

## 서울시 건물형태에 따른 거칠기길이 분포특성 연구

이채연<sup>1)</sup> · 권태현<sup>1)</sup> · 박문수<sup>1)</sup> · 최영진<sup>1)</sup> · 안승만<sup>2),\*</sup>

<sup>1)</sup>한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단, <sup>2)</sup>성균관대학교 조경학과

(접수일: 2015년 2월 9일, 수정일: 2015년 2월 23일, 게재확정일: 2015년 2월 23일)

### A Study on the Roughness Length Spatial Distribution in Relation to the Seoul Building Morphology

Chaeyeon Yi<sup>1)</sup>, Tae Heon Kwon<sup>1)</sup>, Moon-Soo Park<sup>1)</sup>, Young Jean Choi<sup>1)</sup>, and Seung Man An<sup>2),\*</sup>

<sup>1)</sup>Weather Information Service Engine Project, Hankuk University of Foreign Studies, Korea

<sup>2)</sup>Department of Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

(Manuscript received 9 February 2015; revised 23 February 2015; accepted 23 February 2015)

**Abstract** The purpose of this study is for the fundamental understandings about building morphological parameters and aerodynamic roughness parameters of Seoul, Korea using the detailed urban geographic information datasets. Applied roughness parameter calculations are based on a digital map of buildings with lot area polygons. The quality of the developed roughness length ( $z_0$ ) of Seoul was evaluated with densely installed 107 automatic weather stations. The correlation coefficient results between averaged wind speeds of AWS data and averaged  $z_0$  is  $-0.303$  in night and  $-0.398$  in day (200 m radii circles case). Further  $z_0$  enhancement should follow by considering other surface features such as high tree and orography of Seoul. However, this study would meet the needs to for local- or meso-scale meteorological modeling applications of Seoul. However, further studies would require for enhancing the  $z_0$  applications of Seoul.

**Key words:** Seoul land surface, building canopy morphology, roughness length, zero plane displacement

## 1. 서 론

대기 경계층은 지표면 마찰력 영향에 가장 민감한 대기층으로 특히 경계층 하부 약 10% 정도에 분포하며 지표에 의한 역학적 혼합이 지배적인 접지경계층은 연직 바람분포가 대수법칙을 따르는 것으로 알려져 있다(Oke, 1987). 영면변위(zero-plane displacement,  $z_d$ ), 거칠기길이(roughness length,  $z_0$ ) 같은 지표면 마찰을 설명하는 공기역학적 도시 캐노피 모수(Urban Canopy Parameter, UCP)들은 지표-대기간의 열, 수증

기, 운동량의 교환과 대기경계층의 구조를 결정하는데 사용되며 도시열섬 및 대기오염물질 확산 연구에도 응용되고 있다(Vukovich, 1971; Barlag and Kuttler, 1991; Bottema, 1996; Gál and Sümegey, 2007). 이 중  $z_0$ 는 풍속, 풍향, 운동량, 거칠기층, 난류 강도 등의 대기 흐름과 관련 있어(Raupach, 1992; Grimmond and Oke, 1999) 도시 경계층 연구에 많이 적용되었다. 약 30년 넘게 건물 및 식생을 대상으로  $z_0$ 와 관련한 형태적 모수를 얻기 위해 몇몇 도시들에서 실험적 연구들이 수행되었으나, 대부분 대표성 있는 소규모 연구 대상지(주거지 또는 산업/상업지) 등으로 공간적 범위가 제한되었다(Landsberg, 1981; Grimmond and Souch, 1994; Voogt and Oke, 1997; Cionco and Ellefsen, 1998; Grimmond and Oke, 1999; Haala and Brenner, 1999).

근래의 컴퓨팅 기술 발달로 수치모델의 해상도가

\*Corresponding Author: Seung Man An, Department of Landscape Architecture, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Jangnang-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 440-330, Korea.

Fax : +82-31-290-7840

E-mail : asiamd@gmail.com

증가하였고 이로 인해 특정 지역 및 도시를 반영할 수 있는 적합한 공기역학적 UCP 필요성이 점차 높아지고 있다. 도시의 구조 및 지표면의 복잡성은 동일한 분류 내에서도 큰 차이를 보이고 있기 때문에 도시에서의 기상예측을 위해서는 지표면 복잡성을 고려할 수 있는 자료의 선정과 이를 활용한 UCP 산출방법이 필요하다. 지도제작 기술의 발달로 3차원 디지털 건물 및 식생 지표모델 및 고해상도 위성영상 활용이 보편화되면서 도시 전체와 같이 광범위한 영역을 대상으로 지표형태 및 특성 모수화 연구가 효과적으로 수행될 수 있게 되었다(Ratti and Richens, 1999; Priestnall and Duncan, 2000; Saatchi et al., 2001; Ratti et al., 2006; Steiniger et al., 2008).

Burian et al. (2003, 2004)은 3차원 건물 모델, 항공 LiDAR (Light Detection And Ranging) 및 SAR (Synthetic Aperture Rader) 자료 등을 이용해 Oklahoma (Oklahoma, USA) 및 Houston (Texas, USA) 등을 대상으로  $z_0$ 의 공간 분포를 조사하고 토지이용별 및 산정방법별  $z_0$ 의 차이를 비교하였다. Gál and Sümeghy (2007) 및 Ng et al. (2011)은 Szeged (Hungary) 및 Hongkong (China)을 대상으로 필지(lot) 단위별 건물군(building block) 속성들(e.g., area, volume, height)을 활용하여 필지 단위  $z_d$  및  $z_0$  분포를 조사하고 도시열섬에 의한 순환체계를 설명하며 도시계획적 활용을 제안하였다. 국내에서도  $z_0$  연구 결과들(Lee and Park, 1997; Ha et al., 1998; Yoo et al., 2010)이 수행되었으나 특정한 국지 공간을 대상으로 하고 있어 지표 구조로부터 도시규모의 공기역학적 UCP 공간분포를 조사하는 연구가 필요하다.

대도시를 중심으로 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)과 상세한 공간정보 DB들이 국가공간정보화 사업으로 구축되어 국내에서도 공간적으로 확장된 UCP 연구 기초가 마련되었다. 특히,  $z_0$  연구는 개념이 단순하고 도시 전체의 공간적 분포를 상세하게 묘사할 수 있어 수치모델링 및 도시기후 관리/계획 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. 이를 위해서 국내의 지표 특성과 활용되는 기술 및 자료특성을 평가하여, 다양한  $z_0$  활용을 지원하는 기초연구가 필요하다.

## 2. 연구방법

### 2.1 거칠기길이 산출 관련 연구 동향

거칠기길이( $z_0$ ) 산출방법은 크게 풍속계측을 통한 해석적 방법과 지표형태를 통한 해석적 방법으로 구분된다(Grimmond and Oke, 1999). 풍속계측을 통한 해석적 방법은 고도별 바람단면의 로그분포로부터 Monin-Obukhov 상사 이론에 근거해 이론적인  $z_0$ 를 구

하며 평균 수평풍속의 연직 프로파일은 식(1)과 같이 설명된다.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \times \ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right), \quad (1)$$

$U(z)$ 는 높이  $z$ 에서의 시간평균 풍속,  $k$ 는 칼만상수(von Karman's constant, 0.41),  $u_*$ 는 마찰계수,  $z_d$ 는 영면변위이다. 경험적으로 이 식은 지표면이 균질하며, 지속적인 관성 계층에서 대기안정도가 중립인 조건에서 유효한 것으로 알려져 있다. 최근 다양한 항공 및 위성 플랫폼 기반의 센서와 GIS DB를 활용한  $z_0$  산출 기법들이 적용되고 있으며 이들 기법은 모두 지표형태 해석적 방법에 포함된다. 지표형태 해석적 방법은 건물 및 수목 등 도시 지표면을 구성하는 물체의 기하학적 형상 및 크기에 대한 측정 결과들을 이용해  $z_0$ 를 구하는 방법으로 i) 평균높이  $z_H$  적용, ii)  $z_H$ 와 평면비  $\lambda_p$  ( $A_p/A_T$ ) 적용, iii)  $z_H$ ,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_f$  ( $z_H$ 와 풍압을 받는 건물 옆면적비) 적용 방법 등이 있다. 평균 높이, 평균 폭, 평균 밀도를 결합한 옆면적비(Frontal area index,  $\lambda_f$ )와 평면비(Plan area index,  $\lambda_p$ )를 기반으로 여러  $z_0$  근사값 계산법이 적용되었으며 산출된  $z_0$  모델들은 상호 비교 및 타워 관측, 풍동실험, 지상 LiDAR (Light Detection And Ranging) 및 SODAR (SOund Detection And Ranging) 관측 등을 통해 비교 검증이 이뤄지고 있다(Raupach, 1992; Bottema and Mestayer, 1998; Macdonald et al., 1998; Dong et al., 2003; Moore and Bailey, 2004; Ratti et al., 2006; Gál and Unger, 2009; Ng et al., 2011).

