 도시공원은 도시 내 숲 역할을 함으로써 그린인프라의 허브로 기능하며, 가로수는 이러한 공원 간 연결을 수행하는 역할로 보았다. 국립산림과학원(2017)에 따르면 도시숲⁷⁾이 PM₁₀은 25.6%, PM_{2.5}는 40.9%까지 저감할 수 있다고 하였다. 특히 도로를 따라 조성된 가로수는 흡착작용을 통해 분진의 확산을 막아주거나 걸러주고, 도로 양쪽에 조성된 경우에는 미세먼지의 확산을 막고 흡수하는 데 크게 기여할 수 있다(허의염 외, 2017). 우수관리시설, 빗물정원 등도 점 형태로서 그린인프라의 주요한 요소이지만 기능적 측면이 강하므로 이 연구의 주된 관심 사안인 미세먼지 저감 효과 범위에서 제외하였다.

⁷⁾ 국립산림과학원(2017)에서는 도시숲으로 언급하였으나, 미세먼지 측정 사례지역은 서울시 홍릉을 대상으로 함

2_선행연구 검토

1) 연구동향

공원녹지, 수목 등 그린인프라와 미세먼지 관련 연구는 자동차 배기가스, 공장 매연 등 대기오염 문제가 이슈가 되기 시작한 1970년대부터 지속적으로 이루어져 왔으며, 관심분야가 바뀌면서 핵심 주제와 용어는 변화하여 왔으나 대기오염을 저감하는 수단으로서의 그린인프라 역할은 지속적으로 연구가 수행된 분야이다. 기존의 연구는 대기오염이 식물 생태에 미치는 영향(임수길 외, 1993), 수목의 대기오염 정화기능(김정규 외, 1996; 조현길 외, 2001; 주현수 외, 2005), 주요 수종의 대기오염에 대한 내성(우수영 외, 2004) 등이 주제로 다루어졌는데, 연구 대상 대기오염물질은 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂) 등 대부분 가스상 물질에 초점이 맞추어져 있다.

이후 2000년대 후반부터 저탄소 녹색성장 기조에 맞추어 수목의 이산화탄소 흡수량 산정(박은진, 2010; 오창영 외, 2014) 등의 연구가 진행되었으며, 기후변화 대응으로서 그린인프라도 주목받기 시작하였다. 기후변화 대응으로서의 그린인프라 관련 연구는 현재까지 연구가 지속되고 있으며, 주로 수계관리, 침투, 우수관리 등 도시 물순환(장수환, 2009; 강정은 외, 2014; 김승현 외, 2015), 도시 열조절 등 미기후 조절, 재해 저감 수단으로서의 역할이 강조되었다. 최근에는 미세먼지, 초미세먼지 농도 증가로 인한 부정적 영향에 대해 여론이 형성되기 시작하여 쾌적한 공기에 대한 시민 요구 증가, 초미세먼지 환경기준의 신설 등의 이슈가 대두되면서 PM₁₀, PM_{2.5}의 미세먼지, 초미세먼지 개념⁸⁾으로 접근한 연구가 많이 진행되고 있다. 미세먼지 문제 해결에 그린인프라를 접목시키고자 하는 연구로 도시녹지계획, 도시숲 조성 등 정책적 측면의 연구(김용국 외, 2012; 윤상준, 2016), 그린인프라의 환경조절 기능(황희재 외, 2012), 미세먼지 저감에 효율적인 수목 배치 및 식재 기법(허희염 외, 2017), 미세먼지 저감량 분석(황광일 외, 2018) 같은 실증적 연구가 진행되었다.

8) 지름이 10 μ m보다 작은 먼지는 미세먼지(PM₁₀), 지름이 2.5 μ m보다 작은 먼지는 초미세먼지(PM_{2.5})로 지칭함

2) 그린인프라와 미세먼지 선행연구

선행연구는 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂) 등 가스상 물질과 미세먼지, 초미세먼지의 입자상 물질에 대한 그린인프라의 역할과 저감 효과를 주제로 한 실증적 연구 위주로 검토하였다.

조현길·안태원(2001)은 동일 흉고직경 하에서 은행나무, 느티나무, 단풍나무인 낙엽수가 소나무, 잣나무의 상록수보다 CO₂는 1.7배, SO₂와 NO₂는 2.6배 더 흡수하고, 직경이 클수록 그 효과의 차이가 크게 나타남을 확인하였다. 낙엽수 단위엽면적당 광합성능과 엽면적이 상록수보다 큰 것을 원인으로 보았으며, 대기정화 측면만을 고려하여 식재수종은 은행나무, 느티나무 등을 제안하였다.

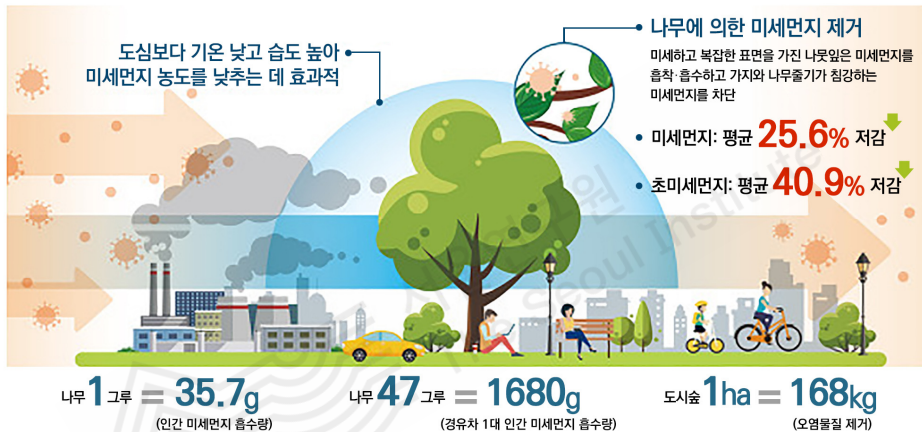
김태선(2003)은 완충녹지의 이산화질소 농도를 분석한 결과, 도로변은 49.8-60.8ppb, 단지 내부로 20m 떨어진 지점은 40.9-56.6ppb로 나타나 도로변보다 아파트 단지의 농도가 낮았으며, 완충녹지 구조는 활엽수를 중심으로 다층구조를 이루는 식생을 활용하는 것이 농도 저감에 효과가 있음을 밝혔다.

주현수·김석철(2009)은 근린공원 녹지의 대기환경에 미치는 영향을 알아보기 위해 질소산화물과 황산화물에 대해 대기환경영향평가 모델링을 수행하였다. 결과로 도시 근린공원의 수목은 자체적으로 오염물질을 흡수 제거하여 대기질을 개선시키는 기능이 크다고는 볼 수 없으나, 상대적으로 친환경적인 토지이용형태를 유지하여 대기환경 악화를 억제하는 효과가 있음을 확인하였다.

황희재(2012)는 나뭇잎 형상에 따른 매연 제거 특성 분석을 위해 가로수로 주로 사용되는 소나무, 주목, 플라타너스, 느티나무, 은행나무를 대상으로 분석한 결과, 매연 나노입자 제거특성이 가장 좋은 나무는 소나무, 주목, 플라타너스, 느티나무, 은행나무 순이라고 하였다.

허희염·김진오(2017)는 미세먼지가 심각한 중국 베이징시를 대상으로 수행된 녹화계획 사례를 선별하여 분석하고, 자동차 공장, 아파트단지에서 미세먼지 저감에 효과적인 녹지계획 방안을 제안하였다.

국립산림과학원(2016)에서는 1ha의 숲은 연간 총 168kg에 달하는 미세먼지 등 대기오염 물질(이산화황, 이산화질소, 오존 포함)을 흡수하는 효과가 있다고 하였다. 국립산림과학원의 2017년 연구에서도 홍릉숲 3개 지점(숲 경계, 내부, 중심)과 숲에서 2km 떨어진 도심에서 부유먼지 및 미세먼지 농도를 측정하여 비교·분석한 결과, 미세먼지는 도심 평균 $60.2\mu\text{g}/\text{m}^3$, 숲 경계 $40.6\mu\text{g}/\text{m}^3$, 숲 내부 $51.2\mu\text{g}/\text{m}^3$, 숲 중심 $42.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 도심 대비 도시숲의 농도가 평균 25.6% 낮고, 초미세먼지는 도심 평균 $23.5\mu\text{g}/\text{m}^3$, 숲 경계 $13.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, 숲 내부 $14.8\mu\text{g}/\text{m}^3$, 숲 중심은 $13.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 도심 대비 도시숲의 농도가 평균 40.9% 낮음을 확인하였다.



[그림 2-2] 국립산림과학원(2016)의 수목 미세먼지 흡수효과 연구 결과

자료: <http://www.forest.go.kr/>(산림청 홈페이지)

해외에서도 그린인프라가 미세먼지 저감에 효과가 있다는 연구가 수행되었다. Nowak D. J. et al.(2013)은 미국 10개 도시수목의 초미세먼지 저감량 분석을 실시하여 수목에 의해 매년 제거되는 미세먼지 총량은 시러큐스의 4.7톤에서 애틀랜타 64.5톤까지 다양하게 나타나며, 1년간 1m²당 미세먼지 저감량은 필라델피아의 0.17g에서 애틀랜타 0.36g까지 나타났다.

중국에서도 미세먼지가 심각한 사회적 문제로 대두되었으며, 특히 초미세먼지에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. Xinxiao Yu(2018)는 베이징시를 대상으로 수목별 초미세먼지의 흡착, 차단 기능 수준을 검토한 결과 초미세먼지 저감능력이 높은 유형은 혼효림이며,

다음으로 활엽수, 침엽수, 관목류, 초본류가 효과가 있다고 하였다.

선행연구 검토 결과 도시숲, 수목, 공원녹지 등은 미세먼지 저감에 효과가 있고, 이들은 수종, 배치, 규모 등의 조건과 외부 영향에 따라 효과의 정도에 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 미세먼지 저감과 그린인프라의 중요성을 강조한 도시녹지계획의 방향성 제시 등과 같은 연구가 주를 이루고, 실제 환경조건하에서 그린인프라의 미세먼지, 초미세먼지 저감에 대해 정량적으로 분석한 연구는 많지 않다.

3) 미세먼지 저감 그린인프라 요소 검토

미세먼지 저감에 효과적인 그린인프라 확대 배치 방안의 제안을 위해 앞서 제시한 연구에서 그린인프라의 개념과 범위를 검토하였으며, 선행연구 검토를 통해 미세먼지 저감에 효과가 있는 그린인프라의 주요 요소와 식재 기법을 정리하였다.

황광일 외(2018)는 도로변에서 발생하는 초미세먼지 농도를 정량적으로 측정하여 완충녹지의 녹량과 식재구조가 초미세먼지 농도 저감에 효과가 있는지를 규명하고, 완충녹지 조성 시 활용할 수 있는 요소를 도출하였다. 조사 결과 녹량 부족형, 관목 부족형, 교목 부족형, 녹량 균형형, 관목 풍부형 순으로 초미세먼지 저감 효과가 높고, 식재구조별로는 교목 1열, 2열, 3열 순으로 초미세먼지 저감 효과가 높았다. 초미세먼지 저감을 위해서는 완충녹지 조성 시 교목을 분산배치하도록 유도하고, 상대적으로 공사비가 경제적인 관목의 식재 비율을 올려 녹피율을 높이고, 수종 선정 시 수관용적이 큰 나무를 선정하여 다층 구조로 식재할 것을 제시하였다.

허희염 외(2017)는 중국의 미세먼지 저감 도시 녹지 정책을 검토하고, 미세먼지 저감에 효율적인 수종과 조성 원칙을 제안하였다. 연구결과에 의하면, 도로녹지의 경우 열악한 대기환경 개선과 소음 저감을 위해 계단식 배치법, 복합 배치법을 활용하고, 주거지역 녹지는 도로와 인접한 부분의 완충녹지 및 녹지대가 필수적이다. 또한 식물배치는 주거지역 방향에 교목·관목·초본 방식으로 밀도 있게 조성해야 하며, 옥상녹화, 벽면녹화 등 입체 녹화가 효과적이다. 공업지역 녹지는 일반 도시녹화 식물보다 저항력을 가진 수종을 선택

하여야 하며, 지피 식물과 활엽교목의 면적 확대를 통해 미립오염물질의 2차 비상을 막으면서도 흡착효과가 뛰어난 교목 위주로 식재하여야 한다.

2018년 6월 진행된 미세먼지 저감을 위한 세미나⁹⁾에서는 교목 2열 가로수+사면형 녹지 구조+다층구조 녹지(관목식재 증가) 식재구조가 가장 효과적이라고 발표하였으며, 교목 배치 시 집중식재보다는 분산식재하는 것이 녹지내 바람통로를 확보해 초미세먼지가 대기중으로 확산하는 것을 도와 농도를 낮춘다고 하였다. 또한 관목층은 정체된 초미세먼지에 대한 필터 역할을 하기 때문에 다층구조로 증가시켜야 한다고 하였다.

미세먼지에 안전한 대구를 위한 그린인프라 확충방안 세미나(2018.07) 발표자료¹⁰⁾에 따르면 미세먼지 저감을 위한 녹지는 양의 문제보다 공기순환을 고려한 디자인과 수종, 식물 선택이 중요하며, 도로변의 경우 지상부터 4m까지의 높이에서 미세먼지 피해가 상대적으로 크고, 바람과 온도의 영향이 낮아 흡착량이 높다고 하였다. 이에 높이를 고려한 수목의 역할을 강조하였으며, 벽면녹화, 수직녹화, 옥상녹화 등 입체적인 녹화 방법을 제안하였다.

Xinxiao Yu(2018)¹¹⁾는 숲에 의해 초미세먼지가 조절되고, 숲이 초미세먼지 흡착에 도움을 줄 수 있다고 하였다. 이에 코리더 숲 최적화 구조와 공원의 수목패치 최적화 구조를 제안하고, 교통량이 많은 지역의 그린벨트형 수목 식재 방법과 공원 수목 식재 방법을 제시하였다.

선행연구 검토를 바탕으로 미세먼지 저감 그린인프라의 주요 요소 및 식재 기법을 정리하였다. 주요 요소는 크게 도로녹지, 주거지 녹지, 공업지 녹지, 가로수, 공원수, 관목으로 나누었다. 녹지와 수목의 배치는 배출원과의 위치, 녹지 조성 위치에 따라 상이하지만, 공통적인 점은 수목과 녹지가 미세먼지 차단과 여과 역할을 한다는 것이고, 미세먼지 저

9) 미세먼지 저감을 위한 신기술·신공법·신소재 세미나의 '도시환경변화 적응형 조경식물 식재기법개발' 발표자료(한봉호 서울시립대 조경학과) 참조(리퍼트 조경뉴스, 2018.6.3.)

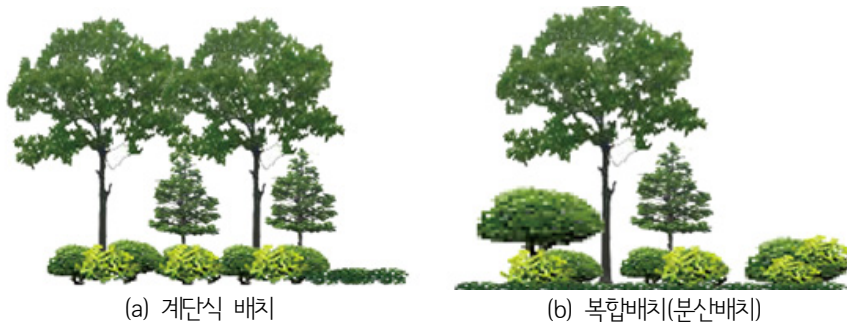
10) '미세먼지 저감 도시 조성 전략 및 기법'(김정곤, 2018) 발표자료 내용 참조

11) 한중 미세먼지 국제 심포지엄 발표자료 'Regulation on PM2.5 and Other Atmospheric Particulate Matter by Forests'(2018.3) 내용 참조

감에 효과를 나타내는 식재 기법의 핵심으로 다층구조 식재를 제안한다는 것이다. 다층구조 식재 시 교목+아교목+관목+초본의 방식은 동일하지만 미세먼지 차단이 필요한 주거지역 같은 경우 배출원으로부터 수직으로 밀식 식재, 계단식 배치가 효과적이며, 미세먼지의 원활한 배출이 필요한 지역은 수목 사이 일정한 틈을 통해 오염된 공기가 도시 외부로 배출되도록 복합 배치가 효과적이라고 할 수 있다([표 2-3], [그림 2-3]).

[표 2-3] 미세먼지 저감 그린인프라의 주요 요소 및 식재 기법

요소	식재기법	출처
도로녹지	• 계단식배치법: 키 큰 교목 후방 식재, 중간 혹은 큰 관목 하부 식재, 앞 부분에 소형 관목 또는 지피식물 식재로 뚜렷한 높이차로 다층식재 • 복합배치법: 키 큰 교목 후방 식재, 앞 부분에 중형관목 위주 군락형태 조합 다층식재로 군락 사이 틈을 만들어 줌	허희염 외 (2017)
	• 도로 중앙부 수목 식재를 통한 미세먼지 여과 • 도로로부터 멀어질수록 수목 밀식 식재(도로로부터 낙엽성 나무, 낙엽성 나무+상록수, 상록수+상록수)를 통한 미세먼지 여과	Xinxiao Yu (2018)
	• 지상에서 4m까지 인간 활동 공간 위주 녹지 조성 • 입체녹화(벽면녹화, 옥상녹화, 수직녹화 등)	김정곤 (2018)
주거지 녹지	• 도로인접 부분 완충녹지대 조성 • 주거지역으로부터 교목-관목-초본 방식으로 다층 밀식 식재 • 옥상녹화, 벽면녹화 등 입체녹화	허희염 외(2017)
공업지 녹지	• 저항력을 가진 수종 식재 • 지피식물과 활엽교목의 면적 확대 • 흡착효과가 뛰어난 교목 위주 오염원 방향으로 수직으로 식재하며, 아교목-관목-잔디 순서로 다층식재(방호림 역할)	허희염 외(2017)
가로수	• 교목 2열 가로수 분산식재+사면형 녹지구조+다층구조 녹지 (관목식재 증가)	한봉호 (2018)
공원수	• 공원 내 활동공간 주변으로부터 안쪽방향으로 수목 밀식 식재(도로로부터 낙엽성 나무, 낙엽성 나무+상록수, 상록수+상록수)를 통한 미세먼지 여과	Xinxiao Yu (2018)
관목	• 관목 풍부형이 효과적 • 교목 대비 관목의 식재비율이 높아야 함 • 수관용적이 큰 나무의 다층구조 식재	황광일 외 (2018)



[그림 2-3] 미세먼지를 고려한 도로녹지 조성 방법

자료: 허희영 외, 2017, 미세먼지 저감을 위한 식재기법 및 도시 녹지계획 방향, 한국조경학회지, 45(5), pp.40~49

3_서울시 그린인프라 현황

이 연구에서는 그린인프라의 요소 중에서도 미세먼지 저감 효과 분석을 위해 현존녹지 및 공원, 가로수를 중심으로 현황을 파악하였다. 항공사진을 이용하여 제작된 소분류 토지피복도를 이용하여 실제 서울시 현존녹지 현황을 파악하고, 공원 및 가로수 현황을 살펴보았다. 공원은 그린인프라의 허브로 기능하며, 가로수는 이러한 공원 간 연결 역할을 수행하는데, 이들은 그린인프라 네트워크를 이루는 대표적인 요소라고 할 수 있다.

1) 현존녹지 및 공원

서울시 현존녹지는 환경부의 1m x 1m 크기의 세분류 토지피복도¹²⁾를 이용하여 파악하였다. 1m 단위의 세분류 토지피복도의 경우 아파트 단지 내 소규모 초지, 건물 주변 조경 녹지 등을 상세히 확인할 수 있는 장점이 있으며, 공원 내 건물 등 녹지가 아닌 면적을 제외하고 실제 현존녹지를 파악할 수 있다. 이를 바탕으로 구별 녹지면적, 시가화지역 대비 녹지지역 비율을 산정하였다.

¹²⁾ 항공사진을 이용하여 지표면의 상태를 반영한 지도로서 일정 기간마다 환경부에서 제작하여 배포함

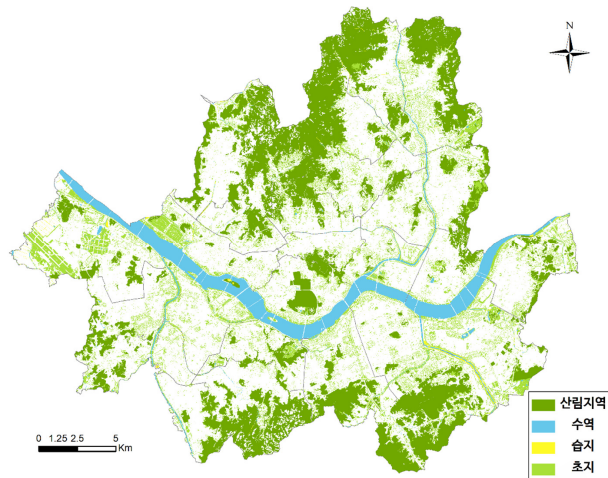
시가화지역 대비 녹지지역 비율은 강북구가 157.3%로 가장 높게 나타났으며, 동대문구가 21.8%로 가장 낮았다. 강북구는 북한산이 위치하고 있어 산림이 크게 분포하지만 상대적으로 시가화 건조지역 면적이 다른 구에 비해 작기 때문에 비율이 상대적으로 높다.

