

# 도시규모 고해상도 하늘시계지수 지도의 구축 및 활용방향 고찰: 수원특례시를 대상으로\*

## A Study on Urban Scale High-Resolution Sky View Factor Mapping and Applications

안승만 An Seung Man\*\*

### Abstract

A sky view factor (SVF) is a dimension-reduced urban canopy parameter (UCP) that captures three-dimensional urban surface morphologic form through a horizontal fraction. This study developed an urban scale high-resolution (2 m) sky view factor (SVF) raster mapping method and discussed it for further applications. The study site is Suwon administrative area, South Korea (121.04 km<sup>2</sup>), with a population of close to 1.3 million. In this study, airborne LiDAR-based three-dimensional point cloud (3DPC) data were used as an input to build urban scale high-resolution SVF raster maps. Two types of SVF maps (GB and GBH) are compared to describe the tree effect using Zonal statistics quantitatively. Results visually and statically explain a relationship between land-use-based urban surface form and the SVF difference map derived from two SVF raster (GB - GBH). The SVF difference average value explains the tree effect which mitigates micro-climate as a land cover lessens solar radiation on hot summer days. A further application research study about the high-resolution SVF map should follow to develop scientific knowledge and support climate-friendly urban planning.

Keywords: Urban Micro-climates, Land-use, Tree Vegetation, Sky View Factor, Airborne LiDAR, Three-dimensional Point Cloud

### I. 서론

기후변화가 빨라지고 도시열섬 강도가 증가하면서 도시의 여름은 더 더워지고 겨울은 더 추워지고 있으며, 이는 온도변화 적응에 취약한 생명체의 긴장감(Stress)을 높이고 보건을 위협한다(Hsu, Sheriff, Chakraborty and Manya 2021). 하늘시계지수(Sky View Factor, SVF)는 토지이용이 만드는 도시의 외형과 미기후의 관계

를 설명하는 지표이다. 3차원적인 도시의 외형을 1차원으로 압축한 계량적 지표로서, 지면을 덮고 있는 피복의 기능을 평가할 수 있다(Middel, Lukasczyk, Maciejewski and Demuzere et al. 2018). 하늘시계지수 관련 요인을 지도로 관리하려는 여러 연구에서 토지이용과 관련한 정착물의 형상과 미기후 기능의 상호작용을 계량적으로 설명할 방법론이 발전해 왔다(Oke 1982; Bruse and Fleer 1998; Carneiro, Morello and

\* 본 논문은 행정안전부 자연재난 정책연계형 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2020-MOIS35-001).

\*\* 국토연구원 국토환경·자원연구본부 연구위원 | Research Fellow, National Territorial Environment & Resources Research Devison, Korea Institute for Human Settlements | sm\_an@krihs.re.kr

Desthieux 2009; Lindberg and Grimmond 2011; Kastendeuch 2013; An, Kim, Lee and Kim et al. 2014). 도시의 형태를 압축한 하늘시계지수를 최근에는 도시 열섬의 완화나 미세먼지 농도 저감을 위한 연구에서도 활용하고 있으나(Middel, Lukasczyk, Maciejewski and Demuzere et al. 2018; Shaker, Altman, Deng and Vaz et al. 2019; Miao, Yu, Hu and Bu et al. 2020; Heo, Lee, Park and Kim 2021) 공간적 상세성과 적용 범위를 지속해서 향상할 수 있는 기반이 체계적으로 논의되고 있지 못하다. 식생처럼 상세한 도시의 미시적 피복 형태를 묘사하면서도 넓은 도시의 외형을 총체적으로 살필 자료처리 방법과 컴퓨터 연산 성능 향상 기술 적용이 필요하다.

이 연구의 목적은 도시공간 전체에 대하여 지형 및 정착물의 형상이 가지는 미기후 영향을 고해상도의 하늘시계지수 지표로 압축하여 지도화하고 조사에 활용하는 방법론을 제시함에 있다. 더불어 이를 고해상도로 발전하지 못하고 있는 타 도시 미기후 정보와 연계·활용 방안도 고찰하였다.

## II. 연구방법

### 1. 선행연구

도시공간의 미기후 요인은 주로 도시를 구성하는 토지의 정착물 형태나 물리적 기능과 관련이 깊다(Oke 1982). 풍향, 풍속, 기온, 습도 등 도시의 물리적 환경을 측정할 값을 도시의 토지 및 정착물의 형태와 연결하여 설명하는 여러 연구에서 하늘시계지수는 주간의 지표면 직달·산란일사 또는 야간의 지면 복사 영향을 설명하는 인자로서 기술된다. Lindberg and Grimmond(2011)는 인체의 온열감에 영향을 주는 여러 외부환경 요인 중에서 하늘시계지수를 중요한 인자로 보았고, UMEP

(The Urban Multi-scale Environmental Predictor) 모델을 통해서 하늘시계지수와 관련한 중요성을 구체화하였다. 미기후에 미치는 영향이 지대하므로 이를 상세하게 조사·분석하는 연구가 이어지고 있다.

An, Kim, Lee and Kim et al.(2014)은 항공 레이저 측량 자료에서 분류된 높이 2m 이상의 식생 관련 자료를 입력 자료로 하여, 하늘시계지수 변화량을 정교하게 구하는 방안을 제시하였다. 그러나 그들은 제시한 연구방법론으로 500m×500m 범위의 자료를 처리하였을 뿐, 도시 단위로 처리해야 할 규모의 하늘시계지수 지도 작성은 향후 과제로 미루었다. 도시 단위 크기로 하늘시계지수 연구를 확장하기 위해서는 체계적인 절차와 병렬적 연산이 마련되어야 한다. 지면의 관측지점 주변에 들어선 숲과 건물 등 도시의 여러 정착물 외형을 1차원인 하늘시계지수로 압축해서 고해상도로 계산하고, 이를 도시 전체로 확대하기 위한 방법론이 필요하다. 더불어 하늘시계지수와 관련한 여러 미기후 상호작용을 탐색하여 고해상도 도시 미기후 지도 작성으로 연계·활용할 방안도 필요하다.

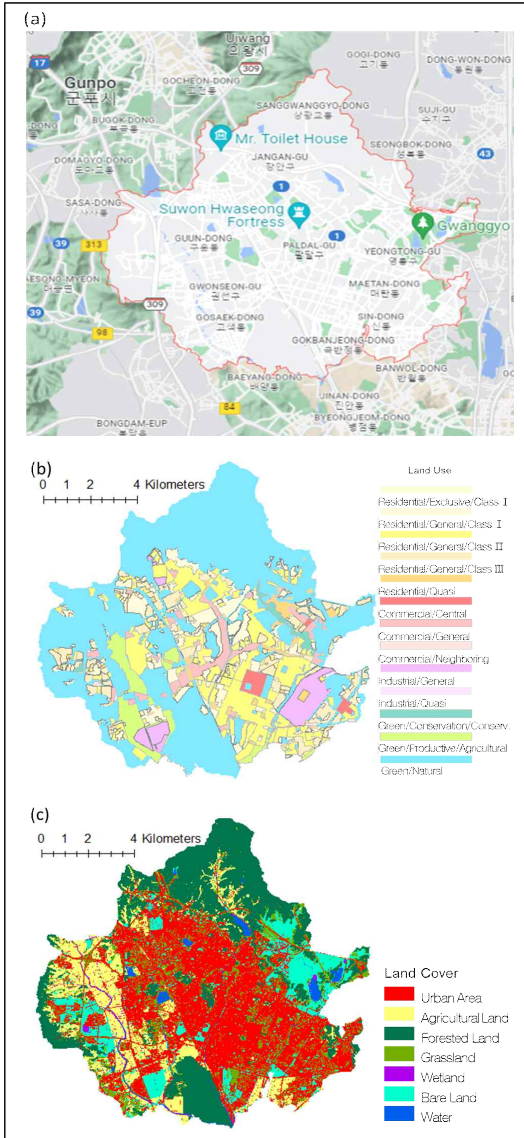
### 2. 수행방법

#### 1) 연구대상지

연구대상지는 경기도 남서부에 위치한 수원특례시로 면적은 121.04km<sup>2</sup>이다. 광주산맥·광교산과 연결된 구릉이 발달한 분지에 자리를 잡고 있으며, 대체로 동북쪽 지형이 높고 남서 방향을 향해 완만하게 경사져 내려온다. 북쪽에 백운산과 광교산이 높은 구릉을, 서쪽 외곽에 칠보산이 낮은 구릉을 이룬다.