### 2.2 지적 필지 기반 서울시 거칠기길이( $z_0$ ) 지도 산출

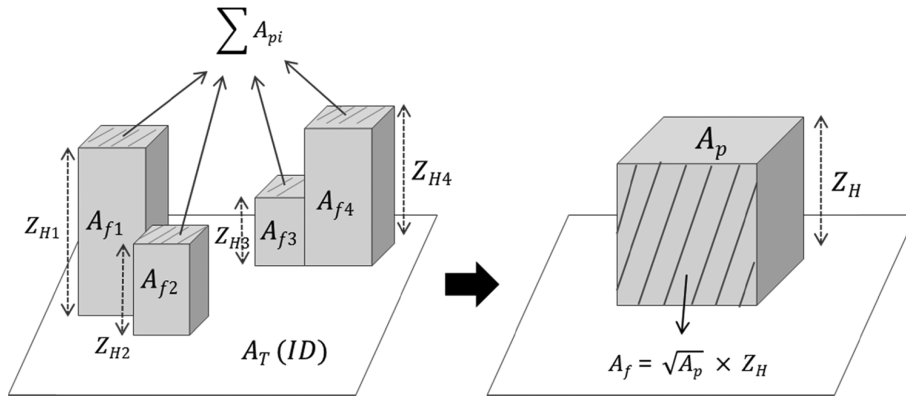
본 연구의 공간적 범위는 행정구역상의 서울시이며 내용적 범위는 건물형태에 따른  $z_0$ 의 공간적 분포 특성 조사 및 평가이다. 건물이 존재하는 서울시 모든 필지에 대한  $z_0$  산출 체계를 구축하고 이로부터 지표형태 해석적 방법으로  $z_0$ 를 구하였다.

지적 필지 기반  $z_0$  지도 산출에 사용된 GIS DB는 Table 1과 같다. 안전행정부에서 제공한 GIS DB 레이어들 중 건물 레이어(TL\_SPBD\_BULD)와 국토지리정보원의 지적 필지 레이어를 이용해  $z_0$  계산에 활용하였다. 각 건물의 높이는 건물 레이어의 지상층수(GR\_FLO\_CO)에 표준높이(3 m)를 적용하여 구하였으며 지상층수 정보가 누락된 69,315개의 건물은 항공 LiDAR 데이터에서 구한 높이정보를 입력하여 보완하였다. 지적도의 시/구/동 단위 레이어 및 도시생태현황도의 토지이용 레이어는  $z_0$ ,  $z_d$ 의 구별, 토지이용별 분포 특성 조사에 이용되었다.

서울시 내의 모든 건물과 필지를 대상으로 하는  $z_0$  계산을 위해서 GIS DB의 크기와 컴퓨터 계산 능력

**Table 1.** Input GIS DB for calculation of Seoul.

	Building Map	Seoul Biotop Map	Airborne LiDAR	Cadastral Map
Format	shape	shape	LAS	shape
Scale	1/1,000	1/5,000	2.5 point/m <sup>2</sup>	1/1,000
year	2013	2010	2009	2009
Source	Ministry of Security and Public Administration	Seoul Institute	National Geographical Information Institute	National Geographical Information Institute



**Fig. 1.** Schematic description of the roughness mapping using GIS DB. Input parameters for the roughness are calculated from one building block in lot area by transforming irregular building group into one rectangular building.

을 고려하여  $z_0$  지도 산출 체계를 단순화하였다. 이에 본 연구에서는 필지별  $z_0$  산정에 있어 각 필지에 포함되어 있는 건물들의 형태를 단순화하여 하나의 단일 건물로 재구성 하였으며(Fig. 1), 생성된 단일 건물이 필지 내의 건물들을 대표하는 것으로 전제하였다. 필지( $A_T$ ) 내에 포함된 모든 건물들을 대표하는 단일 건물의 형상은 모든 건물들의 평면적의 합( $A_p = \sum A_{pi}$ )을 이용하여 근(root)을 한 변으로 하는 정사각형 평면과 총 체적을 평면적으로 나눈 평균높이로 구성된다. 건물들 각각의 옆면적( $A_{fi}$ )은 개별 건물 평면적에서 한 변의 길이와 평균높이( $Z_H$ )의 곱( $\sqrt{A_{pi}} \times Z_H$ )으로 계산되며  $Z_H$ 는 필지 내 건물들의 총 체적으로 단일 건물블록의 평면적으로 나눈 값이다. Raupach (1992) 등 다수 연구에서  $\lambda_f$ 는 중요한 바람 방향의 함수로 활용되었으나 서울시의 경우 고려할 건물들의 수가 많고, 조밀도가 높으며, 공간적 배치 규칙성이 낮다. 따라서, 건물 형상을 단순화하고  $\lambda_f$ 에 따른 바람 방향별 변동성을 고려하지 않았다. Kanda et al. (2013)의 연구에 의하면 주풍향을 고려한  $\lambda_f$ 와 모든 방향을 평균하여 구한  $\lambda_f$ 의 상관계수가 0.9998로 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 본 연구에서 평면적비( $\lambda_p$ )와 옆면적비( $\lambda_f$ )는 식(2)와 식(3)을 통해 계산된다.

$$\lambda_p = \frac{A_p}{A_T}, \tag{2}$$

$$\lambda_f = (\sqrt{A_p} \times Z_H) / A_T, \tag{3}$$

$A_T$ 는 필지의 면적이며  $\lambda_p$ 는 0~1 사이의 실수(float) 값을 가진다.  $\lambda_f$ 는 단순화된 단일 건물의 옆면적이자 공기의 수평적 흐름 저해지수이며 모든 바람방향으로부터 동일한 값을 갖는다. 각 필지의 국지적인 값으로서 건물 등의 지면 거칠기에 의해 운동에너지가 흡수되어 수직적 대수적 풍속 프로파일이 0이 되는 높이인 영면변위( $z_d$ ) 및 로그함수적 풍속 프로파일에 의해 결정되는 모수인 거칠기길이( $z_0$ )는 Macdonald et al. (1998)에 의해 제시된 식(4)와 식(5)를 적용하여 산정하였다.

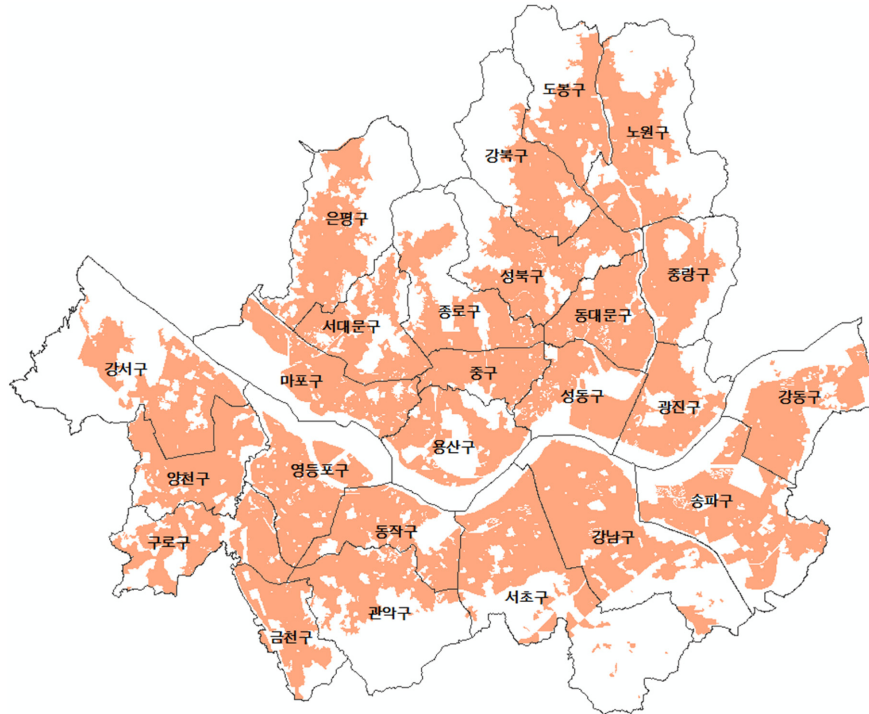
$$z_d = (1 + \alpha^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1)) \times Z_H, \tag{4}$$

$$z_0 = \left[ \left( 1 - \frac{z_d}{Z_H} \right) \exp \left\{ - \left[ 0.5 \beta \frac{C_D}{k^2} \left( 1 - \frac{z_d}{Z_H} \right) \lambda_f \right]^{0.5} \right\} \right] \times Z_H, \tag{5}$$