[표 2-4] 서울시 구별 녹지 면적

구분	산림	초지	습지	시가화·건조지역	시가화지역 대비 녹지지역 비율(%)
강북구	12.72	1.07	0.05	8.79	157.3
노원구	14.65	4.47	0.04	13.86	138.2
서초구	18.86	4.74	0.12	17.20	137.9
종로구	10.40	2.04	0.02	9.63	129.3
도봉구	9.00	1.32	0.06	8.72	119.1
관악구	13.05	1.34	0.01	12.46	115.6
은평구	11.64	1.60	0.08	12.77	104.3
성북구	7.59	2.55	0.03	13.46	75.6
서대문구	4.94	1.38	0.04	10.22	62.3
용산구	4.41	2.24	0.00	10.82	61.5
강서구	3.37	7.85	0.35	19.61	59.0
강남구	6.64	5.36	0.41	21.42	58.0
강동구	3.03	3.66	0.11	12.62	53.8
중랑구	3.56	2.18	0.03	10.94	52.8
동작구	2.78	2.17	0.01	10.30	48.2
구로구	3.41	2.22	0.06	12.05	47.2
금천구	2.85	0.85	0.01	8.43	44.1
송파구	2.02	5.90	0.39	19.16	43.3
마포구	0.80	4.21	0.13	13.30	38.7
광진구	2.28	1.55	0.02	10.48	36.7
양천구	2.03	2.20	0.01	11.95	35.4
성동구	0.51	2.29	0.12	10.42	28.1
중구	1.16	0.83	0.00	7.53	26.4
영등포구	0.21	3.57	0.10	15.04	25.9
동대문구	0.98	1.40	0.02	11.05	21.8

주: 산림, 초지, 습지 시가화건조지역의 분류는 환경부 토지피복도 대부분류 항목을 기준으로 구분한 것으로서 하위 세분류 목록은 총 24개로 나뉘어져 있음

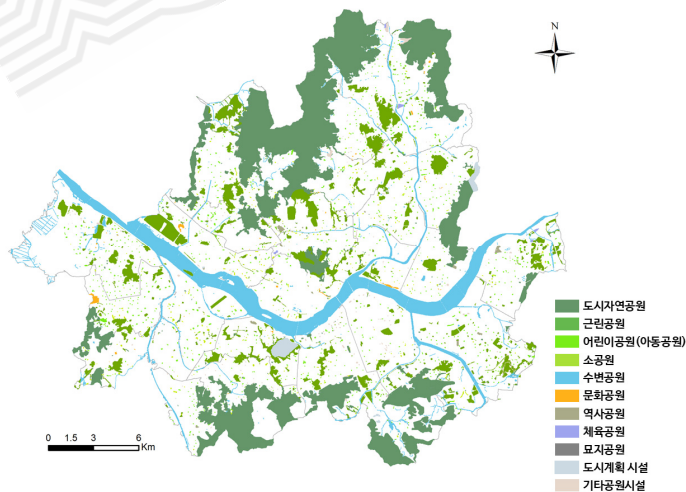
자료: 환경부 토지피복도를 바탕으로 면적 산정



[그림 2-4] 서울시 녹지 분포

자료: [https://egis.me.go.kr/\(환경공간정보서비스\)](https://egis.me.go.kr/(환경공간정보서비스))

서울시 공원 분포를 살펴보면 도시자연공원은 서울시 안에서 식생이 양호한 산지에 위치하며, 남산 도시자연공원을 제외하고는 큰 규모의 도시자연공원이 대부분 서울시 외곽에 분포한다. 도시자연공원은 도시숲으로서 기능하며 도시 내 광역적 그린인프라 네트워크의 거점이라고 할 수 있으나 도시 외곽에 분포하기 때문에 서울시내 근린공원이 이들을 잇는 주요 허브가 된다.



[그림 2-5] 서울시 공원 현황

자료: [http://upis.go.kr/upispweb/\(도시계획통합정보서비스\)](http://upis.go.kr/upispweb/(도시계획통합정보서비스))

서울시 구별 공원 면적은 다음 [표 2-5]와 같다. 서울시 공원 면적은 서초구가 15.87km²로 가장 높게 나타나며, 동대문구가 1.28km²로 가장 낮게 나타났다. 이를 바탕으로 1인당 공원 면적을 산정한 결과, 종로구가 71.4m²로 가장 높았으며, 상대적으로 서울의 도심에 위치하고 산지가 없는 동대문구가 3.4m²로 가장 낮았다.

[표 2-5] 서울시 구별 공원 면적

구분	공원 면적(km ²)	1인당 공원 면적(m ²)
서초구	15.87	35.2
강북구	14.34	43.4
노원구	14.17	24.8
은평구	14.00	28.2
종로구	11.57	71.4
관악구	10.98	20.9
도봉구	10.08	28.8
성북구	8.39	18.2
강남구	6.60	11.5
중랑구	5.21	12.5
서대문구	5.14	15.8
동작구	4.59	11.1
마포구	4.44	11.4
송파구	4.42	6.7
강서구	4.33	7.2
강동구	3.38	7.5
광진구	3.36	9.0
구로구	3.16	7.0
중구	3.13	23.3
영등포구	3.10	7.6
성동구	3.09	10.1
양천구	2.91	6.0
금천구	2.21	8.7
용산구	1.79	7.3
동대문구	1.28	3.4

주: 2018년 1분기 기준 서울 인구 10,089,517명

자료: 서울시(2017), 서울의 공원 현황을 바탕으로 산정

2) 가로수

가로수는 도로 주변에 심는 수목을 말하는 것으로, 서울시 가로수 조성 및 관리 조례에 의거해 “아름다운 경관의 조성, 환경오염 저감과 녹음제공 등 생활·교통환경 개선, 자연생태계의 연결성 유지 등을 위하여 도로의 도로구역 안 또는 그 주변지역에 심는 수목으로서 도로의 구조보전과 안전하고 원활한 도로교통의 확보에 지장이 없도록 식재된 것”으로 정의하고 있다. 서울시 가로수 식재 현황은 [표 2-6]과 같다. 서울시 식재수량은 총 291,043주이며, 강남구가 23,729주로 가장 많고 동작구가 7,110주로 가장 적게 나타난다.

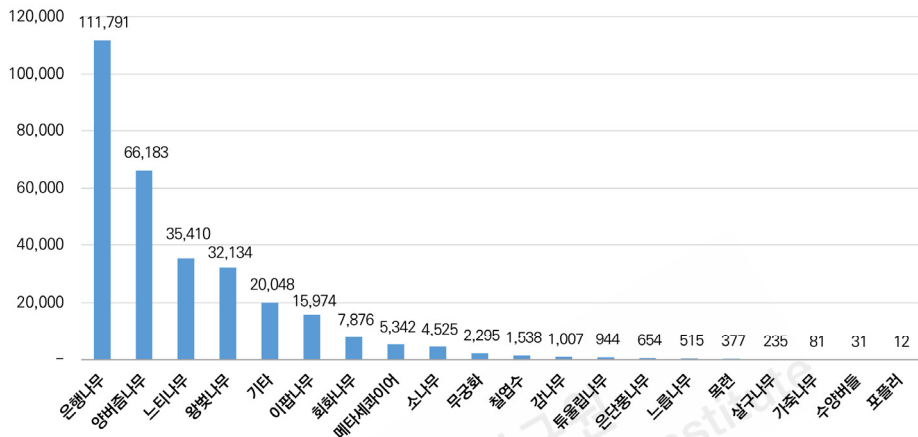
[표 2-6] 서울시 가로수 식재 현황

구분	노선수	수량(주)
종로구	60	8,809
중구	48	8,174
용산구	38	7,851
성동구	35	8,106
광진구	27	7,211
동대문구	43	10,696
종량구	50	8,155
성북구	76	8,192
강북구	30	7,670
도봉구	62	9,453
노원구	50	14,458
은평구	35	11,167
서대문구	39	8,629
마포구	89	14,380
양천구	69	13,470
강서구	41	10,994
구로구	80	11,421
금천구	30	6,697
영등포구	113	18,423
동작구	29	7,110
관악구	26	9,731
서초구	56	17,275
강남구	59	23,729
송파구	97	22,724
강동구	65	16,518
서울시	1,347	291,043

주: 공원녹지사업소, 시설관리공단에서 관리하는 가로수는 포함되어 있지 않음

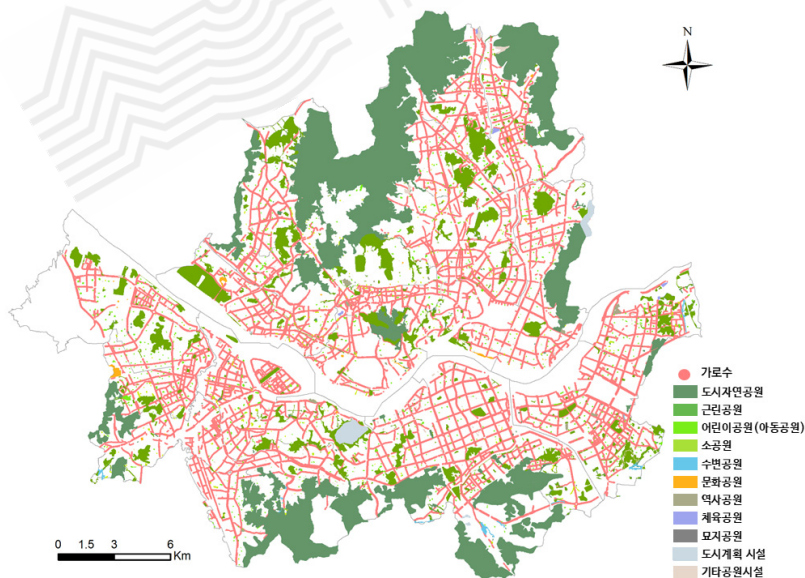
자료: 서울시(2017), 서울시 자치구별 가로수종 종류 및 수량

서울시 전체를 대상으로 식재된 가로수는 총 62종이다. 이 중 서울시에서 연별 통계자료 작성 시 대표적으로 제공하는 주요 가로수 20종과 수량을 다음 [그림 2-6]에 나타내었다. 은행나무가 111,791주, 양버즘나무가 66,183주, 느티나무가 35,410주, 뽕나무가 32,134주로 이들이 서울시 가로수의 약 80%를 차지한다.



[그림 2-6] 서울시 가로수 수종별 수량(주)

자료: 서울시(2017), 서울시 자치구별 가로수종 종류 및 수량



[그림 2-7] 서울시 가로수 분포

자료: <http://data.seoul.go.kr/>(서울열린데이터광장)

03

그린인프라를 이용한 대기오염 관리 사례

- 1_ 해외 그린인프라 정책과 조성 사례
- 2_ 국내 그린인프라 조성 사례

03 | 그린인프라를 이용한 대기오염 관리 사례

1_해외 그린인프라 정책과 조성 사례

1) 영국 런던의 런던플랜과 국립공원도시 환경전략

영국 런던은 도시 내 녹지의 중요성과 녹지의 네트워크화가 주는 이익을 이해하고, 그린인프라 계획을 지속적으로 개발·발전시키고 있다. 그린인프라를 사회 기반시설과 함께 핵심적인 시설 중 하나로 인식하여 도시기본계획인 ‘런던플랜(London Plan)¹³⁾’을 통해 그린인프라 전략과 계획을 세웠다. 그린인프라의 개념을 정책적으로 반영하려는 시도를 하였으며, 지방정부에서 런던플랜을 바탕으로 그린인프라 계획을 수립하고 조성하였다는 점에 서 주목할 만한 사례이다. 런던플랜은 2004년에 첫 공표되었으며, 런던플랜의 프로젝트 중 하나로 그린 그리드(Green Grid) 개념이 도입되었다. 그린 그리드는 오픈스페이스 네트워크를 구축하는 프로젝트로서 해당 지역의 개발 시 오픈스페이스가 필수적으로 고려되어야 한다고 명시하고 있으며¹⁴⁾, 이스트 런던의 도시재생지역에 처음 도입되었다. 그린 그리드 지역은 런던플랜이 지속적으로 수정·보완되면서 런던 전반으로 확산되었으며, 지역별 특성을 고려하여 허브와 연결망을 계획하도록 하고 있다.

도시기본계획에서 지속적으로 그린인프라 개념을 명시하여 지방정부로 하여금 정책에 반영하도록 제안하고, 공간적으로 실행하게 함으로써 런던의 그린인프라 정책은 가시적인 성과를 거둔다.

예로 2008년 런던플랜에서 언급된 포켓파크 계획(Pocket Park Initiative)에 의해 2백만 파운드 기금을 조성하여 런던 26개 지방정부에 100개소의 포켓파크를 조성하였다. 2012년부터 시작하여 2015년에 완료된 사업은 런던에 250,000m² 면적의 새로운 녹지를 공급

13) 런던에 대한 전반적인 계획으로서 향후 20~25년간의 런던 개발을 위해 경제, 환경, 교통, 사회 등 전반의 계획과 전략을 제시함

14) 그린 그리드는 그린인프라의 개념과 정의를 모두 수용하고 있으며, 런던에서 그린인프라의 실행 계획을 위한 명칭으로 해석될 수 있음(윤상준, 2016)

하였다.¹⁵⁾ 포켓파크는 테니스 코트 크기의 작은 공원으로 도로 주변, 화단, 산책로 등 소규모로 다양한 유형이 있다. 빅그린펀드(Big green Fund)를 운영하면서 13개의 연결 오픈스페이스를 조성하였으며, 크로스 리버 파트너십(Cross River Partnership)을 지원하여 2012년부터 2015년까지 런던 중심부에 빗물정원(rain garden), 벽면녹화(green wall), 옥상녹화(green roof) 등 그린인프라 117개소를 조성하였다(윤상준, 2016).



(a) Derbyshire Street 포켓파크



(b) Morry Levy 포켓파크



(c) Vauxhall 빗물정원



(d) Victoria red carnation hotel 벽면녹화

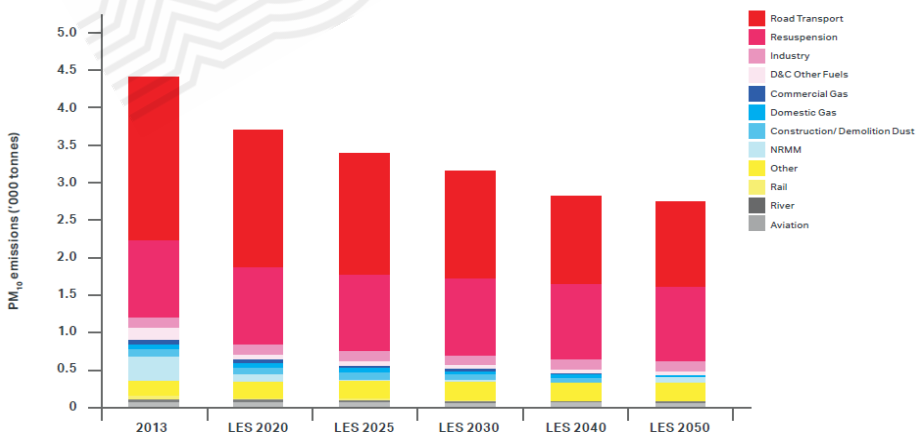
[그림 3-1] 런던시 지원에 의한 소규모 그린인프라 조성 사례

자료: <https://www.london.gov.uk/what-we-do/environment/parks-green-spaces-and-biodiversity/pocket-parks-map>(런던 포켓파크맵); Cross River Partnership, 2016, Capital City.

¹⁵⁾ <https://www.london.gov.uk/press-releases-5639>

런던의 그린인프라와 연계한 계획 및 정책들은 그린인프라의 네트워크를 이루는 것뿐만 아니라 물리적인 환경 개선, 삶의 질 상승, 대기질 개선, 생물다양성 증진, 사회적 비용 절감 등 다양한 이익을 준다.

런던플랜 기조에 맞추어 시에서는 대기오염과 기후변화 등 다양한 환경 문제에 대처하기 위하여 세계 최초의 국가적 공원 도시(National Park City)가 되는 환경전략(London Environmental Strategy)을 2017년 8월에 발표하였다. 2050년까지 세계에서 가장 좋은 공기질로 개선할 수 있도록 미세먼지 38%, 초미세먼지 52%를 줄이고, 도시면적의 50%를 자연 친화 공간으로 조성하는 목표를 세웠다. 특히 도로 교통 분야에서 가장 많은 미세먼지를 저감할 계획을 수립하고 있다([그림 3-2]). 환경계획의 목표는 런던을 더욱 자연 친화적이고, 깨끗하고, 미래에 대비하는 도시로 만들기 위함이다. 목표 달성을 위해 대기질, 자연친화적 기반시설, 기후변화 저감과 에너지, 쓰레기, 기후변화 적응, 소음, 저탄소 순환경제의 여섯 가지 주요 영역으로 구분하여 전략을 수립하였다. 전략 수행을 위해 국립공원에 적용되는 핵심 원칙을 런던시에 적용하여 개발규제, 그린벨트 보호 강화, 옥상정원, 빗물정원, 자연친화시설 조성, 개발지역 내 야생동물 서식지 형성 등 런던만의 그린인프라 구축을 계획하고 있다. 이를 위해 자연친화 도시 기금(Greener City Fund) 약 134억 원을 조성하여 공원녹지 조성, 수목 식재 등의 사업 시에 보조금을 지급하고 있다.



[그림 3-2] 런던환경전략에 의한 미세먼지(PM₁₀) 저감 계획

자료: Mayer of London, 2018, London Environmental Strategy, p.127.

2) 영국 맨체스터의 그린 앤 블루 전략

영국의 맨체스터는 산업혁명 때부터 조성된 도시로 녹지 공간 부족, 생태계 파괴 등 환경 문제뿐만 아니라 도시 전반의 쇠퇴가 나타나고 있었다. 시는 이러한 문제들을 해결하고 도시환경 개선을 위한 방법 중 하나로 도시 내에서의 그린인프라 조성을 선택하였다. 맨체스터는 네트워크화된 녹지공간이 생물다양성, 재해 조절 기능, 시민의 삶의 질 제고 등의 장점이 있음을 이해하고, 이를 도시계획에 접목시켜 국가적, 지역적, 경제적 혜택을 보고자 하였다. 특징적인 점은 대규모 사업보다 소규모 형태의 그린인프라 조성에 초점을 맞추었다는 점이다. 열섬저감, 홍수위험관리 등의 특정 목적을 충족시키기 위해 필요 수요를 조사한 후, 이들의 차이를 분석하여 필요 지역에 그린인프라를 배치하는 기능중심 계획을 수립하였다. 기존의 그린인프라 전략에서 블루인프라를 보완하여 계획을 수립하고, 인프라 간 네트워크를 통해 다양한 도심에서의 이익을 창출하고자 하였다. 맨체스터는 그린인프라 전략을 발전시켜 2025년을 목표로 맨체스터 중심 도시 및 주변지역을 모두 아우르는 그린 및 블루 인프라¹⁶⁾ 전략과 액션플랜¹⁷⁾을 수립하였다. 그린 앤 블루 인프라 전략에서는 도심과 그 주변지역의 그린인프라 현황을 분석하고, 네트워크화를 통해 그린 인프라 간의 연결성을 높여 지역성장, 기후변화 적응, 홍수 관리, 삶의 질 제고, 대기오염 저감, 생물다양성의 증진 등을 도모한다. St John's Gardens, Piccadilly Gardens, Sackville Gardens, Parsonage Gardens, Roman Gardens과 같은 주요 공원녹지를 중심으로 하천, 운하와 같은 블루인프라와의 네트워크를 고려하여 시민의 접근성을 향상시킬 수 있도록 하였으며, 그린인프라 조성 가능성이 있는 기존 부지¹⁸⁾를 선정하여 그린 인프라 조성을 계획하고 있다. 또한 블루인프라를 따라 주변 거주자가 이용할 수 있는 '점심시간(Lunch hour) 녹지'이자 레크리에이션 녹지 공간으로 조성하고, 음식 판매, 전시회, 거리예술, 소매업 등과 같이 지역주민과 기업의 방문 및 수입 창출을 위한 목적으로

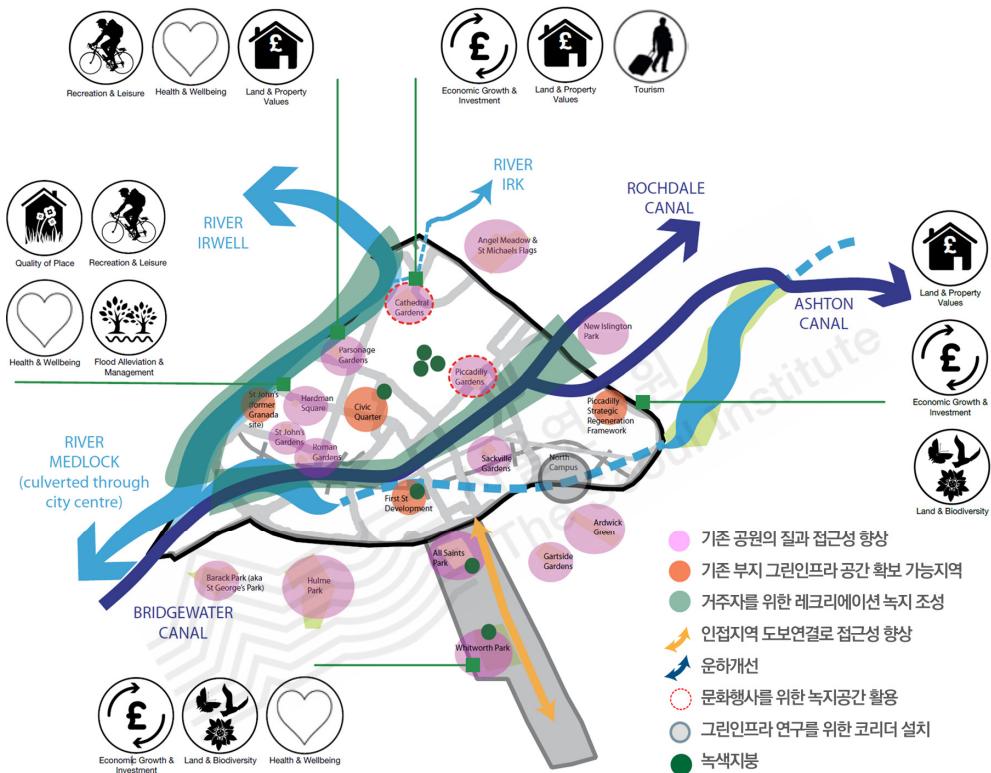
16) 그린 앤 블루 인프라: 오픈스페이스(공원 수림지, 자유롭게 사용되는 야외공간, 자연보호구역, 호수, 가까운 교외지역, 공공장소 등), 연결고리(하천, 수로, 운하, 산책로, 자전거길, 녹지연결로 등), 도시녹지 네트워크(일반인 소유의 정원들, 동네공원, 가로수, 변두리와 옥상정원 등)

17) Manchester city council, 2015, Manchester's Great Outdoors - A Green and Blue Infrastructure Strategy for Manchester 2015-2025.

18) First Street, NOMA, BBC site, Manchester, Science Park, the MMU All Saints Campus 등

는 시내 중심 공원녹지를 지정하여 활용할 수 있도록 계획하였다([그림 3-3] 참조).

도시 대기오염과 관련하여 살펴보면, 맨체스터 그린 앤 블루인프라 전략에서는 그린인프라가 도시 전반의 대기질 향상에 기여하고 이러한 대기질은 시민 건강에 직접적인 연관을 가지므로 그린인프라 네트워크화를 통해 시민 건강과 삶의 질을 높이고자 계획하고 있다.