토지이용 현황은 서울처럼 도시 전체가 도시지역으로 지정되었으며 자연녹지(<Figure 1(b)>와 <Table 1> UQA 430 참조)의 비중이 가장 크고(54.8%), 상업

Figure 1 \_ Study Site: Suwon City



Note: (b) Land Use Zoning, © Land Cover  
Source: Figure 1(a): Google Maps.

지역이 4.2%, 공업지역이 3.2%, 주거지역이 33.2%를 차지하고 있다. 주거지역 용도의 절반 정도(15.7%)는 제2종 일반주거지역이다.

환경부 토지피복 분류에 따르면, 수원시 도시지역 피복 면적은 37.4%로 주거·상업·공업지역 비율과 비슷하지만, 농지(13.0%), 산림(24.2%), 초지(12.1%), 습지(0.7%), 나지(10.9%), 물(1.7%) 분포는 같은 용도지역 토지이용 유형과 다른 분포를 보인다(<Figure 1(c)>, <Table 2> 참조). 도로(Code:154)는 도시(Code:100) 피복 면적의 59.4%(2,686.1ha)를 차지하며 수원시 전역을 고루 연결하고 있다. 산림 피복 면적의 57.8%(1,692.4ha)를 차지하는 활엽수림은 주로 광고산에, 침엽수림(803.1ha)은 철보산과 도시 인근 야산에 분포한다.<sup>1)</sup> 피복 유형이 불명확한 기타가 나지의 90.9%(1,200.5ha)이다.

Table 1 \_ Land-use Zone Area in Suwon

UQA_I3					
Type		No. (ea)	Sum (ha)	Sum (%)	
Residential	Class I Exclusive	UQA111	4	16.1	0.1
	Class I General	UQA121	120	1,135.3	8.3
	Class II General	UQA122	158	2,153.3	15.7
	Class III General	UQA123	89	976.1	7.1
	Quasi	UQA130	56	274.4	2.0
Commercial	Central	UQA210	3	127.1	0.9
	General	UQA220	30	428.7	3.1
	Neighboring	UQA230	9	28.5	0.2
Industrial	General	UQA320	6	424.5	3.1
	Quasi	UQA330	2	10.7	0.1
Green	Conservation	UQA410	4	105.7	0.8
	Agricultural	UQA420	9	501.9	3.7
	Natural	UQA430	86	87.1	54.8

1) 환경부 토지피복 자료는 수원 비행장 일대를 활엽수림으로 분류하고 있음.

**Table 2 \_ Land cover Class and Area in Suwon**  
(unic: ha)

L1		L2		L3	
Code	Area	Code	Area	Code	Area
100 (Urban Area)	4,522.3 (37.4%)	110	804.1	111	472.9
				112	331.1
		120	107.8	121	107.8
				131	609.5
		130	611.1	132	1.6
				141	80.1
		140	80.1	151	-
				152	-
		150	2,723.0	153	33.0
				154	2,686.1
				155	3.9
				161	2.5
		160	196.3	162	112.4
				163	81.4
				211	520.8
200 (Agricultural Land)	1,572.8 (13.0%)	210	738.6	212	217.8
				221	95.6
		220	622.2	222	526.6
				231	97.8
		230	97.8	241	67.6
				251	6.5
		250	46.5	252	40.0
310	1,692.4				
300 (Forested Land)	2,927.0 (24.2%)	320	803.1	321	803.1
				331	431.5
		330	431.5		
400 (Grassland)	1,458.1 (12.1%)	410	158.2	411	158.2
				421	24.2
		420	1,299.9	422	61.3
				423	1,214.4
				511	87.8
500 (Wetland)	87.8 (0.7%)	520		521	
				522	
600 (Bare Land)	1,319.9 (10.9%)	610	19.7	611	
				612	19.1
				613	0.5
		620	1,300.2	621	
				622	99.7
				623	1,200.5
700 (Water)	209.8 (1.7%)	710	209.8	711	68.4
				712	141.5
		720	-	721	-

데이터 종속성이 큰 본 연구의 특성<sup>2)</sup>과 백만 명을 넘는 인구수, 도시 공간의 광역성과 복잡성, 시민의 도시생태계 및 도시기후 관련 관심 등을 종합적으로 고려하여 본 연구는 수원시를 대상지로 정하였다.

**2) 자료 및 방법**

하늘시계지수 산출에는 2007년 구축된 수원시 항공 라이더(Light Detection And Ranging, LiDAR) 자료를 주 자료로 이용하였으며, 토지이용 및 토지피복과의 관련성을 정성·정량적으로 비교하기 위해서 용도지역도, 토지피복도, 정사영상을 보조자료로 이용하였다 (<Table 3> 참조).

**Table 3 \_ Used Input Data**

Data	Scale	Publication	Year
Airborne LiDAR	2.5 point/m <sup>2</sup>	NGII	2007
Ortho Photo	1/5,000	NGII	2014
Land Use	-	MOLIT	2019
Land Cover	1/5,000	MOE	2014

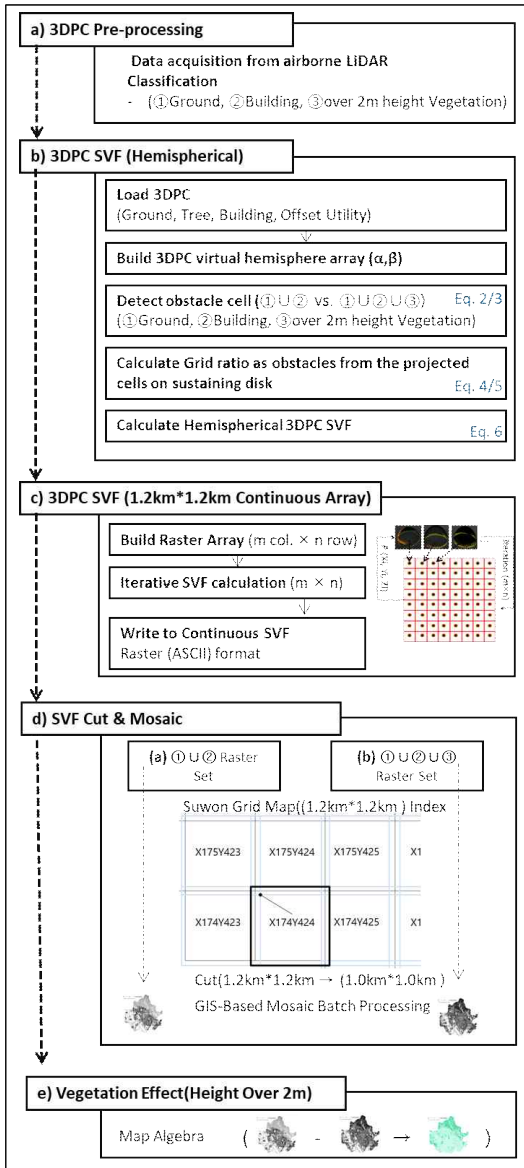
Note: MOE(Ministry of Environment), MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport).

<Figure 2>는 본 연구의 수행 과정을 보여준다. 수원시의 하늘시계지수를 상세하게 계산하여 도시 단위의 고해상도 지도로 산출하고, 이를 토지이용 및 토지피복과 비교·분석하는 과정을 구체화하였다.

하늘시계지수를 통해 복사에너지가 이동(유출입)하는 양을 가늠할 수 있다. 보행자 눈높이 또는 지면에서 가까운 위치에서 보이는 하늘의 비율인 하늘시계지수가 '1'이면 평야처럼 주변에 장애물이 없고 모든 방향에서 하늘이 열린 온전한 복사를, '0'이면 실내처럼 하늘이 전혀 보이지 않는 차단을 가리킨다.

2) 국토지리정보원에서 2002년부터 항공 레이저 측량 기술을 적용하여 수원시 데이터를 구축해왔다는 점을 고려하였음.

Figure 2 \_ Study Work Flow



지형만을 고려하여 하늘시계지수를 계산할 경우, 관측하는 지점의 하늘반구(Sky Dome)를 구성하는 각각의 격자에서 하늘이 보이는지를 판정하고 이를 세어서 전체 격자수로 나누는 <식 1>을 적용한다.

