경사지 저층주거지 골목길 녹지배치에 따른 미세먼지(PM2.5) 저감 효과 CFD 시뮬레이션 연구*

김상현**·배웅규***

CFD Simulation on the Effect of Reducing Fine Dust (PM2.5) according to the Green Space in the Alley of Low-rise Residential Area, Seoul, Korea

Sanghyun Kim* Woongkyoo Bae**

요약: 서울시 미세먼지(PM2.5) 농도는 2015년 23µg/㎡에서 꾸준히 증가하여 2019년 25µg/㎡로 세계보건기구의 권고 기준(AQG:10µg/㎡)을 크게 초과하고 있다. 서울시 저층주거지는 주로 구릉지에 입지하며 노후화된 저층주택과 좁은 골 목길로 이어진 밀집 환경으로 녹지 등 오픈스페이스가 부족하여 공기순환이 원활하지 않은 대표적 취약 지역이다. 이 연구는 노후 저층주거지 골목길에서 녹지배치 유형에 따른 미세먼지(PM2.5) 농도 저감 효과를 CFD 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 첫째, 미세먼지의 기본 거동을 알아보기 위한 시범모델 분석 결과 흡착량, 미세먼지 저감 영향거리, 높이에 따른 미세먼지 저감면적 및 저감구간은 가로녹지〉벽면녹지〉옥상녹지 순으로 나타났다. 둘째, 녹지배치유형에 따 른 미세먼지 저감효과는 골목길(결절점. 경사도, 폭원, 건물층수)의 특성에 따라 지점마다 차이가 있다는 것을 확인하였 다. 셋째, 코로나19 사태 후속대응을 위해 저층주거지의 보행자 환경을 개선하는 녹지설치 등을 적극 고려할 필요가 있 다. 이 같은 결과에 비추어 건강한 주거환경을 조성하려면 이상기후 현상에 취약한 저층주거지 물리적 현실을 고려한 다양한 설계기법이 적용된 주거환경 재생이 요구된다.

주제어: 저층주거지, 골목길, 미세먼지, 녹지배치, 전산유체역학(CFD)

ABSTRACT: The fine dust (PM 2.5) concentration level in Seoul has been steadily increasing, from $23\mu g/m^3$ in 2015 to $25\mu g/m^3$ in 2019, and this greatly exceeds the concentration level of $10\mu g/m^3$, set out by the WHO air quality guideline. The low-rise housings in Seoul are typically located in hill areas and they tend to be the most highly-affected areas of climate issues due to the deteriorated houses and narrow alleys. This research examined the effectiveness of three types of green space in lowering the fine dust concentration level by using CFD simulations. Upon analyzing the case model designed to study the basic flow of fine dust, it has been found that street planting strips are most effective, followed by wall green space, and rooftop green space. Secondly, it has been discovered that the fine dust reduction effect varies by characteristics (i.e. length, slope, width, and building height) of the alleys. Third, it is crucial to place green space near low-rise residential areas in order to create a safer environment for pedestrians in the COVID-19 epidemic. In conclusion, it is necessary to create a healthier living conditions in the low-rise residential areas through suitable environmental design.

KeyWords: Low-rise housing Area, Alley, Fine Dust, Green Space, CFD(Comptational Fluid Dynamics)

^{*} 이 논문은 2013년도 중앙대학교 연구년 결과물이며, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 (No.2019R1A2C1011102)로서 김상현의 석사학위논문의 일부 내용을 보완하여 작성됨.

^{**} 중앙대학교 토목공학과 도시설계 및 계획전공 석사

^{***} 중앙대학교 사회기반시스템공학부 도시시스템공학전공 교수(Professor, Dept. of Urban Design and Studies Chung-Ang Univ.), 교신저자(E-Mail : baegogh@cau.ac.kr, 02-820-5849)

l. 서론

최근 기후변화 현실화로 인한 폭염, 가뭄, 한파 등 이상기후가 빈번해지고, 이로 인한 미세먼지의 그 피해도 심화되고 있다. 우리나라 이상기후 피해 는 국민 90% 이상이 거주하는 도시지역에 집중하 고 있다(녹색위·기상청, 2010). 이는 고밀 도시의 노후화에 따른 쇠퇴 가속 및 개발에 따른 불투수층 증가 등으로 취약지의 확대는 지속될 것이다. 특 히, 60·70년대 급격한 도시화를 거쳐 80년대 전후 완성된 저층주거지들은 물리적 노후화에 따른 취 약성이 높고(강정은, 2011), 인구사회학적 노령화 가 심화되어 시민의 안전과 건강을 위협하고 있다.

서울시 미세먼지(PM2.5) 농도는 2015년 연평균 23,µg/㎡에서 꾸준히 증가하여 2019년 25,µg/㎡로 세계보건기구의 권고기준(IT-3:15,µg/㎡, AQG: 10,µg/㎡)을 크게 초과하고 있다(천권필, 2020). 또 한 서울의 초미세먼지 농도의 나쁨 일수도 해마다 증가하여 2015년 12일에서 2019년에서 23일로 급증한 실정이다. 이 같은 대기 환경은 도시 내 거 주민에게 영향을 미친다.

서울시 주거지역 313km 중 저층주거지는 134 km로 아파트단지 100km에 비해 다수를 차지하고 있다. 저층주거지 건축물은 30년 이상(1980년대 이전) 46.7%, 20년 이상(1990년대 이전) 84%로 나타나고 있으며, 오래될수록 구릉지에 분포하는 경우가 많다(국승렬, 2017). 이 같은 주거환경은 오픈스페이스가 부족한 채 좁은 골목길로 이어진 밀집 환경을 구성하여 공기순환이 원활하지 않아 더위와 추위 등 미기후 환경에 적응력도 낮다. 또 한 서울시 평균 노령화 지수는 69.8%인 데 비해 아파트단지는 55.3%, 저층주거지는 95.1%로 고령 화가 매우 심하다(맹다미 외, 2017) 도시지역에서 평균 경사도가 높아질수록 이상기후에 취약하고 인구 1,000명당 재산피해액도 증가한다(강정은, 2011)는 주장을 고려하면, 저층주거지는 물리적 노후화, 인구 고령화 등이 중첩되어 재해는 물론 거주민의 안전과 건강 등에 취약성이 높다.

앞서 언급한 바와 같이 저층주거지의 거주환경 으로 인해 이상기후에 취약하고, 미세먼지 등에 상시적으로 위험에 노출되므로 이를 해결할 수 있 는 개선방안이 시급하다. 녹지(관목·교목, 초화류 등)는 고밀 환경에 여유 공간을 제공하고, 미세먼 지 등 공기오염 물질을 침착시킴과(Gromke, 2009) 동시에 온도를 낮추는 도시오픈스페이스로 서 역할한다는 점에 주목하고자 한다.

따라서 이 연구는 다음과 같은 연구 목적을 설 정하고자 한다. 첫째, 저층주거지의 여건을 분석하 여 취약성이 심각한 주거환경을 효과적으로 개선 할 수 있는 방안으로 골목길 오픈스페이스 조성의 필요성을 도출하고자 한다. 둘째, 이 같은 골목길 에 녹지를 도입함으로써 미세먼지(PM2.5)저감효 과를 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시 뮬레이션을 통해 구체적으로 분석함으로써 효과적 인 녹지배치의 유형을 밝히고자 한다. 셋째, 시뮬 레이션 결과를 기초로 저층주거지의 환경개선을 위해 요구되는 녹지배치를 중심으로 저층주거지 물리적 환경개선 설계 방향을 제시하고자 한다.

이 연구는 대표적인 경사지 저층주거지인 동작 구 본동 일대를 대상으로 하되, 그중 중심 골목길 을 시뮬레이션 구간으로 선정한다. 주요 내용은 CFD 시뮬레이션을 수행하여 녹지배치(가로녹지, 벽면녹지, 옥상녹지)에 따른 미세먼지 거동을 파악 하고, 이 결과에 기초하여 녹지배치별 미세먼지 저 감 효과를 분석하는 것이다. 이 결과에 따라 보행 자 중심의 쾌적한 골목길 환경 조성을 위한 설계 방향을 도출한다. 시간적 범위는 미세먼지가 가장 심한 계절인 봄철로 하되, 공개된 최신 봄철 데이 터인 한국환경공단(미세먼지) 2019년 봄철 중 가 장 미세먼지가 심한 3월4일로 설정한다.

이 연구는 저층주거지 골목길에 설치하는 녹지 유형에 따른 미세먼지(PM2.5)의 저감효과를 CFD (Computational Fluid Dynamics, 전산유체역 학) 기법을 적용하여 진행하였다. 자세한 연구방법 은 제3장 분석의 틀 부분에 수록한다.