[그림 3-3] 맨체스터 도심지역 그린인프라 전략 2015-2025

자료: Manchester city council, 2015, Manchester's Great Outdoors - A Green and Blue Infrastructure Strategy for Manchester, pp.30~31.

3) 독일 슈투트가르트의 바람길과 도시숲을 통한 미세먼지 저감

독일 슈투트가르트는 벤츠, 포르쉐, 보쉬의 자동차 본사와 공장이 입지하여 남부 독일을 대표하는 자동차 중심의 공업도시이다. 주위가 언덕으로 둘러싸인 분지형 지역에 자리 잡고 있으며, 유일하게 개방되어 있는 동부에는 라인강 지류인 네카(Neckar)강이 흐른다.

슈투트가르트시는 공업 발달에 따라 지속적으로 인구가 유입되고 자동차가 늘어나 대기오염이 심각한 문제가 되고, 분지라는 지역적 특성 때문에 오염된 공기의 대류순환이 원활하지 않아 대기 환경이 지속적으로 악화되는 상황에 직면하였다.

시에서는 이러한 대기오염 문제를 해결하기 위해 도시의 미기후 관리를 중심으로 한 도시 관리를 수행하였다. 1951년 시청에 도시기후부를 만들어 ‘바람길’에 대한 연구를 시행한 것이 시초이다. 대기오염 물질의 정체는 공기의 흐름이 초속 2m 이하일 때 발생하므로 공기의 수평적 흐름이 중요하다고 판단하였으며, 이에 식물의 호흡으로 생성된 차가운 산소가 상대적으로 뜨거운 도심으로 흘러 도심 내 대기오염 물질을 도시 밖으로 실어나르는 ‘바람길’ 조성을 구상하였다(한봉호, 2008). 바람길 조성을 위해 시에서는 먼저 도시 내 주요 지점의 기온을 측정하였는데, 측정 결과 도시 전체 지역 중 시가지 지역보다는 나무가 있는 숲의 기온이 낮고, 숲 중에서는 구릉지보다 계곡부의 기온이 상대적으로 낮은 것을 확인하였다. 둘째로, 찬 공기의 흐름을 관찰하여 계곡부의 찬 공기가 낮은 지형을 따라 도심으로 유입된 후 시의 북쪽에 위치한 네카강을 따라 빠져나가는 것을 확인하였다(한봉호, 2008). 슈투트가르트는 도시계획에 이러한 바람 순환을 적용하여 도시 내 가장 중요한 문제인 대기오염 문제를 해결하고자 하였다. 도시를 둘러싼 도시 외곽 산림의 찬 공기를 저지대의 중심인 시가지로 유도하기 위해 그린 유 프로젝트(Grünes U)에 따라 쉴로스가든(Schlossgarten)에서 킬레스베르크(Höhenpark Killesberg)까지 총 길이가 8 km에 달하는 U자 모양의 숲(Green U forest)을 조성하였으며, 생태다리, 녹도, 계단 등 다양한 길을 통하여 떨어져 있는 공원들을 시가지와 연결하여 도시 전체의 공기 순환을 유도하였다.¹⁹⁾

슈투트가르트의 그린인프라를 활용한 대기오염 저감은 단순히 바람길에 녹지를 확보하는 것뿐만 아니라 주거, 교통 등 다양한 방면에서 함께 이루어졌다. 바람길을 따라 도심과 외곽의 동서남북 녹지축을 만들고, 길이 300m 왕복 5차선의 도로 지하화로 상부에 녹지를 조성하는 등 도시 규모로 녹지를 네트워크화하였으며, 시민 녹지 접근 향상을 위한 교통 체계 개선, 승용차 이용 제한, 육교 및 지하도 폐쇄, 바람길을 피해 능선을 따라

19) 박찬열, 2018, 도시숲 연구 및 정책의 최근 동향과 시사점, 국제산림정책토크, 59, 국립산림과학원 재경리

터널을 조성하여 도시 환경 질을 개선하는 등의 정책이 함께 이루어졌다. 이외에도 옥상, 도로 등을 녹화하고 자투리 공간을 활용하여 공원녹지, 포켓파크 등을 조성하는 등 복합적인 그린인프라 조성으로 대기오염을 줄이는 데 큰 효과를 거두었다.

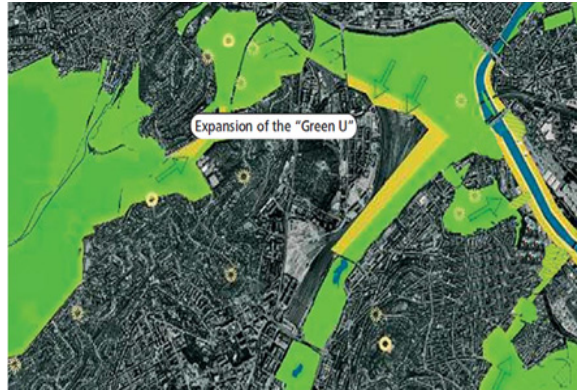
[표 3-1] 독일 슈투트가르트 그린인프라 관련 정책

구분	주요내용
도시 내 녹지 확보	• 도시 전체 녹지비율 50%, 산림지역의 녹지면적 23% 유지 • 개인정원 매입 및 공원 조성 • 공공건물의 옥상녹화 의무화 • 개인건물 옥상녹화 경비 50% 지원 • 도시 내 폐공장, 폐경지, 자투리땅 수목 식재
녹지 접근성 향상	• 시민의 녹지 접근 향상을 위한 교통 체계 개선 • 시민 레크리에이션 장소로 녹지 활용
자연형 하천 복원	• 네카강의 자연형 하천 복원 사업 • 하천 저수보 제거로 단차를 없애 생물 이동 통로로 활용
빗물관리	• 주차장 투수성 포장 • 건물 주변 유수지 조성으로 빗물 습지 조성 • 유수지 소하천 유입을 위해 하천변 차도 제거
도시 녹지 네트워크화	• 동서 녹지축 조성 • 네카강과 도시 중앙부 연결을 위해 150m 폭 녹지 조성(남북 녹지축) • 도로 지하화 및 상부 녹지 조성(길이 300m, 왕복 5차선)
내부 교통 체계 개선	• 도시 내부 승용차 이용 제한 • 대중교통 및 자전거 이용 활성화 • 육교 및 지하도 폐쇄, 횡단보도 증설 • 바람길을 피해 능선을 따라 터널을 조성하여 교통량 감소로 도시 환경 질 개선
에너지 문제 해결 및 생태 주거단지 조성	• 에너지 사용량 30% 저감을 위해 지역난방제 도입 • 태양에너지 등 신재생에너지를 이용하고 옥상녹화, 빗물관리 등 생태 주거단지 조성
건축 폐기물 지역 처리제 실시	• 쓰레기를 난방에 이용하여 처리비용을 줄이고, 매립지 면적 축소 • 건축 폐기물은 주변 도로 공사 시 매립

자료: 한봉호, 2008, 독일 슈투트가르트의 생태도시계획과 관리, 환경과 생명, pp.195~205 내용을 바탕으로 재정리



(a) 그린 유 포레스트



(b) 그린 유 포레스트 확장 계획



(c) 2012년 완공된 Forstamt Stuttgart의 공원



(d) 슈투트가르트 내 그린레일

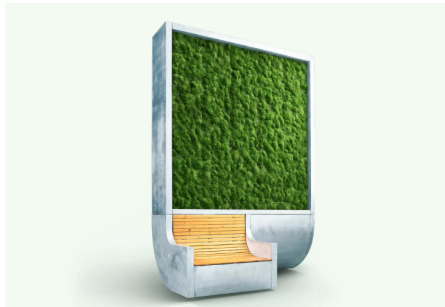
[그림 3-4] 슈투트가르트 그린 유 프로젝트

자료: Stuttgart, 2009, For our environment.; R.S. Deickhoff, The role of urban planning for a green compacts city-the Stuttgart case.; <http://www.stgt.com/parks/homee.htm>(슈투트가르트 공원정보); <https://www.stuttgart.de/>(슈투트가르트 홈페이지)

4) 독일의 그린월을 이용한 미세먼지 흡착

독일의 환경기술기업인 Green City Solution은 사물인터넷 기술을 이용한 미세먼지 저감 그린월(Green Wall) 겸 휴식 공간(벤치)인 '시티트리'를 개발하였다. 시티트리는 폭 3m, 높이 4m, 두께 0.6m의 이끼로 이루어진 미세먼지 및 공기정화 패널로, 땅에 나무를 심는 대신 이끼를 이용하여 수직 녹화함으로써 공기정화를 위한 천연 필터 역할을 한다. 시티트리에는 사물인터넷 기술이 활용되었는데, 벽 양쪽에 대시보드가 있어 실시간으로 이끼 상태를 모니터링할 수 있으며, 토양의 습도, 온도 및 수질을 측정하는 센서를 설치하였다. 또한 오염센서가 있어 주변의 공기 질을 감시하고, 공기를 얼마나 정화하고 있는지 실시간으로 대시보드에 표시된다. 시티트리는 빗물을 모아두는 탱크와 비료 저장소가 내장되어

있어 우수를 재이용하여 자동 관수하는 방식으로 작동하며, 태양열을 이용한 전력 활용으로 친환경적이다. 시티트리에는 하루 약 250g의 먼지를 흡착하고, 연간 240톤의 이산화탄소를 제거할 수 있으며, PM₁₀ 평균 19.7±7%, PM_{2.5} 평균 15±5%, PM 1 평균 11±5%를 저감한다²⁰⁾. 2018년 기준 베를린, 파리, 홍콩 등 14개 도시에 20개의 시티트리가 설치되어 있다.



(a) 시티트리 모델



(b) 프랑스 파리에 설치된 시티트리



(c) 프랑스 파리에 설치된 시티트리 2



(d) 런던에 설치된 시티트리 식재 이끼류

[그림 3-5] 시티트리 설치 사례

자료: <https://greencitysolutions.de/>(그린시티솔루션 홈페이지)

<https://www.dezeen.com/2018/03/21/moss-covered-citytree-bench-combats-urban-pollution-london-uk/>(런던 시티트리 기사)

²⁰⁾ The Institute of Atmospheric Sciences and Climate (CNR-ISAC), Bologna, Italien(2017.11)

2_국내 그린인프라 조성 사례

1) 미세먼지 저감 도시숲 조성 및 녹화 사업²¹⁾

서울시에서는 미세먼지, 도시 열섬화 등 기후변화에 대응하기 위해 2018년 10월 노원구 월계동(산 1번지 일대)에 3,588㎡ 규모의 ‘제1호 민관협력 도시숲’을 조성한다. 사유지인 대상지에 시가 매입을 완료하였으며 지반 정리를 거쳐 설계를 시작하였다. 서울시, 노원구, 사업체, NGO 단체가 함께 조성하는 방식으로 서울시는 부지를 매입하고 사업체에서는 사업비를 제공한다. 조성 및 관리는 NGO 단체가 담당하며, 노원구는 행정적 지원을 맡는다. 노원구 도시숲 조성은 미세먼지 저감을 위해 공공, 민간기업, 민간단체가 함께 진행한 민관협력이 모델이라고 할 수 있다. 서울시는 중장기적으로 이러한 도시숲과 외곽 산림의 연결을 강화하여 바람길을 확보하고, 외곽의 깨끗한 공기를 도심으로 유입시켜 열섬현상을 완화하는 동시에 미세먼지도 저감시킨다는 계획을 세웠다. 이러한 규모의 도시숲 이외에 소규모로 학교, 아파트 단지, 민간건물 등의 옥상정원, 벽면녹화, 자투리공간을 활용한 소규모 공원부터 도시재생사업 중 조성되는 소형 숲이나 공원까지 시민과 함께 조성하는 것을 목표로 하고 있다.

서울주택도시공사에서는 미세먼지 대응을 위해 공사 차원에서 그린인프라를 조성하여 미세먼지를 저감할 수 있도록 계획하였다. 서울주택도시공사의 경우 미세먼지 발생원을 통제하는 기관이 아니기 때문에 공사 차원에서 미세먼지 흡수원을 늘리는 방향으로 대책을 마련하였다. 서울주택도시공사에서 시공한 아파트 층벽의 하층부는 벽면녹화를 실시하고, 상층부에는 선진국형 미세먼지 저감 기술인 광촉매 기술을 이용해 광촉매 도료를 시공하는 것으로 미세먼지 저감 대책을 수립하였다. 또한 공사가 관리하는 아파트 중 약 856개 동 층벽 약 171,200㎡를 대상으로 벽면녹화를 실시하여 미세먼지 저감과 단지 미관 개선을 꾀하고 있다. 광촉매 도료를 아파트 단지 외벽에 시범 시공하여 미세먼지 저감 효과를 모니터링한 후 공사에서 건설 및 관리하는 모든 아파트로 확대할 예정이다.

21) 서울시 보도자료(2018.8.31.), 서울주택도시공사 보도자료(2018.5.17.) 활용



[그림 3-6] 저층부 벽면녹화와 상층부 광촉매 도로 시공 아파트 예시

자료: 서울주택도시공사 보도자료(2018.5.17.)

장기적으로는 아파트단지 주변에 조성하는 녹지에 완충녹지 개념에서 미세먼지 유입 방지를 강화한 수림커튼 개념을 도입하고, 미세먼지 저감숲을 시범 조성하여 주거단지로 유입되는 미세먼지 양을 저감할 계획이다. 이를 위해 위례신도시, 향동지구, 고덕강일지구 완충녹지, 경관녹지 및 근린공원 부지에 미세먼지 저감에 효과적인 침엽수림으로 수림커튼을 조성하여 주거단지로 유입되는 미세먼지를 가능한 한 줄일 예정이다. 위례신도시에 조성되는 근린공원에 미세먼지 저감에 효과적인 침엽수림 및 탄소 저감에 효과적인 활엽수림을 접목한 '미세먼지 저감숲' 2개소를 시범 조성할 계획이다. 이러한 벽면녹화, 수림커튼, 미세먼지 저감숲 조성을 통해 총 녹화면적 202,095 m^2 , 신갈나무 6,392그루(5ha)의 조성효과를 기대할 수 있다.

2) 마포구 미세먼지 저감벤치 및 공기청정숲 조성

마포구는 2018년 10월 마포구청 광장에 미세먼지 저감 기능을 하는 ‘그린벤치’를 시범 설치하였다. 마포구에서 설치한 벤치는 앞서 소개한 독일의 시티트리처럼 한국의 기후와 환경에 맞는 미세먼지 대책의 일환으로 제작한 시설물로서, 가로 2m, 세로 1.5m, 높이 2.5m 크기의 미세먼지 저감 벤치이다. 벤치 외벽에 공기정화식물 324본과 깃털이끼를 식재해 그린월을 만들고, 벤치 안쪽에는 공기정화기를 장착하여 외부 미세먼지를 흡수해 깨끗한 공기로 정화한 후 다시 외부로 내보낸다. 그린벤치는 사물인터넷을 활용한 자동관리 운영 방식으로 레이저 센서로 주변 공기 질을 확인해 미세먼지 농도가 높은 환경(PM2.5 $36\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상, PM10 $81\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상)이 되면 자동으로 공기정화 기능이 작동된다. 운영에 필요한 전력은 100W 태양광 패널로 조달하고, 빗물을 벤치 아래쪽 공간에 저장하여 사용한다. 그린벤치는 하루 동안 $41,472\text{m}^3$ 의 공기를 직접 정화하며, 공기정화 식물과 함께 나무 105그루의 작은 숲과 같은 정화효과를 낸다.

또한 마포구는 공기청정숲 조성 사업을 실시한다. 2018년부터 2022년까지 수목 100만 그루 심기를 통해 마포구 628개소에 공기청정숲($447,223\text{m}^3$)을 조성하는 것을 목표로 하였으며, 이 사업을 통해 미세먼지 약 11.2톤, 이산화탄소 약 308.4톤의 저감 효과를 기대하고 있다.



[그림 3-7] 마포구 그린벤치 설치 사례

자료: <http://www.mapo.go.kr/>(마포구청 홈페이지)

데일리환경 보도자료, 2018.10.01., “사물인터넷 미세먼지 저감 벤치 공간 설치한 마포구청”

04

그린인프라의 미세먼지 저감 효과 분석

- 1_수종별 미세먼지 흡착 효과 분석
- 2_수종별 대기오염 내성 효과 분석
- 3_종합 및 시사점

04 | 그린인프라의 미세먼지 저감 효과 분석

1_수종별 미세먼지 흡착 효과 분석

1) 분석 대상

(1) 조사대상지 및 수종 선정

이 연구에서는 도시에서 주로 활용되는 가로수종의 미세먼지 흡착 효과를 파악하고자 서울시 주요 가로수목을 대상으로 미세먼지 흡착 효과를 분석하고자 하였다. 이에 조사대상지와 분석 대상 수목을 선정하고, 현장조사를 통해 미세먼지 흡착량을 측정하였다.

조사대상지는 최근 5년간 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 농도가 서울시 평균 정도를 보이는 지역인 성동구와 서초구로 한정하였으며, 성동구에서는 서울숲, 서초구에서는 양재 시민의 숲을 선정하였다. 조사는 차량통행이 많은 도로변 가로수와 공원 내 수목으로 구분²²⁾하여 실시하였다.



[그림 4-1] 조사대상지 위치

자료: <http://parks.seoul.go.kr/>(서울의 산과 공원 홈페이지)

22) 공원 도로변과 공원 내는 위치가 같더라도 주변상황에 따라 미세먼지 배출량과 원인이 다를 수 있으므로 미세먼지 흡착량이 상이할 것으로 판단하였으며, 다양한 수목의 위치를 고려한 미세먼지 흡착 효과 분석을 위해서 공원과 도로변의 수목을 모두 측정하였음

[표 4-1] 최근 5년간 미세먼지 농도(2013~2017)

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	PM10 농도	PM2.5 농도
서울시 평균	45.4	24.6
성동구	47.4	24.4
서초구	47.8	24.1

자료: <http://cleanair.seoul.go.kr/>(서울시 대기환경정보시스템)

분석대상 수종으로 서울시 가로수 현황을 바탕으로 서울시 내 식재수량이 가장 많은 수종 중 낙엽활엽수인 양버즘나무(*Platanus occidentalis* L.), 느티나무(*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino), 왕벚나무(*Prunus yedoensis* Matsum.) 3종과 낙엽침엽수인 은행나무(*Ginkgo biloba* L.) 1종, 상록교목인 소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.) 1종을 선정하였다.

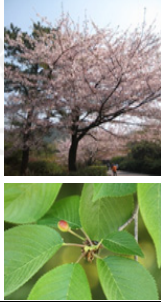
[표 4-2] 서울시 가로수 식재 수량과 분석대상 수종

가로수종	식재수량(주)	가로수종	식재수량(주)
은행나무	111,791	감나무	1,007
양버즘나무	66,183	튜올립나무	944
느티나무	35,410	은단풍나무	654
왕벚나무	32,134	느릅나무	515
이팝나무	15,974	목련	377
화화나무	7,876	살구나무	235
메타세콰이어	5,342	가죽나무	81
소나무	4,525	수양버들	31
무궁화	2,295	포플러	12
칠엽수	1,538	기타	20,048

자료: 서울시 가로수 통계, 2017

분석대상 수종의 특징을 살펴보면 은행나무는 공해에 강하고 이식력이 좋아 서울시에서 가장 많이 식재된 가로수종이며, 양버즘나무는 낙엽활엽수 중에서 가장 많이 식재된 수종이나 봄철 알레르기 유발로 교체 추세에 있다. 느티나무는 바람저항력이 강하고 생장속도가 빨라 가로 적합수종이며, 왕벚나무는 주로 조경수로 사용되어 자동차 중심가로에 적합한 것으로 알려져 있다. 소나무의 경우 공해와 음지에 약해 가로수로서 많이 쓰이지 않지만, 주변경관과 어울리고 생육여건이 양호한 장소에 제한적으로 적용하고 있다.

[표 4-3] 분석대상 수종 특징 및 수형

구분	은행나무 (<i>Ginkgo biloba</i> L.)	양버즘나무 (<i>Platanus occidentalis</i> L.)	느티나무 (<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino)	왕벚나무 (<i>Prunus yedoensis</i> Matsum.)	소나무 (<i>Pinus densiflora</i> Siebold & Zucc.)
형태	낙엽침엽교목	낙엽활엽교목	낙엽활엽교목	낙엽활엽교목	상록교목
도심 생육	공해에 강하고 이식력이 좋음	공해에 강하고 공기정화능력이 큼	바람저항력이 강하고 생장속도가 빠름	내조성은 강하나 배형충해성이 악한 편	공해와 음지에 약하여 부적합
특징	상업가로, 역사경관 가로 적합 수종	업무가로, 주거지인접가로, 자동차중심가로, 대단위 조경단지 적합 수종	업무가로, 역사경관 가로 적합 수종	꽃의 양이 많고 화려하여 조경수로 사용(자동차중심 가로 적합 수종)	주변경관과 어울리고 생육 여건이 양호한 장소에 제한적으로 적용
수형					

자료: 국가생물종지식정보시스템(<http://www.nature.go.kr/>); 서울시 조경과, 2014, 가로수의 조성 및 관리

(2) 분석대상 수목 선정 및 기초 조사

5개 수종별로 차량 통행이 잦은 도로변 3주, 공원 내부 3주를 분석하기로 하고, 서울숲, 양재 시민의 숲 각각 30주, 총 60주를 분석대상으로 선정하였다. 분석대상 수목의 수고와 흉고직경, 미세먼지 측정 등 기초현황 조사를 포함하여 잎 샘플링과 흡착량 분석은 2018년 6월부터 9월까지 조사대상지별로 월 1회씩 총 3회 진행하였다. 서울숲 조사는 1차 6월 28일, 2차 7월 25일, 3차 8월 31일에 수행하였으며, 양재 시민의 숲은 1차 6월 25일, 2차 7월 24일, 3차 9월 5일에 수행하였다. 잎 샘플링은 수목의 수고 3~6m 사이에서 가지를 선정하였다.



[그림 4-2] 잎 샘플링 방법

미세먼지 흡착량 측정을 위한 샘플의 경우 잎을 각각 종이봉투에 담았으며, 아스코르빈산과 pH 분석을 위한 잎 시료는 즉시 알루미늄 호일로 포장하여 액체질소에 보관하였다. 상대수분함량과 엽록소 분석을 위한 잎 시료는 아이스박스에 넣어 보관하였다. 대상지에서 채집한 잎 시료를 실험실로 가져와 분석을 진행하였다.