본 연구는 Macdonald et al. (1998)이 적용한 식(2)~(5) 및 경험상수( $k$  (0.4),  $C_D$  (1.2),  $\alpha$  (4.43),  $\beta$  (1.0))를 지

**Table 2.**  $Z_0$  Class and the classified number of AWSs for two cases.

$Z_0$ Class	$Z_0$ Range (m)	Classified AWS No. (100 m radii circle mean)	Classified AWS No. (200 m radii circle mean)
$Z_0\_L1$	~0.1	42	43
$Z_0\_L2$	0.1~1.0	34	25
$Z_0\_L3$	1.0~2.0	13	14
$Z_0\_L4$	2.0~4.0	6	16
$Z_0\_L5$	4.0~8.0	6	7
$Z_0\_L6$	8.0~16.0	6	2
$Z_0\_L7$	16.0~	-	-



**Fig. 2.** Effective Building Parcel (EBP) area of Seoul ( $z_0 > 0.01$ ).

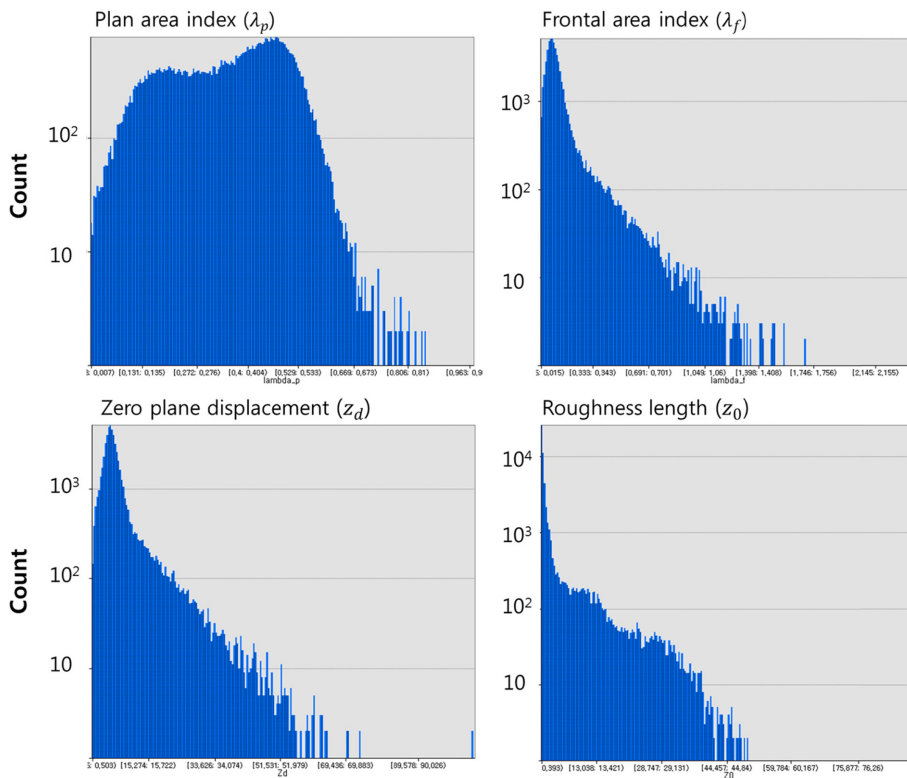
적도 필지단위에 각각 적용하여 테이블 속성으로 구축하였다. 계산된  $z_0$  중 0.01 이하의 값은 공간분포를 고려하여 유효건물 필지에서 제외하였다. 작성된 필지 DB는 10 m 해상도 평면적비( $\lambda_p$ ), 옆면적비( $\lambda_s$ ), 영면변위( $z_d$ ), 거칠기길이( $z_0$ ) 격자(raster) 자료로 변환되었다.

**2.3 서울시  $z_0$  분석 및 고밀도 관측데이터와의 비교**  
 산출된  $z_0$  공간적 분포 특성은 구별 및 토지이용별 분포로 기술되었다. 지적도 필지를 기본단위로 10 m 해상도로 격자화된  $\lambda_p$ ,  $\lambda_s$ ,  $z_d$ ,  $z_0$  데이터가 토지이용, 행정단위(구/동) 등의 구역(zone)별로 통계적 분포를 분석 및 기술에 사용되었다. 더불어 고밀도 AWS

(Automatic Weather Station) 데이터와의 비교를 통해  $z_0$ 와 기상인자 간 상관성을 평가하였다. 민간 기상모니터링 서비스(Weather Planet, [www.weatherplanet.co.kr](http://www.weatherplanet.co.kr))를 통해 2013년 7월 1일부터 9월 30일까지 107개 지점에서 92일간 측정된 지점별 시·공간 분포 특성을 주간(06:00~19:00) 및 야간(20:00~05:00)으로 구분하여 시간별 평균을 산출하고 이를 관측지점 주변 반경  $z_0$  평균과 비교하고 상관계수를 도출하였다. 사용된 S/W는 SPSS v.18이며, 107개 지점으로부터 100 m 반경의  $z_0$  평균과 200 m 반경의  $z_0$  평균을 계급화한  $z_0$  클래스에 대입 후 야간과 주간의 풍속 및 온도 분포 경향을 상자도표를 이용해 파악하고  $z_0$  평균 검색반경에 따른 차이 및 AWS 관측자료와 상관성을 비교하였다(Table 2).

**Table 3.** Descriptive statistics about  $\lambda_p$ ,  $\lambda_f$ ,  $z_d$ , and  $z_0$ . N = 55,605.

	Min	Max	Mean	90%_Mean	Std. Dev.	Skewness	Kurtosis
	P5	P10	P25	P50	P75	P90	P95
$\lambda_p$	0.00 0.11	0.98 0.15	0.35 0.24	0.11 0.38	0.14 0.47	-0.29 0.52	-0.79 0.54
$\lambda_f$	0.01 0.03	2.41 0.04	0.13 0.06	0.11 0.09	0.13 0.13	4.56 0.22	32.28 0.36
$z_d$	0.06 2.22	105.25 3.08	7.35 4.37	6.45 5.64	6.40 7.62	3.81 13.27	21.95 19.73
$z_0$	0.01 0.05	90.05 0.09	2.46 0.19	1.40 0.44	5.78 1.20	3.87 7.67	17.99 14.22



**Fig. 3.** Histogram plot of  $\lambda_p$ ,  $\lambda_f$ ,  $z_d$ , and  $z_0$ .

### 3. 결 과

#### 3.1 서울시 거칠기길이 및 관련 속성들

건물 DB (TL\_SPBD\_BULD)에 따르면 서울은 약 673,000여 개 건물들로 구성된 매우 복잡한 수평적, 수직적 공간분포 패턴을 보인다. 서울시의 면적은 605.2 km<sup>2</sup>로 GIS DB로부터 추정되는 건물들의 평면적(footprint area)은 약 101.6 km<sup>2</sup>로, 총 면적의 약 17%에 건물들이

입지하고 있다. 건물 높이(층수)와 평면적을 고려하여 계산된 건물들의 총 표면적은 약 470.6 km<sup>2</sup>, 총 체적은 약 1.4 km<sup>3</sup>이다. 지적 DB에 따르면 서울에는 56,400여 개의 지적 필지가 등록되어 있으며, 이 중 본 연구에서 고려하고 있는  $z_0$ 가 0.01 이상인 유효건물 지적 필지(Effective Building Parcel, EBP)는 55,605 필지로 서울시 총 면적의 약 54% (324.0 km<sup>2</sup>)이다(Fig. 2).