건물 또한 연결된 지면으로 가정하여 하늘시계지수에 적용할 수 있다.

$$SVF_{terrain} = \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sin \gamma_i}{n} \right) \quad \text{<식 1>}$$

$n$ 은 하늘반구를 구성하는 방향의 수( $360/\alpha$ ),  $\alpha$ 는 회전각 크기,  $i$ 는 수평각,  $\gamma_i$ 는 지형을 벗어나 하늘이 보이는 수직 각이다. 그러나 교목처럼 지면과 연결된 것으로 보기 어려운 입체적 정착물에 대해서는 별도의 하늘시계지수 계산 방법이 필요하다. An, Kim, Lee and Kim et al.(2014)은 교목으로 분류된 3차원의 식생 관련 점군(Point Cloud)을 하늘반구에 투영하는 수식과 방법론을 제시하였다.

<식 2>에서 보듯이, 하늘반구를 구성하는 격자에 식생 관련 점군을 투영하여 하나 이상의 점군이 있으면( $N(i,j) > 0$ ) 하늘을 가리는 것('1')으로 판정한다.

$$\rho(i,j)_{Tree} = \begin{cases} 1 : N(i,j) > 0 \\ 0 : otherwise \end{cases} \quad \text{<식 2>}$$

지표면과 건물로 분류된 점군에 의해 가려진 경우의 판정은 <식 3>을 적용한다.

$$\rho(i,j)_{BuildingGround} = \begin{cases} 1 : \sum_j N(i,j) > 0 \\ 0 : otherwise \end{cases} \quad \text{<식 3>}$$

하늘반구를 구성하는 수평-수직 행렬은 면적으로 계산할 수 있도록 원판에 투영하여 비율을 구해야 한다. 하늘반구를 투영한 전체면적( $\sum_i \sum_j s(i,j)$ )과 지면-건물, 수목이 하늘을 가리는 격자만을 원판에 투영해 계산한 면적( $\sum_i \sum_j \rho(i,j) \times s(i,j)$ )을 비율(Obstacle Grid Ratio)로 구한다(<식 4> 참조).

$$Obstacle\ Grid\ Ratio = \frac{\sum_i \sum_j \rho(i,j) \times s(i,j)}{\sum_i \sum_j s(i,j)} \quad \text{<식 4>}$$

구면의 하늘반구를 구성하는 격자의 투영 면적 ( $s(i,j)$ )이 다르므로 <식 5>를 통해서 평면에 투영된 격자 각각의 면적을 구한다.

$$s(i,j) = \frac{1}{2} \{R^2 - r^2\} \times \alpha \quad \text{<식 5>}$$

$R$ 과  $r$ 은 각각의 투영된  $s(i,j)$  다각형에서 원판의 중심으로부터 가장 먼 거리와 가장 가까운 거리이다. 마지막으로, 지면(Ground)과 그 위를 덮고 있는 피복 관련 하늘시계지수(1~0) 계산에 <식 6>을 적용한다.

$$SVF_{3DPC} = 1 - \text{Obstacle Grid Ratio} \quad \text{<식 6>}$$

대상지인 수원시를 구성하는 행렬 각각에 하늘시계지수를 채우면, 래스터(Raster) 형식의 하늘시계지수 지도를 만들 수 있다(<Figure 2(c)> 참조).

래스터 포맷의 수원시 고해상도 하늘시계지수 지도 작성 입출력(Input/Output, I/O) 환경에 항공 레이저 측량(Airborne Laser Scanning, ALS) 기술로 구축된 라이더(LiDAR) 자료가 입력되었다. 국토지리정보원에서 받은 3차원 점군은 입체적인 수원시 지표면 형상을 2.5pt/m<sup>2</sup> 이상 조밀하게 주사(Scan)된 해수면 높이 기준 점군이 지면, 건물, 식생으로 분류되어 있다. 구축된 시기가 2007년이므로 현재의 수원시와는 다른 외형을 일부 포함하고 있다. 1/5,000 도엽 축척으로 분할된 32개의 파일을 체계적으로 계산하기 위해서, 정사각형 규격의 120개 파일로 나누었다(<Figure 2(d)> 참조). 각 정사각형 파일에서 하늘시계지수 계산 결과로 적용할 범위는 1km×1km 면적이지만, 3차원으로 연산하는 하늘시계지수 특성을 고려해 100m 거리 완충구역(1.2km×1.2km)을 경계부에 두어 하늘시계지수를 계산하였고 모자이크 단계에서 가장자리를 제외하고 집성하였다.

An, Kim, Lee and Kim et al.(2014)의 산출 수식 및 병렬처리 계산기가 하늘시계지수 연산에 적용되었다. 지형, 건물, 식생이 분류된 항공 라이더 자료 중에서, 지형과 건물만을 이용한 하늘시계지수와 지형, 건물, 2m 높이 이상의 식생을 모두 포함하는 하늘시계지수를 120개 파일 각각에서 순차적으로 연산하였다. 항공 라이더 자료 연산 시간을 단축하기 위해 Windows Server 환경(3.6GHz CPU, 64GB RAM)의 16개 실행단위(Thread) 중 14개를 병렬처리에 할당하였다. 90(1°)×180(2°) 하늘반구를 통해 120개 파일을 2m 해상도로 처리하는 데 약 30일이 소요되었다. 생성된 ASCII 래스터(600×600, 2m)를 각각 집성하여 수원시 전체의 2m 해상도 지도를 작성하였다(<Figure 2(e)> 참조). 개별 래스터 자료 중 서로 중복되는 경계부(100m)의 처리를 위해 파이썬(Python)으로 ESRI社의 ArcGIS 모자이크(Mosaic) 기능을 자동화하였다. 집성된 하늘시계지수 지도의 중첩(Overlay) 연산을 통해, 2m 이상의 식생으로 인해 나타나는 하늘시계지수의 영향을 설명할 지도를 작성하였다(<Figure 3(c)> 참조).

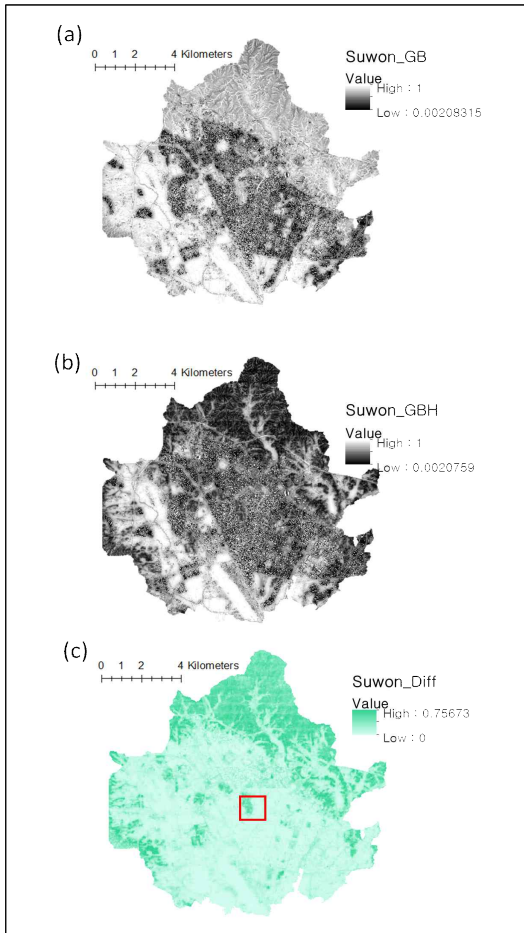
### III. 결과

#### 1. 수원시 하늘시계지수 지도(SVF Map)

도시의 옷에 해당하는, 피복의 미기후적 성능지표를 공간적으로 보여주는 수원시의 하늘시계지수 지도는 실수형 래스터(Floating Point Type Raster) 지도이다(7,227×7,001, 2m 해상도, 193MB).

지형과 건물로 분류된 점군에서 산출한 수원시 하늘시계지수 평균값은 0.71이다(<Figure 3(a)> 참조). 능선부와 평야처럼 사방으로 열린 공간에서는 하늘시계지수가 '1'에 가깝게 크고, 건물들이 밀집한 공간에서는 하늘시계지수가 작아지며 고층의 아파트 단지와

Figure 3 \_ Suwon High Resolution SVF Maps



Note: (a) SVF from ①U②.  
 (b) SVF from ①U②U③, (c)=(a)-(b).  
 ① Ground Points, ② Building Points, ③ Tree Points.  
 Red Rectangle: <Figure 5> Site Area.

상업지역 사이의 좁은 공간에서는 '0'에 가깝다.

