

# 도시 빌딩숲의 분석 및 활용을 위한 기초연구 : 수도권 도시기상 서비스 영역을 중심으로\*

A Fundamental Study for Urban Canopy Layer Analysis and Application  
: Focusing on Seoul Metropolitan Area Urban Weather Service Domain

안승만 An Seung man\*\*, 김도형 Kim Do-Hyoung\*\*\*,  
홍선옥 Hong Seon-Ok\*\*\*\*, 변재영 Byon Jae-Yong\*\*\*\*\*

## Abstract

The purpose of this study is to perform Seoul Metropolitan Area (SMA) urban weather service domain building cluster analysis in the urban canopy modelling framework and to develop urban building cluster management application. Major results show SMA urban weather service model domain(7,114km<sup>2</sup>) covers 7% of the national territory, 1/5 buildings in the nation located, which has 1/3 of the national building total volume area. We found a relation between urban canopy parameters (UCPs) with land use zone type and urban temperature such as LST. Quantile 5 class roughness length group mean LST showed a gradual increase as building clusters become higher but most high group showed about 0.5°C decreased value. In addition, we found South-North directional frontal area fraction shows 10 % higher value than East-West, which is mainly due to the unique Korean apartment culture and residential preference. Building cluster study is important for major urban issues such as climate change adaptation, air quality, revitalization, green new deal, smart eco-city. Hence, as a further project, we propose building cluster-based vertical information (indicator) development and monitoring development study should follow.

Keywords: Seoul Metropolitan Area, Building Cluster, Urban Canopy Layer, Urban Canopy Model, Mean Winds, Monitoring

## I. 서론

1971년 제1차 국토종합계획 이후 30년간 수도권 지역은 빠르게 도시화되었다. 원격탐사 자료를 시계열적으로 비교하면 수도권에서 시가화 건조지역이

빠르게 확산되었음을 알 수 있다(<Figure 1> 참조). 경관의 관점에서 보면 도시지역에 들어선 많은 건축 구조물들이 바뀌어 왔으며 대중들은 이를 빌딩숲의 변화로 인식한다. 사전에서 빌딩숲은 도시에서 빌딩들이 숲의 나무처럼 뻗곡히 들어서 있는 것

\* 이 연구는 기상청 국립기상과학원 ‘생명·산업기상기술개발’(1365003004)의 지원으로 수행되었습니다.

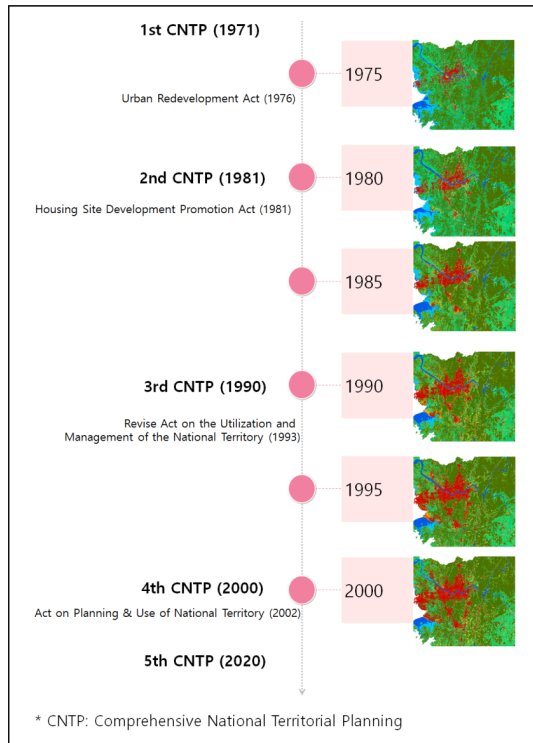
\*\* 국토연구원 책임연구원(제1저자, 교신저자) | Assistant Research Fellow, Korea Research Institute for Human Settlements | Primary & Corresponding Author | sm\_an@krihs.re.kr

\*\*\* 국립기상과학원 연구원 | Research Scientist, National Institute of Meteorological Sciences | kdhsnic@korea.kr

\*\*\*\* 국립기상과학원 연구원 | Research Scientist, National Institute of Meteorological Sciences | seonok0421@korea.kr

\*\*\*\*\* 국립기상과학원 연구관 | Senior Research Scientist, National Institute of Meteorological Sciences | byonjy@kma.go.kr

**Figure 1** \_SMA Urban Expansion with the National Policy Document on Spatial Planning



을 비유하는 말(고려대 한국어대사전)로 “Concrete Jungle”이라고도 한다(Eldredge and Horenstein 2014). 지금까지 빌딩숲은 수평적·수직적 확산이 함께 진행되었으나 수직적 변화가 평면적 변화에 비해서 측정이 어려운 한계로 인해서 관련된 연구가 많이 수행되지 않았다. 도시와 주변을 포함하는 거시적 규모로 빌딩숲을 본다면 수평적·수직적 확산은 도시의 통풍공간을 변화시켰고 이로 인해 도시 곳곳에 고루 전해져야 할 바람의 양적 분배도 달라졌다(Coceal and Belcher 2005). 그리고 이는 대기환경 문제와 이어진다. 극단적으로 바람이 부족한 경우 도시는 고농도 미세먼지 또는 열대야 현상에 시달리고 반대로 극단적으로 바람자원이 집중되는 경우 강한 돌풍(빌딩풍)으로 가로시설이 파손되

거나 보행자의 안전이 위협받는다(Islam, Rahman, Bahar and Habib et al. 2012; Yang 2016; Yuan, Shan, Zhang and Li et al. 2019). 빌딩공학 분야에서는 초고층 건물 건설로 인해서 발생할 통풍공간의 변화 및 영향에 대한 여러 연구들이 있었으나 도시 규모 빌딩숲 조성이 통풍공간과 평균바람 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 적었다(Belcher, Jerram and Hunt 2003; Wong, Nichol, To and Wang 2010). 대부분의 도시들처럼 우리나라의 도시들도 혁신도시, 도시재생 등 다양한 사업들을 통해서 곳곳에 새로운 빌딩숲을 조성할 예정이고 이로 인해 통풍공간이 변화될 것이기 때문에 거시적인 도시 통풍공간을 체계적으로 평가·관리하기 위한 연구가 필요하다.

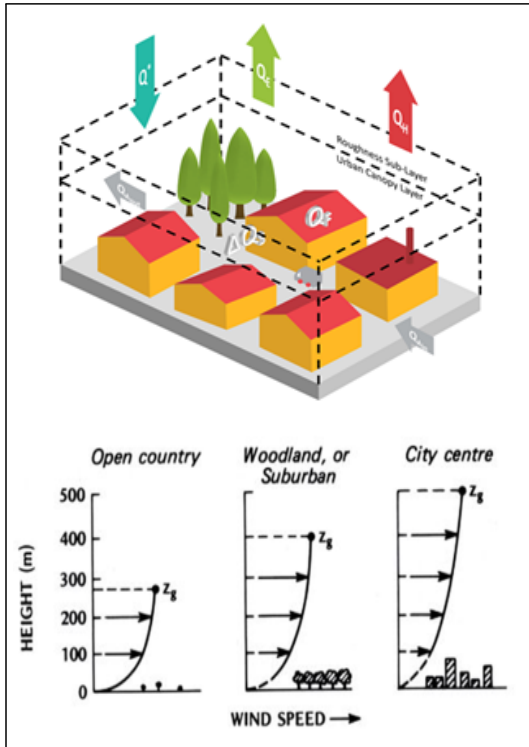
이 논문은 이러한 빌딩숲을 분석하고 국토 관리에 활용함을 목적으로 한다. 수도권 일대를 대상으로 빌딩숲 분포와 평균바람 특성을 공간적으로 분석하였다. 더불어 국토환경 관리를 위한 빌딩숲 연구의 활용과 발전방향도 살펴보았다.

## II. 연구방법

### 1. 개념: 빌딩숲과 평균바람

바람은 대기 순환을 통해 도시에 지속적으로 유입되지만 시·공간적으로 고르게 유입되지는 않는다. 빌딩숲이 들어서는 과정에서 통풍공간이 변화되고 도시로 유입되던 바람의 흐름이 왜곡된다. 빌딩숲이 없었다면 일어나지 않을 유입량의 변화가 거시적·미시적 규모에서 관측된다. 이렇게 관측되는 빌딩숲과 평균바람의 관계를 효과적으로 측정하고 기술하기 위한 연구들이 있어 왔으나 평균바람은 명확한 개념정의 없이 사용되어 왔다(Macdonald 2000; Coceal and Belcher 2005; Coceal and Belcher 2005; Kono, Tamura and Ashie 2010).

**Figure 2\_ Urban Canopy Layer Energy Balance(top) and Mean Wind Effect by UCL Type(bottom)**



Source: Chrysoulakis, Grimmond, Feigenwinter, Lindberg and Gastellu-Etchegorry et al. 2018; Oke 1992.

빌딩숲 조성으로 인한 통풍공간 및 평균바람 변화의 관계를 분석하기 위해서는 평균바람과 빌딩숲에 대한 조작성 정의가 필요하다. 이 논문에서는 평균바람을 통풍공간과 자연바람의 상호작용으로 빌딩숲에서 관측되는 바람의 평균으로 정의하였다<sup>1)</sup>. 빌딩숲은 자연바람의 변화에 영향을 주는 건물과 관련된 인자로서 도시기상기술 분야에 사용하고 있는 도시캐노피(Urban Canopy)와 동일 개념으로 정의하였다. 도시캐노피층(Urban Canopy Layer: UCL)은 수직적으로 땅(Ground)과 빌딩숲 최고층 건물 높이의 절반에 해당

하는 높이 사이의 공간을 채우고 있는 공기층이다 (Chrysoulakis, Grimmond, Feigenwinter, Lindberg and Gastellu-Etchegorry et al. 2018). 콘크리트로 건설된 빌딩들이 밀집될수록 통풍공간은 줄어들고 건물들은 더 많은 태양에너지와 인공열 등을 축적하여 도시캐노피층 공기에 복사·전달한다. 이로 인해 가열된 도시캐노피층 공기는 다른 지표면 공기보다 이류와 같은 수직적 에너지 이동이 활발하여 도시의 빌딩숲 형태에 특화된 규칙적인 대기순환 체계를 만든다 (<Figure 2> 참조). 빌딩숲의 발달과 고층화가 도시의 바람길 순환체계 및 기상·기후를 형성하는 중요한 인자라는 인식이 확산되면서 이를 과학적으로 분석하고 고(이영희, 민기홍 2016; 황미경, 김유근, 오인보, 강윤희 2010; Wie, Hong, Byon and Ha et al. 2020) 보다 바람직한 도시기후가 형성되도록 도시 공간의 기후조절 성능을 향상시키기 위한 제안들이 이어지고 있다 (안승만, 김승중, 이형찬, 손은영 2016; 안승만 2019).