〈그림 1〉 공간적 범위



11. 이론적 고찰 및 선행연구 검토

1. 저층주거지 현실과 개선과제

저층주거지는 4층 이하의 단독·다세대·다가구 등 주택이 밀집된 주거지역을 말하며(김태섭 외 2011; 안병식, 2012; 서수정·임강륜 2010; 맹다 미 외, 2017) 아파트 등으로 이루어진 고층주거지 의 '대립개념'이다. 저층주거지는 구릉지에 입지하 거나 자연발생적으로 조성되어 도로망은 비격자형 이며, 다양한 유형, 높은 노후도, 주택밀집이 특징 이다(맹다미 2016; 배웅규 2011; 서수정 2014). 저층주거지는 개별필지 단위의 건축으로 골목

길이 보존되어 있고 도시공간 내 커뮤니티는 골목 길에서 이루어지고 있다. 필지단위 건축으로 신축 고밀 다세대·연립주택과 노후한 저층 단독·다가구 주택이 혼재되어 기반시설의 확충 및 정비가 이루 어지지 못한 실정이다(맹다미, 2017). 아울러 조 경·녹지 등 오픈스페이스 부족, 주차공간 부족으로 인한 보행환경 악화 등 주거환경의 문제가 있다(이 정현, 2020). 맹다미 외(2017)의 연구에 의하면 저 층주거지의 평균 인구밀도는 4.2만명/km로 아파트 인구밀도 6.6만명/km 보다 낮으나 주택의 높이와 규모를 고려하면 체감되는 인구밀도가 높지만, 노 령화 지수 역시 95.1%로 아파트단지 55.3%에 비 해 크게 높다.

최근의 코로나19 사태로 인해 노후 밀집 저층 주거지는 재해·재난에 취약할 뿐 아니라 감염 우려 도 높은 곳이라 개선이 요구된다. 또한 고령화된 주민이 건강하고 안전하게 살아갈 수 있도록 미세 먼지, 폭염 등 이상기후 상황에 대응력을 높일 수 있도록 주거환경을 조성할 필요가 있다.





출처: 맹다미외(2017.2), "서울시 저층주거지 실태와 개선 방향, p.5,

2. 선행연구 검토

맹다미(2017.2)는 저층주거지의 문제로 주택의 노후화, 지속적인 밀도 증가로 고밀화, 도시기반시 설 부족, 주택유형 획일화 등을 도출했다. 저층주 거지 유형별 특성을 구분하고 거주민 조사도 수행 했다. 이에 따른 개선방향은 기반시설 공급·정비· 관리에 대한 공공의 책임을 강화하고 저층주거지 의 관리를 위한 기초생활권 계획을 제안했다.

강정은(2011)은 주거환경 개선에서 도시 미기 후를 고려한 그린인프라 구축의 미흡함을 지적했 다. 그린인프라를 구축하더라도 이를 효과적으로 활용하는 방법이나 설계도 미흡하다고 밝혔다. 이 에 따라 가로녹지, 옥상녹지, 식생수로, 가로수 등 다양한 기법을 활용하는 시도가 도시계획, 방재, 환경, 조경 등에서 이루어져야 한다고 제시하였다.

녹지의 환경조절 관련 연구를 살펴보면 온도저 감, 대기오염 개선 등에 관한 연구로서 녹지의 기 능 검증 중심이나, 실제 적용방안 및 구체적인 조 성기법을 제시한 연구는 부족했다. 조현길(2003) 은 도시녹지는 CO₂, SO₂, NO₂ 등 대기오염물질을 저감하고 온도저감에 기여한다고 주장하였다. 녹 지의 효과를 바탕으로 황광일(2018)은 보도, 녹지, 주거지에서 PM2.5 미세먼지 농도 저감의 변화를 확인하였다. 실제로 녹지를 통과한 후, 주거지 내 에서 미세먼지 농도값이 가장 많이 저감되었고, 주 거지 내 완충녹지의 필요성을 강조하였다.

Nowak and Crane(2000)은 가로녹지가 미세 먼지를 저감하는 모델링 설정 후, 이를 활용하여 가로녹지는 미세먼지 저감효과가 매우 높음을 지 적하였다. Freer-smith et al.(1997)은 도시지역 의 녹지나 벽면, 옥상 녹화 등은 대기 미세 오염물 입자를 침착시킬 수 있고, PM2.5 등 공기오염 물 질을 흡착시키는 효과는 녹지 배치 및 분포방식에 따라 다르다는 결과를 도출했다.

Vranckx(2015)는 Open FOAM CFD패키지 를 통한 추가 소스팀 방법을 활용하여 도시녹지의 미세먼지 침착효과를 시뮬레이션하였다. Jeanjean APR(2016)은 나무, 잔디 등 식재를 고려하여 미세 먼지 농도를 시뮬레이션한 결과 PM2.5 농도가 9.0% 저감되는 것을 확인했다. Bo Hong(2017)은 수정된 Reynolds -averaged Navier-Stokes (RANS)모형을 활용하여 가로발생 미세먼지(PM 2.5)의 확산 정도를 분석한 결과 도시가로에서 원 통 형태 가로수 수관(树冠)은 미세먼지 농도를 75~85% 감소시키는 것을 확인했다. 최동희(2013) 는 CFD와 실측을 결합하여 실내 미세먼지 재부유 및 확산 해석방법을 제시하고, 김태연(2018)은 실 내 공기오염분석에 CFD를 활용하였다.

3. 선행연구의 시사점 및 차별성

선행연구 분석결과, 우리나라 저층주거지는 노 후화, 좁은 도로폭, 가로환경, 녹지 부족, 상하수도 등 도시기반시설이 부족할 뿐만 아니라 고령화지 수가 높고 저층 건축물 밀집으로 밀집된 주거환경 이라는 점에서 재해·재난 및 감염에 취약한 문제를 제시했다. 또한 이러한 문제점을 해결하기 위해 다 양한 사업이 진행되고 있지만, 도시 미기후를 고려 한 그린인프라 구축이 미흡하다고 지적하였다. 이 를 해결하기 위해 녹지조성계획 등 다양한 기법들 을 고려한 도시계획, 방재, 환경, 기후변화, 조경 등 다양한 분야의 접근이 필요하다.

 (표 1) 대상지 선정 기준 및 선정 과정

 기준1
 기준2
 기준3

 신정 기준
 - 용도지역상 저층 주거지역 (1·2종 일반주거지역)
 - 현장접근성 - 경시지형 저층 주거지(노후도)
 - 공기흐름이 빠른 수변지역 현장 및 자료접근성

 관련 도면
 - 행자지역
 - 행장접근성
 - 양기흐름이 빠른 수변지역 현장 및

이 연구는 저층주거지 골목길 녹지배치에 따른
미세먼지 저감효과를 시뮬레이션하는 것이다. 이
를 위해 〈그림 3〉과 같이 '기초현황분석 → 시뮬레
이션조건 정립 → 시범모델시뮬레이션 → 적용모델
시뮬레이션 → 연구종합 및 시사점'단계를 거친다.

4	(그림 3) 퉌	분석의 틀			
		대상지 기초현황분석			
	임지문석 · 광역입지현황 · 대상지주변현황	인장문석 •표고 ·경사도 ·증수 •도로 폭원 · 결절 정	기신원장 문석 네먼지 실축 속실축 vs 데이터 활용		
	- ; ; - ; ; ; - ; ; ; ;	시불력이선 조건 정됨 기상경계조건 정됨: 성유 포발(이터뷰 통한 가상조건정됨 녹지 크기 및 흡착 조건 팀: 반영수국 문화 지수 교육 방역 가장으로 누지크기설정 사법 적용 모델 모델링: 지 프레이네비배계 웹가장으로 누지 프기설정 사법 자료 유통 모델 모델링: 제품 가지 도명해	녹지 배치유형별 시범, · 국가의 이동 및 PM 입장부분 및 가산물 위해 입장부대까드 Externan 방법 · 해석명역 내 공기이 PM입자부분포를 102 · 제식한지 위방된 값 두다 · 지·배치유형별 적용 · 미세먼지 · 도주 특지 점 선· · 규정및 높이선정	모델 작성 복지 비 · 녹지 · 누지 · 국지 · 국지 · 국지 · 국지 · · 국지 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	지유철별 시범으릴 분석 두편에서의 미세인지 별 확인하여, 10엔서의 부호호류분석 배치철 특지거동분석 인지지강연박 및 구간 분석 고 지장철 열 여만 특지 지정철 호수의 따른 동도 길 특성에 대론 등도 문국에 따른 동도 문서 관량에 다른 동도 문서
		쾌적한 :	길 환경 조성 도시	설계를 위한 시사	점 제시

대상지 기초현황(입지, 골목길, 경사도, 주택현 황 등)을 분석하며, 특히 골목길 현황은 경사도, 도 로폭원, 결절점, 주변 건물높이로 특성을 구분하여 정리한다. 경사도는 평탄지(0~5°), 경사지(5~15°), 급경사지(15~20°이상)로, 도로폭원은 실측 기준(6 m, 4m, 3m 미만)으로 구분한다. 골목의 선형 조 사와 함께 연변 건축물의 층수도 조사한다.