[표 4-4] 서울숲 분석대상 수종별 일반정보

수종	잎*	수고 (m)	흉고직경 (cm)	수관형태**
소나무 (<i>Pinus densiflora</i>)	Ec	11.0 ± 4.7	25.2 ± 4.6	U
느티나무 (<i>Zelkova serrata</i>)	Dc	8.9 ± 2.6	21.9 ± 5.5	V
양버즘나무 (<i>Platanus occidentalis</i>)	Dc	14.6 ± 4.1	30.1 ± 10.9	S
왕벚나무 (<i>Prunus yedoensis</i>)	Dc	8.3 ± 2.5	23.5 ± 8.5	G
은행나무 (<i>Ginkgo biloba</i>)	Dc	12.0 ± 3.3	21.0 ± 9.0	P

* Ec: evergreen coniferous(상록침엽수), Dc: deciduous(낙엽수)

** U: umbrellar(우산형), V: vase(배형), G: globular(구형), S: spread(확산형), P: pyramidal(원추형)



[그림 4-3] 서울숲 분석대상 수목 위치도 및 사진

[표 4-5] 양재 시민의 숲 분석대상 수종별 일반정보

수종	잎*	수고 (m)	흉고직경 (cm)	수관형태**
소나무 (<i>Pinus densiflora</i>)	Ec	7.9 ± 4.1	19.9 ± 7.1	U
느티나무 (<i>Zelkova serrata</i>)	Dc	14.0 ± 5.3	27.6 ± 6.7	V
양버즘나무 (<i>Platanus occidentalis</i>)	Dc	16.4 ± 7.2	35.5 ± 8.9	S
왕벚나무 (<i>Prunus yedoensis</i>)	Dc	11.4 ± 6.2	34.4 ± 14.7	G
은행나무 (<i>Ginkgo biloba</i>)	Dc	9.5 ± 3.4	18.7 ± 2.8	P

* Ec: evergreen coniferous(상록침엽수), Dc: deciduous(낙엽수)

** U: umbrellar(우산형), V: vase(배형), G: globular(구형), S: spread(확산형), P: pyramidal(원추형)



[그림 4-4] 양재 시민의 숲 분석대상 수목 위치도 및 사진

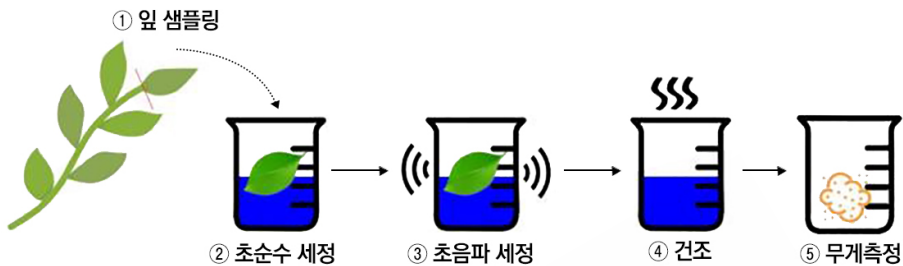
2) 분석 방법

대상 수목의 잎 샘플링을 통해 미세먼지 흡착량 분석을 실시하였다. 미세먼지 흡착량 측정은 Margitai et al.(2017)과 Liu et al.(2018)의 방법을 참고하였다. 잎은 샘플링한 가지에서 무작위로 채취하였다.

채취한 잎은 초순수 세정(water cleaning)과 초음파 세정(ultrasonic clanning)을 연달아 진행하여 세척했다. 초순수 세정은 잎을 270ml의 초순수(deionized water)로 채워진 비커에 담근 후 10분간 진탕기를 이용하여 교반시키는 방식으로 진행되었다. 초순수로 세정된 잎이 담긴 비커를 그대로 초음파 세정기에 넣어 1분간 500W의 초음파로 세척하였다.

잎이 초음파로 세정된 후 생성된 270ml 용리액은 100ml 비커에 90ml씩 다시 분주하였다. 이때, 분주하기 전 모든 100ml 비커는 초음파 세정 후 충분히 말린 뒤 전자저울을 이용하여 무게를 측정하였다(W).

분주된 90ml 용리액이 담긴 비커는 여과지를 덮은 후 건조기를 이용하여 70℃ 고온에서 3일간 건조하였다. 수분이 증발된 모든 비커는 상온에서 식힌 후 전자저울을 이용하여 다시 무게를 측정하였다(W_1). 각각의 세정단계를 거쳐 여과된 미세먼지의 질량은 분주 후 고온에서 용리액이 증발된 100ml 비커 무게와 분주 전 100ml 비커 무게의 차($W_2 - W_1$)를 이용하여 단위면적당 미세먼지 흡착량(mg/cm^2)을 산출하였다([그림 4-5]).



[그림 4-5] 질량을 이용한 미세먼지 흡착량 측정법

수목별 미세먼지 흡착량 해석을 위해서는 단위면적당 미세먼지 흡착량(mg/cm^2)도 중요하지만, 수목이 가진 크기와 엽면적 등이 서로 다르므로 단순히 잎의 흡착량만을 가지고 해석하기엔 무리가 있다. 단위면적당 미세먼지 흡착량이 높더라도 엽면적이 작아 수목당 미세먼지 흡착량이 낮을 수 있으며, 단위면적당 미세먼지 흡착량이 낮더라도 엽면적이 커 수목당 미세먼지 흡착량이 상대적으로 높을 수 있기 때문이다. 이에 엽면적지수와 흉고직경을 이용하여 분석 대상 수목의 엽면적을 추가적으로 계산하였다.

엽면적지수(Leaf Area Index, LAI)는 식물군락의 엽면적을 그 군락이 차지하는 지표면적으로 나눈 값으로, 엽면적지수 측정기 LAI-2000 Plant Canopy Analyzer(Li-Cor)를 이용하여 측정하였다. 엽면적지수는 단위지표면적당 엽면적 합의 비율(m^2/m^2)로 표현되며, 식은 다음과 같다.

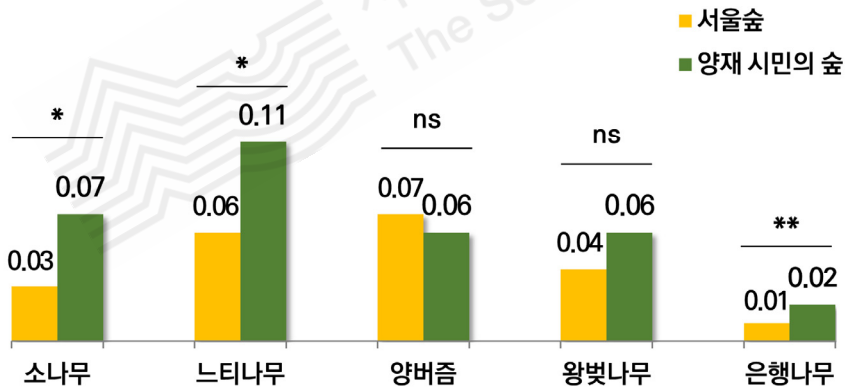
$$LAI = \frac{\text{leaf area}(\text{m}^2)}{\text{Ground surface area}(\text{m}^2)}$$

연면적지수 측정 후에, 잎의 단위면적당 미세먼지 흡착량(mg/cm^2)을 곱하여 환산한 미세먼지 흡착량을 산출하였다.

3) 분석 결과

(1) 잎의 단위면적당 미세먼지 흡착량

서울숲과 양재 시민의 숲 공원수, 도로변 가로수의 5개 수종 미세먼지 흡착량 분석결과는 다음 [그림 4-6]과 같다. 분석 대상 수종 중 단위면적당 미세먼지(단위: mg/cm^2)를 가장 효율적으로 흡착하는 수종은 느티나무($>0.06\text{mg}/\text{cm}^2$)와 양버즘나무($>0.07\text{mg}/\text{cm}^2$)였으며, 두 수종은 뽕뽕한 털로 덮인 잎이 특징이다. 반면에 단위면적당 미세먼지 흡착량이 상대적으로 낮게 나타난 종은 매끄러운 잎의 표면을 가진 은행나무($>0.01\text{mg}/\text{cm}^2$)였다. 서울숲의 경우 느티나무와 양버즘나무의 미세먼지 흡착량이 상대적으로 높게 나타났고, 양재 시민의 숲의 경우 소나무, 느티나무의 미세먼지 흡착량이 높게 나타났다.



[그림 4-6] 잎의 단위면적당 미세먼지 흡착량(mg/cm^2)

미세먼지 흡착에는 종 간에 상당한 변이가 있었고, 일부 수종의 미세먼지 밀도는 다른 종에 비해 2.5~6배 높은 것으로 조사되었다. 느릅나무과의 낙엽활엽 교목으로 가로수와 조경수로 많이 이용되고 있는 느티나무는 잎의 단위면적당 미세먼지를 $0.06\sim 0.11\text{mg}/\text{cm}^2$ 로 포획할 수 있을 정도로 상대적으로 높은 흡착 효과를 보인다. 그 다음으로는 양버즘나무

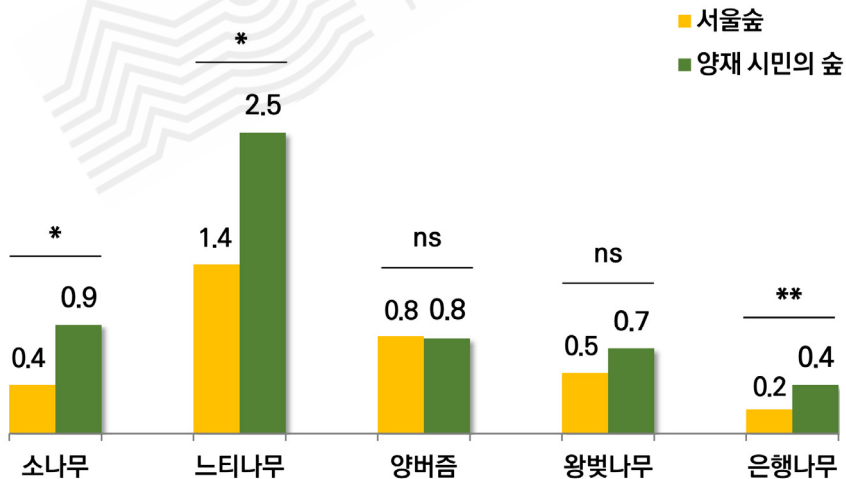
0.06~0.07mg/cm², 소나무 0.03~0.07mg/cm², 왕벚나무 0.04~0.06mg/cm², 은행나무 0.01~0.02mg/cm²의 순으로 나타났다.

(2) 엽면적지수를 고려한 미세먼지 흡착량

잎의 엽면적이 미세먼지 축적에 미치는 영향은 잎의 크기, 형태 및 미세 형태 등 다른 특성보다 상대적으로 우세한 것으로 관찰되었다. 엽면적지수가 높고 더 작은 잎을 가진 수종이 미세먼지 흡착에 상대적으로 효과적이다. 다음 [표 4-6]은 분석대상 수종별 엽면적 지수를 나타낸 것이며, 단위면적당 미세먼지 흡착량에 엽면적지수를 이용하여 수목 개체당 미세먼지 흡착량(g/m³)을 산출한 결과는 [그림 4-7]과 같다.

[표 4-6] 분석대상 수종의 엽면적지수

구분	소나무	느티나무	양버즘나무	왕벚나무	은행나무
엽면적지수(LAI)	1.36	2.20	1.20	1.18	1.78



[그림 4-7] 엽면적지수를 적용한 미세먼지 흡착량(g/m³)

엽면적지수를 적용한 미세먼지 흡착량은 느티나무가 $1.4\sim 2.5\text{g}/\text{m}^2$ 로 두 지역 모두 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로는 양버즘나무 $0.8\text{g}/\text{m}^2$, 소나무 $0.4\sim 0.9\text{g}/\text{m}^2$, 왕벚나무 $0.5\sim 0.7\text{g}/\text{m}^2$, 은행나무 $0.2\sim 0.4\text{g}/\text{m}^2$ 의 순으로 나타났다.

(3) 수목당 미세먼지 흡착량

수목 한 개체가 미세먼지의 미립자 물질을 흡착·흡수·보유하는 식물의 능력은 줄기, 가지, 캐노피 유형, 엽면적을 비롯한 여러 요인에 따라 달라질 수 있다. 특히 털, 흠 등 잎의 미세구조 형태에 주로 의존하는 상당한 종 특이성을 나타낸다(Chen et al., 2017; Shi et al., 2017; Song et al., 2015).

이 연구에서는 수목당 미세먼지 흡착량을 산출하기 위해 [표 4-7]과 같이 선행연구의 흉고직경에 의한 엽면적추정식(prediction equation)²³⁾을 이용하여(Jonckheere et al., 2005; Peper et al., 2001; Semenzato et al., 2011) 수종별 엽면적을 계산하였으며([표 4-8]), 엽면적에 단위면적당 미세먼지 흡착량을 곱해 분석대상 수목당 미세먼지 흡착량(g/tree)을 산출하였다([그림 4-8]).

[표 4-7] 주요 수종별 흉고직경에 의한 엽면적 추정식

수종	추정식(m^2/tree)*	R ²	출처
소나무 (<i>Pinus densiflora</i>)	$y = (0.2988 \times (\text{DBH}^2)) - (7.5336 \times (\text{DBH})) + 74.075$	0.94	Jonckheere et al. (2005)
느티나무 (<i>Zelkova serrata</i>)	$y = \text{EXP}(4.033) \times \text{EXP}((0.045 \times \text{DBH}) - 1) \times \text{EXP}(0.12706/2)$	0.91	Peper et al.(2001)
양버즘나무 (<i>Platanus occidentalis</i>)	$y = \text{EXP}(5.198) \times \text{EXP}((0.021 \times \text{DBH}) - 1) \times \text{EXP}(0.23508/2)$	0.74	Peper et al.(2001)
왕벚나무 (<i>Prunus yedoensis</i>)	$y = 3.036 \times (\text{EXP}(0.09 \times \text{DBH}) - 1)$	0.80	Semenzato et al. (2011)
은행나무 (<i>Ginkgo biloba</i>)	$y = \text{EXP}(3.410) \times \text{EXP}((0.053 \times \text{DBH}) - 1) \times \text{EXP}(0.30207/2)$	0.86	Peper et al.(2001)

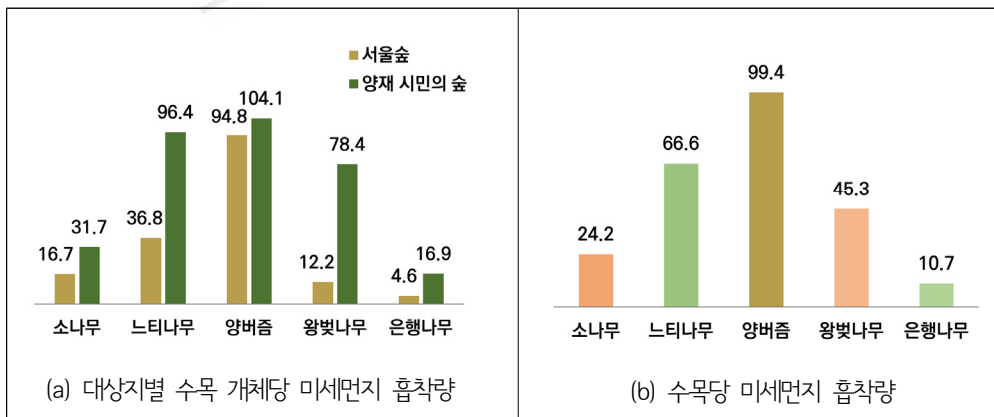
* y = 엽면적, DBH(diameter at breast height) = 흉고직경

²³⁾ 엽면적 추정식은 흉고직경에 의하여 결정되므로 분석대상 수목의 흉고직경에 따라 결정되며, 분석대상 수목의 흉고직경은 제4장 1절의 미세먼지 저감 효과 분석 대상의 분석대상 수목 선정 및 기초 조사에 제시하였음

[표 4-8] 분석대상지별 수목의 엽면적 산출 결과

수종	엽면적(m ²)	
	서울숲	양재 시민의 숲
소나무 (<i>Pinus densiflora</i>)	80.6 ± 39.6	56.8 ± 42.4
느티나무 (<i>Zelkova serrata</i>)	57.7 ± 15.2	75.9 ± 25.6
양버즘나무 (<i>Platanus occidentalis</i>)	144.5 ± 33.0	160.6 ± 32.0
왕벚나무 (<i>Prunus yedoensis</i>)	31.0 ± 30.0	136.4 ± 158.9
은행나무 (<i>Ginkgo biloba</i>)	47.6 ± 25.9	35.2 ± 5.4

조사대상 수목의 흉고직경 범위에서 느티나무는 평균 66.6g의 상대적으로 많은 미세먼지 흡착(37~96g/tree) 효과가 있는 것으로 나타났다. 왕벚나무는 평균 45.3g(12~78g/tree)으로 느티나무와 비슷한 수준으로 미세먼지 흡착효과를 보였고, 그 다음으로 소나무가 평균 24.2g(17~32g/tree), 은행나무가 평균 10.7g(5~17g/tree)으로 나타났다. 양버즘나무의 경우 전체 엽면적당 미세먼지 흡착량은 94.8~104g/tree으로 가장 높게 나타났으나, 조사 대상 수목 중에서 흉고직경이 다른 분석대상 수목보다 크기 때문에 판단된다. 특히, 서울시 주요 가로수 수종 중에서 양버즘나무와 은행나무는 국내에서 알려지를 유발하는 수목(홍천수, 2015)으로 보고되고 있다([표 4-9]).



[그림 4-8] 수목 개체당 미세먼지 흡착량(g/tree)

양버즘나무와 버즘나무 사이의 잡종인 단풍버즘나무(*P. acerifolia*)의 꽃가루 알레르겐 (Pla a 1, Putative Invertase Inhibitor; Pla a 2, Polygalacturonase; Pla a 3, nsLTP) 이 보고되었으며(Asam et al., 2015; Lu et al., 2014; Scala, 2013), 알레르겐 Pla a 1은 양버즘나무에서도 검출이 보고되었다(Alcazar et al., 2015; Fernandez-Gonzalez et al., 2010). 또한, 내구성 및 질병과 해충에 대한 저항성으로 인해 서울시에서 가장 높은 식재비율을 차지하는 은행나무는 최근에 열매 악취 및 흡입 알레르겐(inhalant allergen) 함유에 의한 알러지성 꽃가루(Park et al., 2014)로 인해 가로수 수종선정에 대한 재고가 요구되고 있다. 은행나무의 조밀한 왁스 결정체는 미세먼지의 미립자가 잎표면에 흡착할 수 있는 접촉면을 감소시켜, 미세먼지의 저감효과에 불리하게 작용한다(Wang et al., 2015). 따라서 양버즘나무와 은행나무는 봄철 알레르기 유발 가능성 및 여러 문제점으로 인해 다른 가로수종으로 교체 추세이므로 미세먼지 흡착을 위한 수종으로 적합하지 않을 수 있다.

[표 4-9] 알레르기 질환에서 국내 주요 수목의 꽃가루 감작률(%)

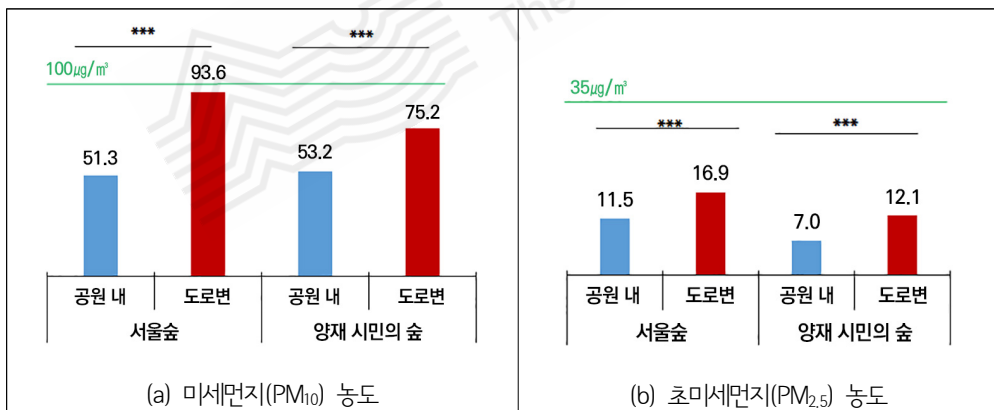
국내 주요 수목		꽃가루에 대한 감작률(Skin reactivity)
국명	영명	
참나무속	Oak	14.36
자작나무속	Birch	13.57
오리나무속	Alder	13.39
뽕나무속	Mulberry	10.04
너도밤나무속	Beech	10.04
느릅나무속	Elm	8.81
아카시아속	Acacia	7.84
호두나무속	Walnut	6.96
단풍나무속	Maple	6.26
버즘나무속	Platanus	5.99
단풍나무속	Elder	5.90
물푸레나무	White ash	4.85
버드나무속	Willow	4.24
사시나무속	Poplar	3.35

자료: 홍천수, 2015, 한국에서 꽃가루 알레르기를 일으키는 식물, Allergy, Asthma & Respiratory Disease, 3(4), pp.239-254. 내용 재정리

위의 결과로 단위면적당 미세먼지 흡착량이 높으면서 엽면적지수 또는 수목 개체의 총 엽면적이 높은 수종이 미세먼지 흡착량이 높을 수 있어 느티나무가 가로수종으로서 보다 친화적이라고 할 수 있다.

(4) 조사대상지 미세먼지 측정 결과

조사대상지 미세먼지 흡착량 분석을 수행한 동일한 조사 시기의 서울숲과 성동구의 공원 내부와 도로변의 미세먼지 농도를 측정한 결과, 조사 시기의 공원 내부와 도로변 모두 미세먼지 대기환경 기준(24시간 PM_{10} $100\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ $35\mu g/m^3$)보다 낮게 나타났다. 특히 서울숲과 양재 시민의 숲 모두 공원내부의 미세먼지 농도가 도로변 미세먼지보다 낮은 농도로 관측되었다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 각각에 대한 서울숲과 양재 시민의 숲 공원 내와 도로변의 미세먼지 농도를 측정했을 때, 도로변의 미세먼지 농도보다 공원의 미세먼지 농도가 서울숲 PM_{10} 은 45%, $PM_{2.5}$ 는 32%, 양재 시민의 숲 PM_{10} 은 29%, $PM_{2.5}$ 는 42% 통계적으로 유의하게 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 미세먼지 배출원의 특성, 배출원과의 거리 등 다양한 요인이 복합적으로 나타난 것이라고 할 수 있으나, 도심과 도시숲의 미세먼지를 측정한 국립산림과학원(2017) 등 관련 선행연구를 보더라도 식물이 미세먼지 저감을 위한 바이오필터로서 기능을 수행한다고 할 수 있다. 향후에는 이러한 차이에 대한 해석을 명확히 하기 위해 추가적으로 배출원에 대한 검토도 함께 이루어져야 할 것으로 보인다.