Table 3과 Fig. 3은 식(2)~(5)에 기반하여 계산된  $\lambda_p$ ,

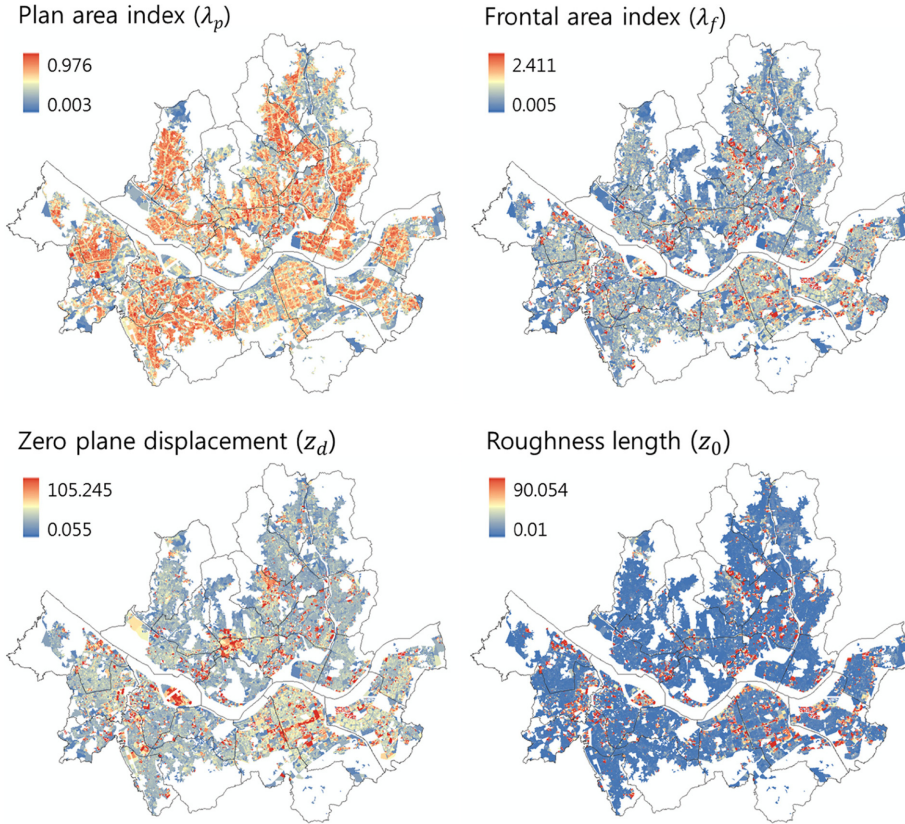


Fig. 4. Spatial distribution of  $\lambda_p$ ,  $\lambda_f$ ,  $z_d$ , and  $z_0$  (10 m by 10 m resolution).

$\lambda_f$ ,  $z_d$ ,  $z_0$  통계분포와 히스토그램(histogram plot)을 보여주고 있다.  $\lambda_f$ ,  $z_d$ ,  $z_0$ 는 첨용(leptokurtic)한 반면  $\lambda_p$ 는 평용(platykurtic)하게 나타났고 왜도는  $\lambda_f$ ,  $z_d$ ,  $z_0$  모두 정적 비대칭(positive skew)인 반면  $\lambda_p$ 는 부적 비대칭(negative skew)이었다. 이는 건물필지 넓이변화 폭이 높이변화 폭에 비해 큰 점, 서울에 작은 건물들이 차지하는 양적 크기와 변화의 폭이 큰 점,  $\lambda_f$ ,  $z_d$ ,  $z_0$ 와 달리  $\lambda_p$ 가 평면적 분포만을 고려하는 점 때문인 것으로 판단된다. 왜도 및 첨도 표준오차는 각각 0.1, 0.21이었다. 격자 자료(10 m × 10 m)의 공간분포를 확인한 결과  $\lambda_f$ ,  $z_d$ ,  $z_0$  공간적 분포가 여의도, 강남, 송파 등에 위치한 고층건물 밀집 지역을 뚜렷하게 보여주고 있었다(Fig. 4).

$\lambda_p$ 와  $z_d$ 는 건물의 평면 분포 특성을 반영하여 평면적으로 밀집될수록 높게 분포하였으며,  $\lambda_f$ 와  $z_0$ 는 고층건물이 밀집한 지역에서 높게 나타난 반면 평면적 밀집도가 낮게 반영되었다. 상관분석 결과,  $\lambda_f$ 와  $z_0$ 의 Pearson상관계수가 0.905로 가장 높았고 이어  $z_d$  (0.842),  $\lambda_p$  (-0.044) 순으로 나타났다(Table 4).

Table 5는 각 구별  $z_0$  유효건물 지적필지(EBP) 면

Table 4. Pearson's correlation coefficient ( $\gamma$ ) and covariance ( $\mu$ ) for the  $\lambda_p$ ,  $\lambda_f$ ,  $z_d$ , and  $z_0$ . N = 55,605.

		$\lambda_p$	$\lambda_f$	$z_d$	$z_0$
$\lambda_p$	$\gamma$	1			
	$\mu$				
$\lambda_f$	$\gamma$	-0.066	1		
	$\mu$	-0.059			
$z_d$	$\gamma$	-0.343	.842	1	
	$\mu$	-0.278	31.128		
$z_0$	$\gamma$	-0.044	.905	.834	1
	$\mu$	-0.001	.776	.646	

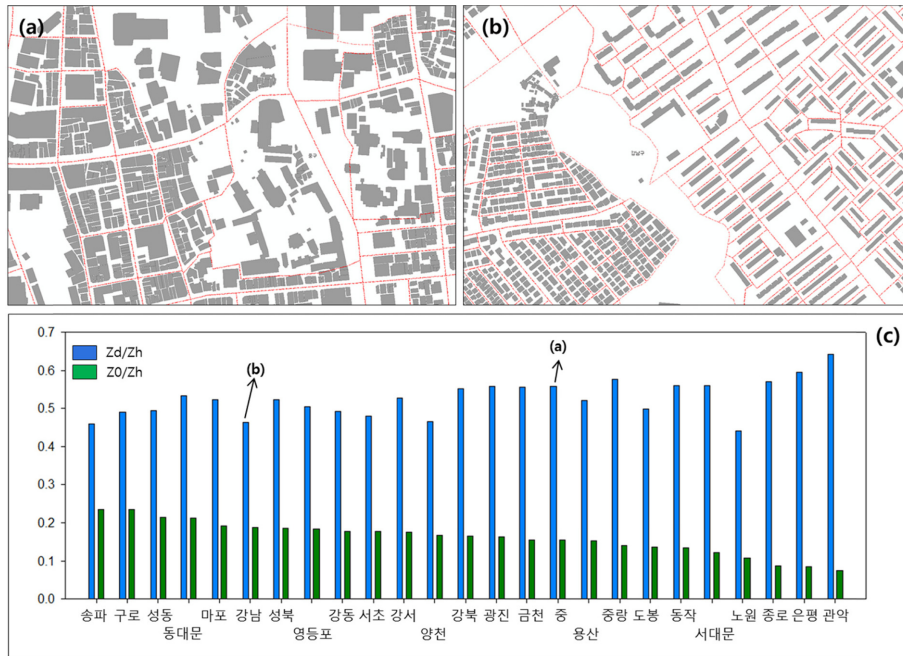
적, 구별 EBP 비율,  $\lambda_p$ ,  $\lambda_f$ ,  $z_d$ ,  $z_0$ 의 통계 분포로 각 속성별 상위 5개 행정단위(구)를 회색 표기하였다.

$z_0$  평균은 송파구(3.64), 강남구(3.30), 양천구(2.72), 영등포구(2.71), 동대문구(2.61) 순으로 높았으며,  $z_d$  평균은 중구(9.53), 강남구(9.18), 송파구(8.55), 영등포구(8.35), 서초구(8.16) 순으로 높았다. 특히,  $\lambda_p$ 가 높고  $\lambda_f$ 가 낮은 차이로 인해 중구의  $z_d$ ,  $z_0$  편차가 두드러졌



**Table 5.** Gu-district property of  $\lambda_p$ ,  $\lambda_f$ ,  $z_d$ , and  $z_0$  in Seoul EBP (Effective Building Parcel).