## 2. 빌딩숲 평균바람 관련 연구

빌딩숲 평균바람 관련 연구들은 모두 도시의 통풍공간인 도시캐노피층을 조사하고 있다.(Oke 2002; Macdonald 2000; Coceal and Belcher 2004; Coceal and Belcher 2005; Kono, Tamura and Ashie 2010). 대기의 흐름은 지표면과 가까울수록 빌딩숲과 같은 수직적 구조물들의 형태에 민감해진다. 그중에서도 지표에 의한 난류혼합이 지배적인 공기층(접지경계층)에서는 대기의 안정도가 중립일 때 연직 바람분포가 대수법칙을 따르는 것으로 알려져 있다(Oke 2002). 빌딩숲은 수직적인 규모가 클수록 평균바람의 흐름을 크게 왜

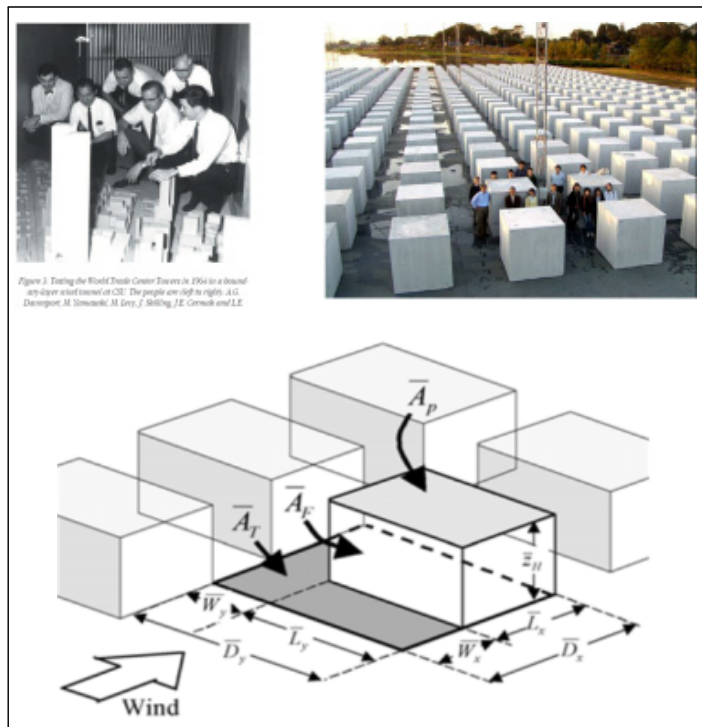
1) 빌딩숲 평균바람의 관측결과 또는 추정결과는 위치(상부 vs. 내부) 및 규모(도시 vs. 단지)에 따라 다를 수 있으나 이 연구는 수치기상모델의 빌딩숲 통풍공간 위치와 규모에 대응하여 평균바람 개념을 적용하였음.

꼭시키기 때문에 이로 인해 풍하지역의 평균풍속은 낮아지고 그만큼 빌딩숲 아래로 하강류가 발달하여 빌딩풍이 거세지는 것으로 알려져 있다.

우리나라도 인천과 부산 등 연안 신도시·지구 개발 등으로 고층화된 빌딩숲이 풍하방향에 위치한 도시들의 평균바람(mean wind)을 약하게 하고 폭염취약성을 증가시키는 등의 변화가 확인된 바 있다(이채연, 안승만, 김규량, 최영진 2012; 권혁기, 양호진, 이채연, 김연희 외 2015; 이채연, 김규량, 안승만, 최영진 2014; 이채연, 권태현, 박문수, 최영진 외 2015). 빌딩숲 내 도시캐노피층 공기는 기상·기후적 활동이 주변 공기층과 뚜렷하게 구분된다. 이렇게 거시적 규모부터 미시적 규모에 이르기까지 다양한 규모에서 나타나는 빌딩숲의 영향을 도시기상 모델에 반영하기 위해서 빌딩숲의 형태와 기상인자의 상관성을 모수화하는 도시캐노피층 연구가 지속적으로 이뤄졌다. 도시캐노피모수(Urban Canopy Parameters: UCPs) 관련 연구들은 모델기반 풍동실험, 도시기상 관측 실험, 모델-관측 결합 실험 등 다양한 실험 형태로 수행된다(<Figure 3> 참조). 도시캐노피모형(Urban Canopy Model: UCM) 개발은 빌딩숲의 형태와 관련된 특성들을 도시기상모델에 적용하였을 때 빌딩숲으로 인한 도시열섬 확산 등 기상·기후 부문의 환경변화 예측 또는 분석이 현실과 보다 부합하도록 정확도를 높이는 것을 목표로 한다. 관련한 도시캐노피모수들은 지표-대기 간의 열, 수증기, 운동량의 교환과 대기경계층 연구에도 이용되며 폭염 및 대기오염물질 확산 등 도시기상

연구에도 이용되고 있다(Vukovich 1971; Barlag and Kuttler 1990; Bottema 1997; Gál and Sümeghy 2007). 국내에서는 국립기상과학원을 중심으로 도시캐노피 모델 정확도 개선을 통한 도시기상 국지예보능력 향상이 추진되고 있다(홍선옥, 변재영, 박향숙, 이영곤 외 2018; 김도형, 홍선옥, 변재영, 박향숙 외 2019). 이를 위해서 기하적으로 복잡한 개개 건물모형을 실제 도시와 가깝도록 세밀하게 적용하여 빌딩숲의 영향들을 상세하게 계량화하고 있다. 최근에는 빌딩숲의 수직적 확산속도가 빨라지고 통풍공간과 평균바람의 분포도 급변하고 있어 도시기상 예측을 어렵게 하고 있다(Park, Park, Cha and Choi et al. 2017; Park and Chae 2018). 빌딩숲의 변화가 신속하게 반영된 도시캐노피 모델(Urban Canopy Model: UCM)의 구축과 최신성 유

Figure 3\_ Urban Canopy Layer Energy Balance(top) and Mean Wind Effect by UCL Type(bottom)



Source: Grimmond and Oke 1999.

지는 도시기상 예보능력 향상을 위해 반드시 해결할 과제가 되었다(Wie, Hong, Byon and Ha et al. 2020). 모델이 실재하는 도시와 가까워질수록 UCL의 공기역학적 특성과 빌딩숲의 관계에 대한 관측·이론 설명력도 높아질 것으로 기대되며 이를 위해서 도시 빌딩숲의 변화를 주기적으로 상세하게 조사하고 빌딩숲의 영향 분석 및 계량화 방법이 개선되어야 한다.

빌딩숲의 형태가 평균바람 감소에 미치는 영향을 계량화하기 위해서 빌딩숲의 형태로부터 (1)평균높이, (2)평면적비<sup>2)</sup>, (3)앞면적비<sup>3)</sup>, (4)빌딩숲 내 건물들의 최고높이, (5)빌딩숲 내 건물들의 높이 표준편차가 측정된다(<Table 1> 참조). 이 측정값들을 이용하여 영면변위(Zero plane displacement,  $z_d$ )<sup>4)</sup>와 거칠기길이(Roughness length,  $z_0$ )<sup>5)</sup> 등 평균바람 관련 인자들이 계량화된다. 대개는 규칙적으로 배열된 빌딩숲에 비해 비틀어지고 불규칙한 방향으로 배열된 빌딩숲일수록 대기 흐름에 더 큰 저항과 운동량 흡수를 일으켜서

거칠기길이 값이 커지고 유입되는 바람의 양적 변화도 커지는 것으로 알려져 있다. 이 현상에 대한 다양한 관측·모델링 기반 계량화 및 개선 연구들이 수행되고 있다.

초기의 평균바람 관련 빌딩숲 형태 모수화 연구는 대부분 빌딩숲의 평균높이를 계산하고 기상관측과 맞추는 모수화 기법(Rule of Thumb: RT)이 적용되었다(<식 1> 참조).

$$RT_{z_d} = f_d \times H_{av}$$

$$RT_{z_0} = f_0 \times H_{av} \quad \text{<식 1>}$$

이후 Raupach(1994)은 빌딩숲 평균높이에 더해 바람방향의 흐름을 가로막는 빌딩숲의 앞면적 모수의 계산에 추가하였다(<식 2> 참조)<sup>6)</sup>

**Table 1** \_ Five Major Urban Canopy Variables(UCPs) Used for Urban Roughness Length Study

Method	Average building height	Plane area	Frontal area	Max building Height	Building Height standard deviation
	$H_{av}$	$\lambda_p$	$\lambda_f$	$H_{max}$	$\sigma_H$
RT	○				
Rau	○		○		
Bot	○	○	○		
Mac	○	○	○		
Kan	○	○	○	○	○

Note: RT: Rule of Thumb, Rau: Raupach(1994), Bot: Bottema and Mayer(1998), Mac: Macdonald, Griffiths and Hall(1998), Kan: Kanda, Inagaki, Miyamoto and Gryschka et al.(2013).

- 2) 평면적비(plane area fraction:  $\lambda_p$ )는 빌딩숲 부지면적 대비 빌딩숲 평면적 비율임.
- 3) 앞면적비(frontal area fraction:  $\lambda_f$ )는 빌딩숲 부지면적 대비 바람방향에 마주하는 빌딩숲 앞면적 비율임.
- 4) 영면변위(zero plane displacement:  $z_d$ )는 거친 지표면(빌딩숲)에 대기 운동량(바람)이 흡수되어 대수풍속프로파일에서 '0'이 되는 높이임.
- 5) 거칠기길이(roughness length:  $z_0$ )는 지면 근처 평균풍속(수평) 모델링 풍향방정식(수직 로그 바람 프로파일)에서 풍속이 이론적으로 0이 되는 높이 또는 곡선형의 높이-풍속 측정치 영면변위 직선을 연장하여 풍속이 '0'이 되는 높이임. 물리적 길이는 아니며 표면의 거칠기를 가늠하는 척도임.
- 6) 원래 앞면적비는 숲에 의한 풍속의 완화 계산에 적용되던 기법이였으나 빌딩숲에 적용되었음.

$$Rau_{zd} = \left( 1 + \left\{ \frac{\exp \left[ - (C_{dl} 2\lambda_f)^{0.5} - 1 \right]}{(C_{dl} 2\lambda_f)^{0.5}} \right\} \right) \times H_{av}$$

$$Rau_{z0} = \left[ \left( 1 - \frac{z_d}{H_{av}} \right) \exp \left( -k \frac{u_z}{u_*} + \Psi_h \right) \right] \times H_{av}$$

<식 2>

Bottema and Mayer(1998)는 도시환경에서 빌딩숲이 평균바람의 감소에 절대적 영향을 미치는 것으로 보았으며 빌딩숲의 평균높이, 앞면적비와 함께 평면적비를 모수 계산에 추가하였다.