[그림 4-9] 서울숲, 양재 시민의 숲 공원 내와 도로변의 미세먼지 농도(mg/m^3)

2_수종별 대기오염 내성 효과 분석

1) 분석 방법

미세먼지 이슈의 성격과 효과는 대개 미립자 오염에 대한 식물의 내성이나 민감도에 달려 있다(Rai, 2011). 대기오염내성지수(APTI, Air Pollution Tolerance Index)는 대기오염에 대한 내성 순위를 정하는 데 사용되며(Rai and Panda, 2014; Thambavani and Sabitha, 2011), 이 순위에서 파악한 대기오염에 민감한 식물은 생물학적 지표 또는 모니터 식물로 사용할 수 있다.

이 연구에서는 각 조사대상 수종의 대기오염에 대한 내성평가를 위해 대기오염내성지수(APTI, Air Pollution Tolerance Index)를 측정하였다. 대기오염내성지수란 식물의 대기오염에 대한 감수성 수준을 나타내는 지수로 대기오염에 어느 정도 민감한지, 내성은 어떠한지를 나타낸다. 잎 pH, 상대 수분 함량(Relative water content, RWC), 총 엽록소 함량(Total chlorophyll content), 아스코르빈산 함량(Ascorbic acid content)이 매개 변수로서 이용된다.

각각 조사대상 수종의 대기오염에 대한 감수성 정도를 측정하기 위해서 대상지 내 조사대상 수종의 잎을 무작위로 선택하였고, 완전히 성숙된 잎을 3번 반복하여 채취하였다. 잎 샘플은 폴리에틸렌 봉지에 담아 아이스박스에 보관 및 액체질소에 담가 보관한 후 각 분석항목을 측정하였다. 대기오염내성지수는 다음 공식을 이용하여 측정하였다(Thambavani and Sabitha, 2011).

$$APTI: \frac{[A(T+P)+R]}{10}$$

A=아스코르빈산 함량(Ascorbic acid content)(mg·g⁻¹FW)

T=총 엽록소 함량(Total chlorophyll content)(mg·g⁻¹FW)

P=잎 pH

R=상대수분함량(Relative water content)(%)

① 아스코르빈산 함량 측정

아스코르빈산은 Keller & Schwager(1977)의 2,6-dichlorophenol indophenol(DCPIP) 저감 방법을 사용하여 측정되었다. 잎의 0.1g 생체중(FW; fresh weight)을 1.5ml의 차가운 상태의 0.5% 옥살산(oxalic acid)을 이용하여 균질화(homogenization)하였다. 이후 원심분리(10,000×g, 4°C, 15분)하여 0.2ml의 상층액을 취하였다. 이 상층액은 1.0ml의 DCPIP(20μg·ml⁻¹)와 혼합 후 볼텍싱(vortexing)하였다. 분홍색의 혼합액 200μl를 취하여 UV/MS spectrophotometer를 이용하여 520nm 파장에서 흡광도를 측정하였다. 측정 후, 이 분홍색의 혼합액에 1% 아스코르빈산을 1방울(10μl) 첨가하여 분홍색을 표백하고 동일한 파장에서 흡광도를 재측정하였다. 두 측정치 사이의 차이값은 아스코르빈산의 양을 결정하는 데 이용되었다. 측정값에 대한 아스코르빈산 계산식은 다음과 같다.

$$\text{Ascorbic acid}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})=[E_o - (E_s - E_t)] \times \frac{V}{W} \times V_1$$

V1=상층액의 양

V=총 혼합액의 양

W=잎 샘플의 무게

EO, Es, Et는 각각 Blank, 잎 샘플, 잎 샘플과 아스코르빈산이 들어 있는 혼합액의 흡광도 값을 뜻한다.

② 총 엽록소 함량 측정

엽록소 함량을 분석하기 위해 잎 0.1g을 10ml 아세톤(80%)에 넣고 4°C 냉암소에서 7일간 침출시킨 후 UV/MS spectrophotometer를 이용하여 파장 663, 645nm에서 흡광도를 측정하고, 총 엽록소 함량은 mg·g⁻¹FW를 기준으로 하여 아래 식을 이용하여 계산하였다(Arnon, 1949).

$$\text{Total chlorophyll}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW})=\frac{20.29 \times A_{645} + 8.02 \times A_{663}}{D \times 1000 \times W} \times V$$

D=빛이 통과하는 cuvette의 길이(cm)

W=잎 샘플의 무게

V=추출 용매의 양

A645=645nm에서 흡광도

A663=663nm에서 흡광도

③ 잎 pH 측정

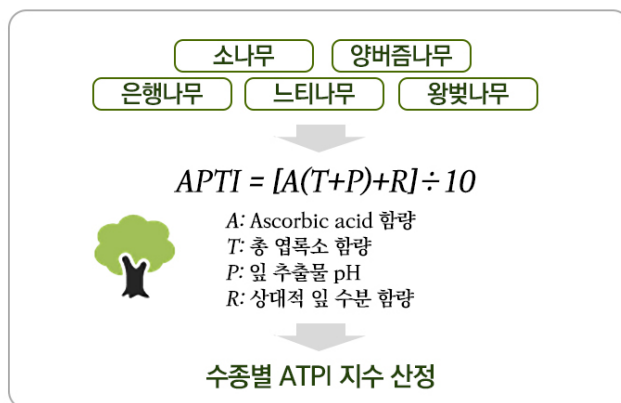
잎의 pH 측정을 위해, 약 0.25g의 생체 잎을 10ml의 초순수(deionized water)에서 균질화시킨 후 원심분리(7,000×g, 4℃, 10분)하였다. 상층액을 일부 취해 pH meter를 이용하여 잎 추출물의 pH를 측정하였다.

④ 상대수분함량 측정

상대수분함량(RWC)은 Sadeghian & Mortazaienezhad(2012)의 방법을 수정하여 측정하였다.

$$\text{상대수분함량(RWC)} = \frac{FW - DW}{TW - DW} \times 100$$

생체중(FW)은 채취된 잎의 무게를 측정하여 값을 얻었다. 잎 샘플을 16시간 초순수에 담근 후 무게를 측정하여 turgid weight(TW) 값을 얻었으며, TW 측정 후 잎 샘플을 건조기를 이용하여 70℃ 고온에서 48시간 건조시킨 뒤 건중량(DW)을 측정하였다.



[그림 4-10] 수종별 대기오염내성지수(APTI) 측정방법 도식화

조사를 통해 얻은 모든 데이터의 통계분석은 IBM SPSS Statistics 25를 사용하여 수행되었으며, 데이터는 평균 $\pm$ 표준편차(SD)로 나타내었다. 주요 가로수 수종 간의 단위면적당 미세먼지 흡착 및 수목 개체별 미세먼지 흡착의 통계학적 유의한 차이를 분석하기 위해 $p < 0.05$ 수준에서 일원배치분산분석(one-way analysis of variance, ANOVA)을 사용하여 검증하였다. 그런 다음 ANOVA를 수행하여 통계적으로 집단 간에 중요한 차이를 확인하고 Duncan의 다중비교검증(Duncan's Multiple Range Test)을 사용하여 각 집단 간 차이의 유의성을 검정하였다. 서울숲과 양재 시민의 숲 사이의 미세먼지 흡착량 및 도로변과 공원 내의 PM10, PM2.5의 통계적 유의성 검정은 paired-samples T-test를 사용하여 수행되었다.

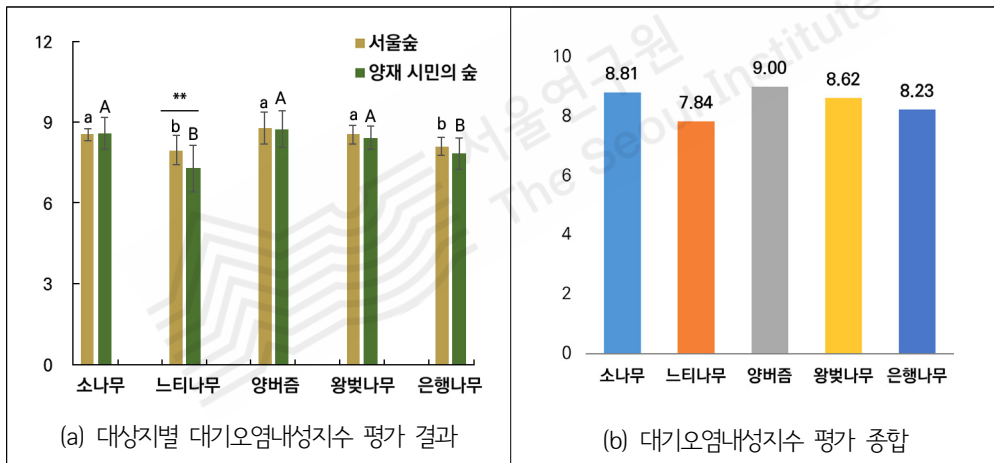
2) 분석 결과

서울숲, 양재 시민의 숲의 공원 내 수종과 도로변의 가로수 5종의 대기오염내성지수(APTI)를 평가하였다. 아스코르빈산 함량, 상대수분 함량, 잎 추출물 pH 및 총 엽록소의 4가지 생화학적 변수를 분석하여 대기오염내성지수를 도출하였으며([표 4-10]), 공원별, 수종별 그래프로 나타내었다([그림 4-11]). 서울숲과 양재 시민의 숲 수목별 대기오염내성지수는 통계적으로 유의한 차이가 없으며, 양버즘나무, 소나무, 왕벚나무의 대기오염내성지수가 상대적으로 약간 높게 나타났으나 5개 수종 모두 비슷한 수치이다.²⁴⁾

[표 4-10] 조사 대상 수목의 대기오염내성지수(APTI) 및 관련 생화학적 특성

수종	아스코르빈산 (mg·g ⁻¹ FW)	총엽록소함량 (mg·g ⁻¹ FW)	pH	상대수분 (%)	APTI
소나무 (<i>Pinus densiflora</i>)	0.70 ± 0.05 ^a	4.2 ± 1.0 ^c	3.8 ± 0.1 ^e	82 ± 5 ^a	8.8 ± 0.5 ^{ab}
느티나무 (<i>Zelkova serrata</i>)	0.56 ± 0.09 ^c	13.7 ± 2.6 ^a	6.0 ± 0.1 ^a	67 ± 8 ^d	7.8 ± 0.9 ^d
양버즘나무 (<i>Platanus occidentalis</i>)	0.57 ± 0.10 ^c	7.8 ± 2.1 ^b	4.9 ± 0.3 ^c	82 ± 6 ^a	9.0 ± 0.6 ^a
왕벚나무 (<i>Prunus yedoensis</i>)	0.47 ± 0.05 ^d	14.0 ± 3.3 ^a	5.7 ± 0.2 ^b	77 ± 5 ^b	8.6 ± 0.5 ^b
은행나무 (<i>Ginkgo biloba</i>)	0.64 ± 0.07 ^b	7.4 ± 1.4 ^b	3.9 ± 0.1 ^d	74 ± 4 ^c	8.2 ± 0.4 ^c

주: 평균 비교는 $p < 0.05$ 수준에서 Duncan의 다중범위검정법을 이용하였음



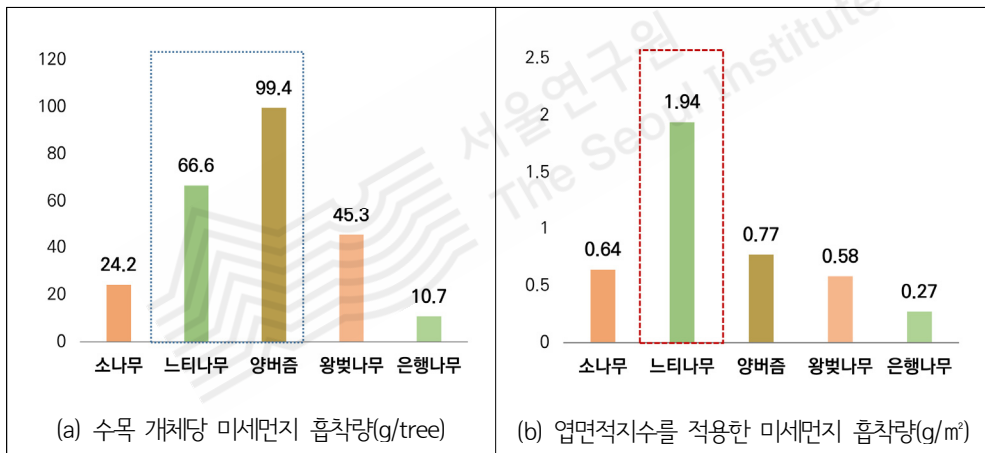
[그림 4-11] 대기오염내성지수(APTI) 평가 결과

²⁴⁾ 외국의 경우 대기오염내성지수가 17 이상일 경우 내성이 있고, 10 미만일 경우 민감한 종으로 해석하고 있으나, 국내에서는 APTI에 대한 연구가 많이 이루어지지 않아 국내 수종에 대한 명확한 지수 해석에 어려움이 있음

3_종합 및 시사점

1) 수종별 미세먼지 저감 효과

도시 특성상 서울시의 제한된 녹지 면적을 감안할 때, 미세먼지 저감을 위해서는 미세먼지 흡착 능력이 상대적으로 큰 식물종을 도시녹화에 활용할 필요가 있다. 이 연구에서는 앞서 제시한 미세먼지 흡착량 분석 결과를 바탕으로 단위면적당 미세먼지 흡착량이 높으면서, 엽면적지수 또는 수목 개체의 총 엽면적도 높은 느티나무가 가로수종으로서 보다 친화적임을 제시하였다. 수목 개체당 미세먼지 흡착량은 양버즘나무가 보다 높았으나, 이는 분석대상 수목의 흉고직경이 상대적으로 컸기 때문이며, 실제 흡착능력은 잎의 단위면적당 미세먼지 흡착량이 높은 느티나무가 미세먼지 흡착 효율에서 더 크다고 할 수 있다 ([그림 4-12]).



[그림 4-12] 수종별 미세먼지 저감 효과

분석대상 수종 가운데 느티나무는 잎에 털(trichome)이 많고, 홈(groove)이 잘 발달되어 있어 다른 활엽수종에 비해 미세먼지 흡착 능력이 우수하다.²⁵⁾ 또한 동일 직경 하에서 탄소저장량이 높아(Jo and Ahn, 2012) 미세먼지를 줄일 수 있으면서도 기후변화 대응과 온실가스 감축을 위한 주요 정책적인 측면에서 적합한 수종이라고 할 수 있다.

²⁵⁾ 활엽수종의 홈(groove)과 털(trichome)은 잎의 PM2.5 축적 효과를 나타내는 지표임(Chen et al., 2017)

미세먼지는 계절별로 큰 차이를 보이는데, 난방 등 연료사용이 증가하는 겨울이 되면 미세먼지 농도가 높아질 수 있고, 봄에는 이동성 저기압과 건조한 지표면의 영향으로 황사를 동반한 고농도 미세먼지가 발생할 가능성이 크다(환경부, 2016). 그러나 낙엽활엽수종은 겨울에 잎이 없어 상대적으로 미세먼지 흡착 효과가 감소할 수 있는 데 반하여 상록교목은 겨울철과 이른 봄 동안 미세먼지를 줄이는 데 상대적으로 효과적일 수 있다.

이에 서울시 가로수 통계를 바탕으로 봄·겨울철에 상대적으로 효과가 있을 것으로 보이는 상록교목을 검토하였다. 62종의 가로수종 중 낙엽활엽수를 제외한 상록교목 중 소나무(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.), 스트로브 잣나무(*Pinusstrobus* L.), 반송(*Pinusdensiflora* f.)을 고려할 수 있다. 바늘 모양의 잎이 겨울철과 봄철에 미세먼지를 포획할 수 있어 낙엽활엽수 대비 상대적인 흡착효과가 높다. 스트로브 잣나무는 수형조절이 자유롭고 입지를 가리지 않아 공원수나 가로수로 적당할 수 있지만, 소나무와 반송의 경우 공해에 다소 약하므로 생육 여건을 고려하여 적절히 식재하여야 한다. 또한 국립산림과학원(2018)²⁶⁾은 미세먼지 저감 수종 평가²⁷⁾를 통해 우수 수종으로 가문비 나무와 곰솔, 양호 수종으로 녹나무와 아왜나무를 제안하였다. 이러한 관련 연구를 통해 서울시 에 적용할 수 있는 상록교목을 종합적으로 검토해 볼 수 있다.



(a) 느티나무
(*Zelkova serrata* (Thunb.) Makino)



(b) 소나무
(*Pinus densiflora* Siebold & Zucc.)

[그림 4-13] 미세먼지 저감 도시생활권 수종 제안

자료: <http://www.nature.go.kr/>(국가생물종지식정보시스템)

²⁶⁾ 국립산림과학원의 미세먼지 대응 도시숲 그린인프라 토론회(2019.12.20.) 발표자료 활용

²⁷⁾ 산림청 권장 주요 조림수종 76종, 2018년 조달청 고시 조경수목 246종, 주요 지표면 피복 수종 70종을 대상으로 평가

2) 분석의 한계

이 연구에서는 도시 주요 가로수종 5개를 대상으로 2018년 6월부터 8월까지 월 1회 미세먼지 흡착량을 조사하여 상대적인 미세먼지 흡착 효과를 분석하였다. 하지만 조사대상 수목의 위치와 전정에 따라 흡착량이 달라질 수 있는 등 현장에서 제어되어야 할 환경변수의 통제에 한계가 있었으며, 미세먼지 흡착량 분석의 횟수가 많지 않고 일부 계절에 집중되어 있어 모든 계절의 특성을 대표하기에는 어려움이 있다. 또한 전체 나무에 의해 흡착된 미세먼지의 추정에는 편차가 존재한다. 향후 더 정확한 연구결과를 위해 모든 계절의 반복 측정과 실험이 필요하다. 또한 대상지의 배출원의 특성, 미세먼지 배출량, 배출원과의 이격거리 등 고려할 수 있는 다양한 변수들의 복합적인 검토가 요구된다.

서울시는 그린인프라 조성 공간이 제한적이므로 미세먼지 흡착 효과가 상대적으로 우수한 수종을 선택하는 것이 중요하다. 그런데 도시의 식생이 대기오염을 통제하기 위한 수단으로 사용된다면 식물에 의한 미세먼지 흡착 및 흡수를 최대화할 수 있는 식재 기법 등 여러 가지 방안을 함께 개발하여야 하며, 이들 간 복합적 활용이 필요하다. 추가적으로 미세먼지의 제거 효율이 높을수록 식물의 생장에 손상을 입힐 수 있으므로 향후 관련 연구가 함께 이루어질 필요가 있다.

3) i-Tree 적용 가능성 검토

수목은 PM_{2.5} 제거 외에도 오존, 이산화황, 이산화질소와 같은 여러 대기오염물질을 제거하고(Nowak et al., 2006), 오존 생성에 기여할 수 있는 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs)을 배출한다. 대기오염을 줄이기 위한 방법으로 도시의 식생을 보다 효과적으로 관리하기 위해서는 수목이 대기환경의 오염에 어느 정도 영향을 미치는지 이해할 필요가 있다. i-Tree(www.itreetools.org)는 도시숲의 계획 및 지속가능한 관리를 위해 도시에서 수목 및 기타 환경서비스에 의한 오염 제거를 계량화하는 데 도움이 되도록 미국 농무부와 관계기관에 의해 개발되었다.

i-Tree 모델은 도시의 산림 구조와 기능을 정량화할 수 있도록 돕기 위해 개발된 컴퓨터 모델로서, 미국의 여러 도시(Nowak and Crane, 2000)를 포함하여 캐나다, 중국, 스페

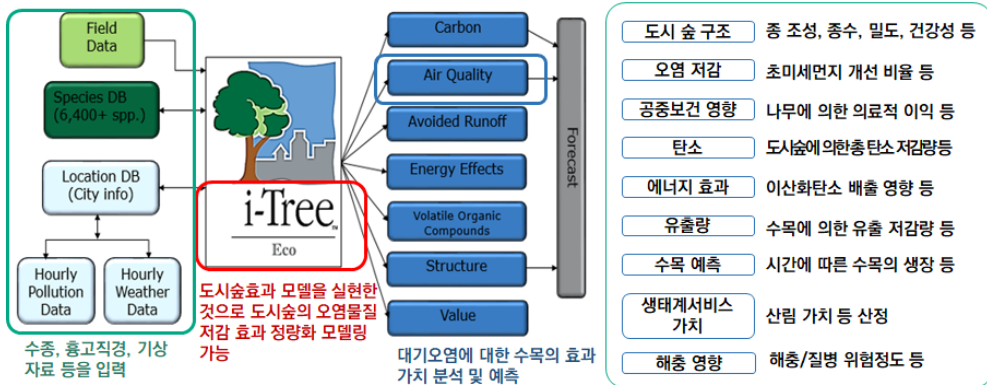
인, 브라질 등에서 사용되고 있다. i-Tree 모델은 무작위 지점으로부터의 표준화된 현장 데이터와 지역의 시간별 대기오염 및 기상 데이터를 사용하여 전 세계 도시의 산림구조와 산림효과를 정량화하는 데 사용되고 있다. 현재 i-Tree Eco, i-Tree Landscape, i-Tree Hydro, i-Tree Design, i-Tree Canopy, i-Tree Species, i-Tree MyTree, i-Tree Streets, i-Tree Vue 등 목적에 따라 다양한 모델들이 개발되어 있다. 이들 모델 가운데 i-Tree Eco는 UFORE(Urban Forest Effects) 모델을 실현한 것으로 여러 도시에서 오염물질 저감 효과에 대해 신뢰할 만한 결과를 도출한 바 있으며, 여러 모델들 중에서도 상당히 많이 이용되고 있다(McPherson, 2010; Nowak et al., 2002).