Gu-district name	EBP Area (km <sup>2</sup> )	Percentile (EBP/Gu)	$\lambda_p$	$\lambda_f$	$z_d$ (m)	$z_0$ (m)
Songpa	18.03	53.56	0.26	0.12	8.55	3.64
Gangnam	23.85	62.04	0.25	0.11	9.18	3.30
Yangcheon	13.44	75.35	0.27	0.10	7.50	2.72
Yeongdeungpo	14.29	66.15	0.31	0.10	8.35	2.71
Dongdaemun	12.48	86.24	0.33	0.10	7.55	2.61
Seochu	17.70	36.95	0.26	0.10	8.16	2.58
Guro	13.38	67.51	0.27	0.09	7.12	2.55
Seongdong	10.10	61.02	0.30	0.09	6.83	2.32
Seongbuk	15.34	62.93	0.31	0.10	7.01	2.15
Mapo	12.99	52.78	0.29	0.09	7.61	2.12
Gangdong	13.36	52.45	0.27	0.09	6.98	2.09
Jung	9.02	89.64	0.31	0.09	9.53	2.02
Gwangjin	9.84	55.58	0.35	0.09	6.81	1.75
Gangseo	15.27	35.67	0.30	0.09	6.55	1.66
Gangbuk	9.59	40.45	0.36	0.09	5.91	1.63
Yongsan	10.19	48.04	0.30	0.07	5.57	1.49
Jungnang	10.36	57.73	0.35	0.09	6.23	1.35
Dobong	10.16	49.03	0.26	0.07	5.49	1.31
Dongjak	12.02	69.08	0.31	0.08	6.23	1.30
Geumcheon	8.36	66.55	0.34	0.07	6.54	1.18
Nowon	15.36	43.18	0.21	0.07	4.67	0.99
Seodaemun	11.37	64.76	0.31	0.07	5.41	0.98
Eunpyeong	14.58	46.58	0.31	0.07	5.31	0.84
Gwanak	11.24	37.64	0.37	0.08	5.51	0.61
Jongno	11.73	49.29	0.29	0.05	5.26	0.58

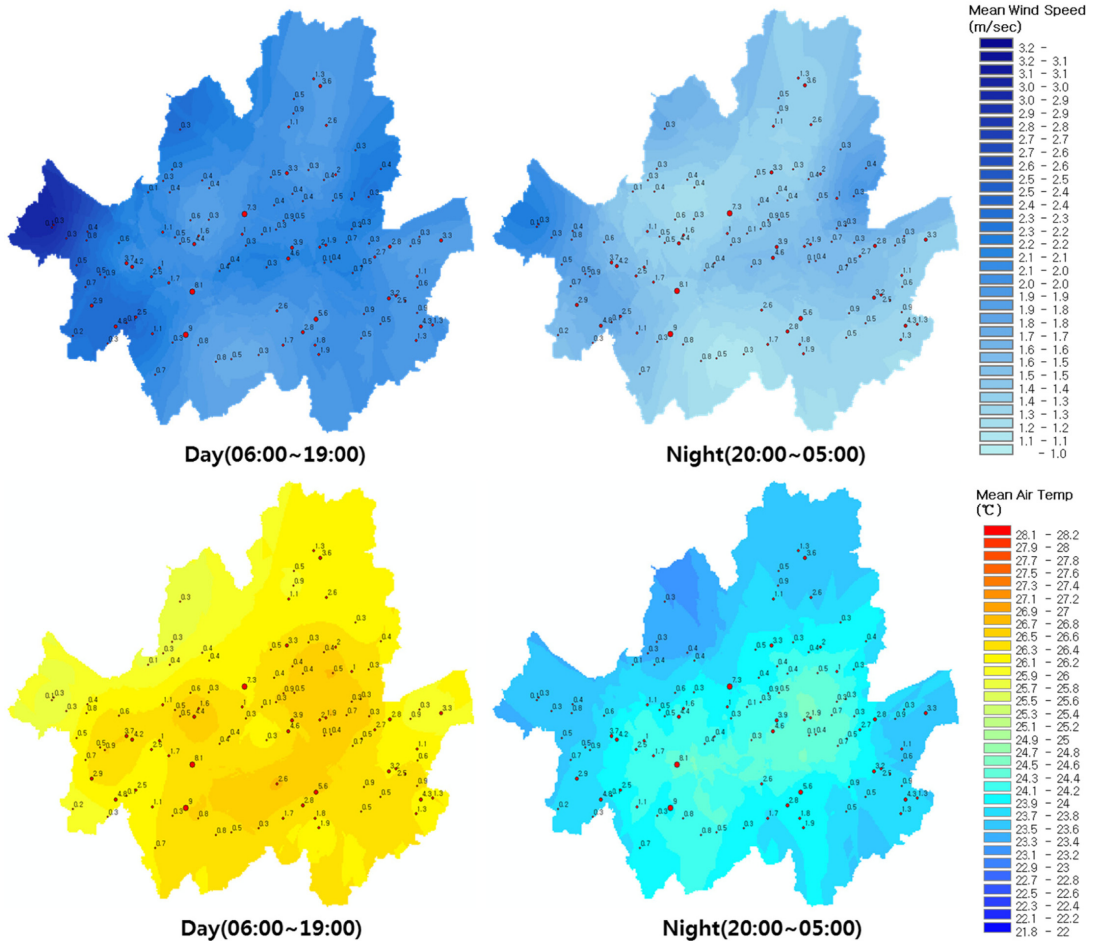


**Fig. 5.** Buildings and parcels of Jung-gu (a) and Gangnam-gu (b) and statistical mean value of  $z_d/z_H$ ,  $z_0/z_H$  about gu districts.

**Table 6.** Land use property of  $\lambda_p$ ,  $\lambda_{fs}$ ,  $z_{ds}$  and  $z_0$  in Seoul EBP.

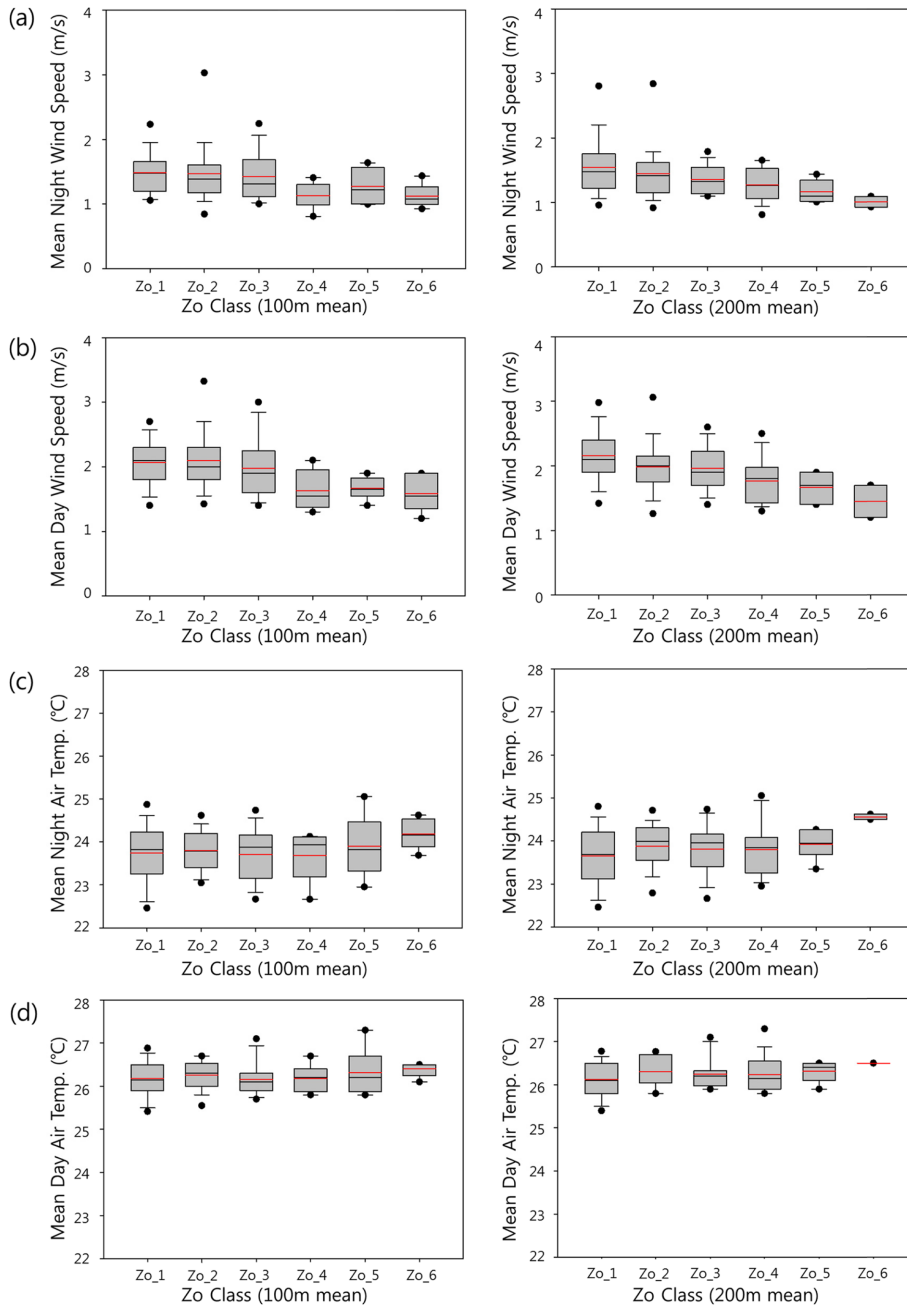
Land Use Type	Biotop LU (A)	EBP_LU (B)	(B)/(A) (%)	MEAN $z_d$	STD $z_d$	MEAN $z_0$	STD $z_0$
Bare soil	12.2	8.7	71.0	9.3	9.9	4.2*	7.8
Residential area	118.8	111.1	93.5	8.0	6.8	3.4	6.4
Traffic area	66.1	41.4	62.6	7.0	6.7	2.0	4.8
Commercial and business area	35.9	32.5	90.5	8.9	8.2	1.6	4.1
Water	49.2	2.9	5.9	4.1	4.2	1.5	5.5
Green area and open space	188.2	21.7	11.5	3.7	3.8	1.0	3.1
Special area	14.5	0.7	5.0	4.9	4.3	0.7	2.3
Mixed area (Residential and commercial)	77.8	76.0	97.7	6.1	3.7	0.7	2.6
Urban supporting facilities	6.7	1.3	19.1	3.5	3.1	0.6	2.3
Industrial area	6.1	4.1	67.3	7.4	4.9	0.5	1.8
Public use area	32.8	23.3	71.2	4.5	3.4	0.4	1.4