Macdonald, Griffiths and Hall(1998)도 이 세 인자들을 경험적인 맞춤형상수와 상관계수를 통해 발전시켰고 국내 다수 연구들이 이 기법을 활용하였다(안승만, 이규석, 이재연 2015; 이재연, 권태현, 박문수, 최영진 외 2015)(<식 3> 참조<sup>7)</sup>).

$$Mac_{zd} = \left[ 1 + \alpha^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1) \right] H_{av}$$

$$Mac_{z0} = \left( \left( 1 - \frac{z_d}{H_{av}} \right) \times \exp \left[ - \left\{ 0.5\beta \frac{C_{Db}}{k^2} \left( 1 - \frac{z_d}{H_{av}} \right) \lambda_f \right\}^{-0.5} \right] \right) H_{av}$$

<식 3>

Kanda, Inagaki, Miyamoto and Gryschka et al.(2013)은 Macdonald, Griffiths and Hall(1998)의 기법에 빌딩숲 내 건물들의 최고높이와 표준편차를 모수 계산에 추가하였다<sup>8)</sup>(<식 4> 참조).

$$Kan_{zd} = \left[ c_0 X^2 + (a_0 \lambda_p^{b_0} - c_0) X \right] H_{max}$$

$$\text{여기서, } X = \frac{\sigma_h + H_{av}}{H_{max}} \quad (\text{for } 0 \leq X \leq 1)$$

$$Kan_{z0} = (b_1 Y^2 + c_1 Y + a_1) Mac_{z0}$$

$$\text{여기서, } Y = \frac{\lambda_p \sigma_H}{H_{av}} \quad (\text{for } 0 \leq Y) \quad \text{<식 4>}$$

### 3. 빌딩숲 DB구축 및 분석환경 구현

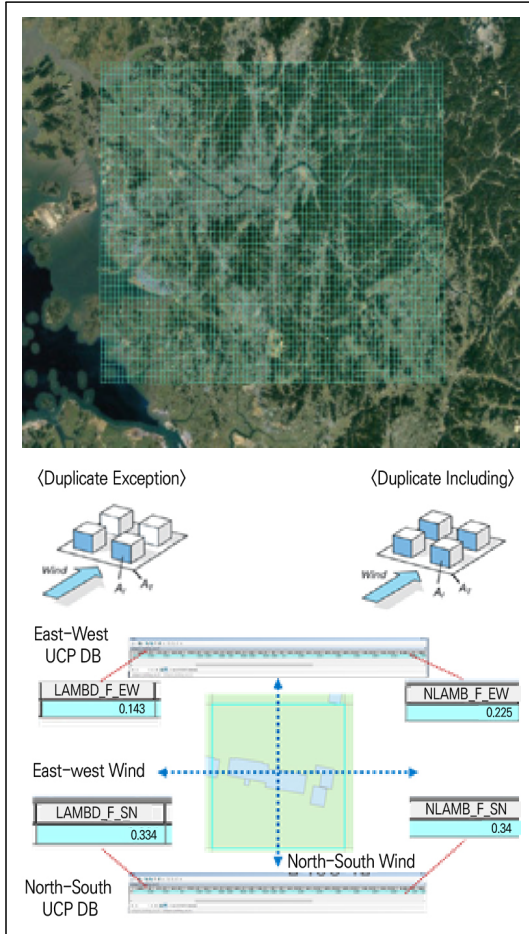
수도권 빌딩숲 DB를 구축하고 평균바람 영향을 분석하기 위해서 국토지리정보원(NGII)에서 제공하는 1/5,000 축척 수치지도(ver 2.0) 건물(N3A\_B001) 자료와 기상청 현업모델인 통합모델(Unifed Model)에서 사용하는 수도권 격자자료(grid data)를 입력 자료로 사용하였다.

수도권 영역을 구성하는 개별 격자(<Figure 4>의 top 참조)를 만들어 빌딩숲의 평균높이, 평면적비, 앞면적비, 최고높이, 표준편차를 구하였다. 개별 격자 내에 위치한 건물들을 빠르게 검색하기 위해 쿼드 트리(Quadtree) 검색 알고리즘을 적용하였다. 빌딩숲 앞면적비는 개별 건물의 층수(NMLY)에 평균높이(3m)를 적용하여 동-서 방향 및 남-북 방향으로 투영된 앞면적을 구하고 이를 빌딩숲 부지에 해당하는 격자면적으로 나누어 구하였다. 이를 Macdonald, Griffiths and Hall(1998)의 제안 기법(<식 3>)과 Kanda, Inagaki, Miyamoto and Gryschka et al.(2013)의 제안 기법(<식 4>)으로 영면변위와 거칠기길이를 구해 평균바람 영향을 분석하였다. 입출력(Input/Output, I/O)은 Shape.lib ver. 2.7(C library), QT ver.5.12(GUI library, 64bit), Visual Studio 2017 C++(통합개발도구, 컴파일러)를 이용하여 구현되었다.

7) 마찰계수( $C_{Db}$ , 1.2), 맞춤형상수 $\alpha$ (비정방향: 4.43 정방향:3.59), 맞춤형상수 $\beta$ (비정방향: 1.0 정방향:0.59)

8) 관측과 수치실험을 통해서  $a_0$ (1.29),  $b_0$ (0.36),  $c_0$ (-0.17),  $a_1$ (0.71),  $b_1$ (20.21),  $c_1$ (-0.77)가 적용되었음.

Figure 4\_SMA Grid Model Doamin(top) and Two Different  $\lambda_f$  Calculation Methods(bottom)



#### 4. 수도권 빌딩숲 평균바람 분석

수도권 빌딩숲 평균바람 분석은 산출된 도시캐노피모수들(UCPs)을 통해 수행되었으며 모든 모수들을 종합하여 산출된 거칠기길이를 주요 분석대상으로 정하였다. 다양한 거칠기길이 산출기법이 검토되었으나 빌딩숲 형태 관련 측정인자들이 기상관측을 통한 평균바람 해석에 많이 적용될수록 도시캐노피모델이 복잡해지고 연산이 늘어나므로 보다 고도화된 방법이라고 할 수 있다. 이 논문에서는 세 개 이상의 빌딩숲 형태 관련 인자들을 이용하는 Macdonald, Griffiths and Hall(1998)과 Kanda, Inagaki, Miyamoto and Gryschka et al.(2013)의 기법을 적용하여 수도권 빌딩숲과 평균바람의 관계를 분석하였다. GIS 기반 분석은 용도지역도와 지표면온도(Land Surface Temperature: LST) 지도를 활용하였다. 용도지역도는 국토교통부 용도지역지도 중 주거지역, 상업지역, 공업지역 자료를 이용하였고 지표면온도지도는 2015년 9월 13일 저녁 10시 20분에 수도권 상공 궤도(path/row: 213/210)에서 촬영된 Landsat 8 위성의 열적외선영상(Band10) 복사휘도(輝度)를 지표면온도(LST)로 변환하는 수식을 적용하여 섭씨온도(°C)로 산출한 지도를 이용하였다 (<Table 2> 참조).

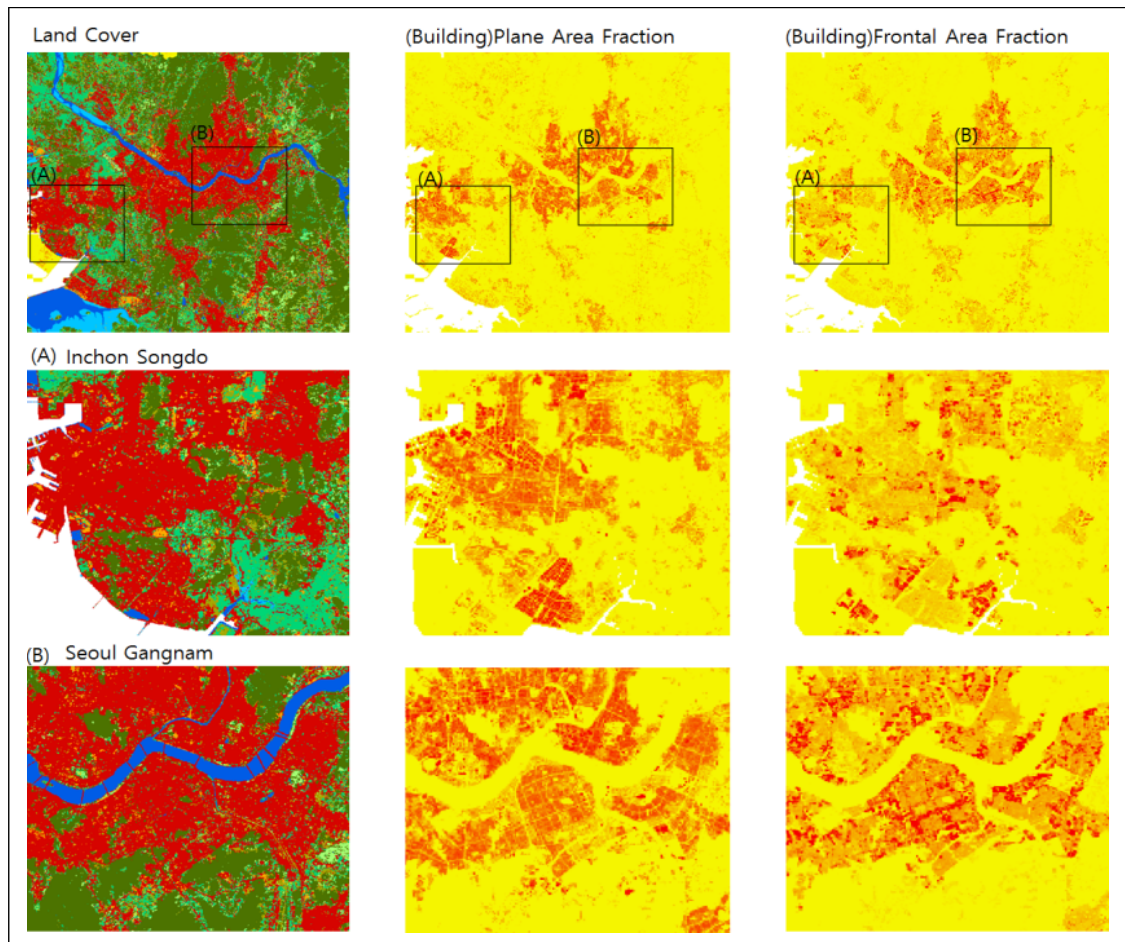
Table 2\_ Used GIS and RS Input Dataset

Data	Type	Attributes	Publication
Digital Map 2.0 Building(N3AB0001)	Vector(Shape polygon)	NMLY(Building Story)	National Geographic Information Institute(NGII)
Model Grid	Vector(Shape polygon)	Area	-
Landsat 8 (Band 10)	Raster Thermal Infra-Red(TIR)	Land surface temperature (Pixel Brightness Value)	U.S. Geological Survey
Land Use District	Vector(Shape polygon)	Land Use	Ministry of Land, Infrastructure and Transport

마지막으로 (1) 빌딩숲 개별 빌딩들의 투영면이 중복되면 제외하고 그림자처럼 투영된 앞면적을 산출하는 방법(중복 제외)과 (2) 빌딩숲을 구성하는 개별 빌딩들의 투영면이 중복되더라도 이를 모두 합산하여 앞면적을 산출하는 방법(중복 포함)으로 산출된 도시 캐노피모수들을 비교하고 정확성이 높은 방법을 평가하였다. <Figure 4>의 'bottom'은 이 두 방법의 차이를 설명하는 그림이다. 남향의 판상형 건물이 위치한 100m×100m 격자에 대하여 개별 건물의 중복을 제외하지 않고 계산한 앞면적과 중복을 제외한 앞면적비를 구하는 방법을 다르게 적용함으로써 앞면적비가

다르게 도출됨을 보여준다(동풍—서풍 바람 vs. 남풍—북풍 바람). 건물의 앞면적 중복을 제외한 경우 앞면적비는 0.143(동풍—서풍 방향)과 0.334(남풍—북풍 방향)였으나 개별 건물들의 앞면적 중복을 포함한 경우 앞면적비는 0.225(동풍—서풍 방향), 0.34(남풍—북풍 방향)였다. 두 계량적 방법 중 보다 현실적인 계량화 방법을 결정하게 되면 향후 도시캐노피 모수화 연구 및 관련 모수활용 연구에 도움이 될 것이다.

