



공동주택 저층부 식재배치 계획에 따른 미세먼지 저감 효과 분석 - 서울시 리모델링 공동주택 실증단지를 중심으로 -

*Analysis for Reducing Fine Dust in the Pedestrian Level of Apartment Complex
- Focused on Demonstration Complex of Remodeling Apartment Housing in Seoul -*

김동준* · 권진화** · 이주왕*** · 김기석****

Dong-Jun Kim* · Jin-Hwa Kwon** · Ju-Wang Lee*** · Gi-Seok Kim****

* Graduate Student, Dept. of Urban Design and Planning, Hongik Univ., South Korea (imissyou1988@nate.com)

** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Urban Design and Planning, Hongik Univ., South Korea (k_evolution@hanmail.net)

*** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Urban Design and Planning, Hongik Univ., South Korea (lklk9947@naver.com)

**** Corresponding author, Researcher, Center for Sustainable Buildings, Yonsei Univ., South Korea (giseok_kim@yonsei.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: In Korea, since industrialization through compressed growth in the 1970s, population growth and urban concentration have emerged, resulting in a variety of environmental problems. Among them, fine dust has recently been recognized as a serious environmental problem, raising its risk and alertness. In the construction sector, pedestrian-first outer space was planned in low-rise areas to remodel sustainable apartment complexes. This method is the right way to create a pleasant external environment in an apartment house by creating an open space and recording in an external space. **Method:** In this study, a study was conducted on the arrangement of low-rise plants to reduce fine dust in one apartment complex where remodeling was conducted. Trees those are effective in reducing fine dust have the ability to absorb fine dust and settle fine dust when it rains. In particular, conifers were found to have better performance than broad-leaved trees. We selected two types of conifers and set up an equation for how much fine dust remains depending on the planting density. **Result:** The conclusions of the study are as follows. First, the microclimate environment was improved due to changes in the low-rise space when remodeling old apartments. Second, the rate of fine dust removal in the complex was found to be effective when setting up trees and shrubs as coniferous trees that are excellent for reducing fine dust. Third, if the wind speed is maintained at a certain speed, it is excellent for reducing fine dust. This study is meaningful in suggesting the right external space landscaping measures in the "Seoul Metropolitan City Remodeling Policy Direction," which will make the low-rise a pedestrian-centered nature-friendly space when remodeling old apartments in the future.

© 2021. KIEAE all rights reserved.

KEYWORD

미세먼지 저감
식재 배치
풍속 효과
공동주택 리모델링
다변량 분석

Reduction of Fine Dust
Planting Arrangement
Wind Speed Effect
Apartment Housing Remodeling
Multivariate Analysis

ACCEPTANCE INFO

Received Apr. 15, 2021

Final revision received May. 24, 2021

Accepted May. 28, 2021

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

국내의 경우 1970년대 압축 성장을 통한 산업화 이후로 인구 증가 및 도시집중화 현상이 나타나게 되어 부수적으로 다양한 환경문제가 발생하게 되었다. 최근에 급격한 지구 온난화로 이상 기후 현상이 빈번하게 발생함과 동시에 미세먼지에 대한 국민적 관심 및 우려가 커지고 있다. 국내에서 발생한 미세먼지 뿐만 아니라 미세먼지 대기 오염 정도가 심각한 중국과 인접해있어 편서풍 영향으로 더욱 국내 대기 질 상태는 심각한 수준이다.

미세먼지란 Fig. 1.과 같이 입자의 크기가 매우 작은 먼지(PM, Particulate Matter)란 뜻으로, 10 μ m보다 작은 미세먼지(PM10)와 지름이 2.5 μ m보다 작은 초미세먼지(PM2.5)로 나뉜다. 이러한 미세먼지는 눈에 보이지 않을 만큼 작은 크기이기 때문에 대기 중에 머물러 있다가 인체 호흡기를 통해 체내로 이동하게 되면서 건강에 해를

끼치게 된다. 세계보건기구(WHO)는 미세먼지에 대한 대기질 가이드라인을 1987년부터 제시해 왔고, 2013년에는 세계보건기구 산하의 국제암연구소(IARC, International Agency for Research on Cancer)에서 미세먼지를 사람에게 발암이 확인된 1군 발암물질(Group1)로 지정하였다[1]. 이에 환경부에서는 2018.03부터 Fig. 2.와 같이 지름 2.5 μ m 이하인 초미세먼지 환경기준을 일평균

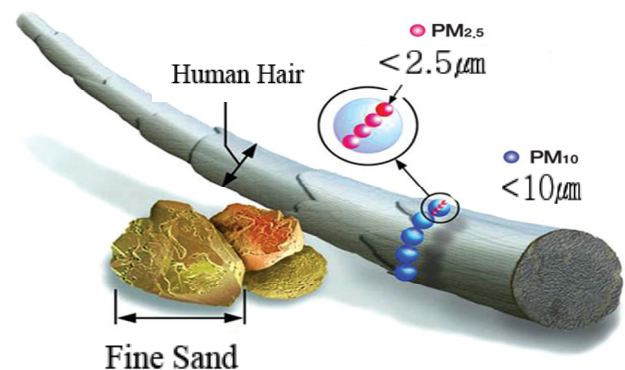


Fig. 1. Definition of fine dust

35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 연평균 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화하는 「환경정책기본법 시행령」을 지정하여 시행하고 있으며, 이는 미국과 일본과 동일한 수준이다[2].

이처럼 미세먼지 이슈는 최근에 심각한 환경문제로 인식되면서 그 위해성과 경각심이 높아지게 되었다. 최근 국내 주요 도시의 미세먼지(PM10) 농도는 Fig. 3.과 같이 줄어드는 추세인 반면, 초미세먼지(PM2.5)의 농도는 크게 줄어들지 않고 있어 국민건강에 악영향을 주고 있다[3-4]. 서울의 경우 Fig. 4.에서 살펴보면 2015년부터 최근까지 일평균 초미세먼지(PM2.5) 농도가 대기환경기준의 ‘매우 나쁨’ 수준인 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 넘는 빈도가 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며[5], 특히 2018년과 2019년에는 ‘매우 나쁨’의 수준의 고농도 초미세먼지(PM2.5)가 나타나는 빈도가 증가하였다[6]. 이에 국가 차원에서 「미세먼지 저감 및 관리에 대한 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 시 차원의 대책을 마련하여 시행하고 있다. 그러나 국내 예방적 차원의 미세먼지 대책 이외에 미세먼지를 줄일 수 있는

다양한 방안이 강구되어야 한다[7].

건축 분야에서도 이러한 상황에 직면하여 미세먼지 저감을 위한 다양한 방법을 모색 중이다. 특히 주거 환경에 있어서 쾌적성은 매우 중요한 요소로 도심지에 있는 주거공간일수록 쾌적한 외부 공간에 대한 고려는 필수적이다. 서울은 1980년대 후반에 정부의 강력한 주택건설 촉진 정책을 비롯하여 소득수준 향상에 따른 중산층의 폭발적인 주택 수요에 기인하여 공동주택 공급이 증가하였다[8]. 이 때 당시의 공동주택 디자인은 획일적으로 남향의 바둑판식 배치가 주를 이루었으며, 시공의 효율성 및 경제성을 위해 외부공간의 대부분은 주차의 목적으로 아스팔트나 시멘트로 포장되었다. 이러한 외부공간 조성으로 인해 단지 내 대류현상이 원활하게 이루어지지 않아 대기 오염물질 및 미세먼지들이 정체하게 되면서 단지 내 쾌적성을 저해하게 되었다.

서울시의 경우 산업화 이후 공동주택의 보급이 급진적으로 이루어졌기 때문에 건물 노후화가 대두되었다. Table 1.과 같이 서울시 공동주택 사용 연수별 현황을 살펴본 결과, 2019년을 기준으로 전체 단지 수는 20,080동이다. 사용 승인 후 30년 이상 된 건축물은 3,542동으로 전체의 약 17.6%를 차지하고 있으며, 15년 이상 된 건축물은 3,775동으로 전체의 약 18.8%에 해당한다[9]. 이러한 경향을 통해 시간이 경과할수록 노후 공동주택의 수가 늘어날 것으로 예측할 수 있다.

노후 공동주택의 경우 이러한 문제를 해결하기 위해 재개발, 재건축과 같은 ‘전면적 철거에 의한 개발방식’이 진행되었다. 이 방식은 노후·불량 주거를 개선함으로써 주거수준의 향상과 안전성을 도모하고, 도시 내 토지 이용도를 극대화 할 수 있는 긍정적인 측면이 있다. 그러나 이러한 개발 방식들이 환경문제, 자원낭비, 부동산투기 등 사회적으로 많은 문제를 일으켰기에 이를 개선하기 위한 대안으로 리모델링이 등장하였다[10].

「건축법」에서는 리모델링을 “건축물의 노후화를 억제하거나 기능 향상 등을 위하여 대수선하거나 일부 증축하는 행위”라 정의하고 있다(제2조)[11]. 「주택법」에서는 리모델링을 “건축물의 노후화 억제 또는 기능 향상 등을 위하여 대수선을 하거나 일정 범위에서 증축을 하는 행위”라 정의하고 있다(제2조)[12].