\* High  $z_0$  value of bare soil LU type is caused from the data integrity problem. Most of bare soil LU area was changed to residential area (high-rise buildings) due to the heavy LU activities in Seoul.



**Fig. 6.** Mean wind speed and mean air temperature of Seoul (Kriging interpolation). Scaled red points and texts show mean  $z_0$  of 107 AWSs (200 m radii circle mean).





**Fig. 7.** Box plots of mean wind speed and air temperature during day time (06:00~19:00) and night time (20:00~05:00) for two cases ( $z_0$  class of AWSs derived from 100 m radii circles and 200 m radii circles). The range of  $Zo_1$ ~ $Zo_6$  classes follows Table 2.

는데 이는 필지가 관리되는 역사와 관련이 있는 것으로 판단된다. Figure 5는 중구(a)와 강남구(b)의 필지별 건물 배치와 구별  $z_d/z_H$ ,  $z_0/z_H$  (c)를 보여주고 있다. 중구에는 하나의 필지에 여러 저층 건물들이 들어서고 건물과 필지의 불일치가 일반적인 반면, 강남의 경

우 하나의 필지에 하나의 고층 건물이 들어서는 필지-1다세대 주택체계가 일반적이었다.

서울시 도시생태현황도(biotope)의 토지이용 분포에 의하면 녹지 및 오픈스페이스(188.2 km<sup>2</sup>) 면적이 가장 크고 다음으로 주거지(118.8 km<sup>2</sup>), 주거 및 상업 혼합

**Table 7.** Pearson's correlation coefficient for the parameters studied. N = 107.

	Mean night wind speed	Mean night air temp.	Mean day wind speed	Mean day air temp.	$z_0$ (200 m mean)	$z_0$ (100 m mean)
Mean night wind speed	1					
Mean night air temp.	-.082	1				
Mean day wind speed	.874	-.077	1			
Mean day air temp.	-.319	.773	-.396	1		
$z_0$ (200 m mean)	-.303	.193	-.398	.163	1	
$z_0$ (100 m mean)	-.234	.157	-.339	.120	.839	1

지(77.8 km<sup>2</sup>), 교통시설지(66.1 km<sup>2</sup>), 하천 및 호소(49.2 km<sup>2</sup>) 순으로 분포하고 있다. 그러나 EBP 영역에서는 녹지 및 오픈스페이스와 하천 및 호소가 제외되기 때문에, 주거지(111.1 km<sup>2</sup>), 주거 및 상업혼합지(76.0 km<sup>2</sup>), 교통시설지(41.4 km<sup>2</sup>), 상업 및 업무지(32.5 km<sup>2</sup>), 공공용도지(23.3 km<sup>2</sup>) 순으로 분포하였다. 토지이용별  $z_0$  평균은 주택지(3.2), 교통시설지(2.0), 상업 및 업무시설지(1.6) 순으로 높았다. 나지의  $z_0$  평균(4.2)이 높았지만 이는 은평 뉴타운과 같은 도시개발이 서울시 토지이용 DB 내에 나지에서 주거지로 갱신되지 않았기 때문이다. 최근 20년간 서울시의 개발지구 지정 및 토지개발이 대부분의 나지를 대상으로 수행되었고 더불어 초고층건물 형태로 건설되어 나지의 평균 거칠기 길이를 크게 증가시켰다. 하천 및 호소의  $z_0$  평균(1.5)은 하천 주변의 고층 건물 필지 중 일부가 EBP로 편입되면서 발생하였다(Table 6).

민간 기상모니터링 지점 중 관측기간 동안 품질이 양호한 107개 지점에 대해 풍속 및 온도 분포를 ESRI社의 ArcMap S/W의 kriging 기법을 적용해 내삽한 결과 주간과 야간 모두 도심의 풍속이 약하고 강변 및 외곽의 평야지대에서 풍속이 강하게 나타났으며 도시를 중심으로 높은 온도가 유지되는 전형적인 도시열섬 패턴을 보여주고 있었다(Fig. 6).

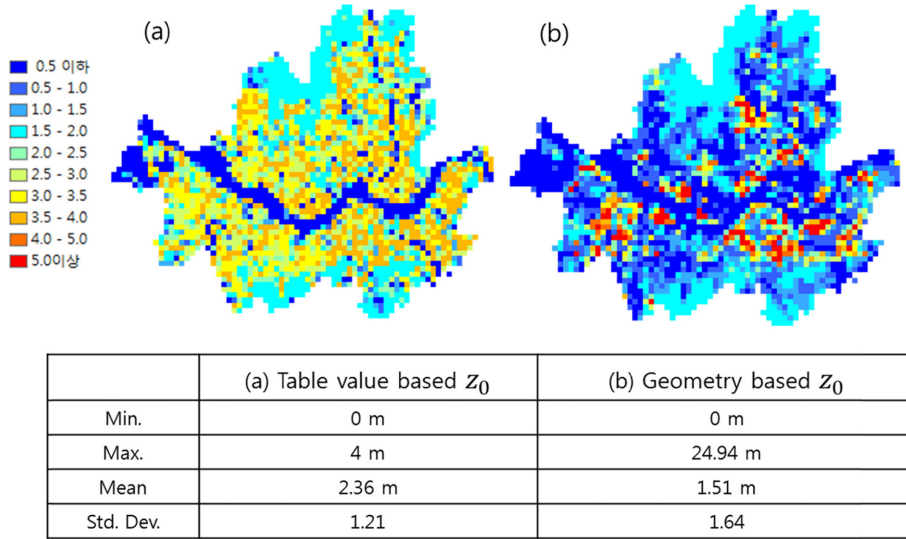
산출된 서울시  $z_0$  공간분포를 평가하기 위해 107개 관측지점별 100 m와 200 m 반경으로부터 평균  $z_0$ 를 각각 추출하였고,  $z_0$  크기에 따라 7개의 클래스로 분류하였다. 관측자료로부터 주간과 야간의 풍속 및 온도 분포를 상자도표로 출력한 결과,  $z_0$ 가 증가함에 따라 풍속이 감소하고 온도가 증가하는 경향이 주간 및 야간에서 모두 나타났다(Fig. 7). 풍속은 주간이 야간보다 약 0.5 m sec<sup>-1</sup> 높았으나 주간의 변동 폭이 크게 나타났다. 온도는 주간이 야간보다 약 3°C 높게 나타났으나 100 m 반경으로부터 구한  $z_0$  클래스의 온도 분포경향이 다르게 나타났다. 전반적으로, 200 m 반경으로부터 구한  $z_0$  평균의 클래스 내에서 이상치(outlier)의 분포가 주간 및 야간 모두에서 100 m 반경을 이용하는 것보다 줄어들어, 200 m 반경으로부터 평균한  $z_0$  클래스가 비교에 더 적합한 것으로 나타났다.