녹지에 의한 미세먼지 등 환경조절 관련 연구 분석 결과 녹지는 온도저감, 미세먼지 저감효과를 증명한 연구가 활발히 진행되었다. 반면, 도시 녹 지가 미세먼지 저감에 매우 효과적이라는 것이 통 념적 생각이었는데 미세먼지 흡착량이나 대기오염 물질의 흡수량이 극히 미미한 것으로 알려지고 있 어 실제로 어떠한지를 확인할 필요가 있다. 미세먼 지 시뮬레이션 관련 연구 분석 결과 CFD를 활용 한 연구가 이루어지고 있지만, 이 연구처럼 저층주 거지의 골목길에 대해 직접적인 연구는 없으며, 녹 지의 흡수작용을 직접 고려한 점도 차별점이다.

이에 따라 저층주거지가 주로 구릉지에 입지하 는 특성을 고려할 때 경사지에 대한 연구가 필요하 며, 골목길 환경개선을 위해 녹지배치 유형별로 시 뮬레이션을 진행함으로써, 이를 기초로 골목길 환 경에 부합하는 주거환경 개선방향이 요구된다.

Ⅲ. 분석의 틀 및 시범모델 분석

1. 대상지 선정 및 분석의 틀

이 연구의 대상지는 우선 서울시내 1·2종 일반 주거지역인 저층주거지를 대상으로 하고, 노후도 가 심하고 경사지 및 현장접근 용이성 여부에 따라 2차 선별하였으며, 3차 선별기준은 시뮬레이션 효 과를 극대화시키기 위해 공기흐름이 빠른 수변주 변과 관련 자료 구득이 쉬운 곳을 기준으로 하고자 한다. 앞선 기준에 따라 1·2종 일반주거지역으로 저층주택이 밀집하며 경사지형의 수변(한강변)지역 이고, 현장 및 자료 접근성이 뛰어난 서울시 동작 구 본동 저층주거지를 선정하였다. 기상경계조건은 기상데이터포털 데이터를 활용 한다. 농도 추출지점은 골목길 폭원, 경사도, 결절점, 건물층수에 따라 10m 간격으로 22개 지점에 대한 7개 추출 높이를 설정한다. 시뮬레이션 전체 크기 는 AIJ Guide Line을 바탕으로 가장 높은 건물 기 준으로 H, Inlet-대상지까지 5H, 대상지에서 Outlet까지 15H, 시물레이션 높이는 지표면에서 5H로 정한다. 녹지크기는 관련 조례에 근거하고, 흡착률은 Bo Hong(2017)의 선행연구를 활용한다.

CFD 시뮬레이션 분석을 위한 모델링은 건물 2 호를 배치하는 시범모델과 실제 경사지 골목길 모 델링을 생성하여 적용모델에 활용한다. 또한 녹지 배치 유형은 녹지의 위치를 기준으로 가로녹지(건 물전면), 옥상녹지(건물벽면), 벽면녹지(건물옥상) 이다. 공기의 이동 및 PM입자분포 계산을 위해 Eulerian-Eulerian 방법을 사용한다.¹⁾

시범모델 시뮬레이션은 녹지주변에서 미세먼지 유동흐름을 분석하고, 녹지유형별 흡착량, 저감거 리, 저감면적 및 구간을 분석하여 미세먼지의 유동 을 파악한다.²⁾ 이를 기초로 실제 저층주거지 골목 길 대상 적용모델 시뮬레이션으로 녹지배치 유형 에 따른 미세먼지(PM2.5) 저감효과를 분석한다. 앞서 설정한 농도 추출지점에서 발굴한 데이터를 비교분석함으로서 결과를 도출한다.

2. 대상지 기초현황 분석

대상지는 한강에 접한 구릉지 저층주거지이다. 입지적으로 한강의 남과 북을 잇는 교통요충지로 인접지역에서 도시재생사업과 역사문화환경정비가 이루어지는 주거지이다. 이곳은 면적 약 8ha로 1·2종 주거지역이 혼재되어있고, 주거용도 건축물 346호 중 노후건축물은 285개 동(30년 이상 103 개 동)이다. 실제로 연구대상지 내 주거지의 골격을 이루는 도로인 골목길은 나뭇가지 줄기와 같은 형 상으로 나타난다. 연구대상지인 본동은 북서측 간 선도로에서 주거단지 내부로 진입하는 골목길이 위 치하고 있다. 적용모델 골목길 현황은 다음과 같다.





¹⁾ PM2.5 상의 흡착은 녹지 영역을 통과하는 PM2.5 상에 대한 Sink 항으로 처리하였으므로, PM2.5 상 소멸에 따른 속도 장 변화를 정밀하게 계산하고, 서로 관통 가능한 공기 상과 PM2.5 상을 고려하여, 다상 모델링은 Eulerian-Eulerian 방법을 사용하며, 각 상의 운동량은 별도의 운동량 방정식을 계산한다. 해석영역 내 공기이동 및 PM입자분포를 10초동안 계산하기 위해 설정값을 투입한다.

2) Eulerian-Eulerian 접근 방법에서는 서로 다른 상을 수학적으로 관통 가능한 연속체로 취급하는데, 하나의 상이 점유한 체적은 다른 상이 점 유할 수 없으므로, 상 체적분율 개념을 적용한다. 전술한 체적분율은 공간과 시간에 대해 연속적인 함수로 가정하며, 각 유한 체적 내의 모든 체적분율의 합은 1과 같다. 공기 상과 PM2.5 상 사이의 힘 상호교환은 항력 효과만을 고려하며, 이는 운동량 보존 방정식에 유체 상호작용계수

$$K_{pq}$$
로 반영한다. $K_{pq} = rac{
ho_p f}{6 au_p} d_p A_i$ $au_p = rac{
ho_p d_p^2}{18\mu_q}$ 항력은 공기 상과 PM2.5상 사이의 계면 면적을 기준으로 계산되며, A_i 는

계면 면적, $f \doteq$ 항력 함수, $\tau_p \doteq$ 입자 완화 시간으로, p상의 입자 크기와 점도, 밀도에 의해 산출된다(G. K. Batchelor. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge Univ.Press. Cambridge, England. 1967, 이 연구에 사용되는 수치해석은 선행연구를 참고해 작성됨).

골목길 폭원은 6m, 4m, 3m 미만(계단포함)이 고, 연장길이는 220m이다. 골목길 전체의 경사도 는 가장 낮은 A 부분의 표고는 약 12m, 가장 높은 B 부분의 표고는 40m로 약 12.7°(높이/거리=경사 도)로 나타났다(〈표 2〉 참고). 이금삼·조화룡 (2000), Huddson(1936) 연구에 따라 경사도로 지형을 분류하였으며, 이 연구에서는 대상지 골목 길 현황을 고려하여 0~5°를 평탄지로, 5~15°를 완경사지로, 15° 이상부터 급경사지로 분류하였다.

〈그림 7〉 적용모델 시뮬레이션 골목길 현장사진 및 기초분석







〈그림 6〉 대상지 건물 층수 현황



〈표 2〉 대상지 골목길 기초 분석 종합

구	분	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
도로	폭원	6m	6m	6m	6m	6m	6m	6m	6m	6m	4m	4m	4m	4m	4m	4m	4m	4m	4m	4m	3m 미만	3m 미만	3m 미만
H	5	12.2	12.7	13.1	13.5	13.7	14.1	14.7	15	15.1	16.5	19	21.1	22.7	24.3	25	25.7	28.4	31.5	35.3	36.4	36.2	38.6
경	사지	평탄	평탄	평탄	평탄	평탄	완경 사지	평탄	평탄	준경 사	급경 사	급경 사	급경 사지	급경 사지	완경 사지	완경 사지	급경 사	급경 사	급경 사	준경 사	평탄	급경	봐
결감	덜점						0										0		0				
건물	북	3	3	4	4	3	3	3	4	4	2	4	2	2	2	2	2	4	4	2	2	1	1
층수	남	5	3	3	3	3	4	4	2	2	2	2	2	4	2	2	2	2	3	2	3	1	1
경사	도(°)	4.9	4.6	3.3	2.5	3.7	5.5	2.9	1.5	14.2	24.8	21	15.6	16.5	7.1	6.1	27.5	30.4	38.2	11.6	-2.6	24.1	
대성 단단 몰	상지 별도 및 루길															구분				분 행가분 행지 경사지 경사지	골목2 방례		1분
특성	분석	1 2	3 4	5 6	7 8	9	10 11	12 13	8 14	15 16	17 18	19 20	21 22				TELON ,						

3. CFD(전산유체역학) 특징 및 시뮬레이션 조건

1) CFD 시뮬레이션 특징

CFD(Computational Fluid Dynamic)는 유체의 동적인 움직임을 컴퓨터를 이용해서 수치 해석적 방법으로 계산하는 전산유체역학을 의미하며, 유체 운동방정식인 나비에-스토크스방정식(Navier-Stokes Equation)을 유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM), 유한체적법(FVM) 등 방법을 사용해 이산화하고 대 수방정식으로 변환하여 이를 수치해석 알고리즘을 사용해 유체 유동을 해석하는 시뮬레이션이다(htt ps://ko.wikipedia.org/wiki/CFD). 실내 환경 에 대한 열 환경 해석 및 환기 시뮬레이션 등 건축 환경 분야에서 활용되고, 외부공간의 열 환경 분석 및 대기 환경 문제에 대응하기 위해 도시설계 및 계획분야로 사용 범위가 확대하고 있다.