2003년 정부는 노후화된 공동주택 리모델링 허용 연한을 20년에서 13년으로 완화시켰고, 2016년에는 공동주택 각 세대주들의 의견권 75% 이상의 동의로 리모델링 허가를 받을 수 있도록 「주택법 시행령」 일부를 개정하였다. 서울시는 도시경관을 저해하는 노후된 건축물의 리모델링을 활성화하기 위해 2010년 9월 ‘리모델링 활성화 시

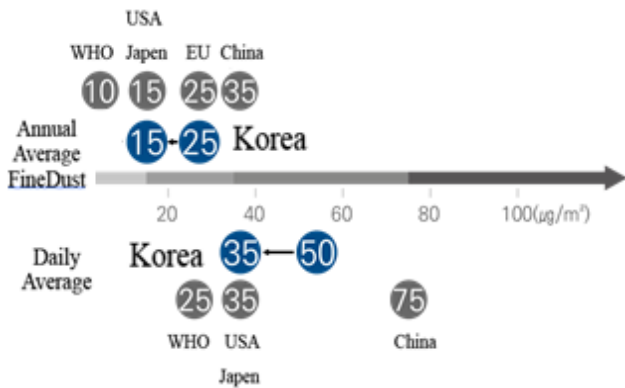


Fig. 2. Enhancement of environmental standards

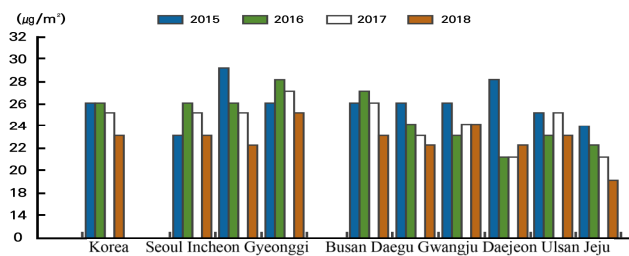


Fig. 3. Annual average concentration of ultrafine dust by major city

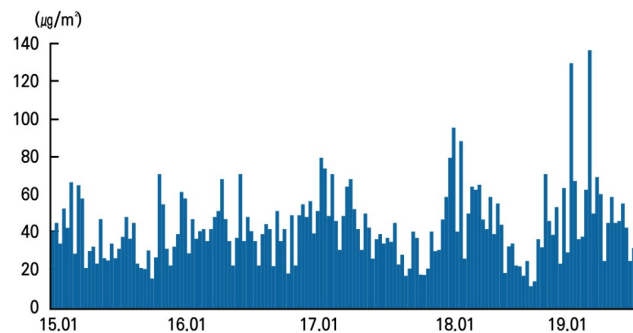


Fig. 4. Daily average concentration of ultrafine dust in Seoul

Table 1. Current status by year of use of apartment houses in Seoul

	Number of complexes	Number of buildings	Number of households
Total	4,177	20,080	1,529,618
Less than 5 years	249	1,841	142,558
5~10 years	406	2,805	178,271
10~15 years	897	3,612	241,256
15~20 years	963	3,775	310,427
20~30 years	953	3,899	387,204
30~40 years	573	3,542	235,268
40~50 years	126	587	33,639
More than 50 years	13	19	995

범구역 6개소'를 선정하였다[13]. 이후 2016년 5월 '2025 서울특별시 공동주택 리모델링 기본계획'을 계획하여 서울시 공동주택 현황, 사업 추진 현황, 리모델링 개념 정립 및 수요를 예측하였으며, 각 부문 별로 리모델링 계획을 유형화하였다. 지속가능한 공동주택 단지로 재생시키기 위해 저층부는 보행우선 외부공간으로 계획하였다. 또한 기존 지상주차장이 주를 이루던 외부공간에 녹화 및 오픈스페이스를 조성하고, 주차문제를 해결하기 위해 지하주차장을 신설하는 등의 방식으로 외부공간을 개선하고자 하였으며, 이는 공동주택 내에 쾌적한 외부환경을 조성할 수 있는 올바른 방안이라고 할 수 있다[14].

본 연구에서는 리모델링을 실시한 공동주택 단지 한 곳을 대상으로 미세먼지 저감을 위한 저층부 식재배치에 관한 연구를 하고자 한다. 현재 저층부의 식재 배치와 미세먼지 저감형 식재 밀도를 반영한 대안들을 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 이를 통해 미기후 환경에 대해 평가한 후 각 조경 식재배치 대안별로 현황 대비 미세먼지 제거량을 산정하여 공동주택 리모델링 시 외부공간 식재 배치에 대한 개선방향을 제시하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구의 분석대상은 2020년 서울의 공동주택 리모델링 준공완료 단지 13개소 중 지역별 미세먼지 공해 정도, 경사 유무, 저층부 필로티 유무, 대로변 접변 유무를 기준으로 Table 2. 중 서울시 당산동 S아파트를 선정하였다[14]. 대상지의 리모델링 과정 및 현황에 대해 살펴보고, 저층부의 현재 식재 배치 및 대지의 피복상태를 조사하였다. 또한 AWS(자동기상관측장비)를 통하여 주 풍향, 대기환경 기초자료를 수집하였다. 현재 저층부 식재배치와 각 식재밀도에 따른 식재배치 개선안 3개를 분석하는데 있어 정량적으로 평가하기 위해 ENVI-met 시뮬레이션을 이용하였다. 식재배치 개선안을 계획하는데 있어 선행연구를 통하여 미세먼지 저감에 효율적인 수목을 선정 및 정량화하였다. '선정된 수목의 면적 침착량'과 '풍속-미세먼지와의 상관관계'를 식으로 도출하여 ENVI-met의 미기후 데이터를 기반으로 다변량분석을 실시하였다. 각 안별로 미기후 환경(기온, 풍속, 풍향)을 분석하여 평가하고, 미세먼지 제거율을 평가하였다. 시간적 범위는 2019년 초미세먼지(PM2.5)가 가장 심했던 1월 14일 17:00~19:00로 선정하였다.

2. 선행연구 고찰

2.1. 미세먼지 저감 관련 연구

미세먼지 저감 관련 연구들은 건축·조경·교통 분야에서 활발하게 진행되고 있다. 건축 분야에서는 배치계획, 입면계획, 환기설비가 주를 이루었고, 조경 분야에서는 식재기법, 수종 선정, 도시숲 정비, 교통 분야에서는 제도개선, 환경정비, 교통수단 개선 방향으로 연구가 진행되었다.

건축 분야에 관한 연구는 다음과 같다. 김현주 등은 공동주택 실내에서 광산란 방법을 사용하여 미세먼지 농도변화를 조사하고, 적절한 환기방법으로 미세먼지를 비롯한 유해물질 저감 방식을 제안하였다[15]. 남성우 등은 미세먼지 저감과 분산을 위한 도시계획적 기법을 발굴하기 위해 세종시 건축물 자료를 활용하여 CFD 시뮬레이션

기반 풍향·풍속 변화 예측을 통해 오픈스페이스와 건축물간의 상관성을 모의실험하였다[16]. 김민주 등은 공동주택에 설치되어 있는 열회수장치의 성능을 비교 분석하여, 이를 극복할 수 있는 프리필터 시스템을 개발하여 환기장치에 적용 가능한 미세먼지 저감 방안을 제시하였다[17]. 엄예슬 등은 주거건물용 이중외피 통합형 전기집진기의 미세먼지 제거율과 집진효율 해석을 위하여 CFD를 활용한 미세먼지 집진해석방법을 제시하여 이중외피 통합형 설계 기법을 제안하

Table 2. Remodeled apartment in Seoul (As of 2020)

Status Map		
Location	Apartment name	
1	Ichon-dong, Yongsan-gu	Ichon Royal Mansion
2	Ichon-dong, Yongsan-gu	Ichon Doosan Weve Fresium Apartment
3	Bangbae-dong, Seocho-gu	Bangbae Ssangyong Yega Classic
4	Bangbae-dong, Seocho-gu	Bangbae Avenue
5	Dangsan-dong, Yeongdeungpo-gu	Ssangyong Yega Classic
6	Changjeon-dong, Mapo-gu	Central Heights
7	Dogok-dong, Gangnam-gu	Dogok Ssangyong Yega Classic
8	Hyeonseok-dong, Mapo-gu	Bamsum Ssangyong Yega Classic
9	Ahyeon-dong, Mapo-gu	Yemiwon Apartment
10	Gwangjang-dong, Gwangjin-gu	Walkerhill Prugio
11	Daechi-dong, Gangnam-gu	Daechi 2 Woo Sung
12	Cheongdam-dong, Gangnam-gu	Cheongdam Raemian Roy View Apartment
13	Cheongdam-dong, Gangnam-gu	Cheongdam I-Park

였다[18]. 이정원 등은 바이오미미크리 적용 방향의 설정을 위해 기존 미세먼지 차단 방안에 대해 고찰을 하고, 사례분석을 통해 생체의 원리를 건축적으로 적용할 수 있는 방안을 제시하였다[19].

조경 분야에 관한 연구는 다음과 같다. 구민아는 도시 내 근린공원 중심이 입구에 비해 미세먼지가 어느 정도 저감된 공간인지 분석하고, 미세먼지 저감률과 미세먼지 농도, 공원의 규모의 상관관계를 파악하였다[20]. 조동길은 퍼지다기준 의사결정법을 활용하여 미세먼지 저감에 영향을 미치는 8가지 지표를 선정하여 도심 내 미세먼지 저감 식재를 위한 수준 기준을 마련하고, 설문조사를 통하여 순위를 정하였다[21]. 서울연구원은 그린인프라와 미세먼지와 관련된 동향 분석, 그린인프라의 미세먼지 저감 효과 분석, 미세먼지 대응을 위한 그린인프라 확대 방안을 제안하였다[22]. 황광일 등은 대상지를 송파구를 설정하고 5개의 완충녹지에서 현장조사를 실시하여 초미세먼지 농도를 측정하고, 미세먼지 저감을 위한 식재구조에 대해 제안하였다[23]. 허희엽·김진오는 미세먼지 저감을 위한 공간 유형별 도시녹지 조성원칙을 도출하고, 이를 활용하여 중국 베이징시의 실제 도시녹화사례를 분석하여 개선방안을 제안하였다[24].