수종, 흉고직경, 다양한 기상 자료(서리일수, 일별 운량 정보, 오존 농도 등) 등을 입력하면 프로그램상 도시생태계에서 대기오염, 온실가스, 지구온난화, 건물 에너지 사용에 대한 수목의 효과와 관련된 다양한 산림기능과 가치를 분석·예측할 수 있다([그림 4-14], [그림 4-15]).



[그림 4-14] i-Tree 예측 모델링 구조화 알고리즘

자료: i-Tree Software Suite v2.0



[그림 4-15] i-Tree Eco 모델과 주요 결과

자료: <http://www.itreetools.org/>(미국 i-tree 홈페이지)

또한 수종별 데이터를 확보하여 흉고직경에 따른 연령, 수고, 수관 직경 등을 모델링하고 일반화시킨 후, 이러한 데이터를 활용하여 생태계의 동향뿐만 아니라 공공의료기여도(public health impacts), 에너지 이용도(energy Effects), 유거 감축량(avoided runoff), 생태계 예측(forecasting), VOC 배출량(bioemissions), 가치 평가(values), 잠재 해충 위험도(potential pest impacts) 등을 산출할 수 있으며, 향후 도시계획과 도시 숲을 운영하는 데 참고할 수 있다. 도시의 미립자성 대기오염은 심각한 인체 건강상의 문제를 야기하는데, 도시생활권 내 수목은 대기로부터 미세 입자를 제거하여 대기질의 개선과 인간의 건강을 향상시킬 수 있다.

한 예로, 미국의 10개 도시를 대상으로 i-Tree Eco 모델을 사용하여 미세먼지 $PM_{2.5}$ 농도와 인체 건강에 미치는 수목의 효과를 분석한 연구결과를 살펴보면, 수목에 의해 매년 제거되는 $PM_{2.5}$ 의 총량은 Syracuse의 4.7톤에서 Atlanta의 64.5톤까지 다양했으며, 연간 미세먼지 저감 효과의 가치는 Syracuse의 110만 달러에서 New York의 6,010만 달러까지 다양하게 나타난다. 이렇듯, i-Tree를 이용하여 도시의 수목이 대기질에 미치는 영향을 이해하면 도시의 인간 건강을 유지하기 위한 개선된 도시숲 관리 전략으로 이어질 수 있다(Nowak et al., 2013).

i-Tree 모델을 이용하여 $PM_{2.5}$ 농도와 인간의 건강에 미치는 수목에 의한 오염 제거의

광범위한 효과를 모델링하면 도시생활권 내에서 수목이 상당한 대기질 개선 및 인체 건강의 향상과 같은 가치를 창출할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 미국에서 구축하고 있는 기본 수종, 특성 등 모델의 데이터베이스와 국내 실정과는 상당한 차이가 있으며, 틀에서 입력을 요구하는 데이터베이스를 구축하는 것부터 국내에서는 상당한 어려움이 있다. 식생 설계의 지역 규모 영향을 개선하기 위해서는 i-Tree의 국내 적용에 대한 더 많은 연구와 데이터베이스 구축이 필요하다. 하지만 지속적인 연구와 데이터베이스 구축을 통해 i-Tree 모델을 적용할 수 있다면, 미세먼지와 다른 대기오염물질과의 관계를 고려한 도시숲 설계가 가능할 것으로 보인다.



05

미세먼지 대응 그린인프라 확대 방안

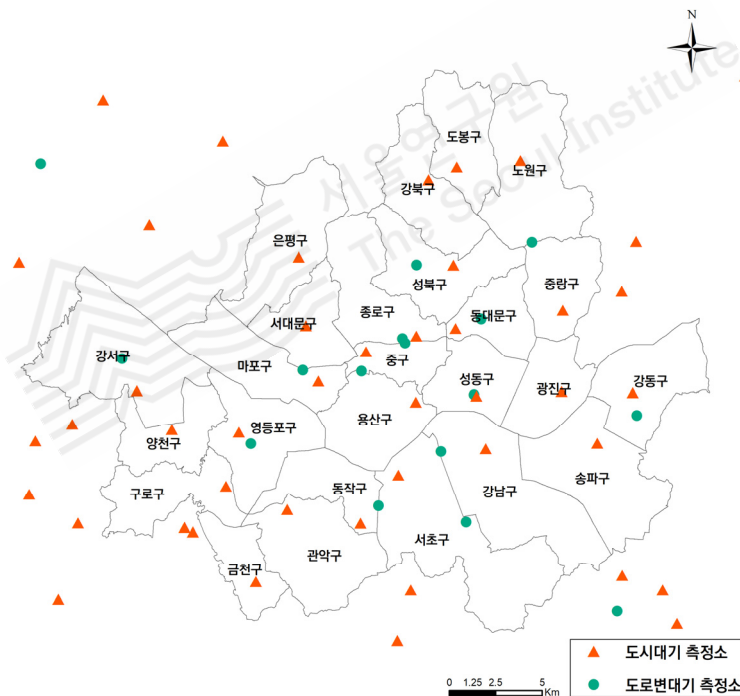
- 1_그린인프라의 연결성 확대
- 2_유형별 그린인프라의 조성 방식

05 | 미세먼지 대응 그린인프라 확대 방안

1_그린인프라의 연결성 확대

1) 서울시 미세먼지와 녹지 분포 분석

서울시 미세먼지, 초미세먼지 분포를 파악하고 그린인프라와의 관계를 살펴보기 위해 서울시 도시대기 측정소²⁸⁾ 25개 지점, 도로변 대기 측정소²⁹⁾ 14개 지점의 측정값을 검토하였다. 또한 미세먼지의 지역 분포를 살펴보고자 서울시 주변에 위치한 경기도 소재의 도시 대기 측정소 19개 지점, 도로변대기 측정소 2개 지점의 자료를 추가적으로 검토하였다.



[그림 5-1] 분석에 활용한 미세먼지 측정소

28) 도심(거주) 지역의 평균대기질 농도를 측정하며, 서울시내 구별 1개씩 총 25개 지점이 있음(2018년 8월 기준)

29) 자동차 통행량과 유동인구가 많은 도로변의 대기농도를 측정하며, 서울시내 총 14개 지점이 있음(2018년 8월 기준)

[표 5-1] 분석에 활용한 미세먼지 측정소

구분	지역	측정소	측정소명	분석 기간
미세먼지 (PM10)	서울	- 도시대기 25개소 - 도로변대기 14개소	- 도시대기: 서울시 25개 구와 동일 - 도로변대기: 강남대로, 강변북로, 공항대로, 내부순환로, 도산대로, 동작대로, 신촌로, 영등포로, 종로, 천호대로, 청계천로, 한강대로, 홍릉로, 화랑로	2013~ 2017년 (5년)
	경기	- 도시대기 19개소 - 도로변대기 2개소	- 도시대기: 고촌읍, 과천동, 교문동, 내동, 단대동, 대야동, 동구동, 별양동, 북정동, 상대원동, 소사본동, 소하동, 식사동, 신원동, 오남읍, 오정동, 중2동, 철산동, 행신동 - 도로변대기: 백마로(마두역), 성남대로(모란역)	
초미세먼지 (PM2.5)	서울	- 도시대기 25개소 - 도로변대기 14개소	(서울 미세먼지 측정소와 동일)	2014~ 2017년 (4년)
	경기	- 도시대기 16개소 - 도로변대기 1개소	- 도시대기: 고촌읍, 교문동, 내동, 단대동, 대야동, 동구동, 별양동, 북정동, 상대원동, 식사동, 신원동, 오남읍, 오정동, 중2동, 철산동, 행신동 - 도로변대기: 성남대로(모란역)	

주: 1) 경기도 초미세먼지 측정자료는 등가성 평가(정도관리)가 완료되지 않거나 미설치 등으로 인하여 일부 자료가 없을 수 있음(경기도 대기환경정보서비스)

2) 서울시 측정자료는 측정기관인 서울시보건환경연구원으로부터 제공받은 자료를 활용함

3) 경기도 초미세먼지 자료는 한국환경공단 에어코리아에서 제공하는 국립환경과학원의 최종확정 자료를 활용하였으며, 분석대상 지점의 2013년 자료 부재로 2014년~2017년까지 자료를 활용함

자료: [http://www.airkorea.or.kr/\(에어코리아\)](http://www.airkorea.or.kr/(에어코리아))

서울시 소재 도시대기 측정소의 최근 5년간(2013~2017) 연평균 미세먼지, 초미세먼지 농도는 다음 표와 같다. 미세먼지의 최근 5년간 연평균 농도는 용산구가 $42.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았으며, 영등포구가 $49.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났다. 초미세먼지는 서대문구가 $22.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았으며, 금천구가 $26.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타나 미세먼지와 초미세먼지 모두 구별 농도 차이는 크지 않다. 대기환경기준³⁰⁾을 바탕으로 볼 때, 미세먼지의 경우 모든 구가 대기환경기준 미만의 값을 보이지만, 초미세먼지는 모든 구가 대기환경기준보다 높은 것으로 나타났다.

30) 미세먼지(PM10) 연간 평균치 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 초미세먼지(PM2.5) 연간 평균치 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하

[표 5-2] 서울시 도시대기 측정소별 연평균 미세먼지, 초미세먼지 농도(2013~2017)

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

측정소명	미세먼지 (PM ₁₀)	초미세먼지 (PM _{2.5})	측정소명	미세먼지 (PM ₁₀)	초미세먼지 (PM _{2.5})
강남구	46.8	25.7	서대문구	45.3	22.9
강동구	46.6	24.1	서초구	47.4	24.1
강북구	43.0	23.9	성동구	46.9	24.3
강서구	47.5	23.9	성북구	44.7	23.0
관악구	47.7	26.5	송파구	44.0	23.5
광진구	46.3	24.6	양천구	46.2	25.8
구로구	47.5	24.8	영등포구	49.0	25.2
금천구	44.1	26.7	용산구	42.6	25.0
노원구	43.6	23.3	은평구	44.9	23.6
도봉구	43.8	23.6	종로구	45.2	25.2
동대문구	45.8	24.2	중구	44.2	23.5
동작구	42.8	25.7	중랑구	46.6	25.0
마포구	45.5	26.3	평균	48.1	25.5

자료: 서울시 보건환경연구원 데이터를 이용하여 산정

[표 5-3] 서울시 도로변 측정소별 연평균 미세먼지, 초미세먼지 농도(2013~2017)

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

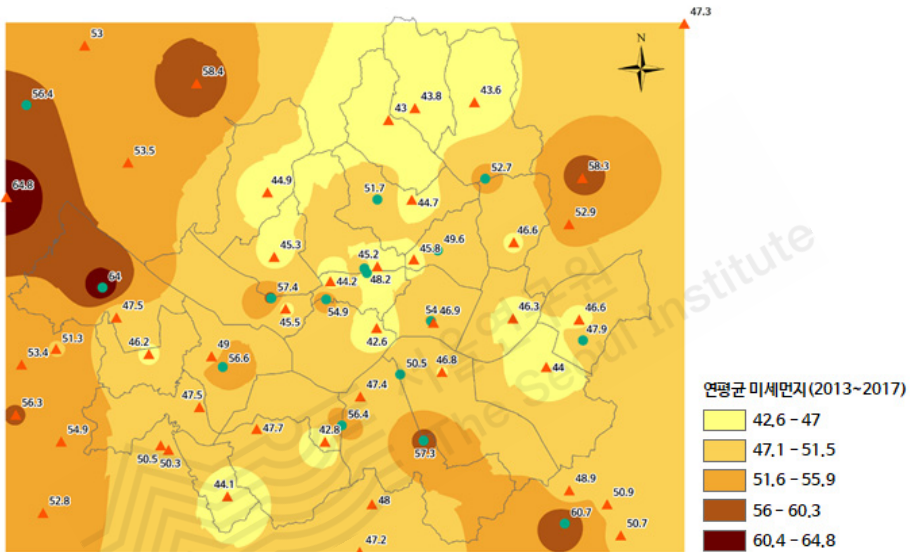
측정소명	미세먼지 (PM ₁₀)	초미세먼지 (PM _{2.5})	측정소명	미세먼지 (PM ₁₀)	초미세먼지 (PM _{2.5})
강남대로	57.3	30.1	영등포로	56.6	29.1
강변북로	54.0	30.1	종로	48.2	27.6
공항대로	64.0	29.4	천호대로	47.9	25.1
내부순환	51.7	24.8	청계천로	46.2	24.1
도산대로	50.5	25.2	한강대로	54.9	25.9
동작대로	56.4	29.8	홍릉로	49.6	32.1
신촌로	57.4	27.9	화랑로	52.7	27.7

자료: 서울시 보건환경연구원 데이터를 이용하여 산정

서울시 최근 5년간 연평균 미세먼지, 초미세먼지 농도(2013~2017)와 서울시 주변에 위치한 경기도 소재 측정소의 최근 5년간 연평균 미세먼지(2013~2017) 농도, 최근 4년간 초미세먼지(2014~2017) 농도를 이용하여 미세먼지 분포도를 작성하였다. 미세먼지 분포는 관련 선행연구(정종철, 2014; 윤훈주 외, 2015) 방법론을 참고하여 Arc GIS 10.3의 공간보

간기법 중 하나인 IDW(Inverse Distance Weighted)³¹⁾를 이용하여 100m 크기의 격자로 보간하였다.

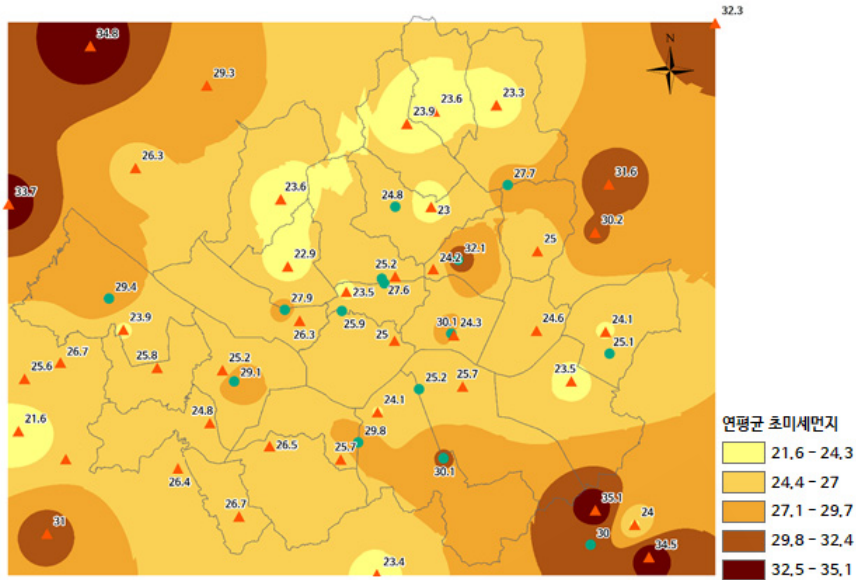
미세먼지 공간 분포를 살펴보면 서울시와 시의 외곽지역(경기)의 최근 5년간 연평균 미세먼지 농도는 $42.6\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 64.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 나타나며, 시의 외곽지역이 서울시내보다 상대적으로 연평균 미세먼지 농도가 높은 것으로 분석되었다. 서울시 내부에서는 강남 대비 강북이 약 $0.5 \sim 6.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이로 상대적으로 농도가 낮은 것으로 나타났다.



[그림 5-2] 서울시 미세먼지 농도 공간 분포 분석 결과

초미세먼지 공간 분포 분석 결과, 서울시와 시의 외곽지역(경기)의 연평균 초미세먼지 농도는 $21.6\mu\text{g}/\text{m}^3 \sim 35.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 나타나며, 미세먼지 분포와 마찬가지로 서울시내보다 시 외곽의 경기지역이 상대적으로 연평균 초미세먼지 농도가 높은 것으로 분석되었다. 다만 미세먼지 농도 분포보다는 지역별 차이가 크지 않으며, 미세먼지와 마찬가지로 서울시 내부에서는 강남 대비 강북권이 약 $0.2 \sim 3.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이로 상대적으로 낮은 농도를 보였다.

31) 미세먼지 공간보간기법으로, 적용방법에 따라 오차의 경향이 다르지만 IDW에 의한 거리가중합수를 고려하여 미측정지점의 농도를 평가하는 것이 미세먼지에 대해 유의한 결과를 나타낸다고 보고함(조흥래 외, 2009)



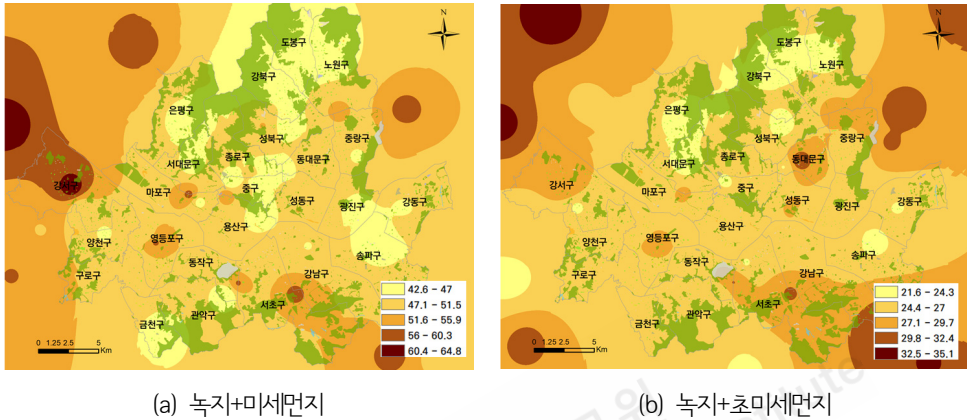
[그림 5-3] 서울시 초미세먼지 농도 공간 분포 분석 결과

서울시 녹지분포를 살펴보면 북한산, 우면산, 관악산이 서울시를 따라 환상녹지축을 이루고 있다. 서울시 내부 녹지는 주로 도시공원으로 구성되어 있고, 대형 녹지로는 남산이 존재한다([그림 5-4]).



[그림 5-4] 서울시 주요 대단위 녹지 분포

서울시 녹지 분포에 미세먼지, 초미세먼지 분포를 중첩하여 그린인프라와 미세먼지 관계를 검토하여 보면, 측정소 위치, 교통량, 토지이용 등 복잡한 요인에 영향을 받지만, 대규모 녹지지역은 상대적으로 타 지역에 비해 농도가 낮게 나타나는 것을 알 수 있다(그림 5-5)).³²⁾



[그림 5-5] 서울시 녹지와 미세먼지 분포도 비교

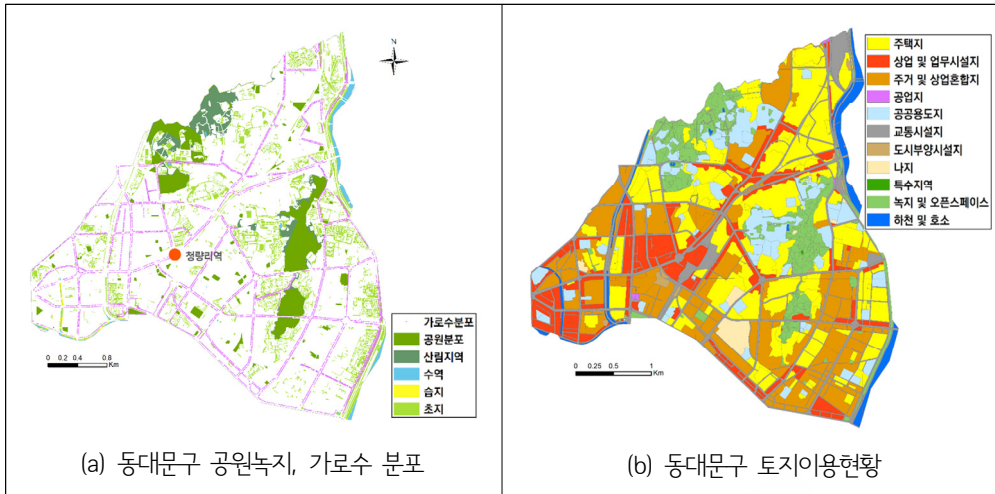
2) 그린인프라 연결성 및 경관 기능 검토

그린인프라의 미세먼지 저감 효과를 위해서 공원녹지, 하천, 습지 등을 유기적으로 배치하고 이를 가로수, 녹색길로 연결하여 네트워크를 구성하여야 한다. 그린인프라 간의 연결은 미세먼지 저감 효과뿐만 아니라 쾌적한 환경 창출, 삶의 질 개선, 생물다양성 측면에서도 중요하다. 이에 GIS buffer를 이용하여 공원 경계 300m, 가로수 10m³³⁾를 기준으로 그린인프라의 연결성을 검토하였다.