상관분석 결과 야간에는 평균 풍속과 반경 100 m 평균  $z_0$ 와의 상관계수가 -0.234, 200 m 평균  $z_0$ 와의 상관계수가 -0.303이었다. 주간에는 평균 풍속과 반경 100 m 평균  $z_0$ 와의 상관계수가 -0.339, 200 m 평균  $z_0$ 와의 상관계수가 -0.398이었다. 평균 온도와 평균  $z_0$ 는 상관성이 낮게 나타났다(Table 7). 그러나 검색반경 적용에 따른  $z_0$  클래스의 이동이 50개 지점에서 발생했으며 상위  $z_0$  클래스에서의 이동비율이 크게 나타났다고 이동 범위는 Zo\_1~Zo\_3 클래스 수준으로 평균을 취하는 범위에  $z_0$  클래스가 민감한 것으로 나타났다.

#### 4. 고찰

도시의 공기역학적 거칠기 속성들은 지표면 마찰, 난류강도와 규모, 풍속 및 연직 바람분포 등에 영향을 미친다(Landsberg, 1981; Ng et al., 2011). 서울시  $z_0$  속성들에 대한 체계적 연구는 WISE project<sup>1</sup>에서 개발하고 있는 WISE 도시미기상 모델(Choi et al., 2013), 도시미세기후분석 모델(Yi et al., 2011; Yi et al., 2012; Kim et al., 2014; Yi et al., 2015), 대기확산 모델의 정확도 향상에 기여할 것이다. 예로 도시미세기후분석 모델(Climat Analysis Seoul, CAS)의 입력자료로 사용되는  $z_0$ 를 500 m 해상도로 만든 격자자료와 본 연구를 통해 산출된  $z_0$  격자자료를 비교한 결과 공간적인 분포와 통계적인 수치는 확연하게 구별되는 특징을 보여준다(Fig. 8). (a)는 CAS에 입력된 참조표(reference table) 기반의 토지피복별  $z_0$  계수를 공간적 대리자(spatial surrogate)인 10 m 해상도 토지피복 자료에 적용하여 500 m × 500 m 격자에 평균한 자료이다. 반면, (b)는 (a)에 사용된 10 m 해상도의  $z_0$  레이어로부터 EBP 영역에 대해 건물형상으로부터 추출된 필지 기반  $z_0$ 를 치환하여 500 m × 500 m 격자에 평균한 자료이다. (a)와 (b)의  $z_0$  비교 결과 통계적으로는 서울시 지면 거칠기길이의 평균이 낮아지고 표준편차는 높아졌으며, 공간적으로는 한강변 바람길 외

<sup>1</sup>WISE project : Weather Information Service Engine project, 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발 사업.



**Fig. 8.** Spatial  $z_0$  distribution of Climate Analysis Seoul model (land use surrogate with  $z_0$  reference table value) (a) and spatial distribution of geometry based  $z_0$  with for compute building morphological parameters, efficiently (b).

에도 통풍이 발달할 수 있는 도심 곳곳의 공간들이 다수 분포하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 연구 결과들은 CAS에 적용되는 중규모 및 국지규모 모델링을 통해서 서울시의 대기 환경을 보다 정확하게 추정할 수 있을 것이다. 이는 기상모델링 및 풍동실험이 어려운 도시계획가들에게 도시 고유의 형태적 특성을 이용한 도시열섬 및 대기오염 현상에 따른 통풍환경의 이해와 도시계획 활동에 도움을 줄 것이다 (Gál and Unger, 2009; Ng et al., 2011).

그러나 일부 필지 기반의 서울시  $z_0$  연구 결과가 보여주듯이 필지와 건물의 관계가 체계적이지 않은 상황에서는  $z_0$ 가 자치구들의 필지 관리 역사나 정책에 따라 영향을 받을 수 있어서, 이를 보완하는 작업과 더불어 상세하고 검증 가능한 산출체계가 필요할 것이다. 본 연구에서는 도시 전반의  $z_0$  연구 및 모델링 응용을 위해 선결되어야 할 추가적인 과제들을 아래와 같이 정리하였다.

● 서울의 지형적 특성 - Gál and Unger (2009)의 연구지역인 세게드(Szeged, Hungary, 280.8 km<sup>2</sup>)는 평지에 가까운 지형이었으나 Ng et al. (2011)의 연구지역인 홍콩은 해안에 가까운 산지지형으로 국지지형과 해륙풍(육지와 해양의 열적 순환) 체계가 인근 도시 캐노피 레이어의 풍향에 심각한 변화를 야기할 수 있어 고려가 필요함을 언급하였다.

서울은 인천 서쪽 해안평야와 이어져 서쪽이 낮고 동쪽이 높으며 북한산(836 m), 도봉산(740 m), 불암산(508 m), 봉화산(138 m), 아차산(287 m), 관악산(629 m), 용마산(348 m), 일자산(150 m), 대모산(293 m), 청계산

(618 m), 우면산(293 m), 관악산(632 m), 굴봉산(145 m), 개화산(132 m), 남산(262 m) 등 50여 개 산들로 둘러싸인 분지형으로 약 800 m의 표고 차를 이루고 있어  $z_0$  연구에 있어 지형의 고려가 필요하다. Chappell and Heritage (2007)는 평지에서 흐르는 공기속도와 거칠기 요소의 높이에 의해 풍하층에서 분리가 발생하는 것을 함수화할 수 있다는 전제를 두고, 공기역학적 흐름의 저항에 대한 추정을 다양한 규모에서 단일화하는 모델을 제안하였다. 이를 지형효과(geometric anisotropic effect)에 적용하여 바람방향과 지면의 각도에 따라  $z_0$  관련 속성들의 수치적 변화가 심각하게 나타날 수 있음을 모델 추정을 통해 언급한 바 있다(Chappell et al., 2010). 이와 같은 관련 연구들(Tian et al., 2011; Zhou et al., 2012)에서 언급하듯이, 서울과 같은 복잡한 지형과 지표특성을 효과적으로 반영하는  $z_0$  연구가 진행되어야 할 것이다.

● EBP의 외부 및 다양한 거칠기 요소 반영 - 서울시 면적의 46%가 EBP 외부 지역으로서 본 연구에서 고려되지 않았으며 서울시 면적의 약 40%를 차지할 것으로 추정되는 도시 숲 및 가로수 등이  $z_0$ 에 영향을 미칠 수 있는 장애 (obstacle) 요소들로 고려되지 않았다. 식생(vegetation)에 의한 거칠기길이 연구들(Burian et al., 2004; Colin and Faivre, 2010)에 의하면 지역별로 차이가 있으나 공업단지나 주거지보다 높게 나타나고 있어 이를 반영할 경우 서울시  $z_0$ 의 공간적 분포와 통계적 분포가 바뀔 것으로 추정된다. 더불어 격자 기반 수치모델링 지원을 위해서는 현재의  $z_0$  산출 공간 범위의 확대가 필요할 것이다.

● 관측 및 검증 - 본 연구에서 적용한 고밀도 관측 자료는 서울시 전반의 바람분포 특성을 상세하게 파악하는데 도움이 되었으나 단일고도에서 관측되어 연직 분포 분석이 수행되지 않았다. 현재 KoFlux 타워(Hong et al., 2003) 및 대기환경연구를 위한 타워들은 주로 서울 외곽에서 운영되고 있어, 도시지역 연구에 제약이 되고 있다. 현재 WISE project(www.wise2020.org)를 통해 설치된 종로구(KT 광화문 지사), 중랑구(KT 중랑 지사) 등에 설치된 타워 관측(Kwon et al., 2014)이 누적된다면 추후 관측을 통한 검증이 수행될 것이다. 더불어 거칠기길이 관측 범위의 제약 등을 고려할때 향후 풍동실험(Dong et al., 2003; Ng et al., 2011), SODAR (SOund Detection And Ranging) 관측(Moore and Bailey, 2004), 항공 및 위성 원격탐사 등 여러 연구들이 제안하는  $z_0$  산출 방법과 비교하여 서울시  $z_0$  분석의 신뢰성을 향상시켜야 할것이다.