교통 분야에 관한 연구는 다음과 같다. 강철구·전소영은 국내 미세먼지 저감을 위해 전기차·수소차의 보급 현황을 살펴보고, 확대하기 위한 정책 및 제도에 대해 방안을 강구하였다[25]. 조태준·김태수는 필터가 장착된 먼지 감소 팬을 포함하여 새로운 Composite Cyclone Scrubber을 개발하여, 도로 환경 정비 시 청소 유지 관리 예산을 최소화하였다[26]. 김남옥은 국내 자동차 미세먼지 저감 법제의 체계를 살펴본 후 자동차 배출가스 허용기준 강화, 운행 제한, 브레이크 패드 및 타이어 분진관리 효율화, 클린디젤 지원제도 폐지, 국가배상책임 등을 검토하여 합리적인 개선방안을 제시하였다[27]. 김혜원·이정옥은 미세먼지 저감을 위한 서울시 대중교통 무료 운행 정책을 전문가의 정치적 관리 관점에서 분석하여 정책방향에 대한 개선을 제시하였다[28]. 서울연구원은 국내·외 도로재미산먼지 저감 사례조사, 서울시 도로 대상의 도로청소 효과 분석 결과 등을 토대로 법제도의 개선 관리 및 대응 방향을 제시하였다[7].

2.2. 연구의 차별성

현재 국내에서는 미세먼지 저감을 위해 건축·조경·교통 부문에서 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구들과 더불어 공동주택 분야에서는 미세먼지 저감을 위해 설비 시스템 개선, 저층부 벽면녹화 설치, 전기자동차 충전시설 설치, 커뮤니티 시설 식재, 미세먼지 저감 설비 장치 설치, 「서울특별시 마포구 공동주택 지원 조례」를 통해 「미세먼지 저감 공동주택 인증제」 실시 등 다양한 기술 개발 및 정책을 장려하고자 한다.

그러나 이러한 방향들은 실내 공기질 개선에 초점이 맞추어져 있지만, 외부공간에 있어서 기계식 공조 설비 구축 등 인위적인 방식으로 공기 개선에 힘을 쓰고 있는 실정이다. 공동주택 거주환경에 있어서 저층부는 조경공간이 주를 이룬다. 이러한 저층부 공간 특성 상 건축과 조경을 분리하여 해결해서는 안 될 것이다. 단지 내 건물과 조경이 어우러진 공간에 미기후를 고려한 적절한 식재기법을 통하여 자연적인 방식으로 미세먼지를 저감시키기 위한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구는 노후 공동주택 단지를 리모델링하여 저층부를

보행중심형 자연 친화 공간으로 조성하는 ‘서울시 리모델링 정책 방향’에 초점을 맞추어 사업이 완료된 리모델링 단지에 대해 미기후 분석을 하였다. 또한 조경분야의 다양한 미세먼지 저감형 식종 기준을 참조하여, 풍향과 미세먼지 저감률에 대한 선행연구를 기초로 단지 내 식재 밀도별 식재 배치에 따른 미세먼지 저감률에 대해 분석하고자 한다. 이러한 연구 방식은 시뮬레이션을 통하여 주거 공간 내 올바른 외부 공간 조경 방안을 제시함으로써 기존 연구와 차별성을 둔다.

Table 3. Business overview of Dangsang-dong S apartment


Site plan	
	
Content	
Location	34, Dangsang-ro 31-gil, Yeongdeungpo-gu, Seoul
Order Organization	Peace Apartment remodeling Housing Association
Construction Period	2008.7.16.~2010.7.15.
Local District	Semi-industrial Areas
Intended Use	Apartment House (APT)
Building Structure	Reinforced Concrete Structure (Rahmens Structure + Wall Column Structure)
Construction Information	Three buildings, 284 households, Horizontal&Vertical Expansion, Two New Underground Parking Lots

Table 4. Dangsang-dong S apartment remodeling : Before & After

	Before Remodeling	After Remodeling
Building Area	2,021.17㎡	3,552.00㎡
Building Coverage	15.39%	27.00%
Total Floor Area	25,375㎡	42,785㎡
Rate of Building Volumn to Lot	175%	243%
Parking spaces	58	285
Type of Pyung	22/28/34 pyung	28/34/41 pyung

3. 연구방법론

3.1. 대지현황분석

본 연구의 분석대상은 서울 공동주택 리모델링 준공완료 단지 13 개소 중 서울특별시 당산동에 위치한 S아파트로, 1979년에 준공된 공동주택을 2010년에 리모델링한 사례이다. 공동주택 리모델링 사업개요는 Table 3.와 같으며, 리모델링 주택조합 중심으로 공사기간은 24개월, 공사금액은 약 380억원이다[29].

Table 4.를 통해 대상 아파트의 리모델링 전·후를 확인할 수 있다 [30]. 수평증축(각 세대별로 면적 증가)과 수직증축(1개층 증축), 2 개 층의 신설 주차장을 조성하여 주차공간을 확대하였다. 리모델링

Table 5. Dangsang-dong S apartment current status of planting

Status map			
Environmental Information			
Sortation	Name	Tree count	Ratio(%)
Conifer	A. Pine	44	19.6
	B. Nut pine	30	13.4
	C. Ginkgo	26	11.6
Broad-leaved Tree	D. Maple	40	17.9
	E. Lagerstroemia	38	17.0
	F. Oak	20	8.9
	G. Magnolia	9	4.0
	H. Zelkova	6	2.7
	I. Evergreen Spindle	6	2.7
J. Platanus		5	2.2
Total		224	100.0

준공완료 단지 중 국내 최초 수직증축을 적용하여 내진성은 물론 기존 건축물까지 보강시키는 효과로 내부공간을 극대화하였으며, 기존 골조를 기반으로 준공하였기 때문에 저탄소의 친환경적 건축방식으로 평가받고 있다.

공동주택 단지 내 정확한 지층부 식재배치 현황을 파악하기 위해 2020.07.30.에 현장 답사를 실시하였다. 리모델링 전에는 단지 내 저층부 대부분이 주차공간으로 조성되어 아스팔트로 뒤덮여 있었으며, 커뮤니티 시설 등이 부족하였다. 리모델링 후 지하주차장 신설로 주차문제를 해결함으로써 필로티 공간에 락커, 동별 전용 로비라운지, 주민편의시설을 계획하였으며, 중앙에 넓은 보행 중심 오픈스페이스를 조성하였다.

현장 답사를 통한 식재 배치를 조사한 결과는 Table 5.와 같다. 침엽수는 전체 수목 중 44.6%(100그루)를 차지하고 있으며, 활엽수는 55.4%(124그루)를 차지하고 있다. 이 중 소나무(44그루), 단풍나무(40그루)가 전체 수목 중 가장 높은 식재 비율을 갖고 있다.

3.2. ENVI-met 시뮬레이션

ENVI-met은 3차원 미기상 모델링 프로그램으로 독일 Bochum University의 Michael Bruse에 의해 1998년 개발되었다. ENVI-met은 1차원 토양모델, 식생모델, 열교환 모델이 포함되어 있다. 그리고 지면과 건축물에 관한 식으로 이루어져 있는데, 이러한 구성적 특성은 공간적으로 넓은 영역보다 좁은 영역에서의 상세한 기상정보를