**Figure 5** \_ SMA Land Cover(left), Building Plane Area Fraction(middle), and Frontal Area Fraction(right)



### III. 결과

#### 1. 수도권 빌딩숲 DB 구축 결과

면적으로 보면 수도권 현업모델(Unified Model: UM) 격자가 차지하는 면적은 약 7,114km<sup>2</sup>로 우리나라 국토(100,377.7km<sup>2</sup>, 2018)의 7% 정도이나 우리나라 총 건물(17,042,043동)의 약 20%(3,497,766동)를 차지할 정도로 수도권은 빌딩숲 밀도가 높다<sup>9)</sup>. 이 건물들이 국토 면적에서 차지하는 비율은 약 0.4%(388km<sup>2</sup>)이다. 각 층의 높이를 3m로 가정할 때 수도권 모델영역에 수직으로 축조된 건물들의 총체적(4.374km<sup>2</sup>)은 우리나라 건물 총체적(12.016km<sup>2</sup>)의 약 1/3이다. 따라서 이 연구는 1km<sup>2</sup> 부피 약 4.4개에 달하는 수도권의 빌딩숲 입방체가 수평적·수직적으로 배치되는 형태에 대한 분석결과를 기술하고 있다. 이를 통해서 빌딩숲의 배치와 평균 바람과의 관계를 제시하였다.

#### 2. 수도권 빌딩숲 평균바람 인자들의 분포

<Figure 5>와 <Table 3>은 산출된 수도권 빌딩숲 관련 평균바람 관련 인자들의 통계와 공간적 분포를 보여준다. 여러 실험에 따르면 빌딩숲의 형태가 단순한 형태로부터 점차 복잡해질수록 앞면적비가 크게 증가하고, 거칠기길어도 최고 5배 이상 증가한다(Hagishima, Tanimoto, Nagayama and Meno 2009; Zaki, Hagishima, Tanimoto and Ikegaya 2011). 수도권 모델 영역 3,975개의 격자들로부터 계산된 거칠기길이 통계에서는 이러한 차이가 더 컸다. 평균값과 최댓값의 차이가  $Mac_{z_0}$ 와  $Kan_{z_0}$  모두 약 50배 이상이었다. 영면변위 통계에서도 평균값과 최댓값의 차이가  $Mac_{z_d}$ 와  $Kan_{z_d}$  모두 약 10배 이상이었다(<Table 3> 참조).

<Figure 5>는 수도권 일대, 인천 송도 일대, 서울 강남 일대의 토지피복과 빌딩숲의 평면적비, 앞면적비(동-서 방향)를 보여준다. 시가화건조지역과 빌딩숲 평면적비는 유사한 분포를 보인다. 반면에 빌딩숲의 높이와 관련된 앞면적비는 토지피복이나 평면적비와

Table 3 \_ SMA UCPs Values(min, max, std) Derived from Building Cluster

SMA UCP	Max. V	Mean	Standard Deviation
lambda_p	0.464	0.05452	0.080249
lambda_f_ew	0.079	0.00821	0.012398
avg_hei	73.010	6.76272	6.837048
max_hei	369.000	26.65358	33.299846
std_hei	40.680	3.38286	4.867560
mac_zd	17.930	1.18820	2.176530
kan_zd	60.260	5.86661	8.024711
mac_z0	4.014	0.08471	0.269879
kan_z0	3.129	0.06923	0.212606
kan_zo/ah	0.064	0.00341	0.008036

Note: East-West Direction, 1.5km×1.5km grid statistics(n=3,975).

9) 1:5,000축척 수치지도 2.0 건물 레이어(N3A\_B0010000) 건물자료(shape feature).

는 다른 분포를 보인다. 제1종일반주거지역과 같이 저층건물이 밀집된 빌딩숲에서는 평면적비가 높게 나타났고 제3종일반주거지역 및 일반상업지역처럼 고층의 빌딩숲에서는 앞면적비가 높게 나타났다. 평면적비 분포도와 앞면적비 분포도에서 상대적으로 고밀한 격자의 위치가 다를 수 있다.

### 3. 용도지역 유형별 비교

용도지역은 건축물의 용도·종류 및 규모를 제한하여 수도권 빌딩숲 형태에도 큰 영향을 준다. 수도권 현업

모델 3,975개 격자들(1.5km×1.5km)을 대상으로 수도권 내 주거지역, 상업지역, 공업지역의 용도별 빌딩숲 형태 관련 모수들의 평균값을 비교한 결과 예상처럼 용도지역 유형과 빌딩숲 평균높이의 관련성은 높았다. 용도지역별 빌딩숲의 평균높이 중 아파트 공동주택이 많은 제3종일반주거지역이 26.76m로 가장 높았고 건축제한으로 단독주택이 대부분인 전용주거지역이 3.85m로 가장 낮았다. 평균바람 관련 거칠기길이는 평균높이, 평면적비, 앞면적비를 연산하여 구하므로(<식 3, 4> 참조) 평균높이와 유사한 관련성이 나타났다. 그러나 일반공업지역처럼 건물의 평면적비가

Figure 6\_ Major SMA UCPs Zonal Means by Land Use District

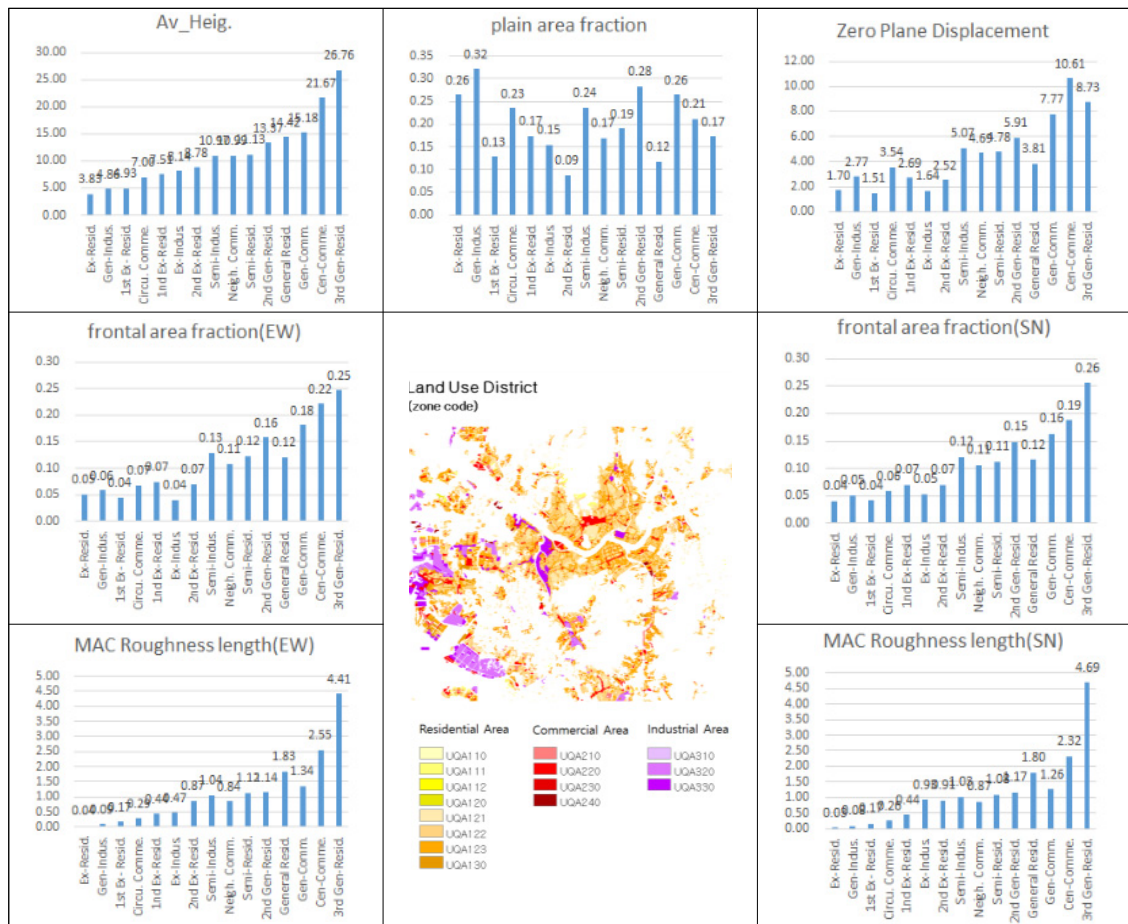


Table 4\_Land Use Zonal Means of the Major SMA UCPS

Zone Type	Code	Av_Ht.	$\lambda p$	$\lambda f(EW)$	$\lambda f(SN)$	Zd	z0(EW)	z0(SN)
Exclusive Residential Area	UQA110	3.83	0.26	0.05	0.04	1.70	0.04	0.03
1st Class Exclusive Residential Area	UQA111	4.93	0.13	0.04	0.04	1.51	0.17	0.17
2nd Class Exclusive Residential Area	UQA112	8.78	0.09	0.07	0.07	2.52	0.87	0.91
General Residential Area	UQA120	14.42	0.12	0.12	0.12	3.81	1.83	1.80
1st Class General Residential Area	UQA121	7.51	0.17	0.07	0.07	2.69	0.44	0.44
2nd Class General Residential Area	UQA122	13.37	0.28	0.16	0.15	5.91	1.14	1.17
3rd Class General Residential Area	UQA123	26.76	0.17	0.25	0.26	8.73	4.41	4.69
Semi-Residential Area	UQA130	11.13	0.19	0.12	0.11	4.78	1.12	1.08
Central Commercial Area	UQA210	21.67	0.21	0.22	0.19	10.61	2.55	2.32
General Commercial Area	UQA220	15.18	0.26	0.18	0.16	7.77	1.34	1.26
Neighboring Commercial Area	UQA230	10.99	0.17	0.11	0.11	4.69	0.84	0.87
Circulating Commercial Area	UQA240	7.00	0.23	0.07	0.06	3.54	0.29	0.26
Exclusive Industrial Area	UQA310	8.14	0.15	0.04	0.05	1.64	0.47	0.93
General Industrial Area	UQA320	4.86	0.32	0.06	0.05	2.77	0.09	0.08
Semi-Industrial Area	UQA330	10.97	0.24	0.13	0.12	5.07	1.04	1.03

큰 경우 영면변위와 거칠기길이 계산에도 상당한 영향을 주어 용도지역 유형별 평균높이와 다른 순위 분포를 보였다. <Figure 6>과 <Table 4>에서 보는 것처럼 용도지역별 앞면적비, 영면변위, 거칠기길이는 전반적으로는 평균높이와 비슷한 추세를 보였다.