CFD시뮬레이션 프로그램은 단시간에 실제와 유사한 가상공간에서 요구되는 성능에 대해 시뮬 레이션이 가능하다는 장점이 있다. 도시환경 분야 에서 대표적 CFD 프로그램은 ENVI-MET(https: //www.envi-met.com/)과 ANSYS Fluent(https: //www.ansys.com/ko-kr/products/fluids/ans ys-fluent)가 있다. ENVI-MET은 열섬현상, 오염 물질 확산, 태양광 분석, 바람의 흐름과 난기류 등 을 시뮬레이션할 수 있다. 반면, ANSYS Fluent 프로그램은 유한요소법을 기준으로 계산알고리즘 을 수행하고, 다양한 공간을 대상으로 하여 분석의 정밀도가 높다. 복잡한 모델은 정밀도가 높고 실제 와 거의 유사한 모델링을 통해 신뢰도 높은 분석이 가능한 것으로 판단되어 이를 적용하고자 한다.

2) 시뮬레이션 경계조건 정립 및 모델링

이 연구의 시뮬레이션 기상조건은 한국환경공 단(http://www.airkorea.or.kr/web)과 서울기상 청(https://data.kma.go.kr)에서 수집한 기상 및 대기오염 데이터를 기준으로 이 연구의 기상경계 조건을 정립한다. 또한 대상지 내 실측데이터(2020. 4.7)는 비교차원에서 활용한다. 미세먼지 저감 효 과를 극대화시키기 위해 연중 초미세먼지 농도가 가장 높았던 2019년 3월 4일의 미세먼지(PM2.5) 농도인 174µg/㎡를 기준으로 설정하였다. 단일 평 균 풍속은 미세먼지(PM2.5) 농도가 가장 높았던 2019년 3월 4일을 기준으로 1.8m/s로 설정하였 다. 시뮬레이션 상에서 풍속은 모든 높이에서 동일 하게 적용하였고, 유체벽면점착조건³⁾에 의해 작동 한다. 이 데이터를 적용하는 기상관측소는 대상지 에서 직선거리 1.5km로 나타난다.

78	현장실측 (2020.4.7.)			7	' 준값*	미기후실측	
TT	1	2	3	실측 당일	최고일** (2019.3.4)	지점도	
미세 먼지 (µg/m³)	19	30	24	69	174		
풍속 (m/s)	0.3	0.2	0.6	2.6	1.8		

〈표 3〉 실측데이터-기상포털 데이터 비교표

*풍속 기준 값은 AWS데이터 활용 **미세먼지 농도가 가장 높은날 *미세먼지 기준 값은 에어코리아 데이터 활용

녹지 경계조건은 서울시 건축조례 제24조 대지안 의조경⁴⁾을 기초로 설정하였다(http://legal.seoul. go.kr) 대상지 내 건축물 가장 큰 건축물은 연면

³⁾ 점착 조건에 의해 유체(미세먼지·공기)가 고체(건물)와의 표면 경계에서 정지 상태가 되고, 고체(건물)와 집적 접촉하고 있는 유체(미세먼지· 공기)는 건물 표면에 달라붙게 되어 미끄러짐이 없게 된다.

적 1,000㎡ 미만으로 조경면적 기준인 대지면적의 5% 이상이 적용된다. 이에 따라 가장 큰 대지면적 114㎡를 고려하여 녹지크기는 6㎡로 정했다. 이에 따라 가로녹지, 벽면녹지, 옥상녹지는 〈표 4〉와 같 은 규격으로 총 35개 건물에 배치하였다. 벽면녹지 유형은 건물 벽면과 지표면에 부착하여 6㎡5㎡*0.2㎡의 크기로 총 35개 건물에 배치하였다. 옥상녹지 유형은 건물 상단인 가로변 옥상에 부착하였고, 6㎡*0.2㎡5㎡의 크기로 총 35개 건물에 배치하였다. 3가지 유형을 비교하기 위해 총 녹지량은 210㎡로 동일하게 설정하였다.

미세먼지 흡착조건은 Bo Hong(2017)의 선행 연구에 따라 적용하였다. 공기에서 떠다니는 미세 먼지 입자는 녹지 내 가로수 수관부분과 접촉하였 을 때 침착효과 때문에 농도가 낮아지는 효과를 발 휘하며 바람의 작용으로 일부 침적되는 미세먼지 과립은 다시 가로 중으로 발산한다. 이런 과정을 반영하기 위해 이 연구에서는 다음 식을 활용하여 모든 녹지에 동일하게 적용하였다.

Ssink= LAD \times Vd \times C⁵⁾

\표 4/ 시설데이긴 국지메시 ㅠ8일 포용 걸음	〈표	4>	시뮬레이션	녹지배치	유형별	모형 설정	
----------------------------	----	----	-------	------	-----	-------	--

유형	체적	모형	규격(㎡, 가로*세로*폭)
가로 녹지	6m³	EM TH	6m*1m*1m
벽면 녹지	6m³	94 94	6m*5m*0.2m
옥상 녹지	6m³	n	6m*0.2m*5m

(표	5>	시뮬레이션	경계조건	종합정리	표
----	----	-------	------	------	---

녹지크기	미세먼지 농도	흡착률	풍속
6m³	174µg/m³	질량기준, 초당 53.7[ug/sec]	1.8m/s

모델링 전체크기는 AIJ guideline(2008)을 바 탕으로 시범모델과 적용모델을 동일하게 설정하였 다(〈표 6〉 참고).⁶⁾

〈표 6〉 시뮬레이션 전체규모, 시범모델 및 적용모델



4) 제24조(대자안의 조경) ① 면적 200제곱미터 이상인 대자에 건축물을 건축하고자 하는 자는 법 제42조제1항에 따라 다음 각 호의 기준에 따른 식수 등 조경에 필요한 면적(이하 "조경면적"이라 한다)을 확보하여야 한다. 〈개정 2018. 7. 19.〉

3. 연면적의 합계가 1천제곱미터 미만인 건축물 : 대지면적의 5퍼센트 이상

- 5) 이 방정식에서 'Ssink'는 흡착률(µg/sec)이고, 'C'는 PM2.5 평균농도(µg/m3)이며, 'Vd'는 PM2.5 참적속도(m/s), LAD는 엽(葉)면적밀도 (㎡/㎡)를 나타낸다.
- 6) 가장 높은 건물을 기준으로 H, Inlet-대상자까지 5H, 대상자에서 Outlet까지 15H, 시물레이션 높이는 지표면에서 5H로 모델링한다(Aij guideline, 2008).

시범모델은 건물 2호를 녹지배치 유형에 따라 모델링하였다. 각각은 A-1, 가로녹지 유형으로 지표 면과 건물에 부착하고 6m*1m*1m의 크기로 총 2 개 건물 앞 가로에 배치하였다. A-2, 벽면녹지 유 형으로 건물 벽면에 부착하여 6m*5m*0.2m의 크 기로 총 2개 건물에 배치하였다. A-3, 옥상녹지 유 형으로 건물 옥상에 부착하여 6m*0.2m*5m의 크 기로 총 2개 건물에 배치하였다. 시범모델의 3가 지 녹지배치 유형에 따른 녹지의 거동을 알아보기 위한 총 녹지량은 18㎡로 동일하게 설정하였다.

적용모델의 경우 연구 대상지로 선정한 골목길 변 건축물은 총 35호로 이루어져 있다. 이 중 건축 물 최저 층고는 3m이며, 최고 층고는 12m이다. 연구 대상지의 현장 조사결과 및 단지 CAD 파일 등 실도면에 근거하여 건축물을 모델링하였으며, 녹지 유형에 따른 미세먼지 저감 효과를 분석하기 위해 면적을 동일하게 설정(210㎡)하여 3개 녹지 배치 유형으로 구분하여 시범모델과 동일하게 모 델링하였다. 각각은 A-1, 가로녹지 유형으로 지표 면과 건물에 설치하고 6m*1m*1m의 크기로 총 35개 동앞에 배치하였다. A-2, 벽면녹지 유형으로 벽면에 설치하여 6m*5m*0.2m의 크기로 총 35개 동에 배치하였다. A-3, 옥상녹지 유형으로 건물 상 단인 옥상에 설치하여 6m*0.2m*5m의 크기로 총 면녹지에 비해 재순환영역(Wake)이 발생하여 유 속이 느려진다(〈표 7〉 참고). 가로녹지, 벽면녹지 의 경우 건물과 건물사이에 위치해있고, 옥상녹지 는 건물 상단에 위치했다. 이는 건물벽면에 충돌한 유체의 점성 때문에 벽면점착이 발생하게 되는데 벽면녹지의 경우 지표면에서 건물 상단까지 유속 이 0이 되는 구간이 발생한다(유체벽면점착조건, no-slip condition). 하지만, 가로녹지, 벽면녹지 는 건물 바닥면, 중심부분에 배치되어 건물사이 유 동이 빨라지는 구간이 발생하여 재순환영역 (Wake)이 옥상녹지에 비해 적게 발생한다.