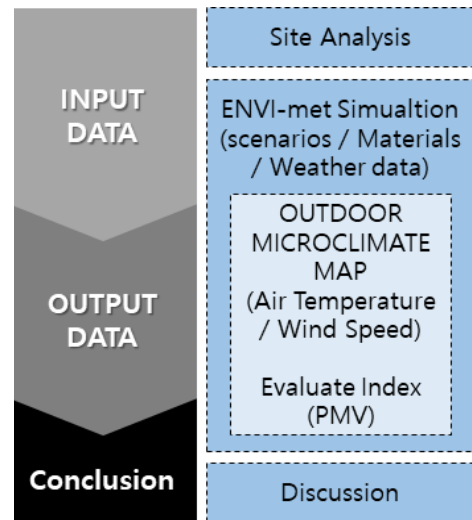


Fig. 5. ENVI-met process

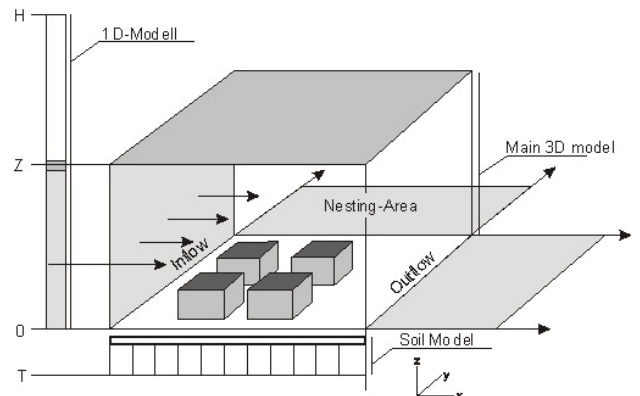


Fig. 6. ENVI-met model boundary

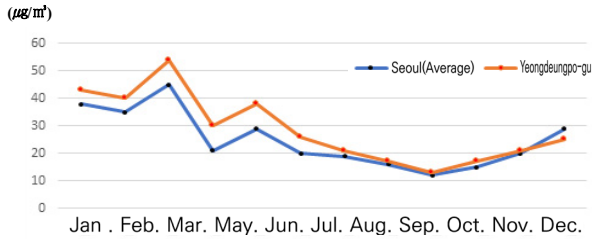


Fig. 7. Monthly distribution of ultrafine dust in Seoul and Yeongdeungpo-gu

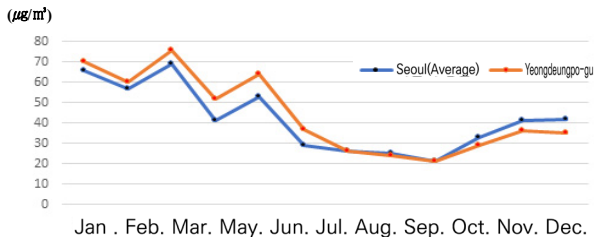


Fig. 8. Monthly distribution of fine dust in Seoul and Yeongdeungpo-gu

Table 6. ENVI-met modeling data

Surface Status Map		
CF file Setting		
Temperature (°C)	2.7	
Wind Direction (deg) / Wind Speed (m/s)	319.1 / 0.7	
Minimum Temperature(°C) / Time(hh:mm)	0 / 07:00	
Maximum Temperature(°C) / Time(hh:mm)	5.3 / 16:00	
Minimum Humidity(%) / Time(hh:mm)	51 / 16:00	
Maximum Humidity(%) / Time(hh:mm)	82.6 / 04:00	
Concentration of Ultrafine Dust (PM2.5) in Yeongdeungpo-gu		
17:00	18:00	19:00
164µg/m³	185µg/m³	176µg/m³
Surface	Surface Area(m²)	Surface Rate(%)
A. Concrete Brick	5588.3	58.3
B. Lawn	3012.7	31.5
C. asphalt	336.5	3.5
D. Concrete	261.1	2.7
E. urethane	255.8	2.6
F. Wooden Deck	125.2	1.4
Sum	9579.6	100.0

도출하는데장점을 갖고 있으며, 미기상에 영향을 미칠 수 있는 물리적 과정에 대해 고려하고 있다. 최대 250×250×30 Grid의 공간 모델링이 가능한 격자 형태를 지원하며, 세밀한 미기후 변화를 수치적으로 분석할 수 있는 장점이 있어 도시지역의 고층 건물에 의한 주변 지역의 미기후 변화(기류, 유체의 흐름, 온도·습도의 분포) 등을 계산할 수 있다(Fig. 5., Fig. 6.)[31]. 이러한 ENVI-met은 소규모 단위로 건물과 외부공간과의 관계를 정량적으로 분석이 가능한 프로그램으로써 건축·조경 분야에 활발하게 사용되고 있다[32-36].

장소의 선정에 있어서 서울시 13곳의 리모델링 준공완료 지역 5곳 중 인체에 해를 많이 미치는 초미세먼지(PM2.5)량 데이터를 2019년 월별로 수집한 결과를 토대로 대상지를 선정하였다. 데이터 자료는 서울특별시 대기환경정보를 통하여 수집하였다[37]. 분석결과, Fig. 7.과 같이 서울시 평균값은 1월에 38µg/m³, 3월에 45µg/m³인 반면에 영등포구의 경우 Fig. 8.와 같이 1월에 43µg/m³, 3월에 54µg/m³로 다소 공해가 높은 지역으로 나타났다.

시간의 선정에 있어서 영등포구의 2019년 일간별 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5)량이 높은 일을 선정하였다. 데이터자료는 에어코리아를 통하여 수집하였다[38]. 분석결과, 2019.03.04.에 미세먼지(PM10)는 180µg/m³, 초미세먼지(PM2.5)는 141µg/m³, 2019.01.14.에 미세먼지(PM10)는 162µg/m³, 초미세먼지(PM2.5)는 139µg/m³로 나타났다. 2019.03.04.의 공해가 더 높은 편이지만, 국내 겨울의 경우 북서풍과 편서풍의 영향을 주로 받아 중국의 미세먼지가 국내로 더 잘 유입

Table 7. Tree of fine dust reduction type

Tree					
Image					
Scientific name	Corsican Pine	Field Maple	Hybrid Poplar	Juniperus Formosana	Pinus Bungeana
Deposition					
PM10	44.85mg/m²	16.28mg/m²	30.57mg/m²	49.14mg/m²	24.36mg/m²
PM2.5	12.24mg/m²	4.58mg/m²	6.11mg/m²	4.19mg/m²	2.94mg/m²
Image					
Scientific name	Platycladus Orientalis	P. tabuliformis	P. orientalis	F. sogdiana	F. rhynchophylla
Deposition					
PM10	24.79mg/m²	0.59mg/m²	0.45mg/m²	0.34mg/m²	0.32mg/m²
PM2.5	2.90mg/m²	0.47mg/m²	0.24mg/m²	0.18mg/m²	0.16mg/m²
Image					
Scientific name	A. triloba	P. persica	F. pennsylvanica	P. tomentosa	Ginkgo Biloba
Deposition					
PM10	0.32mg/m²	0.25mg/m²	0.12mg/m²	0.20mg/m²	0.14mg/m²
PM2.5	0.14mg/m²	0.11mg/m²	0.10mg/m²	0.08mg/m²	0.08mg/m²
Shrub					
Image					
Scientific name	Leyland Cypress	Whitebeam	Euonymus Japonicus	S. japonica	Sorbaria Sorbifolia
Deposition					
PM10	59.28mg/m²	4.00mg/m²	24.84mg/m²	0.62mg/m²	0.15mg/m²
PM2.5	11.21mg/m²	5.10mg/m²	3.10mg/m²	0.39mg/m²	0.08mg/m²

되며, 대기 순환이 잘 되지 않아 지표면 부근에 미세먼지가 더 오래 머물고 적층되는 관계로 인체에 해를 더 많이 끼치는 겨울철 2019.01.14.의 17:00~19:00 초미세먼지(PM2.5) 평균값으로 선정하였다.

본 연구에서는 ENVI-met Science를 이용하였다. ENVI-met 모델링을 하기 위해서는 CF파일(미기후 자료 초기 값)과 IN파일(물리적 환경정보)이 필요하다. CF파일은 기상청 자료의 AWS(자동기상관측장비)를 통하여 수집한 주풍향, 대기환경 기초자료를 이용하였다. IN파일은 건물 높이와 형태, 피복재질, 수목을 기입하여 대상지의 기본적인 환경정보를 력하는 것으로 현장답사를 통해 정보를 기입하였다.

미기후자료는 기상자료개방포털을 통하여 수집하였다[39]. 대상지와 직선 이격거리가 약 1.2km(동측) 정도 떨어져 있는 영등포기상관측소의 자료를 이용하였다. CF파일은 다음 Table 6.과 같다. 미기후 환경에 IN 파일 입력을 위한 모델링의 크기는 147×147×70 Grid로 설정하였으며, 격자 규모는 1.0m로 설정하고 대상지 및 주

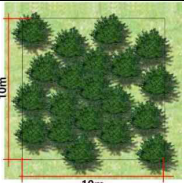
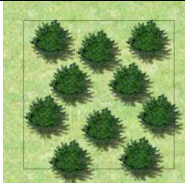
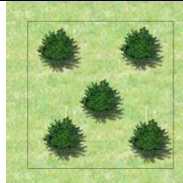
변 대지 피복 상태를 조사한 후 데이터를 기입하였다.

3.3. 수목선정 및 수식산정

미세먼지 저감형 수목을 선정하기 위하여 조경관련 선행연구 고찰을 통해 수목을 Table 7.과 같이 1일 기준으로 목록화하였다 [22][40-45]. 선행연구를 조사한 결과, 수목은 미세먼지를 흡수하고, 우수 시 흡착한 미세먼지들을 침강시키는 성능이 있는 것으로 나타났다. 이러한 저감 성능은 침엽수가 활엽수보다 높은 것으로 나타났다. 이러한 계절 상 겨울의 미세먼지 피해 정도가 크기 때문에 침엽수류의 관목과 교목을 선정하였다. 이 중 식재 밀도별 초미세먼지 산출량을 산출하기 위하여 교목류의 Corsican Pine과 관목류의 Leyland Cypress를 수목으로 선정하였다.