<Figure 3(b)>는 지형, 건물, 표고 2m 이상 수목 관련 점군을 모두 이용해 산출한 하늘시계지수 지도로, 수원시 평균은 0.56이다. 산에서도 지면을 덮고 있는 숲으로 인해서 낮은 하늘시계지수 분포가 보인다. <Figure 3(a)>의 값에서 <Figure 3(b)>의 값을 제한 나머지 값은 지면으로부터 높이 2m 이상의 식생에 의한 하늘시계지수 변화를 설명한다(<Figure 3(c)> 참조).

만약에 수원시에서 2m 이상 수목들이 모두 사라진

다면 수원시 하늘시계지수 평균은 0.16 증가할 것이다. 이러한 하늘시계지수의 증가는 일사량·온도·습도 등과 관련한 외부환경이 급격히 변할 때, 지표면의 모든 생명체가 적응하기 위한 긴장이 더욱 고조될 수 있음을 시사한다.

수목과 관련해 이러한 특성을 확인할 수 있는 하늘시계지수의 공간적 분포는 생태적 균락을 이루는 산림의 수종(Tree Species), 수관밀도(Crown Leaf Density), 수고(Tree Height) 및 지형과 같은 장소적 특성에 따라서 달라진다.

<Figure 3(c)>와 <Table 4>에서 보듯이, 수원시의 수목에 의한 하늘시계지수 변화량 평균은 0.16이지만, 공간적으로는 0~0.76까지 다양하다. 하늘시계지수와 관련한 미기후도 장소마다 다를 것이다.

Table 4 \_ Suwon SVF Statistics

Basic Stats	(b)	(a)	(c)
Min	0.00	0.00	-0.05
Max	1.00	1.00	0.76
Mean	0.56	0.71	0.16
Std.	0.22	0.20	0.16

Note: Suwon SVF Raster based Statistics.

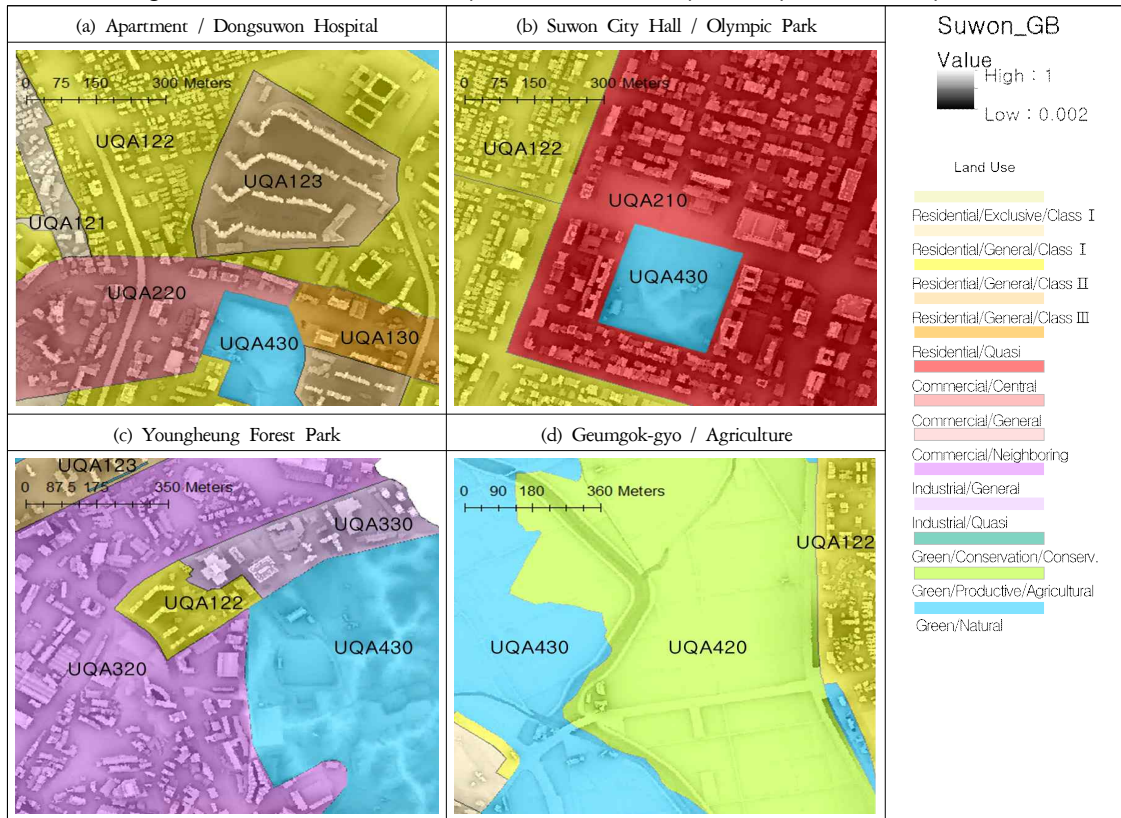
수원시의 용도지역 유형별 하늘시계지수(GBH) 평균을 살펴보면 주거지역이 0.52로 가장 낮고, 공업지역 평균이 0.68로 가장 높다(<Table 5> 참조). 그러나 수원시에서 높이 2m 이상 식생이 없을 때의 하늘시계지수(GB) 평균은 녹지지역이 0.80으로 가장 높다. 녹지지역의 숲이 하늘시계지수 평균에 미치는 변화량은 0.23으로, 타 용도지역 유형보다 월등히 크다. 녹지지역 내에서는 보전지역의 숲이 하늘시계지수 평균에 미치는 변화량(0.41)이 자연녹지(0.24)보다 크고, 생산녹지(0.05)에서의 하늘시계지수 평균 변화량은 적다. 한편, 주거지역의 숲이 하늘시계지수에 기여하는 변화량은 0.08이며, 세부적으로는 전용주거지역(0.15), 준주거지역(0.11), 일반주거지역(0.07) 순으로 식생 관

Table 5 \_ Land-use Zone Mean SVF of the Suwon Urban Area

UQA_L1				UQA_L2				UQA_L3						
Land-use Type	(b)	(a)	(c)	Land-use Type	(b)	(a)	(c)	Land-use Type	(b)	(a)	(c)			
Residential Zone Area	UQA1	0.52	0.60	0.08	Exclusive	UQA110	0.55	0.79	0.15	Class I	UQA111	0.64	0.79	0.15
					General	UQA120	0.52	0.60	0.07	Class I	UQA121	0.54	0.63	0.09
										Class II	UQA122	0.53	0.59	0.06
										Class III	UQA123	0.48	0.56	0.09
Quasi	UQA130	0.56	0.67	0.11	Quasi	UQA130	0.56	0.67	0.11					
Commercial Zone Area	UQA2	0.55	0.62	0.07	Central	UQA210	0.46	0.50	0.04	Central	UQA210	0.46	0.50	0.04
					General	UQA220	0.58	0.66	0.08	General	UQA220	0.58	0.66	0.08
					Neighboring	UQA230	0.60	0.67	0.07	Neighboring	UQA230	0.60	0.67	0.07
Industrial Zone Area	UQA3	0.68	0.72	0.04	General	UQA320	0.68	0.73	0.04	General	UQA320	0.68	0.73	0.04
					Quasi	UQA330	0.44	0.52	0.07	Quasi	UQA330	0.44	0.52	0.07
Green	UQA4	0.57	0.80	0.23	Conservative	UQA410	0.39	0.80	0.41	Conservation	UQA410	0.39	0.80	0.41
					Productive	UQA420	0.82	0.87	0.05	Agricultural	UQA420	0.82	0.87	0.05
					Natural	UQA430	0.55	0.79	0.24	Natural	UQA430	0.55	0.79	0.24

Note: MOLIT Land-use Map based SVF Raster Zonal Statistics.

Figure 4 \_ Suwon SVF(GB) Map and Land-Use Map Overlaid based Survey Case



런 하늘시계지수 변화량이 크다. 일반주거지역 내에서 식생 관련 하늘시계지수 평균 변화량은 1종(0.09)과 3종(0.09)이 2종(0.06)보다 크다. 상업지역의 숲이 하늘시계지수에 기여하는 변화량은 0.07로, 세부적으로는 일반상업지역 평균(0.08)이 중심상업지역 평균(0.04)보다 2배 크다. 마지막으로, 공업지역의 숲이 하늘시계지수에 기여하는 변화량은 0.04로, 준공업지역 평균(0.07)이 일반공업지역 평균(0.04)보다 크다. 이처럼 용도지역 단위 하늘시계지수 평균은 수원시 토지이용이 도시공간에 미치는 숲의 미기후 영향을 가늠할 수 있는 지표이다.