[그림 5-6]과 같이 미세먼지, 초미세먼지 농도가 상대적으로 높으면서 시가화지역 대비 녹지 면적이 낮게 나타난 동대문구와 영등포구를 대상으로 그린인프라 분포, 토지이용현황의 기본 현황을 우선적으로 검토하고, 경관분석을 위한 현장조사 지역 선정에 위하여

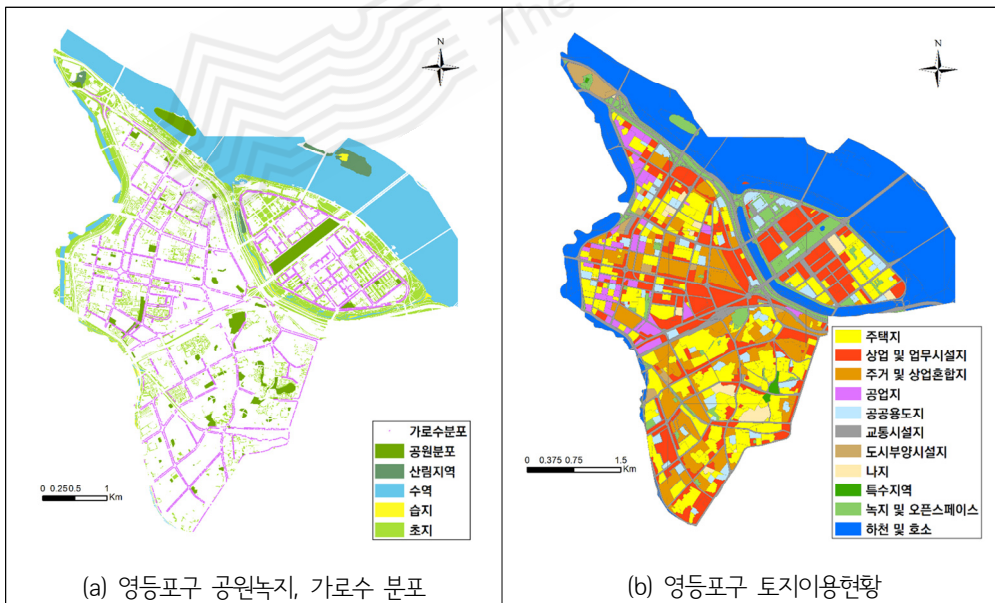
32) 단순히 분포만을 비교한 결과로서, 그린인프라와 미세먼지 관계 검토를 위해서는 서울시내 미세먼지 측정소가 더 많이 구축되어야 하며, 배출원에 대한 추가적인 연구가 요구됨

33) 공원경계는 송인주(2018)의 녹지연결성 지표인 300m를 기준으로 하였으며, 가로수는 교목 식재 간격이 약 10m임을 고려하여 산정함



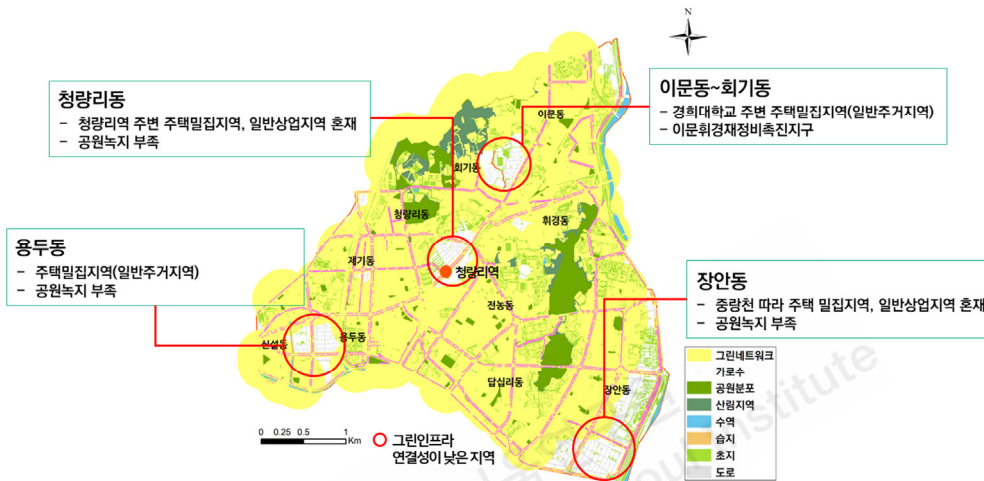
[그림 5-7] 동대문구 그린인프라 분포 및 토지이용현황

영등포구는 한강공원, 선유도 공원 등 총 128개 도시공원이 있으며, 주요 도로를 따라 가로수가 식재되어 있다. 안양천을 따라 대규모 준공업지역으로 분류되어 있으며, 여의도는 대부분 상업 및 준공업지역으로 지정되어 있다([그림 5-8]).



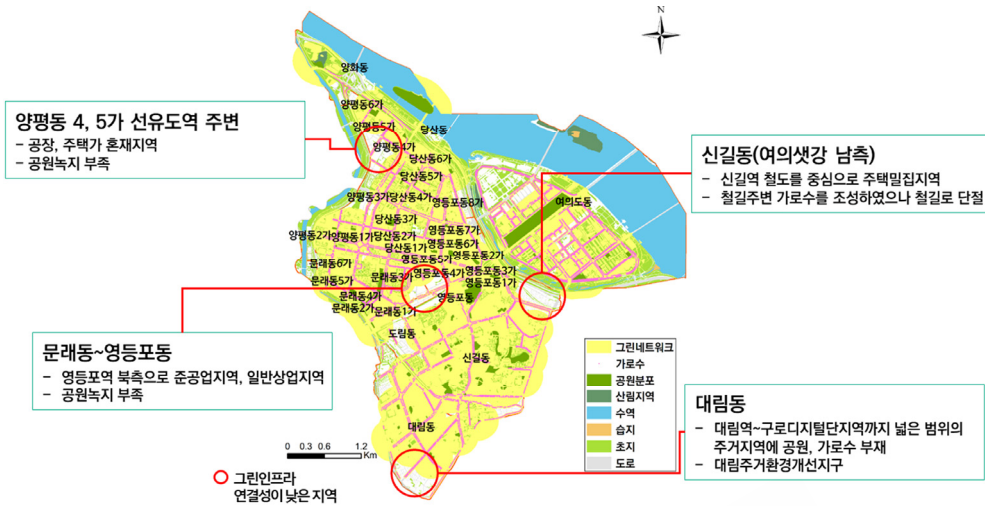
[그림 5-8] 영등포구 그린인프라 분포 및 토지이용현황

동대문구의 그린인프라 연결성을 분석한 결과, 청량리역 주변 재정비촉진지구, 장안동의 일반주거지역, 일반상업지 등이 공원에 대한 접근성이 낮고 상대적으로 현존녹지 분포 또한 낮은 지역으로 나타났다. 동대문구에서 그린인프라 연결성이 낮은 지역은 대체로 단독 주택 밀집지역으로서 공원녹지뿐만 아니라 가로수, 현존녹지 등이 부족한 지역이다.



[그림 5-9] 동대문구 그린인프라 연결성 분석 결과

영등포구의 그린인프라 연결성을 분석한 결과, 양평동 준공업지역, 영등포역 주변 준공업 지역과 일반상업지역, 대림동 주택밀집지역 등이 상대적으로 그린인프라 연결성이 낮은 지역으로 파악되었다. 인근에 공원이 없고 도로폭이 좁아 가로수가 조성되기 어려운 주택 밀집지역이 분포하며, 공장 등이 있는 준공업지역은 주거지와 공업지역이 혼합적으로 나타나며 도로가 넓은 편이나, 가로수와 공원녹지가 부족하다.



[그림 5-10] 영등포구 그린인프라 연결성 분석 결과

이 연구에서는 유형별 그린인프라 조성 방안을 제안하고자 동대문구, 영등포구 그린인프라 연결성 분석 결과 상대적으로 연결성이 낮은 지역에 대해 추가적으로 현장조사를 실시하였다. 동대문구는 장안동 남부 상업 및 주거지 1곳을 대상으로 하였으며, 영등포구 조사대상지는 공업지인 선유도역 부근 양평동 4, 5가와 대림동 남부 도림천 주변 주택밀집 지역 2곳을 대상으로 하였다.

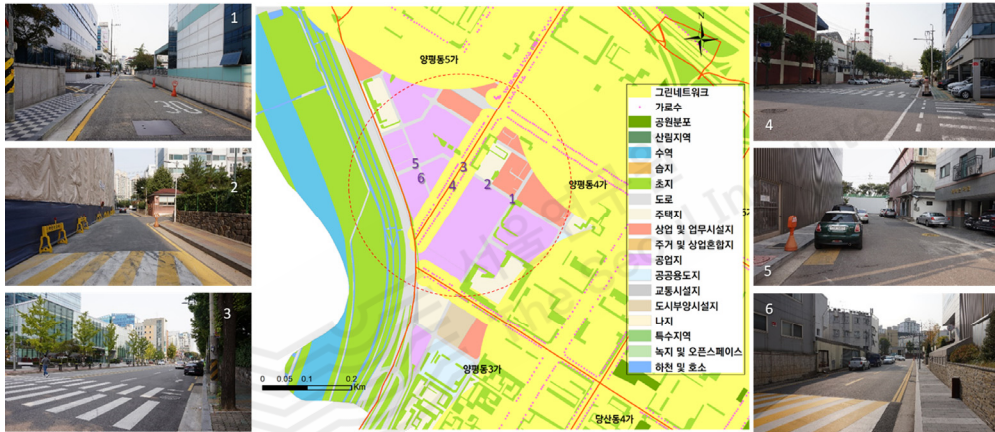
장안동 남부 조사대상지는 안골 어린이공원, 마나리 어린이공원의 소규모 어린이공원 두 곳만 구성되어 있어 공원녹지가 상대적으로 부족하고, 상업지역 내 가로수가 없어 그린인프라 연결성이 상대적으로 낮은 지역이다. 큰 대로를 중심으로 상업지역이 구성되어 있으며 일부 주거지가 혼재한다.

영등포구 양평동 4, 5가의 조사대상지는 공업지로 분류되어 있어 대규모 공장, 업무시설이 있으며, 소규모 주거지가 혼재하고, 부지가 넓음에도 공원녹지가 부족한 것으로 판단된다. 업무시설 주변으로 야외주차장이 조성되어 있고 차량통행이 많아, 도로를 따라 미세먼지의 주거지 유입이 높을 것으로 예상된다.

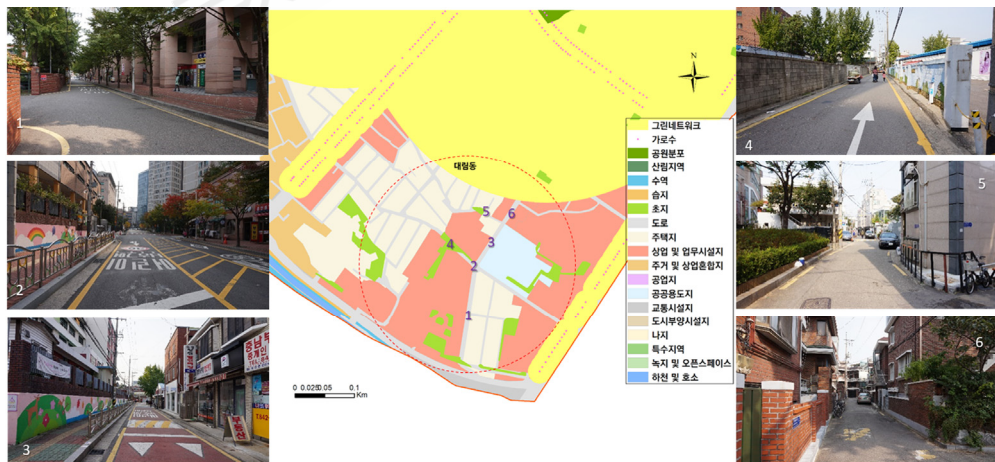
대림동 남부 조사대상지는 주택밀집지역으로 도로폭이 상당히 좁고 유희공간이 없어 공원녹지가 부족하며, 주거환경개선지구로 향후 충분한 공간의 공원녹지 조성이 필요하다.



[그림 5-11] 동대문구 조사대상지(장안동 남부)



[그림 5-12] 영등포구 조사대상지(양평동 4, 5가)



[그림 5-13] 영등포구 조사대상지(대림동 남부)

2_유형별 그린인프라의 조성 방식

1) 미세먼지 저감을 위한 그린인프라 조성

그린인프라 조성 공간이 제한적인 서울시 도시 특성에 따라 벽면녹화, 옥상녹화 등 건축물 입체녹화가 복합적으로 이루어져야 한다. 이에 그린인프라 연결성이 상대적으로 낮은 동대문구 장안동 남부 상업 및 주거지, 영등포구 공업지인 선유도역 부근 양평동 4, 5가, 대림동 남부 도림천 주변 주택밀집지역을 대상으로 주거, 상업, 공업, 대로로 구분하여 미세먼지 저감을 위한 그린인프라 조성 방식을 구상하였다.

주거지역은 대림동 주택밀집지역을 사례지역으로 하였다. 좌측의 철도, 도로가 있는 지역에서 주택지역으로 이동하는 미세먼지 흡착을 위해 사람 키 높이의 주거지 벽면녹화로 도로변 미세먼지를 흡착하고, 도로에서 주거지 방향과 수직으로 느티나무 열식을 통해 미세먼지와 철도, 도로의 소음을 차단하는 역할을 할 수 있도록 구상하였다.



[그림 5-14] 주거지역 그린인프라 조성

상업지역의 그린인프라 조성은 장안동 상업지역을 사례지역으로 하였다. 이 지역은 인도와 도로가 분리되어 있지 않고 가로수가 없으며, 차량의 통행이 잦으면서도 인구 이동이 많아 이에 적합한 그린인프라 조성이 필요하다. 중소규모의 느티나무 식재를 통해 미세먼지를 흡착하고, 바람의 이동을 원활하게 하여 미세먼지가 머물러 있지 않고 도로를 따라

외부로 배출할 수 있도록 교호식재를 구상하였다. 또한 차량 통행이 잦으므로 관목, 초본을 느티나무 하부에 다층식재하여 미세먼지 흡착을 유도하도록 하였다. 또한 상업지 벽면 녹화로 도시 미관 향상과 미세먼지 흡착 효과를 나타낼 수 있도록 구상하였다.



[그림 5-15] 상업지역 그린인프라 조성

공업지역의 그린인프라 조성은 공업지역과 주거지가 혼재하는 양평동을 사례지역으로 하였다. 이 지역은 공장이 크게 위치하여 있고 아파트 등 주거지가 넓은 도로를 두고 앞에 위치하여 공장과 도로로부터 발생되는 미세먼지에 상대적으로 노출되어 있어 이에 적합한 그린인프라 조성이 필요하다. 이에 공장을 따라 느티나무 밀식 식재를 통해 공장으로부터 미세먼지와 소음을 차단하고, 주거지로의 미세먼지 유입이 덜 되도록 주거지에서 도로방향으로 키 큰 느티나무, 키 작은 소나무(스트로브 잣나무), 관목, 초본 순서로 계단식 다층 밀식 식재를 구상하였다. 또한 넓은 도로 중앙에 초본과 관목으로 구성된 중앙분리대를 설치하여 도로변의 미세먼지를 흡착할 수 있도록 구상하였다.



[그림 5-16] 공업지, 주거지 혼재지역 그린인프라 조성

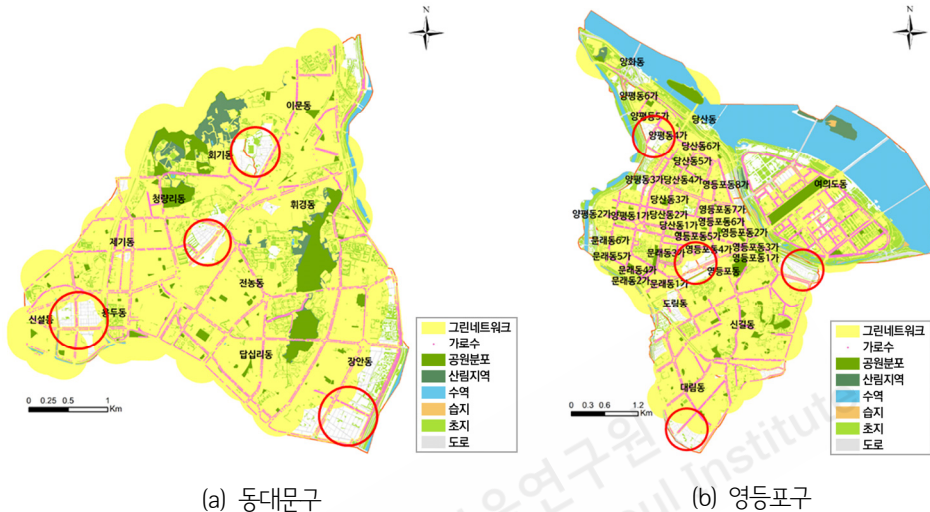
대로변, 가로 그린인프라 조성은 양평동을 사례지역으로 하였다. 준공업지역이 넓게 분포하고 있으며, 넓은 대로와 가로가 구성되어 있으나 상대적으로 가로수 조성이 미흡한 지역이다. 넓은 대로 옆에 인도가 넓게 분포할 경우 많은 차량 통행량을 고려하여 관목, 초본의 다층 밀식 식재를 통해 도로로부터의 미세먼지 흡착을 유도하며, 가로 내 느티나무 교호 식재를 통해 미세먼지를 흡착할 수 있도록 구상하였다.



[그림 5-17] 대로변, 가로 그린인프라 조성

2) 그린인프라 연결성을 고려한 공원 조성

우선적으로 미세먼지 농도가 상대적으로 높으면서 그린인프라 연결성이 상대적으로 낮은 지역에 공원녹지와 가로수 조성을 고려하여야 할 것으로 보인다(그림 5-18).



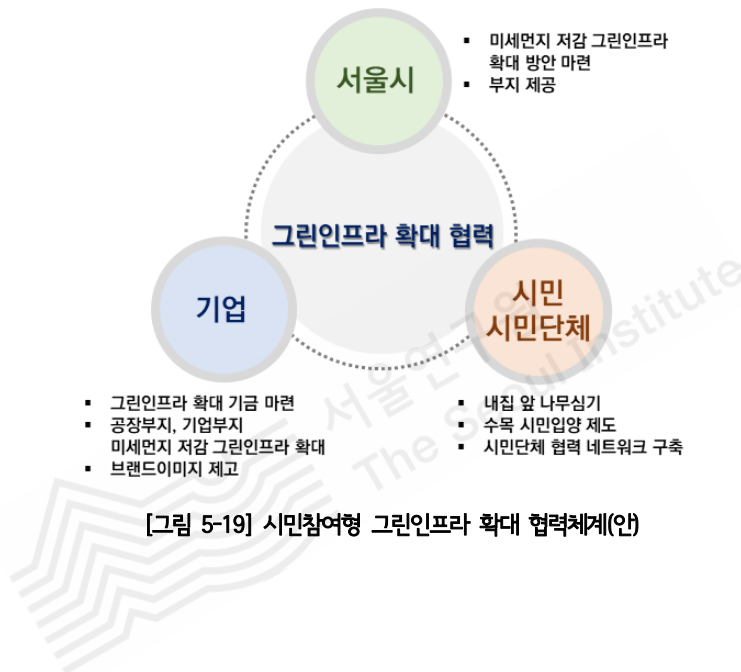
[그림 5-18] 공원녹지 및 가로수 배치 필요지역

조성 시 미세먼지 저감 효과가 상대적으로 높은 교목(느티나무)을 활용하여 다층구조 식재, 공원 내부 밀식 식재 등의 방법으로 조성할 필요가 있으며, 도심지 특성에 따라 옥상 녹화, 벽면녹화 등 건물녹화와 함께 공원 간에 연결성 있는 가로수 조성을 통해 연결성을 확보하여야 한다.

3) 시민참여를 통한 그린인프라 조성 체계 구축

효율적인 그린인프라 확대를 위해서는 무엇보다 시민인식이 가장 중요하다. 시민들이 미세먼지 저감을 위한 그린인프라의 중요성을 인식하고, 이를 조성하기 위한 실천 활동이 함께 이루어져야 효율적인 그린인프라 확대가 이루어질 수 있다. 기업 또한 미세먼지 저감을 위한 그린인프라의 역할을 이해하고, 관련 사업에 자발적으로 참여할 수 있도록 해야 한다. 이와 함께 서울시가 공공의 역할을 수행하여 그린인프라 확대 협력체계를 구축하여

야 한다. 이에 따라 서울시는 미세먼지 저감을 위한 그린인프라 확대 방안을 제시하고, 부지를 제공하는 역할을 수행한다. 기업은 그린인프라 확대를 위한 기금을 마련하고, 공장부지, 기업 부지를 대상으로 미세먼지 저감 그린인프라 확대를 실천함으로써 브랜드 이미지를 제고할 수 있다. 서울시와 기업이 시민 및 시민단체와의 협력 네트워크 구축을 통해 부지 나무심기, 수목 시민입양 제도 등을 추진하여 시민과 시민단체가 그린인프라 확대의 실천 축으로 활동할 수 있도록 그린인프라 확대 협력체계를 구축하여야 한다.



참고문헌

- 강정은·이명진·구유성·조연희, 2014, “도시물순환 개선을 위한 그린인프라 계획 프레임워크 개발 및 시범 적용 - 부산시 연제구 및 남구를 대상으로”, 『환경정책연구』, 13(3), pp.43~73.
- 경기개발연구원, 2009, 「도시 수목의 이산화탄소 흡수량 산정 및 흡수효과 증진 방안」.
- 국립산림과학원, 2014, 「기후변화 적응과 탄소흡수 증진 그리고 수종 육성」.
- 국립산림과학원, 2016, 「시민참여형 도시숲 조성 및 관리사례 1」.
- 국립산림과학원, 2018, 「도시숲 연구 및 정책의 최근 동향과 시사점」, 국제산림정책토크, 59.
- 국립환경과학원, 2016, 「그린인프라를 이용한 도시재해 대응방안 마련 연구(Ⅰ): 도시 열조절 기능을 중심으로」.
- 기획재정부 외, 2009, 「일자리 창출을 위한 녹색 New Deal 사업 추진방안」, 국무회의 보고자료.
- 김승현, 2012, “녹색기반시설에 의한 도시 강우유출 저감방안 연구 - 뉴욕시의 녹색기반시설 계획을 중심으로”, 『국토계획』, 47(4), pp.283~292.
- 김승현·조경진, 2015, “도시 물순환 회복을 위한 그린인프라 계획 및 설계에 관한 연구 - 조경계획 및 설계 해외사례 분석을 중심으로”, 『한국도시설계학회지』, 16(3), pp.37~51.
- 김용국·손용훈, 2012, “도시계획체계와 연계한 그린 인프라 적용 사례연구 - 영국 그린 인프라 계획 및 정책을 중심으로”, 『국토계획』, 47(5), pp.69~86.
- 김정규·고강숙, 1996, “가스상 대기오염물질에 대한 활엽수의 정화능력 평가인자”, 『한국환경농학회지』, 15(4), pp.472~478.
- 김태선, 2003, “도시주거지역 완충녹지의 대기오염 저감 효과”, 한양대학교 석사학위논문.
- 박은진·강규이, 2010, “경기도 도시가로수의 탄소저장량과 연간 이산화탄소 흡수량 산정”, 『한국환경생태학회지』, 24(5), pp.591~600.
- 박재철·양홍모·장병관, 2012, “녹색 인프라 구축을 위한 정책”, 『한국조경학회지』, 40(5), pp.43~50.
- 박찬열, 2018, “도시숲 연구 및 정책의 최근동향과 시사점”, 『국제산림정책토크』, 59, 국립산림과학원.
- 서울시 조경과, 2009, 「서울시 가로수 조성관리 기본계획」.
- 서울시 조경과, 2015, 「서울시 가로수 조성·관리 개선(안)」.
- 성현찬·문다미, 2003, “도시녹지의 대기정화효과에 대한 분석적 연구 - 도시 가로수를 중심으로”, 『한국환경복원 기술학회지』, 6(3), pp.17~28.