국내 미세먼지 대응 숲은 크게 ‘차단숲’, ‘저감숲’, ‘바람길숲’ 3종류로 분류되어진다[46]. ‘차단숲’은 생활권으로부터 미세먼지 확산

Table 8. Criterion of calculation to plant density

Blocking Type			Reduction Type			Windroad Type		
Plant Density	Adequate Plant Density		Plant Density	Adequate Plant Density		Plant Density	Adequate Plant Density	
	Forest Service	ENVI-met Simulation		Forest Service	ENVI-met Simulation		Forest Service	ENVI-met Simulation
	0.2 tree/m ²	0.25 tree/m ²		0.1 tree/m ²	0.11 tree/m ²		0.05 tree/m ²	0.06 tree/m ²

$$Eq. 1) \quad Y = \underbrace{\sum[175 \times Stie \text{ Area}]}_{(a)} - \underbrace{\sum[2.06 \times Wind \text{ Speed}]}_{(b)} - \underbrace{\sum[Corsican \text{ Pine Density of plants} \times 8.5] + \sum[Leyland \text{ Cypress Density of plants} \times 7.8]}_{(c)}$$

Remaining Amount of Ultrafine Dust by Plant Density (Y)

= Average concentration of Ultrafinedust (a) - Reduction of Finedust due to Wind Speed (b) - Deposition of Finedust in Plants (c)

(a) : Average concentration of ultrafine dust (PM2.5) in the Site area

(b) : Correlation Coefficient of Annual Wind Speed and Ultrafinedust Concentration over the last 10 years × Wind Speed [47]

(c) : Tree(Corsican Pine, 8.5ug/m², 12.24mg/m²·day), Shrub(Leyland Cypress, 7.8ug/m², 11.21mg/m²·day)

Table 9. ENVI-met simulation results

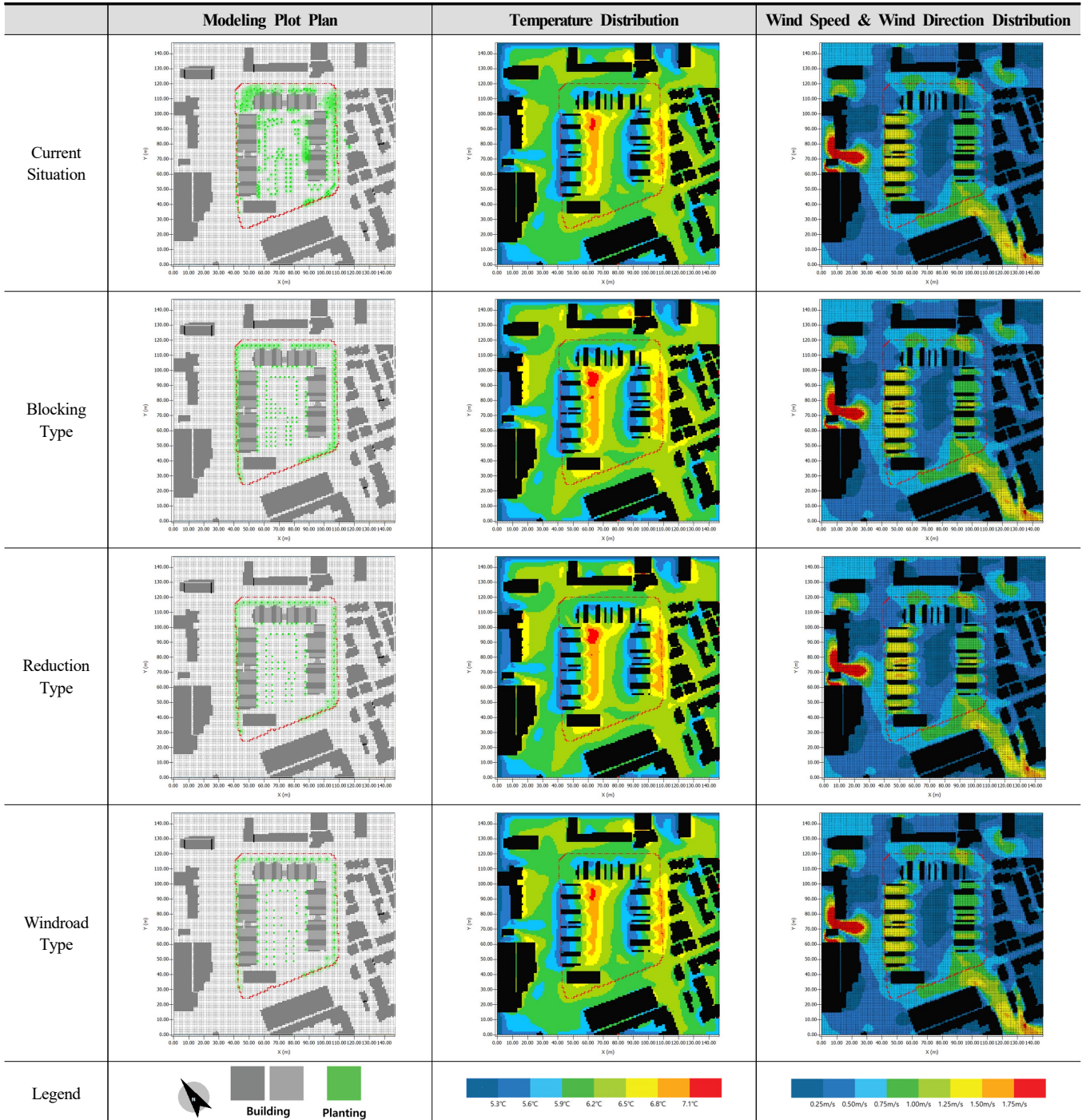
Sortation		Unit	Current Situation	Blocking Type	Reduction Type	Windroad Type
Temperature	G.L+0.9m	Max.	7.66	7.86	7.79	7.86
		Min.	5.49	5.55	5.41	5.47
		Average	6.74	6.73	6.69	6.72
	G.L+1.5m	Max.	7.16	7.37	7.32	7.38
		Min.	5.19	5.19	5.15	5.16
		Average	6.19	6.23	6.22	6.23
	G.L+2.5m	Max.	6.49	6.71	6.69	6.72
		Min.	4.90	4.89	4.90	4.88
		Average	5.61	5.68	5.69	5.69
Wind Speed	G.L+0.9m	Max.	1.60	1.60	1.63	1.61
		Min.	0.03	0.02	0.02	0.03
		Average	0.62	0.62	0.62	0.62
	G.L+1.5m	Max.	1.54	1.58	1.63	1.56
		Min.	0.03	0.03	0.03	0.03
		Average	0.61	0.63	0.64	0.63
	G.L+2.5m	Max.	1.48	1.50	1.55	1.44
		Min.	0.02	0.02	0.03	0.03
		Average	0.54	0.59	0.61	0.59

을 차단하기 위해 공간 내 공기 흐름을 최소화 되도록 미세먼지 발생지역 주변 등에 조성하는 숲을 뜻한다. ‘저감숲’은 미세먼지 저감 기능을 충분히 발휘하기 위해 공간 내 공기흐름을 적절히 유도하고 줄기, 가지, 잎등의 접촉면이 최대화될 수 있도록 조성하는 숲을 뜻한다. ‘바람길숲’은 산림에서 생성된 양질의 공기를 주민생활공간으로 공급하는 통로로서 공간 내 신선하고 깨끗한 양질의 공기를 도심으로 유도·확산할 수 있도록 연결된 숲을 뜻한다. 이러한 미세먼지 대응 숲 종류별 실제밀도를 참조하여 다음 Table 8.과 같이 공동주택 저층부 식재밀도 배치를 산정하였다. ENVI-met Grid 크기가 1m인 관계로 m²당 ‘주’를 산정하여 근사값이 되도록 하였다.

식재배치에 따른 대상지의 초미세먼지 농도의 계산을 위해 겨울철 초미세먼지 피크 시간대의 평균 농도인 175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기준값으로 설정하고 풍속에 의한 미세먼지 저감량과 식재별 침착량에 의한 미세먼지 저감량을 각각 차감하여 Eq. 1을 도출하였다.

Eq. 1의 (b)와 같이 풍속에 의한 미세먼지 저감량은 ENVI-met을 통해 도출된 그리드별 풍속 값에 최근 10년간의 연평균 풍속과 초미세먼지 농도와의 상관도 분석을 통해 산출된 풍속계수를 곱하여 계산하였고, Eq. 1의 (c)와 같이 식재별 침착량은 ENVI-met에 적용된 식재인 Corsican Pine과 Leyland Cypress의 단위면적당 침착량인 8.5 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 과 7.8 $\mu\text{g}/\text{m}^2$ 을 식재별 밀도와 곱하여 계산에 사용하였다.

Table 10. ENVI-met simulation results (G.L+1.5m)



4. 분석결과

4.1. 미기후분석 결과

대상지의 시뮬레이션 결과는 각 유형별로 지상으로부터 약 0.9m, 1.5m, 2.5m 높이에서의 온도 및 풍속·풍향을 분석하였다.

ENVI-met의 시각화 프로그램인 Leonardo를 통하여 Table 10.과 같이 대표성을 띄는 G.L+1.5m 결과값을 도식화하였다. 지상에 서 약 3개의 높이(0.9m, 1.5m, 2.5m)와 각 식재 밀도(차단형, 저감형, 바람길형)로 나누어 분석한 수치는 다음 Table 9.와 같다.

지상으로부터 높이가 1.5m(보행 높이)일 때 평균 온도는 현황일 경우 6.1920°C, 차단형일 경우 6.2307°C, 저감형일 경우 6.2197°C, 바람길형일 경우 6.2307°C로 나타났다. 이를 통해 현재의 조건보다 식재밀도를 조절한 경우 기온은 적게는 0.0277°C, 많게는 0.0387°C가 상승한 것을 알 수 있다.

대상지의 전반적인 풍향은 북서풍 방향으로 진행하고 있으며, 지상으로부터 높이가 1.5m(보행 높이)일 때 평균 풍속은 현황일 경우 0.6133m/s, 차단형일 경우 0.6301m/s, 저감형일 경우 0.6350m/s, 바람길형일 경우 0.6320m/s로 나타났다. 이를 통해 현재의 조건보다 식재밀도를 조절한 경우 풍속은 적게는 0.0168m/s, 많게는

0.0217m/s가 상승한 것을 알 수 있다.