2m 이상 식생이 용도지역을 점유하는 외형적 분포에 따라서 하늘시계지수 변화량 크기가 달라진다. 이를 활용해 평면적인 지표가 아닌 입체적 지표로 숲과 관련한 서식지의 노출 수준 및 생태적 안정성을 검토할 수 있다. <Figure 4>는 수원시 일대의 지형-건물 관련 하늘시계지수와 용도지역 공간의 관계를 보여준다. 1·2종 일반주거지역과는 차별화되는 하늘시계지

수 분포가 3종 일반주거지역(월드메르디앙)에서 나타난다(UQA123). 더욱 큰 용적률이 허용되는 중심상업지역(UQA210)에서는 규칙적으로 밀집된 큰 건물 사이 좁은 공간에서 낮은 하늘시계지수 분포가 확인된다. 공업지역에서는 다양한 외형의 건물이 불규칙하게 배치됨으로 인해 나타나는 하늘시계지수 분포를 볼 수 있다. 생산녹지(UQA420) 및 자연녹지(UQA430)에는 건물이 거의 없어서, 2m 이상의 식생 유무 또는 숲의 외형에 따라 하늘시계지수 분포가 변화됨을 알 수 있다.

수원시 토지피복 유형별 하늘시계지수(GBH) 평균을 살펴보면 산림지역이 0.42로 가장 낮고, 농업지역 평균이 0.77로 가장 높다(<Table 6> 참조). 그러나 2m 이상의 식생이 없을 때의 하늘시계지수(GB) 평균은 도시지역이 0.60으로 가장 낮다. 특히, 고층 아파트 공간에서 낮은 하늘시계지수가 두드러진다. 숲이 하늘시계지수 평균에 미치는 변화량은 산림지역이 0.35로 가장 크고, 초지(Code:400)와 나지(Code:600)의 평균이 0.15로, 2m 높이 이상 큰 외형을 가진 식생을

**Table 6** \_ Areal Mean SVF Value of the Land-cover Type Area in Suwon

L1				L2				L3			
Code	SVF mean			Code	SVF mean			Code	SVF mean		
	GBH	GB	Diff		GBH	GB	Diff		GBH	GB	Diff
100 (Urban Area)	0.54	0.60	0.07	110	0.59	0.63	0.04	111	0.55	0.60	0.05
								112	0.66	0.69	0.03
				120	0.71	0.74	0.03	121	0.71	0.74	0.03
				130	0.59	0.63	0.04	131	0.59	0.63	0.04
								132	0.63	0.65	0.02
				140	0.57	0.66	0.09	141	0.57	0.66	0.09
								151	-	-	-
								152	-	-	-
				150	0.50	0.58	0.08	153	0.69	0.78	0.08
								154	0.49	0.57	0.08
								155	0.71	0.75	0.05
								161	0.66	0.73	0.08
				160	0.63	0.69	0.06	162	0.64	0.69	0.06
				163	0.62	0.68	0.06				

(continued)

Table 6 \_ Areal Mean SVF Value of the Land-cover Type Area in Suwon (continued)

L1				L2				L3			
Code	SVF mean			Code	SVF mean			Code	SVF mean		
	GBH	GB	Diff		GBH	GB	Diff		GBH	GB	Diff
200 (Agricultural Land)	0.77	0.86	0.10	210	0.85	0.90	0.05	211	0.89	0.92	0.03
				212	0.75	0.86	0.10	221	0.85	0.91	0.06
				220	0.69	0.82	0.13	222	0.66	0.81	0.14
				230	0.77	0.86	0.10	231	0.77	0.86	0.10
				240	0.66	0.86	0.20	241	0.66	0.86	0.20
				250	0.65	0.85	0.20	251	0.70	0.81	0.11
				252	0.64	0.86	0.21				
300 (Forested Land)	0.42	0.78	0.35	310	0.45	0.77	0.32	311	0.45	0.77	0.32
				320	0.37	0.79	0.42	321	0.37	0.79	0.42
				330	0.41	0.78	0.37	331	0.41	0.78	0.37
400 (Grassland)	0.54	0.69	0.15	410	0.51	0.75	0.24	411	0.51	0.75	0.24
				420	0.54	0.68	0.14	421	0.67	0.85	0.18
								422	0.50	0.81	0.31
								423	0.54	0.67	0.13
500 (Wetland)	0.73	0.80	0.07	510	0.73	0.80	0.07	511	0.73	0.80	0.07
				520	-	-	-	521	-	-	-
								522	-	-	-
600 (Bare Land)	0.63	0.78	0.15	610	0.67	0.78	0.10	611	-	-	-
								612	0.68	0.78	0.11
								613	0.64	0.72	0.09
				620	0.63	0.78	0.15	621	-	-	-
								622	0.55	0.64	0.09
								623	0.63	0.79	0.16
700 (Water)	0.75	0.82	0.07	710	0.75	0.82	0.07	711	0.66	0.73	0.07
								712	0.79	0.87	0.07
				720	-	-	-	721	-	-	-

상당히 포함함을 알 수 있다. 산림지역 내에서는 수관 밀도가 높은 침엽수림의 하늘시계지수 변화량이 0.42로 가장 크고, 혼효림 0.37, 활엽수림 0.32 순이다. 농업지역 중분류 평균에서는 논외의 변화량이 0.05로 가장 작고, 이 중 경지정리가 안 된 논(0.10)이 경지정리가 된 논(0.03)보다 3배 이상 크다. 과수원 및 기타재배지의 평균 변화량은 0.20이고, 목장·양식장 식생의 외형적 영향(0.11)이 기타 재배지(0.21)보다 작다. 대

분류 평균에서 시가화건조지역(L1)의 변화량은 0.07로, 습지(0.07) 및 수역(0.07)과 더불어 식생의 외형에 의한 변화가 가장 작고, 문화·체육·휴양지역(0.09)과 철도·도로 등을 포함하는 교통지역(0.08)이 상대적으로 크다. 중분류 토지피복 평균에서는 공업지역의 변화량이 0.03으로 가장 작고, 세분류 토지피복 평균에서는 상업지역 내 혼합지역 변화량이 0.02로 가장 작다. 인공 초지(code: 420)의 변화량은 0.14로 초지(L1)

평균(0.15)에 가까우나, 자연 초지의 변화량은 0.24로 비교적 키가 큰 식생의 외형적 영향을 많이 받고 있음을 알 수 있다. 인공 초지(L2)의 변화량(0.14) 내에서도 묘지(0.31)가 골프장(0.18), 기타 초지(0.13)에 비해 크다. 나지(L1)의 변화량은 0.15로, 자연 나지(L2, 610)의 변화량(0.10)과 운동장(L3, 622)의 변화량(0.09)은 작으나, 나지 면적의 90% 이상을 차지하는 기타 나지(L3)의 변화량이 0.16으로 나지(L1)의 변화량을 결정하고 있다.

수원시의 용도지역 및 토지이용 유형별 하늘시계지수 지도의 통계적 분포는 각 유형 내의 건물 및 키가 큰 식생의 외형적 영향을 계량적으로 제시하고 있다. 관련 통계를 수원시의 용도지역과 토지피복 관리를 위한 계획적 지표로서 검토할 수 있을 것이다.

## VI. 고찰

폭염·한파 등 기후적 변동성이 더욱 커질수록, 미래의 도시에서 살아갈 생명은 기후변화 적응을 위해 더 큰 긴장(Stress)을 감내해야 한다. 이러한 긴장을 완화하기 위한 도시 피복의 중요성이 점점 커지고 있으나, 한번 조성된 도시 피복의 외형은 역동적으로 변화되지 않기 때문에 계획적 관리가 필요하다. 기상·기후 분야에서 지표면온도 또는 기온을 관리할 자료가 만들어지고 있지만, 세밀한 공간 또는 토지이용 규모와 적절히 대응되지 못하고 있다. 도시 피복의 외형을 미기후 조절 측면에서 계획적으로 고려할 수 있도록 상세하고 과학적인 정보가 필요하다. 이를 위해서는 정밀한 지형공간정보를 이용하여 건물·식생의 입체적인 형태와 속성을 기후변화 적응 계획의 관점에서 분석할 수 있어야 한다.

하늘시계지수 지도는 기후 변동성이 커질 미래에, 도시의 옷인 피복을 계획적으로 구성하여 생태계의

긴장을 완화하기 위한 기초자료가 될 것이다. 미기후적 관점에서 식생은 건물보다 비교적 외형의 변화를 신속하게 유도할 수 있으므로, 과학적인 방법론에 근거하여 작성된 고해상도 하늘시계지수 지도를 활용해야 할 것이다. 계량적 지표에 근거한 용도지역·토지피복 관리를 추진한다면 겨울에는 덜 춥고 여름에는 덜 더운 기후환경을 유지할 수 있을 것이다.