2) 녹지유형에 따른 흡착량 비교

미세먼지 흡착량을 시뮬레이션하기 위해 동일 한 미세먼지량(2.26828ug/sec)과 동일한 흡착률 (질량기준, 초당 53.7ug/sec)을 경계조건으로 진 행하였다. 가로녹지 흡착 미세먼지량은 -7.98e-5ug/sec로 분석되었다. 벽면녹지의 경우 흡착한 미세먼지의 양은 -2.92e-5ug/sec로 나타났다. 옥 상녹지의 경우 흡착한 미세먼지량은 -1.69e-6ug/sec로 나타났다. 동일조건에서 미세먼 지 흡착량의 차이는 유동 흐름의 차이에서 나타난 것으로 판단된다.

4. 시범모델 시뮬레이션 분석

1) 녹지배치 유형에 따른 유동흐름 분석

미세먼지와 공기 거동을 알아보기 위해 유동흐 름을 분석하였다. 먼저, 옥상녹지는 가로녹지, 벽



〈표 7〉 시범모델 유동흐름 분석 비교표





3) 녹지유형에 따른 미세먼지 저감영향거리 비교

미세먼지 저감영향거리 비교를 위해 시뮬레이 션 분석을 진행한 결과를 정리하면 〈표 8〉과 같 다. 이 연구의 기상경계조건인 1.8m/s를 기준으로 비교 분석한 결과 가로녹지(43.5996m)〉벽면녹지 (27.9168m)〉옥상녹지(26.1428m) 순이다.

이는 앞서 분석한 흡착량의 차이에서 비롯된 것 으로 가로녹지의 흡착량이 가장 많아 정화거리가 크게 나타난 것으로 판단된다. 반대로 옥상녹지는 흡착량이 가장 적어 정화거리의 값이 상대적으로 작게 나타난 것으로 판단된다.

(표)	8>	시범모델	저감영향거리(단위:	m)
-----	----	------	------------	----

구분	모식도	0.1 [m/s]	0.95	1.8	3.95	6.1
가로 녹지 [m]		37.2454	39.2651	43.5996	54.9477	68.9226
벽면 녹지 [m]		18.9697	21.8864	27.9168	41.6291	53.270
옥상 녹지 [m]		19.0148	22.3852	26.1428	39.3797	47.6293

4) 높이에 따른 미세먼지 저감면적 비교

저감 영향 거리 비교를 위해 시뮬레이션 분석을 진행한 결과, 가로녹지는 지표면에서 6m, 벽면녹 지는 지표면에서 10m, 옥상녹지는 3m에서 12m 까지 정화영역이 생성되었다. 3개 녹지 유형에 따 른 높이별 정화영역은 〈표 10〉과 같다. 가로녹지 유형은 지표면에서 높아짐에 따라 정화면적이 감 소한다. 벽면녹지 유형에서 미세먼지 저감 영향 면 적은 1m, 2m, 지표면에서 높게 나타나 실제 보행 자 높이에서 정화영역이 넓다. 옥상녹지의 경우 미세먼지 저감영향 면적은 녹지가 설치된 9m 전 후가 높게 나타났다.

녹지유형에 따른 미세먼지 저감영향거리 비교 결과, 지표면에서 정화면적이 가장 큰 녹지 유형은 가로녹지(724.626㎡)로 나타났고(〈표 9 참고〉), 이 는 앞서 분석한 흡착량 비교에서(〈그림 8〉 참고〉 확인할 수 있다. 보행자 높이에서 효과가 가장 좋 은 녹지는 벽면녹지로 나타났다. 벽면녹지는 지표 면에서 10m까지 정화면적이 생성되었고, 이는 가 로녹지, 옥상녹지에 비해 높이에 따른 미세먼지 정 화 면적이 상대적으로 컸다.

〈표 9〉 시범모델 높이별 미세먼지 저감 영역(m²)



5) 시범모델 시뮬레이션 종합분석

시범모델 시뮬레이션 결과 녹지별 흡착량 및 저 감거리, 저감면적을 정리하면 〈표 12〉와 같다. 미 세먼지 흡착량은 가로녹지〉벽면녹지〉옥상녹지 순 으로 나타났다. 저감거리는 가로녹지가 1위이며, 풍속이 0.1m/s인 경우 옥상녹지가, 풍속이 1.8m/s인 경우 벽면녹지가 2위로 나왔다. 높이에 따른 저감 면적이 가장 큰 녹지 유형은 지표면과 1m 높이에서는 가로녹지가, 높이 2m와 5m에서 는 벽면녹지가, 높이 10m에서는 옥상녹지가 우수 하게 나타났다. 가로녹지는 높이가 높아짐에 따라 저감 면적이 감소하는 경향을 보이고, 벽면녹지의 경우 1~2m에서 높게 나타나며, 옥상녹지는 건물 상단에 배치되어 8~10m에서 높게 나타났다. 벽면 녹지는 다른 녹지에 비해 저감 면적의 높이가 넓게 분포하고, 보행자 레벨에서 저감 효과가 가장 높게 나타났다.

ትባ	녹지유형별 면적(㎡)						
표이	가로녹지	벽면녹지	옥상녹지				
지표면	724.626	449.626	0				
1m	604.059	521.717	0				
2m	424.645	514.8	0				
3m	303.103	446.321	5.87068				
4m	202.501	356.085	72.7053				
5m	137.186	297.794	156.835				
6m	25.3914	231.688	217.883				
7m	0	107.752	255.222				
8m	0	48.3185	283.281				
9m	0	32.5916	297.536				
10m	0	12.0208	280.173				
11m	0	0	218.936				
12m	0	0	70.7939				
13m	0	0	0				
14m	0	0	0				
15m	0	0	0				

〈표 10〉 시범모델 높이에 따른 저감효과영역 종합표

6) 시범모델 시뮬레이션 종합분석

시범모델 시뮬레이션 결과 녹지별 흡착량 및 저 감거리, 저감면적을 정리하면 (표 11)과 같다. 미 세먼지 흡착량은 가로녹지)벽면녹지)옥상녹지 순 으로 나타났다. 저감거리는 가로녹지가 1위이며, 풍속이 0.1m/s인 경우 옥상녹지가, 풍속이 1.8m/s인 경우 벽면녹지가 2위로 나왔다. 높이에 따른 저감 면적이 가장 큰 녹지 유형은 지표면과 1m 높이에서는 가로녹지가, 높이 2m와 5m에서는 벽면녹지가, 높이 10m에서는 옥상녹지가 우수하 게 나타났다. 가로녹지는 높이가 높아짐에 따라 저 감 면적이 감소하는 경향을 보이고, 벽면녹지의 경 우 1~2m에서 높게 나타나며, 옥상녹지는 건물 상 단에 배치되어 8~10m에서 높게 나타났다. 벽면녹 지는 다른 녹지에 비해 저감 면적의 높이가 넓게 분포하고, 보행자 레벨에서 저감 효과가 가장 높게 나타났다.

(표 11) 시험모델 문식결과 문위표

구분		녹지유형	결과치	순위
		가로녹지	7.98e-8kg/sec	1
흡초	턍	벽면녹지	2.92e-8kg/sec	2
		옥상녹지	1.69e-9kg/sec	3
		가로녹지	37.2454m	1
	0.1 m/s	벽면녹지	18.9697m	3
미세 먼지	-	옥상녹지	19.0148m	2
저감 거리		가로녹지	43.5996m	1
· 1-1	1.8 m/s	벽면녹지	27.9168m	2
		옥상녹지	26.1428m	3
	1m 높이	가로녹지 604.059㎡		1
		벽면녹지	521.717m²	2
		옥상녹지	Om²	3
높이에 따른		가로녹지	137.186m²	3
미세 먼지	5m 높이	벽면녹지	297.794m²	1
저감		옥상녹지	156.835m²	2
Ľ'-i		가로녹지	Om²	3
	10m 높이	0m 푹이 ^{벽면녹지} 12.0208㎡		2
		옥상녹지	280.173m²	1

Ⅳ. 적용모델 시뮬레이션

1. 미세먼지 농도 추출 지점 설정

농도 추출지점은 골목길 특성(도로폭원·경사도· 결절점·건물층수)을 고려하여 대략 10m 간격으로 22개 지점(총 220m)을 선정하였다.

또한, 앞서 분석한 미세먼지 저감거리 결과를 바탕으로 농도 추출지점은 녹지의 후류 영역으로 설정하였다. 분석지점은 〈그림 9〉추출지점(spot) 의 골목길 양단(X-Y-Z좌표지정)을 잇는 선으로 하 며 이 선의 평균값을 추출하여 사용하였다. 분석 높이는 지표면, 어린이의 평균 키 높이인 1m, 성 인의 평균 키 높이인 1.5m와 2m, 건물의 1층 높 이인 5m, 대상지 평균 건물 높이인 10m, 그 상부 인 20m로 설정하였다.