4.2. 미세먼지 저감 분석 결과

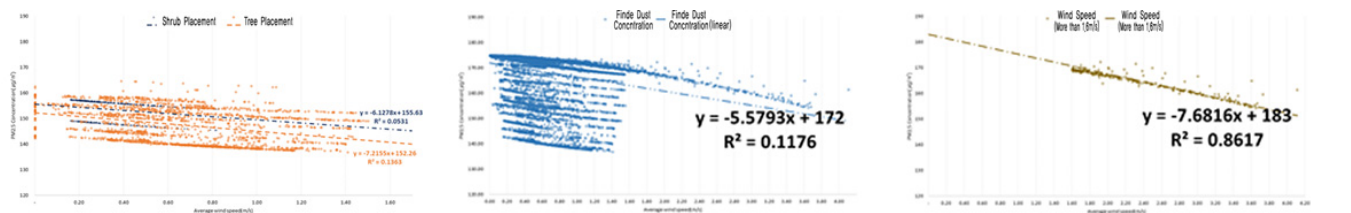
대상지의 시뮬레이션 결과를 통해 각 유형별로 지상으로부터 약 0.9m, 1.5m, 2.5m 높이에서의 미세먼지 잔존량, 현황대비 조정설계별 미세먼지 제거량, 제거율을 분석하였다. 다변량분석을 통하여 수치화로 보여주는 자료는 Table 11.과 같고, 히트맵으로 도식화한 자료는 다음 Table 12.와 같다.

지상으로부터 높이 1.5m(보행 높이)일 때 미세먼지 잔존량은 '평균 초미세먼지 농도'를 적용할 경우 2,298,739 μ g 대비 '현황'일 경우 2,257,509 μ g, '차단형'일 경우 2,132,679 μ g, '저감형'일 경우 2,150,872 μ g, '바람길'일 경우 2,131,690 μ g로 나타났다. 이 때 조정설계별 미세먼지 제거량을 산정한 결과 '현황'일 경우 41,229 μ g, '차단형'일 경우 166,060 μ g, '저감형'일 경우 147,867 μ g, '바람길'일 경우 167,049 μ g으로 각각의 제거율은 '현재'일 경우 1.83%, '차단형'일 경우 7.79%, '저감형'일 경우 6.87%, '바람길형'일 경우 7.87%라는 결과가 도출되었다.

이러한 분석결과를 통해 현재의 조정 설계보다 식재밀도를 조절한 경우가 미세먼지 저감에 더 효율적이나, 그 성능은 다소 차이가

Table 11. Multivariate Analysis Results

	Unit	Current Situation	Blocking Type	Reduction Type	Windroad Type	Application of Average Ultrafine dust Concentration
Planting Spacing	m	-	2	3	4	0
Density of plants	Tree/m ²	-	0.25	0.11	0.0625	0
Remaining amount of fine dust	G.L+0.9m	2,257,467.41 (171.91)	2,132,904.24 (162.43)	2,151,209.31 (163.82)	2,123,764.90 (161.73)	2,298,739.82 (175.05)
	G.L+1.5m	2,257,509.97 (171.91)	2,132,679.41 (162.41)	2,150,872.10 (163.79)	2,131,690.66 (162.33)	2,298,739.82 (175.05)
	G.L+2.5m	2,259,198.42 (172.04)	2,133,693.91 (162.49)	2,150,872.10 (163.79)	2,126,265.63 (161.92)	2,298,739.82 (175.05)
Amount of fine dust removal by landscape design compared to the current status	G.L+0.9m	41,272.40 (3.14)	165,835.57 (12.63)	147,530.50 (11.23)	174,974.92 (13.32)	-
	G.L+1.5m	41,229.85 (3.14)	166,060.41 (12.65)	147,867.72 (11.26)	167,049.15 (12.72)	-
	G.L+2.5m	39,541.40 (3.01)	165,045.90 (12.57)	147,867.72 (11.26)	172,474.19 (13.13)	-
Fine dust removal rate by landscape design compared to the current status	G.L+0.9m	1.83	7.78	6.86	8.24	0
	G.L+1.5m	1.83	7.79	6.87	7.87	0
	G.L+2.5m	1.75	7.74	6.87	8.12	0



a) Wind speed and fine dust concentration (Shrubs arrangement vs. Tree arrangement) b) Wind speed and fine dust concentration in the entire target area c) Wind speed and fine dust concentration in spaces with wind speed greater than 1.6m/s

Fig. 9. Correlation analysis results

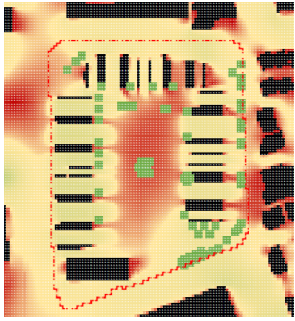
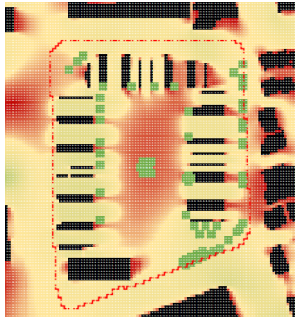
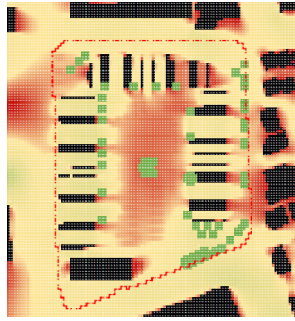
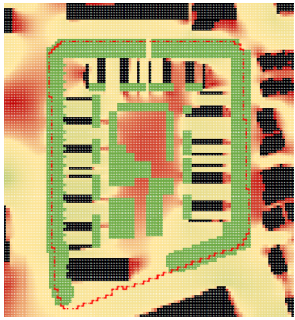
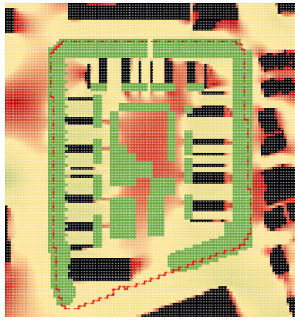
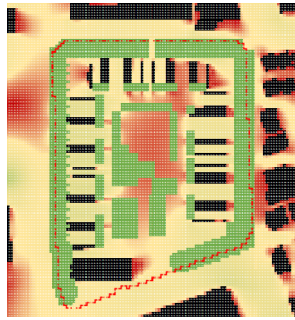
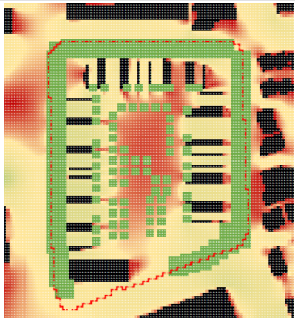
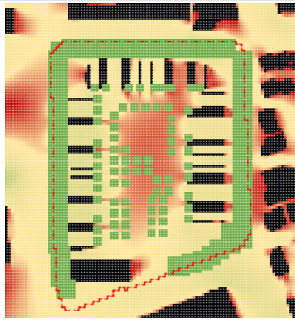
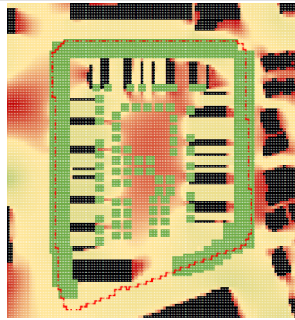
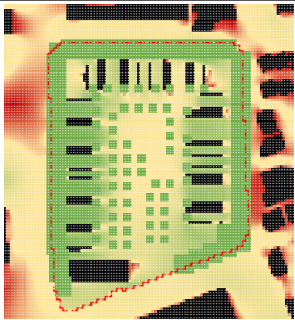
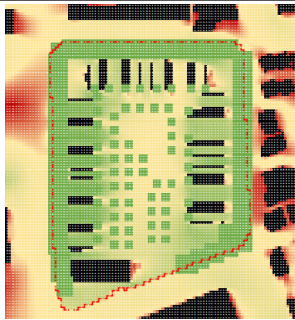
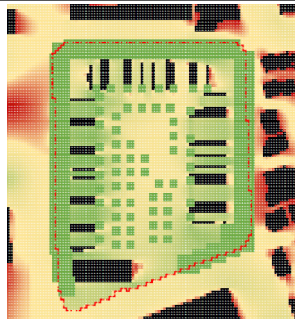

있는 것으로 나타났다. 이 중 기존 산림청에서 제안한 미세먼지 대응 숲의 종류로 ‘미세먼지 저감 기능’을 극대화한 ‘저감숲’의 경우보다 ‘바람길숲’의 경우가 공동주택 단지 내에서 미세먼지 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

이는 건물과 외부공간과의 관계를 고려했을 시 ‘바람길’이 중요한 것으로 나타났다. 이는 녹지공간 중심의 식재 밀도 방식으로 계산하는 것과 달리 도시 내 외부공간 조경 설계 시 미세먼지 저감을 위한

별도의 식재 배치 방식을 고려해야 함을 시사한다.