고해상도 하늘시계지수 지도는 토지이용 기반 정착물의 형태가 가지는 미기후 특성을 체계적으로 관리하는 데 필요하다. 본 고찰에서는 도시 단위 고해상도 하늘시계지수 지도 산출의 전국 도시 적용 가능성, 다양한 미기후 정보의 구축과 활용 측면에서 고해상도 하늘시계지수 지도의 활용 방향을 다루었다. 본 연구에서 산출한 데이터 및 기술에 대한 신뢰성 평가는 An, Kim, Lee and Kim et al.(2014) 및 후속 연구에서 이미 수행되어 생략하였다.

### 1. 고해상도 하늘시계지수 도시지도 작성

‘고해상도 하늘시계지수 도시지도’를 통해서 도시화로 인한 정착물의 외형적 확대로부터 하늘을 볼 수 있는 내부 공간의 감소와 기후변화 적응성능 변화를 살필 수 있었다. 계량화된 ‘고해상도 하늘시계지수 도시지도’ 작성이 가지는 본 연구의 의의는 건물·식생 피복의 외형이 내포된 기후변화 적응성능을 용도지역·토지피복 관련 계획의 지표로서 도입할 기반을 마련한다는 측면에서 찾을 수 있다. 기후변화 적응 관리 측면에서 건물·식생의 입체적인 외형은 관리해야 할 중요 요소이지만 과학적 방법론을 적용하기가 어려웠다. 제시한 것처럼 항공 레이저 측량 자료와 전산 자원을 효율적으로 활용하는 고해상도 하늘시계지수 도시지도 보급이 확대되면, 장소에 기반한 건물·식생의 입체적 미기후 성능 조사·관리도 늘어날 것이다.

<Figure 5>에서 보듯이, 수원시 팔달산 일대를 확대한 2m 해상도의 하늘시계지수 지도에서 지형과 주변 정착물(건물·식생)의 상세한 외형과 기후변화 적응성능을 한눈에 볼 수 있다. 이를 통해 건물·식생 외형의 기능적 검토가 가능하다. 높이 2m 이상의 식생으로 분류된 점군으로 인해 나타나는 팔달산 일대의 음영을 상세하게 살피며 지형·정착물의 외형과 하늘시계지수의 관계를 해석할 수 있다.

<Figure 5(a)>에서 하늘시계지수가 가장 낮은 장소는 경기도청의 중정(0.3 이하)과 팔달문 근처 정조로 상업지역 골목(0.21) 등이다. 팔달문 주변을 확대한 <Figure 5(e)>에서 보듯이, 2m 해상도의 하늘시계지수 지도가 건물과 건물 사이 좁은 공간까지 상세하게 나타내지는 못해도, 보행로나 건물 상부의 구조물 형태는 잘 보여준다. 하늘시계지수 산출 해상도를 1m 이하로 높이면, 고층 건물 옥상에 부착된 구조물 사이의 공간과 작은 구조물의 형태도 살필 수 있을 것이다.

교목 식생이 떨어진 거리, 수관밀도, 수고 등과의 관계를 고해상도 지도를 기반으로 분석하고, 이와 더불어 로드뷰 등 국내에 구축된 다양한 공간정보와 결합하면(<Figure 5(f)> 참조) 육안 판독으로도 도시의 크고 작은 구조물에 대해서 효과적으로 평가·관리할 수 있다. 현장 조사가 줄면 행정 효율성도 높아질 것이다.

계획적 측면에서는 도시의 건물·식생 피복 기능에 대한 계량적 조사를 강화할 것이다. <Figure 5(c)>에서 보듯이, 정주지역은 식생이 부족해서 기후변화 적응성능도 낮다. 팔달산 숲의 외형이 반영된 진한 초록색 지역과 우측의 숲이 없는 도시지역이 극명하게 비교된다. 이러한 음영의 패턴과 강도의 변화 탐색을 바탕으로, 도시의 건물·식생 피복 단위로 관리할 방안을 마련해야 할 것이다. 고해상도 하늘시계지수 도시지도가 정주지역에 건물·식생의 외형을 과학적으로 배치하고 평가하기 위한 기초자료가 되어야 한다.

Figure 5 \_ SVF Maps around Paldal Mountain



Source: Kakao Map Street View.

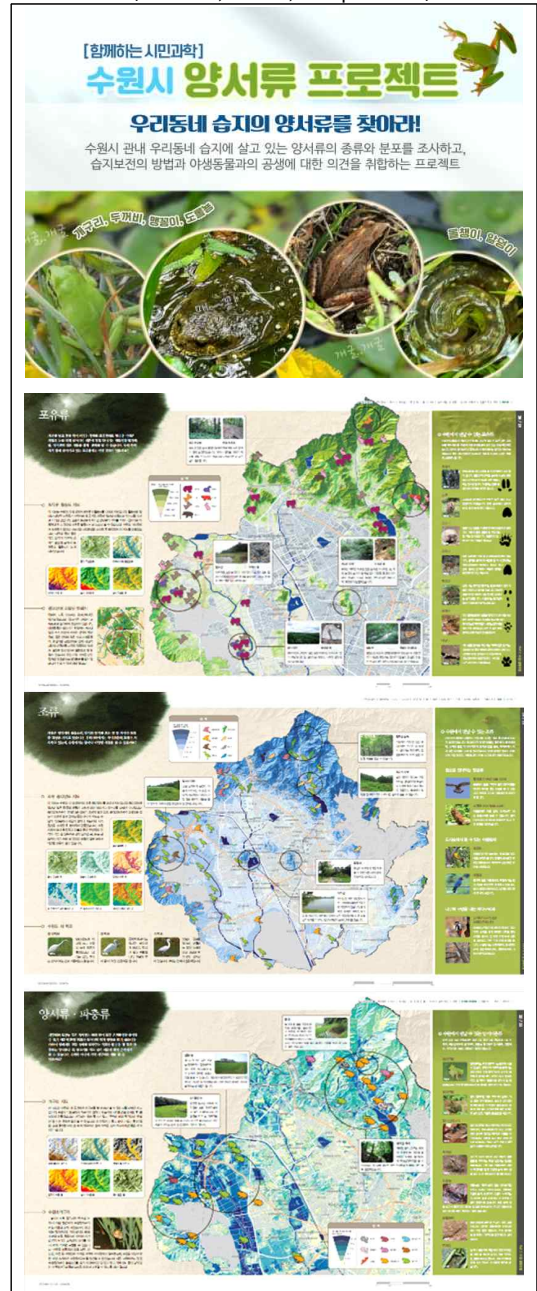
공간 확대 측면에서 본다면, 본 연구의 라이더 자료 의존도가 높더라도 수도권, 광역시, 주요 대도시 관련 자료가 이미 구축되어 있으므로 전국적인 고해상도 하늘시계지수 지도 작성으로 이어질 수 있을 것이다. 디지털 트윈·전환 정책 강화의 흐름 속에서(안승만, 안예현, 김익희 2021), 도시 피복 관리를 통해 기후변

화 적응 도시행정의 효율성과 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. 그러나 제시한 방법론이 데이터의 최신성과 정확도에 크게 의존하고 있으므로, 전 국토에 대한 입력 데이터 기반을 먼저 마련해야 할 것이다. 과거에는 항공 레이저 측량이 체계적으로 이뤄지지 않아서 도시의 입체적 변화를 정기적으로 반영하기 어려웠으나, 최근 국토를 남부/북부로 나누어 2년 주기로 조사 갱신을 추진하고 있는 만큼 항공사진 촬영과 항공 레이저 측량을 동시에 수행하는 것이 바람직하다. 더불어, 항공 레이저 측량 자료가 등고선 등 지형도 작성을 목적으로 운영되고 있어 지표면 외 건물-식생의 분류정보 관리가 소홀한 점도 보완하여, 다목적 활용을 지원할 조사로 공간정보를 활용하도록 지원해야 한다.<sup>3)</sup>

## 2. 도시 미기후 정보와 연계한 활용 방향

한여름의 뜨거운 햇볕은 식물의 생육에 높은 긴장을 유발하지만, 양서류 등에는 생명을 위협할 정도로 치명적이다. 수원시에서 조사한 포유류·조류·양서류 서식지 분포(<Figure 6> 참조)와 숲의 분포에서 공간적인 유사성이 확인된다. 숲과 관련한 하늘시계지수는 지표의 외형에 의한 산란일사 및 지표면 복사의 크기 정보를 일차적으로 제공하지만, 서식지·생명의 보호 측면에서 건물-식생이 생명체를 보호하는 피복의 기능을 검토하고 활용할 수도 있을 것이다. 숲 관련 하늘시계지수 지도는 서식지 보호 측면에서의 시각적 차폐와 더불어, 증발산-미기후 조절 등 여러 기후변화 적응지표와 연계하여 활용할 방안을 찾아야 한다.