## 5. 결 론

본 연구는 도시규모의 국지적 기상 및 기후연구에서 활용할 수 있는 공기역학적 UCP 연구 일환으로, 서울시를 대상으로 수치지도 기반 도시의  $z_0$  산출방법을 적용 및 평가하였고 향후 서울시  $z_0$  연구를 위한 필요한 과제들을 정리하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

도시의 입체적인 구조를 상세하게 설명하는 수치지도 등을 이용하여  $z_0$ 와 같은 UCP 연구가 시·도 단위의 넓은 영역에 걸쳐 적용됨으로써 대기 물리 과정을 수치적으로 모수화하거나 국지모델이나 지역모델 등 수치모델 운영을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것이다. 구축된 서울시를 대상으로 산출된  $z_0$ 를 계급화 하여 고밀도 AWS 관측자료와 비교한 결과 주간과 야간 모두  $z_0$ 가 증가할수록 풍속은 감소하고 온도는 증가하였다. 산출된 결과를 도시미세기후분석 모델  $z_0$ 와 비교한 결과 공간적인 설명능력이 더 높은 것으로 판단되나 추가적인 평가 연구가 필요하다. 향후 현재 구축된  $z_0$  산출방법 및 결과를 보완하고 연직분포 관측을 통한 검증체계 구축이 진행될 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업의 지원으로 수행되었습니다(KMA-2012-0001).

## REFERENCES

Barlag, A. B., and W. Kuttler, 1991: The significance of

country breezes for urban planning. *Energ. Buildings*, **15**, 291-297.

Bottema, M., 1996: Roughness parameters over regular rough surfaces: Experimental requirements and model validation. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **64**, 249-265.

\_\_\_\_\_, and P. G. Mestayer, 1998: Urban roughness mapping-validation techniques and some first results. *J. Wind Eng. Ind. Aerod.*, **74**, 163-173.

Burian, S. J., W. S. Han, and M. J. Brown, 2003: Morphological analyses using 3D building databases: Oklahoma City, Oklahoma. *LA-UR, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos*.

\_\_\_\_\_, S. W. Stetson, W. Han, J. Ching, and D. W. Byun, 2004: High-resolution dataset of urban canopy parameters for Houston, Texas. In Preprint proceedings. *Fifth Symposium on the Urban Environment*, AMS, 23-26 pp.

Chappell, A., and G. L. Heritage, 2007: Using illumination and shadow to model aerodynamic resistance and flow separation: An isotropic study. *Atmos. Environ.*, **41**, 5817-5830.

\_\_\_\_\_, S. Van Pelt, T. Zobeck, and Z. Dong, 2010: Estimating aerodynamic resistance of rough surfaces using angular reflectance. *Remote Sens. Environ.*, **114**, 1462-1470.

Choi, Y., S. L. Kang, J. Hong, S. Grimmond, and K. J. Davis, 2013: A next-generation Weather Information Service Engine (WISE) customized for urban and surrounding rural areas. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, ES114-ES117.

Cionco, R. M., and R. Ellefsen, 1998: High resolution urban morphology data for urban wind flow modeling. *Atmos. Environ.*, **32**, 7-17.

Colin, J., and R. Faivre, 2010: Aerodynamic roughness length estimation from very high-resolution imaging LIDAR observations over the Heihe basin in China. *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, **14**, 2661-2669.

Dong, Z., X. Liu, H. Wang, and X. Wang, 2003: Aeolian sand transport: a wind tunnel model. *Sediment. Geol.*, **161**, 71-83.

Gál, T., and Z. Sümegehy, 2007: Mapping the roughness parameters in a large urban area for urban climate applications, *Acta Climatologica et chorologica, Universitatis Szegediensis*, **Tomus, 40-41**, 27-36.

\_\_\_\_\_, and J. Unger, 2009: Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. *Build. Environ.*, **44**, 198-206

Grimmond, C. S. B., and C. Souch, 1994: Surface description for urban climate studies: a GIS based methodology. *Geocarto International*, **9**, 47-59.

\_\_\_\_\_, and T. R. Oke, 1999: Aerodynamic properties of

- urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteorol.*, **38**, 1262-1292.
- Haala, N., and C. Brenner, 1999: Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.*, **54**, 130-137.
- Ha, K.-J., A.-S. Suh, and H.-S. Chung, 1998: The application of satellite data to land surface process parameterization in ARPS model. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, **1**, 99-108.
- Hong J., H. C. Lee, J. Kim, B. Kim, C. Cho, and S. Lee, 2003: Inferring regional scale surface heat flux around FK. KoFlux site: From one point tower measurement to MM5 mesoscale model. *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, **5**, 138-149.
- Kanda, M., A. Inagaki, T. Miyamoto, M. Gryschka, and S. Raasch, 2013: A new aerodynamic parametrization for real urban surfaces. *Bound.-Layer Meteor.*, **148**, 357-377.
- Kwon, T. H., M. S. Park, C. Yi, and Y. J. Choi, 2014: Effects of different averaging operators on the urban turbulent fluxes. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 197-206.
- Kim, K. R., C. Yi, J.-S. Lee, F. Meier, B. Jaenicke, U. Fehrenbach, and D. Scherer, 2014: BioCAS: Biometeorological climate impact assessment system for building-scale impact assessment of heat-stress related mortality. *Die Erde.*, **145**, 62-79.
- Landsberg, H. E., 1981: *The Urban Climate*. Academic Press, Inc. (London) Ltd., London.
- Lee, Y.-H., and S.-U. Park, 1997: Modification of boundary layer by a change of surface roughness. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 445-456.
- Macdonald, R. W., R. F. Griffiths, and D. J. Hall, 1998: An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864.
- Moore, K., and B. Bailey, 2004: Roughness lengths in complex terrain derived from sodar wind profiles. In 16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence.
- Ng, E., C. Yuan, L. Chen, C. Ren, and J. C. Fung, 2011: Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong. *Landscape Urban Plan.*, **101**, 59-74.
- Oke, T. R., 1987: *Boundary Layer Climates*. Methuen, Inc., USA.
- Priestnall, G., J. Jaafar, and A. Duncan, 2000: Extracting urban features from LiDAR digital surface models. *Computers, Environment and Urban Systems*, **24**, 65-78.
- Ratti, C., and P. Richens, 1999: Urban texture analysis with image processing techniques. *Computers in Building*, Springer US, 49-64 pp.
- \_\_\_\_\_, S. Di Sabatino, and R. Bitter, 2006: Urban texture analysis with image processing techniques: wind and dispersion. *Theor. And Appl. Climatol.*, **84**, 77-99.
- Raupach, M., 1992: Drag and drag partition on rough surfaces. *Bound.-Layer Meteor.*, **60**, 375-395.
- Saatchi, S., E. Rodriguez, S. Denning, and R. Dubayah, 2001: Estimation of aerodynamic roughness from synergistic use of satellite imagery. *Proceeding of IGARSS*, Sydney, Australia.
- Steiniger, S., T. Lange, D. Burghardt, and R. Weibel, 2008: An approach for the classification of urban building structures based on discriminant analysis techniques. *Transactions in GIS*, **12**, 31-59.
- Tian, X., Z. Y. Li, C. Van der Tol, Z. Su, X. Li, Q. S. He, Y. F. Bao, E. X. Chen, and L. H. Li, 2011: Estimating zero-plane displacement height and aerodynamic roughness length using synthesis of LiDAR and SPOT-5 data. *Remote Sens. Environ.*, **115**, 2330-2341.
- Voogt, J. A., and T. R. Oke, 1997: Complete urban surface temperatures. *J. Appl. Meteorol.*, **36**, 1117-1132.
- Vukovich, F. M., 1971: Theoretical analysis of the effect of mean wind and stability on a heat island circulation characteristic of an urban complex. *Mon. Wea. Rev.*, **99**, 919-926.
- Yi, C., S. M. An, K. R. Kim, Y.-J. Choi, and D. Scherer, 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**, 144-158.
- \_\_\_\_\_, J.-H. Eum, Y.-J. Choi, K. R. Kim, D. Scherer, U. Fehrenbach, and G.-H. Kim, 2011: Development of Climate Analysis Seoul (CAS) maps based on landuse and meteorological model. *Journal of the Korean association of geographic information studies.*, **14**, 12-25.
- \_\_\_\_\_, K. R. Kim, S. M. An, Y. J. Choi, A. Holtmann, B. Janicke, U. Fehrenbach, and D. Scherer, 2015: Estimating spatial patterns of air temperature at building-resolving spatial resolution in Seoul, Korea. *Int. J. Climatol.*, doi:10.1002/joc.4363.
- Yoo, J., J. K. Hong, H. Kwon, J.-H. Lim, and J. Kim, 2010: On Estimation of Zero Plane Displacement from Single-level Wind Measurement above a Coniferous Forest. *Korean J. Agric. Forest Meteor.*, **12**, 45-62.
- Zhou, Y., X. Sun, W. Ju, X. Wen, and D. Guan, 2012: Seasonal, diurnal and wind-direction dependent variations of the aerodynamic roughness length in two typical forest ecosystems of China. *Terr. Atmos. Oceanic Sci.*, **23**, 181-191.