그러나 평면적비는 다른 모수들과는 대조적으로 용도지역별 관계가 거의 나타나지 않았다.

#### 4. 평균바람 관련 모수와 지표온도의 관계

빌딩숲의 확산과 같은 도시화 과정은 인공피복비율의 증가 및 통풍공간의 잠식 등을 통해서 도시의 지표면 온도 및 기온 분포에도 영향을 미친다. <Figure 7>은 수도권 야간 지표면온도(LST)의 용도지역 유형 및 빌딩숲 거칠기길이( $Mac_{z0}$ ) 계급별 분포(<Figure 8>의 'Bottom' 참조)의 순위를 조사한 결과이다. 주거·상업·공업 용도지역별 지표면온도 평균을 산출하여 비

Figure 7\_Mean LST of Land use district(Top) and Roughness Length Class(Bottom)

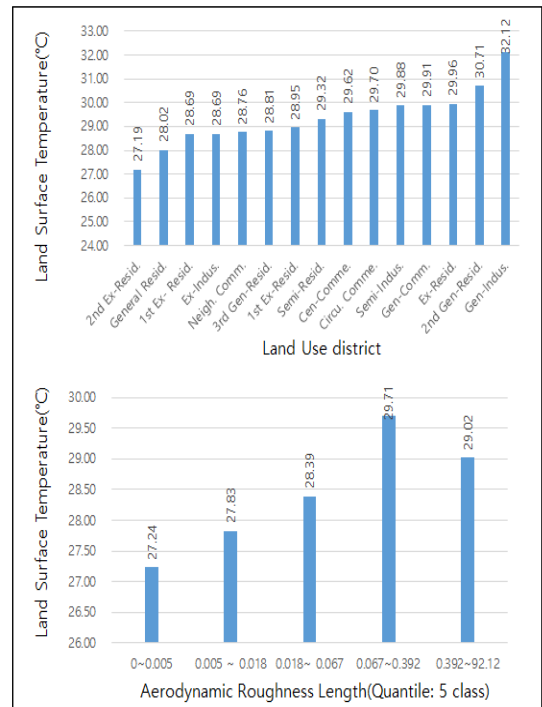
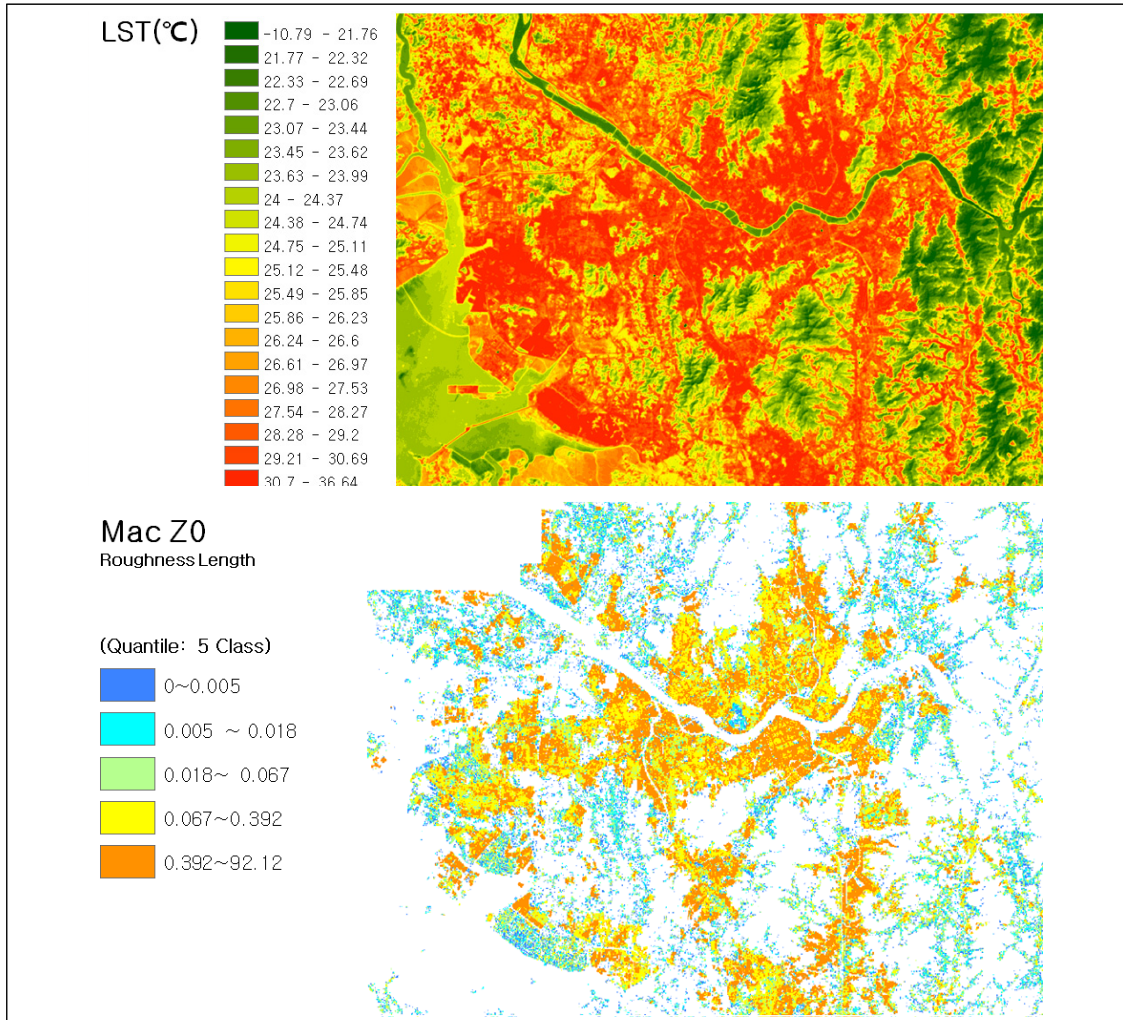


Figure 8\_SMA LST Map(Top) and Roughness Length Class Map(Bottom)



교한 결과 제2종전용주거지역이 27.19℃로 가장 낮았고, 이어 일반주거지역 28.02℃, 제1종전용주거지역 28.69℃ 순으로 점차 증가하였다. LST 평균이 가장 높은 용도지역은 일반공업지역(32.12℃)로 제2종 전용주거지역의 평균값과 약 5℃의 차이를 보였다.<sup>10)</sup>

수도권 빌딩숲 거칠기길이 분포를 5분위(Quantile)로 나누어 야간 지표면온도 평균값을 비교한 결과 4분위까지는 거칠기길이 증가에 따라 LST평균도 증가하지만 거칠기길이 가장 높은 5분위의 경우 LST 평균이 약 0.5℃ 정도 감소하는 것으로 나타났다.<sup>11)</sup>

10) 야간 지표면온도 평균에 큰 영향을 미치는 인자는 인공피복비율로 알려져 있으며 용도지역별 건폐율 제한 범위가 지표면온도 분포에 상당부분 영향을 미치는 것으로 알려져 있음.

11) 평균바람 영향이 가장 큰 상위 20% 지역(5분위)을 대변하는 격자 영역의 지표면온도가 상대적으로 낮게 나타난 원인은 하강류로 인한 냉각, 고층빌딩이 만드는 큰 그림자로 인한 지표면 가열 지연, 용적률 증가에 비례하는 건폐율 감소로(인공피복비율 감소) 등 다양하게 설명될 수 있음.

## 5. 앞면적비 산출방법 관련 UCPs 비교

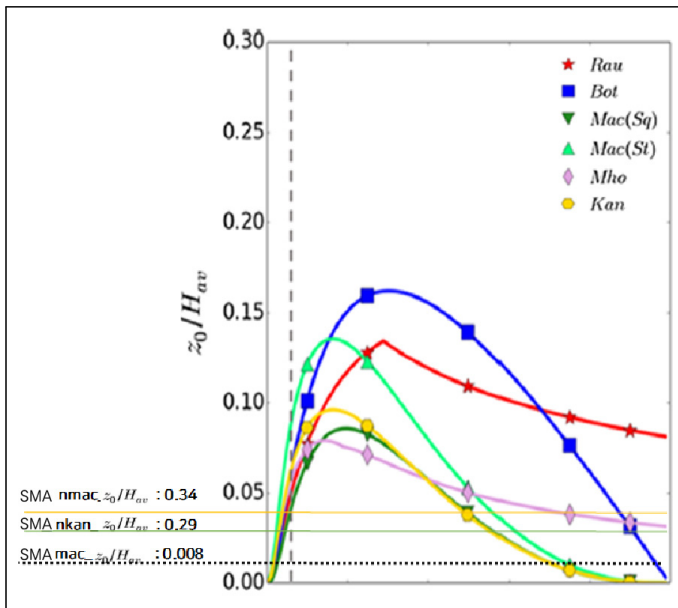
개별 빌딩의 중복을 포함하여 앞면적을 산출한 도시 캐노피모수들(UCPs)이 개별 빌딩의 중복을 제외하고 앞면적을 산출한 UCPs보다 우수하게 나타났다. 두 앞면적비의 정확성을 비교한 결과 개별 빌딩의 앞면적

**Table 5** Different SMA UCPs due to the Wind Directions and Frontal Area Fraction Measurements

UCPs	EWmean (E-W wind)	SNmean (S-N wind)	*Difference (%)
lambd_f	0.00821	0.00752	8.4%
mac_Z0	0.08471	0.07401	12.6%
kan_Z0	0.06923	0.06003	13.3%
new lambd_f	0.04246	0.04684	-10.3%
new mac_Z0	0.47982	0.54566	-13.7%
new kan_Z0	0.40988	0.46233	-12.8%

Note: \*difference=(EWmean-SNmean)/EWmean.