바람길을 활용한 초미세먼지 저감 효과를 정량적으로 나타내기 위해 회귀분석 기법을 통해 대상지의 풍속과 초미세먼지량의 상관도를 Fig. 9. 의 a)와 같이 분석한 결과 관목 배치된 공간에서는 (-)6.13, 교목이 배치된 공간에서는 (-)7.22의 기울기를 각각 보였으며, 이는 2m 이하의 관목 배치 공간보다 6m 이상의 교목 배치공간에서 풍속의 영향도가 더 커짐을 보였다. 이는 관목 배치공간보다

Table 12. Heatmap for fine dust concentration and result of ultra fine dust reduction

Division	G.L+0.9m	G.L+1.5m	G.L+2.5m
Current Situation	 1.83% Reduction	 1.83% Reduction	 1.75% Reduction
Blocking Type	 7.78% Reduction	 7.79% Reduction	 7.74% Reduction
Reduction Type	 6.86% Reduction	 6.87% Reduction	 6.87% Reduction
Windroad Type	 8.24% Reduction	 7.87% Reduction	 8.12% Reduction
Legend			

교목 배치공간의 풍속이 상대적으로 빠르기 때문에 발생한 현상으로 보인다. Fig. 9.의 b)와 c)는 풍속이 빨라짐에 따라 식재 침착효과에 의한 초미세먼지 저감 영향도보다 풍속 증가에 의한 초미세먼지 저감 영향도가 더 커질 뿐만 아니라 풍속과 초미세먼지의 상관도 또한 높아짐을 보여주고 있다. Fig. 9.의 b)는 Eq. 1을 통해 계산된 대상지 전체의 초미세먼지량과 풍속의 관계를 보여주고 있으며, Fig. 9.의 c)는 풍속 1.6m/s 이상인 공간의 초미세먼지량과 풍속의 관계를 보여주고 있다. 대상지 전체 Fig. 9.의 b)의 경우 기울기 (-)5.80에 R^2 은 0.12 정도의 낮은 상관도를 보여주고 있지만 풍속 1.6m/s 이상 Fig. 9.의 c)의 경우는 기울기 (-)7.68에 R^2 은 0.86으로 매우 높은 상관도를 보여주고 있다. 풍속과 식재의 침착량을 종합적으로 고려하여 계산된 미세먼지 잔존량을 히트맵형식으로 가시화하고 미세먼지 저감률을 표기하여 Table 12.에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 외부환경 전용 ENVI-met 시뮬레이션을 이용하여 서울시 당산동 S아파트를 대상으로 리모델링 완료 단지 저층부의 미기후 환경을 분석하였다. 이러한 미기후 환경 데이터를 기반으로 다변량분석을 통하여 다음과 같은 고려사항을 얻을 수 있다.

첫째, 노후 공동주택 리모델링 시 저층부 공간의 변화로 미기후 환경이 개선되었다. 노후 공동주택 리모델링 시 1층은 필로티 구조로 변경되고, 수직·수평 증축 및 외부공간 녹지화로 구성되면서, 단지 내 기류의 흐름이 원활해졌다. 즉, 저층부에 외부 공기와의 바람길이 형성되면서 옥외공간 내 환기 기능이 향상되었다. 이를 통해 풍속에 의한 미세먼지 저감효과가 발생하게 되어 리모델링 전보다 상대적으로 쾌적한 공간이 조성되었다.

둘째, 미세먼지 저감에 탁월한 침엽수로 교목·관목 설정 시 단지 내 미세먼지 제거율은 효과가 있는 것으로 나타났다. 산림청에서 제안한 미세먼지 대응 숲의 종류(차단숲, 저감숲, 바람길숲)에 따라 주(株)당 m^2 를 산정하여 식재 배치 후 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 기반으로 다변량 분석 결과, 대상 지역 초미세먼지(PM_{2.5}) 평균 농도에서 풍속에 의한 미세먼지 저감량, 식재의 미세먼지 침착량을 제외한 값을 비교하였다. 이를 통해 현재의 조건보다 ‘바람길형 > 차단형 > 저감형’ 순으로 미세먼지 저감에 효과적인 것으로 나타났다.

셋째, 일정 속도의 풍속이 유지되면, 미세먼지 저감효과에 탁월하다는 것으로 나타났다. 풍속 1.6m/s 이상 일 경우 미세먼지 저감률과의 상관도가 높아지는 것으로 나타났고, 풍속 1.6m/s 이하일 경우 수목 종류별에 따라 미세먼지 침착량과의 상관도가 높아지는 것으로 나타났다. 이를 통해 노후 공동주택 리모델링 시 저층부 공간을 개선할 때, 일정 풍속을 유지시킬 수 있도록 주동배치 및 조경설계를 고려하여 단지 내 자연적 미세먼지 저감효과를 조성하도록 한다.

본 연구의 한계점으로는 노후 공동주택 리모델링 완료 단지 중 한 곳을 대상으로 분석하여 수행하였기 때문에 다양한 공동주택 배치 유형에 따른 추가적 연구를 진행해야 할 것이다. 또한 현장실측을 통해 단지 내 미세먼지 농도값과 시뮬레이션 값을 비교하여 정확성을 검증하여야 하지만 실측값을 확보하는데 어려움이 있다. 향후 겨울

철 뿐만 아니라 계절별 공동주택 저층부 미세먼지 저감 성능 분석을 위해 심도있는 결과값과 함께 정량적인 분석을 수행할 필요성이 있다. 또한 공동주택 단지 내 수목에 있어서 미세먼지 침착량에 대한 추가적인 연구 및 식재 배치의 전문화가 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 한국에너지기술평가원의 에너지기술개발사업(과제번호 : 2018201060010A)의 연구지원을 받아 수행되었습니다.

Reference

- [1] 환경부, 바로 알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?, 2018. // (Ministry of Environment, You can see it if you know it right away. Fine Dust, What the hell is it?, South Korea: 2018.)
- [2] 환경부, 대기환경 기준, 2018. // (Ministry of Environment, Atmospheric Environment Criteria, South Korea: 2018.)
- [3] 환경부, 대기환경연보, 2019. // (Ministry of Environment, Air Quality Yearbook, South Korea: 2019.)
- [4] 박찬열, 도시숲 연구 및 정책의 최근동향과 시사점, 한국: 국립산림과학원 국제산림정책토포픽, 2018, pp.1-29. // (C.Y. Park, Recent Trends and Implications of Urban Forest Research and Policy, South Korea: N IFoS International Forest Policy Topic, 2018, pp.1-29.)
- [5] 서울특별시 대기환경정보, 미세먼지 대기질 통계, <https://cleanair.seoul.go.kr/>, 2021.04.14. // (Seoul Metropolitan Government, Air Quality Statistics of Finedust, <https://cleanair.seoul.go.kr/>, 2021.04.14.)
- [6] 통계청, 미세먼지, <https://kosis.kr/index/index.do>, 2021.04.14. // (KOSIS, Finedust, <https://kosis.kr/index/index.do>, 2021.04.14.)
- [7] 최유진, 김영은, 미세먼지 저감 위한 도로청소 개선방안, 한국: 서울연구원 정책과제연구보고서, 2018, pp.1-135. // (E.J. Choi, Y.E. Kim, A Study on Road Cleaning to Reduce Resuspension of Road Dust, South Korea: The Seoul Institute Policy Assignment Research Report, 2018, pp.1-135.)
- [8] 서울연구데이터 서비스, 데이터로 본 서울, <http://data.si.re.kr/>, 2021.04.14. // (The Seoul Research Data Service, Seoul based on data, <http://data.si.re.kr/>, 2021.04.14.)
- [9] 서울 열린데이터 광장, 공동주택, <https://data.seoul.go.kr/>, 2021.04.14. // (Seoul Open Data Plaza, Apartment, <https://data.seoul.go.kr/>, 2021.04.14.)
- [10] 성순택, 공동주택 리모델링의 계획요소에 관한연구 : 리모델링의 내/외적 영향분석을 중심으로, 한국: 서울시립대학교 박사학위논문, 2009, pp.1-136. // (S.T. Sung, (A) study on design elements for the remodeling of the apartment housing : analysis on the internal and external influence of remodeling, South Korea: University of Seoul Doctoral Thesis, 2009, pp.1-136.)
- [11] 국토교통부, 건축법, 법률 제17171호. // (Ministry of Land, Building Act, Act No.17171, South Korea: 2019.)
- [12] 국토교통부, 주택법, 법률 제17486호. // (Ministry of Land, Housing Act, Act No.17486, South Korea: 2019.)
- [13] 김동준 외 3인, 공동주택 리모델링의 저층부 미기후환경 및 온열 쾌적성 평가, 한국: 도시설계·한국도시계획학회지, 도시설계·한국도시계획학회지, 제19권 제3호, 2018, pp.33-46. // (D.J. Kim et al., Evaluation of Microclimate Condition and Thermal Comfort in Pedestrianlevel Environment of a Remodeled Apartment Complex, South Korea: Journal of Urban Design, 19(3), 2018, pp.33-46.)
- [14] 서울시, 2025 서울특별시 공동주택 리모델링 기본계획(안), 2016. // (Seoul Metropolitan Government, 2025 Seoul Basic plan of Remodeling to Apartment house, South Korea: 2016.)
- [15] 김현주 외 3인, 한국의 주거환경에서 실내공기 중 유해물질 저감에 미치는 환기의 영향, 한국: 분석과학, 제33권 제1호, 2020, pp.58-65. // (H.J. Kim et al., The effect of ventilation on reducing the concentration of hazardous substances in the indoor air of a Korean living environment, South Korea: The Korean Society of Analytical Sciences, 33(1), 2020, pp.58-65.)
- [16] 남성우, 성선용, 박종순, 미세먼지 저감대책으로서 바람길 적용 방안:

- 세종시를 대상으로, 한국: 한국콘텐츠학회논문지, 제20권 제3호, 2020, pp.1-9. // (S.W. Nam, S.Y. Sung, J.S. Park, Application of Ventilation Corridor to Mitigate Particulate Matter for the Sejong-Si, South Korea: Journal of The Korea Contents Association, 20(3), 2020, pp.1-9.)
- [17] 김민주, 박종일, 이정훈, 공동주택 열회수환기장치의 미세먼지 필터링 성능 개선을 위한 프리필터 시스템 개발, 한국: 한국생활환경학회지, 제26권 제5호, 2019, pp.641-648. // (M.J. Kim, J.I. Park, J.H. Lee, Development of "Pre-filter System" for Improving Particulate Matter Filtering Performance of Multi-unit Heat Recovery Ventilation System, South Korea: Journal of The Korean Society Of Living Environmental System, 26(5), 2019, pp.641-648.)
- [18] 엄예슬, 최동희, 강동화, 주거건물용 이중외피 통합형 전기집진기의 미세먼지 집진성능 수치해석 평가, 한국: 대한건축학회 논문집, 제34권 제12호, 2018, pp.73-82. // (Y.S. Eom, D.H. Choi, D.H. Kang, Numerical Study of Particle Collection Performance of Electrostatic Precipitator Integrated with Double Skin Façade in Residential Buildings, South Korea: Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 34(12), 2018, pp.73-82.)
- [19] 이정원 외 4인, 바이오미미크리를 활용한 미세먼지 저감 방안에 관한 연구, 한국: 대한건축학회 논문집, 제33권 제1호, 2017, pp.11-20. // (J.W. Lee et al., A Study on Biomimicry Methods for Reducing Fine Dust in Buildings, South Korea: Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 33(1), 2017, pp.11-20.)
- [20] 구민아, 도시근린공원 미세먼지(PM)저감과 공간차폐율과의 관계 -대구광역시 수성구 근린공원을 중심으로-, 한국: 한국조경학회지, 제47권 제6호, 2019, pp.67-77. // (M.A. Gu, The Relationship between Particular Matter Reduction and Space Shielding Rate in Urban Neighborhood Park, South Korea: Korean Institute Of Landscape Architecture, 47(6), 2019, pp.67-77.)
- [21] 조동길, 도시 미세먼지 저감 식재를 위한 수종 선정 기준의 우선순위 도출, 한국: 한국환경생태학회지, 제33권 제4호, 2019, pp.472-480. // (D.G. Jo, Prioritization of Species Selection Criteria for Urban Fine Dust Reduction Planting, South Korea: Korean journal of environment and ecology, 33(4), 2019, pp.472-480.)
- [22] 김원주 외 3인, 그린인프라의 미세먼지 저감효과 분석과 확대 방안, 한국: 서울연구원, 2018, pp.1-107. // (W.J. Kim et al., Analysis and Expansion of Green Infrastructure for Reducing Fine Dust, South Korea: The Seoul Institute, 2018, pp.1-107.)
- [23] 황광일 외 3인, 도로면 완충녹지의 식재구조에 따른 초미세먼지 (PM_{2.5})농도 저감효과 연구 - 서울 송파구 완충녹지를 대상으로 -, 한국: 한국조경학회지, 제46권 제4호, 2018, pp.61-75. // (K. I. Hwang et al., A Study on Decreasing Effects of Ultra-fine Particles (PM_{2.5}) by Structures in a Roadside Buffer Green - A Buffer Green in Songpa-gu, Seoul -, South Korea: Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 46(4), 2018, pp.61-75.)
- [24] 허희연, 김진오, 미세먼지 저감을 위한 식재기법 및 도시 녹지계획 방향 - 중국 베이징시 사례를 중심으로 -, 한국: 한국조경학회지, 제45권 제6호, 2017, pp.40-49. // (H.Y. Heo, J.O. Kim, Planting Design Strategies and Green Space Planning to Mitigate Respirable Particulate Matters - Case Studies in Beijing, China -, South Korea: Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 45(6), 2017, pp.40-49.)
- [25] 강철규, 전소영, 미세먼지 저감 전기차 · 수소차 어디까지 왔나, 한국: 경기연구원 이슈&진단, 2020, pp.1-25. // (C.G. Kang, S.Y. Jeon, Where are the electric vehicles and hydrogen cars that reduce fine dust, South Korea: Gyeonggi Research Institute Issue&Diagnosis, 2020, pp.1-25.)
- [26] 조태준, 김태수, 미세먼지 저감을 위한 특허기술들, 한국: 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제24권 제2호, 2020, pp.9-14. // (T.J. Jo, T.S. Kim, Patent Technologies for Reducing Micro-Dust, South Korea: Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 24(2), 2020, pp.9-14.)
- [27] 김남욱, 미세먼지 저감을 위한 법적 검토 -자동차 미세먼지의 저감 법제를 중심으로-, 한국: 토지공법연구, 2019, pp.281-312. // (N.W. Kim, Legal Review to Reduce Fine Dust -Focusing on the Law on Reducing Fine Dust in Automobiles-, South Korea: Public Land Law Review, 2019, pp.281-312.)
- [28] 김혜원, 이정욱, 미세먼지 저감을 위한 서울시의 대중교통 무료 운행 정책은 왜 실패했는가 정치적 관리의 관점을 중심으로, 한국: 지방정부연구, 제22권 제4호, 2019, pp.99-125. // (H.W. Kim, J.W. Lee, Why did Seoul's Free Public Transportation Program for Reducing Fine Particulate Matter Fail? : A Political Management Perspective, South Korea: The Korean Association for Local Government Studies, 22(4), 2019, pp.99-125.)
- [29] 쌍용건설(주) 리모델링사업부, [Remodeling 사례] 당산 쌍용 藝家 클래식(舊 평화아파트) 리모델링 사례, 한국: Remodeling(한국리모델링협회지), 통권 제39호, 2011, pp.27-29. // (Ssangyong E&C Remodeling Business Department, [Remodeling Case] A Case of Remodeling Dang-San Ssangyong Yega Classic Apartment, South Korea: Remodeling(Journal of KRA), 39, 2011, pp.27-29.)
- [30] 쌍용건설, 당산 예가클래식, <http://www.ssyenc.com/>, 2021.04.14. // Ssangyong Engineering & Construction Co., Dangsang Yega Classic, <http://www.ssyenc.com/>, 2021.04.14.
- [31] 최현정, 미기상 도시모델(Envi-Met.)을 이용한 도시 내 열환경 안정도 연구, 한국: 한국건축환경설비학회논문집, 제10권 제6호, 2016, pp.416-427. // (H.J. Choi, Thermal Comfort Evaluation Using the Envi-Met. Micro Climate Model, South Korea: Journal of KIAEBS, 10(6), 2016, pp.416-427.)
- [32] B. Abdi, A. Hami, D. Zarehaghi, Impact of small-scale tree planting patterns on outdoor cooling and thermal comfort, Sustainable Cities and Society, 56, 2020, pp.2210-6707.
- [33] E. Jamei et al., Verification of a bioclimatic modeling system in a growing suburb in Melbourne, Science of The Total Environment, 689, 2019, pp.883-898.
- [34] S. Yin, W. Lang, Y. Xiao, The synergistic effect of street canyons and neighbourhood layout design on pedestrian-level thermal comfort in hot-humid area of China, Sustainable Cities and Society, 49(13), 2019, pp.2210-6707.
- [35] S. Chatterjee et al., Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands, Science of The Total Environment, 663, 2019, pp.610-631.
- [36] Z. Wu, P. Dou, L. Chen, Comparative and combinative cooling effects of different spatial arrangements of buildings and trees on microclimate, Sustainable Cities and Society, 51, 2019, pp.2210-6707.
- [37] 서울특별시 대기환경정보, 초미세먼지 대기질 통계, <https://cleanair.seoul.go.kr/>, 2021.04.14. // Seoul Metropolitan Government Air Quality Information, Air Quality Statistics of UltraFinedust, <https://cleanair.seoul.go.kr/>, 2021. 04.14.
- [38] 에어코리아, 최종확정측정자료조회, <http://www.airkorea.or.kr/>, 2021.04.14. // Air Korea, Final definitive measurement data inquiry, <http://www.airkorea.or.kr/>, 2021.04.14.
- [39] 기상자료개방포털, 영등포기상관측소, <https://data.kma.go.kr/>, 2021.04.14. // Meteorological Data Opening Portal, Yeongdeungpo-gu weather station, <https://data.kma.go.kr/>, 2021.04.14.
- [40] L. Chen et al., Variation in Tree Species Ability to Capture and Retain Airborne Fine Particulate Matter (PM_{2.5}), Scientific reports, 7, 2017, pp.10-11.
- [41] Y. Song et al., Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution, Atmospheric environment, 105, 2015, pp.53-60.
- [42] R. Popek et al., Particulate Matter on Foliage of 13 Woody Species: Deposition on Surfaces and Phytostabilisation in Waxes - a 3-Year Study, 15(3), 2013, pp.245-256.
- [43] K. Dzierżanowski, S. W. Gawroński, Use of trees for reducing particulate matter pollution in air, Challenges of Modern Technology, 2(1), 2011, pp.69-73.
- [44] P. H. Freer-Smith, K. P. Beckett, G. Taylor, Deposition velocities to Sorbus aria, Acer campestre, Populus deltoides x trichocarpa 'Beaupre', Pinus nigra and x Cupressocyparis leylandii for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment, Environmental pollution, 133(1), 2005, pp.157-167.
- [45] 구글이미지, 수목, <https://www.google.co.kr/>, 2021.04.14. // Google Image, Tree, <https://www.google.co.kr/>, 2021.04.14.
- [46] 산림청, 미세먼지 저감을 위한 도시숲 조성·관리 지침(안), 2018. // (Korea Forestry administration, Guidelines for The Creation and Management of Urban Forests to Reduce Fine Dust, South Korea: 2018.)
- [47] H. C. Kim et al., Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Scientific Reports, 7, 2017, pp.1-7.