2. 적용모델 분석항목별 시뮬레이션 분석

1) 골목길 높이별 미세먼지 저감효과 분석

골목길 22개 지점에 대한 높이별 미세먼지 저 감효과 분석결과, 지점마다 다르게 나타났지만 전 체적으로 미세먼지 농도 저감 효과는 가로녹지>벽 면녹지>옥상녹지 순이다. 지표면에서 벽면녹지 (449.626㎡)오 옥상녹지(0㎡)에 비해 가로녹지는 724.626㎡로 효과가 가장 높았다. 미세먼지 변화 량은 변화의 폭이 가장 큰 지점을 기준으로 가로녹 지(21spot)는 174µg/m³에서 110µg/m³로, 벽면녹 지(18spot)는 174µg/m³에서 147µg/m³로, 옥상녹 지는 모든 구간에서 변화가 없었다.

〈표 12〉 미세먼지 농도 추출 높이(지표면으로부터)

추출높이	추출높이모형
10m	L 🕤 🛛 📕
5m	
2m	
1.5m	
1m	
지표면	1 20.00 40.0 m

높이 1m에서 미세먼지 농도 저감 효과는 지점 별로 상이했다. 1~12spot까지 '가로녹지〉벽면녹 지〉옥상녹지' 순으로 나타났고, 13~22spot(16, 18 spot 제외)까지 벽면녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순으 로 나타났다. 높이 1m에서는 가로녹지와 벽면녹지 의 효과가 높았다. 또한, 가로녹지는 604.059㎡로 벽면녹지, 옥상녹지와 비교할 때, 넓은 면적을 정 화하여 상대적으로 높게 나타났지만 높이가 높아 짐에 따라 감소했다. 녹지별 구간마다 미세먼지 변 화량의 차이는 골목길 특성에 따른 차이로 판단된 다. 미세먼지 변화량은 변화폭이 큰 기준으로 가로 녹지(2spot)는 174µg/m³에서 141µg/m³로 감소하 였으며, 벽면녹지(19spot)는 174µg/m³에서 137µg /m³로 감소하였고, 옥상녹지(21spot)는 174µg/m³ 에서 173µg/m³로 감소하였다.

높이 1.5m에서 녹지유형별로 저감효과도 지점 별로 상이했다. 1~12spot까지 가로녹지〉벽면녹지〉 옥상녹지 순이고, 13~22spot(16, 18spot 제외)까 지 벽면녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순이며, 이 구간 에서 가로녹지와 벽면녹지의 효과가 높았다. 미세 먼지 변화량은 큰 순으로 가로녹지(2spot)가 174 µg/m³에서 142µg/m³로, 벽면녹지(13spot)가 137 µg/m³로, 옥상녹지(21spot)가 173µg/m³으로 감소 했다.

높이 2m에서 녹지 유형별 미세먼지 농도 저감 효과는 6, 16, 18spot을 제외한 모든 지점에서 벽 면녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순으로 나타났다. 6, 16, 18spot에서는 가로녹지〉벽면녹지〉옥상녹지 순으로 나타났다. 미세먼지 변화량은 큰 기준으로 가로녹지(6spot)가 174µg/m³에서 156µg/m³로, 벽 면녹지(13spot)가 137µg/m³로, 옥상녹지(21spot)가 172µg/m³로 감소하였다.

높이 5m에서는 미세먼지 농도 저감 효과는 벽 면녹지>가로녹지>옥상녹지 순이다. 5m에서 벽면 녹지의 효과가 가장 크게 나타났고, 이는 앞서 분 석한 미세먼지 저감 영향 거리 비교 결과와 비교해 봤을 때 가로녹지(137.186㎡), 옥상녹지(156.835 ㎡)에 비해 벽면녹지는 297.794㎡의 면적을 정화 하고, 지표면에서 10m까지 효과가 나타나 실제 대 상지에 적용했을 때 나타난 결과로 판단된다. 변 화량은 큰 기준으로 가로녹지(6spot)가 174µg/m³ 로, 옥상녹지(13spot)가 172µg/m³로 감소하였다.

높이 10m에서 미세먼지 농도 저감 효과는 옥 상녹지〉벽면녹지〉가로녹지 순이다. 실제 건물 상 단에 배치되어 있고, 건물 높이가 대부분 10m 내 외인 것이 원인이다. 미세먼지 변화량은 변화의 폭 이 가장 큰 지점을 기준으로 가로녹지와 벽면녹지 는 모든 구간에서 174µg/m³로 변화하지 않았고, 옥상녹지(3spot)는 174µg/m³에서 165µg/m³로 감 소하였다. 높이 20m에서 미세먼지 농도 저감 효과 는 나타나지 않았다. 이는 대상지 내 가장 높은 건 물이 15m이라는 점을 고려할 때 당연한 결과이다.

2) 골목길 결절점 높이별 저감효과 분석

골목길 결절점은 총 3개소(6spot, 16spot, 18spot)로 경사도와 폭원에 관계없이 지표면에서 5m 높이까지 결절점에서 가로녹지가 가장 저감효 과가 우수하게 나타났다. 10m 높이에서는 옥상녹 지의 미세먼지 저감효과가 높게 나타났다.

3) 골목길 경사도 높이별 저감효과 분석

경사도는 평탄지(0~5°)(1~2, 20~21spot), 완 경사지(5~15°)(13~20spot), 급경사지(15~20°) (21~ 22spot)로 구분하였다. 지표면 저감 효과는 평탄 지(0~5°)구간인 1~12spot, 20~21spot과 경사지 (5~20°)구간에서 미세먼지 농도 저감 효과는 가로 녹지)벽면녹지)옥상녹지 순으로 나타났고, 모든 지점에서 가로녹지 효과가 높았다.

골목길 경사도에 따른 미세먼지 저감 효과는 1~ 5m 높이에서 평탄지인 1~12spot과 20~21spot 부분은 가로녹지〉벽면녹지〉옥상녹지 순인 반면에 서 경사지구간인 13~20spot과 21~22spot은 벽 면녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순으로 나타났다. 어린 이 보행 높이인 1m, 성인 보행 높이인 2m, 건물 1층 높이인 5m에서 경사가 가파른 구간일수록 벽 면녹지의 저감 효과가 높고, 경사가 완만한 구간은 가로녹지의 저감 효과가 높고, 경사가 완만한 구간은 가로녹지의 저감 효과가 상대적으로 높게 나타났 다. 즉, 경사도가 높아질수록 보행활동이 많은 1~ 5m에서 벽면녹지의 효과가 가장 높게 나타났다. 반대로 벽면녹지는 1m와 2m구간에서 가장 넓은 면적을 저감한다. 또한 지표면에 충돌한 미세먼지 는 점성 때문에 벽면에 점착하여 가로녹지의 경우 벽면녹지에 비해 지표면에 부딪히는 미세먼지 저 감구간이 상대적으로 많아져 지표면에 부딪힌 미 세먼지는 머무르는 양이 많아진다. 지표면은 유속 이 느려져 가로녹지는 재순환영역(Wake)이 많이 발생하여 미세먼지 저감효과가 낮아지고, 벽면녹 지 농도 저감효과가 상대적으로 낮게 나타난다. 10m 높이에서 옥상녹지의 미세먼지 저감효과가 높게 나타나고, 20m 높이에서는 모든 녹지의 저감 효과가 나타나지 않았다.

4) 골목길 폭원에 따른 저감효과 분석

골목길 폭원 6m, 4m, 3m 미만(1~22spot)의 지 표면 높이에서 미세먼지 저감 효과는 모든 지점에서 가로녹지) 벽면녹지)옥상녹지 순으로 나타났다. 지표 면에서는 골목길 특성에 영향을 받지 않는다.

높이 1~5m에서 저감 효과는 폭원 6m 구간인 1~9spot는 가로녹지〉벽면녹지〉옥상녹지 순이다. 도로폭원 4m 구간인 10~19spot은 일부 지점을 제 외하고 벽면녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순으로 나타났 다. 폭원이 3m 미만인 구간인 20~22spot은 벽면 녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순이다. 폭원이 감소함에 따라 벽면녹지 미세먼지 저감 효과가 상대적으로 높다. 10m 높이는 옥상녹지 저감효과가 높다.

5) 골목길 인접 건물 층수별 저감효과 분석

1~2층(21~22spot)은 벽면녹지의 저감효과가 상대적으로 높고, 2~3층(10, 12, 14~16, 19~20 spot)은 벽면녹지의 저감효과가 상대적으로 높았다. 3~5층(9,11,13,17~18spot)은 13spot을 제외한 구간에서 가로녹지의 저감 효과가 높게 나타났다. 건물 1~2층, 2~3층 구간은 벽면녹지의 저감 효과가 높고, 3~5층 구간은 가로녹지의 저감효과 가 높다. 건물 층수가 1~2층 미만, 2~3층 미만 구 간의 급경사지로는 벽면녹지의 미세먼지 저감 효 과가 높게 나타났다. 저층주거지인 사유로 20m 높 이에서는 미세먼지 저감효과가 나타나지 않았다.

3. 종합분석 및 시사점

녹지의 대기오염물질 저감효과를 검증한 조현 길(2003), 황광일(2018), Nowak and Crane (2000), Jeanjean APR(2016) 등의 연구에 착안 하여 이 연구를 진행한 결과 선행연구와 비슷한 맥 락으로 가로녹지, 벽면녹지, 옥상녹지에서 미세먼 지 저감효과를 확인했다. 또한 Freer-smith et al. (1997)은 PM2.5 등 공기오염 물질 흡착효과가 녹 지 배치 및 분포방식에 따라 다르다는 결과와 유사 한 맥략에서 연구되었다. 이에 시뮬레이션을 통해 골목길 특성을 고려하여 22개 지점 녹지배치에 따 른 저감효과를 분석하면 〈표 14〉, 〈표 15〉과 같다.