**Figure 9** SMA Mean  $z_0/H_{av}$  Comparison(SMA vs. Kent(2017))



Source: Kent(2017), Reconfiguration.

을 포함시킨 산출방법이 타 연구들(Kent, Grimmond, Barlow and Gatey et al. 2017)의 도시캐노피 모수와 근사하였다. <Figure 9>는 개별 빌딩의 중복을 제외하여 산출한 앞면적(<Table 5>의 lambd\_f)으로 구한 평균바람 모수( $Mac z_0/H_{av}=0.008$ ,  $Kan z_0/H_{av}=0.007$ )보다 개별 빌딩의 중복을 포함하여 산출한 앞면적(<Table 5>의 new lamb\_f)으로 구한 모수( $NMac z_0/H_{av}=0.34$ ,  $NKan z_0/H_{av}=0.29$ )가 Kent, Grimmond, Barlow and Gatey et al.(2017)이 수행한 모수( $z_0/H_{av}$ )와 가까움을 보여준다. 예로, Kent, Grimmond, Barlow and Gatey et al.(2017)의 연구에서 제시된 Macdonald, Griffiths and Hall(1998) 방법( $Mac(sq)$ ) 모수( $z_0/H_{av}$ ) 평균값은 약 0.04였다(<Figure 9> 참고). 개별 빌딩의 중복을 제외하여 구한  $Mac z_0/H_{av}$  평균값은 0.008로 0.04에 비해 크게 미달하지만 개별 빌딩의 중복을 포함하여 구한  $NMac z_0/H_{av}$  평균값은 0.34로 0.04와 근사하였다(수도권 모델링 영역).<sup>12)</sup>

## 6. 바람방향별 수도권 UCPs 비교

빌딩숲 앞면적을 산출할 때 중복을 제외하여 동풍-서풍, 남풍-북풍의 차이를 비교한 결과는 동풍-서풍 방향과 남풍-북풍 방향 앞면적비가 크게 차이하지 않았다(<Table 4> 참조). 그러나 개별 빌딩의 중복을 포함하여 앞면적을 산출하고 동풍-서풍, 남풍-북풍의 차이를 비교한 결과에서는 큰 차이가 있었다. 격자(1.5km×1.5km) 내 빌딩숲 앞면적비 산출방법을 바꿈으

12) 대상지가 다를 경우를 고려하며 Kent, Grimmond, Barlow and Gatey et al.(2017)의  $Mac(sq)$ 와 수도권 모델링 영역  $NMac z_0/H_{av}$ 를 비교하였음.

로써 남풍—북풍 바람방향의 앞면적비 평균이 0.00752에서 0.04684로 약 6배 이상 커졌다.

남풍—북풍 방향과 동풍—서풍 방향의 앞면적비 평균의 차를 비율로 계산하는 수식 ( $\frac{EW_{mean} - NS_{mean}}{EW_{mean}}$ , %)

을 적용한 결과 수도권 영역에서 바람방향별 앞면적비 차이 비율이 (+)와 (-)로 역전되어 나타났다.

<Table 5>에서 보듯이 남풍—북풍 방향과 동풍—서풍 방향의 앞면적비 평균의 차(%)가 개별 빌딩의 중복을 포함하여 앞면적을 산출한 결과(+8.4%)와 중복을 제외하고 앞면적을 산출한 결과(-10.3%)가 크게 달랐다.

<Figure 10>을 통해 이러한 차이를 설명할 수 있다. 성남시 일대 남향 중심의 판상형 아파트단지 사례처럼 빌딩숲 내 남향의 판상형 건물 밀도가 높을수록, 그리고 부지(격자)가 커질수록 바람방향에 따른 평균 바람 영향의 차이가 크게 나타났다.<sup>13)</sup>

#### IV. 고찰

이 논문은 수도권의 수평적 확산 연구들에서 충분히 검토되지 않았던 빌딩숲의 수직적 확산과 이로 인해 변화된 도시의 통풍공간 및 평균바람을 도시캐노피층 관련 UCPs 분석을 통해 조사했다. 빌딩숲 연구는 빠르게 변화하는 도시캐노피층 조사와 도시의 기상·기후 예측능력 향상에 중요하지만 지속가능한 도시의 토지이용과 공간 관리를 위한 지표 개발 측면에서도 의미 있는 관리적 시사점과 수단을 제공할 것이다.

고찰에서는 수도권 빌딩숲 평균바람의 특성 평가 및 연구적 시사점과 함께 관련 연구가 지속적으로 발전하기 위한 방향으로 빌딩숲 정보의 최신성 유지 및 분석기술 향상에 대해 기술하였다.

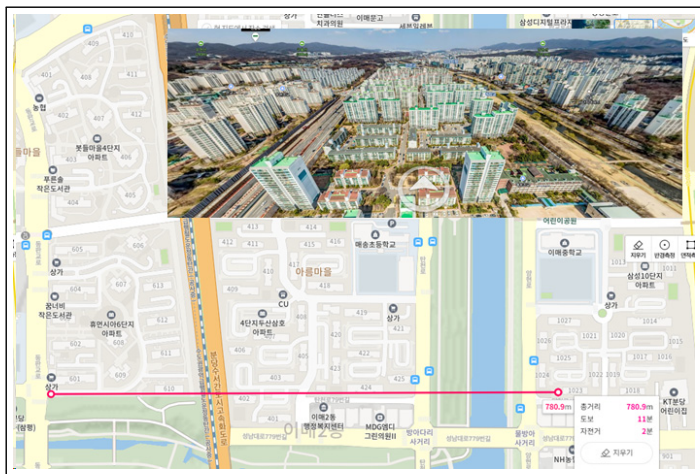
#### 1. 수도권 빌딩숲과 평균바람 특성 평가

수행된 모델면적(7,114km<sup>2</sup>)은 수도권 기상청의 도시기상예측 모델링 영역으로서 서울과 수도권 일대를 포함하고 있다. 국토면적의 7% 정도이지만 우리나라 건축물 수의 1/5, 건물 체적의 1/3을 차지하는 빌딩숲 밀집지역으로 미세먼지 등 깨끗한 공기와 환경에 대한 수요가 높다.

용도지역제도는 수도권 빌딩숲의 형태를 좌우하는 중요한 제도이지만 바람과 같은 보이지 않는 환경자원을 보호하기 위한 통풍 공간 관리에 취약했었다.

그래서 이 연구는 수도권 용도지역 유형을 빌딩숲 평균높이, 앞면적비, 영면면위, 거칠기길이 등과 비교

Figure 10\_ Sunnam-si Buildings Footprint



Source: Naver Map. <https://map.naver.com/>

13) 빌딩숲 개별 건물들의 앞면적 중복도를 고려하는 방식을 국내 연구로 처음 적용하였으며 이를 통해 판상형 아파트 주거공간의 특성을 계량화하였음.

하면서 수도권 빌딩숲과 통풍공간이 의미하는 평균바람 영향을 분석하고 기술하였다. 예로 수도권 빌딩숲의 거칠기길이 평균값과 최댓값의 차이가 50배 이상이고, 영면변위도 10배 이상으로 복잡도가 크며, 빌딩숲에 의한 거칠기길이 커질수록 지표온도도 증가하는 등의 공간적 특성을 기술하였다. 이 연구에서 검토하지 못한 여러 도시케노피 관련 모수들이 향후 후속 연구를 통해 조사된다면 건축물의 배치와 공간관리를 위해 고려해야할 더 많은 정보들을 도시계획과 토지이용 관리에 활용될 것이다. 빌딩숲이 성장하는 만큼 도시의 통풍공간은 축소되어 왔으나 지금까지는 이에 대한 대응체계가 부족했음은 분명하다.

향후 수도권 평균바람 특성에 대한 조사·평가를 강화한다면 지금까지 도시지역 통풍 공간 관리의 숙제였던 폭염 및 미세먼지 저감도 기상기술을 통해서 관리할 수 있는 기초가 될 것이다.

이를 위해서는 현재의 빌딩숲(도시케노피층)과 관련한 단편적 정보, 분절된 정보를 종합하고 연결하는 연구가 다방면으로 수행되어야 할 것이다. 예로 이 연구에서는 건폐율과 관련된 평면적비, 용적률과 관련된 평균고도와 앞면적비에 대해서만 검토하였지만 그 밖에도 미세먼지 저감을 위한 인동간격 설정이나 탄소배출 저감을 위한 빌딩숲 등 분석기법들을 도시의 공간분석과 관리에 적용할 수 있는 여러 요소들이 남아있다. 이를 통해 도시의 통풍 관리가 인동간격과 같은 물리적 거리 지표를 통한 직접적·규제적 관리에서 거칠기길이처럼 종합적 통풍성능 지표를 통한 간접적·자율적 관리로 전환할 수 있을 것이다. 향후 다양한 형태로 수직적으로 성장할 빌딩숲을 관리하기 위해 필요한 정보(지표)를 발굴하고 과학적으로 관리하기 위한 도시연구가 확대되어야 할 것이다. 예로, 현재 격자단위로 계산되고 있는 정보(지표)들을 특정 필지나 지구 등 토지이용계획에 맞춰서 평가·활용될 수

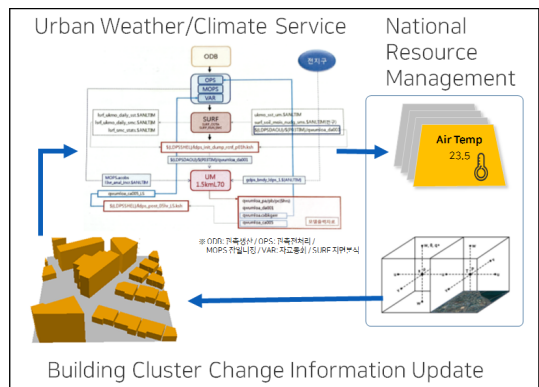
있도록 하는 기술적 연구도 필요할 것이다. 이 밖에도 국토의 70%가 산지(山地)인 우리나라의 지리적 특성을 고려하여 지형을 포함하는 도시공간의 수직적 관리가 필요하며 가로수·도시숲 관리도 필요하다.

가로수나 도시숲 등은 심미적으로 편안한 도시경관 조성과 더불어 도시화로 인해 발생하는 열섬 완화, 미세먼지 여과·흡착, 돌풍 완화, 다양한 미기후 조절 등의 순기능을 수행하고 있으나 가로공간의 통풍기능 저하, 오존 생성 전구물질 배출 등 부정적 역기능에 대한 우려도 있다. 따라서 빌딩숲의 수직화가 기상·기후에 미치는 영향처럼 ‘토지이용-물리환경’ 관계를 증거 기반으로 평가하고 관리하기 위한 다양한 연구들이 파생되고 연결되어야 할 것이다. 수도권을 포함한 우리나라 도시의 토지이용이 보다 환경적으로 보다 지혜로워지도록 도시기상기술과 함께 발전하기 위한 연구적 협력체계가 필요하다(<Figure 11> 참조).