Figure 6 \_ Suwon Eco Survey and Maps (Mamals, Birds, Amphibians)



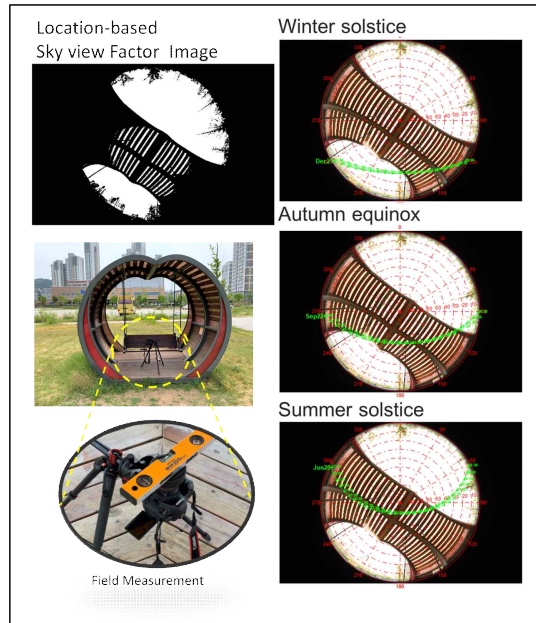
Source: Suwon City Environmental Policy Division.

3) 국토지리정보원에서는 2023년부터 2년 주기로 항공 레이저 측량 기술을 적용해 수치표고모형을 정기적으로 갱신하고, 디지털 영상을 1년 단위로 갱신하기 위한 사업을 추진하고 있음. 주기적인 촬영·조사 과정에서 데이터가 동시 취득되는 것도 중요하지만, 도시와 산림 등 다양한 응용성을 고려해서 지표면 피복 분류 품질을 체계적으로 관리하여 제공하는 방향이 검토되어야 함.

기상기후 분야에서는 특정 공간-계층의 폭염 취약성 평가 연구에 하늘시계지수를 적용하고 있다. 통계 기반 폭염초과사망 예측지도 작성(Kim, Yi, Lee and Meier et al. 2014), 고해상도 도시 미기후 지도 구축(Yi, Kim, An and Choi et al. 2015) 등 다양한 융합지도 생성 연구, 하늘시계지수와 관련된 미기후 인자의 조사 등이 수행되고 있다(이채연, 신이레, 안승만 2017). Envi-met 수치모델(Bruse and Fleer 1998), UMEP 모델(Lindberg and Grimmond 2011) 등에서도 토지이용과 일사량-온도-습도 변화로 인해 변할 태양복사온도(Mean Radiant Temperature)의 시간-공간적 분포의 분석과 예측에 정밀한 하늘시계지수 지도를 사용하고 있다.

변화하는 도시공간과 미기후의 상호작용을 살피는 응용연구(Kim, Yi, Lee and Meier et al. 2014; 안승만, 손학기, 이규석, 이채연 2015; Yi, Kim, An and Choi et al. 2015; 안승만, 김승중, 이형찬 2016)가 다수 수행되었으나, 건물-식생의 외형을 계획적으로 변경하여 기후적 환경을 개선하려는 연구는 미흡했다. 최근 행정안전부에서는 빈번해지는 폭염으로부터 도시가 더욱 안전하도록 상부공간 일사차폐(인공차양, 녹음), 횡방향 벽면냉각(벽면녹화 냉각루버), 지상열 억제 및 냉각(지표면 녹화, 열반사 차단) 요소 기술을 적용하기 위한 R&D를 수행하고 있다. 상부공간 일사차폐 기술의 경우, 하늘시계지수와 연계하여 관측기반의 평가를 강화하거나 폭염으로부터 더 안전한 피복 요소를 도입하기 위한 활동으로 이어질 것이다(<Figure 7> 참조). PALM-4U, UMEP 등의 수치모델이 일사차폐를 통해 조절 가능한 미기후 효과를 모의하여 계량적으로 검토하고 있다. 2m 해상도의 하늘시계지수 도시지도가 본 연구를 통해서 확보되었으므로, 이를 사용할 수 있는 수치모델과 연계하여 효과 평가를 다각화해야 할 것이다.

Figure 7 \_ Urban Utility Field Survey Case

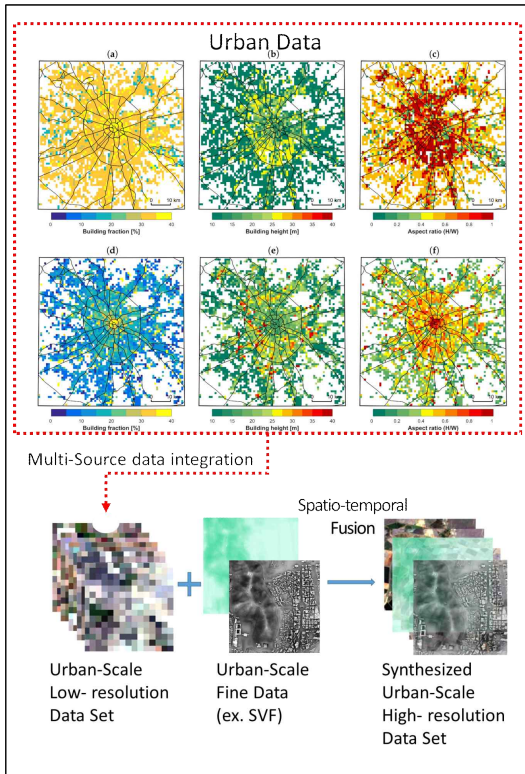


Note: SOLWEIG 1D based Simulation.

Source: Authors' elaboration.

한편, 도시적 규모에서 관측기반 도시 미기후 정보를 취득해 활용하기 위해서는 많은 예산-인력이 필요하다. 그 예로, 도시열섬 조사를 위해서 Landsat 8 위성의 100m 해상도 열화상 또는 항공기-드론 기반 수 m 해상도 열화상을 활용하고 있으나, 많은 도시에 대한 상세한 열환경 자료를 얻기에는 매우 어렵다. 건물 관련 공간정보로 구하는 도시 캐노피 모수(Urban Canopy Parameters)처럼 상세한 해상도 지도를 만들기 어려운 경우도 있다(안승만, 안예현, 김익희 2021). 고 해상도 하늘시계지수 도시지도로 이러한 한계를 일부 보완할 수 있다. 최근 인공지능망(Artificial Neural Network, ANN) 기술 등 공간정보 융합(Fusion) 기술이 빠르게 발전하고 있는 만큼(<Figure 8> 참조), 고 해상도 하늘시계지수 지도를 타 미기후 정보와 융합하여 새로운 고해상도 미기후 지도를 만들어야 할 것이다. 하늘시계지수와 지표면온도 정보를 융합하고 서로 다른 해상도 및 속성을 가진 공간정보의 장점을

Figure 8 \_ Urban Micro-climates Data Fusion



Source: Varentsov, Samsonov and Demuzere 2020.

취해서 수목 하부의 상세 지표면온도 지도를 만드는 것처럼, 적정 해상도의 정보를 얻거나, 새로운 유형의 미기후 지도가 만들어져야 한다(Zeng, Lu, Li and Li 2018).

고해상도 하늘시계지수 지도가 도시 규모로 건물 및 숲의 외형에 의한 미기후 영향을 상세하게 조사하는 데 도움이 될 것이지만, 신뢰성 검증 및 여러 규모에서 적용하기 위한 검토가 필요하다. 향후 다양한 도시 미기후 관심과 연계되도록 지속해서 연구가 이뤄져야 할 것이다.