- 우수영·이성한·이동섭, 2004, “대기오염 피해를 받은 서울 시내 가로수의 엽록소함량과 광합성 특성”, 『한국농림기상학회지』, 6(1), pp.24~29.
- 유소연·구남인·오정학·박찬열, 2017, “도시숲 내 미세먼지 농도 변화 특성”, 『한국환경과학회 2017년 정기학술대회 발표논문집』, 26, p.191.
- 윤상준, 2016, “그린 인프라스트럭처 정책의 확대와 적용 - 런던플랜과 런던 그린그리드를 중심으로”, 『한국조경학회지』, 44(2), pp.83~95.
- 윤훈주·한광안·조성호·정병혁, 2015, “GIS 기반 PM10 미세먼지농도 실시간 서비스”, 『한국대기환경학회지』, 31(6), pp.585~592.
- 이은석·노초원·성종상, 2014, “그린인프라스트럭처의 의미구조 - 기존문헌의 정이문 분석을 중심으로”, 『한국조경학회지』, 42(2), pp.65~76.
- 정종철, 2014, “서울시 PM10 공간분포 분석과 시계열 변화”, 『한국지리정보학회지』, 17(1), pp.61~69.
- 조수준·김택민, 2009, “완충녹지대 대기오염 저감기능 보완방안 고찰 - 사회공단 완충녹지를 대상으로”, 『환경관리학회지』, 15(3), pp.145~154.
- 조현갈·김진영·박혜미, 2013, “도시 상록 조경수의 탄소저장 및 흡수 - 소나무와 잣나무를 대상으로”, 『한국환경생태학회지』, 27(5), pp.571~578.
- 조현갈·안태원, 2001, “도시생태계 수목의 대기정화 역할 - 용인시를 사례로”, 『한국조경학회지』, 29(3), pp.38~45.
- 조흥래·정종철, 2009, “공간보간기법에 의한 서울시 미세먼지(PM10)의 분포 분석”. 『환경영향평가학회지』, 18(1), pp.31~39.
- 주현수·김석철, 2009, “도심지역 녹지의 국지적 대기환경영향에 관한 연구”, 『한국화학공학회지』, 47(3), pp.386~393.
- 추용욱, 2018, “그린인프라와 녹색건축 그리고 강원도”, 『정책메모』, 684, 강원연구원,
- 한국환경정책·평가연구원, 2005, 「녹지의 대기환경영향에 관한 연구 - 도심지역에서의 녹지와 국지적 대기환경영향과의 상관관계를 중심으로」.
- 한국환경정책·평가연구원, 2009, 「신도시의 물순환 건전화를 위한 그린인프라 조성 기준에 대한 연구」.
- 한국환경정책·평가연구원, 2011, 「기후변화 적응형 도시 리뉴얼 전략 수립: 그린인프라의 방재효과 및 적용방안」.
- 한국환경정책·평가연구원, 2012, 「기후변화 적응형 도시구현을 위한 그린인프라 전략 수립」.
- 한봉호, 2008, “독일 슈투트가르트의 생태도시계획과 관리”, 『환경과 생명』, 58, pp.195~205.
- 허희염·김진오, 2017, “미세먼지 저감을 위한 식재기법 및 도시 녹지계획 방향”, 『한국조경학회지』, 45(5), pp.40~49.
- 환경부, 2009, 「기후변화 적응을 위한 한국형 그린인프라 구축방안 연구」.
- 환경부, 2016, 「바로알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?」.

황광일, 2016, “도로변 완충녹지의 식재구조에 따른 초미세먼지(PM_{2.5})농도 저감효과 연구 - 서울 송파구 완충녹지를 대상으로”, 서울시립대학교 석사학위논문.

황희재, 2012, “나뭇잎 형상에 따른 매연 제거 특성”, 한양대학교 석사학위논문.

Alcazar, P., Galan, C., Torres, C., & Dominguez-Vilches, E. (2015). **Detection of airborne allergen (Pla a 1) in relation to Platanus pollen in Cordoba, South Spain.** Annals of Agricultural and Environmental Medicine, 22(1).

Arnon, D. I. (1949). **Copper enzyme in isolated chloroplast: Polyphenol oxidase in *Beta vulgaris*.** Plant Physiology, 24: 1-15.

Asam, C., Hofer, H., Wolf, M., Aglas, L., & Wallner, M. (2015). **Tree pollen allergens?an update from a molecular perspective.** Allergy, 70(10), 1201-1211.

Benedict, M. A. and McMahon E. T., 2006, **Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities**, Island press.

Bottalico, F., Chirici, G., Giannetti, F., De Marco, A., Nocentini, S., Paoletti, E., Salbitano, F., Sanesi, G., Serenelli, C. & Travaglini, D. (2016). **Air pollution removal by green infrastructures and urban forests in the city of Florence.** Agriculture and agricultural science procedia, 8, 243-251.

Cai, M., Xin, Z., & Yu, X. (2017). **Patio-temporal variations in PM leaf deposition: A meta-analysis.** Environmental Pollution, 231, 207-218.

Chen, L., Liu, C., Zhang, L., Zou, R., & Zhang, Z. (2017). **Variation in tree species ability to capture and retain airborne fine particulate matter (PM_{2.5}).** Scientific reports, 7(1), 3206.

Cohen, A. J., Ross Anderson, H., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., ... & Smith, K. (2005). **The global burden of disease due to outdoor air pollution.** Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 68(13-14), 1301-1307.

Fernandez-Gonzalez, D., Gonzalez-Parrado, Z., Vega-Maray, A. M., Valencia-Barrera, R. M., Camazon-Izquierdo, B., De Nuntiis, P., & Mandrioli, P., 2010, **Platanus pollen allergen, Pla a 1: quantification in the atmosphere and influence on a sensitizing population,** Clinical & Experimental Allergy, 40(11), 1701-1708.

Hong, C. S., 2015, **Pollen allergy plants in Korea.** Allergy, Asthma & Respiratory Disease, 3(4), pp.239-254.

Jang, A. S., 2014, **Impact of particulate matter on health,** Journal of the Korean Medical Association, 57(9), pp.763-768.

- Jo, H. K., & Ahn, T. W., 2012, **Carbon storage and uptake by deciduous tree species for urban landscape**, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 40(5), pp.160-168.
- Jonckheere, I., Muys, B., & Coppin, P., 2005, **Allometry and evaluation of in situ optical LAI determination in Scots pine: a case study in Belgium**, Tree physiology, 25(6), pp.723-732.
- Keller, T., & Schwager, H., 1977, **Air pollution and ascorbic acid**, European Journal of Forest Pathology, 7(6), pp.338-350.
- Kume, A., Tsuboi, N., Satomura, T., Suzuki, M., Chiwa, M., Nakane, K. ... & Sakugawa, H., 2000, **Physiological characteristics of Japanese red pine, *Pinus densiflora* Sieb. et Zucc., in declined forests at Mt. Gokurakuji in Hiroshima Prefecture, Japan**, Trees, 14(6), pp.305-311.
- Liu, J. Cao, Z. Zou, S. Liu, H. Hai, X. Wang, S. Duan, J. Xi, B. Yan, G. Zhang, S. Jia, Z., 2018, **An investigation of the leaf retention capacity, efficiency and mechanism for atmospheric particulate matter of five greening tree species in Beijing, China**. Science of the Total Environment, 616, pp.417-426.
- Lu, S., Ren, J., Hao, X., Liu, D., Zhang, R., Wu, M. ... & Wang, Q., 2014, **Characterization of protein expression of Platanus pollen following exposure to gaseous pollutants and vehicle exhaust particles**. Aerobiologia, 30(3), pp.281-291.
- Manchester city council, 2015, **Manchester's Great Outdoors - A Green and Blue Infrastructure Strategy for Manchester**.
- Margitai, Z., Simon, E., Fábán, I., & Braun, M., 2017, **Inorganic chemical composition of dust deposited on oleander (*Nerium oleander* L.) leaves**, Air Quality, Atmosphere & Health, 10(3), pp.339-347.
- Mayer of London, 2018, **London Environmental Strategy**.
- McPherson, E. G., van Doorn, N. S., & Peper, P. J., 2016, **Urban tree database and allometric equations**. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-253. Albany, CA: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, p. 86.
- Mukherjee, A., & Agrawal, M., 2018, **Use of GLM approach to assess the responses of tropical trees to urban air pollution in relation to leaf functional traits and tree characteristics**, Ecotoxicology and environmental safety, 152, pp.42-54.
- Ministry of Environment, 2018, **Environmental Statistics Yearbook 2017**, Ministry of Environment, Korea.
- National Institute of Environmental Research, 2017, **Annual report of air quality in Korea 2016**, National Institute of Environmental Research, Korea.

- Nakaji, T., & Izuta, T., 2001, **Effects of ozone and/or excess soil nitrogen on growth, needle gas exchange rates and Rubisco contents of Pinus densiflora seedlings**, Water, Air, and Soil Pollution, 130(1-4), pp.971-976.
- Nowak, D. J., & Crane, D. E., 2000, **The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest structure and functions**. In: Hansen, Mark; Burk, Tom, eds. **Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century**, Gen. Tech. Rep. NC-212. St. Paul, MN: US Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station, 714-720, 212.
- Nowak, D. J., & Crane, D. E., 2002, **Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA.**, Environmental pollution, 116(3), pp.381-389.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C., 2006, **Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States**, Urban forestry & urban greening, 4(3-4), pp.115-123.
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Hoehn, R., 2013, **Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten US cities and associated health effects**, Environmental Pollution, 178, pp.395-402.
- Park, H. J., Lim, H. S., Park, K. H., Lee, J. H., Park, J. W., & Hong, C. S., 2014, **Changes in allergen sensitization over the last 30 years in Korea respiratory allergic patients: a single-center**, Allergy, asthma & immunology research, 6(5), pp.434-443.
- Peper, P. J., McPherson, E. G., & Mori, S. M., 2001, **Equations for predicting diameter, height, crown width, and leaf area of San Joaquin Valley street trees**, journal of Arboriculture, 27(6), pp.306-317.
- Rai P. K., 2011, **Dust deposition capacity of certain roadside plants in Aizawl, Mizoram: Implications for environmental geomagnetic studies**, In: Recent Advances in Civil Engineering S.B. Dwivedi et al.(Eds), pp.66-73.
- Rai, P. K., & Panda, L. L., 2014, **Dust capturing potential and air pollution tolerance index (APTI) of some road side tree vegetation in Aizawl, Mizoram, India: an Indo-Burma hot spot region**, Air Quality, Atmosphere & Health, 7(1), pp.93-101.
- Sadeghian, M. M., & Mortazaienezhad, F., 2012, **Selection and identification of air pollution-tolerant plants by air pollution tolerance index (APTI) in urban parks of Isfahan, Iran**, African Journal of Biotechnology, 11(55), pp.11826-11829.
- Scala, E., 2013, **Molecule-based diagnosis and allergen immunotherapy**, Eur Ann Allergy Clin Immunol, 45(Suppl 2), pp.25-32.
- Schaubroeck, T., Deckmyn, G., Neiryneck, J., Staelens, J., Adriaenssens, S., Dewulf, J., ... & Verheyen, K., 2014, **Multilayered modeling of particulate matter removal by a growing forest over time, from plant surface deposition to washoff via rainfall**, Environmental science & technology, 48(18),

pp.10785-10794.

Schleicher, N. J., Norra, S., Chai, F., Chen, Y., Wang, S., Cen, K., Yu, Y. & Stüben, D., 2011, **Temporal variability of trace metal mobility of urban particulate matter from Beijing-A contribution to health impact assessments of aerosols**, Atmospheric Environment, 45(39), pp.7248-7265.

Semenzato, P., Cattaneo, D., & Dainese, M., 2011, **Growth prediction for five tree species in an Italian urban forest**, Urban forestry & urban greening, 10(3), pp.169-176.

Shaw, P. J. A., HOLLAND, M. R., Darrall, N. M., & McLeod, A. R., 1993, **The occurrence of SO₂-related foliar symptoms on Scots pine (Pinus sylvestris L.) in an open-air forest fumigation experiment**, New phytologist, 123(1), pp.143-152.

Shi, J., Zhang, G., An, H., Yin, W., & Xia, X., 2017, **Quantifying the particulate matter accumulation on leaf surfaces of urban plants in Beijing, China**, Atmospheric Pollution Research, 8(5), pp.836-842.

Song, Y., Maher, B. A., Li, F., Wang, X., Sun, X., & Zhang, H., 2015, **Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: source identification and size distribution**, Atmospheric Environment, 105, pp.53-60.

Tallis, M., Taylor, G., Sinnett, D., & Freer-Smith, P., 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(2), pp.129-138.

Thambavani, S. D., & Sabitha, M. A., 2011, **Variation in air pollution tolerance index and anticipated performance index of plants near a sugar factory: implications for landscape-plant species selection for industrial areas**, Journal of research in Biology, 7, pp.494-502.

The president's Council on Sustainable Development, 1999, **Towards a Sustainable America**.

Uni, D., & Katra, I., 2017, **Airborne dust absorption by semi-arid forests reduces PM pollution in nearby urban environments**, Science of the Total Environment, 598, pp.984-992.

Wang, L., Gong, H., Liao, W., & Wang, Z., 2015, **Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion**, Science of the Total Environment, 532, pp.420-434.

XinXiao Yu, 2018, Regulation on PM_{2.5} and Other Atmospheric Particulate Matter by Forests, 한중심 포지엄(2018.03) 발표자료.

<http://cleanair.seoul.go.kr/main.htm>(서울시 대기환경정보시스템)

<http://data.seoul.go.kr/>(서울열린데이터광장)

<https://egis.me.go.kr/>(환경공간정보서비스)

<https://www.epa.gov/>(US EPA)

<http://www.forest.go.kr/>(산림청 홈페이지)

<https://greencitysolutions.de/>(그린시티솔루션 홈페이지)

<https://www.london.gov.uk/what-we-do/environment/parks-green-spaces-and-biodiversity/pocket-parks-map>(런던 포켓파크맵)

<http://www.nature.go.kr/>(국가생물종지식정보시스템)

<http://opengov.seoul.go.kr/data/14732526>(서울시 가로수 현황 통계)

<https://seoulsolution.kr/ko/living-Infrastructure>(서울정책아카이브)

<https://www.stuttgart.de/>(슈투트가르트 홈페이지)

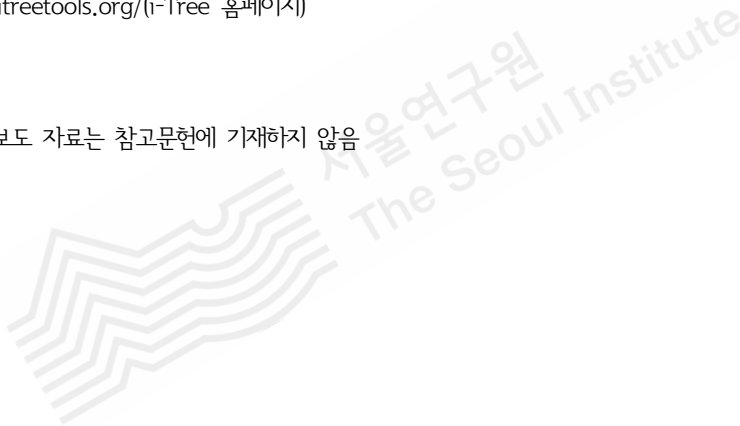
<http://upis.go.kr/upispweb/>(도시계획통합정보서비스)

<http://www.me.go.kr/issue/finedust4/>(환경부 홈페이지)

<http://www.mapo.go.kr/>(마포구청 홈페이지)

[https://www.itreetools.org/\(i-Tree](https://www.itreetools.org/(i-Tree) 홈페이지)

※ 관련 언론보도 자료는 참고문헌에 기재하지 않음



Abstract

Evaluation on the Reduction Effect of Particulate Matter through Green Infrastructure and Its Expansion Plans

Won-Ju Kim · Su-Young Woo · Cho-Rong Yoon · Myeong-Ja Kwak

Outdoor activities have been recently restricted because of the occurrence of particulate matter. Moreover, people have increased concerns on health effects due to the growth of particulate matter. After identifying particulate matter as a disaster, the city of Seoul is taking measures to limit the operation of vehicles and their pollution during the issuance of emergency reduction actions. This done with the aim of ensuring that emissions and exposure are reduced. However, besides preventive measures, various measures should be put in place to reduce particulate matter that has been already generated. In this respect, the importance of green infrastructures, such as parks, green spaces and trees in urban areas is increasing as one of the ways to reduce particulate matter. In order to understand the reduction effects of particulate matter on trees in the city, the particulate matter adsorption of the trees was analyzed through field measurements that targeted the street trees in the major roadsides of Seoul. Expansion plans for green infrastructure, such as theselection of appropriate species to reduce particulate matter and methods of arranging the trees were proposed. The main contents were categorized into analysis of trends related to green infrastructure, review of domestic and foreign green infrastructures related to air pollution, analysis on particulate matter reduction effect on green infrastructure, and proposition on green infrastructure expansion plans for coping with particulate matter.

In the analysis of trends related to green infrastructures, the green and street trees were selected as green infrastructure for reducing the particulate matter. The green infrastructure of Seoul was analyzed. In addition, previous studies on green infrastructure for particulate matter reduction were reviewed.

Second, the domestic and foreign green infrastructure cases related to air pollution were reviewed. The cases for green infrastructure policy related to overseas air pollution were also reviewed. As a result of examining the instances of green infrastructures for particulate matter reduction, a review was done on the city forest(taking into consideration the wind path of Stuttgart in Germany), green wall of Europe and domestic cases, such as the composition of urban forests for reduction of particulate matter, greening business, and the particulate matter reduction bench.

Third, the effect of particulate matter reduction on green infrastructure was analyzed. Through the analysis of the current status of tree species in Seoul, the *Ginkgo biloba* L., *Platanus occidentalis* L., *Zelkova serrata* (Thunb.)Makino, *Prunus yedoensis* Matsum, and *Pinus densiflora* Siebold & Zucc. in Seoul Forest and Yangjae Citizen's Forest were selected. From the analysis of particulate matter adsorption in major species, the species that most effectively adsorbs particulate matter per unit area was the *Zelkova serrata* (Thunb.)Makino and *Platanus occidentalis* L. The amount of particulate matter adsorption by leaf area index(LAI) was 1.4~2.5g/m² for the *Zelkova serrata* (Thunb.)Makino, 0.8g/m² for *Platanus occidentalis* L., 0.4~0.9g/m² for *Pinus densiflora* Siebold & Zucc., 0.5~0.7g/m² for *Prunus yedoensis* Matsum, and 0.2~0.4g/m² for *Ginkgo biloba* L. The amount of particulate matter adsorption per tree within the range of DBH for the target trees was 66.6g average for *Zelkova serrata* (Thunb.)Makino, showing that it had a relatively more particulate matter adsorption effect(37~96g/tree). The air pollution tolerance index per tree within the Seoul Forest and Yangjae Citizen's Forest did not show any statistically significant difference. However, the air pollution resistance index for the *Platanus occidentalis* L., *Pinus densiflora* Siebold & Zucc., and *Prunus yedoensis* Matsum, were

relatively higher. However, all the five species did show similar figures. Depending on the location and pruning of the target trees, the amount of adsorption varied. The number of analysis on particulate matter adsorption was insignificant and focused only towards a certain season. As a result, the estimated amount of particulate matter per tree may have some deviation. In the future, all seasonal repeat measurements are required for more accurate results. Moreover, a complex review of various variables is required. In addition, a planting method should also be developed.

From the study of analyzing the distribution of particulate matter and green infrastructure in Seoul, the results showed that the large green areas had a relatively low concentration compared to other areas. To propose a green infrastructure expansion deployment plan, a green infrastructure connectivity was analyzed, targeting built-up areas having relatively high particulate matter and Yeongdeungpo-gu and Dongdaemun-gu with low green areas. Based on previous researches, a proposal was made by applying green infrastructure elements for reducing particulate matter.

Finally, a green infrastructure expansion plan for coping with particulate matter was proposed. Based on urban characteristics and given the limited green space area of Seoul, in order to reduce particulate matter during urban greening, it is necessary to utilize plant species that have relatively high adsorption ability against the particulate matter. Since the trees that had a high total leaf area or area index while having a high per unit adsorption area had higher adsorption amount of particulate matter, the *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino is relatively the most efficient. However, since deciduous forest trees do not have leaves in autumn and winter, the adsorption effects of the particulate matter can be reduced, whereas the pine and evergreen needle-leaf trees can be said to be relatively effective for particulate matter reduction during winter and early spring. Therefore, by planting the evergreen trees together, the seasonal characteristics of particulate matter reduction should be complemented. The key to green infrastructure deployment for the reduction of particulate matter is the fact that trees and greenery play

a role of blocking and filtering particulate matter, and multi-layered planting is important. During multi-layer planting the method of arbor + arborescent + shrub + herb is the same. However, in the case of a residential area requiring protection from particulate matter vertically from the source, a dense and stepped arrangement is effective. Meanwhile, for the areas where smooth dust emission is required, a composite arrangement is effective such that polluted air is discharged to the outside of the city through a constant gap between the trees. However, since in Seoul there is no room for green space due to the city's characteristics, it is desirable to consider stereoscopic greening, such as wall greening and rooftop greening. Moreover, in order to efficiently expand the green infrastructure, we proposed ways to build a green infrastructure system through citizen participation.



Contents

01 Introduction

- 1_Background and Purpose
- 2_Main Contents and Research Methods

02 Green Infrastructure and Particulate Matter

- 1_Green Infrastructure Concepts and Elements
- 2_Review of Previous Studies
- 3_Status of Green Infrastructure in Seoul

03 Cases of Managing the Particulate Matter using Green Infrastructure

- 1_External Green Infrastructure Policy and Structuring
- 2_Internal Green Infrastructure Structuring

04 Analysis on the Reduction Effect of Particulate Matter by Green Infrastructure

- 1_Analysis on the Adsorption Effect of Particulate Matter by Tree Species
- 2_Air Pollution Removal Evaluation by Tree Species
- 3_Results and Implications of Analysis

05 Green infrastructure Expansion Plans for Reduction of Particulate Matter

- 1_Expanding of Green Infrastructure Connection
- 2_Planning of Green Infrastructure by Types

서울연 2018-PR-36

그린인프라의
미세먼지 저감효과
분석과 확대 방안

발행인 _ 서왕진

발행일 _ 2018년 11월 24일

발행처 _ 서울연구원

ISBN 979-11-5700-381-5 93330 8,000원

06756 서울특별시 서초구 남부순환로 340길 57

본 출판물의 판권은 서울연구원에 속합니다.