## 2. 빌딩숲 정보 최신성과 분석기술 향상

빌딩숲은 다양한 도시지역 토지이용 활동의 결과물이었다. 지난 반세기 동안 우리나라는 다양한 공간정보 화사업들을 통해서 물리적 도시 공간을 관리하기 위

Figure 11\_ Collaborative Building Cluster Management and Weather Service Feedback



한 공간정보를 구축하여 왔으나 빠르게 변화하고 있는 도시의 빌딩숲에 맞춰 공간정보를 갱신하고 최신성을 유지할 수 있는 기반을 마련하지 못하고 있다. 향후 정보사회 혁신을 준비하고 사회적·환경적 변화를 수용하는 스마트한 빌딩숲 관리를 위해서 빌딩숲 모니터링체계도 바뀌어야 한다. 사회·경제·환경적으로 최적화된 빌딩숲이 만들어지기 위해서는 디지털트윈도시(digital twin city) 개념이 구현되고 스마트시티가 정상적으로 운영되면서 빌딩숲과 관련한 빅데이터가 도시정보 생태계 속에서 생산·소비되어야 할 것이다. 그러나 이 연구가 보여주듯이 빌딩숲의 수평적·수직적 변화를 모니터링할 여건은 현재 매우 미흡하다. 디지털트윈이 구현되기 전까지는 현재의 데이터와 시스템을 이용하여 빌딩숲의 조사 또는 모니터링을 발전시킬 방안들을 찾아야 한다. 이 연구에서 사용된 수치지도(건물)는 항공촬영을 통해 획득된 사진들을 이용하여 1/5,000 축적으로 구축된 자료이다. 공간적으로는 전국의 빌딩숲을 평가할 수 있는 장점이 있으나 서로 다른 시기에 구축된 건축물 DB를 통합하였기 때문에 최신성이 일치하지 않는 단점이 있다. 특히 수치지도는 전국을 순환하며 구축하기 때문에 모니터링을 위한 재원도 필요하다. 현재의 정보화 속도를 고려한다면 이러한 구축방법은 지속가능하지 않을 수 있다. 한국과 세계 도시들의 비교를 위한 정기적 모니터링이 필요하다면 TerraSAR-X/ TanDEM-X처럼 저고도의 극궤도를 따라 이동하며 약 12m 해상도 DEM/DSM 높이정보를 정기적으로 획득하는 원격탐사체계를 이용해 빌딩숲을 모니터링할 수 있을 것이다. 항공라이다 또는 드론라이다 촬영을 통해서 특정 장소와 특정 시기의 상세 빌딩숲 정보를 구축할 수도 있을 것이다. 또는 현재 개별적으로 구축되어 있는 다양한 시설물 정보들을 사물인터넷(IoT)을 통해 연결하고 빅데이터를 모니터링하여 빌딩숲의 내적·외적 형태

와 기능을 관리할 수 있을 것이다.

빌딩숲 정보 최신성 향상과 더불어 빌딩숲 분석기술 향상을 위한 다양한 연구들도 필요하다. 연구과정에서 찾은 바람방향별 빌딩숲 앞면적비 평균 차이 계산 수식( $\frac{EW_{mean} - NS_{mean}}{EW_{mean}}$ , %)을 적용하는 과정에서 이 방법이 빌딩숲의 배치 특성을 계량적으로 평가하는 지표로 활용될 수 있음을 발견할 수 있었다.

<Figure 10>에서 보듯이 이러한 차이는 1980년 후반부터 단독주택 비율을 넘어선 우리나라의 아파트 선호 문화와 관련이 있다(Jeong and Ban 2014). 남향의 판상형 아파트를 선호하는 주택시장의 선호로 인해 나타난 수도권 빌딩숲 공간구조를 이 지표를 통해서 계량화 할 수 있었다. 아직 검토되지 않은 도시 캐노피모수들(UCPs)을 고려한다면 향후 빌딩숲과 공간관리 필요한 새로운 지표들이 다양하게 창출될 것으로 기대된다. 따라서 빌딩숲 관련 지표가 다양한 토지이용 관련 사회적 요구를 반영하고, 환경적 안전성과, 경제적 효율성을 높일 수 있도록 개발되어야 할 것이다. 입체적 토지이용이나 복합적 토지이용에 대한 연구들에서 논의된 수직적 도시공간 조성이나 최근 대두되는 드론 자율주행 등의 패러다임도 포함되어야 할 것이다. 4차산업혁명과 인공지능(Artificial Intelligence: AI)으로 대표되는 스마트도시 운영을 위한 정보가 될 것이다. 이미 기존 도시계획·관리 절차를 직관적으로 모델화하는 제어시스템이 발전하고 있다. 도시계획 절차에 기초한 3차원 스마트 도시모델 추진사례로 세종 스마트시티와 부산 에코델타시티가 있다.<Figure 12> 참고. 이러한 역설계(Inverse-design) 과정(Vanegas, Garcia-Dorado, Aliaga and Benes et al. 2012)이 똑똑해질수록 수자원, 에너지자원, 미세먼지 등 지금까지 미흡했던 다양한 사회적 수요대응이 빨라지고 기능적·경제적·환경적으로 최적화된 빌딩숲

**Figure 12** \_ Inverse-Design Urban Planning(SIGGRAPH ACM 2012) and Smart City Projects in Korea(Busan, Sejong)



Source: Vanegas, Garcia-Dorado, Aliaga and Benes et al. 2012; <https://smartcity.go.kr/> (accessed March 1, 2019).

이 발전할 것이다. 지속가능한 스마트시티를 위한 빌딩숲의 역할은 점차 확대해야 할 것이다.

## V. 결론

외연적으로 성장하던 도시들이 지역의 여건에 따라 성장과 쇠퇴로 양분되고 빌딩의 내적·외적 기능이 변화하는 등 도시공간관리 패러다임이 변화되고 있는 시점이다. 기상·기후 분석기술을 적용한 수도권 빌딩숲 연구는 형태에 따른 바람의 영향 분석을 통해서 다음과 같은 결론과 시사점을 도출하였다.

첫째, 수도권 모델면적(7,114km<sup>2</sup>)은 국토면적의 7% 정도이지만 우리나라 건물 총 개수의 1/5, 건물 총 체적의 1/3을 차지하는 빌딩숲이 밀집되어 있다.

둘째, 빌딩숲의 수평적·수직적 공간적 분포 관련 모수들을 비교한 결과 입지특성이 달랐기 때문에 빌

딩숲에 의한 평균바람 영향을 평가하기 위한 다양한 수직정보(지표)의 개발이 필요하다.

셋째, 빌딩숲 개별 건물의 앞면적 중복 적용체계를 개선하여 남향 판상형 아파트가 밀집된 수도권 빌딩숲의 특성을 알 수 있었다. 남풍—북풍 방향의 평균바람 영향이 동풍—서풍 방향보다 10% 이상 크게 나타났다.

넷째, 수도권 빌딩숲 거칠기길이를 5분위로 나누어 야간 지표온도 평균과 비교한 결과 4분위까지는 거칠기길이가 증가에 따라 LST도 증가하지만 거칠기길이가 가장 큰 5분위는 LST가 조금 감소하였다.

다섯째, 기후변화 적응과 대응, 미세먼지 완화, 도시재생·그린뉴딜, 스마트녹색도시 등과 빌딩숲이 연결되도록 빌딩숲의 모니터링과 분석기술 향상 연구가 필요하다.

## 참고문헌 ●●●●●

- 권혁기, 양호진, 이채연, 김연희, 최영진. 2015. 서울 도시계획 정책을 적용한 기후영향평가-남북녹지축 조성사업을 대상으로. 환경영향평가 24권, 2호: 134-153. <https://doi.org/10.14249/eia.2015.24.2.134>  
Kwon Hyuk-Gi, Ho-Jin Yang, Yi Chaeyeon, Kim Yeon-Hee and Choi Young-Jean. 2015. Urban climate impact assessment reflecting urban planning scenarios: Connecting green network across the north and south in Seoul. *Journal of Environmental Impact Assessment* 24, no.2: 134-153. <https://doi.org/10.14249/eia.2015.24.2.134>
- 김도형, 홍선옥, 변재영, 박향숙, 하종철. 2019. 서울 건물정보 자료를 활용한 UM 기반의 도시캐노피 모델 입력자료 구축 및 평가. Atmosphere 29권, 4호: 417-427. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.4.417>  
Kim Do-Hyoung, Hong Seon-Ok, Byon Jae-Yong, Park HyangSuk and Ha Jong-Chul. 2019. Development and evaluation of urban canopy model based on unified model input data using urban building information data in Seoul. *Atmosphere* 29, no.4: 417-427. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2019.29.4.417>