## V. 결론

본 연구는 3차원적인 도시의 외형을 1차원으로 압축한 계량적 지표인 하늘시계지수 지도를 통해서, 도시

의 옷인 피복의 외형이 미기후에 어떻게 영향을 줄 수 있는지를 계량적으로 제시하였다. 전국의 도시에 고해상도 지도를 구축하여 제공할 수 있다면 도시기후 적응을 지원할 기초자료로 유용하게 쓰일 수 있을 것이다. 이에 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 수원시를 대상으로 국토지리정보원에서 제공하는 항공 라이다 자료를 이용하여, 토지와 정착물의 형태 및 하늘시계지수 분포를 함께 살필 수 있는 도시 규모 고해상도 지도를 작성하였다. 전국의 모든 도시에 대한 고해상도 하늘시계지수 지도가 만들어져야 할 것이다.

둘째, 지표면, 건물, 높이 2m 이상 식생 관련 정보를 분리하여 하늘시계지수를 산출하고, 용도지역·토지피복 자료를 중첩하여, 용도지역·토지피복 유형의 하늘시계지수 평균을 구하고 공간적 특성을 설명하였다. 이를 기반으로 용도지역·토지피복 유형 각각에 대한 계획적인 지표관리 연구가 이어져야 한다.

셋째, 기후변화 적응 측면에서 고성능 건물·식생 외형 조성을 체계적으로 추진해야 한다. 폭염 등 온열환경의 저감 해법을 지원하고, 고해상도 하늘시계지수 지도를 타 공간정보 모델 지도와 융합·활용할 방안을 찾아야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 안승만, 손학기, 이규석, 이재연. 2015. 도시림의 여름철 평균복사온도 저감 추정 연구. 한국조경학회지 44권, 1호: 93-106.  
<https://doi.org/10.9715/kila.2016.44.1.093>  
An, Seung Man, Son, Hak-gi, Lee, Kyoo-Seock and Yi, Chaeyeon. 2015. A study of the urban tree canopy mean radiant temperature mitigation estimation. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 44, no.1: 93-106.

2. 안승만, 김승중, 이형찬. 2016. 도시지역 미기후 관리방향 연구. 수시 16-03. 세종: 국토연구원.  
An Seung man, Kim Seungjong and Lee Hyeongchan. 2016. *A Study on the Urban Area Microclimate Management Direction*. 16-03. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlement.
3. 안승만, 안예현, 김익희. 2021. 바람 친화적 토지이용을 위한 디지털 트윈 기술 적용방안 연구. 기본 21-19. 세종: 국토연구원.  
An Seungman, An Yehyeon and Kim Ikhoi. 2021. *A Study on Digital Twinning Applications for a Land Use with Wind*. 21-19. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlement.
4. 이채연, 신이레, 안승만. 2017. 하늘시계지수 비교 및 도시기온 상관성 연구. 강남 선정릉지역을 중심으로. 대기 27권, 4호: 483-498.  
<https://doi.org/10.14191/Atmos.2017.27.4.483>  
Yi, Chaeyeon, Yire Shin and Seung Man An. 2017. A study on a comparison of sky view factors and a correlation with air temperature in the city. *Atmosphere* 27, no.4: 483-498.
5. An, S. M., B. S. Kim, H. Y. Lee, Chang-Hun Kim, C. Y. Yi, J. H. Eum and J. H. Woo. 2014. Three-dimensional point cloud based sky view factor analysis in complex urban settings. *International Journal of Climatology* 34, no.8: 2685-2701.  
<https://doi.org/10.1002/joc.3868>
6. Bruse, Michael and Heribert Fleer. 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software* 13, no.3-4: 373-384.  
[https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
7. Carneiro, Cláudio, Eugenio Morello, and Gilles Desthieux. 2009. Assessment of solar irradiance on the urban fabric for the production of renewable energy using LIDAR data and image processing techniques. In *Advances in GIScience*, pp. 83-112. Springer, Berlin, Heidelberg.
8. Heo, Han Kyul, Dong Kun Lee, Chae Yeon Park and Ho Gul Kim. 2021. Sky view factor calculation in complex urban geometry with terrestrial LiDAR. *Physical Geography* 42, no.4: 374-394.  
<https://doi.org/10.1080/02723646.2020.1778156>
9. Hsu, Angel, Glenn Sheriff, Tirthankar Chakraborty and Diego Manya. 2021. Disproportionate exposure to urban heat island intensity across major US cities. *Nature Communications* 12, no.1: 1-11.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-23972-6>
10. Kastendeuch, Pierre P. 2013. A method to estimate sky view factors from digital elevation models. *International Journal of Climatology* 33, no.6: 1574-1578.  
<https://doi.org/10.1002/joc.3523>
11. Kim, Kyu Rang, Chaeyeon Yi, Ji-Sun Lee, Fred Meier, Britta Jänicke, Ute Fehrenbach and Dieter Scherer. 2014. BioCAS: Biometeorological Climate impact Assessment System for building-scale impact assessment of heat-stress related mortality. *DIE ERDE-Journal of the Geographical Society of Berlin* 145, no.1-2: 62-79.  
<https://doi.org/10.12854/erde-145-6>
12. Lindberg, Fredrik and C. S. B. Grimmond. 2011. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation. *Theoretical and Applied Climatology* 105, no.3: 311-323.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-010-0382-8>
13. Miao, Chunping, Shuai Yu, Yuanman Hu, Rencang Bu, Li Qi, Xingyuan He and Wei Chen. 2020. How the morphology of urban street canyons affects suspended particulate matter concentration at the pedestrian level: An in-situ investigation. *Sustainable Cities and Society* 55: 102042.  
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102042>
14. Middel, Ariane, Jonas Lukaczyk, Ross Maciejewski, Matthias Demuzere and Matthias Roth. 2018. Sky view factor footprints for urban climate modeling. *Urban Climate* 25: 120-134.  
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004>
15. Oke, Timothy R. 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 108, no.455: 1-24.  
<https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
16. Shaker, Richard R., Yaron Altman, Chengbin Deng, Eric Vaz and K. Wayne Forsythe. 2019. Investigating urban heat island through spatial analysis of New York City streetscapes. *Journal of Cleaner Production* 233: 972-992.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.389>
17. Varentsov, Mikhail, Timofey Samsonov and Matthias

- Demuzere. 2020. Impact of urban canopy parameters on a megacity's modelled thermal environment. *Atmosphere* 11, no.12: 1349.  
<https://doi.org/10.3390/atmos11121349>
18. Yi, Chaeyeon, Kyu Rang Kim, Seung Man An, Young-Jean Choi, Achim Holtmann, Britta Jänicke, Ute Fehrenbach and Dieter Scherer. 2015. Estimating spatial patterns of air temperature at building-resolving spatial resolution in Seoul, Korea. *International Journal of Climatology* 36, no.2: 533-549.  
<https://doi.org/10.1002/joc.4363>
19. Zeng, Liyue, Jun Lu, Wuyan Li and Yongcai Li. 2018. A fast approach for large-scale sky view factor estimation using street view images. *Building and Environment* 135: 74-84.  
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.009>

- 
- 논문 접수일: 2022. 4. 12.
  - 심사 시작일: 2022. 5. 10.
  - 심사 완료일: 2022. 6. 23.

---

## 요약

주제어: 도시 미기후, 토지이용, 수목식생, 하늘시계지수, 항공 라이다, 3차원 점군

하늘시계지수(Sky View Factor: SVF)는 도시의 토지 이용으로 만들어지는 피복의 외형과 미기후 상호작용을 설명하는 지표이다. 이 연구에서는 도시 규모의 고해상도(2m) 하늘시계지수 지도를 개발하고 활용 방향을 모색하였다. 연구대상지는 인구 130만 명에 육박하는 수원특례시 행정구역(121.04 km<sup>2</sup>)으로 항공 라이다 기반 3차원 점군 자료가 입력 자료로 적용되었다. 높이 2m 이상의 수목을 반영하지 않은 사례(GB)와 반영한 사례(GBH)로 고해상도 하늘시계지수를 구축하고, 이 두 자료의 차이로부터 수목의 효과(Diff)를 계량적으로 구하고 공간적 분포를 조사하였

다. 결과적으로, 이 연구를 통해서 작성된 각각의 도시 규모의 고해상도 하늘시계지수 지도는 도시의 토지이용 형태 및 이로 인한 미기후 영향을 시각적·통계적으로 잘 보여주고 설명하고 있었다. 건물·식생의 입체적인 외형은 기후변화 적응 관리 측면에서 중요하게 고려할 요소이지만 지금까지는 과학적 도시계획·관리 방법론을 적용하기가 어려웠다. 향후 고해상도 하늘시계지수 지도를 활용한 다양한 응용영역들이 과학적 지식을 발전시키고 기후 친화적으로 도시를 계획할 수 있도록 지원해야 할 것이다.