지표면은 가로녹지〉벽면녹지〉옥상녹지 순으로 나타났으며, 22개 지점의 미세먼지 농도 저감효과 는 녹지배치 유형에 따라 차이가 있다. 골목길 결 절점(6, 16, 18spot) 분석결과, 경사도와 도로폭원 에 관계없이 지표면에서 5m 높이까지 가로녹지의 미세먼지 저감효과가 높게 나타났다.

경사도에 따른 저감효과는 지표면, 1m, 1.5m, 2m, 5m 높이에서 평탄지는 가로녹지〉벽면녹지〉 옥상녹지 순으로 나타났다. 반면, 경사지구간은 벽 면녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순으로 나타났다. 골목 길 폭원에 관계없이 지표면 높이에서는 가로녹지〉 벽면녹지〉옥상녹지 순으로 가로녹지의 효과가 높 게 나타났다. 높이 1m, 1.5m, 2m, 5m에서 폭원 6m 구간은 가로녹지〉벽면녹지〉옥상녹지 순으로 나타났고, 도로폭원 4m 구간은 일부 지점을 제외 하고 벽면녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순으로 확인됐 다. 도로폭원이 3m 미만인 구간은 벽면녹지〉가로 녹지〉옥상녹지 순으로 나타났다.



〈표 13〉 미세먼지 저감효과 분석

〈표 13〉 미세먼지 저감효과 분석 계속

골목길 결절점에 따른 미세먼지 저감효과(D)	골목길 건물층수에 따른 미세먼지 저감효과(E)	검토결과
9.04년2 9.04년2 9.04년2 9.04년2 9.04년3 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년4 9.04년2 9.04년3 9.04년2 9.04년2 9.04년3 9.04 9.04 9.04 9.04 9.04 9.04 9.04 9.04	「	· A, B, C, D, E는 가로녹지의 저감효과가 가장 높게 나타남
1996 1997	100 - 2-3층미만 - 2-3층미만 - 2-3층미만 - 2-3층미만 - 2-3층미만 - 2-3층미만 - 2-3층 - 2-36 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2 - 2	· A는 경사도가 평탄지일 때, 가로녹지의 저
1900 2000 2000 2000 2000 2000 2000 2000	1.5 <u>m 2-30円</u> 1.5 <u>m 2-30円</u> 500 500 500 500 500 500 500 50	김효과가 높고, 급경자지일 때, 역연속지의 저감효과가 가장 높게 나타남 · B는 도로폭이 좁아질수록 벽면녹지의 저감 효과가 가장 높게 나타남 · C는 녹지배치에 따라 높이별 미세먼지 저
2010년 2010 2010	2-360102 2-36010 2-360102 2-360102 2-360102 2-360102 2-360102 2-36010	감효과는 다르게 나타남 · D는 결절점에서 가로녹지의 미세먼지 저감 효과가 가장 높게 나타남 · E는 녹지에 인접한 건물이 저층주거지일수
14904 2004	5m 2-3층 미 만 2-3층 미 만 2-2층 1000 2-2층 3-50 0000 3-50 00000 000000 00000 000000 <td>독 혁면독시의 효과가 높게 나타남</td>	독 혁면독시의 효과가 높게 나타남
1900 30001 30001 30001 30001 30001 30001 30001 30001 30001 30001 30001 30001 30001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 13001 20010 20010 20010 20010 20010	10m 2-3출미단 10m 2-3출미단 10m 2-3章미단 10m 2-3章 10m 2-3 10m 2-3 100m 2-3 100000000000000000	· A, B, C, D, E는 옥상녹지의 저감효과가 가장 높게 나타남
20m	20m 2-3종미만 	· A, B, C, D, E 모든 구간에서 저감효과가 나타나지 않음

골목길 건물층수에 따른 저감효과와 관련하여 지표면 높이는 건물층수에 관계없이 가로녹지〉벽 면녹지〉옥상녹지 순으로 모든 지점에서 나타났다. 건물층수가 높은 구간은 가로녹지의 미세먼지 저 감 효과가 상대적으로 높았고, 건물 층수가 낮은 구간은 벽면녹지의 미세먼지 저감 효과가 상대적 으로 높게 나타났다.

〈표 14〉 골목길 특성에 따른 저감효과 녹지 유형

Ŧ	분	지표면	1m	1.5m	2m	5m	10m	
일정간격		가로	가로,벽면	가로,벽면	벽면	벽면	옥상	
결절점		가로	가로	가로	가로	가로	옥상	
경	평탄지	가로	개로	가로	가로	가로	옥상	
사 도	경사지	가로	벽면	벽면	벽면	벽면	옥상	
골	6m 폭원	가로	가로	가로	가로	가로	옥상	
속 길	3m 폭원	가로	벽면	벽면	벽면	벽면	옥상	
건물	3-5층	가로	가로	가로	가로	가로	옥상	
층수	1-3층	가로	벽면	벽면	벽면	벽면	옥상	

〈표 15〉 골목길 특성을 고려한 높이별 저감 특성 비교

이 같은 결과에 따라 시사점을 제시하면 다음과 같다. 첫째, 22개 지점에 미세먼지 농도 저감효과 는 지점마다 높이에 따라 다르게 나타났다. 지점별 저감효과의 차이 발생원인은 골목길 특성에 따른 차이인 것으로 판단된다.

둘째, 골목길 공간으로서 결절점은 지표면에서 5m 높이까지 가로녹지의 미세먼지 저감효과가 높 게 나타났다. 이는 녹지배치 간격과 관계가 있는 것으로 판단된다. 골목과 골목이 만나는 결절점은 녹지가 배치되어 있지 않은 지점으로 시범모델에 서 미세먼지 저감 영향거리가 높은 가로녹지가 효 과가 가장 높게 나타난 것으로 판단된다.

셋째, 골목길의 특성 중 경사도에서 지표면은 골목길 특성에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 경사도가 높아질수록 사람이 많이 활동하는 높이 인 1m, 1.5m, 2m, 5m에서 벽면녹지의 효과가 가장 높게 나타났다. 이는 가로녹지의 경우 벽면녹

		7			측정높이별 저감량 (단위: μg/m³)												
구분		· 준	지표면		1m		1.5m		2m		5m		10m		20m		
		값	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	
골목길 특성에	가로녹지		110	64	141	33	142	32	156	18	160	14	174	0	174	0	
따른 22개 지점 미세먼지	벽면녹지		141	33	137	37	137	37	137	37	151	23	173	1	174	0	
저감 효과	옥상녹지		174	0	174	0	173	1	174	0	174	0	169	5	174	0	
결절점 미세먼지 저감효과	저전 가로녹지		125	49	151	26	152	22	156	28	160	14	174	0	174	0	
	벽면녹지	174	147	27	159	18	160	14	159	25	161	13	174	0	174	0	
	옥상녹지		174	0	174	0	174	0	174	0	174	0	174	0	174	0	
평탄지	가로녹지		130	44	141	33	142	32	156	18	161	13	174	0	174	0	
미세먼지	벽면녹지		148	26	149	25	153	21	151	23	154	20	173	1	174	0	
저감효과	옥상녹지		174	0	173	1	174	0	174	0	174	0	169	5	174	0	
급경사지 미세먼지 저감효과	가로녹지		110	64	148	26	151	23	156	18	161	13	174	0	174	0	
	벽면녹지		147	27	137	37	137	37	137	37	151	23	174	0	174	0	
	옥상녹지		174	0	173	1	173	1	172	2	172	2	174	0	174	0	

	기 녹지유형 준	7	71	측정높이별 저감량 (단위: µg/m³)													
구분		준	지표면		1m		1.5m		2m		5m		10m		20m		
		값	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	측정값	저감량	
6m폭원 미세먼지 저감효과	가로녹지		130	44	141	33	142	32	156	18	161	13	174	0	174	0	
	벽면녹지		148	26	149	25	153	21	151	23	154	20	173	1	174	0	
	옥상녹지		174	0	174	0	174	0	173	1	174	0	169	5	174	0	
3m미만폭원 - 미세먼지 저감효과 -	가로녹지		110	64	148	26	151	23	156	18	161	13	174	0	174	0	
	벽면녹지		147	27	137	37	137	37	137	37	151	23	174	0	174	0	
	옥상녹지		174	0	173	1	173	1	172	2	172	2	172	2	174	0	
인접건물	가로녹지		125	49	141	33	142	32	156	18	160	14	174	0	174	0	
(3-5응) 미세먼지	벽면녹지		147	27	149	25	153	21	151	23	154	20	174	0	174	0	
저감효과	옥상녹지		174	0	174	0	174	0	174	0	174	0	165	9	174	0	
인접건물 (1-3층) 미세먼지 저감효과	가로녹지		110	64	148	26	153	21	157	17	161	13	174	0	174	0	
	벽면녹지		154	20	141	33	142	32	137	37	151	23	174	0	174	0	
	옥상녹지		174	0	174	0	174	0	174	0	174	0	169	5	174	0	

*미세먼지 농도 값은 저감효과가 가장 높게 나타난 지점 추출 값 **음영은 가장 효과가 좋은 녹지배치 유형

지에 비해 지표면에 부딪히는 미세먼지 저감영역 구간이 상대적으로 많아지게 되고 지표면에 부딪 혀 머무르는 미세먼지는 양이 많아지게 된다. 이에 따라 유속이 느려져 재순환영역(Wake)이 많이 발 생하는 가로녹지는 미세먼지 저감효과가 낮아지고, 벽면녹지는 가로녹지에 비해 미세먼지 농도 저감 효과가 상대적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

넷째, 골목길 폭원이 넓을수록 가로녹지〉벽면녹 지〉옥상녹지 순으로, 도로폭원이 좁아질수록 벽면 녹지〉가로녹지〉옥상녹지 순으로 나타났다. 도로폭 원과 경사도에 따른 높이별 미세먼지 저감효과가 비슷하게 나타난 것으로 판단된다.