3. 스마트시티 코리아: <https://smartcity.go.kr/> (2019년 5월 1일 검색). Smart City Korea. <https://smartcity.go.kr/> (accessed March 1, 2019).
4. 안승만, 김승중, 이형찬, 손은영. 2016. 도시의 미기후 관리 방향. 국토정책 Brief 583호. 세종: 국토연구원.  
An Seung Man, Kim Seungjong, Lee Hyungchan and Sohn Eunyoung. 2016. Icroclimate Management Directions. *KRIHS Policy Briefs* no.583. Sejong: KRIHS.
5. 안승만. 2019. IPCC 기후정의 실현을 위한 국토·도시 관리. 국토이슈리포트 10호. 세종: 국토연구원.  
An Seung Man. 2019. National Territory and City Management for IPCC Climate Justice. *KRIHS Issue Reports* no.10. Sejong: KRIHS.
6. 안승만, 이규석, 이채연. 2015. 거칠기길이를 이용한 바람통로 네트워크 구축. 한국조경학회지 43권, 3호: 101-113. <https://dx.doi.org/10.9715/KILA.2015.43.3.101>  
An SeungMan, Lee Kyoo-seock and Yi Chaeyeon. 2015. Building wind corridor network using roughness length. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 43, no.3: 101-113. <https://dx.doi.org/10.9715/KILA.2015.43.3.101>
7. 이영희, 민기홍. 2016. 도시 캐노피와 수평 고해상도가 여름철 대류성 도시 강수에 미치는 영향: 2015년 8월 16일 서울 강수 사례 분석. *Atmosphere* 26권, 1호: 141-158. <http://dx.doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.1.141>  
Lee Young-Hee and Min Ki-Hong. 2016. Impact of urban canopy and high horizontal resolution on summer convective rainfall in urban area: A case study of rainfall events on 16 august 2015. *Atmosphere* 26, no.1: 141-158. <http://dx.doi.org/10.14191/Atmos.2016.26.1.141>
8. 이채연, 김규량, 안승만, 최영진. 2014. 수도권 열섬 중심으로부터 교외까지의 거리 및 국지적 지표특성이 야간 기온분포에 미치는 영향. 한국지리정보학회지 17권, 1호: 35-49. <https://doi.org/10.11108/kagis.2014.17.1.035>  
Yi Chaeyeon, Kim Kyu-Rang, An SeungMan and Choi Young-Jean. 2014. Impact of the local surface characteristics and the distance from the center of heat island to suburban areas on the night temperature distribution over the Seoul metropolitan area. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17, no.1: 35-49. <https://doi.org/10.11108/kagis.2014.17.1.035>
9. 이채연, 권태현, 박문수, 최영진, 안승만. 2015. 서울시 건물 형태에 따른 거칠기길이 분포특성 연구. 대기 25권, 2호: 339-351. <http://dx.doi.org/10.14191/Atmos.2015.25.2.339>  
Yi Chaeyeon, Kwon Tae Heon, Park Munsoo, Choi Young-Jean and An SeungMan. 2015. A study on the roughness length spatial distribution in relation to the Seoul building morphology. *Atmosphere* 25, no.2: 339-351. <http://dx.doi.org/10.14191/Atmos.2015.25.2.339>
10. 이채연, 안승만, 김규량, 최영진, Scherer, D. 2012. 상세 공간정보를 활용한 국지기온 분석 개선-서울 은평구 뉴타운을 사례로. 한국지리정보학회지 15권, 1호: 144-158.  
Yi Chaeyeon, An SeungMan, Kim Kyu-Rang, Choi Young-Jean and Scherer, D. 2012. Improvement of air temperature analysis by precise spatial data on a local-scale-a case study of Eunpyeong new town in Seoul. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 15, no.1: 144-158.
11. 홍선옥, 변재영, 박향숙, 이영곤, 김백조, 하종철. 2018. 통합 모델을 이용한 토지피복변화와 도시 모수화 방안에 따른 지상 기온 모의성능 민감도 분석. 대기 28권, 4호: 427-441. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.4.427>  
Hong Seon-Ok, Byon Jae-Young, Park HyangSuk, Lee Young-Gon, Kim Baek-Jo and Ha Jong-Chul. 2018. Sensitivity analysis of near surface air temperature to land cover change and urban parameterization scheme using unified model. *Atmosphere* 28, no.4: 427-441. <https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.4.427>
12. 황미경, 김유근, 오인보, 강윤희. 2010. 건물효과를 고려한 연안도시지역 고해상도 기상모델링. 한국대기환경학회지 26권, 2호: 137-150.  
Hwang Mikyung, Kim Yugeun, Oh Inbo and Kang Yunhee. 2010. High-resolution simulation of meteorological fields over the coastal area with urban buildings. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 26, no.2: 137-150.
13. Barlag, A. B. and Kuttler, W. 1990. The significance of country breezes for urban planning. *Energy and Buildings* 15, no.3-4: 291-297.
14. Belcher, S. E., Jerram, N. and Hunt, C. R. 2003. Adjustment of a turbulent boundary layer to a canopy of roughness elements. *Journal of Fluid Mechanics* 488: 369-398. <https://doi.org/10.1017/S0022112003005019>
15. Bottema, M. 1997. Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion. *Atmospheric Environment* 31, no.18: 3059-3075. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00117-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00117-9)

16. Bottema, M. and Mestayer, P. G. 1998. Urban roughness mapping: Validation techniques and some first results. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76: 163-173. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\) 00014-2](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(98) 00014-2)
17. Coceal, O. and Belcher, S. E. 2005. Mean winds through an inhomogeneous urban canopy. *Boundary-Layer Meteorology* 115, no.1: 47-68. <https://doi.org/10.1007/s10546-004- 1591-4>
18. Chrysoulakis, N., Grimmond, S., Feigenwinter, C., Lindberg, F., Gastellu-Etchegorry, J., Marconcini, M. and Mitraka, Z. et al. 2018. Urban energy exchanges monitoring from space. *Scientific Reports* 8, no.1: 1-8. <https://doi.org/10.1038/ s41598-018-29873-x>
19. Eldredge, N. and Horenstein, S. 2014. *Concrete Jungle: New York City and our last best hope for a sustainable future*. Berkeley: Univ. of California Press.
20. Islam, M. N., Rahman, K. S., Bahar, M. M., Habib, M. A., Ando, K. and Hattori, N. 2012. Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening* 11, no.4: 460-464. <https://doi.org/ 10.1016/j.ufug.2012.06.004>
21. Gál, T. M. and Sümegehy, Z. 2007. Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications. *Acta Climatologica ET Chorologica* 40: 27-36.
22. Grimmond, C. S. B. and Oke, T. R. 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology* 38, no.9: 1262-1292. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1262:APOU AD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOU AD>2.0.CO;2)
23. Hagishima, A., Tanimoto, J., Nagayama, K. and Meno, S. 2009. Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries. *Boundary-Layer Meteorology* 132, no.2: 315-337. <https://doi.org/10.1007/ s10546-009-9403-5>
24. Jeong, S. K., & Ban, Y. U. 2014. The spatial configurations in South Korean apartments built between 1972 and 2000. *Habitat International*, 42, 90-102.
25. Kono, T., Tamura, T. and Ashie, Y. 2010. Numerical investigations of mean winds within canopies of regularly arrayed cubical buildings under neutral stability conditions. *Boundary-Layer Meteorology* 134, no.1: 131. <https://doi. org/10.1007/s10546-009-9434-y>
26. Kanda, M., Inagaki, A., Miyamoto, T., Gryschka, M. and Raasch, S. 2013. A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces. *Boundary-Layer Meteorology* 148, no.2: 357-377. <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9818-x>
27. Kent, C. W., Grimmond, S., Barlow, J., Gatey, D., Kotthaus, S., Lindberg, F., & Halios, C. H. 2017. Evaluation of urban local-scale aerodynamic parameters: implications for the vertical profile of wind speed and for source areas. *Boundary-Layer Meteorology*, 164(2), 183-213.
28. Macdonald, R. W., Griffiths, R. F. and Hall, D. J. 1998. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmospheric Environment* 32, no.11: 1857-1864. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00403-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00403-2)
29. Macdonald, R. W. 2000. Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer. *Boundary-Layer Meteorology* 97, no.1: 25-45. <https://doi.org/10.1023/A:1002785830512>
30. Oke, T. R. 2002. *Boundary Layer Climates 2<sup>nd</sup> edition*. London: Routledge.
31. Park Moon-Soo, Park Sung-Hwa, Chae Jung-Hoon, Choi Min-Hyeok, Song Yunyoung, Kang Minsoo, and Roh Joon-Woo. 2017. High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. *Atmospheric Measurement Techniques* 10, no.4: 1575-1594. <https://doi.org/ 10.5194/amt-10-1575-2017>
32. Park Moon-Soo and Chae Jung-Hoon. 2018. Features of sea-land-breeze circulation over the Seoul Metropolitan Area. *Geoscience Letters* 5, no.1: 28.
33. Raupach, M. R. 1994. Simplified expressions for vegetation roughness length and zero-plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-layer Meteorology* 71, no.1-2: 211-216.
34. Vukovich, F. M. 1971. Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat island circulation characteristic of an urban complex. *Monthly Weather Review* 99, no.12: 919-926.
35. Vanegas, C. A., Garcia-Dorado, I., Aliaga, D. G., Benes, B. and Waddell, P. 2012. Inverse design of urban procedural models. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 31(6), 1-11.
36. Wie Jieun, Hong Seon-Ok, Byon Jae-Young, Ha Jong-Chul and Moon Byung-Kwon. 2020. Sensitivity analysis of surface

- energy budget to albedo parameters in Seoul Metropolitan Area using the unified model. *Atmosphere* 11, no.1: 120. <https://doi.org/10.3390/atmos11010120>
37. Wong, M. S., Nichol, J. E., To, P. H. and Wang, J. 2010. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. *Building and Environment* 45, no.8: 1880-1889. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.019>
38. Yang, F. 2016. High-rise urban form and environmental performance: An overview on integrated approaches to urban design for a sustainable high-rise urban future. *International Journal of High-Rise Buildings* 5, no.2: 87-94. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2016.5.2.87>
39. Yuan, C., Shan, R., Zhang, Y., Li, X. X., Yin, T., Hang, J. and Norford, L. 2019. Multilayer urban canopy modelling and mapping for traffic pollutant dispersion at high density urban areas. *Science of the Total Environment* 647: 255-267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.409>
40. S. A., Hagishima, A., Tanimoto, J. and Ikegaya, N. Aerodynamic parameters of urban building arrays with random geometries. *Boundary-Layer Meteorology* 138, no.1: 99-120. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9551-7>
41. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-29873-x>

- 논문 접수일: 2020. 3. 27.
- 심사 시작일: 2020. 4. 28.
- 심사 완료일: 2020. 6. 1.

## 요약

주제어: 수도권, 빌딩숲, 도시캐노피층, 도시캐노피모델, 평균바람, 모니터링

대기 순환을 통해서 도시에 지속적으로 바람이 유입되지만 고르게 분포하지는 않는다. 그리고 빌딩숲은 도시로 유입된 바람의 흐름을 왜곡시킨다. 빌딩숲이 없었다면 일어나지 않을 바람장의 변화가 거시적·미시적 규모에서 목격된다. 이러한 빌딩숲의 영향을 분석하는 것이 이 논문의 목적이다 빌딩숲과 평균바람 분포의 관계를 분석하기 위한 기초연구로서 수도권 일대를 대상으로 빌딩숲과 평균바람 분포 특성을 공간적으로 분석하였다. 더불어 국토환경 관리를 위한 빌딩숲 활용방안도 살펴보았다. 수도권 도시기상 모델면적(7,114km<sup>2</sup>)은 국토면적의 7%정도 이지만 우리나라 건물 총 개수의 1/5, 건물 총체적의 1/3을 차지하는 빌딩숲이 밀집되어 있다. 빌딩숲의 공간적 분포 관련 모수들을 비교한 결과 그 분포가 매우 다르고

빌딩숲에 의한 평균바람 영향을 평가하기 위한 다양한 수직정보(지표)의 개발이 필요함을 확인하였다. 빌딩숲 개별 건물의 앞면적 중복 적용방법을 개선하여 남향 판상형 아파트가 밀집된 수도권의 빌딩숲 특성을 알 수 있었다. 남풍—북풍 방향의 평균바람 영향이 동풍—서풍 방향보다 10% 이상 크게 나타났다. 수도권 빌딩숲 거칠기길이를 5분위로 나누어 야간 지표온도 평균 비교결과 4분위까지는 거칠기길이 증가에 따라 LST도 증가하지만 거칠기길이가 가장 큰 5분위는 LST가 약 0.5℃ 감소하였다. 향후 기후변화 적응과 대응, 미세먼지 완화, 도시재생·그린뉴딜, 스마트녹색도시 등과 빌딩숲이 연결되도록 모니터링과 분석 기술 향상 연구가 필요하다.