다섯째, 10m 높이는 옥상녹지의 저감효과가 상대적으로 높게 나타났다. 이는 옥상녹지가 대상 지 내 건물 평균 높이가 10m로 건물 상단에 설치 되어 녹지는 옥상녹지로 10m 구간에서 상대적으 로 높게 나타난 것으로 판단된다. 하지만, 실제 미 세먼지 저감 효과에는 큰 영향을 주지 않는다.

V. 결론

최근 기후변화의 현실화로 우리나라의 이상기 후 피해는 도시지역에 집중되고 있다. 이는 노후화 와 고령화 등으로 상대적 열위에 있는 저층주거지 가 우선적으로 취약지역이 될 수밖에 없다. 이곳은 충분한 오픈스페이스 없이 저층의 노후주택과 좁 은 골목길로 이루어진 밀집 주택시가지를 형성하 여 공기순환에도 취약할 뿐 아니라 이상 미기후에 적응력도 낮을 수밖에 없다. 이 연구는 이런 저층 주거지의 현실을 고려하여 골목길에 녹지를 도입 하는 CFD 시뮬레이션을 통해 미세먼지의 저감효 과를 확인하는 것이다.

연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하 였다. 첫째, 미세먼지의 기본 거동을 알아보기 위 한 시범모델을 통해 녹지배치 유형별 흡착량, 미세 먼지 저감 영향거리, 높이에 따른 미세먼지 저감 면적 및 저감 구간을 분석한 결과, 가로녹지)벽면 녹지)옥상녹지 순으로 나타났다. 둘째, 미세먼지 저감효과는 골목길(결절점, 경사도, 폭원, 건물층 수)의 특성에 따라 측정지점과 녹지배치 유형에 따 라 차이가 있다는 것을 확인하였다. 즉, 보행자 레 벨에서 효과를 고려하여 골목이 교차하는 지점은 미세먼지 저감효과가 큰 가로녹지를, 경사지가 급 하고 골목길 폭원이 좁은 곳은 벽면녹지를 설치하 고, 옥상녹지의 경우 효과가 확인될 경우에 활용한 다. 셋째, 코로나19 사태 대응을 위해 저층주거지 의 보행자 레벨에서 환경개선을 위한 녹지설치 등 을 적극 고려할 필요가 있다. 여전히 다수를 차지 하는 저층주거지 거주자들의 주거화경 개선을 위 해서는 보행자 레벨에서 건강과 복지를 고려한 녹 지 등 오픈스페이스의 적정한 설계와 배치가 요구 된다.

이 같은 결과에도 불구하고 다음과 같은 한계가 있으며, 향후 주거지 현실을 고려한 바람직한 저층 주거지 주거환경에 대한 연구가 요구된다.

첫째, 실제 경사지 저층주거지에 적용하여 분석 을 진행하였지만, 단일 표본만을 가지고 일반화시 키기에는 한계가 있다. 향후 특성이 분명한 주거지 로 확대할 필요가 있으며, 일반화된 해법이 도출될 수 있도록 각 녹지를 적정 비율로 조합하여 최적 효과를 기할 수 있는 배치방안에 대한 연구도 요구 된다. 둘째, 시뮬레이션의 한계로 시시각각 변화하는 기상현상 반영이 어렵고, 실제 골목길 상에서 차량, 유동인구 및 녹지성능 등 변수의 다양성을 고려하지 못했다. 시뮬레이션의 근본적인 한계라 볼 수 있으나 가능성을 확인하였기에 더 심도있는 연구가 필요하다. 셋째, 녹지배치 유형에 따른 미 세먼지 저감 효과만을 분석함에 따라 구체적인 환 경설계 차원의 관점이 배제될 수밖에 없었다. 향후 이 연구를 기초로 이상기후에 취약한 저층주거지 의 바람직한 주거환경 재생을 위해 뉴딜사업 등 주 거지 재생사업에 적용하여 최적 효과를 거둘 수 있 는 연구가 요구된다.

참고문헌 -

강정은 외, 2011, "기후변화 적응형 도시 리뉴얼 전략 수립: 그린인프라의 방재효과 및 적용방안", 한국환경정 책평가연구원.

국가통계포털, http://kosis.kr/eng/index/index.do, 2019.

- 국승렬, 2020. 2. 22., "시민체감형 저층주거지 종합관리방 안", 저층오래살고싶은 저층주거지 어떻게 만들까, 「저층주거지 미래 정책토론회」, 서울특별시
- 김용우, 2011, "골목길을 활용한 노후불량 밀집주거지의 정 비방식에 대한 연구", 경상대학교 도시공학과 석사 학위논문.
- 김태연, 2018 "CFD를 이용한 실내 미세먼지 해석 방법", 「KIC News」, 21(2).
- 모창환, 2018, "미세먼지 대책과 광역교통", 「월간교통」, 28~34.
- 맹다미, 2017, "서울시 저층주거지의 실태와 개선방향", 서 울연구원

박성주 외 3명, 2020, "복잡한 도심에서의 유입된 미세먼지

잔류 가능성 예보 연구", 한국지구과학회.

- 손세관, 1990, "구릉지 주거지역 공간구조에 관한 비교연 구", 대한건축학회.
- 이정현 외, 2020, "서울시 저층주거지의 주택유형별 개발에 미치는 영향요인에 관한 연구", 「대한국토·도시계 획학회」, 55(1).
- 조현길 외 2명, 2003, "도시녹지의 대기환경 개선 효과 -서 울시 중구를 중심으로-", 「한국환경생태학회」.
- 천권필, 2020. 1. 11., "(중국먼지알지) 베이징 18% 줄고, 성루 9% 늘고 엇갈린 미세먼지 성적표", 중앙일보. 중앙일보사.
- 최동희, 2013, "실험과 CFD를 활용한 건물 내 미세먼지 재 부유 및 확산해석 방법",「大韓建築學會論文集 計 劃系」, 29(10).
- 표승화, 2016, "골목길 보전가치에 대한 연구", 홍익대학교 공간디자인전공 석사학위 논문.
- 홍석환 외 4명, 2018, "도심 도로변 가로녹지가 주변 오픈 스페이스의 미세먼지농도에 미치는 영향 연구 - 부 산시청 광장을 대상으로 -", 한국환경생태학회.
- Buccolieri R, Salim SM, Leo LS, Di Sabatino S, Chan A, lelpo P, de Gennaro G, and Gromke C., 2011, "Analysis of local scale tree– atmosphere interaction on pollutant concen -tration in idealized street canyons and application to a real urban junction", *Atmos. Environ*, 45: 1702~1713.
- David J. Nowak, 2000, "A modeling study of the impact of urban trees on ozone", *Atmospheric Environment*, 34(10): 1601~1613.
- Phoenics J., 1992, "Green SR. Modelling turbulent air flow in a stand of widely-spaced trees", 5: 294~312.
- Gromke C. and Ruck B., 2009, "On the impact of trees on dispersion processes of traffic emissions in street canyons", *Bound.-Lay. Meteorol*, 131: 19~34.
- Hong B, Lin BR, and Qin HQ., 2017, "Numerical Investigation on the Effect of Avenue Trees on PM2.5 Dispersion in Urban Street Canyons",

Atmosphere, 8(7): 129.

- Jeanjean APR, Monks PS, and Leigh RJ., 2016, "Modelling the effectiveness of urban trees and grass on PM2.5 reduction via dispersion and deposition at a city scale", *Atmos. Environ.*, 1~10.
- Lohmann U. and Feichter J., 2005, "Global indirect aerosol effects: a review. Atmospheric Chemistry and Physics", 53: 715~737.
- Sanz C., 2003, "A note on k-ε modelling of vegetation canopy air-flows", Bound-layer Meteorol, 108: 191~197.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., and Shirasawa, T., 2008, "AlJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, 96: 1749~1761

원 고 접 수 일 : 2020년 7월 22일 1 차심사완료일 : 2020년 9월 21일 최종원고채택일 : 2020년 9월 29일